

doi:10.7668/hbnxb.2014.S1.040

水稻对幼穗形成期水分胁迫后复水的响应

李树杏^{1,2}, 郭 慧^{1,3}, 李 敏^{1,2}, 涂 敏¹, 王丽丽¹, 马 均², 王明田^{2,4}

(1. 贵州省水稻研究所, 贵州 贵阳 550006; 2. 四川农业大学 水稻研究所, 四川 温江 611130;

3. 中南大学 研究生院隆平分院, 湖南 长沙 410125; 4. 四川省气象局, 四川 成都 610071)

摘要:为了研究水分胁迫复水后对水稻部分指标的影响,以冈优 527 为试材,通过对水稻幼穗形成期不同时间和不同程度的水分胁迫处理后复水,研究了复水后水稻生理、生化及产量等指标的变化。结果表明:产量与结实率、千粒质量、有效穗以及实粒数都表现为受轻度短期干旱的处理在复水后均提高,高于对照水平;水势受到水分胁迫后降低;可溶性糖、SOD(超氧化物歧化酶)、POD(过氧化物酶)、CAT(过氧化氢酶)、MDA(丙二醛)的活性都表现为轻度短期干旱的水稻恢复效果最好,且活性都低于对照处理。说明水稻在幼穗形成期受到轻度短期干旱胁迫,复水后会达到节水、增产的效果。

关键词:水稻;幼穗形成期;水分胁迫;产量

中图分类号:S511.01 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7091(2014)增刊-0206-07

The Responding of Rice after Water Stress in Young Panicle Formation Stage

LI Shu-xing^{1,2}, GUO Hui^{1,3}, LI Min^{1,2}, TU Min¹, WANG Li-li¹, MA Jun², WANG Ming-tian^{2,4}

(1. Guizhou Rice Research Institute, Guiyang 550006, China; 2. Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, China; 3. Graduate School of Central South University Longping Branch, Changsha 410125, China; 4. Sichuan Provincial Meteorological Observatory, Chengdu 610071, China)

Abstract: In order to study some indicators of water on rice after water stress, through the study of different time and different degrees of water stress in young panicle formation stage of rice, to study the effects of rice physiology, biochemistry and yield; The results showed that: yield, filled grain per panicle, spikelet, panicle, 1 000-grain weight, seed setting rate, filling ratio at short-duration treatment was much higher than that of the control level, water potential reduced, soluble content, SOD, POD, CAT and MDA were achieved a good level after rewatering 7 days in short duration treatment. To showed that the rice young panicle formation was suffered at short-duration treatment was capable of saving water and increasing production after rewater.

Key words: Rice; Young panicle formation stage; Water stress; Yield

水稻是我国主要粮食作物之一,也是耗水量最大的灌溉作物。特别是在我国西南地区,作物分布主要以水稻为主,但由于大部分地处丘陵山区和高山区,经济相对落后,灌溉条件较差。所以在我国西南地区,发展节水农业,增强作物抗旱性,特别是增强水稻的抗旱性,提高水分利用率,对保证粮食作物总产量、促进经济发展尤为重要^[1]。近年来,我国西南地区水稻生长季节时有干旱灾情的发生,对粮食安全问题提出了严峻的考验。一些学者已就水稻

抗旱性品种筛选、水稻抗旱生理机制、水稻节水抗旱技术进行了大量的研究,取得了重要的进展^[2-6],其干旱胁迫后复水对水稻生长及生理机制调节的影响鲜有报道^[7-9],系统研究水稻抗旱节水机理,充分挖掘并利用水稻自身抗旱、节水、增产潜力,深入研究和充分利用水稻的自我补偿效应,对促进农业节水增产具有重大的意义。因此,本研究于水稻幼穗形成期采用不同程度和不同受旱时间水分胁迫后复水,通过对水稻复水后生育后期生理指标和产量的

收稿日期:2014-10-26

基金项目:比尔和梅琳达·盖茨基金会项目-二期子项目(51587-15);贵州省水稻遗传育种研究创新团队(黔科合人才团队项目(2012)4020);四川省气象局重点课题(重08-03)

作者简介:李树杏(1981-),女,内蒙古乌兰察布人,助理研究员,硕士,主要从事水稻栽培生理研究以及区域试验研究。

通讯作者:马 均(1963-),男,四川西充人,教授,博士,主要从事水稻高产栽培与生理生态研究。

测定与比较,以及复水后的恢复效应,为水稻节水灌溉提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本试验所用材料是杂交籼稻品种冈优 527。

