

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响	胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析	王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	郑镇森, 姜建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020 年中国城市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染时空演变特征	牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021 年京津冀及周边地区 PM _{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析	宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020 年中国典型经济区 PM _{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系	徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析	赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征	刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM _{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势	罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征	王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM _{2.5} 组分特征及来源解析	谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 PM _{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估	李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单	刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析	陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势	张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析	贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O ₃ 生成特征	俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应	李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估	俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO ₂ 排放模拟	马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析	卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价	李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析	吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子	谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估	李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价	张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用	纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素	张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响	何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
毫清河水体细菌群落的结构和分布特征	王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (<i>Sinularia microclavata</i>) 共生细菌群落结构和功能的影响	刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价	严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性	刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布	刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估	辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别	张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析	马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估	黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量	马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估	赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险	邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测	戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析	王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析	刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征	刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响	江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应	杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响	王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱渣对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
菌渣与化肥肥施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响	耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响	胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响	储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价	付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征	薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展	胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望	李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910)	《环境科学》征稿简则(1984)
信息	(2167, 2191, 2324)

基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别

张宏泽^{1,2}, 崔文刚^{1,2*}, 刘绥华^{1,2}, 崔瀚文^{1,2}, 黄月美^{1,2}

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550025; 2. 贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室, 贵阳 550001)

摘要: 明确耕地土壤重金属来源对土壤健康合理管护及其可持续发展至关重要. 利用正定矩阵因子分解(PMF)模型源解析结果(源成分谱和源贡献)、历史调查数据和时序遥感数据, 整合地理探测器(GD)、最佳参数地理探测器(OPGD)、空间关联探测器(SPADE)和空间关联交互探测器(IDSA)模型, 探讨了土壤重金属来源空间分层异质性研究中可塑性面积单元问题(MAUP), 分别识别了分类变量和连续变量中控制土壤重金属来源空间分异的驱动因子及其交互作用. 结果表明, 中小尺度下土壤重金属来源的空间分异性研究受空间尺度影响, 0.08 km²能够作为区域土壤重金属来源空间分异性探测的可选空间单元. 连续变量受空间相关性影响, 分位数法和中断数为10的离散化参数组合能够减少连续变量在土壤重金属来源空间分异性探测中所受分区效应的影响. 分类变量中地层(PD 0.12~0.48)控制土壤重金属来源空间分异, 地层和流域的交互作用对各来源解释力为27.28%~60.61%, 各来源的高风险区域分别分布在地层中的下震旦系、上白垩系、土地利用中采矿用地和土壤种类中典型强淋溶土区域. 连续变量中人口(PSD 0.40~0.82)控制土壤重金属来源空间分异, 连续变量的空间组合对各来源解释力为61.77%~78.46%, 各来源的高风险区域分别分布在蒸腾量(41.2~43 kg·m⁻²)、距河流距离(315~398 m)、增强型植被指数(0.796~0.995)和距河流距离(499~605 m)区域. 研究结果为耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用的相关研究提供参考, 为喀斯特地区耕地土壤健康合理管护及其可持续发展提供重要的科学依据.

关键词: 耕地土壤; 重金属; 多源数据; 地理探测器; 驱动因子; 可塑性面积单元问题

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-2177-15 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205201

Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data

ZHANG Hong-ze^{1,2}, CUI Wen-gang^{1,2*}, LIU Sui-hua^{1,2}, CUI Han-wen^{1,2}, HUANG Yue-mei^{1,2}

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Mountain Resources and Environmental Remote Sensing Application Laboratory, Guiyang 550001, China)

Abstract: The identification of heavy metal sources in farmland soils is essential for the rational health condition management and sustainable development of soil. Using source resolution results (source component spectrum and source contribution) of a positive matrix factorization (PMF) model, historical survey data, and time-series remote sensing data, integrating a geodetector (GD), an optimal parameters-based geographical detector (OPGD), a spatial association detector (SPADE), and an interactive detector for spatial associations (IDSA) model, this study explored the modifiable areal unit problem (MAUP) of spatial heterogeneity of soil heavy metal sources and identified the driving factors and their interacting effects on the spatial heterogeneity of soil heavy metal sources in categorical and continuous variables, respectively. The results showed that the spatial heterogeneity of soil heavy metal sources at small and medium scales was affected by the spatial scale, and the optional spatial unit was 0.08 km² for detecting spatial heterogeneity of soil heavy metal sources in the study region. Considering spatial correlation and discretization level, the combination of the quantile method and discretization parameters with an interruption number of 10 could be implied to reduce the partitioning effects on continuous variables in the detection of spatial heterogeneity of soil heavy metal sources. Within categorical variables, strata (PD 0.12-0.48) controlled the spatial heterogeneity of soil heavy metal sources, the interaction between strata and watersheds explained 27.28%-60.61% of each source, and the high-risk areas of each source were distributed in the lower sinian system, upper cretaceous in strata, mining land in land use, and haplic acrisols in soil types. Within continuous variables, population (PSD 0.40-0.82) controlled the spatial variation in soil heavy metal sources, and the explanatory power of spatial combinations of continuous variables for each source ranged from 61.77% to 78.46%. The high-risk areas of each source were distributed in evapotranspiration (41.2-43 kg·m⁻²), distance from the river (315-398 m), enhanced vegetation index (0.796-0.995), and distance from the river (499-605 m). The results of this study provide a reference for the research of the drivers of heavy metal sources and their interactions in arable soils and provide an important scientific basis for the management of arable soil and its sustainable development in karst areas.

Key words: farmland soil; heavy metals; multi-source data; geodetector; driving factor; modifiable areal unit problem

土壤是人类生存和发展的重要自然资源,其在联合国可持续发展目标中得到前所未有的重视^[1]. 然而,存在于地球关键带上的表层土壤易受到不同来源和程度的重金属污染^[2-5]. 土壤重金属污染是导致土壤环境遭到破坏的主要原因,现已成为全球范围内的一个严重问题,且粮食安全与土壤环境质量息息相关^[4-7]. 现阶段土壤环境质量不容乐观,高

强度和超负荷利用致使耕地土壤健康状况堪忧^[5,8]. 喀斯特地区独特的水力和水文地质特征使表层土壤极易受到人类活动的影响^[9,10]. 因此,对控

收稿日期: 2022-05-17; 修订日期: 2022-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(61540072)

作者简介: 张宏泽(1993~),男,硕士研究生,主要研究方向为遥感与生态环境评价, E-mail: 193972589@qq.com

* 通信作者, E-mail: 849028074@qq.com

制喀斯特地区耕地土壤重金属来源的驱动因子及其交互作用的识别研究具有明确的科学与现实意义。

现阶段,对土壤重金属源解析的研究主要分为定性识别和定量解析两类.定性识别土壤中重金属来源的方法主要以因子分析、主成分分析、聚类分析、变量逻辑回归和空间分析等为主^[11,12];定量解析各来源对各土壤重金属采样点位含量贡献的方法多采用源排放清单、化学质量平衡、UN-MIX 模型、绝对主成分得分-多元线性回归、正定矩阵因子分解(positive matrix factorization, PMF)、有限混合分布、条件树推断和随机森林等^[11,12];此外,越来越多的学者结合地理信息系统和多元统计分析技术揭示区域土壤重金属空间特征,识别其来源^[6].空间相关性^[13,14]作为空间数据最重要的特征,在空间数据层内通过 Moran's *I*、Geary's *C*、Getis-Ord General *G*、Ripley's *K*、半变异函数和空间计量模型等描述,在层间以地理加权回归描述^[14,15].有研究者基于上述方法或模型进行土壤重金属源解析的适应性研究,合理分析出人为或自然因素的单方面影响^[11,12].然而,土壤重金属受到自然和人类活动的双重影响,各种环境因子的多样性、复杂性、非线性和异质性共同影响土壤重金属累积的整个过程^[16].传统统计模型在计算交互作用时需假设线性和受多变量共线影响,无法准确量化土壤重金属各来源之间的交互作用^[10,17].

受上述问题困扰,许多学者采用地理探测器(geodetector, GD)模型进行土壤重金属空间分异性研究^[18~23].GD 模型基于空间分层异质性理论探索地理因素^[24,25],其广泛应用于气候与环境、土地利用、污染与人类健康、水资源与动力学等方面决定因素的探测中^[26].然而,目前基于 GD 模型进行空间分异性研究时易忽略地理变量的空间相关性和可塑性面积单元问题(modifiable areal unit problem, MAUP),其是地理学中长期存在和影响深远的问题之一,分为尺度效应和分区效应^[27~31].空间数据受空间相关性和离散化水平影响,在应用时需进行适应性分析,已有研究表明统计结果因规模和聚合而不同^[15,27,31].伴随 GD 模型的应用,基于最佳参数的空间数据离散化、空间尺度效应、空间相关性和基于空间相关性的交互作用探测被整合到 GD 模型中^[17].现阶段,缺乏集合空间尺度、空间相关性和离散化水平进行土壤重金属来源空间分异性的适应性研究.采用多源数据,尤其是引入时序遥感数据进行土壤重金属空间分异性的研究相对较少.

PMF 模型在求解过程中对因子载荷和因子得分均做非负约束,所提取因子的空间分布与其来源

的空间分布相似^[23],源贡献具有可解释性和明确的物理意义^[32].本研究利用地理探测器(整合空间尺度、空间相关性、空间离散化)和多源数据识别土壤重金属来源与环境因子之间的空间关系,揭示多种环境因子如何共同影响土壤重金属来源的累积,通过指出各重金属来源进入土壤的途径,以期对耕地土壤健康合理管护及其可持续发展提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 数据来源和处理

本研究以贵阳市乌当区北部区域为研究区,以 378 个耕地土壤样品中 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 的含量数据为基础数据.研究区概况、样品采集及预处理、污染评价方法和 PMF 模型解析结果见文献^[33].本研究在前期研究基础上,分别统计整理:①378 个采样点处酸碱度(pH);②各采样点综合污染负荷指数(PLI);③PMF 解析 4 个土壤重金属来源(F1~F4)对各采样点处含量贡献.对以上数据采用普通克里金法进行空间插值,各土壤重金属来源含量贡献和综合污染负荷指数等值区域图见图 1.

