

施氮量对绿米稻叶绿素含量及光合特性的影响*

兰 艳, 伍 鑫, 王 锦, 吴超越, 段 强, 彭立功, 李 天**

(四川农业大学 农学院, 作物生理生态及栽培四川省重点实验室, 四川 成都 611130)

摘要:【目的】探索引进日本绿米稻品种 ND4 在四川的高产优质栽培条件。【方法】设置施纯氮 0 (N0)、90 kg/hm² (N90)、135 kg/hm² (N135)、180 kg/hm² (N180) 和 225 kg/hm² (N225) 5 个处理, 以 N0 为对照, 研究施氮量对绿米稻叶绿素含量、产量及光合特性的影响。【结果】绿米颖果中叶绿素 a、叶绿素 b 及总酚含量均随着生育进程的推进而降低, 其中花后 15~20 d 下降速率最快; 花后各时段绿米颖果中叶绿素及总酚含量随施氮量增加而增加, 但成熟期中高氮 (N135、N180 和 N225) 处理下差异不显著 ($P>0.05$); 高氮 (N180 和 N225) 处理下, 随成熟期推进颖果叶绿素含量下降率更低, 色泽更稳定; 剑叶叶绿素含量及净光合速率随着生育进程的推进呈先增后降的趋势, 在花后 20 d 达到峰值; 有效穗数和千粒质量随施氮量增加而增加, 穗粒数、结实率及产量随着施氮量的增加呈先增后降趋势, 在 N180 处理下产量最高, 为 4.66 t/hm²。【结论】本试验条件下绿米高产栽培条件为施氮量 180 kg/hm², 且在腊熟期 (花后 30 d) 能收获叶绿素含量更高的绿米。

关键词: 绿米; 施氮量; 色素含量; 光合特性

中图分类号: S 511.062

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2021) 04-0566-07

Effect of Nitrogen Application Rates on the Chlorophyll Content and Photosynthetic Characteristics of Green Rice

LAN Yan, WU Xin, WANG Jin, WU Chaoyue, DUAN Qiang, PENG Ligong, LI Tian

(College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Crop Ecophysiology and Cultivation Key

Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, China)

Abstract: [Purpose] To explore high-yield and high-quality cultivation conditions of Japanese green rice variety ND4 in Sichuan. [Method] 0 (N0), 90 kg/hm² (N90), 135 kg/hm² (N135), 180 kg/hm² (N180) and 225 kg/hm² (N225) nitrogen application were set, and N0 as a control. The effect of nitrogen application rates on the chlorophyll content, yield and photosynthetic characteristics of green rice were studied. [Result] The contents of chlorophyll a, chlorophyll b and total phenols in green rice caryopsis decreased with the growth process. Among them, the decline rate was the fastest from 15 to 20 days after anthesis; the total phenol content increased with the increase of nitrogen application, but the difference was not significant ($P>0.05$) under the treatment of middle and high nitrogen (N135, N180 and N225) in the mature period; under the treatment of high nitrogen (N180 and N225), the rate of decrease of the chlorophyll content of the caryopsis with the advance of the mature period. The pigments were lower and stable; the chlorophyll content and net photosynthetic rate of the flag leaves in-

收稿日期: 2020-07-08

修回日期: 2021-03-15

网络首发时间: 2021-08-04 17:51:22

*基金项目: 四川省科技计划资助项目 (2020YFH0146)。

作者简介: 兰艳 (1992—), 女, 四川泸州人, 博士研究生, 主要从事功能稻高产优质栽培研究。

E-mail: lanyansicau@163.com

**通信作者 Corresponding author: 李天 (1962—), 男, 安徽蒙城人, 博士, 教授, 主要从事水稻高产优质栽培研究。E-mail: lit@sicau.edu.cn

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20210804.1057.002.html>



creased first and then decreased with the progress of the growth process, and reached a peak at 20 days after anthesis. The effective panicle and 1000-grain weight increased with the increase of nitrogen application. The spike number, seed setting rate and yield increased firstly and then decreased with the increase of nitrogen application. The yield was the highest under N180 treatment, which was 4.66 t/hm². [**Conclusion**] The high-yield cultivation conditions of green rice under this test condition are nitrogen application rate of 180 kg/hm², and green rice with higher chlorophyll content can be harvested at the curing stage (30 days after flowering).

