

水稻维管束的研究进展

李梦阳^{1,2}, 彭冠云^{2,*}, 邓彪², 孟桂元^{1,*}

¹湖南人文科技学院农业与生物技术学院, 湖南娄底417000; ²中国科学院上海应用物理研究所, 上海201204

摘要: 本文较为系统地介绍了水稻维管束植物学研究最新进展, 阐述了影响水稻维管束形成与生长的因子、维管束性状与产量的关系、以及维管束机械支撑作用与抗倒伏机制等方面的最新研究成果, 并展望水稻输导系统三维构造研究可能成为该领域研究新的内容, 能有助于更深入研究水稻“源”足“库”大和“流”畅机制。

关键词: 水稻; 维管束; 产量; 抗倒伏; 三维构造

世界上超过一半人口以大米为主食, 我国则为60%以上。中国既是世界粮食生产大国, 也是粮食消耗大国, 在有限的耕地要养活14亿人, 其单产的提高一直是一个重大课题。1956年洪春利和洪群英发现‘矮脚南特’, 我国开始矮化育种, 水稻单产翻倍; 1964年袁隆平发现雄性不育株, 1970年李必湖发现野败, 为三系育种提供了重要资源, 杂交水稻的成功进一步提高了水稻的单产。此后, 矮化的水稻生物产量限制了水稻单产的再一次提高, 研究者提出了新的水稻理想株型即半高秆株型(袁隆平2011)。提高了水稻生物产量之后, 水稻从矮化品种到现在的半高秆品种, 其产量在2014年试验田超级稻测产已超过1千公斤每亩, 由于超级稻的单产高, 有科学家预言其将成为主要栽培稻。适宜的穗数、较大的穗型、群体总颖花数适宜、较高的最大库容量、稳定的库、有效充实度等因子影响超级稻品种超高产产量的形成。但超级稻若要保持稳定的性状以及其推广面积的增加, 也存在许多亟待解决的课题。如目前的超级稻已经具有了“源”足“库”大的特点, 但仍然存在水稻灌浆不满、结实率不高的问题。“源”足“库”大“流”畅才能保证水稻结实率和收获指数, 相关报道表明亚种间杂交稻籽粒充实滞缓和干物质转化率低可能与输导组织不畅密切相关(陶澜等2004)。水稻光合产物的输出率与转化率和水稻维管束数呈正相关, 转化率与结实率和单个维管束筛管数也呈正相关(廖色梅2015)。做到“源”足“库”大和“流”畅是实现水稻高产的有效途径(杨守仁1987; 许晓明等1999)。维管束是“流”的通道, 研究维管束是研究“流”的重要手段。同时, 随着水稻株高的增加, 抗倒伏也尤为重要, 而这一重要性状无疑与植株体内维管束特征密切相关(袁隆平2015)。

1 水稻维管束的植物学特征

维管束在水稻的整个植株均有分布, 且不同部位的维管束性状不尽相同, 在根中, 维管束为约14条较小筛管环绕4~5条导管。在茎中, 大维管束约32条, 木质部发达; 且维管束分为两环, 内环和外环, 外环维管束基本分布于机械组织, 内环维管束较为发达。水稻的叶为主要光合部位, 运输养分和水分的维管束在叶片和叶鞘中分布细致, 大小维管束均有分布, 同时还形成了维管束鞘。水稻果实发育过程中维管束扮演非常重要的角色。单子叶颖果的营养物质主要贮藏在胚乳中, 营养物质到达胚乳主要通过颖果背部的维管束, 背部维管束由40条左右的筛管环绕约25条导管, 果皮背部维管束对籽粒灌浆影响很大(王敏2011)。

一直以来, 水稻维管束植物学性状的研究受到国内外许多专家学者的重视, 尤其是对穗颈维管束的研究, 穗颈维管束掌控着营养物质到达籽粒的通道, 直接影响最终产量。许明子等(2000)关于穗颈节间的维管束性状的研究结果表明, 6个不同水稻品种间维管束性状的差异较为明显; 在不同水稻品种间仅仅只有韧皮部维管束比和单个小维管束面积这两个性状和其他性状间没有相关性, 其余13个性状间均有显著相关性。研究者多使用徒手切片、石蜡切片法等方法研究维管束的结构和特点(王庭杰2015; 吴冬梅2015)。