1.1.1 环境因子选取

环境因子的选取对探测土壤中重金属来源的空间分异性至关重要^[6].以土壤成土因素和前人关于土壤重金属来源的研究成果为依据^[10,34],选择土壤性质、地形、生态、社会经济和距离这 5 种类型作为解释变量.

距离因子空间分布见图 2,土壤性质、地形、生态和社会经济因子空间分布见图 3.

1.1.2 环境因子来源

(1)土壤性质 土壤中的重金属受成土母质控制,不同发育类型土壤中重金属含量差异大^[6,10].土壤质地和土壤种类数据来源于国家青藏高原科学数据中心的基于世界土壤数据库(harmonized world soil database, HWSD)的中国土壤数据集^[35].地层由中国地质调查局(<https://www.cgs.gov.cn>)公布的 1:200 000 地质图矢量化处理所得.

(2)地形因子 地形是区域和局部空间上地球动力学过程的重要驱动因素^[36].数字高程模型(DEM)来源于航天飞机雷达地形任务数据(<https://asf.alaska.edu>),分辨率为 30 m.坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率、标准曲率和流域由 DEM 经自动化地学分析系统(system for automated geoscientific analyses, SAGA)处理所得^[36].

(3)生态因子 遥感数据常作为评估区域生态环境和社会经济的有效数据源,谷歌云计算平台

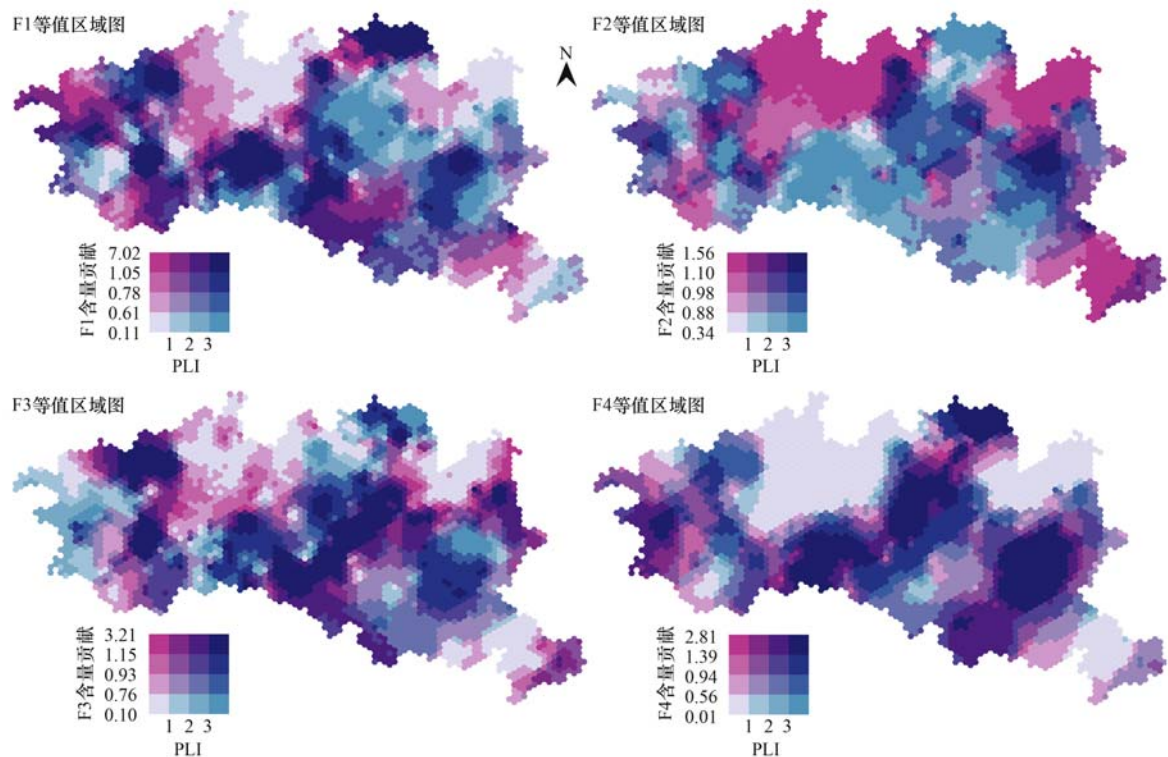


图 1 各土壤重金属来源含量贡献和综合污染负荷指数等值区域

Fig. 1 Equivalent regional map of the content contribution of each soil heavy metal source and the integrated pollution load index

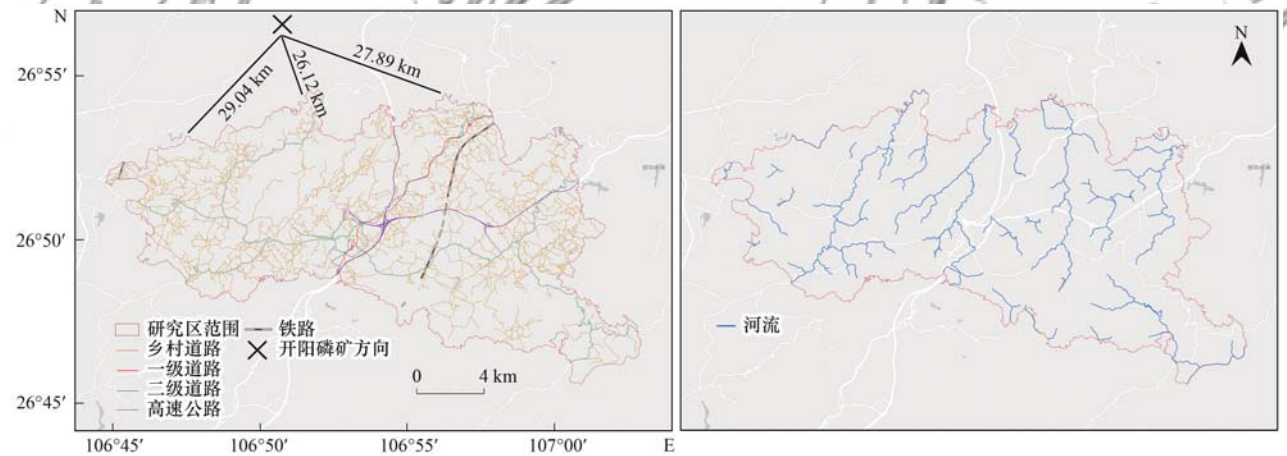


图 2 距离因子空间分布示意

Fig. 2 Distance factors spatial distribution map

(google earth engine, GEE) 常用于快速获取并处理遥感数据^[34,37~39]. 归一化植被指数 (NDVI) 和增强型植被指数 (EVI) 来源于 MOD13Q1 数据集, 分别通过 GEE 收集 23 幅影像; 叶面积指数 (LAI) 基于 MOD15A2H 数据集, 共收集 46 幅影像; 蒸腾量 (ET) 基于 MOD16A2 数据集, 共收集 45 幅影像; 年度净初级生产量 (NPP) 基于 MOD17A3HGF 数据集, 共收集 1 幅影像; 遥感生态指数 (RSEI)^[39] 基于 USGS Landsat8 Level2 Collection2 Tier1 数据集, 由云和水掩膜后的影像利用主成分分析技术并集成绿度、湿度、热度和干度所计算的区域生态环境质量. 其中, 基于空间相关性的时间不变效应来降低数

据源获取时间不同所带来的影响, 所收集遥感数据的时间分辨率选择在 2019 年; 为突出研究区生态状况和抑制云层、大气和太阳高度等方面所导致的噪声, NDVI、EVI、LAI 和 ET 经最大合成法进行年度数据的制作.

(4) 社会经济因子 人类的生产和生活等经营性活动影响土壤中微量元素的积累^[6,10]. 土地利用数据来源于贵阳市乌当区 2018 年土地利用现状数据; 人口数据来源于 WorldPop (<https://worldpop.org>) 的开放空间人口统计数据, 其以 100 m × 100 m 网格评估 2019 年人口规模; 平均夜间灯光指数 (VIIRS) 基于 VIIRS Nighttime Day/Night Band

