

孕穗期高温与涝对水稻光合特性和产量的影响

甄博^{1,2}, 郭瑞琪³, 周新国¹, 李会贞^{1*}, 牛庆林¹, 邱虎森¹, 田广丽¹, 李三军⁴

(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; 3.内蒙古自治区阿拉善盟水政监察支队, 内蒙古 阿拉善 750300; 4.舞钢市农业农村局, 河南 舞钢 462541)

摘要:【目的】探究孕穗期高温与涝胁迫对水稻光合特性和产量的影响。【方法】采用盆栽试验, 设置3个胁迫处理, 分别为涝胁迫(T1, 15 cm), 高温胁迫(T2), 高温×涝胁迫(T3, 15 cm), 以浅水勤灌为对照(CK), 分析了孕穗期高温与涝胁迫条件下水稻光合特性和产量变化。【结果】孕穗期胁迫结束后, T2处理相比CK降低了水稻的光合速率, 较降低了30.77%, T3处理会增加水稻叶片的SPAD值和光合速率以及气孔导度, 尤其是气孔导度较CK显著增加了51.90%; 所有胁迫处理的地上部干物质量都低于CK, 直至成熟期, T1、T2和T3处理的地上部干物质量分别较CK显著降低了6.65%、32.40%和12.98%; T2和T3处理均会降低水稻产量, 且分别较CK显著减产80.09%和12.33%, 千粒质量分别较CK下降了16.31%和11.86%; 且T3处理千粒质量和产量分别较T2处理显著增加了5.32%和3.40倍。【结论】水稻孕穗期若遭遇极端高温天气时, 可以将田间水层保持在15 cm左右, 以缓解高温对水稻造成的热害。

关键词: 水稻; 高温与涝胁迫; SPAD; 光合特性; 产量

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020402

OSID:



甄博, 郭瑞琪, 周新国, 等. 孕穗期高温与涝对水稻光合特性和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 45-51.

ZHEN Bo, GUO Ruiqi, ZHOU Xinguo, et al. The Effects of Thermal and Waterlogging Stresses at Booting Stage on Photosynthesis and Yield of Rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 45-51.

0 引言

【研究意义】水稻是中国最主要的粮食作物之一, 其产量占国内粮食作物之首。因此, 水稻生产的稳定发展对粮食安全至关重要。近年来, 随着全球气候变暖, 高温和极端降水天气发生频率增加, 强度加大^[1-4], 已严重制约农业生产。尤其是黄淮以及南方稻区7—8月极易出现高温和极端降水事件, 此时正值水稻生长关键期, 极端天气严重影响水稻生长发育, 导致水稻减产和品质降低。因此, 开展高温与涝双重胁迫对水稻生长和产量影响的研究尤为重要和迫切。【研究进展】目前, 国内外学者已开展了高温胁迫或涝胁迫单一因素对水稻生长发育影响的研究, 且多集中于形态(株高、分蘖数、绿叶数)、生育时期变化、生理特性(光合作用、酶活性以及花粉活力等)、产量及其构成等方面的影响^[5-9]。光合作用是决定水稻的生长发育和物质积累以及产量的重要因素。已有研究表明, 在全淹处理下, 水稻植株叶片的最大光合速率会显著

下降, 且下降幅度会随着胁迫天数的增加而增大^[10]。光合作用是作物生产和能量代谢的基础生理过程, 极易受温度变化影响^[11]。高温胁迫可增加水稻叶片细胞膜透性和衰老程度^[12-13], 降低叶片的光合速率^[14-16], 显著降低水稻产量^[17-18]。水稻叶片光合能力的下降是导致水稻结实率、千粒质量和籽粒产量降低的根本原因^[19]。【切入点】温度和水分是影响水稻生长发育的重要环境因素, 6—8月, 黄淮及以南地区容易发生极端高温和降水事件, 水稻易遭受高温与涝双重胁迫, 针对单一高温或淹水对单季稻生长的影响研究较多, 但有关高温与涝双重胁迫对水稻生长发育的影响鲜有报道。高温或淹水均会影响水稻光合作用和产量, 但高温与涝双重胁迫是否会影响水稻光合作用和产量? 本试验结合黄淮及以南地区水热分布特点, 开展高温与涝双重胁迫盆栽试验模拟研究, 旨在揭示高温与涝对水稻光合特性和产量的影响。【拟解决的关键问题】通过盆栽试验, 明确高温与涝胁迫处理对水稻光合特性和产量的影响, 以为极端气候下稻田的水分管理提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2018年5—10月在河南商丘农田生态系统国家野外科学观测站(E115°34', N34°35', 海拔50.2 m)

收稿日期: 2020-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508301); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(FIRI202001-04)

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: 李会贞(1989-), 女。助理研究员, 主要从事农田排水理论研究。E-mail: lihuihen@caas.cn

