

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.02017

控水增密模式对杂交籼稻减氮后产量形成的调控效应

李敏* 罗德强* 江学海 蒋明金 姬广梅 李立江 周维佳

贵州省农业科学院水稻研究所, 贵州贵阳 550006

摘要:以杂交籼稻品种成优 981 为试验材料, 于 2017—2018 年开展大田试验, 以常规高产栽培($N_0W_0D_0$)为对照: N_0 为施氮量 187.5 kg hm^{-2} 、 W_0 为湿润灌溉(0 kPa)、 D_0 为密度 $20.0 \times 10^4 \text{ hm}^{-2}$, 在减氮 10% ($N_{-10\%}$)和减氮 30% ($N_{-30\%}$)条件下分别设置 3 种单一增密处理(W_0D_1 、 W_0D_2 、 W_0D_3 ; D_1 为增密 20%、 D_2 为增密 40%、 D_3 为增密 60%)和 9 种控水增密耦合模式处理(W_1D_1 、 W_1D_2 、 W_1D_3 、 W_2D_1 、 W_2D_2 、 W_2D_3 、 W_3D_1 、 W_3D_2 和 W_3D_3 ; W_1 、 W_2 、 W_3 分别为轻、中、重干湿交替灌溉, 低限土壤水势分别为 -10 kPa、-20 kPa 和 -30 kPa), 研究控水增密耦合模式对水稻不同程度减氮后产量形成的调控效应。结果表明: (1) 减氮 10% ($N_{-10\%}$)条件下, 3 种单一增密处理均较对照减产, 其中 W_0D_1 与对照相比产量差异不显著, 其成熟期干物质积累量略有提高, 但收获指数降低。9 种控水增密模式中 W_1D_1 和 W_2D_1 分别较对照平均增产 3.70%和 1.19%, 前者差异达显著水平, 该 2 种模式的有效穗数与对照基本相当, 穗粒数分别降低 3.50%和 2.79%, 结实率分别提高 3.04%和 2.37%, 千粒重分别增加 0.71%和 0.35%, 2 种模式增产的主要原因是分蘖成穗率分别提高 3.88%和 5.54%, 抽穗期高效叶面积指数分别提高 2.77%和 0.59%, 同时成熟期干物质积累总量与对照基本相当, 且穗部干物质分配量分别增加 3.87%和 1.78%、穗部干物质分配比例分别增加 5.50%和 6.24%, 收获指数分别提高 5.53%和 5.93%。(2) 减氮 30% ($N_{-30\%}$)条件下, 9 种控水增密模式 2 年均较对照显著减产, 平均减产 15.44%~30.85%, 其中 W_2D_2 和 W_1D_2 模式减产幅度较小。因此, 合理的控水增密耦合模式能在少量减氮条件下调控群体生长特性以实现水稻增产, 但过量减氮条件下控水增密模式的调控效应变弱、难以实现高产。

关键词: 杂交籼稻; 减氮; 控水; 增密; 调控

Regulations of controlled irrigations and increased densities on yield formation of hybrid *indica* rice under nitrogen-reduction conditions

LI Min*, LUO De-Qiang*, JIANG Xue-Hai, JIANG Ming-Jin, JI Guang-Mei, LI Li-Jiang, and ZHOU Wei-Jia

Rice Research Institute, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, Guizhou, China

Abstract: Rice is one of the most important staple food crops of the world, both water management and plant density are crucial factors for the growth and development of rice. However, little information has been known about the combined effects of water management and plant density on grain yield under nitrogen-reduction conditions in rice. Field experiments were conducted in the farm of Rice Research Institute of Guizhou Agricultural Sciences Academy in 2017 and 2018. The hybrid *indica* rice cultivar Chengyou 981 was selected as the material, and the conventional high-yielding cultivation model as the control (CK), of which the nitrogen application rate (N_0) was 187.5 kg hm^{-2} , the water management (W_0) was wet irrigation, and the plant density (D_0) was $20.0 \times 10^4 \text{ hm}^{-2}$. Three models with increased density (W_0D_1 : a density increased by 20%, W_0D_2 : a density increased by 40%, and W_0D_3 : a density increased by 60%) and nine combined models of controlled irrigation and increased density (W_1D_1 , W_1D_2 , W_1D_3 , W_2D_1 , W_2D_2 , W_2D_3 , W_3D_1 , W_3D_2 , and W_3D_3) were set to study the yield and its formation of rice under two nitrogen-reduction conditions. W_1 , alternate wetting and light drying irrigation with -10 kPa of the minimum soil water potential; W_2 , alternate wetting and moderate drying irrigation with -20 kPa of the minimum soil water potential; and W_3 , alternate wetting and heavy drying irrigation with -30 kPa of the minimum soil water potential. The results were as follows: (1) When the nitrogen

本研究由国家自然科学基金项目(31660369)和贵州省科技基金项目(2016-1148)资助。

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31660369) and the Science and Technology Foundation of Guizhou Province (2016-1148).

* 通信作者(Corresponding authors): 李敏, E-mail: 233652981@qq.com; 罗德强, E-mail: 398004824@qq.com

Received (收稿日期): 2020-03-08; Accepted (接受日期): 2020-06-02; Published online (网络出版日期): 2020-06-18.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200618.1037.002.html>

application was reduced by 10%, compared with CK, the grain yields of three increased density treatments were significantly decreased except W_0D_1 , which had a slightly increased dry matter accumulation at maturity. Among the nine combined models of controlled water and increased density, the grain yields of W_1D_1 and W_2D_1 were 3.70% and 1.19% higher than that of CK, respectively. The effective panicle numbers of W_1D_1 and W_2D_1 were equivalent to that of CK, while the spikelet numbers per panicle decreased by 3.50% and 2.79%, seed-setting rates increased by 3.04% and 2.37%, and 1000-grain weights increased by 0.71% and 0.35%, respectively. Compared with CK, the higher grain yields of W_1D_1 and W_2D_1 were attributed to 3.88% and 5.54% higher percentage of productive tillers, 2.77% and 0.59% higher highly effective leaf area index at heading, 3.87% and 1.78% higher dry matter accumulation in panicles, 5.50% and 6.24% higher percentage of dry matter accumulation in panicles, 5.53% and 5.93% higher harvest index, and the equivalent total dry matter accumulation at maturity, respectively. (2) When the nitrogen application was reduced by 30%, the grain yields of nine combined models of controlled water and increased density were significantly decreased by 15.44%–30.85% as compared with CK. W_2D_2 and W_1D_2 had the smallest yield reductions. Therefore, the reasonable combined model of controlled water and increased density under a small amount of nitrogen-reduction could improve the growth characteristics of rice plants and increase grain yield, while the regulatory effects of controlled water and increased density became weaker and resulted in significantly lower grain yield under the excessive nitrogen-reduction.

Keywords: hybrid *indica* rice; nitrogen-reduction; controlled irrigation; increased density; regulation

水稻是我国最主要的粮食作物之一, 养活了世界上近 50%的人口^[1], 随着人口增加和耕地减少, 产量必须每年提高 1.2%才能满足人类的稻米需求^[2]。增施氮肥使水稻产量一度持续增加, 但我国水稻氮肥用量已超过世界平均水平的近 90%^[1], 造成氮肥严重损失, 极大地降低了氮肥利用效率并易引发环境污染^[1-2], 因此如何在保证水稻高产的同时减少氮肥用量成为亟待解决的重要问题。

在同一栽培环境中, 每个水稻品种均存在着最高产施氮量, 通常也被作为最适施氮量应用^[2-3], 一般来说, 高于最适施氮量范围进行减氮, 水稻产量和氮肥利用率均会不断增加^[3-4], 这也是实现水稻减氮高产的重要措施, 但随着品种不断演进, 一些超级稻品种耐肥性增强^[5-6], 品种的最高产施氮量提高, 如江苏粳稻品种往往在施氮量 300 kg hm^{-2} 时才能获得最高产量^[5-6], 大大超过国际上安全施氮标准^[2], 因此施氮量仍需要进一步降低, 而低于最适施氮量范围进行减氮, 水稻植株容易产生不同程度的氮素亏缺^[7], 表现为群体氮素吸收量和群体干物质积累量显著减少^[6-7], 造成减产。如何调控水稻氮素亏缺以实现减氮高产具有重要研究意义。

合理的移栽密度和改善的水分管理方式均能有效调控水稻群体生长特性并提高产量。关于移栽密度调控的研究表明, 在一定范围内增加移栽密度, 水稻氮素积累量和干物质积累量显著增加, 产量提高^[8-9], 但密度过大也会造成群体郁闭和加重病虫害发生, 降低收获指数和产量^[10]。同时密度与施氮量之间存在互作关系, 不同施氮量条件下的适宜密度有所差异, 一些研究相继提出了高氮高密耦合^[11-12]、高氮低密耦合^[13]、中氮高密耦合^[14]等高产耦合模式。关于水分调控的研究表明, 有效分蘖临界叶龄期后

排水晒田能减少无效分蘖发生、提高分蘖成穗率^[15], 采取干湿交替灌溉技术能提高根系活力、促进籽粒灌浆充实^[16], 提高产量^[17-18]。同时水分与氮肥也存在明显互作关系^[13,19-20], 采取优化的水分管理, 可提高水稻氮肥利用率, 减少稻田氮损失, Sun等^[20]认为采取中氮处理(施氮量 180 kg hm^{-2})与间歇湿润灌溉耦合可实现水稻高产。因此, 采取合适的水分和密度管理均有可能实现减氮高产, 但目前关于水分管理和移栽密度互作影响水稻施氮量和产量的研究较少, 据安宁等^[1]报道, 采取包括干湿交替灌溉、增加密度等多项栽培技术的最佳管理技术能够显著提高水稻产量和降低氮肥用量, 但控水增密耦合模式对水稻氮素亏缺条件的产量形成的调控效应及其生理机理仍不清楚。鉴于此, 本文基于前期研究基础, 以常规高产栽培为对照(CK), 在品种最适施氮量(最高产施氮量)为标准的前提下设置2种减氮处理和控水增密耦合模式, 研究水稻氮素亏缺特征以及控水增密耦合模式对减氮后产量形成的调控效应, 明确不同减氮条件下的最佳控水增密耦合模式, 为水稻合理减氮及水稻减氮高产高效栽培提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验设计

选用中熟杂交籼稻品种成优 981 (国审稻 2014036)作为试验材料, 该品种株高 119.5 cm, 分蘖能力中等, 穗型较大, 中抗稻瘟病。试验在贵州省农业科学院水稻研究所试验农场($27^{\circ}76'N$ 、 $107^{\circ}50'E$)进行, 前茬为冬闲田, 土壤含全氮 0.12% 、碱解氮 86.7 mg kg^{-1} 、速效磷 32.8 mg kg^{-1} 、速效钾 87.7 mg kg^{-1} 。

2015—2016 年进行预备试验,在常规水分密度条件下(移栽密度为 $20.0 \times 10^4 \text{ hm}^{-2}$,水分管理为湿润灌溉),设置 5 个施氮总量 (0、150、187.5、225 和 262.5 kg hm^{-2}),2 年结果一致表明,成优 981 在施氮量 187.5 kg hm^{-2} 条件下产量最高,将其作为该品种最适施氮量。

