

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究 孙建林,常文静,陈正侠,曾辉(1513)

北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究 崔彤,程婧晨,何万清,任培芳,聂磊,徐东耀,潘涛(1523)

2006~2010年珠三角地区 SO₂ 特征分析 李菲,谭浩波,邓雪娇,邓涛,徐婉筠,冉靓,赵春生(1530)

环境空气 PM_{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试 王强,钟琪,迟颖,张杨,杨凯(1538)

燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放 裴冰(1544)

南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应 方峰,王磊,席雪飞,胡佳俊,付小花,陆兵,徐殿胜(1550)

基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算 冯驰,金琦,王艳楠,赵丽娜,吕恒,李云梅(1557)

贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,罗进,蒋浩(1565)

东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析 高磊,陈建耀,王江,柯志庭,朱爱萍,许凯(1573)

河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究 刘肖,杨琰,彭涛,赵景耀,任小凤,张银环,聂旭东,李建仓,凌新有,张志钦(1582)

石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响 肖时珍,熊康宁,蓝家程,张晖,杨龙(1590)

旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异 赵瑞一,梁作兵,王尊波,于正良,江泽利(1598)

有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响 孙玉川,王永启,梁作兵,袁道先(1605)

山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究 曹霏霏,杨丽原,庞绪贵,王炳华,王云倩(1615)

摇蚊幼虫扰动下沉沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应 史晓丹,李勇,李大鹏,王忍,邓猛,黄勇(1622)

南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响 郝卓,高扬,张进忠,徐亚娟,于贵瑞(1630)

不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响 黄雪娇,刘晓晨,李振轮,石纹豪,杨珊(1639)

荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响 汪小雄,姜成春,李锦卫,汪晓军(1648)

黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用 陈亚楠,袁玲(1655)

饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制 丁春生,孟壮,徐洋洋,缪佳(1662)

水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性 凌晓,胡晨燕,程明,谷建(1668)

化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响 张灿,刘文君,史文,安代志,白森,徐稳(1674)

牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性 马锋锋,赵保卫,刁静茹,钟金魁,李安邦(1678)

丁二酸改性茶油树木屑吸附附的研究 张晓峰,陈迪云,彭燕,刘永胜,熊雪莹(1686)

SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响 张静,肖太民,张晶,曹丽亚,杜亚威,刘春,张磊(1694)

TiO₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制 郭宏生,刘亚楠,乔琪,魏红,董呈幸,薛洁,李克斌(1700)

新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能 王刚,杜凤龄,常青,徐敏(1707)

基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量 曾善文,王泽宇,高敬,刘东,张代钧,卢培利(1713)

分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制 黄帅,刘宏波,殷波,马惠君,符波,刘和,白洁(1720)

通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响 张喻,韩融,陆文静,王洪涛,明中远,王强,夏伟(1727)

生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究 吴青,崔延瑞,汤晓晓,杨慧娟,孙剑辉(1733)

百乐克(BIOLAK)活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析 田美,刘汉湖,申欣,赵方庆,陈帅,姚永佳(1739)

异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性 梁贤,任勇翔,杨垒,赵思琪,夏志红(1749)

菌株 *Arthrobacter* sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学 任磊,史延华,贾阳,姚雪松,Ruth Nahurira,弥春霞,闫艳春(1757)

短短芽胞杆菌及其芽胞对苾的降解 刘芷辰,叶锦韶,彭辉,刘则华,邓庭进,尹华,廖丽萍(1763)

垃圾填埋场抗生素抗性基因初探 李蕾,徐晶,赵由才,宋立岩(1769)

不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查 麦晓蓓,陶然,杨扬,张敏,林剑华,满滢(1776)

硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响 柳蓉,龙焰,王立立,何婷,叶锦韶(1785)

山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性 严俊霞,李洪建,李君剑,武江星(1793)

施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响 姜继韶,郭胜利,王蕊,刘庆芳,王志齐,张彦军,李娜娜,李如剑,吴得峰,孙棋棋(1802)

宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估 张文超,吕森林,刘丁或,刘品威,米持真一,王效举,王青耀(1810)

宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义 张俊辉,王瑾,张健,房妮,夏敦胜(1818)

长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征 毛霞丽,陆扣萍,孙涛,张小凯,何丽芝,王海龙(1827)

矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响 李君剑,刘峰,周小梅(1836)

三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究 肖焯,黄志刚,武海涛,吕宪国(1842)

钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应 黄昭露,陈泉源,周娟,谢墨函(1849)

石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应 杨茜,吴蔓莉,聂麦茜,王婷婷,张明辉(1856)

可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究 卫泽斌,陈晓红,吴启堂,谭蒙(1864)

绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性 金诚,赵转军,南忠仁,王胜利,武文飞,王厚成(1870)

硫酸对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响 王丹,李鑫,王代长,饶伟,杜光辉,杨军,化党领(1877)

臭氧对几种楠木气体交换参数的影响 李苗苗(1888)

某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索 蔡锋,赵士波,陈刚才,鲜思淑,杨清玲,周贤杰,余海(1902)

《环境科学》征订启事(1543) 《环境科学》征稿简则(1756) 信息(1667,1726,1809,1848)

硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收镉的影响

王丹¹, 李鑫², 王代长^{1*}, 饶伟¹, 杜光辉¹, 杨军¹, 化党领¹

(1. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002; 2. 河南农业大学理学院, 郑州 450002)

摘要: 添加外源镉污染水稻土进行盆栽试验, 施入不同形态及数量的硫肥(单质硫、石膏), 研究硫素对水稻根系铁锰胶膜的形成及对水稻吸收镉的影响。结果表明, 整个水稻生育期内, 土壤溶液 Eh 范围在 -200 ~ 100 mV 之间; pH 在 6.9 ~ 7.9 之间; $pe + pH$ 在 4 ~ 10 之间。水稻根表胶膜以 Fe 膜为主, 其质量分数达到 5 000 ~ 13 000 $mg \cdot kg^{-1}$, Mn 膜的质量分数相对较小, 为 170 ~ 580 $mg \cdot kg^{-1}$ 。在孕穗期高硫量处理与低硫量处理的铁胶膜质量分数分别为 9 400 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 8 600 $mg \cdot kg^{-1}$, 高硫量处理比低硫量处理可生成更多的铁胶膜; 而根表锰胶膜的数量差异主要表现在分蘖期, 单质硫和石膏硫处理的锰胶膜质量分数分别为 600 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 400 $mg \cdot kg^{-1}$, 达到显著差异水平, 单质硫比石膏硫更易促进水稻根表锰胶膜的形成。胶膜对于 Fe^{2+} 过量吸收有一定阻控作用, 对 Mn^{2+} 作用不显著。水稻根表胶膜吸附 Cd 的质量分数在分蘖期为 78.8 ~ 131.1 $mg \cdot kg^{-1}$, 孕穗期 16.6 ~ 21.1 $mg \cdot kg^{-1}$, 成熟期 3.0 ~ 9.2 $mg \cdot kg^{-1}$ 。在分蘖期与孕穗期, 高硫量处理比低硫量处理的吸附量高, 在成熟期反之。采用 ACA 方法浸提铁锰胶膜内的 Cd 测定值并不能真实地表明胶膜实际固定 Cd 的质量分数。水稻体内各部位 Cd 的质量分数表现为根 > 茎叶 > 籽粒。一定量的施硫能有效减少水稻各器官中 Cd 的质量分数。对于根和茎叶, 单质硫在成熟期以前效果好于石膏硫; 对于籽粒, 石膏硫效果更佳。一定量的硫肥, 能有效阻碍 Cd 从水稻根部向茎叶与籽粒的转移。对于茎叶, 在孕穗期单质硫和石膏硫的 Cd 转移系数分别为 0.13 和 0.25, 差异显著, 单质硫能更好地阻碍 Cd 的转移; 对于籽粒, 石膏硫的阻碍效果更好。

关键词: 水稻; 硫肥; 重金属镉; 氧化还原状况; 铁锰氧化物胶膜

中图分类号: X171.5; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1877-11 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.05.050

Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (*Oryza sativa* L.)

