

高温与涝交互胁迫对水稻孕穗期生理指标的影响

甄博^{1,2}, 周新国^{1*}, 陆红飞¹, 李会贞¹

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南新乡 453002;

2. 河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站, 河南商丘 476000)

摘要:我国黄淮以南地区水稻易遭受高温与涝交互胁迫影响。【目的】充分利用雨水资源,降低面源污染,为暴雨后稻田恰遇高温时排水管理方式提供理论依据。【方法】通过盆栽试验,设置5个高温与涝交互胁迫处理(T1:高温, T2:高温与轻涝, T3:高温与重涝, T4:轻涝, T5:重涝)和1个对照(CK:常规灌溉),观测了孕穗期水稻剑叶叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白和抗氧化酶系统,研究了孕穗期高温与涝交互胁迫对水稻剑叶生理指标的影响。【结果】①孕穗期高温与涝交互胁迫处理降低水稻叶片叶绿素量, T2处理和T3处理分别较CK降低17.27%和19.54%,但恢复自然生长条件20 d后, T2处理表现出一定的超补偿效应,叶绿素量超过CK,且较CK增加12.22%;②孕穗期高温与涝交互胁迫后,水稻叶片中可溶性糖量先增加后降低,尤其是T2处理,胁迫结束时,较CK增加12.36%,恢复自然生长条件20 d后,较CK降低33.33% ($P < 0.05$);③孕穗期高温与涝交互胁迫会提高水稻剑叶中SOD、POD、CAT活性,胁迫结束时, T2处理(高温与轻涝交互)的SOD、POD和CAT活性分别较CK提高102.08%、43.42%和39.80% ($P < 0.05$)。【结论】孕穗期高温与涝交互胁迫可以降低水稻叶片的叶绿素量,可以增强水稻叶片中抗氧化酶的活性;与单一的高温相比,高温与涝交互胁迫可以降低高温对水稻的伤害,但与单一的淹涝相比,高温与涝交互胁迫起到一定的加剧作用。

关键词:胁迫; 叶绿素; 可溶性糖; 抗氧化酶; 水稻

中图分类号:S274.1

文献标志码:A

doi: 10.13522/j.gggs.cnki.20180323

甄博,周新国,陆红飞,等. 高温与涝交互胁迫对水稻孕穗期生理指标的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 1-7.

0 引言

水稻是人类重要的粮食作物之一,为全球50%以上的人口提供营养。水稻是一种喜温喜湿植物,一方面,由于水稻起源于低纬度的热带地区,形成了适应高温环境的特性,但如果日均气温高于32℃,日最高气温高于35℃,仍将导致水稻高温热害^[1]。气温升高将会影响植物的一系列代谢过程,进而改变植物的最终生产力^[2-3]。另一方面,我国水稻大多为灌溉稻,主要分布在江河湖水网地带,地势较低。但是,水稻生长季节与雨期同季,易遭受淹涝。我国黄淮及以南稻区,在7—8月容易出现高温与暴雨天气^[4],此时正值中稻拔节孕穗期,且在暴雨过后偶发高温天气,水稻易遭受高温与涝双重胁迫,会影响水稻叶片酶促反应,最终导致减产。因此研究高温、淹涝以及其交互胁迫对水稻叶片生理生化响应,对该区水稻防灾减灾管理具有重要意义。

近年来,国内关于单一的高温或者淹涝对水稻生长的影响较多。一方面,国内关于高温对水稻的研究大多集中在高温对水稻产量和品质的影响^[5-6];高温胁迫下,水稻抗氧化能力下降,灌浆期高温胁迫加速了剑叶叶绿素降解,使超氧化物歧化酶(SOD)活性明显降低,质膜透性和丙二醛(MDA)量明显增加,脯氨酸、谷胱甘肽以及可溶性蛋白质量明显降低^[7],温度对酶促反应及其发生在细胞膜上的生理生化反应有很大影响。另一方面,关于单一的淹涝对水稻的生长影响较多,淹水胁迫会引起水稻发生一系列形态和生理生化

