中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

高温高湿区增密减氮对杂交稻‘内6优107’产量形成和氮肥利用率的影响

蒋　鹏，徐富贤，张　林，周兴兵，朱永川，郭晓艺，刘　茂，陈　琳，张　容，熊　洪

Effect of increased plant density with reduced nitrogen on yield formation and nitrogen use efficiency of hybrid rice under high temperature and high humidity conditions

JIANG Peng, XU Fuxian, ZHANG Lin, ZHOU Xingbing, ZHU Yongchuan, GUO Xiaoyi, LIU Mao, CHEN Lin, ZHANG Rong, and XIONG Hong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210288

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

减氮配施控释尿素对水稻产量和氮肥利用的影响

Effect of combined application of controlled-release urea and conventional urea under reduced N rate on yield and N utilization efficiency of rice

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(6): 829–838

界面阻隔材料对稻田产量、氮肥利用率和氨挥发排放的影响

Effects of interface barrier materials on rice yield, nitrogen use efficiency, and NH_3 volatilization

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(6): 803–812

不同缓/控释尿素在黄土台塬区春玉米的减量施用效果

Effect of different rates of slow/controlled release urea on nitrogen content in spring maize in loess highlands

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(6): 848–855

秸秆还田下减氮增密对双季稻田土壤氮素库容及氮素利用率的影响

Soil nitrogen storage and recovery efficiency in double paddy fields under reduced nitrogen dose and increased crop density

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(3): 422–430

利用杂交水稻开花比例鉴定耐高温性的方法

Identification method of high temperature resistance of hybrid rice based on flowering rate

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(9): 1335–1344

氮肥运筹与栽植方式对杂交籼稻籽粒灌浆及产量的影响

Effect of nitrogen management and cultivation method on grain-filling characteristics and grain yield of *indica* hybrid rice

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(10): 1485–1494

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 10 月 第 29 卷 第 10 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Oct. 2021, 29(10): 1679−1691

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210288

蒋鹏, 徐富贤, 张林, 周兴兵, 朱永川, 郭晓艺, 刘茂, 陈琳, 张容, 熊洪. 高温高湿区增密减氮对杂交稻‘内 6 优 107’产量形成和氮肥利用率的影响 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(10): 1679−1691

JIANG P, XU F X, ZHANG L, ZHOU X B, ZHU Y C, GUO X Y, LIU M, CHEN L, ZHANG R, XIONG H. Effect of increased plant density with reduced nitrogen on yield formation and nitrogen use efficiency of hybrid rice under high temperature and high humidity conditions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(10): 1679−1691

高温高湿区增密减氮对杂交稻‘内 6 优 107’产量形成和氮肥利用率的影响*

蒋　鹏[1], 徐富贤[1**], 张　林[1], 周兴兵[1], 朱永川[1], 郭晓艺[1], 刘　茂[1], 陈　琳[1], 张　容[2], 熊　洪[1]

(1. 四川省农业科学院水稻高粱研究所/农业部西南水稻生物学与遗传育种重点实验室/四川省作物生理生态及栽培重点实验室　德阳　618000; 2. 遂宁市安居区玉丰镇农业服务中心　遂宁　629023)

摘　要: 探明高温高湿稻区增密减氮对杂交稻产量形成和氮肥利用率的影响, 可为高温高湿稻区氮肥优化管理和合理密植提供依据。本研究以杂交稻‘内 6 优 107’为材料, 于 2018—2019 年在典型的高温高湿稻区四川省泸州市进行大田试验。试验设 6 个密度与施氮量组合, 分别为低密高氮 (习惯移栽密度 16.5 万穴·hm^{-2}, 施氮量为 180 kg·hm^{-2}, LDN_{ck})、低密减氮 15% ($LDN_{-15\%}$)、低密减氮 30% ($LDN_{-30\%}$)、增密减氮 15% (增密 27%, $HDN_{-15\%}$)、增密减氮 30% ($HDN_{-30\%}$) 和低密不施氮 (LDN_0)。结果表明: 不同密肥组合对杂交稻产量影响显著 (P<0.01)。与 LDN_{ck} 相比, $HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 杂交稻产量分别增加 4.3%~4.9% 和 2.3%~3.6%, 其优势主要表现在每穗粒数、结实率、花前干物质转运量、花前干物质转运效率、花前干物质转运对产量的贡献率和收获指数上。$LDN_{-15\%}$ 和 $LDN_{-30\%}$ 杂交稻产量较 LDN_{ck} 分别降低 2.3%~2.5% 和 4.8%~5.0%, 较低的有效穗、干物质、花后干物质积累及花后干物质积累对产量的贡献率是其减产的主要原因。$HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 杂交稻花后氮素积累量、成熟期氮素吸收量低于 LDN_{ck} 处理, 但其花前氮素转运量、花前氮素转运效率、花前氮素转运贡献率、氮素干物质生产效率、氮素籽粒生产效率和氮素收获指数均高于 LDN_{ck} 处理, 因而 $HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理每生产 100 kg 稻谷需氮量分别减少 6.8%~8.4% 和 9.0%~9.9%。与 LDN_{ck} 处理相比, $HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 杂交稻氮肥农学利用率分别增加 36.7%~37.4% 和 55.5%~60.4%、氮肥偏生产力增加 22.8%~23.5% 和 46.3%~48.2%、氮肥吸收利用率增加 5.6%~12.0% 和 17.0%~20.0%。可见, 在高温高湿稻区杂交稻生产上宜采用栽插密度为 21.0 万穴·hm^{-2} 和施氮量为 126~153 kg·hm^{-2} 的组合。

关键词: 杂交稻; 增密减氮; 产量; 氮肥利用率; 高温高湿

中图分类号: S311; S314　　**开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Effect of increased plant density with reduced nitrogen on yield formation and nitrogen use efficiency of hybrid rice under high temperature and high humidity conditions*

* 国家自然科学基金项目 (31971844)、四川省农业科学院青年基金项目 (2019QNJJ-020) 和现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-01-25) 资助

** 通信作者: 徐富贤, 主要研究方向为水稻高产高效栽培理论与技术。E-mail: xu6501@163.com
蒋鹏, 主要研究方向为水稻栽培生理生态。E-mail: jiangyipeng137@163.com

收稿日期: 2021-05-18　接受日期: 2021-06-30

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31971844), the Foundation of Youth Science Program of Sichuan Academy of Agricultural Sciences (2019QNJJ-020) and the Special Fund for the Industrial Technology System Construction of Modern Agriculture of China (CARS-01-25).

** Corresponding author, E-mail: xu6501@163.com

Received May 18, 2021; accepted Jun. 30, 2021

JIANG Peng[1], XU Fuxian[1**], ZHANG Lin[1], ZHOU Xingbing[1], ZHU Yongchuan[1], GUO Xiaoyi[1], LIU Mao[1], CHEN Lin[1], ZHANG Rong[2], XIONG Hong[1]

(1. Rice and Sorghum Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Southwest Rice Biology and Genetic Breeding, Ministry of Agriculture / Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Deyang 618000, China; 2. Yufeng Town Agricultural Service Center of Anju District, Suining City, Suining 629023, China)

Abstract: The effects of increased plant density with reduced nitrogen (N) application rate on yield formation and nitrogen use efficiency (NUE) of hybrid rice were studied to provide a theoretical basis for optimum nitrogen fertilizer management and plant density under high temperature with high humidity conditions. Field experiments were conducted in Luzhou City from 2018 to 2019. The high yield and high quality hybrid rice variety 'Nei6you107' was grown under six combinations of plant density and N application rate: 1) locally recommended combination with a plant density of 16.5×10^4 hills·hm^{-2} and a N rate of 180 kg·hm^{-2} (LDN_{ck}); 2) combination of a plant density of 16.5×10^4 hills·hm^{-2} and a reduced N rate by 15% (153 kg·hm^{-2}, $LDN_{-15\%}$); 3) combination of a plant density of 16.5×10^4 hills·hm^{-2} and a reduced N rate by 30% (126 kg·hm^{-2}, $LDN_{-30\%}$); 4) combination of a increased plant density by about 27% (21.0×10^4 hills hm^{-2}) and a reduced N rate by 15% (153 kg·hm^{-2}, $HDN_{-15\%}$); 5) combination of a increased plant density by about 27% (21.0×10^4 hills·hm^{-2}) and a reduced N rate by 30% (126 kg·hm^{-2} $HDN_{-30\%}$); and 6) combination of a plant density of 16.5×10^4 hills·hm^{-2} and zero N rate (LDN_0). The grain yield, yield components, dry matter, N uptake and NUE were measured. The results showed that the grain yield of hybrid rice was significantly affected by different combinations of plant density and N rate (P<0.01). $HDN_{-15\%}$ and $HDN_{-30\%}$ produced higher grain yields than LDN_{ck} by 4.3%−4.9% and 2.3%−3.6%, respectively. The higher grain yields under $HDN_{-15\%}$ and $HDN_{-30\%}$ were attributed to improvement in spikelets per panicle, grain filling rate, translocation of dry matter accumulated at heading stage (TDM_{HD}), translocation percentage of dry matter accumulated at heading stage ($TPDM_{HD}$), contribution percentage of pre-anthesis dry matter translocation to grain yield ($CPDMTG_{HD}$) and harvest index. The $LDN_{-15\%}$ and $LDN_{-30\%}$ had 2.3%−2.5% and 4.8%−5.0% lower grain yield than LDN_{ck}, respectively. The yield gap between $LDN_{-15\%}$, $LDN_{-30\%}$ and LDN_{ck} was attributed to the difference in effective panicles, total dry matter, dry matter accumulation from heading to maturity, and contribution percentage of dry matter accumulation from heading to maturity stage to grain yield ($CPDMG_{HD\text{-}MA}$). The $HDN_{-15\%}$ and $HDN_{-30\%}$ had lower nitrogen accumulation from heading to maturity and total N uptake than LDN_{ck}, whereas the translocation of N accumulated at heading stage ($NTGN_{HD}$), translocation percentage of N accumulated at heading stage (TPN_{HD}), contribution percentage of pre-anthesis N accumulation translocation to grain N accumulation ($CPNTGN_{HD}$), N use efficiency for biomass production (NUEBP), N use efficiency for grain production (NUEGP) and N harvest index under $HDN_{-15\%}$ and $HDN_{-30\%}$ were higher than those under LDN_{ck}. Consequently, $HDN_{-15\%}$ and $HDN_{-30\%}$ had lower N requirements to produce 100 kg of grain (NRPG) than LDN_{ck} by 6.8%−8.4% and 9.0%−9.9%, respectively. $HDN_{-15\%}$ enhanced the agronomic efficiency of applied N (AE_N) by 36.7%−37.4%, partial factor productivity of applied N (PFP_N) by 22.8%−23.5% and recovery efficiency of applied N (RE_N) by 5.6%−12.0% over LDN_{ck}. The $HDN_{-30\%}$ produced higher AE_N, PFP_N and RE_N than LDN_{ck} by 55.5%−60.4%, 46.3%−48.2% and 17.0%−20.0%, respectively. The rational combination of plant density and N rate can improve panicle number per unit area, grain filling, TDM_{HD}, $TPDM_{HD}$, $NTGN_{HD}$, TPN_{HD} and harvest index, which further increasing the grain yield and NUE. The optimum combination is plant density of 21.0×10^4 hills·hm^{-2} plus N rate of 126−153 kg·hm^{-2} in high temperature with high humidity condition.

