

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

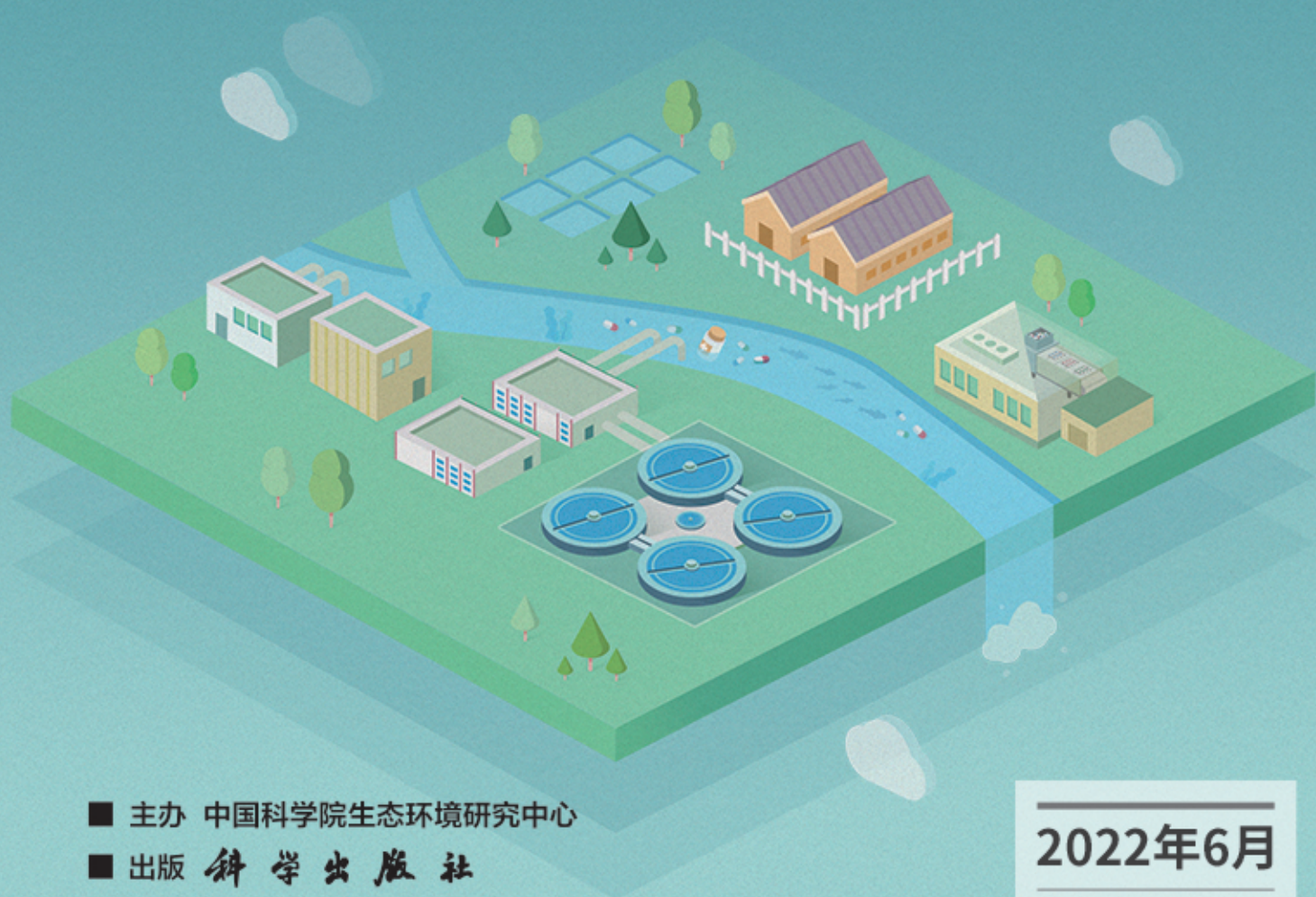
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁铨, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐蘇士, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

南阳盆地东部山区土壤锗分布特征及其影响因素分析

董秋瑶^{1,2}, 赖书雅^{1,2,3*}, 宋超^{1,2}, 温皓天^{1,2,4}, 严明疆^{1,2}, 杨振京^{1,2}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 2. 中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演变重点实验室, 石家庄 050061; 3. 河北地质大学地球科学学院, 石家庄 050030; 4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 基于南阳盆地西南耕地区土地质量地球化学调查成果,对南阳盆地东部山区表层(0~20 cm)土壤及深层(150~200 cm)土壤锗(Ge)的含量情况、空间分布规律和富集特征进行了研究,并对表层土壤 Ge 的影响因素进行分析. 结果表明,南阳盆地东部山区表层和深层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 平均值分别为 $1.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 表层土壤 Ge 土地质量评价等级划分中处于一等丰富等级的点位占比为 12.77%,处于二等较丰富等级的点位占比为 32.22%,其中表层土壤 Ge 含量丰富区主要分布在研究区变质岩发育区和小片的花岗岩发育区. 研究区表层土壤 Ge 变异函数的最优理论模型为球状模型,块金效应值为 0.434,表明表层土壤 Ge 空间自相关性中等,受随机因素和结构性因素的共同影响. 富集因子显示表层土壤 Ge 有 93.61% 的点位主要受自然因素影响,但存在 6.39% 的点位受人为因素影响较大. 研究区土壤 Ge 来源主要受到成土母质的影响,但表层土壤 Ge 的富集主要受到土壤中 Fe、Mn 氧化物、石英和 pH 值的影响.

关键词: 锗(Ge); 土壤; 分布特征; 影响因素; 南阳盆地

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)06-3278-10 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202109093

Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin

DONG Qiu-yao^{1,2}, LAI Shu-ya^{1,2,3*}, SONG Chao^{1,2}, WEN Hao-tian^{1,2,4}, YAN Ming-jiang^{1,2}, YANG Zhen-jing^{1,2}

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China; 2. Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydro-Environmental Evolution, Chinese Geological Survey, Shijiazhuang 050061, China; 3. School of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050030, China; 4. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the land quality geochemical survey results in the southwest cultivated area of Nanyang Basin, the content, spatial distribution, and enrichment characteristics of Ge in surface soil (0-20 cm) and deep soil (150-200 cm) in the eastern mountainous area of Nanyang Basin were studied, and the influencing factors of Ge in the surface soil were analyzed. The results showed that the average $\omega(\text{Ge})$ in the surface soil and deep soil were $1.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $1.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. In the study area, 32.22% of surface soil and 12.77% of surface soil was rich in Ge, and the rich areas of the surface soil Ge were mainly distributed in the metamorphic rock and granite-dominant development areas. The optimal theoretical model of surface soil Ge variogram in the study area was a spherical model, and the nugget effect value was 0.434, indicating that surface soil Ge had moderate spatial correlation due to the joint influence of random factors and structural factors. The enrichment factor showed that 93.61% of Ge sites in the topsoil were mainly affected by natural factors, whereas 6.39% of Ge sites were significantly affected by human factors. The source of Ge in soil in the study area was mainly affected by the parent materials of soil formation, but the enrichment of Ge in surface soil was mainly affected by the Fe, Mn oxides, quartz, and pH in the soil.

