

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 吴雪萍 (1926)

中国城市PM_{2.5}和PM₁₀时空分布特征和影响因素分析 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM_{2.5}和O₃时空变化特征及影响因素 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM_{2.5}和O₃污染特征及成因分析 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM_{2.5}化学组成特征和空间差异 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM_{2.5}来源 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM_{2.5}改善的溢出效益 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM_{2.5}载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海林, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴呈, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠军, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N₂O排放影响:基于Meta分析 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

西南不同类型紫色土 pH 变化、重金属累积与潜在生态风险评估

张海琳¹, 张雨¹, 王顶¹, 谢军¹, 张跃强^{1,2}, 张宇亭^{1,2}, 王洁^{1,2*}, 石孝均^{1,2}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆三峡库区土壤质量国家野外科学观测研究站, 重庆 400716)

摘要: 施肥在作物增产方面的优势已得到广泛认可, 但施肥对西南不同类型紫色土重金属累积与潜在生态风险的长期影响与作用机制尚不清楚. 基于连续 13a 玉米-白菜轮作长期定位试验, 采集单施化肥(NPK)、单施有机肥(M)、有机无机配施(NPKM)和不施肥对照(CK)这 4 个处理的酸性、中性和钙质紫色土, 测定各处理土壤理化指标和耕层土壤中 Cu、Zn、Cd、Ni、Pb 和 Cr 全量, 通过单因子污染指数(P_i)分别计算内梅罗综合污染指数(P_N)和潜在生态风险指数(RI), 评估长期施肥后土壤重金属污染特征和生态风险, 进一步通过偏最小二乘路径模型(PLS-PM)解析土壤理化指标变量与重金属综合污染指数和潜在生态风险的关系. 结果表明, 土壤理化指标和重金属全量在不同施肥方式和土壤类型下差异显著($P < 0.05$), 且施肥方式的影响程度高于土壤类型. 相较于 NPK 处理, NPKM 和 M 处理土壤有机碳(SOC)、有效钾(AK)和有效磷(AP)含量平均增幅达 62.53%~236.07%、105%~505.71% 和 444.92%~1 269.95%; 各施肥处理显著改变酸性和中性紫色土 pH, NPK 处理下显著降低 1.58 和 1.87, NPKM 和 M 处理下平均上升 0.61~1.70. 长期施肥后 3 种不同类型紫色土重金属全量均有提高, NPKM 和 M 处理土壤重金属全量的平均增幅(93.63% 和 96.39%)高于 NPK 处理(51.79%). 长期施用有机肥后 P_N 更高, 其中钙质紫色土 M 处理 P_N 最高, 达中等危害等级, 且酸性和中性紫色土中各处理 RI 高于钙质紫色土, 重金属 Cd 和 Pb 的污染程度和生态风险更高; 对理化因子、 P_N 和 RI 进行冗余分析结果表明, AP、 ΔpH (各施肥处理相较于初始土壤 pH 变化量)和 NO_3^-N 分别解释了方差变异的 57.7%、11.2% 和 9.7%, 达到显著水平; PLS-PM 分析结果表明, 长期施肥通过提高土壤 AP 和加剧 pH 变化影响重金属累积导致潜在生态风险增加. 研究结果可为紫色土农田养分管理与重金属污染防治提供理论依据.

关键词: 不同类型紫色土; pH 变化; 土壤重金属污染; 生态风险; 偏最小二乘路径模型(PLS-PM)

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2440-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202306007

Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China

ZHANG Hai-lin¹, ZHANG Yu¹, WANG Ding¹, XIE Jun¹, ZHANG Yue-qiang^{1,2}, ZHANG Yu-ting^{1,2}, WANG Jie^{1,2*}, SHI Xiao-jun^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. National Monitoring Station of Soil Fertility and Fertilizer Efficiency on Purple Soils, Chongqing 400716, China)

Abstract: The advantages of fertilization in increasing crop yield have been widely recognized, but the long-term effect and mechanism of fertilization on heavy metal accumulation and potential ecological risks in different types of purple soil in Southwest China remain unclear. In this study, we conducted a long-term positioning experiment of maize-cabbage rotation for 13 consecutive years. Four treatments, namely, chemical fertilizer application (NPK), organic fertilizer application (M), organic-inorganic combination application (NPKM), and control without fertilizer application (CK), of acidic, neutral, and calcareous purple soil, were established. The soil physicochemical indicators and the total amount of heavy metals in the topsoil of each treatment, including Cu, Zn, Cd, Ni, Pb, and Cr, were measured. The Nemerlo comprehensive pollution index (P_N) and potential ecological risk index (RI) were separately calculated by using the single-factor pollution index (P_i). The characteristics and ecological risks of soil heavy metal pollution after long-term fertilization were evaluated. Furthermore, the relationship between soil physicochemical index variables, comprehensive pollution index of heavy metals, and potential ecological risks were analyzed through the partial least squares path model (PLS-PM). The results showed that the physicochemical indexes of soil and the total amount of heavy metals were significantly different under different application treatments and soil types ($P < 0.05$), and the effect of the application treatment was significantly higher than that of soil type. Compared to that in the NPK treatment, the average increase in soil organic carbon (SOC), available potassium (AK), and available phosphorus (AP) content in the NPKM and M treatments was 62.53%-236.07%, 105%-505.71%, and 444.92%-1 269.95%, respectively. Each application treatment significantly changed the pH of acidic and neutral purple soil, with a significant decrease of 1.58 and 1.87 under the NPK treatment and an average increase of 0.61-1.70 under the NPKM and M treatments. After long-term fertilization, the total amount of heavy metals in the three different types of purple soil increased. The average increase in the total amount of heavy metals under the NPKM and M treatments (93.63% and 96.39%) was higher than that under the NPK treatment (51.79%). After long-term application of organic fertilizer, the P_N was higher, with the highest P_N under the M treatment of calcareous purple soil, reaching a moderate hazard level. Moreover, the RI of each treatment in acidic and neutral purple soil was higher than that in calcareous purple soil, and the pollution level and ecological risk of the heavy metals Cd and Pb were higher. The redundancy analysis of physical and chemical factors, P_N , and RI showed that AP, ΔpH (relative to the initial soil pH change), and NO_3^-N explained 57.7%, 11.2%, and 9.7% of the variance variation, reaching a significant level. The PLS-PM analysis results showed that long-term fertilization increased the accumulation of heavy metals by increasing soil AP and exacerbating pH changes, leading to potential ecological risks. The results

收稿日期: 2023-06-01; 修订日期: 2023-07-04

基金项目: 国家绿肥产业体系项目(CARS-22-G-13)

作者简介: 张海琳(2000~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤质量评价与土壤肥力演变规律, E-mail:912589916@qq.com

* 通信作者, E-mail: mutouyu@swu.edu.cn

can provide a theoretical basis for nutrient management and heavy metal pollution prevention in arable land with purple soil.

Key words: different types of purple soil; pH variation; soil heavy metal pollution; ecological risk; partial least squares path model(PLS-PM)

农田是粮食生产的物质基础^[1], 为获得粮食高产, 施肥是必要的农田管理措施^[2]. 然而, 前人研究表明长期施肥会导致农田和作物中重金属累积^[3,4]. 《全国土壤污染状况调查公报》^[5]指出, 中国约 19.4% 的耕地超过了重金属污染阈值, 主要以铜(Cu)、锌(Zn)、镉(Cd)、镍(Ni)、铅(Pb)和铬(Cr)等重金属为主, 各重金属点位超标率分别为 2.1%、0.9%、7.0%、4.8%、1.5% 和 1.1%. 耕地重金属污染日渐严重, 其存在的潜在健康风险引发了社会广泛关注. 耕地中的重金属被植物根系吸收和转运, 富集在植物可食部分, 通过食物链进入人体, 最终导致心血管系统损伤和癌症等多种恶性疾病^[6,7]. 因此, 对农田土壤重金属污染程度和风险等级进行评估, 在为土壤重金属污染修复政策制定和保障粮食安全方面具有重要意义.

