

幼穗分化期至齐穗期水分胁迫对水稻产量 及功能叶性状的影响

夏琼梅¹,毛桂祥²,王定开³,王月英⁴,李贵勇¹,
邓安凤¹,龙瑞平¹,杨从党¹

(1.云南省农业科学院粮食作物研究所,云南 昆明 650205; 2.云南省宜良县农业技术推广中心,云南 宜良 652100;
3.云南省文山州农业科学院,云南 文山 663000; 4.云南省曲靖市麒麟区农业技术推广中心,云南 曲靖 655000)

摘 要: 2013年在宜良县通过田间试验,研究了水稻幼穗分化期至齐穗期水分胁迫对云南大面积生产应用的6个粳稻品种产量及产量构成因素、功能叶叶面积及SPAD值的影响。结果表明:幼穗分化至齐穗期水分胁迫后6个品种实际产量比正常灌溉产量下降11.03%,达极显著水平。幼穗分化至齐穗期水分胁迫后有效穗数、总粒数、实粒数分别比正常灌水降低4.58%、7.21%、8.53%,其中对实粒数影响最大,达显著水平。水分胁迫后齐穗期功能叶高效、低效、总叶面积指数比正常灌水分别降低13.60%、10.55%、12.92%,水分胁迫后幼穗分化至齐穗期的倒1叶、倒2叶、倒3叶SPAD值比正常灌水分别降低1.26%、1.32%、2.69%。在幼穗分化至齐穗期水分胁迫条件下,抗旱性强的品种穗总粒数、实粒数、结实率降低的幅度小,抗旱性较弱的品种降低的幅度大;抗旱性强的品种功能叶SPAD受影响越小,且有增加的趋势,而抗旱性较弱的品种呈下降趋势。

关键词: 水稻;水分胁迫;幼穗分化期;齐穗期;产量;功能叶性状

中图分类号: S511.501 **文献标志码:** A

Effects of water stress on rice grain yield and functional leaf traits during panicle differentiation to full heading stages

XIA Qiong-mei¹, MAO Gui-xiang², WANG Ding-kai³, WANG Yue-ying⁴, LI Gui-yong¹,
DENG An-feng¹, LONG Rui-ping¹, YANG Cong-dang¹

(1. Food Crops Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, Yunnan, China;
2. Yiliang Promotion Center of Agricultural Technology, Yiliang 652100, Yunnan, China;
3. Wenshan Academy of Agricultural Sciences, Wenshan 666100, Yunnan, China;
4. Qujing District Promotion Center of Agricultural Technology, Qujing 655000, Yunnan, China)

Abstract: Field experiments were conducted in 2013 in Yiliang to study the effects of water stress on grain yield, yield component, functional leaf area and SPAD value during panicle differentiation to full heading stages. The results showed that compared with normal irrigation mode, grain yield was decreased by 11.03% under water stress during panicle differentiation to full heading stages, reaching a significantly different level. Effective panicles, total grains per panicle and filled grains per panicle were decreased by 4.58%, 7.21%, 8.53%, respectively, which was found to be significant on filled grains per panicle. Effective leaf area index, low efficient leaf area index and total leaf area index at full heading stage became decreased by 13.60%, 10.55%, 12.92%, respectively. SPAD value of the first, second and third leaves from the top were decreased by 1.26%, 1.32%, 2.69%, respectively. Under water stress during panicle differentiation to full heading stages, the descendent rates of total grains per panicle, filled grains per panicle and fertility rate were low in the highly drought resistant varieties, whereas high in the poorly drought resistant varieties. Functional

收稿日期:2014-05-29

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201203031);公益性行业(农业)科研专项(201303129);国家科技支撑计划(2012BAD40B00);云南省创新人才培养计划(2011CI058);云南省科技计划(2013IB011)

作者简介:夏琼梅(1983—),女,云南宣威人,硕士,主要从事作物栽培生理研究。E-mail: xiaqiongmei1983@126.com。

通信作者:杨从党,研究员。E-mail: yangcd2005@163.com。

leaf SPAD value of the highly drought resistant varieties had been barely affected, showing an increasing tendency, but that of the poorly drought resistant varieties was decreased.

