

淹涝胁迫对水稻形态的影响

陆魁东¹, 宁金花², 解娜², 黄晚华¹, 宋忠华²

(1.湖南省气象科学研究所, 湖南 长沙 410118; 2.湖南省长沙农业气象试验站, 湖南 长沙 410125)

摘要:为探明水稻关键生育期形态特征对淹涝胁迫环境的敏感性,以常规稻湘早籼45为供试材料,分别在分蘖期、拔节期、抽穗期、乳熟期等4个生育期,设计不同淹水深度及淹水持续时间的淹涝胁迫试验,利用数理统计方法分析淹涝胁迫对湘早籼45的茎、叶等形态特征的影响。结果表明:1)与淹前相比,淹涝处理后0 d时,2/3淹处理在乳熟期的绿叶数减少最明显,3/3淹处理在分蘖期的减少最不明显,4个生育期均是2/3淹处理较3/3淹处理减少明显;淹后2 d时,各生育期绿叶数变化情况存在明显差异。2)除乳熟期外的其余3个生育期均存在高位分蘖情况,在拔节期最明显,其次是在抽穗期,且3/3淹处理的高位分蘖率高于2/3淹处理的。3)除乳熟期外的其余3个生育期均有增茎发生,且在分蘖期增茎最明显。4)根倒伏主要发生在乳熟期,其余3个生育期在淹涝3 d以后均出现根倒伏、茎倒伏或根茎倒伏并存的现象;气生根仅出现在抽穗期;卷叶现象出现在分蘖期和拔节期。5)在分蘖期和拔节期,淹水处理时间越长,叶鞘越长,且3/3淹处理较2/3淹处理的明显。

关键词:水稻;淹涝胁迫;绿叶数;高位分蘖;增茎;根茎倒伏;叶鞘长度

中图分类号: S162.5⁺³

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2015)01-0018-06

Effects of different submersed stress on rice morphological characteristics

Lu Kuidong¹, Ning Jinhua², Xie Na², Huang Wanhua¹, Song Zhonghua²

(1. Institute of Meteorological Sciences of Hunan Province, Changsha 410118, China; 2. Agro-meteorological Station of Hunan Province, Changsha 410125, China)

Abstract: To know of the sensitivity of morphological characteristics of rice on water-logging stress, the submersed experiments with different depth and duration using rice variety of Xiangzaoxian 45 were designed during the key growth stages of tillering, jointing, heading and milky stage. The morphological characteristics impacted by water-logging stress, such as stems, leaves et al., were analyzed with mathematical statistics methods. The results showed that the number of green leaf at the milky stage was reduced the most with two-thirds flood submergence in 0 day, on the contrast, it did not obviously decrease with full flood at tillering stage; while, it was reduced more obviously with treatment of two-thirds flood than that of with full flood at all growth stages; The number of green leaf became great difference after two days submergence at all stages. It appeared to be a trait of tillering at higher nodal position at all stages except for at milky stage under submergence, and this trait exhibited even more obviously at jointing stage, followed by at heading stage. The tillering rate with full flood treatment was higher than that of with two-thirds flood. Root lodging was mainly occurred at milky stage, while, root lodging, stalk lodging and rhizomes lodging coexisted at the other three stages after three days' water-logging. Aerial roots appeared only at heading stage, leaf-roll, while, occurred at tillering and jointing stages. The longer the time of flooding duration, the longer of leaf sheath would grow at tillering and jointing stages.

Keywords: rice; submersed stress; number of green leaves; higher nodal position tillering; stem increase; the lodging of root and stem; the length of leaf sheath

