

盐土条件下不同品系藜麦生理特性和 产量指标对花期渍水胁迫的响应

晏军, 王伟义, 费月跃, 崔必波, 时丕彪,
马萌萌, 李斌, 陈满霞, 李亚芳, 顾闽峰*

(江苏沿海地区农业科学研究所 新洋试验站, 江苏 盐城 224049)

摘要: 【目的】探索盐土条件下不同藜麦品系花期遭受渍水胁迫的响应机制, 促进沿海地区藜麦的引进、选育和推广种植。【方法】选取4个藜麦品系(SL 21、SL 44、SL 24和SL 45), 采用盆栽实验, 以不渍水为对照(CK), 研究了盐土环境下藜麦花期对不同渍水持续时间(4、8和12 d)的生理特性和产量构成响应, 并明确了排水指标。【结果】盐土条件下, 随着渍水时间的增加, 4个品系藜麦叶片的丙二醛(MDA)物质的量浓度呈增加趋势, 叶绿素Chl(a+b)量、可溶性蛋白(SP)量、可溶性糖(SS)量、光合指标参数(P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i)和叶绿素荧光参数(F_v/F_m 、 F_v/F_o)均呈降低趋势。渍水4 d后, 4个品系藜麦叶片MDA物质的量浓度显著均高于CK, SL 21和SL 24的Chl(a+b)量和SS量显著低于CK, 但4个品系的 P_n 、 F_v/F_o 和 F_v/F_m 未受到显著影响, 渍水胁迫对SL 24和SL 45光合特性参数的影响大于SL 21和SL 44。渍水持续12 d后, 4个品系的各项生理指标均显著低于CK, 藜麦生理代谢遭到严重破坏。在产量构成上, 每株主穗产量占总产量的65%以上, 4个品系在渍水4 d后单株总产量均显著降低, 产量高低表现为SL 44>SL 21>SL 24>SL 45, 在渍水8 d后主穗产量和千粒质量显著低于CK, 渍水持续12 d后, 分枝产量绝收。【结论】4个品系中SL 44的耐渍性相对较好, 若在花期遭遇涝渍灾害, 以藜麦减产15%~20%作为排水控制标准, 允许的渍水时间为3.2~4.1 d。

关键词: 藜麦; 渍水; 生理特性; 产量; 排水指标

中图分类号: S513; S276.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020286

OSID:



晏军, 王伟义, 费月跃, 等. 盐土条件下不同品系藜麦生理特性和产量指标对花期渍水胁迫的响应[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 47-54.

YAN Jun, WANG Weiyi, FEI Yueyue, et al. Response of Physiological Traits and Yield of Different Quinoa Cultivars to Waterlogging at Flowering Stage in Saline Soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 47-54.

0 引言

【研究意义】藜麦(*Chenopodium quinoa Willd*)是一种原产于南美洲安第斯山脉范(藜)科藜属的一年生双子叶草本植物, 具有耐寒、耐旱、耐贫瘠、耐盐碱等生理特性^[1-2]。目前, 世界各国对藜麦的关注越来越多, 还因为藜麦具有非常高的营养价值^[3], 联合国粮农组织(FAO)认为藜麦是唯一一种单体植物即可基本满足人体营养需求的食物, 并将2013年定为

“国际藜麦年”^[4]。因此, 在我国农业“转方式、调结构”的大背景下, 发展集营养、生态和经济价值于一体的藜麦产业, 对于促进我国农业种植结构调整、保障粮食安全方面具有广泛的应用前景。

【研究进展】近年来, 我国藜麦产业发展迅速, 2017年我国种植面积已达9 000 hm², 但产地主要集中在西北地区^[5]。我国东部沿海地区, 拥有大量滩涂资源, 并还在逐渐增加^[6], 由于藜麦具有高度耐盐性, Jacobsen等^[2]研究发现在中度盐胁迫条件下(10~20 dS/m), 藜麦的生物量、种子产量和收获指数都比非盐胁迫处理高。所以在滨海滩涂地区种植藜麦对于完善农业结构、增加农民收入、提高滩涂地利用率以及保持农业生态系统多样性等具有极其重要的现实意义。然而, 在这一区域涝渍灾害严重制约农业生产, 每年4—9月是降雨的多发期, 在此期间持续阴雨、多大雨和暴雨天气, 受平原微地形影响, 农田排水困

收稿日期: 2020-05-29

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(江苏现代农业产业关键技术创新)(CX(19)3116); 江苏沿海地区农业科学研究所基金项目(YHS201808)

