

不同氮肥处理下机插杂交稻的根系动态生长特征研究

刘科^{1,2} 叶昌^{1,2} 刘少文² 陆键² 高梦涛² 卢碧林^{1,2} 田小海^{1,2} 张运波^{1,2,3,*}

(¹长江大学 主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心, 湖北 荆州 434025; ²长江大学 农学院, 湖北 荆州 434025; ³湿地生态与农业利用教育部工程研究中心, 湖北 荆州 434025; *通讯联系人, E-mail: yunbo1022@126.com)

Dynamic Growth Characteristics of Roots of Mechanically-transplanted Hybrid Rice Under Different Nitrogen Treatments

LIU Ke^{1,2}, YE Chang^{1,2}, LIU Shaowen², LU Jian², GAO Mengtao², LU Bilin^{1,2}, TIAN Xiaohai^{1,2}, ZHANG Yunbo^{1,2,3,*}

(¹Hubei Collaborative Innovation Center for Grain Industry Yangtze University, Jingzhou 434025, China; ²Agricultural College, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; ³Engineering Research Center of Ecology and Agricultural Use of Wetland, Ministry of Education, Jingzhou 434025, China; *Corresponding author, E-mail: yunbo1022@126.com)

Abstract: 【Objective】 This experiment is to study the dynamic characteristics of roots grown under different nitrogen levels and their relationship with grain yield in mechanically-transplanted hybrid rice. 【Method】 Two-line hybrid rice combinations, Quanliangyou 1 and Quanliangyou 681, were grown under different nitrogen treatments, N₀(0 kg/hm²), N₁(150 kg/hm²) and N₂(250 kg/hm²), respectively. The dynamic root morphological traits and distribution(0–30 cm) from 20 days after transplanting(DAT) to flowering were analyzed with minirhizotron technique. 【Result】 The total number of roots, root length, root volume and root surface area were all significantly affected by nitrogen levels. The total number of roots of the two combinations under N₂ treatment was significantly higher than that under N₁ treatment. Compared with N₁ treatment, the total number of roots of Quanliangyou 1 and Quanliangyou 681 increased by 12.3% and 17.6%, respectively. The total number of roots of the two combinations maximized 65 days after transplanting. With the increasing amount of nitrogen, the number of roots, root length, root volume and root surface area increased in different soil layers, but the layer (10–20 cm) was much more significant compared with others. The correlation coefficients between the total root length (10–20 cm) and grain yield, the number of roots (10–20 cm) and grain yield were 0.80 and 0.87, respectively, reaching the significant level. Both the number of roots and grain yield of Quanliangyou 681 were much higher than those of Quanliangyou 1. 【Conclusion】 Higher nitrogen level improve the root biomass, while the root distribution in the soil layer(10–20 cm) is closely related to the grain yield. Given this situation, increasing the deep root distribution can make extraordinary contribution to the improvement of the grain yield.

Key words: mechanical-transplanting; hybrid rice; root characteristics; grain yield; nitrogen

摘要: 【目的】研究不同氮肥用量下机插杂交稻的根系生长特征的变化规律及其与产量关系。【方法】以两个杂交水稻组合全两优 1 号和全两优 681 为供试材料, 设置 N₀(0 kg/hm²)、N₁(150 kg/hm²)和 N₂(250 kg/hm²)氮肥处理。利用 Minirhizotron 分析两个品种移栽后 20 d 至开花期在 0~30 cm 土层中的根系分布和动态变化特征。【结果】研究表明, 氮肥处理对两个杂交稻根数、根长、根体积和根表面积影响显著。N₂ 处理下两个品种的总根数显著多于 N₁, 且全两优 1 号和全两优 681 的总根数相比对照 N₁ 分别增加了 12.3% 和 17.6%, 两个品种的总根量在移栽后 65 d 达到最大值。随着施氮量的增加, 两个杂交稻品种的根数、根长、根体积和根表面积在 0~10 cm 和 10~20 cm 两个土层深度均有所增加, 其中以 10~20 cm 土层深度的根量增幅最为显著。10~20 cm 土层深度的总根长与产量、根数与产量显著相关, 且相关系数分别高达 0.80 和 0.87, 且全两优 681 在 10~20 cm 土层深度为的总根量要显著高于全两优 1 号。【结论】高氮下总根量增加, 但 10–20 cm 土层中的根系分布对产量影响最大, 因此, 生产中通过培育和增加深层根系的比例有利于水稻实现高产高效。

关键字: 机插秧; 根系特征; 产量; 氮素;

中图分类号: S143.1; S511.01

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2017)06-0611-08

随着农业生产成本的提高,特别是劳动成本不断上涨,传统的精耕细作已不能满足国家对粮食、农民对收益的要求,轻简化和机械化栽培是中国水稻生产的发展趋势^[1]。江汉平原是我国重要的水稻生产区域,随着经济快速发展和农村劳动力大量转移,适龄劳动力季节性短缺矛盾日益突出,水稻生产迫切需要发展以机械化为主的种植方式^[2]。水稻机械化种植可减少40%劳动量,大幅度提高工效,机械化插秧是实现农业持续生产的重要途径之一^[3]。根系作为水稻生长发育过程中重要的器官,参与水稻体内各种生理生化过程,包括地下营养物质和水的摄取、根系激素的合成等^[4-6]。同时,根系的发育与水稻地上部分的生长息息相关,地上部分能够提供充足的碳水化合物以供根系的生长需要,而根系也能够将摄取的营养物质、水分以及自身合成的各种激素向上运输来维持地上部分的正常生长^[7,8]。研究机械化种植对杂交稻根系性状的影响及其与产量的关系,有助于生产上通过栽培措施调控其根系生长发育,获得高产。

