DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.02040

研究简报

减氮对辽粳 5 号/秋田小町 RIL 群体茎秆维管束、穗部和产量性状的影响及其相互关系

程艳双 胡美艳 杜志敏 闫秉春 李 丽 王祎玮 鞠晓堂 孙丽丽
徐 海*

沈阳农业大学水稻研究所 / 农业农村部东北水稻生物学与遗传育种重点实验室 / 北方超级粳稻育种教育部重点实验室 / 辽宁省北方粳稻遗传育种重点实验室, 辽宁沈阳 110866

摘 要: 以辽宁稻区典型的直立穗型品种辽粳 5 号与日本典型的优质米品种秋田小町杂交构建的重组自交系群体 (recombination inbred lines, RIL) 为试材, 在高氮和低氮 2 种施肥模式下种植, 调查 RIL 群体茎秆维管束、穗部和产量性状, 分析减氮对三者的影响及其相互关系, 探讨在减少氮肥施用量的同时维持产量稳定的可能途径。研究结果表明, 不同施氮模式下, RIL 群体的茎秆维管束性状、穗部及产量性状均呈现连续变异, 符合多基因控制的数量性状遗传特点。氮肥减施后, RIL 群体水稻的单茎穗颈和倒二节间维管束数目、单株穗颈和倒二节间维管束面积减少, 一次枝梗数减少, 一次和二次枝梗结实率、总体结实率和千粒重增加, 单穗重增加, 穗数减少, 产量降低。茎秆维管束性状与穗部和产量性状关系密切, 单茎维管束性状与穗颈粗、一次枝梗数、二次枝梗数、穗粒数、着粒密度、千粒重和单穗重大多呈显著至极显著的正相关, 单株维管束面积与穗数和产量呈极显著正相关。氮肥减施后, RIL 群体中不减产类型株系的主要特征是: 低氮条件下仍能维持稳定的分蘖和茎秆维管束的分化, 保证穗数和穗颈粗稳定, 单茎穗颈和倒二节大、小维管束数目、单茎倒二节大维管束面积和单株倒二节大维管束面积无显著变化, 一次枝梗数变化不显著。在减施氮肥的条件下, 选用茎秆维管束发达, 穗数和穗颈粗稳定的水稻品种, 有可能实现减氮不减产的目标。

关键词: 减氮; 茎秆维管束性状; 穗部性状; 产量

Effects of nitrogen reduction on stem vascular bundles, panicle and yield characters of RIL populations in Liaojing 5/Akitakaomaqi and their correlation

CHENG Yan-Shuang, HU Mei-Yan, DU Zhi-Min, YAN Bing-Chun, LI Li, WANG Yi-Wei, JU Xiao-Tang, SUN Li-Li, and XU Hai*

Institute of Rice Research, Shenyang Agricultural University / Key Laboratory of Northeast Rice Biology and Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Key Laboratory of Northern Japonica Super Rice Breeding, Ministry of Education / Key Laboratory of Northern Japonica Genetics and Breeding of Liaoning Province, Shenyang 110866, Liaoning, China

Abstract: The recombinant inbred lines (RILs) population constructed by crossing between Liaojing 5 (a typical erect panicle type rice variety in Liaoning) and Akitakaomaqi (a good quality rice variety in Japan) were used as experimental materials and planted under high nitrogen and low nitrogen fertilization mode. In order to explore the possible ways to maintain stable yield while reducing the amount of nitrogen application, we investigated the stem vascular, panicle and yield traits of the RIL population and analyzed the effects of nitrogen reduction on them and their correlation. The results showed that the traits of stem vascular bundle, spike and yield of RIL population showed continuous variation under two different fertilization models, which was consistent with the genetic characteristics of quantitative traits controlled by multiple genes. The number of vascular bundles of panicle neck and penultimate internode in a stem, the area of vascular bundles of panicle neck and penultimate internode in a plant

本研究由国家重点研发计划项目(2017YFD0100502), 辽宁省科技重大专项项目(2019JH1/10200001)和国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-01-11)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFD0100502), the Major Scientific and Technological Projects of Liaoning Province (2019JH1/10200001), and the China Agriculture Research System (CARS-01-11).

* 通信作者(Corresponding author): 徐海, E-mail: chinaxuhai@163.com

第一作者联系方式: E-mail: 18302427383@163.com

Received (收稿日期): 2020-05-30; Accepted (接受日期): 2020-11-13; Published online (网络出版日期): 2020-12-15.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20201215.0916.008.html>

were decreased, the number of primary branches decreased, the seed setting rate of primary and secondary branches, the total seed setting rate and 1000-grain weight increased, the weight of single panicle increased, the number of panicle decreased, and the yield was decreased after nitrogen fertilizer reduction. The traits of vascular bundle in stem were closely related to the traits of panicle and yield. The traits of vascular bundle in single stem were positively correlated with the thickness of panicle neck, number of primary branches, number of secondary branches, number of panicle grains, kernel density, 1000-seed weight, and the number of panicles. The area of vascular bundle per plant was positively correlated with the number of panicles and yield. After nitrogen decrease treatment, the main characteristics of no reduction yield type in RIL populations were as follows: under the condition of low nitrogen, there was a stable differentiation of tiller and stem vascular bundle, ensuring the stable number of panicles and neck diameter; there was not significant differences in the number of big and small vascular bundles of panicle necks and penultimate internodes in a stem, the area of big vascular bundles of penultimate internodes in a stem and in a plant, and number of stems and branches. Under the condition of reducing nitrogen fertilizer, it is possible to achieve the goal of reducing nitrogen without reducing yield by selecting rice varieties with developed vascular bundles in stems and stable panicle numbers and panicle necks.

