

不同氮效率水稻品种根系生理生态指标的差异

樊剑波^{1,2}, 沈其荣¹, 谭炯壮¹, 叶利庭¹, 宋文静¹, 张亚丽^{1,*}

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏南京 210095; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008)

摘要:以氮素利用效率差异大的两个水稻品种(氮高效品种南光和氮低效品种 Elio)作为试验材料,设计高低两个供氮水平,在温室砂培条件下研究了不同氮效率水稻高效吸收利用氮素的根系生物学特性及生理机制。结果表明,在两个供氮水平下,氮高效水稻南光的产量均显著大于氮低效水稻,增幅在 50% 以上。随着供氮水平的提高,两个水稻品种植株的总吸氮量和干物质质量随之增加,氮高效水稻南光的生育后期吸氮量和地上部及根系的生物量显著高于氮低效水稻 Elio; 氮高效水稻品种南光根系形态参数对氮素营养的响应度高于氮低效品种 Elio, 高氮处理下, 南光较低氮处理分别增加 127% (总根长) 和 114% (根系表面积), 而 Elio 仅增加 92% (总根长) 和 82% (根系表面积), 而且 Elio 在齐穗期后根系形态参数水平下降显著; 南光的根系伤流强度在拔节期较氮低效水稻 Elio 高出 11% (1mmol L^{-1}) 和 32% (5mmol L^{-1}), 灌浆期南光较 Elio 高出 12% (1mmol L^{-1}) 和 12% (5mmol L^{-1}), 差异均显著。由本试验结果可推断根系形态及根系活力的差异是造成水稻氮效率差异的重要原因之一。

关键词:氮效率; 根系伤流; 总根长; 根系表面积

文章编号:1000-0933(2009)06-3052-07 中图分类号:Q142, Q945, S314 文献标识码:A

Difference of root physiological and ecological indices in rice cultivars with different N use efficiency

FAN Jian-Bo^{1,2}, SHEN Qi-Rong¹, TAN Jiong-Zhuang¹, YE Li-Ting¹, SONG Wen-Jing¹, ZHANG Ya-Li^{1,*}

1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China

2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing Jiangsu 210008, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3052 ~ 3058.

Abstract: Sand culture was conducted to study the root morphologic characteristics and physiological indices in two rice cultivars with different N use efficiency (NUE), Nanguang with high NUE and Elio with low NUE, under two N rates (1mmol L^{-1} and 5mmol L^{-1}). The results obtained were listed as follows. Compared to Elio, grain yields of Nanguang were more than 50% under two N rates. Nitrogen and biomass accumulation in rice cultivars increased with increasing N application rates. But nitrogen and biomass accumulation of Nanguang were much greater than these of Elio at the latter growth stages. The root morphologic characteristics in high NUE rice cultivar (Nanguang) had more sensitive responses to high N application rates than the low NUE rice cultivar (Elio). Compared to N application rate of 1mmol L^{-1} , root lengths were 127% greater in Nanguang and 92% greater in Elio under N rate of 5mmol L^{-1} ; and root surface areas were 114% greater in Nanguang and 82% greater in Elio. Root morphological characteristics of Elio with low NUE rice cultivar, decreased more rapidly than Nanguang after the heading stage. Root bleeding rates of Elio were lower than that of Nanguang at different growth stages. Compared to Elio, root bleeding rate of Nanguang were 11% (1mmol L^{-1}) and 32% (5mmol L^{-1}) greater at jointing stage and 17% (1mmol L^{-1}) and 18% (5mmol L^{-1}) greater at heading stage. It was concluded that efficient N use of rice cultivar depended to a great extent on greater root morphological characteristics and stronger root physiological activity.

