ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第38卷 第1期
2017年1月15日

目 次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估 …… 张玉欣,安俊琳,林旭,王俊秀,师远哲,刘静达(1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布 …… 蒋磊,汤莉莉,潘良宝,刘丹彤,花艳,张运江,周宏仓,崔玉航(13)
基于GAM模型分析影响因素交互作用对$PM_{2.5}$浓度变化的影响 …… 贺祥,林振山(22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散 …… 李双德,徐俊波,莫胜鹏,李文辉,高佳佳,曹亚裙,陈运法(33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量 …… 赵佳玉,张弥,肖薇,王伟,吴红艳,张圳,肖启涛,胡诚,于洲,曹正达,徐敬争,刘寿东,李旭辉(41)
闽江口短叶茳芏+芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性CH_4与CO_2浓度日动态 …… 谭立山,杨平,何露露,黄佳芳,胡智强,仝川(52)
河南鸡冠洞CO_2季节和昼夜变化特征及影响因子比较 … 张萍,杨琰,孙喆, 梁沙,张娜,田宁,李建仓,凌新有,张志钦(60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质(FDOM)荧光光谱特征 …… 陈俊伊,王书航,姜霞,黄晓峰,赵丽(70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析 …… 韩秀秀,黄晓虎,余丽燕,杨浩,黄昌春,黄涛, 余艳红,罗玉(78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化 …… 张维,唐翔宇,鲜青松(87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应 …… 祁闯,王国祥,吴馨婷,许晓光,韩睿明,吴松峻(95)
基于LDI的土地利用类型与湿地水质的相关性:以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例 …… 杨朝辉,苏群,陈志辉,白俊武,钱新强,张志敏(104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征 …… 陈小华,李小平,钱晓雍,胡双庆(113)
深水型水库藻形态功能组(MBFG)的季节演替特征 …… 杨毓,卢金锁,张颖(121)
三峡库区水体中可溶性C、N变化及影响因素 …… 范志伟,郝庆菊,黄哲,柴雪思,江长胜(129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征 …… 华玲玲,李文超,翟丽梅,崔超,刘宏斌,任天志,张富林,雷秋良(138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析:以羊圈沟为例 …… 贾珺杰,高扬,陈维梁,郝卓,汪亚峰,陈利顶(147)
5种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较 …… 金树权,周金波,包薇红,陈君,李丹丹,李洋(156)
骆马湖表层水体中32种PPCPs类物质的污染水平、分布特征及风险评估 …… 张芹, 张圣虎, 汪贞,郭敏, 刘济宁,石利利,古文(162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价 …… 张家泉,胡天鹏,邢新丽,郑煌,张丽,占长林,刘红霞,肖文胜,祁士华(170)
pH和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响 …… 王华伟,李晓月,李卫华,孙英杰(180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制 …… 王文东,王昌鑫,刘荟,韩雨(188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响 …… 艾扬,孔东东,于畅,沈扬,李剑(195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证 …… 高婷婷,杜鹏,徐泽琼,杨军,张华方,李喜青(201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯 …… 赵纯,张帅 ,周宇 ,李琨 ,周炜 , 黎鹏宇 ,杨广,孙志华,郑怀礼(212)
碳纳米管改性PVDF中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究 …… 王利颖,石洁,王凯伦,关羽琪,郭瑾(220)
曝气生物滤池(Fe^{2+})-臭氧组合工艺强化处理石化二级出水 …… 徐敏,吴昌永,周岳溪,郭明昆,王翼(229)
4种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性 …… 王晗,方芳,李凯,邢晖,郭劲松,陈猷鹏,曾前松(238)
硫自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析 …… 张超,陶华强,宋圆圆,逯彩彩,郭延凯,廉静,郭建博(247)
CANON在SBAF中的快速启动及其微生物特征 …… 刘竹寒,岳秀,于广平,金腊华,唐嘉丽,吉世明(253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制 …… 季民,刘灵婕,翟洪艳,刘京,苏晓(260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响 …… 王书永,钱飞跃,王建芳,沈耀良(269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程 …… 郑莹,潘杨,周晓华,廖烜弘,孟璇,夏健伟(276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制:基于增强回归树分析 …… 吴雁雯,张金池,郭晓平,刘鑫(283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响 …… 史广宇,程媛媛,施维林(294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响 …… 石小霞,赵诣,张琳,吴文良,孟凡乔(301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸(PLFAs)及酶活性的季节变化特征 …… 李南洁,曾清苹, 何丙辉, 周飞(309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性 …… 刘晋仙,李毳,景炬辉,贾彤,刘兴港,王小云,柴宝峰(318)
安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析 …… 李法松,倪卉,黄涵宇,徐志兵,张倩,李长霞,黄文秀,金陶胜(327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响 …… 赵世翔,于小玲,李忠徽,杨艳,刘丹,王旭东,张阿凤(333)
水分管理模式与土壤Eh值对水稻Cd迁移与累积的影响 …… 田桃,曾敏, 周航, 徐珺, 杨文弢, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒(343)
茫、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制 …… 陈欣瑶,杨惠子,李敏,牛晓丛,苏雨轩,张园(352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响 …… 高瑞丽,唐茂,付庆灵,郭光光,李晓,胡红青(361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测 …… 李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云(368)
多孔SBA-15颗粒对Cd(Ⅱ)的吸附缝合及其对土壤Cd(Ⅱ)的修复潜力 …… 黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集 …… 何明靖,杨婷,李琦,王登祥,赵佳渊(382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价 …… 陈志良,黄玲,周存宇,钟松雄,王欣,戴玉,蒋晓璐(389)
蔬菜镉(Cd)富集因子变化特征及其影响因素 …… 杨阳,李艳玲,陈卫平,王美娥,彭驰(399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响 …… 余亚伟,杨雨洽,张成,易建婷,安思危,王定勇(405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局 …… 赵辉,郑有飞,曹嘉晨,徐静馨,黄积庆,袁月(412)
《环境科学》征稿简则(12) 《环境科学》征订启事(194) 信息(21, 51)

水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响

田桃,曾敏, 周航, 徐珺, 杨文弢, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒*
(中南林业科技大学环境科学与工程学院,长沙 410004)

摘要: 通过水稻盆栽试验,研究了 4 种水分管理模式[水稻全生育期湿润灌溉(M)、灌浆期湿润和灌浆期后淹水灌溉(M-F)、灌浆期淹水和灌浆后湿润灌溉(F-M)、全生育期淹水灌溉(F)]对土壤 Eh 值、Cd 生物有效性及对水稻 Cd 迁移与累积的影响. 结果表明土壤 Eh 值从负值变为正值时,土壤交换态 Cd 含量先升高后降低. 与 M 处理相比,F-M、M-F、F 处理显著降低水稻根、茎叶、谷壳、糙米 Cd 含量,其中 M-F 和 F 处理水稻糙米 Cd 含量分别为 0.19 mg·kg^{-1}和 0.10 mg·kg^{-1},均低于国家食品污染物限量 <0.2 mg·kg^{-1}的标准(GB 2762-2012). 与 M 处理相比,F-M、M-F、F 处理显著降低水稻地上部 Cd 累积量和水稻中 Cd 的转运系数. 水稻地上部分 Cd 累积量、水稻中 Cd 的转运系数、水稻糙米 Cd 含量与土壤 Eh 值均存在正指数关系. 4 种水分管理模式中,M-F 处理的水稻产量最高. 虽然威优 46 被认为是 Cd 高累积水稻品种,但是在 5 mg·kg^{-1}的 Cd 污染土壤中进行适当的水分管理,威优 46 糙米 Cd 含量也能够达到国家标准. 因此,为了保证水稻的食品安全和水稻产量,建议采用 M-F 处理作为水分管理模式,且灌浆期后的土壤 Eh 值保持在 -160 ~ -130 mV 范围.

