

控制灌溉条件下寒区水稻茎秆抗倒伏力学评价及成因分析

彭世彰^{1,2}, 张正良^{1,2}, 庞桂斌^{1,3}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;
2. 河海大学水利水电工程学院, 南京 210098; 3. 河海大学节水研究所, 南京 210098)

摘要: 为了评价控制灌溉处理与常规灌溉处理下水稻抗倒伏能力的差异, 寻求有利于水稻茎秆抗倒伏的灌溉处理方式, 以水稻茎秆为研究对象, 研究了不同灌溉条件下水稻茎秆抗倒伏性能。引入茎秆系数, 对水稻茎秆进行力学分析, 比较了 2 种控制灌溉和常规灌溉 3 种水分处理下水稻茎秆抗倒伏能力的差异。结果表明, 控制灌溉 (KI、KII) 处理下的水稻节间充实度高于常规灌溉 (CK), KI、KII 处理的水稻茎秆壁厚分别比 CK 高出 0.15 mm 和 0.35 mm; 控制灌溉处理下的水稻茎秆系数显然低于常规灌溉处理, 大小顺序为: CK>KI>KII; 临界力的大小依次为: KII>KI>CK, 因此控制灌溉处理的水稻茎秆更具抗倒伏性。

关键词: 控制灌溉, 力学性质, 茎秆系数, 抗倒伏, 水稻茎秆

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-1-0006-05

彭世彰, 张正良, 庞桂斌. 控制灌溉条件下寒区水稻茎秆抗倒伏力学评价及成因分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 6-10.

Peng Shizhang, Zhang Zhengliang, Pang Guibin. Mechanical evaluation and cause analysis of rice-stem lodging resistance under controlled irrigation in cold region[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 6-10.(in Chinese with English abstract)

0 引言

倒伏是稻体内因和外界环境条件综合作用的结果, 一般使水稻减产 10% 左右^[1-3]。内因主要是品种自身抗倒伏性, 如遗传基因性状等; 外因则为栽培条件和气象因素^[4], 如氮素吸收过剩、过度密植、深水灌溉、风雨及病虫害等均可能会引起倒伏^[5]。通常认为, 水稻倒伏主要有根倒伏和茎倒伏, 前者是由于农田土壤还原性过强, 根系发育不良, 扎根浅而不稳, 稍经风雨侵袭就容易发生平地倒伏; 后者是因为茎秆细弱不健壮, 负担不起上部质量而发生倒伏。郭玉明等^[6]采用灰色关联法分析了不同生长期惯性矩、弹性模量、抗弯刚度、抗弯强度等与弯折性能有关的各生物力学指标与抗倒性之间的关系。袁志华^[2]等利用力学理论和方法, 综合风、雨、土壤、茎秆性状各种因素对水稻茎秆的影响, 给出了水稻茎秆抗倒伏的各种性质参数的关系式。Kashiwagi^[7]指出, 通过延迟叶片衰老使得茎秆碳水化合物重新累积, 可提高水稻茎秆抗倒伏能力。田保明^[8]等人建立了油菜茎秆抗倒伏力学模型, 认为茎秆系数可以作为同一个油菜品种抗倒伏能力的综合评价指标。赵安庆等^[9]对同一品种水稻的茎秆抗倒伏进行了力学分析与评价, 指出茎秆柔度越小茎秆抗倒伏能力越强。控制灌溉处理的水稻大多数生育阶段灌溉后田面没有水层, 势必对水稻茎秆节间充实度、茎

壁厚度与茎秆横截面等产生影响, 进而有可能改善水稻茎秆抗倒伏性能。

本文试图从力学角度分析和评价控制灌溉处理与常规灌溉处理下水稻抗倒伏能力的差异, 定性半定量地分析了水稻茎秆抗倒伏成因, 寻求有利于水稻茎秆抗倒伏的灌溉处理方式, 为制定水稻合理的灌溉制度提供依据。

