

三江平原水稻田耕层土壤铁随开垦年限的动态变化

霍莉莉^{1,2}, 吕宪国¹, 邹元春¹

(1. 中国科学院 湿地生态与环境重点实验室, 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 以三江平原不同开垦年限水稻田为研究对象, 分析了水稻田耕层土壤铁随开垦年限的动态变化情况。结果表明, 随开垦年限增加, 水稻田耕层土壤全铁呈指数形式递增; 游离态铁以波动形式增加, 3 和 11 a 时为波谷, 5 和 14 a 时为波峰; 络合态铁开垦前期逐年增加, 8 a 后增加到 1 562. 41 mg/kg, 随后逐渐减少; 无定形态铁呈指数递减趋势。氧化铁的游离度先升高后降低, 开垦 8 a 时达到最高值 0. 46; 络合度在开垦前 8 a 逐年上升, 5~ 8 a 增速降低, 8 a 时达到最高值 0. 18, 之后逐年下降; 活化度则呈指数形式下降。土壤淹水状况和耕作管理方式的不同造成水稻田和大豆田氧化铁游离度、络合度和活化度随开垦年限变化趋势的差异。水田开发使湿地表土游离态铁、络合态铁和无定形态铁含量增加, 氧化铁游离度升高, 水稻田耕层土壤氧化铁络合度和活化度低于天然湿地, 高于大豆田。

关键词: 水稻田耕层土壤; 铁; 开垦年限; 湿地; 三江平原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)03-0022-04

中图分类号: X53

Changes of Iron in Topsoil of Paddies as Affected by Reclamation Ages in Sanjiang Plain

HUO Lili^{1,2}, LYU Xiangguo¹, ZOU Yuan-chun¹

(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: Temporal changes of the total iron, free iron, chelated iron, amorphous iron, free degree, complex (chelating) degree and activation degree of soil iron oxides in the topsoil of the paddies after reclamation in the Sanjiang Plain were studied. The results showed that total iron in the topsoil of the paddies increased exponentially with time since reclamation. Free iron showed a fluctuating upward trend with the wave troughs appeared in the 3rd year and the 11th year, and the wave peaks in the 5th year and the 14th year. Chelated iron increased during the first eight years after reclamation, reached 1 562. 41 mg/kg at the 8th year, and then decreased. Amorphous iron decreased exponentially with time. Free degree of soil iron oxides first increased then decreased, and reached a maximum value of 0. 46 at the 8th year. Complex degree increased continuously to a maximum value of 0. 18 during the first 8 years, with a slower increasing rate from the 5th to 8th year; and decreased gradually after the eighth year. Activation degree decreased exponentially with time. Different variation trends of free degree, complex degree and activation degree of soil iron oxides between paddies and soybean fields were caused by water flooding in paddies and differences in farming methods between the two systems. Compared with the natural wetland, rice cultivation increased contents of free iron, chelated iron and amorphous iron as well as free degree of soil iron oxides, but decreased contents of complex degree and activation degree of soil iron oxides. However, complex degree and activation degree of soil iron oxides in paddies were greater than those in soybean cultivation stage.

Keywords: topsoil of paddies; iron; age of reclamation; wetland; Sanjiang Plain

收稿日期: 2010-10-13

修回日期: 2010-11-23

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“三江平原湿地系统双向演替下的结构、功能变化与生态效应”(40830535); 国家自然科学基金项目“不同水文情势下铁对三江平原湿地有机质分解过程的影响研究”(40901051); 中国科学院东北地理与农业生态研究所前沿领域项目“三江平原稻田井灌对湿地铁循环的影响研究”(KZCX3-SW-NA09-02)

作者简介: 霍莉莉(1986—), 女(汉族), 河南省驻马店市人, 博士研究生, 主要从事湿地生态过程研究。E-mail: huoliliforgood@163.com。

通信作者: 吕宪国(1957—), 男(汉族), 吉林省长春市人, 研究员, 研究方向为湿地生态系统管理工作。E-mail: luxg@neigae.ac.cn。

