

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

赵海鹏^{1,4}, 宋宏权^{1,2,3,4}, 刘鹏飞^{2,4}, 李霄阳^{1,4}, 王团徽^{1,4}

(1. 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室(河南大学), 开封 475004; 2. 河南大学城市大数据研究所, 开封 475004; 3. 河南省大气污染综合防治与生态安全重点实验室(河南大学), 开封 475004;
4. 河南大学环境与规划学院, 开封 475004)

摘要: 中国北方干旱/半干旱区是全球主要的沙尘源区之一, 风蚀造成的沙尘排放可导致大量的土壤有机质(SOM)与养分流失, 并通过传输与沉降过程对其进行空间再分配, 对空气质量、气候变化、植被生长及生物地球化学过程等具有重要影响。本文利用WRF/Chem(Weather Research Forecasting with Chemistry)v3.7.1大气化学传输模型, 对1980—2015年间中国北方沙尘排放及其引起的SOM、全氮(TN)与全磷(TP)的时空变化过程进行了精细化模拟, 探究了中国北方风蚀引起的SOM、TN与TP养分流失的时空变化特征。结果表明: ① 1980—2015年来平均每年约有66.59 Tg的沙尘颗粒排放至大气; ② 沙尘排放具有较大的时空差异, 沙尘排放源区主要集中在新疆东部、内蒙古西部的巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠等地区; ③ 每年因沙尘排放引起的SOM、TN和TP流失量分别约为0.07 Tg、0.004 Tg和0.005 Tg; ④ 1980—2015年间中国北方沙尘排放及其引起的SOM、TN与TP的流失量具有较强的年际波动, 未呈现显著的趋势性变化特征。本研究对于认知风蚀在碳循环与养分循环过程中的作用, 以及对深入了解中国北方的土地退化机理具有重要意义。

关键词: 中国北方; 风蚀; WRF/Chem; 土壤有机质; 土壤养分; 时空特征

DOI: 10.11821/dlyj020181424

1 引言

风蚀是一个受自然与人文因素共同驱动的复杂时空动态过程^[1-3], 是引起土壤退化、荒漠化、土壤养分与有机质(SOM)变异的重要原因之一^[4-6]。风蚀具有巨大的起沙、运移与空间再分配能力, 可导致SOM与养分的时空再分配, 对区域乃至全球的空气质量、气候变化、人体健康、生态系统等具有重要影响^[7]。然而, 因风蚀造成的土壤有机质与养分动态变化及其在碳循环与养分循环估算中的作用仍然未知^[8], 是造成碳与养分收支估算不确定性的重要因素之一^[3,9]。因此, 研究风蚀对SOM与养分流失的影响具有重要的理论与现实意义。

近年来, 国内外相关学者开展了风蚀对土壤有机质与养分流失的影响研究。多个样地实验通过长期观测发现风蚀可造成地表SOM与养分的显著流失^[7,10-16]。利用遥感与地面观测数据, 相关学者研究了风蚀对土壤有机碳含量的影响^[17-19], 概略估算了风蚀影响下中

收稿日期: 2018-12-26; 修订日期: 2019-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(41401107); 河南省基础前沿与技术研究项目(162300410132)

作者简介: 赵海鹏(1995-), 男, 河南禹州人, 硕士, 研究方向为空间分析、地理建模。E-mail: zhaohp@vip.henu.edu.cn

通讯作者: 宋宏权(1986-), 男, 河南民权人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为地理建模与模拟、视频GIS。

E-mail: hqsong@henu.edu.cn

国西北部干旱半干旱农牧区土壤有机碳年均流失量(60~75 Tg)。利用风蚀模型与土壤普查数据, Chappell等粗略估算了澳大利亚每年约5.83 Tg CO₂在碳收支计算中被忽略^[20]。但目前的研究主要集中在风蚀对土壤有机质流失的影响,且侧重于定性分析与较小空间尺度的样地实验。

鉴于此,本文利用WRF/Chem(Weather Research Forecasting with Chemistry)v3.7.1大气化学传输模型,对1980—2015年间中国北方沙尘排放的时空变化过程进行精细化模拟,结合中国SOM、全氮(TN)与全磷(TP)空间分布数据,估算沙尘排放引起的SOM、TN与TP流失量,并分析其时空变化特征。本研究对于了解中国北方沙尘排放的时空变化规律,研究风蚀作用对沙尘排放源区碳循环及养分流失的影响具有重要参考价值。

2 方法与数据

2.1 基于WRF/Chem的土壤有机质与养分流失估算

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^[21]。WRF/Chem考虑了大气污染物的平流输送、湍流扩散、干湿沉降、辐射传输等主要大气物理过程,以及多相化学、气溶胶演变等大气化学过程。在模拟计算过程中,气象与化学模块采用相同的格点、时间步长、传输方案和物理方案,实现了太阳辐射、大气动力及气溶胶化学等多过程、多物种的在线耦合与反馈^[22]。

Shao等于2011年提出了一种新的起沙机制模型(Shao11)^[23],是对Shao2004年起沙方案(Shao04)的简化^[24]。Shao11起沙方案基于风蚀起沙物理学机制,认为粒径为d_s的沙粒跃移运动可产生下式所示粒径为d_i的沙尘通量:

$$F(d_i, d_s) = c_y \eta_f \sigma_p (1 + \sigma_m) g \frac{Q_{ds}}{u_*^2} \quad (1)$$

式中:F(d_i, d_s)为d_s粒径沙尘跃移产生的d_i粒径沙尘通量(kg/(m²·s));c_y为无量纲比例系数(1×10⁻⁴)^[24];η_f为释放至大气中土壤颗粒的质量比例,计算方法参见文献[25];σ_p为沙尘颗粒占土壤团聚体的质量比例,具体计算方法参见文献[23];σ_m为有效轰击率,详见文献[23];g为重力加速度(9.8 m/s²);u_{*}为摩阻风速;Q_{ds}为粒径为d_s的沙尘横向跃移通量(kg/(m·s)),公式为:

$$Q(d_s) = \begin{cases} (1 - c_f) c_0 \frac{\rho}{g} \left(1 - \frac{u_*}{u_{*t}}\right) \left(1 + \frac{u_{*t}}{u_*}\right) & u_* > u_{*t} \\ 0 & u_* \leq u_{*t} \end{cases} \quad (2)$$

