ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第4期

Vol.33 No.4

2012

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33卷 第4期
2012年4月15日

目 次

碳同位素比技术定量估算城市大气 CO_2 的来源 …… 刘卫,位楠楠,王广华,姚剑,曾友石,范雪波,耿彦红,李燕(1041)
广州大气降水中稳定同位素对2008年初华南地区冰雪灾害期间水汽来源的反映…… 廖聪云,钟巍,马巧红,薛积彬,尹焕玲,龙昆(1050)
北京雾霾天气期间气溶胶光学特性 …… 于兴娜,李新妹,登增然登,德庆央宗,袁帅(1057)
白马泉风景区夏季大气 $PM_{2.5}$ 中二次有机物的初步研究 …… 代东决,李黎,刘子芳,赵敏,冯加良,赖玮,曾燕梅,周宇,刘露云,邓仕槐(1063)
机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性 …… 乔月珍,王红丽,黄成,陈长虹,苏雷燕,周敏,徐骅,张钢锋,陈宜然,李莉,陈明华,黄海英(1071)
法国梧桐叶片氮含量及氮同位素对城市大气湿沉降氮的响应研究 …… 王燕丽,肖化云,肖红伟(1080)
胶州湾及邻近海域表层海水中一氧化氮浓度分布及其影响因素探讨 …… 薛超,刘春颖,杨桂朋,祝陈坚,张洪海(1086)
基于不确定性分析的太湖水体多环芳烃的生态风险评价 …… 郭广慧,吴丰昌,何宏平,冯承莲,张瑞卿,李会仙(1091)
流域水质时空分布特征及其影响因素初析 …… 黄金良,黄亚玲,李青生,周增荣,冯媛,张祯宇(1098)
潮白河周丛生物群落元素组成与水质变化的生态计量学关系研究 …… 崔经国,单保庆,王帅(1108)
春季盘溪河水质日变化规律及水质评价 …… 张千千,王效科,郝丽岭,逯非,欧阳志云,侯培强(1114)
西南喀斯特流域风化作用季节性变化研究 …… 肖琼,沈立成,杨雷,伍坤宇,陈展图(1122)
三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价 …… 郭劲松,谢丹,李哲,陈园,孙志禹,陈永柏,龙曼(1129)
淀山湖水华高发期浮游植物群落变化特征研究 …… 徐春燕,杨洁,马明睿,胡雪芹,由文辉(1136)
三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验 …… 王建超,朱波,汪涛,易礼军(1144)
沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征 …… 李振炜,于兴修,刘前进,井光花(1152)
合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性 …… 李如忠,周爱佳,童芳,李峰,钱家忠(1159)
鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析 …… 张华俊,陈修康,韩博平,罗勇,杨浩文,曾艳,陈敬安(1167)
三门峡库区河流湿地沉积物重金属赋存形态和风险评价 …… 敖亮,单保庆,张洪,唐文忠(1176)
黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价 …… 刘志杰,李培英,张晓龙,李萍,朱龙海(1182)
竺山湾重金属污染底泥环保疏浚深度的推算 …… 姜霞,王雯雯,王书航,金相灿(1189)
雷州近海、流沙湾和深圳湾沉积物 PAHs 污染特征分析 …… 赵利容,孙省利,柯盛(1198)
中国与印度典型城市道路街尘中多环芳烃与黑碳的对比研究 …… 潘苏红,张干,孙亚莉,解启来(1204)
三江平原典型灌区井灌地下水中铁的随水迁移特征 …… 邹元春,于晓菲,霍莉莉,吕宪国,姜明(1209)
海水淡化水在既有管网输配的铁释放控制研究 …… 田一梅,刘扬,赵鹏,单金林,杨所印,刘伟(1216)
新生态铁的混凝作用探索 …… 杨雪,张景成,关小红(1221)
饮用水中甲羟孕酮的臭氧氧化降解研究 …… 岳婵媛,缪恒锋,任洪艳,阮文权(1227)
核壳式磁性碳纳米吸附剂的制备及其对水环境中金霉素的吸附研究 …… 王懿萱,张娣,牛红云,孟昭福,蔡亚岐(1234)
络合-超滤耦合工艺去除水中镍离子的研究 …… 秦姝,邵嘉慧,何义亮,李雯玺(1241)
赤铁矿光助类 Fenton 降解有毒有机污染物 …… 张钰,顾彦,杨慧,何燕,李瑞萍,黄应平,张爱清(1247)
掺氮 Ta_2O_5 诱发可见光-类 Fenton 体系降解阿特拉津研究 …… 赵璐,邓一荣,杜瑛珣,傅翔(1252)
O_3/H_2O_2 降解水中扑灭通效能研究 …… 李绍峰,孙楚(1260)
Pr-N 共掺杂 TiO_2 光电催化降解孔雀石绿动力学 …… 沙爽,周少奇,张小娜,周晓(1267)
铜陵相思谷尾矿用于处理酸性矿山排水的实验研究 …… 张楠,陈天虎,周跃飞,黎少杰,金杰,王延明(1272)
聚合铝铁对 A^2/O 系统 EPS 及生物絮凝性能的影响 …… 温沁雪,刘爱翠,陈志强,施汉昌,吕炳南(1278)
温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响 …… 张婷婷,张建,杨芳,谢慧君,胡振,李一冉(1283)
温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响 …… 李祥,黄勇,郑宇慧,袁怡,李大鹏,潘杨,张春蕾(1288)
好氧颗粒污泥处理制糖工业废水厌氧出水的除磷特性研究 …… 王硕,于水利,时文歆,暴瑞玲,衣雪松,李建政(1293)
除磷颗粒污泥系统中不同粒径颗粒的理化特性分析 …… 李志华,张玉蓉,杨帆,李胜,姬晓琴(1299)
利用氧化亚氮还原酶基因(*nosZ*)评价人工湿地系统中的反硝化菌 …… 王晓君,陈少华,张兆基,肖俊超(1306)
紫外诱变法提高好氧反硝化菌降解性能的研究 …… 于佳佳,陈浚,杨宣,陈建孟(1313)
1株异养硝化菌胞外聚合物的研究 …… 陈哲,张斌,谌志强,邱志刚,郭迎庆,李君文,王景峰(1318)
氨氮对稀有鮈鲃胚胎及卵黄囊期仔鱼的毒性效应研究 …… 王志坚,鲁增辉,石萍(1323)
多年蔬菜连作对土壤氨氧化微生物群落组成的影响 …… 孟德龙,杨扬,伍延正,吴敏娜,秦红灵,朱亦君,魏文学(1331)
生物质炭施用对土壤中氯虫苯甲酰胺吸附及消解行为的影响 …… 王廷廷,余向阳,沈燕,张超兰,刘贤进(1339)
水稻光合同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究:^{14}C连续标记法 …… 聂三安,周萍,葛体达,童成立,肖和艾,吴金水,张杨珠(1346)
油田污染土壤残油组成与特征参数分析 …… 王坚,张旭,李广贺(1352)
挥发性氯代烃在湿润土壤中的平衡吸附研究 …… 孟凡勇,刘锐,小林刚,万梅,余素林,陈吕军(1361)
田间土壤外源铜镍在小麦中的累积及其毒害研究 …… 黄锦孙,韦东普,郭雪雁,马义兵(1369)
中国磷消费结构的变化特征及其对环境磷负荷的影响 …… 马敦超,胡山鹰,陈定江,李有润(1376)
基于3MRA模型的填埋场安全填埋废物污染物阈值评估方法与应用研究 …… 袁英,席北斗,何小松,魏自民,李鸣晓,姜永海,苏婧,安达(1383)
填埋垃圾初始含水率对渗滤液产量的影响及修正渗滤液产量计算公式 …… 兰吉武,詹良通,李育超,陈云敏(1389)
生物反应器填埋场中邻苯二甲酸二丁酯的迁移转化 …… 方程冉,龙於洋,沈东升(1397)
岩溶区峰丛洼地植被指数的克里格分析 …… 杨奇勇,蒋忠诚,马祖陆,曹建华,罗为群,李文军,段晓芳(1404)
《环境科学》征订启事(1062) 《环境科学》征稿简则(1107) 信息(1135,1215,1396)

