

DOI: 10.5846/stxb202107151906

赵志平, 齐永青, 汉瑞英, 肖能文, 李俊生. 近 20 年来京津冀地区土壤风蚀扬尘颗粒物排放变化. 生态学报, 2022, 42(19): 7910-7920.

Zhao Z P, Qi Y Q, Han R Y, Xiao N W, Li J S. Changes in the emission of dust particles from soil in the Beijing-Tianjin-Hebei region in the past 20 years. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7910-7920.

近 20 年来京津冀地区土壤风蚀扬尘颗粒物排放变化

赵志平¹, 齐永青², 汉瑞英¹, 肖能文¹, 李俊生^{1,*}

1 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

2 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050022

摘要: 京津冀地区是我国大气污染严重区域, 土壤扬尘颗粒物排放变化研究对于改善京津冀地区空气质量具有重要意义。收集 2000—2019 年京津冀地区气候、土壤、植被覆盖数据, 分析近 20 年来京津冀地区土壤扬尘颗粒物排放变化, 揭示其变化的影响因素。结果显示 2000—2019 年京津冀地区土壤扬尘源总悬浮颗粒物 (TSP) 排放系数均值为 $1.79 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 其中 PM₁₀ 占 8.99%, PM_{2.5} 占 0.25%。近 20 年土壤扬尘源 TSP 排放系数具有下降趋势, PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放系数变化过程与 TSP 一致。上述变化主要受气候因子变化影响, 其次受植被覆盖度影响。分析发现近 20 年来京津冀地区土壤扬尘源 TSP 排放系数变化主要受年降水量影响。沧州市、天津市和石家庄市土壤扬尘源 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放系数均值较高, 张家口市、保定市和沧州市土壤扬尘源 TSP 排放量占京津冀地区总量的 19.18%、12.98% 和 11.63%。耕地土壤扬尘排放量最大占京津冀地区总量的 59.83%, 是抑制土壤扬尘源颗粒物排放的重点关注对象, 其次为草地占 15.66%。2019 年邢台市土壤扬尘源 PM₁₀ 排放占观测值比例最高为 12.66%, 石家庄市和天津市占比也较高分别为 11.09% 和 10.30%, 沧州市和邯郸市占比分别为 8.63% 和 8.02%。上述地区环境管理部门均应关注土壤扬尘源颗粒物排放对空气质量的影响。

关键词: 气候因子; 植被覆盖; 土壤扬尘源; 颗粒物排放; 京津冀地区

Changes in the emission of dust particles from soil in the Beijing-Tianjin-Hebei region in the past 20 years

ZHAO Zhiping¹, QI Yongqing², HAN Ruiying¹, XIAO Nengwen¹, LI Junsheng^{1,*}

1 State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2 Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China

Abstract: Soil wind erosion is the process by which the topsoil material departs from the original position due to wind action. The source of soil dust is formed by the particles on the bare ground under the action of nature or manpower. The source of dust caused by soil wind erosion is the main source of fine particles. Particulate matter from the uncovered ground enters the atmosphere and causes air pollution. At present, haze pollution has been the main factor affecting the air quality in cities of China and it has become one of the important factors affecting people's happiness in life. Although the air quality is improving year by year, atmospheric particulate matter is still the primary pollutant that affects the air quality of many cities in China, and soil dust is one of the important factors that cause serious urban particulate pollution. The Beijing-Tianjin-Hebei region is an area with serious air pollution in China, and it is easily affected by sand and dust weather from the Inner Mongolia. According to the air quality status released by the Ministry of Ecology and Environment, only 53.1% of the days with good quality in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas are lower than the national average of 82.0%. Therefore, studying the changes in the emission of soil dust particles is of great significance for improving the air quality in the Beijing-Tianjin-Hebei region. In this study, we collected climate, soil, and vegetation coverage data in the Beijing-Tianjin-Hebei region, and analyzed the change of soil dust particulate emission in the region from 2000 to 2019. We also

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0501904); 生物多样性调查评估项目 (2019HJ2096001006)

收稿日期: 2021-07-15; 网络出版日期: 2022-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijsh@craes.org.cn

revealed the driving factors, with a view to provide scientific support for the Beijing-Tianjin-Hebei region to reduce the emission of soil dust particles and to improve the air quality together. The results show that from 2000 to 2019 the average total suspended particulate (TSP) emission coefficient of soil dust sources was $1.79 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, of which PM10 accounted for 8.99% and PM2.5 accounted for 0.25% in the Beijing-Tianjin-Hebei region. The TSP emission coefficient of soil dust source had a downward trend in the past 20 years, and the change processes of PM10 and PM2.5 emission coefficients were consistent with TSP. The trend was firstly affected by changes in climatic factors, and secondly by vegetation coverage. Further analysis found that the changes in the TSP emission coefficient of soil dust sources in the Beijing-Tianjin-Hebei region were mainly affected by the annual precipitation. The Normalized Difference Vegetation Index of the vegetation showed a very significant upward trend, reflecting the overall improvement in vegetation growth in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2019. The change of TSP emission coefficient showed a negative correlation with the Normalized Difference Vegetation Index, reaching some degree of significant level ($P < 0.1$). Hence, vegetation coverage represented by the Normalized Difference Vegetation Index was the secondly factor of TSP emission coefficient change. The TSP, PM10 and PM2.5 emission coefficients of soil dust sources were relatively high in Cangzhou, Tianjin, and Shijiazhuang. The TSP emissions in Zhangjiakou, Baoding and Cangzhou accounted for 19.18%, 12.98% and 11.63% of that in the Beijing-Tianjin-Hebei region. The cultivated land accounted for 59.83% of soil dust emissions of the whole region, which is the focus of attention to suppress the emission of particulate matter from soil dust sources, followed by grassland 15.66%. In 2019, Xingtai had the highest proportion (12.66%) of PM10 emissions from soil dust sources, followed by Shijiazhuang (11.09%), Tianjin (10.30%), Cangzhou (8.63%) and Handan (8.02%). Managers of environment-related departments in those cities should pay attention to the impact of soil dust particulate emissions on air quality.

