

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.7

第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)
基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟	谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)
郑州市 PM _{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析	杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)
能见度与 PM _{2.5} 浓度关系及其分布特征	王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)
基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征	白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)
太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源	李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)
办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征	王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)
南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征	张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)
黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征	张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)
基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析	王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)
李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响	徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)
水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价	王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)
银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价	田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)
人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例	谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)
漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析	唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)
三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析	付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)
降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响	翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)
绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征	童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)
微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析	刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)
钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性	张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)
基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用	唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)
N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水	于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)
Cu ²⁺ 对以 NO ₃ ⁻ 为电子受体反硝化过程的影响	买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)
CANON 中试反应器启动及性能优化	孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)
好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响	徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)
有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响	刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)
不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响	吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)
ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性	张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)
在线 NaClO 反洗对倒置 A ² O-MBR 系统微生物群落的影响	王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)
基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价	袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)
北京市清水与再生水协同利用优化模型	张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)
N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除	柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)
北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存	周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)
贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险	杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)
紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征	程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)
四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响	陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)
热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归	李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)
鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响	武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)
宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制	王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)
石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)
磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度	湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)
会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较	贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)
湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析	蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)
改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)
重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应	韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)
不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异	彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)
添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N ₂ O 排放影响	孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)
渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)
不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征	鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)
西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征	廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)
生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响	李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)
《环境科学》征订启事 (3194)	《环境科学》征稿简则 (3222)
信息 (3256, 3284, 3323)	

湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析

蒋凯^{1,2}, 邓潇^{1,2}, 周航^{1,2}, 龙坚^{1,2}, 李欣阳^{1,2}, 董霞^{1,2}, 王树兵³, 刘文辉⁴, 侯红波^{1,2}, 彭佩钦^{1,2*}, 廖柏寒^{1,2}

(1. 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004; 2. 中南林业科技大学稻米品质安全控制湖南省工程实验室, 长沙 410004; 3. 长沙县黄兴镇农业综合服务中心, 长沙 410100; 4. 宁乡市双江口镇农业综合服务中心, 长沙 410601)

摘要: 运用大田定位试验的方法, 研究了典型稻田系统 Cd 污染发展趋势. 于 2015-11 ~ 2018-11 逐月采集大气沉降及灌溉水样, 同时多次采集肥料、土壤及水稻样, 监测分析样品中 Cd 含量, 研究湘中典型稻田系统 Cd 输入输出平衡情况. 结果表明, 稻田系统 Cd 通过灌溉水、大气沉降和肥料等途径输入, 年均输入量为 $8.735 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 其中大气沉降为主要来源, 占总输入的 69.15% ~ 82.04%, 平均为 76.61%, 其次是灌溉水占 12.62% ~ 23.66%, 平均为 16.94%, 肥料占 5.34% ~ 7.19%, 平均为 6.45%; 稻田系统 Cd 通过地表径流、土壤下渗和水稻地上部分收获途径输出, 年均输出量为 $7.093 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 水稻地上部分收获占总输出的 85.27% ~ 95.02%, 平均为 89.69%, 其次是地表径流 4.57% ~ 13.96%, 平均为 9.41%, 土壤下渗输出的 Cd 最少, 为 0.41% ~ 1.51%, 平均 0.90%. 结果表明, 研究区稻田系统 Cd 为净输入, 土壤 Cd 污染形势仍在加剧. 稻草还田与稻草移除将对土壤 Cd 平衡产生重要影响, 稻草移除可以减缓土壤 Cd 污染发展趋势.

关键词: 稻田土壤; Cd 污染; 大气沉降; 水稻; Cd 平衡

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3324-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811175

Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan

JIANG Kai^{1,2}, DENG Xiao^{1,2}, ZHOU Hang^{1,2}, LONG Jian^{1,2}, LI Xin-yang^{1,2}, DONG Xia^{1,2}, WANG Shu-bing³, LIU Wen-hui⁴, HOU Hong-bo^{1,2}, PENG Pei-qin^{1,2*}, LIAO Bo-han^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. Hunan Engineering Laboratory for Control of Rice Quality and Safety, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 3. Agricultural Integrated Service Center of Changsha County, Huangxing Town, Changsha 410100, China; 4. Agricultural Integrated Service Center of Ningxiang City, Shuangjiangkou Town, Changsha 410601, China)

Abstract: By conducting field positioning experiments, we studied the development trend of Cd pollution in a typical paddy system. The samples of atmospheric deposition and irrigation water were collected monthly from November 2015 to November 2018 during which fertilizer, soil, and rice samples were also collected. The Cd concentration in the samples was monitored and analyzed to conduct research on the balance between Cd inputs and outputs in a typical paddy system in Hunan Province. The results suggest that through irrigation water, atmospheric deposition and fertilizer, the average annual input of Cd in the paddy field system is $8.735 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, of which atmospheric deposition, the major source, accounts for 69.15%-82.04% of the total input, with an average of 76.61%. This is followed by irrigation water and fertilizer, respectively, accounting for 12.62%-23.66% and 5.34%-7.19%, with an average of 16.94% and 6.45%, respectively. Through surface runoff, soil infiltration and the rice harvest of the aboveground portion, the annual average output of Cd contained in the paddy system is $7.093 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. Rice harvest accounts for 85.27% - 95.02% of the total output, with an average of 89.69%; surface runoff accounted for 4.57% - 13.96% of the total output, with an average of 9.41%; and soil infiltration accounted for 0.41% - 1.51% of the total output, with an average of 0.90%. The study indicates that Cd contained in paddy systems in Central Hunan exhibits a net input, and the soil Cd pollution is increasing as a result. Straw returning and straw removal have an important impact on the soil Cd balance, and straw removal can slow the trend of soil Cd pollution accumulation.