Keywords: green rice; nitrogen application rate; pigment content; photosynthetic characteristics

绿米稻因叶绿素大量沉积在种皮而使糙米呈浅绿色, 是宝贵的有色稻种质资源, 其稻壳呈紫色或红色, 富含花青素^[1-2]。绿米米质优良, 富含维生素、脂肪、叶绿素、膳食纤维及大量人体必需的微量元素。郭咏梅等^[3]研究发现: 绿米富含 Fe (9.02 mg/kg) 和 Zn (12.49 mg/kg)。韩磊等^[2]认为绿米的主要特点是含硒量高 (每 100 g 绿米中含硒量高达 23.2 mg)。硒是一种维持生命的物质, 当摄入量不足时, 将会出现细胞病变, 造成癌症及多种疾病的发生, 被科学家誉为生命之火的“奇效元素”和“抗癌防癌之王”。绿米脂肪含量高达 8%~9%, 胶稠度高达 85%, 属于软胶类型, 蒸煮后米饭晶莹透亮, 不易回生变硬, 咀嚼感好, 感观评价和综合评分优于黑米和红米^[4-5]。在中国丰富的稻种资源中蕴藏着一些绿米品种, 比如河南的南阳绿米、中国水稻研究所的绿玉、广东育成的珍珠绿米、陕西育成的绿莹香米和上海交大培育的纯合香绿米品系^[1, 6-8]。有关有色稻米种质资源评价、色素基因以及栽培技术等研究主要涉及常见的黑米和红米, 关于绿米的研究报道极少。本研究以引进日本绿米稻品种 ND4 为材料, 研究施氮量对绿米稻叶绿素含量、产量及光合特性的影响, 为绿米稻的高产优质栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

供试品种为从日本引进的绿米稻品种 ND4, 有芒, 稻壳为紫色, 全生育期 155~158 d, 成熟后大部分糙米为浅绿色, 米粒大都半透明, 米质优良。试验于 2017—2018 年在四川农业大学温江试验基地进行。供试土壤 0~20 cm 化学性状为: 有机质含量为 29.54 g/kg, 全氮含量为 1.76 g/kg, 碱解氮含量为 122.15 mg/kg, 速效磷

含量为 66.21 mg/kg, 速效钾 77.24 mg/kg, pH 7.0。

试验采用单因素随机区组设计, 设置施纯氮 0 (N0)、90 kg/hm² (N90)、135 kg/hm² (N135)、180 kg/hm² (N180) 和 225 kg/hm² (N225) 5 个处理, 以 N0 为对照, 小区面积 12 m², 3 次重复。4 月 16 日播种, 5 月 26 日移栽, 每穴 2 苗, 行穴距为 30 cm×25 cm。氮肥为尿素, 按 m (基肥): m (蘖肥)=7:3 施入, 磷肥为过磷酸钙 (P₂O₅ 90 kg/hm²), 钾肥为氯化钾 (K₂O 180 kg/hm²), 基肥和全部磷钾肥在移栽前 1 d 施入, 其余管理措施保持一致。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 土壤基础肥力的测定

试验前取耕作层 (0~20 cm) 土壤样品, 采用常规方法^[9]测定土壤养分含量。

1.2.2 产量的测定

成熟期 (开花后 35 d) 每小区选取 30 株调查有效穗数; 每小区按平均有效穗数选取 5 株, 调查每穗粒数、结实率、千粒质量和理论产量等指标。

1.2.3 颖果和叶片叶绿素含量的测定

水稻始穗期 (8 月 22 日), 在每个小区挂牌标记同日抽出的稻穗, 分别于开花后 10、15、20、25、30 和 35 d 取样。每次取样于上午 8:30—10:30 采标记稻穗和剑叶, 并以穗上部籽粒和去叶脉的叶片中部为测试材料。每次称取 0.5 g 颖果和 0.1 g 叶片, 分别放入 25 mL 试管内, 向试管内加入 [V (无水乙醇): V (丙酮)]=5:5 混合浸提液 20 mL, 将试管置于黑暗中浸提颖果和颖壳中的叶绿素, 待颖果和叶片完全褪色后, 用浸提剂定容至 25 mL, 以浸提试剂为空白, 分别在波长 663、646 和 470 nm 处测定吸光度, 并按以下公式计算:

叶绿素 a 质量浓度 = $12.2 \times OD_{663} - 2.83 \times OD_{646}$;

叶绿素 b 质量浓度 = $20.11 \times OD_{646} - 5.02 \times OD_{663}$;

叶绿素含量 (mg/g) = 叶绿素 a 或 b 的质量浓度 (mg/L) $\times$ 提取液总量 (mL) / 颖果或叶片鲜质量 $\times 1000$ 。

1.2.4 颖果总酚含量的测定

总酚含量用福林酚法参照张玲^[10]的方法测定。

1.2.5 剑叶光合速率的测定

在水稻开花后 10、15、20、25、30 和 35 d 的上午 8:30—11:00 选取长势一致的 5 株, 利用 LI-6400 型便携式光合作用测定仪测定光合速率, 取 5 株平均值进行数据分析。

