

目次

2018~2020年北京市大气PM _{2.5} 污染特征及改善原因	刘保献, 李倩, 孙瑞雯, 董瑞, 王书肖, 郝吉明 (2409)
京津冀城市群冬季二次PM _{2.5} 的时空分布特征	姚青, 杨旭, 唐颖潇, 樊文雁, 蔡子颖, 韩素芹 (2421)
COVID-19管控前后不同污染阶段PM _{2.5} 中二次无机离子变化特征	姜楠, 郝雪新, 郝祺, 魏云飞, 张瑜, 吕政卿, 张瑞芹 (2430)
基于在线观测的太原市冬季PM _{2.5} 中金属元素污染水平及来源解析	崔阳, 郭利利, 李宏艳, 李永麒, 李滨, 何秋生, 王新明 (2441)
青藏高原东缘黑碳气溶胶变化特征及其来源	王红磊, 刘思晗, 赵天良, 卢文, 夏俊荣, 施双双 (2450)
湛江市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	虎晓蝶, 高博, 陈来国, 刘明, 陆海涛, 王硕, 赵伟, 梁小雅, 郭送军 (2461)
2021年夏季新乡市城区臭氧超标日污染特征及敏感性	侯墨, 蒋小梅, 赵文鹏, 马琳, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (2472)
台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (2481)
天津市空气污染的健康影响分析	华琨, 罗忠伟, 贾斌, 薛倩倩, 李亚菲, 肖致美, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (2492)
2002~2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析	杨传玺, 薛岩, 高畅, 万孜恒, 王小宁, 刘永林, 刘琳, 刘长青, 王炜亮 (2502)
1990~2020年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析	王芳, 李文慧, 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞 (2518)
长江上游小型水库枯水期水质对景观组成、配置和水库特征的响应	钟泳林, 冉娇娇, 文雯, 张名瑶, 吕明权, 吴胜军 (2528)
宁夏入黄排水沟中典型内分泌干扰物的污染特征与风险评价	李凌云, 高礼, 郑兰香, 李富娟, 陶红, 马兰 (2539)
微塑料及金属在黄浦江地表水环境的赋存特征及与金属抗性基因的相关性分析	陆嘉玮, 徐晨辉, 胡纯, 刘树仁, 李方 (2551)
黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 臧飞, 毛满萱, 潘文惠, 米璇 (2562)
三峡库区支流库湾消落带土壤磷形态赋存特征及其释放风险	张雪, 朱波 (2574)
霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价	刘海, 赵国红 (2583)
基于贝叶斯网络的太湖叶绿素a影响因素分析	刘杰, 何云川, 邓建明, 汤祥明 (2592)
河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 路小慧, 郑一迪, 孟顺祥 (2601)
饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向	钟婷婷, 林涛, 刘威 (2613)
镍铁氧体@活性炭复合材料去除六价铬的表征、性能及机制	张华, 李荣华, 陈金雄, 曾鸿鹄, 黄海艺, Asfandiyar Shahab (2622)
纳米核壳Co@NC催化剂活化过氧乙酸降解磺胺甲噁唑	郑婷露, 张龙龙, 陈家斌, 张亚雷, 周雪飞 (2635)
富里酸改性FeMnNi-LDH复合材料对水中砷的吸附性能与机制	何雅馨, 柯心怡, 魏世强, 蒋珍茂 (2646)
富含钙/铝的污泥生物炭复合材料对水溶液中磷酸盐的吸附机制	欧阳铸, 曹露, 王炳乾, 丁丽, 黄海明, 祝采莹, 卞晓彤 (2661)
污泥生物炭掺杂改性及其对水中1,2-二氯乙烷吸附行为和机制	周佳伟, 施维林, 许伟, 魏晨军, 吴建生, 孟宪荣 (2671)
森林生态系统对大气氮沉降降低的响应	谢丹妮, 仰东星, 段雷 (2681)
气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响	张良侠, 岳笑, 周德成, 樊江文, 李愈哲 (2694)
西南地区陆地植被生态系统NPP时空演变及驱动力分析	徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 郭振东, 郑志威, 盘钰春 (2704)
不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响	马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 张甜, 殷珂洁, 陆星宇 (2715)
氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响	刘姝萱, 安慧, 张馨文, 邢彬彬, 文志林, 王波 (2724)
互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响	李文琦, 项琦, 解雪峰, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞 (2735)
黄土旱塬24 a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征	姚志霞, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 陈浩宁, 文永莉, 程曼 (2746)
黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征	许小明, 张晓萍, 王浩嘉, 贺洁, 王妙倩, 易海杰, 薛帆, 邹亚东, 田起隆, 何亮 (2756)
短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响	简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 李佳欣, 温宇豪, 刘付和, 任成杰, 韩新辉 (2767)
福建省水田土壤有机碳积累对未来温度升高的响应	车燕, 邱龙霞, 吴凌云, 龙军, 毋亭, 李晶, 邢世和, 张黎明 (2775)
中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议	赵晓峰, 雷梅, 陈同斌 (2786)
基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展	龚仓, 王顺祥, 陆海川, 陈勇, 刘玖芬 (2799)
河北省土壤化学元素的背景值与基准值	张丽婷, 成杭新, 谢伟明, 齐全强, 谢晓阳, 于文龙, 王俊达 (2817)
非粮化利用下耕地土壤重金属分布特征、生态风险和来源解析	邱乐丰, 祝锦霞, 潘艺, 党云晓, 吴绍华 (2829)
基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价	余飞, 王佳彬, 王锐, 王宇, 宁墨奂, 张云逸, 苏黎明, 董金秀 (2838)
长株潭地区土壤Cd和Pb固液分配特征与环境风险	李钰滢, 彭驰, 刘乐乐, 张严, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元 (2849)
贵州铅锌矿区土壤和作物重金属生态风险与迁移特征	马宏宏, 张利, 郭飞, 杨峰, 王惠艳, 彭敏, 张富贵 (2856)
贵州省旱地土壤Hg污染状况与玉米安全生产评估	马丽钧, 周浪, 宋波, 王佛鹏, 张云霞, 吴勇 (2868)
山西野生连翘生长地土壤PAHs污染特征及风险评价	郭佳佳, 王琦, 康敏捷, 焦海华, 茹文明, 白志辉 (2879)
P对小麦Cd和As吸收与转运的影响	王云, 赵鹏, 李广鑫, 胡彩霞, 王俊, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 睢福庆, 李畅 (2889)
施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响	李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 陈勇, 李奇, 李义纯 (2899)
广东海丰湿地生态恢复进程中不同生境的土壤微生物特征分析	马姣娇, 高常军, 易小青, 吴琰, 李佳鸿, 曾向武, 蔡坚 (2908)
五台山不同退化程度亚高山草甸土壤微生物群落分类与功能多样性特征	罗正明, 刘晋仙, 胡现秋, 赫磊, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (2918)
天然高寒草地转变为混播人工草地对土壤微生物群落特征的影响	于皓, 刘悦, 邓晔, 芦光新, 颜琿璘, 王英成 (2928)
紫云英还田与化肥减量施肥对稻田土壤细菌群落组成和功能的影响	张济世, 刘春增, 郑春风, 张琳, 张香凝, 吕玉虎, 曹卫东, 张玉亭 (2936)
长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响	胡颖榕, 梁辰飞, 金锦, 王潇璇, 叶子豪, 吴家森 (2945)
高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响	张浩, 孙洁, 杨慧颖, 董联政, 滑紫微, 韩辉, 陈兆进 (2955)
菌藻复合体系氮代谢性能及菌群特征	赵志瑞, 吴海森, 马超, 李书缘, 李晴, 袁凯倪, 孟祥源, 刘硕, 方晓峰 (2965)
中国碳排放及影响因素的市域尺度分析	吴健生, 晋雪茹, 王晗, 冯喆, 张丹妮, 李雪尘 (2974)
碳交易政策如何影响工业碳生产率:来自中国省级数据的准自然实验	房琪, 李绍萍 (2983)
垃圾分类对碳减排的影响分析:以青岛市为例	陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 高晨琦, 孙英杰, 李卫华, 张国栋, 占美丽 (2995)
1950~2019年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量化分析	苏越, 路春燕, 黄雨菲, 苏艳琳, 王自立, 雷依凡 (3003)
《环境科学》征订启事(2480)	
《环境科学》征稿简则(2538)	
信息(2766, 2798, 2927)	

基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展

龚仓¹, 王顺祥¹, 陆海川¹, 陈勇¹, 刘玖芬^{2*}

(1. 中国地质调查局军民融合地质调查中心, 成都 611732; 2. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055)

摘要: 地理探测器是探测空间分异性, 以及揭示其背后驱动因子的一种新的统计学方法, 由于其既能揭示单一因素对因变量的影响, 也能评价双因素相互作用的影响, 且不需要考虑线性, 还能避免多变量共线性的影响, 没有较强的模型假设, 解决了传统方法在分析类别变量时的局限性, 在土壤重金属空间分异领域研究的应用越来越广泛。通过收集 40 篇关于地理探测器在土壤重金属空间分异领域的研究报道, 梳理了采用的自变量离散化方法、研究尺度、因变量和自变量类型、因子探测、交换探测、风险探测和生态探测等内容, 并提出下一步的应用研究急需明确的问题, 为地理探测器在土壤重金属空间分异领域深层次应用提供支撑。

关键词: 地理探测器; 土壤重金属; 空间分异; 分布特征; 离散化

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)05-2799-18 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205206

Research Progress on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Soil Heavy Metals Based on Geographical Detector

GONG Cang¹, WANG Shun-xiang¹, LU Hai-chuan¹, CHEN Yong¹, LIU Jiu-fen^{2*}

(1. Civil-Military Integrated Geological Survey Center of China Geological Survey, Chengdu 611732, China; 2. Natural Resources Comprehensive Survey Command Center of China Geological Survey, Beijing 100055, China)

Abstract: The geographical detector is a new statistical method to detect spatial stratified heterogeneity and reveal the driving factors behind it. It can not only reveal the influence of a single factor on dependent variables but also evaluate the influence of two-factor interactions and does not need to consider linearity, while also avoiding the influence of multivariate collinearity. Without strong model assumptions, it solves the limitations of traditional methods in analyzing category variables. The research on the spatial differentiation of heavy metals in soil is increasingly widely used. This study collected 40 research reports on the spatial differentiation of soil heavy metals via geographical detector, combed the discrete methods of independent variables, research scale, dependent variables and types of independent variables, factor detection, exchange detection, risk detection, and ecological detection and put forward the problems that need to be clarified in the future application of this research. It is expected to provide support for the deep application of geo-detector in the field of spatial differentiation of soil heavy metals.

Key words: geographical detector; soil heavy metals; spatial stratified heterogeneity; distribution characteristics; discretization

土壤是人类生存、生产和发展必不可少的重要资源,是生态系统的基本组成部分,也是各种污染的媒介^[1]。土壤也是地球表面一种异质程度较高且具有一定时空连续性的变异体,它的发生发展很容易受到自然和人为等多种因素的影响并与这些因素产生一定的关联^[2]。在过去的几十年中,工业化与城市化的不断发展和人类生产生活的范围不断扩大,加剧农田土壤重金属的累积,使土壤重金属污染因其毒性和难降解性而成为一个重要的环境问题。从空间异质性上来看,通过自然来源(如土壤类型^[3,4]、成土母质^[5]、地形因素^[3]、地貌类型^[6]和植被覆盖^[4]等)或人为来源(如土地利用、交通活动、住宅区、农业活动、工业活动和灌溉^[7-15]等)进入土壤中的重金属也会随土壤的变化发展发生迁移转化,这种空间差异通常体现在重金属元素在空间上的差异性、相关性、变化趋势和含量变化等^[2,16]。空间异质性是环境和社会经济研究中地理现象的一个关键特征^[17]。土壤重金属空间变异主要

有结构变异和随机变异^[2]。通常情况下,各种自然因素都会对土壤的成土过程产生影响发生结构变异,结构变异会对土壤重金属产生较大的影响,使土壤重金属空间变异结构具有的相关性将会更强^[18]。随机变异源于人为活动,包括排放重金属污染物、农药化肥使用、工业化和城市化扩张等,这种变异能够使重金属空间变异具有的相关性和结构性减弱^[19],从而导致空间变异结构的复杂性更高。土壤中的重金属是自然因素和人为因素共同作用的结果^[13,20,21]。为了减少土壤重金属污染、降低环境风险,明确造成污染的主要因素,并对处于重金属污染风险中的土壤进行修复治理,必须先明确 4 个问题^[22]:①诸多影响因素中,哪些是造成污染的原因?

收稿日期: 2022-05-17; 修订日期: 2022-08-02

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(ZD20220408, DD20208067)

作者简介: 龚仓(1987~),男,硕士,工程师,主要研究方向为化学分析、环境污染和空间数据分析, E-mail: dugufengxue@yeah.net

* 通信作者, E-mail: 13863858360@163.com

②这些因素的影响程度如何? ③这些影响因素是独立运行还是相互关联? ④污染风险的地理范围是什么? 并明晰土壤重金属在土壤环境中的迁移转化和空间分异特征。

空间异质性是指层内方差小于层间方差的现象,是地理数据除空间自相关性之外的另一个重要属性^[23]。地理探测器是空间异质性测量和属性分析的一种新的统计理论和方法^[24~26],其核心思想是如果某个自变量对某个因变量有重要影响,那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性。如果分区的方差之和小于全区的总方差,则存在空间异质性。与常规方法相比,地理探测器可以揭示单一因素对因变量的影响,以及双因素相互作用的影响,而不需要线性,避免多变量共线性的影响。地理探测器于2010年首次推出,并于2016年和2017年进一步发展,目前已被20多个国家和地区的学者应用于50多个自然和社会科学分支,截至2021年发表中英文文章2200余篇(<http://www.geodetector.cn>)。地理探测器包括因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测等4种探测器,可定量确定各因子对土壤重金属空间异质性的影响。地理探测器能更直观、更快速、更有效地衡量各因子的贡献^[4],没有较强的模型假设,解决了传统方法在分析类别变量时的局限性^[27],在土壤重金属污染领域逐步得到较好的应用效果^[12,28~31],能有效解决以上4个问题。本文系统总结了地理探测器在土壤重金属空间分异性领域的应用,重点介绍了4个探测器在土壤重金属空间分异性的应用研究,并对进一步提高其性能进行展望,以期能为地理探测器在土壤重金属领域深层次应用提供基础支撑,并为评定土壤质量提供有用信息,也为管理部门制定相关防控措施提供一定的依据。

1 地理探测器简介

地理探测器(geographical detector)是王劲峰等人开发的探寻地理空间分区因素对疾病风险影响机制的一种方法,通过计算分类后各自变量方差之和与因变量方差之和的比来衡量自变量对因变量的贡献,包括分异及因子探测器、交互探测器、风险区探测器和生态探测器,4种探测器计算方法见文献^[26]。

