10475	单位代码
	学号
K909	分类号

河南大學 硕士学位论文

城市街道空气污染物分布的时空精细模拟研究 ——以开封市为例

- 学科、专业: 地图学与地理信息系统
- 研究方向:地理建模与模拟
- 申请学位类别 : 理学硕士
- 申 请 人:赵海鹏
- 指 导 教 师 : 宋宏权 副教授

二〇二〇年五月

摘要

随着工业化与城镇化速度的加快,我国城市面临的空气污染问题日益严峻,机动车 尾气排放是城市空气污染的重要来源之一。由于机动车尾气排放及其扩散过程均发生在 近地面,且集中于城市居民活动较为频繁的道路等场所,对人体健康构成了极大威胁。 亟需开展城市居民对空气污染物暴露的健康风险量化评估研究。

高分辨率城市空气污染物时空分布,是精确评估城市空气污染物暴露的基础与关键。 受排放源、气象、地形、城市建设等因素的非均匀分布影响,城市尤其是街道空气污染 物分布具有显著的时空差异,使得获取高时空分辨率城市精细尺度空气污染物分布面临 诸多挑战。针对现有机动车排放清单与城市精细尺度空气质量模拟存在分辨率低、精度 差等问题,本文开展了高时空分辨率城市机动车排放清单编制研究,耦合区域与街道空 气质量模型,以开封市为例,实现了城市街道尺度空气污染物分布的时空精细模拟,主 要工作如下:

(1) 设计了一种基于地理视频的高时空分辨率城市机动车排放清单编制方案。基于 地理视频研发了道路机动车活动水平智能感知原型系统,实现了对道路机动车流量、车 速、车辆类型等机动车活动水平的智能感知与识别。结合机动车污染物排放模型 VEIN (Vehicular Emissions Inventory),实现了高时空分辨率(时间:小时,空间:路段水平)道 路机动车排放清单的编制。

(2) 分析了开封市道路机动车活动水平的时空变化特征。利用道路机动车活动水平 智能感知原型系统,识别分析了开封市一周内每日 24 小时的机动车活动水平。发现开 封市道路机动车活动水平具有显著的时空差异,快速路与主干道的平均交通流量高于 1,600 辆每小时,而次干道与支路则低于 600 辆每小时。工作日期间存在较为明显的早 晚双高峰现象,早高峰出现在 7:00-8:00 之间,星期一至星期四晚高峰出现在 18:00-19:00 之间,星期五晚高峰则持续至 21:00 左右。

(3) 研制了开封市高时空分辨率道路机动车排放清单。采用本文设计的机动车排放 清单制备方法,编制了 2018 年开封市道路路网水平的高时空分辨率机动车排放清单。 结果表明,全年因机动车排放产生的一氧化碳 (CO) 约 27,839 t,碳氢化合物 (HC) 约

Ι

2,845 t, 氮氧化物 (NO_x) 约 1,273 t, 细颗粒物 (PM_{2.5}) 约 23.56 t, 可吸入颗粒物 (PM₁₀) 约 25.18 t。

(4) 分析了开封市机动车污染物排放的时空格局。开封市机动车排放产生的 CO、 HC、NO_x、PM_{2.5}和 PM₁₀空间分布格局相似,与机动车流量空间分布吻合度较高。排放 高值区主要分布在城市中心区域的主要街道和道路交叉口,而城市南部为排放低值区域。 凌晨各路段的污染物排放量均较低,工作日期间的排放峰值出现在 8:00 和 18:00 左右, 且工作日期间污染物日排放量大都高于周末日排放量。

(5) 实现了城市街道尺度空气质量的时空精细模拟。基于本文研制的高时空分辨率 机动车排放清单,通过耦合区域 (WRF-Chem, Weather Research and Forecasting Model with Chemistry) 与街道 (MUNICH, Model of Urban Network of Intersecting Canyons and Highways) 空气质量模型,对开封市街道尺度二氧化氮 (NO₂) 与臭氧 (O₃) 浓度的时空 分布进行了精细化模拟。结果显示,O₃浓度的模拟结果与监测结果相关系数为 0.98,平 均偏差为-1.77 μg m⁻³,标准化平均误差为 7%; NO₂ 浓度模拟值与监测值相关系数为 0.89, 平均偏差为 1.51 μg m⁻³,标准化平均误差为 20%,表明本研究可较好的模拟再现街道空 气污染物 (NO₂与 O₃) 的精细化时空变化过程。

(6) 分析了开封市街道空气污染物浓度的时空特征。模拟结果表明,2018年7月开 封市街道的 NO2 与 O3 具有明显的时空变化特征,NO2 污染主要分布在城市外围街道, 其浓度自凌晨开始先增大后减少,在上午 10:00 左右达到峰值;而 O3 污染主要集中在城 市内部次干道与支路,其浓度自凌晨开始先减少后增大,在下午 15:00-18:00 左右达到 峰值后开始降低。

关键词: 空气污染, 地理视频, 机动车排放清单, 街道空气质量模型, 时空变化

ABSTRACT

With the acceleration of industrialization and urbanization, air pollution has become a severe environmental issue in Chinese cities. The vehicle exhaust emission is one of the important sources of urban air pollutants. Since motor vehicle exhaust emission and its diffusion process take place near the ground and are concentrated on the roads and other places where urban residents are active frequently, which poses great threats to human health. It is crucial to conduct quantitative assessments on the health risks of urban residents' exposure to air pollutants.

The distribution of urban air pollutants with high spatial and temporal resolution is the foundation to accurately assess the exposure to air pollutants. The distribution of air pollutants in cities, especially at the street level, has significant spatial and temporal differences due to the non-uniform distribution of emission sources, meteorological conditions, topography, urban construction, and other factors. This makes it difficult to obtain fine-scale air pollutant distributions in cities with high spatial and temporal resolutions. To solve the issues of low resolution and poor accuracy of existing motor vehicle emission inventories and urban fine-scale air quality simulation, this study proposed a method for the development of high spatial and temporal resolution motor vehicle emission inventories. Based on this, this study coupled regional and street air quality models, and implemented a fine spatial-temporal simulation of the air pollutants at the street level in Kaifeng city of Henan province in China. The main results are as follows:

(1) This study proposed a method for compiling the urban vehicle emission inventory with high spatial and temporal resolution. An intelligent sensing prototype system for road motor vehicle activity level was developed based on GeoVideo, which implemented the intelligent sensing and recognition of vehicle activity levels such as traffic flow, vehicle speed, vehicle type, and others. Then we developed vehicle emission inventories with high spatial and temporal resolutions by the combination of high spatial and temporal resolution motor vehicle activity and the vehicle pollutant emission model VEIN (Vehicular Emissions Inventory).

(2) The temporal and spatial characteristics of vehicle activity level in Kaifeng were analyzed. The activity level of vehicles in Kaifeng was identified and analyzed by the intelligent sensing prototype system of each hour during one week. We found that the traffic flow of Kaifeng road network showed large spatial and temporal variations. The average traffic flow of fast roads and main roads was more than 1,600 vehicles per hour, while that of secondary roads and branch roads was less than 600 vehicles per hour. During the working day, there was a relatively obvious double peak in morning and evening. The morning peak appears between 7:00-8:00, the evening peak during Monday to Thursday appeared between 18:00-19:00, and evening peak continues until about 21:00 on Friday.

(3) The vehicle emission inventory with high spatial and temporal resolutions were developed in Kaifeng. According to the method of compiling vehicle emission inventory proposed in this study, a high spatial and temporal resolution vehicle emission inventory at the street level of Kaifeng in 2018 was successfully compiled. Results showed that carbon monoxide (CO), hydrocarbon (HC), nitrogen oxide (NO_x), $PM_{2.5}$, and PM_{10} were around 27,839 t, 2,845 t, 1,273 t, and 25.18 t, respectively.

(4) The spatial and temporal pattern of vehicle pollutant emission in Kaifeng was analyzed. The spatial distribution patterns of CO, HC, NO_x, PM_{2.5}, and PM₁₀ produced by vehicle emissions in Kaifeng are similar, which is consistent with the spatial distribution of vehicle flows. The high-emission areas are mainly distributed at the main streets and road intersections in the central area of Kaifeng, while the low-emission areas are located in the southern part of the city. The pollutant emissions of all road sections in the early morning hours are relatively low. The peak emissions during working days appear around 8:00 and 18:00, IV

and the daily pollutant emissions during working days are mostly higher than that on weekend days.

(5) Based on the high spatial and temporal resolution vehicle emission inventory developed in this study, we coupled the regional air quality model (WRF-Chem, Weather Research and Forecasting Model with Chemistry) and the street air quality model (MUNICH, Model of Urban Network of Intersecting Canyons and Highways). The spatial and temporal distributions of nitrogen dioxide (NO₂) and ozone (O₃) concentrations at the street level was simulated. Results showed that the correlation coefficient between the simulated and monitored results of O₃ concentration was 0.98, the mean bias (MB) was -1.77 µg m⁻³, and the normalized mean error (NME) was 7%; the correlation coefficient between the simulated and monitored results of NO₂ concentration was 0.89, and the mean bias (MB) was 1.51 µg m⁻³, and the normalized mean error (NME) was 20%, indicating that the model can well simulated and reproduce the fine spatial and temporal variations of street air pollutants (NO₂ and O₃).

(6) The spatial and temporal characteristics of air pollutant concentration at the street level of Kaifeng were analyzed. Simulation results showed that NO₂ and O₃ of Kaifeng streets in July 2018 had obvious spatial and temporal variations. NO₂ pollution was mainly distributed in the peripheral streets of the city, and its concentration increases first and then decreases from the early morning, and reaches the peak in the morning. But O₃ pollution is mainly concentrated in the secondary trunk roads and branches in the city. Its concentration decreases first and then increase from the early morning, and then decreases after reaching the peak in the afternoon.

KEY WORDS: air pollution, geographical video, vehicle emission inventory, street air quality model, temporal and spatial variation

摘	要	I
AB	BSTR	ACT III
目	录	VII
1	绪论	
	1.1	研究背景与意义1
	1.2	研究目标与内容2
	1.3	技术路线2
	1.4	论文组织框架4
2	研究	综述5
	2.1	城市空气质量监测与模拟5
	2.2	街道空气质量模型与模拟6
	2.3	城市机动车排放清单研究8
	2.4	存在问题及本研究定位9
3	数据	与方法11
	3.1	研究区概况11
	3.2	数据来源12
	3.3	WRF-Chem 模型13
	3.4	VEIN 模型14
	3.5	MUNICH 模型18
	3.6	本章小结
4	高分	辨率机动车活动水平智能感知23
	4.1	地理视频关键技术
	4.2	机动车活动水平智能感知原型系统25
	4.3	地理视频数据采集方案27
	4.4	开封市机动车活动水平时空特征
	4.5	本章小结

5	高时	空分辨率机动车排放清单编制	31
	5.1	VEIN 模型参数与实验设置	31
	5.2	机动车污染物排放清单及其时空特征	32
		5.2.1 机动车污染物排放时间变化趋势	32
		5.2.2 机动车污染物排放空间分布特征	37
	5.3	本章小结	42
6	街道	空气污染物的精细模拟与分析	43
	6.1	模拟方案设置	43
		6.1.1 WRF-Chem 设置	43
		6.1.2 MUNICH 模型设置	44
	6.2	模式评估方法	47
	6.3	结果验证	47
		6.3.1 气象结果验证	47
		6.3.2 街道污染物模拟结果验证	48
	6.4	街道空气污染物时空特征	51
	6.5	讨论	53
	6.6	本章小结	55
7	结论	与展望	57
	7.1	结论	57
	7.2	创新点	58
	7.3	不足与展望	58
参	考文福	献	59
致	谢		69
攻	读学	位期间研究成果目录	71

VIII

1 绪论

1.1 研究背景与意义

随着城镇化与工业化建设进程日益推进,空气污染已成为我国面临的主要生态环境问题之一,对人体健康^[1-2]、气候变化和生态系统具有重要影响,严重制约了我国经济社会的可持续发展。据世界卫生组织 (WHO, Word Health Organization) 报道,2016 年全球因空气污染死亡的人数约为 420 万,而在 2008 年这一数据仅为 130 万^[3],亟待开展人体对空气污染物暴露的健康风险精确量化评估研究。

高精度城市空气污染地图与城市精细尺度的空气质量模拟,对于量化人体对城市空 气污染物暴露的健康效应及制定科学防范措施具有重要参考价值^[4-6],同时对城市空气 质量精细化管理、智慧城市建设及可持续发展等具有重要促进作用^[7]。受排放源、气象、 地形、城市建设、大气化学过程等条件的非均匀分布影响,城市尤其是街道空气污染物 扩散条件及污染水平在极短距离内呈现较大时空差异^[8-9],使得获取高时空分辨率城市 精细尺度空气污染物分布面临诸多挑战。

机动车污染物排放是造成城市空气污染的重要原因之一^[10-11],其具有源强不定、排放随机、类型多样、时空差异显著等特点^[12-14]。受机动车排放感知技术限制,当前的机动车排放清单存在时空分辨率不足、成本高、精度差、更新困难等问题,且空气质量模型大都未考虑机动车排放的时空变化影响^[15],导致城市空气质量模拟具有较大的不确定性。另外,利用稀疏的空气质量监测站点数据,难以准确表征城市精细尺度空气污染物的时空分布特征^[16]。

因此,本研究设计了一种高时空分辨率机动车排放清单制备方案,通过耦合区域与 街道空气质量模型,实现了城市街道尺度空气质量的精细化模拟,为探究城市精细尺度 空气污染的时空动态过程,提升城市空气质量的精细化管理水平,以及精准评估街道空 气污染物暴露的健康风险,为居民推荐健康出行路径等提供方法和技术支撑。

1.2 研究目标与内容

面向城市空气质量精细化管理的重大需求,针对目前道路机动车排放清单与城市精 细尺度空气质量模拟存在的时空分辨率低、精度差等问题,本研究以开封市为例,实现 以下目标: (1)设计一种基于地理视频的城市道路机动车活动水平时空动态智能感知方 案; (2)编制高时空分辨率道路机动车排放清单; (3)耦合高时空分辨率机动车排放清单 数据及区域与街道空气质量模型,实现城市街道尺度空气污染物分布的时空精细模拟。 为城市人群空气污染物暴露健康风险的精准评估,以及城市空气质量的精细化管理等提 供支持。

为实现以上研究目标,本文设定以下研究内容:

(1) 城市道路机动车活动水平时空动态的智能感知

车流量、车辆构成、车速等机动车活动水平是准确估算机动车污染物排放的基础与 关键,研究基于地理视频的道路机动车流量、车辆构成与行驶速度等机动车活动水平智 能识别方法,研发城市道路机动车活动水平参数智能感知识别系统,建立高时空分辨率 城市道路机动车活动水平时空数据库。

(2) 高时空分辨率城市道路机动车排放清单编制

研究机动车污染物排放模型中机动车排放因子本地化设置方案,基于高分辨率城市 道路机动车活动水平时空数据库,结合城市道路路网组成结构,研究城市道路机动车污 染物排放时空分布的高分辨率估算方法,研究编制高时空分辨率城市机动车排放清单。

(3) 城市街道尺度空气污染物时空分布的精细模拟

耦合区域与街道空气质量模型,在气象再分析资料、高时空分辨率机动车排放清单 以及其他大气污染源排放清单的驱动下,研究城市街道尺度下城市空气污染物浓度时空 分布的精细化模拟方法 (以二氧化氮 (NO₂) 和近地面臭氧 (O₃) 为例),并评估模拟结 果精度。

1.3 技术路线

本文以"数据感知-清单编制-数值模拟"为总体研究思路。①数据感知:基于地理 视频感知获取道路机动车行驶速度、交通流量、车辆构成等机动车活动水平高分辨率时 空分布数据;② 清单编制:基于高分辨率机动车活动水平时空分布数据,结合本地化机 动车污染物排放因子,利用机动车污染物排放模型 (VEIN, Vehicular Emissions Inventory) 估算道路机动车的污染物排放量,编制高时空分辨率城市道路机动车排放清单;③数 值模拟:耦合区域 (WRF-Chem, Weather Research and Forecasting Model with Chemistry) 与街道 (MUNICH, Model of Urban Network of Intersecting Canyons and Highways) 空气 质量模型,在气象再分析资料 (NCEP/FNL)、高时空分辨率城市机动车排放清单、中国 多尺度排放清单 (MEIC, Multi-resolution Emission Inventory for China; http://www.meicmodel.org/) 等多源数据的驱动下,对开封市进行街道尺度下的空气污染 物分布的时空精细模拟。

本文总体技术路线如图 1-1 所示:



图 1-1 技术路线图

1.4 论文组织框架

本文的论文组织框架如下:

第一章:绪论。本章主要介绍了本文的研究背景和研究意义,提出本文所要解决的 科学问题,指出本文的研究目的,并简单介绍本文的内容与结构。

第二章:研究综述。本章主要从城市空气污染及其健康效应、城市空气污染物时空特征、空气质量表征方法与技术、街道空气质量模型以及机动车排放清单数据获取与编制等方面,评述了目前国内外的研究进展。

第三章:数据与方法。本章主要介绍了研究区概况以及本文采用的数据来源与特点。 介绍了 VEIN 模型的主要框架,以及 MUNICH 模型的系统构成,并对本文所需的气象 场环境要素进行了简单介绍,同时对本文所采用的大气物理过程以及大气化学机制模块 进行了概述。

第四章:高分辨率机动车活动水平智能感知。本文主要介绍了基于地理视频的机动 车活动水平数据感知,介绍了交通视频的采样方案,视频数据的空间化处理方法,开封 市机动车活动水平的感知识别等,并分析了开封市机动车活动水平的时空变化特征。

第五章:高时空分辨率机动车排放清单编制。本章介绍了基于高分辨率机动车活动 水平时空分布数据,利用 VEIN 机动车排放清单编制模型,编制了开封市高时空分辨率 机动车排放清单,分析了开封市机动车污染物排放的时空特征。

第六章:街道空气污染物的精细模拟与分析。本章介绍了 WRF-Chem 与 MUNICH 模型的参数本地化设置,以及面向街道尺度的空气质量模型耦合方案。以开封市为例实 现了街道尺度空气污染物的时空精细模拟,评估了模型模拟结果的精度,简要分析了开 封市街道空气污染物时空差异的成因。

第七章:结论与展望。本章对本文的主要研究结果进行总结与分析,讨论了本文的 创新点以及不足之处,对接下来进一步的研究工作进行了展望。

2 研究综述

2.1 城市空气质量监测与模拟

随着经济社会的快速发展,工业化和城市化进程的加剧,各类能源消耗量迅速增加,造成了我国尤其是城市区域严重的空气污染问题。城市规模的不断扩张,使得城市人口不断上涨,据我国国民经济和社会发展统计公报报道,2019 年末我国城镇常住人口达84,842 万人,占全国总人口的60.60%,超过1,000 万人口的城市有16 个。严重的城市空气污染问题对居民的人体健康造成了极大威胁^[17-18],评估居民对城市空气污染物暴露的健康风险越来越受到人们的关注^[19]。

高精度城市空气污染地图与城市精细尺度的空气质量模拟,是精准量化评估人体对 城市空气污染物暴露的健康效应以及制定科学防范措施的基础与关键^[4-6]。由于城市内 部污染源、气象条件、地形、城市规划建设、大气化学转化等因素的非均匀分布影响, 城市内部尤其是街道空气污染物及扩散条件在较短距离内存在较大的时空差异^[8-9, 20-26], 使得获取高分辨率城市精细尺度的空气污染物时空分布面临诸多挑战。

目前,大多采用空气质量监测站点数据来表征城市的空气污染水平。但现有空气质 量监测站点的建设与维护成本高昂,仅基于有限数量的监测站点数据代表某城市的空气 污染水平,难以精准刻画城市精细尺度空气污染物的时空变化特征^[4,27]。国内外学者利 用空间插值^[28-29]、地理加权回归^[5,30]、遥感反演^[31-32]、土地利用回归模拟^[33-34]、机器学 习^[35]及空气质量模型^[36]等方法,尝试获取更高分辨率的城市空气污染物时空格局。上述 方法在一定程度提高了城市空气污染物分布的空间分辨率,但难以得到城市精细尺度 (米级或路段)空气污染物的分布状况及细粒度时间变化过程。