2017—2018 年以该品种常规高产栽培为对照 (CK): 施氮量 187.5 kg hm^{-2} (N_0)、湿润灌溉 (W_0)、移栽密度 $20.0 \times 10^4 \text{ hm}^{-2}$ (D_0), 在 2 种减氮条件下(减氮 10% 处理, 施氮量为 $168.75 \text{ kg hm}^{-2}$, 记为 $N_{-10\%}$; 减氮 30% 处理, 施氮量为 $131.25 \text{ kg hm}^{-2}$, 记为 $N_{-30\%}$), 分别设置不控水增密 (W_0D_0)、单一增密 (W_0D_1 、 W_0D_2 、 W_0D_3 ; D_1 为增密 20%、 D_2 为增密 40%、 D_3 为增密 60%) 和控水增密 (W_1D_1 、 W_1D_2 、 W_1D_3 、 W_2D_1 、 W_2D_2 、 W_2D_3 、 W_3D_1 、 W_3D_2 、 W_3D_3 ; W_1 、 W_2 、 W_3 分别为轻、中、重干湿交替灌溉, 低限土壤水势分别为 -10 、 -20 和 -30 kPa), 组合成 27 种栽培模式, 各栽培模式随机区组设计, 小区面积 6 m^2 , 重复 3 次, 小区间单独作埂隔离, 保证单独排灌。2017 年播种期为 4 月 12 日, 湿润育秧, 移栽期为 5 月 12 日, 抽穗期介于 8 月 11 日至 13 日, 成熟期介于 9 月 28 日至 30 日; 2018 年播种期为 4 月 10 日, 湿润育秧, 移栽期为 5 月 10 日, 抽穗期介于 8 月 10 日至 12 日, 成熟期介于 9 月 27 日至 30 日。采用拉绳打点人工移栽, 单本栽插, D_0 处理的行株距为 $30.0 \text{ cm} \times 16.7 \text{ cm}$, D_1 处理的株行距为 $30.0 \text{ cm} \times 13.9 \text{ cm}$, D_2 处理的株行距为 $30.0 \text{ cm} \times 11.9 \text{ cm}$, D_3 处理的株行距为 $30.0 \text{ cm} \times 10.4 \text{ cm}$ 。除施氮总量、水分和密度外, 其余栽培管理按照: 氮肥分 4 次施用, 基肥: 分蘖肥: 促花肥: 保花肥 = 30:20:30:20, 基肥于移栽前施用, 分蘖肥于移栽后 5 d 施用, 促花肥于倒四叶叶龄期施用, 保花肥在倒二叶叶龄期施用; 磷肥 (P_2O_5) 施用总量为 112.5 kg hm^{-2} , 全部用做基肥; 钾肥 (K_2O) 施用总量为 187.5 kg hm^{-2} , 分基肥和拔节肥 2 次等量施用, 病虫害按高产栽培严格管理。4 种灌溉管理方式为: (1) W_0 (湿润灌溉): ($N-n-1$) 叶龄期至 ($N-n$) 叶龄期进行排水搁田, 低限土壤水势为 -20 kPa , 其余时期保持田间 $1\sim 2 \text{ cm}$ 浅水层; (2) W_1 (轻干湿交替灌溉): 从移栽至返青建立浅水层; 返青至有效分蘖临界叶龄期 ($N-n$) 前 2 个叶龄期 ($N-n-2$) 进行间隙湿润灌溉, 低限土壤水势为 0 kPa ; ($N-n-1$) 叶龄期至 ($N-n$) 叶龄期进行排水搁田, 低限土壤水势为 -20 kPa , 并保持 1 个叶龄期; ($N-n+1$) 叶龄期至抽穗

后 45 d 进行轻度干湿交替灌溉, 低限土壤水势为 -10 kPa ; (3) W_2 (中干湿交替灌溉): 从移栽至返青建立浅水层; 返青至有效分蘖临界叶龄期 ($N-n$) 前 2 个叶龄期 ($N-n-2$) 进行间隙湿润灌溉, 低限土壤水势为 -10 kPa ; ($N-n-1$) 叶龄期至 ($N-n$) 叶龄期进行排水搁田, 低限土壤水势为 -20 kPa , 并保持 1 个叶龄期; ($N-n+1$) 叶龄期至抽穗后 45 d 进行中度干湿交替灌溉, 低限土壤水势为 -20 kPa ; (4) W_3 (重干湿交替灌溉): 从移栽至返青建立浅水层; 返青至有效分蘖临界叶龄期 ($N-n$) 前 2 个叶龄期 ($N-n-2$) 进行干湿交替灌溉, 低限土壤水势为 -20 kPa ; ($N-n-1$) 叶龄期至 ($N-n$) 叶龄期进行排水搁田, 低限土壤水势为 -30 kPa , 并保持 1 个叶龄期; ($N-n+1$) 叶龄期至抽穗后 45 d 进行重度干湿交替灌溉, 低限土壤水势为 -30 kPa 。用水分张力计监测各处理 $15\sim 20 \text{ cm}$ 深处土壤水势, 于每天 12:00 读取水势值, 当水势达到预设阈值时即灌 $1\sim 2 \text{ cm}$ 浅层水, 自然落干后达到预设阈值时再灌水, 用水表准确记录灌水量, 全生育期 W_0 、 W_1 、 W_2 和 W_3 处理的平均灌溉用水量分别为 950.0 、 782.0 、 703.0 和 510.0 mm 。本试验地上方搭建透明玻璃顶棚, 保证水稻生长期不受降雨因素的影响, 顶棚高度 4.0 m , 试验区四周空旷通风。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 茎蘖生长 移栽后各处理定点 30 穴, 于拔节期、抽穗期和成熟期调查茎蘖数量(成熟期为有效穗数), 计算单位面积茎蘖数和成穗率。

1.2.2 干物质 在拔节期、抽穗期和成熟期, 每处理选取代表性植株 5 穴, 按器官(茎鞘、叶、穗)分开, 在 105°C 杀青 30 min, 之后于 80°C 烘干至恒重, 计算各生育时期干物质积累量、各生育阶段干物质积累量和积累比例、成熟期各器官干物质积累量及积累比例。

干物质阶段积累量 = 后生育时期干物质积累量 - 前生育时期干物质积累量

干物质阶段积累比例(%) = 干物质阶段积累量 / 成熟期干物质积累量 $\times 100\%$

1.2.3 叶面积 抽穗期干物质测定时, 用 Li-3000 型自动叶面积仪测定取样的植株叶面积, 测定时分为总叶面积(所有茎蘖的叶面积)和高效叶面积(有效茎蘖的倒三叶叶面积), 计算叶面积指数和高效叶面积指数。

1.2.4 产量及其构成因素 成熟期数取各小区定点标记的 30 穴计算平均有效穗数, 并选取代表性植株

5 穴, 测定穗粒数、结实率、千粒重, 并实收小区产量。

1.4 数据处理与统计分析

使用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据计算和图表绘制, 使用 SPSS 19.0 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 2017—2018 年主要性状指标年度间以及年度与处理互作的方差分析

方差分析结果显示(表 1), 2017 和 2018 年试验结果中, 重复的栽培模式主要性状指标在年度间差异大多不显著, 各指标年度与栽培模式交互效应均不显著, 由于 2 年试验结果规律基本一致, 除产量数据外, 本文重点对 2017 年数据进行分析。

2.2 控水增密模式对水稻减氮后产量及其构成的影响

为便于分析, 将减氮与控水增密的组合归为栽培模式作为单一因素进行方差分析(表 2)。与常规高产栽培(N₀W₀D₀, CK)比较, 减氮 10% (N_{-10%})条件下 W₀D₀ 模式 2017 和 2018 年分别减产 8.15%和 8.05%, 差异均达显著水平(表 3 和表 4)。单一增密处理(W₀D₁, W₀D₂, W₀D₃) 2017 年较 CK 分别减产 1.75%、7.65%和 20.80%, 2018 年分别减产 1.00%、6.30%和 20.47%,

其中 W₀D₁ 与 CK 差异不显著。9 种控水增密模式中, W₁D₁ 和 W₂D₁ 两年产量均超过 CK, W₁D₁ 两年分别增产 3.91%和 1.75%, W₂D₁ 两年分别增产 1.50%和 0.44%, 前者 2017 年差异达显著水平, 与 CK 相比, 2 种模式的有效穗数未有显著差异, 穗粒数 2 年分别降低 3.67%和 2.62%, 结实率 2 年分别提高 2.66%和 2.74%, 差异达显著水平, 千粒重分别增加 0.53%和 0.51%, 其余 7 种模式 2 年均较 CK 减产, 减产幅度 2 年分别为 6.35%~21.23%和 1.64%~23.29%。

与常规高产栽培(N₀W₀D₀, CK)相比, 减氮 30% (N_{-30%})条件下 W₀D₀ 两年分别减产 24.68%和 18.72% (表 3 和表 4), 单一增密处理(W₀D₁, W₀D₂, W₀D₃) 2017 年分别减产 25.87%、24.13%和 27.70%, 2018 年分别减产 20.30%、17.76%和 24.67%。9 种控水增密模式均较 CK 减产, 2017 年和 2018 年平均分别减产 24.10%和 22.72%, 平均有效穗数 2 年分别减少 10.73%和 12.99%, 平均穗粒数 2 年分别减少 6.82%和 10.45%, 结实率和千粒重互有高低, 其中 W₂D₂ 和 W₁D₂ 两种模式的减产幅度相对较小, 2 年分别减产 19.86%和 15.92%, 有效穗数 2 年分别减少 8.55%和 10.14%, 穗粒数分别减少 6.52%和 8.48%, 结实率与 CK 基本相当, 千粒重互有高低。

表 1 2017—2018 年不同年份间相同试验处理下主要指标的方差分析(F 值)

Table 1 Analysis of variance for the key growth traits influencing grain yield from 2017 to 2018 under the same cultivation model (F-values)

方差分析 Analysis of variance	产量 Grain yield	分蘖成穗率 Percentage of productive tillers	抽穗期高效叶面积指数 Highly effective leaf area index at heading	干物质积累总量 Above ground biomass	收获指数 Harvest index
年度 Year (Y)	44.37**	2.56 ns	3.12 ns	44.37**	1.28 ns
年度×栽培模式 Y×cultivation model	1.49 ns	1.21 ns	0.87 ns	1.49 ns	0.25 ns

** : 表示在 0.01 水平差异显著; ns: 表示在 0.05 水平差异不显著。

** : significant at the 0.01 probability level; ns: not significant at the 0.05 probability level.

表 2 水稻产量性状的方差分析

Table 2 Analysis of variance for yield traits in rice

性状 Trait	变异来源 Source of variation	自由度 df	平方和 Sum of square	均方 Mean squares	F 值 F-test	显著性 Significance
2017 有效穗数 Effective panicle number	栽培模式 CM	26	64,855.21	2494.43	28.02	< 0.01
	误差 Residual	52	4628.72	89.01		
	总变异 Total	80	74,751.38			
穗粒数 Spikelets per panicle	栽培模式 CM	26	5941.52	228.52	24.32	< 0.01
	误差 Residual	52	488.6	9.4		
	总变异 Total	80	6738.84			
结实率 Seed-setting rate	栽培模式 CM	26	1596.92	61.42	65.32	< 0.01
	误差 Residual	52	48.9	0.94		
	总变异 Total	80	1669.74			

(续表 2)

	性状 Trait	变异来源 Source of variation	自由度 df	平方和 Sum of square	均方 Mean squares	F 值 F-test	显著性 Significance
2018	千粒重 1000-grain weight	栽培模式 CM	26	16.02	0.62	37.94	< 0.01
		误差 Residual	52	0.84	0.02		
		总变异 Total	80	17.14			
	产量 Grain yield	栽培模式 CM	26	116.92	4.5	83.38	< 0.01
		误差 Residual	52	2.8	0.05		
		总变异 Total	80	122.7			
	有效穗数 Effective panicle number	栽培模式 CM	26	46,008.26	1769.55	25.58	< 0.01
		误差 Residual	52	3597.48	69.18		
		总变异 Total	80	51,346.7			
	穗粒数 Spikelets per panicle	栽培模式 CM	26	4424.28	170.16	6.54	< 0.01
		误差 Residual	52	1353.34	26.03		
		总变异 Total	80	5974.32			
	结实率 Seed-setting rate	栽培模式 CM	26	1339.77	51.53	36.97	< 0.01
		误差 Residual	52	72.47	1.39		
		总变异 Total	80	1482.09			
	千粒重 1000-grain weight	栽培模式 CM	26	13.66	0.53	17.85	< 0.01
		误差 Residual	52	1.53	0.03		
		总变异 Total	80	15.7			
	产量 Grain yield	栽培模式 CM	26	91.41	3.52	19.77	< 0.01
		误差 Residual	52	9.25	0.18		
总变异 Total		80	102.23				

CM: cultivation model.

