

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015

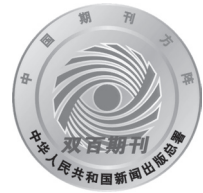
第52卷 第6期

Vol.52 No.6



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 6 期 2015 年 11 月

目 次

综述与评论

- 耕地地力评价指标体系构建中的问题与分析逻辑····· 赵彦锋 程道全 陈 杰等 (1197)
 蚯蚓对土壤温室气体排放的影响及机制研究进展····· 卢明珠 吕宪国 管 强等 (1209)

研究论文

- 高寒山区地形序列土壤有机碳和无机碳垂直分布特征及其影响因素····· 杨 帆 黄来明 李德成等 (1226)
 中国中、东部典型县域土壤与地表水体多样性的粒度效应及关联性····· 任圆圆 张学雷 (1237)
 渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征····· 于 洋 赵业婷 常庆瑞 (1251)
 黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演····· 李 萍 赵庚星 高明秀等 (1262)
 干湿交替对黄土崩解速度的影响····· 王 健 马 璠 张鹏辉等 (1273)
 晋陕蒙接壤区露天矿层状土壤水分入渗特征与模拟····· 吴奇凡 樊 军 杨晓莉等 (1280)
 旱作褐土中氧化铁的厌氧还原与光合型亚铁氧化特征····· 孙丽蓉 王旭刚 徐晓峰等 (1291)
 流动电位法研究高岭石胶体对包铝石英砂zeta电位的影响····· 李忠意 徐仁扣 (1301)
 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析····· 于 飞 施卫明 (1311)
 太行山山麓平原30年间土壤养分与供肥能力变化····· 刘建玲 贾 可 廖文华等 (1325)
 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性····· 杨 文 周脚根 王美慧等 (1336)
 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征····· 李红林 贡 璐 朱美玲等 (1345)
 东北平原土壤硒分布特征及影响因素····· 戴慧敏 宫传东 董 北等 (1356)
 浙江南部亚热带森林土壤植硅体碳的研究····· 林维雷 应雨骐 姜培坤等 (1365)
 土壤非多次叠加污染对蚯蚓的毒性效应····· 马静静 钱新春 张 伟等 (1374)
 有机肥对黄瓜枯萎病的防治效果及防病机理研究····· 赵丽娅 李文庆 唐龙翔等 (1383)
 滴灌枸杞对龟裂碱土几种酶活性的改良效应····· 张体彬 康跃虎 万书勤等 (1392)
 石羊河流域中下游浅层地温变化及其对气温变化的响应····· 杨晓玲 丁文魁 马中华等 (1401)
 高放废物处置库预选场址包气带土壤渗透性研究····· 李杰彪 苏 锐 周志超等 (1412)

研究简报

- 基于TM数据的黑土有机质含量空间格局反演研究····· 宋金红 吴景贵 赵欣宇等 (1422)
 陕西省玉米土壤肥力与施肥效应评估····· 单 燕 李水利 李 茹等 (1430)
 宇宙射线土壤水分观测方法在黄土高原草地植被的应用····· 赵 纯 袁国富 刘 晓等 (1438)

信息

- 《土壤学报》入选“2015期刊数字影响力100强”····· (1437)

封面图片：滴灌枸杞改良龟裂碱土重度盐碱荒地（由张体彬提供）

DOI: 10.11766/trxb201503010103

旱作褐土中氧化铁的厌氧还原与光合型亚铁氧化特征*

孙丽蓉 王旭刚 徐晓峰 郭大勇

(河南科技大学农学院, 河南洛阳 471003)

摘要 土壤中铁的氧还过程与碳氮转化及自净能力关系密切, 已还原亚铁的氧化受土壤性质的影响。采用室内恒温培养试验研究了旱作褐土中铁还原氧化过程、及其与水溶性碳、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 的关系。结果表明旱作褐土中铁氧化物在厌氧光照条件下可先被还原后被再次氧化, 其再氧化量介于 $1.46 \sim 3.00 \text{ mg g}^{-1}$ 之间, 平均 2.09 mg g^{-1} ; 再氧化速率常数介于 $0.23 \sim 0.80 \text{ d}^{-1}$ 之间, 平均 0.48 d^{-1} 。再氧化量与土壤无定形铁、水溶性硫酸盐含量、阳离子交换量显著负相关, 与土壤总氮、总磷显著正相关; 再氧化速率常数与土壤有机碳显著负相关, 与黏粒含量极显著正相关。厌氧光照培养可使旱作褐土水溶性无机碳平均降低 52.74%, 水溶性 NO_3^- 降低 92.15%, 水溶性 SO_4^{2-} 增加 55.38%。研究结果为深入理解旱作土壤潜在的微生物铁循环转化方式提供理论支持。

关键词 铁氧化物; 厌氧还原氧化; 旱作褐土; 碳素转化; 光照

中图分类号 S153.4 **文献标识码** A

厌氧条件下土壤中氧化物的还原-氧化过程与土壤中碳、氮等元素的转化和土壤自净能力关系密切, 备受关注^[1-3]。湿地土壤中氧化物的厌氧还原特征已被广泛研究^[4-8], 且还原过程产生的 $\text{Fe}(\text{II})$ 可在厌氧条件下被硝酸盐还原铁氧化菌^[9-10]、不产氧光合细菌^[9]或者产氧光合菌产生的氧再次氧化^[11]。 $\text{Fe}(\text{II})$ 再氧化的同时, 水溶性无机碳被同化固定, 降低了 CO_2 等含碳温室气体排放的风险^[12]。亚铁再氧化的主要产物是具有较大比表面积的弱晶型的铁氧化物(比如水铁矿、针铁矿和纤铁矿)^[13], 可促使重金属由水溶态、络合态向铁氧化物结合态转化, 降低其生物可利用性, 阻止其顺利进入食物链^[14-15]。虽然铁还原菌(Ion-reducing bacteria, IRB)和铁氧化菌(Iron-oxidizing bacteria, IOB)在厌氧环境中同时存在, 且IOB的数量较IRB高2~3个数量级^[16], 但湿地土壤表现为温室气体 CH_4 和 CO_2 的源^[17], 表明环境中 $\text{Fe}(\text{II})$ 氧化菌对 $\text{Fe}(\text{II})$ 的氧化可能被抑制或限制。

