

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(O₃)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, 刘水桥, 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 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 淡默, 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年来鄱阳湖流域泛濫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, 石浚哲, 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, 林建伟, 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, 杜瑛琦, 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, 司徒壮 (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)

ClO₂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, 黄嫫, 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)

地质高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)

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¹, 周珺楠¹, 汤逸帆^{1,2}, 申建华³, 韩建刚^{1,2*}

(1. 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037; 2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 3. 中粮肉食(江苏)有限公司, 东台 224200)

摘要:为揭示秸秆还田措施下沼液替代化学氮肥施用对土壤中重金属环境风险的影响, 本文以江苏滨海典型围垦农田(稻麦轮作)为对象, 设置不加沼液和加秸秆(CK)、加沼液但不加秸秆(B)、加秸秆但不加沼液(S)和沼液秸秆联用(BS)这4个处理的田间小区试验, 观测不同土层中土壤Cu、Zn、Cd和Pb的迁移及形态变化特征, 并评估其环境风险。结果表明: ①BS处理下稻麦田表层(0~20 cm)土壤中Zn和Pb的总量显著下降($P < 0.05$)。稻田土壤中4种重金属由表层向中下层(20~60 cm)相对迁移6%~11%, 麦田土壤中Cu、Cd和Pb从表层向下迁移25%~33%。这表明, 沼液秸秆联用加速了表层土壤中重金属的垂向下移。②BS处理下, 稻田表层土壤中Cu的弱酸提取态所占质量分数下降8.8%, Zn、Cd和Pb的残渣态降低7.0%~14.2%。这表明Cu被钝化, 但Zn、Cd和Pb有活化趋势。相比较而言, 麦田表层土壤中Cu的残渣态降幅为弱酸提取态的2.8倍, 表明Cu被活化。与此同时, Cd的残渣态升高, Pb的弱酸提取态降低, Cd和Pb被钝化。③重金属生态风险评估表明, BS处理下稻麦田土壤均未发现重金属生态风险, 并且, 其风险指数明显低于B和S处理($P < 0.05$)。因此, 沼液秸秆联用有助于显著降低滨海围垦田土壤重金属污染风险。

关键词:沼液; 秸秆; 稻麦两熟田; 土壤; 重金属

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1979-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007207

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 Wei¹, ZHOU Jun-nan¹, TANG Yi-fan^{1,2}, SHEN Jian-hua³, HAN Jian-gang^{1,2*}

(1. College of Biology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China of Jiangsu Province, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. COFCO Meat (Jiangsu) Co., Ltd., Dongtai 224200, China)

Abstract: In order to reveal the impact of the application of biogas slurry instead of chemical nitrogen fertilizer on the environmental risk of heavy metals in the soil by returning straw to the field, four treatments, without biogas slurry and without straw applications (CK), biogas slurry application without straw (B), straw application without biogas slurry (S), and biogas slurry combined with straw applications (BS), were applied in a typical coastal reclaimed farmland (rice-wheat rotation) in Jiangsu province. The migration and morphological characteristics of Cu, Zn, Cd, and Pb in different soil layers were observed, and the potential environmental risks were estimated. The results showed that: ① The total amounts of Zn and Pb in the surface soils (0-20 cm) in the rice and wheat fields under the BS treatment decreased significantly ($P < 0.05$). The four heavy metals in the paddy soils migrated 6% - 11% from the surface to the middle and lower layers (20-60 cm), and Cu, Cd, and Pb in the wheat soils migrate down from the surface by 25% to 33%. This indicated that the combined use of biogas slurry and straw accelerates the vertical downward movement of heavy metals in the surface soil. ② Under the BS treatment, the contents of the weak acid extraction of Cu in the surface soil of the paddy field decreased by 8.8%, and the residual state of Zn, Cd, and Pb decreased by 7.0% to 14.2%. This revealed that Cu was passivated, but Zn, Cd, and Pb tended to be activated. In comparison, the reduction in Cu residues in wheat field surface soil was 2.8 times that of the weak acid extraction, indicating that Cu was activated. Furthermore, the residue state of Cd increased, the weak acid extraction state of Pb decreased, and Cd and Pb were passivated. ③ The ecological risk assessment of heavy metals showed that there is no ecological risk in the soils under the BS treatment, and the risk indices were significantly lower than those of the B and S treatments ($P < 0.05$). Therefore, the combined use of biogas slurry and straw helps to significantly reduce the risk of heavy metal pollution in the soils in the coastal reclamation areas.

Key words: biogas slurry; straw; rice-wheat double cropping field; soil; heavy metal

收稿日期: 2020-07-22; 修订日期: 2020-09-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505803); 国家自然科学基金项目(41977354)

作者简介: 王伟(1994~), 男, 硕士, 主要研究方向为废弃物资源化利用, E-mail: wangwei940224@163.com

* 通信作者, E-mail: hanjiangang76@126.com

江苏省滩涂总面积7 620 km²,约占全国滩涂总面积的1/4^[1].长期围垦而形成的大量农田已成为我国粮食保障的重要后备基地.然而,作为海陆交汇区域,土壤中重金属的环境风险备受关注^[2~4].例如,孟庆峰等^[5]的研究认为盐城围垦农田土壤重金属含量偏高.姚荣江等^[6]的研究显示重金属呈现不断累积的趋势.刘洋等^[7]对当地作物籽粒进行测定发现存在重金属超标问题.因此,降低围垦田重金属环境风险对提升土壤质量,保障区域粮食安全具有重要意义.

围垦农区分布着众多大规模集约化养猪场,沼液是其最主要的副产品.沼液富含易利用态氮素和多种生物活性物质^[8,9],是化学氮肥替代的首选.然而,有研究表明,沼液施用使土壤中重金属的环境风险增加.例如,汤逸帆等^[10]的研究表明,沼液施用5 a后,稻麦田土壤Cu和Zn含量增加21.50%~30.35%.Duan等^[11]的研究发现长期施用沼肥会显著增加土壤重金属的生物有效性.另一方面,秸秆还田是滨海农区传统的农作措施,可以有效提高土壤有机碳固存率和养分含量,改善土壤结构,促进作物生长^[12~14],而且对盐碱地改良具有很好的效果^[15].有研究表明,秸秆还田对土壤中重金属的有效性也产生显著影响.例如,杨兰等^[16]的研究发现秸秆还田使Cd的有效性下降,但袁雪涛等^[17]的研究则认为秸秆还田可能会活化重金属.尽管以往关于单一施用沼液或秸秆对重金属环境风险的研究取得了重要的进展.然而,有关二者联用的相关影响目前还未见报道.

本文以江苏围垦农区典型稻麦两熟农田为研究对象,设置不加沼液和加不加秸秆(CK)、加沼液但不加秸秆(B)、加秸秆但不加沼液(S)和沼液秸秆联用

(BS)这4个处理的田间小区试验,采集0~20、20~40和40~60 cm土层土壤,分析Cu、Zn、Cd和Pb的总量变化,并采用BCR四步提取法测定土壤中重金属各形态的含量,通过明确沼液秸秆联用对土壤重金属生态环境风险的影响,以期沼液合理施用及滨海围垦田土壤质量提升提供理论与实践依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省东台市黄海沼气站附近农场(32°38'23"N, 120°53'59"E),属于亚热带和暖温带过渡区域.年日照量2100~2400 h,年平均气温为14~15℃,降水量为1 000~1 100 mm,四季分明,光热充足.农作区围垦历史在25 a以上,耕作制度为稻麦两熟制,同时秸秆全量还田.

