

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勣之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勛之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
- 再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
- 基于多种新型受体模型的 $PM_{2.5}$ 来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
- 华中地区夏季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
- 淄博2021年元宵节 $PM_{2.5}$ 水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
- 浙江省大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
- 2001~2019年气象条件对江苏省 $PM_{2.5}$ 分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
- 基于神经网络和数值模型的重点区域 $PM_{2.5}$ 预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
- 2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
- 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
- 山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
- 基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
- 日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
- 泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
- 典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
- 2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
- 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
- 生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
- 不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
- 雨源型城市河流水污染特征及水质联合评价:以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
- 廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
- 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
- 河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素:以石家庄为例 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
- 青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
- 鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
- 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
- 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
- 基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)
- 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
- 铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
- 氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
- 环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
- 冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
- 不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
- 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
- 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
- 地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索:以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
- 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)
- 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
- 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
- 不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘伟丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
- 温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
- 两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
- 复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
- 产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉 (1031)
- 土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
- 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
- 中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
- 稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
- 模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
- 德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
- 陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
- 长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
- 《环境科学》征订启事(618) 信息(685, 935, 956)

地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索： 以农业发达地区为例

鞠铁男^{1,2}, 雷梅^{1,2*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 准确合理的土壤污染评价方法是进行区域性土壤污染评价的前提。将三角模糊数引入地质累积指数法, 结合 α -截集技术以及 Latin Hypercube 抽样 (LHS) 随机模拟方法对研究区重金属含量差异较大的 5 种不同土壤类型 (潮土、风沙土、黄绵土、褐土和新积土) 分别进行土壤重金属 (Cd、Hg、As、Pb 和 Cr) 累积性评价, 能够避免因传统地质累积指数法在背景值选择、研究区局部与整体重金属含量差异较大所带来评价结果不够准确的问题, 可更加全面真实地综合表征区域土壤重金属污染状况, 为科学决策提供理论基础。结果表明, 对于重金属含量差异较小的情况, 也就是当所有点位地质累积指数评价结果均在某一区间等级时, 或所有点位地质累积评价结果均小于 0 的情况, 方法上的改进不会影响评价结果。传统的以及基于三角模糊数的地质累积指数法得出的评价结果为一确定的等级, 而这一等级由整个研究区重金属含量平均值决定, 当研究区土壤采样点位重金属含量差异较大时, 会放大重金属含量较小的或缩小重金属含量较大的地区, 使评价结果不够准确。而结合 LHS 抽样法使评价结果变成各个污染等级的可能性, 能够大大改进传统评价方法的局限性, 使评价结果更加合理准确。再结合地理信息系统 (GIS) 方法还能对区域性重金属污染累积集中地进行可视化表达。

关键词: 土壤重金属污染; 三角模糊数; 地质累积指数评价; 随机抽样; 地理信息系统 (GIS)

中图分类号: X53; X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0957-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105250

Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example

JU Tie-nan^{1,2}, LEI Mei^{1,2*}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An accurate and reasonable soil pollution assessment method is the premise of regional soil pollution assessment. Triangular fuzzy numbers were introduced into the geo-accumulation index method, combined with α -cut technology and the Latin hypercube sampling (LHS) stochastic simulation method, to evaluate the accumulation of heavy metals in five different soil types (moisture soil, aeolian sandy soil, cinnamon soil, loessal soil, and alluvial soil), with large differences in heavy metal (Cd, Hg, As, Pb, and Cr) content in the study area. This method can avoid the inaccuracy of the evaluation results caused by the traditional geological accumulation index method in the selection of background values and the great difference between local and whole heavy metal contents in the study area and can comprehensively and truly represent the regional soil heavy metal pollution status, thus providing a theoretical basis for scientific decision-making. The results showed that the improvement in the method will not affect the evaluation results when the heavy metal content difference is small, that is, when the evaluation results of the geological accumulation index at all points are less than 0. The traditional and geological cumulative index method based on the evaluation with triangular fuzzy numbers provides results for a certain level, which is determined by the heavy metal content in the study area average; conversely, differences in the heavy metal content of soil sampling points throughout the study area can result in a decrease or increase in the recorded heavy metal contents in larger areas, making the evaluation result inaccurate. Combined with the LHS sampling method, the possibility of changing the evaluation results into various pollution levels can greatly improve the limitations of traditional evaluation methods and make the evaluation results more reasonable and accurate. Combined with the geographic information system (GIS) method, the regional heavy metal pollution accumulation concentration can also be visualized.

Key words: soil heavy metal pollution; triangular fuzzy number; geoaccumulation index evaluation; random sampling; geographic information system (GIS)

土壤是多种重金属元素的归宿, 土壤多金属复合污染已经成为自然界普遍的污染形势之一^[1]。而金属冶炼活动、工厂排放、化肥农药投入和污水灌溉等一系列人为活动是造成土壤多金属污染的主要原因^[2]。Hu 等^[3]的研究发现, 中国珠江三角洲地区由于受到改革开放以来的工业和农业的迅速发展, 已经形成了一定量的土壤多金属污染。Quinton 等^[4]的研究表明, 长期的地表径流、土壤流失也会引起土壤多金属的复合污染, 且不同的土壤类型对于重金属的复合污染程度不同。所以, 土壤多金属共同污

染已经成为生态系统最为普遍的问题之一。

而土壤重金属污染评价作为确定地区性土壤污染程度和制定污染控制策略的重要参考而被人们广泛使用, 评价方法的选择对于重金属污染的评价结果影响较大^[5]。目前, 国内外有关土壤重金属污染的评价方法已有很多^[6], 其中主要方法有: 单因子