关键词:水分管理; 土壤 Eh; 水稻; 土壤 Cd; 迁移与累积
中图分类号: X171.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2017)01-0343-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201605234

Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice

TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, XU Jun, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, ZOU Jia-ling, ZHANG Ping, PENG Pei-qin, LIAO Bo-han*
(College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of four modes of water managements on soil Eh values, bioavailability of soil Cd, migration and accumulation of Cd in rice. These four modes of water managements were moistening throughout the entire period of rice growth (M), moistening before filling stage and flooding after filling stage (M-F), flooding before filling stage and moistening after filling stage (F-M), and flooding throughout the entire period of rice growth (F). The results indicated that the exchangeable contents of Cd increased firstly and then declined with the soil Eh values changing from negative to positive. Compared with M, the other three modes (M-F, F-M, and F) significantly reduced the contents of Cd in all rice tissues, including roots, stems, husks and brown rice. Meanwhile, Cd contents in brown rice due to the treatments of M-F and F were 0.19 mg·kg^{-1} and 0.10 mg·kg^{-1}, respectively. These Cd contents were lower than the limits of 0.2 mg·kg^{-1} in national food safety standard (GB 2762-2012). Compared with M, the other three modes significantly decreased Cd accumulation amounts in the aboveground parts of rice and also decreased Cd translocation factors in rice. There were significant positive exponential relations between soil Eh values and Cd accumulation amounts in the aboveground parts of rice, Cd translocation factors in rice, or Cd contents in brown rice. The rice biomass due to M-F treatment reached the maximum among the four modes. It was worthy to be mentioned that although Weiyou 46 was considered a variety rice with high Cd accumulation, Cd content in rice brown of Weiyou 46 could be lower than 0.2 mg·kg^{-1} in the 5 mg·kg^{-1} of Cd contaminated soil through proper water managements. In summary, M-F treatment ensured high rice yield with low Cd contents in brown rice and could be recommended as the irrigation mode in rice production. Simultaneously, maintaining soil Eh value between -160- -130 mV was also important after the filling stage.

Key words: water management; soil Eh; rice; soil Cd; migration and accumulation

我国土壤环境状况总体不容乐观,土壤重金属污染较为严重,耕地土壤环境质量令人堪忧. 全国土壤总的超标率为 16.1%,其中 Cd 的污染最为严重,超标率为 7.0%[1]. 土壤中 Cd 通过作物吸收转运,积累在可食部位,且通过食物链的传递,危害人和动物健康[2~5]. 水稻(*Oryza sativa* L.)是世界上最主要的粮食作物之一,也是一种富集 Cd 的农作物,

收稿日期: 2016-05-31; **修订日期**: 2016-06-30
基金项目: 农业部财政部专项(湘农业联 2015-112-2); 国家自然科学基金项目(41501344); 湖南省重点学科建设项目(2006180)
作者简介: 田桃(1990 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为重金属土壤污染控制,E-mail:15700718997@163.com
* 通信作者,E-mail:liaobh1020@163.com

Cd 易于在水稻籽粒中累积[6]. 因此控制土壤中的 Cd 向水稻迁移是一个急需解决的环境问题.

为了降低水稻对土壤 Cd 的吸收,当前研究多从以下两个方面考虑:一是将土壤中的 Cd“钝化”,降低 Cd 的生物有效性,减少水稻对 Cd 的吸收累积[7~10],但其钝化效果的长久性尚待研究,且长久的施用钝化剂也可能降低土壤质量; 二是利用工程措施[11]或植物修复[12]将土壤中 Cd 去除,但工程措施费用高、技术难度高,并可能对土壤性质造成破坏. 植物修复受到生物量小、修复时间长等条件限制,且造成农田长期撂荒. 农艺调控措施以其简单可行、经济成本低、操作简单、无二次污染成为目前农田土壤重金属污染修复研究的趋势.

近年来,一系列的农艺措施被用于修复土壤中 Cd,如轮作、间作、套种、水分管理措施等[13~15]. 于玲玲等[14]研究发现油菜-水稻轮作可有效降低油菜和糙米中 Cd 的含量. 王吉秀等[16]研究表明玉米和油毛菜间作能使玉米中 Cd 含量降低 72.9%. 还有研究指出,淹水灌溉使土壤形成还原状态,可以有效控制土壤 Cd 向糙米中迁移[17~19]. 刘昭兵等[20]研究表明,水稻在分蘖期晒田比乳熟期晒田更能吸收土壤中 Cd. Arao 等[21]研究发现,水稻抽穗期前 3 周进行淹水可有效降低糙米中 Cd 的含量. 这些研究都是针对水稻分蘖期或乳熟期进行水分调控,而鲜有研究对灌浆期前后采取不同水分管理模式来比较水稻吸收 Cd 的影响. 土壤氧化还原电位(Eh)作为土壤环境条件的一个综合指标,表征土壤氧化性或还原性的相对程度[22]. 不同水分管理对土壤 Eh 值影响较大,淹水时土壤 Eh 值较低,土壤处于还原状况; 湿润时土壤 Eh 值较高,土壤处于氧化状况. 目前对水稻生育期不同水分管理下土壤 Eh 值进行长期监控的报道较少,受研究方法的限制,还没有统一的结论.

本研究通过水稻盆栽试验,采用 4 种不同水分管理模式,即水稻全生育期湿润灌溉(M)、灌浆期湿润和灌浆期后淹水灌溉(M-F)、灌浆期淹水和灌浆后湿润灌溉(F-M)、全生育期淹水灌溉(F),对水稻不同时期(分蘖盛期、灌浆期和成熟期)的土壤氧化还原电位 Eh 值和水稻各部位 Cd 累积量进行分析,来研究不同水分管理模式对水稻吸收土壤 Cd 的影响,以期为控制稻田系统 Cd 的迁移转运提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

土壤采自湖南省长沙市宁乡县双江口镇(28°27.716′N,113°16.356′E,红壤,0 ~ 20 cm),其理化性质见表 1. 将风干的土样过 2 mm 筛,采用内径 300 mm,高 240 mm 的塑料盆,每盆装土 5 kg,添加外源 Cd($CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$)使之达到 Cd 含量 5 $mg \cdot kg^{-1}$水平(重度污染),保持田间最大持水率的 70%. 为保证盆内土壤 Cd 含量分布均匀,每隔 3d 搅拌一次. 在水稻幼苗移栽前一周,土壤中加入 K_2CO_3(按 K_2O 计) 0.2 $g \cdot kg^{-1}$,$(NH_4)_3PO_4$(按 P_2O_5 计)0.21 $g \cdot kg^{-1}$,尿素 0.28 $g \cdot kg^{-1}$作为基肥,并与土壤混合均匀.

