樊琦,刘银涛,葛金鑫,等.减氮增密对水稻产量及稻米食味品质的影响[J].华中农业大学学报,2026,45(2):70-79.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.02.008

减氮增密对水稻产量及稻米食味品质的影响

樊琦[1],刘银涛[1],葛金鑫[1],唐贝云[1],陈坚强[1],
郑侃[2],叶元文[3],曹凑贵[1],江洋[1]

1.华中农业大学植物科学技术学院,武汉 430070; 2.华中农业大学工学院,武汉 430070;
3.湖北永祥农机装备有限公司,孝感 432699

摘要 为探究氮肥管理与种植密度互作对水稻产量形成及稻米食味品质的协调效应,以优质稻品种鄂中5号为试验材料,在3个种植密度(D1:3.7×10^5 蔸/hm^2,D2:3.0×10^{5}蔸/hm^2,D3:2.6×10^5 蔸/hm^2)条件下,分别设置8种氮肥管理处理模式,各处理的施氮量及基肥、分蘖肥、穗肥比例如下:T1(0 kg/hm^2)、T2(50 kg/hm^2,7:3:0)、T3(50 kg/hm^2,5:3:2)、T4(100 kg/hm^2,7:3:0)、T5(100 kg/hm^2,5:3:2)、T6(100 kg/hm^2,4:2:4)、T7(200 kg/hm^2,7:3:0)、T8(200 kg/hm^2,5:3:2),通过2 a田间试验,研究减氮增密栽培对水稻群体质量、产量及食味品质的影响。结果显示,群体质量方面,减氮(T4D3)会降低高效叶面积指数和冠层辐射截获率,但通过增密(T4D1)可优化群体结构,缓解减氮对光能资源利用的负面影响;产量方面,减氮导致穗粒数下降,但增密通过提高有效穗数(增幅为9.14%~16.65%),有效补偿了减氮造成的产量损失,实现产量稳定,其中T4D1的有效穗数较T4D2显著增加15.70%,产量增加19.72%;食味品质方面,通过减氮增密并降低后期穗肥占比,可协同降低籽粒蛋白质含量,显著提升稻米食味值(增幅为13.39%~14.33%)。结果表明,减氮增密同时降低后期穗肥占比(20%以内),可实现水稻产量与食味品质的协同提升。

关键词 水稻;施氮量;施氮比例;密度;产量;食味品质
中图分类号 S511.504.8 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)02-0070-10

水稻作为我国重要的口粮作物,其产量与品质直接关系到我国粮食安全与消费者健康[1]。改革开放初期,为响应粮食生产政策,水稻研究以解决人民温饱为首要目标,栽培和育种中普遍重产量而轻品质,且当时人们对粮食的需求以“吃饱”为核心,对稻米品质的要求较低,市场对优质稻的需求不足,导致当时的稻米品质整体较差[2]。但近年来,随着人民生活水平提高以及市场对优质食味稻米需求的增长,我国水稻研究正从“高产优先”向“优质高产协同”转型[3]。

氮肥管理和种植密度是水稻高产优质高效栽培的重要调控措施,二者相互作用通过影响水稻群体结构共同调控其产量和品质形成。李超等[4]研究表明,增加施氮水平和种植密度可以提高水稻群体生物量;但这也导致稻米的垩白度及垩白粒率增加,使外观品质变劣[5];另外,有研究指出增密可以缓解由增氮所导致的垩白粒率增加的幅度[6];Chen等[7]研究发现,在高密度条件下增施氮肥虽然提高了群体的有效穗数,但穗粒数和结实率显著降低,不但不能使产量进一步提升,反而会降低产量;且在高氮高密处理下稻米中蛋白质含量显著升高[8]。因此,目前水稻种植更多采用高氮低密种植模式。然而,Huang等[9]研究表明,低密度种植条件下,即使增施氮肥也不能得到足够高产的水稻群体,施氮肥过多不仅会降低氮肥利用率,反而导致环境污染及稻米品质降低[10]。综上,可以采取减氮增密的措施,即在减少氮肥施用量的情况下,适当增加种植密度,通过提高群体光能截获率与资源利用率,在确保水稻产量稳定的前提下协同改善品质。因此,本研究通过减氮增密栽培措施,探明氮肥管理与种植密度互作对水稻产量形成及稻米食味品质的协调效应,以期为实现

收稿日期:2025-08-25
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2300405);国家自然科学基金项目(32272204);武汉市科技特派员产学研专项(2023110201030656)
樊琦,E-mail:fanqi@webmail.hzau.edu.cn
通信作者:江洋,E-mail:jiangyang@mail.hzau.edu.cn

稻米食味品质提升、降低氮肥环境污染风险、提高生产经济效益提供理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验地点

试验于2020年和2021年的3—11月在湖北省武汉市华中农业大学校内试验基地（30°48′N，114°37′E）进行。该地位于江汉平原东部，属亚热带季风气候。雨量充沛，日照充足，年平均气温15.8～17.5 ℃，年平均日照时数为1 810～2 100 h，年均降水量1 269 mm，无霜期211～272 d。土壤有机碳9.15 g/kg，全氮1.21 g/kg，全磷0.45 g/kg，全钾3.47 g/kg。

1.2　试验材料

试验供试水稻品种为鄂中5号，是由湖北省农业科学院育成的中籼常规稻品种，主要理化指标达到新国标一级米优质稻谷质量标准。

1.3　试验设计

采用裂区试验设计，在3个种植密度处理：D1（3.7×10^5 蔸/hm^2，株行距9 cm×30 cm）、D2（3.0×10^5 蔸/hm^2，株行距11 cm×30 cm）、D3（2.6×10^5 蔸/hm^2，株行距13 cm×30 cm）条件下，设置8个氮肥处理，分别为T1（0 kg/hm^2）、T2（氮肥50 kg/hm^2，基肥∶蘖肥∶穗肥＝7∶3∶0）、T3（氮肥50 kg/hm^2，基肥∶蘖肥∶穗肥＝5∶3∶2）、T4（氮肥100 kg/hm^2，基肥∶蘖肥∶穗肥＝7∶3∶0）、T5（氮肥100 kg/hm^2，基肥∶蘖肥∶穗肥＝5∶3∶2）、T6（氮肥100 kg/hm^2，基肥∶蘖肥∶穗肥＝4∶2∶4）、T7（氮肥200 kg/hm^2，基肥∶蘖肥∶穗肥＝7∶3∶0）、T8（氮肥200 kg/hm^2，基肥∶蘖肥∶穗肥＝5∶3∶2），共24个处理，3次重复，72个小区，每个小区面积约13.3 m^2。各小区间实行单独打埂、单独灌溉、单独排水，避免水肥串混。各处理磷、钾肥施用量一致，磷肥为50 kg/hm^2，一次性作为底肥施用，钾肥为100 kg/hm^2，按基肥∶拔节肥＝1∶1施用。