旱作土壤属于氧化性土壤, 但研究显示旱地

土壤在含水量充足时存在甲烷排放现象^[17-18], 表明旱地土壤依然存在还原性环境。与湿地土壤相似, 不考虑光照条件时旱作褐土中游离铁氧化物的41.95%可在淹水条件下被还原^[19], 过程中土壤水溶性无机碳含量增加, 硝态氮含量降低^[19]。光照条件水稻土厌氧培养过程中土壤铁氧化物先被还原, 光照刺激了产氧光合菌的繁殖, 其光合作用产生 O_2 , 可使还原产生 $\text{Fe}(\text{II})$ 被氧化^[11], 降低了 CO_2 排放风险^[12]。此外, 光照条件下, 较低pH时, $\text{Fe}(\text{III})$ 在有低分子量有机酸存在的情况下, 可形成 $\text{Fe}(\text{III})$ -Ligand配体接受光能, $\text{Fe}(\text{III})$ 被还原, 致使铁氧化被光还原溶解, 同时有机配体转化为自由基, 自由基可发生链式反应, 氧化 $\text{Fe}(\text{II})$ 或者有机配体, 致使体系有机碳降低无机碳增加^[20-21]。然而, 亦有研究表明采自湖南宁乡县(pH=6.11)和江西安福县(pH=4.84)的酸性水稻土在光照条件下培养时未见亚铁再氧化现象^[11]。光照条件下可发生亚铁再氧化现象的土壤^[12]采样区域附近的旱作褐土中铁是否可发生厌氧再氧化尚未可知。研究显示控制土壤pH可影

* 国家自然科学基金项目(41101215; U1504402)、河南省科技攻关项目(11210211007)资助

作者简介: 孙丽蓉(1977—), 女, 陕西西安人, 博士, 副教授, 主要从事土壤环境化学方面研究。E-mail: slr1206@126.com

收稿日期: 2015-03-01; 收到修改稿日期: 2015-08-20

响Fe(II)再氧化, pH 6~8时湿地土壤可发生Fe(II)再氧化, 而利用0.2 mol L⁻¹乙酸钠和0.3 mol L⁻¹乙酸缓冲液控制pH=4时几无Fe(II)再氧化现象^[22]。Fe(II)再氧化亦受土壤水分含量的影响, 含水量小于50%时增加含水量可促进亚铁的再氧化, 大于50%时则抑制了亚铁的再氧化^[23]。Melton等^[9]认为硝酸盐、无机碳、共存底物(co-substrate)等也可能限制铁氧化菌氧化Fe(II)。而现有关于土壤亚铁再氧化影响因素的研究多采用外源添加试剂的方法, 亚铁再氧化量与土壤自身性质的关系亦不明晰。为了探索旱作褐土中氧化铁被还原后能否发生再氧化及其再氧化特征与土壤自身性质的关系, 本文选取可发生亚铁再氧化的水稻土采样区域附近的7个旱作褐土进行光照厌氧培养试验探索旱作褐土中铁的再氧化特征, 以期明确旱作土壤潜在的微生物铁循环转化方式, 为调控旱作土壤铁的氧化还原过程提供初步的研究思路和理论支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土样采自河南省洛阳市宜阳县韩城镇(简称YY), 孟津县麻屯镇(简称MJ), 伊川县鸦岭乡(简称YC), 洛宁县兴华乡(简称LN), 嵩县饭坡乡(简称SX), 汝阳县刘店乡(简称RY)和新安县铁门镇(简称XA)的旱作农田, 具体采样位置及土壤基本性质见文献[19]。土壤类型为半淋溶土褐土类, 具明显石灰性反应。

1.2 恒温厌氧培养试验

试验采用泥浆厌氧光照恒温培养的方法, 称取若干份质量为3.000 g的风干土壤样品, 分别置于容积为10 ml的血清瓶中, 加去离子水3 ml后充氮5 min排氧, 加橡胶塞及铝盖密封后一半置于配置16根色温6 500 K日光灯管的光照培养箱(宁波莱福, FPG3)中30±1℃不间断光照培养, 照度2 000 lx。一半置于隔水式恒温培养箱(上海博讯, GSP-9270MBE)30±1℃恒温培养作为避光对照(以采自新安土壤样品为例)。采样时各处理取出3瓶, 充分摇匀后吸取0.4 ml土壤泥浆, 溶于4.6 ml浓度为0.5 mol L⁻¹的盐酸中, 置于隔水式恒温培养箱30±1℃下浸提24 h。浸提液采用0.22 μm混合纤维素脂膜过滤后测定滤液中Fe(II)。培

养结束时, 各处理取3瓶, 用去离子水分4次每次3 ml洗净泥浆(控制水土质量比为5:1)至50 ml三角瓶, 摇匀后采用配置0.45 μm混合纤维素脂膜的针头过滤器过滤, 滤液备分析水溶性碳、NO₃⁻和SO₄²⁻用。

1.3 分析指标与方法

土壤基本理化性质采用常规方法分析^[24]。培养过程中0.5 mol L⁻¹可提取Fe(II)采用邻啡罗啉比色法测定^[11]。水溶性NO₃⁻、SO₄²⁻采用离子色谱法(戴安ICS-900, DS5电导检测器, IonPac[®] AS14分析柱, ASRS[®] 300 4 mm抑制器, 淋洗液为3.5 mmol L⁻¹ Na₂CO₃和1.0 mmol L⁻¹ NaHCO₃, 流速1.0 ml min⁻¹)测定。水溶性碳采用TOC分析仪(岛津TOC-V_{CPH}, 680℃催化燃烧, 非色散红外检测, N₂载气150 ml min⁻¹)测定。

1.4 数据处理

$$C_t = \frac{a}{1 + be^{-kt}} \quad (1)$$

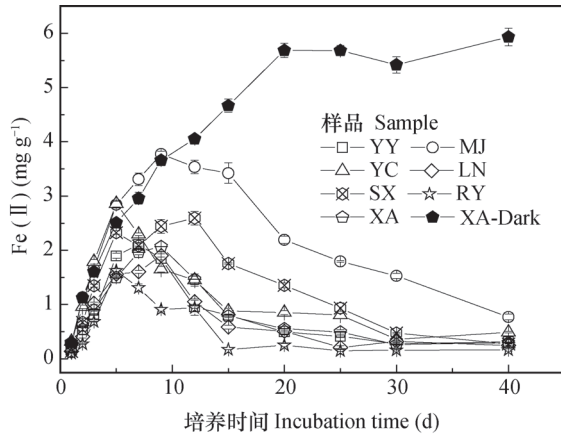
式中, C_t 为 t 天时Fe(II)氧化量, 数值等于Fe(II)_{max}-Fe(II)_t, Fe(II)_{max}为培养过程中Fe(II)含量最大值, mg g⁻¹; Fe(II)_t为培养 t 天时Fe(II)含量, mg g⁻¹; t 为培养时间, d; a 为最大再氧化量, mg g⁻¹; k 为氧化速率常数, d⁻¹; b 为方程无量纲参数。