土壤有机碳是大气中 CO_2 的重要潜在碳源或碳汇^[1], 土壤有机碳库的微小变化, 都可显著地引起大气中 CO_2 浓度的改变^[2]。水稻土壤铁与有机碳循环关系密切, 研究表明, 水稻土中铁铝键合态有机碳在提高有机碳化学稳定性的同时, 降低了易氧化态有机碳在土壤中的分配, 氧化铁铝对有机碳的积累和稳定有重要贡献^[3]。此外, 还原环境下产甲烷菌与高价铁还原菌在普通基质醋酸盐和氢之间的竞争可以抑制甲烷的产生, 这在水稻田中已经得到了验证, 铁处理被认为是水稻田减少甲烷排放的适宜策略^[4]。水稻田土壤铁还对营养元素磷的有效性产生重要影响, 土壤有效磷的变化与铁组分, 尤其是无定形铁的变化有关。Sah 等曾指出, 淹水使土壤 Eh 下降, 土壤中的铁在还原层中被还原, 而还原铁可以通过“泵升作用”迁移到氧化层, 重新氧化后可形成对磷具有强烈吸附作用的无定形铁, 淹水后的土壤落干过程中有一部分无定形氧化铁脱水老化, 形成了结晶程度较高的氧化铁形态, 使土壤对磷的吸附能力显著降低, 磷有效性增加^[5]。铁是植物生长发育过程中必需的微量元素, 植物轻度缺铁会导致叶绿素合成减少, 光合速率降低, 严重缺铁时叶绿素合成停止, 新叶变黄, 生物量大幅度下降。如果长期滞水造成土壤强还原条件, 会产生大量 Fe^{2+} , 对植物产生毒害^[6]。水稻如果长期生长在水溶性 Fe^{2+} 浓度达 50 mg/kg 以上的水田土壤中, 其叶片会出现褐色, 影响光合作用, 从而导致植物生长不良, 产量降低^[7]。植物缺铁不仅影响植物的生长发育, 造成巨大的经济损失, 而且也会通过食物链影响动物和人类对铁的吸收, 从而导致贫血病的发生。总之, 水稻田土壤中铁的含量和形态变化对土壤有机碳循环、水稻生长及动物和人类健康来讲, 意义重大。

20 世纪 50 年代以来, 三江平原大面积淡水沼泽湿地经历了湿地—旱田(大豆)—水稻田的垦殖过程。三江平原水稻田面积由 1986 年的 $5.77 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 增加到 2005 年的 $1.51 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 增加面积占三江平原总面积的 13.86%, 目前, 水稻种植已是三江平原重要的农作形式^[8]。有关三江平原湿地开垦后土壤铁变化的研究集中于旱田^[9], 对作为重要人工湿地的水稻田土壤铁的研究鲜见报道。本文比较分析了三江平原水稻田耕层土壤铁随开垦年限的变化, 了解水田开发过程中土壤铁的转化规律, 可丰富人类垦殖活动对三江平原湿地生物地球化学循环功能的影响研究, 为建立土地利用与湿地功能变化之间的关系模型, 预测湿地功能变化趋势提供数据支撑, 为功能变化引起的生态环境效应研究及合理利用湿地提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选取黑龙江省农垦总局建三江分局洪河农场第 8 作业区; 地理坐标为 $47^\circ 44' 12.2'' \text{ N}$, $133^\circ 30' 37.3'' \text{ E}$, 该区属温带大陆性季风气候, 年平均气温 1.9° C , 1 月平均气温为 -21° C , 7 月平均气温为 22° C , 年平均降雨量 550~600 mm, 无霜期 125 d 左右, 6—9 月为作物生长期。区内潜育白浆土广泛发育, 占全区总面积的 71.65% (洪河农场土壤, 黑龙江省洪河农场土壤普查办, 1981 年 7 月)。目前该区分布有天然淡水沼泽湿地及大面积由湿地开垦而来大豆田和水稻田, 水稻田经历了天然淡水沼泽湿地—旱田(大豆)—水稻田的垦殖过程。农场对大豆田和水稻田分别统一经营管理, 开垦后根据田块开垦年限确定施肥量, 进行标准化施肥, 施肥量随开垦年限递增, 一年一季连作, 根茬残留, 但无秸秆还田, 不施有机肥, 施无机氮磷钾肥料。

1.2 土样采集与分析

于 2010 年 4 月水稻种植前在研究区内选择土壤类型为潜育白浆土的天然沼泽湿地、开垦 10 a 的大豆田(与所选水稻田样地旱改水之前的大豆种植年限吻合)以及开垦 1, 3, 5, 8, 11, 14, 18 a 的水稻田。为使土样均匀有代表性, 每种样地随机采集 10 个土样, 采样深度 0—20 cm, 将 10 个土样带回实验室充分混合。土样自然风干, 研磨过 100 目筛, 测定全铁、游离态铁、络合态铁、无定形态铁。各指标分析方法见参考文献^[10]。

