

兰艳, 黄翌, 隋晓东, 等. 施氮量对低谷蛋白水稻产量及品质的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 8-15.
LAN Yan, HUANG Zhao, SUI Xiaodong, et al. Effects of nitrogen application rate on yield and quality of low-gluten rice[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 8-15.

施氮量对低谷蛋白水稻产量及品质的影响

兰 艳¹, 黄 翌¹, 隋晓东¹, 龚 静¹, 涂云彪¹,
孙影影¹, 伍 鑫¹, 丁春邦², 李 天¹

(1 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;
2 四川农业大学 生命科学学院, 四川 雅安 625014)

摘要:【目的】探明施氮量对低谷蛋白水稻 *Oryza sativa* 产量及品质的影响。【方法】在大田栽培条件下, 设置 5 个施氮处理, N0、N1、N2、N3 和 N4 处理的施氮量分别为 0、90、135、180 和 225 kg·hm⁻², 研究不同氮肥水平对低谷蛋白水稻‘ER22’产量、籽粒蛋白质组分含量和比例、以及稻米品质的影响。【结果】在施氮量为 0~180 kg·hm⁻² 的范围内, 有效穗数、结实率、实粒数和水稻产量随着施氮量的增加而逐渐增加; 但在 N4 处理下, 结实率与实粒数均下降, 导致产量降低。花后 7~35 d, ‘ER22’籽粒总蛋白含量及各组分蛋白含量均随着施氮量的增加而增加, 但各组分蛋白的比例不变; 花后 35 d 籽粒清蛋白和球蛋白含量在 N2、N3 和 N4 处理间差异均不显著, 而醇溶蛋白含量则在 N2、N3 和 N4 处理间差异均显著, 谷蛋白含量在 N3 和 N4 处理间无显著差异。‘ER22’稻米的食味品质在 N1 和 N2 处理下表现良好, N3 处理的稻米加工品质最好, N4 处理的稻米综合品质降低。【结论】实现低谷蛋白水稻‘ER22’高产优质的适宜施氮范围在 135~180 kg·hm⁻² 之间。

关键词: 施氮量; 低谷蛋白含量; 水稻; 产量; 品质
中图分类号: S511.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2019)04-0008-08

Effects of nitrogen application rate on yield and quality of low-gluten rice

LAN Yan¹, HUANG Zhao¹, SUI Xiaodong¹, GONG Jing¹, TU Yunbiao¹,
SUN Yingying¹, WU Xin¹, DING Chunbang², LI Tian¹

(1 College of Agronomy, Sichuan Agricultural University/Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, China; 2 College of life sciences, Sichuan Agricultural University, Yaan 625014, China)

Abstract: 【Objective】To study the effect of nitrogen application rate on yield and quality of low-gluten rice (*Oryza sativa*). 【Method】Five nitrogen treatments were set under field cultivation conditions. The nitrogen application amounts of N0 (Control), N1, N2, N3 and N4 treatments were 0, 90, 135, 180 and 225 kg·hm⁻² respectively. Low-gluten rice ‘ER22’ was used as material. The effects of different nitrogen levels on the yield, grain protein contents and proportion, and grain quality of ‘ER22’ were analyzed. 【Result】Within the range of 0–180 kg·hm⁻² for nitrogen application, the number of effective panicles, seed setting rate, number of solid grains and rice yield increased with the increase of nitrogen application amount. Under N4 treatment, the seed setting rate and number of solid grains decreased leading to rice yield decline. The contents of total protein and each protein component of ‘ER22’ grain increased with the increase of nitrogen application amount during 0–35 d after

flowering. Grain albumin and globulin contents in N2, N3 and N4 treatments at 35 d after flowering were not significantly different, while prolamin contents of N2, N3 and N4 treatments were significantly different. There was no significant difference of gluten content under N3 and N4 treatments. The taste quality of ‘ER22’ grain was good under N1 and N2 treatments. The processing quality was the best under N3 treatment. The overall quality of rice decreased under N4 treatment. 【Conclusion】 The suitable nitrogen application amounts for producing high-yield and high-quality low-gluten rice ‘ER22’ range from 135 kg·hm⁻² to 180 kg·hm⁻².

Key words: nitrogen application rate; low-gluten rice; yield; quality

水稻籽粒中的蛋白质组分因溶解性不同, 可分为 4 类: 水溶性的清蛋白、盐溶性的球蛋白、醇溶性的醇溶蛋白和碱溶性的谷蛋白, 分别占稻米总蛋白质质量分数为 5%、10%、5% 和 80%^[1-2]。清蛋白和球蛋白主要储存在果皮、糊粉层和胚等组织中, 而醇溶蛋白和谷蛋白主要储存在胚乳中^[3]。谷蛋白储藏在蛋白体 PB-II 中易被人体的胃消化吸收, 而醇溶蛋白积淀在蛋白体 PB-I 内, 不能被胃消化吸收, 所以人体主要吸收谷蛋白^[4]。低谷蛋白稻米是一种可吸收蛋白 (指清蛋白、球蛋白、谷蛋白之和) 质量分数只有 3.1%~4.0% 的水稻品种^[5]。糖尿病和肾脏病病人由于肾功能出现障碍, 不宜食用可吸收蛋白质质量分数超过 4% 的大米。因此患者食用低谷蛋白大米后, 人体不会因摄入过量热量而使血糖、血脂升高, 能有效预防、辅助治疗糖尿病和肾病^[6]。