Key Words: nitrogen use efficiency; root bleeding rate; total root length; root surface area

基金项目:中国科技部“973”资助项目(2007CB109304); 国家自然科学基金资助项目(30671234, 30771290)

收稿日期:2008-03-27; 修订日期:2008-10-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ylzheng@njau.edu.cn

根系系统的形态能够影响植物对水分和养分的吸收,而施氮水平^[1]、环境因素^[2,3]以及土壤理化性质^[4]等也显著的影响根系形态特征。Weisler 等对 10 个不同玉米品种的田间实验表明根系密度与土壤中硝态氮含量有一定的相关性^[5]。Lawlor 研究表明在供氮不足时通过增加根系体积和密度来提高氮的吸收是可行的^[6]。已有的关于根系形态的研究主要集中在玉米^[7~9]、小麦^[10,11]等农作物上,由于采样困难等因素的制约,对于水稻根系形态的研究很少。另一方面,作物根系生理活性也影响着氮素的吸收以及产量的形成。目前普遍采用测定根系伤流来衡量其生理活性^[12~14]。孙庆泉等比较了 20 世纪 50、70、90 年代中国玉米品种的根系特性,他们发现随着品种的改良,玉米根系伤流量明显增加^[15]。

目前,氮素高效利用的水稻根系形态构型、生理活力指标与其氮素吸收、产量的定量关系还没有系统研究,但这是一个具有重要理论意义和应用价值的研究领域,所以本文在两个供氮水平下,重点研究氮素利用效率差异大的水稻品种的根系形态特征参数、根系活力和氮素营养吸收能力及产量等指标,可以从水稻根的生理学特征和水稻生理生化的角度揭示水稻高效利用氮素的机制,为在实践上提出水稻氮肥的合理施用技术提供理论基础,也为水稻氮素高效利用的遗传研究提供准确的生理生化指标和参数。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2005 年 5 月至 10 月在南京农业大学温室实施。水稻种子经 30% H₂O₂30min 消毒,催芽,然后播于盛有蛭石的育苗盘,二叶一心时移栽。基质采用粒径一致的消毒细砂。试验开始时的营养液为 1/4 浓度的营养液,三叶一心后为完全营养液。设 1 mmol L⁻¹(N1) 和 5 mmol L⁻¹(N5) 两个供氮处理,均为国际水稻所常规营养液^[16]。营养液中 K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺ 及微量元素的浓度保持不变,其中 Fe 用 Fe(EDTA-Na₂) 代替,并加入硅酸钠以保持营养液中的 SiO₂ 为 120 mg kg⁻¹。为了维持营养液中氮的浓度和其它离子平衡,三叶期前每隔 2d 换 1 次营养液,三叶期后每天换 1 次营养液。营养液 pH 值每天用 0.1 mol L⁻¹ KOH 和 HCl 调至 6.0 左右。砂培容器为直径 25cm 高 25cm 的塑料桶,每桶装砂 15kg。随机区组设计,3 次重复。

1.2 供试水稻品种

根据大田实验的结果^[17,18]筛选出氮效率不同的水稻品种 2 个(表 1),分别是氮高效品种南光和氮低效品种 Elio。氮高效水稻是指水稻品种在任何供氮条件下均可获得籽粒高产;氮低效水稻是指水稻品种在任何供氮条件下其籽粒产量均较低。

表 1 供试水稻品种的基本特性
Table 1 Characteristics of the cultivars used in the experiment

品 种 Cultivars	产地 Birth places	生育期 Growth duration (d)	株高 Plant height(cm)
Elio	意大利 Italy	157	96
南光 Nanguang	日本 Japan	163	98

N = 180 kg hm⁻²

1.3 分析测定

根系形态测定^[19]:于苗期(30d)、分蘖盛期(60d)、拔节期(80d)、齐穗期(110d)和成熟期(140d)采集完整水稻植株根系,于清水中反复洗净后,应用根系分析仪(型号:WinRhizoLA1600)扫描完整根系,记录总根长,表面积等形态数据。

根系伤流液测定^[20]:于拔节期、齐穗期、灌浆期(齐穗后 10d)和成熟期,选取长相一致的稻株 3 株,18:00 在离根基部 10cm 处剪去地上部,套上内装有脱脂棉花并已称重的塑料袋,第 2 天 6:00 收集塑料袋,称重。

另于苗期、分蘖盛期、拔节期、齐穗期和成熟期,利用测定根系形态参数的植株样品,将整个植株分为地上部和根系,分别测定生物量(干重)。干样粉碎后经 H₂SO₄-H₂O₂ 消化,用流动分析仪(型号为 AA3)测定全氮含量。

在水稻籽粒成熟后收获,烘干称重,测定单株水稻的籽粒产量。

所得数据均用 SPSS10 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同氮效率水稻产量及总吸氮量的差异

