

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国国道和省道机动车尾气排放特征 王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)

北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响 闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)

不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征 方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)

大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价 王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)

2014年6月南京大气复合污染观测 郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)

嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征 王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)

应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法 田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)

福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析 张千湖,高兵,黄蕙,颜晓妹,崔胜辉(3610)

珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价 蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)

贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响 谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)

东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价 刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)

基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析 刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)

太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析 连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)

黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征 赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)

三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征 黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)

网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化 沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)

高地下水位地区透水停车场的水文控制效果 金建荣,李田,王圣思,陈子隼,周佳雯(3689)

北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征 于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)

垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征 肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)

潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性 李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)

滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响 臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)

高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征 刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)

活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制 苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)

石墨烯凝胶电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 的性能 王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)

电流密度对 BDD 电极电催化矿化吡啶的影响与机制 张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)

黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制 周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)

双氧水协同生化法强化处理印染废水 岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)

基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制 吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)

利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器 高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)

零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施 张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)

低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析 马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)

市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析 刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)

高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析 孟婷,杨宏(3816)

两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征 张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)

生物炭对土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响 周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)

江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素 江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)

碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响 俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)

黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性 冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)

有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响 费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)

酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)

陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力 王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)

甘肃白银东大沟铅锌镉复合污染场地水泥固化稳定化原位修复 吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)

设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价 金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)

镉-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和镉、铅吸收的影响 常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)

秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响 段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)

Pantoea sp. IMH 介导土壤中砷锑的形态转化 张林,卢金锁(3937)

生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性 王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)

浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制 陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)

灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用 于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)

污泥生物炭制备吸附陶粒 李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)

石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能 黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)

《环境科学》征稿简则(3859) 《环境科学》征订启事(3952) 信息(3644, 3688, 3768)

秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响

段桂兰¹, 王芳^{1,2}, 岑况², 王伯勋^{1,3}, 程旺大⁴, 刘跃川⁵, 张红梅^{4*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 4. 浙江省嘉兴市农业科学研究院, 嘉兴 314016; 5. 湖南省攸县农业局, 株洲 412300)

摘要: 镉(Cd)是人类一级致癌物,大米食用是以大米为主食人群摄入Cd的主要途径。秸秆还田是秸秆处理中主要方式,在Cd污染稻田被广泛应用,其对水稻Cd吸收及水稻体内Cd的分布产生的影响不可忽视。本研究选用Cd水稻土,通过盆栽和大田试验分析了不同的秸秆还田用量(0.0%、1.0%、2.5%和5.0%)对Cd的亚细胞分布以及在水稻籽粒中积累的影响。结果表明水稻根细胞中的Cd主要分布在细胞壁中,占总Cd的86%~95%,茎叶细胞的细胞壁与可溶部分中的Cd含量相当,分别占总Cd的30%~51%和35%~61%。秸秆按1%和2.5%比例还田能显著提高根中Cd含量,以及细胞壁中Cd含量及其分配比例,并降低水稻体内Cd由根向茎叶转运;但5%的秸秆还田,分蘖期根中Cd含量和细胞壁中Cd含量显著降低,Cd由根向茎叶转运系数提高,灌浆期的根中Cd含量和细胞壁中Cd含量均显著提高,转运系数没有显著变化。大田试验前茬的水稻秸秆和油菜秸秆中Cd含量均较高,分别是0.49 mg·kg⁻¹和0.67 mg·kg⁻¹;油菜秸秆单独还田或与石灰一起还田均没有显著影响水稻糙米或秸秆中Cd的积累;水稻秸秆单独还田也没有显著改变水稻糙米或秸秆中Cd的积累,但与石灰一起还田时能显著降低糙米和秸秆中的Cd积累;生物炭添加能显著降低水稻体内的Cd积累,且与石灰一起添加降Cd效果更显著。因此,当用Cd污染稻田前茬所产水稻秸秆还田时,建议与石灰一起添加可达到显著降Cd的效果。该研究将为Cd污染稻田的水稻安全生产与秸秆循环利用提供理论与实践指导。

关键词: 水稻; 镉; 秸秆还田; 亚细胞分布; 细胞壁; 转运系数

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3927-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703185

Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice

DUAN Gui-lan¹, WANG Fang^{1,2}, CEN Kuang², WANG Bo-xun^{1,3}, CHENG Wang-da⁴, LIU Yue-chuan⁵, ZHANG Hong-mei^{4*}

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 4. Jiaxing Academy of Agricultural Sciences, Jiaxing 314016, China; 5. Agricultural Bureau of Youxian County, Hunan Province, Zhuzhou 412300, China)

Abstract: Cadmium (Cd) is classified as a Group-1 human carcinogen and rice consumption constitutes a major source of dietary intake of Cd for populations whose staple food is rice. Straw incorporation is widely performed in Cd-contaminated paddy fields, which may significantly affect the bioavailability of Cd in soil and the distribution of Cd in rice plants, consequently altering Cd accumulation in rice grains. In this study, both pot and field trials were conducted to investigate the effects of different amounts of straw incorporation (0.0%, 1.0%, 2.5%, and 5.0%) on Cd sub-cellular distribution in rice plants and Cd accumulation in rice grains. The results showed that Cd was mainly sequestered in cell wall, accounting for 86%-95% and 30%-51% of total cadmium in root and shoot cells, respectively. In shoot cells, about 35%-61% of Cd was distributed in cellular soluble fractions. When rice straw was incorporated at 1.0% and 2.5% levels, Cd sequestration in the cell wall significantly increased and Cd translocation from roots to shoots significantly decreased. However, when rice straw was incorporated at the 5% level, Cd sequestration in root cell walls significantly decreased and Cd translocation from roots to shoots significantly increased at the tillering stage. At the filling stage, 5% rice straw incorporation still significantly increased Cd sequestration in root cell walls and Cd translocation from roots to shoots did not significantly change. The rice straw and rape straw used for the field trail contained high concentrations of Cd (0.49 and 0.67 mg·kg⁻¹, respectively). Rape straw incorporation alone or together with lime did not significantly affect Cd accumulation in brown rice or rice straw. Rice straw incorporation alone did not significantly affect Cd accumulation in brown rice or rice straw, while incorporation with lime significantly decreased Cd accumulation in both brown rice and rice straw. Biochar application can also significantly reduce Cd accumulation in rice and when biochar was added together with lime, the reduction in Cd accumulation in rice was more significant. Therefore, at Cd-

收稿日期: 2017-03-21; 修订日期: 2017-04-16

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201403015); 浙江省自然科学基金项目(LY15D010001); 浙江省嘉兴市科技计划项目(2014AZ21001)

作者简介: 段桂兰(1972~),女,博士,副研究员,主要研究方向为土壤重金属污染控制, E-mail: duangl@cees.ac.cn

* 通信作者, E-mail: xiuyingyifei10@sina.com

contaminated paddy fields, rice straw or rape straw is not suggested to be returned directly; incorporation with lime would be better for reducing Cd accumulation in rice grains. The results of this study will provide theoretical and practical guidance for the safe production of rice and for straw recycling at Cd-polluted paddy fields.