Key words: paddy soil; Cd pollution; atmospheric deposition; rice; Cd balance

稻田系统 Cd 输入途径包括灌溉水^[1]、大气沉降^[2]和人为施用的农用化学品肥料^[3]、农药^[4]等, 而 Cd 的输出包括稻谷和秸秆收获^[5]、地表径流^[6]和土壤下渗^[7]等途径. Hou 等^[8]对长江三角洲农田 Cd 输入调查发现, 灌溉水是 Cd 主要来源. Luo 等^[9]的研究发现, 牲畜粪便占农田 Cd 输入的 55%. 在新西兰、巴伊亚和巴西, 大气沉降是 Cd 进入农田土壤的主要来源^[10, 11]. Xia 等^[12]在松嫩平原研究发现, 植株和地表径流是农田 Cd 主要输出

途径. Yang 等^[13]对成都农田 Cd 进行分析发现, 植株和下渗是 Cd 主要输出途径. 稻田系统 Cd 平衡研究大多基于模型计算、统计年鉴和已有数据^[14], 仍然鲜见系统的定位调查和分析^[15]. 本研究于 2015-

收稿日期: 2018-11-23; 修订日期: 2019-02-15

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD05B02); 农业部财政部重大专项(农办财函[2016]6号); 湖南省重点学科建设项目(2006180)

作者简介: 蒋凯(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生态, E-mail: 502541321@qq.com

* 通信作者, E-mail: pqpeng123@sina.com

11 ~ 2018-11 对湘中典型稻田系统进行定位试验, 定期采集大气沉降样品, 逐次采集灌溉水、地表径流样品, 并分析土壤、肥料和水稻植株样品, 定量分析稻田 Cd 平衡状况, 探究了湘中典型稻田 Cd 污染发展趋势, 以期为保护土壤质量和制定可持续管理防治措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省长沙市宁乡市东北部 (112°38'E, 28°21'N), 属于亚热带季风湿润气候, 湿润多雨、光热充足, 地势平坦, 总面积 155 km²,

年均气温 16.7℃, 生长期平均 320 d, 无霜期平均 296 d, 平均降水量为 1 367.6 mm, 作物以双季稻为主, 基本无其他轮作物。研究区地处浏水下游, 土壤为第四纪红色黏土母质发育的红黄泥, 稻田土壤基本理化性质如表 1。试验田面积 2 hm², 按当地习惯进行耕作管理。

1.2 样品采集与分析

本试验于 2015-11 ~ 2018-11 进行。每月采集灌溉水和大气沉降样品, 每年 7 月初和 10 月底于水稻成熟后采集早稻、晚稻和土壤样品。在水稻生育期水稻灌溉时采集灌溉水样品, 试验设置了尾水收集系统, 地表径流发生时采集尾水收集桶水样。3 a

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of soil						
土壤类型	有机质/g·kg ⁻¹	pH	CEC	黏粒/%	全镉/mg·kg ⁻¹	有效镉/mg·kg ⁻¹
紫泥田	32.57	5.8	11.72	30.00	0.347	0.154

共采集 108 个灌溉水样、282 个大气沉降样、15 个肥料样、72 个地表径流样和 54 个水稻样。水稻灌溉时, 用 500 mL 聚四氟乙烯白瓶于灌溉沟渠内采集三瓶灌溉水样, 滴入硝酸后带回实验室于 4℃ 冰箱内保存; 试验田设置 3 个大气沉降收集罐, 采样时先用超纯水冲洗罐壁, 搅拌均匀后记录体积, 再收集罐中水样, 滴入硝酸后带回实验室于 4℃ 冰箱内保存; 水稻样按梅花布点法, 选取 5 个点, 每个点采集 1 兜, 混合后装袋作为一个样品, 带回后小心清洗, 然后将水稻分剪成根、茎叶以及谷物后称鲜重, 再将水稻样置于 105℃ 烘箱内杀青 30 min, 然后 60℃ 烘至恒重, 记录干重, 用小型砻谷机对谷物脱壳, 分为糙米和谷壳, 再用小型粉碎机将各部位粉碎后装入样品袋中保存待分析; 土壤样品按 S 型布点法 (HJ/T 166-2004), 采集表层土 (0 ~ 20 cm) 15 个点, 混匀后带回实验室, 挑出石块、细根和杂物, 阴凉处自然风干后研磨制样装入样品袋中保存待消解; 肥料在施用前收集并统计施用量。