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

项目	pH 值	有机质 OM /g·kg^{-1}	阳离子交换量 CEC/cmol·kg^{-1}	碱解氮 /mg·kg^{-1}	有效 P /mg·kg^{-1}	速效 K /mg·kg^{-1}	全 Cd /mg·kg^{-1}
供试土壤	5.61	32.0	31.3	103.3	20.4	77.4	0.23
土壤二级标准	<6.50	—	—	—	—	—	0.30

1.2 盆栽试验设计

盆栽试验在中南林业科技大学生命科学大楼 3 楼露天试验天台进行. 水稻品种为威优 46,属于杂交晚籼稻,由湖南湘潭市兴农种业公司提供. 水稻种子用 30% H_2O_2 消毒 15 min 后,用去离子水洗净,在温室置于潮湿的纱布内培养发芽至 1 cm 左右,播种于未受污染的大田. 2015 年 7 月 28 日选择长势均匀一致的秧苗移栽进行盆栽试验. 在水稻生育期共设计 4 种不同水分管理方式:全生育期湿润灌溉(M),在水稻整个生育期使盆内表土以上无明显水层; 灌浆期前湿润灌溉 + 灌浆期后淹水灌溉(M-F),水稻在灌浆期前保持表土无明显水层,从灌浆期后(48 d)淹水灌溉,表土以上保持 3.0 cm 左右的水层; 灌浆期前淹水灌溉 + 灌浆期后湿润灌溉(F-M),灌浆期前淹水灌溉,表土以上保持 3.0 cm 左右的水层,从灌浆开始后保持表土无明显水层; 全生育期淹水灌溉(F),在水稻整个生育期使盆内表土以上保持 3.0 cm 左右的水层. 每个处理重复 3 次,共 36 盆. 水稻采用随机区组排列的方式于露天栽培,其他农艺措施与当地传统模式保持一致. 为

保证幼苗生长，移栽后进行正常的淹水灌溉，16 d（从插秧计算）开始进行水分管理，每隔 7 d 测定一次土壤氧化还原电位（Eh），直至水稻成熟，共 10 次.

分别在分蘖盛期（插秧 34 d），灌浆期（插秧 64 d），成熟期（插秧 96 d）进行水稻植株、土壤采样分析.

1.3　样品采集和前期处理

将取回的土壤样品自然风干，去除杂质，用非金属器具磨碎分别过 10 目和 100 目尼龙筛，保存待测；水稻样品用自来水和超纯水洗净，晾干后放入烘箱，105℃杀青 30 min，70℃烘干至恒重，烘干后的稻谷经小型脱壳机将壳和米分开，并分别记录根、茎叶、谷壳和糙米干重，所有样品粉碎并用密封袋保存待测.

1.4　分析方法

土壤 Eh 值测定采用 Eh 计（SX712，上海仪电科学仪器股份有限公司）原位测定的方法进行，将 Eh 电极插入土壤表层以下 3 ~ 5 cm，待读数稳定后记录 Eh 值；土壤 pH 值用酸度计（PHS-3C，雷磁）测定；土壤有机质用重铬酸钾氧化-比色法测定[23]；土壤阳离子交换量用氯化钡-硫酸强迫交换法测定[23]；土壤 Cd 交换态用 1 mol·L^{-1} $MgCl_2$ 提取[24]；土壤 Cd 总量用王水-高氯酸消解[23]；水稻样品中重金属（Cd）采用干灰化法消解（GB/T 5009-2003）. 溶液中 Cd 浓度用电感耦合等离子体发射光谱仪（ICP-OES 6300，Thermo）测定. 所有样品分析过程中以国家物质土壤［GBW（E）-070009］和湖南大米［GBW 10045（GSB-23）］进行质量控制分析，Cd 的回收率分别为 94.5% ~ 98.6% 和 97.2% ~ 102.3%，同时做空白试验.

1.5　数据处理

水稻地下部分向地上部分转移 Cd 的能力用转运系数（TF）[25]表示.

$$TF = \frac{C_i}{C_r}$$

式中，C_i 代表地上部分 Cd 含量（mg·kg^{-1}），C_r 代表根系 Cd 含量（mg·kg^{-1}）.

水稻地下部分和地上部分 Cd 累积量用（BA）[26]（mg·株$^{-1}$）表示.

$$BA = \sum C_i \times B_i$$

式中，C_i 分别代表根、茎叶、谷壳、糙米 Cd 含量（mg·kg^{-1}），B_i 代表根、茎叶、谷壳、糙米生物量（kg·株$^{-1}$）

采用 Office 2010、SPSS15.0 和 Origin 8.5 软件进行数据处理及绘图，多重比较结果均在 $P < 0.05$ 水平下进行统计分析.

2　结果与分析

2.1　不同水分管理模式下水稻根际土壤 Eh 值的变化

4 种水分管理模式对土壤 Eh 值影响显著（图 1）. 在水稻全生育期中，M 处理和 F 处理的土壤 Eh 值变化不大，M 处理土壤 Eh 值最高，数值在 34.1 ~ 169.2 mV 之间，土壤处于氧化状态；F 处理土壤 Eh 值最低，数值在 −64.4 ~ −141.5 mV 之间，土壤处于还原状态. M-F 处理在灌浆期开始后（48 d）土壤 Eh 值迅速降低，比灌浆期前下降 85.4%，土壤由氧化状态转变为还原状态；F-M 处理在灌浆期开始后，土壤 Eh 值明显上升，比灌浆期前上升 82.0%，土壤由还原状态转变为氧化状态.

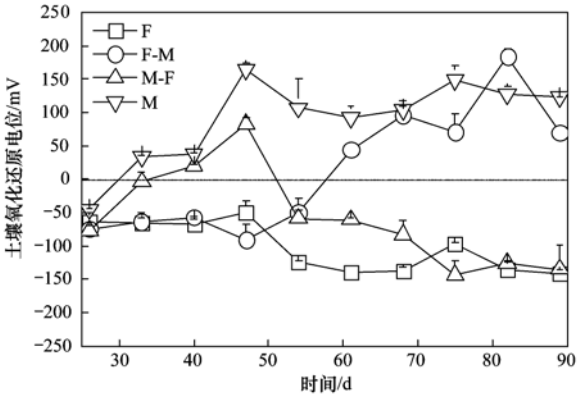


图 1　不同水分管理模式下水稻根际土壤 Eh 值变化

Fig. 1　Changes in Eh values in rice rhizosphere soil with different water managements

2.2　不同水分管理模式对土壤 Cd 交换态含量影响

土壤中的交换态 Cd 活性较高，迁移能力较强，容易被作物吸收和累积[27]. 曾卉等[27]研究表明，土壤交换态 Cd 提取量可以作为土壤中 Cd 生物有效性评价指标之一. 不同生育期土壤中 Cd 交换态含量如表 2 所示. 在水稻全生育期中，4 种水分管理模式下土壤 Cd 交换态含量变化不显著. 分蘖盛期（34 d），M 处理和 M-F 处理下土壤 Cd 交换态含量比 F-M 和 F 处理略微升高. 总体而言，土壤 Cd 交换态含量会随着时间的推移而逐渐降低.

