

光照对水稻土中氧化铁还原的影响*

孙丽蓉 曲东[†] 卫亚红

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要 选择不同地区的水稻土样品, 采用泥浆厌氧恒温培育方法, 在避光和光照条件下, 测定了培养过程中土壤泥浆的 Fe() 浓度及叶绿素 a 含量的变化。结果表明: 光合微生物的产氧作用是影响水稻土中铁还原的主要原因, 而光照对铁还原微生物没有直接影响; 光合微生物仅在某些水稻土中大量繁殖, 其叶绿素 a 含量随着光照时间延长由逐渐增加到趋于稳定。通过微生物镜检和光谱分析发现, 由天津和四川水稻土中分离的光合微生物主要是念珠蓝细菌 (*Nostoc* sp.) 和鱼腥蓝细菌 (*Anabaena* sp.), 其吸收光谱曲线均具有 664 nm 的叶绿素 a 吸收峰, 表明其具有利用光合系统进行产氧光合作用的特征。在厌氧培养过程中 Fe() 浓度与土壤中叶绿素 a 含量变化有着明显的负相关关系。

关键词 光照; 铁还原; 蓝细菌; 叶绿素; 水稻土
中图分类号 S154 **文献标识码** A

氧化铁是土壤中最丰富的金属氧化物, 在土壤形成过程及土壤氧化还原反应中起着十分重要的作用。土壤淹水后, 一些厌氧微生物可利用 Fe() 作为电子受体, 氧化有机物和氢气, 使 Fe() 还原为 Fe()。这种异化 Fe() 还原是水稻土和厌氧沉积物中氧化铁还原的主要途径^[1-4]。Lovley^[5]报道, 能够还原 Fe() 的微生物广泛分布在细菌域中的 8 个门下、13 个纲、22 个目中, 并认为土杆菌科的成员是厌氧条件下 Fe() 及有机污染物降解的主要微生物类群。与铁还原不同, 在 Fe() 氧化过程中化学氧化和微生物氧化均具有重要地位。稻田落干后, 氧气可迅速导致 Fe() 氧化, 是 Fe() 氧化的主要方式。铁的微生物氧化在好氧和厌氧条件下均可发生。好氧条件下, 氧化 Fe() 的微生物包括 *Thiobacillus ferrooxidans*, *Sulfobacillus acidophilus*, *Gallionella ferruginea* 以及 *Leptothrix ochracea* 等^[6-14]。在厌氧条件下, 有两种由不同的微生物引起的 Fe() 氧化为 Fe() 的过程。第一类是铁氧化细菌, 利用 Fe() 为能量满足生长的需要, 以硝酸盐作为电子受体进行自养生长^[15-18]。第二类是一些厌氧的光合细菌, 它在光合过程中利用 Fe() 作为电子供体^[19, 20]。其中, 紫色无硫细菌是最早发现的可在厌氧条件下使 Fe()

氧化为 Fe() 的光合细菌^[20]。根据在光合作用过程中是否有氧气产生, 可以把光合细菌分为产氧光合细菌 (Oxygenic photosynthetic bacteria) 和不产氧光合细菌 (Anoxygenic photosynthetic bacteria) 两大类群^[21]。蓝细菌 (*Cyanobacteria*) 是产氧光合细菌中的典型代表, 它包括两个独立的光反应系统, 即光系统 II 和光系统 I。光系统 II 中水是电子供体, 蓝细菌光解水并产生 O₂。古沉积物中发现的 BIF (Banded iron formation) 被认为是由产氧光合细菌 (蓝细菌) 中伴随 O₂ 的还原而使 Fe() 氧化而形成的^[22], 但也有研究^[19]认为它与不产氧的光合细菌在无氧条件下氧化 Fe() 有关。不产氧光合细菌包括紫色硫细菌 (Purple sulfur)、紫色非硫细菌 (Purple nonsulfur bacteria)、绿硫细菌 (Green sulfur bacteria)、绿色无硫细菌 (Green nonsulfur bacteria) 和阳光细菌 (Helio bacteria)。他们只能在厌氧条件下通过光合作用生长, 因为在这些细菌中色素的产生会被 O₂ 抑制。与产氧光合细菌不同的是, 光合作用中的电子供体依赖还原性的硫化物 (H₂S、S 硫代硫酸盐)、H₂ 或者有机化合物 (如琥珀酸、苹果酸或丁酸)。