2 影响水稻植株内维管束形成和分布的因素

2.1 水稻品种自身遗传因素

王锋尖和黄英金(2013)的研究表明不耐热水

收稿 2017-03-06 修定 2017-08-21

资助 国家自然科学基金(31300480和11405258)。

* 共同通讯作者(E-mail: pengguanyun@sinap.ac.cn; menggu-iyuan@126.com)。

稻品种叶片主脉维管束导管面积约为耐热品种的2.45倍, 韧皮部面积为1.58倍; 耐热水稻品种穗颈节间维管束的大小个数之比约为不耐热品种1.64倍。孙玉友(2012)的研究结果显示籼稻大维管束效率大于粳稻, 约为1.29倍; 籼稻穗颈节大小维管束比约为粳稻的1.18倍, 这也和国外研究成果一致(Fukuyama和Takayama 1995)。廖色梅(2015)的研究结果显示亚种间杂交组合大小维管束数目大于品种间杂交稻。综上所述, 在不同品种中维管束性状因为其各自遗传因素各异而有不同。

2.2 栽培管理因素

维管束性状的差异不仅取决于自身遗传因素, 同时也受环境的影响。水稻作为栽培作物, 生产活动对其各个生长性状的影响很大, 尤其是在栽培管理上。李伟娟等(2008)的研究表明本田的插秧密度对水稻大小维管束的影响非常明显, 稀植有助于水稻大、小维管束的数目均增加, 而小维管束相对更为敏感。对于超级稻, 稀植更有利于维管束的生长和发育, 能促进光合产物的运输, 提高作物产量。黄璜(1994)的研究表明各节间大维管束数目均受到播期的影响, 在一定时期内, 播期的延迟使得第一节间大维管束数目相对减少; 穗颈节间大维管束数在密植的情况下受影响, 比少苗稀植条件下要少; 就直播而言, 稀播情况下穗颈节间大维管束数目同样多于密播; 移栽和直播相比较, 直播的穗颈节间大维管束数较移栽少。目前由于农村劳动力减少等原因, 在许多地区直播更受欢迎, 但从水稻的生理特性考虑, 同等环境条件下移栽更有利于水稻生长和获得高产。

植物激素能刺激维管束的生长和分化, 水稻育种上常利用赤霉素(GA_3)解决包颈问题。陈书强(2016)的研究发现一定量的赤霉素能改善部分维管束性状, 在齐穗后25 d喷施 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的赤霉素会使得倒2节间小维管束数增加; 喷施 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的多效唑能使倒2节间大小维管束数均增加。

水稻所在的农田生态系统主要是人为干预以获得最大的经济产量, 当农田生态系统自身不足以提供其所需的营养物质, 施肥是高产的必要田间管理措施。施肥的多少影响产量的同时也影响水稻自身的生长发育。施肥量的改变影响维管束的生长发育。殷春渊(2007)的研究结果显示氮肥

施用量增加, 水稻穗颈节间单个大维管束面积增大。白羽(2012)的研究结果显示施氮量增加, 水稻维管束的面积及筛管的面积均增大, 且维管束的密度也增加。另外, 张俊(2014)的研究结果表明氮肥的使用量增加会使大小维管束数增加。

3 水稻维管束性状与产量性状的关系

3.1 水稻维管束运流的作用机理

水稻光合作用的产物运输到植株各部位, 供给自身的生命活动, 多余的积累到籽粒中, 完成这一运输过程的通道是维管束, 所以了解维管束运输机理有重要的理论意义和对生产有指导价值。光合产物运输到籽粒, 需经过源叶中的合成与装载、韧皮部长途运输、果实内的筛分子卸载、卸出后的短途运输、进入贮藏薄壁细胞的积累等(卢善发和宋艳茹1999)。压力流动学说能很好地解释有机物在韧皮部的运输机理, 压力流动学说指出, 筛管靠近源一端的蔗糖会主动装载, 引起渗透势下降, 致筛管中溶质浓度增加, 进而引起水分进入筛管, 膨压增加; 而靠近库的筛管一端因蔗糖的主动卸载, 导致渗透势升高, 筛管失水, 膨压下降, 使得筛管两端产生的压力差, 实现韧皮部中的水与溶质由源向库运输, 这种膨压差是推动同化物从源向库运输的主要动力来源。同化物运输必须有木质部水分的参与, 木质部水分大量渗入韧皮部, 这有助于有机物运输压力差的建立, 同时也对韧皮部同化物的运输起着重要的调节作用(刘新等1998)。

