

不同施氮量对两系杂交中籼稻产量和衰老的影响

史方祝¹, 李胜群¹, 蒋继武³, 柯建², 何清华², 武立权^{2*}

(1. 凤台县水稻原种场, 淮南 232100; 2. 安徽农业大学农学院, 合肥 230036; 3. 合肥丰乐种业股份有限公司, 合肥 230036)

摘要: 以超高产水稻品种丰两优香 1 号为材料, 在常规大田生产条件下, 分析不同氮肥用量对两系杂交中籼稻产量、氮肥农学利用效率以及功能叶衰老的影响。结果表明, 施氮量在 0~255 kg·hm⁻² 范围内, 两系稻产量、群体质量和氮肥农学利用效率随施氮量增加而提高, 以 255 kg·hm⁻² 施氮处理的产量最高(11786.4 kg·hm⁻²)、氮肥农学利用率最大; 施氮量增加到 300 kg·hm⁻², 产量、群体质量和氮肥农学利用率均下降。氮素营养影响水稻衰老进程, 适宜施氮量(255 kg·hm⁻²)和较高氮肥农学利用率, 能保证两系杂交中籼稻齐穗后功能叶不早衰, 有利于后期植株光合能力提高和光合产物积累, 使后期物质积累贡献率提高, 为获得高产奠定基础。

关键词: 两系稻; 氮肥; 产量; 衰老

中图分类号: S147.2; S511

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2014)01-0110-06

Effects of different nitrogen levels on two-line indica hybrid rice yields and senescence

SHI Fangzhu¹, LI Shengqun¹, JIANG Jiwu³, KE Jian², HE Qinghua², WU Liquan²

(1. Rice Breeding Farm of Fengtai County, Huainan 231200;

2. School of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036; 3. Hefei Fengle Seed Co., Ltd., Hefei 230036)

Abstract: Super high-yielding rice variety Fengliangyouxiang 1 was used to analyze the impact of different nitrogen application rates on group characteristics, nitrogen agronomic utilization and functional leaf senescence of two-line medium indica hybrid rice under the condition of conventional field test. The results showed as follows: when the nitrogen rate was in the range of 0-255kg·hm⁻², two-line hybrid rice production, population quality and nitrogen agronomic utilization increased along with the increase of nitrogen application rate; when the nitrogen application treatment was of 255 kg·hm⁻², it had the highest yield (11786.4 kg·hm⁻²) and the maximum nitrogen agronomic utilization; when the nitrogen rate increased from 255 to 300 kg·hm⁻², the production, population quality and nitrogen agronomic utilization decreased. Rice aging process was affected by nitrogen nutrition. The optimum nitrogen application rate (255 kg·hm⁻²) and a relatively high nitrogen agronomic utilization could ensure that the functional leaves of the two-line medium indica hybrid rice would not premature aging after the full heading, which is favorable for enhancing plant photosynthetic capacity and the accumulation of photosynthetic products at later stage, increasing the material accumulate contribution rate in later period, so as to lay a foundation for high yield.

Key words: two-line indica hybrid rice; nitrogen fertilizer; yield; senescence

氮素营养状况与水稻产量形成、光合特性、衰老等密切相关^[1-5]。目前氮肥在水稻生产中的投入成为增产的有力措施之一。然而, 氮肥过量施用造成生态环境破坏的同时也威胁到人类健康。合理施氮量不仅可以提高水稻产量, 还可以减少因过量施

用氮肥造成的环境污染。因此, 如何正确进行氮肥运筹、提高氮肥利用率、延迟水稻衰老、增加产量, 是一个值得深入研究的课题。前人研究表明^[6-8], 当氮素施用量由低逐渐增高时, 产量随氮素用量的增加而相应提高; 但是当氮素用量达到一定水平时,

收稿日期: 2013-07-12

基金项目: 安徽省自然科学基金(1208085MC34), 国家科技支撑项目(2011BAD16B06、2012BAD04B09、2012BAD07B02、2013BAD20B09) 共同资助。