从图 1 可以看出,随着施氮量的增加,水稻的籽粒产量随之增加且不同氮效率水稻的籽粒产量差异显著。在低氮水平条件下,氮低效水稻 Elio 的籽粒产量为 $11.26 \text{ g plant}^{-1}$,而氮高效水稻南光的籽粒产量为 $17.77 \text{ g plant}^{-1}$,与氮低效水稻 Elio 相比,氮高效水稻南光的籽粒产量高出约 58%。在高氮水平下,氮低效水稻 Elio 的籽粒产量为 $20.01 \text{ g plant}^{-1}$,而氮高效水稻南光的籽粒产量为 $36.09 \text{ g plant}^{-1}$,与氮低效水稻 Elio 相比,氮高效水稻南光的籽粒产量高出约 80%。

从图 2 可以看出,随着生育期的推进,两个不同氮效率的水稻总吸氮量从分蘖期开始显著增加,至齐穗期趋于平稳,水稻进入生育后期的物质转化运输阶段。两个不同氮效率水稻品种的总吸氮量在生育前期没有差异,拔节期后氮高效水稻品种南光的氮素积累速度大于氮低效水稻,在高氮条件下南光的氮积累量在齐穗期时已显著大于 Elio ($p < 0.05$),在成熟期时无论是低氮还是高氮条件下南光的总吸氮量均显著高出 Elio ($p < 0.05$),差异约在 30%。

2.2 不同氮效率水稻地上部及根系生物量的差异

从图 3 可以看出,在拔节期之前,两个供氮浓度下不同氮效率水稻品种的地上部干物重相差不大。从拔节期开始,氮高效品种南光的地上部干物重迅速增加,高氮条件下在齐穗期时氮高效水稻的地上部干重超过氮低效品种 Elio 约 20%,差异呈显著水平 ($p < 0.05$)。至成熟期时,氮高效水稻品种南光的地上部干物质量在高低两个供氮处理下均显著高于 Elio。

图 4 是全生育期不同氮效率水稻品种根系干物重的结果。从图中可以看出,与地上部干物重类似,齐穗前南光和 Elio 的根系干物重在不同处理下均相差不大。拔节后,南光的根系生长明显好于 Elio。齐穗时,氮高效品种南光的根系干重分别高出氮低效品种 Elio 17% (1 mmol L^{-1}) 和 14% (5 mmol L^{-1}),差异呈显著水平 ($p < 0.05$)。齐穗至成熟期,低氮处理下,两个品种根系干物重略有增加,在成熟期时,南光高出 Elio 19%;高氮处理下,Elio 的根系干物质量出现显著下降,而氮高效品种南光的根系干重基本没有变化,故高出 Elio 约 35%,差异极显著 ($p < 0.01$)。

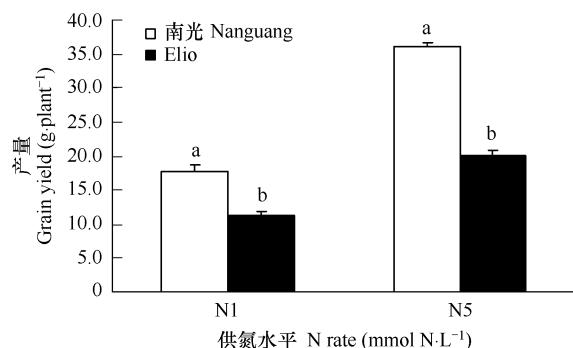


图 1 两个品种籽粒产量的差异

Fig. 1 Difference of grain yield between two cultivars

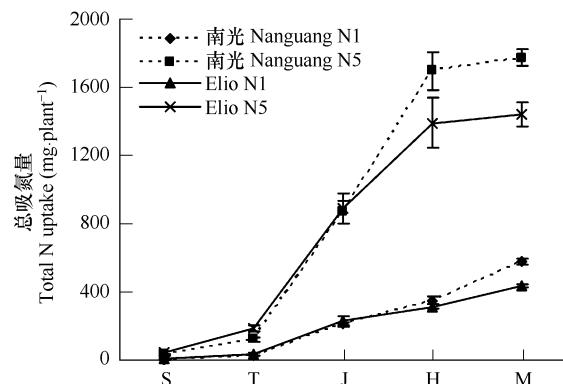


图 2 两个品种总吸氮量的差异

Fig. 2 Difference of total N uptake between two cultivars

S: 苗期 Seedling stage; T: 分蘖盛期 Maximum tillering stage; J: 拔节期 Jointing stage; H: 齐穗期 Heading stage; M: 成熟期 Maturity stage; 下同 the same below

