

基于 GIS 的中国 PM_{2.5} 浓度的空间分布及影响因素分析

李松^{1,2}, 罗绪强¹, 李恋¹, 万红燕¹

(1. 贵州师范学院 资源环境与灾害研究所, 贵州 贵阳 550018; 2. 中国科学院 遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

摘要: [目的] 研究中国 PM_{2.5} 的空间分布特征及其影响因素, 为区域可持续发展提供科学依据。[方法] 利用 2014 年 2 月 25 日上午 9 时和 3 月 23 日 9 时来自国家环保部的 PM_{2.5} 时均浓度值, 以 GIS 为平台利用双三次 B 样条方法, 以中国陆疆国界为内插区域, 模拟两个时相 PM_{2.5} 浓度的空间分布, 并在此基础上对比分析了美国 PM_{2.5} 浓度标准的差异, 进一步分析荒漠化、降水、风速和经济增长水平对 PM_{2.5} 浓度空间分异的影响。[结果] 模拟结果表明, 京、津为中心的华北地区是中国 PM_{2.5} 污染严重的区域, 珠三角是另一个污染较严重的区域, 西藏、新疆和贵州等西部省区是中国 PM_{2.5} 浓度较低, 空气质量较好的区域。[结论] 我国各地区 PM_{2.5} 浓度与区域经济发展水平表现出显著的相关性。

关键词: 空间分布; PM_{2.5}; 空间内插; 影响因素; GIS

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)04-0202-04

中图分类号: X51, X831

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.04.038

Spatial Distribution Model of Countrywide PM_{2.5} Concentration and Influence Factors Using Geographical Information System

LI Song^{1,2}, Luo Xuqiang¹, LI Lian¹, WANG Hongyan¹

(1. Institute of Resources Environment and Disaster, Guizhou Normal College, Guiyang, Guizhou 550018, China;

2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of spatial distribution of PM_{2.5} in China and the influence factors were studied to provide scientific basis for environment monitoring. [Methods] This paper collected hourly concentrations of PM_{2.5} pollutant at 9:00 on February 25 th and 9:00 on March 23 th, 2014. Consequentially, the countrywide spatial distribution of PM_{2.5} concentration was simulated within national boundaries using bicubic B-spline method in GIS. The concentration distribution was compared with that of USA spatially at different standard. [Results] The most serious polluted region is Beijing and Tianjin-centered north China, and another is Pearl River Delta. The western provinces, including Tibet, Xinjiang and Guizhou area are good-air regions with low concentration. [Conclusion] There is a stable relationship between economic growth and PM_{2.5} concentration.

Keywords: spatial distribution; PM_{2.5}; spatial interpolation; influence factors; GIS

近些年来,经常出现的大范围持续空气雾霾污染,成为影响人类社会生活和身体健康的重大难题,引发人们广泛的关注,曾成为百度搜索引擎关注度最高的搜索热词。由于经济的快速增长,煤炭为主的能源结构,以及粗放的经济增长模式,致使中国大气质量出现日益恶化的趋势,严重的空气污染从发达地区尤其是东部发达省份蔓延至全国,雾霾天气产生的频率,呈现显著的上升趋势^[1],对人类的生存环境和身体健康造成严重的影响。大气污染尤其是空气动力

学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的大气污染细颗粒物,也即 PM_{2.5} 引起更广泛的关注,成为世界各国环境污染防控最重要的对象之一^[2]。PM_{2.5} 主要物质来源是人类生产和生活中排放的废弃物,它的物质组成复杂,主要包括有机化合物、铵盐、硝酸盐、硫酸盐,以及钠、镁、铝、铁等金属,也包括铅、锌、砷、镉、铜等重金属元素。目前关于 PM_{2.5} 的研究,主要集中在北京、上海、广州和深圳市等发达地区城市,研究内容主要集中在污染特征和影响因素^[3-7]、污染物质构成和来源解析^[8-11]、污染

