

三江平原多级沟渠系统沉积物中铁的分布特征

邹元春^{1,2}, 吕宪国¹, 姜明^{1*}, 郝敏³

(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; 3. 青岛大学化学化工与环境学院, 青岛 266071)

摘要: 以三江平原典型多级沟渠系统(毛渠-农渠-斗渠-支渠-干渠)为对象, 研究了其 0~60 cm 沉积物全铁含量的空间分布特征. 结果表明, 多级沟渠系统中沉积物的平均铁含量为 $(3.02 \pm 0.10) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 各类型、各等级的沉积物铁含量具有极显著差异 ($F = 6.261, p \ll 0.001$), 最高值出现在农田斗渠 ($3.71 \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 中, 而最低值出现在湿地斗渠 ($2.43 \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 中. 整个多级沟渠系统沉积物各层的铁含量没有显著性差异 ($F = 0.093, p = 0.693$), 但与沟渠相邻湿地同深度土层的铁含量相比, 沟渠沉积物 0~10 cm 层、10~20 cm 层分别增加了 51.96%、62.22%. 铁虽然具有一定的可迁移性, 其最大累积处仅能延伸到第三等级的斗渠中, 而非逐级递增. 由于湿地保护和气候干热化, 现阶段本区含铁径流量有逐渐减少的趋势. 沉积物各层铁含量沿沟渠类型和等级的递变揭示了铁输移的历史变迁.

关键词: 铁; 沟渠系统; 沉积物; 三江平原

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0253-3301(2009)03-0889-05

Distribution of Sediment Iron of the Ditch System in Sanjiang Plain, Northeast China

ZOU Yuan-chun^{1,2}, LÜ Xian-guo¹, JIANG Ming¹, XI Min³

(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; 3. College of Chemical Engineering and Environment, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: The iron distribution of the multi-level ditch system (hair canal-field canal-lateral canal-branch canal-main canal) was studied through total iron determination of the sediments (0-60 cm). The results showed that the mean concentration was $(3.02 \pm 0.10) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Extremely significant difference was observed between different ditch level ($F = 6.261, p \ll 0.001$), and the highest and the lowest concentration were present in the farmland lateral canal ($3.71 \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and wetland canal ($2.43 \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), respectively. The difference of different sediment layers was not significant ($F = 0.093, p = 0.693$), while the iron concentrations of 0-10 cm and 10-20 cm sediments were 51.96% and 62.22% higher than that of the natural wetland soil nearby, respectively. Iron can transfer with the runoff in a certain extent, but it was not cumulated along the ditch system with the largest cumulation location at the third level. The runoff containing iron decreased gradually because of the wetland protection and climate change nowadays. The horizontal transfer of iron along the ditch system indicated the timing and intensity of iron loss in the past since the canals were dredged.

Key words: iron; ditch system; sediment; Sanjiang Plain

铁是自然环境中最基本的氧化还原性质活泼的变价金属元素之一, 在地壳中的丰度为 6.71%, 仅次于氧、硅、铝, 广泛存在于岩石、土壤、水、生物和大气溶胶中, 影响并反映了各圈层的多种环境过程^[1]. 我国早在 19 世纪 30 年代就开始对水稻土铁的还原淋溶、氧化淀积及其对层状粘土矿物的掩盖作用进行研究^[2]. 随着研究方法及手段的提高, 目前对铁循环的研究更加深入, 主要集中在铁循环对营养物质、重金属的吸收及释放等领域^[3].

湿地是陆地向海洋输送铁的重要桥梁, 在全球铁生物地球化学循环中作为源、汇和/或转化器而影响着湿地生态系统本身及其相邻生态系统的结构、功能与健康^[4]. 沟渠作为湿地输铁过程的主要廊道,

铁在沉积物中的赋存状况如实记载了其输移的历史过程与强度. 潘月鹏^[5]的研究表明, 目前三江平原通过各级沟渠和河流汇入黑龙江(松花江汇流前)、松花江和乌苏里江的可溶性铁分别达到 200×10^5 、 40×10^5 和 $70 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 这些铁除部分沉积于江底沉积物外, 最终都进入鄂霍次克海, 参与并影响海洋初级生产等生物地球化学过程; 陈振楼等^[6]对贵州红枫湖的研究发现, 铁在水-沉积物界面的含量较

收稿日期: 2008-03-30; 修订日期: 2008-05-24
基金项目: 国家自然科学基金项目(40501030); 中国科学院东北振兴科技行动计划项目(DBZX-2-024); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX 2-YW-425-02)
作者简介: 邹元春(1981~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为湿地生态过程, E-mail: zouyc@neigae.ac.cn
* 通讯联系人, E-mail: jiangm@neigae.ac.cn

高, 界面以下随沉积深度增加铁含量稍呈递减趋势; 瞿文川等^[7]对蚌湖的研究表明, 铁在沉积物表层 0~ 1 cm 处含量较高, 表层以下含量略低且变化不大; 王立群等^[8]对长江口崇明东滩的研究发现, Fe^{3+} 在沉积物中的含量从表层向下逐渐递减的, 而 Fe^{2+} 含量逐渐增加.

