

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

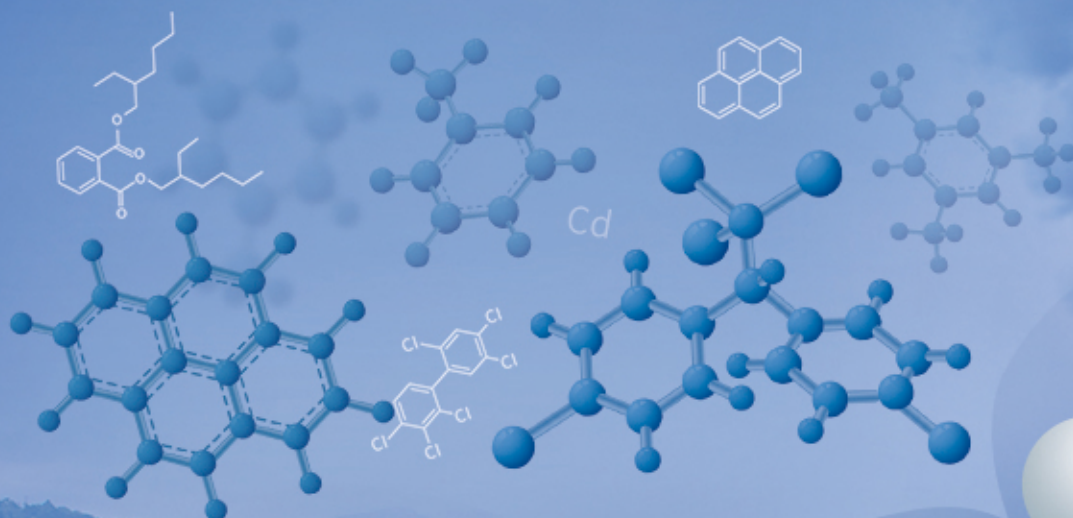
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

PAEs

OCPs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期
Vol.42 No.10

目次

PM _{2.5} 化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用	蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)
汾渭平原 PM _{2.5} 空间分布的地形效应	黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)
华中地区冬季灰霾天气下 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例	李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)
华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性	黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)
成都市春季 O ₃ 污染特征及关键前体物识别	韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)
基于边界观测的长三角某工业区 O ₃ 来源特征	黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)
廊坊开发区 8~9 月 O ₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析	张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)
广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响	曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)
厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应	徐超, 吴水平, 刘怡靖, 钟雪芬 (4650)
北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响	吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖若, 朱晓娟 (4660)
两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响	朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)
燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律	杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)
长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响	王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)
土地利用对太湖入湖河道营养盐的影响	连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)
基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征	梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡恒, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)
三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价	任丙南, 耿静 (4717)
升金湖水体优先污染物筛选与风险评价	龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)
天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素	杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)
华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素	张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)
快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)
盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析	王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)
基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度	周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)
硼酸和磷酸对 PMS/Co ²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制	万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 文刚 (4789)
磁性生物炭负载 α-MnO ₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚	李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)
紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制	张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)
铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性	王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)
低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制	李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)
我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价	耿源濂, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝晓, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)
不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较	杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)
部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳	秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)
同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能	周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)
多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用	赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)
柴达木盆地表土重金属污染与来源分析	陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)
快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险	李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)
广西都安县典型水田土壤地球化学特征及影响因素	刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)
炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害	邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)
海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险	杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)
环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索	苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)
银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估	张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)
施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响	李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)
我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析	吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)
青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)
松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构	王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)
不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征	南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)
稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应	罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)
铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析	曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)
有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响	周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)
水稻产量、稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对长期大气 CO ₂ 浓度升高的响应	于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)
原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响	闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)
中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因素	李宇, 周德成, 闫章美 (5037)
室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展	张万众, 张彭义 (5046)
《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)	

柴达木盆地表土重金属污染与来源分析

陈亮^{1,2}, 张西营^{1,2}, 唐启亮^{1,2}, 耿鋈^{1,2,3}, 王二龙^{1,2,3}, 李姜瑶^{1,2,3}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 西宁 810008; 2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 西宁 810008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 柴达木盆地主要土类为盐化荒漠土和石膏荒漠土, 为了了解区内表层土壤重金属的污染特征、空间分布及污染源, 在盆地内以主要沉积地貌为对象, 以 25 km 左右为采样半径, 共采集了 129 件表土(0~10 cm)样品, 对表土中的 As、Ba、Cr、Mn、Nb、Ni、Pb、Ti、Zn 和 Zr 等 10 种重金属进行含量测定, 并利用富集因子(EF)、地累积指数(I_{geo})及绝对主成分-多元线性回归(APCS-MLR)受体模型等初步定量分析了重金属的污染程度及潜在来源。结果表明, 柴达木盆地 10 种表土重金属元素自 20 世纪 60 年代以来, 有不同程度的富集, As 与 Pb 可能存在点源污染, 整个盆地总体上在尚清洁状态到低污染之间, APCS-MLR 分析表明, 表土重金属受 2 个来源影响, 分别为自然因子和交通因子, As、Cr、Mn、Nb、Ni、Ti、Zn 和 Zr 受自然因素影响, Ba 和 Pb 受自然因素和交通运输双重影响。

关键词: 柴达木盆地; 表土; 重金属; 污染分布; 绝对主成分-多元线性回归(APCS-MLR)

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-4880-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202101052

Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin

CHEN Liang^{1,2}, ZHANG Xi-ying^{1,2}, TANG Qi-liang^{1,2}, GENG Jun^{1,2,3}, WANG Er-long^{1,2,3}, LI Jiang-yao^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lakes, Xining 810008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To understand surface soil heavy metal pollution characteristics, and the spatial distribution and sources of pollution in the main sedimentary features of the Qaidam Basin, a total of 129 topsoil samples(0-10 cm) were collected within a 25 km radius. The concentrations of As, Ba, Cr, Mn, Nb, Ni, Pb, Ti, Zn, Zr, and ten kinds of heavy metals were determined, the degree of contamination and potential sources quantitatively analyzed based on enrichment factors(EFs), the ground accumulation index(I_{geo}), and the absolute principal component-multiple linear regression(APCS-MLR) receptor model. The results showed that the surface soils of the Qaidam Basin have experienced pollution from ten kinds of heavy metals since the 1960s, with varying degrees of enrichment. As and Pb represent probable point source pollutants, and the basin as a whole shows negligible to low levels of pollution. The APCS-MLR analysis showed that heavy metal pollution derives from two sources, natural factors and anthropogenic (transportation) sources. Specifically, As, Cr, Mn, Nb, Ni, Ti, Zn, and Zr are associated with natural sources, while Ba and Pb are associated with both natural and anthropogenic sources.

