

唐承翰, 陈惠哲, 张玉屏, 等. 群体均匀度同时提升水稻产量和品质的研究进展[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(1): 184-191.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.01.021

群体均匀度同时提升水稻产量和品质的研究进展

唐承翰, 陈惠哲, 张玉屏, 向 镜, 王志刚, 张义凯, 王亚梁
(中国水稻研究所/水稻生物学国家重点实验室, 浙江 杭州 311400)

摘要: 水稻群体均匀度是用来衡量水稻植株个体间生长发育差异对群体生长影响的指标, 反映植株分蘖发生、穗粒形成和籽粒灌浆等方面的一致性。水稻产量和品质能否同时提升与群体生长密切相关, 提高种植均匀度能够有效提高群体均衡性, 进而实现产量和品质同时提高。产量和品质同时提高的矛盾与氮素利用密切相关, 增加氮肥施用量虽然能提高水稻产量, 但也提高了籽粒蛋白质含量, 进而导致米饭食味变差。减少氮素穗肥施用是改善稻米品质的重要措施, 在减少氮素穗肥施用条件下, 高种植均匀度群体的个体发育优势明显, 群体氮素吸收利用效率增加, 达到少施氮肥也能形成大穗、多穗的高产群体的目的。围绕提高群体均匀度的目标, 生产上可以采取培育健壮秧苗, 合理分布种植空间, 定量施用氮肥, 培育花后高光效群体等方面的栽培措施更有效地实现水稻产量与品质同时提升。

关键词: 水稻; 群体均匀度; 产量; 品质; 栽培措施

中图分类号: S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)01-0184-08

Research progress on coordinated improvement of rice yield and quality by population uniformity

TANG Chenghan, CHEN Huizhe, ZHANG Yuping, XIANG Jing, WANG Zhigang, ZHANG Yikai, WANG Yaliang

(China National Rice Research Institute/State Key Laboratory of Rice Biology, Hangzhou 311400, China)

Abstract: Rice population uniformity is an index used to measure the effect of growth and development differences between individual rice plants on population growth, reflecting the consistency of tillering, panicle formation and grain filling. The coordination of rice yield and quality is closely related to rice population growth, and improving planting uniformity can effectively improve uniformity of rice population, so as to achieve the equal increase in rice yield and quality. The synergistic contradiction between yield and quality is closely related to nitrogen utilization. Although increasing nitrogen application can increase rice yield, it increases grain protein content, which leads to poor rice taste quality. Reducing application of nitrogen at panicle initiation stage is an important measure to improve rice quality. Under conditions of nitrogen application reduction, the population with high planting uniformity has obvious advantages in individual development, then the

nitrogen uptake and utilization efficiency of the population is increased, so that the coordinated increase of the panicle and grains in high yield population can be formed even with less nitrogen application. Focusing on improving the population uniformity, cultivation measures such as cultivating robust seedlings with reasonable planting spatial distribution, quantitative nitrogen application, and cultivating high photosynthetic efficiency populations should be taken in production to achieve an effective improvement in rice yield and quality.

收稿日期: 2024-04-07

基金项目: 浙江省农业重大技术协同推广计划项目(2023ZDXT01); 国家重点研发计划项目(2023YFD2301404、2023YFD2301304); 2022年度拱墅区“大运英才”创新创业项目; 国家水稻产业技术体系项目(CARS-01-02); 云南省科技厅科技计划项目(202402AE090007-1)

作者简介: 唐承翰(1999-), 男, 广西玉林人, 硕士研究生, 研究方向为水稻机械化栽培。(E-mail) tangchenghancaas@163.com

通讯作者: 王亚梁, (E-mail) wangyaliang@caas.cn

Key words: rice; population uniformity; yield; quality; cultivation measures

水稻是中国人民的主要口粮,增加稻米产量是永恒的主题,在氮肥施用量普遍偏高的情况下,中国水稻的单产水平仍远低于品种的产量潜力上限且产出的稻米品质较差^[1]。随着社会经济的发展,人民对稻米的需求从“吃得饱”向“吃得好”转变,水稻生产目标从单一追求产量提升向产量和品质同步提升转变^[2]。目前,水稻育种方向由单一追求高产向高产优质转变,中国不同稻区均选育出了优质稻品种^[3]。虽然优质稻品种的产量潜力要低于高产品种,但其区试产量仍然高于当前水稻的面上单产,说明优质稻实际单产仍存在较大的提升空间。长期以来,栽培措施发展的最重要目标是高产,为此根据不同类型水稻品种配套相应的高产栽培技术。氮肥调控显著影响着分蘖发生和穗粒发育,但由于传统高产群体的施肥量高导致稻米品质不佳^[4],传统的高产栽培措施并不适用于优质稻的生产。

