环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第44卷 第3期
2023年3月15日

目 次

复合污染条件下人为源VOCs的SOA生成研究进展 …… 陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓(1201)
全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展 …… 孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻豪(1214)
湖泊水质参数遥感监测研究进展 …… 王思梦, 秦伯强(1228)
淡水环境中微塑料与重金属的"木马效应"研究进展 …… 赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铵, 金超(1244)
长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应 …… 吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋(1258)
中国土地利用碳排放变化及协调分区 …… 李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯(1267)
基于STIRPAT模型天津减污降碳协同效应多维度分析 …… 刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛(1277)
基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势 …… 佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧(1287)
浙江省大气颗粒物$PM_{2.5}$化学组分污染特征分析 …… 周菁清,余磊,陈书鑫,陆佳锋,许亚璐,季海冰,张柳芳,刘劲松,王静(1297)
南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源 …… 徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕(1310)
洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析:棕碳的重要贡献 …… 闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思(1319)
江苏省2019年S/IVOCs排放清单及分布特征 …… 宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜(1328)
珠三角典型工业区挥发性有机物(VOCs)组成特征:含氧挥发性有机物的重要性 …… 宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏(1336)
2000~2020年天津市机动车全过程VOCs排放特征及演变 …… 孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧(1346)
港口自有移动源大气污染物排放清单 …… 徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺(1357)
基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控 …… 欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙(1368)
黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估 …… 曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建(1378)
桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征 …… 余悦, 邢新丽, 程铖, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李淼, 余海阔, 罗为群, 祁士华(1387)
广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析 …… 陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成(1397)
宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价 …… 徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军(1407)
典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析 …… 王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫(1416)
牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素 …… 刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁(1429)
石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析 …… 丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞(1440)
北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析 …… 温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞(1452)
拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价 …… 单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文(1465)
南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素 …… 高鹏飞, 王鹏, 黄祎, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔(1475)
调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素 …… 丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文(1484)
典型城市内河菌群组成与氮循环功能垂向分布及溯源分析 …… 谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晓艳, 郑蕾(1497)
滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算 …… 郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中(1508)
窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制 …… 曾少毅, 李坤权(1519)
高比表面硫脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附 …… 闵炳坤, 李坤权(1528)
不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征 …… 刘晨旭, 白晓慧(1537)
水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响:Meta分析 …… 杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕(1542)
增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响 …… 邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章(1553)
三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化 …… 李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源(1562)
鄱阳湖平原直播稻CH_4通量及其与CO_2通量的综合温室效应 …… 时元智, 崔远来, 才硕, 洪大林, 程婕(1572)
不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析 …… 周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君(1583)
石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估 …… 李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建升(1593)
南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价 …… 杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清(1602)
三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析 …… 石雨佳, 方林发, 方标, 叶芊芊, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然(1611)
兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析 …… 康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(1620)
粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价 …… 王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨(1636)
三门峡某铅厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 …… 卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳(1646)
某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价 …… 王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东(1657)
化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制 …… 马强, 卫泽斌, 吴启堂(1668)
再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制 …… 林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞(1678)
长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评价 …… 刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红(1686)
稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应 …… 张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚(1698)
巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性 …… 冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凰榕, 李媛媛, 江海燕(1706)
蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与翅果菊修复锌铅镉污染土壤的影响 …… 陈敏妮, 聂小奇, 张杏锋, 何川黔, 高波(1714)
地质高背景区富Se耕地可利用性研究及区划建议 …… 王锐, 李瑜, 余京, 周皎, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲(1727)
张家口市北新屯地区蔬菜种植区锗元素富集特征及成因分析 …… 安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原(1735)
三峡库区消落带落羽杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化 …… 谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓(1748)
黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响 …… 张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平(1758)
化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响 …… 王鉴燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明(1768)
鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化 …… 张丹, 彭双, 王丹青, 王一明, 林先贵(1780)
牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响 …… 张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林(1792)
《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)

张家口市北新屯地区蔬菜种植区锗元素富集特征及成因分析

安永龙[1,2], 殷秀兰[2*], 金爱芳[2], 李文娟[2], 鲁青原[2]
(1. 北京市生态地质研究所, 北京 102218; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 选取张家口市北新屯地区蔬菜种植基地为研究区,分为重点区和区域范围以及上游地区,共采集表层土壤样品 132 件,垂向土壤剖面 16 条,地表剖面 3 组,彩椒果实、紫甘蓝果实和玉米果实样品各 4 件,在分析土壤、岩石和作物样品的 Sc、Cr、Mo、Cd、V、Zn、Sr、Pb、Co、Ni、Cu、Ge 和 REE 等元素基础上,通过所参照的锗富集标准,发现区域富锗率不高(19.7%),而重点区富锗率较高(52%). 区域范围和重点区土壤中 Ge 与稀土元素呈现较为明显的空间分布一致性,进一步对比土壤与作物中 Ge 和稀土元素相关性特征发现,稀土含量排序为:紫甘蓝 > 彩椒 > 玉米,而 Ge 吸收强度排序为:玉米(微弱吸收) > 紫甘蓝(极弱吸收) > 彩椒(极弱吸收),作物对 Ge 和稀土元素的吸收并没有明显的协同性. 通过对研究区土壤 28 种元素和指标的 PMF 和 RDA 分析表明,区域 Ge 的来源以天然地质背景因素为主(66.3%),人为活动影响因素(27%)和大气干湿沉降因素(6.7%)为辅,重点区 Ge 的来源以天然地质背景因素(33.8%)和人为活动影响因素(27.2%)为主,大气干湿沉降因素(18.5%)和河流沉积因素(20.5%)为辅,土壤 Ge 均与稀土元素和 Cd、Zn、Mn、Ni、V、Co、Cr 等微量元素呈正相关关系,与主量元素 Na_2O、SiO_2、K_2O和 pH 呈负相关关系. 最后通过将土壤横向剖面与垂向剖面结合分析,发现由物源区迁移至区内的 Ge 主要以主河道途径为主,次级河道和洪流途径为辅.

关键词:张家口地区; 锗(Ge); 稀土元素(REE); 冗余分析(RDA); 迁移路径
中图分类号: X142 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2023)03-1735-13 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202205032

Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City

AN Yong-long[1,2], YIN Xiu-lan[2*], JIN Ai-fang[2], LI Wen-juan[2], LU Qing-yuan[2]
(1. Beijing Institute of Ecological Geology, Beijing 102218, China; 2. China Institute of Geo-environmental Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: The vegetable planting base in the Beixintun area of Zhangjiakou City was selected as the study area, divided into the focus area and regional range as well as the upstream area. A total of 132 surface soil samples, 16 vertical soil profiles, 3 groups of surface profiles, and 4 samples each of colored pepper fruit, purple kale fruit, and corn fruit were collected. From the soil, rock, and crop sample Sc, Cr, Mo, Cd, V, Zn, Sr, Pb, Co Ni, Cu, Ge, and REE on the basis of the referenced germanium (Ge) enrichment standards and enrichment factor levels, it was found that the regional Ge enrichment rate was not high (19.7%), whereas the key area had a high Ge enrichment rate (52%). The spatial distribution of Ge and rare earth elements in the soils of the regional scope and the focal area showed a more obvious consistency, and further comparison of the correlation characteristics of Ge and rare earth elements in soil and crops showed that the ranking of rare earth content was purple kale > colored pepper > maize, whereas the ranking of the Ge element uptake intensity was maize (weak uptake) > purple kale (very weak uptake) > colored pepper (very weak uptake), and there was no obvious synergy between the uptake of Ge and rare earth elements by crops. The PMF and RDA analysis of 28 elements and indicators of soil in the study area showed that the source of regional Ge was dominated by natural geological background factors (66.3%), supplemented by anthropogenic activity-influenced factors (27%) and river deposition factors (6.7%). The source of Ge in the focal area was dominated by natural geological background factors (33.8%) and anthropogenic activity-influenced factors (27.2%), with river sedimentation factors (18.5%) and atmospheric dry and wet deposition factors Ge (20.5%) being supplemented. Soil Ge was positively correlated with rare earth elements and trace elements such as Cd, Zn, Mn, Ni, V, Co, and Cr and negatively correlated with the main elements Na_2O, SiO_2, and K_2O and pH. Finally, by combining the analysis of soil lateral profiles with vertical profiles, it was found that the Ge migrating from the source area to the area was primarily in the main river pathway, supplemented by the secondary river and flood flow pathways.

Key words:Zhangjiakou area; germanium(Ge); rare earth elements(REE); redundancy analysis(RDA); migration pathways

锗(Ge)是一种典型的稀有分散元素,多与硫化物伴生于煤矿、铜矿、铁矿和铅锌矿中,土壤和地下水中也含有少量 Ge[1~3],灵芝和人参等名贵药材中含锗较为丰富[4],主要以 GeO_2^{3-} 和 GeO_4^{4-} 等形态赋存于碱性介质中,与其位于同一主族元素的硅和锡化学性质相似,都具有亲硫、亲石、亲铁和亲有机质等特性[5]. Ge 与 Se 相似,是人体机能正常运转所需的重要微量元素,对细胞和器官具有一定的保护修复功能. 相关研究表明,Ge 具有“五抗”生物学功能,即抗病毒、抗癌症、抗炎症、抗射线和抗衰老,因此享有“生命之源奇效元素”、“21 世纪的救命锗”和“长寿先锋”等美誉[6,7]. 同时有研究还指出,土壤中 Ge 与植物中 Ge 在特定环境下呈现出一

收稿日期: 2022-05-05; **修订日期**: 2022-06-21
基金项目: 国家级地质环境监测与预报项目(121201014000150003); 北京市土地质量生态地球化学监测网运行项目(11000022T000000439575)
作者简介: 安永龙(1988~),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为生态环境地质,E-mail:aylzfj@163.com
* 通信作者,E-mail:877966661@qq.com

定的迁移聚集性特征,如孙厚云等[8]通过对承德地区滦河流域与金沟屯和五道岭不同地质建造区 Ge 在基岩-风化壳-土壤-黄芩系统迁聚规律研究,表明黄芩根部对土壤 Ge 和 Fe 的吸收表现出较为明显的协同效应; 杨婉秋等[9]通过对云南省临沧市勐托乡大田河户有村土壤和大叶种茶树各组织 Ge 含量特征分析,表明吸收 Ge 含量大小为:老叶 > 嫩叶 > 根 > 茎 > 皮 > 花 = 果实; 李桂珠等[10]通过调配 Ge 浓度总结对不同时期水稻生理性状的影响,结果表明 Ge 在水稻-土壤体系内迁移转化过程中,低浓度的 Ge 对水稻的生长发育具有促进作用,而高浓度的 Ge 具有抑制作用.

