

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

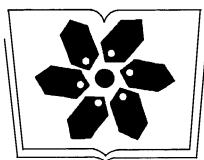
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第7期 Vol.32 No.7 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 7 期 2012 年 4 月 (半月刊)

目 次

城市生态景观研究的基础理论框架与技术构架	孙然好, 许忠良, 陈利顶, 等 (1979)
拟南芥芥子酸酯对 UV-B 辐射的响应	李 敏, 王 垠, 牟晓飞, 等 (1987)
蛋白核小球藻对 Pb(II) 和 Cd(II) 的生物吸附及其影响因素	姜 晶, 李 亮, 李海鹏, 等 (1995)
梨枣在果实生长期对土壤水势的响应	韩立新, 汪有科, 张琳琳 (2004)
产业生态系统资源代谢分析方法	施晓清, 杨建新, 王如松, 等 (2012)
基于物质流和生态足迹的可持续发展指标体系构建——以安徽省铜陵市为例	 赵卉卉, 王 远, 谷学明, 等 (2025)
河北省县域农田生态系统供给功能的健康评价	白琳红, 王 卫, 张 玉 (2033)
温郁金内生真菌 <i>Chaetomium globosum</i> L18 对植物病原菌的抑菌谱及拮抗机理	 王艳红, 吴晓民, 朱艳萍, 等 (2040)
基于稳定碳同位素技术的华北低丘山区核桃-小麦复合系统种间水分利用研究	 何春霞, 孟 平, 张劲松, 等 (2047)
云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量 C、N、P 空间分布	张利青, 彭晚霞, 宋同清, 等 (2056)
水稻根系通气组织与根系泌氧及根际硝化作用的关系	李奕林 (2066)
苹果绵蚜对不同苹果品种春梢生长期生理指标的影响	王西存, 于 毅, 周洪旭, 等 (2075)
磷高效转基因大豆对根际微生物群落的影响	金凌波, 周 峰, 姚 涓, 等 (2082)
基于 MODIS-EVI 数据和 Symlet11 小波识别东北地区水稻主要物候期	 徐岩岩, 张佳华, YANG Limin (2091)
基于降水利用比较分析的四川省种植制度优化	王明田, 曲辉辉, 杨晓光, 等 (2099)
气候变暖对东北玉米低温冷害分布规律的影响	高晓容, 王春乙, 张继权 (2110)
施肥对巢湖流域稻季氨挥发损失的影响	朱小红, 马中文, 马友华, 等 (2119)
丛枝菌根真菌对枳根净离子流及锌污染下枳苗矿质营养的影响	肖家欣, 杨 慧, 张绍铃 (2127)
不同 R:FR 值对菊花叶片气孔特征和气孔导度的影响	杨再强, 张 静, 江晓东, 等 (2135)
神农架海拔梯度上 4 种典型森林凋落物现存量及其养分循环动态	刘 蕾, 申国珍, 陈芳清, 等 (2142)
黄土高原刺槐人工林地表凋落物对土壤呼吸的贡献	周小刚, 郭胜利, 车升国, 等 (2150)
贵州雷公山秃杉种群生活史特征与空间分布格局	陈志阳, 杨 宁, 姚先铭, 等 (2158)
LAS 测算森林冠层上方温度结构参数的可行性	郑 宁, 张劲松, 孟 平, 等 (2166)
基于 RS/GIS 的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究	 徐少君, 曾 波, 苏晓磊, 等 (2174)

模拟氮沉降增加对寒温带针叶林土壤 CO₂ 排放的初期影响 温都如娜,方华军,于贵瑞,等 (2185)

桂江流域附生硅藻群落特征及影响因素..... 邓培雁,雷远达,刘 威,等 (2196)

小浪底水库排沙对黄河鲤鱼的急性胁迫..... 孙麓垠,白音包力皋,牛翠娟,等 (2204)

上海池塘养殖环境成本——基于双边界二分式 CVM 法的实证研究 唐克勇,杨正勇,杨怀宇,等 (2212)

稻纵卷叶螟绒茧蜂对寄主的搜索行为 周 慧,张 扬,吴伟坚 (2223)

农林复合系统中灌木篱墙对异色瓢虫种群分布的影响..... 严 飞,周在豹,王 朔,等 (2230)

苹果脱乙酰几丁质发酵液诱导苹果叶片对斑点落叶病的早期抗性反应.....

..... 王荣娟,姚允聪,戚亚平,等 (2239)

专论与综述

气候变化影响下海岸带脆弱性评估研究进展..... 王 宁,张利权,袁 琳,等 (2248)

外来红树植物无瓣海桑引种及其生态影响 彭友贵,徐正春,刘敏超 (2259)

问题讨论

城市污泥生物好氧发酵对有机污染物的降解及其影响因素..... 余 杰,郑国砥,高 定,等 (2271)

4 种绿化树种盆栽土壤微生物对柴油污染响应及对 PAHs 的修复 闫文德,梁小翠,郑 威,等 (2279)

研究简报

云南会泽铅锌矿废弃矿渣堆常见植物内生真菌多样性..... 李东伟,徐红梅,梅 涛,等 (2288)

南方根结线虫对不同砧木嫁接番茄苗活性氧清除系统的影响 梁 朋,陈振德,罗庆熙 (2294)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 322 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-04



封面图说: 站立的仓鼠——仓鼠为小型啮齿类动物,栖息于荒漠、荒漠草原等地带的洞穴之中。白天他们往往会躲在洞穴中睡觉和休息,以避开天敌的攻击,偶尔也会出来走动,站立起来警惕地四处张望。喜欢把食物藏在腮的两边,然后再走到安全的地方吐出来,由此得仓鼠之名。它们的门齿会不停的生长,所以它们的上下门齿必须不断啃食硬东西来磨牙,一方面避免门齿长得太长,妨碍咀嚼,一方面保持门牙的锐利。仓鼠以杂草种子、昆虫等为食。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201111111712

李奕林. 水稻根系通气组织与根系泌氧及根际硝化作用的关系. 生态学报, 2012, 32(7): 2066-2074.

LI Y L. Relationship among rice root aerenchyma, root radial oxygen loss and rhizosphere nitrification. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2066-2074.