WANG Dan¹, LI Xin², WANG Dai-chang^{1*}, RAO Wei¹, DU Guang-hui¹, YANG Jun¹, HUA Dang-ling¹

(1. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. College of Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: A pool culture experiment using exogenous Cd-polluted paddy soils was carried out to investigate the influence of different forms of sulfur fertilizers (sulfur and gypsum) on the formation of Fe-Mn plaque on rice root and the uptake of Cd by rice. The results showed that the redox potential (Eh) was about -200-100 mV, the pH was 6.9-7.9 and the $pe + pH$ was 4-10 in different growth periods of rice. The mass fractions of Fe and Mn plaque on rice root were 5 000-13 000 $mg \cdot kg^{-1}$ and 170-580 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively. The high sulfur treatment led to the formation of more Fe plaque than the low sulfur treatment, and the mass fractions of Fe plaque in both treatments were 9 400 $mg \cdot kg^{-1}$ and 8 600 $mg \cdot kg^{-1}$ respectively in the boot stage. Contents of Mn plaque, significantly different in the tiller stage by elemental sulfur treatment and gypsum treatment, were 600 $mg \cdot kg^{-1}$ and 400 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively. The elemental S treatment led to the formation of more Mn plaque on rice root than the gypsum treatment. The excessive intake of Fe^{2+} might be prevented by the formation of the plaque which had little significant influence on the uptake of Mn^{2+} . The mass fractions of Cd adsorbed by rice roots surface plaque were 78.8-131.1 $mg \cdot kg^{-1}$ in tiller stage, 16.6-21.1 $mg \cdot kg^{-1}$ in boot stage, and 3.0-9.2 $mg \cdot kg^{-1}$ in mature stage. The high sulfur treatment led to higher adsorption of Cd by the plaque than the low sulfur treatment in the tiller stage and the boot stage, while opposite result was observed in the mature stage. The values of Cd on the plaque measured by ACA could not truly show its actual contents adsorbed. The mass fractions of Cd in the different parts of rice followed the order of roots > stem leaf > grain. The sulfur fertilizers applied significantly reduced the mass fractions of Cd uptake in different parts of rice, and the elemental sulfur treatment had better effects than the gypsum treatment before the mature stage in roots and stem leaf, and the gypsum sulfur treatment was better for grain. A certain amount of sulfur fertilizers could effectively prevent the migration of Cd from roots to stem and grain. The transfer coefficients of Cd from roots to stem leaf in the elemental sulfur treatment and the gypsum treatment were 0.13 and 0.25 in the boot stage, respectively, and the difference was significant. Elemental sulfur was more effective to prevent the Cd migration from roots to stem leaf, and the gypsum treatment was more active from roots to grain.

Key words: rice (*Oryza sativa* L.); sulfur fertilizer; heavy metal Cd; redox condition; Fe/Mn oxide plaque

收稿日期: 2014-11-24; 修订日期: 2014-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271471, 41371311)

作者简介: 王丹(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境化学, E-mail: 18603781027@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dzwang@henau.edu.cn

镉是一种毒害性极强的环境污染元素,大气颗粒沉降、含镉肥料的使用和污水灌溉等能导致土壤或水体中累积重金属镉^[1,2],并通过食物链途径进入人体,危害人体健康.水稻是我国的第一大粮食作物,其生产受镉污染的影响也日益加剧,严重威胁着粮食安全^[3-5].

水稻叶片可将大气中的氧气输送到根部,由根系释放氧气到根际环境中^[6].根部泌氧作用使渍水土壤中大量还原性物质 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 被氧化,在根表和质外体等部位沉积大量的铁锰氧化物胶膜^[7],其对重金属的毒害有一定抵抗作用^[8,9].

硫是植物必需的营养元素,作物对硫的吸收量与磷接近,一定浓度的硫可诱导水稻抑制根系对氧的消耗、侧根的生长等^[10].长期以来,氮、磷、钾肥的不平衡施用掩盖了土壤硫和作物缺硫的现象.近年来,缺硫已成为某些国家作物产量进一步提高的限制因素之一,硫肥的施用成为提高水稻产量必不可少的措施.有研究证实,施硫能显著增加水稻根表铁锰胶膜数量,其效应与硫肥形态及用量有关^[11].土壤重金属的生物地球化学过程也与硫素循环密切相关^[12].硫肥的施入会改变水稻土 pH、氧化还原电位、溶解氧和溶液电导率等作物生长的环境条件,影响重金属镉在土壤中吸附与解吸、溶解与沉淀,络合等赋存状态^[13],进而影响镉在水稻内的生物富集,而表现出不同的毒性和环境行为.

因此,在强调水稻施用硫肥的同时,有必要搞清楚硫素对水稻根系铁锰胶膜的形成,及对水稻吸收重金属镉的影响等问题.本试验通过不同形态及数量硫素的施入,拟采用外源镉污染水稻土的池栽试验,开展不同生育期水稻对镉的吸收、器官分配及转移情况进行研究,对于评价重金属污染土壤水稻品质,保障粮食安全及人类身体健康有十分重要的意义.

1 材料与方法

1.1 材料

供试土壤为河南省信阳市无污染水稻土,土样采回后室内风干、破碎、混匀、备用.其基本理化性质土壤 pH 为 7.05,有机碳为 $9.05 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全 N 为 $0.73 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全 S 为 $167.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效 P 为 $25.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效 K 为 $125.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

利用上述无污染水稻土进行池栽试验,选用规格 $100 \text{ cm}\times 72 \text{ cm}\times 56 \text{ cm}$ (长宽高)塑料盆,每盆均装 400 kg 水稻土.对该无污染水稻土添加外源镉,

添加镉的质量分数为 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (光谱纯金属镉 1.0000 g ,微热于 $20 \text{ mL } 1:1 \text{ HNO}_3$ 溶解,用水定容近 1 L ,配制 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 标准贮备液,稀释至所需,最后溶液 pH 为 5.5),将塑料盆土层淹水,保持水层 $2\sim 3 \text{ cm}$,平衡 60 d 后,晾晒 20 d,再施入基肥.基肥为尿素,底肥 50%,分蘖肥 30%,穗肥 20%,折合纯 N $0.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;磷酸二氢钙,底肥 100%,折合纯 P $0.20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;氯化钾,底肥 70%,穗肥 30%,折合纯 K $0.16 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.设置不施硫处理,记 CdS_0 ;施单质硫,施入量折纯 S $0.15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别记 CdS_1 和 CdS_2 ;施石膏硫 ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$),施入量折纯 S $0.15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别记 CdS_3 和 CdS_4 .均匀施入后再次淹水,保持水层 $2\sim 3 \text{ cm}$,平衡 15 d 后移栽水稻幼苗.试验设计共计 5 个处理,每个处理重复 4 次,随机排列.水稻品种为 Y 两优 1 号,播种日期 2013 年 5 月 5 日,6 月 16 日移栽,全生育期 140 d.按照大田生长状况进行水分管理,在水稻分蘖期(7 月 13 日)、孕穗期(8 月 16 日)、成熟期(9 月 26 日)采集植株样品进行相关分析.

1.2 试验方法

1.2.1 土壤溶液监测

通过 DZS-707 型多参数水质分析仪(上海)在线监测土壤溶液的氧化还原电位(Eh)和 pH 等水质数据.

1.2.2 水稻植株样品处理

取回的新鲜水稻植株用去离子水冲洗干净后从茎基部分开,地上部茎叶与籽粒分开,杀青后在烘箱内 70°C 烘干,磨碎.根内 Fe、Mn 和 Cd 的测定,采用 ACA 法去除铁锰胶膜后的根系样品进行测定.

准确称取植株样品于三角瓶中,加入 12 mL 硝酸、高氯酸混合酸(3:1,体积比)过夜,第 2 d 于电热板上消煮至溶液无色透明,待冷却后转移至 50 mL 容量瓶中定容过滤.

1.2.3 土壤铁锰胶膜的去除处理

一部分新鲜的地下部根表铁锰胶膜,采用 ACA 法(抗坏血酸 + $0.3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 柠檬酸钠 + 10% 乙酸钠)^[14] 浸提,提取后的根系用去离子水反复冲洗干净后,直接测定浸提液中 Fe、Mn 和 Cd 的质量浓度,记为方法 1.另一部分新鲜的根系,采用直接用酸消解,其溶液内各元素的测定值,减去 ACA 法去除胶膜后的根内测定值,记为方法 2.胶膜厚度采用每千克干根重所含铁锰毫克数即 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为单位^[15].