稻米蛋白质及组分主要受稻米品种遗传基因控制, 但环境因素的影响也较大。有研究表明, 对蛋白质含量的影响, 环境因素占 89.14%, 而品种差异仅占 8.06%^[7]。也有研究认为籽粒中蛋白质组分在基因型间存在显著差异, 同时生态环境对蛋白质含量及组分也有极显著的影响^[8-9]。由于经济的快速发展和人类生活方式的改变, 作为功能性稻米的低谷蛋白水稻需求不断增长, 但存在产量低价格高的问题。黎泉^[10] 研究表明, 不同低谷蛋白水稻品种的产量对施氮量的响应不同。增施氮肥会增加水稻籽粒蛋白质及组分蛋白含量, 然而施氮量过低或过高均会降低其产量及品质。因此, 适宜的施氮量是确保低谷蛋白水稻高产优质栽培的关键。低谷蛋白水稻品种 ER22 的谷蛋白占总蛋白的质量分数为 36.9%~37.3%, 本研究以 ER22 为材料, 进一步研究不同施氮量对其产量及蛋白组分的影响, 以期为低谷蛋白水稻品种的高产优质栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究于 2016—2017 年度在四川农业大学温江试验基地进行。供试土壤 0~20 cm 土层养分状况: 有

机质 29.50 g·kg⁻¹、全氮 1.80 g·kg⁻¹、碱解氮 85.24 mg·kg⁻¹、速效磷 66.19 mg·kg⁻¹、速效钾 77.08 mg·kg⁻¹、pH 为 6.9。供试材料: 低谷蛋白品种 ER22, 属常规粳型糯稻, 原产日本, 在四川地区全生育期为 150 d, 株型紧凑, 产量稳定, 品质优良, 适应性强。

试验采用随机区组设计, 设 N0(对照)、N1、N2、N3 和 N4 共 5 个处理, 分别施纯氮 0、90、135、180 和 225 kg·hm⁻²。小区面积为 4 m×5 m, 3 次重复, 行穴距 30 cm×25 cm, 每穴栽 2 苗。4 月 17 日进行早育秧, 5 月 27 日移栽, 秧龄 40 d。氮肥为尿素, 基肥、蘖肥和穗肥以 6:2:2 的质量比施入, 磷肥为过磷酸钙 (P₂O₅, 90 kg·hm⁻²), 钾肥为氯化钾 (K₂O, 180 kg·hm⁻²), 基肥和全部磷钾肥在移栽前一天施入, 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, 采用常规方法测定土壤养分含量。

1.2.2 产量的测定 成熟前每小区选取 30 株调查有效穗数; 并各取具有代表性植株 5 株进行考种, 调查每穗粒数、结实率、千粒质量、理论产量等指标, 然后分区收获脱粒、晒干, 实测产量。

1.2.3 籽粒总蛋白及蛋白组分的测定 分别于花后 7、14、21、28、35 d 取样, 每小区取 10 穗, 带回室内剥取籽粒并将其放入纸袋, 立即在 105 ℃ 烘箱内杀青 30 min, 然后恒温 80 ℃ 烘干, 粉碎过筛后作为测定样品。

总蛋白含量测定: 蛋白质含量测定用凯氏定氮法, 用瑞典 FOSSTECATOR 公司生产的 Kjeltac 2300 全自动凯氏定氮仪进行测定。

蛋白组分含量测定: 采用杨静等^[11] 的连续提取法依次用蒸馏水、质量分数为 5% 的 NaCl 溶液、体积分数为 70% 的乙醇溶液和 0.1 mol·L⁻¹NaOH 溶液这 4 种溶剂对不同组分进行分离提取。然后采用考马斯亮蓝法依次测定各蛋白组分含量^[12]。

1.2.4 稻米主要品质指标测定 水稻成熟后按各处理取样并晒干保存 3 个月, 按照米质测定方法标准 NY/T83—2017^[13] 测定糙米率、精米率和整精米

率。长宽比测定参照中华人民共和国国家标准 GB/T17891—1999^[14] 测定。直链淀粉含量用德国 BRAN LUEBBE 公司生产的 AA3 连续流动分析仪进行测定。稻米淀粉黏滞性 RVA 谱采用澳大利亚 Newport Scientific 仪器公司生产的 RVA-4 型 RVA 仪进行快速测定, 用 Thermal cycle for windows (TCW) 配套软件进行分析。

1.3 数据处理

所有数据利用 SPSS 20.0 统计软件进行数据分析, 结果均为 3 次重复的平均值, 利用最小显著差法 (LSD) 在 $P<0.05$ 水平上进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 施氮量对低谷蛋白水稻产量产量及构成因子的影响

由表 1 可知, 水稻产量及构成因子 (有效穗除外) 均随着施氮量的增加呈先增后降趋势, N0 处理下最低, N3 处理下最高。就产量构成因子而言, 有效穗数随施氮量增加而增加, 在 N4 处理达到最大, N2 处理与 N1、N3 处理差异不显著, 其余各处理间差异显著。随施氮量的增加, 实粒数先增加后减少, N0 处理实粒数最少 (68.24), 在 N3 处理下实粒数最多 (96.56), 且各处理间差异显著。N0 处理千粒质量显著低于各施氮处理, N1、N2 处理均显著低于 N3、N4 处理。随着施氮量的增加, 结实率与实粒数呈相同的变化趋势, 在 N0 处理下最小, N3 处理最大, N4 处理显著低于其余各施氮处理。从整体上看, 水稻产量在 N0 处理下产量最低, N3 处理下最高, 且各处理间差异显著, 因此从产量指标上来看, 生产实践中以 N3 处理效果为最优。