水稻样采用干灰化法^[16], 土壤和肥料样采用王水-高氯酸消解^[17], 水样和大气沉降样采用硝酸-高氯酸消解^[18], 土壤有效态 Cd 用 DTPA 提取 (HJ 804-2016) 固液比为 1:5, 消解液用 ICP-OES (ICP 6300, Thermo) 和石墨炉原子分光光度计 (ICE 3000, Thermo) 测定 Cd 的含量, 干灰化以及消解过程带空白以及质控样品 (植物样选用大米标准物质 (GBW-10044)、土壤质控为国家标准物质土壤标准参考样 (ESS-3)、水样质控为水质监测标准样品 (GSB07-3186-2014))。试剂为优级纯或分析纯, 水为超纯水, 玻璃器皿和容器均用 10% 的硝酸浸泡过

夜, 用超纯水洗净后烘干备用。

1.3 数据处理

试验数据运用 SPSS 17.0、Excel 2010 整理和分析, 作图使用 Origin 8.5。

2 结果与分析

2.1 灌溉水中 Cd 的输入

灌溉水对稻田 Cd 的输入按下列公式计算:

$$I = \sum_{i=1}^n c_i V_i \times 10^{-6} \tag{1}$$

式中, I 是来自灌溉水 Cd 输入量 [$\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]; c_i 是单次灌溉水 Cd 浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); V_i 是单次灌溉水量 [$\text{L} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]; n 为年灌溉次数。

灌溉水 Cd 浓度主要分布在 0.05 ~ 0.1 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 1), 沟渠中灌溉水 Cd 的浓度均符合农田灌溉水质标准 (GB 5084-2005, 10 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 丰水期 (4 ~ 8 月) 和枯水期 (10 月 ~ 次年 1 月) 沟渠灌溉水中

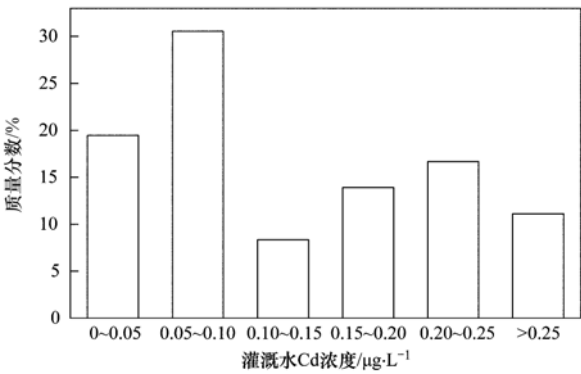


图 1 研究区灌溉水 Cd 浓度分布

Fig. 1 Distribution of Cd concentrations in the irrigation water of the study area

Cd 的浓度变化较大, 变异系数为 0.851(表 2). 根据湖南省用水定额农田灌水常规方式定额(DB43/T 388-2014, III 区早稻 3 675 m³·hm⁻², 晚稻 6 300

m³·hm⁻²)及单次灌溉水 Cd 平均浓度, 3 a 灌溉水中 Cd 年输入通量分别为 1.04、1.94 和 1.42 g·(hm²·a)⁻¹.

表 2 研究区灌溉水 Cd 浓度

Table 2 Cd concentrations in irrigation water in the study area

项目	最小值	最大值	平均值	中位数	标准差	变异系数
灌溉水/μg·L ⁻¹	0.018	0.644	0.155	0.115	0.132	0.851

2.2 大气沉降 Cd 输入

按以下公式来计算大气沉降 Cd 输入量:

$$A = \sum_{a=1}^n c_a V_a \times 100/S \quad (2)$$

式中, A 是大气沉降 Cd 输入量[g·(hm²·a)⁻¹]; c_a 是单次沉降罐样品 Cd 浓度(μg·L⁻¹); V_a 是沉降罐中样品体积(L·a⁻¹); S 是沉降罐底面积(cm²); n 为年取样次数.

大气沉降 Cd 浓度范围为 0.039 ~ 8.342 μg·L⁻¹, 平均为 1.336 μg·L⁻¹, 主要分布在 0~0.5 μg·L⁻¹(图 2), 变异系数为 1.231(表 3). 大气沉降 Cd 输入存在一定规律, 每年 4~7 月, 沉降罐中样品体积可达 4 000~5 000 mL, Cd 平均浓度为 0.150~0.295 μg·L⁻¹, 以湿沉降为主; 在 10 月~次年 2 月, 沉降罐中体积仅为 700~900 mL, 平均

浓度为 0.217~0.352 μg·L⁻¹, 以干沉降为主; 冬季大气沉降 Cd 浓度较高, 而雨季 Cd 通量较大. 3 a 大气沉降中 Cd 年输入通量分别为 6.76、5.67 和 7.68 g·(hm²·a)⁻¹.