Keywords: rice; water stress; panicle differentiation stage; full heading stage; grain yield; functional leaf traits

云南地处中国西南,旱灾是危害云南农业的主要自然灾害之一,其中 1—3 月干旱最严重,其次是 11—12 月,再次是 4—6 月上旬^[1],平均 2.5 a 就会出现一次重大以上的旱灾^[2]。为明确干旱胁迫对水稻的影响,前人已经在不同生育阶段研究了水分胁迫对水稻产量及品质的影响^[3-8]、理化性状的变化与抗旱性的关系^[9-16]等。然而,以往的研究多是利用盆栽或在棚内模拟干旱胁迫条件下对水稻生长发育的影响,这是因为在自然条件下易受天气变化尤其是降雨的影响,进行干旱胁迫研究较难达到预期目标,因此鲜见报道。云南省水稻常年播种面积约 100.0~106.7 万 hm^2 ,自 2010 年以来,云南连续 4 a 特大干旱,研究干旱对水稻生产的影响对节水灌溉及干旱防控意义重大。本试验于 2013 年在云南省宜良县(粳稻区)选择大面积生产应用的水稻品种,将干旱胁迫试验直接在大面积生产示范区进行,幼穗分化期停止人工灌水,直至齐穗期。旨在研究自然条件下幼穗分化期至齐穗期干旱胁迫对水稻生产的危害特征,为今后干旱防控及节水灌溉提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

试验于 2013 年在云南省昆明市宜良县水稻高产核心示范片进行。品种为大面积示范应用的粳稻品种,分别是云南省农业科学院育成的云粳系列粳稻抗病良种云粳 19、云粳 41,由楚雄彝族自治州农业科学研究所选育的高产、抗病超级稻品种楚粳 27 及高产、抗性强的新品种楚粳 29,由云南省农业科学院选育的两系杂交粳稻品种云光 101、云光 109。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 在同一田块进行试验,一半为对照(除晒田期,田间保持 3~5 cm 的浅水层),一半为干旱处理(幼穗分化期停止人工灌水直到齐穗期),两处理间留 30 cm 宽的水沟,沟的两侧及干旱处理四周作宽 30 cm、高 30 cm 的埂,并用宽 1 m 的薄膜包埂,且干旱处理四周的保护行在控水期间管理与其相同,以防水分渗漏。试验采用随机排列,3 次重复,小区面积 $5 \text{ m} \times 3.0 \text{ m} = 15 \text{ m}^2$,行距 26.4 cm,株距 13.2 cm,2~3 苗移栽。3 月 26 日播种,5 月 7 日移栽,6 月 9 日控水晒田,6 月 18 日复水施促花肥后,干旱处理于 6 月 25 日继续控水至 7 月 16 日,期

间不进行人工灌水,对照在干旱处理控水期间进行了 5 次人工灌水,每次灌水至田面保持 3~5 cm 水层。

除水分管理外,其余田间管理均按当地常规方法进行。纯氮每公顷施 240 kg,底肥、分蘖肥、促花肥和保花肥各施用总氮肥量的 1/4。底肥于移栽前整田时施用,分蘖肥于栽后 5 d 施用,促花肥于幼穗分化开始时(小穗长 0.5 cm)施用,保花肥于促花肥施用后 15 d 施用。每公顷施用过磷酸钙 750 kg,于移栽前作为基肥一次性施入;每公顷施用硫酸钾 300 kg,基肥和促花肥各施用 1/2。

1.2.2 测定内容与方法 幼穗分化期进行干旱处理后 7 d 及复水前利用 TDR-300 土壤水分测定仪测定土壤体积含水量。撤水后一周干旱处理无水层,但土壤体积含水量仍与常规水分管理一致,为 64.5%,一周后至复水前干旱处理田块开裂,田面变硬不陷脚,复水前土壤体积含水量平均为 60.0%。

齐穗期按小区平均茎蘖数取 3 丛后,利用 SPAD-502 测定 10 个有效茎上部 3 片叶 SPAD 值。把叶片分为高效功能叶及低效叶片两部分,并利用 LI-3100 叶面积仪分别测定其叶面积,计算叶面积指数。收获前按平均有效穗数取代表性植株 3 丛,考察总粒数、实粒数、结实率、千粒重,各小区单打单收,去除瘪粒及杂质后测定稻谷含水量,折成标准含水量(粳稻 14.5%)的稻谷重量作为小区产量,并按移栽面积计算产量。

