

# 消融期湿地水环境及其中铁和锰的变化特征

叶雅杰<sup>1</sup>, 杨铁金<sup>1</sup>, 罗金明<sup>2\*</sup>, 杨帆<sup>3</sup>

(1.齐齐哈尔大学化工学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006; 2.齐齐哈尔大学理学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006; 3.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

**摘要:**通过野外取样和室内分析,探讨了冻融期间中高纬地区芦苇沼泽湿地水环境的特征。结果表明,铁、锰元素的时空变化特征对湿地的水环境具有指征作用。冻结期整个湿地表层聚集大量水分,消融后土体的水分明显减少。冻结期低洼处湿地土壤表层含水率达  $0.8 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  (过饱和状态),洼地边缘土壤最高含水率为  $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ,微高地土壤整个土层的含水率最小。pH 随着地势逐渐下降而逐渐降低(都表现弱酸性)。低洼部位土壤有机质含量最高,且随着消融过程有机质的增加幅度达 55%,随着地势的增高有机质的含量以及变化幅度逐渐减小。小尺度内不同地貌的湿地土壤水文特征影响湿地铁、锰空间分布格局以及迁移转化特征。从水平空间来看,铁的水平分布表现为随着地势的抬升含量逐渐降低;从土壤垂直剖面来看,一般表现为随着剖面的加深,铁、锰的含量逐渐增加,并且淀积层含量明显高于其他层次。湿地土壤中的铁和锰在消融过程中的含量发生明显的变化。消融期间,湿地土壤表层铁的增量达 80%以上,洼地边缘的表层也有一定增加,微高处土壤表层的铁、锰含量增加幅度最小。沼泽土壤的铁和锰元素含量与土壤的含水率呈正相关,与土壤的 pH 值呈负相关,与土壤中有机质的含量还表现出正相关的特征。通过对湿地中铁、锰元素的时空变化规律可以对湿地水环境特征以及演变特征进行指征。

**关键词:**湿地水环境;冻融作用;指示元素

**中图分类号:**X832 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)12-2571-08

## Hydro Environment of Wetland and Variation Iron and Manganese During the Thawing Season

YE Ya-jie<sup>1</sup>, YANG Tie-jin<sup>1</sup>, LUO Jin-ming<sup>2\*</sup>, YANG Fan<sup>3</sup>

(1.Department of Chemical Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China; 2.Department of Science, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China; 3.Northeast Institution of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Science, Changchun 130012, China)

**Abstract:** Iron and manganese occur naturally in wetland, and are proved to be a good indicator for the variation of hydro environment in wetland. It was reported that freezing and thawing action would not only affect on soil moisture, but also change the chemical properties obviously, i.e. ascending value pH, increasing the content of organic matter and change the state of metal element occurrence. This research is to explore the hydro environment variation translocation and formation change in reed marsh during the frozen and thawing season. A field experiment was conducted along a 600 m distance transect. Maximum elevation difference was approximately 60 cm. Results indicated that trace of iron and manganese translocation was a good indicator for the variation of wet hydro environment during the freezing and thawing season. A large amount of water was enriched in surface horizon in freezing season, and moisture decreased a lot when thawed completely. The water content in reed marsh reached as high as  $0.8 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  (to be over-saturated), as a comparison, merely  $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  in the marginal of wetland. pH would decrease along landscape elevation. The low elevation would enrich organic matter content, and increased by 55% during the freezing and thawing season, but minor variation in micro high. Hydro environment at local scale would affect the iron and manganese profile and the translocation process. The iron content would descent along ground elevation. In addition, the iron and manganese would enrich along soil profile and accumulate most in B horizon. The iron and manganese content would change significantly during the thawing period, increasing by 80% in micro low (reed marsh). It's interesting to note the concentration of iron and manganese were positive correlation with soil moisture and organic matter but negative correlation with value of pH.

**Keywords:** hydro environment; freezing and thawing action; indicating element

收稿日期:2011-04-22

基金项目:国家自然科学基金项目(41071022);齐齐哈尔大学青年教师科研启动项目(2010M-K26)

作者简介:叶雅杰(1979—),女,黑龙江大庆人,硕士,讲师,从事湿地水环境监测研究。E-mail:Yeyajie2960@126.com

\* 通讯作者:罗金明 E-mail:luojm1000@sina.com

铁和锰广泛存在于自然界中,对湿地水环境的变化具有指征意义<sup>[1]</sup>,但对铁、锰等微量元素的探讨仅局限在非冻融季节。我国有 1/3 以上的湿地处于中高纬度地区,例如东北地处我国的最高纬度地区,这部分地区湿地广布(湿地面积达  $730 \times 10^4 \text{ hm}^2$ )<sup>[2]</sup>。受中高纬度地带气候的影响,该地区每年 10 月下旬开始上冻,翌年 4 月开始消融,最大冻土深度达 2 m 以上<sup>[3]</sup>。研究表明,冻融条件下不仅土壤含水率会发生明显的变化,土壤的其他物理性质和化学性质(pH、有机质状态和金属元素赋存形态等)都会发生明显的变化<sup>[4-6]</sup>。湿地是元素(包括铁、锰和其他重金属元素)赋存、迁移的场所,但是关于铁、锰在冻融期的转化特征研究较少,尽管已有研究表明,用铁、锰来作指示性元素研究在非冻融环境下湿地中的变化规律具有重要意义<sup>[7-8]</sup>。冻融作用对湿地水环境形成和演替的作用机理尚有待进一步研究。