随着社会经济的发展,从事水稻生产的劳动力逐渐减少,轻简化种植技术逐步发展,但目前粗放的种植方式在很大程度上限制了品种产量潜力的发挥^[5]。特别是在氮肥减量施用的前提下,种植均匀度低的群体产量提升难。水稻群体均匀度是指用来衡量水稻植株个体间生长发育差异从而对群体生长产生影响的指标,它反映了植株分蘖发生、穗粒形成和籽粒灌浆等方面的一致性。高均匀度的水稻群体主要表现为个体生长发育的一致性和空间布局的合理性,群体越均匀水稻对自然资源的分配、利用越充分。研究发现,通过提高群体均匀度能够促进产量进一步提升^[6],同时对改善稻米品质也起到一定的作用。以提高群体均匀度为核心的栽培措施,为优质稻生产量质同升提供了一条新的路径。

本文综述了水稻产量和品质协同提升的矛盾,阐述了种植均匀度对产量和品质造成的影响,并提出了水稻量质同升栽培的技术路径,以期水稻量质同升栽培技术的转变提供依据。

1 水稻产量和品质协同提升的矛盾

1.1 水稻高产群体的穗粒协同

水稻品种的更新演替对产量提升起到了至关重要的作用,水稻经历几次品种改良,提升了品种的产量潜力。20世纪50年代高秆品种改良成矮秆品种

后,密植显著提高了有效穗数从而促进了中国水稻总产量的提升。20世纪70年代以来,随着杂交稻的推广和应用,产量提升依赖于多分蘖和大穗的优势,稀播少本的杂交稻种植方式得到了大面积推广^[7]。现阶段,同一品种的产量变化主要取决于有效穗粒和每穗粒数,单季稻高产以攻取大穗为主,而双季稻高产以攻取有效穗数为主^[8]。优化栽培措施,通过有效穗数和每穗粒数的协同提高达到高产水平,稳健的群体在高有效穗数的前提下进一步提高每穗粒数就能够争取更高产。

水稻群体的有效穗数取决于种植基本苗数和分蘖速率,受到秧苗素质、种植方式、种植密度以及土壤养分的影响,秧苗素质强的群体返青发棵快^[9]。在水稻产量形成过程中,水分调控在抑制无效分蘖上发挥了重要的作用,对群体的肥水调控也影响着每穗粒数^[10]。矮秆品种一般采用重施基肥的方式以期达到比较高的有效穗数,而杂交稻品种不仅要通过基肥施用促进返青发棵,还要在穗分化期平衡氮素穗肥促进穗发育^[11]。自20世纪90年代大穗型超级稻品种出现以来,氮素施用偏向于后至水稻生殖生长期,以促进大穗形成^[12]。

1.2 稻米品质的影响因素

稻米品质主要由水稻品种自身遗传特性所决定,但栽培环境因素的变化对稻米品质也具有较大的影响^[13]。稻米外观品质垩白度受到气温、光照以及植株自身营养状况的影响,灌浆过快或过慢均会导致垩白度的增加^[14-15],垩白度高的稻米蒸煮过程中垩白粒更易断裂,米饭外观和综合口感均较差。水稻的食味取决于籽粒中直链淀粉含量和蛋白质含量,直链淀粉含量受品种遗传特性控制,受环境因素影响相对较小,而蛋白质含量受环境因素影响较大^[16]。

由前期分期播种试验结果(表1)可知,同一品种整精米率、垩白性状和蛋白质含量受环境的影响最大。籽粒充实度在很大程度上影响了水稻出米率,且长粒型稻谷的出米率相对较低^[17]。水稻种植过程中,同一品种食味的变化,主要受到蛋白质含量的影响^[18],蛋白质含量越高食味值越差(图1)。对籽粒淀粉含量和蛋白质含量而言,两者之间存在一定协作性,这和籽粒充实过程中糖代谢相关途径介导了直链淀粉和蛋白质形成有关,王军可等^[19]的研