水稻根系通气组织与根系泌氧及 根际硝化作用的关系

李奕林*

(中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要:通过根箱土培试验研究了不同产量籼稻品种中旱 22(ZH, 高产品种)及禾盛 10 号(HS, 低产品种)苗期根系生长、通气组织发育、根系径向泌氧量(radial oxygen loss, ROL)以及根表和根际土壤硝化强度差异。结果表明,除水稻播种 40 d 时二者根数量和根干重无显著差异外,ZH 根直径、根数量和根干重均显著高于 HS,二者差异尤其表现在根系生物量差异。两个水稻品种在距根尖 20 mm 处均可见辐射状通气组织,ZH 皮层薄壁细胞已经完全崩溃形成连接中柱和外皮层的纵向气腔,而 HS 皮层薄壁细胞未发生完全离解,但仍能观察到明显的连接中柱和外皮层的纵向气腔的形成。同时 ZH 外皮层厚壁细胞体积较小,排列紧密,细胞壁增厚程度大;而 HS 外皮层厚壁细胞体积相对较大,排列疏松,细胞壁增厚程度相对较小。表明高产品种通气组织发育比低产品种更加完善,表现为 ZH 根孔隙度(porosity of root, POR)显著高于 HS,且高产品种对水稻根系 ROL 的屏蔽作用较低产品种更强,为根系提供更充足的氧气供应,促进根系生长。除了水稻播种后 40 d 时 ZH 和 HS 单根 ROL 无显著差异外($P < 0.05$),ZH 单株、单位重量以及单根 ROL 均显著高于 HS($P < 0.01$)。两个水稻品种硝化强度均表现为根际土壤显著高于根表土壤($P < 0.01$),前者大约是后者的 3—6 倍。两个品种根表土壤硝化强度无显著差异,而 ZH 根际土壤硝化强度均显著高于 HS。相关性分析结果表明水稻根际土壤硝化强度和整株水稻 ROL 呈极显著正相关关系($r = 0.803, P < 0.01$),和水稻 POR 也呈现极显著正相关关系($r = 0.808, P < 0.01$),同时和根系直径、数量和干重均呈极显著正相关关系($P < 0.01$)。而根表土壤硝化强度和以上指标均无相关关系。由于硝化作用是好氧过程,因此高产品种由于根系发达,通气组织发育好,相应 ROL 也较大,造成根际土壤氧气含量高,从而可能导致根际土壤硝化强度显著高于低产品种。

关键词:水稻;通气组织;径向泌氧;根际;硝化作用

Relationship among rice root aerenchyma, root radial oxygen loss and rhizosphere nitrification

LI Yilin*

Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: A soil culture experiment with rhizobox was carried out to study the difference of rice root growth, aerenchyma development, root radial oxygen loss (ROL) and root surface and rhizosphere nitrification activities. Two Indica varieties with different yield potentials, Zhonghan 22 (ZH, high yield) and Hesheng 10 (HS, low yield) were used and the samples were collected at 40, 50 and 60 d after sowing. The results showed that root diameter, root number and root dry weight of ZH were always significantly greater than those of HS, except for the root number and root dry weight at 40 d after sowing. The radial-arrangement aerenchyma tissues were examined at 20 mm behind root tips. The parenchyma cells of ZH entirely collapsed and the radial cell wall aggregated together to form a gas-filled space connected the stele and exodermis, while the parenchyma cells of HS partially collapsed and a gas-filled space connected the stele and exodermis was formed with the

基金项目:国家自然科学基金项目(30900923);中国科学院知识创新工程项目(ISSASIP0705)

收稿日期:2011-11-11; **修订日期:**2012-02-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ylli@issas.ac.cn

residual parenchyma cells and aggregated cell walls. The volume of porosity of root (POR) of ZH was significantly higher than that of HS, indicating better developed aerenchyma for ZH. The cortical prothenchyma cell (ROL barrier) size of ZH was relatively small and closely arranged, and the thickening effect for the cell wall was obvious, whereas that of HS was big and loosely arranged, suggesting that a strong ROL barrier effect is important to provide sufficient oxygen for rice root growth. Except for the difference of ROL per root between ZH and HS at 40 d after sowing, the ROL per plant, ROL per dry weight and ROL per root measured at 40, 50 and 60 d after sowing for ZH were always significantly higher than those for HS ($P < 0.01$). Rhizosphere nitrification activities of both varieties were 3 to 6 times higher than those measured in the root surface soil. Although there had no significant difference of root surface soil nitrification activities between these varieties, the rhizosphere nitrification activities for ZH were generally twice as high as those for HS, and appeared to be significantly correlated to rice ROL per plant, POR, root diameter, root number and root dry weight ($r = 0.803, 0.808, 0.637, 0.646$ and 0.696 , respectively, $P < 0.01$). Because the nitrification prefers aerobic environment, the rice variety with well-developed root system and aerenchyma as well as correspondingly high ROL allows relatively high oxygen entering rhizosphere soil, which might improve rhizosphere nitrification activities.

Key Words: rice; aerenchyma; radial oxygen loss; rhizosphere; nitrification

稻田土壤由于长期处于淹水状态,导致土壤当中氧气含量极低,因此大量好氧过程如硝化作用等被强烈抑制,同时由于缺氧使得土壤当中氧化还原电位降低,导致大量还原性物质浓度上升^[1-2]。为了缓解淹水胁迫,许多水生和湿生植物如水稻在根系内形成通气组织^[3]。通气组织是植物薄壁组织内一些气腔或空腔的集合^[4]。水稻根系通气组织在成熟区形成,首先皮层细胞生长停止,细胞间隙增大;接着皮层细胞衰老并发生自溶,内含物解体;最后解体物逐渐消失,皮层细胞开始收缩、内陷,当细胞内含物全部消失,相邻细胞的残留细胞壁叠合,在两侧形成类似车轮辐条的通气空腔^[5]。稻根内通气组织形成的方式是根皮层细胞衰老自溶和细胞间隙扩大的联合。通气组织的形成不仅为根系氧气运输提供通道,满足根部呼吸需要,同时由于大量薄壁细胞的崩溃减少了根系内部的耗氧量^[6]。由地上部通过通气组织向地下部运输的氧气仍有一部分将释放到根际土壤中,使根际形成微域“氧化圈”,不仅缓解一些还原性物质对根系的毒害作用,同时也促进硝化作用等好氧过程的发生,对根际氮素循环起到重要的意义^[7]。以往的研究发现水稻生长和氮素吸收利用与根际土壤硝化作用密切相关^[8]。本试验通过选取两种不同产量水稻品种,研究其根系通气组织,ROL及根际硝化强度差异,旨在揭示淹水稻田土壤当中水稻根系通气组织发育与ROL和根际硝化作用三者之间的关系,从而为水稻高产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与处理

盆栽试验于中国科学院南京土壤研究所温室进行,试验土壤采自湖北省潜江市(东经 $112^{\circ} 31' 48''$, 北纬 $30^{\circ} 15' 36''$),属亚热带季风气候区,年均气温 16.1°C ,年降雨量 1050 mm 。供试土壤为河流冲积物发育的水稻土,采自高度熟化稻田(开垦年限超过 50 a)。其理化性质为:有机质 27.3 mg/g 、全氮 1.49 mg/g 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 1.46 mg/kg 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 0.48 mg/kg 、粘粒($<2\text{ }\mu\text{m}$) 12.7% 、pH 值 8.05 (水土比 $2.5:1$)。试验用水稻品种选用常规籼稻品种,中早 22(ZH,高产品种;双季稻产量 $10000\text{—}11000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)和禾盛 10 号(HS,低产品种;双季稻产量 $6500\text{—}7500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。

本试验采用根际培养箱培养水稻,根箱为有机玻璃制成,规格为 $12\text{ cm}\times 8\text{ cm}\times 8\text{ cm}$,由两块 400 目尼龙网将根箱分隔为 1 个根室和 2 个边室,根室与边室长分别为 2 cm 和 5 cm ^[2]。水稻种植于根室中,水稻根系被限制于根室中生长,水分与养分可以在根室与 2 个边室之间自由通过。试验用水稻土风干后过 1 mm 筛,每个根箱装 600 g 土(根室 100 g ,两边室各 250 g)。土壤与尿素(纯氮 120 mg/kg 土)和 KH_2PO_4 (93 mg/kg 土)混匀后装入根箱中,均匀浇水。然后将用 30% H_2O_2 消毒过的水稻种子(已露白)直播于根室中,每个根箱播 6

