

不同水文情势下环形湿地土壤铁的时空分布特征

邹元春^{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:通过分季节原位采集三江平原环形湿地不同深度的土壤和土壤溶液, 调查了土壤总铁的空间分布和土壤溶液中可溶性铁的时间变化, 分析了水文情势对这种铁时空分异的影响。结果表明, 环形湿地 0~60 cm 土层总铁的平均含量为 $(2.54 \pm 0.73) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且随地表积水深度的增加由小叶章群落和乌拉苔草群落的 $(2.91 \pm 0.51) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(2.60 \pm 0.35) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 逐渐下降到毛苔草和漂筏苔草群落的 $(2.48 \pm 0.31) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(2.17 \pm 0.31) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 常年积水土壤中铁的可溶性高于季节性积水土壤; 从春季化冻开始, 土壤溶液中的可溶性铁含量随积水时间的延长而逐渐增加, 从 6 月的 $(0.35 \pm 0.086) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 10 月上冻前的 $(12.67 \pm 2.92) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 以 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 表征的土壤还原性随积水深度或浸没时长的增加而增加; 土壤溶液中的可溶性铁与 pH、总有机碳、总氮和磷酸盐都具有显著或极显著相关, 表明铁的分布还受土壤理化性质的影响, 并与土壤碳、氮、磷的迁移转化相耦合。

关键词: 铁; 环形湿地; 时空分布; 三江平原

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)07-2059-06

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Soil Iron in the Annular Wetland Under Different Water Regime

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

(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 effect of water regime on the spatial distribution of total iron and the seasonal variation of dissolved iron in a typical annular wetland of Sanjiang Plain, Northeast China, was analyzed through *in situ* sampling of soils and soil solutions. The results showed that the average level of total iron of the wetland soil (0-60 cm) was $(2.54 \pm 0.73) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, which decreased gradually from the *Calamagrostis angustifolia* community in the edge of the annular wetland [$(2.91 \pm 0.51) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$], to the *C. meyeriana* community [$(2.60 \pm 0.35) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$], the *C. lasiocarpa* community [$(2.48 \pm 0.31) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$], and the of *C. pseudocuraica* community [$(2.17 \pm 0.31) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] in the centre of the annular wetland. The iron solubility of perennial flooding soil was higher than seasonal flooding soil. The gross dissolved iron increased from soil thawing in the late spring [$(0.35 \pm 0.086) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$] to freezing in the late autumn [$(12.67 \pm 2.92) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$], because the soil iron was activated by continuous submergence. The reduced degree as shown by $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ increased with the increment of water depth or flooding duration. Significant and extremely significant correlations were observed between dissolved Fe^{3+} or Fe^{2+} and pH, TOC, TN and PO_4^{3-} , which suggested that the distribution of iron was influenced by the soil physical and chemical properties, and coupled with the transfer and transformation of C, N, and P elements.

Key words: iron; annular wetland; spatiotemporal distribution; Sanjiang Plain

湿地土壤也称水成土壤(hydric soils), 是生长季中经受了足够时长的水浸没、泛滥或积水过程进而在土体上部发展出厌氧环境的土壤^[1]. 不同的水文情势(水浸没或浸没土壤的时机、频率、周期和强度等)可以直接改变湿地土壤中的理化特性^[2], 决定铁元素等的氧化还原和迁移累积过程, 从而对不同价态铁含量的空间分异产生深刻影响。

国内外已有研究揭示了水文情势对土壤理化性质、养分元素和有机碳等的影响^[3~5], 然而对不同水文情势下天然湿地土壤铁的研究较少. 铁是土壤中氧化还原性质活泼的过度金属元素, 可显著影响土壤的形态特征、理化性质、土壤微生物和上覆植物的

生理生态以及其它多种元素的生物地球化学循环过程^[6~11]. 湿地是铁循环的热点区域^[12,13], 研究表明以铁的积累或消耗为特征之一的湿地土壤氧化还原形态特征与土壤水文情势密切相关^[14], 这种相关关系已被成功用于对土壤还原环境的指征^[15,16]; $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 是湿地土壤中重要的氧化还原体系之一, 能迅速响应并指示土壤氧化还原状况的变化, 指示环境

收稿日期: 2008-09-09; 修订日期: 2008-11-04

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(KZCX2-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

变迁^[17,18].