国内在水稻土铁的微生物转化研究中, 较多注重于异化铁还原过程^[23, 24], 对 Fe() 的微生物氧化的研究少见报道。鉴于光合细菌在铁微生物氧

* 国家自然科学基金项目 (40271067) 和西北农林科技大学创新团队项目共同资助

[†] 通讯作者: 曲东 (1960~), 男, 博士, 教授。E-mail: dongqu@mwsuaf.edu.cn

作者简介: 孙丽蓉 (1977~), 女, 湖南长沙人, 博士研究生, 主要从事土壤环境化学的研究

收稿日期: 2007-03-22; 收到修改稿日期: 2007-06-29

化过程中的重要作用,深入探讨光合微生物与水稻土中铁氧化还原的关系,对于进一步阐明土壤氧化铁的环境意义具有重要的理论价值。本研究选择不同水稻土样品,采用土壤泥浆厌氧恒温培育的方法,研究光照对不同土壤中氧化铁还原过程的影响程度,以期明确不同水稻土中潜在的微生物铁循环转化方式,为利用土壤铁的氧化还原作用净化环境提供必要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试水稻土分别采自四川省邛崃市回龙镇柏杨村(用 SC表示),江西省安福县竹江乡店上村(用 JX表示),天津塘沽区四道桥农场(用 TJ表示),湖南省宁乡县城郊村(用 HN表示)。土样自然风干,

磨细,过 1 mm 筛。土壤基本理化性质见表 1。其中 SC和 TJ水稻土分别为下蜀黄土母质及黄土母质发育的石灰性土壤。

1.2 光照条件设置和培养方法

试验采用泥浆恒温厌氧培养的方法,称取风干土壤样品 3.000 g若干份,分别置于容积为 10 ml的血清瓶中,加 3 ml去离子水,充氮 5 min,除去瓶中氧气,加橡胶塞及铝盖密封。置于 30 °C 恒温培养箱中培养。光照条件设置 4种方式:光照培养(L)、避光培养(D)、由光照转避光培养(L/D)及由避光转光照培养(D/L)。光照培养在光照培养箱中进行,并模拟自然昼夜条件设置光暗周期(12/12 h),光照培养箱的最大光照度为 30 000 Lx。培养温度设置为 30 °C。定期采样,测定土壤泥浆中 Fe(II)浓度。同时,用 80%乙醇为提取液,测定土壤泥浆提取液中叶绿素 a含量。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physico-chemical properties of soils studied

土样 Soil sample	土壤类型 Soil type	有机质 OM (mg kg ⁻¹)	无定形铁 Amorphous Fe (g kg ⁻¹)	游离铁 Free Fe (g kg ⁻¹)	pH (H ₂ O 1:5)
SC	铁聚水耕人为土 Fe-accumuli-Stagnic Anthosols	48.9	3.08	11.69	7.34
JX	铁渗水耕人为土 Fe-leachi-Stagnic Anthosols	23.9	1.94	6.48	4.84
TJ	潜育水耕人为土 Gleyi-Stagnic Anthosols	20.4	2.03	10.68	7.85
HN	铁聚水耕人为土 Fe-accumuli-Stagnic Anthosols	27.1	3.75	27.05	6.11

1.3 光合色素吸收光谱特征比较试验

土壤泥浆在光照条件下恒温培养,待光合微生物大量繁殖后,定量采集土壤泥浆,用有机溶剂(丙酮:甲醇=1:9)^[25]提取光合色素,离心后取上清液于分光光度计上扫描 380~900 nm 波长范围的吸收值。与文献[26]中不同光合微生物的吸收曲线比较,初步确定光合微生物的类型。

1.4 光合微生物镜检

在载玻片上滴加一滴蒸馏水,用解剖针从光照处理培养瓶中挑取少量绿色菌体,放入载玻片上的液滴中,用解剖针将其分散,盖上盖玻片,镜检并记录观察结果。

1.5 土壤泥浆中 Fe(II)浓度的测定

每次采样时各处理取出 3瓶,充分摇匀。用自动加样器吸取 0.4 ml土壤泥浆,溶于 4.6 ml浓度为

0.5 mol L⁻¹的盐酸中,置于培养箱中在 30 °C 下浸提 24 h^[27]。浸提液过 0.22 μm 滤膜,用邻菲罗啉分光光度法测定滤液中 Fe(II)浓度^[28]。

1.6 土壤泥浆中叶绿素 a含量测定

不同处理的土壤泥浆取出 2瓶,用无水乙醇定量地将土壤泥浆洗入研钵中,使乙醇的终浓度为 80%,迅速研磨离心,取上清液分别测定 663nm 和 645nm 波长下光合色素提取液的吸光度值。叶绿素 a(Chl a)浓度的测定采用 Annon^[29]方法。并折算出每克风干土中 Chl a含量。