1.2 土壤基本性状

研究区土壤发育为海相沉积物母质,土壤质地为粉砂质壤土,砂粒、粉粒和黏粒含量占比分别为37%、52%和11%,类别为典型的滩涂盐碱地.pH为8.7,电导率(EC)为1.3 mS·cm⁻¹,有机碳含量为5.1 g·kg⁻¹.

1.3 沼液基本性状

供试沼液选自中粮肉食(江苏)有限公司为解决猪场粪污问题建立的沼气发电站,该项目采用大型水泡粪工艺清理并收集猪舍内粪污,由匀浆池(固体浓度控制在2.0%~3.0%)混合升温处理后进入发酵罐,36~38℃的全混合厌氧反应器(CSTR)中发酵15~20 d.产生的沼气用来发电,沉淀池的中上层为沼液原液,底部为沼渣.沼液基本理化性质见表1,重金属含量见表2.

表1 供试沼液基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the biogas slurry

| 项目 | pH | EC/mS·cm ⁻¹ | TN/g·L ⁻¹ | NH ₄ ⁺ -N/g·L ⁻¹ | NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹ | Cl ⁻ /g·L ⁻¹ |
|----|---------|------------------------|----------------------|---|--|------------------------------------|
| 参数 | 8.4±0.4 | 10.2±2.0 | 1.1±0.1 | 0.8±0.0 | 33.0±4.0 | 0.9±0.1 |

表2 供试沼液重金属浓度/mg·L⁻¹

Table 2 Concentration of heavy metals in the biogas slurry/mg·L⁻¹

| 项目 | Cu | Zn | Cd | Pb |
|----|---------|----------|---------|---------|
| 参数 | 2.9±0.6 | 10.3±2.7 | 0.0±0.0 | 0.2±0.2 |

1.4 试验设计

设置4个处理,包括不加沼液和加不加秸秆(CK)、加沼液但不加秸秆(B)、加秸秆但不加沼液(S)和沼液秸秆联用(BS).重复3次,共12个试验小区.每个小区面积为60 m²(6 m×10 m),各小区随机排布,小区间用防渗布隔开.秸秆还田按当

地传统做法全量还田,利用翻耕机粉碎翻耕15 cm左右.

水稻和小麦种植所需总氮量分别为225 kg·hm⁻²和150 kg·hm⁻².通过沼液或尿素态氮肥使每个处理各作物种植季施加的总氮量相等.稻田沼液和尿素施用总量分别为204.5 m³·hm⁻²和484.9 kg·hm⁻²,分基肥、分蘖肥和穗肥按2:1:2比例施用;麦田沼液和尿素施用总量分别为136.4 m³·hm⁻²和323.3 kg·hm⁻²,分基肥和追肥按1:1比例施用.具体施肥量见表3.

表3 各处理施肥量

Table 3 Amount of fertilizer applied in each treatment

| 项目 | 施肥期 | 尿素(CK) /kg·hm ⁻² | 沼液(B) /m ³ ·hm ⁻² | 尿素(S) /kg·hm ⁻² | 沼液(BS) /m ³ ·hm ⁻² |
|----|-----|--------------------------------|--|-------------------------------|---|
| 稻田 | 基肥 | 194.0 | 81.8 | 194.0 | 81.8 |
| | 分蘖肥 | 96.9 | 40.9 | 96.9 | 40.9 |
| | 穗肥 | 194.0 | 81.8 | 194.0 | 81.8 |
| 麦田 | 基肥 | 161.6 | 68.2 | 161.6 | 68.2 |
| | 追肥 | 161.6 | 68.2 | 161.6 | 68.2 |

灌溉水 pH 为 7 左右,灌水时间按当地耕作习惯,沼液与水配比为 1:4,各处理总灌水量相同,避免灌溉对不同处理重金属的积累迁移造成影响.其它田间管理均按照当地耕作传统.小麦和水稻种植周期分别为 2017 年 11 月 4 日~2018 年 6 月 10 日和 2018 年 6 月 10 日~2018 年 11 月 16 日,作物品种为淮稻 5 号和扬麦 16 号.

1.5 样品采集与重金属测定

样品采集与前处理 分别于 2018 年 6 月(小麦收获期)和 11 月(水稻收获期)进行田间采样.采样用梅花形布点,使用 20 cm 土钻垂直采样,每个小区分 0~20、20~40 和 40~60 cm 这 3 个土层,每层取 3 个点混匀为 1 个样品.稻田和麦田各采集 36 个样品.土样经自然风干后,研磨过 100 目(0.149 mm)尼龙筛,备用.

土壤各重金属总量根据 HJ766-2015 国家标准方法进行测定.将土壤样品置于 HNO₃-HF-HClO₄ 体系中消煮^[18,19],利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, NexION 300X 型,美国)测定 Cu、Zn、Cd 和 Pb 的总量.

土壤中重金属各形态含量采用 BCR 四步提取法^[20],根据赋存形态将重金属分为 4 种:F1,弱酸提取态(可交换态和碳酸盐结合态,生物直接利用效率高);F2,可还原态(铁锰氧化物结合态,在还原条件下可被利用,为潜在生物有效组分);F3,可氧化态(有机物及硫化物结合态,在强氧化条件下可被利用,为潜在生物有效组分);F4,残渣态(存在于矿物晶格中,性质稳定,生物不可利用).本试验

以标准土壤 GBW-07451 进行质量控制,所有试验设置空白对照和平行试验,回收率 85.3%~112.2%.

1.6 不同土层重金属累积总量

为了反映重金属在不同土层间的垂直迁移特征,本文定义了土壤中重金属累积总量 [M_i ,式(1)]:

$$M_i = C_i \times \rho_i \times d \times 10 \quad (1)$$

式中, M_i 为第 i 土层中重金属的累积量,kg·hm⁻²; C_i 为第 i 土层中单位土壤重金属实测总量,mg·kg⁻¹; ρ_i 为第 i 土层土壤容重,0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土壤平均容重分别为 1.56、1.71 和 1.79 g·cm⁻³; d 为土层深度,20 cm; 10 为单位转换系数.

1.7 土壤重金属生态风险评价

采用 Hakanson 提出的潜在生态风险指数法^[21] [式(2)]:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_i^i) = \sum_{i=1}^n \left(T_r^i \times \frac{C_i}{C_B^i} \right) \quad (2)$$

式中,RI 为滨海稻麦两熟田土壤中重金属潜在生态风险指数; E_r^i 为单个重金属元素的潜在风险系数; T_r^i 为单个重金属元素毒性响应系数,根据文献^[22]将重金属 Cu、Zn、Cd 和 Pb 毒性响应系数分别定为 5、1、30 和 5; C_i^i 为单个重金属元素污染系数; C_i 为单个重金属元素总量实测值; C_B^i 为重金属元素参比值,Cu、Zn、Cd 和 Pb 的自然背景值分别为 35、100、0.2 和 35 mg·kg⁻¹^[23]. RI 值越大,生态风险越高.评价分级标准参照文献^[24]和表 4.