式中:c_f为覆盖有植被、河流、湖泊、岩石与积雪,以及地表冰冻区域等非可蚀地表所占比例,WRF/Chem采用Ginoux等开发的全球可蚀性地图获取c_f值^[26];c₀是可调节经验比例系数,取值范围在1.8~3.1之间,现有研究表明c₀=2.6时在中国北方具有较好的模拟效果^[27];ρ为空气密度(kg/m³);u_{*t}为临界摩阻风速(m/s),计算方法参见文献[25]。

u_{*}为摩阻风速(m/s),公式为:

$$u_* = \frac{u_z k}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (3)$$

式中:u_z为z高度的风速(m/s),z一般取值为10 m;z₀为空气动力学粗糙长度(m),计算方法参见文献[28]。相关研究已证明Shao11与Shao04具有同等的模拟效果^[27,29],且已被

广泛应用于东亚地区的沙尘模拟。自2013年起该起沙方案已被集成在WRF/Chem模式，并将沙尘粒径划分为0~2 μm、2~3.6 μm、3.6~6 μm、6~12 μm及12~20 μm等五个等级，用于模拟沙尘的起沙、传输和沉降过程^[30]。

基于WRF/Chem模拟计算沙尘排放量，利用土壤有机质与养分含量空间分布，计算风蚀引起的土壤表层有机质与养分流失通量空间分布，公式为：

$$ON_E = M \times ON \quad (4)$$

式中： ON_E 为土壤有机质或养分流失通量($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)； M 为沙尘排放通量($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)； ON 是研究区表层土壤中土壤有机质或养分的含量($\text{g}/100 \text{ g}$)。

2.2 研究区与数据来源

本文的研究区为易发生风蚀的中国北方干旱/半干旱区，属于温带大陆性气候。该区域的主要植被类型是草原和沙漠（图1），区域总面积约占全国面积的30%，年均降水量小于400 mm，年均气温在0~13 °C之间。

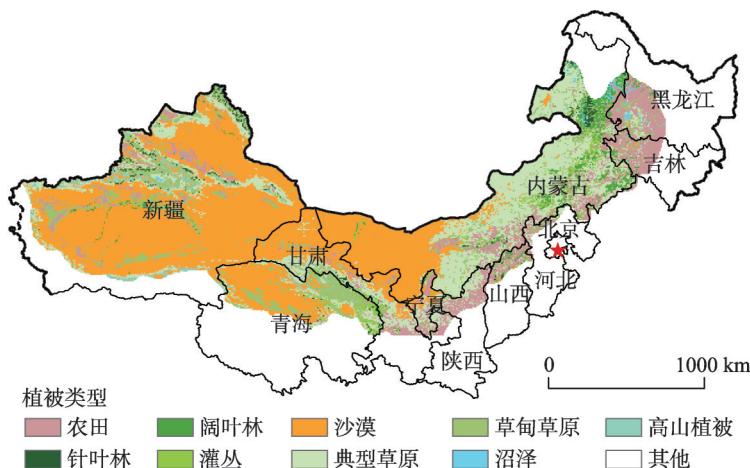


图1 研究区植被类型空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of vegetation type in the research region

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图（审图号为GS（2016）1569号）绘制，底图无修改。

利用美国国家环境预报中心（NCEP）和NCAR联合推出的NCEP/NCAR全球再分析资料作为模式的气象场初始条件，其空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，时间分辨率为6h。表层土壤的SOM、TN与TP含量空间分布数据来自中国陆地表面模型土壤数据库（SDCLSM）^[31]。SDCLSM数据库是由8979个土壤剖面数据及结合1:100万中国土壤图制作而成，其空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。

2.3 参数设置与模拟结果评估

本研究采用3.7.1版本的WRF/Chem大气化学传输模式，模式采用Lambert地图投影，网格空间分辨率设置为36 km，时间分辨率为1 h，中心点经纬度为100°E, 41°N，经向网格数为140，纬向网格数为100，垂直为28层。模式采用表1的参数化方案，为提高风速、温度、降雨等关键气象参数的模拟精度，在模拟过程中启用了四维数据同化（Four-Dimensional Data Assimilation, FD-

表1 模式参数化方案

Tab. 1 Configurations of WRF/Chem options

模型参数	参数设置
长波辐射模型	RRTM长波辐射
短波辐射模型	RRTM短波辐射
近地面层	Revised MM5 MO
微物理方案	Morrison 2-mom
陆面参数	Noah LSM
积云	Multi-scale Kain-Fritsch
边界层	Noah LSM

DA) 技术。将模拟时段设置为1979年12月1日00时—2015年12月31日23时(北京时间),为减少初始条件对模拟结果的影响,1979年12月份的模拟结果不参与本文的分析。

气象参数对沙尘排放模拟具有重要影响,利用NOAA及美国国家气候数据中心(NCDC)469个站点的气象数据,对本文WRF/Chem模拟的气象参数进行了评估(表2)。气象观测数据为距离地面2 m高度的气温(T2)、降水(PCP)、距离地面10 m高度的风速(WSP10)及风向(WDR10),时间分辨率为3 h。本文采用的统计指标包括平均偏差(MB)、标准化平均偏差(NMB)、标准化平均误差(NME)、均方根误差(RMSE)和相关系数(R)(表2),其计算方法详见文献[32]。总体而言,地表气温观测值与模拟值的相关系数可达0.9以上,表明模式能够较准确地模拟各季节的地表气温。风速在一定程度上被高估,其相关系数在春季、夏季与秋季达到了0.5以上。虽然风向的模拟结果稍差,但是本研究未涉及沙尘的传输与沉降过程,利用此参数设置可满足对沙尘排放模拟的需求。