本文选取具有代表性的北方湿地定点监测和分析冻融期间湿地的理化性质以及铁、锰元素的变化,旨在探讨中高纬地区的湿地水环境的演替规律。研究结果对于认识湿地土壤性质和在冰冻消融期的变化特征、进一步利用和保护湿地提供了很好的基础资料,对揭示对我国北方湿地演变具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

选择嫩江沿岸黑龙江省齐齐哈尔市南部城郊湿地作为研究对象( $47^{\circ}00' \sim 47^{\circ}52' \text{ N}$ ,  $123^{\circ}33' \sim 124^{\circ}28' \text{ E}$ ),地域平坦,海拔 146 m,属中温带大陆性季风气候,年降水量 415 mm,受季风影响,冬季寒冷且漫长,春季干旱多风,蒸发强烈,年平均气温  $3.4^{\circ} \text{ C}$ ,1 月份(最冷月)平均气温  $-19.4^{\circ} \text{ C}$ ,冻土最深达 2.25 m。研究区湿地水分来自于天然降水、嫩江江水补给以及齐齐哈尔市排放的生活污水。植被包括芦苇(*Phragmites australis* (Calv.) Trin.)、香蒲(*Typha angustifolia* L.)、寸草苔(*Carex duriuscula* C.A.Mey)和水葱(*Scirpus validus* Vahl)等。研究区的景观类型按海拔高度的变化依次为芦苇/香蒲沼泽(覆盖度 55%以上)、寸草苔湿地(覆盖度 60%以上)、虎尾草/羊草草甸(30%~50%)。

在研究区代表性景观类型依次布点,定义为样点 1、样点 2、样点 3 和样点 4。其中样点 1 为芦苇沼泽(海拔高度 145.1 m),常年积水;样点 2 位于常年积水边缘,植被为芦苇/拂子茅/寸草苔草甸混生(海拔高度 145.5 m);样点 3 季节性积水,植被为苔草/羊草草甸

(海拔高度 145.6 m),样点 4 年内很少时间积水(仅在洪泛期短时积水),植被为羊草/青蒿混生植被群落(海拔高度 145.65 m)。样点 1 至样点 4 的直线距离为 600 m。在各取样点分别取土样回室内分析土壤物理特性和化学特征,取样深度为 0~130 cm,每隔 10 cm 取样回室内分析其理化性质。

### 1.2 研究方法

烘干法测定土壤含水率。采样时间分别为 2009 年 3 月下旬和 5 月中旬。样品用烘干箱在  $105^{\circ} \text{ C}$  条件下烘 24 h,测量土壤含水率,根据土壤的容重数据转换成体积含水率。

测定 pH 值的水土比为 1:2.5。风干样品 10 g 加入 25 g 去离子水,用磁力搅拌器搅拌 5 min,静置 30 min 后用 pH 计测定样品 pH 值。

铁的含量用邻菲罗啉分光光度法测定。取 0.5 g 底泥样品加入混酸体系(6 mL 硝酸+3 mL 氢氟酸+2 mL 高氯酸),使用温压双控微波消解/萃取仪(MDS-6 型)在  $180^{\circ} \text{ C}$  控温消解 8 min,离心机在  $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  离心 10 min,吸取上清液,用邻菲罗啉分光光度法测定。锰的含量以同样的方法测定。有机质含量用硫酸-高锰酸钾氧化法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 研究区土壤特征

研究区的微地貌特征表现明显。整个研究剖面土壤质地类型根据以粉沙质土壤为主。洼地的土壤为典型的沼泽土,土体构型为:O 层(0~30 cm),冰积层,夹杂着植被的枯枝落叶;H 层(30~50 cm),腐殖质层,半分解的根系和落叶夹杂,有明显的铁、锰锈斑,过渡明显;G 层(50 cm 以下),潜育层,灰白色,大量铁、锰锈斑,粉砂夹细砂层,弱酸性。微高处土壤为草甸土,其土壤剖面特征为:A(0~15 cm)-AB(15~60 cm)-B(60~120 cm),Cu(120 cm 以下)。

整个坡面土壤分布格局决定了湿地可溶性元素在冻融季节的转化特征的复杂性。季节性渍水导致氧化还原交替进行,使剖面氧化还原状况产生差异,形成了土壤层次的分化,具有锈纹、锈斑的层次表明湿地土壤中的铁发生了移动或局部淀积<sup>[9]</sup>,这个层次对湿地土壤干湿交替以及其他的土壤特征具有指示性作用<sup>[10]</sup>。

### 2.2 土壤的冻融过程

由于冻融期间(每年 11 月至次年 6 月),土壤温度在剖面上呈逆向变化,土体剖面自上而下出现了较

大的温度差,这种土壤温度的垂直变化格局对化学元素的运移特征有明显影响<sup>[7]</sup>。由图1可见,冬季,地温迅速下降,土壤的冻结缘形成并逐渐向下发展,到3月中旬冻结缘达到1.68 m;然后随着天气的变暖,表层地温迅速上升,冻土表层开始消融,上下冻结缘相向变化,到5月下旬相汇,冻土完全消融(图1b)。

土壤冻结后,大部分水分以固态形式储存在冻层中,导致湿地中的水分迁移能力大大降低。水势梯度和温度梯度共同作用,促使地下水向土壤表层迁移。典型的冻融过程可能对湿地中铁、锰元素的分布产生影响。