Key words:rice; cadmium; straw incorporation; subcellular distribution; cell wall; translocation factor

镉(Cd)被国际癌症研究机构^[1]和美国国家毒理学计划^[2]确证人类第一级致癌物。Cd广泛存在于环境中,全国土壤污染状况调查公报显示,7%的调查点位Cd含量超标,其点位超标比例远高于其它污染物,Cd被证明为中国土壤污染中的首要污染物^[3]。而且,有证据表明近年来土壤平均Cd含量有大幅提高的趋势^[4]。由于稻田土壤的Cd污染严重以及水稻对Cd的高吸收富集能力导致稻米中Cd含量容易超标($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, GB 2762-2012),近年来我国南方的大米Cd超标状况引起了社会各界的广泛关注^[5-9]。

随着全社会对环境保护和生态建设的日益重视和关注,以及农业机械化的推广,秸秆还田在全国水稻产区得到广泛应用并日益推广,其中也包括Cd污染稻田,但迄今国内外仍不清楚在Cd污染稻田实施秸秆还田会如何影响水稻的Cd吸收积累以及Cd在水稻体内的分布。因为水稻秸秆中富含有机质、硅和硫等物质,而这些物质和元素正是影响土壤中Cd生物有效性以及植物体内Cd迁移及分布的重要因子^[10-15]。水稻秸秆中含硅量高达9%~13%(灰分中二氧化硅含量达70%以上)^[16],水稻秸秆还田可增加土壤中有效硅的含量。硅是细胞壁的重要组成元素,通过非损伤扫描离子选择电极技术、X射线光电子能谱,以及电感耦合等离子体质谱的联用技术分析硅对水稻悬浮单细胞吸收Cd及Cd亚细胞分布的影响,结果表明硅与Cd在细胞壁上结合并附着在细胞壁上,加硅能强化细胞壁对Cd的截留作用,从而减少Cd进入细胞的原生质体,进而缓解Cd对细胞的毒性,并减少游离的Cd进一步运输到水稻籽粒^[11]。潘智立等^[14]利用差速分级离心技术也证明施硅可以强化细胞壁对Cd的截留作用,随着施硅量的提升,根和茎叶细胞壁中的Cd分布均显著提升,并且根细胞壁中的提升幅度大于茎,说明施硅不仅能缓解Cd对植物的毒性,同时能增加根和茎叶细胞壁对Cd的截留,进而降低大米中Cd的积累。水稻秸秆中的硫元素也含量丰富,硫的氧化还原价态是影响土壤中Cd生物有效性的关键因子,同时硫也是巯基化合物(如植络素,PCs)的重要组成部分,Cd被巯基化合物络合并被区隔化到液泡被认为是植物Cd解毒的重要机制^[17]。大量研究

表明施硫肥可以提升水稻根和茎叶中的非蛋白巯基(non-protein Thiols, NPT)含量,增强对重金属的耐性,同时增加根和茎叶细胞的液泡对重金属截留,进而降低水稻籽粒中重金属的积累^[14, 18]。另外,水稻秸秆也富含有机质,土壤中可溶性有机质(dissolved organic matter, DOM)易与重金属发生络合反应,成为重金属迁移活化的“载体”,进而提高重金属在土壤中的生物有效性。单玉华等^[19]证明在淹水条件下,秸秆还田明显提高了土壤DOC水平,进而促进土壤中Cu、Cd等重金属的溶出。由此可见,秸秆还田必然会对水稻Cd积累及其亚细胞分布产生不可忽视的影响,且秸秆还田对水稻Cd吸收积累和米中Cd含量的影响是多方面的,既可能通过提高土壤有机质含量来活化土壤中的Cd,并提高水稻对Cd的吸收,也可能通过提高水稻硅和硫的含量来增加细胞壁和液泡对Cd的截留,进而降低水稻籽粒中Cd的积累。

为探索秸秆还田对水稻Cd积累的影响及其相关机制,本研究采用温室盆栽试验,向Cd污染水稻土中添加不同量的水稻秸秆,于分蘖期和灌浆期采集水稻样品,通过差速分级离心技术,分析秸秆还田对Cd在水稻根和茎叶细胞中分布的影响;为指导实践,本研究开展了大田试验,在Cd污染稻田添加不同用量秸秆、生物炭及其与石灰一起施用,待水稻成熟后分析秸秆的不同施用方法与施用量对水稻各组织中Cd积累的影响,以期为Cd污染农田稻米的安全生产与农业废弃物循环利用提供理论与实践指导。

1 材料与方法

1.1 盆栽试验与处理

供试土壤采自湖南攸县Cd轻中度污染水稻田。土壤风干、磨碎,去除土壤中的碎石和植物残留等,过2 mm筛。试验秸秆为浙江嘉兴收集的未污染稻田生产秸秆,秸秆用粉碎机粉碎成粉末备用。土壤粉碎后过筛后与秸秆混合均匀,秸秆共设4种处理:不加秸秆的对照处理;分别按质量比1%、2.5%和5%添加水稻秸秆(1%秸秆、2.5%秸秆和5%秸秆)。把秸秆与土壤混合均匀后进行装盆,每盆6 kg,每个处理设4组重复。尿素(含N 46.6%)

6.48 g, 氯化钾(含 K_2O 62.9%) 0.72 g 和过磷酸钙(含 P_2O_5 14.0%) 1.20 g, 磷钾肥作基肥一次性施用, 氮肥按基肥: 苗肥: 分蘖肥: 穗肥为 30%: 25%: 20%: 25% 的比例施用。为保证秸秆与土壤的充分混合和分解, 加水保持 3~4 cm 水位平衡 1 个月后再用于水稻移栽。

盆栽试验在浙江省嘉兴市农业科学研究所的温室大棚内进行。供试作物为水稻品种秀水 134。水稻种子催芽后育秧, 25 d 后, 将秧苗移栽到已淹水平衡 1 个月的盆钵, 每盆栽 2 株水稻秧苗。所有的试验盆在温室里随机摆设, 不定期加水, 并且随机调换塑料盆的位置, 直到样品收获完成。

1.2 大田试验与处理

为验证盆栽试验的结果, 本研究同时开展了田间试验。大田试验在湖南攸县大同桥镇(N 27°08', E 113°22') 进行, 试验所用田块的土壤属于轻度 Cd 污染的酸性土壤, 添加的秸秆为本试验田前茬所生产的水稻或油菜秸秆, 添加的生物炭购自南京勤丰秸秆科技有限公司的水稻秸秆质生物炭。第一年的试验包括 19 个处理(如表 1), 第二年的试验不包括油菜秸秆的处理, 共有 13 个处理(如表 1)。每个处理设 4 个重复, 选择平整并排水系统良好的田块, 将田块分成 76 小区, 小区面积 20 m², 各小区之间作田埂分隔, 且田埂用塑料薄膜包裹, 以防止处理间水分渗漏而相互污染。各处理在田间的分布随机安排。

秸秆经切碎过筛后, 于栽秧前 3 周左右均匀撒入各小区内, 浸泡 3~4 d 后耕翻至 0~20 cm 土层, 插秧前 1~2 d 翻耕均匀并耙平。水稻栽培过程中的水肥管理、病虫害防治等农艺操作参照当地栽培习惯。待水稻成熟后, 收割水稻, 茎叶(地上部 10 cm 至穗梗基部) 用自来水冲洗干净, 再用去离子水清洗 3 遍, 擦干水分, 然后放入 70℃ 烘箱烘干。手工将稻谷从稻穗上脱落下来, 装入网袋, 于室内通风处自然风干。自然风干后用糙米机将稻谷分成谷壳和糙米两部分。最后茎叶和糙米都用不锈钢粉碎机粉碎成粉, 室温保存待分析。