作者简介: 史方祝, 高级农艺师。

* 通信作者: 武立权, 博士, 副教授。E-mail: wlq_001@163.com

再增加氮肥, 产量提高并不显著, 甚至造成减产。近年来, 两系杂交水稻在长江中下游地区迅猛发展, 推广面积逐年扩增; 但对于两系稻产量形成规律、肥水利用特征特性等的研究既不系统也不完善。本研究选用合肥丰乐股份有限公司选育的、已在长江中下游地区生产中大面积应用的两系杂交中籼稻丰两优香 1 号为材料, 研究氮肥对两系稻产量、氮肥农学利用效率以及功能叶衰老的影响, 以期为长江中下游地区两系杂交稻生产中氮肥的合理施用和更高产量的形成提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

供试水稻品种为两系杂交稻丰两优香 1 号, 合肥丰乐种业股份有限公司提供。

1.2 试验设计

试验于 2012 年在安徽农业大学大杨店农场进行, 土壤有机质 $28.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮(N) $1.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷(P) $21.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾(K) $48.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH6.2。试验采用随机区组设计, 4 个处理: A 为不施氮对照(CK); B 为纯 N $210 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (低氮); C 为纯 N $255 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (中氮); D 为纯 N $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (高氮), 各处理 3 次重复, 小区面积 18 m^2 , 共 12 个小区。每小区磷钾肥按照 $\text{P}_2\text{O}_5 75 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O} 120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施用。磷肥全部基施, 钾肥中穗肥与基肥各占 50%; 氮肥作基肥的占总施 N 量的 60%; 分蘖肥占总施 N 量 10%, 穗肥氮占总施氮量的 30%。各小区薄膜包埂, 独立排管, 四周设保护行。4 月 25 日播种, 5 月 30 日移栽, 栽插密度为 $30 \text{ cm}\times 13 \text{ cm}$ 。水分管理采用浅湿间歇灌溉模式。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 分蘖动态 每个小区定点 10 株水稻定期调查。分别在移栽期、有效分蘖临界叶龄期、拔节期、孕穗期、抽穗期和乳熟期观察茎蘖消长动态。

1.3.2 干物质和叶面积 分别于有效分蘖临界叶龄期、拔节初期、孕穗期、抽穗期、乳熟期、蜡熟期和完熟期小区不同区域取株高、穗型有代表性的 3 株水稻, 测定植株的绿叶叶面积, 叶面积用 LI-COR 公司的 LI-3000A 叶面积仪测定。将水稻植株的叶、茎鞘和穗分装, 于 105°C 杀青, 80°C 烘干至恒重后称干重。

1.3.3 叶片净光合速率 分别于齐穗期 (0 d)、齐穗后 10 d、20 d 和 30 d, 各处理选取具代表性植株的剑叶, 于上午晴天时用 LI-6400XT 型便携式光合作用测定仪(美国 LI-COR 公司生产) 测定植株顶部

完全展开叶的光合速率。测定叶片光合速率时, 设定叶室 CO_2 浓度为 $350 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$, 温度 30°C , 用内源光照处理, 光子量照度为 $1200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1.3.4 其他相关生理指标 叶绿素 (SPAD) 采用日本产 SPAD-502 型叶绿素计测定; 丙二醛(MDA)含量测定参考 Hodges 等的方法^[9]; 超氧化物歧化酶(SOD)活性测定参考 Beers 等紫外分光光度法^[10], 以 1 min 消耗 H_2O_2 的量表示酶活性; 过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法^[11], 用 1 min 内每 g 鲜重生成的愈创木酚单位数表示; 过氧化氢酶(CAT)活性测定参照蒋德安等的方法^[12], 以抑制 NBT 光还原的 50% 为 1 个酶活力单位。

