

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

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

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示	高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康	(1141)
2013年1月北京市PM _{2.5} 区域来源解析	李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松	(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析	程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅	(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征	常燕,冯冲,瞿建国,张经	(1164)
厦门春季PM ₁₀ 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析	张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成	(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气PM _{2.5} 中硫酸盐来源	魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝	(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程	包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠	(1187)
春季华东高山背景区域PM _{2.5} 和PM _{2.5-10} 中水溶性无机离子特征	苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇	(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究	杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹	(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征	何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪	(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究	杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏	(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性	孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗	(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征	张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹	(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应	靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽	(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响	张永领,王明仕,董玉龙	(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响	王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远	(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响	于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚	(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析	任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春	(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价	钟惠舟,韦朝海	(1277)
丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析	李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏	(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例	操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺	(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响	王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪	(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究	杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏	(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析	梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明	(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究	朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽	(1326)
γ 辐照降解水中的盐酸环丙沙星的研究	祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静	(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收	陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼	(1338)
Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水	孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳	(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素	孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪	(1352)
308 nm光作用下 α -Fe ₂ O ₃ 表面HNO ₃ 的光解	陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强	(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚	何家洪,徐强,丁武泉,李强	(1365)
酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究	许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博	(1374)
枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性	马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用	(1379)
嗜碱降解菌筛选及其对焦化废水强化处理	李静,李文英	(1385)
Fe ³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N ₂ O释放的影响	李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建	(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究	赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉	(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻	王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东	(1406)
进水渗滤液总氮和BOD ₅ /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响	杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰	(1412)
重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析	师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先	(1417)
湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析	张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰	(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响	苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春	(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响	王秀丽,梁成华,马子惠,韩月	(1437)
不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复	邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提	(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价	齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞	(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响	王菲,袁婷,谷守宽,王正银	(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究	程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云	(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响	向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐	(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响	郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新	(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究	陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁	(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系	吴静,陈书涛,胡正华,张旭	(1497)
工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析	王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮	(1507)
《环境科学》征订启事		(1216)
《环境科学》征稿简则		(1248)
信息		(1163,1194,1248,1424)

沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响

苏文辉¹, 于晓菲², 王国平², 栾金花³, 邹元春^{2*}

(1. 安阳工学院化学与环境工程学院, 安阳 455000; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 3. 吉林农业大学农学院, 长春 130118)

摘要: 沟渠化是湿地垦殖的标志性过程和景观。在三江平原洪河国家级自然保护区附近选择了一个典型四级排水沟渠系统, 沿等级在沟渠底部布设沉积板, 并以附近的河漫滩天然湿地为对照, 连续两年定量采集了不同级别沟渠和天然湿地中的当年沉积物, 分别计算了沉积通量和沉积物中的铁元素及其氧化物和生源要素含量。结果表明, 各等级沟渠的枯落物、泥沙和总沉积通量都没有显著性差异, 其均值分别为 (57.00 ± 16.90) 、 $(3\,997.57 \pm 798.98)$ 和 $(4\,054.57 \pm 792.91)$ $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 其中枯落物所占比例随沟渠等级增加而逐渐降低; 天然湿地的枯落物沉积通量 $[(120.26 \pm 19.42) \text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ 显著高于沟渠, 而泥沙 $[(35.41 \pm 11.15) \text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ 和总沉积通量 $[(155.67 \pm 20.75) \text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ 则显著低于沟渠; 各级沟渠和天然湿地沉积物中的总铁含量没有显著性差异, 但游离态铁含量显著低于天然湿地; 农渠、斗渠和支渠沉积物的无定形铁和络合态铁含量都与天然湿地接近, 且都高于干渠沉积物; 各级沟渠沉积物中铁氧化物的游离度为天然湿地的 60.2%, 而络合度和活化度都没有显著性差异; 各级沟渠沉积物中的总有机碳、总氮和总磷含量都没有显著差异, 但都低于天然湿地, 分别为天然湿地的 14.6%、31.6% 和 41.0%。三江平原湿地垦殖形成的沟渠化对天然湿地的铁和生源要素沉积产生了显著影响, 合理的农田用水管理才能避免由此带来的环境生态风险。

关键词: 沟渠化; 沉积通量; 铁氧化物; 养分迁移; 三江平原

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1431-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.041

Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain

SU Wen-hui¹, YU Xiao-fei², WANG Guo-ping², LUAN Jin-hua³, ZOU Yuan-chun^{2*}

(1. School of Chemistry and Environmental Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, China; 2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 3. College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: Canalization is the representative process and landscape of wetland reclamation. A typical ditch system of four levels near the Honghe National Nature Reserve in Sanjiang Plain was selected. Deposition plates were set on the sediments along the ditch level and the remained natural wetland nearby was quantitatively sampled for two years as the control. The deposition fluxes, total iron concentration, iron oxides and their components, as well as biogenic elements in the sediments collected by deposition plates were measured. The results showed that the litter, mud/sand and total deposition fluxes showed no significant differences between different ditch levels, with the means of (57.00 ± 16.90) $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, $(3\,997.57 \pm 798.98)$ $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ and $(4\,054.57 \pm 792.91)$ $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, respectively. The litter flux decreased with the increase of ditch level, and the flux in the natural wetland $[(120.26 \pm 19.42) \text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ was significantly greater than that of the ditches. The mud/sand $[(35.41 \pm 11.15) \text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ and total deposition fluxes $[(155.67 \pm 20.75) \text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ were significantly smaller than those of the ditches. There were no significant differences in the total iron between different ditches and natural wetland, while the free iron oxide content in the ditch sediments was significantly lower than that of natural wetland sediment. Except for the main ditch, the amorphous and complex iron oxides in the other ditch and natural wetland sediments showed no significant differences. The free degree of the iron oxide in ditch sediments was 60.2% of that in the natural wetland, while the differences in the complex degree and the activated degree were insignificant. The differences in the total organic carbon, total nitrogen and total phosphorus were insignificant, and all were smaller than those of the natural wetland, with the percentages of 14.6%, 31.6% and 41.0%, respectively. It could be concluded that the effects of canalization on iron and biogenic elements were significant. Consequently, rational agricultural water managements are strongly recommended to avoid the potential environmental and ecological risks caused by canalization in Sanjiang Plain.

Key words: canalization; deposition flux; iron oxides; nutrients transfer; Sanjiang Plain

沟渠化是指以排水垦殖为主要目的, 在天然河网基础上人工挖掘彼此连通的水道的过程或景观。

收稿日期: 2014-09-29; 修订日期: 2014-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271107, 41471079, 41101195); 中国科学院东北地理与农业生态研究所青年人才项目(DLSYQ2012006)

作者简介: 苏文辉(1982~), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为土壤重金属和大气污染控制, E-mail: konglong8225@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zouyc@iga.ac.cn

排水疏干降低地下水位是农作物种植的前提,而沟渠系统在湿地垦殖过程中发挥着基础性作用.对于农田-湿地复合生态系统而言,由不同等级沟渠所形成的网络不仅是排水通道,也是氮磷营养盐和污染物从农田进入湿地和其它水体中的重要路径,导致这些受纳水体富营养化和其它生态环境风险增加,因此,大多数研究者都已将沟渠化视为相关生态环境问题的根源^[1~4].

天然湿地垦殖化是三江平原主要土地利用方式,与之伴生的沟渠化过程不仅导致大量天然湿地被排水疏干,还以高度连通的直线沟渠代替弯曲树枝状的沼泽水系^[5].经过20世纪80年代以来的农业规模化、现代化发展,三江平原目前已经形成完整的排水沟渠系统及其配套设施建设,沟渠密度大为提高^[6].三江平原沟渠系统具有国内外农田沟渠系统的代表性:一方面,沟渠系统是联系农田和受纳水体的过渡带和景观廊道,对于农田径流是汇,而对于受纳水体是源;另一方面,沟渠系统本身也已发育成从局域到区域尺度上的一个由物理-化学-生物过程所形成的复杂生态系统,具有水文调控、水质净化、生物地化循环和维持生物多样性等多种生态系统功能^[5~9].

目前国内外对沟渠化导致的碳、氮、磷迁移关注较多^[1~10],而对铁元素的研究还不多见^[11~13].作为氧化还原性质活泼的过渡金属元素,铁在湿地生物地化循环和生态系统功能形成过程中发挥着重要作用^[14~17].湿地沉积过程研究几乎都是采用沉积芯剖面采集放射性测年的方法,而鲜有采集当年沉积物测定通量及成分的尝试^[18~21].本研究以三江平原为例,利用已获得专利的沉积板连续两年采集了天然湿地-农田-沟渠系统中沉积物,比较了天然湿地和沟渠沉积通量的差异,分析了沉积物中铁、碳、氮、磷元素总量及其不同类型铁氧化物含量的分异,探讨了沟渠化对铁沉积过程的影响,并提出了天然湿地保护恢复和农田用水管理的建议.研究结果对三江平原的粮食安全和生态安全具有一定的参考价值.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三江平原作为我国面积最大的淡水沼泽湿地连片分布区和国家商品粮基地,目前已经形成了完整的沟渠系统及其配套设施,在景观上呈现为2 400 m × 800 m的大网络.这些具有不同等级的沟渠系统