Key words: germanium(Ge); soil; distribution characteristics; influencing factors; Nanyang basin

锗(Ge)作为地壳中最分散的元素之一,由德国化学家 Winkler 于 1886 年从硫银锗矿中发现^[1]. 由于其在自然界中含量较低且极为分散,一般很难独立成矿^[2],主要伴生于铜、铅、锌和煤等矿物中^[3,4]. 随着现代科技社会的进步,Ge 在国内外^[5,6]高新技术、工业^[1,7]、军事和医疗^[8,9]等领域中的需求不断扩大. 土壤作为重要的表生环境 Ge 储库,有研究认为富 Ge 植物可以加强对土壤中 Ge 的吸收,进而对植物中 Ge 的提取可以成为供应工业 Ge 的重要方法^[10,11]. 有机 Ge 化合物 Ge-132 及其衍生物,由于对人体毒性低,具有抗癌和提高免疫力等重要作用^[8,9],引起医疗界的重视. 人体可从食物和饮品中摄取有机 Ge,其中植物被认为是摄取有机 Ge

安全且健康的途径^[12],近些年来富 Ge 农产品的开发逐渐热门. 而土壤中 Ge 能显著影响土壤微生物的生态效应^[13],从而影响植物生长状况和生态产品的品质^[14,15],研究土壤中 Ge 的空间变异性,对农业生产具有重要现实意义^[16]. 我国陆续在西藏拉萨河谷^[17]、青海省黄河谷地^[18]、新疆若羌县绿洲区^[19]、重庆^[20]、贵州^[21]、浙江^[22]、广西北部湾^[23]、云南^[16]、黑龙江鸡东县^[24]和河北承德市^[25]等地发现富 Ge 土壤. 如青海地区首次在黄河谷地

收稿日期: 2021-09-11; **修订日期:** 2021-11-01

基金项目: 中国地质调查项目(DD20190532); 国家自然科学基金项目(41877398)

作者简介: 董秋瑶(1984~),女,硕士,助理研究员,主要研究方向为土壤环境地质调查, E-mail: 64965341@qq.com

* 通信作者, E-mail: 245857069@qq.com

发现1 500 km² 富 Ge 及含 Ge 土壤资源区^[26], 张庆华等^[27]通过对黔东南州表层土壤地球化学调查评价工作研究发现, 区内富 Ge 耕地为1 794.30 km². 国内相关学者的研究结果表明, 我国西部土壤 Ge 含量较低^[17~19], 南部沿海^[22,23] 和西南地区^[16,20,21] 土壤 Ge 含量较高, 北方^[25] 和东北地区^[24] 土壤 Ge 平均含量高于西部地区, 却低于南部沿海和西南地区, 以上研究充分说明了土壤 Ge 在我国分布具有空间差异性.

南阳盆地东部山区位于我国南北方分界秦岭-淮河一线上, 地形复杂多样, 农业类型较多, 同时矿产资源种类多. 而针对研究区土壤 Ge 的研究基本没有, 为了查明该地区土壤 Ge 的分布状况, 则需要加强南阳盆地东部山区土壤 Ge 空间分布规律及其影响因素的研究. 因此本研究以南阳盆地西南耕地 1:25 万土地质量地球化学调查数据为基础, 借助相关统计学软件对南阳盆地东部山区表层土壤和深层土壤 Ge 的含量特征进行统计, 对其空间分布规律及其富集特征进行分析, 并对该地区影响表层土壤 Ge 的因素, 如土壤理化性质、土地利用方式、成土母质和土壤类型进行研究讨论, 以期为该地富 Ge 区发展生态绿色经济农业提供参考依据, 以增加农民创收, 同时为我国土壤 Ge 库的建设、研究土壤生态地球化学、加强富 Ge 土地资源评价和促进富 Ge 农产品开发提供支撑.

1 研究区概况

南阳盆地东部山区地理坐标位于北纬 32°27′ ~ 33°33′, 东经 113°04′ ~ 114°38′ 之间, 覆盖面积约 5 000 km² (图 1). 主要涉及河南省南阳市的桐柏县、社旗县和方城县, 平顶山市的舞钢市, 驻马店市的确山县、泌阳县、驿城区、遂平县和西平县^[28]. 研究区位于秦岭-淮河分界线上, 主要受季风控制, 四季分明, 温度适中, 气候湿润, 降雨主要集中在 3 ~ 10 月. 由于研究区地形多变, 因此研究区气候还受垂直地带性控制. 根据成土母质可将研究区划分为花岗岩、中性岩、基性-超基性岩、变质岩、砂-页岩、碎屑-碳酸盐岩和第四系沉积物. 研究区总体地势西高东低, 其中山地、丘陵和洪积平原地貌占绝对优势, 约占全区的 89.5%. 研究区农业和林业发达, 其中林地和旱地约占全区的 72.5%. 土壤类型多样, 其中粗骨土和黄褐土约占全区的 67%, 其他土壤类型相对较少.

2 材料与方法

2.1 样品采集

采集样品时要严格按照多目标区域地球化学调



图 1 研究区位置及样点组合分布示意

Fig. 1 Study area location and sample sites combination distribution diagram

查规范 (1:250 000) (DZ/T 0258-2014) 中土壤地球化学样品采集工作进行^[29]. 采集表层 (0 ~ 20 cm) 土壤样品共 5 521 件, 深层 (150 ~ 200 cm) 土壤样品共 1 504 件. 使用网格化采集农用地表层和深层土壤样品, 采样时使用 GPS 定位, 避开人为污染区, 去除表层枯枝落叶, 表层采集 0 ~ 20 cm 垂直土柱, 每 1 km² 内设置一个采样点, 每个采样点取 3 ~ 5 个垂直土柱混合成一个样品, 深层土壤样品主要采集 150 ~ 200 cm 的垂直土柱, 山区不足 2 m 的土壤, 则采集 120 cm 以下的土壤, 采样密度为 4 km² 一个点. 将采集超过 1 kg 新鲜土壤样品, 进行自然风干, 干燥后样品经加工、过筛后装袋编号, 接下来对加工好的子样品进行混样. 其中表层土壤的子样品要按照每 4 km² 的大格混合成 1 个浅层母样, 共混合浅层母样品 1 378 件, 深层土壤的子样品要按照每 16 km² 混合成 1 个深层母样, 共混合深层样品 376 件, 保证混合后的样品重量 ≥ 200 g 以备送样测试.

2.2 分析测试

采集的土壤样品在河南省岩石矿物测试中心完成测试. 使用 AFS-8330 原子荧光光度计测定土壤 Ge 含量, 使用 PHS-3C 离子选择电极测定土壤 pH, 使用 ZSXPrimus II 射线荧光光谱仪测定土壤 SiO₂、TF₂O₃ 和 Al₂O₃ 的含量, 使用 HCS878A 碳硫仪测定土壤样品的 Corg, 使用 iCAP6300 Radial 等离子体发射光谱仪测定土壤 Mn、CaO 和 MgO 的含量. 其中 Ge、pH、SiO₂、TF₂O₃、Al₂O₃、Corg、Mn、CaO 和 MgO 按区域地球化学样品分析方法 (DZ/T 0279-2016) 的检验规程进行分析检测^[30], 各分析方法的检出限见表 1, 元素分析方法的各种质量指标均达到或优于多目标区域地球化学调查规范 (1:250 000) (DZ/T 0258-2014) 的要求^[29].

