

干湿交替条件下铁氧化对水稻土 CO₂ 排放的影响

陈凌玉^{1,2}, 刘飞², 赵双娇², 李朋相², 丁冠宇², 石旭², 彭其安^{1,2*}
(1. 武陵山区特色资源植物种质保护与利用湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;
2. 武汉纺织大学 环境工程学院, 湖北 武汉 430073)

摘要:以湖北省2种典型水稻土[咸宁市的中稻-冬闲水稻土(第四纪红壤,XR)和潜江市的中稻-冬闲水稻土(钙质潮土,QR)]为材料,研究土壤干湿交替条件下[土壤落干(孔隙含水率55%)到完全淹水(土水比1:1)]添加Fe²⁺对土壤Fe³⁺、可溶性有机碳(DOC)含量及CO₂排放的影响,拟揭示水分转变过程中土壤活性铁氧化对土壤有机碳固持的影响。结果表明,整个培养期间,与CK(不添加Fe²⁺)相比,添加Fe²⁺促进了XR和QR土壤中活性铁的氧化,XR和QR土壤中Fe³⁺平均含量分别较CK提高了133.87%和95.66%。落干期间,与CK相比,添加Fe²⁺促进了CO₂的排放,XR和QR土壤CO₂累积排放量分别增加了59.77%和124.48%;促进了土壤DOC的积累,XR和QR土壤DOC平均含量分别提高了42.57%和23.71%。淹水期间,与CK相比,添加Fe²⁺抑制了CO₂的排放,XR和QR土壤CO₂累积排放量分别降低了54.03%和35.27%;培养前期促进了土壤DOC的积累,培养后期抑制了土壤DOC含量的积累,总体上XR土壤DOC平均含量降低了35.29%,QR土壤DOC含量提高了16.59%。整个培养期间,添加Fe²⁺后,XR和QR土壤CO₂累积排放量分别降低了43.87%和22.14%。综上,我国南方富含铁氧化物的红壤具有更高的固碳减排潜力。

关键词: 干湿交替; 水稻土; 铁氧化; 可溶性有机碳; CO₂ 排放量

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2017)08-0072-05

Effects of Iron Oxidation on CO₂ Emission in Paddy Soils under Dry-wet Alternation Conditions

CHEN Lingyu^{1,2}, LIU Fei², ZHAO Shuangjiao², LI Pengxiang²,
DING Guanyu², SHI Xu², PENG Qi'an^{1,2*}

(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Protection and Application of Special Plants in Wuling Area, Wuhan 430074, China; 2. School of Environmental Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan 430073, China)

Abstract: The effects of Fe²⁺ addition in soil on Fe³⁺, dissolved organic carbon (DOC) contents and CO₂ emission were studied with Xianning rice field (XR, red soil) and Qianjiang rice field (QR, calcareous fluvo-aquic soil) as materials under dry-wet alternation (55% water filled pore space and flooding) conditions, so as to reveal the effect of iron oxidation on organic carbon sequestration during water transformation. The results showed that the addition of Fe²⁺ promoted the oxidation of active iron in XR and QR soils, compared with CK (without Fe²⁺), the average contents of Fe³⁺ in XR and QR soils increased by 133.87% and 95.66%, respectively. Under drought condition, compared with CK, the addition of Fe²⁺ promoted the CO₂ emission and accumulation of DOC, the cumulative CO₂ fluxes from XR

收稿日期:2017-03-20
基金项目:湖北省教育厅中青年人才项目(164016);武陵山区特色资源植物种质保护与利用湖北省重点实验室开放基金项目(PJS12001);武汉纺织大学大学生实践创新项目(201607101)
作者简介:陈凌玉(1996-),女,湖南益阳人,在读本科生,研究方向:环境微生物。E-mail:657088288@qq.com
* 通讯作者:彭其安(1981-),男,湖北潜江人,讲师,博士,主要从事农田生态系统碳、氮循环研究。
E-mail:pqa2002_@163.com

