

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响

李开叶^{1,2}, 赵婷婷^{1,2}, 陈佳^{1,2}, 赵秀兰^{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: 通过盆栽试验研究了油菜秸秆、蚕豆秸秆、泥炭、猪粪堆肥和生物炭这5种有机物料对贵州石灰岩黄壤区某砷(As)和镉(Cd)复合污染稻田土壤As/Cd有效性、水稻根表铁膜及As/Cd吸收转运的影响。结果表明,施用有机物料显著提高了有机质和水稻生物量;除油菜秸秆对土壤pH值影响不明显外,施用有机物料显著提高土壤pH值,使土壤有效Cd含量降低34.77%~82.69%;猪粪堆肥和生物炭使土壤有效As含量显著提高,油菜秸秆和泥炭处理使土壤有效As含量显著降低;施用有机物料有助于水稻根表铁膜的形成,并使其中Cd、As含量分别提高17.73%~151.03%和28.49%~94.86%,使水稻糙米Cd含量降低15.87%~79.45%,As含量降低27.04%~82.51%,降幅以生物炭处理最大;有机物料还显著降低Cd在根-茎-叶-籽粒的转运系数及As从茎向籽粒转运系数。相关分析表明,土壤pH、有效Cd和铁膜Cd含量是影响籽粒Cd累积的主要因素,土壤pH、有机质和铁膜As含量是影响籽粒As累积的主要因素。有机物料通过改变土壤pH、有机质含量及铁膜中As和Cd含量,影响水稻对As和Cd的吸收和转运。

关键词: 有机物料; As-Cd复合污染; 水稻; 生物有效性; 吸收转运

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-2047-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202007307

Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice

LI Kai-ye^{1,2}, ZHAO Ting-ting^{1,2}, CHEN Jia^{1,2}, ZHAO Xiu-lan^{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: A pot experiment was carried out to study the impacts of five organic materials (rape straw, broad bean stalk, peat, pig manure compost, and biochar) on the availability of arsenic (As) and cadmium (Cd) in soil, the amount of iron plaque on the root surface, as well as the uptake and translocation of As and Cd in rice grown in an As/Cd co-contaminated yellow paddy soil. The results indicated that the application of organic materials significantly increased the contents of the soil organic matter and the yield of rice. The application of broad bean stalk, peat, pig manure compost, and biochar remarkably increased the soil pH, while the application of rape straw exerted no significant influence. The addition of organic matter reduced the available Cd content by 34.77%-82.69%. However, the effects of organic materials on the availability of As varied with the organic materials. The soil-available As content was significantly increased by the application of pig manure compost and biochar, while it was significantly decreased by adding rape straw and peat. The application of organic materials increased As and Cd contents in the Fe plaques on rice root surface by 28.49%-94.86% and 17.73%-151.03%, respectively. It also reduced the As and Cd contents in brown rice by 27.04%-82.51% and 15.87%-79.45%, respectively. The largest decrease was observed in the biochar treatment. The application of organic materials also remarkably reduced the translocation efficiency of Cd from the root-stem-leaf-grain and that of As from the stem to grain. The correlation analysis revealed that the soil pH, available Cd, and Cd content in the Fe plaques are the major factors influencing the accumulation of Cd in the rice grain. Furthermore, the soil pH, soil organic matter, and As content in the Fe plaques are the major factors influencing the accumulation of As in the rice grain. Therefore, it has been concluded that organic materials could influence the uptake and translocation of As and Cd in rice through changing the soil pH, organic matter content, and As and Cd contents in the Fe plaques.

Key words: organic materials; As and Cd co-contamination; rice; availability; uptake and translocation

砷(As)和镉(Cd)是环境中生物毒性和迁移性较强的两种元素,被国际癌症研究机构定为I类致癌物^[1]。土壤中过量的砷镉被植物吸收,会通过食物链的传递作用对人体健康构成严重危害^[2]。水稻是我国的第一大粮食作物,也是一种砷镉富集能力较强的作物,对砷镉复合污染稻田的修复和安全利用十分必要^[3]。

我国常用的农田重金属污染修复技术主要包括物理技术、化学技术、植物技术和农艺修复技术等方案^[4,5]。通过添加改良剂原位固定污染土壤中的重

金属被认为是一种成本低、效率高、操作简便和稳定性好的污染土壤修复措施^[6]。改良剂种类多样,其中,有机物料因其来源广泛、富含有机质及作物所需营养元素,兼具改良土壤、提高土壤肥力和调控重金属活性等多种效用而受到广泛关注。有研究表明,有机物料不仅可通过改变土壤pH值和有机质等理化

收稿日期: 2020-07-31; 修订日期: 2020-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800602)

作者简介: 李开叶(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染防治, E-mail: 1608753764@qq.com

* 通信作者, E-mail: zxl@swu.edu.cn

性质改变重金属的沉淀-溶解平衡,从而影响重金属的有效性^[7,8];还可通过影响水稻根表铁锰膜的形成,而影响水稻对砷镉的吸收利用^[9]. 水稻根表铁锰膜对介质中重金属有极强的富集能力,在水稻重金属的吸收转运过程中起重要作用^[10]. 有研究表明,铁锰膜既可以促进也可抑制水稻根系对重金属的吸收,其作用效果取决于铁锰膜的厚度^[11]. 因此,在施用有机物料时,有必要弄清楚有机物料对水稻根表铁锰膜的形成及其对水稻吸收砷镉的影响.

目前,关于有机物料对土壤 As/Cd 有效性及植物 As/Cd 吸收影响的研究存在抑制和促进两种不同的结果. 如胡雪芳等^[12]的研究认为添加有机物料降低了土壤 Cd 的有效性及植物对 Cd 的吸收, Khan 等^[13]的研究却表明有机物料能活化土壤 Cd,促进植物对 Cd 的吸收. Yin 等^[14]的研究指出施用有机物料提高了土壤 pH 值,增加了土壤胶体表面的负电荷量,可促进 As 解吸, Wang 等^[15]的研究则认为,施用有机物料可提高土壤有机质含量,而有机质可通过作为粘合剂及形成不溶性络合物来固定 As. 因此关于有机物料对土壤 As/Cd 有效性及水稻 As/Cd 吸收的影响有待进一步研究. 本文通过盆栽试验,研究了油菜秸秆、蚕豆秸秆、泥炭、猪粪堆肥和生物炭这 5 种有机物料对石灰岩黄壤区复合污染稻田 As/Cd 有效性、水稻根表铁锰膜的形成及其水稻 As/Cd

吸收转运的影响,以期为该区域砷镉复合污染稻田的修复治理与安全利用提供参考.

