

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源..... 林秋菊,徐娇,李梅,王伟,史国良,冯银厂 (2505)

南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析..... 杨笑影,曹芳,林煜棋,章炎麟 (2519)

西安市PM_{2.5}中水溶性离子的季节变化特征..... 黄舍舍,王羽琴,李升革,陈庆彩 (2528)

新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响..... 刘会斌,迪丽努尔·塔力甫,王新明,张潇潇,王威,阿布力克木·阿不力孜,买里克扎提·买合木提,刘伟 (2536)

长秋季生物质燃烧对PM_{2.5}中WSOC吸光性的影响..... 孟德友,曹芳,翟晓瑶,张世春,章炎麟 (2547)

2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源..... 王倩 (2555)

南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析..... 曹梦瑶,林煜棋,章炎麟 (2565)

郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析..... 任义君,马双良,王思维,于世杰,李一丹,张瑞芹,尹沙沙 (2577)

上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献..... 韩婷婷,李颖若,邱雨露,何迪,王焱,马志强 (2586)

北京市餐饮业大气污染物排放特征..... 孙成一,白画画,陈雪,翟翼飞,高启天,何万清,聂磊,石爱军,李国傲 (2596)

北京市农业机械排放因子与排放清单..... 王凯,樊守彬,亓浩云 (2602)

北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化..... 李贝贝,黄玉虎,毕晓辉,刘李阳,秦建平 (2609)

基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析..... 张颖蕾,崔希民 (2617)

环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟..... 张毅,马艳飞,宋帅,吕永龙,张盛,吴强 (2625)

岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析..... 周石磊,孙悦,苑世超,彭瑞哲,刘世崇,岳奇丞,张航,王周强,李再兴,罗晓 (2635)

“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析..... 李悦昭,陈海洋,孙文超 (2646)

伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价..... 姜时欣,翟付杰,张超,王蒙蒙,单保庆 (2653)

典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析..... 赵然,韩志伟,申春华,张水,涂汉,郭永丽 (2664)

沉积物参与下氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响..... 陈洁,许海,詹旭,许笛,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,康丽娟 (2671)

丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素..... 李胜男,陈豪宇,彭华,李芸君,朱坚,简燕,纪雄辉 (2679)

胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用..... 王振方,韩子玉,王梦雪,马逸驰,王婷,王丽卿,张玮 (2688)

不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较..... 桑雨璇,杨珈乐,熊怡,尹文博,汪华,王和云 (2698)

过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用..... 张帅,李大鹏,丁玉琴,徐楚天,许鑫澎,孙培荣,赵哲豪,黄勇 (2706)

基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例..... 王亚楠,祝伟,祁新华,范水生 (2714)

不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径..... 张杰,梅宁,刘孟浩,叶雪松,李冬 (2727)

高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5..... 李立,吴丽颖,董正玉,王霖,张倩,洪俊明 (2736)

Fe-cyclam/H₂O₂体系催化降解罗丹明B机制..... 余雨清,陈翔宇,蔡权华,黄歆珏,陈曼 (2746)

微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO₂-NTs为光阳极..... 卢忆,周海珊,彭瑞建,叶杰旭,陈建孟,宋爽,张士汉 (2754)

缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性..... 陈凡雨,徐仲,尤宏,柳锋,李之鹏,陈其伟,韩红卫 (2762)

HRT对改良式A²/O-BAF反硝化除磷脱氮的影响..... 赵凯亮,刘安迪,南彦斌,梁利民,王云霞,陈永志 (2771)

重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化..... 孙琪,赵白航,范飒,周邦磊,李玉琪 (2779)

异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去及重金属和盐度的影响..... 王萌萌,曹刚,张迪,冯乃亮,潘涌璋 (2787)

火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替..... 薛嘉俊,张绍青,张立秋,李淑更,姚海楠,耿忠轩,李鸿,刘晓玲 (2796)

游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响..... 沈琛,张树军,彭永臻 (2805)

死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰..... 苏宇傲,刘宏波,毛秋燕,张慧旻,张衍,刘和 (2812)

中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价..... 陈文轩,李茜,王珍,孙兆军 (2822)

土壤环境质量预警体系构建与应用..... 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿 (2834)

不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系..... 毛霞丽,邱志腾,张爽,沈倩,章明奎 (2842)

长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征..... 宁玉菲,魏亮,魏晓梦,祝贞科,袁红朝,葛体达,吴金水 (2852)

生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响..... 黄洋,郭晓,胡学玉 (2861)

基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价..... 肖冰,薛培英,韦亮,刘成程,高培培,樊利敏,杜佳燕,刘文菊 (2869)

重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素..... 胡青青,沈强,陈飞,尹炳,邹宏光,庄红娟,张世文 (2878)

新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果..... 陈兆进,李英军,邵洋,林立安,徐鸽,陈彦,田伟,姚伦广,韩辉 (2889)

三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征..... 李丽娟,李昌晓,陈春桦,杨治华,陈雪梅 (2898)

滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布..... 张宇,左剑恶,王丝可,Alisa Salimova,李爱军,李玲玲 (2908)

模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响..... 王愉琬,马安周,种国双,谢飞,周汉昌,刘国华,庄国强 (2918)

水肥气耦合对温室番茄土壤N₂O排放及番茄产量的影响..... 商子惠,蔡焕杰,陈慧,孙亚楠,李亮,朱艳,王晓云 (2924)

矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用..... 尚誉,杨丰隆,宁夏,董轶茹,桑楠 (2936)

海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价..... 汪慧娟,旷泽行,周贤,覃晓青,黄洪辉 (2942)

春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析..... 贺玉晓,李珂,任玉芬,王思琪,方文颖 (2951)

热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估..... 蔡朝卉,楚沉静,郑浩,罗先香,李锋民 (2963)

长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)..... 蒋自然,金环环,王成金,叶士琳,黄艳豪 (2972)

《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)

北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化

李贝贝¹, 黄玉虎^{1*}, 毕晓辉², 刘李阳^{1,3}, 秦建平¹

(1. 北京市环境保护科学研究院, 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037; 2. 南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300071; 3. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要: 土壤风蚀扬尘源是细颗粒物(PM_{2.5})的来源之一, 对比国内典型省市扬尘源排放清单, 发现土壤风蚀扬尘源对本地扬尘源PM_{2.5}排放清单的贡献率最大差别为4个数量级. 本研究改进一种土壤风蚀扬尘排放因子公式及参数值确定方法, 利用遥感影像、中国土壤数据集和各区气象数据, 分别获得北京市平原区植被覆盖因子(V)、土壤风蚀指数(I)和气候因子(C)空间分布, 并估算土壤风蚀扬尘PM_{2.5}排放因子空间分布. 结果表明: ①以北京市2017年为例, 发现国内学者计算的C值都存在不同程度低估, PM_{2.5}排放因子存在高估或低估; ②V、I和C值都具有明显空间差异, V、I和C值平均值分别为0.63 ± 0.09、188 ± 73和0.029 ± 0.009, 各区V、I和C值的最大值分别是最小值的1.5、2.1和4.5倍; ③北京市土壤风蚀扬尘PM_{2.5}排放因子呈现西北和东南方向较高的空间分布, 全市平均排放因子为(0.0018 ± 0.0008) t·(hm²·a)⁻¹, 是最高区(西城)和最低区(平谷)数值的0.54和3.12倍, 较高强度(0.6~0.8)和高强度(0.8~1.0)的标准化排放因子面积占比分别为0.72%和0.04%.

