

三江平原湿地开垦前后土壤溶液中 Fe²⁺ 的分布特征

潘月鹏^{1,2,3}, 阎百兴¹, 张 柏¹, 王德宣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, 吉林 长春 130012; 2.中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 3.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 为探讨湿地开垦对土壤溶液中可溶性铁迁移的影响, 2006 年 6~9 月对三江平原沼泽湿地、草甸湿地和水田土壤溶液中 Fe²⁺ 含量进行了原位观测。结果表明, 不同利用方式土壤溶液中 Fe²⁺ 的含量在表层和底层较低, 且比较稳定; 中间某层明显较高, 且具有明显的季节变化。湿地开垦对土壤中 Fe²⁺ 向周围水体的迁移过程具有影响, 这一过程发生的位置在表层以下 20~40 cm 深度, 而不是在表层。

关键词: 二价铁; 分布特征; 土壤溶液; 三江平原

中图分类号: S153.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)04-1582-04

Distribution of Ferrous Iron in Porewater Profiles of Different Land Use Patterns in Sanjiang Plain, Northeast China

PAN Yue-peng^{1,2,3}, YAN Bai-xing¹, ZHANG Bai¹, WANG De-xuan¹

(1.Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2.Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The shortage of dissolved iron was considered to be one of the main factors limiting the primary productivity in the Okhotsk Sea and the northwest part of North Pacific. While the changes of land use patterns nearby affect the iron input of these water areas. Sanjiang Plain, where there was largest wetlands distribution, is one of the important parts of Amur Basin. Therefore, it could be a significant source of iron supplying to Amur and the ocean. However, large scale wetlands reclamation to agricultural fields during last decades had led to the obvious change of land use pattern, which may induce the significant changes in biogeochemical cycling and the transportation of iron. By now, there is a poor understanding for its behavior in the region. The distribution of ferrous iron, pH, and redox potential (*E_h*) in pore water of three typical land use types was determined with *in-situ* method from June to September, 2006. The results showed that Fe²⁺ concentration was nearly stable in deeper and surface water in all observations. The minimum concentration often occurred at a depth of surface layer (0 cm) or deeper layer (60 cm), and the concentrations were stable with little variety. However, the maximum concentration occurred at a depth of 20 cm for paddy, 40 cm for *Deyeuxia angustifolia* and the concentrations changed with seasons. The findings are not only interesting in the behavior of Fe, but also used as important evidences in considering the iron transport mechanism from soil to river nearby.

Keywords: ferrous iron; distribution characteristics; porewater; Sanjiang Plain

三江平原是黑龙江流域湿地面积分布最广的地区之一, 是河流和海洋中可溶性铁的重要来源, 在维

持鄂霍茨克海和西北太平洋的初级生产力中具有重要作用^[1,2]。近几十年来, 三江平原大面积湿地被垦殖为农田^[3], 区域气候趋暖也引起湿地类型由常年积水的沼泽湿地向沼泽化草甸演化^[4], 剧烈的土地利用变化对可溶性铁在地表水中的迁移产生了明显影响^[5]。由于不同利用方式土壤溶液中可溶性铁的含量与迁移特征差异较大^[6], 土地利用发生变化必然也会影响可溶性铁从土壤向周围水体的迁移过程, 尤其是

收稿日期: 2007-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(40771035); 中国科学院东北地理与农业生态研究所学科领域前沿项目(KZCX3-SW-NA3-15); 中日合作项目“三江平原铁的生物地球化学作用研究”

作者简介: 潘月鹏(1981—), 男, 山东济南人, 博士研究生, 主要研究方向为环境污染及其调控。E-mail: xdy_23@163.com

通讯作者: 阎百兴, 研究员, 博士生导师。E-mail: yanbx8@163.com

Fe^{2+} 可能对这一变化的响应更为明显。

本文通过2006年6—9月间对三江平原两种类型沼泽湿地及垦殖后的农田不同剖面层次土壤溶液中 Fe^{2+} 含量的定点原位观测,重点探讨其季节变化与剖面分布特征,为深入理解三江平原大面积湿地开垦对可溶性铁在土壤溶液中的迁移所产生的影响提供基础资料。

