

孤饱和了

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法 杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- ■出版斜学出版社





2021年5月

第42卷 第5期 Vol.42 No.5

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第42卷 第5期 2021年5月15日

目 次

北京冬季 PM _{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析徐楠,王甜甜,李晓,唐荣志,郭松,胡敏 (2101)
北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束前后两次污染过程特征分析 尹晓梅,蒲维维,王继康,刘湘雪,乔林 (2110)
北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析 廉涵阳,杨欣,张普,陈义珍,杨小阳,赵妤希,何友江,赵丹婷(2121)
青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比 孙悦,朱玉姣,孟赫,刘兵,刘玉虹,董灿,姚小红,王文兴,薛丽坤(2133)
太原市城乡居民区采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价 黄浩,徐子琪,严俊霞,赵秀阁,王丹璐 (2143)
西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价 范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)
超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征 胡月琪,王铮,郭建辉,冯亚君,丁萌萌,颜旭(2159)
合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析 姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)
郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响 董喆,袁明浩,苏方成,张剑飞,孙佳傧,张瑞芹(2179)
2016~2019年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析 线悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)
天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征 ····································
基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法 杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)
太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化 李娜,李勇,冯家成,单雅洁,钱佳宁(2223)
松花湖水质空间差异及富营养化空间自相关分析 丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)
会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价 朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)
京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素 程中华,邓义祥,卓小可,代丹,于涛(2251)
次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响 罗义峰,陈方鑫,周豪,龙翼,严冬春,谭文浩,李丹丹,陈晓燕(2260)
碳氮氧同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋 任坤,潘晓东,梁嘉鹏,彭聪,曾洁(2268)
冰封状态下达里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异 李文宝,杨旭,田雅楠,杜蕾(2276)
城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析;以京津冀北运河为例 邱莹, 靳燕, 苏振华, 邸琰茗, 赵栋梁, 郭逍宇 (2287)
太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素 赵锋,许海,詹旭,朱广伟,郭宇龙,康丽娟,朱梦圆(2296)
三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系 陈莎,谢青,付梅,江韬,王永敏,王定勇(2303)
铁硫改性生物炭去除水中的磷桑倩倩,王芳君,赵元添,周强,蔡雨麒,邓颖,田文清,陈永志,马娟(2313)
钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析
BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附 ························· 王新欣,孟昭福,刘欣,王腾,胡啸龙,孙秀贤 (2334)
Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能 ······ 高闽闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)
可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A
铁钛共掺杂氧化铝诱发表面双反应中心催化臭氧化去除水中污染物 张帆,宋阳,胡春,吕来(2360)
硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制
电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制
缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制 李冬,杨敬畏,李悦,李帅,张诗睿,王文强,张杰(2385)
反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响 吕永涛、姜晓童、徒彦、王旭东、潘永宝、刘爽、崔双科、王磊(2396)
基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺 薛冰,刘宾寒,韦婷婷,王先恺,陈思思,董滨(2402)
活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响 马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)
6种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制
中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素 李成,王让会,李兆哲,徐扬(2432)
不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征
青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析:以祁连山和藏东南地区为例 何芳,张丽梅,申聪聪,陈金全,刘四义(2449)
基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价 胡梦珺,李春艳,李娜娜,吉天琪,郑登友(2457)
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
川南山区土壤与农作物重金属特征及成因 韩伟,王成文,彭敏,王乔林,杨帆,徐仁廷(2480)
宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价 杨帆,罗红雪,钟艳霞,王幼奇,自一茹(2490)
重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性 庞发虎,吴雪姣,孔雪菲,曾宠,王晓宇,陈兆进,姚伦广,韩辉(2502)
典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响 张雨婷,田应兵,黄道友,张泉,许超,朱捍华,朱奇宏 (2512)
油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响 蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)
土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响
渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落 程森,路平,冯启言(2541)
3种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响 李曦,廖汉鹏,崔鹏,白玉丹,刘晨,文畅,周顺桂(2550)
污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨
《环境科学》征订启事(2439) 《环境科学》征稿简则(2479) 信息(2152, 2231, 2286)
was a construction of the second of the seco



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

夏文建,张丽芳,刘增兵,张文学,蓝贤瑾,刘秀梅,刘佳,刘光荣*,李祖章,王萍 (江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所,国家红壤改良工程技术研究中心,国家农业环境宜春观测实验站, 南昌 330200)

摘要:为研究长期施肥下红壤稻田土壤重金属累积及有效态分布特征,探讨其主要影响因子,选择持续了35年的长期定位试验的不施肥(CK)、磷钾化肥(PK)、氮磷钾化肥(NPK)和不同比例有机肥化肥配施(M1NPK、M2NPK和M3NPK)等6个处理,分析了土壤化学指标、重金属全量(THM)和有效态的分布特征,以及重金属有效态含量与化学指标和全量之间的关系.结果表明,长期施肥改变了土壤化学性质,与CK处理相比,PK处理显著提高了土壤速效磷(AP)和速效钾(AK)含量,NPK处理显著提高了土壤有机质(SOM)、阳离子交换量(CEC)、AP和AK含量,有机肥处理(M1NPK、M2NPK和M3NPK)则大幅提高了SOM、CEC、AP、AK和硝态氮(NO3-N)含量;化肥处理(PK和NPK)土壤重金属全量总体上变化不大,有机肥处理土壤Cu、Zn和Cd的全量显著提高;化肥处理显著提高了土壤有效态Cr和As含量,有机肥处理显著提高了土壤有效态Cu、Zn、Cr、Cd、As和Fe的含量;土壤有效态Cu、Zn、Cr、Cd、As和Fe的含量;土壤有效态Cu、Zn、Cr、Cd、As、Fe与SOM、CEC、AP、NO3-N含量之间呈显著正相关,另外有效态Zn和Cd还与土壤pH呈显著正相关,而有效态Pb与土壤pH、SOM、CEC和NO3-N含量之间呈显著负相关;土壤Cu、Zn和Cd有效态含量与全量之间显著正相关,而Cr、Fe有效态含量与全量之间显著负相关;冗余分析发现,SOM和pH分别解释了重金属全量方差变异的80.7%和5.5%,土壤CEC、AP和pH分别解释了重金属有效态方差变异的81.1%、4.9%和3.3%,达到显著水平;进一步通过偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析,发现THM、CEC和AP对土壤重金属有效态影响的路径系数分别为0.459、0.417和0.293,达到显著水平、长期施用猪粪等有机肥显著改善了土壤化学性质,并影响了土壤重金属有效性,其中土壤CEC和AP可能起到了关键的调控作用。

关键词:长期施肥;红壤稻田;重金属;有效性; PLS-PM 分析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2469-11 DOI: 10.13227/j. hjkx. 202008094

Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil

XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, ZHANG Wen-xue, LAN Xian-jin, LIU Xiu-mei, LIU Jia, LIU Guang-rong*, LI Zu-zhang, WANG Ping

(Institute of Soil Fertilizer and Resource Environment, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Yichun Scientific Observing and Experimental Station of Agro-environment, Nanchang 330200, China)