相对于富硒研究,目前国内外关于富锗土壤研究程度偏低,可查阅的有效资料尚不足,富锗土地及农产品的开发和利用仍任重道远. 张家口市北新屯北部蔬菜种植区为四面环山地貌,物源结构清晰简单,是研究物质迁移及成因的天然试验场,因此,本文选取该地蔬菜种植区为研究对象,厘定土壤 Ge 空间迁移规律和来源,探索不同作物中 Ge 赋存特征等问题,填补了研究区周边该研究领域的空白,以期为当地农业种植结构优化调整、土地开发利用和打造特色农产品提供地球化学依据. 另外,张家口市地处我国低硒带内,土壤中硒元素含量较低,克山病频发[11~13],该地富锗土壤的发现一定程度上有利于改善土壤由缺硒短板所造成的开发僵局.

1 研究区概况

研究区位于张家口市万全区北部的坝缘丘陵,地处内蒙高原与华北平原的过渡带,地势西北高,东南低,山峦起伏,北部约 8 km 为阴山山脉划分的坝上自然地理单元,分布大面积汉诺坝组(E_3N_1h)玄武岩,玄武岩类型主要为杏仁状和致密块状,区内主要以南天门组(K_2n)砾岩、砂砾岩夹砂岩为主. 区内最高海拔为1 300 m,温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同期,无霜期长,多年平均降水量约 350 ~500 mm,平均气温为 5 ~17℃. 区内有上游大营滩水库的一、二级河流通过,属洋河支流[14]. 土壤类型以棕壤、栗褐土和水稻土为主[15],种植区以彩椒、紫甘蓝、西红柿和玉米等作物为主,内含大小不等的砾石,磨圆较好,分选中等,适合植物生长,上游山坡和山脚处主要分布有基性粗骨土,内含石块和砾石较多,性质与基岩相似. 区内生态环境良好,分布落叶松、侧柏、山杨和榆树等.

2 材料与方法

2.1 样品采集

本研究共采集区域和重点区表层土壤样品共计 132 件; 沿流域布设 16 条垂向土壤剖面,深度均为 1 m,每隔 0.2 m 采集 1 件土壤样品,共计 80 件,土壤剖面中 16 件表层土壤样品同时纳入区域表层土壤统计并参与绘图; 采集地表岩土剖面 3 组,共 31 件样品(新鲜岩石样品 3 件,风化壳样品 5 件,土壤样品 23 件); 另采集研究区内彩椒果实、紫甘蓝果实和玉米果实样品各 3 件,采集非研究区(阳原县和崇礼区)内作物果实各 1 件作为对照样,具体采样位置分布如图 1.

样品野外采集及加工过程严格按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)的工作方法

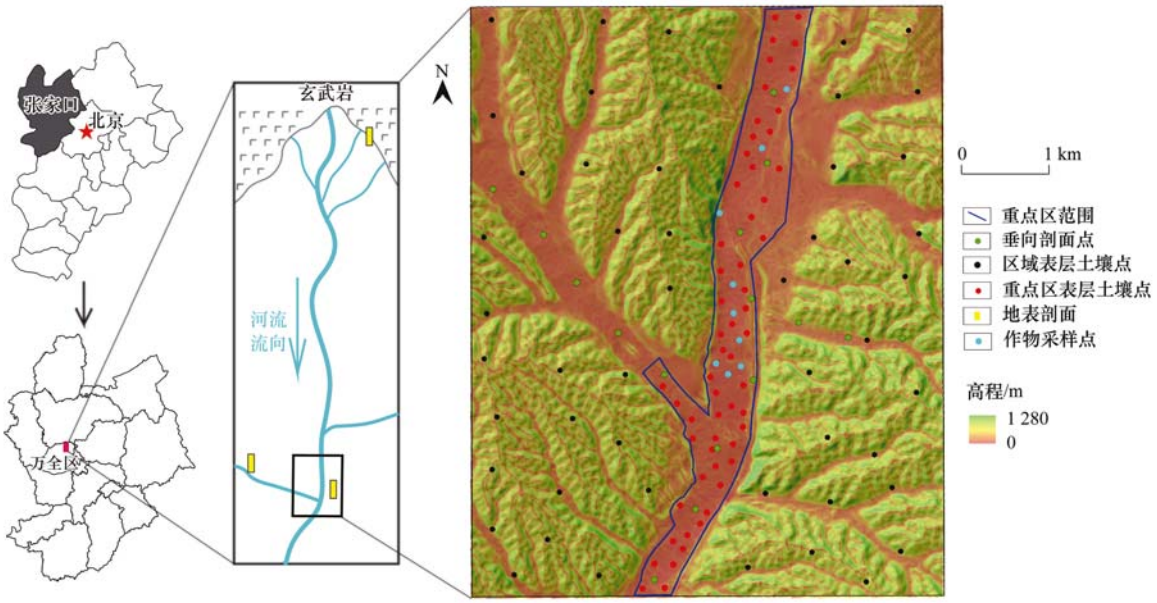


图 1 研究区位置及采样分布示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites distribution

进行. 表层土壤样品参照网格化布点原则,以既定的采样部署点为中心,采用“X”或“S”线路向四周(尽可能是同一岩性单元)辐射 10 ~ 20 m,采集 3 ~ 5 个分样点为一个组合样,采集深度为 0 ~ 20 cm,采样时要尽量做到采样单元内的土地利用类型基本一致,避开垃圾堆放和农业施肥等具有明显点状污染的地段,确保采样点距公路和铁路大于 100 m. 样品中初步去除枯枝落叶、砾石和杂物等,装入洁净的棉布袋,置于通风处进行风干,之后全部过 20 目尼龙筛,及时送实验室进行处理和测试工作. 采集岩石和风化壳样品重量不小于 500 g. 作物样品采集要以 50 ~ 100 m^2 为采样单元,在每个采样单元中选取 2 ~ 3 株作物摘取果实部分,将其装入聚乙烯自封袋冷藏于恒温 4℃ 保温箱,每件样品鲜重不低于 1 000 g,保证当日送往实验室进行处理.

2.2　分析测试

样品测试分析由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,岩石和土壤样品的 Sc、Cr、Mo、Cd、V、Zn、Sr、Pb、Co、Ni、Cu、Ge 和 15 项 REE 含量使用高分辨率等离子体质谱法(X Serise2/SN01831C)测定,准确称取 50 mg 试料于封闭溶样器的内罐中,加入 1 mL 氢氟酸和 0.5 mL 浓硝酸,放入高压溶样釜罐体中,将溶样器放入烘箱中,加热 24 h,温度控制在 185℃ ±5℃. 冷却后取出内罐,置于电热板上加热蒸至近干,再加入 0.5 mL 硝酸蒸发近干,加入 5 mL 硝酸,再次密封,放入烘箱中,130℃ 加热 3 h,冷却后取出内罐,将溶液定量转移至 50 mL 比色管中,用去离子水稀释,定容至 50 mL,摇匀. SiO_2、Al_2O_3、CaO、K_2O、MgO、MnO、Na_2O 和 P_2O_5 含量使用 X 射线荧光光谱仪(ARL Advant XP + 2413)测定,Se、As 和 Hg 含量使用原子荧光光度计(AFS-8510)测定,N 使用全自动定氮法(KDN) 测定,TC 使用高频燃烧-红外碳硫仪测定,S 使用 X-射线荧光粉末压片法测定,C_{org} 使用容量法(VOL)测定,pH 使用电位法测定. 植物样品前处理均采用硝酸-过氧化氢微波消解仪完成消解,Ge 和 REE 均采用高分辨率等离子体质谱法(X Serise2/SN01831C)测定. 测试过程加入 10% 空白样与平行样,采用国家一级标准物质(GSB-1、GSD-15、GSS-20、GSS30 和 GSS33)控制准确度和精密度,一级标准物质分析准确度合格率大于 98%,重复性样品检验合格率大于 99%,相对标准偏差小于 4%,各指标的加标回收率符合国家标准,样品指标各项分析测试方法和检出限均符合《多目标区域地球化学调查规范》(DZ/T 0258-2014)中实验测试部分要求.

2.3　数据处理

土壤数据描述性统计分析、正态分布性检验、相关系数分析、柱状图和箱线图绘制等运用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 软件完成; 利用 EPA PMF 5.0 软件完成正定矩阵分解(PMF)模型,它是美国环境保护机构建立的一种定量化源解析模型,其优点是能够综合所组成的不同数据集合完成种类划分并定量计算源贡献率[16]; 利用 Canoco 5.0 软件完成冗余分析(redundancy analysis, RDA),其特点是可以形象地表达土壤化学元素之间性质差异,为科学解释土壤元素间性质提供方法[17]; 利用 Grapher 16.0 和 CorelDRAW 2018 软件完成图件修饰; 利用 Mapgis 6.7 软件完成地球化学图的绘制.

计算农作物中 Ge 的生物富集系数 BCF (bioconcentration factor)公式[12]如下:

$$\mathrm{BCF} = \frac{[X_i]_{\mathrm{plant}}}{[X_i]_{\mathrm{soil}}} \times 100\% \qquad (1)$$

式中,$[X_i]_{\mathrm{plant}}$ 和 $[X_i]_{\mathrm{soil}}$ 分别为元素 i 在植物和土壤中的含量,按照植物对元素的吸收强度可分为 4 个等级:BCF > 100% 为强烈吸收,10% < BCF ≤ 100% 为中等吸收,1% < BCF ≤ 10% 为微弱吸收,BCF ≤ 1% 为极弱吸收.

3　结果与分析

3.1　土壤锗含量特征

研究区区域土壤样品 ω(Ge)最小值为 0.969 mg·kg^{-1},最大值为 1.759 mg·kg^{-1},变异系数为 1.4%,空间分布均匀. 重点区土壤样品 ω(Ge)最小值为 0.967 mg·kg^{-1},最大值为 1.747 mg·kg^{-1},变异系数为 9.1%. 随后将这 2 种数据整合,样品 ω(Ge)最小值为 0.967 mg·kg^{-1},最大值为 1.759 mg·kg^{-1},变异系数为 10.9%,其余参数可见表 1. 自然界中,如果没有人为活动造成的输入型干扰,土壤元素会呈现标准正态分布,随人为活动干扰程度不同,标准正态分布向非正态分布逐渐转化的程度也随之不

表 1　土壤锗含量的描述性统计

Table 1　Descriptive statistics of Ge concentrations in soils

指标	含量/mg·kg^{-1}					样品数	变异系数/%	偏度值	峰度值
	最小值	最大值	中位数	平均值	标准差				
区域 Ge	0.969	1.759	1.217	1.209	0.017	66	1.4	0.873	2.775
重点区 Ge	0.967	1.747	1.306	1.318	0.120	75	9.1	0.419	1.868
全区 Ge	0.967	1.759	1.267	1.267	0.139	141	10.9	0.383	1.232

同. 针对研究区 Ge 含量数据进行了探索性检验中基于理论假定的概率的绘制,即直方图和箱线图,直方图显示 3 种数据集中数据近似服从正态分布,箱线图表明有一定数量的异常值(图 2).