为此,Apte^[8]利用谷歌采集车集成便携式空气质量检测仪,对美国奥克兰市某街区 各街道进行了长时间重复观测,构建了街道尺度高空间分辨率空气污染物地图,但此方 法难以表征污染物的时间变化趋势且数据采集成本高、效率低。空气质量模型是用于模 拟大气污染物时空演变规律、内在机理、成因来源以及实现空气质量精细化管理的重要 技术方法。空气质量模型已经从 20 世纪 70 年代使用高斯烟羽公式为基础进行局地简单 化学模拟的第一代空气质量模式;到覆盖更大尺度 (城市、区域)以及污染物,关注单 一污染物或问题的第二代空气质量模型;发展成为尺度更大 (大陆、半球)处理多重污

染的第三代空气质量模型。其中美国环保局开发的多尺度多模块三维欧拉大气化学和传输模拟系统 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality Modeling System)^[37];由美国国家海洋和大气管理局 (NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)、美国国家大气研究中心 (NCAR, National Centerfor Atmospheric Research)等单位联合研发的新一代在线 (Online) 空气质量模式 WRF-Chem^[38]以及将区域和大陆尺度的对流层空气污染作为整体"一个大气"来考虑的欧拉区域光化学离散模型 CAMx (Comprehensive Air Quality Model With Extension)^[39]是当前较为流行的第三代空气质量模型。区域空气质量模型发展较为成熟,但其模拟空间分辨率较低 (通常 >4 公里),很难实现城市精细尺度的空气质量模拟^[40]。

2.2 街道空气质量模型与模拟

城市街道峡谷最先早由 Nichclson^[41]在 1975 年提出,其字面意思即城市街道与两旁 建筑物组成的峡谷。街道峡谷具有峡谷效应,及气流从开阔区域进入峡谷后,空气被压 缩,风速增大。城市街道峡谷因其独特组成,会在某些区域形成风速升降幅度明显、在 建筑转角形成漩涡的大气现象^[42],街道内部气体与外界大气流通受到限制,此时机动车 排放的污染物便因复杂的大气环境而难以扩散和稀释,集聚在街道峡谷内导致街道峡谷 污染物浓度升高^[43]。机动车污染物排放将接近地面,街道峡谷内的污染物的积累集中在 人类呼吸道高度分布范围内。而街道是城市居民参与社会活动的主要区域,对暴露在街 道的行人身体健康造成了较大威胁^[44-45]。例如,许多研究表明,暴露于污染空气中的人 更容易患呼吸系统和心血管疾病^[46-47]。

对于此,有诸多研究采用现场观测的方法探讨城市内部街道空气污染的分布于扩散。 现场观测即是通过设置监测点,监测不同街道构成、建筑布局、交通流量以及大气环境 等条件下街道污染物浓度的分布规律。早在 1995 年就有研究^[48]测算了德国埃森某街道 内 NO₂、CO 等污染物的浓度,分析了不同气象条件对污染物浓度的影响。国内有学者 ^[49]在研究西安市某街道典型街区内污染物浓度扩散中,发现了街道污染物浓度扩散的空 间分布特征,以及污染物扩散与气象环境之间的相互关系。Chan 等人^[50]在香港选择了 四条不同街区的街道进行污染物浓度监测,研究结果发现街道旁建筑高度越高 PM₁₀ 和 TSP 污染物浓度越高,且呈现指数增长的趋势,距地面越近污染物浓度越高,该研究同 样发现街道内颗粒物的扩散受到主导风向和街道形态的主要影响。还有诸多研究表明,

街道内污染物浓度与交通流量密度相关、密度越大排放越大,同时气象条件、建筑结构 均是影响街道污染物浓度的关键因素^[51-52]。

但是基于现场观测的城市街道污染研究,多关注一条或几条街道,对于绘制整个城 市或城区的街道污染物浓度分布图就会显得力所不及,其时间成本、人力成本以及操作 难度会大大增加。同时现场观测难以定量分析机动车排放以及相邻区域污染物传输在研 究区污染中的贡献。因此更加精准化的物理实验模拟以及数值模拟的方法开始在研究中 得到应用。

物理模拟通常是采用风洞实验,模拟街道及建筑组成结构,分析街道空气污染扩散 以及时空异质性。国内外的诸多物理实验进行街道内空气流动的变化特征以及污染物传 输与扩散的规律的研究,探究街道几何尺寸、建筑物配置、屋顶形状以及风向等因素对 街道内污染物浓度的影响^[53-55]。物理模拟需要建立与现实环境相对应的物理模型,人为 控制某些变量,对街道空气污染特征进行详细研究,高度再现街道空气流动变化特征。 但是风洞实验成本较高、操作难度较大,同样存在着眼于某种特定街道的污染物分布, 难以研究整个区域或城市的污染物空间分布的不足,难以大规模推广。

为此,相关学者与部门相继开发了 CPBM^[56]、AEOLIUS^[57]、OSPM^[58]、SIRANE^[59]、 CALPUFF^[60]、RLINE^[61]、SinG^[62]等系列城市街道空气质量模型。上述模型进一步提高 了城市空气质量模拟的时空分辨率,但大部分模型仅将监测站点的风速和风向作为气象 条件输入,较少考虑其他气象因素对污染物扩散与转化的影响;大都将机动车排放进行 静态均一化设置,默认机动车排放污染物后污染物化学性质稳定。是导致模拟结果具有 较大偏差及不确定性的主要原因之一^[63-64]。另外,大部分模型是针对少量街道峡谷或特 定点的模拟实验,难以实现较大空间尺度城市街道空气质量的精细模拟。

MUNICH 模型^[62]则是由化学传输模型和街道网格模型耦合而成,模型中包括大气 化学综合处理以及 1 km 以下空间尺度的传输,该模型能够加准确的模拟街道内污染物 的传输扩散以及化学反应状况。综上所述,本文采用更加精准的 MUNICH 模型,模拟 开封市街道空气污染变化情况。

无论是扩散模型还是涵盖了化学机制的模型,均需要高时空分辨率的机动车排放清 单作为数据支持。低分辨率的机动车排放清单,难以精确表现城市街道机动车污染物排 放的空间差异性,会导致城市街道污染物模拟结果准确度下降,不确定性增加。因此高 时空分辨率的机动车排放清单编制是进行数值模拟的基础条件。

2.3 城市机动车排放清单研究

全世界大约 19%的化石燃料作为交通能源被使用,化石燃料在燃烧的过程中会释放 出大量的初级污染物以及二次污染物的前体物质^[65-67]。大量的研究证明,机动车排放的 氮氧化物 (NO_x)、碳氢化合物 (HC)是城市灰霾和光化学污染的主要来源,机动车污染 物排放已经成为城市空气污染的主要诱因之一^[68-70]。在探究机动车排放在城市空气污染 中的贡献作用时,由于城市间地理位置、气候条件、机动车保有量以及活动水平等方面 存在差异,不同地区间排放特征存在明显差异,致使不同的研究学者获得了不同的结论 ^[71-74]。同时,机动车排放的时空分布及其准确性是影响空气质量模拟效果至关重要的因 素之一。

因此定量研究机动车污染物排放,制备高时空分辨率的机动车排放清单是研究区域 主要污染来源、阐明污染特征、精细化模拟城市街道空气质量和制定污染防治对策的重 要数据支撑^[75],对了解本地机动车污染排放现状、量化机动车排放对大气污染贡献、评 估机动车排放健康效应以及指导相关部门针对性地制定控制措施具有一定的帮助作用。

目前比较成熟的模型主要有美国环保局开发的 MOBILE^[76]模型和 MOVES^[77]模型、 欧盟委员会 (EC, European Commission) 开发的 COPERT^[78]模型、国际可持续发展研究 中心 (ISSRC, International Sustainable Systems Research Center) 和加州大学河滨分校 (UCR, University of California at Riverside) 共同开发的 IVE^[79]模型以及巴西圣保罗大学 最新开发的 VEIN^[80]模型。

国内外学者依据上述模型测得北京市机动车排放产生的 CO 和 NO_x 贡献率^[81-82];分 析了不同车型对广东佛山颗粒物污染造成的影响等诸多实验^[83]。研究结果表明,机动车 辆类型、使用年龄以及行驶速度对机动车排放因子具有比较大的影响^[84-85],而机动车流 量的不同则会引起街道内污染物不同程度的释放与积累^[86-87],这些因素均会造成机动车 排放时空异质性的存在

高时空分辨率的机动车活动水平和本地化排放因子是提高排放清单准确性以及分 辨率的重要支撑,是精细化模拟城市街道空气质量的必要条件。而机动车活动水平与排 放因子则具有较强的时空变化特征^[88-89],目前国内外研究通常以统计年鉴、人工调查、 交通需求模拟等获取机动车流量、平均车速、车辆构成和平均车重等数据,通过采集少 量路段的路面积尘负荷作为某种道路类型的排放因子^[90-92],存在成本高、效率低、安全 性差且结果不确定性较大等问题,难以表征机动车活动水平与排放因子时空变化特征, 且通常未对排放因子模型参数进行本地化处理,导致机动车排放清单更新滞后、时空分 辨率低、准确度较差。因此,亟需一种简单便捷的机动车活动水平获取方式,改进排放 清单编制技术。

鉴于此,为提高机动车排放清单的准确性,获取精度更高的机动车活动水平,本文 试图利用地理视频智能化感知时空变化较大的车流量、车速、车辆类型、车重等数据, 以期实现对机动车活动水平的高效获取,大幅提升数据获取效率及其时空分辨率。

2.4存在问题及本研究定位

综上所述,目前在城市精细尺度空气质量的高精度模拟方面仍存在以下明显问题:

(1) **监测数据无法表征城市精细尺度空气污染物分布的时空差异**: 空气质量监测站 点建设与维护成本高、数量少、分布稀疏,利用有限的监测站点数据代表城市的空气污 染水平,难以准确表征精细尺度城市空气污染物的时空变化特征。

(2) 区域空气质量模型难以准确模拟城市街道空气污染物的时空分布:现有城市/区 域空气质量模型大都对机动车排放进行均一化设置,未考虑机动车排放时空变化对空气 污染物分布的影响,是造成现有空气质量模型模拟结果具有较大不确定性主要原因之一。

(3) 机动车活动水平数据的获取困难、时空分辨率不足且准确度低:基于统计年鉴、 人工调查、交通需求模拟等方法估算的机动车活动水平数据,存在成本高、效率低、时 空分辨率不足、更新滞后等问题,难以满足空气质量模型高时空分辨率精细化模拟需求。

因此,本研究拟设计一种基于交通视频的机动车活动水平智能感知方案,研究高时 空分辨率城市机动车污染物排放估算方法,耦合区域与街道空气质量模型,实现城市街 道尺度的污染物时空分布精细化模拟 (时间:1小时,空间:路段水平)。探究机动车排 放对城市街道大气污染的影响,为城市机动车排放与空气质量的精细化管理,城市空气 污染健康暴露的精准评估等提供理论与方法支撑。

3 数据与方法

3.1 研究区概况

开封市位于东经 113°52′15″-113°15′42″、北纬 34°11′45″-35°01′20″之间,地处中原 腹地、河南省东部,总面积约 6,444 平方千米。开封市下辖六区四县,主城区由鼓楼区、 龙亭区、顺河回族区、禹王台区、祥符区和城乡一体化示范区组成,市区面积 546 平方 千米。开封市属温带大陆性气候,气候特点四季分明,海拔 69 米至 78 米。随着开封市 经济的不断发展,城镇化率不断提高截至 2017 年底达到 47.7%,城市公路线路里程不 断增加,截至 2017 年底达到 9,512 千米,同时民用汽车保有量不断增加至 2017 年底达 483,257 辆。

近年开封市城市发展较为明显,尤其在城乡一体化示范区,城市建设发展呈现日新 月异的变化,图 3-1为开封市街道路网示意图。高密度的住宅与商业建筑区构成的城市 街道峡谷,使得开封市形成了独特的城市微气候,机动车排放的空气污染物易于集聚并 难以扩散。独特的地理环境和不断发展居民生活水平,致使机动车造成的污染排放不断 增加并且因城市街道峡谷组成难以扩散。因此,针对机动车污染排放,开封市也制定了 诸多减排控制措施。



图 3-1 开封市街道路网分布

为贯彻落实党的十九大关于"打赢蓝天保卫战""提高污染排放标准"的要求,切实 加大京津冀及周边地区大气污染防治工作力度,依据《中华人民共和国环境保护法》《中 华人民共和国大气污染防治法》,2018 年 1 月生态环境部决定在包括河南省开封市在 内的京津冀大气污染传输通道城市 ("2+26"城市),执行大气污染物特别排放限值,并于 2019 年 10 月印发了《京津冀及周边地区 2019-2020 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行 动方案》。为了减少机动车污染物排放,缓解道路交通压力,持续改善城市空气质量,结 合开封市道路交通实际情况,2017 年以来开封市人民政府在主城区采取不同的机动车 限行措施,为精确评估不同机动车限行措施产生的空气质量改善效应,亟需开展城市精 细尺度空气质量模拟研究。

3.2 数据来源

本文使用的数据主要包括:地理视频、全景图像、建筑物高度、气象观测数据、气 象再分析资料、大气污染物排放清单、大气污染物监测数据 (表 3-1)。

数据名称	数据来源	数据用途
地理视频	实地采集	感知交通流量、车速等机动车活动水平
全景图像	百度地图	获取车道数量、道路宽度等地理数据
建筑物高度	开封市自然资源和规划局	为街道空气质量模型提供街道峡谷信息
气象数据	WRF-Chem 模拟气象数据	为街道空气质量模型提供气象数据
气象再分析资料	NCEP/FNL 再分析资料	验证气象模拟结果
大气污染物排放清单	清华大学 MEIC 清单	为区域空气质量模型提供人为源排放数据
大气污染物监测数据	国家环境监测总站	为模拟提供背景浓度、评价模拟结果

表 3-1 实验数据特征

MUNICH 模型需要城市街道峡谷组成数据,包括各条街道两旁建筑物高度、各街道 交叉路口标号及坐标、各路段起始与终止交点坐标、各路段车道数量、各街道宽度、各 个路段长度以及各道路交叉口所引导的街道数量和编号。本文研究区域中共包括 1,819 条街道,1,166 个道路交叉口。

使用新一代中尺度气象预报模式 WRF-Chem 模型模拟开封市 2018 年 6 月 30 日至 12

2018 年 7 月 12 日的气象环境变化情况为开封市街道空气污染模拟提供气象环境条件。 模拟过程中所需的气象环境条件包括风速、风向、大气压强、温度、摩擦风速、大气边 界层高度以及莫宁奥布霍夫长度 (LMO, Monin-Obukhov length)。

2012 出台了空气质量的新标准《环境空气质量标准》(GB3095-2012),中国环境监测总站在全国 300 多个城市建立了 1,400 多环境监测站点,每小时发布一次空气质量指数报告以及 6 种空气污染物 (NO2、SO2、PM10、PM2.5、CO、O3)实时浓度数据。开封市环境监测国控站点设置在肿瘤医院、妇幼保健医院、世纪星幼儿园以及龙亭公园。本文采用开封市环境监测国控站点发布的 CO 和 O3 浓度数据作为 MUNICH 模型中污染物的背景浓度为模型模拟提供基础数据,同时为验证模型结果提供数据标准。

3.3 WRF-Chem 模型

WRF-Chem 是由美国国家海洋和大气管理局 (NOAA)、美国国家大气研究中心 (NCAR) 等单位联合研发的新一代在线 (Online) 空气质量模式^[93]。WRF-Chem 模式是 在 WRF 中尺度气象数值预报模式中加入了大气化学模式集成而成,是第三代大气环境 质量预报模式,其结合了 WRF 模块和 Chem 化学模块,考虑了干湿沉降、生物排放、 人为排放、诸多气相化学机制 (RADM2、RACM、CB-4、RACM-MIM、SAPRC-99、 MOZART 和 CBMZ) 的选择、光化学反应、大气辐射方案以及微物理参数解等反应机制 参数的选择,还包括行星边界层和积云参数化方案的选择。

WRF-Chem 模型包括诸多物理化学组件选择,主要包括以下几大部分:

(1) 微物理参数化方案,本文采用 Lin 方案^[94],该方案是 WRF 模式中一个微物理 参数化方案,在 CHEM 模块中也得到了大量的应用和分析,其中比较全面的考虑了水 汽、雨水、雪、云水、云冰和霰等水成物,更贴近实际大气中的微物理过程,适于真实 数据的高分辨率数值模拟。

(2) 辐射方案,辐射参数化方案包括长波辐射和短波辐射。长波辐射选用 New Goddard^[95]:在原 Goddard 方案的基础上,对计算云光学厚度,处理短波辐射传输过程 以及气体分子吸收方面做了改进,能够高效且全面的从气候学角度考虑多谱带和臭氧对 辐射的影响。短波辐射选用 Goddard 方案。

(3) 人为排放,本文使用清华大学研发的中国多尺度大气污染源排放清单模型MEIC 清单^[96]。

(4) 生物排放,本文采用 MEGAN (Model of Emissions of Gas and Aerosols from Nature)^[97]输入模型。

(5) 气相化学机制,模型包括 RADM2、RACM、CB-4 和 CBMZ 等诸多化学机制。 本文模拟采用 CBMZ 机制,其包含了 67 种预测物质和 164 种化学反应。它根据化学 物质中不同的碳键机制来对其种类和产生的化学进行分类,同时该机制还发展了包括背 景条件、城市、远郊、生物区和海洋等 5 个反应场景,调整后的模式架构更加适用于比 较大的时空尺度。

(6) 行星边界层方案,本文采用 Mell-Yamada-Janjic (MYJ) 方案^[98]: 该方案利用局 部的垂直混合理论来预测湍流动能,并利用 SLAB 薄层模式计算地表温度,最后通过 隐式扩散方程准确计算得到垂直通量

(7) 陆面过程,本文采用 Noah 方案^[99]:该方案的在 OSU 模式的基础上发展而来, 是一个考虑 4 层土壤的温度值和湿度值,能够推测冠层水汽和雪盖的模式。该方案不 仅为边界层参数化方案提供潜热通量和感热通量,还考虑了雪盖和植被效应。

3.4 VEIN 模型

VEIN (Vehicular Emissions INventories) 是一种自下而上的机动车排放清单编制模型^[80],可以模拟估算机动车在各个街道每小时的污染物排放情况。VEIN 模型是采用免费的开源软件 R 构建的,模型依赖诸多 R 语言包,其中包括提供绘制地图、进行空间选择以及检索功能 sp (Spatial Data)包,从 GEOS (Geometry Engine-Open Source; <u>https://trac.osgeo.org/geos/</u>) 库中引入了 rgeos 接口,还在提供抽象地理空间数据库的 rgdal (Geospatial Data Abstraction Library; <u>http://www.gdal.org/</u>) 中引入函数,在使用 VEIN 模型时需要首先安装这些支持库。

VEIN 模型包含了机动车的冷热排放、蒸发排放以及这些因素的劣化影响。同时 VEIN 能够进行污染物的生成与合并制作数据库,同时将污染物排放分配至空间网格, 进行可视化操作以及进一步分析。该模型允许用户加载适合于研究区域的排放因子,从 而进行本地化排放清单的编制。VEIN 模型通过读取各路段不同使用年限的机动车每小 时的交通流量计算出机动车污染物逐小时排放的空间分布。该模型能够根据不同控制情 景编制不同的机动车排放清单,其结果可为大气模型、健康研究、空气质量标准化以及 政府决策支持。 该模型中,机动车污染物排放的时空分配是按照机动车活动水平与排放因子之间乘 积关系确立的,正如下式所表达:

$$Emission_{pollutant} = \sum_{activity} (AR_{activity} \cdot EF_{pollutin,activity})$$
(3-1)

式中: *Emission_{pollutant}*是污染物排放量; *AR_{activity}*是机动车活动水平,由机动车数量 与行驶距离 (km) 相乘得出; *EF_{pollutin,activity}*是机动车污染物的排放因子 (g km⁻¹)。该 模型中,机动车污染物的排放取决于机动车活动水平 *AR* 和排放因子 *EF*,即机动车根据 活动水平产生相应的污染物的质量。

作为一种自下而上排放清单计算模型,诸多参数设置 (交通流量、车辆组成、行驶 速度、路网组成) 以及排放因子会影响机动车的活动水平 (图 3-2)。本文通过视频 GIS 技术获取开封市各条街道一周内交通流量的变化情况,为 VEIN 提供本地化的交通数据, 排放因子采用中华人民共和国生态环境部 2014 年发布的《道路机动车大气污染物排放 清单编制技术指南(试行)》(000014672/2014-01379)。