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, 成为人类活动影响下湿地变化最为显著的热点区域之一^[9], 对局地的水文与气候特征产生了显著影响^[10, 11]. 大规模的排水渠道形成了错综复杂的廊道网络系统, 成为污染物从农田向河流传输的通道, 影响了区域水环境和湿地生态系统健康, 对湿地生态系统构成了严重威胁, 成为几乎所有生态环境问题的根源^[12~ 16].

本研究通过比较不同土地利用类型和不同等级的排水沟渠沉积物中铁的垂直和水平分布特征, 探讨了铁随沟渠径流的运移规律及其影响因素, 可以为明确排水沟渠控制下湿地土壤铁的流失过程并评价由此带来的环境效应, 重建过去的降水径流特征并预测未来铁对地表水的污染水平, 实现三江平原“湿地-农田”系统的可持续发展提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区设置于中国科学院三江平原沼泽生态试验站(三江站)及其附近的洪河农场. 三江站是我国生态系统研究网络中唯一从事沼泽湿地以及农业合理利用的野外台, 位于我国三江平原东北部, 东经 133°31', 北纬 47°35', 为“中国生态系统研究网络”的本站, 其沼泽类型、植被类型和土壤类型, 在三江平原均具有代表性.

三江站属于温带湿润半湿润大陆性季风气候, 年平均气温 1.9℃, $\geq 10^{\circ}C$ 的年有效积温为 2 300℃, 年降雨量为 500~ 650 mm, 集中在 6~ 9 月, 占全年降水的 70%, 无霜期为 120~ 125 d. 本区主要植被都是能适应水多的沼生、湿生植物和少数中生植物, 主要以各种苔草 (*Carex* spp.)、小叶章 (*Calamagrostis angustifolia*)、丛桦 (*Betule fruticosa*)、沼柳 (*Salix brachypoda*) 等为主. 洪河农场的主要农作物类型为大豆和水稻. 研究所选择的多级沟渠系统都是在原自然湿地的基础上开挖而成, 具有相同的自然环境背景, 为本研究提供了不同等级沟渠的可比性^[14].

1.2 采样方法

在试验站及附近区域选择了纵横不同土地利用

类型——湿地(wetland, W)、大豆地(dry land, D)和水田(paddy land, P)的部分沟渠网络系统, 该系统涵盖了毛渠(hair canal, HC)、农渠(field canal, FC)、斗渠(lateral canal, LC)、支渠(branch canal, BC)和干渠(main canal, MC) 5 个等级(图 1), 彼此曾经连通(如湿地沟渠)或一直连通且有明显的径流过程(如农田沟渠). 其中 HC 和 FC 主要接受其两侧农田排水, 排水快, 流量小, 蓄水时间短而且控制面积小; LC 挖的一般比较深, 流量居中, 除了直接接受两侧农田排水以外, 还接受来自 FC 的沟渠径流, 然后汇入 BC, 最后汇入 MC. BC 和 GC 汇水面积大, 流量大, 蓄水时间较长.

2005 年 10 月, 在每一条沟渠上选择交汇点下游 3 m 左右位置分层采集 0~ 10 cm、10~ 20 cm、20~ 40 cm、40~ 60 cm 深的沉积物样品, 采样深度为 0~ 60 cm, 每个点设有 3 个重复并均匀混合, 共 32 个样品.