收稿日期: 2021-05-24; 修订日期: 2021-07-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1800100)

作者简介: 鞠铁男 (1992~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为场地土壤污染, E-mail: jutn.19b@igsnnr.ac.cn

* 通信作者, E-mail: leim@igsnnr.ac.cn

指数评价法、内梅罗综合污染指数法^[7]、地质累积指数法^[8]和潜在生态风险评价法^[9]等。而地质累积指数法作为判断区域性土壤重金属累积最简洁的方法,常规是通过一个地区土壤点位元素实测含量对比土壤元素背景值来判断累积程度。而有些学者选取不同的土壤背景值以及土壤重金属含量本身就会带来不确定性(由于采样点位多少导致平均含量不同),从而对土壤累积性评价造成一定差异,并且污染程度分级标准跨度较大的缺点也会使评价结果不够准确^[10,11]。

近年来一些学者结合三角模糊数来降低传统地质累积指数法对于评价结果的不确定性^[12,13],在实际应用中结合 α -截集技术、区间数隶属度计算方法,建立土壤重金属污染评价模型,能够规避由于不确定性引起的评价不准确的问题,这种方法特别适用于由于精确度不高或数据丰富度不足的情况^[14,15],并成功地应用于土壤重金属污染风险评价与水环境评价中,使评价结果更加真实可靠。但通过综合分析改进后的地质累积指数评价方法仍存在不足之处,主要表现在:通过结合三角模糊数来增加模糊区间的定义,最终得出的污染等级仍为一个确定的等级,仅能体现研究区整体的土壤污染水平,这就导致局部土壤污染水平可能被放大或缩小,不能体现一个研究区局部污染情况,特别是当研究区点位重金属含量差异较大时,污染程度会被扩大化。

鉴于此,本文以地质累积指数法为研究基础,结合三角模糊数将研究区土壤重金属实测含量与区域土壤背景值模糊化后,加入拉丁超立方抽样法(LHS)进行随机模拟平行化分析,使评价结果更加合理化。为探究不同含量区间此方法的适用性,选择对郑州市重金属含量差异较大的5种土壤类型(潮土、褐土、风沙土、黄绵土和新积土)进行独立评价,再对比研究区整体评价结果,通过找出不同情况下方法应用的差异性,以期对土壤重金属累积性评价提供新思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究选择中国河南省中部地区郑州市作为研究对象,地理坐标为东经112°42′~114°14′,北纬34°16′~34°58′,是中国中部地区重要的农业中心城市,总面积7 446 km²。郑州市土壤类型表现出以西为褐土(图1),以东为潮土的特征,并伴有部分新积土、黄绵土和风沙土,5种土壤类型面积比约为:12.5:8.7:2.2:1.8:1。

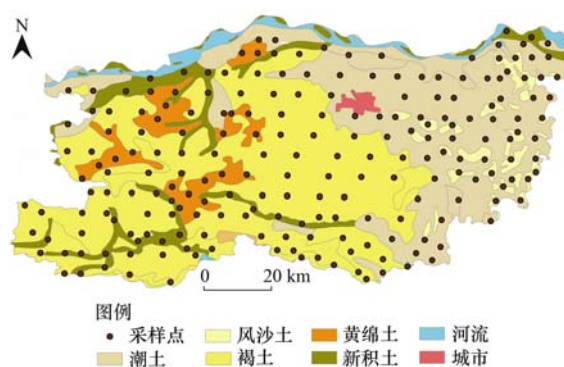


图1 研究区位置、土壤类型和采样点位示意

Fig. 1 Location of study area, soil type, and sampling point sites

1.2 样品采集与处理

本研究样点于2016年5月采集,采用网格布点法对采样区进行均匀布点,为尽量避免人为因素对土壤重金属含量的影响,用5点采样法在样点周围100 m范围内等距离采集4个样品,与采样点混合成一个复合样品。本研究共采集213个表层样(0~20 cm)。所有样品在晾样间风干一周,再去除石块、植物残根和其他杂质,研磨碾碎后过0.149 mm尼龙筛并混合均匀。采用硝酸-氢氟酸-高氯酸消解体系,结合石墨消解仪自动消解。利用电感耦合等离子体质谱仪测定5种重金属(Cd、Hg、As、Pb和Cr)含量。

1.3 基于随机模糊的地质累积指数评价

1.3.1 基于三角模糊数的地质累积指数法构建

在综合考虑采样点的平均值和标准差的基础上^[16],将污染物含量和土壤背景值分别表示为: $A_1 = (a_1, b_1, c_1)$, $A_2 = (a_2, b_2, c_2)$,将 a 取值为数据最小值和数据均值减去2倍标准差之间的较大值, b 表示为数据均值, c 取值为数据最大值和数据均值加上2倍标准差后的较小值,其中 $a \leq b \leq c$ ^[17]。隶属度函数 $\mu_{\bar{A}}(x)$ 表示为^[18,19]:

$$\mu_{\bar{A}} = \begin{cases} (x-a)/(b-a), & a \leq x \leq b \\ (c-x)/(c-b), & b \leq x \leq c \\ 0, & x < a \text{ 或 } x > c \end{cases} \quad (1)$$

计算过程中利用 α -截集技术能够将数据转化为区间形式的可信度水平,再经过隶属度函数计算地区土壤重金属累积等级,能够简化计算过程,方法详见文献[20,21]。 $\alpha=0.9$ 是容易被人们接受的置信水平,故本文所有的置信水平 α 均取0.9。

