ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

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35卷 第6期
2014年6月15日

目 次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析…… 廖晓农,张小玲,王迎春,刘伟东,杜佳,赵玲慧(2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究 …… 苗红妍,温天雪,王跃思,刘子锐,王丽,兰中东(2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究…… 包良满,雷前涛,谈明光,李晓林,张桂林,刘卫,李燕(2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究 …… 马娟娟,李真(2060)
冬季东海、南黄海中DMS和DMSP浓度分布及影响因素研究 …… 宋以柱,张洪海,杨桂朋(2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价 …… 徐姗楠,李纯厚,徐娇娇,肖雅元,林琳,黄小平(2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征 …… 王鑫璇,张鸿,何龙,沈金灿,柴之芳,杨波,王艳萍(2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析 …… 孙玉川,沈立成,袁道先(2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程……
…… 唐文魁,陶贞,高全洲,毛海若,姜光辉,焦树林,郑雄波,张乾柱,马赞文(2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究 …… 杨永刚,李彩梅,秦作栋,邹松兵(2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征 …… 郭高轩,琚宜文,翟航,许亮,沈媛媛,纪轶群(2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用…… 章艳红,叶淑君,吴吉春(2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应 …… 陈维梁,高扬,林勇明,朱波,徐亚娟,于贵瑞,吴承祯(2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究 …… 陆宇超,毕孟飞,李泽利,沙健,王玉秋,钱丽萍(2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价 …… 周晓红,李义敏,周艺,卫安平,周广顺,肖思思(2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响 …… 杨文斌,李阳,孙共献(2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化 …… 武晓飞,李大鹏(2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响 …… 王尚,李大鹏(2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究 …… 吕元蛟,李瑞娇,张念,赵峰,谢从新,张敏(2178)
再悬浮过程中河流底泥PAHs的迁移与释放…… 王晓慧,毕春娟,韩景超(2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响 …… 赵士波,孙荣国,王定勇,王小文,张成(2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂 …… 刘海龙,张忠民,赵霞,焦茹媛(2201)
准分子灯光照降解水相中烷基酚的动力学 …… 刘玉海,叶招莲,文颖频,毕承路(2209)
AF+BAF用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究 …… 涂勇,刘伟京,张耀辉,徐军,唐敏,陈勇,白永刚(2216)
镉(Ⅱ)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究 …… 杨春艳,陈复彬,赵慧,常自强,章竹君(2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究 …… 刘春,年永嘉,张静,张明,张磊,龚鹏飞,肖太民,李星(2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究 …… 唐丹琦,王娟,郑天龙,刘建国,汪群慧(2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响 …… 侍宽,薛罡,高品,吴凡(2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化…… 周振,胡大龙,乔卫敏,陈冠翰,蒋玲燕,李震,麦穗海(2249)
鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟 …… 弓晓峰,向洪锐,陈春丽,周文斌,王佳佳,刘春英,曾艳(2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估……
…… 廖志恒,孙家仁,吴兑,范绍佳,任明忠,吕家扬(2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策 …… 谭冰,王铁宇,李奇锋,张海燕,庞博,朱朝云,王道涵,吕永龙(2272)
渤海湾海域10种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价 ……
…… 王莎莎,高丽荣,田益玲,朱帅,张芹(2281)
基于荧光传感器Frex的特性检测水质环境中生物毒性物质 …… 赵巍,汪钊,蔡强,欧文斌,孟凡国(2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放 …… 张元春,梁文艳,赵远,李飞贞,曹敬灿,胡绍杰(2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育 …… 赵凤敏,梅帅,曹有福,丁进锋,徐嘉杰,李树君(2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究 …… 刘莹,王丽华,郝春博,李璐,李思远,冯传平(2305)
河蚬(*Corbicula fluminea*)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响 … 王雪,赵大勇,曾巾,余多慰,吴庆龙(2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态 …… 田琪,王佳,范晓蕾,罗生军,郭荣波,邱艳玲(2322)
DGGE及T-RFLP分析光照下电位对细菌群落的影响 …… 吴义诚,邓欢,肖勇,赵峰(2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究 …… 田江,彭霞薇,李霞,孙雅君,冯红梅,江泽平(2334)
1株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性 …… 王兆阳,陈国耀,姜珂,许培雅(2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响……
…… 江玲,杨芸,徐卫红,王崇力,陈蓉,熊仕娟,谢文文,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应 …… 李玲,仇少君,陈印平,赵西梅,刘京涛,陆兆华(2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征 …… 蒋跃利,赵彤,闫浩,黄懿梅(2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响 …… 张俊,杨晓洪,葛峰,王娜,焦少俊,叶波平(2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响 …… 常同举,崔孝强,阮震,赵秀兰(2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价 …… 赵新儒,特拉津·那斯尔,程永毅,詹江渝,杨剑虹(2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价 …… 张龙辉,杜永芬,王丹丹,高抒,高文华(2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析 …… 欧阳威,蔡冠清,黄浩波,耿晓君(2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究 …… 张赛,王龙昌,黄召存,贾会娟,冉春燕(2419)
米槠天然林和人工林土壤呼吸的比较研究 …… 吴君君,杨智杰,翁发进,刘小飞,陈朝琪,林伟盛,王小红,陈坦(2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响 …… 刘晓烨,张洪,李永峰(2433)
《环境科学》征订启事(2208) 《环境科学》征稿简则(2400) 信息(2084,2200,2229,2391)

长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响

常同举[1,2], 崔孝强[1,2], 阮震[1,2], 赵秀兰[1,2*]

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 通过长期定位试验, 研究了常规平作、水旱轮作、免耕冬水、垄作免耕和厢作免耕 5 种耕作方式对紫色水稻土剖面重金属(Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Cd)总量、有效量及水稻根、茎叶和糙米重金属含量的影响. 结果表明, 经过 22 a 的耕作, 5 种耕作方式对紫色水稻土剖面 Fe、Cu、Zn、Pb、Cd 总量的剖面分布状况影响不显著, 而对土壤 Mn 的剖面分布状况影响显著, 常规平作、水旱轮作及免耕冬水均导致表层土壤 Mn 向下层淋失. 5 种耕作方式下土壤 Fe、Cu、Zn、Pb 和 Cd 的有效量均随土层深度的增加呈降低趋势, 而常规平作、免耕冬水、垄作免耕及厢作免耕土壤 Mn 有效量则表现出随土层深度的增加而增高的趋势. 5 种耕作方式下, 表层土壤 Fe、Mn 有效量以水旱轮作最高, Zn、Pb 有效量以常规平作最高, 而 Cu 有效量受耕作方式的影响不显著. 相关分析结果表明, 表层土壤有效 Fe 与 pH 呈极显著的负相关关系, 与有机质呈显著的负相关关系, 有效 Mn 与 pH 和有机质均呈极显著的负相关关系, 有效 Zn 与总 Zn 呈显著正相关关系. 水旱轮作、垄作免耕及厢作免耕条件下水稻根部 Fe、Mn 含量, 茎叶 Fe、Mn、Cu、Cd 含量, 糙米 Cu 含量均高于常规平作和免耕冬水, 水旱轮作能明显降低 Cd 向糙米的迁移系数, 对降低糙米 Cd 含量有明显的效果, 且水旱轮作条件下糙米 Cd 含量低于国家食品卫生标准. 水稻根部 Fe 含量与 pH 呈极显著负相关关系, 与有效 Fe 呈极显著正相关关系, 根部 Mn 含量与 pH 呈极显著负相关关系, 与有效 Mn 呈极显著正相关关系, 茎叶中 Mn 含量与 pH 呈显著的负相关关系, 与总 Mn 及有效 Mn 呈显著的正相关关系, 茎叶和糙米 Cu 含量与 pH 均呈极显著的负相关关系, 糙米中 Zn 含量与 pH 呈显著负相关关系, 与 CEC 呈极显著正相关关系. 结果表明, 耕作方式主要通过影响土壤 pH 而影响土壤重金属的有效量及水稻重金属的含量, 水旱轮作可提高表层土壤 Fe、Mn 活性, 降低土壤 Zn、Pb 和 Cd 活性, 并能在一定程度上降低糙米 Pb、Cd 含量, 但也应注意长期的水旱轮作可能会导致表层土壤 Mn 过度向下层淋溶.