三江平原典型灌区井灌地下水中铁的随水迁移特征

邹元春[1], 于晓菲[1], 霍莉莉[1,2], 吕宪国[1], 姜明[1*]
(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 以三江平原典型水稻灌区——黑龙江省农垦总局建三江分局为例, 系统调查了该区地下水的铁含量特征, 并具体分析了铁通过井灌从地下水进入晒水池、稻田, 再通过排水进入多等级沟渠系统的季节迁移过程及铁在相应沉积物或土壤中的分布特征. 结果表明, 研究区地下水总铁质量浓度为(1.73 ± 0.41) mg·L^{-1}, 最大值为 11.4 mg·L^{-1}, 最小值 0.01 mg·L^{-1}, 变异系数 1.29%. 根据 2010 年水稻种植面积和当地实行的每亩额定灌水量推算, 从地下进入稻田和其它地表水体中的铁可达 4 976.40 t. 溶解性 Fe^{2+}、溶解性 Fe^{3+}、溶解性铁和总铁都具有明显的季节变化(6、7 月较高), 且沿水流方向以稻田积水中的含量较高. 晒水池和稻田对地下水铁的富集效应明显, 二者的总铁质量浓度分别达到地下水的 6.17 和 21.65 倍. 晒水池沉积物的总铁含量显著高于稻田、农渠和干渠(浓江河). 不同氧化铁形态中, 仍以晒水池沉积物中各形态铁氧化物的含量较高, 而稻田土壤、农渠和干渠沉积物之间没有显著性差异. 三江平原典型灌区地下水中的铁通过井灌进入地表水体中, 大部分被蓄积在晒水池和稻田中, 仅有少部分随稻田退水进入沟渠网, 并逐级沉淀在稻田和沟渠沉积物中. 铁在随水迁移过程中除了总量变化外, 还伴随着种类和形态的转化, 这些变化直接受水稻灌溉管理方式的影响, 具有明显的季节特征. 长期井灌或将导致铁在稻田土壤和沟渠沉积物中的富集, 具有潜在的污染风险.

关键词: 铁; 迁移; 地下水; 井灌; 三江平原
中图分类号: X131.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2012)04-1209-07

Waterborne Iron Migration by Groundwater Irrigation Pumping in a Typical Irrigation District of Sanjiang Plain

ZOU Yuan-chun[1], YU Xiao-fei[1], HUO Li-li[1,2], LÜ Xian-guo[1], JIANG Ming[1]
(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The iron concentration in groundwater, iron's seasonal migration from groundwater to sun-basked pools, paddy fields and drainage canals, and its distribution in the sediments/soils were observed in the Jiansanjiang Branch Bureau, Heilongjiang Agricultural Cultivation Bureau. The results suggested that the total iron mass concentration of the studied area was (1.73 ± 0.41) mg·L^{-1}, ranging from 0.01 to 11.4 mg·L^{-1}, with the variation coefficient of 1.29%. The annual iron input mass from groundwater to paddy fields and other surface water bodies was 4 976.40 t in 2010, according to the rice planting area and rating irrigation volume. Dissolved Fe^{2+}, Fe^{3+} and iron, as well as the total iron (dissolved and particle) had seasonal variation, with greater values presented in June and July. These waterborne irons in paddy field waters were greater than those in sun-basked pools and drainage canals. Obvious enrichment effect was observed in sun-basked pools and paddy fields, with their total iron mass concentrations were 6.17 and 21.65 times greater than that in groundwater. Either the total iron or iron oxides in sun-baked pool sediments were greater than that in paddy field soils, field canal and main canal sediments. The differences of the total iron and iron oxides in paddy field soils, field canal and main canal sediments were not significantly different. Considerable irons were precipitated within sun-basked pools and paddy fields during the transfer from groundwater to surface water, with a part of irons exporting into canals through drainage and then precipitated there. Not only the change of total iron mass, but the transformation of iron chemical speciation was observed during the transfer, which was affected by paddy irrigation management directly. The long-term irrigation pumping could cause the substantial enrichment of iron in paddy soils and canal sediments, resulting in the increase of potential pollution risk.

Key words: iron; migration; groundwater; irrigation pumping; Sanjiang Plain

铁是湿地中主要的氧化还原物质之一, 也是植物所必须的微量元素, 在土壤中的丰度仅次于氧、硅、铝, 可以直接以化学途径或间接通过微生物途径干预湿地中碳、氮、硫、磷等宏量元素循环[1~3], 对于湿地表生生物地球化学过程至为重要.

一般而言, 湿地的还原环境有利于提高铁的有

收稿日期: 2011-06-13; **修订日期**: 2011-09-27
基金项目: 国家自然科学基金项目(40901051, 40830535, 40871049); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-NA09-02)
作者简介: 邹元春(1981~), 男, 副研究员, 主要研究方向为湿地铁的生物地化过程与生态系统功能, E-mail: zouyc@neigae.ac.cn
* 通讯联系人, E-mail: jiangm@neigae.ac.cn

效性,因此一般不会出现缺铁现象. 然而,土壤中过量的铁也会对湿地植物造成毒害. 许多野外观测和水培实验都表明,高浓度的 Fe^{2+} 能影响水稻的株高,降低叶绿素含量和根系活性,减少大米干重[4],从而严重影响粮食产量[5].