表 1 各项指标分析方法检出限要求/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Detection limit requirements of each index

analysis method/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			
元素	检出限	元素	检出限
Ge	0.1	C_{org}	0.1×10^{-2}
Cd	0.03	SiO_2	0.1×10^{-2}
Pb	2	MgO	0.05×10^{-2}
Zn	4	Al_2O_3	0.05×10^{-2}
Ni	2	TFe_2O_3	0.05×10^{-2}
Cu	1	Mn	10×10^{-2}
As	1	CaO	0.05×10^{-2}
Cr	5	pH(无量纲)	0.01
Hg	0.005		

2.3 数据处理

使用 EXCEL 进行数据处理,使用 SPSS 23.0 软件对南阳盆地东部山区的表层土壤和深层土壤数据及评价结果描述性统计分析,分析内容包括最大值、最小值、平均值、标准差、中位数和变异系数,以及相关性等.使用 GS + 软件进行半方差分析,以确定最优的理论半方差模型,获得反距离权重法插值的最优参数;采用 ArcGIS 10.6 软件的反距离权重法进行插值分析,得到表层土壤 Ge 和深层土壤 Ge 空间分布特征图.并使用 ArcGIS 10.6 软件的空间链接功能进行研究区土壤 Ge 富集特征研究等.

3 结果与讨论

3.1 土壤 Ge 统计特征

南阳盆地东部山区表层和深层土壤(1 378 个)的 Ge 统计特征如表 2 所示.结果表明,表层土壤 Ge 变化范围为 $1.09 \sim 2.19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值为 $1.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,中值为 $1.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.深层土壤 Ge 含量总体略高于表层土壤,变化范围为 $1.16 \sim 2.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值为 $1.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,中值为 $1.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.表层土壤 Ge 的偏度和峰度分别为 1.12

和 5.10,深层土壤 Ge 的偏度和峰度分别为 0.89 和 4.62.表层土壤 Ge 的变异系数为 8.26%,深层土壤 Ge 的变异系数为 7.46%,均属于弱变异性.与河南省 A 层^[31]和全国 A 层土壤背景值相比^[31](表 2),研究区表层土壤 Ge 含量低于河南 A 层和中国 A 层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 平均值为 $1.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,但高于我国西部地区表层土壤 Ge 含量,如青海东部地区^[18]表层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 平均值为 $1.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,若羌县^[19]表层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 平均值为 $1.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,拉萨河流域曲水一带^[17,32]表层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 平均值为 $1.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.却低于我国南方地区表层土壤 Ge 含量,如贵州兴仁市^[33]耕地土壤中 $\omega(\text{Ge})$ 平均值为 $1.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,云南省广南县^[16]表层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 平均值为 $1.648 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,浙江常山县^[22]表层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 平均值为 $1.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,广西钟山县和浦北县^[34,35]表层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 平均值分别为 $1.55 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

3.2 土壤 Ge 空间分布特征

3.2.1 半方差分析

本研究分别运用半方差函数中的球状、指数和高斯模型对南阳盆地东部山区表层土壤 Ge 的含量值进行拟合(表 3 和图 2).通过比较 3 种拟合结果可以得到,表层土壤 Ge 球状模型的决定系数为 0.904,残差为 $9.56\text{E}-06$,表现为决定系数最大,残差最小,因而选用球状模型的拟合结果来反映其空间变异性特征.表层土壤 Ge 球状模型中的块金值为 0.006 57,说明采样密度合适,能够充分反映其空间状况^[36].块金效应为 0.434,在 0.25 ~ 0.75 范围内^[37],表明表层土壤 Ge 空间自相关性中等,受随机因素和结构性因素的共同影响,即表层土壤 Ge 除受结构性因子中成土母质、地形和土壤类型的影响外,人类活动而造成的元素迁移等随机因素也起

表 2 表层和深层土壤 Ge 描述性统计($n=1\ 378$)

Table 2 Descriptive statistics of Ge in surface and deep soils($n=1\ 378$)

类别	样品数	平均值 $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最小值 $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值 $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	中值 $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	偏度	峰度	变异系数 /%	河南省 A 层 土壤背景值 $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	中国 A 层土壤 背景值 $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
表层土壤	1 378	1.39	1.09	2.19	1.39	1.12	5.10	8.26	1.70	1.70
深层土壤	376	1.44	1.16	2.06	1.45	0.89	4.62	7.46	— ¹⁾	—

1) “—”表示没有相关数据

表 3 表层土壤 Ge 的理论半方差模型及参数

Table 3 Theoretical semivariance model and parameters of surface soil Ge

模型	块金值 (C_0)	基台值 ($C_0 + C$)	块金效应 [$C_0/(C_0 + C)$]	变程/m	决定系数 (R^2)	残差 (RSS)
球状模型	0.006 57	0.015 14	0.434	32 400	0.904	$9.56\text{E}-06$
指数模型	0.004 3	0.015 1	0.285	29 400	0.885	$1.15\text{E}-05$
高斯模型	0.007 52	0.015 14	0.497	26 500	0.888	$1.13\text{E}-05$

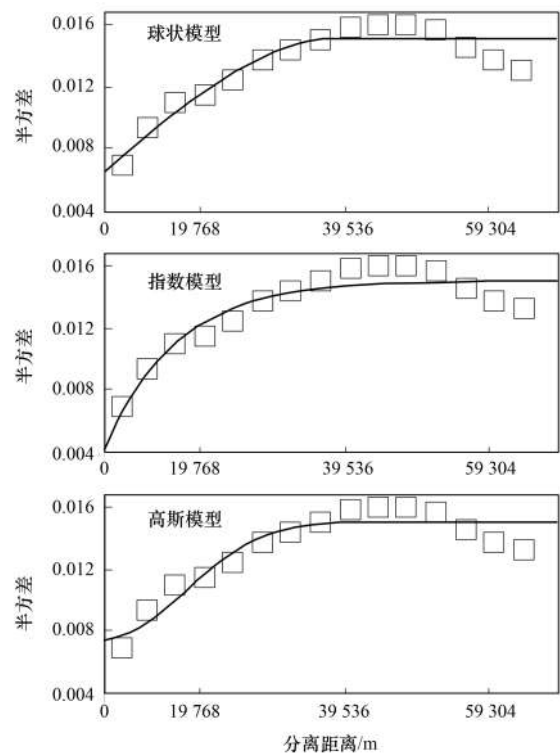


图2 研究区表层土壤Ge的半方差函数

Fig. 2 Semivariance function diagram of surface soil Ge in the study area

到了一定的作用^[12]. 表层土壤Ge的变程为32 400 m,表明土壤Ge空间相关性的最大距离为32.4 km,可以看出表层土壤Ge的变程比较大,这说明表层土壤Ge分布相对比较稳定.

3.2.2 空间分布

运用 ArcGIS 10.6 中的反距离权重法插值,得到的南阳盆地东部山区表层和深层土壤Ge空间分布状况.从图3和图4中可以看出,表层和深层土壤Ge空间分布高度吻合,含量高值区主要分布在研究区西北、东北角和中南部地区,呈岛状和带状分布.根据土地质量地球化学评价规范(DZ/T 0295-2016)中养分等级划分标准将表层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 划分为5个等级(表4),即:缺乏($\leq 1.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、较缺乏($1.2 \sim 1.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、中等($1.3 \sim 1.4$

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、较丰富($1.4 \sim 1.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和丰富($> 1.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[37].如表4所示,研究区表层土壤Ge含量土地质量地球化学等级划分中,缺乏占比为3.48%,较缺乏占比为13.35%,中等等级占比为38.17%,较丰富和丰富占比分别为32.22%和12.77%.其中表层和深层土壤Ge含量丰富区主要分布在研究区南部变质岩发育区(图5),以及小片的花岗岩发育地区,且空间分布不均.同时由前面分析结果可知,深层土壤Ge含量高于表层,且空间分布吻合,而且与某些岩性的分布也相对吻合,说明成土母质对Ge的影响较为明显.

