

三江平原不同土地利用方式下土壤锰含量研究

张仲胜^{1,2}, 吕宪国^{1*}, 宋晓林^{1,2}

(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: 通过对比分析三江平原典型的小叶章湿地、玉米地、水稻田、人工杨树林和岛状林土壤中锰(Mn)含量, 研究了不同土地利用方式下土壤 Mn 分布特征及影响因素。结果表明, 三江平原土壤 Mn 含量范围为 107.73 ~ 2 798.99 mg·kg⁻¹, 平均为 403.24 mg·kg⁻¹, 处于较低的水平。不同利用方式下土壤中 Mn 含量差异显著($F=9.272, P<0.001$), 表现出岛状林 > 人工杨树林 > 玉米地 > 小叶章湿地 > 水稻田的规律; 总体上由表层至底层, 各层土壤 Mn 含量表现为玉米地 > 小叶章湿地 > 水稻田, 岛状林 > 人工杨树林的规律, 表明湿地开发为旱田后, 土壤 Mn 将聚集, 而开发为水田后, 土壤 Mn 则流失。相关性分析表明, 土壤中 Mn 含量与 pH 呈显著的负相关关系($r=-0.279, P<0.05$), Mn 与 S 含量($r=0.383, P<0.01$)和可溶性有机碳含量($r=0.244, P<0.05$)呈显著的正相关关系, 而与土壤有机质(SOM)和有效硫(S_a)含量相关性并不显著。环境因子的改变, 可能是通过改变 Mn 的赋存状态而影响到土壤 Mn 含量。

关键词: 三江平原; Mn; 土地利用方式; 分布特征; 环境因子

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)11-3429-06

Mn Content in Soil of Sanjiang Plain Under Different Land Use

ZHANG Zhong-sheng^{1,2}, LÜ Xian-guo¹, SONG Xiao-lin^{1,2}

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

Abstract: Mn content and its profile distribution characteristics were investigated in soils from the typical *Deyeuxia angustifolia* wetland, corn field, paddy field, poplar forest and island forest in Sanjiang Plain. Results indicated that Mn content was relatively low and was in the range of 107.73-2 798.99 mg/kg with the average value of 403.24 mg/kg. Mn content significantly differed by land use ($F=9.272, P<0.001$) and was in the order of island forest > poplar forest > corn field > *Deyeuxia angustifolia* wetland > paddy field. On the whole, Mn content in each soil layer was in the order of corn field > *Deyeuxia angustifolia* wetland > rice paddy in field and was in the order of island forest > poplar forest in the vertical direction. It suggested that Mn was enriched after wetlands were reclaimed in to the upland field and Mn concentration was decreased when wetlands were changed into rice paddy. Correlation analysis showed that Mn content in soil significantly negatively related to pH ($r=-0.279, P<0.05$), significantly positively related to sulfur ($r=0.383, P<0.01$) and dissolved organic carbon ($r=0.244, P<0.05$), and weakly related to soil organic matter and available sulfur, respectively. Changes of environmental factors had impacts on Mn species and then resulted in soil Mn content.

Key words: Sanjiang Plain; Mn; land use; distribution characteristics; environment al factors

Mn 是岩石圈和土壤中普遍存在的化学元素, 与土壤中的铁元素构成了土壤氧化还原体系中主要的变价金属元素^[1,2]。土壤中 Mn 存在多种价态, 其中主要为 Mn²⁺ 和 Mn⁴⁺, Mn³⁺ 在土壤溶液中不稳定, 容易发生歧化反应^[3]。大的地理尺度上 Mn 分布具有明显的生物地带性^[4], 并受到土壤 pH、Eh、湿度、有机质和土壤通气状况的影响, 其中最直接的是 pH 和 Eh^[5-7]。高的 pH 和 Eh 通常有利于形成难溶性锰氧化物, 而低 pH 和 Eh 则有利于溶液中 Mn(II) 浓度的增加。研究表明, 如果 MnO₂ 不被还原, 仅仅改变 pH 则很难溶解, 然而在较高的 pH 条件下, 如果有强还原剂存在, 将会有相当量的 MnO₂ 被还原, 低 Eh 和 pH 条件下最有利于 MnO₂ 的还原^[8]。土壤干湿交替过程中发生的氧化还原反应通常引起不同