Key words: Qaidam Basin; surface soil; heavy metals; pollution distribution; absolute principal component-multiple linear regression(APCS-MLR)

土壤一旦被重金属污染, 通过自净能力完全复原周期长达千年^[1], 重金属进入食物链不仅降低了作物的产量, 其累积的毒害还可能损害动物和人类的健康, 从而危害生态系统^[2~4]. 土壤中重金属的来源是多途径的^[5]. 此外, 人类工农业生产活动, 也造成重金属对土壤的污染. 其中 Ar、Cr、Ni、Pb 和 Zn 等已被美国环保署(USEPA)列为主要优先污染物清单^[6]. 近些年, 国内外学者针对土壤重金属污染进行了大量研究^[3], 结果发现在工矿业发展、自然风化及交通发达等不同因素影响下, 表土重金属污染具有差异性^[6~12]. 污染源识别是污染防治的前提, 目前源识别主要应用受体模型, 通过不同计算技术与方法(如富集因子法、化学元素平衡法、聚类分析法、因子分析法、主成分分析和目标变换因子分析等多变量分析法与类型识别技术等), 以获得某观测点(即受体)的贡献量大小。

柴达木盆地位于青藏高原东北部, 青海省西北部, 主要在青海省海西蒙古族藏族自治州, 东北抵祁连山脉, 西北有阿尔金山脉, 西南至昆仑山脉, 面积约 24 万 km², 属封闭性的巨大山间断陷盆地, 是中国四大盆地之一. 盆地内盛产铜矿、铁矿、盐矿和锡矿等多种矿物, 故被称作“聚宝盆”. 柴达木循环经济试验区是国家首批 13 个循环经济产业试点园区之一, 是国内面积最大、唯一一个布局在少数民族地区的循环经济试点园区, 是世界上最大的循环经济园区. 有研究表明, 20 世纪 90 年代以来, 青藏高原湖泊受到 Fe、Mn、Cr 和 Ni 的污染较为严重,

收稿日期: 2021-01-07; 修订日期: 2021-03-26

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0805); 青海省应用基础研究计划项目(2018-ZJ-723); 青海省创新平台项目(2018-ZJ-T10)

作者简介: 陈亮(1981~), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为盐湖遥感与环境变化, E-mail: chen@isl.ac.cn

尤其重金属元素 Cr、Ni 超标极为严重,可能与人类活动有关^[13]. 随着交通运输业的发展,道路两侧土壤重金属增高引起了广泛关注^[10]. 目前,柴达木盆地的土壤重金属相关研究较少,多集中于某几个重金属元素;通过不同计算技术与方法,以获得某观测点(即受体)的贡献量大小的研究不足. 全面了解柴达木盆地地表土重金属的污染模式、空间分布及来源分析,是盆地内土壤污染防治的前提,因此,本文对区内 10 种重金属元素 As、Ba、Cr、Mn、Nb、Ni、Pb、Ti、Zn 和 Zr 进行分析,定量阐述其主要影响因素的贡献率,以期为柴达木盆地土壤污染防治提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

于 2019 年 11 月对柴达木盆地开展了实地采样

工作,采集了 0~10 cm 的沉积类型的表土,采样间距控制在 25 km 左右. 样品采集主要集中于柴达木盆地内昆仑山北缘、祁连山南缘和沿着 G315 国道的沉积区(图 1),采样时需满足以下标准:①采样点尽量远离人类活动范围;②样品具有较好的代表性;③采样点的周围应开阔,采样点水平线与周围建筑物高度的夹角应不大于 30°,采样点周围无局部污染源并避开树木及吸附能力较强的建筑物,距采样点 500~1 000 m 范围内不应有炉灶、烟囱、公路等,以消除局部污染源对监测结果代表性的影响. 样品采集:采用手工挖掘的方法,使用手铲采集 1 m×1 m 范围内、0~10 cm 深度的扰动样本若干,并获得整群混合样,将混合后的样品放入自封袋编号,并对周围环境进行拍照和土质描述,整个采样过程符合土壤质量土壤采样技术指南(GB/T 36197-2018)^[14],共采集表土样品 129 件.

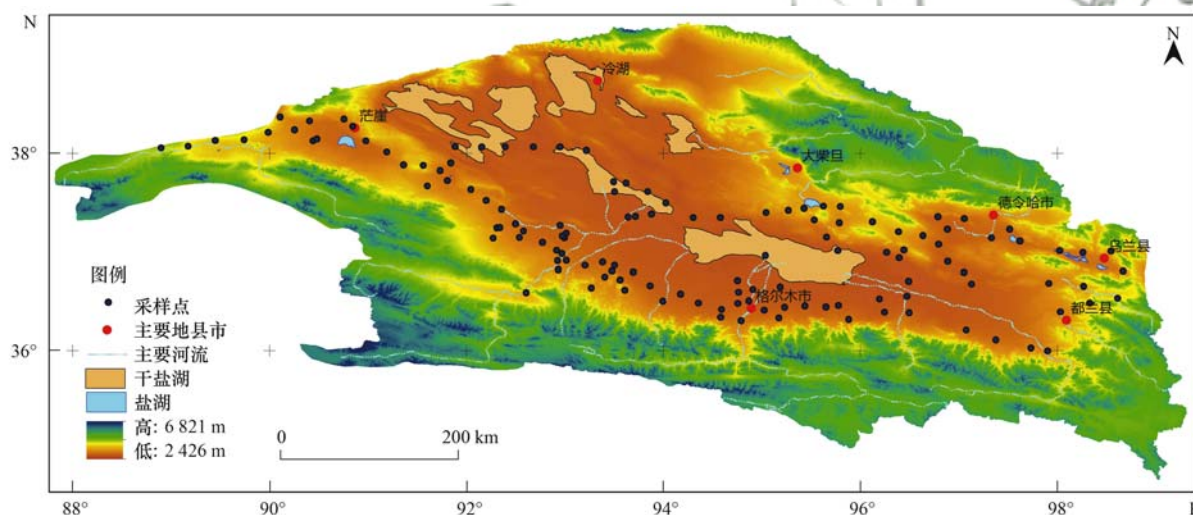


图 1 柴达木盆地地表土采样点位置分布示意

Fig. 1 Sampling locations of surface soils in the Qaidam Basin

1.2 样品处理与分析

将土样去除植物残体、砾石等杂物后,取样品约 50 g 放置在蒸发皿中,在烘箱中以最低风速进行 12 h 的低温烘干,并防止样品间交叉污染,后按四分法取土研磨过 200 目筛. 土样重金属元素含量测定于中国科学院青海盐湖研究所分析测试中心完成,采用 X 射线荧光光谱法对 As、Ba、Cr、Mn、Nb、Ni、Pb、Ti、Zn 和 Zr 这 10 种重金属元素进行测定,设备使用德国布鲁克公司生产的 S2 PUMA Series II 型 X 射线荧光光谱仪. 样品的制备使用粉末压片法,采用自制内控标样建立工作曲线,数量不少于 10 个,且有一定的浓度梯度;玻璃熔融法采用国家标准物质建立工作曲线,数量不少于 10 个,且有一定的浓度梯度;压片压力保证 30 t、保压时间达到 30 s;当样品的粘结性较差难以压制结实成结实的样片

