北方粳稻优化穗部性状和籼型血缘改良品质研究进展

徐海¹, 孙健¹, 徐铨^{1*}, 潘国君², 周广春³, 张忠旭⁴, 孙玥⁵, 徐正进¹, 陈温福¹

1. 沈阳农业大学水稻研究所, 沈阳 110866;

2. 黑龙江省水稻研究所, 佳木斯 154026;

3. 吉林省水稻研究所, 长春 130499;

4. 辽宁省水稻研究所, 沈阳 110101;

5. 天津市农作物研究所, 天津 300380

* 联系人, E-mail: kobexu34@syau.edu.cn

2021-09-10 收稿, 2021-10-23 修回, 2021-10-25 接受, 2021-10-27 网络版发表

国家自然科学基金(U1708231, 31430062)和国家重点研发计划(2017YFD0100500)资助

摘要 进入“十一五”以来, 以沈阳农业大学水稻研究所为首的北方粳稻育种团队, 以提高北方粳稻品质为主攻目标, 以改良穗部性状为突破口, 以调控籼型血缘为主要途径, 在相关性状遗传与生理基础、种质资源创新与新品种培育研究方面取得了显著进展. (1) 明确了直立穗型由一对显性基因*EPI*控制, 表现穗节间缩短、枝梗数和穗粒数增多、着粒密度增大, 在改善产量性状的同时影响外观和加工品质. 研究发现, 东北粳稻引进籼稻遗传背景, 有利于提高产量潜力, 但是对品质特别是食味品质带来负面效应. (2) 首创水稻理想穗型概念, 提出或改进颈穗弯曲度、穗型指数、维管束效率、一次枝梗效率、籼型频率等行之有效的选择指标. 在此基础上建立了北方优质高产粳稻理想穗型量化选择指标体系: 颈穗弯曲度 $<40^\circ$ 、穗型指数 >0.50 、维管束效率 ≥ 0.75 、一次枝梗效率 ≈ 1.0 、一次枝梗数 ≥ 15 、糙米率 $\geq 83\%$ 、整精米率 $\geq 68\%$ 、垩白粒率 $\leq 10\%$ 、食味值 ≥ 80 ; 控制籼型频率在 10% 左右, 有利于实现产量与品质特别是食味品质的协调统一. (3) 系统总结归纳上述研究成果, 创立了以优化穗部性状和籼型血缘为特色的北方粳稻品质改良理论与技术体系: 选择优良籼粳交后代, 以优质高产粳型种质资源进行回交或复交, 通过定向选择优化籼型血缘提高食味品质, 增加穗颈维管束数和一次枝梗数, 选择二次枝梗上位优势型降低强弱粒充实度差异, 实现在保持产量水平基础上加工、外观和食味品质同步改良. 促进21世纪以来东北粳稻单产增加 16.60% , 面积增加 96.88% , 总产占全国的比例由 9.51% 提高到 17.91% , 实现了面积、单产和品质同步显著提升. 此外, 本文还讨论了相关领域存在的问题与发展方向.

关键词 水稻, 北方粳稻, 穗部性状, 籼型血缘, 品质

东北是我国粳稻主产区, 面积和产量都超过全国粳稻面积与产量的 50% ^[1]. 东北粳稻特殊的生态环境、品种类型和育种技术, 与国内以杂种优势利用为核心的南方籼稻及国外以粳稻品种间杂交为主的日本和韩国粳稻有显著差异, 决定了必须结合本地实际开展核心基础理论和关键应用技术研究^[2]. 进入“十一五”以

来, 基于籼粳稻杂交和水稻理想株型基本技术路线, 我国北方粳型超级稻产量的潜力显著提升, 基本满足了国家对“东北大米”的数量需求^[2]. 随着国民经济的发展和人民生活水平的提高, 人民“吃得饱”后还要“吃得好”成为东北粳稻育种面临的新问题. 沈阳农业大学与黑龙江、吉林和辽宁三省农业科学院等共同承担了国家

引用格式: 徐海, 孙健, 徐铨, 等. 北方粳稻优化穗部性状和籼型血缘改良品质研究进展. 科学通报, 2022, 67: 135–142

Xu H, Sun J, Xu Q, et al. Research progress on optimizing panicle characters and quality improvement of *indica* pedigree in northern *japonica* rice (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 135–142, doi: 10.1360/TB-2021-0946