Key Words: climatic factor; vegetation coverage; source of soil dust; emission of particles; Beijing-Tianjin-Hebei region

土壤风蚀是风力作用导致表土物质脱离原空间位置的过程^[1-2],其主要危害包括沙漠化^[3-4]和各种风沙灾害^[5-6]。土壤扬尘源是裸露地面的颗粒物在自然或人力的作用下形成的扬尘^[7],其中土壤风蚀导致的扬尘源是细颗粒物的主要来源^[8]。裸露地面的颗粒物进入大气中造成大气污染,导致 PM10 和 PM2.5 超标^[9]。目前灰霾污染已是影响我国城市空气质量的主要因素^[10],成为影响人们生活幸福感的重要因素之一^[11]。虽然我国空气质量在逐年改善,大气颗粒物仍是影响我国很多城市空气质量的首要污染物,其中土壤扬尘是造成城市颗粒物污染严重的重要因素之一^[12]。

随着大气污染问题日益突出,近年来国内很多地区开展了土壤扬尘源颗粒物排放清单编制工作^[13-18]。2015 年全国风蚀扬尘总悬浮颗粒物(TSP)、PM10 和 PM2.5 的年排放量分别为 $2.27 \times 10^7 \text{ t}$ 、 $6.77 \times 10^6 \text{ t}$ 和 $1.17 \times 10^6 \text{ t}$ ^[19]。京津冀地区是土壤风蚀扬尘高发区,其中北京市西北和东南地区土壤风蚀扬尘 PM2.5 排放因子较高^[8],天津市北辰区 PM10 和 PM2.5 的最大排放源是工地^[20],河北省土壤扬尘源 PM2.5 排放量为 39699 t,农田扬尘排放占 85.3%^[21],此外 2013 年石家庄市土壤扬尘 TSP、PM10 和 PM2.5 的排放量分别为 12569 t、3771 t 和 947 t^[22]。未来气候变化情景下,河北坝上地区土壤风蚀扬尘年排放速率分别增高 25%、54%、35% 和 54%^[23]。综上所述,目前关于京津冀地区土壤扬尘颗粒物排放量研究只有零星报道,且缺乏多年变化状况研究。整体上近 20 年来京津冀地区土壤扬尘颗粒物排放量变化及其主要影响因素仍然未知。

京津冀地区是我国大气污染严重区域,并且容易受到来自内蒙的沙尘天气影响^[24-25]。根据生态环境部发布的空气质量状况,2019 年京津冀及周边地区优良天数只有 53.1%,低于全国 82.0% 的平均水平^[26]。因此,土壤扬尘颗粒物排放量变化研究对于改善京津冀地区空气质量具有重要意义。本研究收集 2000—2019 年京津冀地区气候、土壤、植被覆盖等数据,估算近 20 年来京津冀地区土壤扬尘颗粒物排放量及其变化,揭示其年际变化的影响因素,以期生态环境管理部门提出相应措施、降低京津冀地区土壤扬尘颗粒物排放量、协同改善空气质量提供科学支撑。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

京津冀位于我国北方地区,东临大海、西倚太行山,北为燕山,南部为华北平原,地理上界于北纬 $36^{\circ}05'$ —

42°40', 东经 113°27'—119°50' 之间, 总面积约 $21.8 \times 10^4 \text{ km}^2$, 行政区划包括北京市、天津市和河北省^[27]。气候上该区属于暖温带半湿润大陆性季风气候, 四季分明。年平均温度 8—12.5℃, 年降水量 600—1000 mm。主要土壤质地类型有壤土、壤砂土、砂土、轻粘土、砂质粘壤土等。该区北部植被结构复杂, 种类繁多, 南部平原区大多数以耕地和城市人工植被为主^[28]。该区人类活动强度日益增大^[29], 使得灰霾天气频发^[26], 困扰着京津冀地区环境保护工作。

1.2 数据

本研究用到的气象数据来自于国家气象科学数据中心(网址 <http://data.cma.cn/>), 包括 2000—2019 年京津冀及周边地区气象站点年平均温度、年降水量、年平均风速, 其中年平均温度和年降水量数据利用 Anusplin 软件插值成 1 km 空间栅格数据, 年平均风速数据利用反距离加权插值成 1 km 空间栅格数据。土壤质地数据^[30]来源于黑河计划数据管理中心(网址 <http://westdc.westgis.ac.cn/>)(图 1)。2000—2019 年归一化植被指数(NDVI)数据来源于 MODIS MOD13A2 产品, 空间分辨率 1 km, 通过对每 16 天 NDVI 求均值得到 NDVI 年均值。2000、2005、2010 和 2015 年土地利用状况数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(网址 <http://www.resdc.cn/>), 空间分辨率 1 km。

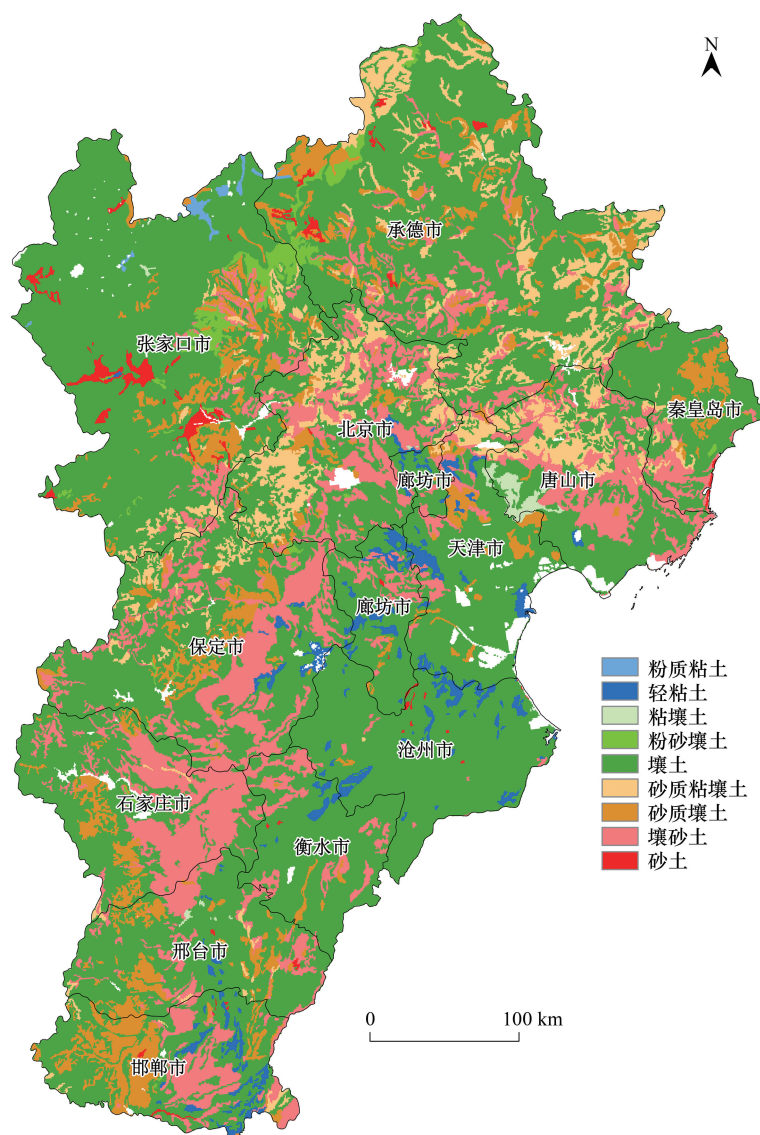


图 1 京津冀地区土壤质地类型

Fig.1 Soil texture types in the Beijing-Tianjin-Hebei region

1.3 方法

本文研究对象为土壤扬尘源排放量,以期为生态环境管理部门提出相应措施、协同改善空气质量提供科学参考,因此本研究采用生态环境部2015年发布的《扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南(试行)》^[7]中土壤扬尘源排放量计算公式:

$$WS_i = ES_i \times AS \tag{1}$$

式中, WS_i 为土壤扬尘中 PM_i (空气动力学粒径在0— $i\text{ }\mu\text{m}$ 间的颗粒物,下同)总排放量, t/a ; AS 为土壤扬尘源的面积, m^2 ; ES_i 为土壤扬尘源的 PM_i 排放系数, $\text{t m}^{-2} \text{a}^{-1}$,计算公式如下:

$$ES_i = D_i \times C \times (1 - \eta) \times 10^{-4} \tag{2}$$

式中, D_i 为 PM_i 的起尘因子, $\text{t } 10^{-4} \text{ m}^{-2} \text{a}^{-1}$; C 为气候因子,表征气象因素对土壤扬尘的影响; η 为污染控制技术对扬尘的去除效率,%,本研究设定 $\eta=0$ 。 D_i 计算公式如下:

$$D_i = k_i \times I_{we} \times f \times L \times V \tag{3}$$

式中, k_i 为 PM_i 在土壤扬尘中的百分含量,推荐值TSP为1、PM10为0.30、PM2.5为0.05; I_{we} 为土壤风蚀指数,推荐值见表1; f 为地面粗糙因子,取值为0.5; L 为无屏蔽宽度因子,本研究取 $L=1.0$ 。 V 为植被覆盖因子,是指裸露土壤面积占总计算面积的比例,本研究利用NDVI数据来代替,该数据来源于MODIS MOD13A2产品。

气候因子 C 计算公式如下:

$$C = 0.504 \times u^3 / PE^2 \tag{4}$$

式中, u 为年平均风速, m/s ; PE 为桑氏威特降水—蒸发指数,计算公式如下:

$$PE = 1.099 \times P / (0.5949 + 0.1189 \times T) \tag{5}$$

式中, P 为年降水量, mm ; T 为年平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

表1 土壤风蚀指数参考值/($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)
Table 1 Reference value of soil wind erosion index

土质主类 Soil texture class	土质细类 Soil texture subclass	TSP	PM10	PM2.5	土质主类 Soil texture class	土质细类 Soil texture subclass	TSP	PM10	PM2.5
砂土 Sand	砂土	490	147	24	粘土 Clay	粘壤土	290	87	15
	壤质砂土	331	99	17		粉砂质粘壤土	385	116	19
壤土 Loam	壤土	911	273	46		粉土	75	23	4
	砂质壤土	447	134	22		粘土	170	51	9
	砂质粘壤土	911	273	46		粉砂质粘土	170	51	9
	粉砂质壤土	476	143	24		砂质粘土	138	41	7

TSP:总悬浮颗粒物 Total suspended particulate; PM10:粒径在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下的颗粒物 Particulate matter with particle size below $10\text{ }\mu\text{m}$; PM2.5:粒径在 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 以下的颗粒物 Particulate matter with particle size below $2.5\text{ }\mu\text{m}$

2 结果

2.1 气候因子变化

2.1.1 风速

2000—2019年京津冀地区年平均风速均值为 2.54 m/s (图2)。总体上2000—2019年京津冀地区年平均风速具有略微上升趋势,但上升速率非常小为 $0.52 \times 10^{-2} \text{ m/s a}^{-1}$,且达到一定的显著水平($P<0.1$)。

2.1.2 温度和降水

2000—2019年京津冀地区年平均温度均值为 9.77°C ,其中2008年平均温度最高为 12.81°C ,2010年平均温度最低为 6.92°C ,近20年京津冀地区年平均温度呈现升高趋势(图3),升高速率约为 0.04°C/a ,但未达到显著水平($P>0.05$)。年降水量也呈现增加趋势,增加速率约为 4.12 mm/a ,且达到一定显著水平($P<0.1$)。2000—2019年京津冀地区年降水量均值为 502.23 mm ,其中2016年降水量最多为 632.50 mm ,2002年最低为

396.40 mm。

2.1.3 气候因子和桑氏威特蒸发指数

气候因子是土壤扬尘源颗粒物排放系数计算的重要因子。2000—2019 年京津冀地区气候因子呈现下降趋势(图 4),但未达到显著水平($P>0.05$)。其中 2002 年最大为 1.51×10^{-4} ,2012 最小为 0.46×10^{-4} 。桑氏威特蒸发指数由年平均温度和年降水量计算得到,是构成气候因子的重要参数。2000—2019 年京津冀地区桑氏威特蒸发指数呈现上升趋势,但未达到显著水平($P>0.05$)。

2.2 植被覆盖变化

2000—2019 年京津冀地区植被 NDVI 均值为 0.38, 2000 年最低为 0.34,2017 年最高为 0.40。2000—2019 年京津冀地区植被 NDVI 年均值呈现极显著增加趋势($P<0.01$),增加速率为 $0.21\times 10^{-2}/a$ (图 5),与 NDVI 均值相比约为 5.53%/10a,虽然反映了近 20 年来该地区植被生长状况整体呈现变好趋势,但变化幅度较小。

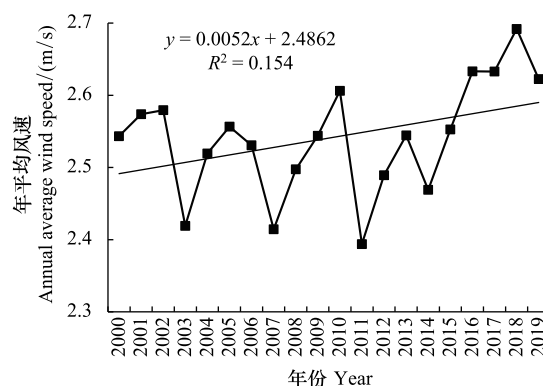


图 2 2000—2019 年京津冀地区风速变化

Fig.2 Changes of wind speed in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2019

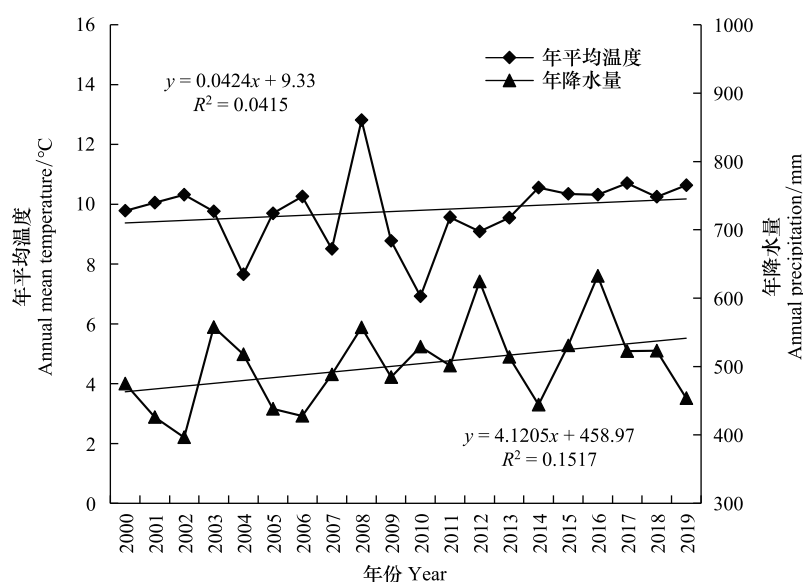


图 3 2000—2019 年京津冀地区年平均温度和年降水量变化

Fig.3 Annual temperature and precipitation in Beijing-Tianjin-Hebei region during 2000—2019

