

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

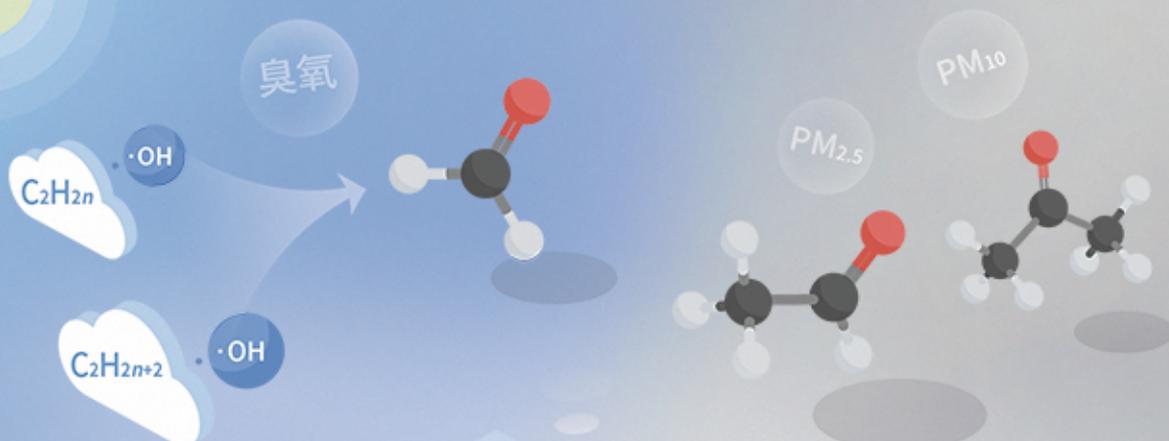
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析：以南京市观测为例
胡崑，王鸣，王红丽，景盛翱，陈文泰，卢兴东



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2021年1月

第42卷 第1期

Vol.42 No.1



目次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测 顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆 (1)

基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨 (9)

中原城市群典型城市秋冬季大气 PM_{2.5} 污染特征及溯源 苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝因, 齐静文 (19)

沈阳市冬季大气 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源解析 王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀 (30)

保定地区 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评估 雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐 (38)

基于 PMF 和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析: 以南京市观测为例 胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翔, 陈文泰, 卢兴东 (45)

2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源 高璟璇, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐逸, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁 (55)

柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽 (65)

天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析 罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂 (75)

2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李浩, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林 (88)

2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势 赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (97)

大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析 李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城 (106)

叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比 岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国 (114)

东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟 张冰, 张芊芊, 应光国 (127)

松花江哈尔滨段及阿什河抗生素的分布规律与生态风险评估 杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨 (136)

东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评估 李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮 (147)

河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评估 周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫 (159)

无锡-常州地下水水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评估 王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波 (166)

清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估 刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛 (175)

会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险 李军, 赵一, 邹胜章, 蓝美宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹滢 (184)

三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化 陈昭宇, 李思悦 (195)

不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布 岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花 (204)

基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险 张红娜, 崔娜, 申红妙 (211)

分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制 闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜 (221)

丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素 郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进 (234)

太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应 郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆 (242)

石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量 邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王盛燕, 王子芳 (251)

前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响 陈焱, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪 (263)

浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制 陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然 (274)

填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响 刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励 (283)

FeMnNi-LDHs 对水中 As(III) 的吸附性能与机制 廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂 (293)

硝酸钙添加和铅改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌 (305)

某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征 颜亚玮, 於驰晟, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远 (315)

不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替 李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送 (323)

天然富硒土地划定的富硒阈值 王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃 (333)

融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测 高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴俊杰, 刘楚藩 (343)

南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟 戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平 (353)

闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险 林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌 (359)

干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交水稻籽粒 Cd 累积及产量的影响 杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵 (368)

三元复合调理剂对土壤镉吸附形态和糙米镉累积的调控效应 蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宇, 周航, 廖柏寒 (378)

风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响 郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星 (386)

不同施肥措施对水稻土壤微生物抗性的影响 郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷 (394)

氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性 张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希 (403)

黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征 钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (411)

生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺 (422)

植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响 张瑞海, 宋振, 付卫东, 鄂玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良 (433)

黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应 史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太 (443)

等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物量碳氮的影响 何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华 (450)

秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响 孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔 (459)

生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响 杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明 (467)

氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响 俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红 (477)

微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累 赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇 (485)

无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟 阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞 (492)

基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析 孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超 (501)

《环境科学》征订启事(8) 《环境科学》征稿简则(220) 信息(233, 352, 421)

南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟

戴雅婷^{1,2}, 傅开道¹, 杨阳^{2*}, 王美娥², 陈卫平^{2,3}

(1. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 模拟分析稻田系统镉(Cd)迁移途径和土壤Cd累积趋势有助于风险决策的科学性和合理性. 本文以湖南省攸县为研究区, 在多环境介质采样的基础上, 构建土壤重金属污染物累积(PAM)模型, 预测区域稻田土壤Cd累积趋势, 结合 Monte Carlo 随机模拟方法评估不同修复措施的有效性和可持续性. 结果表明在当前Cd输入模式下连续耕作50 a后, 攸县稻田土壤Cd含量处于轻度污染的概率高达82.1%, 平均累加量达到 $4.28 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$. 敏感性分析显示大气沉降和水稻吸收是影响攸县水稻土Cd累积的关键输入和输出过程. 多情景模拟结果显示减少秸秆还田、优化工矿企业布局(减少大气沉降)和清洁灌溉水的综合措施可使区域土壤Cd含量在50 a降低43.7%, 轻度污染概率降低了80.6%, 是稻田Cd污染风险防控的长期有效措施.