“十一五”“十二五”科技支撑计划、“十三五”重点研发计划、国家高技术研究发展计划(“863”计划)、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)、国家自然科学基金等项目,以提高东北粳稻品质为主攻目标,以改良穗部性状为突破口,以调控籼型血缘为主要途径,重点开展了相关遗传与生理基础、种质资源创新和新品种培育的研究。

1 直立穗型和籼稻血缘对东北粳稻产量与品质的影响

经过长期系统的研究发现,20世纪80年代以来以直立穗型为代表的株型改良是北方粳型超级稻取得重大突破的关键因素之一^[2]。直立穗型是由一对显性基因 *EPI*(*DEPI*、*qPE9-1*)控制的,定位在第9染色体上。该基因在控制直立穗型的同时,使穗节间缩短、枝梗数和穗粒数增多,由此带来着粒密度增大,强弱势粒差异增加,严重影响稻米外观和加工品质^[3-6]。

随着籼粳稻杂交育种的广泛应用,东北粳稻籼型频率平均值约为5%,最高的接近20%,东北粳稻籼型频率平均为4.71%,显著高于典型粳稻的0.30%,而且12条染色体间籼型频率差异很大,第5、6、10和11染色体均超过了5%,最高的第5染色体达到了9.83%,最低的第7染色体只有0.59%^[7]。穗颈维管束性状和加工品质也有明显差异,表现为典型粳稻的加工品质明显优于东北粳稻的,且程氏指数与加工品质呈极显著正相关,籼型频率与加工品质和食味值呈极显著或显著负相关,与垩白粒率呈极显著正相关。换言之,东北粳稻在保持粳型遗传背景的同时引入了较多的籼型血缘,是导致其米质下降的重要原因之一^[8]。这证明,北方粳稻引入籼型血缘在增加穗粒数的同时对品质特别是食味品质带来负面影响^[9]。

在过去生理生态机制研究的基础上,进一步研究发现,直立穗型品种之所以抗倒伏性显著增强,不但与株高降低、茎秆粗壮、维管束发达有关,还通过大幅度降低茎秆弯曲力矩直接影响抗倒伏性,揭示了 *DEPI* 提高抗倒伏性的形态解剖学基础^[10]。直立穗型除与结实期群体生态环境密切相关外,还直接影响冠层辐射垂直反射率,表明 *DEPI* 在群体水平有减少辐射反射进而降低光能损失的功能,进一步揭示了直立穗型水稻品种产量潜力高的生理基础^[11]。直立穗型强弱势粒成熟度差异显著,与垩白性状、加工品质及蛋白质含量等有直接关系,为直立穗型品质改良提供了新思路^[12]。

*DEPI*对穗部性状的影响与理想株型基因 *IPA1* 有直接关系。*IPA1*与 *DEPI*非等位基因互作明显的性状包括穗长、株高、千粒重、穗粒数、二次枝梗数和穗数;粒长、粒宽、粒厚和一次枝梗数主要由 *IPA1* 决定,特别是一次枝梗数基本不受 *DEPI* 影响。总体而言, *DEPI* 位点对大部分经济性性状的影响明显小于 *IPA1*, 但是对株高和穗长的影响特异性地明显高于 *IPA1*。 *DEPI* 对除一次枝梗数和粒厚外所有性状都表现为抑制作用, *IPA1* 不但对大部分经济性性状影响大于 *DEPI*, 而且对除穗数外所有性状都表现为促进作用。在分离群体条件下, *Ddli* 基因型能够较好地协调株型和产量结构,而且是 *DDli* 基因型,说明这两个株型基因在杂种优势利用上有更大的潜力^[13]。

根据籼型分子标记频率,将籼粳稻杂交RILs群体划分为偏粳型、中间型和偏籼型3种类型。研究发现, *DEPI* 基因型和籼粳遗传背景同时影响穗部性状, *depl* 基因型维管束效率和一次枝梗效率受籼粳遗传背景影响较小,而 *DEPI* 基因型维管束效率和一次枝梗效率分别随籼型频率的增加显著升高或降低^[14]。这表明,通过籼粳稻杂交可以实现 *DEPI* 基因与亚种属性、维管束及穗部性状的优化组合,育成适应不同生态条件的具有新形态解剖特性的优质高产品种,为进一步充分发挥 *DEPI* 育种潜力奠定了遗传基础。