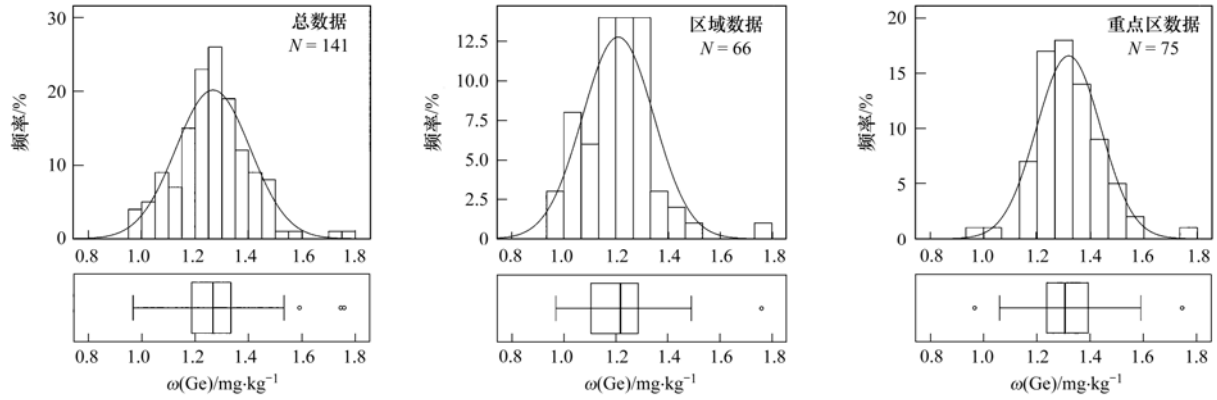


图 2 研究区表层土壤 Ge 统计学分布

Fig. 2 Ge statistics distribution of top soil in the study area

全球土壤 ω(Ge)平均值为1 mg·kg^{-1}[18],中国土壤 ω(Ge)平均值为 1.3 mg·kg^{-1}[19,20],不同类型岩石中 ω(Ge)范围为 0.31 ~ 2 mg·kg^{-1},不同类型土壤中 ω(Ge)范围为 0.1 ~ 34 mg·kg^{-1}. 富锗是一个相对概念,目前并无权威性的规范或者标准来判断土壤富锗等级[21],如果在土壤 Ge 背景含量较高地区,富锗标准随之较高; 相反,低背景区富锗标准随之较低. 例如,游桂芝等[22]采集贵州省安龙县耕地土壤样品5 727 件,发现土壤 ω(Ge)平均值为 1.58 mg·kg^{-1},采用 ω(Ge) >1.6 mg·kg^{-1}为富锗标准; 曾妍妍等[23]采集新疆若羌县绿洲区 434 件表层土壤样品,土壤 ω(Ge)平均值为 1.16 mg·kg^{-1},采用 ω(Ge) > 1.3 mg·kg^{-1}为富锗标准; 段轶仁等[24]在广西北部湾地区采集11 116件表层土壤样品和2 889件深层土壤样品,表层土壤 ω(Ge)算数平均值为 1.43 mg·kg^{-1},深层土壤算数平均值为 1.61 mg·kg^{-1},采用 ω(Ge) > 1.5 mg·kg^{-1}为富锗标准. 本研究区 ω(Ge)背景值为 1.26 mg·kg^{-1},结合研究区地质环境实际状况,并参照前人土壤富锗划分结果划定如下: ω(Ge) < 1.0 mg·kg^{-1}为缺锗, 1.0 mg·kg^{-1} ≤ ω(Ge) < 1.1 mg·kg^{-1}为低锗, 1.1 mg·kg^{-1} ≤ ω(Ge) < 1.2 mg·kg^{-1}为锗适量, 1.2 mg·kg^{-1} ≤ ω(Ge) < 1.3 mg·kg^{-1}为足锗, 1.3 mg·kg^{-1} ≤ ω(Ge) < 1.4 mg·kg^{-1}为潜在锗, ω(Ge) ≥1.4 mg·kg^{-1}为富锗. 本文提出潜在锗概念,定义为目前虽然达不到富锗标准,但是随着 Ge 资源的不断消耗和使用可作为后备资源. 以潜在 Ge 标准衡量研究区土壤样品,区域共有 13 件样品,富锗率为 19.7%,重点区共有 39 件样品,富锗率为52%,如图 3. 插值分析表明,区域范围内富锗及潜在锗范围主要以片状分布北部地区,重点区范围内主要以斑块状分布,如图 4.

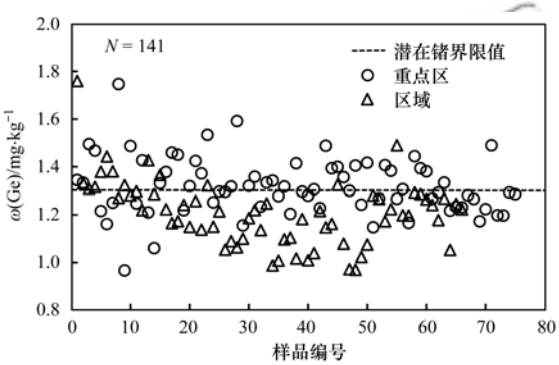


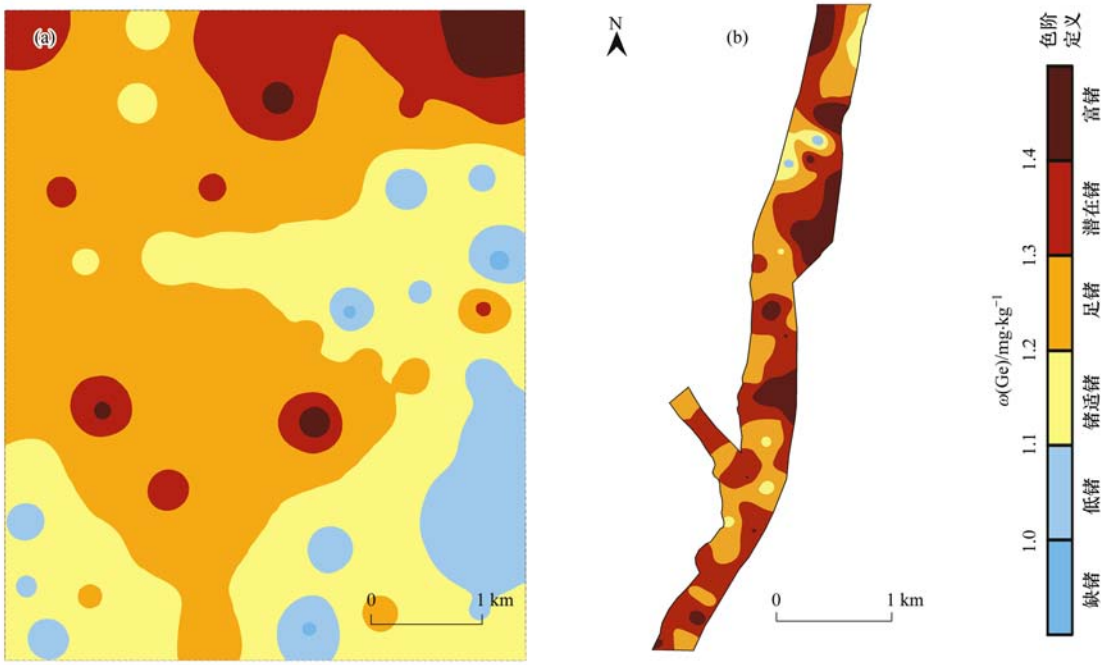
图 3 研究区表层土壤样品 Ge 含量分布

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

3.2 锗与稀土元素关系研究

稀土元素在母岩风化、剥蚀、搬运和再沉积过程中化学性质十分稳定,因此是研究生态地球化学中理想的示踪剂,近几年相关研究尝试将其拓展应用于土壤与植物之间元素迁移性领域,具有重要意义[25~27]. 研究区中区域轻稀土(LREE)总量介于 73.45 ~ 283.06 mg·kg^{-1}, 平均值为 169.97 mg·kg^{-1},重稀土(HREE)总量介于 10.46 ~ 25.59 mg·kg^{-1},平均值为 16.56 mg·kg^{-1}; 重点区 LREE 总量介于 101.74 ~ 202.91 mg·kg^{-1}, 平均值为 162.52 mg·kg^{-1}, HREE 总量介于 10.63 ~ 21.82 mg·kg^{-1},平均值为 17.09 mg·kg^{-1}.

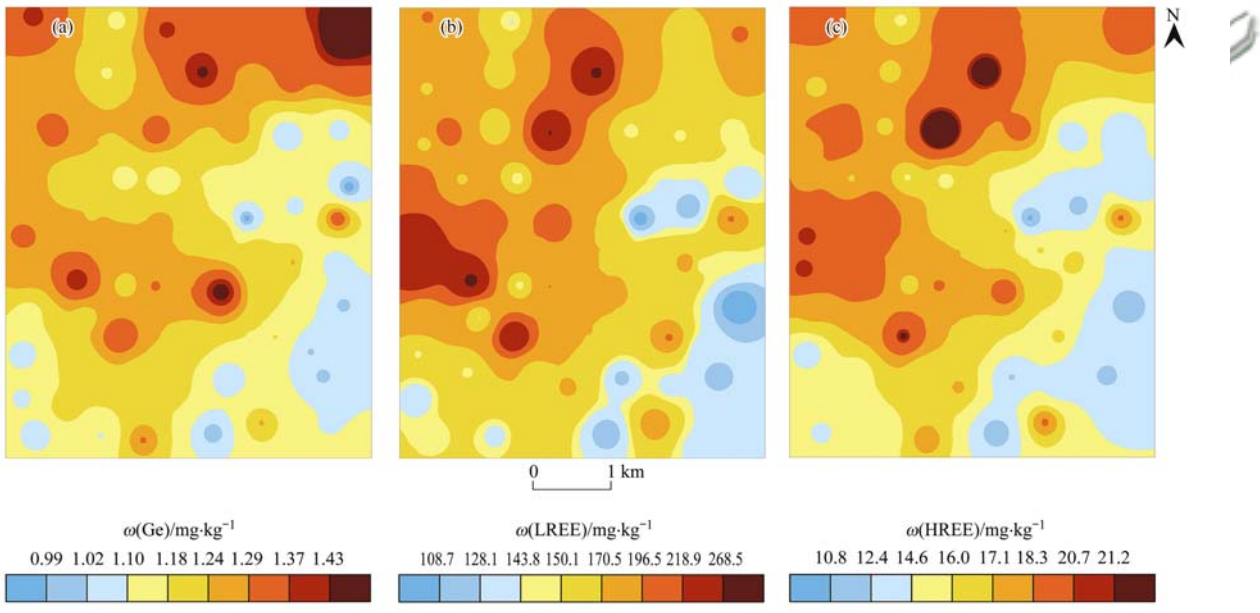
通过相关性分析可知,区域 Ge 与 LREE 和 HREE 相关性高,相关系数分别为 0.697 和 0.827; 重点区 Ge 与 LREE 及 HREE 相关性亦高,相关系数分别为 0.687 和 0.816. 为了进一步探究 Ge 与稀土元素在空间分布中的规律,因此采用 9 级累频法以 5%、10%、25%、40%、60%、75%、90% 和 95% 为节点,以距离幂函数反比加权网格化为插值方法分别绘制区域和重点区范围 Ge 地球化学图,见图 5 和



(a)区域,(b)重点区

图 4　区域和重点区表层土壤富锗等级分布

Fig. 4　Distribution of germanium-rich grades of surface soils in regional and priority areas



(a)区域 Ge;(b)区域轻稀土;(c)区域重稀土

图 5　区域范围 Ge 和稀土元素空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of Ge and rare earth elements on regional scale

图 6. 从中可见,区域范围高值区 Ge 位于西北部,LREE 位于西部,HREE 位于北部,由研究区西部至东部三者均分布中值区至低值区,空间分布具有一致性;重点区范围高值区、中值区和低值区中 Ge 与 LREE 及 HREE 的空间分布几乎一致,其中 Ge 与 HREE 一致性更强.

