

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2008.01060

超级中籼杂交水稻氮素积累利用特性与物质生产

吴文革^{1,2} 张洪程¹ 陈 烨¹ 李 杰¹ 钱银飞¹ 吴桂成¹ 翟超群¹

(¹ 扬州大学 / 江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏扬州 225009; ² 安徽省农业科学院水稻研究所 / 农业部长江中下游稻作技术创新中心, 安徽合肥 230031)

摘 要: 在大田条件下比较了 5 个超级稻品种和对照汕优 63 的物质生产及氮素吸收利用特性。结果表明, 超级稻物质生产与积累优势始于拔节期, 并随着生育进程而扩大, 抽穗以后的干物质质量积累优势明显。超级稻对氮素的吸收积累总量达 196.5 (184.3~200.8) kg hm⁻², 较对照的 176.5 kg hm⁻² 增加 20.0 kg hm⁻², 其中拔节前与对照相当, 拔节至抽穗期增加 9.2 kg hm⁻², 抽穗至抽穗后 25 d 增加 4.9 kg hm⁻², 抽穗后 25 d 至成熟期增加 4.3 kg hm⁻²。氮素吸收速率拔节至孕穗阶段达最高峰, 超级稻为 3.68 (3.44~3.96) kg N hm⁻² d⁻¹, 对照为 3.55 kg N hm⁻² d⁻¹; 孕穗期以后吸氮速率随着生育进程而逐渐下降, 抽穗 25 d 以后, 对照基本不具再吸收能力, 而超级稻仍具一定吸收能力(0.36 kg N hm⁻² d⁻¹)。超级稻生育中、后期氮素吸收利用能力的提高促进了抽穗和灌浆结实期植株特别是叶片含氮率的提高, 孕穗期、抽穗期、抽穗后 25 d、成熟期叶片含氮率均与相应生育阶段的干物质积累量显著相关, 与最终总生物量极显著相关。超级稻在 10.5 t hm⁻² 产量水平下的百千克籽粒吸氮量在 1.83 kg 左右。

关键词: 超级中籼杂交水稻; 氮素; 吸收/运转; 物质生产

Dry-Matter Accumulation and Nitrogen Absorption and Utilization in Middle-Season *Indica* Super Hybrid Rice

WU Wen-Ge^{1,2}, ZHANG Hong-Cheng¹, CHEN Ye¹, LI Jie¹, QIAN Ying-Fei¹, WU Gui-Cheng¹, and ZHAI Chao-Qun¹

(¹ Key Laboratory for Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu; ² Rice Cultivation Technology Innovation Center in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture, Rice Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, Anhui, China)

Abstract: The field experiment was conducted in 2006 to research the difference of characteristics of dry matter accumulation and nitrogen uptake and utilization between five super rice cultivars and the control—Shanyou 63. The dry matter production of middle-season *indica* super hybrid rice was started from the beginning of elongation stage, and with the rice growing, the comparative advantage of dry matter accumulation was gradually speeded up. The middle-season *indica* super hybrid rice had apparent advantage in biomass accumulation after heading. Total amount of nitrogen absorption was 196.5 (184.3–200.8) kg ha⁻¹ in super rice cultivar, which was 20.0 kg ha⁻¹ higher than that of control. The amount of nitrogen absorption of middle-season *indica* super hybrid rice cultivar corresponded to that of control before jointing stage, however, increased 9.2 kg ha⁻¹ more than that of CK from jointing stage to heading stage, 4.9 kg ha⁻¹ more than that of CK at 25 days after heading stage, and 4.3 kg ha⁻¹ more than that of CK from 25 days after heading stage to maturity. The Nitrogen uptake rate reached its peak at booting stage, and the middle-season *indica* super hybrid rice was 3.68 (3.44–3.96) kg N ha⁻¹ d⁻¹ while the control was 3.55 kg N ha⁻¹ d⁻¹. And then, the nitrogen uptake was slower and slower after booting stage, and at 25 days after heading and at maturing stage, the N-uptake rate was 0.36 kg N ha⁻¹ d⁻¹ in super rice, whereas it was almost zero in the control. It can be seen that middle-season *indica* super hybrid rice held high N rate in the leaf blade after heading stage, which was beneficial to chlorophyll contents stability and photosynthate accumulation so that the super high yield of the rice could become true. The result also showed that the super hybrid rice should absorb about 1.83 kg N per hundred kilogram grain when its yielding level was 10.5 t ha⁻¹.

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAD02A04, 2006BAD02A06); 农业部农业结构调整重大技术研究专项项目(06-03-05B)

作者简介: 吴文革(1967–), 男, 安徽安庆人, 博士, 研究员, 主要从事水稻生理生态研究。Tel: 0551-2160196; E-mail: wuwenge@vip.sina.com

Received(收稿日期): 2007-07-23; Accepted(接受日期): 2007-10-20.

Keywords: Middle-season *indica* super hybrid rice; Nitrogen; Absorption/translocation; Dry matter production

目前我国正在大力推广超级稻, 现年种植面积在 400 万公顷以上, 预计到 2010 年全国将达稻作面积的 30%; 推广超级稻对我国的粮食安全具有极其重要的作用。水稻不同基因型对氮素吸收利用的显著差异及其与产量形成的关系已有报道^[1-2], 多数研究表明, 氮肥吸收利用随不同水稻品种产量水平的提高而提高^[3-4], 不同产量水平对氮素的需求也不同^[5-7]。与一般高产水稻相比, 超级杂交水稻穗大粒多, 产量潜力高^[8-9], 探明超级水稻氮素吸收与利用的特性, 不仅可为超级稻超高产栽培中氮肥的合理运筹提供依据, 而且可为超级稻的氮素营养性状改良提供技术支持。关于水稻氮素营养国内外已有较多的研究报道^[4-7,10], 但目前有关超级稻超高产条件下的氮素吸收利用及其与产量形成的关系尚缺乏较系统的研究。