环形湿地是三江平原湿地的重要组成部分,系指以明水面为中心,以岛状林为边界,地势逐渐升高,积水逐渐减少,在景观上具有同心圆环状分布的湿生植被和土壤类型的碟形洼地.环形湿地微地貌的起伏导致了水文情势的变化,这种水文地貌梯度对环形湿地土壤营养元素的空间分异产生了显著的影响^[19,20].由环形湿地中心到边缘,积水时间逐渐变短,水位逐渐降低以至消失,土壤含水量逐渐降低,通气性逐渐增强,土壤由还原环境逐渐变为氧化环境,土壤上覆的植被也由沼生和湿生过度到中生.环形湿地以较高的微生境多样性支撑了较丰富的生物多样性,为研究湿地土壤水铁关系提供了良好的实验对象.

本实验旨在定量刻画土壤水文对湿地土壤铁赋存的影响,其研究结果有助于深入理解湿地土壤铁的环境化学行为及其影响因素,为追踪铁在土壤中的迁移、转化和归趋等提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取中国科学院三江平原沼泽生态试验站内的环形湿地,沿着一定的环境梯度,按照不同的植物群落进行样品采取,其水文情势由常年积水逐渐减少为偶发积水,具有代表性.

环形湿地的植被分布具有明显的同心圆状分布特征(图 1).最外围地势较高者分布着小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)群落,伴生有千屈菜(*Lythrum salicaria*)、大花马先蒿(*Pedicularis grandiflora*)、兴安藜芦(*Verairum dahuricum*)、小白花地榆(*Sanguisorba parviflora*)等,植被覆盖度 70% 以上,仅在雨水较多的年份及初春雪融时地表积水,其余时间地表裸露,发育的土壤类型为潜育草甸土,草根层厚 10 cm 左右;次外围分布着乌拉苔草(*C. meyeriana*)群落,伴生有大花马仙蒿、驴蹄草(*Caltha palustris*)等,植被覆盖度 60% 以上,季节性积水,雨季最大积水深度一般不超过 10 cm,土壤为草甸沼泽土,草根层厚 10~20 cm,零星分布着乌拉苔草形成的草丘塔头,直径 30 cm 左右,高 10~30 cm,丘上有薄层藓类植物,地表季节性积水,水深 5 cm 左右;再次之为毛苔草(*C. lasiocarpa*)群落,植被覆盖度在 60% 以上,地表常年积水,雨季最大积水深度一般不超过 20 cm,土壤为腐殖质沼泽土,草根层厚 20~30 cm;在环形湿地中部地势最低处分布有漂筏苔草

(*C. pseudocuraica*)群落,伴生植物有燕子花(*Iris laevigata*)、睡菜(*Menyanthes trifoliata*)等,植被覆盖度在 60% 以上,地表常年积水,丰水年份雨季最大积水深度可超过 30 cm,土壤为泥炭沼泽土,草根层厚 30 cm 以上(表 1).详细的土壤剖面描述见文献^[19].

