

# 早稻灌浆期淹水对剑叶理化特性及产量和品质的影响

姬静华<sup>1</sup> 霍治国<sup>2</sup> 唐力生<sup>3</sup> 杜尧东<sup>1,3</sup> 胡飞<sup>1,\*</sup>

(<sup>1</sup>华南农业大学 农学院, 广州 510642; <sup>2</sup>中国气象科学研究院, 北京 100081; <sup>3</sup>广东省气候中心, 广州 510080; \* 通讯联系人, E-mail: hufei@scau.edu.cn)

## Grain Yield and Quality and Physiological and Biochemical Characteristics of Flag Leaf in Early Rice as Affected by Submergence at Filling Stage

Ji Jing-hua<sup>1</sup>, HUO Zhi-guo<sup>2</sup>, TANG Li-sheng<sup>3</sup>, DU Yao-dong<sup>1,3</sup>, HU Fei<sup>1,\*</sup>

(<sup>1</sup> College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; <sup>2</sup> Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China; <sup>3</sup> Climate Center of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China; \* Corresponding author, E-mail: hufei@scau.edu.cn)

Ji Jinghua, HUO Zhiguo, TANG Lisheng, et al. Grain yield and quality and physiological and biochemical characteristics of flag leaf in early rice as affected by submergence at filling stage. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30(2): 181–192.

**Abstract:** The early hybrid rice Tianyou 998 and the early conventional rice Guinongzhan were submerged at filling stage to evaluate submergence effects on grain yield, rice quality, and physiological and biochemical characteristics of the flag leaf. The depth of submergence were 2/3, and all of rice plant height lasting 0d, 1d, 3d, 5d and 7d(0 d as CK). The results showed that the plant height increased after submergence and the increments in plant height peaked after 5–7 days of submergence. The grain yield and rice quality decreased significantly after submergence at a depth of 2/3 plant height and complete submergence lasting 1–3 days at the filling stage, especially after complete submergence lasting 5–7 days. The yield decrease was mainly due to reduced effective panicle number after submergence. The grain yield and rice quality varied insignificantly with variety under the same submergence conditions. The free proline and MDA contents in flag leaf increased; however, the SPAD value and the SOD activity decreased following submergence at the filling stage and the variation increased as the depth and duration of submergence increased. The SPAD value and the MDA content, significantly or extremely significantly correlated with grain yield and rice quality at the filling stage, are two physiological indices.

**Key words:** submergence; early rice; filling stage; flag leaf; physicochemical properties; yield; quality

姬静华, 霍治国, 唐力生, 等. 早稻灌浆期淹水对剑叶理化特性及产量和品质的影响. *中国水稻科学*, 2016, 30(2): 181–192.

**摘要:** 以天优 998 和桂农占为试验材料, 盆栽条件下在灌浆期进行 2/3 淹水和没顶淹水处理(淹水历时 0 d, 1 d, 3 d, 5 d 和 7 d, 0 d 为对照), 对淹水后早稻剑叶理化特性以及产量和品质进行分析。结果表明, 灌浆期水稻在 1 d~3 d 短期 2/3 和没顶淹水后产量和品质显著下降, 淹水 5 d~7 d 产量下降最为严重。有效穗数下降是淹水导致产量下降的主要因素。相同淹水条件下, 两个水稻材料间产量和品质变化差异不显著。灌浆期水稻淹水后水稻剑叶的游离脯氨酸和 MDA 含量升高, SPAD 值和 SOD 酶活性下降, 随淹水深度和持续时间的延长变幅增大。灌浆期淹水后水稻剑叶 SPAD 值和 MDA 含量与产量和品质呈显著或极显著相关, 是反映淹水后水稻产量和品质变化生理指标。

**关键词:** 淹水; 早稻; 灌浆期; 剑叶; 理化特性; 产量; 品质

中图分类号: Q945.78; S511.01

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2016)02-0181-12

随着全球气候变暖的加剧, 极端气候事件出现的频率上升, 洪涝灾害也呈频发趋势。气候变化模型预测, 全球发生淹水灾害的频率会增加, 淹水胁迫会长期成为农作物主要的环境威胁<sup>[1]</sup>。水稻虽然属于喜水作物, 但淹水也不利于其生长, 尤其是生殖生

长期, 淹水对其产量和品质会产生不良的影响<sup>[2]</sup>。近年来, 有关耐涝基因、耐涝机理、淹水影响及评估的研究受到广泛的关注<sup>[3-8]</sup>。

灌浆结实期是水稻产量形成的最后阶段, 是决定结实率和粒重的关键时期, 也是稻米品质形成的

收稿日期: 2015-03-11; 修改稿收到日期: 2015-05-13。

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD20B02)。

关键时期。水稻品质和产量受水稻籽粒灌浆结实的直接影响<sup>[9]</sup>。近年来,国内外关于淹水胁迫对水稻生理生化特性和产量构成的影响已有不少的研究。Singh等<sup>[10]</sup>认为骤发山洪引起的稻田水浑浊或淹水会使水稻减产10%~100%;Yoshida<sup>[11]</sup>认为水稻产量的70%以上源于灌浆期功能叶的光合积累,此期遭受淹涝将直接影响功能叶发挥作用,使库源关系恶化,导致减产。有研究表明,涝害造成水稻减产是综合作用的结果<sup>[12]</sup>,主要表现为结实率、有效穗数、每穗总粒数和千粒重的降低<sup>[13,14]</sup>。目前,这方面的研究主要针对我国长江中下游地区水稻灌浆期前淹水危害<sup>[15-23]</sup>,而对华南地区水稻品种抗涝和淹水危害主要时段研究相对较少。

中国是洪涝灾害频发的国家<sup>[24]</sup>。华南地区是中国水稻主产区之一,降水丰沛,且华南地区处于对气候变化敏感的南海季风区和全球气候变化趋势南北位相相反的交界带,气候变化趋势多样,洪涝灾害亦频发<sup>[25,26]</sup>。华南地区早稻灌浆期正值华南前后汛期的交接时期,降水强度大,极易造成洪涝灾害,会给即将成熟收获的水稻产量和品质造成严重的影响。

本研究运用盆栽方法对华南地区生产面积较大的杂交稻组合天优998和常规稻桂农占在灌浆期进行不同程度的淹水处理,分析淹水对灌浆期水稻剑叶理化特性及产量和品质的影响,旨在分析淹水深度和持续时间与灌浆期早稻产量和品质的关系,为构建华南地区早稻灌浆期水稻水涝灾害预警指标和灌浆期减轻淹水危害的管理措施提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试水稻为早晚兼用型超级杂交组合天优998和超级常规稻品种桂农占。种子由广东省农业科学院提供。

### 1.2 水稻栽培与管理

试验采用盆栽方法,于2014年在华南农业大学气象观测站内进行。试验前每个塑料盆(高33 cm,直径25 cm)装入取自华南农业大学实验农场水稻田风干的水稻土10.0 kg。土壤基本理化性状如下:pH值为5.76,有机质含量27.60 g/kg,碱解N、速效P、速效K含量分别为87.20 mg/kg、72.48 mg/kg和126.10 mg/kg。按广州地区常规方法播种育秧,3月10日播种,4月4日水稻秧苗长至3叶1心,选