2 北方粳稻理想穗型的遗传与生理基础及其量化指标

在20世纪末21世纪初超级稻研究中,本团队^[15]提出了北方粳稻直立大穗型超高产株型模式。后来进一步深入、完善、拓展,首创理想穗型概念,丰富和发展了水稻理想株型理论(图1)^[12,16]。株型与产量、品质及抗性都有直接关系,在迄今对茎秆和叶片性状深入研究的基础上,本团队^[16]聚焦穗部性状,参考株型和理想株型的概念,定义穗型为穗的形态特征、空间分布及性状间的相互关系,理想穗型则是在特定生态条件下与高产优质有关的穗部性状的最佳组合。二次枝梗籽粒数量及其在穗上位置既调控每穗粒数,更直接影响弱势粒充实度。为了准确反映二次枝梗粒在穗轴上的分布特点,定义二次枝梗粒数最多的一次枝梗所在穗轴节位与一次枝梗数之比为穗型指数(panicle type index, PTI),并根据PTI将试材分为上部优势型、中部优势型和下部优势型^[17]。理论上, $0 < PTI \leq 1$, 当 $PTI = 0.5$ 时表示二次枝梗籽粒集中分布于穗轴中部; $PTI > 0.5$ 时

图1 水稻理想穗型理论遗传与生理基础. 综合文献[12,16]绘制

Figure 1 The genetic and physiological basis of ideal panicle architecture in rice according to Refs. [12,16]

表示二次枝梗籽粒集中分布偏于上部; $PTI < 0.5$ 时表示二次枝梗籽粒集中分布偏于下部。相比之下, PTI 农学意义更清楚, 应用更方便(日本学者提出的笹原指数 ≥ 1 , 上限不确定, 农学意义不够清晰)。维管束效率是指穗颈与倒二节间大维管束数的比值, 反映倒二节间维管束形成穗颈节间维管束的能力, 籼稻的维管束效率通常显著高于粳稻的; 一次枝梗效率是指一次枝梗数与穗颈节间大维管束数的比值, 表示穗颈节间大维管束分化一次枝梗的能力, 籼稻的一次枝梗效率一般显著低于粳稻^[12]。

我们总结本团队的研究结果并结合国内外文献分析提出, 北方粳稻理想穗型理论量化指标体系为: 穗型指数 > 0.50 、维管束效率 > 0.75 、一次枝梗效率 ≈ 1.0 、糙米率 $\geq 83\%$ 、整精米率 $\geq 68\%$ 、垩白粒率 $\leq 10\%$ 、垩白度 $\leq 1\%$ 、食味值 ≥ 80 、籼型频率 ≈ 0.1 (图2)^[9,12,16]。

3 基于优化穗部性状和籼型血缘的北方粳稻品质改良理论与技术

进一步检测籼粳杂交育成品种重要产量与品质相关基因发现, 育种家通过籼粳稻杂交后代选择, 将控制穗粒数与粒重的籼稻增产基因 *GN1a*、*GS3*、*TGW6*、

GS5 等部分固定于北方粳稻基因组中, 淘汰了适口性差的籼稻高直链淀粉基因 *Waxy* 以及不符合北方农民收获习惯的籼稻落粒基因 *qSH1*, 同时保留了北方粳稻原有的理想株型基因 *dep1* 和宽粒基因 *qSW5*^[18,19]。结果表明, 在通过籼粳稻杂交进行优质超级粳稻育种中, 单纯依靠引进一个或某几个基因是很难成功的, 通过回交或渐渗杂交辅之以定向选择至关重要^[20]。

根据籼粳稻杂交育成品种和重组自交系籼型频率与产量及品质的关系, 并结合20世纪末以来东北特别是辽宁籼粳稻杂交育成品种实际情况印证, 如辽梗454、辽梗371和辽星1的籼型频率分别为0.08、0.15和0.12, 沈农6014、沈农9741和沈农265的籼型频率分别为0.12、0.08和0.07, 辽盐2和盐丰47的籼型频率分别为0.16和0.08, 江苏常规粳稻品种浙梗88的籼型成分也约为10%, 我们认为, 将直立穗型品种中籼型频率控制在0.1左右, 有利于实现北方粳稻产量和品质在更高水平的协调统一^[9]。