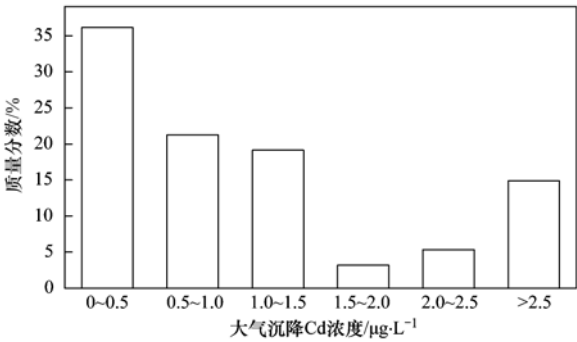


图 2 研究区大气沉降 Cd 浓度分布

Fig. 2 Distribution of Cd concentrations in atmospheric deposition in the study area

表 3 研究区大气沉降 Cd 浓度

Table 3 Cd concentrations in atmospheric deposition in the study area

项目	最小值	最大值	平均值	中位数	标准差	变异系数
大气沉降/μg·L ⁻¹	0.039	8.342	1.336	0.664	1.646	1.231

2.3 肥料 Cd 输入

按肥料施用量与 Cd 含量计算肥料 Cd 输入量, 公式如下:

$$F = \sum_{f=1}^n C_f M_f \quad (3)$$

式中, F 是肥料 Cd 输入量[g·(hm²·a)⁻¹]; C_f 是某次施用肥料中 Cd 含量(μg·g⁻¹); M_f 是某次施用肥料的施用量[g·(hm²·a)⁻¹]; n 是施肥次数.

如图 3, 研究区稻田主要施用复合肥、尿素和钾肥, 不同肥料 Cd 含量为 0.016~0.448 mg·kg⁻¹, 其中 2016 年施用的尿素 Cd 含量最低为 0.016 mg·kg⁻¹, 2017 年施用复合肥 Cd 含量最高为 0.448 mg·kg⁻¹. 早晚稻共施用复合肥 1 200 kg·hm⁻²、尿素 150 kg·hm⁻²和钾肥 300 kg·hm⁻². 同时, 在种植早稻前需要施用 750 kg·hm⁻²石灰来平衡土壤酸性, 石灰中 Cd 的平均含量为 0.363 mg·kg⁻¹. 若把石灰中 Cd 的输入量计算到肥料中, 3 a 肥料 Cd 年输入分别为 0.44、0.59 和 0.66 g·(hm²·a)⁻¹.

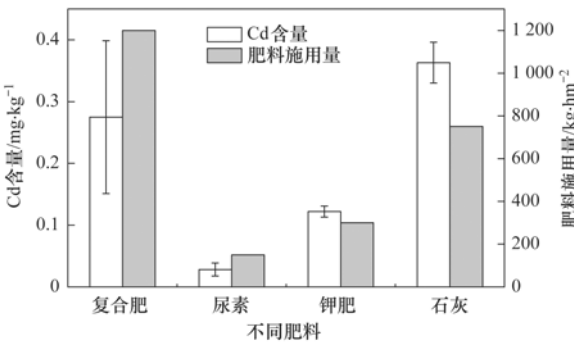


图 3 研究区不同肥料 Cd 含量和施用量

Fig. 3 Cd content and application rate of different fertilizers in the study area

2.4 地表径流和土壤下渗 Cd 输出

地表径流对稻田 Cd 的输出按以下公式计算:

$$R = \sum_{r=1}^n c_r V_r \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中, R 是 Cd 来自地表径流的输出量[g·(hm²·a)⁻¹]; c_r 是尾水中 Cd 的平均输出浓度(μg·L⁻¹); V_r 是尾水的排放量[L·(hm²·a)⁻¹]; n

为排放次数.

地表径流 Cd 浓度范围为 0.033 ~ 1.109 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 0.191 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 4), 变异系数为 0.622. 地表径流中 Cd 的平均浓度高于灌溉水的平均浓度, 因为地表径流中 Cd 的浓度与大气沉降、肥料的施用及土壤 Cd 含量有关. 地表径流的年排放量为 4 980 ~ 5 500 m^3 , 3 a 地表径流中 Cd 年输出量分别为 0.310、0.596 和 1.167 $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$.

表 4 研究区地表径流 Cd 浓度

Table 4 Cd concentrations in surface runoff in the study area

项目	最小值	最大值	平均值	中位数	标准差	变异系数
尾水/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.033	1.109	0.191	0.122	0.119	0.622

2.5 水稻植株 Cd 输出

通过早晚稻可食用部分(稻米)和不可食用部分(稻草)中 Cd 含量和生物量来计算水稻地上部分对 Cd 的移除量, 公式如下:

$$R = M_{e,r}C_{e,r} + M_{e,s}C_{e,s} + M_{l,r}C_{l,r} + M_{l,s}C_{l,s} \quad (5)$$

式中, R 是来自水稻地上部分 Cd 的输出量 [$\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]; $M_{e,r}$ 、 $M_{e,s}$ 、 $M_{l,r}$ 和 $M_{l,s}$ 分别为早稻稻米、早稻稻草、晚稻稻米和晚稻稻草的生物量 [$\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]; $C_{e,r}$ 、 $C_{e,s}$ 、 $C_{l,r}$ 和 $C_{l,s}$ 分别为早稻稻米、早稻稻草、晚稻稻米和晚稻稻草中 Cd 含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