防雨棚内进行。试验区属暖温带大陆性季风气候,近20 a的平均降水量705.1 mm,且降水主要集中在7—9月(占全年降水量的65%~75%),7—8月平均日最高气温为32℃。试验土壤取自试验站内农田耕作层(0~25 cm土层),土壤类型为黏壤土,体积质量为1.46 g/cm³,田间质量持水率(field capacity, FC)为27.09%。耕层土壤全氮量为0.78 g/kg,碱解氮量为56.4 mg/kg、速效磷量10.5 mg/kg、速效钾量52.6 mg/kg,耕层有机质量为9.8 g/kg。

1.2 试验设计

水稻供试品种为获稻008,属粳型常规水稻品种,全生育期138 d。株高97.4~98.1 cm,株型紧凑,分蘖力强,茎秆粗壮,剑叶挺直。于2018年5月7日播种,采用湿润育秧,6月20日移栽,10月23日收获。试验盆尺寸为上口直径25.0 cm,底部直径21.5 cm,桶高29.5 cm,每盆按等边三角形移栽3穴,每穴2株。盆钵内装过筛风干土10.0 kg,每盆施基肥2.20 g CO(NH₂)₂、2.50 g KH₂PO₄、0.90 g K₂SO₄和16.70 g有机肥,均匀施肥后装盆,在水稻拔节后每盆追施尿素1 g,其他管理措施同常规高产栽培措施。

表1 2018年水稻盆栽试验设计

处理	最高气温/℃	水层深度/cm	地点	胁迫时间/d
浅水勤灌(对照) CK	31	0~5	防雨棚	-
淹水 15 cm T1	31	15	防雨棚	7
高温 T2	38	0~5	人工气候室	7
高温×涝(15 cm) T3	38	15	人工气候室	7

注 “15 cm”表示拔节孕穗期保持盆中土面以上15 cm水层,下同。

水稻孕穗—抽穗开花期遭遇持续3 d以上、日平均气温>32℃或日最高气温>35℃的天气过程,水稻将会遭受高温热害^[20](称“高温胁迫”);且水稻淹涝5 d,淹水深度超过10 cm,会对水稻生长以及水稻根系微观结构造成影响^[21](称“涝胁迫”)。本试验于水稻孕穗期进行高温与涝双重胁迫对水稻光合特性和产量影响的对比试验。2018年8月14日(水稻孕穗期)选择水稻长势一致的盆钵,进行高温与涝双重胁迫处理,试验共设置4个处理,1个常规灌溉(浅水勤灌,全生育期5 cm水层,黄熟期除外,CK)和3个胁迫处理(T1:淹水15 cm, T2:高温, T3:高温×涝),具体试验方案见表1,每个处理重复20盆,共计80盆;试验中的高温胁迫处理在人工气候室(浙江求是人工环境有限公司)实现,由程序自动控温,模拟自然气候日变化,24 h连续运转。查询商丘2008—2017年7—8月的极端高温为38℃,因此胁迫期间日最高温设定为38℃(14:00),日最低温为30℃(05:00),期间温度以每小时1℃呈线性变化,其中相对湿度为75%~80%,光照时间为06:00—19:00,光照强度为120~150 J/(m² s)。涝胁迫处理是胁迫期间将盆钵置

于长方形的塑料水箱(长×宽×高=98 cm×76 cm×68 cm)中,调节水箱水位,保持盆钵中土的表层与水箱中水位相距15 cm。高温与涝双重胁迫(T3)处理是将水箱置于人工气候室中,实现高温与涝双重胁迫处理,所有胁迫处理均胁迫7 d(8月14—21日),胁迫结束后,将胁迫处理的水稻移至室外,所有处理恢复室外生长条件直至成熟。除涝与高温胁迫外,各处理其他农技措施相同。

1.3 项目测定与方法

1.3.1 叶片 SPAD 测定

采用手持式叶绿素测定仪(TYS-B)测定水稻剑叶SPAD,测量时,每个处理选取具有代表性的9株水稻植株,测量每株剑叶的叶尖、叶中、叶基3个部位SPAD值,求得平均值作为该植株的SPAD值,9株水稻的平均值作为该处理的SPAD值^[22]。

1.3.2 叶片光合参数测定

水稻孕穗期,2018年9月4日(晴天)10:00,使用LI-6400XT便携式光合测定系统(LI-COR Biosciences Inc., USA)测定水稻植株剑叶,测定部位为叶片中下部。每个处理选择3盆,每盆选择3片主茎剑叶进行测定,取其平均值记为该叶片计算值。测定的主要指标包括:叶片净光合速率 P_n ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$)、胞间CO₂摩尔分数 C_i ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)、蒸腾速率 T_r ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \text{ s})$)、气孔导度 G_s ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \text{ s})$)等。

1.3.3 干物质测定

分别于孕穗期胁迫结束后、抽穗开花期、灌浆期、乳熟期取样,每个处理选取长势一致的3盆水稻植株,用剪刀齐土面剪去地上部分,将其带回实验室按茎、叶、穗分装,在105℃下杀青,80℃烘干至恒质量。