### 2.3 冻融期土体中水分、pH 和有机质的变化特征

图2为2008年3月和5月取样点对应土壤的水

分、pH 和有机质的变化特征。

从图2a可见,尽管取各样点毗邻,但是不同样点位置的理化性质的时空格局存在明显差异。湿地中心处(样点1)土体剖面冻结期表层含水率达  $0.8 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ,含水率随着剖面而逐渐减小,在60 cm 以下土壤的含水率迅速减小,100 cm 深度的含水率仅为  $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。冻结期,洼地边缘10~20 cm 土层的含水率最高,为  $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ,50 cm 以下土层的含水率迅速下降。微高地土壤整个土层的含水率在  $0.3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  左右。另外,冻融过程中,研究区土体的含水率发生了一定变化。5月,样点1的0~30 cm 土层的含水率迅速下降,30~50 cm 土层的含水率略微增加,其原因可能是表层消融后导致亚表层土壤大量滞水所致。样点2

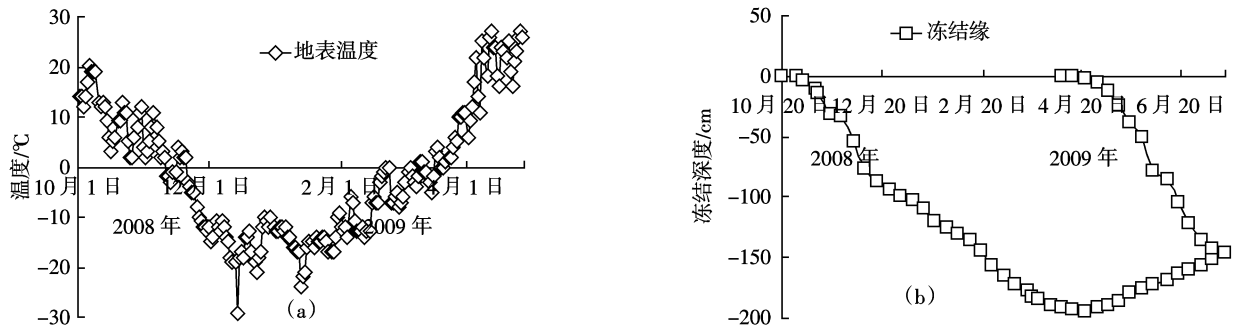
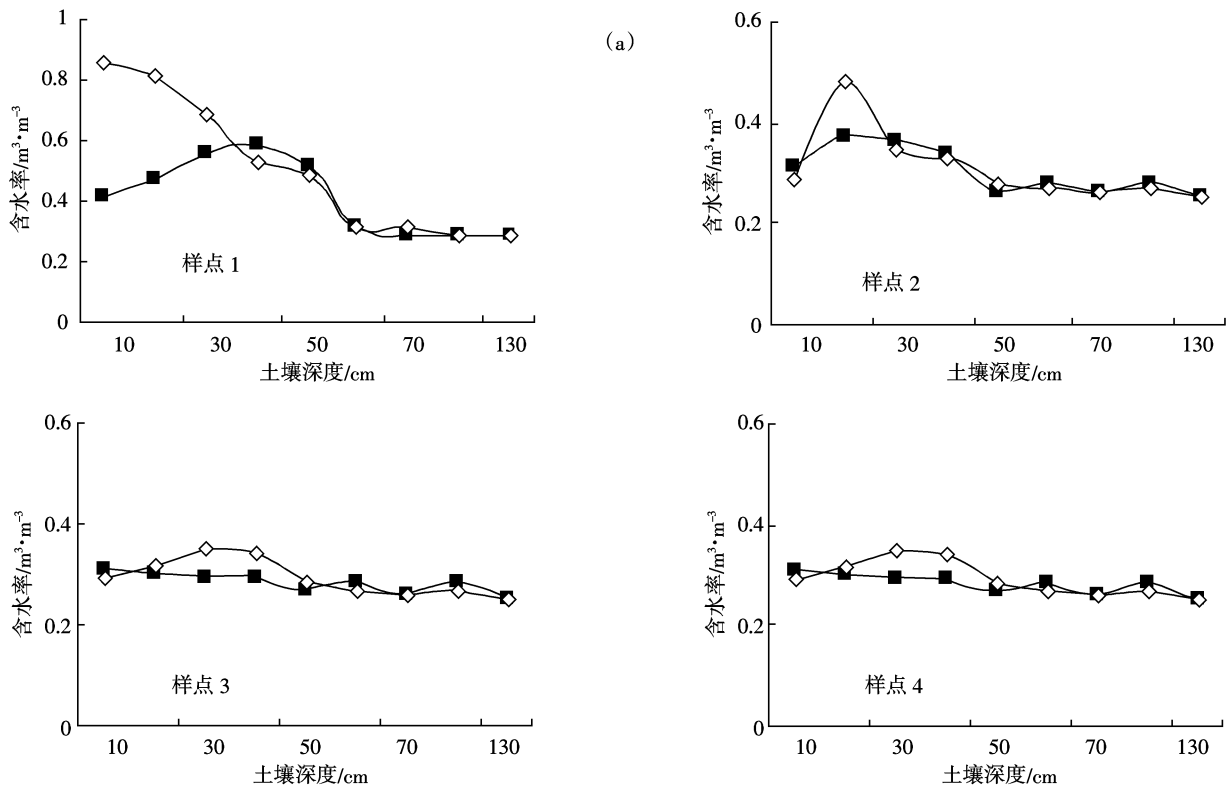


图1 研究区地表的温度日变化特征(a)以及土壤的冻融过程(b)