Keywords: nitrogen reduction; stem vascular bundles traits; panicle traits; yield

中国农田化肥投入量大, 化肥使用以氮肥为主, 我国的氮肥施用量至 2018 年已达到 2065.4 万吨(国家统计局 2019)。由于化肥的过量使用, 化肥面源污染环境风险增加^[1]。相关研究表明, 氮肥减施对提高氮肥利用率和减少农田温室气体排放有重要作用^[2-4]。氮肥对水稻茎秆维管束的生长发育和产量形成有重要影响^[5-11]。水稻光合产物、矿物质和水主要通过维管束系统运输到水稻植株各个部位^[12], 茎秆维管束性状与穗部性状和产量形成关系密切^[13-21]。研究减氮后, 水稻茎秆维管束、穗部和产量性状的变化规律及其相互关系, 对低投入下获得水稻高产稳产有重要意义。在辽宁稻区, 以主栽的直立穗型高产粳稻品种与日本引进的弯曲穗型优质米品种杂交创制高产优质相结合的育种新材料是当地育种者广泛采用的一种主要育种方法。本试验以辽宁高产直立穗型品种辽粳 5 号和日本优质弯曲穗型品种秋田小町杂交后构建的重组自交系为试材, 调查 2 种施肥模式(高氮肥与低氮肥)下中日水

稻品种杂交后代茎秆维管束、穗部和产量性状的变化, 研究减氮对三者关系及对水稻“库-流”关系的影响, 分析不同减产类型株系在 2 种施肥模式下穗部性状和茎秆维管束性状的特点, 探究减氮条件下维持产量稳定的可能途径。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以辽粳 5 号和秋田小町杂交, F₂ 开始采用单粒传法构建的 F₁₁ 代 RIL 群体为试材, 共 200 个株系。

试验材料于 2018 年种植于沈阳农业大学水稻研究所试验田。4 月 13 日播种, 5 月 20 日插秧, 10 月 5 日收获。大田试验分 2 个区, 每个区种植相同的 200 个 RIL 群体株系, 每个株系种植 3 行, 每行 10 穴, 单本插, 株距 13.3 cm, 行距 30.0 cm。分别采用高氮肥和低氮肥 2 种施肥模式, 其他田间管理措施同当地生产田一致。施肥模式如表 1。

表 1 供试材料的施肥处理
Table 1 Two nitrogen patterns (kg hm⁻²)

施肥模式 Fertilizer pattern	基肥 Basal fertilizer			促蘖肥 Topdressing for tillering	保蘖肥 Fertilizer for tiller growth	穗肥 Panicle fertilizer		粒肥 Grain fertilizer
	尿素 Urea	磷酸二铵 DAP	氯化钾 KCl	尿素 Urea	尿素 Urea	尿素 Urea	氯化钾 KCl	尿素 Urea
高氮区 HNP	150	150	112.5	150	75	90	75	0
低氮区 LNP	0	10	112.5	75	0	45	75	18

施肥日期: 基肥 5/15, 促蘖肥 5/28, 保蘖肥 6/20, 穗肥 7/12, 粒肥 8/5。高氮区: 折合纯氮 240 kg hm⁻², 纯磷 69 kg hm⁻², 纯钾 112.5 kg hm⁻²。低氮区: 折合纯氮 90 kg hm⁻², 纯磷 69 kg hm⁻², 纯钾 112.5 kg hm⁻²。
Fertilizer time: basal fertilizer on May 15, topdressing for tillering on May 28, fertilizer for tiller growth on June 20, panicle fertilizer on July 12, grain fertilizer on August 5. High nitrogen pattern: equivalent to 240 kg hm⁻² of pure nitrogen, 69 kg hm⁻² of pure phosphorus, 112.5 kg hm⁻² of pure potassium. Low nitrogen pattern: equivalent to 90 kg hm⁻² of pure nitrogen, 69 kg hm⁻² of pure phosphorus, 112.5 kg hm⁻² of pure potassium. HNP: high nitrogen pattern; LNP: low nitrogen pattern.

1.2 试验方法

在齐穗期每个株系剪取 3 株长势一致的单茎, 取穗颈节底部处和倒二节底部, 徒手切片, 用 1%浓度番红染液对切片染色, 在德国卡尔蔡司公司生产的AxioZoomv16型号的大视野立体变倍显微镜下, 计数各材料单茎穗颈

节大维管束个数(PN LVBV of a stem)和单茎穗颈节小维管束个数(PN SVBN of a stem), 单茎倒二节大维管束个数(SI LVBV of a stem)和单茎倒二节小维管束个数(SI SVBV of a stem), 并测量计算单茎穗颈节大维管束韧皮部面积(PN LVPA of a stem)、单茎穗颈节大维管束木质部面积(PN

LVXA of a Stem)、单茎穗颈节大维管束面积(PN LVA of a stem)、单茎倒二节大维管束韧皮部面积(SI LVPA of a stem)、单茎倒二节大维管束木质部面积(SI LVXA of a stem)、单茎倒二节大维管束面积(SI LVA of a stem), 并分别计算单株大维管束面积(单茎大维管束的总面积 $\times$ 单株穗数)单株大维管束木质部面积(单茎大维管束木质部面积 $\times$ 单株穗数)、单株大维管束韧皮部面积(单茎大维管束韧皮部面积 $\times$ 单株穗数)。

在水稻成熟期, 每个株系选取 5 穴的全部穗, 风干后留室内考种, 剩余材料按小区全部收获, 脱粒测产。考种方法: 调查每个株系所取 5 穴的所有穗的一次枝梗数, 按众数取其中 10 穗, 分别测量每穴穗数、穗长、穗颈粗、一次和二次枝梗数、一次和二次枝梗实粒数和秕粒数, 分别计算一次和二次枝梗结实率、总体结实率、着粒密度、

单穗重、每穗粒数和千粒重。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 和 DPS12.5 数据处理系统进行数据的统计和分析, 用 Microsoft Excel 2010 作图。

2 结果与分析

2.1 RIL 群体茎秆维管束性状的次数分布图

由图 1 可以看出, RIL 群体水稻茎秆维管束各性状的数值均呈连续分布, 且接近正态分布。高、低氮模式下, RIL 群体的茎秆维管束性状表现出单峰或双峰分布, 高氮区的单茎穗颈节、倒二节小维管束个数和单株倒二节大维管束木质部面积的峰值高于低氮区, 高氮区单株倒二节大维管束面积的峰值小于低氮区, 其他茎秆维管束性状与高、低氮区峰值一致。

(图 1)

图 1 高、低氮模式下 RIL 群体的茎秆维管束性状的次数分布图

Fig. 1 Frequency distribution of stem vascular bundle traits of the RIL population under high and low nitrogen patterns

