

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2013.00682

## 超级稻 Y 两优 2 号在两生态区的抗倒性分析

张俊<sup>1</sup> 李刚华<sup>1</sup> 宋云攀<sup>1</sup> 张巫军<sup>1</sup> 杨从党<sup>1,2</sup> 王绍华<sup>1</sup> 丁艳锋<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 南京农业大学国家信息农业工程技术中心 / 农业部南方作物生理生态重点开放实验室, 江苏南京 210095; <sup>2</sup> 云南省农业科学院粮食作物研究所, 云南昆明 650205

**摘要:** 2011—2012 年在水稻特高产生态区(云南涛源)和太湖稻区(江苏丹阳), 以超级稻品种 Y 两优 2 号为材料, 通过比较倒伏指标、形态、生理特征指标, 分析不同生态区抗倒性差异及氮素对水稻抗倒性影响。结果表明, 特高产生态区水稻倒伏指数显著低于太湖稻区。主要原因是其株高及重心高度较低, 植株的弯曲力矩较小, 基部茎秆弯曲应力、叶鞘单位长度干重弥补了其粗度及壁厚在抗折能力上的劣势。两生态区倒伏指数与弯曲应力、抗折力呈显著负相关。特高产生态区受氮素影响显著, 随氮素用量增加, 株高、穗颈高、重心高度、上三叶长度及干重显著增加, 基部茎秆强度、充实度显著降低, 抗折能力下降; 太湖稻区增加氮素用量时, 株高、上三叶干重显著增加, 抗折力显著降低。氮素后移使茎秆机械强度降低, 但有利于增加茎秆粗度及壁厚。

**关键词:** 特高产生态区; 水稻; 氮素; 抗倒性

## Lodging Resistance of Super-Hybrid Rice Y Liangyou 2 in Two Ecological Regions

ZHANG Jun<sup>1</sup>, LI Gang-Hua<sup>1</sup>, SONG Yun-Pan<sup>1</sup>, ZHANG Wu-Jun<sup>1</sup>, YANG Cong-Dang<sup>1,2</sup>, WANG Shao-Hua<sup>1</sup>, and DING Yan-Feng<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology in Southern China, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; <sup>2</sup> Institute of Food Crop of Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China

**Abstract:** Experiments were conducted with super-hybrid rice Y Liangyou 2 at Taoyuan, Yunnan Province and Danyang, Jiangsu Province in 2011 and 2012. The main objective of this study was to reveal the difference of lodging resistance and effects of nitrogen on rice lodging resistance between two ecological regions. Rice lodging indexes were 15% lower at Taoyuan than at Danyang. Bending moment of whole plant was 74.2% at Taoyuan lower than that at Danyang. Bending stress and dry matter weight of leaf sheath at basal stem made up the deficiency in stem diameter and wall thickness. There existed significantly negative correlations between lodging indexes and bending stress, snapping resistance at Taoyuan and Danyang. Plant height, height of ear-neck, height of gravity center increased significantly and bending stress, stem weight per centimeter decreased significantly with increasing nitrogen application rate in special high yield eco-region. For Tai Lake rice region, plant height, dry weight of three leaves from top increased significantly, and snapping resistance decreased significantly with increasing the rate of nitrogen. Thus increasing nitrogen application reduced lodging tolerance. Physical strength of stem decreased significantly with delaying nitrogen application, but it was beneficial to promoting the development of basal stem diameter and wall thickness.

**Keywords:** Special high yield eco-site; Rice; Nitrogen; Lodging resistance

随水稻单产的日益提高, 倒伏逐渐成为其“高产、优质、高效、生态、安全”综合生产目标的主要限制因子之一。有关基因型差异<sup>[1]</sup>、肥水管理<sup>[2-8]</sup>、栽培措施<sup>[9-11]</sup>与水稻的抗倒伏能力关系的研究, 基

本揭示了水稻抗倒的形态及生理机制。从分子生物学和遗传学角度也有相关研究<sup>[12-14]</sup>。Kashiwagi 等<sup>[13]</sup>研究表明在不受任何肥料影响的条件下, 抗倒位点 *prl5* 可以延缓叶片的衰老, 增加茎秆非结构性碳水

本研究由国家科技支撑计划项目(2011BAD16B14), 云南省科技创新强省计划项目(2010AD008)和江苏高校优势学科建设工程项目资助。

\* 通讯作者(Corresponding author): 丁艳锋, E-mail: dingyf@njau.edu.cn, Tel: 025-84395066

第一作者联系方式: E-mail: 2009101053@njau.edu.cn

Received(收稿日期): 2012-08-14; Accepted(接受日期): 2012-12-12; Published online(网络出版日期): 2013-01-28.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20130128.0920.013.html>

化合物的积累,从而加强茎秆基部的物理强度。Ookawa等<sup>[14]</sup>研究表明定位克隆SCM2位点,有助于增加茎粗,提高穗粒数,以实现高产抗倒。针对不同穗型的研究表明,重穗型、直立穗型品种茎秆抗折力显著提高,增强了抗倒伏能力<sup>[15-17]</sup>。田间栽培措施与水稻抗倒性关系密切,合理的栽插密度有助于缩短基部节间,增加茎粗及壁厚,提高茎秆的干物质含量,增加其充实度,增强水稻的抗倒性<sup>[10]</sup>。

一般认为,养分优化管理有助于改善节间配置,增加茎粗和充实度,显著提高水稻抗倒伏能力,从而实现高产抗倒的目的<sup>[18-20]</sup>。艾治勇等<sup>[18]</sup>通过正交旋转组合试验,建立不同肥料施用量与倒伏指数、产量的数学模型,提出了抗倒高产的肥料运筹方案。张明聪等<sup>[19]</sup>研究表明,优化施肥和优化高产施肥使水稻重心高度和株高增加,但是由于优化了水稻节间配置,降低了基部节间长度,提高了水稻茎秆碳氮比,增加了水稻茎粗和充实度,实现了水稻的高产抗倒。生态条件对水稻的抗倒伏能力也有显著影响。杨世明等<sup>[21]</sup>研究表明,由于生态条件不同,稻茎秆抗倒能力受氮肥水平影响的程度存在一定差异。但是,关于氮素对不同生态区水稻影响的差异的机理尚缺乏深入研究。本试验以超级稻品种Y两优2号为材料,在水稻特高生态区(云南涛源)和太湖稻区(江苏丹阳),结合不同氮素运筹处理,研究氮素对不同生态区水稻倒伏指数的影响,以期水稻抗倒性研究和氮素合理运筹提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料选择

试验分别于2011—2012年在云南涛源和江苏丹阳进行。云南省永胜县涛源乡,位于东经100°45′,北纬26°41′,海拔1170 m。供试土壤为沙壤土,含有机质9.6~12.2 g kg<sup>-1</sup>、氮2.8~3.6 g kg<sup>-1</sup>、速效磷22~40 mg kg<sup>-1</sup>、速效钾122~126 mg kg<sup>-1</sup>。江苏丹阳地处长江下游南岸,东经119°28′,北纬31°54′,海拔80 m,供试土壤为黄壤土,含总氮1.11 g kg<sup>-1</sup>、总磷0.48 g kg<sup>-1</sup>、总钾1.96 g kg<sup>-1</sup>、速效磷13.23 mg kg<sup>-1</sup>、速效钾119.41 mg kg<sup>-1</sup>和有机质21.02 g kg<sup>-1</sup>。