and QR soils increased by 59.77% and 124.48%, and the average contents of DOC increased by 42.57% and 23.71%, respectively. Under the flooding condition, compared with CK, the addition of Fe²⁺ inhibited the CO₂ emission, the cumulative CO₂ fluxes from XR and QR soils decreased by 54.03% and 35.27%, respectively; the addition of Fe²⁺ promoted the accumulation of DOC at earlier stage, and inhibited the accumulation of DOC at later stage, the average content of DOC decreased by 35.29% in XR soil but increased by 16.59% in QR soil. During the whole period, compared with CK, the addition of Fe²⁺ significantly decreased cumulative CO₂ fluxes in XR and QR soils by 43.87% and 22.14%, respectively. The results suggested that red soils with rich iron oxide in southern of China had high potential in organic carbon sequestration.

Key words: dry-wet alternation; paddy soils; iron oxidation; dissolved organic carbon; CO₂ emission

水稻土是我国重要的农业耕作土壤。据统计,我国水稻种植面积为 2 860 万 hm², 约占世界水稻总种植面积的 20%^[1]。稻田生态系统具有较好的固碳潜势,我国南方水稻土的固碳潜势为 6.7 ~ 15.3 Mg/hm²,对于抵消和延缓全球大气 CO₂ 浓度增加具有重要作用^[2]。近 30 a 来,我国中南部地区常采取水旱轮作模式种植水稻,在水稻种植期间的灌溉、晒田等农艺措施显著降低了稻田甲烷排放通量^[3]。但这种频繁的干湿交替过程中土壤有机质的分解和转化规律仍未形成统一的认识^[4]。一方面,不同作物种植方式、不同气候等条件下的土壤样本确实存在较大差异;另一方面,即便是同一地区、相同种植模式的不同母质土壤,由于其母质中某些矿质元素(如 Fe、Mn 和 S 等)和土壤结构等的差异,其参与的土壤碳、氮循环耦合过程对土壤有机碳矿化贡献也较难确定。当前,土壤微生物驱动的矿质元素生物地球化学循环已成为土壤科学领域的研究热点之一。

铁作为地壳中第四大元素,在土壤中具有较高的丰度,铁、碳、氮、硫循环等在土壤生态环境中扮演重要角色。例如,在土壤干湿交替过程中,土壤中的活性铁氧化物会发生激烈的氧化还原反应,必定会影响土壤氧化还原条件,改变土壤生物呼吸类型,进

而调节土壤有机质的转化途径。国内外学者关于水稻土中异化铁还原对土壤矿化的影响已有较多的研究和报道,大多数研究已证实土壤中的铁氧化物参与异化铁还原过程对于维持土壤有机质稳定具有重要作用^[5-7]。然而,铁氧化在频繁干湿交替过程中对土壤有机质转化和累积的影响还有待于进一步明确。为此,在室内条件下控制一定的因素,探讨干湿交替条件下铁氧化对水稻土 CO₂ 排放的影响,拟揭示水分转变过程中土壤活性铁氧化对土壤有机碳固持的影响,为制定农田温室气体减排措施提供参考。

1 材料和方法

1.1 采样点概况

供试土壤采自湖北省咸宁市横沟镇附近(114°39'408"E、29°86'222"N)和湖北省潜江市西大垸农场附近(112°43'26"E、30°11'45"N)。咸宁市的土壤母质为第四纪红壤,土地利用方式为中稻-冬闲(简称 XR);潜江市的土壤母质为钙质潮土,土地利用方式为中稻-冬闲(简称 QR)。2 个采样点均属于亚热带大陆性季风气候,降雨量集中在 4—9 月,约占全年总降雨量的 70%。采用“S”形布点采集 0 ~ 20 cm 耕层土壤,自然风干后过 1 mm 筛备用。采样点土壤基本理化性质见表 1。

表 1 土壤基本理化性质						
土样	有机碳/(g/kg)	总氮/(g/kg)	总铁/(mg/g)	阳离子交换量/(cmol/kg)	pH	容重/(g/cm ³)
XR	139.1	1.0	2.86	6.51	5.05	1.23
QR	188.1	1.4	9.07	25.06	7.10	1.18