图 3-2 VEIN 模型流程图

VEIN 主要分为以下几个步骤:

(1) 交通数据处理

VEIN 模型所需要的交通数据必须是每条街道每小时的车辆数据,这些数据可以由 流量模拟、插值或者其他来源提供。

第一步, VEIN 读取研究区域的每条街道每小时的早高峰交通数据, 根据公式(3-2) 按照车辆组成对数据进行整理和组织;

$$F_{i,j,k}^* = Q_i \cdot VC_{i,j} \cdot Age_{j,k} \tag{3-2}$$

式中, *F*^{*}_{*i*,*j*,*k*}是使用了*k*年的*j*类车辆在*i*路段行驶的车流量 (h⁻¹), *Q*_{*i*}是*i*车道内的交通 流量 (h⁻¹), *VC*_{*i*,*j*}是行驶在*i*路段内*j*类车辆的比例, *Age*_{*j*,*k*}是使用了*k*年的*j*类车辆的年 龄分布。由该方程可知, *VC*将交通总流量*Q*依据车辆不同的发动机尺寸、燃料类型以及 车辆质量进行划分。车流的这种特性取决于已经获取数据的数量和质量,将流量以车辆 使用年龄相乘从而获得不同使用年龄段行驶的车辆数量。

获取的交通数据通常为早高峰交通数据,想要获得每小时的交通流量数据必须将交通数据进行时间分配,可以从短期的交通数据扩展为时间跨度较长的数据如年均日交通流量 (AADT, Annual average daily traffic)^[100]接下来是按照不同的路段、车辆种类、使用 年龄以及时间,外拓交通流量情况(3-3):

$$F_{i,j,k,l} = F_{i,j,k}^* \cdot TF_{j,l} \tag{3-3}$$

式中, *F_{i,j,k,l}*是使用了*k*年的*j*类车辆在*l*时刻行驶在路段*i*的流量 (h⁻¹), *TF_{j,l}*是一周内 *l*时刻*j*类车辆行驶数量所占比重。*TF* 是一个 24 行的矩阵, 列数代表星期一到星期日的 每一天。该矩阵表达了一周每天 24 小时的交通变化情况,为了更好地获取其他时刻的 交通流量,将 *TF* 矩阵进行了标准化,即将星期一早高峰时刻的 *TF* 值设置为 1,相应地 将不同比例分配给其他各时段,其计算方法是将矩阵中每个时段的交通流量数据除以星 期一上午高峰时段的交通流量数据。

(2) 排放因子选择

排放因子即排放系数,是描述特定的生产或生活强度与污染物排放之间的关系^[101], 在《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》(000014672/2014-01379)中 机动车污染物排放因子指的是机动车单位行驶里程的大气污染物排放量。VEN 模型考 ¹⁶ 虑了冷排放、热排放、蒸发排放以及老化和磨损排放。VEIN 允许使用三种热排放因子的选择情况:

(a) 使用 Copert (Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport)^[102] 计算方法得出的机动车污染物排放。该模块包含在 VEIN 模型内部,如果没有本地排放 因子的情况下可以采用该模块。

(b) 使用本地的排放因子。其数值是克每千米 (g km⁻¹)由不同类别的车辆、燃料类型、车辆大小和使用年龄决定。

(c) 使用特定的缩放比例系数对 Copert 系数模块进行缩放,这与车辆的使用年龄以 及速度具有一定的相关性。

默认情况下,VEIN 模型包含了一种来自 Copert 模块的恶化因子,这种恶化因素取 决于车辆的行驶里程以及车辆所采用三效催化进化剂的标准有关。

(3) 排放计算

VEIN 模型模拟的排放类型包括热排放、冷排放和蒸发排放。机动车的总排放量是 这些排放的综合。

A. 热排放

依据车道、车辆类型、时间以及污染物种类进行机动车排放模拟,下式显示了机动 车热排放计算过程:

$$EH_{i,j,k,l,m} = F_{i,j,k,l} \cdot L_i \cdot EF(V_{i,l})_{j,k,m} \cdot DF_{j,k}$$
(3-4)

式中, *EH*_{*i,j,k,l,m*}是指使用了 *k* 年的 *j* 类车辆在 *l* 时刻行驶在 *i* 路段内所排放的污染物 *m* 的量 (g h⁻¹), *L*_{*i*}是路段 *i* 的长度 (km), *EF*(*V*_{*i,l*})_{*j,k,m*}是使用了 *k* 年的 *j* 类车辆在 *l* 时刻行 驶在 *i* 路段内排放的污染物 *m* 的排放因子 (g km⁻¹), *DF*_{*j,k*}是使用了 *k* 年的 *j* 类车辆的无 量纲退化系数。退化系数采用欧洲标准的累计行驶里程催化剂和汽油车辆的排放降解功 能,用户也可以采用自己设定的退化因子。

B. 冷排放

冷排放是指发动机启动时,发动机和催化转化器系统未达到正常工作温度时产生的 污染物。因此当车辆在停车场或在主要住宅区街道开始行驶时就会产生冷排放。有研究

表明,冷排放对环境具有重要的影响^[103]。同时,当大气环境降低时,无论催化器是否达到了运行最佳温度,机动车的冷排放都会增加^[104],VEIN 模型在 Copert 模块包含了冷排放的计算。冷排放的产生与机动车的使用年龄以及催化器的效果有直接关系,并且 VEIN 模型包含了 IVE (International Vehicle Emissions) 模型中冷排放数据库。

C. 蒸发排放

蒸发排放是机动车碳氢化合物 (HC) 污染的主要来源,这些排放是由于环境温度变 化导致的燃料汽化而产生的。蒸发排放主要由三种类型构成:大气温度升高,导致罐内 燃料热膨胀而产生的日间排放;运行损耗,机动车正常行驶时致使油箱温度升高而引起 的蒸发排放;热浸排放,即机动车熄火后一段时间内,进气系统内的燃料在发动机残留 的高温作用下产生的蒸汽从进气系统和输油管道等各部分的连接处逃逸进入外界环境 [105]。

(4) 污染物的生成

VEIN 生成的污染物包括黑炭 (BC) 和有机物在内的颗粒物、轮胎由刹车和摩擦造成的微物质、非甲烷总烃 (NMHC, non-methane hydrocarbons) 以及氮氧化物(NO_x),是 大气化学中起到重要作用的几种物质。这些污染物的排放与机动车类型、燃料、排放标 准以及其他特征得出的排放因子有直接关系。

(5) 空间分配

VEIN 模型拥有网格生成功能,能够将生成的污染物数据分配于研究区域的空间格 网中,可将机动车排放清单结果进行可视化处理。为输入大气模型提供帮助也可以为城 市规划建设部门做出协助。

3.5 MUNICH 模型

MUNICH (Model of Urban Network of Intersecting Canyons and Highways) 模型是一种街区尺度的空气污染模型^[62]。该模型包含的化学传输模块能够模拟 1 km 空间分辨率的污染物传输,同时,街道网络模型能够可视化描述城市街道网络中的大气污染分布。模型主要包括两部分,一是街道峡谷的组成部分,由街道和城市建筑组成,模拟城市冠层的大气过程;另一部分是街道交叉口组成部分,模拟交叉口大气过程,其运行流程框架如图 3-3 所示。

3 数据与方法



图 3-3 街道空气污染模拟示意图

MUNICH 模型主要分为以下几个步骤:

(1) 道路组件部分

对于街道路段,是街道峡谷的组成部分,其两端由交叉口或者其他路段引导,满足 以下假设:

(a) 同一路段的街道宽度和建筑物高度是一致的;

(b) 大气污染物的排放和沉积沿街道呈均匀分布;

(c) 在街道峡谷内风向与街道方向一致;

(d) 风速是均匀的,并且风速的大小与建筑顶部风速、顶部风速与道路夹角、路段属性 (宽度、高度) 相关;

对于稳定状态下,同一街道内大气污染物的质量流通是遵循质量守恒的,其存在以下平衡关系 (3-5):

$$Q_s + Q_{inflow} + Q_{chem} = Q_{vert} + Q_{outflow} + Q_{dep}$$
(3-5)

式中, Q_s 是污染物的源排放速率 (µg s⁻¹), Q_{inflow} 是污染物在风的作用下汇入街道的速 率 (µg s⁻¹), Q_{chem} 是指污染物的化学转变速率 (µg s⁻¹), Q_{vert} 是指因湍流扩散在街道峡 谷顶层引起的垂直通量 (µg s⁻¹), 计算见公式(3-6), $Q_{outflow}$ 是污染物流出街道峡谷的速 率 (µg s⁻¹), 计算见公式 (3-7), Q_{dep} 是大气沉降速率 (µg s⁻¹);

$$Q_{vert} = \frac{\sigma w \cdot W \cdot L}{\pi \sqrt{2}} (C_{street} - C_{background})$$
(3-6)

式中, *ow*是街道峡谷顶层垂直风速标准差, *W* 是路段的平均宽度 (m), *L* 是路段长度 (m), *C_{street}*是街道峡谷内污染物的平均浓度 (µg m⁻³), *C_{background}*是街道峡谷内污染物 的背景浓度 (µg m⁻³);

$$Q_{outflow} = H \cdot W \cdot u_{street} \cdot C_{street}$$
(3-7)

式中, H 是街道峡谷建筑物的平均高度 (m), W 是路段的平均宽度 (m), u_{street} 是街道峡谷水平方向的平均风速 (m s⁻¹), C_{street} 是街道峡谷内污染物的平均浓度 (μ g m⁻³)。

(2) 交叉口组件部分

MUNICH 模型对于街道交叉路口部分存在以下假设:

(1) 交叉路口处的大气污染物浓度并不均匀;

(2) 街道网内的气流会在交叉路口或者交叉口顶部流入流出得到补偿,保证街道内 部的空气的质量平衡;

(3) 在建筑顶部气体的平均流动遵循风向的变化;

(4) 某街道的气流经过交叉路口流向另一街道时气流不能发生交叉;

(5) 当某街道气流经过交叉路口时应到考虑风向的变化。

若仅仅考虑平均气流的,则街道内的空气流量完全取决于街道的形状、交叉路口以 及建筑顶部风向。然而,有研究表明风向的波动对交叉路口的气流具有重要的影响^[106]。 因此,必须考虑到交叉路口的气流波动对空气和污染物带来的转移作用,即空气以及污 染物流动是的计算不仅仅取决于平均风向,还与风向的变化有关 (假定风向的变化遵循 以平均风向为中心的高斯分布)。

因此在使用公式 (3-5) 计算交叉路口的空气流通质量或者污染物流通质量时,应当 考虑到交叉路口气流的垂直通量修正了街道的气团通量。

(3) 化学机制

光化学反应对大气污染物具有重要影响,尤其是 NOx 的光化学反应对 O3 以及二次 颗粒物的形成方面发挥很大作用^[107]。模型提供诸多化学机制选择,包括 RACM、RACM2、

CB05 和 Leighton 化学机制,本文研究中采用 CB05 化学动力学机制,该机制包括 53 种挥发性有机物 (VOC, volatile organic compounds) 和无机污染物,以及包括 23 种光解反应在内的 155 种化学反应。在城市冠层污染物中 NO 的排放可能会降低 O3 和其他氧化剂的量,从而低估了 VOC 的量,因此该模型包括涉及 NO、NO2 与 O3 在内的三反应化学机制以实现莱顿光稳态^[108]。但是,在 VOC 污染较为严重的区域,莱顿稳态会失衡,因此化学机制的选择与研究区域空气质量状况有关系。

(4) 干湿沉降

污染物的干沉降采用 Cherin 等人的方法^[109],该方法可以计算街道和人行道表面、 建筑物墙壁以及建筑屋顶。干沉降通量 (μg m⁻² s⁻¹)是将污染物浓度 (μg m⁻³) 与污染物 沉积速率 (m s⁻¹) 相乘得到的,沉降速率取决于大气条件以及建筑 (或者道路) 表面属 性。对于城市冠层,采用城市冠层污染物的浓度,街道网络中的污染物浓度应用与人行 道和建筑物墙壁。

湿沉降,主要指是污染物通过降水清除或者在降水作用下沉积到人行道和建筑物屋顶。湿沉降在建筑物顶部的污染物的量主要由降水强度和城市顶部污染物背景浓度来估算。通过降水清除以及沉降在路面的污染物,需要计算整个大气柱以及城市顶部和内部的所有污染物背景浓度。其计算公式如下:

$$F_{street} = \Lambda \left(C_{street} \cdot H + C_{background} (Z_c - H) \right)$$
(3-8)

式中, F_{street} 是湿沉降于路面的通量 ($\mu g m^{-2} s^{-1}$), Λ 是湿沉降的清除系数 ($\mu g s^{-1}$), Z_c 是 云底高度 (m),云内部的湿沉降对污染物仅有微弱的清除作用。

(5)街道峡谷内大气污染物浓度计算:

$$C = \frac{Q_s + Q_{inflow} + (transfer_{velocity} \cdot W \cdot L) \cdot C_{background}}{Q_{outflow} + trandfer_{velocity} \cdot W \cdot L}$$
(3-9)

式中,*C*是某街道某种大气污染物浓度 (µg m⁻³), *trandfer_{velocity}*是污染物无量纲转换系数。

MUNICH 模型是一种模块化的模型,该模型可以根据用户选择的不同参数得以在 不同的区域不同情况运行,该模型不仅仅是城市冠层的模拟还能够进行街道网格内进行 模拟,同时复杂的大气化学机制的选择也是该模型的独特之处。

3.6本章小结

本章主要介绍了研究区域的基本情况,分析了本研究采用数据的来源、特征与用途。 同时,详细描述了本研究所采用的 VEIN 机动车排放估算模型、区域空气质量模型 WRF-Chem,以及街道空气质量模型 MUNICH 的基本情况、模型架构、模型输入输出等内容, 并介绍了在模型输入准备、模型运行、模型结果分析等过程中需注意的相关问题与技术。

4 高分辨率机动车活动水平智能感知

4.1 地理视频关键技术

随着物联网、云计算、大数据、人工智能等技术的发展,移动物体的位置与轨迹、 城市环境的细微变化等,都已成为可感知、存储、分析和利用的时空数据^[110-112]。越来 越多的研究将多源时空数据应用于空气质量研究^[22,113-116],时空数据的复杂多样性为空 气质量的多维立体观测、高分辨率排放清单编制以及数值模拟等研究提供了强有力支持。

视频数据作为时空数据的主要组成,蕴含着丰富的时间、空间和属性数据,且成本 低廉易于获取^[117],是一类天然的地理空间数据。地理视频是将视频数据进行地理空间化 处理,实现视频场景与地理空间的时空统一^[118-119]。结合视频智能分析技术,在地理时 空参考下实现对视频场景中动态目标识别、分析与挖掘。目前已有少量研究使用视频数 据统计车流量以及车辆类型等机动车活动水平数据,但仅局限于利用人工计数的方式统 计车流量,未能实现对机动车活动水平信息的智能化识别提取、效率低下^[120-121]。

视频数据的地理空间化处理是实现对视频数据在地理空间进行智能分析的关键,其本质是解决视频帧图像坐标系与地理坐标系之间的转换问题,涉及到摄像机位置、拍摄 姿态、摄像机内外参、坐标转换等因素。在透视作用影响下,视频图像会因其真实点位 与摄像机距离远近而发生变形情况,出现近大远小的效果,不能够同现实的地理空间进 行拟合。因此需要对视频图像进行校正处理,将视频像点映射至地理参考,达到视频数 据与真实地理空间的配准。

相机投影几何模型则是通过数学函数将真实的三维坐标投影至平面,构建了目标物与图像平面之间的几何关系,简化为小孔成像理想模型。图 4-1 展示了小孔成像的典型模型^[122],现实空间点 *P(x, y, z)*透过光学中心点 *O*在二维平面 *I*内呈现投影 *p(u, v)*,其中 *o*为像主点,*f*是焦距。现实三维空间中任意点 P 均可在二维平面 I 内呈现投影,均可用小孔成像模型表示,其关系式如下:

$$\begin{cases} u = \frac{fx}{z} \\ v = \frac{fy}{z} \end{cases}$$
(4-1)



图 4-1 相机投影几何模型

视频数据的空间映射则较为复杂,图 4-2 展示了摄像机 C 拍摄现实地理参考平面 G 的效果示意图。平面 I 为摄像机拍摄图像的映射平面,T 为校正后的图像。任意地理参 考平面内一点 P(xg, yg)在映射平面 I 内位置为 p(u, v),经过图像校正后在平面 T 内位置 为 P_t(xt, yt)。寻找平面 I 内 p 点与平面 G 内 P 点之间的转换关系,将图像平面 I 内的图 像映射到现实地理参考的平面 G 内,就是视频数据空间映射的工作。视频数据的地理空 间化处理具体请参考[122-123]。



图 4-2 空间映射平面关系 (引自文献[122])

4.2 机动车活动水平智能感知原型系统

为实现对交通视频数据中机动车活动水平数据的智能获取,本文设计了基于地理视频的机动车活动水平智能感知检测方案,具体流程如图 4-3 所示。具体为:(1)利用普通摄像机采集视频数据,同时利用 GPS 记录摄像机的空间位置,利用电子罗盘记录视频数据采集时的姿态参数,如俯仰角、方位角和横滚角等;(2)将摄像机空间位置与姿态参数输入视频数据地理空间化模型^[123],实现对视频数据的地理空间化处理,成成地理视频;(3)基于 Fast R-CNN 区域卷积神经网络目标检测算法,跟踪检测车流量,分析计算车辆行驶速度,对车辆类型进行分类,实现对机动车活动水平数据的智能感知获取。



图 4-3 基于地理视频的机动车活动水平智能检测流程

Fast R-CNN^[124] 是一种用于目标检测的区域卷积神经网络深度学习算法。Fast R-CNN 算法训练和测试速度较快、检测精度较高,Fast R-CNN 算法简化了基于卷积神经 网络的对象检测器的训练过程,是一种单阶段联合学习的目标建议分类和空间定位的训练算法。该方法可以训练一个比 R-CNN (Regions convolutional neural networks)^[125]快9倍,比 SPPnet (Spatial Pyramid Pooling network)^[126] 快3倍的深度探测网络 VGG16^[127],监测网络能够在 0.3 s 内处理图像,同时在 PASCAL VOC (Visual Object Classes) 2012^[128]中获得 66%的高精度。

Fast R-CNN 中输入整个图像作为一组建议,该网络首先利用几个卷积 (conv) 和最 大池化层对整个图像进行处理,生成一个 conv 特征图。然后每个感兴趣区域 (Rols, regions of interest) 被合并到一个固定大小的特征图中,然后通过完全连接的层 (FCs,

fully connected layers) 映射到特征向量。该网络的每个 Rol 有两个输出向量: softmax 概 率和每个类边界框回归偏移。该架构具有端到端的多任务训练。

Fast R-CNN 针对 R-CNN 算法进行了诸多改进。首先是提高了测试和训练速度,R-CNN 中采用 CNN 对每一个候选区域进行反复特征提取,在一张图片候选区域中有诸多 重叠部分,因此反复提取特征操作造成了大量的重复计算。而 Fast R-CNN 将整张图片 作为一组建议送入 CNN 网络,卷积层 (conv) 不进行特征提取,而是在最后池化层进行 处理,加入候选区坐标信息,进行特征提取的计算。其次,Fast R-CNN 简化了 R-CNN 训练所需要的空间,将先前 R-CNN 两个独立操作的目标分类与候选框的回归统一到 CNN 网络中,因此不需要单独存储特征作为训练样本。

基于上述设计的实验流程,本研究开发了基于地理视频的机动车活动水平智能感知 原型系统,实现了对监控视频中车流量、车辆类型、车速的智能检测与存储。本原型系 统的开发与运行环境如表 4-1 所示。



图 4-4 基于地理视频的机动车活动水平智能感知原型系统

表 4-1	系统开发运行	F环境

项目	描述
体系结构	C/S 架构
开发平台	.NET
开发工具	Microsoft Visual Studio 2010
开发语言	C#
运行环境	Microsoft Windows XP, 7, 10
数据库	Microsoft Access
4.3 地理视频数据采集方案