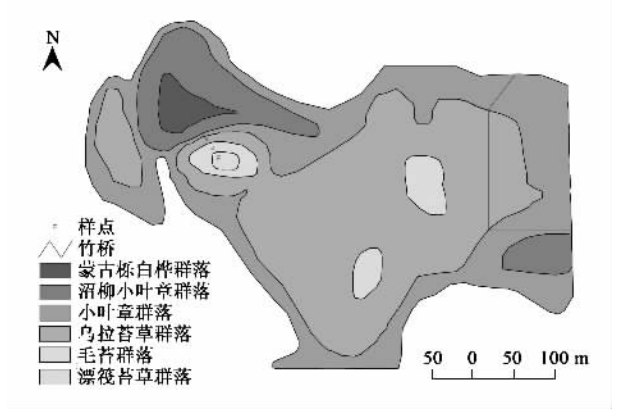


图 1 环形湿地植被分布及样点布设

Fig.1 Vegetation distribution and the sampling sites arrangement in the annular wetland

表 1 环形湿地的样带分布特征

Table 1 Vegetation transect in the annular wetland

编号	湿地类型	植被类型	水文特征	土壤类型
X	沼泽化草甸	小叶章群落	季节性积水	潜育草甸土
W	沼泽化	乌拉苔草群落	季节性积水	潜育草甸沼泽土
M	沼泽	毛苔草群落	常年积水	腐殖质沼泽土
P	沼泽	漂筏苔草群落	常年积水	泥炭沼泽土

1.2 采样方法

土样采用荷兰泥钻于 2006 年 6 月 20 日按 X、W、M、P 每个群落采集 1 个剖面,每个剖面自土壤草根层至潜育层分层钻取 0~10 cm、10~20cm、20~40cm、40~60 cm 共 16 个土样,挑净、风干、过 100 目筛.土壤溶液水样采用中国科学院南京土壤研究所研制的陶土管土壤溶液定点实时采集装置,于 2005 年 10 月按 X、W、M 等 3 个群落分别距地表 10、20、40 和 60 cm 预埋设陶土管,2006 年 6 月 20 日(化冻后)、8 月 23 日(完全解冻)和 10 月 25 日(上冻前)分 3 次采样,采样时利用真空泵抽气造成棕色集水瓶(预先以盐酸酸化处理)中负压,原位抽取 24 h,个别难以抽取者二次加压.所采土壤溶液冷藏于采样箱中,1 h 内送往实验室比色测定.由于陶土头孔隙约为 0.2 μm,因此不需要对土壤溶液样品做 0.45 μm 滤膜过滤的前处理,即可直接测定可溶性铁含量.另外采集各点同层土样送回实验室分析铁的背

景含量。

1.3 分析方法

土壤总铁采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 消解 0.5 h 后采用原子吸收光度法测定;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+} ;pH、总有机碳(TOC)、总氮(TN)和磷酸盐(PO_4^{3-})依据相关国家标准测定^[21]。

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 OriginPro 7.5 绘制。

溶作用要强于沿海拔梯度的侧向渗流作用,与前人研究类似^[22]。

2 结果与讨论

2.1 环形湿地土壤铁含量的空间分布

本研究沿环形湿地中心到边缘设置 1 条样带,跨越 4 个植物群落,每个群落随机设定 3 个样点,分 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 等 4 层采样,分层均匀混合后,代表该群落的土壤铁剖面。4 个群落共得到 16 个土壤总铁含量数据,在一定程度上代表了环形湿地的土壤铁分布规律。

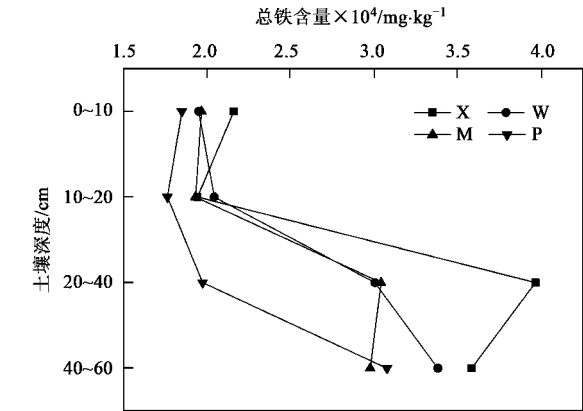
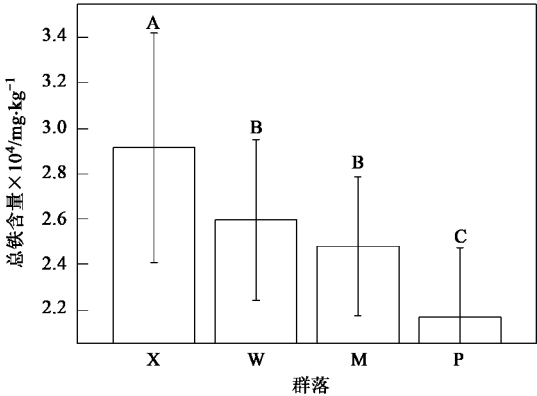