1.3.5 产量及产量构成因素 水稻成熟后, 每处理随机取 10 株, 测定单株有效穗数、每穗颖花数、结实率和千粒重, 同时实割每个小区稻株进行实际产量测定。

1.3.6 氮肥农学利用率 氮肥农学利用率 = (施氮区产量 - 空白区产量) / 施氮量 $\times 100$ 。

1.4 数据分析

使用 DPS 软件对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥水平对两系水稻产量和群体质量影响

2.1.1 对产量和氮肥农学利用率的影响 由表 1 可知, 不同氮肥用量间产量差异显著, 其中施氮量在 $255 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时产量最高, 达到 $11786.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。从产量构成因素来看, 不同施氮量对水稻单位面积群体总颖花量的影响较大, 施氮量增加到 $255 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 单位面积群体总颖花量达到最大、每穗穗粒数最高, 与对照和 $210 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 纯氮水平差异显著, 但与 $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 纯氮水平差异不显著。氮肥用量对结实率、千粒重影响不明显, 处理间差异不显著。氮肥农学利用率受施氮量影响较大, 其中施氮量为 $255 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 水平时, 氮肥农学利用率最大, 与其他处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.1.2 对若干群体质量指标的影响 从图 1 看出, 茎蘖数随施氮水平增加而增大, 从移栽到拔节期, 各处理茎蘖数逐渐增加, 且在拔节期各处理茎蘖数达到最大值, 此后茎蘖数开始下降, 在抽穗期以后趋于基本稳定, 各处理最终成穗数表现为 $C > D > B > A$, 但成穗率随着施氮量的增加而降低, 呈现出 $A (65.8\%) > B (63.5\%) > C (62.3\%) > D (55.0\%)$ 。

由图 2 看出, 从有效分蘖临界叶龄期至抽穗期初期, 各处理在不同生育期叶面积指数随着施氮水平的提高而逐渐增大, 且在抽穗初期叶面积指数达

到最大值,表现出 D (LAI7.8) > C (LAI 7.5) > B (LAI 6.9) > A (LAI 6.3); 在抽穗到腊熟期,各处理叶面积指数较抽穗期均有下降,但各处理叶面

积指数下降的幅度表现为 A(66.7%) > D (54.5%) > B (52.1%) > C (44.1%), 说明氮素过多或过少均会造成水稻绿叶数量的减少,表现出早衰现象。

表 1 不同施氮量对水稻产量及其氮肥农学利用率的影响
Table 1 Effects of rice yield and nitrogen agronomic efficiency under different nitrogen levels

处理 Treatment	穗数 ($\times 10^4/\text{hm}^2$) Panicles	每穗粒数 Spikelets per panicle	总颖花量 ($\times 10^4/\text{hm}^2$) Spikelets	结实率/% Filled-grain percentage	千粒重/g 1000-grain weight	实际产量 /kg·hm ⁻² Harvested yield	氮农学利用 率 Nitrogen agronomic efficiency
A (CK)	154.5 ^a	176 ^a	27192.0 ^a	86.7 ^a	26.5 ^a	5433.1 ^a	-
B	219.5 ^b	184 ^b	40388.0 ^b	86.3 ^a	27.1 ^a	7671.0 ^b	12.4 ^a
C	238.5 ^b	246 ^c	58671.0 ^c	85.6 ^a	27.2 ^a	11786.4 ^c	28.2 ^b
D	227.5 ^b	247 ^c	56192.8 ^c	84.7 ^a	27.1 ^a	10178.7 ^d	17.6 ^c

注:表中不同小写字母表示差异达 5%的显著水平。Note: Different small letters mean significant difference at the 5% level.

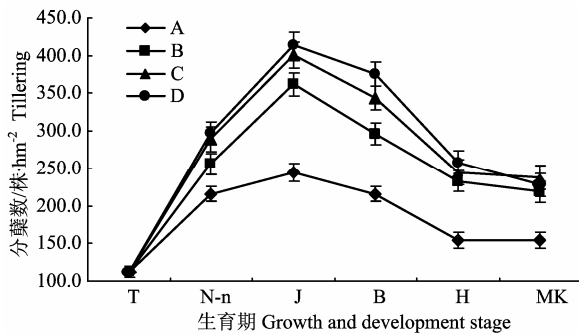


图 1 不同处理下水稻茎蘖动态变化
Figure 1 Dynamic changes of stem and tiller numbers of rice plants under different nitrogen levels