Keywords: Hybrid rice; Increased plant density with reduced nitrogen; Grain yield; Nitrogen use efficiency; High temperature with high humidity

四川省是我国水稻 (*Oryza sativa*) 生产主产省份之一, 同时也是我国西南地区主要缺粮省份的粮食重要供应源, 采用合理的栽培技术持续提高四川省水稻产量对保障我国粮食安全具有重要的意义。种植密度和施氮量作为水稻生产的两个重要栽培技术, 长期以来备受农业科学研究者关注。缘于我国选育的杂交稻品种普遍分蘖能力强[1]、根系发达[2-3]、干物质产量大[4-5] 和栽培技术变革[6], 水稻种植趋于稀植化; 尤其是劳动力成本急剧上升的稻区, 稻农为了降低手插秧劳动力成本, 大幅度地降低水稻本田栽插密度[7]。在稀植条件下必然需要加大基肥、分蘖肥氮素施用量促进杂交稻分蘖来稳定穗数, 同时还要增加穗肥氮素施用量培育大穗和确保后期功能叶片不早衰, 才能达到高产或超高产的目的。高施氮量导致我国稻田氮肥利用率显著下降, 目前稻田氮肥吸收利用率仅为 30%~40%, 有些稻区甚至不足 20%[8-9], 大部分损失到环境中, 造成严重的农业面源污染。最近有研究指出, 在我国南方稻区即使增加施氮量也不能弥补杂交稻因降低移栽密度造成有效穗不足而引起的产量下降[10], 并且移栽密度每降低 10% 和施氮量每增加 10% 杂交稻产量降低 4%[11]。已有研究表明, 减少氮肥施用量有利于氮肥利用率

的提高[12-13], 如果只强调氮肥减施不增加种植密度可能会因有效穗不足而导致杂交稻产量下降。大量研究认为, 在我国南方双季稻区通过增密减氮栽培策略可协同提高杂交稻产量和氮肥利用率[14-16]。但前人的这些研究结果均是在光照、空气湿度较好的南方双季稻区取得的, 难以直接用于指导四川盆地的水稻生产。四川省位于我国西南, 四周高山, 中央为盆地, 气候温和, 雨量充沛, 空气湿度大, 常有云雾, 年日照时数仅有 1000 h 左右, 水稻生长前期光照偏少, 籽粒灌浆结实期光照时数相对较多, 但空气湿度大、温度高 (图 1), 是典型的“低光值、小温差、高湿度”生态区[17]。水稻生长前期日照不足会抑制分蘖产生和大穗形成, 造成库容量不足; 而籽粒灌浆结实期高温高湿易引发水稻群体滋生纹枯病, 尤其是高密群体更容易发病, 进而导致产量下降。另外, 空气湿度过高还会显著加重高温对水稻的热害损伤。上述不利环境气候因素造成了四川盆地水稻单位面积穗容量低, 其超高产育种重点只能走亚种间重穗型杂交稻之路, 而超高产栽培重点则是采用稀植以协调个体与群体之间的矛盾, 进而充分发挥杂交稻产量潜力[18-19]。徐富贤等[20] 研究发现, 在四川东南部冬水田区超稀植高氮 (移栽密度为 9.0 万穴·hm^{-2}, 施氮量为 270 kg·hm^{-2}) 处理杂交稻产量比增密 50% 减氮 20% 处理增产 4.3%, 但其氮肥偏生产力却降低 18.8%, 说明稀植高氮可以促进水稻产量的提高, 但会造成氮肥利用率显著降低和氮肥盈余。由此可知, 在高温高湿的四川盆地采用增密减氮栽培策略能否协同提高杂交稻产量和氮肥利用率目前尚不清楚。高温高湿区增密减氮下杂交稻产量形成特点、干物质生产与转运、氮肥吸收与利用特性也不是很清楚。为此, 本研究在四川盆地高温高湿区开展不同密度、施肥组合 (简称“密肥”) 对杂交稻产量形成特点和氮肥利用率影响的研究, 以期为四川盆地高温高湿区因地制宜地制定增密减氮高产栽培策略提供理论和实践依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料

供试材料为高产优质杂交稻品种‘内 6 优 107’(迟熟杂交稻品种), 生育期为 156.9 d。种子由四川省农业科学院水稻高粱研究所提供。

1.2　试验地点和试验设计

试验在四川省农业科学院水稻高粱研究所泸州基地进行。泸州位于四川盆地东南部, 是典型的亚热带湿润气候。水稻生长期间日照时数约为 800 h, 每月平均湿度在 75% 以上, 尤其是 5—6 月份日照时数更少、湿度更大 (月平均日照时数约为 100 h, 月平均湿度基本在 80% 以上) (图 1), 而此时正处于水稻最高分蘖期和穗分化的关键时期, 日照时数不足、空气湿度大不利于高产群体的构建和大穗的形成, 限制水稻库容量的扩大。另外, 空气湿度大容易引起水稻滋生纹枯病。7—8 月光照相对充足, 但最高、最低温度较高, 昼夜温差小, 空气湿度大, 影响籽粒灌浆结实, 造成结实率下降。穗分化期弱光高湿和籽粒灌浆期高温高湿是限制该区水稻超高产的主要瓶颈。

于 2018—2019 年进行不同密肥处理对杂交稻产量形成特点和氮肥利用率影响的大田试验。试验稻田耕作层土壤 pH 4.5, 含有机质 29.2 g·kg^{-1}, 碱解氮 148.1 mg·kg^{-1}, 速效钾 129.1 mg·kg^{-1}, 有效磷 6.2 mg·kg^{-1}, 全氮 1.6 g·kg^{-1}, 全磷 0.5 g·kg^{-1}, 全钾 29.7 g·kg^{-1}。试验设 6 个密肥组合: 低密高氮处理 (农民大面积生产的密度 16.5 万穴·hm^{-2}, 施氮量为 180 kg·hm^{-2}, LDN_{ck})、低密减氮 15% 处理 (密度 16.5 万穴·hm^{-2}, 施氮量为 153 kg·hm^{-2}, $LDN_{-15\%}$)、低密减氮 30% 处理 (密度 16.5 万穴·hm^{-2}, 施氮量为 126 kg·hm^{-2}, $LDN_{-30\%}$)、增密减氮 15% 处理 (密度增加 27%, 约为 21.0 万穴·hm^{-2}, 施氮量为 153 kg·hm^{-2}, $HDN_{-15\%}$)、增密减氮 30% 组合 (密度增加 27%, 约为 21.0 万穴·hm^{-2}, 施氮量为 126 kg·hm^{-2}, $HDN_{-30\%}$)、低密不施氮处理 (密度 16.5 万穴·hm^{-2}, 施氮量为 0 kg·hm^{-2}, LDN_0)。试验采用随机区组设计, 3 次重复, 共 18 个小区, 小区面积为 30 m^2。过磷酸钙、氯化钾用量分别为 450 kg hm^{-2} 和 180 kg hm^{-2}; 氮肥按底肥∶蘖肥∶穗肥=6∶2∶2, 磷肥全部作基肥, 钾肥按底肥∶穗肥=5∶5 施用。其他管理按高产栽培进行。于每年 3 月 10 日播种, 2018 年于 4 月 10 日移栽, 7 月 1 日齐穗, 8 月 5 日成熟; 2019 年于 4 月 12 日移栽, 7 月 4 日齐穗, 8 月 8 日成熟。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　干物质和产量构成

于齐穗期和成熟期每小区取 5 穴 (边 3 行除外) 生长均匀的植株, 用水冲洗干净后, 剪去根系。其中齐穗期植株样品分成茎叶、稻穗 2 部分; 成熟期植株样品, 人工计数穗数后, 手工脱粒, 将样品分成茎叶、实粒、秕粒 3 部分, 置于 70 ℃ 烘箱, 烘至恒重, 用于计算齐穗期和成熟期干物质、每穗粒数、结实率和千粒重 (为烘干重)。此外, 每小区调查 30 穴