1.3 数据处理

采用 Excel 绘制各指标含量分布图及进行拟合分析。

2 结果与分析

2.1 耕层土壤全铁随开垦年限的变化

如图 1a 所示, 旱改水后随开垦年限增加, 水稻田耕层土壤全铁含量呈指数形式递增。开垦 1 a 后, 全铁含量增加, 比天然湿地和大豆田分别高出 35.98% 和 1.85%, 开垦 18 a 后, 达到 $22\,505.74 \text{ mg/kg}$ (见表 1)。已有研究表明, 三江平原天然湿地开垦为旱地大豆田后耕层土壤全铁含量随开垦年限呈增速逐渐放慢的指数增长趋势^[9], 可见, 三江平原天然湿地开垦为旱田, 旱田再改为人工湿地水田的过程中, 表层土壤全铁含量始终在增加。邹元春等^[9]研究表明, 大豆田土壤全铁含量高于天然湿地, 本研究与其研究结果一致。湿地开垦为旱田后, 不再被水淹, 露出水面, 土

壤出露后,毛细管水上行时所携带可流动态的还原性铁,上行到表层后因氧化作用富集起来,出现铁的表聚现象^[11]。旱改水后,受干湿交替的影响,水稻发展了高孔隙的通气组织,因此导致根部氧气得以扩散到土壤溶液中,这个过程加强了土壤中的氧化还原过程,影响了铁循环,同时会在水稻根部形成锈斑^[12],

水稻田每年约有 500 kg/hm^2 锈斑形成^[6]。翻耕也会使下层铁迁移到耕层增加铁含量^[9]。此外,三江平原抽取地下水灌溉水稻田,这也会使水稻田表土全铁含量大幅增加(根据调查,井灌可导致稻田积水的铁含量增加 100 倍,这些铁大部分都沉积在稻田表土中)。总之,人类垦殖活动增加了湿地表层土壤全铁含量。