1 试验材料与方法

试验区设在黑龙江省汤原县汤旺河灌溉试验站 (129°43'58"E, 46°36'04"N), 地处黑龙江省第二积温带下限和第三积温带上限之间, 水稻生育期内日平均气温 19.3℃, 日照时数 978.1 h, 日均 8.4 h, 降雨量 388.4 mm。土壤为草甸黑土型水稻土, 肥力中等, 水稻供试品种为富尔 9985。试验于 2005 年安排 2 个控制灌溉处理 (简称 KI、KII)、1 个当地常规浅水灌溉 (简称 CK) 处理, 共 3 个灌水处理, 进行对比试验, 各处理设 3 次重复, 共 9 个小区。2 种控制灌溉处理均以田间根层土壤含水率作为控制指标。从返青期至黄熟期分别按土壤饱和体积含水率的 60%~80% 进行适宜组合, KI 为不蓄雨方案, KII 为蓄雨模式 (蓄雨深度不超过 50 mm, 时间不超过 5 d)。CK 的灌溉定额全生育期为 800 m³ 左右。

观测内容主要有常规气象、土壤水分、灌排水量和田间水层、水稻茎秆动态、株高、茎秆截面内外径、茎秆基部节长以及节间充实度等。黄熟期, 在各处理的每个小区随机选取 5 株水稻植株, 选取 5 蘖进行分析, 每个处理共 15 个样本, 取其算术平均值进行分析计算。

2 抗倒伏性能的力学分析

2.1 水稻植株力学模型的基本假定

水稻、玉米等农作物的穗长与其株高相比小得多,

收稿日期: 2007-11-26 修订日期: 2008-12-25

基金项目: 国家“863”计划项目 (2006AA100202); 优秀博士学位论文作者专项基金 (200546)

作者简介: 彭世彰 (1959-), 男, 上海人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事节水灌溉理论与技术研究。南京 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 210098。Email: szpeng@hhu.edu.cn

因此把水稻质量看作集中力作用于一点（即茎秆重心）上^[9,10]，视水稻茎秆为一端固定、一端自由、每节节间均匀的长细杆。假定水稻茎秆横截面为空心圆截面（如图 1，内径为 d ，外径为 D ），认为同一品种水稻拥有相同的茎秆弹性模量，茎秆每节节间重力均匀分布。水稻茎秆力学简化模型如图 1 所示，设 q 为单位长度的自重（即节节间充实度），穗质量为 P ，茎秆自重为 Q ， h 为茎秆重心高度。重心高度的计算采用力矩等效替代原理，对 A 点求矩，得：

$$h = [\rho_1 \cdot l_1 \cdot l_1 / 2 + \rho_2 \cdot l_2 \cdot (l_1 + l_2 / 2) + \rho_3 \cdot l_3 \cdot (l_1 + l_2 + l_3 / 2) + \rho_4 \cdot l_4 \cdot (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 / 2)] / (\rho_1 \cdot l_1 + \rho_2 \cdot l_2 + \rho_3 \cdot l_3 + \rho_4 \cdot l_4) \quad (1)$$

式中 ρ_i ——从地上算起茎秆倒数第 i 节的节节间充实度，g/cm， $i=1、2、3、4$ ； l_i ——从地上起茎秆倒数第 i 节的长度，cm。

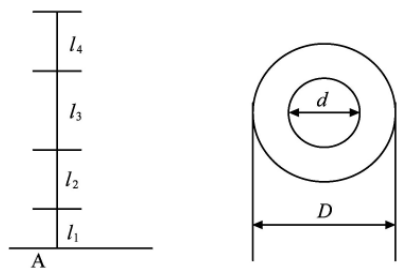
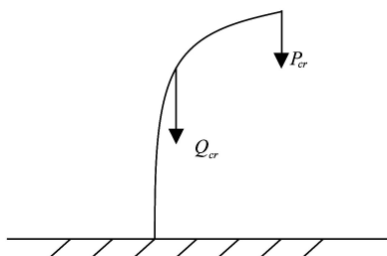