在远离矿区的农田中, 长期施肥被认为是重金属的主要来源^[8,9]. Wang 等^[10]研究表明, 长期施用无机肥料(如磷矿石肥料)会造成 Cu 和 Zn 等潜在有毒微量元素的累积. Duan 等^[11]研究发现, 施用(8 a)猪粪的水稻土 Cu、Zn、Cd 和 As 等重金属含量显著升高. Gao 等^[12]通过长达 40 a 的长期定位试验发现, 牛粪施用导致红壤中 Cd 累积, As 积累则主要来源于磷矿肥, 且长期施肥显著增加了土壤环境风险. 为准确评估重金属污染程度, 许多国家环保部门采用土壤重金属含量作为评价土壤污染程度的标准和参考指标^[13], 常用的重金属污染程度评价方法有单因子指数法、内梅罗综合污染指数法和潜在生态风险评估, 综合多种评价方法结果能更加准确地评估土壤重金属污染状况. 此外, Gao 等^[12]研究表明, pH 是长期施肥过程中影响土壤重金属含量和有效性的关键因素之一, 碱性土壤重金属固定量较高, 植物吸收量较低, 酸性土壤重金属活化度较高, 危害较大^[14].

目前, 农田重金属污染生态风险评估与分析多集中在同一土类, 对于不同 pH 土壤亚类差异性研究较少, 紫色土更是鲜见报道. 紫色土是中国西南部最重要的农业土壤, 具有成土快和矿质养分丰富等特征^[15]. pH 是紫色土亚类的关键分异指标, 中性紫色土约占总量的 80%^[16], 酸性和钙质紫色土占比总和约为 20%. 长期以来, 农业生产者为提升紫色土区农田综合肥力投入了大量肥料, 这不仅导致酸性紫色土占比上升^[17], 还带来了重金属的输入, 特别是畜禽粪污的施用使得紫色土区重金属污染日趋严

重. 因此, 本研究基于连续 13 a 玉米-白菜轮作长期定位试验, 采集单施化肥、单施有机肥、有机无机配施和不施肥对照处理的酸性、中性和钙质紫色土, 探究不同 pH 紫色土重金属污染程度对长期施肥的响应差异, 评估土壤重金属累积特征、潜在生态风险及其机制, 以期为紫色土区耕地土壤重金属污染防治及土地安全高效利用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区国家紫色土肥力与肥料效益监测站(30°26' N, 106°26' E), 属亚热带季风气候, 年平均气温 18.3℃, 年平均降雨量 1 115.3 mm. 本研究基于连续 13 a 的小区定位试验, 在 2020 年进行土壤样品的采集和测定.

长期定位试验采用西南地区有代表性的 3 种紫色土: 酸性紫色土(acidic purple soil, Ac)、中性紫色土(neutral purple soil, Ne)和钙质紫色土(calcareous purple soil, Ca). 酸性紫色土是夹关组砂岩发育成的红紫泥, 中性紫色土为侏罗系沙溪庙组紫色沙页岩母质上发育的灰棕紫泥, 钙质紫色土是侏罗系遂宁组母质上发育的红棕紫泥. 在定位试验开始前, 表层土壤的理化性质见表 1.

表 1 原状土壤基础化学性质¹⁾
Table 1 Undisturbed soil basic chemical properties

指标	酸性土	中性土	钙质土
pH	5.81±0.12	6.82±0.15	8.35±0.09
$\omega(\text{SOC})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	10.06±1.45	10.43±0.87	10.73±1.23
$\omega(\text{TN})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.04±0.09	1.16±0.11	0.99±0.09
$\omega(\text{TP})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.23±0.10	0.44±0.07	0.43±0.03
$\omega(\text{TK})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	18.70±1.87	19.40±1.65	23.40±2.02
$\omega(\text{AHN})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	81.20±8.76	111.01±10.21	78.5±4.32
$\omega(\text{AP})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	17.30±2.98	18.90±3.08	15.00±2.31
$\omega(\text{AK})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	133.00±21.00	97.01±12.10	126.04±16.10

1) SOC: 土壤有机碳(soil organic carbon), TN: 土壤全氮(total nitrogen), TP: 土壤全磷(total phosphorus), TK: 土壤全钾(total potassium), AHN: 土壤碱解氮(alkali hydrolyzed nitrogen), AP: 土壤有效磷(available phosphorus), AK: 土壤有效钾(available potassium), 下同

1.2 试验设计

长期定位试验设置 4 个施肥处理: ①单施氮磷钾化肥(NPK)、②单施有机肥(M)、③50% 有机肥+50% 化肥(NPKM)和④不施肥对照(CK), 3 种紫色土共计 12 个处理, 每个处理设置 3 个重复, 共计 36 个小区, 每个小区面积 1 m × 1.5 m. 小区间用混凝土

浇筑隔开,避免土壤养分和水分扩散.NPK处理的氮磷钾肥分别采用尿素、磷酸二氢钾和硫酸钾,每季分3次施用,详细施肥时期见Xie等^[18]的描述.白菜季施肥量: N 300 kg·hm⁻², P₂O₅ 90 kg·hm⁻², K₂O 150 kg·hm⁻².玉米季施肥量: N 180 kg·hm⁻², P₂O₅ 90 kg·hm⁻², K₂O 90 kg·hm⁻².有机肥选用规模化畜禽养殖场的纯鸡粪, M处理有机肥用量按有机氮白菜季 N 300 kg·hm⁻²和玉米季 N 180 kg·hm⁻²计算施用,并以基肥一次性施用, NPKM处理按50%有机氮和50%的化学氮肥施用,磷钾不足的量用磷酸二氢钾和硫酸钾补足.

1.3 土壤样品采集和测定

2020年8月玉米收获后,采用五点取样法,采集0~20cm土层非根际土壤样品.采回土样自然风干后挑出碎石等杂物,研磨后过18目和100目筛,分别用于土壤基本理化性质和重金属指标测定.

参照《土壤农化分析》^[19]中的方法,有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定;铵态氮(NH₄⁺-N)用酚二磺酸比色法测定;硝态氮(NO₃⁻-N)用靛酚蓝比色法测定;有效磷(AP)用钼锑抗比色法测定;有效钾(AK)用乙酸铵浸提火焰光度法.土壤pH值采用酸度计电位法测定(水土比2.5:1)^[20].土壤机械组成[即黏粒(clay)、粉粒(silt)和砂粒(sand)含量]采用比重计法^[21].土壤重金属全量按照《生态地

球化学评价样品分析技术要求(试行)》(DD 2005-03)^[22]的方法进行测定, Cu、Zn、Cd、Ni和Pb采用等离子体质谱法(ICP-MS7900, Agilent, U.S.A), Cu和Cd检出限分别为1 mg·kg⁻¹和20 ng·g⁻¹, Zn、Ni和Pb检出限均为2 mg·kg⁻¹. Cr采用X-射线荧光光谱(XRF)测定,检出限为5 mg·kg⁻¹.

1.4 数据处理

为更清楚地反映长期有机和无机施肥的3种紫色土重金属累积特征和污染程度,引入了以下3个指标进行分析.

1.4.1 单因子污染指数(P_i)

采用单因子污染指数法^[23]对土壤中单类重金属污染状况进行初步评价,可以得出实际值与参考值的背景值比值,计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中, i 为某一污染物, C_i 为土壤中重金属元素 i 的实际浓度值(mg·kg⁻¹), S_i 为参考土壤中重金属污染物 i 的背景值或标准值(mg·kg⁻¹),本研究选用重庆市土壤重金属元素背景值^[24](表2)作为污染物的评价标准,其中 P_i 为土壤中重金属 i 的环境污染指数, $P_i \leq 1$ 表示无污染, $1 < P_i \leq 2$ 表示轻微污染, $2 < P_i \leq 3$ 表示轻度污染, $3 < P_i \leq 5$ 表示中度污染, $P_i > 5$ 表示高度污染.