分异及因子探测器:用于探测因变量的空间分异性以及各自变量对因变量影响程度的解释能力,用 q 值来度量。 q 的值域为 $[0,1]$, q 值越大,表明该自变量 X 对因变量 Y 的影响程度越大。

交互探测器:通过识别两个不同自变量交互时

的 q 值,判断自变量之间的交互作用对因变量的影响程度,判断依据:当 $q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$ 时,交互作用为非线性减弱;当 $\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$ 时为单因子非线性减弱;当 $q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$ 为双因子增强;当 $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$ 时为独立交互作用;当 $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$ 为非线性增强。

风险区探测:主要用于判断两个子区域间的属性均值是否有显著的差别,用 t 统计量来检验。

生态探测器:用于比较两个影响因子对土壤重金属空间分布的影响是否有显著的差异,如果在 α 的显著性水平上拒绝 H_0 ,表明两个自变量 X_1 和 X_2 对属性因变量 Y 的空间分布的影响存在着显著的差异。

2 地理探测器在土壤重金属空间分异及其影响因素分析中的应用

2.1 数值型自变量离散化方法

地理探测器的数据录入包括因变量 Y 和自变量 X ,其中,自变量须为类型量,若自变量为数值量,则需要离散化处理^[26]。数值量的属性特征所包含的信息为间隔量或比例量,而离散化的实质是将间隔量或比例量转换为离散型因子数据中所对应的命名量或次序量,即通过将连续型因子数据的属性值集合设置断点,并利用断点划分不同区间^[32,33]。在运用地理探测器时,选用适合的离散化方法将数值量因子转换为离散型因子,能够直接提升模型精度,不同的离散化算法,所得到的断点不同,分割的区间也不同,地理探测器的结果存在很大差异^[34]。监督和非监督是两种常用离散化方法类别。监督离散化方法将类别信息与切割点的选择相关联。选择适当的分界点,使得数据实例具有相同的类标签,并且标签在连续的区间上是不同的。无监督离散化方法在离散化过程中不考虑类别信息^[17,34,35]。在没有类别信息可用的情况下,无监督离散化是唯一选择。常用的非监督和单属性的离散化方法(见表1)有自然断点法、K-均值法、等间距法、分位数法和几何断点法等^[33,34]。

表2统计了26篇基于地理探测器的土壤重金属影响因子分析中数值型自变量离散化应用情况。可以看出,自然断点法是最常用的离散化方法,16篇文献采用该离散化方法;其次是等间距法,被5篇文献用于距离的离散化;分位数法和K-均值法均被4篇文献采用;几何断点法则被2篇文献采用;同一研究中,针对不同的数值型变量,选用的离散化

表 1 常用非监督和单属性的离散化方法

Table 1 Commonly used unsupervised, single attribute discretization methods		
离散化方法	原理	适用性
自然断点法 (natural breaks method)	通过划分使区间内的平均离散方差最小, 区间之间的平均离散方差最大	空间数据 ^[33]
K-均值法 (K-means method)	通过随机指定 K 个聚类中心, 计算每个样本到邻近中心的距离, 将每个样本与距离最近的中心归为一类, 重新计算聚类中心, 再重新对每个样本归类, 直到中心不在变化为止	多元正态性和方差齐性好的数据 ^[36]
等间距法 (equal interval method)	将数据以最小值和最大值为端点, 按相等的距离间隔进行划分	正态分布数据 ^[34]
分位数法 (quantile method)	指定具体的区间数, 根据区间数对排序好的数值进行均等分	线性分布数据 ^[34]
几何断点法 (geometrical interval method)	按照使每个区间中的数据平方和最小的原则划分区间	非正态分布的数据 ^[34]

方法也存在差异,如 Yang 等^[37]同时采用自然断点法和等间距法对 5 种数值型因子进行离散化处理,张敏等^[38]采用 5 种离散化方法对 8 种数值型自变量离散为三~四类分类数;同一数值型因子,不同的研究采用的离散化方法也存在差异,如距离因子(距道路、工业区、河流和住宅区等距离),文献^[4,5,22,27,30,39~42]选用自然断点法进行离散化处理,文献^[37,43~45]采用了等间距离散化方法,顾高铨等^[46]和 Wang 等^[47]则采用了 K-均值法进行离散化,而刘需珈^[48]和 Wang 等^[49]分别运用了分位数法和几何断点法完成离散化处理.表 2 还展示了各数值型影响因子离散化后的分类数,最多的被分为 10 类,最少的被分为 2 类,而 5、6 和 7 类的频率最高.尽管划分的分类数越大,表征空间变异性的能力越强,但分类数越多,地理探测器的计算过程就越低效,在实际分类时需要考虑精度与效率的平衡^[26].

由于不同的离散化方法的原理不同,适用性也存在较大差异(表 1),加之不同影响因子数据自身的空间分布特征,数值的频率分布,数据采集的地理位置都存在差异,导致不同的影响因子的最优离散化方法和分类数各不相同,得出的结论存在明显差异.然而,在对土壤重金属的地理探测研究中,尽管多数研究者参考了相似的文献或根据先验知识选择离散化方法,但遗憾的是都未就影响因子的离散化方法选取过程以及最优分类数的确定进行详细报道.因此,在实际应用中,国家或行业有分类要求的如土壤养分分级标准划分、土壤酸碱度等级划分标准、国际地理学会地貌调查与制图委员会坡度分级标准和中国土壤环境质量标准等,建议按照相应要求进行离散化处理,对于没有标准要求的可根据数据正态分布和线性或方差齐性选择离散化方法,确保土壤重金属的空间分异特征得到最佳解释.

表 2 基于地理探测的土壤重金属影响因子分析中数值型自变量离散化应用统计¹⁾

Table 2 Application of discretization of numerical variables in soil heavy metal impact factor analysis based on geographical detection			
数值量离散化方法	影响因子	分类数	文献
自然断点法	高程和植被覆盖指数	6	[4]
	降水、大气温度、距铁路距离、距河流距离、距公路距离和距工厂距离	5	
自然断点法	坡度、海拔、距水源距离、距主干道距离、距居民点距离、距工矿距离、距县城距离和距中心城市距离	/	[27]
自然断点法	高程、地形起伏度和地形湿度指数	3	
按国际地理学会地貌调查与制图委员会坡度分级标准	坡度	3	
按方位重分类	坡向	4	[38]
按目标区域在山体中的相对位置	地形部位指数	3	
结合调研确定影响农户种植管理方式较大的界值	地块面积和距道路距离	3	
自然断点法	人口数据、GDP 数据和海拔高程	5	
/	植被覆盖指数	3	[28]
按砂粒、粉粒、黏粒含量进行划分	黏土分布、砂土分布和粉砂土分布	5	
自然断点法	高程、坡度、坡度变率、坡向变率和地形起伏度	8	[30]
	As 含量	5	
	pH、距公路距离、距河流距离和植被覆盖指数	6	
	坡向	8	
等间距法	EC 值和碳酸钙含量	4	
K-均值法	距 1 号焦炉距离、距 2 号焦炉距离、距 1 号熄焦距离、距 2 号熄焦距离、距煤气柜距离、距硫铵工段距离、距粗苯工段距离、距油库工段距离、距冷鼓工段距离和距煤场距离	6	[46]
按土壤酸碱度等级划分标准划分	pH	4	

续表 2

数值量离散化方法	影响因子	分类数	文献
按全国第二次土壤普查养分分级标准划分	有机碳、全氮量、有机质、有效硅和有效硼	/	
等分法	年值气温和年值降水量	7	
自然断点法	海拔、夜间灯光指数和 pH	7	[50]
	坡度	6	
自然断点法	坡度、植被覆盖指数、化肥用量、距公路距离和距工厂距离	7	[5]
分位数法	pH、CEC、TOC、距灌溉水源距离、高程、坡度、土壤入渗率、人口密度、距交通主干道距离、路网密度、道路交叉口密度、距建筑物距离、距采矿用地距离、工业总产值、工业企业密度和粘粒含量	6	[48]
自然断点法	植被覆盖指数	7	
	高程、距道路距离、距居民地距离、坡度和距河流距离	10	[40]
/	全磷含量	6	
自然断点法	砂粒含量	7	[6,51]
几何断点法	黏粒含量和粉砂粒含量	8	
分位数法	距矿冶用地距离、点距道路距离和高程	10	[52]
自然断点法	距煤化工企业距离、距 Pb-Zn 冶炼厂距离、海拔、坡度、有机质、植被覆盖指数、道路密度、距主要道路距离和距离村庄距离	10	[39,41]
	距燃煤电厂距离和地貌	8	
K-均值法	pH、有机质、海拔、农药用量和化肥用量	/	
等间距法	距采选业距离、距冶炼和压延加工业距离、距交通干线距离和距河流距离	10	[45]
	距其他行业距离	6	
自然断点法	植被覆盖指数、降雨量、海拔、坡度、地形湿度指数、人口空间分布、有机质、pH、距道路距离和距水系距离	5	[42]
自然断点法	pH、铵根含量、硝态氮含量、坡向、坡位、坡度、高程、有机质、腐殖质厚度、立地指数、绿地面积、优势种年龄、农业区、工业区、交通区、农村居民用地和夜间灯光指数	/	[53]
分位数法	高程	10	[43]
等间距法	距矿山或冶炼厂距离和距主干道距离	/	
	坡度	3	
K-均值法	海拔和植被覆盖指数	5	[54]
	坡向	/	
等间距法	距道路距离、距矿山和冶炼厂距离、距一般工厂距离和距农田距离	/	[37]
自然断点法	海拔	10	
自然断点法	高程、坡度、pH、住宅用地面积、距河流距离、距矿区距离和距道路距离	10	[22]
	植被覆盖指数	7	
分位数法	高程和年沉积通量	3	[55]
等间距法	距尾矿区距离、距采矿区距离、距冶炼工业区距离、距化学工业区距离、距煤矿资源距离、距有色金属矿距离、距黑色金属矿距离和距石灰石矿距离	2	
按《中国土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)划分	pH	4	[44]
自然断点法	高程	7	
按《中国土地利用调查技术规程》(1984 年)划分	坡度	5	
/	pH、植被覆盖指数、高程、坡度、重金属含量、水溶性重金属含量和水不溶性重金属含量	5	[56]
自然断点法	工业生产量、每千人的汽车数量、农药使用量和化肥施用量	5	[57]
	有机碳和距河流距离	6	
K-均值法	植被覆盖指数	7	
	高程、距道路距离和 GDP	8	[47]
	pH	9	
几何断点法	潜在生态风险指数、重金属生物可利用性、pH、有机质、距河流距离和距工业区距离	8	[49]

1) “/”为缺少相关内容或数据

2.2 研究尺度和样品数量

地理探测器可用于探测不同尺度的土壤重金属空间分异特征,研究尺度涵盖全国^[28]、省会^[29,49,58]、地级市^[3,4,27,37,47,48,50,59~61]、区(或

县)^[5,6,30,42~44,55]、街道(或乡镇)^[12,22,38,52,56,62]、村^[63]和其它(厂、工业区和流域)^[39~41,45,46,53]等不同大小区域,研究区面积范围约 0.68~960 万 km²(陆地面积,图 1)。有研究表明,不同研究尺度、环

境背景和时空尺度下,土壤重金属的空间分异特征明显不同,地形地貌、土壤类型、成土母岩、土地利用方式和耕作施肥等结构性因素和随机因素均会对土壤重金属值的空间变异产生不同程度的影响,即使在同一地区,随着时间的推移,土壤重金属值的空间分异程度和主要影响因素也会随之发生变化.齐杏杏等^[28]研究指出,在较大的空间尺度上土壤重金属含量的空间分布和变化主要由自然因素造成.地理探测器可以用少于 30 的样本量达到更大样本量其他模型才能达到的统计精度^[26],统计显示土壤样品数量范围为 27~12 970 件(图 1).

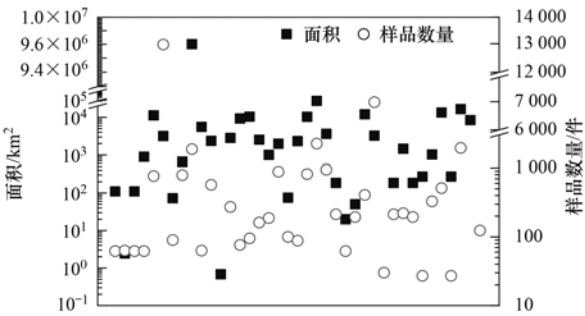


图 1 基于地理探测的土壤重金属空间分异研究的尺寸和样品数量

Fig. 1 Size and sample quantity of spatial differentiation of heavy metals in soil based on geographical detection

表 3 统计了基于地理探测的土壤重金属影响因素分析中的因变量和自变量,按照变量属性将自变量划分为地形地貌、成土、土壤性质、社会、利用

方式、距离、气候和其他共 8 类因子.40 篇文献共计应用了 139 种自变量,通过对相似自变量合并后共计 60 种(图 2).如顾高铨等^[46]研究中的 1 号焦炉、2 号焦炉和 1 号熄焦等合并为距工厂距离,周洋等^[30]研究中的土属合并为成土母质.由图 2 可知,使用频率最高的自变量是距工厂距离,共 33 次;其次是土地利用类型,32 次;高程-海拔、土壤类型、pH 和距道路距离的频率都在 20 次及以上.地形因子中,高程-海拔和坡度的频率最高,分别为 27 次和 19 次;成土因子中,土壤类型和土壤质地的频率最高,分别为 23 次和 17 次;土壤性质因子中,pH、土壤养分(如 TN、TK 和 TP 等)和有机质-碳应用频率最高;社会因子中常用的是 GDP、人口、道路密度和化肥用量;利用方式因子中,土地利用类型是最常用的自变量;距离因子中,距工厂、道路和河流的距离是 3 个最常用的自变量因子;气象因子中气温和降水量使用频率最高.地层、地理区划、坡位、重金属生物可利用性等 23 种自变量仅被少数作者使用,可能由于这些自变量数据相对较难获取.不同的研究考虑的自变量数量也各不相同,如刘需珈等^[61]讨论了 23 个自变量对太湖流域典型农用地表层土壤重金属分布特征研究的影响,文献[43,52,55]仅评价了 4 个自变量对因变量的影响作用.