Abstract: To investigate the effects of long-term fertilization on the accumulation and availability of heavy metals in reddish paddy soil and to analyze the major influencing factors, soil samples were collected after the later rice was harvested in 2018 from a long-term fertilization field experiment that began in 1984. Six treatments were selected, namely CK (control without fertilization), PK (P and K fertilizer), and NPK (N, P, and K fertilizer), and different proportions of organic fertilizer plus chemical fertilizer (M1NPK: 30% M + 70% NPK; M2NPK: 50% M + 50% NPK; and M3NPK: 70% M + 30% NPK), soil chemical properties, total and available heavy metal contents, and the relationships between the available forms of heavy metals and soil chemical parameters and total heavy metals (THM) were analyzed. The results showed that ① long-term fertilization changed the soil chemical properties; compared with those of CK, PK significantly increased the contents of soil available phosphorus (AP) and available potassium (AK), NPK significantly increased the soil organic matter (SOM), cation exchange capacity (CEC), AP, and AK, and the organic fertilizer treatments significantly increased the contents of SOM, CEC, AP, AK, and nitrate (NO₃⁻-N). ② There were slight variations in the THM contents under the chemical fertilizer treatments (PK and NPK), whereas the organic fertilizer treatments significantly increased the available Cr and As, whereas the organic fertilizer treatments significantly increased the available Cu, Zn, Cr, Cd, As, and Fe. ④ There were significant positive correlations between the available Cu, Zn, Cr, Cd, As, and Fe and the SOM, CEC, AP, and NO₃⁻-N. In addition, the available Zn and Cd were significantly positively correlated with the soil pH, whereas the available Pb was significantly negatively correlated with soil

收稿日期: 2020-08-08; 修订日期: 2020-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31560582,32060726); 国家重点研发计划项目(2018YFD0301100); 江西省科技项目(20192BAB204015, 2019AFD44004)

作者简介: 夏文建(1982~),男,博士,主要研究方向为长期施肥与土壤健康,E-mail: xiawenjian@163.com

* 通信作者,E-mail:lgrtfs@vip.sina.com

pH, SOM, CEC, and NO₃⁻-N. ⑤ There were significant positive correlations between the available and total contents of Cu, Zn, and Cd, whereas there were significant negative correlations between the available and total contents of Cr and Fe. ⑥ Redundancy analysis showed that SOM and pH accounted for 80.7% and 5.5% of the variation in THM, whereas the soil CEC, AP, and pH accounted for 81.1%, 4.9%, and 3.3% of the variation in the available heavy metals, respectively. ⑦ The partial least squares path model analysis showed that the path coefficients of the THM, CEC, and AP on the available state of heavy metals were 0.459, 0.417, and 0.293, respectively. Long-term application of organic manure, such as pig manure, significantly improved the soil chemical properties and affected the availability of heavy metals, and soil CEC and AP may play key roles in regulation.

Key words: long-term fertilization; reddish paddy soil; heavy metals; availability; PLS-PM analysis

施用化肥和有机肥是提高粮食产量的重要措 施[1],但由于肥料中含有少量重金属元素,特别是 有机肥中重金属经常超标[2,3],长期施用化肥或有 机肥可能造成土壤重金属累积[2~6]. 我国南方地区 畜禽粪便是土壤重金属的主要来源之一[7],但施用 有机肥同时也是改良土壤结构,减少重金属活性的 重要措施[8~10]. 有机肥可以提高土壤中有机物质含 量,通过有机物的表面羧基、羟基等官能团与重金属 结合[11,12],或者通过提高土壤 pH[8],从而降低土壤 重金属有效态. 薛毅等[13] 在湖南紫泥田的研究发 现,通过连续 4a 施用商品有机肥,可以降低土壤 Cd 有效态从而降低稻米 Cd 含量; 刘灿等[6] 在四川钙 质水稻土中的研究发现,有机肥及有机肥与化肥配 施后 Cu 和 Zn 全量显著提高,而有效态则是 Cu 和 Cd 显著提高,有效态 Zn 差异不大;何其辉等[14]通 过盆栽试验研究发现,施用猪粪使红黄泥 Cu、Pb 和 Cd 有效态含量显著降低了 22.1%、13.4% 和 20.0%,但对河沙泥 Cu、Pb 和 Cd 有效态影响不显 著、Zn 有效态显著上升,而商品有机肥显著提高了 红黄泥有效态 Zn 的含量,同时显著提高了河沙泥 Zn、Pb 和 Cd 有效态含量; 王开峰等[15]分析湖南省 的7个稻田长期定位试验发现,中、高量有机肥明 显提高了土壤 Zn、Cu 和 Cd 的全量及有效态含量. 可见,施用有机肥容易造成土壤重金属累积已达成 共识,但有机肥对重金属有效态的影响结论存在较 大分歧,这与有机肥的种类与用量、土壤环境、种植 制度和重金属的类型等多方面的因素有关. 同样,长 期化肥处理也可能导致重金属全量和活性增加. 陈 芳等[16]在河南潮土的长期定位试验研究发现,土壤 中 As、Hg、Cd 和 Pb 含量随耕作年限呈增长趋势, 磷肥可能是重金属增加的主要原因;而刘灿等[6]的 研究发现长期施用化肥土壤重金属全量变化不明 显,磷肥显著提高了有效 Fe 含量,降低有效 Mn 含 量. 总体上,现有研究主要围绕化肥或有机肥本身带 入重金属的累积风险,关于长期施肥造成土壤化学 性质变化,从而影响重金属有效态及相关机制研究 较薄弱.

一般认为重金属全量对有效性具有较大影响^[17],但长期施肥条件下重金属有效态含量与全量

的相关性因元素而异^[6].常同举等^[18]在紫色水稻土长期不同耕作方式的定位试验中发现土壤 Zn 有效态与全量呈显著正相关关系,而 Cu、Pb 和 Cd 有效态与全量之间的相关性不显著;李双异等^[19]的研究发现 Cu、Zn 和 Cd 有效态含量与全量呈极显著正相关关系,Pb 有效态与全量呈显著负相关;刘灿等^[6]在钙质水稻土长期施肥研究中发现 Mn 和 Cu有效态与全量呈显著正相关关系,而 Fe、Zn、Pb 和 Cd 有效态与全量之间的相关性不显著.长期施肥影响土壤理化性质,从而影响重金属有效性,土壤 pH、有机质、CEC、有效氮和有效磷等均会影响重金属有效性^[20],但不同环境条件下影响重金属有效态的主要因子存在较大差异.长期施用化肥和有机肥对土壤重金属污染风险,以及重金属有效性的关键影响因素尚不清楚.

为了研究长期施肥对红壤稻田重金属有效态的影响及土壤环境作用机制,本文利用持续了35a的长期定位试验,分析了Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、As、Hg、Fe和Mn全量和有效态含量,通过相关分析、主成分分析、冗余分析和偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析土壤重金属分布特征,以及重金属有效态与环境因子之间的关系,通过解析长期施肥土壤重金属有效态的关键影响因素,以期为红壤稻田合理施肥减少环境风险提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长期定位试验于 1984 年开始 [21],地点位于江西省农业科学院试验基地 (N28.57°, E115.94°),该区域处于中亚热带,海拔高度 25 m, 年均温 17.5℃,无霜期 280 d,降雨量约 1 600 mm, 土壤为第四纪酸性红壤发育的中潴黄泥田. 试验前土壤耕层基础肥力状况为: 土壤 pH 6.5,有机质 25.6 g·kg $^{-1}$,全氮 1.36 g·kg $^{-1}$,全 磷 0.49 g·kg $^{-1}$,速 效 氮 81.6 mg·kg $^{-1}$,速 效 磷 20.8 mg·kg $^{-1}$,速 效 钾 35.0 mg·kg $^{-1}$,加离子交换量 (CEC) 7.54 cmol·kg $^{-1}$. 当地土壤 Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、As、Hg、Fe 和 Mn 含量 [22] 分别为 47.0、115、72.0、43.0、0.171、11.0、0.30、29.9×10 3 和 475 mg·kg $^{-1}$.