Mn 形态之间相互转化, 进而影响 Mn 迁移转化过程及其在剖面方向上的分布^[9,10]。如水稻田中进行水旱轮作, 由于种植水稻期间 Mn 的还原淋失及其向深层的氧化淀积, 耕作层土壤全锰和有效锰含量将逐年降低, 并将导致 Mn 向剖面下部迁移^[11-13]。

三江平原是我国最大的淡水沼泽集中分布区之一。近 50 年来, 三江平原经历了大规模的垦殖过程, 大量的湿地被开发为水田、旱田及林地^[14]。土地利用方式的不同, 必将导致土壤物理性状及化学性质的改变, 从而影响土壤中 Mn 含量及其赋存形态。杨

收稿日期: 2010-12-07; 修订日期: 2011-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(40830535)

作者简介: 张仲胜(1982~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为湿地元素生物地球化学循环过程, E-mail: zzslycn@163.com

* 通讯联系人, E-mail: luxg@neigae.ac.cn

继松等^[15]研究表明,与自然沼泽湿地相比,农田中的 Mn 含量较高.但是目前关于三江平原不同土地利用方式下土壤中 Mn 的含量、剖面分布特征及其影响因素的研究尚不多见^[16],研究沼泽湿地及其农业开发过程中土壤锰的分布规律,有助于丰富我国锰研究在地理区域和生态系统类型上的深度和广度.本研究考察了三江平原自然小叶章湿地、旱田,水田,人工杨树林与岛状林土壤中 Mn 元素的含量及剖面分布规律,分析了土壤中 pH、有机质含量(SOM)、可溶性有机碳(DOC)、S 及有效硫(S_a)含量对土壤中 Mn 迁移过程的影响,探讨了沼泽农田化过程中 Mn 含量及剖面分布特征的变化,以期揭示沼泽湿地开发及人类活动对于湿地土壤质量的影响,为合理开发利用湿地资源提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站(47°34′30.5″N, 133°29′45.2″E),见图 1,海拔 55 m,属于温带湿润大陆性季风气候,年均降水量 600 mm,并集中于 7~9 月.主要优势植被类型有小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)、漂筏苔草(*Carex pseudocuraica*)、毛果苔草(*Carex lasiocarpa*)和乌拉苔草(*Carex meyeriana*).土壤类型为泥炭沼泽土、腐殖质沼泽土、草甸沼泽土和潜育白浆土^[17].

1.2 样品采集

2009 年 8 月选择在典型玉米地、水稻田、小叶章湿地、人工杨树林和岛状林中采集土壤样品,水稻田与玉米地均由小叶章湿地垦殖而成.土壤剖面深度为 80 cm,分别为 0~2 cm、2~4 cm、4~6 cm、6~10 cm、10~15 cm、15~25 cm、15~40 cm、40~65 cm 和 65~80 cm.每一个调查样地中选取 3 个剖面,将每一层土壤中混合均匀后密封于聚乙烯塑料袋中带回实验室,室温下自然风干,碾磨过 80 目尼龙筛后,密封于聚乙烯封口袋中保存待测.

1.3 元素分析

土壤样品采用 HNO_3-HClO_4 消解,定容后采用石墨炉原子吸收分光光度计测定 Mn 含量;pH 采用 pHB-3 型 pH 计(上海雷磁)测定,土水比为 1:5. SOM 采用重铬酸钾加热-硫酸亚铁还原滴定法测定.