理论产量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 单位面积(hm^2)有效穗数 $\times$ 每穗总粒数 $\times$ 结实率(%) $\times$ 千粒重(g)/ 10^9

相对值 = 胁迫区测定值/对照区测定值

1.2.3 抗旱性评价指标 抗旱系数(drought resistance coefficient) $\text{DC} = \text{某品种干旱胁迫平均产量} / \text{某品种正常灌水平均产量}$,抗旱指数(drought resistance index) $\text{DI} = \text{DC} \times \text{某品种干旱胁迫平均产量} / \text{干旱胁迫所有参试品种平均产量}$ ^[17]。

根据抗旱指数,栽培稻的抗旱性分为高抗、抗、中抗、中感、感 5 级。评价标准参考张灿军等^[18],并按张安宁等^[19]的修改标准分类(表 1)。

1.3 统计分析

采用 Excel 2003 进行数据汇总和作图,SPSS 统计分析软件进行显著性分析。

表 1 栽培稻抗旱级别划分标准

Table 1 Drought resistance scoring of cultivated rice		
抗旱级别 Drought resistance level	抗旱指数 Drought resistance index	抗旱性评价 Drought resistance evaluation
1	≥1.30	高抗 High resistance
3	0.90 ~ 1.29	抗 Resistance
5	0.70 ~ 0.89	中抗 Medium resistance
7	0.36 ~ 0.69	中感 Medium susceptible
9	≤0.35	感 Susceptible

2 结果与分析

2.1 水分胁迫对产量及产量构成因素的影响

6 个参试品种正常种植时平均产量达 13.51 t·hm⁻², 幼穗分化至齐穗期水分胁迫后产量均下降, 平均产量为 12.02 t·hm⁻², 比对照减产 11.03%, 其中云梗 19 极显著低于对照, 楚梗 27、楚梗 29、云光

109、云梗 41 显著低于对照(表 2)。楚梗 29 和云光 101 分别为 1.05 和 1.00; 而干旱处理对云梗 19 产量影响较大, 其抗旱指数仅为 0.66。根据抗旱指数划分标准, 楚梗 29、云光 101、云梗 41 抗旱级别 3 级, 抗; 楚梗 27、云光 109 抗旱级别 5 级, 中抗; 云梗 19 抗旱级别 7 级, 中感。

从产量构成因素看, 幼穗分化至齐穗期水分胁迫后产量下降的主要原因是有有效穗数、总粒数、实粒数的降低, 其中对实粒数影响最大, 达显著水平, 平均比对照低 8.53%, 其次是总粒数, 平均比对照低 7.21%。表现为抗性的品种结实率和千粒重水分胁迫后受影响较小, 产量显著下降的主要原因是有效穗数和总粒数的降低; 表现为中抗性的品种水分胁迫后产量显著下降, 主要是受总粒数和实粒数降低的影响; 表现为中感性的品种水分胁迫后有效穗数、总粒数、实粒数、结实率的共同降低使得产量极显著下降。