表2 WRF/Chem气象参数模拟结果评估

Tab. 2 Evaluation of meteorological parameters simulated by WRF/Chem

气象参数(单位)	季节	平均观测值	平均模拟值	MB	NMB(%)	NME(%)	RMSE	R
T2 (℃)	冬季	-0.8	-1.9	-1.1	-0.5	2.6	3.5	0.9
	春季	6.1	5.2	-0.9	-15.1	37.9	3.4	0.9
	夏季	21.9	21.7	-0.2	-0.1	8.9	3.3	0.9
	秋季	18.7	17.8	-0.9	-4.6	9.3	3.1	0.9
WSP10 (m/s)	冬季	1.9	3.2	1.3	69.0	76.1	1.7	0.4
	春季	2.5	3.5	1.0	43.0	51.1	1.5	0.5
	夏季	2.2	3.2	1.0	42.1	49.8	1.3	0.5
	秋季	1.9	2.9	1.0	49.4	56.4	1.3	0.5
WDR10 (°)	冬季	210.5	190.1	-20.4	-12.7	46.9	189.0	0.2
	春季	206.4	185.2	-21.3	-13.4	47.3	165.2	0.2
	夏季	201.5	167.3	-34.2	-15.6	47.3	194.7	0.2
	秋季	211.4	172.7	-38.7	-16.3	48.6	192.7	0.2
PCP(mm/d)	冬季	0.9	0.7	-0.2	-10.6	107.3	6.4	0.5
	春季	2.8	2.4	-0.4	-17.2	97.8	9.5	0.4
	夏季	3.5	4.3	0.8	12.2	139.7	7.3	0.5
	秋季	1.8	2.1	0.3	7.2	123.6	8.5	0.3

3 结果分析

3.1 沙尘排放时空变化

模拟结果显示,1980—2015年间中国北方的沙尘排放呈现较大的年际波动,每年约66.59 Tg沙尘排放至大气,2001年的沙尘排放量最大(99.28 Tg),沙尘排放量最低的年份为2003年(42.79 Tg)(图2)。其中,1986年、1996年、2001年和2010年是沙尘排放量较大的年份,其排放量分别达到了79.83 Tg、81.52 Tg、99.28 Tg和81.65 Tg;1988年、2003年和2005年则是该区域沙尘排放量较小的年份,每年分别向大气排放约53.77 Tg、42.79 Tg和46.32 Tg的沙尘颗粒。

中国北方的沙尘排放具有较大的空间分异特征(图3a),主要集中分布在内蒙古西

部、河西走廊、新疆东部、塔克拉玛干沙漠等地区。大部分易发生风蚀的区域年均沙尘排放通量大于 $30 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，部分区域可达 $150 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 以上，如塔克拉玛干沙漠东部、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠以及乌兰布和沙漠等地，该区域的植被盖度大都低于 20% 且年均降水量小于 400 mm。1980—2015 年间，中国北方沙尘排放的变化趋势存在较大空间差异（图 3b）。新疆地区及内蒙古西部的沙尘排放整体呈增加态势，而在甘肃西北部、内蒙古中部、新疆东部戈壁部分地区及青海北部部分地区呈下降趋势。总体来讲，沙尘排放呈增加态势的区域面积大于沙尘排放减少的面积。

吉西部的沙尘排放整体呈增加态势，而在甘肃西北部、内蒙古中部、新疆东部戈壁部分地区及青海北部部分地区呈下降趋势。总体来讲，沙尘排放呈增加态势的区域面积大于沙尘排放减少的面积。

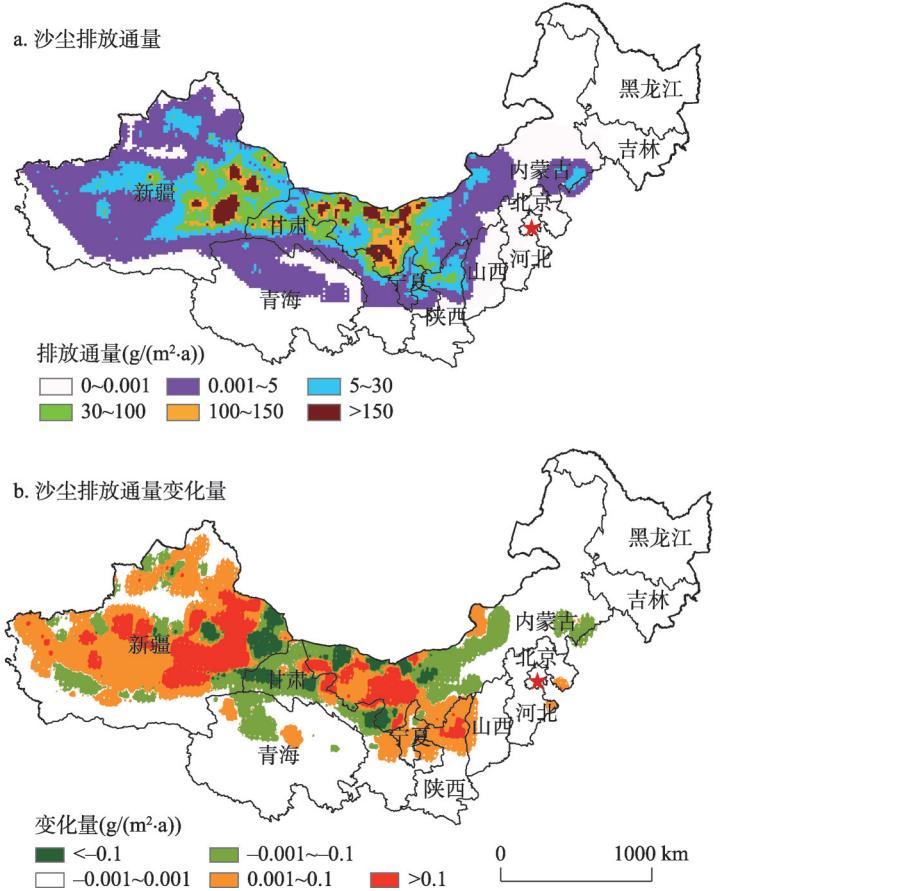


图 2 1980—2015 年中国北方沙尘排放量年际变化

Fig. 2 Inter-annual variations of dust emissions
in northern China from 1980 to 2015