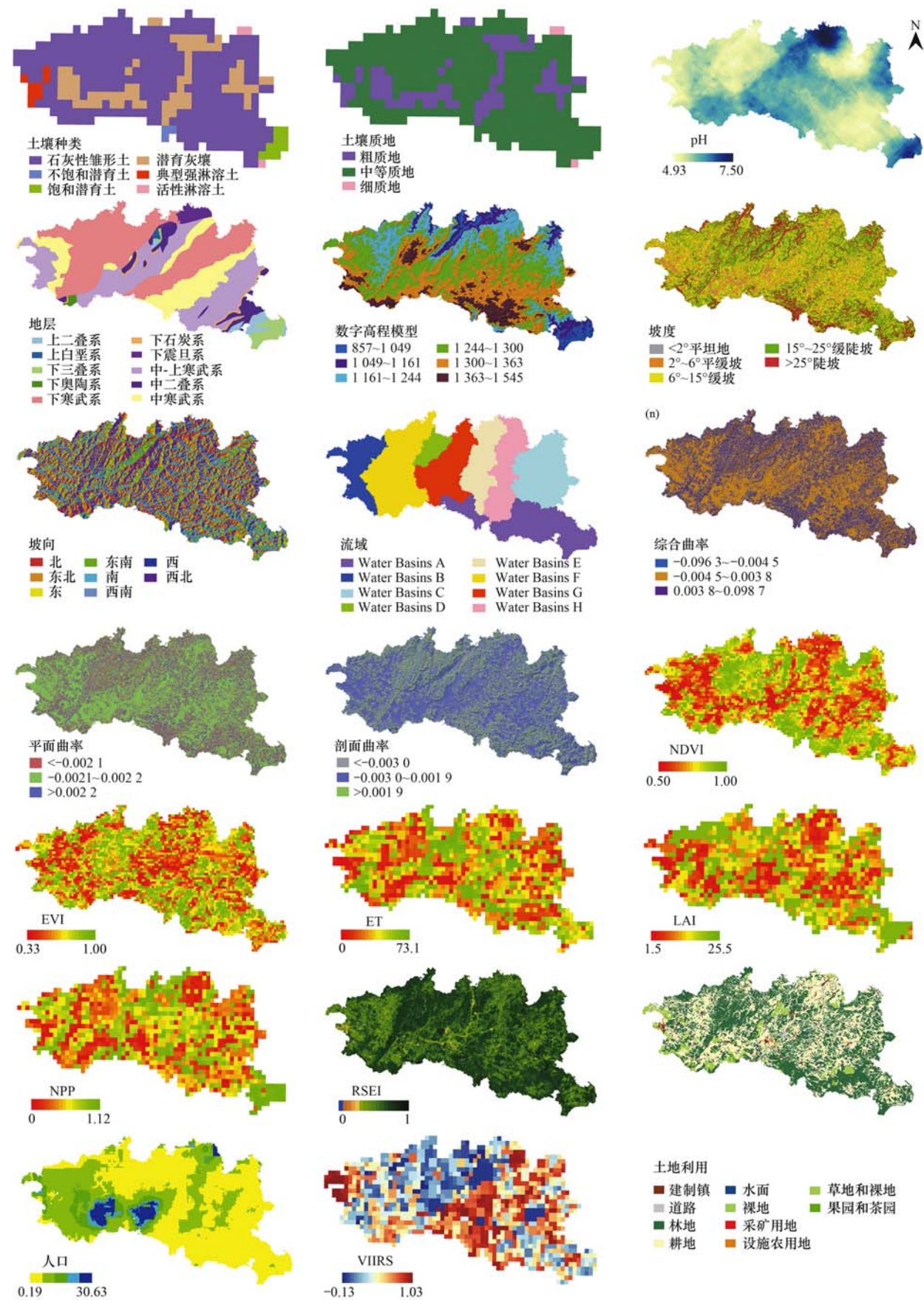


图 3 解释变量

Fig. 3 Explanatory variables

Composites Version1 数据集,是在 GEE 平台经时间序列合成的地面分辨率 500 m 的 2019 年度影像 1 幅。

(5) 距离因子 交通和工农业活动过程中产生的废气、废水和废渣会对周边一定范围内的土壤重金属含量产生影响^[40]。道路、铁路、河流和开阳磷矿位置以 ArcGIS 世界影像图为底图进行绘制,基于 ArcGIS10.2 计算各采样点距道路、铁路、河流和开阳磷矿的欧式距离。

1.1.3 空间离散化

(1) 分类变量 土壤质地和土壤种类基于 HWSD 数据集进行分类;土地利用依据土地利用现状分类标准进行划分;地层按成层岩石所形成的年代进行划分;流域按可能存在的集水区域进行划分。

(2) 基于专业经验的连续变量空间离散化 基于历史文献和相关标准将解释变量中的连续变量离散化为分类变量。pH 和坡向基于专业经验进行划分;坡度基于《第三次全国国土调查技术规程》(TD/T1055-2019)划分;遥感生态指数参考 2015 年修订的《生态环境状况评价技术规范》(HJ/T192-2006)划分;平面曲率、剖面曲率和标准曲率按加速(分散)为正,减速(汇聚)为负,线性为零划分^[41]。

(3) 基于最佳参数的连续变量空间离散化 数字高程模型、归一化植被指数、增强型植被指数、叶面积指数、蒸腾量、年度净初级生产量、人口、夜间灯光指数、距道路距离、距铁路距离、距河流距离和距开阳磷矿距离,分别采用 OPGD 和 SPADE 模型进行最佳参数空间离散化。

1.2 研究方法

1.2.1 地理探测器(GD)模型

GD 模型基于地理现象的空间分异定律探测空间分异性,并揭示其背后驱动力的一组统计学方法,分为因子探测、交互作用探测、风险探测和生态探测,具体见文献[24,25]。

(1) 因子探测 GD 模型的核心,探测响应变量的空间分异性,通过 PD 揭示变量的相对重要性,表达式为:

$$PD = Q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (1)$$

式中, $h=1, \dots, L$ 为解释变量的分层,即分类或分区; N_h 和 N 分别为分层 h 和全区单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是分层 h 和全区的响应变量方差。PD 范围为 $[0, 1]$,以非中心 F 分布检验显著性。

(2) 交互作用探测 交互区域为两个解释变量空间上交集区域,基于因子探测计算交互区域 PD,将其定义为 PID。通过比较两个单一解释变量 PD 和交互作用 PID 探索交互作用。交互作用类型见文献[25]。

(3) 风险探测 探测解释变量各分层的属性均值之间是否存在显著差异,以 t 统计量检验显著性。

(4) 生态探测 探测解释变量对响应变量空间分布的影响是否存在显著差异,以 F 统计量检验显著性。

1.2.2 基于最佳参数的地理探测器(OPGD)模型

OPGD 模型是对 GD 模型的改进,原理及计算公式一致,改进在于连续数据的空间离散化。OPGD 模型通过不同离散化方法(等间段、自然间段、分位数间段、几何间段和标准差间段)和中断数(3~6)的参数组合寻求连续变量的最大 PD。对于 MAUP 效应,OPGD 模型通过比较各空间单元 PD 第 90% 分位数大小来评估尺度效应^[26]。

1.2.3 空间自相关

Tobler's 地理学第一定律指出:所有的地理事物都是相互联系的,但离得越近的事物彼此之间的联系越强^[13]。作为地理现象表现形式的连续数据具有空间相关性,通过全局 Moran's I 统计量测量其要素位置和属性值之间的空间自相关性,以 Z 得分和 P 值进行检验。原理和计算公式见文献[42]。

1.2.4 空间关联检测器(SPADE)模型

SPADE 模型考虑变量间空间联系和最小化离散化水平的影响,其基于解释变量空间离散化水平对响应变量进行分区,以空间加权叉积^[43]计算的空间方差代替传统的方差来衡量彼此之间空间相关性。此外,通过多级离散化和考虑离散化导致的信息损失来减少离散化水平对 PSD 影响^[15]。表达式为:

$$PSD = Q_{SPADE} = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \Gamma_h}{N \Gamma} \quad (2)$$

式中, N_h ($h=1, \dots, L$) 为分层 h 单元数, N 为全区单元数; Γ_h 和 Γ 分别为分层 h 和全区的空间方差, Γ 定义为空间加权叉积的平均值,表达式为:

$$\Gamma = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} W_{ij} C_{ij}}{\sum_i \sum_{j \neq i} W_{ij}} \quad (3)$$

式中, W_{ij} 为位置 i 和位置 j 之间空间加权矩阵的权重值; C_{ij} 为位置 i 和 j 之间响应变量的相似性,以半平方差函数 $(x_i - x_j)^2 / 2$ 表示。

对于离散化会带来信息损失,以响应变量和解释变量 PSD 之比来调整偏差,调整后表达式为:

$$\text{PSD} = Q_{\text{SPADE}} = \text{PSD}_r / \text{PSD}_e \quad (4)$$

1.2.5 基于空间关联的交互检测器 (IDSA) 模型

IDSA 模型用于检验响应变量和解释变量之间空间关联^[17]. IDSA 模型通过最少数量的解释变量、空间重叠区和模糊划分区来解释响应变量,步骤如下:

(1) 空间模糊叠加 空间模糊叠加是解释变量在空间上模糊关系的重叠过程. 模糊关系假设解释变量之间有一定联系,以模糊隶属度函数(以模糊数表示)量化. 模糊数等于 GD 模型风险检测器中归一化后的平均风险值,表达式为:

$$[f_n(X_1) f_n(X_2) \cdots f_n(X_m)] = g([\eta(X_1) \eta(X_2) \cdots \eta(X_m)]) \quad (5)$$

式中, $X_i (i=1, \cdots, m)$ 为解释变量; $f_n(X_i)$ 为模糊数; $\eta(X_i)$ 为平均风险值; $g(X)$ 为归一化函数.

(2) 具有交互作用的组合模糊数 基于模糊 AND 算子对模糊数进行积分,估计解释变量间交互作用的组合模糊数,表达式为:

$$f_n(X_1 \cap X_2 \cap \cdots \cap X_m) = \min[f_n(X_1), f_n(X_2), \cdots, f_n(X_m)] \quad (6)$$

式中, $X_1 \cap X_2 \cap \cdots \cap X_m$ 为解释变量之间的交互作用.

(3) 最佳交互作用的计算和偏差调整 交互作用的计算为具有交互作用的单个解释变量空间叠加区域的方差之和与单个解释变量的全局方差之比,表达式为:

$$\varphi = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^{L_i} N_{i,h} \Gamma_{i,h}}{\sum_{i=1}^m N_i \Gamma_i} \quad (7)$$

式中, $N_{i,h} (i=1, \cdots, m; h=1, \cdots, L_i)$ 为单个解释变量 X_i 在分区 h 上与其他解释变量具有交互作用的单元数; $\Gamma_{i,h}$ 为解释变量 X_i 在分区 h 上空间方差; N_i 和 Γ_i 分别为解释变量 X_i 单元数和全区空间方差.