研究水稻在不同生育期对淹涝胁迫环境的敏感性,对了解洪涝灾害的致灾能力、致灾等级和明确淹涝胁迫对水稻形态、生理、产量等的影响具有非常重要的意义。关于洪涝灾害对水稻形态、生理等影响的研究很多,如对水稻营养生长阶段的淹涝研究结果表明,当植株完全淹没时,氧和二氧化碳的供应有限,以无氧呼吸为主会导致能源急剧消耗^[1];当淹没时间短,或当植株仍有部分高于水面时的淹涝损害明显减少^[2];淹涝胁迫可促进水稻根系木质化和栓质化,减少根中 O₂ 径向泄漏,增加根尖 O₂ 浓度^[3]等;淹涝可引起叶片可溶性糖、淀粉和总糖含量下降^[4]。还有学者对高位分蘖也进行了研究^[5]。对水稻生殖阶段淹涝的研究结果表明,全淹胁迫处理后,植株叶绿素含量在孕穗期明显降低,但在乳熟期只有少量下降^[6-9]。此外还有关于常规稻和杂交稻淹涝适应性的研究^[10]。在水稻淹涝形态学方面,卷叶作为水稻抗旱能力的一个指标在育种和栽培研究中已有应用^[11-12]。虽然关于水稻淹涝方面的研究较多,但针对同一品种水稻在关键生育期不同淹涝环境下的形态学研究相对较少。笔者通过分析绿叶数、茎、植株高度及倒伏等多个形态指标,探讨不同生育期水稻对淹涝环境的敏感性以及适应机制,旨在为研制水稻防灾、减灾措施和指导农业生产及农业保险理赔提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材 料

供试品种为湘早籼 45 号(湘审稻编号 2007002)。该品种是由湖南省益阳市农科所选育而成的 1 个常规中熟早籼,在湖南省作双季早稻栽培,全生育期 106 d 左右,株高 80~85 cm,叶片厚实挺直,株型松紧适中,茎秆较粗且弹性好,落色好,不落粒。

1.2 试 验 设 计

试验地点位于湖南省长沙农业气象试验站(113°05'E, 28°12'N, 海拔高度 44.9 m),属亚热带季风湿润气候,降水充沛,雨水主要集中在 4—6 月(此阶段正值双季早稻分蘖至成熟的阶段,易发生过程性的暴雨洪涝,常发生稻田淹涝)。

2013 年 3 月 24 日播种,大田软盘育秧,4 月 19 日移栽于盆钵中。盆钵口径 30 cm,底径 20 cm,

高 25 cm。移栽前在水泥池中将水、肥、土壤混匀后盛入盆钵中。每盆土层深度约 23 cm。土壤质地为砂壤土,呈弱酸性。每盆移栽带蘖秧苗 1 株。施水稻专用复合肥,用自来水浇灌。于水稻生育期内根据水稻长势施肥 1~2 次。

在水稻分蘖期、拔节期、抽穗期、乳熟期进行不同淹水深度(2/3 淹和 3/3 淹 2 个淹涝深度)和不同淹水时间(每生育期淹 3、5、7、9 d)处理。淹涝深度由预先制作的模拟池控制。以处理植株的平均高度为基准,2/3 淹处理是淹没植株平均高度的 2/3;3/3 淹处理是水稻植株全部淹没于水面以下。模拟池为人工砌的水泥池,3/3 淹处理水泥池深度 1.3 m,长 3.6 m,宽约 2.7 m;2/3 淹处理水泥池深 0.9 m,长 4.5 m,宽 2.7 m。因不同生育期水稻植株的高度不同,所以,人工定做不同高度的铁床,用以控制不同生育期的不同淹水深度。分蘖期处理时间是 5 月 21 日至 5 月 30 日;拔节期是 5 月 31 日至 6 月 9 日;抽穗期是 6 月 17 日至 6 月 27 日;乳熟期是 7 月 5 日至 7 月 15 日。

将水稻按不同淹水深度、不同淹水时间进行淹涝处理,分别挂牌,达到不同淹涝时间后取出,置于自然条件下至成熟后收获,即将各生育期水稻植株 32 盆分别放入 2 个淹涝模拟池进行 2/3 淹处理和 3/3 淹处理 3、5、7、9 d 后,取出置于自然条件下,待其成熟后收获(7 月 24 日后各处理相继成熟,8 月 10 日前收获完成,试验结束)。以整个生育期不受淹处理的植株为对照。每个处理 4 个重复。对照植株从移栽至成熟均置于自然环境下与处理水稻进行平行观测,成熟后收获。

分别观测植株淹前 0 d、淹后 0、2 d 的绿叶数,并计算淹涝后 0、2 d 的绿叶数变化率和增茎率等。

1.3 观 测 项 目

1) 绿叶数(片)。按照《农业气象观测规范》,在淹前和淹后对每盆中水稻所有稻株茎上的绿叶数进行统计,部分黄化的叶片则按绿色部分叶片面积占整个叶片面积的比进行计算,如绿色部分面积占整个叶片面积的 30%,其余部分已变黄,则记为 0.3 片绿叶,为目测估算值,结果保留 1 位小数。对照植株的绿叶数依同样的方法进行平行观测、统计。