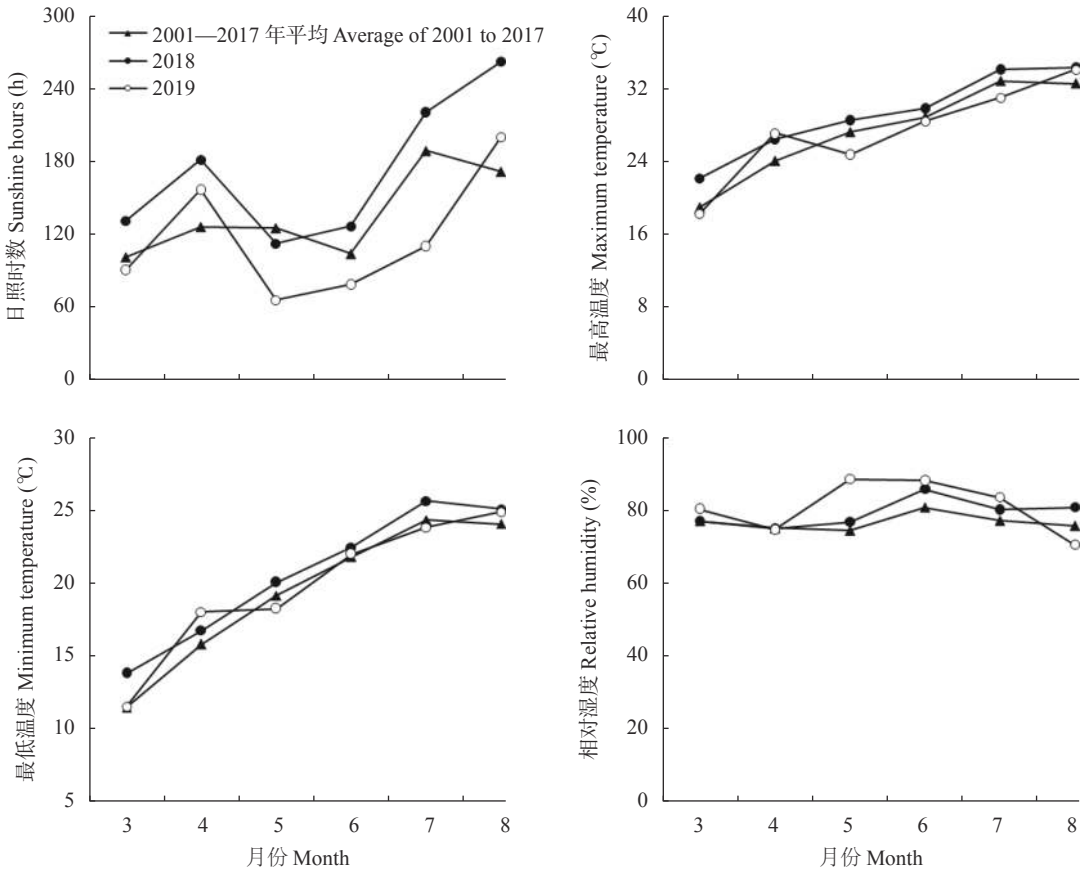

图 1 2001—2019 年研究区水稻生育期月日照时数、平均湿度、平均最高温度和平均最低

Fig. 1 Monthly sunshine hours, average humidity, mean maximum temperature and minimum temperature during rice-growing season from 2001 to 2019 in the study area

(边 3 行除外) 植株穗数, 用于计算单位面积有效穗。

1.3.2 植株氮素含量测定

采用植株粉碎机将齐穗期 (茎叶、稻穗)、成熟期 (茎叶、实粒、秕粒) 植株各器官粉碎并过筛, 经浓 H_2SO_4-H_2O_2 消化后, 采用 Integral Futura 连续流动分析仪 (Alliance Instruments, 法国) 测定氮素含量。

1.3.3 产量

于成熟期每小区中心收割 5 m^2 用于测产, 小区单打单晒, 称重后, 将稻谷含水量折算为 13.5%, 记为该小区的实产。

1.3.4 氮素利用率指标计算

花后干物质积累量 ($g \cdot m^{-2}$) = 成熟期总干物质积累量 – 齐穗期干物质积累量 (1)

花前干物质转运量($g \cdot m^{-2}$) = 产量 – 花后干物质积累量 (2)

花前干物质转运效率(%) = 花前干物质转运量/齐穗期干物质积累量×100% (3)

花前干物质转运对产量的贡献率(%) = 花前干物质转运量/产量×100% (4)

花后干物质积累对产量的贡献率(%) = 花后干物质积累量/产量×100% (5)

氮素吸收量($g \cdot m^{-2}$) = 齐穗期、成熟期单位面积地上部各器官(稻草、稻穗或实粒、秕粒)氮素吸收量之和 (6)

氮肥农学利用率($kg \cdot kg^{-1}$) = (施氮区产量 – 无氮区产量)/施氮量 (7)

氮肥偏生产力($kg \cdot kg^{-1}$) = 施氮区产量/施氮量 (8)

氮肥吸收利用率(%) = (施氮区氮素吸收量 – 无氮区氮素吸收量)/施氮量×100% (9)

茎叶氮素转运量($g \cdot m^{-2}$) = 齐穗期茎叶氮素吸收量 – 成熟期茎叶氮素吸收量 (10)

茎叶氮素表观转运率(%) = (茎叶氮素转运量/齐穗期茎叶氮素吸收量)×100% (11)

茎叶氮素转运贡献率(%) = (茎叶氮素转运量/成熟期籽粒氮素吸收量)×100% (12)

氮素收获指数(%) = 成熟期实粒氮素吸收量/地上部氮素总吸收量×100% (13)

氮素干物质生产效率($kg \cdot kg^{-1}$) = 成熟期单位地上部干物质重/成熟期氮素吸收量　(14)

氮素籽粒生产效率($kg \cdot kg^{-1}$) = 籽粒产量/地上部氮素总吸收量　(15)

每生产100 kg稻谷氮素需要量(kg) = 地上部植株氮素总吸收量/稻谷产量×100　(16)

1.4 数据分析

采用 Excel 2003 整理数据, Statistix 8.0 进行方差分析, $LSD_{0.05}$ 进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 高温高湿区不同密肥处理对杂交稻产量及产量构成的影响

由表 1 可知, 年份、密肥处理对杂交稻产量影响显著 ($P<0.01$), 但互作对杂交稻产量影响不显著 ($P>0.05$)。低密不施氮 (LDN_0) 处理杂交稻产量显著低于其他 5 个密肥处理 ($P<0.01$), 说明施氮可显著提高杂交稻产量。为了更合理地比较不同密肥处理间的差异, 本研究以农民习惯栽插密度+高氮 (LDN_{ck}) 为施氮密肥处理对照。与 LDN_{ck} 处理相比, $LDN_{-15\%}$ 和 $LDN_{-30\%}$ 处理杂交稻产量降低 2.3%~2.5% 和 4.8%~5.0% ($P>0.05$), 说明稀植 (农民习惯栽插密度) 条件下减量施氮 15%~30% 不利于杂交稻高产。$HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理杂交稻产量较 LDN_{ck} 处理分别增加 4.3%~4.9% 和 2.3%~3.6% ($P>0.05$), 可见合理密植下减量施氮 15%~30% 不会造成杂交稻产量下降。由表 1 还可以看出, 不同密肥处理对杂交稻有效穗数、每穗粒数影响显著 ($P<0.05$)。与 LDN_{ck} 相比, $LDN_{-15\%}$ 和 $LDN_{-30\%}$ 处理杂交稻有效穗数分别降低 10.8%~12.1% 和 11.3%~13.2%, 2018 年达显著水平 ($P<0.05$); 每穗粒数分别增加 8.6%~9.1% 和 5.8%~7.1%, 2018 年 $LDN_{-15\%}$ 达显著水平 ($P<0.05$); 结实率分别增加 0.5%~0.6% 和 1.7%~2.7% ($P>0.05$)。2018 年 $HDN_{-15\%}$、$HDN_{-30\%}$ 处理杂交稻有效穗较 LDN_{ck} 分别降低 3.2% ($P>0.05$) 和 13.1% ($P<0.05$), 但 2019 年 $HDN_{-15\%}$、$HDN_{-30\%}$ 处理有效穗较 LDN_{ck} 分别增加 3.2% 和 2.0% ($P>0.05$)。与 LDN_{ck} 相比, $HDN_{-15\%}$、$HDN_{-30\%}$ 处理杂交稻每穗粒数分别增加 0.5%~2.1% 和 2.6%~10.2%, 2018 年 $HDN_{-30\%}$ 达显著水平 ($P<0.05$); 结实率分别增加 0.4%~4.6% 和 1.1%~5.2% ($P>0.05$)。不同密肥处理对杂交稻千粒重影响较小。

2.2 高温高湿区不同密肥处理对杂交稻干物质生产及收获指数的影响

由表 2 可知, 不同年份、密肥处理对杂交稻花前、花后、成熟期干物质 (总干物质) 产量、收获指数影响显著 ($P<0.05$)。2018 年 $LDN_{-15\%}$、$HDN_{-15\%}$ 处理杂交稻花前干物质均略高于 LDN_{ck} 处理, 但其花后干

表 1　高温高湿区不同密肥处理对杂交稻产量及其构成的影响

Table 1　Effect of combination of plant density and N rate on grain yield and yield components of hybrid rice under high temperature and high humidity conditions