20 世纪 50 年代以来,三江平原大规模的开垦已显著改变了区域土壤环境,原生湿地与开垦农田并存,成为湿地土壤受人类活动影响最为显著的热点区域之一[6]. 从 90 年代开始,稻田面积的持续激增迫使各农场大规模、长时期开采地下水作为灌溉用水. 本区地下水中铁含量较高,王保志等[7]测定的地下水总铁均值为 3.53 mg·L^{-1},最高达 36.0 mg·L^{-1}; 王勇等[8]测得的总铁均值为 4.85 mg·L^{-1},最高达 38.5 mg·L^{-1}; 潘月鹏[9]测得的总铁含量均值为 5.48 mg·L^{-1},最高 21.0 mg·L^{-1}. 这样,总量可观的铁从地下水中被带入地表水中,形成了一个持续的铁输入源. 这些铁部分被滞留于稻田中,部分沉积于各级排水沟渠底[10],剩下部分随水进入天然湿地或最后汇入鄂霍次克海[11].

本研究以黑龙江省农垦总局建三江分局为例,在调查区域地下水铁含量背景的基础上,追踪了铁从地下进入地上水体的迁移转化过程,分析了这种完全由人为活动导致的铁元素在不同环境单元的再分配,并探讨了对稻田和天然湿地的影响,有利于科学指导稻田水分管理,降低地表水铁污染风险,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

以黑龙江省农垦总局建三江分局为例,该分局下辖 15 个大中型国有农场,139 个管理区. 水稻产量占黑龙江省净调出量的近 1/5. 粮食总产占黑龙江垦区粮食总产的1/3,占黑龙江省粮食总产的1/9,商品率达 95%,被誉为“中国绿色米都”. 近年来由于水稻种植发展迅猛,水稻种植主要依靠地下水井灌. 2005 年地下水用水量占总用水量的 92.4%,其中农业灌溉用水量占地下水总用量的 99.6%; 到 2007 年,这 2 个比例分别达 96.8% 和 99.4%[12].

根据资料统计,建三江分局 2007 年水稻农业灌溉用水量为223 711万 m^3,铁含量取一般机井(10 ~ 50 m 埋深)的均值 6.89 mg·L^{-1}[8],则该年通过井灌进入稻田的总铁量达15 413.62 t. 2009 年水稻种植面积已达 730 万亩,预计累积抽取地下水可达 316 333万 m^3,约有21 795.14 t铁从地下水进入稻田. 如果进一步考虑到地下水铁含量随井位和井深的变化,则实际值还可能高于该估算值.

本研究在对全区的地下水面上调查的基础上,选择建三江分局辖区内的浓江河流域所属的湿地-农田-沟渠系统作为原位定位监测区(图 1). 该监测区位于洪河农场、浓江农场与鸭绿河农场交界处,洪河农场第八作业区浓江河天然河道附近,洪河国家级自然保护区上游,核心地理坐标为 47°43′N, 133°32′E.

1.2 研究方法

地下水通过机井被抽出后,经过机井口附近的晒水池简单曝晒,作为灌溉用水进入稻田,在泡田期(5 月 20 日左右)、黄熟期(8 月 20 日左右)排出,进入沟渠,并逐级汇流,离开研究区. 地下水样直接利用机井泵出,装入 PVC 集水瓶,利用 HCl 酸化后(pH = 2.0)冷藏保存; 地表水样(晒水池积水、稻田积水、农渠排水和干渠排水)直接装瓶后如法酸化冷藏保存; 各水体沉积物采用荷兰泥钻分别随机挑选 3 点钻取表层 0 ~ 5 cm 沉积物,装入采样自封袋后带回实验室部分风干、过筛供测总铁,部分冷藏供测不同形态的铁氧化物[13].

土壤溶液不同价态铁依据 GB/T 8538-1995 中铁测定标准,其中加入盐酸羟胺还原后测得总铁,不加则测得 Fe^{2+},二者之差为 Fe^{3+}; 沉积物总铁采用 HNO_3-HF-$HClO_4$ 消解 0.5 h 后采用原子吸收光度法测定; 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,再用分光光度法测定[14].

1.3 数据处理

不同水体、沉积物之间铁含量的差异采用 PASW Statistics 18.0 提供的单因素方差分析程序; 各铁含量分布图利用 OriginPro 7.5 绘制.

2 结果与分析

2.1 地下水铁含量调查

2010 年对全分局 30 个机井的实际调查(表 1),结果表明建三江分局地下水总铁质量浓度为(1.73 ± 0.41) mg·L^{-1},最大值为 11.4 mg·L^{-1},最小值 0.01 mg·L^{-1},变异系数 1.29%. 与前人调查结果相比,本研究得到的均值明显较低,这可能与所调查机井中深度机井比例较大(≥100 m 机井占调查总数的 40%)有关.