关键词: 土壤风蚀扬尘; 排放因子; 本地化; 植被覆盖因子; 土壤风蚀指数; 气候因子

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2609-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908243

Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing

LI Bei-bei¹, HUANG Yu-hu^{1*}, BI Xiao-hui², LIU Li-yang^{1,3}, QIN Jian-ping¹

(1. National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Soil wind erosion dust is one of the primary sources of fine particulate matter (PM_{2.5}). Compared with the fugitive dust emission inventory of typical domestic provinces and cities, we found that the maximum among the contribution rates of soil wind erosion dust to the local total fugitive dust PM_{2.5} emission inventory was about 4 orders of magnitude higher than the minimum. This study provided a wind erosion equation and a determination method of parameter values. The remote sensing interpretation, China soil dataset, and meteorological data of each district in Beijing were used to achieve the spatial distribution of the vegetation coverage factor (V), soil erodibility index (I), and climatic factors (C) in the plain area of Beijing. This study also estimated the emission factor of soil wind erosion dust and its spatial distribution. The main conclusions are as follows: ① Taking 2017 and Beijing city as an example, it was found that the climatic factor (C) was underestimated to different extents by domestic scholars, and PM_{2.5} emission factors were overestimated or underestimated. ② V, I, and C showed apparent spatial differences and the average values of them were 0.63 ± 0.09, 188 ± 73, and 0.029 ± 0.009, respectively. The maximum values of V, I, and C were 1.5, 2.1, and 4.5 times the minimum among all districts, respectively. ③ The PM_{2.5} emission factor of soil wind erosion dust in Beijing showed a high spatial distribution in the northwest and southeast. The average emission factor of the city was (0.0018 ± 0.0008) t·(hm²·a)⁻¹, which is 0.54 times the highest emission factor (Xicheng District) and 3.12 times the lowest (Pinggu District). The area proportions of standardized emission factors with higher intensity (0.6 to 0.8) and high intensity (0.8 to 1.0) was 0.72% and 0.04%, respectively.

Key words: soil wind erosion dust; emission factor; localization; vegetation coverage factor; soil erodibility index; climatic factor

2014年,原环境保护部为贯彻落实《大气污染防治行动计划》(国发[2013]37号)^[1],指导各地开展大气污染源排放清单编制工作,编制了《扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南(试行)》^[2]等9项技术指南.2015年2月,又印发了《关于开展源排放清单编制试点工作的通知》(环办[2015]14号),选取全国11个重点城市按照上述技术指南启动大气污染源排放清单编制试点工作^[3].全国各城市陆续开展大气污染源排放清单编制工作,包括编制细颗粒物(PM_{2.5})^[4-10]、扬尘源PM_{2.5}^[11-13]和土壤扬

尘源PM_{2.5}排放清单^[13-19]等.其中,长春市(2013年)^[4]、吉林省(2013年)^[5]、广东省(2010年)^[6]、四川省(2015年)^[7]、天津市北辰区(2016年)^[8]、南充市(2014年)^[9]和北京市(2017年)^[10]扬尘源对本地PM_{2.5}排放清单的贡献率分别为6.0%、9.1%、

收稿日期: 2019-08-30; 修订日期: 2020-01-08

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0208); 北京市科学技术协会2017-2019年度青年人才托举工程项目

作者简介: 李贝贝(1993~),女,硕士,主要研究方向为扬尘污染控制, E-mail: leebeibe0404@163.com

* 通信作者, E-mail: huangyuhu@sina.com

22%、35%、47%、58%和73%,最大差别为1个数量级,而且不是每个排放清单都包括土壤扬尘源,这表明不同地区扬尘源的贡献有较大差别,也表明扬尘源排放清单估算具有较大的不确定性.武汉市(2016年)^[11]、吉林市(2013年)^[5]、哈尔滨市(2016年)^[12]、北京市(2017年)^[10]、天津市北辰区(2016年)^[8]和南充市(2014年)^[9]土壤扬尘源对本地扬尘源PM_{2.5}排放清单的贡献率分别为0.004 0%、0.008 4%、0.065%、0.69%、23%和26%,最大差别为4个数量级,表明土壤扬尘源排放清单估算具有更大的不确定性,是扬尘源排放清单估算中亟待研究的问题.

北京市PM_{2.5}源解析结果表明,扬尘源对本地源的贡献由2013年的14.3%上升为2017年的16.0%^[13],扬尘源治理是当前大气污染治理最薄弱的环节.2014年文献[2]发布前后,国内学者分别估算了中国北方城市(1951~1980年)^[14]、南京市(2010年)^[15]、郑州市(2013年)^[16]、石家庄市(2013年)^[17]、河北省(2015年)^[18]、武汉市(2016年)^[11]、哈尔滨市(2016年)^[12]、北京市(2016年)^[19]和天津市(2013年)^[20]等省市土壤扬尘源排放清单.研究发现国内土壤扬尘源排放清单编制存在差异,原因如下:①文献[2]和根据其编制的土壤扬尘源排放清单只包括土壤风蚀扬尘,并未包括农业耕作扬尘,国内扬尘源排放清单有缺项,本研究将国内文献研究的土壤扬尘源都统一为土壤风蚀扬尘源;②虽然都采用美国农业局的土壤风蚀方程(WEQ)计算土壤风蚀扬尘排放因子,但是引用相关研究时出现了多种版本的WEQ;③对于WEQ参数值的确定缺乏统一方法,导致排放因子结果存在较大差异;④排放因子和排放清单空间分辨率还需要进一步提高.本研究将梳理和借鉴WEQ提出以来的部分科技文献,以北京市2017年为例,比较各种版本WEQ的差别及其对结果的影响,统一WEQ参数值的确定方法,采用一种提高土壤风蚀扬尘排放因子空间分辨率的方法并进行改进,以期为我国土壤风蚀扬尘排放因子、排放清单和控制方案研究提供技术支撑.