地质累积指数算法表示为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_n / k B_n] \quad (2)$$

式中, C_n 为土壤点位平均含量, B_n 为土壤背景值。依据地质累积指数值(I_{geo})把土壤中重金属污染程度分为7个等级(见表1)。

表 1 地质累积指数区间及污染程度分级
Table 1 Range of geological accumulation index and classification of pollution degree

地质累积指数	污染级别	污染程度
$I_{geo} < 0$	0	清洁
$0 \leq I_{geo} < 1$	1	轻度污染
$1 \leq I_{geo} < 2$	2	偏中度污染
$2 \leq I_{geo} < 3$	3	中度污染
$3 \leq I_{geo} < 4$	4	偏重度污染
$4 \leq I_{geo} < 5$	5	重度污染
$I_{geo} > 5$	6	严重污染

1.3.2 三角模糊数随机模拟

利用式(1)中的隶属度函数形成的曲线与 x 轴围成的面积 $0.5(c-a)$ 与该隶属度函数的比值, 再通过逆变换法^[23], 可以得到三角模糊数随机模拟的公式:

$$x = \begin{cases} a + [u(b-a)(c-a)]^{0.5}, & u \leq \frac{b-a}{c-a} \\ c - [(1-u)(c-b)(c-a)]^{0.5}, & u > \frac{b-a}{c-a} \end{cases} \quad (3)$$

随机模拟就是通过计算机程序随机产生 $[0,1]$ 区间上均匀分布的随机数 $u_1, u_2, \dots, u_m$, (m 为随机模拟次数), 再通过公式(3)可以得到一系列 x 的模拟结果 $x_1, x_2, \dots, x_m$, 这样就可以把三角模糊数之间的运算转化为实数之间的运算.

1.3.3 随机模拟后的地质累积指数计算

根据表 1 的地质累积指数区间分级, 经推导基

于随机模拟三角模糊数地质累积指数各污染程度的可信度 P 可表示为:

$$\begin{aligned} P_1 &= 1 - P\{I_{geo} > 0\} \\ P_2 &= P\{I_{geo} \geq 0\} - P\{I_{geo} - 1 > 0\} \\ P_3 &= P\{I_{geo} - 1 \geq 0\} - P\{I_{geo} - 2 > 0\} \\ P_4 &= P\{I_{geo} - 2 \geq 0\} - P\{I_{geo} - 3 > 0\} \\ P_5 &= P\{I_{geo} - 3 \geq 0\} - P\{I_{geo} - 4 > 0\} \\ P_6 &= P\{I_{geo} - 5 \geq 0\} \end{aligned} \quad (4)$$

根据公式(4)得出综合地质累积指数各污染程度的可信度.

2 结果与讨论

2.1 描述性统计分析

表 2 为研究区表层土壤重金属含量的基本描述性统计. 由于研究区不同土壤类型的重金属含量具有一定差异, 所以对不同土壤类型进行分别评价, 可避免不同土壤特征的干扰, 还可以对不同重金属含量的情况进行适用性分析. 总体来说, 风沙土重金属含量较小, 黄绵土重金属含量相对较大. 5 种重金属有一个共同点, 那就是在风沙土中的平均含量都是最低的. 对于 Cd 来说, 风沙土和新积土的平均含量在总体水平之下, 黄绵土平均含量是最高的, 是风沙土平均含量的 2.14 倍. 其他 3 种类型土壤 Cd 平均含量从大到小为: 褐土 > 新积土 > 潮土, 其中潮土标准差最大, 表明在潮土中不同点位 Cd 含量差别

表 2 不同土壤类型点位基础性统计数据
Table 2 Basic statistical data of different soil types

重金属	项目	潮土	风沙土	褐土	黄绵土	新积土	总体
Cd	最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.059	0.069	0.070	0.124	0.099	0.059
	最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.826	0.185	0.604	0.394	0.308	0.826
	平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.161	0.103	0.172	0.220	0.163	0.167
	标准差	0.098	0.036	0.074	0.060	0.048	0.081
Hg	最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.014	0.013	0.019	0.023	0.034	0.013
	最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.232	0.050	0.308	0.160	0.123	0.308
	平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.051	0.024	0.053	0.047	0.057	0.049
	标准差	0.038	0.010	0.034	0.026	0.023	0.033
As	最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	3.76	3.75	5.39	9.80	7.26	3.75
	最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	13.65	10.05	20.55	25.75	12.55	25.75
	平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	8.28	5.39	10.65	12.09	10.54	9.60
	标准差	2.41	1.72	2.46	3.01	1.32	3.00
Pb	最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	17.1	16.5	18	18.9	19.6	16.5
	最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	36.2	23.2	78.3	53.8	33.1	78.3
	平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	21.58	19.22	24.52	26.01	24.87	23.36
	标准差	3.20	1.39	7.97	6.58	3.30	6.12
Cr	最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	34.9	30.50	24.00	58.00	45.80	24.00
	最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	87.6	76.50	116	91.8	96.2	116
	平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	66.86	56.23	68.91	71.16	70.47	67.55
	标准差	11.58	11.85	12.10	7.29	9.51	11.86
pH	最小值	7.37	7.42	5.88	7.84	7.32	5.88
	最大值	8.54	8.47	8.54	8.40	8.35	8.54
	平均值	8.18	8.19	7.92	8.09	7.99	8.05
	标准差	0.18	0.25	0.48	0.13	0.22	0.35