取发育进程与长势一致的秧苗移栽至塑料盆中,每盆栽植3穴,每穴3株秧苗,主茎上挂牌。移栽前5 d在盆中加水,用木棒充分拌匀土壤,每盆加入基肥6.0 g,于移栽后12 d施分蘖肥6.0 g,抽穗前25 d追施穗肥4.0 g,基肥、分蘖肥和穗肥均为水稻专用复合肥雅苜苗乐复合肥(挪威雅苜国际有限公司,总养分 $\geq 45\%$ , $m_N:m_P:m_K=1:1:1$ )。试验期间按广州地区早稻常规管理措施进行水分与病虫害管理。每个处理3个重复,其中,不淹水处理为对照,仅用于生理生化指标取样;淹水处理后,每盆随机选取1穴水稻用于剑叶理化特性的测定,另外2穴水稻用于产量和品质的测定。另选取三盆自始至终均在自然条件下生长,作为所有处理进行产量品质测定时的对照。

### 1.3 试验设计与处理

试验设淹水深度、淹水时间两个因素,淹水深度设两个水平:2/3淹水(淹水深度为水稻株高的2/3)、没顶淹;淹水时间设4个水平:1 d、3 d、5 d、7 d。共8个处理,每个处理重复3盆。以全生育期在自然条件下正常生长的水稻为对照(CK),设15盆重复。

待水稻扬花结束颖壳开始闭合时,对水稻挂牌,并依次放入注有相应深度水的大桶中(桶的高度为110 cm),对水稻进行淹水处理,即在桶底预先装约3 cm厚的泥土,注入清水后用木棍搅5~10 min至浑浊,每8 h搅拌1次。达到预定的淹水时间后,将处理的水稻移出大桶,并对主茎剑叶取样,然后放在自然条件下生长至成熟;同时从15盆对照中随机选取3盆进行取样和测定。

### 1.4 株高及剑叶SPAD值的测定

处理结束后,测定株高,用SPAD-502测定剑叶的SPAD值。

### 1.5 剑叶理化指标的测定

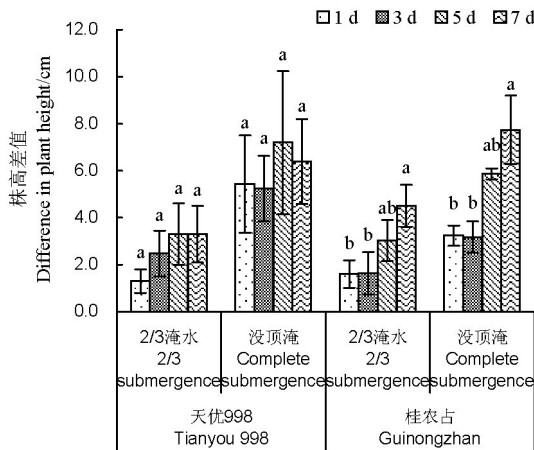
游离脯氨酸含量采用茚三酮比色法测定;丙二醛(MDA)的含量采用硫代巴比妥酸比色法测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法测定<sup>[27]</sup>。

### 1.6 水稻产量的测定

水稻成熟后进行考种,统计每穗空秕粒数、每穗实粒数,计算结实率、千粒重等指标,计算每盆理论产量,测定实际产量。

### 1.7 水稻品质的测定

水稻收获3个月后,待收获后水稻籽粒的含水量至12%~14%时,去除籽粒中的青米、碎米和杂



柱上不同小写字母表示同一品种不同处理天数在 0.05 水平上差异显著 ( $n=3$ , LSD)。下同。

Different lowercase letters mean significant difference for a given variety among various submergence time at 0.05 level ( $n=3$ , LSD). The same as below.

图 1 淹水对水稻株高的影响

Fig. 1. Effect of submergence on plant height in rice.

质,按 NY/T593-2002 规定的方法,测定稻米的加工品质和外观品质,包括糙米率、精米率、整精米率、垩白米率和垩白度。

### 1.8 统计分析

数据由 Excel 2010 软件和 DPS 7.05 统计软件处理,采用 LSD 法分析处理间差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 淹水对水稻株高的影响

图 1 表明,经过淹水处理后,水稻的株高与对照相比,均呈现升高的趋势,没顶淹株高增量大于 2/3 淹水处理。虽然天优 998 的株高与对照的差值在不同的淹水时间处理之间均未达到显著水平,但天优 998 的株高在 2/3 淹水处理下随淹水时间的延长而增加,没顶淹处理下株高增加随着淹水时间延长而增加趋势不明显,在淹水 5 d 后增高 7.2 cm。桂农占在 2/3 淹和没顶淹处理后株高随着淹水时间的延长均呈升高的趋势,淹水 7 d 的增量最大,与对照相比增加了 4.5 cm 和 7.7 cm,与淹水 1 d 和 3 d 的株高增量差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 2.2 淹水对水稻剑叶 SPAD 值的影响

图 2 显示,淹水处理后两品种的剑叶 SPAD 值较对照均有所下降,且没顶淹处理比 2/3 淹处理影

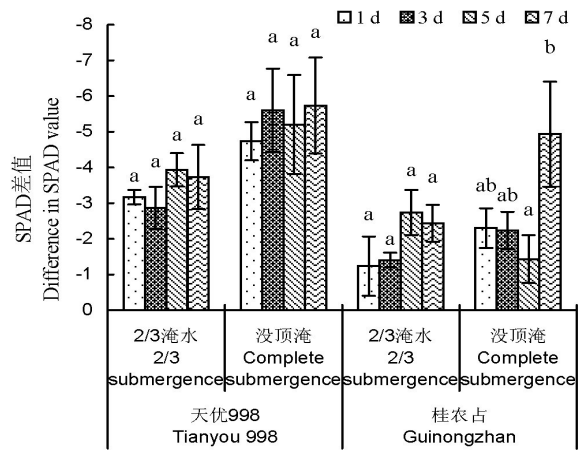


图 2 淹水对水稻剑叶 SPAD 值的影响

Fig. 2. Effect of submergence on SPAD value of rice flag leaf.

响更大,淹水对桂农占剑叶 SPAD 值的影响小于天优 998。天优 998 剑叶的 SPAD 值在 2/3 淹水处理 5 d 后降幅达到最大值(3.93),没顶淹处理 7 d 后剑叶 SPAD 值降幅最大,为 5.73。不同淹水时间处理之间 SPAD 值变化未达到差异显著水平。桂农占剑叶的 SPAD 值在 2/3 淹水处理 5 d 后降幅最大(2.73),不同淹水时间处理 SPAD 值变化量差异不显著。没顶淹处理的桂农占剑叶 SPAD 值 7 d 后降幅最大,为 4.93。

### 2.3 淹水对水稻剑叶渗透调节物质含量的影响

脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质,对于植物适应逆境和减少伤害起着重要的作用。由图 3 可知,淹水处理后水稻剑叶中的游离脯氨酸含量升高,没顶淹比 2/3 淹的升幅更大,总趋势是随着淹水时间的延长上升,相同条件下天优 998 叶片脯氨酸含量升幅比桂农占高。天优 998 2/3 淹水处理 5 d 后脯氨酸含量差值达最大值( $8.42 \mu\text{g/g}$ ),处理之间脯氨酸的差值差异不显著;没顶淹剑叶中的脯氨酸含量差值在淹水 7 d 后达  $18.51 \mu\text{g/g}$ ,与淹水 1 d、3 d 处理差异显著 ( $P<0.05$ )。桂农占 2/3 淹水处理剑叶中脯氨酸含量的变化不大,处理间差异不显著,淹水 3 d 后差值最大,为  $6.10 \mu\text{g/g}$ ;没顶淹处理后剑叶中脯氨酸含量变化量随着淹水时间的延长而增加,7 d、5 d 处理后脯氨酸含量变化量均与 1 d 处理差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 2.4 淹水对水稻剑叶 SOD 酶活性的影响

超氧化物歧化酶(SOD)是抵御活性氧自由基介导的氧化损伤的第一道防线,植物对于逆境的抵

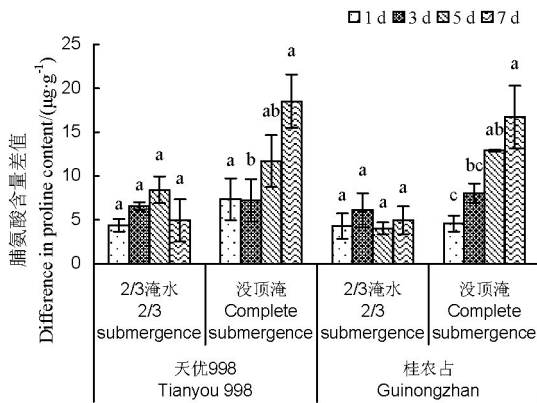


图 3 淹水对水稻剑叶中游离脯氨酸含量的影响  
Fig. 3. Effect of submergence on the free proline concentration in rice flag leaf.

