

目次

“大气十条”实施期间南京市PM_{2.5}化学组成与来源的演变特征 陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)

河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位PM_{2.5}组分差异 王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)

廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)

天津市采暖季不同气团来向PM_{2.5}中重金属污染特征及健康风险评价 李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)

基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析 邓文博, 刘文娟 (38)

北京市PM_{2.5}-O₃复合污染数值响应解析 刘添强 (48)

长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单 田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李旻, 王鑫, 黄成 (58)

南京北郊工业乡村混合区秋季边界层VOCs垂直分布特征 王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)

广西柳城县VOCs组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性 吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 粟少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)

城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例 何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)

华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征 康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)

WRF模式最优参数化方案在不同空气质量模式中的应用 杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)

西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响 魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)

青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征 魏文淑, 祁建华, 常成 (127)

中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子 黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)

长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征 徐秋鸿, 刘曙光, 娄厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金宇辰, 李鑫 (158)

人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共线性 秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)

我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估 何姝, 董慧峰, 任南琪 (180)

珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价 王思瑞, 张坤锋, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)

苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险 郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)

长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素 吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)

过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例 黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)

渭河微塑料污染现状与风险评价 山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)

不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响 王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)

苦草叶表附和浮游细菌群落多样性格局及其影响因素 张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)

基于16S rRNA测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性 璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)

基于eDNA的硅藻群落时空异质性及生态健康评价 姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)

三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制 罗晓佼, 张妍, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)

自然降雨下蔬菜土壤侵蚀及氮素流失特征 宁嘉丽, 黄艳芬, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)

绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重, 张文龙, 李华林 (303)

基于地理探测器的山西省2000~2020年NPP时空变化特征及驱动力分析 邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)

2000~2020年西南地区植被NDVI时空变化及驱动机制探究 徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)

青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性 胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)

四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素 刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)

宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析 陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪细炉, 马进福, 梁翔宇 (356)

铜冶炼场周边土壤重金属污染特征与风险评价 彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)

西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系 凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)

外源Cd在不同类型土壤中的稳定化特征 王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)

基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素 王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)

基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价 陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)

贵州省旱地土壤和玉米As含量特征及其种植安全性评估 黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)

象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力 王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)

1株高耐性肠杆菌的筛选及对镉、砷同步钝化 尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄蔚铭, 张朴心, 铁柏清 (436)

黄土陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系 朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (444)

设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素 方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)

优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益 王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)

缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响 侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)

黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能 南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)

红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应 管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)

半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征 赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)

基于QMEC分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力 张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)

中国主粮作物生物炭产量效应的Meta分析 于滨杭, 姬建梅, 王丽宇, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)

生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的Meta分析 李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)

不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为 李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)

中国县城碳排放时空演变与异质性 宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)

近20年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移 向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)

中国1991~2018年突发环境事件时空特征及影响因素 余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)

季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应 张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

《环境科学》征订启事(29) 《环境科学》征稿简则(57) 信息(443, 481, 530)

西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系

凌云^{1,2}, 刘汉焱^{1,2}, 张小婷^{1,2}, 魏世强^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 采用空间代替时间的方法, 采集了西南地区主要类型 and 不同酸化阶段的土壤样品, 分析了土壤理化性质特征、酸缓冲性能和重金属赋存形态, 结合小白菜盆栽生物试验, 探讨土壤酸化和重金属形态活性变化的耦合关系. 结果表明, 紫色土和黄壤随着土壤酸化程度增加, 土壤交换性盐基离子降低, 由交换性 Ca^{2+} 流失引起. 不同酸化阶段紫色土和黄壤对酸敏感性差异较大, 紫色土在 $\text{pH} > 7.50$ 和 $\text{pH} < 4.50$ 时, 酸缓冲容量较大; 黄壤酸缓冲容量和土壤交换性盐基离子含量呈较强的相关性, 且随着酸添加量增加, 酸缓冲容量的增大倍数和土壤盐基离子消耗速率有关. 重金属 Cd 和 Pb 在土壤中的赋存形态和土壤类型、酸化程度紧密相关, 紫色土与黄壤中 Cd 和 Pb 主要以可交换态和残渣态为主, 且随土壤酸化程度增加交换态占比增加, 残渣态占比减少; 红壤中以残渣态和 Fe-Mn 结合态为主, Cd 的 Fe-Mn 结合态分别是紫色土和黄壤的 2.15 倍和 1.73 倍, Pb 的 Fe-Mn 结合态是紫色土与黄壤的 4.30 倍和 3.91 倍, 与红壤铁含量较高有关. 盆栽试验表明土壤酸化一定程度上抑制小白菜的生长量, 酸化严重的黄壤 ($\text{pH} < 5.70$) 中小白菜生物量显著低于未明显酸化的黄壤; 小白菜对 Cd 和 Pb 富集能力与土壤酸化密切相关, 土壤酸化通过促进土壤中 Cd 和 Pb 向高活性的交换态转化促进小白菜的富集.

关键词: 酸化特征; 土壤类型; 镉(Cd); 铅(Pb); 土壤-作物系统

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0376-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202202070

Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China

LING Yun^{1,2}, LIU Han-yi^{1,2}, ZHANG Xiao-ting^{1,2}, WEI Shi-qiang^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400715, China)

Abstract: Using a spatial instead of temporal approach, soil samples were collected from the main types and different stages of acidification in Southwest China, and the characteristics of soil physicochemical properties, acid-buffering properties, and heavy metal fugacity patterns were analyzed, combined with biological experiments in small cabbage pots, to explore the coupling relationship between soil acidification and changes in heavy metal morphological activity. The results showed that the exchangeable salt-based ions of the soil decreased with increasing acidification in purple and yellow soils, caused by the loss of exchangeable Ca^{2+} . The acid-buffering capacity of purple and yellow soils was higher at $\text{pH} > 7.50$ and $\text{pH} < 4.50$. The acid-buffering capacity of yellow soils was strongly correlated with the content of soil exchangeable salt-based ions, and the increase in acid-buffering capacity was related to the rate of depletion of soil salt-based ions with the increase in acid addition. The distribution of Cd and Pb in the soil was closely related to the soil type and degree of acidification: in the purple and yellow soils, Cd and Pb were mainly in the exchangeable and residue states, and the proportions of the exchangeable state and residue state increased and decreased, respectively, with increasing acidification; in the red soils, the residue state and Fe-Mn bound state were predominant; the Fe-Mn bound state of Cd was 2.15 and 1.73 times higher than that of the purple and yellow soils, respectively, and the Fe-Mn bound state of Pb was 4.30 and 3.91 times higher than that of purple and yellow soils, which was related to the higher iron content in red soils. Pot experiments showed that soil acidification inhibited the growth of Chinese cabbage to a certain extent, and the biomass of Chinese cabbage in the heavily acidified yellow soil ($\text{pH} < 5.70$) was significantly lower than that in the non-acidified yellow soil.

Key words: characteristics of soil acidification; soil types; cadmium(Cd); lead(Pb); soil-crop system

土壤酸化和重金属污染是当前西南地区面临的两大突出土壤环境问题, 对农产品安全和农业可持续发展构成了严重威胁^[1]. 我国西南地区地处亚热带季风气候区, 降水资源丰沛, 区域内黄壤、红壤和紫色土等主要农业土壤抗侵蚀性差, 盐基离子易于流失, 加之西南地区酸雨危害以及人为因素影响, 是我国土壤酸化最为严重的区域之一^[2-4]. 同时, 西南地区矿产资源丰富^[5], 是我国有色金属矿产资源的主要分布区域, 土壤 Cd、Pb、Zn 和 As 等重金属含量均高于全国土壤背景值, 是典型的高地质背景区^[6]. 土壤酸化与高地质背景叠加成为西南地区区

别于其他区域重金属污染的典型特征, 加重了耕地土壤重金属污染危害, 对区域内农产品质量和人体健康构成了严重威胁^[7].