采样时, 每个样品选取 5 个点, 每个点 0.2 m^2 , 计算生物量并分析各部位 Cd 含量来估算 1 hm^2 水稻 Cd 输出量. 水稻收割时, 根部会留在土壤中, 因此根部不计算在内. 水稻植株(茎叶和糙米) Cd 含量范围为 0.819 ~ 1.975 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 1.556 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 4). 糙米中 Cd 含量范围为 0.052 ~ 0.465 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中 51.92% 的糙米样品超过食品安全国家标准 (GB 2762-2017, 0.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 稻草(茎叶)中 Cd 的含量范围为 0.543 ~ 1.829 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 3 a 糙米中 Cd 年输出量分别为

土壤下渗输出的 Cd, 按水稻全生育期土壤下渗量计算, 南方黏壤土地在水稻全生育期的平均下渗为 2.8 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ [19, 20], 湖南双季稻早稻生育期平均 77 d, 晚稻 84 d, 全年下渗水量为 4 508 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, 同时由于土壤和土壤中的有机质等对 Cd 有吸附作用, 80% ~ 95% 的 Cd 会截留在土壤中, 平均有 10% 的 Cd 通过土壤下渗输出, 根据灌溉水中 Cd 的浓度, 得出 3a 土壤下渗中 Cd 年输出量分别为 0.028、0.093 和 0.064 $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$.

1.046、0.725 和 1.661 $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 稻草分别为 5.293、4.726 和 5.460 $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 水稻植株分别为 6.339、5.451 和 7.121 $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$.

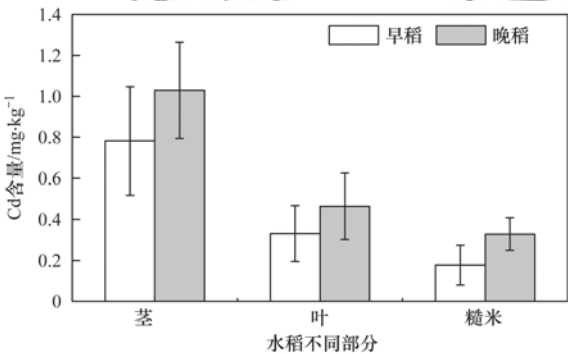


图 4 研究区水稻不同部分 Cd 含量

Fig. 4 Cd content in different parts of rice in the study area

2.6 Cd 平衡

图 5 表明, 大气沉降是最主要的输入途径, 占比 69.15% ~ 82.04%; 灌溉水的输入比重为 12.62% ~ 23.66%; 肥料比重最小为 5.34% ~ 7.19%. 灌溉水 Cd 年输入量先增加后减少, 大气沉降中 Cd 年输入量先减少后增加, 肥料中输入量相差不大, 但总输入量呈增加趋势. 水稻地上部分

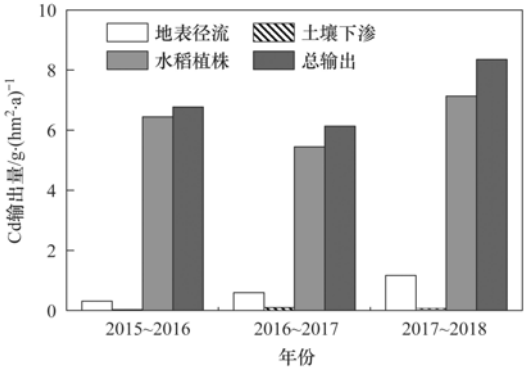
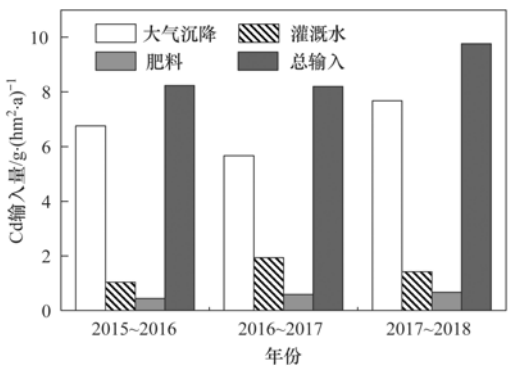


图 5 不同输入和输出途径 Cd 的量及总量

Fig. 5 Amount and total amount of different Cd input and output pathways

收获是最主要的输出途径, 占比 85.27% ~ 95.02%; 地表径流的比重为 4.57% ~ 13.96%; 土壤下渗比重最少为 0.41% ~ 1.51%. 水稻收获 Cd 年输出量先减少后增加, 地表径流 Cd 年输出量逐年增加, 土壤下渗 Cd 输出量变化不大, 总输出量先减少后增加.

通过上述 Cd 输入输出途径来说明稻田土壤中 Cd 的累积和发展趋势, Cd 平衡的计算公式如下:

$$A = I - O \quad (6)$$

式中, I 和 O 分别为 Cd 输入量和输出量 [$\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]; A 为 Cd 的累积量 [$\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], 当 $A > 0$ 时, 表现为土壤中的 Cd 增加, 当 $A < 0$ 时, 表现为土壤中的 Cd 亏损, 或者土壤中的 Cd 减少.