收稿日期:2014-05-06

修回日期:2014-06-17

资助项目:国家自然科学基金项目“喀斯特植物磷、钙胁迫的生态适应性调控机制研究”(31100187); 贵州教育厅科技项目(13GH069); 乌当科技局科研项目([2012]乌科技合同字 48 号)

第一作者:李松(1980—),男(汉族),贵州省织金县人,博士,副教授,主要从事地质灾害遥感研究。E-mail:zhijinese@163.com。

诱发的疾病和健康影响^[12-16]等方面。对大气污染的监测,目前国际通行的方法是通过定点的自动监测进行,有限的监测点只能观测较小范围内的空气污染水平,每个监测点观测值只在一定半径内有效。中国有限的PM_{2.5}监测点,主要集中在华北,其次是华东和珠三角,其他中西部地区监测点群分布较少,分散的监测点群,不能揭示空气污染在区域内的空间分布。因此,空气污染物在空间的连续分布是公众健康和社会经济健康发展所必须解决的问题。本研究试图通过中国PM_{2.5}国控监测点,分析B样条插值在PM_{2.5}空间分布模拟中的应用,并选取空气质量优、劣两个典型案例,结合GIS分析全国PM_{2.5}空间分布和演变特征。

1 研究方法

1.1 数据源

最近几年来,中国PM_{2.5}迅速为国内外所熟悉和关注。在这样的背景下,2011年底中国制定了《环境空气质量标准(二次征求意见稿)》以及《环境空气质量指数(AQI)日报技术规定(三次征求意见稿)》,在征求公众意见基础上,于2012年2月29日正式公布,将PM_{2.5}纳入常规监测标准体系。目前,中国的实时环境空气质量监测点主要设立在城市区域,本研究数据来自国家环保部PM_{2.5}国控监测点,覆盖了每个省级行政区包括新疆、西藏、青海,以及香港、澳门和台湾,超过200个城市,898个监测点。监测点的布局反映一定区域内空气污染水平和变化规律,监测点间设置条件尽可能一致,确保数据具有可比性。监测点覆盖各种污染水平区域。根据《环境空气质量监测规范(2007)》,对于高污染区域,为避免污染源直接影响监测结果,监测点与污染源应保持合适的距离。监测点密度呈现由东部沿海向西部内陆降低的趋势。每个监测点平均覆盖的国土面积,东部的海南、广东、福建、浙江、台湾、江苏、天津、北京、河北、辽宁是2300 km²;西部的新疆、西藏、内蒙古、青海和甘肃是9.63×10⁴ km²;其他中部省区为9500 km²。

1.2 研究方法

各国广泛采用的PM_{2.5}监测方法包括:β射线吸收法、重量法和微量振荡天平法,2008年欧盟成员国使用β射线吸收法和重量法的PM_{2.5}点占监测点的62%。本研究的PM_{2.5}浓度为标准状态下的浓度,污染物单位μg/m³,监测方法以β射线吸收法和重量法为主,并在内插基础上,比较中国(HJ633—2012)和美国PM_{2.5}的浓度标准(national ambient air quality Standards, NAAQS)差异(表1)。由于有限监测点

只能反映一定范围内(0.1~100 km)的区域水平,基于GIS平台,对其进行双三次B样条插值,模拟中国PM_{2.5}浓度的空间分布。

表1 中美PM_{2.5}浓度标准对比 μg/m³

等级	中国标准		美国标准	
	上限	下限	上限	下限
I 优等	35	0	15	0
II 良好	75	35	40	15
III 轻度污染	115	75	65	40
IV 中度污染	150	115	150	65
V 重度污染	250	150	250	150
VI 严重污染	—	250	—	250