HNP: 高氮区; LNP: 低氮区; PN LVBN of a stem: 单茎穗颈节大维管束个数; PN SVBN of a stem: 单茎穗颈节小维管束个数; PN LVPA of a stem: 单茎穗颈节大维管束韧皮部面积; PN LVXA of a stem: 单茎穗颈节大维管束木质部面积; PN LVA of a stem: 单茎穗颈节大维管束面积; SI LVBN of a stem: 单茎倒二节大维管束个数; SI SVBN of a stem: 单茎倒二节小维管束个数; SI LVPA of a stem: 单茎倒二节大维管束韧皮部面积; SI LVXA of a stem: 单茎倒二节大维管束木质部面积; SI LVA of a stem: 单茎倒二节大维管束面积; PN LVPA of a plant: 单株穗颈节大维管束韧皮部面积; PN LVXA of a plant: 单株穗颈节大维管束木质部面积; PN LVA of a plant: 单株穗颈节大维管束面积; SI LVPA of a plant: 单株倒二节大维管束韧皮部面积; SI LVXA of a plant: 单株倒二节大维管束木质部面积; SI LVA of a plant: 单株倒二节大维管束面积。

HNP: high nitrogen pattern; LNP: low nitrogen pattern; PN LVBN of a stem: panicle neck large vascular bundles number of a stem; PN SVBN of a stem: panicle neck small vascular bundles number of a stem; PN LVPA of a stem: panicle neck large vascular bundles phloem area of a stem; PN LVXA of a stem: panicle neck large vascular bundles xylem area of a stem; PN LVA of a stem: panicle neck large vascular bundles area of a stem; SI LVBN of a stem: penultimate internode large vascular bundles number of a stem; SI SVBN of a stem: penultimate internode small vascular bundles number of a stem; SI LVPA of a stem: penultimate internode large vascular bundles phloem area of a stem; SI LVXA of a stem: penultimate internode large vascular bundles xylem area of a stem; SI LVA of a stem: penultimate internode large vascular bundles area of a stem; PN LVPA of a plant: panicle neck large vascular bundles phloem area of a plant; PN LVXA of a plant: panicle neck large vascular bundles xylem area of a plant; PN LVA of a plant: panicle neck large vascular bundles area of a plant; SI LVPA of a plant: penultimate internode large vascular bundles phloem area of a plant; SI LVXA of a plant: penultimate internode large vascular bundles xylem area of a plant; SI LVA of a plant: penultimate internode large vascular bundles area of a plant.

2.2 氮肥减施后 RIL 群体茎秆维管束性状的变化

表 2 显示, 氮肥减施后, RIL 群体水稻的单茎穗颈大维管束个数、穗颈小维管束个数、单茎倒二节大维管束个数和倒二节小维管束个数均极显著减少, 单茎穗颈节大维管束韧皮部面积显著增加, 单茎穗颈节大维管束面积极显著增加, 单茎倒二节大维管束木质部面积显著降低, 单茎倒二节大维管束面积显著增加; 单株倒二节与穗颈节大维管束韧皮部面积、木质部面积和维管束面积都极显著减少。

表 2 氮肥减施后 RIL 群体茎秆维管束性状的变化

Table 2 Variation of stem vascular bundle traits of the RIL population under high and low nitrogen patterns

性状 Trait	高氮区 HNP	低氮区 LNP
单茎穗颈节大维管束个数 PN LVBN of a stem	12.36±0.08	11.97±0.08**
单茎穗颈节小维管束个数 PN SVBN of a stem	20.45±0.20	19.89±0.17**
单茎穗颈节大维管束韧皮部面积 PN LVPA of a stem ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	3.22±0.05	3.35±0.05*
单茎穗颈节大维管束木质部面积 PN LVXA of a stem ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	5.08±0.08	5.03±0.08
单茎穗颈节大维管束面积 PN LVA of a stem ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	14.30±0.22	14.96±0.20**
单茎倒二节大维管束个数 SI LVBN of a stem	31.17±0.12	30.67±0.13**
单茎倒二节小维管束个数 SI SVBN of a stem	27.76±0.11	27.04±0.12**
单茎倒二节大维管束韧皮部面积 SI LVPA of a stem ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	6.16±0.09	6.15±0.10
单茎倒二节大维管束木质部面积 SI LVXA of a stem ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	12.54±0.13	12.12±0.14*
单茎倒二节大维管束面积 SI LVA of a stem ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	30.97±0.31	31.93±0.33**
单株倒二节韧皮部面积 SI LVPA of a plant ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	82.13±1.95	62.74±1.23**
单株倒二节木质部面积 SI LVXA of a plant ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	167.18±3.68	124.72±2.43**
单株倒二节维管束面积 SI LVA of a plant ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	415.14±9.66	328.50±6.12**
单株穗颈节韧皮部面积 PN LVPA of a plant ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	43.25±1.17	34.39±0.75**
单株穗颈节木质部面积 PN LVXA of a plant ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	68.01±1.86	51.84±1.15**
单株穗颈节维管束面积 PN LVA of a plant ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	192.52±5.29	153.89±3.20**

缩写同图 1。*表示 0.05 水平上差异显著; **表示 0.01 水平上差异显著。

Abbreviations are the same as those given in Fig. 1. * and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表 3 氮肥减施后 RIL 群体穗部性状的变化

Table 3 Variation of panicle traits of the RIL population under high and low nitrogen patterns

性状 Trait	高氮区 HNP	低氮区 LNP
穗长 PL (cm)	20.67±0.18	20.71±0.19
穗颈粗 PND (mm)	1.24±0.01	1.31±0.01
一次枝梗数 NPRB	11.75±0.08	11.29±0.09**
二次枝梗数 NSRB	25.93±0.33	26.52±0.33
一次枝梗结实率 SSRPB (%)	94.01±0.28	95.89±0.13**
二次枝梗结实率 SSRSRB (%)	77.21±0.88	86.99±0.55**
着粒密度 GD (kernel 10 cm^{-1})	69.34±0.98	68.22±1.03
单穗重 PPW (g)	3.43±0.03	3.52±0.03*

*表示 0.05 水平上差异显著; **表示 0.01 水平上差异显著。

PL: panicle length; PND: panicle neck diameter; NPRB: number of primary rachis branches; NSRB: number of secondary rachis branches; SSRPB: seed setting rate of primary rachis branches; SSRSRB: seed setting rate of secondary rachis branches; GD: grains density; PPW: per panicle weight; HNP: high nitrogen pattern; LNP: low nitrogen pattern. * and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

著减少。

2.3 氮肥减施后 RIL 群体穗部性状的变化

表 3 显示, 氮肥减施后, 水稻一次枝梗数极显著减少, 一次枝梗结实率与二次枝梗结实率均极显著增加, 单穗重显著增加。

2.4 氮肥减施后 RIL 群体产量性状的变化

表 4 显示, 氮肥减施后, 水稻穗数极显著减少, 结实率与千粒重均极显著增加, 产量极显著降低。

表 4 氮肥减施后 RIL 群体产量性状的变化

Table 4 Variation of yield traits of the RIL population under high and low nitrogen patterns

性状 Trait	高氮区 HNP	低氮区 LNP
穗数 Panicle number	13.64±0.30	10.43±0.18**
每穗粒数 Grains number per panicle	139.45±1.36	136.71±1.39
结实率 Seed setting rate (%)	83.76±0.54	89.52±0.34**
千粒重 1000-grain weight (g)	23.69±0.15	24.90±0.14**
产量 Yield (kg hm^{-2})	7966.92±186.41	6672.09±112.85**

*表示 0.05 水平上差异显著; **表示 0.01 水平上差异显著。

* and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively; HNP: high nitrogen pattern; LNP: low nitrogen pattern.