1.3.4 考种和产量测定

于成熟期每个处理取8盆水稻进行考种和测产,其中3盆水稻植株先进行考种,考查每盆水稻穗数、每穗粒数、百粒质量(千粒质量根据百粒质量进行折算)、实粒数和结实率,考种结束后和另外5盆共同进行产量测定。

1.3.5 数据处理与统计方法

试验数据采用Excel 2016和SPSS 19.0进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理水稻叶片 SPAD 值的动态变化

图1为不同处理水稻叶片SPAD值。由图1可知,孕穗期高温与涝胁迫处理后,随作物生育期的推进(从孕穗期到灌浆期),CK、T2处理和T3处理的SPAD值逐渐降低,而T1处理的SPAD值变化先升高后降低,在抽穗开花期达到最大值,这可能是由于孕穗期淹水处理(15 cm)会促进水稻后期叶片中叶绿素含量的增加,进而促进水稻叶片的光合作用。这主要是由于水稻自孕穗后由营养生长阶段进入生殖生

长阶段, 氮素供应开始由叶片转向籽粒, 叶片中叶绿素量随之下降。

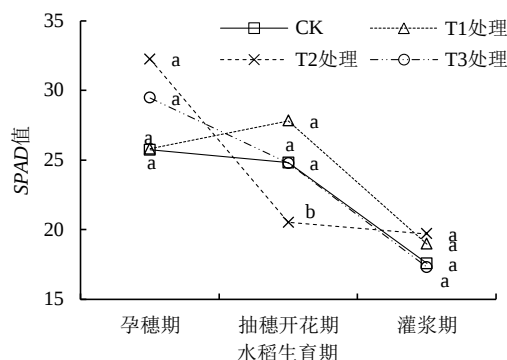


图 1 不同处理水稻叶片 SPAD 值

Fig.1 Leaf SPAD values of rice under different treatments

孕穗期所有处理水稻剑叶 SPAD 值差异不显著 ($p>0.05$)。胁迫结束后, 抽穗开花期, T2 处理的 SPAD 值分别较 CK、T1 处理和 T3 处理显著降低 17.25%、26.21%和 17.11%。灌浆期, 所有处理水稻剑叶 SPAD 较接近。说明孕穗期单一的高温处理会降低水稻剑叶 SPAD 值, 抑制水稻对土壤氮素的吸收转化, 降低水稻叶片的叶绿素量, 进而降低光合速率, 而高温与涝双重胁迫会缓解单一的高温对水稻光合作用的抑制作用。

2.2 不同处理水稻叶片光合特性

表 2 为不同处理水稻剑叶光合参数。由表 2 可知, 高温与涝胁迫后, T1 和 T2 处理的净光合速率 (P_n) 分别较 CK 降低了 10.87%和 30.77%, 但差异不显著, T3 处理的 P_n 较 CK 增加了 17.89%。T1、T2 处理的气孔导度 (G_s) 分别较 CK 降低了 27.07%、35.84% ($p>0.05$), 而 T3 处理的气孔导度 G_s 较 CK 显著增加了 51.91%。T1、T2 处理的胞间 CO_2 摩尔分数 (C_i) 分别较 CK 降低了 7.25%、3.88% ($p>0.05$), 而 T3 处理的 C_i 较 CK 增加了 8.06%。T1 处理和 T2 处理的蒸腾速率 T_r 分别较 CK 降低了 16.20%和 20.19% ($p>0.05$), 而 T3 处理的 T_r 较 CK 显著增加了 36.85% ($p<0.05$)。

表 2 不同处理水稻剑叶的光合参数

Table 2 Photosynthetic parameters of rice flag leaf of different treatments

处理	P_n / ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	G_s / ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	C_i / ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	T_r / ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
CK	5.98±0.91ab	106.77±16.05b	282.24±4.44ab	4.26±0.53b
T1	5.33±1.13ab	77.87±12.29b	261.77±13.24b	3.57±0.46b
T2	4.14±0.35b	68.50±7.60b	271.30±3.01b	3.40±0.42b
T3	7.05±0.49a	162.19±13.86a	304.98±12.49a	5.83±0.32a

注 同时期不同字母表示各处理在 0.05 水平上差异显著, 下同。

由表 2 亦可知, T3 处理的 G_s 和 T_r 分别较 CK 显著增加 51.91%和 36.85%, 说明高温×涝双重胁迫会增加叶片的蒸腾速率, 降低叶片温度, 缓解高温对水稻叶片的损伤, 延缓叶片衰老。但单一的高温处理(T2)会降低水稻叶片的净光合速率, 且分别较 CK 和 T3

处理降低 30.77%和 41.28%。综上所述, 孕穗期高温与涝双重胁迫较单一高温胁迫相比, 会增加水稻叶片的光合速率、气孔导度以及蒸腾速率, 会缓解单一高温胁迫对水稻造成的伤害。