表 2 不同处理产量、产量构成因素的方差分析及各品种抗旱指数

Table 2 Variance analyses on yield and yield components with different treatments and drought resistance coefficients of different varieties															
品种 Variety	有效穗数 Effective panicles /(10 ⁴ ·hm ⁻²)		总粒数 Total grains per panicle		每穗实粒数 Filled grains per panicle		结实率/% Fertility rate		千粒重/g 1000-grain weight		理论产量 Theoretical yield /(t·hm ⁻²)		实际产量 Actual output /(t·hm ⁻²)		抗旱指数 Drought resistance coefficient
	对照	干旱	对照	干旱	对照	干旱	对照	干旱	对照	干旱	对照	干旱	对照	干旱	
	CK	Treatment	CK	Treatment	CK	Treatment	CK	Treatment	CK	Treatment	CK	Treatment	CK	Treatment	
楚梗 29 Chujing 29	407.55 ± 0.67	383.80 ± 0.55	165.37 ± 8.46	158.17 ± 7.67	143.38 ± 5.29	135.07 ± 3.31	86.76 ± 2.37	85.47 ± 2.40	25.01 ± 1.27	26.42 ± 0.49	14.59* ± 0.043	13.69 ± 0.18	14.64* ± 0.56	13.59 ± 0.22	1.05
云光 101 Yunguang 101	404.70* ± 0.19	360.05 ± 0.72	167.13 ± 5.38	171.73 ± 10.79	137.82 ± 5.55	136.33 ± 13.28	82.49 ± 3.23	79.37 ± 5.68	24.62 ± 1.31	26.31 ± 0.91	13.71 ± 0.44	12.88 ± 0.77	13.68 ± 0.44	12.83 ± 0.78	1.00
云梗 41 Yunjing 41	377.15 ± 0.29	385.70 ± 0.58	167.35 ± 13.04	151.52 ± 4.19	142.14 ± 6.72	135.51 ± 5.85	85.08 ± 3.18	89.41 ± 1.48	25.38 ± 0.57	23.69 ± 0.23	13.60* ± 0.48	12.38 ± 0.35	13.60* ± 0.49	12.47 ± 0.52	0.95
楚梗 27 Chujing 27	352.45 ± 0.67	334.40 ± 0.88	211.16 ± 12.54	189.98 ± 19.31	155.58 ± 3.68	146.71 ± 6.95	73.90 ± 5.77	77.64 ± 6.92	24.23 ± 0.45	23.58 ± 0.39	13.29* ± 0.53	12.06 ± 0.27	13.11* ± 0.63	11.85 ± 0.48	0.89
云光 109 Yunguang 109	353.40 ± 0.19	345.80 ± 0.58	187.64 ± 9.95	174.66 ± 17.24	157.72 ± 2.69	137.14 ± 14.34	84.16* ± 3.17	78.49 ± 0.59	24.25 ± 1.31	24.16 ± 0.24	13.52* ± 0.83	11.44 ± 1.02	13.36* ± 0.71	11.33 ± 0.99	0.80
云梗 19 Yunjing 19	400.90 ± 0.90	389.50 ± 2.75	155.58 ± 7.38	132.26 ± 16.27	129.72 ± 1.93	101.72 ± 10.49	83.49 ± 3.66	77.06 ± 2.49	24.44 ± 1.27	25.89 ± 1.83	12.70* ± 0.25	10.18 ± 0.84	12.65* ± 0.07	10.04 ± 1.05	0.66
平均 Mean	382.69	366.54	175.71	163.05	144.39*	132.08	82.65	81.24	24.66	25.01	13.57* *	12.11	13.51* *	12.02	0.89
比对照低/% Reduce to CK		- 4.58		- 7.21		- 8.53		- 1.71		1.42		- 10.76		- 11.03	

注: 同一行中, * 表示 $P < 0.05$, * * 表示 $P < 0.01$, 下同。
Note: In the same column, * mean significant difference ($P < 0.05$), * * mean highly significant difference ($P < 0.01$), and hereinafter.

为进一步分析幼穗分化至齐穗期水分胁迫后产量构成因素变化与水稻品种抗旱能力的关系, 利用产量构成因素相对值与抗旱指数进行了相关性分析(图 1)。结果显示: 实粒数相对值均在 1.0 以下, 且与抗旱指数呈极显著的正相关关系, 相关系数达 0.8464, 说明幼穗分化至齐穗期水分胁迫后导致实粒数降低, 在幼穗分化至齐穗期水分胁迫条件下, 抗

旱性强的品种实粒数降低的幅度小, 抗旱性较弱的品种实粒数降低的幅度大。总粒数相对值仅抗旱指数较高的云光 101 大于 1.0, 其余品种均在 1.0 以下, 与抗旱指数呈正相关关系, 相关系数为 0.5724, 说明在幼穗分化至齐穗期水分胁迫条件下, 抗旱性强的品种穗粒数受影响较小, 抗旱性弱的品种穗粒数降低幅度大。结实率相对值与抗旱指数呈正相关