关键词: 耕作方式; 水旱轮作; 垄作免耕; 重金属; 紫色水稻土; 水稻

中图分类号: X171 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)06-2381-11 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2014.06.047

Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil

CHANG Tong-ju[1,2], CUI Xiao-qiang[1,2], RUAN Zhen[1,2], ZHAO Xiu-lan[1,2]

(1. Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment of Chongqing, Chongqing 400716, China)

Abstract: A long-term experiment, conducted at Southwest University since 1990, was used to evaluate the effect of tillage methods on the total and available contents of heavy metals (Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cd) in the profile of purple paddy soil and the contents of those metals in root, stem leaf and brown rice. The experiment included five tillage methods: conventional tillage, paddy-upland rotation, no-tillage and fallow in winter, ridge-no-tillage and compartments-no-tillage. The results showed that the total concentrations of Fe, Cu, Zn, Pb and Cd in the soil profile had no significant differences among five treatments, but it was found that total Mn has a significant decline in 0-20 cm under conventional tillage, paddy-upland rotation and no-tillage and fallow in winter compared with ridge-no-tillage and compartments-no-tillage. The availability of Fe, Cu, Zn, Pb and Cd decreased with the increase of soil depth in all treatments, but the availability of Mn was found to be the highest in the 20-40 cm layers except those in the paddy-upland rotation. In the ploughed layer, the contents of available Fe, Mn was the highest in paddy-upland rotation, while the contents of available Znand Pb was the highest in conventional tillage, but tillage treatments had not significant influence to the contents of available Cu. Correlation analysis showed that available Fe was significantly negatively related to the pH values and significantly negatively related to the organic matter of soils, available Mn was significantly negatively related to the pH values and organic matter of soils, whereas the available Zn was significantly positively related to total Zn. The contents of Fe, Mn in rice root, the contents of Fe, Mn, Cu and Cd in rice straw

收稿日期: 2013-09-24; **修订日期**: 2013-12-30

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2009B027); 西南大学生态学重点学科"211 工程"建设项目

作者简介: 常同举(1988 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: changyabing@yeah.net

* 通讯联系人, E-mail: zxl@swu.edu.cn

and Cu in brown rice were higher under paddy-upland rotation, ridge-no-tillage and compartments-no-tillage than those in conventional tillage and no-tillage and fallow in winter. Paddy-upland rotation can significantly lower the migration coefficient value of Cd in brown rice, and the Pb, Cd concentration in brown rice in the treatment of paddy-upland rotation was lower than the upper limit (<0.2 $mg \cdot kg^{-1}$) of the National Standard for Food Hygiene for Cd concentration. The content of Fe in root was significantly and negatively related with soil pH and significantly and positively related with soil available Fe, the content of Mn in root was significantly negatively related with soil pH and significantly positively related with soil available Mn, the content of Mn in straw was significantly negatively related with soil pH, significantly positively related with soil total Mn and significantly positively related with soil available Mn, the content of Cu in straw and brown rice was significantly negatively related with soil pH, the content of Zn was significant related with soil pH and significant related with soil CEC. The content of Fe in root, Mn in root and straw and Cd in straw was positively related with soil available Fe, Mn and Cd, respectively, but was negatively related with pH in plough layer soil, Zn in straw was also negatively related with plough layer soil pH. From the results as above, it is concluded that different tillage methods can change the values of soil pH, alter the availability of heavy metal in soils, consequently affect uptake of heavy metal by rice. Of the tillage methods, paddy-upland rotation could increase the availability of Fe and Mn, but decrease the availability of Zn, Pb and Cd in purple paddy soils. Paddy-upland rotation can also increase the contents of Fe, Mn in rice root and straw, but decrease Cd content in brown rice, and could reduce the Pb, Cd contents in brown rice in a certain extent, however, attention should be given to long-term paddy-upland rotation cause of leaching of soil surface Mn.

Key words: tillage methods; paddy-upland rotation; ridge-no-tillage; heavy metals; purple paddy soil; rice

重金属元素在食物链中的流动是关系到人类健康的一个重要问题,其中某些重金属元素如 Fe、Mn、Cu、Zn 等属于作物和人体所必需的微量元素,缺乏会影响作物的生长和人体的健康,而某些重金属如 Pb、Cd 等非必需元素在土壤中的过度积累不仅能对作物产生毒害作用,降低农作物产量和品质,还能通过食物链进入人体,从而对人体健康构成严重威胁[1,2]. 重金属在土壤中的含量、有效性及垂直分布状况不仅与成土母质有关,还受施肥、灌溉、耕作方式等农业管理措施的影响[3~6]. 其中,耕作方式是影响土壤重金属含量、有效性及垂直分布的重要因素之一. 研究表明,与常规耕作相比,免耕条件下由于作物残茬的表层积累、化肥表施及大气沉降作用等因素的影响,一些元素可能在土壤表层富集[7,8]. 此外,免耕还能显著提高土壤有机质含量,降低土壤 pH,而这些性质的改变可能对土壤重金属含量、有效性及作物对重金属的吸收产生极大的影响[9,10]. 如 Santiago 等[11]报道了免耕可显著提高土壤有机质含量,使土壤 Mn、Cu、Zn 有效量升高; Carter 等[12]发现,土壤 pH 降低是免耕提高作物对 Cu、Zn 等重金属吸收量的最重要原因. 但目前关于该领域的研究集中在旱地,对水田的研究很少. 水稻是我国重要的粮食作物,种植面积占全国粮食作物的 25%,一方面,稻田长期淹水种植容易引起土壤 Fe、Mn 向下层淋溶,导致耕层土壤 Fe、Mn 的匮乏[13,14],另一方面,随着工农业迅速发展,受工业"三废"和农业活动的影响,我国稻田重金属污染问题日趋严重,稻米中重金属积累有增加的趋势[15,16]. 因此,研究不同耕作方式对水田土壤重金属的积累及其有效性的影响具有重要的意义. 本研究以 1990 年建立的定位试验田为依托,通过测定土壤剖面重金属总量、有效量及水稻各部位重金属含量,分析长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属累积、迁移及有效性的影响,以期为合理选用耕作方式提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地点位于重庆市北碚区西南大学试验农场,该场地气候为亚热带季风性湿润气候,年平均降雨量为1 105 mm,年平均气温为 18.30℃,年日照 1 276 h,土壤为中生代侏罗纪沙溪庙组灰棕紫色沙泥岩母质上发育的中性紫色水稻土. 试验前耕层土壤的基本性状为:pH 7.1,有机质 23.1 $g \cdot kg^{-1}$,碱解氮 120.1 $mg \cdot kg^{-1}$,速效磷 7.5 $mg \cdot kg^{-1}$,速效钾 71.1 $mg \cdot kg^{-1}$.

长期定位试验始于 1990 年,试验设计及管理方法同文献[17],试验设 5 个处理:①常规平作(中稻-冬水田),按照传统方法每年三犁三耙翻耕植稻,水稻收获后灌冬水休闲至来年四月; ②水旱轮作(中稻-油菜),按照传统方法水稻平作,水稻收获后,放干田内水翻耕种植油菜,油菜收获后灌水犁耙种水稻; ③免耕冬水(中稻-油菜),作垄规格为:一垄一沟 55 cm,垄顶宽 25 cm,沟宽 30 cm,沟深 35 cm,水稻植在垄埂两侧,水稻生长期间保持高-中水位(离垄面 10 ~ 20 cm),水稻收获后免耕灌冬水休闲至来年四月; ④垄作免耕(中稻-油菜),全年不翻不耕,作垄规格和植稻方法与②相同,水稻收获后垄埂上种植油菜,油菜生长期间,降低垄沟水位,保持浸润灌溉,第二年油菜收获后灌水种植水稻; ⑤厢作

免耕(中稻-油菜),全年免耕,作厢规格为一厢一沟 120 cm,厢宽 85 cm,沟宽 35 cm,沟深 35 cm,其它环节与处理④相同.