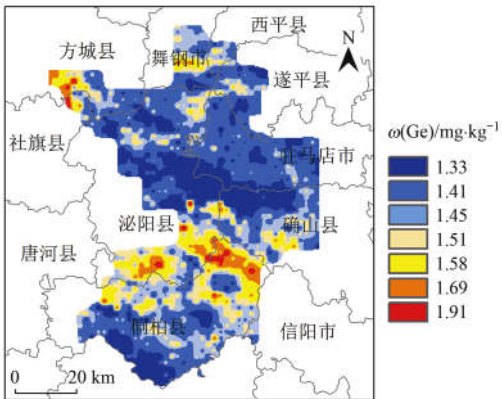


图3 研究区表层土壤Ge空间分布

Fig. 3 Ge spatial distribution of surface soil in the study area

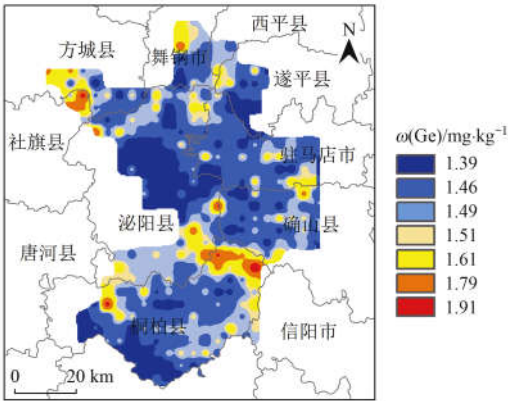


图4 研究区深层土壤Ge空间分布

Fig. 4 Ge spatial distribution of deep soil in the study area

表4 土地质量评价表层土壤Ge等级划分标准

Table 4 Ge grade classification standard for surface soil of land quality evaluation					
指标	一等 (丰富)	二等 (较丰富)	三等 (中等)	四等 (较缺乏)	五等 (缺乏)
$\omega(\text{Ge})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	> 1.5	$1.4 \sim 1.5$	$1.3 \sim 1.4$	$1.2 \sim 1.3$	≤ 1.2
占比/%	12.77	32.20	38.17	13.35	3.48

3.3 土壤Ge富集特征

富集因子是土壤或沉积物中元素的含量与背景中元素的含量进行比较,来判断表生环境中元素受人类活动影响而造成的富集情况^[38],在对富集因子

的计算中常常引入参比元素,目的是为了减小环境和样品加工过程中对元素含量造成的影响^[39],计算公式为:

$$EF = (C_i/C_n)_{\text{sample}} / (D_i/D_n)_{\text{background}}$$

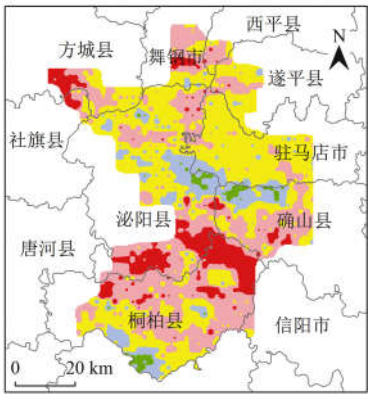


图5 土地质量评价 Ge 等级空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of Ge grade in land quality evaluation

式中, C_i 为土壤元素 i 的实测值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); C_n 为土壤中参比元素的实测值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 通常采用的参比元素有 Al、Fe、Li 和 Ti, 本研究选用表生作用中性质较为稳定的 Ti 元素作为参比元素值; D_i 为河南省 A 层土壤 Ge 背景值, D_n 为河南省 A 层参比元素的背景值. 不同学者对 EF 值划分标准不同, 其中 Fergusson 划分标准为, 当 $\text{EF} < 1$ 时, 则表明该元素主要来自地壳风化, 受自然因素影响较大; 当 $\text{EF} > 1$ 时, 则表明该元素受人类活动影响较大^[40]. 而 Sutherland 将其分为 5 个级别, 即: $\text{EF} < 2$, 无或轻度富集(无-轻度污染)、 $2 \leq \text{EF} < 5$, 中度富集(中度污染)、 $5 \leq \text{EF} < 20$, 显著富集(较强污染)、 $20 \leq \text{EF} < 40$, 强烈富集(强污染)和 $\text{EF} \geq 40$, 极强富集(极强污染)^[41].

因此本文将结合 Fergusson^[40] 和 Sutherland^[41] 的标准对富集因子进行等级划分, 共划分为 6 个等级, 如表 5 所示. 结果显示, 研究区表层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 富集因子均值为 0.82, 基本属于自然状态, 变化范围为 0.35 ~ 1.61, 变异系数为 13.12%, 属于中等偏弱变异, 表明还存在局部区域的样点可能受到人类活动的影响. 其中 $\text{EF} < 1$ 的点位约占 93.61%, 表明这些点位主要受自然因素影响; 有 6.39% 的点位 EF 位于 1 ~ 2 之间, 说明这些点位存在轻度富集, 即受人类活动影响较大. 空间分布图中显示(图 6), 大部分地区的表层土壤 Ge 处于背景水平, 占地面积

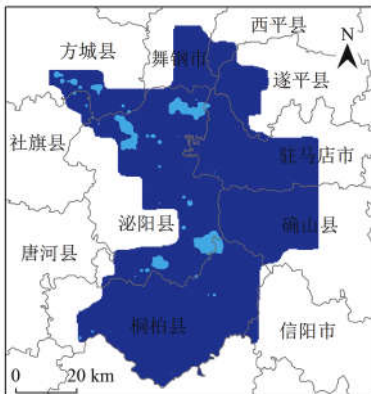


图6 研究区表层土壤 Ge 富集因子空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of Ge enrichment factors in surface soil of the study area

约 5253.39 km^2 , 轻度富集的土壤主要分布于泌阳县北部和南部, 占地面积约 358.61 km^2 . 研究区表层土壤 Ge 中度富集、重度富集、严重富集和极重富集区所占比例为 0.

3.4 土壤 Ge 的影响因素

3.4.1 土壤理化性质分析

Ge 是地壳中典型的分散元素, 其地球化学性质和后期地质作用的多样性, 决定了研究土壤 Ge 分布的影响因素是困难的^[18]. 土壤理化性质是影响土壤 Ge 分布的一个重要因素, 将研究区内 8 个主要重金属元素、铁锰氧化物、pH 值、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 C_{org} 、CaO 和 MgO 与表层土壤 Ge 进行相关性分析. 结果如表 6 所示, 表层土壤 Ge 与重金属 Cr、Ni 和 Cu 呈显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与 TFe_2O_3 、Mn 和 MgO 呈显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与 SiO_2 和 C_{org} 呈显著负相关关系 ($P < 0.01$), 与 As、pH 值和 CaO 呈较弱正相关关系 ($P < 0.01$), 与 Hg、Cd、Pb、Zn 和 Al_2O_3 不存在显著的相关性.