2 结果与分析

2.1 光照对水稻土厌氧培养过程中 Fe(II)浓度的影响

四种水稻土在光照(L)和避光(D)条件下厌氧

培养过程中 Fe(II) 浓度变化如图 1 所示。由图 1a 看出, 样品 SC 和样品 TJ 水稻土在光照和避光培养时 Fe(II) 浓度有显著的差别。这两种石灰性土壤在光照培养的前 5d 及 7 d 的 Fe(II) 浓度与避光培养基本相同, 均表现为升高的趋势, 随后 Fe(II) 浓度开始降低, 其中 TJ 水稻土中下降更为迅速, 达到稳定时的 Fe(II) 浓度分别为 2.86 和 1.40 mg g⁻¹ 干土。避光培养下 SC 和 TJ 水稻土中最终可生成的

Fe(II) 量大体相同, Fe(II) 浓度分别为 6.31 和 6.66 mg g⁻¹ 干土, 但 SC 水稻土中的铁还原速率明显大于 TJ 水稻土。水稻土中最终生成的 Fe(II) 数量与土壤中可还原的氧化铁含量有关, 而铁还原速率则受铁还原微生物活性及土壤中氧化铁组成影响^[24, 30]。对另外两种土壤 (见图 1b), 光照和避光条件下 Fe(II) 浓度基本相同, 表明光照对铁还原过程几乎不产生影响。

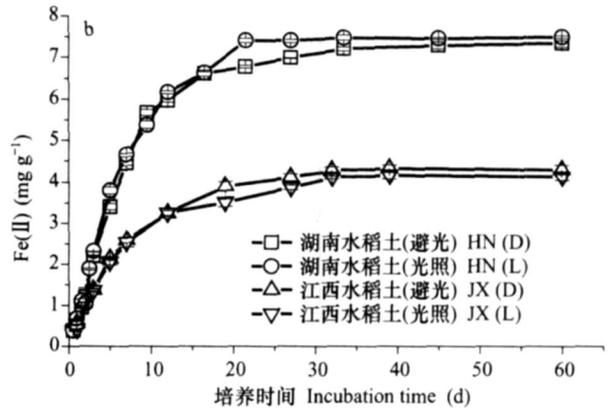
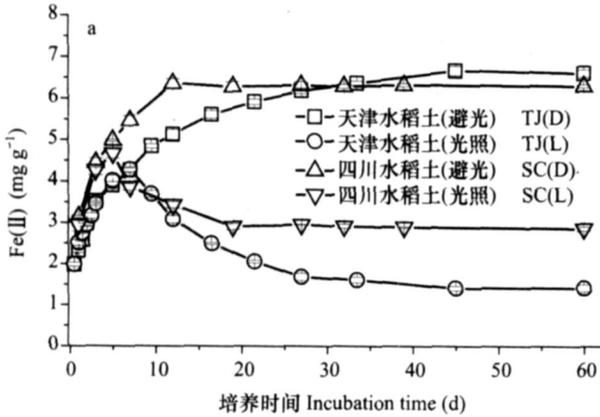


图 1 光照对厌氧培养的水稻土中 Fe(II) 浓度的影响

Fig. 1 Effect of illumination on iron(II) concentration in paddy soils under anaerobic incubation

2.2 不同光照条件转换对 Fe(II) 浓度的影响

两种石灰性土壤光暗转换试验中的 Fe(II) 浓度变化由图 2 所示。D/L 和 L/D 分别表示由避光转为光照培养及光照转为避光培养, 箭头所指为转换时间。

从图 2 看出, SC 和 TJ 水稻土由避光转为光照培养后, Fe(II) 浓度均表现为急剧降低, 但需经过一段时间滞后, 并且 TJ 水稻土的滞后时间较长。与图 1a

结果相似, 培养 60 d 后 SC 和 TJ 水稻土中 Fe(II) 浓度分别降低至 3.04 和 1.63 mg g⁻¹ 干土。由光照转为避光培养过程中, 两种土壤中 Fe(II) 浓度均迅速增大, 其中 SC 水稻土的增加速率明显大于 TJ 水稻土。与避光培养比较, 由光照转为避光培养后的铁还原速率减小, 表明光照能够导致土壤中氧化还原平衡状态的变化, 这种氧化还原平衡状态与土壤中 Fe(II) 还原微生物及能够氧化 Fe(II) 的微生物相互竞争有关。