2.2 施氮量对低谷蛋白稻米组分蛋白含量的影响

2.2.1 清蛋白含量的变化 由图 1A 可以看出, 随着生育进程的推进, 不同处理下, 水稻籽粒清蛋白

的含量在总体上呈增加趋势。随着施氮量的增加, 花后各时段籽粒清蛋白含量呈增加趋势。其中, 花后 7 d, N3 处理下清蛋白含量最高 ($4.99\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$); 花后 14、21 和 28 d, N4 处理下籽粒清蛋白含量最高, 分别比对照高 43.75%、30.64% 和 38.55%; 花后 35 d, N4 处理清蛋白含量 ($10.43\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 显著高于 N0 ($7.62\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)、N1 ($8.68\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 处理, 其余各处理间差异不显著。

2.2.2 球蛋白含量的变化 由图 1B 可以看出, 在水稻籽粒发育过程中, 不同处理下, 球蛋白含量不断增加。花后各时段球蛋白含量随着施氮量的增加而增加。花后 7 d, N0 处理球蛋白含量最低 ($2.13\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), N4 处理最高 ($3.98\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$); 花后 14、21 和 28 d, N4 处理下球蛋白含量最高, 分别为 9.45、10.94 和 $11.95\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 比对照高 20.84%、29.13% 和 19.14%; 花后 35 d, N3、N4 处理籽粒球蛋白含量显著高于 N1 处理。

2.2.3 醇溶蛋白含量的变化 醇溶蛋白含量变化如图 1C 所示。在水稻籽粒发育过程中, 各处理下醇溶蛋白含量持续增加。花后各阶段, 醇溶蛋白含量随着施氮量的增加而增加, 且均在 N4 处理下含量最高。花后 35 d, N0 处理醇溶蛋白含量 ($4.947\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 显著低于其他处理, N3、N4 处理醇溶蛋白含量显著高于其他处理, 且二者间差异显著。

2.2.4 谷蛋白含量的变化 如图 1D 所示, 各处理下, 水稻籽粒谷蛋白含量随着花期的推进逐渐增加。不同施氮水平下, 花后各时段籽粒谷蛋白含量均在 N4 处理下最高 (除花后 7 d 外); 花后 35 d, N1 和 N4 处理下谷蛋白含量 ($36.46\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 显著高于其他处理。