选用品种Y两优2号,于涛源设4个氮素水平(0、150、300、450 kg hm<sup>-2</sup>)、丹阳设3个氮素水平(0、150、300 kg hm<sup>-2</sup>)。设基肥和穗肥比例为8:2和5:5,采用随机区组设计,3次重复,小区用塑料薄膜包埂以防串肥,栽植规格均为30.0 cm×13.3 cm。

涛源试验3月2日播种,4月9日单苗移栽。以磷肥普钙1050 kg hm<sup>-2</sup>作基肥翻入土中;硫酸钾600 kg hm<sup>-2</sup>,基肥和拔节肥各半。丹阳试验6月1日播种,6月25日单苗移栽,以磷肥普钙1500 kg hm<sup>-2</sup>作基肥翻入土中;硫酸钾600 kg hm<sup>-2</sup>,基肥和拔节肥各半。按高产方式管理水分和防除病虫草害。

### 1.2 测定内容与方法

1.2.1 产量及产量结构 于成熟期按平均茎蘖数取样5穴,考察穗粒结构。

1.2.2 田间表观倒伏率(AIR, %) 于收获前调查田间倒伏株数,植株与地面夹角小于45°即为倒伏株,计算小区内倒伏株数占总穴数的百分比。

1.2.3 各倒伏指标 穗后20 d选取长势一致的10根主茎,测定每个主茎高度、穗颈高、重心高度,之后截下基部9 cm长的一段茎秆,用AIKON推拉计(AIKON RX-5,日本产)垂直向下缓缓用力,作用在中点部位测抗折力F,两支点间距8 cm,然后将弯折的茎秆中部剪断,剥去鞘,用游标卡尺测量椭圆形中空茎秆的长短轴的内径和外径,用下列公式计算各项力学参数<sup>[22]</sup>: ①全株加在基部节间的弯曲力矩(WP, g·cm),  $WP=SL \times FW$ ; 式中SL为基部节间折断部位到主茎顶端的距离(cm),FW为基部节间折断部位至穗顶的鲜重(g); ②折断时的弯矩(M, g·cm),  $M=F \times L/4$ , 式中F为使基部被测节段折断时所施加的力(kg),L为两支点间的距离(cm); ③表示基部椭圆形中空节间横切面大小的断面系数(Z, mm<sup>3</sup>),  $Z=\pi/32 \times (a_1^3 b_1 - a_2^3 b_2)/a_1$ ; 式中a<sub>1</sub>和a<sub>2</sub>表示短轴的外径和内径, b<sub>1</sub>和b<sub>2</sub>表示长轴的外径与内径,单位为mm; ④代表茎秆材质强度的弯曲应力(BS, g mm<sup>-2</sup>),  $BS=M/Z$ ; ⑤表示易发生倒伏程度的倒伏指数(LI, %),  $LI=WP/M$ 。

将上述测定后的茎、鞘分装,置105℃烘箱杀青30 min, 80℃烘至恒重,分别称重,计算茎、鞘充实度(单位长度干重)。

### 1.3 统计分析方法

用Microsoft Excel整理数据,SPSS16.0 for Windows进行方差分析和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮素运筹对两生态区水稻产量及产量构成的影响

不同生态点间水稻产量差异显著(表2)。涛源产量为10~18 t hm<sup>-2</sup>,而丹阳产量主要集中在10~13 t hm<sup>-2</sup>,

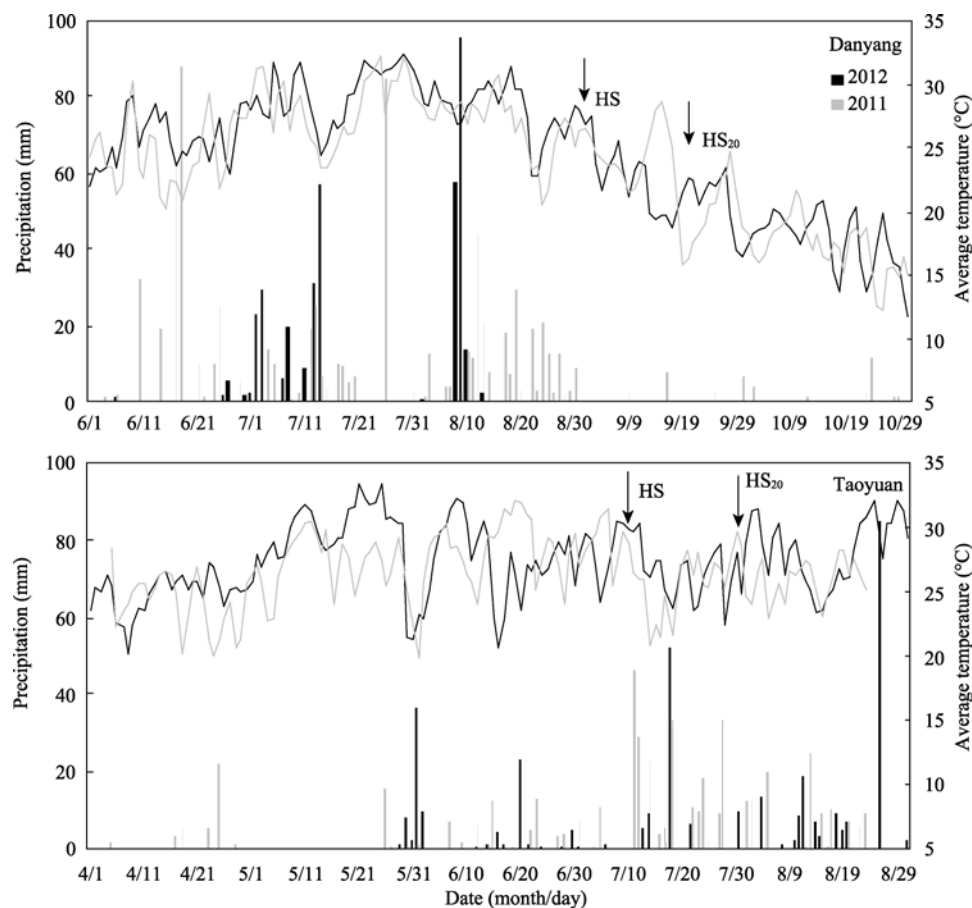


图 1 两生态点温度及降雨量  
**Fig. 1 Temperature and precipitation in two ecological regions**  
HS: 齐穗期; HS<sub>20</sub>: 穗后 20 d. HS: heading stage; HS<sub>20</sub>: 20 days after heading.