作者简介: 晏军(1992-), 男, 研究实习员, 硕士研究生, 主要从事作物逆境生理及农业生产的水土环境调控。E-mail: yj111708@sina.com

通信作者: 顾闽峰(1974-)男, 研究员, 主要从事耐盐作物新品种选育与栽培技术研究。E-mail: ycgmf@126.com

难, 导致藜麦生长期容易受到涝渍胁迫^[7-8], 引起植株发生一系列形态和生理特征变化, 如植株总干质量和叶面积减少, 细胞膜脂过氧化作用加剧, 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, 充实度差等^[11-12]。由于花期与梅雨期重合, 导致藜麦开花结实期更易遭受渍水胁迫, 这种负面影响比干旱胁迫更严重^[9], 有研究指出藜麦对水分最敏感时期是灌浆期和开花期^[10]。但是, 不同品系、不同生育时期对水分胁迫的响应和防御效果均不同, 田计均等^[13]研究指出水涝胁迫对现蕾期藜麦影响较大, 幼苗期和灌浆期藜麦对水分胁迫均表现出较强的耐受性; 岳凯^[14]研究指出 5 个不同品系藜麦对干旱胁迫的耐受范围及其适应能力表现为明显的不同。【切入点】目前, 针对盐土环境下藜麦花期对渍水胁迫的耐逆性分析、耐渍品系筛选及排水调控方面的研究较少。【拟解决的关键问题】本研究探索在沿海滩涂地区藜麦花期遭受渍水胁迫的响应机制, 为引进、选育适合沿海地区种植耐渍、耐涝优质高产稳产的品种提供数据支撑, 对沿海地区藜麦的推广种植和产业发展具有重要指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

盆栽试验于 2019 年在江苏省盐城市新洋农业试验站的沿海现代农业科技创新与示范基地 (34°28'N, 120°54'E) 内进行, 该基地东临黄海, 为沿海滩涂地, 属亚热带季风气候, 年平均气温 14℃, 年降水总量 100 cm, 年平均日照时间 2 200 h, 无霜期 210 d, 海拔不足 5 m; 试验基地土壤类型为滨海盐土, 土壤质地为沙壤土, 五点取样法测得 0~20 cm 土壤 pH 值为 8.2, 干土含盐量为 3~4 g/kg, 总氮量 1.03 g/kg、铵态氮量 6.07 mg/kg、硝态氮量 8.79 mg/kg、速效磷量 7.39 mg/kg、速效钾 212.1 mg/kg。

1.2 试验材料

试验材料为江苏沿海地区农业科学研究所新洋试验站从国内外 200 多份种质资源中自主选育的 4 个藜麦品系 SL 21、SL 44、SL 24、SL 45, 其中 SL 21 和 SL 44 为高秆品系, SL 24 和 SL 45 为矮秆品系, 正常气候条件下适合在本区域 (土壤盐分在 3 g/kg 左右) 种植。试验用盆为 40 L (长、宽、高为 48 cm×34 cm×25 cm) 长方体塑料箱, 于塑料箱侧面底部安装 1 个进出水阀门, 盆内装基地大田 0~20 cm 风干土 25 kg, 选取每品系幼苗株高基本一致的进行移栽, 每盆定植 4 个品系各 1 株, 共定植 30 盆。每盆基施复合肥 (N: 15%, K₂O: 15%, P₂O₅: 15%) 10 g, 于显穗期每盆追施尿素 (N: 46%) 2 g。

1.3 试验设计

试验采用大棚基质育苗, 于 3 月 31 日移栽入盆中, 在主穗开花后 (5 月 23 日上午) 进行渍水试验, 从 30 盆中选取各品系长势一致的 24 盆作为试验对象。渍水时间设 3 个水平, 分别为 4、8 和 12 d, 每个处理重复 6 次, 把试验盆栽放入长、宽、高为 200 cm×60 cm×40 cm 的淹水池中, 保证水刚好淹没过土壤表面, 保持渍水期间土壤水分饱和度为 100%, 渍水结束后不再浇灌。以不渍水作为对照 (CK), 根据作物生长和需水情况用 1 L 自来水正常浇灌, 花期至成熟期共浇灌 5 次。每个渍水时间结束后选取其中 3 盆用于光合参数和生理指标的测定, 另外 3 盆用于产量构成和干物质积累测定。

1.4 测定指标

1.4.1 生理指标测定

于渍水试验结束时测定藜麦叶片的叶绿素 (Chl)、丙二醛 (MDA)、可溶性蛋白 (SP)、可溶性糖 (SS), 采用浸提法 (95%乙醇) 测定剑叶的叶绿素 (Chl) a、叶绿素 b 的质量浓度, 硫代巴比妥酸 (TBA) 比色测定 MDA 物质的量浓度, 考马斯亮蓝 G-250 法测定 SP 量, 蒽酮比色法测定 SS 量, 每个处理重复测 3 次取平均值^[15]。