1.2 试验方法

采用大田水育秧,玻璃大棚水泥池栽培,管理同大田,在 5 叶龄时取长势一致的幼苗于 5 月 18 日移栽进玻璃大棚,小区面积 18.72 m^2 ,按照 $0.20\text{ m} \times 0.33\text{ m}$ 规格插秧;不同处理间扎宽 0.30 m 的土埂,并用塑料薄膜包埂,以免水分流失。施肥方式以施纯氮 18.00 g/m^2 ,按底肥:蘖肥:穗肥 = 6:2:2 施用,磷肥以施 $\text{P}_2\text{O}_5\ 9.00\text{ g/m}^2$,全作底肥;钾肥以施 $\text{K}_2\text{O}\ 18.00\text{ g/m}^2$,按底肥:穗肥 = 7:3 施用。

1.3 试验处理

水分胁迫时间从幼穗形成期开始,试验设 3 种水分胁迫强度和 2 种胁迫时间,各处理分别为:

A:对照处理(土壤水势为:0 kPa)

B:轻度水分处理(土壤水势为:(-25 ± 5) kPa)

a 短期控水:控水 7 d(指达到要求水势后的天数, -25 kPaST)

b 长期控水:控水 14 d(指达到要求水势后的天数, -25 kPaLT)

C:重度水分处理(土壤水势为:(-50 ± 5) kPa)

a 短期控水:控水 7 d(指达到要求水势后的天数, -50 kPaST)

b 长期控水:控水 14 d(指达到要求水势后的天数, -50 kPaLT)

水分控制方法:用土壤水分张力计监测土壤水分含量,使土壤含水量保持在一定的范围内。具体操作方法是:从分蘖后期(7 月 7 日)开始(重度水分胁迫处理小区 7 月 6 日)排水,在每个小区内,把张力计埋入距土层表面 0.10 m 处监测土壤水势,3 d 后土壤水势同时达到要求的值,开始记录,每 4 h 记录 1 次张力计读数,当张力计读数低于设定值,每小区($3.20\text{ m} \times 1.95\text{ m}$)人工浇水,轻度胁迫处理浇水 7.50 L ,重度胁迫处理浇水 5.00 L ,使土壤水势保持在规定的范围,直到控水结束。对照:保持 $10 \sim 20\text{ mm}$ 水层(土壤水势为 0 kPa)。处理期结束,所有小区均进行浅水层灌溉,其他管理按照当地常规栽培模式进行。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 水势测定 分别在控水的前 1 d、控水的最后 1 d 以及复水后每隔 4 d,用美国 DECAGON 公司

产的 WP4-露点水势仪测定剑叶的水势。测定方法:取每个处理长势一致的 5 片剑叶,去掉叶脉,粉碎混匀,测定。

1.4.2 脯氨酸、可溶性糖、SOD、MDA、POD、CAT 活性的测定^[10] 分别在控水的前 1 d、控水的最后 1 d 以及复水后每隔 4 d,选取每个重复 3 株长势一致的水稻,取其剑叶,用液氮保存。

1.4.3 产量及其构成因素 每个小区取有代表性的 5 株水稻,测量有效穗、实收穗、实粒数、穗重、结实率、千粒质量,小区单收,去除缺、杂株数后按实收株数计产。

所测数据采用 Excel、SPSS 软件分析和处理。

2 结果和分析

2.1 水分胁迫复水后对产量及其构成因素的影响

不同水分胁迫处理后复水对水稻产量及其构成因素的影响有明显差异(表 1)。就水分胁迫复水后的水稻产量而言,轻度短期干旱处理 > 对照 > 重度短期干旱处理 > 轻度长期干旱处理 > 重度长期干旱处理。说明幼穗形成期短期轻度的控水,在节水的同时有利于产量的增加,但水分胁迫时间过长或胁迫程度较重则造成减产。就产量构成因素分析,与对照相比,轻度短期干旱处理后复水提高了水稻群体的有效穗数、穗粒数、结实率、千粒质量和充实率,其他 3 种水分处理复水后降低了水稻群体的有效穗、穗粒数、结实率和充实率,降低幅度有效穗和充实率表现为轻度长期干旱处理 < 重度短期干旱处理 < 重度长期干旱处理,穗粒数和结实率表现为重度短期干旱处理 < 轻度长期干旱处理 < 重度长期干旱处理。