1.4　测定项目与方法

1）高效叶面积指数（high-efficiency leaf area index，HLAI）。于水稻齐穗期根据单穴平均茎蘖数，在各小区选取有代表性植株9株，剪下倒1叶、倒2叶和倒3叶，用CI-203叶面积仪（美国CID Bio-Science公司）测定叶面积，并计算高效叶面积指数。

2）冠层辐射截获率。于水稻齐穗期与成熟期选择晴天上午9∶30—11∶30，采用AccuPAR LP-80植物冠层分析仪（美国METER公司）测定冠层辐射截获率（冠层辐射截获率为冠层截获的太阳辐射量占穗顶部太阳辐射总量的百分比）。

3）群体生物量。于水稻成熟期根据平均茎蘖数选取各处理有代表性的植株9株，将茎、叶、穗分开装于标记好的信封内，105 ℃杀青30 min，在80 ℃烘干至恒质量后称取植株干质量。通过单株生物量计算群体生物量。

4）产量及产量构成因素。于水稻成熟期在各小区取1 m^2的穗样用于实际产量测定，晒干后风选，测定质量和含水量，再按标准含水率（13.5%）折算成单位面积产量。各小区调查单位面积有效穗数，各小区选取有代表性的植株15株，考察穗粒数、穗实粒数、结实率和千粒重等产量构成因素。

5）食味品质相关指标。将收获的稻谷晒干后，室内贮藏3个月，待其理化性质稳定后用精米机（河北慧采科技有限公司）进行砻谷，得到的精米用于稻米品质测定。蛋白质含量：取10 g精米通过全自动样品快速研磨仪-96（上海净信）磨成米粉后称取0.1 g过孔径0.15 mm筛，采用蛋白定量（TP）测定试剂盒（南京建成生物工程研究院研制）测定。食味值：采用米饭食味计（STA1A，日本佐竹公司）测定米饭的食味值。

1.5　数据统计与分析

采用Microsoft Excel 2016和SPSS 26.0对数据进行统计分析，各处理之间采用最小显著差异法（LSD）分析差异显著性。利用Origin 2021软件作图。

2　结果与分析

2.1　不同减氮增密处理对水稻群体性状的影响

1）减氮增密对水箱高效叶面积指数（HLAI）的影响。由表1可知，综合2 a数据来看，与200 kg/hm^2（T7、T8）施氮量相比，减氮至100 kg/hm^2（T4、T5、T6）时水稻的HLAI降低16.74%；减氮至50 kg/hm^2（T2、T3）时水稻的HLAI显著降低34.17%。在种植密度上，D1处理的HLAI较D2处理增加3.35%，较D3处理增加5.31%。在氮肥比例上，基肥、分蘖肥、穗肥比例为4∶2∶4（T6）时的HLAI较比例为5∶3∶2（T3、T5、T8）时增加2.36%，较比例为7∶3∶0（T2、T4、T7）时增加19.11%。由此可见，增加密度和氮肥后再减氮至100 kg/hm^2（T6D1）条件下的HLAI增加幅度大于200 kg/hm^2（T8D1）条件下的HLAI增加幅度。

2）减氮增密对水稻群体冠层辐射截获率的影响。由表2可见，在齐穗期和成熟期，与200 kg/hm^2（T7、T8）的施氮量相比，减氮至100 kg/hm^2（T4、T5、

表1 2020和2021年减氮增密处理下水稻高效叶面积指数

Table 1 High-efficiency leaf area index during 2020 and 2021 under nitrogen reduction and densification treatments

种植密度 Planting density	氮肥处理 Nitrogen treatment	高效叶面积指数 HLAI	
		2020	2021
D1	T1	2.25c	2.21c
	T2	2.72bc	2.50c
	T3	3.33bc	2.59c
	T4	3.65ab	3.70b
	T5	3.84ab	3.89b
	T6	3.98ab	4.15ab
	T7	4.36a	4.43ab
	T8	4.56a	5.03a
	平均 Mean	3.59a	3.56a
D2	T1	2.55b	2.49c
	T2	2.60b	2.61c
	T3	3.11ab	2.74c
	T4	3.85ab	3.01bc
	T5	4.21a	3.12bc
	T6	4.47a	3.31bc
	T7	4.48a	3.95ab
	T8	4.55a	4.33a
	平均 Mean	3.72a	3.19a
D3	T1	2.80b	2.33c
	T2	3.26ab	2.82c
	T3	3.28ab	2.88c
	T4	3.28ab	3.10bc
	T5	3.52ab	3.31abc
	T6	3.64ab	3.38abc
	T7	3.68ab	4.04ab
	T8	4.66a	4.22a
	平均 Mean	3.51a	3.26a

注：D1：3.7×10^5 蔸/hm^2，D2：3.0×10^5 蔸/hm^2，D3：2.6×10^5 蔸/hm^2；T1(0 kg/hm^2)、T2(50 kg/hm^2，基肥、分蘖肥、穗肥比为7∶3∶0)、T3(50 kg/hm^2，5∶3∶2)、T4(100 kg/hm^2，7∶3∶0)、T5(100 kg/hm^2，5∶3∶2)、T6(100 kg/hm^2，4∶2∶4)、T7(200 kg/hm^2，7∶3∶0)、T8(200 kg/hm^2，5∶3∶2)。不同小写字母表示相同种植密度处理下不同氮肥处理存在显著差异($P<0.05$)。下同。Note: D1: 3.7×10^5 holes/hm^2, D2: 3.0×10^5 holes/hm^2, D3: 2.6×10^5 holes/hm^2; T1 (0 kg/hm^2); T2 (50 kg/hm^2, the ratio of base fertilizer, tillering fertilizer and panicle fertilizer is 7∶3∶0,); T3 (50 kg/hm^2, the ratio of base fertilizer, tillering fertilizer and panicle fertilizer is 5∶3∶2); T4 (100 kg/hm^2, the ratio of base fertilizer, tillering fertilizer and panicle fertilizer is 7∶3∶0); T5 (100 kg/hm^2, the ratio of base fertilizer, tillering fertilizer and panicle fertilizer is 5∶3∶2); T6 (100 kg/hm^2, the ratio of base fertilizer, tillering fertilizer and panicle fertilizer is 4∶2∶4); T7 (200 kg/hm^2, the ratio of base fertilizer, tillering fertilizer and panicle fertilizer is 7∶3∶0); T8 (200 kg/hm^2, the ratio of base fertilizer, tillering fertilizer and panicle fertilizer is 5∶3∶2). Different lowercase letters indicate significant($P<0.05$)difference between different nitrogen fertilizer treatments under the same planting density . The same as below.