Ge 具有亲石、亲铁、亲硫等多重地球化学性质^[42], 同时 Fe、Ni、Cr 和 Mn 为亲铁元素, Cu 为亲硫元素, 同类元素在表生地球化学上具有一定共性^[43], 因而表层土壤 Ge 与 Cr、Ni、Cu、 TFe_2O_3 、Mn 具有显著相关性. TFe_2O_3 对 Ge 含量的影响主要归因于土壤中次生含 Fe 矿物^[1], 或者土壤中无定形 Fe(III) 的氧化物/氢氧化物可以直接吸附 Ge 从而形成共沉淀^[44,45]. 土壤 SiO_2 与 Ge 含量的负相关关系可能与土壤中石英的存在有关, 而土壤中的石英是典型的贫 Ge 矿物^[46], 石英的富集会导致微量元素含量降低^[47,48], 因此石英含量的增加可能是导致土壤 Ge 含量降低的主要因素. 表层土壤 Ge 与 Al_2O_3 之间不存在相关性, 这与段铁仁等^[23] 的研究是相反的, 可能是在后期地质、地球化学作用下, 二者发生了分离, 因而不具有相关性. 虽然 Ge 具有亲

表5 研究区表层土壤 Ge 富集程度分类及面积

Table 5 Classification and area of Ge enrichment in topsoil of the study area

EF	富集程度	比例/%	面积/ km^2
<1	背景(基本自然状态)	93.61	5253.39
1~2	轻度富集	6.39	358.61
2~5	中度富集	0.00	0.00
5~20	重度富集	0.00	0.00
20~40	严重富集	0.00	0.00
>40	极重富集	0.00	0.00

有机质性,但研究区表层土壤 Ge 与 C_{org} 之间呈负相关关系,表层土壤 Ge 含量会随着 C_{org} 的升高而降低,这与袁宏等^[32]的研究是相反的。

根据中国土壤碱度分级(表 7),将研究区表层土壤按照 pH 大小分为强酸性(<5.0)、酸性(5.0~6.5)、中性(6.5~7.5)和碱性(7.5~8.5),分别占研

究区组合样点数的 12.63%、75.76%、10.16% 和 1.45%,表层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 平均值由强酸性到碱性分别为 1.359、1.394、1.435 和 1.418 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。同时研究区表层土壤 Ge 与 pH 呈正相关性,可以看出表层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 平均值是随着 pH 值的升高而缓慢增加,表明随着 pH 值的升高是有利于表层土壤 Ge 的富集。

表 6 研究区表层土壤 Ge 相关性分析¹⁾
Table 6 Correlation analysis of surface soil Ge in the study area

元素	相关系数	元素	相关系数	元素	相关系数	元素	相关系数
As	0.134 **	Pb	0.019	TFe_2O_3	0.369 **	SiO_2	-0.210 **
Hg	0.006	Zn	0.064	Mn	0.401 **	C_{org}	-0.219 **
Cd	0.026	Ni	0.341 **	pH	0.199 **	CaO	0.171 **
Cr	0.301 **	Cu	0.375 **	Al_2O_3	0.094 **	MgO	0.310 **

1) ** 表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著; * 表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著

表 7 不同 pH 分级下表层土壤 Ge 含量特征值
Table 7 Characteristic values of Ge content in surface soil with different pH values

项目	强酸性 (<5.0)	酸性 (5.0~6.5)	中性 (6.5~7.5)	碱性 (7.5~8.5)	强碱性 (>8.5)
样品数	174	1 044	140	20	0
占比/%	12.63	75.76	10.16	1.45	0
$\omega(\text{Ge})$ 平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.359	1.394	1.435	1.418	0

3.4.2 成土母质分析

母质作为土壤形成的重要基础,土壤特性发生较大变异是由不同母质作用的结果^[19,20]。研究区划分出花岗岩、中性岩、基性-超基性岩、变质岩、砂-页岩、碎屑-碳酸盐岩和第四系沉积物共 7 类母质岩石类型单元(表 8 和图 7)。由表 8 可知,表层土壤不同成土母质类型发育的 $\omega(\text{Ge})$ 变化范围为 1.365~1.495 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,表现为:基性-超基性岩>中性岩>碎屑-碳酸盐岩>变质岩>砂-页岩>第四系沉积物>花岗岩。深层土壤不同成土母质类型发育的 $\omega(\text{Ge})$ 变化范围为 1.427~1.471 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,表现为:

变质岩>中性岩>碎屑-碳酸盐岩>基性-超基性岩>第四系沉积物>砂-页岩>花岗岩。不同成土母质区表层和深层土壤 Ge 平均含量差异变化较小,除变质岩母质区中表层和深层土壤为中等变异程度,其余母质区发育的土壤变异系数均为弱变异,并且研究区内不同成土母质岩石类型发育的表层土壤并未表现为显著低 Ge 特征,可能与 Ge 的表生地球化学行为有关。可能是在表生环境下大多数原生含 Ge 矿物活动性较强而稳定性较低,通常以 Ge^{4+} 状态被淋滤进入水中^[49]。同时 Ge 在表生环境下易随表生溶液迁移,其迁移距离较远^[50]。刘道荣^[22]的研究认

表 8 不同成土母质发育的土壤 Ge 含量特征
Table 8 Characteristics of Ge content in soils with different parent materials

类别	成土母质	平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最小值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	中位数 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数 /%
表层土壤	花岗岩	1.365	1.095	1.986	1.361	0.118	9
	中性岩	1.444	1.208	1.788	1.443	0.092	6
	基性-超基性岩	1.495	1.36	1.682	1.5	0.112	8
	变质岩	1.419	1.086	2.193	1.408	0.182	13
	砂-页岩	1.386	1.153	1.612	1.399	0.089	6
	碎屑-碳酸盐岩	1.425	1.13	2.082	1.417	0.112	8
	第四系沉积物	1.379	1.195	1.649	1.373	0.068	5
深层土壤	花岗岩	1.427	1.180	1.880	1.435	0.121	9
	中性岩	1.454	1.340	1.580	1.460	0.051	4
	基性-超基性岩	1.440	1.420	1.470	1.430	0.026	2
	变质岩	1.471	1.190	2.060	1.460	0.164	11
	砂-页岩	1.432	1.330	1.510	1.410	0.060	4
	碎屑-碳酸盐岩	1.443	1.240	1.810	1.450	0.085	6
	第四系沉积物	1.438	1.160	1.700	1.450	0.084	6

为可能是这种远距离迁移作用导致 Ge 在各母质区中相对均一化. 有研究表明 Ge 在超基性岩到酸性岩中的丰度几乎没有变化^[51], 表明 Ge 作为一种典

型的分散元素, 岩浆作用过程对 Ge 的富集作用并不明显^[52].

3.4.3 土地利用类型分析

不用土地利用类型作为自然环境和人为耕作综合作用的产物, 对土壤肥力的影响是不可忽视的, 土地利用方式和土壤理化性状之间的联系较为密切^[53]. 人为作用下耕作制度、肥料种类和农业管理等不同, 可能会导致土壤中 Ge 的含量不同^[19]. 全区主要划分为水田、旱地、林地、草地和裸地这 5 种土地利用类型, 其中旱地和林地分布面积较大, 分别占研究区面积的 32.37% 和 40.13%. 由表 9 可以看出, 不同土地利用类型表层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 平均值变化范围为 $1.383 \sim 1.424 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表现为: 裸地 > 草地 > 水田 > 林地 > 旱地. 研究区内不同土地利用类型从变异程度来看, 变异系数均小于 10%, 表明均属弱空间变异性.