系统总结归纳上述研究成果, 本团队^[2,21]创立了以优化穗部性状和籼型血缘为特色的北方粳稻品质改良理论与技术体系: 以优良籼稻作母本, 高产、优质、抗逆等表现突出的粳稻作父本再杂交、回交、复交, 其间通过穗型指数、维管束效率、一次枝梗效率等形态

图2 北方粳稻杂交育种量化指标体系. 综合文献[9,12,16]

Figure 2 The quantitative parameters for ideal panicle type of japonica rice in northern China according to Refs. [9,12,16]

解剖性状和粳型频率等基因型选择, 有针对性减少粳型遗传累赘提高食味品质, 增加穗颈维管束数和一次枝梗数、选择二次枝梗上位优势型以降低强弱势粒充实度差异, 提高外观品质和加工品质, 并在不同生态区进行丰产性、适应性、抗病性多点异地穿梭选择和系统鉴定, 仪器检测与品尝评定相结合筛选食味, 实现在保持产量水平的基础上加工品质、外观品质和食味品质同步改良.

4 北方粳稻新种质和新品种品质性状的变化

本团队创制出一批优异种质资源, 如龙稻1605、哈12-1103和哈11-124食味值为86.0, 沈农09001食味值为86.1、哈10-20食味值为87、哈12-1107食味值为90; 哈11-142、吉粳T40、吉粳TK122和吉粳TK125的糙米率分别为83.8%、83.3%、83.5%和83.6%, 整精米率分别为69.9%、71.5%、71.6%和72.9%; 沈农11054和哈11-124的垩白粒率分别为1.0%和1.5%, 沈农09543、吉粳TK121和吉粳TK122的垩白粒率均为2.0%, 垩白度分别为0.9%、0.1%、0.6%、0.3%和0.4%.

基于上述理论与技术体系和种质资源, 本团队育成了一系列保持或提高产量水平而主要品质指标显著

改善的粳稻新品种, 实现了产量与品质特别是食味品质在更高层次的协调. 2015年吉粳511获全国优良食味粳稻品评会特等奖, 2016年获中日优良粳稻食味品评最优秀奖; 2018年龙稻18获第二届中日粳稻优良食味品评特等奖, 通系933、龙稻18、松粳28、吉粳816、松粳22获首届全国优质稻品种食味品质鉴评金奖; 2019年吉农大667、通系945、通育269、吉粳528、吉粳816和吉粳515获第二届全国优质稻品种食味品质鉴评金奖; 2020年沈农508、沈稻529、吉粳528、松粳29、辽粳433、盐粳219、吉农大667获第三届全国优质稻品种食味品质鉴评金奖. 屡获国内外食味品质鉴评特等奖、金奖的吉粳515区试增产7.2%、糙米率为83.7%、整精米率为66.8%. 龙稻18区试增产8.5%、垩白粒率与垩白度分别为2.0%和0.2%、糙米率与整精米率分别为81.3%和70.5%、食味值为88.0, 达到国标一级标准. 沈农9816被全国农业技术推广服务中心鉴评为十大优质超级稻. 这3个品种分别获得所在省科技进步一等奖. 龙粳65区试增产9.9%、糙米率为82.5%、整精米率为67.8%、垩白粒率为14.5%、垩白度为2.7%、食味值为83; 绥粳28区试增产9.0%、糙米率为81.2%、整精米率为69.7%、垩白粒率为5.5%、垩白度为