ACA 法浸提的根表胶膜中 Fe、Mn 和 Cd,植株

中 Fe、Mn 和 Cd 的质量浓度采用火焰原子吸收分光光度计及石墨炉原子吸收分光光度计 (ZEEmit-700) 进行测定。

1.3 数据分析

使用 Microsoft Excel 2007、GraphPad Prism 5.0 和 SPSS 19.0 对数据进行处理分析与绘图。

2 结果与分析

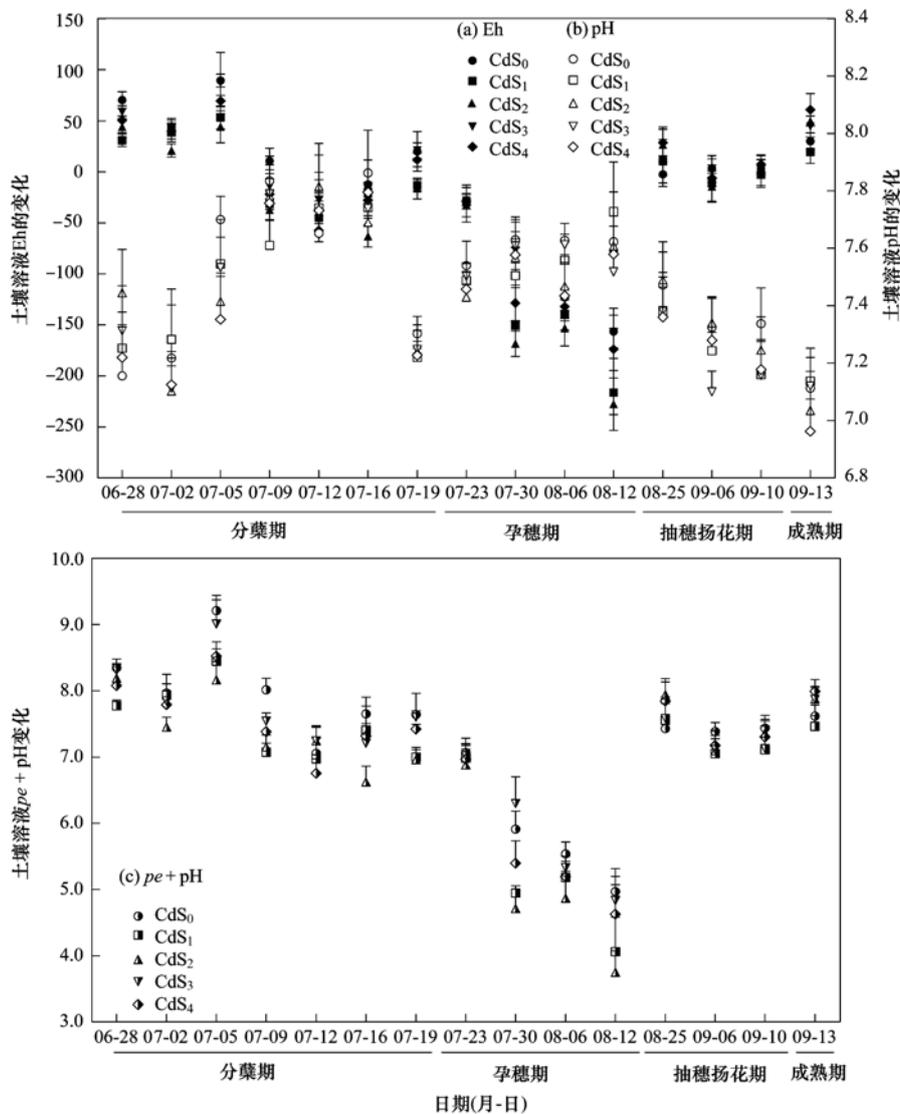
2.1 根部 0~5 cm 范围内土壤溶液 Eh、pH 和 $pe + pH$ 的变化

水稻生育期内土壤溶液 Eh 的变化如 [图 1 (a)]. 分蘖初期 Eh 开始下降, 保持在 -100 mV 以上, 分蘖末期有一次回升; 孕穗期 Eh 再次下降, Eh 在 $0 \sim -200$ mV 之间; 抽穗扬花期 Eh 升高至 -50

~ 50 mV 之间波动, 成熟期起 Eh 逐渐升高. 整个生育期内, 不施硫的处理土壤溶液的 Eh 基本上高于施硫处理, 石膏硫处理的 Eh 略高于单质硫处理, 差异不明显。

水稻生育期内土壤溶液 pH 的变化如 [图 1 (b)]. 分蘖期起 pH 从 7.1 逐渐上升至 7.8 左右, 分蘖末期有一次突降; 孕穗期 pH 再次上升至 7.5 左右; 抽穗扬花期 pH 降低至 7.2 左右, 成熟期 pH 降至 7.1 以下. 整个生育期内, 不施硫处理土壤溶液的 pH 值基本上比施硫处理的值大, 石膏硫处理与单质硫处理无明显差异。

水稻生育期内土壤溶液 $pe + pH$ 的变化情况如 [图 1 (c)]. 分蘖期与孕穗期 $pe + pH$ 变幅在 4.0~8.0 之间, 抽穗扬花期起, $pe + pH$ 逐渐升至 7.0 以上。



日期为 2013-06-28 ~ 2013-09-13

图 1 水稻不同生育期土壤溶液 Eh、pH 和 $pe + pH$ 变化

Fig. 1 Changes of soil solution Eh and pH and $pe + pH$ at different growth stages of rice

2.2 不同生育期水稻根表铁锰胶膜厚度的变化

采用 ACA 法浸提根表的铁锰胶膜,其浸提液测定 Fe 和 Mn 的质量浓度,可能是准胶膜数量,用胶膜厚度表示(方法 1). 水稻根表的铁锰胶膜,以铁膜为主,厚度达到 5 000 ~ 13 000 mg·kg⁻¹; 锰膜相对较少[图 2(b)],厚度为 170 ~ 580 mg·kg⁻¹. 在分蘖期,水稻根系表面的铁膜厚度达到最大值 8 000 ~ 13 000 mg·kg⁻¹; 而后在孕穗期降至 5 100 ~ 10 300 mg·kg⁻¹; 成熟期略有降低至 5 000 ~ 6 100 mg·kg⁻¹. 水稻根系表面锰胶膜的厚度变化趋势与铁胶膜基本一致[图 2(b)],在分蘖期达到最大值 390 ~ 580 mg·kg⁻¹; 随后在孕穗期降至 270 mg·kg⁻¹左右; 在成熟期降至 170 ~ 240 mg·kg⁻¹.

铁氧化物胶膜的厚度[图 2(a)],按照处理之

间差异的显著性分析,在分蘖期,不施硫处理的最低,与施硫处理间均有显著性差异,但施硫处理间差异不显著; 在孕穗期,CdS₂ 处理、CdS₄ 处理 > CdS₁ 处理、CdS₃ 处理 > CdS₀ 处理; 在成熟期,各处理间差异不显著. 锰氧化物胶膜的厚度[图 2(b)],在分蘖期,施单质硫处理显著高于施石膏硫和不施硫的处理; 在孕穗期,施硫处理的差异不显著,但均显著大于不施硫处理; 在成熟期,各处理之间差异不显著.

根系样品用酸消煮后直接测定其 Fe 和 Mn 的质量浓度,包含有根表胶膜铁锰和水稻根内铁锰的质量分数; 减去采用 ACA 法去除根表胶膜后测定根内铁锰的质量分数,计算得出根表铁锰的质量分数,应为根表真实的铁锰胶膜的质量分数(方法 2),其趋势与方法 1 的一致(图 3).