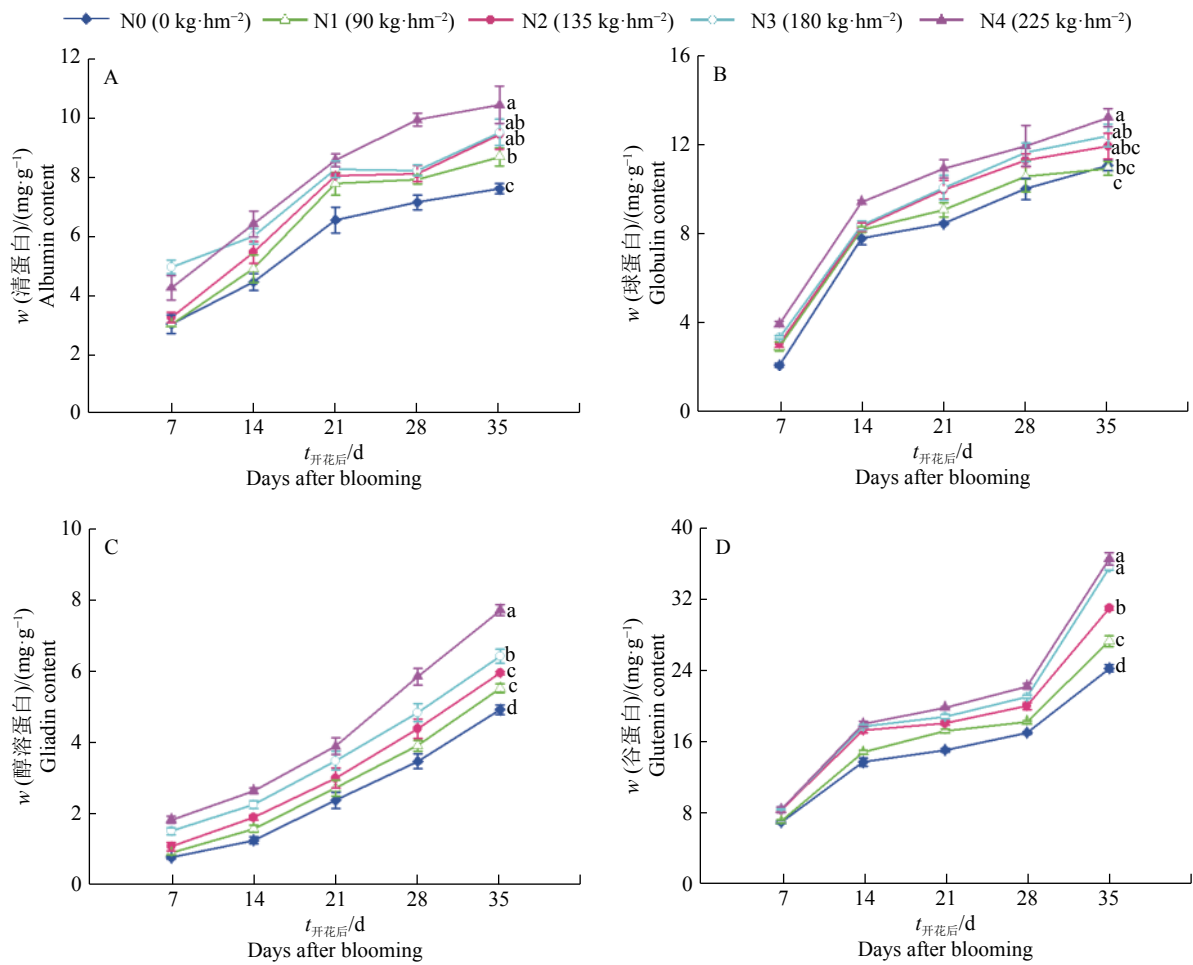
2.3 不同施氮量对低谷蛋白稻米总蛋白质含量变化的影响

在不同的施氮水平下, 水稻籽粒总蛋白含量

表 1 不同施氮量对低谷蛋白水稻产量及其构成因子的影响¹⁾
Table 1 Effects of different nitrogen application amount on yield and its components of rice

处理 Treatment	施氮量/(kg·hm ⁻²) N application amount	有效穗数/(×10 ⁴ hm ⁻²) Number of effective panicle	实粒数 Number of solid particle	千粒质量/g 1 000-grain weight	结实率/% Seed-setting rate	产量/(t·hm ⁻²) Yield
N0	0	237.69d	68.24e	24.19c	86.23e	3.92e
N1	90	345.33c	78.05d	24.79b	90.40c	6.68d
N2	135	350.67bc	79.75c	24.82b	92.43b	6.94c
N3	180	359.04b	96.56a	25.10a	94.68a	8.70a
N4	225	369.44a	89.78b	25.07a	88.25d	8.32b

1) 同列数据后的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, LSD法)
1) Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$, LSD method)



各图中, 不同小写字母表示开花后 35 d 蛋白质含量差异显著 ($P<0.05$, LSD 法)
In each figure, different lowercase letters indicate significant difference 35 days after blooming ($P<0.05$, LSD method)

图 1 不同施氮量对水稻籽粒蛋白质各组分含量变化的影响

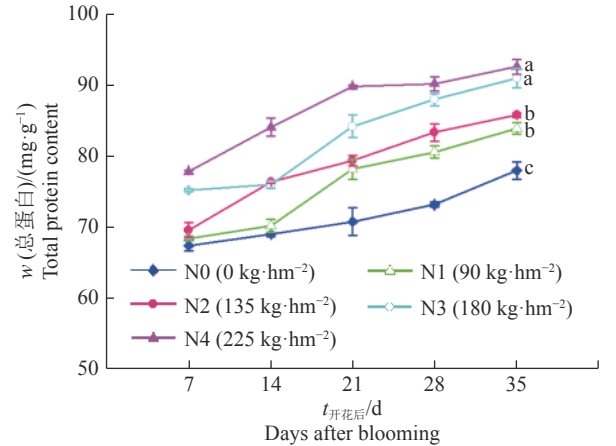
Fig. 1 Effect of different nitrogen application amount on the change of protein content in rice grain

随着花期推进逐渐上升 (图 2)。增加施氮量可以提高籽粒各时期总蛋白含量。花后 7 d, 与 N0 处理

相比, 各施氮处理增加了籽粒总蛋白含量, N1、N2、N3 和 N4 处理相比对照分别增加了 1.48%、3.24%、11.47% 和 15.29%; 花后 14、21 和 28 d, N4 处理下籽粒总蛋白含量最高, 分别为 83.98、89.65 和 90.04 mg·g⁻¹; 花后 35 d, 籽粒总蛋白含量在 N0 处理下最低 (77.95 mg·g⁻¹), N3 和 N4 处理籽粒总蛋白含量 (92.42 mg·g⁻¹) 显著高于其他处理。

2.4 不同施氮量对低谷蛋白稻米蛋白各组分占总蛋白比例的影响

由表 2 可知, 在不同施氮量处理下, 成熟期籽粒各蛋白组分占总蛋白的比例 (以质量分数计) 变化不大, 说明各组分蛋白的比例及低谷蛋白特性主要受基因控制。清蛋白约占 9.78%~12.28%, 球蛋白占 13.06%~14.30%, 醇溶蛋白占 6.34%~8.36%, 谷蛋白占 31.05%~39.45%; 其中, 谷蛋白远远低于普通水稻 (谷蛋白约占总蛋白 80%)。统计分析结果表明, 施氮量主要影响醇溶蛋白和谷蛋白, 对清蛋白和球蛋白影响不显著。



不同小写字母表示开花后 35 d 蛋白质含量差异显著 ($P<0.05$, LSD 法)
Different lowercase letters indicate significant difference 35 days after blooming ($P<0.05$, LSD method)

