

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.2  
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM<sub>2.5</sub>长期变化影响因素 ..... 南洋, 张倩倩, 张碧辉(499)

我国PCDD/Fs网格化大气排放清单 ..... 陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民(510)

成都平原PM<sub>2.5</sub>中碳质组分时空分布特征与来源 ..... 史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东(520)

南京江北新区冬季PM<sub>2.5</sub>中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析 ..... 邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红(529)

南京北郊四季PM<sub>2.5</sub>中有机物的污染特征及来源解析 ..... 李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军(537)

长三角背景点夏季大气PM<sub>2.5</sub>中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析 ..... 薛国艳, 王榕慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健(554)

2017年秋季长春市PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃的污染来源及健康风险评价 ..... 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟(564)

京津冀及周边区域PM<sub>2.5</sub>叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析 ..... 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军(574)

河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析 ..... 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹(587)

河南省气溶胶光学特性的时空变化特征 ..... 张瑞芳, 于兴娜(600)

黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM<sub>2.5</sub>中水溶性有机气溶胶 ..... 黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊(609)

南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 ..... 杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬(620)

连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势 ..... 乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月(630)

挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较 ..... 羌宁, 史天哲, 缪海超(638)

西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析 ..... 丁铖, 于兴娜, 侯思宇(647)

4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的多样性及群落结构 ..... 沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明(656)

辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析 ..... 金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧(665)

国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性 ..... 钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能(674)

南小水流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义 ..... 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗(682)

乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价 ..... 余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云(691)

温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系 ..... 朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新(702)

新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化 ..... 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆(713)

环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估 ..... 宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春(728)

洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化 ..... 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞(734)

西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析 ..... 杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李斌, 徐会宁(743)

透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响 ..... 张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田(750)

微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B ..... 朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠(756)

锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除 ..... 周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏(763)

载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能 ..... 宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章(773)

复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能 ..... 孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董勇(784)

磁性硅藻土负载纳米氧化钙对水中磷酸盐吸附 ..... 徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇(792)

污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应 ..... 汤宁, 李如忠, 王聿庆, 何瑞亮, 刘超(801)

生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析 ..... 赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红(809)

磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能 ..... 于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军(815)

四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响 ..... 阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品(823)

异养硝化细菌*Pseudomonas aeruginosa* YL的脱氮过程及N<sub>2</sub>O产生特性 ..... 杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖(831)

包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析 ..... 王晓瞳, 杨宏, 苏扬, 刘旭妍(839)

包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用 ..... 周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉(849)

厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响 ..... 张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅(856)

除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺 ..... 李冬, 刘博, 王文琪, 张杰(867)

桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价 ..... 王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 庞瑞, 宋波(876)

青藏高原表土重金属污染评价与来源解析 ..... 杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军(886)

黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析 ..... 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德(895)

管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响 ..... 宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕙, 李秧秧(905)

生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响 ..... 周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖(914)

水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制 ..... 余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章(922)

接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制 ..... 刘焱, 王磊, 曹湛波, 段灏(932)

基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较 ..... 胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双(941)

超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素 ..... 陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠(952)

青菜中镉的吸收和累积对晒的响应规律 ..... 余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉(962)

两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制 ..... 卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇(970)

可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤 ..... 贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢(979)

我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析 ..... 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣风, 李花粉(986)

畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系 ..... 蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国(997)

4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性 ..... 朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来(1005)

《环境科学》征订启事(553) 《环境科学》征稿简则(655) 信息(664, 755, 885)

## 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析

杨安<sup>1,2</sup>, 王艺涵<sup>1,2</sup>, 胡健<sup>3</sup>, 刘小龙<sup>2</sup>, 李军<sup>2\*</sup>

(1. 天津师范大学地理与环境科学学院, 天津 300387; 2. 天津师范大学天津市水资源与水环境重点实验室, 天津 300387; 3. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 为了解青藏高原表层土壤重金属的污染特征、空间分布及污染来源, 沿东北-西南方向对青藏高原表土(0~20 cm)样品进行了采集, 对土壤中的 Ba、Cd、Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni、Pb、Sb、Sc 和 Zn 等 13 种重金属总量进行了分析, 并利用主成分分析-绝对主成分分数-多元线性回归(PCA-APCS-MLR)受体模型初步定量解析了重金属的潜在来源。结果表明 Cd 和 Sb 均显著超标, 分别是 20 世纪 70 年代青藏高原土壤背景值的 2.13 与 1.52 倍。富集因子(EF)、地累积指数( $I_{geo}$ )和 Nemerlo 综合指数(PN)分析同样表明青藏高原表土主要以 Cd 和 Sb 污染为主, 但污染程度普遍不高。在空间分布方面, 青藏高原中部、东南部及东北部均呈不同程度污染, 但中部及东南部污染相对较重。PCA-APCS-MLR 分析表明, 青藏高原土壤重金属主要有 3 个来源, 分别为自然、交通和采矿等综合因素。Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni 和 Sc 主要受自然因素影响, Ba、Cd、Mo 和 Pb 主要受交通因素影响, Zn 主要受自然和交通因素共同影响, Sb 主要受采矿、自然和交通等综合因素影响。青藏高原土壤重金属污染防治过程中应着重考虑受交通、采矿等综合因素影响下的 Cd 和 Sb 污染。

**关键词:** 青藏高原; 表土; 重金属; 来源; PCA-APCS-MLR 受体模型

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0886-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201907195

## Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau

YANG An<sup>1,2</sup>, WANG Yi-han<sup>1,2</sup>, HU Jian<sup>3</sup>, LIU Xiao-long<sup>2</sup>, LI Jun<sup>2\*</sup>

(1. College of Geography and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Water Resources and Environment, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in the surface soil of the Qinghai-Tibet Plateau was investigated to gain an understanding of the pollution characteristics. The surface soil (0-20 cm) samples were collected from the northeast to the southwest in the study area. The total amount of 13 heavy metals (Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sc, and Zn) was determined. The potential sources of heavy metals were preliminarily apportioned and identified by the principal component analysis-absolute principal component score-multiple linear regression (PCA-APCS-MLR) receptor model. Results show that the average contents of Cd and Sb significantly exceed the environment standard, and they were 2.13 and 1.52 higher than the soil background values of the Qinghai-Tibet Plateau in the 1970s, respectively. The enrichment factor (EF), geo-accumulation index ( $I_{geo}$ ), and Nemerlo synthesis index (PN) were used to evaluate the surface soil heavy metal contamination, which indicated that Cd and Sb also were pollutants in the Qinghai-Tibet Plateau with a limited pollution level. Various levels of pollution were presented at the central, southeastern, and northeastern regions of the Qinghai-Tibet Plateau, while the central and southeastern areas exhibited relatively severe pollution levels. The PCA-APCS-MLR levels revealed that three main sources of heavy metals in the soil of the Qinghai-Tibet Plateau were the natural source, traffic activities, and the mining industry, in that order. Cobalt, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, and Sc, were largely affected by natural sources, while Ba, Cd, Mo, and Pb were mainly affected by traffic activities. Specifically, Zn gave priority to natural and traffic sources, and Sb was jointly affected by natural sources, traffic activities, and the mining industry. Therefore, Sb and Cd pollution from traffic activities and the mining industry should be noted in control plans for the heavy metal pollution in soil of the Qinghai-Tibet Plateau.