2.5 RIL 群体茎秆维管束性状与穗部性状的关系

表 5 显示, 2 种施肥模式下, RIL 群体穗颈粗、一次枝梗数、二次枝梗数、着粒密度和单穗重和单茎维管束性状大多呈显著或极显著正相关。

2.6 RIL 群体茎秆维管束性状与产量性状的关系

表 6 显示, 2 种施肥模式下 RIL 群体穗数与单茎倒二

表 5 高、低氮模式下 RIL 群体茎秆维管束性状与穗部性状的关系
Table 5 Relationship between stem vascular bundle traits and panicle traits of the RIL population under high and low nitrogen patterns

性状 Trait	施肥模式 FP	穗长 PL	穗颈粗 ND	一次枝梗数 NPRB	二次枝梗数 NSRB	一次枝梗 结实率 SSRPRB	二次枝梗 结实率 SSRSRB	着粒密度 GD	单穗重 PEW
单茎穗颈节大维管束个数 PN LVBN of a stem	高氮区 HNP	-0.034	0.189**	0.275**	0.266**	-0.005	-0.042	0.255**	0.319**
	低氮区 LNP	0.074	0.239**	0.375**	0.379**	-0.106	-0.075	0.223**	0.406**
单茎穗颈节小维管束个数 PN SVBN of a stem	高氮区 HNP	-0.132	0.212**	0.238**	0.310**	-0.048	-0.091	0.321**	0.245**
	低氮区 LNP	-0.086	0.167*	0.185**	0.395**	-0.127	-0.043	0.310**	0.257**
单茎穗颈节大维管束韧皮部面积 PN LVPA of a stem	高氮区 HNP	0.024	0.160*	0.215**	0.249**	0.025	-0.011	0.173*	0.311**
	低氮区 LNP	-0.076	0.308**	0.368**	0.262**	-0.003	0.019	0.201**	0.334**
单茎穗颈节大维管束木质部面积 PN LVXA of a stem	高氮区 HNP	-0.032	0.137	0.115	0.204**	0.039	-0.018	0.166*	0.214**
	低氮区 LNP	-0.139	0.260**	0.432**	0.309**	-0.064	-0.077	0.293**	0.354**
单茎穗颈节大维管束面积 PN LVA of a stem	高氮区 HNP	-0.050	0.165*	0.144*	0.189**	0.062	-0.027	0.170*	0.220**
	低氮区 LNP	-0.067	0.272**	0.360**	0.324**	-0.012	-0.011	0.237**	0.356**
单茎倒二节大维管束个数 SI LVBN of a stem	高氮区 HNP	-0.131	0.143*	0.326**	0.204**	-0.122	-0.231**	0.295**	0.185**
	低氮区 LNP	-0.119	0.250**	0.435**	0.339**	-0.156*	-0.129	0.345**	0.339**
单茎倒二节小维管束个数 SI SVBN of a stem	高氮区 HNP	-0.096	0.160*	0.272**	0.200**	0.049	-0.06	0.259**	0.249**
	低氮区 LNP	0.001	0.263**	0.306**	0.322**	-0.103	-0.011	0.217**	0.304**
单茎倒二节大维管束韧皮部面积 SI LVPA of a stem	高氮区 HNP	0.006	0.194**	0.216**	0.174*	0.020	0.098	0.138	0.271**
	低氮区 LNP	-0.068	0.226**	0.360**	0.264**	0.088	0.076	0.203**	0.357**
单茎倒二节大维管束木质部面积 SI LVXA of a stem	高氮区 HNP	0.069	0.174*	0.136	0.134	-0.007	-0.045	0.052	0.172*
	低氮区 LNP	-0.121	0.246**	0.375**	0.321**	-0.092	-0.083	0.287**	0.320**
单茎倒二节大维管束面积 SI LVA of a stem	高氮区 HNP	0.027	0.246**	0.173*	0.116	0.039	-0.021	0.082	0.190**
	低氮区 LNP	-0.026	0.299**	0.344**	0.269**	0.008	0.035	0.179*	0.325**

缩写同图 1 与表 3。*表示 0.05 水平上差异显著; **表示 0.01 水平上差异显著。
Abbreviations are the same as those given in Fig. 1 and Table 3. * and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

节维管束性状大多有显著或极显著负相关关系, 在低氮区与单茎穗颈节大维管束韧皮部面积和维管束面积有显著负相关; 在 2 种施肥模式下每穗粒数与单茎维管束性状大多有极显著正相关关系; 结实率与单茎倒二节大维管束个数在高氮区呈极显著负相关, 在低氮区呈显著负相关; 千粒重与单茎倒二节大维管束韧皮部面积在 2 种施肥模式下都呈显著正相关, 与低氮区单茎穗颈节小维管束个数有显著负相关, 与低氮区单茎穗颈节大维管束韧皮部面积有显著正相关; 高氮区产量与单茎倒二节大维管束木质部面积有显著负相关。低氮区结实率和千粒重与单株维管束面积性状大多呈显著或极显著负相关; 2 种施肥模式下单株维管束面积性状与穗数和产量都有极显著正相关。

2.7 氮肥减施后 RIL 群体不同产量变化类型株系间的性状差异

以氮肥减施后减产 10% 以上的株系, 划分为大幅减产类型, 有 114 个株系(表 7); 减产 10% 以内的株系, 划分

为小幅减产类型, 有 9 个株系(表 8); 产量不减少的株系, 划分为不减产类型, 有 77 个株系(表 9)。

表 7 显示, 氮肥减施后, 大幅减产类型株系的单茎穗颈节大, 小维管束个数、单茎倒二节大和小维管束个数极显著减小, 单茎倒二节大维管束面积显著增加, 单株茎秆大维管束面积显著或极显著减少; 不减产类型的株系, 单茎穗颈节大维管束韧皮部面积和大维管束面积显著增加, 单株穗颈节大维管束面积显著或极显著增加。