关系,相关系数为 0.2862。有效穗和千粒重相对值与抗旱系数呈负相关关系,但相关系数较小。

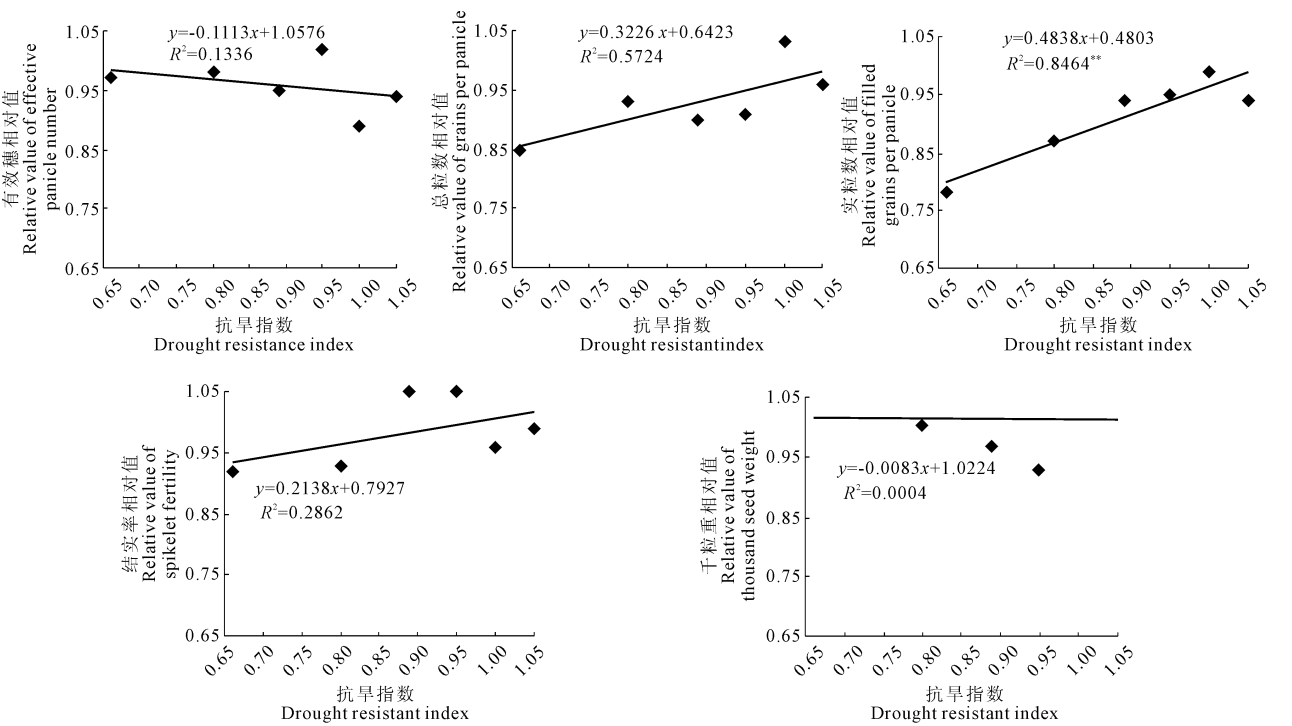


图 1 有效穗数、总粒数、实粒数、结实率和千粒重相对值与抗旱指数的关系

Fig.1 Relationships between relative values of effective panicle number, grains per panicle, filled grains per panicle, spikelet fertility, and thousand seed weight and drought resistance index

2.2 水分胁迫对齐穗期叶面积指数的影响

幼穗分化至齐穗期水分胁迫后水稻齐穗期叶面积指数均不同程度下降,其中高效叶面积指数比对照下降 13.60%,总叶面积指数下降 12.92%,说明

幼穗分化至齐穗期干旱胁迫对叶面积指数影响较大,尤其是功能叶叶面积指数(表 3)。但不同抗性品种干旱胁迫后叶面积指数变化与其抗旱指数相关关系较小(图略)。

表 3 不同处理齐穗期叶面积指数及相对值

Table 3 Leaf area indexes (LAI) and their relative values with different treatments at the full heading stage									
品种 Variety	高效叶面积指数 Effective LAI			低效叶面积指数 Low efficient LAI			总叶面积指数 Total LAI		
	对照 CK	干旱 Dry treatment	相对值 Relative value	对照 CK	干旱 Dry treatment	相对值 Relative value	对照 CK	干旱 Dry treatment	相对值 Relative value
楚梗 29 Chujing 29	4.52 ± 1.29	3.89 ± 0.68	0.86	1.16 ± 0.22	1.11 ± 0.05	0.96	5.68 ± 1.48	5.00 ± 0.63	0.88
云光 101 Yunguang 101	3.86 ± 1.00	2.79 ± 0.41	0.72	1.23 ± 0.22	0.84 ± 0.04	0.69	5.09 ± 1.20	3.64 ± 0.39	0.71
云梗 41 Yunjing 41	3.47 ± 0.54	3.49 ± 0.24	1.01	0.84 ± 0.12	0.66 ± 0.05	0.78	4.31 ± 0.63	4.15 ± 0.27	0.96
楚梗 27 Chujing 27	3.90 ± 0.48	3.82 ± 0.37	0.98	0.67 ± 0.14	0.78 ± 0.21	1.16	4.57 ± 0.60	4.60 ± 0.42	1.01
云光 109 Yunguang 109	3.56 ± 0.32	3.04 ± 0.38	0.86	0.72 ± 0.08	0.69 ± 0.25	0.95	4.28 ± 0.39	3.73 ± 0.16	0.87
云梗 19 Yunjing 19	4.08 ± 0.69	3.56 ± 0.71	0.87	0.83 ± 0.16	0.85 ± 0.35	1.03	4.91 ± 0.84	4.42 ± 1.05	0.90
平均 Mean	3.90	3.43	0.88	0.91	0.82	0.93	4.81	4.26	0.89
比对照低/% Reduce to CK		- 13.60			- 10.55			- 12.92	