Fig. 3 Spatial distribution of annual mean dust flux and trends of annual mean dust flux

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图（审图号为 GS（2016）1569 号）绘制，底图无修改。

3.2 土壤有机质流失时空特征

近40年中国北方沙尘排放导致的SOM流失具有较大的年际波动,每年约有0.07 Tg的SOM排放至大气,其中年最大与最小SOM流失量分别发生在2001年(0.10 Tg)与2003年(0.07 Tg)(图4)。与沙尘排放的变化趋势相似,1986年、1996年、2001年和2010年的SOM流失量较大,分别达0.079 Tg、0.081 Tg、0.099 Tg和0.081 Tg;1999年、2003年和2005年则是SOM流失较少的年份,其流失量分别为0.055 Tg、0.044 Tg以及0.047 Tg。

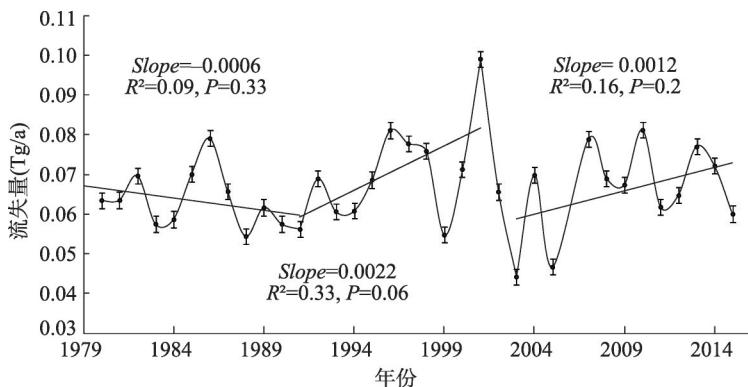


图4 土壤有机质流失量年际变化
Fig. 4 Inter-annual variations of SOM losses

土壤有机质流失较严重的区域主要分布在内蒙古西部、甘肃西北部及新疆东部等地,这些地区土壤有机质的年均流失通量均大于0.5 g/(m²·a)(5 kg/(hm²·a))(图5a)。从1980—2015年间土壤有机质流失通量变化趋势来看(图5b),塔里木盆地北侧与东侧、以及内蒙古西部地区呈增加态势,而在新疆东部与甘肃交界部分地区以及内蒙古西部部分地区呈下降趋势,并且土壤有机质流失通量增加的地区范围较广。

3.3 土壤氮与磷流失时空特征

1980—2015年间,中国北方因风蚀影响每年分别有0.004 Tg和0.005 Tg的土壤氮与磷排放至大气。2001年的土壤氮与磷流失量最大,分别为0.006 Tg与0.007 Tg,最小土壤氮与磷流失量发生在2003年,均为0.003 Tg(图6)。土壤氮与磷流失量年际变化特征与沙尘排放及土壤有机质流失相似(图6),1986年、1996年、2001年与2010年是土壤氮和磷流失较为严重的几个年份,流失量均超过年均流失量的17%;1999年、2003年和2005年则是土壤氮与磷流失量相对较少的年份。

因风蚀作用引起的土壤氮与磷流失主要分布在内蒙古西部、甘肃西北部及新疆东部,且土壤磷的流失比土壤氮更为严重(图7a, 图7c, 见第2785页),这些区域年均流失通量可达0.1g/(m²·a)以上。近40年来,内蒙古西部部分地区、新疆东部及塔里木盆地部分地区的土壤氮与磷流失通量呈增加趋势,而土壤氮与磷流失量降低的区域较少,零星分布在内蒙古西部部分地区、新疆东部及甘肃西部部分区域(图7b, 图7d, 见第2785页)。

4 讨论

风蚀导致的沙尘排放受气候、土壤、植被、土地利用、社会经济发展等多方面因素的影响,其成因机理较为复杂。本文利用WRF/Chem模拟了沙尘排放时空过程,基于土

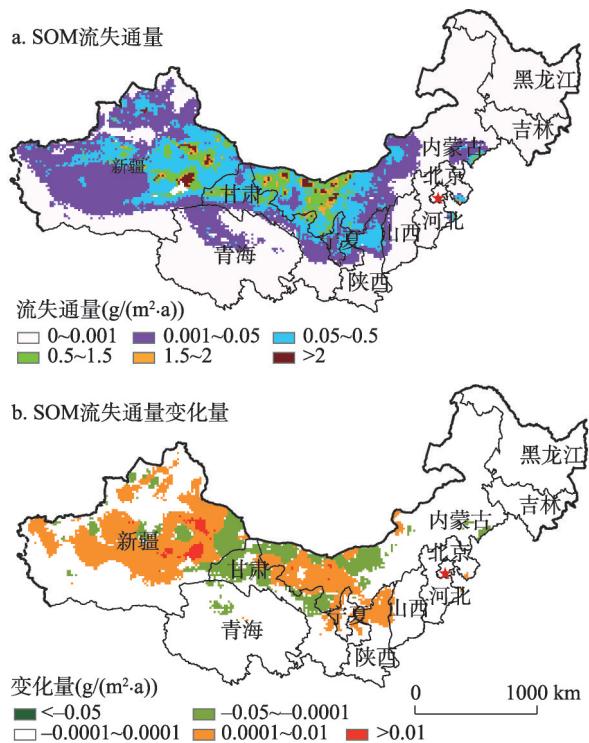


图5 年均土壤有机质流失通量及其变化趋势空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of annual mean SOM loss flux and trends in annual mean SOM loss flux

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图（审图号为GS（2016）1569号）绘制，底图无修改。