表 3 控水增密对水稻减氮后产量及其构成的影响(2017)

Table 3 The effects of controlled water management and increased density on yield and yield components under nitrogen reductions of rice in 2017

栽培模式 Cultivation model		有效穗数 Effective panicle number ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 Spikelets per panicle	颖花量 Total spikelets ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yield (t hm^{-2})
减氮 Nitrogen reduction	控水增密 Water and density treatment						
N ₀	W ₀ D ₀ (CK)	276.2±10.6	200.3±5.7	55,287±1066	82.6±0.4	28.3±0.2	12.02±0.35
N _{-10%}	W ₀ D ₀	255.1±6.7	189.2±4.0	48,256±1143	83.2±0.7	28.5±0.1	11.04±0.32
N _{-10%}	W ₀ D ₁	288.4±17.2	183.6±5.9	52,883±1540	83.2±0.7	28.1±0.1	11.81±0.28
N _{-10%}	W ₀ D ₂	307.3±7.1	175.3±2.6	53,862±997	75.1±0.7	27.6±0.2	11.10±0.35
N _{-10%}	W ₀ D ₃	327.7±16.1	165.9±3.8	54,347±2421	69.6±2.3	27.1±0.1	9.52±0.37
N _{-10%}	W ₁ D ₁	279.3±7.2	189.5±2.8	52,927±1541	85.1±0.5	28.5±0.2	12.49±0.51
N _{-10%}	W ₁ D ₂	295.7±14.9	183.1±1.9	54,124±2181	77.6±0.3	28.1±0.2	11.24±0.38
N _{-10%}	W ₁ D ₃	322.8±13.8	175.2±3.4	56,540±2161	70.3±0.5	27.1±0.1	9.68±0.49
N _{-10%}	W ₂ D ₁	267.2±12.3	196.4±4.5	52,442±1179	84.5±0.7	28.4±0.2	12.20±0.62
N _{-10%}	W ₂ D ₂	279.3±9.6	196.3±3.8	54,802±826	79.3±0.5	28.1±0.1	11.31±0.26
N _{-10%}	W ₂ D ₃	298.8±20.4	188.8±5.0	56,346±2365	73.1±0.5	27.5±0.1	10.50±0.36
N _{-10%}	W ₃ D ₁	256.9±4.9	201.3±1.8	51,715±1160	79.1±0.2	28.1±0.1	10.63±0.15
N _{-10%}	W ₃ D ₂	268.8±6.9	197.2±2.0	52,998±839	77.2±0.9	27.8±0.2	10.28±0.19
N _{-10%}	W ₃ D ₃	288.4±9.6	187.8±2.1	54,148±1230	72.3±1.7	27.6±0.0	9.84±0.12
N _{-30%}	W ₀ D ₀	231.2±4.9	180.1±3.6	41,637±1099	83.8±2.4	28.6±0.1	9.05±0.15

(续表 2)

栽培模式 Cultivation model		有效穗数 Effective panicle number ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 Spikelets per panicle	颖花量 Total spikelets ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	结实率 Seed- setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yield (t hm^{-2})
减氮 Nitrogen reduction	控水增密 Water and density treatment						
N _{-30%}	W ₀ D ₁	237.5±19.3	182.2±6.4	43,191±2007	81.2±1.3	27.5±0.0	8.91±0.36
N _{-30%}	W ₀ D ₂	263.3±11.4	176.3±2.0	46,410±1742	80.6±2.3	27.3±0.2	9.12±0.28
N _{-30%}	W ₀ D ₃	283.6±12.2	170.7±2.3	48,414±2285	73.9±2.1	27.2±0.1	8.69±0.32
N _{-30%}	W ₁ D ₁	229.7±18.7	188.1±7.4	43,166±3171	82.3±1.7	28.0±0.1	9.07±0.16
N _{-30%}	W ₁ D ₂	253.9±22.8	186.3±3.1	47,260±3572	81.1±0.6	27.8±0.1	9.87±0.41
N _{-30%}	W ₁ D ₃	274.8±20.4	179.5±4.4	49,283±2929	74.4±1.1	27.2±0.1	9.18±0.16
N _{-30%}	W ₂ D ₁	222.2±11.7	191.3±2.3	42,489±1722	82.1±0.5	28.0±0.2	8.78±0.30
N _{-30%}	W ₂ D ₂	249.2±3.3	190.4±3.3	47,450±1179	80.5±0.9	27.7±0.1	10.07±0.25
N _{-30%}	W ₂ D ₃	267.3±19.1	182.6±3.7	48,778±2899	74.5±1.1	27.3±0.0	9.17±0.20
N _{-30%}	W ₃ D ₁	214.7±12.1	191.0±3.4	40,995±2055	78.5±0.5	28.0±0.1	8.22±0.37
N _{-30%}	W ₃ D ₂	241.6±15.5	189.3±2.0	45,743±3163	77.0±0.7	27.8±0.4	8.95±0.22
N _{-30%}	W ₃ D ₃	258.3±6.1	186.7±3.0	48,216±847	73.1±0.3	27.4±0.2	8.79±0.26
LSD _{0.05}		22.16	6.29	3263.90	1.90	0.24	0.53

N₀: 施氮量 187.5 kg hm⁻²; N_{-10%}: 施氮量 168.75 kg hm⁻²; N_{-30%}: 施氮量 131.25 kg hm⁻²; W₀: 湿润灌溉; W₁: 轻干湿交替灌溉; W₂: 中干湿交替灌溉; W₃: 重干湿交替灌溉; D₀: 密度 20.0×10⁴ hm⁻²; D₁: 密度 24.0×10⁴ hm⁻²; D₂: 密度 28.0×10⁴ hm⁻²; D₃: 密度 32.0×10⁴ hm⁻²。
 N₀: N application was 187.5 kg hm⁻²; N_{-10%}: N application was 168.75 kg hm⁻²; N_{-30%}: N application was 131.25 kg hm⁻²; W₀: conventional irrigation; W₁: alternate wetting and light drying irrigation; W₂: alternate wetting and moderate drying irrigation; W₃: alternate wetting and severe drying irrigation; D₀: density was 20.0×10⁴ hm⁻²; D₁: density was 24.0×10⁴ hm⁻²; D₂: density was 28.0×10⁴ hm⁻²; D₃: density was 32.0×10⁴ hm⁻².

表 4 控水增密对水稻减氮后产量及其构成的影响(2018)

Table 4 The effects of controlled water management and increased density on yield and yield components under nitrogen reductions of rice in 2018

栽培模式 Cultivation model		有效穗数 Effective panicle number ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 Spikelets per panicle	颖花量 Total spikelets ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yield (t hm^{-2})
减氮 Nitrogen reduction	控水增密 Water-density treatment						
N ₀	W ₀ D ₀ (CK)	264.1±4.7	198.4±3.4	52,388±351	82.1±1.8	28.2±0.2	11.43±0.23
N _{-10%}	W ₀ D ₀	255.0±5.7	193.2±5.1	49,250±734	82.8±1.2	28.3±0.1	10.51±0.18
N _{-10%}	W ₀ D ₁	263.8±9.2	192.6±3.1	50,795±1352	82.3±0.7	28.2±0.0	11.32±0.26
N _{-10%}	W ₀ D ₂	279.4±6.9	187.7±1.8	52,436±911	78.6±1.3	27.8±0.1	10.71±0.34
N _{-10%}	W ₀ D ₃	303.5±16.3	173.9±2.0	52,779±2937	68.9±1.7	27.0±0.4	9.09±0.17
N _{-10%}	W ₁ D ₁	258.9±8.3	195.2±1.9	50,528±1196	84.6±1.0	28.4±0.2	11.63±0.24
N _{-10%}	W ₁ D ₂	275.3±11.8	190.6±4.4	52,494±3145	79.3±1.7	28.0±0.3	10.98±0.48
N _{-10%}	W ₁ D ₃	298.2±9.4	175.2±2.1	52,232±1075	70.1±3.0	27.1±0.1	9.17±0.15
N _{-10%}	W ₂ D ₁	256.2±9.1	191.2±2.4	48,974±1313	84.1±1.5	28.3±0.2	11.48±0.07
N _{-10%}	W ₂ D ₂	269.1±10.7	186.8±3.8	50,253±1698	80.1±1.5	28.0±0.3	11.05±0.39
N _{-10%}	W ₂ D ₃	282.6±5.1	175.1±3.1	49,479±912	73.8±1.6	27.6±0.3	9.47±0.31
N _{-10%}	W ₃ D ₁	232.8±6.2	190.7±3.5	44,385±886	82.2±1.4	28.0±0.3	9.78±0.10
N _{-10%}	W ₃ D ₂	245.9±9.4	187.4±4.3	46,099±2598	80.2±1.6	27.6±0.3	9.66±0.42
N _{-10%}	W ₃ D ₃	255.8±12.9	181.2±2.4	46,346±2299	75.9±1.3	27.3±0.2	9.03±0.22
N _{-30%}	W ₀ D ₀	228.2±8.4	185.6±1.0	42,349±1378	83.6±0.6	28.6±0.0	9.29±0.12
N _{-30%}	W ₀ D ₁	222.7±8.9	182.6±1.8	40,661±1544	82.9±2.0	28.1±0.1	9.11±0.29
N _{-30%}	W ₀ D ₂	239.5±10.9	180.1±1.9	43,142±2263	80.5±0.4	28.0±0.2	9.40±0.26

(续表 2)

栽培模式 Cultivation model		有效穗数 Effective panicle number ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 Spikelets per panicle	颖花量 Total spikelets ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yield (t hm^{-2})
减氮 Nitrogen reduction	控水增密 Water-density treatment						
N _{-30%}	W ₀ D ₃	247.9±10.4	175.3±16.9	43,552±5699	78.4±0.8	27.5±0.1	8.61±1.28
N _{-30%}	W ₁ D ₁	219.8±8.2	185.7±3.6	40,816±1692	84.6±2.5	28.5±0.1	9.32±0.20
N _{-30%}	W ₁ D ₂	236.4±7.3	182.4±2.0	43,118±1326	83.1±0.4	28.2±0.2	9.58±0.20
N _{-30%}	W ₁ D ₃	245.6±13.1	172.1±6.9	42,299±3394	80.6±1.6	27.7±0.2	8.73±0.50
N _{-30%}	W ₂ D ₁	216.8±10.8	182.6±11.2	39,526±1644	83.5±3.2	28.3±0.2	8.84±0.58
N _{-30%}	W ₂ D ₂	236.0±15.1	183.2±6.8	43,292±4217	83.9±2.1	28.2±0.3	9.76±0.75
N _{-30%}	W ₂ D ₃	242.7±5.2	172.2±4.0	41,795±1435	80.4±1.1	27.7±0.2	8.85±0.74
N _{-30%}	W ₃ D ₁	210.3±16.6	179.2±0.9	37,676±2769	82.1±1.2	28.0±0.2	7.99±0.57
N _{-30%}	W ₃ D ₂	222.9±3.4	176.9±8.1	39,423±1616	81.3±1.1	27.7±0.0	8.42±0.42
N _{-30%}	W ₃ D ₃	234.9±8.7	174.2±3.5	40,939±2319	75.6±1.9	27.4±0.3	8.02±0.41
LSD _{0.05}		16.28	8.77	3712.90	2.66	0.32	0.73

缩写同表 3。Abbreviations are the same as those given in Table 3.