机动车活动水平数据是利用机动车排放模型估算污染物排放的重要参数,本文利用 基于地理视频的机动车活动水平智能感知系统,实现对开封市机动车活动水平数据的智 能获取,为进行高时空分辨率的开封市机动车排放估算提供基础数据。具体的地理视频 数据选取了11个观测点采集2018年7月1日至7月7日 (168小时)的全时视频采集, 图 4-5 为开封市道路路网及视频数据采集观测点空间分布图。



图 4-5 交通视频采样点分布情况

按照街道的使用特点、交通功能、服务范围、在城市道路系统中的地位和作用等特征,将开封市的城市道路分为四个等级,依次为:快速路、主干路、次干路和支路(图 4-3)。所选视频数据采集站点包括了开封市所有的城市道路级别,本文选取了两条具有代表性的快速路,分别是郑开大道和东京大道,这两条道路是贯通开封市东西新旧城区的主要交通要道,也是外地游客进入开封市的主要通道;主干道共选取了4个视频数据采集站点,分别分布在新城区金耀路(六大街至七大街)、宋城路、大梁路和金耀路(西关北街至西环城路段),这些路段是连接开封市不同分区之间的主要道路,是城市各区域内居民通勤、出行的主要通道;次干路则选择在了第一大街、金祥路和公园路3的采样点,这些道路是服务区域内部居民通行、使用的街道;胡同巷道是开封市老城区的典型代表,本文选择了2个胡同作为支路的采样点。

对各采样点进行为期一周 (168 h) 的视频数据采集,利用本研究开发的机动车活动 水平智能感知系统,识别视频场景中的机动车类型,分析各采样点小型客车每小时通过 数量 (ldv, h⁻¹)、重型货车每小时通过数量 (hdv, h⁻¹)、各路段高峰时间最大车速 (ps, km h⁻¹)、各路段车辆自由行驶时车辆速度 (ffs, km h⁻¹)、各路段每小时通过的汽车数量 (capacity, h⁻¹) 以及汽车通过各路段的平均时间 (tmin, min)。表 4-2 介绍了不同时间段机 动车行驶速度 (ps、ffs) 的划分依据。根据各观测站点对应的道路类型,进一步推演机 动车活动水平的时空分布。

时间段	各路段速度
00:00-06:00	ffs
06:00-07:00	介于 ffs 和 ps 之间
07:00-10:00	ps
10:00-17:00	介于 ffs 和 ps 之间
17:00-20:00	ps
20:00-22:00	介于 ffs 和 ps 之间
22:00-00:00	ffs

表 4-2 各时段速度分类

4.4 开封市机动车活动水平时空特征

通过在各级道路布设交通流量监测采样点,测算 2018 年 7 月 1 日至 7 月 7 日各路 段 0 时至 23 时的交通流量。利用本文开发的机动车活动水平智能感知原型系统,获取 各级别道路机动车车速、流量等机动车活动水平变化情况。如图 4-6 为开封市各路段平 均每小时小型客车通行量。从图中可以看出开封市交通量分布具有明显的时空变化特征, 位于城市西侧的新城区有较多的城市快速路;老城区以及祥符区内部的主干道是交通流 量较高的几条街道,其交通流量均高于 1,600 辆每小时,而在城市内的支路交通量则低 于 600 辆每小时。



图 4-7 展示了开封市星期一到星期日各时刻与星期一9时交通流量比值关系。从图中可以明显地看出,星期一至星期五交通流量具有早晚双高峰的特点,且星期一早高峰的时间较其他工作日早,其他工作日早高峰出现时间为8点,工作日晚高峰大多出现在 19时,星期一晚高峰则出现在18时,星期五晚高峰则在19至21时,时间跨度较大。 周末不存在明显的晚高峰时刻,星期日早高峰时刻较其他时间更晚,并且周末11时至 17时交通流量明显高于其他时刻,这表明周末道路机动车行驶总量更多,外出时间更为随机,这与开封市限行措施以及外来游客集中在双休时间有关。



4.5本章小结

本章主要介绍了地理视频的关键技术与原理,基于地理视频的机动车活动水平智能 感知原型系统技术流程,视频数据采集方案等。基于采集的地理视频数据,利用机动车 活动水平智能感知原型系统,对开封市一周的机动车活动水平数据进行了智能检测识别, 得到了用于估算机动车污染物排放的高时空分辨率机动车活动水平数据,同时分析了开 封市机动车活动水平数据的时空变化特征。

5 高时空分辨率机动车排放清单编制

本文采用 VEIN 模型进行机动车排放清单编制,通过实地调研、进行道路实验、查阅文献等方法获取开封市机动车基础数据以及活动水平,对模型参数进行修正。将生态环境部发布的编制指南中的排放因子进行本地化处理,结合开封市机动车保有量编制机动车排放清单,测算开封市 2018 年机动车排放的 CO、HC、NO_x、PM_{2.5}以及 PM₁₀ 的排放量。为定量化研究开封市机动车污染水平提供帮助,同时可为实现城市空气污染物的精细化模拟提供数据支撑,为完成《大气污染防治行动计划》目标,改善城市空气质量提供帮助。

5.1 VEIN 模型参数与实验设置

本文采用 VEIN 0.8.7 版本,利用《河南省统计年鉴》和《开封市统计年鉴》,获取 1988 年至 2017 年开封市机动车保有量数据。采集 2018 年 7 月 1 日 0 时至 7 月 7 日 23 时开封市各级别道路机动车活动水平信息,计算开封市 2018 年机动车污染物排放量。 利用生态环境部 2014 年发布的《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》 (000014672/2014-01379)中的排放因子(表 5-1),对 VEIN 模型的机动车排放因子进行 本地化设置。

表 5-1 中所列排放因子并不包括机动车因使用年限造成的劣化、变质影响,但是机动车因使用年限而造成的劣化、变质作用是机动车污染物排放过程中不可或缺的影响因素之一。VEIN 模型提供了劣化函数 (emis_det) 来实现机动车在使用过程中劣化作用对污染物排放造成的影响,该函数的输入参数包括:污染物种类、发动机尺寸、燃料标准以及道路机动车年均行驶里程 (数据来源于机动车排放清单编制技术指南)。

模型中包含诸多函数,其中 ef_ldv_speed 函数用来测算小型载客汽车、轻型商务车辆的污染物排放计算; ef_hdv_speed 函数用来测算重型车辆、卡车的污染物排放。这些函数通过包含排放因子的内部数据库与参数设置计算排放量,函数中的参数包括燃料标准、发动机体积和负载。

机动	车类型	CO	НС	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀		
	国一前	25.72	2.685	1.971	0.028	0.031		
	<u>玉</u> 一	6.71	0.663	0.409	0.026	0.029		
ぼた	国二	2.52	0.314	0.324	0.011	0.012		
软牛	国三	1.18	0.191	0.100	0.007	0.008		
	国四	0.68	0.075	0.032	0.003	0.003		
	国五	0.46	0.056	0.017	0.003	0.003		
	国一前	123.13	6.749	5.807	0.293	0.326		
	围一	75.79	6.759	2.979	0.159	0.177		
1 tr	围二	23.32	3.006	2.905	0.072	0.080		
货牛	围三	10.71	1.354	1.713	0.044	0.049		
	国四	4.50	0.555	0.907	0.044	0.049		
	国五	4.50	0.555	0.680	0.044	0.049		

城市街道空气污染物分布的时空精细模拟研究

表 5-1 机动车污染物排放因子 $(g \text{ km}^{-1})$

5.2 机动车污染物排放清单及其时空特征

依据开封市本地交通变化趋势,结合排放清单编制指南中的排放因子,确定开封市本地机动车排放因子,使用 VEIN 模型模拟开封市 2018 机动车污染物排放状况,编制了开封市 2018 年机动车排放清单。模型输出数组为 1,819 条街道 30 年机动车使用年限,每周 7 天每天 24 小时的污染物排放清单。模拟结果显示,2018 年开封市机动车排放产生的 CO 约 27,839 t,HC 约 2,845 t,NOx 约 1,273 t,PM_{2.5} 约 23.56 t,PM₁₀ 约 25.18 t。CO 是机动车排放的主要污染物,NOx 排放约占 2018 年开封市总排放量^[129]的 68.8%。

5.2.1 机动车污染物排放时间变化趋势

本文编制的排放清单结果呈现出明显的时间变化规律,如表 5-2 展示了开封市机动 车污染物排放量的日变化情况,从表中可以看出,开封市机动车排放产生的 CO、HC 和 NOx 污染物排放量明显高于其产生的一次颗粒物 (PM2.5 和 PM10) 排放量。

时间	CO(t)	HC (t)	$NO_{x}(t)$	PM _{2.5} (kg)	PM ₁₀ (kg)
星期一	84.83	8.81	3.53	64.31	68.74
星期二	72.10	7.40	3.21	59.24	63.32
星期三	69.53	7.06	3.29	61.32	65.54
星期四	77.13	7.79	3.73	69.67	74.47
星期五	81.27	8.31	3.70	68.46	73.18
星期六	72.36	7.35	3.43	63.76	68.14
星期日	78.16	7.98	3.58	66.36	70.93

表 5-2 机动车污染物日排放量

工作日 CO 和 HC 的日均排放量分别为 76.97 t 和 7.88 t,高于周末日均排放量 75.26 t 和 7.66 t; NO_x、PM_{2.5}和 PM₁₀工作日均排放为 3.49 t、64.6 kg 和 69.05 kg,略低于周末 日均排放 3.5 t、65.06 kg 和 69.54 kg。CO 和 HC 的污染物排放最高值出现在星期一,分 别达到了 84.83 t 和 8.81 t,占到周排放总量的 15.8%和 16.1%; NO_x、PM_{2.5}和 PM₁₀ 排放 最高的时间出现在星期四,分别达到了 3.73 t、69.67 kg 和 74.47 kg,占到周排放总量的 15.2%、15.4%和 15.4%。CO 和 HC 日排放量最低值出现在星期三,分别为 69.53 t 和 7.06 t; NO_x、PM_{2.5}和 PM₁₀污染物日排放最低值均出现在星期二,分别为 3.21 t、59.24 kg 和 63.32 kg。

图 5-2 展示了开封市星期一至星期日不同时刻机动车造成 CO 排放的变化趋势 (gh⁻¹)。可以明显地看出 CO 在工作日的排放呈现出明显的早晚双高峰现象, CO 排放较高的时间出现在星期一早晚高峰、星期四晚高峰以及星期五早高峰, 排放量均超过了 7.5 t。 星期三的 CO 排放量在一周内最低, 其最大值出现在晚高峰时刻; 星期三早高峰 CO 排放峰值不足 5 t, 远低于其他日期早高峰排放量。CO 早高峰排放量最大值出现在星期五, 晚高峰排放峰值出现在星期一。



图 5-2 机动车 CO 排放时间特征

图 5-3 为开封市机动车排放 HC 污染物时间变化特征。由图中可以得知 HC 排放时间特征与 CO 排放规律相似,星期一早晚高峰、星期四晚高峰以及星期五早高峰也是 HC 污染物排放较为明显的时刻,其中星期一晚高峰和星期五早高峰 HC 排放均超过了 0.875 t。星期三也是 HC 排放较低值出现的时间,该天排放量最大值低于其他工作日排放峰值,早高峰排放最低值也出现在星期三,为 0.5 t;晚高峰最低值则出现在星期二,不足 0.625 t。与 CO 排放相同的是, HC 早高峰排放最大值出现在星期五,晚高峰排放最大值 出现在星期一。周末 HC 排放较为平均,高峰时间排放量略高于 0.75 t。

图 5-4 为机动车 NO_x 排放量的时间变化特征。与 CO 和 HC 排放相同的是, NO_x 的 排放也呈现出明显的早晚双高峰时间特征。星期一、星期四与星期五是 NO_x 排放较为明 显的几个时间。其中星期五是早高峰排放量最大值出现的时间, 排放量超过了 0.35 t。 与 CO 和 HC 不同的是,晚高峰 NO_x 排放量最大的时间出现在星期四,同样超过了 0.35 t。星期二和星期三是排放较低时刻,早高峰最低值出现在星期三,晚高峰最低值出现在 星期二,均不足 0.25 t。周末 NO_x 排放量高于星期二与星期三的排放量。







图 5-4 机动车 NO_x 排放时间特征

图 5-5 展示了机动车 PM_{2.5} 排放量的时间变化趋势。PM_{2.5} 排放呈现较为明显的双高 峰现象,排放量最高出现在星期四晚高峰,超过了 7,000 g h⁻¹;早高峰排放量最大的时 间出现在星期五,接近 6,500 g h⁻¹。星期二和星期三是 PM_{2.5} 排放量最小的时间,其中星 期三是早高峰排放量最低的时间,为 4,105 g h⁻¹;星期二则是晚高峰排放量最低的时间, 为 4,371 g h⁻¹。周末 PM_{2.5} 排放较为明显,其峰值接近 6,000 g h⁻¹,。



图 5-5 机动车 PM_{2.5} 排放时间特征

图 5-6 展示了机动车排放造成的 PM₁₀ 污染时间变化特征。PM₁₀ 同样呈现出较为明显的早晚双高峰现象。星期四和星期五是 PM₁₀ 排放量较高的两天,其中星期四晚高峰排放量达到了排放量最高的 7,537 g h⁻¹;星期五则是早高峰排放量最大值出现的时间,达到了 6,944 g h⁻¹。星期二与星期三则是 PM₁₀ 排放较低的时间,星期二则是晚高峰排放最低的时间,其排放量为 4,852 g h⁻¹;星期三是早高峰排放最低的时间,其排放量为 4,388 g h⁻¹。周末 PM₁₀ 排放较为明显,其早高峰排放值均超过了 6,000 g h⁻¹,且周末 PM₁₀ 的排放量超过了大多数工作日 (星期一至星期三)的排放量。



图 5-6 机动车 PM₁₀ 排放时间特征

5.2.2 机动车污染物排放空间分布特征

开封市机动车污染物排放具有明显的空间集聚性,图 5-7 是 2018 年 7 月 2 日开封 市机动车排放 CO 空间分布。可以明显的看出 CO 排放具有明显的空间集聚性,不同时 刻 CO 排放的高值区具有相同部分,同时存在比较明显的双高峰,与交通流量变化情况 相似。凌晨 0 时各街道 CO 排放差别并不明显,仅有个别路段排放超过 500 g h⁻¹,主要 分布在老城区内部和祥符区的个别街道。早高峰时段开封市各街区 CO 排放均有较为明 显的提升大多数街道排放量超过了 15,000 g h⁻¹,并且排放高值区域主要集中在城市核心 区域也是人口密度较大的区域。中午 12 时 CO 排放较早高峰下降明显,排放高值街道 减少;15 时排放会相较 12 时出现些许上升,这也与交通流量变化相同。晚高峰时刻 18 时左右 CO 排放高值区会增加较为明显,市内一半以上街道排放的 CO 超过了 8,000 g h⁻¹,略少于早高峰时刻排放的高值区域。夜晚 21 时 CO 排放与 18 时 CO 排放空间分布较 为相似,此时的 CO 排放主要集中在居民生活区。



图 5-7 机动车排放 CO 空间分布

图 5-8 为开封市机动车排放 HC 空间分布特征,其空间分布与 CO 排放具有较强的 相似性。凌晨 0:00 各路段 HC 排放值相差不大,均未超过 300 g h⁻¹。早高峰 8:00 机动车 HC 排放明显增加,高值区集中的区域位于城市的主要交通要道超过了 1,500 g h⁻¹,是居 民生活区与工作区之间主要主要的连接道路。HC 与 CO 排放具有相似变化规律,中午 12:00 机动车产生的 HC 排放较 15:00 产生的排放高值区更少,15:00 排放产生的 HC 区 域相对更加集中。晚高峰 18:00 机动车产生的 HC 排放高值区增加较为明显,排放高值 区略少于 8:00 但仍有较多街道排放超过了 1,000 g h⁻¹,南部的 HC 排放则仍旧是较低水 平,可能与该区域较低的人口密度有关。夜晚 21:00 机动车 HC 排放减低较为明显,此 时出现的高值区主要集中在居民生活区。



图 5-8 机动车排放 HC 空间分布

图 5-9 是开封市机动车 NO_x 排放的空间分布,可以看出 NO_x 排放也呈现早晚双高峰的现象。凌晨 7 月 2 日 0:00 各街道排放产生的 NO_x 均未超过 100 g h⁻¹,各路段排放差别较小。早高峰 8:00 时刻,城市主要路段以及主要道路岔口出现了 NO_x 排放高值区域排放超过 800 g h⁻¹,这些区域是城市内部具有重要功能的主要道路节点,是连接城市各功能分区的主要因素。与 CO 和 HC 排放不同的是,NO_x 排放在 12:00 和 15:00 空间分布差异并不明显,仅有极个别道路节点出现了超过 800 g h⁻¹的高值区,这可能与机动车排放产生的 NO_x量不如 CO 和 HC 高有关。在晚高峰时间 18:00 排放产生的 NO_x增加并不明显,仅有个别街道排放较明显但也为达到 800 g h⁻¹,城市的主要道路节点以及城市主要道路都成为了排放高值区集中的地方。夜晚 21:00 的 NO_x排放量 18:00 差别并不明显,仅在极少数街道排放量超过 600 g h⁻¹,此时研究区域排放量均未超 800 g h⁻¹。



图 5-9 机动车排放 NOx 空间分布

图 5-10 是开封市机动车排放 PM_{2.5} 空间分布特征图, PM_{2.5} 排放呈现出早高峰排放 明显高于其他时刻的特点。凌晨 0:00 机动车排放产生的 PM_{2.5} 各路段均未超过 2 g h⁻¹。 早高峰 8:00 机动车排放 PM_{2.5}, 出现了明显的空间分异,主要街道以及街道道交叉点出 现了明显的排放高值,最高超过 16 g h⁻¹,这些区域是连接城市各功能分区的主要街道。 中午 12:00 和 15:00 机动车排放产生的 PM_{2.5} 空间分布较为相似,这两个时刻 PM_{2.5} 排放 基本未超过 12 g h⁻¹,排放高值分布区域与早高峰高值区基本相同。晚高峰 18:00 机动车 排放 PM_{2.5} 略有升高,及个别路段排放量超过了 16 g h⁻¹,高值区面积明显小于早高峰高 值区面积。夜晚 21:00 机动车排放量大幅度降低,主要街道 PM_{2.5} 排放降低至 12 g h⁻¹ 以 下,总体而言此时,机动车排放 PM_{2.5} 量基本不超过 16 g h⁻¹,明显低于 CO、HC 以及 NO_x等污染物。



图 5-10 机动车排放 PM2.5 空间分布

图 5-11 为 2018 年 7 月 2 日开封市机动车排放 PM₁₀ 空间分布变化情况。与 PM_{2.5} 空间分布相同的是,凌晨 0:00,各路段 PM₁₀排放量就未超过 2 g h⁻¹,各路段差异并不明显。早高峰 8:00 机动车排放 PM₁₀空间分布差异较为明显,城市主要街道、支路以及交叉路口为排放较为明显的区域,最高值超过了 16 g h⁻¹;城市南部排放较低,最高值不超过 4 g h⁻¹。中午 12:00 和 15:00 机动车排放 PM₁₀空间分布基本相同,12:00 个别路段排放超过 12 g h⁻¹,15:00 排放较为明显的区域则均未超过 12 g h⁻¹。晚高峰 18:00 机动车排放 PM₁₀空间分布基本相同,12:00 个别路段排放高值区主要分布在主干道及支路内,这些区域是机动车流量较大或通行怠速时间较长的路段。夜晚 21:00 机动车排放略有降低,与 12:00 机动车排放空间分布相似,主要街道 PM₁₀排放降低至 12 g h⁻¹以下,城市南部排放不超过 4 g h⁻¹,排放较高的区域是城市居民主要生活居住区域。同样 PM₁₀排放低于 CO、HC和 NO_x等气态污染物排放。



图 5-11 机动车排放 PM10 空间分布

5.3本章小结

本章介绍了开封市机动车排放清单编制的主要参数设置,简介了 VEIN 模型中所需 要的主要依赖库以及清单编制过程中采用的排放因子,介绍了 VEIN 模型参数与实验设 置,制备了开封市高时空分辨率机动车排放清单,测算了开封市 1,819 条街道不同时间 五种污染物 (CO、HC、NO_x、PM_{2.5} 以及 PM₁₀)的日排放量,分析了开封市街道机动车 污染物排放的时空变化特征。