每处理小区面积 20 m^2,随机排列,3 次重复,各处理的施肥量均为尿素 273.1 $kg \cdot hm^{-2}$; 过磷酸钙 500.3 $kg \cdot hm^{-2}$; 氯化钾 150.1 $kg \cdot hm^{-2}$,过磷酸钙做底肥一次施用,尿素用量的 2/3 做底肥,1/3 做追肥,氯化钾底肥和追肥各 1/2.

1.2　样品采集与分析

2012 年 8 月底水稻成熟后采集土壤剖面样品和水稻植株样品. 每个小区随机取 6 个点(垄作和厢作处理采样点选在垄面和厢面上),分别取 0 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 层次土样,混匀后放在干净通风处阴干,磨细,过 2 mm 和 0.25 mm 筛后,分析土壤基本理化性质和重金属总量及有效量. 每个小区随机选取 3 株水稻,整株采集,采集后分成根、茎叶和糙米 3 部分,洗净,烘干、磨细过筛后供分析用.

土壤 pH 值、有机质、阳离子交换量及重金属全量的分析见文献[18]. 土壤重金属有效态含量采用 pH 7.3 DTPA-$CaCl_2$-TEA 溶液浸提[19],水稻样品采用 HNO_4-$HClO_4$ 消煮,Fe、Mn、Cu、Zn 用原子吸收分光光度计测定,Pb、Cd 用石墨炉原子吸收分光光度计测定[18].

1.3　数据统计与分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 进行有关数据的计算、统计与处理.

2　结果与分析

2.1　长期不同耕作方式对土壤理化性质的影响

长期不同耕作方式对土壤理化性质的影响见表 1. 耕作方式对土壤 pH 有显著影响,常规平作、水旱轮作、垄作免耕、厢作免耕处理 pH 均随土层深度增加呈明显降低趋势,而免耕冬水处理 pH 剖面变化较小. 在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层,土壤 pH 均以常规平作最高,以水旱轮作最低,在 40 ~ 60 cm 土层中,水旱轮作条件下土壤 pH 显著低于其它 4 个处理,而其它 4 个处理间的差异不显著,表明水旱轮作使各层次土壤 pH 均降低,这与前人研究结果一致[20]. 各处理土壤有机质含量随土层的加深呈明显降低的趋势. 在各土层中,水旱轮作土壤有机质含量显著低于其余 4 个处理,在 0 ~ 20 cm 土层,其余 4 个处理间的差异不显著,在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层中,土壤有机质含量均以厢作免耕最高,其次为垄作免耕,再次为免耕冬水和常规平作,这是由于水旱轮作干湿交替过程中翻耕土壤加速了有机质的分解,而免耕和长期淹水均能降低有机质的矿化速度,罗友进等[21]也有相似的研究结果. 除免耕冬水外,各处理土壤 CEC 均随土层的加深而略有下降,但各土层深度及处理间的差异均不显著.

表 1　耕作方式对土壤理化性质的影响1)

Table 1　Effects of tillage methods on physiochemical properties of purple paddy soil

项目	土层深度/cm	常规平作	水旱轮作	免耕冬水	垄作免耕	厢作免耕
pH	0 ~ 20	7.29 ± 0.04aA2)	6.50 ± 0.08aC	6.77 ± 0.03aB	6.90 ± 0.07aB	6.75 ± 0.05aB
	20 ~ 40	6.91 ± 0.06bA	6.34 ± 0.04abB	6.75 ± 0.05aA	6.55 ± 0.8bB	6.47 ± 0.05bB
	40 ~ 60	6.59 ± 0.18cA	6.28 ± 0.06bB	6.63 ± 0.06aA	6.54 ± 0.05bA	6.46 ± 0.01bA
有机质/$g \cdot kg^{-1}$	0 ~ 20	37.32 ± 2.15aA	25.73 ± 1.12aB	36.33 ± 2.82aA	39.74 ± 2.73aA	36.45 ± 1.88aA
	20 ~ 40	26.60 ± 2.63bB	19.65 ± 2.05bC	24.18 ± 2.29bA	30.27 ± 1.07bA	30.55 ± 2.53abA
	40 ~ 60	22.41 ± 1.86bB	17.36 ± 0.25bC	24.45 ± 0.82bAB	25.46 ± 1.51cAB	27.95 ± 0.58bA
CEC/$cmol \cdot kg^{-1}$	0 ~ 20	21.42 ± 1.09aA	21.20 ± 1.54aA	19.78 ± 1.66aA	24.28 ± 1.51aA	22.45 ± 1.29aA
	20 ~ 40	20.31 ± 1.29aA	18.06 ± 2.21aA	22.97 ± 2.11aA	20.52 ± 1.02aA	21.49 ± 0.95aA
	40 ~ 60	20.03 ± 0.33aA	17.09 ± 2.01aA	20.46 ± 0.98aA	20.44 ± 0.88aA	21.01 ± 1.68aA

1)结果表示为平均值 ± 标准误,下同; 2)同种元素不同小写字母表示同一处理不同土层深度差异显著,不同大写字母表示在同一土层深度不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同

2.2　长期不同耕作方式对土壤重金属总量的影响

长期不同耕作方式对土壤重金属含量及剖面分布状况的影响因元素的不同而异(表 2). 不同土壤深度及耕作方式间土壤总 Fe 含量差异均不显著. 耕作方式对 Mn 的剖面分布影响较大,垄作免耕和厢作免耕条件下土壤总 Mn 含量随土层加深显著降低,而常规平作、水旱轮作及免耕冬水处理土壤总 Mn 含量则以 20 ~ 40 cm 最高; 在 0 ~ 20 和 40 ~ 60 cm 土层,土壤总 Mn 含量以垄作免耕和厢作免耕最高,20 ~ 40 cm 土层以水旱轮作最高,其次为常规平作,各土层总 Mn 含量均以免耕冬水最低. 这是由于常规平作、水旱轮作及免耕冬水处理长期淹水或周

期性的干湿交替作用,造成 Mn 向下淋失,导致表层土壤 Mn 含量减少而在中下层土壤相对富集的趋势[22],而垄作免耕和厢作免耕改淹水种植或放干种植为垄沟浸润种植,避免了 Mn 过度地向土壤下层迁移. 各层次土壤 Cu、Zn、Pb 和 Cd 总量不同耕作方式间的差异不显著,随土层深度增加,土壤 Cu、Zn 和 Pb 总量略有下降,且远低于我国土壤环境质量(GB 15618-1995)二级标准[23],而各处理 Cd 总量则随土层加深显著降低,表现出明显的表聚现象,且其值超过了我国土壤环境质量二级标准.

表 2 耕作方式对土壤重金属总量的影响

Table 2 Effects of tillage methods on total contents of heavy metals in purple paddy soil