关键词: 水稻土; Cd累积风险; 通量模型; Monte Carlo模拟; 敏感性分析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)01-0353-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202006121

Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China

DAI Ya-ting^{1,2}, FU Kai-dao¹, YANG Yang^{2*}, WANG Mei-e², CHEN Wei-ping^{2,3}

(1. Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650091, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The simulation analysis of the migration path and soil accumulation trend of Cd in paddy soil systems could contribute to improved scientific and reasonable risk decision-making. In this study, based on a regional survey of environmental media in Youxian County, Hunan Province, a pollutant accumulation model (PAM) was built to predict the cumulative trend of Cd in paddy soils. Combined with Monte Carlo simulation, the PAM model was used to evaluate the effectiveness and sustainability of various remediation measures. Results showed that the probability of Cd accumulation in paddy soils in Youxian County exceeded that of the national soil environmental quality standard by 2-fold and was up to 82.1%, and the average accumulation rate reached $4.28 \mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$ after 50 years of cultivation under current input pattern. Sensitivity analysis results showed that atmospheric deposition and rice uptake were the key processes affecting Cd accumulation in paddy soils. Results of a multi-scenario simulation showed that the comprehensive measures, such as reducing the straw returning, optimizing the layout of industrial and mining enterprises that reduce the atmospheric deposition of Cd, and cleaning irrigation water, could reduce the Cd accumulation in paddy soils by 43.7% and reduce the probability of light Cd pollution by 80.6% after 50 years, which would be an effective long-term measure to prevent and control Cd pollution risk in paddy soils.

Key words: paddy soils; cadmium accumulation risk; mass balance model; Monte Carlo simulation; sensitivity analysis

重金属镉(Cd)是生物体非必需元素, 毒性大, 迁移性强, 易被水稻吸收, 并在稻米中富集, 对人类健康造成严重威胁^[1,2]. 近年来, 土壤-水稻系统Cd污染事件在我国、日本、欧洲、北美和非洲等地均有报道^[3,4]. Cd在进入土壤后, 经吸附、置换、溶解和络合等多个过程以离子态、还原态和氧化态等多种形态赋存于土壤中, 常规监测难以揭示土壤Cd累积效应动态变化, 如何有效预测土壤Cd累积趋势是当前国内外关注的主要环境问题之一^[5~7].

模型研究可以有效地耦合多种因素, 是科学模拟土壤Cd迁移过程和累积趋势的重要手段^[7,8]. 当前国内外对土壤Cd累积迁移的模型研究多集中在土壤Cd源解析、土壤固液相中Cd的吸附解吸过程、土壤-植物系统中Cd的累积预测以及土壤Cd健

康风险评估等方面^[5~9]. 然而土壤Cd累积迁移过程强度低、周期长且影响因素繁杂, 传统模型无法准确模拟土壤Cd在不同输入模式下的累积过程^[6,10]. 基于质量平衡原理建立的通量模型耦合了重金属多相迁移、土壤淋溶和植物吸收等过程, 可有效模拟土壤Cd在区域尺度上的累积趋势^[8,11,12]. 土壤Cd输入及输出通量具有不确定性, 导致土壤Cd累积过程模拟具有较大的随机性. Monte Carlo模拟基于事物运动几何数量和几何特征, 对每一参数进行随机抽

收稿日期: 2020-06-11; 修订日期: 2020-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907353); 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室项目(SKLU2020-2-5)

作者简介: 戴雅婷(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属累积迁移模型, E-mail: yatingdai05@163.com

* 通信作者, E-mail: yyang@rcees.ac.cn

样并代入概率模型,通过多次模拟计算得到稳定的均值及其出现概率,以降低土壤 Cd 累积过程的随机性^[13]. 目前, Monte Carlo 模拟广泛用于控制土壤重金属模型参数和风险评估系统的不确定性^[7,9].

湖南省攸县是我国南方稻米主产区之一,近年来的“镉米”事件对该地农业生产造成了巨大经济损失,并对当地民众健康带来严重威胁^[14]. 本研究基于区域多环境介质采样,构建重金属污染物累积模型(PAM)模拟区域水稻土 Cd 累积过程,结合 Monte Carlo 模拟和参数敏感性分析,量化不同输入途径对土壤 Cd 累积影响程度,并通过场景模拟和概率分析,评估不同修复措施在区域污染稻田长期应用的有效性和可持续性,以期为我国农田安全管理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 数据获取

于 2013 年在攸县(113°09'09"~113°51'30"E, 26°46'34"~27°26'30"N)进行全县尺度野外实地考察,并设置 124 个采样点采集相关样品. 具体采样方案:在每个采样点上下风向各布置 5 个农田样点,选用 5 点混合采样法采集稻田表层(0~20 cm)土壤样品,同时采集各样点旁边水稻、灌溉水、灌溉渠底泥及肥料样品,并在附近无人扰动,自然植被覆盖的山地采集自然土壤样品. 2013 年 1~12 月共收集 240 个大气沉降物样品,布置原则为在远离工矿企业的农田设置大气沉降桶,逐月收集当地大气沉降物. 样点分布情况参见文献^[9],各类样品 Cd 含量测定分析方法参见文献^[15,16].

1.2 模型介绍

基于质量平衡原理建立重金属污染物累积(PAM)模型,该模型可准确量化土壤中重金属累积和迁移过程,并可对土壤重金属的长期累积趋势进行模拟^[7,8]. 该模型输入过程包括大气沉降输入、灌溉输入、肥料输入及其它输入过程,输出过程包括植物吸收和土壤淋溶输出过程,模型框架参见图 1,涉及的主要控制方程见表 1.