年份 Year	处理 Treatment			有效穗数 Effective panicles ($panicles \cdot m^{-2}$)	每穗粒数 Grains number per panicle	结实率 Grain filling (%)	粒重 Grain weight (mg)	产量 Grain yield ($t \cdot hm^{-2}$)
	代码 Code	密度 Plant density ($\times 10^4$ $holes \cdot hm^{-2}$)	施氮量 N application rate ($kg \cdot hm^{-2}$)					
2018	LDN_0	16.5	0	155.3±13.7c	138.0±4.2c	89.5±1.9a	28.1±0.2b	6.22±0.42d
	$LDN_{-15\%}$	16.5	153	181.4±9.8b	158.8±4.8a	86.5±1.7a	29.7±0.5a	8.31±0.21bc
	$LDN_{-30\%}$	16.5	126	179.2±10.4bc	154.0±3.9ab	88.4±3.0a	29.3±0.3a	8.11±0.14c
	$HDN_{-15\%}$	21.0	153	199.7±9.1ab	148.5±2.4b	90.1±1.0a	29.3±0.5a	8.89±0.11a
	$HDN_{-30\%}$	21.0	126	179.3±4.4bc	160.4±5.1a	90.6±0.9a	29.3±0.6a	8.72±0.37ab
	LDN_{CK}	16.5	180	206.4±22.6a	145.5±6.5bc	86.1±5.9a	29.4±0.9a	8.52±0.70abc
2019	LDN_0	16.5	0	179.2±12.9c	159.3±7.1a	80.9±2.4b	28.1±0.3ab	6.33±0.05c
	$LDN_{-15\%}$	16.5	153	205.4±5.2b	149.3±10.9ab	84.5±1.6ab	27.7±0.6b	8.62±0.25b
	$LDN_{-30\%}$	16.5	126	204.1±21.2bc	147.2±11.2ab	85.4±2.0a	28.8±0.2a	8.38±0.15b
	$HDN_{-15\%}$	21.0	153	237.6±9.1a	138.2±1.8b	84.3±3.1ab	28.5±0.5ab	9.25±0.13a
	$HDN_{-30\%}$	21.0	126	234.7±16.6a	141.1±3.9b	84.9±1.4ab	28.4±0.9ab	9.14±0.23a
	LDN_{CK}	16.5	180	230.2±25.1ab	137.5±2.6b	84.0±3.0ab	27.9±0.5ab	8.82±0.50ab
方差分析 Analysis of variance								
年份 Year (Y)				**	**	*	**	**
处理 Treatment (T)				**	**	ns	ns	**
年份×处理 Y×T				ns	**	ns	ns	ns

同年同列数据后不同字母表示处理间在$P<0.05$水平差异显著。*表示差异达$P<0.05$显著水平, **表示差异达$P<0.01$显著水平, ns 表示差异不显著。Values followed by different letters in a year within a column are significantly different at $P<0.05$ level. * and ** mean significance at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively. ns denotes non-significance.

表 2 高温高湿区不同密肥处理对杂交稻干物质生产及收获指数的影响

Table 2 Effect of combination of plant density and N rate on biomass production of hybrid rice under high temperature and high humidity condition

年份 Year	处理 Treatment			干物质 Dry matter ($g·m^{-2}$)		总干物质 Total dry matter ($g·m^{-2}$)	收获指数 Harvest index (%)
	代码 Code	密度 Plant density ($×10^4$ holes·hm^{-2})	施氮量 N application rate ($kg·hm^{-2}$)	开花前 Before heading	开花后 After heading		
2018	LDN_0	16.5	0	612.3±30.2c	280.6±44.4b	892.8±60.9c	60.3±0.9a
	$LDN_{-15\%}$	16.5	153	981.7±13.1ab	379.2±24.9a	1360.9±37.3a	54.3±0.8b
	$LDN_{-30\%}$	16.5	126	931.8±35.0b	304.1±53.7ab	1235.9±72.7b	57.8±1.3ab
	$HDN_{-15\%}$	21.0	153	1013.1±44.7a	307.4±28.9ab	1320.5±56.6ab	59.3±1.5a
	$HDN_{-30\%}$	21.0	126	968.2±72.5ab	359.5±105.4ab	1327.8±40.6ab	57.5±2.5ab
	LDN_{CK}	16.5	180	978.5±8.7ab	381.6±29.0a	1360.1±37.2a	55.5±3.6b
2019	LDN_0	16.5	0	846.3±43.8b	299.6±77.9ab	1145.9±38.9d	56.6±0.4a
	$LDN_{-15\%}$	16.5	153	1130.1±10.9a	278.4±34.5ab	1408.5±44.0ab	52.5±2.2b
	$LDN_{-30\%}$	16.5	126	1106.5±26.9a	207.4±74.2b	1313.9±50.7c	56.0±1.8a
	$HDN_{-15\%}$	21.0	153	1137.9±32.0a	337.8±35.6a	1475.7±19.6a	53.3±0.7b
	$HDN_{-30\%}$	21.0	126	1102.8±23.6a	285.7±44.4ab	1388.5±21.2b	55.9±0.4a
	LDN_{CK}	16.5	180	1136.3±14.6a	316.9±46.9ab	1453.2±34.5ab	51.7±0.8b
方差分析 Analysis of variance							
年份 Year (Y)				**	*	**	**
处理 Treatment (T)				**	*	**	**
年份×处理 Y×T				ns	ns	**	ns

同年同列数据后不同字母表示处理间在$P<0.05$水平差异显著。*表示差异达$P<0.05$显著水平, **表示差异达$P<0.01$显著水平, ns 表示差异不显著。Values followed by different letters in a year within a column are significantly different at $P<0.05$ level. * and ** mean significance at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively. ns denotes non-significance.

物质均低于 LDN_{ck} 处理, $LDN_{-15\%}$ 成熟期干物质与 LDN_{ck} 处理相当, $HDN_{-15\%}$ 略有降低, 上述变化均未达到显著水平。与 LDN_{ck} 处理相比, 2018 年 $LDN_{-30\%}$、$HDN_{-30\%}$ 处理花前干物质分别降低 4.8% 和 1.1% ($P>0.05$), 花后干物质分别降低 20.3% 和 5.8% ($P>0.05$), 成熟期干物质分别降低 9.1% ($P<0.05$) 和 2.4% ($P>0.05$), 收获指数分别增加 4.1% 和 3.6% ($P>0.05$)。2019 年, $LDN_{-15\%}$、$LDN_{-30\%}$、$HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理杂交稻花前干物质与 LDN_{ck} 处理相当。与 LDN_{ck} 处理相比, $LDN_{-15\%}$、$LDN_{-30\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理杂交稻花后干物质分别减少 12.1%、34.6% 和 9.8% ($P>0.05$), $HDN_{-15\%}$ 处理杂交稻花后干物质增加 6.6% ($P>0.05$)。$LDN_{-15\%}$、$LDN_{-30\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理杂交稻成熟期干物质较 LDN_{ck} 处理分别降低 3.1% ($P>0.05$)、9.6% ($P<0.05$) 和 4.5% ($P>0.05$); $HDN_{-15\%}$ 处理杂交稻成熟期干物质较 LDN_{ck} 处理增加 1.5% ($P>0.05$)。与 LDN_{ck} 处理相比, $LDN_{-15\%}$、$LDN_{-30\%}$、$HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理杂交稻收获指数分别增加 1.5%、8.3%、3.1% 和 8.1%。

2.3 高温高湿区不同密肥处理对杂交稻花前干物质转运的影响

由表 3 可知, 不同密肥处理对杂交稻花前干物质转运量、花前干物质转运对产量的贡献率和花后干物质积累对产量的贡献率的影响显著 ($P<0.05$)。与 LDN_{ck} 处理相比, $HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理花前干物质转运量分别增加 3.9%~23.6% 和 8.9%~11.2% ($P>0.05$), 花前干物质转运效率分别增加 3.8%~19.3% 和 9.6%~14.5% ($P>0.05$)。$HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理花前干物质转运对产量的贡献率较 LDN_{ck} 处理平均分别高 8.1% 和 7.1% ($P>0.05$), 但其花后干物质积累对产量的贡献率较 LDN_{ck} 处理平均分别降低 12.0% 和 10.5% ($P>0.05$)。$LDN_{-15\%}$ 和 $LDN_{-30\%}$ 处理花前干物质转运量、花前干物质转运效率、花前干物质转运对产量的贡献率和花后干物质积累对产量的贡献率与 LDN_{ck} 处理相比差异不显著。

2.4 高温高湿区不同密肥处理对杂交稻氮素吸收积累的影响

由表 4 可知, 不同密肥处理对杂交稻花前、花后、成熟期氮素吸收量和氮素收获指数影响显著 ($P<0.05$)。与 LDN_{ck} 处理相比, $LDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-15\%}$ 处理杂交稻花前氮素吸收量分别增加 4.6%~8.6% 和 1.8%~6.9%, 其中 2018 年达显著水平 ($P<0.05$); $LDN_{-30\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理杂交稻花前氮素吸收量分别降低 2.8%~15.5% 和 0.9%~6.4%, 其中 2018 年 $LDN_{-30\%}$ 处理达显著水平 ($P<0.05$)。$LDN_{-15\%}$、$LDN_{-30\%}$、$HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理杂交稻花后、成熟期总氮素吸收量均低于 LDN_{ck} 处理。与 LDN_{ck} 处理相比, $LDN_{-15\%}$、$LDN_{-30\%}$、$HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理杂交稻成熟期总

表 3　高温高湿区不同密肥处理对杂交稻花前干物质转运的影响

Table 3　Effect of combination of plant density and N rate on translocation of dry matter of hybrid rice at heading stage under high temperature and high humidity condition

年份 Year	处理 Treatment			花前干物质转运量 TDM_{HD} ($g·m^{-2}$)	花前干物质转运效率 $TPDM_{HD}$ ($g·m^{-2}$)	花前干物质转运对产量的贡献率 $CPDMTG_{HD}$ ($g·m^{-2}$)	花后干物质积累对产量的贡献率 $CPDMG_{HD-MA}$ ($g·m^{-2}$)
	代码 Code	密度 Plant density ($\times10^4$ holes·hm^{-2})	施氮量 N application rate ($kg·hm^{-2}$)				
2018	LDN_0	16.5	0	341.4±73.2c	55.7±11.7ab	54.6±8.8a	45.4±8.8a
	$LDN_{-15\%}$	16.5	153	452.1±15.0b	46.1±2.1b	54.4±2.2a	45.6±2.2a
	$LDN_{-30\%}$	16.5	126	507.3±67.2ab	54.5±8.0ab	62.4±7.3a	37.6±7.3a
	$HDN_{-15\%}$	21.0	153	581.7±30.9a	57.4±3.4a	65.4±3.3a	34.6±3.3a
	$HDN_{-30\%}$	21.0	126	512.7±75.7ab	52.7±3.8ab	59.0±10.5a	41.0±10.5a
	LDN_{CK}	16.5	180	470.6±9.7b	48.1±1.1ab	55.3±2.2a	44.7±2.2a
2019	LDN_0	16.5	0	333.3±74.4b	39.2±6.8b	52.7±12.0b	47.3±12.0a
	$LDN_{-15\%}$	16.5	153	583.2±30.8a	51.6±3.2a	67.7±3.6a	32.3±3.6b
	$LDN_{-30\%}$	16.5	126	630.6±89.3a	56.9±6.8a	75.1±9.3a	24.9±9.3b
	$HDN_{-15\%}$	21.0	153	587.5±25.8a	51.6±1.7a	63.5±3.4ab	36.5±3.4ab
	$HDN_{-30\%}$	21.0	126	628.6±65.4a	56.9±4.8a	68.7±5.6a	31.3±5.6b
	LDN_{CK}	16.5	180	565.3±91.9a	49.7±4.8a	63.9±5.6ab	36.1±5.6ab
方差分析 Analysis of variance							
年份 Year (Y)				**	ns	**	**
处理 Treatment (T)				**	ns	*	*
年份×处理 Y×T				ns	*	ns	ns