在杂交水稻高产潜力的生理机制研究中,已经有大量学者对地上部分的干物质积累量、干物质分配和籽粒灌浆特性等进行了相关研究,但对根系动态变化特征探讨较少。究其原因,可能是根系生长于地下,准确取样、测定与观察存在一定的困难,加上研究方法上的欠缺,从而大大阻碍了根系研究的深入^[9]。根系与地上部是一个相互依存、相互作用的统一体,通过对杂交稻根系发育特征的研究可进一步了解其产量的关键构成因子,以及产量形成的生理生态机制。近年来,江汉平原地区机插秧面积占水稻种植面积的比例逐年上升,杂交稻新品种如何在机插秧栽培模式下实现高产高效成为生产上面临的重要问题。本研究探讨了不同氮肥施用量下机插杂交稻根系生长发育特性及其与产量关系的影响,以期为江汉平原水稻高产栽培根系生长调控提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为两系杂交水稻全两优1号和全两优681,由湖北荃银高科种业有限公司提供。全两优1号由全1S×R101育成,全生育期为130 d。全两优681由全1S×R681育成,全生育期为133 d。

1.2 试验设计

试验于2014年和2015在湖北省荆州市华中农

高区太湖农场进行,供试田块前茬为小麦,肥力水平中等,土壤质地为灰潮土,耕作层土壤pH值为6.8,含有机质18.5 g/kg,全氮110.5 mg/kg,速效磷25.0 mg/kg,速效钾105.5 mg/kg。田间试验采用裂区试验设计,以氮肥为主区,设N₀(0 kg/hm²)、N₁(150 kg/hm²)和N₂(250 kg/hm²)3个氮肥处理;副区为全两优1号和全两优681两个品种。2014年试验于5月12日播种,6月2日移栽;2015年试验于5月15日播种,6月8日移栽,采用秧盘育秧,移栽均使用久保田 spw-68c 插秧机,机插规格为30 cm×16 cm。移栽前麦秆全量还田,氮肥肥源为尿素, $m_{\text{基肥}}:m_{\text{蘖肥}}:m_{\text{穗肥}}=4:2:4$ 。其中,基肥在移栽前1 d施用,分蘖肥于移栽后7d、穗肥于幼穗分化四期施用。氮磷钾肥用量(分别以N、P₂O₅、K₂O计,质量比)之比为2:1:2;磷肥使用过磷酸钙,作基肥一次施用;钾肥使用氯化钾,50%作为基肥,50%作穗肥。试验设置3次重复,每个小区的面积为60 m²。小区间筑20 cm高、30 cm宽的埂隔离,埂上覆膜,实行单独排灌。田间按高产栽培精细管理,及时控制和防治病虫害。

1.3 调查项目及方法

1.3.1 根系性状测定

2015年于移栽后2 d在每个小区中安装2根直径为7 cm、长1 m的透明塑料管,入土深度为60 cm,根管与地面呈30°角^[10],暴露于地面上的根管外用一层不透光的黑色胶布包被,并用棉团塞紧管口,盖上盖子,防止光线、杂物、灰尘及水汽进入管内,以避免损坏仪器和减少外界气温对根管内温度的影响。

用CI-600(CID Bio-Science, Camas, WA, USA)根系检测仪器系统配备的扫描仪分别于移栽后20 d、35 d、50 d、65 d和80 d,深入每个根管内部进行扫描。利用仪器匹配的测量杆移动扫描器分别获取0~30 cm土层的根系图片,3个土层深度分别为0~10、10~20和20~30 cm。每次获得的图片面积为14.1 cm×21.6 cm,以bmp的格式保存在便携式电脑上,然后在实验室利用系统配备的WinRhizotron[®](Regent Instruments Inc., Canada)图像分析系统对图片处理,得出根数、总根长、根体积和根表面积等根系特征数据。

1.3.2 产量及产量构成

在成熟期,各小区分别从中心区取5 m²作为测产小区,人工脱粒,晒干风选后称取风干质量。同时测定样品的水分含量,根据水分含量计算稻谷的干质量。另外,取正方形测产区的对角线12穴进

表 1 不同氮肥处理对杂交水稻产量及其构成的影响

Table 1. Effects of different nitrogen levels on grain yield and its components in hybrid rice combinations.