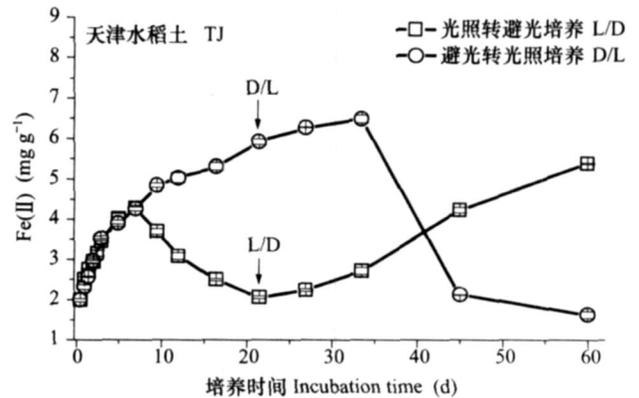
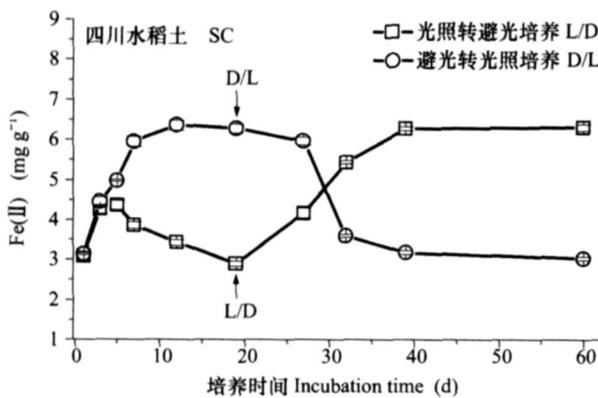


图 2 光照条件转换对厌氧培养的水稻土中 Fe(II) 浓度的影响

Fig. 2 Effect of illumination transition on iron(II) concentration in paddy soils under anaerobic incubation

2.3 Fe()氧化微生物初步鉴定

光照条件 Fe()浓度降低表明 Fe()被氧化了。在供试的四种水稻土中只有石灰性水稻土在光照培养时有 Fe()氧化现象。通过观察发现,在两种石灰性水稻土的培养瓶中有大量繁殖的光合微生物菌体(绿色)。对菌体进行镜检,从形态上初步断定:在 TJ 水稻土中主要属于念珠蓝细菌属 (*Nostoc* sp.) (见图 3左),而在 SC水稻土中主要是鱼腥蓝细菌属 (*Anabaena* sp.) (见图 3右)。从图 3看出,在两种石灰性水稻土厌氧光照培养中得到的光合微生物主要为蓝细菌。

在蓝细菌中有两类与两种不同光合系统相关联的天线色素。参与光合系统 的天线色素可吸收波

长 680 nm的光,并能将能量传递到称为 P700的专门叶绿素 a;而参与光合系统 的天线色素能在 680 nm波长处捕捉光能,并将光能转移到专门的叶绿素 P680^[26]。由两种厌氧光照培养的石灰性水稻土中提取光合色素,提取液进行吸收光谱测定(见图 4)。从图 4看出,SC和 TJ水稻土中提取的光合色素的吸收光谱曲线基本相同,均在 664 nm有叶绿素 a (*Chl a*)的特征吸收峰,表明进行光合系统 的天线色素在起作用。正是由于蓝细菌利用光合系统 进行产氧的光合作用,从而导致了 Fe()的氧化,验证了厌氧光照培养中得到的光合微生物为蓝细菌。在另外两种土壤中未观察到光合微生物菌体的大量繁殖,故光照培养时也未出现 Fe()的氧化现象。