表2 农用地土壤污染风险筛选值和背景值/mg·kg⁻¹

Table 2 Risk screening values and regional background values of agricultural soils/mg·kg⁻¹

项目	风险筛选值				背景值
	pH ≤ 5.5	5.5 < pH ≤ 6.5	6.5 < pH ≤ 7.5	pH > 7.5	
Cu	50	50	100	100	24.6
Zn	200	200	250	300	81.9
Cd	0.3	0.3	0.3	0.6	0.28
Ni	60	70	100	190	31.6
Pb	70	90	120	170	28.1
Cr	150	150	200	250	74.4

1.4.2 内梅罗综合污染指数(P_N)

为了综合描述多种重金属的土壤污染特征,在单因子污染指数基础上引入内梅罗综合污染指数法^[20].内梅罗综合污染指数能够全面地评价研究区域每个样点的整体污染程度.样点综合污染指数的计算公式如下:

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{i\max}^2 + P_{i\text{avg}}^2}{2}}$$

$$P_{i\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

式中, $P_{i\text{avg}}$ 为单项污染指数平均值; $P_{i\max}$ 为最大单项污染指数, $P_{i\text{avg}}$ 为污染指数平均值, n 为样品数量.

土壤综合污染指数(P_N)分析标准如下: 清洁($P_N \leq 0.7$, 安全)、尚清洁($0.7 < P_N \leq 1.0$, 警戒限)、轻度污染($1.0 < P_N \leq 2.0$)、中度污染($2.0 < P_N \leq 3.0$)和重度污染($P_N > 3.0$).

1.4.3 潜在生态风险指数(RI)

潜在生态风险指数由瑞典科学家Håkanson建立^[25],基于单因子污染指数和各元素的毒性系数进行评价,能充分反映出各重金属元素的毒性程度^[26],并综合反映沉积物中重金属的影响潜力^[27].该方法不但将重金属的全量考虑在内,还将重金属的生态效应、环境效应和毒理学效应联系起来,是目前生态风险评价中使用较为广泛的方法^[22],具体

计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times (C^i/C_n^i)$$

$$RI = \sum_i^m E_r^i$$

式中, E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险系数; C^i 为土壤中重金属 i 的实测值; C_n^i 为重金属 i 的背景值; T_r^i 为重金属 i 的毒性系数, 根据 Hakanson 制定的标准, 各种重金属响应系数^[28]分别是 Zn=1、Cr=2、Pb=Cu=Ni=5 和 Cd=30; RI 为土壤中重金属的综合潜在生态风险指数. 潜在生态风险指数 E_r^i 分级标准如表 3 所示.

表 3 潜在生态风险指数污染分级标准

Table 3 Potential ecological risk index pollution classification standard

E_r^i	生态风险等级	RI	生态风险等级
$E_r^i < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强
$160 \leq E_r^i < 320$	很强	$600 \leq RI < 1200$	很强
$E_r^i \geq 320$	极强	$RI \geq 1200$	极强

采用 Microsoft Excel 2021 进行数据初步统计, 利用 IBM SPSS Statistics 24.0 进行单因素 (one-way ANOVA) 方差分析 (LSD, $P < 0.05$) 和相关性分析, 利用 Origin 2021 进行柱状图和主成分分析 (PCA) 图像绘制, 采用 R (4.2.2) 中的 “vegan” 和 “plsrm” 程序包进行置换性多元方差分析 (PERMANOVA, 置换次数为 999) 和偏最小二乘路径回归分析 (PLS-PM), 偏最小二乘路径模型图使用 Microsoft PowerPoint 2021 进行绘制, 利用 Canoco 5.0 进行冗余分析 (RDA).

2 结果与分析

2.1 长期施肥对不同 pH 紫色土基本理化性质的影响

经过 13 a 长期不同施肥处理, 不同类型紫色

土土壤 pH 值、SOC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、AP、AK 和土壤机械组成均发生了显著变化 (表 4). 与 CK 处理相比, 各施肥处理下酸性和中性 2 种土壤 pH 值均发生显著变化, NPK 处理使其降低了 27.34% 和 29.08%, NPKM 处理使 pH 显著升高了 21.63% 和 9.49%, M 处理使 pH 显著升高了 29.41% 和 18.04%, 但各施肥处理对于钙质紫色土 pH 影响不显著. 施肥对 3 种类型紫色土土壤 SOC、AP 和 AK 均有不同程度的提高, 相较于 CK 处理, NPK、NPKM 和 M 处理 3 类土壤 SOC、AP 和 AK 增幅为: 64.55% ~ 125.99%、207.81% ~ 287.14% 和 515.37% ~ 605.79%. NPKM 处理中性紫色土的 $\omega(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 最高, 达到 $107.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高出同类土壤其他处理 83.83% ~ 145.09%. NPK 处理的酸性紫色土的 $\omega(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 最高, 达到 $16.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高出同类土壤其他处理 75.97% ~ 388.30%. 不同土壤类型之间土壤机械组成存在显著差异, 砂粒、粉粒和黏粒分别占 49.67% ~ 74.00%、10.00% ~ 25.00% 和 12.33% ~ 28.00%, 施肥改变了土壤机械组成中砂粒和黏粒的占比, 对粉粒占比无显著影响.

土壤基础理化性质 PCA 如图 1 所示, 前 2 个主成分共解释了总体方差变异的 74.0%. 长期不同施肥使土壤基础理化性质发生了明显变化, NPKM 和 M 处理较 NPK 处理距离 CK 更远, 与 CK 差异更显著. 酸性与钙质土样本间距离更远, 差异更显著. PERMANOVA 结果表明, 本研究中土壤基础理化性质在不同施肥方式和不同 pH 紫色土间均存在极显著差异 ($P < 0.001$, 图 1), 土壤类型和施肥方式的 R^2 分别为 0.10 和 0.88, 施肥方式对主成分的代表性高于土壤类型.