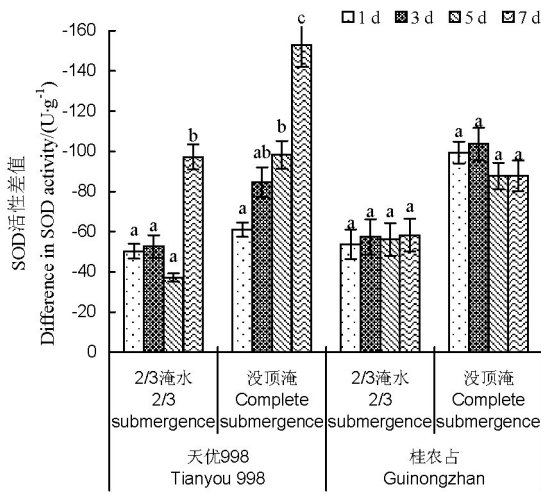


图 4 淹水对水稻剑叶 SOD 酶活性的影响  
Fig. 4. Effect of submergence on the SOD activity of rice flag leaf.

抗能力往往与其体内 SOD 的活性水平有关。研究结果(图 4)表明,水稻经淹水处理后剑叶中 SOD 酶活性下降,没顶淹比 2/3 淹的影响大,总趋势表现为随淹水时间的延长 SOD 酶活性下降幅度增大,天优 998 比桂农占表现得更明显。天优 998 经 2/3 淹水和没顶淹处理后,剑叶中的 SOD 酶活性均在 7 d 后降幅最大,与其他三个时间的处理差异显著( $P < 0.05$ )。桂农占淹水处理后,剑叶中 SOD 酶活性的变化在相同淹水深度的所有处理间差异均不显著。没顶淹处理后剑叶中 SOD 酶活性随着淹水时间的延长先上升后下降,在淹水 3 d 后变化量最大,为 103.60 U/g。

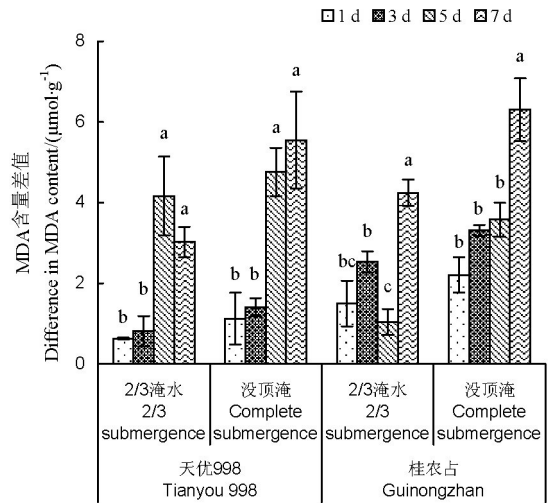


图 5 淹水对水稻剑叶中 MDA 含量的影响  
Fig. 5. Effect of submergence on the MDA concentration of rice flag leaf.

### 2.5 淹水对水稻剑叶 MDA 含量的影响

不同淹水处理对水稻剑叶中丙二醛含量的影响如图 5 所示。经淹水处理后的水稻剑叶中的 MDA 含量升高,没顶淹比 2/3 淹处理升幅大。天优 998 经 2/3 淹水和没顶淹水处理后,剑叶中的 MDA 含量随着淹水时间的延长而上升,淹水 3 d 后升幅均显著增大。桂农占 2/3 淹和没顶淹处理剑叶 MDA 含量上升趋势较缓和,均在淹水 7 d 后达到最大值,与相同深度的其他处理差异显著( $P < 0.05$ )。

### 2.6 淹水对水稻产量及其构成的影响

产量的下降可以反映淹水对水稻的伤害程度。表 1 显示,淹水深度越深,淹水时间越长,天优 998 和桂农占有有效穗数、结实率、千粒重、理论产量和实际产量降幅越大。

无论是 2/3 淹还是没顶淹,两个水稻的有效穗数淹水 1d 后均显著下降,相同淹水时间,天优 998 有效穗数降幅比桂农占大。没顶淹 7 d 后,天优 998 有效穗数下降 63%,桂农占降幅也达 55%以上。结实率和千粒重的下降均与有效穗数相似,但降幅不同,相同淹水时间下,有效穗数下降幅度最大,其次是结实率,千粒重降幅较小。淹水处理后,天优 998 每穗粒数均较对照有所上升,桂农占在 2/3 淹水时每穗粒数上升,但没顶淹水处理每穗粒数下降。总体上看,天优 998 淹水后产量降幅较桂农占大。

2/3 淹水 1 d 后两个水稻产量与对照比下降 1/3 左右,淹水 3d~5d 下降 1/2 左右,淹水 7d,下

表 1 淹水对早稻产量及其构成因素的影响

Table 1. Effects of submergence on grain yield and its components of early rice.

材料与处理 Treatment	有效穗数 Number of productive panicles per pot	结实率 Seed setting rate /%	每穗粒数 Number of grains per panicle	千粒重 1000-grain weight /g	产量 Yield /(g · pot <sup>-1</sup> )
天优 998 Tianyou 998					
2/3 淹 2/3 submergence					
对照 CK	31.0±1.53 a	82.33±6.91 a	103.37±0.90 b	24.33±0.17 a	63.69±2.77 a (63.56±1.70 a)
1 d	21.0±0.58 b	76.17±2.53 ab	127.60±5.42 a	22.67±0.73 b	46.28±3.23 b (44.86±3.52 b)
3 d	16.0±1.15 c	74.57±0.86 ab	108.27±3.42 b	22.83±0.44 b	29.65±3.3 cd (28.39±2.07 c)
5 d	15.0±0.58 c	74.00±6.18 ab	133.40±8.57 a	21.17±0.44 c	31.13±2.43 c (30.98±3.93 cd)
7 d	14.3±2.96 c	62.60±1.99 b	110.63±3.77 b	21.17±0.33 c	20.94±4.13 d (20.29±4.31 d)
没顶淹 Complete submergence					
对照 CK	31.0±1.53 a	82.33±6.91 a	103.37±0.90 c	24.33±0.17 a	63.69±2.77 a (63.56±1.70 a)
1 d	15.7±1.76 b	65.69±1.48 b	136.63±2.15 ab	22.50±0.29 b	31.64±3.78 b (31.37±3.11 b)
3 d	14.0±1.53 b	59.77±5.03 b	142.13±6.94 a	21.83±0.33 b	25.50±1.70 bc (24.94±2.04 c)
5 d	12.7±0.88 b	55.53±0.43 b	133.37±7.45 ab	19.67±0.67 c	18.70±2.78 cd (18.44±1.24 d)
7 d	11.3±0.88 b	53.37±2.59 b	124.67±4.36 b	18.33±0.44 d	13.70±0.54 d (13.36±1.42 d)
桂农占 Guinongzhan					
2/3 淹 2/3 submergence					
对照 CK	23.0±1.53 a	85.23±1.50 a	118.53±0.35 b	23.00±0.00 a	53.32±2.64 a (53.15±3.22 a)
1 d	15.3±1.67 b	80.21±4.13 ab	129.83±1.89 a	22.00±0.50 ab	34.78±2.77 b (34.43±4.81 b)
3 d	14.0±0.58 b	78.76±5.07 ab	125.73±2.57 ab	21.33±0.33 abc	29.67±2.96 bc (23.00±0.65 c)
5 d	12.3±0.67 b	76.55±3.34 ab	132.03±4.40 a	20.67±0.60 bc	25.70±1.72 c (24.31±3.94 bc)
7 d	12.0±0.58 b	72.55±4.16 b	126.13±4.93 ab	19.83±0.88 c	21.81±2.32 c (21.70±3.42 c)
没顶淹 Complete submergence					
对照 CK	23.0±1.53 a	85.23±1.50 a	118.53±0.35 a	23.00±0.00 a	53.32±2.64 a (53.15±3.22 a)
1 d	14.3±0.33 b	82.45±0.73 ab	109.13±2.05 a	21.83±0.93 a	28.09±0.58 b (28.45±1.57 b)
3 d	14.0±1.00 b	74.50±3.8 abc	109.40±9.73 a	21.17±0.44 ab	24.05±2.60 b (22.01±1.37 bc)
5 d	13.3±1.20 bc	71.37±4.61 c	114.93±6.83 a	19.67±0.60 bc	21.30±1.92 bc (19.44±3.32 c)
7 d	10.3±1.33 c	70.45±4.32 c	113.67±5.91 a	18.17±0.73 c	15.47±3.56 c (15.01±1.47 c)

