



中国再生稻的产量差及影响因素

曹玉贤¹, 朱建强², 侯俊²

(¹长江大学生命科学学院, 湖北荆州 434025; ²长江大学农学院, 湖北荆州 434025)

摘要:【目的】阐明再生稻的产量差及影响因素, 为揭示其生产潜力和制定高产高效栽培措施提供科学依据。【方法】从中国知网和 Web of Science 两个数据库, 分别以“再生稻产量、品种、施肥、种植密度、留桩高度、种植方式和收割方式”和“ratoon rice, variety, fertilizer and China”为关键词检索, 共收集目标文献 119 篇。总结再生稻头季、再生季和两季总的产量潜力和产量差, 通过分析品种、施肥、种植密度、留桩高度、种植方式和收割方式对再生稻产量的影响, 阐明再生稻产量差的影响因素及缩小产量差的途径。【结果】当前我国再生稻头季、再生季和两季总的产量潜力分别为 11.65、6.90 和 17.10 t·hm⁻², 总样本平均产量仅分别实现了产量潜力的 71%、53% 和 68%。籼稻和杂交稻的再生稻产量分别比粳稻和常规稻增产 24%—19% 和 18%—8%; 头季的最优施肥量约为 N 168 kg·hm⁻², P₂O₅ 123 kg·hm⁻², K₂O 124 kg·hm⁻²; 再生季的最优施肥量约为 N 145 kg·hm⁻², P₂O₅ 50 kg·hm⁻², K₂O 200 kg·hm⁻²。再生稻头季的适宜种植密度为 22.4—29.1 万穴/hm²; 适宜留桩高度为 40—50 cm; 手栽种植利于再生季产量的提高因而总产量也最大; 人工收割比机械收割的再生季产量高 12%, 虽然机种机收会减少产量, 但差异不显著。【结论】我国再生稻头季、再生季及两季总产量的增产潜力分别为 3.38、3.27 和 5.41 t·hm⁻²。合适的品种、肥料管理、种植密度、留桩高度、种植和收割方式可以缩小产量差, 其中品种以籼稻和杂交稻为主; 优化施肥量可以使头季和再生季分别增产 9% 和 22%, 优化种植密度则分别增产 8% 和 17%; 适宜的留桩高度为 40—50 cm; 机种机收更符合轻简化现代农业的需求。

关键词: 再生稻; 产量差; 品种; 施肥; 种植密度; 留桩高度

Yield Gap of Ratoon Rice and Their Influence Factors in China

CAO YuXian¹, ZHU JianQiang², HOU Jun²

(¹College of Life Sciences, Yangtze University, Jingzhou 434025, Hubei; ²College of Agronomy, Yangtze University, Jingzhou 434025, Hubei)

Abstract: 【Objective】The yield gap and the influence factors of ratoon rice was investigated for revealing yield potential in this study, so as to provide a scientific basis for developing high-yielding and high-efficiency ratoon rice management practices.

【Method】The publications were collected by searching in China National Knowledge Infrastructure and Web of Science by using the keywords of “ratoon rice yield, variety, fertilizer application, density, stubble height, planting methods and harvesting methods” and “ratoon rice, variety, fertilizer and China”, respectively. A total of 119 published literatures were collected. This study summarized the yield potential and yield gap for ratoon rice in China. Meta-analysis method was applied to quantify the effect of variety, fertilization, density, stubble height, planting and harvesting methods on yield of main and ratoon crops of ratoon rice. This paper made a preliminary illustration about the factors that affect yield gap and ways to close the yield gap. 【Result】The ratoon rice

收稿日期: 2019-07-03; 接受日期: 2019-08-06

基金项目: “十三五”国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”(2016YFD0300907)

联系方式: 曹玉贤, E-mail: caoyx2018@yangtzeu.edu.cn. 通信作者侯俊, E-mail: houjungoodluck1@163.com

yield potential was $11.65 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ for main crop, $6.90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ for ratoon crop and $17.10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ in total. The sample average yield of main crop, ratoon crop, and total crop for ratoon rice was 71%, 53% and 68% of the corresponding yield potential, respectively. *Indica* and hybrid variety could increase the ratoon rice yield by 24%-19% and 18%-8% than *japonica* and inbred variety, respectively; Optimized N, P_2O_5 and K_2O application rate was 168, 123 and $124 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for main crop, and 145, 50 and $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for ratoon crop. Optimized density for ratoon rice was $22.4\text{--}29.1 \times 10^4$ hills/ hm^{-2} . Optimized stubble height was 40-50 cm. Artificial transplanting could increase ratoon crop yield and thus maximize the total yield; Manual harvesting yield of ratoon crop was 12% higher than mechanized harvesting. But it's no significant difference between artificial transplanting/harvesting and mechanized planting/harvesting. 【Conclusion】 There was still a huge room to increase the yield of ratoon rice, and the yield gap of main crop, ratoon crop and total was 3.38, 3.27 and $5.41 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. Furthermore, suitable variety, fertilizer application rate, density, stubble height, planting and harvesting method were important to close yield gap. For ratoon rice, the main varieties were *indica* and hybrid variety. Compared to average yield from all the samples, the yield of main crop and ratoon crop could increase by 9% and 22% respectively after optimized fertilization. Suitable density could increase the yield by 8% for main crop, 17% for ratoon crop; For ratoon rice, the optimized stubble height was 40-50 cm. Mechanized planting/harvesting as simplified pattern with low labor input, could more suitable for Chinese modern agriculture.

Key words: ratoon rice; yield gap; variety; fertilizer application; density; stubble height

0 引言

【研究意义】水稻 (*Oryza sativa* L.) 是我国主要粮食作物之一, 稳定提高水稻产量是确保我国粮食安全的关键。目前增加水稻播种面积不现实, 水稻的单产增加越来越困难, 年增幅不到 3%^[1]。提高复种指数就成为确保水稻高产稳产的关键举措^[2]。传统的双季稻近年来净收益低, 播种面积不断下降, 1984 年至 2014 年降幅高达 42%^[3]。再生稻是头季稻收割后利用稻桩上存活的休眠芽萌发成穗而再收获一季的稻作制度, 实现了一种两收, 提高了复种指数^[4]。因其充分利用温光资源, 生长期较短, 病虫害少, 再生稻具有稻米品质好、口感佳, 劳动用工减少, 经济效益高等优点, 是农业增效、农民增收、绿色环保的举措之一, 也是保障粮食有效供给和国家粮食安全的有效途径。

【前人研究进展】产量潜力和产量差的研究可以指导农业生产, 提高作物产量和经济效益^[5-6]。研究表明, 再生季的平均产量只有 $2\text{--}4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 只占头季产量的 $1/2\text{--}3/5$ ^[4, 7-8], 因此再生季的产量有待进一步提高。头季施肥能够影响再生季植株的生长, 促进再生腋芽早发快长^[9], 但不一定能够增加再生季的产量^[10]; 而再生季促芽肥的施用又影响头季生长后期对氮肥的回收, 回收率约 22%—37%^[11]。因此应该将头季和再生季作为一个整体来研究才能提高再生稻产量并缩小产量差。现有的研究多集中在生理特征和具体的单项或若干项栽培管理措施对再生稻产量影响方面。例如, 徐富贤等^[8]认为再生稻头季中上部的再生穗抽穗期比下部抽穗早, 成穗率和结实率高, 更利于高产; 另外,