**Key words:** Qinghai-Tibet Plateau; surface soil; heavy metals; sources; PCA-APCS-MLR receptor model

重金属普遍存在于土壤环境, 具有难降解、危害持久、不可逆转及食物链累积等特点<sup>[1,2]</sup>。进入食物链的重金属, 不仅能降低作物质量, 其过量累积毒害还可损害动物和人类健康, 从而危害生态系统<sup>[3-5]</sup>。土壤中重金属主要来源于土壤母质风化及各种人类活动, 如工农业生产、交通运输、废物处理、采矿、冶炼、电镀等产生的金属残留, 是土壤重金属污染的主要来源<sup>[1,6-9]</sup>。其中, Cd、Cr、Cu、Pb、

Ni 和 Zn 等重金属已被美国环保署(USEPA)列为主要控制污染物<sup>[4]</sup>。近年来, 国内外研究者针对不同

收稿日期: 2019-07-22; 修订日期: 2019-10-08

基金项目: 国际(地区)合作与交流项目(4161101324); 国家重大研究计划项目(91644104); 国家自然科学基金项目(41172315); 天津市水资源与水环境重点实验室开放基金项目

作者简介: 杨安(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境地理, E-mail: yangan0112@163.com

\* 通信作者, E-mail: lijun5931@163.com

区域土壤重金属污染进行了大量研究,发现在自然条件、工矿业发展及交通通达度等不同因素影响下,重金属污染具有一定的差异性<sup>[1,4,5,10~13]</sup>.污染源识别是污染防治的基本前提,目前重金属来源分析已实现了从定性统计(相关、主成分等)-定量解析(绝对主成分分数-多元线性回归等)的转变<sup>[1,5,6,8,12~14]</sup>.

青藏高原地理位置独特,全球平均海拔最高,工农业活动有限,故受人类污染较轻.虽然青藏高原土壤重金属特征、来源的区域性分异,使重金属含量较中国其他地区低,但随着自然资源的开发利用和第二、三产业的不断发展,以及相邻地区工业发达、人口众多和宗教活动频繁,青藏高原土壤生态系统已遭受一定程度重金属污染<sup>[1,3]</sup>.研究表明,1970年后青藏高原经济发展迅速,高原东北部湖泊沉积物汞含量显著增加,可能受人为因素影响<sup>[15]</sup>.同时,随着交通通达度的发展<sup>[16]</sup>,交通运输已成为青藏高原路侧土壤重金属含量的人为影响因素之一<sup>[9]</sup>.目前,土壤重金属的研究范围主要集中在我国西南、东南部矿区、农业区和工业区及道路交通沿线<sup>[4,17]</sup>,研究内容多为污染评价、分布特征和来源解析,但在来源识别分析中,研究方法多以定性分析为主,定量解析仍有待深入.同时,青藏高原的研究相对较少,且存在局域性采样,相关分析多集中于某几种重金属<sup>[3]</sup>,覆盖范围较窄或采样数据较早等现象<sup>[18,19]</sup>.全面了解青藏高原土壤中重金属污染的污染模式、分布及来源,是土壤污染防治的有效前提.因此,本研究对13种重金属(Ba、Cd、Co、Cr、Cu、

Fe、Mn、Mo、Ni、Pb、Sb、Sc和Zn)进行采样与分析,探讨青藏高原土壤重金属的污染特征、空间分布及来源解析,定量阐释其主要影响因素贡献率,以期为其土壤污染防治提供科学依据.

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

青藏高原地处我国西部(26°00'~39°47'N, 73°19'~104°47'E),主要由高山山脉、湖盆及盆地等多种地貌构成,是世界海拔最高的高原,总面积约250万km<sup>2</sup>.主要植被景观为高山及高寒土地,主要气候类型为高原山地气候,日照强烈,干湿差异显著,夏季温凉多雨,冬季干冷漫长.青藏高原地质条件复杂,南部主要由碎屑沉积岩和变质岩构成,中北部主要由火山岩、碎屑砂岩、页岩和泥灰岩构成<sup>[1]</sup>.随海拔由高到低,青藏高原广泛分布着寒漠土、草甸土、草原土、黄棕壤等地带性土壤,发育程度普遍较低,以物理风化为主.

#### 1.2 样品采集与分析

2013年7~8月沿青藏高原东北-西南方向对表层土壤(0~20cm)样品进行采集,采样间距约100km,共采集样品79份(图1).土样自然风干后去除植物残体、砾石等杂物,按四分法取土研磨过200目筛.土样重金属元素含量于国土资源部地球化学勘查监督检测中心测定,Ba、Cr、Fe和Mn用压片-X射线荧光光谱法(XRF, Axios PW4400/40),Cd、Co、Cu、Mo、Ni、Pb、Sb、Sc和Zn用高压密闭分解法<sup>[20]</sup>,即以优级纯HNO<sub>3</sub>、HClO<sub>4</sub>、HF