粒,1 周后间苗,每盒留 3 株苗。在整个培养期间,每天早晚浇水,保持 1 cm 淹水层。

采样时间为水稻播种后 40、50 d 和 60 d。采样为毁灭性采样,两个水稻品种各取 6 个培养箱。采样时将根箱沿中央两片网布处掰开,首先取出根室中间密布水稻根系的土壤块,并用无菌镊子将水稻根上附着的土壤(由于水稻播种 40 d 后水稻根系几乎充满整个根室,因此定义与根表附着部分土壤为根表土壤)小心剥除,然后将两片 2 mm 厚的有机玻璃插片(长 8 cm,宽 8 cm)紧贴左边室外侧的内壁缓慢插入,此时由于根箱内土壤受到外力挤压将沿根箱内侧被推出,用锋利刀片切下所推出土壤即获得距根表 0—4 mm 土壤样品(距根表 0—4 mm 土壤定义为根际土壤)。依此方法将左右两边室距根表 0—4 mm 之间距离的土壤取出后并混匀,根表和根际土壤样品用来进行硝化强度的测定。将土壤采集完毕后,用去离子水小心将根系冲洗干净,并用吸水纸将冲洗干净的水稻根表面附着的水吸干。

1.2 测定方法及数据分析

1.2.1 测定方法

将水稻植株表面附着土壤小心除去后,先用自来水将根系表面残留土壤冲去,然后用去离子水将根系冲洗干净后,用吸水纸吸干表面附着水分。首先数出两个处理中单株水稻不定根数量,重复 3 次。再用游标卡尺测量每株水稻单根直径,测量时均选取每条不定根中部进行测定,每株选长度大致相同的不定根 20—30 根,每个处理重复 3 次。最后将水稻根系与地上部分分离,同时将根系于 105 °C 杀青 30 min 后在 70 °C 烘干 72 h 至恒重并称重。

水稻根孔隙度(porosity of root, POR)测定方法参照并改进 Kludze 等^[9]的方法。将水稻根用去离子水冲洗干净后,用吸水纸将其表面水分彻底吸干。选取新长出的水稻根,并将每条根切成 2—2.5 cm 小段之后备用。将 50 mL 比重瓶装满去离子水后称重,称取 0.5 g 左右的根,然后置于装满水的比重瓶中后,称重。将装入根的比重瓶抽真空 2 h 后,将根取出并置于干燥的研钵中研磨至糊状。将研磨好的根重新放入比重瓶中并称重。POR 计算公式如下:

$$\text{POR}(\%) = [(P_{\text{gr}} - P_{\text{r}}) / (r + P - P_{\text{r}})] \times 100$$

式中, POR 为根孔隙度(%), P_{gr} 为研磨后的根和装满水的比重瓶的总重量(g), P_{r} 为未经研磨的根和装满水的比重瓶的总重量(g), r 为根重(g), P 为充满水的比重瓶重量(g)。

水稻通气组织电镜观测于水稻播种后 50 d 进行。将水稻根用去离子水冲洗干净后,用吸水纸将其表面水分彻底吸干。选取新长出的 3—5 cm 左右长度的水稻根,并将每条根切成 5 mm 小段之后备用。水稻根系扫描电镜(scanning electronic microscope, SEM)样品制备方法参照 David 和 Olga^[10]的方法。最后将制备好的根系样品用 SEM(Model-3000N, Hitachi Inc., Japan)观察并成像。

氧气径向泌氧量(radial oxygen loss, ROL)测定方法采用柠檬酸钛比色法测定^[9]。将 17.7 g 柠檬酸钠加入到 300 mL 脱氧去离子水中以制备 0.2 mol/L 柠檬酸钠溶液。吸取 30 mL 1.16 mol/L TiCl_3 溶液加入到已制备好的柠檬酸钠溶液中,并用饱和 NaCO_3 溶液调节 pH 值至 5.6 以制备柠檬酸钛溶液。将 40 mL 10% 的霍格兰营养液加入至 50 mL 试管中,然后将溶液充氮气 30 min 以赶走试管中多余氧气。将待测水稻根系用去离子水冲洗干净后用石蜡膜将根系基部缠绕后迅速置于刚才的试管中,同时在试管内溶液上层加入 2 cm 石蜡油以防止氧气进入试管。然后用注射器将 5 mL 已制备好的柠檬酸钛溶液加入试管中。其中对照试管为未加入水稻植株的试管。在加入柠檬酸钛溶液 6 h 后,轻摇试管,然后用注射器取出试管中的柠檬酸钠溶液在 527 nm 下用分光光度计比色。ROL 计算公式如下:

$$\text{ROL} = 1000C(Y - Z) / T \cdot W$$

式中, ROL 为径向泌氧量($\mu\text{mol O}_2/\text{h/g}$), C 为最初加入到每一试管中的柠檬酸钛体积(L), Y 为 6 h 后对照处理(不加水稻植株)中柠檬酸钛浓度($\text{mmol Ti}^{3+}/\text{L}$), Z 为 6 h 后添加水稻植株处理中柠檬酸钛浓度($\text{mmol Ti}^{3+}/\text{L}$), T 为反应时间(h), W 为单株水稻根系干重(g)。

短期硝化强度通常用于表征土壤硝化特征,本文参考并改进 Berg 和 Rosswall^[11]的方法。其简要步骤为:

称取 5 g 鲜土样 3 份,分别置于 100 mL 三角瓶中,加 2.5 mL NaClO_3 (抑制 NO_2^- 转换为 NO_3^- , 75 mmol/L), 170 r/min 振荡 30 min 后,其中两份在 25 °C 下培养 24 h,另一份置于 -20 °C 冰箱中 24 h 作对照。培养结束后每份加 5 mL 去离子水,10 mL KCl (2 mol/L), 170 rpm 振荡 30 min 后立即过滤;吸取 5 mL 滤液放入试管中,加 3 mL NH_4Cl 缓冲溶液 (0.19 mol/L, pH 值 8.5) 、2 mL 磺胺试剂,摇匀后室温下放置 15 min, 520 nm 波长下比色。硝化强度按下列公式计算:

$$\text{NO}_2^- \text{-N} = (\text{滤液 NO}_2^- \text{-N 浓度} - \text{对照滤液 NO}_2^- \text{-N 浓度}) \times 12.5 / (5 \cdot \text{dwt} \cdot 24)$$

式中,12.5 为所加入试剂的体积 (mL), 5 为所称取土样的重量 (g), dwt 为每克湿土的烘干重, 24 为土样培养时间 (h)。硝化强度用单位时间内产生的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) 表示。

1.2.2 数据分析

试验结果用算术平均数和标准误表示测定结果的精密度 ($\bar{X} \pm \text{S. D.}$)。利用 SPSS v 13.0 数据分析软件进行两独立样本 T 检验, two-way ANOVA, Person 相关性分析等工作。

2 结果与分析

2.1 不同水稻品种根系生长及形态结构差异

水稻根系随培养时间延长而迅速生长,无论是根系直径、根数量还是根干重均随时间显著增加,尤其表现为根系生物量的增长 (图 1, 表 1)。不同水稻品种根系生长及外部形态结构在苗期已表现出显著差异 (图 1, 表 1), 除水稻播种 40 d 时二者根数量和根干重无显著差异外 (图 1), 高产品种 ZH 根直径、根数量和根干重均显著高于低产品种 HS。二者差异尤其表现在根系生物量差异 (F 值为 47.8, $P < 0.01$), 如水稻播种后 40, 50 d 和 60 d 高产品种根干重分别为低产品种的 1.19、1.47 倍和 1.29 倍 (图 1)。