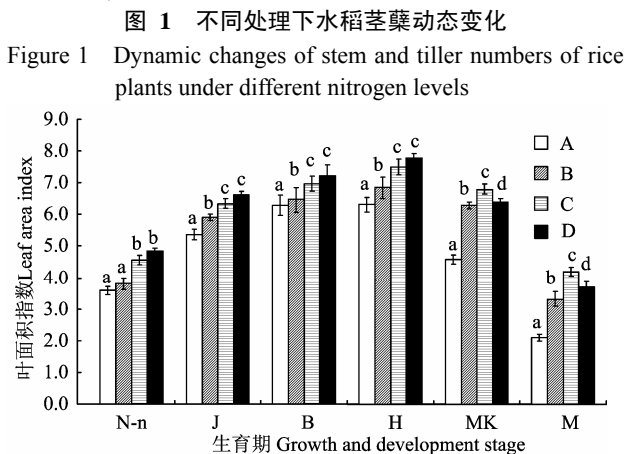


图 2 不同处理下水稻叶面积指数动态变化
Figure 2 Dynamic changes of leaf area index(LAI) of rice plants under different nitrogen levels

图 3 表明,相同处理的干物质积累量随着生育进程的变化而不断增加,但相同生育期不同处理间干物质积累量在水稻抽穗前随着施氮的增加而增大,表现出 D>C>B>A (CK),高氮和中氮在抽穗前与对照差异显著 (P<0.05),但高氮和中氮水

平干物质质量差异不显著;抽穗后,各处理干物质积累量表现出 C>D>B>A (CK),且中氮水平的干物质积累量在蜡熟期和完熟期与其他各处理差异达到显著水平 (P<0.05),说明在一定施氮范围内,水稻干物质积累量随着施氮量的增加而增,当施氮量过大时,反而不利于水稻干物质的积累;从抽穗后干物质生产占总干重的比例看,各处理呈现出 C (46.8%) > D (44.7%) > B (43.5%) > A (40.5%),施氮量达到 255 kg·hm⁻²时,抽穗后干物质生产占总干重的比例均比其他处理的高,表明该氮肥运筹水平可以建立高光效群体,促进光合产物更多的积累到籽粒中去,从而达到高产。

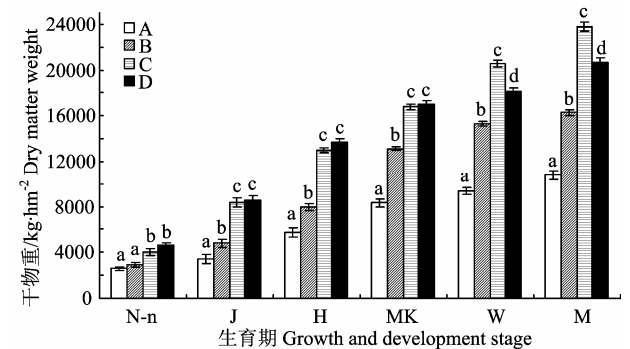


图 3 不同处理下水稻各生育期干物质积累动态变化
Figure 3 Dynamic changes of dry matter weight of rice plants under different nitrogen levels

2.2 不同施氮量对两系水稻齐穗后功能叶绿素含量和净光合速率的影响

叶绿素含量高低可作为衡量水稻光合功能衰退和叶片衰老判断标准之一。从图 4 看出,功能叶叶绿素含量在齐穗到齐穗后 30 d 均表现出下降的趋势,且分别下降 61.7% (CK)、41.8% (B)、24.4% (C) 和 33.7% (D); 其中在齐穗至齐穗后 10 d,

功能叶叶绿素含量以处理 D 最大, 与处理 A (CK) 和 B 差异显著, 与处理 C 差异不显著; 在齐穗后 20 d 和 30 d, 功能叶叶绿素含量以处理 C 最高, 其他处理间差异均达到显著水平 ($P < 0.05$); 说明适宜的施氮量能显著提高水稻齐穗后功能叶叶绿素含量, 而过量供氮, 导致水稻氮素代谢过旺, 不利于叶片内代谢物质积累, 使叶片叶绿素含量降低。

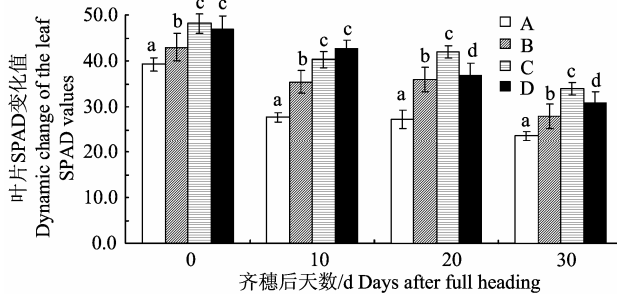


图 4 不同处理下水稻抽穗后功能叶叶绿素 (SPAD 值) 含量的变化

Figure 4 Changes of chlorophyll content (value of SPAD) in functional leaves after full heading