1.4.2 光合指标与叶绿素荧光参数测定

于渍水试验结束时的第 2 天上午 09:00—11:00 利用便携式光合作用测定仪 (LI-6400, USA) 测定藜麦倒四叶净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (C_s) 和细胞间 CO₂ 摩尔分数 (C_i)。光合仪设置为开放式气路, CO₂ 物质的量浓度约为 385 μmol/L 左右, 选择红蓝光源叶室, 设定光合有效辐射 (PAR) 为 1 500 μmol/(m² s), 每处理测定 3 株, 每次 3 次重复。

利用 OS-5p 型脉冲调制叶绿素荧光仪 (Opti-sciences, 美国), 在距藜麦倒 4 叶叶尖 1/2 处将叶片暗适应 20 min, 测定 PSII 初始荧光 (original fluorescence, F_0) 和最大荧光 (maximum fluorescence, F_m), 计算潜在光化学活性 (PSII potential photochemical activity, F_v/F_0 , $F_v/F_0 = (F_m - F_0) / F_0$) 和 PSII 最大光化学量子产量 (PSII maximum photochemical quantum yield, F_v/F_m , $F_v/F_m = (F_m - F_0) / F_m$)。

1.4.3 产量与干物质积累测定

在藜麦叶片 80% 枯黄进行收获测产, 分品系单独统计每盆单株的株高、主穗长、分枝数以及分枝籽粒和主穗籽粒产量, 然后统计每株的千粒质量 (g), 每株分枝籽粒和主穗籽粒产量和作为每处理的实际产量 (g)。单株干物质质量测定: 将用于籽粒产量测定后的叶片和茎秆在 105℃ 下杀青 0.5 h, 80℃ 烘 12 h 至恒质量后称量。

1.5 统计分析

应用 DPS15.1 进行方差和回归分析, 利用 Microsoft Excel 2016 作图, 采用 LSD 法进行处理间多重比较。

2 结果与分析

2.1 藜麦花期渍水对丙二醛和叶绿素的影响

图 1、图 2 给出了渍水胁迫对藜麦叶片 MDA、Chl(a+b)的影响 (图中同一品系柱图不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$); 下同。)。由图 2 可知, 4 个品系 Chl(a+b)量随渍水时间的增加呈逐渐降低趋势, 除 SL 44 外, 其他 3 个品系在渍水 4 d 后 Chl(a+b)量均显著低于 CK, 除 SL 24 外, 与渍水 8 d 相比, 渍水天数 12 d Chl(a+b)量不再显著降低; 4 个品系 MDA 物质的量浓度 (图 1) 均随渍水时间的增加而升高, 且在渍水 4 d 后均显著高于 CK, 除 SL 21 外, 渍水天数每增加 4 d, MDA 都显著增加。

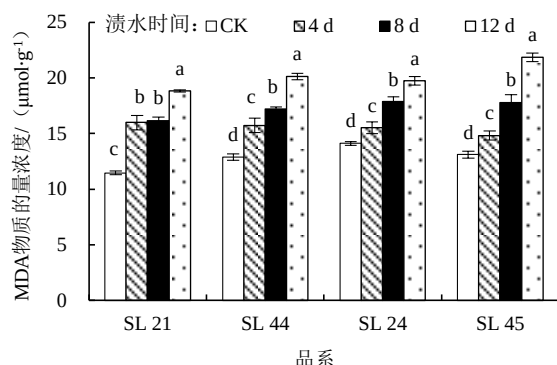


图 1 花期渍水后藜麦叶片 MDA

Fig.1 MDA in leaves of quinoa after Waterlogging at flowering stage

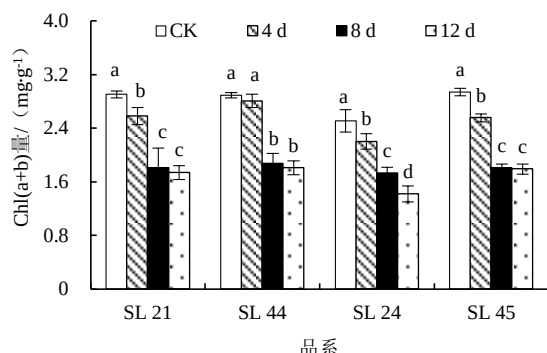


图 2 花期渍水后藜麦叶片 Chl(a+b)