时,添加一定量的粘结剂;准确称量 10 g 样品和 0.5 g 甲基纤维素,将称好的样品和粘结剂倒入 WC 料钵中,再加入 2 滴三乙醇胺,于振动磨上混合 120 s. 确定背景的位置的原则:①若谱峰两边背景水平等高,选择单点法扣背景;②若谱峰两边背景水平不等高,选择两点法扣背景;③背景点不能选择在干扰谱线附近;所有元素的响应值均达到噪声的 3~5 倍. 样品分析质量通过国家土壤成分分析标准物质 GBW07448(GSS-19)、GBW07448(GSS-20)和 GBW07448(GSS-21)控制,回收率 85%~115%,合格率为 100%.

1.3 重金属污染评价方法

采用富集因子法、地累积指数及 Nemer 综合指数,对表土重金属的富集程度及污染水平进行评价. 其中,富集因子法能够较准确地判断自然或人为

污染,地累积指数考虑了自然地质过程造成的背景值影响,Nemero 综合指数则对污染评价进行了分级.

富集因子法^[15] (EF)计算公式为:

$$EF = (C_i/C_r)_{\text{sample}} / (C_i/C_r)_{\text{background}}$$

式中, C_i 为第 i 个土壤元素含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), C_r 为参考元素含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), $(C_i/C_r)_{\text{sample}}$ 为 C_i 元素的相对浓度,同样, $(C_i/C_r)_{\text{background}}$ 为地壳中相应元素的相对浓度,通常选择 Fe、Al、Si、Ti 和 Sc 等作为参考元素,因 Ti 挥发性低、化学稳定性好,且人为污染源较少,故本研究选取 Ti 作为参考^[15]. EF 可用来评估元素的富集程度(表 1),区分元素的人为和自然来源. $EF \leq 1$ 时,表明较参考背景而言,土壤元素并未发生富集,反之,若 $EF > 1$ 时,则表明发生了成土元素富集或受到一定程度人为输入的影响. 另外,自然成土过程中的 EF 值一般小于 2,因此较高的 EF 值则可能指向重要的人为输入. 上述地壳中元素含量(即地壳的元素丰度)可用地球化学上的数据,本研究采用泰勒(Taylor)的地壳元素丰度^[16].

地累积指数^[17,18] (I_{geo})计算公式为:

表 1 PN(Nemero 综合指数)、 I_{geo} (地累积指数)、EF(富集因子)和污染程度信息

Table 1 Nemero synthesis index(PN), I_{geo} , EF, and contamination grades

PN	污染程度	I_{geo}	污染程度	EF	富集等级
$PN \leq 0.7$	清洁	$I_{\text{geo}} \leq 0$	未受污染	$EF < 2$	低富集
$0.7 < PN \leq 1$	尚清洁	$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	未受-中度污染	$2 \leq EF < 5$	中度富集
$1 < PN \leq 2$	低污染	$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	中度污染	$5 \leq EF < 20$	显著富集
$2 < PN \leq 3$	中度污染	$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	中度-严重污染	$20 \leq EF < 40$	高度富集
$3 < PN$	严重污染	$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	严重污染	$40 \leq EF$	极度富集
		$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	严重-极度污染		
		$5 < I_{\text{geo}}$	极度污染		

1.4 重金属来源分析

利用相关性分析(PEARSON)、主成分分析^[21] (PCA)和主成分分析-绝对主成分分数-多元线性回归受体模型^[22~32] (PCA-APCS-MLR)对柴达木盆地表土重金属来源进行分析. 其中,相关性及 PCA 分析能够定性分析污染来源,当元素间相关性较强且存在于同一主成分时,则来源可能相同或相似. 基于 PCA 分析,进一步得到绝对主成分分数(APCS),进行多元线性回归(MLR),计算各因子对表土重金属污染的贡献率,定量表征各污染源对土壤质量的贡献,得出各主成分对各重金属的影响程度.

PCA-APCS-MLR 源分析主要步骤如下.

① 将数据标准化后引入 0 度因子:

$$(Z_0)_i = (0 - \bar{C}_i) / \sigma_i$$

② PCA 归一化因子分数减 Z_0 得到绝对主成分因数(APCS).

③ 以 APCS 为自变量,重金属含量为因变量进

$$I_{\text{geo}} = \log_2(C_n / 1.5B_n)$$

式中, C_n 为土壤中元素 n 的实测含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), B_n 为相应元素背景值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),根据姬亚芹等^[17] 的研究,本研究使用中国土壤元素背景值作为相应元素背景值^[19],由于缺少 Nb 的背景值,则采用世界土壤背景值代替,常数 1.5 为修正指数,是考虑到由于成岩作用可能会引起背景值的变动,通常用来表征沉积特征、岩石地质及其它影响. I_{geo} 可用来评估土壤的污染程度(表 1).

Nemero 综合指数^[19] (PN)计算公式为:

$$PN_j = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\text{max}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2}{2}}$$

式中, PN_j 为第 j 点的综合污染指数, C_i 为实测值, S_i 为第 i 个元素的评价标准限值,在此选取中国土壤元素背景值(青海)^[16] 作为标准限值,由于缺少 Nb 的标准限值,则采用世界土壤背景值代替^[16]. 这种评价方法与 EF 和 I_{geo} 相比,对自然原生高背景含量和人为活动产生污染物的评价结果表现不同^[18]. 根据绿色食品现场环境调查监测与评价规范规定^[20], 确定了 PN 分级标准(表 1).

行多元线性回归,利用回归系数计算每个重金属的源贡献量:

$$C_i = b_{i0} + \sum_{p=1}^p (b_{pi} \times \text{APCS}_p)$$

$$t_i = 100\% \times r_p / \sum_{p=1}^p r_p$$

式中, $\bar{C}_i$ 为重金属含量算数平均值, σ_i 为其标准偏差, C_i 是含量估计值, b_{i0} 是多元线性的常数项, b_{pi} 是多元线性的回归系数, r_p 为因子 p 对 C_i 的回归系数, t_i 为因子 i 的污染贡献率.