2.3 水分胁迫对齐穗期功能叶 SPAD 值的影响

在幼穗分化至齐穗期水分胁迫条件下,6 个品种倒 1 叶、倒 2 叶、倒 3 叶 SPAD 平均值分别比对照低 1.26%、1.32%、2.69%(表 4)。抗旱性表现为抗的品种楚梗 29、云光 101、云梗 41 水分胁迫后倒 1 叶 SPAD 高于对照;楚梗 29、云梗 41 水分胁迫后倒 2 叶

SPAD 值高于对照;楚梗 27、云梗 41 倒 3 叶 SPAD 水分胁迫后比对照略有增加。结果表明,在幼穗分化至齐穗期水分胁迫条件下,抗旱能力强的品种功能叶 SPAD 值呈增加的趋势,而抗旱能力较弱的品种则呈下降趋势。

表 4 不同处理齐穗期功能叶 SPAD 及相对值

品种 Variety	倒 1 叶 The first leaf from the top			倒 2 叶 The second leaf from the top			倒 3 叶 The third leaf from the top		
	对照 CK	干旱 Dry treatment	相对值 Relative value	对照 CK	干旱 Dry treatment	相对值 Relative value	对照 CK	干旱 Dry treatment	相对值 Relative value
楚梗 29 Chujing 29	50.18 ± 1.80	51.74 ± 1.25	1.03	50.46 ± 2.34	50.98 ± 1.85	1.01	51.39 ± 0.49	49.68 ± 2.78	0.97
云光 101 Yunguang 101	51.40 ± 0.99	51.61 ± 0.60	1.00	51.29 ± 1.28	50.66 ± 0.49	0.99	51.24 ± 1.14	50.97 ± 1.08	0.99
云梗 41 Yunjing 41	54.19 ± 0.45	54.52 ± 3.91	1.01	54.63 ± 1.62	55.20 ± 2.50	1.01	54.13 ± 0.80	54.04 ± 3.43	1.00
楚梗 27 Chujing 27	53.97 ± 1.42	52.62 ± 0.24	0.98	53.24 ± 1.61	52.63 ± 0.37	0.99	52.53 ± 0.46	52.88 ± 0.57	1.01
云光 109 Yunguang 109	54.59 ± 0.87	53.14 ± 1.10	0.97	53.58 ± 0.52	51.45 ± 1.28	0.96	53.29 ± 0.54	49.07 ± 2.55	0.92
云梗 19 Yunjing 19	53.56 ± 2.93	50.30 ± 0.31	0.94	54.06 ± 2.95	52.23 ± 1.33	0.97	53.36 ± 1.68	51.02 ± 0.25	0.96
平均 Mean	52.98	52.32	0.99	52.88	52.19	0.99	52.66	51.28	0.98
比对照低/% Reduce to CK		- 1.26			- 1.32			- 2.69	

对幼穗分化至齐穗期水分胁迫后功能叶 SPAD 值变化与水稻品种抗旱能力的关系进一步分析显示(图 2),功能叶 SPAD 相对值与抗旱指数均呈正相关关系,其中倒 1 叶 SPAD 相对值与抗旱指数相关系

数最高,为 0.7921,倒 2 叶为 0.6283,倒 3 叶为 0.4030,说明在幼穗分化至齐穗期水分胁迫条件下,抗旱性较强的品种功能叶 SPAD 受影响较小,而抗旱性较弱的品种受影响较大。