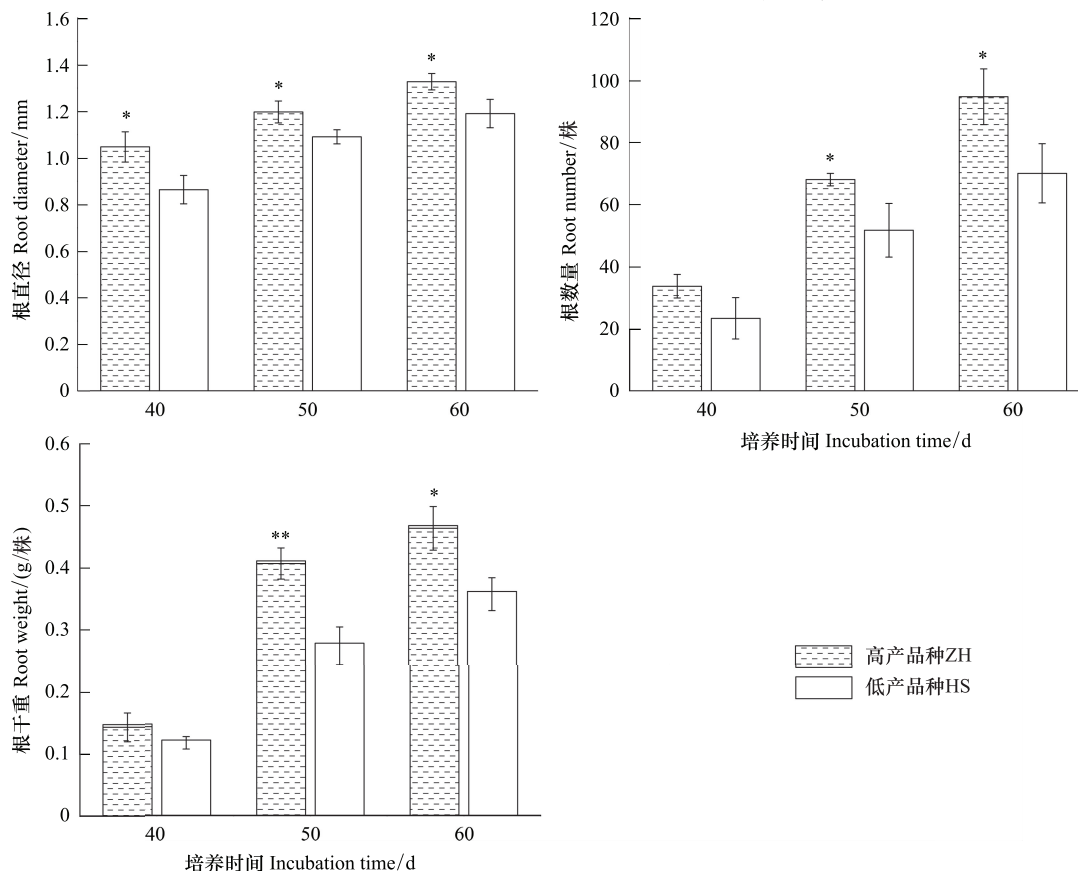


图 1 不同水稻品种根系生长差异

Fig. 1 Differences of rice growth between high and low yield potential varieties

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

表 1 不同水稻品种不同采样时间根系生长、根系结构、径向泌氧量和土壤硝化强度及其相关指标 two-way ANOVA 检验

Table 1 Two-way ANOVA for rice root growth, root morphology, ROL, rhizosphere nitrification activities and related parameters for both rice cultivars (ZH and HS) at different sampling times

指标 Parameter	品种 Variety	培养时间 Incubation time	品种×培养时间 Variety×incubation time
根直径	34.062 **	52.655 **	0.838 NS
根孔隙度	40.572 **	39.953 **	0.592 NS
根数量	25.639 **	85.350 **	1.512 NS
根干重	47.815 **	184.935 **	6.710 *
单株 ROL	115.055 **	66.575 **	21.787 **
单位重量 ROL	115.995 **	26.144 **	12.938 **
单根 ROL	38.299 **	2.457NS	7.556 **
根表土壤硝化强度	5.919 *	0.012NS	0.375NS
根际土壤硝化强度	58.542 **	5.673 *	1.295NS

NS 表示差异不显著,* 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 条件下差异显著;表中数值为 *F* 值

2.2 不同水稻品种通气组织发育差异

从图 2 可以看出两个水稻品种在距根尖 20 mm 处均可见类似车轮辐条状的辐射状通气组织,而二者通气组织发育程度又存在显著差异。图 2 表明高产品种 ZH 在距根尖 20 mm 处,皮层薄壁细胞已经完全崩溃离解,由残余细胞壁构成纵向薄壁将离解的薄壁细胞分隔成连接中柱和外皮层的气腔,而从图 2 可以发现低产品种 HS 在距根尖 20 mm 处皮层薄壁细胞未发生完全离解,但仍能观察到明显的连接中柱和外皮层的纵向气腔的形成,且气腔由残余细胞壁和未分解的薄壁细胞相分隔。根孔隙度 (porosity of root,POR) 表征根通气组织的发育程度,POR 随时间显著增加 ($P<0.01$,表 1,图 3),说明水稻通气组织随水稻生长而逐步发育完善。图 3 表明高产品种 POR 值均显著高于低产品种,且在播种后 60 d 二者差异达到极显著水平 ($P<0.01$)。水稻播种后 40、50 d 和 60 d ZH POR 值分别是 HS 的 1.35、1.22 倍和 1.29 倍 (图 3)。因此扫描电镜结果及 POR 结果均表明高产品种通气组织发育比低产品种更加完善。

从图 2 还可以看出高产品种外皮层厚壁细胞体积较小,排列紧密,细胞壁增厚程度大(图 2A 中箭头指向处);而低产品种外皮层厚壁细胞体积相对较大,排列疏松,细胞壁增厚程度相对较小(图 2B 中箭头指向处)。因此可以推断高产品种径向泌氧屏障 (ROL barrier) 显著优于低产品种,换言之高产品种对水稻根系径向氧气损失的屏蔽作用较较低产品种更强。

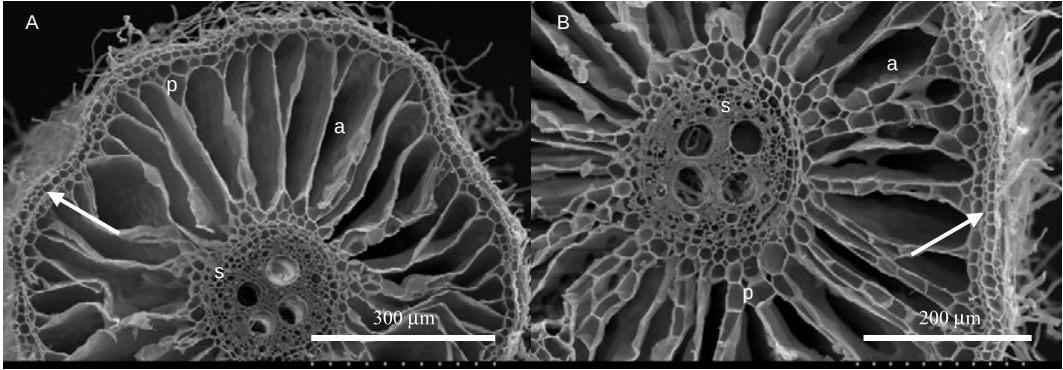


图 2 不同水稻品种根系通气组织发育差异

Fig. 2 Difference of rice root aerenchyma development (35 mm long, measured at 20 mm behind the rice root tips)