划分水稻品种再生力, 通过施用促芽肥来提高再生力进而提高再生季产量。习敏等^[12]以 9 个杂交稻品种为对象发现, 头季的产量差主要来自有效穗数, 再生季的产量差则主要来自于有效穗数和穗粒数; 温玉梅等^[13]综合用种量和用肥量对再生稻产量的影响, 推荐低用种量模式下再生稻的头季、再生季和两季总施肥量分别为 242、164 和 $406 \text{ kg N} \cdot \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 余贵龙等^[14]对豫南再生稻的研究表明, 要充分利用倒 2 节和倒 3 节上的优势芽, 提高再生稻产量。【本研究切入点】前人对生理指标和若干单项的栽培措施在提高再生稻产量方面有很大贡献, 但这些结论无法系统阐述与产量差的关系, 而且相应的再生稻产量潜力的研究比较缺乏。为实现粮食安全和农民增收, 我们迫切需要对上述措施进行数据整合, 研究其对产量的影响并提出系统的栽培措施来指导生产实践。【拟解决的关键问题】本文将再生稻作为整体, 以品种、施肥、种植密度、留桩高度、种植方式和收割方式等重要的栽培管理措施为研究对象, 用文献数据整合的方法探讨它们对产量差的影响及其消减产量差的贡献, 以期对再生稻的科学栽培提供依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

再生稻产量及影响产量的关键因素 (品种、施肥量、种植密度、留桩高度、种植方式和收割方式等) 数据源于已发表的文章, 以“再生稻产量, 施肥, 品种, 种植密度, 留桩高度, 种植方式和收割

方式”和“*ratoon rice, variety, fertilizer and China*”等为关键词，利用文献数据库（中国知网和 Web of Science）对 1987 至 2018 年 7 月以前发表的国内外期刊及硕、博士论文进行检索而获得。为确保数据具有代表性，本研究所建立的数据库具有如下的筛选条件：（1）试验必须为大田试验；（2）试验的数据必须包含施肥量和产量；（3）标明试验的时间和地点。

符合上述筛选标准的文章共 119 篇（见附录），本文中氮磷钾肥施用量不经特殊说明，均指 N、P₂O₅、K₂O 的施入量。

1.2 数据分析

1.2.1 产量潜力与产量差 探索产量潜力的方法有多种^[15]，本研究产量潜力用高产纪录来定量。产量差（t·hm⁻²）=潜力产量（t·hm⁻²）-平均产量（t·hm⁻²）。式中，潜力产量（t·hm⁻²）等于高产纪录（t·hm⁻²），文中高产纪录指文献数据中产量前 5% 的平均值。平均产量等于搜集文献中产量的算术平均值。

1.2.2 品种 基于已发表文献中报道的品种数据，将其分成粳稻和籼稻，常规稻和杂交稻（两组数据存在交叉重合），并记录 2 种分类样本量 *n*，分别拟合头季、再生季和两季总产量与品种的关系，分析品种对再生稻产量的影响。

1.2.3 施肥量 基于已发表文献中报道的再生稻产量与施肥量的数据，分别拟合头季、再生季及两季总产量与氮磷钾肥施用量的关系，确定头季和再生季最高产量的适宜氮磷钾肥施用量。

1.2.4 种植密度 基于已发表文献中报道的再生稻产量与种植密度的数据，分别拟合种植密度与再生稻头季、再生季产量的关系，从而确定再生稻高产的种植密度范围。

1.2.5 留桩高度 根据文献中头季稻收获以后留桩高度的变异范围，将留桩高度划分为 5 个梯度，分别为 0—10、10—20、20—30、30—40 和 40—50 cm。分析不同梯度的留桩高度下再生季产量，确定合适的留桩高度。

1.2.6 种植方式与收割方式 文献中再生稻的种植方式有手栽、机栽、抛秧和直播等 4 种，拟合种植方式与头季、再生季及两季总产量的关系，分析种植方式对再生稻产量的影响。另外头季的收割方式包括机械收割和人工收割，不同收割方式对稻桩的损伤程度不同，影响腋芽分化能力也不同，因此，通过拟合收割方式与再生季产量的关系，分析头季收割方式对再

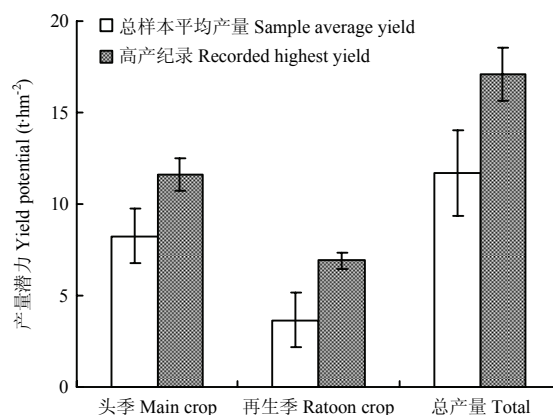
生季产量的影响。

1.2.7 数据分析 利用 SPSS22.0 进行数据相关分析和显著性检验（方差分析或独立样本双尾 T 检验），利用 Excel2010 和 SigmaPlot10.0 进行图形的制作。

2 结果

2.1 再生稻的产量差

由图 1 可知，再生稻头季、再生季和两季总的高产纪录分别为 11.65、6.90 和 17.10 t·hm⁻²，总样本平均产量分别实现了潜力产量的 71%、53% 和 68%，相应的产量差为 3.38、3.27 和 5.41 t·hm⁻²。研究表明作物产量达到产量潜力的 80% 时，作物生产的经济效益最高^[16]，因此，头季和再生季的产量及其经济效益的提升还有一定的空间。



总样本平均产量为总样本平均值，高产纪录为文献数据前 5% 的平均值
Sample average yield is represented by the average of total samples, and recorded highest yield is represented by the average value of the highest 5% yield of collected articles

图 1 再生稻的产量潜力

Fig. 1 Yield potential of ratoon rice

2.2 品种对再生稻产量的影响

品种是影响再生稻高产栽培的主要因素之一，品种划分方法很多，根据文献分别以粳稻 vs 籼稻和常规稻 vs 杂交稻来分析再生稻的产量。统计发现，再生稻生产上主要选用籼稻品种，粳稻品种很少，本文中粳稻品种样本量（头季、再生季和总产量样本数 *n*=18、20 和 12）远少于籼稻品种的样本量（*n*=779, 1106, 777）。籼稻的头季产量比粳稻显著增加 24%（*P*<0.01），再生季产量比粳稻显著增

加 19% ($P<0.05$), 两季总产量比粳稻显著增加 20% ($P<0.01$) (图 2-a)。另外, 再生稻品种选用杂交稻数量也远大于常规稻, 选用杂交稻品种的样本数(头季、再生季和总产量 $n=769$ 、1075 和 776)明显多于常规稻品种的样本数($n=119$ 、157 和 120),

这与杂交稻遗传基础丰富, 具有杂种优势, 一般产量较高有关。杂交稻品种的头季稻产量比常规稻品种显著增加 18% ($P<0.01$), 再生季产量比常规稻品种显著增加 8% ($P<0.05$), 两季总产量比常规稻品种显著增加 16% ($P<0.01$) (图 2-b)。

