

促芽肥施用时期和施用量对再生稻产量和头季稻米品质的影响

肖无为¹ 张雨晴¹ 朱辰光¹ 田贵生² 蔡岳宏² 王飞¹ 熊栋梁¹ 黄见良¹ 彭少兵¹
崔克辉^{1,*}

(¹作物遗传改良全国重点实验室/农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室/华中农业大学 植物科学技术学院, 武汉 430070; ²湖北省武穴市现代农业示范中心, 湖北 武穴 435499; *通信作者, email: cuikehui@mail.hzau.edu.cn)

Effects of Application Time and Rate of Bud-promoting Fertilizer on Main Crop Quality and Annual Yield of Ratoon Rice

XIAO Wuwei¹, ZHANG Yuqing¹, ZHU Chenguang¹, TIAN Guisheng², CAI Yuehong², WANG Fei¹,
XIONG Dongliang¹, HUANG Jianliang¹, PENG Shaobing¹, CUI Kehui^{1,*}

(¹National Key Laboratory of Crop Genetic Improvement/ Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in the Middle Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; ²Wuxue Modern Agriculture Demonstration Center, Wuxue 435499, China; *Corresponding author, email: cuikehui@mail.hzau.edu.cn)

Abstract: 【Objective】 This study investigated the effects of different application time and rates of bud-promoting fertilizer on the quality of main crop rice and annual yield of ratoon rice to lay a basis for optimizing nitrogen management in ratoon rice cultivation for the coordination of high yield and high quality. 【Method】 A field experiment was performed using two rice varieties (Liangyou 6326 and Yongyou 4949), with two application time of bud-promoting fertilizer (early application at heading stage and normal application 15 days after heading) and two rates of fertilizer application (normal nitrogen rate of 75 kg/hm² and reduced nitrogen rate of 30 kg/hm²), to examine the growth of ratoon buds, dry matter accumulation, grain filling characteristics of the main crop, yield and rice quality. 【Result】 When applied at the normal time, the reduced rate led to a decrease in both ratoon and annual yields for both varieties, primarily due to reduced panicle number per unit area in the ratoon crop. Under early application with reduced rate, the effective panicle number and both ratoon and annual yields showed no significant differences compared to the normal application practice of bud-promoting fertilizer. Compared to the normal application practice, early application with reduced application rate of bud-promoting fertilizer lowered the grain filling rate in the main crop of both varieties, extended the active grain filling period of superior spikelets, increased the head rice percentage, decreased the percentage of chalky grains and chalkiness, and improved the appearance and processing quality of main crop rice. However, early application with the normal (high) rate of bud-promoting fertilizer resulted in a decrease in amylose content in Liangyou 6326, an increase in grain protein content, and a decline in cooking quality. 【Conclusion】 Early application with reduced rate of bud-promoting fertilizer enhanced the main-crop rice quality and obtained a similar annual yield as that under the normal application of bud-promoting fertilizer in two varieties. Therefore, optimizing application time and rate of bud-promoting fertilizer according to variety may synergistically improve main-crop rice quality and achieve high annual yield in ratoon rice production.

Key words: ratoon rice; bud-promoting fertilizer; rice quality; grain yield

摘 要: 【目的】探究不同促芽肥施用时期和施用量对再生稻头季品质和周年产量的影响, 为优化再生稻氮肥管理和高产优质提供依据。【方法】采用 2 个水稻品种(两优 6326 和甬优 4949), 在 2 个促芽肥施用时期(早施处理即齐穗期施用、常规施用时期处理即齐穗后 15 d 施用)和 2 种促芽肥施用量(常规施氮量处理即 75 kg/hm²、减施促芽肥处理即 30 kg/hm²)处理下, 考察促芽肥施用时期和施用量对再生芽生长、干物质积累、头季灌浆、产量和稻米品质的影响。【结果】促芽肥施用时期和施用量对两品种头季产量没有显著影响, 常规施用时期处理下减氮

收稿日期: 2024-10-23; 修改稿收到日期: 2024-12-02。

基金项目: “十四五”国家重点研发计划资助项目(2022YFD2301000); 国家水稻产业技术体系项目(CARS-01)。

导致两品种再生季和周年产量下降, 主要原因是再生季单位面积穗数下降; 早施减施促芽肥处理下两品种再生季有效穗数、再生季和周年产量与常规促芽肥施用模式没有显著差异。与常规施用模式相比, 早施减施促芽肥可降低两品种头季籽粒灌浆速率, 延长强势粒活跃灌浆期, 提高两品种头季整精米率, 降低头季垩白粒率、垩白度, 改善头季稻米外观和加工品质; 然而, 在常规促芽肥施用量下, 与常规施用时期相比, 早施促芽肥导致两优 6326 直链淀粉含量下降, 籽粒蛋白含量提高, 蒸煮食味品质降低。【结论】早施减施促芽肥处理周年产量可达到常规施用模式的水平, 可提高头季稻米外观和加工品质。因此, 提前和减量施用促芽肥可实现再生稻头季稻米品质和周年产量协同。

关键词: 再生稻; 促芽肥; 稻米品质; 产量

再生稻是指在头季收获后, 通过水肥调控等栽培措施, 促使稻桩上休眠侧芽重新萌发成穗, 从而实现一种两收的水稻种植模式^[1]。由于再生稻生产具有轻简化、省工省时等特征, 近年来其种植面积不断扩大, 机收再生稻栽培技术的研究也日益受到关注^[2-3]。

再生季产量与头季收割后稻桩上休眠腋芽萌发密切相关^[4]。腋芽萌发和生长受品种和栽培管理影响, 特别是促芽肥施用量和施用时期^[5]。头季收割前再生芽死亡率高是限制再生季产量的主要因素, 施促芽肥可提高活芽率^[6]。但也有研究表明, 头季生育后期不缺乏氮素时, 增施促芽肥对再生季产量提升并不显著^[7]。目前再生稻生产中促芽肥施用时期一般为头季齐穗后 15~20 d^[8]。徐富贤等^[5]认为促芽肥对再生芽生长的调控作用从头季齐穗后 10 d 开始显现, 早施促芽肥有利于提高再生力; 凌启鸿等^[9]发现头季齐穗后 25~28 d 施用促芽肥有利于再生芽生长。这些结果表明, 促芽肥施用时期对再生芽发育和再生季产量的影响存在着种植环境和品种差异。

再生稻头季与再生季生长环境条件和栽培管理措施不同, 导致两季稻米品质存在差异^[10]。头季灌浆期气温较高, 影响籽粒灌浆过程和淀粉合成, 导致头季稻米垩白度和垩白粒率增加^[11-12]; 头季灌浆期施用的促芽肥可导致籽粒蛋白含量增加, 直链淀粉含量下降^[13-14]; 再生季气候较适宜, 再生季稻谷加工、外观和食味品质一般优于头季^[15-17]。目前, 再生稻稻米品质研究主要偏重于不同栽培管理措施影响再生季稻米品质的描述性研究, 头季稻米品质的栽培措施调控的研究相对缺乏^[18]。提苗肥施用可提高再生季稻米加工和外观品质, 而促芽肥对再生季稻米品质影响较小^[19]。促芽肥施用时期与粒肥接近, 施用粒肥可缓解高温对稻米品质的影响^[20]; 然而, 过高的氮素粒肥用量导致头季稻米蛋白含量提高, 食味品质下降^[21]。在保持总氮肥施用量不变的前提下, 将头季适量的氮肥后移, 可保持头季稻生育后期根系活力进而促进腋芽存活^[22]。

目前不少研究表明促芽肥施用时期和施用量影响再生稻产量和稻米品质。然而, 现有的促芽肥施用模式对头季稻米食味品质有不利影响^[2], 促芽肥的施用时期与施用量对再生稻产量和品质影响的了解仍有限。因此, 本研究以华中地区再生稻主推品种两优 6326 和甬优 4949 为供试材料, 以目前再生稻生产中常规的促芽肥施用时期和施用量为对照, 探究促芽肥早施减施对再生芽生长、干物质积累与转运、籽粒灌浆的影响及其与再生稻产量和品质的关系, 以期优化促芽肥施用模式, 为再生稻丰产优质栽培技术建立提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023 年在湖北省武穴市水稻科技小院试验基地进行(30°00' N, 115°44' E)。试验田土壤为黄棕壤, 土壤 pH 值为 6.5, 土壤有机碳含量为 28.04 g/kg, 全氮含量为 3.24 g/kg, 速效磷含量为 8.26 mg/kg, 速效钾含量为 158.44 mg/kg。头季灌浆期为 7 月 10 日至 8 月 10 日, 平均最高气温为 33.4℃, 平均气温为 29℃。2023 年试验点全年降雨量为 978.6 mm。