同年同列数据后不同字母表示处理间在$P<0.05$水平差异显著。*表示差异达$P<0.05$显著水平, **表示差异达$P<0.01$显著水平, ns 表示差异不显著。Values followed by different letters in a year within a column are significantly different at $P<0.05$ level. * and ** mean significance at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively. ns denotes non-significance. TDM_{HD}, $TPDM_{HD}$, $CPDMTG_{HD}$, $CPDMG_{HD-MA}$ represent translocation of dry matter accumulated at heading stage, translocation percentage of dry matter accumulated at heading stage, contribution percentage of pre-anthesis dry matter translocation to grain yield, contribution percentage of dry matter accumulation from heading to maturity stage to grain yield, respectively.

表 4　高温高湿区不同密肥处理对杂交稻植株氮素吸收积累的影响

Table 4　Effect of combination of plant density and N rate on N uptake of hybrid rice under high temperature and high humidity condition

年份 Year	处理 Treatment			氮素吸收量 N uptake ($g·m^{-2}$)		氮素总吸收量 Total N uptake ($g·m^{-2}$)	氮素收获指数 N harvest index (%)
	代码 Code	密度 Plant density ($\times10^4$ holes·hm^{-2})	施氮量 N application rate ($kg·hm^{-2}$)	开花前 Before heading	开花后 After heading		
2018	LDN_0	16.5	0	6.2±0.5d	2.5±1.0abc	8.7±0.5d	75.3±4.4a
	$LDN_{-15\%}$	16.5	153	12.6±0.2a	1.4±0.4c	14.0±0.2bc	68.6±0.7cd
	$LDN_{-30\%}$	16.5	126	9.8±0.8c	3.4±0.9ab	13.2±0.8c	70.0±1.7bcd
	$HDN_{-15\%}$	21.0	153	12.4±0.4a	2.1±0.6bc	14.5±0.9ab	71.9±2.2abc
	$HDN_{-30\%}$	21.0	126	11.5±0.5b	2.6±1.6abc	14.1±1.4bc	72.6±1.0ab
	LDN_{CK}	16.5	180	11.6±0.5b	3.5±0.5a	15.1±0.9a	67.6±2.3d
2019	LDN_0	16.5	0	6.4±0.4d	2.8±0.7a	9.1±0.4c	73.3±1.5a
	$LDN_{-15\%}$	16.5	153	11.4±0.2a	2.4±0.6a	13.8±0.5a	69.0±1.0b
	$LDN_{-30\%}$	16.5	126	10.6±0.7bc	2.3±1.2a	13.0±0.7b	69.7±1.4b
	$HDN_{-15\%}$	21.0	153	11.1±0.4ab	2.9±0.2a	14.0±1.0a	68.5±1.9b
	$HDN_{-30\%}$	21.0	126	10.2±0.4c	3.1±0.3a	13.3±0.4ab	71.2±2.1b
	LDN_{CK}	16.5	180	10.9±0.2abc	3.4±0.5a	14.3±0.4ab	64.9±0.9c
方差分析 Analysis of variance							
年份 Year (Y)				**	ns	ns	*
处理 Treatment (T)				**	*	*	**
年份×处理 Y×T				**	ns	ns	ns

同年同列数据后不同字母表示处理间在$P<0.05$水平差异显著。*表示差异达$P<0.05$显著水平, **表示差异达$P<0.01$显著水平, ns 表示差异不显著。Values followed by different letters in a year within a column are significantly different at $P<0.05$ level. * and ** mean significance at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively. ns denotes non-significance.

氮素吸收量分别减少 3.5%~7.3%、9.1%~12.6%、2.1%~4.0% 和 6.6%~7.0%, 2018 年除 $HDN_{-15\%}$ 外与其他 3 个处理差异达显著水平 ($P<0.05$); 其氮素收获指数分别增加 1.5%~6.3%、3.6%~7.4%、5.5%~6.4% 和

7.4%~9.7%, 且 2019 年 4 个处理的差异均达显著水平 (P<0.05)。

2.5 高温高湿区不同密肥处理对杂交稻茎叶氮素运转的影响

由表 5 可知, 年份、密肥处理对杂交稻茎叶氮素转运量、氮素表观转运率、氮素转运贡献率影响显著 (P<0.05)。一般以 LDN_0 处理杂交稻茎叶氮素转运量和氮素转运贡献率最低, 说明施氮可显著提高杂交稻茎叶氮素转运量和氮素转运贡献率。$LDN_{-15\%}$、$LDN_{-30\%}$、$HDN_{-15\%}$和 $HDN_{-30\%}$ 处理杂交稻植株茎叶氮素运转量、茎叶氮素表观转运率和茎叶氮素转运贡献率均高于 LDN_{ck} 处理 (除 2018 年 $LDN_{-30\%}$ 处理外)。与 LDN_{ck} 处理相比, $LDN_{-15\%}$、$LDN_{-30\%}$、$HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理杂交稻植株茎叶氮素运转量平均分别增加 30.7%、5.7%、27.3% 和 18.2%, 2018 年除 $LDN_{-30\%}$ 外其他 3 个处理、2019 年 $LDN_{-30\%}$ 处理的变化达显著水平 (P<0.05); 茎叶氮素表观转运率分别增加 19.1%~22.0%、5.5%~25.3%、17.3%~24.8% 和 22.2%~22.4%, 2018 年除 $LDN_{-30\%}$、2019 年除 $HDN_{-30\%}$, 其他处理的变化均达显著水平 (P<0.05); 茎叶氮素转运贡献率分别增加 16.7%~48.0%、0.4%~27.5%、15.3%~33.3% 和10.3%~22.6%,2018 年$LDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-15\%}$ 处理的变化达显著水平 (P<0.05)。

2.6 高温高湿区不同密肥处理对杂交稻氮肥利用率的影响

由表 6 可知, 不同密肥处理对杂交稻氮肥农学利用率和氮肥偏生产力影响显著 (P<0.05)。与 LDN_{ck} 处理相比, $LDN_{-15\%}$ 和 $LDN_{-30\%}$ 处理杂交稻氮肥农学利用率分别增加 7.0%~7.2% 和 17.2%~17.3% (P>0.05), $HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理杂交稻氮肥农学利用率分别增加 36.7%~37.4% 和 55.5%~60.4% (P<0.05), 说明稀植下减少施氮量只能小幅度地提高杂交稻氮肥农学利用率, 合理密植结合减量施氮可大幅度地提高杂交稻氮肥农学利用率。$LDN_{-15\%}$、$LDN_{-30\%}$、$HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理杂交稻氮肥偏生产力较 LDN_{ck} 处理分别增加 14.8%~14.9%、35.7%~36.2%、22.8%~23.5% 和 46.3%~48.2% (P<0.05)。除 2018 年 $LDN_{-15\%}$ 处理外, 减量施氮均能提高杂交稻氮肥吸收利用率。与 LDN_{ck} 处理相比, $LDN_{-15\%}$、$LDN_{-30\%}$、$HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理杂交稻氮肥吸收利用率平均分别增加 1.1%、3.1%、8.4% 和 18.6%, 2019 年 4 个处理的变化达显著水平 (P<0.05)。

2.7 高温高湿区不同密肥处理对杂交稻每生产 100 kg 稻谷需氮量、氮素干物质生产效率、氮素籽粒生产效率的影响

由表 7 可知, 年份、密肥处理对杂交稻每生产

表 5 高温高湿区不同密肥处理对杂交稻齐穗期茎叶氮素运转的影响

Table 5 Effect of combination of plant density and N rate on nitrogen translocation of stem and leaf of hybrid rice under high temperature and high humidity condition

年份 Year	处理 Treatment			氮素转运量 N translocation ($g·m^{-2}$)	氮素表观转运率 Apparent N translocation rate (%)	氮素转运贡献率 N translocate contribution rate (%)
	代码 Code	密度 Plant density ($×10^4$ holes·hm^{-2})	施氮量 N application rate ($kg·hm^{-2}$)			
2018	LDN_0	16.5	0	2.8±0.8c	56.2±10.5abc	43.1±12.2d
	$LDN_{-15\%}$	16.5	153	6.6±0.2a	60.0±1.4ab	68.8±2.4a
	$LDN_{-30\%}$	16.5	126	4.3±0.8b	51.9±3.4bc	46.7±9.6cd
	$HDN_{-15\%}$	21.0	153	6.4±0.8a	61.4±2.3a	62.0±1.3ab
	$HDN_{-30\%}$	21.0	126	5.8±0.3a	60.1±1.4ab	57.0±1.6bc
	LDN_{CK}	16.5	180	4.8±0.6b	49.2±4.9c	46.5±4.6cd
2019	LDN_0	16.5	0	2.8±0.5c	52.8±4.0a	41.5±9.7b
	$LDN_{-15\%}$	16.5	153	4.9±0.3ab	53.1±2.7a	51.0±3.2ab
	$LDN_{-30\%}$	16.5	126	5.0±0.6a	55.9±2.9a	55.7±9.9a
	$HDN_{-15\%}$	21.0	153	4.8±0.5ab	52.3±3.8a	50.4±3.2ab
	$HDN_{-30\%}$	21.0	126	4.6±0.5ab	54.6±1.4ab	48.2±2.6ab
	LDN_{CK}	16.5	180	4.0±0.4b	44.6±3.2b	43.7±5.1ab
方差分析 Analysis of variance						
年份 Year (Y)				**	**	*
处理 Treatment (T)				**	**	**
年份×处理 Y×T				**	ns	*

同年同列数据后不同字母表示处理间在P<0.05水平差异显著。*表示差异达P<0.05显著水平, **表示差异达P<0.01显著水平, ns 表示差异不显著。Values followed by different letters in a year within a column are significantly different at P<0.05 level. * and ** mean significance at P<0.05 and P<0.01 levels, respectively. ns denotes non-significance.

