生方知库
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

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第2期
2020年2月15日

目 次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化$PM_{2.5}$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$PM_{2.5}$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$PM_{2.5}$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$PM_{2.5}$中有机胺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$PM_{2.5}$中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析 …… 薛国艳, 王格慧, 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$PM_{2.5}$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$PM_{2.5}$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$PM_{2.5}$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生物多样性及群落结构 …… 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)
南小河沟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, 李燚, 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)
载镧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, 林莉, 黎睿, 董磊(784)
磁性硅藻土负载纳米过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)
磁混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, 焦赟仪, 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_2O产生特性 … 杨垒, 崔珅, 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 …… 王晓曈, 杨宏, 苏杨, 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, 薛萐, 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 …… 刘躲, 王磊, 曹湛波, 段灏(932)
基于漂浮箱法和扩散模型法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硒的响应规律 …… 余垚, 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, 郭俊姮, 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)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第41卷第2期 2020年2月
Vol.41, No.2 Feb., 2020

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[1], 肖乃川[1], 周浪[1], 庞瑞[1], 宋波[1,2]*

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 2. 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 为了解桂西南地球化学异常区土壤 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的空间分布特征及污染状况, 共采集自然土壤和农田土壤 256 个并分析重金属含量. 结果表明: ①自然土壤 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 背景值分别为 0.890、32.58、51.50、55.57 和 168.1 mg·kg^{-1}. 农田土壤(n = 193) pH 值在 4.8 ~ 7.9 之间, Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 几何均值分别为 0.637、30.76、27.04、39.59 和 123.9 mg·kg^{-1}; ②Kriging 插值结果显示农田 Cd、Ni、Pb 和 Zn 空间分布特征较为相似, 高含量区主要集中在崇左—龙州一带; 田林县、凌云县、百色市和田阳县农田 Cu 含量最高; ③以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)和土壤基线值为标准, 农田 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的超标率分别为 57.5%、6.2%、0.5%、3.6%、10.9% 和 4.1%、14.0%、0.5%、2.1% 和 2.1%. 综合污染指数表明, 天等县、隆安县、大新县、龙州县和崇左市表现出较严重的复合污染特征. 研究区地层发育时代齐全, 构造性质复杂, 矿床种类繁多, 母质(岩)自身具有较高含量重金属, 进而在风化成土过程土壤继承母质(岩)中的重金属, 是桂西南地球化学异常区土壤具有较高背景值(特别是 Cd 元素)的最主要自然因素.

关键词: 地球化学异常区; 农田; 重金属; 空间特征; 污染评价; 广西

中图分类号: X53 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)02-0876-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201906218

Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi

WANG Fo-peng[1], XIAO Nai-chuan[1], ZHOU Lang[1], PANG Rui[1], SONG Bo[1,2]*

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Key Laboratory of Theory and Technology of Environmental Pollution Control in Guangxi, Guilin 541004, China)

Abstract: To understand spatial distribution characteristics and pollution status of Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn in soils within geochemical anomaly areas in southwestern Guangxi, 256 natural and farmland soils were collected, and heavy metal contents in soils were analyzed. The results show the following: ① The background values of Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn in natural soils were 0.890, 32.58, 51.50, 55.57, and 168.1 mg·kg^{-1}, respectively. The pH value of farmland soil (n = 193) ranged from 4.8 to 7.9. The geometric mean values of Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn were 0.637, 30.76, 27.04, 39.59, and 123.9 mg·kg^{-1}, respectively. ② Kriging interpolation results showed that the spatial distribution characteristics of Cd, Ni, Pb, and Zn in farmland soils were similar, and high-content areas were mainly concentrated in Chongzuo-Longzhou area. The highest content of Cu was found in Tianlin County, Lingyun County, Baise City, and Tianyang County. ③ Taking the "Standard for Risk Control of Soil Pollution in Agricultural Land of Soil Environmental Quality" (GB 15618-2018) and soil baseline values as evaluation criteria, the above-standard rates of Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn in farmland were 57.5%, 6.2%, 0.5%, 3.6%, 10.9%, and 4.1%, 14.0%, 0.5%, 2.1%, and 2.1%, respectively. The comprehensive pollution index shows that Tiandeng County, Longan County, Daxin County, Longzhou County, and Chongzuo City have severe combined pollution characteristics. The most important reason behind the high background value (particularly the Cd element) in the geochemical anomaly area of southwestern Guangxi is that the topography of the study area is complex, and the types of heavy metal deposits are numerous, which means that the parent material (rock) itself has a high content of heavy metals, which is weathered into soil. This soil inherits heavy metals from the parent material (rock).

Key words: geochemical anomalies; farmland; heavy metals; spatial characteristics; pollution assessment; Guangxi

土壤是环境组成中最重要的成分之一[1], 其中重金属是反映土壤环境质量状况的重要指标, 由于重金属具有持久性和非生物降解性的特点, 因而具有较高的生物毒害作用[2]. 土壤中重金属主要来自成土母质[3]和人类活动[4]. 近年来我国开展的多目标地球化学调查发现, 西南五省存在着规模巨大的以自然地质背景为主的重金属地球化学异常区, 其中广西西部地区 Cd、Cu、Pb、Zn 和 Ni 等重金属均存在异常现象[5]. 复杂的地质构造, 多金属矿床和高背景含量岩石自然风化成为广西重金属异常分布的主要原因[6,7]. 目前研究者围绕矿山开采、金属冶炼等人类活动引起的农田土壤重金属污染进行了详细研究[8~10], 对广西农业土壤环境质量评估具有重

收稿日期: 2019-06-29; **修订日期**: 2019-09-16

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA17204047); 国家重点研发计划项目(2018YFD0800600)

作者简介: 王佛鹏(1993 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属污染土壤修复和区域环境调查, E-mail: 413477862@qq.com

* 通信作者, E-mail: songbo@glut.edu.cn

要意义. 然而因成土母质使得农田土壤重金属超标的研究却较少，仅局限于某一小范围区域内且所调查样本数量少. 吴玉峰[11]对广西崇左市 74 个农田土壤样品进行分析，得到土壤中 Cd 浓度在 0 ~ 21.88 mg·kg^{-1}之间，平均值(4.08 mg·kg^{-1})是国家标准(GB 15618-1995)的 13.6 倍. 唐豆豆等[12]对广西中部某地区 80 个农田土壤样本分析发现，与广西土壤背景值相比，Pb、Cu、Cd、Zn、As 和 Ni 的超标率全部大于 75%. 可见广西地球化学异常区内农田土壤重金属存在普遍超标现象.