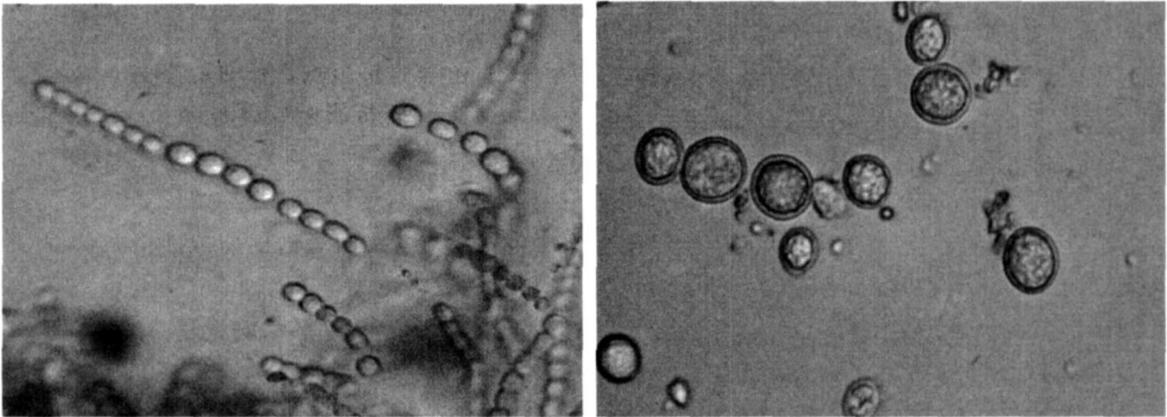


图 3 光照培养两种水稻土中分离出的光合微生物菌体镜检图片(×400)

Fig. 3 Photographs of photosynthetic bacteria isolated from two paddy soils(×400)

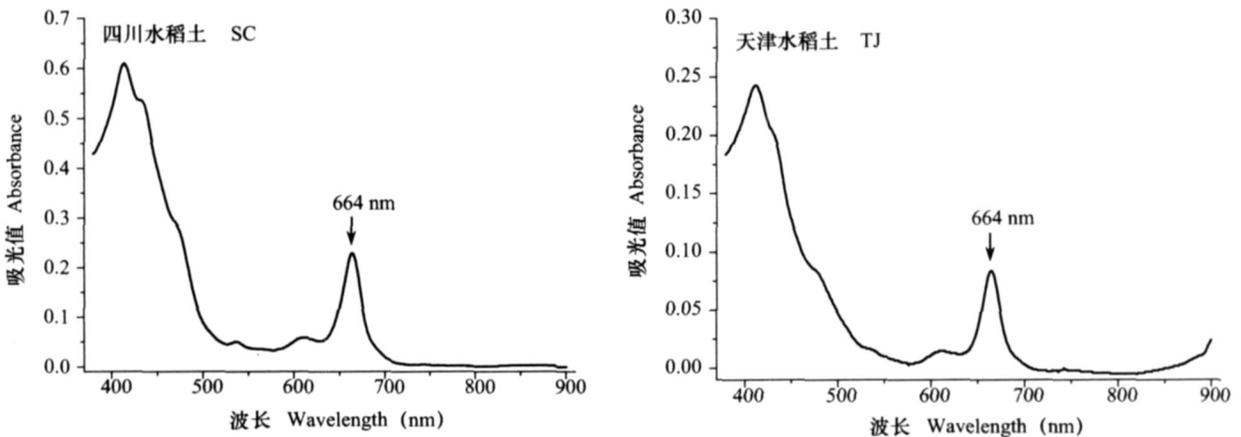


图 4 光照培养两种水稻土中提取的光合微生物叶绿素吸收光谱图

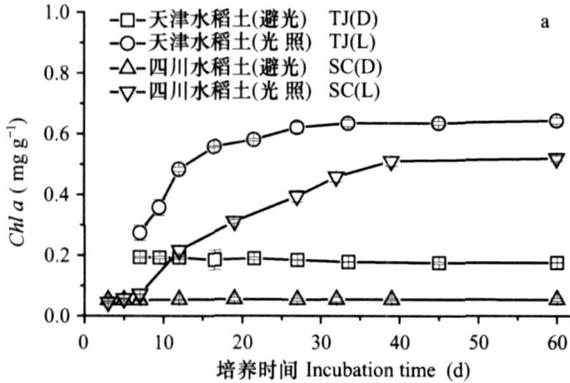
Fig. 4 Spectrogram of chl extracted from two paddy soils

2.4 水稻土厌氧培养过程中蓝细菌 Chl a 含量变化

SC和 TJ水稻土厌氧培养过程中蓝细菌 *Chl a* 含量变化如图 5所示。光照条件下(图 5a)两种土

壤中 *Chl a*含量均有显著增加,其中 TJ水稻土中的 *Chl a*增长速率大,且 TJ水稻土的 *Chl a*产生量大于 SC水稻土中的 *Chl a*的产生量。由光照转入避光培养后,*Chl a*含量逐渐减少,而由避光转入光照培