本试验于 2005 年征集了当时农业部公布认定的所有中籼型超级稻品种及部分超高产组合 21 个, 以产量为主要指标, 筛选出适宜于长江中下游地区稻麦(油)熟制下的 5 个超高产杂交组合。2006 年以这 5 个组合为材料, 以曾在我国分布最广、最具代表性的高产组合汕优 63 为对照, 在田间条件下, 分析比较了不同类品种产量形成的变化和群体质量指标的异同。本文重点从氮素营养的角度分析超级杂交中籼水稻的吸氮特性与物质积累的关系, 旨在明确长江中下游稻区主体稻作类型杂交中籼水稻超高产形成的氮素营养机理, 为超级稻育种和超高产栽培提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选用 II 优明 86 (II youming 86)、II 优 084 (II you 084)、II 优 293 (II you 293)、D 优 527 (D you 527)、两优培九 (Liangyoupeijiu) 等 5 个品种(组合), 以汕优 63 (Shanyou 63) 为对照, 于 2005—2006 年在扬州大学兴化钓鱼试验场进行试验, 前茬为小麦, 土壤含有有机质 27.6 g kg⁻¹、碱解氮 112.1 mg kg⁻¹、速效磷 16.6 mg kg⁻¹、速效钾 89.6 mg kg⁻¹。

1.2 试验方法及测定项目

2006 年 5 月 10 日播种早育秧, 6 月 15 日移栽, 行株距为 30 cm×15 cm, 单本栽插, 3 次重复, 随机排列, 小区面积 15 m²。按超高产栽培进行整个生育

期管理, 总施氮量 225 kg hm⁻², N P₂O₅ K₂O = 2 1 2。其中氮肥基肥 40%, 蘖肥 30%, 促花肥(叶龄余数 3.5) 20%, 保花肥(叶龄余数 2) 10%; 磷肥全部基施; 钾肥 50% 作基肥, 叶龄余数 5 时再施 50% 作壮秆肥。

定点跟踪观测叶龄进程和茎蘖动态, 分别于移栽期、分蘖中期(栽后 18 d)、拔节期、抽穗期、灌浆中期(抽穗后 25 d)和成熟期普查群体茎蘖数并取样, 测定地上部叶、鞘、茎和穗的干重, 成熟期按平均有效穗数在非边行选择连续的有代表性的植株 5 穴, 考种计算理论产量, 同时小区实收称量实际产量。

植株组织全氮用 H₂SO₄-H₂O₂ 混合催化剂消化, 半微量凯氏定氮法测定植株不同器官及籽粒含氮率。

1.3 氮素吸收与利用效率的计算

氮素积累总量(total nitrogen accumulation, TNA) = 成熟期单位面积全株地上部(茎、叶和穗)干物重(W)×植株含 N 率(茎、叶和穗含氮的加权平均)

氮素干物质生产效率(nitrogen use efficiency for biomass production, NUEB) = 单位时间植株干物质积累量(Wt)/单位时间植株 N 积累总量(Nt)

氮素稻谷生产效率(nitrogen use efficiency for grain production, NUEG) = 籽粒产量(Gw)/N 积累量(Nt)

百千克籽粒吸氮量(nitrogen uptake per 100 kg of grain, 100 kg-NU) = N 积累总量/稻谷产量×100%

叶片(茎鞘)氮转运量(nitrogen translocation, NT) = 抽穗期叶片(茎鞘)氮积累量 - 成熟期叶片(茎鞘)N 积累量

叶片(茎鞘)氮表观转运率(apparent N translocation rate, ANTR) = 叶片(茎鞘)氮转运量/抽穗期叶片(茎鞘)N 积累量×100%

叶片(茎鞘)氮素转运贡献率(N translocation conversion rate of vegetative organ, NTCRV) = (氮素转运量/成熟期穗部氮素积累总量)×100%

抽穗后的氮素净积累贡献率(net N absorbed conversion rate after heading stage, NNACR) = 抽穗后净积累的氮素量/成熟期穗部氮素积累总量×100%

氮素收获指数(nitrogen harvest index, NHI) = (成熟期籽粒 N 积累量/全株地上部分 N 积累总量)

氮肥偏生产力(partial factor productivity of ap-

plied N, PFP) = 稻谷产量/施 N 量(GY_{+N}/FN)

2 结果与分析

2.1 物质生长

图 1 表明, 超级稻具有明显的物质生长积累优势。拔节前 5 个超级中籼杂交稻品种和对照汕优 63 的干物质积累量相当, 为 4 t hm^{-2} 左右; 但这一阶段积累的干物质质量占全生育期总量的比重, 超级稻在 21.7%~22.8% 之间, 均低于对照的 23.5%。拔节至抽穗期的干物重, 超级稻品种除 D 优 527 比对照略低外, 其余均比对照高, 平均高出 571.0 kg hm^{-2} , 此期干物质积累量占总生物量的比重, 对照为 40.8%, 超级稻为 38.8%~39.8%, 两者差异不大。抽穗至抽穗后 25 d 的干物质积累, 超级中籼杂交稻品种均高于对照, 平均增加 550.5 kg hm^{-2} ; 但占总生物量的相对比例, 超级稻品种和对照相近, 在 25.8%~27.7% 之间。抽穗后 25 d 至成熟期的干物质积累量, 是超级中籼稻品种与对照差异最大的一个时期, 前者比后者平均增加 678.0 kg hm^{-2} , 占总生物量比重的差异也最大, 对照仅为 9.3%, 超级稻品种在 11.5%~13.7% 之间^[8]。这表明超级中籼杂交稻物质生产优势始于拔节期并随着生育进程越来越大, 抽穗后特别是抽穗 25 d 以后更明显。