广西作为全国重要的粮食产区，农田土壤环境质量的重要性不言而喻. 因此开展广西地球化学异常区农田土壤重金属含量调查及对其风险评估成为亟需解决的问题. 广西地球化学异常区分布在西部，包括桂林市、柳州市、来宾市、南宁市、河池市、百色市、崇左市及其管辖的县级行政区. 本课题组对广西西江流域(河池市、来宾市和柳州市等)农田土壤重金属已进行详细调查研究[13~17]，因此将西南部的田林县、凌云县、百色市、田阳县、田东县、平果县、隆安县、天等县、大新县、龙州县、崇左市和扶绥县作为研究区. 选择研究区内无工矿业，无显著的区域性人为污染影响的农田土壤作为研究对象，分析土壤中 Cd、Cu、Pb、Zn 和 Ni 含量状况，结合地统计信息技术分析农田重金属空间分布特征，并利用单项污染指数法和综合污染指数法评估农田重金属的污染状况，以期为广西地球化学异常区农田土壤的合理利用提供科学依据.

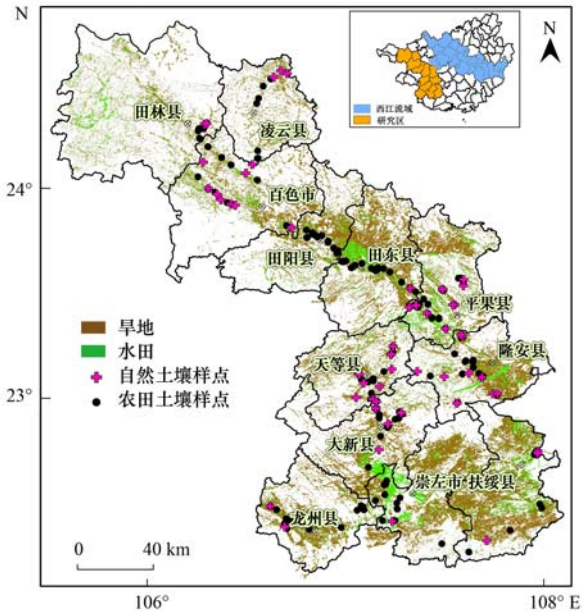
1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区及样点分布如图 1 所示. 研究区地处广西西南部，属于右江盆地，由扬子板块西南缘发生裂解作用而形成的，盆地内主要出露晚古生代和三叠纪地层及少量早古生代和第四纪地层，主要以台地相碳酸盐、盆地相泥质岩、灰岩、砾屑灰岩及泥岩为主[6].

1.2　样品采集与处理

土壤样品采集于 2017 年 4 月，用 GPS 确定点位经纬度信息，共采集样品 256 个(图 1)，其中自然土壤和农田土壤样品数量分别为：63 个和 193 个. 土壤样品采集原则：对于自然土壤，选择远离人类活动或受人类活动影响较小的山地、植被发育完好地方，单点采集深度在 30 cm 以下的土壤作为自然土壤；对于农田土壤，布点过程中综合考虑农田周围环境因素，选择远离公路、工矿企业的农田. 农田土壤均为混合样品，从 10 m × 10 m 的正方形 4 个顶点和中心点共 5 位置采集表层土壤(0 ~ 20 cm)，均匀混合后用



蓝色区域为本课题组前期已完成的调查区域，
黄色区域则为研究区

图 1　研究区及土壤样点分布示意

Fig. 1　Distribution of soil sampling sites in study area

四分法从中选取 1 kg 土壤作为一个样品. 土壤样品在室内自然风干后，拣出植物根系、石块等杂质，木锤捣碎后，用玛瑙研钵研碎，过 20 目尼龙筛，四分法收集其中的一半土装于信封袋中，用于测定土壤 pH 值；另一半土壤样品继续研磨，过 100 目尼龙筛，保存在信封袋中，用于测定土壤重金属含量.

1.3　化学分析

土壤样品采用美国环保署推荐的 HNO_3-H_2O_2 法[18]进行消煮，由美国 PerkinElmer 公司产的 ELAN DRC-e 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定样品中的重金属含量；土壤 pH 值采用玻璃电极法，水土比为 2.5∶1. 分析过程中所用试剂均为优级纯，实验用水均为超纯水，所用器皿均在 10% 的硝酸中浸泡 24 h 以上. 分析过程中加入 GBW 07404(GSS-4)土壤成分分析标准物质和空白进行质量控制，分析样品的重复数为 10% ~ 15%. 标准物质中重金属的回收率见表 1.

表 1　标准物质回收率/%

Table 1　Standard material recovery rate/%

重金属	样本数量/个	最小值	最大值	均值
Cd	6	90.02	108.6	97.90
Cu	6	89.36	110.3	100.3
Ni	6	89.84	94.29	92.04
Pb	6	93.07	110.9	98.35
Zn	6	98.62	108.8	102.4

1.4　土壤污染评价方法

土壤重金属污染指数可以表征土壤重金属的污染状况，分为单项污染指数和综合污染指数. 其中单

项污染指数(PI)计算公式如下:

$$PI_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中,PI_i 表示重金属单项污染指数,C_i 表示重金属元素实际含量值,mg·kg^{-1},S_i 表示重金属元素评价标准,mg·kg^{-1}. 当 PI≤1 时,表示未受污染;PI > 1 时,表示已受污染,PI 越大,污染越严重.

而综合污染指数又与单项污染指数和某种土壤重金属的分担率密切相关,为突出高浓度污染物对土壤环境质量的影响,采用下式计算[19]:

$$PKI = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} (PI_i)^2 \times W_i} \quad (2)$$

式中,PKI 表示重金属综合污染指数;PI_i 表示重金属元素 i 的单项污染指数;W_i 表示土壤重金属元素的分担率,用土壤重金属元素 i 的单项污染指数与该样点 m 个重金属元素单项污染指数之和的比值表示. 当 PKI≤0.7 时,清洁(安全);0.7 < PKI≤1 时,尚清洁(警戒线);1 < PKI≤2 时,污染;PKI > 2 时,重度污染.

1.5 统计分析

本研究中图形处理采用 ArcGIS 10.2 绘制;利用 SPSS 19.0 统计分析软件对原始数据进行描述性统计分析.

2 结果与分析

2.1 自然土壤重金属背景值

对自然土壤的研究有助于了解该区域范围内土壤重金属含量背景值大小,是土壤环境质量评价的重要依据[18],同时是评价区域内农田重金属生态风险的重要指标. 为保证自然土壤重金属背景值的真实性,在进行统计分析前需剔除数据异常值. 采用 Grubbs 检验法对 63 个样品重金属异常值检验,结果显示,Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 异常值数量分别为 5、7、1、1 和 2 个. 表 2 为剔除异常值后自然土壤重金属含量基本统计结果.