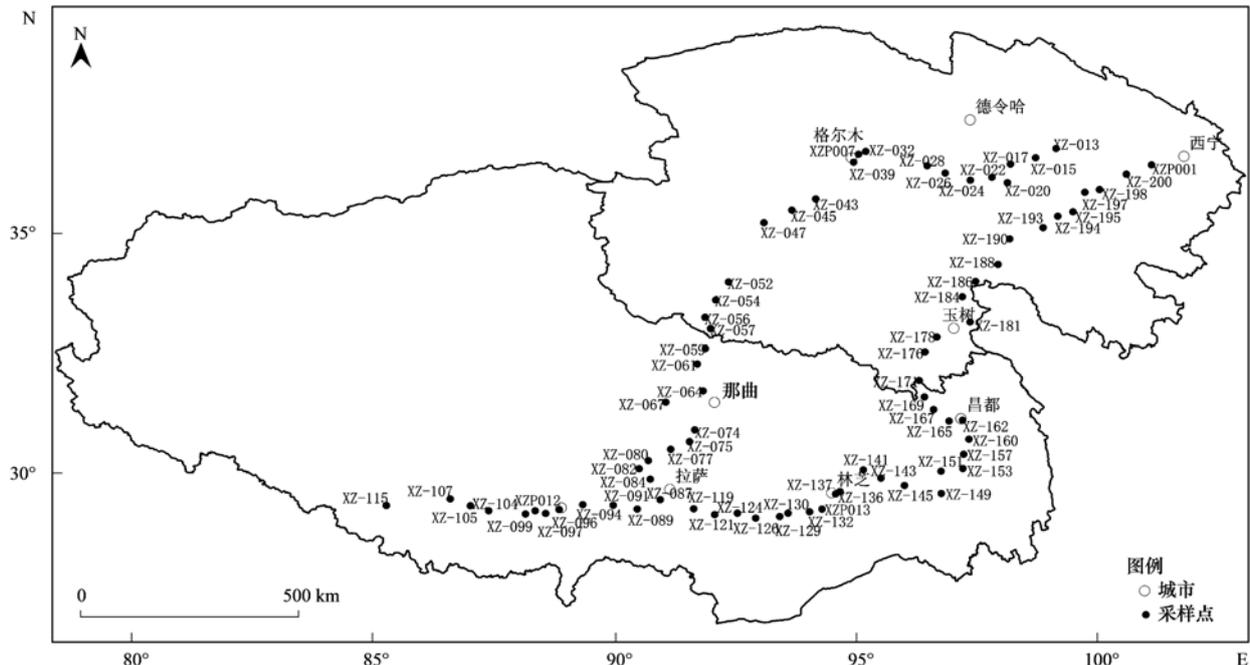


图1 青藏高原土壤采样点分布示意  
Fig. 1 Distribution of soil sampling sites on Qinghai-Tibet Plateau

消解, HF 除 Si 再以稀硝酸溶液稀释定容, 等离子体质谱法 (ICP-MS, iCAP Qc) 测试. 每批样品设置 2 个平行样、1 个空白, Ba、Cr、Fe、Mn、Cd、Co、Cu、Mo、Ni、Pb、Sb、Sc 和 Zn 的检出限分别为  $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.1\%$ 、 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 样品分析质量通过国家土壤成分分析标准物质 GBW07450 (GSS-21)、GBW07451 (GSS-22)、GBW07454 (GSS-25) 和 GBW07456 (GSS-27) 控制, 回收率介于  $85\% \sim 115\%$  之间, 一级标准物质/重复样合格率为  $100\%$ .

### 1.3 重金属污染评价方法

基于富集因子法、地累积指数及 Nemerlo 综合指数, 对青藏高原表土重金属的富集程度及污染水平进行评价. 其中, 富集因子法能够较为准确地判断自然或人为污染, 地累积指数和 Nemerlo 综合指数则分别考虑了成岩作用和重金属含量极值对污染评价等级的影响.

富集因子法 (EF) 计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$EF = \frac{(C_i/C_{ref})_{\text{sample}}}{(C_i/C_{ref})_{\text{background}}} \quad (1)$$

式中,  $C_i$  为第  $i$  个土壤元素含量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),  $C_{ref}$  为参考元素含量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). 通常选择 Fe、Al、Mn、Sc 和 Ti 等作为参考元素<sup>[10-12]</sup>, 因 Sc 挥发性低、化学

稳定性好, 且人为污染源较少, 故本研究选取 Sc 作为参考. EF 可用于评估元素的富集程度 (表 1), 区分元素的自然和人为来源<sup>[11,12]</sup>. 当  $EF \leq 1$  时, 表明较参考背景而言, 土壤元素并未发生富集<sup>[11]</sup>. 反之, 若  $EF > 1$ , 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<sup>[12]</sup>.

地累积指数 ( $I_{geo}$ ) 计算公式为<sup>[22]</sup>:

$$I_{geo} = \log_2 (C_n/1.5B_n) \quad (2)$$

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 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 常数 1.5 为成岩过程中重金属元素含量的自然波动.  $I_{geo}$  可用于评估土壤污染程度, 具体见表 1.

Nemerlo 综合指数 (PN) 计算公式 [式 (3)] 为<sup>[13]</sup>:

$$PN_j = \sqrt{\frac{\left(\frac{C_{ij}}{S_{ij}^{\max}}\right)^2 + \left(\frac{C_{ij}}{S_{ij}^{\text{ave}}}\right)^2}{2}} \quad (3)$$

式中,  $PN_j$  为第  $j$  点的综合指数,  $C_{ij}$  为第  $i$  个元素在第  $j$  点的实测值,  $S_{ij}$  为元素  $i$  的评价标准限值, 在此选取 20 世纪 70 年代青藏高原土壤元素含量<sup>[23]</sup> 作为标准限值. 与 EF 和  $I_{geo}$  等相比, PN 还考虑了可能来自人为污染的元素极值<sup>[13,24]</sup>. 根据中国《绿色食品现场环境调查、监测与评价规范》(NY/T 1054-2013)<sup>[25]</sup> 规定, 确定 PN 分级标准 (表 1).

表 1 富集因子 (EF)、地累积指数 ( $I_{geo}$ ) 及 Nemerlo 综合指数 (PN) 与污染程度

Table 1 Enrichment factor (EF), geoaccumulation ( $I_{geo}$ ), Nemerlo synthesis indices (PN), and contamination grades

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

### 1.4 重金属来源解析方法

为识别重金属来源, 利用相关性分析、主成分 (PCA) 分析和主成分分析-绝对主成分分数-多元线性回归受体模型 (PCA-APCS-MLR) 对青藏高原表土重金属来源进行解析. 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, 利用归一化重金属含量的主成分分数 (APCS), 以及多元线性回归受体模型 (MLR) 可对重金属来源进行定量分析, 确定各主成分对重金属

污染的贡献量, 进而得出各主成分对各重金属的影响程度.

PCA-APCS-MLR 源解析主要步骤如下<sup>[14]</sup>.

(1) 将数据标准化后引入 0 浓度因子

$$(Z_0)_i = (0 - \bar{C}_i) / \sigma_i \quad (4)$$

(2) PCA 归一化因子分数减  $Z_0$  得到绝对主成分分数 (APCS).