表 6　高温高湿区不同密肥处理对杂交稻氮肥利用率的影响

Table 6　Effect of combination of plant density and N rate on nitrogen use efficiency of hybrid rice under high temperature and high humidity condition

年份 Year	处理 Treatment			氮肥农学利用率 Agronomic efficiency of applied N (kg·kg^{-1})	氮肥偏生产力 Partial factor productivity of applied N (kg·kg^{-1})	氮肥吸收利用率 Recovery efficiency of applied N (%)
	代码 Code	密度 Plant density (×10^4 holes·hm^{-2})	施氮量 N application rate (kg·hm^{-2})			
2018	$LDN_{-15\%}$	16.5	153	13.7±2.1c	54.3±1.4d	34.5±3.7b
	$LDN_{-30\%}$	16.5	126	15.0±3.6bc	64.4±1.1b	36.0±3.2ab
	$HDN_{-15\%}$	21.0	153	17.5±2.1ab	58.1±0.7c	38.2±4.5ab
	$HDN_{-30\%}$	21.0	126	19.9±3.2a	69.2±2.9a	43.4±9.5a
	LDN_{CK}	16.5	180	12.8±3.1c	47.3±1.5e	36.2±1.8ab
2019	$LDN_{-15\%}$	16.5	153	14.9±2.0c	56.3±1.6d	30.7±3.1a
	$LDN_{-30\%}$	16.5	126	16.3±1.2bc	66.5±1.2b	30.5±7.8a
	$HDN_{-15\%}$	21.0	153	19.1±0.9b	60.5±0.8c	31.7±3.4a
	$HDN_{-30\%}$	21.0	126	22.3±1.9a	72.6±1.8a	33.1±5.5a
	LDN_{CK}	16.5	180	13.9±3.0c	49.0±2.8e	28.3±4.1b
方差分析 Analysis of variance						
年份 Year (Y)				ns	**	**
处理 Treatment (T)				*	**	ns
年份×处理 Y×T				ns	ns	ns

同年同列数据后不同字母表示处理间在P<0.05水平差异显著。*表示差异达P<0.05显著水平, **表示差异达P<0.01显著水平, ns 表示差异不显著。Values followed by different letters in a year within a column are significantly different at P<0.05 level. * and ** mean significance at P<0.05 and P<0.01 levels, respectively. ns denotes non-significance.

表 7　高温高湿区不同密肥处理对杂交稻每生产 100 kg 稻谷需氮量、氮素干物质生产效率、氮素籽粒生产效率的影响

Table 7　Effect of combination of plant density and N rate on N use efficiency for biomass and grain yield production and N requirement for produced 100 kg grain of hybrid rice under high temperature and high humidity condition

年份 Year	处理 Treatment			100 kg稻谷需氮量 N requirement of 100 kg grains (kg)	氮素干物质生产效率 N use efficiency for biomass production (kg·kg^{-1})	氮素籽粒生产效率 N use efficiency for grain production (kg·kg^{-1})
	代码 Code	密度 Plant density (×10^4 holes·hm^{-2})	施氮量 N application rate (kg·hm^{-2})			
2018	LDN_0	16.5	0	1.39±0.19 b	103.8±9.0 a	72.5±9.1 a
	$LDN_{-15\%}$	16.5	153	1.67±0.04 a	97.8±1.1 ab	59.8±1.3 b
	$LDN_{-30\%}$	16.5	126	1.62±0.03 a	93.9±6.3 b	61.6±1.1 b
	$HDN_{-15\%}$	21.0	153	1.63±0.05 a	91.3±2.7 b	61.5±1.8 b
	$HDN_{-30\%}$	21.0	126	1.62±0.22 a	95.1±12.7 ab	62.5±9.2 b
	LDN_{CK}	16.5	180	1.78±0.04 a	89.9±1.5 b	56.3±1.4 b
2019	LDN_0	16.5	0	1.45±0.06 b	125.4±2.1 a	69.3±2.9 a
	$LDN_{-15\%}$	16.5	153	1.61±0.02 a	101.8±3.4 b	62.2±0.6 c
	$LDN_{-30\%}$	16.5	126	1.55±0.11 ab	101.3±5.5 b	64.7±4.5 bc
	$HDN_{-15\%}$	21.0	153	1.51±0.02 abc	105.4±0.8 b	66.1±1.0 abc
	$HDN_{-30\%}$	21.0	126	1.46±0.04 bc	104.4±4.2 b	68.7±1.7 ab
	LDN_{CK}	16.5	180	1.62±0.04 a	102.2±5.3 b	61.9±1.7 c
方差分析 Analysis of variance						
年份 Year (Y)				**	*	**
处理 Treatment (T)				**	**	**
年份×处理 Y×T				ns	ns	ns

同年同列数据后不同字母表示处理间在P<0.05水平差异显著。*表示差异达P<0.05显著水平, **表示差异达P<0.01显著水平, ns 表示差异不显著。Values followed by different letters in a year within a column are significantly different at P<0.05 level. * and ** mean significance at P<0.05 and P<0.01 levels, respectively. ns denotes non-significance

100 kg 稻谷需氮量、氮素干物质生产效率、氮素籽粒生产效率影响显著 (P<0.05), 但其互作影响不显著。与 LDN_{ck} 处理相比, $LDN_{-15\%}$、$LDN_{-30\%}$、$HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理杂交稻每生产 100 kg 稻谷需氮量分别降低 0.6%~6.2%、4.3%~9.0%、6.8%~8.4% 和 9.0%~9.9%, 2019 年 $HDN_{-30\%}$ 处理的变化达显著水平 (P<0.05); 氮素籽粒生产效率分别提高 0.5%~6.2%、4.5%~9.4%、6.8%~9.2% 和 11.0%, 2019 年 $HDN_{-30\%}$ 处理的变化达显著水平 (P< 0.05), 说明减少氮肥施用量可促进氮肥利用率提高。氮素干物质生

产效率一般以 LDN_0 处理最高, $LDN_{-15\%}$ 和 $LDN_{-30\%}$ 处理杂交稻处理氮素干物质生产效率与 LDN_{ck} 处理相当或略高。与 LDN_{ck} 处理相比, $HDN_{-15\%}$ 和 $HDN_{-30\%}$ 处理氮素干物质生产效率分别提高 1.6%~3.1% 和 2.2%~5.8% (P>0.05)。

3 讨论

3.1 增密减氮对高温高湿区杂交稻产量形成的影响

种植密度和施氮量作为水稻生产的两个重要栽培技术, 对水稻群体发育和产量形成有决定性的影响。谢小兵等[15] 研究表明, 密植 (68 穴·m^{-2}、40 穴·m^{-2}) 处理超级杂交稻产量显著高于常规密度 (27 穴·m^{-2}、19 穴·m^{-2}) 处理, 其增幅为 4.5%~12.5%。陈佳娜等[21] 研究发现, 合理密植 (36.4 穴·m^{-2}) 条件下早稻、晚稻施氮量分别减少 35% 和 25%, 中后期干物质积累量和太阳辐射利用率优势明显, 因而产量高于低密高氮 (移栽密度 19.0 穴·m^{-2}; 早稻和晚稻的施氮量分别为 176 kg·hm^{-2} 和 189 kg·hm^{-2}) 处理。本研究结果表明, 增密减氮 ($HDN_{-15\%}$、$HDN_{-30\%}$) 处理杂交稻产量较低密高氮 (LDN_{ck}) 处理增加 2.3%~4.9%, 说明在高温高湿稻区合理增加杂交稻移栽密度, 氮肥施用量减少 15%~30% 不会造成杂交稻减产。增密减氮 ($HDN_{-15\%}$、$HDN_{-30\%}$) 处理杂交稻有效穗与 LDN_{ck} 处理相当或略高, 每穗粒数、结实率均高于 LDN_{ck} 处理, 说明在高温高湿稻区, 在稳定穗数的基础上, 促进大穗的形成和提高结实率是其高产的重要基础。与 2018 年相比, 2019 年杂交稻每穗粒数、结实率和千粒重平均分别降低 3.6%、5.1% 和 3.3%。从两年杂交稻籽粒灌浆结实期气象因子来看, 2018 年籽粒灌浆结实期平均最高温度略高于 2019 年, 且均高于 31 °C; 2019 年杂交稻齐穗后日照时数较 2018 年减少了约 110 h, 空气湿度较 2018 年增加 4.2%。由此可见, 日照时数和空气湿度是造成 2019 年杂交稻结实率下降的关键气候因子。日照时数、温度和空气湿度是影响水稻开花、受精结实的关键因子。空气湿度能够显著影响高温下热害情况, 空气湿度过高会显著增大高温热害对水稻的损伤。周建霞等[22] 研究发现, 高温高湿条件下水稻叶片温度升高, 柱头上萌发的花粉数显著减少, 颖花不育率显著增加, 进而引起结实率下降。由此可见, 本研究中 2019 年较高空气湿度和温度是其结实率和千粒重下降的重要原因。2019 年杂交稻有效穗显著高于 2018 年, 与 2019 年杂交稻移栽后较高的日照时数、最高温度和最低温度有关; 而 2019 年每穗粒数显著低于 2018 年, 与 2019 年杂交稻幼穗分化期 (5—6 月份) 相对较低的日照时数、最高温度、最低温度和相对较高空气湿度有关 (图 1)。此外, 虽然 2019 年籽粒灌浆结实期日照时数少, 空气湿度大, 但 2019 年增密减氮 ($HDN_{-15\%}$、$HDN_{-30\%}$) 处理较对照 (LDN_{ck}) 的增产幅度 (4.9%、3.6%) 高于 2018 年 (4.3%、2.3%)。说明在弱光、高温、高湿等生态条件下增密减氮可较好地缓解因籽粒灌浆结实期不利气候因子对杂交稻产量造成的不利影响。蒋鹏等[23] 研究发现, 温光条件较好的平原稻区杂交稻产量较高温高湿的川东南稻区增加 14.4%~24.3%, 且温光条件较好的平原稻区增密减氮处理较对照 (低密高氮) 的增产幅度明显高于高温高湿的川东南稻区。物质生产是水稻产量形成的重要基础, 实际上杂交稻产量形成的过程就是物质生产与再分配的过程。已有研究认为, 籽粒产量与齐穗后干物质积累量呈极显著正相关[24], 同时籽粒产量又由两部分物质构成的, 一是抽穗前茎叶营养器官的同化产物向穗部转化, 二是抽穗后的光合产物直接向穗部输送[25]。本研究结果表明, 增密减氮 ($HDN_{-15\%}$) 处理杂交稻齐穗期、成熟期干物质积累量和收获指数, 花前干物质转运量, 花前干物质转运效率和花前干物质转运对产量的贡献率均高于低密高氮 (LDN_{ck}) 处理, 同时其还可保持较高的花后干物质积累对产量的贡献率, 说明在高温高湿稻区提高齐穗期干物质积累量, 促进花前干物质向籽粒转运, 提高花前干物质转运效率和花前干物质转运对产量的贡献率是其获得高产的重要保障。与 2018 年相比, 2019 年花前干物质、总干物质、花前干物质转运量、花前干物质积累对产量的贡献率分别增加 17.7%、9.2%、16.1% 和 11.5%。说明在弱光、高温、高湿年份通过增密减氮增加花前干物质、总干物质、花前干物质转运量、花前干物质积累对产量的贡献率有利于杂交稻高产的形成。由此可见, 稳定杂交稻单位面积有效穗数, 促进大穗形成, 提高花前干物质积累量、花前干物质向籽粒转运量、花前干物质转运效率和花前干物质转运对产量的贡献率, 并保持较高的花后干物质积累对产量的贡献率是高温高湿稻区水稻高产的关键。通过增加施氮量或提高栽插密度都能极好地稳定穗数, 并且足量的基本苗是稳定穗数进而提高产量的重要基础[26], 尤其是氮肥投入减少时增密增产的效果更为明显。本研究中, 合理密植 (21.0 万穴·hm^{-2}) 条件下即使减施 15%~30% 的氮肥, 杂交稻产量也不会减少; 而稀植 (16.5 万穴·hm^{-2}) 条件下减氮 15%~30% 杂交稻产量呈下降趋势, 单位