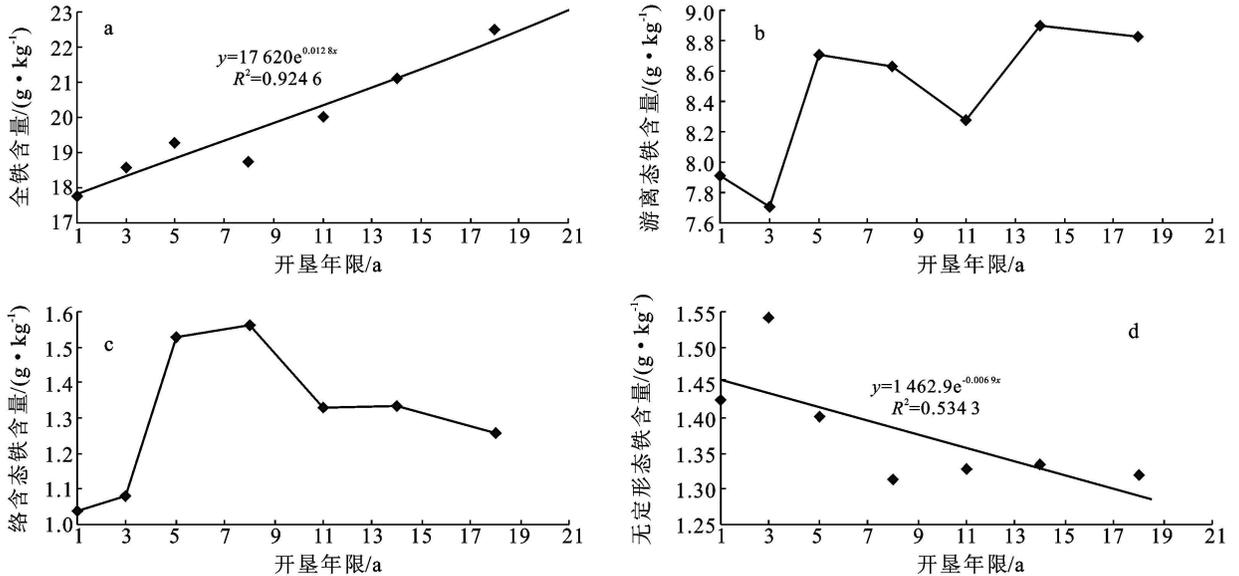


图 1 水稻田耕层土壤全铁及各形态氧化铁含量随开垦年限的变化

表 1 天然湿地表层、大豆田和水稻田耕层土壤铁状况

土地利用类型	全铁/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	游离态铁/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	络合态铁/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	无定形态铁/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	游离度	络合度	活化度
天然湿地	13 067.01	2 295.08	993.75	749.38	0.18	0.43	0.33
旱地大豆田	17 444.78	7 045.14	801.88	925.00	0.40	0.11	0.13
开垦 1 a 水稻田	17 767.91	7 911.94	1 038.52	1 424.85	0.45	0.13	0.18
开垦 18 a 水稻田	22 505.74	8 825.00	1 257.87	1 320.75	0.39	0.14	0.15

2.2 耕层土壤氧化铁随开垦年限的变化

2.2.1 耕层土壤游离态氧化铁随开垦年限的变化

水稻土中铁氧化物的存在形态主要有游离态、络合态和无定形态。氧化铁及其水合物通称为游离铁或游离态氧化铁,不属于晶质层状硅铝酸盐矿物的组成部分的其它形态存在的铁也作游离氧化铁看待^[13]。旱改水 1 a 后,游离态铁相比大豆田增加了 12.30%,之后游离态铁减少,3 a 之后开始增加,5 a 之后减少,11 a 之后又开始增加。随开垦年限增加,游离态铁以波动的形式增加,3 和 11 a 为波谷(7 707.69 和 8 278.37 mg/kg),5 和 14 a 为波峰(8 708.45 和 8 900.00 mg/kg)(见图 1b)。

2.2.2 耕层土壤络合态氧化铁随开垦年限的变化

络合态铁是由有机残体分解形成的简单的有机酸和特殊的腐殖质与铁离子结合生成的有机铁化合物^[14]。旱改水 1 a,络合态铁含量高于天然湿地和大

豆田,开垦前 5 a 快速增加,5~8 a 增速减小,开垦 8 a 达到 1 562.41 mg/kg ,之后则呈现逐渐减少的趋势。总体来看,随开垦年限增加,络合态铁含量先增加后减少(见图 1c)。旱改水后,由于土壤长期滞水,不利于进入土壤的动植物残体分解,有机质逐渐积累,有利于络合态铁的形成。络合态铁的量很少,但它是铁转化细菌的最适底物,对土壤铁的移动影响很大^[15],随开垦年限增加,消耗络合态铁的土壤微生物适应了干湿交替的耕层土壤环境,消耗络合态铁增多,产生和消耗正负 2 种效应综合作用造成了耕层络合态铁先增加后减少的变化趋势。

2.2.3 耕层土壤无定形态氧化铁随开垦年限的变化

无定形氧化铁能反映土壤中氧化铁的表面情况,影响土壤中重金属污染物和某些含氧酸根等养分离子的吸附解吸、沉淀和溶解等物理化学平衡,从而影响重金属等污染物的毒性和养分的有效性^[16]。

研究表明,淹水使土壤无定形氧化铁大大增加^[17]。旱改水1 a后,无定形态铁由大豆田的925.00 mg/kg增加到1 424.85 mg/kg(见表1)。由图1d可以看出,随开垦年限增加,无定形态铁呈指数形式递减(见图1d),有老化趋势。温度、水分、pH值和Eh值、有机质含量、Fe²⁺浓度、铝离子的存在都会影响无定形态铁的含量^[18],且这些因素之间又相互影响,无定形态铁随开垦年限的变化受以上环境条件的共同控制,其具体机理还有待于进一步深入研究。

游离态铁、络合态铁和无定形态铁随开垦年限变化存在共性,旱改水1 a后,相比天然湿地和大豆田含量都明显增加,虽然络合态铁和无定形态铁后期有不同程度的减少,但三者含量始终高于天然湿地和大豆田,由此可见,三江平原水田开发使湿地表层土壤各形态氧化铁含量增加。