(3) 以 APCS 为自变量, 重金属含量为因变量进行多元线性回归, 利用回归系数计算每个重金属的来源贡献量:

$$C_i = b_{i0} + \sum_{p=1}^p (b_{pi} \times \text{APCS}_p) \quad (5)$$

式中,  $\bar{C}_i$  为重金属含量算数平均值,  $\sigma_i$  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,  $b_{pi} \times \text{APCS}_p$  均值为源  $p$  贡献值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 描述性统计

青藏高原表土重金属描述性统计结果见表 2。与上部陆壳(UCC)<sup>[26]</sup>相比,青藏高原表土重金属 Sb、Cr、Cd、Ni、Pb 和 Co 含量较为丰富, Mn、Zn 和 Cu 含量相近, 而 Mo、Ba、Fe 和 Sc 含量偏低。与世界土壤背景值<sup>[27]</sup>相比, Sb、Co 和 Sc 含量较高, Cr 含量相近, 其他均偏低; 与中国土壤背景值<sup>[23]</sup>相比, Sb、Cd、Ni 和 Cr 含量较高, Mo 和 Sc 含量偏低, 其他均相近。与 20 世纪 70 年代青藏高原土壤<sup>[28]</sup>相比, Cd、Sb 和 Ba 含量较高, 其中以 Cd(2.13 倍) 和 Sb(1.52 倍) 较为显著; 与 21 世纪初青藏高原土壤<sup>[1]</sup>相比, Cd 含量略有增加, 但增幅不大。因 As、Cd、Cr、Ni 和 Sb 等元素在青藏高原土壤中存在着

富集现象<sup>[1,13,24,28]</sup>, 与 UCC<sup>[26]</sup>、世界<sup>[27]</sup>及中国土壤背景值<sup>[23]</sup>差异较大。同时, 在 21 世纪初青藏高原土壤元素调查中<sup>[1]</sup>, 并未涉及 Ba、Mo、Sb 和 Sc 等元素, 故选取 20 世纪 70 年代青藏高原土壤元素含量<sup>[28]</sup>作为背景值。

青藏高原表土重金属变异系数大小依次为 Sb > Ni > Cd > Pb > Cr > Mo > Cu > Sc > Co > Mn > Zn > Fe > Ba, 其中, Sb 属极度变异 (> 100%), Cd、Cr、Mo、Ni 和 Pb 属高变异 (50% ~ 100%), 空间异质性强, 初步判断上述 6 种重金属可能存在点源污染。而且, 这些变异系数较高的元素, 偏度和峰度值同样也较高, 进一步表明人类活动可能是造成这些元素空间异质性的主要因素<sup>[29,30]</sup>。另外, Sc 的变异系数为 36.92%, 属中等变异 (20% ~ 50%), 这主要与青藏高原土壤的空间异质性较大有关。青藏高原土壤 Sc 含量的变化范围为 3.89 ~ 21.9 mg·kg<sup>-1</sup><sup>[28]</sup>, 不同类型土壤之间差异较大。同时, 本研究 Sc 平均含量略高于世界土壤背景值<sup>[27]</sup>, 但低于 UCC<sup>[26]</sup>、中国土壤背景值<sup>[23]</sup>及 20 世纪 70 年代青藏高原土壤<sup>[28]</sup>, 因此 Sc 是适合做参考元素的。

表 2 青藏高原土壤重金属描述性统计结果<sup>1)</sup>

元素	本研究						UCC <sup>[26]</sup> /mg·kg <sup>-1</sup>	世界土壤 背景值 <sup>[27]</sup> /mg·kg <sup>-1</sup>	中国土壤 背景值 <sup>[23]</sup> /mg·kg <sup>-1</sup>	青藏高原重金属含量/mg·kg <sup>-1</sup>	
	最小值 /mg·kg <sup>-1</sup>	最大值 /mg·kg <sup>-1</sup>	平均值 /mg·kg <sup>-1</sup>	变异系数 /%	偏度	峰度				20 世纪 70 年代 <sup>[28]</sup>	21 世纪初 <sup>[1]</sup>
Ba	301.70	647.65	437.64	16.65	0.27	0.03	550	500	469	381	—
Cd	0.05	0.72	0.17	63.06	2.59	10.22	0.098	0.35	0.097	0.08	0.141
Co	3.68	21.65	11.39	30.80	0.61	0.50	10	8	12.70	11.60	11.67
Cr	26.30	272.72	70.84	52.14	3.14	13.01	35	70	61	77.40	155.54
Cu	7.50	60.58	23.92	40.07	1.49	3.12	25	30	22.60	21.90	24.27
Mn	274.97	1 119.98	639.64	27.85	0.49	0.37	600	1 000	583	626	617.36
Mo	0.33	3.05	0.81	50.71	2.84	12.51	1.45	1.20	2.00	1.14	—
Ni	9.17	162.80	31.64	70.71	4.01	19.66	20	50	26.90	32.10	55.86
Pb	9.43	122.51	28.65	52.96	3.50	18.36	20	35	26	28.90	32.15
Sb	0.09	35.68	2.57	183.32	5.06	31.93	0.20	1	1.21	1.69	—
Sc	0.50	16.42	8.89	36.92	-0.63	0.84	11	7	11.10	10.70	—
Zn	24.98	136.56	73.31	25.13	0.19	1.03	71	90	74.20	73.70	75.59
Fe	1.02	4.37	2.85	22.83	0.07	0.13	3.50	4	2.94	3.01	—

1) “—”表示文章中没有相关数据; Fe 含量单位为 %

## 2.2 重金属污染评价

### 2.2.1 富集因子(EF)

青藏高原表土重金属富集程度[图 2(a)]为 Sb (6.64) > Cd(3.75) > Ba(2.20) > Cu(1.99) > Mn (1.86) ≥ Fe(1.86) > Co(1.85) > Ni(1.82) > Zn (1.81) > Pb(1.74) > Cr(1.71) > Mo(1.50)。Sb 表现为显著富集, 这是由于 8.86% 的样点为高度及以上富集, 提高了整体的富集等级, 但高富集样点较为分散, 多集中于铋矿成矿带附近<sup>[31]</sup>; Cd 呈中度富集, 但

除 44.30% 的样点呈中度富集以外, 部分样点为更高度富集, 其中有 7.59% 和 3.80% 的样点分别为显著富集和高度富集, Cd 富集程度较高的样点广布, 主要由交通和采矿因素导致<sup>[1]</sup>; Ba 也为中度富集, 但中度富集及以上样点仅为 16.46%。另外, 其余重金属均为低度富集, Cu、Mn、Fe、Co、Ni、Zn、Pb、Cr 和 Mo 中度富集及以上样点分别为 8.86%、8.86%、7.59%、7.59%、11.39%、8.86%、17.72%、15.19% 和 8.86%, 均显著低于 Sb 和 Cd。13 种重金属 EF 值均大于 1, 表