T6)时水稻群体冠层辐射截获率分别降低0.39%和3.07%，差异不显著；而减氮至50 kg/hm^2(T2、T3)时群体冠层辐射截获率显著降低。随着种植密度增加，齐穗期水稻群体冠层辐射截获率显著降低，D1较D3降低1.17%，成熟期的群体冠层辐射截获率差异不显著。在施氮比例上，齐穗期基肥、分蘖肥、穗肥比例为7∶3∶0(T2、T4、T7)时的群体冠层辐射截获率较比例为5∶3∶2(T3、T5、T8)时增加1.87%，较比例为4∶2∶4(T6)时增加1.51%；而成熟期不同施氮比例对冠层辐射截获率的影响呈现相反的趋势。

表2 2020和2021年减氮增密处理下水稻群体冠层辐射截获率

Table 2 Canopy radiation interception rate of rice population during 2020 and 2021 under nitrogen reduction and densification treatments %

种植密度 Planting density	氮肥处理 Nitrogen treatment	冠层辐射截获率 Canopy radiation interception rate			
		2020		2021	
		齐穗期 Full heading stage	成熟期 Maturity stage	齐穗期 Full heading stage	成熟期 Maturity stage
D1	T1	81.9d	93.3d	87.3e	66.8f
	T2	93.2b	94.5cd	93.5c	86.0e
	T3	88.8c	95.4bc	90.7d	87.9d
	T4	97.6a	96.3ab	97.7ab	93.1c
	T5	96.7a	96.8a	96.8ab	94.0c
	T6	96.0a	97.2a	95.4bc	95.0bc
	T7	98.1a	97.6a	98.8a	96.5ab
	T8	97.1a	97.6a	95.8b	97.0a
	Mean	93.7c	96.1a	94.5a	89.3a
D2	T1	82.6e	94.4c	87.5b	78.3e
	T2	95.8c	94.5c	93.9a	83.3d
	T3	93.9d	95.7bc	94.9a	89.0c
	T4	97.3ab	96.2ab	95.0a	89.9c
	T5	96.1bc	96.4ab	94.5a	88.6c
	T6	96.0c	97.2ab	94.4a	92.8b
	T7	98.4a	97.3ab	95.5a	96.2a
	T8	96.1bc	97.4a	93.6a	96.6a
	Mean	94.5b	96.2a	93.6b	89.7
D3	T1	92.2c	94.9d	90.6c	82.7e
	T2	97.9a	95.5cd	96.0ab	87.9c
	T3	93.7b	95.7bcd	94.7b	91.8b
	T4	97.1a	96.0abcd	96.2ab	88.1c
	T5	96.8a	96.2abc	95.5ab	92.1b
	T6	96.6a	96.5abc	92.1c	85.1d
	T7	97.3a	96.7ab	97.0a	94.4a
	T8	96.6a	97.0a	91.8c	96.3a
	Mean	96.1a	96.2a	94.3a	89.6a

3)减氮增密对水稻群体生物量的影响。由表3可知,各处理生物量随密度增加表现出不同的变化趋势,与T1相比施氮可以增加生物量。随着种植密度的增加,水稻茎生物量显著增加,而叶、穗和总生物量显著降低,D1处理的总生物量、穗生物量和叶生物量较D3处理分别降低了2.9%、9.26%和0.88%。在氮肥用量上,与200 kg/hm^{2}施氮量相比,减氮至100 kg/hm^{2}时总生物量降低2.98%;减氮至50 kg/hm^{2}时总生物量显著降低11.98%。在施氮比例上,茎生物量和总生物量随氮肥前移显著增加,叶生物量和穗生物量没有明显变化规律。

2.2　不同减氮增密处理对水稻产量及产量构成因素的影响

由表4可知,在2020年,各处理的有效穗数随密度增加而显著上升,而穗粒数、千粒重和产量表现出下降的趋势,结实率没有显著变化;在施氮量方面,施氮量增加可提高各处理的有效穗数,但结实率降低,穗粒数和千粒重没有明显的变化趋势,产量随施氮量增加表现出先升高后降低的趋势;在施氮比例上,D2处理的结实率和产量随氮肥前移而显著降低,其他处理无明显变化规律。在2021年,随着种植密度的增加各处理的有效穗数表现出与2020年相同的趋势,产量随密度增加而升高,穗粒数和结实率呈现下降趋势,千粒重无显著变化;施氮量的增加对产量及有效穗数、穗粒数有显著的提升作用;在施氮比例上,随着氮肥前移,结实率、千粒重及产量呈现不同程度的下降。从2 a产量数据来看,2020年D2处理与D3处理平均产量无显著差异,

表3　2020和2021年减氮增密处理下水稻群体生物量

Table 3　Biomass of rice population during 2020 and 2021 under nitrogen reduction and densification treatments