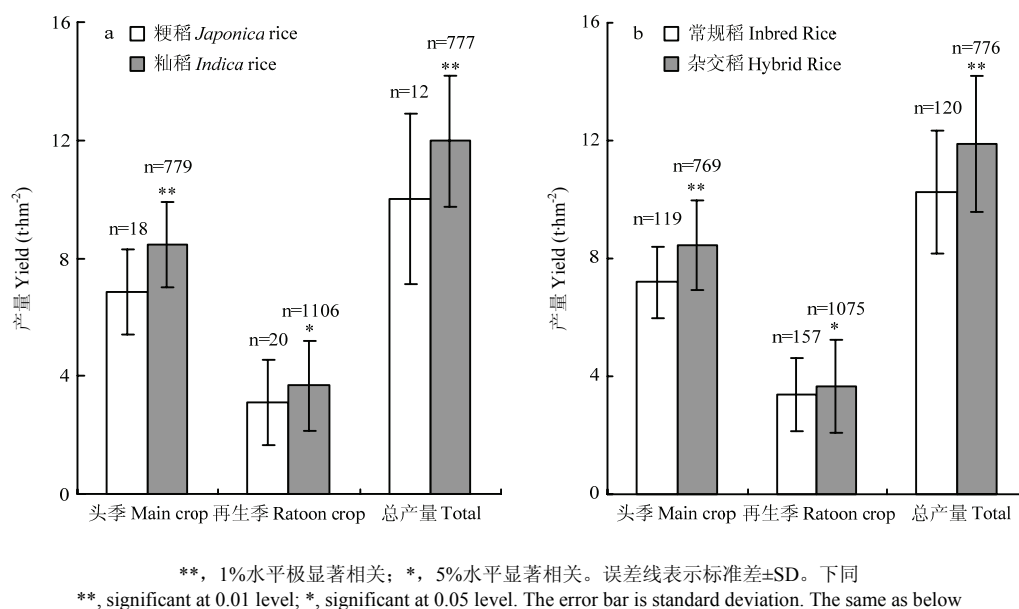


图 2 再生稻产量与品种的关系

Fig. 2 The relationship between ratoon rice yield and variety

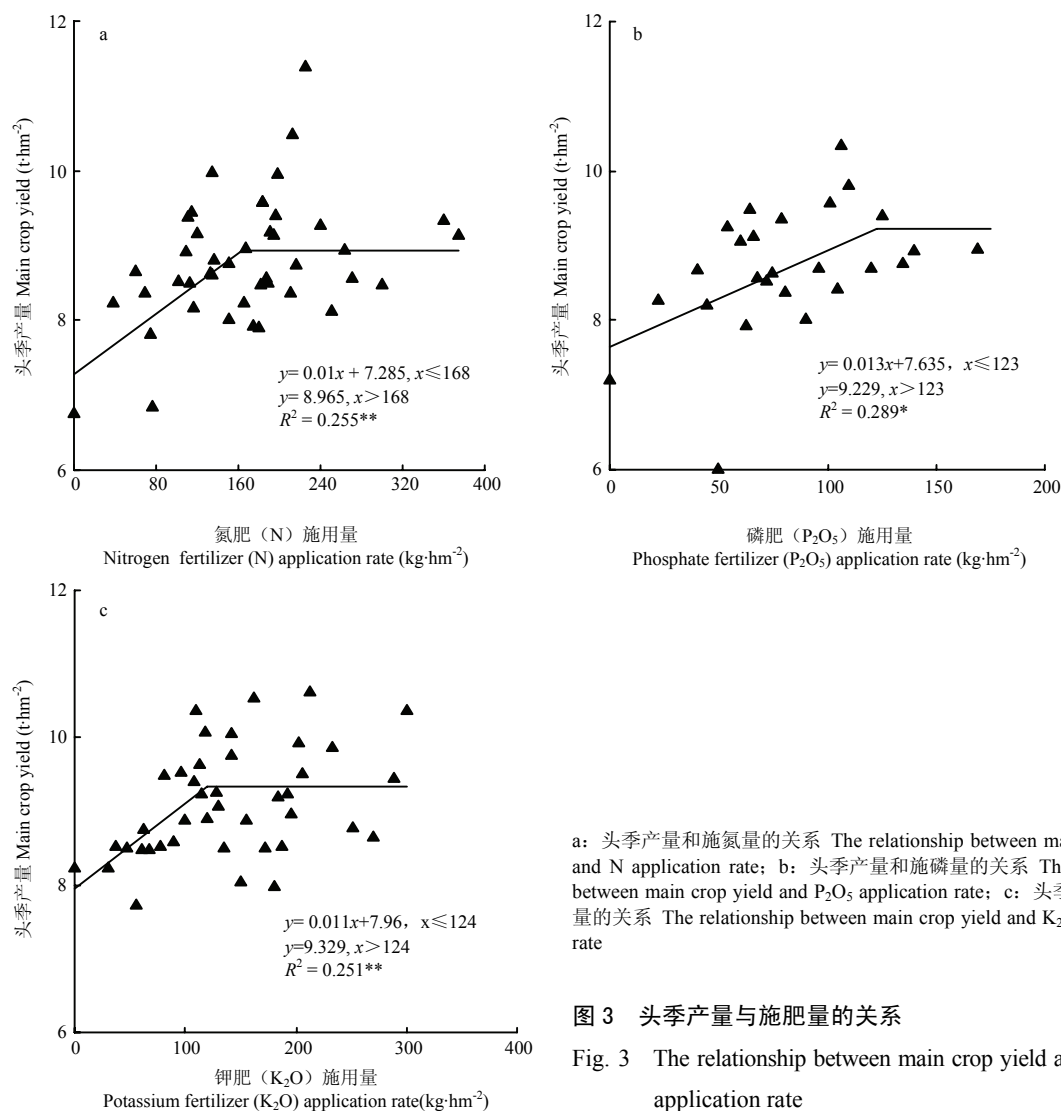
2.3 施肥对再生稻产量的影响

当施氮量很低时, 头季产量随施氮量增加而迅速增加, 当施氮量 $>168 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 头季产量不再增加(图 3-a)。当施磷量 $>123 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和施钾量 $>124 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 头季产量不再增加, 相应的最高产量分别为 $9.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 3-b)和 $9.33 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 3-c)。施磷量与头季产量呈显著相关 ($P<0.05$), 施氮钾量与头季产量呈极显著相关 ($P<0.01$)。头季的最优施氮量为 $168 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 施磷量为 $123 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 施钾量为 $124 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。相比总样本平均产量 $8.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 合理施肥 ($8.97 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 可以使头季增产 9%。

再生季的产量随施氮量的变化呈“线性+平台”的趋势, 当施氮量 $>145 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 再生季产量不再增加, 为 $4.44 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 4-a)。再生季产量与施磷量呈二次曲线的关系, 当施磷量 $<50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 产量随施磷量的增加而增加; 当施磷量 $>50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 产量随施磷量的增加反而下降, 因而最优施磷量为 $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 相应的再生稻产量为 $4.51 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 4-b)。

施钾量与施磷量对再生季产量的影响呈相同的趋势, 但再生季水稻对钾肥的需求量远大于磷肥, 且施钾量与再生季产量呈显著相关 ($P<0.05$), 当施钾量达到 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 增产效果仍十分明显(图 4-c)。相比总样本平均产量 $3.64 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 优化施肥 ($4.44 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 可以使再生季增产 22%。

头季和再生季总产量与氮磷钾肥总的施用量均呈二次曲线的关系(图 5), 且都呈极显著相关 ($P<0.01$), 这表明通过施肥可以促进总产量的增加。其中, 施氮量在 $100\text{—}500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 总产量逐渐增加, 但不能确定最佳施氮量(图 5-a); 当施磷量在 $0\text{—}210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 通过拟合最佳施磷量为 $218 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 总产量可达 $13.38 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 5-b); 当施钾量在 $0\text{—}360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 最佳施钾量为 $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 总产量可达 $14.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 5-c)。上述产量与潜力产量 $17.10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 相比还有很大的提升空间, 这说明除了肥料管理以外, 还需要对其他措施进行综合管理才能进一步提高产量。



2.4 种植密度对再生稻产量的影响

头季和再生季的产量与种植密度的关系均呈二次曲线的关系，即产量随着种植密度的增加呈先增加后降低的趋势，且再生季产量与种植密度呈极显著相关 ($P < 0.01$)。其中，头季产量最高为 $8.94 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，此时最优的种植密度为 $22.4 \text{ 万穴} / \text{hm}^2$ (图 6-a)；当种植密度为 $29.1 \text{ 万穴} / \text{hm}^2$ 时，再生季产量最高为 $4.24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 6-b)，相比头季和再生季的总样本平均产量 8.26 和 $3.64 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，优化种植密度可以使头季增产 8% ，再生季增产 17% 。

2.5 留桩高度对再生稻再生季产量的影响

留桩高度作为再生稻栽培的关键技术之一，对再生季的产量具有直接影响。何花榕等^[17]研究认为水稻的倒二节一般位于 $30\text{—}50 \text{ cm}$ ，头季留桩高度保住倒二节有利于提高再生季的有效穗数和产量。本文统计