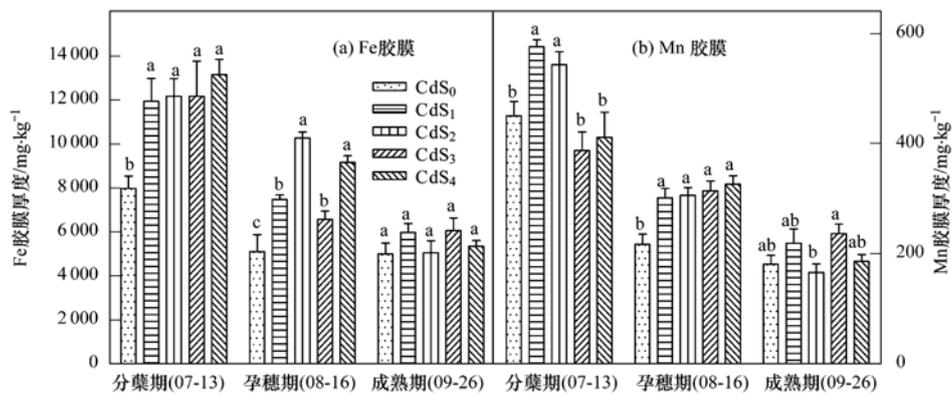


图 2 ACA 法测定水稻不同生育期根表铁锰胶膜厚度

Fig. 2 Concentration of Fe and Mn plaque in different growth stages of rice as determined by ACA

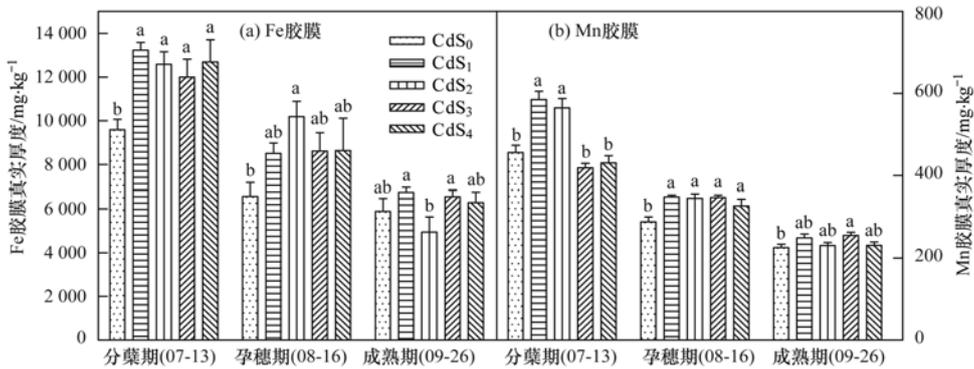


图 3 差值法测定水稻不同生育期根表铁锰胶膜厚度

Fig. 3 Concentration of Fe and Mn plaque in different growth stages of rice as determined by the different method

2.3 不同生育期水稻根内 Fe 和 Mn 质量分数的变化

采用 ACA 法去除根表铁锰胶膜后,再用酸消煮,并测定根部消煮液铁锰的质量浓度,实际上是根部体内铁锰的质量分数. 根内 Fe 的质量分数[图 4(a)],在分蘖期为 4 900 ~ 5 000 mg·kg⁻¹; 孕穗期达到最大值 6 400 ~ 8 000 mg·kg⁻¹; 在成熟期降至

4 800 ~ 6 100 mg·kg⁻¹; 在孕穗期,CdS₃ 处理显著低于不施硫处理; 在分蘖期与成熟期,各处理间差异不显著. 根内 Mn 的质量分数[图 4(b)],变化趋势与 Fe 的基本一致,在分蘖期为 35.2 ~ 44.9 mg·kg⁻¹; 孕穗期达到最大值 69.0 ~ 78.4 mg·kg⁻¹; 在成熟期降至 34.4 ~ 42.6 mg·kg⁻¹; 整个水稻生育

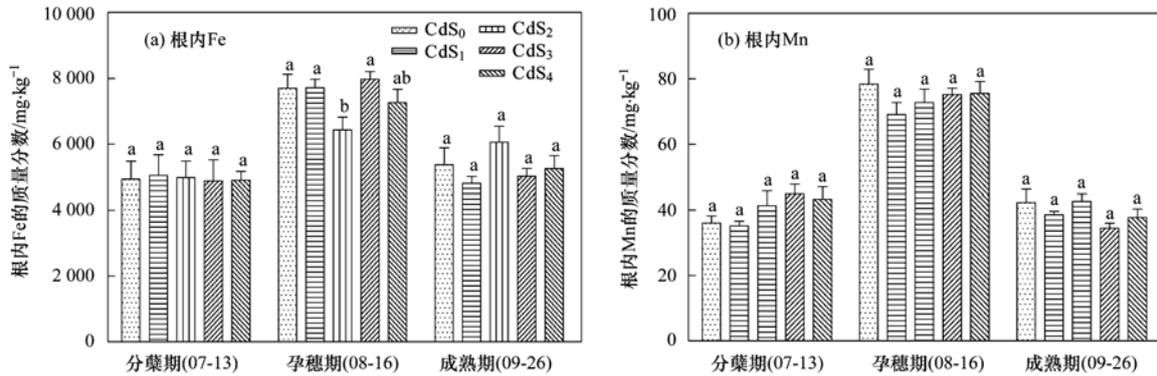


图 4 不同生育期水稻根内 Fe 和 Mn 的质量分数

Fig. 4 Mass fractions of Fe and Mn in roots at different growth stages of rice

期内,各处理间无显著差异。

2.4 不同生育期水稻根表胶膜吸附 Cd 质量分数的变化

采用 ACA 法浸提根表的铁锰胶膜,测定其浸提液 Cd 质量浓度,可能是准胶膜吸附 Cd 的质量分数(方法 1)。不同生育期稻根表面胶膜吸附 Cd 的质量分数如[图 5(a)],在分蘖期达到最大值为 43.1 ~ 55.8 mg·kg⁻¹;随着水稻的生长发育,根表吸附 Cd 的质量分数呈递减趋势,在孕穗期降至 19.1 ~ 26.5 mg·kg⁻¹,在成熟期最低 11.8 ~ 17.6 mg·kg⁻¹。

在分蘖期,施硫处理均大于不施硫处理,但差异不显著;在孕穗期,CdS₂ 处理、CdS₄ 处理 > CdS₁ 处理、CdS₃ 处理 > CdS₀ 处理,CdS₂ 处理显著高于不施硫处理;在成熟期,CdS₃ 处理 > CdS₁ 处理 > CdS₂ 处理 > CdS₀ 处理 > CdS₄ 处理,CdS₄ 处理显著小于 CdS₃ 处理。

根系样品用酸消煮后直接测定其 Cd 的质量浓度,减去采用 ACA 法去除根表胶膜后测定根内 Cd 的质量浓度,计算得出根表胶膜吸附 Cd 的质量分数,应该是根表胶膜真实吸附的 Cd 质量分数(方法 2)。其趋势与方法 1 的基本一致[图 5(b)],但在分

蘖期的计算值为 78.8 ~ 131.1 mg·kg⁻¹,显著大于方法 1 的测定结果,随生育期的延长,此差异逐渐减小消失。

2.5 不同生育期水稻各部位 Cd 质量分数的变化

采用 ACA 法去除铁锰胶膜后测定根部 Cd 的质量浓度,即为不含胶膜水稻根内 Cd 的质量分数。水稻吸收的 Cd 在植株体内表现为根内最多,茎叶次之,籽粒中最低(图 6)。

水稻根内 Cd 的质量分数[图 6(a)],在分蘖期最高,达到 9.31 ~ 18.09 mg·kg⁻¹;孕穗期降至 3.68 ~ 10.38 mg·kg⁻¹;成熟期趋于平稳 3.83 ~ 6.41 mg·kg⁻¹。施硫处理下 Cd 的质量分数显著低于 CdS₀ 处理;在分蘖期,CdS₂ 处理、CdS₄ 处理 < CdS₁ 处理、CdS₃ 处理,差异显著;在孕穗期,CdS₄ 处理 < CdS₃ 处理,差异显著,且施用单质硫的处理显著小于施石膏的处理;在成熟期,各施硫处理间无显著差异。

茎叶中 Cd 的质量分数[图 6(b)]的整体变化趋势与根的一致。在分蘖期达到最大值 5.47 ~ 12.61 mg·kg⁻¹;孕穗期降至 2.40 ~ 8.12 mg·kg⁻¹;成熟期在 2.87 mg·kg⁻¹左右。施硫处理水稻茎叶中