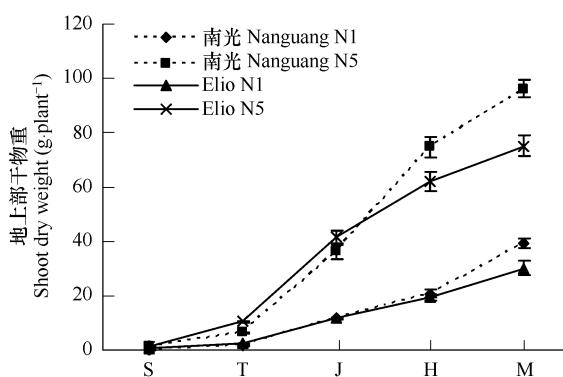


图 3 两个品种地上部干物质量的差异

Fig. 3 Difference of shoot dry weight between two cultivars

2.3 不同氮效率水稻根系形态参数的差异

2.3.1 总根长

从图5可看出,不同供氮水平对水稻总根长影响显著,高氮条件下两个不同氮效率的水稻总根长显著大于低氮条件下的总根长。氮高效南光的总根长在供氮水平为 5 mmol L^{-1} 时较 1 mmol L^{-1} 时平均增加127%,而品种Elio增加92%,表明南光对氮素的响应度更高。随着生育期的推进,南光的总根长持续增加,尤其在齐穗后仍生长旺盛;齐穗后 1 mmol L^{-1} 供氮水平下总根长的增加量明显小于 5 mmol L^{-1} 水平下的总根长,表明在南光生育后期提高供氮水平有利于其根系生长。在两个供氮水平下,Elio的总根长均在齐穗时达到最大值,齐穗期后却明显减少,成熟期总根长较齐穗期平均减少21%。与氮低效品种Elio相比,在高氮水平下氮高效水稻南光在生育中后期的总根长优势明显。

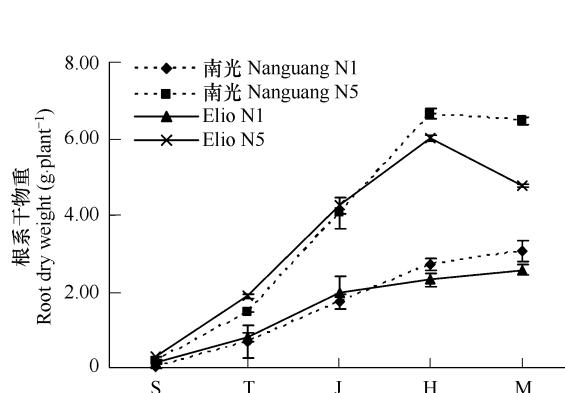


图4 两个品种根系干物质量的差异

Fig. 4 Difference of root dry weight between two cultivars

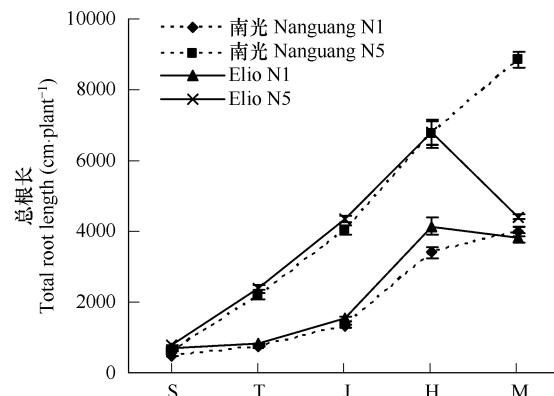


图5 两个品种总根长的差异

Fig. 5 Difference of total root length between two cultivars

2.3.2 根系表面积

从图6可以看出,随着供氮水平的增加两个不同氮效率水稻根系表面积也随之增加。随着生育期的推进,两个水稻品种的根系表面积均随之增加,齐穗后不同氮效率水稻品种间的表面积差异显著,Elio在齐穗期后根系表面积明显降低,在 5 mmol L^{-1} 水平下与齐穗期时的表面积相比,成熟期时Elio的根系表面积降幅为38%,这与总根长的变化是一致的。与水稻的总根长相比,与低氮水平相比,高氮水平下两个水稻品种的表面积增幅略小,南光和Elio分别为114%、82%,这种现象的原因是较高的氮素供应水平会使水稻不定根粗变小。