DOC 测定方法为:称取 10.0 g 风干土样,放入盛有 50 mL 蒸馏水的三角瓶中,常温下振荡浸提 30 min,高速离心 10 min,上清液用 0.45 μm 滤膜过滤,用 TOC-VCPH 测定浸提液中有有机碳浓度,得到 DOC

浓度,通过水土比将 DOC 浓度换算成为土壤 DOC 含量^[18].

土壤中 S 含量采用酸消化-硫酸钡比浊法测定.有效硫采用 $0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 浸提(水土比为 5:1),比浊法测定^[19].测定分析工作由中国科学院东北地理与农业生态研究所分析测试中心完成.

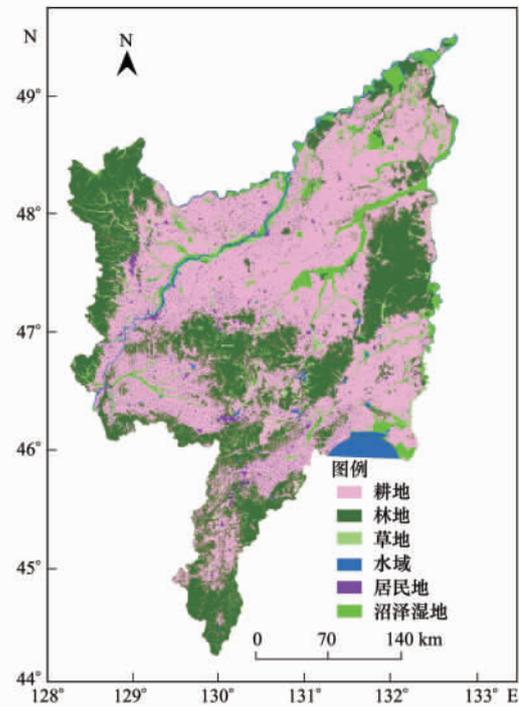


图 1 研究区位置示意

Fig. 1 Location of study area

2 结果与分析

2.1 土壤 Mn 含量及剖面分布特征

三江平原土壤 pH 均低于 7.0,为酸性沼泽土壤.土壤中 Mn 含量范围为 $107.73 \sim 2798.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,各层平均 Mn 含量为 $403.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.不同土地利用方式下土壤 Mn 含量存在显著性差异($F=9.272, P<0.001$),表现出岛状林>人工杨树林>玉米地>小叶章湿地>水稻田的规律(表 1).

Mn 在玉米地、水稻田和小叶章湿地剖面分布规律差异明显.水稻田与小叶章湿地中, Mn 含量在垂直方向上变化不大,水稻田表层 0~2 cm 土壤中 Mn 含量最高;玉米地中,表层 Mn 含量原高于底层,由表层至底层, Mn 含量先升高而后降低.总体上表层土壤中 Mn 含量表现为玉米地>小叶章湿地>水稻田.人工杨树林土壤剖面中 Mn 含量变化不大,而岛状林土壤剖面中土壤 Mn 含量呈现出先升高后降低的趋势,且变化幅度较大(图 2).

表 1 不同土地利用方式下土壤中 Mn 及其它元素含量¹⁾

Table 1 Summary of Mn and other element contents in soils under different land use

土地类型	S/mg·kg ⁻¹	DOC/mg·kg ⁻¹	Mn/mg·kg ⁻¹	S _a /mg·kg ⁻¹	SOM/g·kg ⁻¹
小叶章湿地	109.6 ~ 644.9 (286.88)	11.84 ~ 170.15 (63.05)	107.73 ~ 722.12 (236.36)	3.82 ~ 59.28 (12.72)	1.50 ~ 214.08 (58.80)
水稻田	93.06 ~ 481.35 (210.57)	16.81 ~ 139.35 (52.39)	120.93 ~ 401.38 (155.14)	4.02 ~ 16.74 (9.89)	12.49 ~ 84.02 (44.27)
玉米地	185.86 ~ 297.16 (251.31)	14.82 ~ 71.85 (31.87)	162.69 ~ 767.67 (467.23)	9.08 ~ 39.92 (22.40)	7.92 ~ 48.93 (28.38)
人工杨树林	127.63 ~ 448.72 (252.73)	18.39 ~ 128.35 (57.59)	203.12 ~ 1 092.81 (550.39)	5.10 ~ 34.05 (11.58)	8.27 ~ 96.74 (38.16)
岛状林	119.12 ~ 961.17 (322.54)	23.05 ~ 123.25 (67.67)	140.33 ~ 2 798.99 (1 046.45)	3.80 ~ 16.85 (8.50)	2.28 ~ 82.03 (33.10)