目前西南地区大气酸沉降已经得到有效控制, 但由于高强度农业耕作、化肥施用和集中降雨导致的土壤盐基离子流失等因素的影响^[3], 土壤酸化的

收稿日期: 2022-02-11; 修订日期: 2022-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177012, 41771347); 国家重点研发计划项目(SQ2020YFF0426438)

作者简介: 凌云(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属修复, E-mail: 1271495575@qq.com

* 通信作者, E-mail: sqwei@swu.edu.cn

趋势仍然未得到有效遏制. 不少研究表明, 西南山地土壤形成过程中土壤母质化学风化强烈, 原生矿物不断被分解, 土壤淋溶较强, 酸化趋势明显^[8]. 自 1988 ~ 2013 年, 中国南方典型水稻土 pH 值由 6.64 下降至 6.05, 平均每年下降 0.023 个单位, 明显高于 1980 ~ 2000 年间全国水稻土酸化水平^[9]; 尤以重庆土壤酸化严重, pH 小于 6.50 的酸性紫色土约占整个重庆紫色土的 38%, 其中包含 15% 的强酸性紫色土^[10]; Li 等^[11]的研究结果表明 1981 ~ 2012 年间, 重庆紫色土研究区土壤显著酸化, 平均 pH 值下降了 0.30 个单位; 贵州省土壤从 1980 年代到 2010 年代土壤 pH 值显著下降了 0.31 个单位, 贵州省 pH < 6.50 的土壤面积呈显著增加趋势^[12]. 同时, 酸化过程总是伴随着土壤组成和性质的强烈变化^[13~16], 土壤类型不同对酸化的响应也有差异^[17], 紫色土作为一种非地带性土壤, 受成土母质与发育程度的影响, 酸化后的紫色土仍然具有较高的交换性盐基离子含量, 其酸化特征、过程和机制与黄壤、红壤等地带性土壤存在较大差异^[18]. 重金属在土壤中的溶解度和生物利用度差异很大, 主要取决于土壤中的吸附解吸过程^[19], 而土壤 pH 值、离子含量和竞争金属等都是影响土壤中重金属吸附和解吸的重要因素^[20]. 酸化过程中 H⁺ 浓度增加可置换土壤胶体吸附的重金属离子, 加速土壤矿物溶解释放重金属离子, 促进土壤重金属由 Fe-Mn 结合态和残渣态等非活性态向交换态和碳酸盐结合态等高活性态的转化^[21]. 土壤中重金属形态和活性变化及作物响应是土壤性质变化的综合作用结果. 但迄今西南地区尚未开展主要类型、不同酸化阶段土壤酸化特征、土壤性质的综合比较, 作物生长和重金属累积与酸化驱动下的土壤性质和重金属形态活性变化的耦合关系尚不清楚.

为此, 本文以西南重金属地质高背景和土壤酸化严重区域为对象, 采用空间替代时间的方法, 采集区域石灰岩黄壤、高原红壤和紫色土这三类土壤不同酸化阶段样品, 分析其组成和性质特点、酸化特征以及典型重金属铅 (Pb) 和镉 (Cd) 的形态与有效性, 结合小白菜盆栽生物试验, 探讨土壤酸化和重金属污染协同危害的作物响应, 阐释制约作物产量和重金属累积的关键土壤化学过程和土壤性质因子, 揭示土壤酸化-土壤组成性质变化-重金属形态活性变化-作物响应的耦合机制.

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集

西南地区土壤类型多样, 紫色土、黄壤和红壤

是区域内主要类型土壤. 本文以该三类农地土壤为对象, 首先根据区域重金属污染背景调查结果, 选择重金属 Cd 和 Pb 高背景区域, 利用 pH 试纸初步筛选同一类型土壤不同酸化程度的地块, 以地块为单位, 每一地块按梅花点法采集 0 ~ 20 cm 的表层混合样, 每个地块采集盆栽土壤 (约 1 000 kg) 和分析样品各一个, 共采集 13 件土壤样品. 采样地点基本信息如图 1 所示 (重庆土壤编号为 C1 ~ C5, 贵州土壤编号为 G1 ~ G5, 云南土壤编号为 Y1 ~ Y3).

1.2 土壤样品分析项目与方法

1.2.1 土壤酸化特征

土壤 pH 用酸度计测定, 水土比为 2.5:1; 交换酸采用 1 mol·L⁻¹ KCl 交换-中和法测定; CEC 采用 1 mol·L⁻¹ 中性醋酸铵交换法测定; 交换性 K、Na、Ca 和 Mg 用 1 mol·L⁻¹ 中性醋酸铵浸提, 原子吸收分光光度计测定; 潜在酸、盐基总量通过计算获得.

土壤酸缓冲性能测定: 称取土样 20 g 各 8 份, 置于 100 mL 离心管中, 每份土样定量加入含不同浓度的盐酸溶液 50 mL, 土液比为 1:2.5 加盖后 (有碳酸钙的土壤 5 h 后再加盖), 在室温下间歇振荡 7 d 达平衡后, 用酸度计测定各份悬液 pH. 绘制 pH 与酸消耗量之间的关系曲线.

1.2.2 土壤基本性质

土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定, 土壤 CEC 采用 NH₄OAc 交换-蒸馏法测定; 土壤质地采用比重计法.

1.2.3 重金属 Pb 和 Cd 形态与有效性

土壤 Cd、Pb 总含量采用王水和高氯酸消解^[22], Cd、Pb 形态分级采用改进的 Tessier 方法, 形态依次提取为可交换态 (1 mol·L⁻¹ MgCl₂)、碳酸盐结合态 (1 mol·L⁻¹ CH₃COONa, pH = 5.0)、Fe-Mn 氧化态 (0.04 mol·L⁻¹ NH₂OH·HCl-0.02 mol·L⁻¹ HNO₃)、有机结合态 (pH = 2.0, 0.02 mol·L⁻¹ HNO₃-30% H₂O₂-0.04 mol·L⁻¹ CH₃COONH₄) 和残渣态 (HCl-HNO₃, 体积比 1:3, HClO₄) 等 5 种形态^[1, 23], 所有消解液和提取液中的 Cd 采用石墨炉-AAS 测定, Pb 采用原子吸收分光光度计测定.

小白菜生物量在用去离子水洗净表面附着的泥土和污物后, 滤纸擦干净表面水分, 用实验室天平称量小白菜地上部重量.

1.3 作物对土壤酸化与重金属污染协同响应盆栽试验

以小白菜为指示植物, 开展盆栽试验, 探讨植物在不同酸化程度和重金属污染水平土壤上的响应特征. 本试验在西南大学温室盆栽场进行. 采集的土样自然风干后, 去除砾石、根系等杂质, 过 1 cm 筛备