6 街道空气污染物的精细模拟与分析

6.1 模拟方案设置

6.1.1 WRF-Chem 设置

本研究采用 WRF-Chem 3.8.1 版本大气化学传输模式模拟气象环境。模式采用 Lambert 地图投影,使用了四层嵌套 (图 6-1),第一层嵌套 (D01) 网格空间分辨率为 27km×27km,东西方向有 185 个格网,南北方向有 128 个格网;第二层嵌套 (D02) 网格空间分辨率为 9km×9km,东西方向有 169 个格网,南北方向有 160 个格网;第三层嵌套 (D03) 空间分辨率为 3km×3km,东西方向有 214 个格网,南北方向有 208 个格网; 第四层嵌套 (D04) 空间分辨率为 1km×1km,东西方向有 94 个格网,南北方向有 97 个格网。模型垂直方向共分为 28 层,D02、D03 嵌套层的网格中心点经纬度为 34°N,114°E。





本研究中模型采用表 6-1 的参数化方案进行设置,模拟时段设置为 2018 年 6 月 30 日 0 时至 2018 年 7 月 12 日 23 时。模型的气象场初始条件采用时间分辨率为 6 h,空间分辨率为 2.5°×2.5°的美国国家环境预报中心 (NCEP) 和美国国家大气研究中心 (NCAR) 联合推出的 NCEP/NCAR 全球在分析数据资料。同时,研究中为解决不同数据来源时间、空间分辨率不同的问题,提高风速、温度、降水等关键气象因素的模拟精度,在 WRF-Chem 模型模拟过程中采用四维数据同化技术 (FDDA, Four-Dimensional Data Assimilation)。

方案配置		Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4	
	微物理方案	Lin et al.	Lin et al.	Lin et al.	Lin et al.	
	长波辐射	Goddard	Goddard	Goddard	Goddard	
	短波辐射	(old) Goddard	(old) Goddard	(old) Goddard	(old) Goddard	
物埋模块	边界层物理	MYJ	MYJ	MYJ	MYJ	
	积云参数化	GF	GF	GF	GF	
	陆面过程	Noah	Noah	Noah	Noah	
	化学机制	CBMZ	CBMZ	CBMZ	CBMZ	
化学模块	气溶胶机制	MOSAIC	MOSAIC	MOSAIC	MOSAIC	
	气溶胶反馈	Open	Open	Open	Open	

表 6-1 模式参数化方案选择

6.1.2 MUNICH 模型设置

本研究模拟起始时间为 2018 年 7 月 1 日 0 时,时间步长设置为 3,600 s,共模拟 288 个时间步长。采用 CB05 化学机制,开启光化学反应机理。对于街道内采用 Schulte 参数 化方案计算湍流传输速率,采用 Lemonsu 参数设置计算街道峡谷内的平均风速,开启街 道内水平波动变化,街道内最低风速设置为 0.1 m s⁻¹,将气象数据和污染物背景浓度分 配至每条街道。 模拟时间设置为 2018 年 7 月 1 日 00 时至 2018 年 7 月 12 日 23 时,时间步长设置 为 3,600 s,模拟区域 X 最小值为 113.882°E,Y 最小值为 34.334°N 模拟的空间步长为 0.01°, Nx = 94, Ny = 97,气象数据读取起始时间为 2018 年 7 月 1 日 00 时,时间步长 为 1 h,共读取 288 个时间步长。图 6-2 为 MUNICH 模型预处理和正式运行界面。

<pre>chaptap-Lenvo:=/Sint-training-2nd/surce/proc_101.7g chaptap-Lenvo:=/Sint-training-2nd/surce/punctch/unctch=rg correct date (U(C): 2018-07-01 06:00:00 Current date (U(C): 2018-07-01 06:00 Current date (U(C): 2018-07</pre>	🛞 🖱 💿 zhp@zhp-Lenovo: ~/SinG-training-2nd/source/munich/munich-pre_postprocessing/prepro	😣 🖨 🖨 zhp@zhp-Lenovo: ~/SinG-traiı	ning-2nd/source/munic	h/munich-1.0	
<pre>['Get', 'top', 'to</pre>	<pre>zhp@zhp-Lenovo:-/SinG-training-2nd/source/munich/munich-pre_postprocessing/prepr ocessing YKS python sing preproc1013.py sing preproc 1013.cfg</pre>	zhp@zhp-Lenovo:~/SinG-training-2	nd/source/munich/m	unich-1.0\$./	munich munich.cfg
<pre>current date (Ur(): 2018-07-01 00:00:00 Current date (Ur(): 2018-07-01 00:00 Current date (Ur(): 2018-07-01 00:00 Current date (Ur(): 2018-07-01 01:00 Current date (Ur(): 2018-07-01 01:00:00 Current date</pre>	['CH4', 'NMHC', 'CO', 'NOX']	Transfert parameterization: Schu	lte		
<pre>current det (UTC): 2018-07-01 08:08:00 2018 of 21 00 cla hour): 2018-07-01 08:08:00 2018 of 21 00 cla hour): 2018-07-01 08:08:00 The current data (segment coordinates and emission rates) from the file //howe/hyliof.training-2nd/source/multi/hum/fLiters/1000/100 81070100 Current data: 2018-07-10 00:00 Current data: 2018-07-10 00:00 Performing iteration #3 Current data: 2018-07-10 00:00 Performing iteration #3 Performing iteration #3 Performi</pre>		Mean wind speed parameterization	: Lemonsu		
Current date (UTC): 2018-07-01 00:00:00 Performing iteration #0 Stab or di 00:00:00 Performing iteration #1 Read the input data (sequent coordinates and emission rates) from the file Current date: 2018-07-01 00:00 Read the input data (sequent coordinates and emission rates) from the file Current date: 2018-07-01 00:00 Gurrent date: 2018-07-01 00:00 Current date: 2018-07-01 00:00 Gurrent date: 2018-07-01 00:00 Performing iteration #1 Diversion of the index: 10 Current date: 2018-07-01 00:00 Corrent date: 2018-07-01 00:00 Performing iteration #1 Diversion of the index: 10 Current date: 2018-07-01 00:00 Cose an extof file opends with the index: 10 Performing iteration #1 Cose an extof file opends with meptrove Performing iteration #1 Diversion date: 2018-07-01 00:00 Performing iteration #1 Corrent date: 2018-07-01 00:00 Current date: 2018-07-01 00:00 Corrent date: 100:00 Performing iteration #1 Corrent date: 100:01:00:00		Chemical mechanism: CB05			
2018-07-01 06:00 Current date (local hour): 2018-07-01 06:00 Current date (local hour): 2018-07-01 06:00 Grant date (local hour): 2018-07-01 06:00 (howe/hp/Sind-training-2nd/source/mulch/mulch/pre_postprocessing/preprocessing Deerforming (teration #1 (howe/hp/Sind-training-2nd/source/mulch/mulch/pre_postprocessing/preprocessing Deerforming (teration #1 (howe/hp/Sind-training-2nd/source/mulch/mulch/pre_postprocessing/preprocessing Deerforming (teration #1 (howe/hp/Sind-training-2nd/source/mulch/mulch/pre_postprocessing/preprocessing Deerforming (teration #1 (howe/hp/Sind-training-2nd/source/mulch/mulch/pre_postprocessing/preprocessing/p	Current date (UTC): 2018-07-01 00:00:00	Performing iteration #0			
Tike toks: 6 Current date (local hour): 2018-07-01 00:00:00 the current date (local hour): 2018-07-01 00:00:00 the current date (local hour): 2018-07-01 00:00:00 the current date (local hour): 2018-07-01 00:00 g.WK input_1012/data-neweref/20180701-traiting=20d/source/muth/houricsting/reprocessing/reproducessing/reprocessing/reproducessing/repro	2018-07-01 00:00:00	Current date: 2018-07-01 00:00			
Current date: (Jocal hour): 2018-07-01 00:00:00 Like Current date: 2018-07-01 01:00 Like Current date: 2018-07-01 10:00	Time index: 0	Performing iteration #1			
The current day is a weekend. A more / Physical data (segment coordinates and entission rates) from the flue / howe / Physical training 2m / source / munich/munich/per postprocessing/provides in the flue and is a single performing iteration at 0.200 performing iteration a	Current date (local hour): 2018-07-01 00:00:00	Current date: 2018-07-01 01:00			
Read the Input data (segment coordinates and emission rates) from the file Gurver date: 2018-07-01 02:00 g vX/mput_1013/data-memeref/20180701.Traffrollu.mEr/EL.traf.201807010 g vX/mput_1013/data-memeref/20180701.Traffrollu.mEr/EL.traf.201807010 G vX/mput_1013/data-memeref/20180701.Traffrollu.mEr/EL.traf.20180701 04:00 Performing treation #5 Gurvent date: 2018-07-01 05:00 Performing treation #5 Gurvent date: 2018-07-01 15:00 Performing treation #5 Gurvent date: 2018-07-01 15:00 Curvent date: 2018-07-01 15:00 Performing treation #5 Gurvent date: 2018-07-01 15:00 Performing treation #5 Performing treation #5 Curvent date	The current day is a weekend.	Performing iteration #2			
/home/hp/sinct-training-2nd/source/numich/munich-pre_postprocessing/preprocessing//sinctraining-2nd/source/numich/munich-pre_postproce Performing teration #3 g:Winput_1031/data-meere/20180701-training-2nd/source/numich/munich-pre_postproce Performing teration #4 www.cf round with the index: 7 Winput_1031/data-meere/20180701-training-2nd/source/numich/munich-pre_postproce Www.cf round with the index: 7 Winput_1031/data-meere/20180701-training-2nd/source/numich/munich-pre_postproce Www.cf round with the index: 10 Current date: 2018-07-01 03:00 T. Number of the streets: 1819 Current date: 2018-07-01 03:00 Winch-pre postprocessing/w/numich/mpt_1013/street-geog-info.dst Performing iteration #3 Read the geographical informations: _home/hp/sinG-training-2nd/source/munich/meisterials Performing iteration #3 Notaw a wetch in home/num wets wetser Performing iteration #3 Cirrent date: 2018-07-01 01:00:00 Performing iteration #3 Cirrent date: 2018-07-01 01:00:00 Current date: 2018-07-01 13:00 Cirrent date: 101 Current date: 2018-07-01 13:00 Current date: 2018-07-01 01:00:00 Current date: 2018-07-01 13:00 Current date: 2018-07-01 01:00:00 Current date: 2018-07-01 13:00 Current date: 2018-07-01 01:00:00 Performing iteration #3	Read the input data (segment coordinates and emission rates) from the file	Current date: 2018-07-01 02:00			
g _Winput_10i3/data-newref/20180701-TraftPolu-REF/EL.traf.201807010 G	/home/zhp/SinG-training-2nd/source/munich/munich-pre_postprocessing/preprocessin	Performing iteration #3			
<pre>series and proproces ling %/ Long / Ling / Lin</pre>	g_YK/input_1013/data-newref/20180701-TrafiPollu-REF/EL.traf.2018070100	Current date: 2018-07-01 03:00			
ssing/preprocessing/X(input_1013)data-newref/20180701-Trafibollu-REF/EL.traf.20 Current date: 2018-07-81 04:00 Performing teration #3 Current date: 2018-07-81 04:00 Performing teration #3 Current date: 2018-07-81 05:00 Current date: 2018-07-81 05:00 Current date: 2018-07-81 05:00 Current date: 2018-07-81 05:00 Performing teration #3	==========================/home/zhp/SinG-training-2nd/source/munich/munich-pre_postproce	Performing iteration #4			
<pre>Hadfalob (H4 Found with the index: 7 wht found with the index: 7 wht found with the index: 8 wht found with the index: 9 wht found with the index: 10 fr. 8, 9, 10] wht found with the index: 11 fr. 8, 9, 10] wht found with the index: 11 fr. 8, 9, 10] wht found with the index: 12 fr. 8, 9, 10] wht found with the index: 12 fr. 8, 9, 10] wht found with the index: 12 fr. 8, 9, 10] wht found with the index: 13 fr. 8, 9, 10] wht found with the index: 10 fr. 8, 9, 10] while propreduces in the street in 11 while propreduces in the street in 110 from inter interval in 110 from interval interval in 110 from interval interval in 110 from interval interval interval in 110 from interval interv</pre>	ssing/preprocessing_YK/input_1013/data-newref/20180701-TrafiPollu-REF/EL.traf.20	Current date: 2018-07-01 04:00			
CHA found with the index: 7 Medic found with the index: 8 Corrent date: 2018-07-01 65:00 Merforming iteration 77 (7, 7, 9, 10) (7, 7, 9,	18070100	Performing iteration #5			
NMMC found with the index: 8 Performing iteration #6 Corrent dist: 2018-07-01 02:08-07-01 02:08-07-01 02:08 Mox found with the index: 10 Mox found with the index: 11 Mox found with map for the date 2018-07-01 01:00:00 Mox found with the index: 11 Mox found with map for the date 2018-07-01 01:00:00 Mox found with map for the date 2018-07-01 01:00:00 Mox found with the index: 10 Mox found with the index: 10 Mox found with the index: 10 Mox found with the index: 11	CH4 found with the index: 7	Current date: 2018-07-01 05:00			
CU round with the lindex: 3 War found with the lindex: 10 (7, 6, 9, 10] (7, 6, 9, 10] Read the geographical informations: /home/zhp/Sin6-training-2nd/source/multh/m unch pre postprocessing/V(input_fold:/street_geographical Background concentrations are available for the date 2018-07-01 00:00 Background concentrations are available for the date 2018-07-01 00:00 Background concentrations are available for the date 2018-07-01 00:00 Background concentrations are available for the date 2018-07-01 00:000 Background concentrations are available for the date 2018-07-01 00:00 Background concentrations are available for the date 2018-07-01 00:000 Current date: 2018-07-01 10:00 Performing iteration #1 (corrent date: 2018-07-01 10:00 Performing iteration #1 (corrent date: 2018-07-01 10:00 Performing iteration #1 (corrent date: 2018-07-01 10:00 Deforming iteration #1 (corrent date: 2018-07-01 01:00:00 Dine index: 1 Current date: 2018-07-01 01:00:00 Dine index: 1 Current date: 2018-07-01 01:00:00 Dine index: 1 Current date: 2018-07-01 01:00:00 Dine index: 1 (corrent date: 2018-07-01 01:00:00 Dine index: 1 Current date: 2018-07-01 01:00 Performing iteration #15 Current date: 2018-07-01 01:00 Performing iteration #2 Current date: 2018-07-01 01:00 Performing iteration #2 Current date: 2018-07-01 10:00 Performing iteration #2 Current date: 2018-07-01 10:00 Performing iteration #2 Current date: 2018-07-01 10:00 Performing iteration #2 Current date: 2018-07-01 20:00 Performing iteration #2 Current date: 2018-07-	NMHC found with the index: 8	Performing iteration #6			
Much Tonde With The Tuber: 10	CO Found with the index: 9	Current date: 2018-07-01 06:00			
[7, 8, 9, 10] Up refronting terration #	NOX Found with the index: 10	Performing iteration #/			
<pre></pre>	[7, 8, 9, 10]	Current date: 2018-07-01 07:00			
<pre></pre>	Number of the order, 2630	Cursont datas 2010 07 01 00:00			
<pre>introduct of the streets: 1319 introduct of the streets: 1319 kead the geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2nd/source/nunich/m geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2n</pre>	Window of the streams, 1910	Desfermine iteration #0			
Read the geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2nd/source/munich/m Background Concentrations are available for the date 2018-07-01 00:000 (Lose a netcof File opened with map=Fire, when netcof variables or arrays refer ring to its data still exist. All data arrays obtained from such files refer dir. (Lose a netcof File opened with map=Fire, when netcof variables or arrays refer ring to its data still exist. All data arrays obtained from such files refer dir. (Lose a netcof File opened with map=Fire, when netcof variables or arrays refer ring to its data still exist. All data arrays obtained from such files refer dir. (Lose a netcof File docstring for more information on mmap.)). category=RuntineWarning) Current date (UCC): 2018-07-01 01:00:00 Current date (Local hour): 2018-07-01 01:00:00 (Lose an etcl (Local hour): 2018-07-01 01:00:00 Current date (Local hour): 2018-07-01 01:00:00 (Lorent date (Local hour): 2018-07-01 01:00:00 (Lorent date (Local hour): 2018-07-01 01:00:00 (Lorent date: 2018-07-01 10:00:00 (Lorent date: 2018-07-01 10:00:00 Current date: 2018-07-01 10:00 Current date: 2018-07-01 20:00 Current date:	Number of the streets. 1819	Current dates 2018 07 01 00:00			
<pre>http://thispic.org/initiality/set/set/set/set/set/set/set/set/set/set</pre>	Pead the geographical informations: /home/zhp/SinC-training.2nd/source/munich/m	Performing iteration #10			
<pre>mich programmed concentration grin processing proc</pre>	unich pre postprocessing/preprocessing VK/input 141/strate-pool of dat	Current date: 2018-07-01 10:00			
<pre>bidge bidge b</pre>	Background concentrations are available for the date 2018.07.01 00:00:00	Performing iteration #11			
<pre>prforming iteration #12 Close a netcdf_file opened with mapsTrue, when netcdf_variables or arrays refer ring to its data still exist. All data arrays obtained from such files refer dir prior to its data still exist. All data arrays obtained from such files refer dir prior to its data on disk, and must be copied before the file can be cleanly closed (see netcdf_file docstring for more information on mmap.)), category=RuntimeWarning) Current date (UTC): 2018-07-01 01:00:00 2018-07-01 00:00:00 2018-07-01 00:00:00 2018-07-01 00:00:00 2018-07-01 00:00:00 The current date (local hour): 2018-07-01 01:00:00 The current date (local hour): 2018/0701-TrafiPollu-REF/EL.traf.2018/07010 The current date: 2018-07-01 10:00 Performing iteration #20 Current date: 2018-07-01 20:00 Performing iteration #20 Current date: 2018-07-0</pre>	Just / jib / puthon 2 7/dist-parkages/scipte/io/pet/df_put/2015_010100.00.00	Current date: 2018-07-01 11:00			
<pre>ring to its data still exist. All data arrays obtained from such files refer dir ectly to data on disk, and must be copied before the file can be cleanly closed (See netcd_file docstring for more information on mmap.)), category=huttmeWarning) current date (UTC): 2018-07-01 01:00:00 2018-07-01 00:00:00 time index: 1 Current date (UTC): 2018-07-01 01:00:00 Current date (Local hour): 2018-07-01 01:00:00 The current date (Local hour): 2018-07-01 01:00:00 The current date (Local hour): 2018-07-01 01:00:00 The current date (Local hour): 2018-07-01 01:00:00 Read the input data (segment coordinates and emission rates) from the file</pre>	close a netodf file opened with mman=True, when netodf variables or arrays refer	Performing iteration #12			
ective to data on disk, and must be copied before the file can be cleanly closed. (See netcd_file docstring for more information on mmap.)), category=huntLmeWarning)	ring to its data still exist. All data arrays obtained from such files refer dir	Current date: 2018-07-01 12:00			
(See net.df file docktring for more information on mmap.)), category=RuntimeWarning) current date: 2018-07-01 13:00 Performing iteration #14 Current date: 2018-07-01 13:00 Performing iteration #15 Current date: 2018-07-01 13:00 Performing iteration #16 Current date: 2018-07-01 13:00 Performing iteration #16 Current date: 2018-07-01 13:00 Performing iteration #17 Current date: 2018-07-01 13:00 Performing iteration #18 Nome/zhp/SinG-training-2nd/source/muntch/munch.pre_postprocessing/preprocessing /preprocessing	ectly to data on disk. and must be copied before the file can be cleanly closed.	Performing iteration #13			
), category=RuntimeWarning) Performing iteration #14 Current date (UTC): 2018-07-01 01:00:00 Current date (UTC): 2018-07-01 01:00:00 The current date (local hour): 2018-07-10 10:00:00 The current date (local hour): 2018-07-10 10:00:00 The current date: 2018-07-01 10:00 Performing iteration #12 (urrent date: 2018-07-01 10:00 Current date: 2018-07-01 10:00 Performing iteration #18 Current date: 2018-07-01 18:00 Performing iteration #19 Current date: 2018-07-01 18:00 Performing iteration #20 Current date: 2018-07-01 19:00 Performing iteration #20 Current date: 2018-07-01 20:00 Performing iteration #20 Current date:	(See netcdf file docstring for more information on mmap.)	Current date: 2018-07-01 13:00			
Current därte: 2018-07-01 11:00 Performing iteration #16 Current däte: 2018-07-01 15:00 Performing iteration #17 Current däte: 2018-07-01 15:00 Performing iteration #17 Current däte: 2018-07-01 15:00 Performing iteration #17 Current däte: 2018-07-01 12:00 Performing iteration #20 Current däte: 2018-07-01 22:00 Performing iteration #21 Current däte: 2018-07-01 22:00 Performing iteration #23 Current däte: 2018-07-01 22:00 Performing iteration #23 Current däte: 2018-07-01 22:00 Performing iteration #24 Current däte: 2018-07-01 23:00 Performing iteration #25 Current däte: 2018-07-02 00:00 Performing iteration #26 Current däte: 2018-07-02 00:00 Performing iteration #26 Current däte: 2018-07-02 01:00 Performing iteration #26 Current däte: 2). category=RuntimeWarning)	Performing iteration #14			
current date (UTC): 2018-07-01 01:00:00 2018-07-01 00:00:00 2018-07-01 00:00:00 Current date (local hour): 2018-07-01 01:00:00 Handex: 1 Current date (local hour): 2018-07-01 01:00:00 Head the index: 3 /home/zhp/SinG-training-2nd/source/muntch/munch-pre_postprocessing YK/input 1013/data-newref/20180701-TrafiPollu-REF/EL.traf. 2018-07-01 12:00 Performing iteration #18 Current date: 2018-07-01 01:00:00 Current date: 2018-07-01 10:00:00 Performing iteration #17 Current date: 2018-07-01 10:00:00 Performing iteration #17 Current date: 2018-07-01 10:00:00 Current date: 2018-07-01 10:00:00 Performing iteration #19 Current date: 2018-07-01 10:00:00 Sing/preprocessing YK/input 1013/data-newref/20180701-TrafiPollu-REF/EL.traf.20180701 Current date: 2018-07-01 10:00 Performing iteration #20 Current date: 2018-07-01 20:00 Performing iteration #21 Current date: 2018-07-01 20:00 Performing iteration #22 Corrent date: 2018-07-01 20:00 Performing iteration #23 Corrent date: 2018-07-01 20:00 Performing iteration #23 Current date:		Current date: 2018-07-01 14:00			
Current date (UTC): 2018-07-01 01:00:00 Current date: 2018-07-01 15:00 2018-07-01 00:00:00 Current date: 2018-07-01 15:00 1 The torrent date (local hour): 2018-07-01 01:00:00 Current date: 2018-07-01 15:00 Read the input data (segnent coordinates and emission rates) from the file Current date: 2018-07-01 17:00 Read the input data (segnent coordinates and emission rates) from the file Current date: 2018-07-01 17:00 9_TK/input_1013/data-newref/20180701-TraftPollu-REF/EL.traf.2018070101 Current date: 2018-07-01 18:00 9_TK/input_1013/data-newref/20180701-TraftPollu-REF/EL.traf.2018070101 Current date: 2018-07-01 19:00 Sting/preprocessing_VK/input_1013/data-newref/20180701-TraftPollu-REF/EL.traf.20 Performing iteration #10 CO found with the index: 10 Current date: 2018-07-01 20:00 Performing iteration #20 Current date: 2018-07-01 20:00 Performing iteration #21 Current date: 2018-07-01 20:00 Co found with the index: 10 Current date: 2018-07-01 20:00 Co found with the index: 10 Current date: 2018-07-01 20:00 Current date: 2018-07-01 20:00 Performing iteration #20 Current date: 2018-07-01 20:00 Performing iteration #20 Current date: 2018-07-01 20:00 Performing iteration #20 Current date: 2018-07-01 20:00		Performing iteration #15			
2018-07-01 00:00:00 Performing iteration #16 Current date (local hour): 2018-07-01 01:00:00 Performing iteration #16 Current date (local hour): 2018-07-01 01:00:00 Performing iteration #16 The current date (local hour): 2018-07-01 01:00:00 Performing iteration #16 Read the input data (segment coordinates and emission rates) from the file Performing iteration #16 /home/zhp/SinG-training-2nd/source/munich/munich-pre_postprocessing/preprocessing/pr	Current date (UTC): 2018-07-01 01:00:00	Current date: 2018-07-01 15:00			
line index: 1 Current date: 2018-07-01 01:00 corrent date (local hour): 2018-07-01 01:00:00 Current date: 2018-07-01 17:00 The current day is a weekend. Read the input data (segment coordinates and emission rates) from the file Current date: 2018-07-01 17:00 /home/zhp/SinG-training-2nd/source/munich/munich-pre_postprocessing/preprocessing_VK/input_1013/data-newref/20180701-TraftPollu-REF/EL.traf.2018070101 Current date: 2018-07-01 18:00 g_TK/input_1013/data-newref/20180701-TraftPollu-REF/EL.traf.2018070101 Current date: 2018-07-01 18:00 B0070101 Current date: 2018-07-01 18:00 Performing iteration #19 Current date: 2018-07-01 19:00 Performing iteration #20 Current date: 2018-07-01 20:00 Read the index: 7 Number of the nodes: 3638 Current date: 2018-07-01 22:00 Number of the nodes: 3638 Current date: 2018-07-01 23:00 Performing iteration #23 Current date: 2018-07-01 23:00 Current date: 2018-07-01 23:00 Current date: 2018-07-01 23:00 Performing iteration #24 Current date: 2018-07-01 23:00 Current date: 2018-07-01 23:00 Performing iteration #25 Current date: 2018-07-02 00:00 Current date: 2018-07-02 00:00 Current date: 2018-07-02 00:00 Current date: 2018-07-02 00:00 Current date: 2018-07-02 00:00 Cu	2018-07-01 00:00:00	Performing iteration #16			
Current date (local hour): 2018-07-01 01:00:00 Read the input data (segment coordinates and emission rates) from the file fhome/zhp/SinG-training-Znd/source/multich/munich-pre_postprocessing g_YK/input_1013/data-newref/20180701-TrafiPollu-REF/EL.traf.2018070101 ssing/preprocessing_YK/input_1013/data-newref/20180701-TrafiPollu-REF/EL.traf.2018-07-01 19:00 Performing iteration #19 Current date: 2018-07-01 19:00 Performing iteration #20 Current date: 2018-07-01 19:00 Performing iteration #20 Current date: 2018-07-01 19:00 Performing iteration #20 Current date: 2018-07-01 20:00 Current date: 2018-07-01 20:00 Performing iteration #20 Current date: 2018-07-01 20:00 Performing iteration #2	Time index: 1	Current date: 2018-07-01 16:00			
The current day is a weekend. Read the input data (segment coordinates and emission rates) from the file /home/zhp/SinG-training-2nd/source/multch/mulch-pre_postprocessing/preprocessing/WK/input_103/data-newref/20180701-TraftPollu-REF/EL.traf.20180701 19:00 ssing/preprocessing_VK/input_1013/data-newref/20180701-TraftPollu-REF/EL.traf.20 B070101 CH4 found with the index: 7 NMHC found with the index: 8 CO found with the index: 10 Nox found with the index: 18 (C 7, 8, 9, 10] Number of the nodes: 3638 Number of the streets: 1819 	Current date (local hour): 2018-07-01 01:00:00	Performing iteration #17			
Read the input data (segment coordinates and emission rates) from the file	The current day is a weekend.	Current date: 2018-07-01 17:00			
/home/zhp/SinG-training-2nd/Source/nunich/munich-pre_postprocessing/preprocessing/ g_YK/input_1013/data-newref/20180701-TrafiPollu-REF/EL.traf.2018070101 sing/preprocessing_YK/input_1013/data-newref/20180701-TrafiPollu-REF/EL.traf.20 18070101 CH4 found with the index: 7 CO found with the index: 8 CO found with the index: 9 NOX found with the index: 10 (a) (b) CH4 found with the index: 7 CH4 found with the index: 7 CH4 found with the index: 7 CH4 found with the index: 8 CO found with the index: 10 (c) CH4 found with the index: 10 CO found with the index: 10 CO found with the index: 10 (c) CH4 found with the index: 10 (c) CH4 found with the index: 10 CH4 found with the index: 2018-07-01 20:00 Performing iteration #22 Current date: 2018-07-01 22:00 Performing iteration #23 Current date: 2018-07-01 20:00 Performing iteration #23 Current date: 2018-07-02 20:00 Performing iteration #24 Current date: 2018-07-02 20:00 Performing iteration #25 Current date: 2018-07-02 00:00 Performing iteration #25 Current date: 2018-0	Read the input data (segment coordinates and emission rates) from the file	Performing iteration #18			
g_VX/input_1013/data-newref/20180701-TrafiPollu-REF/EL.traf.2018070101 Performing iteration #19 ssing/preprocessing_VX/input_1013/data-newref/20180701-TrafiPollu-REF/EL.traf.20 Grift found with the index: 7 NWHC found with the index: 8 C0 found with the index: 9 NOX found with the index: 10 [7, 8, 9, 10]Number of the nodes: 3638Number of the streets: 1819Read the geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2nd/source/multch/m Read the geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2nd/source/mul	/home/zhp/SinG-training-2nd/source/munich/munich-pre_postprocessing/preprocessin	Current date: 2018-07-01 18:00			
#========= /home/zhp/SinG-training-Zhd/source/munich/munich-pre_postproce Current date: 2018-07-01 19:00 #======== /home/zhp/SinG-training-Zhd/source/munich/m Performing iteration #20 18070101 Current date: 2018-07-01 20:00 CH4 found with the index: 7 Performing iteration #21 NNHC found with the index: 8 Current date: 2018-07-01 22:00 Co found with the index: 10 Current date: 2018-07-01 22:00 Performing iteration #21 Current date: 2018-07-01 22:00 Nox found with the index: 10 Current date: 2018-07-01 22:00 Performing iteration #23 Current date: 2018-07-01 22:00 Number of the nodes: 3638 Current date: 2018-07-01 22:00 Number of the streets: 1819 Performing iteration #24	g_YK/input_1013/data-newref/20180701-TrafiPollu-REF/EL.traf.2018070101	Performing iteration #19			
ssing/preprocessing_YK/input_1013/data-newref/20180701-TratiPollu-REF/EL.traf.20 Performing iteration #20 GM4 found with the index: 7 NMHC found with the index: 8 C0 found with the index: 9 Nox found with the index: 10 Number of the nodes: 3638 Number of the streets: 1819 Read the geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2nd/source/mulch/m Read the geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2nd/source/mulch/m	======================================	Current date: 2018-07-01 19:00			
18670101 Current date: 2018-07-01 22:00 CH4 found with the index: 7 Performing iteration #21 NWHC found with the index: 8 Current date: 2018-07-01 22:00 Co found with the index: 9 (a) (7, 8, 9, 10] (a) Number of the nodes: 3638 (current date: 2018-07-01 22:00 Number of the streets: 1819 (current date: 2018-07-01 22:00 Performing iteration #23 Current date: 2018-07-01 22:00 Qurrent date: 2018-07-01 23:00 Performing iteration #23 Current date: 2018-07-01 23:00 Performing iteration #24 Current date: 2018-07-01 23:00 Performing iteration #25 Performing iteration #25 Performing iteration #26 Witch-pre postprocessing YK/input 1013/street-geog-info.dat Performing iteration #26	ssing/preprocessing_YK/input_1013/data-newref/20180701-TrafiPollu-REF/EL.traf.20	Performing iteration #20			
CH4 Found with the lindex: 7 Performing iteration #21 WhHC found with the index: 8 Co found with the index: 9 CO found with the index: 9 (a) (7, 8, 9, 10] (a) Number of the nodes: 3638 (a) Number of the streets: 1819 (c) Read the geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2nd/source/mulch/m Current date: 2018-07-02 00:00 Performing iteration #24 Current date: 2018-07-02 00:00 Performing iteration #25 Performing iteration #26		Current date: 2018-07-01 20:00			
NMMHC Toulna with the index: 8 Current date: 2018-07-01 21:00 CO found with the index: 9 (a) [7, 8, 9, 10] (current date: 2018-07-01 22:00 Number of the nodes: 3638 (current date: 2018-07-01 23:00 Number of the streets: 1819 (current date: 2018-07-01 23:00 Read the geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2nd/source/mulch/m Current date: 2018-07-02 00:00 Performing iteration #25 Performing iteration #26	CH4 found with the index: /	Performing iteration #21			
(b) Nox found with the index: 9 Nox found with the index: 10 [7, 8, 9, 10] Number of the nodes: 3638 Number of the streets: 1819 Read the geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2nd/source/mulch/m Read the geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2nd/source/mulch/m Dich-pre postprocessing YK/input 1013/street-geog-info.dat Performing iteration #26 Performing iteration #26	NMHC Tound with the index: 8	Current date: 2018-07-01 21:00			
MOX Found with the thext: 10 (a) (b) [7, 8, 9, 10] (a) (current date: 2018-07-01 22:00 Number of the nodes: 3638 (current date: 2018-07-01 23:00 (b) Number of the streets: 1819 (current date: 2018-07-02 00:00 (current date: 2018-07-02 00:00 Read the geographical informations: //nome/zhp/SinG-training-2nd/source/multch/m Current date: 2018-07-02 00:00 Performing terration #25 Performing iterration #26 Performing iterration #26 Current date: 2018-07-02 01:00 Performing terration #26	Lo found with the index: 9	Current datas 2010 07 01 22:00			
[1', 6', 7', 10] [2] <th>Nox round with the thdex: 10</th> <th>Performing iteration #22</th> <th></th> <th></th> <th>(b)</th>	Nox round with the thdex: 10	Performing iteration #22			(b)
Number of the nodes: 3638 Number of the streets: 1819 Read the geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2nd/source/munich/m Nich-pre postprocessing YK/input 1013/street-geog-info.dat Performing iteration #26	(a)	Current date: 2018-07-01 22:00		PAR	(D)
Read the geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2nd/source/munich/m Current date: 2018-07-02 00:00 Performing iteration #25 Read the geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2nd/source/munich/m Current date: 2018-07-02 01:00 Performing iteration #26	Number of the podes: 3638	Performing iteration #24			(/
Read the geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2nd/source/mulch/m Current date: 2018-07-02 01:00 which-pre postprocessing YK/input 1013/street-geog-info.dat Performing iteration #26	Number of the streets: 1819	Current date: 2018-07-02 00:00			
Read the geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2nd/source/munich/m Current date: 2018-07-02 01:00 unich-pre postprocessing/preprocessing YK/input 1013/street-geog-info.dat Performing iteration #26	Nonder of the Streets. 1015	Performing iteration #25			
unich-pre postprocessing/preprocessing YK/input 1013/street-geog-info.dat Performing iteration #26	Read the geographical informations: /home/zhp/SinG-training-2nd/source/munich/m	Current date: 2018-07-02 01:00			
	unich-pre postprocessing/preprocessing YK/input 1013/street-geog-info.dat	Performing iteration #26			