1) 括号内为平均值

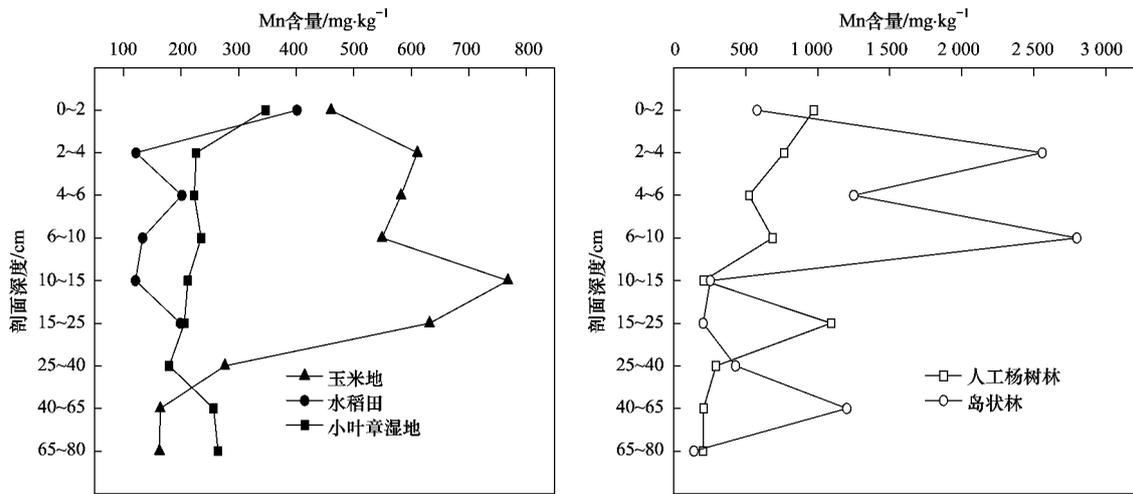


图 2 土壤 Mn 含量剖面分布

Fig. 2 Mn content distribution in soil profiles

2.2 Mn 同其它元素之间相关性分析

Mn 同其它元素之间相关分析表明,土壤中 Mn 含量与 S 含量和 DOC 含量呈显著正相关关系,与土壤 pH 呈显著负相关关系,与 S_a 含量及 SOM 含量不显著相关(表 2). 具体如图 3 ~ 图 5 所示.

表 2 土壤 Mn 含量与其它元素相关性分析 (n = 83)¹⁾

Table 2 Correlation analysis of Mn content and other elements

	S	DOC	Mn	S _a	pH	SOM
S	1					
Fe	-0.204					
DOC	0.450 **	1				
Mn	0.383 **	0.244 *	1			
S _a	0.271 *	0.095	0.099	1		
pH	-0.155	-0.228 *	-0.279 *	-0.464 **	1	
SOM	0.354 **	0.588 **	-0.023	0.043	-0.355 **	1

