

肥力水平对水稻苗期生长及氮素吸收同化的影响^①

李奕林, 王兴祥*

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 通过盆栽试验研究了不同肥力水平红壤水稻土种植条件下, 水稻苗期生长及其 N 素吸收同化的差异。结果表明, 在高肥力土壤中水稻的苗期生物量均显著高于低肥力土壤, 主要表现为根生物量的差异, 而且高肥力显著增加了水稻根数, 但对水稻根冠比无显著影响。高土壤肥力对水稻 N 素吸收有显著促进作用, 在一定程度上提高了水稻 N 素利用率, 但并无显著影响。与低肥力红壤水稻土相比, 水稻在高肥条件下叶片和根硝酸还原酶活性 (NRA) 和谷氨酰胺合成酶活性 (GSA) 均显著提高, 显著促进水稻对 N 素的吸收同化。因此, 适当提高和改善红壤水稻土肥力对红壤区水稻生长及 N 素营养具有重要意义。

关键词: 红壤水稻土; 肥力; 水稻; 氮素同化

中图分类号: S158.3; S511; Q945.1

红壤广泛分布于中国南部和中部的热带和亚热带地区, 栽培水稻是红壤的主要利用方式之一^[1]。例如江西省水稻土总面积为 303.3 万 hm^2 , 其中红壤水稻土占稻田土壤总面积的 66.9%^[2]。由于高度的风化淋溶, 红壤具有低 pH、低阳离子交换量、养分贫瘠等特点^[3]。因此, 必须通过合理施肥维持和提高水稻产量^[4]。以往的研究表明 N 素是水稻生产最重要的限制因素之一^[5], 且不同水稻品种之间生长和 N 素吸收利用存在显著差异^[6], 而不同肥力水平下水稻 N 素吸收利用差异研究尚不多见。本文以南方红壤区不同肥力水平水稻土为例, 对比研究水稻生长及 N 素吸收利用差异, 揭示红壤区稻田肥力水平与水稻 N 素营养之间的关系, 为改善红壤区水稻 N 素营养提供理论依据。

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, 试验土壤采自中国科学院红壤生态实验站 (东经 $116^{\circ}5'30''$, 北纬 $28^{\circ}5'30''$), 属亚热带季风气候区, 年均气温 17.8°C , 年降雨量 1785 mm, 年蒸发量 1318 mm, 无霜期 261 天。供试土壤母质均为第四纪红黏土红壤发育的水稻土, 分别采自不同肥力稻田 (高肥力稻田开垦年限超过 50 年、低肥力稻田开垦年限为 15 年)。其中高肥力水稻土理化性质为: 有机质 27.3

mg/g、全 N 1.74 mg/g、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 2.27 mg/kg、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 0.48 mg/kg、黏粒 ($<2\ \mu\text{m}$) 127 g/kg、pH 5.02 (土水比 1:2.5); 低肥力水稻土理化性质为: 有机质 17.5 mg/g、全 N 0.85 mg/g、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 0.72 mg/kg、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 0.17 mg/kg、黏粒 ($<2\ \mu\text{m}$) 363 g/kg、pH 4.75 (土水比 1:2.5)。试验水稻品种选用江西常规籼稻品种禾盛 10 号。

本试验采用根箱 (三室) 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。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 N 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 和 60 天。采样时间为上午 10:00 左右, 两个肥力水平处理根箱各取 6 盒, 其中 3 盒用于水稻生物量和含 N 量的测定, 其余 3 盒用于水稻硝酸还原酶活性 (NRA) 和谷氨酰胺合

①基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB109301) 和中国科学院知识创新工程领域前沿项目 (ISSASIP0705) 资助。

* 通讯作者 (xxwang@issas.ac.cn)

作者简介: 李奕林 (1979—), 女, 河南郑州人, 博士, 助理研究员, 主要从事根际过程与植物营养研究。E-mail: ylli@issas.ac.cn

成酶活性 (GSA) 的测定。取样时直接将根箱沿尼龙网处掰开, 然后将附着有根表土的根系取出, 这样可以避免普通盆栽试验取样时对根系的损伤, 然后将水稻根用去离子水小心冲洗干净, 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 植株含N量测定 将整个植株分为地上部和根系, 称其鲜重后, 于 105℃ 杀青 30 min 后在 70℃ 烘干 72 h 至恒重, 称重。样品粉碎后, 用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 用连续流动分析仪 (AA3, 德国 Bran & Luebbe 公司) 测定其含N量。