基于 40 篇文献统计结果可以看出(表 3),因变量以土壤重金属含量为主,有研究探讨了自变量对土壤重金属的污染负荷指数^[3]、内梅罗污染指

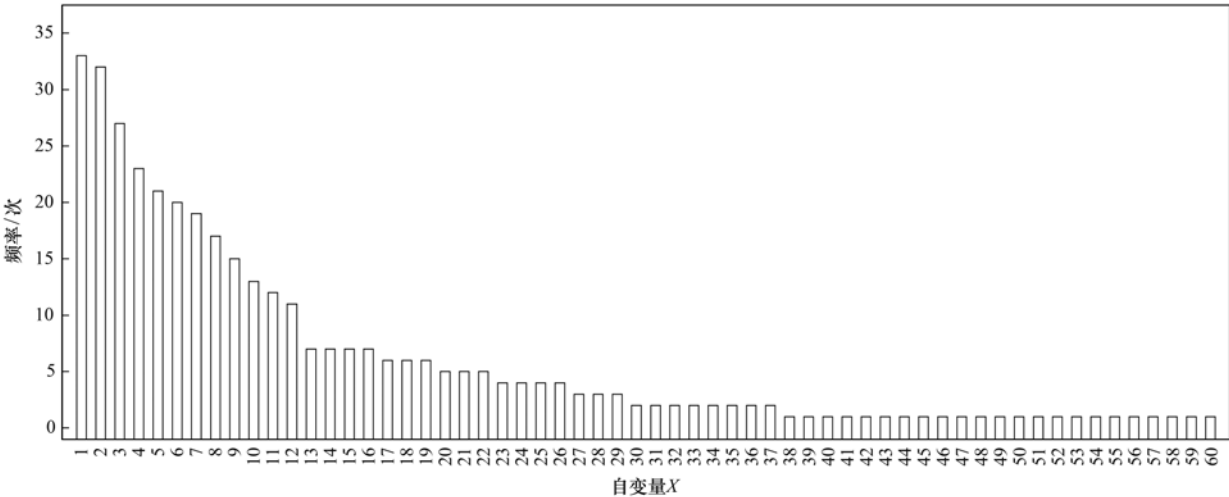


图 2 不同类型自变量使用频率

Fig. 2 Use frequency of different types of arguments

1. 距工厂距离,2. 土地利用类型,3. 高程-海拔,4. 土壤类型,5. pH,6. 距道路距离,7. 坡度,8. 土壤质地,9. 距河流距离,10. 土壤养分,11. 植被覆盖指数,12. 有机质-碳,13. 坡向,14. 地形,15. GDP,16. 人口,17. 成土母质,18. 距居民地距离,19. 气温,20. 道路密度,21. 重金属含量,22. 化肥用量,23. 植被类型,24. 地貌类型,25. 距铁路距离,26. 降水量,27. 土地覆盖,28. 夜间灯光指数,29. 农药用量,30. 地块面积,31. 岩层类型,32. 地质年代,33. 距城镇距离,34. 相对湿度,35. 湿润指数,36. 工业总产值,37. 工业企业密度,38. 地层,39. 地理区划,40. 地势三大阶梯,41. 坡位,42. 容重,43. 土壤侵蚀,44. 土种,45. 土壤入渗率,46. 流域,47. 腐殖质厚度,48. 距其他行业距离,49. 距农田距离,50. 气候带类型,51. 干湿分布,52. 健康风险指标,53. 潜在生态风险指数,54. 重金属生物可利用性,55. 年沉积通量,56. 净初级生产力,57. 矿产资源与数量,58. 立地指数,59. 优势种年龄,60. 每千人汽车数量

数^[63]、健康风险^[39,41,49,59,64]、潜在生态风险^[60]、地累积指数^[12]和源解析主成分因子^[43,45,52]空间分异特征的影响.以土壤重金属含量为因变量,探讨的是各土壤重金属的背景值和人类活动累加后的空间分异特征,如宋恒飞等^[27]研究指出,影响黑龙江省海伦市土壤 As 空间分异的主要是交通因素, Hg 的第一影响因素是水源因素,影响 Cd、Cu、Pb 和 Zn 空间分布差异的首要因素是县城活动,Cr 和 Ni 的首要影响因素分别是工矿影响和乡镇影响;

污染负荷指数、内梅罗污染指数、健康风险、潜在生态风险和源解析主成分因子针对土壤重金属综合污染的空间分异特征,不具体探讨某个单一重金属,如肖武等^[63]对土壤重金属 Zn、Cr、Cd、Hg、Pb、As、Cu 和 Ni 的内梅罗综合指数因子探测研究表明,农用地类型对内梅罗污染指数空间分布的解释力最大.地累积指数由于扣除了背景值的掩盖作用,探讨了由于人类活动引起的各重金属积累的空间分异特征^[28].

表 3 基于地理探测的土壤重金属影响因子分析中因变量和自变量统计

Table 3 Statistics of dependent variables and independent variables in soil heavy metal impact factor analysis based on geographical detection

变量	影响因子
地形地貌	海拔 ^[27,28,39,41,45,64] 、坡度 ^[22,27,29,30,38~42,44,48,53,54,56,58,61,64] 、坡向 ^[30,38,48,53,54,58,61,65] 、地形起伏度 ^[30,38] 、地形湿度指数 ^[38] 、地形部位指数 ^[38] 、地势三大阶梯 ^[28] 、坡度变率 ^[30] 、坡向变率 ^[30] 、地形部位 ^[22,30] 、地貌 ^[39,41] 、坡位 ^[53] 和流域 ^[44]
成土	地层 ^[64] 、土类 ^[30,48,61] 、土壤质地 ^[3~5,46,48,53,60,61] 、成土母质 ^[5,30,48,57,61,66] 、岩层类型 ^[6,51] 、地质类型 ^[42,54] 、岩性 ^[44] 、地质年代 ^[6,51,58] 、土壤侵蚀 ^[28] 、地貌类型 ^[6,28,51,58] 、土壤亚类 ^[30] 和土属 ^[30]
土壤性质	植被覆盖指数 ^[3~5,28,30,39~42,47,54,56,58] 、碳酸钙 ^[46] 、有效硅 ^[46] 、有效硼 ^[46] 、pH ^[12,22,30,39,41,42,44~50,53,56,60,61,66,67] 、植被类型 ^[6,28,30,49,51] 、砂土含量 ^[6,28,29,51] 、As 含量 ^[30] 、黏-粘土含量 ^[6,28,29,48,51,61] 、(总)有机碳(TOC) ^[46~48,61] 、电导率(EC) ^[46] 、有机质 ^[39,41,42,45,46,49,53,60,67] 、土壤入渗率 ^[48,61] 、粉砂土含量 ^[6,28,29,51] 、铵根含量 ^[53] 、总重金属含量 ^[56] 、水溶性重金属含量 ^[56] 、水不溶性重金属含量 ^[56] 、全氮量 ^[46,60] 、硝态氮量 ^[53] 、全磷量 ^[6,51,60] 、阳离子交换量(CEC) ^[48,61] 、全钾量 ^[60] 、容重 ^[48,61] 和腐殖质厚度 ^[53]
社会	道路密度 ^[3,42,48,61] 、GDP ^[12,28,47,50,58,67] 、东中西经济划分 ^[28] 、胡焕庸线 ^[28] 、工业总产值 ^[48,57,61,67] 、人口密度 ^[28,42,48,58,61,66,67] 、农药使用量 ^[45,57,67] 、夜间灯光指数 ^[50,53,58] 、化肥施用量 ^[5,45,57,66,67] 、工业企业密度 ^[48,61,66] 、净初级生产力 ^[58] 、矿产资源开采区 ^[6,51] 、交通路网 ^[66] 、绿地面积 ^[53] 、住宅用地面积 ^[22] 、矿产资源与数量 ^[66] 、农业区 ^[53] 、工业区 ^[53] 、交通区 ^[53] 、农村居民用地 ^[53] 和每千人汽车数量 ^[57]
利用方式	土地利用类型 ^[3~6,22,28~30,40,42,44,45,47,48,51~56,58,61,63,64,66] 、地块面积 ^[38] 和种植类型 ^[38]
距离 ¹⁾	铁路 ^[3,4,60,63] 、河流 ^[3,4,22,29,30,40,42,45,47,49,58,60,64] 、水源 ^[27,48,61,63] 、道路(或公路) ^[4,5,22,27,29,30,37~43,45,47,48,52,58,60,61,63,67] 、工段 ^[46] 、矿区 ^[22,27,37,43~45,48,52,58,60,61] 、工业区 ^[3~5,37,39,41,44,45,49] 、居民区 ^[27,39~41,48,58,60,61,63] 、其他行业 ^[45] 和农田 ^[37]
气候	气温 ^[4,12,29,50,58] 、干湿分布 ^[28] 、降水 ^[4,42] 、相对湿度 ^[12,29,58] 、气候带类型 ^[28] 、年均降水量 ^[50,58] 、干燥度 ^[58]
其他	健康风险指标 ^[59] 、地理区划 ^[28] 、优势种 ^[53] 、优势种年龄 ^[53] 、重金属含量 ^[62] 、立地指数 ^[53] 、土地覆盖 ^[43] 、年沉积通量 ^[55] 、重金属生物可利用性 ^[49] 和潜在生态风险指数 ^[49]
因变量 Y	污染负荷指数 ^[3] 、内梅罗污染指数 ^[63] 、重金属含量 ^[4~6,12,22,27~29,37,38,40,42,44,46~48,50,51,53~58,61,62,66,67] 、健康风险 ^[39,41,49,59,64] 、地累积指数 ^[28] 、潜在生态风险 ^[60] 和主成分分析因子(PC) ^[43,45,52]

1)道路(或公路):主干道、交通主干道、主要道路、交通干线和道路交叉口;工段:焦炉、熄焦、硫铵工段、粗苯工段、油库工段、煤气柜、冷鼓工段和煤场;居民区:居民点、村庄、居民地、城镇、乡镇、县城和建筑物;矿区:矿冶用地、采选业、矿山或冶炼厂、尾矿区、煤矿资源、有色金属矿、黑色金属矿、石灰石矿、工矿、矿山和冶炼厂、采矿区和采矿用地;工业区:燃煤电厂、冶炼工业区、化学工业区、煤化工企业、一般工厂、工厂、Pb-Zn 冶炼厂、冶炼和压延加工业

2.3 因子探测

因子探测能明确各种自变量对因变量影响程度的解释能力,是所有应用地理探测器研究重金属空间分异特征的首选方法.进行因子探测时,须进行显著性检验,若未通过检验,不能进行因子探测^[27,50,55,60].表 4 统计了 40 篇应用因子探测研究自变量对土壤重金属影响程度的探测结果.第一主导因子的 q 值最大,其对因变量的解释能力最强,第二主导因子和第三主导因子的解释能力依次减弱,各影响因子对不同重金属影响程度排序不同,揭示了不同重金属变化机制的异质性^[68].同一区域不同土壤重金属的第一主导因素大多为相同自变量,但第

二和第三主导因子差异较大,如张军等^[3]的研究指出,宝鸡市土壤重金属除 Cd 外的 As、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn 的第一主导因子是高程,Cd 的为降水,但 8 种重金属的第二主导因子分别是大气温度(Cd)、土地利用类型(Zn 和 Ni)、土壤类型(As 和 Pb)、植被覆盖指数(Cu 和 Cr)和降水(Mn),第三主导因子分别是土壤类型(Cd 和 Zn)、降水(As、Ni 和 Pb)、距工厂距离(Cu 和 Cr)和大气温度(Mn).然而在部分研究区域不同土壤重金属的第一主导因子各不相,如刘需珈等^[61]的研究指出,太湖流域典型农用地表层土壤重金属 As、Cd、Cu、Hg、Pb 和 Zn 的第一主导因子分别是成土母质、工业企业密

表 4 基于地理探测的土壤重金属影响因子分析因子探测结果统计¹⁾

Table 4 Statistics of factor detection results in soil heavy metal impact factor analysis based on geographical detection							
因变量	第一主导因子	q 值	第二主导因子	q 值	第三主导因子	q 值	文献
污染负荷指数	土壤质地	0.04	距铁路距离	0.026	公路密度	0.02	[3]
内梅罗污染指数	土地利用类型	0.405	距铁路距离	0.362	距水库距离	0.057	[60]
重金属含量	Cd	降水	0.188	大气温度	0.187	土壤类型	0.159
	Zn	高程	0.203	土地利用类型	0.077	土壤类型	0.029
	As	高程	0.355	土壤类型	0.133	降水	0.093
	Cu	高程	0.082	植被覆盖指数	0.047	距工厂距离	0.045
	Ni	高程	0.279	土地利用类型	0.076	降水	0.054
	Pb	高程	0.142	土壤类型	0.039	降水	0.01
	Cr	高程	0.095	植被覆盖指数	0.054	距工厂距离	0.053
	Mn	高程	0.305	降水	0.204	大气温度	0.204
健康风险	Cd	地层	0.313 6	土壤类型	0.176 3	海拔	0.159 1
	Sb	地层	0.1655	坡度	0.086 6	土壤类型	0.057
健康风险	HQa	HQa_Cr	0.013 98	HQa_Hg	0.012 02	HQa_Pb	0.010 99
	HQc	HQc_Cr	0.127 74	HQc_Pb	0.101 58	HQc_Hg	0.005 04
土壤重金属含量	As	距主干道距离	0.049 7	距乡镇距离	0.033 8	距工矿距离	0.0235
	Hg	距水源距离	0.024 3	距县城距离	0.014 7	距乡镇距离	0.011 4
	Cd	距县城距离	0.053 3	距主干道距离	0.020 1	土壤类型	0.017 6
	Cr	距工矿距离	0.066	距主干道距离	0.059	距乡镇距离	0.058 2
	Cu	距县城距离	0.062 8	距工矿距离	0.028 3	距乡镇距离	0.027 2
	Ni	距乡镇距离	0.058 6	距主干道距离	0.058 5	距工矿距	0.055 7
	Pb	距县城距离	0.025 2	土壤类型	0.005	距主干道距离	0.004 6
	Zn	距县城距离	0.041 6	距乡镇距离	0.033 8	距主干道距离	0.032 8
重金属含量	Pb	未通过显著性检验					
	As	坡向	0.129 2	距道路距离	0.058 4	/	/
	Cu	未通过显著性检验					
	Cr	种植类型	0.067 2	高程	0.034 6	/	/
	Ni	距道路距离	0.044 1	/	/	/	/
	Zn	坡向	0.193 7	种植类型	0.086 6	/	/
重金属含量	GDP	/	/	平均温度	/	相对湿度	/
重金属含量	Cd	海拔高度	/	土壤类型	/	粉砂土含量	/
	Pb	土壤类型	/	植被类型	/	气候带类型	/
	Zn	海拔高度	/	土壤类型	/	地貌类型	/
	As	土地利用类型	/	气候带类型	/	东中西经济划分	/
	Cu	土壤类型	/	气候带类型	/	干湿分布	/
	Cr	土壤类型	/	气候带类型	/	地理区划	/
			/	/	/	/	/
地累积指数	Cd	地理区划	/	海拔高度	/	地势三大阶梯	/
	Pb	地势三大阶梯	/	气候带类型	/	干湿分布	/
	Zn	海拔高度	/	气候带类型	/	地势三大阶梯	/
	As	气候带类型	/	土壤类型	/	粉砂土含量	/
	Cu	海拔高度	/	地势三大阶梯	/	气候带类型	/
	Cr	土壤类型	/	地理区划	/	东中西经济划分	/
			/	/	/	/	/
重金属含量	Pb	坡度和距河流距离	0.93	土壤类型	0.86	距道路距离	0.82
	Cu	土壤类型	0.82	坡度	0.68	土地利用类型	0.31
	Zn	坡度	0.99	相对湿度	0.93	土壤类型	0.86
	Cr	坡度和土地利用类型	0.99	土壤类型	0.95	砂粒	0.89
	Ni	坡度、土地利用类型和粉砂	0.99	粘粒	0.82	砂粒	0.77
微量元素含量	B	土属	0.152	成土母质	0.128	地形部位	0.092
	Se	As 含量	0.257	土属	0.15	高程	0.149
	Mn	土属	0.094	高程	0.071	土壤亚类	0.071
	Cu	As 含量	0.162	土属	0.106	高程	0.092
重金属含量	SPC-ICP-Hg	有效硼	/	土壤质地	/	碳酸钙	/
	SPC-ICP-As	全氮量	/	有效硅	/	有效硼	/
	SPC-ICP-Cd	全氮量	/	碳酸钙	/	土壤质地	/
	SPC-ICP-Cr	全氮量	/	效硅含	/	有机碳	/
	SPC-ICP-Cu	全氮量	/	碳酸钙	/	有机碳	/
	SPC-ICP-Ni	全氮量	/	有机碳	/	土壤质地	/