图 2 环形湿地土壤总铁含量的剖面分布

Fig.2 Distribution profiles of soil total iron of each communication in the annular wetland

从环形湿地各群落土壤铁含量的垂直分布特征(图 2)可以看出,随着积水深度的增加,土壤总铁剖面逐渐左移,即土壤铁含量随积水深度的增加而逐渐下降,由小叶章群落和乌拉苔草群落的 $(2.91 \pm 0.51) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(2.60 \pm 0.35) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 逐渐下降到毛苔草和漂筏苔草群落的 $(2.48 \pm 0.31) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(2.17 \pm 0.31) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,如图 3。尽管各群落土壤铁含量的标准误较大,但 0~60 cm 土壤的铁含量随积水深度增加而逐渐降低的规律仍然明显可见,表明铁在还原条件下向下淋



柱形图中相同的字母表示在 0.05 水平没有显著性差异; 各级各类沟渠的铁含量表示为 $M \pm SE$, $n = 4$,下同

图 3 不同群落土壤总铁含量的均值分布

Fig.3 Mean distribution of soil total iron in the different communities

如果视不同群落为各土层总铁含量的重复样点,则 4 个土层每个土层各有 4 个重复,对这 16 个数据的单因素方差分析表明,各层的总铁含量具有显著性差异($F = 9.800, p = 0.002$),各层土壤的铁含量分别为 $(1.98 \pm 0.13) \times 10^4$ 、 $(1.92 \pm 0.12) \times 10^4$ 、 $(3.00 \pm 0.81) \times 10^4$ 和 $(3.26 \pm 0.28) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而整个环形湿地 60 cm 以上土壤的总铁含量为 $(2.54 \pm 0.73) \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,如图 4。

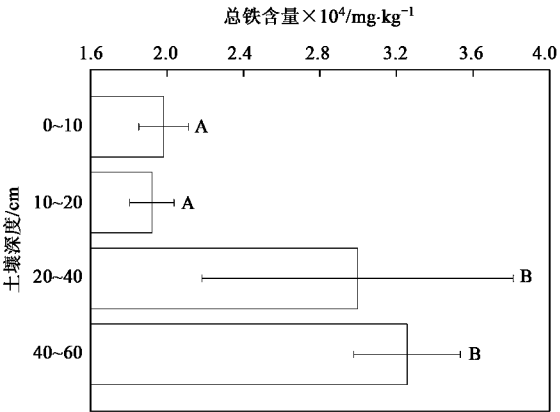


图 4 不同土层土壤总铁含量的均值分布

Fig.4 Mean distribution of soil total iron in the different layers

由图 4 可以看出,土壤总铁含量随采样深度的增加而明显分为 2 段:20 cm 以上土层的 8 个样点中,75%(6 个)的总铁含量不超过 $2.0 \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 20~60 cm 土层的 8 个样点中,也有 75%的总铁含量超过 $3.0 \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,增幅达到 50% 以上,呈现出

明显的阶段分布规律,即草根层或腐泥层土壤(0 ~ 20 cm)的总铁含量远低于腐泥层或潜育层土壤(20 ~ 60 cm)。

若以百分含量表示则环形湿地土壤铁的平均含量为 2.54%。根据中国土壤环境背景调查资料,全国 A 层土壤铁的平均含量为 2.94%,其中沼泽土类的平均含量为 2.86%^[23];对三江平原沼泽土壤铁的研究发现,0 ~ 100 cm 沼泽土的平均含量为 2.98%^[24]。由此可见,环形湿地表层土壤铁含量明显低于全国平均水平,而全剖面含量则与区域铁环境背景一致。沼泽土铁含量较低的原因可能是由于三江平原土壤多由冲积物和洪积物构成的母质发育而来,因此易随水迁移的元素较为丰富,而仅在还原环境中可迁移的铁元素含量较低。