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验土壤:采自贵州省贵阳市开阳县某砷镉复合污染土壤稻田 0~20 cm 表层土壤,该土壤为石灰岩黄壤性水稻土. 土壤样品经风干,去除杂物后混匀磨碎,过 2 mm 尼龙筛备用. 土壤的基本性质为:pH 值 6.68,有机质含量 51.84 g·kg⁻¹,总镉含量 0.96 mg·kg⁻¹,总砷含量 52.88 mg·kg⁻¹,其砷镉含量超过了《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[16]的风险筛选值.

供试有机物料:油菜秸秆(RS)、蚕豆秸秆(BS)、泥炭(PT)、生物炭(BC)和猪粪堆肥(PM). 油菜秸秆、泥炭和猪粪堆肥均由本实验室提供;生物炭购自江苏华丰农业生物工程有限公司,该生物炭采用干法和湿法相结合的方法制备,原料为水稻秸秆和稻壳混合物,制备温度为 600℃,时间为 20 s;蚕豆秸秆取自重庆某农村. 有机物料经粉碎机粉碎过 1.0 mm 筛备用. 供试有机物料基本理化性质见表 1.

水稻:品种为丰优 210 (*Oryza sativa* L. var. Fengyou210).

表 1 供试有机物料基本理化性质

Table 1 Basic physiochemical properties of tested materials

有机物料	pH 值	有机碳 /g·kg ⁻¹	活性有机碳 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	全钾 /g·kg ⁻¹	全镉 /mg·kg ⁻¹	全砷 /mg·kg ⁻¹
RS	7.04	388.2	23.67	7.91	7.08	19.46	0.28	0.17
BS	6.98	385.5	34.10	7.60	4.47	19.67	0.10	0.22
PT	7.20	490.4	24.05	19.89	1.45	16.67	0.28	3.91
BC	9.27	205.6	15.96	2.05	11.34	17.42	1.15	2.98
PM	8.15	358.2	23.81	14.81	6.67	19.15	0.14	1.84

1.2 试验设计

采用盆栽试验研究不同有机物料对水稻砷镉吸收及转运的影响. 本试验于 2019 年 4~9 月在西南大学温室进行,水稻生长期间,通过温室大棚恒温调节装置,保证温室温度与当地温度条件一致,光照条件为自然光照. 试验用盆为上口直径 25 cm,下口直径 21.5 cm,高 24 cm 的塑料桶,每盆装土 4 kg. 共设计 6 个处理,分别为对照 CK(不施加有机物料)、油菜秸秆、蚕豆秸秆、泥炭、猪粪堆肥和生物炭处理,每处理 3 次重复. 根据本实验室前期研究结果,以等有机碳量添加有机物料,有机碳添加为 5 g·kg⁻¹^[17,18],5 种有机物料的添加量分别为 12.88、12.97、10.19、24.32 和 13.95 g·kg⁻¹. 基肥为尿素(以 N 计)、磷酸二氢钾(P₂O₅)和氯化钾(K₂O),施用量分

别为 0.15、0.10 和 0.10 g·kg⁻¹. 将有机物料、肥料与土壤充分混匀后装入桶中,淹水 1 周后移栽水稻,每盆 1 株,全生育期保持 3~5 cm 的相同水深,每周随机更换盆钵位置.

1.3 样品采集

2019 年 9 月 23 日收获,将整个植株从盆钵中取出,用自来水和去离子水洗净后,将根系和地上部分分开,取部分新鲜的根部测定根表铁锰氧化膜铁锰砷镉含量,其余水稻植株于 70℃烘干,分成根、茎叶和稻谷,测定各部分生物量,稻谷脱壳分成壳和糙米,粉碎备用. 采集土壤样品,一部分保存鲜土用于土壤有效态含量的测定,另一部分样品风干后,过 1 mm 和 0.25 mm 筛分别用于土壤 pH 值和有机质含量测定.

1.4 测定方法

供试土壤和有机物料的 pH、全氮、全磷、全钾和有机质的测定按照土壤农化分析常规方法进行^[19].

土壤有效 Cd 用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 浸提-石墨炉原子吸收分光光度法测定^[20],有效 Fe 和有效 Mn 用 DTPA 浸提-火焰原子吸收分光光度计测定,有效 As 用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ ^[21] 浸提-原子荧光分光光度法测定.

水稻根表铁膜用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-碳酸氢钠 (DCB) 法进行提取^[22],水稻全 Cd 含量用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解-石墨炉原子吸收分光光度法,全 As 含量用反王水消解-原子荧光分光光度法测定.

分析过程中采用空白试验、平行样和标准物质 [土壤样品 GBW07387、植物样品 GBW(E)100353] 进行质量控制.土壤样品 Cd 元素和 As 元素的回收率分别为 105% 和 103%;植物样品 Cd 元素和 As 元素的回收率分别为 102% 和 105%.

1.5 数据处理方法

采用 Excel 2007 软件进行数据计算,SPSS 19.0 软件进行方差分析和相关性分析,用 Duncan 法进行多重比较法,显著水平设为 0.05,采用 Origin 8.5 软件进行作图.

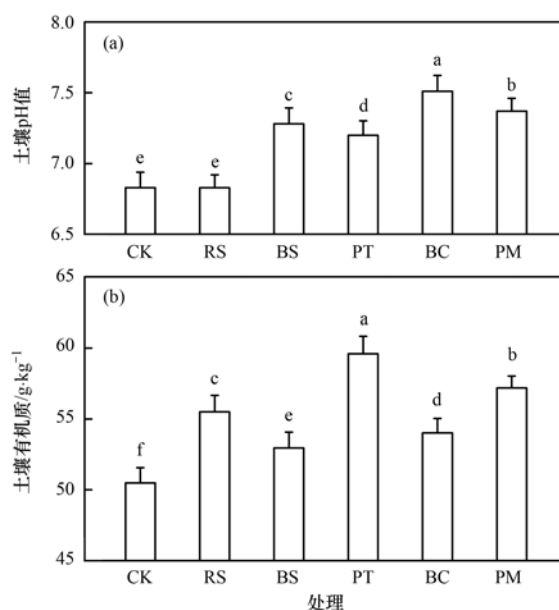
2 结果与分析

2.1 有机物料对土壤理化性质的影响

2.1.1 对土壤 pH 和有机质的影响

土壤 pH 值是影响土壤重金属有效性及迁移性重要因素之一.不同处理土壤 pH 值如图 1(a) 所示.水稻收获后土壤 pH 值在 6.83 ~ 7.51 之间,不同处理土壤 pH 值高低顺序为 $\text{BC} > \text{PM} > \text{BS} > \text{PT} > \text{CK} > \text{RS}$.与 CK 相比,除油菜秸秆处理 pH 略有降低外,其他物料使水稻土 pH 值提高 0.37 ~ 0.68 个单位,达显著水平,以生物炭处理提高幅度最大,泥炭处理提高幅度最小.有研究表明,有机物料可以通过分解产生有机酸和 CO_2 等过程产生质子,降低土壤 pH,也可通过分解产生有机还原物质等过程消耗质子,提高土壤 pH,最终影响结果取决于各过程的相对强度^[17].本研究中,除油菜秸秆外,有机物料使土壤 pH 值提高,说明有机物料分解过程中质子消耗过程强于质子产生过程.此外,相关分析结果显示,土壤 pH 值与有机物料 pH 值呈显著极正相关关系 ($r = 0.737^{**}$, $r_{(0.01, 13)} = 0.641$),说明有机物料的酸碱度是土壤 pH 值的主要因素.