究结果表明,高温下淀粉水解增加,α-酮戊二酸的 积累增加,进而增加了蛋白质含量。

表 1 不同播期条件下的稻米品质

Table 1 Rice quality under different sowing date conditions

品种	播期	糙米率 (%)	精米率 (%)	整精米率 (%)	粒长 (mm)	长宽比	垩白粒率 (%)	垩白度	碱消值	胶稠度 (mm)	直链淀粉含量 (%)	蛋白质含量 (%)
黄华占	4 月 10 日	81.4	71.7	17.3	6.6	3.3	3.0	2.4	5.9	78.7	16.4	8.5
	4 月 20 日	82.1	72.6	32.1	6.4	3.4	1.7	0.3	5.9	84.0	15.9	8.8
	4 月 30 日	81.9	72.5	30.4	6.4	3.4	4.3	0.7	6.0	82.7	16.4	8.3
	5 月 10 日	82.0	72.8	34.0	6.5	3.6	3.0	0.6	6.0	77.3	16.0	9.0
	5 月 20 日	81.5	72.2	53.2	6.5	3.4	3.3	0.5	6.0	72.7	16.0	9.3
	5 月 30 日	82.2	72.7	47.5	6.6	3.5	3.3	0.6	6.8	70.7	16.1	10.8
	6 月 9 日	82.1	72.8	59.4	6.8	3.6	4.0	0.6	7.0	65.3	16.1	10.6
	6 月 19 日	81.1	71.5	49.9	6.7	3.5	5.0	0.9	7.0	53.7	16.3	11.3
	6 月 29 日	80.6	71.2	39.6	6.8	3.5	3.7	0.5	7.0	54.7	16.2	10.8
	7 月 9 日	78.1	68.8	50.9	6.6	3.5	9.3	1.0	7.0	53.3	16.8	11.1
秀水 134	4 月 10 日	78.3	69.1	59.0	4.6	1.9	25.7	9.4	6.2	70.3	14.5	8.1
	4 月 20 日	80.1	70.7	59.1	4.5	1.8	20.7	3.4	6.2	72.3	14.3	7.8
	4 月 30 日	81.0	71.8	65.3	4.6	1.8	12.7	2.4	6.5	74.3	14.1	7.6
	5 月 10 日	80.1	70.8	65.9	4.8	1.8	8.3	1.0	7.0	76.3	14.0	8.7
	5 月 20 日	81.3	72.1	67.9	4.8	1.7	13.0	2.6	6.9	75.7	14.2	8.0
	5 月 30 日	82.7	73.2	57.3	4.8	1.8	24.3	4.8	6.9	62.7	14.3	9.2
	6 月 9 日	83.6	73.8	70.5	4.9	1.8	34.3	6.0	7.0	61.3	15.1	9.1
	6 月 19 日	83.5	73.8	69.0	4.9	1.9	53.0	10.6	6.9	57.0	15.1	9.7
	6 月 29 日	82.9	73.4	69.2	4.8	1.8	40.3	8.4	7.0	58.0	15.7	9.9
	7 月 9 日	83.6	74.0	70.9	4.8	1.8	28.3	5.1	7.0	64.0	16.5	10.3

数据来自 2017 年分期播种试验;地点:富阳;施用纯氮量:180 kg/hm²。

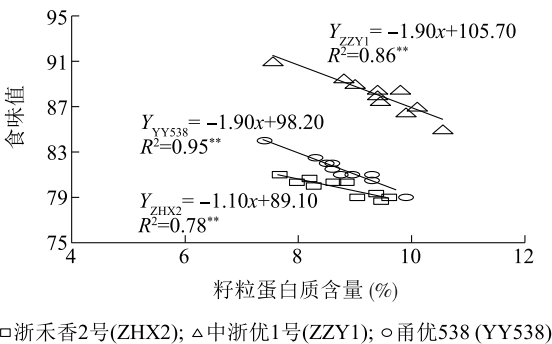


图 1 籽粒蛋白质含量与米饭食味值的关系
Fig.1 Relationship between grain protein content and rice taste value

由于品种特性和各地食味习惯不一,一般而言优质粳稻蛋白质含量为6%~7%,优质籼稻蛋白质含量为8%~9%^[16]。目前以中国各地水稻施用的氮肥量而言,产出的稻米蛋白质含量普遍偏高。因此,优质稻米生产种植的主要目标是降低籽粒蛋白质含量,通过优化籽粒灌浆充实过程,起到减少籽粒

淀粉水解而避免蛋白质含量增加的作用^[20]。同时,均匀的灌浆过程有利于降低籽粒垩白度,提高籽粒充实度,促进出米率和外观品质的提升^[21]。

1.3 水稻产量和品质同时提高(量质同升)存在的矛盾

籽粒充实的物质积累来自茎鞘和叶片,丰产健壮的个体茎鞘碳、氮积累多,而氮素是维持高光效最重要的营养元素。因此,个体丰富的氮“源”和流畅的氮“流”导致籽粒灌浆过程中积累较多氮素,进而导致蛋白质含量增加,因此产量和品质难以同时提高^[22]。量质同升的途径在于水稻品种在协调有效穗数和每穗粒数达到高产水平的同时,要求籽粒蛋白质含量不上升,或低于品种遗传特性^[23-24]。高产大穗的群体籽粒蛋白质积累多,出现高产不优质的现象,而优质稻米蛋白质积累相对较少,植株氮素积累相对少,整体干物质积累不佳,出现优质不高产的现象,这也是目前多数优质稻品种产量表现不佳的原因^[25]。

水稻群体后期灌浆充实显著影响产量的形成,

氮肥做穗肥对大穗形成具有重要作用。随着氮肥施用总量以及氮素穗肥施用量的增加,有效穗数和每穗粒数显著增加,然而籽粒蛋白质含量也随着穗肥的增施显著增加,导致水稻食味变差^[26]。为了减少氮肥施用,一些地区开始采用氮肥前移的一次性施肥方式,但穗分化始期不施氮肥容易导致水稻每穗粒数不足,同时不施氮素穗肥导致植株后期早衰,籽粒充实性变差,引起甬优 538 等大穗型籼粳杂交稻

品种的千粒重降低(表 2)。在一定有效穗数的条件下,产量和品质同时提升出现矛盾的原因在于穗肥的不合理施用,如表 2 所示,在氮肥施用总量相同的前提下,氮肥前移明显降低了籽粒中的蛋白质含量,然而穗分化期不施氮肥减少了每穗粒数进而降低了稻谷产量。过量的氮素穗肥供应超过了穗发育和后期籽粒充实过程中的氮素需求,导致籽粒中氮素吸收过多,同时也对籽粒碳水化合物积累不利。