结构充分利用地貌的多层次性和地表坡降的特点,由斜坡向下等级逐渐增加,最后都汇入乌苏里江和黑龙江.按地形和控制面积大小,三江平原的沟渠系统由低向高可以分为农渠、斗渠、支渠、干渠和总干渠五级^[5].这些多等级沟渠系统交错相连,成为物质沉积和运移的主要通道.本研究选择的天然湿地-农田-沟渠系统典型研究区属于浓江河流域,具体位于洪河农场第八作业区浓江河附近和洪河国家级自然保护区上游,其中心地理坐标为47°43'N, 133°32'E^[13].天然湿地为残存的一段浓江河旧河道,已被河堤与周边农田隔开,主要植物为漂筏苔草(*Carex pseudocuraica*)、灰脉苔草(*C. appendiculata*)、芦苇(*Phragmites australis*)、和小叶章(*Calamagrostis angustifolia*).农渠、斗渠、支渠、干渠四级渠道由低级到高级逐级连通.其中,干渠即与浓江河旧河道平行的浓江河主排干,因为人为水利工程养护,两岸几乎无植被;支渠、斗渠和农渠的部分渠段生长有芦苇和狭叶香蒲(*Typha angustifolia*)等挺水植物.依靠沟渠系统排水和灌溉的农田主要作物为水稻和大豆.随着近年来该区“旱地改水田”强度的增加,稻田所占比例逐年增大,旱地和残存的天然湿地有全部转化为稻田的趋势.

1.2 样品采集与处理

沉积物的采集装置为已获得国家发明专利的一种短期风成、水成沉积物采集板(专利号:ZL 201010535053),该沉积板表面有多个凹槽,位于采集板中心的固定杆可垂直插入天然湿地或沟渠沉积物中并紧贴沉积物表面,然后定期收集采集板上捕获的水成沉积物,供通量计算及理化性质分析.2012年5月在研究区的多级沟渠系统内沿等级在各沟渠底部布设沉积板,同时还在沟渠系统临近的天然湿地(浓江河旧河道河漫滩)中另外布设了同等规格的沉积板,共计24个,同年10月成功回收14个;2013年5月再次在相同的位置布设沉积板24个,同年10月回收9个,连续两年共获得23份沉积物样品,其中天然湿地沉积物样品3份,农渠沉积物样品7份,斗渠沉积物样品4份,支渠沉积物样品4份,干渠沉积物样品5份.将所有沉积物样品带回实验室挑出植物枯落物,与泥沙分别风干后,结合沉积板面积,分别计算了天然湿地和不同等级沟渠的年沉积通量.为了消除年际差异,并增加平行样本数量,将两年采集的同一等级的沉积物样品视为平行样品.

1.3 测定方法

所有沉积物样品经风干、过 200 目筛后备分析测试. 总有机碳采用重铬酸盐-外加热法测定; 总铁采用湿法消解后原子吸收光度法 (GBC-906, 澳大利亚) 测定; 总氮、总磷采用湿法消解后连续流动分析法 (SKALAR SAN⁺⁺, 荷兰) 测定; 各形态氧化铁 (游离态、无定形态和络合态) 的测定分别采用 DCB、草酸铵和焦磷酸钠溶液浸提化冻后的鲜土, 再用分光光度法 (岛津 UV-2550, 日本) 测定^[22,23].

1.4 数据处理与分析

不同沟渠沉积物之间沉积通量、总铁、总有机碳、总氮、总磷、各类型铁氧化物含量及其相关比值的差异采用 PASW Statistics 18.0 提供的单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和 Pearson 相关分析程序; 各铁含量分布图利用 Origin Pro 8.0 绘制.