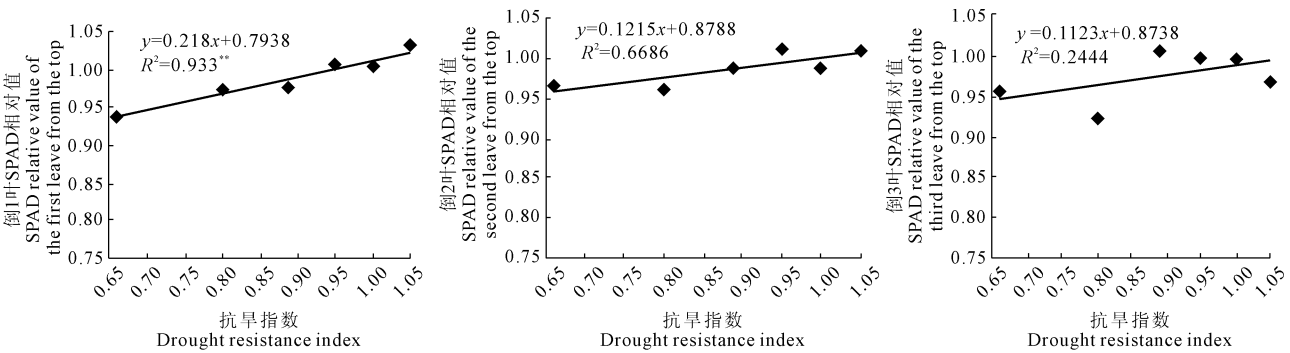


图 2 齐穗期倒 1 叶、倒 2 叶、倒 3 叶 SPAD 相对值与抗旱指数的关系

Fig.2 Relationships between relative values of functional leaf chlorophyll SPAD and drought resistance indexes

3 讨 论

3.1 幼穗分化期至齐穗期水分胁迫对产量的影响

稻穗发育过程是水稻一生中生理需水临界期,抽穗开花期植株对稻田缺水的敏感程度仅次于孕穗

期。陈彩虹^[20]等研究表明,干旱对产量影响最大的时期是孕穗期,其次是灌浆期,减产原因是大幅度降低结实率和千粒重。拔节孕穗期水分胁迫后单位面积有效穗数、每穗实粒数和千粒重均降低,严重影响了水稻产量^[21]。幼穗分化到抽穗期胁迫对产量影

响最大,胁迫后每穗粒数下降,空瘪粒增加,千粒重下降从而使产量下降^[22]。穗分化期水分胁迫对总粒数和结实率影响最大^[23],抽穗期水分胁迫超过 9 天后有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒重均显著降低从而使水稻产量显著下降^[24]。本试验研究结果显示,幼穗分化期至齐穗期水分胁迫使水稻产量极显著下降,主要原因是有效穗、总粒数、实粒数降低,其中对实粒数影响最大,且相对值与品种的抗旱性呈显著正相关关系。与前人研究相比^[20-22,24],本试验中千粒重受影响较小,反而略有增加,结实率因总粒数和实粒数均降低,因此降低幅度也较小,原因可能是受水分胁迫程度差异的影响。

3.2 水分胁迫对功能叶叶面积指数及 SPAD 值的影响

旱种条件下叶面积指数小,且下降速度加快^[24],同时抑制了水稻齐穗期功能叶生长,叶面积指数和 SPAD 值显著下降^[25]。在幼穗形成期水分胁迫后,水稻叶面积、SPAD 值均降低^[26]。拔节期不同程度胁迫叶面积相对生长速率均呈负值^[27]。本试验中,幼穗分化至齐穗期干旱胁迫叶面积指数下降,尤其对功能叶叶面积指数影响较大。而抗旱能力强的品种 SPAD 值受水分胁迫后增加,抗旱能力较弱的品种则呈下降趋势。

参 考 文 献:

[1] 彭贵芬,刘 瑜,张一平.云南干旱的气候特征及变化趋势研究[J].灾害学,2009,24(4):40-44.

[2] 余 航,王 龙,田 琳,等.云南旱灾综合指数时间序列趋势分析[J].安徽农业科学,2012,40(4):2090-2092.

[3] 汪妮娜,黄 敏,陈德威,等.不同生育期水分胁迫对水稻根系生长及产量的影响[J].热带作物学报,2013,34(9):1650-1656.