2 结果与分析

中国国界和省界来自国家基础地理信息中心,投影为UTM投影。监测点经过UTM投影后,生成GIS点文件,构建PM_{2.5}字段,将PM_{2.5}时均浓度值与GIS点文件PM_{2.5}关联。利用监测点2014年2月25日上午9时和3月23日9时的PM_{2.5}时均浓度,以中国陆疆为内插区域,模拟两个时相PM_{2.5}浓度的空间分布(图1)。监测结果表明,3月23日9时的全国空气质量总体上明显优于2月25日上午9时。3月23日中国标准下,PM_{2.5}符合优秀标准的区域1.37×10⁶ km²,分布在西藏和上海大部,福建、浙江、广东沿海,黄土高原和内蒙古地区局部,贵州地区西南部。PM_{2.5}良好区域4.79×10⁶ km²,占中国总面积的近50%。轻度污染区域2.39×10⁶ km²,集中分布在新疆、华中、华北和东北沿边沿海区域。中度以上污染区域9.46×10⁵ km²。其中,中度污染主要集中在河北、山东和沈阳为中心的华北、东北地区 and 新疆,在湖北和珠三角地区也有较为集中的分布。重度污染区域分布在新疆维吾尔自治区库尔勒、广东省清远、北京、天津、山东省滨州和淄博、辽宁省瓦房店和本溪等地区。同期美国标准下,优秀区域2.53×10⁴ km²,仅在西藏南部和内蒙古东部地区有零星分布。良好区域1.59×10⁶ km²,分布区与中国标准下的优秀区域相似。轻度污染3.02×10⁶ km²,分布在四川、青海、甘肃和内蒙古大部。中度污染4.39×10⁶ km²,分布在新疆,以及湖南、湖北、河南、河北和东北三省的东北—西南向的带状区域。重度以上污染2.39×10⁶ km²。2014年2月25日,中国PM_{2.5}优秀和严重污染的区域都很广,呈现以京津为核心的近同心圆状分布,优秀区域3.60×10⁶ km²,主要分布在同心圆最外侧的西藏、新疆大部,云南、广西、江西、贵州局部。同心圆内侧是良好区域,面积2.00×10⁶ km²。轻度污染

$1.20 \times 10^6 \text{ km}^2$, 主要分布在在四川、重庆、青海地区。中度以上污染区域 $3.00 \times 10^6 \text{ km}^2$, 集中分布在华中、华北、华东和东北地区, 其中北京、天津、吉林和黑龙江地区为严重污染。美国标准中, 优秀的区域缩减到 $3.50 \times 10^5 \text{ km}^2$, 分布在西藏和云南南部、新疆北部和海南地区。中度污染区域扩大到四川、重庆和青海大部、甘肃东部和内蒙古西部地区。为了分析 $\text{PM}_{2.5}$ 的变化, 对 2 月 25 日、3 月 23 日的浓度做减法运算, 结果如图 2—3 所示。浓度增加 $0 \sim 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的主要有西藏和新疆地区, 增加 $\geq 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的主要有新疆库尔勒区域。其余区域的浓度降低, 降低的幅度由外向京津地区逐步增加。分别从东北 ($46.985^\circ \text{E}, 133.14^\circ \text{N}$) 到西南 ($28.758^\circ \text{E}, 90.786^\circ \text{N}$)、西北 ($43.147^\circ \text{E}, 80.827^\circ \text{N}$) 到东南 ($28.3^\circ \text{E}, 120.615^\circ \text{N}$)

两条直线切割 3 月 23 日和 2 月 25 日的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度图, 得到两个时相的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度剖面图。东北—西南切割线上每隔 500 km 的地名分别是(起点)黑龙江佳木斯富锦市建鸡高速—黑龙江五常市—吉林彰武县—北京平谷县—山西古交市—甘肃镇原县—西藏玛曲县—昌都县—桑日县—浪卡子县(终点), 结果表明, 在中国东北—西南方向上, 2 月 25 日的浓度显著高于 3 月 23 日的浓度。同样在西北—东南向的(起点)新疆昭苏县卡拉乌提克力—新疆尉犁县—新疆若羌县—青海德令哈市—青海泽库县—陕西勉县—彭泽县—浙江永嘉县岩头镇(终点)方向上, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化趋势较为复杂, 2 月 25 日的浓度与 3 月 23 日相比, 出现了“高一低—高一相似”的变化趋势, 交替点出现在青海北部和湖北东部, 东南沿海地区浓度趋于相近。