2.3 控水增密模式对水稻减氮后分蘖状况的影响

各栽培模式分蘖性状的方差分析见表 5。与常规高产栽培(N₀W₀D₀, CK)比较, 减氮 10% (N_{-10%})条件下 W₀D₀ 在拔节、抽穗和成熟期的群体茎蘖数分别降低 6.80%、5.47%和 7.64% (表 6)。单一增密处理(W₀D₁, W₀D₂, W₀D₃)增加了各生育时期的茎蘖数量, 其中成熟期茎蘖数分别增加 4.42%、11.26%和 18.65%。控水增密模式下, 与 CK 相比, W₁D₁ 和 W₂D₁ 的茎蘖数在拔节期分别降低 3.19%和 8.84%, 抽穗期和成熟期与 CK 基本相当, 分蘖成穗率分别提高 3.88%和 5.54%, 差异达显著水平, W₃D₁ 茎蘖成穗率提高 7.55%, 但成熟期茎蘖数降低 6.99%。

W₁D₂、W₂D₂、W₁D₃、W₂D₃ 和 W₃D₃ 均不同程度增加了群体茎蘖数, 分蘖成穗率互有高低。

减氮 30% (N_{-30%})条件下 W₀D₀ 各生育时期群体茎蘖数进一步降低(表 6)。单一增密处理下, W₀D₁ 和 W₀D₂ 在成熟期的茎蘖数较 CK 分别降低 14.01%和 4.67%, W₀D₃ 增加 2.68%。控水增密模式下, 与 CK 比较, W₁D₁、W₂D₁ 和 W₃D₁ 各生育时期茎蘖数较低, W₁D₂ 和 W₂D₂ 在拔节期、抽穗期和成熟期的茎蘖数平均分别降低 11.22%、7.96%和 8.92%, 分蘖成穗率平均提高 2.02%, W₃D₂ 茎蘖数进一步降低。W₁D₃ 和 W₂D₃ 在拔节期和抽穗期的茎蘖数与 CK 基本相当, 成熟期有所降低, W₃D₃ 茎蘖数进一步降低。

表 5 水稻分蘖性状的方差分析

Table 5 Analysis of variance for tillering traits in rice

性状 Trait	变异来源 Source of variation	自由度 df	平方和 Sum of square	均方 Mean squares	F 值 F-value	显著性 Significance
拔节期茎蘖数 Tillers at elongation	栽培模式 CM	26	166,840.3	6416.94	64.03	< 0.01
	误差 Residual	52	5211.16	100.21		
	总变异 Total	80	176,864.6			
抽穗期茎蘖数 Tillers at heading	栽培模式 CM	26	73,586.9	2830.3	20.38	< 0.01
	误差 Residual	52	7497.9	138.8		
	总变异 Total	80	81,084.7			
成熟期茎蘖数 Tillers at maturity	栽培模式 CM	26	64,855.2	2494.4	13.61	< 0.01
	误差 Residual	54	9896.2	183.3		
	总变异 Total	80	74,751.4			
成穗率 Percentage of productive tillers	栽培模式 CM	26	370.87	14.26	1.01	ns
	误差 Residual	52	730.94	14.06		
	总变异 Total	80	1141.71			

CM: cultivation model.

表 6 控水增密对水稻减氮后分蘖性状的影响

Table 6 Effects of controlled water management and increased density on tillering characteristics under nitrogen reductions in rice

栽培模式 Cultivation model		群体茎蘖数 Tillers per unit area ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)			分蘖成穗率
减氮 Nitrogen reduction	控水增密 Water-density treatment	拔节期 Elongation stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity stage	Percentage of productive tillers (%)
N ₀	W ₀ D ₀ (CK)	373.5±10.5	294.1±5.8	276.2±10.6	73.9±1.4
N _{-10%}	W ₀ D ₀	348.1±9.8	278.0±6.1	255.1±6.7	73.3±0.5
N _{-10%}	W ₀ D ₁	387.2±13.8	298.2±19.5	288.4±17.2	74.5±2.7
N _{-10%}	W ₀ D ₂	416.8±13.5	327.5±8.4	307.3±7.1	73.8±1.6
N _{-10%}	W ₀ D ₃	459.9±20.0	359.6±8.8	327.7±16.1	71.3±3.5
N _{-10%}	W ₁ D ₁	361.6±8.2	292.5±6.3	279.3±7.2	77.2±0.7
N _{-10%}	W ₁ D ₂	394.5±14.1	312.2±13.7	295.7±14.9	74.9±1.2
N _{-10%}	W ₁ D ₃	448.4±16.9	352.6±11.5	322.8±13.8	72.0±1.4
N _{-10%}	W ₂ D ₁	340.5±12.7	283.5±11.2	267.2±12.3	78.5±1.5
N _{-10%}	W ₂ D ₂	370.5±12.7	316.7±17.8	279.3±9.6	75.4±3.2
N _{-10%}	W ₂ D ₃	408.2±8.9	334.5±13.8	298.8±20.4	73.2±5.0
N _{-10%}	W ₃ D ₁	321.3±14.7	270.2±8.9	256.9±4.9	80.1±3.4
N _{-10%}	W ₃ D ₂	350.9±15.1	292.5±6.3	268.8±6.9	76.6±1.3
N _{-10%}	W ₃ D ₃	389.8±9.5	310.6±12.1	288.4±9.6	74.0±1.9
N _{-30%}	W ₀ D ₀	307.5±26.9	267.1±7.7	231.2±4.9	75.7±7.9
N _{-30%}	W ₀ D ₁	315.9±14.9	265.7±10.6	237.5±19.3	75.1±3.6
N _{-30%}	W ₀ D ₂	357.4±18.3	287.3±6.9	263.3±11.4	73.8±3.6
N _{-30%}	W ₀ D ₃	389.2±24.4	311.6±10.3	283.6±12.2	73.2±7.4
N _{-30%}	W ₁ D ₁	297.0±6.7	249.2±11.4	229.7±18.7	77.3±5.0
N _{-30%}	W ₁ D ₂	336.2±7.4	272.9±17.3	253.9±22.8	75.5±6.8
N _{-30%}	W ₁ D ₃	373.5±5.7	298.5±6.5	274.8±20.4	73.5±4.4
N _{-30%}	W ₂ D ₁	286.4±6.2	241.6±13.7	222.2±11.7	77.6±3.7
N _{-30%}	W ₂ D ₂	327.0±5.8	268.5±10.2	249.2±3.3	76.2±1.0
N _{-30%}	W ₂ D ₃	358.5±11.1	294.2±22.7	267.3±19.1	74.6±6.2
N _{-30%}	W ₃ D ₁	268.7±9.2	234.0±10.2	214.7±12.1	79.9±3.1
N _{-30%}	W ₃ D ₂	316.4±12.6	267.1±12.5	241.6±15.5	76.3±2.4
N _{-30%}	W ₃ D ₃	345.5±10.1	285.4±5.6	258.3±6.1	74.8±1.2
LSD _{0.05}		22.30	19.29	22.16	6.19

缩写同表 3。Abbreviations are the same as those given in Table 3.

2.4 控水增密模式对水稻减氮后抽穗期叶面积指数的影响

表 7 为各栽培模式叶面积指数的方差分析。与常规高产栽培(N₀W₀D₀)比较, 减氮 10% (N_{-10%})条件下 W₀D₀ 抽穗期叶面积指数和高效叶面积指数分别降低 5.75%和 5.35% (表 8)。单一增密处理(W₀D₁, W₀D₂, W₀D₃)增加了抽穗期叶面积指数, 但高效叶面积率均呈下降趋势。控水增密模式下, 随密度增加, 抽穗期叶面积指数逐渐增加, 高效叶面积指数及高效叶面积率逐渐降低, 随控水程度增加, 抽穗期叶面积指数逐渐降低, 高效叶面积

率呈增加趋势, 其中 W₁D₁ 和 W₂D₁ 的叶面积指数与 CK 差异较小, 高效叶面积指数及高效叶面积率均较 CK 有所增加。

减氮 30% (N_{-30%})条件下 W₀D₀ 抽穗期叶面积指数进一步降低(表 8)。与常规高产栽培(CK)相比, 单一增密处理(W₀D₁、W₀D₂、W₀D₃)抽穗期叶面积指数分别降低 9.34%、4.60%和 0.64%, 高效叶面积率未有提高。控水增密模式下, 与 CK 相比, W₁D₁、W₂D₁、W₃D₁ 和 W₁D₂、W₂D₂、W₃D₂ 的叶面积指数分别降低 8.95%、5.24%、1.79%和 11.89%、8.82%、4.86%, 但高效叶面积率均有所提高。

表 7 水稻叶面积性状的方差分析

Table 7 Analysis of variance for leaf area traits in rice

性状 Trait	变异来源 Source of variation	自由度 df	平方和 Sum of square	均方 Mean squares	F 值 F-value	显著性 Significance
叶面积指数 Leaf area index	栽培模式 CM	26	20.52	0.79	22.97	< 0.01
	误差 Residual	52	1.79	0.03		
	总变异 Total	80	23.75			
高效叶面积指数 Highly effective leaf area index	栽培模式 CM	26	3.99	0.15	3.49	< 0.01
	误差 Residual	52	2.29	0.04		
	总变异 Total	80	7.04			
高效叶面积率 Percentage of highly effective leaf area index	栽培模式 CM	26	459.69	17.68	1.93	< 0.05
	误差 Residual	52	477.00	9.17		
	总变异 Total	80	940.60			

CM: cultivation model.

表 8 控水增密对水稻减氮后抽穗期叶面积指数的影响

Table 8 The effects of controlled water management and increased density on leaf area index under nitrogen reductions in rice

栽培模式 Cultivation model		叶面积指数 Leaf area index	高效叶面积指数 Highly effective leaf area index	高效叶面积率 Percentage of highly effective leaf area index (%)
减氮 Nitrogen reduction	控水增密 Water-density treatment			
N ₀	W ₀ D ₀ (CK)	7.82±0.10	5.05±0.07	64.58±0.57
N _{-10%}	W ₀ D ₀	7.37±0.10	4.78±0.18	64.85±1.92
N _{-10%}	W ₀ D ₁	7.85±0.14	5.01±0.24	63.82±2.77
N _{-10%}	W ₀ D ₂	8.12±0.14	5.08±0.37	62.58±4.83
N _{-10%}	W ₀ D ₃	8.29±0.34	4.89±0.11	59.02±1.41
N _{-10%}	W ₁ D ₁	7.83±0.34	5.19±0.19	66.40±4.53
N _{-10%}	W ₁ D ₂	8.08±0.21	5.12±0.20	63.36±1.41
N _{-10%}	W ₁ D ₃	8.22±0.18	5.03±0.12	61.21±2.03
N _{-10%}	W ₂ D ₁	7.71±0.18	5.08±0.07	65.92±2.19
N _{-10%}	W ₂ D ₂	7.96±0.24	5.03±0.19	63.27±4.19
N _{-10%}	W ₂ D ₃	8.11±0.11	4.97±0.28	61.27±3.11
N _{-10%}	W ₃ D ₁	7.69±0.25	4.87±0.09	63.35±1.17
N _{-10%}	W ₃ D ₂	7.82±0.28	4.78±0.23	61.11±0.94
N _{-10%}	W ₃ D ₃	7.89±0.27	4.75±0.20	60.22±2.34
N _{-30%}	W ₀ D ₀	6.72±0.13	4.43±0.28	65.89±3.05
N _{-30%}	W ₀ D ₁	7.09±0.36	4.56±0.35	64.46±6.60
N _{-30%}	W ₀ D ₂	7.46±0.31	4.77±0.44	63.85±3.38
N _{-30%}	W ₀ D ₃	7.77±0.43	4.91±0.42	63.17±3.30
N _{-30%}	W ₁ D ₁	7.12±0.21	4.71±0.08	66.19±2.17
N _{-30%}	W ₁ D ₂	7.41±0.26	4.88±0.26	65.86±2.94
N _{-30%}	W ₁ D ₃	7.68±0.11	4.86±0.07	63.29±1.12
N _{-30%}	W ₂ D ₁	6.89±0.24	4.72±0.12	68.55±2.58
N _{-30%}	W ₂ D ₂	7.13±0.19	4.65±0.14	65.23±1.84
N _{-30%}	W ₂ D ₃	7.44±0.22	4.61±0.45	61.88±4.13
N _{-30%}	W ₃ D ₁	6.33±0.18	4.39±0.20	69.39±3.54
N _{-30%}	W ₃ D ₂	6.66±0.44	4.44±0.28	66.69±1.89
N _{-30%}	W ₃ D ₃	7.14±0.15	4.57±0.12	64.02±2.05
LSD _{0.05}		0.40	0.40	4.89

缩写同表 3。Abbreviations are the same as those given in Table 3.