数据采用Microsoft Excel、OriginPro 8.5和SPSS 13.0分析处理。

2 结果

2.1 厌氧光照条件下褐土的Fe转化

旱作褐土在厌氧光照培养过程中Fe(II)的浓度变化如图1所示, 随着培养时间的延长, 0.5 mol L⁻¹可提取Fe(II)先逐渐增加, 后呈现降低趋势, 显著有别于避光对照试验, 表明Fe(II)再氧化过程的存在。光照条件下旱地褐土铁的最大还原量介于1.62~3.77 mg g⁻¹, 平均2.42 mg g⁻¹; 占土壤游离铁含量的10.88%~38.95%, 平均19.93%, 土壤间变异系数48.08%。40 d培养结束时, 体系中0.5 mol L⁻¹ HCl可提取Fe(II)含量介于0.16~0.77 mg g⁻¹, 亦即已还原铁氧化物的79.56%~90.09%可在光照培养过程中被再次氧化, 再氧化量介于1.46~3.00 mg g⁻¹, 平均2.09 mg g⁻¹(表1)。相



空心符号表示光照处理，实心符号表示避光处理 Black circles stand for illuminated incubation, and filled circles for non-illuminated one

图1 旱作褐土厌氧光照培养过程中Fe(II)含量

Fig. 1 Content of Fe(II) in upland cinnamon soils under illuminated anaerobic incubation

关分析显示(表2)，亚铁再氧化量与土壤无定形铁($p=0.04$)、水溶性硫酸盐含量($p=0.05$)、阳离子交换量($p=0.03$)显著负相关，与总氮($p=0.05$)、总磷($p=0.02$)和铁氧化物最大还原量($p<0.01$)显著正相关。

如图2所示，亚铁氧化量随培养时间的延长表现出S型增加趋势，符合描述微生物生长的Logistic方程。不同土壤样品亚铁再氧化速率常数介于 $0.23 \sim 0.80 \text{ d}^{-1}$ 之间，平均 0.48 d^{-1} ，样品间变异系数46.74%。相关分析显示(表2)，亚铁氧化速率常数与土壤有机碳含量之间存在显著负相关关系($p=0.03$)，与黏粒含量极显著正相关($p=0.01$)，与最大还原量($p=0.04$)、再氧化量($p=0.03$)之间存在显著负相关关系。

2.2 厌氧光照培养对褐土水溶性碳的影响

厌氧光照培养40 d后，土壤中水溶性无机碳

表1 旱作褐土厌氧光照培养过程中铁还原氧化过程的关键参数

Table 1 Key parameters of redox of iron oxide in upland cinnamon soils under illuminated anaerobic incubation

样品编号 Soil code	40天培养过程实测 Measured during 40-d of incubation				Logistic模型拟合结果 Fitted using the logistic model		
	最大还原量 Max Fe(II) reduction (mg g^{-1})	游离铁还原率 Reduction rate of free iron (%)	再氧化量 Reoxidation (mg g^{-1})	再氧化率 Reoxidation rate (%)	再氧化量 Reoxidation (mg g^{-1})	速率常数 Rate constant (d^{-1})	统计学概率 p
YY	2.11 ± 0.03	18.34	1.83	86.78	1.71 ± 0.08	0.59 ± 0.16	<0.001
MJ	3.77 ± 0.05	38.95	3.00	79.56	2.82 ± 0.28	0.24 ± 0.07	<0.001
YC	2.86 ± 0.06	25.92	2.50	87.46	2.24 ± 0.12	0.39 ± 0.11	<0.001
LN	1.91 ± 0.03	14.97	1.70	89.01	1.57 ± 0.07	0.80 ± 0.31	<0.001
SX	2.59 ± 0.12	14.95	2.32	89.49	2.30 ± 0.25	0.23 ± 0.08	0.002
RY	1.62 ± 0.05	10.88	1.46	90.09	1.47 ± 0.09	0.40 ± 0.12	<0.001
XA	2.07 ± 0.01	15.53	1.81	87.37	1.56 ± 0.07	0.71 ± 0.20	<0.001
平均值 Average	2.42 ± 0.73	19.93 ± 9.58	2.09 ± 0.54	87.11 ± 3.54	1.95 ± 0.51	0.48 ± 0.22	
变异系数 Coefficient of variation (%)	30.10	48.08	25.89	4.07	26.01	46.74	

注：再氧化率为实测再氧化量占最大还原量的百分比例 Note: Re-oxidation rate refers to ratio of the reoxidated to the max Fe(II) reduced

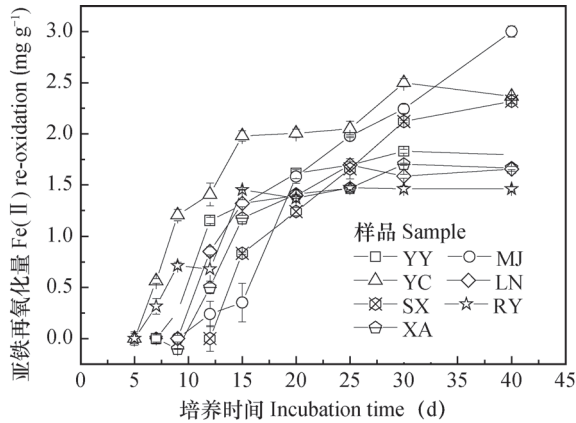


图2 旱作褐土光照培养过程中Fe(II)氧化动力学
Fig. 2 Dynamics of Fe(II) oxidation in upland cinnamon soils under illuminated anaerobic incubation

均呈现明显降低, 其降幅介于22.45%~84.41%之间, 平均降低了52.74%(表3)。水溶性有机碳则增减不一, 采自汝阳、嵩县、宜阳的低有机碳含量土壤经过40 d的光照培养后水溶性有机碳降低了20.63%、25.48%和27.77%, 而采集孟津、新安等较高有机碳含量土样中水溶性有机碳则表现为增加趋势, 相关分析显示水溶性有机碳变化量与有机质($p=0.01$)和硫酸盐变化量($p=0.01$)极显著正相关, 而水溶性无机碳变化量与供试土壤的理化性质无明显相关关系(表2)。

