

E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  
李勳之, 姜榕, 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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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, 谢付莹, 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, 邱琰蓉, 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 ..... 陈召堂, 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, 张绮英, 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, 黄蓉, 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, 刘祎丹, 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, 唐焯 (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, 余烁, 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, 张祯敏, 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镉污染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) 《环境科学》征稿简则(761) 信息(685, 935, 956)

# 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\*

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

**摘要:** 为探讨典型山地平原过渡带地区耕地土壤重金属空间分布特征及其潜在生态风险因素. 本文以拥有成都平原-龙门山脉过渡带这一典型过渡地形的四川省某县域为研究区, 采用地统计法和潜在生态风险指数法分析研究区耕地土壤 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的空间分布情况并进行潜在生态风险评价, 结合地理探测器进一步发掘导致其潜在生态风险空间差异的主要影响因素. 结果表明: ①研究区耕地土壤平均  $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Pb})$  和  $\omega(\text{Zn})$  为 0.39、123.00、31.28、51.04 和 119.66  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 均超过地区土壤背景值含量的 2.60、1.59、1.19、2.00 和 1.54 倍. ②研究区耕地土壤 Cd 和 Cr 的高值区主要分布于山地区西部、过渡带南部和平原区西部, Cu 和 Zn 的高值区主要分布于山地区西部, Pb 高值区主要分布于过渡带南部和平原区西部, 5 种重金属的低值区均主要分布于过渡区北部. ③研究区耕地土壤整体以轻微潜在生态风险为主, 各重金属元素的潜在生态风险指数平均值从高到低依次为  $\text{Cd}(32.58) > \text{Pb}(3.12) > \text{Cu}(2.82) > \text{Cr}(1.58) > \text{Zn}(0.98)$ , Cd 是造成研究区耕地土壤潜在生态风险的主要重金属元素. ④不同地形区耕地土壤潜在生态风险的主要影响因素存在显著差异, 其中距河流距离与土壤类型是影响山地区的关键因素, 复种指数和距工矿距离是影响过渡区的关键因素, 土壤 pH 值与化肥施用量是影响平原区的关键因素.

**关键词:** 山地平原过渡带; 耕地土壤; 重金属; 空间分布; 潜在生态风险; 影响因素

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0946-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202105139

## 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\*

(College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** The purpose of this study was to explore the spatial distribution characteristics and potential ecological risk factors of heavy metal pollution in cultivated soil in the transitional zone of a typical mountain plain. In this study, a county in Sichuan Province, which has the typical transitional topography of the Chengdu Plain-Longmen Mountain transition zone, was taken as the study area. Geostatistics and potential ecological risk index methods were used to analyze the spatial distribution of Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn from cultivated land in the study area, and a potential ecological risk assessment was carried out. This was combined with geographical detector analysis to further explore the main influencing factors leading to the spatial difference in potential ecological risk. The results showed that: ① The average values of  $\omega(\text{Cd})$ ,  $\omega(\text{Cr})$ ,  $\omega(\text{Cu})$ ,  $\omega(\text{Pb})$ , and  $\omega(\text{Zn})$  of cultivated land in the study area were 0.39, 123.00, 31.28, 51.04, and 119.66  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively, which were more than 2.60, 1.59, 1.19, 2.00, and 1.54 times the soil background value in the study area. ② The high value areas of Cd and Cr in cultivated land in the study area were mainly distributed in the west of the mountain area, the south of the transition zone, and the west of the plain area; the high value areas of Cu and Zn were mainly distributed in the west of the mountain area; the high value areas of Pb were mainly distributed in the south of the transition zone and the west of the plain area; and the low values of the five heavy metals were mainly distributed in the north of the transition zone. ③ The soil of cultivated land in the study area was dominated by slight potential ecological risk, and the average value of potential ecological risk index of heavy metals was  $\text{Cd}(32.58) > \text{Pb}(3.12) > \text{Cu}(2.82) > \text{Cr}(1.58) > \text{Zn}(0.98)$ . Cd was the main factor causing the potential ecological risk of cultivated land in the study area. ④ There were significant differences in the key influencing factors of soil potential ecological risk of cultivated land in different topographic regions of the study area. The distance from the river and the soil type were the key factors affecting the mountain area; the multiple cropping index and the distance from the industry and mine were the key factors affecting the transition zone, and the soil pH value and the amount of chemical fertilizer were the key factors affecting the plain area.

**Key words:** mountain plain transition zone; cultivated soil; heavy metals; spatial distribution; potential ecological risk; influencing factors

目前, 国家倡导“山水林田湖”, 耕地作为“田”, 其数量和质量的保障关系到国家粮食安全和农业健康发展<sup>[1,2]</sup>. 土壤作为耕地的主体, 其质量优劣能够直接影响作物生长、食品安全乃至生物健康<sup>[3]</sup>. 据《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国耕地土壤普遍存在污染, 其中重金属污染令人堪忧<sup>[4]</sup>. 耕地土壤中重金属的超标不仅直接影响土壤的生态平衡, 而且会造成农产品重金属富集<sup>[5,6]</sup>, 最终通过食物链危害人

体健康<sup>[7,8]</sup>, 因此耕地土壤重金属污染问题一直备受关注. 近年来, 学者对土壤重金属污染及其风险开展了大量的研究工作, 其中人为因素和自然因素是影响耕地土壤重金属的主要因素, 但不同区域的重金属影

收稿日期: 2021-05-13; 修订日期: 2021-07-23

基金项目: 四川省科技计划项目(2021YFH0121); 重庆市教委科技项目(KJZD-K202004101, KJZD-K20180410)

作者简介: 张丁(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为耕地资源可持续利用, E-mail: 735121793@qq.com

\* 通信作者, E-mail: gxs80@126.com

响因素各异,必须根据地区耕地的实际情况开展土壤重金属污染因素的调查研究<sup>[9-11]</sup>。

我国山区面积占国土面积的 60% 以上,造就了大面积平原与山地之间的过渡地带。龙门山区-成都平原过渡带是我国大陆上非常典型的山地平原过渡带,其地貌类型多样,垂直分异显著,具有重要的生态屏障功能<sup>[12,13]</sup>,但其抗干扰能力弱,也是典型生态环境脆弱区<sup>[14,15]</sup>。由于该过渡带位于成都平原西部,得天独厚的农业发展条件使耕地成为了地区的重要土地利用方式。但随着区域社会经济的迅速发展,过渡带开发活动的不断增强,以耕地为首的土地生态环境系统受到了建设用地扩张和工农业生产等活动的强烈威胁<sup>[16,17]</sup>。其次,发源于龙门山区的河流冲积物中重金属含量常见异常,导致了整个成都平原区西部 Cd、Cr 本底含量较高<sup>[18]</sup>。因此,在自然和社会条件的双重影响下,土壤污染特别是重金属超标问题成为了过渡带内大部分耕地普遍存在的问题<sup>[19-21]</sup>。但是,当前对于土壤污染问题研究多集中于平原地区,对过渡地区的相关研究较少。因此,探明过渡地带耕地土壤的主要污染物与进行潜在风险的评价,并对其影响因素进行判断及识别具有重要的现实意义。

本文选择了四川省中部一个拥有典型成都平原-龙门山脉过渡地形的工农业生产大县为研究对象,基于地统计法、GIS 空间分析法、潜在生态风险指数法和地理探测器分析研究区耕地土壤 5 种重金属空间分布特征,并对其潜在生态风险进行了评价,探析了潜在生态风险空间分布差异的影响因素,以期生态脆弱地区耕地土壤污染防治和农业持续发展提供一定指导意见。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省中部,地处东经 103°40' ~