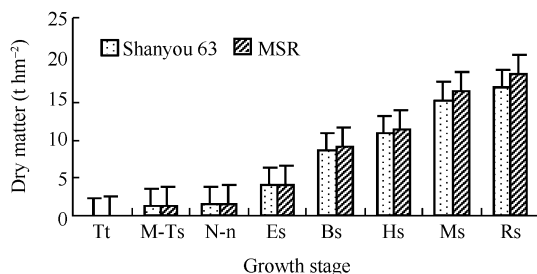


图 1 不同超级稻品种不同生育时期群体干物质积累

Fig. 1 Dry matter of middle-season indica super hybrid rice at different growth stages

MSR: mean of middle-season indica super hybrid rice. Tt: transplanting time; M-Ts: mid-tillering stage; N-n: the critical stage of productive tillering; Es: elongation stage; Bs: booting stage; Hs: heading stage; Ms: milking stage (25 d after heading stage); Rs: ripening stage.

2.2 氮素的吸收

2.2.1 不同生育阶段的氮素积累量 超级中籼杂交水稻的干物质积累和氮素积累均遵循“慢—快—慢”S 形变化规律(图 1 和图 2)。图 2 显示在拔节前超级稻氮素吸收积累量与对照相比并无优势, 拔节期以后则显著超过对照。

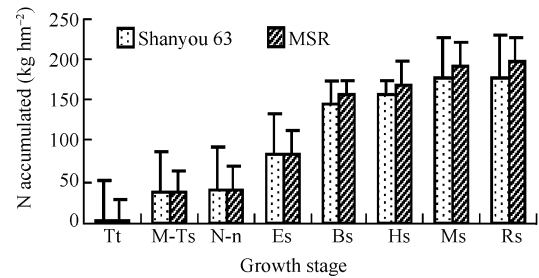


图 2 不同超级稻品种不同生育时期群体氮素积累

Fig. 2 Nitrogen accumulation in middle-season indica super hybrid rice at different growth stages

缩写同图 1。Abbreviations as in Fig. 1.

表 1 表明, 成熟期超级稻对氮素的吸收量达 $196.5\text{ (}184.3\sim200.8\text{) kg hm}^{-2}$, 较对照的 176.5 kg hm^{-2} 增加 20.0 kg hm^{-2} , 高出 11.3%。积累量的增加主要在拔节至抽穗期(9.2 kg hm^{-2})、抽穗期至抽穗后 25 d (4.9 kg hm^{-2}) 和抽穗后 25 d 至成熟期(4.3 kg hm^{-2}), 值得注意的是抽穗后 25 d 至成熟期对照汕优 63 很少从土壤中吸收氮素(仅 2.3 kg hm^{-2}), 而超级稻还能继续从土壤中吸收少量氮素(6.6 kg hm^{-2}); 虽然超级稻增加氮吸收的绝对量仅为 4.3 kg hm^{-2} , 但相对增加量高达 187%。这表明超级稻具有后期的氮素吸收优势和根系活力优势。

2.2.2 氮素积累的时空分布 若将水稻的大田生长期划分为前、中、后 3 个时期, 即自移栽至拔节期为前期, 拔节期至抽穗期为中期, 抽穗期至成熟期为后期。氮素积累(表 1), 超级稻品种和对照汕优 63 均以前期较多, 占全生育期吸收总量的 40.8%~46.7%; 中期次之, 占总量的 39.9%~44.9%; 后期较少, 占总量的 11.3%~16.5%。其中超级稻品种前期吸氮量占全生育期的比例显著低于对照; 中期超级稻平均与对照相当, 不同超级稻品种与对照的差异均未达显著水平; 后期除 D 优 527 增加不显著外, 其他超级稻品种均显著高于对照。可见超级稻品种中期和后期需要较多的氮素供应。

2.2.3 氮素吸收速率 图 3 显示, 供试品种氮素的吸收高峰在拔节至孕穗阶段, 孕穗之后吸氮强度随着根系活力下降而逐步降低, 这说明杂交中籼水稻幼穗分化阶段需要高强度氮素供应。吸氮速率, 在前期和中期超级稻品种与对照相当, 超级杂交中籼稻比对照并无规律性明显优势, 但抽穗后尤其是灌浆结实后期(抽穗后 25 d 至成熟期)表现出明显优势。

2.2.4 氮的分配 图 4 表明, 成熟期氮素在稻株体内的分配, 参试组合均以穗部最高, 叶、鞘次之,

表 1 超级中籼杂交水稻不同生育阶段氮素积累
Table 1 Nitrogen accumulation at different growth stages of middle-season *indica* super hybrid rice

组合 Combination	拔节前 Before elongation stage		拔节—抽穗 Elongation stage–heading stage		抽穗—抽穗后 25 d Heading stage–25 d after heading		抽穗后 25 d—成熟 25 d After heading–maturing stage		总量 (kg hm ⁻²) Total	氮素收获 指数 NHI	稻谷产量 (kg hm ⁻²) Yield
	kg hm ⁻²	%	kg hm ⁻²	%	kg hm ⁻²	%	kg hm ⁻²	%			
II 优明 86 II youming 86	87.2 a	43.4 b	80.4 b	40.0 b	24.7 a	12.3 a	8.5 a	4.2 a	200.8 a	0.556	11041.5 a
II 优 084 II you 084	88.7 a	44.6 ab	79.4 b	39.9 b	24.6 a	12.4 a	6.1 c	3.1 b	198.8 a	0.549	10819.5 b
II 优 293 II you 293	80.8 c	40.8 b	87.5 a	44.1 a	22.3 a	11.3 a	7.6 b	3.8 ab	200.1 a	0.539	10765.5 b
D 优 527 D you 527	80.2 c	43.4 ab	83.0 ab	44.9 a	17.9 b	9.7 b	4.2 d	2.3 b	198.1 a	0.559	10704.0 b
两优培九 Liangyoupeijiu	84.2 b	42.1 b	85.9 a	42.9 ab	23.2 a	11.6 a	6.8 bc	3.4 ab	184.3 b	0.530	10203.0 c
汕优 63 Shanyou 63(CK)	82.4 bc	46.7 a	74.1 c	42.0 ab	17.7 b	10.0 b	2.3 e	1.3 c	176.5 c	0.544	9712.5 d
超级稻品种平均 MSR	84.2	42.9	83.2	42.4	22.5	11.5	6.6	3.4	196.5	0.546	10706.7
超级稻平均与 CK 之差 MSR minus CK	1.8	-3.8	9.2	0.4	4.9	11.2	4.3	3.0	20.0	0.002	994.2

同一处理数据后有相同字母表示该数据在 0.05 水平差异不显著。
Values in a column followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 probability level.