图 6-2 模型预处理界面 (a) 以及正式运行界面 (b)

[display]
Show_iterations: yes
Show_date: yes
[domain]
Domain where species concentrations are computed.
Date_min = $2018-07-01-00$ Delta_t = $3,600.0$ Nt = 288
File containing the species data.
Species: species-cb05.dat
[options]
With chemistry module (ves or no)

With_chemistry: yes
Which chemistry model (RACM, RACM2 or CB05, Leighton)?
Option_chemistry: CB05
With adaptive time stepping for gaseous chemistry?
With_adaptive_time_step_for_gas_chemistry: yes
Adaptive_time_step_tolerance: 0.001
Minimum time step that can be used.
Min_adaptive_time_step: 10.0
Maximum time step that can be used.
Max_adaptive_time_step: 600.0
With_photolysis: yes
Photolysis tabulation option compute from tabulations (1) or read from binary
files (2).
Photolysis_option: 2
[street]
Parameterization to compute turbulent transfert velocity: "Sirane" or "Schulte".
Transfert_parameterization: Schulte
Parameterization to compute mean wind speed within the street-canyon: "Sirane" or "Lemonsu".
Mean_wind_speed_parameterization: Lemonsu
If the horizontal fluctuation is taken into account.
With_horizontal_fluctuation: yes # yes or no
File containing the input data for intersections.
Intersection: intersection.dat
File containing the input data for streets.
Street: street.dat
Minimum wind speed within the streets.
Minimum_Street_Wind_Speed: 0.1 # in m/s
If meteo data and background concentrations are available for each street.
With_local_data: yes
[data]
File describing the input data.
Data_description: munich-data1013.cfg
[output]
File describing which concentrations are saved.
Configuration_file: munich-saver1013.cfg

6.2 模式评估方法

本文对模拟结果进行评估采用的统计指标共五种,包括平均偏差 (MB)、标准化平均偏差 (NMB)、标准化平均误差 (NME)、均方根误差 (RMSE)以及相关性系数 (R)。其计算公式如下:

$$MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i)$$
(5-1)

$$NMB = \sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i) / \sum_{i=1}^{N} O_i \cdot 100\%$$
(5-2)

$$NME = \sum_{i=1}^{N} / P_i \cdot O_i / / \sum_{i=1}^{N} O_i \cdot 100\%$$
(5-3)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i)^2}$$
(5-4)

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N} (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (P_i - \bar{P})^2 \cdot \sum_{i=1}^{N} (O_i - \bar{O})^2}}$$
(5-5)

式中, P 为模型模拟结果, P 为 P 的平均值, O 为实际监测值, O 为 O 的平均值, N 为检验样本数量。

6.3 结果验证

6.3.1 气象结果验证

本研究使用上文所介绍的统计指标对模型模拟的结果进行评估,评估数据包括距离 地面 2 m 高度的气温 (T2)、降水 (PCP)、距离地面 10 m 高度的风速 (WSP10) 以及风 向 (WDR10),本文利用时间分辨率为 3 小时的美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 以 及美国国家气候数据中心 (NCDC, National Climatic Data Center) 的气象数据,对本文 WRF-Chem 模拟的气象要素模拟结果进行了评估 (表 6-2)。

气象参数	监测均值	模拟均值	MB	NMB (%)	NME (%)	RMSE	R
T2 (°C)	11.6	10.3	-1.3	-11.3	28.7	4.5	0.9
WSP10 (m s ⁻¹)	2.9	3.3	0.4	12.4	56.5	2.2	0.5
WDR10 (°)	211.3	178.7	-32.5	-15.4	49.6	186.8	0.2
PCP (mm day ⁻¹)	2.0	2.3	0.3	12.9	139.0	10.2	0.3

表 6-2 WRF-Chem 气象参数模拟结果评估

根据表 6-2 可以看出, WRF-Chem 模拟的地表气温与监测值之间存在 0.9 左右的相关性,表明模型能够比较准确地模拟出该时段内地表气温的变化过程;风速的相关系数则为 0.5, RMSE 为 2.2;降水量的相关系数为 0.3, RMSE 为 10.2;相较风向的模拟结果相关性系数最低为 0.2, RMSE 为 186.8。总体而言,模型的参数设置能够较为准确地模拟出研究区气象环境的变化情况。

6.3.2 街道污染物模拟结果验证

中国环境监测总站在开封市共设立了四个监测站点,分别是妇幼保健医院、龙亭公园世纪星幼儿园和肿瘤医院。本章将四个站点的模拟结果与站点监测数据进行比对,并使用 MB、RMSE、NMB、NME 和 R 五种统计指标评估本研究的模拟效果,其结果如表 6-3 所示。

污染物	监测站点	MB (µg m ⁻³)	NMB (%)	NME (%)	RMSE (µg m ⁻³)	R
	肿瘤医院	2.16	11.9	21	5.43	0.9
	龙亭公园	2.17	12	19.3	4.92	0.93
NO ₂	妇幼保健院	-1.65	-7.5	12.1	3.63	0.97
	世纪星幼儿园	3.38	18.8	29	7.18	0.78
O3	肿瘤医院	1.61	1.7	5.9	8.54	0.98
	龙亭公园	-4.89	-4.9	7.2	9.7	0.98
	妇幼保健院	-1.77	-1.8	5.5	7.41	0.99
	世纪星幼儿园	-2.03	-2	7.7	12.34	0.97