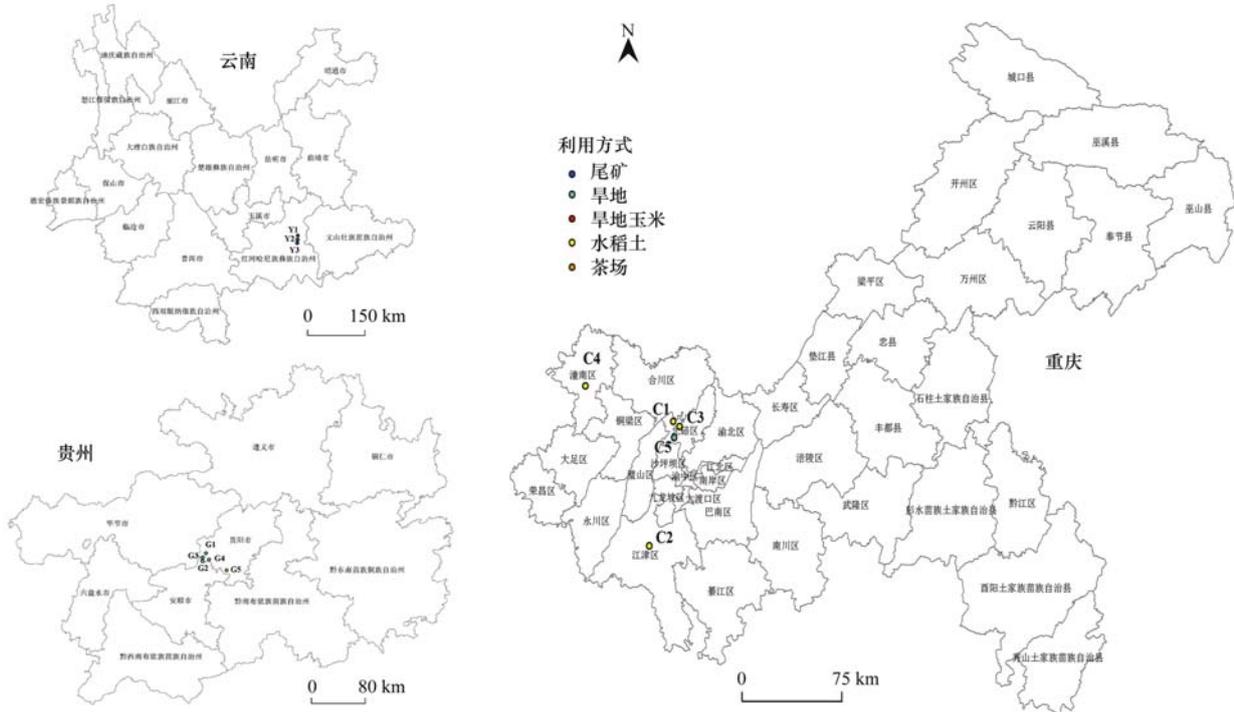


图1 采样点示意

Fig. 1 Sampling site coordinates

用. 每种土壤为一个处理, 共 13 个处理. 分别称取 1.5 kg 土壤均匀装入 PVC 塑料小桶中, 按尿素 0.15 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、磷肥 0.05 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (磷酸二氢钠) 和钾肥 0.10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (硫酸钾) 用量施入底肥, 将肥料与土壤充分混匀, 喷洒去离子水保持土壤水分含量在田间持水量的 60%~70%, 选取吉祥牌胶白快菜种子, 在每盆土壤中均匀播种 6 颗种子, 出苗约 10 d 后进行间苗, 每盆定植健壮、长势均匀的菜苗 3 株, 每周称重法补充去离子水一次. 小白菜生长 1 个月后, 分地上部和地下部进行收获采样, 用去离子水冲洗, 用吸水纸将表面水分吸干. 将其置于 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱内杀青 0.5 h, 在 75 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干 10 h, 烘干至恒重后粉碎装袋备用. 各处理均重复 3 次. 植物样品采用浓 HNO_3 与 HClO_4 混合液 (体积比为 3:1) 进行消解, 植物消解液 Cd 用石墨炉-AAS 测定, Pb 用原子吸收分光光度计测定.

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2012 和 Spss 21.0 进行数据的描述性统计和相关性分析, 用 Origin15 进行绘图.

生物富集系数 (CF): 植物对重金属的生物富集系数, 也称吸收系数, 是指植物地上部某重金属的含量与其生长介质中某重金属含量之比

$$\text{CF} = C_{\text{Mp}} / C_{\text{Ms}}$$

式中, C_{Mp} 为植物体内某重金属含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); C_{Ms} 为土壤中重金属含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

2 结果与讨论

2.1 土壤酸化特征

供试 13 种土壤主要酸化指标如表 1 所示. 其中, 紫色土 pH 值变化在 3.90~8.37 之间, 黄壤在 4.99~7.93 之间, 同类土壤 pH 值变异幅度约 4~5 个单位, 能很好地反映土壤酸化程度, 但红壤因取样原因, 未能获得不同酸化程度样品, 因此, 本文着重以紫色土和黄壤为例讨论土壤性质随酸化进程的变化特征.

从表 1 可知, 交换酸只存在于 $\text{pH} < 6.60$ 的酸化土壤中, 且酸化土壤中的交换酸组成随着 pH 降低逐渐由交换性 H^+ 主导转换为以交换性 Al^{3+} 存在. pH 在 6.60 以上未酸化紫色土和黄壤盐基饱和度为 100%, 随着土壤酸化程度增加, 盐基饱和度逐渐下降. 3 种类型土壤中交换性盐基组成以 Ca^{2+} 为主, 占盐基总量的 58%~95%, 其次为 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ . 以交换性 Ca^{2+} 对土壤酸化的响应最为敏感, 紫色土与黄壤中的交换性盐基总量、交换性 Ca^{2+} 含量与 pH 之间呈显著正相关关系 (图 2), 从图 2 可知, 土壤 pH 值每降低 1 个单位, 紫色土中的交换性盐基总量和 Ca^{2+} 分别降低了 4.16 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 4.36 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$; 黄壤交换性盐基总量和 Ca^{2+} 分别降低 8.91 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 8.21 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 黄壤在酸化过程中随着土壤 pH 值降低, 土壤中交换性盐基总量与交换性 Ca^{2+} 的流失速度约为紫色土的两倍多, 说明

表 1 供试土壤酸化特征¹⁾

Table 1 Acidizing characteristics of selected soils

土壤类型	紫色土					黄壤					红壤		
	C1	C2	C3	C4	C5	G1	G2	G3	G4	G5	Y1	Y2	Y3
pH	3.90	5.12	6.05	7.80	8.37	4.99	5.70	6.56	6.60	7.93	7.71	7.90	8.00
交换酸/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.30	2.40	2.10	—	—	7.80	1.20	1.20	—	—	—	—	—
交换性 Al^{3+} / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	2.00	1.80	0.90	—	—	6.87	1.08	0.15	—	—	—	—	—
Al^{3+} 饱和度/%	61.00	75.00	42.90	—	—	88.00	90.00	12.50	—	—	—	—	—
交换性 K^{+} / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.38	0.36	0.46	0.79	0.580	0.38	1.26	0.70	0.37	0.53	0.88	0.73	0.23
交换性 Na^{+} / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.020	0.020	0.014	0.019	0.011	0.025	0.014	0.021	0.029	0.019	0.030	0.023	0.033
交换性 Ca^{2+} / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	12.25	11.42	15.33	23.32	32.25	1.61	10.37	15.66	11.31	27.35	8.84	42.37	17.71
交换性 Mg^{2+} / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	3.00	3.02	4.89	2.19	2.00	0.75	2.56	2.56	5.45	2.33	3.06	1.24	3.88
交换性盐基总量/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	15.65	14.82	20.69	26.32	34.84	2.77	14.20	18.94	17.16	30.80	12.81	44.36	21.85
CEC/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	18.95	17.22	22.79	26.32	34.84	10.57	15.4	20.14	17.16	30.8	12.81	44.36	21.85
盐基饱和度/%	82.59	86.06	90.78	100	100	26.21	92.21	94.04	100	100	100	100	100
ω (有机质)/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	42.92	45.58	24.93	18.48	22.57	29.48	38.88	41.61	36.07	39.66	26.49	4.49	7.70
ω (土壤砂粒)/%	3.70	3.00	2.20	2.00	3.00	7.30	8.20	5.70	4.80	10.90	50.00	6.00	18.00

1) “—”表示未检出

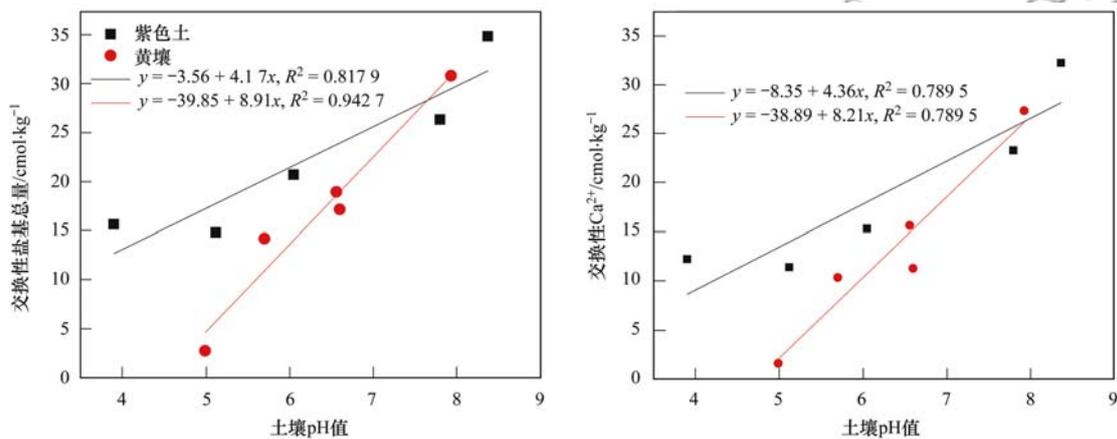
图 2 紫色土与黄壤土壤 pH 值与土壤交换性盐基总量、交换性 Ca^{2+} 的相关关系

Fig. 2 Correlation between soil pH and soil base ions in purple soil and yellow soil

黄壤中盐基离子特别是 Ca^{2+} 离子更容易随土壤酸化而流失. 另外 3 种交换性盐基离子含量较低且与酸度变化无显著相关性.