1.3 亚细胞组分提取与消解

在水稻分蘖期和灌浆期, 分别采集水稻新鲜样品, 用去离子水清洗 3 次, 分开根和茎秆两部分。分别取部分根和茎秆样品用于 Cd 含量分析, 剩余样品用于亚细胞组分提取。具体提取步骤如下: 将样品剪成约 2 mm 的小段, 在预冷的研钵下加入液氮研磨, 研磨成粉末后放入 4℃ 下保存。采用分级离心法分离细胞不同组分^[20], 亚细胞各组分提取剂为:

250 mmol·L⁻¹ 蔗糖、50 mmol·L⁻¹ tris-HCl、1.0 mmol·L⁻¹ 二硫赤藓糖醇、5.0 mmol·L⁻¹ 抗坏血酸、1.0% (质量分数) Polyclar AT PVPP, pH 为 7.5。样品和提取剂以 1:5 的比例充分混合, 用 240 μmol·L⁻¹ 尼龙膜过滤, 尼龙膜上残骸作为细胞壁组分; 上清液在 5 000 r·min⁻¹ 离心 20 min 后, 沉淀为细胞器组分; 而上清液继续在 65 000 r·min⁻¹ 离心 3 h, 所得上清液为可溶性组分。所有的操作步骤都在 4℃ 操作。将各组分移入三角瓶中, 在电热板上蒸发至 5 mL 左右, 加入 10 mL 硝酸和 3 mL 高氯酸, 消煮至澄清透明后定容, 过滤(0.45 μm) 后放入 4℃ 冰箱保存, 待测。

表 1 田间的秸秆、生物炭与石灰的处理方式与用量/kg·hm⁻²

处理	处理名称	秸秆用量	生物炭用量	生石灰用量
1	对照	—	—	—
2	秸秆 1	3 750	—	—
3	秸秆 2	7 500	—	—
4	秸秆 3	15 000	—	—
5	秸秆 1 + 石灰	3 750	—	1 500
6	秸秆 2 + 石灰	7 500	—	1 500
7	秸秆 3 + 石灰	15 000	—	1 500
8	生物炭 1	—	3 750	—
9	生物炭 2	—	7 500	—
10	生物炭 3	—	15 000	—
11	生物炭 1 + 石灰	—	3 750	1 500
12	生物炭 2 + 石灰	—	7 500	1 500
13	生物炭 3 + 石灰	—	15 000	1 500
14	油秆 1	3 750	—	—
15	油秆 2	7 500	—	—
16	油秆 3	15 000	—	—
17	油秆 1 + 石灰	3 750	—	1 500
18	油秆 2 + 石灰	7 500	—	1 500
19	油秆 3 + 石灰	15 000	—	1 500

1.4 样品测定

植物样品消解与测定: 称取秸秆、生物炭、茎叶和糙米粉末各 0.2 g 于 50 mL 离心管中, 加入 2 mL 优级纯硝酸, 混合均匀后室温下放置过夜, 然后用微波消煮炉(MARS5, CEM Microwave Technology Ltd. Matthews, 美国) 消煮, 消煮程序是 55℃, 10 min; 75℃, 10 min; 95℃, 30 min。同时消煮空白硝酸和标准样品(GBW08502, 大米粉成分分析标准物质, 国家标准物质研究中心), 以确保消煮过程的准确度, 并用于回收率的计算。消煮后的样品用 2% 的硝酸溶液稀释至 40 mL, 过 0.45 μm 滤膜, 4℃ 保存待测。消解液中重金属浓度用电感耦合等离子体质谱系统(ICP-MS 7500, 安捷伦科技, 美国) 进行测定。

土壤样品的消解与测定: 称取 0.2 g 土壤样品于

石英玻璃管,加入 5 mL 王水(HCl:HNO₃ = 3:1),混匀后室温下平衡过夜.平衡后的土壤样品采用开放式消煮炉消解,消解程序是 100℃,1 h; 120℃,1 h; 保持 140℃到溶液清澈,消解后的样品置于通风橱挥发酸,然后用 2%的硝酸溶液定容到 20 mL,过 0.45 μm 滤膜后备用.空白和标准样品(GBW07405,土壤成分分析标准物质,国家标准物质研究中心)同时消煮.消煮液中的重金属浓度用 ICP-OES(Optima 2000 DV, Perkin Elmer,美国)进行测定.

1.5 数据处理

水稻 Cd 由根向地上部的转运系数(translocation factor, TF)计算公式如下:

$$TF = \frac{\text{茎叶 Cd 含量}}{\text{根 Cd 含量}} \times 100\%$$

试验数据采用 Excel 2007 和 SPSS 13.0 软件进行统计分析,并采用 One-Way ANOVA 和 T-test 进行

显著性检验,采用 Excel 2007 和 Sigma-Plot 10.0 软件作图.

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 和土壤及秸秆的重金属含量

处理之前的土壤重金属含量及 pH 值如表 2 所示,土壤 pH 值小于 5,属于酸性土壤,Cd 含量超过《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)的二级标准(土壤 pH < 6.5, 0.3 mg·kg⁻¹),其它重金属如 As、Cu、Zn 和 Pb 的含量均低于土壤环境质量二级标准,说明试验所用土壤为 Cd 单一污染的酸性土壤.添加的秸秆呈弱酸性,盆栽试验所用秸秆的重金属含量均较低;大田试验所用秸秆为试验点收集,水稻和油菜秸秆中的 Cd 含量均较高,是盆栽试验所用秸秆 Cd 含量的约 2 倍,其它重金属含量均较低.生物炭 pH 值较高,为 9.78.

表 2 土壤 pH 及重金属含量/mg·kg⁻¹

Table 2 Soil pH and heavy metal concentration/mg·kg⁻¹

样品	pH	Cd	As	Cu	Zn	Pb
盆栽用水稻秸秆	5.63	0.27	1.89	2.34	53.38	2.56
盆栽土壤	4.52	0.65	17.98	28.49	125.87	39.78
大田用水稻秸秆	5.34	0.49	2.42	2.96	65.48	1.91
大田用油菜秸秆	5.69	0.67	3.57	3.24	74.67	2.14
秸秆质生物炭	9.78	0.54	0.82	3.78	58.74	3.27
大田土壤(第一年)	4.68	0.58	22.10	27.36	115.26	42.30
大田土壤(第二年)	4.75	0.62	19.86	29.45	129.34	36.42
标准 ¹⁾		0.3	30	50	200	250

1)《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)二级标准(土壤 pH < 6.5)