基于研究区 Ge 与稀土元素具有密切的空间分布特征,探究区内不同作物是否对 Ge 和稀土元素具有吸收协同特征. 以大陆上地壳[28]为标准物质分别对研究区岩石、风化壳、剖面土壤、作物根系土和作物等样品进行标准化,得到稀土元素配分模式曲线. 研究区地表剖面中玄武岩-风化壳-剖面土壤均表现为正 Eu 异常,玄武岩整体表现为右倾斜型,剖面土壤 HREE 近似一条平坦直线,风化壳曲线介于两者之间,如图 7(a). 剖面土壤与紫甘蓝、玉米、彩椒根系土和周边地区(崇礼县和阳原县)稀土元

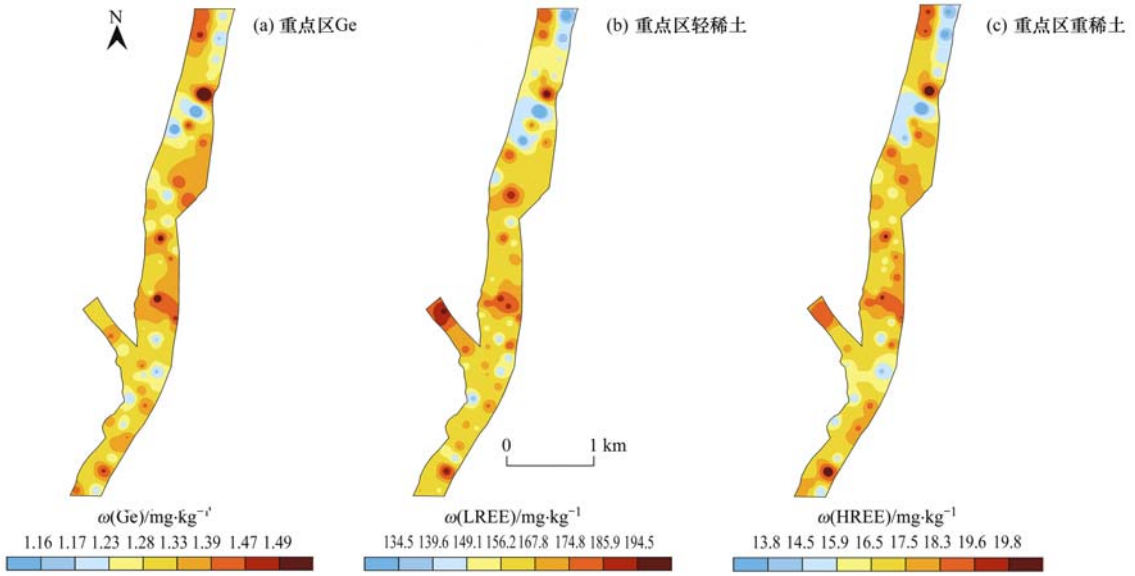


图 6 重点区范围 Ge 和稀土元素空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of Ge and rare earth elements within the focus area

素配分模式曲线除了 2 件剖面土壤表现正 Eu 异常外,整体表现一致,如图 7(b);研究区就稀土元素含量来看,整体表现为:紫甘蓝 > 彩椒 > 玉米,并且相对于其他两种作物紫甘蓝具有明显的正 Eu 异常,如图 7(c);本区彩椒样品稀土元素含量均小于对比区,玉米中除 La 和 Ce 外本区样品稀土元素含量均小于对比区,紫甘蓝中除 Ce、Dy、Tm 和 Yb 外本区样品稀土元素含量均小于对比区,如图 7(d).

生物富集系数(BCF)表示作物对土壤中元素的吸收性强度. 按作物种类进行根系土配套统计分析对土壤 Ge 的吸收强度,特征见表 2. BCF 由大到小顺序为:玉米(微弱吸收) > 紫甘蓝(极弱吸收) > 彩椒(极弱吸收),明显可见研究区种植玉米时对 Ge 的吸收利用效果最好. 这可能是由于玉米生长周期相对其他两者较长,可以充分吸收土壤中的 Ge.

综上所述,虽然研究区表层土壤中 Ge 与稀土元素呈现良好的相关性,但是作物对 Ge 和稀土元素的吸收并没有明显的协同性,从 Ge 开发角度考虑,区内建议以大宗作物玉米的种植为主.

表 2 不同作物 Ge 富集系数统计

Table 2 Statistics of Ge enrichment factor for different crops

作物种类	样本量	富集系数最小值/%	富集系数最大值/%	富集系数中位值/%	富集系数平均值/%	等级
紫甘蓝	4	0.055	0.435	0.149	0.197	极弱吸收
玉米	4	4.182	5.024	4.690	4.647	微弱吸收
彩椒	4	0.059	0.191	0.100	0.112	极弱吸收

3.3 锗与土壤特征的关系

冗余分析(RDA)是一种回归分析结合主成分分析的排序方法,即响应变量矩阵与解释变量之间多元多重线性回归的拟合值矩阵的 PCA 分析[29]. 在生态环境领域应用比较成熟,目前已经延伸至土壤环境领域[30,31]. 为了进一步揭示研究区土壤中 Ge 所在的物种矩阵与其它土壤环境因子矩阵之间的关系,绘制排序图并进行分析. 在确定最适宜的排序方法前,需要依据每个轴的梯度长度(lengths of gradient,LGA)选用物种数据进行除趋势对应分析(detrended correspondence analysis,DCA)来确定,当 LGA > 4 时,应选典范对应分析(canonical correspondence analysis,CCA);当 LGA < 3 时,应选 RDA;当 3 ≤ LGA ≤ 4 时,二者皆可选[32]. 本次研究中区域土壤和重点区土壤的 DCA 分析结果 LGA 均为 1.0,因此采用 RDA 线性模型进行分析.

在同一张排序中(图 8),RDA 模型可以准确反映出物种因子和环境梯度因子之间的近似相关性. 本研究中 RDA 中包含的土壤 Ge 与环境因子之间具有重要的预测度($P < 0.05$). 将土壤中 12 项物种因子和 16 项环境因子显示为图形化向量,当因子之间角度为锐角时表示两者之间呈正相关关系,钝角则呈负相关关系,其长度越大表示该环境或物种因子影响越大,反之长度小则影响越小. 另外也可将物种向量投影至环境向量所在直线上,依据投影点在坐标原点的位置和距离判断相关性的正负和大小.

由区域范围内表层土壤元素分析数据进行主成分分析提取 2 个主成分,主成分 PC1 和 PC2 的特征

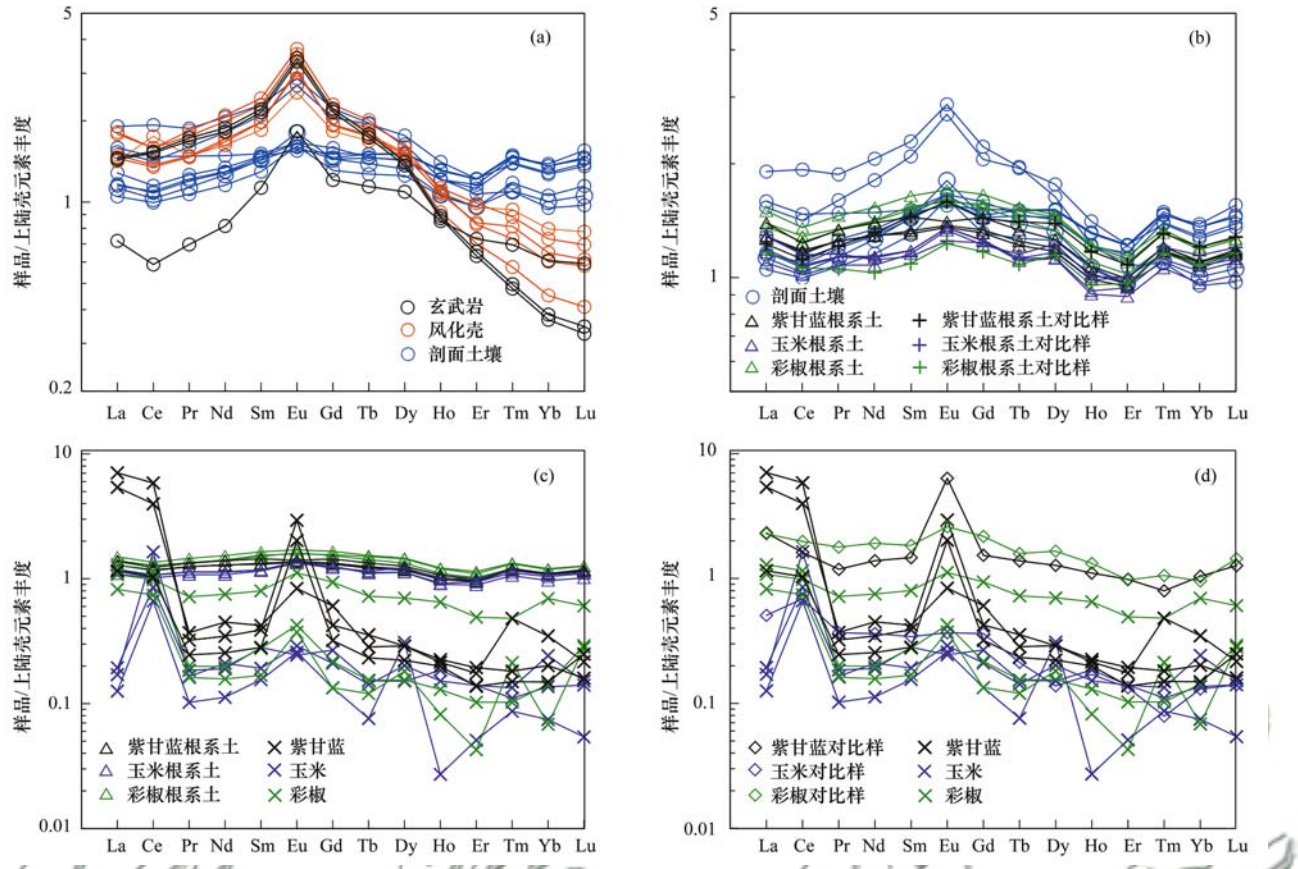


图 7　岩石-风化壳-土壤-作物稀土元素配分模式曲线

Fig. 7　Rock-weathering crust-soil-crop rare earth element distribution pattern curve