结果显示 (图 7)，当留桩高度在 $40\text{—}50 \text{ cm}$ 时，再生季的产量最高，平均为 $4.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，其次为留桩高度 $0\text{—}10 \text{ cm}$ ；而当留桩高度 $20\text{—}30 \text{ cm}$ 时，再生季的产量最低，平均为 $3.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ；留桩高度 $40\text{—}50 \text{ cm}$ 的再生季产量比留桩高度 $20\text{—}30 \text{ cm}$ 增产 24% 。综上，适宜的留桩高度为 $40\text{—}50 \text{ cm}$ 。

2.6 种植方式对再生稻产量的影响

由图 8 可知，不同的种植方式对再生稻头季产量的影响变化幅度在 $8.02\text{—}8.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，但差异不显著。再生季的产量受种植方式的影响差异显著，变化幅度为 $3.09\text{—}5.20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，其中手栽 $>$ 机栽 \approx 直播 $>$ 抛秧。此外，手栽的总产量显著高于其他种植方式，其他 3 种植方式的总产量间差异不显著。由此可知，种植方式主要影响再生季产量，手栽种植方式由于最利于再生季产量的提高因而也能获得最大的总产量。

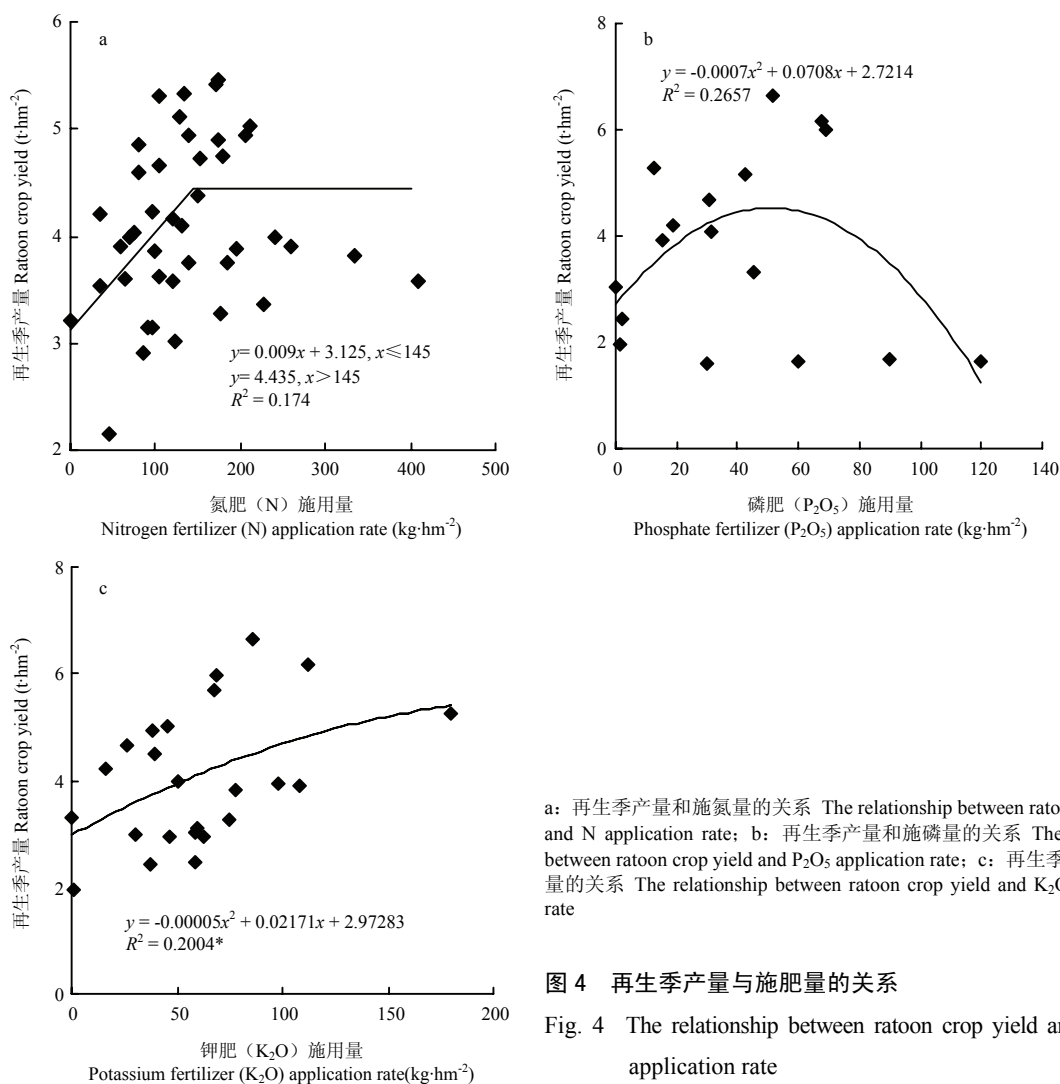


图 4 再生季产量与施肥量的关系

Fig. 4 The relationship between ratoon crop yield and fertilizer application rate