最大. 对于重金属 Hg, 除了风沙土中平均 $\omega(\text{Hg})$ 为 $0.024 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其余 4 种类型的土壤中平均 $\omega(\text{Hg})$ 差别不大, 其中新积土最高为 $0.057 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其他 3 种重金属含量从大到小排序为: 褐土 > 潮土 > 黄绵土. 与 Cd 一样, 平均 $\omega(\text{As})$ 最高的土壤类型为黄绵土, 为 $12.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 这要比平均 $\omega(\text{As})$ 最小的风沙土高了 1.24 倍. 同样, 在黄绵土中 $\omega(\text{Pb})$ 也是最大的, 为 $26.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其他 4 种土壤中从大到小排序为: 新积土 ($24.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、褐土 ($24.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、潮土 ($21.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和风沙土 ($19.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 对于 Cr 来说, 5 种土壤类型中含量从大到小的排序与 Pb 相同, 在黄绵土、新积土、褐土、潮土和风沙土的含量分别为 71.16、70.47、68.91、66.86 和 $56.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

2.2 土壤重金属空间分布研究

利用 ArcScene 软件将研究区 DEM 与 5 种重金属 (Cd、Hg、As、Pb 和 Cr) 以及 pH 空间插值结合成

立体的空间插值图 (图 2), 能够更加直观地了解研究区重金属含量与高程之间的联系. 研究区 pH 低值区出现在研究区西部地势较高的部分, 而随着向东地势的逐渐降低, pH 随之逐渐升高, 但 pH 最高值与最低值相差不大, 研究区整体 pH 偏弱碱性. 重金属 Cd 含量在西北部达到最高, 继而向西南部随着 DEM 的升高 Cd 含量逐渐降低到中等水平, 而向东南部随着 DEM 的降低 Cd 含量逐渐降低到较低水平. Hg 的含量态势则与 Cd 略有不同, 最高值区出现在北部地势较低地区, 低值区依旧是在东部地区, 而中部形成了一条蜿蜒曲折的 Hg 含量较低地区, 被南、西、北三面 Hg 含量较高地区包围. As 和 Pb 的含量则与研究区 DEM 趋势相同, 在地势高的地区两种重金属含量较高, 随着地势的降低, 两种重金属含量随之降低. 对于 Cr 而言, 除研究区东南部有部分 Cr 含量低值区, 其余部分含量均相对较高.

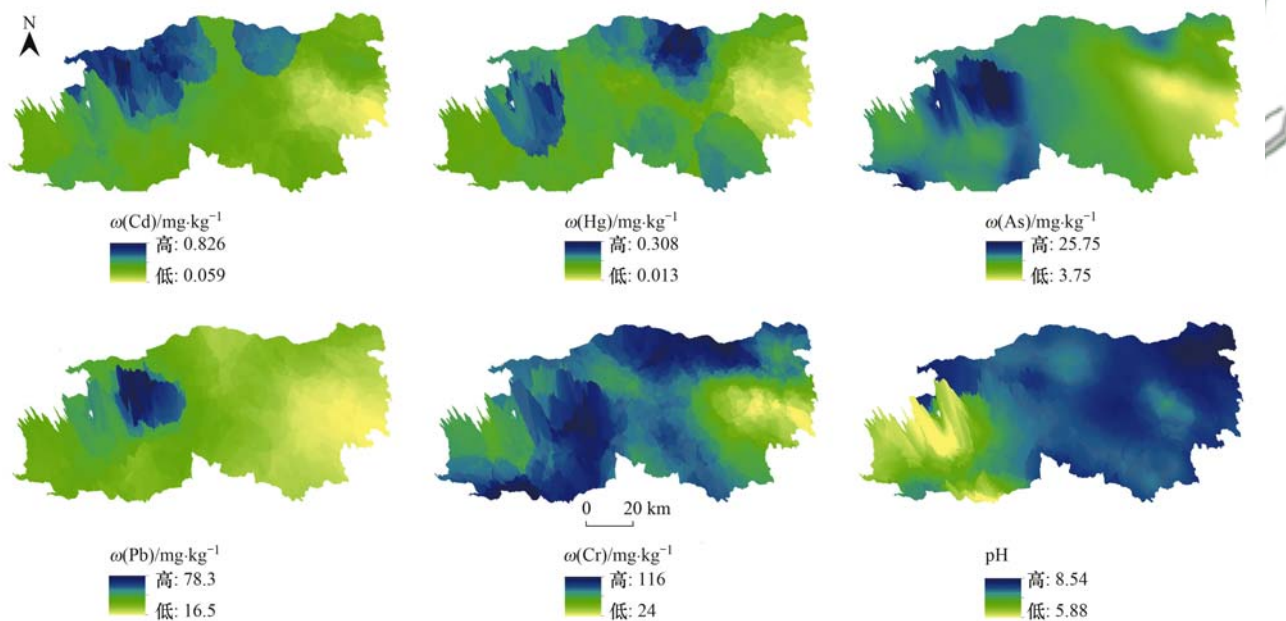


图2 研究区重金属立体空间分布

Fig. 2 Stereo spatial distribution of heavy metals in the study area

2.3 随机模拟下的三角模糊数的地质累积指数评价

2.3.1 三角模糊化处理

利用公式(1), 根据土壤点位的基础性统计数据中的最大值、最小值、均值和标准差, 得出地质累积指数中三角模糊数 $\tilde{C}$ 的最小可能值 a_1 , 最可能值 b_1 以及最大可能值 c_1 , 采用 α -截集技术将三角模糊数模糊化处理成图 3 的区间形式.