2.2 土壤酸缓冲容量

2.2.1 土壤酸缓冲曲线

3 种类型土壤样品的酸缓冲曲线如图 3 所示, 土壤酸缓冲曲线随土壤类型和酸化程度(初始 pH 值)的不同而异. 处于不同酸化阶段的土壤在面对外源酸输入时, 土壤酸缓冲能力有所差异, 具体表现在外源酸添加量相同时, 土壤 pH 值下降幅度不同: 从图中缓冲曲线下降幅度来看, 紫色土与黄壤 pH 值处于 5.00 ~ 7.50 范围内的土壤样品 pH 值下降幅度较大, 未酸化的紫色土(C5, pH = 8.37)与黄壤(G5, pH = 7.93)以及极强酸性紫色土(C1, pH = 3.90) pH 下降幅度较小, 这主要与不同酸化阶段土壤中的酸缓冲体系有关. 当土壤溶液的 pH 为 8.50 ~ 6.20 时, 土壤中的缓冲作用主要取决于 CaCO_3 溶解速度, C5(pH = 8.37)与 C4(pH = 7.82)都属于未见明

显酸化的土壤, 但 pH 下降单位相差较大, 主要原因可能是 C4 土壤中 CaCO_3 含量显著低于 C5 土壤^[24]. 根据廖柏寒等^[25]对土壤缓冲划分的初级和次级缓冲体系理论, 土壤 pH < 4.20 时土壤进入次级缓冲体系, 此时土壤对抗外源质子进入主要表现为矿物风化, 缓冲能力较大但动力学上较慢, 土壤 pH 下降速度较慢, 所以在土壤 pH 值较高或较低时(pH > 6.20 或 pH < 4.50)紫色土与黄壤对外源酸的缓冲能力较强, pH 值下降单位较小. 供试的 3 种云南红壤均未处于酸化阶段(初始 pH 均在 7.70 以上), 但添加总量为 38.40 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的外源酸后, Y1 土壤 pH 下降了 1.77, 而 Y2 和 Y3(pH = 7.99)土壤 pH 仅仅分别下降 0.41 和 0.39, 分析红壤土样的性质, 可以发现 Y1 土壤 > 0.05 的砂粒含量达到 50.00%, 属于砂质土壤, 导致 Y1 土壤极低的黏粒含量, 土壤酸缓冲性能降低^[26], 更加容易受到外源酸的侵蚀.

2.2.2 土壤酸缓冲容量

从图 3 可知, 不同酸化程度的土壤酸缓冲转折

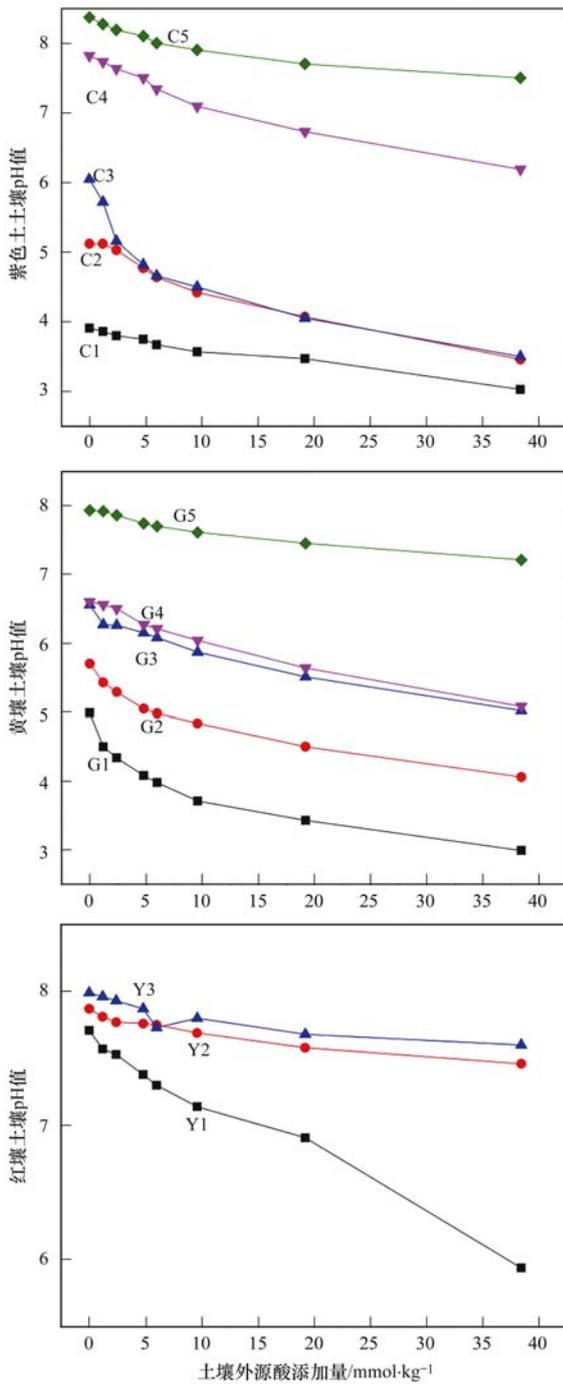


图3 3种类型土壤酸缓冲曲线

Fig. 3 Acid buffer curves of three types of soil

点不同,多数土壤在 $9.60 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 酸添加量前和超过 $9.60 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 酸添加量后的缓冲曲线表现出不同趋势.对3种类型13个土壤酸缓冲曲线斜率相近的部分进行局部拟合计算^[27],得到不同类型不同酸度土壤pH值与加入 H^+ 量之间的拟合方程及酸缓冲容量(表2).由表2可知,在酸添加量 $9.60 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 前后土壤酸化速率与土壤酸缓冲容量存在很大差异.在酸添加量为 $0 \sim 9.60 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,酸化程度不同的紫色土对酸沉降敏感性的差异十分明显:pH为8.37的C5土壤酸缓冲容量为 20.66

$\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH为7.80的C4土壤酸缓冲容量为 $13.14 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,依据Ulrich^[28]对土壤缓冲体系的划分,此时土壤处于碳酸钙缓冲体系,具有较强的酸缓冲能力,一定范围内受酸的影响pH的变化幅度不大;pH在5.00~6.20之间的弱酸化土壤,土壤酸化过程主要为硅酸盐缓冲^[29,30],在这个范围内,C2和C3的酸缓冲容量为 $6.18 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $12.44 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,但是C2土样的交换性盐基总量($14.82 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)低于C3($20.69 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$),说明这个阶段可能不仅与硅酸盐溶解释放阳离子缓冲速度有关,还与土壤交换性盐基含量有关;强酸化的C1(pH=3.90)土壤的酸缓冲容量为 $28.41 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤进入铝缓冲范围,土壤酸化速率降低,酸缓冲能力增强.

黄壤5个土样在面对酸沉降时,表现出与紫色土类似的规律.在酸添加量为 $9.60 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,不同初始pH值土样表现出不同的酸敏感性.结合表1和表2,土壤酸缓冲容量与土壤交换性盐基阳离子含量呈较强的正相关性,土壤交换性盐基离子含量越低,酸缓冲能力越弱;pH=4.99的G1土样交换性盐基离子为 $10.57 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,含量最低,酸缓冲能力最弱(酸缓冲容量 = $8.31 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$).随着黄壤土壤样品pH值升高,酸缓冲容量有一定程度地增加,说明处于交换性阳离子控制缓冲阶段的黄壤,土壤酸缓冲容量与土壤交换性盐基总量处于正相关,与仇荣亮等^[31]的研究结果一致.

当加大外源酸浓度时($9.60 \sim 38.40 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$),土壤对酸的缓冲能力都有一定程度的加强.pH为3.90的强酸化紫色土C1酸缓冲容量增大了1.82倍,土壤进入铝缓冲体系控制范围内.pH在4.50~7.50范围内的C2和C3土样分别增大了4.77和2.43倍,观察C2土样酸缓冲曲线,其初始pH值及交换性阳离子较低,更快由阳离子缓冲进入下一阶段的铁铝缓冲体系,导致酸缓冲容量急剧增大.pH为7.80的C4土样和pH为8.37的C5土样分别扩大了2.47倍和3.61倍,造成这两种土样的差异与土壤从碳酸钙缓冲体系进入交换性阳离子缓冲体系有关,C5土样的交换性阳离子含量更高,对酸沉降表现出更强的酸缓冲能力.

黄壤在酸添加量从 $9.60 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $38.40 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,整体土样的酸缓冲容量也有所增加.pH在4.50~7.50范围内黄壤土样G1、G2、G3和G4的酸缓冲容量分别增加了4.87、3.25、2.14和1.91倍.这4种土壤除G4外同处于硅酸盐缓冲阶段,外源酸添加量增加时,土壤需要阳离子缓冲质子,当碱性阳离子耗尽,进入土壤铝缓冲体系,

酸缓冲能力加强,土壤初始 pH 值与交换性阳离子含量越低,越快进入下一缓冲期,酸缓冲容量增大倍数越大. G5 (pH = 7.93) 处于碳酸钙缓冲期,与紫色土 C4 (pH = 7.80) 相比,两段酸缓冲容量都较大,接近 C5 (pH = 8.37) 土样,说明同 pH 条件下的黄壤酸缓冲能力大于紫色土,原因可能是紫色土中易风化矿物含量低,没有潜力提供风化反应释放阳离子.

红壤初始 pH 值接近,但酸缓冲容量相差较大. Y2 土样酸添加量为 $9.60 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,酸缓冲容量为

$61.73 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,可能与该土样交换性盐基离子总量较高有关,达 $44.36 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,是 13 个土壤样品中交换性盐基离子含量最高的土样. 红壤 Y3 土样与紫色土 (C5, pH = 8.37) 和黄壤 (G5, pH = 7.93) 相比,虽然盐基离子含量较低,但是酸缓冲容量都相对较高,可能与红壤成土母质与质地有关^[32]. Y1 由于较低的黏土含量,质地较粗停留时间较短,被输入质子的中和反应可能并不能反应完全,由此两段都表现出较低的酸缓冲容量^[32].