2.7 收割方式对再生季产量的影响

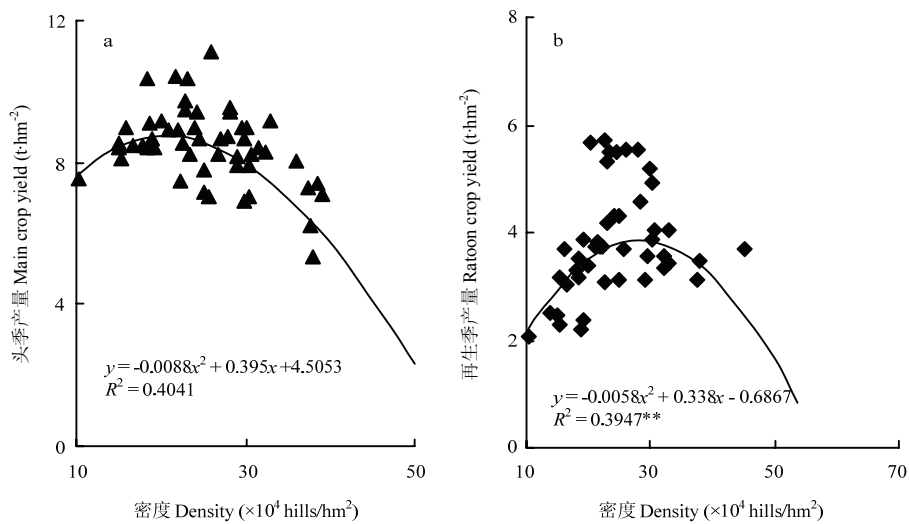
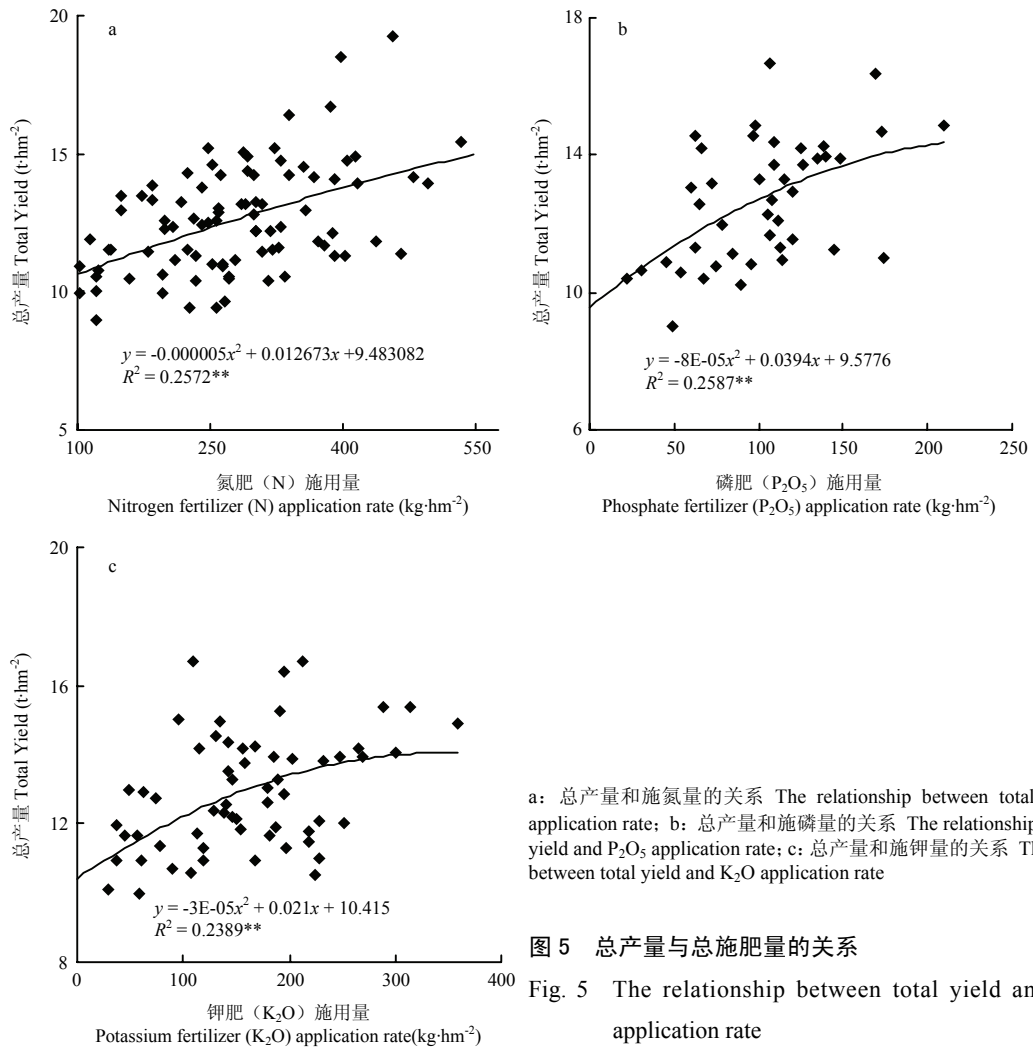
头季稻的收割方式对再生季产量是否产生影响主要在于是否对稻桩进行了碾压,机械碾压导致机械收割部分的再生稻不能成苗或发育较迟,不能正常抽穗而影响再生季水稻的产量。人工收割头季稻虽然规避了碾压稻桩的风险,但是需要大量的劳动力,作业效率低。由图 9 可知,人工收割方式下的再生季产量比机械收割高 12%,但统计显示二者之间差异不显著 ($P>0.05$)。虽然机械收割对再生季产量有一定影响,但其具有节省劳力和提高劳动效率的特点,因此更符合现代农业轻简化发展要求。

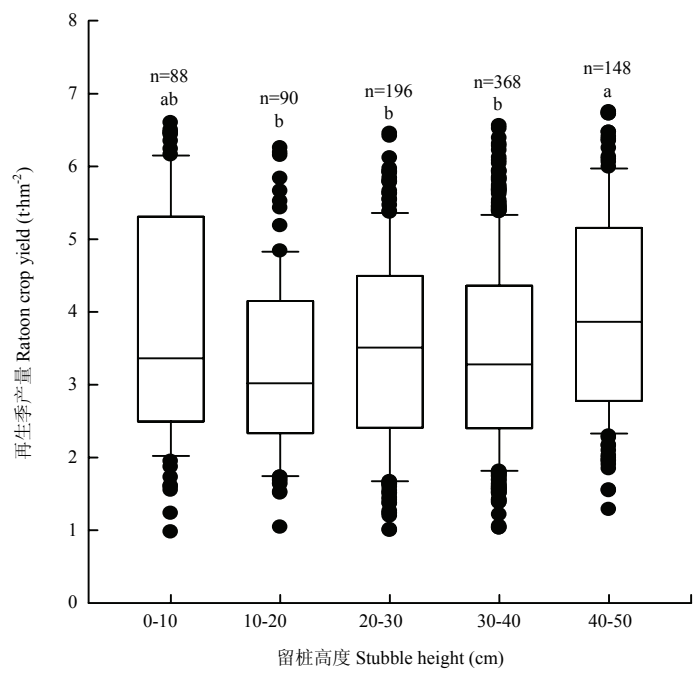
3 讨论

3.1 再生稻的产量潜力

再生稻是利用头季水稻收割后稻桩上的休眠芽

萌发生长成穗而再收获一季短生育期水稻的稻作制度^[4]。由于强再生力水稻品种的育成和再生稻栽培技术的发展,再生稻经济效益显著高于单季稻和双季稻^[18]。本文结果表明,再生稻头季、再生季及两季总的平均产量为 8.26、3.64 和 11.69 t·hm⁻²。中国南方稻区适宜种植再生稻的地区主要分布在四川、重庆和福建,其中面积最大的四川再生稻平均产量分别为 8.4、2.1 和 10.5 t·hm⁻²,重庆的再生稻平均单产又比四川略低^[8],二者都要比本研究统计的产量低;从光热资源上看,川渝地区是种植再生稻比较理想的地区,这说明川渝地区仍需要通过综合管理来提高产量。另外,从文献本身的数据进行比较,头季、再生季及两季总产量的产量潜力分别为 11.65、6.90 和 17.10 t·hm⁻²,平均产量分别达到产量潜力的 71%、53%和 68%,这说明中国再生稻生产有较大的缩小产量差的潜力。本研究是





箱形图中部实线代表中位数，箱形框上下边缘分别代表全部数据的 75%和 25%，箱形框上下横线的边缘分别代表全部数据的 95%和 5%，实心圆点代表异常值
The middle solid line in the box indicate median, and the box boundaries indicate the 75% and 25% quartiles, the whisker caps indicate 95% and 5% quartiles, and the solid points indicate the vertical outliers