养后 *Chl a* 含量又开始增加 (图 5b)。与 $Fe(II)$ 产生相比,叶绿素大量产生的时间相对较晚,并且在



由光照转入避光培养时叶绿素含量的减少也较为缓慢。

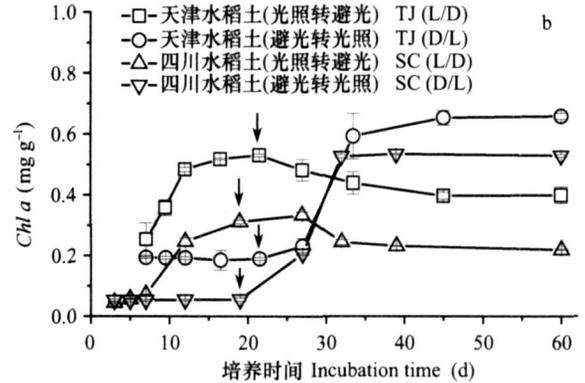


图 5 水稻土厌氧培养过程中 *Chl a* 含量变化

Fig. 5 Change in count of *Chl a* in paddy soils under anaerobic incubation

3 讨论

尽管人们已经注意到了淹水稻田会有一些数量的水藻产生,并推测由于藻类光合作用产生的氧气可导致土壤氧化还原电位升高,使土壤中诸如 $Fe(II)$ 和 S^{2-} 氧化。但在严格厌氧条件下探讨光合微生物与氧化铁还原的关系国内还未见系统的报道。本研究选择了四种典型的水稻土,通过厌氧光照培养试验发现,仅有两种土壤 (SC 和 TJ 水稻土) 中有光合微生物的大量繁殖,并且对 $Fe(II)$ 浓度有显著的影响,这两种土壤均属于石灰性土壤。表明光照条件是影响石灰性土壤中厌氧铁还原的重要因素。传统上将这些光合微生物归于藻类,然而新的分类方法已将其命名为蓝细菌^[21, 26]。蓝细菌有产氧和不产氧两种光合系统,当进行产氧的光合作用时,氧气的产生必然会对异化铁还原过程有影响,这种影响包括对厌氧微生物的毒性以及对 $Fe(II)$ 的氧化。

许多化学上结构不同的叶绿素可以通过它们不同的吸收光谱区别开。从两种水稻土中提取光合色素进行光谱分析,结果表明蓝细菌主要是利用光合系统 II 进行光合作用,随着蓝细菌光合作用,光解水产生 O_2 ,当 $Fe(II)$ 与 O_2 接触时, $Fe(II)$ 可被氧化成可溶性的 $Fe(III)$,最终形成 $Fe(III)$ 的氢氧化物沉淀^[31]。在光照培养的初期,由于光合微生物尚未大量繁殖,其 $Fe(II)$ 产生并未发现抑制现象,铁还原过程仍然占主导地位。当光合微生物数量有一定积累后, $Fe(II)$ 会迅速降低。这一结果说

明光照并非直接影响铁还原微生物,而是通过光合微生物繁殖间接影响铁还原过程。将光照培养转入避光培养后,光合作用相继停止,此时体系中剩余的氧气依然制约着铁还原过程,当 O_2 完全被消耗后, $Fe(II)$ 浓度又可迅速增大。由试验结果看出,TJ 水稻土在光照培养过程中 *Chl a* 含量高,其产生 O_2 的数量大,所以在转入避光培养后消耗 O_2 的时间较长,其 $Fe(II)$ 浓度增加速率也低于 SC 水稻土。将避光培养的样品转入光照培养后,蓝细菌开始繁殖,进行光合作用放出氧气,将还原的 $Fe(II)$ 氧化,导致 $Fe(II)$ 浓度开始降低,其中 TJ 水稻土中对 $Fe(II)$ 浓度下降迅速与其 *Chl a* 含量高有关。对 SC 和 TJ 水稻土厌氧光照培养过程中 *Chl a* 含量与 $Fe(II)$ 浓度变化进行相关性分析发现, $Fe(II)$ 浓度变化与土壤中 *Chl a* 含量变化有着显著的负相关关系。无论是在光照培养还是由避光转入光照培养,TJ 水稻土中 $Fe(II)$ 浓度下降相比 SC 水稻土更为迅速,即 TJ 水稻土光照培养下 $Fe(II)$ 氧化速率大于 SC 水稻土,而避光培养下 SC 水稻土中的铁还原速率明显大于 TJ 水稻土。表明光照能够导致土壤中氧化还原平衡状态的变化,这种氧化还原平衡状态与土壤中氧化铁还原微生物及能够氧化 $Fe(II)$ 的微生物相互竞争有关。相对于 TJ 水稻土,SC 水稻土中铁还原微生物的活性较强,而 TJ 水稻土中氧化铁还原微生物的活性较强。对另外两种土壤,光照培养过程中未观察到光合微生物菌体的大量繁殖,故光照培养时未出现氧化 $Fe(II)$ 的现象,光照和避光条件下 $Fe(II)$ 浓度基本相同,表明光照对这两种土壤中的铁还原过程几乎不产生影响。