A: ZH, B: HS; a 辐射状通气组织,p 残余皮层薄壁细胞,s 中柱,箭头指向外皮层厚壁细胞

2.3 不同水稻品种径向泌氧量差异

水稻单株根系径向泌氧量(radial oxygen loss, ROL)随着水稻生长显著增加(表1,图4),且高产品种增加幅度远大于低产品种。而单位重量 ROL 及单根 ROL 则随时间变化无明显规律(图4),如高产品种 ZH 单位重量 ROL 随时间呈现出先降低后增加的趋势(图4),这主要是由于 ZH 在第2次采样期间(50 d)根系干重增加迅速造成的(图1)。从图4可以看出,除了水稻播种后40 d时 ZH 和 HS 单根 ROL 无显著差异外(图4),高产品种单株、单位重量以及单根 ROL 均显著高于低产品种,且均达到了极显著水平($P<0.01$,表1,图4)。其中二者整株及单位重量根系 ROL 差异最显著(F 值分别为115和116, $P<0.01$,表1)。二者 ROL 差异随时间显著增加,例如水稻在播种后40、50和60 d时,高产品种整株根系 ROL 分别是低产品种的1.62、1.95和2.63倍(图4)。整株水稻根系 ROL 和水稻根系生长以及通气组织发育程度如根直径、根数量、根干重及 POR 均呈极显著正相关关系($P<0.01$,表2),而单位重量 ROL 和单根 ROL 则和以上指标无显著相关关系(表2)。相关性分析结果表明根系发达,通气组织发育好的水稻相应 ROL 也较大,因此可以推测高产品种根际土壤中氧气含量较低产品种含量高。

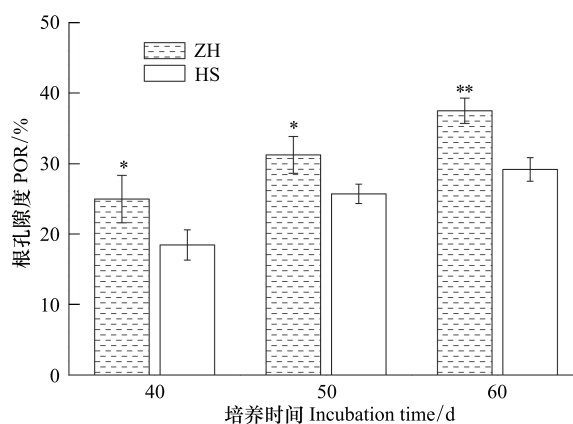


图3 不同水稻品种根孔隙度差异

Fig. 3 Difference of rice root POR between high and low yield potential varieties

* $P<0.05$, ** $P<0.01$

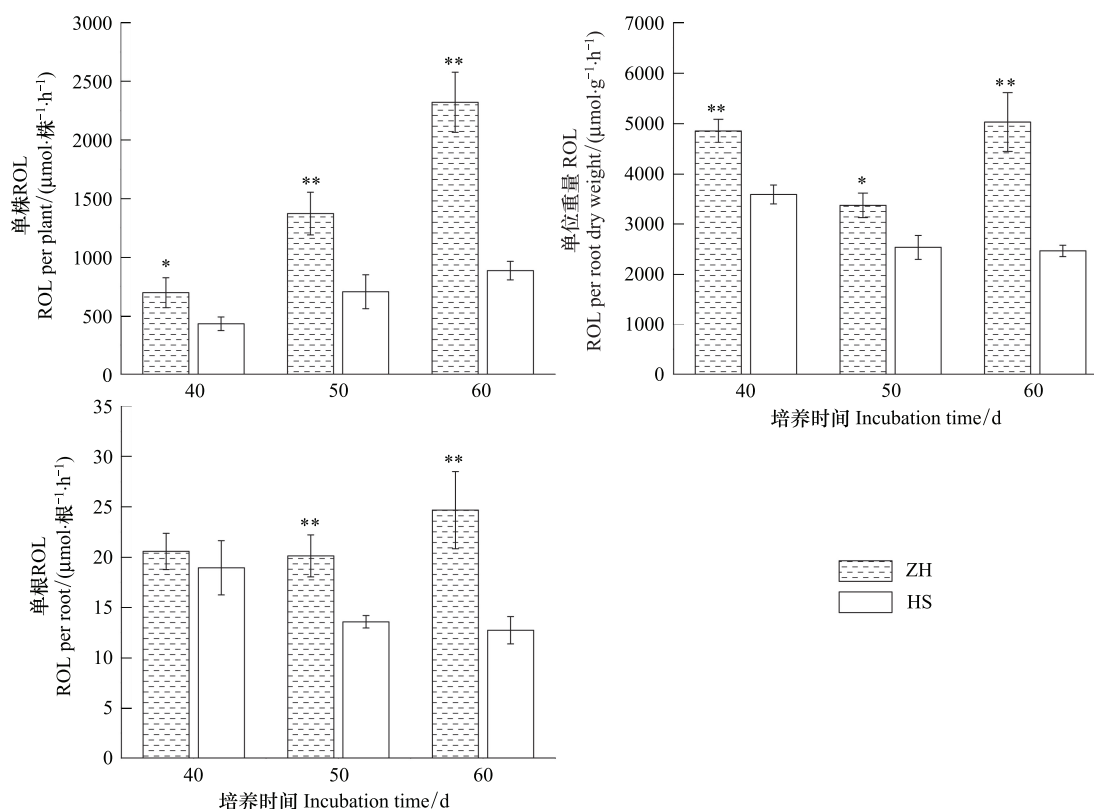


图4 不同水稻品种径向泌氧量差异

Fig. 4 Difference of rice root ROL between high and low yield potential varieties

* $P<0.05$, ** $P<0.01$

表2 不同水稻品种根系生长、根系结构、径向泌氧量和土壤硝化强度及其相关指标相关性分析

Table 2 Correlation matrix among rice root growth, root morphology, ROL, rhizosphere nitrification activities and related parameters for both rice cultivars at different sampling times

指标 Parameter	根直径 Root diameter	根孔隙度 POR	根数量 Root number	根干重 Root dry weight	单株 ROL ROL per plant	单位重量 ROL ROL per dry weight	单根 ROL ROL per root	根表土壤硝化强度 Root surface nitrification activity
根孔隙度	0.860 **							
根数量	0.904 **	0.912 **						
根干重	0.870 **	0.911 **	0.950 **					
单株 ROL	0.799 **	0.921 **	0.876 **	0.834 **				
单位重量 ROL	0.144 NS	0.308 NS	0.120 NS	-0.026 NS	0.505 *			
单根 ROL	0.223 NS	0.384 NS	0.250 NS	0.156 NS	0.625 **	0.877 **		
根表土壤硝化强度	0.319 NS	0.146 NS	0.072 NS	0.078 NS	0.144 NS	0.267 NS	0.115 NS	
根际土壤硝化强度	0.637 **	0.808 **	0.646 **	0.696 **	0.803 **	0.499 *	0.579 *	0.313 NS