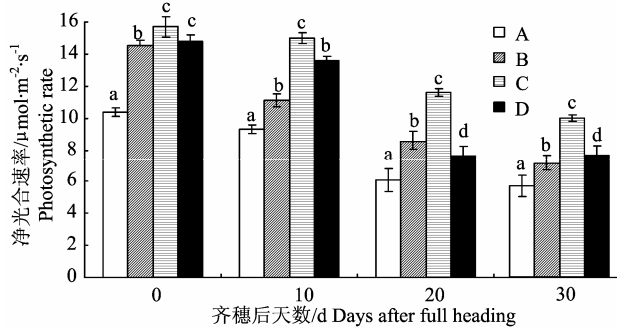


图 5 水稻抽穗后功能叶净光合速率的变化

Figure 5 Changes of photosynthetic rate in functional leaves after full heading

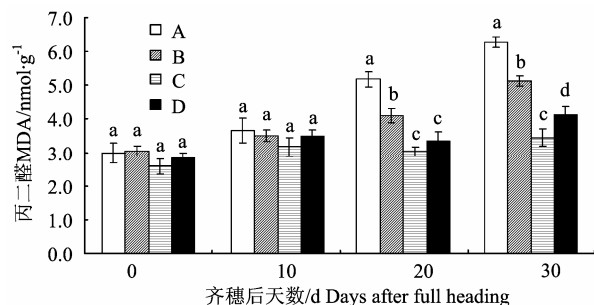


图 6 水稻抽穗后功能叶丙二醛的变化

Figure 6 Changes of MDA in functional leaves after full heading

水稻籽粒灌浆物质的 80%~90%来自抽穗以后的光合同化物, 此时功能叶光合作用的强弱对水稻产量影响较大^[13]。由图 5 看出, 各处理功能叶的净光合速率自齐穗期开始表现出下降的趋势, 分别由抽穗期的 $10.39 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (CK)、 $13.51 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

(B)、 $14.7 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (C) 和 $14.85 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (D) 下降到抽穗后 30 d 的 $4.7 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (CK)、 $7.09 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (B)、 $9.98 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (C) 和 $7.61 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (D), 下降幅度分别为 54.3%、47.5%、32.1%和 48.6%, 其中以 C 处理 (中氮) 下降幅度最小; 在齐穗后 10 d、20 d 和 30 d, 各处理中均以处理 C (中氮) 功能叶净光合速率最高, 且与其他处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。说明合理氮肥运筹对提高水稻齐穗后功能叶净光合速率具有显著效果, 因而能增强水稻孕穗后功能叶的光合作用强度, 增加光合产物的积累, 有利于水稻籽粒的充实和千粒重的提高 (表 1), 对于提高水稻产量具有重要意义。