表 4 土壤基础理化性质¹⁾

Table 4 Soil basic physicochemical properties

土壤类型	施肥方式	pH	$\omega(\text{SOC})$ / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{NH}_4^+\text{-N})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{NO}_3^-\text{-N})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AP})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AK})$ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{砂粒})$ /%	$\omega(\text{粉粒})$ /%	$\omega(\text{黏粒})$ /%
Ac	CK	5.78±0.32Cc	7.90±1.12Ac	9.49±0.37Ab	12.32±2.12Bc	10.63±0.70Bd	79.53±2.62Cd	70.67±10.97Aa	17.00±10.39Aa	12.33±0.58Cc
	NPK	4.20±0.08Cd	9.57±1.69Abe	16.70±1.40Aa	64.20±9.94ABa	35.56±1.80Ac	176.79±8.00Ac	74.00±1.00Aa	10.00±1.00Ca	16.00±0.00Bb
	NPKM	7.03±0.18Bb	12.84±0.14Cb	3.42±1.11Ac	68.16±8.12Ba	74.28±3.85Ab	238.69±16.49Ab	72.33±0.58Ca	11.67±0.58Ca	16.00±1.00Cb
	M	7.48±0.03Ba	19.79±3.11Aa	3.49±1.29Ac	49.15±2.26Ab	134.06±11.58Aa	481.72±7.71Aa	72.00±1.00Ca	10.67±1.15Ba	17.33±0.58Ca
Ne	CK	6.43±0.22Bc	6.46±1.86Ac	3.17±0.70Ba	58.61±8.30Ab	13.42±0.43Ad	94.37±5.91Bd	62.33±0.58ABb	15.67±1.53Aa	22.00±1.00Ba
	NPK	4.56±0.06Bd	9.04±1.51Ac	2.21±0.67Ca	54.73±5.03Bb	36.49±0.37Ac	140.52±20.93Bc	66.00±2.00Ba	15.33±0.58Ba	18.67±2.52Bb
	NPKM	7.04±0.10Bb	16.08±0.98Ab	2.31±1.26Aa	107.74±10.05Aa	77.48±5.08Ab	240.06±16.93Ab	62.33±1.53Bb	16.00±1.00Ba	21.67±0.58Bab
Ca	CK	7.59±0.14Ba	21.71±1.41Aa	2.21±0.42Aa	43.96±10.80Ab	128.78±13.26Aa	519.44±17.50Aa	62.00±1.00Bb	17.00±1.00Ba	21.00±1.00Bab
	CK	8.03±0.12Aa	8.43±3.50Ab	1.53±0.40Cb	22.29±3.58Bb	9.55±0.96Bc	120.12±0.91Ac	50.33±3.21Ba	22.00±2.00Aa	27.67±1.53Aa
	NPK	7.94±0.19Aa	13.46±5.04Aab	9.77±2.68Ba	85.87±22.32Aa	18.79±1.58Bc	164.85±2.21ABc	50.33±3.06Ca	21.67±1.53Aa	28.00±1.73Aa
	NPKM	8.09±0.13Aa	14.59±0.75Bab	2.46±0.77Ab	90.27±27.19ABa	52.04±7.66Bb	246.76±8.12Ab	49.67±3.51Aa	24.00±2.00Aa	26.33±1.53Aab
M	8.19±0.09Aa	19.45±1.42Aa	1.87±0.34Ab	95.82±46.01Aa	130.83±16.74Aa	523.48±48.44Aa	51.00±6.08Aa	25.00±6.08Aa	24.00±1.00Ab	

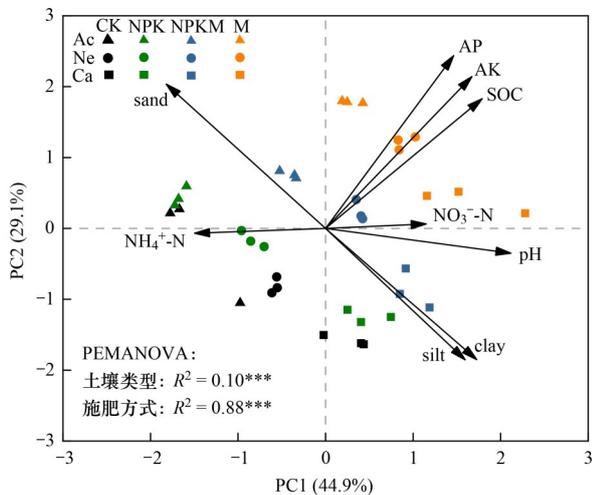
1) 不同大写字母表示同一施肥处理下不同 pH 土壤中理化性质存在显著差异 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同 pH 土壤中不同施肥处理下土壤理化性质存在显著差异 ($P < 0.05$), 下同

2.2 长期施肥对不同pH紫色土重金属全量的影响

长期施肥处理下3种紫色土的 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Cr})$ 分别为：21.10 ~

40.89、88.94 ~ 126.22、0.13 ~ 0.50、5.81 ~ 16.73、49.11 ~ 94.18和13.14 ~ 34.91 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图2). 3种紫色土表层土壤中Cu、Zn、Ni、Pb和Cr这5种重金属含量均未超出《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(表2). 但在酸性和中性紫色土中, 施肥处理后Cd含量均超出农用地土壤污染风险筛选值, NPK处理下分别超标45.70%和31.64%, NPKM处理下分别超标61.14%和67.97%, M处理下分别超标50.36%和47.84%.

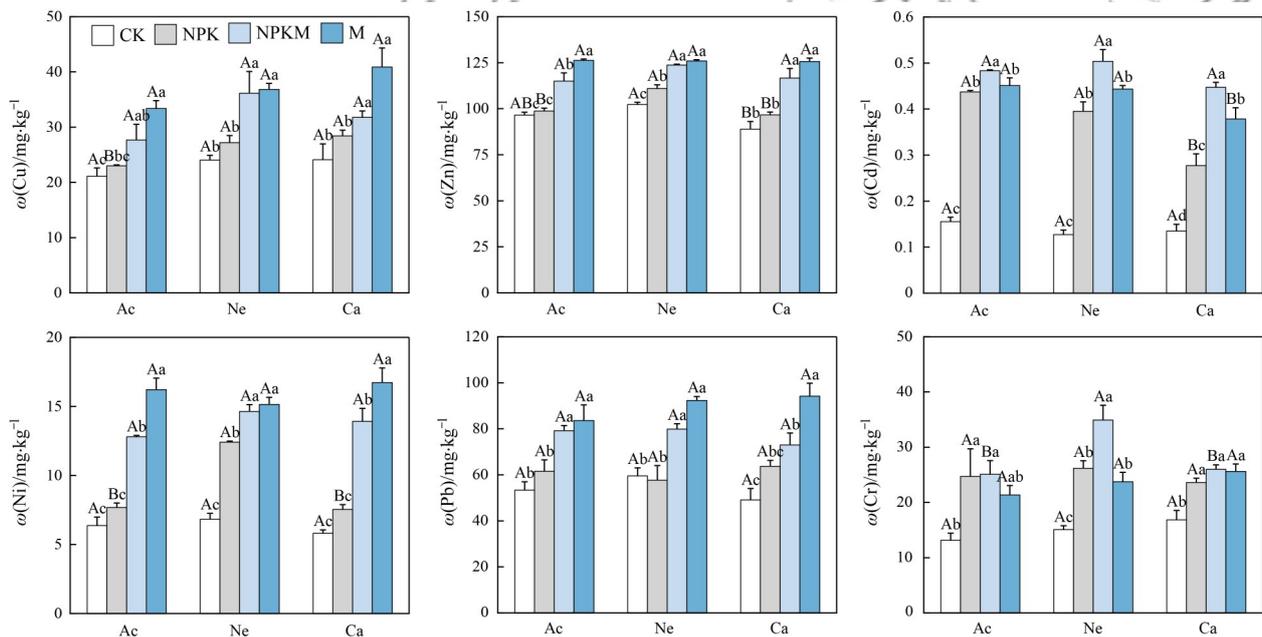
长期不同施肥处理对土壤6种重金属全量的影响如图2所示, 在相同土壤类型中, 与CK相比, 施肥显著提高了Cu、Zn、Cd、Ni、Pb和Cr的重金属含量($P < 0.05$). 其中, NPKM和M处理的6种重金属含量的平均增幅(93.63%和96.39%)显著高于NPK处理(51.79%). 在相同施肥处理中, 不同pH紫色土重金属含量有所不同, 其中Cu、Zn、Ni和Cr这4种重金属在中性紫色土中表现出更为富集的趋势; 土壤重金属Cd含量表现出在酸性和中性紫色土中更高的趋势.