有机质是反映土壤肥力的重要指标,也是影响土壤重金属迁移转化的重要因素之一^[23].从图 1(b) 看出,各处理土壤有机质含量达 50.48 ~ 59.60



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同

图 1 有机物料对土壤 pH 值和有机质含量的影响

Fig. 1 Effects of different organic materials on soil pH and organic matter contents

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,不同处理土壤有机质含量高低为: $\text{PT} > \text{PM} > \text{RS} > \text{BC} > \text{BS} > \text{CK}$.与 CK 相比,有机物料使土壤有机质含量提高 4.89% ~ 19.07%,达显著水平.提高幅度以泥炭处理最大,蚕豆秸秆处理最小,有机物料处理间土壤有机质含量存在显著差异,相关分析结果表明,土壤有机质含量与有机物料活性有机碳含量占物料总含碳量之比呈极显著负相关关系 ($r = -0.750^{**}$, $r_{(0.01, 13)} = 0.641$),说明在等碳量加入条件下,有机物料对土壤有机质含量的影响与其活性有机碳数量的不同有关,由于有机物料的组分和活性有机碳数量的差异,其在土壤中分解程度不同,对土壤有机质含量的影响也不一样.

2.1.2 对土壤有效 Fe 和有效 Mn 的影响

各处理土壤有效 Fe 和有效 Mn 含量分别在 $0.28 \sim 0.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $27.33 \sim 52.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间 (图 2).与 CK 相比,有机物料使土壤有效 Fe 和有效 Mn 含量分别降低 4.19% ~ 40.16% 和 3.66% ~ 47.76%.降幅以生物炭处理最大,油菜秸秆处理最小.相关分析可知,土壤有效 Fe 和有效 Mn 含量均与土壤 pH 值呈极显著负相关关系 ($r_{\text{Fe}} = -0.721^{**}$, $r_{\text{Mn}} = -0.792^{**}$, $r_{(0.01, 16)} = 0.590$),说明有机物料使土壤有效 Fe 和有效 Mn 含量降低,与其提高了土壤 pH 值有关.

2.1.3 对土壤有效 Cd 和有效 As 的影响

由图 3(a) 可知,各处理土壤有效 Cd 含量在 $0.02 \sim 0.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,仅占其总量的 1.68% ~ 14.36%,与其它土壤相比,本研究所用的土壤有效

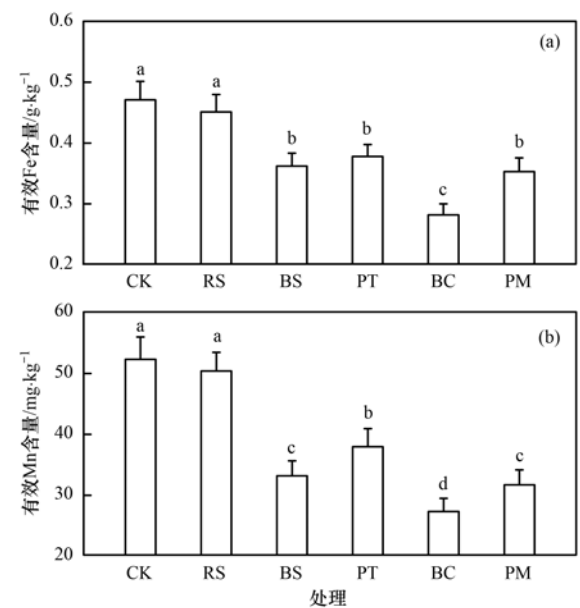


图2 不同处理下土壤有效 Fe 含量和有效 Mn 含量
Fig. 2 Contents of available Fe and available Mn in the soil under different treatments

Cd 含量占总量的比例较低^[24,25]. 不同处理土壤有效 Cd 含量为:CK>RS>PT>BS>PM>BC, 与对照相比,有机物料使土壤有效 Cd 含量降低 34.77%~82.69%,均达显著水平,降低幅度以生物炭最大,猪粪堆肥其次,油菜秸秆最小.

与有效 Cd 含量的变化不同,相比 CK,猪粪堆肥和生物炭处理土壤有效 As 含量分别提高 14.73% 和 73.43%,油菜秸秆和泥炭处理分别降低 21.43% 和 40.16%,蚕豆秸秆处理变化不明显.表明有机物料对土壤有效 Cd 和有效 As 含量的影响不同,即由于砷与镉的物理化学性质不同,对有机物料的反应也不一样.

2.2 有机物料对水稻根表铁锰膜 Fe、Mn、Cd 和 As 含量的影响

水稻根系表面形成的铁锰膜中 Fe 和 Mn 含量分别为 4.34~8.96 g·kg⁻¹ 和 0.07~0.12 g·kg⁻¹ [图 4(a) 和 4(b)]. 表明水稻根表铁锰胶膜以铁氧化物胶膜为主,锰氧化物胶膜相对较少.有机物料在一定程度上促进了水稻根表铁锰膜形成.与 CK 相比,铁膜 Fe 和铁膜 Mn 含量分别提高 20.65%~

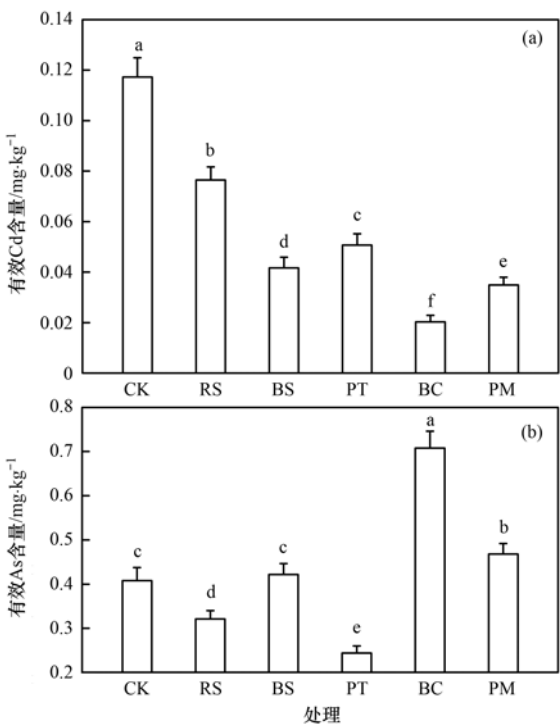


图3 不同处理下土壤有效 Cd 含量和有效 As 含量
Fig. 3 Contents of available Cd and available As in the soil under different treatments

106.38% 和 24.38%~77.26%,提高幅度同样以生物炭处理最大,猪粪堆肥其次,油菜秸秆最小.