括号内为实际产量。平均值±标准误。不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著(LSD法)。下表同。

Within parentheses are actual yield. Mean±SE. Figures flanked by various lowercase letters are significantly different at 0.05 level. The same as in tables below.

降约 2/3。没顶淹水 1 d 后两个水稻品种产量与对照比下降 1/2 左右,淹水 3 d~5 d 下降约 2/3,7 d 下降约 3/4。

## 2.7 淹水对稻米外观品质和加工品质的影响

表 1 显示,淹水后稻米加工和外观品质受到了严重的影响。淹水处理后稻米的糙米率、精米率和整精米率下降,而垩白米率和垩白度升高。总趋势为淹水深度越深,时间越长,稻米的糙米率、精米率和整精米率越低,垩白米率和垩白度越高。

表 2 显示,在相同淹水条件下,整精米率降幅最大,精米率次之,糙米率降幅较小。垩白度升幅比垩白率大,无论是 2/3 淹,还是没顶淹,两个水稻品种垩白米率和垩白度都大幅升高,米质显著下降,天优

998 的垩白米率和垩白度升幅较桂农占大。

天优 998 在 2/3 淹水和没顶淹处理 1 d 后,其糙米率和整精米率较对照的降幅在 10% 左右;2/3 淹水和没顶淹水 3 d~5 d,天优 998 糙米率下降 10% 左右,整精米率下降了 50% 左右。淹水 7 d 后降幅均高达 50% 以上。

桂农占在 2/3 淹水和没顶淹后 1 d,糙米率降幅较小,整精米率降幅较大,达 15%~20%。桂农占 2/3 淹水和没顶淹 3 d~7 d 糙米率下降不明显,均在 7% 以下,2/3 淹水精米率下降 10% 左右,没顶淹 5 d 下降了 12% 左右,淹水 7 d 后下降 15%~25%。2/3 淹 3 d~5 d 和没顶淹 3 d 桂农占整精米率下降 30% 左右,2/3 淹 7 d 和没顶淹 5 d~7 d 桂农占整

表 2 淹水对早稻加工和外观品质的影响

Table 2. Effects of submergence on the processing and appearance qualities of early rice

材料与处理 Treatment	糙米率 Brown rice rate/%	精米率 Milled rice rate/%	整精米率 Head milled rice rate /%	垩白率 Percentage of chalky grain /%	垩白度 Chalkiness degree /%
天优 998 Tianyou 998					
2/3 淹 3/2 submergence					
对照 CK	87.64±5.93 a	64.55±0.82 a	48.34±0.52 a	19.33±0.88 b	3.65±0.75 b
1 d	78.57±0.30 ab	63.99±0.24 a	44.96±2.36 a	20.33±0.88 b	4.77±0.93 b
3 d	77.64±1.35 ab	61.56±4.17 a	25.88±1.31 b	25.67±4.41b	6.71±0.80 b
5 d	77.64±0.83 ab	59.47±0.48 ab	25.50±0.35 b	47.00±2.00 a	13.00±0.80 a
7 d	77.05±2.84 b	55.31±0.76 b	23.56±0.41 b	50.00±4.04 a	16.29±1.97 a
没顶淹 Complete submergence					
对照 CK	87.64±5.93 a	64.55±0.82 a	48.34±0.52 a	19.33±0.88 c	3.65±0.75 d
1 d	78.09±1.07 ab	62.85±0.67 a	42.64±0.16 b	30.33±1.20 b	16.55±2.73 c
3 d	77.63±0.98 ab	56.53±2.87 b	25.95±1.76 c	33.67±1.45 b	18.34±1.20 c
5 d	77.27±0.62 b	55.90±2.06 b	24.59±0.20 c	49.33±1.86 a	28.73±4.28 b
7 d	74.85±3.80 b	54.79±0.95 b	19.03±0.70 d	52.00±2.08 a	40.00±1.86 a
桂农占 Guinongzhan					
2/3 淹 2/3 Submergence					
对照 CK	80.37±1.41 a	65.55±0.59 a	50.65±0.88 a	25.67±2.03 c	4.54±0.47 c
1 d	79.89±0.72 a	63.41±0.64 ab	41.19±0.37 b	29.00±1.15 c	7.70±2.19 c
3 d	79.19±0.45 ab	61.93±1.09 b	36.27±0.40 c	39.00±1.15 b	12.64±1.69 bc
5 d	78.91±0.13 ab	59.29±0.10 c	35.32±0.20 c	43.33±1.45 ab	20.26±1.01 ab
7 d	76.63±0.84 b	55.30±1.05 d	21.34±0.04 d	49.00±3.51 a	25.51±7.16 a
没顶淹 Complete submergence					
对照 CK	80.37±1.41 a	65.55±0.59 a	50.65±0.88 a	25.67±2.03 c	4.54±0.47 c
1 d	79.84±1.51 a	60.36±0.66 b	42.60±0.43 b	26.67±2.19 c	8.08±0.89 c
3 d	78.46±0.79 ab	59.07±0.34 b	37.58±0.44 c	54.67±4.81 b	18.37±0.71 b
5 d	77.73±0.9 ab	57.11±0.66 c	25.66±0.49 d	54.67±1.86 b	23.45±1.46 b
7 d	75.24±1.08 b	49.97±0.72 d	20.71±0.30 e	71.00±2.52 a	42.42±3.46 a

精米率下降 50%~60%。

## 2.8 淹水后水稻剑叶生化指标与理论产量的关系

图 6 表明,剑叶 SPAD 与两个水稻的理论产量呈极显著正相关;MDA 含量与理论产量呈显著负相关;天优 998 剑叶中 SOD 酶活性与理论产量正相关,但相关未达显著;桂农占剑叶的 SOD 酶活性与其理论产量呈极显著正相关;游离脯氨酸含量与理论产量呈负相关,但相关均不显著。