表 1 云南涛源和江苏丹阳气象条件  
**Table 1 Meteorological conditions in two ecological regions**

年份 Year	生态点 Eco-site	光合有效辐射 Photo-synthetically active radiation ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	太阳辐射 Solar radiation ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	大气湿度 Relative humidity (%)	最高气温 Maximum temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	最低气温 Minimum temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	降雨量 Precipitation (mm)
2011	云南涛源 Taoyuan, Yunnan	776.1	1984.6	52.4	33.1	20.5	319.3
	江苏丹阳 Danyang, Jiangsu	446.6	1364.2	82.4	28.2	20.5	767.5
2012	云南涛源 Taoyuan, Yunnan	709.4	1717.6	52.3	33.1	21.8	446.2
	江苏丹阳 Danyang, Jiangsu	628.4	1731.4	77.4	30.2	22.1	367.5

涛源水稻两年平均产量高出丹阳生态点约 31.0%，差异达到极显著水平。氮素运筹对产量影响显著，随施氮水平增加，有效穗、颖花量显著增加，两生态点趋势一致。氮素后移，显著增加了颖花量，有利于产量的增加。

2.2 氮素运筹对两生态区水稻倒伏指标的影响

倒伏指数越高，抗倒伏能力越低。涛源水稻倒伏指数小于丹阳，弯曲力矩、折断弯矩均小于丹阳，2011 年涛源水稻弯曲力矩降低幅度大于折断弯矩，

2012 年则是折断弯矩降低幅度大于弯曲力矩(图 2)。

氮素用量增加，倒伏指数显著增加，两生态区趋势一致(表 3)。不同生态区水稻倒伏指数对氮素的响应不同。增加氮肥用量，显著增加了涛源水稻折断部位至穗顶长度，提高了折断部位至穗顶的鲜重，导致弯曲力矩显著增加，水稻的倒伏指数显著增加；丹阳水稻折断部位至穗顶的长度显著降低。氮素后移增加了折断部位至穗顶的鲜重，提高了植株的弯曲力矩，同时降低了折断弯矩，导致倒伏指数增加，

表 2 氮素运筹对两生态区产量及产量构成的影响  
Table 2 Effects of nitrogen strategies on yield and yield components in two ecological regions

氮素用量 Nitrogen application (kg hm <sup>-2</sup> )	施氮比例 N ratio	产量 Yield (t hm <sup>-2</sup> )	有效穗 Panicles (×10 <sup>4</sup> hm <sup>-2</sup> )	穗粒数 Spikelets per panicle	颖花量 Spikelets (×10 <sup>5</sup> hm <sup>-2</sup> )	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	表观倒伏率 Apparent lodging rate (%)
2011, 云南涛源 Taoyuan, Yunnan								
0		10.8 c	267.0 e	164.0 b	4379.4 c	93.8 a	26.2 a	0 a
150	8:2	14.5 b	336.0 d	182.8 ab	6135.3 b	89.7 ab	26.4 a	0 a
150	5:5	16.0 ab	358.5 cd	193.2 a	6936.0 ab	88.8 b	25.9 a	0 a
300	8:2	16.1 ab	382.5 abc	187.1 ab	7171.1 a	87.9 b	25.5 a	0 a
300	5:5	16.7 ab	376.5 bc	194.7 a	7344.3 a	89.0 b	25.6 a	0 a
450	8:2	17.5 a	394.5 ab	192.4 a	7577.7 a	90.7 ab	25.5 a	0 a
450	5:5	18.3 a	408.0 a	192.5 a	7854.0 a	90.9 ab	25.7 a	0 a
2011, 江苏丹阳 Danyang, Jiangsu								
0		10.7 a	246.2 c	187.8 a	3082.1 b	88.5 a	26.1 a	0 a
150	8:2	12.2 a	276.9 b	195.0 a	3594.6 ab	88.5 a	25.5 ab	0 a
150	5:5	11.4 a	271.5 bc	186.7 a	3382.2 ab	89.2 a	25.2 ab	0 a
300	8:2	12.0 a	313.9 a	169.5 a	3539.1 ab	91.1 a	24.8 b	0 a
300	5:5	12.3 a	282.4 b	195.1 a	3667.1 a	89.5 a	25.0 b	0 a
2012, 云南涛源 Taoyuan, Yunnan								
0		10.6 c	252.0 c	164.3 a	4137.2 c	95.0 a	27.0 a	0 a
150	8:2	14.3 b	324.0 b	189.6 a	6124.8 b	88.7 ab	26.4 ab	0 a
150	5:5	15.9 ab	343.5 ab	198.5 a	6828.5 ab	88.0 ab	26.4 ab	0 a
300	8:2	16.9 a	357.0 a	205.0 a	7332.2 a	89.5 ab	25.9 bc	0 a
300	5:5	17.3 a	357.0 a	205.4 a	7336.2 a	91.7 ab	25.7 bc	0 a
450	8:2	16.0 ab	372.0 a	199.4 a	7422.9 a	85.2 b	26.0 bc	5.6 a <sup>1)</sup>
450	5:5	16.2 a	376.5 a	193.6 a	7270.7 a	89.1 ab	25.0 c	0 a
2012, 江苏丹阳 Danyang, Jiangsu								
0		10.9 b	222.0 c	202.9 a	4514.4 b	89.4 b	27.8 ab	0 b
150	8:2	11.4 b	277.5 ab	169.1 b	4688.3 ab	90.5 ab	27.0 ab	1.90 b
150	5:5	12.2 ab	273.0 b	174.8 b	4776.8 ab	94.2 a	26.5 b	2.57 b
300	8:2	13.3 a	303.0 a	176.8 b	5361.2 a	91.9 ab	26.5 b	32.6 a
300	5:5	12.0 ab	297.0 a	164.7 b	4885.1 ab	91.2 ab	26.5 b	29.8 a

<sup>1)</sup> 小区虫害(褐飞虱)。数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。  
<sup>1)</sup> Insect damaged (brown plant hopper). Values followed by different letters are significantly different at 0.05 probability levels.

抗倒伏能力降低。

年际间倒伏指数变化较大, 与 2011 年相比, 2012 年涛源水稻略有增加, 而丹阳降低了约 21.2%。分析表明, 涛源水稻折断弯矩降低了 18.7%; 丹阳水稻弯曲力矩较 2011 年降低了约 29.8%, 折断弯矩降低了约 11.1%, 其中鲜重变化最大, 较 2011 年降低了约 25.6%, 折断部位至穗顶的长度平均降低了约 6.7 cm。

由表 4 可见, 两生态点产量、倒伏指数、弯曲力矩、折断部位至穗顶长度及鲜重、弯曲应力均达到显著或极显著差异; 两年倒伏指数的差异主要集中在弯曲力矩( $F=465.7^{**}$ , 2011;  $F=42.0^{**}$ , 2012), 其

中折断部位至穗顶的长度的差异大于折断部位至穗顶的鲜重。氮素用量对产量、倒伏指数均有显著影响, 其中 2011 年主要影响折断部位至穗顶的长度, 2012 年则主要影响弯曲应力。施氮比例对两年的基部茎秆的弯曲应力影响显著。

**2.3 水稻株型指标及基部茎秆形态特征与倒伏指数的相关分析**

相关分析(表 5)表明, 与丹阳相比, 涛源水稻的株高、穗颈高、重心高度、上三叶干重及长度等个体形态指标与倒伏指数均呈显著正相关; 抗折力、弯曲应力、基部茎秆单位长度干重、基部叶鞘单位长度干重以及茎鞘单位长度总干重等基部茎鞘特征