2.2 环形湿地土壤溶液中铁含量的季节变化

土壤溶液中的可溶性铁含量具有明显的季节变化特征。6 月各群落的可溶性铁含量都随采样深度增加而降低,最大值出现在 10 cm 处,而最小值出现在 60 cm 处。8 月和 10 月与 6 月的趋势不同,可溶性铁含量呈现出先降低后升高然后再降低的趋势,最大值多出现在 40 cm 处,而最小值出现则分别出现在 20 cm 和 60 cm 处,如图 5。

由图 5 可以看出,各群落土壤溶液中的可溶性铁含量并没有完全随采样深度的增加而增加,这就表明铁的溶解性随土壤深度的增加呈阶段降低的趋势,即 20 cm 处土壤铁的可溶性低于 10 cm 处,而 60 cm 处土壤铁的可溶性低于 40 cm 处。就不同群落而言,乌拉苔草群落土壤总铁含量低于小叶章群落,但可溶性铁含量反而高于小叶章群落,表明乌拉苔草群落土壤铁可溶性高于小叶章群落;毛苔草群落土壤总铁含量显著低于小叶章群落,但可溶性铁含量略低于小叶章群落,表明毛苔草群落土壤铁的可溶性也高于小叶章群落;乌拉苔草和毛苔草群落土壤铁的可溶性差异不明显。由此可见,常年积水土壤铁的可溶性高于季节性积水土壤。

从整个环形湿地 12 个采样点的可溶性铁含量均值的季节性变化中可以看出,自春季化冻开始,土壤铁在水分过饱和的还原条件下不断活化,其中 Fe^{3+} 的含量由 6 月的 $(0.35 \pm 0.086) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 上升到 8 月的 $(0.70 \pm 0.24) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 进而上升到 10 月的 $(4.73 \pm 1.15) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Fe^{2+} 的含量由 6 月的 $(0.60 \pm 0.14) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 上升到 8 月的 $(1.28 \pm 0.28) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 进而上升到 10 月的 $(7.94 \pm 1.98) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 总铁(TFe)的含量由 6 月的 $(0.95 \pm 0.14) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 上