图 2 不同施氮量对水稻籽粒总蛋白含量变化的影响
Fig. 2 Effect of different nitrogen application amount on the change of total protein content in rice grain

表 2 成熟期不同施氮量对稻米蛋白质各组分占总蛋白比例的影响

Table 2 Effect of different nitrogen application amount on the ratio of each component protein to total protein at maturity stage of rice grain

处理 Treatment	施氮量/(kg·hm ⁻²) N application amount	w ¹⁾ /%				
		清蛋白 Albumin	球蛋白 Globulin	醇溶蛋白 Gliadin	谷蛋白 Glutenin	剩余蛋白 Other protein
N0	0	9.78a	14.23a	6.34c	31.05c	38.60a
N1	90	10.36a	13.06a	6.61bc	32.51c	37.46a
N2	135	11.02a	13.93a	6.96b	36.13b	31.96b
N3	180	10.46a	13.67a	7.09b	39.06a	29.71bc
N4	225	11.28a	14.30a	8.36a	39.45a	26.61c

1) 同列数据后的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, LSD法)
1) Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$, LSD method)

2.5 施氮量对低谷蛋白稻米理化性质的影响

施肥处理对稻米理化性质的影响如表 3 所示, 淀粉 RVA 谱特性是反映稻米食味性的重要指标。从表 3 可以看出, 不同施氮量对 RVA 谱各特征值的影响达到显著差异水平, N1 处理下的消减值最低 (−806.67 cp), 崩解值最高 (1 366.67 cp), 但与 N2 处理差异不显著; N4 处理下的崩解值最低 (310.33 cp), 消减值最高 (197.33 cp), 说明 N1 处理下稻米的食味最好, 而 N4 处理的食味较差, 各处理食味排序

为 N1>N2>N0>N3>N4。

2.6 施氮量对低谷蛋白水稻加工品质的影响

由表 4 可以看出, 不同氮肥处理对低谷蛋白水稻加工品质各指标影响不一致。从整体上看, 糙米率和精米率随着施氮量的增加而有所提高, 其中 N4 处理显著高于 N0 处理, 但与其他处理差异不显著。整精米率随施氮量的增加而提高, N4 处理下显著高于 N0、N1 和 N2 处理, 而与 N3 处理无显著差异。稻米的长宽比在 N3 处理下最大, 在 N2 处理下

表 3 施氮量对稻米 RVA 谱特性的影响¹⁾

Table 3 Effect of different nitrogen application amount on RVA profile characteristic of rice

处理 Treatment	施氮量/(kg·hm ⁻²) N application amount	最高黏度/cp Peak viscosity	热浆黏度/cp Hot paste viscosity	崩解值/cp Break down value	最终黏度/cp Final viscosity	消减值/cp Set back value
N0	0	1 843.67±29.54b	973.00±11.36a	870.67±20.38b	1 595.33±12.78a	−248.33±17.46c
N1	90	2 376.33±49.28a	1 009.67±9.82a	1 366.67±39.83a	1 569.67±9.84ab	−806.67±42.81d
N2	135	2 338.00±25.03a	991.00±15.04a	1 347.00±27.71a	1 541.33±27.17b	−796.67±38.87d
N3	180	1 444.33±17.70c	767.00±11.02b	677.33±7.88c	1 334.67±13.97c	−109.67±4.10b
N4	225	927.67±32.36d	617.33±11.62c	310.33±20.95d	1 125.00±13.02d	197.33±22.48a

1) 同列数据后的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, LSD法)
1) Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$, LSD method)

表 4 施氮量对稻米加工品质的影响¹⁾

Table 4 Effect of different nitrogen application amount on processing quality of rice

处理 Treatment	施氮量/(kg·hm ⁻²) N application amount	糙米率/% Brown rice rate	精米率/% Milled rice rate	整精米率/% Head rice rate	长宽比/% Length-wide ratio
N0	0	80.87±0.18b	69.80±0.50b	44.07±1.05b	1.72±0.03ab
N1	90	81.67±0.64ab	70.53±0.37ab	44.60±0.46b	1.71±0.02b
N2	135	82.27±0.48a	71.53±0.84ab	45.00±2.52b	1.69±0.03b
N3	180	82.27±0.13a	72.01±0.12ab	47.73±2.15ab	1.78±0.01a
N4	225	82.47±0.07a	72.67±1.43a	52.73±1.73a	1.72±0.02ab

1) 同列数据后的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, LSD法)
1) Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$, LSD method)