104°10',北纬 30°54' ~ 31°26' 之间,区域总面积为 1 421 km<sup>2</sup>,其中耕地面积 563.36 km<sup>2</sup>。该区地势西高东低,北高南低,主要包括山地、丘陵和平原这 3 种典型地形,地质结构复杂,矿产资源丰富,工矿业发达;区域北部山区土壤成土母质以粗结晶岩和砂页岩混合风化物为主,主要土壤类型为黄棕壤、棕壤和新积土;南部平原区土壤成土母质以冲积物和砂页岩风化物为主,主要土壤类型为水稻土、潮土、紫色土和黄壤。该区属亚热带季风气候区,冬冷夏热,雨热同季。该区河网密布,灌溉水源丰富,是重要的农业生产区。目前该区拥有大型工业企业 160 家,有色金属冶炼、水泥制造和能源开发等产业发达,是地区典型的工业城市。

### 1.2 样品采集与测定

按照四川省海拔分类标准<sup>[22]</sup>将研究区划分为上游山地区,中游山地-平原过渡带区以及下游平原区 3 个采样区,按照不同地形区耕地面积和人口的比重(表 1),对各地形区耕地大致按 1:3:4 的比例进行表层土采样(0 ~ 20 cm),采样点共计 249 个,对实验数据进行异常值剔除后剩余 235 个,其中山地区采集样品 34 个,过渡区采集 95 个,平原区采集 106 个(图 1)。采样时间为 2020 年 5 月,选择在晴朗和近期无降水日期进行土壤样品采集,采样日平均气温 25℃。在每个采样点,根据梅花型布点法(3 ~ 5 个点)进行混合采样,为避免重金属污染,利用木铲采集耕地表层土壤,每个采样点 3 次重复。将土壤样品样本粗筛后,用木棍碾碎,使其全部通过 100 目的尼龙筛后待测。镉(Cd)采用石墨炉原子吸收光谱法(GB/T 17141-1997),铬(Cr)、铜(Cu)、铅(Pb)和锌(Zn)采用火焰原子吸收分光光度法(HJ/T 491-2019)<sup>[23]</sup>,分析过程中均进行了空白对照、平行双样以控制和保证测试结果的准确性。

表 1 各地形区耕地面积及人口比重

Table 1 Area of cultivated land and the proportion of population in various areas

地形分区	面积/km <sup>2</sup>			共计	耕地占比/%	人口数量/人	人口占比/%
	旱地	水浇地	水田				
山地区	57.55	8.31	3.49	69.36	12.31	17 281.00	6.46
过渡区	75.35	21.81	136.88	234.07	41.55	49 607.00	18.54
平原区	2.05	20.15	237.70	259.93	46.14	200 665.00	75.00
总计	134.96	50.30	378.10	563.36	100.00	267 553.00	100.00

### 1.3 影响因素获取

为探明影响研究区耕地土壤潜在生态风险的主要影响因素,本研究参考文献<sup>[9-11]</sup>,从自然与土壤条件、工农业生产和交通活动等造成土壤重金属输入与潜在生态风险升高的常见因素入手,选取了高程、年降雨量、距河流距离、土壤类型、土壤 pH

值、有机质含量、化肥施用量、复种指数、耕地距场镇距离、距公路距离、距铁路距离和距工矿距离等 12 个因子作为探讨区域耕地土壤潜在生态风险空间分布差异的影响因素。其中,12.5 m DEM 数据(源自 <https://asf.alaska.edu/>)经裁剪、拼接和提取后获取高程数据;2017 年土壤类型(1:500 000)

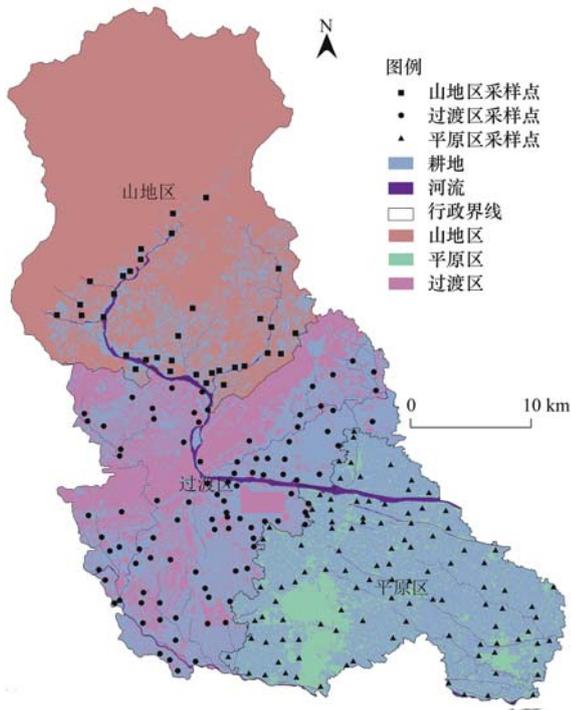


图 1 耕地土壤采样点位示意

Fig. 1 Site map of soil sampling points for cultivated land

源自西南区(四川)耕地资源管理数据库;2018年土地利用现状数据(1:250 000)源自地区国土部门,在 Arcgis 软件中提取出河流、场镇、公路、工矿企业和铁路的空间分布数据并进行欧氏距离的计算,以计算结果作为因素数据源;化肥施用量和复种指数为实地调查后插值结果数据,土壤 pH 值和有机质含量为实验成果插值结果数据.按行政界线中对研究区创建出 500 m×500 m 的网格,按耕地分布数据提取中心点,利用采样工具获取各点位的 12 项因子数据于 Excel 2016 软件中作为开展影响因素探测的基础数据库,各影响因素空间分布如图 2 所示.

1.4 研究方法

1.4.1 描述性统计分析

使用 SPSS 22.0 软件进行最大值、最小值和标准差等常规统计分析.使用标准化数值(Z-score)识别异常值,Z 分数低于 -3 或高于 3 的数据作为异常值并进行剔除,以剩余的 235 个点位数据作为基础数据集.在此基础上结合各项数据的峰度、偏度、变异系数对所有采样点位数据进行 K-S 正态分布检

验,如果某项数据不为正态分布,则对该项数据进行对数、平方根转换,使其达到正态分布或趋近正态分布的要求<sup>[24]</sup>.

1.4.2 地统计分析

本研究将通过正态检验的实验数据输入 GS + 10.0 中,通过选择不同模型和参数进行最精度拟合,将拟合系数经过 Arcgis 10.2 中的地统计工具(geostatistical analysis)处理后形成合理的重金属空间分布数据<sup>[25]</sup>.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} + \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \tag{1}$$

式中, $\gamma(h)$ 为函数模型预测值; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为 $Z(x)$ 在空间位置 $x_i$ 和 $x_i + h$ 上的观测值 $[i = 1, 2, \dots, N(h)]$ , $N(h)$ 属于在分隔距离 $h$ 中具有的本量.

1.4.3 潜在生态风险评价

潜在生态风险评价是由学者 Håkanson 提出的估算沉积物和土壤中污染物的潜在生态风险的方法,也是评估土壤重金属污染风险和土壤环境质量的重要方法<sup>[26]</sup>.各参比值具体取值如表 2 所示.具体计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i = T_r^i \times (c_j^i / c_r^i) \tag{2}$$

$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times C_r^i \tag{3}$$

式中,RI 为土壤综合潜在生态风险指数; $E_r^i$ 为第 $i$ 种重金属元素的潜在生态风险指数, $C_r^i$ 为重金属元素 $i$ 的积累指数,由重金属实测数据 $c_j^i$ 与重金属参比值 $c_r^i$ 的比值来表示, $T_r^i$ 为第 $i$ 种重金属元素的毒性系数.