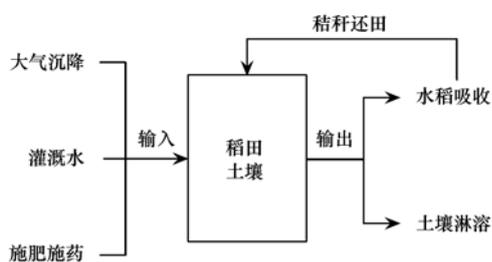


图 1 重金属污染物累积模型(PAM)框架

Fig. 1 Framework of the PAM model

表 1 重金属污染物累积模型(PAM)主要环境过程及其控制方程¹⁾

Table 1 Descriptions of the key processes and the main control equations in the PAM model

环境过程	计算方程	文献
质量平衡过程	$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{I_t}{\partial t} - \frac{\partial U}{\partial t} - \frac{\partial L}{\partial t}$	[7,17]
大气沉降输入过程	$I_{atm} = \sum_{i=1}^{12} W_{atm}$	本研究
灌溉输入过程	$I_{irr} = W_{irr} \cdot C_{irr}$	本研究
水稻吸收输出过程	$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{C_t \cdot R_p \cdot PUF \cdot G_{biomass}}{\rho \cdot d}$	[7,8]
秸秆还田过程(Michaelis-Menten 动力方程)	$I_r = \frac{\partial U}{\partial t} \cdot \frac{T_r \cdot R_r}{d}$	[7]
淋溶输出过程(一维对流扩散方程)	$\frac{\partial L}{\partial t} = \frac{K_h \cdot \theta \cdot C}{d}$	[8]

1) C_t 表示土壤 Cd 总量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); U 表示植物 Cd 吸收量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); L 表示 Cd 淋溶量($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$); t 表示时间步长(h); I_a 表示大气沉降通量 [$\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]; W_{atm} 表示月沉降通量 [$\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{月})^{-1}$]; I_{irr} 表示单位时间灌溉 Cd 输入量($\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$); W_{irr} 表示单位时间内净灌溉水量($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$); C_{irr} 表示灌溉水 Cd 浓度($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); R_p 表示表层植物根系比例(%); PUF 表示植物 Cd 富集因子; $G_{biomass}$ 表示植物生物量增长速率 [$\text{kg} \cdot (\text{dm}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]; ρ 表示土壤容重($\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$); d 表示土壤深度(cm); I_r 表示 1d 内秸秆还田输入量 [$\text{mg} \cdot (\text{dm}^3 \cdot \text{d})^{-1}$]; T_r 表示秸秆还田持续天数(d); R_r 表示还田率,还田量占同期植物吸收量的百分比(%); K_h 表示淋溶速率($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); θ 表示土壤含水量($\text{dm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$); C 表示土壤液相 Cd 含量($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$)

考虑到区域稻田 Cd 累积的随机性和不确定性^[7,9],本研究在 PAM 定量分析的基础上加入 Monte Carlo 模拟,通过对土壤 Cd 累积关键参数进行抽样,并将其代入主控方程揭示影响土壤 Cd 累积的关键过程,预测不同修复措施下土壤 Cd 累积趋势,进一步提高风险决策的科学性和合理性.

1.3 参数设置

基于本研究团队在攸县开展的大量前期工作^[7,9,16]获取所需参数信息,结合本研究区域多介质调查结果及样品实测数据进行参数修正,最终模型输入参数设定如表 2. 相关研究表明 Monte Carlo 执行次数越多,得到的风险概率越准确,当模拟次数达 10 000 次时,计算结果趋于稳定^[7,9,13]. 本研究 Monte Carlo 计算循环次数为 10 000 次.

2 结果与讨论

2.1 稻田土壤 Cd 污染及来源概况

研究区域多介质调查结果如表 3 所示. 研究区稻田表土 Cd 平均含量为 $0.498 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 约为湖南省表层土壤 Cd 背景值^[18] ($0.126 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 3.95 倍,是国家土壤环境质量标准值^[19] ($0.300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{pH} \leq 5.5$) 的 1.66 倍. 稻米 Cd 平均含量为 $0.583 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 为国家粮食标准^[20] (0.200

表2 重金属污染物累积模型(PAM)设定参数¹⁾

Table 2 Descriptions of the parameters of the PAM model

模型参数	单位	数值
土壤 Cd 含量(C_i)	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.498
模拟周期(T)	a	0~50
土壤深度(d)	cm	20
土壤含水量(θ)	$\text{dm}^3\cdot\text{dm}^{-3}$	0.297
土壤容重(ρ)	$\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$	1.01
淋溶速率(K_h)	$\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$	0.005 33
Freundlich 分配系数(K_f)	$\text{dm}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	140
Freundlich 吸附参数(n)	—	0.57
大气沉降通量(I_a)	$\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$	7.67
稻米 Cd 富集因子(PUF_{rice})	—	1.17
秸秆 Cd 富集因子($\text{PUF}_{\text{straw}}$)	—	2.47
还田量(BioG)	$\text{t}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$	12
根系比例(R_p)	%	70
早稻生长期	d	100
晚稻生长期	d	120
灌溉水 Cd 浓度(C_{irr})	$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.196
早稻灌溉水量	$\text{cm}\cdot\text{season}^{-1}$	12.7
晚稻灌溉水量	$\text{cm}\cdot\text{season}^{-1}$	35.8
肥料 Cd 含量(C_f)	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.226

1) 肥料年输入量为 $3\ 000\ \text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 年灌溉水量为 $4\ 850\ \text{m}^3\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 2.92 倍。研究发现攸县稻田土壤 Cd 固液分配系数(土壤 Cd/溶液 Cd, K_d) 均值为 $29.5\ \text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$, 约为加州农田土壤 K_d 值^[21] ($3\ 010\ \text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 0.980%, 南京水田 K_d 值^[22] ($940\ \text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的 3.14%。研究区稻米 PUF 均值为 1.17, 是全国稻米 PUF 均值^[23] (0.260) 的 4.50 倍。结果说明攸县水稻 Cd 迁移风险较高, 水稻 Cd 富集水平显著。