如表 1 所示:幼穗形成期经不同程度和时间水分胁迫后,有效穗数表现为经过轻度短期干旱处理的最多,高于对照水平,且与重度胁迫处理达到差异极显著水平,与轻度长期干旱处理达到差异显著水平。穗粒数表现为轻度短期干旱处理与重度长期干旱处理差异达到显著水平,其余处理间都没有差异。千粒质量表现为轻度短期干旱处理分别与对照和重度、轻度长期处理间差异达到极显著水平,重度长期干旱处理与对照和重度短期干旱处理差异分别达到显著水平。结实率表现为对照和轻度短期干旱处理分别与其他 3 个处理都达到差异极显著水平;重度短期干旱处理与重度长期干旱处理间差异显著,且整体表现为轻度短期干旱处理结实率最高。充实率表现为轻度短期干旱处理最大,重度长期干旱处理的充实率最小,二者差异达到显著水平,其余各处理

间差异不显著。产量表现为对照、轻度短期干旱处理与重度胁迫处理差异达到极显著水平,且轻度短期干旱处理与轻度长期干旱处理间差异达到显著水

平;产量具体表现为轻度短期干旱处理值最大,是对照的 1.09 倍,是轻度长期干旱处理的 1.28 倍,分别是重度胁迫处理短期干旱和长期干旱的 1.39,1.61 倍。

表 1 幼穗形成期不同水分处理产量及其构成因素

Tab. 1 The grain yield and its components in different treatments at young panicle formation stage

处理 Treatments	有效穗数/(万/hm ²) EP	穗粒数/(Sp/Pa) FGP	千粒质量/g TGW	结实率/% Ssr	充实率/% FR	产量/(g/m ²) Yield
CK	278.55ABab	166.97Aab	27.33Bb	87.46Aa	94.95Aab	847.33ABab
-25 kPa ST	299.25Aa	168.01Aa	27.77Aa	88.61Aa	95.66Aa	924.78Aa
-50 kPa ST	246.00BCcd	158.75Aab	27.59ABab	81.66Bb	94.40Aa	722.80BCbc
-25 kPa LT	264.00ABCbc	138.46Aab	27.22Bbc	79.44Bbc	94.63Aab	663.26Cc
-50 kPa LT	237.00Cd	135.16Ab	26.82Bc	77.55Bc	91.28Ab	572.86Cc

注:ST. 短时间(7 d);LT. 长时间(14 d);EP. 有效穗;Sp. 粒;Pa. 穗;TGW. 千粒质量;Ssr. 结实率;FR. 充实率。表中标以大小写字母的值分别在 0.01 或 0.05 水平差异显著,标以相同字母的差异不显著。

Note:ST. Short time;LT. Long time;EP. Effective panicle;FGP. Filled grain per panicle;Sp. Spikelet;Pa. Panicle;TGW. 1 000-grain weight;Ssr. Seed setting rate;FR. Filling ratio. In the table,small letter means significant at the 0.05 probability levels,and the capital letter means significant at the 0.01 probability levels.

2.2 水分胁迫复水后对水稻叶片水势的影响

如图 1 所示,短期干旱处理在复水前 1 d,受胁迫的处理叶片水势低于对照,分别是对照的 2.22,2.48 倍;在复水后第 4 天叶片水势升高,轻度胁迫处理高于对照;在复水后第 8 天,轻度胁迫处理比对照高 0.21 MPa,重度胁迫处理比对照低 0.07 MPa;在复水后 12 d,重度胁迫处理高于对照 0.06 MPa;

在复水 16 d 受胁迫处理的叶片水势都下降,低于对照。长期干旱的处理在复水前 1 d 轻、重度 2 个处理的叶片水势都低于对照,在复水后第 4 天都有所升高;在复水后第 8 天,叶片水势分别达到最大值,轻度胁迫处理是 -0.61 MPa,比对照高 0.01 MPa,重度胁迫处理是 -0.70 MPa,比对照低 0.09 MPa,之后随着复水天数增加,各处理的叶片水势都呈下降趋势。