1.2 试验设计

本研究选取长期定位试验中的 6 个处理, 分别为: 不施肥(CK)、施用磷钾化肥(PK)、施用氮磷钾化肥(NPK)、70% 化肥 + 30% 有机肥(M1NPK)、50% 化肥 + 50% 有机肥(M2NPK)、30% 化肥 + 70% 有机肥(M3NPK). 试验常年种植模式为早稻晚稻-冬闲, 小区面积 33.3 $\,\mathrm{m}^2$, 水泥梗分隔, 独立排灌. 早稻季施用纯 N 150 $\,\mathrm{kg}\cdot\mathrm{hm}^{-2}$, 晚稻季施用纯 N 180 $\,\mathrm{kg}\cdot\mathrm{hm}^{-2}$, 早稻和晚稻各施 $\,\mathrm{P_2O_5}\,60\,\mathrm{kg}\cdot\mathrm{hm}^{-2}$, K20 150 $\,\mathrm{kg}\cdot\mathrm{hm}^{-2}$. 各处理肥料用量详见表 1. 肥料品种氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙(含 $\,\mathrm{P_2O_5}\,12\%$),钾肥为氯化钾(含 $\,\mathrm{K_2O}\,60\%$). 有机肥早稻为紫云英,晚稻为猪粪. 猪粪含水率 85%,养分含量 N 0. 45%、 $\,\mathrm{P_2O_5}\,0$. 19% 和 $\,\mathrm{K_2O}\,0$. 60%;紫云英含水率 88%,养分含量 N 0. 30%、 $\,\mathrm{P_2O_5}\,0$. 08% 和 $\,\mathrm{K_2O}\,0$

0. 23%. 猪粪中 Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、As、Hg、Fe 和 Mn 含量分别为 110、280、2. 35、1. 16、0. 27、0. 48、0. 09、391 和 93. 2 mg·kg⁻¹, 紫云英中分别为 1. 3、3. 8、0. 26、0. 12、0. 04、0. 03、0. 001、16. 2 和 21. 4 mg·kg⁻¹. 尿素中 Cu、Zn、Fe 和 Mn 含量分别为 0. 13、2. 31、10. 2 和 0. 21 mg·kg⁻¹, 其他重金属未检出;氯化钾中 Cu、Zn、Fe 和 Mn 含量分别为 1. 31、5. 8、106 和 8. 42 mg·kg⁻¹, 其他重金属未检出;过磷酸钙 Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、As、Hg、Fe 和 Mn 含量分别为 5. 80、22. 8、1. 87、0. 36、0. 33、0. 01、0. 01、431 和 23. 2 mg·kg⁻¹. 其中磷肥和有机肥全作基肥,氮肥 50% 作基肥,25% 作分蘖肥,25% 作幼穗分化肥. 钾肥全作追肥,50% 作分蘖肥,50% 作幼穗分化肥. 所有小区的播种、移栽、灌溉和打药等日常管理措施与当地习惯相同.

表 1 不同试验处理每年肥料总用量

		300						40000
Table 1	Annual	total	amount	of	fertilizers	for	different	treatments

		1 2300	1.1		1 Spirit
处理	猪粪	紫云英	过磷酸钙	尿素	氯化钾
大/王	/t·hm ⁻²	/t•hm ⁻²	/kg·hm ⁻²	∕kg•hm ⁻²	/kg·hm ⁻²
CK	0	0	0	0	10 C 8
PK /	0 /	11/04/	1 000	0	500
NPK ///	0	V///6/_	1 000	717	500
M1NPK	12. 0	14. 8	710	512	324
M2NPK	20. 0	24. 8	520	358	206
M3NPK	28. 0	34. 6	337	218	119

1.3 研究方法

2018 年晚稻收获后,采用土钻每小区 S 型采集 0~20 cm 耕层土壤样品.按四分法分出一半鲜样分析土壤硝态氮和铵态氮,剩余一半样品摊匀风干,磨细过筛分析土壤化学性质.

土壤化学性质采用常规试验方法^[23],具体为: 土壤 pH(水: 土2.5:1)采用酸度计电位法;土壤有机质(SOM)采用重铬酸钾外加热法测定;速效磷(AP)用 Olsen 法;速效钾(AK)用 1 mol·L⁻¹ NH₄OAc 浸提-火焰光度法;硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)采用 2 mol·L⁻¹的 KCl 溶液提取,流动分析仪测定;阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵(NH₄OAc)交换法测定;土壤重金属全量(THM)采用 HCl-HNO₃-HClO₄ 消煮,重金属有效态采用稀酸法提取^[17,24,25],消煮液和提取液中 Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、Fe 和 Mn 含量采用原子吸收分光光度计测定,As 和 Hg 含量采用原子荧光光度计测定.土壤重金属全量和有效态含量分析过程中分别采用国家标准样 GSS-22 及 ASA-5a 进行质量控制.

1.4 数据处理

本试验数据利用 Excel 2016 进行整理、统计分

析、计算和绘图,运用 SPSS 17.0 进行单因素方差分析和差异显著性检验(LSD 法, P < 0.05);采用 R (4.0.0)中的"corrplot"包进行相关性分析,"pheatmap"包进行热图聚类分析,"plspm"包进行偏最小二乘路径回归分析(PLS-PM).重金属的全量和有效态分类根据聚类树进行划分,聚类之前数据进行归一化处理,距离算法采用欧几里德距离,聚类采用最大距离法,通过层次聚类获得聚类树.采用 Canoco 5.0 软件进行主成分分析(PCA)和冗余分析(RDA).

2 结果与分析

2.1 长期施肥对土壤化学性质的影响

经过 35 a 的长期不同施肥处理,土壤化学性质发生了显著变化(表 2). 与 CK 处理相比, PK 处理显著提高了土壤 AP 和 AK 含量,分别增加了 747%和 90.5%; NPK 处理显著提高了 SOM、CEC、AP和 AK 含量,分别增加了 18.8%、13.3%、343%和17.7%; 有机肥处理(M1NPK、M2NPK和 M3NPK)显著提高了 SOM、CEC、AP、AK和NO3-N含量,分别增加了 33.1%~56.4%、31.6%~69.3%、860%~1057%、16.9%~38.4%和 341%~958%,并且随着

有机肥用量增加呈增加趋势. 与 NPK 处理相比,有机肥处理(M1NPK、M2NPK 和 M3NPK)显著提高了SOM、CEC、AP 和 NO₃-N 含量,高量有机肥

(M3NPK)还显著提高了土壤 pH 值和 AK 含量. 土壤 NH_4^+ -N含量范围为 4. 80 ~ 8. 26 $mg \cdot kg^{-1}$,不同处理之间差异不显著.