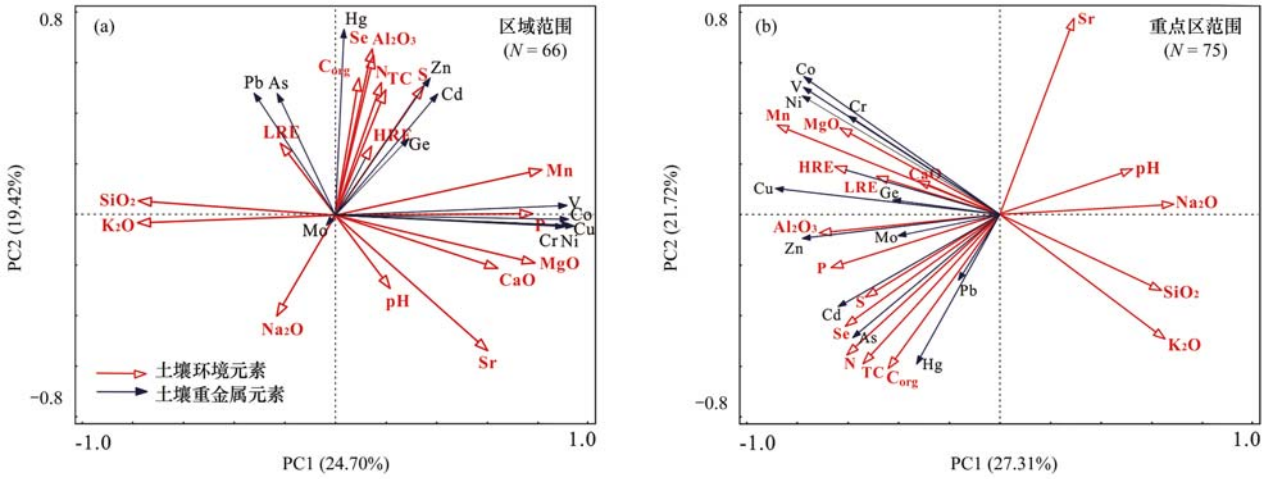


图 8　土壤物种因子与环境因子关系的 RDA 分析排序

Fig. 8　Ranking diagram of RDA analysis of the relationship between soil specie factors and environmental factors

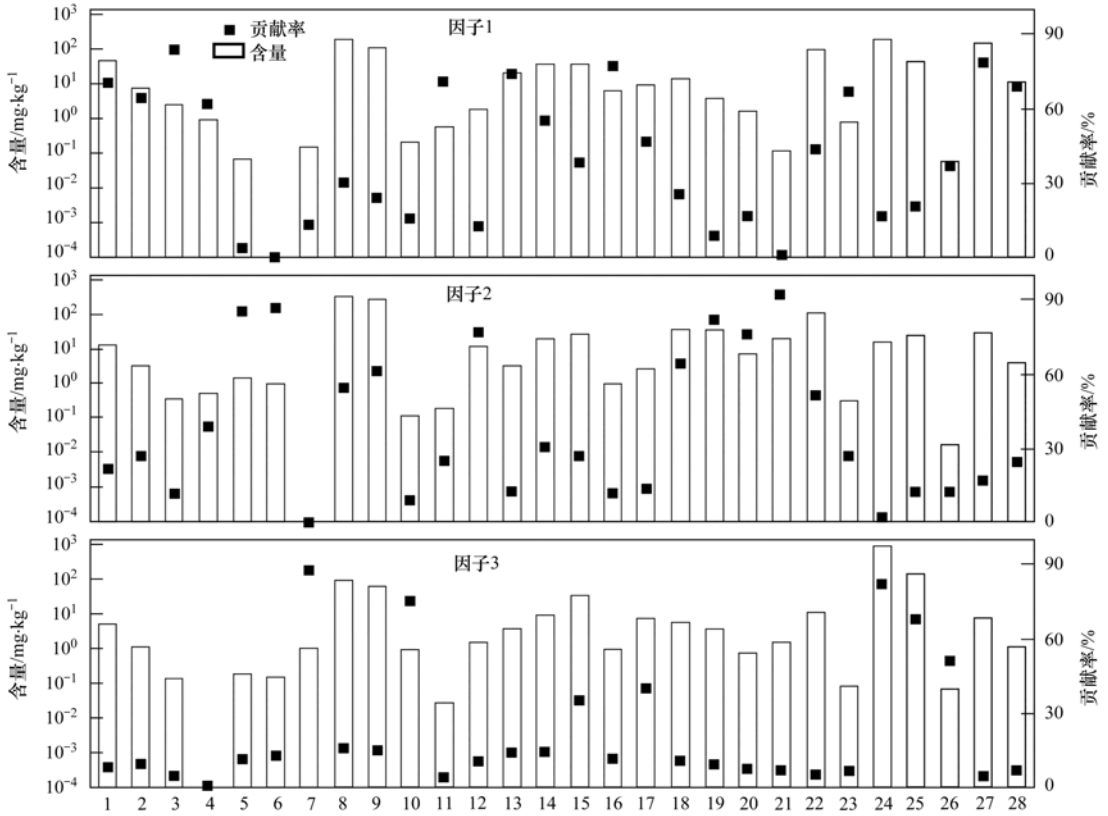
值方差分别为 24.70% 和 19.42%，可进行分析变量的解释. 红线表示环境因子，黑线表示物种因子，如图 8 所示. 区域表层土壤 Ge 与热液成矿与运矿元素 Cd、Zn 和 Hg 的向量夹角为锐角，表示其相关程度较高，其中 Ge 与 Cd 元素夹角最小，相关性最高，相关系数为 0.87；与 Zn、Hg、As 和 Pb 元素含量正相关，相关系数分别为 0.77、0.58、0.36、0.31；与高场强元素 V、Co、Cr 和 Ni 以及热液成矿元素 Cu 呈正相关关系，这可能与冬季燃煤及农药使用有关[33~35]. 与主量元素和相关指标 S、P、N、Al_2O_3、TC、C_{org}和稀散元素 Se 相关程度高，相关研究表明，河流具有较强的搬运、储存有机碳的能力[36]，N、P 和 S 可通过地下渗滤或者地表径流等途径迁移搬运，其中底泥的吸附及沉降能力起到了重要作用[37~39]. HREE 的相关系数为 0.83，高于 LREE 的相关系数 0.69，稀土元素的化学性质稳定，在母岩

发生表生地质作用过程中能够极大程度保留母岩物源信息[40],为 Ge 来源的地质因素. 重点区范围内表层土壤元素含量主成分分析 PC1 和 PC2 特征值方差分别为 27.31% 和 21.72%,可信度较高. Ge 与热液成矿与运矿元素 Cu、Zn、Cd 和 Mo 以及高场强元素 V、Co、Cr 和 Ni 呈锐角,相关程度较高,其中与 Cu 的相关性最大,相关系数为 0.85. Ge 与稀土元素角度较小,相关性较大,其中 HREE 相关程度略高于 LREE,与主量元素 Al_2O_3、MgO、CaO、P 和 S 呈锐角,均为正相关关系;另外与 TC、N、C_{org}、Se、Hg 和 Pb 亦呈正相关关系,但角度变大,相关性降低. 区域及重点区中 Ge 与主量元素 Na_2O、SiO_2 和 K_2O 均呈钝角,表现出分异特征,与 Ge 呈明显的负相关关系,这可能与 Ge 在长石类矿物分化过程中矿物晶格破坏后释出后形成次生矿物,Na_2O、SiO_2 和 K_2O 含量相对恒定有关,同时 Ge 测定值都与 pH 呈负相关性,主要由于随着土壤 pH 值升高,与土壤中 OH^- 和 S^{2-} 等负离子结合的 H^+ 降低,原本与负离子结合的 Ge 离子结合键变强,间接降低了 Ge 离子的迁移能力[41].

3.4 定量化贡献率计算

土壤元素源解析是判定土壤元素的来源受周围环境因子影响程度大小的有效手段,目前多元统计分析是各领域应用较广且操作简便的方法,但缺乏定量性. PMF 模型是一种成熟的源解析方法,可定量化判断不同元素源贡献率的受体模型,已经广泛应用于土壤、生态等领域[42].