面积穗数显著减少, 花后干物质积累量和总干物质积累量下降是其减产的主要原因。本试验条件下高温高湿稻区杂交稻生产的最佳密肥组合为 21.0 万穴·hm^{-2}和施氮量为 126~153 kg·hm^{-2}。

3.2　增密减氮对高温高湿区杂交稻氮肥利用率的影响

采用合理栽培技术提高氮肥利用率是实现杂交稻高产与资源高效协调的关键所在。杂交稻对氮素的吸收利用与品种基因型、氮肥管理、栽插密度等有密切关系。已有研究表明, 增加移栽密度可促进杂交稻氮素吸收量的提高[27], 减少氮肥施用量有利于杂交稻氮肥利用率的提高[12-13,28], 合理密植下减量施氮可实现杂交稻产量和氮肥利用率的协同提高[16,21,27,29]。氮肥利用率常用的定量指标有氮肥农学利用率、氮肥偏生产力、氮肥吸收利用率等, 这些指标从不同侧面反映水稻对氮肥的利用率, 其中氮肥农学利用率和氮肥偏生产力最直接表征氮素的利用状况, 也是农户比较关心的指标, 即农户每投入 1 kg 氮肥能产生多少公斤稻谷? 本研究结果表明, 增密减氮 ($HDN_{-15\%}$、$HDN_{-30\%}$) 处理在提高杂交稻产量的同时, 大幅度降低了氮肥投入, 显著提高了杂交稻氮肥农学利用率、氮肥偏生产力, 实现了杂交稻高产与资源高效的协调。Chen 等[30] 认为增强水稻对氮素的吸收能力有利于提高水稻氮素利用效率。陈佳娜等[21] 研究发现, 高密度条件下机插水稻在生育前期的氮素积累量增加, 后期向籽粒转运量也相应增加。本研究结果则表明, 低密高氮处理提高了杂交稻成熟期氮素积累量, 但产量并未增加, 并且绝大部分吸收的氮素滞留在稻草内 (氮素收获指数较低) 未能转化为籽粒生产力, 致使氮肥农学利用率、氮肥偏生产力、氮肥吸收利用率和氮素籽粒生产效率降低; 而增密减氮处理杂交稻成熟期氮素积累量与低密高氮处理相当, 但其提高了杂交稻齐穗期氮素积累量, 促进了齐穗后叶片和茎鞘氮素向籽粒转运, 提高了茎叶氮素表观转运率、氮素转运贡献率、氮素收获指数, 进而促进了杂交稻氮肥利用率的提高。可见, 通过增密减氮增加齐穗期氮素积累量, 提高了茎叶氮素转运量、茎叶氮素表观转运率、茎叶氮素转运贡献率、氮素收获指数是高温高湿稻区杂交稻提高氮肥利用率的关键所在。已有研究表明, 过量施氮条件下氮肥农学利用率值低与籽粒氮素生产效率值低有密切联系[31]。本研究中, 低密高氮处理杂交稻氮素收获指数、氮素籽粒生产效率均低于低密减氮和高密减氮处理, 说明低密度条件下过量施氮导致了杂交稻对氮素奢侈吸收, 并且植株吸收的氮素不能有效地转化为稻谷产量, 进而导致其氮肥利用率降低。由此可知, 在杂交稻生产上, 适当增加移栽密度可提高前期氮素积累量, 减少氮素流失, 同时提高氮素转运量、氮素表观转运效率、氮素转运贡献率, 进而提高氮肥利用率。此外, 虽然低密减氮 ($LDN_{-15\%}$、$LDN_{-30\%}$) 处理也可提高杂交稻氮肥农学利用率、氮肥偏生产力、氮肥吸收利用率, 但其产量呈下降趋势, 不利于粮食安全。

3.3　增密减氮对高温高湿区杂交稻氮素生产效率的影响

氮素干物质生产效率和氮素籽粒生产效率是衡量氮素生产效率的两个主要指标, 其中氮素干物质生产效率由干物质生产和氮素吸收积累共同决定。过量施氮会造成水稻植株氮素积累量偏高, 降低了碳同化能力, 同时较多氮素滞留在茎叶内并未转运到籽粒中, 导致氮素干物质生产效率和氮素籽粒生产效率降低[32-33]。本研究结果表明, 增密减氮处理杂交稻氮素干物质生产效率和氮素籽粒生产效率均高于低密高氮处理。从干物质生产特性和氮素吸收积累特性来看, 增密减氮处理干物质产量与低密高氮处理相当, 氮素吸收积累量低于低密高氮处理, 因而氮素干物质生产效率较高。从产量和氮素吸收积累特性来看, 增密减氮处理提高了杂交稻产量, 成熟期氮素积累量相对较低, 促进了齐穗后叶片和茎鞘氮素向籽粒转运, 提高了茎叶氮素表观转运率、茎叶氮素转运贡献率, 进而提高了杂交稻氮素籽粒生产效率。每 100 kg 籽粒需氮量反映的是水稻生产 100 kg 籽粒所需的氮肥用量, 直接与产量、施氮量密切相关。敖和军等[34] 研究发现, 超级杂交稻每生产 100 kg 稻谷氮需要量为 1.65~2.24 kg, 并且随超级杂交稻产量水平的提高, 氮需要量呈下降趋势; 徐富贤等[35] 则认为杂交稻每生产 100 kg 稻谷氮需要量与产量水平相关性不明显。蒋鹏等[36] 研究发现, 杂交稻每生产 100 kg 稻谷氮需要量受种植地生态条件和密肥组合影响, 其中低中施氮水平下, 合理增加栽插密度可有效降低每生产 100 kg 稻谷氮需要量。本研究结果表明, 增密减氮处理 ($HDN_{-15\%}$、$HDN_{-30\%}$) 杂交稻每生产 100 kg 稻谷需氮量较 LDN_{ck} 处理分别降低 6.8%~8.4% 和 9.0%~9.9%。从氮素吸收特点来看, 增密减氮处理成熟期氮吸收量较低密高氮处理减少 2.1%~4.0% 和 6.6%~7.0%, 氮素收获指数较低密高氮处理分别增加 5.5%~6.4% 和 7.4%~9.4%, 可见, 增密减氮处理较低的氮素吸收量和较高的氮素收获指数是其

生产单位籽粒稻谷氮需要量下降的主要原因。说明在高温高湿稻区采用增密减氮栽培策略可促进植株茎叶中积累的氮素 (尤其是齐穗前积累的氮素) 向籽粒转运, 提高植株茎叶氮素转运量、氮素表观转运效率、氮素转运贡献率和氮素收获指数, 进而提高氮素籽粒生产效率。低密条件下, 增加施氮量 (LDN_{ck}) 可促进杂交稻植株对氮素的吸收积累, 但其茎叶氮素转运量、茎叶表观转运效率、氮素干物质生产效率、氮素收获指数相对较低, 说明通过过量施用氮肥增加的植株氮素积累量, 并未能转化为籽粒生产优势, 过多地用于营养生长, 这也是导致低密高氮处理氮肥利用率下降的主要原因。