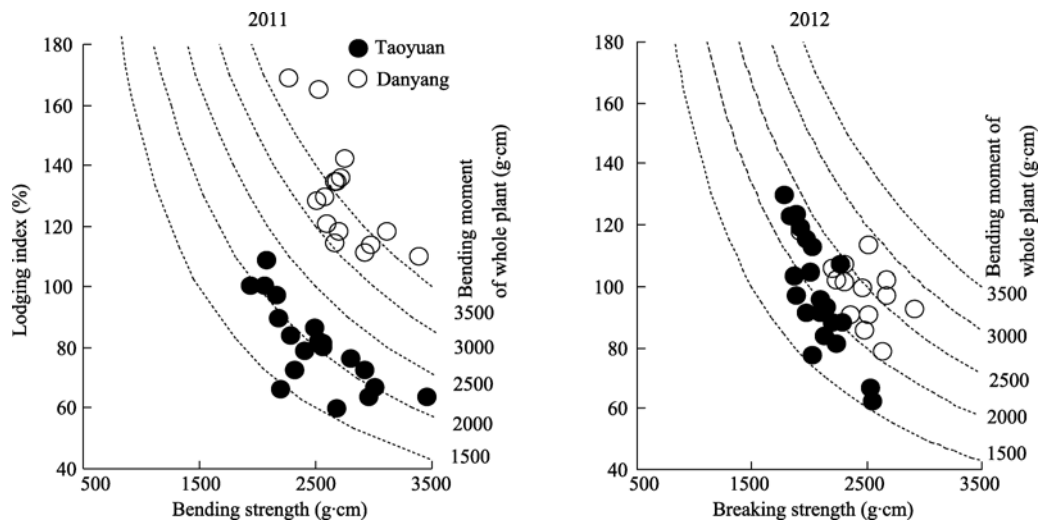


图 2 倒伏指数与弯曲力矩、折断弯矩的关系  
Fig. 2 Relationship of lodging index with bending moment of whole plant and breaking strength

表 3 氮素运筹对两生态区水稻倒伏指标的影响

Table 3 Effects of nitrogen strategies on lodging parameters of rice basal stem and sheath in two ecological regions						
氮素用量 Nitrogen application (kg hm <sup>-2</sup> )	氮素比例 Nitrogen ratio	倒伏指数 LI (%)	弯曲力矩 WP (g·cm)	折断部位至 穗顶长度 SL (cm)	折断部位至 穗顶鲜重 FW (g)	折断弯矩 M (g·cm)
2011, 云南涛源 Taoyuan, Yunnan						
0		59.9 c	1579.3 c	90.9 d	17.4 b	2449.4 a
150	8:2	78.9 b	1892.9 b	97.5 c	19.4 a	2399.4 a
150	5:5	76.0 bc	2026.1 ab	99.4 bc	20.4 a	2714.7 a
300	8:2	74.8 bc	2061.8 ab	101.1 abc	20.4 a	2804.0 a
300	5:5	77.2 bc	2040.0 ab	100.3 ab	20.3 a	2667.1 a
450	8:2	85.9 ab	2057.1 ab	102.1 ab	20.1 a	2438.6 a
450	5:5	101.7 a	2147.9 a	102.9 a	20.9 a	2112.8 a
2011, 江苏丹阳 Danyang, Jiangsu						
0		111.7 b	3345.4 a	119.7 ab	27.9 b	3001.5 a
150	8:2	120.9 ab	3413.3 a	120.5 a	28.3 ab	2827.2 a
150	5:5	130.7 ab	3387.0 a	118.6 abc	28.6 ab	2590.9 a
300	8:2	128.1 ab	3354.3 a	116.4 bc	28.8 ab	2656.4 a
300	5:5	138.8 a	3674.4 a	115.9 c	31.7 a	2649.7 a
2012, 云南涛源 Taoyuan, Yunnan						
0		71.5 b	1614.8 b	93.0 b	17.4 b	2276.7 a
150	8:2	94.2 ab	1815.8 ab	97.5 ab	20.1 ab	1929.8 ab
150	5:5	90.5 ab	1926.1 ab	97.9 ab	19.7 ab	2127.8 ab
300	8:2	100.9 ab	2203.4 a	99.3 ab	22.1 a	2191.4 ab
300	5:5	108.9 a	2145.6 a	99.8 a	21.5 a	2024.5 ab
450	8:2	112.9 a	2181.2 a	100.7 a	21.8 a	1874.3 b
450	5:5	116.3 a	2174.2 a	99.3 ab	21.8 a	1873.7 b
2012, 江苏丹阳 Danyang, Jiangsu						
0		97.0 a	2556.8 a	112.8 a	22.6 a	2641.0 a
150	8:2	95.0 a	2339.9 a	112.4 a	20.8 a	2480.1 a
150	5:5	94.1 a	2261.5 a	110.0 a	20.6 a	2405.2 a
300	8:2	105.5 a	2533.7 a	111.7 a	22.7 a	2430.0 a
300	5:5	104.9 a	2357.4 a	110.1 a	21.5 a	2246.9 a

数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

LI: lodging index; WP: bending moment of whole plant; SL: length from broken point to the panicle top; FW: fresh weight from broken point to the panicle top; M: breaking strength. Values followed by different letters are significantly different at 0.05 probability levels.

表 4 两生态区各指标方差分析  
Table 4 Analysis of some parameters in two ecological regions

方差分析 Variance analysis	产量 Y	倒伏指数 LI	弯曲力矩 WP	折断部位至 穗顶长度 SL	折断部位至 穗顶鲜重 FW	折断弯矩 M	弯曲应力 BS
2011							
生态点 (S)	83.4**	163.2**	465.7**	812.6**	290.2**	1.9	141.3**
氮素用量 (N)	8.60**	6.01**	1.59	5.12*	2.08	2.53	1.75
氮素比例 (R)	3.87*	5.48*	2.53	0.05	3.74*	0.85	5.41*
生态点×氮素用量 (S×N)	0.64	1.41	0.05	12.7**	1.48	0.77	0.2
生态点×氮素比例 (S×R)	0.16	1.81	0.45	1.21	0.99	0.63	0.68
氮素用量×氮素比例 (N×R)	0.09	1.35	0.26	0.08	0.29	0.87	1.47
生态点×氮素用量×氮素比例 (S×N×R)	0.30	0.02	2.94	1.75	2.53	1.37	1.29
2012							
生态点 (S)	61.9**	5.34*	42.0**	134.7**	7.71*	18.6**	37.8**
氮素用量 (N)	7.1**	7.1**	3.06	0.49	3.22	3.05	3.49*
氮素比例 (R)	0.32	0.23	1.13	1.68	0.76	0.44	3.92*
生态点×氮素用量 (S×N)	2.15	0.36	0.22	0.60	0.18	2.30	2.44
生态点×氮素比例 (S×R)	2.85	0.18	0.13	0.06	0.03	1.20	1.82
氮素用量×氮素比例 (N×R)	2.63	0.08	0.29	0.09	0.45	0.73	0.03
生态点×氮素用量×氮素比例 (S×N×R)	0.33	0.06	0.03	0.57	0.00	0.24	4.08*

\*和\*\*表示达 0.05 和 0.01 差异水平。

\* and \*\* denote significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. Y: yield; LI: lodging index; WP: bending moment of whole plant; SL: length from broken point to the panicle top; FW: fresh weight from broken point to the panicle top; M: breaking strength; BS: bending stress; S: site; N: nitrogen rate; R: nitrogen ratio.