表 2 土壤缓冲曲线拟合方程及缓冲容量¹⁾

Table 2 Soil buffer curve fitting equation and buffer capacity

土壤类型	土壤编号	拟合方程 $y = ax + b$			酸缓冲容量 / $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	
			a	b		R^2
紫色土	C1	A	-0.035 2	3.900 8	0.985 7	28.41
		B	-0.019 3	3.790 0	0.975 1	51.81
	C2	A	-0.161 8	5.798 8	0.856 8	6.18
		B	-0.033 9	4.775 0	0.982 6	29.50
	C3	A	-0.080 4	5.171 5	0.974 9	12.44
		B	-0.033 1	4.725 0	0.998 8	30.21
	C4	A	-0.076 1	7.822 7	0.992 8	13.14
		B	-0.030 8	7.360 0	0.994 4	32.47
	C5	A	-0.048 4	8.331 9	0.967 4	20.66
		B	-0.013 4	8.000 0	0.964 3	74.63
黄壤	G1	A	-0.120 3	4.747 7	0.893 5	8.31
		B	-0.024 7	3.930 0	0.996 1	40.49
	G2	A	-0.086 0	5.558 8	0.903 8	11.63
		B	-0.026 5	5.060 0	0.986 5	37.74
	G3	A	-0.061 9	6.445 8	0.904 9	16.16
		B	-0.028 9	6.115 0	0.989 6	34.60
	G4	A	-0.062 6	6.613 8	0.978 5	15.97
		B	-0.032 7	6.320 0	0.991 2	30.58
	G5	A	-0.036 3	7.938 5	0.974 0	27.55
		B	-0.013 7	7.730 0	0.994 4	72.99
红壤	Y1	A	-0.057 6	7.668 8	0.981 7	17.36
		B	-0.042 9	7.625 0	0.977 1	23.31
	Y2	A	-0.016 2	7.839 6	0.887 4	61.73
		B	-0.007 7	7.750 0	0.973 0	129.87
	Y3	A	-0.030 4	8.001 5	0.957 0	32.89
		B	-0.003 6	7.740 0	0.979 6	277.78

1) A 为酸添加量为 $0 \sim 9.60 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的拟合数据, B 为酸添加量为 $9.60 \sim 38.40 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的拟合数据

2.3 土壤重金属 (Cd、Pb) 总量和形态分布特征

表 3 为研究区不同类型土壤 13 个土壤样品的重金属总量测定结果. 依据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618-2018) 中农用地土壤污染风险筛选值与管控值标准, 紫色土 $\omega(\text{总 Cd})$ 在 $1.40 \sim 2.25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{总 Pb})$ 在 $50.99 \sim 122.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 紫色土各个酸化程度的土

壤样品中 Cd 含量超过风险筛选值, 但均未超过农用地土壤污染风险管控值, 土壤中重金属 Pb 含量均未超过农用地土壤污染风险筛选值; 黄壤 $\omega(\text{总 Cd})$ 在 $2.19 \sim 4.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{总 Pb})$ 在 $38.53 \sim 79.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 部分土样 Cd 含量超过土壤污染管控值, Pb 含量低于农用地土壤污染筛选值; 红壤 $\omega(\text{总 Cd})$ 在 $4.76 \sim 53.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{总 Pb})$ 在

表 3 不同类型土壤重金属总量

Table 3 Total amount of heavy metals in different types of soil

土壤编号	C1	C2	C3	C4	C5	G1	G2	G3	G4	G5	Y1	Y2	Y3
pH 值	3.90	5.12	6.05	7.20	8.37	4.99	5.71	6.56	6.60	7.93	7.71	7.87	7.99
$\omega(\text{Cd})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.50	1.40	1.76	2.25	1.72	2.19	3.41	4.84	2.39	3.79	4.76	53.40	46.17
$\omega(\text{Pb})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	66.00	69.44	66.28	122.09	50.99	50.42	60.77	57.86	79.04	38.53	407.99	4 074.39	3 477.94

407.99 ~ 4 074.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cd 和 Pb 污染均已超过土壤污染风险管控值,土壤重金属污染严重。

重金属 Cd 和 Pb 在 3 种类型土壤中的形态分布特征如图 4~6。由图 4(a)可知, Cd 在紫色土中主要以可交换态与残渣态为主,可交换态占比随着土壤酸化程度的增加(初始 pH 值升高)逐渐增加,残渣态占比减少, C5 土样的可交换态与残渣态的异常可能是土壤利用类型不同,导致土壤的可交换态含量

较低,残渣态较高,该类型土壤虽然 pH 值较高,但是仍然存在利用风险。钟晓兰等^[33]在模拟酸雨对土壤重金属镉形态转变的试验中表明, Cd 的各个形态除残渣态外含量均表现为随酸雨 pH 降低而增加;马宏宏等^[34]研究也表现相类似的研究结果。紫色土中 Pb 形态分布特征基本与 Cd 类似,随着土壤酸化程度增加,可交换态占比增加,残渣态占比减少。

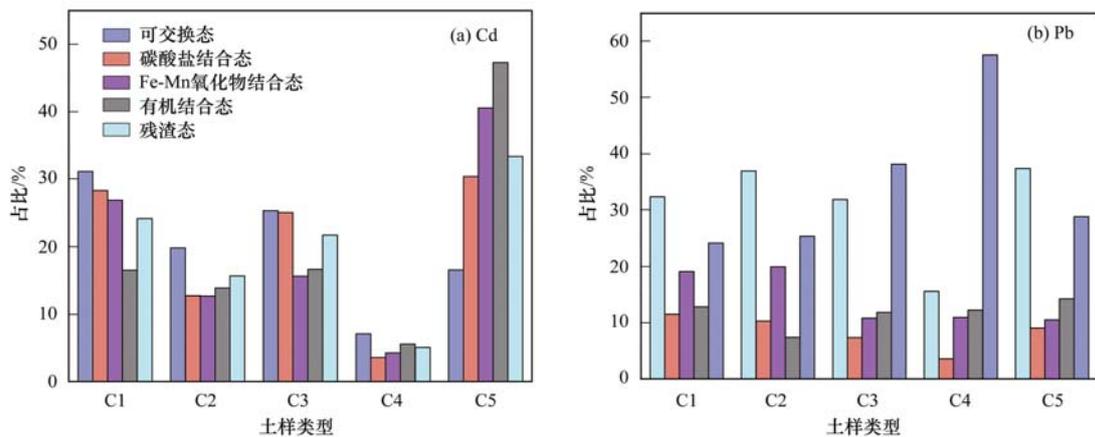


图 4 紫色土中重金属形态

Fig. 4 Distribution of heavy metals in purple soil

图 5(a)中黄壤 Cd 的形态分布并没有表现很强的随 pH 值变化的规律,但是对比酸化程度高的 G1 与尚未酸化的 G5 土样,可交换态含量仍有所降低,但是残渣态含量占比变化不大,而是 Fe-Mn 结合态 Cd 含量占比上升明显,说明黄壤酸化,可交换态含

量增加的同时, Fe-Mn 结合态占比也增加,可能是因为黄壤中铁锰氧化物含量较高的原因^[35]。Pb 在黄壤中的形态主要以可交换态与残渣态存在,且随着土壤酸化程度增加,呈现一定的上升趋势,并且残渣态也有所降低。