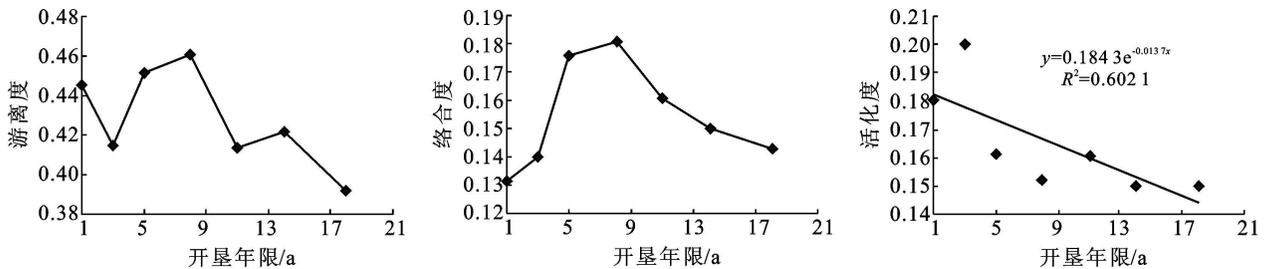


图2 水稻田耕层土壤氧化铁的游离度、络合度和活化度随开垦年限的变化

对比有关三江平原大豆田铁的研究发现,水稻田和大豆田耕层土壤氧化铁的游离度、络合度和活化度随开垦年限变化情况有所不同。大豆田游离度随开垦年限先降低后增加;络合度呈指数形式降低;活化度则是先升高后降低^[9]。大豆田和水稻田的土壤淹水状况和耕作管理方式造成了土壤环境的不同,进而影响了各形态铁的转化和迁移过程,造成游离度、络合度和活化度变化趋势的差异。在天然湿地—旱田(大豆)—水稻田的水田开发过程中耕层土壤氧化铁的游离度升高,水稻田铁的络合度和活化度低于天然湿地高于大豆田。

3 结论

(1) 三江平原水稻田耕层土壤全铁含量随开垦年限呈指数形式递增,且在天然湿地—旱田(大豆)—水稻田的水田开发过程中,全铁含量始终在增加。

(2) 随开垦年限增加,游离态铁以波动的形式增加,络合态铁先增加后减少,无定形态铁呈指数递减趋势,各开垦年限水稻田耕层土壤游离铁、络合态铁和无定形态铁含量均高于天然湿地和大豆田。三江平原水田开发使湿地表层土壤各形态氧化铁含量增加。

2.3 耕层土壤氧化铁的游离度、络合度和活化度随开垦年限的变化

游离度是指游离态氧化铁占全铁的比例,是表征土壤风化程度的重要指标^[9]。铁的络合度表征了与有机质结合的铁占游离铁的比例,与土壤有机质含量密切相关^[10]。活化度则是无定形铁占游离铁的比例,也是土壤风化程度的指标。土壤中氧化铁易随环境条件的变化而转变^[10]。由图2可以看出,旱改水1 a后,水稻田耕层土壤铁的游离度、络合度和活化度都较大豆田有不同程度的升高。随开垦年限增加,水稻田耕层土壤氧化铁的游离度以开垦8 a为节点先升高后降低,开垦8 a游离度为0.46,这与土壤水分状况和微生物活性有关^[19];络合度在开垦前后8 a逐年上升,5~8 a上升速度较之前减小,8 a时达到最高值0.18,随后逐年下降;活化度则呈指数形式下降。

(3) 随开垦年限增加,水稻田与大豆田耕层土壤氧化铁的游离度、络合度和活化度变化趋势存在明显差异,土壤淹水状况和耕作管理方式是造成差异的关键因素。水田开发过程中耕层土壤氧化铁的游离度升高,水稻田氧化铁的络合度和活化度低于天然湿地高于大豆田。

[参考文献]

- [1] Post W M, Mann L K. Changes in soil organic carbon and nitrogen as a result of cultivation [C] // Bouwman A F. Soils and Greenhouse Effect. New York: John Wiley and Sons Inc., 1990: 401-406.
- [2] Sundquist E T. The global carbon dioxide budget [J]. Science, 1993, 259(5097): 934-941.
- [3] 周萍, 宋国涵, 潘根兴, 等. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究II: 团聚体内有机碳的化学结合机制[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 263-273.
- [4] Jäckela U, Russob S, Schnella S. Enhanced iron reduction by iron supplement: A strategy to reduce methane emission from paddies [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(11): 2150-2154.
- [5] 苏玲. 水稻土淹水过程中铁化学行为变化对磷有效性影响研究[D]. 浙江 杭州: 浙江大学, 2001.

