

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.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM_{2.5} 浓度遥感反演 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一(1513)

秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响
..... 李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉(1520)

基于 GAM 模型的西安市 O₃ 浓度影响因素解析 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎(1535)

北京及周边 6 个城市大气 PM_{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征 朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕(1544)

典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析 李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤(1550)

成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析 王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛(1561)

天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖(1573)

涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正(1582)

典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤(1589)

中国地表水硝酸盐分布及其来源分析 张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦(1594)

中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险 杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇(1607)

小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析 范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟(1619)

浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征 马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖(1629)

三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴(1636)

骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子 张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军(1648)

拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系 王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁(1657)

基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素
..... 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升(1666)

岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析 赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航(1676)

巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应 李如忠, 王莉, 刘超(1684)

镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复 丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇(1692)

氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用 杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君(1700)

北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性 陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡(1709)

新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用 黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵娴, 冯华军(1716)

Ni 掺杂 Sb-SnO₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶 石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠(1725)

磁性 Fe₃O₄-CuO 非均相活化过碳酸钠降解 A07 徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅(1734)

赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星, 性能和机制 史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟(1743)

工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响 张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜(1752)

污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性 陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇(1761)

改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性 毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆(1770)

A²/O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性 刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康(1779)

基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制 杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮(1787)

HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响 王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪(1794)

低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征 朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(1801)

不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征 程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良(1808)

投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响 杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪(1816)

中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险
..... 李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新(1825)

基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染 胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜(1838)

扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险 姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然(1847)

桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波(1855)

重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素 王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜(1864)

棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用 刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛(1871)

连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠(1880)

纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响 邓继宝, 张春来, 徐卫红(1888)

矿业废弃地复垦土壤-作物晒吸收特征及其对重金属拮抗效应 尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文(1904)

不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高(1914)

化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响 朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳(1921)

紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应 熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明(1930)

浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径 吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰(1941)

极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素 孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国(1950)

红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽(1960)

稻田土壤 N₂O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制 郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅(1968)

京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估 陈盼, 施晓清(1976)

中国城市工业化发展与 PM_{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波(1987)

《环境科学》征订启事(1618) 《环境科学》征稿简则(1635) 信息(1724, 1769, 1800)

基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染

胡梦珺, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 将2018年1~12月兰州市主城区校园地表灰尘重金属元素含量计算得到的综合污染指数(P_N)和潜在生态风险指数(RI)作为训练集,使用11个影响地表灰尘重金属污染和积累的特征参数,利用随机森林算法对信息采样点的 P_N 、RI进行估算,分析了地表灰尘重金属污染的时空变化特征,并对传统算法插值结果和随机森林插值结果进行了比较.结果表明,研究区地表灰尘重金属各元素浓度均高于本地背景值;研究区 P_N 排序为城关区>西固区>安宁区>七里河区,RI排序为城关区>西固区>七里河区>安宁区, P_N 和RI在空间分布特征上很相似,都位于交通枢纽或市中心; P_N 在冬季和夏季出现高值,RI高值则出现在冬季,冬季高值主要源于采暖燃煤源的增加;空间插值结果对比表明随机森林插值结果优于传统算法插值结果.

关键词: 随机森林; 综合污染指数; 潜在生态风险指数; 分布特征; 校园

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1838-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201908118

Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests

HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, LI Chun-yan, LI Na-na

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In this study, seven types of heavy metal elements and 11 types of characteristic parameters affecting heavy metal pollution and accumulation in surface dust were selected. Based on the comprehensive pollution index (P_N) and potential ecological risk index (RI) calculated from the heavy metal element content of the school dust in the main urban area of Lanzhou City in 2018 as the training set, the P_N and RI of the information sampling points were estimated using random forests. Then, the temporal and spatial characteristics of heavy metals in school dust in the main urban area of Lanzhou were analyzed. Finally, the correlation coefficient was used to evaluate the advantages and disadvantages of the traditional interpolation results and the random forest interpolation results. The results showed that the concentrations of heavy metals in the dust were higher than the local background values. The over standard rate of a single sample is 100%, Zn is 5 times higher than the background value, and Pb is 4 times higher than background value. P_N in the study area was in the order Chengguan > Xigu > Anning > Qilihe, and RI was in the order Chengguan > Xigu > Qilihe > Anning. P_N and RI exhibited very similar spatial distribution characteristics, both located in transportation hubs or downtown. In winter and summer, P_N exhibited a high value, whereas RI had a high value. The reason for the high value of P_N and RI in winter was the increase of coal sources in winter. The comparison of spatial interpolation results shows that the correlation coefficient between the results of random forest interpolation and traffic flow and normalized building index is greater than that of the traditional algorithm.

Key words: Random Forests; comprehensive pollution index; potential ecological risk index; distribution characteristics; schools

国内外学者对灰尘重金属污染状况^[1-3]、潜在生态风险^[4]和健康风险^[5,6]开展过大量研究,发现城市灰尘均存在不同程度的污染.目前对地表灰尘重金属主要的研究热点集中在累积现状的剖析且关注累积区域,而对一些特殊区域关注不够,特别是对这些特殊区域地表灰尘重金属导致的健康风险的关注更为薄弱^[7].校园是学生长期学习和生活的场所,人群密集,学生与环境接触密切,且未成年人的身体发育尚未成熟,受环境的影响更强烈^[8].

机器学习最早可追溯到人工神经网络的研究,1943年,有研究者提出了神经网络层次结构模型^[9],为机器学习的发展奠定了基础.机器学习包括人工神经网络(artificial neural network, ANN)^[10]、支持向量机(support vector machine, SVM)和随机森

林(random forests, RF)等方法,到目前为止有了十分广泛的应用.如Jung^[11]和陈浩等^[12]都在地学领域使用机器学习算法进行模拟或预测.

本文利用随机森林(random forests, RF)算法选取11个特征参数和钴(Co)、铬(Cr)、铜(Cu)、镍(Ni)、铅(Pb)、锌(Zn)和砷(As)等7种重金属元素对兰州市主城区校园环境进行评价,分析综合污染指数和潜在生态风险指数的时空变化特征,评价空间插值结果,以期评估城市校园环境质量提供理论依据.