收稿日期:2018-06-07

基金项目:中国农业科学院基本业务费专项(FIRI2017-16);中国农业科学院创新工程项目

作者简介:甄博(1988-),女,助理研究员,主要从事农田排水理论研究。E-mail: zhenbo@caas.cn

通信作者:周新国(1970-),男,研究员,主要从事农田排水技术研究。E-mail: firizhouxg@126.com

特征变化,如叶片绿叶数减少、叶鞘伸长、细胞膜脂过氧化作用加剧、丙二醛量升高、体内保护酶受损、光合速率降低、蒸腾作用减弱、籽粒结实率降低、充实度变差、穗长变短、产量下降等^[8-10];淹水还会降低土壤的氧化还原电位,增强土壤的还原性^[11]。但是,针对高温与淹涝耦合胁迫对水稻叶片生理指标以及抗氧化酶的影响研究鲜见。为此,于2017年采用盆栽试验在人工气候室模拟高温与涝交互逆境对孕穗期水稻叶片生理指标的影响,以期为暴雨后稻田恰遇高温适时排水提供一定理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于2017年5—10月在河南商丘生态系统国家野外科学观测研究站进行。供试品种为“荻稻008”,属粳型常规水稻品种,抗病性强,沿淮及豫南稻区全生育期为145 d左右,属当地常用品种。试验区多年平均降水量为705.1 mm,多年平均蒸发量为1 751 mm,多年7—8月平均日高温为32 ℃。气候属温带半湿润季风气候。试验采用盆栽定植种植方式,采用防雨棚挡雨。试验盆尺寸为底部直径21.5 cm,上部直径25 cm,盆深29.5 cm,土壤质地为黏壤土,其全氮质量分数为0.78 g/kg,碱解氮、有效磷、速效钾质量分数分别为56.4、10.5、52.6 mg/kg,经晒干、打碎、过2 mm筛后,每盆装干土10 kg,均匀施肥,每千克干土施纯N、P₂O₅、K₂O量分别为0.15、0.10、0.10 g,有机肥为1.67 g,有机肥氮素质量分数为3.75%。

1.2 试验设计

盆栽试验于2017年5月4日育种,6月13日三叶一心时选择大小基本一致的秧苗移栽,每盆种植3穴,每穴移栽2株,于10月24日收割。试验于孕穗期开始进行温度与水分胁迫,试验共设计2因素,分别是温度(自然温度,高温35~38 ℃)和淹水深度(0~5、10、15 cm),共6个处理(5个胁迫处理和1个浅水勤灌处理),具体试验设计方案见表1,每个处理重复20盆,共120盆;高温胁迫在人工气候室实现,涝胁迫在贮水箱实现。试验于8月4日06:00开始进行胁迫处理,将需要高温胁迫的水稻移到人工气候室,高温与涝交互胁迫水稻放置相应的贮水箱中,人工气候室温度日变化模拟自然气温特征,有程序自动控制,06:00—13:00期间每小时递增1 ℃(31~38 ℃);14:00—21:00期间每小时递减1 ℃(38~31 ℃);其余时间设为30 ℃,相对湿度为80%,光照时间为06:00—19:00,光照强度1 000 μmol/(m²·s)。胁迫5 d结束,于8月9日06:00将人工气候室的水稻全部移到室外,所有处理恢复自然生长条件。除高温和涝胁迫外,各处理其他农技措施相同。

表1 试验设计方案

处理	编号	温度/℃	水层深度/cm	地点	胁迫时间/d
高温	T1	35~38	0~5	人工气候室	5
高温×轻涝	T2	35~38	10	人工气候室	5
高温×重涝	T3	35~38	15	人工气候室	5
轻涝	T4	自然温度	10	室外	5
重涝	T5	自然温度	15	室外	5
浅水勤灌	CK	自然温度	0~5	室外	5

1.3 试验方法

采用双组分分光光度计法测定叶绿素,所用分光光度计为上海元析UV-8000A型,测试方法参照文献[12],测试叶片为剑叶,于胁迫开始时、胁迫结束0、5、10、15和20 d,共测定6次。

采用双组分分光光度计法测定可溶性糖量,所用分光光度计为上海元析UV-8000A型,测试方法参照文献[13],测试叶片为剑叶,于胁迫结束0、10、15和20 d,共测定4次。