续表 4

因变量		第一主导因子	q 值	第二主导因子	q 值	第三主导因子	q 值	文献
重金属含量	SPC-ICP-Pb	全氮量	/	有机碳	/	有效硅	/	[46]
	SPC-ICP-Zn	全氮量	/	有效硅	/	机质碳	/	
	SPC-OCP-Hg	有机碳	/	有机质	/	pH	/	
	SPC-OCP-As	有机碳	/	土壤质地	/	有机质	/	
	SPC-OCP-Cd	有机碳	/	全氮量	/	EC	/	
	SPC-OCP-Cr	全氮量	/	有机碳	/	有机质	/	
	SPC-OCP-Cu	全氮量	/	土壤质地	/	有效硼	/	
	SPC-OCP-Ni	有机碳	/	全氮量	/	有效硼	/	
	SPC-OCP-Pb	有机质	/	有效硅	/	全氮量	/	
	SPC-OCP-Zn	有机质	/	有效硅	/	全氮量	/	
	DFP-ICP-As	距冷鼓工段距离	/	距煤场距离	/	距1号焦炉距离	/	
	DFP-ICP-Cd	距粗苯工段距离	/	距油库工段距离	/	距煤气柜距离	/	
	DFP-ICP-Cr	距1号焦炉距离	/	距冷鼓工段距离	/	距粗苯工段距离	/	
	DFP-ICP-Cu	距粗苯工段距离	/	距油库工段距离	/	距煤气柜距离	/	
	DFP-ICP-Hg	距1号焦炉距离	/	距1号熄焦距离	/	距煤气柜距离	/	
	DFP-ICP-Ni	距冷鼓工段距离	/	距1号焦炉距离	/	距粗苯工段距离	/	
	DFP-ICP-Pb	距冷鼓工段距离	/	距粗苯工段距离	/	距1号焦炉距离	/	
	DFP-ICP-Zn	距冷鼓工段距离	/	距粗苯工段距离	/	距1号焦炉距离	/	
	DFP-OCP-As	距2号熄焦距离	/	距硫铵工段距离	/	距粗苯工段距离	/	
	DFP-OCP-Cd	2号焦炉距离	/	距硫铵工段距离	/	距1号熄焦距离	/	
	DFP-OCP-Cr	距1号焦炉距离	/	距煤气柜距离	/	距油库工段距离	/	
	DFP-OCP-Cu	距2号熄焦距离	/	距2号焦炉距离	/	距硫铵工段距离	/	
	DFP-OCP-Hg	距2号熄焦距离	/	距1号熄焦距离	/	距2号焦炉距离	/	
	DFP-OCP-Ni	距2号熄焦距离	/	距煤气柜距离	/	距1号焦炉距离	/	
	DFP-OCP-Pb	距硫铵工段距离	/	距2号焦炉距离	/	距2号熄焦距离	/	
	DFP-OCP-Zn	距硫铵工段距离	/	距2号焦炉距离	/	距2号熄焦距离	/	
潜在生态风险	Cd	pH	0.051	全钾	0.033	坡度	0.024	[62]
	Hg	全磷	0.057	土壤类型	0.041	高程	0.029	
	综合指数	全磷	0.055	pH	0.04	土壤类型	0.034	
重金属含量	安顺市-As	未通过显著性检验						[50]
	安顺市-Cd	未通过显著性检验						
	安顺市-Cr	未通过显著性检验						
	安顺市-Hg	未通过显著性检验						
	安顺市-Pb	未能通过显著性检验						
	葫芦岛市-As	年值降水量	0.148	海拔	0.137	/	/	
	葫芦岛市-Cd	pH	0.333	年值降水量	0.125	年值气温	0.116	
	葫芦岛市-Cr	未通过显著性检验						
	葫芦岛市-Hg	未通过显著性检验						
葫芦岛市-Pb	未能通过显著性检验							
潜在生态风险	距公路距离	0.165 2	化肥施用量	0.109 6	成土母质	0.070 1	[5]	
	Cd	化肥施用量	0.287 1	距水源距离	0.160 7	距公路距离		0.128 1
	Cr	成土母质	0.399 5	距公路距离	0.208 3	化肥施用量		0.158 1
	As	坡度	0.179 8	距水源距离	0.148 5	土壤类型		0.142 4
	Pb	距公路距离	0.343 2	化肥施用量	0.215	距工厂距离		0.146 1
	Cu	距公路距离	0.221 5	距水源距离	0.130 3	化肥施用量		0.101 5
	Zn	距公路距离	0.225 9	成土母质	0.216 5	距工厂距离		0.135 7
	Hg	距公路距离	0.223 9	成土母质	0.137	化肥施用量		0.107 1
	Ni	化肥施用量	0.335 2	距公路距离	0.183 5	成土母质		0.165 1
重金属含量	As	化肥使用量	0.27	农药使用量	0.27	pH	0.12	[63]
	Cr	化肥使用量	0.4	工业总产值	0.38	农药使用量	0.27	
	Hg	化肥使用量	0.43	农药使用量	0.43	有机质	0.4	
	Cd	化肥使用量	0.44	农药使用量	0.42	pH	0.38	
	Cu	化肥使用量	0.26	农药使用量	0.23	工业总产值	0.23	
	Pb	化肥使用量	0.17	农药使用量	0.17	工业总产值	0.13	
重金属含量	As	成土母质	0.248 6	坡度	0.154 3	土地利用 B 类型	0.136 2	[48,58]
	Cd	土种	0.103 8	成土母质	0.043 9	工业企业密度	0.018 5	
	Cu	CEC	0.02	人口密度	0.016 6	工业企业密度	0.015	

续表 4

因变量		第一主导因子	q 值	第二主导因子	q 值	第三主导因子	q 值	文献
重金属含量	Hg	成土母质	0.087 4	TOC	0.07	人口密度	0.047 6	[48,58]
	Pb	TOC	0.036	距采矿用地距离	0.016 5	工业企业密度	0.016	
	Zn	土种	0.113 7	成土母质	0.043 4	pH	0.011 3	
重金属含量	Zn	高程	0.36	土壤类型	/	距道路距离	/	[40]
	Ni	高程	0.34	土壤类型	/	距居民地距离	/	
	Cr	高程	0.36	土壤类型	/	距居民地距离	/	
	Cu	高程	0.39	土壤类型	/	距居民地距离	/	
	Pb	高程	0.34	土壤类型	/	距道路距离	/	
	Cd	土地利用类型	0.072	距河流距离	0.058	高程	/	
重金属含量	非矿区-Cd	土壤类型	0.340 9	土壤砂粒含量	0.299 6	土壤粉砂粒含量	0.295 5	[6,51]
	矿产区-Cd	矿产资源开采区	0.083 4	岩层类型	0.049 1	地质年代	0.028 2	
重金属含量	Pb	GDP	0.083	距矿区距离	0.051	夜光灯指数	0.051	[64]
	As	地貌类型	0.178	地质年代	0.169	GDP	0.131	
	Ni	人口密度	0.237	GDP	0.234	年均气温	0.197	
	Cr	人口密度	0.201	GDP	0.194	年均气温	0.178	
	Zn	GDP	0.178	土壤类型	0.173	人口密度	0.154	
重金属含量	Cd	工业企业类型与数量	0.467	肥料类型与施用量	0.272	人口数量	0.028	[67]
	Hg	工业企业类型与数量	0.711	人口数量	0.556	肥料类型与施用量	0.456	
	As	肥料类型与施用量	0.327	土壤类型	0.319	成土母质	0.259	
	Pb	矿产资源与数量	0.379	肥料类型与施用量	0.156	人口数量	0.112	
	Cr	土壤类型	0.435	成土母质	0.354	人口数量	0.155	
	Cu	肥料类型与施用量	0.231	土壤类型	0.211	成土母质	0.182	
	Zn	人口数量	0.067	交通路网	0.066	肥料类型与施用量	0.043	
	Ni	土壤类型	0.294	成土母质	0.234	矿产资源与数量	0.098	
PC	PC1	距道路距离	0.28	土地利用类型	0.152	高程	0.087	[52]
	PC2	距工矿用地距离	0.126	土地利用类型	0.121	距道路距离	0.113	
	PC3	高程	0.129	距工矿用地距离	0.128	距道路距离	0.114	
健康风险	H1a	距 Pb-Zn 冶炼厂距离	0.342	距燃煤电厂距离	0.304	距煤化工企业距离	0.277	[39,41]
	H1c	距 Pb-Zn 冶炼厂距离	0.335	距燃煤电厂距离	0.308	距煤化工企业距离	0.283	
	CRa	距 Pb-Zn 冶炼厂距离	0.347	海拔	0.329	距燃煤电厂距离	0.31	
	CRc	距 Pb-Zn 冶炼厂距离	0.34	海拔	0.332	距燃煤电厂距离	0.306	
重金属含量	Hg	Ag	/	Pb	/	Ni	/	[66]
	As	Cu	/	Ag	/	Cd	/	
	Cu	As	/	Ag	/	Hg	/	
	Zn	Pb	/	Cd	/	Cu	/	
	Cr	Ni	/	As	/	Pb	/	
	Cd	As	/	Pb	/	Zn	/	
	Pb	As	/	Zn	/	Cu	/	
	Ni	Cr	/	Pb	/	As	/	
	Ag	Hg	/	Cd	/	As	/	
PC	PC1	距采选业距离	0.227	距冶炼和压延加工业距离	0.093	化肥施用量	0.081	[45]
	PC2	距采选业距离	0.156	化肥施用量	0.063	距冶炼和压延加工业距离	0.061	
	PC3	化肥施用量	0.236	农药使用量	0.212	有机质	0.149	
	PC4	土壤类型	0.397	pH	0.2	海拔	0.139	
Cd 含量		降水	/	道路密度	/	有机质	/	[42]
重金属含量	核心区-Cr	铵根含量	0.555	土壤质地	0.272	硝态氮含量	0.213	[53]
	核心区-Ni	铵根含量	0.657	土壤质地	0.22	二级土地利用类型	0.173	
	核心区-Cu	夜间灯光指数	0.263	有机质	0.221	二级土地利用类型	0.102	
	核心区-Zn	pH	0.435	铵根含量	0.378	有机质	0.376	
	核心区-As	有机质	0.396	土壤质地	0.18	铵根含量	0.169	
	核心区-Cd	硝态氮含量	0.124	夜间灯光指数	0.106	有机质	0.088	
	核心区-Sb	pH	0.373	夜间灯光指数	0.333	有机质	0.161	
	核心区-Pb	有机质	0.182	pH	0.156	土壤质地	0.101	
	郊区-Cr	铵根含量	0.383	土壤质地	0.188	坡位	0.179	
	郊区-Ni	铵根含量	0.445	有机质	0.19	硝态氮含量	0.15	
	郊区-Cu	铵根含量	0.361	有机质	0.289	硝态氮含量	0.14	
	郊区-Zn	铵根含量	0.343	有机质	0.284	硝态氮含量	0.164	

续表 4

因变量	第一主导因子	q 值	第二主导因子	q 值	第三主导因子	q 值	文献
重金属含量	郊区-As	铵根含量	0.6	硝态氮含量	0.169	土壤质地	0.115
	郊区-Cd	铵根含量	0.699	硝态氮含量	0.35	有机质	0.122
	郊区-Sb	夜间灯光指数	0.268	有机质	0.251	硝态氮含量	0.202
	郊区-Pb	铵根含量	0.425	夜间灯光指数	0.407	硝态氮含量	0.219
	远郊-Cr	pH	0.583	硝态氮含量	0.337	铵根含量	0.217
	远郊-Ni	pH	0.519	硝态氮含量	0.42	铵根含量	0.416 [53]
	远郊-Cu	pH	0.314	农村居民用地	0.206	铵根含量	0.114
	远郊-Zn	pH	0.361	农村居民用地	0.187	铵根含量	0.122
	远郊-As	pH	0.608	铵根含量	0.391	有机质	0.353
	远郊-Cd	pH	0.563	高程	0.142	二级土地利用类型	0.135
	远郊-Sb	pH	0.513	农村居民用地	0.17	铵根含量	0.134
	远郊-Pb	pH	0.467	农村居民用地	0.173	铵根含量	0.158
PC	PC1	距矿山或冶炼厂距离	0.2	距主干道距离	0.15	高程	0.062
	PC2	距矿山或冶炼厂距离	0.21	土地覆盖	0.094	高程	0.043 [43]
重金属含量	As	地质类型	0.38	高程	0.05	坡度	0.05 [54]
	Pb	土地利用类型	0.31	植被覆盖度	0.26	地质类型	0.02
重金属含量	Pb	距矿山和冶炼厂距离	0.37	土地覆盖	0.11	距一般工厂距离	0.08 [37]
重金属含量	As	距矿区距离	/	距河流距离	/	pH	/
	Cd	距矿区距离	/	距河流距离	/	高程	/
	Cr	pH	/	距矿区距离	/	高程	/
	Cu	距矿区距离	/	pH	/	土壤类型	/
	Ni	距矿区距离	/	pH	/	土壤类型	/
	Pb	距矿区距离	/	距河流距离	/	pH	/
	Zn	距矿区距离	/	pH	/	距河流距离	/ [22]
水溶性重金属含量	As	pH	/	距矿区距离	/	距河流距离	/
	Cd	距矿区距离	/	pH	/	高程	/
	Cr	pH	/	距矿区距离	/	高程	/
	Cu	距矿区距离	/	pH	/	高程	/
	Ni	距矿区距离	/	高程	/	距河流距离	/
	Pb	pH	/	距矿区距离	/	高程	/
	Zn	距矿区距离	/	pH	/	高程	/
重金属含量	As	高程	0.093			未通过显著性检验	
	Cd	年沉积通量	0.1	高程	0.044	未通过显著性检验	
	Hg	年沉积通量	0.04			未通过显著性检验	
	Cu	高程	0.023			未通过显著性检验	
	Pb	年沉积通量	0.022			未通过显著性检验	
	Zn					未通过显著性检验	[55]
PC	PC1	Cd 的年沉积通量	0.041	As 的年沉积通量	0.038	Pb 的年沉积通量	0.033
	PC2	高程	0.064	Cd 的年沉积通量	0.055	土壤性质	0.045
	PC3	Hg 的年沉积通量	0.07	Cd 的年沉积通量	0.051	未通过显著性检验	
重金属含量	As	距冶炼工业区距离	/	/	/	/	/
	Cd	流域	/	/	/	/	/
	Cr	pH	/	/	/	/	/ [44]
	Hg	流域	/	/	/	/	/
	Pb	距采矿区距离	/	/	/	/	/
重金属含量	As	土壤类型	0.111 3	植被覆盖度	0.051 5	高程	0.049 5
	Pb	土壤类型	0.143 6	总重金属含量	0.064	植被覆盖度	0.051 9
	Cd	土壤类型	0.204 2	植被覆盖度	0.079 3	水溶性重金属含量	0.069 8
	As	成土母质	0.164	每千人的汽车数量	0.135	化肥施用量	0.124 [56]
	Cd	成土母质	0.127	每千人的汽车数量	0.121	农药使用量	0.11
	Cr	成土母质	0.214	土地利用类型	0.126	工业生产量	0.125
	Hg	成土母质	0.113	工业生产量	0.11	每千人的汽车数量	0.11
重金属含量	Pb	成土母质	0.125	化肥施用量	0.114	农药使用量	0.11 [57]
重金属含量	As	有机碳	0.129	土壤类型	0.105	GDP	0.049 [47]
健康风险		植物类型	0.479	有机质	0.292	重金属生物可利用性	0.107 [49]