对于离散化过程中信息缺失而导致的偏差,以响应变量和解释变量 PSD 之比进行调整,以 t 统计量检验显著性,调整后表达式为:

$$\text{PID}_{\text{IDSA}} = Q_{\text{IDSA}} = \text{PSD}_r / \varphi \quad (8)$$

1.3 采样

以研究区外接矩形为范围进行网格与样点制作. 正六边形具有邻近空间概念清晰、视野偏差少和信息空间结构明确等特点^[44]. 因此,本研究选用六边形格网来减少边界效应触发的样本偏差,共设计 14 组空间单元探究 MAUP 效应,各空间单元面积和样点数见表 1.

表 1 各空间单元面积和样点数描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of space unit area and sample number

空间单元编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
面积/km ²	0.01	0.02	0.025	0.03	0.04	0.06	0.08	0.1	0.12	0.16	0.24	0.32	0.64	1.28
样点数/个	25 808	12 987	9 304	7 749	6 496	3 865	3 253	2 329	1 940	1 629	963	817	408	201

1.4 数据处理

使用 Excel 2019 进行数据整理和计算;利用 GEE 进行遥感数据收集和处理;地形因子计算由 SAGA 完成;采用 ArcGIS10.2 进行栅格数据处理、空间相关性检测、空间单元布设和采样;基于 R 语言 GD 包、SPADE 包和 IDSA 包进行数据分析与绘图.

2 结果与分析

2.1 最佳空间单元的确定

在空间分异性探讨方面,确定合理空间单元的常用方法是基于 OPGD 模型比较各空间单元 PD 第 90% 分位数 ($\text{PD}_{90\%}$) 的大小^[26]. 以 PLI 作为响应变量探究 MAUP 效应,各空间单元尺度效应比较见图 4. 由单变量 PD 变化趋势和 $\text{PD}_{90\%}$ 局部加权回归 (LOESS) 模型分析结果可知,随着空间单元面积增

大,PD 排序稳定, $\text{PD}_{90\%}$ 逐渐增加;具有显著性 ($P < 0.05$) 的解释变量个数逐渐减少. 单变量 PD 变化表明,随着空间单元增大,分类变量 PD 高而稳定,在空间单元增大到 0.08 km² 后,连续变量 PD 变化幅度大且一些连续变量未通过显著性检验. $\text{PD}_{90\%}$ 的 LOESS 模型表明, $\text{PD}_{90\%}$ 增长速率趋势为增长-下降-增长,当空间单元从 0.01 km² 增大到 0.16 km² 时,增长速率先增后降,增长速率在 0.08 km² 时达到局部最大;当空间单元从 0.16 km² 增大到 1.28 km² 时,增长速率提升较快, $\text{PD}_{90\%}$ 变化波动强烈. 从整体空间格局来看,0.16 km² 的空间单元具有相对较高的 $\text{PD}_{90\%}$. 空间单元从 0.01 km² 增大至 0.08 km² 时, $\text{PD}_{90\%}$ 增长速率稳步增大, $\text{PD}_{90\%}$ 在 0.08 km² 时达到局部最优解且能够去除无效因子. 因此,从局部格局的稳定性来看,0.08 km² 是本研究用于评估环境因子对土壤重金属源空间分布影响的最佳空间单元.

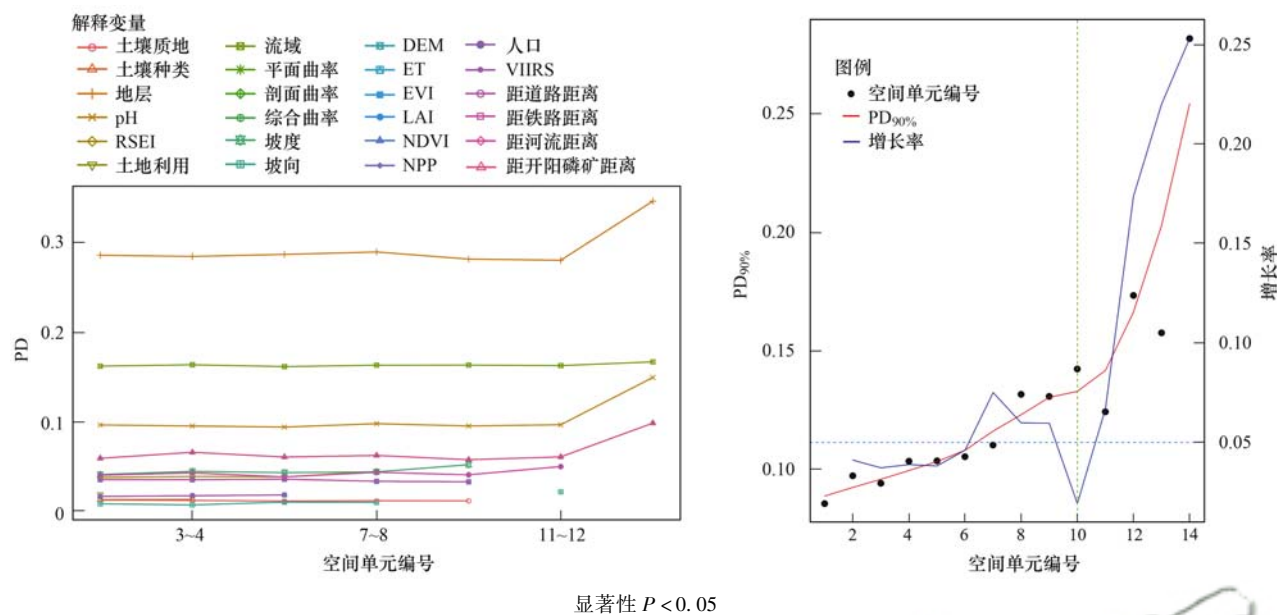


图 4 基于 OPGD 模型的各空间单元尺度效应比较
Fig. 4 OPGD-based comparison of size effects of spatial units

2.2 最佳空间单元下土壤重金属来源的驱动因子及其交互作用识别

在最佳空间单元下,以 F1 ~ F4 作为响应变量,各环境因子作为解释变量,从两方面探究环境因子中控制土壤重金属来源的驱动因子及其之间的交互作用;①基于 GD 模型对分类变量进行识别;②基于 OPGD 模型、SPADE 模型和 IDSA 模型识别连续变量。

2.2.1 基于 GD 模型的分类型变量驱动因子及其交互作用识别

由 GD 模型分析结果可知(图 5),地层是分类变量中导致各源空间分异的主导因子。F1 主要驱动因子分别为地层(45.78%)、pH(10.09%)和流域(8.06%),地层为下震旦系的区域具有最高的源贡献率风险,与其他类型的源贡献率均值之间差异最大,下三叠系则为最低风险区域;交互探测表明地层和其他解释变量的交互作用表现为增强,其中地层∩流域对 F1 贡献率为 58.57%,两者呈非线性增强。F2 主要驱动因子分别为地层(30.41%)、流域(14.54%)和坡度(5.16%),地层为上白垩系的区

域具有高风险,地层∩流域呈非线性增强,其对 F2 贡献率为 49.28%。F3 主要驱动因子分别为地层(11.71%)、pH(5.14%)和流域(3.39%),土地利用为采矿用地的区域具有高风险,地层∩流域呈非线性增强,其对 F3 贡献率为 27.28%。F4 主要驱动因子分别为地层(48.47%)、流域(16%)和坡度(7.69%),土壤种类为典型强淋溶土的区域具有高风险,地层∩流域呈线性增强,其对 F4 贡献率为 60.61%。生态矩阵探测结果表明地层对各源贡献率的影响分别与土壤种类和土壤质地显著不同。

2.2.2 基于 OPGD 模型、SPADE 模型和 IDSA 模型的连续变量驱动因子及其交互作用识别

(1)连续变量的空间相关性检测 SPADE 模型要求连续变量具有空间自相关假设^[15]。基于反距离平方策略,通过 ArcGIS10.2 进行连续变量全局 Moran's I 统计量计算。由表 2 可知,各连续变量全局 Moran's I 指数大于 0.2, Z 得分大于 1.96, P 值小于 0.01,具有统计学意义,结果表明各连续变量空间分布呈显著聚集特征。

表 2 各连续变量全局 Moran's I 分析结果¹⁾
Table 2 Results of Global Moran's I analysis for continuous variables

连续变量	DEM	ET	EVI	LAI	NDVI	NPP	人口	VIIRS	距道路距离	距铁路距离	距河流距离	距开磷矿距离
Moran's I	0.874	0.601	0.300	0.369	0.506	0.417	0.729	0.675	0.702	0.996	0.799	0.997
Z 得分	105.14	103.33	36.17	44.65	60.95	50.27	91.03	81.19	84.68	119.77	96.17	119.90

1) P 值 < 0.01

(2)基于 SPADE 模型的连续变量最佳参数离散化 由图 6 可知,大部分连续变量的 PSD 随中断数增加而增大,连续变量对各源解释力的变化趋势

一致。随中断数增加,PSD_{75%} 逐步增大,增长速率总体上呈由高递减趋势。当中段数为 7 ~ 18 时,各连续变量 PSD 排序稳定,其中,当中断数为 10 时,F1 和

F3 的 $PSD_{75\%}$ 增长率降到 5% ; F2 和 F4 的 $PSD_{75\%}$ 增长率先增(微变)后降,最大增长率未达 5%,但在中
断数 9~10 时增长率达到最大值. 结合 PSD 变化趋势和 $PSD_{75\%}$ 增长率确定各连续变量的最佳中断数为 10.