张敏等^[16]的研究指出大气沉降是攸县地区稻田土壤最主要的 Cd 来源。灌溉水作为水稻土 Cd 输入源之一, 灌溉水浓度、水量和模式将影响土壤 Cd 累积^[24]。化肥的使用会增加土壤 Cd 累积量^[25]。攸县水稻土 Cd 输入通量结果(表 3)显示, 研究区稻田土壤 Cd 大气沉降通量为 $7.67\ \text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 超过全国农田土壤大气沉降输入通量均值^[26] [$3.92\ \text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$] 的 1.95 倍; 灌溉水 Cd 输入通量为 $0.951\ \text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 超过全国均值^[26] [$0.238\ \text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$] 的 3.99 倍; 肥料 Cd 输入通量为 $0.678\ \text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 低于全国均值^[26] [$0.897\ \text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]。攸县稻田土壤 Cd 大气沉降输入通量显著高于其他输入源, 为区域稻田 Cd 污染的主要来源。该结果与 Yi 等^[27]对湖南长株潭地区稻田大气沉降输入通量占总输入通量 51.2%~94.7% 的监测结果一致。

2.2 稻田土壤 Cd 累积模拟

应用所构建的 PAM 模型模拟攸县稻田土壤 Cd

表3 研究区土壤 Cd 含量及其输入通量

Table 3 Concentration of Cd in soil and its input flux in the investigated region

项目	观测值
自然土壤/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.306 ± 0.156
水稻田表土/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.498 ± 0.277
底泥/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.50 ± 1.11
稻米/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.583 ± 0.300
秸秆/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.23 ± 0.867
$K_d/\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$	29.5 ± 240
稻米 PUF	1.17 ± 1.21
大气沉降输入通量/ $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$	7.67 ± 3.24
灌溉水输入通量/ $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$	0.951 ± 0.441
肥料输入通量/ $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$	0.678 ± 0.591

累积趋势。结果显示(图 2)在当前 Cd 输入模式下, 连续耕作 50 a 后区域水稻田表土 Cd 平均含量由初始值 $0.498\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加到 $0.712\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 区域稻田土壤 Cd 多年平均累积量为 $4.28\ \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$, 高于全国农田土壤平均 Cd 累积量^[26] [$4.00\ \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$]。另外, 土壤 Cd 累积量预测标准差逐年增大, 50 a 后模拟结果标准差高达 $0.296\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 接近目前实际观测值标准差。这可能与区域土壤 Cd 输入途径、人为活动方式、强度等因素有关^[28], 因此需要在定量模拟的基础上再次进行随机模拟, 以降低模拟结果的随机性和不确定性。

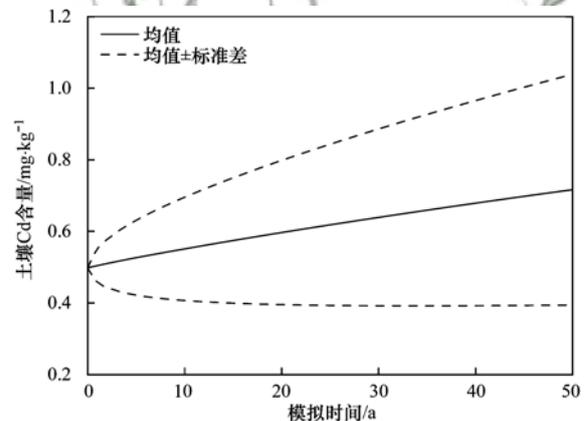


图2 当前输入模式下攸县水稻田表土 Cd 累积模拟结果

Fig. 2 Accumulation simulation results of Cd in paddy soils of Youxian County under the current input pattern

以 PAM 模拟结果为基础, 结合 Monte Carlo 模拟方法对攸县水稻土 Cd 累积过程进行随机模拟。结果显示(图 3)随着时间推移, 攸县水稻土 Cd 平均含量逐年增加, 10 a 后攸县水稻土 Cd 有 9.83% 概率处于轻度污染^[29] ($0.6\sim0.9\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 20 a 后该概率增长到 29.3%, 30 a 后超过一半的区域 (52.2%) 土壤 Cd 含量处于轻度污染状态。值得注意的是, 40 a 后区域土壤 Cd 处于轻度污染的概率为 70.8%, 同时有 8.64% 概率达中度污染^[29] ($0.9\sim1.5\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 50 a 后高达 82.1% 区域土壤为轻度

污染且中度污染概率增长到 12.4%。可见在当前土壤 Cd 输入模式下攸县水稻土 Cd 污染形势严峻,在风险管理时应给予足够重视,并采取有效措施降低区域土壤 Cd 累积风险。

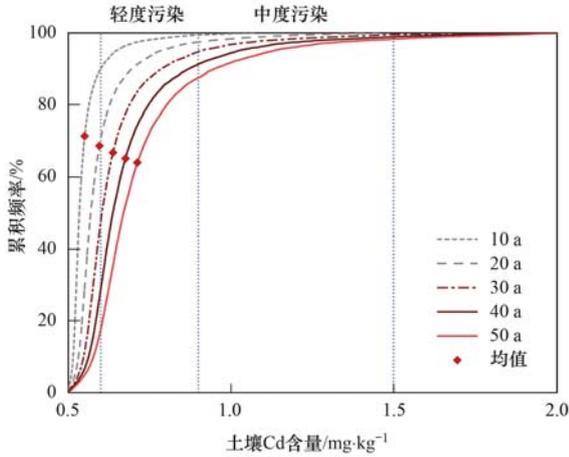


图3 当前输入模式下攸县水稻土 Cd 累积风险

Fig. 3 Accumulation risk of Cd in the paddy soils of Youxian County under the current input pattern

2.3 影响因素分析

敏感性分析可以量化模型参数对模型输出的影响,揭示土壤 Cd 累积过程中的主要影响因素^[30]。本研究采用全局敏感性分析方法^[31],评估各参数对土壤 Cd 累积的影响。参数敏感性分析结果(图4)显示,大气沉降通量(I_a , 5.43%)、水稻 Cd 富集因子(PUF, -3.11%)、还田量(BioG, -3.11%)及 Freundlich 吸附系数(n , -2.58%)参数敏感性较高,灌溉水浓度(C_{ir} , 0.672%)、Freundlich 分配系数(K_f , 0.440%)、体积含水量(θ , -0.319%)及淋溶速率(K_h , -0.321%)参数敏感性较低。可见多重因素的共同作用导致水稻土 Cd 累积迁移过程的复杂性和异质性。