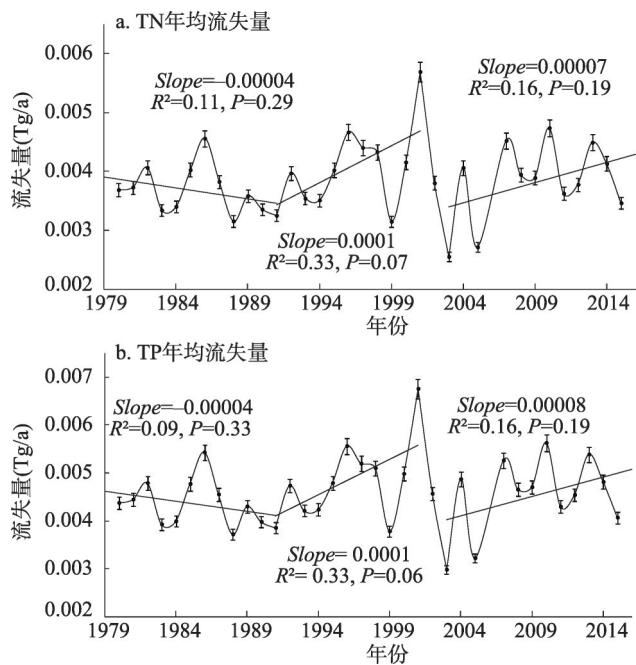


图6 1980—2015年土壤氮与磷流失量年际变化

Fig. 6 Inter-annual variations of losses of soil nitrogen and phosphorus under wind erosion during 1980 to 2015

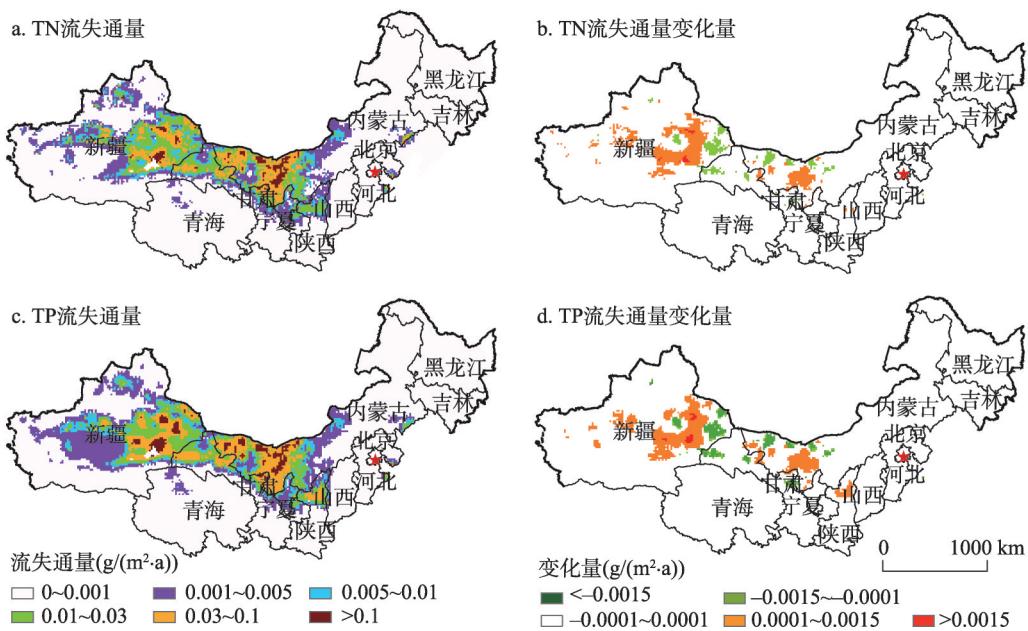


图7 年均土壤氮与磷流失通量及其变化趋势空间分布
Fig. 7 Spatial distributions of annual mean TN and TP losses flux and trends
in annual mean losses of TN and TP in China

注: 该图基于国家测绘地理信息局标准地图(审图号为GS(2016)1569号)绘制, 底图无修改。

壤有机质与养分的空间分布数据来估算 SOM、TN 与 TP 的流失量。沙尘排放量的模拟精度决定了 SOM、TN 与 TP 流失量的估算精确度, 因难以获取中国的沙尘排放实际观测数据, 实现对本模型沙尘排放模拟结果的精度评估较为困难。已有大量研究利用多种起沙机制模型对中国部分地区的沙尘排放量进行了估算^[33-37], 相关研究及敏感性实验表明, Shao11 起沙机制模型可较好的模拟东亚地区的沙尘排放, 且能够很好的对戈壁区域的起沙进行模拟^[38-40]。本研究模拟得到的沙尘排放时空变化特征与相关研究报道基本吻合^[41], 春季沙尘排放($0\sim20 \mu\text{m}$)通量约为 $18 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 与文献[39]对中国干旱半干旱区 3 月与 4 月的沙尘排放通量模拟结果相当 ($4 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。在浑善达克沙地及其周边区域模拟得到的沙尘排放量并不明显, 这可能是因为浑善达克沙地及其周边表层土壤以黏土和细沙为主, 土壤颗粒占比最大的粒径范围在 $50\sim250 \mu\text{m}$ 之间^[42], 而本文所模拟的沙尘排放粒径在 $20 \mu\text{m}$ 以下。

本研究发现塔克拉玛干沙漠和内蒙古西部大戈壁是中国北方两大沙尘源区, 这与前人的研究结果相符^[43]。近 40 年来中国北方沙尘排放具有较强的年际波动, 与沙尘暴事件发生的时间变化特征具有较好的一致性^[37]。2001 年的沙尘排放量最大, 主要原因是 2000 年中国北方大部分区域的降水量与往年相比偏少, 同时大部分地区在夏季出现了持续性的极端高温天气, 直接影响了植被生长并导致植被盖度偏低^[44], 从而造成 2001 年的沙尘排放量偏大。而 2003 年与 2005 年中国北方春季的降水偏多, 土壤湿度较大, 促进植被生长, 植被覆盖度较大, 同时大风天气日数较少^[45,46], 进而造成了这两年的沙尘排放量较少。本文估算的表层 SOM 与 TN 年流失通量分别为 $(1\sim204) \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $(0.1\sim8.8) \text{ kg}/\text{hm}^2$, 稍低于已有研究报道的沙尘暴事件引起的土壤表层碳($(53\sim1044)\text{kg}/\text{hm}^2$)与氮($(5\sim90)$

kg / hm^2 ）年流失量估算值^[47]，可能是由于已有研究主要关注于碳氮含量较高的农田表土流失^[15]。同时，对于土壤流失量的估算大都根据遥感等方法提取的风蚀强度或模数来完成的^[48]，未对土壤流失量进行精细化的模拟估算，导致了对表层土壤流失量的高估。另外，本研究仅考虑土壤粒径在 $20 \mu\text{m}$ 以下易于释放至大气的土壤颗粒，也是本文土壤碳与氮流失量低于其他估算结果^[18]的原因之一。