鉴于 2010 年水稻种植面积已达 870 万亩,按当

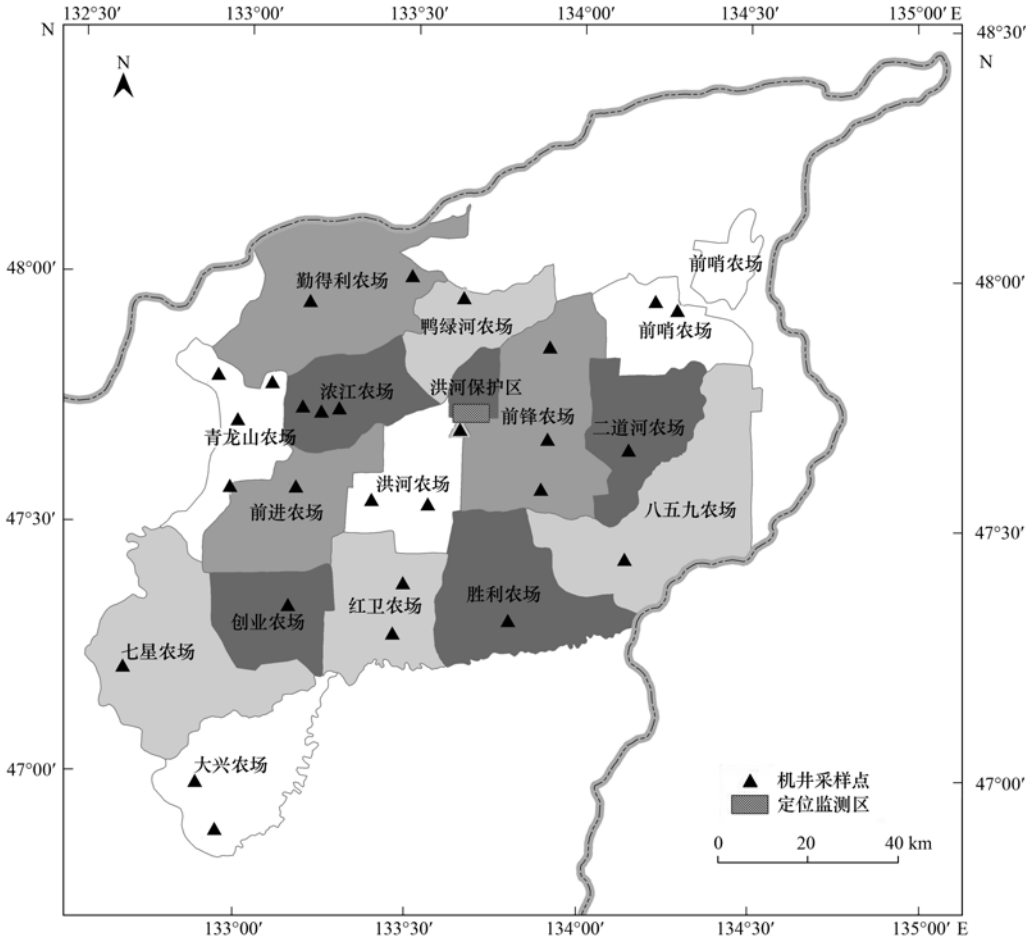

图 1　研究区示意

Fig. 1　Sketch map of sampling sites and monitoring plot

地实行的每亩额定灌水量计算,则该年累积抽取地下水可达377 000万 m^3. 根据地下水铁含量调查结果计算,2010 年从地下进入稻田和其它地表水体中的铁可达4 976. 40 t. 如果进一步考虑到地下水铁含量随井位和井深的变化,则实际值还可能高于该估算值.

2. 2　铁在研究区主要水体中的分布规律

比较晒水池水、稻田积水和沟渠排水中溶解性 Fe^{2+}(图 2),发现稻田积水 > 沟渠排水 > 晒水池水. 5 月和 9 月沟渠排水中的 Fe^{2+} 含量最高. 稻田积水中 Fe^{2+} 的最高含量出现在 7 月(0. 24 $mg\cdot L^{-1}$),最低含量出现在 9 月(0. 021 $mg\cdot L^{-1}$);从 5 ~ 9 月,沟渠排水中的 Fe^{2+} 含量逐渐降低. 晒水池水中的 Fe^{3+} 含量从 5 月(0. 048 $mg\cdot L^{-1}$)到 7 月(0. 068 $mg\cdot L^{-1}$)逐渐升高,从 7 ~ 9 月(0. 021 $mg\cdot L^{-1}$)呈下降趋势. 晒水池水、稻田积水和沟渠排水的溶解性 Fe^{2+} 的月均质量浓度分别为(0. 05 ± 0. 01)、(0. 11 ± 0. 04)和(0. 08 ± 0. 01) $mg\cdot L^{-1}$.

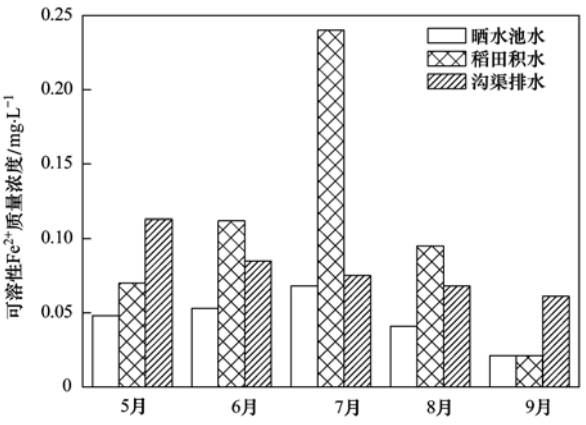

图 2　溶解性 Fe^{2+} 沿水流走向的变化

Fig. 2　Dissolved Fe^{2+} mass concentration in the water along the flow direction

比较晒水池水、沟渠排水和稻田积水中溶解性 Fe^{3+}(图 3),发现稻田积水 > 沟渠排水 > 晒水池水. 5 月稻田积水中 Fe^{3+} 含量最高,但是晒水池水中的 Fe^{3+} 含量是沟渠排水的 1. 57 倍. 9 月晒水池水中的

表 1 建三江地区地下水总铁含量

Table 1 Total iron concentration in Jiansanjiang area

序号	位置	机井深度/m	总铁含量/mg·L^{-1}
1	建三江分局	100	0.383
2	大兴农场场部	200	0.282
3	大兴农场 8 区	110	2.34
4	红卫农场场部	60	3.12
5	红卫农场 16 区	70	0.58
6	二道河农场场部	85	2.73
7	浓江农场场部	100	2.03
8	浓江农场老场部	75	11.4
9	浓江农场 6 区	110	1.47
10	青龙山农场场部	55	4.58
11	青龙山农场 6 区	90	3.50
12	青龙山农场 17 区	105	0.80
13	勤得利农场场部	100	0.21
14	勤得利农场 50 区	80	3.80
15	八五九农场场部	70	0.03
16	胜利农场场部	132	0.03
17	鸭绿河农场场部	69	2.55
18	鸭绿河农场 1 区	75	1.50
19	鸭绿河农场 6 区	100	2.40
20	创业农场场部	60	1.77
21	前进农场场部	120	2.26
22	前进农场 22 区	100	2.30
23	前哨农场场部	70	0.109
24	前哨农场 1 区	55	0.01
25	前锋农场场部	60	0.464
26	前锋农场 1 区	75	0.30
27	前锋农场 6 区	85	0.10
28	洪河农场场部	130	0.335
29	洪河农场 6 区	65	0.33
30	洪河农场 8 区	60	0.285

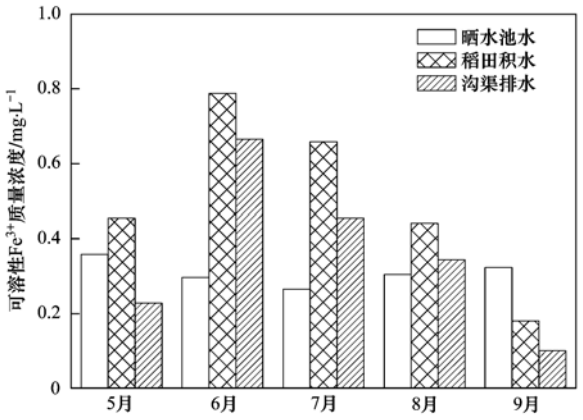

图 3 溶解性 Fe^{3+} 沿水流走向的变化

Fig. 3 Dissolved Fe^{3+} mass concentration in the water along the flow direction

Fe^{3+} 含量最高,其次依次是稻田积水和沟渠排水. 6 月稻田积水中的 Fe^{3+} 含量为 0.788 mg·L^{-1},明显高于其它月份,5 月和 8 月稻田积水中的 Fe^{3+} 含量接近,9 月稻田积水中的 Fe^{3+} 含量最低,仅为 7 月的 22.8%. 沟渠排水中 Fe^{3+} 含量的时间变化趋势与稻田积水类似. 5 月和 9 月晒水池水中的 Fe^{3+} 含量略高于其它月份. 晒水池水、稻田积水和沟渠排水的溶解性 Fe^{3+} 的月均质量浓度分别为(0.31 ± 0.02)、(0.50 ± 0.10)和(0.36 ± 0.10) mg·L^{-1}.