图 7 再生稻产量与留桩高度的关系

Fig. 7 The relationship between ratoon crop yield and stubble height

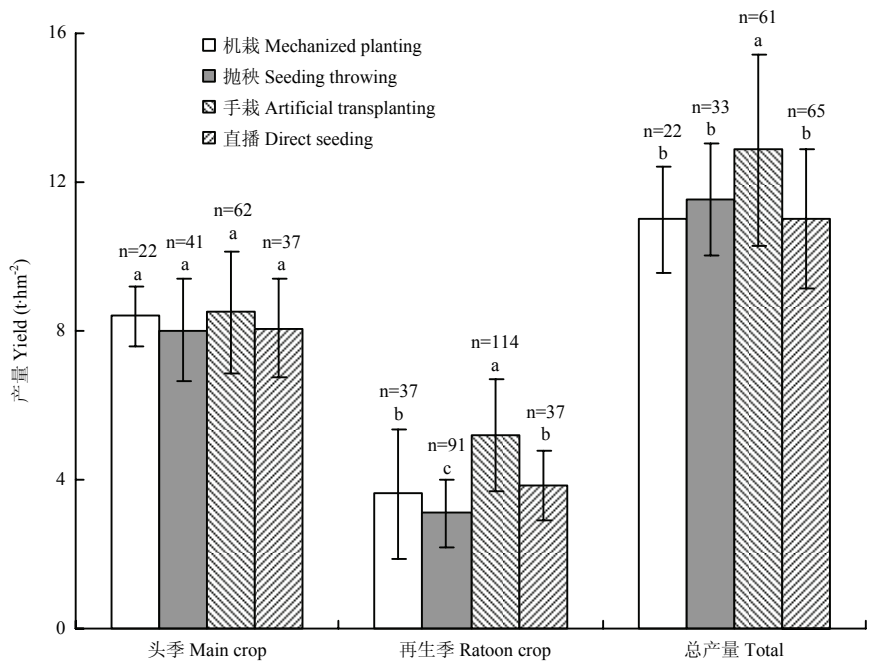


图 8 再生稻产量与种植方式的关系

Fig. 8 The relationship between ratoon rice yield and planting methods

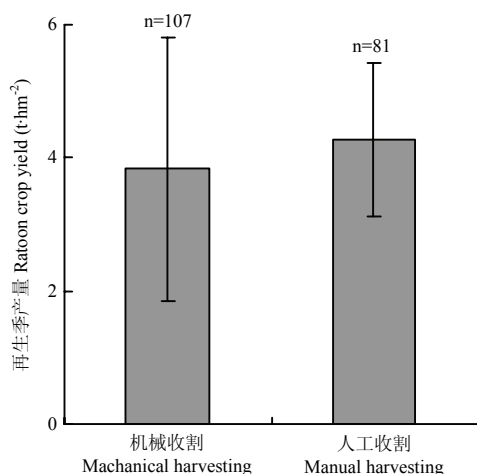


图9 再生季产量与收割方式的关系

Fig. 9 The relationship between ratoon crop yield and harvesting methods

根据文献大数据分析获得，如果根据气候和土壤等因素，利用作物生长模型并经过田间校正分区探讨再生稻的产量潜力或许更具有现实指导意义，拟在下一步研究中进行。

3.2 品种对再生稻产量的影响

本文统计结果显示籼稻比粳稻在头季、再生季和两季总产量上都有优势（图 2-a），主要原因是粳稻生育期较籼稻长，较长的生育期有可能影响再生季的安全抽穗和成熟，这与前人研究结论一致^[8,19]。例如，陈小华^[19]在湖北地区选用粳稻作再生稻，由于头季稻生育期长达 150 d，不利于再生季水稻的抽穗进而降低再生季的产量。徐富贤等^[8]通过产量构成因素分析表明，适宜的生育期保证再生季齐穗，并且使用再生能力强的品种有利于提高再生季产量，因此在热量相对丰裕的南方稻区，籼稻特别是杂交籼稻常被作为再生稻的品种。

本文统计结果显示，杂交稻品种被更多科研人员选用，而且较常规稻有产量优势（图 2-b）。唐文帮等^[20]、徐富贤等^[21]，朱永川等^[4]研究认为杂交水稻品种蓄留再生稻，其再生率明显高于一般水稻品种，这已经得到前人的共识。徐富贤等^[8]认为再生能力强的品种更利于提高再生稻的产量，这说明杂交水稻主要依靠强再生力来提高再生季的产量。

3.3 施肥对再生稻产量的影响

研究表明施肥对再生稻产量影响很大，水稻高产需要协调各肥料因子的用量^[13]。本文通过 96 个田间

试验数据进行拟合，研究表明再生稻头季产量随着氮磷钾施用量呈“线性+平台”的趋势，即施肥量并不是越多越好，当施肥量达到一定程度（氮磷钾分别约为 168、123 和 124 kg·hm⁻²）时头季产量不再增加（图 3-a）。而再生季的肥料管理与头季存在很大的差异，促芽肥和促苗肥的施用是再生季水稻养分管理的重要措施，二者的配合通过提高再生力增加再生季产量^[13]。再生季的产量随施氮量的变化呈“线性+平台”的趋势（图 4-a），这与 BOND 等^[22]的研究结论相似，当施氮量 ≤ 145 kg·hm⁻² 时，再生稻产量随施氮量的增加而增加，当施氮量在 145—410 kg·hm⁻² 时，再生季产量保持 4.44 t·hm⁻² 不再增加。针对再生季的施氮量变化范围很大，有研究认为大田撒施 300 kg·hm⁻² 尿素（约 138 kg N·hm⁻²）作促芽肥可以获得再生季最佳产量^[23]，但也有研究认为施氮量为 60—70 kg·hm⁻² 即可获得再生季高产^[24-25]。造成这些差异的主要原因是土壤基础肥力的差异，具体操作可以通过头季的苗情来判断。因此关于再生季促芽肥和促苗肥的施用，应根据头季水稻抽穗后的植株生长状况决定；长势较好的区域，应减少氮肥投入，反之增加氮肥投入^[26]，本研究通过大数据分析为再生稻高产提供一个氮素的参考范围，实际栽培中宜根据当地土壤状况和目标产量等酌情进行增减用量。磷钾的最佳施用量也是如此。

3.4 栽培管理措施对头季和再生季产量的影响

通过文献检索发现，栽培管理措施，如种植密度、留桩高度、种植方式和收割方式等方面的研究受到越来越多的关注。

本文统计结果显示，不同的种植密度对头季、再生季产量均有明显影响。头季和再生季的产量与种植密度均呈二次曲线的关系，且再生季产量与种植密度呈极显著相关（ $P < 0.01$ ）；当种植密度在 22.4—29.1 万穴/hm² 时，再生稻两季产量达到最高，该结论与前人研究相似^[8,27-28]。唐仁忠等^[29]认为种植密度过低，水稻腋芽萌发的幼苗数量和有效穗少，造成头季和再生季减产；而种植密度过高，则水稻通透性差，病虫害严重，也会影响两季水稻产量。因此合理的密度才能保证稻株健壮生长和头季有效穗多，进而促进总产量的增加。

头季收割后的留桩高度是再生稻栽培的关键技术之一，在一定范围内与再生季产量呈正相关^[30]，其机制是通过促进腋芽分化来提高有效穗数^[17]和穗重^[31]来增产。何花榕等^[17]研究表明倒二节一般位于

30—50 cm, 留桩高度在这个范围能够保住倒二节的腋芽(保护段 2—3 cm), 通过促进腋芽分化提高再生季有效穗数来增加再生季稻产量。本研究通过大样本统计显示(图 7), 适宜的留桩高度范围是 40—50 cm, 这与他人的研究结果相类似^[14,32-33], 即适当高留桩有助于提高再生稻的产量。当留桩高度为 0—10 cm 时, 再生稻的平均产量为 3.80 t·hm⁻², 仅次于留桩高度 40—50 cm, 表明部分水稻品种在温光资源足够的地区可以选择低留桩, 通过促进低节位腋芽分化提高穗重, 但以降低有效穗数为代价确保产量^[31]。然而这存在诸多风险, 例如, 光温资源丰富地区也可能发生阴雨天气, 这些天气如果发生在孕穗和灌浆期就会造成光合产物积累不够就不能增加穗重, 甚至造成减产。

研究表明不同种植方式之间, 手栽种植更利于再生稻的产量提高, 其对秧苗损伤较小缓苗快, 这与李杰等^[34]、张现伟等^[35]结论一致。而机插秧和抛秧种植时都存在根系生长空间小、秧苗弱、发苗慢的情况, 因而成熟期偏晚, 再生季的生长发育与产量都受到影响^[35]。直播栽培时由于受气温影响而推迟播期, 进而导致头季生育期延长及再生季成熟期推迟, 会造成光温资源不匹配而减产^[34]。因此比较不同种植方式下再生稻的产量, 手栽种植对头季和再生季产量的影响最小, 在产量上具有明显优势, 但由于其具有劳动强度大、成本高、费工费时等特点, 不符合现代农业发展的趋势, 因此从轻简化角度宜选用机插秧和直播技术, 并在发展中加以完善。

在收割方式上, 机械收割时再生季产量比人工收割少 10% (图 9), 徐富贤等^[8]田间试验总结机械收割会减产 5%—12%, 这和本研究结果一致。钱太平等^[36]、夏桂龙等^[37]、徐小兵等^[38]研究均认为头季稻机收碾压造成减产是限制再生稻机械化生产的重要因素, 因为机械碾压导致被碾压稻桩在再生季不能成苗或发育较迟, 不能正常抽穗而影响再生季的产量。由于机械碾压造成的再生稻减产对保证国家粮食安全不利, 应采取相应的措施, 例如在机械收割工具上采用小型化、加强排水管控以减轻对再生季稻秧的损害、及时追肥等^[8]。