## 2.9 水稻剑叶生化指标与整精米和垩白米率的关系

图 7 表明,两个水稻品种经淹水处理后整精米率与水稻剑叶中的 SPAD 值和 SOD 活性呈正相关,但均不显著;而与游离脯氨酸和 MDA 含量呈负相关,其中,桂农占整精米率与 MDA 含量相关达极显著水平。

图 8 表明,淹水后两个水稻品种垩白米率与剑叶的 SPAD 值和 SOD 活性呈负相关,与 SPAD 相关达显著水平。垩白米率与剑叶脯氨酸和 MDA 含量呈正相关( $P<0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 灌浆期淹水对水稻株高及剑叶 SPAD 值的影响

水稻株高变化的生理原因比较复杂,生理学研究表明,植物乙烯、脱落酸和赤霉素参与调节淹水胁迫下水稻伸长生长反应<sup>[28]</sup>。史济林等<sup>[29]</sup>对 10 个水稻材料的淹水试验结果表明,10 个材料在孕穗期 72 h 的淹水期间平均株高比正常高 4.7 cm。Hirano 和 Koshimura<sup>[30]</sup>在浮稻受淹时也发现有类似的节间伸长情况。说明水稻在灌浆期仍具有调节株高以降低淹水对叶片伤害的能力,但这种调节能力是有限的,随着淹水深度的增加和持续时间的延长,株高增幅达到最大后将不再增加,杂交组合天优 998 在淹水 5 d~7 d 后达到最大,且增量没有超 10 cm,虽然常规品种桂农占在淹水 7 d 后株高仍较淹水 5 d 后有所增加,但增幅大幅收窄(图 1)。

SPAD 值反映了水稻叶片中叶绿素的相对含量,淹水处理后水稻叶片的叶绿素发生了降解<sup>[7]</sup>,

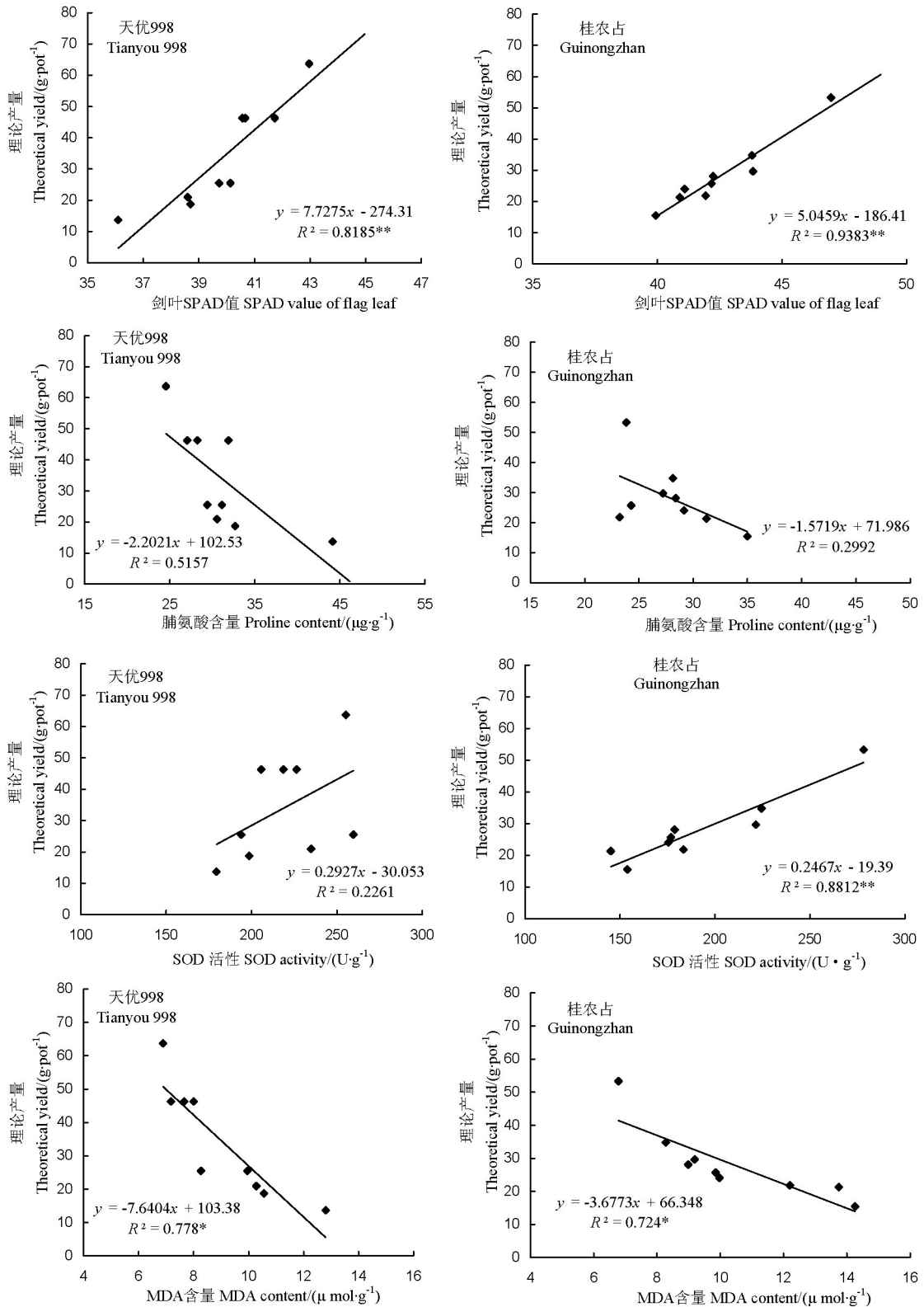


图 6 水稻淹水后理论产量与剑叶理化指标的关系

Fig. 6. Correlation between yield and physiological indexes of flag leaf in rice under submergence.