| 年份与品种 Year and combination | 氮肥处理 Nitrogen level | 结实率 Seed setting rate/% | 有效穗数 Productive panicle number per m ² | 每穗粒数 Spikelet number per panicle | 千粒重 1000-grain weight/g | 产量 Grain yield /(t·hm ⁻²) |
|----------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---|--|-------------------------------|---|
| 2014 | | | | | | |
| 全两优 1 号 Quanliangyou 1 | N ₀ | 87.5±0.7 a | 175.2±20.4 b | 165.2±11.6 b | 27.5±0.05 a | 6.3±0.23 c |
| | N ₁ | 86.1±0.3 b | 214.4±14.0 a | 184.2±14.0 ab | 27.3±0.05 ab | 9.1±0.20 b |
| | N ₂ | 83.1±0.8 b | 247.1±11.3 a | 200.1±10.7 a | 27.2±0.05 b | 9.5±0.15 a |
| | N ₀ | 87.9±0.4 a | 191.2±22.9 b | 171.8±11.7 a | 27.5±0.06 a | 6.3±0.06 c |
| | N ₁ | 86.7±1.3 a | 229.5±17.4 ab | 189.5±14.2 a | 27.3±0.04 b | 9.1±0.13 b |
| | N ₂ | 83.4±0.6 b | 258.4±13.5 a | 198.6±19.2 a | 27.2±0.06 b | 10.1±0.16 a |
| 2015 | | | | | | |
| 全两优 1 号 Quanliangyou 1 | N ₀ | 86.2±0.7 a | 168.1±13.9 b | 163.1±11.1 b | 27.4±0.05 a | 6.1±0.25 b |
| | N ₁ | 85.4±0.6 a | 217.7±13.3 a | 179.8±10.0 ab | 27.2±0.02 a | 8.8±0.31 a |
| | N ₂ | 81.5±0.7 b | 247.6±14.9 a | 190.3±12.2 a | 27.1±0.03 b | 9.3±0.16 a |
| 全两优 681 Quanliangyou 681 | N ₀ | 84.6±1.1 a | 189.2±14.8 b | 158.1±12.1 b | 27.4±0.29 a | 6.3±0.16 c |
| | N ₁ | 82.3±1.4 a | 227.6±15.7 ab | 171.7±15.1 ab | 27.3±0.07 a | 8.8±0.13 b |
| | N ₂ | 79.5±0.9 b | 256.4±17.3 a | 189.8±7.8 a | 27.1±0.09 a | 9.3±0.17 a |

数据后标注相同小写字母表示差异未达 0.05 显著水平。

The values followed by common letters indicate no significant differences at the 0.05 level.

行考种，考查单株有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒重等性状。

1.4 数据处理与分析

试验采用 Microsoft Excel 2007 和 DPS 2000 软件进行数据处理和分析。

2 结果与分析

2.1 氮肥处理对杂交水稻产量及其构成的影响

从表 1 看出，2014 年，氮肥处理对全两优 1 号的产量影响显著，产量构成影响不显著，对全两优 681 的产量和结实率影响显著。2015 年中全两优 1 号的结实率和千粒在不同氮肥处理间差异显著，全两优 681 的产量和结实率在不同氮肥处理间亦达到显著水平。2015 年试验，全两优 1 号和全两优 681 在 N₂ 处理下的产量均为 9.3 t/hm²，分别比 N₀ 高出 52.5% 和 47.6%；两年试验中随着氮肥施用量的增加，全两优 1 号和全两优 681 两个品种的有效穗数和每穗粒数均呈增加的趋势，但结实率和千粒重均有所下降。

2.2 不同氮肥处理对杂交水稻根数的影响

由图 1 可知，全两优 1 号和全两优 681 的总根数在不同氮肥水平下表现为 N₂>N₁>N₀。在 N₂ 处理下，全两优 1 号和全两优 681 的总根数增幅分别为 48.3% 和 46.4%，而 N₁ 条件下这两个组合的增幅分别为 32.0% 和 24.5%。移栽后 65 d，全两优 1

号和全两优 681 的总根数达到最大值，在 N₂ 条件下两个品种的最大总根数分别为 43.5 和 46.0，N₁ 处理中的这两个品种分别为 42 和 44。移栽后 65 d，两个品种的总根数逐渐开始下降，在 N₂ 处理下，全两优 681 的根数降幅为 31.4%，低于全两优 1 号（其降幅为 50.0%）。

2.3 不同氮肥处理对杂交水稻根长动态变化的影响

图 2 中，移栽后 20 d 至移栽后 80 d，两个品种的根长均随着施氮量的增加而增加。在 N₂ 处理下，全两优 1 号和全两优 681 的总根长显著增加，显著高于 N₁（22.8% 和 17.5%）。移栽后 65 d，全两优 1 号和全两优 681 的根长达到最大，在 N₂ 条件下两个品种的最大总根长分别为 108.4 cm 和 119.5 cm，也高于 N₁ 条件下的 101.6 cm 和 106.2 cm。移栽后 65 d 开始，两个品种的总根长均呈现出下降的趋势。移栽后 65 d 至移栽后 80 d，在 N₂ 处理下，全两优 681 降幅为 18.4%，全两优 1 号（12.4%）。

2.4 不同氮肥处理对杂交水稻根系表面积的影响

由图 3 可见，全两优 1 号和全两优 681 的总根系表面积在不同氮肥处理下表现为 N₂>N₁>N₀。在 N₂ 处理下，全两优 1 号和全两优 681 的总根系表面积增幅分别为 43.2% 和 43.4%，N₁ 条件下的 31.6% 和 13.0%。移栽后 65 d，全两优 1 号和全两优 681 的总根表面积达到最大，在 N₂ 条件下两个品种的最大总根面积分别为 34.3 cm² 和 39.0 cm²，亦高于