收稿日期: 2019-08-14; 修订日期: 2019-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171018); 甘肃省高等学校科研项目(2018A-009)

作者简介: 胡梦珺(1974~),女,博士,副教授,主要研究方向为环境演变与沙漠化防治、元素地球化学, E-mail: lele200466@163.com

1 材料与方法

1.1 研究区与样品采集

兰州市是甘肃省省会 (36.03 ~ 36.15° N, 103.58 ~ 103.95° E), 本文选取兰州市所辖城关、七里河、安宁和西固这 4 个区作为研究区。城关区是政治、经济中心; 七里河区以机械、仓储和新兴加工业为主; 安宁区为高教文化区; 西固区则是综合工业区^[13]。在研究区内均匀布点, 保证幼儿园、小学和中学分散分布, 每个区选取幼儿园、小学和中学各 8 所, 共 96 所学校, 其中一半为灰尘采样点, 另一半为

信息采样点。灰尘采样点收集地表灰尘进行元素分析, 同时采集特征参数信息; 信息采样点只收集特征参数信息(图 1)。采样时间为 2018 年, 每月月末采集一次, 每所校园内选择多个点收集较为隐蔽地面灰尘后混合为一个样品, 每份约重 50 g 密封于聚乙烯塑料样品袋中, 实验室内剔除杂质后过 0.15 mm 铜筛。元素分析实验在中国科学院西北生态资源环境研究院沙漠室中进行, 将经碳化钨磨样机 (ZHM-1A) 研磨的灰尘样品用半自动压样机 (ZHY-401A) 加硼酸镶边压制成圆饼后, 用 X 射线荧光光谱仪 (Axios, 帕纳科公司, 荷兰) 分析各样品的元素含量。

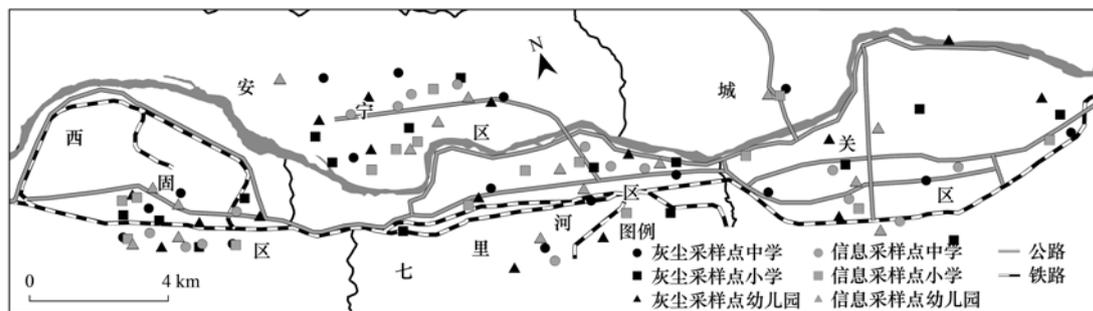


图1 研究区样点分布示意

Fig. 1 Sample distribution map of the study area

1.2 特征参数与数据

已有研究发现校园地表灰尘一般来源于道路扬尘、大气降尘、建筑物磨损和土壤母质^[14]。本研究将土壤母质视为稳定的灰尘积累因素不参与模型运算, 所以选取了校园地表灰尘一般来源的其它 3 个方面 11 个影响地表灰尘重金属污染和积累的特征参数作为输入, 分别为办学时间、环境质量指数 (air quality index, AQI)、在校人数、校园面积、校园绿地面积、校园 1 km 范围内工厂数、校园 1 km 范围内加油站数、校园 500 m 范围内公交站点数、人口密度、校园施工天数和校园施工面积。AQI 实测数据来自中国空气质量在线检测分析平台, 每所学校 AQI 的空间分布数据由 MODIS 地表反射率产品结合 Landsat 8 OLI 卫星数字产品蓝光波段反演获取^[15]; 办学时间、在校人数、校园施工天数和校园施工面积经实地走访调查得到; 校园 1 km 范围内工厂数、校园 1 km 范围内加油站数和校园 500 m 范围内公交站点数通过百度地图查询后统计; 校园占地面积和绿地面积采用谷歌地图量算; 人口密度通过 NPP-VIIRS VCMCFG 夜间灯光数据反演获取^[16]。

为了对空间插值结果进行评价, 下载了兰州市道路和建筑物数据, 归一化建筑指数采用 Landsat 8 OLI 卫星数字产品短波红外和近红外波段反演^[17], 道路数据来源于 OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org/>) 划分类别后计算交通流量。

1.3 研究方法

1.3.1 综合污染指数法

单因子污染指数法是指对某一污染物的污染程度进行评价, 计算公式为:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中, C_i 为污染物 i 的实测含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i 为污染物 i 的背景值。

综合污染指数^[18]是一种兼顾极值的多因子环境质量指数, 但过分突出极大值对污染的影响^[19], 评价结果不够客观, 所以不同污染因子的值应区别对待, 即增加权重因素进行修正, 公式为:

$$P_N = \sqrt{\frac{(P_{\max} + P_w)^2 + (P_{\text{ave}})^2}{2}} \quad (2)$$

式中, P_N 综合污染指数; P_{\max} 为各污染物中污染指数最大值; P_w 为各污染物以背景值作为评价因子的权重值; P_{ave} 为各污染物中污染指数的平均值。综合污染指数法将污染水平划分为 5 个等级, 清洁 ($P_N \leq 0.7$)、尚清洁 ($0.7 < P_N \leq 1.0$)、轻污染 ($1.0 < P_N \leq 2.0$)、中污染 ($2.0 < P_N \leq 3.0$) 和重污染 ($P_N > 3.0$)。

1.3.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法^[20] (potential ecological risk index, RI) 能定量地评价重金属污染程度, 结合污染物的毒性特征, 可以准确揭示各种污染物的影响和多种污染物的综合影响, 其计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_r^i) = \sum_{i=1}^n \left(T_r^i \times \frac{C^i}{C_n^i} \right) \quad (3)$$

式中,RI 为多种重金属潜在生态风险指数, E_r^i 为单一重金属潜在生态风险因子, C^i 为重金属含量, C_n^i 为土壤背景参考值, T_r^i 为不同重金属生物毒性影响因素 ($Co = 5, Cr = 2, Cu = 5, Ni = 5, Pb = 5, Zn = 1$ 和 $As = 10$)^[21]. 因本文仅涉及 7 种重金属, RI 的范围需调整^[22, 23]. RI 的分级标准为 $RI < 40$ 轻微生态危害 (I)、 $40 \leq RI < 80$ 中等生态危害 (II)、 $80 \leq RI < 160$ 强生态危害 (III)、 $RI \geq 160$ 很强生态危害 (IV).

1.3.3 随机森林

随机森林是 Breiman^[24] 开发的一种集成学习技术, 通过组合决策树来改进分类和回归树的集成学习方法^[25]. 在随机森林中有两个关键参数, “Ntree” 是随机森林中树的个数, “mtry” 是树节点预选的变量个数^[26]. 随机森林算法过程如下.