综上所述,不同氮效率的两个水稻品种根系形态参数差异明显。氮低效水稻品种Elio在齐穗后根系形态参数迅速下降,且均显著小于品种南光,而氮高效品种南光随着生育期的推进其根系形态各指标均明显增加,这对其生育后期对地上部营养供给和产量的形成都有重要影响。

2.4 不同氮效率水稻根系活力的差异

从图7可以看出,两个不同氮效率品种的根系伤流强度从拔节期开始逐渐减弱,但是高氮条件下伤流强度下降趋势明显比低氮条件下缓慢。在生育后期, 5 mmol L^{-1} 下伤流强度均大于 1 mmol L^{-1} ,这表明提高供氮水平可以有效地延缓根系的衰老。如图7所示,在同一供氮水平下,在各生育期,南光的伤流强度均大于Elio。低氮条件下,拔节期南光伤流强度比Elio高出11%;进入齐穗期后,南光伤流强度比Elio平均高出5%以上,灌浆期时两者差异显著($p < 0.05$),其它时期差异未达显著水平($p > 0.05$)。高氮条件下,拔节期南光伤流强度比Elio高出32%,两者差异达极显著水平($p < 0.01$);进入齐穗期后,南光伤流强度比Elio平均高出8%以上,灌浆期时两者差异显著($p < 0.05$)。

综上所述,氮高效品种南光的根系活力在生育后期显著强于氮低效品种Elio,其根系对养分的吸收同化

及向上运输的能力明显高于 Elio, 这是南光的总吸氮量、产量、生物量大大高于 Elio 的基本原因。齐穗灌浆到成熟期, 根系活力与产量有显著的正相关^[21], 因此生育后期, 保持较高的根系活力是水稻高产的重要基础。

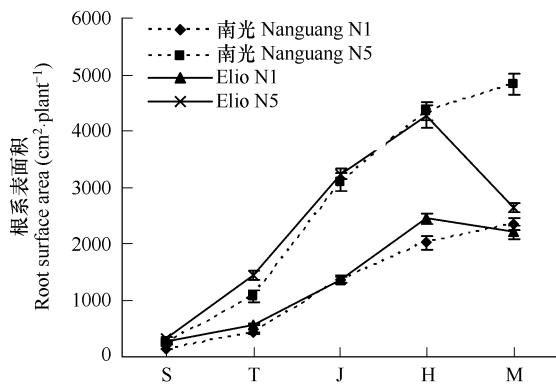


图 6 两个品种根系表面积的差异

Fig. 6 Difference of root surface area between two cultivars

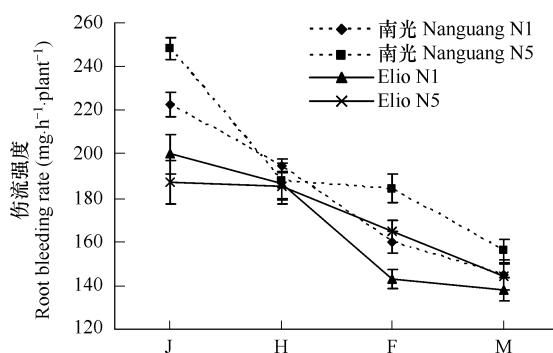


图 7 两个品种根系伤流强度的差异

Fig. 7 Difference of root bleeding rate between two cultivars

3 讨论

3.1 氮素利用效率以及供氮水平对水稻氮素吸收的影响

Moll 等^[22]将氮素利用效率定义为籽粒产量和介质供氮水平之比, 当介质供氮量比较难于计算时, 在相同试验条件下氮素利用效率可相对地表征为同一供氮水平下的水稻(相同生育期)的籽粒产量。不论介质供氮水平如何, 当水稻的产量均高于其同一生育期的水稻平均产量时该水稻品种即可定义为氮高效品种^[23]。本试验中氮高效水稻是指水稻品种在任何供氮条件下均可获得籽粒高产; 氮低效水稻是指水稻品种在任何供氮条件下其籽粒产量均较低。本实验条件下对已知的两个不同氮效率水稻的试验结果表明, 不同供氮处理, 氮高效品种南光均取得较高籽粒产量, 而氮低效品种 Elio 籽粒产量较低。