表 2 氮肥施用量对产量结构及籽粒蛋白质含量的影响

Table 2 Effects of nitrogen fertilizer application rate on yield components and grain protein content

品种	氮素基 肥 (kg/hm ²)	氮素穗肥 (kg/hm ²)	氮肥施用 总量 (kg/hm ²)	有效穗数 (穗)	每穗粒数 (粒)	结实率 (%)	千粒重 (g)	稻谷产量 (t/hm ²)	糙米率 (%)	籽粒蛋白 质含量 (%)
中浙优 1 号	0	0	0	23.0	159.0	89.1	19.8	5.5	49.9	7.6
	60	0	60	23.3	148.4	92.7	22.1	5.7	54.0	8.8
	60	30	90	22.3	157.5	91.7	21.9	6.5	53.9	9.4
	60	60	120	25.0	151.2	91.6	21.7	6.6	54.1	9.5
	120	0	120	24.7	132.7	92.8	22.0	5.8	53.2	9.0
	120	30	150	27.0	140.4	92.3	22.0	6.8	55.7	9.8
	120	60	180	26.7	141.5	90.5	21.8	7.0	56.1	10.1
	180	0	180	27.0	139.4	87.4	22.2	6.0	54.6	9.4
	180	30	210	27.3	142.3	91.6	22.2	7.0	51.5	9.9
	180	60	240	23.0	154.7	93.2	21.9	6.9	52.1	10.6
甬优 538	0	0	0	16.0	283.6	84.0	22.0	6.3	56.4	7.4
	60	0	60	15.0	278.0	83.3	22.5	6.5	58.8	8.6
	60	30	90	17.3	259.7	86.3	24.2	7.3	55.4	8.6
	60	60	120	18.7	266.9	81.8	26.5	7.7	58.4	8.3
	120	0	120	16.3	276.1	85.5	22.9	6.7	63.9	8.5
	120	30	150	18.0	267.5	83.1	23.8	7.4	63.3	9.3
	120	60	180	18.3	266.0	82.9	27.8	7.7	63.0	9.3
	180	0	180	19.3	248.6	85.5	24.4	7.7	62.1	9.0
	180	30	210	20.3	256.2	80.5	26.2	8.0	66.2	9.9
	180	60	240	18.7	272.5	81.9	26.6	8.3	64.0	8.8
浙禾香 2 号	0	0	0	22.7	87.5	94.6	23.1	4.8	51.3	7.7
	60	0	60	25.3	95.0	94.5	25.8	5.5	60.3	8.2
	60	30	90	26.3	120.3	95.2	26.5	6.6	60.1	8.6
	60	60	120	25.7	112.6	94.9	25.8	6.6	56.3	9.4
	120	0	120	31.7	103.7	94.0	26.9	6.7	63.2	8.0
	120	30	150	30.7	114.4	95.1	26.0	6.9	55.6	8.9
	120	60	180	30.7	114.4	95.0	25.9	7.1	54.5	9.5
	180	0	180	33.7	84.5	95.1	26.0	6.6	61.1	8.3
	180	30	210	33.7	108.9	94.8	25.8	7.1	64.0	9.0
	180	60	240	34.0	111.0	91.8	26.2	7.1	60.6	9.6

数据来自 2019 年单季稻不同氮肥处理试验;中浙优 1 号和甬优 538 试验地点:金华;浙禾香 2 号试验地点:嘉兴。

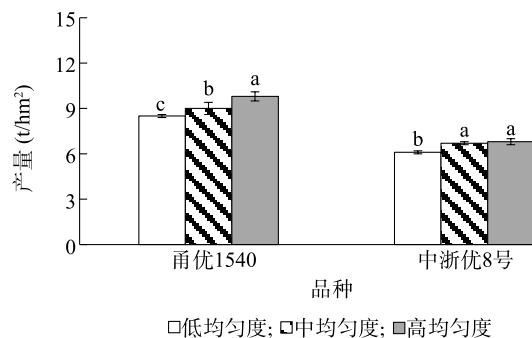
2 群体均匀度对水稻产量和品质的影响

2.1 群体均匀度与水稻产量的关系

群体均匀度与作物产量密切相关,以往关于均匀度的研究主要集中在小麦、玉米、棉花等作物上。薛盈文^[27]的研究结果表明,群体均匀度高,小麦个体生产性能差异小,个体发育优势强,群体产量高。李福建^[28]的研究结果表明,小麦早期幼苗的均匀度与单穗产量和籽粒产量呈正相关,条播较撒播提高了幼苗的均匀度从而使群体产量提高。于慧玲等^[29]的研究结果也表明,立体匀播条件下能提高小麦叶面积指数,促进干物质积累从而使产量提高。张丽华等^[30]的研究结果表明,群体均匀度提高能够促进玉米有效利用自然资源,抑制杂草生长,改善玉米生长的生态环境,个体分布均匀的群体具有更高的产量。黄血训等^[31]的研究结果表明,群体均匀度提高是促进棉花产量和品质提升的关键因素。