1) “/”为缺少相关内容或数据; HQa 和 HQc 分别表示成人非致癌风险和儿童非致癌风险; Hla 和 Hlc 分别表示成人非致癌风险指数和儿童非致癌风险指数; CRA 和 CRE 分别表示成人致癌风险指数和儿童致癌风险指; SPC-ICP 表示土壤理化性质因子-焦化厂内部; SPC-OCF 表示土壤理化性质因子-焦化厂外部; DFP-ICP 表示距污染源远近因子-焦化厂内部; DFP-OCF 表示距污染源远近因子-焦化厂外部,下同

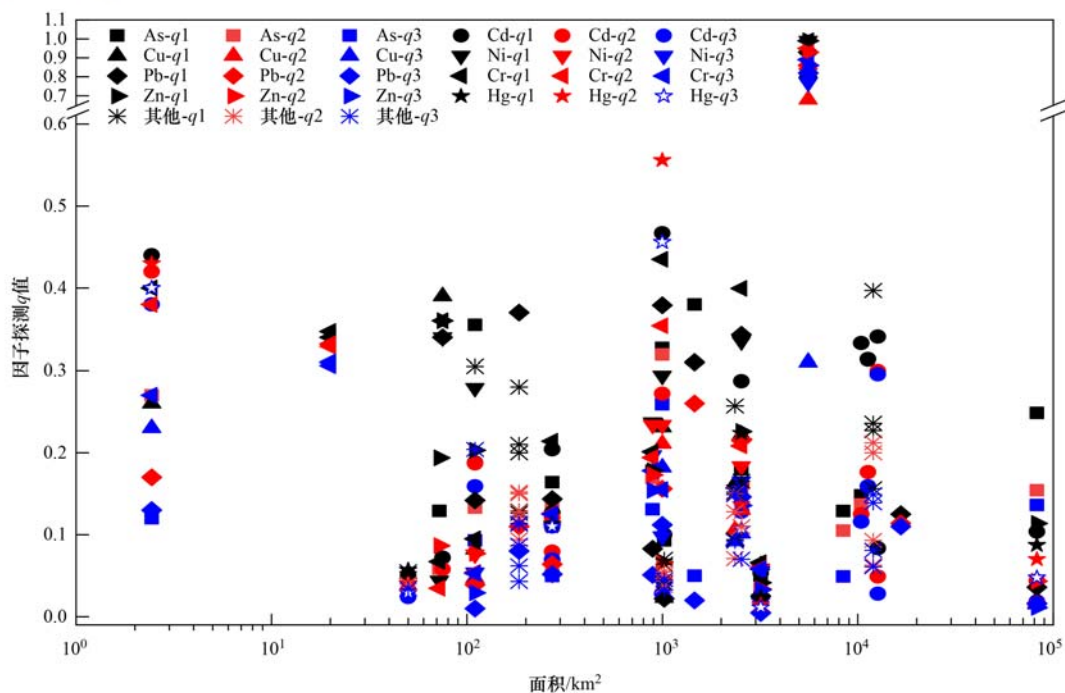
度、CEC、成土母质、TOC 和土种. 同一研究区域由于因变量的差异也会引起同一种重金属所受自变量的影响存在较大区别. 如齐杏杏等^[28]对全国范围内 6 种土壤重金属与影响因素的相关程度的研究指出, 当因变量为土壤重金属原始含量时, Cd、Pb、Zn、As、Cu 和 Cr 的第一主导因子分别是海拔高度、土壤类型、土地利用类型、土壤类型和土壤类型, 当因变量为土壤重金属地累积指数, Cd、Pb、Zn、As、Cu 和 Cr 的第一主导因子分别是地理区划、地势三大阶梯、海拔高度、气候带类型、海拔高度和土壤类型, 这是由于采用土壤重金属原始含量进行因子探测时, 原始含量是背景值和人为活动累加的结果, 背景值会掩盖累积的含量造成的.

结合图 1 和表 3 分析发现, 研究区域尺寸较小时, 土壤重金属的主导因子以人为因素为主, 相反, 研究区域尺寸较大时, 主导因子以自然因子为主. 另外, 从图 3 可见, 随着研究区面积变大, 主导因子的 q 值总体上呈现较小趋势. 王劲峰等^[26]的研究指出, 因子探测的 q 值域为 $[0, 1]$, q 值越大, 意味着自变量 X 对因变量 Y 的影响程度越大, 但对于 q 值多大时才有意义没有明确的定义, 类似线性回归中的 R^2 , q 值的物理含义是自变量 X 解释了 $100 \times q\%$ 的因变量 Y . 从表 4 可看出, 40 篇文献中除未给 q 值的 5 篇外, 第一主导因子的 q 值的最大值为 0.99, 最小值为

0.013 979; 除未给 q 值的 6 篇文献外, 第二主导因子的 q 值的最大值为 0.95, 最小值为 0.005; 除未给 q 值的 7 篇文献外, 第三主导因子的 q 值的最大值为 0.89, 最小值为 0.004 6.

2.4 交互探测

交互探测用于识别两个自变量的相互作用对因变量的解释力是增大还是减小. 在实际环境中, 土壤的成分和结构复杂, 土壤重金属的空间分异特征不可能是由单一因素影响形成的, 而是由多种影响因素相互作用的结果, 利用交互探测器探测多种自变量因子对重金属空间分异的交互影响程度, 有利于精准判断影响重金属空间分布的深层驱动机制^[4,12,68,69]. 表 5 统计了 30 篇应用交互探测研究自变量对土壤重金属影响程度的交互探测结果. 30 篇文献中除未给 q 值的 6 篇外, 第一主导交互因子的 q 值的最大值为 1.147, 最小值为 0.099; 除未给 q 值的 11 篇文献外, 第二主导交互因子的 q 值的最大值为 0.981, 最小值为 0.092; 除未给 q 值的 14 篇文献外, 第三主导交互因子的 q 值的最大值为 0.976, 最小值为 0.067. 总的来看, 除周伟等^[29]的研究外, 第一主导交互因子的 q 值明显大于第二主导因子的 q 值 (表 4), 多数表现为非线性增强的交互作用, 如刘需珈等^[61]的研究指出, 太湖流域典型农用地表层土壤重金属 Zn 的第一主导交互因子 (土种 $\cap$ 坡向) 的 q 值为 0.937 6, 是单因子土种



q_1 表示第一主导因子 q 值, 以此类推

图 3 土壤重金属第一、第二和第三主导因子的 q 值和研究区面积关系

Fig. 3 Relationship between q value of the first, second, and third dominant factors of soil heavy metals and the area of the study area

(0.113 7) 和坡向(0.007 5)对其空间分异性解释力的 7.74 倍,而第二主导交互因子(成土母质 $\cap$ 坡向)的 q 值为 0.9218,是单因子成土母质(0.0431)和坡向(0.007 5)对其空间分异性解释力的 18.11 倍,意味着两个因子的交互作用对土壤重金属空间分异性影响的解释程度大于单个因子的解释程度,进一步证明土壤重金属扩散分布特征的复杂性,并非单一指标能够完全解释与表达,需要考虑多种因子的共同作用. 30 篇统计文献中,周伟等^[29]对重庆市土壤重金属 Pb 的交互探测结果呈减弱的交互作用,其第一主导交互因子(高程 $\cap$ 距河流距离)的 q 值为 0.68,而高程和距河流距离的 q 值分别为 0.010 和 0.93,第二主导交互因子(高程 $\cap$ 坡度)的 q 值为 0.65,而高程和坡度的 q 值分别为 0.010 和 0.93,第三主导交互因子(高程 $\cap$ 土地利用类型)的 q 值为 0.65,而高程和土地利用类型的 q 值分别为 0.010 和 0.83,交互作用均为单因子非线性减弱.

对比表 4 和表 5,交互探测的第一主导因子或第二主导因子大多是相应交互探测的第一主导交互因子中的其中一个因子,且交互探测的前三个主导因子基本都是相应交互探测的前三主导交互因子的构成因子,且交互探测的 q 值明显高于因子探测的 q 值.但少数的研究中,部分重金属的第一主导交互因子由除第一、第二和第三主导因子外的其他因子组成,如周洋等^[30]的研究指出,Mn 的第一主导交互因子是坡度 $\cap$ As 含量,而 Mn 的第一、第二和第三主导因子分别是土属、高程和土壤亚类;刘需珈等^[61]对太湖流域典型农用地表层土壤重金属的地理探测分析结果显示,除 Zn 外,As、Cd、Cu、Hg 和 Pb 的第一主导交互因子分别是土种 $\cap$ CEC、土种 $\cap$ 坡向、土种 $\cap$ 坡度、土种 $\cap$ 坡向和土种 $\cap$ 坡向,均不包含对应的第一、第二和第三主导因子.这进一步说明土壤重金属迁移、扩散和分布复杂的同时,也意味着研究所选取的因子未能完全代表或反映出相应区域土壤重金属的环境行为.

2.5 风险探测和生态探测

风险探测器揭示了各土壤重金属在影响因子内部不同子区域(表 2 中分类数)间的显著性差异.张军等^[3]对宝鸡市土壤重金属 Cd 和 Zn 进行风险探测发现,Cd 含量在高程、植被覆盖指数、土壤质地、降水和大气温度各自内部不同子区域间的差异性最为显著,Zn 含量在高程、土地利用类型和土壤质地各自内部不同子区域间的差异性最为显著.刘需珈等^[48,61]对江苏省南部土壤重金属影响因素风险探

测显示,As 的第一显著性风险因子是成土母质第 9 类石灰岩风化残积物,Cd 的第一显著性风险因子是工业企业密度第 4 类,Cu 的第一显著性风险因子是 CEC 第 4 类,Hg 的第一显著性风险因子是成土母质第 1 类砂岩坡积物,Pb 的第一显著性风险因子是 TOC 第 6 类,Zn 第一显著性风险因子是第 35 类(耕型)厚层棕色石灰土.尽管风险探测可进一步分析各影响因子子区域对土壤重金属含量分布的影响程度,但仅在少数土壤重金属分布特征研究中被应用^[6,12,29,42,48,51,58,61,69].

生态探测着重比较一个影响因子和另一个影响因子对土壤重金属的空间分布的影响是否有显著的差异^[69].李雨等^[12]对湘潭县农田土壤重金属 Pb 的影响因子生态探测结果显示,平均温度、相对湿度和 GDP 对 Pb 的影响与土壤、土壤类型和高程存在显著差异;周伟等^[29]研究显示,重庆土壤重金属的分异特征影响因子中,高程对 Pb 空间分布的影响与平均气温、相对湿度、坡度、土地利用类型、土壤类型、土壤质地、距离河流和道路的距离等影响因子间存在显著差异,对 Cu、Cr 和 Ni 空间分布,高程、坡度、土地利用类型、土壤类型、土壤质地、距河流距离和距道路距离与平均气温和相对湿度间存在显著差异,高程、土壤质地、距河流距离和距道路距离对 Zn 空间分布的影响和土地利用类型、土壤类型、坡度、平均气温和相对湿度等影响因子间存在显著差异.生态探测和风险探测类似,仅用于少数土壤重金属分布特征的研究中^[12,30,40,52,69].

2.6 地理探测和 Pearson 相关性分析比较

李雨等^[12]和龚仓等^[69]对比了土壤重金属的地理探测和 Pearson 相关性分析,发现两者的结果存在一致性和差异性,一致性如某种影响因子对土壤重金属的含量变化存在显著相关性,该影响因子对土壤重金属的空间分布也具有显著影响;差异性如某种影响因子对土壤重金属的含量变化无显著相关性,但地理探测分析显示该影响因子对土壤重金属含量变化具有很高的解释能力,这是由于地理探测器分析的是重金属和影响因子之间的关联性,包括线性和非线性关系两种,而 Pearson 相关系数不显著,说明土壤重金属和影响因子之间没有显著的线性关系,但是不代表没有非线性关系.地理探测器主要是研究变量间的关联性,可表征线性和非线性关系,能够有效避免因子间的冗余性和共线性的问题,尤其是在多因子相关性分析问题的研究中,其具有更好的解释力,分析精度和结果更为全面^[62].