Fig.2 Chl(a+b) in leaves of quinoa after Waterlogging at flowering stage

2.2 藜麦花期渍水对可溶性蛋白与可溶性糖的影响

图 3、图 4 给出了渍水后各处理叶片中 SP 与 SS 量, 随着渍水时间的增加, 各品系藜麦叶片中的 SP 和 SS 量均呈逐渐降低的趋势。从质量浓度降低相对比例可以看出, 渍水对 SS 量的影响大于 SP 量; 除

SL 24 外, 其他 3 个品系在渍水达到 8 d 时 SP 量均显著低于 CK; 除 SL 45 外, 其他 3 个品系在渍水达到 4 d 时 SS 量均显著低于 CK, 在达到 8 d 时 SL 24 和 SL 45 SS 量降低幅度相对较大。

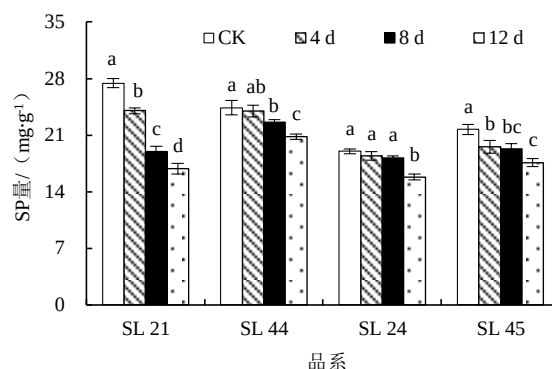


图 3 花期渍水后藜麦叶片 SP

Fig.3 SP in leaves of quinoa after Waterlogging at flowering stage

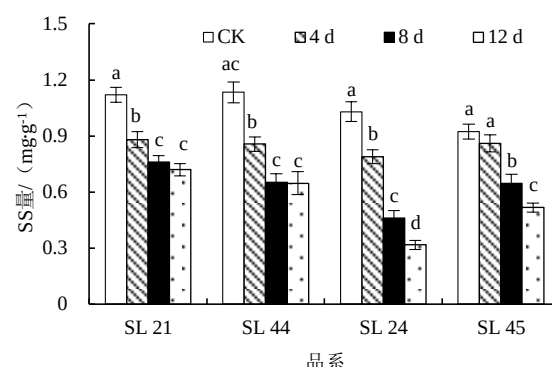


图 4 花期渍水后藜麦叶片 SS

Fig.4 SS in leaves of quinoa after waterlogging at flowering stage

2.3 藜麦花期渍水对光合特性的影响

表 1 为花期渍水后藜麦叶片光合特性。由表 1 可知, 随着渍水时间增加, 净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 摩尔分数 (C_i) 和蒸腾速率 (T_r) 呈现下降趋势, 且渍水持续时间越长, 下降趋势越明显。多重分析结果可得, 4 个品系在渍水持续 12 d 时, P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 均显著低于 CK; SL 21 和 SL 44 在渍水 4、8 d 和 12 d 时 P_n 逐渐下降但处理间差异不显著, 在渍水 12 d 时, SL 21、SL 44、SL 24 和 SL 45 的 P_n 相较 CK 分别显著降低 26.2%、30.7%、36.6% 和 50.0%; SL 44 在渍水达到 8 d 时 T_r 与 CK 无显著差异, 在渍水 12 d 时, SL 21、SL 44、SL 24 和 SL 45 的 T_r 相较 CK 分别显著降低 32.0%、32.8%、41.2% 和 61.0%, G_s 相较 CK 分别显著降低 38.7%、41.4%、70.8% 和 70.1%, C_i 相较 CK 分别显著降低 11.3%、26.1%、17.1% 和 11.9%。表明藜麦花期遭受短期渍水胁迫不会显著影响其光合特性, 说明藜麦有一定耐逆性, 但随着渍水时间增加, 对 SL 24 和 SL 45 光合特性各参数的影响大于 SL 21 和 SL 44。

表 1 花期渍水后藜麦叶片光合特性

Table 1 Photosynthetic characteristics in leaves of quinoa after waterlogging at flowering stage