1) * 表示 P < 0.05; ** 表示 P < 0.01

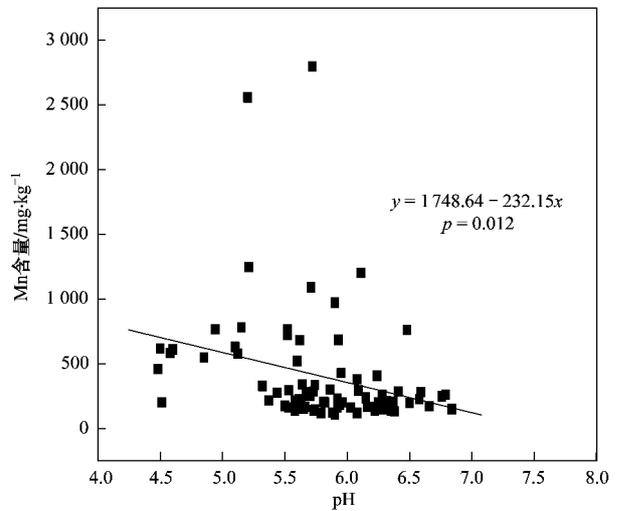


图 3 土壤 pH 与 Mn 含量关系

Fig. 3 Relationship of pH and Mn content in soil

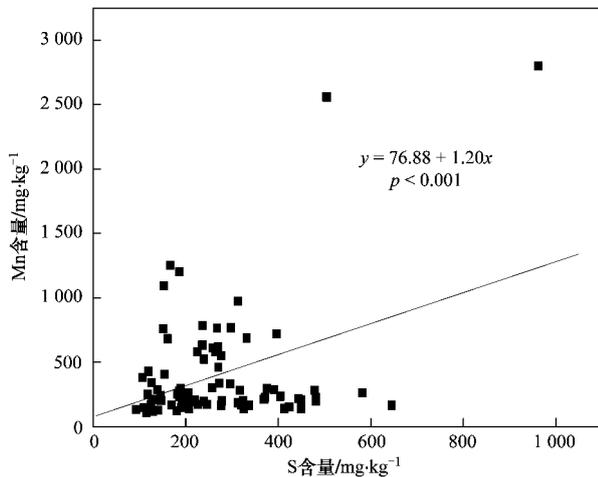


图4 土壤 S 含量与 Mn 含量关系

Fig. 4 Relationship of sulfate and Mn content in soil

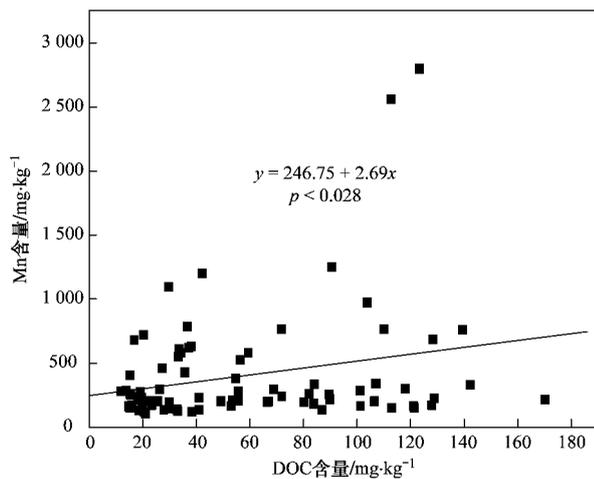


图5 土壤 DOC 含量与 Mn 含量关系

Fig. 5 Relationship of DOC and Mn content in soil

3 讨论

3.1 三江平原土壤 Mn 含量与背景值的比较

同黑龙江省、我国土壤 Mn 背景含量及 Mn 在地壳中的克拉克值相比,湿地土壤 Mn 含量处于较低的水平(表 3),这主要是由于湿地 Mn 具有较强的迁移能力,溶解态的 Mn 容易通过生物吸收或者随着水流发生迁移. Mn 的生物迁移系数为 $n \times 10$, Mn 的水迁移系数为 n ,均处于较高的水平^[17]. 以往的研究表明,三江草甸沼泽土中 Mn 的含量平均含量为 $431 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[18],高于本研究中土壤 Mn 平均含量,说明在几十年的垦殖过程中,三江平原中的 Mn 可能在不断流失.