1.2 试验设计

在土壤落干(即孔隙含水率为 55%)到完全淹水(土水比为 1:1)的培养过程中,设置添加 FeCl₂(Fe²⁺)和空白对照(CK)2 个处理。FeCl₂添加量为 6 mmol/kg。1 L 玻璃瓶装 200 g 风干土,每个处理设置 3 个重复。正式试验前,土壤预培养 3 周,然后在落干条件下培养 15 d;淹水后,所有处理添加

5 mmol/kg 乙酸钠作为补充碳源,继续培养 41 d。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 培养土样 Fe³⁺ 及可溶性有机碳(DOC)含量 每 2 ~ 4 d 取 1 次土样,经 0.5 mol/L HCl 浸提后,采用邻菲罗啉分光光度法测定 Fe³⁺ 含量;每 2 d 取 1 次土样,用蒸馏水浸提后,用总有机碳/氮分析仪(Vitro,德国)测定土壤 DOC 含量。

1.3.2 CO₂ 排放通量及累积排放量 用培养瓶密闭培养 2 h 后,每天测定 CO₂ 排放通量及累积排放量。单位时间内土壤 CO₂ 浓度的变化率用气相色谱仪测定 (Agilent 6890, 美国), CO₂ 排放通量计算参考文献[8], 公式如下。

$$F = \rho \times (V/W) \times (\Delta C/\Delta t) \times 273/(T+273) \times \alpha$$

式中, F 为 CO₂ 排放通量; ρ 为 CO₂ 标准状况下的密度; V 为培养瓶体积; W 为风干土质量; $\Delta C/\Delta t$ 表示单位时间内 CO₂ 浓度的变化率; T 是培养温度 (℃); α 是 CO₂ 换算成 C 的转换因子 ($\alpha = 12/44$)。

1.4 数据处理

试验数据采用 SPSS 16 软件进行方差分析和相关性分析, 利用 Origin 8.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 添加 Fe²⁺ 对 2 种水稻土 Fe³⁺ 含量的影响

整个培养期间, 添加 Fe²⁺ 促进了土壤活性铁的氧化 (图 1)。落干期间, XR 土壤中 CK Fe³⁺ 平均含量为 1.64 mg/g, Fe²⁺ 处理 Fe³⁺ 平均含量为 2.52 mg/g; QR 土壤中 CK Fe³⁺ 平均含量为 3.10 mg/g, Fe²⁺ 处理 Fe³⁺ 平均含量为 4.86 mg/g。淹水期间, 2 种土壤铁氧化反应依然较强, XR 土壤中 CK Fe³⁺ 平均含量为 1.49 mg/g, Fe²⁺ 处理 Fe³⁺ 平均含量为 4.80 mg/g; QR 土壤中 CK Fe³⁺ 平均含量为 4.05 mg/g, Fe²⁺ 处理 Fe³⁺ 平均含量为 9.13 mg/g。总体上, 整个培养期间, 添加 Fe²⁺ 使 XR 和 QR 土壤中 Fe³⁺ 平均含量分别较 CK 提高了 133.87% 和 95.66%。

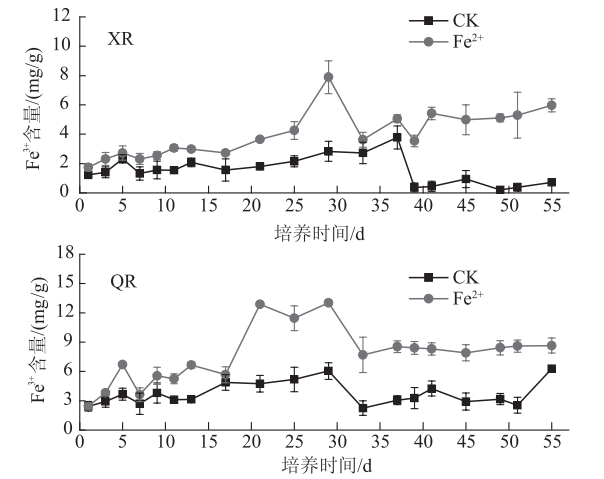


图 1 2 种水稻土 Fe³⁺ 含量变化情况

2.2 铁氧化对 2 种水稻土 DOC 含量的影响

由 2.1 分析可知, 添加 Fe²⁺ 促进了土壤活性铁的氧化, 而铁氧化调节了土壤 DOC 含量 (图 2)。落干期间, Fe²⁺ 处理 DOC 含量整体上高于 CK, XR 土