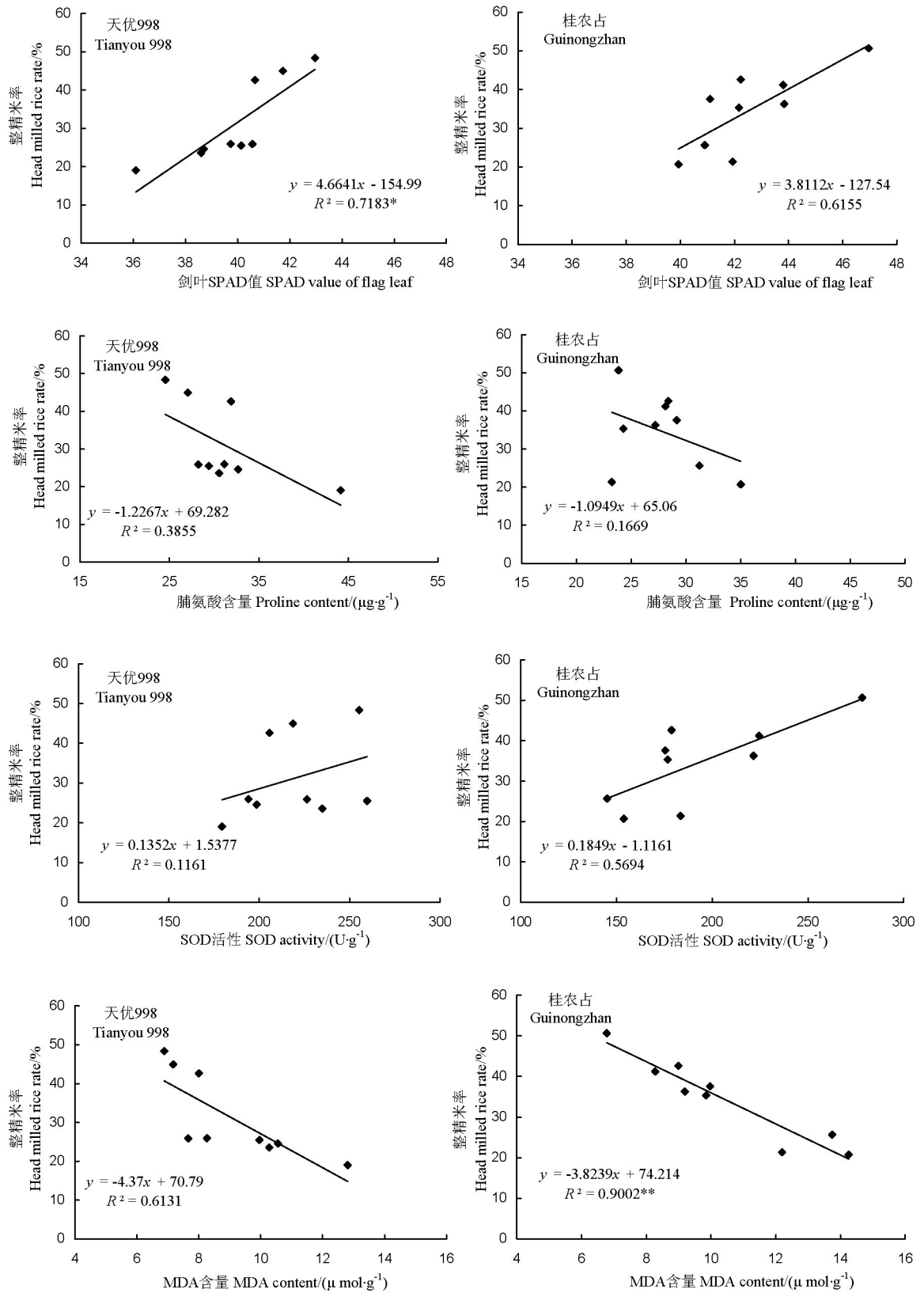


图7 水稻淹水后整精米率与剑叶理化指标的关系

Fig. 7. Correlation between head milled rice rate and physiological indexes of flag leaf in rice under submergence.



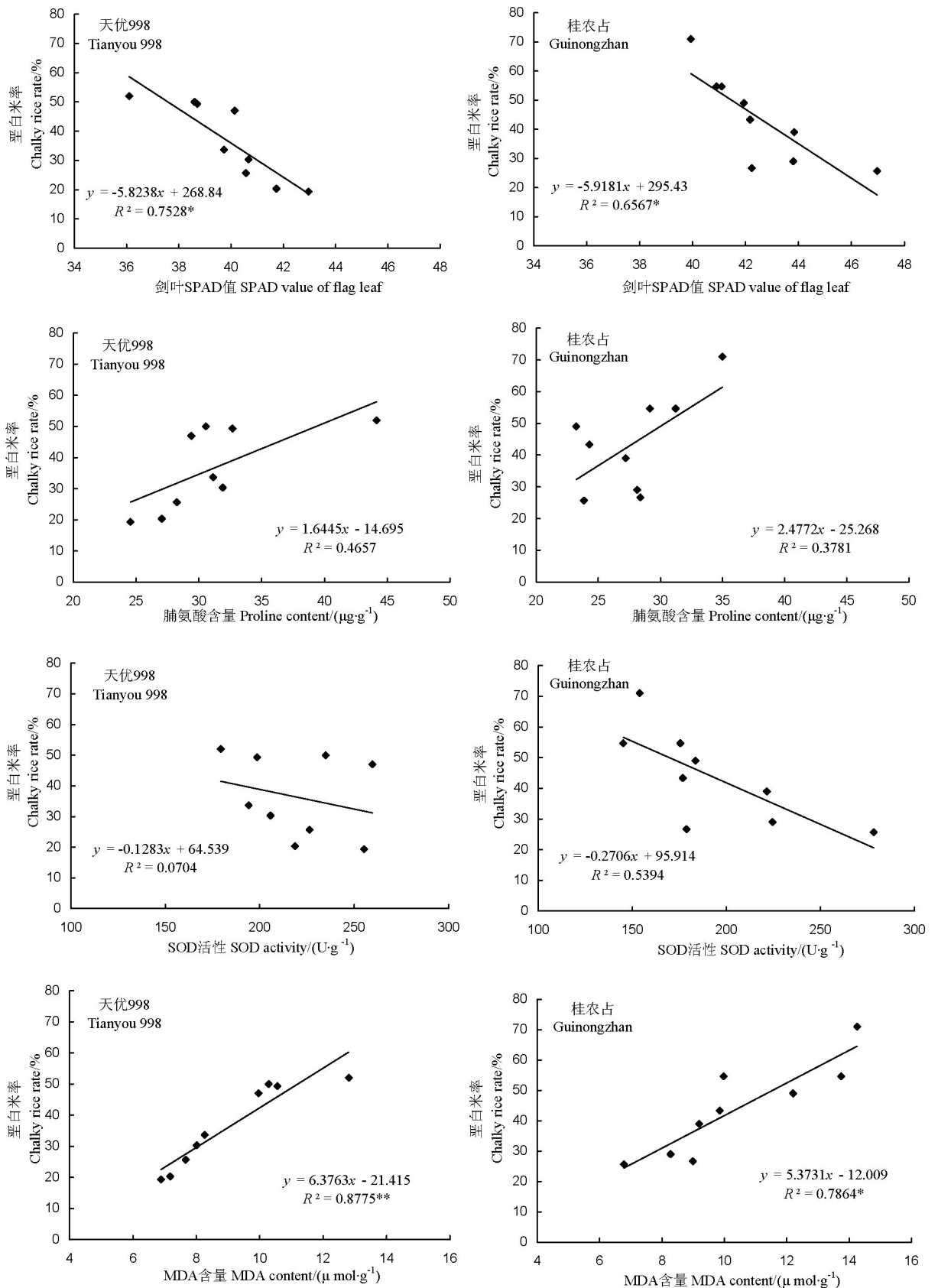


图8 水稻淹水后垩白米率与剑叶理化指标的关系

Fig. 8. Correlation between chalky rice rate and physiological indexes of flag leaf in rice under submergence.

SPAD 值较对照均下降。本研究显示,灌浆期水稻剑叶的 SPAD 值在 2/3 淹水处理下降幅小于没顶淹(图 2),这可能是 2/3 淹水时顶部叶片仍能接收光照,而没顶淹时叶片完全处于水中,缺乏氧气和光照致使叶绿素分解。本研究显示,在相同条件下杂交组合天优 998 SPAD 值降幅比常规品种桂农占要大。

### 3.2 灌浆期水稻剑叶的生理生化指标对淹水胁迫的响应

淹水胁迫下水稻叶片的生理生化代谢会发生相应的变化,这是水稻响应淹水胁迫的一个重要方式。渗透调节物质、活性氧清除系统和胞膜透性等生理生化特性可以很好地评价水稻受到胁迫后的受损程度<sup>[31]</sup>。灌浆期水稻剑叶生理状况对产量和品质的形成具有重要的影响。本研究中,淹水处理后的天优 998 和桂农占剑叶中的渗透调节物质游离脯氨酸含量、SOD 活性、MDA 含量随胁迫程度加剧变化的规律与前人的结果是一致的<sup>[12,32,33]</sup>。