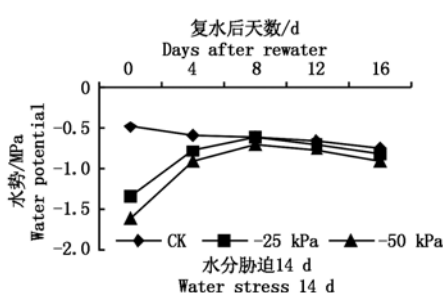
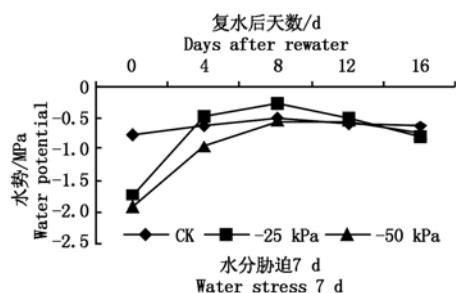


图 1 复水后叶片水势变化

Fig. 1 Changes of water potential content after rewater

2.3 水分胁迫复水后对水稻可溶性糖含量变化的影响

供试材料在幼穗形成期经过水分胁迫处理后可溶性糖含量变化如图 2 所示:在复水前 1 d,经过胁迫的处理可溶性糖含量均高于对照。短期干旱的处理:在复水后第 8 天可溶性糖含量降到最低,轻度胁迫处理比对照降低了 61.27%,重度胁迫处理比对

照降低了 47.47%;之后随着复水天数的持续增加,轻、重度胁迫处理都出现了一些波动,但一直低于对照水平。长期干旱处理在复水后第 4 天,轻度胁迫处理含量低于对照,下降了 25.83%,随后上升,随着复水天数的增加,轻、重度胁迫处理的可溶性糖含量最终都超过了对照。

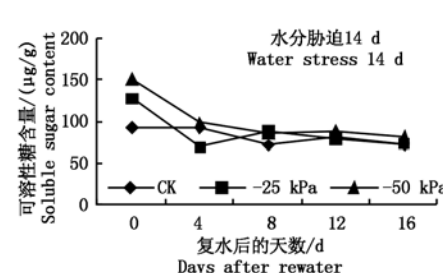
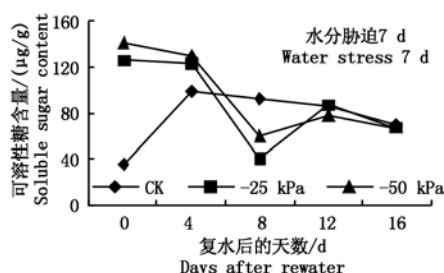


图 2 复水后可溶性糖含量动态变化

Fig. 2 The dynamic changes of soluble sugar content after rewater

2.4 幼穗形成期水分胁迫复水后对脯氨酸含量的影响

脯氨酸是植物在逆境中增强抗逆性的一种渗透调节物,在逆境胁迫时其含量会升高。如图3所示,供试材料在复水前1 d各处理时间段的脯氨酸含量表现为重度胁迫处理>轻度胁迫处理>对照。短期干旱处理从复水开始直到复水后第8天,脯氨酸含量一直保持下降趋势,在复水后第8天时轻度胁迫处理脯氨酸含量达到最低,低于对照36.84%;重度

胁迫处理在复水第8天降低了58.33%,高于对照26.94%。在复水后12 d,轻度胁迫处理依然低于对照,之后随着复水天数的增加,轻、重度胁迫处理脯氨酸含量都趋向对照。长期干旱处理在复水后第4天脯氨酸含量下降到最低,与复水前相比降低了47.90%,53.67%,分别高于对照19.15%,34.71%,之后随着复水天数的增加,各胁迫处理的脯氨酸含量总体趋势与对照接近。

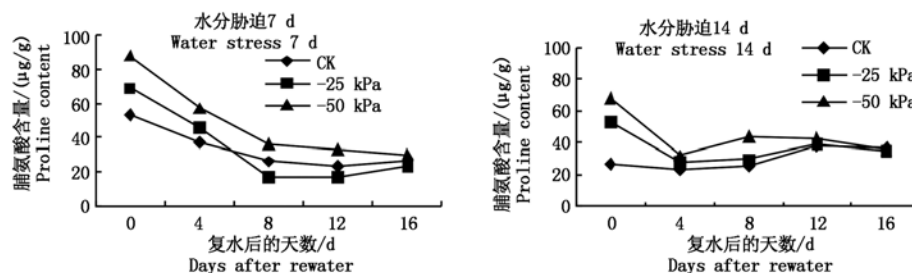


图3 复水后脯氨酸含量的动态变化

Fig. 3 The dynamic changes of proline content after rewater

2.5 幼穗形成期水分胁迫复水后对SOD含量的影响

SOD活性在受到水分胁迫后会提高,如图4所示,在复水前1 d长期与短期水分胁迫的处理SOD含量都表现为重度胁迫处理>轻度胁迫处理>对照。短期干旱处理复水后SOD含量都下降;在复水后第8天下降幅度最大,与复水前相比,轻度胁迫处理下降了75.67%,低于对照55.74%,重度胁迫处理下降了15.67%,高于对照54.44%;之后随着复