2 结果与分析

2.1 天然湿地和不同等级沟渠沉积物的沉积通量差异

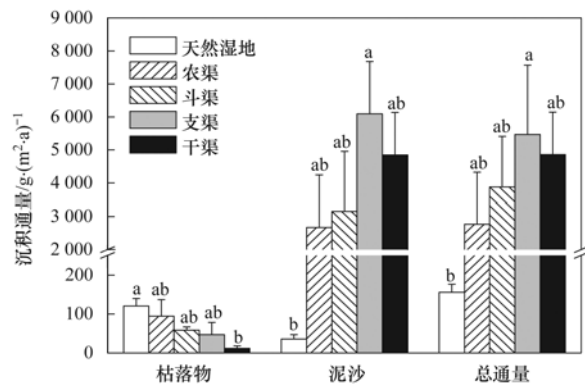
单因素方差分析表明: 无论沉积板中搜集到的枯落物 ($F = 1.554$, $P = 0.229$)、泥沙 ($F = 1.689$, $P = 0.196$) 还是总沉积通量, 在各级沟渠中都没有显著差异 ($F = 1.307$, $P = 0.305$). 由此将所有等级沟渠视为整体, 求其平均枯落物沉积通量为 $(57.00 \pm 16.90) \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 显著低于天然湿地 $[(120.26 \pm 19.42) \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$, 而沟渠中的泥沙沉积通量 $[(3997.57 \pm 798.98) \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ 则显著高于天然湿地 $[(35.41 \pm 11.15) \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$, 受泥沙通量控制的总沉积通量也表现为沟渠沉积物 $[(4054.57 \pm 792.91) \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ 显著高于天然湿地 $[(155.67 \pm 20.75) \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$.

对天然湿地和不同等级沟渠的沉积通量的多重比较发现, 枯落物沉积通量有沿沟渠等级增大而减少的趋势. 泥沙和总沉积通量变化规律相似, 天然湿地中最小, 而支渠中最大, 表现为沿沟渠等级增大先增加后减少的趋势 (图 1).

2.2 不同沉积物中铁含量的差异

单因素方差分析结果表明, 天然湿地和不同等级沟渠沉积物总铁 ($F = 0.869$, $P = 0.501$) 和游离态铁 ($F = 1.998$, $P = 0.138$) 含量差异不显著, 而无定形态铁 ($F = 5.827$, $P = 0.003$) 和络合态铁 ($F = 6.835$, $P = 0.002$) 含量存在显著性差异.

根据对沉积物中铁含量的多重比较, 尽管总铁含量在不同沉积物中没有显著性差异, 但铁氧化物



不同的小写字母表示天然湿地和沟渠之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)

图 1 天然湿地和沟渠系统沉积速率的差异

Fig. 1 Differences in litter, mud/sand and total sediment fluxes between natural wetland and canals

的含量却与各级沟渠沉积物存在显著性差异: 天然湿地沉积物中的游离态铁含量高于各级沟渠沉积物; 天然湿地沉积物的无定形铁和络合态铁含量都与斗渠、支渠和干渠沉积物的两种铁氧化物含量相近, 且都高于农渠沉积物 (图 2).

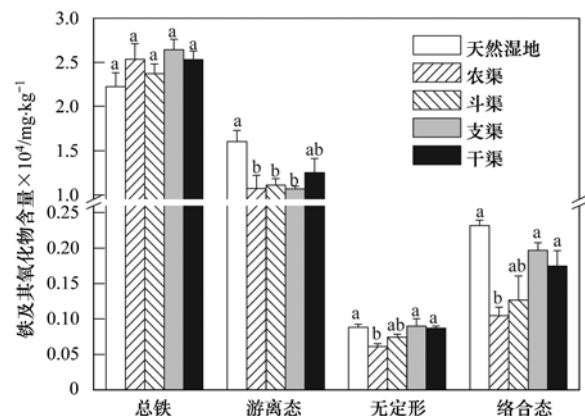


图 2 天然湿地和沟渠系统沉积物铁及其氧化物含量的差异

Fig. 2 Differences in iron and iron oxide concentrations between natural wetland and canals

2.3 不同沉积物中铁氧化物的区分

为了进一步分析不同沉积物铁氧化物的组成, 并藉此反映湿地土壤和农田土壤的发育状况, 本研究比较了游离度、络合度和活化度的差异. 结果表明, 天然湿地和不同等级沟渠沉积物中铁氧化物的游离度存在显著性差异 ($F = 6.170$, $P = 0.003$), 而铁氧化物的络合度 ($F = 0.962$, $P = 0.452$) 和活化度 ($F = 1.158$, $P = 0.362$) 都没有显著性差异.