1 排放因子研究进展

1.1 WEQ及其参数介绍

1965年,Woodruff等^[21]和美国农业部在其多年农田土壤风蚀研究的基础上,提出了土壤风蚀方程(WEQ),该方程是第一个用于计算田间风蚀量的模型.1974年甚至更早之前,美国环保署将WEQ用于估算农业风蚀扬尘总悬浮颗粒物(TSP)排放^[22],

WEQ见公式(1).

$$EF = a \times k \times I \times K \times C \times L \times V \quad (1)$$

式中,EF为土壤风蚀扬尘中不同粒径颗粒物年排放因子,t·(hm²·a)⁻¹;a为粒径≤50 μm颗粒物占≤0.84 mm的质量分数;k为颗粒物粒径系数^[23],无量纲,TSP、PM₁₀和PM_{2.5}的k分别为1.00、0.50和0.075;I为土壤风蚀指数,t·(hm²·a)⁻¹;K为土壤粗糙因子,无量纲;C为气候因子^[23~26],无量纲,见公式(2);L为田间无屏蔽宽度因子,无量纲;V为植被覆盖因子,无量纲.

$$C = 3.86 \times u^3 / (PE)^2 \quad (2)$$

$$PE = 3.16 \times \sum_{i=1}^{12} \left[\frac{P_i}{(1.8T_i + 22)} \right]^{10/9} \quad (3)$$

式中,u为年平均风速,m·s⁻¹;PE为桑氏威特降水-蒸发指数^[24~26],无量纲,见公式(3);P_i为月降水量,mm,当P_i<12.7 mm按12.7 mm计算^[27,28];T_i为月平均温度,℃,当T_i<-1.7℃按-1.7℃计算^[27,28].

WEQ建立在特定区域“美国堪萨斯州加登市”的气候条件基础之上^[21,29,30],当应用于与其气候差异较大地区的风蚀量计算时,会有一定误差;在WEQ中,各种风蚀因子之间的复杂关系没有被考虑,将各因子总体效应采用乘积方式表达,可能会夸大某些因子的作用.

1.2 文献[2]中排放因子模型

文献[2]推荐的土壤风蚀扬尘排放因子模型见公式(4).

$$E_{si} = k \times I \times K \times C \times L \times V \times (1 - \eta) \quad (4)$$

式中,η为污染控制技术控制效率,无量纲;其他参数与前文WEQ一样,但C和PE的计算公式与前文不同,见公式(5)和(6),年蒸发量(E)计算见公式(7),或是将公式(6)和(7)合并为公式(8),虽然文献[2]的E计算公式源自文献[14],但文献[2,14]都与该公式的出处^[31,32]有所不同,文献[14]使用公式(9)计算E.

$$C = 0.504 \times u^3 / (PE)^2 \quad (5)$$

$$PE = 100 \times (P/E) \quad (6)$$

$$E = (0.5949 + 0.1189T_a) \times 91 \quad (7)$$

$$PE = 1.099 \times P / (0.5949 + 0.1189T_a) \quad (8)$$

$$E = (0.5949 + 0.1189T_a) \times 365 \quad (9)$$

文献[2]排放因子公式因为引用偏差和文献[14]自身问题导致文献[2]公式存在以下问题:①公式中缺少TSP占总风蚀损失的比例系数(a),美国环保署推荐a=2.5%^[22,24],Xuan^[14]引用文献[33]推荐的一组与土壤质地对应的系数,这组系数

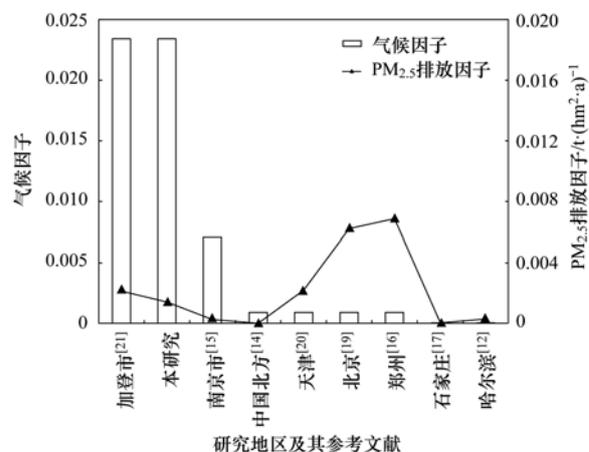
是干筛分得到的粒径 $\leq 50 \mu\text{m}$ 颗粒物占 $\leq 0.84 \text{ mm}$ 颗粒物的百分比;②土壤风蚀指数(I)源自文献[14,34,35],但是在单位换算时均未将美制 st 换算为公制 t ($1 \text{ st} = 0.907 \text{ t}$),导致计算结果被高估10%.此外 I 是针对于粒径 $\leq 0.84 \text{ mm}$ 的颗粒物,而文献[2]给TSP、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 分别赋了 I 值,使用者易在计算过程中重复计算 k 值,导致 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的 I 与EF分别被低估了70%和95%;③气候因子(C)公式源自文献[14],但并未给出其相关研究或推导过程,虽然该公式的形式与美国农业部公式一样,但是公式常数项仅为美国农业部公式的13%;④ C 的计算公式中桑氏威特降水-蒸发指数(PE)源自公式: $PE = 100 \times (P/E)$,是指年降水量和年蒸发量比值的100倍^[32],而桑氏威特将 PE 定义为1年内12月每月降水量和每月蒸发量比值之和的10倍^[25].

1.3 国内 WEQ 应用情况

表1是国内外学者估算研究区域内土壤风蚀扬尘排放因子选用的公式及参数值情况汇总,可以看出国内学者实际选用的公式及参数值差异较大.其中,WEQ选用了Chepil等^[29]在1954~1956年在美国堪萨斯州加登市的研究结果,该时段加登市 $u = 6.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $PE = 29.0$ 和 $C = 1.0$,并以加登市 $C = 1.0$ 作为基准^[21,22].因为相关研究中没有列出参数值以及 C 和EF计算结果,因此无法比较不同公式

的 C 和EF计算结果.本研究以北京市2017年气象数据和壤质砂土为例,以表1中各相关研究选用的公式计算 C 和土壤风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子(EF),计算结果比较见图1.对于相关研究中无数据的参数,计算时以本研究确定的参数值赋值,对于某些未考虑参数 a 和 η 的研究,将 a 赋值为1,将 η 赋值为0.