本文利用 WRF/Chem 对中国北方风蚀作用下的土壤有机质与养分流失量进行了估算，可为顾及风蚀过程的生态系统模型研发提供支持。沙尘携带的 SOM 与养分通过传输与沉降导致其在空间上进行再分配，可影响沙尘源区及其下游的各类生态系统，急需进一步研究沙尘过程引起的 SOM 与养分的源汇效应、沙尘过程对生态系统结构和功能的影响等。

5 结论

通过以上分析，可以得出以下结论：

(1) 1980—2015 年间，中国沙尘排放最严重的地区出现在新疆东部、内蒙古西部、巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠地区，这些区域的年均沙尘排放通量大于 150 g/m^2 。平均每年约有 66.59 Tg 的沙尘排放至大气，2001 年沙尘排放量是近 40 年最多的年份 (99.3 Tg)，沙尘排放最少的年份出现在 2003 年 (42.8 Tg)。

(2) 1980—2015 年间中国沙尘排放增加的面积大于沙尘排放减少的面积。其中沙尘排放通量年增加量大于 0.1 g/m^2 的区域主要集中在新疆东部大部分区域、新疆中部部分区域、内蒙古中西部及陕西北部部分区域。

(3) 1980—2015 年中国北方因风蚀每年引起的 SOM、TN 与 TP 流失量分别为 0.07 Tg 、 0.004 Tg 和 0.005 Tg ，SOM、TN 及 TP 的最高年（2001 年）流失量可达 0.1 Tg 、 0.006 Tg 和 0.007 Tg 。在该段时间中国北方沙尘排放及其引起的土壤有机质与养分流失无明显的变化趋势，且呈现较大的年际波动。风蚀作用下 SOM、TN 与 TP 流失较严重的地区主要分布在内蒙古西部、新疆东部及甘肃西北部，且大部分区域的流失量呈增加态势。

参考文献(References)

- [1] 苏永中, 赵文智. 土壤有机碳动态: 风蚀效应. 生态学报, 2005, 25(8): 2049-2054. [Su Yongzhong, Zhao Wenzhi. Soil organic carbon dynamics: Wind erosion effect. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 2049-2054.]
- [2] Neff J C, Ballantyne A P, Farmer G L, et al. Increasing eolian dust deposition in the western United States linked to human activity. Nature Geoscience, 2008, 1(3): 189-195.
- [3] Chappell A, Sanderman J, Thomas M, et al. The dynamics of soil redistribution and the implications for soil organic carbon accounting in agricultural south-eastern Australia. Global Change Biology, 2012, 18(6): 2081-2088.
- [4] Jickells T D, An Z S, Andersen K K, et al. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. Science, 2005, 308(5718): 67-71.
- [5] Kok J F. A scaling theory for the size distribution of emitted dust aerosols suggests climate models underestimate the size of the global dust cycle. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(3): 1016-1021.
- [6] Munson S M, Belnap J, Okin G S. Responses of wind erosion to climate-induced vegetation changes on the Colorado Plateau. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(10): 3854-3859.
- [7] 王训明, 周娜, 郎丽丽, 等. 风沙活动对陆地生态系统影响研究进展. 地球科学进展, 2015, 30(6): 627-635. [Wang Xunming, Zhou Na, Lang Lili, et al. Aeolian processes and their effects on terrestrial ecosystem: An overview. Advances in Earth Science, 2015, 30(6): 627-635.]
- [8] Van O K, Quine T A, Govers G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle. Science, 2007, 318(5850): 626-629.
- [9] Webb N P, Chappell A, Strong C L, et al. The significance of carbon-enriched dust for global carbon accounting. Global