不同处理水稻根表铁锰膜中 Cd、As 含量如图 [4(c) 和 4(d)] 所示.铁锰膜中 Cd 和 As 含量高低为 BC>PM>BS>PT>RS>CK.相比 CK,有机物料使铁锰膜的 Cd 和 As 含量分别提高 17.73%~151.03% 和 28.49%~94.86%,表明有机物料促进了水稻根表铁锰膜的形成并增强了根表铁锰膜对 Cd 和 As 的固定.

2.3 有机物料对水稻生物量的影响

从表 2 看出,相比 CK,有机物料使水稻根干重提高 85.08%~99.64%,不同有机物料处理之间无显著差异;水稻茎干重提高 42.23%~120.96%,提高幅度以生物炭处理最大,泥炭处理最小;叶干重提高 43.11%~112.85%,提高幅度以猪粪堆肥处理最大,蚕豆秸秆处理最小;籽粒干重提高 10.83%~97.98%,提高幅度以生物炭处理最大,油菜秸秆处

表2 水稻成熟期生物量¹⁾/g·pot⁻¹
Table 2 Biomass of rice at harvest stage/g·pot⁻¹

处理	根干重	茎干重	叶干重	籽粒干重
CK	11.13 ± 0.54b	15.84 ± 0.90d	18.21 ± 1.01d	24.74 ± 1.37f
RS	20.79 ± 1.83a	29.05 ± 1.74b	26.20 ± 1.56c	27.42 ± 1.52e
BS	20.60 ± 2.04a	29.98 ± 2.83b	26.06 ± 1.49c	35.70 ± 2.55c
PT	21.05 ± 1.94a	22.53 ± 1.20c	32.07 ± 2.10b	33.11 ± 2.16d
BC	22.22 ± 1.82a	35.00 ± 1.73a	27.72 ± 1.01c	48.98 ± 2.83a
PM	21.29 ± 1.63a	28.81 ± 1.75b	38.76 ± 2.17a	38.82 ± 2.86b

1) 数据为平均值 ± 标准误,同列数据不同小写字母表示不同处理间差异显著 (P < 0.05)

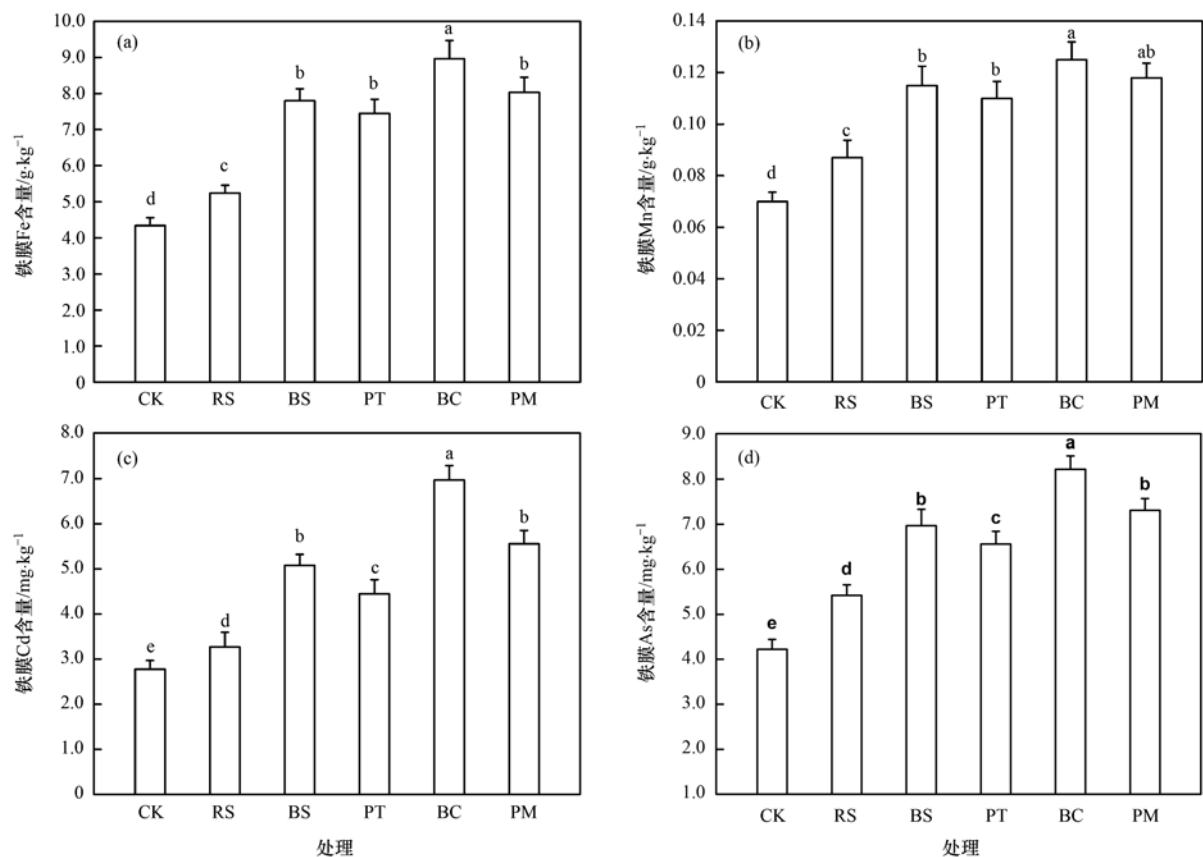


图 4 不同处理水稻铁锰膜 Fe、Mn、Cd 和 As 含量
Fig. 4 Fe, Mn, Cd, and As contents in the Fe plaque under different treatments

理最小. 表明有机物料可显著提高水稻各部位生物量,这是因为有机物料增加了土壤有机质、氮、磷和钾等养分因子的含量,提高土壤肥力,促进水稻的生长,导致水稻生物量增加^[25].