***表示在0.001水平上极显著相关

图1 不同施肥处理下3种土壤理化性质的主成分分析

Fig. 1 Principal component analysis (PCA) of basic physicochemical properties in three soil types under different fertilization treatments



不同大写字母表示同一施肥处理下不同pH土壤中重金属含量存在显著差异($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同pH土壤中不同施肥处理下土壤重金属含量存在显著差异($P < 0.05$)

图2 不同施肥处理3种土壤的重金属含量

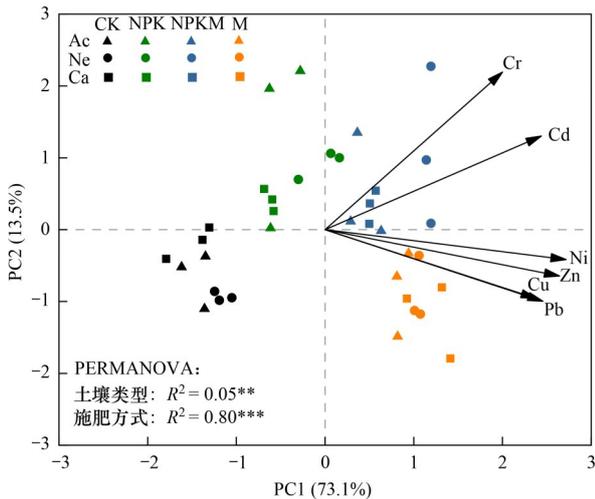
Fig. 2 Total amount of heavy metals in three soil types under different fertilization treatments

6种重金属含量PCA如图3所示, 前2个主成分共解释了总体方差变异的86.6%. 长期不同施肥使土壤重金属含量发生了明显变化, NPKM和M处理较NPK处理距离CK更远, 与CK差异更显著. 但不同土壤类型之间位置无直观分布规律. PERMANOVA结果表明, 本研究中土壤重金属含量在不同施肥方式和土壤类型间均存在极显著差

异($P < 0.01$, 图3), 土壤类型和施肥方式的 R^2 分别为0.05和0.80, 施肥方式对主成分的代表性高于土壤类型.

2.3 长期施肥下不同类型紫色土土壤重金属污染特征和潜在生态风险评价

3种紫色土重金属含量单因子污染指数如表5所示, 6种重金属的单因子污染指数中Pb元素最大,



表示在 0.01 水平上极显著相关,*表示在 0.001 水平上极显著相关

图 3 不同施肥处理下 3 种土壤重金属全量的主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis(PCA) of total amount of heavy metals in the three soil types under different fertilization treatments

均大于 1.0, 污染等级最高达到中度污染; Ni 元素最小, 均小于 1.0, 污染等级安全; Cu、Zn、Cd 和 Ni 这 4 种重金属污染等级基本分布在安全和警戒限内. CK 和 NPK 处理下内梅罗综合污染指数均在 1.0 ~ 2.0 之间, 污染等级达轻度污染; NPKM 和 M 处理下内梅罗综合污染指数均在 2.0 ~ 3.0 之间, 污染等级达中度污染.

在相同土壤类型中, 与 CK 相比, NPK、NPKM 和 M 各施肥处理均提高了 Cu、Zn、Cd、Ni、Pb 和 Cr 各重金属元素单因子污染指数和内梅罗综合污染指数, 其中综合污染指数分别提高了 3.05% ~ 18.92%、40.24% ~ 51.45% 和 58.78% ~ 89.86%. NPKM 和 M 处理的各重金属元素单因子污染指数和内梅罗综合污染指数均普遍高于 NPK 处理. 在相同施肥处理下, 不同 pH 紫色土之间各重金属元素单因子污染指数和内梅罗综合污染指数及其对应的综合污染等级无显著差异.

表 5 土壤重金属单因子污染及综合污染指数

Table 5 Soil heavy metal single factor pollution and comprehensive pollution indexes

土壤类型	施肥处理	单因子污染指数 (P_i)						P_N
		Cu	Zn	Cd	Ni	Pb	Cr	
Ac	CK	0.86	1.18	0.56	0.20	1.90	0.54	1.48
	NPK	0.94	1.21	1.56	0.24	2.19	1.01	1.76
	NPKM	1.12	1.40	1.73	0.40	2.82	1.03	2.23
	M	1.36	1.54	1.61	0.51	2.98	0.88	2.35
Ne	CK	0.98	1.25	0.45	0.22	2.12	0.62	1.64
	NPK	1.11	1.35	1.41	0.39	2.05	1.07	1.69
	NPKM	1.47	1.51	1.80	0.46	2.84	1.43	2.30
	M	1.50	1.54	1.58	0.48	3.28	0.97	2.57
Ca	CK	0.98	1.09	0.48	0.18	1.75	0.69	1.38
	NPK	1.15	1.18	0.99	0.24	2.27	0.97	1.79
	NPKM	1.29	1.42	1.60	0.44	2.60	1.07	2.09
	M	1.66	1.53	1.35	0.53	3.35	1.05	2.62

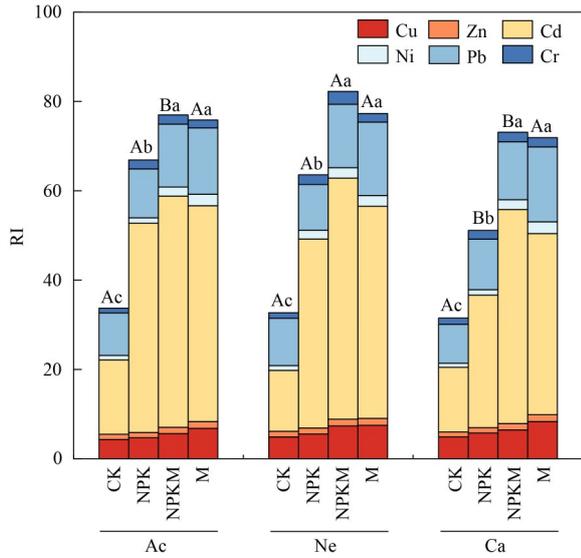
3 种紫色土综合潜在生态风险指数如图 4 所示, 综合潜在生态风险指标 RI 值均小于 150, 风险等级均为轻微生态危害. 重金属 Cd 的潜在生态风险最大且在综合潜在生态风险指数中占比最高, 其潜在污染指数范围为 14.47 ~ 53.99, 占综合指数的 41.65% ~ 70.01%, 风险等级达低等和中等生态危害. 其次是 Pb 元素潜在生态风险值占比较高, 其潜在污染指数范围为 8.74 ~ 16.76, 但均小于 40, 占综合指标的 16.04% ~ 32.41%, 风险等级均为低生态危害. Cu、Zn、Ni 和 Cr 这 4 种重金属潜在风险值均较低, 风险等级均为低生态危害.

在相同土壤类型中, 相比于 CK 处理, NPK、NPKM 和 M 各施肥处理均显著提高了潜在生态风险,

该指数分别增加了 62.31% ~ 98.49%、118.36% ~ 151.58% 和 115.01% ~ 136.49%. 不同施肥处理间以 NPKM>M>NPK>CK 的趋势依次递减. 在相同施肥处理下, 钙质紫色土中各处理综合潜在生态风险低于酸性和中性紫色土中的各处理.

2.4 土壤重金属综合污染特征及潜在生态风险的冗余分析和 PLS-PM 分析

对所有土壤理化因子与综合评价指标之间进行冗余分析, 土壤重金属综合污染特征 (P_N) 以及潜在生态风险 (RI) 与土壤理化因子之间存在较强的约束关系 (图 5), 其方差变异的 80.95% 可以由环境因子解释, 其中 AP、 Δ pH (长期施肥 13 a 各施肥处理相较于 CK 处理的 pH 变化量) 和 NO_3^- -N 分别解释了方



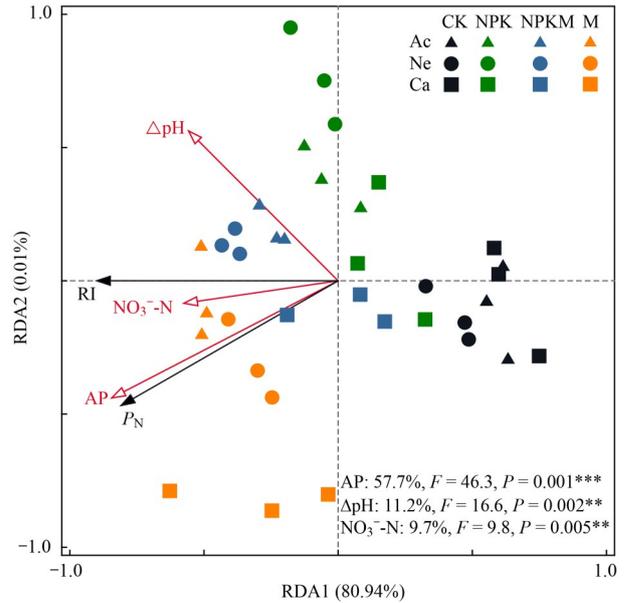
不同大写字母表示同一施肥处理下不同 pH 土壤 RI 值存在显著差异 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同 pH 土壤中不同施肥处理下土壤 RI 值存在显著差异 ($P < 0.05$)