1.2 试验设计

大田试验采用裂-裂区试验设计, 以促芽肥施用时期为主区, 促芽肥施用量为副区, 品种为副副区。供试品种为两优 6326 和甬优 4949。2 个促芽肥施用时期分别为齐穗期(T1, 早施促芽肥处理)、齐穗后 15 d (T2, 常规施用时期)。设置 2 个促芽肥施用量, 分别为 75 kg /hm²(以纯氮计)促芽肥(N1, 常规施用量)、30 kg /hm² 促芽肥(N2, 减施促芽肥)。3 次重复, 共 24 个小区, 每个小区面积 25 m²。

于 3 月 25 日播种, 4 月 26 日移栽, 移栽密度为 20 cm×20 cm, 双本移栽。头季采用人工收割, 留桩高度保留至倒 2 节(40 cm 左右)。小区间用 30 cm 宽田埂隔开, 所有田埂均覆盖黑色塑料薄膜并插入田埂两侧 20 cm 深处以防止小区间水肥互串。

两优 6326 和甬优 4949 头季齐穗时间分别为 7 月 6 日和 8 日,头季收获时间分别为 8 月 10 日和 11 日,再生季收获时间均为 10 月 20 日。全生育期内严格控制病虫害。头季移栽后灌深水促秧苗返青,分蘖后期晒田,幼穗分化期保持浅水层直至收获前 7 d。所有氮肥均以尿素(N 含量 46.4%)形式施入。头季氮肥施用量为 180 kg/hm²(以纯氮计),施用比例为基肥(移栽前 2 d):分蘖肥(移栽后 7 d):穗肥(幼穗分化期)=4:3:3;磷肥施用量为 114.68 kg/hm²(以 P₂O₅ 计),作基肥一次性施入;钾肥施用量为 120.47 kg/hm²(以 K₂O 计),按基肥:穗肥=1:1 的施用比例施入。再生季促芽肥施入时均加施钾肥(48.19 kg/hm², K₂O),提苗肥在头季收割后 3 d 灌溉时施用,施用量为 75 kg/hm²(折合纯氮)。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质和产量及构成因子测定

分别于头季和再生季齐穗期(头季 80%母茎已抽穗的时间定义为齐穗期,再生季 50%的母茎产生的再生分蘖至少有一个已抽穗的时间定义为齐穗期)和成熟期,每个小区分别取 12 蔸代表性植株,头季稻取样分为叶片、茎鞘和穗三部分,再生季取样分为茎鞘、叶片、头季收割所保留的 40 cm 稻桩和穗四部分。样品于 105℃烘箱中杀青 30 min 后置于 80℃烘箱中烘至恒重,测定各部分干质量,并按下述公式计算成熟期地上部干物质积累量、齐穗后干物质积累量、齐穗后茎鞘干物质转运量。

齐穗期(成熟期)地上部干物质积累量(t/hm²)=齐穗期(成熟期)茎鞘干质量(t/hm²)+叶片干质量(t/hm²)+穗部干质量(t/hm²);齐穗后干物质积累量(t/hm²)=成熟期地上部干物质积累量(t/hm²)-齐穗期地上部干物质积累量(t/hm²);齐穗后茎鞘干物质转运量(t/hm²)=齐穗期茎鞘干质量(t/hm²)-成熟期茎鞘干质量(t/hm²)。

另外,分别于头季和再生季成熟期在每小区选取 4 m²(100 蔸)进行收割,脱粒后将籽粒晒干并与室内空气吸湿平衡后称总质量。用谷物水分仪(LDS-1G)测定籽粒含水量,并换算为 14%含水量的产量(t/hm²)。

在头季、再生季成熟期每小区选取有代表性的 12 蔸植株,记录有效穗数(饱粒数≥5 的稻穗数)。将穗部样品徒手脱粒,采用水选法、风选法将籽粒分为饱粒、半饱粒和空粒,并分别计数,于 80℃烘箱中烘干至恒重,称量干质量。计算籽粒产量、有效穗数、每穗颖花数、结实率和千粒重。再生力为再生季有效穗数(No./m²)与头季有效穗数(No./m²)

之比。

1.3.2 再生芽生长调查

在头季成熟期从每个小区 6 蔸植株共取 18 个生长一致的一次分蘖,记录高节位(倒 2、3 节)和低节位(倒 4 节及以下)再生芽数,并测量单芽芽长。根据 He 等^[23]方法,统计长度大于 1 cm 的再生芽的芽数量和芽长,并计算不同节位芽长、活芽数和芽干质量。

1.3.3 头季籽粒灌浆动态

于头季抽穗期,在每个小区挂牌标记 100 个当天抽穗且二分之一抽出叶鞘的穗。标记当天记为抽穗后 0 d,此后每个小区每隔 5 d 随机取 10 个标记穗,直至成熟。将所取的标记穗置于 105℃烘箱中杀青 30 min 后取出脱粒。将籽粒分为强势粒和弱势粒(强势粒为着生在穗顶端三个一次枝梗上的籽粒,弱势粒为穗基部三个一次枝梗的二次枝梗上着生的籽粒)。自第二次取样开始,籽粒样品均在无影灯上通过观察和手指按压的方法去除病粒和空粒,其他灌浆籽粒经过计数、烘干和称重后用于计算单粒粒重。每个重复的粒重用于拟合 Richards 方程和计算籽粒灌浆动态参数^[24]。

1.3.4 稻米品质测定

按照中华人民共和国农业部标准米质测定方法(GB/T 17891-1999),采用 SC-E 型万深大米外观品质检测仪测定头季、再生季稻米外观品质。参照 GB/2905-1982,用消煮法测定稻米粗蛋白含量。稻米直链淀粉含量参照国标 GB/T15683-1995 方法测定。

1.3.5 统计分析

采用 Excel 2021 软件进行数据整理,IBM SPSS Statistics 26 软件进行统计分析。采用方差分析和最小显著差异法(LSD)分析比较不同处理间的差异显著性。本试验处理对再生季稻米品质没有显著影响,因此相关数据没有呈现。

2 结果与分析

2.1 不同促芽肥处理对再生稻头季、再生季和周年产量的影响

方差分析表明促芽肥施用量影响再生季和周年产量,促芽肥施用时期和施用量两者互作影响头季、再生季和周年产量(表 1)。在 4 个促芽肥处理组合下两个品种头季产量为 8.69~9.65 t/hm²,再生季产量为 4.82~5.47 t/hm²,周年产量为 13.51~14.88 t/hm²。不同促芽肥施用时期、不同促芽肥施用量分

表 1 不同促芽肥处理对再生稻产量的影响

Table 1. Effect of different bud-promoting fertilizer treatments on grain yields in ratoon rice

品种 Variety	促芽肥施用时期 Application time of bud-promoting fertilizer	促芽肥施用量 Application rate of bud-promoting fertilizer (kg/hm²)	头季产量 Main crop yield (t/hm²)	再生季产量 Ratoon crop yield (t/hm²)	周年产量 Annual yield (t/hm²)
两优 6326 Liangyou 6326	T1	N1	9.06 a	5.15 a	14.22 ab
		N2	9.27 a	5.18 a	14.46 a
	T2	N1	9.15 a	5.47 a	14.61 a
		N2	8.69 a	4.82 b	13.51 b
甬优 4949 Yongyou 4949	T1	N1	9.54 a	5.31 a	14.85 a
		N2	9.46 a	4.92 bc	14.37 ab
	T2	N1	9.65 a	5.23 ab	14.88 a
		N2	9.12 a	4.83 c	13.95 b
方差分析 ANOVA					
品种 Variety(V)			**	ns	*
促芽肥施用时期 Application time(T)			ns	ns	ns
促芽肥施用量 Application rate(N)			ns	**	**
V×T			ns	ns	ns
V×N			ns	ns	ns
T×N			*	*	**
V×T×N			ns	*	ns

T1 和 T2 分别表示齐穗期和齐穗后 15 d 施用促芽肥，N1 和 N2 分别表示 75 kg/hm² 和 30 kg/hm²(以纯氮计)促芽肥。同一列内不同小写字母表示同一品种不同促芽肥施用时期和施用量处理间差异显著(LSD 法)。*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著，ns 表示在 0.05 水平上差异不显著。下同。

T1 and T2 represent the application of bud-promoting fertilizer at the full heading stage and 15 days after full heading, respectively. N1 and N2 represent bud-promoting fertilizer application rates of 75 kg/hm² and 30 kg/hm²(as pure nitrogen), respectively. Different lowercase letters within a column indicate significant differences between treatments with varying application time and rates for the same variety (LSD method). * and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively, while ns indicates no significant difference at the 0.05 level. The same below.