总溶解性铁含量的变化规律(图 4)与 Fe^{3+} 含量的规律类似. 所不同的是 6 月和 7 月稻田积水中总溶解性 Fe 的含量差异不大. 5 月晒水池水中的总溶解性 Fe 含量最高,其它月份差异不大. 晒水池水、稻田积水和沟渠排水的溶解性总铁的月均质量浓度分别为(0.36 ± 0.01)、(0.61 ± 0.13)和(0.44 ± 0.10) mg·L^{-1}.

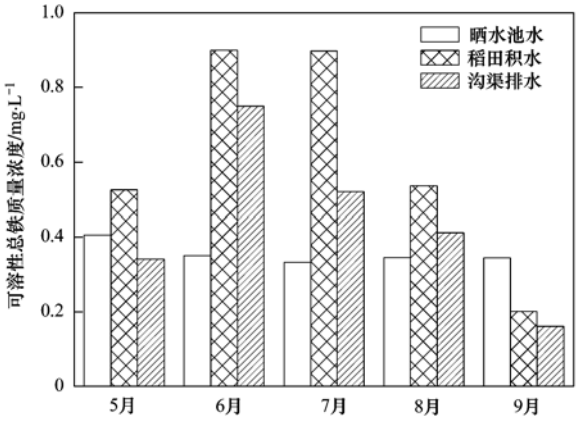

图 4 溶解性铁沿水流走向的变化

Fig. 4 Dissolved iron mass concentration in the water along the flow direction

稻田积水中总铁含量明显高于晒水池水和沟渠排水(图 5). 6 月和 8 月,沟渠排水中的总铁含量高于晒水池水. 5 月和 9 月,晒水池水中的总铁含量高于沟渠排水. 6 月(9.20 mg·L^{-1})稻田积水中的总铁

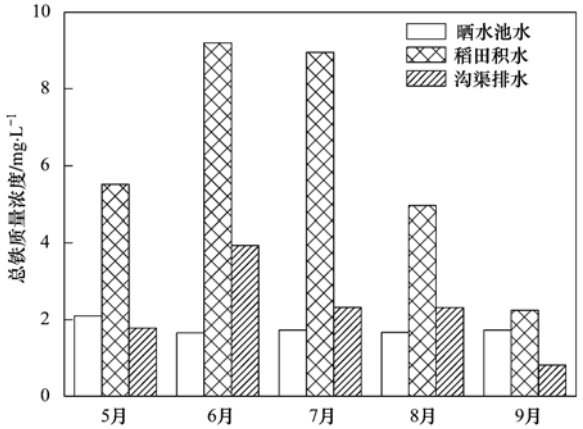

图 5 总铁沿水流的变化

Fig. 5 Total iron mass concentration in the water along the flow direction

含量略高于 7 月(8.95 mg·L^{-1}),二者明显高于其它月份,5 月和 8 月稻田积水中的总铁含量明显高于 9 月.6 月沟渠排水中的总铁含量最高,是 9 月的 2.19 倍.晒水池水中的总铁含量几乎不随时间变化.晒水池水、稻田积水和沟渠排水的总铁的月均质量浓度分别为(1.77 ± 0.08)、(6.17 ± 1.31)和(2.23 ± 0.51) mg·L^{-1}.

三江平原抽取地下水灌溉稻田,这也会使稻田表土铁含量大幅增加.以含铁水流的不同沉积地点的沉积物铁含量为例,生产过程中人工排灌水管理影响了土壤中铁的迁移和积累.深井水灌溉稻田前经过晒水池晾晒,然后经过沟渠进入稻田,井水中部分铁进入晒水池和沟渠沉积物中,部分被带进稻田,稻田退水时铁进入沟渠和河口沉积物,整个过程中受环境条件影响,还伴随铁形态的转化(图 6).由图 6 可以看出,晒水池沉积物的总铁含量显著高于稻田、农渠和干渠(浓江河).不同氧化铁形态中,仍然呈现出晒水池沉积物各形态铁含量较高,而稻田、农渠和干渠沉积物之间没有显著性差异(总铁:F = 1.856, P = 0.233;游离态铁:F = 2.956, P = 0.103;络合态铁:F = 4.584, P = 0.062;无定形铁:F = 4.862, P = 0.059).

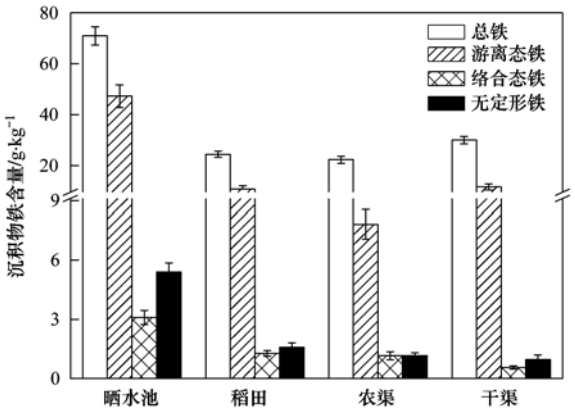

图 6　沉积物和土壤铁含量沿水流的变化

Fig. 6　Iron and iron oxides concentrations in the sediments/soils along the flow direction

3　讨论

3.1　影响铁迁移的环境因素

铁虽然能够参与土壤中多种生物地球化学过程,但其移动性却不高.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[3],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[15,16].已有研究表明,土壤氧化还原情势变化会导致铁的种类和溶解度的变化[17],进而影响铁的迁移.

从本研究的观测结果(图 2 ~ 5)可以看出,不同形态的铁具有相似的季节变化规律,这与稻田水分管理方式有关,一般 4 月开始泡田,5 月插秧之前部分排出,然后根据稻田水位的降低随时补灌,维持稻田覆水 5 cm 左右,直至 8 月水稻黄熟期排出.灌区沟渠的水文动态几乎都呈人为水稻生产活动所导致的季节动态中.因此,溶解性 Fe^{2+}、Fe^{3+}、溶解性铁和总铁含量都以 6、7 月较高,而 9 月最低.