1 材料与方法

观测样点选在中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站内,该站位于三江平原腹地典型沼泽湿地分布区(47°35'N, 133°31'E),海拔55~65 m,属温带大陆性季风气候,年平均气温1.9℃,1月平均气温-21℃,7月平均气温22℃,年平均降雨量550~600 mm,主要集中在7~9月,无霜期125 d左右。沼泽试验场为一典型碟形洼地,从外围到中心依次分布灌丛杂草、小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)、毛苔草(*Carex lasiocarpa*)等多种湿草甸和草本沼泽;农田试验场距沼泽试验场200 m左右,有大豆田和水稻田各7 hm²,由小叶章草甸开垦而来。

选取常年积水的毛苔草沼泽(腐殖化沼泽土)、季节性积水的小叶章沼泽化草甸(草甸白浆土)、水稻田3种生态类型(分别标记为M、X、S),于2006年6—9月间进行了6次同步对比观测。每种生态类型布置一个样点,按0(表层水和土壤界面处)、20、40、60 cm 4个层次埋设Eh电极(中国科学院南京土壤研究所生产)、土壤溶液原位采集装置(中国科学院北京地理与资源科学研究所生产)。

土壤溶液提取的同时测定Eh;土壤溶液提取后用U-10水质速测仪(日本HORIBA公司)现场测定pH;利用RPA 100铁含量分析仪(江苏江环分析仪器有限公司)现场测定水样中 Fe^{2+} ,最低检测限为0.01 mg·L⁻¹,工作原理见文献[7、8]。在对每批样品进行测定之前均用去离子水调零,用标准溶液进行校准,设置空白样以控制分析质量。

2 结果与讨论

2.1 土壤剖面中 Fe^{2+} 的分布特征

X、S、M 3种土地利用方式不同层次土壤水中 Fe^{2+} 的含量具有一个共同的分布特征,即表层(0 cm)和底层(60 cm) Fe^{2+} 的浓度比较稳定,而其他层随季节出现了不同程度的变化,尤其是S点20 cm和X点40 cm深度季节变化最明显(图1),即6月份一般较

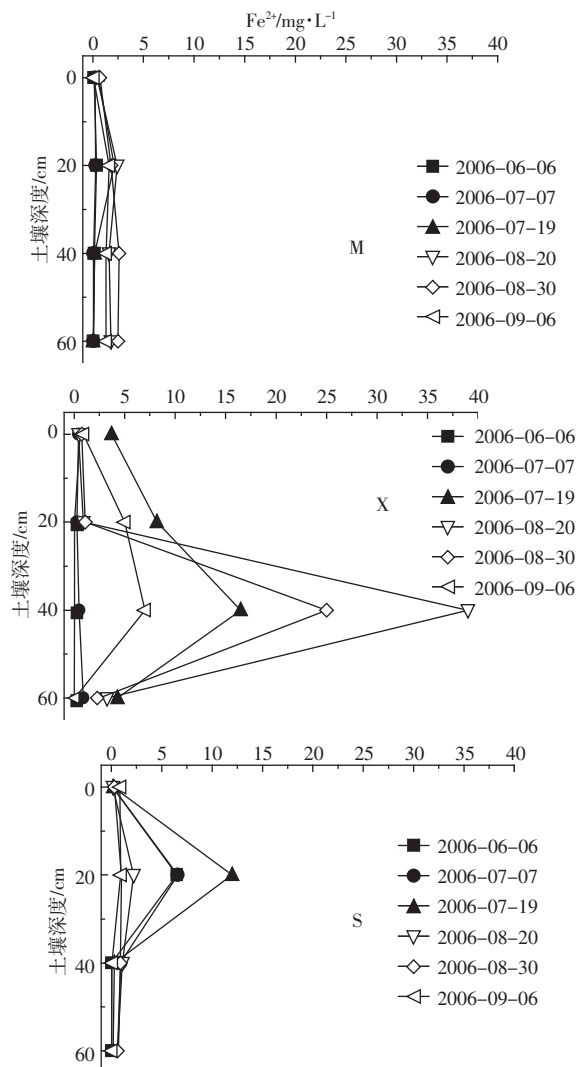


图1 不同利用方式下土壤溶液中 Fe^{2+} 变化

Figure 1 Concentration of ferrous iron in soil porewater

低,7~8月份逐渐升高并出现峰值(8月下旬),9月份开始降低。这与该深度土壤温度的季节变化特征^[9]相似,反映了土壤温度对 Fe^{2+} 含量的影响。

相比而言,S点剖面中 Fe^{2+} 的峰值出现的时间(7月中旬)早于X,之后便急剧下降并低于观测开始时期 Fe^{2+} 的含量,这与农业活动有很大的关系。三江平原水稻田一般使用含有高浓度铁离子(6~7 mg·L⁻¹)的地下水灌溉(5—8月份),这一方面增加了铁离子的来源,同时使土壤表层以下形成还原环境,影响了土壤剖面中铁的分布;灌溉结束后,水田自9月份开始排水晒田,土壤由还原环境转向氧化环境, Fe^{2+} 被氧化, Fe^{2+} 含量大幅度的降低。