由交互作用的双因子方差分析可知 (表 3), 温度对水稻剑叶的光合参数影响不显著, 水分仅对气孔导度 (G_s) 的影响显著, 温度和水分交互作用对的气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r) 及胞间 CO_2 摩尔分数 (C_i) 影响显著。

表 3 试验因子及交互作用对水稻剑叶光合参数的 F 值

Table 3 F value of experimental factors and the

interactions on Photosynthetic parameters of rice flag leaf

试验因子	P_n	G_s	C_i	T_r
温度	2.058	3.222	2.894	2.541
水分	0.006	6.378*	0.485	3.928
温度×水分	5.159	22.839*	8.147*	12.702*

注 “*”表示该试验因子对水稻剑叶光合参数在 $p<0.05$ 水平的影响显著。

2.3 水稻地上部干物质积累

图 2 为孕穗期不同处理水稻地上部干物质积累量。由图 2 (a) 可知, 孕穗期高温与涝双重胁迫 7 d 后, T1 处理地上部干物质质量最大, T3 处理最小, 且 T3 处理分别较 CK 和 T1 处理显著降低 11.20%和 12.18%, T3 处理的水稻茎干质量分别较 CK 和 T1 处理显著降低 13.95%和 15.44% (图 2 (b))。胁迫结束后, 抽穗期 T2 处理和 T3 处理的地上部干物质质量仍低于 CK, 且分别较 CK 显著降低 18.14%和 13.45%; 成熟期, T1、T2 和 T3 处理地上部干物质质量分别较 CK 显著降低 6.65%、32.40%和 12.98%, T3 处理地上部干物质质量比 T2 处理显著高了 28.72%。孕穗期高温处理会降低水稻地上部干物质积累, 抑制水稻地上部干物质的转移, 但高温与涝双重胁迫会缓解单一高温对水稻地上部干物质积累与转移, 避免水稻大幅度减产。

由图 2 (b) —图 2 (d) 可知, 孕穗期, 与 CK 相比, T2 和 T3 处理的水稻茎干质量分别显著降低 13.33%和 13.95%, 这可能是孕穗期高温抑制了水稻茎的生长, 进而降低了水稻地上部干物质质量。抽穗期, T1、T2 和 T3 处理的水稻茎干质量分别较 CK 显著降低 11.25%、20.24%和 14.87%; 灌浆期, T2 和 T3 处理的水稻茎干质量分别较 CK 显著降低了 20.12%和 16.21%; 成熟期, T2 和 T3 处理的水稻茎干质量仍低于 CK, T3 处理水稻茎质量较 CK 显著降低 21.47% (图 2 (b))。所有胁迫处理对水稻叶片干质量影响不显著 (图 2 (c))。抽穗期 T2 和 T3 处理的穗质量分别较 CK 显著降低 25.44%和 36.47%; 灌浆期 T2 和 T3 处理的穗质量分别较 CK 显著降低 77.59%和 39.52%, 成熟期, T2 和 T3 处理的穗质量仍低于 CK, 且分别较 CK 显著降低 78.66%和 11.45% (图 2 (d))。可见, 高温会降低水稻茎和穗质量, 而高温×涝胁迫