3.2 pH 对土壤 Mn 含量的影响

pH 是影响土壤中 Mn 赋存形态的主要因素之

一. 本研究中 pH 与土壤中 Mn 含量呈显著负相关关系,与前人的研究结果一致. 水稻田一年绝大部分时间内处于淹水状态,小叶章湿地一年中也要经历季节性的干湿交替,土壤中的 Eh 较低,土壤中 Mn 可能主要以 Mn^{2+} 的价态存在,易于迁移和流失. pH 和土壤的氧化还原状态可能是导致不同土地利用方式下土壤 Mn 含量差异的重要原因.

表3 三江平原土壤 Mn 含量与 Mn 的背景相比较

Table 3 Comparison of Mn content in soil from Sanjiang Plain and the background values

地区	Mn 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	文献
黑龙江省	596	[20]
中国	710	[21]
克拉克值	750	[22]
三江平原	403.24	本研究

由于玉米地土壤中透气性良好,土壤 Eh 较高,处于相对富氧状态,土壤中 Mn 可能主要以 MnO_2 形态存在. 虽然玉米地剖面 pH 平均为 5.1,处于较低水平,但是如果还原剂的存在,仅仅靠改变酸度很难溶解 MnO_2 . 研究表明,当稀酸溶液中 H^+ 的浓度 $< 0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, HCl、 HNO_3 及 H_2SO_4 这 3 种强酸对 MnO_2 均无明显的溶解能力,低 Eh 和 pH 条件下最有利于 MnO_2 的溶解^[8]. 相比于玉米地,小叶章湿地和水稻田积水时间长,土壤处于还原环境中,土壤中 Eh 较低,还原性物质含量较高, Mn 可能主要以 Mn^{2+} 价态存在. Mn^{2+} 是土壤溶液中占优势的 Mn 形态, pH 在 4.57 ~ 8.21 的范围内,氧化锰随着 pH 的升高而升高,而水溶性锰和代换态锰则减少^[7]. 此外 Mn^{2+} 土壤溶液中易与 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 及 Cl^- 相结合,其中以与 PO_4^{3-} 的结合最为重要. Mn^{2+} 可以与磷酸根形成溶于水的水合物,如 $\text{Mn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (溶于水)^[21],并随着地表水流迁移出,导致水稻田及小叶章湿地土壤中 Mn 含量处于较低水平.

3.3 土壤 S 及 S_a 含量与 Mn 含量关系

S 是地壳中含量最丰富的元素之一. 关于土壤 S 含量对 Mn 在土壤中的赋存价态及迁移影响的研究并不多. 在我国南方酸性硫酸盐土壤中,土壤 Mn 含量处于较低的状态,在 $0.25 \sim 0.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,这主要是由于酸性硫酸盐土壤中酸度较高,锰的活动性较强,在土壤中 Mn 的淋溶和迁移系数较大,导致 Mn 淋失严重^[23]. 三江平原土壤 S 含量与 Mn 含量呈显著正相关关系. 虽然有效硫含量与土壤 pH 呈显著的负相关关系,但是 S_a 与 Mn 含量并不显著相关,说明 S_a 可能并不能通过改变土壤中 pH 来影响

土壤 Mn 中的含量. 由于沼泽湿地土壤水分含量很高, 土壤中 Eh 较低, S 主要以有机硫形式存在^[19]. 土壤中 Mn 与有机硫(如 SH—等有机官能团)通过络合或者螯合等作用形成移动性较差的化合物而被固定^[24]. 如 MnS 的溶度积常数(K_{sp})较低, MnS(粉红)为 2.5×10^{-10} , MnS(绿)为 2.5×10^{-13} , 均不容易溶解.