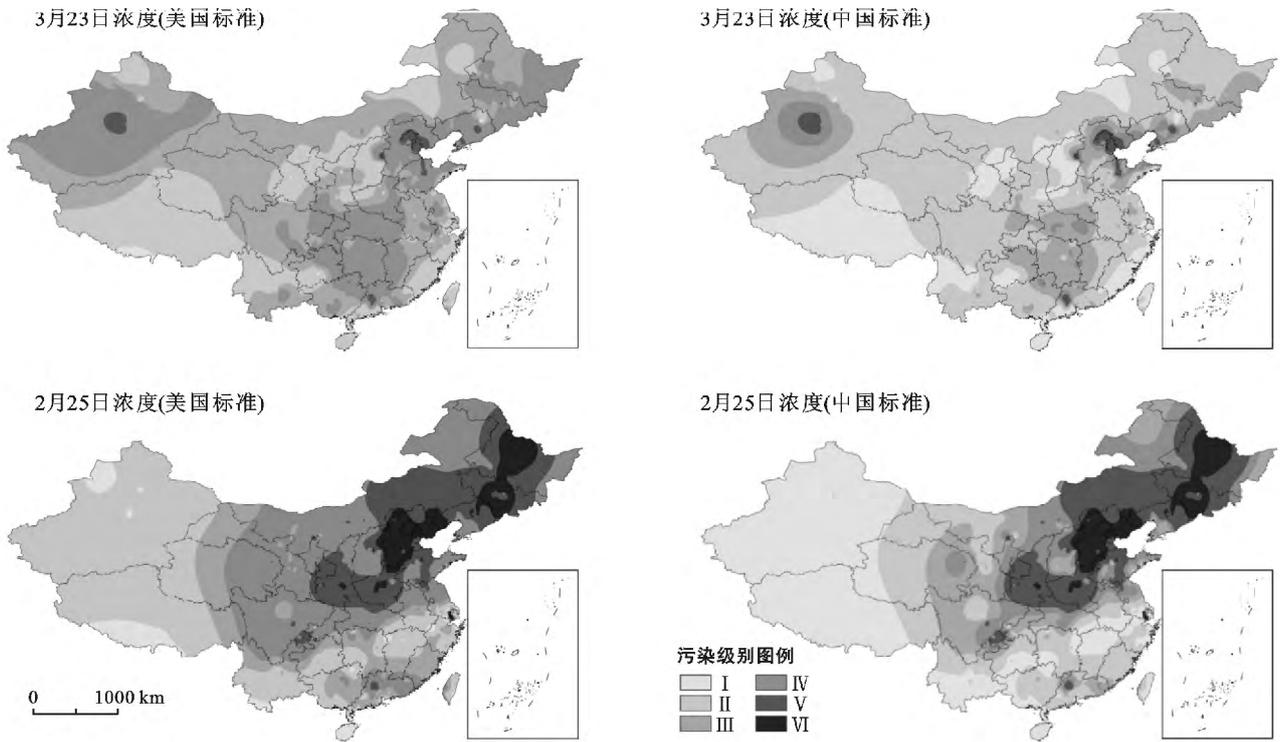


图 1 中国 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间模拟及与美国标准比较结果

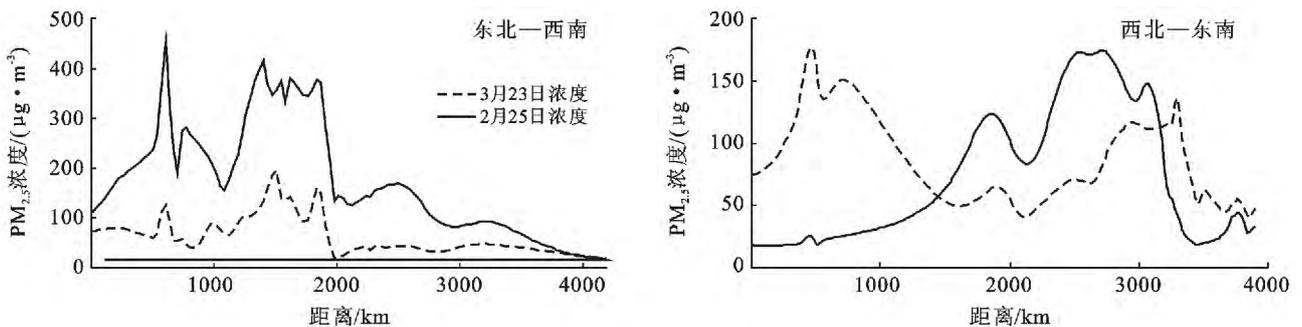


图 2 $\text{PM}_{2.5}$ 东北—西南向浓度曲线和 $\text{PM}_{2.5}$ 西北—东南向浓度曲线

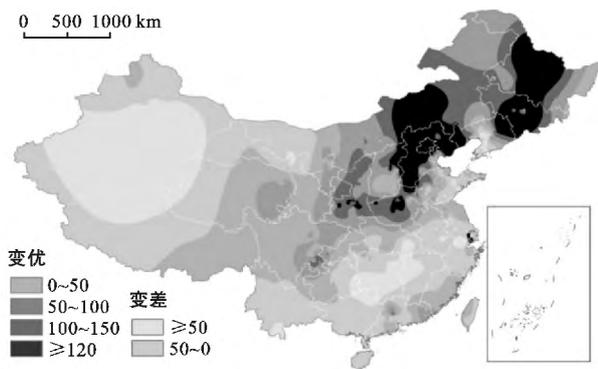


图 3 中国 2 月 25 日至 3 月 23 日 PM_{2.5} 浓度变化

3 PM_{2.5} 浓度影响因素分析

3.1 经济水平对 PM_{2.5} 浓度的影响

选择的两个时相,2 月 25 日的空气质量明显好于 3 月 23 日。但两个时相都表现出相似的空间分布特征。总体上,PM_{2.5} 浓度和经济发展水平有明显的相关性。在宏观地域上,中国北方大于南部,东部沿海大于西部内陆。中国 PM_{2.5} 浓度最高的 3 个区域都是中国经济发达程度最高的:广州、深圳为中心的珠江三角洲地区,上海为中心的长江三角洲地区,北京天津为中心的华北地区。经济落后地区的贵州、新疆、西藏、云南是全国 PM_{2.5} 浓度较低,空气质量较好的区域。