1.2.2 叶片和根系NRA和GSA的测定 采用离体法测定叶片和根系的NRA和GSA^[7]。

1.2.3 数据分析 N 素利用率 (mg/mg) = 干物质积累量/N 积累量。所有数据均采用 SPSS v13.0 统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 土壤肥力水平对水稻生长的影响

由表 1 可以看出, 与低肥力红壤水稻土相比, 高肥力种植条件下, 水稻地上部、根或是植株生物量均显著增加, 且在 3 次采样期间均表现出相同趋势。不同肥力条件下, 水稻生物量的差异主要表现为根生物量的差异, 尤其表现为根干重的差异。高肥力土壤水稻地上部、根和植株干重约增加 62.8%、84.2% 和 67.1% (表 1), 表明土壤肥沃程度对水稻根系生长及干物质积累具有重要作用。

水稻根冠比 (以干重计) 随时间无显著变化, 高肥力土壤水稻根冠比略有增加, 但差异未达显著水平 (表 1)。水稻根数随水稻生长显著增加, 且高肥力显著增加水稻根数 (表 1), 表明土壤肥力水平可以通过增加水稻单株根数显著提高水稻根生物量。

表 1 土壤肥力水平对水稻生长的影响 (g/株)

Table 1 Effects of soil fertility levels on rice growth

肥力水平	采样时间 (天)	地上部		根		植株		根冠比	根数
		鲜重	干重	鲜重	干重	鲜重	干重		
低肥力	40	2.08 d	0.38 d	0.71 d	0.11 d	2.79 d	0.49 d	0.28 ab	22 d
	50	3.55 c	0.65 c	1.29 c	0.20 c	4.84 c	0.85 c	0.31 a	42 c
	60	4.77 b	1.08 b	1.43 c	0.24 c	6.20 b	1.32 b	0.22 b	49 c
高肥力	40	3.61 c	0.71 c	1.43 c	0.21 c	5.04 c	0.93 c	0.30 a	28 d
	50	4.63 b	1.06 b	2.01 b	0.35 b	6.64 b	1.41 b	0.34 a	61 b
	60	6.41 a	1.50 a	2.46 a	0.42 a	8.86 a	1.92 a	0.28 ab	82 a

注: 同列中不同字母表示 LSD 检验在 p<0.05 水平差异显著, 下同。

2.2 土壤肥力水平对水稻 N 素吸收利用的影响

水稻地上部、根或是植株, 其 N 素积累量均随水稻生育期的延长而显著增加 (表 2)。其中地上部 N 素积累量在水稻播种后 40 和 50 天增加不显著, 而在播种后 60 天显著增加; 而根 N 素积累量在播种后 50 天显著高于播种后 40 天, 而播种后 60 与 50 天无显著差异; 水稻植株 N 素积累量随时间显著增加。无论地上部、根和植株 N 素积累量均表现为高肥力种植条件下高于低肥力, 水稻在高肥力条件下植株 N 素积累量在播种后 40、50 和 60 天分别比低肥力提高 47.9%、48.6% 和 29.9% (表 2), 表明高土壤肥力对水稻 N 素吸收有显著促进作用。

水稻植株 N 素利用率随时间无显著变化, 地上部 N 素利用率随水稻生长显著增加, 而根 N 素利用率变化趋势与地上部相反 (表 2)。土壤肥力水平在一定程

度上提高了水稻 N 素利用率, 但并无显著影响; 高肥力对水稻 N 素吸收和水稻生长都有显著促进作用 (表 1、2), 表明土壤肥力主要是通过增加水稻生物量的方式促进了水稻对 N 素的吸收。