Figure 1 Fluctuation of soil surface daily temperature(a)and the freezing and thawing period(b)



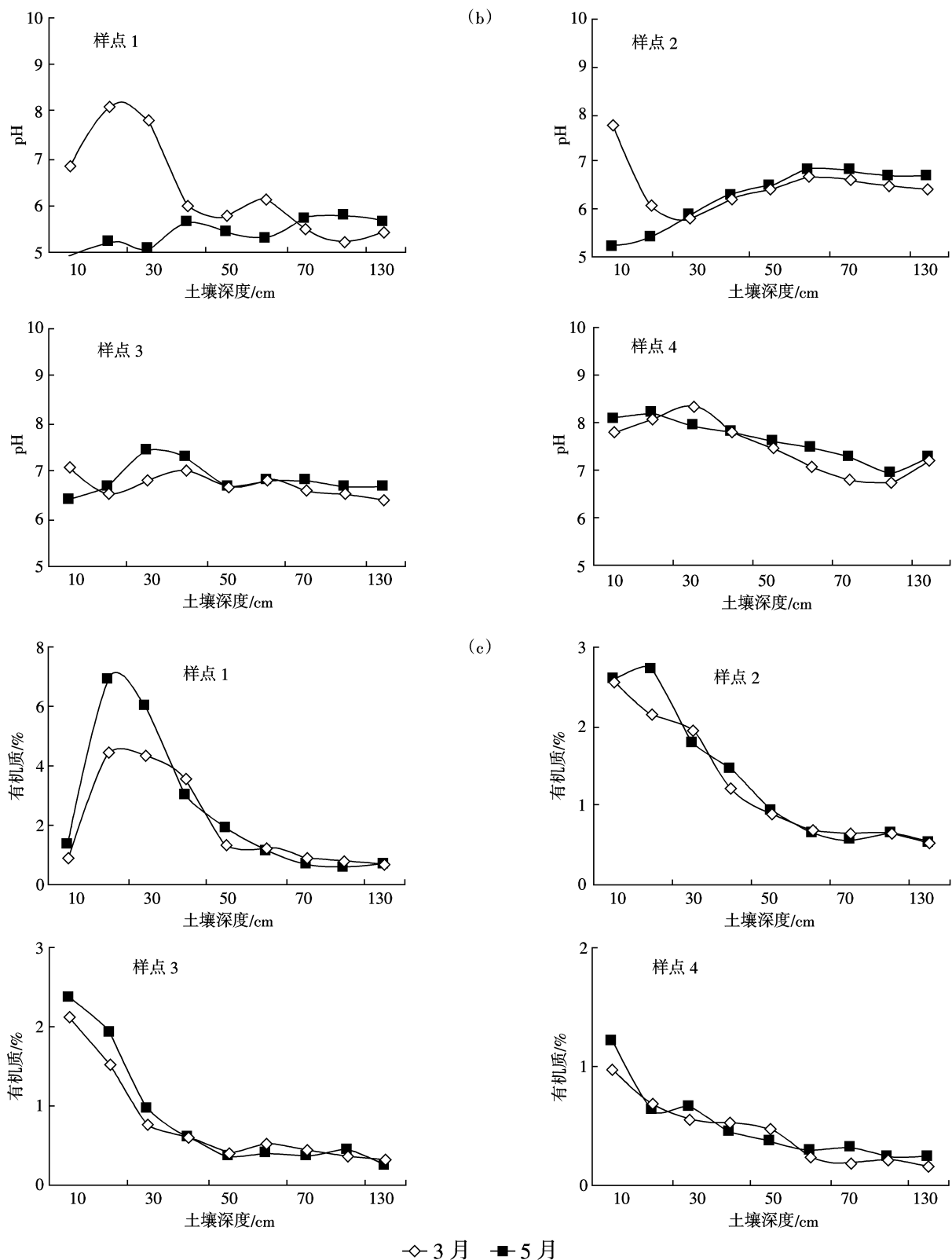


图 2 冻融期间研究区土壤不同深度的含水率变化(a), pH 值变化特征(b)以及有机质的变化特征(c)

Figure 2 The soil moisture along soil profile during the freezing and thawing period(a), pH(b) and organic matter (c)

和样点 3 的水分在冻融期间的变化规律与样点 1 相似。微高处(样点 4)土体的含水率在消融季节明显

减少。

pH 值的时空分布与土壤含水率存在明显差异。

图2b可见,整个取样区间的土壤(包括地表滞水)表现为弱酸性。消融期,样点1的0~30 cm(滞水层)pH值从8.1下降为5左右,整个0~70 cm土层的pH都下降。pH值随着地势下降而逐渐降低,呈酸性。研究区土壤系统的酸性变化规律与该地区湿地水环境密切相关:冻结期,来自居民区的生活污水难以排入湿地系统,消融季节大量的生活污水排入湿地系统导致湿地的pH明显下降。土壤pH决定着铁化合物的溶解性,也就决定了铁、锰迁移的难易程度<sup>[8-10]</sup>。