稻田 Cd 年输入量和输出量表明(图 5), 3 a 土壤 Cd 输入通量分别为 8.240、8.200 和 9.766 $\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 平均为 8.735 $\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$; 3 a 土壤 Cd 输出通量分别为 6.778、6.139 和 8.361 $\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 平均为 7.093 $\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$; 净输入通量分别为 1.462、2.061 和 1.405 $\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 平均为 1.643 $\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 3 a 稻田土壤 Cd 总净输入量为 4.928 $\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 对土壤 Cd 有累积效果.

3 讨论

3.1 大气沉降输入量和水稻输出量影响因素

本研究发现, 2015-11 ~ 2018-11 大气沉降是最主要 Cd 输入途径. 大气中 Cd 主要来自能源燃烧、采矿冶炼、交通运输和电镀染料等人类活动^[21], 有研究表明农田生态系统 Cd 的重要来源是大气沉降^[22~24]. 研究区在夏季以南风为主, 冬季为北风, 西南方向大约 15 km 和 35 km 处, 分别为经济开发区和煤炭坝矿区, 经济开发区有装备和建材制造行业, 煤炭坝矿区有一座火力发电厂; 同时稻田紧邻村道, 距离县道 800 m, 来往车辆会产生汽车尾气并扬起灰尘, 这是研究区大气沉降输入量远高于灌溉水和化肥的原因之一, 随着人类活动更加频繁, 大气沉降年输入量呈增加趋势. Feng 等^[25]采用同位素追踪发现, 沪宁高速路旁稻米中 41% 的 Cd 来自于大气沉降. 杨丽萍等^[26]分析发现, 燃煤、扬尘和汽车尾气等是兰州市大气沉降污染物来源. 大气 Cd 沉降量还会随着降雨量、季节和气候等时空变

化存在差异^[27], 研究区在 6 ~ 7 月降雨量大, 11 月 ~ 次年 1 月样品 Cd 浓度高, 这些月份 Cd 沉降量会略高于其它月份. 李定远等^[28]的研究发现南方降雨量大, 湿沉降量大, 通过降雨的 Cd 输入占总沉降的 90% 以上. Sharma 等^[29]对印度瓦拉纳西大气沉降调查发现, 夏季和冬季 Cd 的沉降量高于秋季.

水稻对 Cd 的吸收与水稻品种^[30]、土壤 pH^[31]、Cd 的形态^[32]和地表水分管理^[33]等因素有关, 研究区水稻植株收获 Cd 年输出量为 2018 > 2016 > 2017. 试验田早稻种植湘早粳 45 号, 晚稻种植湘晚粳 13 号, 均为常规稻. 2017 年 6 ~ 7 月, 研究区平均降雨量较常年提高了 90%, 相当于早稻在灌浆期和成熟期处于淹水条件下, 减少了水稻对 Cd 的吸收, 大量降雨也降低了水稻产量, 使 2017 年 Cd 输出量较低. 文献[34 ~ 36]通过水稻盆栽试验也发现, 长期淹水灌溉能显著降低水稻中 Cd 含量.

3.2 稻草对稻田土壤 Cd 平衡的影响

研究区稻草 Cd 平均累积量为 5.160 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$, 稻草还田会使土壤 Cd 污染加剧. 研究区稻田 2016 ~ 2018 年根中 Cd 含量范围为 0.410 ~ 4.590 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均为 1.689 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 5). 1 hm^2 双季稻根干重约为 1500 kg, Cd 累积量约为 2.534 $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占水稻 Cd 总累积量的 28.67%. 水稻收获时残留根茬中的 Cd 可重新释放进入土壤环境. 假设 Cd 输入在土壤表层(0 ~ 20 cm)^[9], 土壤重 $2.25 \times 10^6 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 且输入的 Cd 均被保留在土壤表面而无迁移. 通过 3 a 试验结果来评估研究区 Cd 年增长率, 以湖南省土壤背景值 0.21 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为研究区稻田土壤 Cd 质量分数^[37], 按平均净输入量为 1.643 $\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 计算(表 6), 土壤中 Cd 含量达到超过风险筛选值(GB 15618-2018, 0.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 需要 260 a; 若用污染区域稻草还田, 平均净输入量可达 6.809 $\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 62.7 a 就将超过风险筛选值. 研究区土壤 Cd 平均含量为 0.362 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 稻草还田情况下, 只需 12.6 a 就将超过风险筛选值, 而稻草离田情况下, 在 52 a 后达到风险筛选值. 因此在制定土壤污染防治措施时, 可以考虑将稻草和根茬移除, 稻草离田可减少 Cd 净输入量. 目前已有研究表明, 对离田稻草可以煅烧回收重金属^[38], 或无害化处理后再利用, 如制成饲料、生物炭和草木灰等^[39].