由图1可以看出,北京市2017年 C 值为加登市的2.3%,这是因为北京市 u 仅为加登市的35%,年降水量(P)为加登市的1.22倍, u 减小和 P 增大都会导致 C 减小,而且 u 对 C 的影响更大.南京^[15]、中



以北京市2017年气象条件为例
图1 国内学者的 C 和EF计算结果比较

Fig. 1 Comparison of C and EF results of domestic scholars

表1 土壤风蚀扬尘排放因子公式及参数值选取汇总

Table 1 Summary of soil wind erosion dust emission factor equation and parameter value selection

研究区域(研究年份)	EF 计算公式编号	C 计算公式编号	I (以壤质砂土为例)			$a/\%$	文献
			TSP	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$		
加登市(1955)	(1)	(2)、(3)	—	—	—	—	[21]
北京市(2017)	(1)	(2)、(3)	300	300	300	1.0	本研究
南京市(2010)	(1)	(2)、(6)、(9)	—	—	—	—	[15]
中国北方(1951~1980)	(1)	(5)、(6)、(9)	331	331	331	1.0	[14]
天津市(2013)	(4)	(5)、(6)、(9)	331	331	331	#	[20]
北京市(2016)	(4)	(5)、(6)、(9)	—	—	—	#	[19]
郑州市(2013)	(4)	(5)、(6)、(9)	331	331	331	#	[16]
石家庄市(2013)	(4)	(5)~(8)	331	331	331	#	[17]
哈尔滨市(2016)	(4)	(5)~(8)	331	331	331	#	[12]

研究区域(研究年份)	k			K	L	η	V	以北京市(2017年) 为例计算结果		文献
	TSP	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$					C	EF($\text{PM}_{2.5}$)	
加登市(1955)	—	—	—	1.0	0.96	#	0.42	0.023 4	0.002 1	[21]
北京市(2017)	1.00	0.50	0.075	0.5	0.85	#	0.63	0.023 4	0.001 4	本研究
南京市(2010)	1.00	0.20	0.033	—	—	—	—	0.007 1	0.000 3	[15]
中国北方(1951~1980)	1.00	—	—	0.5	1.00	#	0.125	0.000 9	6.0×10^{-6}	[14]
天津市(2013)	0.90	0.47	0.21	0.5	0.85	0.80	0.47	0.000 9	0.002 2	[20]
北京市(2016)	1.00	0.30	0.05	0.5	1.00	#	0.90	0.000 9	0.006 2	[19]
郑州市(2013)	1.00	0.30	0.05	0.5	1.00	#	0.90	0.000 9	0.006 9	[16]
石家庄市(2013)	1.00	0.30	0.05	0.5	1.00	0.75	0.28	5.7×10^{-5}	3.3×10^{-5}	[17]
哈尔滨市(2016)	1.00	0.30	0.05	0.5	1.00	#	—	5.7×10^{-5}	3.0×10^{-4}	[12]

1)“—”表示该参数无数据,计算时参考本研究的数据赋值;“#”表示未考虑该参数,当“ a ”为“#”时赋值1,当“ η ”为“#”时赋值0

国北方城市^[14]、天津^[20]、北京^[19]、郑州^[16]、石家庄^[17]和哈尔滨^[12]的研究中公式计算的 C 值分别是本研究的 0.302、0.039、0.039、0.039、0.039、0.002 和 0.002 倍,可见 C 值都存在不同程度的低估; $PM_{2.5}$ 排放因子分别是本研究的 0.191、0.004、1.547、4.415、4.871、0.024 和 0.212 倍,加登市采用本研究的 C 值计算得到的排放因子为 0.002 1,是本研究的 1.51 倍,北京^[19]和郑州^[16]高估 EF 的主要原因是缺少 a (赋值为 1,相比本研究选取 1.0% 增大了 100 倍),天津^[20]与本研究的 EF 较接近的原因是缺少 a 、低估 C 和考虑 η 等的综合结果,石家庄^[17]和哈尔滨^[12]的研究低估 EF 主要原因是严重低估了 C 值,此外哈尔滨^[12]的研究还严重低估了 I 值。

1.4 参数值确定方法

对比国内外相关研究,发现虽然 WEQ 中参数 a 、 k 、 K 和 L 值的确定非常复杂,但是取值相对比较统一,本研究参考的 a 值见表 1, k 值参考美国环保署推荐值, K 和 L 分别取值 0.5 和 0.85; 而 I 值的确定需要获取土壤质地空间分布,确定的 V 值有较大差异(0.125~0.90),国内缺乏 I 和 V 值的确定方法,本研究将详细介绍 I 值确定方法和改进 Li 等^[20] 于 2018 年提出的 V 值确定方法。

1.4.1 植被覆盖因子(V)确定方法

植被覆盖因子(V)在文献^[2]中被定义为裸露土壤面积占总计算面积的比例^[2], Li 等^[20] 于 2018 年提出了一种 V 值确定方法,即分别使用 Landsat 8 遥感影像计算不同季节的归一化植被指数(NDVI),通过像元二分模型^[36] (DPM)和公式(10)估算植被覆盖度(VC),其中,使用土地分类结果中该土地类型的 NDVI 最小值和最大值分别与对应类型的波段进行运算,以得到 DPM 中 $NDVI_{min}$ 和 $NDVI_{max}$,从而获得 VC,根据 V 的定义及公式 $V = (1 - VC)$,将 VC 转换为 V 。

$$VC = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (10)$$

式中,VC 为像元的植被覆盖度;NDVI 为像元的 NDVI 值; $NDVI_{min}$ 为植被覆盖部分的 NDVI 值; $NDVI_{max}$ 为非植被覆盖部分的 NDVI 值。

关于获取 $NDVI_{min}$ 和 $NDVI_{max}$,除了用分类后的土地类型分别求其 $NDVI$ ^[20,36] 的方法外,通常对 NDVI 统计直方图给定置信区间,求该区间内的最小和最大值作为 $NDVI_{min}$ 和 $NDVI_{max}$,或者取 5% 和 95% 频率的 NDVI 值作为 $NDVI_{min}$ 和 $NDVI_{max}$ 。本研究采取第二种方法。