观测初期,3种利用方式土壤剖面溶液中 Fe^{2+} 在各层次中差异不大,但在其他时期一般是以某一层最高,如S点20 cm和X点40 cm Fe^{2+} 浓度在每次观测

中均比其他层高,这与各点土壤剖面特征相吻合,因为以上层次土壤中均发现了大量铁锈斑的存在。究其原因,S点剖面 20 cm 深度即犁底层,为隔水层,土壤黏重;同时也是水稻根系末梢所在层,通过根系输送的 O_2 很难到达这一层次,该深度为还原环境, Fe^{2+} 相对较高。X点所在的研究区,即小叶章湿地多没有泥炭层或仅有泥炭薄层,泥炭薄层或腐泥主要出现在 35~50 cm 层,土壤有机质高, E_h 多低于 -200 mV (图 2),是典型的还原环境,这导致 X 点剖面 40 cm 层 Fe^{2+} 相对较高。由图 2 还可以看出 M 点上下层之间 E_h 虽然也较低,但差异不大,这导致 Fe^{2+} 在整个观测期间上下各层次中并没有太大的差异。

三江平原地表下普遍发育有较厚(5~17 m)的黏土层,透水性差,加之季节冻层的存在,地表水向下的补给较弱,主要以径流方式将可溶性铁从地表输送到周围水体。水田和湿地周围修建了完善、密集的排水渠系,土壤水的侧向排泄通道畅通,从而成为土壤水中 Fe^{2+} 向周围水体迁移的主要方式。从图 1 可以看出 3 种利用方式土壤表层水中 Fe^{2+} 的浓度与其他层相比较低,由于这一层在铁的生物地球化学循环中具有重要的作用,形成这种现象的原因还需要进一步的关注。同时这也可能暗示着 Fe^{2+} 从陆地向周围水体迁移的主要过程发生在土壤表层以下某深度,而不是在表层。

2.2 影响土壤剖面中 Fe^{2+} 分布的因素

2.2.1 土壤温度

土壤温度主要通过影响微生物活性、有机质分解

及氧化还原反应的速率来影响铁离子的分布^[10,11]。在温度较高的淹水状态下,微生物活动频繁,有机质分解快,加速了氧的消耗,还原性铁离子产生的多而且快,从而造成同一层次 Fe^{2+} 含量的季节差异,这在峰值所在层次最为明显。

土壤温度对剖面 Fe^{2+} 分布的另一种影响方式即改变土壤的物理特性。在观测初期(7月中旬以前)X、M 两点 40 cm 左右深度均有冻层存在,影响了土壤中 Fe^{2+} 的向下迁移,导致 60 cm 深度含量也较低。冻层消失后,土壤温度逐渐升高,上下层之间水分的连通性增加,下层剖面中 Fe^{2+} 的含量便有了不同程度的增加。这也可能是 X 点 60 cm 深度 Fe^{2+} 含量季节差异的原因。

2.2.2 土壤溶液的 pH 值

pH 值对亚铁的溶解性具有重要影响,pH<9 时有利于亚铁以 Fe^{2+} 离子的形态存在^[12]。但统计分析表明 pH 值与 Fe^{2+} 含量之间的相关性并不显著,这主要是因为本研究中测试的 pH 值变化幅度较小(X、M、S 3 点分别变化于 5.94~6.96、5.68~6.39、6.77~7.40 之间^[6]),均处于弱酸性至中性,pH 值的影响程度接近,没有显示出明显差异,使得在类型、深度和时间上没有表现出对 Fe^{2+} 含量的影响。因此,在三江平原土壤溶液的 pH 值不是控制 Fe^{2+} 含量的主要因子。

2.2.3 土壤溶液的 E_h 值

土壤溶液中 Fe^{2+} 的存在与否与氧化还原状况(E_h 值)也有着密切关系。一般认为湿地土壤中 Fe^{2+} 在 120 mV 时即被氧化为 Fe^{3+} ^[13],由于对转化速率而言,温度和