别对两品种头季产量无影响。在 T1(早施促芽肥)处理下，促芽肥施用量对两品种头季、再生季以及周年产量无影响；在 T2(常规促芽肥施用时期)处理下，与 N1 相比，N2(减施促芽肥)导致两优 6326 和甬优 4949 再生季产量分别下降 13.5%和 8.3%，周年产量分别下降 8.1%和 6.7%。在 N1(常规促芽肥施用量)处理下，促芽肥施用时期对两品种再生季和周年产量无影响；在 N2 处理下，与 T2 相比，T1 导致两优 6326 再生季和周年产量分别提高 7.5%和 7.0%，甬优 4949 增加 1.86%和 3.0%(不显著)(表 1)。

2.2 不同促芽肥处理对头季和再生季产量构成因子的影响

方差分析表明促芽肥施用时期影响头季产量因子(除总颖花数外)，促芽肥施用量影响头季单位面积穗数(表 2)。在两个促芽肥施用时期(T1 和 T2)下，与 N1 相比，N2 导致两优 6326 头季单位面积穗数分别下降 10.0%和 15.9%，而对甬优 4949 头季产量构成因子没有影响(表 2)。在 N1 处理下，与 T2 相比，T1 导致两优 6326 头季单位面积穗数提高

15.2%，甬优 4949 单位面积总颖花数和结实率提高 19.2%和 5.6%；在 N2 处理下，与 T2 相比，T1 导致两优 6326 头季单位面积穗数提高 23.3%，两优 6326 和甬优 4949 结实率分别提高 3.3%和 7.9%(表 2)。

方差分析表明促芽肥施用时期影响再生季产量构成因子(除总颖花数外)，施用量影响单位面积穗数和结实率，两者互作影响结实率(表 3)。在 T1 处理下，与 N1 相比，N2 导致两优 6326 结实率下降 8.9%，对甬优 4949 产量构成因子影响未达显著；在 T2 处理下，与 N1 相比，N2 导致两品种单位面积穗数分别下降 14.1%和 29.6%(表 3)。

2.3 不同促芽肥处理对头季稻米品质的影响

方差分析表明促芽肥施用时期对头季稻米加工、外观和蒸煮食味品质都有影响，促芽肥施用量对头季稻米蒸煮食味品质有影响，两者互作影响头季稻米整精米率、胶稠度、直链淀粉含量以及籽粒蛋白含量(表 4)。

在 T1 处理下，与 N1 相比，N2 导致甬优 4949

表 2 不同促芽肥处理对再生稻头季产量构成因子的影响

Table 2. Effect of different bud-promoting fertilizer treatments of yield components of the main crop in ratoon rice

品种 Variety	促芽肥施用时期 Application time of bud-promoting fertilizer	促芽肥施用量 Application rate of bud-promoting fertilizer(kg/hm ²)	有效穗数 Effective panicles per 1 m ²	每穗颖花数 Spikelets per panicle	总颖花数 Total spikelets (×10 ³ /m ²)	结实率 Seed setting rate(%)	千粒重 1000-grain weight(g)
两优 6326 Liangyou 6326	T1	N1	280.05 a	144.10 b	40.28 a	78.25 a	26.40 a
		N2	251.92 b	167.52 ab	42.14 a	78.12 a	26.98 a
	T2	N1	243.06 b	162.88 ab	39.51 a	77.18 ab	26.33 a
		N2	204.38 c	170.20 a	38.07 a	75.60 b	26.15 a
甬优 4949 Yongyou 4949	T1	N1	221.90 a	264.05 a	56.59 a	77.28 a	19.68 a
		N2	219.44 a	243.84 a	53.55 ab	77.36 a	19.74 a
	T2	N1	210.42 a	225.74 a	47.49 b	73.20 b	20.18 a
		N2	201.39 a	241.68 a	48.29 b	71.69 b	20.17 a
方差分析 ANOVA							
品种 Variety(V)			**	**	**	**	**
促芽肥施用时期 Application time(T)			**	**	ns	**	ns
促芽肥施用量 Application rate(N)			*	ns	ns	ns	ns
V×T			ns	ns	ns	ns	*
V×N			ns	ns	ns	ns	ns
T×N			ns	ns	ns	ns	ns
V×T×N			ns	ns	ns	ns	ns

表 3 不同促芽肥处理对再生稻再生季产量构成因子的影响

Table 3. Effect of different bud-promoting fertilizer treatments on yield components of the ratoon crop in ratoon rice

品种 Variety	促芽肥施用时期 Application time of bud-promoting fertilizer	促芽肥施用量 Application rate of bud- promoting fertilizer (kg/hm ²)	有效穗数 Effective panicles per 1 m ²	每穗颖花数 Spikelet per panicle	总颖花数 Total spikelets (No. × 10 ³ /m ²)	结实率 Seed setting rate(%)	千粒重 1000-grain weight(g)
两优 6326 Liangyou 6326	T1	N1	384.72 a	79.22 a	30.51 ab	77.27 a	24.60 a
		N2	357.64 ab	75.30 a	26.78 b	70.40 b	24.70 a
	T2	N1	380.56 a	90.15 a	34.21 a	75.71 ab	24.86 a
		N2	327.08 b	93.07 a	30.29 ab	74.89 ab	24.63 a
甬优 4949 Yongyou 4949	T1	N1	336.11 a	100.01 a	33.26 a	79.16 a	20.16 a
		N2	298.61 ab	109.58 a	33.13 a	72.95 ab	20.49 a
	T2	N1	330.56 a	115.09 a	38.11 a	67.98 b	19.95 a
		N2	232.64 b	121.11 a	28.36 a	68.78 b	20.31 a
方差分析 ANOVA							
品种 Variety(V)			**	**	ns	ns	**
促芽肥施用时期 Application time(T)			*	*	ns	*	ns
促芽肥施用量 Application rate(N)			*	ns	ns	*	ns
V×T			ns	ns	ns	**	ns
V×N			ns	ns	ns	ns	ns
T×N			ns	ns	ns	*	ns
V×T×N			ns	ns	ns	ns	ns

头季稻米整精米率提高 15.0%；在 T2 处理下，N2 导致两优 6326 头季稻米垩白粒率提高 19.7%(表 4)。在 N1 处理下，与 T2 相比，T1 导致两优 6326 和甬优 4949 头季稻米垩白粒率分别下降 20.1%和 28.7%，垩白度分别下降 35.5%和 21.6%；在 N2 处

理下，T1 导致两优 6326 和甬优 4949 整精米率分别提高 10.9%和 15.8%，两优 6326 和甬优 4949 垩白粒率、垩白度分别下降 44.6%、25.4%和 33.2%、13.7%(表 4)。

在 T1 处理下，与 N1 相比，N2 导致两优 6326

表 4 不同促芽肥处理对再生稻头季稻米品质的影响

Table 4. Effect of different bud-promoting fertilizer treatments on rice quality of the main crop in ratoon rice