图 4 土壤重金属潜在生态风险指数

Fig. 4 Potential ecological risk index of soil heavy metals

差变异的 57.7%、11.2% 和 9.7%，达到显著水平，是解释度最高的 3 种理化因子。冗余分析结果表明，土壤重金属综合污染特征及潜在生态风险与土壤理化因子 AP、 ΔpH 和 $NO_3^- - N$ 之间相较于其他理化因子有更为强烈的关联。

利用偏最小二乘路径模型 (PLS-PM) 解析长期施肥对于上述 3 种土壤关键理化因子 (AP、 ΔpH 和 $NO_3^- - N$) 与土壤重金属全量 (THM) 及土壤重金属污染程度之间的关系，模型的整体拟合度为 0.59 [图 6 (a)]，长期施肥对 AP 和 ΔpH 影响的路径系数分别为 0.33 和 0.50，达到显著水平，而对 $NO_3^- - N$ 的影响

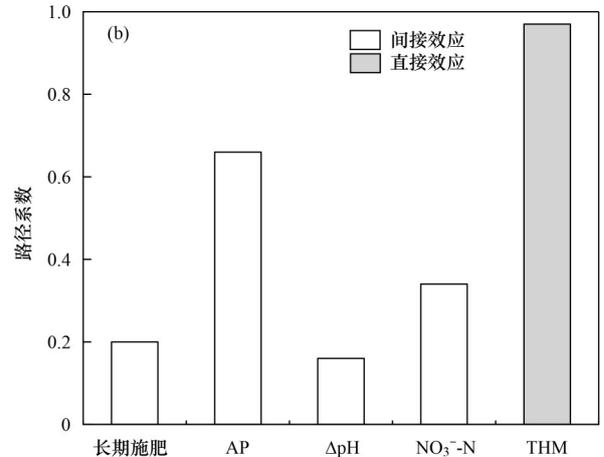
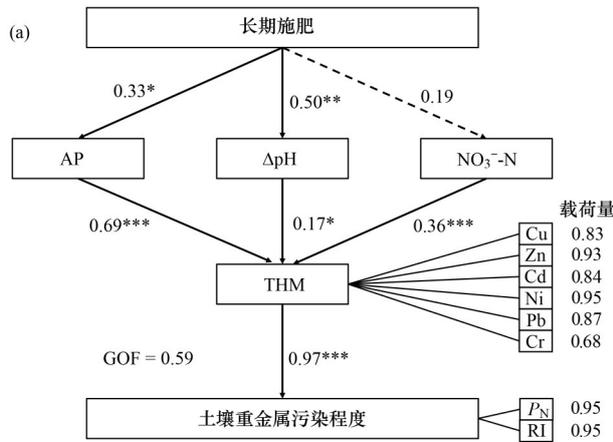


** 表示在 0.01 水平上极显著相关, *** 表示在 0.001 水平上极显著相关, 仅展示显著理化因子

图 5 土壤重金属综合污染特征及潜在生态风险与土壤基本理化性质的冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis of comprehensive pollution characteristics (P_N) and potential ecological risk index (RI) of heavy metals in soil and basic physicochemical properties of soil

不显著；AP、 ΔpH 和 $NO_3^- - N$ 对重金属全量影响的路径系数为 0.69、0.17 和 0.36，达到显著水平；THM 对土壤重金属污染程度影响的路径系数为 0.97，达到显著水平。其中 THM 包括 6 个潜在变量 (Cu、Zn、Cd、Ni、Pb 和 Cr)，各潜变量对应的载荷量为 0.83、0.93、0.84、0.95、0.87 和 0.68；土壤重金属污染程度包括 2 个潜在变量 (P_N 和 RI)，各潜变量对应的载荷量为 0.95 和 0.95。长期施肥对土壤重金属综合污染



(a) 长期施肥对土壤重金属污染程度的偏最小二乘路径模型：THM 表示重金属全量 (包括 Cu、Zn、Cd、Ni、Pb 和 Cr 这 6 种重金属全量)，土壤重金属污染程度包括土壤重金属综合污染特征 P_N 和潜在生态风险系数 RI 这 2 个指标，黑色实线表示路径系数显著，黑色虚线表示路径系数不显著，实线和虚线旁边的数值为路径系数；* 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著，** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著，*** 表示在 $P < 0.001$ 水平上显著；重金属右侧数字对应各载荷量具体数值，GOF 为模型整体拟合度；(b) 各参数对土壤重金属污染程度的直接和间接效应

图 6 长期施肥对土壤重金属污染程度的偏最小二乘路径模型 (PLS-PM) 分析

Fig. 6 Partial least squares path model (PLS-PM) analysis of long-term fertilization on soil heavy metal pollution

程度及潜在生态风险影响的间接效应系数为 0.20 [图 6(b)]. 长期施肥可通过提高土壤 AP 含量和加剧 pH 变化影响土壤重金属含量, 从而间接导致土壤重金属综合污染特征和潜在生态风险增加.

3 讨论

3.1 长期施肥处理不同类型紫色土中重金属累积特征

施肥是影响土壤中重金属累积的重要因素. 本研究中, 长期施肥显著增加了紫色土中 Cu、Zn、Cd、Ni、Pb 和 Cr 这 6 种重金属含量(图 2), 相比于单施化肥, NPKM 和 M 处理下的重金属含量更高. 类似地, 前人长期定位肥效试验研究结果也表明, 有机肥对重金属含量的增幅高于化肥^[29-31], 这可能与规模化养殖场有机粪肥重金属含量较高有关^[32,33]. 集约化管理的畜牧生产系统为控制牲畜疾病和提高产量, 常常使用饲料添加剂, 导致了重金属的输入, 有机肥来源与种类的不同均会造成重金属累积特征出现差异.

不同 pH 紫色土在经过长达 13 a 的施肥处理后, 土壤重金属累积特征也出现显著差异(图 3), 重金属(Cu、Zn、Ni 和 Cr)元素表现出了在中性紫色土中更为富集的趋势(图 2). 类似地, 岳建华^[34]研究结果显示随着土壤 pH 升高, Cu、Zn 和 Ni 等重金属含量显著增加, 在土壤 pH 为 6.5~7.5 时, 它们的全量平均值最高. 在特定的 pH 范围中土壤重金属会处于惰性结合状态, 它们对土壤污染的影响也较小^[35]. 因此, 在农用地土壤污染风险管控标准中, 不同 pH 条件下的重金属阈值管控标准(表 2)也存在一定的差异, 且重金属有效态大多存在于酸性和中性土壤中^[36], 这也是本研究中长期施肥后 Cd 含量超出风险阈值的现象只出现在酸性和中性紫色土中的原因. 王腾飞等^[35]研究同样发现长期施肥会导致土壤中 Cd 含量超标, 这与肥料长期施入有关, 肥料和农药的施用是土壤中重金属 Cd 的主要来源^[37], 这使得 Cd 成为农业来源的标志金属, 同时也是南方蔬菜地土壤中重金属污染最严重的元素^[38].