项目	土层深度/cm	常规平作	水旱轮作	免耕冬水	垄作免耕	厢作免耕
总 Fe/g·kg^{-1}	0 ~ 20	25.45 ± 0.79aA	24.17 ± 0.89aA	23.30 ± 0.97aA	25.64 ± 0.77aA	25.55 ± 0.62aA
	20 ~ 40	25.55 ± 0.27aA	24.99 ± 0.62aA	25.17 ± 0.48aA	25.17 ± 0.60aA	25.42 ± 0.35aA
	40 ~ 60	24.93 ± 0.35aA	25.01 ± 0.49aA	24.79 ± 0.75aA	24.69 ± 0.39aA	24.12 ± 0.65aA
总 Mn/mg·kg^{-1}	0 ~ 20	500.81 ± 13.35bB	512.21 ± 10.68bB	397.26 ± 11.03bC	642.86 ± 8.70aA	611.13 ± 9.82aA
	20 ~ 40	542.13 ± 11.50aAB	566.36 ± 4.57aA	477.53 ± 15.17aC	506.51 ± 15.31bB	532.16 ± 6.46bAB
	40 ~ 60	427.66 ± 7.88cB	404.38 ± 8.46cC	399.16 ± 6.09bC	460.91 ± 11.03cA	459.48 ± 14.24cA
总 Cu/mg·kg^{-1}	0 ~ 20	14.30 ± 0.23aA	14.12 ± 1.20aA	15.24 ± 0.90aA	14.69 ± 0.48aA	13.95 ± 0.52aA
	20 ~ 40	13.64 ± 0.48aA	12.36 ± 0.29aA	12.99 ± 0.48aA	13.89 ± 0.41aA	13.73 ± 0.60aA
	40 ~ 60	12.31 ± 0.83aA	12.04 ± 0.94aA	12.98 ± 0.96aA	13.31 ± 0.83aA	13.11 ± 0.24aA
总 Zn/mg·kg^{-1}	0 ~ 20	76.25 ± 4.55aA	73.06 ± 3.82aA	73.25 ± 1.17aA	75.03 ± 5.71aA	74.95 ± 2.48aA
	20 ~ 40	69.49 ± 4.58aA	69.03 ± 3.93aA	67.78 ± 3.06aA	72.64 ± 2.96aA	72.28 ± 4.37aA
	40 ~ 60	68.74 ± 5.24aA	66.78 ± 5.29aA	64.12 ± 4.67aA	71.46 ± 2.33aA	67.04 ± 2.19aA
总 Pb/mg·kg^{-1}	0 ~ 20	36.19 ± 1.58aA	36.65 ± 1.82aA	35.73 ± 1.40aA	38.57 ± 1.66aA	36.54 ± 1.47aA
	20 ~ 40	34.75 ± 1.07aA	32.53 ± 1.15aA	33.08 ± 0.73aA	34.05 ± 2.09aA	33.84 ± 0.56aA
	40 ~ 60	31.81 ± 1.95aA	32.55 ± 1.74aA	33.18 ± 1.12aA	33.34 ± 0.46aA	33.69 ± 0.88aA
总 Cd/mg·kg^{-1}	0 ~ 20	0.49 ± 0.02aA	0.48 ± 0.01aA	0.49 ± 0.01aA	0.50 ± 0.04aA	0.49 ± 0.02aA
	20 ~ 40	0.42 ± 0.03abA	0.42 ± 0.02abA	0.43 ± 0.02abA	0.44 ± 0.02abA	0.42 ± 0.02abA
	40 ~ 60	0.39 ± 0.01bA	0.38 ± 0.02bA	0.40 ± 0.01bA	0.39 ± 0.01bA	0.40 ± 0.02bA

2.3 长期不同耕作方式对土壤重金属有效态含量的影响

各耕作处理土壤 Fe、Cu、Zn、Pb 和 Cd 的有效态含量随土层的加深均呈显著降低的趋势(表 3). 在 0 ~ 20 cm 土层中,水旱轮作条件下土壤有效 Fe 含量显著高于其它 4 个处理,而在 20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层中,各处理间有效 Fe 含量均无显著差异,表明水旱轮作能够使表层土壤 Fe 活化,但耕作方式对下层土壤 Fe 活性影响很小. 水旱轮作条件下土壤剖面有效 Mn 含量变化规律不明显,这可能与土壤翻动及油菜根系的吸收有关,而其它 4 个处理土壤有效 Mn 含量均随土层深度的增加显著提高(表 3),这与免耕及常规耕作结合灌冬水有助于土壤有效 Mn 的向下淋失有关. 0 ~ 20 cm 土层中,有效 Mn 含量以水旱轮作最高,其次为垄作免耕和厢作免耕,以常规平作和免耕冬水最低,在 20 ~ 40 cm 土层,水旱轮作、垄作免耕及厢作免耕显著高于常规平作和免耕冬水,而在 40 ~ 60 cm 土层,仅免耕冬水处理显著降低,其余各处理间的 Mn 含量差异不显著,表明耕作方式对土壤有效 Mn 的影响随深度的增加而减小. 各土层土壤有效 Cu 含量受耕作方式的影响均不显著. 土壤有效 Zn 含量在 0 ~ 20 cm 土层中以常规平作最高,水旱轮作最低,且均与其它 3 个处理达到显著性差异水平,而在 20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层中以免耕冬水最高,以水旱轮作最低. 各土层土壤有效 Pb 含量均以常规平作最高,其次为免耕冬水,水旱轮作最低,表明长期淹水能导致土壤 Pb 的活化. 各层土壤有效 Cd 含量均以水旱轮作处理最低,其余 4 种耕作方式间差异不显著. 结果表明水旱轮作有助于表层土 Fe、Mn 活性提高,Zn、Pb 和 Cd 活性降低,常规平作使 Fe、Mn 活性降低,Zn、Pb 活性提高,而 Cu 活性受耕作方式影响很小.

2.4 长期不同耕作方式对水稻各部位重金属含量的影响

5 种耕作方式下,水稻 Fe、Pb 和 Cd 含量均为根 > 茎叶 > 糙米,而 Mn、Cu、Zn 的积累和分配规律则有所不同(表 4). 经过 22 a 的长期定位试验,不同耕作处理使水稻植株各重金属的积累出现了明显的差异. 耕作方式对水稻各部位 Fe、Mn 含量的影响相似,根和茎叶 Fe、Mn 含量的大小顺序均为水旱

轮作 > 垄作免耕，厢作免耕 > 免耕冬水 > 常规平作，且水旱轮作条件下水稻根、茎叶 Fe、Mn 含量均显著高于常规平作和免耕冬水处理，这表明与长期淹水种植相比，水旱轮作可以促进水稻对 Fe、Mn 的吸收，但各处理糙米 Fe、Mn 含量均无显著差异. 各处理水稻根部 Cu 含量无显著差异，但水旱轮作、垄作免耕及厢作免耕条件下水稻茎叶和糙米 Cu 含量显著高于常规平作、免耕冬水. 常规平作水稻根部 Zn 含量显著高于厢作免耕，茎叶 Zn 含量则以水旱轮作最高，且与常规平作和免耕冬水达到显著性差异水平，而各处理糙米 Zn 含量无显著性差异. 各耕作处理水稻根、茎叶、糙米 Pb 含量均无显著差异. 各耕作处理水稻根部 Cd 含量差异不显著，茎叶中的 Cd 含量则表现为水旱轮作、垄作免耕、厢作免耕显著高于常规平作和免耕冬水，糙米 Cd 含量则以免耕冬水最高，以水旱轮作最低，且达到显著差异水平.

表 3　耕作方式对土壤重金属有效态含量的影响

Table 3　Effects of tillage methods on available heavy metals in purple paddy soil

元素	深度/cm	常规平作	水旱轮作	免耕冬水	垄作免耕	厢作免耕
有效 Fe/mg·kg^{-1}	0 ~ 20	68.70 ± 2.88aC	136.13 ± 7.79aA	75.01 ± 4.17aBC	86.55 ± 3.58aB	83.78 ± 1.92aB
	20 ~ 40	47.85 ± 2.56bA	53.82 ± 2.44bA	46.38 ± 4.29bA	58.85 ± 5.11bA	56.38 ± 4.61bA
	40 ~ 60	43.70 ± 4.63bA	58.28 ± 6.94bA	48.35 ± 3.80bA	54.08 ± 3.85bA	50.10 ± 2.71bA
有效 Mn/mg·kg^{-1}	0 ~ 20	18.13 ± 0.71cD	65.37 ± 1.19aA	24.33 ± 2.98bC	37.05 ± 2.14bB	38.78 ± 1.76bB
	20 ~ 40	31.93 ± 1.43bB	43.68 ± 2.04cA	34.48 ± 3.25aB	46.88 ± 2.41aA	46.12 ± 2.45abA
	40 ~ 60	50.60 ± 0.49aA	54.25 ± 4.24bA	42.90 ± 0.95aB	51.93 ± 2.75aA	55.78 ± 3.10aA
有效 Cu/mg·kg^{-1}	0 ~ 20	1.96 ± 0.06aA	1.97 ± 0.09aA	1.94 ± 0.15aA	1.87 ± 0.09aA	1.92 ± 0.09aA
	20 ~ 40	1.64 ± 0.05bA	1.59 ± 0.04bA	1.48 ± 0.04bA	1.46 ± 0.07bA	1.66 ± 0.14bA
	40 ~ 60	1.62 ± 0.06bA	1.56 ± 0.09bA	1.44 ± 0.04bA	1.48 ± 0.06bA	1.56 ± 0.05bA
有效 Zn/mg·kg^{-1}	0 ~ 20	1.70 ± 0.10aA	0.61 ± 0.02aC	1.20 ± 0.11aB	1.01 ± 0.14aB	1.03 ± 0.11aB
	20 ~ 40	0.61 ± 0.06bB	0.53 ± 0.02abB	0.81 ± 0.05bA	0.64 ± 0.03bB	0.61 ± 0.06bB
	40 ~ 60	0.51 ± 0.05bB	0.46 ± 0.05bB	0.95 ± 0.03bA	0.51 ± 0.03bB	0.56 ± 0.03bB
有效 Pb/mg·kg^{-1}	0 ~ 20	3.82 ± 0.14aA	2.84 ± 0.09aB	3.59 ± 0.29aA	3.01 ± 0.14aB	2.98 ± 0.07aB
	20 ~ 40	2.70 ± 0.16bA	1.73 ± 0.11bB	2.36 ± 0.24bAB	2.31 ± 0.25bAB	2.33 ± 0.19bAB
	40 ~ 60	2.19 ± 0.11cA	1.43 ± 0.01cB	2.14 ± 0.15bA	2.13 ± 0.08bA	1.88 ± 0.09cA
有效 Cd/mg·kg^{-1}	0 ~ 20	0.34 ± 0.02aA	0.29 ± 0.02aA	0.33 ± 0.01aA	0.34 ± 0.02aA	0.32 ± 0.01aA
	20 ~ 40	0.22 ± 0.02bAB	0.19 ± 0.01bB	0.23 ± 0.02bAB	0.24 ± 0.03bAB	0.28 ± 0.02abA
	40 ~ 60	0.18 ± 0.01bBC	0.15 ± 0.01cC	0.18 ± 0.01cBC	0.21 ± 0.01bAB	0.24 ± 0.02bA