1.3 数据处理

所有数据结果均为 3 次重复的平均值, 利用 SPSS 20.0 软件进行数据分析和差异显著性检验, 采用最小显著性差异法 (LSD) 在 $P < 0.05$ 水平上做多重比较。

2 结果与分析

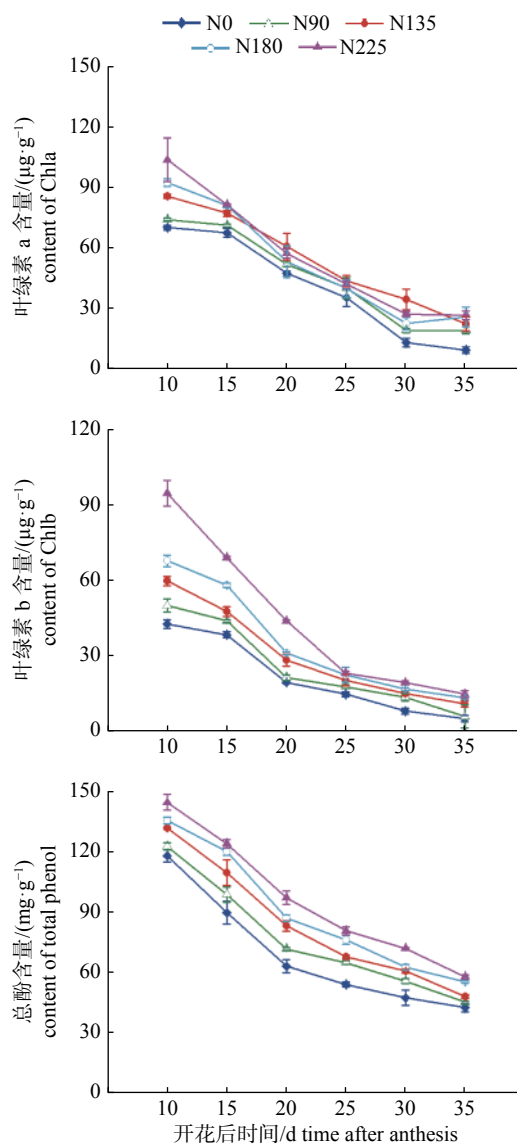
2.1 施氮量对绿米颖果叶绿素含量的影响

2.1.1 施氮量对绿米颖果叶绿素 a 含量的影响

如图 1 所示: 绿米颖果中叶绿素 a 的含量随着生育进程的推进表现出降低的趋势, 其中开花后 15~20 d, 下降速率最快。开花后 10 d, N225 处理下的叶绿素 a 含量最高 ($103.3 \mu\text{g/g}$), 且显著高于其他处理 ($P < 0.05$), N135 和 N180 处理下叶绿素 a 含量显著高于 N90 和 N0 ($P < 0.05$); 开花后 15 d, N225 ($81.0 \mu\text{g/g}$) 和 N180 ($80.6 \mu\text{g/g}$) 处理下的叶绿素 a 含量显著高于其他处理 ($P < 0.05$); 开花后 20 和 25 d 各施氮处理间叶绿素 a 含量差异不显著; 开花后 30 d (腊熟期), N135 处理下叶绿素 a 含量 ($34.2 \mu\text{g/g}$) 显著高于其他处理 ($P < 0.05$), N180 ($22.3 \mu\text{g/g}$) 和 N225 ($27.1 \mu\text{g/g}$) 处理间差异不显著; 开花后 35 d (完熟期), N225 处理下叶绿素 a 含量最高 ($26.4 \mu\text{g/g}$), 各施氮处理间差异不显著, 但均显著高于 N0 处理 ($9.2 \mu\text{g/g}$) ($P < 0.05$), 分别比对照高 186.95%、178.26%、140.22% 和 105.43%。表明施氮能显著提高绿米颖果叶绿素 a 含量。

2.1.2 施氮量对绿米颖果叶绿素 b 含量的影响

如图 1 所示: 绿米颖果中叶绿素 b 的含量随着生育进程的推进而降低, 其中开花后 15~20 d 下降速率最快。开花后 10 和 15 d, 叶绿素 b 含量随施氮量的增加而增加, N225 处理下含量最高,



注: N0、N90、N135、N180 和 N225 分别代表施氮量 0、90、135、180 和 225 kg/hm^2 。

Note: N0, N90, N135, N180 and N225 represent the nitrogen application rates of 0, 90, 135, 180 and 225 kg/hm^2 .