2.3 土壤扬尘源排放系数变化

空间上 2019 年京津冀地区土壤扬尘源 TSP 排放系数均值约为 $2.30 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中最大为 $23.95 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,最小为 $0.03 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。TSP 排放系数最高地区主要分布在河北省西南部地区,包括保定市西南部、石家庄市西部、邢台市中西部和邯郸市西北部地区(图 6)。TSP 排放系数较高地区主要分布在天津市南部、沧州市东北部以及张家口市局部地区。TSP 排放系数较低地区主要分布在京津冀北部地区。2019 年京津冀地区土壤扬尘源 PM10 和 PM2.5 排放系数分布格局与 TSP 一致。

2000—2019 年京津冀地区土壤扬尘源 TSP 排放系数均值为 $1.79 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中 PM10 占 8.99%,PM2.5 占 0.25%。近 20 年 TSP 排放系数具有下降趋势(图 7),但未达到显著水平($P>0.05$)。其中 2002 年最高为

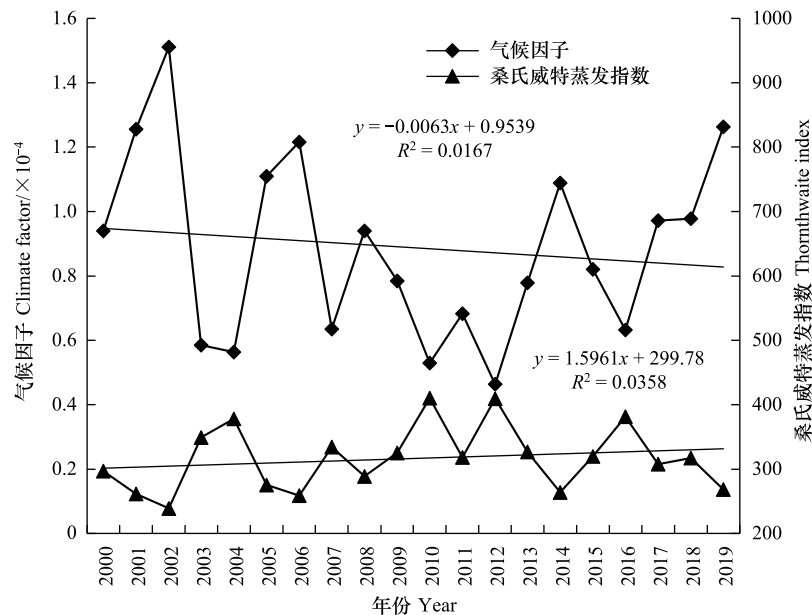


图 4 2000—2019 年京津冀地区气候因子和桑氏威特指数变化

Fig.4 Changes in climate factor and Thornthwaite index in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2019

$3.27 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 2003 年最低为 $1.01 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。相关分析显示,近 20 年土壤扬尘源 TSP 排放系数变化与气候因子呈现极显著正相关($P < 0.01$),与植被 NDVI 指数呈现负相关,但未达到显著水平($P > 0.05$),表明京津冀地区土壤扬尘源 TSP 排放系数变化与气候因子有关,而气候因子与温度和降水具有极显著相关关系($P < 0.01$)。2000—2019 年京津冀地区土壤扬尘源 PM10 和 PM2.5 排放系数变化过程与 TSP 一致。

2.4 土壤扬尘源排放量空间格局

2000—2019 年京津冀地区土壤扬尘源 TSP、PM10 和 PM2.5 排放系数均值分别为 1.79 、 0.16 、 $0.45 \times 10^{-2} \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (表 2)。沧州市土壤扬尘源 TSP、PM10 和 PM2.5 排放系数均值最高为 3.17 、 0.29 、 $0.80 \times 10^{-2} \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其次是天津市和石家庄市,分别为 2.96 、 0.27 、 0.75×10^{-2} 、 2.62 、 0.24 、 $0.66 \times 10^{-2} \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。承德市土壤扬尘源 TSP、PM10 和 PM2.5 排放系数均值最低为 0.60 、 0.05 、 $0.15 \times 10^{-2} \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其次是秦皇岛市 0.71 、 0.06 、 $0.18 \times 10^{-2} \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

2000—2019 年京津冀地区土壤扬尘源 TSP、PM10 和 PM2.5 排放总量均值分别为 $3.81 \times 10^5 \text{ t/a}$ 、 $0.34 \times 10^5 \text{ t/a}$ 、 $0.96 \times 10^3 \text{ t/a}$ 。其中张家口市土壤扬尘源 TSP 排放量均值最大为 $0.73 \times 10^5 \text{ t/a}$,占京津冀地区总量的 19.18% ,其次是保定市和沧州市分别为 $0.49 \times 10^5 \text{ t/a}$ 和 $0.44 \times 10^5 \text{ t/a}$,分别占 12.98% 和 11.63% 。秦皇岛市土壤扬尘源 TSP 排放量均值最小为 $0.06 \times 10^5 \text{ t/a}$,占京津冀地区总量的 1.44% ,其次是廊坊市和唐山市分别为 $0.12 \times 10^5 \text{ t/a}$ 和 $0.15 \times 10^5 \text{ t/a}$,分别占京津冀地区总量的 3.27% 和 4.00% 。

2000—2019 年承德市、秦皇岛市、邢台市和邯郸市土壤扬尘源 TSP、PM10 和 PM2.5 排放系数具有上升趋势,但未达到显著水平($P > 0.05$)。其余地区均具有下降趋势,其中北京市、衡水市土壤扬尘源 TSP、PM10 和

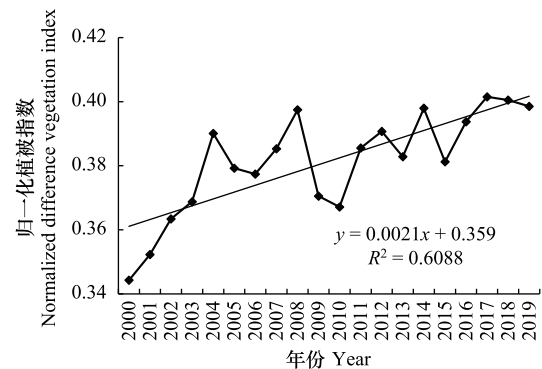


图 5 2000—2019 年京津冀地区植被 NDVI 变化

Fig.5 Changes of vegetation NDVI in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2019