2 结果与讨论

2.1 重金属元素含量统计

柴达木盆地表土重金属元素描述性统计见表 2,与大陆上地壳(UCC)^[16] 相比,柴达木盆地表土重金属 As 和 Cr 的含量偏高, Ni 和 Pb 的含量相差不大, Ba、Mn、Nb、Ti、Zn 和 Zr 的含量偏低. 与世

界土壤背景值相比^[16], As 和 Nb 的含量相差不大, Ba、Cr、Mn、Ni、Pb、Ti、Zn 和 Zr 的含量偏低. 与中国土壤背景值相比^[16], As、Ni 和 Pb 的含量相差不大, Ba、Cr、Mn、Ti、Zn 和 Zr 的含量偏低. 与青海土壤背景值相比^[16], As 和 Pb 的含量相差不大, Ba、Cr、Mn、Ni、Ti、Zn 和 Zr 的含量偏低. 与可可西里地区土壤背景值相比^[33], Ba 的含量偏高, As、Cr、Nb、Ni、Pb 和 Zn 的含量相差不大, Mn 和 Zr 的含量偏低. 总体来看, 只有 As 和 Cr 的含量与 UCC 相比偏高, Ba 较可可西里地区偏高, 分别偏高了 6.73、15.81 和 64.97 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 但偏高不大, 这说明柴达木盆地土壤重金属元素含量大致与我国及世界的土壤背景值相近, 变化不大.

柴达木盆地土壤重金属元素含量变异系数由大到小依次为: $\text{Ni} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Zr} > \text{Nb} > \text{Ti} > \text{Ba} > \text{Mn}$, 其中, 高变异(变异系数在 50%~100%)的有 Ni 和 As, 说明这 2 种元素空间异质性较强, 可能存在点源污染. 而且, 这些变异系数较高的元素通常偏度和峰度也较高, 这进一步表明人类活动可能是引起导致元素空间异质性增强的主要因素^[25]. 中等变异(变异系数在 20%~50%)的元素由高到低依次为 Pb、Cr、Zn、Zr、Nb、Ti 和 Ba, 说明这些元素含量的空间异质性较大. 中国土壤元素背景值 Ti 含量 95% 的范围值为 1 500~6 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[16], 本研究 Ti 的变异系数最低为 20.69%, 仅次于 Mn, 其含量低于 UCC、中国土壤背景值和青海土壤背景值, 因此 Ti 适合作为参考元素.

表 2 柴达木盆地土壤重金属含量统计¹⁾

元素	本研究						Table 2 Descriptive statistics of heavy metals in the Qaidam Basin				
	最大值	最小值	平均值	变异系数	偏度	峰度	UCC ^[19]	世界土壤 ^[19]	中国土壤 ^[19]	青海土壤 ^[19]	可可西里土壤 ^[33]
As	49.60	1.75	8.23	59.39	4.87	38.99	1.5	6	11.2	11.2	13.28
Ba	627.29	66.48	425.50	20.37	-0.78	1.87	550.0	500	469.0	411.0	360.53
Cr	153.75	10.79	50.81	34.41	1.31	8.27	35.0	70	61.0	70.1	47.80
Mn	881.60	259.63	478.32	18.73	0.63	2.18	600.0	1 000	583.0	580.0	503.80
Nb	19.60	1.95	10.18	30.87	-0.06	0.45	25.0	10	—	—	9.31
Ni	151.27	3.32	19.16	71.05	7.30	68.90	20.0	50	26.9	29.6	23.59
Pb	75.01	5.65	17.42	38.08	5.15	43.40	20.0	35	26.0	20.9	16.54
Ti	4 518.60	872.52	2 698.26	20.69	-0.18	0.80	3 000.0	5 000	3 800.0	3 200.0	—
Zn	103.20	14.00	44.28	34.15	1.06	2.03	71.0	90	74.2	80.3	51.41
Zr	492.18	68.33	182.05	32.43	1.29	4.90	190.0	400	256.0	214.0	248.20

1) 元素含量单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数单位为%, 偏度与峰度无单位, “—”表示文献中无相关数据

2.2 重金属污染评价

2.2.1 富集因子

柴达木盆地土壤重金属富集程度如图 2 所示, 平均富集程度由大到小依次为: $\text{As} (9.61) > \text{Pb} (2.99) > \text{Zr} (2.33) > \text{Ba} (2.16) > \text{Zn} (1.33) > \text{Mn} (1.08) > \text{Nb} (1.07) > \text{Cr} (1.06) > \text{Ni} (0.54)$. As 为显著富集, 这主要是由于泰勒 (Taylor) 的地壳元素丰度 As 的值为 1.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[16], 明显低于世界土

壤背景值 (6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和中国土壤背景值 (11.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 这导致了 As 的富集程度总体偏高, 其中 93.02% 的样点为显著富集, 有一例样点达到了 44.68, 为极度富集, 这个样点在格尔木市乌图美仁乡以南牧场内, 这可能与畜牧及施肥有关^[34]. Pb、Zr 和 Ba 总体呈现中度富集, 这其中只有 3.88% 的 Pb 样点呈现显著富集, 这是因为部分样点周边有正在开采的矿山所致^[35]. Cr、Mn、Nb、

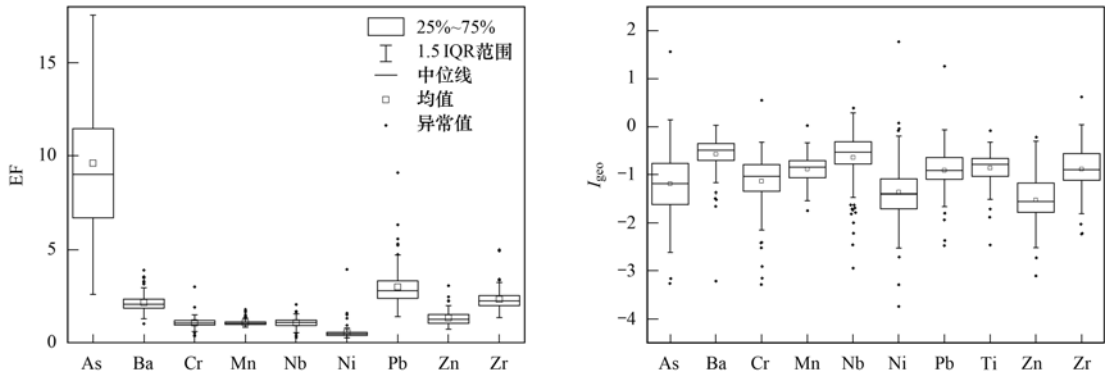


图 2 柴达木盆地土壤重金属 EF 和 I_{geo} 箱线图

Fig. 2 Box-line diagrams of heavy metals EF and I_{geo} in the Qaidam Basin

Ni 和 Zn 总体呈现低富集,低富集的样点数分别占到了 99.22%、100%、99.22%、99.22% 和 96.90%。8 种重金属元素的 EF 值均大于 1,这表明柴达木盆地