2.5 控水增密模式对水稻减氮后干物质积累量的影响

表 9 为各栽培模式干物质积累量的方差分析。与常规高产栽培(N₀W₀D₀, CK)比较, 减氮 10% (N_{-10%})条件下 W₀D₀ 在拔节、抽穗和成熟期的干物质积累量分别降低 6.61%、7.82%和 6.98%, 差异均达显著水平(表 10)。单一增密处理中, W₀D₁ 各时期的干物质积累量与 CK 基本相当, 收获指数降低 2.07%, W₀D₂ 和 W₀D₃ 的干物质积累总量较 CK 分别增加 2.22% 和 5.31%, 收获指数分别降低 9.42% 和 24.86%。控水增密模式中, W₁D₁、W₂D₁、W₃D₁ 在成熟期的干物质积累量较 CK 分别降低 1.77%、4.42%、16.81%, 收获指数均显著提高, W₁D₂、W₂D₂、W₃D₂

和 W₃D₃ 在成熟期的干物质积累量较 CK 分别降低 0.88%、1.33%、7.96%和 6.64%, W₁D₃、W₁D₃ 分别增加 3.10%和 1.33%, 收获指数均呈降低趋势。

减氮 30% (N_{-30%})条件下 W₀D₀ 各生育时期的干物质积累量进一步降低(表 10)。单一增密处理(W₀D₁, W₀D₂, W₀D₃)的干物质积累总量较 CK 分别降低 25.66%、15.37%和 12.83%, 收获指数也呈降低趋势。控水增密耦合模式下, 与 CK 相比, W₁D₁、W₁D₂、W₁D₃ 在成熟期的干物质积累量降低 13.72%~26.11%, W₁D₁ 收获指数提高, W₂D₁、W₂D₂、W₂D₃ 成熟期的干物质积累量降低 14.16%~26.99%, W₂D₁ 和 W₂D₂ 收获指数与 CK 相当, W₃D₁、W₃D₂、W₃D₃ 成熟期的干物质积累量降低 15.49%~30.97%, 收获指数均有所降低。

表 9 水稻干物质积累量及收获指数的方差分析

Table 9 Analysis of variance for dry matter accumulation and harvest index of rice

性状 Trait	变异来源 Source of variation	自由度 df	平方和 Sum of square	均方 Mean squares	F 值 F-value	显著性 Significance
拔节期干物质质量 Dry matter at elongation	栽培模式 CM	26	26.54	1.02	66.23	< 0.01
	误差 Residual	52	0.80	0.02		
	总变异 Total	80	27.64			
抽穗期干物质质量 Dry matter at heading	栽培模式 CM	26	170.36	6.55	111.45	< 0.01
	误差 Residual	52	3.06	0.06		
	总变异 Total	80	175.72			
成熟期干物质质量 Dry matter at maturity	栽培模式 CM	26	454.03	17.46	60.68	< 0.01
	误差 Residual	52	14.96	0.29		
	总变异 Total	80	484.13			
收获指数 Harvest index	栽培模式 CM	26	0.15	0.01	23.55	< 0.01
	误差 Residual	52	0.01	0		
	总变异 Total	80	0.16			

CM: cultivation model.

表 10 控水增密对水稻减氮后干物质积累量及收获指数的影响

Table 10 Effects of controlled water management and increased density on dry matter accumulation under nitrogen reductions in rice

栽培模式 Cultivation model		干物质积累量 Dry matter accumulation (t hm ⁻²)			收获指数 Harvest index
减氮 Nitrogen reduction	控水增密 Water-density treatment	拔节期 Elongation stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity stage	
N ₀	W ₀ D ₀ (CK)	4.8±0.2	12.6±0.4	22.6±0.9	0.532±0.005
N _{-10%}	W ₀ D ₀	4.2±0.2	11.6±0.4	21.0±1.2	0.526±0.015
N _{-10%}	W ₀ D ₁	4.7±0.2	13.1±0.5	22.7±1.2	0.521±0.016
N _{-10%}	W ₀ D ₂	5.0±0.2	13.4±0.4	23.1±0.9	0.481±0.005
N _{-10%}	W ₀ D ₃	5.2±0.1	13.9±0.1	23.8±0.9	0.400±0.011
N _{-10%}	W ₁ D ₁	4.3±0.1	12.3±0.2	22.2±1.0	0.563±0.001
N _{-10%}	W ₁ D ₂	4.6±0.2	12.7±0.2	22.4±1.2	0.502±0.013
N _{-10%}	W ₁ D ₃	4.9±0.2	13.0±0.2	23.3±0.6	0.416±0.022
N _{-10%}	W ₂ D ₁	4.2±0.1	12.1±0.3	21.6±0.8	0.565±0.020
N _{-10%}	W ₂ D ₂	4.4±0.1	12.3±0.2	22.3±0.9	0.507±0.011

(续表 10)

栽培模式 Cultivation model		干物质积累量 Dry matter accumulation ($t\text{ hm}^{-2}$)			收获指数
减氮	控水增密	拔节期	抽穗期	成熟期	Harvest index
Nitrogen reduction	Water-density treatment	Elongation stage	Heading stage	Maturity stage	
N _{-10%}	W ₂ D ₃	4.7±0.1	12.7±0.2	22.9±0.7	0.459±0.011
N _{-10%}	W ₃ D ₁	3.8±0.1	11.8±0.3	18.8±0.9	0.567±0.035
N _{-10%}	W ₃ D ₂	4.2±0.2	12.2±0.2	20.8±1.1	0.495±0.017
N _{-10%}	W ₃ D ₃	4.4±0.1	12.6±0.2	21.1±0.4	0.467±0.014
N _{-30%}	W ₀ D ₀	3.6±0.1	9.1±0.3	16.6±1.0	0.547±0.041
N _{-30%}	W ₀ D ₁	3.8±0.1	9.9±0.2	16.8±0.5	0.530±0.010
N _{-30%}	W ₀ D ₂	4.0±0.2	10.7±0.3	18.9±0.4	0.482±0.007
N _{-30%}	W ₀ D ₃	4.5±0.2	11.5±0.4	19.7±0.2	0.441±0.016
N _{-30%}	W ₁ D ₁	3.4±0.0	9.4±0.4	16.7±0.7	0.544±0.013
N _{-30%}	W ₁ D ₂	3.7±0.2	10.2±0.3	18.8±0.6	0.525±0.006
N _{-30%}	W ₁ D ₃	4.3±0.1	11.0±0.6	19.5±0.3	0.471±0.002
N _{-30%}	W ₂ D ₁	3.2±0.1	9.5±0.3	16.5±0.3	0.532±0.010
N _{-30%}	W ₂ D ₂	3.6±0.1	10.0±0.3	19.0±0.2	0.530±0.011
N _{-30%}	W ₂ D ₃	3.9±0.2	10.3±0.4	19.4±0.3	0.473±0.005
N _{-30%}	W ₃ D ₁	3.0±0.1	9.1±0.4	15.6±0.3	0.527±0.016
N _{-30%}	W ₃ D ₂	3.3±0.3	9.4±0.3	18.5±0.1	0.484±0.014
N _{-30%}	W ₃ D ₃	3.6±0.1	9.9±0.4	19.1±0.3	0.460±0.008
LSD _{0.05}		0.23	0.52	1.22	0.026

缩写同表 3。Abbreviations are the same as those given in Table 3.

2.6 控水增密模式对水稻减氮后干物质阶段积累量及其比例的影响

表 11 为各栽培模式干物质阶段积累量的方差分析。与常规高产栽培(N₀W₀D₀, CK)比较, 减氮 10% (N_{-10%})条件下 W₀D₀在各生育阶段的干物质积累量均有所降低(表 12), 单一增密处理(W₀D₁, W₀D₂, W₀D₃)在抽穗至成熟阶段的干物质积累量和积累比例均呈下降趋势。控水增密模式下, 与 CK 相比, W₁D₁和 W₂D₁拔节前的干物质积累量和积累比例分别降低 11.16%和 14.10%, 拔节至抽穗、抽穗至成熟阶段的干物质积累量与 CK 基本相当, 干物

质阶段积累比例均有所提高。W₁D₂、W₂D₂和 W₁D₃、W₂D₃增加了各阶段干物质积累量, W₃条件下有所降低。

与 CK 比较, 减氮 30% (N_{-30%})条件下 W₀D₀在拔节前、拔节至抽穗、抽穗至成熟阶段的干物质积累量分别降低 25.76%、31.84%和 24.64% (表 12)。控水增密模式下, 与 CK 相比, W₁D₁、W₂D₁、W₃D₁在拔节前、拔节至抽穗、抽穗至成熟阶段的干物质积累量平均分别降低 33.44%、24.50%、30.44%, W₁D₂、W₂D₂、W₃D₂平均分别降低 27.19%、21.55%、10.74%, W₁D₃、W₂D₃、W₃D₃平均分别降低 18.18%、20.43%、10.42%。

表 11 水稻产量性状的方差分析

Table 11 Analysis of variance for period dry matter accumulation in rice

性状 Trait	变异来源	自由度 df	平方和 Sum of square	均方 Mean squares	F 值 F-value	显著性 Significance
	Source of variation					
拔节前干物质质量 Dry matter before elongation stage	栽培模式 CM	26	26.54	1.02	66.23	< 0.01
	误差 Residual	52	0.80	0.02		
	总变异 Total	80	27.64			
拔节抽穗期干物质质量 Dry matter from elongation stage to heading stage	栽培模式 CM	26	70.70	2.72	38.73	< 0.01
	误差 Residual	52	3.65	0.07		
	总变异 Total	80	75.30			
抽穗成熟期干物质质量 Dry matter from heading stage to maturity stage	栽培模式 CM	26	99.90	3.84	12.47	< 0.01
	误差 Residual	52	16.02	0.31		
	总变异 Total	80	122.46			

(续表 11)

性状 Trait	变异来源	自由度 df	平方和 Sum of square	均方 Mean squares	F 值 F-value	显著性 Significance
	Source of variation					
拔节前干物质比例 Rate of dry matter before elongation stage	栽培模式 CM	26	113.02	4.35	8.1	< 0.01
	误差 Residual	52	27.90	0.54		
	总变异 Total	80	145.11			
拔节抽穗期干物质比例 Rate of dry matter from elongation stage to heading stage	栽培模式 CM	26	378.76	14.57	4.99	< 0.01
	误差 Residual	52	151.77	2.92		
	总变异 Total	80	538.52			
抽穗成熟期干物质比例 Rate of dry matter from heading stage to maturity stage	栽培模式 CM	26	517.65	19.91	5.83	< 0.01
	误差 Residual	52	177.73	3.42		
	总变异 Total	80	719.18			

CM: cultivation model.