3.2 水稻维管束对光合作用和产量的影响

维管束运输光合产物, 在水稻产量形成过程中扮演者很重要的角色, 水稻生长后期的灌浆过程和籽粒的充实与否很大程度影响最终产量。水稻茎鞘中更多的非结构性碳水化合物向籽粒运输是水稻增产的重要途径(李国辉和崔克辉2014)。水稻穗颈维管束是灌浆物质到达籽粒的重要通道, 灌浆物质来源于抽穗后的光合产物, 也包含源于抽穗前贮藏的碳水化合物, 穗颈节间小维管束能促进茎鞘中非结构性碳水化合物的转运(潘俊峰等2014)。周红英等(2014)的研究结果显示当穗颈节间维管束数增加及韧皮部总面积增加时, 谷粒充实率会变大, 水稻单穗重会有一定程度的增加。张喜娟(2009)的研究证明穗颈节和枝梗维管

束性状是影响水稻不同粒位和穗位籽粒结实率的重要因素;改善维管束系统能使品种的穗粒数增加。在于晓刚(2010)的研究中,不同枝梗颖果背部维管束面积呈现为一次枝梗大于二次枝梗;在籽粒性状方面,谷粒充实度和谷粒干质量均为一次枝梗大于二次枝梗。

4 水稻维管束机械支撑作用与抗倒伏

水稻倒伏是制约产量的一个重要因素,也影响水稻的品质。目前水稻增产株型的改良势必要增加水稻株高,而株高和抗倒伏显著负相关,解决倒伏问题是目前水稻高产稳产以及水稻机械化收获的重要问题。水稻维管束有结构支撑的作用,相关研究表明,维管束的性状与水稻倒伏联系紧密(陈桂华等2016)。比如水稻是否抗倒伏的重要指标包括维管束的数目和大小维管束的比例等。

4.1 倒伏对水稻产生的影响

水稻倒伏后,茎秆倾斜甚至植株匍匐在地,使得叶片在空间分布上发生改变,同时改变水稻冠层结构,影响光合作用;茎秆运流通道也受阻碍,从而光合产物的运输及籽粒灌浆受影响,直接影响水稻的产量。相关研究表明,随着倒伏时间在生育期上的越早对产量的影响越大。比如齐穗后20 d倒伏,产量不超过成熟期的40%,而齐穗后40 d发生倒伏,产量约为成熟期的70%。倒伏后,水稻的结实率迅速下降,相应的千粒重下降,水稻整体产量严重受影响(刘利华等2009)。苏仕华等(2008)的研究结果也显示,水稻倒伏使得稻谷产量明显下降,某些地区甚至于不足30%,穗粒数、实粒数、千粒重等均减少。

倒伏同样影响稻米品质,在一定范围内影响整精米率,并且倒伏时间越早,整精米率下降越大,但是并不显著;就外观品质、长宽比稍有一定的差异,不明显。另外,有相关研究结果显示,倒伏影响稻米垩白粒率与垩白度、食味性和营养品质。在齐穗后,水稻越早倒伏,垩白粒率与垩白度越高;因在灌浆前期蛋白质的积累速度比淀粉快,水稻倒伏越早,蛋白质含量增加越多,口感越差(窦永秀2008;郎有忠等2011;张磊等2002)。