0.8%、食味值为85。这两个品种年推广面积均超过200万亩,成为近年来北方粳稻优质高产育种的亮点成果。

上述研究促进“十三五”末期(2018~2020年平均值)东北稻区水稻单产较“十五”初期(2001~2003年平均值)增加了16.60%,显著高于同期14.76%的全国平均增幅;同期东北水稻面积由26.2958 km²增加到51.7707 km²,增幅达96.88%,几乎翻了一番;同期全国水稻面积增加了6.25%。因此,东北水稻面积和总产量占全国的比例分别由“十五”初期的9.32%、9.51%提高到“十三五”末期的17.26%、17.91%(图3)^[1,22]。同时,也促进我国北方特别是东北粳稻遗传生理基础、育种理论、技术研究及种质资源创新和新品种选育不断进步,不但产量潜力、外观和加工品质全面赶超日本品种,而且食味品质也赶上或超过一般的日本品种,突出品种可与日本国内王牌渔沼越光相媲美。

5 问题与展望

普通野生稻的人工驯化发生在一万多年前,早在人类有文字出现以前就被栽培利用。现有文字记载不能直接描述这个过程,有关栽培稻粳亚种驯化与演化过程还没有一个完整的结论^[23]。从育种角度考虑,尽管粳稻杂交育种广泛应用,但是育成品种仍然基本保持粳或籼亚种属性,亚种之间相互引入的血缘都较低^[19]。本团队总结多年研究成果,提出了北方粳稻杂交育种量化指标体系^[9,12,16]。今后粳稻杂交育种策略是打破亚种界限,实现与特定生态条件相适应的粳

粳基因组最佳重组,还是基本保持亚种遗传背景,相互利用粳或籼部分有利基因?一定地区的粳适应性是生态条件、自然选择和人工选择共同作用的结果,而育种过程中的人工选择与消费需求等社会因素有密切关系。历史上韩国与我国台湾地区的粳籼交替、长江中下游粳籼消长、南方稻区“北粳南引”和“籼稻改粳稻”的经验及教训,以及近十年来南方粳稻面积不断扩大的趋势,无疑与粳籼亚种的生态适应性、产量及品质差异有关。换句话说,至少部分地区过去长期以来形成的粳籼类型地理分布未必是最佳的,或者说是可以改变的,迄今很少有相关系统研究的报道。我国历史形成的南籼北粳的粳籼分布区划是局部调整还是重新规划,是需要深入探讨的重要理论和实践问题。育成直立穗型粳品种并在全中国粳稻产区大面积推广是新中国水稻育种三大突破之一^[24]。本团队系统总结相关研究结果,提出穗型指数概念和水稻理想穗型理论^[12]。但是直立穗型品种大多粒形偏小、短圆,食味品质有待改良,其遗传调控与分子机理需要深入探讨。20世纪80年代,辽粳5号育成推广后,结实性差和品质不佳一度成为生产上的主要问题^[2]。基于包括本团队的遗传生理基础研究,后期育成的直立穗型品种,在保持较高产量潜力的基础上外观和加工品质以及结实性都有很大改善,甚至超过一般弯曲穗型(散穗型或稀穗型)品种^[21]。黄淮稻区直立穗型粳稻也经历了类似的发展过程^[25]。2020年,直立穗型品种盐粳219荣获第三届全国优质稻品种食味品质鉴评金奖,展示了直立穗型品种食味品质改良的前景。另外,直立穗型粳稻在黄淮、四川等地

图3 “十五”初期(2001~2003年)和“十三五”末期(2018~2020年)全国和东北水稻单产(a)与面积(b)的变化。根据文献^[1,22]数据绘制

Figure 3 The per unit yield (a) and cultivation area (b) of the whole country and northeast in China at the beginning of the “Tenth Five Year Plan” (2001–2003) and the end of the “Thirteenth Five Year Plan” (2018–2020) according to Refs. ^[1,22]

表现较好^[26,27], 启示我们探索培育直立穗型籼稻的可行性。

迄今克隆的水稻基因越来越多, 很多重要农艺性状相关基因都存在籼粳分化, 为我们充分利用分子生物学等相关学科理论和技术最新成果, 通过基因编辑

等实现分子设计育种提供了更多可能性^[28,29]。当前有必要深入研究籼粳分化基因相互之间及其与亚种分化、遗传背景的关系, 实现聚合亚种有利基因特别是籼粳具有互补性的资源高效利用、优异株型和品质、生物及非生物胁迫抗性基因。