结合影像质量,选取 2017 年的 7、10、12 月和

2018 年 4 月的 Landsat 8 遥感影像 (<https://www.gscloud.cn>) 分别代表夏、秋、冬和春季,使用 ENVI 5.3 中波段计算器计算 NDVI,并对 NDVI 结果统计分析,查找 5% 和 95% 频率对应的 NDVI 值。当 $NDVI < NDVI_{min}$, $VC = 0$; 当 $NDVI > NDVI_{max}$, $VC = 1$; 介于两者之间的用公式(10)运算,在波段计算器中写入波段运算公式,得到每个季节的 VC,4 个季节的 VC 平均值为年 VC,并利用 $V = (1 - VC)$ 得到 V 。

1.4.2 土壤风蚀指数(I)确定方法

表 2 是美国环保署推荐的土壤风蚀指数(I),选取时必须先确定土壤质地类型,而一个城市的土壤质地类型往往不是单一的。其中土壤质地类型划分是依据美国农业部(USDA)土壤分类标准,根据土壤中砂土、黏土和粉土任意 2 种的百分含量(质量分数),以及土壤质地三角图确定土壤质地类型。寒区旱区科学数据中心提供的基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(V1.1) (<http://westdc.westgis.ac.cn/>),提供了土壤中砂土、黏土和粉土百分含量的空间数据,但没有划分土壤质地。本研究采用在 Microsoft Excel 中自动查询的方法^[37],输入砂土、黏土和粉土百分含量数据,批量得到土壤质地信息,通过 GIS 得到研究区域的土壤质地类型图,查阅表 2 中 I 值,得到研究区域的 I 值空间分布。

表 2 土壤风蚀指数(I)和粒径分布

Table 2 Erodibility and average percent suspended particulate-sized particles by soil type

序号	土壤质地类型	土壤风蚀指数(I) ^[34] / $t \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$	粒径 $\leq 50 \mu m$ 颗粒物占 $\leq 0.84 mm$ 的质量分数 ^[33,35] /%
1	砂土	493	0.9
2	壤质砂土	300	1.0
3	砂质壤土	193	2.1
4	黏土	193	0.8
5	粉质黏土	193	0.8
6	壤土	126	6.6
7	砂质黏壤土	126	4.1
8	砂质黏土	126	1.0
9	粉质壤土	105	4.1
10	黏质壤土	105	2.5
11	粉质黏壤土	85	4.1
12	粉土	85	0.8

2 排放因子本地化

2.1 植被覆盖因子(V)

北京市山区植被覆盖度很高,山区土壤风蚀扬尘排放极少,因此本文的研究区域为北京市平原区。图 2 是北京市平原区植被覆盖因子(V)年均值 $1 km \times 1 km$ 的空间分布图,全市 V 平均值为 0.63 ± 0.09 。研究区内北京市各区存在较大差异,最大值和最小值分别为西城区 0.79 和顺义区 0.52,北京市

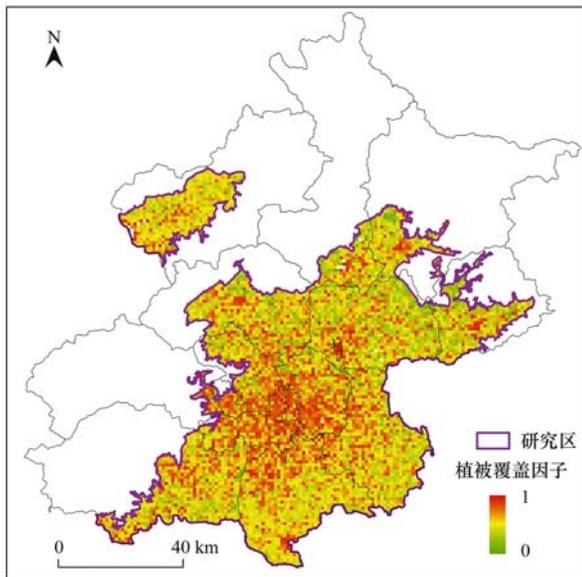


图2 北京市植被覆盖因子(V)空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of vegetation cover factor (V) in Beijing

不同区域的 V 值由内向外逐渐减少。

2.2 土壤风蚀指数(I)

图3是北京市 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的土壤质地空间分布,全市包括表2中全部12种土壤质地类型,其中壤土是北京市主要土壤质地类型,面积占比为32.1%;其次是砂质黏壤土,面积占比为13.8%,但是主要分布在北京市山区;黏质壤土和砂质壤土面积占比分别为13.3%和12.5%;其他类型土壤质地占比都低于10%,黏土、壤质砂土、砂土和粉质壤土的面积占比分别为9.8%、5.4%、5.2%和4.2%,剩余土壤质地占地面积合计为3.7%。北京市各区土壤质地分布和面积占比也不相同,例如平谷区、房山区和密云区以壤土、壤质砂土和砂质黏壤土为主,3种土壤合计分别占本区土地面积的98.1%、90.8%和88.7%;通州区和顺义区以壤土和壤质砂土为主,2种土壤分别占本区土地面积的97.4%和98.8%。

利用表2推荐的 I 值对图3进行 I 值赋值,将 I 值相同的土壤质地进行合并,北京市平原区6种土壤质地(壤土、黏土、砂质壤土、壤质砂土、黏质壤土和砂质黏壤土)对应4个 I 值,得到北京市 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的 I 值空间分布图(见图4)。就北京市而言, $I = 126$ 的土壤面积占比最大,其中包括土壤面积占比最大的壤土,以及 I 值与壤土相同的砂质黏壤土和砂质黏土,但砂质黏壤土主要分布在北京市山区。按照本文研究区域(北京市平原区)进行统计,壤土、壤质砂土、砂质壤土的面积占比排名前三,分别为49.4%、21.9%和12.3%,北京市平原区 I 值平均值为 188 ± 73 ,不同 I 值土壤面积占比排名前三的分别为 $I = 126$ 占55.1%、 $I = 300$ 占21.9%、 $I = 193$ 占

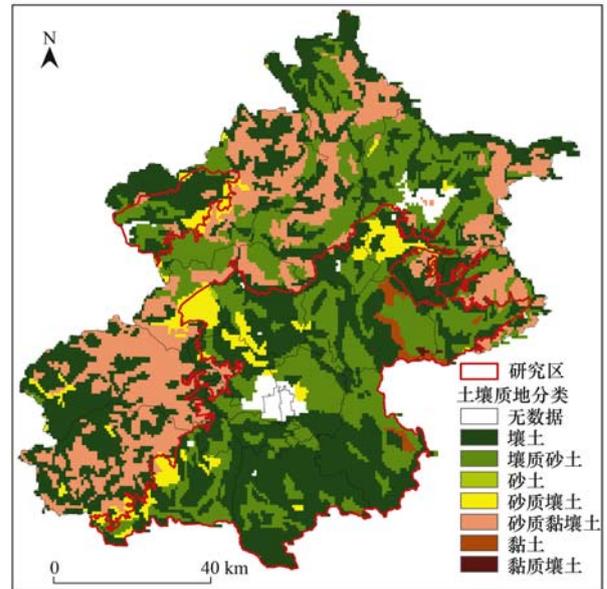


图3 北京市土壤质地空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil texture in Beijing