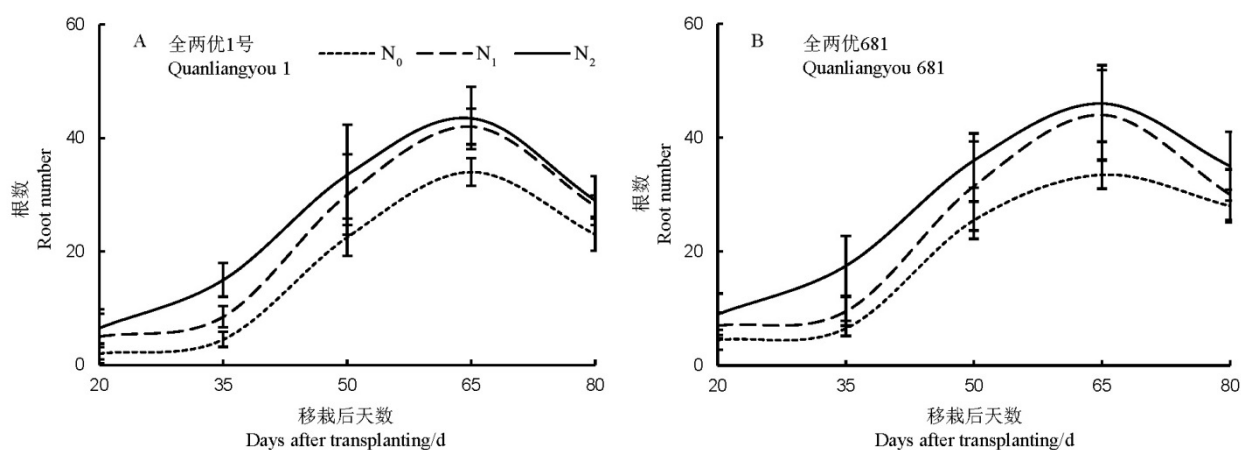


图1 不同氮肥处理对杂交机插水稻根数的影响

Fig. 1. Effects of different nitrogen treatments on root number of mechanically-transplanted hybrid rice combinations(Mean±SD).

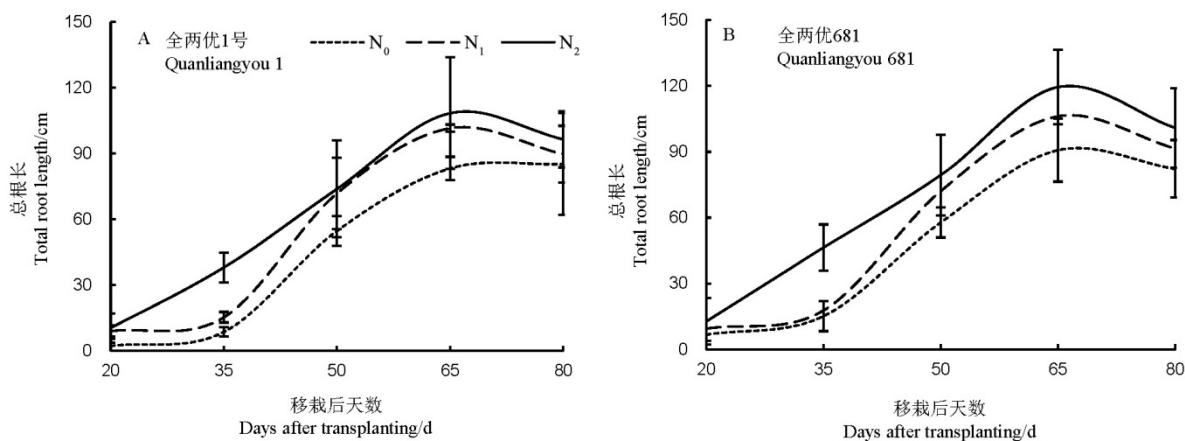


图2 不同氮肥处理对机插杂交水稻根长的影响

Fig. 2. Effects of different nitrogen treatments on root length of mechanically-transplanted hybrid rice combinations.

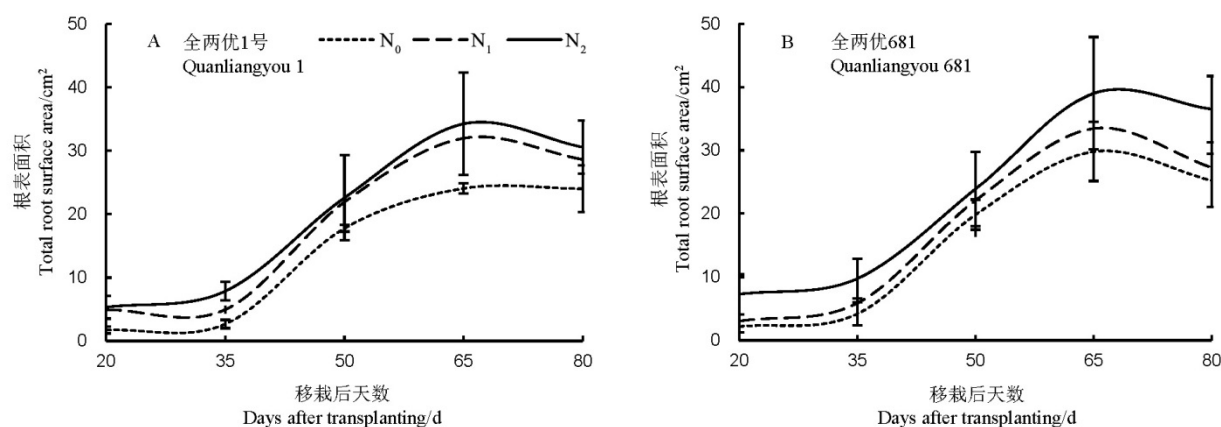


图3 不同氮肥处理对机插杂交水稻根表面积的影响

Fig. 3. Effects of different nitrogen treatments on root surface area of mechanically-transplanted hybrid rice combinations.