2.3 厌氧光照培养对褐土水溶性NO₃和SO₄²⁻的影响
光照培养40 d 土壤中水溶性NO₃均显著降低, 降幅介于82.40%~96.11%, 平均降幅92.15%, 不同样品间变异5.65%(表4)。

土壤中水溶性NO₃含量变化受总氮含量、CEC及铁氧化还原过程的影响(表2)。相关分析显示, 影响土壤中水溶性NO₃变化量与土壤总氮含量呈现正相关关系($p=0.09$), 与CEC呈现负相关关系($p=0.06$)。且与土壤中铁的最大还原量($p=0.05$)呈显著正相关关系, 与铁的再氧化量呈正相关关系($p=0.08$)。研究表明NO₃可作为Fe(III)的竞争电子受体而被还原, 据此, 体系中NO₃减少量应与铁还原量呈现负相关关系。由此可见, 在未外加NO₃的条件下, 土壤水溶性NO₃可能是作为微生物可利用的氮源, 在铁还原-氧化过程可能被铁还原/氧化微生物消耗以合成微生物氮。

水溶性SO₄²⁻含量变化受土壤有机质含量、CEC、水溶性碳含量及铁还原过程的影响(表2)。培养过程中水溶性SO₄²⁻则明显增加, 增幅

介于8.08%~127.6%, 平均55.38%, 不同样品间变异达86.41%。相关分析表明, 水溶性SO₄²⁻增量与土壤OM正相关($p=0.11$), 与CEC显著负相关($p=0.04$), 与土壤水溶性有机碳变化量($p=0.01$)和水溶性总碳变化量($p<0.01$)极显著正相关。水溶性SO₄²⁻的增加可能是土壤有机碳尤其是水溶性有机碳中硫在被微生物分解过程中释放的。

3 讨论

本试验结果显示, 光照条件下旱作褐土中铁氧化物可被还原, 其最大还原量介于1.62~3.77 mg g⁻¹, 占土壤游离铁含量的10.88%~38.95%; 而且培养后期已还原铁氧化物的79.56%~90.09%可在光照培养过程中被再次氧化。之前研究显示厌氧避光条件下旱作土壤铁氧化物的还原潜势介于4.47~5.95 mg g⁻¹之间, 游离铁的还原率介于29.97%~50.79%之间^[19]。由此可见, 光照不仅抑制了土壤中铁氧化物的继续还原, 也促进了已还原亚铁的再氧化过程。之前的研究认为光照对水稻土等湿地土壤中铁氧化物还原的影响可能体现在光照激活了土壤存在的光合微生物, 其光合产氧作用改变了土壤的氧还电位, 抑制了铁氧化物的进一步还原, 促进了已还原亚铁的再次氧化。但是这一假设仍需测试体系中氧含量变化进一步证实, 此外本试验显示的亚铁再氧化现象的原因是否如此仍需要验证。

旱地土壤避光培养时铁还原过程伴随着水溶性无机碳含量的激增和水溶性有机碳的增加, 其原因可能是微生物在还原土壤中铁氧化物的同时促进了土壤有机碳的矿化分解, 增加了水溶性无机碳^[12]。而本实验显示培养40 d后土壤水溶性无机碳含量均呈现降低趋势, 平均降幅达52.74%; 这可能与光照条件下光合微生物对土壤水溶性无机碳的利用有关^[12]。水溶性有机碳则因土壤有机碳含量高低不同而增减不一, 较高有机碳含量土壤培养40 d后水溶性有机碳的变化趋势与之前避光培养趋势一致^[19]; 而低有机质含量土壤则表现为降低, 其原因可能与水溶性有机碳更易于被微生物利用, 而土壤有机碳含量较低, 对水溶性有机碳的补充有限有关。

厌氧条件下, Fe(II)可被硝酸盐还原铁氧化菌(Nitrate-reducing Ferrous oxidizing bacteria)

表2 亚铁厌氧再氧化过程关键参数与土壤性质的相关分析

Table 2 Correlation analysis of key parameters of anaerobic re-oxidation of ferrous and soil properties

土壤性质 Soil properties	统计检验 Statistical test	Δ WSIC ^①	Δ WSOC ^②	再氧化量 Fe (II) reoxidized	速率常数 Rate constant of re-oxidation	Δ NO ₃ ^{-③}	Δ SO ₄ ^{2-④}
有机碳	Pearson correlation	0.079	0.858	0.694	-0.791	0.501	0.659
Organic carbon	Sig. (2-tailed)	0.866	0.013	0.083	0.034	0.252	0.108
游离铁	Pearson correlation	-0.203	-0.540	-0.435	0.475	-0.478	-0.281
Free Iron oxide	Sig. (2-tailed)	0.663	0.211	0.329	0.281	0.278	0.542
无定形铁	Pearson correlation	-0.226	-0.186	-0.788	0.608	-0.586	-0.069
Amorphous Iron oxide	Sig. (2-tailed)	0.626	0.689	0.035	0.147	0.167	0.883
总氮	Pearson correlation	-0.057	0.611	0.752	-0.612	0.684	0.301
Total nitrogen	Sig. (2-tailed)	0.904	0.145	0.051	0.144	0.090	0.513
总磷	Pearson correlation	-0.220	0.547	0.834	-0.586	0.655	0.356
Total phosphors	Sig. (2-tailed)	0.636	0.204	0.020	0.167	0.110	0.433
水溶性硫	Pearson correlation	-0.373	-0.202	-0.757	0.746	-0.375	-0.231
Water soluble sulfate	Sig. (2-tailed)	0.410	0.664	0.049	0.054	0.407	0.618
阳离子交换量	Pearson correlation	-0.282	-0.708	-0.818	0.540	-0.732	-0.768
Cation exchange capacity	Sig. (2-tailed)	0.539	0.075	0.025	0.210	0.061	0.044
黏粒含量	Pearson correlation	-0.041	-0.448	-0.708	0.878	-0.272	-0.320
Clay content	Sig. (2-tailed)	0.931	0.313	0.075	0.009	0.556	0.484
最大还原量	Pearson correlation	0.316	0.574	0.992	-0.771	0.748	0.562
Max Fe (II) reduced	Sig. (2-tailed)	0.490	0.177	0.000	0.043	0.053	0.190
Δ WSTC ^⑤	Pearson correlation	0.494	0.961	0.530	-0.460	0.670	0.922
	Sig. (2-tailed)	0.260	0.001	0.221	0.299	0.099	0.003
水溶性无机碳	Pearson correlation	-0.173	0.499	0.427	-0.671	0.143	0.263
Water soluble inorganic carbon	Sig. (2-tailed)	0.710	0.255	0.339	0.099	0.760	0.569
水溶性有机碳	Pearson correlation	0.165	-0.421	0.048	-0.160	-0.115	-0.465
Water soluble organic carbon	Sig. (2-tailed)	0.724	0.347	0.919	0.731	0.805	0.293
Δ WSIC ^①	Pearson correlation	1.000	0.235	0.245	-0.102	0.462	0.444
	Sig. (2-tailed)		0.612	0.597	0.828	0.296	0.318
Δ WSOC ^②	Pearson correlation	0.235	1.000	0.514	-0.482	0.602	0.890
	Sig. (2-tailed)	0.612		0.238	0.273	0.152	0.007
亚铁再氧化量	Pearson correlation	0.245	0.514	1.000	-0.794	0.697	0.498
Fe (II) re-oxidized	Sig. (2-tailed)	0.597	0.238		0.033	0.082	0.255
再氧化速率常数	Pearson correlation	-0.102	-0.482	-0.794	1.000	-0.224	-0.454
Rate constant of re-oxidation	Sig. (2-tailed)	0.828	0.273	0.033		0.630	0.306
Δ NO ₃ ^{-③}	Pearson correlation	0.462	0.602	0.697	-0.224	1.000	0.507
	Sig. (2-tailed)	0.296	0.152	0.082	0.630		0.246
Δ SO ₄ ^{2-④}	Pearson correlation	0.444	0.890	0.498	-0.454	0.507	1.000
	Sig. (2-tailed)	0.318	0.007	0.255	0.306	0.246	