植物对氮的需求调节其对氮的吸收, 氮的需求就是植物从土壤或介质中吸收氮, 用于满足植物生长和同化合成新组织所需求的氮量。选育水稻品种进而提高其吸氮效率是水稻种植的一个重要目标, 也是提高养分有效性的重要的生物学途径。研究在不同供氮水平下不同水稻品种对氮素吸收的差别, 对提高水稻氮素吸收效率有重要的作用。有研究表明^[24], 不同类型水稻在氮素吸收上存在显著差异, 即不同类型水稻对土壤或介质中氮供应的响应度不同。江立庚等^[25]以南方籼型水稻品种为试验材料进行的大田试验表明, 各基因型氮素吸收效率存在显著或极显著的差异, 提高水稻氮素吸收效率的潜力很大。对 8 个不同粳稻品种的试验表明, 供试的水稻品种在不同供氮水平下对氮的响应度差异较大^[26]。本试验表明, 供氮处理对不同基因型水稻氮素吸收的影响差异显著, 氮高效品种南光对氮的响应较高。

3.2 根系形态参数对氮素吸收的影响

有研究表明^[27], 从对氮素供应高低的反应而言, 根系性状可以分为 3 大类: 第 1 类为随着供氮浓度的提高而增加的性状, 如每株不定根数; 第 2 类为随供氮浓度的提高而显著下降的性状, 如每条不定根的基本性状, 包括每条不定根长、不定根粗、不定根重及单位长度不定根重等; 第 3 类根系性状, 在一定的氮素供应范围内, 随供氮浓度的提高而提高, 进一步增加供氮浓度反而下降, 如每株根干重和每株不定根总长度。这里所说的总根长、根系表面积等根系形态参数属于第 3 类, 它在水稻吸收获取氮素方面起着重要的作用, 而且也是筛选水稻不同氮效率品种的重要参数。一般来讲, 优势水稻品种其根系总长、表面积等与一般品种相比优势明显^[27]。董桂春等^[28]研究表明, 杂交水稻的每株不定根总长显著或极显著高于常规水稻。沈波等^[29]的研究表明, 不同基因型水稻根系干重在营养生长期差异不显著, 在生殖生长期差异较明显; 有的水稻根系在齐穗期后仍能保持一定的生长速率, 到乳熟期达到高峰后才下降, 而有的在幼穗分化后即出现根重增长缓慢。本实验对两个不同氮效率常规粳稻根系形态参数的测定表明, 氮高效品种南光的根系对氮素响应度高, 且在整个

生育期较氮低效品种均保持优势;氮低效品种 Elio 的根系在齐穗时各参数已达最大,生育后期根系参数迅速下降,而氮高效品种南光的总根长和根系表面积在齐穗后仍有增加,上文图 2 又表明,在生育后期南光的总吸氮量显著高于 Elio。因此我们说根系形态参数在衡量水稻氮素吸收和利用中起着关键的作用。

3.3 根系活力在各生育期的变化及对产量的影响

水稻根系必须具备强大的吸收水分、无机养分以及合成氨基酸、一些植物激素的能力。这种能力的强弱可以用根系活力的大小进行衡量。在整个生育时期中,水稻根系活力是不断变化的。当前关于根系活力下降时期存在争议。孙静文等^[30]研究表明不同处理根系活力在拔节期迅速上升,在抽穗期前后达到最大,进入灌浆期开始下降。本实验各供氮处理,两个品种的根系活力都是在拔节期最大,进入齐穗期后开始下降。我们认为,根系活力随生育期变化的趋势可能因品种或者根系活力测定方法的不同而异。

水稻根系活力与品种的稻谷生产能力之间有着密切的关系^[31],根系活力是水稻前期生长旺盛和保证后期灌浆结实的基础。生育后期是水稻根系生理功能由旺盛逐渐衰退的时期,也是水稻籽粒充实、产量形成的关键时期。已有研究表明,高产水稻的表根根活力较高,且在生育后期下降较缓^[31]。本实验研究结果表明,氮高效品种南光根系活力(伤流强度)在生育后期明显强于氮低效品种 Elio,结合 Elio 在齐穗后根系形态参数显著下降,我们认为 Elio 在生育后期根系指标的下降不仅影响干物质的生产和积累,使生育后期的干物质生产优势变为劣势,而且影响籽粒灌浆和干物质的运输与分配,最终阻碍产量潜力的发挥。