2.4 有机物料对水稻各部位 Cd/As 含量的影响
成熟期水稻各部位 Cd 含量如表 3 所示. 与 CK 相比,水稻各部位 Cd 含量均显著降低,水稻根、茎、叶和糙米的 Cd 含量降低幅度分别为 4.38% ~ 21.67%、18.80% ~ 57.83%、26.37% ~ 67.15% 和 15.87% ~ 79.45%. 糙米 Cd 含量在 0.019 ~ 0.092 mg·kg⁻¹之间,水稻糙米 Cd 含量顺序为:CK > RS >

BS > PT > PM > BC,所有处理糙米 Cd 含量均低于国家《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中的规定值(0.2 mg·kg⁻¹,GB 2762-2017)^[26].

不同部位 As 含量为根 > 茎 > 叶 > 糙米. 与 CK 相比,有机物料使水稻根、茎、叶和糙米的 As 含量分别降低 11.92% ~ 44.36%、9.83% ~ 40.26%、10.83% ~ 34.32% 和 27.04% ~ 82.51%. 各处理糙米 As 含量在 0.13 ~ 0.73 mg·kg⁻¹之间,不同处理水稻糙米 As 含量顺序为:CK > RS > PT > BS > PM > BC,即油菜秸秆处理的降低幅度最小,生物炭处理的降低幅度最大.

表 3 不同处理水稻各部位 Cd 和 As 含量/mg·kg⁻¹
Table 3 Cd and As contents in different parts of the rice under different treatments/mg·kg⁻¹

项目	处理	根	茎	叶	糙米
Cd	CK	1.41 ± 0.03a	0.88 ± 0.01a	0.22 ± 0.01a	0.10 ± 0.01a
	RS	1.35 ± 0.01b	0.71 ± 0.01b	0.16 ± 0.01b	0.08 ± 0.01b
	BS	1.22 ± 0.02d	0.51 ± 0.01d	0.12 ± 0.01c	0.04 ± 0.01c
	PT	1.30 ± 0.03c	0.56 ± 0.01c	0.11 ± 0.01c	0.04 ± 0.01c
	BC	1.11 ± 0.02e	0.37 ± 0.01f	0.07 ± 0.01e	0.02 ± 0.01e
	PM	1.18 ± 0.02d	0.45 ± 0.01e	0.09 ± 0.01d	0.03 ± 0.01d
As	CK	603.04 ± 30.72a	11.12 ± 0.25a	4.86 ± 0.11a	0.73 ± 0.03a
	RS	531.15 ± 26.64b	10.02 ± 0.16b	4.33 ± 0.11b	0.53 ± 0.02b
	BS	410.89 ± 25.38d	8.93 ± 0.23c	3.68 ± 0.12cd	0.27 ± 0.01c
	PT	458.24 ± 18.31c	8.70 ± 0.26c	3.86 ± 0.09c	0.29 ± 0.01c
	BC	335.51 ± 16.64f	6.64 ± 0.11e	3.19 ± 0.12e	0.13 ± 0.01d
	PM	380.87 ± 8.92e	8.12 ± 0.21d	3.50 ± 0.12d	0.24 ± 0.01c

2.5 有机物料对水稻 Cd/As 的富集与转运的影响

水稻从土壤中富集和转运重金属的能力可以分别用富集系数(BCF)和转运系数(TF)来表征,富集系数越大表示水稻根表对土壤中重金属的富集能力越大,转运系数越大说明该部位对重金属的转运能力越强^[24,27].从表4可知,5种有机物料均显著降低了水稻根系对土壤Cd的富集系数 $BCF_{根/土}$ 和水稻各部位的转运系数 $TF_{茎/根}$ 、 $TF_{叶/茎}$ 和 $TF_{糙米/茎}$,不同有机物料处理之间富集系数和各部位转运系数各有差异,说明有机物料抑制了水稻根系对土壤Cd的富集及Cd从根向茎叶和茎叶向糙米转运,且不同有机物料对水稻根系富集能力及各部位转运能力影响不同.

相比CK,油菜秸秆处理根系对土壤As的富集系数 $BCF_{根/土}$ 和茎向叶的转运系数 $TF_{叶/茎}$ 略有降低(表4),根部转运系数 $TF_{茎/根}$ 略有提高,茎向糙米的转运系数 $TF_{糙米/茎}$ 则降低了19.10%,达显著水平($P < 0.05$),意味着油菜秸秆可能主要通过影响As从

水稻茎向糙米的转运,从而减少糙米As累积;蚕豆秸秆使水稻根系富集系数 $BCF_{根/土}$ 和茎向糙米的转运系数 $TF_{糙米/茎}$ 分别降低31.86%和54.46%,茎向叶的转运系数 $TF_{叶/茎}$ 略有降低,但根部转运系数 $TF_{茎/根}$ 提高了17.71%,表明蚕豆秸秆既可降低根系对土壤As的富集也可抑制As向糙米的转运;泥炭施用使根系富集系数 $BCF_{根/土}$ 和茎向糙米的转运系数 $TF_{糙米/茎}$,分别降低24.01%和46.96%,茎向叶的转运系数 $TF_{叶/茎}$ 略有降低,根部转运系数 $TF_{茎/根}$ 略有提高,表明泥炭对水稻As的吸收和转运均有显著降低效果;施加生物炭抑制了水稻根系对As的富集及茎向糙米的转运, $BCF_{根/土}$ 较对照降低了44.36%, $TF_{糙米/茎}$ 降低70.76%, $TF_{茎/根}$ 和 $TF_{叶/茎}$ 有所增加;猪粪堆肥使根系富集系数 $BCF_{根/土}$ 和茎向糙米的转运系数 $TF_{糙米/茎}$ 分别降低36.84%和57.48%, $TF_{叶/茎}$ 有所降低, $TF_{茎/根}$ 提高了15.62%.可见,有机物料主要是通过抑制水稻根系对土壤As的富集及茎向糙米的转运来降低水稻糙米对As的累积.