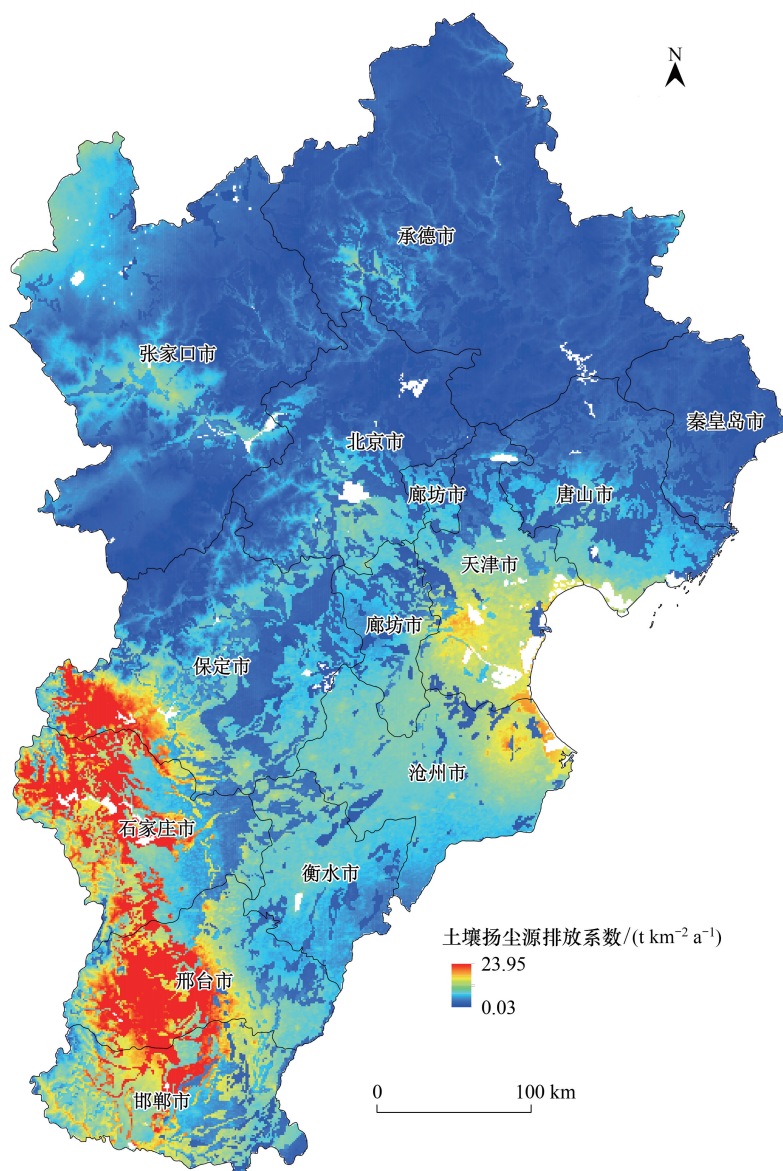


图6 2019年京津冀地区土壤扬尘源总悬浮颗粒物(TSP)排放系数

Fig.6 TSP emission coefficient of soil dust source in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2019

PM_{2.5} 排放系数下降趋势达到极显著水平 ($P < 0.01$), 天津市、廊坊市和保定市下降趋势达到显著水平 ($P < 0.05$)。上述土壤扬尘源 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放系数显著下降区域的排放量仅占京津冀总量的 35.63%, 京津冀大部分区域土壤扬尘源颗粒物排放状况未得到有效遏制。

本研究利用 2000、2005、2010 和 2015 年京津冀地区 4 期土地利用空间状况数据来统计 2000—2019 年京津冀地区土壤扬尘源 TSP 排放量, 结果显示耕地排放量最大为 2.29×10^5 t/a (图 8), 占京津冀地区总量的 59.83%, 是抑制土壤扬尘源颗粒物排放的重点关注对象, 其次为草地为 0.60×10^5 t/a, 占 15.66%。林地和居民地土壤扬尘源 TSP 排放量分别为 0.42×10^5 t/a 和 0.36×10^5 t/a, 分别占 11.04% 和 9.50%。水体排放量为 0.14×10^5 t/a, 占 3.64%。裸地排放量最低为 0.13×10^4 t/a, 占京津冀地区总量的 0.33%。

表 2 2000—2019 年京津冀各市土壤扬尘源 TSP、PM10 和 PM2.5 排放量

Table 2 TSP, PM10 and PM2.5 emissions from soil dust sources in Beijing-Tianjin-Hebei cities from 2000 to 2019

城市 City	排放系数 Emission coefficient/ (t km ⁻² a ⁻¹)			排放量 Emission amount/t			2000—2019 年排放系数变化 Change of emission coefficient from 2000 to 2019/(t km ⁻² a ⁻¹)		
	TSP	PM10	PM2.5	TSP	PM10	PM2.5	TSP	PM10	PM2.5
北京	1.37	0.12	0.35×10 ⁻²	22080.53	1984.59	55.82	-0.07***	-0.66×10 ⁻² ***	-1.85×10 ⁻⁴ ***
天津	2.96	0.27	0.75×10 ⁻²	32088.02	2884.75	81.04	-0.12*	-1.08×10 ⁻² *	-3.03×10 ⁻⁴ *
石家庄	2.62	0.24	0.66×10 ⁻²	36223.97	3255.61	91.57	-0.01	-0.06×10 ⁻²	-0.17×10 ⁻⁴
保定	2.24	0.20	0.57×10 ⁻²	49420.13	4442.10	124.87	-0.08*	-0.73×10 ⁻² *	-2.05×10 ⁻⁴ *
唐山	1.20	0.11	0.30×10 ⁻²	15230.88	1368.93	38.56	-0.01	-0.09×10 ⁻²	-0.24×10 ⁻⁴
廊坊	1.94	0.17	0.49×10 ⁻²	12438.98	1118.18	31.47	-0.07*	-0.66×10 ⁻² *	-1.85×10 ⁻⁴ *
张家口	2.01	0.18	0.51×10 ⁻²	73018.65	6564.85	184.03	-0.02	-0.19×10 ⁻²	-0.54×10 ⁻⁴
承德	0.60	0.05	0.15×10 ⁻²	23454.27	2108.54	59.14	0.02	0.15×10 ⁻²	0.41×10 ⁻⁴
沧州	3.17	0.29	0.80×10 ⁻²	44281.03	3980.97	111.87	-0.12	-1.06×10 ⁻²	-2.97×10 ⁻⁴
秦皇岛	0.71	0.06	0.18×10 ⁻²	5463.29	491.09	13.79	0.001	0.01×10 ⁻²	0.03×10 ⁻⁴
衡水	2.22	0.20	0.56×10 ⁻²	19575.76	1759.69	49.47	-0.15**	-1.33×10 ⁻² **	-3.73×10 ⁻⁴ **
邢台	2.15	0.19	0.54×10 ⁻²	26761.89	2405.70	67.51	0.07	0.59×10 ⁻²	1.65×10 ⁻⁴
邯郸	1.72	0.15	0.43×10 ⁻²	20598.99	1851.65	51.93	0.03	0.28×10 ⁻²	0.77×10 ⁻⁴
京津冀	1.79	0.16	0.45×10 ⁻²	380636.40	34216.64	961.08	-0.03	-0.29×10 ⁻²	-0.81×10 ⁻⁴