图 1 施氮量对颖果叶绿素 a、b 和总酚含量的影响

Fig. 1 Effect of nitrogen application rates on the contents of chlorophyll a, b and total phenol in caryopsis

且各处理间差异显著 ($P < 0.05$); 开花后 20 d, N135 ($28.3 \mu\text{g/g}$)、N180 ($31.0 \mu\text{g/g}$) 和 N225 ($43.7 \mu\text{g/g}$) 处理间叶绿 b 含量差异显著 ($P < 0.05$), 且显著高于 N90 ($21.3 \mu\text{g/g}$) 和 N0 ($19.5 \mu\text{g/g}$); 开花后 25 d, 施氮量 $\geq 135 \text{ kg/hm}^2$ 时, 颖果叶绿素 b 的含量差异不显著, 但显著高于 N90 和 N0 ($P < 0.05$); 开花后 30 d (腊熟期), N225 处理下叶绿素 b 含量 ($19.4 \mu\text{g/g}$) 分别比 N0、N90、N135 和 N180 高 139.51%、42.65%、29.33% 和 16.16%; 开花后

35 d (完熟期), 颖果叶绿素 b 的含量在 N135 (11.0 $\mu\text{g/g}$)、N180 (13.3 $\mu\text{g/g}$) 和 N225 (14.8 $\mu\text{g/g}$) 处理间差异不显著, 但显著高于 N90 (6.0 $\mu\text{g/g}$) 和 N0 (5.1 $\mu\text{g/g}$) ($P<0.05$)。表明开花后各个生育时期氮肥对绿米稻颖果中叶绿素 b 含量影响较大, 且随施氮量增加而增加。

2.1.3 施氮量对不同成熟期绿米颖果叶绿素含量的影响

如表 1 所示: 颖果叶绿素含量随施氮量的增加而增加, 但随成熟期的推进呈下降趋势。其中腊熟期 N135 处理下叶绿素含量最高, 与 N225 处理差异不显著; 各处理下, 完熟期相对腊熟期分别下降 31.58%、23.38%、32.72%、0.51% 和 11.21%。表明高氮 (N180 和 N225) 处理下, 随成熟期推进颖果叶绿素含量下降率更低, 色素更稳定。就叶绿素含量而言, 在腊熟期 (开花后 30 d) 能收获叶绿素含量更高的绿米。

表 1 施氮量对不同成熟期绿米颖果叶绿素含量的影响
Tab. 1 Effect of nitrogen application rates on the chlorophyll content in different maturity caryopsis $\mu\text{g/g}$

处理 treatment	腊熟期 maturity stage	完熟期 full ripening stage
N0	20.9 $\pm$ 3.2 d	14.3 $\pm$ 3.0 d
N90	32.5 $\pm$ 2.5 c	24.9 $\pm$ 2.8 c
N135	49.2 $\pm$ 4.6 a	33.1 $\pm$ 4.3 b
N180	39.0 $\pm$ 3.5 b	38.8 $\pm$ 5.2 ab
N225	46.4 $\pm$ 1.0 a	41.2 $\pm$ 3.5 a

注: N0、N90、N135、N180和N225分别代表施氮量0、90、135、180和225 kg/hm^2 ; 同一列不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P<0.05$); 下同。
Note: N0, N90, N135, N180 and N225 represent the nitrogen application rates of 0, 90, 135, 180 and 225 kg/hm^2 ; different lowercase letters in the same columns indicate significantly difference among treatments ($P<0.05$); the same as below.

2.2 施氮量对绿米颖果总酚含量的影响

如图 1 所示: 绿米颖果中总酚的含量随着生育进程的推进也表现出降低的趋势。颖果中总酚的含量在各施氮处理下表现为 N225>N180>N135>N90>N0。开花后 10、20 和 30 d, N225 处理下的颖果总酚含量显著高于其他处理 ($P<0.05$), 而 N135 和 N180 处理间差异不显著; 开花后 15 d, N180 (119.77 mg/g) 和 N225 (123.72 mg/g) 处理下颖果的总酚含量显著高于其他处理 ($P<0.05$); 开花后 25 d, 施氮量 $\geq 180 \text{ kg/hm}^2$ 时, 颖果总酚含量显著高于 N90 和 N0 处理, 且各处理间差异显著 ($P<0.05$); 开花后 35 d 各施氮处理间颖果总酚的含量分别为 N225 (57.74 mg/g)>N180 (55.34 mg/g)>N135 (48.10 mg/g)>N90 (45.20 mg/g)>N0 (42.58 mg/g)。说明在绿米开花后各个生育时期氮肥对总酚的影响比较大。

2.3 施氮量对绿米剑叶光合特性的影响
2.3.1 施氮量对绿米剑叶叶绿素含量的影响

由图 2 所示: 绿米剑叶叶绿素含量随着生育进程的推进表现出先增加后降低的趋势, 在开花后 20 d 含量最高。开花后各时段, 不同施氮处理下剑叶叶绿素含量均随施氮量的增加而增加。N180 处理下开花后 20 d 的叶绿素的含量在整个生育期最高 (3.99 mg/g), 比对照 (N0) 高 48.51%, 但与 N225 差异不显著; 开花后 25 d, 叶绿素含量在各处理下相对于开花后 20 d 分别下降 9.33% (N0)、1.05% (N90)、3.16% (N135)、13.28% (N180) 和 10.80% (N225); 开花后 30 d, 叶绿素含量在各处理下相对于开花后 25 d 分别下降 28.56% (N0)、27.20% (N90)、24.10% (N135)、8.82%