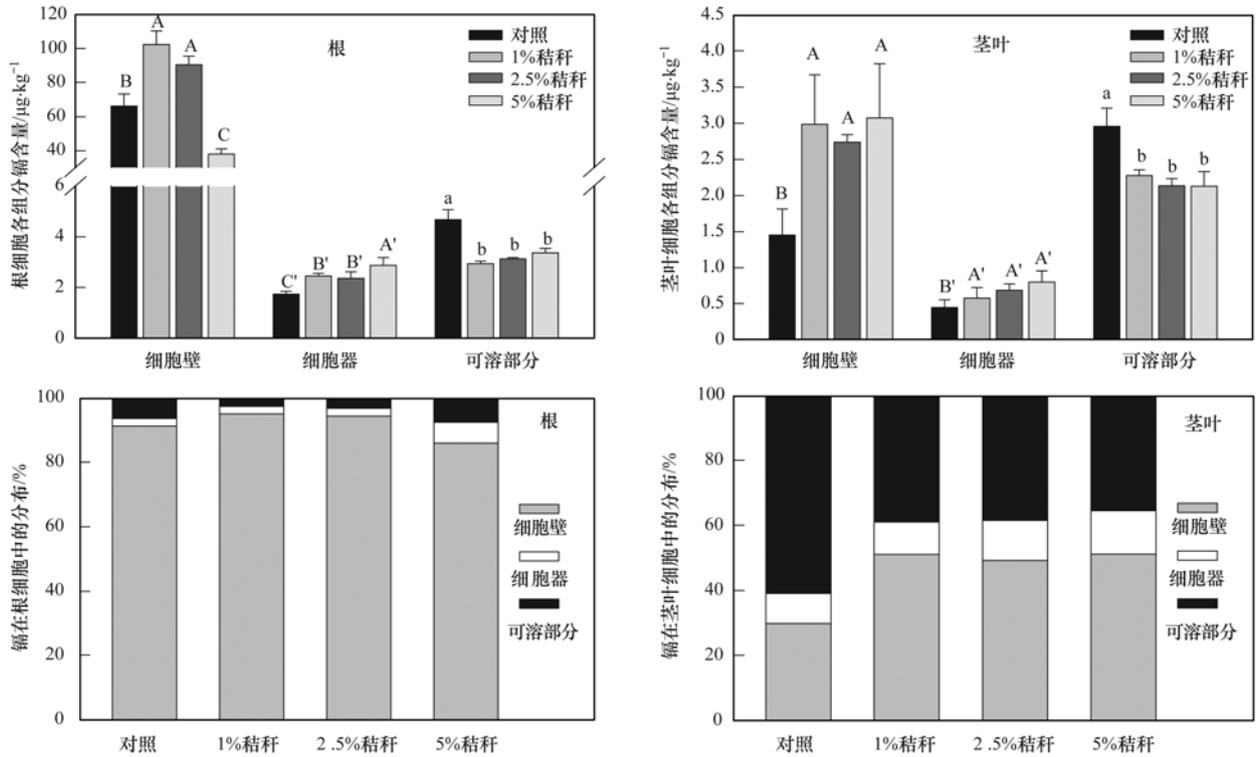
2.2 秸秆还田对盆栽水稻分蘖期根及茎叶细胞中 Cd 积累及其分布的影响

在盆栽水稻的分蘖期收获水稻植株,采用差速分级离心技术将植物细胞分离成 3 部分:细胞壁、叶绿体等细胞器以及细胞质等可溶部分.分蘖期水稻根细胞的细胞壁中 Cd 含量显著高于细胞器和可溶部分,分别是细胞器和可溶部分 38 倍和 14 倍(图 1);茎叶细胞各组分中的 Cd 含量均显著低于根细胞的 Cd 含量,其中细胞壁中的 Cd 含量下降最显著,仅为根细胞壁中 Cd 含量的 2%~8%(图 1).水稻根细胞中的 Cd 主要分布在细胞壁中,占总 Cd 的 86%~95%(图 1);茎叶细胞的细胞壁与可溶部分中的 Cd 含量相当,分别占总 Cd 的 30%~51%和 35%~61%(图 1);根和茎叶细胞的细胞器中 Cd 分布均较低.秸秆还田显著提高了细胞壁中的 Cd 含量及其分配比例,当秸秆按 1%和 2.5%比例还田时,根细胞壁中的 Cd 含量分别提

高了 55%和 37%,但按 5%比例还田时,根细胞壁中 Cd 含量反而降低了 42%,秸秆还田使茎叶细胞壁中 Cd 含量提高 89%~112%;秸秆还田也显著提高了细胞器中的 Cd 含量,根和茎叶细胞器中的 Cd 含量分别提高 36%~65%和 30%~78%;秸秆还田显著降低了细胞中可溶部分的 Cd 含量,根和茎叶细胞中可溶部分分别降低 28%~37%和 23%~28%.可见,秸秆还田可以提高分蘖期水稻根和茎叶细胞的细胞壁对 Cd 的截留,降低可溶部分的 Cd 含量.

2.3 秸秆还田对盆栽水稻灌浆期根及茎叶细胞中 Cd 积累及其分布的影响

水稻灌浆期是水稻籽粒中 Cd 积累的关键时期.在盆栽水稻的灌浆期收获水稻植株,将根和茎叶细胞也分离成细胞壁、叶绿体等细胞器以及细胞质等可溶部分三部分.与分蘖期相比,灌浆期的根细胞细胞壁中 Cd 含量显著减低,但细胞器和可溶



不同字母表示同一细胞组分中不同秸秆处理间的 Cd 含量存在差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图1 分蘖期水稻根和茎叶细胞中 Cd 含量及其亚细胞分布比例

Fig. 1 Cadmium concentration and distribution in rice root and shoot cells at the tillering stage