考虑到潜在生态风险评估中参比值重要的限定作用,本研究选用《农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)》中的风险筛选值作为不同地形区耕地土壤重金属参比值 $c_r^i$ <sup>[27]</sup>.具体方法如下:依据各地形区采样点 pH 值的频数、中位数以及均值,确定各地形区耕地土壤 pH 值的归属区间( $pH \leq 5.5$ 、 $5.5 < pH \leq 6.5$ 、 $6.5 < pH \leq 7.5$ ),根据不同区间对 $c_r^i$ 进行取值(表 2),并将其用于潜在生态风险指数的计算中.

表 2 各地形区耕地面积及人口比重

Table 2 Area of cultivated land and the proportion of population in various areas

地形区	pH 平均值	pH 中位数	各区间 pH 出现频数			采用参比值/ $mg \cdot kg^{-1}$				
			<5.5	5.5~6.5	6.5~7.5	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
山地区	6.34	6.61	3	10	22	0.6	200	100	120	250
过渡区	5.72	5.69	39	37	19	0.4	150	50	90	200
平原区	5.35	5.35	66	38	2	0.3	150	50	70	200

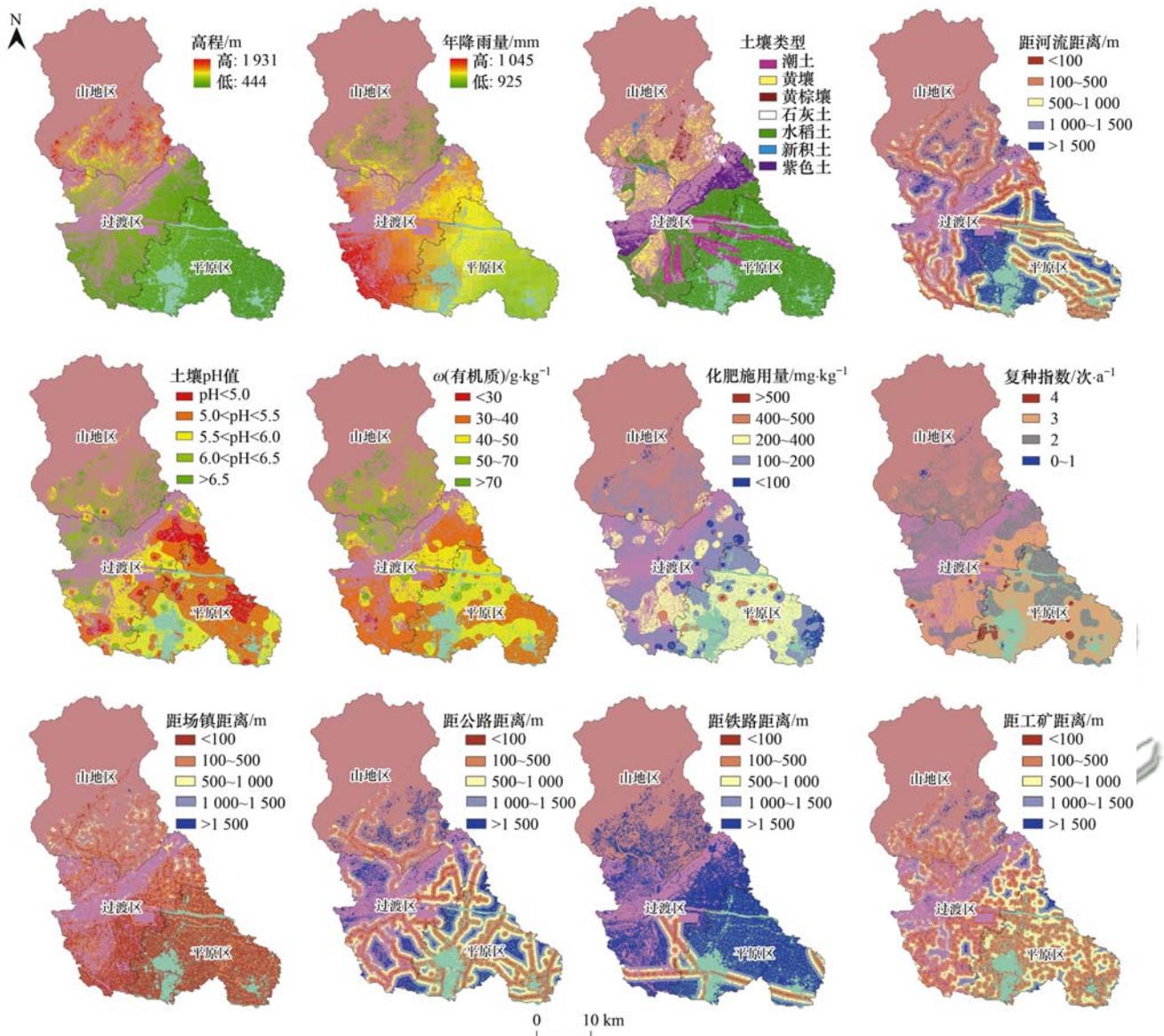


图2 研究区耕地土壤潜在生态风险影响因素空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of factors affecting potential ecological risk of cultivated land in the study area

#### 1.4.4 地理探测器

地理探测器 (geodetector) 是基于空间分异理论的空间关联探测模型, 相较于地理加权回归模型、主成分分析等其他影响因素探测方法而言, 其操作更为方便、结果更加客观, 正逐渐被广泛应用于环境污染、人体健康、城市发展等领域的研究中, 其主要用于探测不同影响因素对某项因子空间分布的解释程度, 用  $q$  值度量,  $q$  值越高, 说明该影响因素对因子的解释力越强<sup>[28]</sup>; 交互作用探测器能够发掘出两种不同的影响因素对某项因子空间分布的复合作用程度, 其值越高, 交互作用解释力越强, 因素间的复合作用愈强。为了减少探测过程中各影响因素共线性影响, 对于探测结果还需要通过统计学检验值  $P$  作为筛选, 一般而言  $P < 0.05$  则说明该项指标通过显著性检验, 具有统计学意义。具体计算原理

如下:

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (4)$$

$$SST = N\sigma^2 \quad (5)$$

$$q = 1 - (SSW/SST) \quad (6)$$

式中,  $h=1, \dots, L$ ;  $L$  为因子  $Y$  或影响因素  $X$  的分层 (分区);  $N_h$  和  $N$  分别为层  $h$  和全区的单元数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别为层  $h$  和全区的  $Y$  值的方差;  $SSW$  和  $SST$  分别为层内方差之和与全区总方差;  $q$  为影响因素  $X$  对因子  $Y$  空间分布的解释力。

## 2 结果与分析

### 2.1 耕地土壤重金属含量特征

从表 3 可以看出, 研究区耕地土壤平均  $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Pb})$  和  $\omega(\text{Zn})$  分别为 0.39、

123.00、31.28、51.04 和 119.66  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均超过成都平原区土壤元素背景值<sup>[29]</sup>,其中 Cd 平均值约为背景值含量的 2.60 倍(最大); Cu 平均值约为背景值的 1.19 倍(较小). 变异系数(CV)能够大致了解元素的分布态势,CV > 36.00% 属于高度变异水平,16.00% < CV < 36.00% 为中度变异水平,CV < 16.00% 时为低度变异水平<sup>[30]</sup>. 从表 3 还可以看出,研究区土壤 5 种重金属的变异系数为 36.47% ~ 49.77%,均属于高度变异范围,说明 5 种重金属元素在研究区内的空间变化具有明显波动,适合做进一步空间分析研究. 通过正态分布检验发现,Cd、Cr 和 Pb 符合正态分布,经对数转换后,Cu 和 Zn 符合对数正态分布.