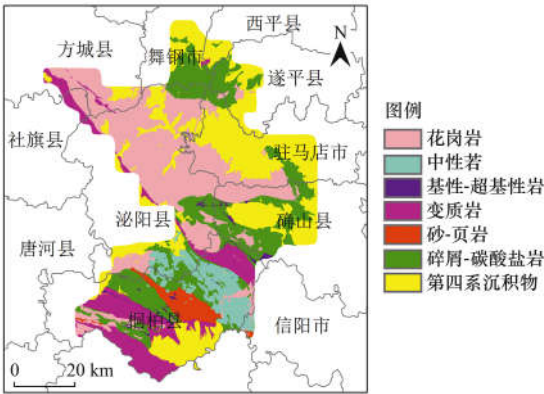


图 7 研究区主要成土母质分布状况
Fig. 7 Distribution of main soil parent materials in the study area

表 9 不同土地利用类型表层土壤 Ge 描述性统计

Table 9 Ge descriptive statistics of surface soil of different land use types						
土地利用类型	平均值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最小值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最大值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	中位数 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准差 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	变异系数 /%
水田	1.398	1.260	1.552	1.397	0.051	4
旱地	1.383	1.150	2.193	1.371	0.094	7
林地	1.389	1.095	2.082	1.388	0.136	9
草地	1.416	1.086	1.732	1.409	0.108	8
裸地	1.424	1.195	1.697	1.426	0.105	7

3.4.4 农业地貌分析

全区划分出山地、丘陵、台地、洪积平原和河谷平原共 5 类地貌类型. 山地和丘陵发育土壤主要为粗骨土和黄棕壤性土, 土地利用类型为林地、草地和裸地. 台地主要为黄褐土性土, 土地利用类型为林地和草地. 河谷和洪积平原为黄褐土、灰潮土和水稻土, 土地利用类型为旱地和水田, 该类成土母质主要是第四系沉积物, 受人类活动影响较大.

其中山地、丘陵和洪积平原分布面积较大, 分别占研究区面积的 21.70%、35.99% 和 31.86%. 由表 10 可以看出, 不同土地利用类型表层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 平均值变化范围为 $1.366 \sim 1.415 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表现为: 丘陵 > 河谷平原 > 洪积平原 > 台地 > 山地. 研究区内不同地貌类型从变异程度来看, 山地类型下土壤 Ge 属于中等程度空间变异, 其他均属弱空间变异性.

表 10 不同地貌类型表层土壤 Ge 描述性统计

Table 10 Descriptive statistics of surface soil Ge for different geomorphic types						
地貌类型	平均值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最小值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最大值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	中位数 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准差 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	变异系数 /%
山地	1.366	1.086	2.193	1.356	0.150	11
丘陵	1.415	1.120	2.011	1.403	0.114	8
台地	1.383	1.253	1.572	1.374	0.063	5
洪积平原	1.392	1.130	2.082	1.389	0.092	7
河谷平原	1.404	1.208	1.732	1.403	0.103	7

3.4.5 土壤类型分析

全区共包含粗骨土、黄褐土、黄褐土性土、黄棕壤性土、灰潮土、石灰土和水稻土这 7 种类型的土壤, 其中分布最广泛的是粗骨土和黄褐土, 分别占研究区总面积的 33.16% 和 33.96%. 粗骨土、黄棕

壤性土和石灰土分布范围较广, 主要分布在研究区侵蚀剥蚀中、低山和丘陵地带, 以林业用地为主. 黄褐土、黄褐土性土和灰潮土多发育于水流长期冲刷沉积和冲洪积相互交错地带, 主要分布在研究区北部和边缘地区, 以旱地为主. 水稻土是经过人工熟化

的土壤,分布在研究区南部洪积平原为主和小部分河谷平原的区域,以种植水稻为主. 研究区不同土壤类型中土壤 Ge 元素含量统计显示(表 11),表层土壤中不同类型土壤 $\omega(\text{Ge})$ 平均值变化范围为 $1.370 \sim 1.407 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表现为:黄棕壤性土 < 黄褐土性土 < 灰潮土 < 水稻土 < 粗骨土 < 黄褐土 < 石灰土. 表层土壤 Ge 元素含量在不同类型土壤的

平均值均达到 Ge 中等至较丰富的等级($1.3 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),其中黄褐土和石灰土 $\omega(\text{Ge})$ 平均值均达到 $1.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,达到较丰富土壤 Ge 的等级. 各类土壤 Ge 平均含量之间差异不显著. 由表 11 可知,研究区内不同类型土壤从变异程度来看,粗骨土属于中等程度空间变异,其他均属弱空间变异性.

表 11 不同土壤类型表层土壤 Ge 描述性统计

Table 11 Ge descriptive statistics of surface soil of different soil types						
土壤类型	平均值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最小值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最大值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	中位数 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准差 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	变异系数 /%
粗骨土	1.395	1.086	2.193	1.393	0.140	10
黄褐土	1.402	1.119	2.082	1.394	0.101	7
黄褐土性土	1.379	1.095	1.949	1.359	0.125	9
黄棕壤性土	1.370	1.113	1.622	1.356	0.111	8
灰潮土	1.387	1.130	1.570	1.377	0.085	6
石灰土	1.407	1.119	1.620	1.414	0.088	6
水稻土	1.392	1.225	1.589	1.391	0.068	5

3.5 土壤 Ge 开发利用前景评价

富 Se 产品已经在全国各地打开市场并走向世界,而富 Ge 土地和富 Ge 产品的开发利用需要加强,并进一步打开市场走向国门. 目前富 Ge 产品发展前景巨大,如富 Ge 大米、富 Ge 水果、富 Ge 鸡蛋、富 Ge 中药材和富 Ge 饮品等相继出现在市场上,且市场价较高. 如辽宁盘锦“富 Ge 有机大米”以高出市场近 10 倍的价格卖到 $80 \sim 100 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$,四川曹家香的“曹家富 Ge 贡梨”更是以 $28 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的价格出售到国内外. 通过对我国土壤 Ge 的空间分布状况和富集因素进行研究,对富 Ge 土地和农产品的开发具有重要意义.

南阳盆地东部山区表层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 变化范围为 $1.09 \sim 2.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值为 $1.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,深层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 变化范围为 $1.16 \sim 2.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值为 $1.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,根据土地质量地球化学评价规范(DZ/T 0295-2016)中对表层土壤 Ge 养分状况划分的标准(表 4),其中处于二等(较丰富)等级的表层土壤 Ge 占比达到 32.20%,占地面积约为 $1\,807 \text{ km}^2$,处于一等(丰富)等级的 Ge 占比为 12.77%,占地面积约为 717 km^2 . 根据图 5 显示,一等即土壤 Ge 含量丰富区主要分布在研究区方城县的二郎庙乡、社旗县的下洼乡、舞钢市的扬库乡和尹集镇、泌阳县的铜山乡南部、盘古乡和马古田镇,以及桐柏县的安集镇和回龙乡,尤其是桐柏县回龙乡整个乡镇 Ge 含量非常丰富. 一等土壤 Ge 含量丰富区现阶段土地利用类型主要以林地和旱地为主,主要地貌类型有低山、丘陵、河谷平原和洪积平原. 因此富 Ge 区开发土地资源,发展生态农业时要因地制宜.

4 结论

(1)南阳盆地东部山区表层和深层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 平均值分别为 $1.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,表层和深层土壤 Ge 均属于弱空间变异性. 表层土壤 Ge 含量低于河南省 A 层和中国 A 层土壤 Ge 背景值,但高于我国西部,低于我国南部沿海和西南地区土壤 Ge 含量平均值. 半方差分析结果显示,球状模型作为表层土壤 Ge 的最优理论模型,块金效应值为 0.434,表明具有中等程度的空间自相关性.