促芽肥施用		促芽肥施用量 Application time of bud-promoting fertilizer (kg/hm ²)	糙米率 Brown rice rate (%)	精米率 Milled rice rate (%)	整精米率 Head rice rate (%)	长宽比 Length/ Width	垩白粒率 Chalkiness rate (%)	垩白度 Chalkiness degree (%)	胶稠度 Gel consistency (mm)	直链淀粉 含量 Amylose content (%)	蛋白质 含量 Protein content (%)
时期	Application										
品种	stage of bud-										
Variety	promoting fertilizer										
两优 6326	T1	N1	79.65 a	67.44 a	54.73 ab	2.89 a	5.98 c	8.13 b	77.33 a	12.29 c	12.57 a
Liangyou		N2	79.13 a	66.82 a	55.48 a	2.90 a	4.96 c	8.35 b	79.00 a	14.75 b	9.77 b
6326	T2	N1	79.39 a	67.20 a	52.93 b	2.89 a	7.48 b	11.40 a	84.83 a	14.93 b	9.30 b
		N2	79.67 a	67.06 a	50.04 b	2.85 a	8.95 a	11.20 a	62.83 b	17.57 a	7.67 c
甬优 4949	T1	N1	79.74 a	69.29 ab	57.55 b	2.11 a	5.20 b	6.14 c	82.00 a	11.42 b	10.21 a
Yongyou		N2	79.86 a	71.19 a	66.20 a	2.13 a	5.44 b	6.42 bc	83.50 a	18.05 a	9.83 a
4949	T2	N1	79.64 a	67.70 b	56.95 b	2.13 a	8.06 a	7.83 a	88.17 a	17.30 a	10.31 a
		N2	79.45 a	68.18 b	57.16 b	2.11 a	8.14 a	7.44 ab	87.50 a	17.37 a	8.17 b
方差分析 ANOVA											
品种	Variety(V)		ns	**	**	**	ns	**	**	*	ns
促芽肥施用时期	Application time(T)		ns	*	**	ns	**	**	ns	**	**
促芽肥施用量	Application rate(N)		ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	**	**
V×T			ns	*	ns	ns	ns	*	*	ns	**
V×N			ns	ns	*	ns	ns	ns	*	ns	ns
T×N			ns	ns	**	ns	ns	ns	**	**	*
V×T×N			*	ns	ns	ns	ns	ns	*	**	**

和甬优 4949 头季籽粒直链淀粉含量分别提高 20.0%和 57.6%；在 T2 处理下，N2 导致两优 6326 籽粒直链淀粉含量提高 17.7%，但对甬优 4949 无显著影响。在 N1 处理下，与 T2 相比，T1 处理导致两优 6326 和甬优 4949 头季籽粒直链淀粉含量降低 17.7%和 33.9%；在 N2 处理下，T1 导致两优 6326 籽粒直链淀粉含量降低 16.1%，但对甬优 4949 无显著影响(表 4)。

在 T1 处理下，与 N1 相比，N2 导致两优 6326 头季籽粒蛋白含量下降 22.3%，但对甬优 4949 无显著影响；在 T2 处理下，N2 导致两优 6326 和甬优 4949 籽粒蛋白含量分别下降 17.5%和 20.8%。在 N1 处理下，与 T2 相比，T1 导致两优 6326 头季籽粒蛋白含量提高 35.2%，对甬优 4949 无显著影响；在 N2 处理下，T1 导致两优 6326 和甬优 4949 头季籽粒蛋白含量分别提高 27.4%和 20.3%(表 4)。

2.4 不同促芽肥处理对再生稻头季干物质积累转运的影响

方差分析表明促芽肥施用时期影响地上部干物质积累量、稻桩干质量、齐穗后干物质积累量以及茎鞘干物质转运量，施用量影响地上部干物质积累和齐穗后干物质积累量(表 5)。

在 N1 处理下，与 T2 相比，T1 导致甬优 4949

稻桩干质量提高 25.6%，齐穗后茎鞘干物质转运量降低 56.8%，而对两优 6326 无显著影响。在 N2 处理下，与 T2 相比，T1 导致两优 6326 稻桩干质量和齐穗后干物质积累量分别提高 11.7%和 109.4%，甬优 4949 齐穗后干物质积累量提高 30.7%；T1 导致两优 6326 和甬优 4949 齐穗后茎鞘干物质转运量分别降低 46.4%和 45.2%(表 5)。

2.5 不同促芽肥处理对再生芽生长发育的影响

方差分析表明促芽肥施用时期、施用量对再生芽的芽长和芽干质量没有影响，施用时期对活芽数有显著影响，施用量显著影响再生力(表 6)。在 N1 处理下，与 T2 相比，T1 导致两优 6326 高节位和甬优 4949 低节位再生芽活芽数显著提高 60.9%和 71.8%；在 N2 处理下，T1 导致两优 6326 高节位和甬优 4949 低节位再生芽活芽数提高 69.6%和 44.8%。

2.6 不同促芽肥处理对再生稻头季灌浆动态的影响

方差分析表明促芽肥施用时期影响再生稻头季强、弱势粒灌浆参数(表 7)。在 T1 处理下，与 N1 相比，N2 导致两优 6326 头季强势粒和弱势粒平均灌浆速率分别提高 16.4%和 16.3%，最大灌浆速率分别提高 19.6%和 16.8%，活跃灌浆期分别缩

表 5 不同促芽肥处理对再生稻头季干物积累和转运的影响

Table 5. Effect of different bud-promoting fertilizer treatments on dry matter accumulation and remobilization of the main crop in ratoon rice

品种 Variety	促芽肥施用时期 Application time of bud-promoting fertilizer	促芽肥施用量	地上部干物质	稻桩干质量	齐穗后干物质	齐穗后茎鞘干物质
		Application rate of bud-promoting fertilizer (kg/hm ²)	积累量 Aboveground dry matter accumulation (t/hm ²)	Stubble dry weight (t/hm ²)	积累量 Post-full heading dry matter accumulation (t/hm ²)	转运量 Dry matter translocation of stem and sheath after full heading(t/hm ²)
两优 6326	T1	N1	16.59 a	3.30 ab	5.45 a	2.01 a
Liangyou 6326		N2	16.89 a	3.53 a	6.03 a	1.11 b
	T2	N1	15.41 a	3.04 b	4.54 ab	1.87 a
		N2	14.59 a	3.16 b	2.88 b	2.07 a
甬优 4949	T1	N1	16.91 a	3.53 a	6.55 a	0.63 b
Yongyou 4949		N2	15.23 b	2.88 b	6.09 a	0.92 b
	T2	N1	15.50 b	2.81 b	5.59 ab	1.46 a
		N2	14.99 b	2.93 b	4.66 b	1.68 a
方差分析 ANOVA						
品种 Variety(V)			ns	**	**	**
促芽肥施用时期 Application time(T)			**	**	**	**
促芽肥施用量 Application rate(N)			**	ns	*	ns
V×T			ns	ns	ns	ns
V×N			ns	**	ns	*
T×N			ns	*	ns	ns
V×T×N			*	**	*	*

表 6 不同促芽肥处理对再生稻头季成熟期高低节位再生芽生长和再生力的影响

Table 6. Effect of different bud-promoting fertilizer treatments on bud growth at upper and lower nodes of the main crop during the maturity stage in ratoon rice

品种 Variety	促芽肥施用时期 Application time of bud-promoting fertilizer	促芽肥施用量 Application rate of bud-promoting fertilizer (kg/hm ²)	芽长 Bud length (cm)		芽干质量 Bud dry weight (g/m ²)		活芽数 Bud number (No./m ²)		再生力 Ratooning ability
			高节位	低节位	高节位	低节位	高节位	低节位	
			Upper node	Lower node	Upper node	Lower node	Upper node	Lower node	
两优 6326	T1	N1	12.24 a	10.81 a	29.08 a	16.37 a	245.88 a	248.36 a	1.46 a
Liangyou		N2	12.98 a	10.40 a	24.86 a	17.12 a	248.83 a	243.38 a	1.38 a
6326	T2	N1	15.82 a	19.09 a	18.13 a	29.88 a	152.85 b	238.81 a	1.57 a
		N2	11.83 a	12.26 a	17.69 a	22.88 a	146.69 b	216.90 a	1.52 a
甬优 4949	T1	N1	13.00 a	12.32 a	16.91 a	14.97 a	130.71 a	215.86 a	1.50 a
Yongyou		N2	12.19 a	10.53 a	6.38 a	14.58 a	90.28 a	157.10 ab	1.36 ab
4949	T2	N1	10.65 a	10.66 a	7.29 a	10.54 a	111.19 a	125.62 b	1.57 a
		N2	11.47 a	18.92 a	8.32 a	14.74 a	107.95 a	108.49 b	1.17 b
方差分析 ANOVA									
品种 Variety(V)			ns	ns	**	ns	**	**	ns
促芽肥施用时期 Application time(T)			ns	ns	ns	ns	*	*	ns
促芽肥施用量 Application rate(N)			ns	ns	ns	ns	ns	ns	**
V×T			ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
V×N			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
T×N			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
V×T×N			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

短 18.0%和 19.5%; N2 处理导致甬优 4949 头季强势粒平均灌浆速率和最大灌浆速率分别降低 11.8%和 15.1%, 活跃灌浆期延长 19.5%。在 T2 处理下, 与 N1 相比, N2 导致甬优 4949 弱势粒平均灌浆速率和最大灌浆速率分别降低 38.8%、38.9%, 活跃灌浆期延长 28.9%, 但对强势粒灌浆特性没有显著影