表 2 长期施肥对土壤化学性质的影响1)

Table 2 Soil chemical properties under long-term fertilizations

处理	рН	土壤有机质 (SOM) /g·kg ⁻¹	阳离子交换量 (CEC) /cmol·kg ⁻¹	速效磷 (AP) /mg·kg ⁻¹	速效钾 (AK) /mg·kg ⁻¹	硝态氮 (NO ₃ N) /mg·kg ⁻¹	铵态氮 (NH ₄ +-N) /mg·kg ⁻¹
CK	$5.71 \pm 0.30 \text{ ab}$	$37.3 \pm 3.42 \text{ a}$	6. 68 ± 0.36 a	$5.73 \pm 2.78 \text{ a}$	60. 7 ± 2.94 a	1. 55 ± 0.34 a	8. 13 ± 3. 65 a
PK	$5.72 \pm 0.29 \text{ ab}$	39. 5 ± 1.44 a	7. 18 ± 0.09 ab	48. 5 \pm 11. 1 c	115. 7 \pm 7. 45 d	1.50 ± 0.71 a	7. 19 ± 0.64 a
NPK	5. 17 \pm 0. 30 a	$44.4 \pm 3.22 \text{ b}$	7. 57 ± 0.50 b	$25.4 \pm 12.4 \text{ b}$	71. 5 ± 4 . 10 b	2.25 ± 0.36 a	4.80 ± 0.85 a
M1 NPK	$5.58 \pm 0.14 \text{ ab}$	49. $7 \pm 2.22 \text{ c}$	$8.79\pm0.33~\mathrm{c}$	55.0 ± 9.13 ed	75. 2 ± 2 . 17 b	6. 87 $\pm 1.18 \text{ b}$	8.26 ± 0.84 a
M2NPK	$5.82 \pm 0.38 \text{ ab}$	$53.~3~\pm1.~20~\mathrm{c}$	$9.81\pm0.65~\mathrm{d}$	$55.~8\pm2.~10$ ed	71. 0 ± 4 . 93 b	6. $84 \pm 0.95 \text{ b}$	8.20 ± 2.97 a
M3 NPK	6. 05 \pm 0. 65 b	$58.4 \pm 0.58 \; \mathrm{d}$	11. 3 ± 0.65 e	66. 3 ± 2 . 29 d	84. 0 ± 2.75 c	16. 4 ± 0 . 56 c	6.87 \pm 1.32 a

¹⁾数据是平均值±标准差,同一列不同字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同

2.2 长期施肥对土壤重金属全量和有效态的影响

长期施肥影响了土壤重金属全量和有效态,不同元素之间存在较大差异(图 1). 与 CK 相比, 化肥处理(PK 和 NPK)土壤重金属全量变化不大, 有机肥处理(M1NPK、M2NPK、M3NPK)显著提高了土壤 Cu、Zn 和 Cd 的含量, 但对 As、Hg、Mn 和 Pb 无显著影响,而 Cr 和 Fe 有所下降. 根据我国农田土壤标准 GB15618-2018, 有机肥处理(M1NPK、M2NPK和 M3NPK)土壤铜(56.5~82.0 mg·kg⁻¹)轻微超标, 高量有机肥 M3NPK 处理土壤镉(0.486mg·kg⁻¹)轻微超标,其他元素均未超标. Heatmap聚类结果显示,不同施肥处理可以分为 3 类:①CK 和PK;②NPK;③M1NPK、M2NPK和 M3NPK,不同重金属全量可以划分为 3 类:①Cu、Zn、Cd和 Hg;②As和 Mn;③Pb、Cr和 Fe [图 1(a)].

与 CK 相比, 化肥处理(PK 和 NPK) 土壤有效态

Cr和As含量显著上升,其他重金属有效态含量呈略微增加趋势;有机肥处理(M1NPK、M2NPK和M3NPK)显著提高了土壤有效态 Cu、Zn、Cr、Cd、As和Fe的含量.聚类结果显示,不同施肥处理可以分为4类:①M3NPK;②M1NPK和M2NPK;③CK和NPK;④PK,不同重金属元素有效态可以划分为3类:①Cu、Zn、Cd、Cr、Fe和As;②Mn;③Pb和Hg[图1(b)].

与 CK 相比,施用化肥土壤重金属有效态占全量的比例变化较小,PK 处理显著提高了有效态 Cu、Cr、As 和 Fe 的比例,NPK 处理显著提高了有效态 Cr、As 和 Hg 的比例;而有机肥处理(M1NPK、M2NPK和M3NPK)显著提高了 Cu、Zn、Cr、As 和 Fe 有效态的比例,M3NPK 处理显著降低了有效态 Pb 的比例,M1NPK 处理显著提高了有效态 Hg 的比例(表3).

表 3 长期施肥下土壤重金属有效态占全量的比例1)/%

 $Table \ 3 \quad Proportion \ of \ soil \ available \ heavy \ metals \ to \ total \ contents \ under \ long-term \ fertilization/\%$

处理	Cu	Zn	Cr	Pb	Cd	As	Hg	Fe	Mn
CK	24. 94 ± 1. 71	5.91 ±0.60	0.28 ± 0.08	16. 56 ± 4. 80	40. 51 ± 7. 72	0. 28 ± 0. 12	0.50 ± 0.10	1. 20 ± 0.47	14. 67 ± 5. 99
PK	32.61 ± 4.92	7.97 ± 1.00	0.65 ± 0.19	18. 19 ± 3.83	41.38 ± 4.93	1.49 ± 0.38	0.44 ± 0.03	2.03 ± 0.20	17. 57 ± 4 . 15
NPK	30.08 ± 5.20	7.59 ± 0.85	0.71 ± 0.12	21.64 ± 4.33	36.46 ± 2.85	1.51 ± 0.38	0.72 ± 0.17	1.80 ± 0.20	15. 65 ± 6.09
M1 NPK	34.58 ± 2.92	15. 64 ± 0.51	0.88 ± 0.09	19. 61 ± 4. 17	40.49 ± 3.70	2.02 ± 0.49	0.74 ± 0.10	2.83 ± 0.34	15. 56 ± 2.37
M2NPK	35.30 ± 0.95	20. 19 ± 1.43	0.76 ± 0.15	11. 86 ± 2. 86	40.34 ± 7.98	2.07 ± 0.69	0.56 ± 0.09	2.66 ± 0.44	16. 69 ± 4 . 37
M3 NPK	39. 11 ± 4. 98	25.98 ± 2.96	0.85 ± 0.26	5.80 ± 1.62	41. 95 ± 1. 05	2.39 ± 0.61	0.53 ± 0.07	2.77 ± 0.42	13. 38 ± 2. 72

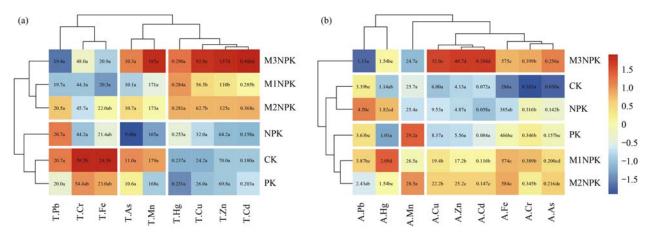
¹⁾ 黑体字表示与 CK 相比差异显著(P<0.05)

2.3 土壤重金属有效性与土壤化学性质和重金属 全量的相关性

土壤有效态 Cu、Zn、Cr、Cd、As、Fe 与 SOM、CEC、AP、 NO_3 -N含量之间呈显著正相关,另外有效态 Zn、Cd 还与土壤 pH 呈显著正相关,而有效态 Pb 与土壤 pH、SOM、CEC 和 NO_3 -N含量之间呈显

著负相关. 有效态 Hg 和 Mn 与土壤化学指标之间相关性不显著,土壤 AK 和 NH_4^+ -N与各重金属有效态之间相关性不显著[图 2(a)].