表 5 各指标与倒伏指数的相关  
Table 5 Relationship of lodging index and other parameters

指标 Parameter	2011		2012	
	涛源 Taoyuan (n=21)	丹阳 Danyang (n=15)	涛源 Taoyuan (n=21)	丹阳 Danyang (n=15)
个体形态指标 Individual morphological parameters				
株高 Plant height (cm)	0.646**	0.437	0.889**	0.528*
穗颈高 Height of ear-neck (cm)	0.614**	-0.149	0.829**	—
重心高度 Height of gravity center (cm)	0.706**	-0.197	0.894**	0.137
相对重心高度 Relative height of gravity center (%)	0.139	0.126	0.238	-0.445
上三叶干重 Dry weight of top-three leaves (g)	0.640**	0.549*	0.873**	0.483
剑叶长度 Length of flag leaf (cm)	0.300	0.127	0.719**	0.414
倒二叶长度 Length of 2nd leaf from top (cm)	0.406*	-0.272	0.652**	0.246
倒三叶长度 Length of 3rd leaf from top (cm)	0.748**	-0.154	0.598**	0.105
基部茎秆特征指标 Parameters of basal stem and sheath				
壁厚 Stem wall thickness (mm)	-0.282	0.071	0.096	-0.287
茎粗 Stem diameter (mm)	0.015	0.051	0.484*	-0.149
抗折力 Snapping resistance (kg)	-0.757**	-0.254	-0.734**	-0.592*
断面系数 Section modulus (mm <sup>3</sup> )	0.029	0.187	0.424	0.045
弯曲应力 Bending stress (g mm <sup>-2</sup> )	-0.872**	-0.701**	-0.746**	-0.491
茎秆单位长度干重 Dry weight per cm of stem (mg cm <sup>-1</sup> )	-0.734**	0.318	-0.521*	-0.213
叶鞘单位长度干重 Dry weight per cm of sheath (mg cm <sup>-1</sup> )	-0.669**	0.318	-0.667**	-0.643**
茎鞘单位长度总干重 Total dry weight per cm of stem and sheath (mg cm <sup>-1</sup> )	-0.745**	0.442	-0.635**	-0.425

\*和\*\*表示达 0.05 和 0.01 差异水平。

\* and \*\* denote significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

指标均与倒伏指数呈极显著负相关, 两年结果一致。2011年丹阳水稻仅上三叶干重与倒伏指数呈显著正相关( $r$ 分别为0.549\*), 弯曲应力与倒伏指数呈极显著负相关( $r = -0.701^{**}$ ), 而2012年株高与倒伏指数呈显著正相关( $r = 0.528^*$ ), 抗折力及叶鞘单位长度干重与倒伏指数呈显著负相关( $r$ 分别为 $-0.592^*$ 和 $-0.643^*$ )。

#### 2.4 氮素运筹对两生态区水稻株型特征的影响

两生态区水稻个体形态指标差异显著(表6)。2011年涛源株高、穗颈高均显著低于丹阳, 分别降低约25.2%和19.0%, 降低了折断部位至穗顶的长

度。涛源水稻上三叶干重显著低于丹阳, 两者相差约0.41 g, 剑叶、倒二叶、倒三叶叶长分别较丹阳水稻降低了约33.8%、27.5%和38.7%, 差异均达到极显著水平, 涛源水稻重心高度降低, 降低了整株水稻所承受的弯曲力矩。两年结果趋势一致。

氮素显著影响水稻个体形态。两生态区水稻个体形态受氮素影响表现不一致, 增加氮素用量显著增加了涛源水稻株高、穗颈高、上三叶干重及叶长, 水稻重心高度比空白分别增加了5.6%、7.8%和10.3%, 2012年趋势与此一致; 丹阳株高、上三叶干重及长度显著增加。氮素后移, 上三叶长度及干重、

表6 氮素运筹对两生态区水稻株型特征的影响

Table 6 Effects of nitrogen strategies on individual morphological parameters of rice basal stem and sheath in two ecological regions

氮素用量 Nitrogen application (kg hm <sup>-2</sup> )	氮素 比例 Nitrogen ratio	株高 Plant height (cm)	穗颈高 Height of ear neck (cm)	重心高度 Height of gravity center (cm)	相对重心高度 Relative height of gravity center (%)	上三叶干重 Dry weight of top-three leaves (g)	单穗重 Individual panicle weight (g)	叶长 Leaf length (cm)		
								剑叶 Flag leaf	倒二叶 2nd leaf from top	倒三叶 3rd leaf from top.
2011, 云南涛源 Taoyuan, Yunnan										
0		97.4 c	69.9 b	41.5 c	42.6 a	0.50 e	3.69 a	25.1 e	32.7 e	30.7 c
150	8:2	105.0 b	74.8 ab	43.6 bc	41.5 a	0.68 d	3.63 a	32.2 d	39.5 d	35.1 bc
150	5:5	104.2 b	75.5 ab	43.4 bc	41.6 a	0.69 cd	3.30 a	33.0 d	41.7 cd	34.7 bc
300	8:2	109.4 ab	76.8 a	45.2 ab	41.3 a	0.78 bc	3.41 a	35.9 cd	44.1 bc	38.7 b
300	5:5	112.5 a	77.3 a	48.6 a	43.2 a	0.82 ab	4.09 a	41.2 b	49.2 a	31.5 c
450	8:2	111.8 a	77.6 a	47.1 a	42.2 a	0.86 ab	3.58 a	39.1 bc	45.9 ab	43.5 a
450	5:5	115.1 a	76.5 a	48.7 a	42.3 a	0.90 a	3.94 a	46.7 a	49.3 a	37.4 b
2011, 江苏丹阳 Danyang, Jiangsu										
0		122.2 c	—	46.4 b	38.0 a	1.07 a	3.12 a	38.6 c	44.7 c	51.9 c
150	8:2	132.2 ab	—	47.5 ab	35.9 a	0.91 b	2.96 a	39.7 c	46.1 bc	58.2 b
150	5:5	129.8 b	—	46.4 b	35.8 a	0.87 b	3.19 a	41.2 b	47.1 b	58.1 b
300	8:2	134.2 ab	—	48.2 ab	35.9 a	0.99 ab	2.86 a	41.5 b	49.4 a	61.0 a
300	5:5	136.5 a	—	49.2 a	36.1 a	0.97 a	2.94 a	44.5 a	47.0 b	58.3 b
2012, 云南涛源 Taoyuan, Yunnan										
0		95.4 d	71.0 c	41.6 c	43.7 a	0.51 c	3.86 a	23.7 c	33.0 b	29.8 d
150	8:2	102.0 c	77.1 b	43.4 bc	42.5 a	0.73 ab	3.41 a	25.1 bc	36.3 ab	36.4 c
150	5:5	103.9 bc	78.7 ab	44.5 ab	42.9 a	0.70 b	3.80 a	26.7 bc	38.8 ab	39.2 c
300	8:2	105.6 ab	80.9 a	44.7 ab	42.3 a	0.76 ab	3.29 a	26.7 bc	32.4 b	36.6 c
300	5:5	104.8 abc	79.2 ab	45.0 ab	43.0 a	0.79 ab	3.57 a	33.9 a	40.9 a	38.3 c
450	8:2	106.6 ab	81.1 a	45.3 ab	42.5 a	0.80 ab	3.38 a	28.3 b	41.2 a	43.5 b
450	5:5	107.4 a	81.9 a	46.5 a	43.3 a	0.82 a	3.28 a	29.0 b	40.9 a	48.2 a
2012, 江苏丹阳 Danyang, Jiangsu										
0		135.0 b	97.4 a	54.9 a	44.2 a	1.00 c	2.68 a	34.3 b	48.9 a	62.4 a
150	8:2	138.9 ab	98.3 a	54.7 a	43.7 a	1.14 bc	2.62 a	41.0 ab	52.1 a	67.0 a
150	5:5	138.1 ab	97.2 a	53.3 a	43.3 a	1.15 bc	2.31 a	49.3 a	56.8 a	68.4 a
300	8:2	139.1 ab	96.6 a	53.4 a	44.2 a	1.19 ab	2.09 a	40.1 ab	50.7 a	65.6 a
300	5:5	142.3 a	95.3 a	53.8 a	44.7 a	1.20 a	2.11 a	43.9 a	51.2 a	66.0 a

数据后不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。

Values followed by different letters are significantly different at 0.05 probability levels.