区域土壤 Cd 输入过程中大气沉降输入和灌溉输入参数敏感性分别为 5.43% 和 0.672%,输出过程中水稻吸收及淋溶输出则为 -6.21% 和 -2.46% (图4)。Luo 等^[22]的研究指出我国农田土壤 Cd 年均输入通量[$11.5 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]约为其年均输出通量[$1.40 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]的 8.21 倍,可见源头控制是降低我国区域农田土壤 Cd 累积的关键步骤。攸县区域土壤 Cd 输入过程中,大气沉降 Cd 输入通量[$7.67 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]超过灌溉 Cd 输入通量[$0.951 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]的 8.06 倍。水稻秸秆富含 Cd 迁移活化的载体,是土壤 Cd 输出的主要途径之一^[32],研究区秸秆 Cd 平均含量(表3, $1.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)约为稻米 Cd 平均含量(表3, $0.583 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的 2.11 倍,当地秸秆还田量高达 $12 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ (表2),通过秸秆还田攸县水稻 Cd 返还给土壤 Cd 的通量高

达 $14.8 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。可见优化工矿企业布局(减少大气沉降)和减少秸秆还田量是降低区域土壤 Cd 累积的潜在有效措施。

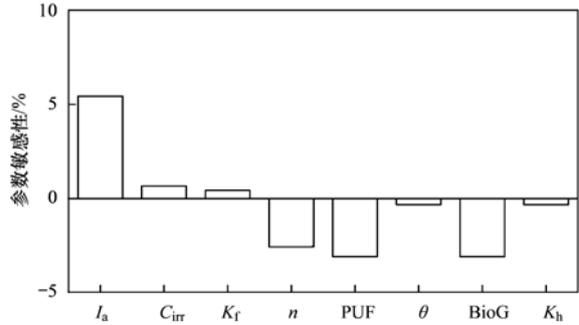


图4 参数值变化对水稻土 Cd 累积的影响

Fig. 4 Effects of changes in parameter values on Cd accumulation in the paddy soils of Youxian County

2.4 区域土壤多情景模拟

场景分析有助于评估不同修复措施在区域污染稻田长期应用的有效性和可持续性^[7]。基于区域土壤 Cd 累积模拟结果及其关键环境过程(2.2 节和 2.3 节),本研究共设定 5 个区域土壤 Cd 输入模式,其中情景 1 为当前攸县水稻土 Cd 输入模式;情景 2 通过秸秆不还田以降低土壤 Cd 含量;情景 3 为通过产业结构升级,优化工矿企业布局,减少当地大气沉降 Cd 输入通量的修复措施;情景 4 通过清洁灌溉水,降低灌溉水浓度,以此减少区域土壤 Cd 灌溉输入通量;考虑到现实情况情景 2~4 难以完全实现,故设置综合措施情景 5:减少秸秆还田(情景 2 为秸秆不还田)、减少大气沉降(年降低率低于情景 3)和清洁灌溉水(灌溉水浓度高于情景 4),各情景参数设定见表 4。

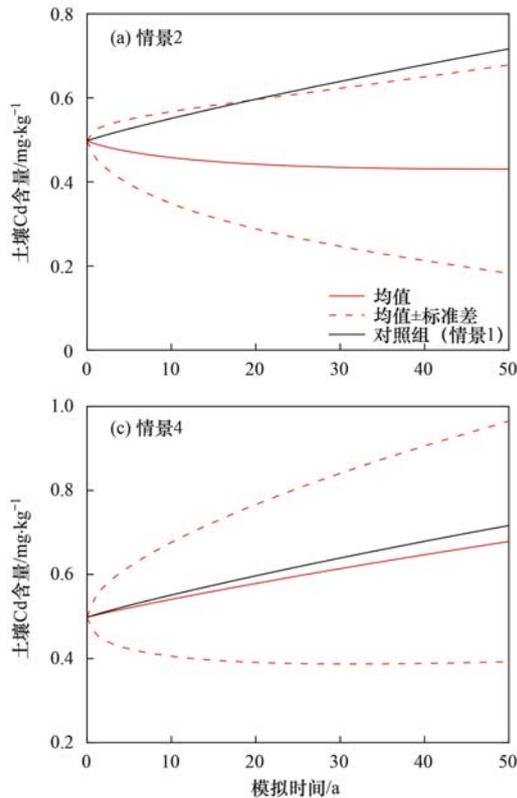
表4 攸县水稻土不同 Cd 输入模式描述和参数设定

Table 4 Description and parameter settings of the different input patterns of Cd in the paddy soils of Youxian County

情景	描述	参数调整
1	当前 Cd 输入情景(对照组)	默认
2	秸秆不还田	PUF(2.47), BioG(0 t)
3	优化工矿企业布局(减少大气沉降)	I_a 年变化率为 -15%
4	清洁灌溉水	C_{ir} ($0.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
5	综合措施(减少秸秆还田、减少大气沉降、清洁灌溉水)	PUF(2.47), BioG(6 t), I_a 年变化率为 -5%, C_{ir} ($0.15 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)

不同修复措施下攸县区域稻田土壤多情景模拟结果如图 5 所示。在不同情景模式下连续耕作 50 a 后,与对照组(情景 1)对比,情景 2、3 和 5 中区域土壤 Cd 累积量呈逐年递减趋势,表明这些措施均可显著降低土壤 Cd 累积量[图 5(a)、5(b)和 5(d)],其中综合措施可降低区域土壤 Cd 平均含量的 47.3% (从 $0.712 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低至 $0.375 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),是降 Cd 效果最为显著的措施[图 5

(d)]. 情景4中区域土壤Cd平均含量累积速率较低,在5a后土壤Cd平均含量均低于情景1[图5



(c)],可见清洁灌溉水对土壤Cd累积的影响主要体现在长期作用.