表 4　耕作方式对水稻植株不同部位重金属含量的影响[1)]/mg·kg^{-1}

Table 4　Effects of tillage methods on heavy metal contents in different parts of rice/mg·kg^{-1}

项目	处理	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Cd
根	常规平作	400.24 ± 10.90d	226.60 ± 6.28c	7.49 ± 0.68a	18.77 ± 1.20a	11.73 ± 1.03a	2.20 ± 0.09a
	水旱轮作	590.73 ± 20.91a	374.97 ± 17.77a	7.57 ± 0.22a	15.41 ± 1.01ab	11.29 ± 0.64a	2.85 ± 0.31a
	免耕冬水	450.38 ± 10.12c	237.62 ± 7.30c	7.72 ± 0.39a	15.79 ± 1.08ab	11.43 ± 0.57a	2.96 ± 0.38a
	垄作免耕	513.33 ± 19.01b	262.54 ± 10.46bc	8.18 ± 0.40a	15.27 ± 1.49ab	10.64 ± 0.87a	2.72 ± 0.17a
	厢作免耕	525.87 ± 13.66b	324.97 ± 18.62b	7.13 ± 0.23a	14.91 ± 0.54b	12.20 ± 0.66a	2.28 ± 0.25a
茎叶	常规平作	205.81 ± 17.18c	236.57 ± 15.40b	0.82 ± 0.11c	23.72 ± 1.34b	4.81 ± 0.31a	0.52 ± 0.03b
	水旱轮作	342.03 ± 12.85a	339.64 ± 12.94a	2.31 ± 0.08a	38.05 ± 4.18a	5.23 ± 0.47a	0.82 ± 0.03a
	免耕冬水	242.70 ± 20.09bc	257.76 ± 11.87b	1.23 ± 0.11b	27.18 ± 1.21b	6.00 ± 0.52a	0.59 ± 0.02b
	垄作免耕	252.51 ± 19.27bc	335.56 ± 13.30a	2.10 ± 0.32a	31.74 ± 4.00ab	4.80 ± 0.38a	0.85 ± 0.13a
	厢作免耕	281.87 ± 25.49ab	310.94 ± 5.63a	2.20 ± 0.47a	30.72 ± 4.01ab	5.37 ± 0.78a	0.90 ± 0.05a
糙米	常规平作	11.51 ± 1.43a	15.22 ± 0.50a	1.00 ± 0.11c	18.53 ± 1.01a	0.21 ± 0.02a	0.24 ± 0.01b
	水旱轮作	9.09 ± 0.56a	15.71 ± 1.38a	2.03 ± 0.10a	19.36 ± 0.46a	0.22 ± 0.02a	0.13 ± 0.02c
	免耕冬水	10.24 ± 2.57a	15.47 ± 1.31a	1.49 ± 0.06b	19.16 ± 0.55a	0.18 ± 0.01a	0.36 ± 0.02a
	垄作免耕	10.08 ± 1.04a	13.39 ± 0.46a	1.97 ± 0.10a	17.96 ± 0.81a	0.18 ± 0.01a	0.24 ± 0.03b
	厢作免耕	11.88 ± 1.93a	13.85 ± 0.76a	1.94 ± 0.20a	17.81 ± 0.72a	0.19 ± 0.02a	0.26 ± 0.02b

1) 同列不同小写字母表示差异达到显著水平($P < 0.05$)

2.5 长期不同耕作方式对重金属在土壤-水稻体系中迁移能力的影响

用富集系数 BCF(水稻根部重金属含量/土壤中相应重金属含量)来表示重金属在土壤-水稻根之间迁移能力大小,用迁移系数 TF1(水稻茎叶重金属含量/水稻根部相应重金属含量)、TF2(糙米重金属含量/水稻茎叶相应重金属含量)分别表示重金属在根-茎叶、茎叶-糙米间的迁移能力[24]. 如表 5 所示,水稻根部对土壤重金属的富集能力的大小顺序为 Cd > Cu > Mn > Zn > Pb > Fe,表明在研究的金属元素中,Cd 向水稻根部的迁移能力最强,耕作方式对水稻根部 Fe、Cu、Zn、Pb、Cd 的富集系数影响较小,而对 Mn 的影响较大,其中水旱轮作条件下水稻根部对 Mn 的富集系数最大. 重金属在水稻根部-茎叶间的迁移能力表现为 Zn > Mn > Fe > Pb > Cd > Cu,其中 Cu、Zn、Cd 向地上部的迁移能力受耕作方式的影响较大,常规平作、免耕冬水条件下 TF1 值均小于水旱轮作、垄作免耕与厢作免耕,而 Fe、Mn、Pb 在水稻根部-茎叶间的迁移受耕作方式影响较小. 而对于重金属元素在茎叶-糙米间的迁移系数,Cd 受耕作方式的影响最大,其中水旱轮作条件下 Cd 的迁移系数远低于其它 4 个处理.

表 5 不同耕作方式下重金属在土壤-水稻系统的迁移情况

Table 5 Effects of tillage methods on translocation of heavy metals in the soil-paddy system

项目	处理	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Cd
BCF	常规平作	0.02	0.45	0.53	0.25	0.32	4.51
	水旱轮作	0.02	0.73	0.55	0.21	0.31	5.89
	免耕冬水	0.02	0.60	0.51	0.21	0.32	6.08
	垄作免耕	0.02	0.41	0.56	0.20	0.27	5.58
	厢作免耕	0.02	0.53	0.51	0.20	0.34	4.63
TF1	常规平作	0.51	1.04	0.11	1.28	0.42	0.24
	水旱轮作	0.58	0.91	0.30	2.48	0.47	0.29
	免耕冬水	0.54	1.08	0.16	1.75	0.52	0.21
	垄作免耕	0.49	1.29	0.26	2.12	0.45	0.31
	厢作免耕	0.54	0.96	0.31	2.08	0.45	0.40
TF2	常规平作	0.06	0.06	1.23	0.78	0.04	0.47
	水旱轮作	0.03	0.05	0.89	0.52	0.04	0.16
	免耕冬水	0.04	0.06	1.23	0.71	0.03	0.61
	垄作免耕	0.04	0.04	0.94	0.58	0.04	0.29
	厢作免耕	0.04	0.04	0.88	0.59	0.04	0.30

3 讨论

3.1 长期不同耕作方式对土壤重金属含总量的影响

重金属通过大气沉降、污泥农用、污水灌溉、化肥和农药的施用等途径进入农田并在土壤中积累,具有很大的生态和健康风险,受到广泛的关注[25]. 对不同耕作方式下重金属变化状况已有大量研究,如 Düring 等[26]指出,免耕条件下土壤各层 Cd 含量及表层 Zn 含量均高于常规翻耕,Hargrove[27]发现免耕使 Mn 和 Zn 在土壤表层积累,Fe 的累积量减少,而 Cu 的积累与耕作方式无关.