表 12 控水增密对水稻减氮后干物质阶段积累量及比例的影响

Table 12 The effects of controlled water management and increased density on dry matter accumulation during different growth periods under nitrogen reductions in rice

栽培模式 Cultivation model		阶段积累量 Dry matter accumulation (t hm ⁻²)			干物质积累比例 Dry matter accumulation rate (%)		
减氮 Nitrogen reduction	控水增密 Water-density treatment	拔节前	拔节-抽穗	抽穗-成熟	拔节前	拔节-抽穗	抽穗-成熟
		Sowing to elongation stage	Elongation stage to heading stage	Heading stage to maturity stage	Sowing to elongation stage	Elongation stage to heading stage	Heading stage to maturity stage
N ₀	W ₀ D ₀ (CK)	4.8±0.2	7.8±0.3	10.0±0.5	21.2±0.5	34.5±0.5	44.2±1.0
N _{-10%}	W ₀ D ₀	4.2±0.2	7.4±0.3	9.4±0.9	20.0±0.4	35.3±1.8	44.7±2.0
N _{-10%}	W ₀ D ₁	4.7±0.2	8.4±0.4	9.6±0.8	20.7±0.5	37.0±0.8	42.3±1.3
N _{-10%}	W ₀ D ₂	5.0±0.2	8.4±0.2	9.7±0.6	21.7±0.2	36.4±1.0	42.0±1.2
N _{-10%}	W ₀ D ₃	5.2±0.1	8.7±0.1	9.9±0.8	21.9±0.7	36.6±1.2	41.6±1.8
N _{-10%}	W ₁ D ₁	4.3±0.1	8.0±0.1	9.9±0.9	19.4±0.5	36.1±1.6	44.5±2.1
N _{-10%}	W ₁ D ₂	4.6±0.2	8.1±0.1	9.7±1.0	20.6±0.4	36.2±1.9	43.2±2.2
N _{-10%}	W ₁ D ₃	4.9±0.2	8.1±0.4	10.3±0.6	21.0±0.8	34.8±1.8	44.2±1.7
N _{-10%}	W ₂ D ₁	4.2±0.1	7.9±0.3	9.5±0.5	19.5±0.8	36.6±0.8	44.0±0.9
N _{-10%}	W ₂ D ₂	4.4±0.1	7.9±0.1	10.0±0.8	19.7±0.5	35.5±1.1	44.8±1.6
N _{-10%}	W ₂ D ₃	4.7±0.1	8.0±0.1	10.2±0.5	20.5±0.3	35.0±0.7	44.5±1.0
N _{-10%}	W ₃ D ₁	3.8±0.1	8.0±0.2	7.0±0.9	20.2±0.6	42.6±2.3	37.2±2.9
N _{-10%}	W ₃ D ₂	4.2±0.2	8.0±0.0	8.6±1.1	20.2±1.1	38.5±2.1	41.2±2.9
N _{-10%}	W ₃ D ₃	4.4±0.1	8.2±0.2	8.5±0.5	20.9±0.4	38.9±1.5	40.3±1.8
N _{-30%}	W ₀ D ₀	3.6±0.1	5.5±0.4	7.5±1.0	21.8±1.8	33.2±2.3	45.1±3.4
N _{-30%}	W ₀ D ₁	3.8±0.1	6.1±0.2	6.9±0.3	22.6±0.7	36.3±0.5	41.1±0.6
N _{-30%}	W ₀ D ₂	4.0±0.2	6.7±0.4	8.2±0.4	21.2±1.0	35.5±2.3	43.4±1.6
N _{-30%}	W ₀ D ₃	4.5±0.2	7.0±0.2	8.2±0.3	22.8±0.8	35.5±0.8	41.6±1.5
N _{-30%}	W ₁ D ₁	3.4±0.0	6.0±0.4	7.3±0.8	20.4±0.8	36.0±3.0	43.7±3.4
N _{-30%}	W ₁ D ₂	3.7±0.2	6.5±0.4	8.6±0.5	19.7±0.7	34.6±2.3	45.7±1.6
N _{-30%}	W ₁ D ₃	4.3±0.1	6.7±0.5	8.5±0.5	22.1±0.2	34.4±2.7	43.6±2.7
N _{-30%}	W ₂ D ₁	3.2±0.1	6.3±0.2	7.0±0.1	19.4±0.4	38.2±0.5	42.4±0.8
N _{-30%}	W ₂ D ₂	3.6±0.1	6.4±0.2	9.0±0.3	19.0±0.5	33.7±1.0	47.4±1.4
N _{-30%}	W ₂ D ₃	3.9±0.2	6.4±0.6	9.1±0.2	20.1±1.0	33.0±2.5	46.9±1.6
N _{-30%}	W ₃ D ₁	3.0±0.1	6.1±0.4	6.5±0.4	19.2±0.9	39.1±2.7	41.7±2.4
N _{-30%}	W ₃ D ₂	3.3±0.3	6.1±0.0	9.1±0.3	17.8±1.5	33.0±0.2	49.2±1.5
N _{-30%}	W ₃ D ₃	3.6±0.1	6.3±0.4	9.2±0.2	18.9±0.4	33.0±1.5	48.2±1.4
LSD _{0.05}		0.23	0.48	1.06	1.27	2.82	3.17

缩写同表 3。Abbreviations are the same as those given in Table 3.

2.7 控水增密模式对水稻减氮后干物质分配的影响

表 13 为各栽培模式干物质分配量的方差分析。与常规高产栽培($N_0W_0D_0$, CK)比较, 减氮 10% ($N_{-10\%}$)条件下 W_0D_0 在茎鞘、叶片、穗部的干物质分配量分别降低 5.41%、6.37%和 7.99%, 差异达显著水平, 单一增密处理(W_0D_1 , W_0D_2 , W_0D_3)穗部干物质分配量和比例均呈下降趋势(表 14)。控水增密模式下, W_1D_1 和 W_2D_1 能促进干物质从营养器官向穗部转运, 2 种模式成熟期茎鞘和叶片干物质分配量较 CK 平均分别降低 7.08%和 14.76%、分配比例分别降低 4.33%和 12.26%, 穗部干物质分

配量平均增加 2.83%, 分配比例增加 5.87%, 差异达显著水平。

与 CK 比较, 减氮 30% ($N_{-30\%}$)条件下 W_0D_0 在茎鞘、叶片、穗部的干物质分配量分别降低 27.18%、28.34%和 25.50% (表 14), 随着密度增加, 茎鞘和叶片的干物质分配量和比例总体上呈增加趋势, 穗部干物质分配量呈降低趋势, 随控水程度增加, 各器官的干物质分配量均逐渐降低。 W_1D_1 、 W_2D_1 和 W_3D_1 平均在茎鞘、叶片、穗部的干物质分配量分别降低 20.77%、37.74%和 29.24%, W_1D_2 、 W_2D_2 和 W_3D_2 平均分别降低 10.69%、17.69%和 20.15%, W_1D_3 、 W_2D_3 和 W_3D_3 平均分别降低 9.69%、3.42%和 25.01%。

表 13 水稻干物质分配的方差分析

Table 13 Analysis of variance for dry matter allocation in rice

性状 Trait	变异来源 Source of variation	自由度 df	平方和 Sum of square	均方 Mean squares	F 值 F-value	显著性 Significance
茎鞘干物质分配量 Dry matter allocation in stem and sheath	栽培模式 CM	26	52.70	2.03	14.03	< 0.01
	误差 Residual	52	7.51	0.14		
	总变异 Total	80	61.20			
叶片干物质分配量 Dry matter allocation in leaf	栽培模式 CM	26	69.44	2.67	173.65	< 0.01
	误差 Residual	52	0.80	0.02		
	总变异 Total	80	70.56			
穗部干物质分配量 Dry matter allocation in panicle	栽培模式 CM	26	130.98	5.04	13.34	< 0.01
	误差 Residual	52	19.63	0.38		
	总变异 Total	80	158.31			
茎鞘干物质分配比例 Dry matter allocation rate in stem and sheath	栽培模式 CM	26	284.86	10.96	2.67	< 0.01
	误差 Residual	52	213.76	4.11		
	总变异 Total	80	520.57			
叶片干物质分配比例 Dry matter allocation rate in leaf	栽培模式 CM	26	779.72	29.99	59.74	< 0.01
	误差 Residual	52	26.10	0.5		
	总变异 Total	80	805.86			
穗部干物质分配比例 Dry matter allocation rate in panicle	栽培模式 CM	26	1482.41	57.02	11.34	< 0.01
	误差 Residual	52	261.48	5.03		
	总变异 Total	80	1767.02			

CM: cultivation model.

表 14 控水增密对水稻减氮后干物质分配的影响

Table 14 Effects of controlled water management and increased density on dry matter allocation under nitrogen reductions in rice

栽培模式 Cultivation model		干物质分配量 Dry matter allocation ($t\text{ hm}^{-2}$)			干物质分配比例 Dry matter allocation rate (%)		
减氮 Nitrogen reduction	控水增密 Water-density treatment	茎鞘 Stem and sheath	叶片 Leaf	穗 Panicle	茎鞘 Stem and sheath	叶片 Leaf	穗 Panicle
N_0	W_0D_0 (CK)	6.8±0.2	3.5±0.1	12.3±0.6	30.1±0.7	15.5±0.2	54.4±0.8
$N_{-10\%}$	W_0D_0	6.4±0.2	3.3±0.1	11.3±1.0	30.5±1.0	15.8±0.9	53.7±1.8
$N_{-10\%}$	W_0D_1	7.1±0.1	3.5±0.0	12.1±1.2	31.3±1.4	15.5±0.8	53.2±2.3
$N_{-10\%}$	W_0D_2	7.5±0.1	4.2±0.2	11.4±0.9	32.5±1.4	18.2±0.9	49.3±2.2

(续表 14)

栽培模式 Cultivation model		干物质分配量 Dry matter allocation (t hm ⁻²)			干物质分配比例 Dry matter allocation rate (%)		
减氮 Nitrogen reduction	控水增密 Water-density treatment	茎鞘 Stem and sheath	叶片 Leaf	穗 Panicle	茎鞘 Stem and sheath	叶片 Leaf	穗 Panicle
N _{-10%}	W ₀ D ₃	8.1±0.2	5.9±0.3	9.8±0.5	34.1±0.7	24.8±0.4	41.2±0.5
N _{-10%}	W ₁ D ₁	6.4±0.4	3.1±0.1	12.7±0.6	28.8±0.6	14.0±0.7	57.2±0.3
N _{-10%}	W ₁ D ₂	7.1±0.2	3.8±0.1	11.5±1.0	31.7±1.3	17.0±0.7	51.3±1.8
N _{-10%}	W ₁ D ₃	7.8±0.2	5.5±0.3	10.0±0.4	33.5±0.3	23.6±1.1	42.9±1.4
N _{-10%}	W ₂ D ₁	6.2±0.2	2.9±0.0	12.5±0.6	28.7±0.2	13.4±0.5	57.9±0.7
N _{-10%}	W ₂ D ₂	7.1±0.2	3.5±0.2	11.7±0.9	31.9±0.6	15.7±1.3	52.4±1.8
N _{-10%}	W ₂ D ₃	7.2±0.3	4.8±0.1	10.9±0.4	31.4±0.3	21.0±0.3	47.6±0.1
N _{-10%}	W ₃ D ₁	5.3±0.3	2.5±0.2	11.0±0.7	28.2±1.6	13.3±0.2	58.5±1.4
N _{-10%}	W ₃ D ₂	7.0±0.2	3.2±0.2	10.6±0.9	33.7±1.5	15.4±0.1	50.9±1.4
N _{-10%}	W ₃ D ₃	6.9±0.1	4.0±0.2	10.2±0.4	32.7±1.1	19.0±0.6	48.3±0.8
N _{-30%}	W ₀ D ₀	4.9±0.1	2.5±0.1	9.2±1.0	29.6±2.0	15.1±0.6	55.3±2.5
N _{-30%}	W ₀ D ₁	5.5±0.3	2.4±0.1	8.9±0.7	32.8±2.0	14.3±0.9	52.9±2.8
N _{-30%}	W ₀ D ₂	6.5±0.2	3.2±0.2	9.2±0.2	34.4±0.9	16.9±0.6	48.7±0.5
N _{-30%}	W ₀ D ₃	6.8±0.2	4.1±0.2	8.8±0.1	34.5±0.8	21.0±0.8	44.5±0.1
N _{-30%}	W ₁ D ₁	5.4±0.1	2.3±0.1	9.0±0.7	32.4±1.7	13.8±0.6	53.8±2.2
N _{-30%}	W ₁ D ₂	6.0±0.1	2.8±0.1	10.0±0.7	32.0±1.5	14.9±0.8	53.2±2.1
N _{-30%}	W ₁ D ₃	6.3±0.1	3.8±0.2	9.4±0.1	32.3±0.0	19.5±0.6	48.2±0.7
N _{-30%}	W ₂ D ₁	5.4±0.1	2.2±0.1	8.9±0.1	32.7±0.4	13.3±0.4	53.9±0.4
N _{-30%}	W ₂ D ₂	5.9±0.4	2.8±0.1	10.3±0.4	31.1±2.0	14.7±0.4	54.2±2.1
N _{-30%}	W ₂ D ₃	6.1±0.2	3.8±0.2	9.5±0.1	31.4±0.5	19.6±0.6	49.0±1.1
N _{-30%}	W ₃ D ₁	5.2±0.1	2.0±0.1	8.4±0.4	33.4±1.1	12.8±0.7	53.8±1.4
N _{-30%}	W ₃ D ₂	6.3±0.1	3.1±0.2	9.1±0.3	34.1±0.7	16.8±1.0	49.2±1.4
N _{-30%}	W ₃ D ₃	6.9±0.1	3.3±0.1	8.9±0.1	36.1±0.2	17.3±0.4	46.7±0.2
LSD _{0.05}		0.31	0.24	1.04	1.86	1.13	2.47

缩写同表 3。Abbreviations are the same as those given in Table 3.