注：① 水溶性无机碳变化量，② 水溶性有机碳变化量，③ 水溶性NO₃变化量，④ 水溶性硫酸盐变化量，⑤ 水溶性总碳变化量
 Note: ① refers to water soluble inorganic carbon, ② to water soluble organic carbon, ③ to water soluble nitrate, ④ to water soluble sulfate and ⑤ to water soluble total carbon

表3 厌氧培养前后土壤中的水溶性碳

Table 3 Content of water soluble carbon in the cinnamon soils before and after anaerobic incubation

样品编号 Soil code	水溶性无机碳 Water soluble inorganic carbon			水溶性有机碳 Water soluble organic carbon		
	培养前 Before incubation	培养后 After incubation	降幅 Descent rate	培养前 Before incubation	培养后 After incubation	增幅 Ascent rate (%)
	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(%)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(%)
LN	72.30 ± 7.92	11.27 ± 0.34	84.41	149.4 ± 15.1	163.3 ± 8.2	9.33
MJ	71.85 ± 1.63	55.72 ± 0.48	22.45	186.0 ± 3.8	278.2 ± 2.7	49.62
RY	58.63 ± 0.53	24.33 ± 0.01	58.50	141.6 ± 8.3	112.4 ± 6.3	-20.63
SX	60.33 ± 2.44	22.84 ± 0.10	62.14	125.5 ± 4.0	93.52 ± 3.21	-25.48
XA	66.00 ± 0.92	39.54 ± 0.48	40.09	147.2 ± 4.0	214.7 ± 7.0	45.81
YC	71.65 ± 0.35	19.67 ± 0.13	72.55	137.1 ± 2.0	147.7 ± 5.3	7.79
YY	68.75 ± 1.06	48.78 ± 0.93	29.05	156.2 ± 4.9	112.8 ± 3.5	-27.77
平均值 Average	67.07 ± 5.65	31.74 ± 16.46	52.74	149.0 ± 19.0	160.4 ± 65.9	5.52 ± 32.51
变异系数 Coefficient of variation (%)	8.43	51.86	43.48	12.76	41.07	588.7

表4 厌氧培养前后土壤中水溶性NO₃⁻、SO₄²⁻的浓度变化

Table 4 Contents of water soluble nitrate and sulfate in the cinnamon soils before and after anaerobic incubation

样品编号 Soil code	NO ₃ ⁻			SO ₄ ²⁻		
	培养前 Before incubation	培养后 After incubation	降幅 Descent rate (%)	培养前 Before incubation	培养后 After incubation	增幅 Ascent rate (%)
	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(%)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(%)
YY	58.42 ± 1.42	2.27 ± 0.22	96.11	108.8 ± 7.0	119.1 ± 0.4	9.45
MJ	85.63 ± 1.56	15.07 ± 0.94	82.40	88.66 ± 1.81	201.8 ± 0.9	127.6
YC	42.48 ± 2.47	4.31 ± 0.23	89.85	77.23 ± 8.54	83.47 ± 0.39	8.08
LN	78.46 ± 0.97	1.52 ± 0.19	98.06	178.0 ± 0.6	259.7 ± 1.0	45.90
SX	37.56 ± 0.84	1.90 ± 0.18	94.94	77.74 ± 0.42	111.3 ± 0.8	43.18
RY	42.29 ± 0.77	4.04 ± 0.42	90.45	167.8 ± 8.9	185.4 ± 1.1	10.46
XA	40.96 ± 1.06	2.76 ± 0.32	93.26	106.3 ± 17.7	209.5 ± 0.5	97.04
平均值 Average	55.11 ± 19.66	4.55 ± 4.75	92.15 ± 5.21	114.9 ± 41.6	167.2 ± 63.7	55.38 ± 47.86
变异系数 Coefficient of variation (%)	35.68	104.4	5.65	36.19	38.08	86.41