3.2 长期施肥通过提高土壤 AP 和加剧 pH 变化影响重金属累积导致潜在生态风险增加

长期施肥显著提高了紫色土 P_N 和 RI 值(表 5 和图 4), 一方面与施肥带来了重金属的输入有关, 另一方面施肥也使得土壤性质发生了改变^[39]. 本研究表明, 长期施肥后 3 种紫色土土壤基本理化性质发生了显著变化(表 4 和图 1), 通过冗余分析和 PLS-PM 分析发现, 长期施肥主要通过 AP 和 ΔpH 影响重金属含量, 最终导致土壤重金属污染程度有差

异(图 6). 张民等^[40]研究表明, Cu、Zn 和 Pb 等重金属元素含量与 AP 呈现出极显著的正相关关系, 这些重金属元素可以与土壤中的磷生成磷酸盐, 随着肥料的施用, AP 的含量增加而造成土壤重金属累积. Liu 等^[41]研究也表明, 土壤中的磷和金属离子之间存在显著的正相关关系, 土壤中的磷容易被金属矿物固定, 施用有机肥会导致磷在水稻土中的累积, 增加潜在污染风险.

除此之外, 土壤 pH 的变化则是影响土壤重金属污染程度和潜在生态风险的关键因子之一. 酸性和中性紫色土中重金属生态风险表现出了更高的趋势(图 4). 从不同处理间看, 相比于 CK 处理, 长期施肥后酸性和中性紫色土 pH 值均发生了较为显著的变化(表 4), 而钙质紫色土经过 13 a 长期施肥后 pH 值仍然相对稳定在碱性环境中, 这也使其重金属综合污染程度相对更低. 土壤 pH 值作为土壤化学性质的综合反映, 对土壤重金属的存在形态和转化迁移都有很大的影响, 这是因为在 pH 较高的土壤环境中, 土壤中的氧化物、粘粒矿物和负电荷增强, 会使得土壤中重金属离子的吸附能力增强, 有利于重金属的沉淀^[42,43], 且当 pH 过高时, 重金属沉淀物与羟基络合而溶出, 从而导致土壤中重金属含量降低^[44].

3.3 紫色土农田重金属污染治理建议

紫色土农田管理需重点监测管控 Cd 和 Pb 这 2 种重金属的污染. 本研究表明, Pb 元素单因子污染指数最高(表 5), Pb 对人体造血系统和中枢神经系统等都有重要的影响^[45]. Cd 元素单因子潜在生态风险指数在综合潜在生态风险指数中占比远高于其他元素(图 4), 这是由于 Cd 元素的毒性响应系数远高于其余重金属, 农作物对农田土壤中 Cd 元素的富集程度较高, Cd 会通过食物链进入人体, 并在肝脏、肾脏和骨骼等部位大量累积, 造成严重的神经痛^[46], 人体健康风险阈值较低.

酸性和中性紫色土农田管理时, 需更加注意调酸培肥与管控重金属输入. 整体而言, 不同类型紫色土均需对施肥农田土壤进行定期监测, 并做出必要的管控措施. 其中, 酸性和中性紫色土农田重金属的全量和潜在生态风险等级都较高. 在后续土地利用中, 对于已经达到中度污染的农田土壤, 需考虑采取源头管控和技术修复^[47], 对污染程度较高的 Pb 和 Cd 等元素重点修复治理, 以保证紫色土区土壤环境的安全利用和健康绿色发展.

4 结论

(1) 长期施肥改变了土壤理化性质, 其中有机

肥对土壤SOC、AP和AK的含量提高幅度较大；各施肥处理对钙质紫色土pH影响不显著。长期施肥下不同类型紫色土中Cu、Zn、Cd、Ni、Pb和Cd这6种重金属全量均有提高，NPKM和M处理下平均增幅高于NPK处理；在酸性紫色土和中性紫色土中，长期施入有机肥后会使土壤中Cd全量超出农用地土壤污染风险筛选值；重金属有在中性紫色土中富集的趋势。

(2)长期施用有机肥后土壤综合污染程度高于只施化肥，最高达中等危害等级。酸性和中性紫色土中各处理潜在生态风险高于钙质紫色土，重金属Cd和Pb污染程度和生态风险高于Cu、Zn、Ni、Cr。

(3)土壤AP、 ΔpH 和 NO_3^--N 分别解释了重金属污染特征和潜在生态风险的57.7%、11.2%和9.7%，达显著水平；PLS-PM分析发现，长期施肥通过改变土壤化学性质影响重金属积累，其中AP和 ΔpH 可能对不同类型紫色土土壤重金属污染特征和潜在生态风险起关键调控作用，而 ΔpH 可能是影响3种紫色土重金属累积出现差异的关键因素。

参考文献：

- [1] Ji W B, Yang Z F, Yu T, *et al.* Potential ecological risk assessment of heavy metals in the Fe-Mn nodules in the karst area of Guangxi, Southwest China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, **106**(1): 51-56.
- [2] Qaswar M, Liu Y R, Huang J, *et al.* Soil nutrients and heavy metal availability under long-term combined application of swine manure and synthetic fertilizers in acidic paddy soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, **20**(4): 2093-2106.
- [3] Hussain B, Li J M, Ma Y B, *et al.* A field evidence of Cd, Zn and Cu accumulation in soil and rice grains after long-term (27 years) application of swine and green manures in a paddy soil[J]. *Sustainability*, 2021, **13**(4), doi: 10.3390/su13042404.
- [4] Mirzaei M, Marofi S, Solgi E, *et al.* Ecological and health risks of soil and grape heavy metals in long-term fertilized vineyards (Chaharmahal and Bakhtiari province of Iran)[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, **42**(1): 27-43.
- [5] 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. https://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm, 2014-04-17.
- [6] Al Osman M, Yang F, Massey I Y. Exposure routes and health effects of heavy metals on children[J]. *Biometals*, 2019, **32**(4): 563-573.
- [7] Sall M L, Diaw A K D, Gningue-Sall D, *et al.* Toxic heavy metals: impact on the environment and human health, and treatment with conducting organic polymers, a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(24): 29927-29942.
- [8] Wang M, Li S T, Ma Y B. Effect of long-term fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(1): 63-74.
- [9] Wang Q Y, Zhang J B, Zhao B Z, *et al.* The influence of long-term fertilization on cadmium (Cd) accumulation in soil and its uptake by crops[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(17): 10377-10385.
- [10] Wang X B, Liu W X, Li Z G, *et al.* Effects of long-term fertilizer applications on peanut yield and quality and plant and soil heavy metal accumulation[J]. *Pedosphere*, 2020, **30**(4): 555-562.
- [11] Duan G L, Zhang H M, Liu Y X, *et al.* Long-term fertilization with pig-biogas residues results in heavy metal accumulation in paddy field and rice grains in Jiaying of China[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, **58**(5): 637-646.
- [12] Gao P, Huang J, Wang Y, *et al.* Effects of nearly four decades of long-term fertilization on the availability, fraction and environmental risk of cadmium and arsenic in red soils[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **295**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113097.
- [13] Jiang L, Sun H J, Peng T J, *et al.* Comprehensive evaluation of environmental availability, pollution level and leaching heavy metals behavior in non-ferrous metal tailings[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **290**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112639.
- [14] Zhou W X, Han G L, Liu M, *et al.* Vertical distribution and controlling factors exploration of Sc, V, Co, Ni, Mo and Ba in six soil profiles of the Mun River basin, Northeast Thailand[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(5), doi: 10.3390/ijerph17051745.
- [15] Zhu X Y, Zhu B. Diversity and abundance of soil fauna as influenced by long-term fertilization in cropland of purple soil, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, **146**: 39-46.
- [16] Zhou Z F, Shi X J, Zheng Y, *et al.* Abundance and community structure of ammonia-oxidizing bacteria and archaea in purple soil under long-term fertilization[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, **60**: 24-33.
- [17] 凌云, 刘汉焱, 张小婷, 等. 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[J]. *环境科学*, 2023, **44**(1): 376-386.
- [17] Ling Y, Liu H Y, Zhang X T, *et al.* Characteristics of typical soil acidification and effects of heavy metal speciation and availability in Southwest China[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 376-386.
- [18] Xie J, Shi X J, Zhang Y, *et al.* Improved nitrogen use efficiency, carbon sequestration and reduced environmental contamination under a gradient of manure application[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, **220**, doi: 10.1016/j.still.2022.105386.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 石雨佳, 方林发, 方标, 等. 三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1611-1619.
- [20] Shi Y J, Fang L F, Fang B, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of heavy metals in vegetable field in the three gorges reservoir area (Chongqing section)[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1611-1619.
- [21] 马作豪, 唐昊冶, 李文红, 等. 吸管法和比重计法测定土壤机械组成的比对研究[J]. *中国无机分析化学*, 2023, **13**(6): 645-651.
- [21] Ma Z H, Tang H Y, Li W H, *et al.* Comparative study on the determination method of soil mechanical composition between pipette method and hydrometer method[J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2023, **13**(6): 645-651.
- [22] 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.
- [22] 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.
- [23] 杜贯新, 闫百泉, 孙雨, 等. 松嫩平原黑土区西北部阿荣旗黑土重金属分布特征、评价及预警[J]. *地质科学*, 2022, **57**(2): 606-621.
- [23] Du G X, Yan B Q, Sun Y, *et al.* Distribution characteristics,