References:

- [1] Eghball B, Settimi J R, Maranville J W, et al. Fractal analysis for morphological description of corn roots under nitrogen stress. *Agron J*, 1993, 85: 287—289.
- [2] Feil B, Thirapon R, Geisler G, et al. The impact of temperature on seedling root traits of European and tropical corn (*Zea mays L.*) cultivars. *J Agron Crop Sci*, 1991, 166:81—89.
- [3] Stamp P. Chilling tolerance of young plants demonstrated on the example of maize (*Zea mays L.*). In G. Geisler ed. *Adv. Agron. Crop Sci.* 7. Verlag Paul Parey, Berlin, 1984.
- [4] Bengough A G, Mullins C E. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses. *J Soil Sci*, 1990, 41: 341—358.
- [5] Weisler F, Horst W J. Root growth and nitrate utilization of maize cultivars under field conditions. *Plant and Soil*, 1994, 163: 267—277.
- [6] Lawlor D W. Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: mechanisms are the key to understanding production systems. *J Exp Bot*, 2002, 53: 773—787.
- [7] Wang Y, Mi G H, Chen F J, et al. Genotypic differences in nitrogen uptake by maize inbred lines its relation to root morphology. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2):297—302.
- [8] Wang Y, Mi G H, Chen F J, et al. Response of root morphology to nitrate supply and its contribution to nitrogen accumulation in maize. *Journal of Plant Nutrition*, 2004, 27(12): 2189—2202.
- [9] Li B, Tian X L, Wang G W, et al. Heterosis of root growth in maize (*Zea mays L.*) seedling under water stress. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(4):662—668.
- [10] Passioura J B, Wetselaar R. Consequences of banding nitrogen fertilizers in soil II. Effects on the growth of wheat roots. *Plant and Soil*, 1972, 36(1-3): 461—473.
- [11] Wen Y, Zhao X, Zhang X. Effects of nitric oxide on root growth and absorption in wheat seedlings in response to water stress. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(2):344—348
- [12] Hiroshi Soejima, Tamizi Sugiyama, Kuni Ishihara. Changes in cytokinin activities and mass spectrometric analysis of cytokinins in root exudates of rice plant (*Oryza sativa L.*) *Plant Physiol*, 1992, 100: 1724—1729.
- [13] Murofushi N, Inoue A, Watanabe N, et al. Identification of cytokinins in root exudate of the rice plant. *Plant Cell Physiol*, 1983, 24: 87—92.
- [14] Yoshida R, Oritani T. Studies on nitrogen metabolism in crop plants XIII. Effects of nitrogen top-dressing on cytokinin content in the root exudate of rice plant. *Proc Crop Sci Soc Jpn*, 1974, 43: 47—51.
- [15] Sun Q Q, Hu C H, Dong S T, et al. Evolution of root characters during all growth stage of maize cultivars in different eras in China. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(5): 641—645.
- [16] Mao D R. The methods of plant nutrition research. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1994. 16
- [17] Zhang Y H, Fan J B, Zhang Y L, et al. Nitrogen accumulation and translocation of four *Japonica* rice cultivars under different nitrogen application rates. *Pedosphere*, 2007, 17(6): 792—800
- [18] Zhang Y L, Fan J B, Duan Y H, et al. Variation of nitrogen use efficiency of rice different in genotype and its evaluation. *Acta Pedologica Sinica*,