2) 绿叶数变化率。淹水后绿叶数占淹前绿叶数的百分比。

3) 高位分蘖率。成熟时存在的高位分蘖茎数占总茎数的比, 即高位分蘖率=收获时存在高位分蘖的茎数/收获时总茎数。

4) 增茎率。淹后至收获时增加的茎数占总茎数的比, 即增茎率=(收获时总茎数 - 淹后总茎数)/淹后总茎数。

5) 气生根。每次处理结束后立即对各处理的所有植株气生根情况进行观测。因受试植株有限, 所有的观测都在植株上直接观测, 不取样。

6) 倒伏。观测每盆处理植株发生倒伏的情况, 主要包括倒伏的种类、倒伏的程度等。

1.4 数据分析

用软件 Excel 2010 和 SPSS 20.0 进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 各淹涝处理的绿叶数

由表 1 可知, 淹后 0 d 与淹前 0 d 相比, 2/3 淹处理在处理 0 d 的绿叶数以乳熟期的减小幅度最大, 在抽穗期的减小幅度最小; 分蘖期和抽穗期在淹涝 3 d 的绿叶数略增加, 其余淹涝时间的绿叶数均减少; 拔节期和乳熟期各淹涝时间的绿叶数均减小。3/3 淹处理的植株在分蘖期除淹涝 9 d 的绿叶数减少外, 其余淹涝时间的绿叶数均比淹前 0 d 增加, 这可能是由于水稻正处于营养生长期, 其生长重心茎和叶在淹涝胁迫环境下加速生长, 以维持植株的生长发育; 在拔节期和抽穗期, 绿叶数减少的幅度不明显; 在乳熟期减少的幅度最大。各生育期水稻在同一淹涝深度下随着淹涝时间的延长, 绿叶数明显减少。

表 1 各生育期水稻经不同淹涝处理后的绿叶数

Table 1 Number of green leaves of rice with submersed treatments at different growth stages

生育期	处理	淹涝时间/d	绿叶数			绿叶数变化率/%	
			淹前 0 d	淹后 0 d	淹后 2 d	淹后 0 d	淹后 2 d
分蘖期	2/3 淹	3	19.3	19.4	18.2	0.5	-6.2
		5	19.8	18.6	16.4	-6.1	-11.8
		7	21.2	16.8	6.7	-20.8	-60.1
		9	21.2	6.7	3.1	-68.4	-53.7
	3/3 淹	3	22.1	23.4	28.8	5.9	23.1
		5	26.4	30.2	29.7	14.4	-1.7
		7	19.6	20.0	10.6	2.0	-47.0
		9	24.6	19.7	4.8	-19.9	-75.6
		拔节期	2/3 淹	3	46.5	40.5	43.0
	5	56.9	40.6	41.7	-28.6	2.7	
	7	42.0	24.6	23.8	-41.4	-3.3	
	9	44.0	18.7	13.9	-57.5	-25.7	
	3/3 淹	3	56.0	55.4	56.0	-1.1	1.1
	5	47.9	45.2	43.8	-5.6	-3.1	
	7	57.7	54.7	42.8	-5.2	-21.8	
	9	41.3	37.3	20.5	-9.7	-45.0	
抽穗期	2/3 淹	3	82.6	86.8	95.4	5.1	9.9
		5	98.1	83.8	90.6	-14.6	8.1
		7	83.1	58.7	63.2	-29.4	7.7
		9	79.6	50.8	53.4	-36.2	5.1
	3/3 淹	3	76.8	78.5	90.7	2.2	15.5
		5	75.0	74.4	81.7	-0.8	9.8
		7	63.2	60.9	65.7	-3.6	7.9
		9	78.0	69.3	61.4	-11.2	-11.4
		乳熟期	2/3 淹	3	57.0	32.0	29.8
	5	45.7	17.8	16.4	-61.1	-7.9	
	7	49.4	16.3	14.7	-67.0	-9.8	
	9	58.6	16.7	12.7	-71.5	-24.0	
	3/3 淹	3	54.9	43.4	38.6	-20.9	-11.1
	5	58.5	42.5	32.3	-27.4	-24.0	
	7	53.0	30.7	21.0	-42.1	-31.6	
	9	55.9	20.3	2.5	-63.7	-87.7	