表 5 基于地理探测的土壤重金属影响因子分析交互探测结果统计

Table 5 Statistics of interactive detection results in soil heavy metal impact factor analysis based on geographical detection							
因变量	第一主导交互因子	q 值	第二主导交互因子	q 值	第三主导交互因子	q 值	文献
污染负荷指数	距离铁路距离∩土壤质地	0.099	土壤质地∩高程	0.092	土壤质地∩公路密度	0.067	[3]
内梅罗污染指数	土地利用类型∩距铁路距离	0.676	土地利用类型∩距水库距离	0.554	距铁路距离∩高程	0.521	[63]
重金属含量	Cd 降水∩土壤类型	0.307	降水∩土壤质地	0.251	降水∩土地利用	0.221	[4]
	Zn 高程∩大气温度	0.298	高程∩降水	0.298	高程∩植被覆盖指数	0.273	
	As 高程∩降水	0.441	高程∩大气温度	0.439	高程∩土壤类型	0.417	
	Cu 高程∩降水	0.251	高程∩大气温度	0.251	高程∩土壤类型	0.201	
	Ni 高程∩土地利用	0.331	高程∩降水	0.331	高程∩大气温度	0.324	
	Pb 高程 ∩土壤类型	0.227	高程 ∩降水	0.213	高程 ∩大气温度	0.213	
	Cr 高程∩降水	0.244	高程∩大气温度	0.243	高程∩土壤类型	0.184	
	Mn 高程∩降水	0.424	高程∩大气温度	0.422	高程∩土壤类型	0.363	
重金属含量	Pb 坡向∩种植类型	0.383	/	/	/	/	[38]
	As 坡向∩种植类型	0.494 9	/	/	/	/	
	Cu 坡向∩种植类型	0.345 1	/	/	/	/	
	Cr 坡向∩种植类型	0.463 7	/	/	/	/	
	Ni 坡向∩种植类型	0.351 1	/	/	/	/	
	Zn 坡向∩种植类型	0.498 6	/	/	/	/	
重金属含量	平均温度∩pH	0.981	相对湿度∩pH	0.981	GDP∩pH	0.976	[12]
地累积指数	Cd 地理区划∩土壤类型	0.18	/	/	/	/	[28]
	Pb 气候带类型∩土壤类型	0.14	/	/	/	/	
	Zn 地理区划∩气候带类型	0.14	/	/	/	/	
	As 气候带类型∩土壤类型	0.1	/	/	/	/	
	Cu 气候带类型∩土壤类型	0.13	/	/	/	/	
	Cr 地理区划∩土壤类型	0.16	/	/	/	/	
重金属含量	Pb 高程∩距河流距离	0.68	高程∩坡度	0.65	高程∩土地利用类型	0.65	[29]
微量元素含量	B 土属∩坡向变率	/	土属∩As 含量	/	土属∩坡度变率	/	[30]
	Se 土属∩As 含量	/	高程∩As 含量	/	地形部位∩As 含量	/	
	Mn 坡度∩As 含量	/	坡向变率∩植被覆盖度	/	地形起伏度∩As 含量	/	
	Cu 高程∩As 含量	/	土属∩As 含量	/	地形部位∩As 含量	/	
重金属含量	SPC-ICP-Hg 距油库工段距离∩有机碳	0.953	/	/	/	/	[46]
	SPC-ICP-As 距焦炉距离∩有效硼	0.978	/	/	/	/	
	SPC-ICP-Cd 距焦炉距离∩有效硼	0.973	/	/	/	/	
	SPC-ICP-Cr 距油库工段距离∩有机碳	0.996	/	/	/	/	
	SPC-ICP-Cu 有效硼∩土壤质地	0.987	/	/	/	/	
	SPC-ICP-Ni 全氮∩土壤质地	0.982	/	/	/	/	
	SPC-ICP-Pb 距油库工段距离∩有机碳	0.989	/	/	/	/	
	SPC-ICP-Zn 碳酸钙∩土壤质地	0.985	/	/	/	/	
	SPC-OCP-Hg 距焦炉距离∩有效硼	0.813	/	/	/	/	
	SPC-OCP-As 距熄焦距离∩全氮量	0.872	/	/	/	/	
	SPC-OCP-Cd 距焦炉距离∩全氮量	0.903	/	/	/	/	
	SPC-OCP-Cr 距煤气柜距离∩土壤质地	0.998	/	/	/	/	
	SPC-OCP-Cu 距熄焦距离∩土壤质地	0.974	/	/	/	/	
	SPC-OCP-Ni 距油库工段距离∩土壤质地	0.904	/	/	/	/	
	SPC-OCP-Pb 距煤场距离∩有机质	0.989	/	/	/	/	
	SPC-OCP-Zn 距粗苯工段距离∩有机质	0.995	/	/	/	/	
重金属含量	安顺市-As 年值降水量∩年值气温	0.93	年值降水量∩海拔	0.894	pH∩海拔	0.807	[50]
	安顺市-Cd 年值气温∩坡度	0.977	年值降水量∩年值气温	0.968	年值气温∩县 GDP	0.967	
	安顺市-Cr pH∩海拔	0.952	年值气温∩pH	0.934	年值降水量∩年值气温	0.899	
	安顺市-Hg 年值降水量∩pH	0.869	pH∩海拔	0.805	年值降水量∩年值气温	0.800	
	安顺市-Pb 年值降水量∩年值气温	0.924	年值降水量∩pH	0.899	年值气温∩pH	0.876	
	葫芦岛市-As pH∩海拔	0.494	年值降水量∩pH	0.447	年值降水量∩坡度	0.426	
	葫芦岛市-Cd 海拔∩pH	0.564	年值气温∩pH	0.535	年值降水量∩pH	0.525	
	葫芦岛市-Cr pH∩海拔	0.496	年值降水量∩pH	0.394	pH∩县 GDP	0.386	
	葫芦岛市-Hg 年值降水量∩pH	0.332	pH∩坡度	0.328	夜间灯光指数∩pH	0.326	
	葫芦岛市-Pb 年值气温∩pH	0.477	pH∩坡度	0.464	海拔∩pH	0.457	
重金属含量	潜在生态风险 成土母质∩化肥施用量	/	化肥施用量∩距水源距离	/	/	/	[5]
	Cd 成土母质∩化肥施用量	/	成土母质∩距水源距离	/	/	/	
	Cr 成土母质∩化肥施用量	/	成土母质∩土壤类型	/	/	/	
	As 成土母质∩距水源距离	/	成土母质∩化肥施用量	/	/	/	
	Pb 成土母质∩化肥施用量	/	化肥施用量∩距工厂距离	/	/	/	
	Cu 成土母质∩化肥施用量	/	成土母质∩距水源距离	/	/	/	

续表 5

因变量	第一主导交互因子	q 值	第二主导交互因子	q 值	第三主导交互因子	q 值	文献
重金属含量	Zn 成土母质 $\cap$ 距工厂距离	/	化肥施用量 $\cap$ 距工厂距离	/	/	/	[5]
	Hg 成土母质 $\cap$ 化肥施用量	/	化肥施用量 $\cap$ 土壤类型	/	/	/	
	Ni 成土母质 $\cap$ 化肥施用量	/	成土母质 $\cap$ 距工厂距离	/	/	/	
重金属含量	As 土种 $\cap$ CEC	0.492 4	土种 $\cap$ 坡向	0.459 8	/	/	[48,61]
	Cd 土种 $\cap$ 坡向	0.657	土种 $\cap$ 成土母质	0.582 6	/	/	
	Cu 土种 $\cap$ 坡度	0.186 4	土地利用 B 类型 $\cap$ 工业企业密度	0.154 7	/	/	
	Hg 土种 $\cap$ 坡向	0.461 2	土种 $\cap$ pH	0.442 5	/	/	
	Pb 土种 $\cap$ 坡向	0.692	成土母质 $\cap$ 坡向	0.639 9	/	/	
	Zn 土种 $\cap$ 坡向	0.937 6	成土母质 $\cap$ 坡向	0.921 8	/	/	
重金属含量	Zn 距河流距离 $\cap$ 距居民地距离	/	距河流距离 $\cap$ 土地利用类型	/	/	/	[40]
	Ni 高程 $\cap$ 土地利用类型	/	距河流距离 $\cap$ 土地利用类型	/	/	/	
	Cr 距河流距离 $\cap$ 距居民地距离	/	距河流距离 $\cap$ 土地利用类型	/	/	/	
	Cu 距河流距离 $\cap$ 土地利用类型	/	距河流距离 $\cap$ 土地利用类型	/	/	/	
	Pb 距居民地距离 $\cap$ 距河流距离	/	距河流距离 $\cap$ 土地利用类型	/	/	/	
	Cd 高程 $\cap$ 距河流距离	/	高程 $\cap$ 土地利用类型	/	/	/	
重金属含量	非矿区-Cd 土壤全磷含量 $\cap$ 地质年代	0.485 1	土壤类型 $\cap$ 地质年代	0.472 6	粉砂粒含量 $\cap$ 地质年代	0.461 5	[6,51]
	矿产区-Cd /	/	/	/	/	/	
重金属含量	Pb 坡度 $\cap$ GDP	/	高程 $\cap$ 坡度	/	高程 $\cap$ GDP	/	[58]
	As 高程 $\cap$ 人口密度	/	距矿区距离 $\cap$ 人口密度	/	坡度 $\cap$ 人口密度	/	
	Ni 高程 $\cap$ 坡度	/	距矿区距离 $\cap$ 高程	/	土壤类型 $\cap$ 高程	/	
	Cr 高程 $\cap$ 净初级生产力	/	坡度 $\cap$ 净初级生产力	/	高程 $\cap$ 坡度	/	
	Zn GDP $\cap$ 高程	/	坡度 $\cap$ GDP	/	距城镇距离 $\cap$ GDP	/	
重金属含量	Cd 肥料类型与施用量 $\cap$ 工业企业类型与数量	0.777	人口数量 $\cap$ 工业企业类型与数量	0.563	人口数量 $\cap$ 肥料类型与施用量	0.376	[66]
	Hg 肥料类型与施用量 $\cap$ 工业企业类型与数量	1.147	土壤类型 $\cap$ 工业企业类型与数量	0.978	成土母质 $\cap$ 工业企业类型与数量	0.881	
	As 土壤类型 $\cap$ 肥料类型与施用量	0.669	土壤类型 $\cap$ 人口数量	0.605	人口数量 $\cap$ 肥料类型与施用量	0.572	
	Pb 人口数量 $\cap$ 矿产资源与数量	0.463	肥料类型与施用量 $\cap$ 矿产资源与数量	0.463	成土母质 $\cap$ 矿产资源与数量	0.430	
	Cr 土壤类型 $\cap$ 人口数量	0.592	土壤类型 $\cap$ 肥料类型与施用量	0.592	土壤类型 $\cap$ 交通路网	0.567	
	Cu 土壤类型 $\cap$ 交通路网	0.443	人口数量 $\cap$ 交通路网	0.352	肥料类型与施用量 $\cap$ 交通路网	0.352	
	Zn 人口数量 $\cap$ 交通路网	0.177	肥料类型与施用量 $\cap$ 交通路网	0.177	肥料类型与施用量 $\cap$ 工业企业类型与数量	0.143	
	Ni 土壤类型 $\cap$ 人口数量	0.379	土壤类型 $\cap$ 肥料类型与施用量	0.379	成土母质 $\cap$ 土壤类型	0.345	
PC	PC1 距道路距离 $\cap$ 高程	0.902	距道路距离 $\cap$ 距工矿用地距离	0.901	距道路距离 $\cap$ 土壤利用类型	0.822	[52]
	PC2 距工矿用地距离 $\cap$ 土地利用类型	0.527	土地利用类型 $\cap$ 距工矿距离	0.464	高程 $\cap$ 土地利用类型	0.433	
	PC3 距道路距离 $\cap$ 高程	0.573	距工矿用地距离 $\cap$ 高程	0.526	距工矿用地距离 $\cap$ 距道路距离	0.499	
健康风险	H1a 燃煤电厂距离 $\cap$ 海拔	0.75	距煤化工企业距离 $\cap$ 海拔	0.674	距 Pb-Zn 冶炼厂距离 $\cap$ 有机质	0.666	[39,41]
	H1c 燃煤电厂距离 $\cap$ 海拔	0.763	距煤化工企业距离 $\cap$ 海拔	0.691	距 Pb-Zn 冶炼厂距离 $\cap$ 有机质	0.666	
	CRa 距燃煤电厂距离 $\cap$ 海拔	0.817	距 Pb-Zn 冶炼厂距离 $\cap$ 距燃煤电厂距离	0.717	距煤化工企业距离 $\cap$ 海拔	0.710	
	CRc 距燃煤电厂距离 $\cap$ 海拔	0.816	距 Pb-Zn 冶炼厂距离 $\cap$ 距燃煤电厂距离	0.718	距煤化工企业距离 $\cap$ 海拔	0.713	
PC	PC1 距采选业距离 $\cap$ 距冶炼和压延加工业距离	0.534	距采选业距离 $\cap$ 土地利用类型	0.422	距采选业距离 $\cap$ 海拔	0.407	[45]
	PC2 距采选业距离 $\cap$ 土地利用类型	0.505	距采选业距离 $\cap$ 距河流距离	0.452	距冶炼和压延加工业距离 $\cap$ 距交通干线距离	0.401	
	PC3 农药施用量 $\cap$ 土地利用类型	0.601	化肥施用量 $\cap$ pH	0.432	农药使用量 $\cap$ pH	0.401	
	PC4 土壤类型 $\cap$ pH	0.507	有机质 $\cap$ pH	0.501	海拔 $\cap$ pH	0.493	
Cd 含量	有机质 $\cap$ 降水		降水 $\cap$ 高程		有机质 $\cap$ 高程		[42]
PC	PC1 距矿山或冶炼厂距离 $\cap$ 距主干道距离	0.59	高程 $\cap$ 距主干道距离	0.330	土地覆盖 $\cap$ 距矿山或冶炼厂距离、高程 $\cap$ 距矿山或冶炼厂距离	0.28	[43]
	PC2 高程 $\cap$ 距矿山或冶炼厂距离	0.34	土地覆盖 $\cap$ 距矿山或冶炼厂距离	0.330	土地覆盖 $\cap$ 距主干道距离和土地覆盖 $\cap$ 高程	0.27	
重金属含量	As 地质类型 $\cap$ 高程	0.50	地质类型 $\cap$ 坡度	0.490	/	/	[54]
	Pb 植被覆盖度 $\cap$ 土地利用类型	0.39	/	/	/	/	