2.3　不同水分管理模式对水稻生物量影响

表 3 是不同水分管理模式下水稻在不同生育期

表 2 不同水分管理模式对土壤 Cd 交换态含量影响[1)]

Table 2 Effects of different water managements on exchangeable Cd contents in soil

水分管理模式	不同时期土壤 Cd 交换态含量/mg·kg^{-1}		
	分蘖盛期	灌浆期	成熟期
M	3.20 ±0.05a	2.72 ±0.09a	1.31 ±0.06a
M-F	3.20 ±0.05a	2.58 ±0.21a	1.50 ±0.01a
F-M	3.01 ±0.21a	2.72 ±0.03a	1.57 ±0.04a
F	3.01 ±0.21a	2.93 ±0.10a	1.44 ±0.07a

1)同一水分管理模式的数据相同字母表示在 0.05 水平上无显著性差异,不同字母表示有显著性差异,下同

的生物量. 分蘖盛期,M 处理的水稻根系、茎叶的生物量与 M-F 处理相近; F-M 处理的水稻根系、茎叶的生物量与 F 处理相近. 同时,M、M-F 处理的水稻根、茎叶的生物量显著高于 F-M、F 处理. 灌浆期,4 种水分管理模式的水稻根系和谷壳的生物量无明显变化,而 M 处理糙米产量明显低于其他 3 种水分管理模式,仅为 4.1 g·株$^{-1}$. 成熟期,4 种水分管理模式的水稻根系生物量无明显变化,水稻谷壳和糙米的生物量的大小顺序为:M-F > F-M > F > M,而 M-F 处理的糙米生物量显著高于其他处理,差异显著(P <0.05).

表 3 不同水分管理模式对水稻各时期生物量的影响/g·株$^{-1}$

Table 3 Effect of different water managements on rice biomass in different stages/g·plant^{-1}

水分管理模式	分蘖盛期		灌浆期				成熟期			
	根	茎叶	根	茎叶	谷壳	糙米	根	茎叶	谷壳	糙米
M	4.8 ±1.1a	20.4 ±2.0a	3.1 ±0.9a	24.4 ±5.2a	6.0 ±1.3a	4.1 ±1.3b	4.6 ±0.6a	23.5 ±4.7a	4.8 ±0.8b	12.0 ±2.7b
M-F	4.8 ±1.1a	20.4 ±2.0a	2.6 ±0.3a	17.2 ±1.7b	5.8 ±0.6a	11.3 ±0.4a	3.8 ±1.8a	17.6 ±1.1b	7.2 ±0.8a	17.8 ±1.1a
F-M	3.4 ±0.1a	16.3 ±1.2b	3.6 ±0.8a	22.2 ±1.8ab	5.6 ±0.1a	10.7 ±1.0a	4.0 ±1.0a	15.3 ±2.1b	5.1 ±1.7b	15.8 ±0.6ab
F	3.4 ±0.1a	16.3 ±1.2b	3.4 ±0.8a	21.0 ±5.5ab	6.5 ±1.2a	9.8 ±0.7a	4.3 ±0.6a	18.4 ±1.8b	5.1 ±1.7b	14.2 ±5.0ab

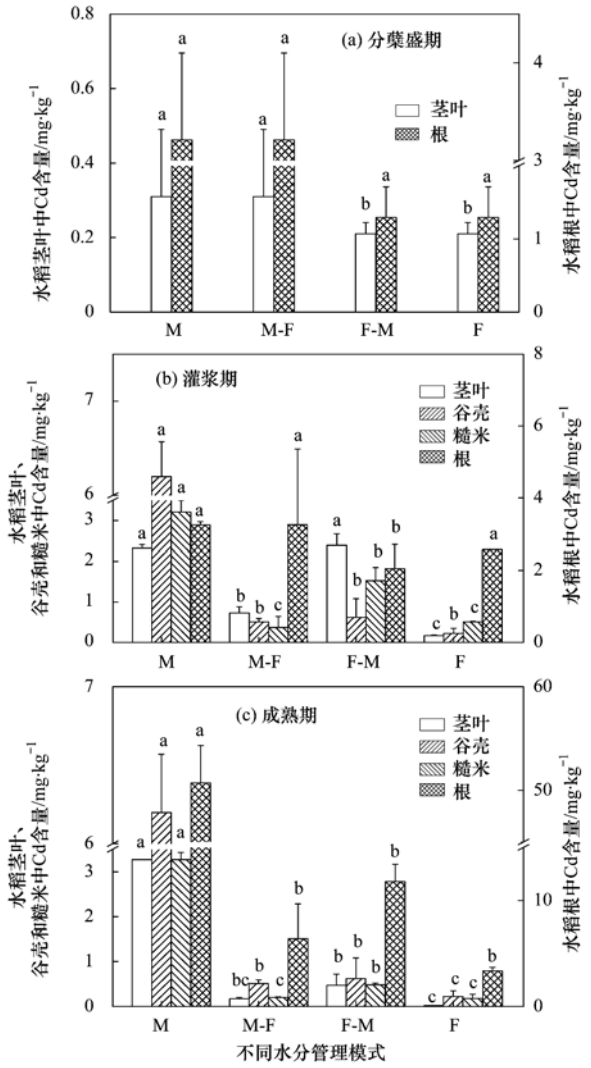
2.4 不同水分管理模式对水稻各部位 Cd 含量和累积量的影响

4 种水分管理模式在不同生育期对水稻各部位 Cd 含量的影响具有显著差异(P <0.05,图 2). 在分蘖盛期(34 d),4 种水分管理之间的根中 Cd 的含量无明显差异. M 和 M-F 处理下,水稻茎叶中 Cd 的含量明显高于 F-M 和 F 处理,且存在显著差异(P <0.05). 在灌浆期(64 d),4 种水分管理模式下茎叶、谷壳和糙米 Cd 的含量变化规律一致. M 处理下水稻茎叶、谷壳和糙米 Cd 的含量均最大,且 M 处理与各处理之间均存在显著差异(P <0.05),而 4 种水分管理下根中 Cd 含量不存在差异性. M 处理下糙米 Cd 含量为 3.21 mg·kg^{-1}; 与 M 处理相比,F-M、M-F 和 F 处理下糙米 Cd 含量分别降低了 52.3%、88.5%、84.1%,差异性显著(P <0.05). 在成熟期(96 d),4 种水分管理模式下水稻各部位(根系、茎叶、谷壳和糙米)Cd 的含量大小顺序均为:M > F-M > M-F > F, M 处理与各处理之间均存在显著差异(P <0.05),糙米 Cd 含量最大,达到 3.27 mg·kg^{-1},分别为 F-M、M-F 和 F 处理下糙米 Cd 含量的 1.0、16.4、32.7 倍. M-F 和 F 处理下,糙米中 Cd 含量分别为 0.19 mg·kg^{-1}和 0.10 mg·kg^{-1},均低于国家食品中污染物限量标准 0.2 mg·kg^{-1}的限制.