铁在随水迁移过程中,从地下到晒水池、灌溉稻田,再随退水进入沟渠网,除了总量变化外,还伴随着形态的转化[18].对于溶解性 Fe^{2+} 而言(图 2),晒水池水和沟渠排水的月均质量浓度没有显著差异,而稻田积水的 Fe^{2+} 质量浓度较晒水池水显著增加了 120%.与溶解性 Fe^{2+} 相似,稻田积水中的溶解性 Fe^{3+}(图 3)和总铁(图 5)在晒水池水和沟渠排水中的质量浓度没有显著差异,而稻田积水中的质量浓度则显著增加,较晒水池水分别增加了 61% 和 249%.由此可见,从地下水输入地表水体中的铁主要蓄积在稻田积水中.然而有趣的是,稻田沉积物中的铁含量相对于排水沟渠而言,并没有显著的升高(图 6),这就表明稻田积水的较高铁含量可能来自于水分浓缩效应[19].这些铁大部分以 Fe^{3+} 离子或胶体形式、小部分以 Fe^{2+} 离子或胶体形式进入沟渠,因沟渠受纳水量的激增而被稀释,从而造成排水沟渠中的铁含量低于稻田积水的现象.

稻田积水中的 Fe^{2+} 含量虽然较高,但并未对水稻造成毒害.事实上,水稻由于根膜(iron plaque)的存在,能够有效抑止水稻对铁的过量吸收[20],尽管目前在建三江垦区尚未观测到水稻铁中毒现象,但随着铁从地下水到稻田的迁移和富集,这种潜在风险值得关注.

此外,从表 1 和图 5 可以看出,晒水池水中的总铁质量浓度较该点地下水的总铁质量浓度增加了 521%,表明通过对地下水的增温充氧,大部分 Fe^{2+} 被氧化沉淀而蓄积在池底沉积物中,显著降低了铁在稻田土壤中的过量累积风险.由此可见,晒水池对于降低稻田铁污染的作用很大,值得推广.

3.2　井灌铁迁移对湿地生态系统的影响

在还原环境下,产甲烷菌与高价铁还原菌在普通基质醋酸盐和氢气之间的竞争可以抑制甲烷的产生,这在稻田中已经得到了验证,铁处理被认为是稻

田减少甲烷排放的适宜策略[21]. 由此可见,铁对稻田温室气体排放具有显著影响. 反之,有机物也能影响铁的迁移转化. 有实验表明,天然有机碳(NOM)可以将亚铁稳定为铁氧化物胶体,并可能从湿地输出到地下水中[22]. 已有研究发现荷兰部分灌区由于地下水的大量抽取导致含铁渗流逐渐降低而不得不依靠含硫酸盐的地表水补充灌溉. 硫酸盐的还原导致了溶解性 Fe^{2+} 的氧化沉淀,从而降低了铁对磷酸盐的闭蓄效应,增加了地表水体的富营养化风险[23]. 此外,湿地中铁对氮循环和重金属迁移转化的影响也见诸报道[24,25]. 由此可见,铁随地下水的迁移转化将导致更为复杂的湿地物质循环变化,从而影响湿地固碳和净化水质等生态系统服务.

因此,下一步还需要深入研究通过井灌从地下水进入稻田、沟渠和天然湿地等地表水体的铁的环境行为,并分析由此带来的湿地关键生态过程和生态功能的改变,并在风险评价的框架下,结合地下水铁含量的空间差异,划分稻田不同铁污染等级,将具有重要的区域生态和粮食安全战略意义和湿地生物地球化学研究价值.

4 结论

(1)三江平原典型灌区地下水中的铁通过井灌进入地表水体中,大部分被蓄积在晒水池和稻田中,仅有少部分随稻田退水进入沟渠网,并逐级沉淀在稻田和沟渠沉积物中; 2010 年从地下进入稻田和其它地表水体中的铁约为4 976. 40 t.

(2)铁随水迁移过程中,除了总量变化外,还伴随着铁种类和形态的转化,大部分铁在迁移过程中形成了颗粒态或悬浮态铁络合物,其质量浓度比溶解态铁高 1 个数量级; 晒水池和稻田对地下水铁的富集效应明显,其总铁质量浓度分别达到地下水的 6. 17 和 21. 65 倍.

(3)铁在晒水池、稻田和沟渠等地表水体中的质量浓度还具有季节动态,以 6、7 月最高,而 5、9 月最低,直接受水稻灌溉管理方式的影响.

(4)地表水体沉积物中的铁都以游离态铁氧化物为主,络合态和无定形态的比重相对较低; 总铁含量以晒水池最高,稻田和不同等级沟渠中的总铁含量没有显著差异.

参考文献:

[1] Stumn W, Sulzberger B. The cycling of iron in natural environments: considerations based on laboratory studies of heterogeneous redox processes [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, **56**(8): 3233-3257.

[2] Straub K L, Benz M, Schink B. Iron metabolism in anoxic environments at near neutral pH [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2001, **34**(3): 181-186.

[3] 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.

[4] 蔡妙珍, 林咸永, 罗安程, 等. 过量 Fe^{2+} 对水稻生长和某些生理性状的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2002, **8**(1): 96-99.

[5] 冯双华, 贾凌辉, 苏以荣. 不同浓度亚铁培养液对水稻生长发育及产量构成的影响 [J]. 农业现代化研究, 1992, **13**(6): 362-365.

[6] Liu Z G, Ma X H. Effect of reclamation on soil environment in Sanjiang Plain [J]. Pedosphere, 1997, **7**(1): 73-78.

[7] 王保志, 王永勤, 王殿印, 等. 井灌水稻的天敌—二价铁离子 [J]. 黑龙江水利科技, 1997, (1): 9-12.

[8] 王勇, 柏钰春, 尹喜霖, 等. 三江平原生态地质环境分区研究 [J]. 水文地质工程地质, 2004, **31**(6): 11-18.

[9] 潘月鹏. 三江平原土地利用变化对铁迁移的影响研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.

[10] 邹元春, 吕宪国, 姜明, 等. 三江平原多级沟渠系统沉积物中铁的分布特征 [J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 256-260.

[11] Onishi T, Shibata H, Yoh M, *et al*. Mechanism for the production of dissolved iron in the Amur River basin-a modeling study of the Naoli River of the Sanjiang Plain [A]. In: From headwaters to the ocean: Hydrological changes and watershed management [C]. London: Taylor and Francis, 2008. 355-360.