壤中 CK 和 Fe²⁺ 处理 DOC 平均含量分别为 51.37 mg/kg 和 73.24 mg/kg, Fe²⁺ 处理较 CK 增加了 42.57%; QR 土壤中 CK 和 Fe²⁺ 处理 DOC 平均含量分别为 60.64 mg/kg 和 75.02 mg/kg, Fe²⁺ 处理较 CK 增加了 23.71%。淹水促进了土壤 DOC 的积累 (尽管初期补充了一定碳源, 但淹水后 1 周内 DOC 含量仍然不断增加)。值得注意的是, 落干期 2 种土壤 Fe²⁺ 处理 DOC 含量均高于 CK, 但淹水后期 (41 d 后) CK 均高于 Fe²⁺ 处理。在整个淹水期间, XR 土壤中 CK 和 Fe²⁺ 处理 DOC 平均含量分别为 208.45 mg/kg 和 134.88 mg/kg, Fe²⁺ 处理较 CK 降低了 35.29%; 而 QR 土壤中 CK 和 Fe²⁺ 处理 DOC 平均含量分别为 157.84 mg/kg 和 184.02 mg/kg, Fe²⁺ 处理较 CK 增加了 16.59%。表明厌氧铁氧化对不同母质土壤 DOC 含量的调节存在一定差异。

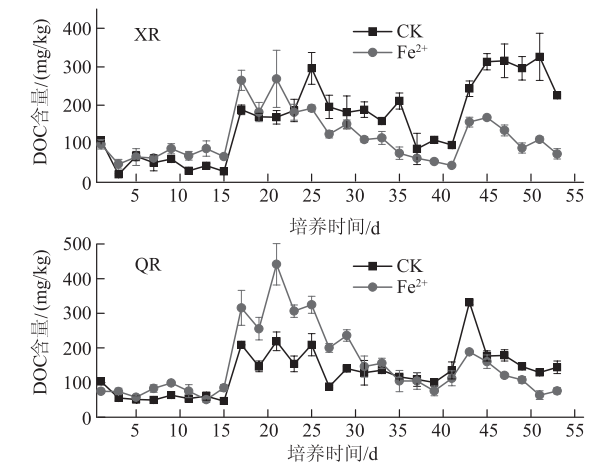


图 2 2 种水稻土 DOC 含量变化情况

2.3 铁氧化对 2 种水稻土 CO₂ 排放量的影响

添加 Fe²⁺ 促进了土壤活性铁的氧化, 而铁氧化调节了土壤 CO₂ 排放通量 (图 3—4)。

2.3.1 落干期间 由图 3 可知, 落干期间, XR 与 QR 土壤的 CO₂ 排放通量总体呈波动下降趋势。与 CK 相比, 2 种土壤经 Fe²⁺ 处理后 CO₂ 排放通量和累积排放量均增加 (图 3—4)。对于 XR 土壤来说, 落干期间, CK 和 Fe²⁺ 处理 CO₂ 排放通量的峰值均出现在培养 1 d, 分别为 5.51 mg/(kg · d) 和 10.07 mg/(kg · d), CO₂ 排放通量均值分别为 4.05 mg/(kg · d) 和 6.47 mg/(kg · d); 累积排放量分别为 60.77 mg/kg 和 97.09 mg/kg, Fe²⁺ 处理较 CK 增加了 59.77%。对于 QR 土壤来说, 落干期间, CK 和 Fe²⁺ 处理 CO₂ 排放通量的峰值也均出现在培养 1 d, 分别为 7.50 mg/(kg · d) 和 30.56 mg/(kg · d), CO₂ 排放通量均值分别为 3.00 mg/(kg · d) 和 6.74 mg/(kg · d); 累积排放量分别为 45.06 mg/kg