会缓解单一高温对水稻籽粒灌浆的抑制作用,避免水稻大幅度减产。

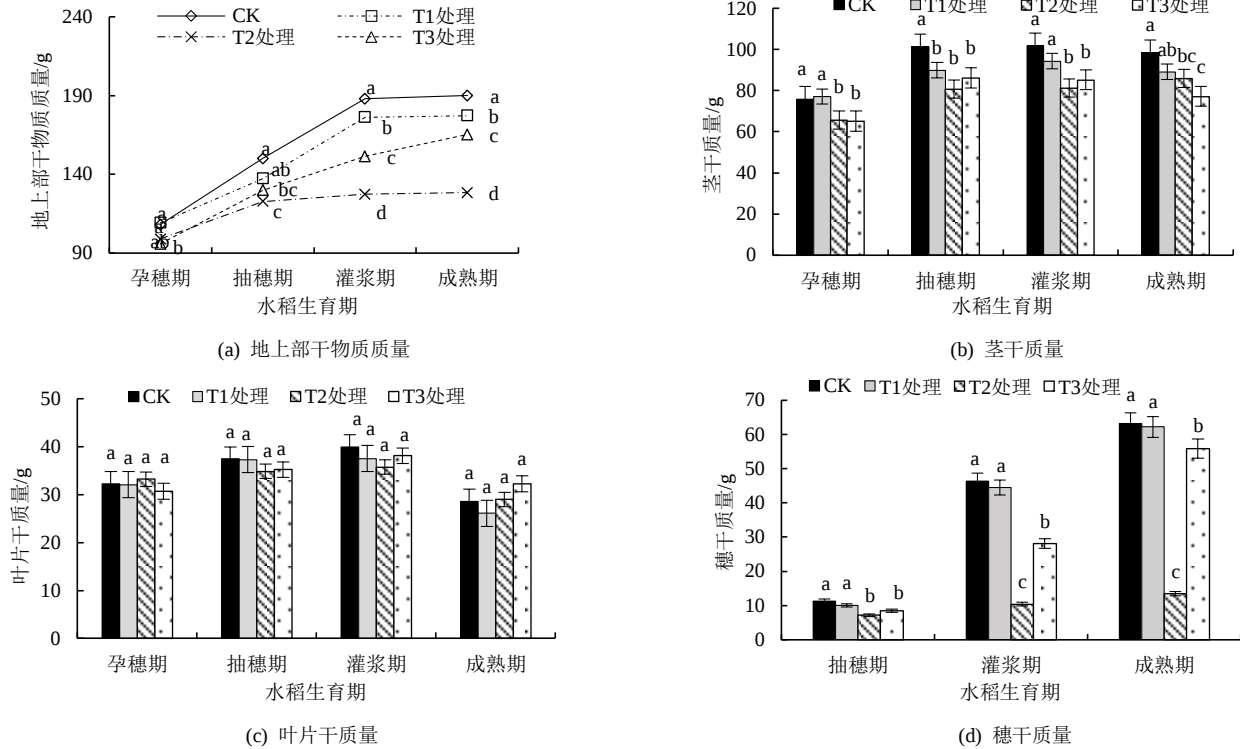


图2 不同处理水稻地上部干物质积累及分配

Fig.2 Effects of different treatments on shoot drying weight accumulation and distribution of rice

2.4 水稻产量及其构成因素

表4为不同处理水稻产量及产量构成因素。从表4可以看出,与CK相比,T1、T2和T3处理的穗长分别较CK显著降低5.44%、13.29%和5.59%;T2处理的穗质量较CK显著降低82.84%;T1、T2和T3处理的结实率分别较CK显著降低5.89%、25.06%和17.13%;T2和T3处理千粒质量分别较CK显著降低16.31%和11.86%,T2和T3处理每盆产量分别较CK显著降低80.09%和12.33%,且T2处理千粒质量和产量分别较T3处理显著降低5.05%和77.29%。综上可知,孕穗期高温处理会显著降低水稻穗长、穗质量、结实率、千粒质量和产量,而高温×涝双重胁迫处理会显著降低结实率、千粒质量和产量,但与单一高温处理相比,高温×涝双重胁迫处理会缓解单一高温对结实率和千粒质量的影响,从而降低产量损失。

表4 不同处理水稻产量及产量构成因素

Table 4 Rice yield and yield components for different treatments

处理	穗长/cm	穗质量/g	结实率/%	千粒质量/g	每盆产量/g
CK	12.87a	2.04a	89.11a	24.28a	61.88a
T1	12.17b	2.16a	83.86b	24.08a	59.62a
T2	11.16c	0.35b	66.78d	20.32c	12.32c
T3	12.15b	1.87a	73.85c	21.40b	54.25b

3 讨论

水分和温度是影响水稻生长和产量的重要环境因子。本研究表明,孕穗期单一的淹水处理(T1)会

增加水稻叶片SPAD值,促进水稻叶片中叶绿素的增加^[23],进而促进水稻叶片的光合作用^[24-26]。孕穗期T2(高温)处理会降低水稻叶片SPAD值、光合速率以及气孔导度,这与杜尧东等^[27]研究结果一致。这可能是高温降低了水稻叶片的气孔导度,使叶绿体内CO₂供应受阻,致使光合速率下降。孕穗期T2(高温)会降低水稻叶片的净光合速率(P_n),一方面可能是由于高温会造成叶绿体和细胞质破坏,同时,降低叶绿体的酶活性^[28];另一方面,高温时,植株光合速率低于呼吸速率^[28],因此,高温虽然会增加植株的真正光合作用,但受植株呼吸作用的牵制,会导致表观光合作用降低。但与单一的高温胁迫相比,T3(高温×涝)处理的水稻叶片光合速率、气孔导度以及蒸腾速率都显著增加,且与CK无显著性差异,说明高温×涝双重胁迫会缓解单一高温对水稻造成的伤害,延缓水稻衰老,这主要是由于高温×涝双重胁迫会通过增加蒸腾作用来降低叶片温度^[29],延缓叶片衰老,延长叶片光合作用功能^[30],促进水稻生长发育。通过双因素方差分析可知,孕穗期高温对水稻剑叶的各个光合参数影响不显著,但温度和水分交互作用对水稻剑叶的气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)及胞间CO₂摩尔分数(C_i)影响显著,这可能是高温与涝交互作用短期内改变植株生长环境,高温高湿会增加植株叶片的光合作用,促进水稻生长发育。

高温不仅对作物的光合作用产生抑制,还会对作物的产量及产量构成因素产生影响^[31]。干物质积累与分配直接影响产量和经济效益。孕穗期T2(高温)和T3(高温×涝)处理均会降低孕穗期水稻地上部干物