较 20 世纪 60 年代以来有不同程度的富集现象,As 较为突出,As 与 Pb 的富集因子(EF)空间分布见图 3。

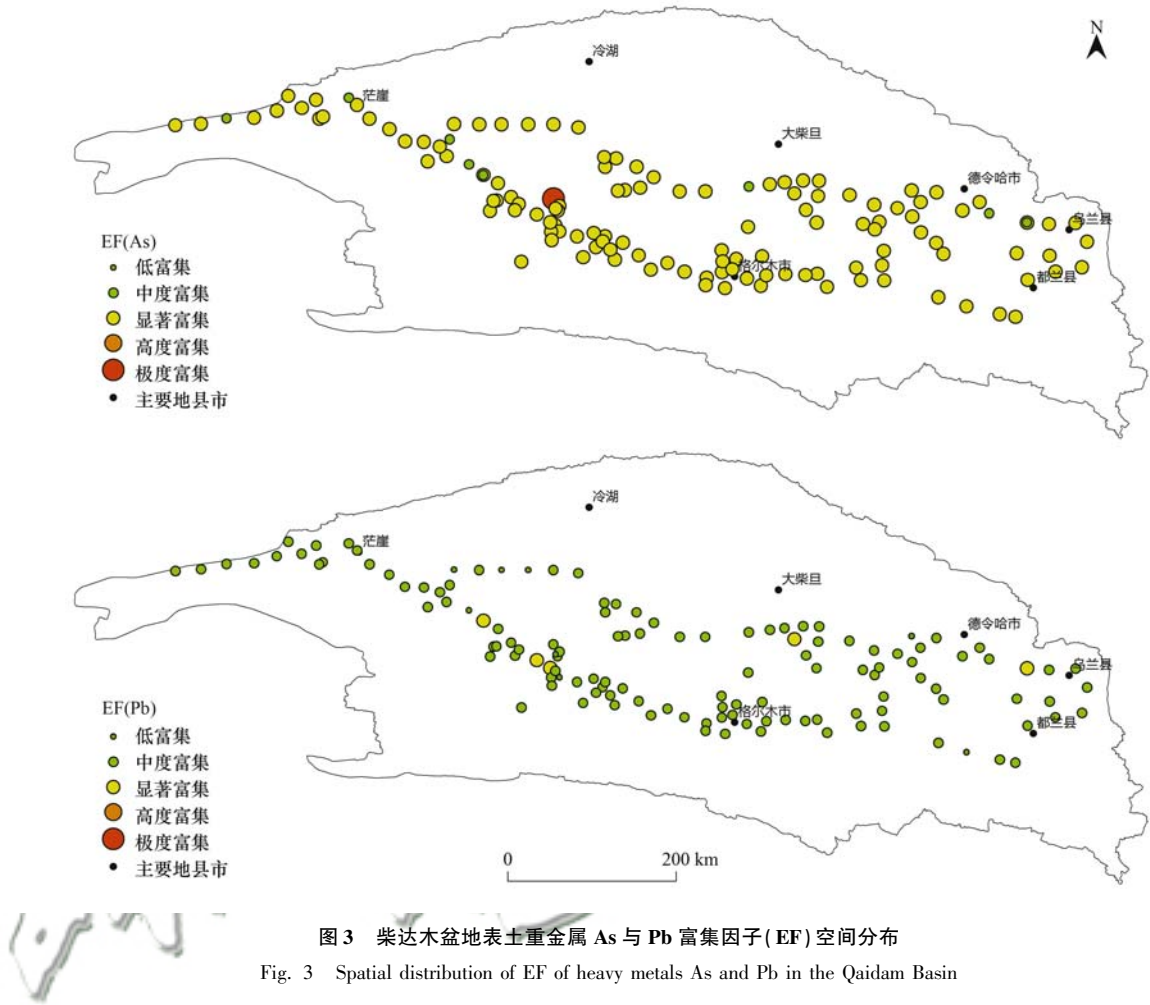


图 3 柴达木盆地土壤重金属 As 与 Pb 富集因子(EF) 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of EF of heavy metals As and Pb in the Qaidam Basin

2.2.2 地累积指数

柴达木盆地土壤重金属污染地累积指数如图 2 所示,其指数平均值由大到小依次为: Ba(-0.575) > Nb(-0.645) > Ti(-0.866) > Mn(-0.888) > Zr(-0.891) > Pb(-0.917) > Cr(-1.142) > As(-1.194) > Ni(-1.372) > Zn(-1.524)。所有样本中,As 2 例、Ba 2 例、Cr 1 例、Mn 1 例、Nb 8 例、Ni 1 例和 Zr 2 例共 17 例为未受污染-中度污染(0.001 ~0.617); As 1 例、Ni 1 例和 Pb 1 例共 3 例为中度污染(1.259 ~1.768); 整个样本无 $I_{geo} > 2$,而中度污染的 3 例数据非同一表土样本,故也无法判断是否为点污染源,其余所有重金属元素 I_{geo} 值都小于 0,达到了所有样本 10 种重金属 I_{geo} 值的 98.45%,表明柴达木盆地污染程度较小,整体上几乎未受到重金属污染。

2.2.3 Nemero 综合指数

柴达木盆地土壤重金属污染 Nemero 综合指数(PN)如图 4 所示,3.88% 的样本的 PN 小于 0.7 处于清洁状态,37.21% 的样本处于尚清洁状态,

56.59% 的样本处于低污染,0.78% 的样本处于中度污染,1.54% 的样本处于严重污染,表明整个环境从清洁到严重污染不等,中度污染与严重污染共出现 3 例,分布在盆地的不同区域,第 1 例 PN 为 2.77,在大柴旦行政区锡铁山镇附近,第 2 例 PN 为 3.39,在格尔木市乌图美仁乡南部牧场内,第 3 例 PN 为 3.87,在茫崖市西部老茫崖石棉矿附近,第 1、3 例在矿山附近,PN 偏高与矿山的开采及粉尘有关,第 2 例主要是由于 As 偏高导致的,这个样点在格尔木市乌图美仁乡以南牧场内,这可能与畜牧及施肥有关^[34],这与 EF 的分析结构一致,有 93.80% 样本在尚清洁状态到低污染之间,这表明整个盆地重金属污染尚不严重,但需保持警惕。PN 与 EF 值相接近,而大于 I_{geo} 值,这是由于 PN 考虑了最大值后提升了污染等级,说明 PN 在评价土壤污染时,注重极值对环境的影响。