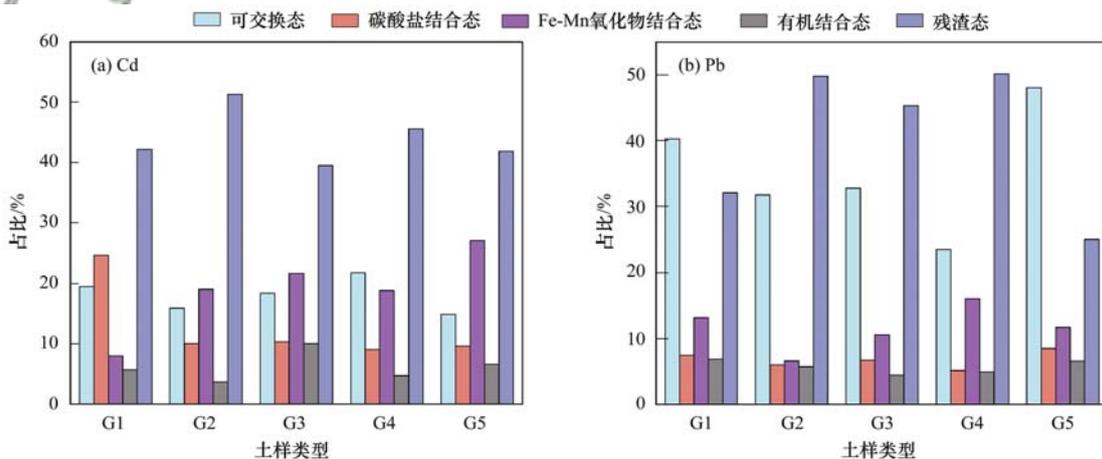


图 5 黄壤中重金属形态

Fig. 5 Distribution of heavy metals in yellow soil

与紫色土和黄壤不同的是,红壤中重金属 Cd 和 Pb 可交换态含量都非常低,可能是因为红壤 pH 值接近且都为碱性(图 6), Cd 和 Pb 主要以 Fe-Mn 结合态和残渣态为主, Fe-Mn 结合态含量占比远远高于紫色土与黄壤,在土壤 pH 接近 8 时, Y3 土样中 Cd 和 Pb 铁锰结合态占比分别达到 46.79% 和 43.08%,是未酸化紫色土的 2.15 倍和 4.3 倍,黄壤

的 1.73 倍和 3.91 倍,是控制该土壤重金属的形态组成特征的主要组分,这与云南红壤发育于玄武岩,铁和锰含量甚高有关。

2.4 小白菜对土壤酸化及重金属污染的响应

2.4.1 小白菜生长对土壤酸化及重金属污染的响应

作物生长和重金属累积是对土壤酸化和重金属污染的综合反映。供试 3 种类型不同酸化阶段土壤

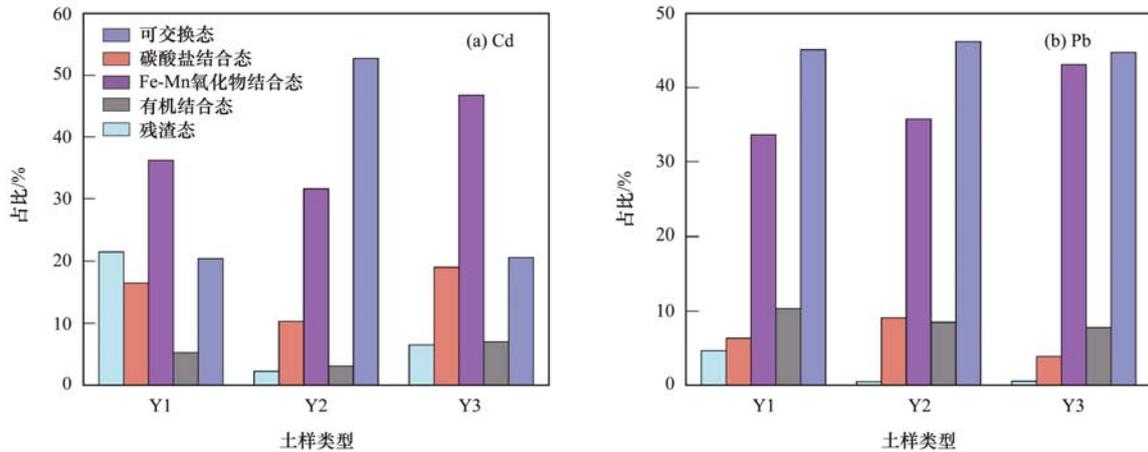


图 6 红壤中重金属形态

Fig. 6 Distribution of heavy metals in red soil

上小白菜生物量见表 4。从中可知,紫色土小白菜生物量有随着土壤 pH 值升高而逐渐增加的趋势,强酸化的 C1 土上小白菜生物量较低,但 5 个不同酸化程度紫色土小白菜生长量之间并没有表现出显著性差异,说明紫色土土壤酸化对小白菜生长抑制作用并不明显;黄壤上不同酸化阶段土壤小白菜生物量之间存在显著性差异,随着黄壤酸化程度的增加,小白菜生长量显著降低,说明黄壤土壤酸化对小白菜生长产生了明显的抑制作用;红壤 Y1 土壤小白菜生长量显著低于另外两种土壤,主要原因可能是 Y1 土样是砂土质地,不利于作物生长。显然,就作物生长而言,除酸化和重金属污染的影响外,土壤性质和养分状况也是重要的影响因素。

表 4 不同类型土壤小白菜的生长状况¹⁾

Table 4 Growth of cabbage in different types of soils

土壤编号	小白菜地上部鲜重/g·pot ⁻¹
C1	33.97 ± 4.29a
C2	39.64 ± 2.36a
C3	35.97 ± 1.56a
C4	38.45 ± 1.51a
C5	39.11 ± 3.88a
G1	33.01 ± 2.09b
G2	33.07 ± 3.52b
G3	38.81 ± 0.55a
G4	36.77 ± 0.30ab
G5	38.61 ± 0.86a
Y1	3.46 ± 0.92c
Y2	36.24 ± 0.81b
Y3	39.14 ± 1.79a

1) 数据为平均值 ± 标准误差; 同列数据相同字母表示同种土壤处理间无显著差异, 不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$, $n = 3$)。

2.4.2 小白菜体内镉、铅累积量分析

3 种类型不同酸化阶段土壤上小白菜地上部可食部分 Cd 和 Pb 含量如图 7 所示,紫色土 5 个土壤

小白菜地上部 ω (Cd) 分别为 1.01、0.79、0.58、0.41 和 0.37 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,小白菜地上部 ω (Pb) 分别为 5.87、4.72、3.97、5.72 和 4.90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;黄壤 5 个土壤小白菜地上部 ω (Cd) 分别为 3.41、2.64、0.85、0.27 和 0.26 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,小白菜地上部 ω (Pb) 分别为 6.63、4.80、4.08、5.49 和 5.15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;红壤 3 个土壤小白菜地上部 ω (Cd) 分别为 0.64、1.52 和 2.45,小白菜地上部 ω (Pb) 分别为 5.85、112.36 和 8.61 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均已超过《食品安全国家标准食物中污染物限量》(GB 2762-2017)规定的重金属限量指标 [ω (Pb) 为 0.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, ω (Cd) 为 0.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]。

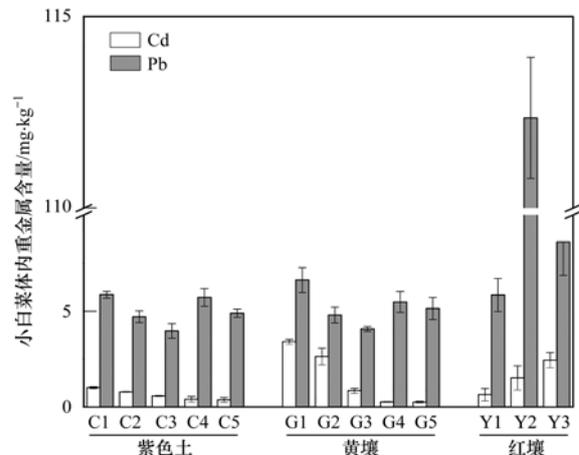


图 7 3 种类型土壤小白菜重金属含量

Fig. 7 Accumulation of Cd and Pb in cabbage in three types of soils

2.4.3 小白菜镉和铅富集与土壤酸化和重金属污染的耦合关系

作物生长和重金属累积是对土壤酸化和重金属污染的综合反映。供试 3 种类型不同酸化阶段土壤上小白菜 Cd 和 Pb 生物富集情况分别见表 5。

表 5 不同类型土壤小白菜重金属富集系数

Table 5 Growth and accumulation of cabbage in different types of soils

土壤编号	Cd 富集系数	Pb 富集系数
C1	0.68 ± 0.04a	0.09 ± 0.00a
C2	0.56 ± 0.01a	0.07 ± 0.00b
C3	0.32 ± 0.02b	0.06 ± 0.01b
C4	0.18 ± 0.08c	0.05 ± 0.00c
C5	0.21 ± 0.09bc	0.10 ± 0.01a
G1	1.58 ± 0.07a	0.13 ± 0.01a
G2	0.77 ± 0.16b	0.08 ± 0.01b
G3	0.18 ± 0.33c	0.07 ± 0.00b
G4	0.11 ± 0.01c	0.07 ± 0.01b
G5	0.07 ± 0.01c	0.13 ± 0.02a
Y1	0.13 ± 0.08a	0.01 ± 0.00b
Y2	0.03 ± 0.01ab	0.03 ± 0.00a
Y3	0.05 ± 0.01ab	0.00 ± 0.00c

1) 数据为平均值 ± 标准误差; 同列数据相同字母表示同种土壤处理间无显著差异, 不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$, $n = 3$)

作物重金属含量受土壤污染状况的制约, 土壤酸化通过影响重金属形态和活性而影响其在作物中的累积, 由于本文是采用原位实际污染土壤, 其污染程度差异较大, 因此着重采用富集系数分析酸化的影响. 对比表 5 小白菜重金属富集系数, 可以看出紫色土中小白菜对 Cd 和 Pb 的富集均存在较大差异性.