最小,而各处理间无显著差异。

3 讨论与结论

3.1 氮肥对低谷蛋白稻米产量的影响

施氮量是影响水稻产量的决定性因素。大量的研究表明,氮肥施用量对水稻的产量形成有很大影响^[15-16]。Anzoua 等^[17]研究表明,提高氮肥用量能增加水稻单位面积有效穗数,从而增加水稻产量;王宇等^[18]研究指出,当施氮量为 240 kg·hm⁻² 时,水稻‘盐丰 47’前中后期生长稳健,营养生长生殖生长协调,总颖花数、每穗成粒数多,单产最高(8 707.50 kg·hm⁻²);鲁艳红等^[19]研究发现,当施氮量为 180 kg·hm⁻² 时,水稻‘籼稻皖 153’产量最高,比不施肥增产 26.8%;周江明等^[20]研究提出早稻施氮 105 kg·hm⁻²、晚稻施氮 165 kg·hm⁻² 是水稻施氮的技术拐点。刘文祥等^[21]研究表明,水稻产量与施氮量呈单峰曲线关系,随施氮量增加,有效穗数显著增加,但穗粒数先增加后下降。综上所述,由于水稻品种及地域差异,不同水稻品种最佳施氮用量也不尽相同。然而,已有的研究报道有一个共性,即在一定的施氮范围内,水稻产量随施氮量增加而显著增加,但当氮肥用量达到一定水平时,再增加氮肥,产量提高并不显著甚至造成减产,也就是说在一定范围内施氮量与产量呈抛物线关系。本研究中,有效穗数随施氮量增加而增加,结实率与实粒数呈先增后降的趋势,且均在 N3 处理时达到最大值,表明增加施氮量提高水稻产量是通过增加有效穗数、提高结实率和实粒数共同实现的。这与徐春梅等^[22]的研究结果一致。在 N4 处理下,结实率与实粒数均下降,导致产量减少,这与前人研究一致,表明就产量而言,该供试品种的适宜施氮量为 N3 处理。

3.2 氮肥对低谷蛋白稻米蛋白质及各组分含量变化的影响

稻米蛋白质含量是一个受遗传和环境影响较大的品质指标,其中又以氮素的施用对其影响最大^[11]。关于施氮量对蛋白质及其组分影响的研究很多^[23-26],一般认为增加氮肥用量能够提高水稻籽粒中蛋白质及其各组分的含量^[27-28]。但是,肥料的施用量、施用时期对蛋白质含量均有不同程度的影响,且氮肥的施用对蛋白质组分百分比含量的影响较小^[29-30]。耿春苗^[5]研究发现,低谷蛋白稻米蛋白质含量对氮素供应水平的反应均随施氮量增加和穗肥比例的增加而提高,增加施氮量和穗肥后移使精米的醇溶蛋白和谷蛋白含量显著提高,但高肥处理 360 和 270 kg·hm⁻² 之间差异没达到极显著水平。Li 等^[31]

研究表明,随着施氮量增加,4 种蛋白组分均显著增加,但不同蛋白组分对氮素的响应不同,施氮主要影响了糙米中的谷蛋白和醇溶蛋白,而对清蛋白和球蛋白的影响较小;同一蛋白组分不同水稻品种对氮素的响应也不同。本研究中水稻籽粒总蛋白含量及各组分蛋白含量均随着施氮量的增加而增加,这与前人研究结果一致。此外,N4 及 N3 处理下,花后 35 d(成熟期)籽粒总蛋白含量和可溶性蛋白含量差异均不显著,表明合理的施氮量就能保证低谷蛋白水稻的品质特性。这是因为在一定范围内,随施氮量增加,植株氮素积累和转运增加,籽粒蛋白质含量增加,当施氮量继续增加,植株氮素积累增加,但转运下降,故向籽粒转运减少,最终籽粒蛋白质含量反而降低^[32]。通过比较成熟期水稻籽粒各组分蛋白占总蛋白比例发现,不同的施氮处理下,4 个组分蛋白占总蛋白含量的比例变化很小,说明施氮量对蛋白组分比例影响较小,这与张欣等^[28]在水稻上的研究结果一致。此外,本研究中花后 35 d(成熟期)各组分蛋白在各施氮处理间差异显著性均不一致,水稻籽粒清蛋白和球蛋白含量在 N2、N3 和 N4 处理间差异均不显著,醇溶蛋白含量则在 N2、N3 和 N4 处理间差异均显著,谷蛋白含量在 N3 和 N4 处理下无显著差异,但显著高于其他处理,说明不同的施氮量对清蛋白和球蛋白的影响较小,对醇溶蛋白和谷蛋白则有不同程度的影响,对成熟期水稻籽粒各组分蛋白占总蛋白比例的统计分析也验证了该结论。耿春苗^[5]研究表明,随着施氮量的增加,蛋白质组分中清蛋白和球蛋白变化不显著,但醇溶蛋白和谷蛋白含量显著增加。抽穗前期(灌浆期前 15 d)是清蛋白和球蛋白积累的关键时期,这一时期植株的代谢较快,而随着生育进程推进,成熟期代谢减慢,清蛋白和球蛋白的积累趋于稳定,因此不同施氮量对成熟期籽粒的清蛋白和球蛋白影响较小。有研究表明,环境对醇溶蛋白和谷蛋白的影响大于对球蛋白和清蛋白的影响^[33],氮素对水稻籽粒醇溶蛋白和谷蛋白的调控作用大于基因型,而对清蛋白和球蛋白的调控作用小于基因型^[34]。也有研究指出灌浆成熟期间前、中期温度对清蛋白和谷蛋白含量影响大,灌浆成熟期间中、后期温度对球蛋白和醇溶蛋白含量影响大^[35],因此灌浆成熟后期温度对醇溶蛋白的影响是成熟期籽粒醇溶蛋白在不同施氮量下差异显著的重要原因。此外,谷蛋白和醇溶蛋白是水稻的主要储藏蛋白,分别积累在蛋白体 II(PB-II)和蛋白体 I(PB-I)上,这种分布的差异也是二者受氮肥影响不同的原因之一。综上,