3.4 土壤 SOM 及 DOC 含量与 Mn 含量的关系

土壤有机质对土壤中 Mn 的赋存形态、迁移及成矿作用都有重要影响. 有机质的增加, 能够促进 Mn 向有效态转化. 在有机质的腐殖作用过程中产生的富啡酸和胡敏酸可以溶解或者吸附土壤中的 Mn. 富啡酸与锰离子可形成可溶性配合物, 提高 Mn 的迁移能力, 而胡敏酸分子量较高, 能以配合物的方式吸附 Mn, 并且使 Mn 沉淀富集^[25]. 虽然本研究中 SOM 与土壤 Mn 含量呈极微弱的负相关关系, 但是土壤中 DOC 则与 Mn 含量呈显著的正相关关系.

DOC 在土壤中移动较快, 不稳定, 易于氧化和分解, 是土壤有机碳中最容易被植物和微生物利用的部分^[26]. 土壤中 DOC 的增加, 可能刺激了微生物的活性, 增加了微生物和植物对土壤中 Mn 的吸收^[27, 28]. 如 Mn 通过螯合某些含有 N—和 S—配位体的官能团而与生物分子紧密链接, 在生物的生物膜中聚集, 在生物死亡后进入沉积物内. Mn 与有机组分的结合通常非常稳定, 在细胞溶解后仍不分解. 虽然有机质的增加能够促进 Mn 向 Mn^{2+} 价态转化, 但是有机质分解过程提供电子, 产生还原作用, 在 pe (电子活度) + pH 低于 16 时, 能够形成 $MnCO_3$ ^[25]. 而 $MnCO_3$ 的 K_{sp} 为 1.8×10^{-11} , 使得 Mn^{2+} 重新被固定在沉淀中; 当土壤中通透性良好时, $MnCO_3$ 在已有的 MnO_2 的触媒作用下能够重新被氧化为 MnO_2 而保存在土壤中. 土壤 SOM 及 DOC 含量对 Mn 赋存形态及迁移过程受到多方面的因素影响, 非常复杂, 尚需进一步深入研究.

4 结论

在湿地垦殖为农田的过程中, 由于土地利用方式发生改变, 土壤中的水分含量、透气性、pH、Eh 等条件发生变化, 导致土壤中 Mn 发生迁移或者淀积. 湿地开发为旱田, 土壤中 Mn 将淀积富集, 反之开发为水田, 土壤中 Mn 则发生流失. 但是湿地土壤中的 Mn 含量、分布特征及其迁移过程受到多种环境因子的影响, 相关分析表明土壤中 Mn 含量与土壤 pH、S 和 DOC 均呈显著的负相关或者正相关关系. 环境因

子的改变, 导致 Mn 在还原价态 Mn^{2+} 与氧化价态 Mn^{4+} 间互相转化, 由于 Mn^{2+} 及 Mn^{4+} 的化合物在土壤溶液中的溶解度及生物可利用性不同, 使得 Mn 在土壤中溶解、迁移或者淀积聚集. 由于 Mn 在土壤中赋存形态、各种 Mn 化合物的溶解及相互转化过程非常复杂, 因此湿地垦殖过程对土壤 Mn 迁移转化的影响还需要进一步深入研究.

参考文献:

- [1] Goulet R R, Pick F R. Changes in dissolved and total Fe and Mn in a young constructed wetland: implications for retention performance [J]. *Ecological Engineering*, 2001, **17** (4): 373-384.
- [2] 高凡, 贾建业, 梅雪清, 等. 土壤中微量元素锰及其化合物的环境意义 [J]. *广东微量元素科学*, 2004, **11** (4): 10-13.
- [3] 刘学军, 吕世华, 张福锁, 等. 土壤中锰的化学行为及其生物有效性 I. 土壤中锰的化学行为及其影响因素 [J]. *土壤农化通报*, 1997, **12** (3): 41-47.
- [4] 丁维新. 生物气候带对土壤中锰的赋存形态及其有效性的影响 [J]. *地理科学*, 1995, **15** (4): 368-373.
- [5] 刘鑫, 雷宏军, 朱端卫. 变动氧化还原状况下酸性土壤中活性锰的变化 [J]. *土壤学报*, 2008, **45** (4): 734-739.
- [6] 刘鑫, 朱端卫, 雷宏军, 等. 酸性土壤活性锰与 pH、Eh 关系及其生物反应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, **9** (3): 317-323.
- [7] 丁维新. 土壤 pH 对锰赋存形态的影响 [J]. *热带亚热带土壤科学*, 1994, **3** (4): 233-237.
- [8] 涂仕华. 酸和氧化还原剂对二氧化锰溶解度的影响 [J]. *土壤学报*, 2004, **41** (4): 530-535.
- [9] 史春霞, 柏彦超, 徐香君, 等. 不同水分条件下锰元素的渗漏及其在土体中的垂直分布研究 [J]. *江苏农业科学*, 2007, (2): 205-207.
- [10] 司友斌, 马友华, 章力干. 土壤湿度水平和湿-干循环对硝酸钙盐积累土壤锰释放的影响 [J]. *应用生态学报*, 2001, **12** (2): 233-236.
- [11] 刘学军, 廖晓勇, 张扬珠, 等. 不同稻作制对红壤性水稻土中锰剖面分布的影响 [J]. *生态学报*, 2002, **22** (9): 1140-1145.
- [12] Shuman L M, Hargrove W L. Effect of tillage on the distribution of manganese, copper, iron and zinc in soil fractions [J]. *Soil Science Society of America*, 1985, **49** (5): 1117-1121.
- [13] 刑世和, 吴金奖, 林景亮. 水稻土发生分类的研究 II. 两种水型水稻土中有机质淋溶累积的特点及其与铁锰淋淀的关系 [J]. *福建农学院学报*, 1989, **18** (2): 212-217.
- [14] 吕宪国. *中国湿地与湿地研究* [M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2008.
- [15] 杨继松, 于君宝, 刘景双, 等. 自然沼泽湿地开垦前后土壤中微量元素含量的变化 [J]. *中国科学院研究生院学报*, 2004, **21** (3): 372-379.
- [16] 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 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [17] 刘兴土, 马学慧. 三江平原自然环境变化与生态保育 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.

- [18] 郗敏,孔范龙,吕宪国,等.三江平原典型岛状林湿地土壤水DOC质量浓度分布特征[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009,28(2):322-325.
- [19] 郝庆菊.三江平原典型湿地开垦前后硫的含量及形态分布[D].北京:中国科学院研究生院,2002.
- [20] 国家环境保护局,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.
- [21] 刘铮.土壤与植物中锰的研究进展[J].土壤学进展,1991,19(6):1-10.
- [22] B B多布罗沃利斯基著,朱颜明译.微量元素地理学[M].北京:科学出版社,1987.
- [23] 刘兆辉,王遵亲.我国酸性硫酸盐土壤中铁锰形态转化及迁移[J].土壤学报,1994,31(4):376-384.
- [24] 郝瑞霞,关广岳.有机质在锰成矿过程中的作用[J].冶金地质动态,1995,(8):14-16.
- [25] Shu L M. Effect of organic matter on the distribution of manganese, copper, iron, and zinc in soil fractions [J]. Soil Science, 1988, 146(3):192-197.
- [26] Tao S, Lin B. Water soluble organic carbon and its measurement in soil and sediment [J]. Water Research, 2000, 34(5):1751-1755.
- [27] 吴慧芳,龚春风,刘鹏,等.锰对商陆根际微生物及土壤酶的影响[J].贵州农业科学,2009,37(12):94-98.
- [28] 李学军,吕世华,张福锁,等.土壤中锰的化学行为及其生物有效性II.土壤中锰的生物有效性[J].土壤农化通报,1998,12(1):51-57.