* $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$

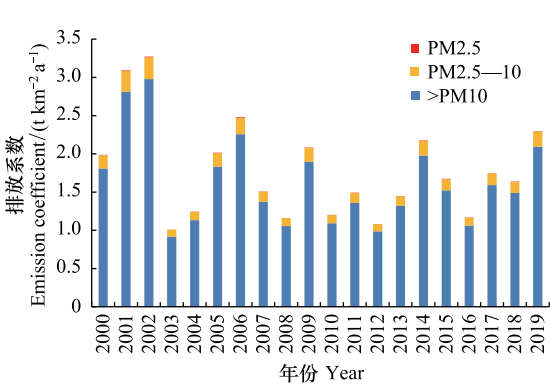


图 7 2000—2019 年京津冀地区土壤扬尘源 TSP、PM10 和 PM2.5 排放系数变化

Fig.7 Changes in the emission coefficient of TSP, PM10 and PM2.5 of soil dust sources in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2019

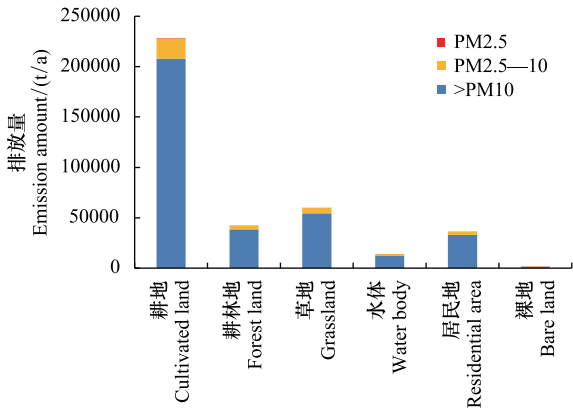


图 8 2000—2019 年京津冀地区各土地利用类型土壤扬尘源 TSP、PM10 和 PM2.5 排放量

Fig.8 Emissions of TSP, PM10 and PM2.5 from soil dust sources of various land use types in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2019

3 讨论

2021 年 3 月初以来,京津冀地区遭遇多场沙尘暴袭击,是扬尘污染严重区。本研究参考生态环境部 2015 年发布的《扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南(试行)》^[7],估算京津冀地区年度土壤扬尘颗粒物排放。该方法中用到的变量均为年值,因此不能用于季节土壤扬尘颗粒物排放计算,否则会出现较大误差。与以往京津冀地区研究结果比较发现,本研究 2000—2019 年北京市土壤扬尘 PM2.5 排放系数均值为 0.45×10^{-2} t km⁻² a⁻¹,其中 2017 年为 0.44×10^{-2} t km⁻² a⁻¹,以往学者认为 2017 年北京市土壤扬尘 PM2.5 排放系数为 0.18 t km⁻² a⁻¹,与本研究相比存在一定低估^[8]。此外,还有研究认为 2015 年河北省各地级市中承德市、廊坊市、唐山市、秦皇岛市土壤扬尘颗粒物排放系数较低,沧州市、邢台市和邯郸市土壤扬尘颗粒物排放系数较高^[21]。

本研究结果与之相比土壤扬尘颗粒物排放系数空间格局大体一致,即沧州市、石家庄市土壤扬尘颗粒物排放系数较高,承德市、秦皇岛市、唐山市土壤扬尘颗粒物排放系数较低。2013 年石家庄市土壤扬尘 TSP 排放为 12569 t、PM10 为 3771 t、PM2.5 为 947 t^[22],转换后平均排放系数分别为 0.87、0.26、0.07 t km⁻² a⁻¹,分别为本研究(2.62、0.24、0.07×10⁻¹ t km⁻² a⁻¹)的 0.33 倍、1.08 倍和 10 倍,相比本研究 TSP 存在一定低估、PM10 接近、PM2.5 存在一定高估。总体上本研究中京津冀地区土壤扬尘颗粒物排放量估算相对合理。

本研究发现 2000—2019 年土壤扬尘源 TSP 排放系数变化与气候因子呈现极显著正相关(图 9, $P < 0.01$),因此京津冀地区土壤扬尘源 TSP 排放系数变化主要与气候因子有关。2000—2019 年京津冀地区植被 NDVI 呈现极显著上升趋势,反映了近 20 年来该地区植被生长状况整体呈现变好,但由于上升幅度较小,仅为 5.53%/10a,与土壤扬尘源 TSP 排放系数变化呈现一定显著水平负相关(图 9, $P < 0.1$),因此植被覆盖是土壤扬尘源 TSP 排放系数变化的次要因素。进一步分析发现气候因子中年降水量与土壤扬尘源 TSP 排放系数变化具有极显著负相关关系(图 9, $P < 0.01$),而年平均风速和年平均温度与土壤扬尘源 TSP 排放系数变化相关性不显著($P > 0.05$),表明京津冀地区土壤扬尘源 TSP 排放系数变化主要受年降水量影响。