品系	渍水时间	$P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$T_l/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$G_s/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	$C_i/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
SL 21	CK	21.64±1.56 a	8.46±0.75 a	0.31±0.09 a	256.28±23.67 a
	4 d	19.12±1.59 ab	7.99±0.89 b	0.29±0.06 ab	251.54±13.98 a
	8 d	17.56±2.97 b	7.54±0.66 b	0.19±0.01 bc	241.83±28.06 a
	12 d	15.98±0.76 b	5.75±0.04 b	0.19±0.02 c	227.24±13.46 b
SL 44	CK	23.31±1.27 a	7.86±1.07 a	0.29±0.05 a	278.72±21.54 a
	4 d	18.57±2.11 b	6.82±0.25 a	0.26±0.02 a	227.66±10.77 b
	8 d	17.95±2.10 b	6.74±0.94 a	0.19±0.01 b	209.21±14.05 b
	12 d	16.15±3.07 b	5.28±0.37 b	0.17±0.06 b	206.04±8.47 b
SL 24	CK	20.55±1.77 a	9.93±0.54 a	0.48±0.14 a	246.16±16.06 a
	4 d	18.26±1.39 ab	6.31±1.13 b	0.22±0.05 b	245.18±14.47 a
	8 d	16.05±1.21 bc	5.92±0.38 b	0.19±0.02 b	233.70±21.41 ab
	12 d	13.03±2.03 c	5.84±1.03 b	0.14±0.02 b	204.07±9.54 b
SL 45	CK	22.37±1.57 a	9.21±0.73 a	0.41±0.08 a	268.50±11.65 a
	4 d	19.26±0.64 a	5.49±0.61 b	0.29±0.11 ab	248.12±7.95 ab
	8 d	14.61±2.80 b	3.84±2.33 b	0.27±0.12 ab	224.61±18.29 bc
	12 d	11.16±1.34 c	3.59±0.36 b	0.12±0.02 b	236.59±5.08 c

注 平均值±标准差 ($n=3$)；同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)；下同。

2.4 藜麦花期渍水对叶绿素荧光动力学参数的影响

表 2 为花期渍水后藜麦叶片叶绿素荧光动力学参数。由表 2 可知，随着渍水天数增加，PS II 的潜在光化学活性 (F_v/F_o) 和最大光化学量子产量 (F_v/F_m) 呈下降趋势，且渍水深持续时间越长，下降趋势越明显。多重分析结果可得，渍水 4 d 不会显著影响 F_v/F_o 和 F_v/F_m ；除 SL 21 外，其他 3 个品系在渍水 12 d 后 F_v/F_o 和 F_v/F_m 显著低于 CK。由此表明，花期藜麦渍水 12 d，PS II 反应中心结构发生显著破坏，其潜在活性显著降低，最终导致其光能转化效率降低。

2.5 藜麦花期渍水对产量构成的影响

表 3 为花期渍水对藜麦农艺性状和产量构成，由表 3 可知，随着渍水时间增加，藜麦的单株地上部干物质量、有效分枝数、单株主穗产量、单株分枝产量、单株总产量和千粒质量均呈下降趋势，单株主穗产量占总产量的 65% 以上。多重分析结果可得，渍水 12 d 对 SL 21 和 SL 24 的株高没有显著影响，而 SL 44 和 SL 45 显著低于 CK；除 SL 21 外，SL 44、SL 24 和 SL 45 在渍水 8 d 时，单株地上部分干物质量显著低于 CK；除 SL 21 外，SL 44、SL 24 和 SL 45 在渍水 4 d 时，有效分枝数显著低于 CK，在渍水 12 d 时，4 个品系均无有效分枝；4 个品系在渍水持续 12 d 后，单株分枝产量降为 0，在渍水 8 d 后单株主穗产量和千粒质量显著低于 CK；4 个品系在渍水 4 d 时单株总产

量均显著低于 CK，单株总产量的大小顺序为 SL 44>SL 21>SL 24>SL 45，渍水 12 d 后，SL 21、SL 44、SL 24 和 SL 45 单株总产量相较 CK 分别显著降低 81.3%、83.2%、77.7% 和 78.6%。

表 2 花期渍水后藜麦叶片叶绿素荧光动力学参数

Table 2 Fluorescence induction kinetic parameters in leaves of quinoa after waterlogging at flowering stage

品系	渍水时间	F_v/F_o	F_v/F_m
SL 21	CK	4.08±0.06 a	0.80±0.02 a
	4 d	3.61±0.36 a	0.79±0.03 ab
	8 d	3.56±0.46 a	0.78±0.01 ab
	12 d	3.51±0.42 a	0.77±0.03 b
SL 44	CK	4.06±0.21 a	0.80±0.01 a
	4 d	3.71±0.25 ab	0.79±0.01 ab
	8 d	3.50±0.38 b	0.78±0.02 b
	12 d	3.24±0.18 b	0.76±0.01 b
SL 24	CK	4.19±0.05 a	0.80±0.01 a
	4 d	3.78±0.38 ab	0.79±0.01 ab
	8 d	3.67±0.27 b	0.78±0.02 ab
	12 d	3.67±0.23 b	0.77±0.01 b
SL 45	CK	3.52±0.39 a	0.8±0.01 a
	4 d	3.55±0.23 a	0.78±0.01 b
	8 d	3.29±0.13 ab	0.77±0.01 bc
	12 d	3.04±0.19 b	0.75±0.01 c