氧化, $10\text{Fe}^{2+} + 2\text{NO}_3^- + 24\text{H}_2\text{O} \rightarrow 10\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{N}_2 + 18\text{H}^+$ [9-10], 也可被不产氧厌氧的光合细菌 (*photoferrotrophs*) $\text{Fe}(\text{II})$, $\text{HCO}_3^- + 4\text{Fe}^{2+} + 10\text{H}_2\text{O} + h\nu \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + 4\text{Fe}(\text{OH})_3 + 7\text{H}^+$ [9] 或者在近中性环境中被厌氧产氧光合细菌产生的氧氧化。Melton等 [9] 认为虽然避光时亚铁再氧化过程由硝酸盐还原铁氧化菌主导, 光照时由光合型亚铁氧化微生物主导, 但在适合的光照条件下, 光合微生物可在硝酸盐还原铁氧化开始之前便使 $\text{Fe}(\text{II})$ 消耗殆尽。但本试验及前期研究结果显示湿地土壤避光培养过程中并无表观 $\text{Fe}(\text{II})$ 再氧化现象, 且相对于旱作褐土避光培养无亚铁再氧化现象时 NO_3^- 高达 99.26% 的降幅 [19], 本试验条件下 NO_3^- 降幅为 92.15%。因而, 本试验条件下高达 2.09 mg g^{-1} 的再氧化量可能并不是硝酸盐还原铁氧化菌引起的。此外, 试验结果显示水溶性 NO_3^- 降幅不仅与 $\text{Fe}(\text{II})$ 氧化量之间存在一定正相关关系, 也与铁还原量之间存在显著正相关关系。也从侧面说明本试验条件下的 $\text{Fe}(\text{II})$ 再氧化可能不是硝酸盐还原铁氧化菌氧化, 但其相关关系表明硝酸盐的降低可能是由于水溶性硝酸盐是铁还原氧化微生物易于利用的氮源。亚铁再氧化量与总氮、总磷之间的正相关关系也说明了这一点。

虽然不产氧的光合菌亦可氧化 $\text{Fe}(\text{II})$, 但是其过程需要硫的参与 [25], 而试验数据显示水溶性 SO_4^{2-} 与 $\text{Fe}(\text{II})$ 再氧化量负相关, 其增量与铁氧化还原过程中铁的最终还原量正相关, 表现出了还原态硫对铁的还原作用。此外, 不产氧光合氧化 $\text{Fe}(\text{II})$ 虽可致水溶性无机碳降低, 同时亦可降低体系 pH [22, 26], 然而光照条件下培养结束后 pH 出现略增趋势 [22]。故本试验体系中 $\text{Fe}(\text{II})$ 的再氧化也可能不是不产氧光合氧化。之前研究认为厌氧产氧光合细菌产生的氧是光照条件下该湿地土壤 $\text{Fe}(\text{II})$ 氧化的主要原因 [11, 27]。产氧光合菌产生氧对 $\text{Fe}(\text{II})$ 的氧化作用是一个表面反应。黏粒表面吸附结合 $\text{Fe}(\text{II})$ 更易被氧化 [28], 而试验结果也显示 $\text{Fe}(\text{II})$ 再氧化速率常数与黏粒含量正相关。 $\text{Fe}(\text{II})$ 氧化量与无定形铁和 CEC 的负相关关系可能与土壤无定形铁对 $\text{Fe}(\text{II})$ 的包裹作用和阳离子交换的保护作用阻碍了氧气对 $\text{Fe}(\text{II})$ 的进一步氧化, 侧面说明试验中 $\text{Fe}(\text{II})$ 的氧化可能是产氧光合菌产生氧的氧化作用。是否确实如此, 仍需要进一步通过分析光合色素和顶空气体进行验证。

此外, 光照条件下铁氧化物在酸性条件下有机配体存在时可以接受光能, 致使氧化铁光化学还原溶解和含碳自由基的形成, 自由基可通过链式反应氧化有机物或者 $\text{Fe}(\text{II})$ 。虽本试验光照前期表现为还原作用, 但是与避光相比光照铁还原阶段铁的还原量不仅未显著提高, 且略低于避光处理。表明光照铁配体类 fenton 反应对铁还原溶解的促进作用并不明显。此外, 类 Fenton 反应需要较低 pH [21], 且该反应致无机碳增加, 有机碳降低 [20]。而本试验 7 个土壤样品 pH 介于 7.46 ~ 7.90; 且本试验中虽然有机碳增减不一, 但无机碳均显著降低, 平均降幅可达 52.74%。此外, 铁配体类 Fenton 反应也受到土壤有机酸种类和含量的限制 [29]。因而, 本试验中光照培养后期的亚铁氧化可能不是非生物的光化学氧化引起的。

4 结 论

旱作褐土中铁氧化还原循环受光照影响, 厌氧光照条件下旱作褐土中 10.88% ~ 38.95% 的铁氧化物可被还原, 其中 79.56% ~ 90.09% 的 $\text{Fe}(\text{II})$ 可被再次氧化, 再氧化量介于 $1.46 \sim 3.00\text{ mg g}^{-1}$ 之间, 平均 2.09 mg g^{-1} 。旱作褐土中可发生光合型亚铁氧化现象, 且亚铁再氧化量与土壤无定形铁、水溶性硫酸盐含量、阳离子交换量显著负相关, 受土壤总氮、总磷影响; 再氧化速率常数与土壤有机碳显著负相关, 与黏粒含量极显著正相关。厌氧光照条件下土壤水溶性无机碳平均降低 52.74%, 水溶性 NO_3^- 降幅达 92.15%, 水溶性 SO_4^{2-} 含量增加 55.38%。

参 考 文 献

- [1] Kögel-Knabner I, Amelung W, Cao Z, et al. Biogeochemistry of paddy soils. *Geoderma*, 2010, 157 (1/2): 1—14
- [2] Li F B, Li X M, Zhou S G, et al. Enhanced reductive dechlorination of DDT in an anaerobic system of dissimilatory iron-reducing bacteria and iron oxide. *Environmental Pollution*, 2010, 158 (5): 1733—1740
- [3] Azam H M, Finneran K T. Ferric iron amendment increases $\text{Fe}(\text{III})$ -reducing microbial diversity and carbon oxidation in on-site wastewater systems. *Chemosphere*, 2013, 90 (4): 1435—1443