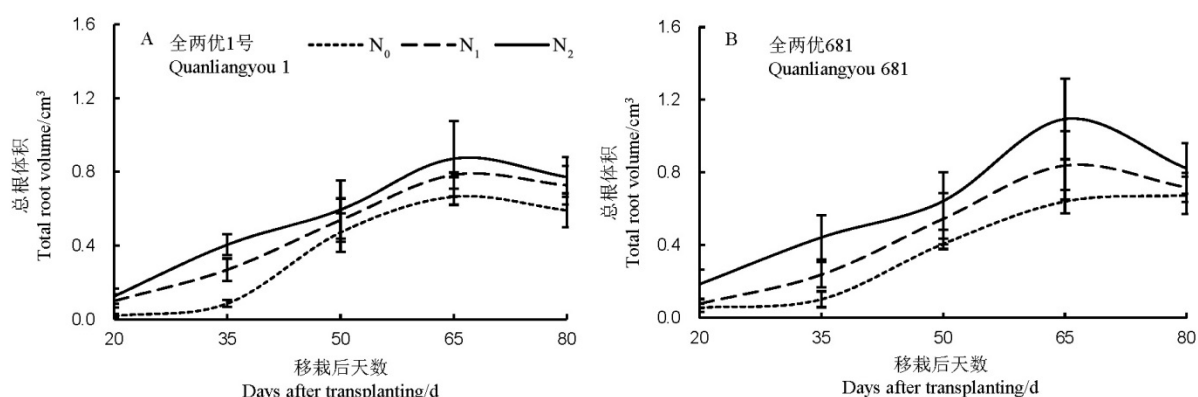


图 4 不同氮肥处理对杂交水稻根体积的影响

Fig. 4. Effects of different nitrogen treatments on root surface area of mechanically transplanted hybrid rice.

N_1 处理中的 32.0 cm^2 和 33.5 cm^2 。移栽后 65 d, 两个品种的总根表面积开始逐渐下降, 在 N_2 处理下, 全两优 1 号和全两优 681 的下降幅度分别为 12.1% 和 6.8%。

2.5 不同氮肥处理对杂交水稻根体积的影响

从图 4 看出, 全两优 1 号和全两优 681 的总根表面积在氮肥处理下的表现为 $N_2 > N_1 > N_0$ 。在 N_2 处理下, 全两优 1 号和全两优 681 的总根体积增长幅度分别为 51.1% 和 69.7%, 高于 N_1 条件下的 32.0% 和 28.6%。移栽后 65 d, 全两优 1 号和全两优 681 的总根体积达到最大, 在 N_2 条件下两个品种的最大总根面积分别为 0.87 cm^3 和 1.09 cm^3 , 亦高于 N_1 处理中的 0.78 cm^3 和 0.84 cm^3 。移栽后 65 d, 两个品种的总根表面积开始逐渐下降, 在 N_2 处理下, 全两优 1 号和全两优 681 的降幅分别为 12.9% 和 33.1%。

2.6 氮肥处理对杂交水稻齐穗期不同土层中总根数、总根长、总根表面和总根体积分布影响

由图 5 可知, 随着施氮量的增加, 两个杂交稻品种的根数在不同土层均有所增加, 其中以 10~20 cm 土层深度变化最大, 同时此土层两个品种的根系数量有比也最大, 但在 20~30 cm 根数增幅较小。在 N_2 处理下全两优 1 号和全两优 681 在土层深度为 10~20 cm 的最大平均根数分别达到为 21.5 和 24.5; 施氮量对杂交稻品种的根长在不同土层的分布亦有显著影响, 其中在深度为 0~10 cm 和 10~20 cm 的根系显著增长, 两个品种的根长均在 N_2 处理下达到最大, 分别为 59.42 cm 和 67.19 cm。全两优 1 号和全两优 681 根体积在各土层的表现与根长一致, 提高氮肥用量可使 0~10 cm 和 10~20 cm 土层深度中的根体积增加, 但 20~30 cm 土层的根体积增幅较小。两个杂交稻在各土层的根系表面积随

着施氮量增加均有所变化, 其中在土层 10~20 cm 的根表面积增加显著, 在其他土层根表面积增加不显著, 全两优 681 在各土层的根表面积均显著高于全两优 1 号。

2.7 不同土层的根系特征与产量及其构成的相关性

由表 2 可知, 总根长、根数、根表面积和根体积均与产量、每穗粒数和每平方米有效穗数呈正相关, 其中以 10~20 cm 土层的相关系数最大, 10~20 cm 土层深度中的总根长、根数和根表面积与产量的相关系数分别达到 0.80, 0.87 和 0.89。总根长、根数、根表面积和根体积与每平方米有效穗数亦呈正相关, 其中 10~20 cm 土层为相关性也最高, 相关系数分别达到 0.86, 0.83, 0.86 和 0.86。总根长与结实率和千粒重呈负相关。

3 结论与讨论

本研究分析了不同氮肥施用量对机插杂交稻根系形态及产量的影响, 结果表明, 氮肥处理对两个杂交稻根系形态特征和产量影响显著, 根系形态指标和产量均随着施氮量的增加而增加。全两优 1 号和全两优 681 的根数、根长、根体积和根表面积在 0~10 cm 和 10~20 cm 两个土层深度均有所增加, 其中以 10~20 cm 土层深度的增幅最为显著。相关分析结果显示, 10~20 cm 土层深度的总根长、根数与产量显著相关, 相关系数分别为 0.80 和 0.87, 全两优 681 在 10~20 cm 土层深度为的根量要显著高于全两优 1 号。本研究主要分析了不同氮肥处理下水稻主要时期内根系形态特征的动态变化, 并探讨了不同土层根系分布与氮肥管理对实现水稻高产高