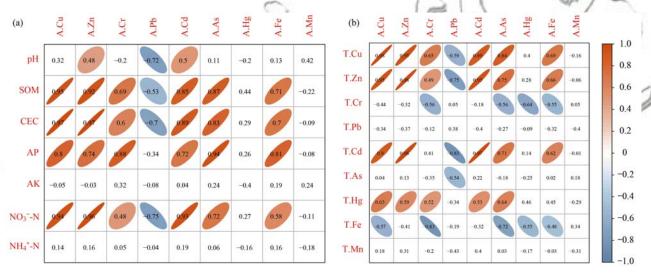
土壤 Cu、Zn 和 Cd 有效态含量与全量之间显著 正相关,而 Cr 和 Fe 有效态含量与全量之间显著负 相关,其余重金属有效态含量与全量之间相关性不



T. Cu、T. Zn、T. Cr、T. Pb、T. Cd、T. As、T. Hg、T. Fe 和 T. Mn 分别表示 Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、As、Hg、Fe 和 Mn 全量; A. Cu、A. Zn、A. Cr、A. Pb、A. Cd、As、Ag、A. Hg、A. Fe 和 A. Mn 分别表示 Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、As、Hg、Fe 和 Mn 有效态含量; 图中的数值代表重金属全量或有效态含量,其中 Fe 全量单位为g·kg⁻¹,Hg 有效态单位为μg·kg⁻¹,其他为mg·kg⁻¹;颜色表示同一列重金属全量或有效态不同处理之间的相对值,同一列不同字母表示处理间差异显著(P < 0.05)

图 1 长期施肥土壤重金属全量和有效态的 heatmap 聚类分析

Fig. 1 Cluster heatmap of the total and available contents of heavy metals in reddish paddy soil under long-term fertilization



橙色椭圆表示重金属有效态与化学指标或全量之间呈显著正相关(P<0.05),蓝色椭圆表示呈显著负相关(P<0.05),椭圆面积越小表示相关系数绝对值越大

图 2 重金属有效量与土壤化学性质和重金属全量之间的相关关系

Fig. 2 Correlations between available heavy metals and soil chemical properties and total heavy metals

显著[图 2(b)]. 同时有效态 Cu、Zn、Cd、As、Fe与全量 Cu、Zn、Cd、Hg显著正相关,有效态 Pb与全量 Cu、Zn、Cd和 As显著负相关,全量 Cr与有效态 As、Hg和 Fe显著负相关,全量 Fe与有效态 Cu、Cr、As和 Hg显著负相关.可见,受长期施肥影响土壤中不同重金属有效态与全量之间的关系存在差异,并且不同类型重金属有效态与其他元素之间存在较为复杂的相关关系,其原因还有待深入分析.

2.4 土壤重金属的主成分分析与冗余分析

通过对 9 种土壤重金属的全量和有效态分别进行主成分分析,重金属全量和有效态的前两个主成分共解释了总体方差变异的 93.6% 和 94.4% (图 3).长期不同施肥使土壤中重金属全量和有效态发

生了明显变化,从主成分分布图中可以看出,不同施肥处理重金属的全量和有效态分布规律一致,CK处理分布在第二象限,化肥处理(PK和NPK)分布在第二和第三象限,而有机肥处理(M1NPK、M2NPK和M3NPK)分布在第一和第四象限,并且随着有机肥用量增加,样点分布由第四象限的左下方向第一象限右上方移动.

通过冗余分析发现,土壤重金属全量和有效态与土壤化学性质间存在较强的约束关系.土壤重金属全量变异的 88.1% 可以由土壤 pH、SOM、CEC、AP、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N解释,其中 SOM 和 pH 分别解释了方差变异的 80.7% 和 5.5%,达到显著水平[图 4(a)];土壤重金属有效态变异的 90.5% 可以由土

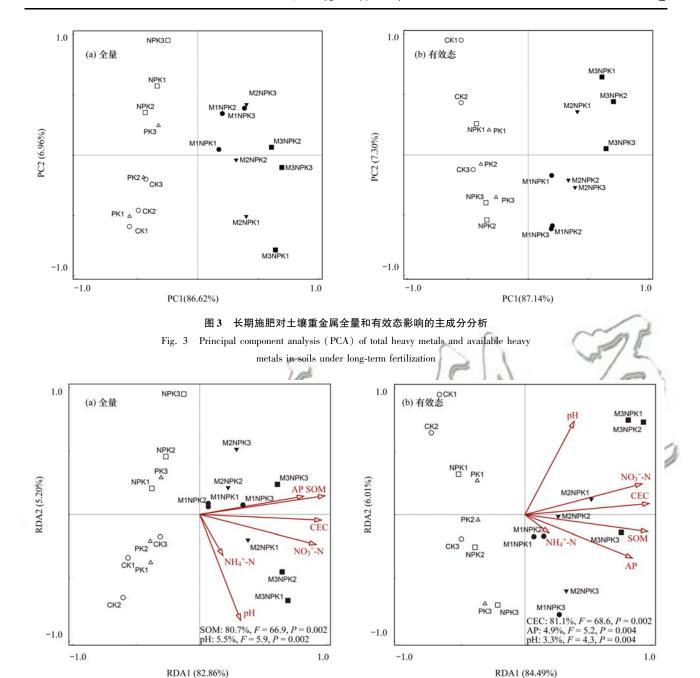


图 4 土壤重金属全量和有效态与土壤化学指标的冗余分析

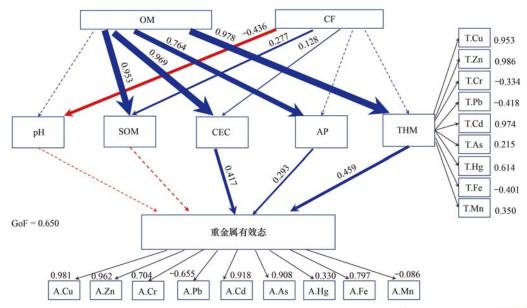
Fig. 4 Redundancy analysis (RDA) of the correlations between soil variables with total heavy metals and available heavy metals

壤 pH、SOM、CEC、AP、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N解释,其中土壤 CEC、AP 和 pH 分别解释了方差变异的81.1%、4.9%和3.3%,达到显著水平[图4(b)].冗余分析结果,反映了土壤重金属全量及有效态与土壤 pH、SOM、CEC 和 AP 之间有较强的关联.

2.5 土壤重金属有效性的 PLS-PM 分析

在前述分析的基础上,进一步通过偏最小二乘路径模型(PLS-PM)分析了有机肥、化肥以及土壤化学性质(pH、SOM、CEC和AP)与重金属全量(THM)及重金属有效态(AHM)之间的关系,模型的拟合优度为0.650(图5).有机肥对SOM、CEC和

AP和 THM的路径系数分别为0.953、0.969、0.764和0.978,达到显著水平,但对土壤pH的影响不显著.化肥对土壤pH、SOM和CEC的路径系数分别为-0.436、0.277和0.128,达到显著水平,而对AP和THM之间路径系数不显著.CEC、AP和THM对有效态重金属影响的路径系数分别为0.417、0.293和0.459,达到显著水平.土壤pH和SOM对重金属有效态的路径系数为负,但不显著.有机肥和化肥主要通过影响土壤CEC和AP和THM间接影响土壤重金属的有效性,间接效应系数分别为0.958和0.138(表4),可见有机肥的影响远



OM 表示有机肥 (organic manure), CF 表示化肥(chemical fertilizers), THM 表示重金属全量;蓝色箭头表示路径系数为正红色箭头表示路径系数为负,虚线表示路径系数不显著,线条粗细表示路径系数大小

图 5 长期施肥对土壤重金属有效性影响的偏最小二乘路径模型 (PLS-PM)分析

Fig. 5 Directed graph of the partial least squares path model (PLS-PM) of the effects of soil available heavy metals under long-term fertilization

表 4 长期施肥通过不同参数影响土壤重金属有效态的间接效应系数

Table 4 Indirect effect coefficient of long-term fertilization on soil heavy metal availability through different parameters

肥料类型	рН	阳离子交换量 (CEC)	土壤有机质 (SOM)	速效磷 (AP)	重金属全量 (THM)	合计
有机肥(OM)	-0.030	0. 404	- 0. 088	0. 224	0. 449	0. 959
化肥(CF)	0.031	0. 054	-0.026	0. 074	0. 004	0. 138

大干化肥.