图 1 水稻茎秆的力学简化模型
Fig.1 Mechanical simplified model of rice stem

2.2 水稻茎秆抗倒伏性能力学分析模型

和油菜、玉米等作物一样，一般水稻茎秆可视为直线生长^[3,5]。在抽穗之前，水稻几乎不发生倒伏，当重力较小时，横向作用力（如风力）使茎秆发生弯曲，作用力消失后恢复直线生长状态。抽穗以后，随着水稻抽穗，植株重力增加，茎秆干物质输出，横向作用力虽消失，茎秆仍保持弯曲的形状，而不能恢复原有的直线状态，使稳定平衡变为不稳定平衡，即进入倒伏的临界平衡状态（如图 2 所示），植株极容易发生倒伏现象。



P_{cr} ——临界状态时的穗质量，g； Q_{cr} ——临界状态时的茎秆自重，g

图 2 水稻茎秆倒伏的临界平衡状态
Fig.2 Critical balance state of rice-stem lodging

茎秆在临界力作用下，在微弯曲状态下处于不稳定平衡，其挠曲线方程为^[11]：

$$\omega = \delta(3Lx^2 - x^3) / 2L^2 \quad (2)$$

式中 ω ——挠度，表示 x 截面处的水平位移，m； δ ——位移参数，表示茎秆顶部的飘移幅度，即茎秆顶端水平位移，m； L ——茎秆高度，即茎秆地上部高度，m； x ——假定的截面位置。

由此可得水稻茎秆的势能为：

$$\Pi = \frac{3EI\delta^2}{2L^3} - \frac{3}{16}q_{cr}\delta^2 - \frac{9\delta^2}{8L^6} \left(\frac{4}{3}L^2h^3 - Lh^4 + \frac{1}{5}h^5 \right) P_{cr} \quad (3)$$

式中 E ——茎秆弹性模量，MPa，本文认为同一品种水稻的弹性模量相同； I ——茎秆截面惯性矩， mm^4 ； h ——茎秆重心高度，m； q_{cr} ——临界状态的茎秆单位长度的自重，g/m。

由势能驻值原理 $\frac{\partial \Pi}{\partial \delta} = 0$ 可得^[12]：

$$q_{cr} + \frac{6P_{cr}}{L^6} \left(\frac{4}{3}L^2h^3 - Lh^4 + \frac{1}{5}h^5 \right) = \frac{8EI}{L^3} \quad (4)$$

$$\text{令 } b = 6a^3(4/3 - a + 1/5a^2); \quad a = h/L$$

$$P_{cr} + Q_{cr}/b = W_{cr} \quad (5)$$

式中 W_{cr} ——临界力， $Q_{cr} = q_{cr}L$ ， $P_{cr} = p_{cr}L$ ； p_{cr} ——临界状态时单位长度的穗质量，g/m。

代入式（4），整理可得：

$$W_{cr} = 8EI/(bL^2) \quad (6)$$

由此可知，在水稻品种确定（ E 恒定）的前提下，临界力与惯性矩（主要由截面尺寸决定）成正比，与茎秆高度的平方成反比。即茎秆越高，临界力越小，茎秆越容易倒伏；茎秆越粗（截面尺寸越大），惯性矩越大，临界力也就越大，茎秆越不易倒伏。

$$\text{又令 } \lambda^2 = bL^2 / I \quad (7)$$

式中 λ ——水稻茎秆系数，它综合反映了水稻茎秆高度、截面尺寸和形状、穗位高等茎秆物理性状。

$$\text{则: } W_{cr} = 8E / \lambda^2 \quad (8)$$

由式（8）可知，对于同一水稻品种，临界力与茎秆系数的平方成反比，即 λ^2 越小， W_{cr} 值越大，抗倒伏能力越强；反之， λ^2 越大，水稻茎秆就越不稳定。

2.3 控制灌溉处理水稻茎秆抗倒伏性能力学评价

对各处理重复间的数据进行统计分析，差异不显著，变异系数均充分小，满足算术平均值的要求，根据 2005 年在黑龙江省汤原县旺河试验站观测不同灌溉处理的水稻几何形状数据计算重心高度 h 以及 λ^2 值（见表 1）。将相关数据代入公式 $\lambda^2 = bL^2 / I$ ，即可算出 λ^2 值。