由表 4 可知,5 种重金属的拟合模型均为指

数模型. 指标在空间中的具体关联程度以块金值( $C_0$ )和基台值( $C_0 + C$ )的比值 $[C_0/(C_0 + C)]$ 来表征,块基比小于 25.00%,则说明变量的空间关联性较强,主要受到结构性因素(土壤类型和成土母质等)的作用;块基比大于 75.00%,说明变量的空间关联性较弱,主要受到随机性因素(施肥和工农业活动等)的作用;块基比介于 25.00% ~ 75.00% 之间,说明变量具有中等程度的空间相关性,受到结构性因素和随机性因素的共同作用<sup>[31]</sup>. 如表 4 所示,Cd、Cr、Cu 和 Pb 的块基比均位于 25.00% ~ 75.00% 之间,表明这 4 种重金属元素可能受到结构性因素和随机性因素的共同影响;而土壤 Zn 块基比低于 25.00%,主要受到结构性因素的影响.

表 3 研究区耕地土壤重金属描述性统计( $n=235$ )

Table 3 Descriptive statistics of heavy metals in cultivated soils in the study area( $n=235$ )

重金属元素	极小值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	极大值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	偏度	峰度	标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数 /%	背景值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	分布类型
Cd	0.03	0.83	0.22	-0.23	0.16	0.39	40.14	0.15	正态分布
Cr	24.35	256.26	0.21	-0.23	44.86	123.00	36.47	77.25	正态分布
Pb	6.08	117.40	0.31	-0.34	22.79	51.04	44.64	25.51	正态分布
Cu	10.17	85.71	1.40	1.78	15.57	31.28	49.77	26.22	对数正态
Zn	47.90	294.85	1.26	1.79	45.82	119.66	38.29	77.85	对数正态

表 4 耕地土壤重金属半方差函数模型及其参数结果

Table 4 Semi-variance function model of heavy metals in cultivated soil and its parameter results

重金属元素	拟合模型	块金值( $C_0$ )	基台值( $C_0 + C$ )	变程 /km	块基比 / $[C_0/(C_0 + C)]$ /%	决定系数 ( $R^2$ )	残差 (RSS)
Cd	指数模型	0.01	0.02	2.73	42.64	0.75	8.59E-06
Cr	指数模型	1 191.38	2 121.00	13.5	56.17	0.84	42.023
Pb	指数模型	134.93	511.00	2.07	26.41	0.81	88.3
Cu	指数模型	0.02	0.04	9.85	49.05	0.67	6.891E-05
Zn	指数模型	0.01	0.02	2.82	21.19	0.92	4.565E-07

## 2.2 耕地土壤重金属空间分布特征

根据半方差函数拟合结果,本研究运用 Arcgis 的地统计板块(geostatistical analysis)中的普通克里金法对 5 种重金属进行了全域范围的空间插值,并提取了耕地土壤的重金属空间分布如图 3 所示. 结果表明,Cd 和 Cr 的高值区在整个研究区均有分布,主要分布于研究区北部的山地区与南部平原区; Cu 和 Zn 的高值区主要分布于山地区,过渡区和平原区有部分异常值呈团状分布; Pb 高值区主要分布于南部平原区,过渡区和山地区有部分异常值呈条带状分布. 5 种重金属的低值区均分布于研究区中部的过渡区. 同时,各地形区内耕地土壤重金属空间分布也存在明显差异,其中,Cd 和 Zn 在山地区东西部、过渡区南北部与平原区东西部含量差别均较

大; Cr 在山地区东西部、过渡区南北部的含量相差较大; Pb 在过渡区南北部、平原区东西部的含量差异较大;而 Cu 仅在山地区东西部的含量差别较大.

## 2.3 耕地土壤重金属潜在生态风险评价

参照 Hakanson 研究中提出的常见污染物的毒性响应系数,结合计算公式计算了各样点 5 项土壤重金属的潜在生态风险指数. 参照表 5 的等级划分标准<sup>[32]</sup>,将计算结果归类合并后形成单项重金属潜在生态风险指数( $E$ ). 从中可知,研究区耕地土壤 Cd 以中等风险和轻微风险为主,而 Cr、Pb、Cu 和 Zn 均为轻微风险. 5 项重金属元素的潜在生态风险指数( $E$ )的平均值表现为  $\text{Cd}(32.58) > \text{Pb}(3.12) > \text{Cu}(2.82) > \text{Cr}(1.58) > \text{Zn}(0.98)$ ,分别达到 Cr、Pb、Cu 和 Zn 的 21、10、12 和 33 倍.

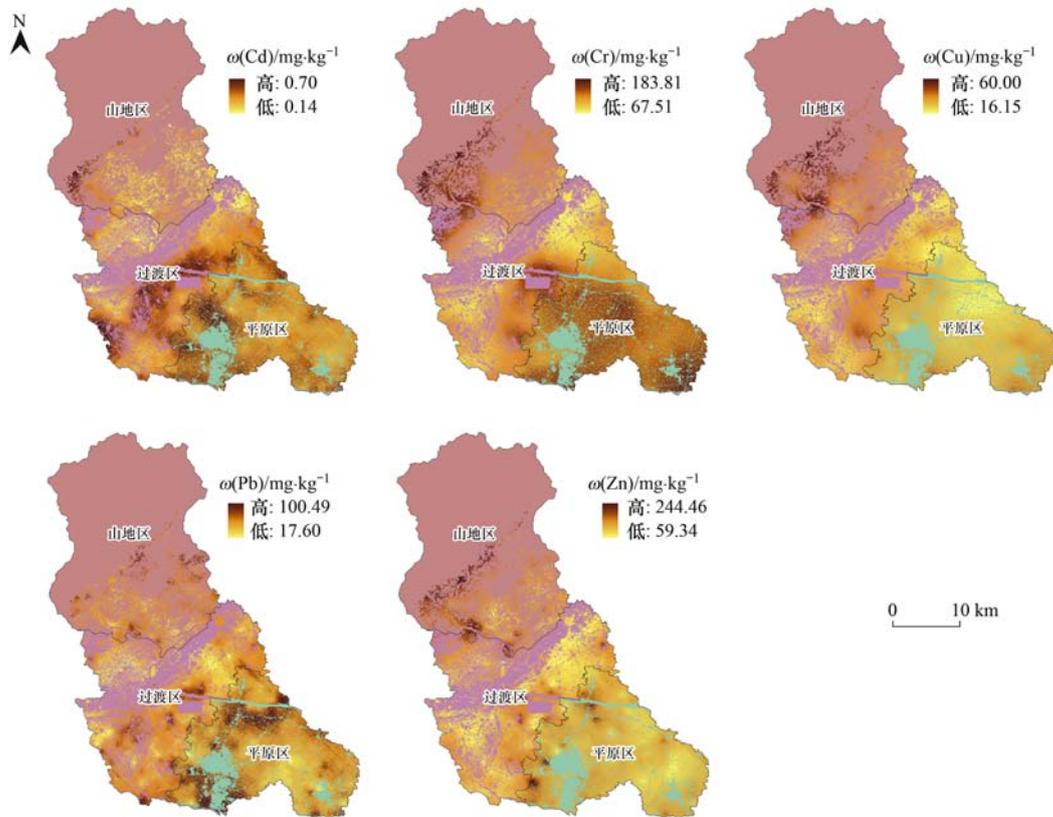


图3 研究区耕地土壤重金属空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of heavy metals in cultivated land in the study area

表5 单项重金属潜在生态风险指数与毒性响应系数

Table 5 Potential ecological risk index and toxicity response coefficient of heavy metals

重金属元素	毒性指数	轻微风险	中等风险	强风险	E 平均值
		$P_i \leq 30$	$30 \leq P_i < 60$	$60 \leq P_i < 120$	
Cd	30	107	118	10	32.58
Cr	2	235	0	0	1.58
Cu	5	235	0	0	2.82
Pb	5	235	0	0	3.12
Zn	1	235	0	0	0.98

参考单因子空间分布分析的方法,获得了研究区耕地潜在生态风险等级的空间分布结果如图4和表6所示.研究区耕地整体以轻微风险区(40.40%)和中等风险区(59.58%)为主.其中,中等风险区主要分布于研究区南部.轻微风险区主要分布于研究区北部.强风险区面积较小,占比仅为0.02%,仅分布于平原区.