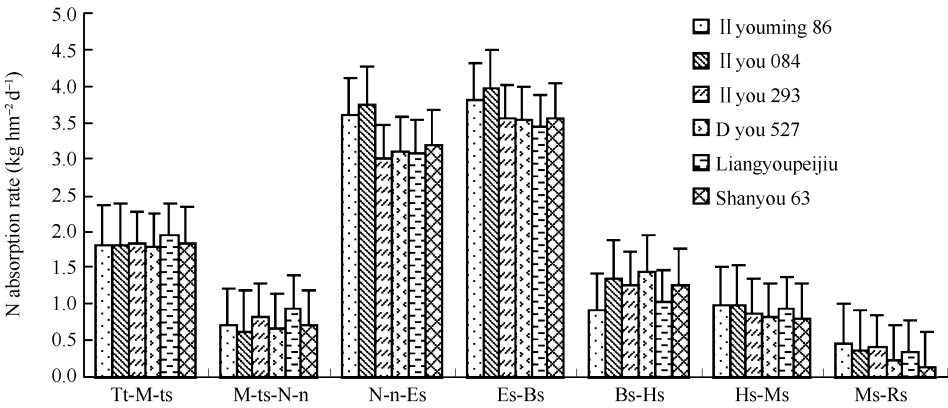


图 3 不同生育阶段吸氮速率的变化
Fig. 3 Nitrogen absorption rate at different growth stages in different rice cultivars
缩写同图 1。Abbreviations as in Fig. 1.

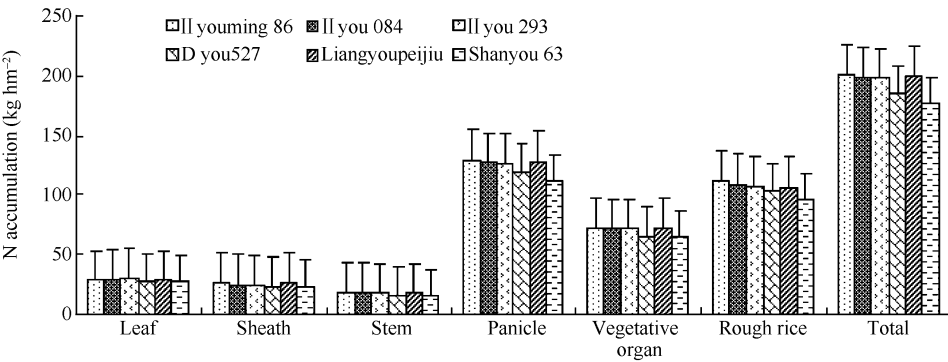


图 4 成熟期不同器官氮素积累量
Fig. 4 Nitrogen accumulation at mature stages of middle-season *indica* super hybrid rice

茎最少；地上部分营养器官的氮素积累量显著低于稻谷中的氮素积累量。与对照相比，超级稻在穗部、稻谷、稻草及全株的氮素积累均高于对照，表明超级稻不仅具有物质生长优势而且也具有氮素积累优势。

2.3 氮素的运转与利用

上述表明，杂交中籼水稻氮素吸收高峰在孕穗期，本文所分析的氮素运转利用以孕穗期为起点。在孕穗前稻株吸收的氮素集中于茎叶，孕穗期后开

始向穗部运转。表 2 表明, 稻株抽穗期前积累于叶、鞘、茎叶中约 55% 的氮素转移至穗部, 说明杂交稻

营养器官在前、中期吸收的氮素随着籽粒的形成, 大部分转移到穗部。

表 2 氮素运转与积累
Table 2 Nitrogen accumulation and translocation

组合 Combination	氮素的输出量及组成 Nitrogen exportation from vegetative organ and its component (kg hm ⁻²)				穗部积累量 Nitrogen in spike (kg hm ⁻²)		孕穗期后净 积累量 Net total N after booting	氮素表观 转运率 NATR (%)	氮素转运 贡献率 NTCRV (%)	氮素净积累 贡献率 NNACR (%)
	叶 Leaf	鞘 Sheath	茎 Stem	合计 Total	孕穗前 Before booting	孕穗后 After booting				
II 优明 86 II youming 86	57.9 a	18.1	8.9	85.0 a	2.7	126.2	41.2 a	54.2	67.3	32.7 a
II 优 084 II you 084	56.5 a	18.4	6.9	81.9 ab	2.7	124.6	42.7 a	53.4	65.7	34.3 a
两优培九 Liangyoupeijiu	54.5 a	20.4	6.9	81.8 ab	2.3	124.4	42.6 a	53.4	65.8	34.2 a
II 优 293 II you 293	50.6 ab	19.4	8.9	78.8 b	2.6	116.6	37.8 ab	54.6	67.6	32.4 ab
D 优 527 D you 527	54.6 a	21.3	8.7	84.6 a	3.1	124.9	40.4 a	54.0	67.7	32.3 ab
汕优 63 Shanyou 63(CK)	47.1 b	22.0	6.4	75.4 c	2.3	109.1	33.7 b	53.7	69.1	30.9 b
超级稻品种平均 MSR	54.8	19.5	8.1	82.4	2.7	123.3	40.9	53.9	66.8	32.5
超级稻平均与 CK 之差 MSR minus CK	7.8	-2.4	1.7	7.0	0.4	14.2	7.2	0.2	-2.3	1.6

ANTR: apparent N translocation rate; NTCRV: N translocation conversion rate of vegetative organ; NNACR: net N absorption and conversion rate after heading stage; MSR: mean of middle-season *indica* super hybrid rice. Values in a column followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 probability level.