NS 表示差异不显著, * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 条件下差异显著;表中数值为相关系数(*r* 值)

2.4 不同水稻品种根表和根际土壤硝化强度差异

根际土壤硝化强度随水稻生育期延长而逐渐增强,而根表土壤随时间无显著变化(表1,图5)。且两个水稻品种硝化强度均表现为根际土壤显著高于根表土壤($P<0.01$),前者大约是后者的3—6倍。两个品种根表土壤硝化强度无显著差异,而二者根际土壤硝化强度差异显著(表1,图5)。高产品种根际土壤硝化强度均显著高于低产品种,且二者差异在水稻播种后50 d达到极显著水平(图5)。高产品种 ZH 根际土壤硝化强度在播种后40、50 d和60 d分别是低产品种的2.02、2.47倍和1.86倍。从图5中可以看出根际土壤硝化强度变化趋势与整株水稻 ROL 呈现出非常高的一致性。相关性分析结果表明水稻根际土壤硝化强度和整株水稻 ROL 呈极显著正相关关系($r=0.803, P<0.01$),和水稻 POR 也呈现极显著正相关关系($r=0.808, P<0.01$),同时和根系直径、数量和干重均呈极显著正相关关系($P<0.01$,表2)。而根表土壤硝化强度和以上指标均无相关关系(表2)。由于硝化作用是好氧过程,因此高产品种由于 ROL 强造成根际土壤氧气含量高,从而可能导致根际土壤硝化强度显著高于低产品种。

3 讨论

通常认为水稻通气组织在根系伸长区开始分化,在成熟区开始形成^[5]。汪晓丽等^[12]通过水培试验发现,距水稻幼苗(28 d)根尖0—10 mm 内和15 mm 处通气组织都未明显发育,而在距根尖25 mm 处可见明显通气组织形成。而孔好^[13]研究发现籼稻品种(扬稻6号,7 d)通气组织在距根尖15 mm 处开始发育。我们以往的研究发现不同基因型水稻通气组织发育存在显著差异,籼稻(扬稻6号,51 d)在距根尖10 mm 处可见通气组织开始发育,而粳稻(农垦57,51 d)未见明显通气组织形成,而在距根尖15 mm 处时二者均可见完善的通气组织形成^[8]。根系通气组织发育程度,即通气组织大小占整个根体积的比例可以用 POR 表示^[14]。本试验发现两个不同产量水稻品种(50 d)在距根尖20 mm 处时均可见通气组织,且二者发育程度不同,高产水稻品种通气组织更发达(图2,图3)。可见水稻根系通气组织发育程度存在显著的品种差异,且不同生育时期也存在较大差异。

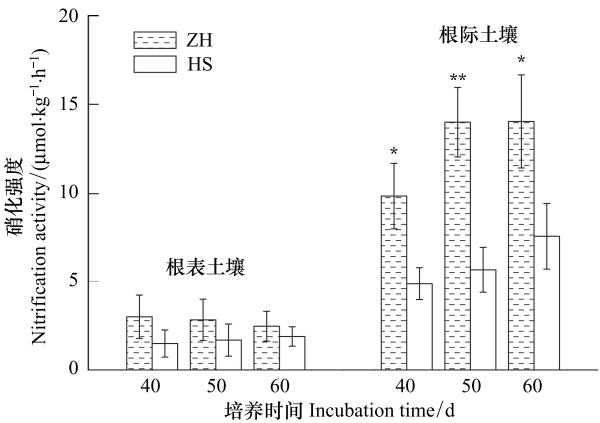


图5 不同水稻品种根表和根际土壤硝化强度差异
Fig. 5 Differences of root surface soil and rhizosphere nitrification activities measured in paddy soils grown with high and low yield potential rice varieties

* $P<0.05$, * * $P<0.01$

Kludze 等^[9]对水稻的研究结果表明,通气组织径向向根际释放氧气的量与通气组织的发达程度呈正相关,因此通气组织发育良好的水稻品种相应的 ROL 就比较大。Huang 等^[15]的研究表明,在淹水条件下小麦根内通气组织的发育程度及产生通气组织的能力有明显的基因型差异,而且这种差异与小麦的抗涝性密切相关,抗涝性强的小麦基因型有较发达的通气组织。本试验结果再次验证前人结果,POR 与 ROL 呈极显著正相关关系($P<0.01$,表 2),即通气组织越发达,相应的径向泌氧量也越大。

由于水稻根系具有向根际土壤分泌氧气的功能,极易导致根内氧气径向扩散损失,而水稻等淹水植物外皮层具有厚壁细胞,能够最大程度的降低根系 ROL,保证根内氧气供应,促进根系伸长生长,因此这层厚壁细胞又称为 ROL 屏障(ROL barrier)^[16]封克等^[17]通过水培试验研究 5 种基因型水稻(常规粳稻、常规籼稻、杂交粳稻、杂交籼稻和旱稻),结果表明水稻在距根尖 10 mm 处时,5 种基因型在皮层边缘处均已出现明显的厚壁细胞,但该层细胞在常规粳稻和常规籼稻之间表现出明显的形态学差异,常规粳稻皮层厚壁细胞体积小且排列紧密,而常规籼稻的该层细胞体积大且排列疏松。本试验结果表明两个不同产量水稻品种在距根尖 20 mm 处时也可见明显厚壁细胞形成,且高产品种外皮层厚壁细胞体积较小,排列紧密,细胞壁增厚程度大;而低产品种外皮层厚壁细胞体积相对较大,排列疏松,细胞壁增厚程度相对较小(图 2)。因此可以推断高产品种径向泌氧屏障作用较低产品种更强,能够为根系提供更充足的氧气供应,促进根系生长(图 1)。

水稻以有氧呼吸为主,通过叶片吸收空气中的氧气以及通过光合作用释放的氧气,经由叶鞘和茎秆的通气组织输送到根系,供根系呼吸,同时有大约 30% 到 40% 的氧气扩散到根际土壤当中^[6],形成一个微域的“氧化圈”。水稻根际土壤氧气含量与分布一方面取决于水稻根系泌氧能力,另一方面也与土壤氧气消耗(如硝化过程)密切相关,是一个不断变化的过程。硝化作用是地球氮素循环重要过程之一,包括两个步骤:首先氨在氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)的作用下被氧化为亚硝,然后亚硝在亚硝酸氧化细菌(nitrite-oxidizing bacteria, NOB)作用下被氧化为硝酸盐。其中氨氧化是限速过程,决定着整个硝化过程进行的速度^[18]。由于 AOB 是严格好氧的,因此 AOB 数量与土壤氧浓度成正比^[18-19]。Jensen 等^[20]研究结果也表明,当淹水土壤铵态氮浓度不限制硝化细菌活性时,土壤硝化强度随淹水层氧浓度增加而显著增强。而稻田淹水层及土壤当中氧气浓度在不考虑自身氧气消耗的基础上,一方面与其本底溶解氧含量有关,另一方面主要取决于水稻根系 ROL 高低。本试验结果表明根表土壤硝化强度与单株 ROL 没有显著性相关关系($P<0.05$,表 2),而根际土壤硝化强度与单株 ROL 呈极显著正相关关系($P<0.01$,表 2)。由于水稻根系对铵态氮的大量吸收,导致根表土壤存在明显的铵态氮亏缺区^[2],因此根表土壤由于缺乏硝化底物,导致其一方面硝化强度显著低于根际土壤(图 5),另一方面也使得根表土壤硝化强度与 ROL 无相关关系(表 2)。而根际土壤硝化强度与水稻根系 ROL 之间的显著正相关关系说明,在土壤铵态氮浓度不是限制因子的情况下,水稻 ROL 越高,相应的根际土壤氧气含量也较高,因此导致根际硝化强度较高。Ghosh 和 Kashyap^[21]在田间条件下研究了 3 种不同产量水稻品种,结果表明高产品种相应的通气组织发育较好(表现为 POR 较高),同时其根际硝化细菌数量以及硝化强度也较高,因此推测可能由于高产品种具有发达的通气组织导致根际氧气含量较高,因此根际硝化细菌数量与硝化强度都较高。Briones 等^[22]通过水培试验研究了 3 种不同基因型水稻品种,利用 DGGE 及荧光原位杂交技术研究发现,水稻根表具有一层富含 AOB 的生物膜,且通过¹⁵N 稀释技术测定发现高产水稻品种根际硝化强度显著高于两个低产品种,同时利用尖端直径 10 μm 的氧电极原位测定发现高产品种根表氧气含量显著高于低产品种。本次盆栽试验结果与上述田间和水培试验结果相吻合。