表 2 自然土壤重金属基本统计结果[1)]

Table 2 Basic statistical results of heavy metals in natural soil

元素	样本数/个	范围/mg·kg^{-1}	算术均值±标准差/mg·kg^{-1}	几何均值(标准差)/mg·kg^{-1}	原始数据		对数转换		原始数据	对数转换
					峰度	偏度	峰度	偏度	($P_{K\text{-}S}$)	($P'_{K\text{-}S}$)
Cd	58	0.026~7.305	1.825±1.855	0.890(1.829)	0.152	1.057	-0.725	-0.437	0.000	0.046
Cu	56	13.64~72.58	35.04±13.79	32.58(1.181)	0.706	0.955	-0.299	0.036	0.022	0.200
Ni	62	11.35~120.6	51.50±27.39	43.65(1.306)	-0.528	0.448			0.086	
Pb	62	13.43~136.0	55.57±28.90	48.49(1.265)	0.217	0.874			0.200	
Zn	61	41.32~413.7	168.1±82.07	149.1(1.245)	0.136	0.782			0.200	

1) $P_{K\text{-}S}$ > 0.05 表示呈正态分布

对数据进行异常值处理后,用 K-S 检验法和峰度偏度联合检验法对数据进行正态分布检验,以减少非正态分布引起的统计误差. 结果显示,Cd 和 Cu 原始数据经对数转换后呈正态分布或近似正态分布,Ni、Pb 和 Zn 原始数据均呈正态分布. 在土壤背景值的表达方式中,呈对数正态或近似对数正态分布的元素,用几何平均值表示数据分布的集中趋势,呈正态分布或接近正态分布的元素,用算术平均值表示数据分布的集中趋势[20]. 因此,研究区自然土壤 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 背景值分别为 0.890、32.58、51.50、55.57 和 168.1 mg·kg^{-1},是广西土壤 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 背景值[21] 0.060、21.10、14.40、23.60 和 75.60 mg·kg^{-1}的 14.8、1.5、3.6、2.4 和 2.2 倍. 研究区自然土壤背景值高于广西土壤背景值可能受两个因素的共同影响,一方面,广西土壤背景值是基于整个广西区内土壤得到的,而此次所调查范围相较于整个广西而言较小. 另一方面,此次调查对象是广西地球化学异常区内土壤,而地球化学异常区内土壤重金属本底值较高. 这两方面原因最终使得自然土壤背景值高于广西土壤背景值.

2.2 农田土壤重金属含量特征及污染评价

研究区农田土壤 pH 范围在 4.8~7.9 之间,均值为 6.6,其中 pH 大于 6.5 的比例为 61%(117/193),表明农田土壤以中性和碱性为主. 这主要是由于广西岩溶地形由石灰岩溶蚀形成,而石灰岩中含有丰富的 $CaCO_3$ 和 $MgCO_3$ 等盐基性物质[22],经风化后产生氢氧离子,使得土壤偏碱性或中性.

经统计后发现,农田重金属含量呈对数正态分布,几何均值更能体现数据的集中分布趋势,因此用几何均值表征土壤重金属含量大小. 由表 3 可知,农田 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 几何平均含量为 0.637、30.76、27.04、39.59 和 123.9 mg·kg^{-1}. 可以发现农田重金属均值含量要低于自然土壤重金属背景值. 这可能是由两方面原因造成的. 一方面,地球化学异常区岩石中重金属本底值较高,在风化成土过程中土壤继承岩石中的重金属,因此自然土壤中重金属含量较高;另一方面,研究区具有悠久的农业种植历史,在农作物种植过程中吸附带走了大量重金属. 在后续采集的 656 件水稻样品中,以 Cd 为例(其它数据未发表,暂不列出),水稻根、茎、叶、籽

表 3　农田土壤重金属含量基本统计结果

Table 3　Basic statistical results of heavy metal content in farmland soil

元素	样本数/个	范围/mg·kg^{-1}	算术均值 ± 标准差/mg·kg^{-1}	几何均值(标准差)/mg·kg^{-1}	变异系数/%	分布类型
Cd	193	0.107 ~ 6.833	0.991 ± 1.020	0.637(1.498)	103	对数正态
Cu	193	4.167 ~ 106.3	33.83 ± 15.10	30.76(1.217)	44.6	对数正态
Ni	193	4.249 ~ 146.9	30.80 ± 16.96	27.04(1.254)	55.1	对数正态
Pb	193	8.095 ~ 138.7	46.15 ± 25.16	39.59(1.283)	54.5	对数正态
Zn	193	36.60 ~ 635.3	140.1 ± 78.71	123.9(1.232)	56.2	对数正态

粒 Cd 含量分别介于 0.082 ~ 25.58、0.043 ~ 7.414、0.003 ~ 5.604 和 0.002 ~ 1.488 mg·kg^{-1}之间[23].

变异系数可以表征数据的离散程度,一定区域内重金属含量的变异大小,可以反映该区域内重金属元素的分布和污染程度地差异[24,25]. 当变异系数 < 10% 为弱变异, 10% ~ 90% 为中等变异, > 90% 为高度变异[26]. Cu、Ni、Pb 和 Zn 的变异系数在 44% ~ 57% 之间,表现为中等程度变异,Cd 的变异系数为 103%,说明研究区土壤重金属分布差别较大,含量不均匀,同时也预示着农田土壤可能会受到较多 Cd 污染,土壤也受到 Cu、Ni、Pb 和 Zn 不同程度地污染. 采用单项污染指数法对农田土壤重金属污染情况的评价结果见表 4.

表 4　农田土壤单项污染指数评价结果

Table 4　Evaluation results of single factor pollution index in farmland soil

元素	样本数/个	以《土壤环境质量》(GB 15618-2018)为参考				以土壤基线值为参考			
		最小值	最大值	平均值	超标率/%	最小值	最大值	平均值	超标率/%
Cd	193	0.18	14.01	1.98	57.5	0.04	2.30	0.33	4.1
Cu	193	0.08	2.13	0.49	6.2	0.09	2.34	0.74	14.0
Ni	193	0.03	1.47	0.35	0.5	0.04	1.38	0.29	0.5
Pb	193	0.05	1.98	0.39	3.6	0.07	1.22	0.41	2.1
Zn	193	0.12	2.54	0.59	10.9	0.11	1.91	0.42	2.1

以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中农用地土壤重金属污染风险筛选值为标准,土壤 Cd 的污染指数 PI 大于 1,表明研究区土壤 Cd 呈现一定的累积趋势,土壤 Cd 超标率达到了 57.5%. Zn、Cu、Pb 和 Ni 的 PI 均值均小于 1,表明土壤中重金属的累积量没有达到威胁农业生产的程度,但仍有部分样点重金属含量超过了重金属污染风险筛选值,Zn、Cu、Pb 和 Ni 的超标率分别为 10.9%、6.2%、3.6% 和 0.5%. 然而由于此次所选研究区在地球化学异常区范围内,土壤具有较高背景值,若用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)作为评价标准,易导致该地区被认为是重金属超标而污染,另外若采用土壤背景值作为评判土壤清洁与否则过于严苛,因此采用土壤基线值进行评价则更能反映该地区土壤环境质量的客观情况. 对于正态分布的数据,土壤基线值用自然背景算术均值与 2 倍算术标准差之和表征;对于对数正态分布的数据,土壤基线值则用自然背景几何均值与几何标准差平方的乘积表征[20],所以基于上述自然土壤背景值得到 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的基线值为 2.977、45.44、106.3、113.4 和 332.2 mg·kg^{-1}. 以土壤基线值作为评价标准,土壤 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的污染指数均值 PI 均小于 1,总体来看研究区土壤没有受到重金属污染,但仍存在部分样点重金属含量超过土壤基线值,Cu 超过基线值的样品最多,占总数的 14.0%,Cd、Ni、Pb 和 Zn 则分别有 4.1%、0.5%、2.1% 和 2.1% 的样品超过基线值.