可溶性蛋白和酶活性叶片取样方法:胁迫结束0、5、10、15和20 d,选取长势较一致的3株水稻剑叶,用锡箔纸将叶片包裹后置于液氮中保存,带回试验室后保存于-80 ℃冰箱,采用BCA法蛋白含量测定试剂盒测定可溶性蛋白,所用酶标分析仪为RT-2100C,测试叶片为剑叶,共测定4次;于胁迫结束0、5、15 d,测定剑叶酶活性,共测定3次,所用酶标分析仪为RT-2100C,采用核黄素-NBT法^[14]测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,活性单位以抑制NBT光化还原50%所需酶量为1个酶活单位(U),采用愈创木酚法^[15]测定过氧化物酶(POD)活性,以每分钟A470变化0.5为1个酶活力单位,采用紫外吸收法^[16-17]测定过氧化氢酶(CAT)活性,以每分钟内A240减少0.1的酶量为1个酶活单位(U)。

2 结果与分析

2.1 孕穗期高温与涝交互胁迫对水稻叶片叶绿素总量的影响

植物叶片中叶绿素总量影响作物光合能力,是反映植物叶片衰老的重要参数。高温与涝交互胁迫及胁迫解除后水稻叶片中叶绿素总量的变化如图1所示,图1中叶绿素总量数据为平均值,测量样本数为 $n(n=3)$,同时期不同小写字母分别表示处理间差异显著($P<0.05$);下同。

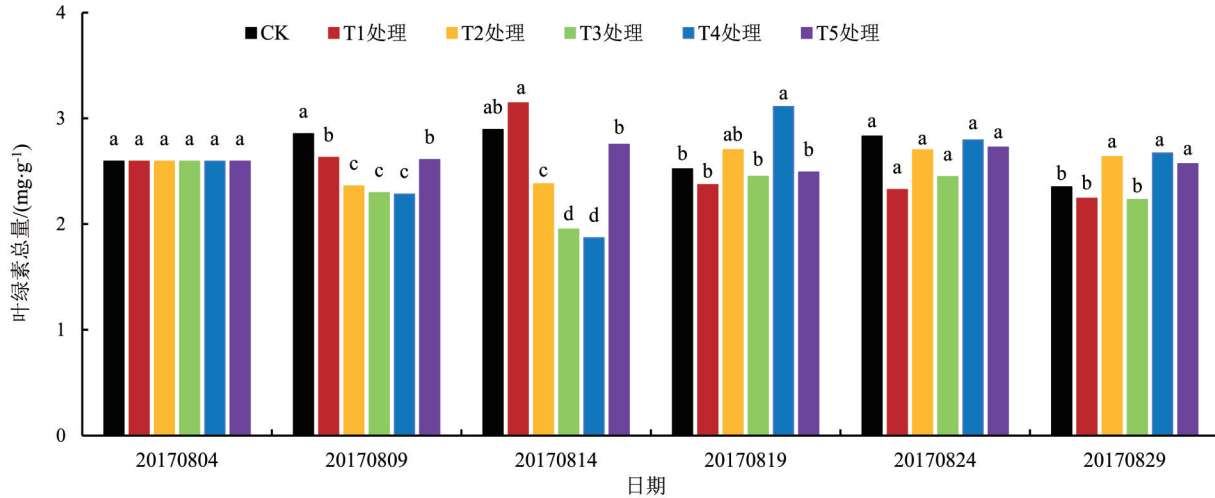


图1 孕穗期高温与涝交互胁迫下的水稻叶片叶绿素总量

由图1可知,孕穗期高温与涝交互胁迫5 d后(20170809),所有胁迫处理的叶绿素总量都有所降低,水稻叶片叶绿素总量由高到低依次是:CK>T1处理>T5处理>T2处理>T3处理>T4处理,且T1和T5处理分别较CK降低了7.83%和8.57%($P<0.05$),T2、T3和T4处理分别较CK降低17.27%、19.54%和19.99%($P<0.05$),其中,T2和T3处理分别较T1处理降低10.25%和12.70%($P<0.05$),T2和T3处理分别较T5处理降低9.52%和12.00%($P<0.05$),说明孕穗期单一的高温或者涝处理都会降低水稻叶片中叶绿素总量,孕穗期高温与涝交互胁迫会降低水稻叶片中叶绿素总量,且较单一的高温或重涝胁迫表现出一定加剧作用,抑制水稻叶片的光合作用;恢复自然生长条件5 d后,T2、T3和T4处理的水稻叶绿素总量较CK显著降低了17.69%、32.55%和35.39%($P<0.05$);说明孕穗期高温与涝交互胁迫和轻涝可以降低水稻叶片叶绿素总量,且有一定后效性;恢复自然生长条件10 d后(20170819),T4处理较CK显著增加了23.39%,说明经过10 d恢复自然温度生长条件,轻涝处理可以增加水稻叶片叶绿素总量,表现出一定的超补偿效应。恢复自然生长条件20 d(20170829),T2、T4和T5处理的水稻叶片的叶绿素总量超过CK,且分别较CK显著增加12.22%、13.63%和9.36%($P<0.05$),与单一高温(T1)处理相比,T2处理增加了17.53%,说明孕穗期高温与轻涝交互胁迫后,恢复自然生长条件后,可以增加水稻叶片中叶绿素总量,促进水稻的光合作用。