(3) 基于 OPGD 模型和 SPADE 模型连续变

量单因子作用和风险区探测 由图 7(a)可知,人口、距开阳磷矿距离和距铁路距离的 PSD 较高,表明其与各来源的空间关联度高,而 EVI 、距道路距离和距河流距离与各源空间关联低. 除 F2 中距道路距离的 PSD 较 PD 下降 0.074 9 外,其余连续变量 PSD 高于 PD ,大部分连续变量空间关联性增

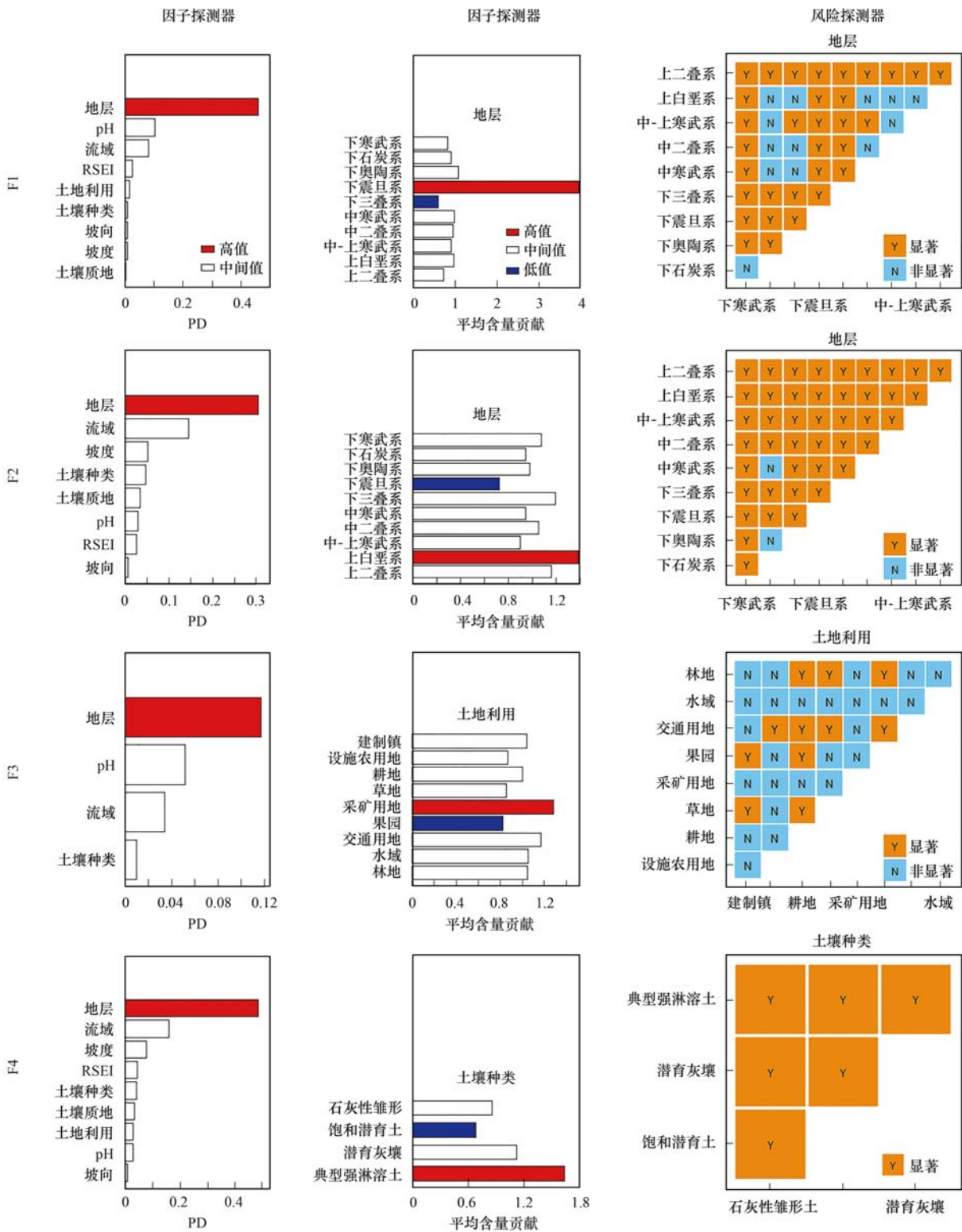
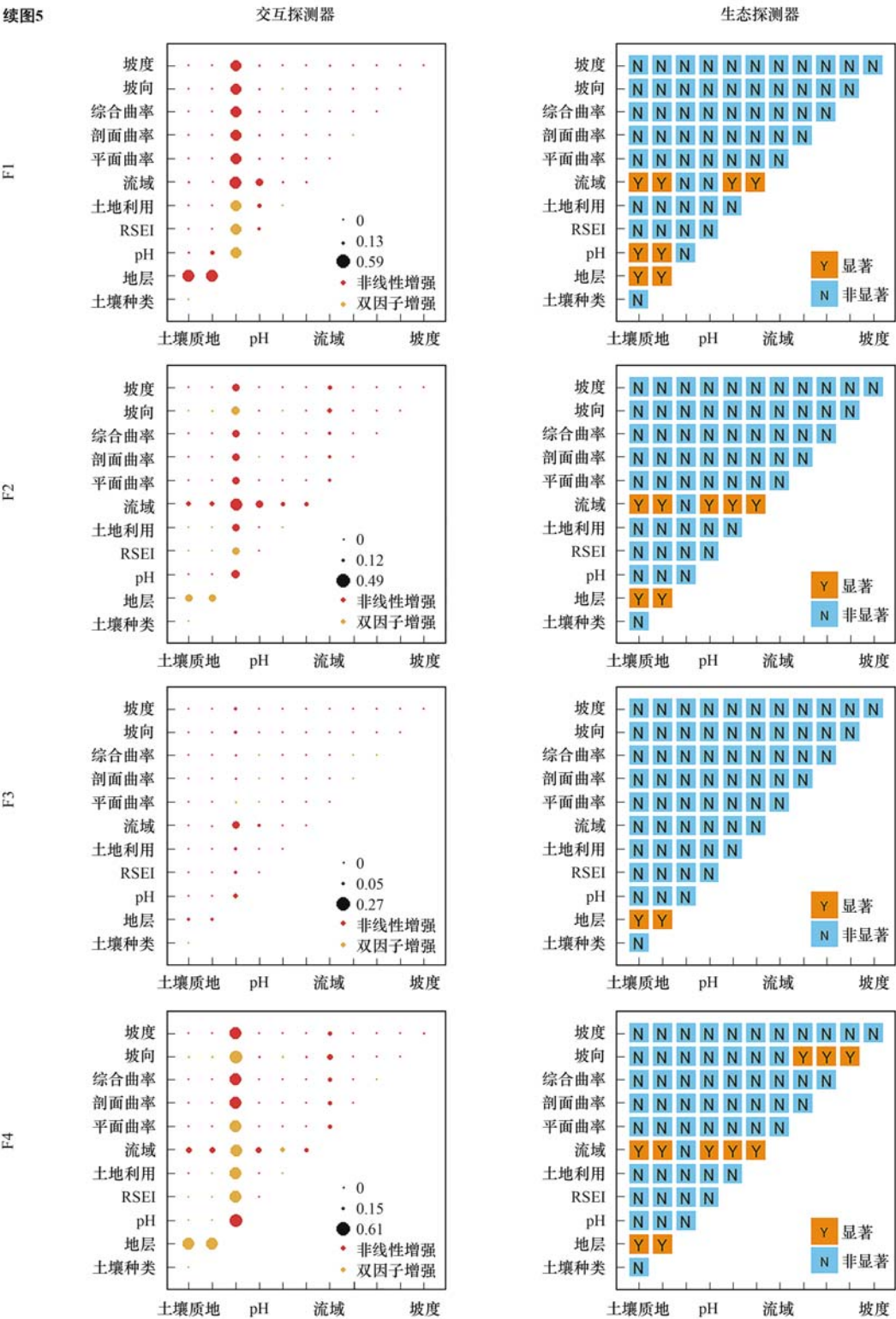


图 5 基于 GD 模型分类变量对土壤重金属来源解释力探测

Fig. 5 GD-based categorical variables for soil heavy metal source explanatory power detection



强. 人口是连续变量中控制研究区土壤重金属源空间分布的主导因子. 由图 7(b) 可知, 连续变量划分后的各分层内各源贡献率不同. 其中, F1、F2、F3 和 F4 贡献率较高的区域分别分布在 ET 为 $41.2 \sim 43 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、距河流距离为 $315 \sim 398 \text{ m}$ 、EVI 为 $0.796 \sim 0.995$ 和距河流距离为 $499 \sim 605 \text{ m}$ 的区域.