表4 潜在生态风险评价法等级划分

Table 4 Classification of potential ecological risk assessment method

| 项目 | 生态风险等级 | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1 级(轻微) | 2 级(中等) | 3 级(重度) | 4 级(强烈) | 5 级(极强) |
| E_r^i | <30 | 30~60 | 60~120 | 120~240 | >240 |
| RI | <50 | 50~100 | 100~200 | >200 | — |

1.8 数据处理与分析

运用 Excel 2019 和 Origin 2017 对数据进行整理、分析和绘图,采用 SPSS 19.0 统计分析软件进行

单因素方差分析(one-way ANOVA),利用 Duncan 新复极差法来分析稻麦田不同处理下 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土壤中重金属总量的差异显著性

($P < 0.05$).

2 结果与分析

2.1 土壤中重金属的积累分布

2.1.1 稻田土壤重金属总量分布特征

S 和 BS 处理下,稻田土壤中 Zn 在 0~20 cm 土层的总量显著低于 CK 和 B 处理($P < 0.05$); 20~40 cm 土层中 B 处理显著高于 CK 和 BS,但三者均

显著高于 S 处理(图 1). B 处理下, 0~20 cm 和 20~40 cm 土层中 Cd 的总量显著高于 S 和 BS 处理. 相比较而言,CK 和 BS 处理下, 40~60 cm 土层中 Cd 的总量显著高于 S. 在 0~20 cm 土层中,BS 处理下 Pb 的总量显著低于 CK 和 S,同时 B 和 S 处理显著低于 CK($P < 0.05$); 20~40 cm 和 40~60 cm 土层中 S、BS 处理显著低于 CK,但高于 B 处理. Cu 的总量在各土层中 4 个处理间差异不显著.

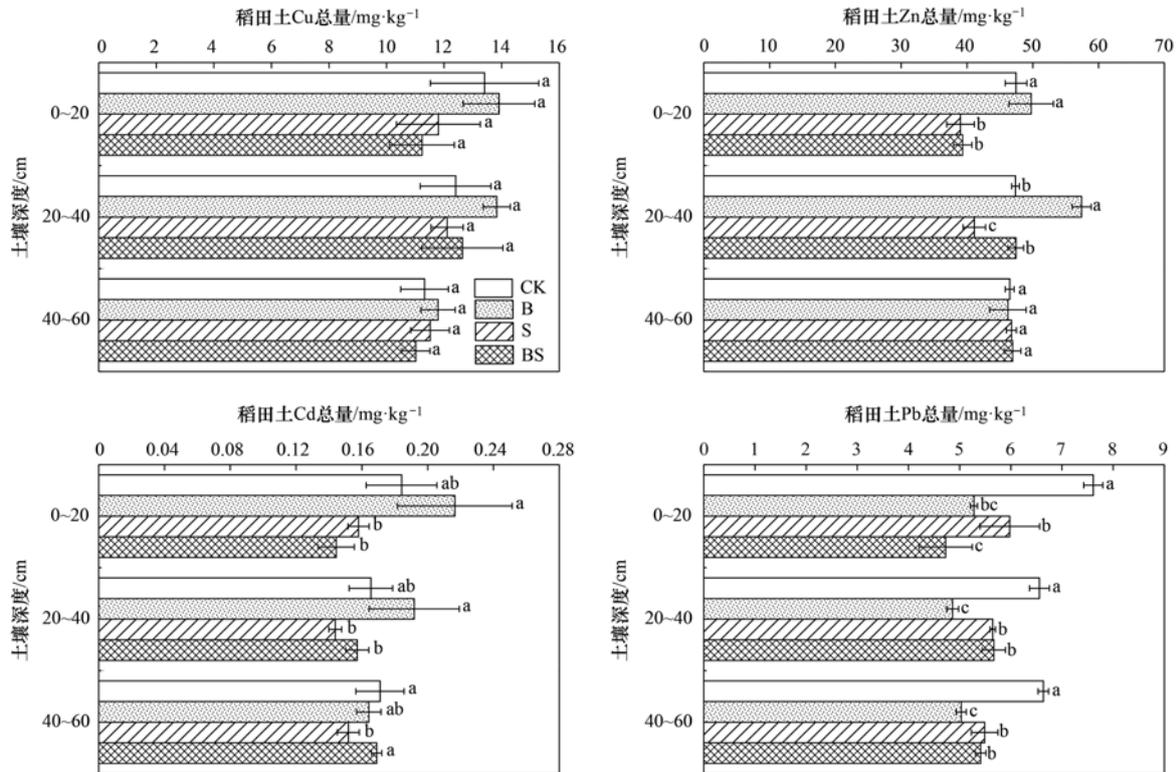


图 1 稻田各处理不同土层土壤中重金属总量

Fig. 1 Total amount of heavy metals in different soil layers of the paddy field

2.1.2 麦田土壤重金属总量分布特征

麦田 0~20 cm 土壤 Cu、Zn 和 Cd 的总量按高低依次为 B>CK>S>BS(图 2). S 处理下, 20~40 cm 土层中 Cu 和 Cd 的总量显著低于其它 3 个处理, B 处理下 Zn 的总量显著高于其它处理. CK 和 S 处理下, 40~60 cm 土层中 Cu、Zn 和 Cd 的总量显著低于 B 和 BS 处理, B 处理下 Cd 的总量显著高于 BS. BS 处理下, Pb 的总量在 0~20 cm 土层土壤中显著低于 B 和 S 处理,但二者均显著低于 CK; 在 20~40 cm 土层中 B 和 S 处理显著低于 CK 和 BS; 40~60 cm 土层中 B 处理显著低于 CK 和 S,同时显著低于 BS.

2.2 重金属在土层间的迁移

BS 处理下,稻田土壤中 Cu、Zn、Cd 和 Pb 在中下层(20~60 cm)积累量的占比分别高出表层(0~20 cm)6%、10%、8% 和 11% (表 5); Zn 在 B 和 S 处理下中下层比表层分别高出 5% 和 8%; Cu、Cd

和 Pb 在 B 和 S 处理下土层间的差异均小于 5%. 表 6 可见,麦田土壤中 Cu、Cd 和 Pb 在 BS 处理下中下层积累量占比较表层分别高出 25%、33% 和 25%; 其他变化均小于 5% (除 S 处理 Cd 增加 8%).