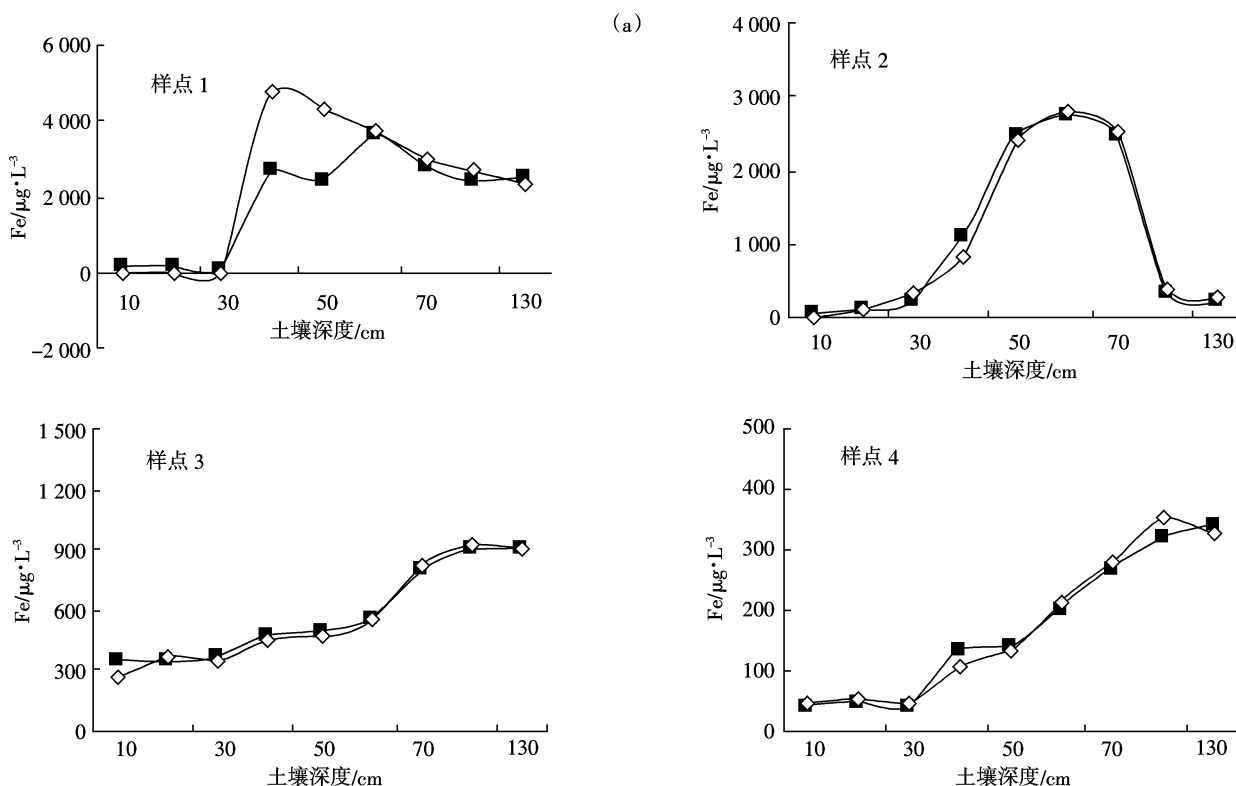
土壤有机质含量的时空变化与植被类型、微地貌环境以及气候变化密切相关<sup>[11-12]</sup>。芦苇沼泽的有机质含量最高,且随着消融过程的发展迅速增加。从图2c可见,3月份芦苇沼泽土其表层的含量为4.43%,到5月中旬上升为6.86%,增加幅度达55%;寸草苔草甸土表层的有机质含量在此期间也从2.17%增加到2.72%;羊草草甸区土壤的有机质主要分布在0~10 cm土层(为1.51%),10 cm以下土层有机质含量迅速减少,表层的有机质含量到5月增加为1.90%。小尺度内不同地貌的湿地土壤水文特征不同,导致湿地土壤氧化还原过程的改变,影响了湿地铁和锰空间分布格局以及迁移转化特征。

#### 2.4 冻融期间土体内铁、锰含量特征

土壤溶液中铁的迁移性能以及含量与环境要素

密切相关<sup>[9]</sup>。受到湿地水的作用,湿地土壤中铁、锰的垂向变化为随着剖面的加深含量逐渐增加,淀积层含量明显高于其他层次。图3为研究区不同取样点土壤的铁、锰在空间上的变化特征以及冻融期间的变化特征。可见研究区土壤全铁和锰的分布表现为自表层向下含量增大,且不同地貌部位铁锰高峰期分布位置存在一定差异。从水平空间来看,铁的水平分布表现为自岸边向中心递减的趋势,即随着地势的抬升铁含量逐渐降低。从图3可见,3种土壤类型的全铁、全锰含量表现为沼泽土(样点1)最大,草甸沼泽土(样点3和样点4)相对较低。从土壤垂直剖面来看,冻融时期湿地土壤中铁的垂直分布一般表现为随着剖面的加深含量逐渐增加,淀积层含量明显高于其他层次。样点1在40 cm左右处的潜育层顶部达到最高值,而样点2铁、锰高峰期分布在50~60 cm,样点3铁、锰最高值分布在70~100 cm,微高处的铁、锰最高值分布在130 cm。在研究区内,湿地中心的全铁含量最高,微高处草甸土含量最低。这也表明随着水文地貌条件不同,土壤剖面中铁元素呈现一种有规律的变化。

图3还揭示湿地土壤中铁和锰在消融过程中的含量发生了明显的变化。从图可见,消融期间样点1的土壤表层的铁和锰含量有明显的增加特征。样点1的30 cm土层铁、锰变化量最大,其中铁的增量达