(2)表层和深层土壤 Ge 含量高值区分布基本吻合,深层土壤 Ge 含量均值高于表层,并且表层和深层土壤 Ge 含量丰富区主要分布在研究区变质岩发育区,以及小片的花岗岩发育地区,且空间分布不均,表明土壤 Ge 来源主要受成土母质的影响. 表层土壤 Ge 含量土地质量地球化学等级划分中,缺乏占比 3.48%,较缺乏占比 13.35%,中等等级占比 38.17%,其中达到较丰富水平的面积为 $1\,807 \text{ km}^2$,占比达到 32.20%,达到丰富水平的面积为 717 km^2 ,占比 12.77%. 桐柏县回龙乡整个乡镇 Ge 含量等级处于一等丰富,很有开发利用价值.

(3)研究区表层土壤 $\omega(\text{Ge})$ 富集因子均值为 0.82,变化范围为 $0.35 \sim 1.61$,变异系数为 13.12%,属于中等偏弱变异,表明还存在局部区域样点的富集可能受到人类活动的影响. 其中 $EF < 1$ 的点位约占比 93.61%,表明这些点位主要受自然因素影响;有 6.39%的点位 EF 位于 $1 \sim 2$ 之间,说明这些点位存在轻度富集,即受人类活动影响较大.

(4)土壤理化性质、成土母质、地貌、土地利

用类型和土壤类型均是影响土壤 Ge 的因素. 不同成土母质、地貌、土地利用类型和土壤类型之间 Ge 含量平均值变化不明显, 可能是 Ge 的远距离迁移作用而导致其含量较为均一化. 土壤理化性质分析结果显示, 表层土壤 Ge 的富集主要受土壤中 Fe、Mn 氧化物、石英和 pH 值的影响.

参考文献:

- [1] Höll R, Kling M, Schroll E. Metallogenesis of germanium—a review[J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, **30**(3-4): 145-180.
- [2] Frenzel M, Ketris M P, Gutzmer J. On the geological availability of germanium[J]. *Mineralium Deposita*, 2014, **49**(4): 471-486.
- [3] 黄少青, 张建强, 张恒利. 东北赋煤区煤中锗元素分布特征及富集控制因素[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, **46**(3): 6-10.
Huang S Q, Zhang J Q, Zhang H L. Distribution and controlling factors of enrichment of germanium in coal-bearing region of Northeast China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, **46**(3): 6-10.
- [4] 王乾, 安匀玲, 顾雪祥, 等. 康滇地轴东缘典型铅锌矿床伴生分散元素镉锗镓赋存状态与富集规律研究[J]. *地球与环境*, 2010, **38**(3): 286-294.
Wang Q, An Y L, Gu X X, *et al.* The research of occurrence state and enrichment law of associated dispersed elements Cd, Ge and Ga of typical lead-zinc deposits in the eastern edge of Kangdian Axis, China[J]. *Earth and Environment*, 2010, **38**(3): 286-294.
- [5] 姬丙艳, 许光, 姚振, 等. 锗的研究进展及开发前景[J]. *中国矿业*, 2016, **25**(S1): 22-24.
Ji B Y, Xu G, Yao Z, *et al.* The advancement and development prospect of germanium[J]. *China Mining Magazine*, 2016, **25**(S1): 22-24.
- [6] Wiche O, Székely B, Moschner C, *et al.* Germanium in the soil-plant system—a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(32): 31938-31956.
- [7] Négrel P, Ladenberger A, Reimann C, *et al.* GEMAS: source, distribution patterns and geochemical behaviour of Ge in agricultural and grazing land soils at European continental scale[J]. *Applied Geochemistry*, 2016, **72**: 113-124.
- [8] Dobrzyński D, Boguszevska-Czubara A, Sugimori K. Hydrogeochemical and biomedical insights into germanium potential of curative waters: a case study of health resorts in the Sudetes Mountains (Poland)[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, **40**(4): 1355-1375.
- [9] Wada T, Hanyu T, Nozaki K, *et al.* Antioxidant activity of Ge-132, a synthetic organic germanium, on cultured mammalian cells[J]. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 2018, **41**(5): 749-753.
- [10] Wiche O, Heilmeier H. Germanium (Ge) and rare earth element (REE) accumulation in selected energy crops cultivated on two different soils[J]. *Minerals Engineering*, 2016, **92**: 208-215.
- [11] Wiche O, Zertani V, Hentschel W, *et al.* Germanium and rare earth elements in topsoil and soil-grown plants on different land use types in the mining area of Freiberg (Germany)[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, **175**: 120-129.
- [12] 刘艳娟. 贵州省沿河县土壤及特色农产品硒锌锗调查研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009.
- [13] 林匡飞, 徐小清, 郑利, 等. 土壤锗污染对土壤微生物的生态毒理效应[J]. *土壤学报*, 2005, **42**(2): 266-269.
Lin K F, Xu X Q, Zheng L, *et al.* Ecological effects of germanium-pollution on soil microorganisms and their critical value[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, **42**(2): 266-269.
- [14] 陈松灿, 孙国新, 陈正, 等. 植物硒生理及与重金属交互的研究进展[J]. *植物生理学报*, 2014, **50**(5): 612-624.
Chen S C, Sun G X, Chen Z, *et al.* Progresses on selenium metabolism and interaction with heavy metals in higher plants[J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, **50**(5): 612-624.
- [15] 刘艳, 侯龙鱼, 赵广亮, 等. 锗对植物影响的研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2015, **23**(8): 931-937.
Liu Y, Hou L Y, Zhao G L, *et al.* Mechanism and application of germanium in plant growth[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, **23**(8): 931-937.
- [16] 洪涛, 孔祥胜. 云南省广南县富锗土壤地球化学特征及成因分析[J]. *矿产与地质*, 2021, **35**(2): 290-295.
Hong T, Kong X S. Geochemical feature and genesis analysis of germanium-rich soil in Guangnan County of Yunnan[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2021, **35**(2): 290-295.
- [17] 袁宏, 赵利, 王茂丽, 等. 拉萨河流域曲水一带土壤锗含量地统计学分析与评价[J]. *土壤通报*, 2019, **50**(5): 1079-1084.
Yuan H, Zhao L, Wang M L, *et al.* Geostatistical analysis and evaluation of soil germanium content in the Qushui Area of Lhasa River Basin[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, **50**(5): 1079-1084.
- [18] 代璐, 姬丙艳, 潘燕青, 等. 青海东部富锗土壤成因研究[J]. *中国科技成果*, 2018, **19**(11): 26-28.
- [19] 曾妍妍, 周金龙, 郑勇, 等. 新疆若羌县绿洲区富锗土壤地球化学特征及成因分析[J]. *土壤通报*, 2017, **48**(5): 1082-1086.
Zeng Y Y, Zhou J L, Zheng Y, *et al.* Geochemical features of germanium-rich soils and its causes in oasis region of Ruqiang County, Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, **48**(5): 1082-1086.
- [20] 肖广全, 木志坚, 魏世强, 等. 重庆地区紫色土锗的背景含量及分布特征[J]. *水土保持学报*, 2009, **23**(5): 171-174, 214.
Xiao G Q, Mu Z J, Wei S Q, *et al.* Background values and distribution characteristics of germanium of purple soils in Chongqing Areas[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, **23**(5): 171-174, 214.
- [21] 游桂芝, 鲍大忠, 李丕鹏. 贵州安龙县耕地土壤富锗含量特征及成因探讨[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2020, **37**(5): 35-39.
You G Z, Bao D Z, Li P P. Germanium content characteristics and cause of germanium-rich soil in Anlong County, Guizhou Province[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Science)*, 2020, **37**(5): 35-39.
- [22] 刘道荣. 浙江常山县表层土壤锗地球化学特征及影响因素[J]. *现代地质*, 2020, **34**(1): 97-103.
- [23] Liu D R. Geochemical characteristics and influencing factors of germanium in surface soil of Changshan County, Zhejiang Province[J]. *Geoscience*, 2020, **34**(1): 97-103.
- [24] 段铁仁, 杨忠芳, 杨琼, 等. 广西北部湾地区土壤锗分布特征、影响因素及其生态环境评价[J]. *中国地质*, 2020, **47**(6): 1826-1837.
Duan Y R, Yang Z F, Yang Q, *et al.* The distribution, influencing factors and ecological environment evaluation of soil germanium in Beibu Gulf of Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. *Geology in China*, 2020, **47**(6): 1826-1837.
- [24] 李绍铜, 王美玉. 鸡东县土壤锗元素富集特征调查与分析[J]. *水利科学与寒区工程*, 2021, **4**(2): 61-64.