2.2 孕穗期高温与涝交互胁迫对水稻叶片可溶性糖和可溶性蛋白量的影响

可溶性糖是一类具有渗透调节功能的小分子有机化合物,是逆境条件下很多非盐生植物的渗透调节剂^[18];可溶性蛋白量能够反映作物在逆境条件下细胞渗透势的变化^[19]。同时,可溶性糖是植物光合作用的直接产物,也是植物体内多糖、蛋白质、脂肪等大分子化合物的物质基础,在植物碳代谢中发挥着非常重要的作用。高温与涝交互胁迫及胁迫解除后水稻叶片中可溶性糖量和可溶性蛋白量如表2所示。

表2 高温与涝交互胁迫后水稻叶片中可溶性糖和可溶性蛋白量

处理	胁迫结束后0 d		胁迫结束后10 d		胁迫结束后15 d		胁迫结束后20 d	
	可溶性糖量/%	可溶性蛋白量/(mg·g ⁻¹)	可溶性糖量/%	可溶性蛋白量/(mg·g ⁻¹)	可溶性糖量/%	可溶性蛋白量/(mg·g ⁻¹)	可溶性糖量/%	可溶性蛋白量/(mg·g ⁻¹)
CK	7.04abc	65.62bc	5.77b	54.66b	5.74b	39.88b	6.03bc	30.27c
T1	7.52ab	76.88a	5.61bcd	67.28a	5.46bc	46.14a	5.26d	36.24b
T2	7.91a	62.50c	5.71bc	39.72d	4.12d	37.11c	4.02e	33.55bc
T3	6.68bc	60.84cd	7.78a	66.82a	5.34c	45.57a	5.68cd	44.69a
T4	6.23c	56.47d	5.33cd	44.43c	5.65bc	28.52d	7.16a	44.90a
T5	5.03d	71.13ab	5.31d	44.58c	6.17a	44.09a	6.43b	35.29b

从表2可以看出,高温与涝交互胁迫结束0 d,T3、T4处理和T5处理的可溶性糖量低于CK,尤其是T5处理,较CK降低了28.58%($P<0.05$),T2处理的可溶性糖量较CK增加了12.36%($P>0.05$),说明单一的涝处理会降低水稻叶片中可溶性糖量,且随着淹水深度增加,可溶性糖量降低越多,这与已有研究结果^[20]一致;但是单一的高温处理会增加水稻叶片中的可溶性糖和可溶性蛋白量,且可溶性蛋白量较CK显著增加17.16%。胁迫结束恢复自然生长条件10 d后,高温与重涝交互胁迫(T3)处理会增加叶片中的可溶性糖和可溶性蛋白量,说明高温与重涝胁迫恢复自然生长条件后,水稻叶片中的可溶性糖量和可溶性蛋白表现出一定的超补偿效应。恢复自然生长条件20 d后,轻涝处理会增加水稻叶片中的可溶性糖和可溶性蛋白量,且可溶性糖和可溶性蛋白量分别较CK显著增加18.63%和48.35%。T1、T2处理和T3处理分别较CK显著降低12.78%、33.33%和5.85%($P<0.05$),说明单一的淹涝处理后经过20 d左右恢复,水稻叶片中的可溶性糖量高于CK,表现出一定的超补偿效应,而单一的高温或者高温与涝胁迫处理经过20 d自然生长条件,水稻叶片中的可溶性糖量低于CK,尤其是高温与轻涝胁迫,较单一的高温相比,表现出一定的加剧作用。可见,孕穗期单一的高温会增加水稻叶片中的可溶性糖和可溶性蛋白量,而单一的淹涝处理会降低水稻叶片中的可溶性糖量,高温与涝交互胁迫对水稻叶片中的可溶性糖和蛋白量影响不显著。恢复自然生长条件后,尤其是T3处理会增加水稻叶片中的可溶性蛋白量,表现出一定的后效性。