从各地形区看,中等风险区和轻微风险区在各

地形区均有分布,但分区占比的差异较大,中等风险区占各地形区耕地总面积比例表现为:平原区(94.32%)>过渡区(37.99%)>山地区(2.28%),而轻微风险区占各地形区耕地总面积与中等风险区相反,占比表现为:山地区(97.72%)>过渡区(62.01%)>平原区(5.65%).可以看出,随着地形由山地向平原过渡,大部分耕地的潜在生态风险等级有所上升.

表6 各地形区耕地潜在生态风险分区面积统计

Table 6 Statistics of potential ecological risk zoning area of cultivated land in various regions

分级	山地区		过渡区		平原区		总面积 /km <sup>2</sup>	分区面积占比 /%
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%		
轻微风险	67.78	97.72	145.15	62.01	14.68	5.65	227.61	40.40
中等风险	1.58	2.28	88.92	37.99	245.16	94.32	335.66	59.58
强风险	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.03	0.09	0.02
总计	69.36	100.00	234.07	100.00	259.93	100.00	563.36	100.00

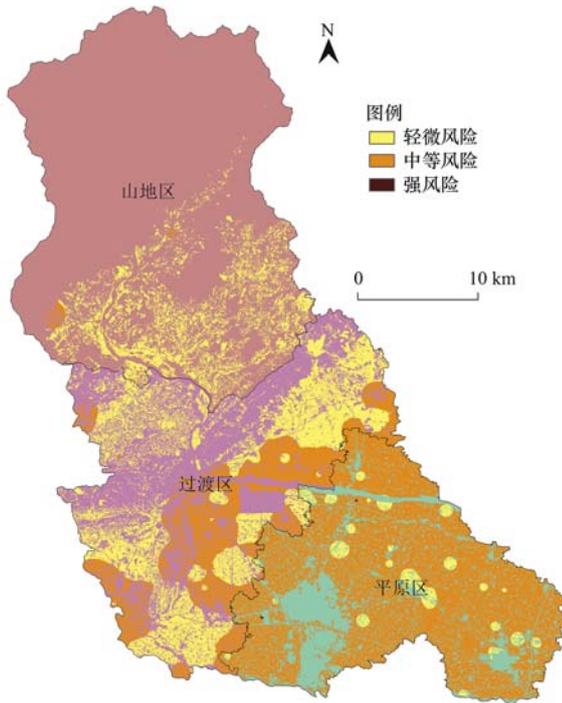


图4 研究区耕地潜在生态风险等级  
Fig. 4 Potential ecological risk grade  
of cultivated land in the study area

表7 各地形区单因子探测结果<sup>1)</sup>

Table 7 Results of single factor detection in each topographic area

地形分区	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$Y_7$	$Y_8$	$Y_9$	$Y_{10}$	$Y_{11}$	$Y_{12}$
山地区	0.080**	0.058*	0.120**	0.078**	0.070*	0.093**	0.113**	0.009	0.039	0.029**	0.000	0.048
过渡区	0.087**	0.060**	0.002	0.300**	0.214**	0.066**	0.085**	0.386**	0.035*	0.120**	0.055*	0.092**
平原区	0.004	0.010*	0.036	0.016	0.133**	0.023	0.008*	0.038**	0.122**	0.027**	0.046**	0.120**

1) \*\*表示  $P < 0.01$ , 因素间关联水平极显著, \*表示  $P < 0.05$ , 因素间关联水平显著;  $Y_1$  为高程,  $Y_2$  为年降雨量,  $Y_3$  为距河流距离,  $Y_4$  为土壤类型,  $Y_5$  为土壤 pH 值,  $Y_6$  为有机质含量,  $Y_7$  为距场镇距离,  $Y_8$  为复种指数,  $Y_9$  为化肥施用量,  $Y_{10}$  为距公路距离,  $Y_{11}$  为距铁路距离,  $Y_{12}$  为距工矿距离

( $Y_7$ )、有机质含量( $Y_6$ )和距场镇距离( $Y_7$ )也对山地区耕地 RI 产生了较强的交互作用. 复种指数( $Y_8$ )和距工矿距离( $Y_{12}$ )对过渡区耕地 RI 的交互作用最强,复种指数( $Y_8$ )和土壤 pH 值( $Y_5$ )、土壤类型( $Y_4$ )和有机质含量( $Y_6$ )、复种指数( $Y_8$ )和距公路距离( $Y_{10}$ )、复种指数( $Y_8$ )和有机质含量( $Y_6$ )也对过渡区耕地 RI 产生了较强的交互作用. 土壤 pH 值( $Y_5$ )和化肥施用量( $Y_9$ )对平原区耕地 RI 的交互作用最强,土壤 pH 值( $Y_5$ )和距工矿距离( $Y_{12}$ )、土壤 pH 值( $Y_5$ )和有机质含量( $Y_6$ )、土壤 pH 值( $Y_5$ )和距铁路距离( $Y_{11}$ )、土壤 pH 值( $Y_5$ )和复种指数( $Y_8$ )也对平原区耕地 RI 产生了较强的交互作用.

因子探测和交互作用探测结果表明,交互作用探测出的 5 种主要交互因素与单因子探测结果一致,取两种探测结果共同因素作为各地形区耕地 RI 的主要影响因素. 可以发现,不同地形区耕地土壤潜在生态风险的主导影响因素存在显著差异. 其

## 2.4 耕地土壤重金属潜在生态风险因素探测

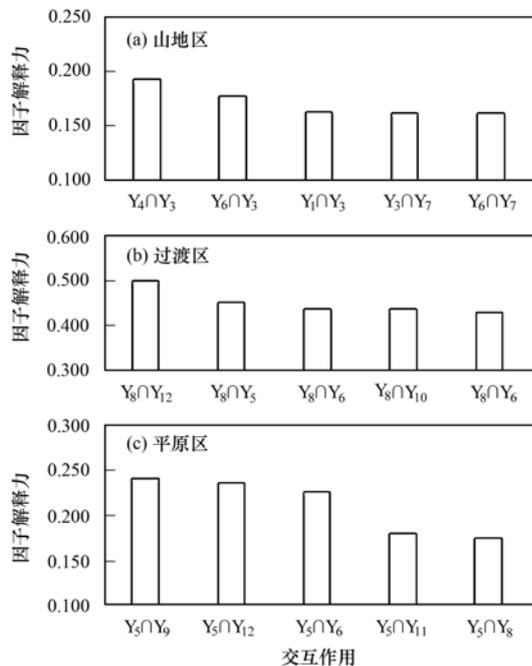
研究区耕地土壤潜在生态风险指数(RI)单因子探测结果如表7所示. 12种因子对于不同地形区耕地 RI 解释程度有较大差异. 其中,距河流距离( $Y_3$ )、距场镇距离( $Y_7$ )、有机质含量( $Y_6$ )、高程( $Y_1$ )和土壤类型( $Y_4$ )对山地区耕地 RI 的解释力较强. 复种指数( $Y_8$ )、土壤类型( $Y_4$ )、土壤 pH 值( $Y_5$ )、距公路距离( $Y_{10}$ )和距工矿距离( $Y_{12}$ )对过渡区耕地 RI 的解释力较强. 土壤 pH 值( $Y_5$ )、化肥施用量( $Y_9$ )、距工矿距离( $Y_{12}$ )、距铁路距离( $Y_{11}$ )和复种指数( $Y_8$ )对平原区耕地 RI 的解释力较强. 山地区和平原区单因子解释力较低,耕地土壤潜在生态风险可能受到多种因子的复合作用,可以通过交互作用探测器进一步发掘因子间的共同作用.