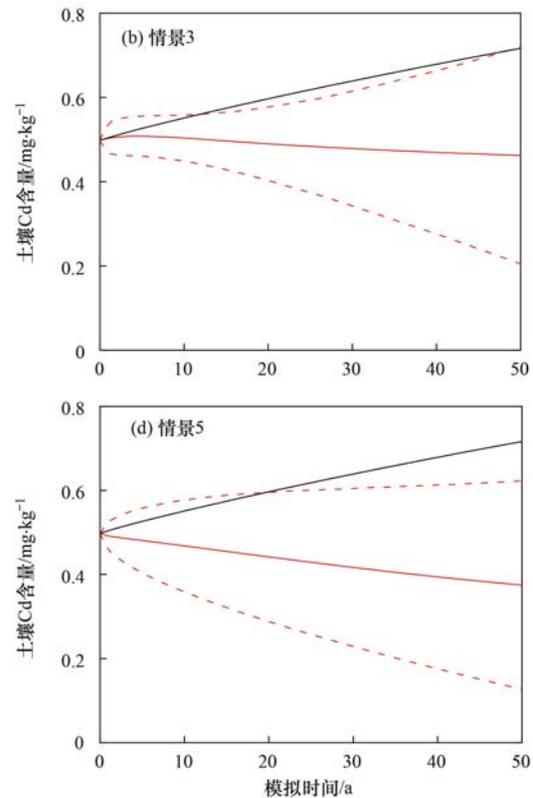


图5 不同输入模式下攸县水稻土Cd累积模拟结果

Fig. 5 Accumulation simulation results of Cd in paddy soils of Youxian County under different input patterns

不同情景模式下区域土壤Cd累积的随机模拟结果如图6所示.连续耕作50a后,情景1~5中区域土壤Cd含量轻度污染的概率分别为82.1%、16.6%、1.23%、73.4%和1.47%.可见秸秆不还田及综合措施可显著降低土壤Cd累积风险.区域土壤条件、气候条件和耕作管理水平的不同会进一步加剧土壤Cd累积的空间变异^[3,9].通量模型和随机模拟分析的联合应用有利于污染物管控和修复措施

的科学决策.

3 结论

攸县水稻土Cd累积风险较高,大气沉降输入、秸秆还田输入和灌溉输入是影响区域土壤Cd累积的关键过程.多场景模拟结果显示清洁灌溉水对土壤Cd累积的影响主要体现在长期作用,减少秸秆还田和优化工矿企业布局可显著降低区域土壤Cd含量和累积风险.结合模型模拟,在区域尺度上加强土壤污染源识别,进行源头管控与消减,针对性地控制农田重金属污染趋势,建立经济可行的区域农田土壤重金属污染治理方案,可有效提升土壤修复效率,保障土壤生态系统的健康运转.

参考文献:

- [1] Du Y, Hu X F, Wu X H, *et al.* Affects of mining activities on Cd pollution to the paddy soils and rice grain in Hunan province, Central South China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(12): 9843-9856.
- [2] Meharg A A, Norton G, Deacon C, *et al.* Variation in rice cadmium related to human exposure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(11): 5613-5618.
- [3] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. *土壤学报*, 2018, **55**(2): 261-272.
Chen W P, Yang Y, Xie T, *et al.* Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of

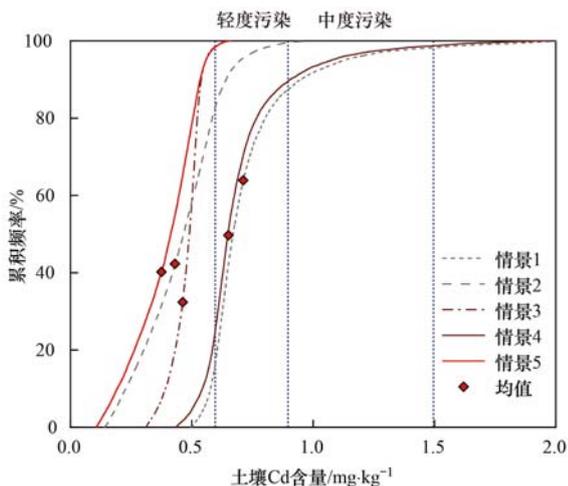


图6 不同输入模式下连续耕作50a后攸县水稻土Cd累积风险

Fig. 6 Accumulation risk of Cd in the paddy soils of Youxian County under different input patterns after 50 years of cultivation