2.3 土壤肥力水平对水稻 N 素同化的影响

由表 3 可知, 水稻叶片和根 NRA 随水稻生育期延长无显著变化, 而且在水稻种植期间叶片的 NRA 显著高于根的 NRA。水稻叶片 NRA 在低肥和高肥条件下分别为 7.14 和 10.6 μg/(g·h), 而根 NRA 分别为 4.27 和 6.39 μg/(g·h)。与低肥力水平相比, 叶片和根 NRA 在高肥力下增幅分别为 48.2% 和 49.7%, 表明高肥力能显著提高水稻叶片和根 NRA。

与水稻 NRA 变化趋势相同, 叶片和根 GSA 随生育期延长也无显著变化, 且在水稻种植期间叶片 GSA

显著高于根 GSA。高土壤肥力显著提高水稻叶片和根肥力种植条件下叶片和根分别较之低肥力条件下提高 GSA, 尤其表现为对水稻根 GSA 促进作用, 水稻在高 37.6% 和 103.1% (表 3)。

表 2 土壤肥力水平对水稻 N 素吸收利用的影响

Table 2 Effects of soil fertility levels on rice N accumulation and N use efficiency

肥力水平	采样时间 (天)	N 积累量 (mg/株)			N 素利用率 (mg/mg)		
		地上部	根	植株	地上部	根	植株
低肥力	40	14.7 e	2.04 d	16.8 d	25.6 c	56.6 a	36.3 b
	50	17.2 de	6.24 b	23.4 c	38.3 ab	32.1 c	36.5 b
	60	27.6 b	7.17 b	34.8 b	39.2 ab	33.0 c	37.9 ab
高肥力	40	21.2 cd	3.64 c	24.8 c	33.8 b	58.4 a	37.4 ab
	50	25.0 bc	9.73 a	34.8 b	42.1 a	36.5 c	40.4 ab
	60	35.2 a	9.95 a	45.1 a	42.6 a	42.2 bc	42.5 a

表 3 土壤肥力水平对水稻 N 素同化的影响

Table 3 Effects of soil fertility levels on rice N assimilation

肥力水平	采样时间 (天)	NRA ($\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$)		GSA ($\text{mmol}/(\text{g}\cdot\text{min})$)	
		叶	根	叶	根
低肥力	40	7.21 b	4.06 c	1.85 c	0.08 b
	50	6.84 b	4.61 bc	2.09 bc	0.09 b
	60	7.38 b	4.14 c	2.35 bc	0.11 b
高肥力	40	10.6 a	5.85 ab	2.56 b	0.18 a
	50	10.7 a	6.86 a	2.58 b	0.18 a
	60	10.5 a	6.45 a	3.51 a	0.21 a

3 讨论

红壤是我国南方热带和亚热带地区最重要的土壤资源, 红壤区水热资源丰富, 生产潜力大, 是我国重要的农业产区, 但由于红壤肥力水平、pH 值较低等因素, 严重降低红壤区生产能力^[1,8-10]。水稻是我国南方地区重要的粮食作物, 旱改水是目前红壤地区快速恢复土壤肥力和生产力的有效措施之一^[10]。第四纪红黏土发育的红壤, 黏粒含量通常高于 350 g/kg, 因此新垦红壤水田由于土壤质地粘重而不利于耕作和水稻生长, 正是由于水耕利用后黏粒的不断淋失, 以及土壤氧化还原过程交替发生的铁解作用对黏粒的破坏, 使得红壤水稻土结构发育, 耕性和通气透水状况得到显著改善, 物理肥力显著提高^[10]。本试验供试的两种水稻土壤分别采自水耕 15 和 50 年的稻田, 其土壤黏粒 (<2 μm) 含量分别为 363 g/kg 和 127 g/kg, 可以看出随着水耕年限的增加, 土壤黏粒含量显著下降, 因此水耕 50 年的稻田土壤物理肥力显著高于水耕 15 年的稻田。长期施肥是红壤水稻土培肥的重要举措, 显著提高土壤化学和生物学肥力^[11-12]。本试验供