图 3 是 4 种水分管理对不同生育期水稻地下部分和地上部分 Cd 累积量的影响. 在分蘖盛期,4 种水分管理的水稻地下部分和地上部分 Cd 累积量无明显差异. 在灌浆期,水稻地上部分 Cd 累积量显著增大,但地下部分变化不显著,4 种水分管理下水稻地上部 Cd 累积量大小顺序为:$BA_M > BA_{F-M} > BA_{M-F} > BA_F$,M 处理与各处理之间均存在显著差异($P$ <0.05). 在成熟期,水稻地上部分 Cd 的累积量继续增大,且地下部分也出现增大的趋势,其中 M 处理 Cd 在地上部分的 Cd 累积量达到 0.49 mg·株$^{-1}$,F-M、M-F、F 处理分别为 0.07、0.04、0.02 mg·株$^{-1}$,差异性显著(P <0.05). 显然,水稻灌浆期开始后,淹水处理可降低水稻植株 Cd 的累积量.

2.5 不同水分管理模式对水稻中 Cd 从地下部到地上部转运系数的影响

水稻中 Cd 从地下部转运到地上部的过程是水稻根系吸收的 Cd 经过水稻木质部运输到水稻地上部位[28]. 转运系数 TF(translocation factor)指水稻后一部位中 Cd 含量与前一部位中 Cd 含量的比值;转运系数越大,则表明该部位对 Cd 的转运能力越强[29]. 表 4 是不同水分管理模式对水稻中 Cd 从地下部转运到地上部的影响. 在分蘖盛期,4 种水分管理模式的水稻中 Cd 的转运系数大小无显著性差异(P >0.05). 在灌浆期和成熟期,4 种水分管理模式对水稻中 Cd 的转运系数均有显著影响(P <0.05),水稻中 Cd 从地下部位到地上部位的转运系数大小顺序为:$TF_M > TF_{F-M} > TF_{M-F} > TF_F$. 在灌浆期,F-M、M-F、F 处理与 M 处理相比,水稻中 Cd 转运系数分别降低了 7.8%、72.5%、94.1%. 在成熟



同一水分管理模式的数据相同字母表示在 0.05 水平上无显著性差异，不同字母表示有显著性差异，下同

图 2　不同水分管理模式对水稻各部位 Cd 含量的影响

Fig. 2　Effects of different water managements on Cd contents in different rice tissues

期，F-M、M-F、F 处理与 M 处理水稻中 Cd 转运系数分别降低了 33.3%、50.0%、83.3%. 显然，水稻全生育期阶段，F 处理能有效阻止水稻中 Cd 从地下部位转运到地上部位.

表 4　不同水分管理模式对水稻中 Cd 从地下部转运到地上部的影响

Table 4　Effects of different water managements on Cd migration from the underground parts to the aboveground parts of rice

水分管理模式	不同时期水稻中 Cd 转运系数		
	分蘖盛期	灌浆期	成熟期
M	0.22 ± 0.02a	1.53 ± 0.29a	0.06 ± 0.01a
M-F	0.22 ± 0.02a	0.42 ± 0.06b	0.03 ± 0.02ab
F-M	0.17 ± 0.06a	1.41 ± 0.09a	0.04 ± 0.01bc
F	0.17 ± 0.06a	0.09 ± 0.03c	0.01 ± 0.01c

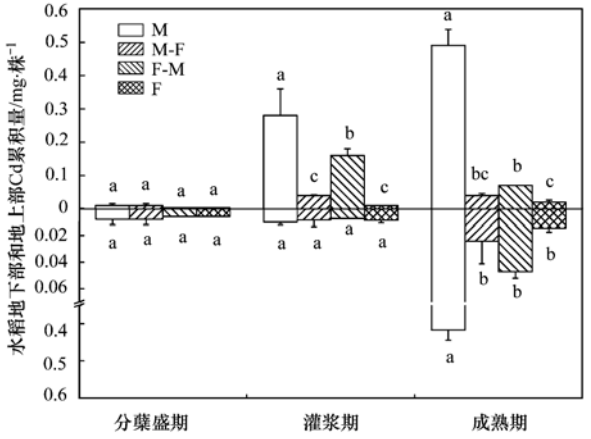


图 3　不同水分管理模式对水稻地下部和地上部分 Cd 累积量的影响

Fig. 3　Effects of different water managements on Cd accumulation amounts in the underground and aboveground parts of rice

3　讨论

3.1　土壤 Eh 值与土壤 Cd 生物有效的关系

不同水分管理模式会直接影响土壤的 Eh 值，进而影响土壤 Cd 的生物有效性[30]. 为研究土壤 Eh 值与土壤 Cd 交换态关系，分别对其做相关分析. 结果表明，土壤 Eh 值与土壤 Cd 交换态含量之间存在显著的多项式函数关系（图 4），相关系数 $R^2 = 0.452$（$n = 12$，$R^2_{0.05} = 0.332$，$R^2_{0.01} = 0.501$）. 土壤 Eh 为负值时，土壤 Cd 交换态含量与土壤 Eh 值之间呈现正相关关系；土壤 Eh 为正值时，土壤 Cd 交换态含量与土壤 Eh 值之间呈现负相关关系. 有研究表明[19,20]，土壤 Eh 为正值时，可使土壤有效态 Cd 含量提高. 这一结论与本研究结果不一致. 这可能是因为上述报道中进行 Cd 交换态的提取是采用新鲜土，而本研究采用的是风干后的土壤. 相关学者认为[31~33]，淹水土壤样品在风干过程中，改变了土壤 Cd 的各形态分配系数，使土壤 Cd 的生物有效性升高. 因此，分析土壤中 Cd 的生物有效性时，建议采用新鲜土壤.

3.2　土壤 Eh 值与水稻地下部位和地上部 Cd 累积量的关系

本研究表明，土壤 Eh 值与水稻地下部和地上部 Cd 累积量均存在极显著正指数关系（图 5），相关系数 $R^2_{\text{地下部Cd}} = 0.956$，$R^2_{\text{地上部Cd}} = 0.971$（$n = 12$，$R^2_{0.01} = 0.501$）. 土壤 Eh 值为负值时，土壤处于还原状态，水稻地下部和地上部 Cd 累积量都很低，变化幅度不大；当土壤 Eh 值在 0 ~ 200 mV 时，水稻地下部和地上部 Cd 累积量呈现明显上升的趋势. 这可能