- Li S T, Wang M Y. Investigation and analysis of germanium enrichment characteristics of soils in Jidong County[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2021, **4**(2): 61-64.
- [25] 孙厚云, 孙晓明, 贾凤超, 等. 河北承德锗元素生态地球化学特征及其与道地药材黄芩适生关系[J]. 中国地质, 2020, **47**(6): 1646-1667.
- Sun H Y, Sun X M, Jia F C, *et al.* The eco-geochemical characteristics of germanium and its relationship with the genuine medicinal material *Scutellaria baicalensis* in Chengde, Hebei Province[J]. Geology in China, 2020, **47**(6): 1646-1667.
- [26] 青海发现大面积富锗土壤资源区[J]. 中国矿业, 2015, **24**(10): 107.
- [27] 张庆华, 苏之良, 罗勇军, 等. 黔东南州富锗土壤地球化学特征及成因分析[J]. 上海国土资源, 2021, **42**(2): 20-24, 29.
- Zhang Q H, Su Z L, Luo Y J, *et al.* Geochemical features and origin of germanium-rich soil in Qianzhongnan prefecture [J]. Shanghai Land & Resources, 2021, **42**(2): 20-24, 29.
- [28] 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 等. 南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5500-5509.
- Lai S Y, Dong Q Y, Song C, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in the eastern mountainous area of the Nanyang Basin [J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5500-5509.
- [29] DZ/T 0258-2014, 多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)[S].
- [30] DZ/T 0279-2016, 区域地球化学样品分析方法[S].
- [31] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, **12**(4): 12-19.
- Wei F S, Chen J S, Wu Y Y, *et al.* Study on the background contents on 61 elements of soils in China[J]. Environmental Science, 1991, **12**(4): 12-19.
- [32] 袁宏, 赵利, 王茂丽, 等. 西藏拉萨至曲水拉萨河沿岸农用地土壤硒锗空间分布与评价[J]. 土壤, 2020, **52**(2): 427-432.
- Yuan H, Zhao L, Wang M L, *et al.* Spatial distribution and evaluation of selenium and germanium in farmland soils from Lhasa to Qushui along the Lhasa River in Tibet[J]. Soils, 2020, **52**(2): 427-432.
- [33] 鲍大忠, 游桂芝, 李丕鹏. 贵州省兴仁市耕地土壤富锗地球化学特征及影响因素浅析[J]. 四川地质学报, 2020, **40**(3): 500-504, 512.
- Bao D Z, You G Z, Li P P. A simple analysis of geochemical characteristics of Ge-rich soil in Xingren, Guizhou [J]. Acta Geologica Sichua, 2020, **40**(3): 500-504, 512.
- [34] 蒋惠俏, 龙婧宇, 黄英, 等. 广西钟山县土壤锗的地球化学特征[J]. 南方国土资源, 2020, (3): 32-38.
- [35] 高艺瑞, 刘海. 广西浦北县表层土壤锗元素地球化学特征[J]. 区域治理, 2019, (12): 252-253.
- [36] McGrath D, Zhang C S, Carton O T. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland[J]. Environmental Pollution, 2004, **127**(2): 239-248.
- [37] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [38] 吴光红, 苏睿先, 李万庆, 等. 大沽排污河污灌区土壤重金属富集特征和来源分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(6): 1693-1698.
- Wu G H, Su R X, Li W Q, *et al.* Source and enrichment of heavy metals in sewage-irrigated area soil of Dagou sewage discharge channel[J]. Environmental Science, 2008, **29**(6): 1693-1698.
- [39] 刘子宁, 朱鑫, 窦磊, 等. 珠江三角洲典型肝癌发病区土壤重金属富集特征分析及生态风险测度[J]. 土壤通报, 2011, **42**(2): 471-476.
- Liu Z N, Zhu X, Dou L, *et al.* Assessment on enrichment level and potential ecological risk of heavy metals in soils from high liver cancer incidence area in Pearl River Delta, Guangdong[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, **42**(2): 471-476.
- [40] Fergusson J E. The heavy elements: chemistry, environmental impact and health effects[M]. New York: Pergamon, 1990.
- [41] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. Environmental Geology, 2000, **39**(6): 611-627.
- [42] 胡瑞忠, 苏文超, 戚华文, 等. 锗的地球化学、赋存状态和成矿作用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, **19**(4): 215-217.
- [43] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖, 等. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(1): 123-126.
- Lu Y, Gong Z T, Zhang G L, *et al.* Heavy metal concentration in Nanjing urban soils and their affecting factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, **15**(1): 123-126.
- [44] Braun J J, Marechal J C, Riotte J, *et al.* Elemental weathering fluxes and saprolite production rate in a Central-African lateritic terrain (Nsimi, South Cameroon) [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2012, **99**: 243-270.
- [45] Pokrovsky O S, Galy A, Schott J, *et al.* Germanium isotope fractionation during Ge adsorption on goethite and its coprecipitation with Fe oxy (hydr) oxides [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, **131**: 138-149.
- [46] Lugolobi F, Kurtz A C, Derry L A. Germanium-silicon fractionation in a tropical, granitic weathering environment [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, **74**(4): 1294-1308.
- [47] Hardy M, Cornu S. Location of natural trace elements in silty soils using particle-size fractionation[J]. Geoderma, 2006, **133**(3-4): 295-308.
- [48] Acosta J A, Martínez-Martínez S, Faz A, *et al.* Accumulations of major and trace elements in particle size fractions of soils on eight different parent materials[J]. Geoderma, 2011, **161**(1-2): 30-42.
- [49] 章明, 顾雪祥, 付绍洪, 等. 锗的地球化学性质与锗矿床[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, **22**(1): 82-87.
- Zhang M, Gu X X, Fu S H, *et al.* A review of disperse element germanium [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, **22**(1): 82-87.
- [50] Murnane R J, Stallard R F. Germanium and silicon in rivers of the Orinoco drainage basin [J]. Nature, 1990, **344**(6268): 749-752.
- [51] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [52] 姜德波, 张长青, 山成栋, 等. 川滇黔铅锌(锗)成矿区区域地球化学测量在找锗预测中的作用[J]. 岩石学报, 2019, **35**(11): 3407-3428.
- Lou D B, Zhang C Q, Shan C D, *et al.* Role of regional geochemical survey for Ge mineral prediction in Chuan-Dian-Qian Pb-Zn (Ge) metallogenic region [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, **35**(11): 3407-3428.
- [53] 陈小梅, 姚玉才, 章明奎. 浙东海积平原耕地土壤肥力特征及空间变化规律研究[J]. 土壤通报, 2016, **47**(3): 618-623.
- Chen X M, Yao Y C, Zhang M K. Soil fertility and its spatial variation pattern of cultivated land in Marine Plain of Zhejiang province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, **47**(3): 618-623.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)