要保证低谷蛋白水稻的功能特性, 需要合理控制施氮量。

3.3 氮肥对低谷蛋白稻米理化性质及加工品质的影响

稻米 RVA 谱特征值为判断稻米食味品质提供了数据支撑, 有研究认为随施氮量增加, 最高黏度降低, 崩解值下降, 消碱值增加, 糊化温度升高, 稻米食味品质变劣, 使稻米胶稠度变小, 米饭变硬^[36]。也有研究指出, 淀粉 RVA 谱特征值中消减值>0 时, 崩解值越小、消减值越大, 适口性越好; 当消减值<0 时, 崩解值越大, 消减值越小, 则适口性好^[37]。本研究中, 除 N4 处理外, 消减值均<0, 且随着施氮量增加, 消减值呈先降低后增加的趋势, 而崩解值则呈相反趋势, 均在 N1 处理时达到最大值, 说明 N1 处理下稻米的食味最好, 这与之前的研究基本一致。对各处理食味排序为 N1>N2>N0>N3>N4, 表明一定范围内, 低谷蛋白稻米 ER22 蒸煮品质随施氮量的增加有所改善, 而过量施氮会使稻米蒸煮品质下降。此外, 稻米的 RVA 谱特性还与蛋白质含量及组分蛋白的比例相关, 吴洪恺等^[38]研究发现, 谷蛋白相对于醇溶蛋白的含量对稻米食味品质有着一定程度的影响, 认为 Igclgc 型稻米 (谷蛋白含量大于醇溶蛋白含量) 米饭软而黏, 食味较好。

众多研究一致认为, 增加氮肥用量, 可以提高糙米率、精米率和整精米率^[33, 39-41], 本研究也不例外, 在一定施氮量范围内, 较高的氮含量可维持根系活力和提高叶片光合速率, 促进物质运转, 增加籽粒质量和充实度, 同时植株含氮量增加, 向穗部运转的氮素化合物增加, 谷粒硬度也随之增大, 加工品质提高。过高的施氮量使穗部物质分配下降, 灌浆受阻而导致不饱满籽粒增加, 最终使加工品质下降^[32]。本研究发现, 当施氮量达到 225 kg·hm⁻² 时 (N4 处理), 对稻米加工品质的影响相对于低氮处理 (N1、N2 处理) 表现出显著差异, 但与 N3 处理差异不显著, 说明过高的施氮量对加工品质并没有显著的改善, 甚至略有降低, 因此, 选择合理的施氮量对提高低谷蛋白水稻 ER22 的食味品质及加工品质有很大的影响。

3.4 结论

在本试验条件下, 在施氮量为 0~180 kg·hm⁻² 范围内, 增施氮肥提高水稻产量是通过增加有效穗、提高结实率和实粒数共同实现的。但在 N4 (225 kg hm⁻²) 处理下, 结实率与实粒数均下降, 导致产量降低。表明就产量而言, ER22 的适宜施氮量为 N3(180 kg·hm⁻²)。施氮量对低谷蛋白水稻 ER22

籽粒的总蛋白及组分蛋白有不同程度的影响。总体而言水稻籽粒总蛋白含量及各组分蛋白含量在花后各时期均随着施氮量的增加而增加, 但在 N4 (225 kg·hm⁻²) 及 N3 (180 kg·hm⁻²) 处理下, 成熟期籽粒总蛋白含量和可溶性蛋白含量差异均不显著, 说明合理的施氮量才能保证低谷蛋白水稻的品质特性。就各组分蛋白而言, 成熟期水稻籽粒清蛋白和球蛋白含量在 N2 (135 kg·hm⁻²)、N3 (180 kg·hm⁻²) 和 N4 (225 kg·hm⁻²) 处理间差异均不显著, 醇溶蛋白和谷蛋白则表现出不同的差异性, 说明不同的施氮量对清蛋白和球蛋白的影响较小, 对醇溶蛋白和谷蛋白影响较大。此外, 不同的施氮处理下, 各组分蛋白占总蛋白的比例变化较小, 表明施氮量并不改变组分蛋白的比例。低谷蛋白水稻 ER22 稻米的食味品质在 90~135 kg·hm⁻² 处理范围内表现良好, 加工品质在 N3 (180 kg·hm⁻²) 处理最好, 施氮量在 N4 (225 kg·hm⁻²) 处理时, 稻米综合品质降低。综上所述, 低谷蛋白水稻 ER22 优质高产的适宜施氮范围在 135~180 kg·hm⁻² 之间。

参考文献:

[1] 张建奎. 作物品质分析[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 2012.

[2] 周丽慧, 刘巧泉, 张昌泉, 等. 水稻种子蛋白质含量及组分在品种间的变异与分布 [J]. 作物学报, 2009, 35(5): 884-891.

[3] MIZUMA T, FURUKAWA S, KIYOKAWA Y, et al. Characteristics of low-glutelin rice for sake brewing : Studies on rice for sake brewing[J]. Seibutsu-kogaku, 2002, 80(11): 503-511.

[4] FURUKAWA S, ITOU M, MASUMURA T, et al. Ultra-structure of low-glutelin rice endosperm[J]. Plant Biotechnol, 2007, 24(2): 227-229.

[5] 耿春苗. 氮肥及播期对低谷蛋白水稻产量和品质形成的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.