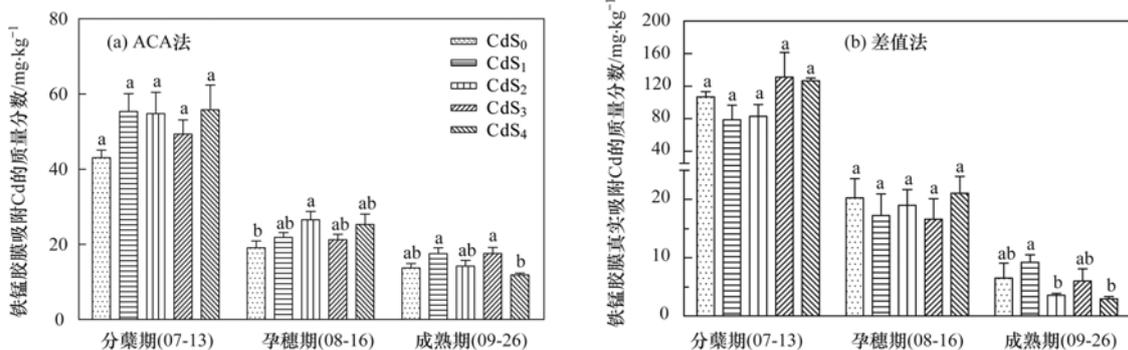


图 5 水稻根表吸附 Cd 的质量分数

Fig. 5 Mass fractions of root surface adsorbed Cd in rice

Cd 的质量分数显著低于 CdS₀ 处理; 在分蘖期与孕穗期, 施用单质硫的处理显著小于施石膏的处理, 且孕穗期 CdS₄ 处理 > CdS₃ 处理, 差异显著; 在成熟期, 各施硫处理间无显著差异。

籽粒中 Cd 的质量分数[图 6(c)], CdS₀ 处理最高, 在 0.80 mg·kg⁻¹ 左右, 施硫处理均显著低于不施硫处理; CdS₂ 处理、CdS₄ 处理 < CdS₁ 处理、CdS₃ 处理, 差异不显著. 不同形态的硫处理间 CdS₃ 处理 < CdS₁ 处理, 差异显著, CdS₄ 处理 < CdS₂ 处理。

2.6 不同生育期水稻各部位对 Cd 的转移系数

转移系数(TF)是植物地上部与根部重金属含量的比值, 可以体现植物从根部向地上部转移重金属的能力^[16]. 在整个生育期内, 水稻茎叶对 Cd 的转移系数(表 1), 不同处理间有显著性差异. 随水稻生育期延长, 各处理下水稻 Cd 的转移系数逐渐变大. 在分蘖期, Cd 的转移系数为 0.065 ~ 0.101, 施硫处理间差异不显著, 但均显著小于不施硫处理; 在孕穗期, Cd 的转移系数为 0.122 ~ 0.273, 单质硫处理下 Cd 的转移系数显著小于施石膏硫和不施硫的处理; 在成熟期, Cd 的转移系数最大 0.236 ~ 0.314, 各处理间差异不显著. 水稻籽粒对 Cd 的转移系数为 0.050 ~ 0.071, CdS₁ 处理与 CdS₃ 处理显著低于不施硫处理。

3 讨论

3.1 水分管理对土壤溶液 Eh、pH 和 pe + pH 的影响

水稻生长与养分和水分管管理密切相关. 人为灌溉、耕作和施肥等农业技术综合措施, 均会对水稻的生态环境条件造成影响, 引起水稻土一系列物理、化学和生物化学性质的变化. Eh 和 pH 是水稻土的主要环境化学因素, 它决定土壤的氧化还原状

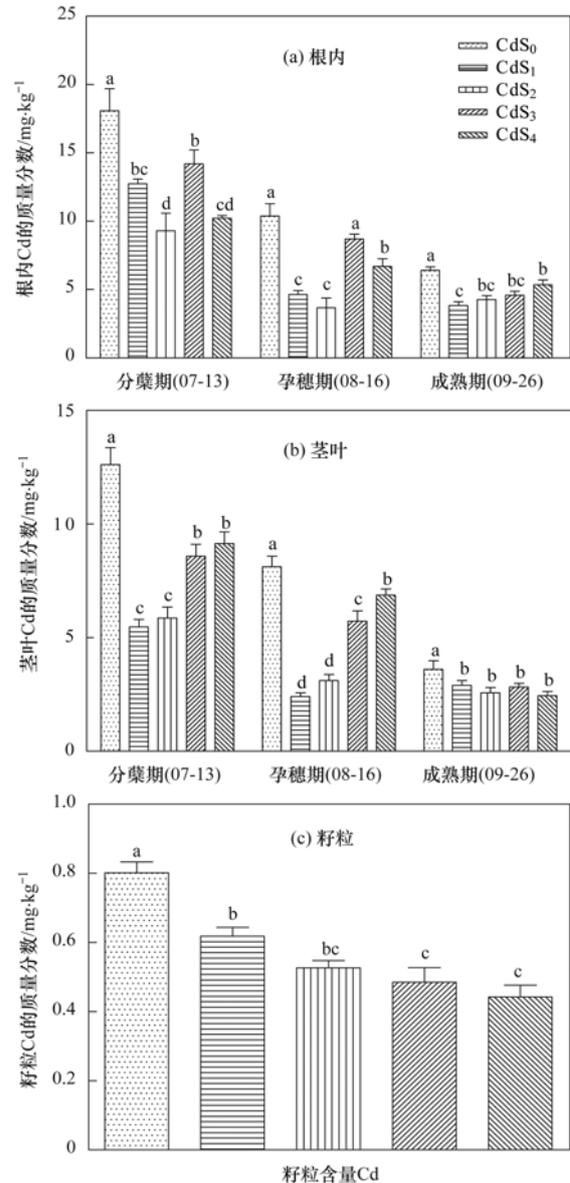


图 6 不同生育期水稻各部位 Cd 的质量分数
 Fig. 6 Mass fractions of Cd in different parts at different growth stages of rice

表 1 不同生育期水稻 Cd 的转移系数¹⁾

Table 1 Transference coefficient of Cd at different growth stages of rice

类型	生育期	CdS ₀	CdS ₁	CdS ₂	CdS ₃	CdS ₄
茎叶	分蘖期(07-13)	0.101 ± 0.012 a	0.068 ± 0.029 b	0.070 ± 0.031 b	0.065 ± 0.019 b	0.067 ± 0.010 b
	孕穗期(08-16)	0.273 ± 0.039 a	0.122 ± 0.047 b	0.139 ± 0.020 b	0.248 ± 0.119 a	0.251 ± 0.031 a
	成熟期(09-26)	0.314 ± 0.153 a	0.236 ± 0.081 a	0.338 ± 0.110 a	0.307 ± 0.137 a	0.305 ± 0.067 a
籽粒		0.071 ± 0.029 a	0.050 ± 0.015 b	0.068 ± 0.010 ab	0.050 ± 0.016 b	0.055 ± 0.008 ab

1) 同行数值后跟英文小写字母表示处理间显著性差异 (P < 0.05)

况, 直接影响土壤养分和污染元素的存在状态和有效性等. pe + pH 则揭示了氧化还原反应中电子与质子活度的变化, 是表征土壤氧化还原平衡状况的特征值^[17-19].

从试验结果图 1 来看, 在 0 ~ 5 cm 范围内, 不同水稻生育期根系土壤溶液 Eh、pH 和 pe + pH 的变化受水分管理的影响较为显著. 分蘖期保持浅水勤灌, 促进早分蘖, 提高分蘖成穗率, Eh 缓慢下降, pH

逐渐上升;分蘖后期控制无效分蘖,排水晒田,Eh 有所回升;孕穗期保持水层 6~8 cm,Eh 再次大幅下降,pH 则再次上升至 7.5 左右;抽穗扬花期田间保持湿润,干湿交替,Eh 升高并趋于平稳,而 pH 降低至 7.2 左右;成熟期排水晾田,促进成熟及籽粒饱满,故 Eh 逐渐升高,且 pH 降至 7.1 以下.在分蘖期与孕穗期, $pe + pH$ 均逐渐减小,变幅在 4.0~8.0 之间,土壤溶液处于还原状态;抽穗扬花期起, $pe + pH$ 逐渐升至 7.0 以上,土壤溶液从还原状态向着氧化状态转变,这与杨世杰等^[20]的研究结果类似.