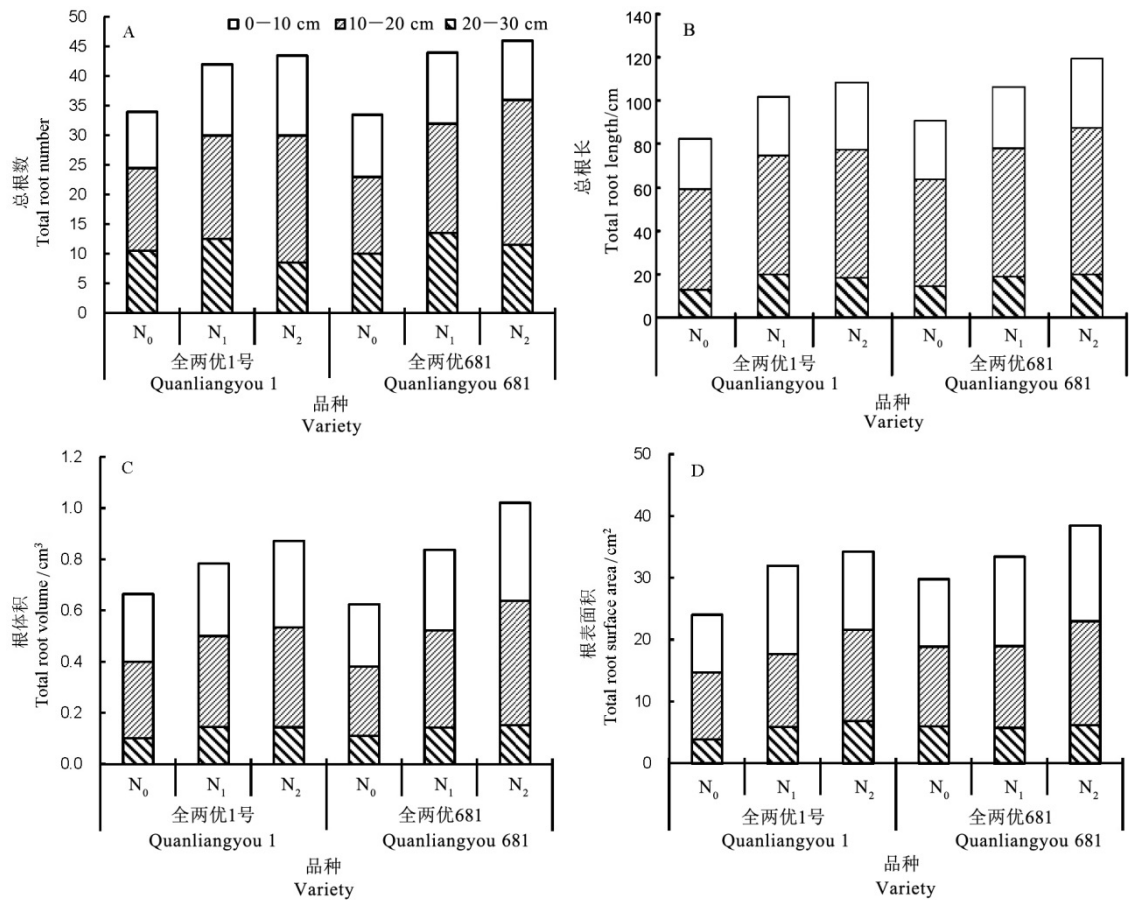


图 5 不同氮肥处理对机插杂交水稻总根数、总根长、总根体积和总根表面分布影响
Fig. 5. Effects of different nitrogen treatments on total root numbers(A), total root length(B), total root volume(C) and total root surface area(D) at different soil layers in mechanically transplanted hybrid rice.

表 2 不同土层的根系特征与产量以及产量构成的相关性(n=36)
Table 2. Relationship between root characteristics in different soil layers and grain yield and its components.

| 根系参数 | 土层深度 | 结实率 | 每平方米有效穗数 | 每穗粒数 | 千粒重 | 产量 |
|-----------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------|
| Root system parameter | Soil layer | Seed setting rate | Panicle number per m ² | Spikelet number per panicle | 1000-grain weight | Grain yield |
| 总根长(TRL) | L ₀₋₁₀ | 0.31 | 0.56 | 0.48 | 0.03 | 0.05 |
| | L ₁₀₋₂₀ | -0.95** | 0.86* | 0.39 | -0.73 | 0.80* |
| | L ₂₀₋₃₀ | -0.80* | 0.83* | 0.31 | -0.63 | 0.76* |
| 根数(TRN) | L ₀₋₁₀ | -0.76* | 0.63 | 0.52 | -0.87** | 0.76* |
| | L ₁₀₋₂₀ | -0.93* | 0.83* | 0.47 | -0.93* | 0.87* |
| | L ₂₀₋₃₀ | -0.94* | 0.82* | 0.41 | -0.94* | 0.84* |
| 根表面积(TRSA) | L ₀₋₁₀ | -0.61 | 0.83* | 0.05 | -0.46* | 0.73 |
| | L ₁₀₋₂₀ | -0.96** | 0.86* | 0.12 | -0.50 | 0.57 |
| | L ₂₀₋₃₀ | -0.51 | 0.49 | 0.61 | -0.60 | 0.89** |
| 根体积(TRV) | L ₀₋₁₀ | -0.92** | 0.82* | 0.42 | -0.83* | 0.86* |
| | L ₁₀₋₂₀ | -0.98** | 0.86* | 0.36 | -0.74 | 0.77* |
| | L ₂₀₋₃₀ | -0.34 | 0.36 | 0.60 | -0.56 | 0.83* |

* ** 分别表示显著或极显著相关。
*,** denote significant correlation, respectively at P=0.05 and P=0.01 levels. TRL, Total root length; TRN, Total root number; TRSA, Total root surface area; TRV, Total root volume.