表 5 研究区水稻根中 Cd 含量

Table 5 Cd content in rice roots in the study area

项目	最小值	最大值	平均值	中位数	标准差	变异系数
根/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.410	4.590	1.689	1.122	1.082	0.641

表 6 稻田 Cd 年净输入通量/ $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$
Table 6 Annual net input fluxes of Cd in paddy fields/ $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$

来源	类型	2015 ~ 2016 年	2016 ~ 2017 年	2017 ~ 2018 年	平均
总输入		8.240	8.200	9.766	8.735
总输出	稻草离田	6.778	6.139	8.361	7.093
	稻草还田	1.485	1.413	2.901	1.933
平衡	稻草离田	1.462	2.061	1.405	1.643
	稻草还田	6.775	6.787	6.865	6.809

4 结论

通过稻田 Cd 平衡调查发现,研究区稻田 Cd 来源于灌溉水、大气沉降和肥料,其中大气沉降是最主要输入途径,输入量平均为 $6.703 \text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 占总输入量 76.61%。地表径流、土壤下渗和水稻收获是研究区稻田 Cd 主要输出途径,其中水稻收获是最主要输出途径,平均为 $6.340 \text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 占总输出量 89.69%, 地表径流次之为 9.41%, 土壤下渗最少为 0.90%。Cd 输入通量高于输出通量, Cd 在土壤中累积并污染稻田, 稻草还田将增加稻田 Cd 的累积量和污染程度。

参考文献:

[1] Yang Y, Chen W P, Wang M E, *et al.* Regional accumulation characteristics of cadmium in vegetables; influencing factors, transfer model and indication of soil threshold content [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 1036-1043.

[2] Pan Y P, Wang Y S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(2): 951-972.

[3] Sheppard S C, Grant C A, Sheppard M I, *et al.* Risk indicator for agricultural inputs of trace elements to Canadian soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, **38**(3): 919-932.

[4] Lu Y L, Song S, Wang R S, *et al.* Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China [J]. *Environment International*, 2015, **77**: 5-15.

[5] Yi K X, Fan W, Chen J Y, *et al.* Annual input and output fluxes of heavy metals to paddy fields in four types of contaminated areas in Hunan Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **634**: 67-76.

[6] Bengtsson H, Alvenäs G, Nilsson S I, *et al.* Cadmium, copper and zinc leaching and surface run-off losses at the Öjebyn farm in Northern Sweden—temporal and spatial variation [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, **113**(1-4): 120-138.

[7] Jiang W, Hou Q Y, Yang Z F, *et al.* Annual input fluxes of heavy metals in agricultural soil of Hainan Island, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(13): 7876-7885.

[8] Hou Q Y, Yang Z F, Ji J F, *et al.* Annual net input fluxes of heavy metals of the agro-ecosystem in the Yangtze River Delta, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **139**: 68-84.

[9] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(8): 2524-2530.

[10] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C. Atmospheric accessions of heavy metals to some New Zealand pastoral soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **305**(1-3): 105-115.

[11] De P Pereira P A, Lopes W A, Carvalho L S, *et al.* Atmospheric concentrations and dry deposition fluxes of particulate trace metals in Salvador, Bahia, Brazil [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(36): 7837-7850.

[12] Xia X Q, Yang Z F, Cui Y J, *et al.* Soil heavy metal concentrations and their typical input and output fluxes on the southern Song-nen Plain, Heilongjiang Province, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **139**: 85-96.

[13] Yang Z F, Hou Q Y, Yu T, *et al.* Eco-geochemical assessment of agroecosystems: Cd in the Chengdu economical region, Sichuan, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, **15**(5): 23-35.

[14] Belon E, Boisson M, Deportes I Z, *et al.* An inventory of trace elements inputs to French agricultural soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **439**: 87-95.

[15] Zhang P Y, Qin C Z, Hong X, *et al.* Risk assessment and source analysis of soil heavy metal pollution from lower reaches of Yellow River irrigation in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **633**: 1136-1147.

[16] 李欣阳, 龙坚, 王树兵, 等. 典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 406-414.

Li X Y, Long J, Wang S B, *et al.* Differences in Cd accumulation in typical soils under the double rice system [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 406-414.

[17] 陈齐, 邓潇, 陈珊, 等. 典型土壤不同提取态 Cd 与水稻吸收累积的关系 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2538-2545.

Chen Q, Deng X, Chen S, *et al.* Correlations between different extractable cadmium levels in typical soils and cadmium accumulation in rice [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2538-2545.

[18] Klaic P M A, Nunes A M, Da Silveira Moreira A, *et al.* Determination of Na, K, Ca and Mg in xanthan gum: Sample treatment by acid digestion [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, **83**(4): 1895-1900.

[19] 王传娟, 王少丽, 陈皓锐, 等. 稻田水量调控模拟计算及分析 [J]. *中国农村水利水电*, 2016, (8): 137-143.

Wang C J, Wang S L, Chen H R, *et al.* The simulation and analysis of paddy rainfall storage and water conservation [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016, (8): 137-143.

[20] 薛万来, 牛文全, 罗春艳, 等. 微润灌溉土壤湿润体运移模型研究 [J]. *水土保持学报*, 2014, **28**(4): 49-54.

Xue W L, Niu W Q, Luo C Y, *et al.* Prediction model of wetted front migration distance under moistube-irrigation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(4): 49-54.