基于上述 3 种污染指数分析可以看出,整个柴达木盆地只有极少区域出现了不同程度的污染,这可能与盆地内矿产开发相关,石棉、锡铁矿床开采与自

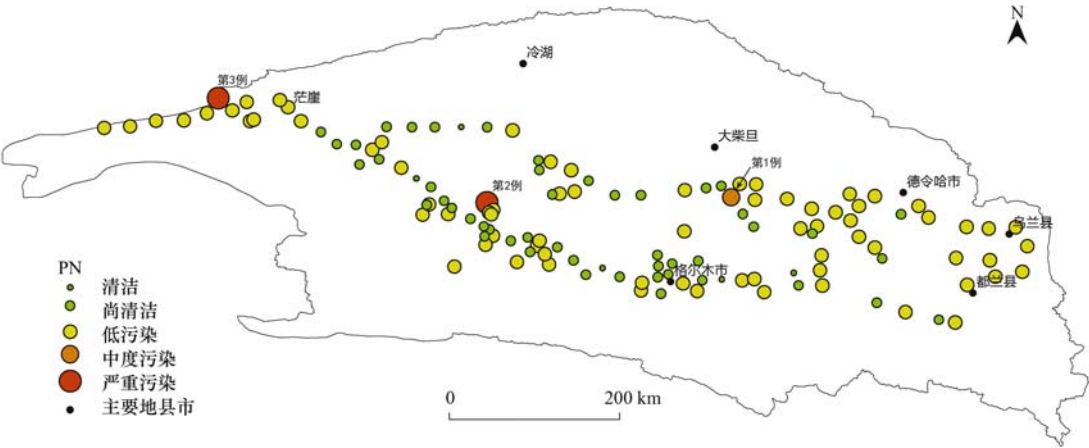


图4 柴达木盆地地表土重金属 Nemero 综合指数 (PN) 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of Nemero synthesis index (PN) of heavy metals in the Qaidam Basin

然风化可能导致了 As 和 Pb 的释放.同时,柴达木盆地作为青海省重要的矿产资源区,高交通量、高排放量是导致污染偏高的叠加效应^[35].总体上看,整个柴达木盆地地表土重金属污染尚不严重,但需保持警惕.

2.3 重金属来源分析

2.3.1 相关性分析

柴达木盆地地表土重金属相关性见表3,可见 As-Mn、As-Zn、Cr-Ni、Cr-Ti、Mn-Nb、Mn-Ti、Mn-Zn、Nb-Ti、Nb-Zn、Ti-Zn 和 Ti-Zr 共 11 组重金属元素呈显著相关($P>0.6$),As-Cr、As-Nb、As-Ni、As-Pb、

As-Ti、Ba-Cr、Ba-Mn、Ba-Nb、Ba-Pb、Ba-Ti、Ba-Zn、Cr-Mn、Cr-Nb、Cr-Pb、Cr-Zn、Cr-Zr、Mn-Ni、Mn-Pb、Mn-Zr、Nb-Ni、Nb-Pb、Nb-Zr、Ni-Zn、Pb-Ti 和 Pb-Zn 共 25 组重金属元素呈中等相关($0.3 < P \leq 0.6$),As-Ba、As-Zr、Ba-Ni、Ba-Zr、Ni-Pb、Ni-Ti、Ni-Zr、Pb-Zr 和 Zn-Zr 共 9 组重金属元素呈弱相关或无相关性.可以看出,大多数重金属元素呈显著相关或中度相关,可能具有共同或相似的来源,另外 9 组重金属元素中有 5 组包括了 Zr,表明 Zr 可能与其他重金属元素有不同的来源.

表3 柴达木盆地地表土重金属含量相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis of heavy metals in the Qaidam Basin

	As	Ba	Cr	Mn	Nb	Ni	Pb	Ti	Zn
As	1.000								
Ba	0.134	1.000							
Cr	0.307	0.501	1.000						
Mn	0.701 **	0.368	0.587	1.000					
Nb	0.337	0.342	0.539	0.722 **	1.000				
Ni	0.363	0.148	0.693 **	0.463	0.324	1.000			
Pb	0.322	0.351	0.382	0.349	0.344	0.116	1.000		
Ti	0.400	0.516	0.668 **	0.805 **	0.769 **	0.278	0.387	1.000	
Zn	0.671 **	0.315	0.470	0.839 **	0.615 **	0.422	0.572	0.618 **	1.000
Zr	0.142	0.250	0.420	0.420	0.500	0.043	0.183	0.644 *	0.198

1) * 表示 $P<0.05$ 下的显著相关, ** 表示 $P<0.01$ 下的显著相关

2.3.2 主成分分析

通过之前的相关性分析,表明柴达木盆地地表土重金属元素含量相关性较好,适合进行主成分分析(表4),对数据进行相关矩阵特征值分析,得到前4个主成分的贡献率达到了83.91%,而其余每个成分的贡献率小于6%,根据陡坡图(略)中出现的凸点值,也可确定选择的主成分数为4.

第一主成分(F1)的贡献率为51.09%,远高于其他主成分,载荷较高的重金属元素有 Mn、Ti、Zn、Nb、Cr 和 As,分别为0.403、0.390、0.367、0.355、0.346和0.278,这6种重金属元素含量呈现了较高的相关性(表3),以此可以推断这6种重金属具有

表4 柴达木盆地地表土重金属含量主成分分析

Table 4 Principal component analysis of heavy metals in the Qaidam Basin

元素	F1	F2	F3	F4
As	0.278	-0.470	-0.259	-0.191
Ba	0.238	0.314	0.077	0.588
Cr	0.346	0.068	0.489	0.184
Mn	0.403	-0.135	-0.094	-0.231
Nb	0.355	0.174	-0.045	-0.219
Ni	0.238	-0.383	0.664	0.013
Pb	0.243	-0.044	-0.403	0.574
Ti	0.390	0.282	-0.046	-0.127
Zn	0.367	-0.309	-0.266	0.037
Zr	0.236	0.551	-0.030	-0.367
特征值	5.109	1.303	1.039	0.940
方差百分比/%	51.09	13.03	10.39	9.40

相同或相似的来源,由于地壳中 Mn 含量丰富^[16],因此 F1 主要受自然因素影响。

第二主成分(F2)的贡献率为 13.03%,载荷较高的重金属元素有 Zr、Ba 和 Ti,达到了 0.551、0.314 和 0.282. Ba 为较小负载荷,且与 Zr 呈弱相关或无相关.Ti 与 Zr 在 0.05 置信水平下呈显著相关(表 3).这表明 Zr 可能与 Ti 相似,具有相同的来源,由于含锆的天然硅酸盐锆石或称风信子石广泛分布于自然界中,柴达木盆地也广泛发育着古生代花岗岩锆石,故 F2 也同样受自然因素影响。

第三主成分(F3)的贡献率为 10.39%,载荷较高的重金属元素有 Ni 和 Cr,达到了 0.664 和 0.489, Ni 与 Cr 在 0.01 置信水平下呈显著相关(表 3),由于整个青藏高原广布由超镁铁岩发育而来的土壤^[2],Ni 与 Cr 含量丰富,故 F3 同样受自然因素影响。