以模拟 P_N 时 “mtry” 是 4 (特征参数总数的 1/3), “Ntree” 是 500 为例, 元素含量计算得到 48 个采样点 12 个月的 P_N 作为训练结果, 与灰尘采样点的 11 类特征参数组成训练集; 训练集内有 6336 个特征参数和 576 个训练结果, 从训练集中随机且有放回的抽取训练样本. 选取 11 类特征参数中的 4 类, 即 2304 个特征参数和 576 个训练结果对应组成训练样本, 再将训练样本分成两部分, 1/3 的数据不参与训练, 对 2/3 的数据进行训练, 在每一个节点随机抽取如 “在校人数是否大于 500” 这样的特征参数 + 判

别条件 + 数值形式的判别条件, 直至训练样本全部被分配到叶节点生成决策树. 在生成决策树时为了避免过拟合或者算法冗余还采用了剪枝算法. 最后用 1/3 的验证训练样本来验证生成的决策树, 计算袋外错误率测试决策树的性能. 重复上述过程直至生成 “Ntree” 即 500 棵决策树组成随机森林. 训练过程用 Gini impurity 来评价误差, 计算公式如下:

$$I_G(f) = \sum_{i=1}^m f_i(1 - f_i) = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{i=1}^m f_i^2 = 1 - \sum_{i=1}^m f_i^2 \quad (4)$$

式中, f 是评价的数据, Gini impurity 越小, 纯度越高, 集合的有序程度越高, 分类的效果越好; Gini impurity 为 0 时, 集合类别一致.

得到 500 棵决策树之后进行回归过程, 回归过程的输入值为信息采样点的 6336 个特征参数组成的预测集, 通过回归得到信息采样点的 P_N . 回归过程采用最小均方差进行评价. 表达式为:

$$LMS = \min_{A,s} \left[\min_{c_1} \sum_{x_i \in D_1(A,s)} (y_i - c_1)^2 + \min_{c_2} \sum_{x_i \in D_2(A,s)} (y_i - c_2)^2 \right] \quad (5)$$

式中, c_1 为 D1 数据集的样本输出均值, c_2 为 D2 数据集的样本输出均值. 程序由 Python 语言编写. 本研究的流程见图 2.

1.3.4 特征参数的反演与验证数据

为获得 AQI 空间分布数据, 需对气溶胶厚度进行反演. 研究表明气溶胶厚度与 AQI 具有很强的相关性^[27]. 本文利用地物波谱库中典型地物波谱数

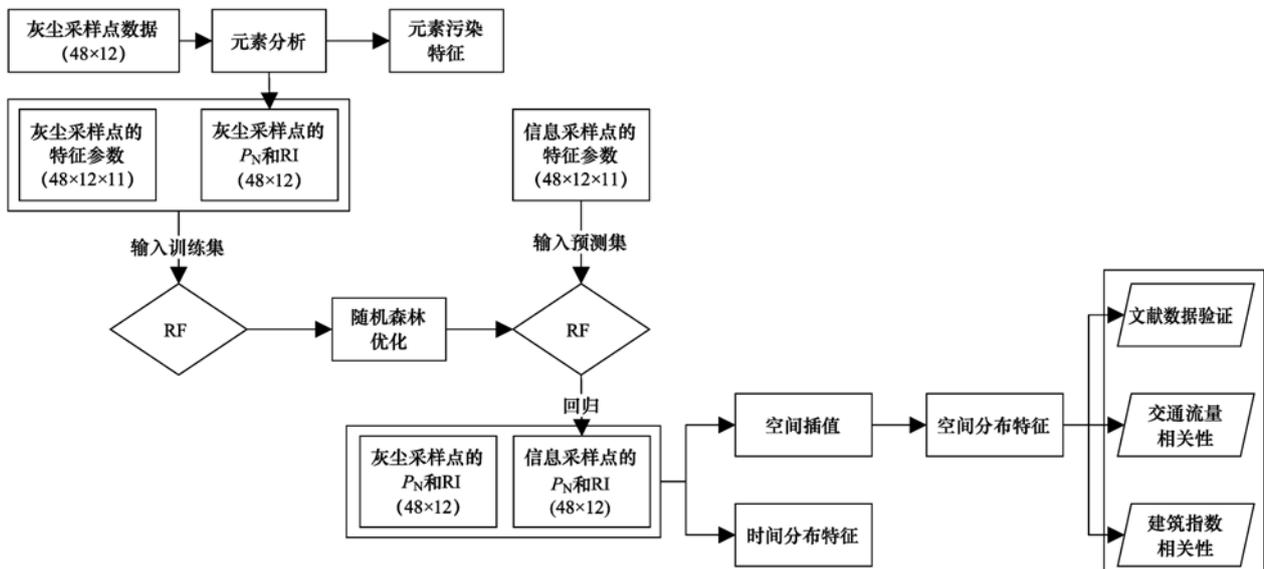


图 2 流程示意

Fig. 2 Technical flow chart

据,分析建立了 MODIS 与 Landsat 8 OLI 传感器蓝光波段反射率转换模型,转换模型选自文献[15],模型为 $\rho(\text{OLI}) = 1.4244 \times \rho(\text{MODIS}) - 0.0265$,然后用兰州地区 AERONET 地基观测数据(下载自 NASA, <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)确定了气溶胶光学物理参数。

为获取兰州市人口密度的空间数据,首先通过降尺度将夜间灯光数据进行处理获得 1 km^2 的兰州市城关区、七里河区、西固区和安宁区的夜间灯光数据,其次将灰度值求和与每个区的人口总数相除得到人口与灯光数据的加权值,反演出每一个栅格的人口数据,最后计算人口分布等值线,得到兰州市人口空间分布[图 3(a)]. 图 3(b)展示了兰州市归一化建筑指数,该指数的范围在 $0 \sim 1$ 之间,值越大代表该像元为城镇用地的可能性越高(其中白色的区域是空值区),图 3(c)展示了兰州市交通流量数据,为便于计算本研究将道路以两车道为界划分为两类,两车道及以上划分为一类,一车道划分为一类. 图 3(b)和图 3(c)用来评价空间插值结果。

1.3.5 相关性计算

采用基于像元的空间分析方法计算 P_N 或 RI 与交通流量及归一化建筑指数的相关性,结果值为 -1

~ 1 ,正值代表正相关,负值代表存在负相关,绝对值越接近于 1 相关性越显著. 公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=0}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中, R_{xy} 为 x, y 两变量的相关系数; x_i 为第 i 个 P_N 或 RI; y_i 为第 i 个交通流量或归一化建筑指数; \bar{x} 为 P_N 或 RI 的平均值; \bar{y} 为交通流量或建筑物指数的平均值。