表 5 稻田各处理下重金属在不同土层土壤中的质量分数/%

Table 5 Proportion of heavy metal accumulation in three soil layers under different treatments in the paddy field/%

| 处理 | 土壤深度/cm | Cu | Zn | Cd | Pb |
|----|---------|----|----|----|----|
| CK | 0~20 | 34 | 31 | 33 | 34 |
| | 20~40 | 34 | 34 | 32 | 32 |
| | 40~60 | 33 | 35 | 35 | 34 |
| B | 0~20 | 33 | 30 | 35 | 32 |
| | 20~40 | 36 | 38 | 34 | 32 |
| | 40~60 | 32 | 32 | 31 | 35 |
| S | 0~20 | 31 | 28 | 32 | 32 |
| | 20~40 | 35 | 33 | 32 | 33 |
| | 40~60 | 35 | 39 | 36 | 34 |
| BS | 0~20 | 30 | 27 | 28 | 28 |
| | 20~40 | 37 | 36 | 34 | 36 |
| | 40~60 | 34 | 37 | 38 | 36 |

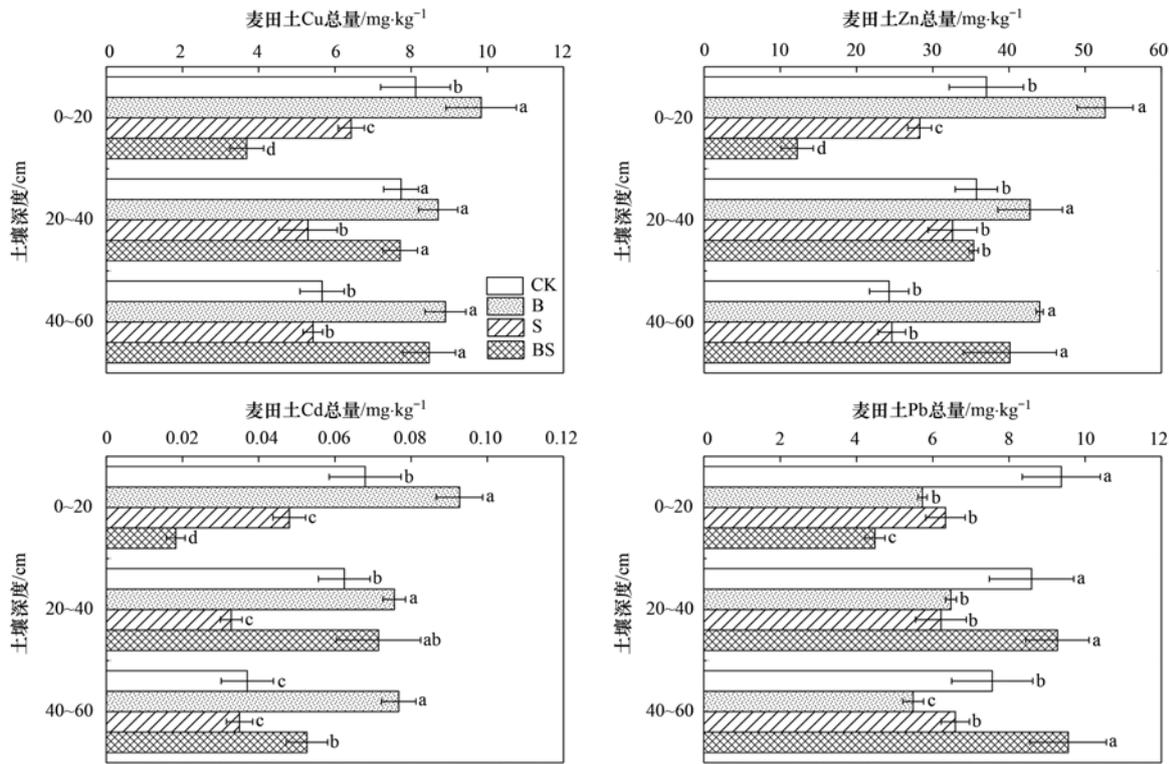


图 2 麦田各处理不同土层土壤中重金属总量

Fig. 2 Total amount of heavy metals in different soil layers of the wheat field

表 6 麦田各处理下重金属在不同土层土壤中的质量分数/%

Table 6 Proportion of heavy metal accumulation in three soil layers under different treatments in the wheat field/%

| 处理 | 土壤深度/cm | Cu | Zn | Cd | Pb |
|----|---------|----|----|----|----|
| CK | 0~20 | 35 | 36 | 38 | 34 |
| | 20~40 | 37 | 38 | 38 | 34 |
| | 40~60 | 28 | 27 | 24 | 32 |
| B | 0~20 | 33 | 35 | 35 | 30 |
| | 20~40 | 32 | 31 | 31 | 37 |
| | 40~60 | 35 | 34 | 33 | 33 |
| S | 0~20 | 35 | 31 | 39 | 31 |
| | 20~40 | 31 | 39 | 29 | 33 |
| | 40~60 | 34 | 31 | 32 | 37 |
| BS | 0~20 | 17 | 32 | 12 | 17 |
| | 20~40 | 39 | 31 | 50 | 40 |
| | 40~60 | 45 | 37 | 39 | 43 |

2.3 土壤重金属形态的变化

2.3.1 稻田土壤重金属形态变化特征

稻田 0~20 cm 土层土壤中, 与 CK 相比, BS 处理下 Cu 的弱酸提取态质量分数降低 8.8%, Zn、Cd 和 Pb 的残渣态分别降低 7.0%、8.9% 和 14.2% (图 3). B 和 S 处理下, Pb 的残渣态分别降低 8.1% 和 6.8%, 可还原态和可氧化态 (F2 + F3 态) 相应升高, 但 Cu、Zn 和 Cd 各形态质量分数无明显变化. 中下层 (20~60 cm) 土壤中, BS 处理下 Cu 和 Cd 的残渣态分别降低 12.6% 和 5.9%. B 处理 Cu 的 F2 + F3 态升高 27.8%, 残渣态降低. S 处理下 Pb 的残渣态

降低 7.4%, 转化成 F2 + F3 态.

2.3.2 麦田土壤重金属形态变化特征

麦田 0~20 cm 土层中, BS 处理下 Cu 的 F2 + F3 态质量分数升高 47.7%, 而弱酸提取态和残渣态分别降低 12.6% 和 35.1%; Cd 的残渣态升高 7.1%; Pb 的弱酸提取态质量分数降低 9.2%, 转化成 F2 + F3 态 (图 4). B 处理下 Cu、Zn 和 Cd 的残渣态质量分数分别升高 19.4%、13.7% 和 21.7%. S 处理 Cu 的弱酸提取态和残渣态分别降低 14.7% 和 16.0%, F2 + F3 态升高; Zn 的残渣态降低 10.5%; Cd 的残渣态上升 9.8%. 中下层土壤中 BS 处理下 4 种重金属残渣态质量分数上升 5.6%~17.8%. B 处理各重金属残渣态含量也均增加. S 处理 Cu 的 F2 + F3 态降低 19.9%, 而残渣态上升, Cd 则相反.