模糊化处理后的相对区间越大, 表明土壤重金属污染程度的不确定性越大. 从图 3 可以看出, 经 α -截集技术处理后, 相比其他 4 种土壤, 风沙土在 5 种重金属中的区间含量是最小的, 在 Cd、Hg、As 和 Pb 中

的含量区间绝对宽度都是最小的, 表明风沙土在这 4 种重金属中的点位含量离散程度较低, 数据不确定性较小; 而黄绵土在 Cr 中的含量区间绝对宽度是最小的, 其余 4 种重金属在 Cr 中含量区间绝对宽度从大到小依次为: 褐土 > 风沙土 > 潮土 > 新积土. 潮土中的 Cd 和 Hg 含量区间绝对宽度都是相对最大的, 而褐土中 As 和 Pb 的相对含量区间绝对宽度是最大的.

目前, 学者在区域土壤重金属累积性研究中的地球化学背景值选择上, 大多数选择的都是该省的土壤背景值^[24], 而这对于小区域的土壤重金属累积性评价来说是不够准确的, 因为会存在省内地域上

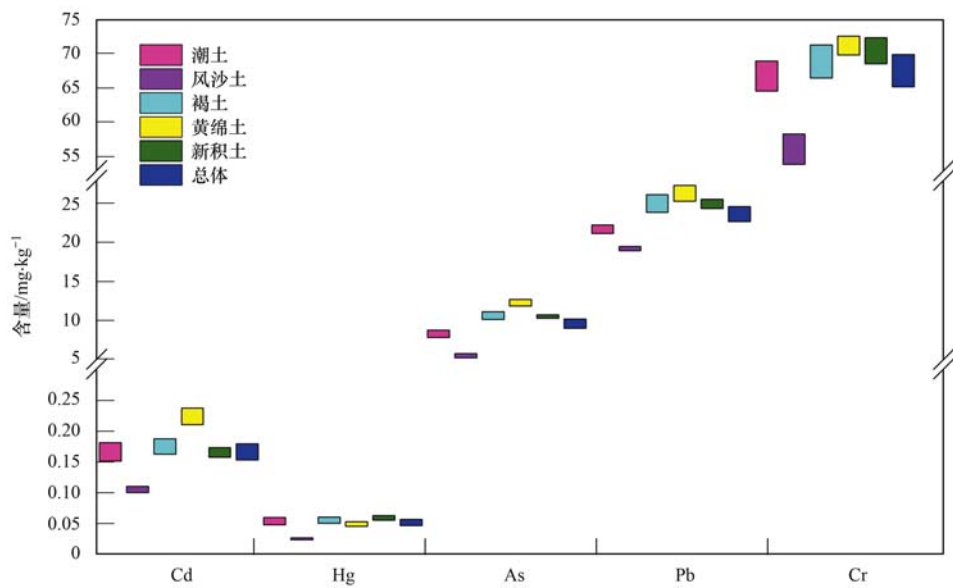


图3 经 α -截集技术处理后的研究区土壤重金属实测含量区间

Fig. 3 Measured concentration range of heavy metals in soil treated by α -cutting technique in the study area

重金属含量的差异,从而导致评价结果不准确.也有些学者将地质背景值、普通页岩的平均值和砂岩中的地球化学背景值当作研究区背景值参与评价^[25],这都会造成评价结果的差异性.因此,考虑到不同背

景值的影响,本研究中采用河南省土壤重金属背景值^[22],将10%作为最大可能值,−10%作为最小可能值,并通过 α -截集技术将背景值处理成区间形式,结果见表3.

表3 河南省土壤背景值三角模糊化结果¹⁾

Table 3 Triangulation of soil background values in Henan province

项目	Cd	Hg	As	Pb	Cr
背景值	0.074	0.03	11.4	19.6	63.8
三角模糊化	(0.067, 0.074, 0.081)	(0.027, 0.03, 0.033)	(10.26, 11.4, 12.54)	(17.64, 19.6, 21.56)	(57.42, 63.8, 70.18)
α -截集	[0.073, 0.075]	[0.029 7, 0.030 3]	[11.286, 11.514]	[19.404, 19.796]	[63.162, 64.438]

1) 利用表3中的河南省土壤背景值当做公式(2)中的 B_n

根据研究区土壤重金属实测含量区间以及河南省土壤背景值经 α -截集技术计算出的区间值,得出研究区土壤重金属地质累积指数区间(图4).如果区间值介于表1中两个地质累积等级之间,则表明对于污染程度的判断具有较大模糊性.根据图4结果可知,研究区土壤重金属地质累积

指数中除了黄绵土中的Cd在两个污染等级之间,其余的所有地质累积指数区间均没有跨越两个污染等级,表明各元素污染等级的不确定性程度不大.

2.3.2 随机模拟

由于受自然过程以及人类活动的影响,污染物受土壤或水环境中物理、化学和生物过程等一系列作用后,污染程度具有一定的不确定性^[26].所以为减少不确定度,将研究区重金属实测数据与地球化学背景值三角模糊化后的评价结果分别进行5 000~40 000次的蒙特卡罗抽样(MCS)和拉丁超立方抽样(LHS)下的随机模拟.因模拟结果过于繁杂,所以只列出Cd的随机模拟结果(图5).可以看出,利用MCS模拟在30 000次随机试验后,结果收敛,而利用LHS模拟在20 000次的随机模拟后的结果收敛,说明LHS模拟效率更高.为比较两种方法的误差,故本文对两种方法分别进行30 000次下,置信水平为90%和95%的随机模拟绝对误差分析(表4).可以