表4 有机物料对水稻 Cd 和 As 富集和转运的影响¹⁾

Table 4 Accumulation coefficient and transport coefficient of Cd and As in the rice as affected by organic materials

处理	Cd				As			
	$BCF_{根/土}$	$TF_{茎/根}$	$TF_{叶/茎}$	$TF_{糙米/茎}$	$BCF_{根/土}$	$TF_{茎/根}$	$TF_{叶/茎}$	$TF_{糙米/茎}$
CK	1.40	0.62	0.25	0.11	11.40	0.018	0.44	0.07
RS	1.32	0.53	0.23	0.10	10.04	0.019	0.43	0.05
BS	1.23	0.42	0.23	0.08	7.77	0.022	0.41	0.03
PT	1.28	0.43	0.19	0.08	8.67	0.019	0.44	0.03
BC	1.04	0.33	0.19	0.05	6.34	0.020	0.48	0.02
PM	1.14	0.39	0.20	0.08	7.20	0.021	0.43	0.03

1) 富集系数 $BCF_{根/土}$ 为水稻根部Cd含量与土壤Cd含量之比;转运系数 $TF_{茎/根}$ 为水稻茎部Cd含量与水稻根部Cd含量之比; $TF_{叶/茎}$ 为水稻叶部Cd含量与水稻茎部Cd含量之比; $TF_{糙米/茎}$ 为水稻糙米Cd含量与水稻茎部Cd含量之比

3 讨论

3.1 有机物料对土壤 Cd/As 有效性的影响

土壤pH值和有机质是影响土壤金属元素有效性的重要因素.一般来说,土壤pH升高,土壤胶体表面的可变负电荷增加,对重金属离子的吸附能力增强,重金属生物有效性降低^[28].土壤有机质对重金属有效性的影响有“活化”^[29]和“钝化”^[30]两种,与土壤有机质组分和含量有关.本研究中,5种有机物料显著降低了土壤有效Cd含量.相关分析表明,土壤有效Cd含量与土壤pH值呈极显著负相关关系($r = -0.902^{**}$, $r_{(0.01, 16)} = 0.590$),与有机质含量呈显著负相关关系($r = -0.475^{*}$, $r_{(0.05, 16)} = 0.468$),说明有效Cd含量的降低与施加有机物料后土壤pH值和有机质含量提高有关.有机质可通过络合、离子交换和沉淀等过程增强土壤对Cd的吸附能力,使土壤中的 Cd^{2+} 由溶解在土壤溶液中的

离子态变为难溶解的有机结合态,从而降低土壤有效Cd含量^[8].不同处理降低幅度不同,这可能与不同有机物料对土壤pH值影响程度不同有关,生物炭和猪粪堆肥pH值最高,使土壤pH值提高程度最大,Cd有效性降低幅度也最大^[31].

与土壤有效Cd不同,土壤有效As含量与土壤pH值呈显著正相关关系($r = 0.519^{*}$, $r_{(0.05, 16)} = 0.468$).猪粪堆肥和生物炭处理使土壤有效As含量提高,可能是施加猪粪堆肥和生物炭使土壤pH值提高幅度较大,土壤胶体表面的负电荷增量多,从而促进了As解吸引起^[14],另一方面生物炭矩阵结构中的宏观、微观和纳米孔道可能包含拥有还原As潜能的Fe和Mn种类^[32].油菜秸秆处理土壤有效As含量明显降低可能是油菜属于十字花科植物,对硫吸收量大,其秸秆含有较多的硫代葡萄糖苷物质,施入土壤后这些硫化物可与金属离子产生螯合作用,从而降低金属离子的有效性^[33].可见,不同有机

物料处理对土壤 As 和 Cd 的有效性影响不同,可能与 As 主要以阴离子的形式存在,Cd 主要以阳离子的形式存在有关,它们对土壤环境条件的响应不同^[34,35].

3.2 有机物料对水稻根表铁膜的影响

水稻根系泌氧作用被认为是铁锰胶膜形成的重要生物控制因素.这种根际连续氧化作用,使淹水土壤中存在的大量 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 离子在根表面被氧化,形成红棕色铁、锰氧化物胶膜^[36].影响水稻根表铁锰胶膜形成的因素有许多,如土壤 pH、Eh、土壤

有机质和 Fe^{2+} 含量等^[37~40].本研究中 5 种有机物料的施用促进了水稻根表铁锰膜的形成.相关分析可知,根表铁膜和锰膜含量与土壤 pH 值和有机质含量呈显著正相关关系,与土壤有效 Fe 和有效 Mn 含量呈显著负相关关系(表 5),说明铁膜的形成与土壤 pH 和有机质含量的提高及土壤有效 Fe 和有效 Mn 含量的降低有关.进一步分析可知,铁锰中 As 和 Cd 含量与铁膜和锰膜数量呈极显著正相关关系,说明有机物料也促进了铁锰膜对 As 和 Cd 的富集.

表 5 铁膜 Cd 及 As 含量和影响因子间相关性分析¹⁾

Table 5 Correlation between the Cd and As contents in the Fe plaque and the influencing factors						
项目	pH	有机质	有效 Fe	有效 Mn	铁膜 Fe	铁膜 Mn
铁膜 Cd	0.679 **	0.514 *	-0.518 *	-0.549 *	0.739 **	0.802 **
铁膜 As	0.852 **	0.485 *	-0.671 **	-0.557 *	0.753 **	0.757 **

1) *表示在 0.05 水平上显著相关,**表示在 0.01 水平上显著相关; n = 18,下同

3.3 有机物料对水稻 Cd/As 吸收转运的影响

成熟期水稻植株不同部位 As 和 Cd 含量受多种因素影响,如土壤 pH、Eh、有机质含量和土壤重金属的有效性等^[36,38].本研究中,有机物料的施入均不同程度地增加了水稻的生物量,显著降低水稻各部位 As 和 Cd 含量.原因可能是有机物料可通过改变根际环境 pH、有机质含量及根表铁锰膜的形成等影响水稻对 As 和 Cd 的吸收转运.相关分析结果表明(表 6),水稻各部位 Cd 含量及各部位 Cd 的转运系数与土壤 pH、铁膜 Cd 含量呈极显著负相关关系,与土壤有效 Cd 含量呈极显著正相关关系,而与土壤有机质含量相关性不显著.说明有机物料通过提高土壤 pH 值降低有效 Cd 含量,抑制了水稻对 Cd 的吸收;同时根表铁膜的形成抑制了水稻植株对 Cd 的吸收转运.

水稻各部位 As 含量与土壤 pH 和铁锰膜 As 含量呈极显著负相关关系(表 6),根部和糙米 As 含量与土壤有机质和有效 As 含量呈显著负相关,可能是有机物料富含丰富的有机质,有机质可以

通过形成不溶性络合物来固定 As,降低水稻对 As 的吸收累积,生物炭处理土壤有效 As 含量显著提高,但水稻根部和糙米 As 含量明显降低,可能是因为根表铁锰膜对土壤 As 起固定作用,阻碍了 As 向水稻体内转移;也有研究表明,随土壤中 As 有效性的增加,稻米中的 As 含量并不会增加,稻米中 As 的累积可能与根际硅的有效性有关^[41],该生物炭含硅量较高.水稻 As 的茎向糙米的转运系数 $\text{TF}_{\text{糙米/茎}}$ 与土壤 pH 和铁膜 As 含量呈极显著负相关,说明土壤 pH 值和铁膜 As 含量是影响水稻 As 由茎向糙米转运的主要因素,有机物料的施用增强了铁膜对 As 的固定,阻碍了 As 由茎向糙米的转运,降低了糙米 As 的累积.相比 CK,施加有机物料处理根表铁锰膜 As/Cd 含量显著增加,水稻根和各部位 As 和 Cd 含量明显降低,说明铁锰膜抑制了水稻对 As/Cd 的吸收和转运.Liu 等^[22]和王丹等^[36]的研究也表明,水稻根表铁锰膜对 As/Cd 有很强的富集能力,阻碍水稻植株对 As/Cd 的吸收转运.