在不同的水稻种植方式中,手插秧的群体均匀度要好于传统的机插秧种植模式,原因是传统的机插秧方式下,秧盘所育秧苗素质低、秧苗分布不均匀、出苗不整齐,导致机插后每穴苗数变异系数增大,使得群体均匀度低。当前,叠盘暗出苗以及精量播种等方式的出现提高了秧苗素质和秧苗群体的均匀度^[32],提高了水稻机械化种植的均匀度。杜永林等^[33]对江苏高产示范方进行分析后发现,有效穗数均匀度、每穗粒数均匀度和产量呈正相关,高产田块的二次枝梗数整齐度、单穴穗数整齐度、每穗粒数整齐度高于中低产田块。汪建军等^[34]的研究结果表明,适当增加早稻播种量能够提高群体均匀度进而提高水稻产量。笔者前期的研究结果表明,同等种植规格下,群体的种植均匀度越高,群体的产量水平越高(图 2)。高均匀度群体通过增加叶面积指数和氮素吸收能力,促进了群体干物质积累,从而通过更多的高峰苗数使群体有效穗数增加,最终群体以更多的有效穗数获得高产^[35]。同时高均匀度群体的植株生长均匀、个体间竞争小、水稻群体通风透光性好。对生长不均匀的群体而言,每穴苗数差异大,在每穴苗数多的高密度区块,个体间竞争激烈,降低了单株分蘖能力,而低密度区块分蘖发生不足以补齐高密度区块的损失,进而导致群体有效穗数减少,限制了品种产量潜力的发挥^[6,36]。

水稻的源库关系协调是其后期灌浆充实的关键,高均匀度群体空间布局更合理,且个体发育优势促进了群体灌浆结实期源库关系的协调,群体表现出更充分的灌浆过程,从而使其产量提升^[37]。



数据来自 2022 年单季稻不同种植均匀度试验;地点:富阳;施用纯氮量:180 kg/hm²;种植密度:1 hm²1.85×10⁵穴。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 不同均匀度群体的水稻产量水平

Fig.2 Rice yield levels under different population uniformity levels

2.2 群体均匀度与稻米品质的关系

对同一品种来说,个体间稻米的成分及品质存在差异,个体生长差异影响稻米品质^[38]。低位分蘖产出稻米的品质要优于高位分蘖^[39],稻穗强势粒的稻米品质要优于弱势粒的稻米品质^[40]。

前期通过精准播种育秧有效构建了高机插种植均匀度的群体,发现通过提高机插群体的均匀度,可以使群体稻米的直链淀粉含量、垩白粒率有所降低,但也使得蛋白质含量有所提高,说明提高群体均匀度能够在一定程度上改善稻米品质(表 3)。前人研究结果表明,籽粒直链淀粉含量随着种植密度的升高呈先降低后升高的趋势^[41],后期温光受性好的群体支链淀粉酶活性要高于直链淀粉酶活性^[42]。高均匀度群体分蘖发生能力和空间布局的整齐性都高于低均匀度群体,所以在基本苗数相同时,高均匀度群体表现为更高的群体密度且良好的后期温光受性,从而使产出的籽粒有更低的直链淀粉含量^[43-44]。而高均匀度群体籽粒蛋白质含量的提高,说明植株在生育后期氮素吸收能力较强,可通过适当的氮肥前移,让群体在生育前期有更多有效分蘖发生的同时,在穗发育期减少对氮素的吸收,从而达到降低籽粒蛋白质含量并维持群体高产性状的效应,最终实现群体的产量和品质的协同提升。

表 3 不同机插播种方式对群体均匀度和稻米品质的影响

Table 3 Effects of different seed sowing methods for machine transplanting on rice population uniformity and rice quality

品种	机插播种方式	群体均匀度 (%)	糙米率 (%)	精米率 (%)	整精米率 (%)	垩白粒率 (%)	垩白度 (%)	碱消值	胶稠度 (mm)	直链淀粉含量 (%)	蛋白质含量 (%)
壮优 831	撒播	51.2±4.5	80.4±0.6	69.8±1.3	54.4±1.1	2.0±0.7	0.1±0.2	4.1±0.1	83.3±0.6	15.4±0.4 *	7.5±0.3
	条播	71.3±6.7 *	80.6±0.4	71.3±0.2 *	55.3±0.6	1.0±0.3	0.1±0.1	4.2±0.1	84.0±2.0	14.8±0.1	8.1±0.2 *
隆香优 130	撒播	55.7±3.5	81.3±0.5	71.1±1.2	64.0±0.5	8.7±1.2 *	0.7±0.2	4.1±0.1	85.3±0.6	13.3±0.3 *	8.2±0.3
	条播	72.5±5.1 *	81.4±0.1	71.5±0.2	64.7±3.2	6.7±0.6	0.5±0.2	4.1±0.2	83.3±1.2 *	12.6±0.3	8.6±0.4 *