3.2 硫素对水稻根表铁锰胶膜的影响

许多水下植物、挺水植物和渍水环境中的陆生植物,其根系分泌氧气及氧化性物质等具有氧化根际环境的能力^[21~24].水稻根系泌氧作用被认为是铁锰胶膜形成的重要生物控制因素.这种根际连续氧化作用,可使淹水土壤中存在的大量 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 离子,在根表面及根质体外被氧化,形成明显可见的红色铁、锰氧化物胶膜^[21,24].该胶膜上可发生离子吸附与解吸、沉淀与溶解、氧化与还原等化学反应,从而在很大程度上影响水稻根系对养分的吸收^[25].影响水稻根表铁锰胶膜形成的因素目前已有许多研究,如水稻土肥力、水稻品种、铁锰肥的使用和水分管理等^[26,27].

本研究采用 2 种方法分别测定和计算水稻根表铁锰胶膜的数量,整体趋势一致,但方法 1 测定铁锰的质量分数普遍低于方法 2 计算的结果(图 2 和图 3).与方法 2 相比较,Fe 的浸提率达到 76%~106%,Mn 的浸提率达到 72%~100%.2 种测定方法差异的可能原因,方法 1 有部分铁锰和硫酸盐被还原后生成 FeS 和 MnS 沉淀,溶液过滤后测定其铁锰的质量浓度略有偏低.

水稻根表铁锰胶膜的数量,以 Fe 膜为主,而 Mn 膜数量相对较少(图 3).由于土壤中 Mn 的临界 Eh 值(300~700 mV)比 Fe 的临界 Eh 值(300~100 mV)高得多,在水稻根际附近 Fe^{2+} 比 Mn^{2+} 容易被氧化^[20].曾祥忠等^[28]研究发现,尽管在土壤有效 Mn 十分丰富,且大量施 Mn 肥来诱发铁锰胶膜形成的条件下,水稻根系表面仍以铁膜为主,锰膜相对较少.水稻根表胶膜呈现降低的趋势,原因是在分蘖中期稻田淹水,土壤为厌氧状态,存在大量 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} ^[21],这些物质迁移至水稻根系附近后,被水稻泌氧作用生成氧化物胶膜,它们附着在根表和临近的土体上;而分蘖末期排水晒田的管理措施,导致

了土壤从还原状态向氧化状态的转变(图 1), Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 大量减少,相应减少根表铁锰胶膜;孕穗期又进行了灌水并保持水层,铁锰胶膜的厚度虽有一定回升,而水稻本身也吸收了部分 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} (图 4),导致孕穗期的胶膜厚度比分蘖期稍低;收获的成熟期,稻田已不再淹水,土壤呈氧化状态,迁移至根际的 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 大量减少,故胶膜厚度再次降低.

从试验结果图 3 来看,施入单质硫或石膏硫的处理,铁锰胶膜的厚度均高于不施硫处理,均在一定程度上促进了胶膜形成.Hu 等^[11]研究发现,施用硫酸肥能诱导水稻根表胶膜的生成.不同硫施用量的处理,在孕穗期,高硫水平处理比低硫水平处理下胶膜厚度大;在成熟期,高硫量处理下胶膜厚度反而变低,可能是大量的硫在根际被氧化,影响了 MnO_2 和 $Fe(OH)_3$ 被还原^[29],降低胶膜 Fe 和 Mn 的厚度.

不同形态硫处理,在分蘖期,施硫处理的 Fe 胶膜厚度差异不显著;但单质硫处理的 Mn 胶膜厚度显著高于石膏硫处理,可能是单质硫被氧化成硫酸盐后才能被水稻吸收.单质硫的氧化与铁锰的氧化还原电位临界值也有关系,在分蘖期的水分管理可能导致大量高价锰被还原;在孕穗期,施硫处理的 Mn 胶膜厚度差异不显著;石膏硫处理下 Fe 胶膜厚度却低于单质硫处理,是因为在孕穗期保持较厚水层,体系从氧化态再次向还原态过度, SO_4^{2-} 在硫酸盐还原菌的作用下被还原成 S^{2-} ,进而与 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 生成硫化物沉淀 FeS 和 MnS^[30],减少了迁移至根表 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 的数量;在成熟期,稻田排水,土壤中 FeS 等沉淀中的 S^{2-} 在硫氧化菌的作用下被氧化为 SO_4^{2-} ,释放了 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} ,为胶膜的形成提供了更多的 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} ,故施用石膏硫处理下胶膜的厚度再次高于单质硫处理.石膏硫的施入较单质硫更能促进根面膜的生成,这与前人的研究结果一致.

3.3 硫素对水稻根内 Fe 和 Mn 质量分数的影响

水稻根系具有固定、吸收、合成与分泌养分等功能,对水稻植株地上部的生长及稻谷产量具有重要作用^[22,23].研究表明,根表铁锰胶膜的生成,具有物理屏障作用,减少 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 的过量吸收,而使植物免受其毒害^[31].

水稻根表去除胶膜后,测定得出根内铁锰的质量分数(图 4).随生育期延长,Fe 和 Mn 的质量分数均呈现先升高,后降低的趋势.在分蘖期水稻处于营养生长旺盛时期,且土壤处于还原状态(图 1),稻根

表面迅速生成了铁锰胶膜,同时水稻也吸收了一定量的 Fe 和 Mn; 在孕穗期,由于采取的水分管理措施,使氧化物铁锰胶膜再次被还原而释放出 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} ,从而被水稻根系所吸收; 另外铁锰胶膜的变薄也降低了阻碍铁锰吸收的作用; 在成熟期,土壤从还原状态向氧化状态的转变,减少了大量可被吸收的 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} ,故水稻体内 Fe 和 Mn 的质量分数有所下降。

从试验结果来看(图 4),在分蘖期,根内 Fe 和 Mn 的质量分数各处理间差异不显著。这可能是由于,施硫处理较不施硫处理促进根表形成更多的铁锰胶膜,但此厚度胶膜的差异对于 Fe 和 Mn 的吸收并没有造成显著影响。在孕穗期,根内高施硫处理 Fe 的质量分数小于不施硫与低施硫处理,根内 Mn 的质量分数差异不显著。这可能是大量 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 存在于根系附近,不同施硫处理促进根表胶膜生成,阻碍了根系对 Fe 和 Mn 的吸收。在成熟期,各处理间根内 Fe 和 Mn 的质量分数差异均不再显著。

胶膜的生成对于 Fe^{2+} 离子过量吸收有一定的阻控作用,而对于 Mn^{2+} 离子吸收的作用并不明显。这可能是 Mn^{2+} 较 Fe^{2+} 难于被氧化而形成胶膜,故大量进入水稻根内。曾祥忠等^[28]研究发现,进入水稻根际微域的 Fe^{2+} 更多地被氧化在根表或根质外体, Mn^{2+} 则较多地被吸收转移到水稻体内; 根表铁锰胶膜的生成更主要是减少了 Fe^{2+} 的过量吸收,与本试验结果相一致。

3.4 硫素对水稻根表胶膜 Cd 吸附的影响

稻田淹水环境中根表可形成明显可见的铁锰胶膜。研究发现,这层胶膜对土壤中的重金属离子有极强富集能力,起着重要的调控作用,如影响 Cd^{2+} 离子进入水稻体内,提高水稻抗重金属污染的能力,具有十分重要的环境学意义^[32,33]。

本研究同样采用 2 种方法测定和计算水稻根表胶膜吸附 Cd 的数量,整体趋势基本一致,但方法 1 测定得出 Cd 的质量分数[图 5(a)]在分蘖期明显小于方法 2 计算的结果[图 5(b)]。与方法 2 相比较,胶膜吸附 Cd 的浸提率仅达到 38%~70%; 随生育期的延长,此差异逐渐减小消失。二者测定方法差异的可能原因,方法 1 的提取剂是还原剂,在提取过程中胶膜含有的部分 SO_4^{2-} 被还原成 S^{2-} ,进而与 Cd 共沉淀,溶液过滤后其 Cd 的质量浓度有所损失,测定值偏低; 随着时间的推移,胶膜逐渐变薄,此作用造成的差异也相应减小。经推测采用 ACA 法浸提的 Cd 测定值并不能完全真实地表明胶膜吸附