计算结果表明，KII、KI 处理的茎秆系数远远小于 CK 处理。其中 KII 处理的 λ 值最小，说明其临界力最大，茎秆抗倒伏能力最强。茎秆系数的排序：CK>KI>KII；因此临界力的大小依次为：KII>KI>CK。

表 1 水稻茎秆性状及茎秆系数平方值（黑龙江汤原，2005）
Table 1 Characteristics of rice stem and square values of stem coefficient

| 处理 | 内径 d/mm | 外径 D/mm | 壁厚 θ/mm | 穗位高 L/cm | 重心高度 h/cm | 茎秆质量 M/g | 惯性矩 I/mm^4 | a | b | λ^2 |
|-----|------------------|------------------|-------------------|------------|-------------|--------------------|--------------------|-------|-------|---------------------|
| CK | 2.1 ^a | 3.1 ^a | 0.50 ^a | 71.13 | 25.55 | 0.532 ^a | 3.579 ^a | 0.359 | 0.278 | 393.01 ^a |
| KI | 2.2 ^a | 3.5 ^b | 0.65 ^b | 68.78 | 21.79 | 0.621 ^a | 6.216 ^b | 0.317 | 0.198 | 150.49 ^b |
| KII | 2.1 ^a | 3.8 ^b | 0.85 ^b | 65.94 | 21.96 | 0.475 ^a | 9.281 ^b | 0.333 | 0.227 | 106.23 ^b |

注: $p < 0.05$ 。

3 控制灌溉处理水稻茎秆抗倒伏性能成因分析

3.1 株高

控灌处理下轻控促苗发, 中期重控促壮蘖, 后期重控促转换, 秧苗早生长、早发苗, 低位分蘖, 叶片刚劲, 株高增加较缓, 构成合理的群体结构。控制灌溉的水稻群体高度较低, 茎秆矮而整齐, 茎秆节节间短, 密实粗壮, 因此具有较强的抗倒伏性。

株高是决定抗倒伏性的重要因素^[13], 因而对于株高与抗倒伏性的关系, 不同研究者持有不同的观点。杨守仁等^[14]认为, 植株的抗倒伏能力与株高成反比, 与茎粗成正比; 大量研究者^[4,15,16]认为, 植株过高是引起水稻倒伏的主要原因; 张忠旭等则认为, 株高与抗倒伏能力关系并不明显, 即矮秆不一定抗倒伏, 高秆不一定不抗倒

伏^[17]。段传人^[18]通过测定水稻茎秆的拉伸强度极限和弹性模量, 研究和比较了高、中、矮和杂交稻品种的力学性能, 认为中秆类型水稻的茎秆结构更为合理。从利于抗倒伏方面考虑, 育种上应选择较粗的茎秆, 在栽培上应控制株高但要适度, 因为适当增加水稻植株的高度, 可以提高水稻的生物学产量, 也有利于改善群体的通风透光状况^[19,20]。

3.2 茎秆节间长度与节间充实度

水稻黄熟期的观测资料显示(如表 2 所示), 控灌处理的水稻茎节间充实度明显高于 CK 处理。水稻茎秆倒伏主要和倒三倒四的节间充实度密切相关, 对于倒三和倒四的节间充实度来说, KI、KII 处理的水稻节间充实度分别较 CK 多 0.007 g/cm、0.023 g/cm 和 0.004 g/cm、0.001 g/cm, 分别比 CK 高 70%、135.3%和 40%、5.9%。

表 2 水稻黄熟期茎秆节间长度与节间充实度（黑龙江汤原，2005）
Table 2 Internode length and plumpness of rice-stem at the stage of yellow ripeness

| 处理 | 茎节间长度/cm | | | | 节间充实度/g·cm ⁻¹ | | | |
|-----|-------------------|--------------------|-------|-------|--------------------------|--------------------|-------|-------|
| | 倒四 | 倒三 | 倒二 | 倒一 | 倒四 | 倒三 | 倒二 | 倒一 |
| CK | 7.13 ^a | 17.6 ^a | 19.8 | 26.6 | 0.017 ^a | 0.01 ^a | 0.006 | 0.004 |
| KI | 2.35 ^b | 14.88 ^b | 22.45 | 29.1 | 0.04 ^b | 0.017 ^a | 0.008 | 0.004 |
| KII | 2.31 ^b | 13.52 ^b | 22.52 | 27.59 | 0.018 ^b | 0.014 ^a | 0.007 | 0.003 |