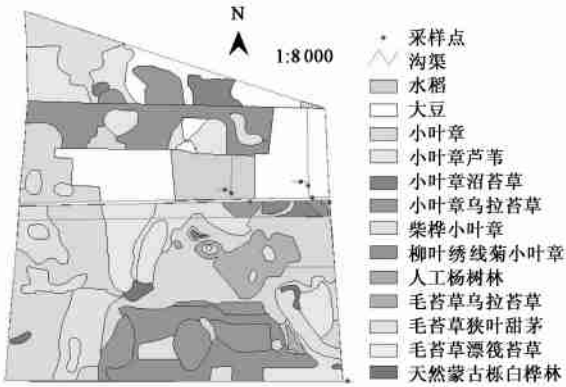


图 1 三江平原排水沟渠等级示意

Fig. 1 Skeptic map of multi-level ditch system in Sanjiang Plain

1.3 分析方法

所有沉积物样品经风干、过 200 目筛, HNO_3-HClO_4-HF 消解 0.5 h 后, 原子吸收分光光度法测定全铁含量. 具体方法如下: 取消溶液根据铁含量适当稀释后(检出限为 0.03~ 5.0 $mg \cdot L^{-1}$), 在空气-乙炔火焰中将铁化合物原子化, 在波长 248.3 nm 处测量铁基态原子对铁空心阴极等特征辐射的吸收, 根据标准曲线求得溶液中的铁浓度, 换算出沉积物样品中的铁含量. 测定时用 $SrCl_2$ ($1\ 000\ mg \cdot L^{-1}$) 屏蔽 Al、P、Ti 离子对铁测定的干扰^[17].

1.4 数据处理

方差分析采用 SPSS 11.0 提供的分析程序; 各铁含量分布图利用 OriginPro7.5 绘制.

2 结果与讨论

2.1 多级沟渠系统沉积物中铁的均值分布

基于沉积物各层铁含量均值的单因素方差分析表明, 各类型、各等级的沉积物铁含量具有极显著差异($F=6.261, p \ll 0.001$), 如图 2.

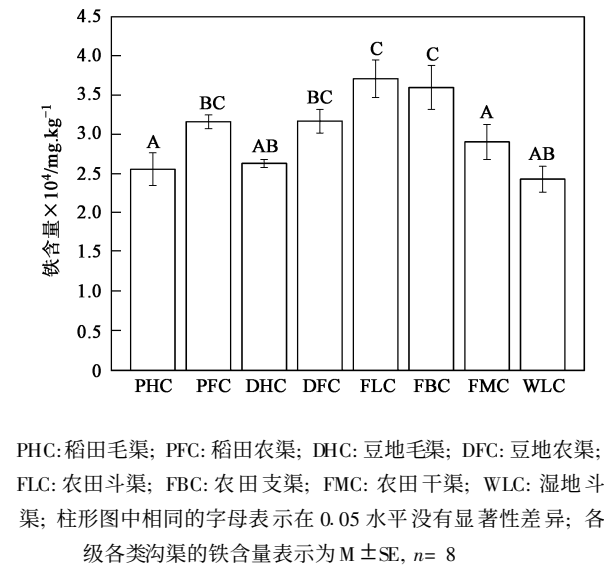


图 2 多级沟渠系统沉积物中铁含量的均值分布
Fig. 2 Distribution of sediment iron (mean value) in multi-level ditch system

由图 2 可以看出, 所有沟渠沉积物的平均铁含量为 $(3.02 \pm 0.10) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中最高值出现在农田斗渠 ($3.71 \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 中, 而最低值出现在湿地斗渠 ($2.43 \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 中.

若将湿地斗渠除外, 则铁在农田的沟渠等级系统中的分布呈单峰曲线, 峰值出现在农田斗渠中, 峰

值两侧对称分布. 具体而言, 斗渠以下等级铁含量逐渐升高, 处于末等毛渠的含量显著低于较高级的农渠和斗渠, 而农渠略低于斗渠, 但二者之间没有显著性差异; 斗渠以上等级铁含量逐渐降低, 斗渠略高于支渠, 但二者之间没有显著性差异, 而支渠显著高于干渠.

由此可见, 铁虽然具有一定的可迁移性, 但其随水迁移能力较养分元素小^[14,18], 表现为最大铁含量累积沟渠等级仅能延伸到第三等级的斗渠. 铁沿多级沟渠系统的运移并非逐级富集, 而是受到沟渠构型、径流水文、径流水质和植被覆盖等多种因素共同作用的结果.

不同土地利用类型中, 同属末等的旱地毛渠略高于稻田毛渠, 但二者之间没有显著性差异; 第四等级的旱地农渠略高于稻田农渠, 但二者之间没有显著性差异; 而同属第三等级的农田斗渠则显著高于湿地斗渠, 后者约为前者的 65.55%. 依据沟渠沉积物铁含量的差异可以确定土壤铁的流失能力大小为: 豆地 > 稻田 > 湿地. 由此可见疏干有利于土壤铁的活化, 排水有利于土壤铁的流失.