2 结果与分析

2.1 校园地表灰尘重金属元素含量特征

7 种重金属元素含量均值及在 4 个区的均值都高于兰州市背景值,所有采样点重金属含量均高于背景值的 $1 \sim 5$ 倍,其中 Zn 高出 5 倍, Pb 高出 4 倍,单个样品的超标率为 100% (表 1); Cu、Zn 和 Pb 含量空间变异明显,大多数在 30% 以上,其它元素的空间差异较小,且呈现出 $\text{Cu} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Co}$ 的特征. 七里河区的重金属空间变异显著,城关区变异系数除 Pb 元素外,其它均在 30% 以下;空间变异在各区呈现出七里河区 $>$ 安宁区 $>$ 城关区 $>$ 西固区的特征。

表 1 校园地表灰尘重金属含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

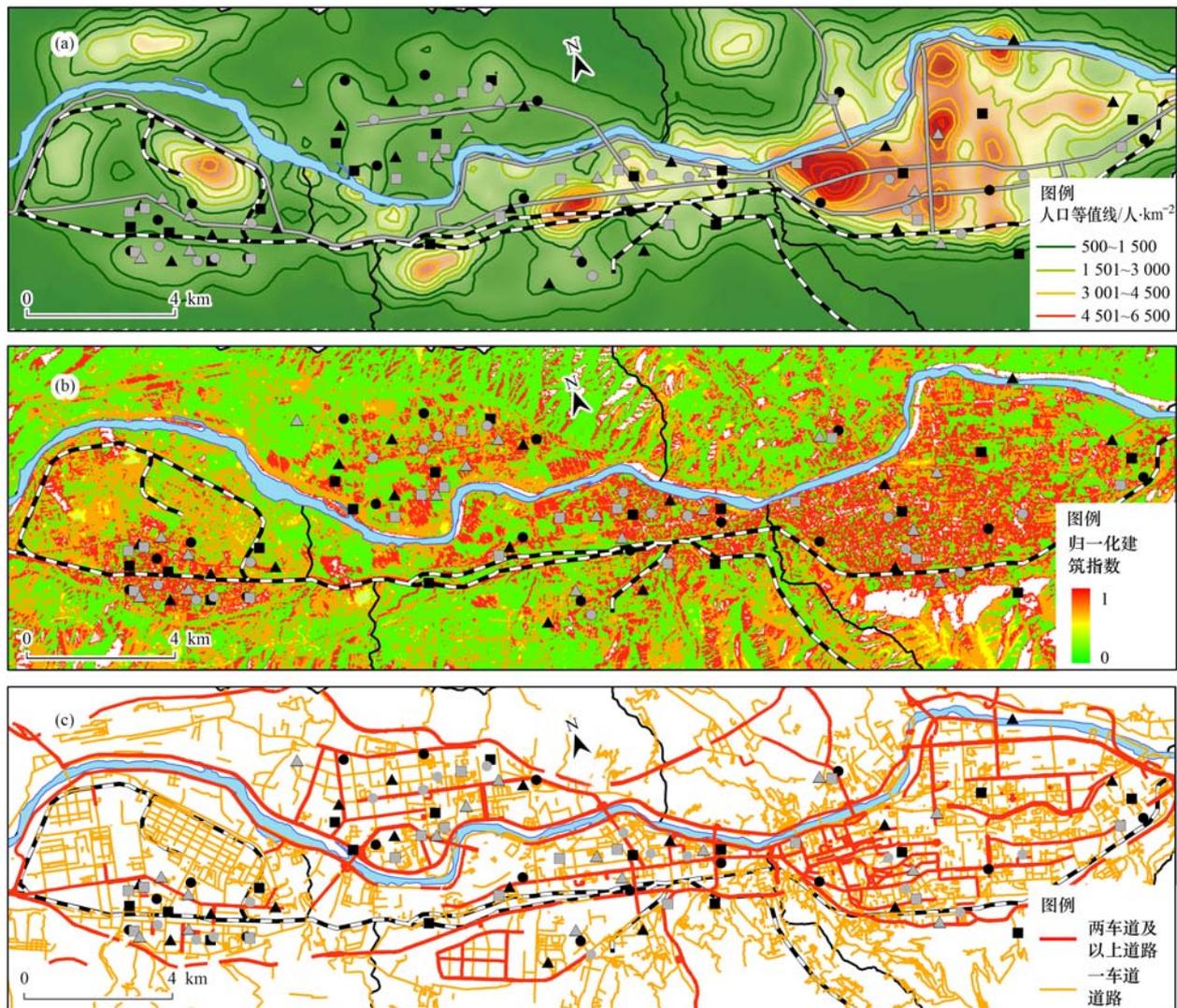
Table 1 Concentrations of heavy metals in campus dust/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

| 位置 | 项目 | Co | Cr | Cu | Ni | Pb | Zn | As |
|-------------------------|---------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-------------|
| 西固区 | 范围 | 14.6 ~ 18.4 | 91.7 ~ 166.2 | 47.3 ~ 113.5 | 34.2 ~ 59.92 | 63.8 ~ 147.7 | 210.9 ~ 759.7 | 14.4 ~ 19.1 |
| | 平均值 | 16.27 | 105.89 | 66.44 | 46.51 | 86.18 | 345.10 | 15.76 |
| | 变异系数/% | 6.66 | 6.14 | 36.65 | 14.38 | 25.39 | 39.70 | 7.46 |
| | 95% UCL | 16.86 | 109.39 | 79.52 | 50.11 | 97.94 | 418.70 | 16.39 |
| 安宁区 | 范围 | 13.7 ~ 16.5 | 79.6 ~ 103.8 | 45.2 ~ 180.0 | 31.4 ~ 45.0 | 49.6 ~ 96.4 | 201.9 ~ 949.5 | 11.5 ~ 17.9 |
| | 平均值 | 14.94 | 88.89 | 61.34 | 33.48 | 75.48 | 294.43 | 12.00 |
| | 变异系数/% | 4.83 | 6.77 | 50.21 | 10.51 | 18.63 | 58.45 | 12.06 |
| | 95% UCL | 15.33 | 97.58 | 86.98 | 40.58 | 85.42 | 438.45 | 15.97 |
| 七里河区 | 范围 | 14.4 ~ 23.8 | 71.7 ~ 173.0 | 41.1 ~ 91.2 | 30.7 ~ 116.5 | 42.3 ~ 163.9 | 150.2 ~ 417.4 | 11.0 ~ 18.6 |
| | 平均值 | 16.42 | 108.95 | 59.82 | 44.66 | 82.25 | 284.07 | 15.12 |
| | 变异系数/% | 13.44 | 45.49 | 71.70 | 64.74 | 47.14 | 32.89 | 26.57 |
| | 95% UCL | 17.85 | 125.34 | 67.65 | 56.74 | 100.82 | 332.55 | 16.54 |
| 城关区 | 范围 | 14.0 ~ 18.3 | 84.6 ~ 139.3 | 49.6 ~ 77.5 | 30.2 ~ 40.2 | 55.1 ~ 220.2 | 241.6 ~ 573.0 | 11.6 ~ 21.5 |
| | 平均值 | 15.92 | 99.02 | 62.60 | 34.78 | 99.40 | 348.48 | 15.66 |
| | 变异系数/% | 6.63 | 16.20 | 12.67 | 8.48 | 47.40 | 29.28 | 16.46 |
| | 95% UCL | 16.49 | 107.64 | 66.86 | 36.36 | 124.72 | 403.31 | 17.04 |
| 背景值 ^[28, 29] | | 13.01 | 59.90 | 22.90 | 30.16 | 22.00 | 67.10 | 10.60 |