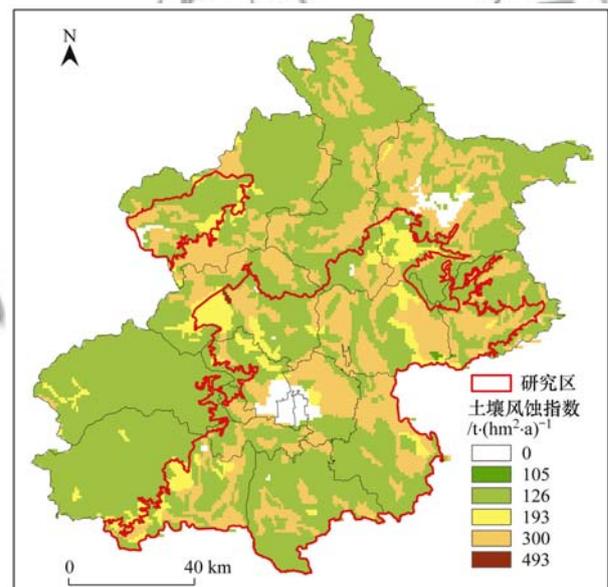


图4 北京市土壤风蚀指数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of erodibility index in Beijing

17.6%。

2.3 气候因子(C)

2.3.1 北京市气候因子

气候因子(C)本地化是实现土壤风蚀扬尘排放因子本地化最关键环节。图5是北京市54511号气象站(全球数据交换站)2008~2017年逐年的 C 值,可以看出北京市 C 的年际变化较大,其中2012年最小(0.017),2015年最大(0.042),近10年 C 的平均值为 0.029 ± 0.009 ,相对标准偏差为32%,因此计算 C 和土壤风蚀扬尘排放因子应该使用当年的月气象数据。按月将近10年的气象参数数据分别求平均,再代入气候因子公式,得到近10年平均气象条件下的平均 C 值为0.030,该 C 值是近10年 C 值

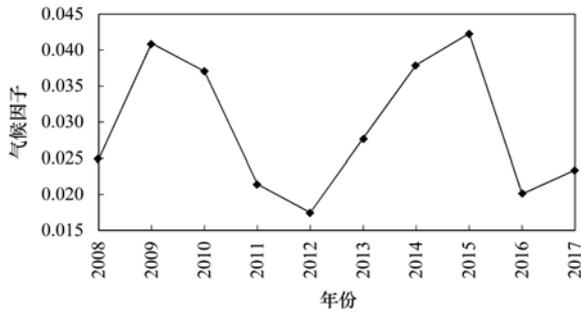


图5 北京市2008~2017年气候因子变化

Fig. 5 Changes in climate factors in Beijing from 2008 to 2017

平均值(0.029)的1.03倍,说明北京市使用累年月平均气象条件计算 C 值平均值会出现约3%的高估。

2.3.2 北京市各区气候因子

北京市各区气象条件存在差异,为了估算和对比各区土壤风蚀扬尘排放因子,需要根据北京市各区气象数据计算各区气候因子。目前可以免费获取的北京市各区逐月气象资料(月平均风速、月平均温度和月降水量)来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)提供的1981~2010年累年月均值,虽然使用平均气象条件计算 C 会出现约3%的高估,但是仍可以利用平均气象条件对比计算北京市各区之间的 C 值差异(见图6)。可以看出,各区之间 C 值存在较大差异,其中北京市54511号气象站平均 C 值为0.045,是近10年平均气象条件下平均 C 值(0.030)的1.5倍,这是因为近10年相比1981~2010年 u 值略有降低, PE 略有增加;通州区平均 C 值最高(0.050),平谷区 C 值最低(0.011),前者是后者的4.5倍;昌平区和海淀区的

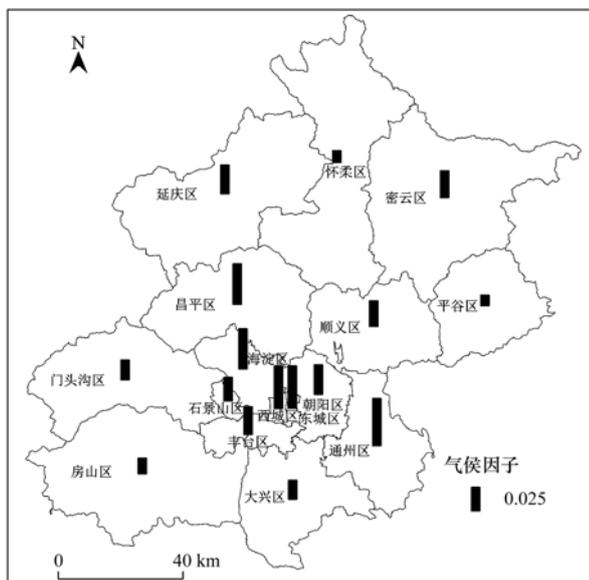


图6 北京市各区1981~2010年气候因子差异

Fig. 6 Differences in the climate factors in Beijing districts from 1981 to 2010

C 值都大于0.042;朝阳区、丰台区、密云区、石景山区、顺义区和延庆区的 C 值较为接近,约为0.030;房山区和怀柔区的 C 值较为接近,都小于0.017。

2.4 土壤风蚀扬尘排放因子

在GIS中对 V 、 I 和 C 进行空间叠加分析,根据公式(1)以及表1和表2中相关参数计算,绘制得到北京市平原区 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 土壤风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子空间分布(图7)。可以看出,北京市土壤风蚀扬尘排放因子呈现西北和东南方向较高的空间分布。全市平均值为 $(0.0018 \pm 0.0008)\text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,其中西城区排放因子最大,为 $0.0034\text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,因为西城区 V 值较大;其次是东城区、通州区、海淀区、昌平区和朝阳区;平谷区排放因子最小,为 $0.0006\text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,因为平谷区 C 值和 V 值较小。全市排放因子平均值是最高区(西城)和最低区(平谷)数值的0.54和3.12倍。