通过对上述 3 个铁氧化物指标的多重比较发现, 天然湿地沉积物中铁氧化物的游离度约为各级沟渠沉积物中铁氧化物含量平均值的 1.66 倍,

而络合度和活化度都没有显著性差异。整体而言,各点络合度的平均值为活化度平均值的 2.09 倍(图 3)。

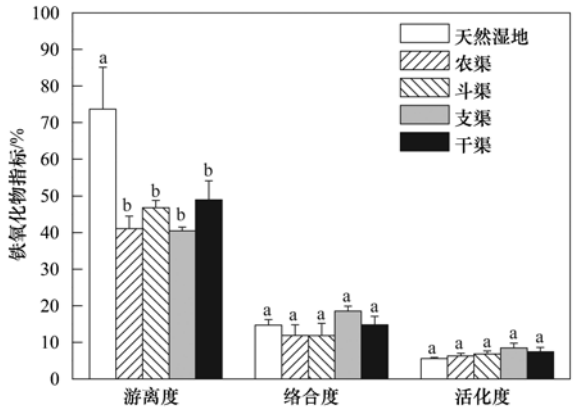


图 3 天然湿地和沟渠系统沉积物中铁氧化物组成指标的差异
Fig. 3 Differences in composition indexes of iron oxides between natural wetlands and canals

2.4 不同沉积物中碳、氮、磷含量的差异

单因素方差分析结果表明,天然湿地和不同等级沟渠沉积物有机质 ($F = 84.525, P \leq 0.001$) 和总磷 ($F = 5.118, P = 0.006$) 含量存在显著性差异,而总氮 ($F = 1.523, P = 0.238$) 的差异不显著。

对碳、氮、磷含量的多重比较发现,天然湿地沉积物中的总有机碳含量显著高于各级沟渠沉积物;天然湿地沉积物中的总氮含量显著高于干渠沉积物,而其它各级沟渠沉积物的总氮含量介于其中;

天然湿地沉积物中的总磷含量显著高于各级沟渠沉积物。天然湿地沉积物中的总有机碳、总氮和总磷含量分别为各级沟渠沉积物均值的 6.85、3.17 和 2.44 倍(图 4)。

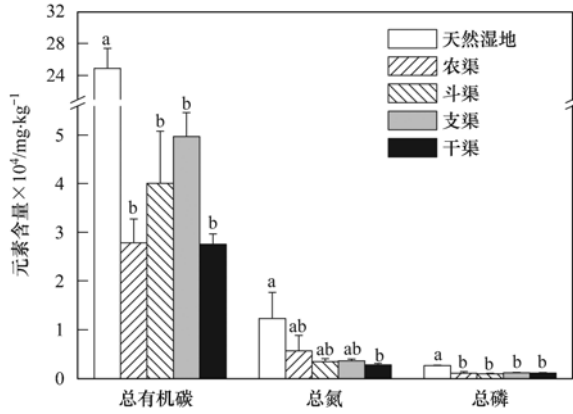


图 4 天然湿地和沟渠系统沉积物碳、氮、磷含量的差异
Fig. 4 Differences in total organic carbon, nitrogen and phosphorus between natural wetlands and canals

2.5 沉积物中铁元素与碳、氮、磷的相关性

将所有沉积物中的总铁、铁氧化物及其组成指标与碳、氮、磷进行相关分析表明,总有机碳、总氮和总磷之间存在显著的正相关,而总铁与这 3 种生源要素之间没有显著的相关性;游离铁和络合铁与总有机碳呈显著的正相关,而无定形铁的相关性不显著;游离度与总有机碳、总氮和总磷之间都存在显著的正相关,而络合度仅与总铁呈显著的负相关(表 1)。

表 1 总有机碳、氮、磷、铁与铁氧化物及其指标之间的相关性¹⁾

	总氮	总磷	总铁	游离铁	无定形铁	络合铁	游离度	络合度	活化度
总有机碳	0.501 *	0.758 **	-0.338	0.492 *	0.331	0.549 **	0.734 **	0.100	-0.195
总氮	1	0.345	-0.142	0.369	0.159	0.238	0.506 *	-0.068	-0.225
总磷		1	0.040	0.518	0.392	0.334	0.565 **	-0.113	-0.214
总铁			1	0.390	0.065	-0.105	-0.091	-0.425 *	-0.408