采用不同评价标准所得到的评价结果可知,研究区局部分农田土壤在一定程度上已受到 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 污染. 这 5 种重金属中特别值得关注的是 Cd 和 Pb,Pb 超标较严重区域主要分布在天等县及大新县、龙州县和崇左市这三县市的交界处,Cd 超标严重区域比 Pb 污染区域还多了平果县和隆安县,因此这些区域的土壤环境质量状况应引起足够重视.

为全面反映各重金属对土壤环境质量的影响,采用综合污染指数法对农田土壤重金属污染状况进行综合评价,结果见表 5. 从中可知,按照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中污染物风险筛选值得到的评价结果中,处于污染和严重污染的比例分别为 25.9%、24.9%,剩余 49.2% 的样点则属于清洁和尚清洁等级. 以土壤基线值为评价标准,研究区土壤主要属于清洁等级,占样品总数的 69.9%,有 21.8% 的样点处于尚清洁等级,剩下的 8.3% 点位表现为污染级别. 综合来

看,桂西南地球化学异常区部分农田土壤受到 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的复合污染,复合污染较严重区域主要集中在天等县、隆安县、大新县、龙州县和崇左市,这些区域土壤表现出污染特征,因此可能具有一定的潜在生态风险,有必要对该区域农作物进行监测,并进行人体健康风险评估.

表 5 农田土壤重金属综合污染指数评价结果/%

Table 5 Evaluation results of comprehensive pollution index of heavy metals in farmland soils/%

评价标准	样本数/个	清洁 (PKI≤0.7)	尚清洁(警戒线) (0.7 < PKI≤1)	污染 (1 < PKI≤2)	严重污染 (PKI > 2)
《土壤环境质量标准》筛选值	193	35.2	14.0	25.9	24.9
土壤基线值	193	69.9	21.8	8.3	0

2.3 农田土壤重金属空间分布特征

变异系数只能概括反映土壤重金属的总体特点,而不能定量地刻画其在空间尺度上的随机性和结构性、独立性和相关性[24]. 因此,利用地统计学中的半方差函数对土壤重金属的空间分布特征进一步分析. 表 6 为农田土壤重金属的半方差函数相关参数. 除了 Cu 的变异函数理论模型决定系数偏低外,其余重金属变异函数理论模型拟合程度相当高. 土壤 Cd、Pb 和 Zn 符合球状模型,Cu 和 Ni 则较好地符合指数模型.

表 6 农田土壤重金属的变异函数理论模型及其相关参数

Table 6 Theoretical models and their corresponding parameters for heavy metals in farmland soil

重金属	分布类型	理论模型	块金值 (C_0)	基台值 (C_0+C)	块基比/% [$C_0/(C_0+C)$]	变程(A)/km	残差 (RSS)	决定系数 (R^2)
Cd	对数正态	球状模型	0.037	1.006	69.5	8.410	0.052	0.912
Cu	对数正态	指数模型	0.031	0.214	85.2	2.430	0.004	0.436
Ni	对数正态	指数模型	0.184	0.369	50.1	29.22	0.003	0.890
Pb	对数正态	球状模型	0.151	0.512	70.5	41.00	0.004	0.934
Zn	对数正态	球状模型	0.109	0.243	55.1	7.110	0.003	0.855

块基比是反映变量空间异质性程度的重要指标,比值大则说明由随机因素(实验误差和人为活动等)引起的变异程度较大,相反则由结构性因素(土壤母质、地形和气候等)引起的变异程度较大[24]. 另外块基比还可以表示变量的空间相关性程度,块基比 <25%,变量有强烈的空间相关性, 25 ~ 75% 时变量有中等程度的空间相关性, >75% 时变量的空间相关性很弱[27]. 由表 6 可知,Cu 的空间相关性很弱,Cd、Ni、Pb、Zn 则具有中等程度的空间相关性,表明土壤重金属受结构性因素和随机因素的共同影响. 上文中当以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)为评价标准时,农田 Cd 超标率(57.5%)高于 Cu 的超标率(6.2%),而以土壤基线值为标准时,Cd 超标率(4.1%)反而低于 Cu 的超标率(14.0%). 从此处 Cd 的块基比(69.5%)低于 Cu 的块基比(85.2%)可以看出,Cd 更接近强烈空间自相关,可以说明农田 Cd 含量整体上呈现偏高的态势.

利用拟合得到的变异函数模型,采用 Kriging 插值法绘制农田土壤重金属空间分布特征,如图 2 所示. 为便于描述,按地理位置将田林县、凌云县、百色市和田阳县划分为西北部,中部为田东县、天等县、平果县和隆安县,南部为大新县、龙州县、崇左市和扶绥县.

由图 2 可知,土壤中 Cd 表现出西北部偏低、中部和南部偏高的特征,高含量斑块出现在中部的局部区域,整体上 Cd 含量以大于 0.34 mg·kg^{-1}为主;土壤中高 Cu 含量区主要分布在西北部的大部分区域、中部的隆安县及南部的龙州县和崇左市的部分区域,该区域 Cu 含量以大于 36 mg·kg^{-1}为主;土壤 Ni 和 Zn 的空间分布较为相似,田阳县、田东县、平果县样点的东北侧含量要低于西南侧,中部天等县和南部的龙州县、大新县、崇左市以及三县市的交界处,土壤 Ni 和 Zn 的含量均较高. 另外,大新县中间区域 Ni 和 Zn 含量要低于周边土壤重金属含量;土壤中 Pb 含量表现出两端高中间低的格局. 南部龙州县属于高值斑块区,土壤中 Pb 含量大于 80 mg·kg^{-1}为主,以此斑块为中心 Pb 含量逐级向四周递减. 整体来看,土壤中 Cd、Ni、Pb、Zn 含量空间分布格局表现出南部较高,西北部次之,中部较低的趋势,而土壤中 Cu 含量的空间分布格局较为特殊,呈现西北最高,南部次之,中部偏低的趋势,其含量最高的区域位于西北部的田林县、凌云县、百色市和田阳县.