- China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(2): 261-272.
- [4] De Livera J, McLaughlin M J, Hettiarachchi G M, *et al.* Cadmium solubility in paddy soils; effects of soil oxidation, metal sulfides and competitive ions [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(8): 1489-1497.
- [5] Bonten L T C, Groenenberg J E, Weng L P, *et al.* Use of speciation and complexation models to estimate heavy metal sorption in soils[J]. *Geoderma*, 2008, **146**(1-2): 303-310.
- [6] Hough R L, Tye A M, Crout N M J, *et al.* Evaluating a 'free ion activity model' applied to metal uptake by *Lolium perenne* L. grown in contaminated soils[J]. *Plant and Soil*, 2005, **270**(1): 1-12.
- [7] Peng C, Wang M E, Chen W P. Modelling cadmium contamination in paddy soils under long-term remediation measures; model development and stochastic simulations [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 146-155.
- [8] Chen W P, Chang A C, Wu L S. Assessing long-term environmental risks of trace elements in phosphate fertilizers[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, **67**(1): 48-58.
- [9] 杨阳, 陈卫平, 李艳玲, 等. 基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4800-4805.
Yang Y, Chen W P, Li Y L, *et al.* Comprehensive risk evaluation of Cadmium in soil-rice system based on uncertainty analysis[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4800-4805.
- [10] Bonten L T C, Römkens P F A M, Brus D J. Contribution of heavy metal leaching from agricultural soils to surface water loads [J]. *Environmental Forensics*, 2008, **9**(2-3): 252-257.
- [11] Keller A, Schulin R. Modelling regional-scale mass balances of phosphorus, cadmium and zinc fluxes on arable and dairy farms [J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, **20**(1-2): 181-198.
- [12] Shi T R, Ma J, Wu F Y, *et al.* Mass balance-based inventory of heavy metals inputs to and outputs from agricultural soils in Zhejiang Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 1269-1280.
- [13] Koupaie E H, Eskicioglu C. Health risk assessment of heavy metals through the consumption of food crops fertilized by biosolids; a probabilistic-based analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **300**: 855-865.
- [14] 王美娥, 彭驰, 陈卫平. 水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4283-4290.
Wang M E, Peng C, Chen W P. Effects of rice cultivar and typical soil improvement measures on the uptake of Cd in rice grains[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4283-4290.
- [15] Yang Y, Wang M E, Chen W P, *et al.* Cadmium accumulation risk in vegetables and rice in southern China; insights from solid-solution partitioning and plant uptake factor [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, **65**(27): 5463-5469.
- [16] 张敏, 王美娥, 陈卫平, 等. 湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻土壤镉污染特征及污染途径分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1425-1430.
Zhang M, Wang M E, Chen W P, *et al.* Characteristics and inputs of Cd contamination in paddy soils in typical mining and industrial areas in Youxian County, Hunan Province [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1425-1430.
- [17] de Vries W, McLaughlin M J. Modeling the cadmium balance in Australian agricultural systems in view of potential impacts on food and water quality [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **461-462**: 240-257.
- [18] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [19] 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].
GB 15618-2018, Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of agricultural land[S].
- [20] GB 2715-2016, 食品安全国家标准 粮食[S].
- [21] Chen W P, Li L Q, Chang A C, *et al.* Characterizing the solid-solution partitioning coefficient and plant uptake factor of As, Cd, and Pb in California croplands[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, **129**(1-3): 212-220.
- [22] Luo X S, Zhou D M, Liu X H, *et al.* Solid/solution partitioning and speciation of heavy metals in the contaminated agricultural soils around a copper mine in eastern Nanjing city, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **131**(1-3): 19-27.
- [23] Zhang H Z, Luo Y M, Song J, *et al.* Predicting As, Cd and Pb uptake by rice and vegetables using field data from China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(1): 70-78.
- [24] 彭世彰, 乔振芳, 徐俊增. 控制灌溉模式对稻田土壤-植物系统镉和铬累积的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, **28**(6): 94-99.
Peng S Z, Qiao Z F, Xu J Z. Effect of controlled irrigation on accumulation of heavy metal Cd, Cr in soil-plant system in rice paddy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(6): 94-99.
- [25] 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.
- [26] Luo L, Ma Y P, 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.
- [27] 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.
- [28] Wang M E, Chen W P, Peng C. Risk assessment of Cd polluted paddy soils in the industrial and township areas in Hunan, Southern China[J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 346-351.
- [29] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [R]. 北京: 环境保护部, 国土资源部, 2014.
- [30] 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 等. 环境模型中敏感性分析方法评述[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4889-4896.
Chen W P, Tu H Z, Peng C, *et al.* Comment on sensitivity analysis methods for environmental models [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4889-4896.
- [31] 何亮, 赵刚, 靳宁, 等. 不同气候区和不同产量水平下 APSIM-Wheat 模型的参数全局敏感性分析[J]. *农业工程学报*, 2015, **31**(14): 148-157.
He L, Zhao G, Jin N, *et al.* Global sensitivity analysis of APSIM-Wheat parameters in different climate zones and yield levels[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(14): 148-157.
- [32] 段桂兰, 王芳, 岑况, 等. 秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3927-3936.
Duan G L, Wang F, Cen K, *et al.* Effects of straw incorporation on cadmium accumulation and subcellular distribution in rice [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3927-3936.