(1) 小白菜铅的富集特征 结合表 5, 3 种类型土壤中生长的小白菜 Pb 含量和 Pb 富集系数并没有与土壤 pH 呈显著线性相关, 但是仍然可以看出紫色土与黄壤中小白菜对 Pb 的富集系数随着土壤酸化程度的减轻有一个下降的趋势. 在紫色土中, C4 土壤小白菜对 Pb 的富集系数显著低于其它 4 个土壤, 结合原土 Pb 总量和重金属 Pb 的赋存形态: C4 土壤中总 Pb 含量是紫色土土中最高的, 但是由于土壤 pH 值较高, C4 土壤 Pb 的交换态含量占比最低, 残渣态占比最高, 说明 C4 土壤中 Pb 虽然总量较

高, 但是生物活性较低, 小白菜富集系数最低.

黄壤中小白菜体内 Pb 富集系数表现出随土壤 pH 值升高而降低的富集规律, 在酸化土壤中, 小白菜对重金属的富集能力较强, 黄壤中 G5 土样生长的小白菜 Pb 富集系数较高, 可能与重金属 Pb 可交换态含量占比较高有关; 红壤生长的小白菜 Pb 的富集系数存在较大差异, 可能是 3 种红壤土样原土 Pb 含量存在较大差异, Y1 土壤原土总 Pb 含量显著低于其他两种红壤, 导致 Y1 土壤小白菜 Pb 富集系数显著低于其他两种红壤.

对比 3 种不同类型土壤中小白菜体内 Pb 富集系数规律, 可以明显看出虽然红壤中原土 Pb 总量显著高于紫色土与黄壤, 但是由于土壤 pH 值较高导致 Pb 交换态含量占比极低, 虽然小白菜 Pb 含量较高, 但是富集系数却显著低于其他两种类型土壤, 重金属 Pb 在红壤中迁移性显著低于紫色土与黄壤.

(2) 小白菜镉的富集特征 从表 5 可知, 紫色土与黄壤中酸化土壤都对 Cd 表现出较强的富集能力, 随着土壤初始 pH 值升高至中性土、碱性土时, Cd 富集系数显著降低. 根据表 5 小白菜内重金属 Cd 含量与富集系数, 对紫色土与黄壤 pH 值与小白菜重金属 Cd 含量与富集系数进行线性分析, 如图 8 所示. 紫色土土样 Cd 总量并没有显著性差异, 说明紫色土土壤酸化显著增加了小白菜对 Cd 的富集能力; 由图 8 可知, 在紫色土中, 小白菜吸收的 Cd 含量与土壤 pH 呈现线性相关, Cd 富集系数与土壤 pH 值也呈现线性相关; C4 土壤小白菜 Cd 富集系数显著低于其他 4 个紫色土土样, 虽然紫色土 C4 原土 Cd 总量较高, 但是 C4 土壤重金属 Cd 交换态占比最低, 说明土壤 pH 值较高, 导致土壤移动性和生物活性较低, 小白菜对 Cd 的富集系数显著大于其他 4 个土壤.

黄壤中小白菜体内 Cd 含量与 Cd 富集系数与

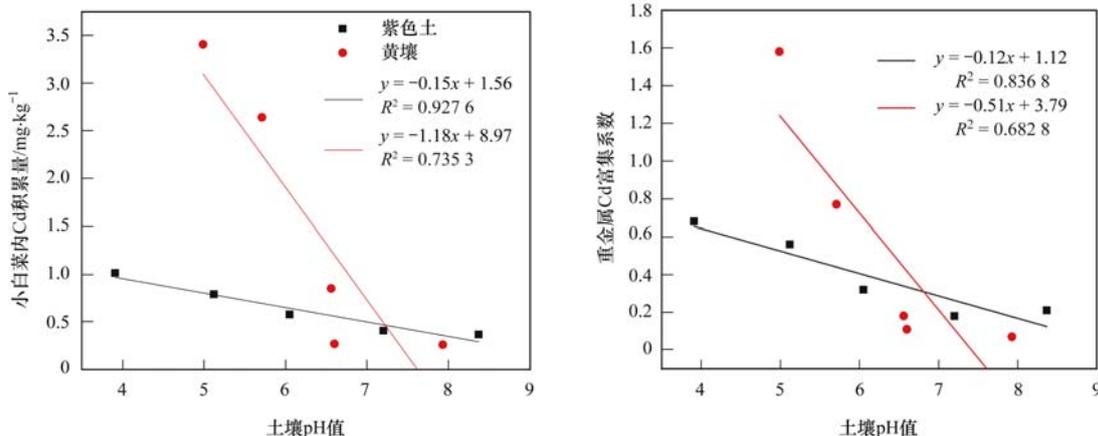


图 8 不同类型土壤小白菜重金属 Cd 积累量与土壤 pH 关系

Fig. 8 Relationship between Chinese cabbage growth and heavy metal accumulation and soil pH, Pb content and form in different types of soil

土壤 pH 值的线性拟合度较差,可能是 5 个黄壤土样原始 Cd 含量与 Pb 含量差异较大的原因,但是结合表 5 可知,在酸性黄壤中小白菜 Cd 含量富集系数显著大于未酸化的黄壤,说明土壤 pH 值降低,显著增加了重金属 Cd 从土壤向小白菜迁移的可能性。红壤 3 个土样小白菜 Cd 富集系数差异性不大,但是远远低于其他两种类型的土壤,与土壤 pH 值以及重金属交换态含量较低有关。

3 结论

(1) 供试三类土壤交换性酸只存在于 pH < 6.60 的样品中,随土壤酸化程度加强,交换性酸中以交换性 H⁺ 为主逐渐转变为以交换性 Al³⁺ 为主;紫色土与黄壤交换性盐基总量与 pH 值呈显著正相关,土壤酸化主要导致交换性盐基中 Ca²⁺ 的降低。

(2) 不同酸化阶段的紫色土与黄壤对酸敏感性相差较大,这是由于土壤处于不同酸缓冲体系所造成的。紫色土在 pH > 7.50 与 pH < 4.50 时,酸缓冲容量较大,前者受碳酸钙缓冲体系制约,后者已经进入铝缓冲范围,pH 在 5~7 的土壤主要酸缓冲体系为盐基和硅酸盐体系,对酸化敏感,是土壤酸化防控的重点;黄壤多数样品目前酸缓冲性能处于交换性盐基控制阶段,在酸添加量为 0~9.60 mmol·kg⁻¹ 时,酸缓冲容量与土壤交换性盐基离子含量有较强的正相关性;且随着酸添加量增加,酸缓冲容量的增大倍数与土壤盐基离子消耗速率有关。

(3) 供试紫色土、黄壤、红壤污染程度差异较大,土壤 Cd 和 Pb 主要赋存形态及其对酸化的响应受土壤类型制约;紫色土中主要以可交换态与残渣态为主,且随土壤酸化程度增加交换态占比增加,残渣态占比减少;黄壤中以 Fe-Mn 结合态和残渣态为主,土壤酸化显著增加了交换态和 Fe-Mn 结合态的占比;红壤中以残渣态与 Fe-Mn 结合态为主,Cd 的 Fe-Mn 结合态是紫色土与黄壤的 2.15 倍与 1.73 倍,Pb 的 Fe-Mn 结合态是紫色土与黄壤的 4.30 倍与 3.91 倍,与红壤铁含量较高有关。

(4) 小白菜生长和 Cd 和 Pb 累积受土壤类型 and 酸化程度的制约。紫色土上,仅当土强烈酸化,pH < 4 时才表现出明显的生长抑制;而在黄壤上小白菜生长受土壤酸化影响明显,生物量随土壤酸化程度的增加明显降低;小白菜对 Cd、Pb 富集能力与土壤酸化密切相关,土壤酸化通过促进土壤中 Cd、Pb 向高活性的交换态转化促进小白菜的富集(富集系数 > 1)、以对 Cd 的促进作用更加显著。未酸化的红壤上小白菜重金属的富集受土壤质地的强烈影响。

参考文献:

- [1] 骆永明,滕应. 我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 145-152.
- [2] Luo Y M, Teng Y. Regional difference in soil pollution and strategy of soil zonal governance and remediation in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 145-152.
- [3] 李士杏,王定勇. 重庆地区 20 年间紫色土酸化研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2005, 22(1): 70-73.
- [4] Li S X, Wang D Y. A study of the acidification of purple soil in Chongqing in recent two decades[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition), 2005, 22(1): 70-73.
- [5] Tao L, Li F B, Liu C S, et al. Mitigation of soil acidification through changes in soil mineralogy due to long-term fertilization in southern China[J]. Catena, 2019, 174: 227-234.
- [6] Duan L, Chen X, Ma X X, et al. Atmospheric S and N deposition relates to increasing riverine transport of S and N in Southwest China: implications for soil acidification[J]. Environmental Pollution, 2016, 218: 1191-1199.
- [7] 张健琳,瞿明凯,陈剑,等. 中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4414-4421.
- [8] Zhang J L, Qu M K, Chen J, et al. Meta-analysis of the effects of metal mining on soil heavy metal concentrations in Southwest China[J]. Environmental Science, 2021, 42(9): 4414-4421.
- [9] 杨剑. 黔北地区下寒武统黑色岩系形成环境与地球化学研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [10] Yang J. Study on the formation environment and geochemistry of lower cambrian black shale series, northern Guizhou Province, China[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [11] 穆德苗,孙约兵. 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 965-974.
- [12] Mu D M, Sun Y B. Safety production threshold and land quality classification of vegetable Pb in high geological background area of Southwest China[J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 965-974.
- [13] 段雷,郝吉明,叶雪梅,等. 中国土壤风化速率研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(S1): 1-7.
- [14] Duan L, Hao J M, Xie S D, et al. Study on weathering rate of soil in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(S1): 1-7.
- [15] 周晓阳,周世伟,徐明岗,等. 中国南方水稻土酸化演变特征及影响因素[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4811-4817.
- [16] Zhou X Y, Zhou S W, Xu M G, et al. Evolution characteristics and influence factors of acidification in paddy soil of Southern China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(23): 4811-4817.
- [17] 李士杏. 重庆市紫色土酸化现状及机理研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2003.
- [18] Li S X. Acidification status of purple soil and its mechanism in Chongqing[D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2003.
- [19] Li Q Q, Li S, Xiao Y, et al. Soil acidification and its influencing factors in the purple hilly area of Southwest China from 1981 to 2012[J]. Catena, 2019, 175: 278-285.
- [20] 黄至颖,刘鸿雁,冉晓追,等. 贵州省土壤 pH 时空变化趋势分析[J]. 山地农业生物学报, 2020, 39(4): 21-29.
- [21] Huang Z Y, Liu H Y, Ran X Z, et al. Spatial and temporal

- distribution of soil pH in Guizhou Province [J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2020, **39**(4): 21-29.
- [13] 段雷, 周益, 杨永森, 等. 酸化及化学修复剂对森林土壤有机物淋溶的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 440-445.
Duan L, Zhou Y, Yang Y S, *et al.* Effects of acidification and liming on organic matter leaching in forest soil [J]. Environmental Science, 2008, **29**(2): 440-445.
- [14] 张倩, 宗良纲, 曹丹, 等. 江苏省典型茶园土壤酸化趋势及其制约因素研究[J]. 土壤, 2011, **43**(5): 751-757.
Zhang Q, Zong L G, Cao D, *et al.* Study on soil acidification and its restrictive factors of typical tea garden in Jiangsu Province [J]. Soils, 2011, **43**(5): 751-757.
- [15] Li X L, Wang Y Q, Zhang Y, *et al.* Response of soil chemical properties and enzyme activity of four species in the Three Gorges Reservoir area to simulated acid rain [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, **208**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111457.
- [16] Zhang M, McSaveney M J. Is air pollution causing landslides in China? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, **481**: 284-289.
- [17] Shi R Y, Li J Y, Jiang J, *et al.* Incorporation of corn straw biochar inhibited the re-acidification of four acidic soils derived from different parent materials [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(10): 9662-9672.
- [18] 刘莉, 谢德体, 李忠意, 等. 酸性紫色土的阳离子交换特征及其对酸缓冲容量的影响[J]. 土壤学报, 2020, **57**(4): 887-897.
Liu L, Xie D T, Li Z Y, *et al.* Cations exchange and its effect on acid buffering capacity of acid purple soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, **57**(4): 887-897.
- [19] 徐洁, 侯万国, 台培东, 等. 东北污灌区草甸棕壤吸附重金属铅的形态分布及解吸行为[J]. 环境化学, 2010, **29**(2): 210-214.
Xu J, Hou W G, Tai P D, *et al.* Speciation distribution and desorption of lead adsorbed on meadow brown soil in northeastern sewage irrigation district of China [J]. Environmental Chemistry, 2010, **29**(2): 210-214.
- [20] Rezapour S, Atashpaz B, Moghaddam S S, *et al.* Cadmium accumulation, translocation factor, and health risk potential in a wastewater-irrigated soil-wheat (*Triticum aestivum* L.) system [J]. Chemosphere, 2019, **231**: 579-587.
- [21] 唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 等. 典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评估[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3913-3923.
Tang S Q, Liu X J, Yang K, *et al.* Migration, transformation characteristics, and ecological risk evaluation of heavy metal fractions in cultivated soil profiles in a typical carbonate-covered area [J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3913-3923.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [23] 陈莹, 刘汉焱, 刘娜, 等. 农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3494-3506.
Chen Y, Liu H Y, Liu N, *et al.* Screening and evaluation of methods for determining available lead (Pb) and cadmium (Cd) in farmland soil [J]. Environmental Science, 2021, **42**(7): 3494-3506.
- [24] 俞映惊, 杨林章, Odindo A O, 等. 碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3851-3859.
Yu Y L, Yang L Z, Odindo A O. Influence of calcium carbonate and biochar addition on soil nitrogen retention in acidified vegetable soil [J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3851-3859.
- [25] 廖柏寒, 戴昭华. 土壤对酸沉降的缓冲能力与土壤矿物的风化特征[J]. 环境科学学报, 1991, **11**(4): 425-431.
Liao B H, Dai Z H. Soil buffering capacity to acid precipitation and weathering characteristics of soil minerals [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1991, **11**(4): 425-431.
- [26] Jalali M, Moradi A. Measuring and simulating pH buffer capacity of calcareous soils using empirical and mechanistic models [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2020, **66**(4): 559-571.
- [27] Nelson P N, Su N H. Soil pH buffering capacity: a descriptive function and its application to some acidic tropical soils [J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, **48**(3): 201-207.
- [28] Ulrich B. Natural and anthropogenic components of soil acidification [J]. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 1986, **149**(6): 702-717.
- [29] 江军, 曹楠楠, 俞梦笑, 等. 酸性森林土壤缓冲酸沉降关键机理研究进展[J]. 热带亚热带植物学报, 2019, **27**(5): 491-499.
Jiang J, Cao N N, Yu M X, *et al.* A review of the key mechanisms of acidic forest soils to buffer acid deposition [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2019, **27**(5): 491-499.
- [30] Wang Z N, Jia M Y, Li Z, *et al.* Acid buffering capacity of four contrasting metal-contaminated calcareous soil types: changes in soil metals and relevance to phytoextraction [J]. Chemosphere, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127045.
- [31] 仇荣亮, 董汉英, 吕越娜, 等. 南方土壤酸沉降敏感性研究 VII——盐基淋溶与缓冲机理[J]. 环境科学, 1997, **18**(5): 23-27.
Qiu R L, Dong H Y, Lv Y N, *et al.* Soil sensitivity to acid deposition in South China VII. Cation leaching and buffering mechanism [J]. Environmental Science, 1997, **18**(5): 23-27.
- [32] 赵凯丽. 不同母质红壤的酸化特征及趋势[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
Zhao K L. Acidification characteristics and trend of red soil from different parent materials [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [33] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 模拟酸雨对土壤重金属镉形态转化的影响[J]. 土壤, 2009, **41**(4): 566-571.
Zhong X L, Zhou S L, Li J T, *et al.* Effect of simulated acid rains on Cd form transformation in contaminated soil [J]. Soils, 2009, **41**(4): 566-571.
- [34] 马宏宏, 彭敏, 郭飞, 等. 广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1514-1522.
Ma H H, Peng M, Guo F, *et al.* Factors affecting the translocation and accumulation of cadmium in a soil-crop system in a typical karst area of Guangxi Province, China [J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1514-1522.
- [35] 杨炜林, 祖艳群, 李元. 土壤重金属化学形态的空间异质性及其影响因素研究[J]. 云南农业大学学报, 2007, **22**(6): 912-916.
Yang W L, Zu Y Q, Li Y. Spatial variability of sequential extraction parts of heavy metals and its affecting factors in soil [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2007, **22**(6): 912-916.

CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-jan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)