3 讨论

3.1 水稻减氮后的氮素亏缺效应

较多研究报道显示, 每个水稻品种均有各自适宜的施氮量^[2,6], 过低的施氮量不能充分满足植株生长的营养需求^[3,6]、不利于水稻产量潜力发挥, 过高的施氮量造成水稻植株氮素盈余, 容易引起水稻倒伏和加重病虫害发生^[4], 最终影响产量。我国目前水稻生产中普遍存在氮肥施用量大、氮肥利用率不高等问题^[1-2], 降低氮肥用量已然十分紧迫。前人就减少施氮量对水稻产量形成的影响进行了大量研究, 大部分研究结果表明, 减量施氮降低了水稻产量^[11-12], 同时也有一些减量施氮后水稻产量有所提高的研究报道^[1,6], 结果不完全一致的主要原因在于施氮量是否符合各品种最适施氮量^[2-3], 当施氮量高于或低于品种最适施氮量均有可能导致产量降低。目前以

水稻品种最适施氮量(最高产施氮量)为标准, 研究不同程度减氮后水稻氮素亏缺的研究^[22]鲜见报道, 本文结果表明, 以品种最适施氮量为标准, 其他栽培措施不变(均为 W₀D₀), 减氮 10% (N_{-10%})条件下水稻产量降低 7.35%, 减氮 30% (N_{-30%})条件下水稻产量降低 20.98%, 说明低于水稻品种最适施氮量条件下持续减氮, 如果不采取栽培措施调控, 水稻产量表现为不可逆转的降低趋势。主要表现为减氮后有效穗数和穗粒数持续显著降低, 虽然结实率和千粒重略有增加, 但未能弥补产量损失, 这与前人关于低氮条件下水稻产量形成特征^[4,6]基本一致。减氮条件下水稻产量降低的主要原因是较低的氮肥水平(尤其是减氮 30%)难以充分满足植株生长发育的营养需求, 植株出现氮素亏缺现象, 主要表现为分蘖数量明显减少、各个生育时期和各生育阶段的干物质积累量显著降低, 而对收获指数的影响较小。众

所周知,水稻产量由生物产量和收获指数共同决定,自矮秆育种以来,高产水稻的收获指数一般比较稳定^[5,8],高产育种和高产栽培实践中主要通过提高生物产量以突破水稻产量限制^[5],因此,如何在维持较高收获指数基础上显著提高水稻群体生物产量是调控水稻氮素亏缺实现减氮高产的重要途径。

3.2 单一增密对水稻减氮后氮素亏缺的影响

增加移栽密度是低氮条件下提高水稻群体生长量的关键措施^[8-10]。一些学者相继开展了减氮条件下单一增密调控研究^[12-14],吴培等^[12]研究认为,直播粳稻在不同氮密组合中以高氮低密(施氮量 300 kg hm⁻²、密度 90×10⁴ hm⁻²)时产量最高(9.55 t hm⁻²),当施氮量降低至 225 kg hm⁻²时,密度需增至 180×10⁴ hm⁻²,产量可接近 9.0 t hm⁻²;陈佳娜等^[24]研究认为,机插条件下双季稻以高氮高密处理(施氮量 176~189 kg hm⁻²)产量最高,但与低氮高密处理(施氮量 110~140 kg hm⁻²)产量差异不显著。本研究表明,与正常高产栽培(CK)相比,在减氮 10% (N_{-10%})条件下,3种单一增密处理产量均降低,表现为 W₀D₁>W₀D₂>W₀D₃,其中 W₀D₁ 减产幅度较小,与 CK 差异不显著,随增密程度加大产量持续降低,这与相关学者关于减氮增密的研究结果^[12,24]基本一致,说明在少量减氮条件下,单一增密可一定程度上弥补产量损失甚至实现减氮稳产,主要原因是适当增密后各生育时期的群体茎蘖数和干物质积累量、抽穗期叶面积指数均不同程度增加(表 6、表 8 和表 10),保证了较大的群体生长量。但鲜有关于减氮后单一增密能实现水稻增产的研究报道,究其原因,可能与单一增密后水稻生长特征有关^[12-14]。本研究表明,与正常高产栽培(CK)相比,减氮后单一增密处理的抽穗期高效叶面积率有所降低,影响了光合质量^[17],同时抽穗至成熟阶段的干物质积累量和积累比例较低,成熟期干物质在穗部的分配量降低,导致收获指数明显下降(表 8 和表 14),这与前人报道的高产水稻生长特征^[4,25]有所差异,可能是单一增密处理难以减氮增产的重要原因^[12-13]。

3.3 控水增密模式对水稻减氮后氮素亏缺的调控

水分管理是调控水稻生长和产量形成的另一重要手段,杨建昌等^[23]研究报道,干湿交替灌溉可促进水稻干物质向穗部转运,同时水分管理与施氮量存在较强的互作关系^[19-20],王绍华等^[19]研究认为,适当的水分胁迫可减少水稻氮的损失,提高氮肥利用率;Sun 等^[20]提出在间歇湿润灌溉条件下中氮处

理产量最高,旱种条件下施氮量应进一步降低。可见,控水可一定程度上调节水稻低氮条件下产量形成,目前通过单一增密进行减氮栽培的研究^[11-14]较多,而控水增密耦合模式对水稻氮素亏缺条件下产量形成的调控效应尚未明晰。本文结果显示,与单一增密处理相比,合理的控水增密模式对减氮后水稻产量形成的调控效应进一步改善,且不同减氮程度下调控效应有所差异。

减氮 10% (N_{-10%})条件下,增密对产量形成的调控效果总体以 D₁>D₂>D₃,原因是 D₁能维持与 CK 基本相当的有效穗数和较大穗型,保持较高的结实率和粒重(表 2 和表 3),而过量增加密度(D₂、D₃)造成群体过大,虽然干物质积累总量增加,但向籽粒的转运受阻,籽粒充实程度较差,这与朱相成等^[14]的研究结果一致。此时控水对产量形成的调控效果以 W₁(轻干湿交替灌溉)最佳、W₂(中干湿交替灌溉)次之、W₃(重干湿交替灌溉)最差,表现为 W₁和 W₂的有效穗数、群体颖花量以及各时期干物质积累量均更高,W₃则刚好相反,这与陈婷婷等^[26]、杨建昌等^[23]的研究结果一致,原因可能是适度干湿交替灌溉提高了水稻根系活力、促进了氮素和干物质的积累及转运^[16,27],而重度干湿交替灌溉对水稻正常生长产生了较重的干旱胁迫^[22],降低了干物质积累量和产量。减氮 10%条件下,控水与增密耦合表现出较好调控效应,W₁D₁、W₁D₂、W₂D₁、W₂D₂等 4 种控水增密模式的产量较 N_{-10%} W₀D₀均有所提高,对减氮后产量的调控效应为正效应,其中 W₁D₁和 W₂D₁的产量均超过常规高产栽培(CK);其余 5 种模式均较 N_{-10%} W₀D₀减产,调控为负效应。与单一增密最佳模式(W₀D₁)相比,控水增密最佳模式(W₁D₁)产量显著增加,表现为各时期分蘖数量及有效穗数有所减少,而每穗粒数、结实率及千粒重均有所增加,这与 Li 等^[2]研究报道的高产氮高效型水稻品种的产量构成特征较为吻合。W₁D₁显著增产的主要原因是改善的光合质量和更强的同化物转运能力,主要表现为 W₁D₁抽穗期高效叶面积指数及高效叶面积率更高,叶片光合质量得到改善,增加了抽穗后干物质积累量;同时 W₁D₁干物质向穗部的转运量增加,收获指数显著提高,这与一些学者关于轻干湿交替灌溉可促进同化物转运和籽粒灌浆的研究结果较为一致^[16-17,28],也是控水增密模式(W₁D₁)较单一增密模式(W₀D₁)对水稻减氮后产量调控效应得到改善的根本原因。此外,据 Zhang 等^[16]和褚光等^[29]观察结果,与常规灌

溉相比, 适度干湿交替灌溉条件下水稻灌浆期的根系氧化力显著提高, 可为地上部生长提供更多营养, 同时灌浆期根系和叶片中细胞分裂素的含量更高, 可促进籽粒胚乳细胞分裂, 延缓植株衰老, 因此我们推测 W_1D_1 较 W_0D_1 增产的原因可能还与其根系生长特性有关, 这有待进一步研究。综上, 在少量减氮条件下, 采取适量增密配合轻干湿交替灌溉既有利于构建合理群体、也能较好协调光合生产与同化物转运的关系, 实现水稻减氮高产。

减氮 30% ($N_{-30\%}$) 条件下, 增密对产量形成的调控效果总体以 D_2 优于 D_1 和 D_3 , 主要原因是过量减氮条件下, 水稻有效穗数和干物质积累总量显著降低, 少量增密(D_1)对有效穗数和干物质积累量的增加程度较小, 中量增密(D_2)能形成相对较高的干物质积累量、且维持与 CK 相当的收获指数, 高量增密(D_3)虽能形成较高的干物质积累量、但收获指数显著降低, 这与胡雅杰等^[9]、许俊伟等^[10]关于不同移栽密度的研究结果基本一致。此时控水的调控效果以 W_2 最佳、 W_1 次之、 W_3 最差, 表现为 W_2 和 W_1 的有效穗数和结实率明显高于 W_3 , 据杨建昌等^[23]研究指出, 耕层土壤水势控制在 -25 kPa 以内, 水稻光合作用不会受到明显抑制, 且有利于促进籽粒灌浆充实, 本研究中 W_1 和 W_2 的水势低限值均高于 -25 kPa, 而 W_3 水势低限值为 -30 kPa, 可能造成了较严重的水分胁迫, 显著降低了干物质积累量, 与密度的耦合模式均为负效应。减氮 30% 条件下, 控水增密耦合的调控效应变弱, 9 种模式均较常规高产栽培(CK)减产, 但 W_1D_2 、 W_2D_2 较 $N_{-30\%}$ W_0D_0 仍有所增产, 对减氮后产量的调控效应为正效应, 该 2 种模式能保持相对较高的群体颖花量和正常的结实率, 同时成熟期具有相对较高的干物质积累总量和与 CK 相当的收获指数。因此, 在过量减氮条件下, 必须增加较高移栽密度并配合中干湿交替灌溉以形成较大群体生长总量和稳定的收获指数, 减少产量损失。

此外, 本文仅研究了控水增密模式对杂交籼稻品种减氮后产量形成的调控效应, 由于不同类型品种间的最佳施氮量及对氮肥的敏感特性等存在显著差异^[2-4], 本试验结果是否适用于其他常规稻品种特别是粳稻品种, 有待进一步研究。

4 结论

缺少控水、增密调节(W_0D_0), 水稻常规高产栽培减氮后产量表现为不可逆转的降低趋势。单一增密处理可增加水稻减氮后的群体生长量, 但抽穗后

干物质转运量及收获指数呈下降趋势。合适的控水增密耦合模式能有效调控水稻减氮后产量形成, 且不同减氮程度下调控效应有所差异。本试验减氮 10% 条件下, 轻干湿交替灌溉-增密 20% (W_1D_1) 和中干湿交替灌溉-增密 20% (W_2D_1) 模式均能实现水稻减氮高产, 该 2 种模式在保持较高群体颖花量前提下, 可有效提高结实率和千粒重, 成熟期穗部干物质分配量和收获指数显著提高; 减氮 30% 条件下控水增密的调节效应变弱, 导致减产。