目前已有研究证明有机质及硫元素均能有效促进水稻根系通气组织发育^[23],因此我们推断稻田土壤增施有机肥及硫肥可以增强水稻泌氧能力,从而增加水稻抗涝性。因此,今后将通过盆栽结合田间试验进一步研究其机理及可行性,为水稻高产高效栽培提供新的理论支撑。

4 结论

高产水稻具有较为发达的根系,同时根系通气组织发育较低产品种更完善,而通气组织发育良好的水稻品种相应的径向泌氧量也较高。由于二者泌氧能力的差异导致根际土壤氧气含量差异,从而可能最终导致高

产品种根际硝化作用比低产品种更强。另一方面高产品种根系外皮层厚壁细胞体积较小,排列紧密,细胞壁增厚程度大;而低产品种外皮层厚壁细胞体积相对较大,排列疏松,细胞壁增厚程度相对较小。因此高产品种径向泌氧屏障作用较低产品种更强,能够为根系提供更充足的氧气供应,促进根系生长。

References:

- [1] Colmer T D, Pedersen O. Oxygen dynamics in submerged rice (*Oryza sativa*). *New Phytologist*, 2008, 178(2): 326-334.
- [2] Li Y L, Zhang Y L, Hu J, Shen Q R. Spatiotemporal variations of nitrification in rhizosphere soil for two different rice cultivars at the seedling stage growing under waterlogged conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1461-1467.
- [3] Armstrong W. Radial oxygen losses from intact rice roots as affected by distance from the apex, respiration and waterlogging. *Physiologia Plantarum*, 1971, 25(2): 192-197.
- [4] Fan M S, Zhang F S. Aerenchyma formation in plant and its physiological and ecological significance. *Plant Physiology Communications*, 2002, 38(6): 615-618.
- [5] Kong Y, Wang Z, Kong Y J, Wang Y X. Research progress on aerenchyma formation in plant roots. *Chinese Bulletin of Botany*, 2008, 25(2): 248-253.
- [6] Armstrong W. Aeration in higher plants. *Advances in Botanical Research*, 1980, 7: 225-332.
- [7] Li Y L, Zhang Y L, Hu J, Shen Q R. Contribution of nitrification happened in rhizospheric soil growing with different rice cultivars to N nutrition. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43(4): 417-425.
- [8] Li Y L, Fan X R, Shen Q R. The relationship between rhizosphere nitrification and nitrogen-use efficiency in rice plants. *Plant, Cell and Environment*, 2008, 31(1): 73-85.
- [9] Kludze H K, DeLaune R D, Patrick W H. Aerenchyma formation and methane and oxygen exchange in rice. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(2): 386-391.
- [10] David J L, Olga N B. Root cell ultrastructure in developing aerenchyma tissue of three wetland species. *Annals of Botany*, 2000, 86(3): 641-646.
- [11] Berg P, Rosswall T. Ammonium oxidizer numbers, potential and actual oxidation rates in two swedish arable soils. *Biology and Fertility of Soils*, 1985, 1(3): 131-140.
- [12] Wang X L, Si J Y, Chen D M, Feng K. Effects of different nitrogen sources on rice root aerenchyma formation at low pH level. *Journal of Yangzhou University: Griculture and Life Sciences Edition*, 2005, 26(2): 66-70.
- [13] Kong Y. Study on the Formation of Aerenchyma and the Development of the Sclerenchyma on the Edge of Exodermis in Rice Roots [D]. Yangzhou. Yangzhou University. 2009: 36-50.
- [14] Aguilera E A, Turnera D W, Sivasithamparam K. Aerenchyma formation in roots of four banana (*Musa* spp.) cultivars. *Scientia Horticulturae*, 1999, 80(1/2): 57-72.
- [15] Huang B, Johnson J W, Nesmith S, Bridges D C. Growth, physiological and anatomical responses of two wheat genotypes to waterlogging and nutrient supply. *Journal of Experimental Botany*, 1994, 45(2): 193-202.
- [16] Colmer T D. Aerenchyma and an inducible barrier to radial oxygen loss facilitate root aeration in upland, paddy and deep-water rice (*Oryza sativa* L.) *Annals of Botany*, 2003, 91(2): 301-309.
- [17] Feng K, Si J L, Wang X L, Sheng H J. Comparative analysis on rice root anatomical structure under different soil moisture. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(3): 346-351.
- [18] Briones A M, Okabe S, Umekiya Y, Ramsing N B, Reichardt W, Okuyama H. Ammonia-oxidizing bacteria on root biofilms and their possible contribution to N use efficiency of different rice cultivars. *Plant and Soil*, 2003, 250(2): 335-348.
- [19] Kirk G J D, Kronzucker H J. The potential for nitrification and nitrate uptake in the rhizosphere of wetland plants: a modeling study. *Annals of Botany*, 2005, 96(4): 639-646.
- [20] Jensen K, Revsbech N P, Nielsen L P. Microscale distribution of nitrification activity in sediment determined with a shielded microsensor for nitrate. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, 59(10): 3287-3296.
- [21] Ghosh P, Kashyap A K. Effect of rice cultivars on rate of N-mineralization, nitrification and nitrifier population size in an irrigated rice ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 2003, 24(1): 27-41.
- [22] Briones A M, Okabe S, Umekiya Y, Ramsing N B, Reichardt W, Okuyama H. Influence of different cultivars on populations of ammonia-oxidizing bacteria in the root environment of rice. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, 68(6): 3067-3075.
- [23] Meng D M, Zhu Y G, Zhou J G. Study on the relationship between aerenchyma of rice root systems and iron plaque outside roots. *Modern Agricultural Sciences*, 2008, 15(4): 55-58.