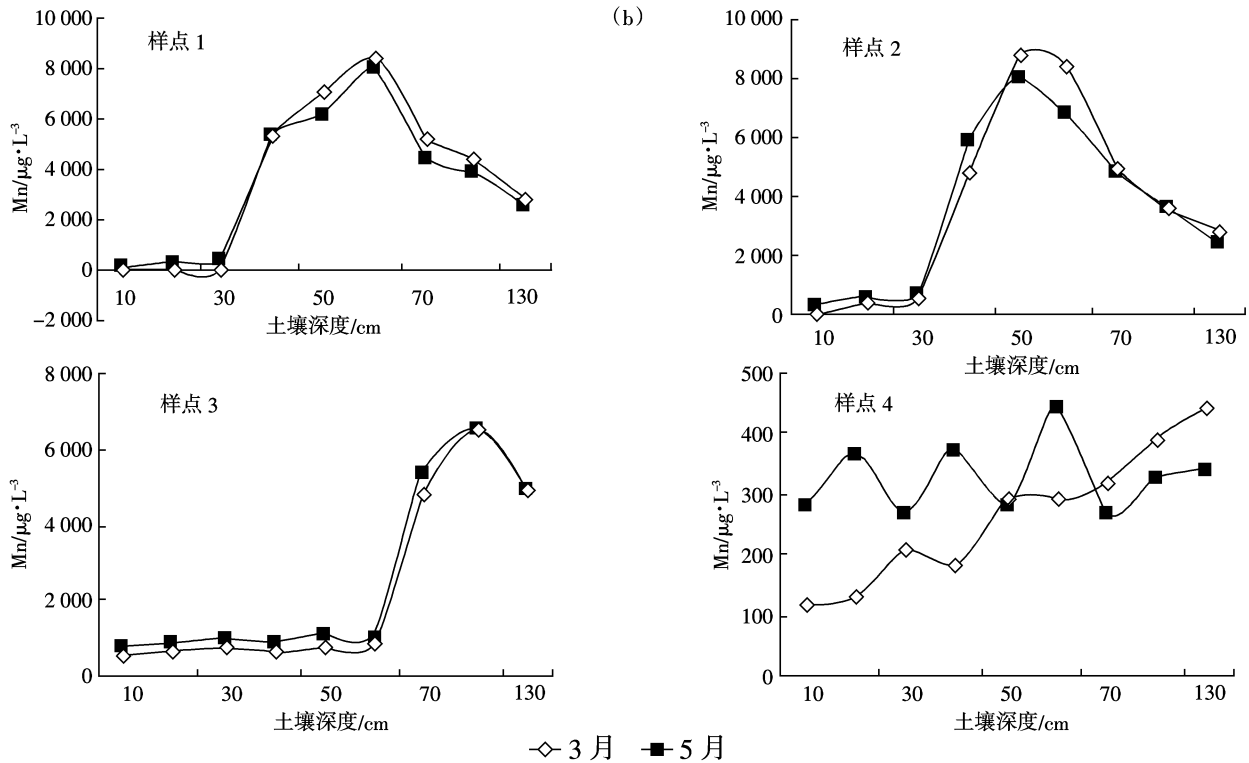


图 3 冻融期不同取样点土壤的总铁 (a) 以及锰 (b) 含量变化特征

Figure 3 The total iron content (a) and Mn (b) at four sample spots during the freezing and thawing period

80%以上,洼地边缘(样点 2)的表层也有一定增加。微高处土壤表层铁、锰含量也有明显增加。

通过相关分析可知(图 4),沼泽土壤的铁和锰元素含量与土壤的含水率呈正相关,与土壤的 pH 值呈负相关,铁、锰的含量与土壤中有有机质的含量还表现出正相关的特征。铁、锰元素含量与环境因子的关系可以用来对湿地的水文环境进行指示。

## 2.5 讨论

湿地土壤中铁的转化主要由土壤所处的环境因子所决定<sup>[13]</sup>。季节性渍水导致氧化还原交替进行,使剖面氧化还原状况产生差异,形成了土壤层次的分化,具有锈纹、锈斑的层次表明湿地土壤中的铁发生了移动或局部淀积<sup>[14-15]</sup>。有机质的出现增强了铁在湿地生态系统中的活性<sup>[11-12]</sup>。研究表明,渍水条件下有机质的厌氧分解影响着土壤的 Eh 和 pH,从而影响到铁和锰的迁移性能,这种还原作用随着 pH 和有机质组成的改变而改变<sup>[9-10]</sup>。pH 较低时有利于土壤中锈斑形成,pH 还影响着微生物的种类和数量,从而影响到铁的迁移能力。有机质是土壤中电子的主要来源和有效络合剂,铁还原微生物和发酵菌表明其利用腐殖质作为电子受体。因此,有机质含量高的区域土壤溶液中可迁移态的铁浓度含量增大。另外,植被枯枝落叶聚

集和分解产生的各种碳水化合物、有机酸等物质将直接改变湿地土壤 pH 环境以及提供溶解基,从而提高铁、锰等元素的溶解度和迁移性能。

冻结期间,湿地低洼部位土壤剖面中的水处于冻结状态,土体中铁、锰等指示元素难以迁移,冻结期间城市生活污水难以直接进入湿地,因此这期间研究区湿地的 pH 值为中性。pH 值特征以及土壤孔隙水大部分处于冻结状态,使土壤中铁和锰元素的活性减小,不利于其迁移。进入 5 月,地表水开始消融,大量的生活污水排入研究区,导致研究区低洼部位土壤水分的 pH 显著减小,例如样点 1 的 0~30 cm 层次的 pH 从 7.9 下降到 4.8。pH 值的下降和水分消融导致低洼部位滞水使土壤的 Eh 值减小,二者都使铁和锰向低价态转换,利于铁和锰的迁移。在研究区的微高处(例如样点 4)受这种冻融期间水环境的变化影响相对小,所以其元素的含量的变化幅度也较小。