交互作用探测结果如图5所示,12种影响因素中均有10种以上的影响因素对三大地形区的耕地 RI 产生了较强交互作用. 其中,距河流距离( $Y_3$ )和土壤类型( $Y_4$ )对山地区耕地 RI 的交互作用最强. 距河流距离( $Y_3$ )和有机质含量( $Y_6$ )、距河流距离( $Y_3$ )和高程( $Y_1$ )、距河流距离( $Y_3$ )和距场镇距离

中,距河流距离和土壤类型是影响山地区耕地 RI 的关键因素,距场镇距离、有机质含量和高程也对山地区耕地 RI 的变化产生了一定的单因子作用和交互作用. 复种指数和距工矿距离是影响过渡区耕地 RI 的关键因素,土壤类型、土壤 pH 值和距公路距离也对过渡区耕地 RI 的变化产生了一定的单因子作用和交互作用. 土壤 pH 值和化肥施用量是影响平原区耕地 RI 的关键因素,距工矿距离、距铁路距离和复种指数也对平原区耕地 RI 的变化产生了一定的单因子作用和交互作用.

## 3 讨论

地理探测结果表明,距河流距离和土壤类型是影响山地区耕地潜在生态风险指数(RI)的关键因素,距场镇距离、有机质含量和高程也对山地区耕地 RI 的变化产生了一定的单因子作用和交互作用. 由于山地区耕地多分布于靠近河流的沟谷地带,该



$Y_1$  为高程,  $Y_3$  为距河流距离,  $Y_4$  为土壤类型,  $Y_5$  为土壤 pH 值,  $Y_6$  为有机质含量,  $Y_7$  为距场镇距离,  $Y_8$  为复种指数,  $Y_9$  为化肥施用量,  $Y_{10}$  为距公路距离,  $Y_{11}$  为距铁路距离,  $Y_{12}$  为距工矿距离

图5 影响因素交互作用探测结果

Fig. 5 Detection results of interaction of influencing factors

地带地势普遍较低,受河流作用影响较大,耕地发育以新积土和水稻土为主的土壤类型,冲积物丰富,有机质含量较高<sup>[33]</sup>;该地带耕地灌溉便利,靠近场镇和居民点,受人类活动一定扰动。有研究表明,长时间的河流冲积作用下带来了有机质输入,有机质含量的增加对重金属具有络合作用,使其固化于土壤中<sup>[34]</sup>,加之化肥与农药的施用和场镇生活污水的排放也可能增加了重金属的输入<sup>[35]</sup>,进而导致了耕地 RI 的升高。山地区远离河流的耕地多分布于地势较高的坡地边缘,受到河流冲积作用较弱,外源物质侵入较少,以岩石风化物母质为主,发育了石灰土、黄棕壤和紫色土等地带性土壤。

复种指数和距工矿距离是影响过渡区耕地 RI 的关键因素,土壤类型、土壤 pH 值和距公路距离也对过渡区耕地 RI 的变化产生了一定的单因子作用和交互作用。由于过渡区耕地集中连片分布于南部地势平坦区,农业生产活动频繁,复种指数较山地区有明显提高,高强度的作物种植直接增强了重金属的输入和耕地 RI<sup>[36,37]</sup>。同时,过渡区南部工矿企业密集,并分布有石油冶炼和水泥制造等大型工业基地。有研究发现,石油、水泥制造中产生的扬尘、废气易携带 Cd 和 Hg 等元素沉降于附近地区,导致周围区域土壤中重金属的输入和 RI 的升高<sup>[38,39]</sup>。另外,过渡区南部地形属沱江流域典型冲积扇。有研究

发现,发育于龙门山区的沱江冲积物中 Cd 和 Cr 有异常富集表现<sup>[40,41]</sup>。并且过渡区南部发育了面积较大的潮土,该类型土壤易发生羟基沉淀反应将重金属元素固定于土壤中,可能导致过渡区南部耕地 RI 的升高<sup>[43]</sup>。此外,过渡区南部公路路网密集,公路上汽车尾气沉降和刹车部件磨损等交通源会增强公路周围土壤 Pb 和 Cd 等重金属的输入,使耕地 RI 有所升高<sup>[42,43]</sup>。

土壤 pH 值和化肥施用量是影响平原区耕地 RI 的关键风险因素,距工矿距离、距铁路距离和复种指数也对平原区耕地 RI 的变化产生了一定的单因子作用和交互作用。由于平原区整体地势平坦,自然条件差异不大,耕地土壤中的重金属受河流和地形等自然迁移的影响大致相同,背景值含量差异不大,其输入风险主要来源于人类活动。首先,由于平原区大部分耕地属于著名的商品粮和经济作物生产基地,利用强度极高,化肥施用量和复种指数普遍能达到  $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $3 \sim 4 \text{ 次} \cdot \text{a}^{-1}$ ,高强度耕地利用模式下直接导致了土壤重金属的富集。同时,该区是主城区所在地,靠近场镇,人类活动频繁,耕地土壤受到生活垃圾和污水等排放的一定扰动。此外,平原区西部不仅靠近过渡区南部的重工业集聚区,还分布有以石油和矿产运输为主的铁路干线与密集的公路网,交通运输和工业活动产生的含 Cd 和 Hg 等扬尘、废气可能沉降于周围的农田<sup>[44]</sup>,因此平原区耕地土壤重金属含量和 RI 都较高。值得注意的是,由于平原区耕地 RI 可能受到了 pH 值降低和土壤酸化的强烈影响,活化了 Cd 为首的重金属元素,并迅速在土壤动植物、微生物体中迁移<sup>[45,46]</sup>,导致了小部分地区耕地土壤重金属含量和 RI 的下降。

#### 4 结论

(1) 研究区耕地土壤普遍出现重金属含量超标的问题。Cd、Cr、Pb、Cu 和 Zn 的平均值各超过背景值含量的 2.60、1.59、1.19、2.00 和 1.54 倍。

(2) 随着地形由山地向平原过渡,土壤 Cd 和 Pb 含量逐渐上升,Cu 含量逐渐下降,Cr 和 Zn 含量先降低后略有升高。除 Cu 外,研究区大部分区域耕地土壤的 Cd、Cr、Pb 和 Zn 含量均大于其背景值含量。