孕穗前贮存于营养器官中的氮素输出以叶最多, 占全部输出的 62.4%~69.0%; 鞘次之, 为 21.3%~29.1%; 茎最少, 仅 8.4%~11.3%。其中超级稻叶片中贮藏的氮素输出绝对量显著高于对照, 鞘和茎的输出量与对照相当, 输出总量也显著高于对照; 但由于超级稻孕穗前贮藏的氮素总量高, 叶、鞘、茎等营养器官氮素表观输出率也与对照相当。

超级稻孕穗后氮素净积累量为 40.9 (37.8~42.7) kg hm⁻², 所有超级稻品种均高于对照的 33.7 kg hm⁻²; 其净贡献率为 32.5% (32.3%~34.3%), 均高于对照的 30.9%。而孕穗前氮素运转贡献率超级稻为 66.8% (65.7%~67.3%), 均低于对照的 69.1%。这进一步证明超级稻生育后期具有氮素吸收利用的优势, 尤其是抽穗后植株具有较强的吸氮能力, 以满足籽粒形成期植株对氮素的利用, 这也有利于维持后期功能叶叶绿素含量的稳定, 减缓绿叶面积衰减速率、提高植株净同化率、增加抽穗至成熟阶段物质生产量的根本原因。在氮素利用上虽然有品种间差异, 但超级稻品种抽穗后的氮素利用优势非常明显, 笔者认为这是超级稻的氮素营养重要的特性之一。

2.4 氮素利用率

图 5 显示超级稻品种的氮素偏生产效率 47.6 kg kg⁻¹, 显著高于对照的 43.2 kg kg⁻¹。超级稻在 10.5 t hm⁻² 产量水平下的百千克籽粒吸氮量为 1.836 (1.812~1.851) kg, 对照在 9.7 t hm⁻² 产量水平下的百

千克籽粒吸氮量为 1.820 kg, 因而可以认为在产量潜力正常发挥条件下两者的百千克籽粒吸氮量相当, 也即超级稻在产量正常表达时, 产量较一般高产品种提高, 总的需氮量增加, 但每生产 100 kg 稻谷的需氮量并未增加。

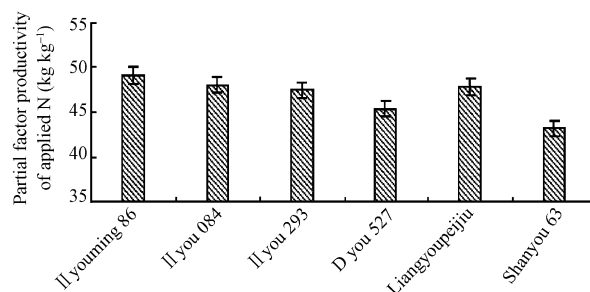


图 5 氮素偏生产力

Fig. 5 Partial factor productivity of applied N

2.5 氮素吸收与物质积累

2.5.1 叶片含氮率与氮素积累 由表 3 可见, 孕穗期及其以后各关键生育时期的叶片含氮率, 与其下一生育时期的叶片含氮率显著或极显著相关; 如孕穗期率与抽穗期显著正相关, 抽穗期与抽穗后 25 d 及成熟期均极显著相关, 抽穗后 25 d 与成熟期也极显著相关。抽穗期及抽穗后 25 d、成熟期叶片含氮率与相应各期的植株氮素吸收积累均显著或极显著正相关, 并与其以后的植株氮素吸收积累也显著或极显著正相关, 如抽穗期的叶片含氮率(L₄N%)与抽

穗期、抽穗后 25 d、成熟期的叶片含氮率极显著相关，也与这三期的植株氮素积累量也极显著相关。孕穗期鞘和茎的含氮率，以及全株的平均含氮率与植株

氮素积累量的相关性没有明显规律(表略)。可见叶片的含氮率是重要的营养生理诊断指标，保持中后期的叶片含氮率有利于促进群体植株氮素的吸收积累。

表 3 不同生育阶段叶片含氮量与阶段吸氮量的相关性

Table 3 The correlation between nitrogen content of leaves and nitrogen accumulation in different growth durations

	L ₂ N%	L ₃ N%	L ₄ N%	L ₅ N%	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅
L ₁ N%	0.549		0.070	0.078	0.841 [*]	0.311	0.329	0.419	0.368
L ₂ N%		0.862 [*]	0.788	0.786	0.619	0.878 [*]	0.919 ^{**}	0.941 ^{**}	0.929 ^{**}
L ₃ N%			0.942 ^{**}	0.947 ^{**}	0.487	0.975 ^{**}	0.978 ^{**}	0.979 ^{**}	0.984 ^{**}
L ₄ N%				0.999 ^{**}	0.251	0.908 [*]	0.922 ^{**}	0.902 [*]	0.931 ^{**}
L ₅ N%					0.245	0.907 [*]	0.926 ^{**}	0.904 [*]	0.931 ^{**}
N ₁						0.561	0.455	0.568	0.544
N ₂							0.967 ^{**}	0.979 ^{**}	0.985 ^{**}
N ₃								0.991 ^{**}	0.986 ^{**}
N ₄									0.996 ^{**}