t/hm^2

种植密度 Planting density	氮肥处理 Nitrogen treatment	茎生物量 Stem biomass		叶生物量 Leaf biomass		穗生物量 Panicle biomass		总生物量 Total biomass	
		2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021
D1	T1	9.94d	10.50f	2.25d	2.35g	7.73c	5.59e	19.93d	18.45f
	T2	11.47c	12.74d	2.89c	3.04e	7.95bc	7.55b	22.30c	23.32d
	T3	10.53d	11.93e	2.38d	2.81f	8.05bc	6.21d	20.95d	20.95e
	T4	13.33b	13.26c	2.83c	3.52d	9.35a	6.83c	25.52a	23.61d
	T5	13.20b	14.81b	3.40ab	3.75c	9.22a	7.55b	25.82a	26.12c
	T6	11.85c	13.14cd	3.34ab	3.45d	8.61b	7.23b	23.80b	23.81d
	T7	14.17a	15.22ab	3.36ab	4.66b	5.93d	8.55a	23.46b	28.43b
	T8	13.04b	15.67a	3.42a	4.93a	7.30c	8.55a	23.76b	29.15a
	平均 Mean	12.19a	13.41a	2.98b	3.57a	8.02b	7.26b	23.19c	24.23b
D2	T1	8.76e	11.35d	2.08e	2.67e	7.45cd	6.82b	18.30g	20.84e
	T2	12.44c	11.91c	3.19c	2.93d	7.04d	6.86b	22.67e	21.70d
	T3	12.36c	11.73cd	3.50b	2.93d	7.81c	7.87a	23.67d	22.53c
	T4	13.38b	12.85b	3.23c	3.20c	8.54b	6.88b	25.15bc	22.93c
	T5	12.88bc	12.83b	3.61b	3.25c	8.98ab	7.90a	25.47b	23.98b
	T6	10.11d	12.44b	2.54d	2.94d	7.82c	6.32c	20.48f	21.69d
	T7	14.70a	14.94a	3.65ab	4.24a	9.42a	7.54a	27.77a	26.72a
	T8	12.72bc	12.90b	3.82a	3.92b	7.84c	7.76a	24.39cd	24.57b
	平均 Mean	12.17a	12.62c	3.20a	3.26c	8.11b	7.24b	23.49b	23.12c
D3	T1	10.68c	12.05e	2.45 e	3.00de	6.36d	7.71de	19.50f	22.76d
	T2	10.09c	12.42de	2.58e	3.17d	8.46c	7.34e	21.12e	22.93d
	T3	11.63b	12.59de	3.21c	2.97e	8.43c	7.80cd	23.27d	23.36d
	T4	11.40b	13.72b	3.15c	3.60b	8.51c	8.48 b	23.06d	25.80b
	T5	11.66b	12.94cd	2.87d	3.36c	9.98ab	9.33a	24.51c	25.63b
	T6	13.79a	15.31a	3.61b	3.90a	10.33a	9.01a	27.73a	28.22a
	T7	14.04a	13.27bc	3.28c	3.90a	9.45b	7.40e	26.76ab	24.58c
	T8	14.17a	13.46bc	3.97a	3.83a	7.94cd	8.14bc	26.08b	25.42b
	平均 Mean	12.18a	13.22b	3.14a	3.47b	8.68a	8.15a	24.00a	24.83a

表4 2020和2021年减氮增密处理下水稻产量及其构成因素

Table 4 Rice yield and yield components during 2020 and 2021 under nitrogen reduction and densification treatments

种植密度 Planting density	氮肥处理 Nitrogen treatment	有效穗数/(万/hm²) Effective panicles		穗粒数 Grain number per spike		结实率/% Seed setting rate		千粒重/g 1000-seeds weight		产量/(t/hm²) Production	
		2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021
D1	T1	289bc	284ab	143c	118e	64.0bc	67.9c	20.0a	19.1e	5.31c	4.39f
	T2	272c	263bc	171ab	119e	74.4a	75.8a	19.1c	22.9d	6.61b	5.35e
	T3	277c	253c	174ab	137d	75.1a	69.7bc	18.7d	25.0c	6.75b	6.03d
	T4	301ab	280ab	180a	152b	71.1ab	71.4abc	19.4c	25.4bc	7.51a	7.77c
	T5	312ab	288a	176ab	144bcd	71.3ab	72.7abc	20.2a	26.1bc	7.95a	7.89bc
	T6	306ab	280ab	174a	141cd	75.5a	73.6ab	19.3c	27.8a	7.75a	8.12bc
	T7	324a	305a	153bc	150bc	58.3c	68.7bc	19.9ab	26.8ab	5.75c	8.47b
	T8	320a	291a	175ab	163a	60.3c	70.6abc	19.5bc	28.0a	6.57b	9.36a
	平均 Mean	292a	280a	172b	141b	70.4a	71.3c	19.4b	25.1a	6.78b	7.17a
D2	T1	253c	246bc	178b	124d	71.9ab	73.3abc	19.0e	22.4d	6.16c	5.03e
	T2	285a	266ab	180b	125d	65.6bc	70.4c	19.4cde	24.1bcd	6.51bc	5.66d
	T3	259bc	249bc	180b	140c	75.1a	76.9ab	19.2de	23.4cd	6.72b	6.28c
	T4	298a	242c	173b	153b	67.7b	70.4c	22.4a	25.0abc	7.82a	6.49c
	T5	303a	252bc	171b	151b	75.8a	77.9a	19.6c	25.1abc	7.71a	7.41b
	T6	279ab	262abc	183ab	148bc	72.9ab	77.5a	20.2b	25.3abc	7.53a	7.64b
	T7	299a	273a	170b	162a	60.1c	68.1c	19.5cd	26.0ab	5.94c	7.82b
	T8	295a	266ab	200a	167a	66.1bc	71.3bc	20.1b	26.7a	7.84a	8.46a
	平均 Mean	281b	256b	179b	145a	69.9a	73.5b	19.8a	24.7a	7.02a	6.79b
D3	T1	250d	228d	177bc	135c	68.9a	76.1ab	20.7a	23.3b	6.32d	5.49e
	T2	244d	261abc	189ab	111d	76.4a	79.8a	19.1d	25.1ab	6.71bcd	5.80e
	T3	253d	246bcd	191ab	141c	73.8a	78.5a	19.0d	25.7ab	6.78cd	7.00cd
	T4	265cd	242cd	187ab	154b	75.4a	72.3b	19.7bc	24.3ab	7.35abc	6.54d
	T5	297ab	237d	179bc	168a	73.8a	80.4a	19.8bc	23.9ab	7.77a	7.60b
	T6	280bc	248abcd	187ab	153b	70.2a	80.6a	20.1b	24.7ab	7.37ab	7.52bc
	T7	301ab	266a	178bc	169a	68.5a	72.5b	20.1ab	26.0ab	7.40abc	8.43a
	T8	310a	264ab	206a	152b	54.2b	75.3ab	19.4cd	26.1a	6.71d	7.85b
	平均 Mean	275b	249c	183a	148a	71.4a	76.9a	19.8a	24.8a	7.05a	7.02a

2021年D1处理平均产量与D3处理无显著差异，减氮至100 kg/hm²处理的产量较200 kg/hm²处理的产量仅降低0.13%，且在2021年产量构成中，T4D1的有效穗数较T4D2增加15.70%，产量较T4D2增加19.72%，其产量增加水平接近T7D2。可见，增加种植密度可通过增加有效穗数来弥补因减氮造成的减产。