淹后 2 d 的绿叶数变化率反映了淹涝处理后植株的恢复能力。2/3 淹处理植株在抽穗期的恢复能力最强，与淹前 0 d 相比，经各淹涝时间处理后植株的绿叶数均有增加；在拔节期淹涝 3、5 d 的绿叶数均有增加；在分蘖期和乳熟期植株的恢复能力较差，不同淹涝时间处理后植株的绿叶均减少。3/3 淹处理植株在抽穗期的恢复能力最强，仅淹涝 9 d 时绿叶略有减少；在乳熟期的恢复最差；在分蘖期和拔节期仅淹涝 3 d 的绿叶数有增加。

不同淹涝深度对各生育期绿叶数的影响存在差异，在相同淹涝时间处理下，除分蘖期 2/3 淹和 3/3 淹处理淹涝 3 d 的绿叶数变化不明显外，其他各处理的减少幅度均是 2/3 淹处理的较 3/3 淹处理的大。各

生育期植株的恢复能力以分蘖期 2/3 淹处理植株的最差；拔节期淹涝 3、5 d 植株的恢复较快，淹涝 7、9 d 植株的恢复较差；抽穗期各处理植株均有不同程度的恢复；乳熟期 3/3 淹处理植株的恢复能力最差。

2.2 各淹涝处理植株茎的变化

由表 2 可知，除乳熟期以外的其余 3 个生育期有效茎数和无效茎数的总和均高于总茎数，甚至出现了有效茎数或无效茎数高于总茎数的现象，如抽穗期 3/3 淹处理 5 d 的有效茎数高于总茎数，而全淹 7 d 以上的有效茎数为零，无效茎数明显高于总茎数。除乳熟期外，其余生育期 3/3 淹处理也出现了有效茎和无效茎之和高于总茎数的情况。

表 2 各生育期水稻经不同淹涝处理后的茎数

Table 2 Stem numbers of rice with submersed treatments at different growth stages

生育期	淹涝处理	淹涝时间/d	茎数/根				高位分蘖率/%	增茎率/%		
			淹前 0 d	淹后 0 d	收获时	有效茎				
分蘖期	2/3 淹	3	9	10	21	16	5	0	0.0	110.0
		5	8	10	28	23	5	5	17.9	180.0
		7	10	7	21	18	6	6	28.6	200.0
		9	11	5	18	11	10	8	44.4	260.0
	3/3 淹	3	12	13	25	23	2	0	0.0	92.3
		5	11	12	27	28	2	5	18.5	125.0
		7	8	9	23	23	3	3	13.0	155.6
		9	11	8	24	24	5	10	41.7	200.0
		9	11	8	24	24	5	10	41.7	200.0
拔节期	2/3 淹	3	13	13	22	22	7	8	61.5	69.2
		5	16	16	28	24	5	10	62.5	75.0
		7	11	11	20	17	9	8	72.7	81.8
		9	12	12	22	13	12	9	75.0	83.3
	3/3 淹	3	15	16	25	26	4	5	33.3	56.3
		5	13	14	23	19	13	10	76.9	64.3
		7	16	17	31	33	14	13	81.3	82.4
		9	12	12	27	27	11	11	91.7	125.0
		9	12	12	27	27	11	11	91.7	125.0
抽穗期	2/3 淹	3	21	24	26	21	5	5	19.2	8.3
		5	20	25	30	25	7	8	26.7	20.0
		7	23	27	26	20	6	9	34.6	-3.7
		9	19	24	22	12	12	11	50	-8.3
	3/3 淹	3	19	20	22	20	3	10	45.5	10.0
		5	17	21	24	27	11	11	45.8	14.3
		7	15	18	21	0	29	14	66.7	16.7
		9	18	18	23	0	34	18	78.3	27.8
		9	18	18	23	0	34	18	78.3	27.8
乳熟期	2/3 淹	3	15	15	15	12	3	0	0.0	0.0
		5	18	19	19	18	1	0	0.0	0.0
		7	15	15	15	13	2	0	0.0	0.0
		9	18	18	18	19	3	0	0.0	0.0
	3/3 淹	3	17	17	17	16	1	0	0.0	0.0
		5	19	19	19	18	1	0	0.0	0.0
		7	18	18	18	13	5	0	0.0	0.0
		9	19	19	19	15	3	0	0.0	-0.0
		9	19	19	19	15	3	0	0.0	-0.0