单穗重增加, 导致稻株重心高度增加, 间接地加大了植株所承受的弯曲力矩, 两生态区一致。

与 2011 年相比, 2012 年溧源水稻株高、单穗重及剑叶、倒二叶叶片长度增大, 穗颈高降低, 重心高度和上三叶干重略有增加; 丹阳水稻株高、重心高度、上三叶干重、剑叶及倒二叶长度降低, 单穗重增大。

## 2.5 氮素运筹对两生态区茎秆基部形态特征的影响

由图 3 可见, 丹阳水稻折断弯矩略大于溧源, 但两者的影响因素不一致; 溧源水稻茎秆的粗度、壁厚显著低于丹阳, 其断面系数小, 但弯曲应力显著大于丹阳, 茎秆的机械强度显著增加。

表 7 表明, 溧源水稻壁厚、茎粗均极显著低于丹阳, 基部茎秆单位长度干重极显著低于丹阳, 但叶鞘单位长度干重极显著高于丹阳, 茎鞘单位长度总干重略大于丹阳, 弯曲应力显著大于丹阳。

氮素用量增加, 抗折力降低, 弯曲应力显著降低。氮素用量增加, 溧源水稻壁厚、茎粗降低, 茎秆单位长度、叶鞘单位长度干重及茎鞘单位长度总干重显著降低; 丹阳水稻基部茎粗、壁厚增加, 茎秆单位长度干重显著增加。氮素后移, 溧源水稻茎秆、叶鞘单位长度干重及茎鞘单位长度总干重降低, 茎秆的弯曲应力显著降低, 减小了茎秆的茎秆强度。丹阳水稻基部弯曲应力显著降低, 两年结果一致。

与 2011 年相比, 溧源水稻壁厚、叶鞘单位长度干重及茎鞘单位长度总干重降低, 导致抗折力下降, 弯曲应力降低; 丹阳水稻壁厚、茎粗、茎秆单位长度干重及茎鞘单位长度总干重降低, 导致抗折力下

降, 但其弯曲应力增加, 茎秆强度增强。

## 3 讨论

### 3.1 不同生态区抗倒性差异比较

高产栽培需要足够大的生物产量, 这就使茎秆承受的重量(弯曲力矩)增加, 倒伏的风险增大, 因此高产与抗倒存在一定的矛盾。李刚华等<sup>[23]</sup>认为特高产生生态区水稻单茎叶面积较小, 植株具有叶片短、宽、厚、叶角小等优势株型, 同时单位面积有效穗数高, 且光照资源充足, 因此产量显著高于太湖稻区。本试验表明, 特高产生生态区水稻产量高出太湖稻区约 31.0%, 差异达到显著水平。两生态区抗倒性差异显著, 弯曲力矩对倒伏指数的贡献率大于折断弯矩。特高产生生态区水稻株高、穗颈高、上三叶干重均显著低于太湖稻区, 重心高度、植株鲜重及植株基部所承受的弯曲力矩均显著降低。

茎秆抗倒性与水稻株高、重心高度、茎粗和节间长度等<sup>[1,15,24]</sup>形态指标及充实度等<sup>[8,19]</sup>生理指标关系密切。试验结果表明, 虽然特高产生生态区水稻茎秆直径、壁厚、茎秆的充实度小于太湖稻区, 但由于其茎秆强度高, 叶鞘充实度高, 对茎秆起到了一定的保护和支撑作用, 降低了与太湖稻区基部茎鞘抗折能力的差距。这可能与溧源的特殊生态条件有关<sup>[23]</sup>, 特高产生生态区的光合辐射强, 昼夜温差大, 促进了齐穗期茎秆中干物质积累, 增强了茎秆的充实度及其机械结构。因此, 从抗倒栽培上来讲, 增加茎秆的充实度可实现既高产又抗倒的效果。这与杨惠杰等<sup>[25]</sup>研究结果一致。

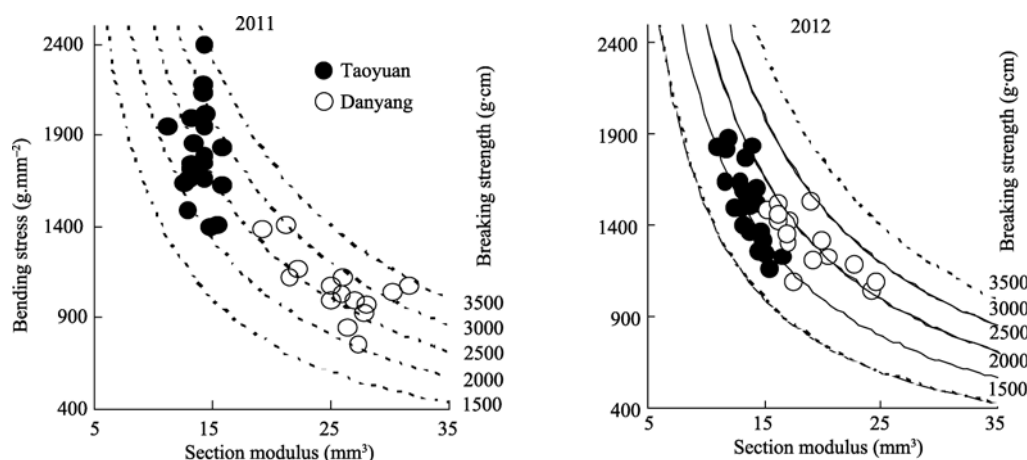


图 3 折断弯矩与弯曲应力、断面系数的关系  
Fig. 3 Relations of breaking strength with bending stress and section modulus



表 7 氮素运筹对两生态区水稻基部茎秆形态及生理指标的影响  
Table 7 Effects of nitrogen strategies on the morphological and physiological indices of rice basal stem and sheath in two ecological regions