L₁N%: 拔节期叶片含氮率; L₂N%: 孕穗期叶片含氮率; L₃N%: 抽穗期叶片含氮率; L₄N%: 抽穗后 25 d 叶片含氮率; L₅N%: 成熟期叶片含氮率。N₁: 拔节期植株氮素积累量; N₂: 孕穗期植株氮素积累量; N₃: 抽穗期植株氮素积累量; N₄: 抽穗后 25 d 植株氮素积累量; N₅: 成熟期氮素积累量。相关系数临界值: $r_{0.05}=0.811$, $r_{0.01}=0.917$ 。

L₁N%: nitrogen content of leaves at elongation stage; L₂N%: nitrogen content of leaves at booting stage; L₃N%: nitrogen content of leaves at heading stage; L₄N%: nitrogen content of leaves at 25 d after heading stage; L₅N%: nitrogen content of leaves at maturing stage. N₁: N-absorbing at elongation stage; N₂: N-absorbing at booting stage; N₃: N-absorbing at heading stage; N₄: N-absorbing at 25 d after heading stage; N₅: total amount of absorbing nitrogen at maturing stage. Relative coefficient: $r_{0.05}=0.811$, $r_{0.01}=0.917$ 。

2.5.2 叶片含氮率与物质积累 中后期功能叶片

较高的含氮率不仅有利于植株氮素积累，还有利于干物质积累。表 4 表明除了拔节期叶片含氮率与各生育阶段干物质积累量及最终总生物量不相关外，孕穗期、抽

穗期及抽穗后 25 d、成熟期叶片含氮率均与其以后各生育阶段的干物质积累量显著相关，与最终总生物量极显著相关。可见保持孕穗期以后的适宜的叶片含氮量，有利于叶片叶绿素含量的增加和光合产物的积累。

表 4 不同生育阶段叶片含氮量与物质积累的相关性

Table 4 The correlation between nitrogen content of leaves and dry matter accumulation in different growth durations

	L ₂ N%	L ₃ N%	L ₄ N%	L ₅ N%	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅
L ₁ N%	0.549		0.070	0.078	-0.421	0.037	0.061	0.346	0.314
L ₂ N%		0.862 [*]	0.788	0.786	0.342	0.621	0.827 [*]	0.881 [*]	0.900 [*]
L ₃ N%			0.942 ^{**}	0.947 ^{**}	0.684	0.895 [*]	0.928 ^{**}	0.992 ^{**}	0.983 ^{**}
L ₄ N%				0.999 ^{**}	0.765	0.831 [*]	0.938 ^{**}	0.914 [*]	0.940 ^{**}
L ₅ N%					0.763	0.840 [*]	0.937 ^{**}	0.921 ^{**}	0.938 ^{**}
W ₁						0.870 [*]	0.804	0.665	0.681
W ₂							0.897 [*]	0.905 [*]	0.860 [*]
W ₃								0.937 ^{**}	0.949 ^{**}
W ₄									0.975 ^{**}

L₁N%: 拔节期叶片含氮率; L₂N%: 孕穗期叶片含氮率; L₃N%: 抽穗期叶片含氮率; L₄N%: 抽穗后 25 d 叶片含氮率; L₅N%: 成熟期叶片含氮率。W₁: 拔节期植株干物质积累量; W₂: 孕穗期干物质积累量; W₃: 抽穗期干物质积累量; W₄: 抽穗后 25 d 干物质积累量; W₅: 物质积累总量。相关系数临界值: $r_{0.05}=0.811$, $r_{0.01}=0.917$ 。

L₁N%: nitrogen content of leaves at elongation stage; L₂N%: nitrogen content of leaves at booting stage; L₃N%: nitrogen content of leaves at heading stage; L₄N%: nitrogen content of leaves at 25 d after heading stage; L₅N%: nitrogen content of leaves at maturing stage. W₁: dry matter weight at elongation stage; W₂: dry matter weight at booting stage; W₃: dry matter weight at heading stage; W₃: dry matter weight at 25 d after heading stage; W₅: dry matter weight at maturing stage. Relative coefficient: $r_{0.05}=0.811$, $r_{0.01}=0.917$ 。

2.5.3 氮素吸收与干物质积累 表 5 表明，除拔

节期以外，孕穗期及以后各时期的氮素积累量与其对应的各生育期及最终总的干物质积累量均极显著正相

关。而且拔节至孕穗、孕穗至抽穗、抽穗至抽穗后 25 d、抽穗后 25 d 至成熟期各阶段的氮素积累量与全生育期总的氮素吸收量显著相关；与相应阶段的干物质

积累量也显著或极显著相关, 拔节前的氮素吸收量与各生育阶段干物质积累量及最终总生物量相关不显

著。可见提高中后期氮素的吸收积累也有利于中后期的干物质积累, 从而提高总的生物产量及经济产量。

表 5 不同生育阶段吸氮量与物质积累的相关性

Table 5 The correlation between nitrogen accumulation and dry matter production of different growth duration

	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅
N ₁	0.561	0.455	0.568	0.544	-0.064	0.275	0.292	0.484	0.534
N ₂		0.967**	0.979**	0.985**	0.704	0.892*	0.948**	0.973**	0.993**
N ₃			0.991**	0.986**	0.643	0.870*	0.955**	0.992**	0.975**
N ₄				0.996**	0.591	0.839*	0.928**	0.987**	0.986**
N ₅					0.629	0.841*	0.940**	0.982**	0.996**
W ₁						0.870*	0.804	0.665	0.681
W ₂							0.897*	0.905*	0.860*
W ₃								0.937**	0.949**
W ₄									0.975**

N₁: 拔节期植株氮素积累量; N₂: 孕穗期植株氮素积累量; N₃: 抽穗期植株氮素积累量; N₄: 抽穗后 25 d 植株氮素积累量; N₅: 成熟期氮素积累量。W₁: 拔节期植株干物质积累量; W₂: 孕穗期干物质积累量; W₃: 抽穗期干物质积累量; W₄: 抽穗后 25 d 干物质积累量; W₅: 物质积累总量。相关系数临界值: $r_{0.05}=0.811$, $r_{0.01}=0.917$ 。