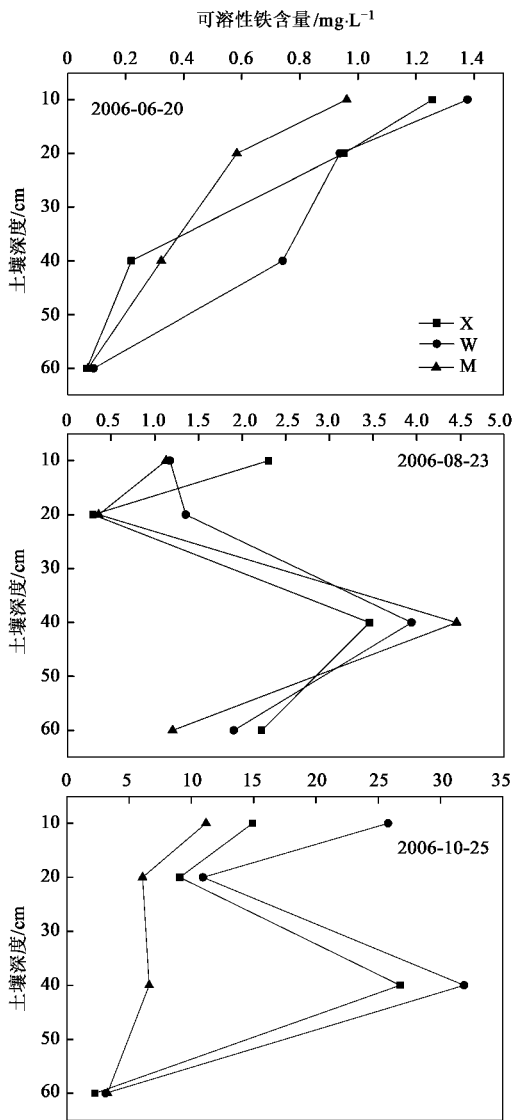


图 5 土壤溶液可溶性铁含量的季节变化
Fig.5 Seasonal variation of the distribution profiles of dissolved iron in the soil solutions

升到 8 月的 $(1.98 \pm 0.39) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 进而上升到 10 月的 $(12.67 \pm 2.92) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 如图 6。

从理论上讲,环形湿地 7、8 月的降雨相对集中,积水最深,因此,土壤的还原性也最强,此时的 Fe^{2+} 含量应最高。然而,测定结果表明,10 月上冻前土壤溶液中无论可溶性铁总量、 Fe^{2+} 或 Fe^{3+} 含量,都高于 8 月,这种“反常”趋势很可能与 10 月由于蒸发和下渗导致土壤溶液被浓缩有关。

一般而言,根据 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值,可以判定土壤的氧化还原状况。当 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} < 1$, 土壤溶液为还原环境,且比值越小,还原性越强;当 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} > 3$, 为氧化环境,且比值越大,氧化性越强^[17,18]。当比值介于 1~3 之间为弱氧化环境。各群落土壤溶液 $\text{Fe}^{3+}/$