参考文献

- 1 China Planting Industry Information Network-Crops Database (in Chinese). <http://zzys.agri.gov.cn/nongqing.aspx> [中国种植业信息网-农作物数据库. <http://zzys.agri.gov.cn/nongqing.aspx>]
- 2 Xu Z J, Chen W F. Research progress and related problems on *japonica* super rice in northern China (in Chinese). *Sci Agric Sin*, 2016, 49: 239–250 [徐正进, 陈温福. 中国北方粳型超级稻研究进展. *中国农业科学*, 2016, 49: 239–250]
- 3 Xu Z J, Chen W F, Zhang L B, et al. The heredity of the erect panicle character and relation with other characters in rice (in Chinese). *J Shenyang Agric Univ*, 1995, 26: 1–7 [徐正进, 陈温福, 张龙步, 等. 水稻直立穗性状的遗传与其他性状的关系. *沈阳农业大学学报*, 1995, 26: 1–7]
- 4 Wang J, Nakazaki T, Chen S, et al. Identification and characterization of the erect-panicle gene *EP* conferring high grain yield in rice (*Oryza sativa* L.). *Theor Appl Genet*, 2009, 119: 85–91
- 5 Zhou Y, Zhu J, Li Z, et al. Deletion in a quantitative trait gene *qPE9-1* associated with panicle erectness improves plant architecture during rice domestication. *Genetics*, 2009, 183: 315–324
- 6 Huang X, Qian Q, Liu Z, et al. Natural variation at the *DEP1* locus enhances grain yield in rice. *Nat Genet*, 2009, 41: 494–497
- 7 Gao H, Li F F, Lü G Y, et al. Effect of *indica-japonica* hybridization on grain quality of rice cultivars in Northeast China (in Chinese). *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 1806–1813 [高虹, 李飞飞, 吕国依, 等. 籼粳稻杂交对中国东北粳稻品质的影响. *作物学报*, 2013, 39: 1806–1813]
- 8 Gao H, Jiang N, Lü G Y, et al. Dissection of grain yield differences between *japonica* rice in Northeast China and in Japan (in Chinese). *Chin J Rice Sci*, 2018, 32: 357–364 [高虹, 姜楠, 吕国依, 等. 中国东北粳稻与日本粳稻产量差异及原因分析. *中国水稻科学*, 2018, 32: 357–364]
- 9 Wang X H, Li M X, Zhang Q, et al. Effect of *indica* pedigree on yield and milling and appearance qualities in the offspring of *indica/japonica* cross (in Chinese). *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 538–545 [王旭虹, 李明晓, 张群, 等. 籼型血缘对籼粳稻杂交后代产量和加工及外观品质的影响. *作物学报*, 2019, 45: 538–545]
- 10 Zhang X J, Li H J, Li W J, et al. The lodging resistance of erect panicle *japonica* rice in northern China (in Chinese). *Sci Agric Sin*, 2009, 42: 2305–2313 [张喜娟, 李红娟, 李伟娟, 等. 北方直立穗型粳稻抗倒性的研究. *中国农业科学*, 2009, 42: 2305–2313]
- 11 Xu Z J, Chen W F, Zhang W Z, et al. A preliminary analysis on difference of nadir reflectance of canopy and its affecting factors different rice varieties (in Chinese). *Sci Agric Sin*, 2008, 41: 2868–2872 [徐正进, 陈温福, 张文忠, 等. 水稻冠层垂直反射率的品种间差异及其影响因素初步分析. *中国农业科学*, 2008, 41: 2868–2872]
- 12 Xu Z J, Lin H, Ma D R, et al. Research and application of the panicle type improved theory and technology in northern *japonica* rice (in Chinese). *J Shenyang Agric Univ*, 2012, 43: 650–659 [徐正进, 林晗, 马殿荣, 等. 北方粳稻穗型改良理论与技术研究及应用. *沈阳农业大学学报*, 2012, 43: 650–659]
- 13 Xu Q, Xu N, Xu H, et al. Breeding value estimation of the application of *IPA1* and *DEP1* to improvement of *Oryza sativa* L. ssp. *japonica* in early hybrid generations. *Mol Breed*, 2014, 34: 1933–1942
- 14 Xu Q, Liu T, Bi W, et al. Different effects of *DEP1* on vascular bundle- and panicle-related traits under *indica* and *japonica* genetic backgrounds. *Mol Breed*, 2015, 35: 173
- 15 Chen W F, Xu Z J. The Theories and Methods of Rice Breeding for Maximum Yield (in Chinese). Beijing: Science Press, 2007 [陈温福, 徐正进. 水稻超高产育种理论与方法. 北京: 科学出版社, 2007]
- 16 Xu Z J, Chen W F, Zhang L B, et al. The principles and parameters of the design for ideal panicle type in rice (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2009, 50: 2037–2039 [徐正进, 陈温福, 张龙步, 等. 水稻理想穗型设计的原理与参数. *科学通报*, 2009, 50: 2037–2039]
- 17 Xu Z J, Chen W F, Zhang S L, et al. Differences of panicle trait index among varieties and its relationship with yield and quality of rice in Liaoning (in Chinese). *Sci Agric Sin*, 2005, 38: 1926–1930 [徐正进, 陈温福, 张树林, 等. 辽宁水稻穗型指数品种间差异及其与产量和品质的关系. *中国农业科学*, 2005, 38: 1926–1930]
- 18 Liu D, Wang J Y, Sun J, et al. Genetic components analysis on super *japonica* rice using InDel and SSILP molecular markers (in Chinese). *China J Rice Sci*, 2014, 28: 148–154 [刘丹, 王嘉宇, 孙健, 等. 利用InDel和SSILP标记分析北方粳型超级稻的遗传组成. *中国水稻科学*, 2014, 28: 148–154]
- 19 Yang X L, Wang J Y, Liu D, et al. Structure analysis of high-yielding rice varieties and their derived lines bred by Shenyang Agricultural University