明青藏高原多种土壤重金属较 20 世纪 70 年代更为富集,其中以 Sb 和 Cd 最为突出。

### 2.2.2 地累积指数( $I_{geo}$ )

地累积指数分析结果显示[图 2(b)]:青藏高原原表土重金属均处于未受污染至严重污染范围( $-5.01 < I_{geo} < 3.81$ ),污染程度为 Cd(0.25) > Ba(-0.40) > Cu(-0.56) > Mn(-0.61) > Zn(-0.64) > Co(-0.68) > Fe(-0.70) > Pb(-0.73) > Ni(-0.80) > Cr(-0.84) > Sb(-0.90) > Sc(-1.04) > Mo(-1.21),与 EF 的分析结果基本一致.青藏高原表土重金属污染以 Cd(-1.19 ~ 2.59)为主,Cd 污染分布范围广,但污染

程度普遍不高,分别有 48.10%、12.66% 和 1.27% 的样点处于未受污染-中度污染状态、中度污染和中度-严重污染状态. Sb(-4.84 ~ 3.81)整体上处于未受污染状态,但个别样点污染程度高,分别有 2.53%、7.59%、5.06% 和 1.27% 的样点处于未受污染-中度污染、中度污染、中度-严重污染和严重污染状态.部分地区出现 Cd 和 Sb 的复合污染现象,且部分污染样点呈局部聚集(图 3),如中部(XZ-052 和 XZ-054)及东北部(XZ-017、XZ-190、XZ-194、XZP001 和 XZP007)样点,Cd 和 Sb 都呈现未受污染-中度污染以上.另外,其余 11 种重金属 86% 以上的样点均处于未受污染状态。

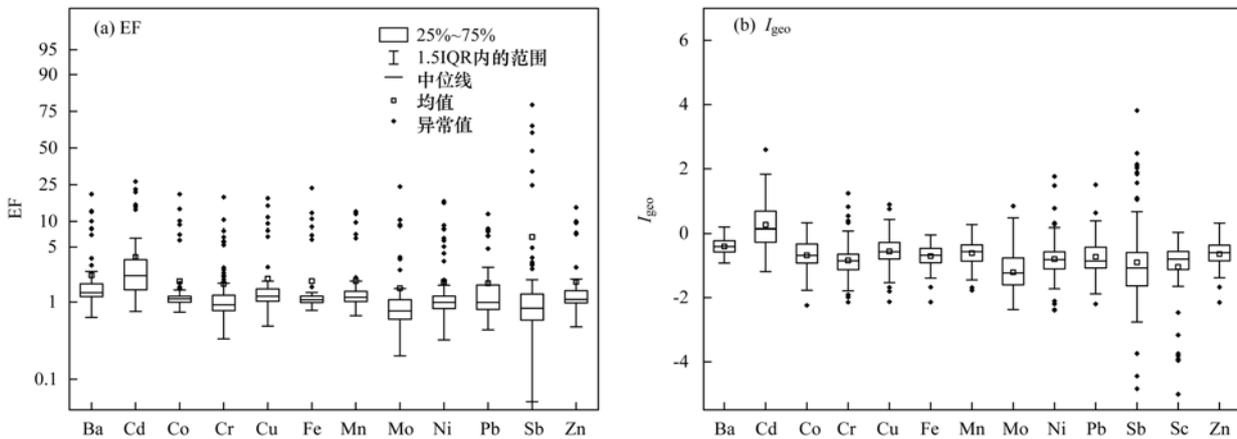


图 2 青藏高原土壤重金属 EF 和  $I_{geo}$  箱线图

Fig. 2 Box-line diagram of heavy metals EF and  $I_{geo}$  on Qinghai-Tibet Plateau

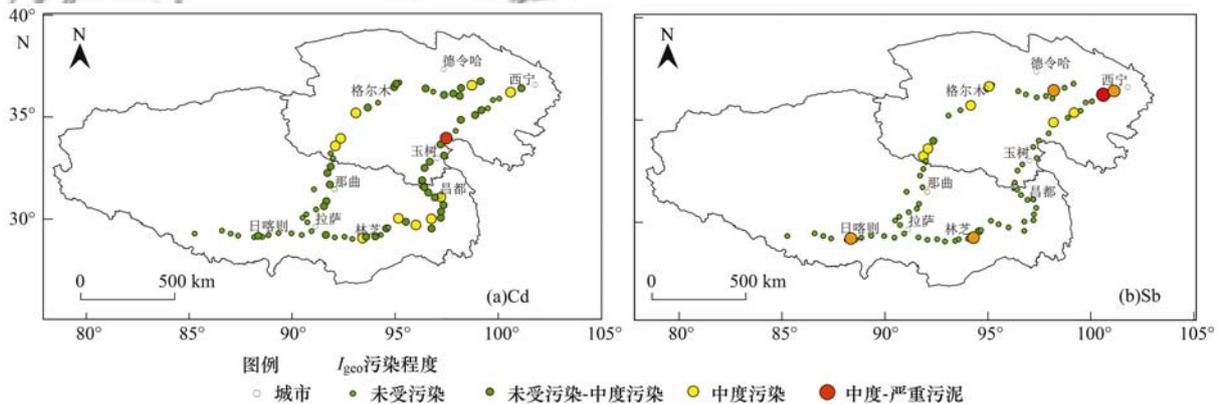


图 3 青藏高原土壤重金属 Cd 和 Sb 地累积指数( $I_{geo}$ )空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of geoaccumulation index of heavy metals Cd and Sb on Qinghai-Tibet Plateau

### 2.2.3 Nemero 综合指数(PN)

PN 结果表明青藏高原 7.59% 表土样品处于需要保持警惕的状态(图 4), 58.23% 处于低污染, 13.92% 处于中度污染, 20.25% 处于严重污染, 环境状态从低污染至严重污染不等,但普遍存在污染现象.富集因子与地累积指数分析表明,青藏高原中部、东南部及东北部土壤可能存在污染,但污染程度普遍不高.与 PN 对比分析后发现,三者的分析结

果在污染区域上具有一致性,但 PN 的污染程度有所增加,其中尤以东北部污染最为严重.这是由于 PN 计算中不仅考虑了元素的平均含量,而且考虑元素最高含量的影响<sup>[13,24]</sup>.在 79 个样点中,Cd 和 Sb 作为公式中极大值,占比分别为 56.96% 和 31.92%,是造成 PN 较大的主要影响因素,这与上述分析结果一致.污染程度较上述评估较重是因为考虑最大值后提升了污染等级,说明在评估及治理土

壤重金属时,只考虑均值会忽略极值对环境的影响,从而低估环境污染程度,故在治理过程中需将极值加入考虑范围之内。

基于上述污染指数分析结果可以看出,青藏高原中部、东南部和东北部都可能存在一定污染. 中部污染可能与铬矿开采及成岩过程中 Cr 和 Ni 的释放有关,而东南部污染可能是岩石风化、矿业开采及农业活动等共同作用的结果<sup>[1]</sup>. 同时,青藏高原主要交通干线贯穿了存在污染的区域,表明污染可能是在高交通量、高排放车辆多及高海拔-高排放-高积累等的共同作用下产生的<sup>[24]</sup>. 另外,位于青藏高原东北部青海地区土壤重金属的污染程度也较西藏地区严重,这可能与青海地区频繁的采矿、旅游和交通等因素密不可分<sup>[3]</sup>.