为了精准判定研究区区域土壤和重点区土壤中 Ge 的物质来源,并定量化确定每一种途径下 Ge 的贡献率,本研究采用 PMF 模型对 28 种元素进行分析,通过计算结果划分来源途径,然后依据不同来源进行 Ge 的定量化解析. 为了确保分析过程的科学性,需要找到最小 Q 值用来控制残差矩阵 $\boldsymbol{E}$,然后确定合理数量的因子. 选择随机起始序列(random start seed number),并设定运行次数(number of runs)为 20. 区域土壤分析时,将因子数分别设置为 2、3、4 和 5,当因子数为 3 时, Q 值最小,并且大部分残差值在 -4 ~ 4 之间,S/N 均为 9.0,等级(category)均为 strong,因此 PMF 模型的最佳解决方案包含 3 个因素. 观测值与预测值之间的决定系数(r^2)表明,元素具有很强的相关性(Cr 的 r^2 最大,为 0.915,SiO_2 的 r^2 最小,为 0.526,其余元素的 r^2 值均大于 0.55);重点区土壤分析时,将因子数同样分别设置为 2、3、4 和 5,当因子数为 4 时, Q 值最小,并且大



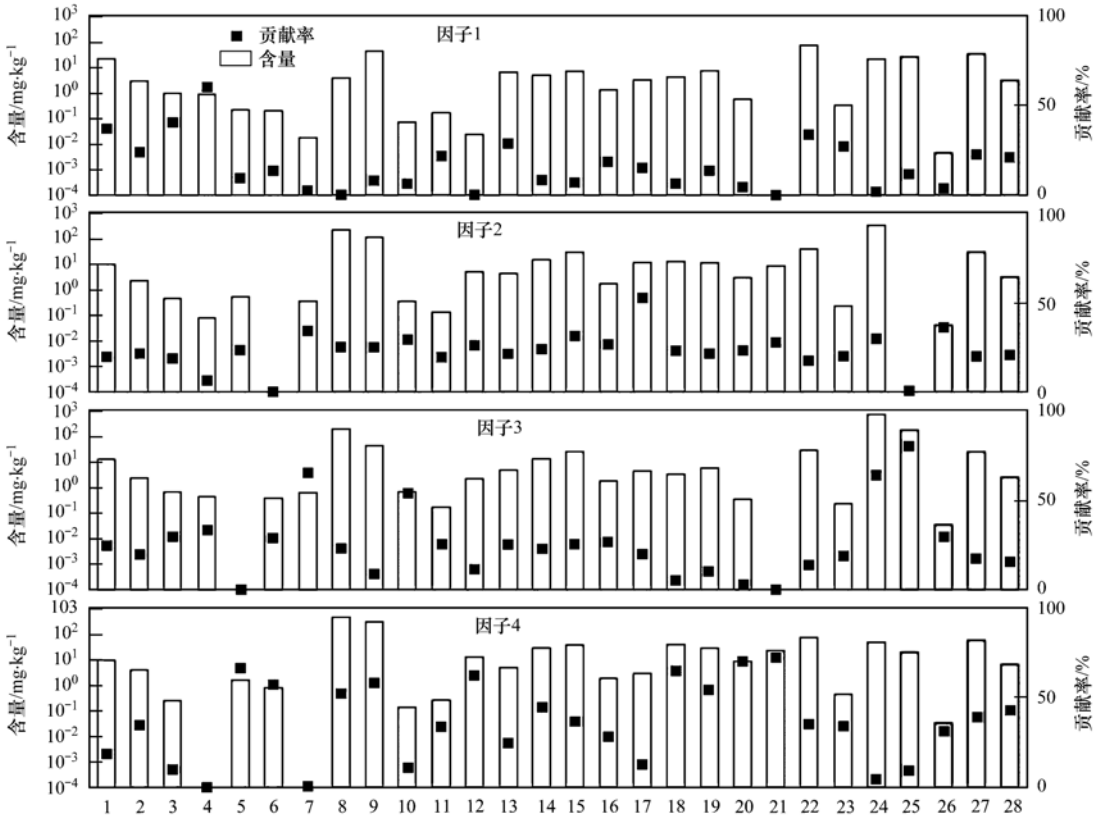
1. SiO_2, 2. Al_2O_3, 3. K_2O, 4. Na_2O, 5. CaO, 6. MgO, 7. C_{org}, 8. P, 9. Mn, 10. TC, 11. Mo, 12. Cu, 13. Pb, 14. Zn, 15. Cd, 16. As, 17. Hg, 18. V, 19. Cr, 20. Co, 21. Ni, 22. Sr, 23. Ge, 24. N, 25. S, 26. Se, 27. LREE, 28. HREE

图 9 区域土壤元素来源分布和贡献率

Fig. 9 Regional soil element source distribution and contribution rate

部分残差值在 -3.5 ~3.5 之间,S/N 均为 9.0,等级均为 strong,因此 PMF 模型的最佳解决方案包含 4 个因素. 观测值与预测值之间的决定系数(r^2)表明,元素具有很强的相关性(V 的 r^2 最大,为 0.902,Na_2O的 r^2 最小,为 0.578,其余元素的 r^2 值均大于 0.6),以上数据表明利用 PMF 模型能够合理地解释所包含信息因素的原始数据.

本研究结果表明,研究区区域土壤因子 1 综合解释元素指标贡献率分别为 SiO_2(70.5%)、Al_2O_3(64.1%)、K_2O(84.1%)、Na_2O(61.8%)、Mo(71.2%)、Pb(74.3%)、Zn(55%)、Cd(38%)、As(76.8%)、Hg(46.6%)、Ge(66.3%)、LREE(78.6%)和 HREE(68.9%),列为天然地质背景源;因子 2 中综合解释了 CaO(84.8%)、MgO(86.8%)、P(54%)、Mn(61.1%)、Cu(76.8%)、V(64.4%)、Cr(81.8%)、Co(75.9%)、Ni(92.3%)和 Sr(51.4%)列为人为活动源;因子 3 中综合解释了 C_{org}(87.4%)、C(75.3%)、N(82.3%)、S(67.5%)、Se(50.8%)和 Hg(45.5%)列为大气干湿沉降源,碳氮硫参与到岩石圈-大气圈的物质循环中,这 3 种来源与 Duan 等[43]的研究结果相一致. 基于以上 3 种来源,可得 Ge 的来源以天然地质背景因素为主(66.3%,贡献率, 下同),人为活动影响因素(27%)和大气干湿沉降因素(6.7%)为辅,如图 9. 同样,重点区土壤因子 1 综合解释元素指标贡献率分别为 SiO_2(37.1%)、K_2O(40.6%)、Na_2O(60.5%)和 Pb(28.6%)列为人为活动源;因子 2 中综合解释了 C_{org}(34.4%)、Hg(52.4%)、Se(35.5%)和 P(30.3%)列为河流沉积源;因子 3 中综合解释了 C_{org}(64.5%)、TC(54.2%)、N(64.3%)、S(79.8%)和 Hg(30.1%)列为大气干湿沉降源;因子 4 中综合解释了 Al_2O_3(34.3%)、CaO(66.6%)、MgO(57.6%)、P(51.9%)、Mn(58.2%)、Mo(33.7%)、Cu(62.5%)、Zn(44.3%)、Cd(36.6%)、As(28.1%)、V(64.3%)、Cr(53.7%)、Co(69.6%)、Ni(72.4%)、Sr(35.3%)、Ge(33.8%)、LREE(38.8%)和 HREE(42.6%)列为天然地质背景源,如图 10. 相关研究已论证 Hg 在符合一定外界条件下能够从壤中气汞态转化为大气汞态,从全球来看,1 a 中排放到大气中的气态汞形式总含量为 80 ~600 t,绝大部分的大气汞在大气中长途搬运后,会通过干湿沉降的方式输入土壤,进而增加土壤中汞含量[44~47]. 基于以上 4



1. SiO_2, 2. Al_2O_3, 3. K_2O, 4. Na_2O, 5. CaO, 6. MgO, 7. C_{org}, 8. P, 9. Mn, 10. TC, 11. Mo, 12. Cu, 13. Pb, 14. Zn, 15. Cd, 16. As, 17. Hg, 18. V, 19. Cr, 20. Co, 21. Ni, 22. Sr, 23. Ge, 24. N, 25. S, 26. Se, 27. LREE, 28. HREE

图 10　重点区土壤元素来源分布和贡献率

Fig. 10　Distribution and contribution rate of soil element sources in priority areas

种来源,可得 Ge 的来源以天然地质背景因素(33.8%,贡献率,下同)和人为活动影响因素(27.2%)为主,大气干湿沉降因素(18.5%)和河流沉积因素(20.5%)为辅.

3.5 锗的河流迁移路径研究

河流运移方式虽然在本次研究中为一种辅助迁移途径,但是仍然属于元素迁移、运移重要途径之一.河流沉积物对元素吸收的强度大小取决于不同离子半径、电位、有效离子和水化热的大小,进而影响了离子间的水解能力和配位能力[48].

通过地形地貌初步分析研究区可作为 Ge 堆积区的迁移路径有 3 条,即主河道、次级河道和洪流道.物源区元素通过河流搬运作用及降雨引起的洪流运移作用由 3 个地表剖面位置向研究区中心方向迁移,为进一步判断 3 条路径迁移贡献大小,分别沿路径部署横向土壤剖面和纵向剖面,横向剖面样品选用每条纵向剖面中的表层样品,并在物源区各部署 1 条地表剖面.本研究表明,主河道方向由上游至下游,TP5 点紧邻村庄,地势较为平缓,含量最高,可达 1.49 mg·kg^{-1},适宜 Ge 在此富集,整体迁移路径可体现出 Ge 由上游迁移至下游的趋势,如图 11(a).次级河道方向由上游至下游,ω(Ge)范围为 1.18~1.29 mg·kg^{-1},整体呈现出由上游迁移至下游的趋势,如图 11(b).洪流道方向,ZD21 点 ω(Ge)为 1.42 mg·kg^{-1},虽然处于迁移路径末端,但是该点实际采于主河道,ω(Ge)范围为 1.05~1.25 mg·kg^{-1},均为砂质土,因此洪流方向路径,并不是 Ge 的迁移路径,如图 11(c).此外,迁移过程中整体表现为泥质土壤的 Ge 含量均高于砂质土壤,这是由于河流中黏土矿物、部分氧化物以及有机质都具有较大的表面积,表面能相对较高,是吸附和储藏元素的载体[49].

PM1、PM3 和 PM4 分别为主河道、次级河道和洪流道迁移方向的源头剖面,深度分别为 15.1、3.5 和 6.6 m.可见 PM1 地表剖面上部 8 件土壤样品均为潜在 Ge 标准(1.3 mg·kg^{-1})以上,另外有 1 件风化壳样品 ω(Ge)高达 1.8 mg·kg^{-1},这是由于该点正好位于剖面上半部分与下半部分的交界处,该界限为一天然平台,相比之下,成土过程受到降雨冲刷和淋滤作用较强,土壤中盐基离子(Na^+、K^+、Mg^{2+}和 Ca^{2+})容易不断迁移淋失,致使 Al、Mn 和 Fe 氧化物不断富集,一方面由于这些物质能够增加化学吸附作用的表面位点,间接增加了 Ge 的吸附力;另一方面由于 Ge—O 键和 Al—O 键的长度相似,因此风化后的黏土矿物八面体片中的 Al 容易被类质同象 Ge 替代,从而富集 Ge[50,51].PM3(除表层样品外)和 PM4 垂向样品均为潜在锗标准(1.3 mg·kg^{-1})以上.