水天数的增加SOD含量又略有上升,但轻度胁迫处理的SOD含量一直低于对照水平。长期干旱处理在复水后第4天,各处理的SOD含量都下降,轻、重度胁迫处理分别是对照的65.56%,91.51%,轻度胁迫处理降幅最大;之后随着复水天数的增加,所有处理的SOD含量都随着生育时期的推进而上升,在复水后12 d,重度胁迫SOD含量比对照高21.56 U/g,轻度胁迫依然低于对照;在复水后16 d,轻度胁迫SOD含量略高于对照。

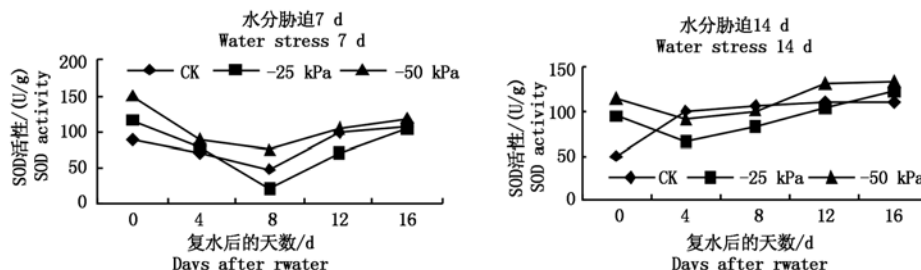


图4 复水后SOD的含量变化

Fig. 4 The dynamic changes of SOD content after rewater

2.6 幼穗形成期水分胁迫复水后对POD含量的影响

POD的变化如图5所示,在复水前1 d不同处理时间都表现为重度胁迫处理>轻度胁迫处理>对照,在复水后第12天受胁迫处理的POD含量都降到各自的最低点。短期干旱处理,复水后12 d内,随着复水天数的增加,POD含量呈现下降趋势,在复水后第4天轻、重度胁迫POD含量都低于对照,分别是对照的92.21%,99.08%;在复水后的第12天,轻、重度胁迫POD含量与复水前相比,分别比对

照降低了22.04%,26.14%,轻度胁迫处理<重度胁迫处理<对照;复水后16 d两处理POD含量略有上升,都高于对照。长期干旱处理,复水后POD含量呈现下降趋势,在复水后8 d,轻、重度胁迫的处理均低于对照水平;在复水后第12天各处理POD都最低,轻、重度胁迫处理POD含量分别是对照的69.65%,88.37%;在复水后第16天,重度胁迫处理的POD含量提高,高于对照,轻度胁迫处理的POD含量也有提高,是对照的92.32%。

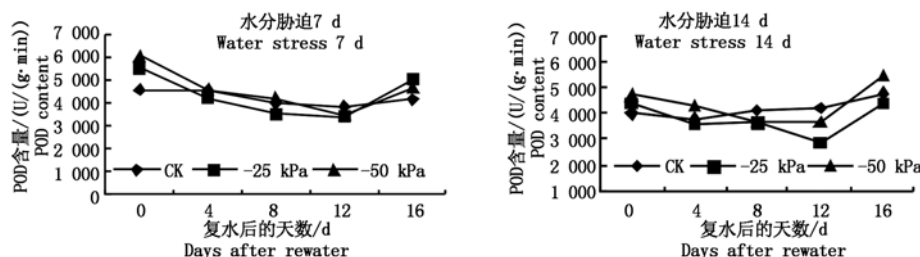


图5 复水后 POD 含量的变化

Fig. 5 The dynamic changes of POD content after rewater

2.7 幼穗形成期水分胁迫复水后对 CAT 含量的影响

如图6所示,各胁迫时间段内,CAT含量在复水前1 d都表现为重度胁迫处理>轻度胁迫处理>对照。短期干旱处理,在复水后第8天CAT含量分别降低到最低,与复水前相比,CAT含量低于对照水平,轻度胁迫处理降低了56.21%,重度胁迫处理降低了56.00%;在复水后的第12天,各处理CAT