- [4] Shi L, Rosso K M, Clarke T A, et al. Molecular underpinnings of Fe (III) oxide reduction by *Shewanella Oneidensis* MR-1. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 50. DOI: 10.3389/fmicb.2012.00050
- [5] Roden E E, McBeth J M, Blothe M, et al. The microbial ferrous wheel in a neutral pH groundwater seep. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 172. DOI: 10.3389/fmicb.2012.00172
- [6] Emerson D, Roden E, Twining B S. The microbial ferrous wheel: Iron cycling in terrestrial, freshwater, and marine environments. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 383. DOI: 10.3389/fmicb.2012.00383
- [7] 王旭刚, 孙丽蓉. 土壤剖面胶体中铁氧化物及其厌氧还原特征研究. *河南农业科学*, 2009, 39 (3) : 38—42. Wang X G, Sun L R. Iron oxides in soil colloids and its reduction characters (In Chinese). *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2009, 39 (3) : 38—42
- [8] 孙丽蓉, 曲东, 易维洁. 多糖对水稻土中异化 Fe (III) 还原过程的影响. *河南农业科学*, 2010, 40 (6) : 62—66. Sun L R, Qu D, Yi W J. Effect of polysaccharide concentration on dissimilatory Fe (III) reduction in paddy soils (In Chinese). *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2010, 40 (6) : 62—66
- [9] Melton E D, Schmidt C, Kappler A. Microbial iron (II) oxidation in littoral freshwater lake sediment: The potential for competition between phototrophic vs. nitrate-reducing iron (II) -oxidizers. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 197. DOI: 10.3389/fmicb.2012.00197
- [10] Shelobolina E, Konishi H, Xu H, et al. Isolation of phyllosilicate-iron redox cycling microorganisms from an illite-smectite rich hydromorphic soil. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 134. DOI: 10.3389/fmicb.2012.00134
- [11] 孙丽蓉, 曲东, 卫亚红. 光照对水稻土中氧化铁还原的影响. *土壤学报*, 2008, 45 (4) : 628—634. Sun L R, Qu D, Wei Y H. Effect of illumination on iron oxide reduction in anaerobic paddy soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (4) : 628—634
- [12] 孙丽蓉, 黄海霞, 王旭刚, 等. 褐土中铁的氧化还原与碳素转化. *土壤学报*, 2013, 50 (3) : 540—547. Sun L R, Huang H H, Wang X G, et al. Relationship between anaerobic redox of iron oxides and carbon transformation in cinnamon soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (3) : 540—547
- [13] Senko J M, Dewers T A, Krumholz L R. Effect of oxidation rate and Fe (II) , state on microbial nitrate-dependent Fe (III) mineral formation. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71 (11) : 7172—7177
- [14] Lack J G, Chaudhuri S K, Kelly S D, et al. Immobilization of radionuclides and heavy metals through anaerobic bio-oxidation of Fe (II). *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, 68 (6) : 2704—2710
- [15] Cui B, Zhang Q, Zhang K, et al. Analyzing trophic transfer of heavy metals for food webs in the newly-formed wetlands of the Yellow River Delta, China. *Environmental Pollution*, 2011, 159 (5) : 1297—1306
- [16] Yu R, Gan P, Mackay A A, et al. Presence, distribution, and diversity of iron-oxidizing bacteria at a landfill leachate-impacted groundwater surface water interface. *FEMS Microbiology Ecology*, 2010, 71 (2) : 260—271
- [17] Wang Y Y, Hu C S, Ming H, et al. Concentration profiles of CH₄, CO₂ and N₂O in soils of a wheat-maize rotation ecosystem in North China Plain, measured weekly over a whole year. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 260—272
- [18] 刘硕, 李玉娥, 孙晓涵, 等. 温度和土壤含水量对温带森林土壤温室气体排放的影响. *生态环境学报*, 2013, 22 (7) : 1093—1098. Liu S, Li Y E, Sun X H, et al. Effects of temperature and soil moisture on greenhouse gases emission of temperate forest soil (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22 (7) : 1093—1098
- [19] 孙丽蓉, 王旭刚, 郭大勇, 等. 旱作褐土中铁氧化物的厌氧还原动力学特征. *土壤学报*, 2013, 50 (1) : 106—112. Sun L R, Wang X G, Guo D Y, et al. Dynamics of iron oxides anaerobic reduction of iron oxides in upland arid cinnamon soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (1) : 106—112
- [20] Voelker B M, Morel F M M, Sulzberger B. Iron redox cycling in surface waters: Effects of humic substances and light. *Environmental Science & Technology*, 1997, 31 (4) : 1004—1011
- [21] Cieřla P, Kocot P, Mytych P, et al. Homogeneous photocatalysis by transition metal complexes in the environment. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2004, 224 (1/2) : 17—33
- [22] 李金珠, 王旭刚, 袁雪红, 等. pH与石灰性水稻土铁氧化还原过程的关系. *土壤学报*, 2014, 51 (1) : 143—149. Li J Z, Wang X G, Yuan X H, et al. Relationship between pH and iron redox cycle in calcareous paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (1) : 143—149

- [23] 王旭刚, 郭大勇, 张莘, 等. 水稻土中铁氧化还原循环的光照水分效应. 土壤学报, 2014, 51 (4) : 853—859. Wang X G, Guo D Y, Zhang P, et al. Effect of illumination and water condition on iron redox cycle in paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (4) : 853—859
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical method for soil and agr-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science Technology Press, 2000
- [25] Brabec M Y, Lyons T W, Mandernack K W. Oxygen and sulfur isotope fractionation during sulfide oxidation by anoxygenic phototrophic bacteria. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 83: 234—251
- [26] Feng Y, Grogan P, Caporaso J G, et al. pH is a good predictor of the distribution of anoxygenic purple phototrophic bacteria in Arctic soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 74: 193—200
- [27] Steuer R, Knoop H, Machne R. Modelling cyanobacteria: From metabolism to integrative models of phototrophic growth. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63 (6) : 2259—2274
- [28] Hiemstra T, van Riemsdijk W H. Adsorption and surface oxidation of Fe (II) on metal (hydr) oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71 (24) : 5913—5933
- [29] Xiao D, Guo Y, Lou X, et al. Distinct effects of oxalate versus malonate on the iron redox chemistry: Implications for the photo-Fenton reaction. *Chemosphere*, 2014, 103: 354—358

ANAEROBIC REDOX OF IRON OXIDES AND PHOTOSYNTHETIC OXIDATION OF FERROUS IRON IN UPLAND CINNAMON SOILS

Sun Lirong Wang Xugang Xu Xiaofeng Guo Dayong

(*Agricultural College, Henan University of Science & Technology, Luoyang, Henan 471003, China*)