3 讨论

3.1 长期施肥对红壤稻田土壤重金属累积的影响

施肥是影响土壤重金属含量变化的重要因素, 一般长期施用化肥对土壤重金属全量的影响不 大[2],但仍然有累积的风险. 任顺荣等[26]的研究发 现 25 a 长期不同施肥土壤重金属 Cu、Zn、Cd、Cr、 Hg 和 As 均呈增加趋势, 氮肥对重金属影响不大, 磷 肥使重金属含量有所增加,而有机肥使 Cu、Zn 和 Hg 增幅较大. 由于氮肥和钾肥中重金属元素含量较 低[27],而磷肥中重金属 Cd 含量相对较高[28],长期 施用磷肥的情况下,可能会造成 Cd 的累积[29]. 我国 磷矿具有镉含量低的优势,但酸性稻田仍然需要注 意镉污染风险[25~30]. 本研究长期不施肥的对照处理 水稻产量低,对土壤重金属的影响较小,与当地土壤 的背景值相比变化不大. 试验中化肥重金属含量低, 长期施用化肥处理(PK和NPK)土壤重金属全量与 对照相比变化不大,NPK 处理土壤 Cd 和 As 有下降 趋势,这与作物收获带走有关[5,6].

长期施用有机肥或有机肥与化肥配施对土壤重 金属全量和有效态有较大影响,但不同重金属元素

之间差异较大[2,31],这与有机肥的种类、来源、用量, 以及种植制度、土壤性质和元素本身的迁移性有 关[31~35]. 王改玲等[36]的研究发现化肥配施商品有 机肥增加了土壤 Cu、Zn、As 和 Pb 的含量,降低土 壤 Hg 含量,但对土壤 Cd、Cr 和 Ni 的影响不显著; 猪粪连续施用显著增加耕层土壤 Cu 和 Zn, 而施用 鸡粪显著增加土壤 Cu、Zn、Cd、Cr、As 和 Pb^[32]. 本 研究中有机肥为猪粪,有机肥处理(M1NPK、 M2NPK和M3NPK)显著提高了土壤Cu、Zn和Cd 的含量,其他重金属差异不显著.而有研究结果显示 施用有机肥显著提高了耕层土壤 Cu、Zn 和 As 含 量[37],这可能与早期猪粪中 As 含量较高有关. 本研 究中有机肥处理 As 的全量无明显增加,但有效态含 量显著提高,其原因还有待进一步分析. 刘荣乐 等[38]的研究发现我国主要商品有机肥中重金属含 量变异很大,商品有机肥中重金属含量与所使用的 有机物料中重金属含量呈显著正相关,其中猪粪中 重金属以 Cu、Zn 和 Cd 为主,而江西省猪粪中 Cu 和 Zn 含量超过全国平均水平[2],可能是本研究中 有机肥处理土壤 Cu 和 Zn 含量显著提高的主要原 因. 经过35 a 的长期施肥,与我国农田土壤标准GB 15618-2018 相比,有机肥处理(M1NPK、M2NPK、

M3NPK)土壤铜(56.5~82.0 mg·kg⁻¹)轻微超标,高量有机肥 M3NPK 处理土壤镉(0.486 mg·kg⁻¹)轻微超标.同时施用有机肥处理籽粒中 Cu、Zn 和Cd含量有明显的增加,其中 M3NPK 处理水稻籽粒 Cd含量达到 0.28 mg·kg⁻¹,超过国家食品安全限值,与李本银等^[39]的研究结果一致.因此有机肥长期施用需要考虑生态效益和环境承载力,避免过量施用造成环境和粮食安全风险^[39,40].

本文通过对土壤重金属进行 Heatmap 聚类分析 发现,重金属全量不同施肥处理可以分为: ① CK 和 PK; ② NPK; ③ M1NPK、M2NPK 和 M3NPK 这 3 类[图1(a)],重金属有效态不同施肥处理可以分 为: ① M3NPK; ② M1NPK 和 M2NPK; ③ CK 和 NPK; ④ PK 这 4 类[图 1(b)],长期施用有机肥处 理土壤重金属全量和有效态发生了显著变化,该结 果与主成分分析结果(图3)一致. 根据聚类树重金 属全量可以划分为: ① Cu、Zn、Cd 和 Hg; ② As 和 Mn; ③Pb、Cr 和 Fe 这 3 类, 施用有机肥土壤 Cu、 Zn 和 Cd 含量显著增加,而土壤 Hg 含量变化规律与 Cu、Zn、Cd 一致[图 1(a)],可能是这 4 个元素聚 到一起的原因. 有机肥处理(M1NPK、M2NPK、M3NPK)显著提高了土壤有效态 Cu、Zn、Cr、Cd、 As 和 Fe 的含量,不同处理有效态 Mn 的含量差异均 不显著,而有效态 Hg 和 Pb 含量随着有机肥用量增 加呈下降趋势,因此重金属有效态可以划分为: ① Cu、Zn、Cd、Cr、Fe 和 As; ② Mn; ③ Pb 和 Hg 这3类.

3.2 长期施肥对红壤稻田土壤重金属有效性的 影响

施用有机肥不仅带入了大量重金属,使土壤重 金属全量分布情况有明显变化[图1(a)],同时重 金属有效态的分布也与对照和化肥处理明显不同 [图1(b)]. 然而不同重金属元素有效态与全量之 间的相关性并不一致[图 2(b)],这可能与不同元 素本身的性质和来源有关[6,41],在稻田[18]、旱地[42] 和菜地[43]的研究中也发现部分重金属有效态与对 应重金属全量间的相关性不高. 本研究中 Cu、Zn 和 Cd 有效态与全量具有较高的相关性,表明 Cu、Zn 和 Cd 的有效态和全量的来源都主要为有机肥带 人. 施用有机肥处理(M1NPK、M2NPK 和 M3NPK) 明显提高了 Cu、Zn、Cr、As 和 Fe 有效态与全量之 间的比值,但 Cd 有效态与全量比值没有明显变化 (表3). 长期施肥影响土壤重金属有效性,一方面与 施肥带人有关,另一方面由于施肥能显著改变土壤 化学性质,如土壤 pH、土壤溶液中离子组成、阳离子 交换量等,或肥料成分直接与土壤中金属离子发生 反应,从而影响重金属的有效性[39~43].