对网格化后的土壤风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子进行标准化处理^[38],使排放因子落在 $[0, 1]$,并采用等分法将结果分为5级,便于有针对性地开展土壤风蚀扬尘监管。低强度 $(0.0 \sim 0.2]$ 、较低强度 $(0.2 \sim 0.4]$ 、中等强度 $(0.4 \sim 0.6]$ 、较高强度 $(0.6 \sim 0.8]$ 和高强度 $(0.8 \sim 1.0]$ 的标准化排放因子面积占比分别为71.66%、22.80%、4.78%、0.72%和0.04%。

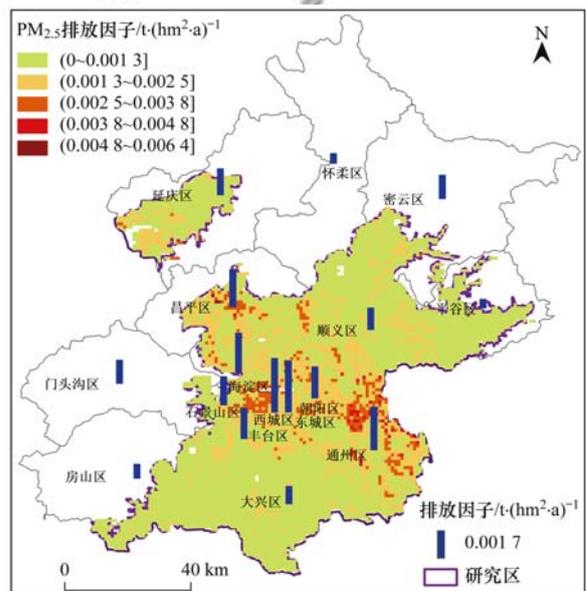


图7 北京市各区土壤风蚀扬尘 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of $\text{PM}_{2.5}$ emission factors of soil wind erosion dust in districts of Beijing

3 结论

(1)对比国内典型省市场尘源排放清单,发现土壤风蚀扬尘源对本地扬尘源 $\text{PM}_{2.5}$ 排放清单的贡献率分别为0.0040%、0.0084%、0.065%、0.69%、

23%和26%,最大差别为4个数量级,主要原因是土壤风蚀扬尘排放因子公式和参数值选取不统一。本研究采用一种土壤风蚀扬尘排放因子公式及参数值确定方法并改进,利用植被覆盖度遥感解译、中国土壤数据集(V1.1)和各区气象数据,分别计算北京市平原区的植被覆盖因子(V)、土壤风蚀指数(I)和气候因子(C)空间分布,并估算土壤风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 排放因子空间分布。

(2)以北京市2017年为例,发现国内某些学者的气候因子(C)值分别是本研究的0.302、0.039和0.002倍,都存在不同程度低估; $PM_{2.5}$ 排放因子分别是本研究的0.191、0.004、1.547、4.415、4.871、0.024和0.006倍,存在高估或低估的情况。

(3) V 、 I 和 C 值都具有明显空间差异, V 、 I 和 C 平均值分别为 0.63 ± 0.09 、 188 ± 73 和 0.029 ± 0.009 ,各区 V 、 I 和 C 值的最大值分别是最小值的1.5、2.1和4.5倍,多年平均气象条件计算的平均 C 值比多年 C 值的平均值略高3%。

(4)北京市土壤风蚀扬尘 $PM_{2.5}$ 排放因子呈现西北和东南方向较高的空间分布,全市平均排放因子为 $(0.0018 \pm 0.0008) t \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$,是最高区(西城)和最低区(平谷)数值的0.54和3.12倍,较高强度(0.6~0.8]和高强度(0.8~1.0]的标准化排放因子面积占比分别为0.72%和0.04%。

参考文献:

- [1] 国务院. 大气污染防治行动计划[Z]. 2013-09-10.
- [2] 环境保护部. 扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南(试行)[Z]. 2015-01-13.
- [3] 环境保护部. 关于大气污染源排放清单编制试点工作有关事项的通知[Z]. 2015-03-27.
- [4] 孔茹钰. 长春市大气中细颗粒物源排放清单编制研究[D]. 长春:吉林大学,2016.
Kong Y R. Research on emission inventory of fine particulate matter ($PM_{2.5}$) in the atmosphere of Changchun [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [5] 孙俐袁. 大气环境中 $PM_{2.5}$ 污染源排放清单研究——以吉林市为例[D]. 长春:吉林大学,2016.
Sun L Y. Study on emission inventory of $PM_{2.5}$ pollution sources in atmospheric environment - a case study of Jilin city [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [6] 潘月云,李楠,郑君瑜,等. 广东省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J]. 环境科学学报,2015,35(9):2655-2666.
Pan Y Y, Li N, Zheng J Y, et al. Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Guangdong Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(9): 2655-2666.
- [7] 周子航,邓也,谭钦文,等. 四川省人为源大气污染物排放清单及特征[J]. 环境科学,2018,39(12):5344-5358.
Zhou Z H, Deng Y, Tan Q W, et al. Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in the Sichuan province[J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5344-5358.
- [8] 张骥,徐媛,刘茂辉,等. 天津市北辰区大气污染物小尺度精细化源排放清单[J]. 中国环境监测,2018,34(2):20-27.
Zhang J, Xu Y, Liu M H, et al. Development of refined emission inventory of air pollutants for Beichen district of Tianjin [J]. Environmental Monitoring in China, 2018, 34(2): 20-27.
- [9] 舒丽,罗彬,胡健,等. 南充市大气 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 排放清单及特征[J]. 中国环境监测,2018,34(3):84-92.
Shu L, Luo B, Hu J, et al. Emission inventory and characteristics of atmosphere $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Nanchong [J]. Environmental Monitoring in China, 2018, 34(3): 84-92.
- [10] 北京市生态环境局. 北京市主要大气污染物排放清单(2017年度)[R]. 北京:北京市环境保护科学研究院,2018.
- [11] 黄宇,虎彩娇,成海容,等. 武汉市扬尘源颗粒物排放清单及空间分布特征[J]. 武汉大学学报(理学版),2018,64(4):354-362.
Huang Y, Hu C J, Cheng H R, et al. Emission inventory and spatial distribution characteristics of particulate matters from dust source in Wuhan, China [J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2018, 64(4): 354-326.
- [12] 李莉莉. 哈尔滨市高分辨率扬尘源排放清单及控制对策的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
Li L L. A highly resolved fugitive dust emission inventory in Harbin and assessment of control strategies [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [13] 北京市环境保护局. 最新科研成果新一轮北京市 $PM_{2.5}$ 来源解析正式发布[EB/OL]. <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/xxgk/jgm/jgsz/jjggszjzz/xcjyc/xwfb/832588/index.html>, 2018-05-14.
- [14] Xuan J. Dust emission factors for environment of northern China [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(11): 1767-1776.
- [15] 王社扣,王体健,石睿,等. 南京市不同类型扬尘源排放清单估计[J]. 中国科学院大学学报,2014,31(3):351-359.
Wang S K, Wang T J, Shi R, et al. Estimation of different fugitive dust emission inventory in Nanjing [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2014, 31(3): 351-359.
- [16] 徐媛倩,姜楠,燕启社,等. 郑州市裸露地面风蚀扬尘排放清单研究[J]. 环境污染与防治,2016,38(4):22-27.
Xu Y Q, Jiang N, Yan Q S, et al. Research on emission inventory of bareness wind erosion dust in Zhengzhou [J]. Environmental Pollution and Control, 2016, 38(4): 22-27.
- [17] 李媚,倪爽英,雷永从,等. 石家庄市土壤扬尘排放量估算及分布特征[J]. 环境工程学报,2017,11(11):5993-5999.
Li M, Ni S Y, Lei Y C, et al. Estimation and spatial distribution characteristics of soil dust emissions in Shijiazhuang [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(11): 5993-5999.
- [18] 郭祥,冯海波,陆雅静. 河北省土壤扬尘源 $PM_{2.5}$ 排放量估算[J]. 河北工业科技,2017,34(6):477-482.
Guo X, Feng H B, Lu Y J. Estimation of emissions of $PM_{2.5}$ from soil dust in Hebei province [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2017, 34(6): 477-482.
- [19] 刘奥博,吴其重,陈雅婷,等. 北京市平原区裸露地风蚀扬尘排放量[J]. 中国环境科学,2018,38(2):471-477.
Liu A B, Wu Q Z, Chen Y T, et al. Estimation of dust emissions from bare soil erosion over Beijing plain area [J]. China Environmental Science, 2018, 38(2): 471-477.
- [20] Li T K, Bi X H, Dai Q L, et al. Improving spatial resolution of soil fugitive dust emission inventory using RS-GIS technology: an application case in Tianjin, China [J]. Atmospheric