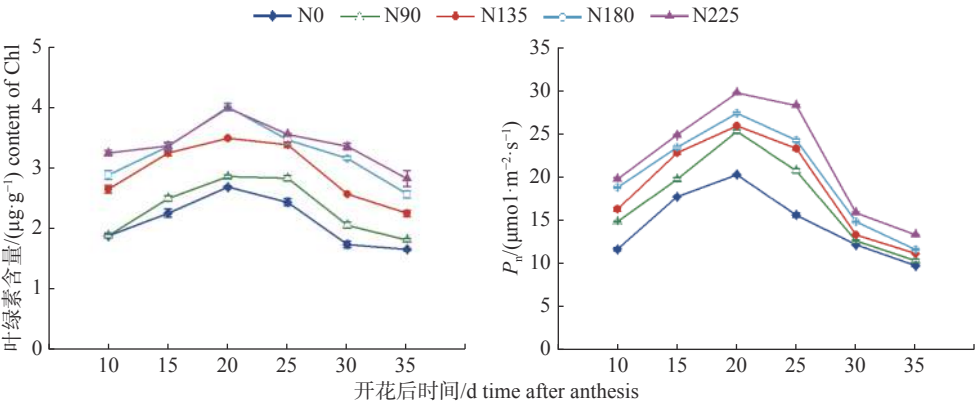


图 2 施氮量对剑叶叶绿素含量和净光合速率的影响
Fig. 2 Effect of nitrogen application rates on the chlorophyll content and net photosynthetic rate (P_n) of flag leaves

(N180) 和 5.68% (N225); 开花后 35 d, 光合速率下降变缓, 各处理相对开花后 30 d 分别下降 4.67% (N0)、12.00% (N90)、12.36% (N135)、18.77% (N180) 和 15.81% (N225)。

2.3.2 施氮量对绿米剑叶光合速率的影响

如图 2 所示: 随着生育进程的推进, 不同氮肥处理下的剑叶净光合速率呈先增后降的变化趋势, 在开花后 20 d 最高; 从施氮水平来看, 开花后各时段均随施氮量的增加而增加。开花后 20 d, 各处理下净光合速率分别为 N225 [29.67 mol/(m²·s)]>N180 [27.33 mol/(m²·s)]>N135 [25.85 mol/(m²·s)]>N90 [25.24 mol/(m²·s)]>N0 [20.27 mol/(m²·s)]; 开花后 25 d, 光合速率下降缓慢, 各处理相对于开花后 20 d 分别下降 22.94% (N0)、19.69% (N90)、9.98% (N135)、11.31% (N180) 和 4.89% (N225); 开花后 30 d, 光合速率下降最快, 各处理相对于开花后 25 d 分别下降 21.93% (N0)、38.83%

(N90)、42.63% (N135)、38.73% (N180) 和 43.70% (N225); 开花后 35 d, 光合速率下降变缓, 各处理相对开花后 30 d 分别下降 19.65% (N0)、18.10% (N90)、16.26% (N135)、21.48% (N180) 和 16.01% (N225)。

2.4 施氮量对绿米产量的影响

如表 2 所示: 有效穗数随着施氮量的增加而增加, 且各处理间差异显著 ($P<0.05$); 千粒质量也随施氮量增加而增加, N225 处理显著高于 N0 和 N90 ($P<0.05$), 其余各处理间差异不显著; 穗粒数及产量随着施氮量的增加呈先增后降的变化趋势, 在 N180 处理下产量达到最大值, 为 4.66 t/hm², 当施氮量超过 180 kg/hm² 时产量下降。当施氮在量 0~180 kg/hm² 范围内, 施用氮肥增加了绿米的有效穗数和穗粒数, 因而产量增加, 而当施氮量超过这个范围时, 穗粒数、结实率和产量均降低。

表 2 施氮量对绿米稻产量构成及产量的影响

Tab. 2 Effect of nitrogen application rates on the yield components and yield of green rice