相关分析结果表明土壤重金属有效态主要受 SOM、CEC、AP、NO₃-N和 pH 影响,其中 Zn、Cd 有 效态与上述指标显著正相关,而 Pb 有效态与上述指 标显著负相关[图 2(a)]. 进一步通过 RDA 分析发 现重金属全量主要受 SOM 和 pH 影响[图 4(a)], 而重金属有效态主要受 CEC、AP 和 pH 影响 [图 4 (b)]. 在此基础上通过 PLS-PM 分析发现,长期施用 化肥对重金属的间接效应系数为 0.138, 主要通过 AP(0.074)、CEC(0.054)和pH(0.031)影响重金 属有效性;而有机肥的间接效应系数为0.959,主要 通过重金属全量 THM(0.449)、CEC(0.404)和 AP (0.224)影响重金属有效性(表4). 张民等[44]的研 究发现土壤重金属的全量和有效态与有机质和速效 磷含量呈显著正相关,猪粪中全磷和有机质含量较 高[45],长期施用猪粪使土壤 Cu、Zn 和 Cd 发生累 积,同时也通过影响土壤 SOM、pH、CEC 和 AP 等 影响重金属有效性. 稻田土壤中磷对重金属的固定 和活化受到土壤 pH、氧化还原反应、根际酸化效应 和根表铁膜等影响[46],稻田渗滤液中磷和重金属含 量显著相关[47],但磷与重金属之间存在复杂的源汇 关系和固定活化作用,两者之间的作用和相关机制 还有待深入研究[46]. 通过改善土壤理化性质有助于 缓解土壤重金属污染[48],酸性土壤中碱性调节效果 优于有机调节[34],而本研究发现土壤 CEC 和 AP 可 能是酸性稻田中重金属有效态调控的关键因子,但 具体的调控措施还有待进一步研究.

4 结论

- (1)长期施肥改变了土壤化学性质,特别是有机肥处理大幅提高了土壤 SOM、CEC、AP、AK 和 NO_3^- -N. 长期施用化肥对土壤重金属全量影响不大,长期施用有机肥使土壤 Cu、Zn 和 Cd 全量和有效态显著提高,并显著提高了 Cr、As 和 Fe 有效态含量.
- (2) Heatmap 聚类结果显示,重金属全量可以划分为①CK 和 PK;②NPK;③M1NPK、M2NPK 和 M3NPK 这 3 类,重金属有效态可以划分为①Cu、Zn、Cd、Cr、Fe 和 As;②Mn;③Pb 和 Hg 这 3 类.
- (3)土壤 CEC、AP和 pH 分别解释了重金属有效态方差变异的 81.1%、4.9%和 3.3%; PLS-PM 分析发现, CEC和 AP 对重金属有效态影响的路径系数分别为 0.417和 0.293, 达显著水平.长期施肥条件下土壤 CEC和 AP可能对重金属有效态起关键调控作用.

参考文献:

[1] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物

- 营养与肥料学报, 2013, **19**(2): 259-273. Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, **19**(2): 259-273.
- [2] 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 986-996.
 - Mu H Y, Zhuang Z, Li Y M, et al. Heavy metal contents in animal manure in China and the related soil accumulation risks [J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 986-996.
- [3] 王美,李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(2):
 - Wang M, Li S T. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(2): 466-480
- [4] Uprety D, Hejcman M, Száková J, et al. Concentration of trace elements in arable soil after long-term application of organic and inorganic fertilizers [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 85(3): 241-252.
- [5] Ning C C, Gao P D, Wang B Q, et al. Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(8): 1819-1831.
- [6] 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.
- [7] Peng H, Chen Y L, Weng L P, et al. Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in North and South China: a review[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 776-786.
- [8] Huang Q Q, Yu Y, Wan Y N, et al. Effects of continuous fertilization on bioavailability and fractionation of cadmium in soil and its uptake by rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 215: 13-21.
- [9] Zhen H Y, Jia L, Huang C D, et al. Long-term effects of intensive application of manure on heavy metal pollution risk in protected-field vegetable production [J]. Environmental Pollution, 2020, 263, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114552.
- [10] 宁川川,王建武,蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报,2016,25(1):175-181
 - Ning C C, Wang J W, Cai K Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: a review [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(1): 175-181.
- [11] Li F, Li Z A, Mao P, et al. Heavy metal availability, bioaccessibility, and leachability in contaminated soil: effects of pig manure and earthworms [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(20): 20030-20039.
- [12] Wan Y N, Huang Q Q, Wang Q, et al. Accumulation and bioavailability of heavy metals in an acid soil and their uptake by paddy rice under continuous application of chicken and swine manure[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 384, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121293.
- [13] 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 等. 连续 4a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1880-1887. Xue Y, Yin Z R, Sheng H, *et al.* Reduction of soil cadmium

- activity and rice cadmium content by 4-year-consecutive application of organic fertilizer [J]. Environmental Science, 2020, 41(4): 1880-1887.
- [14] 何其辉, 谭长银, 曹雪莹, 等. 肥料对土壤重金属有效态及水稻幼苗重金属积累的影响[J]. 环境科学研究, 2018, **31** (5): 942-951.
 - He Q H, Tan C Y, Cao X Y, et al. Effects of fertilizer on the availability of heavy metals in soil and its accumulation in rice seedling[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31 (5): 942-951.
- [15] 王开峰,彭娜,王凯荣,等. 长期施用有机肥对稻田土壤重 金属含量及其有效性的影响[J]. 水土保持学报,2008,22 (1):105-108.
 - Wang K F, Peng N, Wang K R, et al. Effects of long-term manure fertilization on heavy metal content and its availability in paddy soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(1): 105-108.
- [16] 陈芳,董元华,安琼,等. 长期肥料定位试验条件下土壤中重金属的含量变化[J]. 土壤,2005,37(3):308-311.

 Chen F, Dong YH, An Q, et al. Variation of soil heavy metal contents in a long-term fertilization experiment[J]. Soils, 2005, 37(3):308-311.
- [17] 钟晓兰,周生路,李江涛,等. 土壤有效态 Cd、Cu、Pb 的分布特征及影响因素研究[J]. 地理科学,2010,30(2):254-260.
 - Zhong X L, Zhou S L, Li J T, et al. Soil available Cd, Cu, Pb distribution characteristic and its influencing factors [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(2): 254-260.
- [18] 常同举, 崔孝强, 阮震, 等. 长期不同耕作方式对紫色水稻 土重金属含量及有效性的影响[J]. 环境科学, 2014, 35 (6): 2381-2391.
 - Chang T J, Cui X Q, Ruan Z, et al. Long-term effects of tillage methods on heavy metal accumulation and availability in purple paddy soil [J]. Environmental Science, 2014, 35 (6): 2381-2391
- [19] 李双异,刘赫,汪景宽.长期定位施肥对棕壤重金属全量及 其有效性影响[J].农业环境科学学报,2010,**29**(6):1125-1129.
 - Li S Y, Liu H, Wang J K. Effects of long-term located fertilization on heavy metals and their availability in brown earth [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29** (6): 1125-1129.
- [20] 王美,李书田,马义兵,等. 长期不同施肥措施对土壤铜、 锌、镉形态及生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1500-1510.
 - Wang M, Li S T, Ma Y B, et al. Influence of different long-term fertilization practices on fractionations and bioavailability of Cu, Zn, and Cd in soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(8): 1500-1510.
- [21] 冀建华, 刘秀梅, 李祖章, 等. 长期施肥对黄泥田碳和氮及 氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2011, **44**(12): 2484-2494.
 - Ji J H, Liu X M, Li Z Z, et al. Effects of long-term fertilization on carbon and nitrogen in yellow clayey soil and its nitrogen utilization [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44 (12): 2484-2494.
- [22] 毛大发,鄢新华,刘小兵,等. 试论南昌—莲塘—带土壤环境地球化学特征及其环境质量[J]. 地质与勘探,2003,39(3)·72-77.
 - Mao D F, Yan X H, Liu X B, et al. Soil geochemical characteristic and environment quality in Nanchang—Liantang