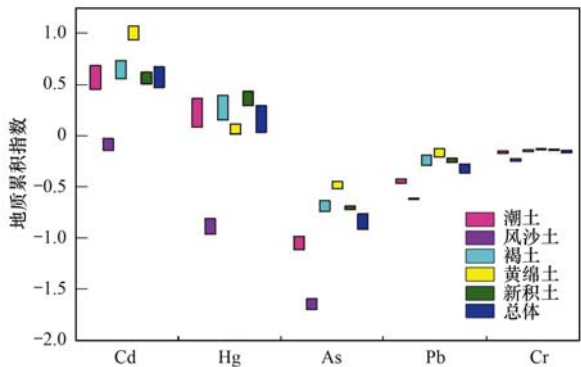


图4 研究区土壤重金属地质累积指数区间

Fig. 4 Index range of heavy metal geological accumulation in the soil in the study area

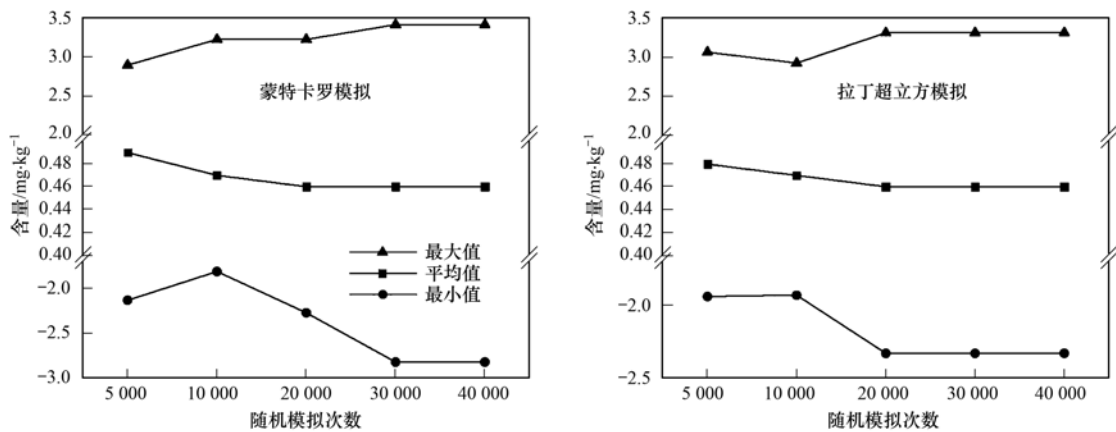


图5 模糊化参数的Cd随机模拟

Fig. 5 Random simulation of cadmium with fuzzy parameters

表4 30 000次模拟下的MCS方法和LHS方法的绝对误差分析

Table 4 Absolute error analysis of MCS method and LHS method under 30 000 simulations

重金属	MCS		LHS		绝对误差	
	90%	95%	90%	95%	MCS	LHS
Cd	0.467 7	0.464 0	0.463 5	0.463 3	0.003 7	0.000 2
Hg	-0.106 1	-0.100 1	-0.098 6	-0.098 9	0.006 0	0.000 3
As	-0.940 1	-0.937 0	-0.937 9	-0.938 3	0.003 1	0.000 4
Pb	-0.371 0	-0.368 6	-0.365 5	-0.365 3	0.002 4	0.000 2
Cr	-0.539 8	-0.540 2	-0.540 0	-0.540 0	0.000 4	0

看出,利用LHS随机模拟结果绝对误差都小于0.000 5,而利用MCS随机模拟方法除了Cr的绝对误差较小以外,其余4种金属的绝对误差都在0.002以上.所以,在最终的模拟中选取30 000次下的LHS方法来评价5种金属的累积性.

2.3.3 三角模糊数下的评价结果与结合LHS下的评价结果对比

表5为三角模糊数下的研究区5种土壤类型与总体的地质累积指数评价结果,而图6为结合LHS下的研究区5种金属地质累积等级可信度.由于研究区5种金属地质累积指数均小于3,所以只列出小于3的部分.可以看出,前者得到的是确定的地质累积等级,而后者得到的结果为各地质累积等级的可能性.根据结果对比显示,研究区Hg存在较大不确定性,Cd有较小不确定性,而As、Pb和Cr的污染等级基本无争议.仅用三角模糊数方法的评价结果中,潮土、褐土、黄绵土和风沙土Cd和Hg的地质累积指数均为1级轻微污染水平,而结合LHS评价方法的结果中,潮土、褐土、黄绵土和风沙土的Cd有超过65%的可能性为1级轻微污染;潮土Hg的地质累积指数有64%的可能为0级清洁水平;褐土中Hg有48%的可能为1级轻微污染水平,而有47%的可能为0级清洁水平,两者比例基本持平;

黄绵土Hg的地质累积指数为0级的可能性(56%)要大于为1级的可能性(44%);新积土的Hg为0级的概率为40%,占有一定比例;而总体Hg只有36%的可能为1级,超过55%的可能性为0级.所以说,基于三角模糊数地质累积指数法评价出的研究区潮土、黄绵土以及总体的Hg评价结果与结合LHS法的评价结果具有一定差异,这是由于研究区土壤点位Hg的含量差别较大,而决定评价结果的是研究区土壤点位Hg含量的平均值,这就导致含量低值区平均含量被扩大化,使评价结果准确性降低.而研究区土壤点位Cr含量都较低,评价结果基本都小于0,这就导致方法的改进对于评价结果没有改变.