氮素用量 Nitrogen application (kg hm <sup>-2</sup> )	施氮比例 Nitrogen ratio	抗折力 Snapping resistance (kg)	壁厚 Stem wall thickness (mm)	茎粗 Stem diameter (mm)	茎秆单位 长度干重 Dry weight of stem (mg cm <sup>-1</sup> )	叶鞘单位 长度干重 Dry weight of sheath (mg cm <sup>-1</sup> )	茎鞘单位 长度总干重 Total dry weight of stem and sheath (mg cm <sup>-1</sup> )	断面系数 Section modulus (mm <sup>3</sup> )	弯曲应力 Bending stress (g mm <sup>-2</sup> )
2011, 云南涛源 Taoyuan, Yunnan									
0		1.335 a	1.07 a	5.56 a	34.0 a	39.2 a	73.2 a	13.1 a	1964.4 a
150	8:2	1.199 a	1.13 a	5.68 a	33.4 a	37.3 ab	70.8 ab	14.2 a	1698.0 abc
150	5:5	1.357 a	1.14 a	5.71 a	32.3 a	34.2 bc	66.5 abc	14.5 a	1801.9 ab
300	8:2	1.319 a	1.07 a	5.73 a	30.9 ab	34.0 bc	64.9 bcd	14.3 a	1848.2 ab
300	5:5	1.178 a	1.08 a	5.62 a	26.9 b	31.2 c	58.1 de	14.0 a	1682.1 bc
450	8:2	1.219 a	1.07 a	5.67 a	30.0 ab	31.0 c	61.0 cde	13.9 a	1740.5 abc
450	5:5	1.057 a	1.07 a	5.70 a	26.2 b	30.0 c	56.2 e	14.4 a	1474.4 c
2011, 江苏丹阳 Danyang, Jiangsu									
0		1.397 a	1.16 a	7.13 a	36.6 c	19.7 a	56.3 a	25.8 a	1189.3 a
150	8:2	1.392 a	1.18 a	7.01 a	39.1 bc	21.0 a	60.1 a	24.7 a	1158.4 a
150	5:5	1.333 a	1.20 a	7.06 a	41.0 abc	21.4 a	62.7 a	25.8 a	1003.6 a
300	8:2	1.247 a	1.22 a	7.13 a	46.4 a	18.9 a	65.3 a	24.7 a	1099.6 a
300	5:5	1.440 a	1.22 a	7.13 a	43.5 ab	21.8 a	65.3 a	27.2 a	974.9 a
2012, 云南涛源 Taoyuan, Yunnan									
0		1.1383 a	1.00 ab	5.50 c	37.4 a	33.4 a	70.9 a	12.4 a	1840.2 a
150	8:2	0.961 b	1.04 a	5.86 abc	32.3 ab	29.7 ab	62.0 ab	14.4 a	1362.6 bc
150	5:5	1.064 ab	1.02 ab	5.58 bc	29.4 b	30.4 ab	59.8 abc	13.0 a	1649.4 ab
300	8:2	1.096 ab	1.05 a	5.90 abc	30.0 b	25.1 bc	55.1 bcd	14.5 a	1526.2 bc
300	5:5	1.013 ab	0.93 b	5.91 ab	26.7 b	17.5 d	44.2 d	13.8 a	1551.0 bc
450	8:2	0.937 b	0.98 ab	5.99 a	27.9 b	19.9 cd	47.8 cd	14.6 a	1288.8 c
450	5:5	0.937 b	0.98 ab	5.73 abc	27.1 b	18.0 d	45.1 d	13.3 a	1430.2 bc
2012, 江苏丹阳 Danyang, Jiangsu									
0		1.321 a	1.17 a	6.68 a	33.3 a	21.4 a	54.7 a	18.6 a	1459.2 a
150	8:2	1.240 a	1.05 a	6.40 a	32.3 a	21.0 a	53.2 a	18.4 a	1355.5ab
150	5:5	1.203 a	1.13 a	6.45 a	34.8 a	23.2 a	58.0 a	18.7 a	1278.6 abc
300	8:2	1.215 a	1.00 a	6.43 a	32.2 a	18.5 a	50.8 a	20.2 a	1111.2 c
300	5:5	1.123 a	1.03 a	6.46 a	37.5 a	23.7 a	61.2 a	17.9 a	1242.7 bc

数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。  
Values followed by different letters are significantly different at 0.05 probability levels.

水稻抗倒性还与生态条件有关<sup>[21]</sup>。年际间特高产生态区水稻株高及剑叶、倒二叶长度、壁厚、叶鞘单位长度干重均存在差异,这可能与太阳辐射强度及光合有效辐射高有关,高光强抑制株高及叶片长度增长;另一方面,籽粒灌浆前期的低温使叶鞘中干物质向籽粒中的转运降低,叶鞘维持较高的充实度,提高了茎秆的抗折断能力。对于太湖稻区,年际间差异与特高产生态区类似,这可能与抽穗前丹阳低温寡照有关;另外,灌浆期温度较高,植株叶片光合作用强,产生的大量光合产物除了向籽粒中

运输外,还有一部分运输到茎秆中,而抽穗后低温,光合强度降低,茎秆中物质向籽粒中运输,导致茎秆单位长度干重降低(图 1 和表 1),这可能也是两年茎秆、叶鞘单位长度干重变化不一致的原因<sup>[21,23]</sup>。

3.2 氮素对水稻抗倒性的影响

氮素与水稻的抗倒伏能力有密切关系,氮素显著影响水稻的形态特征及基部茎秆的特性<sup>[19-21,26]</sup>。一般认为,施氮量增加导致株高增加而增加倒伏的风险。但石扬娟等<sup>[27]</sup>认为随着施氮量的增加,倒伏指数先降低再升高。杨世民等<sup>[21]</sup>则认为由于生态条

件不同, 水稻茎秆抗倒能力受氮肥水平影响的程度存在一定差异。本研究表明, 水稻倒伏指数均随施氮量增加呈上升趋势, 两生态区一致。氮素后移在一定程度上加重了倒伏的风险。但氮素对不同生态区水稻抗倒性的影响机制不一致。

随氮素用量增加, 倒伏指数增大, 水稻茎秆抗倒性降低, 两生态区一致。随氮素用量增加, 特高产生生态区水稻株高、穗颈高、上三叶长度及干重显著增加, 导致植株的重心高度显著增加, 加大了倒伏的风险。太湖稻区氮素用量对水稻株高、上三叶干重及抗折力影响显著。这可能与当地的基础地力有关, 溇源基础地力较低, 植株对氮素比较敏感<sup>[20]</sup>。从生理和力学特征上分析, 随氮素用量的增加, 特高产生生态区茎秆、叶鞘单位长度干重、茎秆机械强度降低, 导致基部茎秆的抗折能力下降; 太湖稻区水稻基部茎秆、叶鞘单位长度干重增加, 但由于其茎秆强度变弱, 抗折力降低。

氮素后移, 倒伏指数略有增加, 一定程度上降低了水稻的抗倒伏能力。试验结果表明, 氮素后移, 特高产生生态区水稻折断部位至穗顶长度及鲜重、上三叶长度及干重、单穗重增加, 提高了植株的重心高度, 同时单位长度茎秆干重、基部的茎秆强度显著降低, 抗折能力下降, 导致抗倒伏能力降低。太湖稻区水稻株高、折断部位至穗顶的鲜重增加, 但其折断部位至穗顶的长度降低, 这可能与剑叶长度有关, 基部的弯曲应力降低, 植株的抗倒性下降。试验还表明, 氮素后移有利于提高基部茎秆的粗度及壁厚。

## 4 结论

特高产生生态区水稻抗倒伏能力大于太湖稻区, 主要因其株高及重心高度降低, 降低了植株的弯曲力矩。与太湖稻区相比较, 特高产生生态区水稻虽基部茎秆直径和壁厚均较小, 但单位长度叶鞘干重、茎秆强度显著提高, 缩小了茎秆在抗弯折能力上的差距。氮素用量显著影响水稻抗倒性, 随氮素用量增加, 倒伏指数增加, 抗倒性降低; 氮素后移使茎秆强度显著降低, 但有利于增加茎粗和秆壁厚度。