质积累,这主要是由于茎秆干物质降低导致的(由图2(b)),孕穗期后,水稻由营养生长转向生殖生长,地上部干物质积累由茎、叶转向籽粒。孕穗期高温胁迫降低了水稻产量,主要是由于孕穗期高温降低水稻千粒质量和结实率;一是因为孕穗期高温胁迫会阻碍枝梗形成与小花分化,导致花粉败育、结实率降低,阻碍茎鞘碳水化合物向穗部转运,进而降低穗粒数和结实率^[32-33],表现为高温限制库容;二是高温下同化物合成、积累、转运及分配等过程受阻,源供应和流转运能力受到限制。高温导致穗分化期和籽粒灌浆期缩短^[34-35],增加呼吸消耗,抑制叶片光合作用,从而引起籽粒不灌浆或灌浆不良,导致空、瘪粒率增加,降低水稻产量,而高温与涝双重胁迫会缓解单一高温胁迫对水稻生长发育的抑制作用,保证水稻生育后期具有较高的光合速率和地上部干物质积累速率,促进水稻光合产物积累和籽粒灌浆,从而减少产量损失。

水稻生长期雨热同期,容易遭遇极端高温或降水事件以及二者相继发生的天气现象,其发生的时期、强度以及持续时间因地而异。同时,高温与涝双重胁迫对水稻生长的影响机理还与水稻品种的特性(耐高温和耐涝性)相关。因此,要全面揭示不同生育期高温与涝双重胁迫对水稻的响应机制,需要开展大量的试验研究。本研究表明,孕穗期遭遇高温天气时,可以增加稻田水层至15 cm左右,缓解高温对水稻生长的影响。本试验结果仅是盆栽试验的研究结果,还需进行大田试验验证。

4 结 论

1) 孕穗期高温会降低水稻叶片的 *SPAD* 值和净光合速率,且 T2 处理的净光合速率较 CK 降低 30.77%,而高温和涝处理会增加水稻叶片的 *SPAD* 值和光合速率以及气孔导度,且气孔导度较 CK 显著增加 51.90%。

2) 孕穗期高温会降低水稻地上部干物质量、产量要素及产量,T2 和 T3 处理千粒质量分别较 CK 显著降低 16.31%和 11.86%,T2 和 T3 处理每盆产量分别较 CK 显著降低 80.09%和 12.33%,且 T3 处理千粒质量和产量分别较 T2 处理显著增加了 5.32%和 3.40 倍。

3) 高温与涝双重胁迫可以缓解单一高温对水稻生长的抑制作用,若水稻生长关键生育期遭遇高温天气时,可以适当增加稻田水层,缓解高温对水稻的影响,减少产量损失。

参考文献:

- [1] 董思言,高学杰. 长期气候变化: IPCC 第五次评估报告解读[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 56-59.
DONG Siyan, GAO Xuejie. Long-term climate change: Interpretation of IPCC fifth assessment report[J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2014, 10(1): 56-59.
- [2] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. New York: IPCC, Geneva, Switzerland, 2015.
- [3] 邓超,李蕾. 1981—2010 年江淮地区持续性强降水低频特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(2): 50-59.
DENG Chao, LI Lei. Properties of the low frequency oscillations of persistent heavy precipitation in the Yangtze-Huai river valley during 1981—2010[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(2): 50-59.
- [4] 郭雪,王志伟,俞胜彬,等. 20 世纪我国东部地区的降水及极端旱涝事件变化规律[J]. 干旱气象, 2013, 31(3): 476-481.
GUO Xue, WANG Zhiwei, YU Shengbin, et al. Precipitation and variations of extreme drought/flood events in the Eastern China in the 20th century[J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(3): 476-481.
- [5] 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.
WANG Kuang, WANG Youzhen, TANG Guangmin. Effects of submergence stress on rice yield factors in jointing-booting stage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(9): 40-43.
- [6] 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[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6): 875-882.
WU Qixia, YANG Wei, ZHU Jianqiang, et al. Response of hybrid rice to flooding and establishment of drainage index[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(6): 875-882.
- [7] KUANAR S R, RAY A, SETHI S K, et al. Physiological basis of stagnant flooding tolerance in rice[J]. Rice Science, 2017, 24(2): 73-84.
- [8] 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.
XIE Xiaojin, LI Bingbai, LI Yingxue, et al. Effects of high temperature stress on yield components and grain quality during heading stage[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(3): 411-415.
- [9] 张桂莲,张顺堂,萧浪涛,等. 水稻花药对高温胁迫的生理响应[J]. 植物生理学报, 2013, 49(9): 923-928.
ZHANG Guilian, ZHANG Shuntang, XIAO Langtao, et al. Physiological responses of anther to high temperature stress in rice[J]. Plant Physiology Journal, 2013, 49(9): 923-928.
- [10] 成添,胡继超,李映雪,等. 淹涝胁迫对水稻植株叶片光合性能的影响[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(1): 26-33.
CHENG Tian, HU Jichao, LI Yingxue, et al. Effects of flooding stress on leaf's photosynthetic capability of paddy rice[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42(1): 26-33.
- [11] 刘春溪,孙备,王国骄,等. 开放式增温对梗稻光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(9): 1 665-1 672.
LIU Chunxi, SUN Bei, WANG Guojiao, et al. Effects of open temperature increasing on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of japonica rice[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(9): 1 665-1 672.
- [12] 廖江林,肖小军,宋宇,等. 灌浆初期高温对水稻籽粒充实和剑叶理化特性的影响[J]. 植物生理学报, 2013, 49(2): 175-180.
LIAO Jianglin, XIAO Xiaojun, SONG Yu, et al. Effects of high temperature on grain-filling of rice caryopsis and physiological and biochemical characteristic of flag leave at early milky stage[J]. Plant Physiology Journal, 2013, 49(2): 175-180.