表 6-3 街道 NO2 和 O3 污染模拟结果评估

图 6-3 是妇幼保健医院站点 NO₂(a) 和 O₃(b) 浓度监测值与模拟值之间的对比图。 该站点 NO₂浓度 MUNICH 模拟结果平均偏差 (MB) 为-1.65 μg m⁻³,监测值与模拟值之 间均方根误差 (RMSE) 为 3.63 μg m⁻³,标准化平均偏差 (NMB) 为-7.5%,表明模拟值 较监测值低,标准化平均误差 (NME) 为 12.1%,相关性系数达到了 0.97。该站点 O₃浓 度模拟结果平均偏差为-1.77 μg m⁻³,模拟值与监测值之间均方根误差 (RMSE) 为 7.41 μg m⁻³,标准化平均偏差 (NMB) 为-1.8%,标准化平均误差 (NME) 为 5.5%,相关系数 达到了 0.99。该站点 O₃浓度模拟效果较 NO₂模拟效果更好并且该站点 O₃模拟效果是四 个站点中最好的,无论是 O₃还是 NO₂模拟值均较监测值略低。



图 6-4, 是龙亭公园监测站点 NO₂和 O₃ 模拟结果与监测值之间对比图。由图中可以 看出,该站点 O₃ 模拟效果优于 NO₂,模拟前期 NO₂ 模拟效果略低于监测值,后期略低 于监测值;O₃ 模拟前期略低于监测值随后与监测值相差不大。此处,NO₂ 模拟结果平均 偏差为 2.17 µg m⁻³,模拟值略高于监测值。NO₂ 浓度模拟值均方根误差 (RMSE) 为 4.92 µg m⁻³,标准化平均偏差 (NMB) 为 12%,标准化平均误差 (NME) 为 19.3%,相关系数 为 0.93。图 6-4 (b)中 O₃ 模拟结果平均偏差为-4.89 µg m⁻³,与妇幼保健院站点同样 O₃ 模拟值略低于监测数据,该数据均方根误差 (RMSE)为 9.7 µg m⁻³,标准化平均偏差 (NMB)为-4.9%,标准化平均误差 (NME)为 7.2%,相关系数达到了 0.98。



图 6-4 龙亭公园监测站点 NO₂(a)和 O₃(b)模拟结果评价

图 6-5 是世纪星幼儿园监测站点 NO2 和 O3 模拟值与监测值之间对比图。从图 6-5 (a) 中可以看出起始时期 NO2浓度模拟值较监测值偏高。NO2模拟模拟结果平均偏差为 3.38 µg m⁻³,模拟值略高于监测值,均方根误差 (RMSE)为7.18 µg m⁻³,标准化平均偏 差 (NMB)为18.8%,标准化平均误差 (NME)为29%,相关系数为0.78。图 6-5 (b)展 示了该站点 O3浓度模拟值与监测值间对比关系,模拟结果平均偏差为-2.03 µg m⁻³,与 妇幼保健院和龙亭公园站点的 O3 模拟效果相同,此处模拟结果略低于监测值。此处的 均方根误差 (RMSE)为12.34 µg m⁻³,标准化平均偏差 (NMB)为-2%,标准化平均误差 (NME)为7.7%,相关系数达到了0.97。同样,该监测站点O3的模拟效果略好于 NO2的 模拟效果。



图 6-5 世纪星幼儿园监测站点 NO₂(a)和 O₃(b)模拟结果评价

图 6-6 是肿瘤医院监测站点 NO₂和 O₃模拟结果与监测数据之间的对比关系。图 6-6 (a) 为 NO₂模拟浓度与监测浓度对比关系,此处 MUNICH 模拟结果平均偏差为 2.16 μg m⁻³,与龙亭公园和世纪星幼儿园结果相同,该站点 NO₂模拟值较监测值略高,NO₂ 模拟值与监测值之间均方根误差 (RMSE) 为 5.43 μg m⁻³,标准化平均偏差 (NMB) 为 11.9%,标准化平均误差 (NME) 为 21%,相关系数达到 0.9。图 6-6 (b) 展示了该站点 O₃浓度模拟值与监测值之间的对比关系。与其他三个站点不同的是该处的 O₃浓度略高 于监测浓度,模拟浓度平均偏差为 1.61 μg m⁻³,同时该处的 O₃浓度模拟值与监测值之 间均方根误差 (RMSE) 为 8.54 μg m⁻³,标准化平均偏差 (NMB) 为 1.7%,标准化平均 误差 (NME) 为 5.9%,相关系数达到了 0.98。



图 6-6 肿瘤医院监测站点 NO₂(a)和 O₃(b)模拟结果评价

在开封市四个国控监测站点中,O₃浓度的模拟效果更加理想,同时四个站点O₃浓 度模拟的平均平均偏差为1.77 μg m⁻³,模拟的标准化平均误差 (NME)为7%,相关系 数达到了0.98。同时,四个站点中,妇幼保健院、龙亭公园、世纪星幼儿园中O₃浓度的 模拟值略低于监测值。四个站点 NO₂浓度模拟的平均偏差为1.51 μg m⁻³,模拟结果的标 准化平均误差 (NME)为20%,相关系数为0.89。同时四个站点中,龙亭公园、世纪星 幼儿园、肿瘤医院三个站点的 NO₂浓度模拟结果略高于监测值。

6.4 街道空气污染物时空特征

本研究模拟了开封市 2018 年 7 月 1 日 0 时至 7 月 12 日 23 时的街道空气污染状况, 本章以 2018 年 7 月 2 日为典型分析 NO₂ 和 O₃ 污染物时空变化过程。图 6-7 是 7 月 2 日 NO₂ 在不同时刻时空变化示意图。从图中可以明显看出,一天内 NO₂浓度呈现出先增大 后减少最后又增大的现象。深夜 NO₂浓度在 30 μ g m⁻³ 至 54 μ g m⁻³之间,各街道污染物 浓度差异并不明显,仅个别链接祥符区与主城区以及链接西区与东区之间的街道污染物 浓度超过 45 μ g m⁻³。早上 8:00,各街道污染物浓度明显增加,并且研究区内污染物浓度 基本分布在 54 μ g m⁻³ 至 56 μ g m⁻³之间,老城区内部以及祥符区街道 NO₂浓度略低。 12:00 街道 NO₂浓度明显低于早上 8:00,大多数街道内 NO₂浓度在 5 μ g m⁻³ 至 15 μ g m⁻³ 之间,仅有个别快速路 NO₂浓度超过了 30 μ g m⁻³;此时城市中心区域污染物浓度明显 低于城市外围街道污染物浓度,表明此时城市中心区域污染物浓度降低较为明显。15:00 大多数街道污染物浓度在 5 μ g m⁻³至 10 μ g m⁻³之间,表明 12:00 至 15:00 城市外围街道 污染物弄得也开始降低与城市中心街道污染物浓度相差无几,此时仅有个别街道污染物 浓度达到 15 μ g m⁻³以上。15:00 至 18:00 污染物浓度开始升高,且城市外围街道浓度增加较为明显达到了 15 μ g m⁻³以上,此时城市中心街道污染物浓度大多分布在 15 μ g m⁻³以下,位于北侧与东侧的高速公路污染物浓度超过 56 μ g m⁻³。



图 6-7 2018 年 7 月 2 日街道 NO2 时空分布

图 6-8 则展示了 2018 年 7 月 2 日 O₃ 污染物浓度时空变化示意图。从图中可以看 出,7月 2 日 O₃ 污染物浓度呈现出先降低后增加最后在降低的现象。凌晨 0:00 各街道 O₃ 浓度在 71 µg m⁻³ 至 212 µg m⁻³ 之间,链接主城区与祥符区之间的街道以及高速公路 此时 O₃ 浓度较低。早上 8:00 开封市各路段污染物浓度均有所降低,各街道 O₃ 浓度在 70 µg m⁻³ 至 71 µg m⁻³ 之间,包括北部、西部高速公路在内的个别路段 O₃ 浓度降低至 70 µg m⁻³ 以下。12:00 各路段 O₃ 浓度较 8:00 开始上升,位于城市中心的街道 O₃ 浓度升高 较为明显达到了 212 µg m⁻³ 至 215 µg m⁻³ 之间,这些区域大多是支路人口密度较大机动 车行驶缓慢。15:00 各街道 O₃浓度继续升高,城市中心以及祥符区个别街道浓度达到 225 μg m⁻³ 至 230 μg m⁻³之间,城市外围街道 O₃浓度也均有明显升高,大多数街道超过了 215 μg m⁻³。18:00 城市内各街道 O₃浓度持续升高,城市中心 O₃浓度超过了 230 μg m⁻³ 的街道持续增加,城市外围街道 O₃浓度大多也超过了 215 μg m⁻³;此时城市北部、西部 以及南部的街道 O₃浓度最低,在 212 μg m⁻³以下。夜晚 21:00 城市各街道 O₃浓度降低 较为明显,各街道浓度基本在 212 μg m⁻³以下,开封西区极个别街道 O₃浓度降低至 97 μg m⁻³以下。整体而言,城市中心区域街道 O₃浓度变化更加突出,下午是 O₃浓度最高 的时间。



图 6-8 2018 年 7 月 2 日街道 O3 时空分布

6.5 讨论

城市街道空气质量受到气象条件、机动车排放、机动车保有量以及街道组成结构等 53 诸多因素的影响。本研究利用 WRF-Chem、VEIN 以及 MUNICH 模型进行开封市街道 空气质量时空变化精细模拟。研究发现城市街道空气质量时空分布呈现明显的规律性变 化。深夜时分城市内部大气污染物浓度并不明显,此时的 NO2 污染物主要集中在城市外 围街道,这与此时街道通行车辆主要以重型货车为主有关,这是由于本地的机动车限行 措施。开封市三大街以东、公园路以西、东京大道以南、滨河路-宋城路以北路段以及劳 动路北段、五福路、郑开大道全段为 24 小时禁止货车通行路段,市内其他路段为每日 5 时至 24 时限时禁止通行。因此,造成了 NO2 在深夜呈现出中心城区浓度低、城市外围 浓度高的空间分布特征。O3 浓度则在城市中心区域分布较为集中,这与白天 O3 污染形 成的积累有关。

早高峰时段的大气污染物浓度显著增大,各路段 NO₂浓度较深夜均有明显增高,O₃浓度则呈下降趋势。这是由于早高峰机动车行驶量增大,由机动车排放造成的 NO₂ 排放显著增强;但 O₃的形成与太阳光照有关,此时前一天形成的 O₃浓度正在逐步降低,而新的 O₃ 尚未形成。同时,街道交叉路口 NO₂ 污染物浓度较其他路段范围明显较高,城市内部短、窄的巷道污染物排放也十分明显,主要原因可能是上述区域的机动车行驶缓慢,怠速时间变长,引起机动车在单位距离内油耗显著升高,致使单位行驶距离内机动车排放的污染物增多^[130-131]。

NO₂浓度呈现出先增加后降低最后又增加的变化趋势,在上午 9:00 至 10:00 左右达 到一天内的峰值,这与前人的研究结果相符^[132]。由于早高峰机动车排放积累因此 NO₂ 浓度峰值出现在上午,随后太阳光照增加,光分解致使 NO₂浓度降低,NO₂浓度最低值 出现在下午光照最强烈的时间,之后光照强度降低 NO₂浓度开始上升。而在夜间,街道 通行重型货车较多,货车排放因子高于小型客车,并且此时没有太阳光照致使光化学去 除效应降低^[133],造成夜间 NO₂浓度持续增加。

O3浓度则呈现先降低后增加再降低的变化趋势,在下午15:00至18:00达到高峰, 这符合前人的研究结果^[134-135]。早高峰较夜晚浓度有所下将,可能与O3的形成机制有关。 O3是 VOC 和 NOx 等前体物在大气辐射作用下经光化学反应生成的二次污染产物^[136-137] 因此经过长时间的太阳辐射以及光化学反应。下午 O3 浓度达到最大值,随后光照强度 降低光反应减弱 O3 浓度开始降低,至凌晨 O3 浓度达到最低值。大气污染物浓度的变化, 不仅仅与排放有关,同时与大气边界层高度有关,垂直混合也是 NO2 和 O3 浓度日变化 的重要因素。

54

6.6本章小结

本章主要介绍了 WRF-Chem 模型模拟气象环境场时的参数设置,讲解了本文采用 WRF-Chem 模型中设置四层嵌套的结构设置,同时详细介绍了模式中四层嵌套采用的各 个参数机制的选择与设置。详细介绍了 MUNICH 模型的化学机制选择以及诸多参数设置,模拟了 2018 年 7 月 1 日至 2018 年 7 月 12 日开封市街道空气污染物浓度 (NO₂、O₃)的时空变化特征。采用五项统计指标验证了气象模拟结果与街道空气污染物浓度模 拟结果。分析了开封市街道空气污染物时空变化特征,并简单分析其主要诱因。

7 结论与展望

7.1 结论

针对现有空气质量监测站点与空气质量模型难以表征城市精细尺度空气污染物时 空变化这一问题,本文利用地理视频数据与 VEIN 机动车排放模型,耦合区域与街道空 气质量模型,主要开展了城市机动车活动水平的时空动态感知、高时空分辨率城市机动 车排放清单编制、城市街道尺度空气污染物时空分布模拟等研究。主要研究成果如下:

(1) 研发了道路机动车活动水平数据智能感知原型系统。结合 Fast R-CNN 深度学 习目标检测算法,成功开发了基于地理视频数据的道路机动车活动水平数据感知原型系 统,实现了对道路机动车流量、车速、车辆类型等用于输入排放模型的机动车活动水平 参数智能感知与识别。

(2) 设计了基于地理视频的高时空分辨率城市机动车排放清单编制方案。基于高时空分辨率道路机动车活动水平数据,结合 VEIN 机动车排放模型,以开封市为例,实现 了高时空分辨率城市道路机动车排放清单的研制。发现,2018 年开封市城区机动车排放 的 CO 约 27,839 t, HC 约 2,845 t, NO_x 约 1,273 t, PM_{2.5} 约 23.56 t, PM₁₀ 约 25.17 t。

(3) 分析了开封市机动车污染物排放的时空变化特征。通过分析机动车排放清单, 发现各类污染物排放存在显著的时空差异,且具有较为明显的时空变化规律。工作日期 间的机动车污染物的日排放量明显高于周末,早晚高峰时段的污染物排放量显著高于其 他时段,且表现为城市中心区域排放量较大,而在0时至6时污染物的排放量远低于其 他时段,且空间差异不明显。

(4) 实现了城市街道尺度空气污染物分布时空精细化模拟。利用本文研制的高时空 分辨率道路机动车排放清单,结合其他大气污染源排放清单,通过耦合区域与街道空气 质量模型,以开封市为例,实现了对研究区街道路网水平的 O3 与 NO2 空气污染物的精 细化模拟。通过与实际监测数据对比验证,表明本方法对于街道尺度的空气质量具有较 强的模拟能力。

(5) 分析了开封市街道尺度空气污染物的时空变化特征。模拟结果较好的再现了城 市街道尺度空气污染物的时空变化过程,O3 与 NO2 在道路路网水平均呈现显著的时空 差异,总体表现为中心城区道路污染物浓度高于城市外围道路污染物浓度,且日间污染

57

物浓度明显高于夜间。NO2浓度最大值一般出现在上午 9:00-10:00 左右, 而 O3浓度最 大值一般出现在下午 15:00-18:00。

7.2 创新点

本文的创新点主要在于以下两点:

(1) 设计了基于地理视频的高时空分辨率城市机动车排放清单编制方案。改善了现 有机动车排放清单存在的时空分辨率低、成本高、精度差、更新滞后等问题,为进行城 市精细尺度空气质量的高精度模拟提供了数据支持。

(2) 实现了面向城市街道尺度空气污染物分布的时空精细模拟。通过耦合高时空分 辨率道路机动车排放清单、大气污染源排放清单、区域与街道空气质量模型,实现了对 城市街道水平空气污染物分布的时空精细模拟,一定程度上解决了现有监测数据与空气 质量模型无法表征城市精细尺度空气污染物时空变化特征的问题。

7.3 不足与展望

本文在研究过程中尚存在一些不足之处,需在今后的工作中进一步开展研究:

(1) 机动车排放清单的准确性对空气质量模拟结果具有较大影响。本文通过采集交通视频,使用视频 GIS 技术获取用于估算机动车排放的交通流量、速度等模型参数,因此交通视频采样点的分布情况及数量的选择十分重要。布局更加均匀、数量更多的视频采样点能够更加真实的测算不同街道的机动车活动水平变化情况。

(2) 气象因素对街道空气污染时空变化过程具有非常重要的影响。因此气象参数的 准确性在比较大的程度上影响着研究结果的准确性。针对 WRF-Chem 模式目前模拟气 象存在的偏差,可以通过进一步尝试不同物理、化学参数配置,选择更优的参数化方案。

(3) 近年各地为实现减排目标陆续实施了诸多控制措施。需进一步研究不同减排控制情景下的机动车污染物排放量变化情况,模拟分析不同控制情景下街道空气质量的时空差异。可为评估控制措施效益,制定减排方案提供参考。

(4) 机动车污染物排放以及城市街道空气质量状况与城市居民健康息息相关。因此, 基于本文的研究,量化评估人体对街道空气污染物暴露的健康风向,探讨城市机动车污 染以及街道空气质量对人体健康的影响。同时,可研究不同控制情景下城市街道空气污 染对人体健康或社会经济效益产生的效应。

参考文献

- [1] Brunekreef B, Holgate S T. Air pollution and health[J]. The Lancet, 2002, 360(9341): 1,233-1,242.
- [2] EEA. Air Quality in Europe e 2014 Report[R]. Copenhagen: Denmark. European Environment Agency, 2014.
- [3] WHO, Mortality and burden of disease from ambient air pollution[EB/OL]. https://www.who.int/airpollution/data/AAP BoD results March2014.pdf?ua=1.htm, 2020-05-23.
- [4] Beans C. News Feature: Exposing the exposome to elucidate disease[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(47): 11,859-11,862.
- [5] Pu Q, Yoo E. Spatio-temporal modeling of PM_{2.5} concentrations with missing data problem: a case study in Beijing, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2020, 34(3): 423-447.
- [6] Zou B, Li S, Zheng Z, et al. Healthier routes planning: A new method and online implementation for minimizing air pollution exposure risk[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2020(80): 101,456.
- [7] Li W, Batty M, Goodchild M F, et al. Real-time GIS for smart cities[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2020, 34(2): 311-324.
- [8] Apte J S, Messier K P, Gani S, et al. High-Resolution Air Pollution Mapping with Google Street View Cars: Exploiting Big Data[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(12): 6,999-7,008.
- [9] Messier K P, Chambliss S, Gani S, et al. Mapping Air Pollution with Google Street View Cars: Efficient Approaches with Mobile Monitoring and Land Use Regression[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(21): 12,563-12,572.
- [10] Vardoulakis S, Fisher B E, Pericleous K, et al. Modelling air quality in street canyons: a review[J].Atmospheric Environment, 2003, 37(2): 155-182.
- [11] Thorpe A J, Harrison R M. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review[J]. Science of The Total Environment, 2008, 400(1): 270-282.
- [12] 牛玉芾. 中国空气污染的空间集聚特征及区域性差异研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.

- [13] 罗菊英,张仪,虞列辉.基于复杂地理环境条件下的恩施州空气污染时空分布特征[J].环境保 护科学,2018,44(04):35-43.
- [14] 田军. 南京市机动车大气环境影响及其控制策略研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [15] 宋晓伟,郝永佩,朱晓东. 长三角城市群机动车污染物排放清单建立及特征研究[J]. 环境科学 学报, 2020, 40(01): 90-101.
- [16] 危浩. 空气质量模拟与监测数据融合方法优化及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [17] Song J, Lu M, Lu J, et al. Acute effect of ambient air pollution on hospitalization in patients with hypertension: A time-series study in Shijiazhuang, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019: 286-292.
- [18] Xia Y, Guan D, Jiang X, et al. Assessment of socioeconomic costs to China's air pollution[J]. Atmospheric Environment, 2016: 147-156.
- [19] Caplin A, Ghandehari M, Lim C C, et al. Advancing environmental exposure assessment science to benefit society[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1,236.
- [20] Escobedo F J, Nowak D J. Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest[J].Landscape and Urban Planning, 2009, 90(3): 102-110.
- [21] 王少剑, 高爽, 陈静. 基于 GWR 模型的中国城市雾霾污染影响因素的空间异质性研究[J]. 地理研究, 2020, 39(03): 651-668.
- [22] Li X, Song H, Zhai S, et al. Particulate matter pollution in Chinese cities: Areal-temporal variations and their relationships with meteorological conditions (2015–2017)[J]. Environmental Pollution, 2019: 11-18.
- [23] 高倩. 青岛市区大气污染物时空异质性及其影响因素分析[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.
- [24] Liu P, Song H, Wang T, et al. Effects of meteorological conditions and anthropogenic precursors on ground-level ozone concentrations in Chinese cities[J]. Environmental Pollution, 2020, 262: 11,436.
- [25] 刘宁微, 王扬锋, 马雁军, 等. 复杂地形对城市空气污染影响的数值试验研究[J]. 地理科学, 2008(03): 396-401.
- [26] 张红. 典型沿江城市空气污染物特征及与气象条件的耦合关系研究[D]. 合肥: 中国科学技术 大学, 2017.
- [27] Leung Y, Zhou Y, Lam K, et al. Integration of air pollution data collected by mobile sensors and ground-based stations to derive a spatiotemporal air pollution profile of a city[J]. International Journal

of Geographical Information Science, 2019, 33(11): 2,218-2,240.