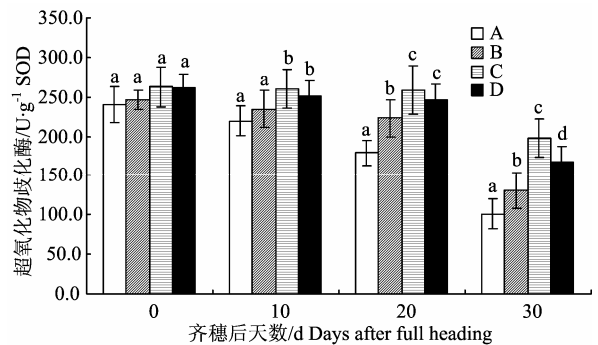


图 7 水稻抽穗后功能叶超氧化物歧化酶活性的变化

Figure 7 Changes of SOD in functional leaves after full heading

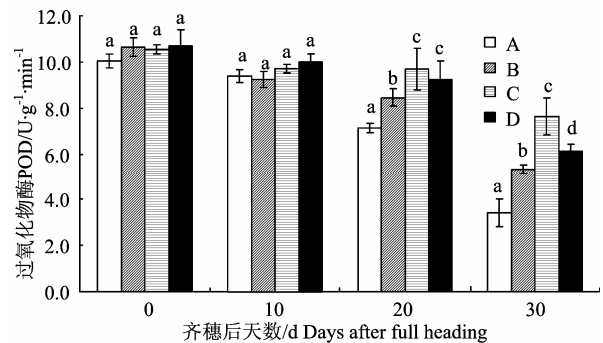


图 8 水稻抽穗后功能叶过氧化物酶活性的变化

Figure 8 Changes of POD in functional leaves after full heading

2.3 不同施肥水平对两系水稻齐穗后功能叶活性氧清除系统的影响

2.3.1 对丙二醛 (MDA) 含量的影响

MDA 是膜脂过氧化作用的最终产物, 其含量高低反映了植物细胞内膜脂过氧化水平和细胞受损程度。图 6 表明, 随生育后期水稻叶片的衰老, 剑叶中 MDA 含量逐渐增加。齐穗后 20 d 和 30 d B, 处理 A (CK) 功能叶中的 MDA 含量均显著高于处理 D 和 C; 在齐穗后的 30 d, 各处理功能叶 MDA 含量 (鲜重, 下同)

分别为 5.28 nmol·g⁻¹ (CK)、4.63 nmol·g⁻¹ (B)、3.45 nmol·g⁻¹ (C) 和 4.12 nmol·g⁻¹ (D)，处理 C 功能叶 MDA 含量最小，与其他处理间差异显著 ($P < 0.05$)，说明处理 C 功能叶衰老较慢，细胞内受过氧化物损伤程度小。

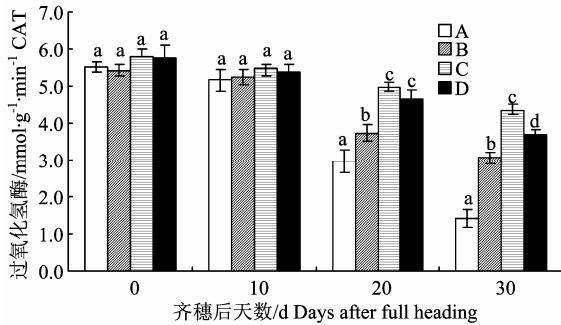


图 9 水稻抽穗后功能叶过氧化氢酶活性的变化
Figure 9 Changes of CAT in functional leaves after full heading

2.3.2 对内源保护酶活性的影响 SOD 是细胞内自由基清除系统中一个关键性酶，在保护细胞器免遭活性氧损害中起至关重要的作用^[14]，是衡量植物衰老的良好指标。图 7 表明，齐穗后，各处理水稻功能叶内的 SOD 活性均随叶片的衰老呈下降趋势，

但其活性指标值及下降幅度存在差异。齐穗后处理 C 功能叶内的 SOD 活性高于其他氮素水平，在齐穗后 30 d 时，处理 C 功能叶内的 SOD 活性分别比其他处理高 96.0% (CK)、51.1% (B) 和 18.7% (D)，与其他处理差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。本试验结果说明中氮水平 (255 kg/hm²) 提高了水稻功能叶 SOD 活性，增强了超氧自由基的清除能力，减轻对细胞原生质造成损害，从而延缓水稻功能叶衰老。

POD 是细胞防御活性氧毒害酶系统的成员之一，能催化 H₂O₂ 氧化其他底物以清除 H₂O₂。图 8 表明，齐穗后各处理水稻功能叶内的 POD 活性均随叶片的衰老呈下降趋势，但其活性指标值及下降幅度存在差异。齐穗至齐穗后 10 d，各处理水稻功能叶 POD 活性差异不显著，分别是齐穗期的 10.33 U·g⁻¹·min⁻¹ (CK)、10.46 U·g⁻¹·min⁻¹ (B)、10.54 U·g⁻¹·min⁻¹、10.70 U·g⁻¹·min⁻¹ 和齐穗后 10 d 的 9.5 U·g⁻¹·min⁻¹ (CK)、9.35 U·g⁻¹·min⁻¹ (B)、9.6 U·g⁻¹·min⁻¹ (C)、9.77 U·g⁻¹·min⁻¹ (D)；在齐穗后 30 d，处理 C 功能叶 POD 活性分别比其他处理高 91.2% (CK)、22.1% (B) 和 20.0% (D)，与其他处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。