定量产量潜力和产量差的方法有很多, 但每种方法都有不完善的地方。现阶段, 国内发表了很多试验数据, 从中筛选出高产的试验结果, 通过高产纪录来表示产量潜力更可行。消减产量差需要多种措施同时进行, 栽培管理上, 选用适宜的品种, 优化种植密度

和施肥量, 选择合适的留桩高度、种植方式和收割方式等措施; 育种上, 培育具有更高产量潜力、强再生力和高抗逆性的品种; 政策上, 加强再生稻高产高效技术的推广。再生稻研究还应该继续关注不同气候、土壤和生态区的产量差和养分利用效率等问题, 为各区域再生稻产量和养分利用效率的协同提高提供科学依据。

4 结论

我国再生稻头季、再生季及两季总产量尚有很大的提高空间, 增产潜力分别为 3.38、3.27 和 5.41 t·hm⁻²。合适的品种、肥料管理、种植密度、留桩高度、种植和收割方式可以缩小产量差, 其中再生稻生产中品种选择以籼稻和杂交稻为主; 与总样本平均产量相比, 优化施肥量可以使头季增产 9%, 再生季增产 22%; 优化种植密度可以使头季增产 8%, 再生季增产 17%; 适宜的留桩高度范围为 40—50 cm; 机种机收相比于人工操作会损失若干产量, 但采取措施后会缩小产量差, 因此更符合轻简化现代农业发展需求。

References

- [1] 蔡承智, 梁颖, 万怀韬. 基于产量潜力预测的中国水稻单产分析. 中国农学通报, 2010, 26(4): 310-313.
CAI C Z, LIANG Y, WAN H T. Analyses of rice yield in China based on the projection of yield potential. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(4): 310-313. (in Chinese)
- [2] RAY D K, FOLEY J A. Increasing global crop harvest frequency: Recent trends and future directions. *Environmental Research Letters*, 2013, 8: 44041-44050.
- [3] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2015.
National Bureau of Statistics. *China Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2015. (in Chinese)
- [4] 朱永川, 熊洪, 徐富贤, 郭晓艺, 张林, 刘茂, 周兴兵. 再生稻栽培技术的研究进展. 中国农学通报, 2013, 29(36): 1-8.
ZHU Y C, XIONG H, XU F X, GUO X Y, ZHANG L, LIU M, ZHOU X B. Progress on research of ratoon rice cultivation technology. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(36): 1-8. (in Chinese)
- [5] AGGARWAL P K, HEBBAR K B, VENUGOPALAN M V, RANI S, BALA A, BISWAL A, WANI S P. Quantification of yield gaps in rain-fed rice, wheat, cotton and mustard in India. Andhra Pradesh,

- India:
International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 2008.
- [6] HOCHMAN Z, HOLZWORTH D, HUNT J R. Potential to improve on-farm wheat yield and WUE in Australia. *Crop & Pasture Science*, 2009, 60(8): 708-716.
- [7] ISLAM M S, HASANUZZAMAN M, ROKONUZZAMAN M. Ratoon rice response to different fertilizer doses in irrigated condition. *Agriculture Conspectus Scientificus*, 2008, 73(4): 197-202.
- [8] 徐富贤, 熊洪, 张林, 朱永川, 蒋鹏, 郭晓艺, 刘茂. 再生稻产量形成特点与关键调控技术研究进展. 中国农业科学, 2015, 48(9): 1702-1717.
- XU F X, XIONG H, ZHANG L, ZHU Y C, JIANG P, GUO X Y, LIU M. Progress in research of yield formation of rationing rice and its high-yielding key regulation technologies. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(9): 1702-1717. (in Chinese)
- [9] 杨东, 陈鸿飞, 卓传营, 林文雄. 头季不同施氮方式对再生稻生理生化的影响. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 643-646.
- YANG D, CHEN H F, ZHUO C Y, LIN W X. Effect of different N application modes in the first cropping rice on the physiobiochemistry of the first cropping rice and its ratoon rice. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(4): 643-646. (in Chinese)
- [10] 陈鸿飞, 杨东, 梁义元, 张志兴, 梁康迳, 林文雄. 头季稻氮肥运筹对再生稻干物质积累、产量及氮素利用率的影响. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 50-56.
- CHEN H F, YANG D, LIANG Y Y, ZHANG Z X, LIANG K J, LIN W X. Effect of nitrogen application strategy in the first cropping rice on dry matter accumulation, grain yield and nitrogen utilization efficiency of the first cropping rice and its ratoon rice crop. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 50-56. (in Chinese)
- [11] 姜照伟, 林文雄, 李义珍, 卓传营, 谢华安. 不同氮肥施用量对再生稻氮素吸收和分配的影响. 福建农业学报, 2003, 18(1): 50-55.
- JIANG Z W, LIN W X, LI Y Z, ZHUO C Y, XIE H A. Effect of nitrogen fertilizer rates on uptake and distribution of nitrogen in ratoon rice. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2003, 18(1): 50-55. (in Chinese)
- [12] 习敏, 吴文革, 汪靖桂, 汪宏伟, 陈刚, 许有尊. 再生稻种植产量差形成的研究. 华北农学报, 2017, 32(1): 104-110.
- XI M, WU W G, WANG J G, WANG H W, CHEN G, XU Y Z. Study on formation of grain yield differences in rationing rice cultivation. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(1): 104-110. (in Chinese)
- [13] 温玉梅, 苏克诚, 王俊, 尤锦伟, 叶磊, 胡红青. 肥种用量对‘新两优 233’再生稻产量和养分吸收的影响. 中国农学通报, 2018, 34(29): 1-7.
- WEN Y M, SU K C, WANG J, YOU J W, YE L, HU H Q. The amounts of seed sowing and fertilizer affect yield and nutrients uptake of ratooning rice ‘Xinliang you 233’. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(29): 1-7. (in Chinese)
- [14] 余贵龙, 刘祥臣, 丰大清, 张强, 赵海英, 张万平, 李伟, 陈昌. 不同留茬高度对豫南再生稻生育期及产量的影响. 中国稻米, 2018, 24(5): 112-115.
- YU G L, LIU X C, FENG D Q, ZHANG Q, ZHAO H Y, ZHANG W P, LI W, CHEN C. Effects of different stubble height on yield and growth period of ratoon rice in south of Henan. *China Rice*, 2018, 24(5): 112-115. (in Chinese)
- [15] 刘保花, 陈新平, 崔振岭, 孟庆锋, 赵明. 三大粮食作物产量潜力与产量差研究进展. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 525-534.
- LIU B H, CHEN X P, CUI Z L, MENG Q F, ZHAO M. Research advance in yield potential and yield gap of three major cereal crops. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(5): 525-534. (in Chinese)
- [16] 彭少兵. 对转型时期水稻生产的战略思考. 中国科学: 生命科学, 2014, 44(8): 845-850.
- PENG S B. Reflection on China's rice production strategies during the transition period. *Scientia Sinica Vitae*, 2014, 44(8): 845-850. (in Chinese)
- [17] 何花榕, 房贤涛, 翁国华, 郭灵灵, 杨惠杰. 留茬高度对再生稻生长发育和产量的影响研究现状及展望. 中国农学通报, 2012, 28(9): 6-10.
- HE H R, FANG X T, WENG G H, GUO L L, YANG H J. Current status and prospect of the effects of stubble height of the main crop on growth, development and grain yield of ratoon rice. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(9): 6-10. (in Chinese)
- [18] 林文雄, 陈鸿飞, 张志兴, 徐倩华, 屠乃美, 方长旬, 任万军. 再生稻产量形成的生理生态特性与关键栽培技术的研究与展望. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 392-401.
- LIN W X, CHEN H F, ZHANG Z X, XU Q H, TU N M, FANG C X, REN W J. Research and prospect on physio-ecological properties of ratoon rice yield formation and its key cultivation technology. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(4): 392-401. (in