2.2 多级沟渠系统沉积物铁含量的剖面分布

各级沟渠系统沉积物铁含量的垂直分布如图 3. 从中可以看出, 8 个剖面 8 按形态的不同大致可以分为 4 类: PHC、DHC、FBC 和 FMC 属于单峰曲线, 最小值都出现在 40~60 cm 层, 而峰值大都出现在 10~20 cm 层 (PHC 例外, 出现在 20~40 cm 层); PFC、DFC 和 FLC 属于单谷曲线, 最大值出现在 0~10 cm 层, 而谷值分别出现在 20~40 cm 层和 10~20 cm 层; PFC 和 BC 都属于峰谷曲线, 峰值出现在 10~

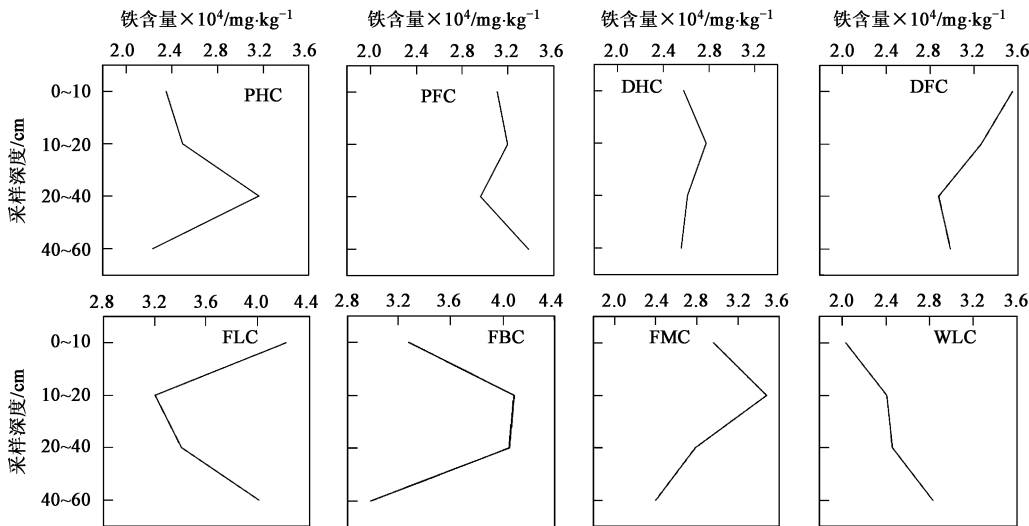


图 3 多级沟渠系统沉积物中铁含量的剖面分布

20 cm 而谷值出现在 20~ 40 cm; WLC 单独一类, 属于随深度增加而增加的线型分布。

就不同等级看, PHC 与 DHC 近似; PFC 与 DFC 近似, 最小值(谷值) 较 PHC 和 DHC 因为时间滞后而从 40~ 60 cm 层上升到 20~ 40 cm 层; FLC 基本上承袭了 PFC 和 DFC 的规律, 只是谷值因为时间滞后而从 20~ 40 cm 层上升到 10~ 20 cm 层; FBC 与 FLC 的明显不同可能得益于 WLC 的补充; FBC、FMC 自底层而上先增加, 到表层后再减少的分布规律可能揭示了现阶段因为湿地保护和气候干热化导致的本研究区域含铁径流量的减少, 表明目前铁的流失状况有所减轻, 从另一方面也表明铁对地表水的污染逐渐降低。

从最末等级的 PHC 到第三等级 FLC, 铁含量的谷值由于现阶段沟渠排水中铁流失量的减少而逐渐上移, 表现出重建过去铁流失事件“以空间代表时间”的时空耦合性。

各剖面各层铁含量的极差都不超过最小值的 50%, 表明各层的差异有限 对各层铁含量的单因素方差分析也证明了整个多级沟渠系统沉积物各层的铁含量没有显著性差异($F = 0.093, p = 0.693$), 如图 4。

与沟渠相邻湿地同深度土层的铁含量相比, 沟渠沉积物 0~ 10 cm 层、10~ 20 cm 层分别增加了 51. 96%、62. 22%, 表明湿地土壤铁的流失主要来自

表层土壤, 特别是农田排水; 而 20~ 60 cm 层的铁含量约等于同深度湿地土层, 其中 20~ 40 cm 层和 40~ 60 cm 层的差异仅为 3. 12% 和 6. 26%, 从而证明了沟渠与湿地的土壤铁背景值没有显著的差异。