2.3 不同减氮增密处理对稻米蛋白质及食味值的影响

由表5可知，在蛋白质含量方面，种植密度增加会降低籽粒的蛋白质含量，D1的蛋白质含量较D2和D3分别降低4.78%和7.48%；减少施氮量可以降低籽粒的蛋白质含量，施氮量为50 kg/hm²处理的籽粒蛋白质含量较施氮量为100 kg/hm²处理降低20.23%，施氮量为100 kg/hm²处理的籽粒蛋白质含量较施氮量为200 kg/hm²处理降低13.20%；氮肥前移也可降低籽粒蛋白质含量，基肥、分蘖肥、穗肥比例为7∶3∶0时籽粒蛋白质含量较比例为5∶3∶2的处理降低8.29%，较比例为4∶2∶4的处理降低15.21%。综上，减氮增密和氮肥施用前移可有效减少稻米蛋白质含量。

在食味值方面，随着种植密度增加稻米的食味值呈现上升趋势，D1处理的食味值较D2和D3分别增加了0.83%和2.29%；减少氮肥用量可以增加稻米的食味值，施氮量为50 kg/hm²处理的食味值较施氮量为100 kg/hm²处理增加4.71%，施氮量为100 kg/hm²处理的食味值较200 kg/hm²处理增加5.38%；随着氮肥前移食味值呈现上升趋势，基肥、

表 5　2020 和 2021 年 减氮增密处理下稻米蛋白质及食味值

Table 5　Rice protein and eating quality values during 2020 and 2021 under nitrogen reduction and densification treatments

种植密度 Planting density	氮肥处理 Nitrogen treatment	蛋白质含量/% Protein content		食味值 Taste value	
		2020	2021	2020	2021
D1	T1	5.48c	6.10e	71.33b	73.00a
	T2	4.71d	4.37f	72.67a	74 .00a
	T3	6.17c	6.98d	69.67c	69.67b
	T4	7.03b	7.25cd	69.00cd	69.33b
	T5	7.36b	7.73cd	68.33de	68.00c
	T6	9.11a	8.52ab	64.67f	65.33d
	T7	7.58b	7.85bc	67.67e	68.00c
	T8	9.42a	8.93a	62.33g	64.00e
	Mean	7.11c	7.22b	68.21a	68.92a
D2	T1	6.14ef	6.54de	70.00ab	72.00a
	T2	6.43de	6.65de	69.33abc	72.00a
	T3	5.66f	6.14e	71.00a	72.67a
	T4	7.04cd	6.89cd	69.00bc	71.00b
	T5	7.53c	8.22b	67.67c	67.33d
	T6	8.47b	7.42c	66.00d	68.67c
	T7	9.26a	8.31b	64.00e	66.33e
	T8	9.53a	10.12a	59.67f	61.33f
	Mean	7.51b	7.54b	67.08b	68.92a
D3	T1	6.43e	6.89c	63.67d	71.00a
	T2	6.11e	6.82c	70.33a	71.33a
	T3	7.30d	6.90c	68.67b	70.00b
	T4	7.87cd	8.15bc	66.00c	67.67c
	T5	6.51e	7.24bc	69.33ab	69.67b
	T6	8.57bc	8.76ab	65.33c	64.67d
	T7	8.77ab	8.26bc	65.33c	67.00c
	T8	9.52a	9.80a	60.00e	62.00e
	Mean	7.64a	7.85a	66.08c	67.92b

分蘖肥、穗肥比例为 7∶3∶0 时的食味值较比例为 5∶3∶2 的处理增加 3.12%，较比例为 4∶2∶4 的处理增加 4.51%。由此可见，减氮增密并降低水稻穗肥占比可以增加稻米食味值。

2.4　不同减氮增密处理下产量和品质协同分析

综合 2 a 数据可得，从产量表现来看，与 200 kg/hm^2 处理相比，减氮至 100 kg/hm^2 时水稻的高效叶面积指数降低 16.74%，但通过增加种植密度可显著提高有效穗数，使该施氮水平下的产量较 200 kg/hm^2 处理仅降低 0.13%，且部分减氮增密处理产量接近不减氮处理，实现了减氮条件下的产量稳定。从稻米食味品质表现来看，减氮增密可以显著改善稻米品质：与 200 kg/hm^2 处理相比，减氮至 100 kg/hm^2 时稻米蛋白质含量降低 13.20%，食味值提高 5.38%；D1 处理的蛋白质含量较 D3 处理降低 7.48%，食味值提高 2.29%；降低后期穗肥占比也可以降低蛋白质含量并提高食味值。可见，通过增加种植密度提高有效穗数，能够降低减氮导致的穗粒数下降的影响，保障产量稳定；而减氮和降低后期穗肥占比可以协调生育期氮素分配，促进稻米食味品质的改善。综合上述分析并结合图 1 来看，在施氮水平低于 100 kg/hm^2 时，需降低种植密度并适当增加后期氮肥比例来维持水稻产量，施氮水平高于 100 kg/hm^2 时，需增加种植密度以及适当降低后期氮肥比例来实现水稻增产；稻米的食味值随施氮量降低、种植密度增加以及后期氮肥比例降低而增加。在图 1 中产量和食味值交叉重叠的范围内，可以获得较好的产量和较优的食味品质。

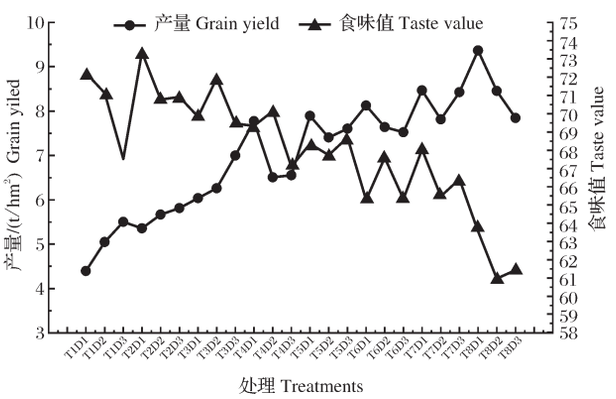


图 1　不同处理下产量和食味值的变化

Fig.1　Changes of yield and taste value under different treatments

3　讨　论

3.1　减氮增密对水稻产量的影响

减施氮肥可以解决水稻生产中过量施氮导致的氮素利用效率低和环境污染等问题[11]，但减氮会降低水稻产量[12]。本研究中减氮处理的水稻产量降低，与前人研究结果[12]一致。为了解决这一问题，Liu 等[13]提出通过增加水稻种植密度来补偿因减施氮肥造成的减产；Hou 等[12]研究表明，增加种植密度有效补偿了杂交稻因减氮导致的产量损失；蒋鹏等[14]研究也表明，合理密植下减量施氮不会造成杂交稻产量下降。本研究与前人研究结果基本一致，在减氮条件下，随着种植密度的增加各处理的有效