4.2 维管束与水稻抗倒伏的关系

许多研究都表明维管束性状影响着水稻的抗倒性,水稻的各个节间维管束性状与抗折力有显

著或极显著关系。维管束性状是水稻抗倒的选育指标之一。申广勤(2008)的研究发现维管束数目影响着水稻茎秆基部的抗折力,进而影响水稻的倒伏指数;随着大小维管束数目的增加,倒伏指数减小,且小维管束数目的影响更大。邵平(2015)对超高产梗稻研究发现,随着水稻株高的增加,倒伏指数随之加大;水稻最容易发生倒伏的时期是在齐穗后30 d左右,茎秆维管束数目在一定程度上与倒伏关系密切;茎基部节间长度等性状和倒伏紧密相关;对水稻茎秆基部第2、3节间维管束分析结果表明,基部节间维管束面积和数目与倒伏指数呈负相关。李红娇等(2008)也在研究中发现,茎秆维管束数目影响着水稻抗倒性,基部节间大小维管束数目的增加,水稻抗倒性也随着增强。在莫永生等(2008)研究中,水稻的抗折力随着节间长度拉长而下降,大小维管束数与水稻抗折力呈正相关关系,尤其与小维管束数目关系更密切。

5 展望

研究者通过石蜡切片等研究方法,对不同地区不同品种、不同抗性以及不同产量水稻的维管束已进行了研究,观测到水稻维管束的基本结构,掌握其相关特性。随着研究手段的不断发展,如水稻三维探测实验仪器的逐渐完备,构建水稻维管束三维立体结构图将能进一步推动维管束在水稻“流”机制研究以及水稻抗倒性方面的研究,对水稻单产的提高提供新的理论依据(马学强2015)。目前,已有同属禾本科竹子的节部维管束三维构造相关报道(Peng等2014),技术手段已具备。水稻输导系统的三维构造研究很可能将为水稻“源”“库”“流”研究领域新的的重要内容。

参考文献

- Bai Y (2012). Effects of nitrogen levels on large panicle rice in grain filling and its mechanism [Master's Thesis]. Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese with English abstract) [白羽 (2012). 施氮水平对大穗型水稻品种籽粒灌浆结实的影响及其机制(硕士论文). 南京: 南京农业大学]
- Chen GH, Deng HB, Zhang GL, Tang WB, Huang H (2016). The correlation of stem characters and lodging resistance and combining ability analysis in rice. *Sci Agric Sin*, 49 (3): 407-417 (in Chinese with English abstract) [陈桂华, 邓化冰, 张桂莲, 唐文帮, 黄璜(2016). 水稻茎秆性状与抗倒性的关系及配合力分析. *中国农业科学*, 49 (3): 407-417]
- Chen SQ (2016). Effect of exogenous GA₃ and PP₃₃₃ treatment agro-