本研究发现所选两个水稻材料剑叶淹水后生理指标的变化量随淹水深度和持续时间的不同表现出不同的特征。脯氨酸作为渗透调节物质,其增量在两个材料中随淹水时间延长变化不大,但在没顶淹处理下,淹水 5 d 后增量大幅上升,且基本稳定,显示全淹 5 d 后水稻叶片经脯氨酸调节渗透的能力可能达到了峰值(图 3)。天优 998 剑叶 SOD 酶活性随淹水持续时间的延长降幅较明显,但桂农占剑叶 SOD 活性随淹水持续时间变化降幅较小。没顶淹 1~3 d 后天优 998 剑叶 SOD 活性降幅较桂农占小,表明在短期淹水下天优 998 较桂农占清除自由基的能力强,但淹水 5 d 后,这种优势已不存在(图 4)。这是否是由杂交稻与常规稻剑叶之间调节能力的差异引起的,需要较多的品种间进行比较才能有明确的结果。MDA 含量是由于植物器官衰老或在逆境条件下受伤害,其组织或器官膜脂质发生过氧化反应而产生的,水稻剑叶在淹水后其含量的变化与其受损程度有密切关系。两个水稻材料在 2/3 淹和没顶淹时均表现为淹水 5 d 后,MDA 含量大幅升高;相同条件下天优 998 MDA 的含量较桂农占低(图 5)。综合 SOD 活性和 MDA 含量的变化,天优 998 剑叶淹水后调节能力强于桂农占。

### 3.3 灌浆期淹水对水稻产量的影响

不同时期水稻淹水后其产量均随淹水时间和淹水深度的不同而有不同程度的下降<sup>[16-19,21]</sup>。本研究

也显示灌浆期淹水水稻产量不仅下降,而且降幅很大(表 1~2)。灌浆期淹水胁迫首先是有效穗数下降,这表现为很多有效分蘖在淹水后不能正常灌浆结实,实际收获的有效穗数大幅下降。后期的大量分蘖,淹水后成为无效分蘖,靠近主茎的有效分蘖每穗粒数较多,因此,淹水后平均每穗粒数较对照略有升高。淹水后结实率、千粒重也下降。综合分析,淹水后两个水稻材料产量构成要素降幅从大到小依次为有效穗数>结实率>千粒重。灌浆期水稻淹水后,首先是大量的可收获有效穗死亡,而存活的收获穗数因剑叶光合能力下降,结实率下降,并伴随千粒重的减轻,导致大幅减产。观测发现淹水后水稻茎秆变弱,极易出现折秆倒伏,这可能与淹水后土壤通气状况不良,有害物质增多,氧气含量少,以及淹水后节间伸长导致重心失衡等因素有关。

大田观察发现杂交稻比常规稻耐涝性要好<sup>[34]</sup>,从理论产量看,天优 988 降幅比桂农占大,但由于天优 998 对照产量较高,在 2/3 淹水 1 d 后其理论产量仍比桂农占高,淹水 3 d~7 d,其理论产量仍与桂农占相近;在没顶淹 1 d~3 d 后天优 998 的理论产量仍比桂农占高,但在淹水 5 d~7 d 后因其降幅大,其理论产量略低于桂农占。

本研究则表明,灌浆期在短暂淹水下杂交组合天优 998 理论产量比常规水稻桂农占高,随着淹水深度的增加和淹水时间延长,杂交组合与常规品种的理论产量均大幅下降,差别减小。

水稻在淹水后的理论产量与剑叶 SPAD 呈显著正相关,而与 MDA 含量呈显著负相关(图 6),显示剑叶 SPAD 值和 MDA 含量对水稻理论产量形成具有重要的意义,是判别水稻淹水损失的较好指标。

### 3.4 灌浆期淹水处理对稻米外观品质和加工品质的影响

稻米品质受水稻品种和外界环境因素的影响,灌浆期籽粒的发育状况决定了其外观品质和加工品质<sup>[35]</sup>。在灌浆期对水稻进行不同程度的淹水胁迫,水稻的糙米率、精米率和整精米率下降,垩白率和垩白度增大,这可能是由于淹水使剑叶叶绿体破坏,光合能力减弱,灌浆不均匀,导致籽粒发育不良。

两个水稻材料的整精米率与剑叶生理指标间的相关性不高,其与剑叶的 SPAD 值和 MDA 含量间的相关性较好,桂农占的整精米率甚至与 MDA 含量极显著相关。另外,两个水稻材料的垩白米率与剑叶的 SPAD 值和 MDA 含量均呈显著正相关,天

优 998 的垩白米率甚至与 MDA 含量呈极显著正相关(图 7)。剑叶的 SPAD 值和 MDA 含量与受淹后稻米的加工品质和外观品质的相关性较稳定,可作为分析灌浆期水稻淹水后品质下降原因的良好指标。

灌浆期水稻剑叶淹水后渗透调节物质脯氨酸含量的变化,以及 SOD 活性在不同淹水条件下具有较大的波动性,其与产量和品质的相关性虽然趋势明显,但未达显著,不宜作为淹水后判别受损参考依据。

### 参考文献:

- [1] Pucciariello C, Voeselek L A C J, Perata P, et al. Plant responses to flooding. *Front Plant Sci*, 2014, 5:1-2.
- [2] Hattori Y, Nagai K, Ashikari M. Rice growth adapting to deep water. *Curr Opin Plant Biol*, 2011, 14(1):100-105.
- [3] 李玉昌,李阳生,李绍清.淹涝胁迫对水稻生长发育危害与耐淹性机理研究的进展. *中国水稻科学*, 1998, 12(增刊): 70-76. Li Y C, Li Y S, Li S Q. Progress in research on injury to rice growth and development under submergence stress and mechanism of submergence tolerance. *Chin J Rice Sci*, 1998, 12 (suppl): 70-76. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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. *杂交水稻*, 2000, 15(2):38-40(44). Li S Q, Li Y S, Li D M, Liao J L. Effect of complete submergence at milky stage on source and sink of two-line hybrid rice. *Hybrid Rice*, 2000, 15(2):38-40, 44. (in Chinese with English abstract)
- [5] 夏石头,彭克勤,曾可.水稻涝害生理及其与水稻生产的关系. *植物生理学通讯*, 2000, 36(6): 581-588. Xia S T, Peng K Q, Zeng K. Relationship between physiological damage of flood to rice and rice production. *Plant Physiology Comm*, 2000, 36(6):581-588. (in Chinese with English abstract)
- [6] Dar M H, de Janvry A, Emerick K, et al. Flood-tolerant rice reduces yield variability and raises expected yield, differentially benefitting socially disadvantaged groups. *Nature*, 2013, 3: 1-8. DOI: 10.1038/srep03315.
- [7] Fukao T, Yeung E, Bailey-Serres J. The submergence tolerance gene *SUB1* a delays leaf senescence under prolonged darkness through hormonal regulation in rice. *Plant Physiol*, 2012, 160(4): 1795-1807.
- [8] Miro B, Ismail A M. Tolerance of anaerobic conditions caused by flooding during germination and early growth in rice (*Oryza sativa* L.). *Front Plant Sci*, 2013, 4:1-18.
- [9] 韩立宇,刘洁,董明辉.水分和氮肥对大穗型水稻籽粒灌浆结实的影响与生理分析. *中国稻米*, 2014, 20(5):8-12. Han L Y, Liu J, Dong M H. Effects and physiological analysis of soil moisture and nitrogen nutrient on grain filling of large panicle rice. *China Rice*, 2014, 20(5):8-12. (in Chinese with English abstract)
- [10] Singh S, Mackill D J, Ismail A M. Tolerance of longer-term partial stagnant flooding is independent of the *SUB1* locus in rice. *Field Crops Res*, 2011, 121: 311-323.
- [11] Yoshida S. Physiological aspect of grain yield. *Plant Physiol*, 1972, (23):437-464.
- [12] 彭克勤,夏石头,李阳生.涝害对早中稻生理特性及产量的影响. *湖南农业大学学报*, 2001, 27(3):173-176. Peng K Q, Xia S T, Li Y S. Effects of complete submergence on some physiological and yield characteristics of early and middle-season rice. *J Hunan Agric Univ*, 2001, 27(3):173-176. (in Chinese with English abstract)
- [13] 蔺万煌,孙福增,彭克勤,等.洪涝胁迫对水稻产量及产量构成因素的影响. *湖南农业大学学报*, 1997, (1):50-54. Lin W H, Sun F Z, Peng K Q, et al. Effects of flooding on the yield and the yield components of rice. *J Hunan Agric Univ*, 1997, (1):50-54. (in Chinese with English abstract)
- [14] Kato Y, Collard B C Y, Septiningsih E M, et al. Physiological analyses of traits associated with tolerance of long-term partial submergence in rice. *AoB Plants*, 2014, 6: 1-11.
- [15] 陈永华,柳俊,赵森,等.水稻分蘖期耐淹能力评价及不同淹涝强度对重要农艺性状的影响. *广西农业生物科学*, 2006, 25(2):111-115. Chen Y H, Liu J, Zhao S, et al. Evaluations of submergence tolerance at tillering stage and effects of different submergence stress on some important agronomic characters in rice. *J Guangxi Agric Biol Sci*, 2006, 25(2):111-115. (in Chinese with English abstract)
- [16] 宁金花,霍治国,龙志长,等.淹涝胁迫条件对水稻形态的试验研究初报. *中国农学通报*, 2013, 29(27):24-29. Ning J H, Huo Z G, Long Z C, et al. The preliminary study in rice morphology under waterlogging stress. *Chin Agric Sci Bull*, 2013, 29(27): 24-29. (in Chinese with English abstract)
- [17] 宁金花,霍治国,陆魁东,等.不同生育期淹涝胁迫对杂交水稻形态特征和产量的影响. *中国农业气象*, 2013, 34(6):678-684. Ning J H, Huo Z G, Lu K D, et al. Effects of waterlogging on morphological characteristics and yield of hybrid during growth stages. *Chin J Agrom*, 2013, 34(6):678-684. (in Chinese with English abstract)
- [18] 宣守丽,石春林,张建华,等.分蘖期淹水胁迫对水稻地上部分物质分配及产量构成的影响. *江苏农业学报*, 2013, (6):1199-1204. Xuan S L, Shi C L, Zhang J H, et al. Effects of submergence stress on aboveground matter distribution and yield components of rice at tillering stage. *Jiangsu J Agric Sci*, 2013, (6):1199-1204. (in Chinese with English abstract)
- [19] 宁金花,陆魁东,霍治国,等.拔节期淹涝胁迫对水稻形态和产量构成因素的影响. *生态学杂志*, 2014, 33(7):1818-1825.