续表 5

因变量	第一主导交互因子	<i>q</i> 值	第二主导交互因子	<i>q</i> 值	第三主导交互因子	<i>q</i> 值	文献
重金属含量	As 距矿区距离∩土壤类型		pH∩土壤类型	/	/	/	[22]
	Cd pH∩距矿区距离		pH∩土壤类型	/	/	/	
	Cr 植被覆盖度∩距矿区距离		植被覆盖度∩坡度	/	/	/	
	Cu 距矿区距离∩高程		土壤类型∩高程	/	/	/	
	Ni 植被覆盖度∩坡度		植被覆盖度∩高程	/	/	/	
	Pb 植被覆盖度∩距矿区距离		植被覆盖度∩距河流距离	/	/	/	
	Zn pH∩距矿区距离		pH∩土壤类型	/	/	/	
水溶性重金属含量	As pH∩距矿区距离		距矿区距离∩高程	/	/	/	[22]
	Cd pH∩距矿区距离		pH∩土壤类型	/	/	/	
	Cr pH∩土壤类型		距矿区距离∩高程	/	/	/	
	Cu 距矿区距离∩高程		pH∩距矿区距离	/	/	/	
	Ni pH∩距矿区距离		距矿区距离∩高程	/	/	/	
	Pb pH∩距矿区距离		距矿区距离∩高程	/	/	/	
	Zn pH∩距矿区距离		pH∩距河流距离	/	/	/	
重金属含量	As 距冶炼工业区距离∩流域	/	/	/	/	/	[44]
	Cd 土地利用类型∩流域	/	/	/	/	/	
	Cr pH∩流域	/	/	/	/	/	
	Hg 岩性∩流域	/	/	/	/	/	
	Pb 距采矿区距离∩距黑色金属矿距离	/	/	/	/	/	
重金属含量	As 土壤类型∩水溶性重金属含量	0.214 9	土壤类型∩植被覆盖度	0.195 9	土壤类型∩水不溶性重金属含量	0.154 3	[56]
	Pb 土壤类型∩水溶性重金属含量	0.245 9	土壤类型∩植被覆盖度	0.211 9	土壤类型∩水不溶性重金属含量	0.211 3	
	Cd 土壤类型∩水溶性重金属含量	0.365 2	土壤类型∩植被覆盖度	0.306 4	土壤类型∩水不溶性重金属含量	0.275 7	
	As 成土母质∩农药使用量	0.316	/	/	/	/	
	Cd 成土母质∩农药使用量	0.255	/	/	/	/	
	Cr 成土母质∩农药使用量	0.279	/	/	/	/	
	Hg 成土母质∩农药使用量	0.186	/	/	/	/	
重金属含量	Pb 成土母质∩农药使用量	0.275	/	/	/	/	[57]
重金属含量	As 有机碳∩土壤类型	0.219	植被覆盖度∩GDP	0.199	土壤类型∩GDP	0.186	[47]

3 展望

地理探测器用于探测土壤重金属含量的空间分异性,核心是如果某一影响因子对重金属含量有重大的驱动作用,则该影响因子和重金属含量之间的地理空间分布具有显著相似性,该模型既能够直接探测数值型的数据,也能够探测定性或类型数据,有效识别出引起土壤重金属空间分异的主导因子,还能直接分析两个影响因子之间交互作用的影响力。尽管地理探测器在土壤重金属空间分异及其影响因素分析领域有了较多的应用,但还存在诸多不足,更多的研究要深入开展,许多评价依据和标准还需进一步明确,包括:①数值型自变量离散化方法较多,没有固定或统一的离散化方法和最佳分类数,导致使用不同的自变量离散化方法或不同的自变量分类的地理探测结果可比性的可信度有待商榷,需进一步明确其在土壤重金属空间分异及其影响因素分析统一的自变量离散化方法和最佳分类数;②尽管地理探测开发者王劲峰等人指出,*q* 值就像其它模型(如线性回归中的 R^2)一样,没有明确的定义,不同专业有不同的要求。但就其用于土壤重金属空间分异领域而言,目前不同作者的研究的第一、第二和

第三主导因子的 *q* 值分别相差 1 个、2 个和 2 个数量级,结果的可比性意义不大,需进一步研究明确多大的 *q* 值才有意义或评价标准或等级范围;③对比因子探测和交互探测,风险探测和生态探测在土壤重金属领域的应用较少,已有的应用大多处于浅尝辄止的状态,且极少数的研究混淆了风险探测和生态探测,未来的研究中应加大这两个探测器的应用。

参考文献:

[1] Wong C S C, Li X D, Thornton I. Urban environmental geochemistry of trace metals[J]. Environmental Pollution, 2006, 142(1): 1-16.

[2] 刘媚媚. 黑土区小流域土壤重金属空间异质性规律研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.

Liu M M. Study on the law of spatial heterogeneity of soil heavy metals in a mollisol watershed of in black soil area[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.

[3] 张军, 董洁, 梁青芳, 等. 宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3774-3784.

Zhang J, Dong J, Liang Q F, et al. Heavy metal pollution characteristics and influencing factors in Baoji Urban soils[J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3774-3784.

[4] 张军, 高煜, 王国兰, 等. 典型河谷城市土壤重金属含量空间分异及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2021, 30(6): 1276-1285.

Zhang J, Gao Y, Wang G L, et al. Spatial differentiation and influencing factors of heavy metal content in soils of typical river

- valley city[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, **30**(6): 1276-1285.
- [5] 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.
- [6] 邓齐玉. 基于地理探测器的广西土壤镉来源识别及高风险靶区界定[D]. 桂林: 广西师范学院, 2018.
- Deng Y Q. Identifying sources and defining the target area with high risk of soil cadmium in Guangxi based on the geographical detector[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2018.
- [7] Li Y F, Zhao Z Q, Yuan Y, *et al.* Application of modified receptor model for soil heavy metal sources apportionment: a case study of an industrial city, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(16): 16345-16354.
- [8] Zhao L, Xu Y F, Hou H, *et al.* Source identification and health risk assessment of metals in urban soils around the Tanggu chemical industrial district, Tianjin, China[J]. Science of the Total Environment, 2014, **468-469**: 654-662.
- [9] 李冰, 王昌全, 谭婷, 等. 成都平原土壤重金属区域分布特征及其污染评价[J]. 核农学报, 2009, **23**(2): 308-315.
- Li B, Wang C Q, Tan T, *et al.* Regional distribution and pollution evaluation of heavy metal pollution in topsoils of the Chengdu plain[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2009, **23**(2): 308-315.
- [10] 孙秀敏, 陈琼, 张键, 等. 广东某区农田土壤重金属污染现状及潜在生态风险分析[J]. 当代化工, 2021, **50**(2): 293-297.
- Sun X M, Chen Q, Zhang J, *et al.* Status of pollution of heavy metals in agricultural soil in an area of Guangdong and assessment of potential ecological risk[J]. Contemporary Chemical Industry, 2021, **50**(2): 293-297.
- [11] 沈洪艳, 安冉, 师华定, 等. 湖南省某典型流域农用地土壤重金属污染及影响因素[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(3): 715-724.
- Shen H Y, An R, Shi H D, *et al.* Heavy metal pollution and influencing factors of agricultural land in a typical Watershed in Hunan province[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(3): 715-724.
- [12] 李雨, 韩平, 任东, 等. 基于地理探测器的农田土壤重金属影响因子分析[J]. 中国农业科学, 2017, **50**(21): 4138-4148.
- Li Y, Han P, Ren D, *et al.* Influence factor analysis of farmland soil heavy metal based on the geographical detector[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, **50**(21): 4138-4148.
- [13] 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 等. 太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5073-5081.
- Li W D, Cui Y X, Zeng C C, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in farmland soils in the Taige canal valley[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5073-5081.
- [14] 韦壮绵, 陈华清, 张煜, 等. 湘南柿竹园东河流域农田土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 环境化学, 2020, **39**(10): 2753-2764.
- Wei Z M, Chen H Q, Zhang Y, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in farmland soils at Shizhuyuan Donghe river basin of Southern Hunan [J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(10): 2753-2764.
- [15] 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 等. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. 中国地质, 2020, **47**(6): 1625-1636.
- Bao L R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil of northwest Xiushan, Chongqing[J]. Geology in China, 2020, **47**(6): 1625-1636.
- [16] 李菊梅, 李生秀. 几种营养元素在土壤中的空间变异[J]. 干旱地区农业研究, 1998, **16**(2): 58-64.
- Li J M, Li S X. Spacial variations of some nutrient elements in soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998, **16**(2): 58-64.
- [17] Zhang Z H, Song Y Z, Wu P. Robust geographical detector[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, **109**, doi: 10.1016/j.jag.2022.102782.
- [18] Oyarzun R, Lillo J, López-García J A, *et al.* The Mazarrón Pb-(Ag)-Zn mining district (SE Spain) as a source of heavy metal contamination in a semiarid realm: geochemical data from mine wastes, soils, and stream sediments[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011, **109**(1-3): 113-124.
- [19] 邱孟龙, 李芳柏, 王琦, 等. 工业发达城市区域耕地土壤重金属时空变异与来源变化[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(2): 298-305.
- Qiu M L, Li F B, Wang Q, *et al.* Spatio-temporal variation and source changes of heavy metals in cultivated soils in industrial developed urban areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, **31**(2): 298-305.
- [20] 宋波, 张云霞, 庞瑞, 等. 广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4317-4326.
- Song B, Zhang Y X, Pang R, *et al.* Analysis of characteristics and sources of heavy metals in farmland soils in the Xijiang river draining of Guangxi[J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4317-4326.
- [21] 赵靛, 梁云平, 陈倩, 等. 中国北方某城市城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5552-5561.
- Zhao L, Liang Y P, Chen Q, *et al.* Spatial distribution, contamination assessment, and sources of heavy metals in the urban green space soils of a city in north China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5552-5561.
- [22] Qiao P W, Yang S C, Lei M, *et al.* Quantitative analysis of the factors influencing spatial distribution of soil heavy metals based on geographical detector[J]. Science of the Total Environment, 2019, **664**: 392-413.
- [23] Chen F H, Wu S H, Cui P, *et al.* Progress and prospects of applied research on physical geography and the living environment in China over the past 70 years (1949-2019) [J]. Journal of Geographical Sciences, 2021, **31**(1): 3-45.
- [24] Wang J F, Li X H, Christakos G, *et al.* Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, **24**(1): 107-127.
- [25] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. Ecological Indicators, 2016, **67**: 250-256.
- [26] 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.

- [27] 宋恒飞, 吴克宁, 李婷, 等. 寒地黑土典型县域土壤重金属空间分布及影响因素分析——以海伦市为例[J]. 土壤通报, 2018, **49**(6): 1480-1486.
- Song H F, Wu K N, Li T, *et al.* The spatial distribution and influencing factors of farmland heavy metals in the cold black soil region: a case of Hailun county [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, **49**(6): 1480-1486.
- [28] 齐杏杏, 高秉博, 潘瑜春, 等. 基于地理探测器的土壤重金属污染影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(11): 2476-2486.
- Qi X X, Gao B B, Pan Y C, *et al.* Influence factor analysis of heavy metal pollution in large-scale soil based on the geographical detector[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(11): 2476-2486.
- [29] 周伟, 李丽丽, 周旭, 等. 基于地理探测器的土壤重金属影响因子分析及其污染风险评价[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(1): 173-180.
- Zhou W, Li L L, Zhou X, *et al.* Influence factor analysis of soil heavy metal based on geographic detector and its pollution risk assessment[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, **30**(1): 173-180.
- [30] 周洋, 赵小敏, 郭熙, 等. 基于地理探测器的寻乌县土壤微量元素影响因子分析[J]. 核农学报, 2021, **35**(6): 1420-1432.
- Zhou Y, Zhao X M, Guo X, *et al.* Influence factors analysis of soil trace elements in Xunwu county based on the geographical detector[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, **35**(6): 1420-1432.
- [31] 雷凌明, 喻大松, 陈玉鹏, 等. 陕西泾惠渠灌区土壤重金属空间分布特征及来源[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(6): 88-96.
- Lei L M, Yu D S, Chen Y P, *et al.* Spatial distribution and sources of heavy metals in soils of Jinghui Irrigated Area of Shaanxi, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, **30**(6): 88-96.
- [32] 陈述彭. 地理科学的信息化与现代化[J]. 地理科学, 2001, **21**(3): 193-197.
- Chen S P. Information and modernization of geography [J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, **21**(3): 193-197.
- [33] 李家旭. 地理探测器中数据空间离散化算法设计实现与应用[D]. 南宁: 南宁师范大学, 2020.
- Li J X. Design implementation and application of data spatial discretization algorithm in geographical detector model [D]. Nanning: Nanning Normal University, 2020.
- [34] Cao F, Ge Y, Wang J F. Optimal discretization for geographical detectors-based risk assessment [J]. GIScience & Remote Sensing, 2013, **50**(1): 78-92.
- [35] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, *et al.* An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data[J]. GIScience & Remote Sensing, 2020, **57**(5): 593-610.
- [36] 卢松, 张捷, 唐文跃, 等. 基于旅游影响感知的古村落旅游地居民类型划分——以世界文化遗产皖南古村落为例[J]. 农业经济问题, 2008, (4): 69-74.
- [37] Yang X, Yang Y, Wan Y Y, *et al.* Source identification and comprehensive apportionment of the accumulation of soil heavy metals by integrating pollution landscapes, pathways, and receptors[J]. Science of the Total Environment, 2021, **786**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147436.
- [38] 张敏, 陈海, 史琴琴, 等. 黄土丘陵沟壑区耕层土壤重金属空间分异及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(11): 2465-2475.
- Zhang M, Chen H, Shi Q Q, *et al.* Spatial heterogeneity of heavy metals and influencing factors in the surface cultivated soil of the loesshilly-gully region, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(11): 2465-2475.
- [39] Zhang R, Chen T, Zhang Y, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in agricultural soils and identification of main influencing factors in a typical industrial park in northwest China [J]. Chemosphere, 2020, **252**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126591.
- [40] 路茜. 典型喀斯特流域土壤重金属分布关键影响因素诊断及源风险评估[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- Lu Q. Diagnosis and source risk assessment of key factors affecting the distribution of heavy metals in typical karst watershed soils[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [41] 张瑞. 某典型工业园周边农田土壤重金属的健康风险评估及来源解析[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2020.
- Zhang R. Health risk assessment and source apportionment of heavy metals in farmland soil around a typical industrial park [D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2020.
- [42] 肖艳桐. 山区土壤重金属风险分区研究——以赫章土壤为例[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- Xiao Y T. Risk zoning of heavy metals in soils of mountainous areas——taking cadmium in hezhang soil as an example [D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [43] Yang Y, Yang X, He M J, *et al.* Beyond mere pollution source identification: determination of land covers emitting soil heavy metals by combining PCA/APCS, GeoDetector and GIS analysis [J]. CATENA, 2020, **185**, doi: 10.1016/j.catena.2019.104297.
- [44] Tao H, Liao X Y, Li Y, *et al.* Quantifying influences of interacting anthropogenic-natural factors on trace element accumulation and pollution risk in karst soil[J]. Science of the Total Environment, 2020, **721**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137770.
- [45] 徐源. 区域尺度典型工业聚集区土壤重金属源解析[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2021.
- Xu Y. Source apportionment of soil heavy metals in a regional-scale typical industrial area [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2021.
- [46] 顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 等. 焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1081-1092.
- Gu G Q, Wan X M, Zeng W B, *et al.* Analysis of the spatial distribution of heavy metals in soil from a coking plant and its driving factors [J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1081-1092.
- [47] Wang X L, Sun Y J, Zhang L P, *et al.* Spatial variation and influence factor analysis of soil heavy metal as based on geodetector[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, **35**(10): 2021-2030.
- [48] 刘需珈. 县域重金属污染农用地土壤安全利用评价与调控[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- Liu P J. Safe utilization evaluation and regulation of agricultural land soil contaminated by heavy metal elements in a Chinese county [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2017.
- [49] Wang H F, Wu Q M, Hu W Y, *et al.* Using multi-medium factors analysis to assess heavy metal health risks along the Yangtze River in Nanjing, Southeast China[J]. Environmental