注: $p < 0.05$ 。

水稻的茎秆有支持地上部的功能, 且有贮藏和运输养料的作用, 它由节和节间组成, 节可以增加水稻茎秆的刚度, 使其抵抗外部的弯曲载荷能力得以提高^[3]。对于水稻茎秆来说, 与抗倒伏性有密切关系的是倒三、倒四(即基部第二、第一)节间。水稻抗倒性强弱与茎秆机械组织的强度、茎秆的韧性以及地上各节的长度, 特别地表节的长度密切相关。杨惠杰等^[21]认为节间长度、节间粗度与秆长、株高及弯曲力矩多呈正相关。

返青期, 控灌技术为水稻生长提供了适宜的水、肥、气、热条件, 茎秆发育良好; 分蘖中期, 通过对田间土壤水分的进一步控制, 控制和促进了水稻对水分和养分的吸收, 使其分蘖旺盛, 茎秆长势平稳, 当田间苗量达到或接近丰产需求的茎蘖量时, 吸收的养分主要用于茎秆生长和组织强度的加强。控制灌溉的水稻节间生长旺盛期, 恰好处于重施分蘖肥和穗肥之间, 很好地协调了产量因素构成和植株生长的矛盾, 增强了水稻耐肥性和抗倒伏性^[22]。

3.3 茎壁厚度与茎秆横截面

张忠旭^[17]认为抗倒伏能力与基部茎秆壁厚度和茎壁截面面积呈极显著线性正相关, 同时, 还认为抗倒伏能

力与基部茎秆截面椭圆长轴、短轴和面积均呈极显著的线性正相关, 说明基部茎秆厚度和基部茎秆的粗度是影响倒伏的两个重要因素, 增大基部茎秆厚度和粗度(即茎秆的内径、外径以及壁厚), 抗倒伏能力明显增强^[23,24]。

控制灌溉, 既能有效满足水稻高产栽培对水分的需求, 控制无效分蘖的发生, 确保群体适中, 又使得茎秆粗壮, 防止或减轻倒伏^[22]。水稻茎秆基部内外径指标观测(见表 1)显示, 控制灌溉的茎秆壁厚明显厚于 CK 的。KI、KII 处理的水稻底部茎秆壁厚分别比 CK 处理的多 0.15 mm 和 0.35 mm。科学控制水分供应, 使得控制灌溉处理下的水稻节间长度显著小于常规灌溉, 而节间充实度高于常规灌溉, 茎秆壁厚和截面尺寸更符合抗倒伏的要求, 因此表现出较常规灌溉更为优越的力学性能。

4 结论

1) 在水稻品种确定的前提下, KII、KI 处理的茎秆系数远远小于 CK 处理。其中 KII 处理的 λ^2 值最小, 为 106.23, 比 CK 处理低 72.97%, 说明其临界力最大, 茎秆抗倒伏能力最强。

2) 控制灌溉条件下水稻节间长度显著小于 CK, 而

节间充实度高于 CK, 对倒三和倒四来说, KI、KII 处理的水稻节间充实度分别较 CK 多 0.007 g/cm、0.023 g/cm 和 0.004 g/cm、0.001 g/cm, 分别比 CK 高 70%、135.3% 和 40%、5.9%。

3) KI、KII 处理的水稻底部茎秆壁厚分别比 CK 高出 0.15 mm 和 0.35 mm, 茎秆壁厚和截面尺寸更符合抗倒伏的需求, 表现出较常规灌溉更为优越的力学性能。

4) 引入茎秆系数从水稻茎秆角度进行了力学分析, 评价效果较好, 茎秆系数可以作为水稻茎秆抗倒伏评价的力学指标。但本文未能涉及到水稻地下部, 根系的表面积、土壤密实度、根系与土界面的静摩擦力、根与土的固作强度等指标和水稻抗倒伏的量化关系有待于进一步的试验研究。

[参 考 文 献]