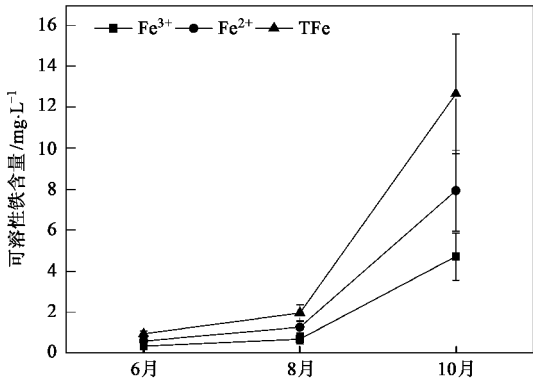


图 6 土壤溶液可溶性铁含量的季节变化

Fig.6 Seasonal variation of dissolved iron in the soil solutions

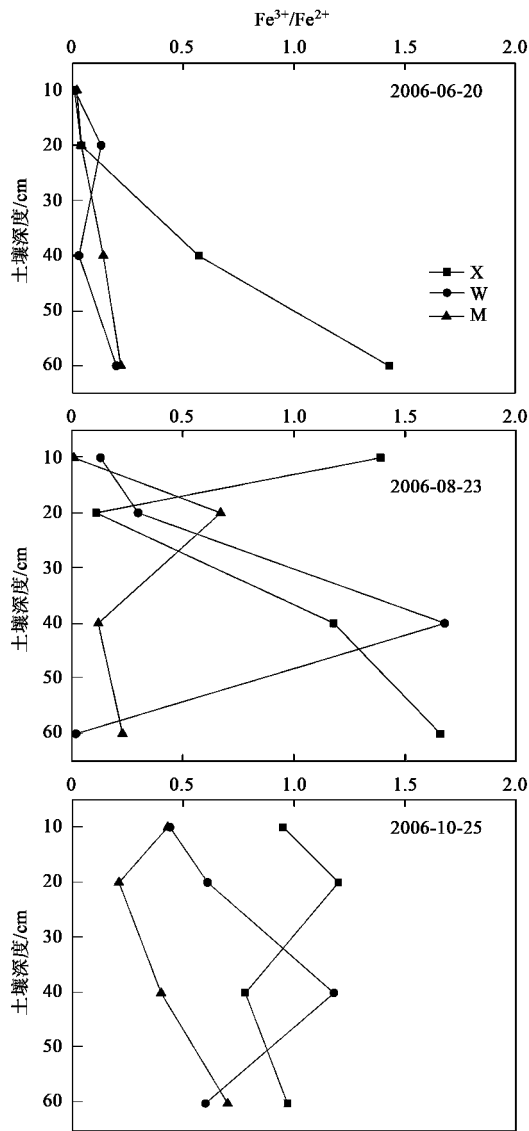


图 7 土壤溶液 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的季节变化

Fig.7 Seasonal variation of the distribution profiles of $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ in the soil solutions

Fe^{2+} 的季节变化如图 7.

由图 7 还可以看出,6 月各群落土壤的还原性几乎都随深度增加而降低,这可能与土壤融通时长随深度增加而降低有关.完全化冻条件下 Fe^{2+} 含量与活化时间成正比^[25].不同群落之间,季节性积水的小叶章群落土壤的还原性随土壤深度增加而降低的幅度最大,而常年积水的毛苔草群落土壤的还原性则随深度增加而略有降低.8 月季节性积水的小叶章和乌拉苔草群落土壤的还原性波动巨大,而常年积水的毛苔草群落波动较小.10 月环形湿地各土层的还原性较为均衡,各群落土壤的还原性大致积水深度和时长的增加而增加.

环形湿地一般处于还原环境,少数情况之所以出现“弱氧化”环境,可能与部分 Fe^{3+} 与有机物络合导致可溶性 Fe^{3+} 含量增加有关,这可以通过下文中 Fe^{3+} 与 TOC 的极显著相关中得到证明(表 2).

表 2 铁与其它理化指标的相关分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis between iron and other physical and chemical indicators

	Fe^{3+}	Fe^{2+}	pH	TOC	TN	PO_4^{3-}
Fe^{3+}	1	0.829**	-0.558**	0.719**	0.690**	-0.427*
Fe^{2+}		1	-0.624**	0.596**	0.613**	-0.401*
pH			1	-0.582**	-0.621**	0.624**
TOC				1	0.783**	-0.608**
TN					1	-0.479*
PO_4^{3-}						1

1) * 表示显著性水平为 0.05, ** 表示显著性水平为 0.01

2.3 环形湿地土壤溶液中铁与土壤理化性质的关系

利用 Pearson 相关分析,可以发现土壤溶液中可溶性铁与 pH、TOC、TN 和 PO_4^{3-} 都具有显著或极显著相关(表 2).其中, Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 与 pH 的相关系数都为负数,表明随着 pH 的升高, Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 的含量会降低,形成溶解性较低的氢氧化物,在有机物存在的情况下, pH 的影响会受到缓解,因此相关系数不高,分别为 -0.558 和 -0.624; Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 与 TOC、TN 的相关系数都为正数,表明铁与 C、N 具有较好的共存性,特别是湿地土壤中的有机物含量较高,部分可溶性铁可能以有机物络合态存在;铁与 PO_4^{3-} 具有一定程度的负相关,表明可溶性铁能够在一定程度上能够闭蓄 PO_4^{3-} ,从而证明了铁对于防止底泥 P 的活化并治理水体富营养化的价值.

3 结论

(1) 环形湿地土壤铁的时空分布主要受水文地貌的控制, 总铁的平均含量随地表积水深度的增加而逐渐下降。

(2) 环形湿地土壤铁的可溶性和还原性都具有土层和季节性差异, 一般随积水深度或浸没时长的增加而增加。

(3) 环形湿地土壤铁的时空分布还受土壤理化性质影响, 并与土壤碳、氮、磷的迁移转化相耦合。

参考文献:

- [1] Hurt G W, Whited P M, Pringle R F. Field Indicators of Hydric Soils in the United States [M]. Fort Worth: USDA/NRCS in cooperation with the National Technical Committee for Hydric Soils, 2003. 1-4.
- [2] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000. 107-110.
- [3] 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.
- [4] 郭跃东, 何岩, 邓伟, 等. 水文过程对乌裕尔河河滨湿地缓冲带表层土壤养分空间分异的影响[J]. 土壤通报, 2005, **36**(6): 831-835.
- [5] 童成立, 张文菊, 王洪庆. 三江平原湿地沉积物有机碳与水分的关系[J]. 环境科学, 2005, **26**(6): 38-42.
- [6] Takai Y, Kamura T. Mechanism of reduction in waterlogged paddy soil [J]. Folia Microbiol, 1966, **11**: 304-313.
- [7] Ponnampetuma F N. The chemistry of submerged soils [J]. Advanced Agron, 1972, **24**: 29-96.
- [8] Reddy K R, D' Angelo E M, Harris W G. Biogeochemistry of Wetlands [A]. In: Sumner M E. Handbook of Soil Science [C]. Boca Raton: CRC Press, 2000. G89-G119.
- [9] Guerinot M L, Yi Y. Fe: nutritious, noxious, and not readily available [J]. Plant Physiol, 1994, **104**: 815-820.
- [10] Rudnick R L, Gao S. The composition of continental crust [A]. In: Rudnick R L. Treatise on Geochemistry, Vol. 3, The Crust [C]. Amsterdam: Elsevier Press, 2004. 1-64.
- [11] 姜明, 吕宪国. 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.
- [12] Liesack W, Schnell S, Revsbech N P. Microbiology of flooded rice paddies [J]. FEMS Microbiol Rev, 2000, **24**: 625-645.
- [13] Roden E E, Wetzel R G. Kinetics of microbial $\text{Fe}(\text{III})$ oxide reduction in freshwater wetland sediments [J]. Limnol & Oceanogr, 2002, **47**: 198-211.
- [14] Jacobs P M, West L T, Shaw J N. Redoximorphic Features as Indicators of Seasonal Saturation, Lowndes County, Georgia [J]. Soil Sci Soc Am J, 2002, **66**(1): 315-323.
- [15] Castenson K L, Rabenhorst M C. Indicator of Reduction in Soil (IRIS): Evaluation of a New Approach for Assessing Reduced Conditions in Soil [J]. Soil Sci Soc Am J, 2006, **70**(4): 1222-1226.
- [16] Rabenhorst M C, Burch S N. Synthetic Iron Oxides as an Indicator of Reduction in Soils (IRIS) [J]. Soil Sci Soc Am J, 2006, **70**(4): 1227-1236.
- [17] Calvert S E, Pedersen T F. Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: Implications for the geological record [J]. Mar Geol, 1993, **113**(1-3): 67-88.
- [18] 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.
- [19] 杨青, 刘吉平, 吕宪国. 三江平原典型环型湿地土壤-植被-动物系统的结构及功能研究[J]. 生态学杂志, 2004, **23**(4): 72-77.
- [20] 刘吉平, 杨青, 吕宪国. 三江平原典型环型湿地土壤营养元素的空间分异规律[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(2): 76-79.
- [21] 谢贤群, 王立军. 水环境要素观测与分析(中国生态系统研究网络观测与分析标准方法)[M]. 北京: 中国标准出版社出版, 1998. 56-57, 66-67, 89.
- [22] Reuter R J, Bell J C. Soils and Hydrology of a Wet-Sandy Catena in East-Central Minnesota [J]. Soil Sci Soc Am J, 2001, **65**(5): 1559-1569.
- [23] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 90, 247.
- [24] 金泰龙. 三江平原沼泽生态系统的化学特征[A]. 见: 黄锡畴. 中国沼泽研究[C]. 北京: 科学出版社, 1987. 145-152.
- [25] Du Laing G, Vanthuyne D R J, Vandecasteele B, et al. Influence of hydrological regime on pore water metal concentrations in a contaminated sediment-derived soil [J]. Environ Pollut, 2007, **147**(3): 615-625.