表 8 显示, 氮肥减施后, 大幅减产类型株系的穗颈粗、一次枝梗结实率和二次枝梗结实率极显著增加, 一次枝梗数极显著下降; 小幅减产类型的株系, 二次枝梗结实率显著增加; 不减产类型的株系穗颈粗显著增加, 二次枝梗数、一次和二次枝梗结实率和单穗重均极显著增加。

表 9 显示, 氮肥减施后, 大幅减产类型株系的结实率和千粒重极显著增加, 穗数、每穗粒数和产量极显著下降; 小幅减产类型的株系结实率显著增加, 产量极显著减小; 不减产类型的株系穗数、结实率、千粒重和产量均极显著增加。

表 6 高、低氮模式下 RIL 群体茎秆维管束性状与产量性状的关系
Table 6 Relationship between stem vascular bundle traits and yield traits of the RIL population under high and low nitrogen patterns

性状 Trait	施肥模式 FP	穗数 PN	每穗粒数 GNPS	结实率 SSR	千粒重 TGW	产量 Yield
单茎穗颈节大维管束个数 PN LVBN of a stem	高氮区 HNP	-0.091	0.322**	-0.051	-0.012	0.019
	低氮区 LNP	-0.104	0.421**	-0.105	-0.020	0.106
单茎穗颈节小维管束个数 PN SVBN of a stem	高氮区 HNP	0.005	0.316**	-0.107	-0.112	0.072
	低氮区 LNP	-0.070	0.368**	-0.102	-0.176*	0.057
单茎穗颈节大维管束韧皮部面积 PN LVPA of a stem	高氮区 HNP	-0.055	0.263**	-0.023	0.075	0.067
	低氮区 LNP	-0.170*	0.257**	0.002	0.149*	0.020
单茎穗颈节大维管束木质部面积 PN LVXA of a stem	高氮区 HNP	-0.098	0.201**	-0.024	0.021	-0.006
	低氮区 LNP	-0.102	0.330**	-0.096	0.048	0.068
单茎穗颈节大维管束面积 PN LVA of a stem	高氮区 HNP	-0.033	0.193**	-0.025	0.046	0.052
	低氮区 LNP	-0.144*	0.322**	-0.034	0.067	0.044
单茎倒二节大维管束个数 SI LVBN of a stem	高氮区 HNP	-0.087	0.270**	-0.235**	-0.136	-0.088
	低氮区 LNP	-0.170*	0.397**	-0.159*	-0.104	-0.014
单茎倒二节小维管束个数 SI SVBN of a stem	高氮区 HNP	-0.065	0.259**	-0.046	-0.025	0.016
	低氮区 LNP	-0.176*	0.323**	-0.054	-0.028	-0.010
单茎倒二节大维管束韧皮部面积 SI LVPA of a stem	高氮区 HNP	-0.186**	0.184**	0.086	0.142*	-0.030
	低氮区 LNP	-0.292**	0.265**	0.074	0.158*	-0.087
单茎倒二节大维管束木质部面积 SI LVXA of a stem	高氮区 HNP	-0.253**	0.114	-0.052	0.090	-0.178*
	低氮区 LNP	-0.159*	0.327**	-0.107	-0.012	-0.013
单茎倒二节大维管束面积 SI LVA of a stem	高氮区 HNP	-0.154*	0.134	-0.008	0.088	-0.068
	低氮区 LNP	-0.189**	0.274**	0.021	0.089	-0.015
单株倒二节大维管束韧皮部面积 SI LVPA of a plant	高氮区 HNP	0.816**	0.054	-0.006	-0.022	0.794**
	低氮区 LNP	0.640**	0.097	-0.097	-0.149*	0.647**
单株倒二节大维管束木质部面积 SI LVXA of a plant	高氮区 HNP	0.870**	-0.007	-0.092	-0.075	0.776**
	低氮区 LNP	0.806**	0.076	-0.216**	-0.277**	0.732**
单株倒二节大维管束面积 SI LVA of a plant	高氮区 HNP	0.900**	-0.002	-0.069	-0.084	0.808**
	低氮区 LNP	0.838**	0.028	-0.153*	-0.241**	0.764**
单株穗颈节大维管束韧皮部面积 PN LVPA of a plant	高氮区 HNP	0.764**	0.107	-0.069	-0.054	0.734**
	低氮区 LNP	0.671**	0.086	-0.135	-0.131	0.672**
单株穗颈节大维管束木质部面积 SI LVXA of a plant	高氮区 HNP	0.738**	0.072	-0.063	-0.090	0.691**
	低氮区 LNP	0.725**	0.120	-0.205**	-0.216**	0.697**
单株穗颈节大维管束面积 SI LVA of a plant	高氮区 HNP	0.790**	0.059	-0.069	-0.078	0.733**
	低氮区 LNP	0.744**	0.108	-0.173*	-0.219**	0.719**

缩写同图 1 与表 4。*表示 0.05 水平上差异显著; **表示 0.01 水平上差异显著。
Abbreviations are the same as those given in Fig. 1 and Table 4. * and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表 7 氮肥减施后 RIL 群体不同产量变化类型株系茎秆维管束性状的变化
Table 7 Stem vascular bundle traits variation of the RIL population of different yield change under high and low nitrogen patterns

性状 Trait	大幅减产类型 Significant reduction yield		小幅减产类型 Slight reduction yield		不减产类型 No reduction yield	
	高氮区 HNP	低氮区 LNP	高氮区 HNP	低氮区 LNP	高氮区 HNP	低氮区 LNP
单茎穗颈节大维管束个数 PN LVBN of a stem	12.45	11.87**	12.46	12.15	12.22	12.11
单茎穗颈节小维管束个数 PN SVBN of a stem	20.63	19.87**	20.93	20.67	20.13	19.83
单茎穗颈节大维管束韧皮部面积 PN LVPA of a stem ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	3.32	3.40	3.00	3.07	3.10	3.31*

(续表 7)