表 7 不同促芽肥处理对再生稻头季强势粒和弱势粒灌浆动态的影响

Table 7. Effect of different bud-promoting fertilizer treatments on grain filling dynamics for superior and inferior grains of the main crop in ratoon rice

品种 Variety	促芽肥施用时期 Application time of bud-promoting fertilizer	促芽肥施用量 Application rate of bud- promoting fertilizer (kg/hm ²)	平均灌浆速率 Average grain-filling rate (mg·grain ⁻¹ d ⁻¹)		最大灌浆速率 Maximum grain filling rate (mg·grain ⁻¹ d ⁻¹)		活跃灌浆期 Effective grain filling time(d)	
			强势粒	弱势粒	强势粒	弱势粒	强势粒	弱势粒
			Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
两优 6326	T1	N1	2.38 c	1.78 c	3.47 c	2.67 c	11.29 a	11.87 a
Liangyou 6326		N2	2.77 b	2.07 b	4.15 b	3.11 b	9.26 b	9.55 b
	T2	N1	3.21 a	2.63 a	4.82 a	3.94 a	8.20 bc	8.31 bc
		N2	3.29 a	2.70 a	4.94 a	4.05 a	7.96 c	7.87 c
甬优 4949	T1	N1	2.03 a	1.23 b	3.05 a	1.85 b	9.81 b	11.91 a
Yongyou 4949		N2	1.73 b	1.34 b	2.59 b	2.01 b	11.72 a	11.22 ab
	T2	N1	2.08 a	1.75 a	3.12 a	2.62 a	9.90 b	9.24 b
		N2	2.09 a	1.07 b	3.14 a	1.60 b	9.94 b	12.99 a
方差分析 ANOVA								
品种 Variety(V)			**	**	**	**	**	**
促芽肥施用时间 Application time(T)			**	**	**	**	**	**
促芽肥施用量 Application rate(N)			ns	ns	ns	ns	ns	ns
V×T			**	**	**	**	*	*
V×N			**	**	**	**	**	**
T×N			ns	**	ns	**	ns	**
V×T×N			**	*	**	*	**	ns

响(表 7)。

在 N1 处理下，与 T2 相比，T1 导致两优 6326 强势粒平均灌浆速率和最大灌浆速率分别降低 25.9%和 28.0%，活跃灌浆期延长 37.7%，对甬优 4949 强势粒无显著影响；T1 处理导致两优 6326 和甬优 4949 弱势粒平均灌浆速率分别降低 32.3%和 29.7%，最大灌浆速率分别降低 32.2%和 29.4%，活跃灌浆期分别延长 42.8%和 28.9%。在 N2 处理下，与 T2 相比，T1 导致两优 6326 和甬优 4949 强势粒平均灌浆速率分别降低 15.8%和 17.2%，最大灌浆速率分别降低 16.0%和 17.5%，活跃灌浆期延长 16.3%和 17.9%；T1 处理导致两优 6326 弱势粒平均灌浆速率、最大灌浆速率分别降低 30.4%、23.2%，活跃灌浆期提高 21.3%(表 7)。

2.7 再生稻头季干物质积累转运与再生芽生长发育相关性

成熟期稻桩干质量与再生芽活芽数呈显著正相关，而齐穗后干物质积累量和茎鞘干物质转运量与再生芽芽长、活芽数、芽干质量未达显著相关(表 8)。齐穗后干物质积累量与稻米垩白粒率和垩白度呈显著负相关；齐穗后茎鞘干物质转运量与精米率、整精米率呈显著负相关，与垩白粒率、垩白度

表 8 头季干物质积累转运与再生芽生长发育和头季稻米品质相关性 (n=24)

Table 8. Correlations of dry matter accumulation and translocation during the main crop with the growth and development of regenerated buds and rice quality in the main season (n=24)

性状 Trait	齐穗后干物质积累量 Post-full heading dry matter accumulation	齐穗后茎鞘干物质转运量 Dry matter translocation of stem and sheath after full heading	成熟期稻桩干质量 Stubble dry weight at maturity
芽长 Bud length	-0.010	0.100	-0.192
芽干质量 Bud dry weight	-0.012	0.117	0.203
活芽数 Bud number	0.021	0.032	0.643**
精米率 Milled rice rate	0.402	-0.468*	-0.199
整精米率 Head rice rate	0.349	-0.547**	-0.192
垩白粒率 Chalkiness rate	-0.633**	0.560**	-0.546**
垩白度 Chalkiness degree	-0.723**	0.693**	0.112

*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 (n=24)。下同。
* and ** indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 probability level(n=24). The same below.

表9 再生稻头季灌浆特征与稻米品质间相关性 (n=24)

Table 9. Correlation between grain filling characteristics and rice quality in the main crop (n=24)

品质 Rice quality	平均灌浆速率 Average grain-filling rate		最大灌浆速率 Maximum grain filling rate		活跃灌浆期 Effective grain filling time	
	强势粒 Superior grain	弱势粒 Inferior grain	强势粒 Superior grain	弱势粒 Inferior grain	强势粒 Superior grain	弱势粒 Inferior grain
精米率 Milled rice rate	-0.687*	-0.581**	-0.692*	-0.584**	0.437*	0.485*
整精米率 Head rice rate	-0.780**	-0.650**	-0.781**	-0.657**	0.598**	0.551**
长宽比 Length/Width	0.729**	0.696**	0.722**	-0.702**	-0.351	-0.459*
垩白度 Chalkiness degree	0.760**	0.755**	0.771**	0.762**	-0.557**	-0.663**
胶稠度 Gel consistency	-0.451*	-0.381	-0.450*	-0.392	0.209	0.219

呈显著正相关；成熟期稻桩干质量与垩白粒率呈显著负相关(表 8)。

2.8 灌浆特征与头季稻米品质相关性

头季稻米精米率和整精米率与强势粒、弱势粒的平均灌浆速率和最大灌浆速率呈显著负相关，与强势粒、弱势粒的活跃灌浆期呈显著正相关(表 9)。垩白度与强势粒和弱势粒的平均灌浆速率、最大灌浆速率呈显著正相关，与强势粒与弱势粒的活跃灌浆期呈显著负相关。胶稠度仅与强势粒的平均灌浆速率和最大灌浆速率呈显著负相关。

3 讨论

3.1 促芽肥施用时期和施用量对再生稻产量和再生芽的影响

促芽肥的施用是再生稻高产栽培的重要氮肥管理措施之一，可以延缓头季叶片衰老和增加稻桩含氮量，从而提高再生芽成活率，从而提高产量^[5,6,25]。本研究中促芽肥施用时期、施用量处理对头季产量没有影响，但常规施用时期条件下减施降低了再生季和周年产量(表 1)，这与前人研究一致^[19, 26]。目前关于促芽肥适宜施用时期存在不同观点。孙晓辉等^[25]认为在头季抽穗后 15 d 施用促芽肥可提高再生稻发苗数，而徐富贤等^[5]认为齐穗后茎鞘干物质向籽粒转运导致低节位再生芽死亡，在齐穗期施用促芽肥可补充茎鞘中营养物质，提高再生芽成活率。本研究中，常规促芽肥施用量下，早施促芽肥没有导致再生季产量下降，但在减量施用时，早施促芽肥显著提高两优 6326 再生季产量。因此，促芽肥施用时间、施用量与再生季产量的关系存在着品种差异，需进一步研究。

本研究发现与常规促芽肥施用模式相比(T2N1)，早施减施(T1N2)促芽肥可提高两优 6326 稻桩生物量，减少两品种茎鞘干物质转运量(表 7)；

这是因为齐穗期施用促芽肥可提高叶片光合速率，增加叶片光合产物向籽粒运输，减少稻桩储存物质向籽粒运输，从而增加茎鞘物质积累^[27]。再生芽生长主要依赖稻桩所贮藏同化物，本研究中早施促芽肥在常规氮水平上提高两优 6326 高节位和甬优 4949 低节位活芽数(表 6)，这与徐富贤等^[5]研究结果一致。尽管本研究没有观察到再生芽性状与齐穗后干物质积累、茎鞘干物质转运间的相关性(表 8)，但前人研究表明头季齐穗后高干物质积累量和高稻桩生物量均有利于再生芽生长发育，再生芽芽长、活芽数与头季齐穗后干物质积累显著正相关^[26-28]；类似地，本研究中成熟期稻桩干质量与再生芽活芽数(表 8)和再生季单位面积穗数($r=0.502$, $n=24$)呈正相关。本研究中，在减施促芽肥处理下，早施促芽肥显著提高两优 6326 再生季和周年产量(表 1)。这些结果表明早施促芽肥可提高头季成熟期稻桩干物质积累，从而有利于再生芽生长和再生季产量。