2.3 孕穗期高温与涝交互胁迫对水稻叶片抗氧化酶活性的影响

植物体内具有抗氧化系统,如抗氧化酶,可有效清除植物组织中的活性氧,对细胞有保护作用。孕穗期高温与涝交互胁迫后水稻叶片中抗氧化酶活性如表3所示。

表3 孕穗期高温与涝交互胁迫后水稻叶片的抗氧化酶活性

处理	胁迫结束0 d			胁迫结束后5 d			胁迫结束后15 d		
	SOD/ (U·g ⁻¹)	POD/ (U·g ⁻¹)	CAT/ (nmol·min ⁻¹ ·g ⁻¹)	SOD/ (U·g ⁻¹)	POD/ (U·g ⁻¹)	CAT/ (nmol·min ⁻¹ ·g ⁻¹)	SOD/ (U·g ⁻¹)	POD/ (U·g ⁻¹)	CAT/ (nmol·min ⁻¹ ·g ⁻¹)
CK	140.99d	342.11e	765.47c	320.38b	302.49c	1 009.11c	254.94de	411.54c	775.56c
T1	243.91c	457.12ab	950.79ab	315.84b	440.02a	1 073.03bc	295.71bc	482.20b	1 189.99a
T2	284.91ab	490.65a	1 070.10a	354.12a	364.05b	1 391.43a	309.51ab	550.38a	1 099.97ab
T3	262.16bc	391.87d	1 005.26ab	362.13a	364.11b	933.58c	272.67cd	532.33ab	1 029.86b
T4	271.73b	441.97bc	1 065.67a	375.19a	325.97bc	1 252.91ab	327.15a	371.73c	1 080.16b
T5	303.54a	412.33cd	899.96b	311.05b	294.74c	1 421.90a	229.79e	530.29ab	542.68d

由表3可知,高温与涝交互胁迫结束后,所有胁迫处理的SOD活性、POD活性和CAT活性都高于CK,尤其是T2处理,SOD活性、POD活性和CAT活性分别较CK显著增加102.08%、43.42%和39.80%,与单一高温相比,T2处理的SOD、POD、CAT活性显著增加16.81%、7.19%、12.55%。胁迫结束恢复自然生长条件5 d后,所有胁迫处理的SOD活性、POD活性和CAT活性都高于或者接近CK;胁迫结束恢复自然条件15 d后,除T5处理外,其他胁迫处理的SOD活性都高于CK,尤其是T4处理,较CK增加28.32%;所有胁迫处理的POD活性都高于或者接近CK,尤其T2处理较CK增加33.74%;所有处理的水稻叶片中CAT活性高低依次是:T1处理>T2处理>T4处理>T3处理>CK>T5处理,且T1、T2、T3和T4处理分别较CK显著增加53.44%、41.83%、32.79%和39.27%($P<0.05$),T5处理较CK显著降低30.03%($P<0.05$)。

可见,与CK相比,所有胁迫处理都会造成水稻叶片中SOD活性、POD活性和CAT活性有所增加;但胁迫结束后,高温和淹水条件解除,恢复自然生长条件后,单一的高温胁迫、高温与涝交互胁迫以及单一的轻涝胁迫可以增加水稻叶片中SOD、POD和CAT酶活性。

2.4 孕穗期高温与涝交互胁迫对水稻叶片生理指标的交互效应

高温、淹水和高温与涝对水稻叶片生理指标有一定的影响,但是3种胁迫之间的交互效应是否显著,需要进一步进行数据分析。由表4可知,对于叶绿素,T和T×W的P值均大于0.05,只有W的P值均小于0.05,在0.05显著水平下,因子W是显著的,即不同淹水深度对水稻叶片叶绿素量产生显著影响,温度和高温与涝交互作用对水稻叶绿素量影响不显著。对于可溶性糖,T和W的P值均小于0.05,在0.05显著水平下,因子T和W是显著的,即不同淹水深度和温度对水稻叶片可溶性糖量影响显著,但高温与涝交互作用对水稻叶片可溶性糖量影响不显著。对于可溶性蛋白,W和T×W的P值均小于0.05,在0.05显著水平下,因子W和T×W是显著的,淹水深度和高温与涝交互作用对水稻叶片可溶性蛋白量影响显著。