性状 Trait	大幅减产类型		小幅减产类型		不减产类型	
	Significant reduction yield		Slight reduction yield		No reduction yield	
	高氮区 HNP	低氮区 LNP	高氮区 HNP	低氮区 LNP	高氮区 HNP	低氮区 LNP
单茎穗颈节大维管束木质部面积 PN LVXA of a stem ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	5.16	5.05	4.97	5.35	4.96	4.97
单茎穗颈节大维管束面积 PN LVA of a stem ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	14.68	15.12	13.86	15.04	13.78	14.71*
单茎倒二节大维管束个数 SI LVBV of a stem	31.23	30.53**	31.31	31.37	31.06	30.80
单茎倒二节小维管束个数 SI SVBV of a stem	27.87	26.92**	27.61	27.93	27.62	27.11
单茎倒二节大维管束韧皮部面积 SI LVPA of a stem ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	6.16	6.29	6.16	5.54	6.16	6.02
单茎倒二节大维管束木质部面积 SI LVXA of a stem ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	12.44	12.06	12.43	12.33	12.70	12.18
单茎倒二节大维管束面积 SI LVA of a stem ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	30.97	32.23*	30.65	31.68	31.00	31.51
单株倒二节大维管束韧皮部面积 SI LVPA of a plant ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	95.62	59.38**	68.03	58.39	63.82	68.21
单株倒二节大维管束木质部面积 SI LVXA of a plant ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	193.01	114.49*	136.59	129.40	132.51	139.33
单株倒二节大维管束面积 SI LVA of a plant ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	484.04	306.25**	339.32	332.91	322.00	360.92
单株穗颈节大维管束韧皮部面积 PN LVPA of a plant ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	51.44	32.24**	33.23	32.39	32.30	37.80**
单株穗颈节大维管束木质部面积 PN LVXA of a plant ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	80.08	48.10**	55.11	56.47	51.66	56.84*
单株穗颈节大维管束面积 PN LVA of a plant ($\times 10^{-4} \mu\text{m}^2$)	228.97	144.04**	153.65	158.10	143.10	167.98**

缩写同图 1。*表示 0.05 水平上差异显著; **表示 0.01 水平上差异显著。

Abbreviations are the same as those given in Fig. 1. * and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表 8 氮肥减施后 RIL 群体不同产量变化类型株系穗部性状的变化

Table 8 Panicle traits variation of the RIL population of different yield change under high and low nitrogen patterns

性状 Trait	大幅减产类型		小幅减产类型		不减产类型	
	Significant reduction yield		Slight reduction yield		No reduction yield	
	高氮区 HNP	低氮区 LNP	高氮区 HNP	低氮区 LNP	高氮区 HNP	低氮区 LNP
穗长 PL (cm)	21.25	20.92	21.24	20.54	20.13	20.78
穗颈粗 ND (mm)	1.25	1.33**	1.21	1.30	1.24	1.29*
一次枝梗数 NPRB	11.93	11.29**	11.47	11.24	11.44	11.43
二次枝梗数 NSRB	26.52	26.52	26.98	25.71	25.41	27.40**
一次枝梗结实率 SSRPRB (%)	94.82	96.25**	93.93	95.39	93.42	95.79**
二次枝梗结实率 SSRSRB (%)	79.25	86.95**	77.70	85.13*	73.58	86.68**
着粒密度 GD (kernel 10 cm^{-1})	69.00	67.16	68.45	67.43	70.41	70.75
单穗重 PEW (g)	3.50	3.48	3.52	3.29	3.30	3.60**

缩写同表 3。*表示 0.05 水平上差异显著; **表示 0.01 水平上差异显著。

Abbreviations are the same as those given in Table 3. * and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表 9 氮肥减施后 RIL 群体不同产量变化类型株系产量性状的变化

Table 9 Yield traits variation of the RIL population of different yield change under high and low nitrogen patterns

性状 Trait	大幅减产类型		小幅减产类型		不减产类型	
	Yield substantial reduction		Yield slight reduction		Yield no reduction	
	高氮区 HNP	低氮区 LNP	高氮区 HNP	低氮区 LNP	高氮区 HNP	低氮区 LNP
穗数 PN	15.72	9.58**	11.00	10.44	10.51	11.49**
每穗粒数 GNPS	144.36	137.96**	144.78	136.27	138.76	143.20
结实率 SSR (%)	86.53	91.12**	85.07	89.71*	82.83	90.76**
千粒重 TGW (g)	24.33	25.32**	24.45	24.21	23.95	25.25**
产量 Yield (kg hm^{-2})	637.27	405.51**	440.21	418.94**	384.61	506.01**

缩写同表 4。*表示 0.05 水平上差异显著; **表示 0.01 水平上差异显著。

Abbreviations are the same as those given in Table 4. * and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

3 讨论

水稻植株群体结构和籽粒产量形成与氮素含量密切相关。水稻生长过程中,大部分氮素都积累在叶片中,在一定的含氮量水平下,水稻叶片含氮量越高,叶片的光合生产能力越强^[22]。增加施氮量能增加有效穗数、每穗粒数,但也降低结实率^[23-24]。杨守仁等^[25]认为产量构成因素可以简化为穗数乘穗重(指平均每穗粒重),用分蘖力来协调穗多与穗大的矛盾是有效的。

本研究表明,氮肥减施后,RIL群体水稻的单茎维管束个数减少,大维管束面积增加,说明减氮可以增加单个大维管束面积,但是引入穗数性状后,减氮后水稻的单株维管束面积显著降低。在穗部和产量性状上,减少氮肥会使水稻一次枝梗数、穗数、产量减少,增加一次枝梗、二次枝梗结实率、单穗重、结实率和千粒重。结合穗颈维管束越多一次枝梗数和二次枝梗数越多,可以推断,减氮会使水稻分蘖减少,茎秆维管束分化减少,因此穗数、茎秆维管束个数、一次和二次枝梗数减少,穗数的减少使整体的“流”和“库”都减少,单茎的“流”增加,不能弥补穗数减少的损失,所以,单穗的结实率、千粒重和单穗重有所增加,但整体产量显著减少。进一步分析,减氮条件下水稻分蘖、茎秆维管束分化和库容量的关系,对研究水稻生长发育过程中“源库流”的变化和关系有重要意义。