- [13] 江晓东, 姜琳琳, 华梦飞, 等. 喷施不同化学制剂对水稻叶片抗高温胁迫的效果分析[J]. 中国农业气象, 2018, 39(2): 92-99.
JIANG Xiaodong, JIANG Linlin, HUA Mengfei, et al. Analysis the effect of different chemical agents on high temperature stress in rice leaves[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(2): 92-99.
- [14] CHENG W G, SAKAI H, YAGI K, et al. Combined effects of elevated [CO₂] and high night temperature on carbon assimilation, nitrogen absorption, and the allocations of C and N by rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(9): 1 174-1 181.
- [15] 凌启鸿, 杨建昌. 水稻群体“粒叶比”与高产栽培途径的研究[J]. 中国农业科学, 1986, 19(3): 1-8.
LING Qihong, YANG Jianchang. Studies on “grain-leaf ratio” of population and cultural approaches of high yield in rice plants[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1986, 19(3): 1-8.
- [16] 杨建昌, 王志琴, 朱庆森. 水稻产量源库关系的研究[J]. 江苏农学院学报, 1993, 14(3): 47-53.
- [17] WANG P, ZHANG Z, SONG X, et al. Temperature variations and rice yields in China: Historical contributions and future trends[J]. Climatic Change, 2014, 124(4): 777-789.
- [18] 江敏, 金之庆, 石春林, 等. 长江中下游地区水稻孕穗开花期高温发生规律及其对产量的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(4): 649-656.
JIANG Min, JIN Zhiqing, SHI Chunlin, et al. Occurrence patterns of high temperature at booting and flowering stages of rice in the middle and lower reaches of Yangtze River and their impacts on rice yield[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(4): 649-656.
- [19] 江晓东, 华梦飞, 杨沈斌, 等. 喷施钾钙硅制剂改善高温胁迫水稻叶片光合性能提高产量[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 126-133.
JIANG Xiaodong, HUA Mengfei, YANG Shenbin, et al. Spraying exogenous potassium, calcium and silicon solutions improve photosynthetic performance of flag leaf and increase the yield of rice under heat stress condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(5): 126-133.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 主要农作物高温危害温度指标: GB/T 21985—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [21] 甄博, 郭相平, 陆红飞. 旱涝交替胁迫对水稻分蘖期根解剖结构的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 107-113.
ZHEN Bo, GUO Xiangping, LU Hongfei. Effects of alternative stress of drought and waterlogging at tillering stage on rice root anatomical structure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(9): 107-113.
- [22] 周敏姑, 邵国敏, 张立元, 等. 无人机多光谱遥感反演冬小麦 SPAD 值[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 125-133.
ZHOU Mingu, SHAO Guomin, ZHANG Liyuan, et al. Inversion of SPAD value of winter wheat by multispectral remote sensing of unmanned aerial vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(20): 125-133.
- [23] 朱寒, 时元智, 洪大林, 等. 水肥调控对水稻叶片 SPAD 值与产量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2019(11): 50-53, 65.
ZHU Han, SHI Yuanzhi, HONG Dalin, et al. Effects of water and fertilizer application on leaf SPAD values and yield of rice[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(11): 50-53, 65.
- [24] 石小虎, 蔡焕杰. 基于叶片 SPAD 估算不同水氮处理下温室番茄氮营养指数[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 116-126.
SHI Xiaohu, CAI Huanjie. Estimation of nitrogen nutrition index of greenhouse tomato under different water and nitrogen fertilizer treatments based on leaf SPAD[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(17): 116-126.
- [25] 邱权, 李吉跃, 王军辉, 等. 水肥耦合效应对楸树苗期叶片净光合速率和 SPAD 值的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3 459-3 468.
QIU Quan, LI Jiyue, WANG Junhui, et al. Interactive effects of soil water and fertilizer application on leaf net photosynthetic rate and SPAD readings of *Catalpa bungei* seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): 3 459-3 468.
- [26] 李静, 李志军, 张富仓, 等. 水氮供应对温室黄瓜叶绿素含量及光合速率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(5): 198-204.
LI Jing, LI Zhijun, ZHANG Fucang, et al. Effects of water and nitrogen supply on chlorophyll content and photosynthetic rate of greenhouse cucumber[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(5): 198-204.
- [27] 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.
DU Yaodong, LI Jianling, WANG Hua, et al. Effects of high temperature stress on the flag leaf photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of rice[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(10): 2 541-2 548.
- [28] 吴韶辉, 蔡妙珍, 石学根. 高温对植物叶片光合作用的抑制机理[J]. 现代农业科技, 2010(15): 16-18.
WU Shaohui, CAI Miaozhen, SHI Xuegen. Inhibition mechanism of high temperature on Photosynthesis of plant leaves [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2010(15): 16-18.
- [29] 甄博, 周新国, 陆红飞, 等. 拔节期高温与涝交互胁迫对水稻生长发育的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 105-111.
ZHEN Bo, ZHOU Xinguo, LU Hongfei, et al. Effect of interaction of high temperature at jointing stage and waterlogging on growth and development of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(21): 105-111.
- [30] 郭立君, 肖小平, 程凯凯, 等. 缓解超级早稻灌浆结实期高温热害的灌水深度研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 62-70.
GUO Lijun, XIAO Xiaoping, CHENG Kaikai, et al. Study on irrigation depth to effectively alleviate high temperature and heat damage of super early rice during grain-filling period[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(1): 62-70.
- [31] 宋晓雯, 王国骄, 孙备, 等. 开放式增温对不同耐热性粳稻光合作用和产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(6): 648-655.
SONG Xiaowen, WANG Guojiao, SUN Bei, et al. Effects of free air temperature increasing on photosynthesis and yield of japonica rice with different heat-tolerance characteristics[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019, 50(6): 648-655.
- [32] SATAKE T, YOSHIDA S. High temperature-induced sterility in indica rices at flowering[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1978, 47(1): 6-17.
- [33] 曹云英, 段骅, 杨立年, 等. 减数分裂期高温胁迫对耐热性不同水稻品种产量的影响及其生理原因[J]. 作物学报, 2008, 34(12): 2 134-2 142.
CAO Yunying, DUAN Hua, YANG Linian, et al. Effect of heat-stress during meiosis on grain yield of rice cultivars differing in heat-tolerance