除乳熟期外的其余 3 个生育期均存在高位分蘖情况,其中拔节期的高位分蘖率最高,其次是抽穗期的。从不同淹涝深度来看,各生育期存在差异,分蘖期 3/3 淹处理的高位分蘖率低于 2/3 淹处理的,而拔节期和抽穗期 3/3 淹处理的高位分蘖率高于 2/3 淹处理的,可见,水稻营养生长期遭遇淹涝胁迫,其茎比较敏感,而生殖生长期遭遇淹涝胁迫时,其茎和叶的变化相对较弱,特别是在乳熟期后,茎和叶的生长都进入衰减阶段,淹涝胁迫加快了茎和叶的衰老。虽然抽穗期的生长重心是穗,但由于淹涝胁迫影响甚至破坏了水稻的正常生长发育,穗的正常灌浆被终止或破坏,致使水稻出现二次分蘖及高位分蘖。

由淹涝前后的增茎率可知,仅乳熟期没有增茎现象,其余 3 个生育期均存在增茎现象,其中分蘖期增茎最明显,不论是 2/3 淹处理还是 3/3 淹处理,

增茎率一般在 92.3% ~ 260%,且 2/3 淹处理的增茎率略高于 3/3 淹处理的。拔节期增茎现象也比较明显,但 2 种淹涝深度处理的增茎率间差异不明显。抽穗期 2/3 淹处理淹涝 3、5 d 出现增茎现象,而淹涝 7、9 d 出现减茎现象;3/3 淹处理淹涝 3、5、7、9 d 均出现增茎现象,且淹涝时间越长,增茎率越大。

2.3 各淹涝处理水稻植株的倒伏、气生根、卷叶等形态特征

由表 3 可见,各生育期水稻遭遇淹涝胁迫后都发生了倒伏,其中分蘖期、拔节期和抽穗期淹涝 3 d 未出现倒伏现象,乳熟期以根倒伏为主,其余 3 个生育期在淹涝 3 d 后出现了根倒伏、茎倒伏或根茎倒伏并存的现象。

表 3 各生育期水稻经不同淹涝处理后的卷叶长度和叶鞘长度及倒伏、气生根情况

Table 3 Length of roll leaf, leaf sheath and the status of lodging and aerial roots of rice with submersed treatments at different growth stages

生育期	淹涝处理	淹涝时间/d	倒伏	气生根	卷叶长度/cm	叶鞘长度/cm	
分蘖期	2/3 淹	3	无倒伏	无	17	4.3	
		5	根倒伏	无	15	7.8	
		7	根倒伏	无	10	10.1	
		9	根倒伏	无	4	15.6	
	3/3 淹	3	无倒伏	无	23.8	15.3	
		5	茎倒伏	无	25.8	15.9	
		7	根倒伏+茎倒伏	无	20.6	19.8	
		9	根倒伏+茎倒伏	无	17.9	23.1	
	拔节期	2/3 淹	3	无倒伏	无	23.0	14.4
			5	茎倒伏	无	22.0	19.3
			7	茎倒伏	无	15.0	21.2
			9	根倒伏+茎倒伏	无	7.0	22.6
3/3 淹		3	无倒伏	无	21.0	13.5	
		5	茎倒伏	无	24.0	18.1	
		7	茎倒伏	无	28.0	23.3	
		9	根倒伏+茎倒伏	无	34.0	23.8	
抽穗期		2/3 淹	3	无倒伏	无	-	-
			5	无倒伏	有	-	-
			7	茎倒伏	有	-	-
			9	茎倒伏	有	-	-
	3/3 淹	3	无倒伏	无	-	-	
		5	茎倒伏	有	-	-	
		7	茎倒伏	有	-	-	
		9	茎倒伏	有	-	-	
	乳熟期	2/3 淹	3	无倒伏	无	-	-
			5	根倒伏	无	-	-
			7	根倒伏	无	-	-
			9	根倒伏	无	-	-
3/3 淹		3	根倒伏	无	-	-	
		5	根倒伏	无	-	-	
		7	根倒伏	无	-	-	
		9	根倒伏	无	-	-	