处理 treatment	有效穗数×10 ⁴ /hm ⁻² effective panicle	穗粒数 spikelet number	千粒质量/g 1 000-grain weight	结实率/% seed setting rate	产量/(t·hm ⁻²) grain yield
N0	296.44±1.83 e	65.29±1.11 e	23.41±0.51 bc	79.23±0.27 a	3.59±0.31 c
N90	315.52±1.03 d	79.45±1.20 d	23.75±0.37 bc	66.74±0.29 b	3.97±0.27 bc
N135	328.74±1.04 b	83.15±0.69 b	24.24±0.16 ab	63.08±0.31 d	4.18±0.27 ab
N180	321.87±1.00 c	91.87±0.85 a	24.43±0.19 ab	64.50±0.33 c	4.66±0.46 a
N225	337.66±1.21 a	81.08±0.54 c	24.73±0.16 a	60.85±0.15 e	4.12±0.33 b

3 讨论

3.1 施氮量对绿米叶绿素含量的影响

研究表明: 水稻颖果在发育初期呈绿色, 这是因为果皮中层细胞中含有叶绿体的缘故^[11]。柳敏^[12]对黑米的研究发现: 从外观上看, 黑米颖果发育早期果皮呈绿色, 表明其颖果中也含有叶绿素, 但随着花色素的积累, 果皮逐渐呈现花色素的颜色, 叶绿素颜色被花色素掩盖, 其存在与否从外表上已无法辨别; 利用荧光显微镜观察颖果横切面, 发现颖果中的叶绿素只存在于果皮细胞中, 且靠近背部维管束的部位最为丰富; 颖果发育前中期, 叶绿素含量较多, 往后逐渐减少, 开花后 28 d 时叶绿素含量已经很低, 而开花后 35 d 时几乎不存在。本试验中, 绿米颖果叶绿素含量和前人研究结论相似, 随着绿米稻生育进程的推

进, 叶绿素含量逐渐降低, 因此为保证绿米色泽, 收获期不宜太迟。本试验结果表明: 在开花后 30 d (腊熟期) 收获为宜。叶绿素是含氮化合物, 本试验中随施氮量的增加叶绿素含量总体呈增加的趋势, 且施氮处理的叶绿素含量均显著高于不施氮, 说明施氮量能提高绿米颖果叶绿素含量。

总酚包括多酚和单酚, 是广泛存在于蔬菜、水果、豆类和谷物类等植物中的复杂次生代谢物^[13]。酚类化合物一般可以分为两大类: 一类是多酚体, 主要包括苯丙烷类和类黄酮化合物; 另一类则是由多个单聚体聚集成的低聚体或多聚体, 统称单宁类物质^[14]。由于绿米颖壳为紫色, 推测其可能含有大量花青素及酚类等次生代谢物, 而颖果却呈绿色, 因此本研究测定了颖果花青素和总酚含量。但由于颖果中花青素含量低于所用方法的检测限值, 所以并未测出。研究发

现:水稻籽粒中绝大多数代谢物随籽粒发育呈显著下降趋势,本试验中总酚含量与叶绿素均随生育期的推进降低。不同施氮处理下,总酚含量随施氮量的增加而增加,这与前人研究结果相似。吴碧球等^[15]研究表明:水稻叶片总酚含量与施氮量呈显著正相关关系。李耀光^[16]研究发现:不同粒色小麦品种对氮磷肥配比的响应不同,豫麦49-198在高氮(N2P1和N2P2)处理下总酚含量较高,红麦则以N1P2处理时的总酚含量较高,黑小麦新周1号在N2P2条件下总酚含量较高。此外,本研究发现:成熟期绿米颖果叶绿素和总酚在中高氮(N135、N180和N225)处理下差异不显著,这是由于随生育进程推进,籽粒的发育效应大于氮素调控效应^[17]。

3.2 施氮量对绿米剑叶光合特性的影响

研究表明:增施氮素能显著提高植物叶片氮素和光合色素含量,改善植物光合性能,增强叶片生理活性^[18-19]。氮是水稻的必需元素,对水稻叶片生长及叶片的光合能力影响很大。增施氮肥可以增加叶绿素含量,延长叶片功能期,提高光合效率,但随着施氮量的增加,无效分蘖增多,氮素较多地积累在营养器官中,不利于从源到库的转化,导致抽穗后叶绿素含量降低^[20-21]。本试验结果表明:随着生育进程的推进,剑叶叶绿素含量呈先增后降的趋势,在开花后20 d最高,此时在不同的施氮水平下表现为N180>N225>N135>N90>N0。可能是由于施氮量过大导致剑叶叶面积加大,叶片变薄,叶绿素相对含量会随之下降^[22]。说明适宜的施氮量能有效提高绿米稻剑叶中叶绿素的含量,可以提高水稻后期光合作用强度,从而为生产高含量叶绿素的绿米稻产品提供了可能途径。

光合作用是作物生长发育的决定性因素,光合速率是表征光合能力的重要参数之一^[23]。本试验结果显示:开花后各时段随施氮量的增加光合速率提高;随着生育进程的推进,呈先增后降的趋势,在开花后20 d最大;在开花后20~25 d下降缓慢,开花后25~30 d下降速率最快。表明增施氮肥可提高水稻剑叶的光合速率,增强PS I和PS II的电子传递能力,延长叶片光合速率高值持续期,改善光合性能,增加非光化学猝灭(NPQ),增强生育后期叶片的PS II潜在活性、PS最大光