第四主成分(F4)的贡献率为 9.40%,载荷较高的重金属元素有 Ba 和 Pb,达到了 0.588 和 0.574, Ba 与 Pb 在 0.01 置信水平下呈中等相关(表 3), Ba 常被用于柴油机及其它内燃机清洗剂中,可能来自交通污染^[10]. Pb 主要通过石油的不完全燃烧及轮胎的磨损等,这表明 Ba 和 Pa 具有相似和相同的来源, F4 主成分可能受交通运输影响。

由此可以看出,前 3 个主成分都受自然因素影

响, F1 主要是由于地壳中广泛分布, F2 与 F3 主要受出露于地表的岩石与矿物风化有关. 而 F4 与人为活动有关,主要受交通运输的影响,无直接证据表明与柴达木盆地矿产资源开发有关。

2.3.3 APCS-MLR 分析

柴达木盆地 APCS 重金属贡献量见表 5, EST 为重金属元素含量的估计值, OBS 为实测值, E/O 越接近 1 说明拟合程度越好,即 APCS-MLR 分析的可信程度. 由上述主成分分析可知第一、第二和第三主成分为自然因素,故在 APCS-MLR 分析中,将 F1、F2 和 F3 归为自然因素共同讨论。

柴达木盆地表土重金属 As、Mn 和 Zn 的第一主成分贡献率分别为 97.54%、98.77% 和 94.65%, Nb、Ni、Ti 和 Zr 的第一、第二主成分贡献率分别为 77.49%、22.51%、28.28%、70.87%、69.95%、30.05% 和 41.91%、58.09%, Cr 的第一、第二和第三主成分贡献率为 37.30%、4.36% 和 47.32%,表明这些重金属元素完全或大部分受自然因素影响。

Ba 和 Pb 的第四主成分贡献率为 39.88% 和 56.77%,表明这两种重金属元素受自然因素和交通运输双重影响为主, Cr 和 Zn 的第四主成分贡献率为 11.02% 和 5.35%,表明这两种重金属轻微受交通运输影响, Ni 的第四主成分贡献率为 0.85%,可忽略不计。

表 5 柴达木盆地表土重金属污染贡献分析

Table 5 Analysis of the contributions of heavy metal pollution sources in the Qaidam Basin

元素	贡献率/%					EST	OBS	E/O
	F1	F2	F3	F4	其它来源			
As	97.54	—	—	—	2.46	8.227	8.23	0.999 604
Ba	28.97	22.70	8.45	39.88	—	425.501	425.50	1.000 003
Cr	37.30	4.36	47.32	11.02	—	50.811	50.81	1.000 028
Mn	98.77	—	—	—	1.23	478.323	478.32	1.000 005
Nb	77.49	22.51	—	—	—	10.181	10.18	1.000 130
Ni	28.28	70.87	—	0.85	—	19.155	19.16	0.999 749
Pb	43.23	—	—	56.77	—	17.419	17.42	0.999 991
Ti	69.95	30.05	—	—	—	2 698.258	2 698.26	0.999 999
Zn	94.65	—	—	5.35	—	44.282	44.28	1.000 047
Zr	41.91	58.09	—	—	—	182.053	182.05	1.000 014

3 结论

(1)柴达木盆地土壤重金属元素含量与我国及青海的土壤背景值大致相近,变化不大。

(2)与大陆上地壳(UCC)相比, As 和 Cr 的含量偏高, Ni 和 Pb 的含量相差不大, Ba、Mn、Nb、Ti、Zn 和 Zr 的含量偏低. Ni 和 As 的变异系数较高,说明这两种元素空间异质性较强,可能存在点源污染。

(3)EF、 I_{geo} 和 PN 分析表明, As 的 EF 值为显

著富集,这主要是由于地壳元素丰度值明显低于世界土壤背景值、中国土壤背景值及实测值,这导致了 As 的富集程度总体偏高. I_{geo} 值总体小于 0,表明未受重金属污染. PN 有 93.80% 样本在尚清洁状态到低污染之间,这表明整个盆地重金属污染尚不严重,但需保持警惕。

(4)APCS-MLR 分析表明,柴达木盆地表土重金属污染主要有 2 个来源,分别为自然因素和交通运输,受自然因素影响的重金属元素为 As、Cr、Mn、Nb、Ni、Ti、Zn 和 Zr. Ba 和 Pb 可能受自然因

素和交通运输双重影响。

参考文献:

- [1] Islam S, Hossain M B, Matin A, *et al.* Assessment of heavy metal pollution, distribution and source apportionment in the sediment from Feni River estuary, Bangladesh [J]. *Chemosphere*, 2018, **202**: 25-32.
- [2] Wu J, Duan D P, Lu J, *et al.* Inorganic pollution around the Qinghai-Tibet Plateau: an overview of the current observations [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **550**: 628-636.
- [3] Qin G W, Niu Z D, Yu J D, *et al.* Soil heavy metal pollution and food safety in China: effects, sources and removing technology [J]. *Chemosphere*, 2021, **267**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129205.
- [4] Hong H L, Dai M Y, Lu H L, *et al.* Risk assessment and driving factors for artificial topography on element heterogeneity: case study at Jiangsu, China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 246-260.
- [5] 杨伟光, 王美娥, 陈卫平. 新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 445-452.
- Yang W G, Wang M E, Chen W P. Effect of a mining and smelting plant on the accumulation of heavy metals in soils in arid areas in Xinjiang [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 445-452.
- [6] EPA. Priority pollutant list [EB/OL]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/priority-pollutant-list-epa.pdf>, 2014-12-01.
- [7] Dai L J, Wang L Q, Liang T, *et al.* Geostatistical analyses and co-occurrence correlations of heavy metals distribution with various types of land use within a watershed in eastern Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **653**: 849-859.
- [8] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 3018-3027.
- Wang R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Spatial distribution characteristics, pollution, and ecological risk assessment of soil heavy metals around mercury mining areas [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 3018-3027.
- [9] 曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 等. 多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1105-1113.
- Zeng W B, Gu G Q, Wan X M, *et al.* Heavy metal contents of soil and surface dust and its ecological risk analysis in a multifunctional industrial park [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1105-1113.
- [10] Wang G X, Zeng C, Zhang F, *et al.* Traffic-related trace elements in soils along six highway segments on the Tibetan Plateau: Influence factors and spatial variation [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **581-582**: 811-821.
- [11] 陈亮, 陈克龙, 张志军. 青海湖周边地区表土磁化率与土壤重金属的相关性研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, **27**(S1): 51-54.
- Chen L, Chen K L, Zhang Z J. Correlation between magnetic susceptibility and contaminated topsoil with heavy metals around the Qinghai Lake Area [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, **27**(S1): 51-54.
- [12] 陈亮. 青海湖环湖区表土磁性、金属元素空间分布特征及污染评价研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2012.
- [13] 闫露霞, 孙美平, 姚晓军, 等. 青藏高原湖泊水质变化及现状评价[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(3): 900-910.
- Yan L X, Sun M P, Yao X J, *et al.* Lake water in the Tibet Plateau: quality change and current status evaluation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **38**(3): 900-910.
- [14] GB/T 36197-2018, 土壤质量 土壤采样技术指南[S].
- [15] 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 等. 典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- Sun X F, Zhang L X, Dong Y L, *et al.* Source apportionment and spatial distribution simulation of heavy metals in a typical petrochemical industrial city [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- [16] 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.
- [17] 姬亚芹, 朱坦, 冯银厂, 等. 应用地质累积指数分析城市颗粒物源解析土壤风沙尘的污染[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(4): 949-953.
- Ji Y Q, Zhu T, Feng Y C, *et al.* Pollution analysis of soil dusts of source apportionment using geoaccumulation index (Igeo) in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, **25**(4): 949-953.
- [18] 陈城, 鲁潇, 于坤, 等. 安徽迪沟采煤沉陷区土壤和沉积物重金属特征及潜在生态风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(3): 570-579.
- Chen C, Lu X, Yu K, *et al.* Heavy metal characteristics and potential ecological risk assessment of the soil and sediment in the Digou coal mining subsidence area, Anhui [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(3): 570-579.
- [19] 韩煦, 陈洁, 孙守钧, 等. 染料厂遗留场地中氯仿和苯并(a)芘的污染特征与健康风险评价[J/OL]. *环境工程*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20201230.0945.010.html>, 2021-01-06.
- Han X, Chen J, Sun S J, *et al.* Pollution analysis and spatial distribution of health risk in the residual site of dye factory [J/OL]. *Environmental Engineering*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20201230.0945.010.html>, 2021-01-06.
- [20] NY/T 1054-2013, 绿色食品 产地环境调查、监测与评价规范[S].
- [21] 段友春, 梁兴光, 臧浩, 等. 日照市典型农用地土壤重金属来源分析及环境质量评价[J]. *环境污染与防治*, 2020, **42**(11): 1410-1414, 1429.
- Duan Y C, Liang X G, Zang H, *et al.* Source analysis and environmental quality assessment of heavy metals in farmland soil in a typical area of Rizhao city [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2020, **42**(11): 1410-1414, 1429.
- [22] Li M, Zuo R, Wang J S, *et al.* Apportionment and evolution of pollution sources in a typical riverside groundwater resource area using PCA-APCS-MLR model [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, **218**: 70-83.
- [23] Liu L L, Tang Z, Kong M, *et al.* Tracing the potential pollution sources of the coastal water in Hong Kong with statistical models combining APCS-MLR [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **245**: 143-150.
- [24] Jin G Q, Fang W, Shafi M, *et al.* Source apportionment of heavy metals in farmland soil with application of APCS-MLR model: A pilot study for restoration of farmland in Shaoxing City Zhejiang, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **184**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109495.
- [25] Gholizadeh M H, Melesse A M, Reddi L. Water quality assessment and apportionment of pollution sources using APCS-MLR and PMF receptor modeling techniques in three major rivers of South Florida [J]. *Science of the Total Environment*, 2016,

- 566-567; 1552-1567.
- [26] 秦子元, 高瑞忠, 张生, 等. 西北旱区盐湖盆地地下水化学组分源解析[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(11): 1790-1799.
Qin Z Y, Gao R Z, Zhang S, *et al.* Source identification of groundwater chemical components in the salt Lake Basin of northwest arid Area, China [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(11): 1790-1799.
- [27] 杨安, 王艺涵, 胡健, 等. 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 886-894.
Yang A, Wang Y H, Hu J, *et al.* Evaluation and source of heavy metal pollution in surface soil of Qinghai-Tibet plateau [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 886-894.
- [28] 孟利, 左锐, 王金生, 等. 基于 PCA-APCS-MLR 的地下水污染源定量解析研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(10): 3773-3786.
Meng L, Zuo R, Wang J S, *et al.* Quantitative source apportionment of groundwater pollution based on PCA-APCS-MLR [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(10): 3773-3786.
- [29] 杨安, 邢文聪, 王小霞, 等. 西藏中部河流、湖泊表层沉积物及其周边土壤重金属来源解析及风险评价[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(10): 4557-4567.
Yang A, Xing W C, Wang X X, *et al.* Source and risk assessment of heavy metals in surface sediments of rivers, lakes and their surrounding soils in central Tibet [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(10): 4557-4567.
- [30] 赵含嫣, 赵锐, 孙源媛, 等. 基于受体模型和控制单元分区的流域污染源解析——以永定河张家口段为例[J]. 环境工程技术学报, 2020, **10**(5): 758-768.
Zhao H Y, Zhao R, Sun Y Y, *et al.* Watershed pollution source analysis based on receptor model and control unit division: taking Zhangjiakou section of Yongding River as an example [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, **10**(5): 758-768.
- [31] 林海明, 张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件——兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷[J]. 统计研究, 2005, (3): 65-69.
Lin H M, Zhang W L. The Relationship between principal component analysis and factor analysis and SPSS Software—to discuss with comrade Liu Yumei, Lu Wendai etc [J]. Statistical Research, 2005, (3): 65-69.
- [32] 陈秀端, 卢新卫. 基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2513-2521.
Chen X D, Lu X W. Source Apportionment of soil heavy metals in city residential areas based on the receptor model and geostatistics [J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2513-2521.
- [33] 柏建坤, 王建力, 李潮流, 等. 藏北可可西里地区土壤元素背景值研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1498-1501.
Bai J K, Wang J L, Li C L, *et al.* Study on soil element background values of the Hoh Xil area in north Tibet [J]. Environmental Science, 2014, **35**(4): 1498-1501.
- [34] 刑廷铤. 畜牧业生产对生态环境的污染及其防治[J]. 云南环境科学, 2001, **20**(1): 39-43.
Xing T X. Animal husbandry production pollution [J]. Yunnan Environmental Science, 2001, **20**(1): 39-43.
- [35] 廖宇斌, 李碧乐, 孙永刚, 等. 柴达木盆地北缘锡铁山铅锌矿区辉长岩锆石 U-Pb 年代、岩石地球化学和 Hf 同位素特征[J]. 世界地质, 2020, **39**(3): 495-508.
Liao Y B, Li B L, Sun Y G, *et al.* Zircon U-Pb age, petrochemistry and Hf isotope characteristics of gabbro in Xitieshan Pb-Zn mining area in northern margin of Qaidam Basin [J]. Global Geology, 2020, **39**(3): 495-508.

CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i> (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i> (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i> (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i> (4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i> (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i> (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i> (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i> (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i> (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i> (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i> (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i> (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System: Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i> (4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i> (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i> (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i> (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i> (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i> (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i> (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i> (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i> (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i> (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i> (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i> (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i> (4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i> (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvio-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i> (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i> (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i> (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i> (5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i> (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i> (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)