2.2 研究区校园地表灰尘重金属污染时空分布特征

RF 模拟得出 4 个区 P_N 的高值区均出现在交通枢纽站附近或交通线路密集的区域[图 4(a)],可见人流和车流是灰尘重金属污染的主要来源. 李海雯等^[30]的研究表明, Zn、Pb 和 Cu 主要源于尾气排放和

车轮磨损,在本文研究中这 3 种元素也是污染的主要贡献因子. 西固区中心、兰州西站和城关区中心为 3 个强生态风险区,相比之下安宁区和黄河沿岸的区域生态风险较低,黄河及沿岸湿地绿化带对生态风险有很大缓冲作用, RI 较低[图 4(b)]. P_N 和 RI 在空间分



(a)人口密度,(b)归一化建筑指数,(c)交通流量数据

图3 兰州市特征参数与验证数据空间分布

Fig. 3 Lanzhou characteristic parameters and spatial distribution of verification data

布特征上很相似,高值区都位于交通枢纽或市中心,这与实际情况完全相符,城关区是研究区的中心,最密集的交通流量和人口都是地表灰尘的强大来源;西固区是兰州乃至整个西北的核心工业区,几十年的工业发展使得重金属粉尘、气体、废渣出现严重富集,这与开封、沈阳等城市中工业区的污染最严重相吻合^[31, 32]. 研究区校园地表灰尘重金属元素 P_N 排序为城关区 > 西固区 > 安宁区 > 七里河区, RI 值排序为城关区 > 西固区 > 七里河区 > 安宁区.

RF 模拟结果显示,研究区校园地表灰尘重金属污染具有明显的时间变化. P_N 呈现“M”型特征,高值区出现在冬季和夏季.自2月出现第一峰值后,4~5月开始上升至7~8月出现最大峰值,后逐步下降至10月后又逐渐上升[图5(a)]. RI 的时间分布特征呈单一一峰值,出现在2月,随后逐步下降在5月开始缓慢上升[图5(b)]. P_N 和 RI 的高值都

出现在冬季的原因是冬季兰州市燃煤源^[33]增加,且冬季温度低、云雾多、日照少,贴地逆温出现频率较高,气流垂直运动受限;同时受特殊下垫面地形影响,风速小,静风频率高,气流水平方向移动比较缓慢,非常不利于污染物扩散;春秋季节相对其它季节多风,且风速较大,由此造成的地面扬尘对大气中颗粒物的影响不可忽视,空气流动性强,有利于地表灰尘传输迁移^[34].

3 讨论

3.1 随机森林模型的优化

为了获得最佳模拟结果有必要对“mtry”和“Ntree”进行优化.“mtry”的取值范围是1~11,“Ntree”从500起以500为步长增长到4000.排列组合共有88种情况,随着“Ntree”数量的增加LMS随之降低.在“mtry”=4(特征参数的1/3)“Ntree”为

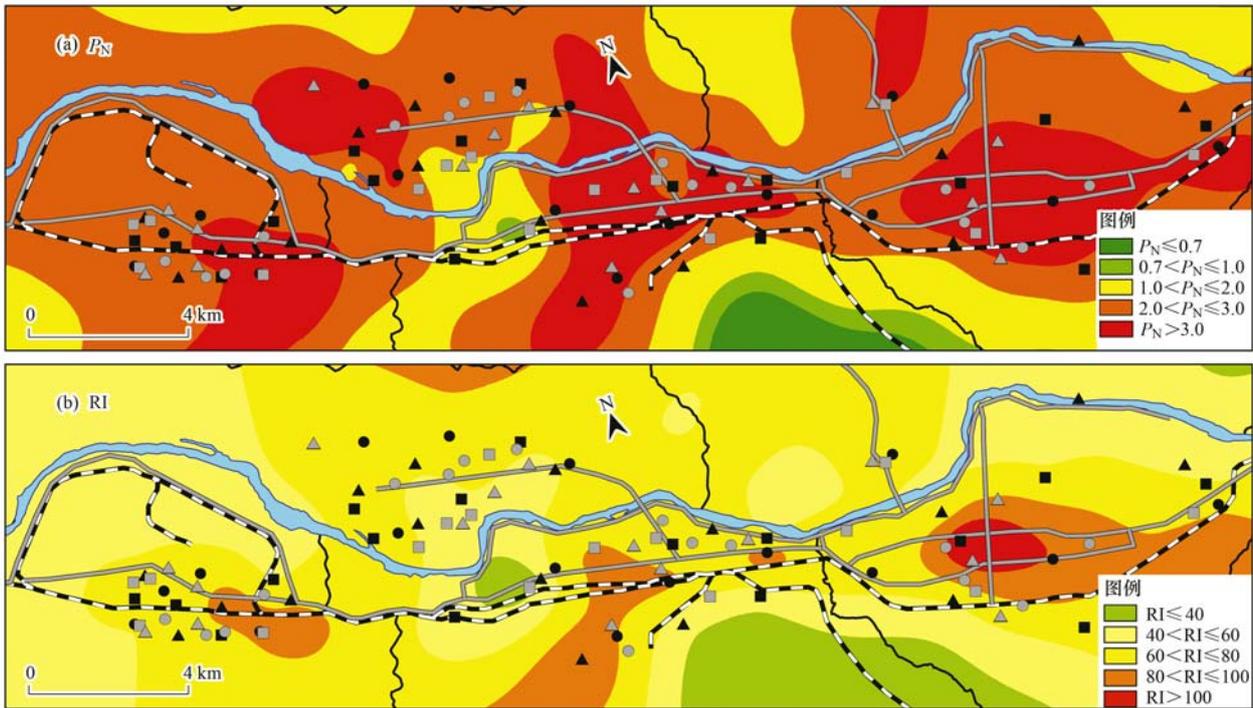


图4 灰尘重金属空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of dust heavy metals