N₁: N-absorbing at elongation stage; N₂: N-absorbing at booting stage; N₃: N-absorbing at heading stage; N₄: N-absorbing at 25 d after heading stage; N₅: total amount of nitrogen absorbing at maturing stage. W₁: dry matter weight at Es; W₂: dry matter weight at elongation stage; W₃: dry matter weight at heading stage; W₄: dry matter weight at 25 d after heading stage; W₅: dry matter weight at maturing stage. Relative coefficient: $r_{0.05}=0.811$, $r_{0.01}=0.917$ 。

3 讨论

3.1 超级杂交中籼水稻物质生产与氮素积累

水稻产量与光合产物生产显著相关^[8-9,11-12], 在目前的产量水平下进一步提高产量, 多数研究认为主要依靠提高生物积累量^[8-9,12]。而水稻的物质生产在很大程度上受氮素营养所左右^[7,10]。超级稻产量优势源于其物质积累优势^[8]。本研究表明超级杂交中籼水稻具有明显氮素吸收积累优势, 尤其是生育中后期, 特别是在抽穗后 25 d 以后一般高产杂交中籼品种基本不具再吸收能力, 而超级杂交中籼水稻仍具有一定的吸收能力($0.36 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$)。正是这种氮素吸收优势, 保证了抽穗以后植株尤其是叶片较高的氮含量, 维持功能叶绿素含量的稳定, 减缓群体功能绿叶面积的消亡, 提高了群体光合势^[12], 促进后期和中期的物质积累而提高总的生物产量。笔者认为这是超级稻物质生长优势的营养学原理。

氮素干物质生产效率指的是水稻每吸收单位质量的氮素植株地上部分积累的干物质质量, 反映了对物质积累与氮素积累影响的相对大小, 当对干物质积累的促进作用大于对氮素积累的促进作用时, 氮素干物质生产效率提高; 反之, 氮素利用效率下降。本试验表明, 超级稻的氮素干物质生产效率并未表现出优势, 在一些生育时期甚至还略低于对照。可

见, 超级稻的氮素积累与干物质积累间是一种动态平衡关系, 氮素吸收与物质积累互为因果。

3.2 超级稻氮素利用率及其提高

表征氮肥利用率(fertilizer-N use efficiency, NUE)的指标很多, 且目前国内仍然没有统一的标准^[13]。本课题组以往的研究表明, 在施氮量相同、运筹不同时, 氮肥的农学效率与产量有更好的相关性, 更能说明氮素利用状况^[14]。本研究表明, 在相同的施氮量和运筹条件下, 超级杂交中籼水稻在氮素干物质生产效率、稻谷生产率、氮收获指数方面, 比一般高产品种的对照并无优势; 但氮肥偏生产力超级稻品种却显著高于对照, 可以推知超级杂交中籼水稻的氮肥农学利用率也较高。可见从氮肥生理利用率来看, 超级稻未必具备恒定优势, 但从氮肥的农学效率的角度, 超级杂交中籼水稻的氮肥利用具有一定优势, 因此在建立以提高经济产量为中心的超级稻育种与超高产栽培体系中, 笔者认为氮肥的农学利用率或氮肥偏生产力更能说明品种对氮素吸收利用状况。但如何将高效吸收和高效利用综合在超级稻品种上则有待于育种家和栽培生理工作者进一步研究。彭少兵等^[13]认为在高氮背景下选育出耐肥抗倒的超级稻, 由于其对氮肥反应的敏感性降低而可能成为其氮肥利用率低的原因之一。本试验设计了 225 kg hm^{-2} 的施氮量, 水平相对较高。一般认为, 施氮量

增加, 水稻氮素积累总量增加, 而氮素生产效率下降^[13,14-17], 在氮素水平较低的种植条件下(如 150 kg hm^{-2}), 可以显著提高水稻的氮素利用率^[5-6], 本研究也得到类似结论, 在中低水平供氮背景下, 超级杂交中籼水稻的物质生产效率和氮素稻谷生产效率, 随着施氮水平的降低而显著提高(结果另文发表)。

3.3 超级稻超高产栽培的氮肥精确定量施用

施氮是水稻生长和产量形成的最重要调控手段之一。施氮不足往往造成水稻生长量小、穗型小、产量不高。而施氮过量和不当地造成群体过大, 恶化群体株型, 引起倒伏, 导致减产; 同时施氮过量还会造成肥料流失, 导致肥料利用率低, 引起环境污染。精确定量施氮是高产高效的重要措施, 也是农业可持续生产的重要手段。超级中籼杂交水稻物质生长量大, 对氮素的吸收量大, 因此更需要精确定量运筹氮肥^[7]。本研究初步探明了超级中籼稻在超高产($\geq 10.5 \text{ t hm}^{-2}$) 条件下的百千克籽粒需氮量为 1.836 (1.812~1.851) kg, 将为依据 Stanford 方程精确施氮提供重要的计算参数。

4 结论

超级中籼杂交水稻具有明显的物质生产后发优势, 其优势始于拔节期并随着生育进程而扩大, 抽穗后特别是抽穗 25 d 以后的干物质质量积累优势明显。对氮素的吸收, 超级中籼杂交水稻拔节前低于对照, 拔节至抽穗与对照相当, 抽穗后显著高于对照, 尤其是抽穗 25 d 以后, 对照基本不再具吸收能力, 而超级中籼杂交水稻仍具有一定的吸收能力($0.36 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ d}^{-1}$)。超级稻的物质生产和氮素积累优势均在中后期, 故在其超高产栽培中应加强中后期的氮素供应。