## 2.3 重金属来源解析

### 2.3.1 相关性分析

土壤重金属间的相关性见表 3. 其中, Ba-Cd、Ba-Cr、Ba-Ni、Cd-Pb、Cd-Zn、Co-Cr、Co-Cu、Co-Fe、Co-Mn、Co-Ni、Co-Sc、Co-Zn、Cr-Fe、Cr-Ni、

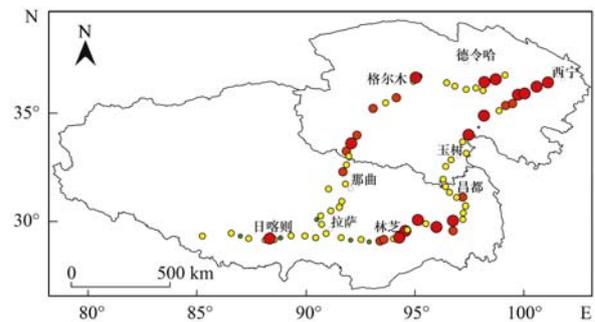


图 4 青藏高原土壤重金属 Nemerow 综合指数 (PN) 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of PN index of heavy metals on Qinghai-Tibet Plateau

Cu-Fe、Cu-Mn、Cu-Ni、Cu-Sc、Cu-Zn、Fe-Mn、Fe-Ni、Fe-Sc、Fe-Zn、Mn-Sc、Mn-Zn、Pb-Zn、Sb-Sc 和 Sc-Zn 呈极显著相关 ( $P < 0.01$ ), Ba-Fe、Cd-Mo、Mn-Ni、Mo-Sb 和 Ni-Sc 呈显著相关 ( $P < 0.05$ ). 显著相关的重金属,可能具有共同或相似来源,因 13 种重金属间不完全显著相关,则可能具有多种来源。

表 3 青藏高原土壤重金属相关性分析<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation analysis of heavy metals in Qinghai-Tibet Plateau

	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Sc
Cd	0.307**	1										
Co	-0.182	-0.071	1									
Cr	-0.445**	-0.070	0.320**	1								
Cu	-0.031	-0.063	0.781**	0.128	1							
Fe	-0.241*	-0.036	0.858**	0.292**	0.686**	1						
Mn	0.009	0.194	0.720**	-0.006	0.684**	0.651**	1					
Mo	0.184	0.235*	-0.069	-0.162	-0.030	-0.090	0.004	1				
Ni	-0.320**	-0.144	0.660**	0.717**	0.385**	0.444**	0.225*	-0.167	1			
Pb	0.138	0.444**	-0.031	-0.100	-0.064	-0.026	0.190	0.211	-0.109	1		
Sb	0.017	0.142	0.046	0.052	0.095	0.108	0.034	0.252*	0.024	0.169	1	
Sc	-0.037	-0.025	0.588**	0.110	0.504**	0.547**	0.515**	-0.096	0.244*	0.063	-0.351**	1
Zn	0.153	0.628**	0.469**	-0.056	0.344**	0.497**	0.593**	0.120	0.106	0.432**	0.096	0.390**

1) \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$

### 2.3.2 主成分分析(PCA)

Bartlett 球形度检验结果 ( $0.00 < 0.05$ ) 与 KMO 度量值检验结果 ( $0.698 > 0.5$ ) 表明各个元素间相关性强(表 3), 适合进行主成分分析(表 4). 对 Kaiser 标准化的因子进行 Varimax 正交旋转后, 得到 4 个特征值大于 1 的主成分, 贡献率分别为 33.597%、19.855%、11.518% 和 8.763%, 累积贡献率为 73.652%, 可解释所有重金属的大部分信息。

第一主成分(F1)贡献率(33.597%)远高于其他主成分, 载荷较高的重金属为 Co、Cu、Fe、Mn、Sc 和 Zn, 分别为 0.908、0.883、0.855、0.843、0.679 和 0.541. 第一主成分重金属变异系数均较低(表 2), 受人为影响程度小, 且 Co、Cu、Fe、Mn、Sc

和 Zn 间呈极显著正相关关系(表 3), 推断这 6 种重金属具有相同或相似来源. 由于地壳中 Fe 和 Mn 含量丰富, 且 Co、Cu 和 Sc 受土壤母质影响较大<sup>[32]</sup>, 因此 F1 主要受自然因素影响。

第二主成分(F2)方差贡献率为 19.855%, 载荷较高的重金属为 Ba、Cr 和 Ni, 分别为 -0.663、0.910 和 0.785. Ba 为较小负荷, 分别与 Cd 呈极显著正相关、Fe 呈显著负相关关系(表 3), 且常被用于柴油机及其他内燃机清洁剂中<sup>[33]</sup>, 可能来自交通污染. 青藏高原广布由超镁铁岩发育而来的土壤, Cr 和 Ni 含量丰富<sup>[1,3]</sup>, 故 F2 同样受自然因素影响。

第三主成分(F3)方差贡献率为 11.518%, 载荷较高的重金属为 Cd、Pb 和 Zn, 分别为 0.863、

0.765 和 0.732, Cd、Pb 和 Zn 呈极显著正相关关系(表 3), 且都主要通过汽车燃料的不完全燃烧及轮胎的磨损、撕裂等释放<sup>[1, 13, 24]</sup>. 青藏高原东北-西南方向分布有青藏公路, Zhang 等<sup>[13]</sup> 研究表明青藏公路沿线表层土壤中 Cd、Pb 和 Zn 含量较高, 因此 F3 主要受交通因素影响. Zn 在第一和第三主成分均有一定载荷, 表明其可能存在双重来源.

第四主成分(F4)方差贡献率为 8.763%, 载荷较高的重金属为 Mo 和 Sb, 分别为 0.571 和 0.893. Mo 和 Sb 主要受土壤母质影响, 也存在交通污染排放中<sup>[33, 34]</sup>. 另外, 它们还受采矿、电子和冶金等影响<sup>[31, 35]</sup>. 因 Mo 与 Cd 呈显著正相关关系(表 3), 来源可能相似, 且采矿导致青藏高原中部 Cd 污染严重<sup>[1, 4]</sup>. 同时, 在青藏高原中南部存在多处 Sb 矿<sup>[31]</sup>, 且 Sb 与 Sc 呈极显著负相关关系(表 3), 来源可能不同. 因此, F4 可能受采矿等综合因素影响.