表4 SPSS得到的双因子方差分析结果数据(考虑交互效应)

源	因变量	III型平方和	df	均方	F	P
T (温度)	叶绿素	0.154	1	0.154	3.060	0.106
	可溶性糖	7.236	1	7.236	25.717	0.000
	可溶性蛋白	24.558	1	24.558	1.387	0.262
W (水分)	叶绿素	0.574	2	0.287	5.707	0.018
	可溶性糖	7.134	2	3.567	12.676	0.001
	可溶性蛋白	416.824	2	208.412	11.774	0.001
T×W (水分×温度)	叶绿素	0.068	2	0.034	0.674	0.528
	可溶性糖	1.407	2	0.703	2.500	0.124
	可溶性蛋白	379.070	2	189.535	10.708	0.002

3 讨论

试验结果表明,孕穗期高温与涝交互胁迫可以降低水稻叶片中叶绿素总量,这可能是由于单一的高温胁迫^[21]和单一的淹涝胁迫^[22]均可以降低水稻叶片的叶绿素总量,将2种胁迫同时作用于水稻,尤其是高温与重涝交互胁迫,水稻叶片叶绿素总量会降低更多,较单一胁迫表现出一定的加剧作用,抑制水稻光合作用;恢复自然生长条件15 d后,高温与涝交互胁迫处理的水稻叶片叶绿素量超过或者接近CK,尤其是高温与轻涝处理下水稻叶片表现出贪青晚熟,这可能是高温与轻涝处理恢复自然生长条件后,促使水稻叶片生长,在生育后期保持了较大的光合面积,显著降低生育后期的叶绿素的降解^[23],使功能叶在生育后期维持较高的光合效率,有利于干物质积累。

植物体内的可溶性糖和可溶性蛋白对细胞具有渗透调节及保护细胞膜结构稳定的作用。试验结果表明,孕穗期单一的高温处理可以增加水稻剑叶中的可溶性糖和可溶性蛋白量,这与已有研究结果^[24]一致,可能是孕穗期高温处理时,植物体内的大分子碳水化合物和蛋白质的分解加强,而合成受到抑制,蔗糖的合成则加快光合产物形成过程中直接转成低分子量的物质蔗糖^[25]等。恢复自然生长条件后,单一的高温处理和高温与涝交互胁迫处理的剑叶中的可溶性糖量都低于CK,这可能是高温时间较短,高温引起叶片内源物质变化具有一定的滞后性,恢复自然生长条件后,这些内源物质变化开始显现出来。

植物在正常生长条件下体内自由基的产生与其清除系统保持平衡,体内自由基水平较低,不会引起伤害,但在环境胁迫下代谢障碍,活性氧大大增加。高水平的活性氧可使膜脂过氧化及大分子蛋白质之间聚合,从而导致膜结构和功能的破坏或蛋白质变性,引起膜结构变化及电解质外渗^[26]。SOD、POD、CAT、AsA-POD作为植物体内抗氧化酶系统,可以保护细胞膜系统,使其免受活性氧或其他过氧化物自由基的伤害^[27]。SOD能催化超氧阴离子自由基的歧化反应而形成O₂和H₂O₂,从而减轻氧自由基对植物毒害作用,POD和CAT则进一步分解H₂O₂。SOD是一种典型的诱导酶^[28],其活性变化在一定程度上意味着植株受胁迫程度的变化。试验结果表明,孕穗期高温与涝交互胁迫可以增强水稻叶片中的SOD、POD、CAT活性,尤其是高温与轻涝交互胁迫,一方面,可能是人工气候室38℃的高温天气下,由于水稻叶片较强的散热能力(主要为蒸腾作用),水稻叶片表面温度有所降低^[29],对水稻叶片未造成伤害;另一方面,可能是孕穗期淹涝可以增强水稻叶片中SOD、POD、CAT活性^[30-31],这是因为植株体内活性氧产生和清除作用是处于一种动态平衡的状态,在自身和外在环境的刺激下,活性氧增加,激发自身平衡,抗氧化酶随之增加^[32]。将2种胁迫同时作用,其影响表现出一定的叠加效应。