3.2 气象因素对 PM_{2.5} 浓度的影响

利用来自中国农业科学院的全国 2 月和 3 月份平均风速和年均降水量,分析风速、降水量对 PM_{2.5} 浓度变化的影响。在中国东南部,1 000 mm 等降水线东南部,是中国 PM_{2.5} 浓度最低的区域。在 1 000 mm 等降水线北部,PM_{2.5} 浓度分异特征和风速的地区差异相关,平均风速较高的西部,PM_{2.5} 浓度总体上低于东部地区。由于中国温度和降水表现出类似的地区分异特征,对 PM_{2.5} 的影响与降水类似,在平均气温最高的中国南部,尤其 16 °C 等温线南部,是中国 PM_{2.5} 浓度总体最低的区域。

3.3 荒漠化对 PM_{2.5} 的影响

荒漠化对 PM_{2.5} 有着重要的影响,尤其伴随着气象条件的变化,表现得更为明显。2014 年 3 月 23 日 9:00,在中国 PM_{2.5} 总体浓度较低,空气质量较好的背景下,以库尔勒为中心的新疆地区,塔克拉玛干大沙漠影响区域,却是 PM_{2.5} 浓度最高的最大的连续分布区之一。相比之下,2 月 25 日该地区的 PM_{2.5} 浓度却是全国最优的区域。