1) * 表示显著性水平 $P < 0.05$; ** 表示显著性水平 $P < 0.01, n = 23$

3 讨论

3.1 沟渠化对沉积通量的影响

天然湿地由于植被覆盖率较高,水流缓慢,各种颗粒物和悬浮物易于发生沉积^[19]。因此,湿地具有促进沉降净化水质的重要生态系统功能。根据沉积板的调查发现,研究区残存的天然湿地沉积通量为 $(155.67 \pm 20.75) \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ (图 1),远小于根据用¹³⁷Cs、²¹⁰Pb测定沉积年代并结合恒定放射性通量模式推算出的三江平原七星河湿地平均沉积通量 $[300 \sim 4\,800 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ ^[21] 和向海 $[2\,700 \sim 9\,600 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ ^[19],以及采用特征沉积层化学标记法

测定的美国佛罗里达 Everglades 大沼泽 $[565 \sim 2\,400 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ ^[18]。究其原因,除了测定方法的不同外,主要是由于本研究中的残留天然湿地与河流之间的地表水力联系仅仅发生在汛期,河流带来的外源泥沙沉积很少,而主要来自湿地自身产生的枯落物,占到总通量的 77% 以上,远低于沟渠沉积物。沟渠沉积物中的枯落物所占的比例随沟渠等级的提高而逐渐降低,其中农渠为 3.4%,斗渠为 1.5%,支渠为 0.9%,而干渠为 0.2% (图 1)。除支渠外,各级沟渠中泥沙和总沉积通量随沟渠等级增加而增加,表明逐级汇流后可沉降颗粒物流量随河水流量的增加而增加。支渠中沉积通量大于更高等级的干渠,可

能与支渠中生长有挺水植被而干渠中没有挺水植被且水流流速较快有关^[5]。

3.2 沟渠化对沉积物中铁元素分异的影响

铁氧化物作为土壤矿物的重要组分,能够参与土壤中多种生物地球化学过程,但水溶性较差导致其移动性不高。湿地中溶解性铁主要是土壤母质分解和/或通过地表地下径流汇集的铁胶体或铁离子,极易在氧化环境中沉淀或析出而难以迁移^[14,15],但在长期被水淹没或饱和的湿地土壤中却存在明显的水平和垂直迁移过程,表现出一定的随水迁移能力^[12,13]。根据天然湿地的沉积通量与沉积物中总铁含量的乘积,可以计算出天然湿地总铁沉积通量为 $3.46 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ (图 2), 低于美国 Everglades 大沼泽 $[5.45 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}]$ ^[18], 可能是由于本研究区表层土壤铁元素含量背景值较低, 径流携带的铁元素本身并不高^[12], 加上天然湿地由于水力阻隔, 一年之中仅汛期能少量接受上游来水中外源铁输入的补充, 导致总铁含量较低。

天然湿地与各级沟渠沉积物中的总铁含量没有显著性差异(图 2), 表明铁在湿地沟渠化和沉积物随水迁移过程中都没有发生“分馏”现象, 在湿地沟渠化过程中并没有出现流失, 而仅表现为随水的物理迁移和多重来源沉积物的混合, 其迁移远近同时受含铁矿物粒径及沟渠水动力因子的影响。由于低等级沟渠直接接受农田退水, 因此其沉积物的组成主要反映了农田土壤的属性; 高等级沟渠同时接受农田退水和天然湿地汛期排水, 其沉积物中无论是总铁含量还是铁氧化物组成都与天然湿地没有显著性差异, 表明来自天然湿地的沉积物“混淆”了来自农田的沉积物组成的差异。天然湿地排水具有季节性特征, 尽管沉积物含量不高, 但对湿地下游沟渠沉积物中铁矿物的组成仍起着重要作用。因此, 定量分析沟渠化对区域现代沉积过程的影响时, 天然湿地汛期排水的作用不可忽视。

对沉积物中铁氧化物的组成分析表明(图 3), 天然湿地沉积物铁氧化物的游离度为各级沟渠沉积物的 1.66 倍, 表明其来源大都为风化程度较高的风成颗粒, 而沟渠收集的农田退水中的土壤颗粒可能更多来自因长期淹水而导致风化程度相对较弱的稻田中。络合度为活化度的 2.09 倍, 表明较多的铁氧化物以与有机质络合的形态存在, 而较少以无定形态存在, 即铁氧化物在沉积板中以发生老化过程为主, 而活化过程相对较弱。这可能是由于沉积板都不能如湿地或稻田土壤一样, 随季节变化出现反复淹水的情况,