- [1] 吕纯波, 王福林, 郭彦文. 控制灌溉条件下水稻抗逆能力分析[J]. 中国农村水利水电, 2006, (10): 139-141.
- [2] 袁志华, 赵安庆, 苏宗伟, 等. 水稻茎秆抗倒伏的力学分析[J]. 生物数学学报, 2003, 18(2): 234-237.
Yuan Zhihua, Zhao Anqing, Su Zongwei, et al. Dynamic analysis of rice stem lodger resistance[J]. Journal of Biomathematics, 2003, 18(2): 234-237. (in Chinese with English abstract)
- [3] 周丽华. 水稻茎秆性状与抗倒伏关系的研究综述[J]. 中国稻米, 2006, (3): 10-11
- [4] Tripathi S C, Sayre K D, Kaul J N. Lodging behavior and yield potential of spring wheat (*Triticum aestivum* L.): effects of ethephon and genotypes[J]. Field Crops Research, 2004, 87: 207-220.
- [5] 杨长明, 杨林章, 颜廷梅, 等. 不同养分和水分管理模式对水稻抗倒伏能力的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 646-650.
Yang Changming, Yang Linzhang, Yan Yanmei, et al. Effects of nutrient and water regimes on lodging resistance of rice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(4): 646-650. (in Chinese with English abstract)
- [6] 郭玉明, 袁红梅, 阴妍, 等. 茎秆作物抗倒伏生物力学评价研究及关联分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 14-18.
Guo Yuming, Yuan Hongmei, Yin Yan, et al. Biomechanical evaluation and grey relational analysis of lodging resistance of stalk crops[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(7): 14-18. (in Chinese with English abstract)
- [7] Takayuki Kashiwagi, Yuka Madoka, Naoki Hirotsu. Locus *prl5* improves lodging resistance of rice by delaying senescence and increasing carbohydrate reaccumulation[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2006, 44: 152-157.
- [8] 赵安庆, 袁志华, 曹晴. 水稻茎秆抗倒伏的综合评价[J]. 生物数学学报, 2006, 21(4): 554-556.
Zhao Anqing, Yuan Zhihua, Cao Qing. The Total evaluation on rice lodging resistance[J]. Journal of Biomathematics, 2006, 21(4): 554-556. (in Chinese with English abstract)
- [9] 田保明, 袁志华, 王建平. 油菜茎秆抗倒伏的力学分析及综合评价探讨[J]. 河南农业科学, 2005, (3): 30-32.
Tian Baoming, Yuan Zhihua, Wang Jianping. Exploration of dynamics analysis and comprehensive evaluation on lodging resistance in stem of rapeseed (*B.napus* L)[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2005, (3): 30-32. (in Chinese with English abstract)
- [10] 袁志华, 冯宝萍, 赵安庆, 等. 作物茎秆抗倒伏的力学分析及综合评价探讨[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 30-31.
Yuan Zhihua, Feng Baoping, Zhao Anqing, et al. Dynamic analysis and comprehensive evaluation of crop-stem lodging resistance[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(6): 30-31. (in Chinese with English abstract)
- [11] 徐道远, 黄孟生, 朱为玄, 等. 材料力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2001.
- [12] 袁志华, 全林斯, 赵祥雄, 等. 玉米茎秆抗倒伏的综合评价[J]. 河南科学, 2002, 20(5): 495-497.
Yuan Zhihua, Quan Linsi, Zhao Xiangxiong, et al. The total evaluation on maize lodging resistance[J]. Henan Science, 2002, 20(5): 495-497. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李荣田, 姜廷波, 秋太权, 等. 水稻倒伏对产量影响及倒伏和株高关系的研究[J]. 黑龙江农业科学, 1996, (1): 13-17.
Li Rongtian, Jiang Tingbo, Qiu Taiquan, et al. Study on Effect of Lodging to Yield and Relationship between Lodging and Plant Height in Rice[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 1996, (1): 13-17. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨守仁, 张龙步, 王进民. 水稻理想株形育种的理论和方法初论[J]. 中国农业科学, 1984, (3): 6-13.
Yang shouren, Zhang Bulong, Wang Jinmin. The theory and method of ideal plant morphology in rice breeding[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1984, (3): 6-13. (in Chinese with English abstract)
- [15] 孙旭初. 水稻茎秆抗倒性的研究[J]. 中国农业科学, 1987, 20(4): 32-37.
Sun Xuchu. Studies on the resistance of the culm of rice to lodging[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1987, 20(4): 32-37. (in Chinese with English abstract)
- [16] 关玉萍, 沈枫. 水稻抗倒伏能力与茎秆物理性状的关系及对产量的影响[J]. 吉林农业科学, 2004, 29(4): 6-11.
Guan Yuping, Shen Feng. Effect of lodging resistance on yield of rice and its relationship with stalk physical characteristics[J]. Jilin Agricultural Sciences, 2004, 29(4): 6-11. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张忠旭, 陈温福, 杨振玉, 等. 水稻抗倒伏能力与茎秆物理性状的关系及其对产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 1999, 30(2): 81-85.
Zhang Zhongxu, Chen Wenfu, Yang Zhenyu, et al. Effect of lodging resistance on yield and its relationship with stalk physical characteristics[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1999, 30(2): 81-85. (in Chinese with English abstract)
- [18] 段传人, 王伯初, 龙雪峰. 水稻茎秆微观结构及其抗倒伏研究[A]. 力学 2000 年学术大会论文集[C]. 北京: 中国力学学会, 2000.
- [19] 陈温福, 徐正进, 张龙步. 水稻理想株型的研究[J]. 沈阳农业大学学报, 1989, 20(4): 417-420.
- [20] 徐正进, 陈温福, 张龙步, 等. 水稻高产生理研究的现状与展望[J]. 沈阳农业大学学报, 1991, 22(S1): 115-123.
- [21] 杨惠杰, 杨仁崔, 李义珍, 等. 水稻茎秆性状与抗倒性的