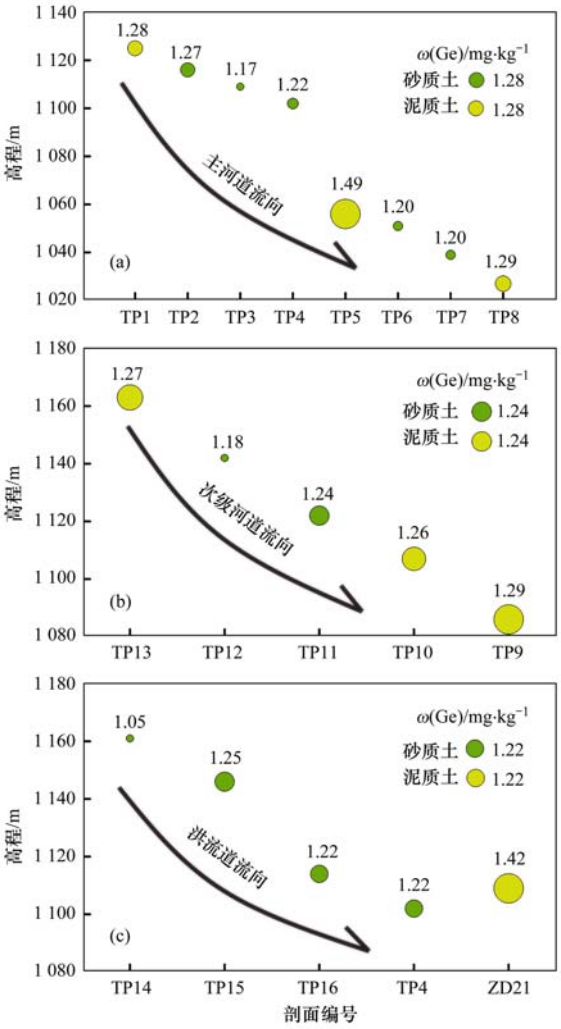


图 11 Ge 河流迁移分析

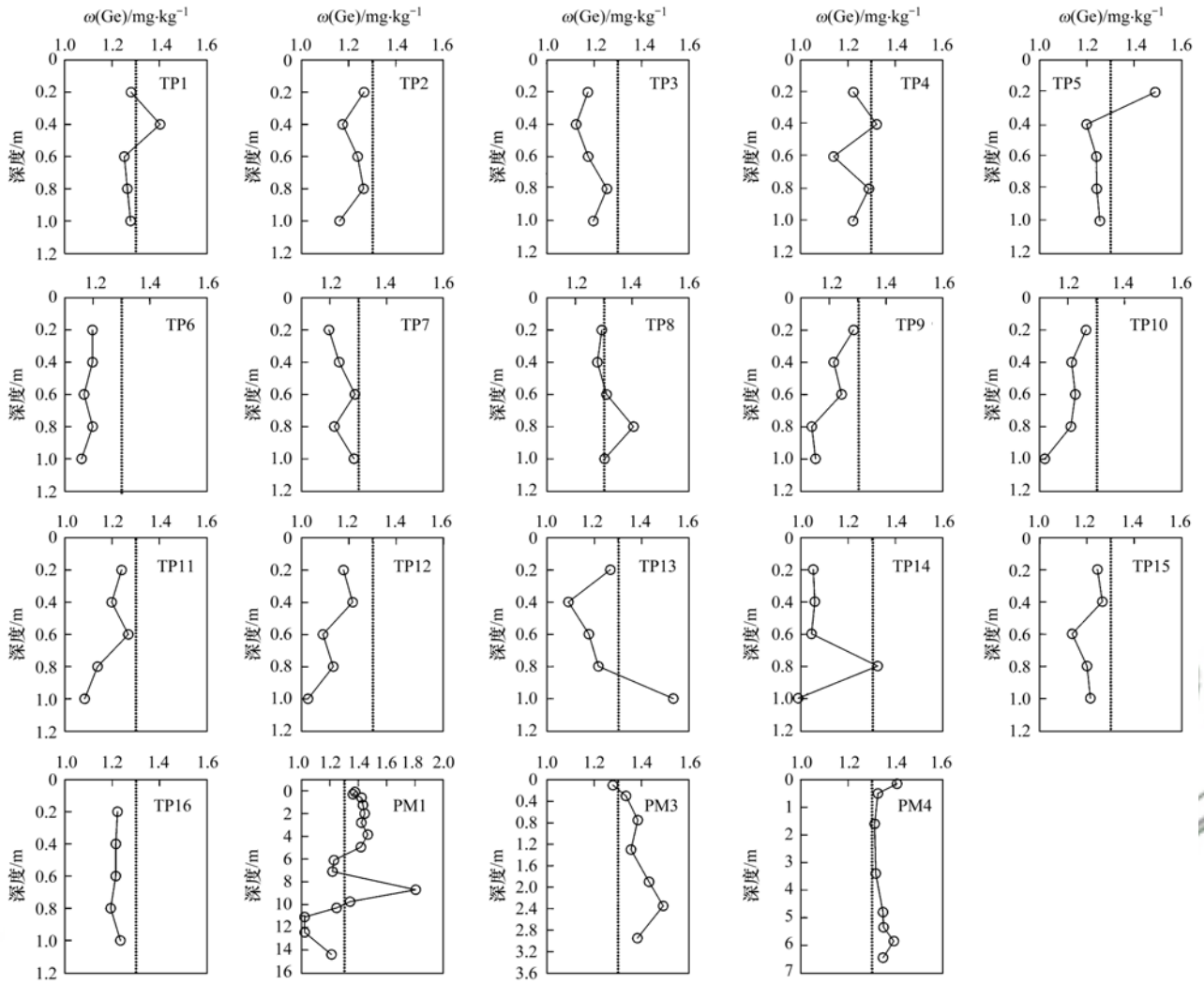
Fig. 11 Ge river migration analysis

16 条垂向剖面中有 10 条剖面全部样品均低于潜在锗标准,TP1、TP4、TP5 和 TP8 属于主河道迁移路径上的剖面,只有 TP13 和 TP14 属于另外 2 条路径,如图 12.表明虽然研究区上游 3 个物源区的土壤 Ge 含量较高,但是下游的垂向土壤中高含量 Ge 只有通过主河道迁移较为明显,其它两种迁移途径贡献不明显,在垂向上并无明显富集规律.

4 结论

(1)张家口市北新屯北部地区区域范围和重点区表层土壤 ω(Ge)平均值分别为 1.209 mg·kg^{-1}和 1.318 mg·kg^{-1},均属于弱空间变异性.依据所确定的锗富集标准,区域范围内的富锗率为 19.7%,富锗及潜在锗范围主要以片状分布于北部地区,重点区富锗率为 52%,主要以斑块状分布于种植区.

(2)表层土壤中 Ge 与 HREE 和 LREE 空间分布呈现良好的相关性,稀土元素含量大小为:紫甘蓝



黑色虚线表示潜在锗界限值

图 12　Ge 含量垂向分布

Fig. 12　Vertical distribution of Ge element content

>彩椒>玉米,而 Ge 吸收强度大小为:玉米(微弱吸收)>紫甘蓝(极弱吸收)>彩椒(极弱吸收),故而作物对 Ge 和稀土元素的吸收并没有明显的协同性.

(3)RDA 结果表明,区域及重点区土壤中 Ge 均与 Cd、Zn、Mn、Ni、V、Co、Cr 和稀土元素等微量元素呈正相关关系,与主量元素 Na、Si、K 和指标 pH 呈负相关关系. PMF 模型研究结果表明,区域 Ge 的来源以天然地质背景因素为主(66.3%),人为活动影响因素(27%)和大气干湿沉降因素(6.7%)为辅,重点区 Ge 的来源以天然地质背景因素(33.8%)和人为活动影响因素(27.2%)为主,大气干湿沉降因素(18.5%)和河流沉积因素(20.5%)为辅.

(4)河流迁移路径研究发现由物源区迁移至堆积区内的 Ge 主要以主河道途径为主,次级河道和洪流途径为辅,且迁移过程中表层土壤 Ge 含量整体表现为泥质土大于砂质土.

参考文献:

[1] 董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 等. 南阳盆地东部山区土壤锗分布特征及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 3278-3287.
Dong Q Y, Lai S Y, Song C, *et al*. Distribution characteristics and influencing factors of germanium in soil in the eastern mountainous area of the Nanyang Basin [J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 3278-3287.

[2] 胡乔木. 中国大百科全书[M]. (第 2 版). 北京: 中国大百科全书出版社, 2009.

[3] 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 等. 钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1166-1176.
Sun H Y, Wei X F, Sun X M, *et al*. Bioaccumulation and translocation characteristics of heavy metals in a soil-maize system in reclaimed land and surrounding areas of typical vanadium-titanium magnetite tailings[J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1166-1176.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Winkler C. Mittheilungen über das Germanium[J]. Journal für Praktische Chemie, 1887, **36**(1): 177-209.

[7] 叶铁林, 徐宝财. 化学元素的奇妙世界[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
Ye T L, Xu B C. The magic world of chemical elements[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.

[8] 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.

[9] 杨婉秋, 肖涵, 缪德仁. 锗、铜、铅和锌在云南大叶种茶树不同组织中的含量分布[J]. 昆明学院学报, 2020, **42**(6): 30-34.
Yang W Q, Xiao H, Miao D R. Concentration distribution characteristics of germanium, copper, lead and zinc in different tissues of Yunnan large-leaved tea plant[J]. Journal of Kunming University, 2020, **42**(6): 30-34.

[10] 李桂珠, 许运新. 锗在水稻—土壤体系内的迁移转化规律研究[J]. 长春师范学院学报(自然科学版), 2007, **26**(1): 62-66.
Li C Z, Xu Y X. Transport and transformation of germanium in the rice-soil system[J]. Journal of Changchun Normal University (Natural Science), 2007, **26**(1): 62-66.

[11] 葛晓立, 李家熙, 万国江, 等. 张家口克山病地区土壤硒的地球化学形态研究[J]. 岩矿测试, 2000, **19**(4): 254-258.
Ge X L, Li J X, Wan G J, *et al*. Study on characteristics of selenium geochemical speciation in soil in Zhangjiakou Keshan disease area[J]. Rock and Mineral Analysis, 2000, **19**(4): 254-258.

[12] 安永龙, 黄勇, 张艳玲, 等. 北京房山南部地区富硒土壤生物有效性特征及来源[J]. 地质通报, 2020, **39**(2-3): 387-399.
An Y L, Huang Y, Zhang Y L, *et al*. Bioavailability and source analyses of Se-enriched soil in the south of Fangshan district, Beijing[J]. Geological Bulletin of China, 2020, **39**(2-3): 387-399.

[13] 谭杰, 谷海军, 肖容容, 等. 2018 年张家口市克山病病情调查及结果评价[J]. 医学动物防制, 2021, **37**(3): 290-293.
Tan J, Gu H J, Xiao R R, *et al*. Investigation and evaluation of Keshan disease in Zhangjiakou City in 2018[J]. Journal of Medical Pest Control, 2021, **37**(3): 290-293.

[14] 苏亮. 张家口区域内开展生态水文监测的探讨[J]. 河北水利, 2010, (8): 33.

[15] 尹海魁, 赵文廷, 李超, 等. 基于生态分区的河北省植被覆盖时空变化特征研究[J]. 土壤通报, 2016, **47**(1): 29-35.
Yin H K, Zhao W T, Li C, *et al*. The spatial-temporal change of vegetation cover based on ecological zones in Heibei province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, **47**(1): 29-35.