表 3 花期渍水后藜麦农艺性状和产量构成

Table 3 Agronomic characters and yield components of quinoa after waterlogging at flowering stage								
品系	渍水时间	株高	单株地上部干物质质量/g	有效分枝数	单株主穗产量/g	单株分枝产量/g	千粒质量/g	单株总产量/g
SL 21	CK	107.67±9.71 a	33.14±6.93 a	9.0±1.0 a	24.16±1.31 a	12.54±0.90 a	2.65±0.07 a	36.70±2.14 a
	4 d	107±3.46 a	31.96±2.70 a	8.33±1.53 a	19.43±0.92 b	8.09±0.51 b	2.32±0.08 b	27.52±1.38 b
	8 d	104.67±6.03 a	29.66±0.82 ab	6.33±0.58 b	16.39±0.98 c	3.10±1.01 c	1.64±0.087 c	19.49±1.98 c
	12 d	107.67±5.03 a	23.67±1.63 b	0 c	6.88±1.21 d	0 d	1.55±0.06 d	6.88±1.21 d
SL 44	CK	98.33±6.66 a	41.53±7.70 a	12.33±1.53 a	27.50±0.92 a	14.60±1.07 a	2.63±0.11 a	42.10±1.98 a
	4 d	95.67±11.02 ab	31.20±3.36 ab	7.0±1.0 b	19.34±0.85 b	8.48±0.80 b	2.54±0.05 a	27.82±1.42 b
	8 d	99.33±8.14 a	28.33±8.91 b	667±2.52 b	16.37±1.56 c	6.87±1.87 b	2.33±0.04 b	23.24±0.37 c
	12 d	82.67±5.51 b	16.08±1.49 c	0 c	7.06±1.97 d	0 c	1.95±0.14 c	7.06±1.97 d
SL 24	CK	62.67±8.08 a	22.13±5.40 a	7.33±2.08 a	18.17±1.82 a	9.36±0.98a	2.70±0.06 a	27.53±2.79 a
	4 d	60.33±5.69 a	18.89±3.41 ab	3.0±1.0 b	16.32±1.04 ab	5.75±0.63 b	2.18±0.09 b	22.07±0.58 b
	8 d	70.0±6.93 a	12.40±3.30 bc	1.0±1.0 bc	14.84±1.70 b	2.95±0.71 c	1.97±0.05 c	17.79±2.20 c
	12d	61.33±4.62 a	8.14±5.56 c	0 c	6.14±1.64 c	0 d	1.75±0.13 d	6.14±1.64 d
SL 45	CK	88.0±6.56 a	18.02±1.47 a	5.67±0.58 a	17.11±0.73 a	5.05±1.49 a	2.40±0.09 a	22.16±1.86 a
	4 d	75.0±4.58 ab	17.70±1.33 a	2.33±1.53 b	13.28±0.86 b	4.31±0.44 a	2.34±0.51 a	17.59±1.24 b
	8 d	62.33±3.06 b	12.76±1.61 b	2.33±0.58 b	10.43±0.88 c	2.59±0.67 c	1.79±0.09 b	13.02±1.34 c
	12 d	65.33±11.72 b	10.04±2.67 b	0 c	4.75±2.20 d	0 d	1.52±0.09 b	4.75±2.20 d

2.6 排水指标探究

考虑天气原因、农田排水工程的使用效率及其相关费用等因素，以一定频率（20%或 10%）降水发生条件下可接受或者容许的减产水平，可作为选择排水控制指标的依据。4 个品系相对产量与渍水天数的回归关系如表 4 所示，相关性均极显著，优化后的回归关系如图 5 所示，以藜麦减产 15%~20%（即 Ry 为 80%~85%）作为排水控制标准，花期允许的渍水时间为 3.2~4.1 d，在此期间及时采取排水措施。

表 4 渍水时间与藜麦相对产量的关系分析

Table 4 Regression analysis between waterlogging days and relative yield of quinoa		
品系	回归关系	R ²
SL 21	Ry = -5.68T + 103.26	0.94**
SL44	Ry = -5.84T + 98.95	0.97**
SL 24	Ry = -5.17T + 107.84	0.83**
SL 45	Ry = -5.83T + 101.59	0.98**