含量都呈上升趋势,直到复水后第16天CAT含量超过对照;重度胁迫处理从复水后第8天往后一直升高,在复水后第12天高于对照,之后一直高于对照。长期干旱处理,CAT含量各处理均在复水后第4天降到最低,与复水前比较,轻度胁迫处理降低54.78%,重度胁迫处理降低了32.75%;与同时间段的对照处理相比较,轻度胁迫处理达到对照水平,重度胁迫处理比对照高58.07%。

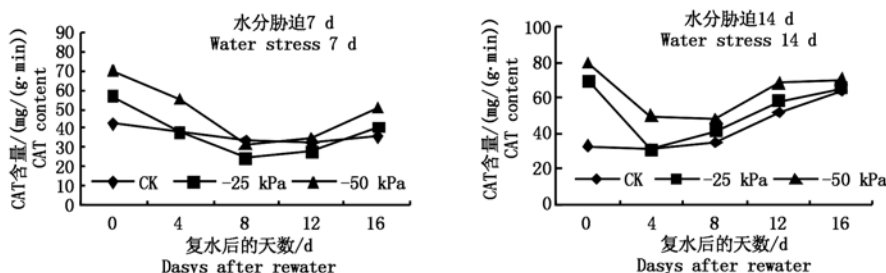


图6 复水后 CAT 含量的变化

Fig. 6 The dynamic changes of CAT content after rewater

2.8 幼穗形成期水分胁迫复水后对 MDA 含量的影响

图7表明,MDA含量在复水前1 d均表现为重度胁迫处理>轻度胁迫处理>对照。短期干旱处理复水前1 d轻度胁迫的处理是对照的300.00%,重度胁迫处理是对照的367.14%;复水后第4天,MDA含量都不同程度下降,轻度胁迫处理与复水前比较降低了54.50%,重度胁迫处理降低了12.94%,分别是对照的131.17%,306.51%;复水后第8天,轻、重度胁迫处理与复水前比较分别降低

了74.88%,64.92%,分别是对照的65.12%,117.59%,轻度胁迫处理达到对照水平,之后随着复水天数的增加,各处理MDA含量一直保持上升趋势,但轻度胁迫处理MDA含量一直低于对照水平,达到超补偿效应。长期干旱处理:复水前1 d MDA含量表现为重度胁迫处理>轻度胁迫处理>对照;在复水后第4天,轻度胁迫处理的MDA含量是对照的79.91%,重度胁迫处理是对照的111.11%,之后随着复水天数的增加各处理MDA含量都高于对照水平。