- Ning J H, Lu K D, Huo Z G, et al. Effects of waterlogging stress on rice morphology and yield component at the jointing stage. *Chin J Ecol*, 2014, 33(7): 1818-1825. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王矿, 王友贞, 汤广民. 分蘖期水稻对淹水胁迫的响应规律研究. *灌溉排水学报*, 2014, 33(6): 58-61.  
Wang K, Wang Y Z, Tang G M. Response of rice to waterlogging stress in tillering stage. *J Irrig Drain*, 2014, 33(6): 58-61. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王斌, 周永进, 许有尊, 等. 不同淹水时间对分蘖期中稻生育动态及产量的影响. *中国稻米*, 2014, 20(1): 68-72.  
Wang B, Zhou Y J, Xu Y Z, et al. Effects of different straw incorporation depth on grain yields and qualities of rice. *China Rice*, 2014, 20(01): 68-72. (in Chinese with English abstract)
- [22] 吴启侠, 杨威, 朱建强, 等. 杂交水稻对淹水胁迫的响应及排水指标研究. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(6): 875-881.  
Wu Q X, Yang W, Zhu J Q, Wang Z Z, Ye H. Response of hybrid rice to flooding and establishment of drainage index. *Environ Yangtze Basin*, 2014, 23(6): 875-881. (in Chinese with English abstract)
- [23] 俞双恩, 郭杰, 陈军, 等. 探索涝渍连续抑制天数指标作为水稻排水标准的试验. *水科学进展*, 2014, 25(2): 282-287.  
Yu S E, Guo J, Chen J, et al. Experimental study of continuous stress-day index of waterlogging and excessive soil water as drainage standard of rice paddy fields. *Adv Water Sci*, 2014, 25(2): 282-287. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李茂松, 李森, 李育慧. 中国近50年洪涝灾害灾情分析. *中国农业气象*, 2004, 25(1): 38-41.  
Li M S, Li S, Li Y H. Analysis of flood disaster in the past 50 years in China. *Agric Meteorol*, 2004, 25(1): 38-41. (in Chinese with English abstract)
- [25] 《华南区域气候变化评估报告》编写委员会. 华南区域气候变化评估报告: 决策者摘要及执行摘要(2012). 北京: 气象出版社, 2013.  
The preparation of the commission of South China regional assessment of climate change. The South China Region Climate Change Assessment Report: Executive Summary and the Summary for Policymakers (2012). Beijing: China Meteorological Press, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [26] 段海来, 王春林, 唐力生, 等. 华南地区晚稻洪涝灾害风险评估. *生态学杂志*, 2014, 33(5): 1368-1373.  
Duan H L, Wang C L, Tang L S, et al. Risk assessments of late rice flood disaster in South China. *Chin J Ecol*, 2014, 33(5): 1368-1373. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
Li H S. Principle and Technology of Plant Physiology and Biochemistry Experiment. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [28] Kende H, Vander K E, Cho H T. Deeperwater rice: A model plant to study stem elongation. *Plant Physiol*, 1998, 118(4): 1105-1110.
- [29] 史济林, 罗中元, 唐厚传. 涝害对早稻生育影响及抗涝措施的研究. *浙江农业科学*, 1992(2): 53.  
Shi J L, Luo Z Y, Tang H C. The study on the effects of early rice growth under flooding and the measures of defense against floods. *J Zhejiang Agric Sci*, 1992, (2): 53. (in Chinese with English abstract)
- [30] Hirano T, Koshimura N. Growth and distribution of photo assimilates in floating rice under submergence. *Jpn J Trop Agric*, 1995, 9(3): 177-183.
- [31] 武维华. 植物生理. 北京: 科学出版社, 2003: 429-430.  
Wu W H. Plant Physiology. Beijing: Academic press, 2003, 429-430. (in Chinese with English abstract)
- [32] 邢少辰, 蔡玉红. 环境胁迫与植物体内脯氨酸的关系. *生态农业研究*, 1998, 6(2): 30-33.  
Xing S C, Cai Y H. Relationship between environmental stresses and proline in plant. *Eco-agric Res*, 1998, 6(2): 30-33. (in Chinese with English abstract)
- [33] Ushimaru T, Ogawa K, Ishida N, et al. Changes in organelle superoxide dismutase isoenzymes during air adaptation of submerged rice seedlings: Differential behavior of isoenzymes in plastids and mitochondria. *Planta*, 1995, 196: 606-613.
- [34] 钱奕胜. 杂交水稻抗涝性的观察. *湖南农业科学*, 1984(4): 封面三.  
Qian Y S. Observation on the flood preparedness of hybrid rice. *Hunan Agric Sci*, 1984, (4): Inside back cover. (in Chinese with English abstract)
- [35] 官春云. 现代作物栽培学. 北京: 高等教育出版社, 2011: 239.  
Guan C Y. Modern crop cultivation. Beijing: Higher Education Press, 2011: 239. (in Chinese with English abstract)