- Change Biology, 2012, 18(11): 3275-3278.
- [10] Li F R, Zhao W Z, Liu J L, et al. Degraded vegetation and wind erosion influence soil carbon, nitrogen and phosphorus accumulation in sandy grasslands. Plant and Soil, 2009, 317(1-2): 79-92.
- [11] Ikazaki K, Shinjo H, Tanaka U, et al. Aeolian materials sampler for measuring surface flux of soil nitrogen and carbon during wind erosion events in the Sahel, West Africa. Transactions of the ASABE, 2011, 54(3): 983-990.
- [12] Faghihinia M, Afzali S F. Effects of wind erosion on soil organic carbon dynamics and other soil properties: Dejgah catchment, Farashband County, Shiraz Province, Iran. African Journal of Agricultural Research, 2013, 8(34): 4452-4459.
- [13] Santra P, Mertia R S, Kumawat R N, et al. Loss of soil carbon and nitrogen through wind erosion in the Indian Thar Desert. Journal of Agricultural Physics, 2013, 13(1): 13-21.
- [14] 高静静. 风蚀和放牧对温带草原碳循环的影响. 开封: 河南大学硕士学位论文, 2013. [Gao Jingjing. Effects of wind erosion and grazing on carbon cycle in temperate grasslands. Kaifeng: Master Dissertation of Henan University, 2013.]
- [15] 朱孟郡, 平严, 宋阳, 等. 风蚀作用下农田土壤碳损失的估算. 水土保持研究, 2008, (1): 226-228, 231. [Zhu Mengjun, Yan Ping, Song Yang, et al. The influence of wind erosion on soil carbon pool of cropland and an assessment. Research of Soil and Water Conservation, 2008, (1): 226-228, 231.]
- [16] 连杰, 赵学勇, 王少昆, 等. 科尔沁沙地风蚀作用对土壤碳、氮分布的影响. 生态学杂志, 2013, 32(03): 529-535. [Lian Jie, Zhao Xueyong, Wang Shaokun, et al. Impacts of wind erosion on the distribution patterns of soil organic carbon and total nitrogen in Horqin Sandy Land, China. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(3): 529-535.]
- [17] Harper R J, Gilkes R J, Hill M J, et al. Wind erosion and soil carbon dynamics in south-western Australia. Aeolian Research, 2010, 1(3-4): 129-141.
- [18] 胡云锋, 王绍强, 杨凤亭. 风蚀作用下的土壤碳库变化及在中国的初步估算. 地理研究, 2004, (6): 760-768+878. [Hu Yunfeng, Wang Shaoqiang, Yang Fengting. The influence of wind erosion on soil organic carbon pool and an assessment in China. Geographical Research, 2004, (6): 760-768+878.]
- [19] Yan H, Wang S, Wang C, et al. Losses of soil organic carbon under wind erosion in China. Global Change Biology, 2005, 11(5): 828-840.
- [20] Chappell A, Webb N P, Butler H J, et al. Soil organic carbon dust emission: An omitted global source of atmospheric CO₂. Global Change Biology, 2013, 19(10): 3238-3244.
- [21] 庞杨, 韩志伟, 朱彬, 等. 利用WRF-Chem模拟研究京津冀地区夏季大气污染物的分布和演变. 大气科学学报, 2013, 36(6): 674-682. [Pang Yang, Han Zhiwei, Zhu Bin, et al. A model study on distribution and evolution of atmospheric pollutants over Beijing-Tianjin-Hebei region in summertime with WRF-Chem. Transactions of Atmospheric Sciences, 2013, 36(6): 674-682.]
- [22] 刘琳, 王玲玲, 白永清, 等. 应用WRF/Chem模拟河南冬季大气颗粒物的区域输送特征. 环境科学学报, 2017, 37(5): 1843-1854. [Liu Lin, Wang Lingling, Bai Yongqing, et al. Simulation for the impacts of regional transport on winter particulate matter levels over Henan base on WRF/Chem model. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(5): 1843-1854.]
- [23] Shao Y P, Ishizuka M, Mikami M, et al. Parameterization of size-resolved dust emission and validation with measurements. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D8): D08203.
- [24] Shao Y P. Simplification of a dust emission scheme and comparison with data. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D10): D10202.
- [25] Shao Y P, Jung E, Leslie L M. Numerical prediction of northeast Asian dust storms using an integrated wind erosion modeling system. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2002, 107(D24): AAC 21-1-AAC 21-23.
- [26] Ginoux P, Chin M, Tegen I, et al. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D17): 20255-20273.
- [27] 刘筱冉. 西北地区沙尘天气的数值模拟及其对典型城市大气环境影响的研究. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2018. [Liu Xiaoran. Research on numerical simulation of dust storms in Northwest region and their effects on atmospheric environment in typical city. Lanzhou: Master Dissertation of Lanzhou University, 2018.]
- [28] Kimura R, Shinoda M. Spatial distribution of threshold wind speeds for dust outbreaks in northeast Asia. Geomorphology, 2010, 114(3): 319-325.
- [29] 刘筱冉, 王金艳, 邱继勇, 等. 起沙方案对西北地区沙尘过程模拟的影响. 环境保护科学, 2018, 44(04): 69-76. [Liu Xiaoran, Wang Jinyan, Qiu Jiyong, et al. Impact of dust emission schemes on the simulation of dust storms in the northwest region. Environmental Protection Science, 2018, 44(4): 69-76.]
- [30] 吴成来, 林朝晖. WRF/Chem模式中两种起沙参数化方案对东亚地区一次强沙尘暴过程模拟的影响. 气候与环境研究, 2014, 19(4): 419-436. [Wu Chenglai, Lin Zhaohui. Impact of two different dust emission schemes on the simulation of a