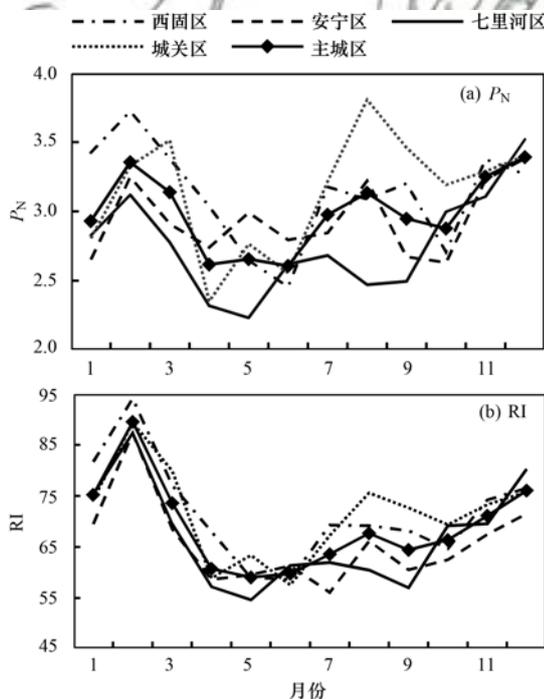


图5 灰尘重金属时间分布特征

Fig. 5 Time distribution characteristics of dust heavy metals

4 000时,产生最低误差. 本文的模拟选取误差最低的结果,通过模型优化得到了最优解,所以采用特征参数在随机森林模型中模拟 P_N 和 RI 是可行的.

3.2 灰尘重金属元素含量特征比较

元素含量空间变异的排序显示七里河区最高,与所处位置密切相关. 位于城关区与西固区之间,且作为城关区旧城区改造的承接区、冬季风的下风向,

既受西固工业区的强烈影响,又承担着大量的人流物流,故七里河区由于交通和工业造成的重金属空间变异在4个区中最为显著^[35]. 研究区地表灰尘含量值与国内外其它城市的学校、道路、地表灰尘、大气降尘和地表土壤相比(表2),Co 偏高,Cr、Cu、Ni 和 Zn 含量居中,Pb 和 As 偏低.

3.3 空间插值结果对比

采用两种方式对比随机森林插值结果和传统算法插值结果. 第一种使用萃取法从兰州市重金属的研究中找到存在于本文研究区范围内的采样点进行对比,如李萍等^[42]在兰大逸夫楼和赵一莎等^[43]在兰州交通大学的采样结果均接近于本研究中传统算法插值结果和随机森林插值结果;但在城市边缘存在较大误差,如王艳霞等^[44]在秀川采样计算的 P_N 为 0.575(清洁),传统算法插值结果的 P_N 值为 1.545(轻污染),随机森林插值结果的 P_N 值为 0.832(尚清洁),可见随机森林插值结果与实测值计算的结果更为接近,说明随机森林插值误差小于传统算法插值. 第二种分别计算交通流量和归一化建筑指数与传统算法插值结果和随机森林插值结果的相关性. 大气降尘、交通流量和建筑物磨损是灰尘的主要来源,所以空间插值结果和它们的相关性越高表示插值结果越好. 由表3可看出,传统算法插值结果和交通流量或归一化建筑指数的相关性均低于随机森林插值结果. 以上两种方式均表明,随机森林插值结果明显优于传统算法插值结果.

表 2 不同城市灰尘重金属含量比较¹⁾/mg·kg⁻¹Table 2 Comparison of heavy metal contents in dust of different cities/mg·kg⁻¹

| 城市 | Co | Cr | Cu | Ni | Pb | Zn | As | 灰尘类型 |
|----------------------|-------|--------|--------|-------|----------|-----------------|--------|------|
| 淮南 ^[8] | 11.09 | 80.15 | 42.55 | 23.99 | 97.21 | — ¹⁾ | — | 校园 |
| 北京 ^[36] | — | 85.00 | 78.30 | 41.10 | 69.60 | 248.50 | — | 道路 |
| 上海 ^[37] | — | 218.90 | 186.40 | 64.90 | 212.90 | 687.30 | — | 地表 |
| 西安 ^[38] | 9.80 | 177.50 | 46.60 | 29.30 | 97.40 | 169.20 | — | 道路 |
| 乌鲁木齐 ^[39] | — | 66.05 | 59.05 | 48.79 | 33.94 | 806.00 | 151.50 | 大气 |
| 呼和浩特 ^[40] | — | 54.75 | 30.07 | 16.47 | 11.63 | 89.93 | — | 土壤 |
| 伦敦 ^[41] | — | 112.00 | 191.00 | — | 2 008.00 | 1 176.00 | — | 道路 |
| 纽约 ^[41] | — | — | 335.00 | — | 2 583.00 | 1 811.00 | — | 道路 |
| 爱丁堡 ^[8] | — | 16.00 | 57.00 | 15.00 | 118.00 | 213.00 | — | 校园 |
| 埃莫西约 ^[8] | — | 11.15 | 26.40 | 4.70 | 36.15 | 387.98 | — | 校园 |
| 本研究 | 15.89 | 102.01 | 64.34 | 41.09 | 86.37 | 327.83 | 15.40 | 校园 |

1) “—”表示文献中没有相关数据

表 3 空间插值结果相关性分析

Table 3 Relevance analysis of spatial difference results

| 组别 | 项目 | P_N & 交通 | P_N & 建筑物 | RI & 交通 | RI & 建筑物 |
|--------|------|------------|-------------|---------|----------|
| 随机森林插值 | 西固区 | 0.71 | 0.73 | 0.72 | 0.81 |
| | 安宁区 | 0.63 | 0.62 | 0.60 | 0.65 |
| | 七里河区 | 0.54 | 0.56 | 0.57 | 0.62 |
| | 城关区 | 0.73 | 0.76 | 0.79 | 0.84 |
| | 主城区 | 0.66 | 0.68 | 0.69 | 0.74 |
| 传统算法插值 | 西固区 | 0.60 | 0.62 | 0.62 | 0.73 |
| | 安宁区 | 0.38 | 0.44 | 0.36 | 0.48 |
| | 七里河区 | 0.43 | 0.46 | 0.47 | 0.53 |
| | 城关区 | 0.59 | 0.63 | 0.66 | 0.71 |
| | 主城区 | 0.51 | 0.55 | 0.54 | 0.62 |

4 结论

(1) 通过模型优化得到了最优解,说明采用特征参数在随机森林模型中模拟 P_N 和 RI 是可行的。

(2) 研究区校园地表灰尘重金属各元素浓度均高于兰州市土壤背景值,Zn、Pb 是主要污染因子,元素含量空间变异程度七里河区最高。

(3) P_N 和 RI 空间分布特征很相似,高值区都位于交通枢纽或市中心,河流和湿地对污染区的缓冲作用明显; P_N 最高值出现在冬季、次高值在夏季,RI 冬季值最高,两者均在冬季出现高值的原因因为冬季燃煤源的增加。

(4) 空间插值结果对比表明,随机森林插值结果明显优于传统算法插值结果。

致谢:感谢中国科学院寒区旱区环境与工程研究所公共技术服务中心提供样品测试服务;对中国科学院西北生态资源环境研究院张彩霞高级工程师协助完成元素测试、西北师范大学地理与环境科学学院硕士研究生孙皓在研究方法上给予的指导与帮助致以诚挚的谢意!