## 3 结论

湿地的水环境影响着铁、锰元素的时空变化规律。在小尺度内湿地水环境的理化性质存在明显差异,且在整个冻融期间变化特征也存在差异。湿地中心处土体剖面冻结期聚集水分,其表层含水率达 0.8

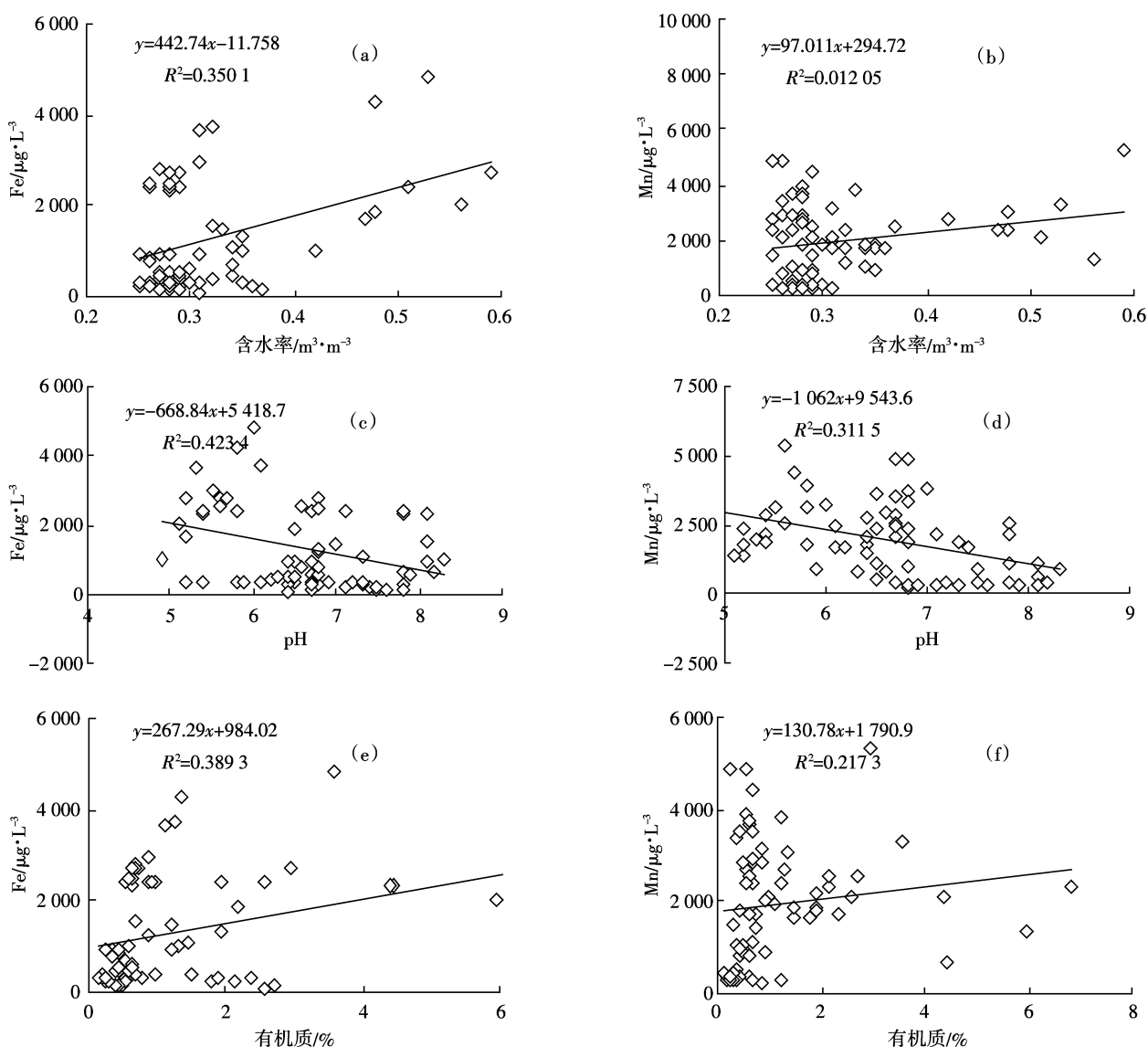


图4 湿地土壤中Fe、Mn含量与环境因子(土壤含水率、pH值以及有机质)之间的相关性

Figure 4 The relation between Fe/Mn and the environment factors (soil moisture, pH and organic matter)

$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$  (过饱和状态), 含水率随着剖面加深而逐渐减小; 洼地边缘土壤最高含水率为  $0.5 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ , 微高地土壤整个土层的含水率在  $0.3 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$  左右。在消融期, 湿地低洼处表层消融后水分下移在冻结缘处聚集导致亚表层土壤大量滞水, 微高处土体的含水率在消融季节明显减少。pH 随着地势下降而逐渐降低(都表现弱酸性)。消融期, 湿地低洼点的酸性逐渐增强。低洼部位土壤的有机质含量最高, 且随着消融过程有机质的增加幅度达 55%, 随着地势的增高有机质的含量以及变化幅度逐渐减小。