本试验是在人工气候室进行的,试验环境条件是可控的,且试验数据仅为1 a盆栽试验数据,需要进一步做不同生育期的大田试验,对试验结果需要进一步的验证,为进一步明确高温与涝交互胁迫对水稻生长影响的机理,为稻田暴雨遭遇高温时排水管理提供一定的理论依据。

4 结论

1)孕穗期高温与涝交互胁迫会降低水稻叶片中的叶绿素量,尤其是T2处理和T3处理分别较CK降低17.27%、19.54%($P<0.05$),恢复自然生长条件后,高温与轻涝表现出一定的超补偿效应,水稻叶片中的叶

绿素量超过CK,与单一的高温相比,T2处理较T1处理增加了17.53%($P<0.05$),增加水稻生育后期的光合能力。

2)孕穗期高温与涝交互胁迫后,水稻叶片中可溶性糖量表现出先增加后降低,尤其是T2处理,胁迫结束时,较CK增加12.36%,恢复自然生长条件20 d后,T2处理较CK降低33.33%。

3)孕穗期高温与涝交互胁迫会增强水稻叶片中SOD、POD、CAT活性。胁迫结束时,T2处理(高温与轻涝交互)的SOD、POD、CAT活性分别较CK增加102.08%、43.42%和39.80%。与单一的高温相比,T2处理(高温与轻涝交互)的SOD、POD、CAT活性分别较T1处理增加16.81%、7.19%、12.55%,减少单一的高温胁迫对水稻造成的迫害,增强水稻抵御高温能力。

参考文献:

- [1] TIAN X, DENG Y. Characterizing the rice field climatic factors under high temperature stress at anthesis[J]. *International Crop Science*, 2008,16(4):19-27.
- [2] WASSMANN R, JAGADISH SVK, SUMFLETH K, et al. Chapter 3: Regional vulnerability of climate change impacts on Asian rice production and scope for adaptation.[J]. *Advances in Agronomy*,2009,102(9):91-133.
- [3] FITZGERALD MA, RESURRECCION AP. Maintaining the yield of edible rice in a warming world[J]. *Functional Plant Biology*,2009,36(12):1 037-1 045.
- [4] 杨舒楠,何立富. 2013年8月大气环流和天气分析[J]. *气象*,2013,39(11):1 521-1 528.
- [5] 张桂莲,陈立云,张顺堂,等. 抽穗开花期高温对水稻剑叶理化特性的影响[J]. *中国农业科学*,2007,40(7):1 345-1 352.
- [6] 谢晓金,李秉柏,李映雪,等. 抽穗期高温胁迫对水稻产量构成要素和品质的影响[J]. *中国农业气象*,2010,31(3):411-415.
- [7] 汤日圣,郑建初,陈留根,等. 高温对杂交水稻籽粒灌浆和剑叶某些生理特性的影响[J]. *植物生理与分子生物学学报*,2005,31(6):657-662.
- [8] 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[J]. *生态学杂志*,2014,33(7):1 818-1 825.
- [9] 王矿,王友贞,汤广民. 水稻拔节孕穗期淹水对产量要素的影响[J]. *灌溉排水学报*,2015,34(9):40-43.
- [10] 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.
- [11] 甄博,郭相平,陆红飞,等. 旱涝交替胁迫对拔节期水稻生长和土壤氧化还原电位的影响[J]. *灌溉排水学报*,2018,37(10):42-47.
- [12] 张宪政. 植物生理学实验技术[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1989.
- [13] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
- [14] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [15] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [16] 李璇,王升,岳红,等. 不同pH值和酶提取体系对丹参抗氧化酶活性的影响[J]. *中国现代中药*,2011,13(12):46-49.
- [17] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [18] 喻方圆,徐锡增,ROBERT,等. 水分和热胁迫对苗木针叶可溶性糖含量的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*,2004,28(5):1-5.
- [19] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48(12):909-930.
- [20] 罗昊文,孔蕾雷,钟卓君,等. 淹水胁迫对水稻玉香油占秧苗生长和生理特性的影响[J]. *作物杂志*,2017(1):135-139.
- [21] 杜尧东,李键陵,王华,等. 高温胁迫对水稻剑叶光合和叶绿素荧光特征的影响[J]. *生态学杂志*,2012,31(10):2 541-2 548.
- [22] 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(2):117-122.
- [23] 郝树荣,郭相平,王文娟. 旱后复水对水稻生长的后效影响[J]. *农业机械学报*, 2010,41(7):76-79.
- [24] 谢华英. 抽穗期高温和干旱胁迫对水稻产量的影响及其生理基础[D]. 雅安:四川农业大学,2016.
- [25] MUNNS R, BRADY CJ, BARLOW EWR. Solute Accumulation in the Apex and Leaves of Wheat During Water Stress[J]. *Functional Plant Biology*, 1979, 6(3):379-389.
- [26] PRASAD T K. Mechanisms of chilling-induced oxidative stress injury and tolerance: change in antioxidant system, oxidation of proteins and lipids and protease activities[J]. *Plant Journal*, 1996, 10(6):1 017-1 026.
- [27] KANAZAWA S, SANO, KOSHIBA T, et al. Changes in antioxidative enzymes in cucumber cotyledons during natural senescence: comparison with those during dark-induced senescence[J]. *Physiologia Plantarum*, 2000, 109(2):211-216.
- [28] 余叔文. 植物生理与分子生物学[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [29] 符冠富,张彩霞,杨雪芹,等. 水杨酸减轻高温抑制水稻颖花分化的作用机理研究[J]. *中国水稻科学*,2015,29(6):637-647.
- [30] 晏军,吴启侠,朱建强,等. 拔节期杂交中稻对淹水胁迫的响应及指示性指标探讨[J]. *中国稻米*,2017,23(1):17-25.
- [31] 晏军,吴启侠,朱建强. 中稻灌浆期对淹水胁迫的响应及排水指标研究[J]. *灌溉排水学报*,2017,36(5):59-65.
- [32] 黄万勇,卢成,郑世宗,等. 淹水胁迫对水稻植株抗氧化酶变化的影响[J]. *排灌机械工程学报*,2017,35(11):1 008-1 012.