- region[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(3): 72-77.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 李发生,韩梅,熊代群,等. 不同浸提剂对几种典型土壤中重金属有效态的浸提效率研究[J]. 农业环境科学学报,2003,22(6):704-706.
 - Li F S, Han M, Xiong D Q, et al. Efficiency of some extractants for available heavy metals from several typical soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(6): 704-706.
- [25] 周卫红,张静静,邹萌萌,等. 土壤重金属有效态含量检测与监测现状、问题及展望[J]. 中国生态农业学报,2017,25(4):605-615.
 - Zhou W H, Zhang J J, Zou M M, et al. The detection and monitoring of available heavy metal content in soil: a review[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 605-615.
- [26] 任顺荣, 邵玉翠, 高宝岩, 等. 长期定位施肥对土壤重金属含量的影响[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(4): 96-99. Ren S R, Shao Y C, Gao B Y, *et al.* Effects of long-term located fertilization on heavy-metal content of soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, **19**(4): 96-99.
- [27] Raven K P, Loeppert R H. Trace element composition of fertilizers and soil amendments [J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26(2): 551-557.
- [28] 王起超,麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险[J]. 农村生态环境, 2004, **20**(2): 62-64. Wang Q C, Ma Z W. Heavy metals in chemical fertilizer and environmental risks[J]. Rural Eco-Environment, 2004, **20**(2): 62-64.
- [29] 杨旭,余垚,李花粉,等. 我国与欧美化肥重金属限量标准的比较和启示[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(1):
 - Yang X, Yu Y, Li H F, et al. Comparison of heavy metal limits for chemical fertilizers in China, EU and US and enlightenments [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25 (1): 149-156.
- [30] 马文奇, 张福锁, 张卫锋. 关乎我国资源、环境、粮食安全和可持续发展的化肥产业[J]. 资源科学, 2005, **27**(3): 33-40
 - Ma W Q, Zhang F S, Zhang W F. Fertilizer production and consumption and the resources, environment, food security and sustainable development in China[J]. Resources Science, 2005, 27(3): 33-40.
- [31] Sukitprapanon T, Suddhiprakarn A, Kheoruenromne I, et al. Partitioning and potential mobilization of aluminum, arsenic, iron, and heavy metals in tropical active and post-active acid sulfate soils: Influence of long-term paddy rice cultivation [J]. Chemosphere, 2018, 197: 691-702.
- [32] 何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 等. 畜禽粪便有机肥中重金属在 土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异[J]. 环境科 学, 2017, 38(4): 1576-1586. He M Y, Dong T X, Ru S H, et al. Accumulation and migration characteristics in soil profiles and bioavailability of heavy metals from livestock manure [J]. Environmental Science, 2017, 38 (4): 1576-1586.
- [33] 陈卫平,杨阳,谢天,等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报,2018,55(2):261-272.
 Chen W P, Yang Y, Xie T, et al. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018,55(2):261-272.
- 34] 王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 等. 长期施肥对土壤重金属积累 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.
- [35] Lu H L, Wu Y X, Liang P X, et al. Alkaline amendments improve the health of soils degraded by metal contamination and acidification: crop performance and soil bacterial community responses [J]. Chemosphere, 2020, 257, doi: 10.1016/j. chemosphere. 2020. 127309.
- [36] 王改玲,李立科,郝明德,等.长期定位施肥对土壤重金属含量的影响及环境评价[J].水土保持学报,2010,24(3):60-63,70.
 - Wang G L, Li L K, Hao M D, et al. Effects of long-term fertilization on heavy-metal contents of soil and environmental quality evaluation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(3): 60-63, 70.
- [37] 李祖章, 谢金防, 蔡华东, 等. 农田土壤承载畜禽粪便能力研究[J]. 江西农业学报, 2010, 22(8): 140-145, 149. Li Z Z, Xie J F, Cai H D, et al. Environmental loading capacity of farmland soil for dung of livestock and poultry [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2010, 22(8): 140-145, 149.
- [38] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 392-397.

 Liu R L, Li S T, Wang X B, et al. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(2): 392-397.
- [39] 李本银, 汪鹏, 吴晓晨, 等. 长期肥料试验对土壤和水稻微量元素及重金属含量的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 281-288.

 Li B Y, Wang P, Wu X C, et al. Effect of long-term fertilization experiment on concentration of micronutrients and heavy metals in soil and brown rice[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(2):
- [40] 柳开楼, 李大明, 黄庆海, 等. 红壤稻田长期施用猪粪的生态效益及承载力评估[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 303-313.
 - Liu K L, Li D M, Huang Q H, et al. Ecological benefits and environmental carrying capacities of red paddy field subjected to long-term pig manure amendments [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(2): 303-313.
- [41] 张磊, 宋凤斌, 崔良. 化肥施用对土壤中重金属生物有效性的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, **14**(4): 122-125.
 - Zhang L, Song F B, Cui L. Effects of application of chemical fertilizers on bioavailability of heavy metals in soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(4): 122-125.
- [42] Zhou S W, Liu J, Xu M G, et al. Accumulation, availability, and uptake of heavy metals in a red soil after 22-year fertilization and cropping [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(19): 15154-15163.
- [43] Hao X Z, Zhou D M, Huang D Q, et al. Heavy metal transfer from soil to vegetable in southern Jiangsu Province, China [J]. Pedosphere, 2009, 19(3): 305-311.
- [44] 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.
- [45] 黄绍文, 唐继伟, 李春花. 我国商品有机肥和有机废弃物中

重金属、养分和盐分状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 162-173.

Huang S W, Tang J W, Li C H. Status of heavy metals, nutrients, and total salts in commercial organic fertilizers and organic wastes in China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(1): 162-173.

[46] Seshadri B, Bolan N S, Wijesekara H, et al. Phosphoruscadmium interactions in paddy soils [J]. Geoderma, 2016, 270: 43-59.

- [47] 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.
- [48] Li C, Sanchez G M, Wu Z F, et al. Spatiotemporal patterns and drivers of soil contamination with heavy metals during an intensive urbanization period (1989-2018) in southern China [J]. Environmental Pollution, 2020, 260, doi: 10.1016/j. envpol. 2020.114075.

《环境科学》征稿简则

- 1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www. hikx. ac. cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.
- 2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.
 - 3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.
- 4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.
 - 5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.
- 6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号太小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
- 7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.
 - 8. 文中各级标题采用 1,1.1,1.1 的形式,左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩 2 格书写.
- 9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:期刊:作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者. 论文名[A]. 见(In):编者. 文集名[C]. 出版地:出版社(单位),年. 起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

- 11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.
- 12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等. 编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees. ac. cn; 网址:www. hjkx. ac. cn

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 42 No. 5 May 15, 2021

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City	y During the Heating Season
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	
·	
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sou	rees with Ultra-Low Emission
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City · · · · ·	
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the T	
Tempora and Spatial Distribution Characteristics of Actosic Optical Properties in Orban Aggioniciations on the North Stope of the F	
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China.	
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin; Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the Nort	
Analysis of the Optical Changes in Datectial Communities in Chan recommend water Channel Securious; A case Study of the Fort	
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typi	
The same of the sa	
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water S	
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	
Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Composited Material and Its Mechanism for Chromium Removal	
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating C	
The state of the s	
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge	
7,0 4	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, et al. (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Muni-	
	·· MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, et al. (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbia	
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case	Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet
	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, et al. (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzho	
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish	•
	···· XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, et al. (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdon	
, 11	······ YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, et al. (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (Oryza sativa L.) Growing in Typical Paddy Soil	•
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, et al. (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the	he Songhua River
	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, et al. (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	