表 6 水稻 Cd 和 As 含量及转运系数与影响因子间的相关分析

Table 6 Correlation between the content and transport coefficient of Cd and As in the rice and the influencing factors									
项目	土壤 pH	土壤有机质含量	土壤有效 Cd 含量	根表铁膜 Cd 含量	项目	土壤 pH	土壤有机质含量	土壤有效 As 含量	根表铁膜 As 含量
根 Cd	-0.841 **	-0.220	0.931 **	-0.950 **	根 As	-0.908 **	0.478 *	-0.473 *	-0.923 **
茎 Cd	-0.655 **	-0.419	0.791 **	-0.471 *	茎 As	-0.755 **	-0.395	-0.391	-0.862 **
叶 Cd	-0.732 **	-0.403	0.652 **	-0.724 **	叶 As	-0.639 **	-0.402	-0.338	-0.864 **
糙米 Cd	-0.879 **	-0.414	0.881 **	-0.851 **	糙米 As	-0.950 **	-0.488 *	-0.478 *	-0.880 **
$\text{TF}_{\text{茎/根}}$	-0.849 **	-0.445	0.878 **	-0.936 **	$\text{TF}_{\text{茎/根}}$	0.462	0.010	0.272	0.424
$\text{TF}_{\text{叶/茎}}$	-0.712 **	-0.467	0.777 **	-0.709 **	$\text{TF}_{\text{叶/茎}}$	0.314	0.071	0.523 *	0.334
$\text{TF}_{\text{糙米/茎}}$	-0.910 **	-0.372	0.818 **	-0.897 **	$\text{TF}_{\text{糙米/茎}}$	-0.963 **	-0.411	-0.510 *	-0.978 **

4 结论

(1)除油菜秸秆对土壤 pH 值影响不明显外,其余 4 种有机物料使土壤 pH 值显著提高,5 种有机物料使土壤有机质含量显著提高,Cd 有效性显著降低,对土壤 As 有效性的影响因物料的类型不同而异。

(2)5 种有机物料均显著提高水稻根表铁锰膜数量及铁锰膜中 Cd/As 含量,提高幅度以生物炭处理最大,油菜秸秆处理最小。

(3)有机物料显著降低了水稻各部位 Cd/As 含量,使 Cd 的各部位转运系数显著降低;对水稻 As 的根向茎和茎向叶的转运系数影响不大,但显著降低了茎向糙米的转运系数。

(4)相关分析表明,土壤有效 Cd 含量与土壤 pH 值和有机质含量呈显著负相关关系,有效 As 含量与土壤 pH 呈显著正相关;土壤 pH、有效 Cd 和铁膜 Cd 含量是影响籽粒 Cd 累积的主要因素,土壤 pH、有机质含量和铁膜 As 含量是影响籽粒 As 累积的主要因素。有机物料通过改变土壤 pH 值,有机质含量影响土壤 Cd/As 的有效性和根表铁膜的形成,从而对水稻 Cd/As 的吸收转运和籽粒 Cd/As 累积产生影响。

参考文献:

- [1] Diacomanolis V, Noller B N, Ng J C. Bioavailability and pharmacokinetics of arsenic are influenced by the presence of cadmium[J]. Chemosphere, 2014, **112**: 203-209.
- [2] Honma T, Ohba H, Kaneko-Kadokura A, et al. Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50** (8): 4178-4185.
- [3] Wang X Q, Yu H Y, Li F B, et al. Enhanced immobilization of arsenic and cadmium in a paddy soil by combined applications of woody peat and Fe (NO₃)₃: possible mechanisms and environmental implications [J]. Science of the Total Environment, 2019, **649**: 535-543.
- [4] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: current status and mitigation strategies [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(2): 750-759.
- [5] Li X N, Jiao W T, Xiao R B, et al. Soil pollution and site remediation policies in China: a review [J]. Environmental Reviews, 2015, **23**(3): 263-274.
- [6] Zhang L W, Shang Z B, Guo K X, et al. Speciation analysis and speciation transformation of heavy metal ions in passivation process with thiol-functionalized nano-silica [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, **369**: 979-987.
- [7] 杜志敏, 郝建设, 周静, 等. 四种改良剂对铜和镉复合污染土壤的田间原位修复研究[J]. 土壤学报, 2012, **49**(3): 508-517.
Du Z M, Hao J S, Zhou J, et al. Field in-situ remediation of Cu-Cd polluted soil by four amendments [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, **49**(3): 508-517.
- [8] Kalbitz K, Wennrich R. Mobilization of heavy metals and arsenic in polluted wetland soils and its dependence on dissolved organic matter[J]. Science of the Total Environment, 1998, **209**(1): 27-39.
- [9] 范晶晶, 许超, 王辉, 等. 3 种有机物料对土壤镉有效性及水稻镉吸收转运的影响[J/OL]. 农业环境科学学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20200513.1643.008.html>, 2020-05-13.
Fang J J, Xu C, Wang H, et al. Effects of three organic materials on the availability of cadmium in soil and cadmium accumulation and translocation in rice plants[J/OL]. Journal of Agro-Environment Science, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20200513.1643.008.html>, 2020-05-13.
- [10] Zhang Q, Zhang L, Liu T T, et al. The influence of liming on cadmium accumulation in rice grains via iron-reducing bacteria [J]. Science of the Total Environment, 2018, **645**: 109-118.
- [11] 孙国红, 李剑睿, 徐应明, 等. 不同水分管理下镉污染红壤钝化修复稳定性及其对氮磷有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(11): 2105-2113.
Sun G H, Li J R, Xu Y M, et al. Effects of water management on cadmium stability and nitrogen and phosphorus availability in cadmium polluted red soil after immobilization remediation [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34** (11): 2105-2113.
- [12] 胡雪芳, 田志清, 梁亮, 等. 不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3409-3417.
Hu X F, Tian Z Q, Liang L, et al. Comparative analysis of different soil amendment treatments on rice heavy metal accumulation and yield effect in Pb and Cd contaminated farmland [J]. Environmental Science, 2018, **39** (7): 3409-3417.
- [13] Khan S, Chao C, Waqas M, et al. Sewage sludge biochar influence upon rice (*Oryza sativa* L.) yield, metal bioaccumulation and greenhouse gas emissions from acidic paddy soil[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(15): 8624-8632.
- [14] Yin N Y, Cui Y S, Zhang Z N, et al. Bioaccessibility and dynamic dissolution of arsenic in contaminated soils from Hunan, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, **15**(3): 584-593.
- [15] Wang S L, Mulligan C N. Effect of natural organic matter on arsenic release from soils and sediments into groundwater[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2006, **28** (3): 197-214.
- [16] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [17] 周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 等. 几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响[J]. 环境科学, 2016, **37** (10): 4011-4019.
Zhou G Y, Jiang H M, Yang J C, et al. Effects of different organic materials on bio-availability of Cd, Pb in a contaminated greenhouse soil [J]. Environmental Science, 2016, **37** (10): 4011-4019.
- [18] 汪月, 张名豪, 赵秀兰. 有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3808-3815.
Wang Y, Zhang M H, Zhao X L. Effects of organic amendments on microbial biomass carbon and nitrogen uptake by corn seedlings grown in two purple soils [J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3808-3815.
- [19] 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.
- [20] Ardestani M M, Van Gestel C A M. Using a toxicokinetics approach to explain the effect of soil pH on cadmium bioavailability to *Folsomia candida*[J]. Environmental Pollution, 2013, **180**: 122-130.
- [21] 谢伟, 谭向平, 田海霞, 等. 土壤水分对稻田土壤有效砷及碱性磷酸酶活性影响[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(8): 2418-2424.
- Xie W, Tan X P, Tian H X, *et al.* Effects of soil moisture on available arsenic and alkaline phosphatase activity in paddy soil [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(8): 2418-2424.
- [22] Liu W J, Zhu Y G, Hu Y, *et al.* Arsenic sequestration in iron plaque, its accumulation and speciation in mature rice plants (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(18): 5730-5736.
- [23] Filipović L, Romić M, Romić D, *et al.* Organic matter and salinity modify cadmium soil (phyto) availability [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **147**: 824-831.
- [24] 李娜, 贺红周, 冯爱焯, 等. 渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4637-4646.
- Li N, He H Z, Feng A X, *et al.* Safe utilization of paddy soils lightly polluted with cadmium in western Chongqing [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4637-4646.
- [25] 彭惠, 邓华健, 徐浩然, 等. 石灰对生物炭和腐殖酸阻控水稻 Cd 吸收的效应[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(1): 329-337.
- Peng H, Deng H J, Xu H R, *et al.* Effect of lime on biochar and humic acid controlling cadmium uptake in rice [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(1): 329-337.
- [26] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [27] Yang L Q, Huang B, Hu W Y, *et al.* The impact of greenhouse vegetable farming duration and soil types on phytoavailability of heavy metals and their health risk in eastern China [J]. Chemosphere, 2014, **103**: 121-130.
- [28] 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.
- [29] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, *et al.* The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(1): 84-91.
- [30] 冯璞阳, 李哲, 者渝芸, 等. 我国 18 种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 3160-3168.
- Feng P Y, Li Z, Zhe Y Y, *et al.* Selenate adsorption and desorption in 18 kinds of Chinese soil with their physicochemical properties [J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 3160-3168.
- [31] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of Pb-and Cu-contaminated soil using coal fly ash and peat [J]. Environmental Pollution, 2007, **145**(1): 365-373.
- [32] 李季, 黄益宗, 保琼莉, 等. 几种改良剂对矿区土壤中 As 化学形态和生物可给性的影响[J]. 环境化学, 2015, **34**(12): 2198-2203.
- Li J, Huang Y Z, Bao Q L, *et al.* Effect of several amendments on the speciation and bio-accessibility of arsenic polluted soils in adjacent areas of mine [J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(12): 2198-2203.
- [33] 孙晓铎, 黄益宗, 肖可青, 等. 磷矿粉、骨炭和油菜秸秆对重金属复合污染土壤细菌和古菌数量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(3): 565-571.
- Sun X H, Huang Y Z, Xiao K Q, *et al.* Effects of phosphate rock, bone char and rape straw on quantity of bacteria and archaea in soils combined polluted by heavy metals [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(3): 565-571.
- [34] 单天宇, 刘秋辛, 阎秀兰, 等. 镉砷复合污染条件下镉低吸收水稻品种对镉和砷的吸收和累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(10): 1938-1945.
- Shan T Y, Liu Q X, Yan X L, *et al.* Cd and As absorption and transport characteristics of rice in a paddy field co-contaminated by Cd and As [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(10): 1938-1945.
- [35] 孙约兵, 周启星, 任丽萍. 镉超富集植物球果蕓菜对镉-砷复合污染的反应及其吸收积累特征[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1355-1360.
- Sun Y B, Zhou Q X, Ren L P. Growth responses of *Rorippa globosa* and its accumulation characteristics of Cd and As under the Cd-As combined pollution [J]. Environmental Science, 2007, **28**(6): 1355-1360.
- [36] 王丹, 李鑫, 王代长, 等. 硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收镉的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1877-1887.
- Wang D, Li X, Wang D C, *et al.* Influence of sulfur on the formation of Fe-Mn plaque on root and uptake of Cd by rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1877-1887.
- [37] Bauer I, Kappler A. Rates and extent of reduction of Fe(III) compounds and O₂ by humic substances [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(13): 4902-4908.
- [38] 杨世杰, 唐冰培, 王代长, 等. 硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3553-3563.
- Yang S J, Tang B P, Wang D C, *et al.* Influence of sulfur on the bioavailability of arsenic uptake by rice (*Oryza sativa* L.) and its speciation in soil [J]. Environmental Science, 2014, **35**(9): 3553-3563.
- [39] 郭伟, 林咸永, 程旺大. 不同地区土壤中分蘖期水稻根表铁氧化物的形成及其对砷吸收的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 496-502.
- Guo W, Lin X Y, Cheng W D. Effect of iron plaque formation of root surface on As uptake by rice seedlings grown on different types of soils [J]. Environmental Science, 2010, **31**(2): 496-502.
- [40] 刘春英, 弓晓峰, 陈春丽, 等. 鄱阳湖湿地植物根表铁膜形成的影响因素分析[J]. 土壤通报, 2014, **45**(6): 1297-1304.
- Liu C Y, Gong X F, Chen C L, *et al.* Analyses on the influence factors of iron plaque formation on the roots of wetland plants from Poyang Lake [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, **45**(6): 1297-1304.
- [41] Yang Y P, Zhang H M, Yuan H Y, *et al.* Microbe mediated arsenic release from iron minerals and arsenic methylation in rhizosphere controls arsenic fate in soil-rice system after straw incorporation [J]. Environmental Pollution, 2018, **236**: 598-608.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Huai-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)