化学效率和叶片生理活性,延缓中、下部叶片的衰老,增加生育后期的光合产量^[24-25]。同时研究表明:施氮加快后期碳氮代谢的速率,光合强度增加,可以提高后期叶片的光化学猝灭,提高叶片净光合速率^[26]。

3.3 施氮量对绿米产量的影响

研究表明:当氮素施用水平由低逐渐增高时,产量随氮素用量的增加相应的提高,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^[27-28]。关于水稻适宜施氮量的研究较多,由于试验品种、方法及条件的不同,结果也有差异^[29-31]。从夕汉等^[32]认为:施氮量为120~270 kg/hm²时,水稻籽粒产量增幅最大,超过270 kg/hm²时则下降。张桂莲等^[33]研究表明:适宜的施氮量能增加穗粒数和结实率,但不能超过150 kg/hm²。卢浩宇等^[34]研究表明:随施氮量增加,紫米稻分蘖增加、成穗率提高、叶面积增大、物质积累增多以及产量显著提高。本试验结果表明:产量随氮肥用量的增加而呈先增后降的趋势,并以N180处理时达到最高。在0~180 kg/hm²范围内,穗粒数和千粒质量均随着施氮量的增加而增加;但当施氮量超过180 kg/hm²,穗粒数和结实率均降低导致产量降低;这可能是过高的施氮量导致水稻贪青晚熟,植株干物质积累过多,但向穗部转移少,空瘪粒增加^[35]。因此,适宜的施氮量才能强化光合产物向穗部转移,以此达到充实的目的,提高氮素偏生产力,进而提高产量。

4 结论

绿米颖果中叶绿素及总酚的含量均随着生育进程的推进表现出降低的趋势;开花后各个生育时期绿米颖果中叶绿素及总酚含量随施氮量增加而增加。此外,高氮(N180、N225)处理下,随成熟期推进颖果色泽更稳定。绿米剑叶叶绿素含量及净光合速率随着生育进程的推进表现出先增加后降低的趋势,在开花后20 d达到峰值;开花后各时段随施氮量的增加而增加。产量在N180(180 kg/hm²)处理下达到最大值(4.66 t/hm²),当超过180 kg/hm²时产量下降;产量构成因子中,有效穗数和千粒质量随施氮量增加而增加,穗粒数和结实率随着施氮量的增加呈先增后降的变化

趋势。因此,本试验条件下绿米高产栽培条件为 N180 (180 kg/hm²) 处理,且在腊熟期(开花后 30 d)能收获叶绿素含量更高的绿米。

[参考文献]