References

- [1] 安宁, 范明生, 张福锁. 水稻最佳作物管理技术的增产增效作用. 植物营养与肥料学报, 2015, 21: 846-852.
An N, Fan M S, Zhang F S. Best crop management practices increase rice yield and nitrogen use efficiency. *Plant Nutr Fert Sci*, 2015, 21: 846-852 (in Chinese with English abstract).
- [2] Li M, Zhang H C, Yang X, Ge M J, Ma Q, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Luo D Q. Accumulation and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium of rice cultivars with high yield and high N use efficiency. *Field Crops Res*, 2014, 161: 55-63.
- [3] 魏海燕, 王亚江, 孟天瑶, 葛梦婕, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 机插超级粳稻产量、品质及氮肥利用率对氮肥的响应. 应用生态学报, 2014, 25: 488-496.
Wei H Y, Wang Y J, Meng T Y, Ge M J, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Response of yield, quality and nitrogen use efficiency to nitrogen fertilizer from mechanical transplanting super japonica rice. *Chin J Appl Ecol*, 2014, 25: 488-496 (in Chinese with English abstract).
- [4] 张洪程, 马群, 杨雄, 李敏, 葛梦婕, 李国业, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉, 刘艳阳. 水稻品种氮肥群体最高生产力及其增长规律. 作物学报, 2012, 38: 86-98.
Zhang H C, Ma Q, Yang X, Li M, Ge M J, Li G Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H, Liu Y Y. The highest population productivity of nitrogen fertilization and its variation rules in rice cultivars. *Acta Agron Sin*, 2012, 38: 86-98 (in Chinese with English abstract).
- [5] Tang L, Xu Z J, Chen W F. Advances and prospects of super rice breeding in China. *J Integr Agric*, 2017, 16: 984-991.
- [6] Zhu D W, Zhang H C, Guo B W, Xu K, Dai Q G, Wei H Y, Gao H, Hu Y J, Cui P Y, Huo Z Y. Effects of nitrogen level on yield and quality of japonica soft super rice. *J Integr Agric*, 2017, 16: 1018-1027.
- [7] Yang Z, Wang Z, Yang C, Yang Z, Li H, Wu Y. Physiological responses and small RNAs changes in maize under nitrogen deficiency and resupply. *Genes Genomics*, 2019, 41: 1183-1194.
- [8] Huang M, Shan S L, Xie X B, Cao F B, Zou Y B. Why high grain yield can be achieved in single seedling machine transplanted hybrid rice under dense planting conditions? *J Integr Agric*, 2018, 17: 1299-1306.
- [9] 胡雅杰, 曹伟伟, 钱海军, 邢志鹏, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫, 高辉, 沙安勤, 周有炎, 刘国林. 钵苗

- 机插密度对不同穗型水稻品种产量、株型和抗倒伏能力的影响. 作物学报, 2015, 41: 743–757.
- Hu Y J, Cao W W, Qian H J, Xing Z P, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W, Gao H, Sha A Q, Zhou Y Y, Liu G L. Effect of planting density of mechanically transplanted pot seedlings on yield plant type and lodging resistance in rice with different panicle types. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 743–757 (in Chinese with English abstract).
- [10] 许俊伟, 孟天瑶, 荆培培, 张洪程, 李超, 戴其根, 魏海燕, 郭保卫. 机插密度对不同类型水稻抗倒伏能力及产量的影响. 作物学报, 2015, 41: 1767–1776.
- Xu J W, Meng T Y, Jing P P, Zhang H C, Li C, Dai Q G, Wei H Y, Guo B W. Effect of mechanical-transplanting density on lodging resistance and yield in different types of rice. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 1767–1776 (in Chinese with English abstract).
- [11] 蒋鹏, 熊洪, 张林, 朱永川, 周兴兵, 刘茂, 郭晓艺, 徐富贤. 不同生态条件下施氮量和移栽密度对杂交稻氮、磷、钾吸收积累的影响. 植物营养与肥料学报, 2017, 23: 342–350.
- Jiang P, Xiong H, Zhang L, Zhu Y C, Zhou X B, Liu M, Guo X Y, Xu F X. Effects of N rate and planting density on nutrient uptake and utilization of hybrid rice under different ecological conditions. *Plant Nutr Fert Sci*, 2017, 23: 342–350 (in Chinese with English abstract).
- [12] 吴培, 陈天晔, 袁嘉琦, 黄恒, 邢志鹏, 胡雅杰, 朱明, 李德剑, 刘国林, 张洪程. 施氮量和直播密度互作对水稻产量形成特征的影响. 中国水稻科学, 2019, 33: 269–281.
- Wu P, Chen T Y, Yuan J Q, Huang H, Xing Z P, Hu Y J, Zhu M, Li D J, Liu G L, Zhang H C. Effects of interaction between nitrogen application rate and direct-sowing density on yield formation characteristics of rice. *Chin J Rice Sci*, 2019, 33: 269–281 (in Chinese with English abstract).
- [13] 徐新朋, 周卫, 梁国庆, 孙静文, 王秀斌, 何萍, 徐芳森, 余喜初. 氮肥用量和密度对双季稻产量及氮肥利用率的影响. 植物营养与肥料学报, 2015, 21: 763–772.
- Xu X P, Zhou W, Liang G Q, Sun J W, Wang X B, He P, Xu F S, Yu X C. Effects of nitrogen and density interactions on grain yield and nitrogen use efficiency of double-rice systems. *Plant Nutr Fert Sci*, 2015, 21: 763–772 (in Chinese with English abstract).
- [14] 朱相成, 张振平, 张俊, 邓艾兴, 张卫建. 增密减氮对东北水稻产量、氮肥利用效率及温室效应的影响. 应用生态学报, 2016, 27: 453–461.
- Zhu X C, Zhang Z P, Zhang J, Deng A X, Zhang W J. Effects of increased planting density with reduced nitrogen fertilizer application on rice yield, N use efficiency and greenhouse gas emission in Northeast China. *Chin J Appl Ecol*, 2016, 27: 453–461 (in Chinese with English abstract).
- [15] 李俊峰, 杨建昌. 水分与氮素及其互作对水稻产量和水肥利用效率的影响研究进展. 中国水稻科学, 2017, 31: 327–334.
- Li J F, Yang J C. Research advances in the effects of water, nitrogen and their interaction on the yield, water and nitrogen use efficiencies of rice. *Chin J Rice Sci*, 2017, 31: 327–334 (in Chinese with English abstract).
- [16] Zhang H, Xue Y, Wang Z, Yang J, Zhang J. An alternate wetting and moderate soil drying regime improves root and shoot growth in rice. *Crop Sci*, 2009, 49: 2246–2260.
- [17] 张自常, 李鸿伟, 曹转勤, 王志琴, 杨建昌. 施氮量和灌溉方式的交互作用对水稻产量和品质影响. 作物学报, 2013, 39: 84–92.
- Zhang Z C, Li H W, Cao Z Q, Wang Z Q, Yang J C. Effect of interaction between nitrogen rate and irrigation regime on grain yield and quality of rice. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 84–92 (in Chinese with English abstract).
- [18] Lin X Q, Zhou W J, Zhu D F, Chen H Z, Zhang Y P. Nitrogen accumulation, remobilization and partitioning in rice under an improved irrigation practice. *Field Crops Res*, 2006, 127: 448–454.
- [19] 王绍华, 曹卫星, 丁艳锋, 田永超, 姜东. 水氮互作对水稻氮吸收与利用的影响. 中国农业科学, 2004, 37: 497–501.
- Wang S H, Cao W X, Ding Y F, Tian Y C, Jiang D. Interactions of water management and nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization in rice. *Sci Agric Sin*, 2004, 37: 497–501 (in Chinese with English abstract).
- [20] Sun Y J, Ma J, Sun Y Y, Xu H, Yang Z Y, Liu S J, Jia X W, Zheng H Z. The effects of different water and nitrogen managements on yield and nitrogen use efficiency in hybrid rice of China. *Field Crops Res*, 2012, 127: 85–98.
- [21] 李敏. 水稻高产与氮高效的协同机理. 贵阳: 贵州科技出版社, 2019. pp 103–118.
- Li M. The Coordination Mechanism of High Yield and High Nitrogen Use Efficiency in Rice. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishers, 2019. pp 103–118 (in Chinese).
- [22] 汤国平, 熊强强, 钟蕾, 陈小荣, 朱昌兰, 彭小松, 贺浩华. 双季早稻氮素亏缺补偿效应的形成及其生理机制初探. 核农学报, 2017, 31: 1585–1593.
- Tang G P, Xiong Q Q, Zhong L, Chen X R, Zhu C L, Peng X S, He H H. Primary research on the formation and its physiological mechanism of nitrogen deficiency compensatory effects in double-season early rice. *J Nucl Agric Sci*, 2017, 31: 1585–1593 (in Chinese with English abstract).
- [23] 杨建昌, 张建华. 促进稻麦同化物转运和籽粒灌浆的途径与机制. 科学通报, 2018, 63: 2932–2943.
- Yang J C, Zhang J H. Approach and mechanism in enhancing the remobilization of assimilates and grain-filling in rice and wheat. *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 2932–2943 (in Chinese with English abstract).
- [24] 陈佳娜, 曹放波, 谢小兵, 单双吕, 高伟, 李志斌, 黄敏, 邹应斌. 机插条件下低氮密植栽培对“早晚兼用”双季稻产量和氮素吸收利用的影响. 作物学报, 2016, 42: 1176–1187.
- Chen J N, Cao F B, Xie X B, Shan S L, Gao W, Li Z B, Huang M, Zou Y B. Effect of low nitrogen rate combined with high plant density on yield and nitrogen use efficiency of machine-transplanted early-late season double cropping rice. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 1176–1187 (in Chinese with English abstract).
- [25] 杨建昌, 杜永, 吴长付, 刘立军, 王志琴, 朱庆森. 超高产粳型水稻生长发育特性的研究. 中国农业科学, 2006, 39: 1336–1345.
- Yang J C, Du Y, Wu C F, Liu L J, Wang Z Q, Zhu Q S. Growth and development characteristics of super-high-yielding mid-season japonica rice. *Sci Agric Sin*, 2006, 39: 1336–1345 (in Chinese with English abstract).

- [26] 陈婷婷, 许更文, 钱希昉, 王志琴, 张耗, 杨建昌. 花后轻干-湿交替灌溉提高水稻籽粒淀粉合成相关基因的表达. *中国农业科学*, 2015, 48: 1288-1299.
Chen T T, Xu G W, Qian X Y, Wang Z Q, Zhang H, Yang J C. Post-anthesis alternate wetting and moderate soil drying irrigation enhance gene expressions of enzymes involved in starch synthesis in rice grains. *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 1288-1299 (in Chinese with English abstract).
- [27] 徐云姬, 许阳东, 李银银, 钱希昉, 王志琴, 杨建昌. 干湿交替灌溉对水稻花后同化物转运和籽粒灌浆的影响. *作物学报*, 2018, 44: 554-568.
Xu Y J, Xu Y D, Li Y Y, Qian X Y, Wang Z Q, Yang J C. Effect of alternate wetting and drying irrigation on post-anthesis remobilization of assimilates and grain filling of rice. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 554-568 (in Chinese with English abstract).
- [28] Yao F, Huang J, Cui K, Nie L, Xiang J, Liu X, Wu W, Chen M, Peng S. Agronomic performance of high-yielding rice variety grown under alternate wetting and drying irrigation. *Field Crops Res*, 2012, 126: 16-22.
- [29] 褚光, 展明飞, 朱宽宇, 王志琴, 杨建昌. 干湿交替灌溉对水稻产量与水分利用效率的影响. *作物学报*, 2016, 42: 1026-1036.
Chu G, Zhan M F, Zhu K Y, Wang Z Q, Yang J C. Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield and water use efficiency of rice. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 1026-1036 (in Chinese with English abstract).