本试验研究不同耕作方式对水稻土重金属含量及迁移状况的影响,结果发现,不同耕作处理对土壤总 Fe 剖面分布无显著影响,这可能是由于土壤中 Fe 含量较高,而不同耕作方式对作物残茬在土壤中的分布及作物对于 Fe 吸收的影响不足以改变土壤中 Fe 含量引起. 土壤 Mn 剖面分布状况受耕作方式影响较大,常规平作、免耕冬水及水旱轮作条件下表层土壤 Mn 有较强的向下层土壤淋溶的趋势,应注意长期淹水和干湿交替可能会导致表层土壤 Mn 的匮乏,而垄作免耕和厢作免耕可以在一定程度上避免表层土壤 Mn 的过度淋失. 土壤剖面中的重金属含量分布状况反映土壤受污染的程度和重金属在土壤中的迁移状况,一般情况下,土壤重金属含量随土层深度增加而降低表明土壤受到人类活动的污染[28]. 本研究中,各耕作处理 Cu、Zn、Pb 含量在各土层均无显著差异,而各处理土壤表层 Cd 含量明显高于下层土壤,表明该人类活动对土壤镉含量有显著的影响,对于一般农地土壤,重金属的来源主要来自大气沉降、施肥、灌溉和作物残茬. 本研究表明该土壤中的 Cu、Zn、Pb 含量受上述因素的影响较小而 Cd 受的影响较大. 水稻对 Cd 具有较强的富集能力,土壤中过量 Cd 会对稻米的质量安全构成严重威胁[29],应采取措施减少其向农田的输入和向

水稻籽粒迁移. 不同耕作条件下土壤各层 Cu、Zn、Pb、Cd 含量均无显著差异,与前人研究结果有所不同,可能是由于试验的土壤性质、气候条件、作物种类、水分及施肥管理措施等的不同所致,需要进一步深入研究.

3.2　长期不同耕作方式对土壤重金属有效态含量的影响

有效态重金属表示能够被植物吸收利用的部分,与土壤性质密切相关,其中,土壤 pH 和有机质是影响土壤重金属有效态含量的重要因素. 不同耕作方式对重金属有效性的影响及其与土壤理化性质的关系已有较多报道,但得出的结论有所不同. 如 Edwards 等[30]发现,免耕条件下土壤表层 Pb、Co 的有效态含量高于翻耕,而 Cu、As、Ni 的有效态含量则不受耕作方式的影响,有效 As 无明显的剖面分布规律,其它几种元素的有效态含量则随土层的加深呈显著降低的趋势. Santiago 等[11]指出,免耕土壤表层有效 Mn、Cu、Zn 均高于翻耕,有效 Mn、Cu、Zn 与有机质均呈显著的正相关关系. 也有报道认为免耕使土壤重金属有效态含量升高的原因是土壤 pH 的下降[27]. 但 Fergusson[31]指出,土壤重金属的有效态含量的变化不能完全用土壤理化性质的改变来解释.

本研究中,各处理土壤有效 Fe、Cu、Zn、Pb 和 Cd 均表现出表层高而下层低的趋势,除水旱轮作外,有效 Mn 的含量随土层加深而升高. 在 0 ~ 20cm 的表层土壤中,水旱轮作能使表层 Fe、Mn 的有效量显著提高,同时使表层 Zn、Pb 和 Cd 的有效量显著降低,而常规平作条件下 Fe、Mn 活性较低,Zn、Pb 活性较高,但 Cu 的有效态含量受耕作方式的影响很小. 在本研究所测试的重金属元素中, Fe、Mn、Cu 和 Zn 是植物必需的微量元素,根据土壤有效态微量元素分级和评价指标[32],各处理表层土壤有效 Fe、有效 Mn 及有效 Cu 属于很高水平,水旱轮作条件下土壤有效 Zn 属于低水平,而其它 4 个处理属于中等水平. 将表层土壤重金属有效量与 pH、有机质、CEC 及重金属总量进行相关分析,结果表明,有效 Fe 与 pH 呈极显著的负相关关系,与有机质呈显著的负相关关系,有效 Mn 与 pH 和有机质均呈极显著的负相关关系,有效 Zn 与总 Zn 呈显著正相关关系,而有效 Cu、Pb 和 Cd 与土壤 pH、有机质、CEC 及其总量的相关性均不显著(表 6),这可能与其它理化性质如氧化还原电位及元素间交互作用的影响有关,有待进一步研究影响这些元素有效态含量的因素.

表 6　土壤重金属有效态含量与土壤理化性质及重金属总量的相关关系($n = 15$)1)

Table 6　Correlation between soil available heavy metals, properties and total heavy metal

	有效 Fe	有效 Mn	有效 Cu	有效 Zn	有效 Pb	有效 Cd
pH	-0.703**	-0.792**	0.255	0.503	0.479	0.326
有机质	-0.568*	-0.680**	-0.219	0.104	-0.133	0.123
CEC	0.148	0.020	-0.229	-0.229	-0.356	0.461
总 Fe	0.114					
总 Mn		0.126				
总 Cu			0.129			
总 Zn				0.608*		
总 Pb					-0.381	
总 Cd						0.282

1) * 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关,下同

3.3　长期不同耕作方式对水稻吸收重金属的影响

研究表明,耕作方式可以改变土壤 pH、有机质含量、CEC 及作物的根系在土壤中的分布状况,这些变化可能会影响到作物对重金属的吸收. 如 Gao 等[33]报道,与传统翻耕相比,免耕可以降低小麦籽粒中 Cd 含量. Lavado 等[34]在对耕作方式对小麦-大豆/玉米轮作系统重金属影响的研究发现,大豆籽粒和根中 Cu 含量为翻耕高于免耕,而根部 Zn 含量则为免耕高于翻耕,且大豆根部 Zn 含量与土壤 Zn 呈显著的正相关关系. Düring 等[35]认为翻耕条件下菠菜嫩叶中 Cd 含量显著高于免耕是由于免耕提高了土壤有机质含量,从而导致土壤有效 Cd 含量降低所致. Tiller 等[36]和 Oliver 等[37]发现,与翻耕相比,免耕对土壤有效 Cd 含量虽无显著影响,但能显著提高作物对 Cd 的吸收,原因可能是免耕条件下作物根系主要分布在 Cd 含量相对较高的表层所致.

本研究发现,耕作方式对重金属在土壤-水稻系统的迁移有显著的影响. 水稻根部 Fe、Mn 含量以水旱轮作最高,Zn 含量以常规平作最高,这可能是由于水旱轮作提高了表层土壤 Fe、Mn 活性而常规平作提高了表层土壤 Zn 活性所致,水稻根部 Cu、

表 7 水稻各部位重金属含量与有机质、pH、CEC、土壤重金属总量及有效态含量的相关关系($n=15$)

Table 7 Correlation coefficients between heavy metal contents in different parts of rice and soil organic matter, pH, CEC, total and available heavy metals

	根 Fe	茎叶 Fe	糙米 Fe	根 Mn	茎叶 Mn	糙米 Mn	根 Cu	茎叶 Cu	糙米 Cu	根 Zn	茎叶 Zn	糙米 Zn	根 Pb	茎叶 Pb	糙米 Pb	根 Cd	茎叶 Cd	糙米 Cd
pH	-0.802**	-0.498	0.136	-0.735**	-0.582*	-0.121	-0.047	-0.673**	-0.669**	0.495	-0.650**	-0.222	0.007	-0.276	0.308	-0.434	-0.381	0.181
有机质	-0.388	-0.356	0.244	-0.484	-0.086	-0.404	0.201	-0.160	-0.248	0.077	-0.505	-0.628*	-0.003	0.016	-0.022	-0.174	0.095	0.410
CEC	0.249	0.029	-0.244	0.095	0.472	-0.389	-0.030	0.368	0.218	-0.137	-0.061	-0.685**	0.285	0.077	-0.405	-0.391	0.485	-0.057
总 Fe	0.286	-0.005	-0.021															
有效 Fe	0.784**	0.479	-0.322															
总 Mn				0.240	0.607*	-0.268												
有效 Mn				0.837**	0.716**	0.158												
总 Cu							0.088	-0.181	-0.102									
有效 Cu							0.044	-0.464	-0.489									
总 Zn										0.508	-0.358	0.031						
有效 Zn										0.410	-0.097	-0.072						
总 Pb													0.492	-0.018	-0.152			
有效 Pb													0.276	-0.164	0.112			
总 Cd																-0.281	-0.324	-0.129
有效 Cd																-0.111	0.296	-0.247