CONTENTS

Concurrent Collection of Ammonia Gas and Aerosol Ammonium in Urban Beijing During National Celebration Days Utilizing an Acid-Coated Honeycomb Denuder in Combination with a Filter System	GU Meng-na, PAN Yue-peng, SONG Lin-lin, <i>et al.</i> (1)
Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model	YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (9)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter	MIAO Qing-qing, JIANG Nan, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i> (19)
Characteristics and Sources of Water-soluble Ion Pollution in PM _{2.5} in Winter in Shenyang	WANG Guo-zhen, REN Wan-hui, YU Xing-na, <i>et al.</i> (30)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Baoding	LEI Wen-kai, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (38)
Source Apportionment of Ambient Carbonyl Compounds Based on a PMF and Source Tracer Ratio Method: A Case Based on Observations in Nanjing	HU Kun, WANG Ming, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (45)
Characterization and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Tianjin in 2019	GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, XU Hong, <i>et al.</i> (55)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou	LIU Qi, LU Xing-lin, ZENG Peng, <i>et al.</i> (65)
Characteristics of Ozone and Source Apportionment of the Precursor VOCs in Tianjin Suburbs in Summer	LUO Rui-xue, LIU Bao-shuang, LIANG Dan-ni, <i>et al.</i> (75)
Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017	XIE Fang-jian, LU Xiao-bo, YANG Feng, <i>et al.</i> (88)
Ozone Pollution Trend in the Pearl River Delta Region During 2006-2019	ZHAO Wei, GAO Bo, LU Qing, <i>et al.</i> (97)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition in Areas Adjacent to a Large Petrochemical Enterprise	LI Da-yan, QI Xiao-bao, WU Jian, <i>et al.</i> (106)
Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves	YUE Chen, LI Guang-de, XI Ben-ye, <i>et al.</i> (114)
Emission Estimation and Fate Simulation of Dichlorvos in the Dongjiang River Watershed	ZHANG Bing, ZHANG Qian-qian, YING Guang-guo (127)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Songhua River Basin of the Harbin Section and Ashe River	YANG Shang-le, WANG Xu-ming, WANG Wei-hua, <i>et al.</i> (136)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of POPs Pollution in Sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China	LI Hui, LI Jie, SONG Peng, <i>et al.</i> (147)
Distribution and Ecological Risk Assessment of PPCPs in Drinking Water Sources of Henan Province	ZHOU Ying, WU Dong-hai, LU Guang-hua, <i>et al.</i> (159)
Occurrence Characteristics and Health Risk Assessment of Endocrine Disrupting Chemicals in Groundwater in Wuxi-Changzhou	WANG Shu-ting, RAO Zhu, GUO Feng, <i>et al.</i> (166)
Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River	LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wen-jia, <i>et al.</i> (175)
Metal Pollutions and Human Health Risks in Groundwater from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Sheng-zhang, <i>et al.</i> (184)
Seasonal Variation of DOM Spectral Characteristics of Rivers with Different Urbanization Levels in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (195)
Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland	YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, <i>et al.</i> (204)
Metagenomic Analysis Provides Insights into Bacterial Communities, Antibiotic Resistomes, and Public Health Risks in the Dongping Lake Reservoir	ZHANG Hong-na, CUI Na, SHEN Hong-miao (211)
Mechanism of Algal Community Dynamics Driven by the Seasonal Water Bacterial Community in a Stratified Drinking Water Reservoir	YAN Miao-miao, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (221)
Community Structure, Function, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in the Danjiangkou Reservoir	ZHENG Bao-hai, WANG Xiao-yu, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (234)
Changes in Algal Particles and Their Water Quality Effects in the Outflow River of Taihu Lake	GUO Yu-long, XU Hai, CHEN Xu-qing, <i>et al.</i> (242)
Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Schemes in the Shipanqiu Watershed	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (251)
Influence of Antecedent Dry Days on Nitrogen Removal in Bioretention Systems	CHEN Yao, LI Xin-rui, ZHENG Shuang, <i>et al.</i> (263)
Effect of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar on the Adsorption Characteristics and Adsorption Mechanisms of Ammonia Nitrogen in Rainfall Runoff	CHEN You-yuan, LI Pei-qiang, LI Xian-chi, <i>et al.</i> (274)
Effect of Filter Medium on the Enhancement of Complete Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Process in a Tidal Flow Constructed Wetland	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, QIN Hui-an, <i>et al.</i> (283)
Adsorption Effect and Mechanism of Aqueous Arsenic on FeMnNi-LDHs	LIAO Yu-mei, YU Jie, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (293)
Combined Use of Zirconium-Modified Bentonite Capping and Calcium Nitrate Addition to Control the Release of Phosphorus from Sediments	ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (305)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	XIE Ya-wei, YU Chi-sheng, LI Fei-fei, <i>et al.</i> (315)
Occurrence of Antibiotic Resistance Genes and Bacterial Community Structure of Different Sludge Samples During Microwave Pretreatment-Anaerobic Digestion	LI Hui-li, WU Cai-yun, TANG An-ping, <i>et al.</i> (323)
Selenium Threshold for the Delimitation of Natural Selenium-Enriched Land	WANG Hui-yan, ZENG Dao-ming, GUO Zhi-juan, <i>et al.</i> (333)
Improved Regression Kriging Prediction of the Spatial Distribution of the Soil Cadmium by Integrating Natural and Human Factors	GAO Zhong-yuan, XIAO Rong-bo, WANG Peng, <i>et al.</i> (343)
Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China	DAI Ya-ting, FU Kai-dao, YANG Yang, <i>et al.</i> (353)
Bioaccessibility and Health Risks of the Heavy Metals in Soil-Rice System of Southwest Fujian Province	LIN Cheng-qi, CAI Yu-hao, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (359)
Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation	YANG Ru, CHEN Xin-rui, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (368)
Regulation Control of a Tribasic Amendment on the Chemical Fractions of Cd and As in Paddy Soil and Their Accumulation in Rice	JIANG Yi, LIU Ya, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (378)
Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains	ZHENG Shun-an, WU Ze-ying, DU Zhao-ling, <i>et al.</i> (386)
Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms	ZHENG Kai-kai, MA Zhi-yuan, SUN Bo, <i>et al.</i> (394)
Soil Enzyme Activity in <i>Picea schrenkiana</i> and Its Relationship with Environmental Factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang	ZHANG Han, GONG Lu, LIU Xu, <i>et al.</i> (403)
Effects of Farmland Abandonment on Soil Enzymatic Activity and Enzymatic Stoichiometry in the Loess Hilly Region, China	ZHONG Ze-kun, YANG Gai-he, REN Cheng-jie, <i>et al.</i> (411)
Effect of Biochar on Soil Enzyme Activity & the Bacterial Community and Its Mechanism	FENG Hui-lin, XU Chen-sheng, HE Huan-hui, <i>et al.</i> (422)
Effects of Vegetation Restoration on the Structure and Function of the Rhizosphere Soil Bacterial Community of <i>Solanum rostratum</i>	ZHANG Rui-hai, SONG Zhen, FU We-dong, <i>et al.</i> (433)
Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer	SHI Deng-lin, WANG Xiao-li, LIU An-kai, <i>et al.</i> (443)
Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen	HE Tian-tian, WANG Jing, FU Yun-peng, <i>et al.</i> (450)
How Different Ratios of Straw Incorporation to Nitrogen Fertilization Influence Endogenous and Exogenous Carbon Release from Agricultural Soils	SUN Zhao-an, ZHANG Xuan, HU Zheng-jiang, <i>et al.</i> (459)
Effect of Biochar and Chemical Fertilizer Mixture on Ammonia Volatilization and Phosphorus Fixation	YANG Wen-na, DENG Zhen-xin, LI Jiao, <i>et al.</i> (467)
Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application	YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, <i>et al.</i> (477)
Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish <i>Danio rerio</i>	ZHAO Jia, RAO Ben-qiang, GUO Xiu-mei, <i>et al.</i> (485)
Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data	YANG Shao-qi, FENG Li, TIAN Hui-hui, <i>et al.</i> (492)
Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale	SUN Yan-wei, WANG Run, GUO Qing-hai, <i>et al.</i> (501)