- and its physiological mechanism[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(12): 2 134-2 142.
- [34] MOHAMMED A R, TARPLEY L. High nighttime temperatures affect rice productivity through altered pollen germination and spikelet fertility[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(6/7): 999-1 008.
- [35] KIM J, SHON J, LEE C K, et al. Relationship between grain filling duration and leaf senescence of temperate rice under high temperature[J]. Field Crops Research, 2011, 122(3): 207-213.

The Effects of Thermal and Waterlogging Stresses at Booting Stage on Photosynthesis and Yield of Rice

ZHEN Bo^{1,2}, GUO Ruiqi³, ZHOU Xinguo¹, LI Huizhen^{1*},
NIU Qinglin¹, QIU Husen¹, TIAN Guangli¹, LI Sanjun⁴

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

2. National Agro-ecosystem Observation and Research Station of Shangqiu, Shangqiu 476000, China;

3. Water Administration Supervision Detachment of Alxa League, Alxa 750300, China;

4. Agricultural and Rural Bureau of Wugang City, Wugang 462541, China)

Abstract: 【Objective】Crops often endure various biotic and abiotic stresses during their growth. This paper investigates how thermal and waterlogging stresses occurring at booting stage affect photosynthesis and the ultimate yield of paddy field rice. 【Method】The experiments were conducted in pots and consisted of four treatments: waterlogging stress by keeping the water on the soil surface 15 cm deep (T1), higher than stress (T2), high thermal stress combined with the waterlogging stress (T3). Conventional irrigation with water on the soil surface kept at 0~5 cm deep was taken as the control (CK). In each treatment, we measured the change in *SPAD*, photosynthetic traits and yield of the rice. 【Result】Compared to CK, T2 reduced the photosynthetic rate by 30.77%, while T3 increased *SPAD*, photosynthetic rate and stomatal conductance of the leaves by up to 51.90%. Compared to CK, the impact of the stresses occurring at booting stage on shoot growth lasted into mature stage. It hence reduced the yield, especially T2 and T3 which reduced the rice yield by 80.09% and 12.33%, and 1 000-grain weight by 16.31% and 11.86% respectively. 【Conclusion】To alleviate the adverse impact of thermal stress at the booting stage on yield, water in the soil surface should be kept about 15 cm deep to ameliorate the potential thermal damage.

Key words: rice; thermal and waterlogging stress; *SPAD*; photosynthetic traits; yield

责任编辑：白芳芳