[12] 赵清. 三江平原建三江地区农业需水量及水稻生产潜力研究 [J]. 现代农业科技, 2009, (9): 185-186, 188.

[13] 邹元春, 姜明. 湿地土壤铁的分析测定方法比较 [J]. 湿地科学, 2008, **6**(2): 136-141.

[14] 熊毅, 陈家坊, 马毅杰, 等. 土壤胶体(第二册) [M]. 北京: 科学出版社, 1985. 245-268.

[15] Poulton S W, Raiswell R. The low-temperature geochemical cycle of iron: from continental fluxes to marine sediment deposition [J]. American Journal of Science, 2002, **302**(9): 774-805.

[16] 潘晓峰, 阎百兴, 祝惠, 等. 三江平原水田灌溉-排水过程中铁形态变化及输出贡献 [J]. 环境科学学报, 2010, **30**(5): 1087-1092.

[17] Roden E E, Wetzel R G. Kinetics of microbial Fe (Ⅲ) oxide reduction in freshwater wetland sediments [J]. Limnology and Oceanography, 2002, **47**(1): 198-211.

[18] 潘晓峰, 阎百兴, 王莉霞. 三江平原河水中铁的形态研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(9): 2042-2047.

[19] Zou Y C, Lu X G, Jiang M. Dynamics of dissolved iron under pedohydrological regime caused by pulsed rainfall events in wetland soils [J]. Geoderma, 2009, **150**(1-2): 46-53.

[20] 刘文菊, 朱永官. 湿地植物根表的铁锰氧化物膜 [J]. 生态学报, 2005, **25**(2): 359-363.

[21] Jäckel U, Russo S, Schnell S. Enhanced iron reduction by iron supplement: a strategy to reduce methane emission from paddies [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005, **37**(11): 2150-2154.

[22] 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.

[23] Smolders A, Roelofs J G M. Internal eutrophication, iron limitation and sulfide accumulation due to the inlet of river Rhine water in peaty shallow waters in the Netherlands [J]. Hydrobiology, 1995, **133**(3): 349-365.

[24] Clément J C, Shrestha J, Ehrenfeld J G, *et al*. Ammonium oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron under anaerobic conditions in wetland soils [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005, **37**(12): 2323-2328.

[25] Thompson A, Chadwick O A, Boman S, *et al*. Colloid mobilization during soil iron redox oscillations [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(18): 5743-5749.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”和“中国精品科技期刊”称号

2011 年 12 月 2 日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”和“中国精品科技期刊”获奖名单.《环境科学》连续 10 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号和再次荣获“中国精品科技期刊”称号.

“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 33 No. 4

Apr. 15, 2012

CONTENTS

Quantitative Estimation Source of Urban Atmospheric CO_2 by Carbon Isotope Composition ····· LIU Wei, WEI Nan-nan, WANG Guang-hua, *et al.* (1041)

Moisture Sources of Guangzhou During the Freezing Disaster Period in 2008 Indicated by the Stable Isotopes of Precipitation ····· LIAO Cong-yun, ZHONG Wei, MA Qiao-hong, *et al.* (1050)

Optical Properties of Aerosol During Haze-Fog Episodes in Beijing ····· YU Xing-na, LI Xin-mei, DENG Zen-grandeng, *et al.* (1057)

Secondary Organic Tracers in Summer $PM_{2.5}$ Aerosols from Baima Spring Scenic Area, Yaan, Sichuan Province ····· DAI Dong-jue, LI Li, LIU Zi-fang, *et al.* (1063)

Source Profile and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Vehicle Exhaust ····· QIAO Yue-zhen, WANG Hong-li, HUANG Cheng, *et al.* (1071)

Platanus orientalis Foliar N% and $\delta^{15}N$ Responses to Nitrogen of Atmospheric Wet Deposition in Urban Area ····· WANG Yan-li, XIAO Hua-yun, XIAO Hong-wei (1080)

Distribution and Controlling Factors of Nitric Oxide Concentrations in Surface Seawater of Jiaozhou Bay and Adjacent Waters ····· XUE Chao, LIU Chun-ying, YANG Gui-peng, *et al.* (1086)

Uncertainty Characterization Approaches for Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Taihu Lake ····· GUO Guang-hui, WU Feng-chang, HE Hong-ping, *et al.* (1091)

Preliminary Analysis of Spatiotemporal Variation of Water Quality and Its Influencing Factors in the Jiulong River Watershed ····· HUANG Jin-liang, HUANG Ya-ling, LI Qing-sheng, *et al.* (1098)

Ecological Stoichiometric Relationships of Periphyton Community Elemental Composition and Variations of Water Quality in the Chaobai River ····· CUI Jing-guo, SHAN Bao-qing, WANG Shuai (1108)

Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality of Panxi River in Spring ····· ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, *et al.* (1114)

Weathering Seasonal Variations in Karst Valley in Southwest China ····· XIAO Qiong, SHEN Li-cheng, YANG Lei, *et al.* (1122)

Algal Community Structure and Water Quality Assessment on Drawdown Area of Kaixian Waters in Three Gorges Reservoir During Winter Storage Period ····· GUO Jing-song, XIE Dan, LI Zhe, *et al.* (1129)

Characteristics of Phytoplankton Community Changes in Dianshan Lake During Peak Period of Algal Blooms ····· XU Chun-yan, YANG Jie, MA Ming-rui, *et al.* (1136)

Nitrogen and Phosphorus Release from Herbaceous Vegetation Under Simulated Inundation Experiment of Water-Level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservior Area ····· WANG Jian-chao, ZHU Bo, WANG Tao, *et al.* (1144)

Output Characteristics of Non-point Phosphorus from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area Under the Special Rainfall ····· LI Zhen-wei, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, *et al.* (1152)

Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Urban Dusts from Hefei City ····· LI Ru-zhong, ZHOU Ai-jia, TONG Fang, *et al.* (1159)

Distribution and Pollution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Hedi Reservoir ····· ZHANG Hua-jun, CHEN Xiu-kang, HAN Bo-ping, *et al.* (1167)

Heavy Metals Distribution and Risk Assessment of Sediments in the Riverine Wetland of Sanmenxia Reservoir ····· AO Liang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, *et al.* (1176)

Regional Distribution and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Surface Sediments from Coastal Wetlands of the Yellow River Delta ····· LIU Zhi-jie, LI Pei-ying, ZHANG Xiao-long, *et al.* (1182)

Calculation of Environmental Dredging Depth of Heavy Metal Polluted Sediments in Zhushan Bay of Taihu Lake ····· JIANG Xia, WANG Wen-wen, WANG Shu-hang, *et al.* (1189)