2.4 土壤重金属生态风险评价

表 7 可见, 除稻田 B 处理 Cd 超过 1 级标准 8.3%, 其它处理土壤中重金属的 E_r^i 值均小于 30, 整体处于轻微程度. 相比于 CK, 稻田和麦田土壤 BS 处理下 4 种重金属的潜在生态风险系数分别降低 16.67%~37.61% 和 52.24%~73.11%. 稻田 B 处理 Cd 的潜在生态风险系数增加 17.60%, Pb 降低 31.19%; 但麦田 Cu、Zn、Cd 的风险系数增加 21.55%~43.24%. 稻田和麦田 S 处理 4 种重金属的潜在生态风险系数降幅分别为 11.98%~22.02% 和 20.69%~32.84%. 稻田和麦田 RI 的范围分别为

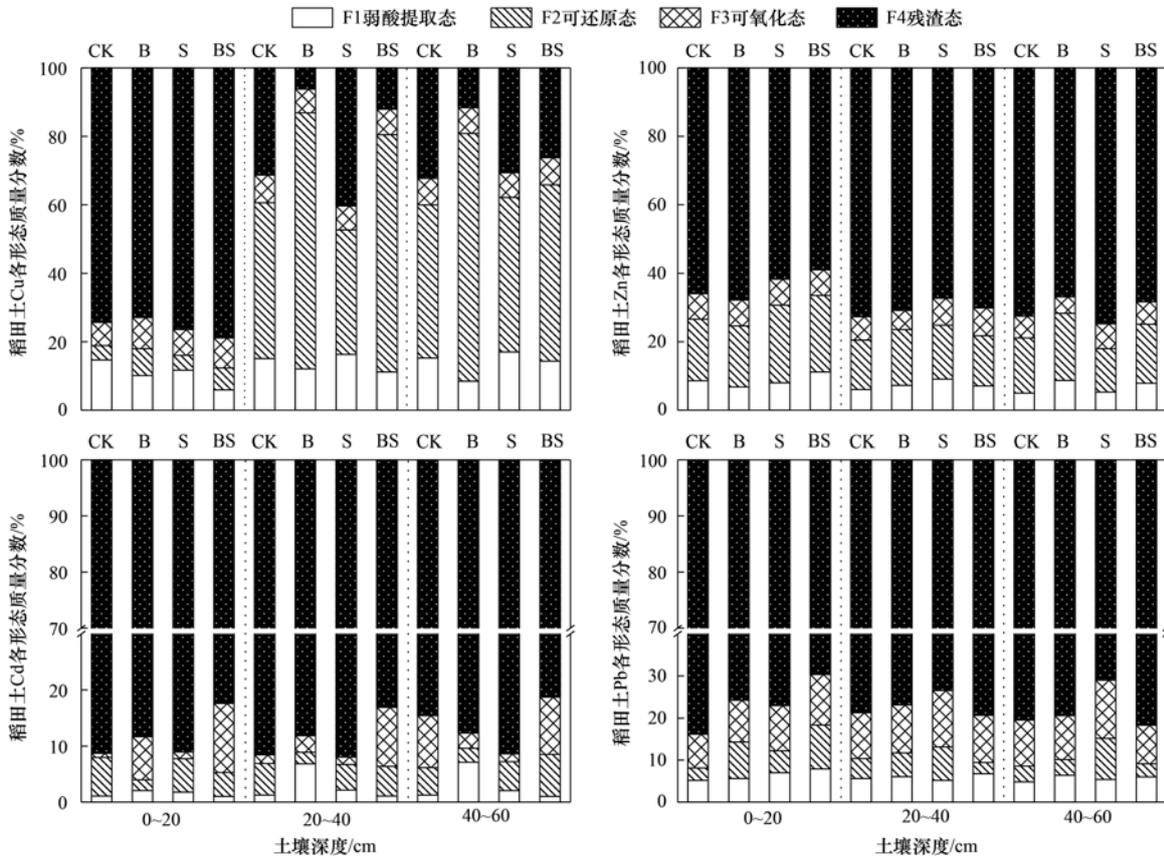


图3 稻田不同处理土壤中重金属各形态分布

Fig. 3 Distribution of four forms of heavy metals in the paddy soil under different treatments

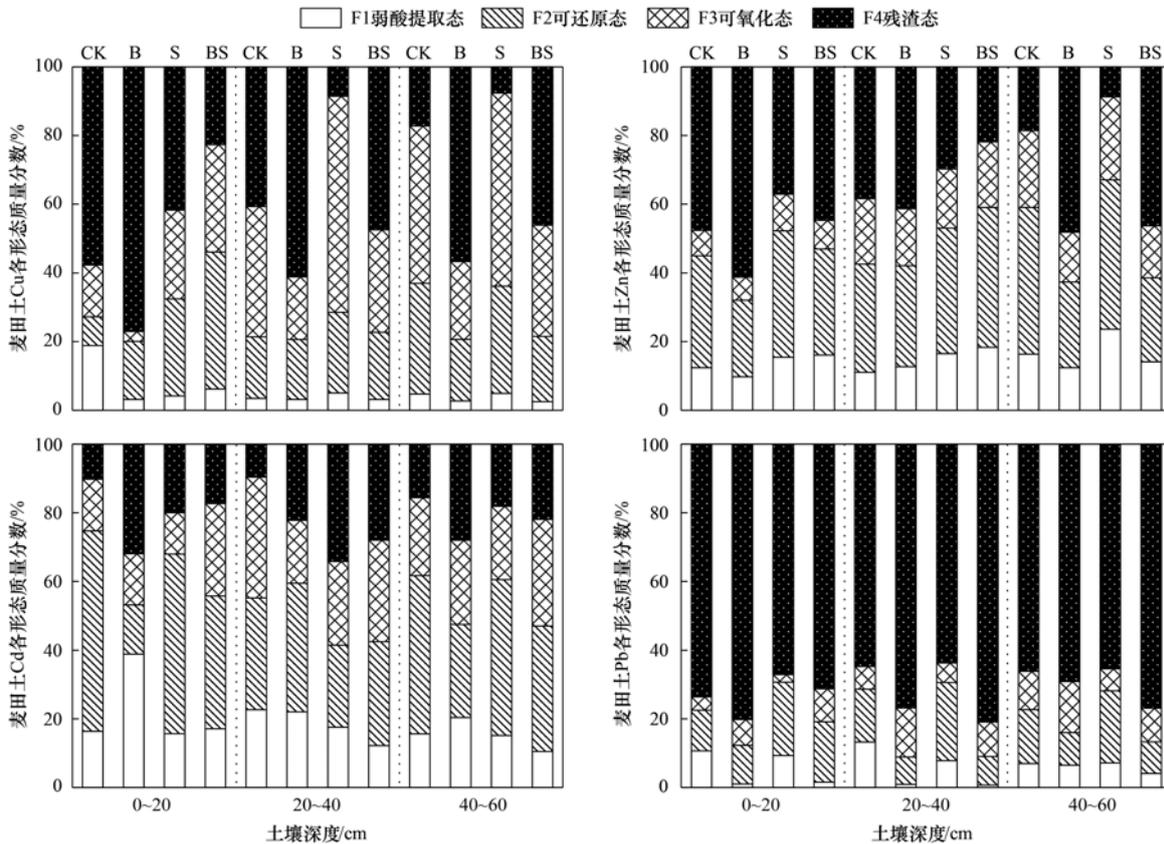


图4 麦田不同处理土壤中重金属各形态分布

Fig. 4 Distribution of four forms of heavy metals in the wheat soil under different treatments

表 7 不同处理下围垦田土壤重金属潜在生态风险系数和指数

Table 7 Potential ecological risk factor and index of heavy metals in the coastal farmland soil

| 处理 | $E_r^{(1)}$ | | | | | | | | RI ²⁾ | |
|----|-------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------------------|-------|
| | Cu | | Zn | | Cd | | Pb | | | |
| | 稻田 | 麦田 | 稻田 | 麦田 | 稻田 | 麦田 | 稻田 | 麦田 | 稻田 | 麦田 |
| CK | 1.92 | 1.16 | 0.47 | 0.37 | 27.62 | 10.19 | 1.09 | 1.34 | 31.10 | 13.06 |
| B | 1.99 | 1.41 | 0.50 | 0.53 | 32.48 | 13.91 | 0.75 | 0.82 | 35.72 | 16.66 |
| S | 1.69 | 0.92 | 0.39 | 0.28 | 23.70 | 7.21 | 0.85 | 0.90 | 26.63 | 9.31 |
| BS | 1.60 | 0.53 | 0.39 | 0.12 | 21.66 | 2.74 | 0.68 | 0.64 | 24.34 | 4.02 |

1) 潜在生态风险系数; 2) 潜在生态风险指数

24.34 ~ 35.72 和 4.02 ~ 16.66, 均无生态风险. RI 值大小按各处理排序为: B > CK > S > BS.