- Pollution, 2018, **243**: 1047-1056.
- [50] 陈运帷, 王文杰, 师华定, 等. 区域土壤重金属空间分布驱动因子影响力比较案例分析[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(7): 1213-1223.
- Chen Y W, Wang W J, Shi H D, *et al.* Comparative case study on the influence of spatial distribution of heavy metals in regional area[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(7): 1213-1223.
- [51] Zhao Y J, Deng Q Y, Lin Q, *et al.* Cadmium source identification in soils and high-risk regions predicted by geographical detector method [J]. Environmental Pollution, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114338.
- [52] 刘亚军. 矿冶城市土壤重金属源解析与景观分异研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- Liu Y J. Research on heavy metal source analysis and landscape differentiation of soil of mineral city [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.
- [53] Zuo S D, Dai S Q, Li Y Y, *et al.* Analysis of heavy metal sources in the soil of riverbanks across an urbanization gradient [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(10), doi: 10.3390/ijerph15102175.
- [54] Shi T Z, Hu Z W, Shi Z, *et al.* Geo-detection of factors controlling spatial patterns of heavy metals in urban topsoil using multi-source data[J]. Science of the Total Environment, 2018, **643**: 451-459.
- [55] Dong S W, Pan Y C, Guo H, *et al.* Identifying influencing factors of agricultural soil heavy metals using a geographical detector: a case study in Shunyi District, China[J]. Land, 2021, **10**(10), doi: 10.3390/LAND10101010.
- [56] Qiao P W, Lei M, Guo G H, *et al.* Quantitative analysis of the factors influencing soil heavy metal lateral migration in rainfalls based on geographical detector software: a case study in Huanjiang County, China[J]. Sustainability, 2017, **9**(7), doi: 10.3390/su9071227.
- [57] Ren Z Q, Xiao R, Zhang Z H, *et al.* Risk assessment and source identification of heavy metals in agricultural soil: a case study in the coastal city of Zhejiang Province, China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2019, **33**(11-12): 2109-2118.
- [58] 程葛鉴. 基于环境变量的土壤元素空间分异特征分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- Cheng G J. Analysis of spatial differentiation characteristics of soil elements based on environmental variables [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [59] 姬超, 侯大伟, 李发志, 等. 耕地土壤重金属健康风险空间分布特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1440-1448.
- Ji C, Hou D W, Li F Z, *et al.* Assessment and spatial characteristics analysis of human health risk of heavy metals in cultivated soil[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1440-1448.
- [60] 余慧敏, 郭熙. 鄱阳湖平原区农田土壤重金属 Cd、Hg 空间特征及潜在风险影响因素探析[J]. 核农学报, 2020, **34**(8): 1785-1795.
- Yu H M, Guo X. Spatial variation in cadmium and mercury and factors influencing their potential ecological risks in farmland soil in Poyang lake plain, China[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, **34**(8): 1785-1795.
- [61] 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.
- [62] 陈锋. 宁夏某铜银矿区周边土壤重金属污染特征分析及生态环境风险评估[D]. 银川: 宁夏大学, 2020.
- Chen F. Heavy metal pollution characteristics and ecological health risk analysis for soil in copper-silver mining neighboring region of Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020.
- [63] 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.
- [64] 张双银, 吴琳娜, 张广映, 等. 都柳江上游沿岸喀斯特地区土壤重金属污染及健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(7): 421-433.
- Zhang S Y, Wu L N, Zhang G Y, *et al.* Soil heavy metal pollution analysis and health risk assessment in Karst areas along the upper reaches of the Du Liujiang river [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(7): 421-433.
- [65] Fabijańczyk P, Zawadzki J, Magiera T. Magnetometric assessment of soil contamination in problematic area using empirical Bayesian and indicator kriging: a case study in Upper Silesia, Poland[J]. Geoderma, 2017, **308**: 69-77.
- [66] 邵帅. 基于空间分析与数据挖掘的区域土壤重金属“源汇”污染特征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- Shao S. Regional research of “source-sink” contamination characteristics of heavy metals in soils based on spatial analysis and data mining [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [67] 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.
- [68] 龚仓, 王亮, 王顺祥, 等. 四川成都市唐昌镇土壤硒分布特征及影响因素[J]. 岩矿测试, 2022, **41**(3): 437-450.
- Gong C, Wang L, Wang S X, *et al.* Distribution characteristics of soil selenium and its influencing factors in Tangchang town of Chengdu city, Sichuan province [J]. Rock and Mineral Analysis, 2022, **41**(3): 437-450.
- [69] 龚仓, 王亮, 王顺祥, 等. 基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4565-4577.
- Gong C, Wang L, Wang S X, *et al.* Spatial differentiation and influencing factors analysis of soil heavy metal content at scale on town level based on geographic detector [J]. Environmental Science, 2022, **43**(10): 4565-4577.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Factors Influencing the Reduction in Ambient PM _{2.5} in Beijing from 2018 to 2020	LIU Bao-xian, LI Qian, SUN Rui-wen, <i>et al.</i>	(2409)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of Secondary Aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in Winter	YAO Qing, YANG Xu, TANG Ying-xiao, <i>et al.</i>	(2421)
Changes in Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} at Different Pollution Stages Before and After COVID-19 Control	JIANG Nan, HAO Xue-xin, HAO Qi, <i>et al.</i>	(2430)
On-line Measurement of Trace Elements in PM _{2.5} in Winter in Urban Taiyuan, China: Levels and Source Apportionment	CUI Yang, GUO Li-li, LI Hong-yan, <i>et al.</i>	(2441)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Over the Eastern Tibetan Plateau	WANG Hong-lei, LIU Si-han, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(2450)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Zhanjiang in Summer	PANG Xiao-die, GAO Bo, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	(2461)
Ozone Pollution Characteristics and Sensitivity During the Ozone Pollution Days in Summer 2021 of Xinxiang City	HOU Mo, JIANG Xiao-mei, ZHAO Wen-peng, <i>et al.</i>	(2472)
Influence of Typhoon Nangka Process on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i>	(2481)
Health Impacts of Air Pollution in Tianjin	HUA Kun, LUO Zhong-wei, JIA Bin, <i>et al.</i>	(2492)
Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020	YANG Chuan-xi, XUE Yan, GAO Chang, <i>et al.</i>	(2502)
Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020	WANG Fang, LI Wen-hui, LIN Yan-min, <i>et al.</i>	(2518)
Response of Water Quality in Small Reservoirs to Landscape Composition, Landscape Configuration, and Reservoir Characteristics in the Upper Reaches of the Yangtze River During Dry Season	ZHONG Yong-lin, RAN Jiao-jiao, WEN Wen, <i>et al.</i>	(2528)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Endocrine Disrupting Chemicals in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	LI Ling-yun, GAO Li, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i>	(2539)
Occurrence Characteristics of Microplastics and Metal Elements in the Surface Water of Huangpu River and Their Associations with Metal Resistance Genes	LU Jia-wei, XU Chen-ye, HU Chun, <i>et al.</i>	(2551)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban River Surface Sediments from the Lanzhou Reach of the Yellow River	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(2562)
Distribution and Release Potential of Soil Phosphorus Fractions in Water-level Fluctuation Zone of the Tributary Bay, Three Gorges Reservoir	ZHANG Xue, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(2574)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County	LIU Hai, ZHAO Guo-hong, <i>et al.</i>	(2583)
Analysis of Influencing Factors of Chlorophyll-a in Lake Taihu Based on Bayesian Network	LIU Jie, HE Yun-chuan, DENG Jian-ming, <i>et al.</i>	(2592)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Shunping County, Hebei Province	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(2601)
Distribution, Transformation, and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Drinking Water Treatment	ZHONG Ting-ting, LIN Tao, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2613)
Removal of Cr(VI) via a Nickel Ferrite/Activated Carbon Composite Under Batch Experiments: Study of Characterization, Performance, and Mechanism	ZHANG Hua, LI Rong-hua, CHEN Jin-xiong, <i>et al.</i>	(2622)
Degradation of SMX with Peracetic Acid Activated by Nano Core-shell Co@NC Catalyst	ZHENG Ting-lu, ZHANG Long-long, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i>	(2635)
Adsorption Characteristics of Arsenic and Cadmium by FeMnNi-LDH Composite Modified by Fulvic Acid and Its Mechanisms	HE Ya-xin, KE Xin-yi, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(2646)
Adsorption Mechanism for Phosphate in Aqueous Solutions of Calcium/Aluminum-rich Sludge Biochar Composite	OUYANG Zhu, CAO Lu, WANG Bing-qian, <i>et al.</i>	(2661)
Sludge Biochar Modified by B-doped and Its Adsorption Behavior and Mechanism of 1,2-DCA in Water	ZHOU Jia-wei, SHI Wei-lin, XU Wei, <i>et al.</i>	(2671)
Response of Forest Ecosystems to Decreasing Atmospheric Nitrogen Deposition	XIE Dan-ni, YANG Dong-xing, DUAN Lei, <i>et al.</i>	(2681)
Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in Typical Grasslands of China	ZHANG Liang-xia, YUE Xiao, ZHOU De-cheng, <i>et al.</i>	(2694)
Spatial-temporal Variation in Net Primary Productivity in Terrestrial Vegetation Ecosystems and Its Driving Forces in Southwest China	XU Yong, HUANG Hai-yan, DAI Qiang-yu, <i>et al.</i>	(2704)
Effects of Different Carbon Inputs on Soil Stoichiometry in Tianshan Mountains	MA Xin-yu, GONG Lu, ZHU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2715)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Nutrient Content and Stoichiometry in Desert Grassland	LIU Shu-xuan, AN Hui, ZHANG Xin-wen, <i>et al.</i>	(2724)
Effect of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil C:N:P Stoichiometry in Coastal Wetland of Hangzhou Bay	LI Wen-qi, XIANG Qi, XIE Xue-feng, <i>et al.</i>	(2735)
Effects of 24 Years Different Straw Return on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Extracellular Enzymatic Stoichiometry in Dryland of the Loess Plateau, China	YAO Zhi-xia, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, <i>et al.</i>	(2746)
Carbon Sequestration Characteristics Under Natural Vegetation Restoration in Ziwuling Area of the Loess Plateau	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, WANG Hao-jia, <i>et al.</i>	(2756)
Effects of Short-term Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Components in <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Plantation	JIAN Jun-nan, LIU Wei-chao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i>	(2767)
Response of Soil Organic Carbon Accumulation in Paddy Fields in Fujian Province to Future Temperature Increases	CHE Yan, QIU Long-xia, WU Ling-yun, <i>et al.</i>	(2775)
Species, Habitat Characteristics, and Screening Suggestions of Cadmium Hyperaccumulators in China	ZHAO Xiao-feng, LEI Mei, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i>	(2786)
Research Progress on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Soil Heavy Metals Based on Geographical Detector	GONG Cang, WANG Shun-xiang, LU Hai-chuan, <i>et al.</i>	(2799)
Geochemical Background and Baseline Value of Soil Chemical Elements in Hebei Province	ZHANG Li-ting, CHENG Hang-xin, XIE Wei-ming, <i>et al.</i>	(2817)
Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-grain Production	QIU Le-feng, ZHU Jin-xia, PAN Yi, <i>et al.</i>	(2829)
Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Arable Soil at the Geological High Background, Based on the Township Scale	YU Fei, WANG Jia-bin, WANG Rui, <i>et al.</i>	(2838)
Solid-solution Partitioning Coefficients and Environmental Risk of Cd and Pb in Soil in Chang-Zhu-Tan Area	LI Yu-ying, PENG Chi, LIU Le-le, <i>et al.</i>	(2849)
Ecological Risk and Migration Patterns of Heavy Metals in Soil and Crops in the Lead-Zinc Mining Area in Guizhou, China	MA Hong-hong, ZHANG Li, GUO Fei, <i>et al.</i>	(2856)
Mercury Pollution in Dryland Soil and Evaluation of Maize Safety Production in Guizhou Province	MA Li-jun, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i>	(2868)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs in the Soil of Wild <i>Forsythia Suspensa</i> in Shanxi	GUO Jia-jia, WANG Qi, KANG Min-jie, <i>et al.</i>	(2879)
Effects of P on the Uptake and Transport of Cd and As in Wheat Seedlings	WANG Yun, ZHAO Peng, LI Guang-xin, <i>et al.</i>	(2889)
Effects of Silicon Application on Arsenic Sequestration in Iron Plaque and Arsenic Translocation in Rice	LI Lin-feng, WEN Wei-fa, XU Zi-sheng, <i>et al.</i>	(2899)
Characteristics of Soil Microbial Community in Different Habitats in the Process of Ecological Restoration of Haifeng Wetland in Guangdong	MA Jiao-jiao, GAO Chang-jun, YI Xiao-qing, <i>et al.</i>	(2908)
Taxonomic and Functional Diversity of Soil Microbial Communities in Subalpine Meadow with Different Degradation Degrees in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, LIU Jin-xian, HU Yan-qiu, <i>et al.</i>	(2918)
Effects of the Transformation from Natural Alpine Grassland to Mixed Artificial Grassland on the Characteristics of Soil Microbial Community	YU Hao, LIU Yue, DENG Ye, <i>et al.</i>	(2928)
Effects of Chinese Milk Vetch Returning Incorporated with Chemical Fertilizer Reduction on the Composition and Function of Soil Bacterial Communities in Paddy Fields	ZHANG Ji-shi, LIU Chun-zeng, ZHENG Chun-feng, <i>et al.</i>	(2936)
Effects of Long-term Sod Cultivation on Chinese Hickory Plantation Soil Fungal Community and Enzyme Activities	HU Ying-bing, LIANG Chen-fei, JIN Jin, <i>et al.</i>	(2945)
Effects of Microplastic High-density Polyethylene on Cotton Growth, Occurrence of <i>Fusarium</i> wilt, and Rhizosphere Soil Bacterial Community	ZHANG Hao, SUN Jie, YANG Hui-ying, <i>et al.</i>	(2955)
Nitrogen Metabolism and Flora Characteristics of Bacteria Algae Complex System	ZHAO Zhi-rui, WU Hai-miao, MA Chao, <i>et al.</i>	(2965)
Analysis of Carbon Emissions and Influencing Factors in China Based on City Scale	WU Jian-sheng, JIN Xue-ru, WANG Han, <i>et al.</i>	(2974)
How Do Carbon Trading Policies Affect Industrial Carbon Productivity: Quasi-natural Experiments from Chinese Provincial Data	FANG Qi, LI Shao-ping, <i>et al.</i>	(2983)
Influence of the Classification of Municipal Solid Wastes on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Qingdao City, China	CHEN Ji-hong, BIAN Rong-xing, ZHANG Ting-xue, <i>et al.</i>	(2995)
Quantitative Analysis of Spatio-temporal Evolution Characteristics of Seasonal Average Maximum Temperature and Its Influence by Atmospheric Circulation in China from 1950 to 2019	SU Yue, LU Chun-yan, HUANG Yu-fei, <i>et al.</i>	(3003)