种处理与不覆盖秸秆的条件下相比较, 土壤蒸发的抑制率分别为 80.54%, 79.01%, 62.45%, 37.93%。

(2) 不同秸秆覆盖量对土壤蒸发量、土壤含水率、土壤蒸发的抑制率等多项指标的影响程度很大, 秸秆覆盖量越高越有利于水分利用效率的提高, 即多量秸秆覆盖量处理的综合效应优于少量秸秆覆盖量处理。

(3) 研究结果表明, 秸秆覆盖有效地减少了土壤水分蒸发, 控制了地下水位的上升, 抑制了土壤盐渍化的形成, 达到了保墒抑蒸效应, 并随着秸秆覆盖量的增大而愈加明显。秸秆覆盖使盐分向地表聚集逐渐减弱, 使土壤的脱盐量增加, 并且脱盐层的深度加深; 使孔隙度增加, 透水性增强, 有利于盐分淋洗。同时秸秆覆盖后, 可以明显地抑制盐分在 0—10 cm 土层的积累, 使整个土壤盐分含量变化趋于平稳。

[参 考 文 献]

- [1] 王尊亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 250-311.
- [2] 王维, 郑曙峰, 路曦结, 等. 农田秸秆覆盖技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(18): 8343-8346.
- [3] Tolk J A, Howell T A, Evett S R. Effect of mulch, irrigation and soil type on water use and yield of maize [J]. Soil & Tillage Research, 1999, 50: 137-147.
- [4] Jia S N, Paul W Unger. Soil water accumulation under different precipitation, potential evaporation, and straw mulch conditions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65: 442-448.
- [5] 李新举, 张志国. 秸秆覆盖对土壤水分蒸发及土壤盐分的影响[J]. 土壤通报, 2009, 30(6): 257-258.
- [6] 侯连涛, 焦念元, 韩宾, 等. 不同覆盖方式对土壤水分分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(1): 47-48.
- [7] 李玲玲, 黄高宝, 张仁陟, 等. 免耕秸秆覆盖对旱作农田土壤水分的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 94-96.
- [8] 新举, 张志国, 刘勋岭, 等. 秸秆覆盖对土壤水盐运动的影响[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2000, 31(1): 38-40.
- [9] 虎胆·吐马尔白, 吴旭春, 迪力达. 不同位置秸秆覆盖条件下土壤水盐运动实验研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(1): 34-37.
- [10] 陈素英, 张喜英, 裴冬, 等. 玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 171-173.
- [6] 姜明, 吕宪国, 杨青, 等. 湿地铁的生物地球化学循环及其环境效应[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 493-499.
- [7] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤: 改良利用, 性质, 肥沃度, 生成分类[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [8] 黄妮, 刘殿伟, 王宗明. 1986—2005 年三江平原水田与旱地的转化特征[J]. 资源科学, 2009, 31(2): 324-329.
- [9] 邹元春, 吕宪国, 姜明. 不同开垦年限湿地土壤铁变化特征研究[J]. 环境科学, 2008, 29(3): 814-818.
- [10] 熊毅, 陈家坊, 马毅杰, 等. 土壤胶体: 第 2 册[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 241-268.
- [11] 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动的关系[J]. 湖泊科学, 1996, 8(1): 35-42.
- [12] Chen C C, Dixon J B, Turner F T. Iron coatings on rice roots—mineralogy and quantify influencing factors [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(3): 635-639.
- [13] 马毅杰, 陈家坊. 我国红壤中氧化铁形态及其特性和功能[J]. 土壤, 1998, 30(1): 1-6.
- [14] Aristovskaya T V, Zavarain G A. Biochemistry of iron in soil [C] // McLaren A D, Skujins J, eds. Soil Biochemistry. New York: Marcel Dekker Inc., 1971: 385-408.
- [15] 谭中欣. 水稻土中铁还原及其电子传递特征[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2003.
- [16] 蔡妙珍, 邢承华. 土壤铁的活化与环境意义[J]. 浙江师范大学学报: 自然科学版, 2004, 27(3): 279-282.
- [17] Kumar S. Changes in some physico-chemical properties and activities of iron and zinc on submergence of iron and zinc on submergence of some rice soils [J]. Journal Indian Society of Soil Science, 1981, 29(1): 204-207.
- [18] 熊毅, 陈家坊, 马毅杰, 等. 土壤胶体: 第 1 册[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 148-155.
- [19] 刘晔, 关连珠, 张瑞杰, 等. 不同利用方式棕壤中氧化铁的存在形态和分异特征研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(2): 184-183.

(上接第 25 页)