## References

- [1] Sun X-C(孙旭初). Study on the resistance of the culm of rice to lodging. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 1987, 20(4): 32–37 (in Chinese with English abstract)
- [2] Shi Y-J(石扬娟). Studies on Traits Correlating to Lodging Resistance under the Different Fertilization Manner and Planting Density in Rice. MS Thesis of Anhui Agricultural University, 2008 (in Chinese with English abstract)
- [3] Yang C-M(杨长明), Yang L-Z(杨林章), Yan T-M(颜廷梅), Ou-Yang Z(欧阳竹). Effects of nutrient and water regimes on lodging resistance of rice. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2004, 15(4): 646–650 (in Chinese with English abstract)
- [4] Wang D(王丹), Liu Y-Y(刘元英), Peng X-L(彭显龙), Liu Z-L(刘智蕾), Song W-B(宋文博). Effects of water and fertilizer optimization on lodging resistance of rice in cold area of northeastern China. *J Nucl Agric Sci* (核农学报), 2012, 26(2): 352–357 (in Chinese with English abstract)
- [5] Liu L-J(刘立军), Wang K-J(王康君), Ge L-L(葛立立), Fan M-M(范苗苗), Zhang Z-C(张自常), Wang Z-Q(王志琴), Yang J-C(杨建昌). Relationship between characteristics of basal internodes and lodging and its physiological mechanism in dry-cultivated rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2012, 38(5): 848–856 (in Chinese with English abstract)
- [6] Tang S-H(唐拴虎), Xu P-Z(徐培智), Zhang F-B(张发宝), Chen J-S(陈建生), Xie C-S(谢春生). Influence of single basal application controlled-release fertilizer on morphologic development of root system and lodging resistance of rice. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2006, 12(1): 63–69 (in Chinese with English abstract)
- [7] Bhiah K M, Guppy C, Lockwood P, Jessop R. Effect of potassium on rice lodging under high nitrogen nutrition. In: Proc 19th World Congress of Soil Sci, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia. August, 2010. pp 136–139
- [8] Islam Z, Bagchi B, Hossain M. Adoption of leaf color chart for nitrogen use efficiency in rice: Impact assessment of a farmer-participatory experiment in West Bengal, India. *Field Crops Res*, 2007, 103: 70–75
- [9] Li J(李杰), Zhang H-C(张洪程), Gong J-L(龚金龙), Chang Y(常勇), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许轲), Wei H-Y(魏海燕). Effects of different planting methods on the culm lodging resistance of super rice. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2011, 44(11): 2234–2243 (in Chinese with English abstract)
- [10] Yan C(闫川), Ding Y-F(丁艳锋), Wang Q-S(王强盛), Li G-H(李刚华), Huang P-S(黄丕生), Wang S-H(王绍华). Effects of row-spacing on morphological and eco-physiological characteristics in rice. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2007, 21(5): 530–536 (in Chinese with English abstract)
- [11] Guo Y-H(郭玉华), Zhu S-G(朱四光), Zhang L-B(张龙步), Du H(都华). Influence on the material characteristics of rice culms in different cultivation conditions. *J Shenyang Agric Univ* (沈阳农业大学学报), 2003, 34(1): 4–7 (in Chinese with English abstract)
- [12] Kashiwagi T, Hirotsu N, Ujiie K, Ishimaru K. Lodging resistance locus *prl5* improves physical strength of the lower plant part under different conditions of fertilization in rice (*Oryza sativa* L.). *Field Crops Res*, 2010, 115: 107–115
- [13] Ishimaru K, Togawa E, Ookawa T, Kashiwagi T, Madoka Y, Hirotsu N. New target for rice lodging resistance and its effect in a typhoon. *Planta*, 2008, 227: 601–609
- [14] Ookawa T, Hobo T, Yano M, Murata K, Ando T, Miura H, Asano

- K, Ochiai Y, Ikeda M, Nishitani R, Ebitani T, Ozaki H, Angeles E R, Hirasawa T, Matsuoka M. New approach for rice improvement using a pleiotropic QTL gene for lodging resistance and yield. *Nat Commun*, 2010, 1: 132
- [15] Ma J(马均), Ma W-B(马文波), Tian Y-H(田彦华), Yang J-C(杨建昌), Zhou K-D(周开达), Zhu Q-S(朱庆森). The culm lodging resistance of heavy panicle type of rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2004, 30(2): 143–148 (in Chinese with English abstract)
- [16] Zhang X-J(张喜娟), Li H-J(李红娇), Li W-J(李伟娟), Xu Z-J(徐正进), Chen W-F(陈温福), Zhang W-Z(张文忠), Wang J-Y(王嘉宇). The lodging resistance of erect panicle *japonica* rice in northern China. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2009, 42(7): 2305–2313 (in Chinese with English abstract)
- [17] Li H-J(李红娇), Zhang X-J(张喜娟), Li W-J(李伟娟), Xu Z-J(徐正进), Xu H(徐海). Lodging resistance in *japonica* rice varieties with different panicle types. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2009, 23(2): 191–196 (in Chinese with English abstract)
- [18] Ai Z-Y(艾治勇), Ma G-H(马国辉). Study on mathematical models of fertilizer management technique for resisting lodging and high yield of super hybrid rice. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2011, 17(4): 803–808 (in Chinese with English abstract)
- [19] Zhang M-C(张明聪), Liu Y-Y(刘元英), Luo S-G(罗盛国), Peng X-L(彭显龙), Chen L-N(陈丽楠), Li Z-Y(李宗云), Li J(李佳). Effects of integrated nutrient management on lodging resistance of rice in cold area. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2010, 43(21): 4536–4542 (in Chinese with English abstract)
- [20] Li M(李敏), Zhang H-C(张洪程), Yang X(杨雄), Ge M-J(葛梦婕), Ma Q(马群), Wei H-Y(魏海燕), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许轲). Comparison of culm characteristics with different nitrogen use efficiencies for rice cultivars. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2013, 39(1): 101–109
- [21] Yang S-M(杨世民), Xie L(谢力), Zheng S-L(郑顺林), Li J(李静), Yuan J-C(袁继超). Effects of nitrogen rate and transplanting density on physical and chemical characteristics and lodging resistance of culms in hybrid rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2009, 35(1): 93–103 (in Chinese with English abstract)
- [22] Ookawa T, Ishihara K. Varietal difference of physical characteristics of the culm palated to lodging resistance in paddy rice. *Jpn J Crop Sci*, 1992, 61: 419–425
- [23] Li G, Xue L, Gu W, Yang C, Wang S, Ling Q, Qin X, Ding Y. Comparison of yield components and plant type characteristics of high-yield rice between Taoyuan, a ‘special eco-site’ and Nanjing, China. *Field Crops Res*, 2009, 112: 214–221
- [24] Zhang X-J(张喜娟), Jiang S-K(姜树坤), Zheng X(郑旭), Xu Z-J(徐正进), Chen W-F(陈温福), Ma D-R(马殿荣), Xu H(徐海). Correlation between traits of basal elongating internodes and culm mechanical strength and QTL location in rice. *Plant Physiol Commun* (植物生理学通讯), 2009, 45(3): 223–228 (in Chinese with English abstract)
- [25] Yang H-J(杨惠杰), Yang R-C(杨仁崔), Li Y-Z(李义珍), Jiang Z-W(姜照伟), Zheng J-S(郑景生). Relationship between culm traits and lodging resistance of rice cultivars. *Fujian J Agric Sci* (福建农业学报), 2000, 15(2): 1–7 (in Chinese with English abstract)
- [26] Sun Y-J(孙永健), Chen Y(陈宇), Sun Y-Y(孙园园), Xu H(徐徽), Xu Y-M(许远明), Liu S-J(刘树金), Ma J(马均). Relationship between culm lodging resistance and population quality of hybrids under triangle-planted system of rice in tensification at different nitrogen application rates and planting densities. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2012, 26(2): 189–196 (in Chinese with English abstract)
- [27] Shi Y-J(石扬娟), Huang Y-L(黄艳玲), Shen G-L(申广勤), Wang W-G(王维刚), Zhang Z-Z(张志转), Shi Y-Y(石英尧), Chen D-P(陈多璞). Effect of N-application rate and planting density on mechanic characteristics of rice culms. *Chin Agric Sci Bull* (中国农学通报), 2008, 24(7): 101–106 (in Chinese with English abstract)