表5 基于三角模糊数的土壤重金属地质累积指数评价等级¹⁾

Table 5 Evaluation grade of soil heavy metal geological accumulation index based on triangular fuzzy number

重金属	潮土	风沙土	褐土	黄绵土	新积土	总体
Cd	1	0	1	1	1	1
Hg	1	0	1	1	1	1
As	0	0	0	0	0	0
Pb	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0

1)数值表示等级,标准参照表1

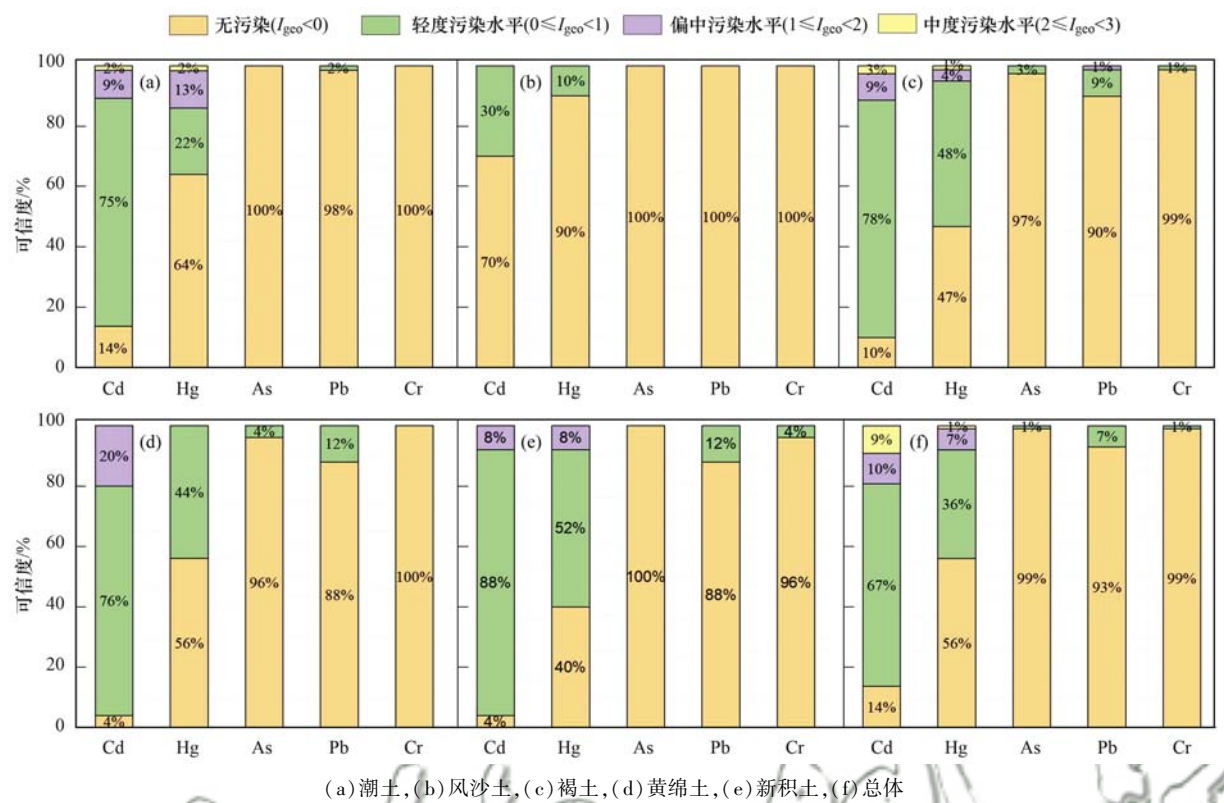


图 6 结合拉丁超立方抽样下的三角模糊数评价结果

Fig. 6 Combined with the triangular fuzzy number evaluation results under Latin hypercube sampling

3 结论

(1)郑州市 5 种土壤类型重金属含量差异较大,风沙土中 5 种重金属点位平均含量都是最小的,而黄绵土除了 Hg 之外,其余 4 种重金属平均含量均为最大.除了 Cr 之外,研究区东北部其余 4 种重金属含量较高,而 Cr 则是西部和东南部含量较高,土壤 pH 整体呈现由西向东逐渐升高的态势.

(2)不论是基于三角模糊数的地质累积指数法还是结合 LHS 方法,对于重金属含量差异较小或所有点位地质累积指数评价结果均小于 0 的研究区,方法上的改进不能改变评价结果.也就是说,当评价结果由于差异较小都趋于统一地质累积区间时,或地质累积指数评价结果已经达到最小,像本文的 As、Pb 和 Cr,虽然结合 LHS 方法能够评价出研究区的污染程度还有较小的可能性为轻微污染,但在 88% 的可信度以上为清洁水平.不过结合 LHS 方法能够指出虽然研究区整体处于清洁水平,但还是有很小一部分受到了污染,再结合 GIS 方法能够用于人们研究更小区域的污染集中情况.

(3)基于三角模糊数的地质累积指数法评价结果为确定的污染等级,而这一确定的污染等级是由研究区总体的重金属平均值决定的,所以在一定程度上低值区的点位平均值被高值区点位平均值放大

了,这就导致部分地区的污染水平被放大,如本研究的风沙土 Cd 和 Hg 的污染等级均为 0,但研究区总体的污染水平为 1.而这一观点反过来亦成立,某些区域的污染水平可能被缩小.这就是常规和基于三角模糊数地质累积指数的局限性,而结合 LHS 方法使评价结果变成各个累积等级的可能性后,就缩小了这个缺点,能够评价出研究区局部地区的土壤污染程度.