效的关系。
3.1 不同氮肥施用量对水稻根系形态特征的影响
目前根系的研究工作主要集中根系活力、根系特征等^[11-14]，研究方法主要集中在大田破坏性取样、水培或沙培环境模拟，基于大田试验真实环境基础上的根系动态求证很少。本研究基于土壤剖面图像

的根系生长实时动态测定, 改变了以往根系研究中的取样破坏性和环境的模拟性, 比较真实客观, 更贴近实际大田生态环境, 使结果更加准确可信。本研究系统地分析了水稻从移栽后20 d至开花期的根系形态特征动态变化特征, 研究结果表明, 两个品种的根长、根数、根体积以及根表面积对氮肥响应显著, 随着氮肥用量的增加, 水稻根数、根长、根体积和根表面积等指标也有所提高。本研究还发现, 从移栽后30 d开始, 两个品种的根数、根长、根体积和根表面积均开始大幅增加, 到移栽后65 d左右达到最大值, 之后开始逐渐下降。因此, 生产上应具体根据品种特性, 在关键生育期适当追施氮肥, 促进水稻根系的生长, 扩大根系摄取养分的范围, 进而在生育中后期仍然保持较优的根系形态指标, 通过氮肥管理调控水稻根系生长来实现水稻高产高效生产。另外, 本研究中, 全两优1号和全两优681根系特征在同一氮肥处理下表现不一致, 全两优681中4个根系性状指标均要优于全两优1号, 这可能与品种本身对氮肥的响应有关, 不同品种的根系生长发育速度、氮肥需求量以及根系对氮素的吸收能力均存在一定差异, 一旦施氮量超过品种本身需求范围可能并不会对根系的生长起到促进作用。

3.2 不同土层根系分布与水稻产量形成的关系

根系是水稻吸收养分与水分的主要器官, 根系发达、活力强大是水稻吸收能力增强的重要基础。氮肥处理对水稻根系性状影响已有一些报道^[15-17], 但对于土壤中不同深度的根系分布方面的研究却比较少, 已有的部分结论在不同品种间也存在很大差异。前人研究发现, 根系主要分布在土壤耕作层(0~20 cm), 其中, 表层土(0~10 cm)中的根系占水稻整个根系80%以上^[17]。本研究发现, 不同氮肥处理对两个杂交稻品种的根长、根数、根体积和根表面积均有显著影响, 10~20 cm土层中的4个根系性状指标增幅显著高于其他土层, 其中表层土(0~10 cm)根数仅占总根数25%~30%, 而10~20 cm土层中的根数占整个水稻根系的50%左右, 与之前研究结果存在明显差异, 这可能与选择的供试品种有关。杂交稻品种具有地上部分生物量大、穗大粒多的特点, 若耕作层太浅, 根系大量集中在表土层, 容易造成倒伏。在杂交稻育种改良进程中, 增加深土层的根系量, 能够拓展根系表面积, 增加根系吸收营养的范围, 这对于提高结实率和抗倒伏能力有重要作用。研究指出上层根和下层根与产量的相关性不一致, 深层根与产量密切相关^[17]。本研究中, 在同一氮肥处理下, 两个品种在0~10 cm土层和10~20 cm土

层所占比例也存在显著差异, 全两优1号在0~10 cm土层中的根数比例大于全两优681, 但在10~20 cm土层的根数比例却低于全两优681, 连续两年试验中, 全两优1号的平均产量均低于全两优681。通过相关性分析发现10~20 cm土层深度的总根长、根数与产量显著相关, 且相关系数分别高达0.80和0.87, 这可能是全两优681产量高于全两优1号的原因之一, 深层根能够延缓植株的衰老, 使地上部分进行有效光合的时间更长, 产生更多的光合产物, 从而提高产量^[18]。因此, 杂交水稻品种改良时, 应注重具有合理根系分布结构, 通过氮肥管理着力维持深层根的比例, 同时注重延缓根系衰老速度, 以保持生育后期后有较大的根系表面积, 来实现水稻高产高效生产。

参考文献:

- [1] 彭少兵. 转型时期杂交水稻的困境与出路. 作物学报, 2016, 42(3): 313-319.
Peng S B. Dilemma and way-out of hybrid rice during the transition period in China. *Acta Agrono Sin*, 2016, 42(3): 313-319. (In Chinese with English abstract)
- [2] 陈佳娜, 曹放波, 谢小兵, 单双吕, 高伟, 李志斌, 黄敏, 邹应斌. 机插条件下低氮密植栽培对“早晚兼用”双季稻产量和氮素吸收利用的影响. 作物学报, 2016, 42(8): 1176-1187.
Chen J N, Cao F B, Xie X B, Shan S L, Gao W, Li Z B, Huang M, Zou Y B. Effect of low nitrogen rate combined with high plant density on yield and nitrogen use efficiency of machine-transplanted early-late season double cropping Rice. *Acta Agrono Sin*, 2016, 42(8): 1176-1187. (in Chinese with English abstract)
- [3] 何金均, 王立臣, 宋建农, 刘娟容, 林桂竹. 水稻种植机械化发展现状及制约因素分析. 农机化研究, 2009, 31(2): 1-4.
He J J, W L C, S J N, L J R, L G Z. The progress of rice planting mechanization and analysis of its restrictive factors. *J Agric Mechan Res*, 2009, 31(2): 1-4. (In Chinese with English abstract)
- [4] Yang C, Yang L, Yang Y, Ouyang Z. Rice root growth and nutrient uptake as influenced by organic manure in continuously and alternately flooded paddy soils. *Agric Water Manag*. 2004, 70(1): 67-81.
- [5] Samejima H, Kondo M, Ito O, Nozoe T, Shinano T, Osaki M. Characterization of root systems with respect to morphological traits and nitrogen absorbing ability in new plant type of tropical rice lines. *J Plant Nutr* 2005, 28(5): 835-850.
- [6] Osaki M, Shinano T, Matsumoto M, Zheng T, Tadano T.