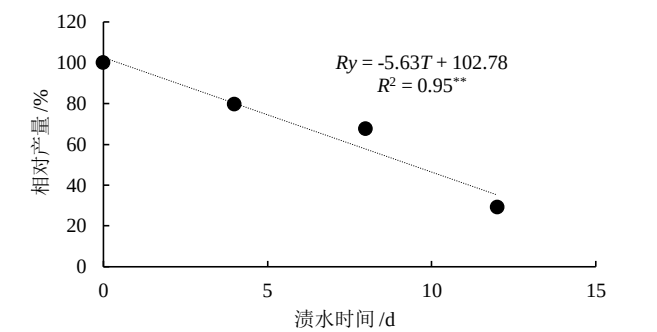


图 5 渍水时间与藜麦相对产量的优化分析

Fig.5 Optimization analysis between waterlogging days and relative yield of quinoa

3 讨论

3.1 藜麦花期生理代谢指标对渍水胁迫的响应

MDA 作为膜脂过氧化程度的指标，可反映膜脂过氧化反应速率和膜的受损程度^[16]。田计均等^[13]研究表明，藜麦现蕾期遭受水涝胁迫 48 h，MDA 能显著增加，但其他时期无明显变化，本研究表明，藜麦花期渍水 4 d，MDA 物质的量浓度显著增加，并随着渍水时间增加有持续显著增加的趋势，说明藜麦花期对渍水胁迫的逆境反应比较强，使藜麦产生了氧化胁迫，导致叶片细胞膜系统受损。可溶性蛋白作为重要的渗透调节物质，可以起到调节细胞渗透压，保护膜结构稳定的功能，糖类是新陈代谢的基础，植物体内糖的质量浓度越高，则新陈代谢越旺盛，其生命力就越强^[17]。本研究表明，随着渍水时间的增加，各品系藜麦叶片中的 SP 量和 SS 量均呈逐渐降低的趋势，说明藜麦在遭受渍水胁迫是渗透调节平衡被打破，3 个品系在渍水 8 d 时 SP 量均显著低于 CK，这与周琴等^[18]在大豆上的研究相似。3 个品系在渍水达到 4 d 时 SS 量均显著低于 CK，且随渍水时间的增大，表明花期渍水不会导致叶片糖外运受阻但随渍水时间的延长糖类合成受阻加重，这与杨长琴等^[19]在棉花上的研究相反，可能原因是藜麦中的 SS 量能够在一定程度的逆境胁迫下调节植物细胞的渗透平衡，保持运输通道的畅通，有研究指出^[13]藜麦可以通过提高 SS 量来减少水分胁迫带来的不利影响，但是长时间的渍水胁迫导致其生理系统严重破坏，从而会影响糖类物质的合成。

3.2 藜麦花期光合特征和叶绿素荧光参数对渍水胁迫的响应

光合作用是衡量植物抗逆能力的重要指标之一^[20-21]。本研究表明 Chl(a+b)量随渍水时间的增加呈逐渐降低趋势,可能原因是渍水导致其叶绿体色素合成酶活性降低、叶绿素分解加速、叶绿体功能紊乱或结构受损等。叶绿素量的降低必然会影响光能的吸收、传递和转化,随着亏缺灌溉程度的加大,藜麦植株 P_n 、 T_r 、 G_s 均显著降低^[20]。在遭受渍水胁迫下也有相同表现,本研究中 4 个品系藜麦随着渍水时间增加, P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 均呈下降趋势,这与在其他作物(小麦、油菜和棉花)上的研究结论^[22-24]基本一致。叶绿素荧光参数的变化可以更好地反映出逆境下植物内在光能利用激发能传递和光化学反应等光合作用过程^[21,25],在渍水 12 d 时, P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 显著低于 CK,除 SL 21 外,其他 3 个品系在渍水 12 d 后 F_v/F_o 和 F_v/F_m 才显著低于 CK,而 SL 21 和 SL 44 在渍水 4、8 d 和 12 d 时 P_n 逐渐下降但处理间差异不显著,渍水 4 d 后不会显著影响 F_v/F_o 和 F_v/F_m ,表明藜麦在适应逆境环境后,会有一定的耐受性,在耐逆阈值范围内光合作用不会受到显著影响。但随着渍水时间增加,SL 24 和 SL 45 光合特性各参数和叶绿素荧光参数的下降趋势大于 SL 21 和 SL 44。