4 结论

在高温高湿稻区, 与低密高氮 (LDN_{ck}, 农民大面积生产的密度 16.5 万穴·hm^{-2}, 施氮量为 180 kg·hm^{-2}) 相比, 增密减氮 (密度增加 27%, 施氮量减少 15%~30%, 即施氮量为 126~153 kg·hm^{-2}) 处理可稳定有效穗, 提高每穗粒数和结实率, 促进花前干物质转运, 提高花前干物质转运效率和花前干物质转运对产量的贡献率, 进而实现高产。增密减氮处理可明显提高杂交稻氮肥农学利用率、氮肥偏生产力、氮肥吸收利用率、籽粒氮素生产效率和生产单位籽粒稻谷需氮量, 较高的茎叶氮素转运量、茎叶氮素表观转运效率、茎叶氮素转运贡献率、氮素收获指数是其氮肥利用效率提高的重要原因。由此可知, 在高温高湿稻区合理增加栽插密度和减少 15%~30% 氮肥施用量既能实现杂交稻产量和氮肥利用率协同提高, 又能推动资源节约与环境友好型栽培技术的发展。

参考文献 References

[1] 邹应斌, 周上游, 唐起源. 中国超级杂交水稻超高产栽培研究的现状与展望[J]. 中国农业科技导报, 2003, 5(1): 31−35
ZOU Y B, ZHOU S Y, TANG Q Y. Status and outlook of high yielding cultivation researches on China super hybrid rice[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2003, 5(1): 31−35

[2] 朱德峰, 林贤青, 曹卫星. 超高产水稻品种的根系分布特点[J]. 南京农业大学学报, 2000, 23(4): 5−8
ZHU D F, LIN X Q, CAO W X. Characteristics of root distribution of super high yielding rice varieties[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2000, 23(4): 5−8

[3] 袁小乐, 潘晓华, 石庆华, 等. 超级早、晚稻的养分吸收和根系分布特性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 27−32
YUAN X Y, PAN X H, SHI Q H, et al. Characteristics of nutrient uptake and root system distribution in super early and super late rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(1): 27−32

[4] 朱铁忠, 柯健, 姚波, 等. 沿江双季北缘区机插早稻的超高产群体特征[J]. 中国农业科学, 2021, 54(7): 1553−1564
ZHU T Z, KE J, YAO B, et al. Super-high yield characteristics of mechanically transplanting double-cropping early rice in the northern margin area of Yangtze River[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(7): 1553−1564

[5] JIANG P, XIE X B, HUANG M, et al. Potential yield increase of hybrid rice at five locations in Southern China[J]. Rice, 2016, 9(1): 1−14

[6] 邹应斌. 长江流域双季稻栽培技术发展[J]. 中国农业科学, 2011, 44(2): 254−262
ZOU Y B. Development of cultivation technology for double cropping rice along the Changjiang River valley[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(2): 254−262

[7] PENG S B, TANG Q Y, ZOU Y B. Current status and challenges of rice production in China[J]. Plant Production Science, 2009, 12(1): 3−8

[8] 朱兆良. 我国土壤供氮和化肥氮去向研究的进展[J]. 土壤, 1985, 17(1): 2−9
ZHU Z L. Research in soil supply nitrogen and fate of fertilizer nitrogen Chinese[J]. Soils, 1985, 17(1): 2−9

[9] WANG G H, DOBERMANN A, WITT C, et al. Performance of site-specific nutrient management for irrigated rice in southeast China[J]. Agronomy Journal, 2001, 93(4): 869−878

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

[11] AO H J, XIE X B, HUANG M, et al. Decreasing hill density combined with increasing nitrogen rate led to yield decline in hybrid rice under low-light conditions[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 15786

[12] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259−273
ZHU Z L, JIN J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259−273

[13] PENG S B, BURESH R J, HUANG J L, et al. Improving nitrogen fertilization in rice by sitespecific N management. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30(3): 649−656

[14] WU W, NIE L X, LIAO Y C, et al. Toward yield improvement of early-season rice: Other options under double rice-cropping system in central China[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 45: 75−86

[15] 谢小兵, 王玉梅, 黄敏, 等. 单本密植机插对杂交稻生长和产量的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(6): 924−931
XIE X B, WANG Y M, HUANG M, et al. Effect of mechanized transplanting with high hill density and single seedling per hill on growth and grain yield in hybrid rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(6): 924−931

[16] HUANG M, CHEN J N, CAO F B, et al. Increased hill density can compensate for yield loss from reduced nitrogen input in machine-transplanted double-cropped rice[J]. Field Crops Research, 2018, 221: 333−338

[17] 马金玉, 梁宏, 罗勇, 等. 中国近50年太阳直接辐射和散射辐射变化趋势特征[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 069601
MA J Y, LIANG H, LUO Y, et al. Variation trend of direct and diffuse radiation in China over recent 50 years[J]. Acta Physica

Sinica, 2011, 60(6): 069601

[18] 周开达. 四川水稻超高产育种的发展趋势[J]. 西南农业学报, 1998, 11(S2): 1
ZHOU K D. Trends of super high yield breeding in rice (*Oryza sativa* L.) in Sichuan Province[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 1998, 11(S2): 1

[19] 周开达, 马玉清, 刘太清, 等. 杂交水稻亚种间重穗型组合选育——杂交水稻超高产育种的理论与实践[J]. 四川农业大学学报, 1995, 13(4): 403−407
ZHOU K D, MA Y Q, LIU T Q, et al. The breeding of subspecific heavy ear hybrid rice—exploration about super-high yield breeding of hybrid rice[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 1995, 13(4): 403−407

[20] 徐富贤, 熊洪, 朱永川, 等. 川东南冬水田杂交中稻进一步高产的栽培策略[J]. 作物学报, 2007, 33(6): 1004−1009
XU F X, XIONG H, ZHU Y C, et al. Cultivation strategy of hybrid mid-season rice for further high yield in winter water-logged field in the southeast of Sichuan Province[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(6): 1004−1009

[21] 陈佳娜, 曹放波, 谢小兵, 等. 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[J]. 作物学报, 2016, 42(8): 1176−1187
CHEN J N, CAO F B, XIE X B, et al. 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[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(8): 1176−1187

[22] 周建霞, 张玉屏, 朱德峰, 等. 空气湿度和土壤水分对高温诱导水稻颖花不育的影响[J]. 江西农业学报, 2017, 29(2): 24−27
ZHOU J X, ZHANG Y P, ZHU D F, et al. Effects of air humidity and soil moisture on rice spikelet sterility induced by high temperature[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2017, 29(2): 24−27

[23] 蒋鹏, 熊洪, 张林, 等. 不同生态条件下施氮量和移栽密度对杂交稻旌优127产量及稻米品质的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(10): 2007−2015
JIANG P, XIONG H, ZHANG L, et al. Effects of nitrogen fertilization and planting density on grain yield and quality of Jingyou127 and rice quality under different ecological conditions[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(10): 2007−2015

[24] 马均, 朱庆森, 马文波, 等. 重穗型水稻光合作用、物质积累与运转的研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(4): 375−381
MA J, ZHU Q S, MA W B, et al. Studies on the photosynthetic characteristics and accumulation and transformation of assimilation product in heavy panicle type of rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(4): 375−381

[25] YANG J C, PENG S B, ZHANG Z J, et al. Grain and dry matter yields and partitioning of assimilates in Japonica/indica hybrid rice[J]. Crop Science, 2002, 42(3): 766

[26] 谢小兵, 蒋鹏, 黄敏, 等. 基于黄金分割法的双季稻合理密植研究[J]. 核农学报, 2016, 30(12): 2467−2476
XIE X B, JIANG P, HUANG M, et al. Study on rational close planting based on golden section method for double cropping rice[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(12): 2467−2476

[27] 徐新朋, 周卫, 梁国庆, 等. 氮肥用量和密度对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 763−772
XU X P, ZHOU W, LIANG G Q, et al. Effects of nitrogen and density interactions on grain yield and nitrogen use efficiency of double-rice systems[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(3): 763−772

[28] 黄巧义, 唐拴虎, 张发宝, 等. 减氮配施控释尿素对水稻产量和氮肥利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 829−838
HUANG Q Y, TANG S H, ZHANG F B, et al. Effect of combined application of controlled-release urea and conventional urea under reduced N rate on yield and N utilization efficiency of rice[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 829−838

[29] 肖小平, 李超, 唐海明, 等. 秸秆还田下减氮增密对双季稻田土壤氮素库容及氮素利用率的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(3): 422−430
XIAO X P, LI C, TANG H M, et al. Soil nitrogen storage and recovery efficiency in double paddy fields under reduced nitrogen dose and increased crop density[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(3): 422−430

[30] CHEN Y T, PENG J, WANG J, et al. Crop management based on multi-split topdressing enhances grain yield and nitrogen use efficiency in irrigated rice in China[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 50−57

[31] PENG S B, BURESH R J, HUANG J L, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China[J]. Field Crops Research, 2006, 96(1): 37−47

[32] JIANG L G, DAI T B, JIANG D, et al. Characterizing physiological N-use efficiency as influenced by nitrogen management in three rice cultivars[J]. Field Crops Research, 2004, 88(2/3): 239−250

[33] QIAO J, YANG L Z, YAN T M, et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 146(1): 103−112

[34] 敖和军, 王淑红, 邹应斌, 等. 不同施肥水平下超级杂交稻对氮、磷、钾的吸收累积[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3123−3132
AO H J, WANG S H, ZOU Y B, et al. Characteristics of nutrient uptake and utilization of super hybrid rice under different fertilizer application rates[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(10): 3123−3132

[35] 徐富贤, 熊洪, 张林, 等. 西南稻区不同地域和施氮水平对杂交中稻氮、磷、钾吸收累积的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(5): 882−894
XU F X, XIONG H, ZHANG L, et al. Characteristics of nutrient uptake and utilization of mid-season hybrid rice under different nitrogen application rates in different locations of southwest China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(5): 882−894

[36] 蒋鹏, 熊洪, 张林, 等. 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 342−350
JIANG P, XIONG H, ZHANG L, et al. Effects of N rate and planting density on nutrient uptake and utilization of hybrid rice under different ecological conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(2): 342−350