(4) 基于 OPGD 模型和 IDSA 模型的交互作用

探测和模型性能评估 由表 3 和图 7(c) 可知, 对于 F1、F2 和 F4, 连续变量 (DEM、LAI、NDVI、VIIRS、距道路距离和距开阳磷矿距离彼此之间存在交互作用) 的 PID 分别为 0.1483 、 0.2222 和 0.2017 ; 对 F3, 连续变量 (DEM、ET、NDVI、NPP、距道路距离和距铁路距离彼此之间存在交互作用) 的 PID 为 0.0636 . 由表 3 可知, IDSA 模型交互探测中 12 个连续变量交互作用的 PID_{IDSA} 分别为 0.6465 、 0.7846 、

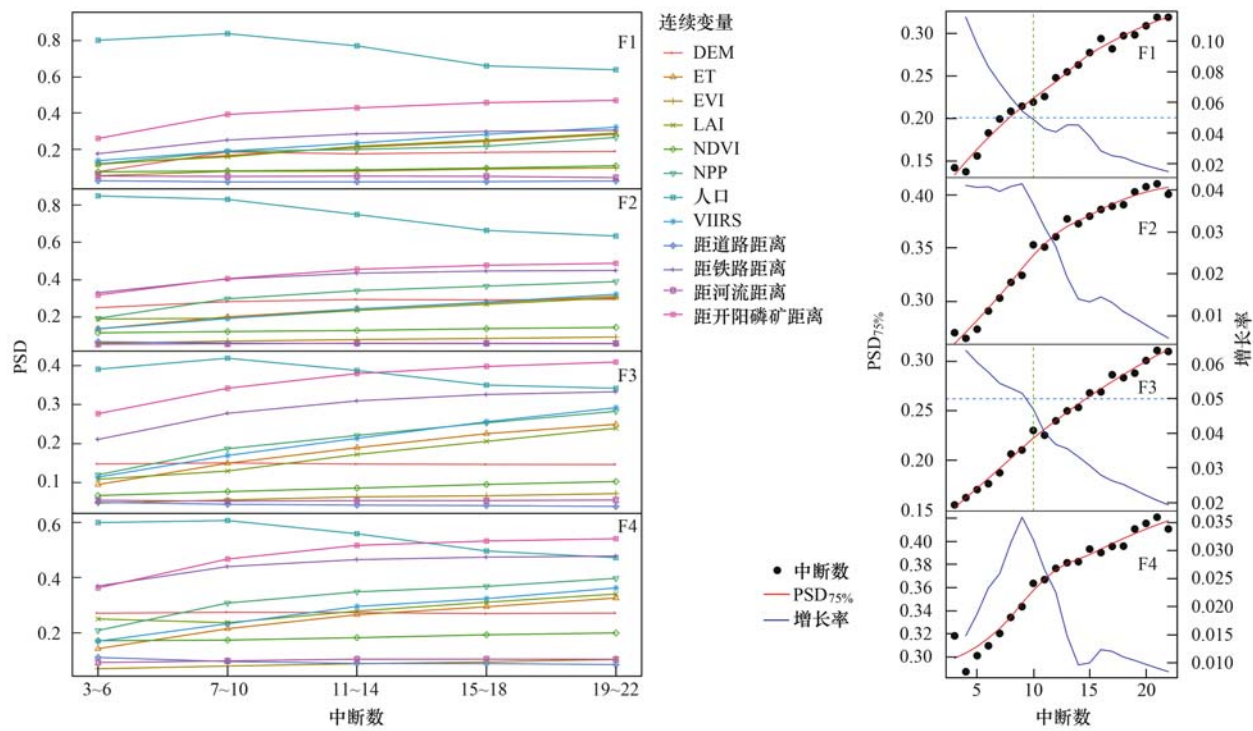


图 6 基于 SPADE 模型的连续变量最佳空间离散化

Fig. 6 SPADE-based optimal spatial discretization of continuous variables

表 3 连续变量最佳交互作用探测和模型性能评估

Table 3 Optimal interaction detection and model performance evaluation for continuous variables

响应变量	模型	交互作用值	叠加区	单观测值分区	叠加区对	具有显著不同的叠加区对占比/%
F1	OPGD	0.148 3	325	60	52 650	—
	IDSA	0.646 5	67	9	2 211	18.72
F2	OPGD	0.222 2	328	66	53 628	—
	IDSA	0.784 6	68	7	2 278	41.70
F3	OPGD	0.063 6	262	40	34 191	—
	IDSA	0.617 7	52	5	1 326	30.84
F4	OPGD	0.201 7	423	94	89 253	—
	IDSA	0.776 1	62	5	1 891	40.61

0.617 7和0.776 1,图 7(d)表明,VIIRS $\cap$ ET $\cap$ NDVI $\cap$ NPP 的空间交互对 F1 的解释力为 57.89%;距开阳磷矿距离 $\cap$ VIIRS $\cap$ 距河流距离的空间交互对 F2 的解释力为 66.01%;人口 $\cap$ EVI $\cap$ ET $\cap$ NPP 的空间交互对 F3 的解释力为 60.99%;VIIRS $\cap$ 距开阳磷矿距离 $\cap$ DEM $\cap$ LAI 的空间交互对 F4 的解释力为 76.41%.

在模型性能评估中,OPGD 模型划分的交互作用区域为 262~423 个,叠加区对数量为 34 191~89 253 对,单观测值分区出现 40~94 个;IDSA 模型划分的交互作用区域为 52~68 个,叠加区对数量为 1 326~2 278 对,单观测值分区出现 5~9 个.此外,IDSA 模型中连续变量的密度曲线[图 7(e)]近似钟形,大部分值聚集在中间区域,叠加区对之间存在显著差异的概率[图 7(f)]在 18.72%~41.70% 之间.

3 讨论

本研究基于空间分异性原理,通过环境因子描述和解释 PMF 模型所解析出各来源的空间分异性,揭示对各源起主导作用的环境因子及其之间的交互作用.先前土壤重金属来源空间分异性的研究大多是基于 GD 或 OPGD 模型来解释变量之间关联^[18~23,45,46].然而,GD 模型基于数据特征和 OPGD 模型基于最大 PD 原则所进行的空间数据离散化仅考虑连续变量分布,忽略解释变量与响应变量之间相关性^[15,17].此外,MAUP 存在于大规模和空间数据明确的任何方面,研究者在评估地理现象时所选空间单元的面积和方法会对统计分析产生影响^[27,30,31,47].MAUP 的分区效应体现在连续变量的离散化水平上,太少和太多的离散化水平分别描述原始数据特征不足和产生过多冗余信息的情况,阻

碍分析和解释^[48]. 有研究表明, 环境因子空间尺度的选取在探讨土壤重金属累积方面非常重要^[10], 遥感数据分辨率与 MAUP 的尺度效应相对应, 不合理的空间单元难以准确响应自然系统的复杂性^[27]. 也有研究表明, 岩溶土壤中微量元素累积的机制复杂, 研究区域规模和边界的具体选择会对导致土壤中微量元素累积主导因子的确定产生影响, 甚至可以极大地改变研究结果^[10]. 由于喀斯特地区土壤的特性, 确定最佳空间单元仍然具有难度. 另一方面, 总是很难确定最佳离散化组合参数, 因为最佳离散化

水平与数据特征和具体研究问题有关^[48]. 研究结果表明, 相对于 GD 和 OPGD 模型, SPADE 和 IDSA 模型明确考虑空间相关性和补偿离散化导致的信息损失, 两者联合使得土壤重金属来源空间分异性的探测结果更稳定和准确. 因此, 本研究设计 14 组数据探究土壤重金属来源分异性研究中的 MAUP 效应应具有明确的科学意义.