表 2 水稻功能叶衰老生理性状与氮素农学利用率的相互关系

Table 2 Relationships between nitrogen agronomic efficiency and physiological characteristics of functional leaves senescence

功能叶生理性状 Physiological characteristics of functional leaves	齐穗期 Full heading	齐穗后 10 d 10 days after full heading	齐穗后 20 d 20 days after full heading	齐穗后 30 d 30 days after full heading
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.9677**	0.9658**	0.9836**	0.9789**
净光合速率 Photosynthetic rate	0.9487**	0.9596**	0.9215**	0.9431**
丙二醛含量 MDA content	-0.9125**	-0.9246**	-0.9341**	-0.9425**
超氧化物歧化酶活性 SOD activity	0.8927**	0.9234**	0.9157**	0.9321**
过氧化物酶活性 POD activity	0.9340**	0.8975**	0.9624**	0.9087**
过氧化氢酶活性 CAT activity	0.8975**	0.9325**	0.9244**	0.9126**

注：*和**分别表示 5%和 1%显著水平。

Note : * and** mean significant difference at the 5% and 1% probability levels , respectively.

CAT 是植物体内 H₂O₂ 等活性氧的清除酶，它与 SOD、POD 等协同作用维持体内活性氧代谢平衡。图 9 表明，齐穗后各处理水稻功能叶内的 CAT 活性均随叶片的衰老呈下降趋势。齐穗至齐穗后 10 d，各处理水稻功能叶 CAT 活性差异不显著；在齐穗后 30 d，处理 C 功能叶 CAT 活性分别比其它他处理高 207.1% (CK)、42.3% (B) 和 18.3% (D)，各处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。

2.4 两系水稻齐穗后功能叶生理特性与氮肥农学利用率的相关性

水稻功能叶衰老生理性状不仅与氮肥供应水平

存在差异，同时与水稻氮肥农学利用率关系密切。表 2 表明，水稻的氮肥农学利用率与齐穗后功能叶的叶绿素含量、净光合速率、SOD、POD、CAT 活性呈显著的正相关，而与功能叶中 MDA 含量呈极显著负相关关系。因此不同施氮量处理间，氮肥农学利用率高的处理，水稻功能叶中叶绿素含量、净光合速率、SOD、POD、CAT 具有较高活性，能及时清除活性氧自由基，阻止膜脂过氧化作用，从而使得其功能片衰老进程相对延缓，在延长功能叶寿命的同时也增强了植株干物质积累，最终有利于水稻获得高产。

3 小结与讨论

水稻产量与氮肥用量密切相关, 前人如石庆华等^[15]研究表明, 水稻产量与施氮量之间呈开口向下抛物线性关系, 存在适宜的施氮量; 曾勇军等^[16]研究得出过量施氮会使每穗粒数降低, 同时影响后期特别是乳熟期以后的物质生产和氮素吸收, 当氮素施用水由低逐渐增高时, 产量随氮素用量的增加而相应地提高; 但是当氮素用量达到一定水平时, 再增加氮素, 产量提高并不显著, 甚至造成减产。过量氮素往往伴随着高呼吸消耗、病虫害加剧、倒伏、降低收获指数, 最终降低氮肥利用率。本试验中施氮量在 0~300 kg·hm⁻² 范围内, 两系杂交水稻产量以 255 kg·hm⁻² 的产量最高(11786.4 kg·hm⁻²)、氮肥的农学利用效率最大、水稻群体较为合理; 说明适宜施氮量, 可促进水稻分蘖, 增加有效穗和提高成穗率, 提高叶面积指数, 优化群体质量, 促进中后期群体物质积累而提高总生物学产量, 进而增产; 此外, 总施氮量在 300 kg·hm⁻² 情况下, 因基肥所占比例过高, 导致水稻前期生长过旺, 无效分蘖增多, 成穗率降低, 田间通风透光条件恶化, 分蘖成穗降低, 不利于培育高产群体, 氮肥农学利用率不高, 难以获得高产, 这与前人研究结果基本一致。