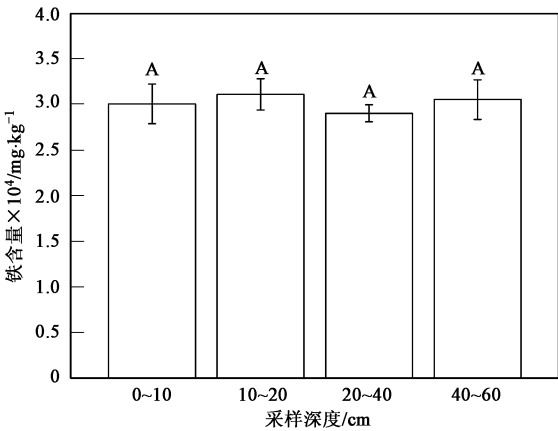


图 4 多级沟渠系统沉积物各层的铁含量均值($M \pm SE, n = 8$)
Fig. 4 Sediment iron of each layers in multi-level ditch system

2.3 各层沉积物铁含量沿沟渠类型和等级的递变
对沉积物 0~ 10 cm 层铁含量的逐类逐级分析表明, 单峰曲线的形态与整个系统的均值分布局势完全一致, 峰值和最大值都出现在 FLC 中, 而最小值出现在 WLC 中. 同一级别中, DHC、DFC 分别略大于 PHC、PFC, 而 WLC 显著小于 FLC, 如图 5(a) . 对 10

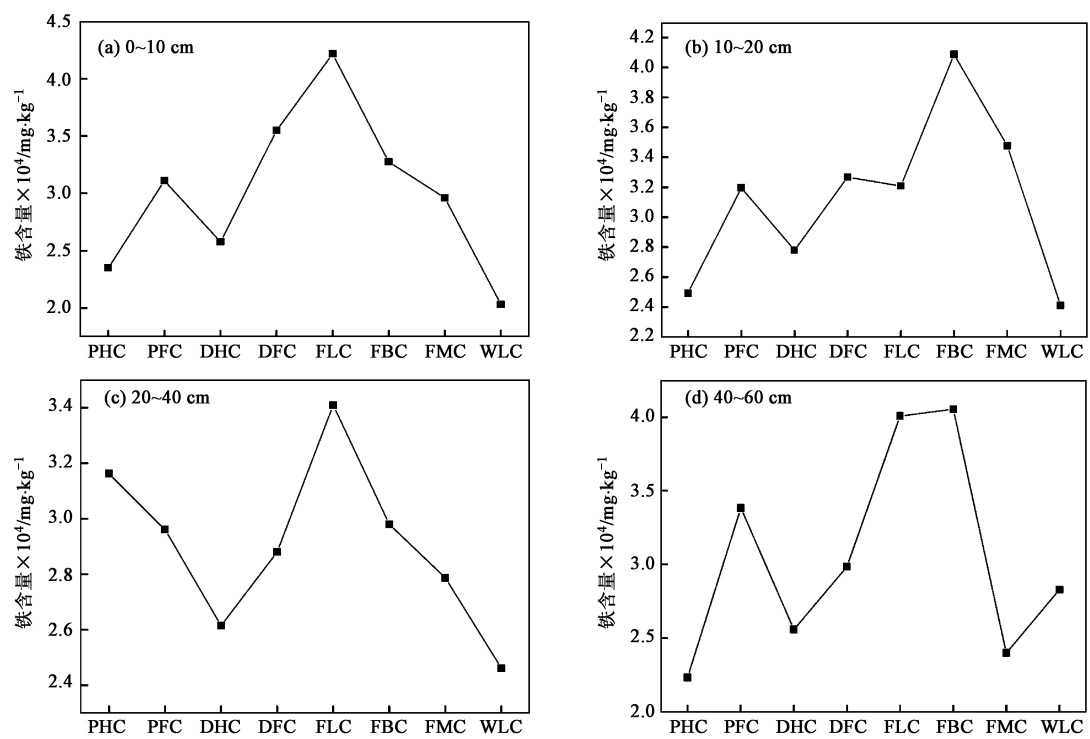


图 5 沉积物铁含量沿多级沟渠系统中的递变

~ 20 cm 层的分析表明, 单峰曲线形态与 0~ 10 cm 层近似, 只是峰值和最大值都出现在 FBC 而不是 FLC, 如图 5(b)。

根据基本沉积原理, 10~ 20 cm 层的形成时间要高于 0~ 10 cm 层, 表明过去某个阶段铁的可迁移能力较现阶段更强, 可能揭示了当时较为湿润的气候下较大的径流量。整个 10~ 20 cm 层铁含量较 0~ 10 cm 层的增加可能得益于当时还在起着排水作用的湿地沟渠的贡献, 如 WLC 的铁含量较现阶段便高出了 18.65%。