已有研究多从历史调查数据中提取环境因子^[10,16,49,50], 结合时序遥感数据进行分析的研究较少. 本研究基于土壤成土因素和前人关于土壤重金

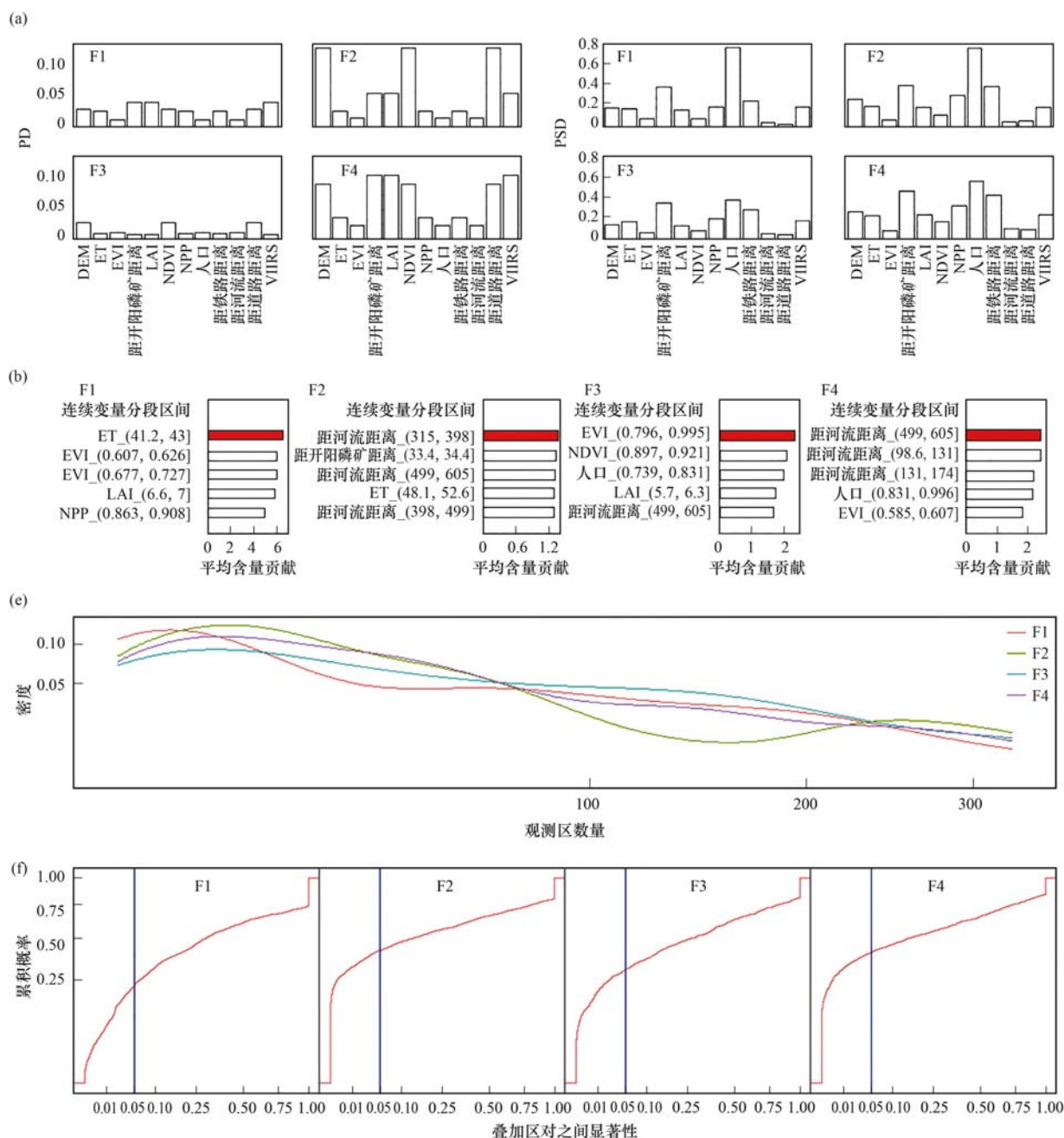
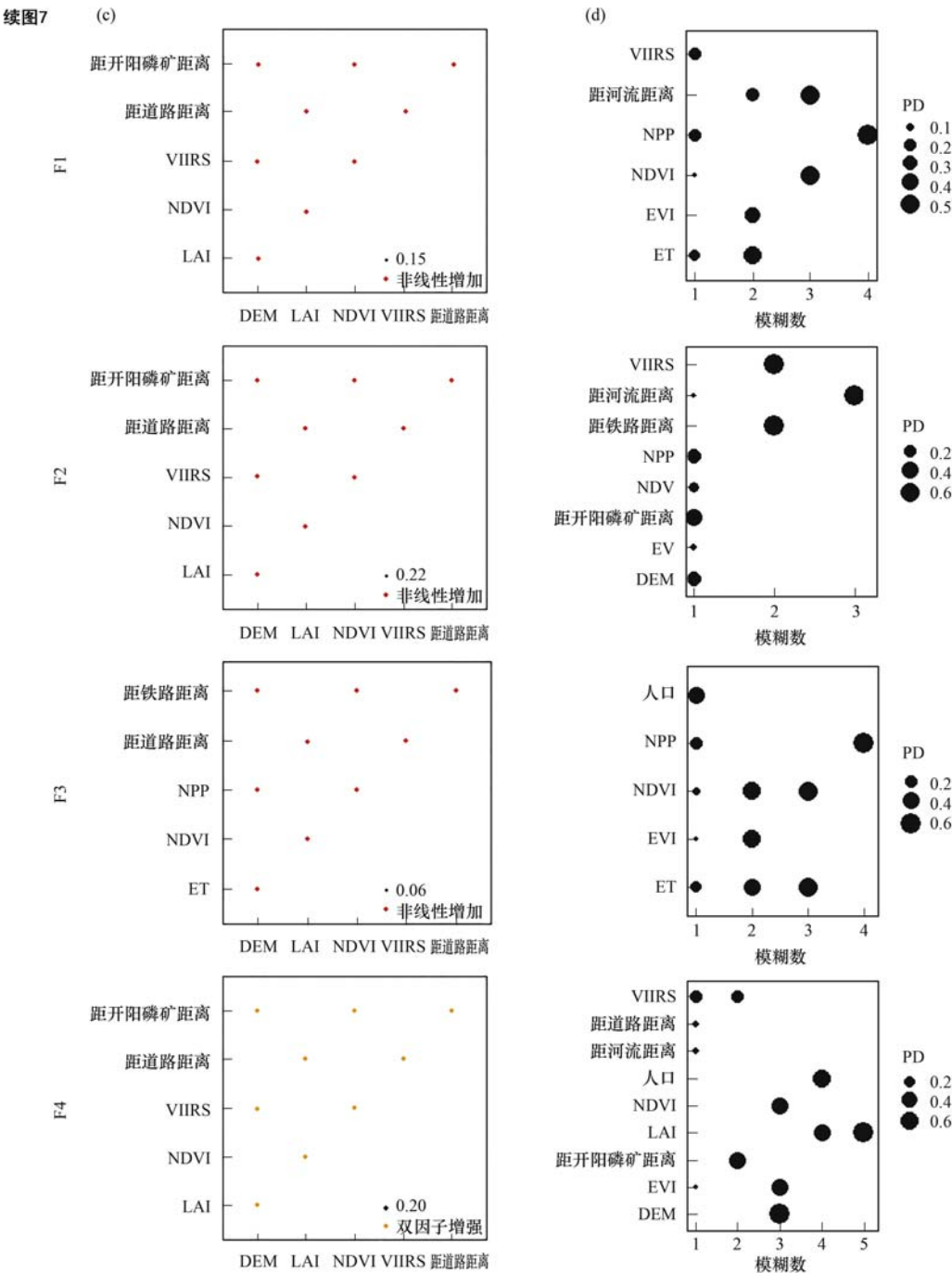


图 7 基于 OPGD、SPADE 和 IDSA 模型的连续变量对土壤重金属来源解释力探测

Fig. 7 Continuous variables based on OPGD, SPADE and IDSA models for soil heavy metal source explanatory power detection



属源解析的研究成果选取环境因子,采用多源数据探测土壤重金属来源的空间分异性,以期补充遥感数据在土壤重金属来源空间分异性研究中的应用。但本研究仍有不足。首先,能够描述土壤性质的因子较少;其次,缺乏农业经营性活动和源清单数据。

对影响土壤重金属来源的主导因子及其交互作用的识别有助于区分重金属的来源和评估其风险^[6,10,22]。研究结果表明,地层、流域、坡度、pH、人口、距开阳磷矿距离和距铁路距离是研究区内导致各来源贡献空间分异的主要因子。有研究表明,喀斯特地区复杂的地质背景导致土壤重金属含量变异大,碳酸盐岩相关地层是最易导致土壤重金属含量

高的因素之一,碎屑岩类岩石在氧化环境下会释放大量元素^[11,33,10]。也有研究表明,喀斯特地区土地利用和流域的交互作用会显著增加土壤侵蚀,从而导致土壤中微量元素随径流发生累积和转移^[10,49]。由连续变量的空间分布可知,PSD 较高的连续变量和土壤重金属来源的空间分布相似。有研究表明,人类活动是影响土壤重金属含量的主要因素,靠近河流和矿区的土壤更易受到人类经营性活动的影响^[6,11]。此外,对风险探测出的高风险区域仍需进一步基于实地情况和结合空间分析进行解释。

由图 7 和表 3 可知,IDSA 模型对各来源贡献迭代计算中所需的连续变量个数分别为 4、3、4 和 5,

其在多变量交互作用中产生单观测值分区的比例为 8.06%~13.43%。研究结果表明其较 OPGD 模型在多变量交互作用的识别过程中更具优势,但在交互作用的估计中仍然存在不确定性。因此,接下来需结合其他更具创新的模糊算子用于空间模糊叠加以及结合机器学习算法、多变量回归和最大熵等模型进一步分析。

4 结论

(1) 基于各空间单元的尺度效应比较,确定本研究最佳空间单元为 0.08 km²。通过分位数法进行的多级离散化结果表明,本研究连续变量的最佳中断数为 10。

(2) 因子探测结果表明,地层和人口分别是分类变量和连续变量中控制土壤重金属来源空间分异的主要驱动因子。

(3) 交互作用探测结果表明,分类变量中地层和流域的空间交互对土壤重金属来源的解释力分别为 F1(58.57%)、F2(49.28%)、F3(27.28%)和 F4(60.61%);连续变量的空间组合对土壤重金属来源空间格局的解释力分别为 F1(64.65%)、F2(78.46%)、F3(61.77%)和 F4(77.61%)。

(4) 风险探测结果表明,分类变量中各来源的高风险区域分别为地层中下震旦系、上白垩系区域、土地利用中采矿用地和土壤种类中典型强淋溶土区域;连续变量中各来源的高风险区域分别为 ET(41.2~43 kg·m⁻²)、距河流距离(315~398 m)、EVI(0.796~0.995)和距河流距离(499~605 m)。

参考文献:

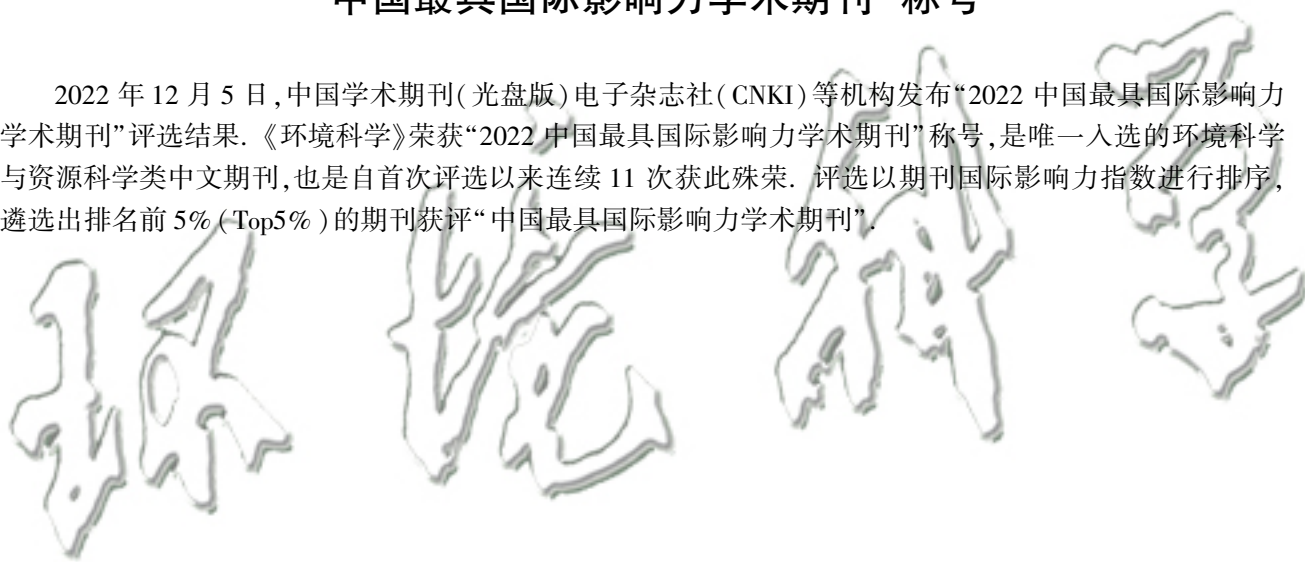
- [1] 沈仁芳, 颜晓元, 张甘霖, 等. 新时期中国土壤科学发展现状与战略思考[J]. 土壤学报, 2020, **57**(5): 1051-1059.
Shen R F, Yan X Y, Zhang G L, *et al.* Status quo of and strategic thinking for the development of soil science in China in the new era[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(5): 1051-1059.
- [2] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, **55**(2): 261-272.
Chen W P, Yang Y, Xie T, *et al.* Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(2): 261-272.
- [3] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(9): 1689-1692.
Chen N C, Zheng Y J, He X F, *et al.* Analysis of the Report on the national general survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(9): 1689-1692.
- [4] 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, **20**(2): 293-298.
Song W, Chen B M, Liu L. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, **20**(2): 293-298.
- [5] 曾思燕, 于昊辰, 马静, 等. 中国耕地表层土壤重金属污染状况评判及休耕空间权衡[J]. 土壤学报, 2022, **59**(4): 1036-1047.
Zeng S Y, Yu H C, Ma J, *et al.* Identifying the status of heavy metal pollution of cultivated land for tradeoff spatial fallow in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, **59**(4): 1036-1047.
- [6] Hou D Y, O'Connor D, Nathanail P, *et al.* Integrated GIS and multivariate statistical analysis for regional scale assessment of heavy metal soil contamination: A critical review [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **231**: 1188-1200.
- [7] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, *et al.* Soil contamination in China: current status and mitigation strategies [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(2): 750-759.
- [8] 农业农村部. 2019 年全国耕地质量等级情况公报[J]. 中华人民共和国农业农村部公报, 2020, (4): 113-121.
- [9] 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**(5): 1-14.
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**(5): 1-14.
- [10] 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.
- [11] 于旦洋, 王颜红, 丁蓁, 等. 近十年来我国土壤重金属污染源解析方法比较[J]. 土壤通报, 2021, **52**(4): 1000-1008.
Yu D Y, Wang Y H, Ding F, *et al.* Comparison of analysis methods of soil heavy metal pollution sources in China in last ten years[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, **52**(4): 1000-1008.
- [12] 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(10): 2219-2238.
CHEN Y L, WENG L P, MA J, *et al.* Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(10): 2219-2238.
- [13] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the detroit region[J]. *Economic Geography*, 1970, **46**(S1): 234-240.
- [14] Odland J. Spatial autocorrelation [EB/OL]. <https://researchrepository.wvu.edu/rri-web-book>, 2020-09-15.
- [15] Cang X Z, Luo W. Spatial association detector (SPADE) [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2018, **32**(10): 2055-2075.
- [16] 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.
- [17] Song Y Z, Wu P. An interactive detector for spatial associations [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2021, **35**(8): 1676-1701.
- [18] 周伟, 李丽丽, 周旭, 等. 基于地理探测器的土壤重金属影响因素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.
- [19] 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): 4566-4577.
- 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): 4566-4577.
- [20] 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.
- [21] 高浩然, 周勇, 刘甲康, 等. 基于EBK插值预测和GDM模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(11): 5180-5191.
- Gao H R, Zhou Y, Liu J K, *et al.* Spatial and temporal distribution and source variation of heavy metals in cultivated land soil of Xiangzhou district based on EBK interpolation prediction and GDM model [J]. Environmental Science, 2022, **43**(11): 5180-5191.
- [22] 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.
- [23] Guo G H, Li K, Zhang D G, *et al.* Quantitative source apportionment and associated driving factor identification for soil potential toxicity elements via combining receptor models, SOM, and geo-detector method [J]. Science of the Total Environment, 2022, **830**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154721.
- [24] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity [J]. Ecological Indicators, 2016, **67**: 250-256.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Dark S J, Bram D. The modifiable areal unit problem (MAUP) in physical geography [J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2007, **31**(5): 471-479.
- [28] 陈江平, 张瑶, 余远剑. 空间自相关的可塑性面积单元问题效应[J]. 地理学报, 2011, **66**(12): 1597-1606.
- Chen J P, Zhang Y, Yu Y J. Effect of MAUP in spatial autocorrelation [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, **66**(12): 1597-1606.
- [29] Ye X, Rogerson P. The impacts of the modifiable areal unit problem (MAUP) on omission error [J]. Geographical Analysis, 2022, **54**(1): 32-57.
- [30] Gao F, Li S Y, Tan Z Z, *et al.* Understanding the modifiable areal unit problem in dockless bike sharing usage and exploring the interactive effects of built environment factors [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2021, **35**(9): 1905-1925.
- [31] Duque J C, Laniado H, Polo A. S-maup: statistical test to measure the sensitivity to the modifiable areal unit problem [J]. PLoS one, 2018, **13**(11), doi: 10.1371/journal.pone.0207377.
- [32] Paatero P, Eberly S, Brown S G, *et al.* Methods for estimating uncertainty in factor analytic solutions [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, **7**(3): 781-797.
- [33] 张宏泽, 崔文刚, 黄月美, 等. 黔中喀斯特地区临近矿区耕地土壤重金属污染评价及其源解析[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(4): 412-421.
- Zhang H Z, Cui W G, Huang Y M, *et al.* Evaluation and source analysis of heavy metal pollution of farmland soil around the mining area of karst region of central Guizhou Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(4): 412-421.
- [34] 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.
- [35] Fischer G, Nachtergaele F, Prieler S, *et al.* Global agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ 2008) [R]. Rome, Italy: IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, 2008.
- [36] Conrad O, Bechtel B, Bock M, *et al.* System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4 [J]. Geoscientific Model Development, 2015, **8**(7): 1991-2007.
- [37] Kong D D, Zhang Y Q, Gu X H, *et al.* A robust method for reconstructing global MODIS EVI time series on the Google Earth Engine [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, **155**: 13-24.
- [38] Luo P, Song Y Z, Huang X, *et al.* Identifying determinants of spatio-temporal disparities in soil moisture of the Northern Hemisphere using a geographically optimal zones-based heterogeneity model [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2022, **185**: 111-128.
- [39] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013, **33**(24): 7853-7862.
- Xu H Q. A remote sensing urban ecological index and its application [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(24): 7853-7862.
- [40] Pagotto C, Rémy N, Legret M, *et al.* Heavy metal pollution of road dust and roadside soil near a major rural highway [J]. Environmental Technology, 2001, **22**(3): 307-319.
- [41] Olaya V, Conrad O. Chapter 12 Geomorphometry in SAGA [J]. Developments in Soil Science, 2009, **33**: 293-308.
- [42] 陈彦光. 基于Moran统计量的空间自相关理论发展和方法改进[J]. 地理研究, 2009, **28**(6): 1449-1463.
- Chen Y G. Reconstructing the mathematical process of spatial autocorrelation based on Moran's statistics [J]. Geographical Research, 2009, **28**(6): 1449-1463.
- [43] Getis A. Spatial interaction and spatial autocorrelation: a cross-product approach [J]. Environment and Planning A: Economy and Space, 1991, **23**(9): 1269-1277.
- [44] Carr D B, Olsen A R, White D. Hexagon mosaic maps for display of univariate and bivariate geographical data [J]. Cartography and Geographic Information Systems, 1992, **19**(4): 228-236.
- [45] 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.
- [46] 陈艺, 蔡海生, 曾君乔, 等. 襄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.
- [47] Openshaw S. Ecological fallacies and the analysis of areal census data[J]. Environment and Planning A: Economy and Space, 1984, **16**(1): 17-31.
- [48] Meng X Y, Gao X, Lei J Q, *et al.* Development of a multiscale discretization method for the geographical detector model[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2021, **35**(8): 1650-1675.
- [49] Liang S Z X, Fang H Y. Quantitative analysis of driving factors in soil erosion using geographic detectors in Qiantang River catchment, Southeast China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, **21**(1): 134-147.
- [50] Ye H, Sun C G, Wang K, *et al.* The role of urban function on road soil respiration responses[J]. Ecological Indicators, 2018, **85**: 271-275.

《环境科学》连续 11 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2022 年 12 月 5 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2022 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2022 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 11 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.



CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i> (1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qì, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i> (1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-ping, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i> (1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i> (1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling (1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i> (1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i> (1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i> (1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i> (1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i> (1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i> (1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i> (1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i> (1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi (1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i> (1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i> (2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i> (2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i> (2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i> (2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i> (2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i> (2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	Ji Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i> (2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i> (2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen (2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i> (2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi (2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i> (2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu (2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i> (2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i> (2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i> (2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i> (2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i> (2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i> (2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i> (2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i> (2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i> (2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i> (2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i> (2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i> (2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i> (2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i> (2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i> (2395)