和 101.15 mg/kg, Fe²⁺ 处理较 CK 增加了 124.48%。
2.3.2 淹水期间 由图 3—4 可知,淹水期间,对于 XR 来说,Fe²⁺ 处理 CO₂ 的排放通量和累积排放量总体上均低于 CK。其中,CK CO₂ 排放通量总体上呈现先升高后降低的趋势,培养 30 d 时达到峰值,为 29.48 mg/(kg·d); Fe²⁺ 处理 CO₂ 排放通量相对比较平缓,没有较大的波动,最大值为 11.43 mg/(kg·d)。淹水期间,CK 和 Fe²⁺ 处理 CO₂ 累积排放量分别为 620.34 mg/kg 和 285.20 mg/kg, Fe²⁺ 处理较 CK 降低了 54.03%。对于 QR 来说,Fe²⁺ 处理 CO₂ 排放通量和累积排放量总体上均低于 CK。其中,CK CO₂ 排放通量在培养 32 d 时达到峰值,为 19.84 mg/(kg·d), Fe²⁺ 处理 CO₂ 排放通量在培养 16 d 时最高,为 14.32 mg/(kg·d)。淹水期间,CK 和 Fe²⁺ 处理 CO₂ 累积排放量分别为 503.23 mg/kg 和 325.76 mg/kg, Fe²⁺ 处理较 CK 降低了 35.27%。

整个培养期(1~56 d),XR 土壤 CK 和 Fe²⁺ 处理 CO₂ 累积排放量分别为 681.11 mg/kg 和

382.29 mg/kg,而 QR 土壤分别为 548.29 mg/kg 和 426.91 mg/kg, Fe²⁺ 处理 XR 和 QR 土壤 CO₂ 累积排放量较 CK 分别降低了 43.87% 和 22.14%。

3 结论与讨论

前人研究表明,铁循环过程在水稻土壤、沉积物以及自然湿地等环境中构成了铁-碳-氮等元素的生物地球化学耦合循环的关键环节^[9-10]。故推测,土壤活性铁的存在极可能是维持土壤有机质稳定的关键因素之一。有研究证实,土壤在淹水条件下,DOC 与铁离子的结合可通过配位交换、多价阳离子桥和弱键胶结等物理、化学的缔合促进土壤铁-碳稳定性复合物形成^[11-12],酸性黏土的这种固碳效应尤为显著^[13]。曲东等^[14]研究表明,土壤在淹水等厌氧条件下添加无定形氧化铁能显著抑制水稻土中甲烷的形成,并导致有机碳的转移发生变化。

本研究结果表明,在落干土壤中添加外源 Fe²⁺ 时,2 种土壤的 DOC 含量均高于 CK,表明外源 Fe²⁺ 有利于土壤中 DOC 的释放,促进了土壤 CO₂ 排放;但淹水后期,外源 Fe²⁺ 能明显抑制土壤 CO₂ 排放,且对第四纪红壤(XR)DOC 的抑制效应更为明显。值得注意的是,尽管 XR 土壤中 Fe³⁺ 含量比钙质潮土(QR)低,但对土壤 DOC 含量的影响却更为明显。很可能是因第四纪红壤中黏粒含量较高,淹水后铁氧化-还原过程更有利于形成稳定的铁-碳复合体^[15]。本研究揭示了不同水分条件下红壤的铁氧化过程对土壤有机碳固持具有重要作用。