- 关系[J]. 福建农业学报, 2000, 15(2): 1-7.
- Yang Huijie, Yang Rencui, Li Yizhen, et al. Relationship between culm traits and lodging resistance of rice cultivars [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2000, 15(2): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [22] 彭世彰, 俞双恩. 水稻节水灌溉技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 18-45.
- [23] 胡婷, 付志一, 焦群英. 小麦茎秆抗弯性能研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 31-35.
- Hu Ting, Fu Zhiyi, Jiao Qunying. Experimental study on the bending mechanical properties of wheat stalk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10): 31-35. (in Chinese with English abstract)
- [24] 廖宜涛, 廖庆喜, 田波平, 等. 收割期芦竹底部茎秆机械物理特性参数的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 124-129.
- Liao Yitao, Liao Qingxi, Tian Boping, et al. Experimental research on the mechanical physical parameters of bottom stalk of the *Arundo donax* L. in harvesting period[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(4): 124-129. (in Chinese with English abstract)

Mechanical evaluation and cause analysis of rice-stem lodging resistance under controlled irrigation in cold region

Peng Shizhang^{1,2}, Zhang Zhengliang^{1,2}, Pang Guibin^{1,3},

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Institute of Water-saving, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to evaluate the differences of rice-stem lodging resistance between controlled irrigation and regular irrigation, and seek irrigation treatment which was beneficial to rice stem lodging resistance, rice-stem was taken as the research object, and the performance of rice-stem lodging resistance was studied under different irrigation treatments. Stem coefficient was introduced, and the mechanical analysis of rice-stem was carried out. The differences of lodging resistance ability under two kinds of controlled irrigations and one kind of regular irrigation were compared. The result showed that the values of internode plumpness of rice stem under controlled irrigations were bigger than that under regular irrigation, and the values of wall thickness of rice stem under KI and KII were much superior to that under regular irrigation by 0.15 mm and 0.35 mm. It also pointed out the values of rice stem coefficient under controlled irrigations were lower than that under regular irrigation, the order was CK>KI>KII, while the order of critical force was KII>KI>CK. Therefore, the rice stem under controlled irrigation is much better at lodging resistance.

Key words: controlled irrigation, mechanical properties, stem coefficient, lodging resistance, rice stem