- (in Chinese). *China J Rice Sci*, 2014, 28: 496–502 [杨贤莉, 王嘉宇, 刘丹, 等. 沈农系列水稻高产品种及其衍生系的遗传结构分析. *中国水稻科学*, 2014, 28: 496–502]
- 20 Sun J, Liu D, Wang J Y, et al. The contribution of intersubspecific hybridization to the breeding of super-high-yielding *japonica* rice in Northeast China. *Theor Appl Genet*, 2012, 125: 1149–1157
 - 21 Xu Q, Tang L, Xu F, et al. Research advances and prospects of eating quality improvement in *japonica* rice (*Oryza sativa* L.) (in Chinese). *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 961–968 [徐铨, 唐亮, 徐凡, 等. 粳稻食味品质改良研究现状与展望. *作物学报*, 2013, 39: 961–968]
 - 22 Wan J M. Genetic Breeding and Variety Pedigree of Rice in China (in Chinese). Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2010 [万建民. 中国水稻遗传育种与品种系谱. 北京: 中国农业科技出版社, 2010]
 - 23 Gu M H, Cheng Z K. Origin, Differentiation and Cytogenetics of Rice (in Chinese). Beijing: Science Press, 2020 [顾铭洪, 程祝宽. 水稻起源、分化与细胞遗传. 北京: 科学出版社, 2020]
 - 24 Gu M H. Discussion on the aspects of high-yielding breeding in rice (in Chinese). *Acta Agron Sin*, 2010, 36: 1431–1439 [顾铭洪. 水稻高产育种中一些问题的讨论. *作物学报*, 2010, 36: 1431–1439]
 - 25 Xu D Y, Du Y, Fang Z W, et al. Comparison on main agronomical and quality characters between *japonica* cultivars with different panicle types in Jiang-Huai area (in Chinese). *Acta Agron Sin*, 2006, 32: 379–384 [徐大勇, 杜永, 方兆伟, 等. 江淮稻区不同穗型粳稻品种主要农艺和品质特性的比较分析. *作物学报*, 2006, 32: 379–384]
 - 26 Zhang H C, Xu K, Zhang J, et al. Productivity and eco-physiological characteristics of late *japonica* rice in double-cropping system (in Chinese). *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 283–300 [张洪程, 许轲, 张军, 等. 双季晚粳生产力及相关生态生理特征. *作物学报*, 2014, 40: 283–300]
 - 27 Li X Y, Chi Z Z, Jiang X L, et al. Analysis on grain filling characteristics of *indica* and *japonica* rice in rapeseed(Wheat)-rice planting area in Chengdu Basin (in Chinese). *Sci Agric Sin*, 2012, 45: 3256–3264 [李旭毅, 池忠志, 姜心禄, 等. 成都平原两熟区籼粳稻品种籽粒灌浆特性. *中国农业科学*, 2012, 45: 3256–3264]
 - 28 Wang W, Mauleon R, Hu Z, et al. Genomic variation in 3010 diverse accessions of Asian cultivated rice. *Nature*, 2018, 557: 43–49
 - 29 Guo T, Yu H, Qiu J, et al. Advances in rice genetics and breeding by molecular design in China (in Chinese). *Sci Sin Vitae*, 2019, 49: 1185–1212 [郭韬, 余泓, 邱杰, 等. 中国水稻遗传学研究进展与分子设计育种. *中国科学: 生命科学*, 2019, 49: 1185–1212]