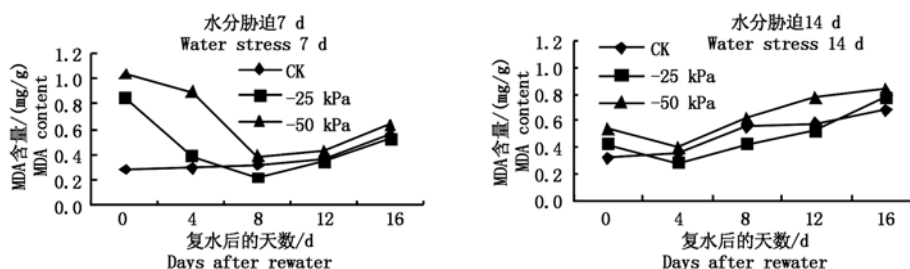


图7 复水后 MDA 含量的变化

Fig. 7 The dynamic changes of MDA content after rewater

3 结论与讨论

3.1 水分胁迫后复水对水稻产量的补偿效应

水稻生育中后期受到不同程度的水分胁迫后,对产量及其构成因素都会造成不同程度的影响。水分胁迫导致穗粒数、千粒质量与结实率下降^[11-12]。但水分胁迫后复水水稻穗粒数和结实率提高^[13]。本试验结果表明,水稻幼穗形成期受到不同时间和不同程度的水分胁迫后复水,轻度短期干旱处理的结实率、有效穗、穗粒数、千粒质量和充实率都超过了对照水平;重度水分胁迫处理复水后产量构成因素除千粒质量外均低于对照。轻度、短期干旱处理复水后水稻产量超过对照水平,其原因可能是水分胁迫导致生命力弱的颖花退化数增加,穗粒数下降,同时也降低了空粒率与秕粒率,从而促使结实率提高,产量增加,达到超补偿效应。说明轻度干旱胁迫处理能够在节水的基础上增加产量,达到高产高效的水分利用;重度短期干旱与对照相比较,由于后期复水的补偿效应,虽略有减产,但是节水较多,利于水资源短缺的西南地区应用;其他胁迫处理复水后产量降低,原因可能是胁迫导致水稻渗透物质减少,抗氧化系统遭到破坏,不能进行修复和补偿,减数分裂降低,颖花形成率减少,最终导致减产幅度大。

3.2 水分胁迫后复水对水稻渗透调节能力的补偿效应

水势是反映植物缺水最敏感的指标之一^[14]。叶片含水量则可以直接反映植物体内的水分状况。张喜英^[15]对冬小麦、谷子和高粱的研究中得出,当土壤湿度在一定界限值以上时,土壤含水量对作物的叶水势是等效的,只有低于此值,随着土壤含水量的降低,叶水势才明显降低。杨建伟等^[16]研究证明,杨树叶水势和叶片相对含水量受干旱的影响较大,在中度水分亏缺和严重干旱下杨树叶水势和叶片含水量均下降,在轻度和中度水胁迫时下降速度较缓慢,重度水分胁迫时下降最为显著。本试验结果表明,幼穗形成期受胁迫处理的水稻在复水后,轻度短期干旱处理叶片水势复水后提高最快,高于对照水平;其他处理在复水后叶片水势略有提高,但没有达到对照水平。从水势变化曲线可以看出,幼穗形成期营养生长大于生殖生长,复水后根系迅速吸水补偿叶片水势,促使叶片水势在复水后逐渐提高,原因可能是受到干旱胁迫时,叶片水势下降,当水分胁迫取消后,水分从土壤表面到达土壤底层,根部吸水通过茎秆把水分输送到叶片需要一定的时间,这样叶片水势在复水后经过一段时间,才能达到最高

值。从复水后的总体效应来看,轻度水分胁迫处理的水势值在恢复供水后起到了补偿作用。

可溶性糖和游离脯氨酸等对渗透调节的贡献较大,是细胞质中渗透调节的重要有机溶质,是逆境条件下植物抗逆性的重要物质基础^[17]。朱维琴等^[18]研究表明,水稻受胁迫后叶片中可溶性糖含量、游离脯氨酸含量均成倍增加。杨建昌等^[19]指出,在干旱情况下脯氨酸积累增加,可以使失水减少。田小磊^[20]研究指出,失水减少的原因是由于脯氨酸有较好的水合作用,而且能提高原生质胶体的稳定性。本研究结果显示,幼穗形成期水稻在受到水分胁迫后,轻度短期干旱处理在复水后第8天可溶性糖和脯氨酸含量均降低到最小;长期干旱处理在复水后可溶性糖和脯氨酸略有恢复,但均没有达到补偿效应。

3.3 水分胁迫后复水对水稻保护系统的补偿效应

膜脂过氧化是一个复杂的过程,MDA 含量的高低表示了膜脂过氧化作用的程度^[21-22]。本试验结果显示:在水分胁迫条件下,MDA 含量提高,复水后下降。轻度短期干旱处理复水后 MDA 含量下降幅度最大,低于对照水平,复水后第8天达到超补偿效应;长期干旱处理复水后的 MDA 含量略有下降。表明水分胁迫下活性氧的产生和积累是引起 MDA 含量增加的主要因素,水稻在胁迫复水后,某些物质含量提高,清除掉水稻体内的部分活性氧,使水稻的 MDA 得到恢复,含量下降,部分处理得到补偿效应。