- onomic characteristics of effect panicle type NILs of *Japonica* rice. Seed, 35 (05): 76–79 (in Chinese with English abstract) [陈书强(2016). 外源生长调节剂对直立穗型近等系农艺性状的影响. 种子, 35 (05): 76–79]
- Dou YX (2008). Evaluation of lodging resistance and effects of lodging on yield & rice quality during grain filling stage [Master's Thesis]. Yangzhou: Yangzhou University (in Chinese with English abstract) [窦永秀(2008). 水稻结实期抗倒性评价及倒伏对产量与品质影响的研究(硕士学位论文). 扬州: 扬州大学]
- Fukuyama T, Takayama T (1995). Variations of the vascular bundle system in Asian rice cultivars. Euphytica, 86 (3): 227–231
- Huang H (1994). The influence of ecological condition to rice stem vascular bundles. J Zhongkai Agrotec Coll, 70 (2): 9–15 (in Chinese with English abstract) [黄璜(1994). 生态条件对水稻茎秆维管束数的影响. 仲恺农业技术学院学报, 7 (02): 9–15]
- Lang YZ, Yang XD, Wang ME, Zhu QS (2011). Effects of lodging at different filling stages on rice grain yield and quality. Chin J Rice Sci, 25 (04): 407–412 (in Chinese with English abstract) [郎有忠, 杨晓东, 王美娥, 朱庆森(2011). 结实阶段不同时期倒伏对水稻产量及稻米品质的影响. 中国水稻科学, 25 (04): 407–412]
- Li GH, Cui KH (2014). Sucrose translocation and its relationship with grain yield formation in rice. J Plant Physiol, 50 (6): 735–740 (in Chinese with English abstract) [李国辉, 崔克辉(2014). 水稻蔗糖转运及其与产量形成的关系. 植物生理学报, 50 (6): 735–740]
- Li HJ, Zhang XJ, Li WJ, Xu ZJ (2008). Initial research on lodging resistance in super high- yielding japonica rice cultivars. North Rice J, 38 (2): 22–27 (in Chinese with English abstract) [李红娇, 张喜娟, 李伟娟, 徐正进(2008). 超高产粳稻品种抗倒伏性的初步研究. 北方水稻, 38 (2): 22–27]
- Li WJ, Zhang XJ, Li HJ, Xu ZJ (2008). Effects on neck vascular bundles of super rice in different field collocation patterns. North Rice J, 38 (03): 58–61 (in Chinese with English abstract) [李伟娟, 张喜娟, 李红娇, 徐正进(2008). 不同田间配置方式对超级稻穗颈维管束数的影响. 北方水稻, 38 (03): 58–61]
- Liao SM (2015). Study on the effects of hybrid rice's photosynthetic product and sieve tube structure on the conversion rate of dry matter between subspecies [Master's Thesis]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University (in Chinese with English abstract) [廖色梅(2015). 亚种间杂交稻光合产物与筛管结构对干物质转化率的影响研究(硕士学位论文). 乌鲁木齐: 新疆农业大学]
- Liu LH, Jin ZX, Liu XL, Xu YJ (2009). The analysis results of rice lodging yield effect. China Rice, (02): 19–21 (in Chinese with English abstract) [刘利华, 金再欣, 刘小丽, 徐云杰(2009). 水稻倒伏对产量影响的试验结果分析. 中国稻米, (02): 19–21]
- Liu X, Ge CL, Luo S, Shi MF, Gong J (1998). Tracer kinetics research on the quantitative relationship between photo synthase and water transportation in the phloem. J Jiangsu Agric Coll, 19 (03): 34–37 (in Chinese with English abstract) [刘新, 葛才林, 罗时, 石马飞, 龚荐(1998). 棉花果枝韧皮部同化物运输与水分伴随运移定量关系的示踪动力学研究. 江苏农学院学报, 19 (03): 34–37]
- Lu SF, Song YR (1999). Molecular mechanisms of phloem transport and defense. Chin Bull Bot, 16 (02): 18–26 (in Chinese with English abstract) [卢善发, 宋艳茹(1999). 韧皮部运输和防御作用的分子机理. 植物学通报, 16 (02): 18–26]