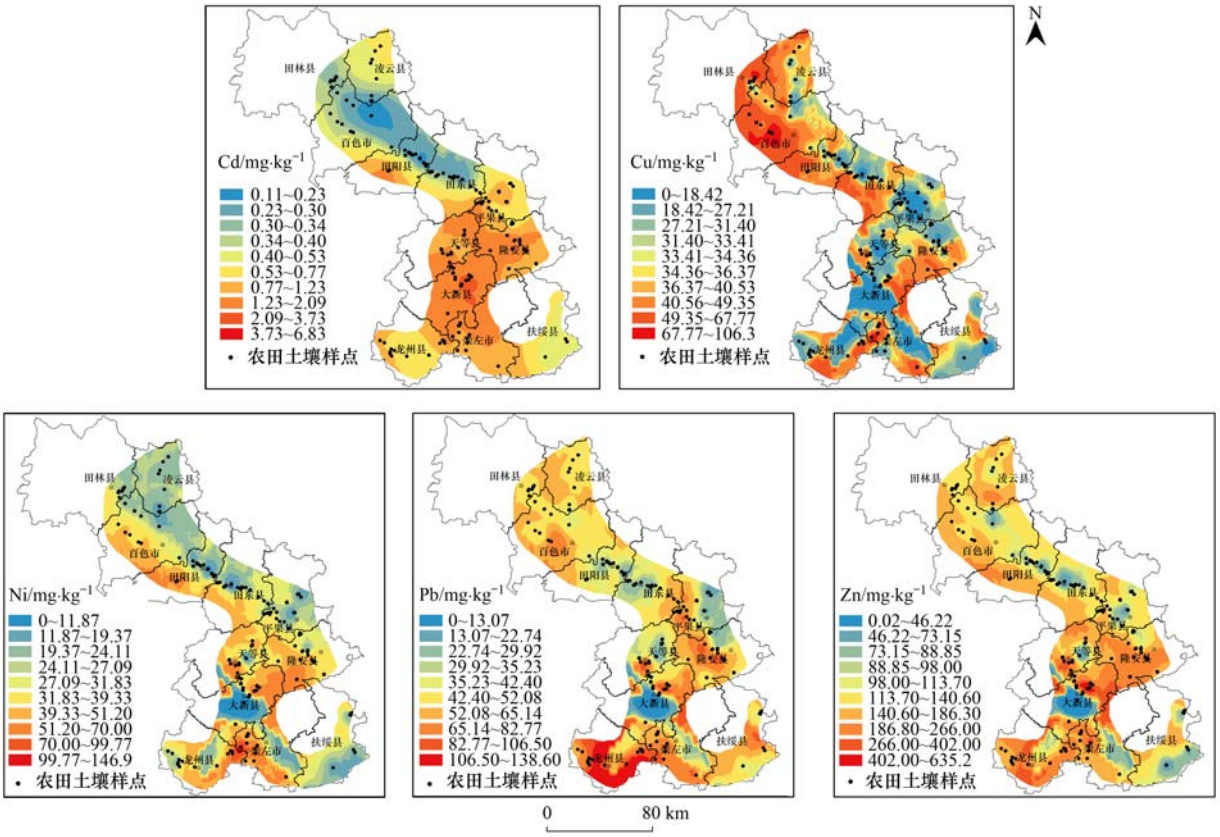


图 2　农田土壤重金属空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of heavy metals in farmland soil

3　讨论

通过对广西西南部地球化学异常区土壤进行分析，得到自然土壤背景值要高于广西土壤背景值，同时以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)和土壤基线值为评价标准，发现农田土壤 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 均存在不同程度的超标现象，尤其是对植物和人体健康产生毒害作用的 Cd. 因此，有必要对地球化学异常区土壤中重金属来源进行探讨.

3.1　人为来源

目前研究结果表明人类活动是造成土壤重金属污染的主要原因，包括矿业活动[28]和农业生产[29,30]等. 广西矿产资源丰富、储量庞大，是我国重要的有色金属产区之一，因此矿业活动极易造成土壤重金属污染，当前此类研究较多. 本文目的是了解在自然因素影响下地球化学异常区土壤重金属含量状况，因而选择远离人类活动或受人类活动影响较小的山地、植被发育完好区域的自然土壤和无工矿业影响的农田土壤作为研究对象，所以土壤中高含量重金属不是矿业活动所引起的.

农业活动中施肥和喷洒农药被认为可能是引起土壤重金属污染的重要人为污染源. 广西喀斯特岩溶地区由于地质构造特殊、成土母质缺乏成土物质以及土壤存储矿物营养元素能力弱等特点，致使土壤营养成分含量低，因而刺激了对化肥的过分需求[31]. 2000 ~ 2008 年全区农作物总播种面积由 625.86 万 hm^2 下降到 569.56 万 hm^2，而化肥施用量(折纯)却由 157.76 万 t 增加到了 222.58 万 t，单位播种面积化肥施用量(折纯)由 252 $kg\cdot hm^{-2}$ 增加到 391 $kg\cdot hm^{-2}$[32]. 以 2008 年化肥施用量 391 $kg\cdot hm^{-2}$ 为例估算输入到土壤中的重金属含量. 以南方某地市售化肥中 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量 0.28、7.50、12.5、21.5 和 48.1 $mg\cdot kg^{-1}$ 为参考[33]，土壤耕作层为 20 cm，土壤容重为 1160 $kg\cdot m^{-3}$[34]，由以上数据得出化肥对土壤 Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 的输入量分别为：0.05、1.26、2.10、3.61 和 8.08 $\mu g\cdot kg^{-1}$，则化肥中重金属输入量占土壤重金属总量的比例分别为 0.008%、0.004%、0.008%、0.009% 和 0.007%. 同样罗慧等[35]根据我国 2015 年化肥施用量推算出磷肥对土壤 Cd 的贡献率仅为 0.04%.

由上可知，在区域选择上已避开矿业活动区及周边区域，半方差函数表明土壤重金属(Cd、Ni、Pb 和 Zn)受结构性因素和随机因素的共同影响，也从侧面反映施用化肥在一定程度上能够影响土壤重金

属含量,但以上分析发现其输入量不足以导致土壤重金属过量累积而超标. 因此,土壤重金属含量偏高并不是由人为因素起主导作用引起的.