[21] 王梦梦, 原梦云, 苏德纯. 我国大气重金属干湿沉降特征及时空变化规律 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(11): 4085-

4096.
Wang M M, Yuan M Y, Su D C. Characteristics and spatial-temporal variation of heavy metals in atmospheric dry and wet deposition of China[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37** (11): 4085-4096.
- [22] 邓昌州, 孙广义, 杨文, 等. 黑龙江甘南县大气降尘重金属元素沉降通量及来源分析[J]. *地球与环境*, 2012, **40**(3): 342-348.
Deng C Z, Sun G Y, Yang W, *et al.* Analysis of the deposition flux and source of heavy metal elements in atmospheric dustfall in Ganan county, Heilongjiang province [J]. *Earth and Environment*, 2012, **40**(3): 342-348.
- [23] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, *et al.* An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **311**(1-3): 205-219.
- [24] Pandey J, Pandey U. Accumulation of heavy metals in dietary vegetables and cultivated soil horizon in organic farming system in relation to atmospheric deposition in a seasonally dry tropical region of India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **148**(1-4): 61-74.
- [25] Feng J F, Wang Y X, Zhao J, *et al.* Source attributions of heavy metals in rice plant along highway in eastern China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(7): 1158-1164.
- [26] 杨丽萍, 陈发虎. 兰州市大气降尘污染物来源研究[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(4): 499-502.
Yang L P, Chen F H. Study on the source apportionment of atmospheric dust pollutants in Lanzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, **22**(4): 499-502.
- [27] 戴青云, 贺前锋, 刘代欢, 等. 大气沉降重金属污染特征及生态风险研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2018, **41**(3): 56-64.
Dai Q Y, He Q F, Liu D H, *et al.* Progress in research on heavy metals in atmospheric deposition: pollution characteristics and ecological risk assessment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41**(3): 56-64.
- [28] 李定远, 石德强, 申锐莉, 等. 江汉平原大气污染源分析[J]. *现代地质*, 2008, **22**(6): 915-921.
Li D Y, Shi D Q, Shen R L, *et al.* Analysis on source apportionment of atmosphere particulates in Jiangnan Plain, China[J]. *Geoscience*, 2008, **22**(6): 915-921.
- [29] Sharma R K, Agrawal M, Marshall F M. Atmospheric deposition of heavy metals (Cu, Zn, Cd and Pb) in Varanasi city, India [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **142**(1-3): 269-278.
- [30] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒 Cd、Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄取风险[J]. *环境科学*, 2003, **24**(3): 112-115.
Li Z W, Zhang Y L, Pan G X, *et al.* Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake[J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(3): 112-115.
- [31] 邹佳玲, 辜娇峰, 杨文毅, 等. 不同 pH 值灌溉水对土壤 Cd 生物有效性及稻米 Cd 含量的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(4): 1508-1514.
Zou J L, Gu J F, Yang W T, *et al.* Effects of different pH values of irrigation water on soil Cd bioavailability and Cd content in rice [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(4): 1508-1514.
- [32] 关共凑, 徐颂, 黄金国. 重金属在土壤-水稻体系中的分布、变化及迁移规律分析[J]. *生态环境*, 2006, **15**(2): 315-318.
Guang G C, Xu S, Huang J G. The Regularity of distribution, change and migration of heavy metals in soil-rice plant system [J]. *Ecology and Environment*, 2006, **15**(2): 315-318.
- [33] Arao T, Ae N. Genotypic variations in cadmium levels of rice grain[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2003, **49**(4): 473-479.
- [34] 田桃, 曾敏, 周航, 等. 水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 343-351.
Tian T, Zeng M, Zhou H, *et al.* Effects of different water managements and soil Eh on migration and accumulation of Cd in rice[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 343-351.
- [35] 纪雄辉, 梁永超, 鲁艳红, 等. 污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. *生态学报*, 2007, **27**(9): 3930-3939.
Ji X H, Liang Y C, Lu Y H, *et al.* The effect of water management on the mechanism and rate of uptake and accumulation of cadmium by rice growing in polluted paddy soil [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(9): 3930-3939.
- [36] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 水分管理模式对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(4): 908-914.
Liu Z B, Ji X H, Peng H, *et al.* Effects and action mechanisms of different water management modes on rice Cd absorption and accumulation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(4): 908-914.
- [37] 段淑辉, 周志成, 刘勇军, 等. 湘中南农田土壤重金属污染特征及源解析[J]. *中国农业科技导报*, 2018, **20**(6): 80-87.
Duan S H, Zhou Z C, Liu Y J, *et al.* Distribution and source apportionment of soil heavy metals in central-south of Hunan province[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, **20**(6): 80-87.
- [38] Van Der Ent A, Baker A J M, Reeves R D, *et al.* Agromining: farming for metals in the future? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(8): 4773-4780.
- [39] 马骁轩, 蔡红珍, 付鹏, 等. 中国农业固体废弃物秸秆的资源化处置途径分析[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(1): 168-174.
Ma X X, Cai H Z, Fu P, *et al.* Analysis of the reutilization methods for agricultural waste of straw in China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(1): 168-174.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)