参考文献:

[1] Al-Khashman O A. The investigation of metal concentrations in

street dust samples in Aqaba City, Jordan [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2007, **29**(3): 197-207.

[2] Zhu W, Bian B, Li L. Heavy metal contamination of road-deposited sediments in a medium size city of China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, **147**(1-3): 171-181.

[3] Lu X W, Wang L J, Lei K, et al. Contamination assessment of copper, lead, zinc, manganese and nickel in street dust of Baoji, NW China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **161**(2-3): 1058-1062.

[4] 林啸, 刘敏, 侯立军, 等. 上海城市土壤和地表灰尘重金属污染现状及评价 [J]. 中国环境科学, 2007, **27**(5): 613-618.

Lin X, Liu M, Hou L J, et al. Soil and surface dust heavy metal pollution state and assessment in Shanghai City [J]. China Environmental Science, 2007, **27**(5): 613-618.

[5] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, et al. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China [J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(4): 726-733.

[6] 郑小康, 李春晖, 黄国和, 等. 保定城区地表灰尘污染物分布特征及健康风险评估 [J]. 环境科学学报, 2009, **29**(10): 2195-2202.

Zheng X K, Li C H, Huang G H, et al. Pollutant distribution in urban dusts of Baoding and health risk assessment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, **29**(10): 2195-2202.

[7] 李晓燕, 陈同斌, 雷梅, 等. 北京城市广场及校园表土(灰尘)中重金属水平与健康风险 [J]. 地理研究, 2010, **29**(6):

- 989-996.
- Li X Y, Chen T B, Lei M, *et al.* Concentrations and risk of heavy metals in surface soil and dust in urban squares and school campus in Beijing[J]. *Geographical Research*, 2010, **29**(6): 989-996.
- [8] 武家园, 方凤满, 姚有如, 等. 淮南小学校园不同活动场所灰尘重金属区域分异及生物可给性[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(4): 1287-1296.
- Wu J Y, Fang F M, Yao Y R, *et al.* Bioaccessibility and spatial distribution of heavy metals in dust from different activity areas of elementary schools in Huainan City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(4): 1287-1296.
- [9] 陈凯, 朱钰. 机器学习及其相关算法综述[J]. *统计与信息论坛*, 2007, **22**(5): 105-112.
- Chen K, Zhu Y. A summary of machine learning and related algorithms[J]. *Statistics & Information Forum*, 2007, **22**(5): 105-112.
- [10] Dawson C W, Wilby R L. Hydrological modelling using artificial neural networks[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2001, **25**(1): 80-108.
- [11] Jung M, Reichstein M, Margolis H A. Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**(G3): G00J07.
- [12] 陈浩, 宁忱, 南卓铜, 等. 基于机器学习模型的青藏高原日降水数据的订正研究[J]. *冰川冻土*, 2017, **39**(3): 583-592.
- Chen H, Ning C, Nan Z T, *et al.* Correction of the daily precipitation data over the Tibetan Plateau with machine learning models[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, **39**(3): 583-592.
- [13] 刘淑净. 兰州市城区建设用地开发强度与环境效应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- Liu S J. Study on urban construction land exploit intensity and environmental effect in Lanzhou city [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [14] 张丹龙, 方凤满, 姚有如, 等. 淮南市不同功能区叶面尘和地表灰尘中重金属分布特征、来源及健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(9): 3322-3332.
- Zhang D L, Fang F M, Yao Y R, *et al.* Distribution, sources and health risk assessment of heavy metals in foliar and surface dust of different functional areas of Huainan City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(9): 3322-3332.
- [15] 田信鹏, 孙林, 刘强, 等. 北京地区 Landsat 8 OLI 高空间分辨率气溶胶光学厚度反演[J]. *遥感学报*, 2018, **22**(1): 51-63.
- Tian X P, Sun L, Liu Q, *et al.* Retrieval of high-resolution aerosol optical depth using Landsat 8 OLI data over Beijing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, **22**(1): 51-63.
- [16] 高义, 王辉, 王培涛, 等. 基于人口普查与多源夜间灯光数据的海岸带人口空间化分析[J]. *资源科学*, 2013, **35**(12): 2517-2523.
- Gao Y, Wang H, Wang P T, *et al.* Population spatial processing for Chinese coastal zones based on census and multiple night light data[J]. *Resources Science*, 2013, **35**(12): 2517-2523.
- [17] 胡荣明, 黄小兵, 黄远程. 增强形态学建筑物指数应用于高分辨率遥感影像中建筑物提取[J]. *测绘学报*, 2014, **43**(5): 514-520.
- Hu R M, Huang X B, Huang Y C. An enhanced morphological building index for building extraction from high-resolution images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, **43**(5): 514-520.
- [18] 关伯仁. 评内梅罗的污染指数[J]. *环境科学*, 1979, (4): 67-71.
- [19] 谷朝君, 潘颖, 潘明杰. 内梅罗指数法在地下水水质评价中的应用及存在问题[J]. *环境保护科学*, 2002, **28**(1): 45-47.
- Gu C J, Pan Y, Pan M J. The application and existed problems of Nemer index in groundwater quality evaluation [J]. *Environmental Protection Science*, 2002, **28**(1): 45-47.
- [20] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [21] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J]. *地理科学*, 2005, **25**(1): 108-112.
- Guo P, Xie Z L, Li J, *et al.* Specificity of heavy metal pollution and the ecological hazard in urban soils of Changchun City [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, **25**(1): 108-112.
- [22] 周笑白, 梅鹏蔚, 彭露露, 等. 渤海湾表层沉积物重金属含量及潜在生态风险评价[J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(3): 452-456.
- Zhou X B, Mei P W, Peng L L, *et al.* Contents and potential ecological risk assessment of selected heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2015, **24**(3): 452-456.
- [23] 宁增平, 蓝小龙, 黄正玉, 等. 贺江水系沉积物重金属空间分布特征、来源及潜在生态风险[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(8): 3036-3047.
- Ning Z P, Lan X L, Huang Z Y, *et al.* Spatial distribution characteristics, sources and potential ecological risk of heavy metals in sediments of the Hejiang river [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(8): 3036-3047.
- [24] Breiman L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001, **45**(1): 5-32.
- [25] Cutler D R, Edwards Jr T C, Beard K H, *et al.* Random forests for classification in ecology [J]. *Ecology*, 2007, **88**(11): 2783-2792.
- [26] Vincenzi S, Zucchetto M, Franzoi P, *et al.* Application of a random forest algorithm to predict spatial distribution of the potential yield of *Ruditapes philippinarum* in the Venice lagoon, Italy [J]. *Ecological Modelling*, 2011, **222**(8): 1471-1478.
- [27] 张丽娟. 北京市 MODIS 遥感气溶胶光学厚度与空气质量关系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- Zhang L J. Study on the correlation between MODIS AOD products and the air pollution in Beijing [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.
- [28] 卢子扬, 张崇德, 郝敬丹. 兰州地区土壤元素背景值的研究[J]. *环境研究*, 1987, (1): 17-22.
- [29] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 8.
- [30] 李海雯, 陈振楼, 王军, 等. 基于 GIS 的上海城市灰尘重金属空间分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(5): 803-809.
- Li H W, Chen Z L, Wang J, *et al.* Research of spatial variability of heavy metal pollution of dust in Shanghai urban area based on the GIS [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(5): 803-809.
- [31] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 1037-1044.
- Li Y M, Ma J H, Liu D X, *et al.* Assessment of heavy metal

- pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng City, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 1037-1044.
- [32] Li X Y, Liu L J, Wang Y G, *et al.* Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China[J]. *Geoderma*, 2013, **192**: 50-58.
- [33] 齐梦溪, 赵文慧, 孙爽, 等. 2014-2016年北京市PM_{2.5}污染时空分布特征[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(1): 97-105.
Qi M X, Zhao W H, Sun S, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of PM_{2.5} pollution in Beijing from 2014 to 2016 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(1): 97-105.
- [34] Murakami M, Nakajima F, Furumai H. Modelling of runoff behaviour of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from roads and roofs[J]. *Water Research*, 2004, **38**(20): 4475-4483.
- [35] 李彤玥. 基于“暴露—敏感—适应”的城市脆弱性空间研究——以兰州市为例[J]. *经济地理*, 2017, **37**(3): 86-95.
Li T Y. Spatial vulnerability based on the framework of the exposure-sensitivity-adaptive capacity: a case study of Lanzhou [J]. *Economic Geography*, 2017, **37**(3): 86-95.
- [36] 向丽, 李迎霞, 史江红, 等. 北京城区道路灰尘重金属和多环芳烃污染状况探析[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 159-167.
Xiang L, Li Y X, Shi J H, *et al.* Investigation of heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in street dusts in urban Beijing[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(1): 159-167.
- [37] 王冠, 陈裕颖, 夏敦胜, 等. 上海城市表土磁性特征对重金属污染的指示作用[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(8): 3302-3312.
Wang G, Chen Y Y, Xia D S, *et al.* Magnetic property of urban topsoil and its implication of heavy metal pollution in Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(8): 3302-3312.
- [38] 石栋奇, 卢新卫. 西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3126-3133.
Shi D Q, Lu X W. Contamination levels and source analysis of heavy metals in the Finer particles of urban road dust from Xi'an, China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3126-3133.
- [39] 张海珍, 任泉, 魏疆, 等. 乌鲁木齐市不同区域大气降尘中重金属污染及来源分析[J]. *环境污染与防治*, 2014, **36**(8): 19-23.
Zhang H Z, Ren Q, Wei J, *et al.* Analysis on the heavy metal pollutants in atmospheric dust in different regions of Urumqi and its sources apportionment [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2014, **36**(8): 19-23.
- [40] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1561-1567.
Guo W, Sun W H, Zhao R X, *et al.* Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Hohhot [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1561-1567.
- [41] Fergusson J E, Ryan D E. The elemental composition of street dust from large and small urban areas related to city type, source and particle size[J]. *Science of the Total Environment*, 1984, **34**(1-2): 101-116.
- [42] 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 等. 兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1021-1028.
Li P, Xue S Y, Wang S L, *et al.* Pollution evaluation and health risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in Lanzhou [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 1021-1028.
- [43] 赵一莎, 赵梦竹, 刘冲, 等. 兰州市城关区街尘重金属的分布特征、赋存形态及环境风险评价[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2016, **52**(5): 605-610.
Zhao Y S, Zhao M Z, Liu C, *et al.* Distribution character, chemical speciation and environmental risks of heavy metals in the surface dusts taken from Chengguan [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2016, **52**(5): 605-610.
- [44] 王艳霞, 赵军, 赵国虎. 兰州市安宁区菜园土壤重金属含量分析与评价[J]. *安徽农业科学*, 2007, **35**(19): 5804-5805, 5898.
Wang Y X, Zhao J, Zhao G H. Analysis and evaluation of heavy metal content of vegetable garden soil in Anning District of Lanzhou City [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, **35**(19): 5804-5805, 5898.

CONTENTS

| | | |
|--|---|--------|
| PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning | LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> | (1513) |
| Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities | LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> | (1520) |
| Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models | HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> | (1535) |
| Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities | ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> | (1544) |
| Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period | LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> | (1550) |
| Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu | WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> | (1561) |
| Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer | YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> | (1573) |
| Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry | WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> | (1582) |
| Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants | DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> | (1589) |
| Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China | ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> | (1594) |
| Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea | YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> | (1607) |
| Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaqing River Estuary in Recent Ten Years | FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> | (1619) |
| Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province | MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> | (1629) |
| Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir | MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> | (1636) |
| Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province | ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> | (1648) |
| Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland | WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> | (1657) |
| Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir | ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> | (1666) |
| Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake | ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> | (1676) |
| Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone | LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao | (1684) |
| Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar | DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> | (1692) |
| Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments | YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> | (1700) |
| Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing | CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> | (1709) |
| 3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment | HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> | (1716) |
| Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode | SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> | (1725) |
| Degradation of AO7 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System | XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> | (1734) |
| Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism | SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> | (1743) |
| Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation | ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> | (1752) |
| Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue | CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> | (1761) |
| Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II) | BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> | (1770) |
| Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System | LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> | (1779) |
| Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants | YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> | (1787) |
| Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor | WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> | (1794) |
| Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment | ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> | (1801) |
| Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs | CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> | (1808) |
| Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge | YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> | (1816) |
| Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities | LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> | (1825) |
| Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests | HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> | (1838) |
| Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China | YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> | (1847) |
| Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi | CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> | (1855) |
| Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing | WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> | (1864) |
| Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar | LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> | (1871) |
| Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer | XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> | (1880) |
| Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil | DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong | (1888) |
| Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals | YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> | (1904) |
| Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland | YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao | (1914) |
| Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field | ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> | (1921) |
| Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw | XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> | (1930) |
| Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil | WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> | (1941) |
| Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert | MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> | (1950) |
| Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation | LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> | (1960) |
| Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities | GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> | (1968) |
| Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei | CHEN Pan, SHI Xiao-qing | (1976) |
| Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC | LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> | (1987) |