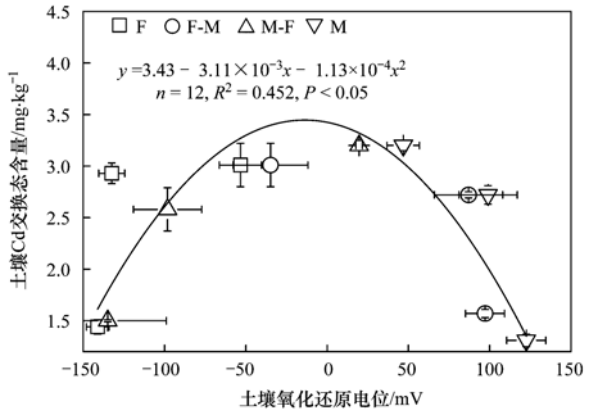


图 4 土壤氧化还原电位和土壤 Cd 交换态含量的关系

Fig. 4 Correlations of soil Eh values and exchangeable Cd contents in soil

是因为土壤在淹水条件时,土壤中还原细菌[34,35]将硫酸盐还原成硫化物或 S^{2-},与 Cd^{2+} 形成 CdS 沉淀[36]; 淹水后晶型氧化铁不仅吸附 Cd,也可促进土壤有机质固定 Cd,使交换态 Cd 向有机结合态转化[37],降低水稻地上部位对 Cd 的吸收. 土壤在湿润条件时,土壤中 Cd 更容易由稳定态转化为水溶态和交换态[38],促进水稻地上部位对 Cd 的吸收. Honma 等[39]认为,土壤 Eh 值为负值时,土壤溶液中只能检测到少量的溶解性 Cd. Reddy 等[40]认为,随着 Eh 值增大,水稻吸收 Cd 的总量和地上部 Cd 含量也会增加. 这与本研究的结果相一致. 另外,当土壤 Eh 值在 75 ~ 125 mV 时,水稻地下部 Cd 累积量急剧上升; 当 Eh 值在 50 ~ 125 mV 时,地上部 Cd

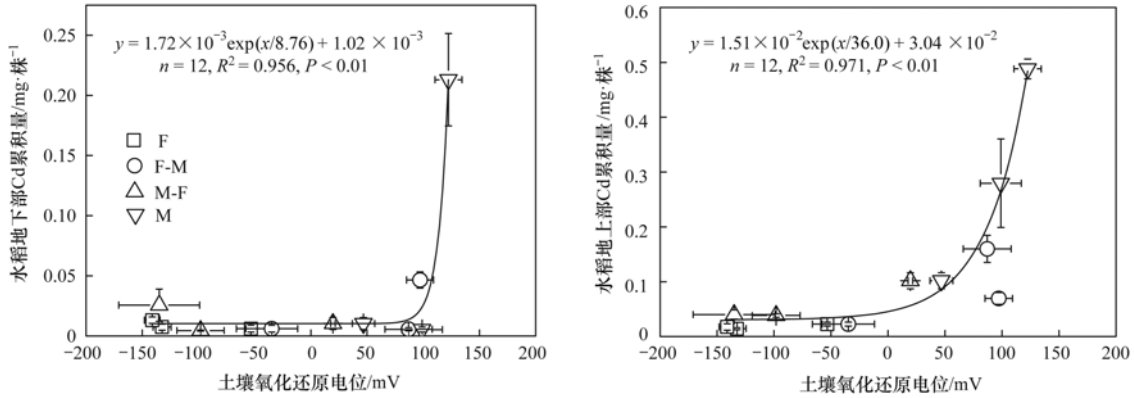


图 5 土壤氧化还原电位和水稻地下部分和地上部分 Cd 累积量的关系

Fig. 5 Correlations of soil Eh values and Cd accumulation amounts in the underground and aboveground parts of rice

累积量急剧上升. 这说明,土壤 Eh 值为 50 ~ 75 mV 可能是水稻急剧积累 Cd 的阈值范围,将土壤 Eh 值控制在 50 mV 以下,能大量减少水稻植株对 Cd 的吸收累积.

3.3 土壤 Eh 值与水稻中 Cd 转运系数的关系

4 种水分管理模式下水稻中 Cd 转运系数大小顺序为:$TF_M > TF_{F-M} > TF_{M-F} > TF_F$(表 4). 为研究土壤 Eh 值与水稻中 Cd 转运系数的关系,分别对其做相关分析. 结果表明,土壤 Eh 值与水稻中 Cd 转运系数存在极显著正指数关系(图 6),相关系数 $R^2 = 0.895$ ($n = 12$, $R^2_{0.01} = 0.501$). 土壤 Eh 值为负值时,水稻中 Cd 转运系数较小,转运能力较差. 随着土壤 Eh 值增大,特别是当 Eh 值超过 50 mV 时,水稻中 Cd 转运能力迅速增强. 显然,淹水处理降低土壤 Eh 值,可显著降低水稻中 Cd 转运系数.

3.4 土壤 Eh 值与水稻糙米中 Cd 含量以及水稻产量的关系

本研究中土壤 Eh 值对水稻糙米 Cd 含量和水

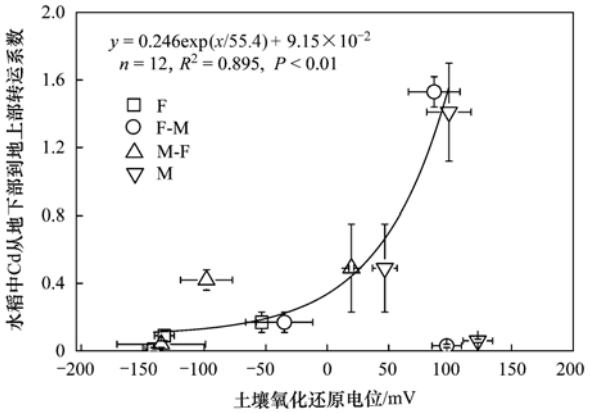


图 6 土壤 Eh 值与水稻中 Cd 转运系数的关系

Fig. 6 Relationship of soil Eh values and Cd translocation factors in rice

稻产量具有显著影响,且土壤 Eh 值与水稻糙米中 Cd 含量呈极显著正指数相关关系(图 7),相关系数 $R^2 = 0.997$ ($n = 4$, $R^2_{0.01} = 0.990$). 土壤 Eh 值在 −160 ~ −130 mV 范围时,水稻糙米中 Cd 含量变化在 0.10 ~ 0.19 $mg \cdot kg^{-1}$ 之间,达到国家食品污染物

限量 <0.2 mg·kg^{-1}的标准(GB 2762-2012),水稻产量相比于更高的土壤 Eh 值时维持较高水平,为 15.8 ~ 17.8 g·株$^{-1}$. 结果表明,土壤 Eh 值控制在 -160 ~ -130 mV,水稻糙米 Cd 含量可以保持较低水平,且水稻产量保持较高水平.