3 讨论

沼液施用会显著增加土壤中重金属的累积量, 原因可能与畜禽养殖饲料中有不同程度重金属的添加有关^[25]. 宋三多等^[26]在成都平原施用沼肥发现高量沼肥(稻麦季施肥量分别为 $1.7 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.3 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)显著增加了稻麦田 0 ~ 20 cm 土壤 Cu、Zn 和 Pb 的含量, 麦田土壤 Cd 含量显著增加, 但稻田降低. 赖星等^[27]的研究表明, 连续 3 a 施用沼液会显著增加土壤中重金属的累积量, 并且随着沼液用量增加, 土壤重金属的累积量也随之增大. 本研究发现麦田单施沼液处理表层土壤中 Cu、Zn 和 Cd 的含量显著增加. 这与以往研究结论相似. 此外, 本研究表明秸秆还田措施也会对土壤重金属含量产生显著影响. 曹阳等^[28]的研究认为水稻秸秆还田显著降低耕作层土壤 Pb 和 Cd 的含量, 与不还田处理相比分别下降 8.96% 和 11.08%. 但郑顺安等^[29]的研究发现, 秸秆还田会增加表层土壤中的 Cd 累积量, 并且 4 ~ 5 a 后土壤重金属含量显著高于不还田处理. 本文单施秸秆处理显著降低表层土壤中 Zn 和 Pb 的总量, 但 Cu 和 Cd 的总量无显著变化. 该变化的原因可能在于不同试验涉及的秸秆还田量和施用年限存在差异. 前一研究采用 150% 秸秆还田经过 2 a 处理, 而后者采用上季作物秸秆全量还田经过 5 ~ 9 a 田间试验. 沼液秸秆联用下, 稻田 Zn、Pb 和麦田 Cu、Zn、Cd、Pb 在表层(0 ~ 20 cm)土壤的总量均显著降低. 这表明, 沼液与秸秆联用可显著降低稻麦田表层土壤中重金属总量, 比单一施加沼液或秸秆的作用效果更好.

施用有机肥有利于农田土壤重金属向下层迁移. 何梦媛等^[30]通过连续 4 a 在麦田施用猪粪发现, Cu 可迁移至 15 ~ 30 cm 土层中, 但 Cd、Pb 迁移较弱. 孙娜等^[31]的研究也表明, Cu 可迁移至 15 ~ 30 cm 土层, Zn 则迁移至 60 ~ 90 cm 土层土壤中. 本研究中沼液与秸秆联用下, 稻田 4 种重金属从表层向

中下层(20 ~ 60 cm)土壤相对迁移 6% ~ 11%, 麦田 Cu、Cd 和 Pb 达到 25% ~ 33%, 相比较来说, 单施沼液或秸秆处理下, 重金属向中下土层相对迁移量均小于 BS. 王琼瑶等^[32]研究猪粪和秸秆配施时发现除水稻季表层土壤中的 Cu 含量略低于下层土壤, Zn 并没有发生显著下移. 该变化的原因可能在于, 土壤质地显著影响重金属的迁移. 土壤中黏粒多会对重金属的迁移产生阻滞作用, 从而减缓重金属向下运移^[33,34]. 同时, 表层土壤中的有机质高于底层, 这使得重金属在表层形成稳定的有机质-重金属络合物, 向下迁移的能力减弱^[35,36]. 沼液与秸秆联用下, 重金属发生明显垂向下移原因可能在于, 二者共存时沼液中的小分子有机酸和官能团与秸秆腐解后产生游离腐植酸^[37], 提高重金属迁移活性. 此外, 沼液中大量的盐基离子可占据秸秆或其腐解产物上的吸附位点, 通过竞争降低了其对重金属的吸附, 进而增加重金属的迁移性^[38,39]. 另一方面, 沼液施用后碱性土壤 pH 下降^[40], 这可能使吸附于土壤上的重金属易于解吸^[41], 有利于重金属向下层土壤垂直迁移. 值得关注的是, 麦田沼液秸秆联用下 Cd 仅有 12% 残留在表层土壤, 其他均迁移至中下层, 这可能与 Cd 的水合离子半径小, 迁移速度快有关^[42].

重金属的环境效应不仅由重金属的总量决定, 同时也取决于其在土壤环境中的赋存形态^[43]. 沼液秸秆联用下, 稻田表层土壤中 Cu 的弱酸提取态所占质量分数降低, 这表明沼液与秸秆联用降低了稻田土壤中 Cu 的生物活性. 相比较而言, 麦田 Cu 的 F4 残渣态降幅为 F1 弱酸提取态的 2.8 倍, 麦田土壤 Cu 被活化. 稻田单施沼液或秸秆处理 Cu 的弱酸提取态均有下降趋势, 但降低幅度均低于 BS. 该变化的原因可能与沼液中的小分子有机酸及秸秆腐解产生的胡敏酸(HA)和富里酸(FA)有关. 邱勇等^[44]的研究发现 HA 可与土壤中的 Cu 通过络合、氢键结合、离子交换以及物理吸附等方式结合, 抑制其活性. 罗梅等^[45]的研究认为腐植酸能作为电子传递体影响重金属的氧化还原过程, 从而改变重金属的形态及生物有效性. 此外, 沼液与秸秆联用加快了稻田

表层土壤 Zn、Cd 和 Pb 活化,但麦田 Cd 和 Pb 被钝化. 胡青青等^[46]的研究认为随着土壤中有机和阳离子交换量的增加,重金属的生物有效性增加,但这种作用对中下层土壤影响较小.

表层土壤重金属与作物安全和人体健康紧密相关^[47,48]. 本研究对滨海围垦农田表层土壤进行重金属生态风险评估,结果显示除稻田单施沼液处理土壤中 Cd 存在轻微超标风险,其它重金属的潜在生态风险系数均显示稻麦围垦田土壤无生态风险水平. 从 RI 值来看,单施沼液会显著增加稻麦田土壤潜在生态风险指数,而单施秸秆则会有效降低生态风险,二者联用下比单一施用秸秆降低生态风险的效果更好. 由此,在沼液替代化学氮肥背景下,农田消纳沼液与秸秆联用值得推荐. 相比较而言,沼液与秸秆联用下,稻田土壤的潜在生态风险指数比麦田高出 5 倍. 该变化与谢沂希等^[49]的研究结论一致. 原因可能在于,一方面稻田处于厌氧环境中,氧化还原电位低^[50,51];另一方面可能与稻田沼液施肥量大于麦田有关. 因此,水稻种植时,适当降低沼液的施用量有望进一步降低重金属污染风险.