研究表明,铁氧化细菌可以直接驱动或参与调节环境中 Fe²⁺ 的氧化,铁氧化细菌对湿地土壤中微生物的氧化贡献达 50%~60%^[16]。在本研究中,淹水后由于微生物的激发效应,2 种土壤的呼吸均明显增加,铁氧化过程对土壤呼吸表现出截然不同的效应,即淹水时抑制土壤呼吸,而落干时促进土壤呼吸。表明土壤活性铁在不同氧化过程能直接影响土壤有机质矿化效率。本研究结果表明,好氧铁氧化提高 XR 和 QR 土壤 CO₂ 累积排放量 59.77% 和 124.48%;但在整个干湿交替过程中,外源铁氧化降低 XR 和 QR 土壤 CO₂ 累积排放量 43.87% 和 22.14%。

总体而言,土壤中活性铁氧化过程有助于维持土壤有机质稳定,特别是对我国南方的红壤具有更高的固碳减排的潜力。

参考文献:

[1] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京:科学出版社,

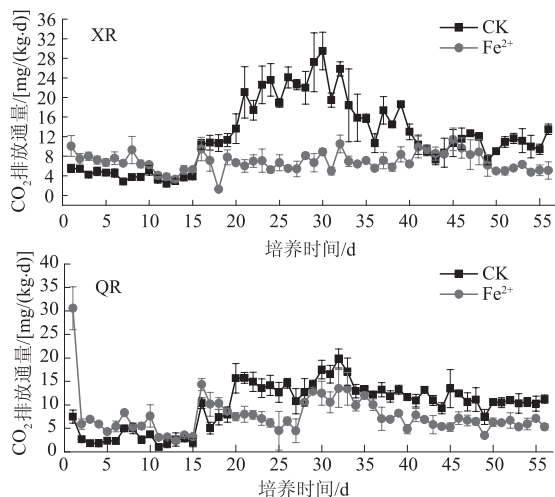


图 3 2 种水稻土 CO₂ 排放通量变化情况

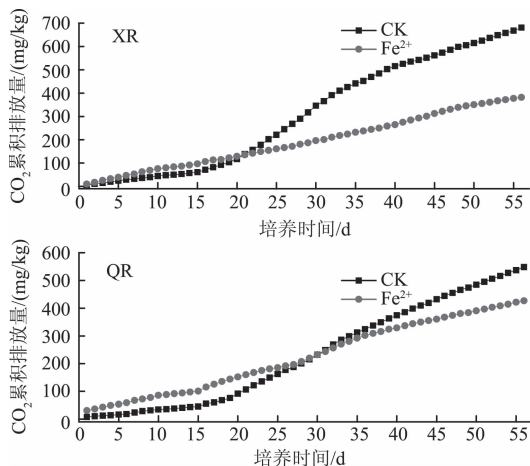


图 4 2 种水稻土 CO₂ 累积排放量变化情况

- 2001;6-10.
- [2] Yan X,Zhou H,Zhu Q H,*et al.* Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013,130(6):42-51.
- [3] Li C S,Qiu J J,Frolking S,*et al.* Reduced methane emissions from large-scale changes in water management of China's rice paddies during 1980—2000[J]. *Geophysical Research Letters*,2002,29(20):331-334.
- [4] Borken W,Matzner E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils [J]. *Global Change Biology*,2009,15(4):808-824.
- [5] Ratering S,Schnell S. Localization of iron-reducing activity in paddy soil by profile studies[J]. *Biogeochemistry*, 2000,48(3):341-365.
- [6] Qu D,Ratering S,Schnell S. Microbial reduction of weakly crystalline iron(Ⅲ) oxides and suppression of methanogenesis in paddy soil [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*,2004,72(6):1172-1181.
- [7] Zhou S G,Xu J L,Yang G Q,*et al.* Methanogenesis affected by the co-occurrence of iron(Ⅲ) oxides and humic substances [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, 88(1):107-120.
- [8] Hu R G,Hatano R,Kusa K,*et al.* Soil respiration and net ecosystem production in an onion field in central Hokkaido, Japan[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*,2004,50:27-33.
- [9] Lovley D R,Holmes D E,Nevin K P. Dissimilatory Fe(Ⅲ) and Mn(Ⅳ) reduction[J]. *Advances in Microbial Physiology*,2004,55(2):259-287.
- [10] Clément J C,Shrestha J,Ehrenfeld J G,*et al.* Ammonium oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron under anaerobic conditions in wetland soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2005,37(12):2323-2328.