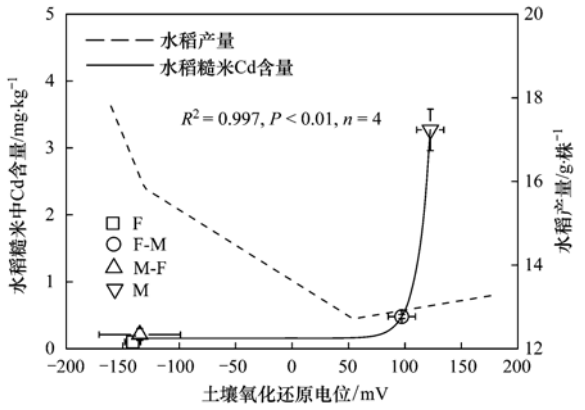


图 7　土壤 Eh 值与水稻糙米中 Cd 含量相关关系

Fig. 7　Correlations of soil Eh values and Cd contents in brown rice

4　结论

(1) 不同水分管理模式的水稻地上部 Cd 累积量和水稻中 Cd 转运系数的大小关系均为:M > F-M > M-F > F. 与 M 处理相比,F-M、M-F、F 处理的水稻地上部 Cd 累积量分别降低了 85.7%、91.8%、95.9%; F-M、M-F、F 处理的水稻中 Cd 转运系数分别降低了 33.3%、50.0%、83.3%.

(2) 土壤 Eh 值为 50 ~ 75 mV 可能是水稻急剧积累 Cd 的阈值范围,通过水分管理将土壤 Eh 值控制在 50 mV 以下,能大量减少对水稻 Cd 的吸收累积.

(3) 土壤 Eh 值控制在 -160 ~ -130 mV 时,水稻糙米中 Cd 含量变化在 0.10 ~ 0.19 mg·kg^{-1}范围,达到国家食品污染物限量 <0.2 mg·kg^{-1}的标准(GB 2762-2012),且保持较高水稻产量. 因此,建议在水稻种植过程中采用 M-F 处理作为水分管理模式.

参考文献:

[1] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014,(5): 10 -11.
Ministry of Environment Protection, Ministry of Land and Resources. The bulletin of the national general survey of soil contamination [J]. China Environment Protection Industry, 2014, (5):10-11.

[2] Mireles A, Solís C, Lagunas-Solar M, *et al*. Heavy metal accumulation in plants and soil irrigated with wastewater from Mexico City[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2004, **219-220**: 187-190.

[3] Sharma R K, Agrawal M, Marshall F. Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, **66**(2): 258-266.

[4] Roy M, McDonald L M. Metal uptake in plants and health risk assessments in metal-contaminated smelter soils [J]. Land Degradation & Development, 2015, **26**(8): 785-792.

[5] 唐翔宇, 朱永官. 土壤中重金属对人体生物有效性的体外试验评估[J]. 环境与健康杂志, 2004, **21**(3): 183-185.
Tang X Y, Zhu Y G. Advances in *in vitro* tests in evaluating bioavailability of heavy metals in contaminated soil via oral intake [J]. Journal of Environment and Health, 2004, **21**(3): 183-185.

[6] 江巧君, 周琴, 韩亮亮, 等. 有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻镉吸收和分配的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(1): 9-14.
Jiang Q J, Zhou Q, Han L L, *et al*. Effects of organic manure on uptake and distribution of cadmium in different rice genotypes under cadmium stress[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(1): 9-14.

[7] 王秀丽, 梁成华, 马子惠, 等. 施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1437-1444.
Wang X L, Liang C H, Ma Z H, *et al*. Effects of phosphate and zeolite on the transformation of Cd speciation in soil [J]. Environmental Science, 2015, **36**(4): 1437-1444.

[8] 徐明岗, 张青, 曾希柏. 改良剂对黄泥土镉锌复合污染修复效应与机理研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1361-1366.
Xu M G, Zhang Q, Zeng X B. Effects and mechanism of amendments on remediation of Cd-Zn contaminated paddy soil [J]. Environmental Science, 2007, **28**(6): 1361-1366.

[9] 周航, 周歆, 曾敏, 等. 2 种组配改良剂对稻田土壤重金属有效性的效果[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(2): 437-444.
Zhou H, Zhou X, Zeng M, *et al*. Effects of two combined amendments on heavy metal bioaccumulation in paddy soil[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(2): 437-444.

[10] 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 等. 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 309-313.
Wu L S, Zeng D M, Mo X R, *et al*. Immobilization impact of different fixatives on heavy metals contaminated soil [J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 309-313.

[11] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(3): 409-417.
Huang Y Z, Hao X W, Lei M, *et al*. The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(3): 409-417.

[12] 杨胜香, 田启建, 梁士楚, 等. 湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 2038-2045.
Yang S X, Tian Q J, Liang S C, *et al*. Bioaccumulation of heavy metals by the dominant plants growing in huayuan manganese and lead/zinc mineland, Xiangxi[J]. Environmental Science, 2012, **33**(6): 2038-2045.

[13] Hu P J, Li Z, Yuan C, *et al*. Effect of water management on cadmium and arsenic accumulation by rice (*Oryza sativa* L.) with different metal accumulation capacities[J]. Journal of Soils

and Sediments, 2013, **13**(5): 916-924.

[14] 于玲玲, 朱俊艳, 黄青青, 等. 油菜-水稻轮作对作物吸收累积镉的影响[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(1): 1-6, 12.
Yu L L, Zhu J Y, Huang Q Q, *et al*. Bioavailability of cadmium in the rotation system of oilseed rape and rice grown in Cd-contaminated soil[J]. Environmental Science and Technology, 2014, **37**(1): 1-6, 12.

[15] 魏祥东, 邹慧玲, 铁柏清, 等. 种植模式对南方旱地重金属含量及其迁移规律的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(6): 1096-1106.
Wei X D, Zou H L, Tie B Q, *et al*. Effects of different planting patterns on concentrations and migration of soil heavy metals in dryland in southern China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(6): 1096-1106.

[16] 王吉秀, 祖艳群, 李元, 等. 玉米和不同蔬菜间套模式对重金属 Pb、Cu、Cd 累积的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(11): 2168-2173.
Wang J X, Zu Y Q, Li Y, *et al*. Effects of maize and vegetable intercropping system on accumulation of Pb, Cu and Cd in plants [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(11): 2168-2173.

[17] 王荣萍, 张雪霞, 郑煜基, 等. 水分管理对重金属在水稻根区及在水稻中积累的影响[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(12): 1956-1961.
Wang R P, Zhang X X, Zheng Y J, *et al*. Accumulation of heavy metal in rhizosphere of rice and their uptake in rice with different water managements[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, **22**(12): 1956-1961.

[18] 张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 等. 水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2837-2846.
Zhang X X, Zhang X X, Zheng Y J, *et al*. Accumulation of S, Fe and Cd in rhizosphere of rice and their uptake in rice with different water managements[J]. Environmental Science, 2013, **34**(7): 2837-2846.

[19] Hu P J, Ouyang Y N, Wu L H, *et al*. Effects of water management on arsenic and cadmium speciation and accumulation in an upland rice cultivar[J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, **27**: 225-231.

[20] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 水分管理模式对水稻吸收累积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.

[21] Arao T, Kawasaki A, Baba K, *et al*. Effects of water management on cadmium and arsenic accumulation and dimethylarsinic acid concentrations in Japanese rice[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(24): 9361-9367.

[22] 丁昌璞, 徐仁扣. 土壤的氧化还原过程及其研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Ding C P, Xu R K. Oxidation-reduction processes of soils and their research methods[M]. Beijing: Science Press, 2011.

[23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Lu R K. Analytical methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[24] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M, *et al*. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, **51**(7): 844-851.