Cd 量。

从试验结果图 5 来看,稻根表面胶膜吸附 Cd 的质量分数,随生育期延长呈下降趋势,这与根表胶膜数量的变化有关。前期根表铁锰胶膜厚度大,吸附的 Cd^{2+} 也多; 随后的晒田措施等,致使后期根表胶膜减少,导致吸附 Cd 质量分数的降低; 而由于成熟期田间呈氧化态条件,大量存在的 SO_4^{2-} 在根表富集,导致 Cd^{2+} 的活性与迁移性降低^[29,34]; 另外稻田处于氧化状态导致 Fe 和 Mn 氧化物的生成,接着与 Cd 共沉淀,也有可能减少了 Cd 的吸附。

不同形态施硫处理的胶膜对 Cd 吸附量也不相同。在分蘖期[图 5(b)],根表胶膜吸附 Cd 的质量分数为石膏硫 > 不施硫 > 单质硫处理,但从图 5(a)来看,施硫处理胶膜吸附 Cd 的质量分数高于不施硫处理,这种现象会引起试验结果的误判,需要进一步研究。从不同硫肥施用量看,在孕穗期水稻根表吸附 Cd 的质量分数,低硫量处理的低于高硫量处理,而在成熟期结果却相反,这可能与根表胶膜厚度有关(图 3)。综合来看,不同硫肥处理下水稻根表胶膜吸附 Cd 的质量分数并没有显著差异。

3.5 硫素对水稻体内各部位 Cd 质量分数的影响

根作为水稻吸收 Cd 的主要器官,水稻通过根部吸收和积累 Cd,并向地上部转运以及在籽粒中贮存。水稻体内各部位 Cd 的质量分数呈现自下向上依次减少,即根 > 茎叶 > 籽粒,这与大多数前人的研究结果一致^[35,36]。

随水稻生育期延长,根与茎叶 Cd 的质量分数表现为分蘖期最多,孕穗期相对减少,成熟期趋于稳定的趋势[图 6(a)与图 6(b)]。是因为分蘖期为水稻的营养生长期,需求大量的养分等,期间可能通过主动以及被动的方式吸收了大量的 Cd,并在植株体内累积^[37],因此水稻各部位中 Cd 的质量分数在分蘖期最高。进入孕穗期后,水稻体内吸收的部分 Cd 随光合产物及养分等向上运移,并逐渐在籽粒中积累; 根内高浓度的 Fe 与 Cd 竞争结合位点,也可能干扰到水稻对 Cd 的吸收^[38]; 另外由于植株生物量的迅速增加,生长量的稀释效应也导致表现出 Cd 质量分数逐渐减少的趋势。这与莫争等^[39]的研究结果一致。而王凯荣等^[40]的研究表明,水稻对 Cd 的吸收速率表现为生育中期 > 后期 > 前期,与本试验结果不一致,可能是因为王凯荣等进行的是水培试验,试验条件与试验环境不一致; 土壤 Cd 处理浓度的不同,供试水稻品种不同其对 Cd 的转移能力、对 Cd 的耐性也不尽相同等也可能是以上差异产生的

原因。

从图 6(a) 看出, 根内 Cd 的质量分数, 施硫处理均显著低于不施硫处理, 说明硫肥的施用能够相对提高根膜对根际环境中 Cd 的阻碍。不同硫肥施用量的处理, 在水稻生育前期, 高施硫处理下根部 Cd 的质量分数小于低施硫处理, 是因为随着硫用量的增加, 促进生成更多的根表胶膜, 并通过吸附解吸等作用对根内 Cd 的吸收起到了一定的阻碍作用; 在成熟期, 高施硫处理下根内 Cd 的质量分数大于低施硫处理, 可能是随着施硫量增加, 胶膜减少, 释放出部分先前固定的 Cd^{2+} , 之后被水稻所吸收, 增加了根内 Cd 的质量分数。不同形态硫肥处理间差异并不显著, 而在孕穗期, 单质硫处理的根内 Cd 的质量分数显著低于石膏硫处理, 可能是因为孕穗期土壤处于淹水还原状态, 与石膏硫处理相比, 单质硫处理在根表形成了更多的铁胶膜, 对 Cd^{2+} 在根内的吸收与积累起到了相应的阻碍作用。

从图 6(b) 看出, 茎叶中 Cd 的质量分数, 施硫处理显著低于不施硫处理, 与根的结果相似。不同硫肥施用量的处理, 在分蘖期与孕穗期, 高施硫处理下茎叶中 Cd 的质量分数大于低施硫处理, 可能是在分蘖期与孕穗期高施硫处理促进根表形成了更多胶膜 (图 3), 其对 Cd 有一定的富集作用, 能从土壤中富集到更多的 Cd, 从而致使地上部 Cd 的质量分数也较高; 在成熟期, 高施硫处理下水稻茎叶中 Cd 的质量分数略低于低施硫处理, 可能是在成熟期高施硫处理下的根表胶膜变薄, 对 Cd 的富集作用有所减弱, 导致地上部茎叶中 Cd 的质量分数也相应降低。不同形态的硫肥处理, 单质硫处理下茎叶中 Cd 的质量分数在中前期较石膏硫处理的低, 但在成熟期差异不显著。

从图 6(c) 看出, 籽粒 Cd 的质量分数, 表现为施硫处理显著低于不施硫处理, 说明施硫对 Cd 在水稻籽粒中贮存具有重要调控作用, 可明显降低籽粒中 Cd 的质量分数。不同硫肥施用量的处理, 随着硫用量增加, 籽粒中 Cd 的质量分数略有下降, 但不显著。不同形态的硫肥处理, 石膏硫处理下籽粒中 Cd 的质量分数低于单质硫处理, 石膏硫效果更佳。

3.6 硫素对水稻各部位 Cd 转移系数的影响

植物的转移系数 (TF) 不仅与重金属元素种类有关, 也与植物种类有十分重要的关系。转移系数越小, 则植物对重金属的迁移越弱, 其转移重金属的能力也越差^[16]。

从表 1 可知, 在整个生育期内, 水稻茎叶对 Cd

的转移系数, 不同处理间有显著性差异。随水稻生育期延长, 各处理下茎叶的 Cd 转移系数均逐渐变大, 这可能是滞留于根系中的 Cd 能够逐渐转移到茎叶中^[40], 并最终进入籽粒。表 1 还可以看出, 施硫处理下茎叶对 Cd 的转移系数均小于不施硫处理, 说明硫肥的施入可能阻碍 Cd 从根部向茎叶转移, 不同硫用量的处理差异并不显著。不同形态的硫处理间, 在孕穗期, 单质硫处理下茎叶对 Cd 的转移系数显著小于石膏硫处理。

水稻籽粒对 Cd 的转移系数, 施硫处理的均小于不施硫处理, 说明硫肥的施入可能阻碍 Cd 向籽粒中转移。随施硫量增加, Cd 的转移系数反而变大, 但仍小于不施硫处理, 也许过高的硫用量趋于促进 Cd 逐渐向籽粒中转移。不同形态的硫处理间, 石膏硫处理下籽粒 Cd 的转移系数更小, 能更为有效地阻碍 Cd 向籽粒中转移。

4 结论

(1) 水稻整个生育期内, 土壤溶液 Eh、pH 和 $p_e + \text{pH}$ 随水管理有规律地变化, 其变化影响施用硫肥促进根表铁锰胶膜的形成。水稻根表胶膜以 Fe 膜为主, Mn 膜相对较少。胶膜对于水稻根系 Fe^{2+} 过量吸收有一定阻控作用; 对于 Mn^{2+} 作用不显著。

(2) 水稻根表胶膜吸附 Cd 的质量分数随生育期延长而下降。分蘖期与孕穗期高硫量处理比低硫量处理的吸附量大, 成熟期反之。采用 ACA 法浸提的铁锰胶膜内 Cd 测定值并不能真实地表明胶膜实际吸附 Cd 量。