4 结论

(1) 沼液秸秆联用加速了表层(0~20 cm)土壤中 Cu、Zn、Cd 和 Pb 向中下层(20~60 cm)迁移,稻田土壤重金属向中下层相对迁移 6%~11%,麦田 Cu、Cd 和 Pb 下移 25%~33%.

(2) 沼液与秸秆联用下,稻田表层土壤中 Cu 的有效性降低,Zn、Cd 和 Pb 增加;麦田表层土壤中 Cu 被活化,但 Cd 和 Pb 被钝化.

(3) 沼液与秸秆联用下稻麦田土壤均未发现重金属生态风险,二者联用是降低滨海围垦田土壤重金属污染风险的有效措施.

参考文献:

- [1] 沈洪运,解雪峰,濮励杰,等. 不同改良方式下滩涂围垦区土壤水盐动态——以江苏如东为例[J]. 土壤通报, 2019, **50**(2): 316-322.
Shen H Y, Xie X F, Pu L J, *et al.* Dynamics of soil water-salt as affected by different improvement measures in coastal reclamation: a case study of rudong in Jiangsu Province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, **50**(2): 316-322.
- [2] 郑江鹏,矫新明,方南娟,等. 江苏近岸海域沉积物重金属来源及风险评价[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(4): 1514-1522.
Zheng J P, Jiao X M, Fang N J, *et al.* Sources and risk assessment of heavy metals in sediments in Jiangsu coastal areas [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(4): 1514-1522.
- [3] 吕建树,何华春. 江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2853-2864.
Lü J S, He H C. Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in the soils of the Jiangsu coast [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2853-2864.
- [4] Bai J H, Xiao R, Cui B S, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in wetland soils from the young and old reclaimed regions in the Pearl River estuary, South China [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(3): 817-824.
- [5] 孟庆峰,杨劲松,姚荣江,等. 滩涂围垦区土壤重金属调查及生态风险评价——以盐城市弶港镇为例[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(11): 2249-2257.
Meng Q F, Yang J S, Yao R J, *et al.* Investigation and ecological risk assessment of heavy metals pollution in reclaimed tidal flat soil: a case study of Jianggang County, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(11): 2249-2257.
- [6] 姚荣江,杨劲松,谢文萍,等. 苏北滨海滩涂区土壤重金属含量及其时空变异研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(6): 1810-1820.
Yao R J, Yang J S, Xie W P, *et al.* Contents and spatio-temporal variability of soil heavy metals in the coastal mud-flat area of north Jiangsu Province [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(6): 1810-1820.
- [7] 刘洋,潘国浩,赵永强,等. 滨海滩涂不同围垦年代垦区农作物重金属累积特征及其与氮、磷的关系[J]. 生态毒理学报, 2018, **13**(6): 186-201.
Liu Y, Pan G H, Zhao Y Q, *et al.* Heavy metal accumulation in crops and its relationships with nitrogen and phosphorus in different-age reclaimed farmlands in tidal flat area [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, **13**(6): 186-201.
- [8] Zirkler D, Peters A, Kaupenjohann M. Elemental composition of biogas residues: variability and alteration during anaerobic digestion [J]. Biomass and Bioenergy, 2014, **67**: 89-98.
- [9] Alburquerque J A, de la Fuente C, Ferrer-Costa A, *et al.* Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues [J]. Biomass and Bioenergy, 2012, **40**: 181-189.
- [10] 汤逸帆,汪玲玉,吴旦,等. 农田施用沼液的重金属污染评价及承载力估算——以江苏滨海稻麦轮作田为例[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(4): 1687-1695.
Tang Y F, Wang L Y, Wu D, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and bearing capacity estimation of continuous biogas slurry application on cropland: a case study of the coastal rice-wheat rotated farmland in Jiangsu, China [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(4): 1687-1695.
- [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] 全孝飞,颜晓元,王书伟,等. 长期施用有机物料对稻田生态系统服务功能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(7): 1406-1415.
Quan X F, Yan X Y, Wang S W, *et al.* Effects of long-term application of organic materials on the ecosystem services of paddy fields [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(7): 1406-1415.
- [13] Huang S, Zeng Y J, Wu J F, *et al.* Effect of crop residue retention on rice yield in China: a meta-analysis [J]. Field Crops Research, 2013, **154**: 188-194.
- [14] 范倩玉,李军辉,李晋,等. 不同作物秸秆还田对潮土结构的改良效果[J]. 水土保持学报, 2020, **34**(4): 230-236.
Fan Q Y, Li J H, Li J, *et al.* Effect of different crop straw mulching on alluvial soil structure improvement [J]. Journal of