数据来自 2021 年连作晚稻机插不同播种方式试验;试验地点:上高县;施用纯氮量:180 kg/hm²。* 表示条播与撒播处理之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

3 群体均匀度同时提高水稻产量和品质的栽培途径及机制

研究结果已表明通过提高种植均匀度能够有效增加产量并改善稻米品质,但更高产量的实现还需进一步增加水稻群体有效穗数和每穗粒数,并保障籽粒灌浆顺畅,同时降低籽粒蛋白质含量和直链淀粉含量。实现以上目标的主要栽培途径有三条:一是培育健壮秧苗,合理分布种植空间,促进返青发棵;二是定量施用氮肥,防止氮素供应过剩;三是培育高光效群体,促进灌浆结实期碳水化合物的积累。

3.1 培育健壮秧苗,合理分布种植空间,促进返青发棵

高产的基本路径是要在足够的有效穗数的前提下,进一步提高每穗粒数^[45]。在保障基本种植密度的条件下,提高每穴苗数均匀度能够显著提高有效穗数。当前,机械化种植逐步替代了人工种植,因此培育机插秧模式下水稻单穴内健壮个体的关键在于秧苗素质提高和农机农艺融合的实现,实现机械化种植群体的合理空间分布、早生快发和均衡生长。针对水稻机插种植,通过秧苗定向、定位、定量条播,并结合叠盘出苗,实现低播量秧苗的均匀健壮生长;通过配套定向、定量的机插技术,实现秧苗的均匀机插,显著提高机插均匀度。

低位分蘖的有效穗能够有效促进籽粒灌浆结实,低位分蘖快发要求秧苗种植后能够快速返青发棵、出分蘖^[46]。当前,机插育秧由于秧盘播种密度高,分蘖发生受限制,低位分蘖蘖芽发生受到限制。通过降低机插秧盘的播种量和优化种子的空间布局,培育出带蘖壮秧,同时减少机械化种植的损伤,有望促进机插秧苗低位分蘖的发生。生产上,钵苗摆栽和有序抛秧的效果较好,但生产效率降低,限制了它的推广^[47-48]。直播稻低位分蘖发生多,但是由

于扎根不深,影响了后期分蘖和大穗生长,对产量形成不利^[49]。

3.2 定量施用氮肥,防止氮素供应过剩

基肥和群体营养生长密切相关,基肥不足植株分蘖发生慢、茎秆细弱,而基肥施用过多又会导致无效分蘖发生过多^[50],影响群体的生长发育,同时营养生长过旺导致群体透风、透气性差,病虫害多发,不利于水稻病虫害的防控。在双季稻生产中,为了进一步减少氮肥的施用,采用了增密减氮的栽培方式^[51],但目前同时提高水稻产量和品质的机制还没有完全被解析。

氮素穗肥的施用对同时提高水稻产量和品质至关重要,研究发现籽粒蛋白质来源在品种间存在显著差异,籼粳杂交稻籽粒灌浆过程中籽粒氮素来源主要依赖于穗肥的施用,而普通籼型杂交稻籽粒氮素主要来源于茎鞘和叶片的转运^[52]。在优质稻生产中,穗肥施用一方面要施足量以确保水稻有适宜的每穗粒数,另一方面要防止施用过多导致籽粒蛋白质含量过高而影响其食用品质。

针对各类型水稻品种,为了同时提高水稻的产量和品质,可以利用栽培措施进行理想群体株型的设计,在快速返青发棵和均匀种植的基础上,针对目标株型和土壤肥力状况,控制基肥的施用,根据籽粒蛋白质积累的需求,控制穗肥施用。在完善种植群体均匀性的基础上,采用变量施肥的方式,根据植株的营养状态,实现肥料施用的精确控制,最大化实现氮肥促进产量提高的同时,降低籽粒蛋白质含量,从而实现优质稻品种的产量与品质同时提升。

3.3 培育高光效群体,促进灌浆结实期碳水化合物的积累

目前,高光效群体叶片叶绿素含量高,为了防止早衰,通常会增施氮素穗肥,但增施氮素穗肥会增加蛋白质含量^[53]。高光效群体的培育和群体均匀度

密切相关,群体均匀度好的群体个体株型健壮且布局合理,使后期群体具有更高的叶面积指数的同时,具有更优的光温通风特性,能减少病虫害的发生。因此提高群体均匀度,有望在少施氮素穗肥的基础上,优化群体结构,提高群体花后光合效率,促进灌浆结实期碳水化合物的积累。为进一步延长群体花后光合时间,目前可以通过部分外源调节剂的施用达到较好的抑制叶片早衰效果。研究发现,油菜素内酯外源施用能够有效促进碳水化合物从叶片向茎鞘的转运,对增加籽粒碳水化合物积累有比较好的效果^[54]。