Characteristics of PAHs Pollution in Sediments from Leizhou Coastal Marine Area, Liusha Bay and Shenzhen Bay ····· ZHAO Li-rong, SUN Sheng-li, KE Sheng (1198)

Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Black Carbon in Road Dusts from Typical Cities of China and India ····· PAN Su-hong, ZHANG Gan, SUN Ya-li, *et al.* (1204)

Waterborne Iron Migration by Groundwater Irrigation Pumping in a Typical Irrigation District of Sanjiang Plain ····· ZOU Yuan-chun, YU Xiao-fei, HUO Li-li, *et al.* (1209)

Research on Controlling Iron Release of Desalted Water Transmitted in Existing Water Distribution System ····· TIAN Yi-mei, LIU Yang, ZHAO Peng, *et al.* (1216)

Exploration of Newly-Formed Ferric as the Coagulant ····· YANG Xue, ZHANG Jing-cheng, GUAN Xiao-hong (1221)

Degradation of Medroxyprogesterone in Drinking Water by Ozone Oxidation ····· YUE Chan-yuan, MIAO Heng-feng, REN Hong-yan, *et al.* (1227)

Synthesis of Core/Shell Structured Magnetic Carbon Nanoparticles and Its Adsorption Ability to Chlortetracycline in Aquatic Environment ····· WANG Yi-xuan, ZHANG Di, NIU Hong-yun, *et al.* (1234)

Removal of Nickel from Aqueous Solutions Using Complexation-Ultrafiltration Process ····· QIN Shu, SHAO Jia-hui, HE Yi-liang, *et al.* (1241)

Degradation of Organic Pollutants by Photo-Fenton-Like System with Hematite ····· ZHANG Yu, GU Yan, YANG Hui, *et al.* (1247)

Study on the Degradation of Atrazine in Photo-Fenton-Like System Under Visible Light Irradiation Promoted by N-doped Ta_2O_5 ····· ZHAO Lu, DENG Yi-rong, DU Ying-xun, *et al.* (1252)

Degradation of Prometon by O_3/H_2O_2 ····· LI Shao-feng, SUN Chu (1260)

Photoelectrocatalytic Degradation Kinetics of Malachite Green by Pr-N Co-doped TiO_2 Photocatalyst ····· SHA Shuang, ZHOU Shao-qi, ZHANG Xiao-na, *et al.* (1267)

Experimental Study on Acid Mine Drainage Treatment Using Mine Tailings of Xiangsi Valley, Tongling, China ····· ZHANG Nan, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, *et al.* (1272)

Effect of Polymeric Aluminum-iron on EPS and Bio-flocculation in A^2/O System ····· WEN Qin-xue, LIU Ai-cui, CHEN Zhi-qiang, *et al.* (1278)

Effect of Temperature on Pollutant Removal and Nitrous Oxide Emission of Wastewater Nitrogen Removal System ····· ZHANG Ting-ting, ZHANG Jian, YANG Fang, *et al.* (1283)

Effect of Temperature on Stability of Nitrogen Removal in the ANAMMOX Reactor ····· LI Xiang, HUANG Yong, ZHENG Yu-hui, *et al.* (1288)

Phosphorus Removal Characteristics by Aerobic Granules in Normal Molasses Wastewater After Anaerobic Treatment ····· WANG Shuo, YU Shui-li, SHI Wen-xin, *et al.* (1293)

Physicochemical Characteristics of Granules with Different Size in a Granular Sludge System for Phosphorus Removal ····· LI Zhi-hua, ZHANG Yu-rong, YANG Fan, *et al.* (1299)

Denitrifying Bacteria of Constructed Wetland System Based on Nitrous Oxide Reductase Gene (*nosZ*) ····· WANG Xiao-jun, CHEN Shao-hua, ZHANG Zhao-ji, *et al.* (1306)

Improving Degradation Ability of an Aerobic Denitrifer by Ultraviolet Mutagenesis ····· YU Jia-jia, CHEN Jun, YANG Xuan, *et al.* (1313)

Characteristics of the Extracellular Polymeric Substances of a Heterotrophic Nitrifying Bacterium Strain ····· CHEN Zhe, ZHANG Bin, SEN Zhi-qiang, *et al.* (1318)

Study on Toxic Effects of Ammonia on Embryonic and Yolk-sac Stage Larvae of Rare minnow ····· WANG Zhi-jian, LU Zeng-hui, SHI Ping (1323)

Effects of Continuous Cropping of Vegetables on Ammonia Oxidizers Community Structure ····· MENG De-long, YANG Yang, WU Yan-zheng, *et al.* (1331)

Impact of Biochar Amendment on the Sorption and Dissipation of Chlorantraniliprole in Soils ····· WANG Ting-ting, YU Xiang-yang, SHEN Yan, *et al.* (1339)

Quantifying Rice (*Oryza sativa* L.) Photo-assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ^{14}C Labeling ····· NIE San-an, ZHOU Ping, GE Ti-da, *et al.* (1346)

Compositions and Diagnostic Ratios of Heavily Degraded Crude Oil Residues in Contaminated Soil in Oilfields ····· WANG Jian, ZHANG Xu, LI Guang-he (1352)

Study on Equilibrium Adsorption of Volatile Chlorinated Hydrocarbons on Humid Soils ····· MENG Fan-yong, LIU Rui, Kobayashi Takeshi, *et al.* (1361)

Toxicity and Accumulation of Copper and Nickel in Wheat Plants Cropped on Alkaline and Acidic Field Soils ····· HUANG Jin-sun, WEI Dong-pu, GUO Xue-yan, *et al.* (1369)

Change Traits of Phosphorous Consumption Structure in China and Their Effects on Environmental Phosphorous Loads ····· MA Dun-chao, HU Shan-ying, CHEN Ding-jiang, *et al.* (1376)

Research Based on 3MRA Model About the Risk Assessment Methods and Applications of the Landfill Waste ····· YUAN Ying, XI Bei-dou, HE Xiao-song, *et al.* (1383)

Impacts of Initial Moisture Content of MSW Waste on Leachate Generation and Modified Formula for Predicting Leachate Generation ····· LAN Ji-wu, ZHAN Liang-tong, LI Yu-chao, *et al.* (1389)

Transformation of Dibutyl Phthalate in Bioreactor Landfill ····· FANG Cheng-ran, LONG Yu-yang, SHEN Dong-sheng (1397)

Kriging Analysis of Vegetation Index Depression in Peak Cluster Karst Area ····· YANG Qi-yong, JIANG Zhong-cheng, MA Zu-lu, *et al.* (1404)

《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）

2012 年 4 月 15 日　33 卷　第 4 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 33　No. 4　Apr. 15, 2012

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：70.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行