- severe dust storm in East Asia using the WRF/Chem model. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19(4): 419-436.]
- [31] Shangguan W, Dai Y, Liu B, et al. A China dataset of soil properties for land surface modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2013, 5(2): 212-224.
- [32] Zhang Y, Liu P, Pun B, et al. A comprehensive performance evaluation of MM5-CMAQ for the Summer 1999 Southern oxidants study episode part I: Evaluation protocols, databases, and meteorological predictions. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(26): 4825-4838.
- [33] 邢春燕, 郭中领, 常春平, 等. RWEQ 模型在河北坝上地区的适用性. *中国沙漠*, 2018, 38(6): 66-78. [Xing Chunyan, Guo Zhongling, Chang Chunping, et al. Validation of RWEQ model in the Bashang area, Hebei, China. *Journal of Desert Research*, 2018, 38(6): 66-78.]
- [34] 曹月娥, 吴芳芳, 张婷婷, 等. 基于风蚀模型的准东地区土壤风蚀研究. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(3): 94-99. [Cao Yuee, Wu Fangfang, Zhang Tingting, et al. Research and application of wind erosion model in Zhundong area. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(3): 94-99.]
- [35] 王仁德, 常春平, 郭中领, 等. 适用于河北坝上地区的农田风蚀经验模型. *中国沙漠*, 2017, 37(6): 23-30. [Wang Rende, Chang Chunping, Guo Zhongling, et al. A wind erosion empirical model of farmland applied in Bashang area of Hebei, China. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(6): 23-30.]
- [36] 巩国丽, 刘纪远, 邵全琴. 基于 RWEQ 的 20 世纪 90 年代以来内蒙古锡林郭勒盟土壤风蚀研究. *地理科学进展*, 2014, 33(6): 825-834. [Gong Guoli, Liu Jiyuan, Shao Quanqin. Wind erosion in Xilingol League, Inner Mongolia since the 1990s using the revised wind erosion equation. *Progress in Geography*, 2014, 33(6): 825-834.]
- [37] Song H Q, Zhang K S, Piao S L, et al. Spatial and temporal variations of spring dust emissions in northern China over the last 30 years. *Atmospheric Environment*, 2016, 126(3): 117-127.
- [38] Du H Q, Xue X, Wang T. Estimation of the quantity of aeolian saltation sediments blown into the Yellow River from the Ulanbuh Desert, China. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(2): 205-218.
- [39] Su L, Fung J C H. Sensitivities of WRF-Chem to dust emission schemes and land surface properties in simulating dust cycles during springtime over East Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(21): 11, 215-11, 230.
- [40] Mao R, Ho C H, Shao Y, et al. Influence of Arctic Oscillation on dust activity over northeast Asia. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(2): 326-337.
- [41] Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(24): 2272-2275.
- [42] 刘树林, 王涛, 郭坚. 浑善达克沙地春季风沙活动特征观测研究. *中国沙漠*, 2006, 26(3): 356-361. [Liu Shulin, Wang Tao, Guo Jian. Characteristics of blown sand activities in Hunshandake Sandy Land in spring. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(3): 356-361.]
- [43] 成天涛, 吕达仁, 徐永福. 浑善达克沙地起沙率和起沙量的估计. *高原气象*, 2006, (2): 236-241. [Cheng Tiantao, Lv Daren, Xu Yongfu. Emistation on dust emission from ground surface in Hunshandake Sandland. *Plateau Meteorology*, 2006, (2): 236-241.]
- [44] 吴晓京, 陆均天, 张晓虎, 等. 2001 年春季沙尘天气分析. *国土资源遥感*, 2001, (3): 8-10, 24-67. [Wu Xiaojing, Lu Juntian, Zhang Xiaohu, et al. Synoptic analysis on the sand-dust storm in spring, 2001. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2001, (3): 8-10, 24-67.]
- [45] 牛若芸, 周自江, 刘月巍, 等. 2003 年春季我国沙尘天气异常偏少的成因分析. *气候与环境研究*, 2004, (1): 24-33. [Niu Ruoyun, Zhou Zijiang, Liu Yuwei, et al. Causes of abnormal decreasing of dusty weather in China during the spring of 2003. *Climatic and Environmental Research*, 2004, (1): 24-33.]
- [46] 牛若芸, 蔡梦宁, 邹旭恺, 等. 2005 年我国沙尘天气的若干特征分析. *气候与环境研究*, 2007, (3): 358-364. [Niu Ruoyun, Cai Xiangning, Zou Xukai, et al. The characteristics of sand and dust weather events in China in 2005. *Climatic and Environmental Research*, 2007, (3): 358-364.]
- [47] Wang X B, Oenema O, Hoogmoed W B, et al. Dust storm erosion and its impact on soil carbon and nitrogen losses in northern China. *CATENA*, 2006, 66(3): 0-227.
- [48] 刘晓东, 宋友桂, 孙有斌, 等. 亚洲风尘循环的过程、机制和环境效应. *地球环境学报*, 2016, 7(6): 613-619. [Liu Xiaodong, Song Yougui, Sun Youbin, et al. Process, mechanism and environmental effect of the dust cycle in Asia. *Journal of Earth Environment*, 2016, 7(6): 613-619.]

Spatio-temporal variations of soil organic matter and nutrient losses resulted from wind erosion in northern China from 1980 to 2015

ZHAO Haipeng^{1,4}, SONG Hongquan^{1,2,3,4}, LIU Pengfei^{2,4}, LI Xiaoyang^{1,4}, WANG Tuanhui^{1,4}

(1. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions (Henan University), Ministry of Education, Kaifeng 475004, Henan, China; 2. Institute of Urban Big Data, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China; 3. Henan Key Laboratory of Integrated Air Pollution Control and Ecological Security, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China;
4. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: The arid and semi-arid region in northern China is one of the major dust source areas and a major contributor to global dust emissions in the world. The area affected by wind erosion in China accounts for approximately 30% of the national territory, which is a primary contributor to atmospheric dust aerosols in East Asia and frequently transported over long distances to North Pacific Ocean, North America, and even Europe. Dust emissions resulted from wind erosion could generate a large amount of soil organic matter (SOM) and cause nutrient losses. Dust transportation and deposition processes of the wind erosion can redistribute the losses of SOM and nutrient, which can profoundly impact air quality, climate change, plant growth and productivity as well as ecosystem carbon (C) cycling and sequestration in China. However, how dust emissions affect SOM and nutrient losses in this region are poorly understood. In this paper, the WRF/Chem (Weather Research Forecasting model coupled with Chemistry) v3.7.1 atmospheric chemical transport model was adopted to simulate the spatio-temporal variations of dust emissions in northern China from 1980 to 2015. The spatio-temporal variations of losses of SOM, total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) resulted from wind erosion were calculated by the combination of simulated dust emissions and the spatial distribution of SOM, TN, and TP in the research region. Results showed that: (1) the annual dust emission was around 66.59 Tg (< 20 μm) over the past 40 years in northern China; (2) dust emissions showed large spatial and temporal disparities, and the dust source areas are mainly concentrated in regions such as eastern Xinjiang, the Badain Jaran Desert, and the Tengger Desert; (3) spatial patterns of SOM, TN, and TP losses were consistent with those of dust emission rates over the research region; (4) the annual losses of SOM, TN, and TP due to wind erosion are around 0.07 Tg, 0.004 Tg, and 0.005 Tg, respectively; (5) there were no obvious trends but large inter-annual fluctuations in dust emissions and the losses of SOM, TN, and TP resulted from wind erosion during 1980–2015 at the regional scale. Although numerous impacting factors can cause potential uncertainty in the estimation of SOM and nutrient losses by wind erosion, very little is known concerning the linkages between dust processes and the productivity and biogeochemical cycles of terrestrial ecosystems. Losses of SOM and nutrients by wind erosion should be included in projecting plant growth and ecosystem productivity, especially in dust storm-prone areas. It is critical to reduce the uncertainties in simulating regional biogeochemical cycling. This study is of great significance for the impacts of wind erosion on carbon cycle and nutrient cycling, as well as a deep understanding of the mechanism of land degradation in northern China.

Keywords: northern China; wind erosion; WRF/Chem; soil organic matter; soil nutrient; spatio-temporal variations