(3) 随着地形的过渡,大部分耕地潜在生态风险等级有所上升。区域内耕地土壤均存在轻微乃至中等程度的生态风险,Cd 是造成耕地土壤潜在生态风险的主要重金属元素。

(4) 随着地形的变化,人类活动因素开始代替自然因素对耕地土壤潜在生态风险产生主要影响。

其中,距河流距离和土壤类型是影响山地区的关键因素,复种指数和距工矿距离是影响过渡区的关键因素,土壤 pH 值和化肥施用量是影响平原区的关键因素。

#### 参考文献:

- [1] Hong W Y, Li F X, Li M C, *et al.* Toward a sustainable utilization of land resources in China: problems, policies, and practices[J]. *AMBIO*, 2014, **43**(6): 825-835.
- [2] 陈先鹏,方恺,吴次芳,等. 2009-2015 年中国耕地资源利用时空格局变化研究——基于粮食安全与生态安全双重视角[J]. *水土保持通报*, 2019, **39**(3): 291-296, 306.  
Chen X P, Fang K, Wu C F, *et al.* A study on spatio-temporal changes in patterns of China's cultivated land use from 2009 to 2015—insights from food safety and ecological security[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation Bulletin*, 2019, **39**(3): 291-296, 306.
- [3] 马芊红,张光辉,耿韧,等. 我国东部水蚀区坡耕地土壤质量现状分析[J]. *中国水土保持科学*, 2017, **15**(3): 36-42.  
Ma Q H, Zhang G H, Geng R, *et al.* Present condition analysis of sloping farmland soil quality in the eastern water erosion zone of China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, **15**(3): 36-42.
- [4] 蔡美芳,李开明,谢丹平,等. 我国耕地土壤重金属污染现状与防治对策研究[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(S2): 223-230.  
Cai M F, Li K M, Xie D P, *et al.* The status and protection strategy of farmland soils polluted by heavy metals[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(S2): 223-230.
- [5] 陈洁,王娟,王怡雯,等. 影响不同农作物镉富集系数的土壤因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 2031-2039.  
Chen J, Wang J, Wang Y W, *et al.* Influencing factors of cadmium bioaccumulation factor in crops[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 2031-2039.
- [6] 张定熙,孙涛,王永敏,等. 不同长度秸秆还田对土壤汞甲基化与水稻植株甲基汞富集的影响[J]. *环境化学*, 2019, **38**(7): 1488-1496.  
Zhang D X, Sun T, Wang Y M, *et al.* Effect of straw returning with different lengths on mercury methylation in paddy soil and methylmercury accumulation in rice plants[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(7): 1488-1496.
- [7] 赵迪. 大米中镉的人体生物有效性及其健康风险评估研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.  
Zhao D. Assessment of cadmium bioavailability in rice and its health risk to humans[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.
- [8] 李嘉蕊. 基于土壤-作物-人体系统的耕地重金属污染评价和健康风险评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.  
Li J R. Heavy metal pollution assessment and health risk assessment of cultivated land based on soil-crop-human system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [9] 陈艺,蔡海生,曾君乔,等. 袁州区表层土壤重金属污染特征及潜在生态风险来源的地理探测[J]. *环境化学*, 2021, **40**(4): 1112-1126.  
Chen Y, Cai H S, Zeng J Q, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in surface soil and geographical detection of potential ecological risk sources in Yuanzhou District[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(4): 1112-1126.
- [10] 王信凯,张艳霞,黄标,等. 长江三角洲典型城市农田土壤重金属累积特征与来源[J]. *土壤学报*, 2021, **58**(1): 82-91.  
Wang X K, Zhang Y X, Huang B, *et al.* Accumulation and sources of heavy metals in agricultural soil in a city typical of the Yangtze River Delta, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, **58**(1): 82-91.
- [11] 刘霏珈,吴克宁,罗明. 太湖流域典型农用地表层土壤重金属空间分异潜在风险因子识别[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, **29**(3): 609-622.  
Liu P J, Wu K N, Luo M. Potential risk factors identification of heavy metals spatial variation in typical agricultural land topsoil of Taihu Basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(3): 609-622.
- [12] 钟兆站,李克煌. 山地平原交界带与区域可持续发展[J]. *地理科学进展*, 1998, **17**(2): 25-33.  
Zhong Z Z, Li K H. The transition zone between mountain and plain and regional sustainable development[J]. *Progress in Geography*, 1998, **17**(2): 25-33.
- [13] Liu X, Zhao Y X, Qin Y J, *et al.* Driving analysis on ecological security in vulnerable transition areas of mountain and plain[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2013, **14**(3): 433-435.
- [14] Guo H X, Sun G, Shi F S, *et al.* Water, soil and nutrient losses caused by Wenchuan Earthquake: a case study in Pengzhou[J]. *Water Science and Technology*, 2013, **68**(5): 1055-1062.
- [15] Yao X, Li L J. Spatial-temporal assessment of debris flow risk in the  $M_s$  8.0 Wenchuan earthquake-disturbed area[J]. *Journal of Disaster Research*, 2016, **11**(4): 720-731.
- [16] 钟文挺,李浩,谢丽红,等. 成都平原-山地过渡带不同高程下耕地土壤养分变异特征分析——以彭州市为例[J]. *西南农业学报*, 2020, **33**(3): 575-583.  
Zhong W T, Li H, Xie L H, *et al.* Variation characteristics of soil nutrients of cultivated land at different elevation in transition zone between plain and mountain of Chengdu: a case in Pengzhou City[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, **33**(3): 575-583.
- [17] 罗若倩. 成都平原—山地过渡带耕地质量空间分异特征及影响因素研究——以邛崃市为例[D]. 成都: 四川农业大学, 2016.  
Luo R Q. Spatial distribution pattern and factors of farmland resources quality of Chengdu Plain transition zone—Take Qionglai city as an example[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2016.
- [18] 刘应平. 成都平原土壤地球化学组成及其生态响应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.  
Liu Y P. The soil geochemical and ecological response research of Chengdu Plain[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [19] 杨克燕,熊伟,罗阳,等. 都江堰市城区周边农田土壤重金属污染状况分析与评价[J]. *中国环境监测*, 2011, **27**(5): 10-16.  
Yang K Y, Xiong W, Luo Y, *et al.* Analysis and assessment on pollution condition of heavy metals in soil in the farmland around Dujiangyan city[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2011, **27**(5): 10-16.
- [20] 陈丹,周于杰,章佳文,等. 基于什邡市农田土壤中 Pb、Zn 的人体健康风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(12): 2687-2693.
- [21] 袁宏,赵利,薛勇. 基于最适空间插值的崇州市典型农田土