穗数增加，虽然穗粒数呈现下降趋势，但增密处理的产量仍保持在较高的水平，这说明了增密通过增加有效穗数来弥补减氮造成的部分产量损失。

由于作物产量的90%以上来源于光合作用，因此，可以通过增强冠层辐射截获率，提高干物质生产能力，从而增加作物产量[15]。有研究提出群体叶面积指数影响着冠层辐射截获率[16]。李敏等[17]研究表明，与单一减氮栽培相比，减氮增密栽培可显著增加叶面积指数，从而使产量显著增加；该研究也指出适当的减氮增密可以弥补氮素不足造成的群体生长量不足的劣势，但却难以实现减氮高产的问题。本研究中，减氮增密处理的高效叶面积指数、冠层辐射截获率和总生物量较不减氮处理相比均呈现下降趋势，与李敏等[17]研究结果不完全一致，出现差异的原因可能是由于减氮条件下增密，使得冠层中下部叶片受到光抑制而早衰，实际参与高效光合作用的叶面积比例降低，从而导致冠层辐射截获率和总生物量降低。

3.2 减氮增密对稻米食味品质的影响

蛋白质作为稻米胚乳的第二大储藏物质是衡量其营养品质的重要指标[18]。Shi等[19]研究表明籽粒中蛋白质含量与稻米的食味品质呈现显著负相关；刘劲松等[20]研究发现，减少20%氮肥用量可以显著降低早稻的蛋白质含量。本研究结果也表明减氮处理显著降低了籽粒蛋白质含量并提高了稻米的食味值。此外，增加种植密度同样有利于食味品质的改善。徐春梅等[21]指出，籽粒中蛋白质含量随种植密度增加而降低；刘子琛等[22]指出，增密减氮栽培显著降低了稻米的总蛋白含量，并得出该栽培模式有利于改善稻米的蒸煮食味品质的结论。本研究中增密处理的蛋白质含量较不增密处理显著降低，食味值提升，与上述研究结果一致。由此可见，适当减少氮肥施用量和增加种植密度，可以使籽粒中蛋白质含量降低，稻米食味值增加。

3.3 氮肥运筹比例对优质稻产量与食味品质的影响

合理的氮肥运筹是影响水稻产量和品质的主要栽培手段。在群体质量方面，叶面积指数(LI)可反映作物群体的光合能力，与群体生物量积累及产量形成密切关联。水稻群体的LAI在齐穗期达到全生育时期的最大值，可以代表群体的生长状况[23]。因此，较高的叶面积指数是水稻获得高产的前提。所以通过提高水稻群体的LAI有助于提高产量。在本研究中，随着后期施氮比例增加，水稻的高效叶面积指数显著增加，这与张君莉等[24]结果一致。然而，在产量形成方面，本研究中后期施氮比例增加并未使产量显著增加，尤其在较高密度下。这可能是因为高密度加剧了群体郁闭，抑制了个体发育，从而影响了穗粒数与结实率。在品质方面，舒傲等[25]发现，随着后期穗肥占比减少，稻米中蛋白质含量显著降低；Zhu等[26]研究发现穗肥比例越高，蛋白质含量增加，虽然营养品质更佳，但食味品质变差；刘秋员等[27]研究也表明，在减氮的同时增加穗肥比例稻米中蛋白质含量显著增加。本研究结果与前人一致，抽穗后高穗肥比例会使氮素向籽粒运输积累，导致蛋白质积累增多，虽然可能改善营养品质，但增加了米饭硬度、降低了食味品质，因此，适度控制穗肥比例是协调产量与品质的关键。

3.4 减氮增密对优质稻产量与品质协同的影响

优质稻生产中，产量与品质的协同提升一直是农业研究的核心目标，氮肥科学管理和合理的种植密度对于提高水稻产量和改善稻米品质非常重要[28]。一般来说，随着施氮量增加，水稻产量和食味品质呈现此消彼长变化，二者难以协调[29]。宁慧峰[30]研究发现，增施氮肥水稻产量升高，但增施氮肥和增加穗肥比例使蛋白质含量显著增加，淀粉含量降低。这可能是因为水稻幼穗形成前期吸收的氮素主要促进穗粒数形成，蛋白质积累少且农学效率高；抽穗后吸氮增产效应低，籽粒含氮量增加[31]。因此，有研究人员认为适当将氮肥前移可以协调蛋白质和淀粉间的平衡关系，从而提升食味品质[32]。本研究结果与此一致，氮肥适当前移有利于提高食味值；然而单一减氮或调整氮肥比例虽能改善品质，但可能面临产量下降风险；采取增密配合氮素调控配合，有利于实现产量与品质的协同提升。为明确不同处理对稻米产量与品质协同的影响，本研究在进行不同处理间比较时，将稻米食味值有所提升且产量之间差异不大、或产量有所提升且食味值之间差异不大的处理，视为相较于对照处理实现了产量与品质的协同。从本研究结果来看，适当减氮后，通过增密优化群体库容弥补减氮导致的个体生长不足，使产量保持在较高水平；且适度减氮增密可减少籽粒氮素冗余积累，氮肥前移避免了抽穗后过量氮素向籽粒转运导致的食味品质降低。这与张凯等[10]的研究中适当减氮增密可实现高产优质的结果一致。

综上，对于优质稻品种，在施氮量从200 kg/hm^2

减少至100 kg/hm^{2}条件下，种植密度增至3.0×10^5～3.7×10^{5}蔸/hm^2，可通过增加有效穗数、优化群体结构，缓解减氮对光能资源利用的负面影响，实现产量稳定；同时，通过降低后期穗肥占比，调整基肥∶分蘖肥∶穗肥比例至(5∶3∶2)～(7∶3∶0)，可显著提升稻米食味值。因此，减氮增密，同时调整水稻后期施氮比例，可实现优质稻产量与食味的协同提升。

参考文献 References

[1] 章秀福，王丹英，方福平，等．中国粮食安全和水稻生产[J]．农业现代化研究，2005，26(2)：85-88.ZHANG X F，WANG D Y，FANG F P，et al.Food safety and rice production in China[J].Research of agricultural modernization，2005，26(2)：85-88 (in Chinese with English abstract).

[2] 胡贤巧，卢林，张卫星，等．食用稻品质评价标准发展及其对稻米品质改善的影响[J]．中国稻米，2022，28(5)：133-138.HU X Q，LU L，ZHANG W X，et al.Development of standard of cooking rice variety quality in China and its influence on rice quality improvement[J].China rice，2022，28(5)：133-138 (in Chinese with English abstract).