Yang 等^[19]发现施用促芽肥和提苗肥分别对再生季产量提升贡献 5.5%和 30.5%。本研究发现减施促芽肥导致再生季产量降低(表 1)，其主要原因是单位面积穗数的降低(表 3)，这与前人研究一致^[29]。然而，减施促芽肥处理下早施促芽肥可提高再生季有效穗数，弥补减施引起的产量下降(表 1 和表 3)。徐富贤等^[5]发现常规时期促芽肥施用时，增施促芽肥对头季生长后期稻桩营养充足的水稻品种增产作用不显著，而促芽肥提前到齐穗期施用可提高叶片光合能力，增加茎鞘同化物量，从而提高再生芽活芽率。另外，减少施氮量可以减少因同化氮而消耗的光合产物(碳架)，这也有利于茎鞘同化物积累^[30]。本研究也发现齐穗期施用高的促芽肥施用量对于稻桩生物量较高的两优 6326 再生季增产不显著(表 1 和表 5)，而早施减施促芽肥时两品种再生季有效穗数达到常规促芽肥施用模式的水平(表 3)。由此看来，在齐穗期减量施用促芽肥即可达到促进再生

芽生长的目的, 从而实现减氮和稳产。

3.2 促芽肥施用时期和施用量对头季灌浆的影响

氮素粒肥和灌浆期温度是影响籽粒灌浆的两个重要因子^[10,20]。粒肥可延缓籽粒发育, 延长灌浆时间^[31]。可能是因为施氮可提高茎叶中氮浓度, 提高蛋白合成相关酶活性同时降低淀粉合成相关酶活性, 进而延缓籽粒灌浆^[32]。本研究也发现, 在常规促芽肥施用量下, 早施促芽肥延长了两品种弱势粒活跃灌浆期, 这表明早施促芽肥可以发挥头季氮素粒肥的作用。灌浆初期是温度影响籽粒灌浆的关键时期, 气温超过适宜的灌浆温度(21~26℃)时可导致灌浆速率加快、灌浆时间缩短^[33]。在齐穗期施用氮肥有助于缓解高温导致的灌浆速率过快、灌浆时间缩短^[34]。本研究中头季灌浆期高温(日平均气温 29.1℃, 平均最高气温 33.4℃)可能会促进籽粒灌浆。然而, 本研究中齐穗期施用促芽肥显著降低两优 6326 强势粒和弱势粒平均灌浆速率, 延长活跃灌浆期(表 5), 这与前人研究一致^[34]。齐穗期施用促芽肥对甬优 4949 灌浆的影响仅出现在常规促芽肥施用量处理下的弱势粒以及减施促芽肥处理下的强势粒中, 这可能是由于甬优 4949 属于强、弱势粒异步灌浆型^[35]。花前茎鞘同化物可增加籽粒库强度和灌浆速率^[36], 与常规促芽肥施用模式相比, 本研究中早施减施促芽肥显著降低齐穗后茎鞘干物质转运量(表 5), 这也导致头季籽粒灌浆速率下降。另外, Hu 等^[37]和 Liu 等^[38]观察到幼穗分化期、开花期增施氮肥可以减缓高温对产量的伤害。这些结果表明, 早施减施促芽肥通过调节籽粒淀粉、蛋白合成和同化物再分配影响头季灌浆过程, 也可缓解高温对头季灌浆过程造成的不利影响。

3.3 促芽肥施用时期和施用量对再生稻头季稻米品质的影响

水稻稻米品质形成与籽粒灌浆过程、充实程度紧密相关^[10]。本研究发现头季籽粒加工、外观和食味品质与灌浆速率呈负相关, 与活跃灌浆期呈正相关(表 9), 这与前人研究一致^[39-40]。这些结果表明低灌浆速率和长活跃灌浆期有利于优良稻米品质形成。本研究发现低促芽肥施用量处理下, 齐穗期施用促芽肥显著提高了头季稻米加工和外观品质(表 4)。这可能因为早施促芽肥导致灌浆速率降低, 灌浆时间延长(表 7), 进而使籽粒充实度提高, 淀粉颗粒之间排列更加有序^[10,41]。水稻茎鞘同化物的再分配可加速胚乳发育, 提高灌浆速率^[36]。与常规施用模式相比, 早施减施促芽肥降低齐穗后茎鞘干物质转运量(表 5), 这解释了本研究中观察到的齐穗期施

用促芽肥导致灌浆速率降低(表 7)以及齐穗后茎鞘干物质转运量与稻米加工和外观品质之间的负相关(表 8)。齐穗期施用促芽肥可延缓叶片衰老和增加干物质积累, 为籽粒灌浆提供持续稳定的同化物^[27], 有利于优良稻米品质形成, 这也解释了本研究中观察到的齐穗后干物质积累量与稻米垩白粒率和垩白度之间的显著负相关(表 8)。因此, 早施减施促芽肥可通过降低灌浆速率, 延长灌浆时间, 提高稻米加工和外观品质。

本研究发现, 在常规促芽肥施用下, 早施促芽肥可降低头季籽粒直链淀粉含量(表 4), 这是因为早施促芽肥可降低籽粒中淀粉合成相关酶活性^[14]; 然而, 常规促芽肥水平下, 早施促芽肥导致两品种籽粒直链淀粉含量低于 13%, 蒸煮食味品质下降(表 4), 这与前人研究一致^[2]。Dou 等^[32]研究发现齐穗期施用氮肥可增加水稻籽粒中蛋白质浓度, 从而提高水稻营养品质; 类似地, 本研究发现早施促芽肥在两个促芽肥水平上可提高籽粒蛋白含量(表 4), 这和人研究一致^[14], 这与齐穗期施氮可提高叶片氮同化相关酶活性并促进籽粒蛋白合成有关^[14]。蛋白质附着在淀粉颗粒外围可提高淀粉稳定性和抗水解能力, 对稻米加工品质有利^[42-43]; 蛋白体可填充淀粉颗粒间孔隙, 减少垩白发生, 提高稻米外观品质^[44-45]。然而, 籽粒蛋白含量高可导致稻米蒸煮食味品质下降, 因为较多蛋白质附着在淀粉颗粒上可导致淀粉吸水性下降^[13,43]。因此, 与常规促芽肥施用模式相比, 早施减施促芽肥可提高加工和外观品质, 同时可避免籽粒直链淀粉含量过低和蛋白含量过高导致蒸煮食味品质下降。

华中地区再生稻生产中头季灌浆期时常遇到高温, 影响头季产量和品质形成^[2]。灌浆期不适宜的环境温度可影响灌浆过程, 导致稻米外观和加工品质下降^[11-12]。本研究中头季灌浆期的高温也可能影响了灌浆和稻米品质; 然而, 本研究发现与常规施用时期处理相比, 齐穗期施用促芽肥降低了两品种头季稻米垩白粒率和垩白度, 也降低了直链淀粉含量(表 4)。Dou 等^[32]和 Tang 等^[46]也观察到抽穗期施用氮肥可缓解高温导致的稻米品质劣化。因此, 这些研究表明再生稻生产中提前施用促芽肥可以缓解高温伤害, 提高头季稻米加工和外观品质。

头季收获后施用的提苗肥也影响再生季稻米品质, 施用提苗肥显著改善再生季稻米加工和外观品质^[19]; 然而, 促芽肥施用对再生季稻米品质没有显著影响^[47]。本研究也发现促芽肥施用时期和施用量处理对再生季稻米品质无显著影响(数据未呈现),

与他人研究结果相似^[19, 47]。这可能是由于再生季两次施肥主要目的不同, 促芽肥可延缓头季叶片衰老和增加稻桩含氮量, 从而提高再生芽成活率^[27]; 提苗肥可增加再生季新叶含氮量, 促进再生分蘖生长, 协调再生季源库关系^[48-49]。本研究和前人研究结果表明合理运筹促芽肥和提苗肥管理可协同提升再生稻头季和再生季产量和品质。