[16] 温玲, 徐建平. EPA PMF5.0 在浦东新区降水源解析中的使用研究[J]. 环境科学与管理, 2016, **41**(1): 115-118.
Wen L, Xu J P. Application of EPA PMF5.0 in analysis of precipitation in Pudong New Area[J]. Environmental Science and Management, 2016, **41**(1): 115-118.

[17] Vieira L R, Morgado F, Nogueira A J A, *et al*. Integrated multivariate approach of ecological and ecotoxicological parameters in coastal environmental monitoring studies [J]. Ecological Indicators, 2018, **95**: 1128-1142.

[18] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[19] 鄢明才, 顾铁新, 迟清华, 等. 中国土壤化学元素丰度与表生地球化学特征[J]. 物探与化探, 1997, **21**(3): 161-167.
Yan M C, Gu T X, Chi Q H, *et al*. Abundance of chemical elements of soils in China and supergenesis geochemistry characteristics[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1997, **21**(3): 161-167.

[20] 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 conte elementa of soils in China [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 1991, **12**(4): 12-19.

[21] 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.

[22] 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 Sciences), 2020, **37**(5): 35-39.

[23] 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 Ruoqiang County, Xinjiang[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, **48**(5): 1082-1086.

[24] 段轶仁, 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.

[25] 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 Dagu sewage discharge channel[J]. Environmental Science, 2008, **29**(6): 1693-1698.

[26] Fu W, Luo P, Hu Z Y, *et al*. Enrichment of ion-exchangeable rare earth elements by felsic volcanic rock weathering in South China: Genetic mechanism and formation preference[J]. Ore Geology Reviews, 2019, **114**, doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.103120.

[27] 李朝峰, 李启航, 刘岚君, 等. 贵州蓝莓核心产区岩石-土壤-植物系统稀土元素地球化学特征[J]. 中国稀土学报, 2021, **39**(4): 653-662.
Li C F, Li Q H, Liu L J, *et al*. Geochemical characteristics of rare earth elements in rock soil plant system in blueberry core

production area of Guizhou province[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2021, **39**(4): 653-662.

[28] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. Reviews of Geophysics, 1995, **33**(2): 241-265.

[29] 王蕾, 王艳玲, 李欢, 等. 长期施肥下红壤旱地磷素有效性影响因子的冗余分析[J]. 中国土壤与肥料, 2021, (1): 17-25.
Wang L, Wang Y L, Li H, *et al*. Redundancy analysis of influencing factors of phosphorus availability in red soil upland under long-term fertilization[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021, (1): 17-25.

[30] Gabarrón M, Faz A, Acosta J A. Use of multivariable and redundancy analysis to assess the behavior of metals and arsenic in urban soil and road dust affected by metallic mining as a base for risk assessment[J]. Journal of Environmental Management, 2018, **206**: 192-201.

[31] 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 等. 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5629-5639.
Chen J Y, Liu G B, Cui J L, *et al*. Mobilization of heavy metals in a soil-plant system and risk assessment in the Dabaoshan mine area, Guangdong Province, China[J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5629-5639.

[32] 赖江山. 生态学多元数据排序分析软件 Canoco 5 介绍[J]. 生物多样性, 2013, **21**(6): 765-768.
Lai J S. Canoco 5: a new version of an ecological multivariate data ordination program[J]. Biodiversity Science, 2013, **21**(6): 765-768.

[33] Wang X Q, Zeng X D, Liu C P, *et al*. Heavy metal contaminations in soil-rice system: source identification in relation to a sulfur-rich coal burning power plant in Northern Guangdong Province, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, **188**(8): 460.

[34] 杨子鹏, 肖荣波, 陈玉萍, 等. 华南地区典型燃煤电厂周边土壤重金属分布、风险评估及来源分析[J]. 生态学报, 2020, **40**(14): 4823-4835.
Yang Z P, Xiao R B, Chen Y P, *et al*. Heavy metal distribution, risk assessment and source analysis of soil around a typical coal-fired power plant in South China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(14): 4823-4835.

[35] 开晓莉. 清水河重金属与有机氯农药的环境行为及健康风险研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2021.
Kai X L. Research on environmental behavior and health risks of heavy metals and organochlorine pesticides in Qingshui river [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.

[36] 王丹阳. 青藏高原弯曲河流地貌单元对有机碳迁移的影响规律和机制[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
Wang D Y. Pattern and mechanism of influence of geomorphic units within meandering river of the Tibetan Plateau on organic carbon transport[D]. Changsha: Hunan University, 2020.

[37] 卢家烂, 庄汉平, 傅家谟, 等. 临沧超大型锗矿床的沉积环境、成岩过程和热液作用与锗的富集[J]. 地球化学, 2000, **29**(1): 36-42.
Lu J L, Zhuang H P, Fu J M, *et al*. Sedimentation, diagenesis, hydrothermal process and mineralization of germanium in the Lincang superlarge germanium deposit in Yunnan Province, China[J]. Geochimica, 2000, **29**(1): 36-42.

[38] 段斐. 亚高山针叶林—溪流—河流集合生态系统的氮磷硫迁移过程[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.
Duan F. Transferring process of nitrogen, phosphor and sulfur insubalpine coniferous forest-stream-river meta-ecosystem[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2017.

[39] 林灿阳, 田委民, 叶沛成, 等. 河流底泥活性覆盖板的制备及其对城市内河底泥氮磷释放的抑制效果[J]. 环境工程学报, 2021, **15**(6): 1927-1936.
Lin C Y, Tian W M, Ye P C, *et al*. Preparation of active capping plate for sediment in urban river and its effect on nitrogen and phosphorus reduction[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, **15**(6): 1927-1936.

[40] Cullers R L. The controls on the major and trace element variation of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, **58**(22): 4955-4972.

[41] Chang C, Yin R, Zhang H, *et al*. Bioaccumulation and health risk assessment of heavy metals in the soil-rice system in a typical seleniferous area in central China[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2019, **38**(7): 1577-1584.

[42] Guan Q Y, Wang F F, Xu C Q, *et al*. Source apportionment of heavy metals in agricultural soil based on PMF: A case study in Hexi Corridor, northwest China[J]. Chemosphere, 2018, **193**: 189-197.

[43] Duan X C, Yu H H, Ye T R,, *et al*. Geostatistical mapping and quantitative source apportionment of potentially toxic elements in top- and sub-soils: a case of suburban area in Beijing, China [J]. Ecological Indicators, 2020, **112**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106085.

[44] Wang J X, Feng X B, Anderson C W N, *et al*. Remediation of mercury contaminated sites-a review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **221-222**: 1-18.

[45] Driscoll C T, Mason R P, Chan H M, *et al*. Mercury as a global pollutant: sources, pathways, and effects[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(10): 4967-4983.

[46] Zhang H, Wang Z W, Zhang X S. Methylmercury concentrations and potential sources in atmospheric fine particles in Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **681**: 183-190.

[47] 王硕. 燃煤烟气中气态重金属铅、硒、砷的迁移转化机理研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
Wang S. Research on migration and transformation mechanismof heavy metals lead, selenium and arsenic fromcoal-fired units flue gas [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2021.

[48] 张岚, 倪晋仁, 孙卫玲, 等. 高含沙水体中黄土吸持和释放铜的机理[J]. 环境科学, 2003, **24**(3): 79-84.
Zhang L, Ni J R, Sun W L, *et al*. Copper sorption and desorption by loess in water-sediment systems[J]. Environmental Science, 2003, **24**(3): 79-84.

[49] Ralkıs N, Çağatay M N. Factors controlling metal distributions in the surface sediments of the Erdek Bay, Sea of Marmara, Turkey [J]. Environment International, 2001, **27**(1): 1-13.

[50] 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.

[51] 余飞, 张永文, 王宇, 等. 重庆典型农业区富锗土壤分布特征及影响因素[J]. 地质与资源, 2021, **30**(5): 609-616.
Yu F, Zhang Y W, Wang Y, *et al*. Distribution characteristics and influencing factors of germanium-rich soil in typical agricultural area of Chongqing Municipality[J]. Geology and Resources, 2021, **30**(5): 609-616.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 44 No. 3

Mar. 15, 2023

CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition ····· CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, *et al.* (1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances(PFASs) ····· SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, *et al.* (1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters ····· WANG Si-meng, QIN Bo-qiang (1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment ····· ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, *et al.* (1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO_2 Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt ····· WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, *et al.* (1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China ····· LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, *et al.* (1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model ····· LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, *et al.* (1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis ····· TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, *et al.* (1287)
Pollution Characteristics of $PM_{2.5}$ Chemical Composition in Zhejiang Province ····· ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, *et al.* (1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing ····· XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, *et al.* (1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution ····· YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, *et al.* (1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019 ····· SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, *et al.* (1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds ····· SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, *et al.* (1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020 ····· SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, *et al.* (1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory ····· XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, *et al.* (1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model ····· OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, *et al.* (1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin ····· CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, *et al.* (1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin ····· YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, *et al.* (1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province ····· CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, *et al.* (1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo ····· XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, *et al.* (1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area ····· WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, *et al.* (1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River ····· LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, *et al.* (1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area ····· DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, *et al.* (1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir ····· WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, *et al.* (1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin ····· SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-rui, *et al.* (1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang ····· GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, *et al.* (1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs ····· DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, *et al.* (1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River ····· TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, *et al.* (1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau ····· GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, *et al.* (1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline ····· ZENG Shao-yi, LI Kun-quan (1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper ····· MIN Bing-kun, LI Kun-quan (1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes ····· LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui (1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis ····· YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, *et al.* (1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation ····· DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, *et al.* (1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region ····· LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, *et al.* (1562)
CH_4 Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO_2 Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain ····· SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, *et al.* (1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types ····· ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, *et al.* (1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang ····· LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, *et al.* (1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China ····· YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, *et al.* (1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section) ····· SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, *et al.* (1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou ····· KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, *et al.* (1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province ····· WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, *et al.* (1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia ····· LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, *et al.* (1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range ····· WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, *et al.* (1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil ····· MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang (1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process ····· LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, *et al.* (1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin ····· LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, *et al.* (1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation ····· ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, *et al.* (1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland ····· FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, *et al.* (1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by *Solanum photeinocarpum* and *Pterocypsela indica* ····· CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, *et al.* (1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning ····· WANG Rui, LI Yu, YU Jing, *et al.* (1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City ····· AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, *et al.* (1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of *Taxodium distichum* in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area ····· TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, *et al.* (1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities ····· ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, *et al.* (1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality ····· WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, *et al.* (1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure ····· ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, *et al.* (1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland ····· ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, *et al.* (1792)