水稻生育后期, 叶片逐渐衰老, 光合能力下降, 严重影响籽粒的灌浆成熟。可溶性蛋白和叶绿素含量是衡量水稻生理状态和叶片衰老情况的重要指标之一, 丙二醛、超氧自由基等是膜质过氧化的最终分解产物, 对细胞膜具有伤害作用; 植物体内内源保护酶 SOD、POD 等可以降低或消除活性氧对膜质的攻击能力从而保护膜结构提高植物抗性。前人研究发现氮素营养缺乏会引起植物整株叶片的叶绿素可溶性蛋白质含量大幅度地降、丙二醛含量升高, 加速衰老进程^[17]; 氮素营养充足可以使水稻叶片中叶绿素、可溶性蛋白质含量适宜、SOD、POD 活性提高, MDA 积累量降低; 当氮素过多时, 在增加叶面积指数的同时, 加速了叶片的衰老。本研究发现, 随着施氮量的增加(0~255 kg·hm⁻²), 水稻齐穗后功能叶的生理活性增强, 叶片寿命延长; 当施氮量 255 kg·hm⁻² 增加到 300 kg·hm⁻² 时, 叶片表现出早衰现象。因此, 在长江中下游稻区两系杂交水稻高产栽培中, 适宜施氮量为 255 kg·hm⁻², 可获得延缓后期功能叶衰老的效果, 同时提高了氮肥的农学利用效率, 达到高产超高产节氮栽培目的。

参考文献:

- [1] Abiko T, Wakayama M, Kawakami A, et al. Changes in nitrogen assimilation, metabolism, and growth in transgenic rice plants expressing a fungal NADP(H)-dependent glutamate dehydrogenase (gdhA)[J]. *Planta*, 2010, 232: 299-311
- [2] Hirel B, Le Gouis J, Ney B, et al. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(9): 2369-2387
- [3] 刘宛, 徐正进, 陈温福, 等. 氮素水平对不同穗型水稻品种植株衰老和产量的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2001, 32(4): 243-246.
- [4] 魏海燕, 张洪程, 戴其根, 等. 不同氮肥吸收利用效率水稻基因型叶片衰老特性[J]. *作物学报*, 2010, 36(4): 645-654.
- [5] Gesch R W, Heilman J L. Responses of photosynthesis and phosphorylation of the light-harvesting complex of photosystem II to chilling temperature in ecologically divergent cultivars of rice[J]. *Environmental Experimental Botany*, 1999, 41(3): 257-266.
- [6] 刘立军, 徐伟, 桑大志, 等. 实地氮肥管理提高水稻氮肥利用效率[J]. 2006, 32(7): 987-994.
- [7] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1095-1103.
- [8] 魏海燕, 张洪程, 戴其根, 等. 不同水稻氮利用效率基因型的物质生产与积累特性[J]. *作物学报*, 2007, 33(11): 1802-1809.
- [9] Hodges D M, Delong J M, Forney C F, et al. Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds[J]. *Planta*, 1999, 207: 604-611.
- [10] Beers E P. Programmed cell death during plant growth and development[J]. *Cell Death and Differentiation*, 1997, 4: 649-661.
- [11] Amalo K, Chen G X, Asade K. Separate assays specific for ascorbate peroxidase and guaiacol peroxidase and for the chloroplastic and cytosolic isozymes of ascorbate peroxidase in plants[J]. *Plant Cell Physiol*, 1994, 35: 497-504.
- [12] 蒋德安, 朱城. 植物生理学实验指导[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1998: 40-41.
- [13] 魏海燕, 张洪程, 马群, 等. 不同氮肥利用效率水稻基因型剑叶光合特性[J]. *作物学报*, 2009, 35(12): 2243-2251.
- [14] Fridovich I. Superoxide radical and superoxide dismutases[J]. *Annual Review of Biochemistry*, 1995, 64: 97-112.
- [15] 石庆华. 大穗型水稻根系生长特性与产量形成的研究[J]. *江西农学院学报*, 1988, 38(1): 53-61.
- [16] 曾勇军, 石庆华, 潘晓华, 等. 施氮量对高产早稻氮素利用特征及产量形成的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(8): 1409-1416.
- [17] 魏海燕, 张洪程, 马群, 等. 不同氮肥吸收利用效率水稻基因型叶片衰老特性[J]. *作物学报*, 2010, 36(4): 645-654.