小尺度内不同地貌的湿地土壤水文特征不同, 导致湿地土壤氧化还原过程的改变, 影响湿地铁和锰空间分布格局以及迁移转化特征。从水平空间来看, 铁

的水平分布表现为随着地势的抬升铁含量逐渐降低。从土壤垂直剖面来看, 冻融时期湿地土壤中的铁垂直分布一般表现为随着剖面的加深, 含量逐渐增加, 淀积层含量明显高于其他层次。低洼处在 40 cm 左右处的潜育层顶部达到最高值, 而洼地边缘的铁、锰高峰区分布在 50~60 cm, 微高处的铁、锰最高值分布在 130 cm。湿地土壤中的铁和锰在消融过程中的含量变化明显, 消融期间, 湿地土壤表层的铁和锰含量有明显的增加特征, 其中铁的增量达 80% 以上, 洼地边缘的表层也有一定增加, 微高处土壤表层的铁、锰含量增加幅度最小。通过相关分析发现, 沼泽土壤的铁和锰元素含量与土壤的含水率呈正相关, 与土壤的 pH 值呈负相关, 与土壤中有机质的含量还表现出正相关

的特征。通过对湿地中铁、锰元素的时空变化规律可以对湿地水环境特征以及演变特征进行指示。

本文的结论只反映研究区 2008—2009 年的冻融期间湿地环境的变化及其对湿地铁、锰等元素的变化影响,尚缺乏对非冻结期(夏季或秋季)研究区湿地土壤中铁、锰的变化资料。结合冻融和非冻融期间湿地水环境监测资料探讨铁、锰对湿地水环境的指征效应乃是下一步亟待研究的重要课题。

#### 参考文献:

- [1] Kim J G. Response of sediment chemistry and accumulation rates to recent environmental changes in the Clear Lake watershed[J]. *Wetlands*, 2003, 23(1):95–103.
- [2] 陆健健. 中国湿地[M]. 上海:华东师范大学出版社, 1990:145.  
LU Jian-jian. China wetland[M]. Shanghai:Northeast China Normal University Press, 1990:145.
- [3] 黑龙江省土地管理局/黑龙江省土壤普查办公室. 黑龙江土壤[M]. 北京:农业出版社, 1992:11.  
Land Planning Bureau/Soil Survey Office in Heilongjiang Province. Heilongjiang Province soil[M]. Beijing: Agricultural Press, 1992:11.
- [4] 王 洋, 刘景双, 王金达, 等. 土壤 pH 值对冻融黑土重金属 Cd 赋存形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2):574–578.  
WANG Yang, LIU Jing-shuang, WANG Jin-da, et al. Effects of pH on the fraction transformations of Cd in phaeozem soil at the condition of freeze/thaw cycles[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2):574–578.
- [5] 周旺明, 秦胜金, 刘景双, 等. 沼泽湿地土壤氮矿化对温度变化及冻融的响应[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4):806–811.  
ZHOU Wang-ming, QIN Sheng-jin, LIU Jing-shuang, et al. Response to temperature and freezing and thawing by soil nitrogen mineralization in marsh wetland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4):806–811.
- [6] 罗金明, 邓 伟, 张晓平, 等. 冻融季节苏打盐渍土的水盐变化规律[J]. 水科学进展, 2008, 19(4):559–566.  
LUO Jin-ming, DENG Wei, ZHANG Xiao-ping, et al. Variation of water and salinity in sodic saline soil during frozen thawing season[J]. *Advance in Water Science*, 2008, 19(4):559–566.
- [7] 姜 明, 吕宪国, 杨 青, 等. 湿地铁生物地球化学循环及其环境效应[J]. 土壤学报, 2006, 43(3):493–499.  
JIANG Ming, LÜ Xian-guo, YANG Qing, et al. Iron biogeochemical cycle and its environmental effect in wetlands[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3):493–499.
- [8] JIANG Ming, LU Xianguo, WANG Hongqing, et al. Transfer and transformation of soil iron and implications for hydro-geomorphological changes in Naoli River Catchment, Sanjiang Plain, Northeast China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(2):149–158.
- [9] 董元华, 徐 琪. 不同脱沼泽阶段土壤中铁锰的比较研究[J]. 土壤学报, 1991, 28(4):382–387.  
DONG Yuan-hua, XU Qi. A comparative study on changes of iron and manganese of soil in different de-swamping stages[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(4):382–387.
- [10] 鲍根德. 控制铁锰结核地球化学特征的主导因素研究: I 铁锰结核的地球化学特征[J]. 中国科学(B 辑), 1991, 8:860–866.  
BAO Gen-de. Leading factor of controlling iron and manganese concretions geochemical feature[J]. *China Science(B eds.)*, 1991, 8:860–866.
- [11] Collins J F, Boul SW. Effects of fluctuations in the Eh-pH environment on iron and/or manganese equilibrium[J]. *Soil Science*, 1970, 110:111–118.
- [12] 唐罗忠, 生原喜久雄, 户田浩人, 等. 湿地林土壤的  $\text{Fe}^{2+}$ , Eh 及 pH 值的变化[J]. 生态学报, 2005, 25(1):103–107.  
TANG Luo-zhong, HAIBARA Ki-kuo, 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.
- [13] Kappler A, Benz M, Schink B. Electron shuttling via humic acids in microbial iron(III) reduction in a fresh water sediment[J]. *Microbiology Ecology*, 2004, 47:85–92.
- [14] Thompson A, Chadwick O A, Rancourt D G, et al. Iron-oxide crystallinity increases during soil redox oscillations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70:1710–1727.
- [15] Kostka J E, Luther G W. Seasonal cycling of Fe in salt-marsh sediments[J]. *Biogeochemistry*, 1995, 29:159–181.