部分的 Cd 含量显著提高; 茎叶细胞的细胞壁、细胞器和可溶部分的 Cd 含量均显著提高(图 2). 与

分蘖期一致, 灌浆期的根细胞与茎叶细胞中的 Cd 仍主要分布在细胞壁中, 分别占总 Cd 的 54% ~

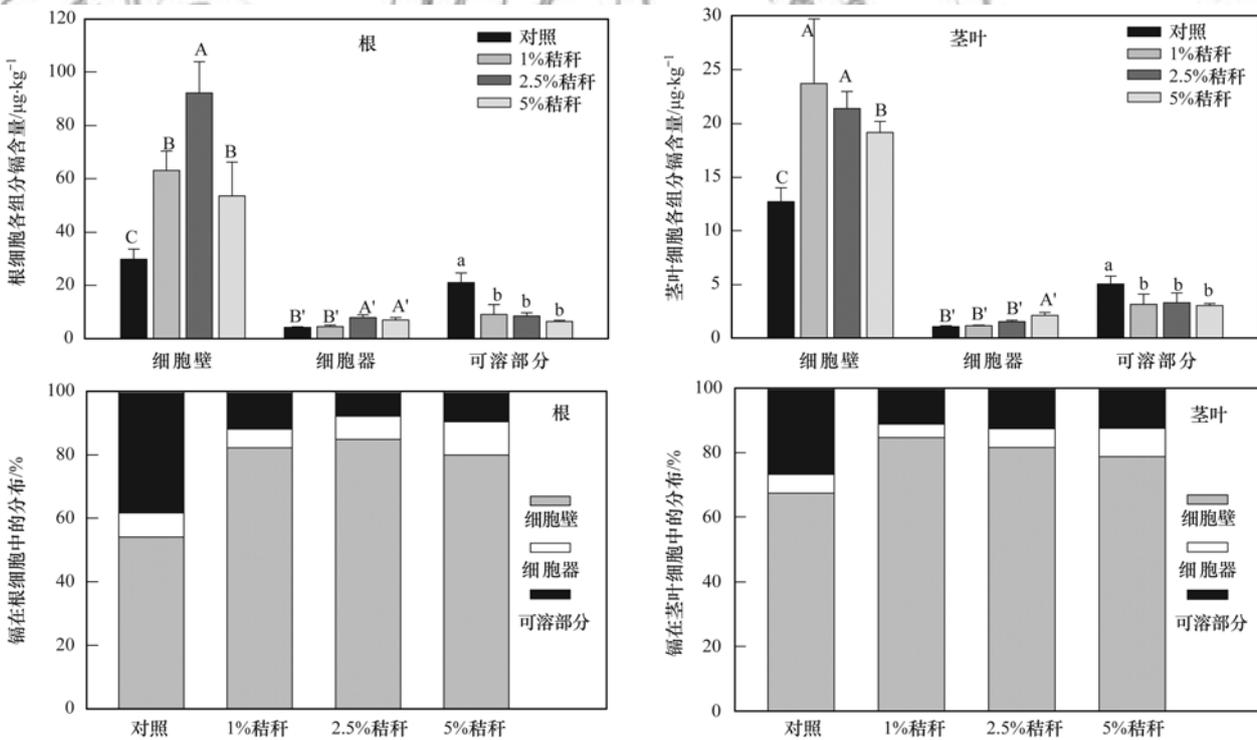


图2 灌浆期水稻根和茎叶细胞中 Cd 含量及其亚细胞分布比例

Fig. 2 Cadmium concentration and distribution in rice root and shoot cells at the grain filling stage

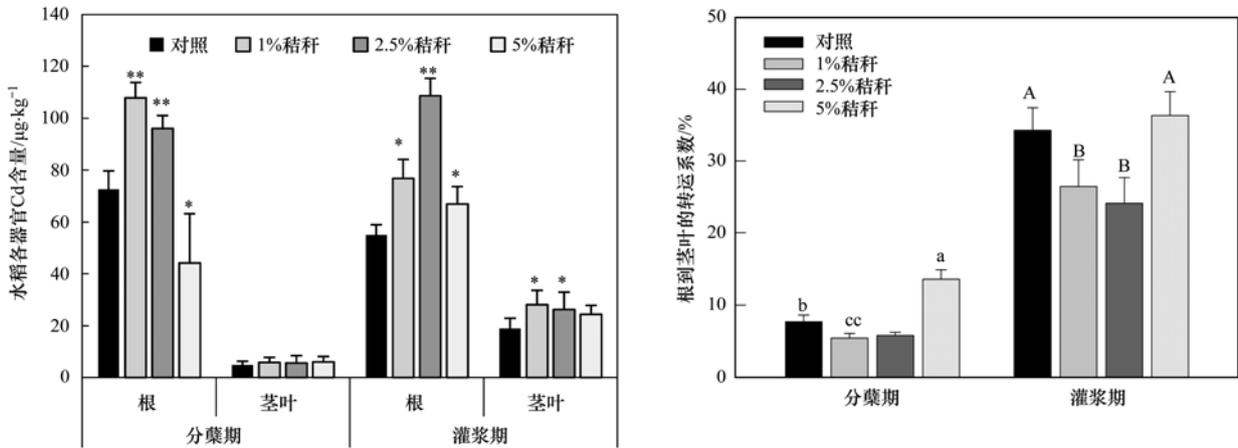
85% 和 67% ~ 85% ; 可溶部分的 Cd 在根和茎叶细胞中的占比都高于分蘖期, 分别占总 Cd 的 8% ~ 38% 和 11% ~ 27% (图 2)。

与分蘖期一致, 秸秆还田显著提高了细胞壁中的 Cd 含量及其分配比例。当秸秆按 1%、2.5% 和 5% 比例还田时, 根细胞壁中的 Cd 含量分别提高了 112%、210% 和 80%, 茎叶细胞壁中分别提高了 86%、68% 和 51%; 秸秆还田也显著提高了细胞器中的 Cd 含量, 根和茎叶细胞中的 Cd 含量分别提高 8% ~ 90% 和 7% ~ 96%; 秸秆还田显著降低了细胞中可溶部分的 Cd 含量, 根和茎叶细胞中分布提高 57% ~ 70% 和 34% ~ 39%。可见, 秸秆还田可以进一步提高灌浆期水稻根和茎叶细胞的细胞壁对 Cd

的截留, 降低可溶部分的 Cd 含量, 从而可减少 Cd 向水稻籽粒的转运。

2.4 秸秆还田对盆栽水稻体内 Cd 含量及其由根向地上部转运系数(TF)的影响

秸秆还田对分蘖期和灌浆期水稻根及茎叶中 Cd 积累的影响如图 3 所示, 在分蘖期, 1% 和 2.5% 的秸秆还田显著提高了根中 Cd 的含量, 但 5% 的秸秆还田却显著降低了根中 Cd 的含量, 各种比例的秸秆还田均没有显著影响茎叶中 Cd 的含量; 在灌浆期, 3 个比例的秸秆还田均显著提高了根中 Cd 的含量, 1% 和 2.5% 的秸秆还田还显著提高了茎叶中 Cd 的含量, 但 5% 的秸秆还田没有显著影响茎叶中 Cd 的含量。



不同字母表示同一细胞组分中不同秸秆处理间的 Cd 含量存在差异显著 ($P < 0.05$); * 表示 Cd 含量与对照存在差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示与对照存在差异极显著 ($P < 0.01$), 下同

图 3 水稻体内 Cd 的含量及其由根向茎叶的转运系数

Fig. 3 Cd concentrations in rice and the translocation factor from the root to the shoot

水稻在分蘖期的 TF 较小 (5.42% ~ 13.60%), 灌浆期的 TF 显著大于分蘖期 (24.13% ~ 36.36%) (图 3), 这说明灌浆期是水稻地上部 Cd 积累的关键时期。当秸秆按 1% 和 2.5% 比例还田时, 水稻体内 Cd 由根向地上部的转运显著降低, 1% 比例的秸秆还田分别使分蘖期和灌浆期的 TF 降低 30% 和 23%; 2.5% 比例的秸秆还田分别使分蘖期和灌浆期的 TF 降低 25% 和 30%。但 5% 比例的秸秆还田却使分蘖期的 TF 提高 77%, 对灌浆期的 TF 没有显著影响。

2.5 秸秆还田对大田水稻籽粒中 Cd 积累的影响

水稻成熟后收集水稻籽粒和秸秆测定 Cd 含量。第一年所有处理的糙米中 Cd 含量均较低, 平均 Cd 含量在 0.05 ~ 0.10 mg·kg⁻¹ 之间, 均低于《食品中污染物限量》(GB 2762-2012) 糙米中 Cd 安全限值 ($Cd \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 见图 4。与对照相比, 水稻

秸秆单独还田能使糙米中的平均 Cd 含量降低约 20% ~ 30%, 但重复之间误差较大, 不同秸秆还田量之间的糙米 Cd 含量没有显著差异, 与对照相比也没有显著差异。水稻秸秆与石灰一起还田的条件下, 当秸秆还田量在每亩 500 和 1 000 kg 时, 糙米中平均 Cd 含量显著低于对照, 分别降低约 50% 和 40%。生物炭单独添加或生物炭与石灰一起添加均没有显著降低糙米中的 Cd 含量; 油菜秸秆单独还田或者与石灰一起添加也没有显著降低糙米中的 Cd 含量 (图 4)。不同处理的水稻秸秆中的平均 Cd 含量在 0.22 ~ 0.54 mg·kg⁻¹ 之间 (图 4), 与对照相比, 水稻秸秆单独还田或者与石灰一起添加均能使秸秆中的平均 Cd 含量降低, 但重复之间误差较大, 不同秸秆还田量之间的秸秆 Cd 含量没有显著差异, 与对照相比也没有显著差异。当生物炭施用量为每亩 250 kg, 或每亩 1 000 kg 生物炭与石灰一起

还田能使秸秆中的 Cd 含量显著低于对照. 油菜秸秆单独还田或者与石灰一起添加没有显著影响秸秆中的 Cd 含量(图 4).