3.2 自然来源

地质矿物组成是决定地表化学元素组成的主要来源. 研究区地处广西右江盆地,主要发育北西向、北东向两组断裂,北西向主要以南丹-都安断裂、富宁-凭祥断裂、右江断裂为主,北东向包括下雷-灵马断裂、凭祥-南宁断裂等[36]. 在断裂带上形成了卡林型金矿、热液型锑矿、沉积及风化型锰矿及各类铜铅锌等矿床[6, 37]. 将 Kriging 插值法得到的土壤重金属空间分布图与研究区矿床分布进行对比,结果显示,两者具有一定的重叠性. 百色、天等县、大新县均有中型铜矿床,但 Cu 异常强度相对较低[5],平均含量为 53.4 $mg\cdot kg^{-1}$,图 2 显示该区域土壤 Cu 含量要低于西北部田林县和凌云县土壤 Cu 含量. 虽然田林县和凌云县没有单独的 Cu 矿床,但其位于桂西北早中三叠世裂陷金矿成矿带上[38],金矿中伴生有 Ag、Cu、Pb、Zn 等重金属. 因此,西北部土壤 Cu 偏高可能与金矿床中的载金矿物黄铜矿所致. 同样,研究区 Ni 异常强度较低,平均含量为 70.8 $mg\cdot kg^{-1}$,Ni 的分布特征与 Cu 在中部、南部分布特征极为相似,高含量区主要集中在天等-大新和崇左-龙州交界地带,该区域处于桂西南泥盆纪裂陷锰-重晶石-黄铁矿成矿带上[38],而 Ni 是亲铁元素,并具有强烈的亲硫性,在硫化镍矿床中伴生 Cu,因而在中、南部 Ni 和 Cu 具有相似的分布特征. 地球化学异常区内 Pb 和 Zn 的异常强度也较低,两者高含量区域分布比较一致,主要集中分布在天等县、大新县、隆安县、龙州县和崇左市. 对于 Pb 而言,尤其是在右江盆地南缘崇左-龙州一带形成了高含量区,Zn 的浓集区域较分散. 反应到矿床分布上,该区域位于桂西南泥盆纪裂陷锰-重晶石-黄铁矿成矿带上,产出较多的伴生铅锌-重晶石矿床、铅锌-黄铁矿矿床[38],并存在铅独立矿床(点),但却很少见锌矿床单独产出[6]. 研究区 Cd 的异常强度最高,恰好处于平果-河池 Cd 浓集中心,Cd 平均值达 1.21 $mg\cdot kg^{-1}$,Cd 是典型的亲铜亲硫元素,常产于闪锌矿中,同时又是亲石元素,因而也存在于钙、锰的氧化矿物中. 土壤 Cd 高含量区域主要集中分布在中部和南部,该区域处于锰-重晶石-黄铁矿成矿带上,同时区域内分布有铅锌矿床. 因此,Cd 与 Pb、Zn 在中部和南部区域具有相似的分布特征.

以上从地质矿物组成层面分析得到矿床分布与土壤重金属在空间分布上具有一定联系,那么地貌类型则是区分景观地球化学类型的主要依据[39]. 广西具有独特的裸露型喀斯特地貌,其形成与碳酸盐岩有密切联系. 区内碳酸盐岩分布面积约为 9.6 万 km^2,约占全区陆地面积的 40.7%[40]. 喀斯特地貌的溶岩特性使得土壤具有不保水肥,富含重金属离子等特点[41],并在岩石风化过程中释放的 Ni、Zn、Pb、As 和 Cd 等重金属元素背景值通常要高于其它成土母质发育的土壤[31]. 何腾兵等[42]得到贵州喀斯特山区土壤 Cd 和 Pb 的含量差异主要是由于成土母质(岩)的“遗传”差异性所致,母质(岩)是影响该区土壤重金属含量的关键自然因素. 李丽辉等[43]综述了云南省各类土壤与母岩中 As、Cd 的地球化学背景及异常分布特征,分析得出 As、Cd 异常主要是由高含量的母岩(碳酸盐岩)造成的,其富集的主要原因是由于碳酸盐岩高 pH 及高 CEC 值的特性,使得 As、Cd 的迁移速率降低,容易被土壤吸附,最终造成碳酸盐岩发育区土壤 As、Cd 高度富集. 位于瑞士和法国交界的阿尔卑斯山区的侏罗山(Jura Mountains)地区,多个土壤剖面均表现出 Cd 异常特征,土壤中 Cd 含量高达 22.3 $mg\cdot kg^{-1}$,远远高于瑞士对土壤中 Cd 的限定值 0.8 $mg\cdot kg^{-1}$[44]. 有研究者分析发现人类活动对土壤 Cd 造成的影响并不明显,一方面从大气沉降和粪肥、磷肥的施用并不能充分解释土壤 Cd 的高含量异常[45];另一方面,采样点多数远离城市和工矿业活动区域[44]. 进一步对土壤下岩石开展研究,结果显示母岩表现出 Cd 含量异常特征,Cd 含量可高达 8.15 $mg\cdot kg^{-1}$[46],从而得到土壤中 Cd 的过量累积主要是由成土母质造成的. 不难发现,不同研究者所得结论中由碳酸盐岩发育而来的土壤中 Cd 的富集最为严重,此次调查的结果中相对于 Cu、Ni、Pb 和 Zn 而言,土壤 Cd 高达 6.8 $mg\cdot kg^{-1}$,要高于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中 Cd 污染风险筛选值,表现出异常特征,与其它研究者所得结论具有一致性.

综上所述,农业活动在一定程度上能够影响土壤重金属含量,但并不是造成地球化学异常区土壤重金属含量偏高的主要原因,特别是 Cd 元素. 研究区地层发育时代齐全,构造性质复杂,矿床种类繁多,母质(岩)自身具有较高含量重金属,进而在风化成土过程中土壤继承母质(岩)中的重金属,是桂西南地球化学异常区土壤具有较高背景值(尤其是 Cd)的最主要自然因素.

4 结论

(1)自然土壤 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 背景值分别为 0.890、32.58、51.50、55.57 和 168.1

$mg \cdot kg^{-1}$，是广西土壤背景值的 14.8、1.5、3.6、2.4 和 2.2 倍.

(2)农田土壤 pH 在 4.8 ~ 7.9 之间，Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 的平均含量分别为 0.637、30.76、27.04、39.59 和 123.9 $mg \cdot kg^{-1}$. 以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)为评价标准，Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的超标率分别为 57.5%、6.2%、0.5%、3.6% 和 10.9%. 综合污染指数评价结果显示，污染和严重污染的比例分别为 25.9% 和 24.9%. 以土壤基线值为评价标准，Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 超标率为 4.1%、14.0%、0.5%、2.1% 和 2.1%. 土壤属于清洁和尚清洁等级的比例为 69.9% 和 21.8%，8.3% 点位表现为污染级别.

(3)农田 Cd、Ni、Pb 和 Zn 空间分布特征较为相似，总体上表现为南部较高，西北部次之，中部含量较低的趋势；Cu 空间分布呈现西北最高，南部次之，中部偏低的趋势，其含量最高的区域位于西北部的田林县、凌云县、百色市和田阳县.

(4)桂西南地球化学异常区土壤具有较高背景值(尤其是 Cd)的最主要自然因素是由于研究区地层发育时代齐全，构造性质复杂，矿床种类繁多，母质(岩)自身具有较高含量重金属，进而在风化成土过程土壤继承母质(岩)中的重金属造成的.

参考文献：

[1] 李杰，朱立新，战明国，等. 南方典型丘陵区酸性土壤重金属地球化学分布特征及来源分异解析[J]. 地质学报，2016，**90**(8)：1978-1987.
Li J，Zhu L X，Zhan M G，*et al*. The geochemical distribution characteristics and source analysis of heavy metals in the typical hilly acidic soil region of south China[J]. Acta Geologica Sinica，2016，**90**(8)：1978-1987.