参考文献

- [1] Lovley D R. Dissimilatory Fe() and Mn() reduction *Microbiol Rev* , 1991, 55: 259 ~ 287
- [2] Lovley D R. Fe() and Mn() reduction *In: Lovley D R. ed Environmental Metal-Microbe Interactions* Washington, D C, USA: American Society for Microbiology Press, 2000. 3 ~ 30
- [3] Roden E E, Sobolev D, Glazer B, *et al* Potential for microscale bacterial Fe redox cycling at the aerobic-anaerobic interface. *Geomicrobiol J.* , 2004, 21: 379 ~ 391
- [4] Straub K L, Benz M, Schink B. Iron metabolism in anoxic environments at near neutral pH. *FEMS Microbiol Ecol* , 2001, 34: 181 ~ 186
- [5] Lovley D R, Holmes D E, Nevin K P. Dissimilatory Fe() and Mn() reduction *Adv. Microb. Phys.* , 2004, 49: 219 ~ 286
- [6] Hanert H H. The genus *Gallionella* *In: Starr M P, Stolp H, Trueper H G, et al eds The Prokaryotes* Berlin: Springer, 1981. 509 ~ 515
- [7] Emerson D, Revsbech N P. Investigation of an iron-oxidizing microbial mat community located near Aarhus, Denmark: Field studies *Appl Environ Microbiol* , 1994, 60: 4 022 ~ 4 031
- [8] Emerson D, Moyer C. Isolation and characterization of novel iron-oxidizing bacteria that grow at circumneutral pH. *Appl Environ Microbiol* , 1997, 63: 4 784 ~ 4 792
- [9] Edwards K J, Rogers D R, Wirsén C O, *et al* Isolation and characterization of novel psychrophilic, neutrophilic, Fe-oxidizing, chemolithoautotrophic alpha-and, gamma-Proteobacteria from the deep sea *Appl Environ Microbiol* , 2003, 69: 2 906 ~ 2 913
- [10] Sobolev D, Roden E E. Characterization of a neutrophilic, chemolithoautotrophic Fe()-oxidizing -Proteobacterium from freshwater wetland sediments *Geomicrobiol J.* , 2004, 21: 1 ~ 10
- [11] Emerson D, Weiss J V. Bacterial iron oxidation in circumneutral freshwater habitats: Findings from the field and the laboratory. *Geomicrobiol J.* , 2004, 21: 405 ~ 414
- [12] Baker B J, Banfield J F. Microbial communities in acid mine drainage *FEMS Microbiol Ecol* , 2003, 44: 139 ~ 152
- [13] Brock T D, Gustafson J. *Sulfolobus*: A new genus of sulfur-oxidizing bacteria living at low pH and high temperature. *Arch Microbiol* , 1972, 84: 54 ~ 68
- [14] Johnson D B, Ghauri M A, Ghauri M A. Biogeochemical cycling of iron and sulfur in leaching environments *FEMS Microbiol Rev* , 1993, 11: 63 ~ 70
- [15] Ratering S, Schnell S. Nitrate-dependent iron () oxidation in paddy soil *Environ Microbiol* , 2000, 3: 100 ~ 109
- [16] Finneran K T, Housewright M E, Lovley D R. Multiple influences of nitrate on uranium solubility during bioremediation of uranium-contaminated subsurface sediments *Environ Microbiol* , 2002, 4: 510 ~ 516
- [17] Senn D B, Hemond H F. Nitrate controls on iron and arsenic in an urban lake *Science*, 2002, 296: 2 373 ~ 2 376
- [18] Shebbolina E S, Gaw-Van Praagh C, Lovley D R. Use of ferric and ferrous iron containing minerals for respiration by *Desulfotomobacterium frappieri* *Geomicrobiol J.* , 2003, 20: 143 ~ 156
- [19] Widdel F, Schnell S, Heising S, *et al* Ferrous iron oxidation by anoxygenic phototrophic bacteria *Nature*, 1993, 362: 834 ~ 835
- [20] Ehrenreich A, Widdel F. Anaerobic oxidation of ferrous iron by purple bacteria, a new type of phototrophic metabolism. *Appl Environ Microbiol* , 1994, 60 (12): 4 517 ~ 4 526
- [21] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册. 北京: 科学出版社, 2001. 9 ~ 42. Dong X Z, Cai M Y. Manual of Determinative Bacteriology (In Chinese). Beijing: Science Press, 2001. 9 ~ 42
- [22] Konhauser K O, Hamade T, Raiswell R, *et al* Could bacteria have formed the Precambrian banded iron formations? *Geology*, 2002, 30: 1 079 ~ 1 082
- [23] 曲东, 张一平, Schnell S, 等. 水稻土中铁氧化物的厌氧还原及其对微生物过程的影响. *土壤学报*, 2003, 40 (6): 858 ~ 863. Qu D, Zhang Y P, Schnell S, *et al* Reduction of iron oxides and its effect on microbial processes in anaerobic paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (6): 858 ~ 863
- [24] 曲东, 贺江舟, 孙丽蓉. 不同水稻土中氧化铁的微生物还原特征. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33 (4): 97 ~ 101. Qu D, He J Z, Sun L R. Microbial reducing characteristics of iron oxides in different paddy slurries (In Chinese). *Jour of Northwest Sci-Tech Univ of Agri and For (Nat Sci Ed)* , 2005, 33 (4): 97 ~ 101
- [25] Kondratieva E N, Pfennig N, Trüper H G. The phototrophic prokaryotes *In: Balows A, Truper H G, Dworkin M, et al eds The Prokaryotes* New York: Springer-Verlag, 1992. 312 ~ 330
- [26] Prescott L M, Harley J P, Klein D A. *Microbiology* (5th Ed). Beijing: Higher Education Press, 2002. 468 ~ 477
- [27] Schnell S, Ratering S. Simultaneous determination of iron (), iron () and manganese () in environmental samples by ion chromatography. *Environ Sci Technol* , 1998, 32: 1 530 ~ 1 537
- [28] 曲东, 王保莉. 邻氮二萘分光光度法同时测定水稻土中的 Fe()和 Fe(). *西北农业大学学报*, 1991, 19: 85 ~ 88. Qu D, Wang B L. Simultaneous determination of Fe() and Fe() by spectrophotometry with 1, 10-Phenanthroline in paddy soil (In Chinese). *Acta Univ Agric Boreali-occidentalis*, 1991, 19: 85 ~ 88
- [29] Amor D I. Copper enzyme in isolated chloroplasts Polyphenoloxidase in BETA VULGARIS *Plant Physiology*, 1949, 24: 1 ~ 5
- [30] 曲东, 谭中欣, 王保莉, 等. 外源物质对水稻土铁还原的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 31 (4): 6 ~ 10. Qu D, Tan Z X, Wang B L, *et al* Effect of EDTA, fulvic acid and acetate addition on microbial iron reduction in paddy soils (In Chinese). *Jour of Northwest Sci-Tech Univ of Agri and For (Nat Sci Ed)* , 2003, 31 (4): 6 ~ 10
- [31] Taillefert M, Bono A, Luther G. Reactivity of freshly formed Fe () in synthetic solutions and (pore) waters: Voltammetric evidence of an aging process *Environ Sci Technol* , 2000, 34: 2 169 ~ 2 177