试的两种水稻土由于水耕利用时间的不同而导致物理、化学和生物化学肥力差异显著。

本试验结果表明种植于高肥力红壤水稻土水稻生物量显著高于低肥力红壤水稻土, 且主要表现为根生物量的差异 (表 1), 同时高肥力土壤水稻根数也显著提高。根生物量是根系生长状况的集中体现, 反映根系发达程度, 水稻根系与地上部生长发育和产量形成密切相关^[13-14]。土壤肥力对水稻根系的影响表现为高肥力显著提高水稻单株根数和根生物量 (表 1)。王月福等^[15]在小麦中也发现了相同的现象, 通过田间土柱栽培的方法研究发现, 高土壤肥力有利于小麦根系的生长发育, 同时提高根系活力, 增加小麦根系 NRA 和 GSA, 有利于小麦对 N 素的吸收同化, 促进 N 素在小麦体内的积累。本研究结果也表明高肥力土壤上水稻显示出更强的生长势、N 素同化酶活性 (NRA 和 GSA) 增加, 水稻 N 素吸收积累量也显著提高 (表 1、2 和 3)。

以往的研究表明, 不同水稻品种由于其根际硝化作用的差异最终导致水稻生长和 N 素吸收利用的差异, 即根际硝化作用强的水稻品种生长及 N 素营养均

显著优于根际硝化作用弱的品种^[16]。由于硝化作用所形成的 NO_3^- -N 能够大量被水稻根系所吸收^[17-18], 因此由于水稻根际土壤硝化强度差异造成水稻根际土壤 NH_4^+ 、 NO_3^- 浓度及比例差异可能最终导致水稻吸收 NO_3^- 多少的差异。本试验发现不同肥力土壤根际硝化作用也存在显著差异, 表现为高肥力土壤根际硝化强度显著高于低肥力土壤(数据未发表)。李忠佩等^[10]通过长期定位试验研究表明, 红壤开垦利用后随着水耕熟化过程的进行, 土壤 pH 值显著提高, 亚硝化细菌数量呈递增趋势, 硝化强度显著增加。因此, 我们推断高肥力水稻土由于开垦年限较长, 因此具有较高的硝化强度, 而两种肥力水平水稻土硝化作用的差异也造成种植于不同肥力红壤水稻土中水稻吸收 NO_3^- 的差异, 最终导致水稻生长和 N 素吸收利用的差异。NR 是一种诱导酶, 其活性取决于介质中 NO_3^- 的浓度。在一定浓度范围内, NO_3^- 浓度与 NRA 呈正相关^[19]。本试验中, 高肥力土壤水稻根与叶片 NRA 均显著高于低肥力土壤(表 3), 此结果表明高肥力条件下, 水稻对 NO_3^- 的吸收同化作用增强, 而二者对 NO_3^- 的吸收同化差异应主要归功于根际土壤硝化强度的差异。

4 结论

不同肥力红壤水稻土种植条件下水稻生长及N素吸收同化差异显著, 表现为高肥力下, 水稻苗期生物量、N素吸收及同化均显著提高。由于红壤稻田开垦时间及管理的差异, 导致水稻土物理、化学和生物学肥力的差异。而土壤肥力的差异又造成水稻根际硝化强度以及水稻吸收 NO_3^- 的差异, 因此最终导致水稻种植于高肥力土壤中显示出更强的生长势和N素吸收利用能力。因此适当提高和改善红壤水稻土肥力对红壤区水稻生长及N素营养具有重要意义。

参考文献:

- [1] 钟文辉, 蔡祖聪, 尹力初, 张鹤. 种植水稻和长期施用无机肥对红壤氨氧化细菌多样性和硝化作用的影响. 土壤学报, 2008, 45(1): 105-111
- [2] 范业成, 叶厚专. 江西红壤性水稻土肥力特性及其管理. 江西农业学报, 1998, 10(3): 70-74
- [3] 张桃林, 鲁如坤, 李忠佩. 红壤丘陵区土壤养分退化与养分库重建. 长江流域资源与环境, 1998, 7(1): 18-24
- [4] 李辉信, 胡锋, 刘满强, 蔡贵信, 范晓晖. 红壤氮素的矿化和硝化作用特征. 土壤, 2000, 32(4): 194-214
- [5] Fageria NK, Barbosa FMP. Nitrogen use efficiency in lowland rice genotypes. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2001, 32(13/14): 2079-2089
- [6] 李奕林, 张亚丽, 贺巍, 沈其荣. 淹水条件下籼稻与粳稻苗期生长及氮素吸收同化差异比较. 南京农业大学学报, 2007, 30(3): 73-77
- [7] 曹云, 范晓荣, 贾莉君, 尹晓明, 沈其荣. 不同水稻品种对 NO_3^- 同化差异的比较. 南京农业大学学报, 2005, 28(1): 52-56
- [8] Zhang MK, Xu JM. Restoration of surface soil fertility of an eroded red soil in southern China. Soil & Tillage Research, 2005, 80: 13-21
- [9] Xu RK, Zhao AZ, Li QM, Kong XL, Ji GL. Acidity regime of the red soils in a subtropical region of southern China under field conditions. Geoderma, 2003, 115: 75-84
- [10] 李忠佩, 李德成, 张桃林, 陈碧云, 尹瑞玲, 施亚琴. 红壤水稻土肥力性状的演变特征. 土壤学报, 2003, 40(6): 870-878
- [11] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国中亚热带缓丘区红粘土红壤肥力的演化 II. 化学和生物学肥力的演化. 土壤学报, 1999, 36(2): 203-217
- [12] Zhong WH, Cai ZC. Long-term effects of inorganic fertilizers on microbial biomass and community functional diversity in a paddy soil derived from quaternary red clay. Applied Soil Ecology, 2007, 36: 84-91
- [13] 蔡昆争, 骆世明, 段舜山. 水稻根系在根袋处理条件下对氮养分的反应. 生态学报, 2003, 23(6): 1109-1116
- [14] 蔡昆争, 骆世明, 段舜山. 水稻群体根系特征与地上部生长发育和产量的关系. 华南农业大学学报, 2005, 26(2): 1-4
- [15] 王月福, 于振文, 李尚霞, 余松烈. 土壤肥力和施氮量对小麦根系氮同化及子粒蛋白质含量的影响. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 39-44
- [16] Li YL, Zhang YL, Hu J, Shen QR. Contribution of nitrification happened in rhizospheric soil growing with different rice cultivars to N nutrition. Biology and Fertility of Soils, 2007, 43: 417-425
- [17] Kronzucker HJ, Glass ADM, Siddiqi MY, Kirk GJD. Comparative kinetic analysis of ammonium and nitrate acquisition by tropical lowland rice: Implications for rice cultivation and yield potential. New Phytologist, 2000, 145: 471-476
- [18] Kronzucker HJ, Siddiqi MY, Glass ADM, Kirk GJD. Nitrate-ammonium synergism in rice: A subcellular flux analysis. Plant Physiology, 1999, 119: 1041-1045
- [19] 何文寿, 李生秀, 李辉桃. 水稻对铵态氮和硝态氮吸收特性的研究. 中国水稻科学, 1998, 12(4): 249-252

Effects of Soil Fertility Levels on Rice Growth, Nitrogen Accumulation and Assimilation at Seedling Stage

LI Yi-lin, WANG Xing-xiang

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the differences in rice plant biomass, N accumulation, N use efficiency, glutamine synthetase activity (GSA) and nitrate reductase activity (NRA) of paddy soil derived from red soil under different fertility levels at 40, 50 and 60 days after sowing. The results showed that the fresh and dry weights of rice plant under high fertility condition were significantly higher than those under low fertility condition, especially for the root biomass. High soil fertility increased rice root numbers significantly, but showed no significant effect on the root/shoot ratio. The rice N accumulation, NRA and GSA were significantly improved under high fertility soil conditions, which showed that high soil fertility increased rice N accumulation and assimilation significantly. High soil fertility increased the rice N use efficiencies but resulted in no statistically significant difference. In summary, appropriate amelioration for the paddy soil fertility was of important strategic significance for rice growth and nitrogen nutrition in tropical and subtropical China.

Key words: Paddy soil derived from red soil, Fertility, Rice, Nitrogen assimilation