- Ma XQ (2015). Research on the model with growth features for virtual plants [PhD Thesis]. Jinan: Shandong Normal University (in Chinese with English abstract) [马学强(2015). 具有生长特征的虚拟植物模型研究(博士论文). 济南: 山东师范大学]
- Mo YS, Cai ZQ, Yang QQ, Wei Y (2008). The Breaking resistance of higher, thicker, and tougher rice. Chin Agric Sci Bull, 24 (02): 193–198 (in Chinese with English abstract) [莫永生, 蔡中全, 杨亲琼, 韦莹(2008). 高大韧稻茎秆的抗折力研究. 中国农学通报, 24 (02): 193–198]
- Pan JF, Li GF, Cui KH (2014). Re-partitioning of non-structural carbohydrates in rice stems and their roles in yield stability and stress tolerance. Chin J Rice Sci, 28 (04): 335–342 (in Chinese with English abstract) [潘俊峰, 李国辉, 崔克辉(2014). 水稻茎鞘非结构性碳水化合物再分配及其在稳产和抗逆中的作用. 中国水稻科学, 28 (4): 335–342]
- Peng GY, Jiang ZH, Liu XE, Fei BH, Yang SM, Qin DC, Ren HQ, Yu Y, Xie HL (2014). Detection of complex vascular system in bamboo node by X-ray μ CT imaging technique. Holzforschung, 68 (2): 223–227
- Shao P (2015). Research on physiological elasticity lodging resistance in semi-high-stem hybrid rice with higher biomass [Master's thesis]. Jingzhou: Yangtze University (in Chinese with English abstract) [邵平(2015). 半高秆高生物量型杂交稻生理弹性抗倒研究(硕士学位论文). 荆州: 长江大学]
- Shen GQ (2008). Study on physiological mechanisms of lodging resistance and evaluating method in rice [Master's Thesis]. Hefei: Anhui Agricultural University (in Chinese with English abstract) [申广勤(2008). 水稻抗倒伏生理机制与评价方法研究(硕士学位论文). 合肥: 安徽农业大学]
- Su SH, Wang Y, Sun CL, Cheng Y, Lu H (2008). Investigation and analysis of effect of lodging on rice yield. North Rice J, (06): 41–43 (in Chinese with English abstract) [苏仕华, 王珏, 孙成亮, 成英, 卢红(2008). 水稻倒伏对产量影响的调查与分析. 北方水稻, (06): 41–43]
- Sun YY (2012). To research the relation of indicate and japonica rice vascular property. Heilongjiang Agric Sci, (01): 4–6 (in Chinese with English abstract) [孙玉友(2012). 粳籼稻维管束性状关系研究. 黑龙江农业科学, (01): 4–6]
- Tao L, Cheng YJ, Xie R, He GH, Yang ZL, Zhang Y (2004). Analysis of genetic effects for eck-panicle vascular bundles and Its related characteristics in rice. Sci Agric Sin, 37 (12): 1932–1937 (in Chinese with English abstract) [陶澜, 程艳军, 谢戎, 何光华, 杨正林, 张毅(2004). 水稻穗颈维管束及其相关性状的基因效应分析. 中国农业科学, 37 (12): 1932–1937]
- Wang JF, Huang YJ (2013). Comparison on the anatomic of vascular bundle of different heat tolerant rice varieties. Hubei Agric Sci, 52 (02): 262–264 (in Chinese with English abstract) [王锋尖, 黄英金(2013). 不同耐热性水稻品种维管束解剖性状的比较. 湖北农业科学, 52 (02): 262–264]
- Wang M (2011). Caryopsis development of rice [Master's Thesis]. Yangzhou: Yangzhou University (in Chinese with English abstract) [王敏(2011). 关于水稻颖果发育的研究(硕士学位论文). 扬州: 扬州大学]
- Wu DM (2015). The study of plant print apparent structural and system evolution of 17 genus in Ranunculaceae [PhD Thesis].