### 2.3.3 APCS-MLR 源解析

利用 APCS 计算重金属源贡献量  $C_i$ , 计算结果见表 5. 其中, EST 为重金属的估计值, OBS 为重金属的实测值, E/O 接近 1 说明拟合度好, 即 APCS-MLR 分析的可信度高. 由主成分分析可知, 第一、二主成分为自然因素, 故在以下分析中, 将 F1 和 F2 统一归为自然因素共同讨论.

青藏高原表土重金属 Co、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni 和 Sc 以自然因素影响为主, 贡献率分别为 99.96%、52.12%、99.12%、98.40%、86.81%、100.00% 和 91.76%. 其中, Ni 完全受自然因素影响. Cr 除受自然因素影响外, 还受其他未知因素的影响. Cd、Mo 和 Pb 以交通影响为主, 贡献率分别为 97.89%、

表 4 青藏高原土壤重金属主成分分析矩阵<sup>1)</sup>

Table 4 Principal component analysis matrix of heavy metals in Qinghai-Tibet Plateau

重金属元素	F1	F2	F3	F4
Ba	-0.008	<b>-0.663</b>	0.217	0.072
Cd	-0.024	-0.124	<b>0.863</b>	0.115
Co	<b>0.908</b>	0.327	0.001	0.000
Cr	0.060	<b>0.910</b>	0.021	-0.019
Cu	<b>0.883</b>	0.048	-0.115	0.092
Fe	<b>0.855</b>	0.282	0.022	0.028
Mn	<b>0.843</b>	-0.066	0.243	-0.010
Mo	-0.003	-0.257	0.208	<b>0.571</b>
Ni	0.382	<b>0.785</b>	-0.042	-0.018
Pb	-0.022	-0.057	<b>0.765</b>	0.109
Sb	0.043	0.104	0.071	<b>0.893</b>
Sc	<b>0.679</b>	0.005	0.116	-0.498
Zn	<b>0.541</b>	-0.067	<b>0.732</b>	0.008
初始特征值	4.368	2.581	1.497	1.139
方差贡献率/%	33.597	19.855	11.518	8.763

1) 黑体字表示所占载荷较高的元素, 即某成分的主要组成元素

69.36%、97.76%. Sb 以采矿等综合因素影响为主, 贡献率为 48.55%, 其次自然因素也较高(27.40%), 最后是交通因素(24.05%). Zn 主要来源于自然、交通因素的共同影响, 贡献率分别为 58.32%、41.61%. 除 Ba 和 Cr 外, 其他重金属可由 APCS-MLR 分析的 3 类因子解释, 但 Ba 和 Cr 中分别存在 66.99%、38.50% 其他来源需进一步研究. 研究表明 Ba 主要受交通因素影响<sup>[31]</sup>, Cr 主要受自然因素的影响<sup>[9]</sup>. 13 种重金属中, 除 Ni 完全受自然因素影响外, 自然、交通、采矿对另外 12 种重金属分别有不同程度的贡献, 说明针对单一某种重金属, 其通常受多源影响.

表 5 青藏高原土壤重金属污染源贡献分析结果<sup>1)</sup>

Table 5 Analysis of contributions of heavy metal pollution sources in Qinghai-Tibet Plateau

项目	F1/%	F2/%	F3/%	F4/%	其他来源/%	EST	OBS	E/O
Ba	—	—	31.33	1.68	66.99	437.70	437.64	1.000 1
Cd	—	—	97.89	2.11	—	165.02	0.16	1.023 1
Co	99.93	0.03	0.04	—	—	11.39	11.39	1.000 2
Cr	51.48	0.64	9.38	—	38.50	70.85	69.06	1.026 0
Cu	99.11	—	—	0.88	—	23.92	23.85	1.002 8
Fe	98.37	0.03	1.32	0.28	—	2.85	2.85	0.999 9
Mn	86.81	—	13.19	—	—	639.66	639.64	1.000 0
Mo	—	—	69.36	30.64	—	0.81	0.78	1.040 2
Ni	99.83	0.17	—	—	—	31.64	29.97	1.055 7
Pb	—	—	97.76	2.24	—	28.66	28.65	1.000 4
Sb	27.35	0.05	24.05	48.55	—	2.57	2.29	1.119 0
Sc	91.76	—	8.24	—	—	8.89	8.89	0.999 9
Zn	58.32	—	41.61	0.07	—	73.31	73.31	1.000 0

1) “—”表示源贡献率值很小至可忽略不计

## 3 结论

(1) 与上部陆壳(UCC)相比, 青藏高原表土 Sb、

Cr、Cd、Ni、Pb 和 Co 含量丰富; 与世界土壤背景值相比, Sb、Co 和 Sc 含量较高; 与中国土壤背景值相比, Sb、Cd、Ni 和 Cr 含量较高; 与 20 世纪 70 年代

青藏高原土壤相比,Cd 和 Sb 含量较高;与 21 世纪初相比,Cd 含量略有增加. 总之,青藏高原表土 Cd 和 Sb 含量较高且变异系数较大,可能受人为污染影响.

(2) 富集因子 (EF)、地累积指数 ( $I_{geo}$ ) 及 Nemero 综合指数 (PN) 分析表明,青藏高原表土重金属污染主要以 Cd 和 Sb 为主,虽平均污染程度普遍不高,但个别样点存在污染较重现象,进行环境污染治理时应重点关注. 在空间分布上,青藏高原中部、东南部及东北部都存在一定程度污染,高交通量及采矿活动可能是产生重金属污染的主要原因.

(3) PCA-APCS-MLR 分析表明,青藏高原表土 13 种重金属主要有 3 个来源,分别为自然、交通及采矿等综合因素. 其中,Ni、Co、Cu、Fe、Sc、Mn 和 Cr 主要受自然因素影响,贡献率分别为 100%、99.96%、99.12%、98.40%、91.76%、86.81% 和 52.12%;Cd、Pb 和 Mo 主要受交通因素影响,贡献率分别为 97.89%、97.76% 和 69.36%;Sb 主要受采矿、自然和交通等综合因素影响,贡献率分别为 48.55%、27.40% 和 24.05%;Zn 主要受自然和交通因素共同影响,贡献率分别为 58.32% 和 41.61%;Ba 主要受交通因素(31.33%)影响.