- [11] Kögel-Knabner I,Amelung W,Cao Z H,*et al.* Biogeochemistry of paddy soils [J]. *Geoderma*,2010,157(1/2):1-14.
- [12] Hanke A,Cerli C,Muhr J,*et al.* Redox control on carbon mineralization and dissolved organic matter a long a chronosequence of paddy soils [J]. *European Journal of Soil Science*,2013,64(4):476-487.
- [13] Oades J M. The retention of organic matter in soils [J]. *Biogeochemistry*,1988,5(1):35-70.
- [14] 曲东,张一平,Schnell S,等. 添加氧化铁对水稻土中 H₂、CO₂ 和 CH₄ 形成的影响 [J]. *应用生态学报*, 2003,14(8):1313-1316.
- [15] Peng Q A,Shaaban M,Hu R G,*et al.* Effects of soluble organic carbon addition on CH₄ and CO₂ emissions from paddy soils regulated by iron reduction processes [J]. *Soil Research*,2015,53(3):316-324.
- [16] Neubauer S C,Emerson D,Megonigal J P. Life at the energetic edge; Kinetics of circumneutral iron oxidation by lithotrophic iron-oxidizing bacteria isolated from the wetland-plant rhizosphere [J]. *Applied and Environmental Microbiology*,2002,68(8):3988-3995.
- ~~~~~
- (上接第 56 页)
- [15] 刘国顺,罗贞宝,王岩,等. 绿肥翻压对烟田土壤理化性状及土壤微生物量的影响 [J]. *水土保持学报*, 2006,20(1):95-98.
- [16] 黄平娜,秦道珠,龙怀玉,等. 绿肥还田对烟田土壤培肥和烤烟产量品质的作用 [J]. *土壤通报*,2010,41(2):379-382.
- [17] 侣国涵,赵书军,王瑞,等. 连年翻压绿肥对植烟土壤物理及生物性状的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014,20(4):905-912.
- [18] 马哲,邓昌斌. 不同冬油菜翻压量对安康地区烤烟产量和品质的影响 [J]. *安徽农业科学*,2013,41(3):1015-1017.
- [19] 刘强,袁谋志. 湘西烟区土传病害及其防治 [J]. *作物研究*,2012,26(7):120-123.
- [20] Larkin R P,Honeycutt C W,Olanya O M. Management of *Verticillium* wilt of potato with disease-suppressive green manures and as affected by previous cropping history [J]. *Plant Disease*,2011,95(5):568-576.
- [21] 乔世佳,李淑敏,孟令波. 芸薹属植物对四种土传病原微生物熏蒸效果的研究 [J]. *东北农业大学学报*, 2010,41(5):19-24.
- [22] Larkin R P,Griffin T S. Control of soilborne potato diseases using *Brassica* green manures [J]. *Crop Protection*, 2007,26(7):1067-1077.
- [23] 何洪巨,陈杭,Schnitzler W H. 芸薹属蔬菜中硫代葡萄糖苷鉴定与含量分析 [J]. *中国农业科学*,2002,35(2):192-197.
- [24] 李锋,张春雷. 芸薹属植物的生防作用 [J]. *中国油料作物学报*,2006,28(1):97-103.
- [25] 潘福霞,鲁剑巍,刘威,等. 三种不同绿肥的腐解和养分释放特征研究 [J]. *植物营养与肥料学报*,2011,17(1):216-223.
- [26] 李继伟,周俊学,张喜文,等. 烤烟田休闲期 5 种绿肥的生物量及硫苷含量比较 [J]. *湖北农业科学*,2016,55(19):5056-5058,5132.
- [27] 李红燕,胡铁成,曹群虎,等. 旱地不同绿肥品种和种植方式提高土壤肥力的效果 [J]. *植物营养与肥料学报*,2016,22(5):1310-1318.