由于第一年攸县当地雨水较多, 在水稻收获时稻田的水分仍未排干, 导致水稻糙米中 Cd 含量较

低, 因此第二年在附近选择一块地势较高且平整, 排水方便的稻田重复试验. 但因为油菜秸秆中 Cd 含量较高, 油菜秸秆还田导致秸秆中的 Cd 归还到土壤的风险, 所以第二年的试验未包含油菜秸秆的处理. 第二年大田试验的糙米和秸秆中 Cd 含量如图

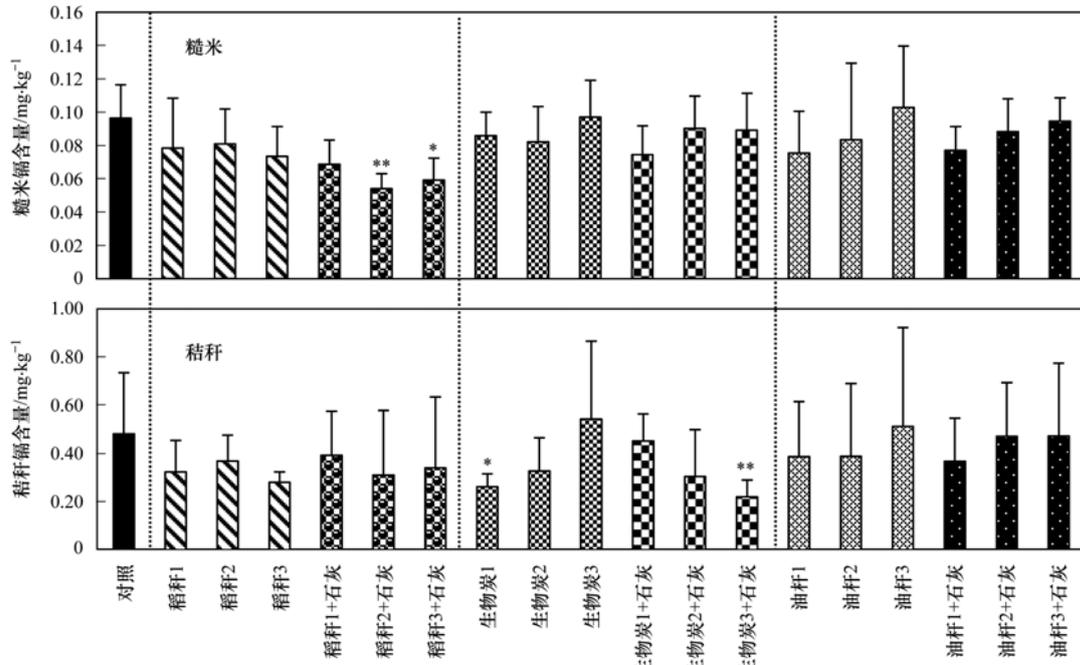


图 4 第一年大田水稻糙米及秸秆中的 Cd 含量

Fig. 4 Cadmium concentrations in brown rice and straws harvested in the first year

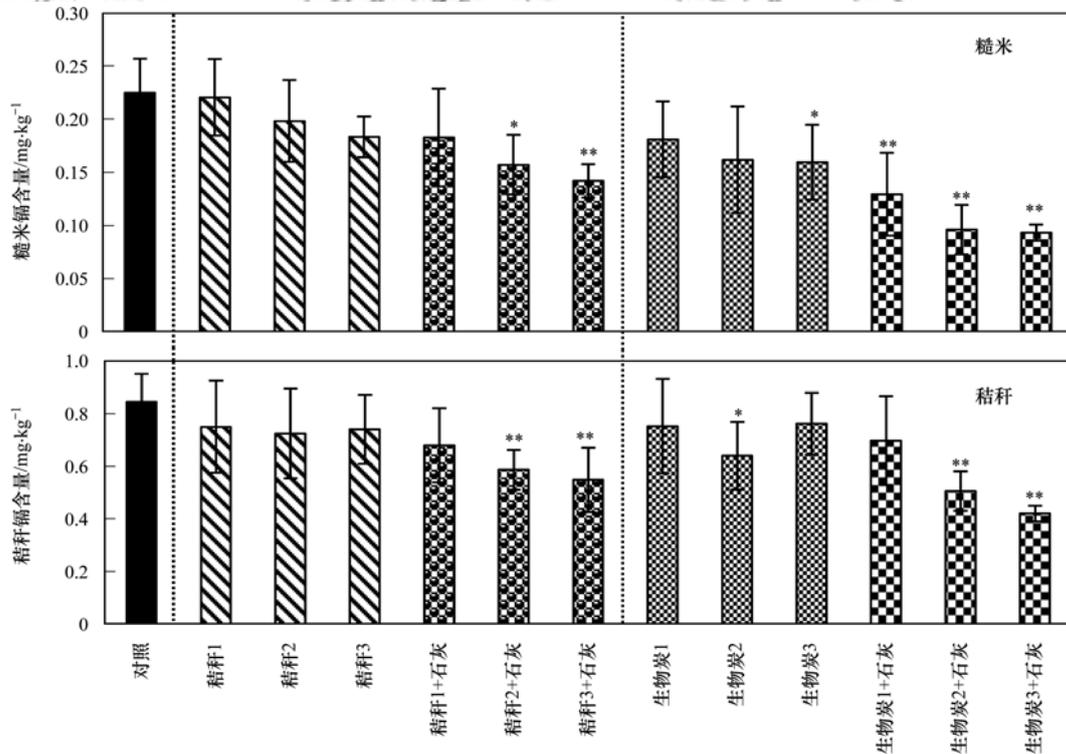


图 5 第二年大田水稻糙米及秸秆中的 Cd 含量

Fig. 5 Cadmium concentrations in brown rice and straws harvested in the second year

5 所示,对照和每亩添 250 kg 秸秆处理的糙米中平均 Cd 含量超过了食品中 Cd 的安全限值 ($0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),其他秸秆和生物炭处理的糙米平均 Cd 均低于 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中秸秆或生物炭与石灰一起还田的处理显著地降低了糙米中的 Cd 含量,每亩 1 000 kg 生物炭与石灰一起还田能使糙米中的 Cd 含量降低约 60%. 秸秆或生物炭还田也能降低水稻秸秆中的 Cd 含量,当与每亩 500 kg 或 1 000 kg 生物炭与石灰一起还田能使秸秆中的 Cd 降低约 30% ~ 50%.