(3) 水稻体内各部位 Cd 的质量分数表现为根 > 茎叶 > 籽粒。施用硫肥能有效减少各器官中 Cd 的质量分数。对于根和茎叶, 单质硫在成熟期以前效果好于石膏硫; 对于籽粒, 石膏硫效果会更好。一定量的硫肥能有效阻碍 Cd 从水稻根部向茎叶与籽粒的转移。对于茎叶, 在孕穗期单质硫能更好地阻碍 Cd 的转移; 对于籽粒, 石膏硫阻碍效果更好。

参考文献:

- [1] Bolan N S, Makino T, Kunhikrishnan A, *et al.* Cadmium contamination and its risk management in rice ecosystems[J]. *Advances in Agronomy*, 2013, **119**: 183-273.
- [2] Vega F A, Covelo E F, Andrade M L. Competitive sorption and desorption of heavy metals in mine soils: Influence of mine soil characteristics[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, **298**(2): 582-592.
- [3] Wang L X, Guo Z H, Xiao X Y, *et al.* Heavy metal pollution of soils and vegetables in the midstream and downstream of the

- Xiangjiang River, Hunan Province[J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, **18**(3): 353-362.
- [4] Wei C Y, Wang C, Yang L S. Characterizing spatial distribution and sources of heavy metals in the soils from mining smelting activities in Shuikoushan, Hunan Province, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(9): 1230-1236.
- [5] Zhang X Y, Lin F F, Wong M T F, *et al.* Identification of soil heavy metal sources from anthropogenic activities and pollution assessment of Fuyang County, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **154**(1-4): 439-449.
- [6] Wang M Y, Chen A K, Wong M H, *et al.* Cadmium accumulation in and tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) varieties with different rates of radial oxygen loss [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(6): 1730-1736.
- [7] Liu W J, Zhu Y G, Smith F A. Effects of iron and manganese plaques on arsenic uptake by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture supplied with arsenate and arsenite [J]. Plant and Soil, 2005, **277**(1-2): 127-138.
- [8] Xu W, Wang H J, Liu R P, *et al.* Arsenic release from arsenic-bearing Fe-Mn binary oxide: Effects of Eh condition [J]. Chemosphere, 2011, **83**(7): 1020-1027.
- [9] Zhu Y G, Sun G X, Lei M, *et al.* High percentage inorganic arsenic content of mining impacted and non-impacted Chinese rice [J]. Environmental Science and Technology, 2008, **42**(13): 5008-5013.
- [10] Armstrong J, Armstrong W. Rice: Sulfide-induced barriers to root radial oxygen loss, Fe²⁺, and water uptake, and lateral root emergence [J]. Annals of Botany, 2005, **96**(4): 625-638.
- [11] Hu Z Y, Zhu Y G, Li M, *et al.* Sulfur (S)-induced enhancement of iron plaque formation in the rhizosphere reduces arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings [J]. Environmental Pollution, 2007, **147**(2): 387-393.
- [12] Fan J L, Hu Z Y, Ziadi N, *et al.* Excessive sulfur supply reduces cadmium accumulation in brown rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(2): 409-415.
- [13] 李义纯, 葛滢. 淹水土壤中镉活性变化及其制约机理 [J]. 土壤学报, 2011, **48**(4): 840-846.
- [14] 高明霞, 胡正义, 王国栋. 水稻根表胶膜的浸提及其元素测定方法 [J]. 环境化学, 2007, **26**(3): 331-334.
- [15] Taylor G J, Crowder A A. Use of the DCB technique for extraction of hydrous iron oxides from roots of wetland plants [J]. American Journal of Botany, 1983, **70**(8): 1254-1257.
- [16] Stoltz E, Greger M. Accumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn by four wetland plant species growing on submerged mine tailings [J]. Environmental and Experimental Botany, 2002, **47**(3): 271-280.
- [17] Zarate-Valdez J L, Zasoski R J, Lauchli A E. Short-term effects of moisture content on soil solution pH and soil Eh [J]. Soil Science, 2006, **171**(5): 423-431.
- [18] Herbel M J, Suarez D L, Goldberg S, *et al.* Evaluation of chemical amendments for pH and redox stabilization in aqueous suspensions of three California soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, **71**(3): 927-939.
- [19] Sun L, Chen S, Chao L, *et al.* Effects of flooding on changes in Eh, pH and speciation of cadmium and lead in contaminated soil [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, **79**(5): 514-518.
- [20] 杨世杰, 唐冰培, 王代长, 等. 硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响 [J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3553-3563.
- [21] 唐冰培, 杨世杰, 王代长, 等. 硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响 [J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3851-3861.
- [22] Baruah K K, Gogoi B, Gogoi P. Plant physiological and soil characteristics associated with methane and nitrous oxide emission from rice paddy [J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2010, **16**(1): 79-91.
- [23] Colmer T D, Cox M C H, Voesenek L A C J. Root aeration in rice (*Oryza sativa*) evaluation of oxygen, carbon dioxide, and ethylene as possible regulators of root acclimatizations [J]. New Phytologist, 2006, **170**(4): 767-777.
- [24] Laskov C, Horn O, Hupfer M. Environmental factors regulating the radial oxygen loss from roots of *Myriophyllum spicatum* and *Potamogeton crispus* [J]. Aquatic Botany, 2006, **84**(4): 333-340.
- [25] 刘文菊, 朱永官. 湿地植物根表的铁锰氧化物膜 [J]. 生态学报, 2005, **25**(2): 358-363.
- [26] Bauer I, Kappler A. Rates and extent of reduction of Fe(III) compounds and O₂ by humic substances [J]. Environmental Science and Technology, 2009, **43**(13): 4902-4908.
- [27] Kögel-Knabner I, Amelung W, Cao Z H, *et al.* Biogeochemistry of paddy soils [J]. Geoderma, 2010, **157**(1-2): 1-14.
- [28] 曾祥忠, 吕世华, 刘文菊, 等. 根表铁、锰氧化物胶膜对水稻铁、锰和磷、锌营养的影响 [J]. 西南农业学报, 2001, **14**(4): 34-38.
- [29] Borch T, Kretzschmar R, Kappler A, *et al.* Biogeochemical redox processes and their impact on contaminant dynamics [J]. Environmental Science and Technology, 2010, **44**(1): 15-23.
- [30] Seyfferth A L, Webb S M, Andrews J C, *et al.* Defining the distribution of arsenic species and plant nutrients in rice (*Oryza sativa* L.) from the root to the grain [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2011, **75**(21): 6655-6671.
- [31] Machado W, Gueiros B B, Lisboa-Filho S D, *et al.* Trace metals in mangrove seedlings: Role of iron plaque formation [J]. Wetlands Ecology and Management, 2005, **13**(2): 199-206.
- [32] Robinson B, Kim N, Marchetti M, *et al.* Arsenic hyperaccumulation by aquatic macrophytes in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand [J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, **58**(1-3): 206-215.
- [33] Hinsinger P, Plassard C, Jaillard B. Rhizosphere: A new frontier for soil biogeochemistry [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, **88**(1-3): 210-213.
- [34] Hu Z Y, Haneklaus S, Wang S P, *et al.* Comparison of

- mineralization and distribution of soil sulfur fractions in the rhizosphere of oilseed rape and of rice[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2003, **34** (15- 16): 2243-2257.
- [35] 龙小林, 向珣朝, 徐艳芳, 等. 镉胁迫下籼稻和粳稻对镉的吸收、转移和分配研究[J]. *中国水稻科学*, 2014, **28** (2): 177-184.
- [36] Liu J G, Qian M, Cai G L, *et al.* Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **143** (1-2): 443-447.
- [37] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 不同生育期水稻对 Cd、Pb 的吸收累积特征及品种差异[J]. *土壤通报*, 2011, **42** (5): 1125-1130.
- [38] Liu H J, Zhang J L, Zhang F S, *et al.* Role of iron plaque in Cd uptake by and translocation within rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in solution culture [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, **59** (3): 314-320.
- [39] 莫争, 王春霞, 陈琴, 等. 重金属 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd 在水稻植株中的富集和分布[J]. *环境化学*, 2002, **21** (2): 110-116.
- [40] 王凯荣, 龚惠群. 不同生育期镉胁迫对两种水稻的生长、镉吸收及糙米镉含量的影响[J]. *生态环境*, 2006, **15** (6): 1197-1203.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-lu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoextraction of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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
欧阳自远 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)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行