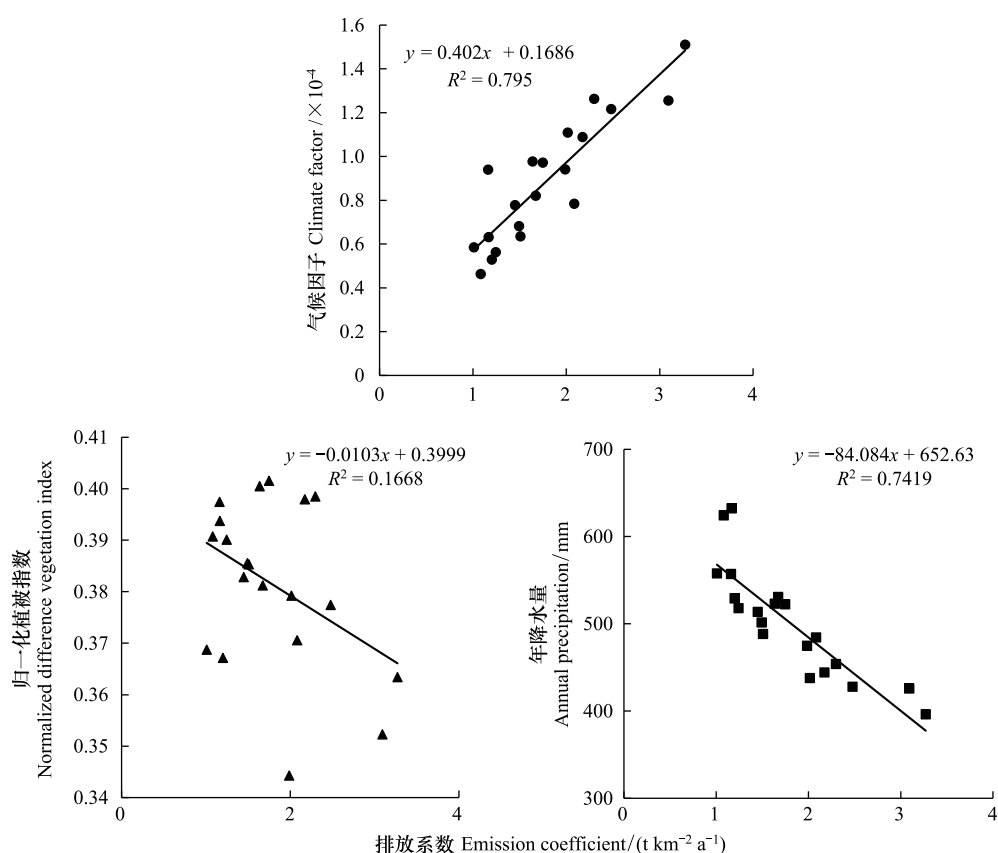


图 9 2000—2019 年京津冀地区土壤扬尘源总悬浮颗粒物(TSP)排放系数与气候因子、覆盖因子、年降水量相关性

Fig.9 Correlations of Total Suspended Particulate (TSP) emission coefficient and climate factor, coverage factor, and annual precipitation in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2019

本研究假设京津冀地区土壤扬尘源可能影响的高度为 100 m,同时利用 2019 年各市土壤扬尘源排放系数计算得到土壤扬尘源 PM10 和 PM2.5 在空气中含量,并与 2019 年京津冀各地区发布的环境质量公报结果进行对比。结果显示土壤扬尘源排放颗粒对 PM10 影响较大,对 PM2.5 影响较小(表 3)。2019 年邢台市 PM10 观测值 115 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,其中土壤扬尘源排放颗粒物含量占比最高为 12.66%。石家庄市和天津市 PM10 观测值分别为 118 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,其中土壤扬尘源排放颗粒物含量占比也较高分别为 11.09%和 10.30%。

沧州市和邯郸市 PM10 观测值分别为 89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 124 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,其中土壤扬尘源排放颗粒物含量占比分别为 8.63%和 8.02%。上述地区应关注土壤扬尘源颗粒物排放对空气质量影响。秦皇岛市和承德市土壤扬尘源排放颗粒物含量占 PM10 观测值比例分别为 2.55%和 2.99%,可能与当地植被覆盖状况较好有关。

表 3 2019 年京津冀各市土壤扬尘源排放颗粒物含量占比
Table 3 Percentage of particulate matter emitted by soil dust sources in Beijing-Tianjin-Hebei cities in 2019

城市 City	2019 年观测 颗粒物含量 Observed particulate content in 2019/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		2019 年土壤扬尘源 排放系数 Soil dust emission coefficient in 2019/($\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$)		2019 年土壤扬尘源 排放颗粒物含量 Soil dust emission content in 2019/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		土壤扬尘源排放 颗粒物含量占比 Soil dust emission content percent in 2019/%	
	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
北京	68	42	0.11	0.31×10^{-2}	2.98	0.08	4.39	0.20
天津	76	51	0.29	0.80×10^{-2}	7.83	0.22	10.30	0.43
石家庄	118	63	0.48	1.34×10^{-2}	13.08	0.37	11.09	0.58
承德	63	29	0.07	0.19×10^{-2}	1.88	0.05	2.99	0.18
张家口	56	25	0.12	0.34×10^{-2}	3.33	0.09	5.94	0.37
秦皇岛	73	41	0.07	0.19×10^{-2}	1.86	0.05	2.55	0.13
唐山	101	54	0.14	0.39×10^{-2}	3.81	0.11	3.77	0.20
廊坊	85	46	0.19	0.54×10^{-2}	5.24	0.15	6.17	0.32
保定	100	58	0.23	0.66×10^{-2}	6.44	0.18	6.44	0.31
沧州	89	50	0.28	0.79×10^{-2}	7.68	0.22	8.63	0.43
衡水	94	56	0.20	0.57×10^{-2}	5.51	0.15	5.86	0.28
邢台	115	65	0.53	1.49×10^{-2}	14.56	0.41	12.66	0.63
邯郸	124	66	0.36	1.02×10^{-2}	9.95	0.28	8.02	0.42

本研究估算了 2000—2019 年京津冀地区土壤扬尘源排放,从长时间尺度上阐明该地区土壤扬尘颗粒物排放空间格局和变化过程,发现京津冀大部分区域土壤扬尘源颗粒物排放状况未得到有效遏制。人为翻动表土会导致严重的土壤风蚀发生,人类扰动会导致土壤风蚀加剧。本研究中耕地扬尘源 TSP 排放量最大占京津冀地区总量的 59.83%,是抑制土壤扬尘源颗粒物排放的重点关注对象,其次为草地占 15.66%。该结果可为京津冀地区各市相关管理部门制定降低大气颗粒物含量、减少土壤扬尘颗粒物排放措施的依据。同时相关部门可以引入空气质量模型分析土壤扬尘源对大气环境空气质量的影响,以探索适合京津冀地区实际情况的土壤扬尘防治策略。主要包括京津冀地区沙尘抑制生态屏障协同建设,统筹协调退耕还林还草和自然植被恢复工作,以及沙尘天气动态监测和预警系统建设^[31]。由于气候因子和土壤质地数据来源和分辨率的差异,本研究结果与前人的结果存在一定差异,下一步工作应该加强土壤扬尘颗粒物排放研究的细致对比分析工作,同时搜集实测数据,结合其他源的排放清单,同颗粒物源解析结果进行比较验证。

4 结论

(1)2000—2019 年京津冀地区土壤扬尘源 TSP 排放系数均值为 $1.79 \text{ t km}^{-2} \text{a}^{-1}$,其中 PM10 占 8.99%,PM2.5 占 0.25%。近 20 年土壤扬尘源 TSP 排放系数具有下降趋势,PM10 和 PM2.5 排放系数变化过程与 TSP 一致。上述变化主要受气候因子影响,其次受植被覆盖度影响。进一步分析发现近 20 年来京津冀地区土壤扬尘源 TSP 排放系数变化主要受年降水量影响。

(2)2000—2019 年沧州市土壤扬尘源 TSP、PM10 和 PM2.5 排放系数均值最高,其次是天津市和石家庄市。张家口市土壤扬尘源 TSP 排放量均值最大占京津冀地区总量的 19.18%,其次是保定市和沧州市分别占 12.98%和 11.63%。北京市、衡水市、天津市、廊坊市和保定市土壤扬尘源 TSP、PM10 和 PM2.5 排放系数显著下降,然而上述区域土壤扬尘排放量仅占京津冀总量的 35.63%,京津冀大部分区域土壤扬尘源颗粒物排放状况未得到有效遏制。耕地土壤扬尘排放量最大占京津冀地区总量的 59.83%,是抑制土壤扬尘源颗粒物排放的重点关注对象,其次为草地占 15.66%。林地和居民地分别占 11.04%和 9.50%。