- [1] 孙美玲,梁月洋,王红朵,等.河南南阳地产绿米稻壳中花青素的提取工艺研究[J].中国农学通报,2018,34(18): 77. DOI: 10.11924/j.issn.1000-6850.casb18020020.
- [2] 韩磊,汪旭东,徐建第,等.有色稻米研究现状分析[J].中国稻米,2003,9(5): 5. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8082.2003.05.002.
- [3] 郭咏梅,段延碧,李少明,等.有色稻米Fe、Zn、Cu和Mn含量及与种皮颜色相关分析[J].植物遗传资源学报,2011,12(6): 971. DOI: 10.13430/j.cnki.jprg.2011.06.019.
- [4] 江谷驰弘,雷小波,兰艳,等.梗稻脂肪含量对稻米品质的影响[J].华南农业大学学报,2016,37(6): 98. DOI: 10.7671/j.issn.1001-411X.2016.06.015.
- [5] 张守文,周云.绿米、红米、黑米的可食品质研究[J].粮食与食品工业,2004,11(4): 11. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5026.2004.04.003.
- [6] 袁炎长.稻米家族“新面孔”[J].湖南农业,2002,16: 9. DOI: 10.3969/j.issn.1005-362X.2002.04.006.
- [7] 赵则胜.上农香糯,红香玉,上农黑糯,乌贡1号,巨胚稻6601与上农绿米[J].作物研究,2004,18(4): 281. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5280.2004.04.083.
- [8] 张弘,张彩虹,宋长宇,等.特种绿香稻的选育经过及栽培技术[J].现代农业科技,2017(9): 51. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5739.2017.09.033.
- [9] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [10] 张玲.水稻紫黑色颖壳*Pbh*基因的遗传分析与克隆[D].北京:中国农业科学院,2011.
- [11] 顾蕴洁,王忠,陈娟,等.水稻果皮的结构与功能[J].作物学报,2002,28(4): 439. DOI: 10.3321/j.issn:0496-3490.2002.04.002.
- [12] 柳敏.关于色米发育进程中形态结构变化及色素沉积的研究[D].扬州:扬州大学,2005.
- [13] 严娜,高雪燕,王汝华,等.稻米中多酚类化合物研究进展[J].食品工业科技,2015,36(19): 374. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2015.19.068.
- [14] 华晓雨,陶爽,孙盛楠.植物次生代谢产物—酚类化合物的研究进展[J].生物技术通报,2017,33(12): 22. DOI: 10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2017-0546.
- [15] 吴碧球,黄所生,李成,等.环境因素对水稻次生物质的影响及其与抗褐飞虱关系[J].西南农业学报,2016,29(10): 2371. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2016.10.022.
- [16] 李耀光.不同粒色小麦籽粒抗氧化物质积累机理及氮磷肥调控效应研究[D].郑州:河南农业大学,2016.
- [17] 张新城.氮素穗肥调控粳稻籽粒灌浆的代谢组学与转录组学研究[D].南京:南京农业大学,2017.
- [18] 李耕,高辉远,刘鹏,等.氮素对玉米灌浆期叶片光合性能的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3): 536. DOI: 10.11674/zwyf.2010.0304.
- [19] 王帅.长期不同施肥对玉米叶片光合作用及光系统功能的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2014.
- [20] 吴自明,王竹青,李木英,等.后期水分亏缺与增施氮肥对杂交稻叶片光合功能的影响[J].作物学报,2013,39(3): 118. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2013.00494.
- [21] 赵建红,李玥,孙永健,等.灌溉方式和氮肥运筹对免耕厢沟栽培杂交稻氮素利用及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(3): 609. DOI: 10.11674/zwyf.15067.
- [22] 王美,赵广才,石书兵,等.施氮量对不同粒色小麦花后光合特性及成熟期氮素分配和籽粒蛋白质组分的影响[J].麦类作物学报,2015,35(6): 829. DOI: 10.7606/j.issn.1009-1041.2015.06.14.
- [23] 刘宇锋,李伏生.灌溉方式与施肥水平对超级稻光合生理的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(4): 416. DOI: 10.3724/SP.J.1011.2013.00416.
- [24] 徐国伟,陆大克,王贺正,等.干湿交替灌溉与施氮量对水稻叶片光合性状的耦合效应[J].植物营养与肥料学报,2017,23(5): 1225. DOI: 10.11674/zwyf.17067.
- [25] 郭智,刘红江,张岳芳,等.氮磷减施对水稻剑叶光合特性、产量及氮素利用率的影响[J].西南农业学报,2017,30(10): 2263. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2017.10.018.
- [26] 王卫,谢小立,谢永宏,等.不同施肥制度对双季稻氮吸收、净光合速率及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3): 752. DOI: 10.11674/zwyf.2010.0334.
- [27] 吴培,陈天晔,袁嘉琦,等.施氮量和直播密度互作对水稻产量形成特征的影响[J].中国水稻科学,2019,33(3): 269. DOI: 10.16819/j.1001-7216.2019.8112.
- [28] 严凯,蒋玉兰,唐纪元,等.盐碱地条件下施氮量和栽插密度对水稻产量和品质的影响[J].中国土壤与肥料,2018(2): 67. DOI: 10.11838/sfsc.20180210.
- [29] 金鸿明,付丽,郝娜,等.不同施氮水平对4个粳稻品种株型及产量的影响[J].分子植物育种,2018,16(2): 670. DOI: 10.13271/j.mpb.016.000670.
- [30] 高帅,潘勇辉,孙玉明,等.不同供氮水平对常规稻与杂交稻产量及氮素利用效率的影响[J].南京农业大学学报,2018,41(6): 97. DOI: 10.7685/jnau.201803042.
- [31] 成臣,曾勇军,王祺,等.施氮量对晚粳稻甬优1538产量、品质及氮素吸收利用的影响[J].水土保持学报,2018,32(5): 222. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.05.036.
- [32] 从夕汉,施伏芝,阮新民,等.氮肥水平对不同基因型水稻氮素利用率、产量和品质的影响[J].应用生态学报,2017,28(4): 1219. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201704.010.
- [33] 张桂莲,赵瑞,刘逸童,等.施氮量对优质稻产量和稻米品质及氮素利用效率的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2019,45(3): 231. DOI: 10.13331/j.cnki.jhau.2019.03.002.
- [34] 卢浩宇,文浩,易镇邪,等.施氮量与无机有机肥配施比例对紫米稻产量形成与米质的影响[J].作物杂志,2017(6): 147. DOI: 10.16035/j.issn.1001-7283.2017.06.024.
- [35] 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. DOI: 10.3724/SP.J.1006.2008.01409.

责任编辑: 何承刚