- 壤重金属污染特征分析与评价[J]. 土壤与作物, 2020, **9**(1): 94-101.
- Yuan H, Zhao L, Xue Y. Heavy metal pollution characteristics and soil quality assessment of typical farmland Soils in Chongzhou City of Sichuan Province[J]. Soil and Crop, 2020, **9**(1): 94-101.
- [22] 范建容, 张子瑜, 李立华. 四川省山地类型界定与山区类型划分[J]. 地理研究, 2015, **34**(1): 65-73.
- Fan J R, Zhang Z Y, Li L H. Mountain demarcation and mountainous area divisions of Sichuan province[J]. Geographical Research, 2015, **34**(1): 65-73.
- [23] 岑如香, 张旺, 韦小了, 等. 黔产薏苡仁及其产地土壤重金属污染的特征[J]. 水土保持通报, 2021, **41**(1): 103-111.
- Cen R X, Zhang W, Wei X L, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution of coix seed and soil from its producing area in Guizhou Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, **41**(1): 103-111.
- [24] 吕悦风, 孙华. 浙江某县域耕地土壤重金属空间分异特征、污染评价及来源分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(1): 95-102.
- Lv Y F, Sun H. Spatial differentiation characteristics, pollution evaluation, and source analysis of heavy metals in farmland soil in a county in northern Zhejiang Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(1): 95-102.
- [25] 姜秋香, 付强, 王子龙. 空间变异理论在土壤特性分析中的应用研究进展[J]. 水土保持研究, 2008, **15**(1): 250-253.
- Jiang Q X, Fu Q, Wang Z L. Research progress of the spatial variability theory in application to soil characteristic analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, **15**(1): 250-253.
- [26] Håkanson L. Metal monitoring in coastal environments[A]. In: Seeliger U, De Lacerda L D, Patchineelam S R (Eds.). Metals in Coastal Environments of Latin America [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1988. 239-257.
- [27] 张云芸, 马瑾, 魏海英, 等. 浙江省典型农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(6): 1233-1241.
- Zhang Y Y, Ma J, Wei H Y, *et al.* Heavy metals in typical farmland soils of Zhejiang Province: levels, sources and ecological risks[J]. Ecology and Environment Sciences, 2019, **28**(6): 1233-1241.
- [28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, **72**(1): 116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(1): 116-134.
- [29] 刘红樱, 谢志仁, 陈德友, 等. 成都地区土壤环境质量初步评价[J]. 环境科学学报, 2004, **24**(2): 297-303.
- Liu H Y, Xie Z R, Chen D Y, *et al.* Primary assessment of environmental quality of soils in Chengdu Area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, **24**(2): 297-303.
- [30] 马群, 赵庚星. 集约农区不同土地利用方式对土壤养分状况的影响[J]. 自然资源学报, 2010, **25**(11): 1834-1844.
- Ma Q, Zhao G X. Effects of different land use types on soil nutrients in intensive agricultural region[J]. Journal of Natural Resources, 2010, **25**(11): 1834-1844.
- [31] 柴磊, 王新, 马良, 等. 基于 PMF 模型的兰州耕地土壤重金属来源解析[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(9): 3919-3929.
- Chai L, Wang X, Ma L, *et al.* Sources appointment of heavy metals in cultivated soils of Lanzhou based on PMF models[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(9): 3919-3929.
- [32] 李小平, 徐长林, 刘献宇, 等. 宝鸡城市土壤重金属生物活性与环境风险[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(4): 1241-1249.
- Li X P, Xu C L, Liu X Y, *et al.* Bioactivity and environment risk of heavy metals in urban soil from Baoji City, P. R. China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(4): 1241-1249.
- [33] 张文博, 张福平, 苏玉波, 等. 渭河干流沿岸土壤有机质空间分布特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2014, **34**(1): 138-143.
- Zhang W B, Zhang F P, Su Y B, *et al.* Spatial distribution characteristics of soil organic matter and its influencing factors on two sides along mainstream of Weihe River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, **34**(1): 138-143.
- [34] 李思民, 王豪吉, 朱曦, 等. 土壤 pH 和有机质含量对重金属可利用性的影响[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2021, **41**(1): 49-55.
- Li S M, Wang H J, Zhu X, *et al.* Effects of soil pH and organic matter on the content of bioavailable heavy metals[J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition), 2021, **41**(1): 49-55.
- [35] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 长期灌溉农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(11): 2152-2159.
- Chen T, Chang Q R, Liu J, *et al.* Pollution and potential environment risk assessment of soil heavy metals in sewage irrigation area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, **31**(11): 2152-2159.
- [36] Hu W Y, Zhang Y X, Huang B, *et al.* Soil environmental quality in greenhouse vegetable production systems in eastern China: current status and management strategies [J]. Chemosphere, 2017, **170**: 183-195.
- [37] 赵玲, 滕应, 骆永明. 中国农田土壤农药污染现状和防控对策[J]. 土壤, 2017, **49**(3): 417-427.
- Zhao L, Teng Y, Luo Y M. Present pollution status and control strategy of pesticides in agricultural soils in China: a review[J]. Soils, 2017, **49**(3): 417-427.
- [38] Wang C, Yang Z Z, Zhang Y H, *et al.* PAHs and heavy metals in the surrounding soil of a cement plant co-processing hazardous waste[J]. Chemosphere, 2018, **210**: 247-256.
- [39] 刘鹏, 胡文友, 黄标, 等. 大气沉降对土壤和作物中重金属富集的影响及其研究进展[J]. 土壤学报, 2019, **56**(5): 1048-1059.
- Liu P, Hu W Y, Huang B, *et al.* Advancement in researches on effect of atmospheric deposition on heavy metals accumulation in soils and crops [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, **56**(5): 1048-1059.
- [40] 陈国光, 冯小铭, 郭坤一, 等. 广州、武汉、成都地区的生态地球化学特征[J]. 地质通报, 2007, **26**(11): 1418-1423.
- Chen G G, Feng X M, Guo K Y, *et al.* Ecogeochemical features in Guangzhou, Wuhan and Chengdu, China [J]. Geological Bulletin of China, 2007, **26**(11): 1418-1423.
- [41] 刘应平, 喻成燕. 成都平原土壤中 Cd 的空间分布与第四纪单元响应分析[J]. 中国地质, 2012, **39**(3): 804-810.
- Liu Y P, Yu C Y. A study of the spatial distribution and genesis of Cd in soil of Chengdu Plain[J]. Geology in China, 2012, **39**(3): 804-810.
- [42] 颜培, 王攀运, 张佳宝, 等. 长期施用畜禽养殖废弃物下潮土重金属的累积特征[J]. 土壤, 2017, **49**(2): 321-327.
- Yan P, Wang Q Y, Zhang J B, *et al.* Impacts of long-term livestock manure application on heavy metal accumulation in a typical fluvo-aquic soil[J]. Soils, 2017, **49**(2): 321-327.

- [43] 周怡, 胡文友, 黄标, 等. 我国高速公路周边土壤重金属污染现状及研究进展[J]. 中国环境监测, 2020, **36**(5): 112-120.  
Zhou Y, Hu W Y, Huang B, *et al.* Current status and research progress of heavy metal pollution in soils surrounding highways of China[J]. Environmental Monitoring in China, 2020, **36**(5): 112-120.
- [44] 肖武, 隋涛, 王鑫, 等. 巢湖流域典型农田土壤重金属污染评价与地理探测分析[J]. 农业机械学报, 2018, **49**(7): 144-152.  
Xiao W, Sui T, Wang X, *et al.* Assessment and geographical detection of heavy metal pollution in typical farmland soil in Chaohu Lake Basin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, **49**(7): 144-152.
- [45] 王存龙, 曾宪东, 刘华峰, 等. 烟台市土壤环境质量现状及重金属元素分布迁移规律[J]. 中国地质, 2015, **42**(1): 317-330.  
Wang C L, Zeng X D, Liu H F, *et al.* The present situation of soil environmental quality and the distribution and migration regularity of heavy metals in soil of Yantai [J]. Geology in China, 2015, **42**(1): 317-330.
- [46] 张玲玉, 赵学强, 沈仁芳. 土壤酸化及其生态效应[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(6): 1900-1908.  
Zhang L Y, Zhao X Q, Shen R F. Soil acidification and its ecological effects [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, **38**(6): 1900-1908.

## 《环境科学》多项引证指标名列前茅

2021年12月27日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上发布了2020年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2020年度总被引频次12 709,影响因子2.736,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

## 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i>	( 639 )
Impact of Meteorological Conditions on PM <sub>2.5</sub> in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming	( 649 )
Comparison and Analysis of PM <sub>2.5</sub> 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 <sub>3</sub> 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 PN/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 Weibei 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 )