Pb、Cd 含量则受耕作方式的影响很小. 为探讨水稻各部位重金属含量与耕作方式引起的土壤性质变化间的关系,将水稻根、茎叶、糙米重金属含量与表层土壤 pH、有机质、CEC、重金属总量及有效态含量进行相关分析,结果发现,水稻根部 Fe 含量与 pH 呈极显著负相关关系,与有效 Fe 呈极显著正相关关系,根部 Mn 含量与 pH 呈极显著负相关关系,与有效 Mn 呈极显著正相关关系,茎叶中 Mn 含量与 pH 呈显著的负相关关系,与总 Mn 呈显著正相关关系,与有效 Mn 呈极显著的正相关关系,茎叶和糙米 Cu 含量与 pH 均呈极显著的负相关关系,糙米中 Zn 含量与 pH 呈显著负相关关系,与 CEC 呈极显著正相关关系(表 7),表明 pH 和重金属有效态含量是影响水稻对重金属吸收的最重要因素.

3.4　长期不同耕作方式对重金属在水稻中迁移的影响

耕作方式对重金属在水稻根部-茎叶间的迁移系数有一定的影响,水旱轮作、垄作免耕、厢作免耕条件下 Cu、Zn、Pb 的迁移系数均明显高于常规平作和免耕冬水,有研究认为水稻根部重金属主要靠蒸腾作用向茎叶转移,高蒸腾作用下植株体内重金属明显高于低蒸腾作用[38~40],与长期淹水的常规平作和免耕冬水相比,水旱轮作、垄作免耕、厢作免耕条件下水稻生物量增大,根系活性提高,叶面积系数增加[41, 42],加之这 3 种耕作方式使土壤 Fe、Mn 活性明显提高能够增强水稻的光合作用[43],这些变化均能一定程度上提高水稻的蒸腾强度,从而提高重金属向茎叶的迁移系数,导致水旱轮作、垄作免耕、厢作免耕条件下茎叶 Cu、Cd 含量显著高于常规平作和免耕冬水,水旱轮作条件下茎叶 Zn 含量显著高于常规平作和免耕冬水. 糙米中 Fe、Mn、Cu、Zn 是人体必需营养元素,缺乏易导致疾病发生,本研究与常规平作和免耕冬水相比,水旱轮作、垄作免耕及厢作免耕条件下糙米 Cu 含量有显著的提高,但各耕作处理间糙米 Fe、Mn、Zn 含量均无显著差异,这可能与水稻对元素的吸收、分配过程中元素间的交互作用有关. Pb、Cd 作为人体的非必需元素,采取措施减少其向水稻籽粒的转运可以降低对人体的危害,本研究常规平作、免耕冬水处理糙米 Pb 含量超过国家食品卫生标准(GB 2762-2005)[44],水旱轮作、垄作免耕、厢作免耕条件下糙米 Pb 含量虽略有下降,但差异并不显著,表明耕作措施对降低土壤 Pb 向水稻籽粒迁移的作用有限. 土壤 Cd 向水稻籽粒的迁移能力较强,水旱轮作可以明显降低 Cd 在茎叶-糙米间的迁移系数,这可能是由于水旱轮作条件下土壤 Fe 活性明显提高(表 3),导致水稻体内转运蛋白减少,最终使 Cd 向糙米的迁移量降低[45],此外,也有研究认为茎叶中的 Cd 主要是通过韧皮部转移至植物的籽粒,Zn 可以抑制 Cd 在韧皮部的装载和运输,减少其向籽粒的迁移[46], 本研究中水旱轮作条件下水稻茎叶 Zn 含量最高(表 4),对 Cd 在茎叶-糙米间的迁移有一定的抑制作用. 除水旱轮作外,其它 4 个处理糙米 Cd 含量均超过了国家食品卫生标准(GB 2762-2005)[44],表明水旱轮作对降低 Cd 向糙米的迁移保证食品安全有较明显的效果.

4　结论

(1)相对于常规平作、水旱轮作及免耕冬水的长年淹水或周期性干湿交替的种植模式,垄作免耕和厢作免耕降低了土壤 Mn 向下层淋溶的趋势,但不同耕作方式对 Fe、Cu、Zn、Pb 和 Cd 总量的剖面分布状况影响不明显.

(2)水旱轮作使表层土壤 Fe、Mn 有效量显著提高,Zn、Pb 有效量显著下降,常规平作使表层土壤 Fe、Mn 有效量显著降低, Zn、Pb 有效量显著升高. 表层土壤有效 Fe、Mn 含量与 pH、有机质均呈显著的负相关关系,有效 Zn 与总 Zn 呈显著的正相关关系.

(3)相对于常规平作和免耕冬水,水旱轮作、垄作免耕及厢作免耕条件下水稻根部 Fe、Mn 含量,茎叶 Fe、Mn、Cu、Cd 含量,糙米 Cu 含量均有一定程度的提高. 水旱轮作能明显降低 Cd 在水稻茎叶-糙米间的迁移系数,显著降低糙米 Cd 含量.

(4)土壤 pH、重金属有效量的变化是耕作方式影响水稻对重金属吸收的最主要因素.

参考文献:

[1] 汤文光, 唐海明, 罗尊长, 等. 不同种植模式对稻田土壤重金属含量及晚稻稻米品质的影响[J]. 作物学报, 2011, **37**(8): 1457-1464.

[2] 张军. 微量元素与人体健康[J]. 实用预防科学, 2004, **11**(5): 1070-1071.

[3] 周利强, 尹斌, 吴龙华, 等. 有机物料对污染土壤上水稻重金属吸收的调控效应[J]. 土壤, 2013, **45**(2): 227-232.

[4] 王昌全, 代天飞, 李冰, 等. 稻麦轮作下水稻土重金属形态特征及其生物有效性[J]. 生态学报, 2007, **27**(3): 889-897.

[5] Abedin M J, Cotter-Howells J, Meharg A A. Arsenic uptake and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) irrigated with contaminated water[J]. Plant and Soil, 2002, **240**(2): 311-

319.

[6] Mench M J. Cadmium availability to plants in relation to major long-term changes in agronomy systems [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1998, **67**(2-3): 175-187.

[7] Shuman L M, Hargrove W L. Effect of tillage on the distribution of manganese, copper, iron, and zinc in soil fractions[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, **49**(5): 1117-1121.

[8] Lavado R S, Porcelli C A, Alvarez R. Concentration and distribution of extractable elements in a soil as affected by tillage systems and fertilization[J]. Science of the Total Environment, 1999, **232**(3): 185-191.

[9] Datta A, Sanyal S K, Saha S. A study on natural and synthetic humic acids and their complexing ability towards cadmium[J]. Plant and Soil, 2001, **235**(1): 115-125.

[10] 孙卫玲, 赵蓉, 张岚, 等. pH 对铜在黄土中吸持及其形态的影响[J]. 环境科学, 2001, **22**(3): 78-83.

[11] Santiago A, Quintero J M, Delgado A. Long-term effects of tillage on the availability of iron, copper, manganese, and zinc in a Spanish Vertisol[J]. Soil and Tillage Research, 2008, **98**(2): 200-207.

[12] Carter M R, Gupta U C. Micronutrient concentrations in barley and soybean under minimum tillage on podzolic soils in a cool climate[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 1997, **47**(1): 7-13.

[13] 赵秀芬, 刘学军, 吕世华, 等. 水肥状况对土壤中铁的移动及水稻吸铁的影响[J]. 中国农业大学学报, 2003, **8**(5): 74-78.