4 结论

研究区监测点有污染监控点、空气质量评价点、

空气质量对照点和空气质量背景点 4 类,后两类监测点远离污染源和建成区 20~50 km 以上,空气质量对照点代表性范围为几十千米。空气质量背景点的布置考虑了区域大气环境特征并远离污染源,不受局地环境的影响,代表性范围超过 100 km。西部的新疆、青海、西藏的监测点过于稀疏,而中、东部地区的布点满足空间内插的需要,因此,基于 GIS 的双三次 B 样条插方法在本次研究取得良好的效果。总体上,经济发展水平对 PM_{2.5} 浓度分异的影响还叠加了气象要素的作用,PM_{2.5} 浓度与区域经济发展水平表现出显著的相关性,3 月 23 日和 2 月 25 日的模拟结果表明,京、津为中心的华北地区是中国 PM_{2.5} 污染严重的区域,珠三角地区是另一个污染较严重的区域。西藏、新疆和贵州等西部省区是中国 PM_{2.5} 浓度较低,空气质量较好的区域。

[参 考 文 献]

- [1] Guo Jianping, Zhang Xiaoye, Wu Yerong, et al. Spatio-temporal variation trends of satellite-based aerosol optical depth in China during 1980—2008[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(37):6802-6811.
- [2] 王敏,周滨,郭宇,等. 基于 BP 人工神经网络的城市 PM_{2.5} 浓度空间预测[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(9): 63-66.
- [3] 蒲维维,赵秀娟,张小玲. 北京地区夏末秋初气象要素对 PM_{2.5} 污染的影响[J]. 应用气象学报, 2011, 22(6):716-723.
- [4] 孟晓艳,魏桢,王瑞斌,等. 灰霾试点城市 PM_{2.5} 浓度特征及其影响因素分析[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(9): 76-80.
- [5] 李龙凤,王新明,赵利容,等. 广州市街道环境 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度的变化特征[J]. 地球与环境, 2005, 33(2):57-60.
- [6] 于建华,虞统,魏强,等. 北京地区 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度的变化特征[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1):45-47.
- [7] 苏彬彬,刘心东,陶俊. 华东区域高山背景点 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 背景值及污染特征[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 455-461.
- [8] Karnae Saritha, John Kuruvilla. Source apportionment of fine particulate matter measured in an industrialized coastal urban area of South Texas[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(23):3769-3776.
- [9] Xu Lingling, Chen Xiaoqi, Chen Jinshen, et al. Seasonal variations and chemical compositions of PM_{2.5} aerosol in the urban area of Fuzhou, China[J]. Atmospheric Research, 2012, 104(3/4):264-272.
- [10] 黄虹,李顺诚,曹军骥,等. 广州市住宅室内 PM_{2.5} 排放源的定量计算[J]. 华南师范大学学报:自然科学版, 2007(1):64-69.

(下转第 212 页)