参考文献:

- [2] 李奕林, 张亚丽, 胡江, 沈其荣. 淹水条件下籼稻与粳稻苗期根际土壤硝化作用的时空变异. *生态学报*, 2006, 26(5): 1461-1467.
- [4] 樊明寿, 张福锁. 植物通气组织的形成过程和生理生态学意义. *植物生理学通讯*, 2002, 38(6): 615-618.
- [5] 孔好, 王忠, 孔蕴洁, 汪月霞. 植物根内通气组织形成的研究进展. *植物学通报*, 2008, 25(2): 248-253.
- [12] 汪晓丽, 司江英, 陈冬梅, 封克. 低 pH 条件下不同氮源对水稻根通气组织形成的影响. *扬州大学学报: 自然科学版: 农业与生命科学版* 2005, 26(2): 66-70.
- [13] 孔好. 关于稻根通气组织形成和外皮层边缘厚壁细胞发育的研究 [D]. 扬州. 扬州大学, 2009: 36-50.
- [17] 封克, 司江英, 汪晓丽, 盛海君. 不同水分条件下水稻根解剖结构的比较分析. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(3): 346-351.
- [23] 孟冬梅, 朱永官, 周建国. 水稻根系通气组织与根表铁膜关系的研究. *现代农业科学*, 2008, 15(4): 55-58.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 7 April, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Theoretical framework and key techniques of urban ecological landscape research	SUN Ranhao, XU Zhongliang, CHEN Liding, et al (1979)
Response of sinapate esters in <i>Arabidopsis thaliana</i> to UV-B radiation	LI Min, WANG Yin, MU Xiaofei, et al (1987)
Biosorption of lead (II) and cadmium (II) from aqueous solution by <i>Chlorella pyrenoidsa</i> and its influential factors	JIANG Jing, LI Liang, LI Haipeng, et al (1995)
Response of pear jujube trees on fruit development period to different soil water potential levels	HAN Lixin, WANG Youke, ZHANG Linlin (2004)
An approach for analyzing resources metabolism of industrial ecosystems	SHI Xiaoqing, YANG Jianxin, WANG Rusong, et al (2012)
Establishment of environmental sustainability assessment indicators based on material flow and ecological footprint model in Tongling City of Anhui Province	ZHAO Huihui, WANG Yuan, GU Xueming, et al (2025)
Health status evaluation of the farmland supply function at county level in Hebei Province	BAI Linhong, WANG Wei, ZHANG Yu (2033)
Inhibition effects and mechanisms of the endophytic fungus <i>Chaetomium globosum</i> L18 from <i>Curcuma wenyujin</i>	WANG Yanhong, WU Xiaomin, ZHU Yanping, et al (2040)
Water use of walnut-wheat intercropping system based on stable carbon isotope technique in the low hilly area of North China	HE Chunxia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (2047)
Spatial heterogeneity of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in sloping farmland in a karst region on the Yunnan-Guizhou Plateau	ZHANG Liqing, PENG Wanxia, SONG Tongqing, et al (2056)
Relationship among rice root aerenchyma, root radial oxygen loss and rhizosphere nitrification	LI Yilin (2066)
Effects of <i>Eriosoma lanigerum</i> (Hausmann) on physiological indices of different apple cultivars	WANG Xicun, YU Yi, ZHOU Hongxu, et al (2075)
Effects of P-efficient transgenic soybean on rhizosphere microbial community	JIN Lingbo, ZHOU Feng, YAO Juan, et al (2082)
Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet11 wavelet in Northeast China	XU Yanyan, ZHANG Jiahua, YANG Limin (2091)
Cropping system optimization based on the comparative analysis of precipitation utilization in Sichuan Province	WANG Mingtian, QU Huihui, YANG Xiaoguang, et al (2099)
The impacts of global climatic change on chilling damage distributions of maize in Northeast China	GAO Xiaorong, WANG Chunyi, ZHANG Jiquan (2110)
Effect of fertilization on ammonia volatilization from paddy fields in Chao Lake Basin	ZHU Xiaohong, MA Zhongwen, MA Youhua, et al (2119)
Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on net ion fluxes in the roots of trifoliate orange (<i>Poncirus trifoliata</i>) and mineral nutrition in seedlings under zinc contamination	XIAO Jiaxin, YANG Hui, ZHANG Shaoling (2127)
The effect of red:far red ratio on the stomata characters and stomata conductance of <i>Chrysanthemum</i> leaves	YANG Zaiqiang, ZHANG Jing, JIANG Xiaodong, et al (2135)
Dynamic characteristics of litterfall and nutrient return of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia, China	LIU Lei, SHEN Guozhen, CHEN Fangqing, et al (2142)
Aboveground litter contribution to soil respiration in a black locust plantation in the Loess Plateau	ZHOU Xiaogang, GUO Shenli, CHE Shengguo, et al (2150)
Life history and spatial distribution of a <i>Taiwania flousiana</i> population in Leigong Mountain, Guizhou Province, China	CHEN Zhiyang, YANG Ning, YAO Xianming, et al (2158)
The feasibility of using LAS measurements of the turbulence structure parameters of temperature above a forest canopy	ZHENG Ning, ZHANG Jinsong, MENG Ping, et al (2166)
Spatial distribution of vegetation and carbon density in Jinyun Mountain Nature Reserve based on RS/GIS	XU Shaojun, ZENG Bo, SU Xiaolei, et al (2174)
Early nitrogen deposition effects on CO ₂ efflux from a cold-temperate coniferous forest soil	WENDU Runa, FANG Huajun, YU Guirui, et al (2185)
Epilithic diatom assemblages distribution in Gui River basin, in relation to chemical and physiographical factors	DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al (2196)
Acute stress caused by sand discharging on Yellow River Carp (<i>Cyprinus carpio</i>) in Xiaolangdi Reservoir	SUN Luyin, Baiyinbaoligao, NIU Cuijuan, et al (2204)
Environmental cost of pond aquaculture in Shanghai: an empirical analysis based on double-bounded dichotomous CVM method	TANG Keyong, YANG Zhengyong, YANG Huaiyu, et al (2212)
Host searching behaviour of <i>Apanteles cypris</i> Nixon (Hymenoptera: Braconidae) ...	ZHOU Hui, ZHANG Yang, WU Weijian (2223)
The effect of hedgerows on the distribution of <i>Harmonia axyridis</i> Pallas in agroforestry systems	YAN Fei, ZHOU Zaibao, WANG Shuo, et al (2230)
Induction of early resistance response to <i>Alternaria alternata</i> f. sp. <i>mali</i> in apple leaves with apple and chitosan fermentation broth ...	WANG Rongjuan, YAO Yuncong, QI Yaping, et al (2239)
Review and Monograph	
Research into vulnerability assessment for coastal zones in the context of climate change	WANG Ning, ZHANG Liquan, YUAN Lin, et al (2248)
Introduction and ecological effects of an exotic mangrove species <i>Sonneratia apetala</i>	PENG Yougui, XU Zhengchun, LIU Minchao (2259)
Discussion	
Degradation of organic contaminants with biological aerobic fermentation in sewage sludge dewatering and its influencing factors	YU Jie, ZHENG Guodi, GAO Ding, et al (2271)
Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using four greening tree species	YAN Wende, LIANG Xiaocui, ZHENG Wei, et al (2279)
Scientific Note	
Diversity of endophytic fungi from six dominant plant species in a Pb-Zn mine wasteland in China	LI Dongwei, XU Hongmei, MEI Tao, et al (2288)
Effects of <i>Meloidogyne incognita</i> on scavenging system of reactive oxygen species in tomato seedlings grafted with different rootstocks ...	LIANG Peng, CHEN Zhende, LUO Qingxi (2294)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 7 期 (2012 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 7 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元