[3] 肖国樱，肖友伦，李锦江，等．高效是当前水稻育种的主导目标[J]．中国水稻科学，2019，33(4)：287-292.XIAO G Y，XIAO Y L，LI J J，et al.High efficiency is a dominant target for current rice breeding[J].Chinese journal of rice science，2019，33(4)：287-292 (in Chinese with English abstract).

[4] 李超，陈恺林，刘洋，等．增苗节氮对早稻抛秧群体生物学特性及产量的影响[J]．中国生态农业学报，2014，22(7)：774-781.LI C，CHEN K L，LIU Y，et al.Population biological characteristics and yield of early rice of throwing transplanting under seedling-increase and nitrogen-reduction measures[J].Chinese journal of eco-agriculture，2014，22(7)：774-781 (in Chinese with English abstract).

[5] 魏玉光．不同密度和施肥量对水稻产量及品质的影响[J]．农业科技通讯，2012(12)：62-63.WEI Y G.Effects of different density and fertilization amount on rice yield and quality[J].Bulletin of agricultural science and technology，2012(12)：62-63 (in Chinese).

[6] 匡旭．氮密耦合对水稻产量和品质的影响[D]．哈尔滨：东北农业大学，2020.KUANG X.Effects of nitrogen and planting density coupling on yield and quality of rice[D].Harbin：Northeast Agricultural University，2020 (in Chinese with English abstract).

[7] CHEN W W，WANG Y Y，ZHAO Z C，et al.The effect of planting density on carbon dioxide，methane and nitrous oxide emissions from a cold paddy field in the Sanjiang Plain，Northeast China[J].Agriculture，ecosystems & environment，2013，178：64-70.

[8] 张忠臣，刘海英，高红秀，等．施肥量和穴内插秧密度对寒地粳稻产量和品质性状的影响[J]．作物杂志，2012(3)：99-104.ZHANG Z C，LIU H Y，GAO H X，et al.Effects of seedlings number per hill and fertilizer application on grain yield and quality of Japonica rice in cold region[J].Crops，2012(3)：99-104 (in Chinese with English abstract).

[9] HUANG M，YANG C L，JI Q M，et al.Tillering responses of rice to plant density and nitrogen rate in a subtropical environment of Southern China[J].Field crops research，2013，149：187-192.

[10] 张凯，陈明睿，刘秋员．减氮增密对籼粳杂交稻产量和稻米品质的影响[J]．河南农业科学，2023，52(10)：14-21.ZHANG K，CHEN M R，LIU Q Y.Effects of reduced nitrogen application rate with increased density on yield and quality of indica-Japonica hybrid rice[J].Journal of Henan agricultural sciences，2023，52(10)：14-21 (in Chinese with English abstract).

[11] HUANG L Y，YANG D S，LI X X，et al.Coordination of high grain yield and high nitrogen use efficiency through large sink size and high post-heading source capacity in rice[J].Field crops research，2019，233：49-58.

[12] HOU W F，KHAN M R，ZHANG J L，et al.Nitrogen rate and plant density interaction enhances radiation interception，yield and nitrogen use efficiency of mechanically transplanted rice[J].Agriculture，ecosystems & environment，2019，269：183-192.

[13] LIU K，YANG R，LU J，et al.Radiation use efficiency and source-sink changes of super hybrid rice under shade stress during grain-filling stage[J].Agronomy journal，2019，111(4)：1788-1798.

[14] 蒋鹏，徐富贤，张林，等．高温高湿区增密减氮对杂交稻‘内6优107’产量形成和氮肥利用率的影响[J]．中国生态农业学报(中英文)，2021，29(10)：1679-1691.JIANG P，XU F X，ZHANG L，et al.Effect of increased plant density with reduced nitrogen on yield formation and nitrogen use efficiency of hybrid rice under high temperature and high humidity conditions[J].Chinese journal of eco-agriculture，2021，29(10)：1679-1691 (in Chinese with English abstract).

[15] 陈雨海，余松烈，于振文．小麦生长后期群体光截获量及其分布与产量的关系[J]．作物学报，2003，29(5)：730-734.CHEN Y H，YU S L，YU Z W.Relationship between amount or distribution of PAR interception and grain output of wheat communities[J].Acta agronomica sinica，2003，29(5)：730-734 (in Chinese with English abstract).

[16] MASSIGNAM A M，CHAPMAN S C，HAMMER G L，et al.Physiological determinants of maize and sunflower grain yield as affected by nitrogen supply[J].Field crops research，2009，113(3)：256-267.

[17] 李敏，罗德强，蒋明金，等．控水增密模式对水稻减氮后光合生产特性的影响[J]．贵州农业科学，2020，48(10)：1-4.LI M，LUO D Q，JIANG M J，et al.Effect of water control and densi-

ty increased cultivation mode on photosynthetic characteristics of nitrogen-reduction fertilized rice[J].Guizhou agricultural sciences,2020,48(10):1-4 (in Chinese with English abstract).

[18] LI X X,HUANG L Y,PENG S B,et al.Inter-annual climate variability constrains rice genetic improvement in China [J/OL].Food and energy security,2021,10(4):e299[2025-08-25].https://doi.org/10.1002/fes3.299.

[19] SHI S J,ZHANG G Y,LI L N,et al.Effects of nitrogen fertilizer on the starch structure,protein distribution,and quality of rice[J].ACS food science & technology,2022,2(8):1347-1354.

[20] 刘劲松,伍龙梅,包晓哲,等.短期减施氮肥对华南地区早晚兼用型水稻产量和稻米品质的影响[J].中国农业科学,2025,58(8):1508-1520.LIU J S,WU L M,BAO X Z,et al.Effects of a short-term reduction in nitrogen fertilizer application rates on the grain yield and rice quality of early and late-season dual-use rice in South China[J].Scientia agricultura sinica,2025,58(8):1508-1520 (in Chinese with English abstract).

[21] 徐春梅,王丹英,邵国胜,等.施氮量和栽插密度对超高产水稻中早22产量和品质的影响[J].中国水稻科学,2008,22(5):507-512.XU C M,WANG D Y,SHAO G S,et al.Effects of transplanting density and nitrogen fertilizer rate on yield formation and grain quality of super high yielding rice Zhongzao 22[J].Chinese journal of rice science,2008,22(5):507-512 (in Chinese with English abstract).

[22] 刘子琛,尚李岩,叶佳雨,等.增密减氮栽培对杂交籼稻稻米品质的影响[J].作物杂志,2024(5):194-203.LIU Z C,SHANG L Y,YE J Y,et al.Effects of dense planting with reduced nitrogen input cultivation on the grain quality of hybrid indica rice[J].Crops,2024(5):194-203 (in Chinese with English abstract).