- evaluation and early warning of heavy metals in Arongqi black soil in northwest of Songnen black soil region [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2022, **57**(2): 606-621.
- [24] 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 等. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评估[J]. *中国地质*, 2020, **47**(6): 1625-1636.
Bao L R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil of northwest Xiushan, Chongqing [J]. *Geology in China*, 2020, **47**(6): 1625-1636.
- [25] 王玉, 辛存林, 于爽, 等. 南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评估[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4756-4766.
Wang Y, Xin C L, Yu S, *et al.* Evaluation of heavy metal content, sources, and potential ecological risks in soils of Southern hilly areas [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4756-4766.
- [26] 张娜, 崔娇梅, 孙晶, 等. 土壤重金属污染评价方法对比研究[J]. *绿色科技*, 2022, **24**(8): 151-155.
Zhang N, Cui J M, Sun J, *et al.* Comparative study on evaluation methods of soil heavy metal pollution [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2022, **24**(8): 151-155.
- [27] 王伟全, 王雪, 高珊, 等. 基于田块尺度土壤重金属空间分布及其生态风险评估[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, **39**(3): 475-484.
Wang W Q, Wang X, Gao S, *et al.* Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in soil at the field scale [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, **39**(3): 475-484.
- [28] 赵东杰, 王学求. 滇黔桂岩溶区河漫滩土壤重金属含量、来源及潜在生态风险[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(4): 1609-1619.
Zhao D J, Wang X Q. Distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in the floodplain soils of the karst area of Yunnan, Guizhou, Guangxi [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(4): 1609-1619.
- [29] Grütter R, Costerousse B, Mayer J, *et al.* Long-term organic matter application reduces cadmium but not zinc concentrations in wheat [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **669**: 608-620.
- [30] 刘灿, 秦鱼生, 赵秀兰. 长期不同施肥对钙质紫色水稻土重金属累积及有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(7): 1494-1502.
Liu C, Qin Y S, Zhao X L. Long-term effect of fertilization on accumulation and availability of heavy metal in a calcareous paddy soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(7): 1494-1502.
- [31] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖, 等. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(1): 123-126.
Lu Y, Gong Z T, Zhang G L, *et al.* Heavy metal concentration in Nanjing urban soils and their affecting factors [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(1): 123-126.
- [32] 王开峰, 彭娜. 长期有机无机肥配施对红壤稻田土壤重金属的影响[J]. *江苏农业科学*, 2009, (2): 258-261.
Wang K F, Peng N. Effects of long-term integrated fertilization with organic manure and chemical fertilizers on heavy metal in paddy soil [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2009, (2): 258-261.
- [33] Wang Y Z, Xu C L, An Z H, *et al.* Effect of dietary bovine lactoferrin on performance and antioxidant status of piglets [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2008, **140**(3-4): 326-336.
- [34] 岳建华. 长株潭城市群土壤 pH 与重金属污染的研究[J]. *中国农学通报*, 2012, **28**(2): 267-272.
Yue J H. The correlation of heavy metal with pH in soils from Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban agglomeration [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, **28**(2): 267-272.
- [35] 王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 等. 长期施肥对土壤重金属累积和有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(2): 257-263.
Wang T F, Tan C Y, Cao X Y, *et al.* Effects of long-term fertilization on the accumulation and availability of heavy metals in soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(2): 257-263.
- [36] 杨希, 岳晓岚, 李靖, 等. pH 值对土壤重金属污染的影响及其准确测定[J]. *贵州地质*, 2021, **38**(4): 466-471.
Yang X, Yue X L, Li J, *et al.* The influence of pH on soil heavy-metal contamination and its accurate determination [J]. *Guizhou Geology*, 2021, **38**(4): 466-471.
- [37] Lian Z M, Zhao X M, Gu X, *et al.* Presence, sources, and risk assessment of heavy metals in the upland soils of northern China using Monte Carlo simulation [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, **230**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.113154.
- [38] 冯英, 马璐瑶, 王琼, 等. 我国土壤-蔬菜作物系统重金属污染及其安全生产综合农艺调控技术[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(11): 2359-2370.
Feng Y, Ma L Y, Wang Q, *et al.* Heavy-metal pollution and safety production technologies of soil-vegetable crop systems in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(11): 2359-2370.
- [39] 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 等. 长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2469-2479.
Xia W J, Zhang L F, Liu Z B, *et al.* Effects of long-term application of chemical fertilizers and organic fertilizers on heavy metals and their availability in reddish paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2469-2479.
- [40] 张民, 龚子同. 我国菜园土壤中某些重金属元素的含量与分布[J]. *土壤学报*, 1996, **33**(1): 85-93.
Zhang M, Gong Z T. Contents and distribution of some heavy metal elements in the vegetable cultivated soils in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, **33**(1): 85-93.
- [41] Liu X P, Bi Q F, Qiu L L, *et al.* Increased risk of phosphorus and metal leaching from paddy soils after excessive manure application: insights from a mesocosm study [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **666**: 778-785.
- [42] Otero X L, Macías F. Spatial and seasonal variation in heavy metals in interstitial water of salt marsh soils [J]. *Environmental Pollution*, 2002, **120**(2): 183-190.
- [43] Friesl W, Friedl J, Platzer K, *et al.* Remediation of contaminated agricultural soils near a former Pb/Zn smelter in Austria: batch, pot and field experiments [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(1): 40-50.
- [44] Pedron F, Petruzzelli G, Barbaferri M, *et al.* Strategies to use phytoextraction in very acidic soil contaminated by heavy metals [J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(6): 808-814.
- [45] 王思远, 杨树俊, 张贺, 等. 土壤中铅污染来源及其危害综述[J]. *农业与技术*, 2022, **42**(9): 78-81.
- [46] 马婵华. 不同钝化剂对轻度镉污染农田水稻吸附的钝化修复作用[J]. *安徽农业科学*, 2021, **49**(2): 46-47.
Ma C H. Passivation and remediation effects of different passivation agents on the adsorption of lightly cadmium-contaminated farmland rice [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, **49**(2): 46-47.
- [47] 陈浩, 吉力力·阿不都外力, 刘文, 等. 博尔塔拉河沿岸土壤重金属含量特征与有机质、pH 值的关系[J]. *水土保持研究*, 2016, **23**(5): 210-213.
Chen H, Jilili A B D W L, Liu W, *et al.* Correlation between heavy metals organic matter, pH value in the soils along the Bortala river [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, **23**(5): 210-213.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohu River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chang, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)