Abstract Iron redox cycle is an important microbial process of the degradation of organic matter in anaerobic soil and sediment environment, and it is closely related to transformation of carbon and nitrogen and soil self-purification capacity. As Fe (II) produced anaerobically by dissimilatory iron reduction process could be oxidized by nitrate-reducing/iron-oxidizing bacteria, anoxygenic photosynthetic bacteria or oxygen produced by oxygenic photosynthetic bacteria in wetland soil anaerobically. Furthermore, risk of emission of greenhouse gases, such as CO₂ and biological availability of heavy metals decreases in the process at the same time. Whether oxidation of ferrous generated by dissimilatory iron reduction would occurs or not depends on soil properties, and ferrous oxidation characteristics, including capacity and rate constant are governed by soil pH and contents of water, nitrate, inorganic carbon and other co-substrates. Though upland cinnamon soils belong to oxisol, dissimilatory iron reduction of iron oxide may occur in the semi-luvisol cinnamon soils with adequate water content under non-illuminated incubation as the preliminary study shows, whether the Fe (II) produced anaerobically under non illuminated incubation could be re-oxidized in upland cinnamon soils under illumination incubation is not still clear and neither, are characteristics of the re-oxidation in these soils, not to mention relationship between oxidation characteristics and soil properties. To learn further in-depth about potential microbial iron redox cycle in upland soils, oxidation of ferrous generated by iron reduction, and relationship between ferrous oxidation in upland soils under illuminated incubation and soil properties, soil samples collected from upland farmlands at 7 different locations, and from nearby paddy fields, in which ferrous oxidation occurs under illumination anaerobically, were both prepared into slurry and then put under illuminated anaerobic incubation, to study characteristics of the anaerobic redox of iron oxide in these soils and its influence on contents of water soluble carbon, nitrate and sulfate. Results of the incubation show that iron oxide in upland cinnamon soils could be reduced first and then re-oxidized under light. The amount of iron oxide re-oxidized in these soils ranged from 1.46 to 3.00 mg g⁻¹, with an average

of 2.09 mg g^{-1} . And the re-oxidation rate constant ranged from 0.23 to 0.80 d^{-1} , with an average of 0.48 d^{-1} . The amount of re-oxidation is closely and negatively related to the contents of amorphous iron, water soluble sulphate and cation exchange capacity, and closely but positively related to the contents of total nitrogen and total phosphorus, while re-oxidation rate constant is significantly and negatively related to the content of soil organic carbon, but positively to the content of clay. These findings suggest that anaerobic oxidation of ferrous in upland cinnamon soils under illumination is mainly caused by oxygen generated by oxygenic photosynthetic bacteria, and may decrease the content of water soluble inorganic carbon by 52.74% , and the content of water soluble nitrate by 92.15% , but may increase the content of water soluble sulfate by 55.38% in the soil under illuminated anaerobic incubation. The findings may help understand further in-depth the potential microbial iron redox cycle in upland cinnamon soils.

Key words Iron oxide; Anaerobic reduction-oxidation; Upland cinnamon soil; Carbon transformation; Illumination

(责任编辑: 汪枫生)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Problems and analytical logic in building cultivated land productivity evaluation index system..... Zhao Yanfeng, Cheng Daoquan, Chen Jie, et al. (1207)
 Advancement in study on effect of earthworm on greenhouse gas emission in soil and its mechanism Lu Mingzhu, Lü Xianguo, Guan Qiang, et al. (1224)

Research Articles

- Vertical distributions of soil organic and inorganic carbon and their controls along toposequences in an alpine region Yang Fan, Huang Laiming, Li Decheng, et al. (1235)
 Effect of grain size on and correlation analysis of pedodiversity and surface water body diversity in counties typical of Central and East China Ren Yuanyuan, Zhang Xuelei (1249)
 Spatial-temporal variability of soil readily available nutrients in cultivated land of Weibei Tableland Area Yu Yang, Zhao Yeting, Chang Qingrui (1260)
 Hyperspectral estimation and remote sensing retrieval of soil water regime in the Yellow River Delta Li Ping, Zhao Gengxing, Gao Mingxiu, et al. (1271)
 Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate Wang Jian, Ma Fan, Zhang Penghui, et al. (1278)
 Experiment and simulation of infiltration from layered soils in open pit mine in Jin-Shaan-Meng adjacent region Wu Qifan, Fan Jun, Yang Xiaoli, et al. (1289)
 Anaerobic redox of iron oxides and photosynthetic oxidation of ferrous iron in upland cinnamon soils Sun Lirong, Wang Xugang, Xu Xiaofeng, et al. (1299)
 Study on effect of kaolinite colloids on zeta potential of Al oxide coated quartz with streaming potential method Li Zhongyi, Xu Renkou (1309)
 Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years Yu Fei, Shi Weiming (1324)
 Changes of soil nutrients and supply capacities in the piedmont plain of Taihang Mountain during the period of 1978–2008 Liu Jianling, Jia Ke, Liao Wenhua, et al. (1334)
 Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small hilly watershed in subtropics of China Yang Wen, Zhou Jiaogen, Wang Meihui, et al. (1343)
 Stoichiometric characteristics of soil in an oasis on northern edge of Tarim Basin, China Li Honglin, Gong Lu, Zhu Meiling, et al. (1354)
 Distribution of soil selenium in the Northeast China Plain and its influencing factors Dai Huimin, Gong Chuandong, Dong Bei, et al. (1364)
 Study on phytolith-occluded organic carbon in soil of subtropical forest of southern Zhejiang Lin Weilei, Ying Yuqi, Jiang Peikun, et al. (1372)
 Toxic effect of multiple-time overlying pollution of Phe in soil on *Eisenia fetida* Ma Jingjing, Qian Xinchun, Zhang Wei, et al. (1381)
 Effect of organic manure on cucumber Fusarium wilt control and its mechanism Zhao Liya, Li Wenqing, Tang Longxiang, et al. (1390)
 Ameliorative effect of cropping *Lycium barbarum* L. with drip irrigation on soil enzymes activities in takyric solonetz Zhang Tibin, Kang Yaohu, Wan Shuqin, et al. (1399)
 Change in shallow soil temperature and its response to change in air temperature in middle and lower reaches of Shiyang River Basin Yang Xiaoling, Ding Wenkui, Ma Zhonghua, et al. (1410)
 Soil permeability of aeration zone in Xinchang-Xiangyangshan - a preselected site for high level radioactive waste disposal Li Jiebiao, Su Rui, Zhou Zhichao, et al. (1420)

Research Notes

- Inversion of spatial pattern of organic matter contents in black soil based on TM data Song Jinhong, Wu Jinggui, Zhao Xinyu, et al. (1429)
 Analysis of soil fertility and fertilizer efficiency of maize field in Shaanxi Shan Yan, Li Shuili, Li Ru, et al. (1437)
 Application of cosmic-ray method to soil moisture measurement of grassland in the Loess Plateau Zhao Chun, Yuan Guofu, Liu Xiao, et al. (1444)

Cover Picture: Reclamation of a highly saline-sodic wasteland of takyric solonetz while cropping *Lycium barbarum* L. with drip irrigation (by Zhang Tibin)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枏生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 6 期 2015 年 11 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 6 Nov., 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156