- Environment, 2018, **191**: 46-54.
- [21] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1965, **29**(5): 602-608.
- [22] U. S. Environmental Protection Agency. Development of emission factors for fugitive dust sources [R]. Triangle Park, North Carolina; U. S. Environmental Protection Agency, 1974.
- [23] U. S. Environmental Protection Agency. Fugitive Dust Background Document and Technical Information Document For Best Available Control Measures [R]. Triangle Park, North Carolina; U. S. Environmental Protection Agency, 1992.
- [24] U. S. Environmental Protection Agency. Guideline for development of control strategies in areas with fugitive dust problems [R]. Triangle Park, North Carolina; U. S. Environmental Protection Agency, 1977.
- [25] Thornthwaite C W. The climates of North America: according to a new classification [J]. Geographical Review, 1931, **21**(4): 633-655.
- [26] Skidmore E L. Wind Erosion Climatic Erosivity [J]. Climatic Change, 1986, **9**(1-2): 195-208.
- [27] Lyles L. Erosive wind energy distributions and climatic factors for the West [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, **38**(2): 106-109.
- [28] Panebianco J E, Buschiazio D E. Erosion predictions with the wind erosion equation (WEQ) using different climatic factors [J]. Land Degradation & Development, 2008, **19**(1): 36-44.
- [29] Chepil W S, Siddoway F H, Armbrust D V. Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1962, **17**(4): 162-165.
- [30] Woodruff N P, Armbrust D V. A monthly climatic factor for the wind erosion equation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1968, **23**(3): 103-104.
- [31] 潘亚茹, 王春乙. 气候变化对华北地区桑氏威特水分指数的影响 [A]. 见: 高素华, 王春乙. 农业气象试验与研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1992. 33-34.
- Pan Y R, Wang C Y. Effects of climatic change in North China on the Thornthwaite's precipitation—evaporation index [A]. In: Gao S H, Wang C Y (Eds.). Experiments and Studies of Agricultural Meteorology [M]. Beijing: Meteorology Press, 1992. 33-34.
- [32] McCabe Jr G J, Wolock D M, Hay L E, *et al.* Effects of climatic change on the Thornthwaite Moisture Index [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1990, **26**(4): 633-643.
- [33] Chepil W S. Soil conditions that influence wind erosion [R]. Washington: U. S. Department of Agriculture, 1958.
- [34] Craig D G, Turelle J W. Guide for wind erosion control on cropland in the Great Plains States [R]. U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1964.
- [35] Jutze G A, Axetell K. Factors influencing emissions from fugitive dust [A]. In: Symposium on Fugitive Emission Measurement and Control [C]. Hartford, CT, 1976.
- [36] 熊春妮. 基于 Landsat8 的广州市植被覆盖度监测 [J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(S2): 383-386.
- Xiong C N. Vegetation coverage based on Landsat8 images in Guangzhou [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **38**(S2): 383-386.
- [37] 郭彦彪, 戴军, 冯宏, 等. 土壤质地三角图的规范制作及自动查询 [J]. 土壤学报, 2013, **50**(6): 1221-1225.
- Guo Y B, Dai J, Feng H, *et al.* Standard mapping of soil textural triangle and automatic query of soil texture classes [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, **50**(6): 1221-1225.
- [38] 张立坤, 李令军, 姜磊, 等. 北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放 [J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 135-142.
- Zhang L K, Li L J, Jiang L, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics and fugitive dust emission of building sites in Beijing [J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 135-142.

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i>	(2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i>	(2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i>	(2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i>	(2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i>	(2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian	(2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin	(2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i>	(2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i>	(2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i>	(2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun	(2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i>	(2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min	(2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i>	(2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i>	(2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao	(2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Han, <i>et al.</i>	(2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i>	(2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i>	(2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i>	(2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i>	(2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i>	(2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i>	(2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i>	(2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i>	(2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i>	(2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i>	(2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i>	(2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i>	(2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-qing, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i>	(2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i>	(2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen	(2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i>	(2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i>	(2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i>	(2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i>	(2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu	(2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i>	(2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i>	(2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xixiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i>	(2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i>	(2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i>	(2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i>	(2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i>	(2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i>	(2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i>	(2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i>	(2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i>	(2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i>	(2972)