[14] 刘学军, 吕世华, 张福锁, 等. 水肥状况对土壤剖面中锰的移动和水稻吸锰的影响[J]. 土壤学报, 1999, **36**(3): 369-376.

[15] 钱春香, 王明明, 许燕波. 土壤重金属污染现状及微生物修复技术研究进展[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, **43**(3): 669-674.

[16] 范中亮, 季辉, 杨菲, 等. 不同土壤类型下 Cd 和 Pb 在水稻籽粒中累积特征及其环境安全临界值[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(4): 792-797.

[17] 肖剑英, 张磊, 谢德体, 等. 长期免耕稻田的土壤微生物与肥力关系研究[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2002, **24**(1): 82-85.

[18] 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.

[19] Emteryd O. Chemical and physical analysis of inorganic nutrients in plant, soil, water and air (Stencil) [M]. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig ståndortslära, 1989.

[20] 王子芳, 高明, 秦建成, 等. 稻田长期水旱轮作对土壤肥力的影响研究[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2003, **25**(6): 514-517, 521.

[21] 罗友进, 王子芳, 高明, 等. 不同耕作制度对紫色水稻土活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 水土保持学报, 2007, **21**(5): 55-58, 81.

[22] 刘学军, 廖晓勇, 张扬珠, 等. 不同稻作制对红壤性水稻土中锰剖面分布的影响[J]. 生态学报, 2002, **22**(9): 1440-1445.

[23] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].

[24] 李非里, 刘从强, 杨元根, 等. 贵阳市郊菜园土-辣椒体系中重金属的迁移特征[J]. 生态与农村环境学报, 2007, **23**(4): 52-56.

[25] 李本银, 汪鹏, 吴晓晨, 等. 长期肥料试验对土壤和水稻微量元素及重金属含量的影响[J]. 土壤学报, 2009, **46**(2): 281-288.

[26] Düring R A, Hoβ T, Gäth S. Depth distribution and bioavailability of pollutants in long-term differently tilled soils [J]. Soil and Tillage Research, 2002, **66**(2): 183-195.

[27] Hargrove W L. Influence of tillage on nutrient uptake and yield of corn[J]. Agronomy Journal, 1985, **77**(5): 763-768.

[28] 刘洪莲, 李恋卿, 潘根兴. 苏南某些水稻土中 Cu、Pb、Hg、As 的剖面分布及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(5): 1221-1227.

[29] 赵雄, 李福燕, 张冬明, 等. 水稻土镉污染与水稻镉含量相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(11): 2236-2240.

[30] Edwards J H, Wood C W, Thurlow D L, *et al*. Tillage and crop rotation effects on fertility status of a Hapludult Soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, **56**(5): 1577-1582.

[31] Fergusson J E. The heavy elements: chemistry, environmental impact and health effects[M]. Oxford, UK: Pergamon Press, 1990.

[32] 胡霭堂. 植物营养学(下册)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.

[33] Gao X P, Brown K R, Racz G J, *et al*. Concentration of cadmium in durum wheat as affected by time, source and placement of nitrogen fertilization under reduced and conventional-tillage management[J]. Plant and Soil, 2010, **337**(1): 341-354.

[34] Lavado R S, Porcelli C A, Alvarez R. Nutrient and heavy metal concentration and distribution in corn, soybean and wheat as affected by different tillage systems in the Argentine Pampas[J]. Soil and Tillage Research, 2001, **62**(1-2): 55-60.

[35] Düring R A, Hoβ T, Gäth S. Sorption and bioavailability of heavy metals in long-term differently tilled soils amended with organic wastes[J]. Science of the Total Environment, 2003, **313**(1-3): 227-234.

[36] Tiller K G, Oliver D P, Mclaughlin M J, *et al*. Managing cadmium contamination of agricultural land, Remediation of soils Contaminated by Metals[A]. In: Proceedings of a Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements[C]. Taipei, Taiwan, 1997. 225-255.

[37] Oliver D P, Schultz J E, Tiller K G, *et al*. The effect of crop rotations and tillage practices on cadmium concentration in wheat grain[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1993, **44**(6): 1221-1234.

[38] 张玉秀, 于飞, 张媛雅, 等. 植物对重金属镉的吸收转运和累积机制[J]. 中国生态农业学报, 2008, **16**(5): 1317-

1321.
[39] 黄白飞，辛俊亮. 植物积累重金属的机理研究进展[J]. 草业学报，2013，**22**(1)：300-307.
[40] 张永志，赵首萍，徐明飞，等. 不同蒸腾作用对番茄幼苗吸收Pb、Cd的影响[J]. 生态环境学报，2009，**18**(2)：515-518.
[41] 高明，张磊，魏朝富，等. 稻田长期垄作免耕对水稻产量及土壤肥力的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报，2004，**10**(4)：343-348.
[42] 王人民，丁元树，陈锦新. 稻田年内水旱轮作对晚稻产量及生长发育的影响[J]. 浙江农业大学学报，1996，**22**(4)：412-417.
[43] 郑甲成，刘婷，张百忍，等. 几种微量元素作用及对水稻发育的影响[J]. 吉林农业大学学报，2010，**32**(S1)：5-8.
[44] GB 2726-2005，食品污染物限量标准[S].
[45] Nakanishi H，Ogawa I，Ishimaru Y，*et al*. Iron deficiency enhances cadmium uptake and translocation mediated by the Fe^{2+} transporters OsIRT1 and OsIRT2 in rice[J]. Soil Science and Plant Nutrition，2006，**52**(4)：464-469.
[46] 蔡保松，张国平. 大、小麦对镉的吸收、运输及在籽粒中的积累[J]. 麦类作物学报，2002，**22**(3)：82-86.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明.

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为. 自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上)：

1）来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊.

2）在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊.

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动.

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任. 我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合.

《环境科学》编辑部
《中国环境科学》编辑部
《环境科学学报》编辑部
《Journal of Environmental Sciences》编辑部

HUANJING KEXUE Vol. 35 No. 6
Environmental Science (monthly) Jun. 15, 2014

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing ····· LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, *et al.* (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang ····· MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, *et al.* (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway ····· BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, *et al.* (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiyi Glacier Region ····· MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter ····· SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks ····· XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, *et al.* (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups ····· WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, *et al.* (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water ····· SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River ····· TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, *et al.* (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment ····· YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, *et al.* (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis ····· GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, *et al.* (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application ····· ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil ····· CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, *et al.* (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuaishui Watershed ····· LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, *et al.* (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town ····· ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, *et al.* (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water ····· YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance ····· WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal ····· WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment ····· LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, *et al.* (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension ····· WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury ····· ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, *et al.* (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon ····· LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, *et al.* (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation ····· LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, *et al.* (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park ····· TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, *et al.* (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(Ⅱ)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres ····· YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, *et al.* (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor ····· LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, *et al.* (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification ····· TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, *et al.* (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor ····· SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, *et al.* (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride ····· ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, *et al.* (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake ····· GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, *et al.* (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission ····· LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, *et al.* (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory ····· TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, *et al.* (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China ····· WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, *et al.* (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex ····· ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, *et al.* (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by *Microcystis aeruginosa* Under Hydroquinone Inhibition ····· ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, *et al.* (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella ····· ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, *et al.* (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake ····· LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, *et al.* (2305)
Effects of *Corbicula fluminea* Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments ····· WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, *et al.* (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments ····· TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, *et al.* (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP ····· WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, *et al.* (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability ····· TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, *et al.* (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier ····· WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, *et al.* (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato ····· JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, *et al.* (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta ····· LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, *et al.* (2358)
Variation of Soil Nitrogen During *in situ* Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China ····· JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, *et al.* (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes ····· ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, *et al.* (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil ····· CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, *et al.* (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation ····· ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, *et al.* (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the *Spartina alterniflora* Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province ····· ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, *et al.* (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification ····· OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, *et al.* (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage ····· ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, *et al.* (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural *Castanopsis carlesii* Forest and Plantation Forest ····· WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, *et al.* (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor ··· LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《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　汤鸿霄　陈吉宁　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）

2014年6月15日　第35卷　第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 35　No. 6　Jun. 15, 2014

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：90.00元　　**国外发行代号**：M 205

国内外公开发行