- Chinese)
- [19] 陈小花. 粳稻和籼稻品种的再生特性比较研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- CHEN X H. Comparative research on regeneration characteristic of japonica and indica rice varieties[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [20] 唐文帮, 陈立云, 肖应辉, 刘建丰. 再生稻某些性状与产量及产量构成因子的关系. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2002, 28(1): 1-3.
- TANG W B, CHEN L Y, XIAO Y H, LIU J F. Relationships among yield, yield components and some features of ratooning rice. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2002, 28(1): 1-3. (in Chinese)
- [21] 徐富贤, 郑家奎, 朱永川, 熊洪, 王贵雄. 杂交中稻再生力的鉴定方法. 作物学报, 2005, 31(4): 506-510.
- XU F X, ZHENG J K, ZHU Y C, XIONG H, WANG G X. Evaluation method of rationing ability of mid-season hybrid rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(4): 506-510. (in Chinese)
- [22] BOND J A, BOLLIH P K. Ratoon rice response to nitrogen fertilizer. *Crop Management*, 2006, 5(1): 1-5.
- [23] 吉中贵, 邓相秋, 何花强, 张建奎, 孙海艳. 抛栽密度与促芽肥用量和化学促芽剂对中稻-再生稻的影响研究. 中国农学通报, 2009, 25: 109-113.
- JI Z G, DENG X Q, HE H Q, ZHANG J K, SUN H Y. Effect of seedling-throwing density and application amount of bud-promoting fertilizer on hybrid medium rice-ratooning rice. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(22): 109-113. (in Chinese)
- [24] PETROUDI E R, NOORMOHAMMADI G, MIRHADI M J, MADANI H, MOBASSER H R. Effects of nitrogen fertilization and rice harvest height on agronomic yield indices of ratoon rice-berseem clover intercropping system. *Australian Journal of Crop Science*, 2011(5): 566-574.
- [25] HUOSSAINZADE A, AZARPOUR E, DOUSTAN H Z, MORADITOECHAE M, BOZORGI H R. Management of cutting height and nitrogen fertilizer rates on grain yield and several attributes of ratoon rice (*Oryza sativa* L.) in Iran. *World Applied Sciences Journal*, 2011(15): 1089-1094.
- [26] 熊洪, 冉茂林, 徐富贤, 洪松. 南方稻区再生稻研究进展及发展. 作物学报, 2000, 26(3): 297-304.
- XIONG H, RAN M L, XU F X, HONG S. Achievements and developments of ratooning rice in south of China. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(3): 297-304. (in Chinese)
- [27] 黄林煌. 内优航 148 不同种植密度对再生稻产量的影响. 福建农业科技, 2016, 5: 19-21.
- HUANG L H. Effects of different planting densities on yield of ratoon rice cv. "Neiyouhang 148". *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2016, 5: 19-21. (in Chinese)
- [28] 蒋鹏, 徐富贤, 刘茂, 熊洪, 张林, 朱永川, 周兴兵, 郭晓艺, 陈琳. 不同移栽密度下氮素调控对杂交中稻-再生稻产量和稻米品质的影响. 中国稻米, 2019, 25(3): 37-43.
- JIANG P, XU F X, LIU M, XIONG H, ZHANG L, ZHU Y C, ZHOU X B, GUO X Y, CHEN L. Effects of nitrogen management and plant density on grain yield and quality of mid-season hybrid rice in rice-ratoon rice system. *China Rice*, 2019, 25(3): 37-43. (in Chinese)
- [29] 唐仁忠, 梁昌南, 贾翠仙, 韦凤舞, 柳有广. 不同栽培密度对头季稻及再生稻产量的影响. 广西农学报, 2014, 29(1): 3-6.
- TANG R Z, LIANG C N, JIA C X, WEI F W, LIU Y G. Different cultivation densities' impact on the yield of first season and ratoon rice. *Journal of Guangxi Agriculture*, 2014, 29(1): 3-6. (in Chinese)
- [30] 向泽华. 不同留桩高度对 C 两优 34156 再生稻生长发育及产量的影响. 杂交水稻, 2018, 33(6): 47-48.
- XIANG Z H. Effects of stubble height on growth and yield of ratoon rice of C Liangyou 34156. *Hybrid Rice*, 2018, 33(6): 47-48. (in Chinese)
- [31] HARRELL D L, BOND J A, BLANCHE S. Evaluation of main-crop stubble height on ratoon rice growth and development. *Field Crops Research*, 2009, 114(3): 396-403.
- [32] DALIRI M S, EFTEKHARI A, MOBASSER H R, TARI D B, PORKALHOR H. Effect of cutting time and cutting height on yield and yield components of ratoon rice (Tarom langrodi variety). *Asian Journal of Plant Sciences*, 2009(8): 89-91.
- [33] 王尚明, 张崇华, 胡磊, 胡逢喜, 张清霞, 王芸, 曾凯, 杨林. 头季稻不同收割方式对再生稻生长和产量的影响. 湖北农业科学, 2018, 57(20): 31-34.
- WANG S M, ZHANG C H, HU L, HU F X, ZHANG Q X, WANG Y, ZENG K, YANG L. Effects of different harvesting methods in main crop on growth and yield of regenerated rice. *Hubei Agricultural Sciences*, 2018, 57(20): 31-34. (in Chinese)
- [34] 李杰, 张洪程, 常勇, 龚金龙, 郭振华, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉. 不同种植方式水稻高产栽培条件下的光合物质生产

- 特征研究. 作物学报, 2011, 37(7): 1235-1248.
- LI J, ZHANG H C, CHANG Y, GONG J L, GUO Z H, DAI Q G, HUO Z Y, XU K, WEI H Y, GAO H. Characteristics of photosynthesis and matter production of rice with different planting methods under high-yielding cultivation condition. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(7): 1235-1248. (in Chinese)
- [35] 张现伟, 李经勇, 唐永群, 姚雄. 不同栽培处理下杂交水稻渝香 203 的再生性分析. 西南农业学报, 2012, 25(1):59-62.
- ZHANG X W, LI J Y, TANG Y Q, YAO X. Analysis of regeneration of hybrid rice in different planting treatments. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25(1): 59-62. (in Chinese)
- [36] 钱太平, 梅少华, 张键, 喻均吉, 方锡文, 陈建军, 张从德, 魏坦雄. 再生稻不同留桩高度和收割方式的产量及其构成因素分析. 湖北农业科学, 2015, 54(1): 14-17.
- QIAN T P, MEI S H, ZHANG J, YU J J, FANG X W, CHEN J J, ZHANG C D, WEI T X. Yield and yield components of ratoon rice with different stubble height and harvest methods. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(1): 14-17. (in Chinese)
- [37] 夏桂龙, 欧阳建平, 柳开楼, 李亚贞, 周利军, 余跑兰, 胡惠文. 促芽肥用量和留茬方式对赣东北地区再生稻产量和再生能力的影响. 中国稻米, 2016, 22(2): 27-30.
- XIA G L, OUYANG J P, LIU K L, LI Y Z, ZHOU L J, YU P L, HU H W. Effects of bud fertilizer and stubble types on grain yield and regeneration capacity of ratoon rice in northeast of Jiangxi province. *China Rice*, 2016, 22(2): 27-30. (in Chinese)
- [38] 徐小兵, 陈凌, 钱太平, 郭建新. 再生稻头季机械收割和人工收割对比试验. 中国种业, 2016(11): 52-53.
- XU X B, CHEN L, QIAN T P, GUO J X. Contrast experiment of mechanical harvesting and artificial harvesting in the first season of ratooning rice. *China Seed Industry*, 2016(11): 52-53. (in Chinese)
- (责任编辑 杨鑫浩)