- Changchun: Northeast Normal University (in Chinese with English abstract) [吴东梅(2015). 毛茛科17属植物外观结构植纹鉴定及其系统演化研究(博士论文). 长春: 东北师范大学]
- Wang TJ (2015). Effect of stalk tissue and lignin metabolism on the lodging resistance and rice [Master's Thesis]. Xinxiang: Henan Normal University (in Chinese with English abstract) [王庭杰(2015). 水稻茎组织构建与木质素代谢对抗倒伏的影响(硕士论文). 新乡: 河南师范大学]
- Xu MZ, Quan XL, Shi TY, Zhen CS, Liu XH (2000). Different kinds of rice panicle vascular bundle property as well as the relation research. *J Agric Sci Yanbian Univ*, 22 (02): 81–85 (in Chinese with English abstract) [许明子, 全雪丽, 石铁源, 郑成淑, 刘宪虎(2000). 不同水稻品种穗颈维管束性状及其相关研究. 延边大学学报, 22 (02): 81–85]
- Xu XM, Dai XB, Lu W, Zhang RX (1999). Nuclear gene cytoplasmic genes and the relationship between photosynthesis. *Bull Biol*, 34 (10): 5–6 (in Chinese with English abstract) [许晓明, 戴新宾, 陆巍, 张荣铎(1999). 细胞核、细胞质基因和光合作用的关系. 生物学通报, 34 (10): 5–6]
- Yang SR (1987). Rice is high in excess of new trend——ideal plant type to combine heterosis utilization. *J Shenyang Agric Univ*, 18 (1): 1–5 (in Chinese with English abstract) [杨守仁(1987). 水稻超高产育种新动向——理想株型与优势利用相结合. 沈阳农业大学学报, 18(1):1–5]
- Yin CY (2007). Study of nitrogen regulation on the inferior-grain plumpness of rice [Master's Thesis]. Zhengzhou: Henan Agricultural University (in Chinese with English abstract) [殷春渊(2007). 水稻弱勢粒充实的氮素调控研究(硕士论文). 郑州: 河南农业大学]
- Yu XG (2010). The structural characteristics of vascular bundle of Japonica rice caryopsis and its relationships with quality traits and grain filling [Master's Thesis]. Shenyang: Shenyang Agricultural University (in Chinese with English abstract) [于晓刚(2010). 粳稻颖果维管束结构特征及其与品质和灌浆特性的关系(硕士论文). 沈阳: 沈阳农业大学]
- Yuan LP (2011). Progress of new plant type breeding. *Hybrid Rice*, (04): 72–74 (in Chinese with English abstract) [袁隆平(2011). 新株型育种进展. 杂交水稻, (04): 72–74]
- Yuan LP (2015). Chinese super hybrid rice breeding technology of looking forward to the future. *Chin Coun Dis*, (01): 18–21 (in Chinese with English abstract) [袁隆平(2015). 中国超级杂交稻育种技术的未来展望. 中国乡村发现, (01): 18–21]
- Zhang J (2014). Mechanism of the lodging resistance characteristics and its responses to nitrogen of different high-yielding rice populations under two eco-sites [PhD Thesis]. Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese with English abstract) [张俊(2014). 不同生态区高产水稻群体抗倒性及对氮素响应机理研究(博士论文). 南京: 南京农业大学]
- Zhang L, Wu DY, Zhang MG, Li JQ (2002). Effects of temperature and light on the dynamic change in soluble protein and sugar in rice leaves and grains the milk-filling stage. *J South Chin Nor University (Nat Sci Ed)*, (02): 98–101 (in Chinese with English abstract) [张磊, 吴冬云, 朱碧岩, 张铭光, 黎杰强(2002). 灌浆期不同温光对水稻叶、籽粒可溶性蛋白质及可溶性糖动态变化的影响. 华南师范大学学报(自然科学版), (02): 98–101]
- Zhang Xi (2009). Physiological characters and genetic basis of super-high-yield rice [PhD Thesis]. Shenyang: Shenyang Agricultural University (in Chinese with English abstract) [张喜娟(2009). 水稻超高产品种的生理特性及遗传基础(博士论文). 沈阳: 沈阳农业大学]
- Zhou HY, Zhang GL, Xiao YH, Tang WB, Cheng LY (2014). Relationship between the conducting tissue in the first internode and the grain-filling of super large panicle rice line R1126 and its derived combinations. *Chin J Rice Sci*, 28 (04): 411–418 (in Chinese with English abstract) [周红英, 张桂莲, 肖应辉, 唐文邦, 陈立云(2014). 超大穗型水稻R1126及其组合穗颈输导组织与籽粒灌浆结实的关系. 中国水稻科学, 28 (04): 411–418]

Research progress of rice vascular bundle

LI Meng-Yang¹, PENG Guan-Yun^{2*}, DENG Biao², MENG Gui-Yuan^{1*}

¹College of Agriculture and Biotechnology, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi, Hu'nan 417000, China;

²Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China

Abstract: In order to improve the per unit yield and resistance for rice, many researchers have focused on the key aspects including vascular bundle research. This paper introduced the latest developments of rice vascular bundle botanical characteristic; expounded the influencing factors on vascular bundle growth and development, and the relationship between the vascular bundle properties and the yield; discussed the vascular bundle mechanism properties and the stalk lodging-resistant. Authors here prospected the 3D anatomical structure of conducting tissue research would probably become the important new research content, which would be conducive to further research on mechanism of source-sink-translocation for rice.

Key words: rice; vascular bundle; yield; lodging-resistance; three dimensional structure

Received 2017-03-06 Accepted 2017-08-21

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 31300480 and 11405258).

*Co-corresponding author (E-mail: pengguanyun@sinap.ac.cn; mengguiyuan@126.com).