参考文献:

[1] De Nicola F, Baldantoni D, Sessa L, *et al.* Distribution of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in holm oak plant-soil system evaluated along urbanization gradients [J]. *Chemosphere*, 2015, **134**: 91-97.

[2] 陈雅丽,翁莉萍,马杰,等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38** (10): 2219-2238.

Chen Y L, Weng L P, Ma J, *et al.* Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(10): 2219-2238.

[3] Hu Y A, Cheng H F. A method for apportionment of natural and anthropogenic contributions to heavy metal loadings in the surface soils across large-scale regions [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **214**: 400-409.

[4] Quinton J N, Catt J A. Enrichment of heavy metals in sediment resulting from soil erosion on agricultural fields [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41** (10): 3495-3500.

[5] Li X N, Cundy A B, Chen W P. Fuzzy synthetic evaluation of contaminated site management policy from the perspective of

- stakeholders: A case study from China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **198**: 1593-1601.
- [6] 刘硕, 吴泉源, 曹学江, 等. 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 270-279.
Liu S, Wu Q Y, Cao X J, *et al.* Pollution assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soils of coal mining area in Longkou City[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 270-279.
- [7] Nemerow N L. Scientific stream pollution analysis [M]. Washington: Scripta Book Co., 1974.
- [8] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river[J]. *Geojournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [9] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [10] Ackah M. Soil elemental concentrations, geoaccumulation index, non-carcinogenic and carcinogenic risks in functional areas of an informal e-waste recycling area in Accra, Ghana [J]. *Chemosphere*, 2019, **235**: 908-917.
- [11] Memoli V, Esposito F, Panico S C, *et al.* Evaluation of tourism impact on soil metal accumulation through single and integrated indices[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **682**: 685-691.
- [12] 赵艳民, 张雷, 秦延文, 等. 基于三角模糊数的清河沉积物重金属评价[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(10): 1538-1544.
Zhao Y M, Zhang L, Qin Y W, *et al.* Assessment of heavy metals in sediments of Qinghe River based on triangular fuzzy numbers[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(10): 1538-1544.
- [13] 易昊旻, 周生路, 吴绍华, 等. 基于正态模糊数的区域土壤重金属污染综合评价[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(4): 1127-1134.
Yi H M, Zhou S L, Wu S H, *et al.* An integrated assessment for regional heavy metal contamination in soil based on normal fuzzy number[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(4): 1127-1134.
- [14] 刘玘玘, 汪妮, 解建仓, 等. 基于熵权法的城市生态系统健康模糊评价[J]. *武汉大学学报*, 2014, **47**(6): 755-759.
Liu H H, Wang N, Xie J C, *et al.* Fuzzy assessment of city ecosystem health based on entropy weight method [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2014, **47**(6): 755-759.
- [15] Zou Z H, Yun Y, Sun J N. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, **18**(5): 1020-1023.
- [16] Promentilla M A B, Furuichi T, Ishii K, *et al.* A fuzzy analytic network process for multi-criteria evaluation of contaminated site remedial countermeasures [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, **88**(3): 479-495.
- [17] Gardner M J, Altman D G. Confidence intervals rather than P values; estimation rather than hypothesis testing [J]. *British Medical Journal*, 1986, **292**(6522): 746-750.
- [18] Chang D Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP[J]. *European Journal of Operational Research*, 1996, **95**(3): 649-655.
- [19] Nirmala G, Uthra G. AHP based on triangular intuitionistic fuzzy number and its application to supplier selection problem [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, **16**: 987-993.
- [20] Giachetti R E, Young R E. Analysis of the error in the standard approximation used for multiplication of triangular and trapezoidal fuzzy numbers and the development of a new approximation[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, **91**(1): 1-13.
- [21] Pan N F. Fuzzy AHP approach for selecting the suitable bridge construction method[J]. *Automation in Construction*, 2008, **17**(8): 958-965.
- [22] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境出版社, 1990.
- [23] 王文圣, 金菊良, 李跃清, 等. 水文水资源随机模拟技术 [M]. 成都: 四川大学出版社, 2007.
Wang W S, Jin J L, Li Y Q, *et al.* Stochastic simulation technology for hydrology and water resources [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2007.
- [24] Baltas H, Sirin M, Gökbayrak E, *et al.* A case study on pollution and a human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around Sinop province, Turkey [J]. *Chemosphere*, 2020, **241**: 125015, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.125015.
- [25] 方元, 吴志峰, 杨春林. 广东省土壤铜环境背景值空间变异研究[J]. *土壤通报*, 2008, **39**(3): 647-651.
Fang Y, Wu Z F, Yang C L. Spatial distribution and vertical variation of soil Cu environmental background value in Guangdong [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, **39**(3): 647-651.
- [26] Juang K W, Chen Y S, Lee D Y. Using sequential indicator simulation to assess the uncertainty of delineating heavy-metal contaminated soils [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **127**(2): 229-238.

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i>	(577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo	(586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li	(597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i>	(608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i>	(619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i>	(639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming	(649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i>	(675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i>	(686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i>	(696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i>	(707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i>	(714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i>	(723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i>	(735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao	(743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun	(752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i>	(762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i>	(770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i>	(782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	(813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i>	(826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i>	(837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i>	(859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong	(867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i>	(878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i>	(887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i>	(907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i>	(920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i>	(928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i>	(936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song	(946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei	(957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing	(965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i>	(975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i>	(985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i>	(995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i>	(1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i>	(1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i>	(1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i>	(1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i>	(1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i>	(1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i>	(1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i>	(1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i>	(1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i>	(1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1108)