The Effects of Alternate Hot Wave and Waterlogging on Physiological Traits of Rice at Booting Stage

ZHEN Bo^{1,2}, ZHOU Xinguo^{1,2*}, LU Hongfei¹, LI Huizhen^{1,2}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. National Research and Observation Station of Shangqiu Agro-ecology System, Shangqiu 476000, China)

Abstract: **【Objective】** Rice in southern Huanghuai Plain of China is susceptible to high temperature and waterlogging stress. This paper presents results of an experimental study on response of physiological traits of rice to alternate high temperature and waterlogging in attempts to improve rainwater use and reduce non-point source pollution. **【Method】** Rice was planted in pots and we investigated five treatments: high temperature (T1), high temperature coupled with light waterlogging (T2), high temperature coupled with heavy waterlogging (T3), light waterlogging (T4) and heavy waterlogging (T5). The control (CK) was conventional irrigation. For each treatment, we measured the chlorophyll, soluble sugars, soluble proteins and antioxidant enzyme in the flag leaves at booting stage, from which we analyzed the effects of alternate high-temperature and waterlogging on physiological indices of the flag leaf. **【Result】**① Alternate occurrence of high temperature and waterlogging at the booting stage reduced the chlorophyll content in the flag leaf. Compared to CK, T2 and T3 reduced the chlorophyll content by 17.27% and 19.54% respectively. However, after recovering from the stresses, T2 saw a certain compensation and the chlorophyll content in its flag leaf increased consequently by 12.22% compared to the CK. ② The soluble sugar content in the flag leaf increased first followed by a decline after occurrence of high temperature and waterlogging at the booting stage, especially in T2 which was 12.36% higher than that in CK. After recovering for 20 days, the soluble sugar content in T2 was 33.33% lower than that in CK ($P<0.05$). ③ High temperature and waterlogging at the booting stage enhanced the activities of SOD, POD and CAT in the flag leaf, and at the end of the stresses, the activities of SOD, POD and CAT in T2 increased by 102.08%, 43.42% and 39.80%, respectively, compared to those in the CK. **【Conclusion】** Alternate high temperature and waterlogging at the booting stage reduced the chlorophyll content in the flag leaf but enhanced the activity of antioxidant enzymes. The effect of alternate high temperature and waterlogging is less detrimental than that caused by high temperature alone, but more damaging than that induced by waterlogging alone.

Key words: interaction; chlorophyll; soluble sugars; soluble proteins, antioxidant enzyme; rice

责任编辑:刘春成