[23] 罗德强,王绍华,江学海,等.精确定量施肥对贵州高原山区杂交籼稻产量与群体质量的影响[J].中国农业科学,2014,47(11):2099-2108.LUO D Q,WANG S H,JIANG X H,et al.Effects of accurate fertilizer model(AF) on yield and population quality of hybrid indica rice cultivars in Guizhou highland area[J].Scientia agricultura sinica,2014,47(11):2099-2108 (in Chinese with English abstract).

[24] 张君莉,王瑶,夏琼梅,等.氮肥运筹对'超优千号'产量和产量构成因素的影响[J].农学学报,2025,15(8):23-29.ZHANG J L,WANG Y,XIA Q M,et al.Effect of nitrogen fertilizer operation on yield and yield components of 'Chaoyou 1000'[J].Journal of agriculture,2025,15(8):23-29 (in Chinese with English abstract).

[25] 舒傲,解嘉鑫,曹威,等.氮肥运筹对优质杂交中稻产量和品质的影响[J].中国水稻科学,2025,39(2):255-263.SHU A,XIE J X,CAO W,et al.Effect of nitrogen management strategies on yield and grain quality of high-quality hybrid mid-season rice[J].Chinese journal of rice science,2025,39(2):255-263 (in Chinese with English abstract).

[26] ZHU D W,ZHANG H C,GUO B W,et al.Effect of nitrogen management on the structure and physicochemical properties of rice starch[J].Journal of agricultural and food chemistry,2016,64(42):8019-8025.

[27] 刘秋员,李猛,高阳光,等.减氮并调整氮肥运筹模式对常规粳稻产量及稻米品质的影响[J].作物杂志,2023(5):131-137.LIU Q Y,LI M,GAO Y G,et al.Effects of different nitrogen fertilization patterns on yield and quality of conventional Japonica rice under reduced nitrogen[J].Crops,2023(5):131-137 (in Chinese).

[28] 江青山,蒋鹏,姜方洪,等.不同密肥组合对优质杂交稻'宜香4245'产量形成及稻米品质的影响[J].西南农业学报,2014,27(5):1989-1994.JIANG Q S,JIANG P,JIANG F H,et al.Effects of different combinations of plant densities and N rates on yield formation and rice quality of high-quality hybrid rice 'Yixiang4245'[J].Southwest China journal of agricultural sciences,2014,27(5):1989-1994 (in Chinese with English abstract).

[29] 覃金华,洪卫源,冯向前,等.基于氮肥运筹下水稻产量与品质协同的农艺生理指标解析[J].作物学报,2025,51(2):485-502.QIN J H,HONG W Y,FENG X Q,et al.Analysis of agronomic and physiological indicators of rice yield and grain quality under nitrogen fertilization management[J].Acta agronomica sinica,2025,51(2):485-502 (in Chinese with English abstract).

[30] 宁慧峰.氮素对稻米品质的影响及其理化基础研究[D].南京:南京农业大学,2011.NING H F.The effect of nitrogen on rice quality and its physicochemical foundation[D].Nanjing:Nanjing Agricultural University,2011 (in Chinese with English abstract).

[31] 赵镛洛,张云江,王继馨,等.日本北海道优质稻米生产、加工及贮藏技术概述[J].中国农学通报,2005,21(4):101-103.ZHAO Y L,ZHANG Y J,WANG J X,et al.The technique on good quality rice production,process and store in Hokkaido[J].chinese agricultural science bulletin,2005,21(4):101-103 (in Chinese with English abstract)).

[32] 潘圣刚,曹凑贵,蔡明历,等.栽插密度及方式对杂交水稻"红莲优6号"产量和品质的影响[J].江西农业大学学报,2006,28(6):845-849.PAN S G,CAO C G,CAI M L,et al.Effects of transplanting density and mode on yield and quality in hybrid rice "Honglianyou 6"[J].Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2006,28(6):845-849 (in Chinese with English abstract).

Effects of reducing nitrogen and increasing planting density on yield and taste quality of rice

FAN Qi[1], LIU Yintao[1], GE Jinxin[1], TANG Beiyun[1], CHEN Jianqiang[1], ZHENG Kan[2], YE Yuanwen[3], CAO Cougui[1], JIANG Yang[1]

1.*College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*;
2.*College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*;
3.*Hubei Yongxiang Agricultural Machinery Equipment Co. Ltd., Xiaogan 432699, China*

Abstract The elite rice variety Ezhong 5 was used to study the coordinated effects of nitrogen fertilizer and planting density on the yield formation and taste quality of rice.8 treatments of nitrogen fertilizer consisted of the nitrogen application level and the ratio of fertilizer for base, tiller, and spikes including T1 (0 kg/hm^2), T2 (50 kg/hm^2, 7∶3∶0), T3 (50 kg/hm^2, 5∶3∶2), T4 (100 kg/hm^2, 7∶3∶0), T5 (100 kg/hm^2, 5∶3∶2), T6 (100 kg/hm^2, 4∶2∶4), T7 (200 kg/hm^2, 7∶3∶0), T8 (200 kg/hm^2, 5∶3∶2) were set up under 3 densities including D1 (3.7×10^5 holes/hm^2), D2 (3.0×10^5 holes/hm^2), and D3 (2.6×10^5 holes/hm^2).A 2-year field experiment was conducted to study the effects of reducing nitrogen and increasing planting density on the population quality, yield and taste quality of rice.The results showed that T4D3 reduced the high-efficiency leaf area index and canopy radiation interception rate and T4D1 optimized the population structure to alleviate the negative effect of reducing nitrogen on the utilization of light energy resources in terms of population quality.Reducing nitrogen decreased the number of grains per spike, but increasing planting density effectively compensated for the yield loss caused by reducing nitrogen via increasing the number of effective spikes (with an increase of 9.14%-16.65%) to achieve stable yield in terms of yield.The number of effective spikes of T4D1 was significantly increased by 15.70% compared with that of T4D2, with an increase in yield of 19.72%.In terms of taste quality, the content of protein in grain was synergistically reduced by reducing nitrogen, increasing planting density, and reducing the proportion of fertilizer for spikes at the late stage of growth and development.The taste value of rice was significantly improved, with an increase ranging from 13.39% to 14.33%.It is indicated that reducing nitrogen and increasing planting density, while reducing the proportion of fertilizer for spikes at the late stage of growth and development (less than 20%) can synergistically improve the yield and taste quality of elite rice.

Keywords rice; nitrogen application level; nitrogen application ratio; planting density; yield; taste quality

（责任编辑：张志钰）