EFFECT OF ILLUMINATION ON IRON OXIDE REDUCTION IN ANAEROBIC PADDY SOILS

Sun Lirong Qu Dong[†] Wei Yahong

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Soil samples collected in paddy fields in Tianjin (TJ), Sichuan (SC), Jiangxi (JX) and Hunan (HN) provinces of China. The experiment was designed to have four levels of illumination, i. e. entire dark (D), light (L) and change from dark to light (D/L) and from light to dark (L/D) during anaerobic incubation of slurries prepared out of the paddy soil samples. Concentrations of Fe() and chlorophyll a (*Chl a*) were determined in the samples under incubation, to study effect of illumination on reduction of dissimilatory iron oxide. Results show that oxygen production of photosynthetic bacteria leads to oxidation of Fe() in paddy slurry under anaerobic incubation. Light does not affect iron-reducing bacteria. Photosynthetic bacteria reproduce massively only in some paddy soils, and *Chl a* content increases first with illumination going on, and then levels off. *Anabaena* sp. and *Nostoc* sp. of *Cyanobacteria* were identified respectively in TJ and SC soils, and both of these *Cyanobacteria* had the same *Chl a* absorption peak at 664nm, which suggests that oxygen production by photosynthesis occurred. A significant negative correlation was observed between Fe() and *Chl a* content in the two calcareous paddy soils under anaerobic incubation.

Key words Illumination; Iron reduction; *Cyanobacteria*; Chlorophyll ; Paddy soil