[25] 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 不同生育期水稻根表铁膜的形成及其对水稻吸收和转运 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(3): 432-437.
Hu Y, Huang Y Z, Huang Y C, *et al*. Formation of iron plaque on root surface and its effect on Cd uptake and translocation by rice (*Oryza sativa* L.) at different growth stages[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(3): 432-437.

[26] 陈新红, 叶玉秀, 潘国庆, 等. 杂交水稻不同器官重金属铅浓度与累积量[J]. 中国水稻科学, 2014, **28**(1): 57-64.
Chen X H, Ye Y X, Pan G Q, *et al*. Concentration and accumulation of lead in different organs of hybrid rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2014, **28**(1): 57-64.

[27] 曾卉, 周航, 邱琼瑶, 等. 施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 727-732.
Zeng H, Zhou H, Qiu Q Y, *et al*. Effects of group matching curing agent on exchangeable Pb, Cd, Zn contents in the potted soils and their accumulation in rice plants[J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 727-732.

[28] Uraguchi S, Mori S, Kuramata M, *et al*. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2009, **60**(9): 2677-2688.

[29] Ueno D, Koyama E, Yamaji N, *et al*. Physiological, genetic, and molecular characterization of a high-Cd-accumulating rice cultivar, Jarjan[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, **62**(7): 2265-2272.

[30] 关天霞, 何红波, 张旭东, 等. 土壤中重金属元素形态分析方法及形态分布的影响因素[J]. 土壤通报, 2011, **42**(2): 503-512.
Guan T X, He H B, Zhang X D, *et al*. The methodology of fractionation analysis and the factors affecting the species of heavy metals in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, **42**(2): 503-512.

[31] 邓林, 李柱, 吴龙华, 等. 水分及干燥过程对土壤重金属有效性的影响[J]. 土壤, 2014, **46**(6): 1045-1051.
Deng L, Li Z, Wu L H, *et al*. Influence of moisture and drying process on soil heavy metal availability[J]. Soils, 2014, **46**(6): 1045-1051.

[32] Saeki K, Okazaki M, Matsumoto S. The chemical phase changes in heavy metals with drying and oxidation of the lake sediments [J]. Water Research, 1993, **27**(7): 1243-1251.

[33] Xu J Z, Peng S Z, Qiao Z F, *et al*. Binding forms and availability of Cd and Cr in paddy soil under non-flooding controlled irrigation[J]. Paddy and Water Environment, 2014, **12**(1): 213-222.

[34] Vanbroekhoven K, Van Roy S, Gielen C, *et al*. Microbial processes as key drivers for metal (im)mobilization along a redox gradient in the saturated zone[J]. Environmental Pollution, 2007, **148**(3): 759-769.

[35] Van Roy S, Vanbroekhoven K, Dejonghe W, *et al*. Immobilization of heavy metals in the saturated zone by sorption

and in situ bioprecipitation processes[J]. Hydrometallurgy, 2006, **83**(1-4): 195-203.

[36] Zheng S N, Zhang M K. Effect of moisture regime on the redistribution of heavy metals in paddy soil[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(3): 434-443.

[37] 郑绍建, 胡霭堂. 淹水对污染土壤镉形态转化的影响[J]. 环境科学学报, 1995, **15**(2): 142-147.
Zheng S J, Hu A T. Effects of flooding on the transformation of cadmium fractions in contaminated soils[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1995, **15**(2): 142-147.

[38] 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.

[39] Honma T, Ohba H, Kaneko-kadokura A, *et al*. Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(8): 4178-4185.

[40] Reddy C N, Patrick W H. Effect of redox potential and pH on the uptake of cadmium and lead by rice plants[J]. Journal of Environmental Quality, 1977, **6**(3): 259-262.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 38 No. 1

Jan. 15, 2017

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter ····· ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, *et al.* (1)

Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event ····· JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, *et al.* (13)

Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of $PM_{2.5}$ Concentration Based on GAM Model ····· HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)

Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume ····· LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, *et al.* (33)

Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer ····· ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, *et al.* (41)

Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH_4 and CO_2 in a Brackish Marsh Dominated by *Cyperus malaccensis* and *Phragmites australis* During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary ····· TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, *et al.* (52)

Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO_2 and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China ····· ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, *et al.* (60)

Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake ····· CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, *et al.* (70)

Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake ····· HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, *et al.* (78)

Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil ····· ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)

Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake ····· QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, *et al.* (95)

Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou ····· YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, *et al.* (104)

Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression ····· CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, *et al.* (113)

Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir ····· YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)

Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir ····· FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, *et al.* (129)

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area ····· HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, *et al.* (138)

Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed ····· JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, *et al.* (147)

Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes ····· JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, *et al.* (156)

Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake ····· ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, *et al.* (162)

Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake ····· ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, *et al.* (170)

Effects of pH and Complexing Agents on Sb(Ⅴ) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface ····· WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, *et al.* (180)

Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms ····· WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, *et al.* (188)

Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment ····· AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, *et al.* (195)

Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater ····· GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, *et al.* (201)

Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique ····· ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, *et al.* (212)

Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent ····· WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, *et al.* (220)

Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe^{2+})-Ozonation Process ····· XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, *et al.* (229)

Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors ····· WANG Han, FANG Fang, LI Kai, *et al.* (238)

Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration ····· ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, *et al.* (247)

Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis ····· LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, *et al.* (253)

Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification ····· JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, *et al.* (260)

Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules ····· WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, *et al.* (269)

Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization ····· ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, *et al.* (276)

Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis ····· WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, *et al.* (283)

Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by *Pseudomonas aeruginosa* ····· SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)

Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain ····· SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, *et al.* (301)

Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing ····· LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, *et al.* (309)

Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibahe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi ····· LIU Jin-xian, LI Cui, JING Ju-hui, *et al.* (318)

Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China ····· LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, *et al.* (327)

Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Soil Active Organic Carbon ····· ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, *et al.* (333)

Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice ····· TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, *et al.* (343)

Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress ····· CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, *et al.* (352)

Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition ····· GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, *et al.* (361)

Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(Ⅵ) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring ····· LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, *et al.* (368)

Cd(Ⅱ) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(Ⅱ) Polluted Soil Remediation ····· HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, *et al.* (374)

Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River ····· HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, *et al.* (382)

Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou ····· CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, *et al.* (389)

Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors ····· YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, *et al.* (399)

Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants ····· YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, *et al.* (405)

Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution ····· ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, *et al.* (412)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：赵进才

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　刘　毅　汤鸿霄　孟　伟　周宗灿　林金明

赵进才　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环境科学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2017 年 1 月 15 日　第 38 卷　第 1 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 38　No. 1　Jan. 15, 2017

主　　管	中国科学院	**Superintended**	by Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored**	by Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored**	by Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	赵进才	**Editor-in -Chief**	ZHAO Jin-cai
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited**	by The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published**	by Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京宝昌彩色印刷有限公司	**Printed**	by Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发　　行	科 学 出 版 社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed**	by Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　国内邮发代号：2-821

国 内 定 价：140.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行

ISSN 0250-3301