- A root-shoot interaction hypothesis for high productivity of field crops. *Soil Sci Plant Nutr*, 1996, 42(2): 289-301.
- [7] Samejima H, Kondo M, Ito O, Nozoe T, Shinano T, Osaki M. Characterization of root systems with respect to morphological traits and nitrogen absorbing ability in new plant type of tropical rice lines. *J Plant Nutr*, 2005, 28(5): 835-850.
- [8] Zhang H, Xue Y, Wang Z, Yang J, Zhang J. Morphological and physiological traits of roots and their relationships with shoot growth in "super" rice. *Field Crops Res*, 2009, 113(1): 31-40.
- [9] 梁永书,周军杰,南文斌,段东东,张汉马. 水稻根系研究进展. *植物学报*, 2016, 51(1): 98-106.
Liang Y S, Zhou J J, Nan W B, Duan D D, Zhang H M. Progress in rice root system research. *Chin Bull Bot*, 2016, 51 (1): 98-106. (In Chinese with English abstract)
- [10] Johnson M G, Tingey D T, Phillips D L, Storm M J. Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environ Exp Bot*. 2001, 45, 263-289
- [11] 董桂春, 陈琛, 袁秋梅, 羊彬, 朱正康, 曹文雅, 仲军, 周娟, 罗刚, 王熠, 黄建晔, 王余龙. 氮肥处理对氮素高效吸收水稻根系性状及氮肥利用率的影响. *生态学报*, 2016, 36(3): 642-651.
Dong G C, Chen C, Yuan Q M, Yang B, Zhu Z K, Cao W Y, Zhong J, Zhou J, Luo G, Wang Y, Huang J Y, Wang Y L. The effect of nitrogen fertilizer treatments on root traits and nitrogen use efficiency in indica rice varieties with high nitrogen absorption efficiency. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36(3): 642-651.
- [12] 吴伟明, 宋祥甫, 孙宗修, 于永红, 邹国燕. 不同类型水稻的根系分布特征比较. *中国水稻科学*, 2001, 15(4): 276-280.
Wu W M, Song X F, Sun Z X, Yu Y H, Zou G Y. Comparison of root distribution between different type tice. *China J Rice Sci*, 2001, 15(4): 276-280. (in Chinese with English abstract)
- [13] 史正军, 樊小林. 水稻根系生长及根构型对氮素供应的适应性变化. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2002, 30(6): 1-6.
- Shi Z J, Fan X L. Growth and adaptive changes of rice (*Oryza sativa* L.) root architecture in response to nitrogen supply. *J Northwest A&F Univ : Nat Sci Ed*, 2002, 30(6): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李洪亮, 孙玉友, 曲金玲, 魏才强, 孙国宏, 赵云彤, 柴永山. 施氮量对东北粳稻根系形态生理特征的影响. *中国水稻科学*, 2012, 26(6): 723-730.
Li H L, Sun Y Y, Qu J L, Wei C Q, Sun G H, Zhao Y T, Chai Y S. Influence of nitrogen levels on morphological and physiological characteristics of root system in japonica rice in northeast China. *China J Rice Sci*, 2012, 26(6): 723-730.
- [15] 戢林, 李廷轩, 张锡洲, 余海英. 氮高效利用基因型水稻根系形态和活力特征. *中国农业科学*, 2012, 45(23): 4770-4781.
Ji L, Li T X, Zhang X Z, Yu H Y. Root Morphological and Activity Characteristics of Rice Genotype with High Nitrogen Utilization Efficiency. *Sci Agric Sin*, 2012, 45(23): 4770-4781. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王余龙, 姚友礼, 刘宝玉, 吕贞龙. 不同生育时期氮素供应水平对杂交水稻根系生长及其活力的影响. *作物学报*, 1997, 23(6): 699-706.
Wang Y L, Yao Y L, Liu B Y, Lv Z L. Effects of Nitrogen treatment in different growth periods on the root growth and its activity of hybrid rice. *Acta Agron Sin*, 1997, 23(6): 699-706. (in Chinese with English abstract)
- [17] 蔡昆争, 骆世明, 段舜山. 水稻根系的空间分布及其与产量的关系. *华南农业大学学报: 自然科学版*, 2003, 24(3): 1-4.
Cai K Z, Luo S M, Duan S S. The Relationship between Spatial Distribution of Rice Root System and Yield. *J South Chin Agric Univ: Nat Sci Ed*. 2003, 24(3): 1-4. (In Chinese with English abstract)
- [18] 朱德峰, 林贤青, 曹卫星. 水稻深层根系对生长和产量的影响. *中国农业科学*, 2001, 34(4): 429-432.
Zhu D F, Lin X Q, Cao W X. Effects of deep roots on growth and yield in two rice varieties. *Sci Agric Sin*, 2001, 34(4): 429-432. (in Chinese with English abstract)