[6] MOCHIZUKI T, HARA S. Usefulness of the low protein rice on the diet therapy in patients with chronic renal failure[J]. Nihon Jinzo Gakkai Shi, 2000, 42(1): 24-29.

[7] 周海涛. 不同生态环境对裸燕麦籽实营养品质影响的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.

[8] 陈锦清. 水稻品种间蛋白质含量差异及其环境的影响 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 1986, 12(2): 182-186.

[9] 周丽慧. 水稻种子蛋白质含量的变异及其遗传研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2008.

[10] 黎泉. 施氮量对功能稻产量、品质与功能特性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.

[11] 杨静, 罗秋香, 钱春荣, 等. 氮素对稻米蛋白质组分含量及蒸煮食味品质的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2006, 37(2): 145-150.

[12] 汤章城. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

[13] 中华人民共和国农业部. 米质测定方法: NY/T 83—2017[S].北京: 中国农业出版社, 2017.

[14] 中华人民共和国国家标准. 优质稻谷: GB/T 17891—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.

[15] 谢黎虹, 叶定池, 胡培松, 等. 氮肥用量和施用方式对水稻“甬优 6 号”产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 789-794.

[16] 王春雨, 余华清, 何艳, 等. 播栽方式与施氮量对杂交籼稻氮肥利用特征及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1792-1801.

[17] ANZOUA K G, JUNICHI K, TOSHIHIRO H, et al. Genetic improvements for high yield and low soil nitrogen tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) under a cold environment[J]. Field Crops Res, 2010, 116(1): 38-45.

[18] 王宇, 付立东, 李旭, 等. 不同施氮量对水稻生长发育及产量的影响[J]. 北方水稻, 2013(5): 14-17.

[19] 鲁艳红, 廖育林, 汤海涛, 等. 不同施氮量对水稻产量、氮素吸收及利用效率的影响[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(4): 479-483.

[20] 周江明, 赵琳, 董越勇, 等. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 274-281.

[21] 刘文祥, 青先国, 艾治勇. 氮肥和密度对双季杂交稻干物质积累和产量的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 3094-3101.

[22] 徐春梅, 周昌南, 郑根深, 等. 施氮量和栽培密度对超级早稻不同器官氮素积累与转运及其吸收利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011, 2011(1): 15-20.

[23] 池忠志, 赵广才, 郑家国, 等. 施氮量对不同品种小麦籽粒蛋白组分和加工品质的影响[J]. 西南农业学报, 2010, 23(2): 427-431.

[24] 池忠志, 赵广才, 常旭虹, 等. 施氮量对冬小麦籽粒蛋白质及其组分含量和比例的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(6): 65-69.

[25] 王月福, 于振文, 李尚霞, 等. 施氮量对小麦籽粒蛋白质组分含量及加工品质的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1071-1078.

[26] 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): 829-835.

[27] 王爽. 氮肥用量和插秧密度对寒地粳稻蛋白质及稻米品质的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.

[28] 张欣, 施利利, 刘晓宇, 等. 不同施肥处理对水稻产量、食味品质及蛋白质组分的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(4): 104-108.

[29] 王爽, 赵宏伟, 姚辰, 等. 氮肥用量和插秧密度对寒地粳稻籽粒转氨酶活性及蛋白质含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(2): 70-77.

[30] 陈依露. 播期对低谷蛋白水稻产量及功能特性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.

[31] LI G H, CHEN Y L, DING Y F, et al. Charactering protein fraction concentrations as influenced by nitrogen application in low-glutelin rice cultivars[J]. J Integr Agr, 2016, 15(3): 537-544.

[32] 兰艳, 黄鹏, 江谷驰弘, 等. 成都平原稻作区施氮量和栽插密度对粳稻 D46 产量及品质的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2016, 42(1): 63-73.

[33] 凌建群, 何祖华, 马志超, 等. 水稻醇溶蛋白的多态性研究[J]. 中国水稻科学, 1997, 11(3): 129-135.

[34] NING H F, LIU Z H, WANG Q S, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on grain phytic acid and protein concentrations in japonica rice and its variations with genotypes[J]. J Cereal Sci, 2009, 50(1): 49-55.

[35] 黄英金, 漆映雪, 刘宜柏, 等. 灌浆成熟期气候因素对早籼稻米蛋白质及其 4 种组分含量的影响[J]. 中国农业气象, 2002, 23(2): 9-12.

[36] 季红娟, 赵步洪, 陈刚, 等. 扬粳 805 产量和品质对麦秸还田与施氮量的响应[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2016, 37(4): 60-64.

[37] 王玉文, 李会霞, 田岗, 等. 小米外观品质及淀粉 RVA 谱特征与米饭适口性的关系[J]. 山西农业科学, 2008, 36(7): 34-39.

[38] 吴洪恺, 刘世家, 江玲, 等. 稻米蛋白质组分及总蛋白质含量与淀粉 RVA 谱特征值的关系[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(4): 421-426.

[39] 魏海燕, 王亚江, 孟天瑶, 等. 机插超级粳稻产量、品质及氮肥利用率对氮肥的响应[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 488-496.

[40] 王力冬. 分蘖期冷水胁迫下施氮量对寒地粳稻生长特性和产质量形成的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.

[41] 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): 1219-1226.

【责任编辑 庄 延】