4 研究展望

随着人民生活水平的提高,中国对优质稻米的需求增加。优质稻品种选育不断实现突破,但优质稻生产存在品质潜力发挥不足、品质与产量提升协同度低的问题。在当前高产栽培技术发展的基础上,以提高群体均匀度为核心,在种植和肥水管理 2 个环节提高植株生长均衡性进而提升水稻单产。结合塑造优质稻生产的株型和后期高光效均匀群体的理论基础,利用群体营养快速诊断技术,通过定量氮素施用控制籽粒蛋白质含量,从而实现水稻产量和品质的同时提升。

参考文献:

- [1] FEI L W, PAN Y H, MA H L, et al. Optimal organic-inorganic fertilization increases rice yield through source-sink balance during grain filling[J]. *Field Crops Research*, 2024, 308: 109285.
- [2] 朱大伟,章林平,陈铭学,等. 中国优质稻品种品质及食味感官评分值的特征[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(7): 1271-1283.
- [3] 刘 信,刘春青,王玉玺,等. 我国优质稻品牌化发展现状及建议[J]. *中国稻米*, 2022, 28(2): 12-15.
- [4] 汪本福,余振渊,程建平,等. 氮素对水稻产量和品质形成的影响研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2022, 41(1): 76-83.
- [5] 张 桥,向开宏,孙永健,等. 不同育秧方式下播种量和插秧机具对水稻产量及群体质量的影响[J]. *核农学报*, 2020, 34(11): 2595-2606.
- [6] 王亚梁,朱德峰,陈若霞,等. 杂交稻低播量精准条播育秧机具提高群体均匀度和产量的效应分析[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(4): 666-679.
- [7] 林 海,李婷婷,童汉华,等. 我国水稻主栽品种演替分析[J]. *中国水稻科学*, 2018, 32(6): 565-571.
- [8] 朱德峰,张玉屏,陈惠哲,等. 中国水稻栽培技术发展展望[J]. *中国稻米*, 2021, 27(4): 45-49.
- [9] 安之冬,管 浩,朱远芑,等. 育秧基质配施腐植酸对水稻秧苗

- 素质及产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022, (6): 173-181.
- [10] 徐 冉,杨文叶,朱均林,等. 不同灌溉模式对粳籼杂交稻甬优 1540 产量与水分利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2024, 50(2): 425-439.
- [11] 刘 昆,黄 健,周沈琪,等. 穗肥施氮量对不同穗型超级稻品种产量的影响及其机制[J]. *作物学报*, 2022, 48(8): 2028-2040.
- [12] 张洪程,吴桂成,吴文革,等. 水稻“精苗稳前、控蘖优中、大穗强后”超高产定量栽培模式[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(13): 2645-2660.
- [13] 季 平,柳 浩,叶世河,等. 不同生殖生长阶段高温胁迫对水稻产量和品质的影响[J]. *核农学报*, 2023, 37(9): 1872-1883.
- [14] XIE Q, XU J K, HUANG K, et al. Dynamic formation and transcriptional regulation mediated by phytohormones during chalkiness formation in rice[J]. *BMC Plant Biology*, 2021, 21(1): 308.
- [15] 丛舒敏,余恩唯,蔡 沁,等. 结实期温光胁迫对水稻产量和品质及淀粉理化特性的影响研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(10): 20-29.
- [16] 朱大伟,郑 欣,余 静,等. 中国高食味北方粳稻与南方半糯粳稻品种理化特性及食味品质的差异分析[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(3): 469-483.
- [17] 徐富贤,熊 洪,张 林,等. 杂交中稻稻谷整精米率与籽粒及穗部性状的关系研究[J]. *中国稻米*, 2010, 16(2): 39-42.
- [18] 曲红岩,张 欣,施利利,等. 水稻食味品质主要影响因子分析[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(6): 172-175.
- [19] 王军可,王亚梁,陈惠哲,等. 灌浆初期高温影响水稻籽粒碳氮代谢的机理[J]. *中国农业气象*, 2020, 41(12): 774-784.
- [20] 王丹英,徐春梅,褚 光,等. 水稻高产与优质栽培的冲突与协调[J]. *中国稻米*, 2021, 27(4): 58-62.
- [21] 蒋 岩,赵 灿,陈 越,等. 氮素穗肥对粳米淀粉特性和结构的影响及其与食用特征的关系[J]. *作物学报*, 2023, 49(1): 200-210.
- [22] 张继宁,王乐惠,孙会峰,等. 稻田施氮量对水稻产量和稻米品质的影响[J]. *土壤通报*, 2024, 55(1): 130-139.
- [23] 徐云姬,唐树鹏,简超群,等. 多胺与乙烯对水稻籽粒灌浆、粒重和品质的调控作用[J]. *中国水稻科学*, 2022, 36(4): 327-335.
- [24] 吴子帅,刘广林,李 虎,等. 施氮量对优质常规粳稻米品质的影响[J]. *作物杂志*, 2023(1): 84-88.
- [25] 赵正洪,胡文彬,汪 丽,等. 湖南省优质稻研发的历程、问题与展望[J]. *中国稻米*, 2022, 28(5): 117-123.
- [26] 刘媛桦,李小坤. 不同肥料施用与稻米品质关系的整合分析[J]. *中国水稻科学*, 2023, 37(3): 276-284.
- [27] 薛盈文. 小麦群体均匀度的调控效应及机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [28] 李福建. 机械耕播方式对稻茬小麦幼苗质量与产量形成的影响机理及其调控[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [29] 于慧玲,阚茗溪,徐哲莉,等. 匀播和条播小麦产量及干物质积累对春季灌水量的响应[J]. *作物学报*, 2023, 49(10): 2833-2844.