[2] 林凡华，陈海博，白军. 土壤环境中重金属污染危害的研究[J]. 环境科学与管理，2007，**32**(7)：74-76.
Lin F H，Chen H B，Bai J. In soil environment heavy metal pollution harm research[J]. Environmental Science and Management，2007，**32**(7)：74-76.

[3] 刘意章，肖唐付，宁增平，等. 三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究[J]. 环境科学，2013，**34**(6)：2390-2398.
Liu Y Z，Xiao T F，Ning Z P，*et al*. Cadmium and selected heavy metals in soils of Jianping Area in Wushan County，the Three Gorges Region：distribution and source recognition[J]. Environmental Science，2013，**34**(6)：2390-2398.

[4] 张孝飞，林玉锁，俞飞，等. 城市典型工业区土壤重金属污染状况研究[J]. 长江流域资源与环境，2005，**14**(4)：512-515.
Zhang X F，Lin Y S，Yu F，*et al*. Pollution of heavy metals in urban soils of typical industrial and surrounding residential area in Nanjing city[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin，2005，**14**(4)：512-515.

[5] 谢学锦，程志忠，张立生，等. 中国西南地区 76 种元素地球化学图集[M]. 北京：地质出版社，2008. 138-152.

[6] 刘舒飞. 广西地球化学区带规律与异常分布分形解析[D]. 北京：中国地质大学(北京)，2017. 10-15.
Liu S F. Fractal analysis on geochemical distribution and anomaly separation in the Guangxi Zhuang Autonomous Region[D]. Beijing：China University of Geosciences (Beijing)，2017. 10-15.

[7] 田恒川，徐国志. 镉地球化学行为与我国西南地区镉污染[J]. 现代矿业，2014，**30**(11)：134-136.

[8] 翟丽梅，廖晓勇，阎秀兰，等. 广西西江流域农业土壤镉的空间分布与环境风险[J]. 中国环境科学，2009，**29**(6)：661-667.
Zhai L M，Liao X Y，Yan X L，*et al*. Spatial variation and environment risk of cadmium in agricultural land in the Xijiang River draining of Guangxi Province[J]. China Environmental Science，2009，**29**(6)：661-667.

[9] 黄玉溢，陈桂芬，熊柳梅，等. 桂西地区稻田土壤重金属污染现状调查及评价[J]. 南方农业学报，2014，**45**(2)：240-243.
Huang Y Y，Chen G F，Xiong L M，*et al*. Survey and evaluation of heavy metal contamination of paddy soil in western Guangxi[J]. Journal of Southern Agriculture，2014，**45**(2)：240-243.

[10] 陆素芬，张云霞，余元元，等. 广西南丹土壤-玉米重金属积累特征及其健康风险[J]. 生态与农村环境学报，2017，**33**(8)：706-714.
Lu S F，Zhang Y X，Yu Y Y，*et al*. Characteristics of heavy metal accumulation in soil-corn system contents and their health risks in Nandan[J]. Journal of Ecology and Rural Environment，2017，**33**(8)：706-714.

[11] 吴玉峰. 广西典型高背景镉地区的生态风险评价[D]. 南宁：广西师范学院，2016. 5-10.
Wu Y F. Ecological risk assessment of the typical high cadmium background in Guangxi[D]. Nanning：Guangxi Teachers Education University，2016. 5-10.

[12] 唐豆豆，袁旭音，汪宜敏，等. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测[J]. 农业环境科学学报，2018，**37**(1)：18-26.
Tang D D，Yuan X Y，Wang Y M，*et al*. Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background[J]. Journal of Agro-Environment Science，2018，**37**(1)：18-26.

[13] 宋波，杨子杰，张云霞，等. 广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估[J]. 环境科学，2018，**39**(4)：1888-1900.
Song B，Yang Z J，Zhang Y X，*et al*. Accumulation of Cd and its risks in the soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi[J]. Environmental Science，2018，**39**(4)：1888-1900.

[14] 李藜，宋波，陈同斌，等. 广西西江流域土壤铜含量状况调查与风险评估[J]. 自然资源学报，2018，**33**(4)：644-656.
Li L，Song B，Chen T B，*et al*. Copper concentration in soil of Xijiang River Basin of Guangxi and risk assessment[J]. Journal of Natural Resources，2018，**33**(4)：644-656.

[15] 杨子杰，宋波，陈同斌，等. 广西西江流域土壤 Zn 积累和分布特征及生态风险[J]. 生态与农村环境学报，2017，**33**(12)：1064-1074.
Yang Z J，Song B，Chen T B，*et al*. Accumulation，distribution and ecological risk of Zn in soils in the Xijiang River Valley of Guangxi[J]. Journal of Ecology and Rural Environment，2017，**33**(12)：1064-1074.

[16] 于洋，宋波，陈同斌，等. 西江流域土壤镍含量特征及风险评估[J]. 环境污染与防治，2018，**40**(6)：698-703，709.
Yu Y，Song B，Chen T B，*et al*. Content characteristics and risk

assessment of Ni in soils of Xijiang River Basin [J]. Environmental Pollution & Control, 2018, **40**(6): 698-703, 709.

[17] 张云霞, 宋波, 陈同斌, 等. 广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2446-2455.
Zhang Y X, Song B, Chen T B, *et al*. Spatial distribution study and pollution assessment of Pb in soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2446-2455.

[18] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, **25**(1): 117-122.
Chen T B, Zheng Y M, Chen H, *et al*. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing[J]. Environmental Science, 2004, **25**(1): 117-122.

[19] 陈同斌. 区域土壤环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2015. 9-11.

[20] 夏增禄, 李森照, 李廷芳. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987. 107-110.

[21] 广西环境保护科学研究所. 土壤背景值研究方法及广西土壤背景值[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1992. 216-223.

[22] 谢传维. 广西岩溶地区土壤类型及特性[J]. 广西农学院学报, 1982, (1): 83-93.

[23] 宋波, 王佛鹏, 周浪, 等. 广西镉地球化学异常区水稻籽粒镉含量预测模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(12): 2672-2680.
Song B, Wang F P, Zhou L, *et al*. Prediction model of rice cadmium content in cadmium geochemical anomaly area in Guangxi[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(12): 2672-2680.

[24] 赵科理. 土壤-水稻系统重金属空间对应关系和定量模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. 48-50.
Zhao K L. Spatial relationships of heavy metals in soil-rice system and the quantitative model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. 48-50.

[25] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al*. Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **261**: 387-397.

[26] Zhang X Y, Sui Y Y, Zhang X D, *et al*. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China [J]. Pedosphere, 2007, **17**(1): 19-29.