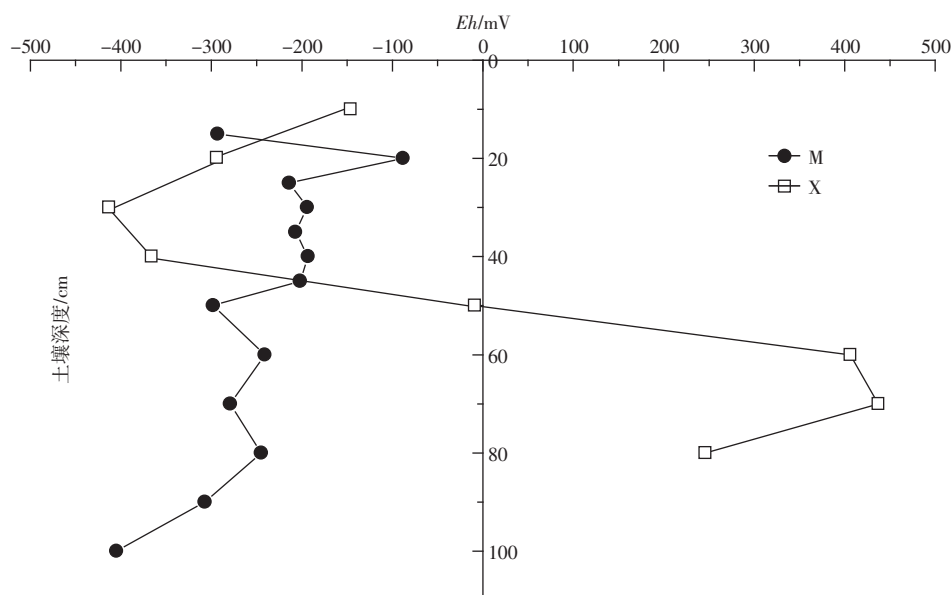


图 2 土壤溶液中 E_h 的剖面变化(7 月 12 日)

Figure 2 Variation of E_h in porewater through soil profiles (July 12)

pH 值也是重要的影响因子,所以这些氧化还原电位并不是精确的阈值,使得本研究在较高的 Eh 值条件下(X、M、S3 点分别变化于 196~387、130~384、49~123 mV 之间^[6])也出现了 Fe^{2+} 。第二个重要原因可能与土壤种类有关,即土壤性质的差异导致 Fe^{2+} 出现的临界 Eh 值可能是 200 mV^[14],也可能高于 200 mV^[15]。

Eh 值不仅是 Fe^{2+} 出现的一个限制条件,而且对 Fe^{2+} 含量在土壤剖面中的分布规律也有影响。由图 1 和图 2 对比可知, Eh 值与 Fe^{2+} 垂直变化趋势具有相似性,即剖面某层次相对较低的 Eh 值对应着该层 Fe^{2+} 的峰值(S 点 20 cm 和 X 点 40 cm); Eh 值在上下层变化幅度较小时 Fe^{2+} 变化也不明显。因此, Eh 值对 3 种利用方式土壤溶液中 Fe^{2+} 出现垂直差异具有重要影响。

3 结 论

野外原位观测试验表明,在三江平原地区,不同利用方式土壤溶液中 Fe^{2+} 的含量在表层和底层较低而且季节变化不明显;而中间某层(S 点 20 cm 和 X 点 40 cm) Fe^{2+} 的含量明显高于其他层次,且具有明显的季节变化。湿地开垦必然影响土壤中 Fe^{2+} 向周围水体的迁移过程,而这一过程发生的位置在表层以下 20~40 cm 深度,而非表层。为合理评价湿地开垦对可溶性铁迁移的影响,土壤表层以下可溶性铁的迁移机制应该是下一步研究的重点;同时应该开展土壤溶液中铁的赋存形态及其稳定性研究,尤其是铁离子形成的有机络合物。

参考文献:

- [1] 潘月鹏, 阎百兴, 张凤英, 等. 三江平原毛茛沼泽和小叶章沼泽化草甸湿地水体中可溶性铁的分布特征[J]. 湿地科学, 2007, 5(1): 89-96.
PAN Yue-peng, YAN Bai-xing, ZHANG Feng-ying, et al. Distribution of water-soluble ionic iron in marsh water of *Deyeuxia Angustifolia* and *Carex Lasiocarpa* in the Sanjiang Plain[J]. *Wetland Science*, 2007, 5(1): 89-96.
- [2] 潘月鹏, 阎百兴, 路永正, 等. 三江平原水环境中可溶性铁的含量水平与分布特征研究[J]. 地理科学, 2007, 27(6): 820-824.
PAN Yue-peng, YAN Bai-xing, LU Yong-zheng, et al. Distribution of water soluble iron in water environment of Sanjiang Plain [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(6): 820-824.
- [3] 刘兴土, 马学慧. 三江平原大面积开荒对自然环境影响及区域生态环境保护[J]. 地理科学, 2000, 20(1): 14-19.
LIU Xing-tu, MA Xue-hui. Influence of large scale reclamation on natural environment and regional environmental protection in the Sanjiang Plain[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(1): 14-19.
- [4] 刘振乾, 刘红玉, 吕宪国. 三江平原湿地生态脆弱性研究 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(2): 241-244.
LIU Zhen-qian, LIU Hong-yu, LU Xian-guo. Ecological fragility of wetlands in Sanjiang Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(2): 241-244.
- [5] 潘月鹏, 阎百兴, 徐治国, 等. 三江平原湿地开垦对地表水中可溶性铁分布特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 899-903.
PAN Yue-peng, YAN Bai-xing, XU Zhi-guo, et al. Impact of wetland reclamation on water soluble ionic iron distribution in surface water of the Sanjiang Plain [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2007, 26(3): 899-903.
- [6] 潘月鹏, 阎百兴, 路永正, 等. 不同土地利用类型土壤剖面溶解性铁的含量与迁移特征[J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 1234-1236.
PAN Yue-peng, YAN Bai-xing, LU Yong-zheng, et al. Distribution of water soluble ionic iron in vertical pore water profiles from humus mire soil and brown meadow soils in Sanjiang Plain, northeast of China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(6): 1234-1236.
- [7] 王洁青, 陈文闯, 张金锐. 地下水中亚铁含量的快速测定方法 [J]. 化学世界, 1997, (10): 546-547.
WANG Jie-qing, CHEN Wen-chuang, ZHANG Jin-rui. Determination of ferrous iron in groundwater using the portable analyser [J]. *Chemical Word*, 1997, (10): 546-547.
- [8] Stookey L L. Ferrozine—a new spectrophotometric reagent for iron[J]. *Analytical Chemistry*, 1970, 42: 779-781.
- [9] 宋长春, 杨文燕, 徐小锋, 等. 沼泽湿地生态系统土壤 CO_2 和 CH_4 排放动态及影响因素[J]. 环境科学, 2004, 25(4): 1-6.
SONG Chang-chun, YANG Wen-yan, XU Xiao-feng, et al. Dynamics of CO_2 and CH_4 concentration in the mire soil and its impact factors[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(4): 1-6.
- [10] 熊 毅. 土壤胶体[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 241-290.
XIONG Yi. Soil colloid[M]. Beijing: Science Press, 1985. 241-290.
- [11] 于天仁. 水稻土的物理化学[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 185-192.
YU Tian-ren. Physical and chemical properties of paddy soil[M]. Beijing: Science Press, 1983. 185-192.
- [12] 贾国东, 钟佐桑. 铁的环境地球化学综述[J]. 环境科学进展, 1999, 7(5): 74-84.
JIA Guo-dong, ZHONG Zuo-shen. Review on environmental geochemistry of iron[J]. *Advances in Environmental Science*, 1999, 7(5): 74-84.
- [13] William J M, James G G. Wetlands[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1986. 94-95.
- [14] 唐罗忠, 生原喜久雄, 户田浩人, 等. 湿地林土壤的 Fe^{2+} , Eh 及 pH 值的变化[J]. 生态学报, 2005, 25(1): 103-107.
TANG Luo-zhong, HAIBARA Kikuo, TODA Hiroto, et al. Dynamics of ferrous iron, redox potential and pH of forested wetland soils [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 103-107.
- [15] 潘淑贞. 潜育化水稻土物质的转化及其区分的指标体系[C]//马义杰, 陈家坊. 水稻土物质变化与生态环境. 北京: 科学出版社, 1999. 145-158.
PAN Shu-zhen. Transformation of materials in gleying paddy soil and its indicator system for distinguishing [C]//Ma Yi-jie, CHEN Jia-fang. Change of materials in paddy soil and its effect on eco-environment. Beijing: Science Press, 1999. 145-158.