- [30] 张丽华,马瑞昆,贾秀领,等. 植株田间分布均匀度对夏玉米植株性状、田间光照和杂草的影响[J]. 玉米科学,2010,18(6):73-77.
- [31] 黄血训,陈其元. 提高棉田棉株分布均匀度是夺取棉花高产与品质的重要因素[J]. 石河子科技,1994(2):21-23.
- [32] 王亚梁,朱德峰,李 慧,等. 水稻叠盘出苗育秧对秧苗生长特性及均匀度的影响[J]. 杂交水稻,2022,37(2):118-122.
- [33] 杜永林,缪学宽,李刚华,等. 江苏机插水稻大面积均衡增产共性特征分析[J]. 作物学报,2014,40(12):2183-2191.
- [34] 汪建军,曾勇军,易艳红,等. 基于不同播种量的双季机插早稻均匀度对产量形成的影响[J]. 作物杂志,2018(2):141-147.
- [35] 王亚梁,朱德峰,陈惠哲,等. 籼粳杂交稻精准条播育秧机插减氮增产的效应研究[J]. 中国水稻科学,2021,35(5):495-502.
- [36] 杨祥田,何贤彪,王旭辉,等. 水稻机插缺丛条件下自然补偿能力研究[J]. 中国农学通报,2014,30(21):70-74.
- [37] 杨占烈,林泽川,戴高兴,等. 水稻籽粒灌浆充实研究进展[J]. 西南农业学报,2013,26(3):1286-1290.
- [38] 顾 骁,吴孚桂,刘慧芳,等. 豇豆-水稻轮作模式下水稻生长的不均匀性[J]. 热带作物学报,2019,40(7):1259-1264.
- [39] 鲁 晴. 氮素对北方粳稻不同节位分蘖稻米品质的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2022.
- [40] 蒋晶晶,周天阳,韦陈华,等. 不同栽培措施对超级稻强、弱势粒品质的影响[J]. 中国农业科学,2022,55(5):874-889.
- [41] 武 辉. 籼粳杂交稻花后物质生产与碳氮转运特征研究[D]. 武汉:华中农业大学,2018.
- [42] 陈 云,刘 昆,张宏路,等. 机插密度和穗肥减量对优质食味水稻品种籽粒淀粉合成的影响[J]. 作物学报,2021,47(8):1540-1550.
- [43] ZHU D W, ZHANG H C, GUO B W, et al. Physicochemical properties of *indica-japonica* hybrid rice starch from Chinese varieties[J]. Food Hydrocolloids,2017,63:356-363.
- [44] PATINDOL J A, SIEBENMORGEN T J, WANG Y J. Impact of environmental factors on rice starch structure;a review[J]. Starch-Starke,2015,67:42-54.
- [45] 赵庆勇,朱 镇,张亚东,等. 超级稻新品种南粳 9108 产量稳定性及高产特征分析[J]. 中国稻米,2016,22(6):61-65.
- [46] 隗 溟,廖学群,李冬霞,等. 水稻分蘖节位生产力比较[J]. 植物生态学报,2012,36(4):324-332.
- [47] 张洪程,朱聪聪,霍中洋,等. 钵苗机插水稻产量形成优势及主要生理生态特点[J]. 农业工程学报,2013,29(21):50-59.
- [48] 郭保卫,许 轲,张洪程,等. 有序摆抛栽超高产栽培对水稻根系形态生理特征的影响[J]. 中国水稻科学,2016,30(6):611-625.
- [49] 雷小龙,刘 利,刘 波,等. 杂交籼稻机械化种植的分蘖特性[J]. 作物学报,2014,40(6):1044-1055.
- [50] 范立慧,徐珊珊,侯朋福,等. 不同地力下基肥运筹比例对水稻产量及氮肥吸收利用的影响[J]. 中国农业科学,2016,49(10):1872-1884.
- [51] 李 敏,罗德强,蒋明金,等. 不同减氮栽培模式对杂交籼稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(4):598-610.
- [52] WANG X D, WANG Y L, ZHANG Y K, et al. The nitrogen top-dressing mode of indica-japonica and indica hybrid rice are different after side-deep fertilization with machine transplanting[J]. Scientific Reports,2021,11(1):1494.
- [53] 李 可,禹 晴,徐云姬,等. 水稻叶片早衰突变体的农艺与生理性状研究进展[J]. 中国水稻科学,2020,34(2):104-114.
- [54] 陈燕华,王亚梁,朱德峰,等. 外源油菜素内酯缓解水稻穗分化期高温伤害的机理研究[J]. 中国水稻科学,2019,33(5):457-466.

(责任编辑:陈海霞)