[27] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征——变异函数与 Kriging 插值分析[J]. 地理学报, 2000, **67**(5): 555-566.
Guo X D, Fu B J, Chen L D, *et al*. The spatio-temporal variability of soil nutrients in Zunhua Plain of Hebei Province: semivariogram and Kriging analysis [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, **67**(5): 555-566.

[28] 白松涛, 郭熙保. 广西矿业重金属污染现状调查与对策[J]. 社会科学家, 2010, (12): 116-118.
Bai S T, Guo X B. Investigation and countermeasures of heavy metal pollution in Guangxi mining industry[J]. Social Scientist, 2010, (12): 116-118.

[29] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(2): 466-480.
Wang M, Li S T. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, **20**(2): 466-480.

[30] 刘童祎, 张杰. 浅析农业面源污染的类型及危害[J]. 农村经济与科技, 2016, **27**(10): 6, 9.

[31] 阮玉龙, 李向东, 黎廷宇, 等. 喀斯特地区农田土壤重金属污染及其对人体健康的危害[J]. 地球与环境, 2015, **43**(1): 92-97.
Ruan Y L, Li X D, Li T Y, *et al*. Heavy metal pollution in agricultural soils of the Karst Areas and its harm to human health [J]. Earth and Environment, 2015, **43**(1): 92-97.

[32] 凌乃规. 广西不同类型农田土壤重金属含量状况分析[J]. 农业环境与发展, 2010, **27**(4): 91-94.

[33] 陈景春, 易廷辉, 陈丽. 重庆市市售化肥重金属含量调查分析[J]. 湖南农业科学, 2017, (6): 41-44.
Chen J C, Yi T H, Chen L. Investigation of heavy metal concentrations of commercial fertilizers in Chongqing[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2017, (6): 41-44.

[34] 盛茂银, 刘洋, 熊康宁. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应[J]. 生态学报, 2013, **33**(19): 6303-6313.
Sheng M Y, Liu Y, Xiong K N. Response of soil physical-chemical properties to rocky desertification succession in South China Karst[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(19): 6303-6313.

[35] 罗慧, 刘秀明, 王世杰, 等. 中国南方喀斯特集中分布区土壤 Cd 污染特征及来源[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(5): 1538-1544.
Luo H, Liu X M, Wang S J, *et al*. Pollution characteristics and sources of cadmium in soils of the Karst area in South China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(5): 1538-1544.

[36] 梁婷, 王登红, 蔡明海, 等. 桂西北矿集区锡多金属矿床成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014, **88**(12): 2443-2463.
Liang T, Wang D H, Cai M H, *et al*. Metallogenic regularity of Tin polymetallic deposit from Northweatern Ore concentration area, Guangxi[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, **88**(12): 2443-2463.

[37] 李政林, 刘希军, 许继峰, 等. 右江盆地基性岩的地球化学演化特征及其区域构造意义[J]. 桂林理工大学学报, 2015, **35**(4): 727-735.
LI Z L, Liu X J, Xu J F, *et al*. Geochemical evolution characteristics and regional tectonic significance of mafic rocks from Youjiang Basin [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2015, **35**(4): 727-735.

[38] 陈大经, 谢世业. 广西热水沉积成矿作用的基本特征[J]. 矿产与地质, 2004, **18**(5): 415-421.
Chen D J, Xie S Y. Basic characer of hydrothermal depositional mineralization in Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2004, **18**(5): 415-421.

[39] 胡伟. 广西喀斯特地区土壤 Cd 分布特征及其来源分析——以姑娘江流域为例[D]. 南宁: 广西师范学院, 2015. 8-10.
Hu W. Distribution and source recognition for cadmium content of soil in Karst Basin of Guangxi: a case in Gu-niang Basin[D]. Nanning: Guangxi Techers Education University, 2015. 8-10.

[40] 刘旭, 顾秋蓓, 杨琼, 等. 广西象州与横县碳酸盐岩分布区土壤中 Cd 形态分布特征及影响因素[J]. 现代地质, 2017, **31**(2): 374-385.
Liu X, Gu Q B, Yang Q, *et al*. Distribution and influencing factors of cadmium geochemical fractions of soils at carbonate covering area in Hengxian and Xiangzhou of Guangxi [J]. Geoscience, 2017, **31**(2): 374-385.

[41] 王倩, 曹迅, 唐皓, 等. 广西百色喀斯特地貌土壤产铁载体细菌的分离和鉴定[J]. 基因组学与应用生物学, 2018, **37**(5): 1955-1964.
Wang Q, Cao X, Tang H, *et al*. Isolation and identification of

siderophore-producing bacteria in soil from Karst landform, Baise in Guangxi[J]. Genomics and Applied Biology, 2018, **37**(5): 1955-1964.

[42] 何腾兵, 董玲玲, 李广枝, 等. 喀斯特山区不同母质(岩)发育的土壤主要重金属含量差异性研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(1): 188-193.
He T B, Dong L L, Li G Z, *et al*. Differences of heavy metal contents in soils derived from different parent materials/rocks in Karst Mountain Area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(1): 188-193.

[43] 李丽辉, 王宝禄. 云南省土壤 As、Cd 元素地球化学特征[J]. 物探与化探, 2008, **32**(5): 497-501.
Li L H, Wang B L. Geochemical characteristics of As and Cd in soils of Yunnan Province[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2008, **32**(5): 497-501.

[44] Quezada-Hinojosa R P, Matera V, Adatte T, *et al*. Cadmium distribution in soils covering Jurassic oolitic limestone with high Cd contents in the Swiss Jura[J]. Geoderma, 2009, **150**(3-4): 287-301.

[45] Atteia O, Thélin P, Pfeifer H R, *et al*. A search for the origin of cadmium in the soil of the Swiss Jura[J]. Geoderma, 1995, **68**(3): 149-172.

[46] Baize D, Sterckeman T. Of the necessity of knowledge of the natural pedo-geochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements[J]. Science of the Total Environment, 2001, **264**(1-2): 127-139.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2019 年 11 月 19 日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2018 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2018 年度总被引频次11 644,影响因子 2. 130,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 41 No. 2

Feb. 15, 2020

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded $PM_{2.5}$ 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 $PM_{2.5}$ 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 $PM_{2.5}$ 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 ($PM_{2.5}$) in Northern Suburb of Nanjing ····· LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, *et al.* (537)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of *n*-Alkanes and PAHs in Summertime $PM_{2.5}$ 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 $PM_{2.5}$ in Changchun City, Autumn of 2017 ··· ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, *et al.* (564)

Heavy Pollution Characteristics and Assessment of $PM_{2.5}$ 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 $PM_{2.5}$ 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 Nanxiaohegou 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_2-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_2O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium *Pseudomonas aeruginosa* 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 *Pinus tabulaeformis* Plantations on Loess Plateau ··· SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-yang, 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 *Brassica rapa* Under the Influence of Selenium ····· YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, *et al.* (962)

Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two *Brassica napus* L. Cultivars ····· BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, *et al.* (970)

Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by *Trifolium Repens* 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)