4 结论

早施促芽肥可提高稻桩干物质积累, 有利于再生芽生长。早施处理下, 减氮对两品种头季产量无影响, 降低了甬优4949再生季产量, 然而对稻桩生物量较高品种(两优6326)再生季无影响, 这表明早施减施促芽肥可促进稻桩生物量高品种的再生芽生长, 从而实现减氮和稳产。早施减施促芽肥可通过调节籽粒淀粉和蛋白质合成、茎鞘物质向籽粒分配来调节头季灌浆过程, 有利于提高头季稻米品质。因此, 在再生稻生产中可以通过促芽肥提前并减量施用来实现再生稻头季品质和周年产量的协同提升, 以实现再生稻生产的高效、绿色和可持续发展。

参考文献:

- [1] 彭少兵. 对转型时期水稻生产的战略思考[J]. 中国科学: 生命科学, 2014, 44(8): 845-850.
Peng S B. Reflection on China's rice production strategies during the transition period[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2014, 44(8): 845-850. (in Chinese with English abstract)
- [2] Peng S B, Zheng C, Yu X. Progress and challenges of rice ratooning technology in China[J]. *Crop and Environment*, 2023, 2(1): 5-11.
- [3] Yu X, Guo Y, Yang G D, Zhang Z L, Liang Y J, Zheng C, Xu L, Yuan S, Wang F, Huang J L, Peng S B. Nitrogen response of regenerated tillers varied among node positions in ratoon rice[J]. *Field Crops Research*, 2022, 289: 108717.
- [4] 周文新. 不同类型再生稻生育特性及源库关系比较研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2006.
Zhou W X. Comparative studies on growth characters and source-sink relationships of different types of ratooning rice[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [5] 徐富贤, 熊洪, 朱永川, 张林, 郭晓艺, 刘茂. 促芽肥施用时期对不同源库类型杂交中稻再生力的影响[J]. 杂交水稻, 2010, 25(3): 57-63+99.
Xu F X, Xiong H, Zhu Y C, Zhang L, Guo X Y, Liu M. Effects of the time of N application for bud development on the ratooning ability of mid-season rice hybrids with different source-sink structure[J]. *Hybrid Rice*, 2010, 25(3): 57-63+99. (in Chinese with English abstract)
- [6] 徐富贤, 洪松, 熊洪. 促芽肥与杂交中稻再生力关系及其作用机理[J]. 作物学报, 1997, 23(3): 311-317.
Xu F X, Hong S, Xiong H. Relation between N applying for bud development and ratooning ability and its mechanism in hybrid rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23(3): 311-317. (in Chinese with English abstract)
- [7] 熊洪, 冉茂林, 徐富贤, 洪松. 南方稻区再生稻研究进展及发展[J]. 作物学报, 2000, 26(3): 297-304.
Xiong H, Ran M L, Xu F X, Hong S. Achievements and developments of ratooning rice in south of China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(3): 297-304. (in Chinese with English abstract)
- [8] 林文雄, 陈鸿飞, 张志兴, 徐倩华, 屠乃美, 方长旬, 任万军. 再生稻产量形成的生理生态特性与关键栽培技术的研究与展望[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 392-401.
Lin W X, Chen H F, Zhang Z X, Xu Q H, Tu N M, Fang C X, Ren W J. Research and prospect on physio-ecological properties of ratoon rice yield formation and its key cultivation technology[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(4): 392-401. (in Chinese with English abstract)
- [9] 凌启鸿, 苏祖芳, 侯康平, 郭宏文. 水稻潜伏芽生长和穗分化形成规律及其应用的研究[J]. 中国农业科学, 1989, 22(1): 35-43.
Ling Q H, Su Z F, Hou K P, Guo H W. Studies on the growth and panicle differentiation of resting bud and its application in rice plants[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, 22(1): 35-43. (in Chinese with English abstract)
- [10] Huang J W, Pan Y P, Chen H F, Zhang Z X, Fang C X, Shao C H, Amjad H, Lin W W, Lin W X. Physiochemical mechanisms involved in the improvement of grain-filling, rice quality mediated by related enzyme activities in the ratoon cultivation system[J]. *Field Crops Research*, 2020, 258: 107962.
- [11] Chun A, Lee H J, Hamaker B R, Janaswamy S. Effects of ripening temperature on starch structure and gelatinization, pasting, and cooking properties in rice (*Oryza sativa*) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(12): 3085-3093.
- [12] Fan X F, Sun X S, Yang R, Chen S, Li R M, Bian X Y, Xiao L X, Zhang C. Comparative analyses of grain quality in response to high temperature during the grain-filling stage between Wx^a and Wx^b under indica and japonica backgrounds[J]. *Agronomy*, 2022, 13(1): 17.
- [13] 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)
- [14] Fei L W, Yang S C, Ma A, Lun Z C, Wang M, Wang G J, Guo S W. Grain chalkiness is reduced by coordinating the biosynthesis of protein and starch in fragrant rice (*Oryza sativa* L.) grain under nitrogen fertilization[J].

- Field Crops Research*, 2023, 302: 109098.
- [15] 刘国华, 邓化冰, 陈立云, 肖应辉, 唐文邦. 中稻头季稻与再生稻的品质比较研究[J]. 杂交水稻, 2002, 17(1): 47-49.
Liu G H, Deng H B, Chen L Y, Xiao Y H, Tang W B. Comparison of grain quality between main and ratooning crops of middle-season rice[J]. *Hybrid Rice*, 2002, 17(1): 47-49. (in Chinese with English abstract)
- [16] Yuan S, Yang C, Yu X, Zheng C, Xiao S, Xu L, Cui K H, Huang J L, Peng S B. On-farm comparison in grain quality between main and ratoon crops of ratoon rice in Hubei Province, Central China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(15): 7259-7267.
- [17] Lin F F, Huang J W, Lin S, Letuma P, Xie D X, Rensing C, Lin W X. Physiological and transcriptomic analysis reveal the regulatory mechanism underlying grain quality improvement induced by rice ratooning[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(7): 3569-3578.
- [18] 肖无为, 朱辰光, 王飞, 熊栋梁, 黄见良, 彭少兵, 崔克辉. 再生稻稻米品质研究进展[J]. 中国水稻科学, 2025, 39 (1): 33-46.
Xiao W W, Zhu C G, Wang F, Xiong D L, Huang J L, Peng S B, Cui K H. Research progress on the rice quality of ratoon rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2025, 39 (1): 33-46. (in Chinese with English abstract)
- [19] Yang D S, Peng S B, Zheng C, Xiang H S, Huang J L, Cui K H, Wang F. Effects of nitrogen fertilization for bud initiation and tiller growth on yield and quality of rice ratoon crop in central China[J]. *Field Crops Research*, 2021, 272: 108286.
- [20] 缪乃耀. 氮素粒肥对水稻灌浆前期高温胁迫的缓解效应及其生理机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
Miao N Y. Nitrogen granular fertilizer alleviating rice early grain filling stage heat stress and its physiological mechanism[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [21] 沈圻垭, 李思宇, 刘立军. 氮素粒肥对长江中下游粳稻产量、氮肥利用率和品质的影响[J]. 核农学报, 2024, 38(8): 1585-1594.
Sen X Y, Li S Y, Liu L J. Effects of grain nitrogen fertilizer on yield, nitrogen use efficiency and quality in japonica rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2024, 38(8): 1585-1594. (in Chinese with English abstract)
- [22] 林文雄, 翁佩莹, 林文芳, 邵彩虹, 郭春林, 李忠, 陈鸿飞, 陈婷. 中国机收再生稻研究现状与展望[J]. 应用生态学报, 2024, 35(3): 827-836.
Lin W X, Weng P Y, Lin W F, Shao C H, Guo C L, Li Z, Chen H F, Chen T. Research status and prospect of ratoon rice in China under mechanically harvested condition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(3): 827-836. (in Chinese with English abstract)
- [23] He A B, Wang W Q, Jiang G L, Sun H J, Jiang M, Man J, Cui K H, Huang J L, Peng S B, Nie L. Source-sink regulation and its effects on the regeneration ability of ratoon rice[J]. *Field Crops Research*, 2019, 236: 155-164.
- [24] 朱庆森, 曹显祖, 骆亦其. 水稻籽粒灌浆的生长分析[J]. 作物学报, 1988, 14(3): 182-193.
Zhu Q S, Cao X Z, Luo Y Q. Growth analysis on the process of grain filling in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1988, 14(3): 182-193. (in Chinese with English abstract)
- [25] 孙晓辉, 田彦华, 任天举. 促芽肥对杂交稻培育再生稻效果研究[J]. 四川农业科技, 1982(3): 1-4+7.
Sun X H, Tian Y H, Ren T J. Study on the effect of bud-promotion fertilizer on hybrid rice cultivation ratoon rice[J]. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 1982(3): 1-4+7. (in Chinese with English abstract)
- [26] 高欠清, 任孝俭, 翟中兵, 郑普兵, 吴源芬, 崔克辉. 头季穗肥和促芽肥对再生稻再生芽生长及产量形成的影响[J]. 中国水稻科学, 2023, 37(4): 405-414.
Gao Q Q, Ren X J, Zhai Z B, Zheng P B, Wu Y F, Cui K H. Effects of panicle and bud-promoting nitrogen fertilizer application on growth of regenerated bud and grain yield of ratoon rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2023, 37(4): 405-414. (in Chinese with English abstract)
- [27] Xu F X, Zhang L, Zhou X B, Guo X Y, Zhu Y C, Mao L, Xiong H, Jiang P. The ratoon rice system with high yield and high efficiency in China: Progress, trend of theory and technology[J]. *Field Crops Research*, 2021, 272: 108282.
- [28] Zhang Q, Liu X C, Yu G L, Wang H, Feng D Q, Zhao H Y, Liu L J. Agronomic and physiological characteristics of high-yielding ratoon rice varieties[J]. *Agronomy Journal*, 2021, 113(6): 5063-5075.
- [29] 袁高华. 促芽肥和留桩高度对水稻再生芽生长及产量形成的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
Yuan G H. Effect of bud-promoting fertilizer and main crop stubble height on growth of rice ratooning buds and ratooning yield formation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [30] Gebbing T, Schnyder H, Kühbauch W. The utilization of pre-anthesis reserves in grain filling of wheat. Assessment by steady-state $^{13}\text{CO}_2$ / $^{12}\text{CO}_2$ labelling[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1999, 22: 851-858.
- [31] 王凯璐. 灌浆期增温和增施氮肥对稻米品质及淀粉理化性质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2021.
Wang K L. Effects of warming and nitrogen application at grain filling stage on rice quality and physicochemical properties of starch[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [32] Dou Z, Tang S, Li G H, Liu Z H, Ding C Q, Chen L, Wang S H, Ding Y F. Application of nitrogen fertilizer at heading stage improves rice quality under elevated temperature during grain-filling stage[J]. *Crop Science*, 2017, 57(4): 2183-2192.
- [33] 沈泓, 姚栋萍, 吴俊, 罗秋红, 吴志鹏, 雷东阳, 邓启