- Soil and Water Conservation, 2020, **34**(4): 230-236.
- [15] 崔士友, 张蛟. 秸秆和植被覆盖对江苏滨海盐土土壤盐分变化的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, **34**(6): 509-516.
- Cui S Y, Zhang J. Effects of straw mulching and vegetative covering on soil salinity dynamics of salt affected soils in Jiangsu coastal region, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, **34**(6): 509-516.
- [16] 杨兰, 李冰, 王昌全, 等. 长期秸秆还田对德阳地区稻田土壤镉赋存形态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, **23**(6): 725-732.
- Yang L, Li B, Wang C Q, *et al.* Effects of long-term straw incorporation on cadmium speciation and bioavailability in paddy soils in Deyang Area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, **23**(6): 725-732.
- [17] 袁雪涛, 谷海红, 李富平, 等. 施用玉米秸秆对铅镉尾矿速效养分和重金属活性的影响[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(7): 36-40.
- Yuan X T, Gu H H, Li F P, *et al.* Effects of maize straw addition on nutrition availability and heavy metal activity in lead/zinc tailings[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **37**(7): 36-40.
- [18] Hu Y N, Wang D X, Wei L J, *et al.* Bioaccumulation of heavy metals in plant leaves from Yan'an City of the Loess Plateau, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **110**: 82-88.
- [19] 赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 等. 再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4094-4099.
- Zhao Z M, Chen W P, Jiao W T, *et al.* Effect of reclaimed water irrigation on soil properties and vertical distribution of heavy metal[J]. Environmental Science, 2012, **33**(12): 4094-4099.
- [20] 林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 等. 九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 453-460.
- Lin C Q, Huang H B, Hu G R, *et al.* Assessment of the speciation and pollution of heavy metals in paddy soils from the Jiulong River Basin[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 453-460.
- [21] Hu Y A, Liu X P, Bai J M, *et al.* Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(9): 6150-6159.
- [22] 洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞. 滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4620-4627.
- Hong T, Kong X S, Yue X F. Concentration characteristics, source analysis, and potential ecological risk assessment of heavy metals in a Peak-cluster depression area, Southeast of Yunnan Province[J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4620-4627.
- [23] 李健, 郑春江. 环境背景值数据手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988. 179-180.
- [24] 陈凤, 董泽琴, 王程程, 等. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4360-4369.
- Chen F, Dong Z Q, Wang C C, *et al.* Heavy metal contamination of soils and crops near a zinc smelter [J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4360-4369.
- [25] Wang H, Dong Y H, Yang Y Y, *et al.* Changes in heavy metal contents in animal feeds and manures in an intensive animal production region of China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(12): 2435-2442.
- [26] 宋三多, 刘汉军, 刘轶豪, 等. 沼肥施用对成都平原稻麦轮作土壤及作物养分和重金属含量的影响[J]. 生态科学, 2018, **37**(1): 35-41.
- Song S D, Liu H J, Liu Y H, *et al.* Effects of biogas manure application on nutrient and heavy metal content in soil and crop under rice-wheat rotation in Chengdu plain [J]. Ecological Science, 2018, **37**(1): 35-41.
- [27] 赖星, 伍钧, 王静雯, 等. 连续施用沼液对土壤性质的影响及重金属污染风险评价[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(6): 359-364, 370.
- Lai X, Wu J, Wang J W, *et al.* The long-term effects of biogas slurry on soil properties and potential risks of heavy metals in soils [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, **32**(6): 359-364, 370.
- [28] 曹阳, 陈新兵, 沙之敏, 等. 水稻秸秆还田量对土壤重金属及小麦产量的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2019, **37**(4): 6-11.
- Cao Y, Chen X B, Sha Z M, *et al.* Effect of rice straw returning on accumulation of heavy metals in soil and yield of wheat [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2019, **37**(4): 6-11.
- [29] 郑顺安, 刘代丽, 章明奎, 等. 长期秸秆还田对污染农田土壤与农产品重金属的影响[J]. 水土保持学报, 2020, **34**(2): 354-359.
- Zheng S A, Liu D L, Zhang M K, *et al.* Effects of long-term straw returning on heavy metals of soil and agricultural products in the polluted farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, **34**(2): 354-359.
- [30] 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.
- [31] 孙娜, 商和平, 茹淑华, 等. 连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 815-824.
- Su N, Shang H P, Ru S H, *et al.* Effects of continuous application of sewage sludge compost on heavy metals accumulation and mobility characteristics in soil profile and on heavy metals uptake of wheat [J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 815-824.
- [32] 王琼瑶, 李森, 周玲, 等. 猪粪-秸秆还田对土壤、作物重金属铜锌积累及环境容量影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(9): 1764-1772.
- Wang Q Y, Li S, Zhou L, *et al.* Accumulation and environmental capacity of Cu and Zn in soil-crop with swine manure applying and straw returning [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(9): 1764-1772.
- [33] Hesterberg D. Biogeochemical cycles and processes leading to changes in mobility of chemicals in soils [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1998, **67**(2-3): 121-133.
- [34] 李沅蔚, 邹艳梅, 王传远. 黄河三角洲油田区土壤重金属的垂直分布规律及其影响因素[J]. 环境化学, 2019, **38**(11): 2583-2593.
- Li Y W, Zou Y M, Wang C Y. Vertical distribution and influencing factors of heavy metals in oilfield soil in the Yellow River delta [J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(11):

- 2583-2593.
- [35] 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 等. 厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3764-3773.
Zhang W H, Yu R L, Yang Y J, *et al.* Migration and source analysis of heavy metals in vertical soil profiles of the drylands of Xiamen city[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3764-3773.
- [36] Xu P, Sun C X, Ye X Z, *et al.* The effect of biochar and crop straws on heavy metal bioavailability and plant accumulation in a Cd and Pb polluted soil[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, **132**: 94-100.
- [37] 蔡雨. 沼液中溶解性有机质与典型重金属络合作用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
Cai Y. A study of complexation of DOM in biogas slurry with typical heavy metals [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [38] Chen M, Cui Y S, Bai F, *et al.* Effect of two biogas residues' application on copper and zinc fractionation and release in different soils[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(9): 1865-1873.
- [39] Mahmoodabadi M, Yazdanpanah N, Sinobas L R, *et al.* Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): redistribution of soluble cations within the soil profile[J]. Agricultural Water Management, 2013, **120**: 30-38.
- [40] Wang S X, Zhang L, Jiang M L, *et al.* Cyclic and safety utilisation of Cu polluted biogas residue in saline-alkali soil[J]. Science of the Total Environment, 2020, **704**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135410.
- [41] Jalali M, Khanlari Z V. Effect of aging process on the fractionation of heavy metals in some calcareous soils of Iran[J]. Geoderma, 2007, **143**(1-2): 26-40.
- [42] 徐宁, 魏忠义. 沈抚灌区耕地重金属 Cd、Pb 的变化特征分析[J]. 农业资源与环境学报, 2019, **36**(6): 783-791.
Xu N, Wei Z Y. Analysis on the variation character of heavy metals Cd and Pb in the cultivated land of Shenfu sewage irrigation district [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, **36**(6): 783-791.
- [43] 王蕊, 陈明, 陈楠, 等. 基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比: 以龙岩市适中镇为例[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4348-4359.
Wang R, Chen M, Chen N, *et al.* Comparison of ecological risk assessment based on the total amount and speciation distribution of heavy metals in soil: a case study for Longyan City, Fujian Province[J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4348-4359.
- [44] 邱勇, 兰天, 赵庆杰. 海南热带雨林土壤中胡敏酸对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸附解吸特性研究[J]. 生态科学, 2020, **39**(1): 78-84.
Qiu Y, Lan T, Zhao Q J, *et al.* Characteristic of adsorption of Pb^{2+} and Cu^{2+} onto soil humic acids from tropical rainforest, Hainan province[J]. Ecological Science, 2020, **39**(1): 78-84.
- [45] 罗梅, 柏宏成, 陈亭悦, 等. 腐殖酸对土壤铅镉吸附、赋存形态及生物可给性的影响[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(3): 1191-1202.
Luo M, Bai H C, Chen T Y, *et al.* Effects of humic acids on the adsorption, chemical speciation, and bioaccessibility of soil lead and cadmium[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(3): 1191-1202.
- [46] 胡青青, 沈强, 陈飞, 等. 重构土壤垂直剖面重金属 Cd 赋存形态及影响因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2878-2888.
Hu Q Q, Shen Q, Chen F, *et al.* Reconstructed soil vertical profile heavy metal Cd occurrence and its influencing factors[J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2878-2888.
- [47] Zou J M, Liu X X, Dai W, *et al.* Pollution assessment of heavy metal accumulation in the farmland soils of Beijing's suburbs[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(27): 27483-27492.
- [48] 吴劲楠, 龙健, 刘灵飞, 等. 某铅锌矿区农田重金属分布特征及其风险评价[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(3): 1054-1063.
Wu J N, Long J, Liu L F, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of a lead-zinc mining area[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(3): 1054-1063.
- [49] 谢沂希, 谢尚春, 刘慧, 等. 双孢蘑菇菌渣还田下水稻土 Cu、Cd、Pb、Zn 相关性分析及污染评价[J]. 农业资源与环境学报, 2018, **35**(6): 518-526.
Xie Y X, Xie S C, Liu H, *et al.* Correlation analysis and pollution assessment about Cu, Cd, Pb and Zn in paddy soil under *Agaricus bisporus* residues recycling [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, **35**(6): 518-526.
- [50] 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.
- [51] Tang Y F, Wang L Y, Carswell A, *et al.* Fate and transfer of heavy metals following repeated biogas slurry application in a rice-wheat crop rotation[J]. Journal of Environmental Management, 2020, **270**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110938.

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-wei, 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) |