(3)2019 年邢台市土壤扬尘源 PM₁₀ 排放占观测值比例最高为 12.66%, 石家庄市和天津市占比也较高分别为 11.09% 和 10.30%, 沧州市和邯郸市占比分别为 8.63% 和 8.02%。上述地区环境管理部门均应关注土壤扬尘源颗粒物排放对空气质量的影响。秦皇岛市和承德市土壤扬尘源排放颗粒物含量占 PM₁₀ 观测值比例分别为 2.55% 和 2.99%, 可能与当地植被覆盖状况较好有关。

参考文献 (References):

- [1] 陈发虎, 吴绍洪, 崔鹏, 蔡运龙, 张懿铨, 尹云鹤, 刘国彬, 欧阳竹, 马巍, 杨林生, 吴铎, 雷加强, 张国友, 邹学勇, 陈晓清, 谈明洪, 王训明, 包安明, 程维新, 党小虎, 韦炳干, 王国梁, 王五一, 张兴权, 刘晓晨, 李生字. 1949—2019 年中国自然地理学与生存环境应用研究进展. 地理学报, 2020, 75(9): 1799-1830.
- [2] 邹学勇, 张春来, 程宏, 亢力强, 吴晓旭, 常春平, 王周龙, 张峰, 李继峰, 刘辰琛, 刘博, 田金鹭. 土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达. 地球科学进展, 2014, 29(8): 875-889.
- [3] Shi P J, Yan P, Yuan Y, Nearing M A. Wind erosion research in China: past, present and future. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2004, 28(3): 366-386.
- [4] 孙禹, 杜会石, 哈斯额尔敦, 刘美萍. 固定沙丘风蚀坑风沙动力学观测研究. 地理学报, 2016, 71(9): 1562-1570.
- [5] Borbély-Kiss I, Kiss Á Z, Koltay E, Szabó G, Bozó L. Saharan dust episodes in Hungarian aerosol: elemental signatures and transport trajectories. Journal of Aerosol Science, 2004, 35(10): 1205-1224.
- [6] Goudie A S. Desert dust and human health disorders. Environment International, 2014, 63: 101-113.
- [7] 环境保护部. 扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南(试行). (2014-12-31). http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/t20150107_293955.htm.
- [8] 李贝贝, 黄玉虎, 毕晓辉, 刘李阳, 秦建平. 北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化. 环境科学, 2020, 41(6): 2609-2616.
- [9] 赵福梅, 李绍才, 孙海龙, 李乃稳, 李广辉. 不同土地类型的土壤扬尘特征与控制技术. 环境科学与技术, 2019, 42(7): 38-43.
- [10] 黄宇, 虎彩娇, 成海容, 王祖武. 武汉市扬尘源颗粒物排放清单及空间分布特征. 武汉大学学报: 理学版, 2018, 64(4): 354-362.
- [11] 秦建新, 朱柯颖, 吴涛, 申慧晴. 长沙市城区施工扬尘和土壤扬尘污染时空特征研究. 中国环境监测, 2020, 36(4): 69-79.
- [12] 王海婷, 温杰, 徐娇, 田瑛泽, 史国良, 冯银厂, 李梅. 天津市城市扬尘及土壤单颗粒质谱特征. 环境科学研究, 2018, 31(5): 844-852.
- [13] 杨卫芬, 程钟, 张洁, 滕加泉, 陈心一, 蔡继军. 常州市裸露地面风蚀扬尘排放清单及分布特征研究. 环境监测管理与技术, 2020, 32(2): 56-60.
- [14] 张翊峰, 金永民. 抚顺市地面扬尘的来源解析. 辽宁城乡环境科技, 2005, 25(1): 19-21.
- [15] 王社扣, 王体健, 石睿, 田军. 南京市不同类型扬尘源排放清单估计. 中国科学院大学学报, 2014, 31(3): 351-359.
- [16] 崔克强, 王学中, 何友江, 孟凡. 锡林浩特露天煤矿排土场扬尘排放及污染. 干旱区资源与环境, 2017, 31(6): 160-165.
- [17] 徐媛倩, 姜楠, 燕启社, 张瑞芹, 陈良富, 李莘莘. 郑州市裸露地面风蚀扬尘排放清单研究. 环境污染与防治, 2016, 38(4): 22-27.
- [18] 印红玲, 邱长燕, 叶芝祥, 邹长武, 唐文龙, 王海宁. 成都市春季土壤和扬尘中饱和烃的污染特征与来源分析. 土壤通报, 2011, 42(5): 1236-1241.
- [19] 吴一鸣, 王乙斐, 周怡静, 焦丽君, 田贺忠. 1995—2015 年中国风蚀扬尘 TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放清单及未来趋势预测. 中国环境科学, 2019, 39(3): 908-914.
- [20] 张骥, 徐媛, 刘茂辉, 展先辉, 郭金龙, 孙猛. 天津市北辰区大气污染物小尺度精细化源排放清单. 中国环境监测, 2018, 34(2): 20-27.
- [21] 郭祥, 冯海波, 陆雅静. 河北省土壤扬尘源 PM_{2.5} 排放量估算. 河北工业科技, 2017, 34(6): 477-482.
- [22] 李媚, 倪爽英, 雷永从, 陆雅静, 鲍晓磊. 石家庄市土壤扬尘排放量估算及分布特征. 环境工程学报, 2017, 11(11): 5993-5999.
- [23] 吴建国, 徐天堂. 气候变化对河北坝上地区草地土壤风蚀扬尘季节和年排放速率的影响. 气象与环境学报, 2019, 35(3): 68-78.
- [24] 胡云锋, 张云芝. 内蒙古浑善达克沙地南缘¹³⁷Cs、²¹⁰Pb_{ex}复合示踪研究. 地理学报, 2019, 74(9): 1890-1903.
- [25] 徐洁, 肖玉, 谢高地, 王洋洋, 江源, 陈文辉. 防风固沙型重点生态功能区防风固沙服务的评估与受益区识别. 生态学报, 2019, 39(16): 5857-5873.
- [26] 中华人民共和国生态环境部. 2019 中国生态环境状况公报. (2020-06-02). <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgh/202006/P020200602509464172096.pdf>.
- [27] 张蓬涛, 刘双嘉, 周智, 刘春敬, 徐磊, 高星. 京津冀地区生态系统服务供需测度及时空演变. 生态学报, 2021, 41(9): 3354-3367.
- [28] 王静, 周伟奇, 许开鹏, 颜景理, 李伟峰, 韩立建. 京津冀地区的生态质量定量评价. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2667-2676.
- [29] 冼超凡, 王莉雁, 逮非, 郑华, 欧阳志云. 基于“氮补偿”机制及数据包络分析的活性氮减排评价——以京津冀区域为例. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2545-2553.
- [30] Wieder W R, Boehnert J, Bonan G B, Langseth, M. Regridded harmonized world soil database v1.2. data set. Available on-line[<http://daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2014. <http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1247>.
- [31] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 张增祥, 王一谋, 周自江, 鞠洪波, 黄笠. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策. 地理学报, 2000, 55(5): 513-521.