- 传多样性研究[D]. 陕西 西安:西北大学,2002.
- [2] 魏文寿,刘明哲. 古尔班通古特沙漠现代沙漠环境与气候变化[J]. 中国沙漠,2000,20(2):178-184.
- [3] 李生字,雷加强. 草方格沙障的生态恢复作用:以古尔班通古特沙漠油田公路扰动带为例[J]. 干旱区研究,2003,20(1):7-10.
- [4] 王雪芹,蒋进,张元明,等. 古尔班通古特沙漠南部防护体系建成 10 a 来的生境变化与植物自然定居[J]. 中国沙漠,2012,32(2):372-379.
- [5] 王雪芹,蒋进,雷加强,等. 古尔班通古特沙漠重大工程扰动地表稳定性与恢复研究[J]. 资源科学,2006,28(5):190-195.
- [6] 顾峰雪,潘晓玲,潘伯荣,等. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被土壤肥力变化[J]. 生态学报,2002,22(8):1179-1188.
- [7] 贾晓红,李新荣,王新平,等. 流沙固定过程中土壤性质变异初步研究[J]. 水土保持学报,2003,17(4):46-50.
- [8] 王雪芹,王涛,蒋进,等. 古尔班通古特沙漠南部沙面稳定性研究[J]. 中国科学(D 辑):地球科学,2004,34(8):763-768.
- [9] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978.
- [10] 段民福. 毛乌素沙地榆林沙区樟子松人工林土壤理化性质时空变异规律研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [11] 许尔琪,张红旗,许咏梅. 伊犁新垦区土壤全盐量和电导率定量关系探讨[J]. 资源科学,2012,34(6):1119-1124.
- [12] 张建国,徐新文,雷加强,等. 咸水滴灌下沙漠公路防护林土壤理化性质的变化[J]. 中国生态农业学报,2009,17(4):667-672.
- [13] 肖振华,万洪富,郑莲芬,等. 灌溉水质对土壤化学特征和作物生长的影响[J]. 土壤学报,1997,34(3):272-285.
- [14] 孙国荣,阎秀峰,李晶,等. 星星草对碱化土壤化学性质的影响[J]. 草地学报,2002,10(3):179-183.
- [15] 李生字,雷加强,徐新文,等. 流动沙漠地区灌溉林地盐结皮层特征的初步研究[J]. 北京林业大学学报,2007,29(2):41-49.
- [16] 杨梅焕,曹明明,朱志梅,等. 毛乌素沙地东南缘荒漠化过程中土壤理化性质分析[J]. 水土保持通报,2010,30(2):169-176.
- [17] 张庆费,由文辉,宋永昌. 浙江天童森林公园植物群落演替对土壤物理性质的影响[J]. 植物资源与环境学报,1997,6(2):36-40.
- [18] 贾晓红,李新荣,王新平,等. 流沙固定过程中土壤性质变异初步研究[J]. 水土保持学报,2003,17(4):46-50.
- [19] 王永芳,包慧娟,海春兴,等. 防护林对科尔沁沙地耕地土壤理化性质的影响[J]. 干旱区研究,2012,29(6):1009-1013.
- [20] 曾小梨,薛立,刘斌,等. 不同密度红苞木幼林的土壤理化性质研究[J]. 水土保持通报,2010,30(5):43-44.
- [21] 靳正忠,雷加强,徐新文,等. 塔里木沙漠公路防护林地土壤肥力质量变化与评价[J]. 科学通报,2008(S2):112-122.
- [22] 张瑾,贾宏涛,盛建东. 北疆荒漠植被梭梭林立地土壤特征及其空间变异性研究[J]. 新疆农业大学学报,2007,30(2):33-37.
- [23] 常庆瑞,高亚军,刘京. 陕北农牧交错带荒漠化土壤肥力水平研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2005,33(1):29-33.

(上接第 205 页)

- [11] 王泰,陈曦,何公理,等. 北京市城区冬季雾霾天气 $PM_{2.5}$ 中元素特征研究[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(6):1441-1445.
- [12] 时彦玲,邓林红. 细颗粒物($PM_{2.5}$)对气道的病理作用及其与哮喘病理机制的关系[J]. 医用生物力学,2013,28(2):127-134.
- [13] 谢元博,陈娟,李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 $PM_{2.5}$ 持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. 环境科学,2013,35(1):1-8.
- [14] 殷永文,程金平,段玉森,等. 上海市霾期间 $PM_{2.5}$, PM_{10} 污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关分析[J]. 环境科学,2011,32(7):1894-1898.
- [15] 谢元博,陈娟,李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 $PM_{2.5}$ 持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. 环境科学,2014,35(1):1-8.
- [16] Ma Yanjun, Chen Renjie, Pan Guowei, et al. Fine particulate air pollution and daily mortality in Shenyang, China[J]. Science of the Total Environment, 2011,409(13):2473-2477.