[4] 彭世彰,蔡 敏,孔伟丽,等.不同生育阶段水分亏缺对水稻干物质与产量的影响[J].水资源与水工程学报,2012,23(1):10-13.

[5] 张卫星,朱德峰,林贤青,等.干旱胁迫对不同穗型超级稻品种产量及穗部性状的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(1):255-260.

[6] 王成瑗,王伯伦,张文香,等.不同生育时期干旱胁迫对水稻产量与碾米品质的影响[J].中国水稻科学,2007,21(6):643-649.

[7] 蔡一霞,王 维,朱庆森.水分胁迫对水稻籽粒蛋白质积累及营养品质的影响[J].植物生态学报,2007,31(3):536-543.

[8] 王成瑗,王伯伦,张文香,等.土壤水分胁迫对水稻产量和品质

的影响[J].作物学报,2006,32(1):131-137.

[9] 王成瑗,赵 磊,王伯伦,等.干旱胁迫对水稻生育性状与生理指标的影响[J].农学学报,2014,4(1):4-14.

[10] 郭 慧,马 均,李树杏,等.孕穗期水分胁迫对水稻部分生理特性与产量补偿效应的研究[J].南方农业学报,2013,44(9):1448-1454.

[11] Chen T T, Xu Y J, Wang J C, et al. Polyamines and ethylene interact in rice grains in response to soil drying during grain filling[J]. Journal of Experimental Botany, 2013,64(8):2523-2538.

[12] 赵鹏珂,王昌贵,冯小磊,等.孕穗期水稻叶片生理性状与抗旱性相关分析[J].中国农业大学学报,2012,17(2):37-41.

[13] 蔡昆争,吴学祝,骆世明,等.抽穗期不同程度水分胁迫对水稻产量和根叶渗透调节物质的影响[J].生态学报,2008,28(12):6148-6158.

[14] 吴学祝,蔡昆争,骆世明.抽穗期土壤干旱对水稻根系和叶片生理特性的影响[J].中国农学通报,2008,24(7):202-207.

[15] 王贺正,马 均,李旭毅,等.水稻开花期一些生理生化特性与品种抗旱性的关系[J].中国农业科学,2007,40(2):399-404.

[16] Yang J C, Zhang J H, Liu K, et al. Involvement of polyamines in the drought resistance of rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2007,58(6):1545-1555.

[17] 兰巨生,胡福顺,张景瑞.作物抗旱指数的概念和统计方法[J].华北农学报,1990,5(2):20-25.

[18] 张灿军,姚宇卿,王育红,等.早稻抗旱性鉴定方法与指标研究-1 鉴定方法与评价指标[J].干旱地区农业研究,2005,23(3):33-36.

[19] 张安宁,王飞名,余新桥,等.基于土壤水分梯度鉴定法的栽培稻抗旱标识品种筛选[J].作物学报,2008,34(11):2026-2032.

[20] 陈彩虹,张志珠,卢宏琮,等.不同生育期干旱对水稻生长和产量的影响[J].西南农业学报,1993,6(2):38-43.

[21] 邵玺文,张瑞珍,齐春艳,等.拔节孕穗期水分胁迫对水稻生长发育及产量的影响[J].吉林农业大学学报,2004,26(3):237-241.

[22] 王成瑗,王伯伦,张文香,等.不同生育时期干旱胁迫对水稻产量与碾米品质的影响[J].中国水稻科学,2007,21(6):643-649.

[23] 张玉屏,朱德峰,林贤青,等.不同时期水分胁迫对水稻生长特性和产量形成的影响[J].干旱地区农业研究,2005,23(2):48-53.

[24] 程建平,曹凑贵,蔡明历,等.不同灌溉方式对水稻生物学特性与水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2006,17(10):1859-1865.

[25] 张荣萍,马 均.不同灌水方式对水稻齐穗期功能叶性状的影响[J].西昌学院学报(自然科学版),2008,22(3):31-34.

[26] 李树杏,郭 慧,李 敏,等.幼穗形成期水分胁迫后复水对水稻叶片光合特性及物质生产的影响[J].华北农学报,2013,28(5):133-137.

[27] 郝树荣,郭相平,王为木,等.胁迫后复水对水稻叶面积的补偿效应[J].灌溉排水学报,2005,24(4):19-21,32.