植物体内活性氧的产生和清除依赖于保护性酶系统和非酶系统的共同作用,其中起主要作用的是活性氧清除酶系统,SOD、CAT、POD 等是活性氧清除酶系统的重要保护酶^[23]。本试验结果显示:幼穗形成期水分胁迫后复水,轻度短期干旱处理在复水后恢复最快,且表现为在复水后第8天 SOD、CAT 达到最大恢复效应,比 POD 恢复早4d,在复水后短期内均低于对照,达到超补偿效应;重度短期干旱处理 CAT 和 POD 在复水后都达到补偿效应。长期干旱的处理在复水后,3种酶恢复没有一定的规律,恢复效果最好的是 SOD,原因可能是胁迫时间太长,3种酶的恢复受到限制。研究表明,水稻在幼穗形成期经过水分胁迫后复水,轻度短期干旱处理 SOD、POD、CAT 恢复后超过对照水平,有利于水稻后期生长,达到补偿,与蒋明义等^[21]研究相一致。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李树杏,郭慧,马均,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]. 农业科学与技术:英文版,2013,9(12):1750-1755,1809.
- [3] 王贺正,马均,李旭毅,等. 水稻开花期抗旱性鉴定指标的筛选[J]. 作物学报,2005,31(11):1485-1489.
- [4] 杨建昌,王志琴,朱庆森. 水稻品种的抗旱性及其生理特性的研究[J]. 中国农业科学,1995,28(5):65-72.
- [5] 张卫星,朱德峰,林贤青,等. 干旱胁迫对不同超级稻品种植株形态和干物质积累的影响[J]. 福建农业学报,2010,25(1):47-52.
- [6] 杨建昌,张亚洁,张建华,等. 水分胁迫下水稻剑叶中多胺含量的变化及其与抗旱性的关系[J]. 作物学报,2004,30(11):1069-1075.
- [7] 张荣萍,马均,王贺正,等. 不同灌水方式对水稻生育特性及水分利用率的影响[J]. 中国农学通报,2005,21(9):144-150.
- [8] Fu G F, Song J, Xiong J, *et al.* Changes of oxidative stress and soluble sugar in anthers involve in rice pollen abortion under drought stress[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(7):1016-1025.
- [9] Chen M Y, Ali J, Fu B Y, *et al.* Detection of drought-related loci selected introgressed line[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(1):1-8.
- [10] 李合生. 植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [11] 郭相平,张烈君,王琴,等. 拔节孕穗期水分胁迫对水稻生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(2):125-129.
- [12] 郝树荣,郭相平,王为木,等. 水稻拔节期水分胁迫及复水对叶片叶绿体色素的影响[J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(4):397-400.
- [13] 张羽,曹春瑞,刘丽华,等. 土壤水势下限对寒地水稻穗部性状和产量的影响[J]. 中国种业,2013(5):55-58.
- [14] Mrema A M, Granhall U. Sennerby forest plant growth, leaf water potential, nitrogena seactivity and nodule anatomy in *Leucaena leucocephala* as affected by water stress and nitrogen availability[J]. Trees-Structure and Function, 1997, 12(1):42-48.
- [15] 张喜英,裴冬,由懋正. 几种作物的生理指标对土壤水分变动的阈值反应[J]. 植物生态学报,2000,24(3):280-283.
- [16] 杨建伟,梁宗锁,韩蕊莲,等. 不同干旱土壤条件下杨树的耗水规律及水分利用效率研究[J]. 植物生态学报,2004,28(5):630-636.
- [17] 张明生,彭忠华,谢波,等. 甘薯离体叶片失水速率及渗透调节物质与品种抗旱性的关系[J]. 中国农业科学,2004,37(1):152-156.
- [18] 朱维琴,吴良欢,陶勤南. 干旱逆境对不同品种水稻生长、渗透调节物质含量及保护酶活性的影响[J]. 科技通报,2006,22(2):176-181.
- [19] 杨建昌,王志琴,朱庆森. 水稻在不同土壤水分状况下脯氨酸的累积与抗旱性的关系[J]. 中国水稻科学,1995,9(2):92-96.
- [20] 田小磊,关晓岚,李云,等. 盐胁迫条件下 γ -氨基丁酸对玉米幼苗 SOD、POD 及 CAT 活性的影响[J]. 实验生物学报,2005,38(1):75-79.
- [21] 蒋明义,郭绍川. 渗透胁迫下稻苗中铁催化的膜脂过氧化作用[J]. 植物生理学报,1996,22(1):6-12.
- [22] 唐连顺,李广敏. 干旱对玉米杂交种及其亲本自交系幼苗膜脂过氧化及其保护酶活性的影响[J]. 作物学报,1995,21(4):509-512.
- [23] 孙彩霞,沈秀瑛,刘志刚. 作物抗旱性生理生化机制的研究现状和进展[J]. 杂粮作物,2002,22(5):285-288.