对 20~ 40 cm 层的分析表明, 除 PHC 的铁含量明显较高(可能来自采样误差)外, 整个单峰曲线形态与 0~ 10 cm 层非常近似。最大值和均值都略低于上面两层, 可能揭示了更早期降水少径流量少的阶段。由于径流量较小, 铁的最大累积处也随之降低等级, 回到 FLC, 如图 5(c)。

对 40~ 60 cm 层的分析表明, 除了 WLC 显著增加外, 整体趋势与 10~ 20 cm 层非常近似, 最高值出现在 FBC, 且各点的均值高于 20~ 40 cm 层, 可能揭示了又一次降水多径流量大的阶段。值得注意的是 WLC 的含量比以上各层都高, 可能揭示了沟渠开挖之初同深度湿地土壤的背景值, 如图 5(d)。

3 结论

(1) 三江站及附近区域多级沟渠系统中沉积物的平均铁含量为 $(3.02 \pm 0.10) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 各类型、各等级的沉积物铁含量具有极显著差异, 最高值出现在农田斗渠 $(3.71 \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 中, 而最低值出现在湿地斗渠 $(2.43 \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 中。

(2) 铁沿多级沟渠系统的运移并非逐级富集, 而是受到沟渠构型、径流水文、径流水质和植被覆盖等多种因素共同作用的结果。

(3) 各级沟渠沉积物的铁含量剖面分布表明现阶段因为湿地保护和气候干热化导致的本区含铁径流量的减少趋势。

(4) 沉积物各层铁含量沿沟渠类型和等级的递

变揭示了铁输移的历史变迁。

参考文献:

- [1] Rudnick R L, Gao S. The composition of continental crust[A]. In: Rudnick R L, ed. Treatise on Geochemistry, Vol. 3, The Crust[C]. Amsterdam: Elsevier Press, 2004. 1-64.
- [2] 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.
- [3] 姜明, 吕宪国. 湿地生物地球化学循环及其环境效应[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 493-499.
- [4] Reddy K R, D'Angelo E M, Harris W G. Biogeochemistry of Wetlands[A]. In: Sumner M E, ed. Handbook of Soil Science[C]. Boca Raton: CRC Press, 2000. G89-G119.
- [5] 潘月鹏. 三江平原土地利用变化对可溶性迁移的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007. 41-42.
- [6] 陈振楼, 黄荣贵, 万国江. 红枫湖沉积物-水界面 Fe, Mn 的分布和迁移特征[J]. 科学通报, 1992, 37(21): 1974-1977.
- [7] 瞿文川, 余源盛. 鄱阳湖湿地土壤中 Fe, Mn 的迁移特征及其与水位周期变化的关系[J]. 湖泊科学, 1996, 8(1): 35-42.
- [8] 王立群, 戴雪荣, 刘清玉, 等. 长江口崇明东滩地貌发育过程中的活性铁变化及环境意义[J]. 海洋通报, 2006, 25(3): 45-51.
- [9] Liu Z G, Ma X H. Effect of Reclamation on Soil Environment in Sanjiang Plain[J]. Pedosphere, 1997, 7(1): 73-78.
- [10] Wang Y Y, Yang Y X. Effects of agricultural reclamation on the hydrological characteristics in the Sanjiang Plain, China[J]. Chin Geograph Sci, 2001, 11(2): 163-167.
- [11] Yan M H, Deng W, Chen P Q. Recent trends of temperature and precipitation disturbed by large-scale reclamation in the Sanjiang Plain of China[J]. Chin Geograph Sci, 2003, 13(4): 317-321.
- [12] 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.
- [13] 郝敏, 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.
- [14] 郝敏, 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.
- [15] 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.
- [16] 陆琦, 马克明, 倪红. 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.
- [17] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. (第二版). 北京: 中国农业出版社, 1990. 162-163.
- [18] 金泰龙. 三江平原沼泽土壤中几种重金属元素的地球化学特征[A]. 见: 黄锡畴. 中国沼泽研究[C]. 北京: 科学出版社, 1988. 153-161.