3 讨论

对于大多数植物,根系从土壤中吸收的 Cd 绝大部分都滞留在根中,仅有小部分的 Cd 会运输到地上部,通常根中 Cd 含量是地上部分 Cd 含量的 10 倍左右,可见根中 Cd 的滞留对于植物的 Cd 解毒和农作物的食品安全有重要意义^[21~24]. 本研究盆栽试验的水稻在分蘖期的转运系数是 5.42% ~ 13.60%,即水稻地上部积累的 Cd 仅占水稻体内总 Cd 的 5% ~ 12% (图 3);但在灌浆期,Cd 向地上部的转运系数显著提高(30% 左右),可能是因为所用土壤中的有效 Cd 含量较高,而此时地下部的 Cd 积累已经达到饱和,导致向地上部运输的 Cd 较多.

植物根和茎叶细胞中 Cd 的亚细胞定位对于植物体内 Cd 的转运与分布有重要影响. 细胞壁是植物根和茎叶细胞中 Cd 积累的主要亚细胞组织,如水稻根系细胞壁中的 Cd 约占 60%,茎叶细胞壁中的 Cd 可达 90%^[23,25],大麦细胞壁中的 Cd 占 35% ~ 44%^[26],小麦根系细胞壁中的 Cd 占 26% ~ 44%,高粱茎叶细胞壁中的 Cd 占 26% ~ 44%^[27]. 与上述的报道一致,本研究发现水稻根细胞壁中的 Cd 占总 Cd 的 86% ~ 95%,茎叶细胞的细胞壁与可溶部分中的 Cd 含量相当,分别占总 Cd 的 30% ~ 51% 和 35% ~ 61% (图 1 和图 2).

盆栽试验的结果表明秸秆还田能显著提高根和茎叶的细胞壁中 Cd 含量及其分配比例,降低可溶部分的 Cd 含量,从而减少水稻体内 Cd 由根向茎叶的转运(图 1 和图 2). 这可能是因为水稻秸秆中富含硅和硫^[28,29],水稻秸秆还田可增加土壤中有效硅和硫的含量,而硅能促进细胞壁对 Cd 的固持^[11],硫能促进液泡对 Cd 的区隔化^[14,17],通过增加细胞壁的固持或液泡的区隔化能减少 Cd 向地上部转运,进而降低籽粒中 Cd 的积累,多项研究已表明水稻施硅处理能显著降低糙米中的 Cd 含

量^[11, 13, 14, 30, 31].

从盆栽试验的结果来看,可以推测秸秆还田在理论上可以降低水稻籽粒中 Cd 的积累. 张庆沛等^[15]和林鸾芳等^[32]在成都平原德阳市旌阳区 Cd 污染稻田开展的小区试验证明油菜秸秆和小麦单独还田处理均能使糙米中的 Cd 含量显著降低. 为实践指导 Cd 污染稻田的秸秆还田与水稻安全生产,本研究开展了两年的田间试验,但结果均表明水稻秸秆单独还田未能使糙米中的 Cd 能显著降低. 大田秸秆还田不能显著降低糙米 Cd 含量原因可能是当地生产的水稻和油菜秸秆中均携带高含量的 Cd,分别为 $0.49 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 将这些秸秆还田能使秸秆中富集的 Cd 重新归还到稻田土壤中,从而使土壤和水稻植株中的 Cd 含量显著提高^[33,34]. 在本研究中,单独添加生物炭处理的糙米中 Cd 也没有显著低于对照(图 4 和图 5). 该结果也与部分已经报道的研究结果不一致^[35,36]. Zheng 等^[35]的田间试验表明稻秆炭处理能使水稻糙米和稻壳中的 Cd 含量分别降低 71% 和 71%,豆秆炭处理分别降低 26% 和 46%. 存在这种差异的原因可能是 Zheng 等^[35]使用的生物炭中 Cd 含量较低,豆秆炭和稻秆炭的 Cd 含量分别为 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而且本研究中使用的稻秆炭 Cd 含量分别为 $0.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 由于当地土壤的 pH 值较低,施石灰调 pH 是当地广泛推荐的控 Cd 措施,多项研究也证明在当地施石灰或配套其它土壤改良措施能显著降低水稻对 Cd 的积累^[37,38],本研究的两年大田试验均表明水稻秸秆或生物炭与石灰一起施用能显著降低糙米中的 Cd 含量,秸秆加石灰处理最多能使糙米中 Cd 含量减低 50%,生物炭加石灰处理最多减低 60% (图 4 和图 5). 因此,在南方 Cd 污染稻田实施秸秆或生物炭添加时需要考虑秸秆和生物炭中富集的 Cd 重新归还到稻田土壤中的风险,推荐与石灰一起施用来提高控制水稻 Cd 积累的效果.

4 结论

(1) 水稻根细胞中的 Cd 主要分布在细胞壁中,占总 Cd 的 86% ~ 95%,茎叶细胞的细胞壁与可溶部分的 Cd 分别占总 Cd 的 30% ~ 51% 和 35% ~ 61%.

(2) 秸秆还田能提高了根和茎叶的细胞壁中 Cd 含量及其分配比例,并降低水稻体内 Cd 由根向茎叶转运.

(3) 当地所产水稻和油菜秸秆中 Cd 含量均较高, 秸秆单独还田不能显著降低糙米中的 Cd 含量, 当生物炭 Cd 含量较高时, 单独添加生物炭也未能显著降低糙米中的 Cd 含量。

(4) 当秸秆或生物炭与石灰一起还田时, 糙米中的 Cd 含量均显著降低, 因此, 建议当地秸秆还田的同时添加一定量的石灰可达到显著降 Cd 的效果。

参考文献:

- [1] NTP National Toxicology Program. Tenth report on carcinogens, department of health and human services, research Triangle Park [R]. NC, 2000. III-42-III-44.
- [2] IARC. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Vol. 58 beryllium, cadmium, mercury, and exposures in the glass manufacturing industry, Lyon [EB/OL]. <http://www.iarc.fr>, 1993.
- [3] 中华人民共和国环境保护部和国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.
- [4] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, *et al.* Soil contamination in China: current status and mitigation strategies [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(2): 750-759.
- [5] 甄燕红, 成颜君, 潘根兴, 等. 中国部分市售大米中 Cd、Zn、Se 的含量及其食品安全评价 [J]. *安全与环境学报*, 2008, **8**(1): 119-122.
- Zhen Y H, Cheng Y J, Pan G X, *et al.* Cd, Zn and Se content of the polished rice samples from some Chinese open markets and their relevance to food safety [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2008, **8**(1): 119-122.
- [6] Williams P N, Lei M, Sun G X, *et al.* Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(3): 637-642.
- [7] 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.
- [8] Zhu H H, Chen C, Zhu Q H, *et al.* Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 99-106.
- [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] 孔文杰, 倪吾钟. 有机无机肥配合施用对土壤-水稻系统重金属平衡和稻米重金属含量的影响 [J]. *中国水稻科学*, 2006, **20**(5): 517-523.
- Kong W J, Ni W Z. Effects of integrated fertilization with commercial organic manure and chemical fertilizers on heavy metal balance in soil-rice cropping system [J]. *Chinese Journal of Rice Sciences*, 2006, **20**(5): 517-523.
- [11] Liu J, Ma J, He C W, *et al.* Inhibition of cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells by a wall-bound form of silicon [J]. *New Phytologist*, 2013, **200**(3): 691-699.
- [12] 潘瑶, 尹洁, 高子平, 等. 硫对水稻幼苗镉积累特性及亚细胞分布特征的影响 [J]. *农业资源与环境学报*, 2015, **32**(3): 275-281.
- Pan Y, Yin J, Gao Z P, *et al.* Effects of sulfur on the accumulation and subcellular distribution of cadmium in rice seedlings [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, **32**(3): 275-281.
- [13] Duan G L, Zhang H M, Shen Y Q, *et al.* Mitigation of heavy metal accumulation in rice grain with silicon in animal manure fertilized field [J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2016, **15**(10): 2223-2229.
- [14] 潘智立, 李军. 硫、硅对水稻体内 npt 含量及镉亚细胞分布的影响 [J]. *土壤通报*, 2016, **47**(5): 1253-1258.
- Pan Z L, Li J. The response of non-protein thiols and subcellular distribution of cadmium in rice to the exogenous sulfur and silicon [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, **47**(5): 1253-1258.
- [15] 张庆沛, 李冰, 王昌全, 等. 秸秆还田配施无机改良剂对稻田土壤镉赋存形态及生物有效性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(12): 2345-2352.
- Zhang Q P, Li B, Wang C Q, *et al.* Effects of combined application of straw and inorganic amendments on cadmium speciation and bioavailability in paddy soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(12): 2345-2352.
- [16] Ma J F, Takahashi E. Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan [M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2002.
- [17] Schmöger M E V, Oven M, Grill E. Detoxification of arsenic by phytochelatins in plants [J]. *Plant Physiology*, 2000, **122**(3): 793-802.
- [18] Zhang J, Zhao Q Z, Duan G L, *et al.* Influence of sulphur on arsenic accumulation and metabolism in rice seedlings [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, **72**(1): 34-40.
- [19] 单玉华, 李昌贵, 陈晨, 等. 施用秸秆对淹水土壤镉、铜溶出的影响 [J]. *生态学杂志*. 2008, **27**(8): 1362-1366.
- Shan Y H, Li C G, Chen C, *et al.* Effects of straw incorporation on the solubility of cadmium and copper in flooded soil [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, **27**(8): 1362-1366.
- [20] 史静, 潘根兴. 外加镉对水稻镉吸收、亚细胞分布及非蛋白巯基含量的影响 [J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(5): 853-859.
- Shi J, Pan G X. Effects of Cd-spiking treatment on Cd accumulation, subcellular distribution and content of nonprotein thiols in rice [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(5): 853-859.
- [21] 熊礼明, 鲁如坤. 镉在水稻体内的分布及其影响因素 [J]. *土壤*, 1992, **24**(3): 138-141, 145.
- [22] Liu D H, Kottke I. Subcellular localization of cadmium in the root cells of *Allium cepa* by electron energy loss spectroscopy and cytochemistry [J]. *Journal of Biosciences*, 2004, **29**(3): 329-335.
- [23] Li H, Luo N, Zhang L J, *et al.* Do arbuscular mycorrhizal fungi affect cadmium uptake kinetics, subcellular distribution and chemical forms in rice? [J]. *Science of the Total Environment*,

- 2016, **571**: 1183-1190.
- [24] 赵艳玲, 张长波, 刘仲齐. 植物根系细胞抑制镉转运过程的研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2016, **33**(3): 209-213.
Zhao Y L, Zhang C B, Liu Z Q. Inhibiting cadmium transport process in root cells of plants: a review [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, **33**(3): 209-213.
- [25] Liu J G, Qu P, Zhang W, *et al.* Variations among rice cultivars in subcellular distribution of Cd: the relationship between translocation and grain accumulation [J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, **107**: 25-31.
- [26] 陆仲烟, 刘仲齐, 宋正国, 等. 大麦中镉的亚细胞分布和化学形态及 PCs 合成的基因型差异[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(11): 2125-2131.
Lu Z Y, Liu Z Q, Song Z G, *et al.* Subcellular distribution and chemical forms of Cd and the synthesis of phytochelatins (PCs) in different barley genotypes [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(11): 2125-2131.
- [27] 翁南燕, 周东美, 武敬, 等. 铜镉复合胁迫下温度对小麦幼苗生长及其对铜、镉和矿质营养元素吸收与各元素在亚细胞分布的影响[J]. 生态毒理学报, 2011, **6**(6): 607-616.
Weng N Y, Zhou D M, Wu J, *et al.* Uptake, subcellular distributions of Cu, Cd and mineral elements, and plant growth for wheat seedlings under stress of Cu and Cd as affected by temperature [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2011, **6**(6): 607-616.
- [28] Konboon Y, Blair G, Lefroy R, *et al.* Tracing the nitrogen, sulfur, and carbon released from plant residues in a soil/plant system [J]. Australian Journal of Soil Research, 2000, **38**(3): 699-710.
- [29] Seyferth A L, Kocar B D, Lee J A, *et al.* Seasonal dynamics of dissolved silicon in a rice cropping system after straw incorporation [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, **123**: 120-133.
- [30] 黄秋蝉, 黎晓峰, 沈方科, 等. 硅对水稻幼苗镉的解毒作用及其机制研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1307-1311.
Huang Q C, Li X F, Shen F K, *et al.* Cadmium resistance improved by silicon and corresponding mechanisms in *Oryza sativa* L. seedlings [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, **26**(4): 1307-1311.
- [31] 王芳, 丁杉, 张春华, 等. 不同镉耐性水稻非蛋白巯基及镉的亚细胞和分子分布[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(4): 625-629.
Wang F, Ding S, Zhang C H, *et al.* Non-protein thiols, subcellular and molecular distribution of cadmium in two rice cultivars with difference tolerance [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(4): 625-629.
- [32] 林鸾芳, 王昌全, 李冰, 等. 秸秆还田下改良剂对水稻生长和 Cd 吸收积累的影响[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(9): 1492-1497.
Lin L F, Wang C Q, Li B, *et al.* Effect of amendments on rice growth and Cd uptake based on straw returning [J]. Ecology and Environment Sciences, 2014, **23**(9): 1492-1497.
- [33] 贾乐, 朱俊艳, 苏德纯. 秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(10): 1992-1998.
Jia L, Zhu J Y, Su D C. Effects of crop straw return on soil cadmium availability in different cadmium contaminated soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(10): 1992-1998.
- [34] 汤文光, 肖小平, 唐海明, 等. 长期不同耕作与秸秆还田对土壤养分库容及重金属 Cd 的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(1): 168-176.
Tang W G, Xiao X P, Tang H M, *et al.* Effects of long-term tillage and rice straw returning on soil nutrient pools and Cd concentration [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(1): 168-176.
- [35] Zheng R L, Chen Z, Cai C, *et al.* Mitigating heavy metal accumulation into rice (*Oryza sativa* L.) using biochar amendment—a field experiment in Hunan, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(14): 11097-11108.
- [36] 高瑞丽, 朱俊, 汤帆, 等. 水稻秸秆生物炭对镉、铅复合污染土壤中重金属形态转化的短期影响[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(1): 251-256.
Gao R L, Zhu J, Tang F, *et al.* Fractions transformation of Cd, Pb in contaminated soil after short-term application of rice straw biochar [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(1): 251-256.
- [37] 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.
- [38] 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.

CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H ₂ O ₂ -Biochemical Method	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria	MENG Ting, YANG Hong (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH ₄ and N ₂ O Emissions from Lou Soil	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3845)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables influenced by Facility Cultivation JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI)	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)