超级中籼杂交水稻生育中、后期氮素吸收利用能力的提高, 促进了抽穗和灌浆结实期植株特别是叶片含氮率的提高, 而鞘、茎的氮含量增加不明显。孕穗期、抽穗期、抽穗后 25 d、成熟期叶片含氮率均与相应生育阶段的干物质积累量显著相关, 与最终总生物量极显著相关。可见孕穗期以后较高的叶片含氮率, 有利于叶绿素含量的稳定和光合产物的积累, 因而后期的叶片含氮率也是超高产栽培的重要生理诊断与调控指标。

超级稻氮素干物质生产效率和稻谷生产效率并无优势, 但其氮肥偏生产力高; 超级稻实现超高产需要较高的氮素供应, 但生产 100 kg 稻谷的需氮量

并不增加。

References

- [1] de Datta S K, Broadbent F E. Nitrogen use efficiency of 24 rice genotypes in N-deficient soil. *Field Crops Res*, 1990, 23: 81-92
- [2] Shan Y-H(单玉华), Wang Y-L(王余龙), Yamamoto Y(山本由德), Huang J-Y(黄建晔), Yang L-X(杨连新), Zhang C-S(张传胜). Effects of N application date on hull size and grain plumpness of japonica rice. *Yangzhou Univ (Nat Sci Edn)*(扬州大学学报·自然科学版), 2001, 4(3): 42-45(in Chinese with English abstract)
- [3] Wang W-J(王维金). Studies on rice uptake and distribution of ^{15}N of indica rice and at different fertilizer in different varieties growth stages. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1994, 20(4): 476-480(in Chinese with English abstract)
- [4] Koutroubas S D, Ntanos D A. Genotypic differences for grain yield and nitrogen utilization in indica and japonica rice under mediterranean conditions. *Field Crops Res*, 2003, 83: 251-260
- [5] Wu W-G(吴文革), Ruan X-M(阮新民), Shi F-Z(施伏芝). Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield in middle-season rice. *Anhui Agric Sci*(安徽农业科学), 2007, 35(5): 1403-1405(in Chinese)
- [6] Zhang Y-H(张耀鸿), Zhang Y-L(张亚丽), Huang Q-W(黄启为), Xu Y-C(徐阳春), Shen Q-Y(沈其荣). Effects of different nitrogen application rates on grain yields and nitrogen uptake and utilization by different rice cultivars. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2006, 13(5): 616-621(in Chinese with English abstract)
- [7] Ling Q-H(凌启鸿), Zhang H-C(张洪程), Dai Q-G(戴其根), Ding Y-F(丁艳锋), Ling L(凌励), Su Z-F(苏祖芳), Xu M(徐茂), Que J-H(阙金华), Wang S-H(王绍华). Study on precise and quantitative N application in rice. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2005, 38(12): 2457-2467(in Chinese with English abstract)
- [8] Zhang H-C(张洪程), Wang X-Q(王秀芹), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许轲). Effects of N-application rate on yield, quality and characters of nitrogen uptake of hybrid rice variety Liangyoupeijiu. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2003, 36(7): 800-806(in Chinese with English abstract)
- [9] Jiang G Z. Physiological and ecological characteristics of high yielding varieties in rice plant: I. Yield and dry matter production. *Jpn J Crop Sci*, 1998, 57: 132-138
- [10] Ying J F, Peng S B, Yang G Q, Zhou N, Romeo M, Kenneth G. Comparison of high-yield rice in a tropical and subtropical

- environment: I. Determinants of grain and dry matter yields. *Field Crops Res*, 1998, 57: 71–84
- [11] Wu W-G(吴文革), Zhang H-C(张洪程), Qian Y-F(钱银飞), Chen Y(陈烨), Xu J(徐军), Wu G-C(吴桂成), Zhai C-Q(翟超群), Huo Z-Y(霍中洋), Dai Q-G(戴其根). Analysis on dry matter production characteristics of middle-season *indica* super hybrid rice. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2007, 21(3): 287–293(in Chinese with English abstract)
- [12] Yang H-J(杨惠杰), Li Y-Z(李义珍), Yang R-C(杨仁崔), Jiang Z-W(姜照伟), Zheng J-S(郑景生). Dry matter production characteristics of super high yielding rice. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2001, 15(4): 265–270(in Chinese with English abstract)
- [13] Wu W-G(吴文革), Zhang S-H(张四海), Zhao J-J(赵决建), Wu G-C(吴桂成), Li Z-F(李泽福), Xia J-F(夏加发). Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rimland of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料报), 2007, 13(5): 757–764(in Chinese with English abstract)
- [14] Peng S-B(彭少兵), Huang J-L(黄见良), Zhong X-H(钟旭华), Yang J-C(杨建昌), Wang G-H(王光火), Zou Y-B(邹应斌), Zhang F-S(张福锁), Zhu Q-S(朱庆森), Buresh R, Witt C. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2002, 35(9): 1095–1103(in Chinese with English abstract)
- [15] Jiang L-G(江立庚), Cao W-X(曹卫星), Gan X-Q(甘秀芹), Wei S-Q(韦善清), Xu J-Y(徐建云), Dong D-F(董登峰), Chen N-P(陈念平), Lu F-Y(陆福勇), Qin H-D(秦华东). Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2004, 37(4): 490–496(in Chinese with English abstract)
- [16] Tang Q-Y(唐启源), Zou Y-B(邹应斌), Mi X-C(米湘成), Wang H-L(汪汉林), Zhou M-L(周美兰). Grain yield construction and N fertilizer efficiency of super hybrid rice under different N applications. *Hybrid Rice*(杂交水稻), 2003, 18(1): 44–48
- [17] Yang X-E(杨肖娥), Sun X(孙羲). Physiological effect of nitrate or ammonia top-dressing on hybrid and conventional rice varieties at the late growth stage. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1991, 17(4): 283–291(in Chinese with English abstract)