- 2008, 45(2):267~273.
- [19] Arsenault J L, Pouleur S, Messier C, et al. WinRHIZO a root-measuring system with a unique overlap correction method. HortScience, 1995, 30: 906.
- [20] Hirasawa T, Araki T, Matsuda E, et al. On exudation rate from the base of leaf blade in rice plants. Jpn J Crop Sci, 1983, 52: 574~581.
- [21] Zheng Y L, Wang Y R. Root System Activity and rice grain productivity of rice plant. Journal of Guangzhou Normal University (Natural Science Edition), 1996, 1: 54~59.
- [22] Moll R H, Kamprath E J, Jackson W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. Agronomy J, 1982, 74: 562~564.
- [23] Ladha J K, Kirk G J D, Bennett J, et al. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved low land rice germplasm. Field Crops Research, 1998, 83: 41~71.
- [24] Shan Y H, Wang Y L, Yamamoto Yoshinori, et al. Study on the differences of nitrogen uptake and use efficiency in different types of rice. Journal of Yangzhou University (natural science edition), 2001, 4(3): 21~26.
- [25] Jiang L G, Dai T B, Wei S Q, et al. Genotypic differences and valuation in nitrogen uptake and utilization efficiency in rice. Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27(4): 466~471.
- [26] Fan J B, Zhang Y L, Wang D S, et al. Difference in capacity of N uptake between different rice genotypes. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(6): 805~810.
- [27] Shi Z J, Fan X L. Progress in root morphology for nitrogen efficient acquisition in crop. Journal of Guangxi Agric. and Biol. Science, 2003, 22(3): 225~229.
- [28] Dong G C, Wang Y L, Wu H, et al. Effect of nitrogen supplying levels on the development of roots in rice (*Oryza sativa* L.). Jiangsu Agriculture Research, 2001, 22(4): 9~13.
- [29] Shen B, Wang X. Physiological activities of root system in two inter-subspecific hybrid rice combinations. Chinese J Rice Sci, 2002, 16(2): 146~150.
- [30] Sun J W, Chen W F, Zen Y Q, et al. Effects of different levels of nitrogen on root morphological characteristics and activities in Japonica rice. Journal of Shenyang Agricultural University, 2003, 34(5): 344~346.
- [31] Shen B. Dynamic changes of root exudates in inter-subspecific hybrid rice and its influencing factors. Journal of Hangzhou Teachers College (Natural Science), 2002, 1(1): 49~52.

参考文献:

- [7] 王艳, 米国华, 陈范骏, 等. 玉米氮素吸收的基因型差异及其与根系形态的相关性. 生态学报, 2003, 23(2): 297~302.
- [9] 李博, 田晓莉, 王刚卫, 等. 苗期水分胁迫对玉米根系生长杂种优势的影响. 作物学报, 2008, 34(4): 662~668.
- [11] 闻玉, 赵翔, 张骁. 水分胁迫下二氧化氮对小麦幼苗根系生长和吸收的影响. 作物学报, 2008, 34(2): 344~348.
- [15] 孙庆泉, 胡昌浩, 董树亭, 等. 我国不同年代玉米品种生育全程根系特性演化的研究. 作物学报, 2003, 29(5): 641~645.
- [16] 毛达如. 植物营养研究方法. 北京:北京农业大学出版社, 1994. 16.
- [18] 张亚丽, 樊剑波, 段英华, 等. 不同基因型水稻氮利用效率的差异及评价. 土壤学报, 2008, 45(2): 267~273.
- [21] 郑燕玲, 王永锐. 水稻根系活力与稻谷生产能力. 广州师学院学报(自然科学版), 1996, 1: 54~59.
- [24] 单玉华, 王余龙, 山本由德, 等. 不同类型水稻在氮素吸收及利用上的差异. 扬州大学学报(自然科学版), 2001, 4(3): 21~26.
- [25] 江立庚, 戴廷波, 韦善清, 等. 南方水稻氮素吸收与利用效率的基因型差异及评价. 植物生态学报, 2003, 27(4): 466~471.
- [26] 樊剑波, 张亚丽, 王东升, 等. 不同水稻品种获取氮能力的差异. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 805~810.
- [27] 史正军, 樊小林. 作物对氮素养分高效吸收的根系形态学研究进展. 广西农业生物科学, 2003, 22(3): 225~229.
- [28] 董桂春, 王余龙, 吴华, 等. 供氮浓度对水稻根系生长的影响. 江苏农业研究, 2001, 22(4): 9~13.
- [29] 沈波, 王熹. 两个亚种间杂交稻组合的根系生理活性. 中国水稻科学, 2002, 16(2): 146~150.
- [30] 孙静文, 陈温福, 曾雅琴, 等. 氮素水平对粳稻根系形态及其活力的影响. 沈阳农业大学学报, 2003, 34(5): 344~346.
- [31] 沈波. 亚种间杂交稻根系伤流强度变化动态及影响因素. 杭州师范学院学报, 2002, 1(1): 49~52.