#### 参考文献:

- [1] Sheng J J, Wang X P, Gong P, *et al.* Heavy metals of the Tibetan top soils [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, **19**(8): 3362-3370.
- [2] Islam M 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.
- [3] 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.
- [4] Li Z Y, Ma Z W, Van Der Kuijp T J, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 843-853.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 690-700.
- [8] 李锋, 刘思源, 李艳, 等. 工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 934-944.  
Li F, Liu S Y, Li Y, *et al.* Spatiotemporal variability and source apportionment of soil heavy metals in a industrially developed city [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 934-944.
- [9] 王冠星, 闫学东, 张凡, 等. 青藏高原路侧土壤重金属含量分布规律及影响因素研究 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(2): 431-438.  
Wang G X, Yan X F, Zhang F, *et al.* Influencing factors of heavy metal concentration in roadside-soil of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(2): 431-438.
- [10] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al.* Contamination features and health risk of soil heavy metals in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **512-513**: 143-153.
- [11] Namaghi H H, Karami G H, Saadat S. A study on chemical properties of groundwater and soil in ophiolitic rocks in Firuzabad, east of Shahrood, Iran: with emphasis to heavy metal contamination [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **174**(1-4): 573-583.
- [12] Szolnoki Z, Farsang A, Puskás I. Cumulative impacts of human activities on urban garden soils: origin and accumulation of metals [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **177**: 106-115.
- [13] Zhang H, Wang Z F, Zhang Y L, *et al.* Identification of traffic-related metals and the effects of different environments on their enrichment in roadside soils along the Qinghai-Tibet highway [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **521-522**: 160-172.
- [14] 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.
- [15] Wang X P, Yang H D, Gong P, *et al.* One century sedimentary records of polycyclic aromatic hydrocarbons, mercury and trace elements in the Qinghai Lake, Tibetan Plateau [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(10): 3065-3070.
- [16] 高兴川, 曹小曙, 李涛, 等. 1976-2016 年青藏高原地区通达性空间格局演变 [J]. *地理学报*, 2019, **74**(6): 1190-1204.  
Gao X C, Cao X S, Li T, *et al.* Evolution of accessibility spatial pattern of the Qinghai-Tibet Plateau in 1976-2016 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(6): 1190-1204.
- [17] 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 等. 西南高锡地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2877-2884.  
Liu Y Z, Xiao T F, Xiong Y, *et al.* Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of cadmium, southwestern China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2877-2884.
- [18] 夏增禄, 李森照, 罗金发. 喀喇崑仑山——西昆仑山地区土壤元素的自然含量特征 [J]. *应用生态学报*, 1992, **3**(1): 28-35.  
Xia Z L, Li S Z, Luo J F. Characteristics of natural contents of soil elements in Karakoram and West-Kunlun Mountains of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1992, **3**(1): 28-35.
- [19] Zhang X P, Deng W, Yang X M. The background concentrations of 13 soil trace elements and their relationships to parent materials and vegetation in Xizang (Tibet), China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, **21**(2): 167-174.

- [20] HJ/T 166-2004, 土壤环境监测技术规范[S].
- [21] Buat-Menard P, Chesselet R. Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1979, **42**(3): 399-411.
- [22] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, **2**(3): 109-118.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] NY/T 1054-2013, 绿色食品产地环境调查、监测与评价规范[S].
- [26] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust [J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, **33**(2): 241-265.
- [27] Bowen H J M. *Environmental chemistry of the elements* [M]. New York: Academic Press, 1979.
- [28] 成延鳌, 田均良. 西藏土壤元素背景值及其分布特征[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [29] 舒心, 李艳, 李锋, 等. 土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2471-2482.  
Shu X, Li Y, Li F, *et al.* Impacts of land use and landscape patterns on heavy metal accumulation in soil [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2471-2482.
- [30] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2202-2210.  
Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from lake Taihu basin [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2202-2210.
- [31] 丁建华, 杨毅恒, 邓凡. 中国锑矿资源潜力及成矿预测[J]. *中国地质*, 2013, **40**(3): 846-858.  
Ding J H, Yang Y H, Deng F. Resource potential and metallogenic prognosis of antimony deposits in China [J]. *Geology in China*, 2013, **40**(3): 846-858.
- [32] 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.
- [33] 王学松, 秦勇. 徐州城市表层土壤中重金属环境风险测度与源解析[J]. *地球化学*, 2006, **35**(1): 88-94.  
Wang X S, Qin Y. Environmental risk and sources of heavy metals in Xuzhou urban topsoil [J]. *Geochimica*, 2006, **35**(1): 88-94.
- [34] Wang X D, Cheng G W, Zhong X H, *et al.* Trace elements in sub-alpine forest soils on the eastern edge of the Tibetan Plateau, China [J]. *Environmental Geology*, 2009, **58**(3): 635-643.
- [35] 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2304-2312.  
Sun J W, Hu G R, Yu R L, *et al.* Tracing sources of heavy metals in the soil profiles of drylands by multivariate statistical analysis and lead isotope [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2304-2312.

## CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM <sub>2.5</sub> of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui ( 499 )
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, et al. ( 510 )
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, et al. ( 520 )
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, et al. ( 529 )
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM <sub>2.5</sub> ) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, et al. ( 537 )
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM <sub>2.5</sub> at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, et al. ( 554 )
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM <sub>2.5</sub> in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, et al. ( 564 )
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM <sub>2.5</sub> Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, et al. ( 574 )
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, et al. ( 587 )
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na ( 600 )
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM <sub>2.5</sub> with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, et al. ( 609 )
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, et al. ( 620 )
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, et al. ( 630 )
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao ( 638 )
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu ( 647 )
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, et al. ( 656 )
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, et al. ( 665 )
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, et al. ( 674 )
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohogou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, et al. ( 682 )
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, et al. ( 691 )
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, et al. ( 702 )
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, et al. ( 713 )
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, et al. ( 728 )
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, et al. ( 734 )
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, et al. ( 743 )
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, et al. ( 750 )
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, et al. ( 756 )
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, et al. ( 763 )
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, et al. ( 773 )
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, et al. ( 784 )
Phosphate Adsorption from Water on CaO <sub>2</sub> -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, et al. ( 792 )
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, et al. ( 801 )
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, et al. ( 809 )
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, et al. ( 815 )
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, et al. ( 823 )
Denitrification Process and N <sub>2</sub> O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, et al. ( 831 )
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, et al. ( 839 )
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, et al. ( 849 )
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, et al. ( 856 )
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, et al. ( 867 )
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, et al. ( 876 )
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, et al. ( 886 )
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, et al. ( 895 )
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-xiang, LIU Hong-fei, et al. ( 905 )
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, et al. ( 914 )
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, et al. ( 922 )
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, et al. ( 932 )
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, et al. ( 941 )
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, et al. ( 952 )
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, et al. ( 962 )
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, et al. ( 970 )
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, et al. ( 979 )
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, et al. ( 986 )
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, et al. ( 997 )
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, et al. ( 1005 )