- 云, 柏斌. 灌浆期不同时段高温对稻米淀粉理化特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(4): 377-387.
- Shen H, Yao D P, Wu J, Luo Q H, Wu Z P, Lei D Y, Deng Q Y, Bai B. Effects of high temperature in various phases of grain filling on rice starch physicochemical properties[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2022, 36(4): 377-387. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘文哲. 开放式增温条件下氮素粒肥对水稻籽粒灌浆及品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- Liu W Z. Effects of nitrogen granular fertilizer on rice grain filling and quality under open warming conditions[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [35] 杨建昌, 徐国伟, 仇明, 张文虎, 王志琴, 朱庆森. 新株型水稻生育特性及产量形成特点的研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2002, 23(1): 45-50.
- Yang J C, Xu G W, Qiu M, Zhang W H, Wang Z Q, Zhu Q S. Growth and development characteristics and yield formation of new plant type rice[J]. *Journal of Yangzhou University(Agricultural and Life Sciences Edition)*, 2002, 23(1): 45-50. (in Chinese with English abstract)
- [36] Fu J, Huang Z H, Wang Z Q, Yang J C, Zhang J H. Pre-anthesis non-structural carbohydrate reserve in the stem enhances the sink strength of inferior spikelets during grain filling of rice[J]. *Field Crops Research*, 2011, 123(2): 170-182.
- [37] Hu Q Q, Yan N, Cui K H, Li G H, Wang W C, Huang J L, Peng S B. Increased panicle nitrogen application improves rice yield by alleviating high-temperature damage during panicle initiation to anther development[J]. *Physiologia Plantarum*, 2024, 176(2): e14230.
- [38] Liu K, Deng J, Lu J, Wang X Y, Lu B L, Tian X H, Zhang Y B. High nitrogen levels alleviate yield loss of super hybrid rice caused by high temperatures during the flowering stage[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 357.
- [39] 王军可, 王亚梁, 陈惠哲, 向镜, 张义凯, 朱德峰, 张玉屏. 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.
- Wang J K, Wang Y L, Chen H Z, Xiang J, Zhang Y K, Zhu D F, Zhang Y P. Mechanism of high temperature affecting carbon and nitrogen metabolism of rice grain at the early stage of grain filling[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2020, 41(12): 774-784. (in Chinese with English abstract)
- [40] Dou Z, Tang S, Chen W Z, Zhang H X, Li G H, Liu Z H, Ding C Q, Wang S H, Zhang H C, Ding Y F. Effects of open-field warming during grain-filling stage on grain quality of two japonica rice cultivars in lower reaches of Yangtze River delta[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 81: 118-126.
- [41] 何丽萍. 利用双向导入系解析再生稻外观与蒸煮食味品质的遗传基础[D]. 荆州: 长江大学, 2022.
- He L P. Genetic dissection of appearance and cooking quality of ratooning rice by two sets of reciprocal introgression lines [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [42] Zhou T Y, Zhou Q, Li E P, Yuan L M, Wang W L, Zhang H, Liu L J, Wang Z Q, Yang J F, Gu J F. Effects of nitrogen fertilizer on structure and physicochemical properties of 'super' rice starch[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 239: 116237.
- [43] Shi S J, Zhang G Y, Chen L L, Zhang W H, Wang X D, Pan K Q, Li L N, Wang J, Liu J, Cao C G, Jiang Y. Different nitrogen fertilizer application in the field affects the morphology and structure of protein and starch in rice during cooking [J]. *Food Research International*, 2023, 163: 112193.
- [44] Zhao Y F, Ran X, Yin T Y, Guo H, Zhang X Y, Shen Y Y, Liu W Z, Ding Y F, Tang S. Nitrogen alleviated the deterioration of rice quality by affecting the accumulation of grain storage protein under elevated temperature[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2022, 42(6): 3388-3404.
- [45] Wang X Q, Wang K L, Yin T Y, Zhao Y F, Liu W Z, Shen Y Y, Ding Y F, Tang S. Nitrogen fertilizer regulated grain storage protein synthesis and reduced chalkiness of rice under actual field warming[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 715436.
- [46] Tang S, Zhang H X, Liu W Z, Dou Z, Zhou Q Y, Chen W Z, Wang S H, Ding Y F. Nitrogen fertilizer at heading stage effectively compensates for the deterioration of rice quality by affecting the starch-related properties under elevated temperatures[J]. *Food Chemistry*, 2019, 277: 455-462.
- [47] 余延丰, 张富林, 刘冬碧, 吴茂前, 张志毅, 夏颖, 范先鹏, 王玲, 肖依波, 肖国平. 氮肥用量和运筹方式对再生稻产量品质和氮肥利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(12): 133-140.
- Yu Y F, Zhang F L, Liu D B, Wu M Q, Zhang Z Y, Xia Y, Fan X P, Wang L, Xiao Y B, Xiao G P. Effect of nitrogen fertilizer application rate and strategy on yield, quality and nitrogen utilization of ratoon rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(12): 133-140. (in Chinese with English abstract)
- [48] 苏素苗, 戴志刚, 王敏羽, 王森, 王志宾, 余德芳, 李旭春, 李小坤. 氮肥运筹方式及催芽氮肥用量对再生稻产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(12): 2172-2184.
- Su S M, Dai Z G, Wang M Y, Wang S, Wang Z B, Yu D F, Li X C, Li X K. Effects of nitrogen application method and bud-promoting nitrogen fertilizer rate on yield and quality of ratoon rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(12): 2172-2184. (in Chinese with English abstract)
- [49] 袁继超, 孙晓辉. 留桩节位与母叶对再生稻生长发育的影响[J]. 四川农业大学学报, 1996, 14(4): 523-528.
- Yuan J C, Sun X H. Effect of cutting node and leaves retained on the mother stem on rice ratooning[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 1996, 14(4): 523-528. (in Chinese with English abstract)