Summary for “北方粳稻优化穗部性状和籼型血缘改良品质研究进展”

Research progress on optimizing panicle characters and quality improvement of *indica* pedigree in northern *japonica* rice

Hai Xu¹, Jian Sun¹, Quan Xu^{1*}, Guojun Pan², Guangchun Zhou³, Zhongxu Zhang⁴, Yue Sun⁵, Zhengjin Xu¹ & Wenfu Chen¹

¹ Rice Research Institute of Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

² Heilongjiang Rice Research Institute, Jiamusi 154026, China;

³ Jilin Rice Research Institute, Changchun 130499, China;

⁴ Liaoning Rice Research Institute, Shenyang 110101, China;

⁵ Tianjin Crop Research Institute, Tianjin 300380, China

* Corresponding author, E-mail: kobexu34@syau.edu.cn

Since the Eleventh Five Year Plan began, the northern *japonica* rice breeding team, headed by the Rice Research Institute of Shenyang Agricultural University, has undertaken an effort to improve the quality of northern *japonica* rice, with particular attention to panicle traits and regulating the *indica* pedigree. Remarkable progress has been made in the elucidation of the genetic and physiological basis of important agronomic traits, germplasm resource innovation, and the breeding of new varieties. (1) We found that erect panicle architecture is controlled by a dominant allele of *EP1*, which produces the shortened internode of the panicle, increases both the number of grains per panicle and the seed density, and eventually affects overall appearance and milling quality while improving the yield characters. We also found that the introgression of *indica* pedigree improved the yield potential of *japonica* rice, though there was a detectable quality penalty, especially in eating and cooking quality. (2) We proposed a model of ideal panicle architecture and identified effective selection indicators including panicle curvature, panicle type index, vascular bundle efficiency, primary branch efficiency, and *indica* pedigree introgression percentage. On this basis, we established the quantitative parameters for ideal panicle type of *japonica* rice in northern China (neck panicle curvature < 40°, panicle type index > 0.50, vascular bundle efficiency ≥ 0.75, primary branch efficiency ≈ 1.0, number of primary branches ≥ 15, brown rice rate ≥ 83%, head rice rate ≥ 68%, chalky rice rate ≤ 10%, taste value ≥ 80, the *indica* pedigree introgression at about 10%) to coordinate the balance between yield and quality, especially eating quality. (3) We have systematically summarized the results of our research, and we developed a strong theory for the improvement of the quality and technical systems of northern *japonica* rice by optimizing panicle traits and *indica* pedigree introgression. We first selected elite offspring derived from the cross between *indica* and *japonica*, and then backcrossed or double-crossed them with high-quality, high-yield *japonica* germplasm resources, optimized the eating and cooking quality using a directional selection of *indica* pedigree introgression, and narrowed the gap between superior and inferior grains through the increase in the number of panicle neck vascular bundles and primary branches to realize the synchronous improvement of milling, appearance, and eating and cooking quality on the basis of maintaining the grain yield. This research has led to a 16.60% increase in the per unit yield of *japonica* rice in northeastern China and a 96.88% increase in cultivation area since the beginning of the 21st century. The proportion of total yield in the country has increased from 9.51% to 17.91%, indicating a synchronous and significant improvement of cultivation area per unit yield, and grain quality. In this paper, we also discuss existing problems and directions for the development of related fields.

rice, northern *japonica* rice, panicle characteristics, *indica* pedigree, quality

doi: [10.1360/TB-2021-0946](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0946)