- [28] Xu Y, Jiang S, Li R, et al. Unraveling environmental justice in ambient PM_{2.5} exposure in Beijing: A big data approach[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2019: 12-21.
- [29] Van Zoest V, Osei F B, Hoek G, et al. Spatio-temporal regression kriging for modelling urban NO₂ concentrations[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2019: 1-15.
- [30] Fotheringham A S, Yue H, Li Z, et al. Examining the influences of air quality in China's cities using multi-scale geographically weighted regression[J]. Transactions in Gis, 2019, 23(6): 1,444-1,464.
- [31] Guo Y, Tang Q, Gong D, et al. Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations in Beijing using a satellite-based geographically and temporally weighted regression model[J]. Remote Sensing of Environment, 2017: 140-149.
- [32] Zhang T, Zhu Z, Gong W, et al. Estimation of ultrahigh resolution PM_{2.5} concentrations in urban areas using 160 m Gaofen-1 AOD retrievals[J]. Remote Sensing of Environment, 2018: 91-104.
- [33] Shi Y, Lau K K, Ng E, et al. Developing Street-Level PM_{2.5} and PM₁₀ Land Use Regression Models in High-Density Hong Kong with Urban Morphological Factors[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(15): 8,178-8,187.
- [34] Zou B, Zheng Z, Wan N, et al. An optimized spatial proximity model for fine particulate matter air pollution exposure assessment in areas of sparse monitoring[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2016, 30(4): 727-747.
- [35] Lim C C, Kim H, Vilcassim M J, et al. Mapping urban air quality using mobile sampling with low-cost sensors and machine learning in Seoul, South Korea[J]. Environment International, 2019,131: 1,051.
- [36] Zhong J, Cai X, Bloss W J, et al. Coupling dynamics and chemistry in the air pollution modelling of street canyons: A review[J]. Environmental Pollution, 2016: 690-704.
- [37] 李霄阳, 李思杰, 刘鹏飞, 等. 2016 年中国城市臭氧浓度的时空变化规律[J]. 环境科学学报, 2018, 38(04): 1,263-1,274.
- [38] 赵海鹏, 宋宏权, 刘鹏飞, 等. 1980—2015 年风蚀影响下中国北方土壤有机质与养分流失时空 特征[J]. 地理研究, 2019, 38(11): 2,778-2,789.
- [39] 张婷慧,陈报章,王瑾,等. 基于 CAMx 的徐州市 2016 年冬季 PM_{2.5} 污染过程及来源分析[J].
 环境科学学报, 2017(10): 292-299.

- [40] Kim Y, Wu Y, Seigneur C, et al. Multi-scale modeling of urban air pollution: development and application of a Street-in-Grid model (v1.0) by coupling MUNICH (v1.0) and Polair3D (v1.8.1)[J]. Geoscientific Model Development, 2018, 11(2): 611-629.
- [41] Nicholson S E. A pollution model for street-level air[J]. Atmospheric Environment, 1975, 9(1): 19-31.
- [42] 周颖. 建设活动对街道峡谷固体颗粒物影响的数值模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [43] 朱中伟. 城市街道峡谷内机动车排放活性污染物扩散研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [44] Nosek S, Fuka V, Kukacka L, et al. Street-canyon pollution with respect to urban-array complexity: The role of lateral and mean pollution fluxes[J]. Building and Environment, 2018: 221-234.
- [45] Fu X, Liu J, Banweiss G, et al. Effects of canyon geometry on the distribution of traffic-related air pollution in a large urban area: Implications of a multi-canyon air pollution dispersion model[J]. Atmospheric Environment, 2017: 111-121.
- [46] Ebenstein A, Fan M, Greenstone M, et al. New evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River Policy[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(39): 10,384-10,389.
- [47] Zhou Y, Zhou J. Urban atmospheric environmental capacity and atmospheric environmental carrying capacity constrained by GDP–PM_{2.5}[J]. Ecological indicators, 2017, 73: 637-652.
- [48] Pfeffer H, Friesel J, Elbers G, et al. Air pollution monitoring in street canyons in North Rhine-Westphalia, Germany[J]. Science of The Total Environment, 1995: 7-15.
- [49] 张云伟, 王晴茹, 陈嘉, 等. 城市街谷内 PM_{2.5}浓度时空变化及影响因素分析[J]. 中国环境科学,
 2016, 36(10): 2,944-2,949.
- [50] Chan L Y, Kwok W S. Vertical dispersion of suspended particulates in urban area of Hong Kong[J].Atmospheric Environment, 2000, 34(26): 4,403-4,412.
- [51] 周洪昌. 城市汽车排放 CO 污染模式的概略分析[J]. 环境科学, 1994(05): 78-82+96.
- [52] 简颖涛, 叶兆贤, 吴建勋. 机动车尾气污染物 NO_x 在主干道水平、垂直方向上的浓度分布规律 初探[J]. 中国环境监测,1999(05):38-41.
- [53] Meroney R N, Pavageau M, Rafailidis S, et al. Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 62(1): 37-56.
- [54] Rafailidis S. Influence of stable atmospheric thermal stratification on urban street-canyon re-
aeration[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2001: 393-403.

- [55] 高政. 三维城市建筑布局下街谷风环境与污染物扩散的研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2019.
- [56] Yamartino R J, Wiegand G. Development and evaluation of simple models for the flow, turbulence and pollutant concentration fields within an urban street canyon[J]. Atmospheric Environment, 1986, 20(11): 2,137-2,156.
- [57] Vardoulakis S, Valiantis M, Milner J, et al. Operational air pollution modelling in the UK—Street canyon applications and challenges[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(22): 4,622-4,637.
- [58] Berkowicz R, Ketzel M, Jensen S S, et al. Evaluation and application of OSPM for traffic pollution assessment for a large number of street locations[J]. Environmental Modelling and Software, 2008, 23(3): 296-303.
- [59] Soulhac L, Salizzoni P, Cierco F X, et al. The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion; part I, presentation of the model[J]. Atmospheric environment, 2011, 45(39): 7,379-7,395.
- [60] Fallahshorshani M, Shekarrizfard M, Hatzopoulou M, et al. Evaluation of regional and local atmospheric dispersion models for the analysis of traffic-related air pollution in urban areas[J]. Atmospheric Environment, 2017: 270-282.
- [61] Snyder M, Venkatram A, Heist D, et al. RLINE: A line source dispersion model for near-surface releases[J]. Atmospheric Environment, 2013: 748-756.
- [62] Kim Y, Wu Y, Seigneur C, et al. Multi-scale modeling of urban air pollution: development and application of a Street-in-Grid model (v1.0) by coupling MUNICH (v1.0) and Polair3D (v1.8.1)[J]. Geoscientific Model Development, 2018, 11(2): 611-629.
- [63] La Paz D D, Borge R, Vedrenne M, et al. Implementation of road dust resuspension in air quality simulations of particulate matter in Madrid (Spain)[J]. Frontiers in Environmental Science, 2015, 3: 72.
- [64] Rzeszutek M, Bogacki M, Bździuch P, et al. Improvement assessment of the OSPM model performance by considering the secondary road dust emissions[J]. Transportation Research Part Dtransport and Environment, 2019: 137-149.
- [65] Van Wijnen J H, Der Zee S C. Traffic-related air pollutants: exposure of road users and populations living near busy roads[J]. Reviews on environmental health, 1998: 1-25.
- [66] HEI, Traffic-related air pollution: a critical review of the literature on emissions, exposure, and health

effects[R]. USA: Boston, 2010.

- [67] An X, Hou Q, Li N, et al. Assessment of human exposure level to PM₁₀ in China[J]. Atmospheric Environment, 2013: 376-386.
- [68] He K, Huo H, Zhang Q, et al. URBAN AIR POLLUTION IN CHINA: Current Status, Characteristics, and Progress[J]. Annual Review of Energy and The Environment, 2002, 27(1): 397-431.
- [69] Lopez J M, Callen M S, Murillo R, et al. Levels of selected metals in ambient air PM₁₀ in an urban site of Zaragoza (Spain)[J]. Environmental Research, 2005, 99(1): 58-67.
- [70] Reche C, Querol X, Alastuey A, et al. New considerations for PM, black carbon and particle number concentration for air quality monitoring across different European cities[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011(11): 6,207-6,227.
- [71] Song Y, Xie S, Zhang Y, et al. Source apportionment of PM_{2.5} in Beijing using principal component analysis/absolute principal component scores and UNMIX[J]. Science of The Total Environment, 2006, 372(1): 278-286.
- [72] Cheng S, Lang J, Zhou Y, et al. A new monitoring-simulation-source apportionment approach for investigating the vehicular emission contribution to the PM_{2.5} pollution in Beijing, China. [J]. Atmospheric Environment, 2013(79): 308-316.
- [73] Wu Q, Xu W, Shi A, et al. Air quality forecast of PM₁₀ in Beijing with Community Multi-scale Air Quality Modeling (CMAQ) system: emission and improvement[J]. Geoscientific Model Development, 2014, 7(5): 2,243–2,259.
- [74] Huo H, Zhang Q, He K, et al. Modeling vehicle emissions in different types of Chinese cities: importance of vehicle fleet and local features[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(10): 2,954-2,960.
- [75] 郝保国. 关中地区机动车污染物高分辨率排放清单[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [76] 任小平. 基于 MOBILE6.2 模型的西安市机动车综合排放因子研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
- [77] 冯玉松. MOVES-西安排放模型的建立及污染评估应用[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [78] 丘福明. 基于 COPERT 模型的道路交通部门节能减排潜力及其路径研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [79] 郭幸运. 基于 IVE 模型的城市交叉口机动车尾气排放与扩散特征研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.

- [80] Ibarraespinosa S, Ynoue R Y, Osullivan S, et al. VEIN v0.2.2: an R package for bottom-up vehicular emissions inventories[J]. Geoscientific Model Development, 2017, 11(6): 2,209-2,229.
- [81] Fu L, He K, He D, et al. A study on models of mobile source emission factors[J]. Acta scientiae circumstantiae, 1997, 17(4): 474-479.
- [82] 郝吉明, 吴烨, 傅立新, 等. 北京市机动车污染分担率的研究[J]. 环境科学, 2001(05): 1-6.
- [83] 徐伟嘉,李红霞,黄建彰,等.佛山市机动车尾气颗粒物 PM_{2.5}的排放特征研究[J].环境科学与 技术, 2014, 37(03): 152-158+173.
- [84] 黄冠涛. 基于 MOVES 的微观层次交通排放评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [85] 郭园园. 基于 MOVES 模型的深圳市某路段机动车尾气排放评估[C]. 中国环境科学学会. 2015 年中国环境科学学会学术年会论文集(第一卷). 中国环境科学学会: 中国环境科学学会, 2015: 1,713-1,719.
- [86] 王海鲲,陈长虹,黄成,等.应用 IVE 模型计算上海市机动车污染物排放[J].环境科学学报, 2006(01): 1-9.
- [87] 姚志良, 贺克斌, 王岐东, 等. IVE 机动车排放模型应用研究[J]. 环境科学, 2006(10): 1,928-1,933.
- [88] Gustafsson M, Blomqvist, Göran, Järlskog, Ida, et al. Road dust load dynamics and influencing factors for six winter seasons in Stockholm, Sweden[J]. Atmospheric Environment: X, 2019, 2: 100,014.
- [89] Jeong C, Wang J M, Hilker N, et al. Temporal and spatial variability of traffic-related PM2.5 sources: Comparison of exhaust and non-exhaust emissions[J]. Atmospheric Environment, 2019: 55-69.
- [90] Padoan E, Ajmonemarsan F, Querol X, et al. An empirical model to predict road dust emissions based on pavement and traffic characteristics[J]. Environmental Pollution, 2017: 713-720.
- [91] Rzeszutek M, Bogacki M, Bździuch P, et al. Improvement assessment of the OSPM model performance by considering the secondary road dust emissions[J]. Transportation Research Part Dtransport and Environment, 2019: 137-149.
- [92] 樊守彬,杨涛,李雪峰,等.北京城市副中心道路扬尘排放清单与控制情景[J].环境科学与技术,2019,042(004):173-179.
- [93] Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, et al. Fully coupled "online" chemistry within the WRF model[J].Atmospheric Environment, 2005, 39(37): 6957-6975.
- [94] Lin Y.L. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. J. Appl. Meteorol., 1983, 22(6):1065-1092.

- [95] Chou M.D., Suarez M.J. An Efficient Thermal Infrared Radiation Parameterization for use in GeneralCirculation Models[J]. NASA Tech Memo 104606, 1994, 3: 85-85.
- [96] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, 9(14): 5,131-5,153.
- [97] Guenther A, Karl T, Harley P, et al. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, 6(11): 3,181-3,210.
- [98] Mellor G.L., Yamada T. Development of a Turbulent Closure Model for Geophysical Fluid Problems[J]. Rev. Geophys. Space Phys., 1982, 20: 851-875.
- [99] Chen F, and Dudhia J. Coupling an Advanced Land Surface Hydrology Model with the Penn StateNCAR MM5 Modeling System. Part II: Preliminary Model Validation [J]. Mon. Weather Rev., 2001,129(4): 569-585.
- [100] Wang X, Kockelman K M. Forecasting Network Data: Spatial Interpolation of Traffic Counts from Texas Data[J]. Transportation Research Record, 2009, 2105(2105): 100-108.
- [101] Pulles T, Heslinga D. The art of emission inventorying[J]. TNO, Utrecht, 2010: 29-53.
- [102] Ntziachristos L, Samaras Z. EMEP/EEA emission inventory guidebook; Road Transport: Passenger cars, Light commercial trucks, Heavy-duty vehicles including buses and Motorcycles[J]. European Environment Agency, Copenhagen, 2016: 31-33.
- [103] Chen R H, Chiang L B, Chen C N, et al. Cold-start emissions of an SI engine using ethanol–gasoline blended fuel[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(8): 1,463-1,467.
- [104] Boulter, P. Environmental traffic management: A review of factors affecting cold start emissions[M]. Transport Research Laboratory, 1997.
- [105] 岳婷婷, 王鸣宇, 黄志辉, 等. 轻型汽油车蒸发排放特征及温度对蒸发排放的影响[J]. 环境科学研究, 2020, 33(01): 73-81
- [106] Soulhac L, Garbero V, Salizzoni P, et al. Flow and dispersion in street intersections[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(18): 2,981-2,996.
- [107] 田云, 邹宇, 殷长秦, 等. 大气光化学反应高发季节 NO、NO2 和 O3 污染特征[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(02): 74-80.
- [108] Leighton, Philip A. photochemistry of Air pollution[J]. American Journal of Public Health & the

Nations Health, 1961.

- [109] Cherin N, Roustan Y, Mussongenon L, et al. Modelling atmospheric dry deposition in urban areas using an urban canopy approach[J]. Geoscientific Model Development, 2014, 8(3): 893-910.
- [110] 骆剑承, 胡晓东, 吴炜, 等. 地理时空大数据协同计算技术[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(5): 590-598.
- [111] 程昌秀, 史培军, 宋长青, 等. 地理大数据为地理复杂性研究提供新机遇[J]. 地理学报, 2018, 73(8): 1,397-1,406.
- [112] 关雪峰, 曾宇媚. 时空大数据背景下并行数据处理分析挖掘的进展及趋势[J]. 地理科学进展,2018, 37(10): 14-27.
- [113] Du Y, Wu J, Yang S, et al.Predicting vehicle fuel consumption patterns using floating vehicle data[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017,59: 24-29.
- [114] 王艳东, 荆彤, 姜伟, 等. 利用社交媒体数据模拟城市空气质量趋势面[J]. 武汉大学学报(信息 科学版), 2017, 42(1): 14-20.
- [115] 秦之湄, 唐文雅, 尹元畅, 等. 基于互联网大数据的成都餐饮源细颗粒物排放空间分配研究[J].环境科学学报, 2018, 37(12): 4,511-4,518.
- [116] 唐伟,杨强,黄成,等. 基于大数据分析和 IVE 模型的杭州市机动车污染物排放变化特征研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(1): 71-78.
- [117] 宋宏权, 王丰, 刘学军, 等. 地理环境下的群体运动分析与异常行为检测[J]. 地理与地理信息 科学, 2015, 31(4): 1-5.
- [118] Feng J, Wang F, Feng S, et al. A multibranch object detection method for traffic scenes[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2019: 3,679,203.
- [119] 周艳, 罗云馨, 江荣贵, 等. 基于视频场景多因素的人群运动状态分析[J]. 地理信息世界, 2019, 26(02): 13-20.
- [120] 郭硕, 肖捷颖, 安塞, 等. 利用快速检测法研究石家庄道路交通扬尘排放特征[J]. 环境污染与 防治, 2019, 41(2): 206-210.
- [121] 竹涛, 王若男, 袁前程, 等. 基于积尘负荷法对北京市铺装道路扬尘排放清单的研究[J]. 太原 理工大学学报, 2019, 50(04): 503-509.
- [122] 宋宏权. 区域人群状态与行为的时空感知方法[D]. 南京: 南京师范大学.
- [123] 张兴国, 刘学军, 王思宁,等. 监控视频与 2D 地理空间数据互映射[J]. 武汉大学学报(信息科学

版), 2015, 040(008): 1,130-1,136.

- [124] Girshick R. Fast R-CNN[C]. International Conference on Computer Vision, 2015: 1440-1448.
- [125] Girshick R, Donahue J, Darrell T, et al. Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation[C]. Computer vision and pattern recognition, 2014: 580-587.
- [126] He K, Zhang X, Ren S, et al. Spatial Pyramid Pooling in Deep Convolutional Networks for Visual Recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(9): 1,904-1,916.
- [127] Simonyan K, Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition[C]. Computer Vision and Pattern Recognition, 2014.
- [128] Everingham M, Van Gool L, Williams C K, et al. The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge[J]. International Journal of Computer Vision, 2010, 88(2): 303-338.
- [129] 河 南 省 生 态 环 境 斤 . 2018 年 度 河 南 省 环 境 统 计 年 报 [EB/OL]. http://www.hnep.gov.cn/hjzl/hnshjzkgb/webinfo/2019/12/1575251232810900.htm, 2019-12-02
- [130] 赵凤琴, 汤洁, 李昭阳, 等. 长春市大气中 NO_x 污染现状和机动车排放污染分担率研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(2): 243-247.
- [131] 宋翔宇, 谢绍东. 中国机动车排放清单的建立[J]. 环境科学, 2006, 27(6): 1,041-1,045.
- [132] 章吴婷. 基于多源遥感的中国大气 NO2 浓度时空变化特征研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [133] Khoder M I. Diurnal, seasonal and weekdays-weekends variations of ground level ozone concentrations in an urban area in greater Cairo[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 149(1): 349-362.
- [134] 王鑫龙,赵文吉,李令军,等.中国臭氧时空分布特征及与社会经济因素影响分析[J].地球与 环境, 2020, 48(01): 66-75.
- [135] 易睿,王亚林,张殷俊,等. 长江三角洲地区城市臭氧污染特征与影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(08): 2,370-2,377.
- [136] Fishman J, Grutzen P J. The origin of ozone in troposphere[J]. Nature, 1978, 274: 855-858.
- [137] 张小娟,李莉,王红丽,等. 2010—2016 年上海城区臭氧长时间序列变化特征初探[J]. 环境科 学学报, 2019, 39(01): 86-94.

致 谢

攻读学位期间研究成果目录