相关分析得出,茎秆维管束个数与枝梗数、穗粒数关系密切,茎秆维管束面积与籽粒充实度密切相关。单茎维管束个数越多,穗颈粗越粗,枝梗数和穗粒数越多;单茎大维管束韧皮部面积越大,千粒重越重;单茎大维管束面积越大,穗数越少,与前人^[26-28]研究结果基本一致。在低氮区,结实率和千粒重与单株维管束面积性状大多呈显著或极显著负相关,但高氮区没有显著相关,可能是高氮区单株维管束面积足够大,“流”的负荷小,减氮后,维管束总体面积减小,结实率和千粒重增加,籽粒足够充实,即使“流”增加,也不能继续提高籽粒充实度,此时限制产量增加的是“库”容。

从茎秆维管束性状上分析,氮肥减施后,单株茎秆大维管束面积的减少可能是产量减少的原因,单茎穗颈节和倒二节大、小维管束个数稳定,单茎和单株穗颈节大维管束面积的增加,可能是产量不减的原因。从穗部性状上分析,氮肥减施后,一次枝梗数的减少可能是减产的原因,二次枝梗数增加可能是不减产的原因。从产量性状上分析,氮肥减施后,穗数和每穗粒数的减少是产量减少的直接原因,穗数的增加可能是不减产的原因。实际生产中,影响产量的因素错综复杂,互相制约,单一性状的变化不能决定产量。

References

[1] 刘钦普. 中国化肥投入区域差异及环境风险分析. 中国农业科学, 2014, 47: 3596–3605.

Liu Q P. Distribution of fertilizer application and its environmental risk in different provinces of China. *Sci Agric Sin*, 2014, 47: 3596–3605 (in Chinese with English abstract).

[2] 朱相成. 增密减氮对东北水稻产量和氮肥效率及温室气体排放的影响. 中国农业科学院研究生院博士学位论文, 北京, 2015.

Zhu X C. Effects of Dense Planting with Less Basal Nitrogen on Rice Yield, Nitrogen Use Efficiency and Greenhouse Gas Emissions in Northeast China. PhD Dissertation of Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing, China, 2015 (in Chinese with English abstract).

[3] 侯红乾, 冀建华, 刘光荣, 刘益仁, 刘秀梅, 程正新, 杨俊诚, 文石林. 南方红壤区稻-稻连作体系下氮肥减施模式研究. 中国水稻科学, 2012, 26: 555–562.

Hou H Q, Ji J H, Liu R G, Liu Y R, Liu X M, Cheng Z X, Yang J C, Wen S L. On the mode of nitrogen-reduction in double-rice cropping region in red soil area of South China. *Chin J Rice Sci*, 2012, 26: 555–562 (in Chinese with English abstract).

[4] 尹彩侠, 李前, 孔丽丽, 秦裕波, 王蒙, 于雷, 刘春光, 王立春, 侯云鹏. 控释氮肥减施对春玉米产量、氮素吸收及转运的影响. 中国农业科学, 2018, 51: 3941–3950.

Yin C X, Li Q, Kong L L, Qin Y B, Wang M, Yu L, Liu C G, Wang L C, Hou Y B. Effect of reduced controlled-release nitrogen fertilizer application on yield, nitrogen absorption and transportation of spring maize. *Sci Agric Sin*, 2018, 51: 3941–3950 (in Chinese with English abstract).

[5] 张俊, 李刚华, 宋云攀, 张巫军, 杨从党, 王绍华, 丁艳锋. 超级稻 Y 两优 2 号在两生态区的抗倒性分析. 作物学报, 2013, 39: 682–692.

Zhang J, Li G H, Song Y P, Zhang W J, Yang C D, Wang S H, Ding Y F. Lodging resistance of super-hybrid rice Y Liangyou 2 in two ecological regions. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 682–692 (in Chinese with English abstract).

[6] 李国辉, 张国, 崔克辉. 水稻穗颈维管束特征及其与茎鞘同化物转运和产量的关系. 植物生理学报, 2019, 55: 329–341.

Li G H, Zhang G, Cui K H. Characteristics of vascular bundles of peduncle and its relationship with translocation of stem assimilates and yield in rice. *Plant Physiol J*, 2019, 55: 329–341 (in Chinese with English abstract).

[7] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 杨建昌, 王光火, 邹应斌, 张福锁, 朱庆森, Roland B, Christian W. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略. 中国农业科学, 2002, 35: 1095–1103.

Peng S B, Huang J L, Zhong X H, Yang J C, Wang G H, Zou Y B, Zhang F S, Zhu Q S, Roland B, Christian W. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Sci Agric Sin*, 2002, 35: 1095–1103 (in Chinese with English abstract).

[8] 张刚, 王德建, 俞元春, 王灿, 庄锦贵. 秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响. 植物营养与肥料学报, 2016, 22: 877–885.

Zhang G, Wang D J, Yu Y C, Wang C, Zhuang J G. Effects of straw incorporation plus nitrogen fertilizer on rice yield, nitrogen use efficiency and nitrogen loss. *J Plant Nutr Fert*, 2016, 22: 877–885 (in Chinese with English abstract).