气生根仅出现在抽穗期淹涝 3 d 以后,在相同淹涝深度下,气生根随着淹涝时间的延长而增多,且 2/3 淹处理的气生根现象较 3/3 淹处理的明显。

卷叶现象只出现在分蘖期和拔节期,2/3 淹处理下,淹水时间越长,卷叶越短;3/3 淹处理下,分蘖期植株淹水时间越长,卷叶越短,而拔节期植株淹水时间越长,卷叶越长。此外,分蘖期和拔节期淹涝胁迫处理前、后倒三叶叶枕至倒二叶叶鞘长度值随着淹水处理时间的增加而增加,而且 3/3 淹处理的较 2/3 淹处理的明显。

3 结论与讨论

淹涝深度和淹涝时间对各生育期水稻的绿叶数均有影响,2/3 淹和 3/3 淹处理除分蘖期和抽穗期淹涝 3 d 的绿叶数和 3/3 淹处理分蘖期淹涝 5、7 d 的绿叶数增加外,其他各处理的绿叶均有减少;在同一淹涝深度下,随着淹涝时间的延长,各生育期植株的绿叶减少越明显,但淹涝 2 d 后各生育期植株的恢复能力存在差异。

不同淹涝深度处理对高位分蘖和增茎率的影响以分蘖期最明显,拔节期次之,乳熟期最小。除乳熟期外的其他生育期均存在高位分蘖现象,且 3/3 淹处理比 2/3 淹处理的明显。

2 个处理淹涝 3 d 基本无倒伏现象(3/3 淹处理乳熟期淹涝 3 d 出现根倒伏),其余淹涝时间 2 个处理均有倒伏发生,其中乳熟期为根倒伏,其余生育期茎倒伏和根倒伏并存;气生根仅出现在抽穗期。

本试验中的淹涝处理在静态环境下完成,与实际洪涝发生存在一定的差异,且本试验仅从形态学方面探索了淹涝胁迫对水稻不同生育期的影响,对于形态的改变与产量结构之间的关系等尚需进一步研究。

参考文献:

[1] Setter T L, Ellis M, Laureles E V, et al. Physiology and

genetics of submergence tolerance in rice[J]. *Annals of Botany*, 1997, 79: 67-77.

[2] Kotera A, Nawata E, Thao L V, et al. Effect of submergence on rice yield in the Red River Delta Vietnam[J]. *Japanese Journal of Tropical Agriculture*, 2005, 49(3): 197-206.

[3] 李玉昌, 李阳生, 李绍清. 淹涝胁迫对水稻生长发育的危害与耐淹性机理研究的进展[J]. *中国水稻科学*, 1998, 12(增刊): 70-76.

[4] 李乐农, 麻浩, 李继军, 等. 淹水处理对不同水稻品种碳氮代谢的影响[J]. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 1995, 21(3): 235-238.

[5] 莫永. 水稻高位分蘖发生的原因与预防控制[J]. *种子科技*, 2010(12): 33-34.

[6] 李阳生, 李绍清. 淹涝胁迫对水稻生育后期的生理特性和产量性状的影响[J]. *武汉植物学研究*, 2000, 18(2): 117-122.

[7] Middelboe A L, Markager S. Depth limits and minimum light requirements of freshwater macrophytes[J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37(3): 553-568.

[8] EnrSquez S, Pantoja-Reyes NI. Form-function analysis of the effect of canopy morphology on leaf self shading in the seagrass *Thalassia testudinum*[J]. *Oecologia*, 2005, 145: 235-243.

[9] 李绍清, 李阳生, 李达模, 等. 乳熟期淹水对两系杂交水稻源库特性的影响[J]. *杂交水稻*, 2000, 15(2): 38-40.

[10] 李阳生, 李绍清, 李达模, 等. 杂交稻与常规稻对涝渍环境适应能力的比较研究[J]. *中国水稻科学*, 2002, 16(1): 45-51.

[11] O'Toole J C, Cruz R T. Response of leaf water potential stomatal resistance and leaf rolling to water stress[J]. *Plant Physiol*, 1980, 65: 428-432.

[12] Neil C, Turner N C, O'TOOLE J C, et al. Responses of seven diverse rice cultivars to water deficits I. Stress development, canopy temperature, leaf rolling and growth[J]. *Field Crops Res*, 1986, 13: 257-271.

责任编辑: 王赛群

英文编辑: 王 库