一旦汛期过去, 沉积板出露水面后, 其搜集的沉积物将逐渐干燥, 铁氧化物也沿着“离子态——非晶质——隐晶质——晶质”的单向发育^[14]。

3.3 沟渠化对养分迁移的影响

生源要素碳、氮、磷与铁的迁移行为(图 2)不同, 无论总有机碳, 还是氮、磷营养盐, 天然湿地沉积物中的含量都显著高于沟渠沉积物中, 而不同等级的沟渠沉积物中的碳、氮、磷含量则没有显著性差异(图 4), 这与 Guo 等^[9]的研究结果相同, 表明生源要素在湿地沟渠化过程中都出现了不同程度的流失。对总有机碳、氮、磷、铁与铁氧化物及其指标之间的相关分析(表 1)表明, 天然湿地沉积物中总氮含量与有机质含量呈显著的正相关, 与于君宝等^[20]、李瑞利等^[21]在三江平原的研究结果相同, 表明总氮主要以有机氮形态存在; 总磷含量也与有机质含量呈显著的正相关, 与李瑞利等相同而与于君宝等相反, 这可能与沟渠沉积物中汇集有来自农田径流中排出的磷肥有关。

不论天然湿地或是沟渠水体中的有机质含量都很丰富, 部分铁氧化物在发育过程中与有机质络合, 形成了 Fe-OM 的稳定胶体, 不仅实现了铁元素的随水迁移, 也对湿地有机质输出起到了促进作用^[24], 部分未能随水向下游迁移的胶体聚合沉降于沉积板中, 随着沉积物的水分丧失而被氧化并形成络合态铁氧化物, 表现出与总有机碳之间的显著正相关(表 1)。此外, 铁的游离度同时与碳、氮、磷都呈显著的正相关, 表明沉积物中铁氧化物的转化除了水分丧失本身带来的化学驱动外, 还受微生物作用影响, 充足的氮、磷养分保证了微生物的活性, 使得微生物在铁氧化物晶体发育过程中发挥着重要作用^[25]。

3.4 对天然湿地保护恢复和农田用水管理的启示

农业开发是目前我国东北地区天然湿地丧失和退化的最主要因素, 而农业开发的主要途径是开挖排水渠道, 排干湿地造田。这些沟渠不仅是农田用水管理的重中之重, 还是天然湿地的重要威胁。在区域或流域尺度, 对过去成片分布的天然湿地而言, 网络化的沟渠系统在景观上表现为隔离作用^[3], 宏观的湿地动植物迁移和微观的元素循环都被沟渠所阻断^[6], 破碎化的结果就是整个湿地生态系统的退化乃至丧失; 对于具体的某一农田中的残存湿地而言, 附近的挖沟排水降低了天然湿地水位, 促进了降水期间和降水后的排水, 形成了与农业生产密切相关的径流条件, 显著影响沉积过程及沉积物中元素的分布(图 1~4), 原生的和由农业开发活动新产生

的污染物将沿着沟渠系统向下游输出,最终导致全流域甚至跨流域的环境生态问题^[26]。因此,系统研究排水渠系的湿地生态系统的影响,在农业用水管理中增加对区域湿地保护和恢复的考量,寻求切实可行的水资源管理调控方案和生态水利工程措施,已成为湿地保护和恢复的关键。重建沟渠的沼泽河流属性,恢复沟渠中的湿生植被,促进湿地对颗粒物的沉降和对水质的净化效能,无论是对区域的粮食生产,还是生态安全,都具有重要价值。

4 结论

(1)沟渠系统的沉积通量不仅显著高于天然湿地,而且在沉积物的组成上也有显著差异:前者的泥沙占绝对优势,而后者以枯落物为主。

(2)各级沟渠和天然湿地沉积物中的总铁含量没有显著性差异,但铁氧化物及其组成已发生了改变。

(3)各级沟渠沉积物中的总有机碳、总氮和总磷含量都没有显著差异,但都低于天然湿地,表现为生源要素的流失。

(4)沟渠化显著影响铁的沉积过程及元素的分布和迁移,并最终将对区域生态环境造成直接或潜在影响,因此推荐合理的农田用水管理以避免由此带来的环境生态风险。

致谢:感谢黑龙江省洪河国家级自然保护区和洪河农场对本研究的支持。

参考文献:

- [1] Skaggs R W, Brevé M A, Gilliam J W. Hydrologic and water quality impacts of agricultural drainage[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1994, **24**(1): 1-32.
- [2] Sharpley A N, Krogstad T, Kleinman P J A, *et al.* Managing natural processes in drainage ditches for nonpoint source phosphorus control[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, **62**(4): 197-206.
- [3] 陆琦, 马克明, 倪红伟. 湿地农田渠系的生态环境影响研究综述[J]. *生态学报*, 2007, **27**(5): 2118-2125.
- [4] Edwards A C, Withers P J A. Transport and delivery of suspended solids, nitrogen and phosphorus from various sources to freshwaters in the UK[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **350**(3-4): 144-153.
- [5] 郗敏, 吕宪国. 三江平原湿地多级沟渠系统底泥可溶性有机碳的分布特征[J]. *生态学报*, 2007, **27**(4): 1434-1441.
- [6] 郗敏, 吕宪国. 沟渠对湿地生物地球化学循环影响初析——以三江平原湿地为例[J]. *水土保持通报*, 2006, **26**(5): 43-45, 64.
- [7] 张芸, 吕宪国. 排水对三江平原沼泽湿地土壤中化学元素的影响[J]. *农村生态环境*, 2001, **17**(1): 9-12.
- [8] 陆琦, 马克明, 卢涛, 等. 三江平原农田渠系中氮素的时空变化[J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1560-1566.
- [9] Guo L, Ma K M. Seasonal dynamics of nitrogen and phosphorus in water and sediment of a multi-level ditch system in Sanjiang Plain, Northeast China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2011, **21**(4): 437-445.
- [10] Hill C R, Robinson J S. Phosphorus flux from wetland ditch sediments[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **437**: 315-322.
- [11] Krachler R, von der Kammer F, Jirsa F, *et al.* Nanoscale lignin particles as sources of dissolved iron to the ocean [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, **26**(3): GB3024.
- [12] Pan X F, Yan B X, Yoh M. Effects of land use and changes in cover on the transformation and transportation of iron: A case study of the Sanjiang Plain, Northeast China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, **54**(5): 686-693.
- [13] 邹元春, 于晓菲, 霍莉莉, 等. 三江平原典型灌区井灌地下水中铁的随水迁移特征[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1209-1215.
- [14] Reddy K R, D'Angelo E M, Harris W G. Biogeochemistry of Wetlands[A]. In: *Handbook of Soil Science*[C]. Boca Raton: CRC Press, 2000. G89-G119.
- [15] 姜明, 吕宪国, 杨青, 等. 湿地铁的生物地球化学循环及其环境效应[J]. *土壤学报*, 2006, **43**(3): 493-499.
- [16] Zou Y C, Jiang M, Yu X F, *et al.* Distribution and biological cycle of iron in freshwater peatlands of Sanjiang Plain, Northeast China[J]. *Geoderma*, 2011, **164**(3-4): 238-248.
- [17] Finzi A C, Cole J J, Doney S C, *et al.* Research frontiers in the analysis of coupled biogeochemical cycles [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, **9**(1): 74-80.
- [18] Merkel R S, Hickey-Vargas R. Element and sediment accumulation rates in the Florida Everglades [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2000, **122**(3-4): 327-349.
- [19] 王国平, 刘景双, 汤洁, 等. 吉林向海沼泽湿地典型剖面沉积及年代序列重建[J]. *湖泊科学*, 2003, **15**(3): 221-228.
- [20] 于君宝, 刘景双, 王金达. 三江平原泥炭沼泽沉积物中营养物质的分布规律[J]. *湿地科学*, 2004, **2**(1): 31-35.
- [21] 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 等. 三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2928-2936.
- [22] 史瑞和. 土壤农化分析 [M]. (第二版). 北京: 农业出版社, 1986. 89-227.
- [23] 熊毅, 陈家坊, 马毅杰, 等. 土壤胶体 [M]. (第二册). 北京: 科学出版社, 1985. 245-268.
- [24] Peiffer S, Walton-Day K, Macalady D L. The Interaction of natural organic matter with iron in a wetland (Tennessee Park, Colorado) receiving acid mine drainage [J]. *Aquatic Geochemistry*, 1999, **5**(2): 207-223.
- [25] Roden E E. Fe(III) oxide reactivity toward biological versus chemical reduction [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(7): 1319-1324.
- [26] McDowell R W, Sharpley A N, Condon L M, *et al.* Processes controlling soil phosphorus release to runoff and implications for agricultural management [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, **59**(3): 269-284.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-guo, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 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