[9] 从夕汉, 施伏芝, 阮新民, 罗玉祥, 马廷臣, 罗志祥. 氮肥水平对不同基因型水稻氮素利用率、产量和品质的影响. 应用生

- 态学报, 2017, 28: 1219–1226.
- Cong X H, Shi F Z, Ruan X M, Luo Y X, Ma T C, Luo Z X. Effects of nitrogen fertilizer application rate on nitrogen use efficiency and grain yield and quality of different rice varieties. *Chin J Appl Ecol*, 2017, 28: 1219–1226 (in Chinese with English abstract).
- [10] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China. *Plant Prod Sci*, 2009, 12: 3–8.
- [11] 陈书强. 施氮量和比例对不同类型水稻品种穗部性状和产量的影响. 黑龙江农业科学, 2019, (6): 40–46.
- Chen S Q. Effect of amount and proportion of nitrogen application on panicle traits and yield of different types of rice. *Heilongjiang Agric Sci*, 2019, (6): 40–46 (in Chinese with English abstract).
- [12] Jan D, Annakaisa E, Ykä H. Hormone interactions during vascular development. *Plant Mol Biol*, 2009, 69: 347–360.
- [13] 凌启鸿, 蔡建中, 苏祖芳. 水稻茎秆维管束数与穗部性状关系及其应用的研究. 江苏农学院学报(农业与生命科学版), 1982, 3(3): 7–16.
- Ling Q H, Cai J Z, Su Z F. The relationship between the number of macro-vascular bundles in culm and the panicle characters in rice plant and its application. *J Yangzhou Univ (Agric Life Sci Edn)*, 1982, 3(3): 7–16 (in Chinese with English abstract).
- [14] 黄璜. 水稻穗颈节间组织与颖花数的关系. 作物学报, 1998, 24: 193–200.
- Huang H. Relation between the tissue of the highest internode and the number of spikelets. *Acta Agron Sin*, 1998, 24: 193–200 (in Chinese with English abstract).
- [15] 徐正进, 陈温福, 曹洪任, 张龙步, 杨守仁. 水稻穗颈维管束数与穗部性状关系的研究. 作物学报, 1998, 24: 47–54.
- Xu Z J, Chen W F, Cao H R, Zhang L B, Yang S R. Relation between the characters of panicle and vascular bundle in neck-panicle of rice. *Acta Agron Sin*, 1998, 24: 47–54 (in Chinese with English abstract).
- [16] 徐海, 朱春杰, 郭艳华, 刘宏光, 王嘉宇, 杨莉, 杨乾华, 郑家奎, 徐正进, 陈温福. 生态环境对粳籼稻杂交后代穗部性状的影响及其与亚种特性的关系. 中国农业科学, 2009, 42: 1540–1549.
- Xu H, Zhu C J, Guo Y H, Liu H G, Wang J Y, Yang L, Yang Q H, Zheng J K, Xu Z J, Chen W F. Effect of ecological environments on panicle traits and its relationship with subspecies characteristics in filial generations of cross between *indica* and *japonica*. *Sci Agric Sin*, 2009, 42: 1540–1549 (in Chinese with English abstract).
- [17] 陈书强, 徐正进, 陈温福, 徐海, 刘宏光, 朱春杰, 王韵, 王嘉宇. 粳籼稻杂交后代维管束性状与穗部性状的关系. 华北农学报, 2007, 22(5): 8–14.
- Chen S Q, Xu Z J, Chen W F, Xu H, Liu H G, Zhu C J, Wang Y, Wang J Y. The relation between the characters of vascular bundle and panicle in the filial generation from *indica* and *japonica* rice. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2007, 22(5): 8–14 (in Chinese with English abstract).
- [18] 荆彦辉, 徐正进. 水稻维管束性状的研究进展. 沈阳农业大学学报, 2003, 34: 467–471.
- Jing Y H, Xu Z J. Research progress of rice vascular bundle characters. *J Shenyang Agric Univ*, 2003, 34: 467–471 (in Chinese with English abstract).
- [19] 李木英, 潘晓华, 石庆华. 两系杂交稻穗部解剖特征及其与结实关系的研究. 江西农业大学学报, 2000, 22: 147–151.
- Li M Y, Pan X H, Shi Q H. The anatomic characters of panicle and its relations to filled grain in two-line hybrid rice. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2000, 22: 147–151 (in Chinese with English abstract).
- [20] Ashraf M, Akbar M, Salim M. Genetic improvement in physiological traits of rice yield. In: Slafer G A ed. Genetic Improvement of Field Crops. New York: Marcel Dekker Incorporates, 1994. pp 413–455.
- [21] Pan J F, Cui K H, We D, Huang J L, Xiang J, Nie L X. Relationships of non-structural carbohydrates accumulation and translocation with yield formation in rice recombinant inbred lines under two nitrogen levels. *Physiol Plant*, 2011, 141: 321–331.
- [22] Sinclair T R, Horie T. Leaf nitrogen, photosynthesis and crop radiation use efficiency a review. *Crop Sci*, 1989, 29: 90–98.
- [23] 潘圣刚, 黄胜奇, 翟晶, 蔡明历, 曹凑贵, 展茗, 唐湘如. 氮肥用量与运筹对水稻氮素吸收转运及产量的影响. 土壤, 2012, 44: 23–29.
- Pan S G, Huang S Q, Zhai J, Cai M L, Cao C G, Zhan M, Tang X R. Effects of nitrogen rate and its basal to dressing ratio on uptake, translocation of nitrogen and yield in rice. *Soils*, 2012, 44: 23–29 (in Chinese with English abstract).
- [24] 周亮, 荣湘民, 谢桂先, 王心星, 谢勇. 不同氮肥施用对双季稻产量及氮肥利用率的影响. 土壤, 2014, 46: 971–975.
- Zhou L, Rong X M, Xie G X, Wang X X, Xie Y. Effects of different nitrogen fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency. *Soils*, 2014, 46: 971–975 (in Chinese with English abstract).
- [25] 杨守仁, 张龙步, 陈温福, 徐正进, 王进民. 水稻超高产育种的理论和方法. 中国水稻科学, 1996, 10: 115–120.
- Yang S R, Zhang L B, Chen W F, Xu Z J, Wang J M. Theories and methods of rice breeding for maximum yield. *Chin J Rice Sci*, 1996, 10: 115–120 (in Chinese with English abstract).
- [26] 荆彦辉, 付永彩, 孙传清, 张培江, 徐正进, 陈温福, 王象坤. 水稻穗颈维管束及产量相关性状的 QTL 分析. 中国农业大学学报, 2004, 9(5): 16–21.
- Jing Y H, Fu Y C, Sun C Q, Zhang P J, Xu Z J, Chen W F, Wang X K. Mapping QTLs for vascular bundle in peduncle and yield components of rice (*Oryza sativa* L.). *J China Agric Univ*, 2004, 9(5): 16–21 (in Chinese with English abstract).
- [27] 马均, 马文波, 周开达, 汪旭东, 田彦华, 明东风, 许凤英. 水稻不同穗型品种穗颈节间组织与籽粒充实特性的研究. 作物学报, 2002, 28: 215–220.
- Ma J, Ma W B, Zhou K D, Wang X D, Tian Y H, Ming D F, Xu F Y. The characteristics of the tissues of the first internode and their relations to the grain-filling for the different panicle types of rice. *Acta Agron Sin*, 2002, 28: 215–220 (in Chinese with English abstract).
- [28] 李金泉, 徐正进, 荆彦辉, 姜健, 陈温福. 水稻穗颈及第2节间维管束数的遗传分析. 华南农业大学学报, 2002, 23(3): 5–8.
- Li J Q, Xu Z J, Jing Y H, Jiang J, Chen W F. Genetic analysis of vascular bundle numbers in panicle base and the second internode in *Oryza sativa* L. *J South China Agric Univ*, 2002, 23(3): 5–8 (in Chinese with English abstract).