3.3 藜麦花期渍水的产量响应及排水指标确定

本研究表明,SL 44、SL 24 和 SL 45 在渍水 8 d 时,单株干物质质量显著低于 CK,原因可能是花期主要以生殖生长为主,长时间渍水胁迫会影响物质吸收转运,进而导致地上部干物质积累降低。姚有华等^[20]研究表明,充分灌溉下藜麦的有效分枝数均高于亏缺灌溉处理,但亏缺灌溉处理有利于有效分枝数的形成。本研究表明渍水胁迫会导致有效分枝数减少,在渍水 12 d 时,4 个品系有效分枝数为 0,可能原因是藜麦开花期不一致,本试验主要以主穗开花为标准开始渍水,而此时大部分分枝开花期不一致,当渍水时间延长,分枝营养供应不够,就会严重影响分枝开花与灌浆。在产量形成上,主穗产量占总产量的 65%以上,4 个品系在渍水 4 d 时单株总产量均显著低于 CK,渍水 8 d 后 4 个品系的千粒质量显著低于 CK,渍水 12 d 后 SL 21、SL 44、SL 24 和 SL 45 单株总产量相较 CK 分别显著降低 81.3%、83.2%、77.7%和 78.6%。表明渍水胁迫会严重影响藜麦分枝灌浆结实,同时灌浆不充分导致千粒质量降低,使得总产量降低明显。研究^[26]表明,通过轻度亏缺灌溉对藜麦单穗粒质量、单株粒质量和千粒质量的形成有积极促进作用,所以在沿海地区引进藜麦种植,要选择地势相对较高、排水条件好的农田。作物在遭受田间渍水后,及时排水

是关键,若以减产 15%~20% (即 R_y 为 80%~85%) 作为排水控制标准,杨威等^[27]研究表明油菜花期允许田间渍涝为 4.7~6.2 d,本研究表明藜麦花期允许的渍水时间为 3.2~4.1 d,在此期间可及时采取排水措施。

4 结论

1) 随着渍水时间的增加,4 个品系藜麦叶片的 MDA 物质的量浓度呈增加趋势,Chl(a+b)、SP、SS、光合指标参数 (P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i) 和叶绿素荧光参数 (F_v/F_o 、 F_v/F_m) 均呈降低趋势。渍水 12 d 后,4 个品系的各项生理指标均显著低于 CK。

2) 在产量构成上,4 个品系在渍水 4 d 后单株总产量均显著降低,产量高低表现为 SL 44>SL 21>SL 24>SL 45,在渍水 8 d 后主穗产量和千粒质量显著低于 CK,渍水 12 d 后,分枝产量绝收。

3) SL 44 的耐渍性相对较好,若在花期遭遇涝渍灾害,以藜麦减产 15%~20%作为排水控制标准,允许的渍水时间为 3.2~4.1 d。

参考文献:

- [1] 魏玉明,杨发荣,刘文瑜,等. 藜麦不同生育期营养物质积累与分配规律[J]. 草业科学, 2018, 35(7): 1 720-1 727.
WEI Yuming, YANG Farong, LIU Wenyu, et al. Regulation of nutrient accumulation and distribution in quinoa at different growth stages[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(7): 1 720-1 727.
- [2] JACOBSEN S E, MUJICA A, JENSEN C R. The resistance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) to adverse abiotic factors[J]. Food Reviews International, 2003, 19(1/2): 99-109.
- [3] BAZILE D, JACOBSEN S E, VERNIAU A. The global expansion of quinoa: Trends and limits[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 622.
- [4] 任永峰,梅丽,杨亚东,等. 播期对藜麦农艺性状及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(5): 643-656.
REN Yongfeng, MEI Li, YANG Yadong, et al. Effects of sowing time on agronomic characteristics and yield of quinoa[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(5): 643-656.
- [5] 任贵兴,杨修仕,么杨. 中国藜麦产业现状[J]. 作物杂志, 2015(5): 1-5.
REN Guixing, YANG Xiushi, YAO Yang. Current situation of quinoa industry in China[J]. Crops, 2015(5): 1-5.
- [6] 练薇薇. 江苏省沿海滩涂资源可持续开发利用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
LIAN Weiwei. Research on the sustainable development and utilization of seabeach resources of Jiangsu Province[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [7] 张倩玉,许有鹏,雷超桂,等. 东南沿海水库下游地区基于动态模拟

- 的洪涝风险评估[J]. 湖泊科学, 2016, 28(4): 868-874.
- ZHANG Qianyu, XU Youpeng, LEI Chaogui, et al. Risk assessment of flood based on dynamic simulation in downstream of reservoirs in coastal area of southeast China[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(4): 868-874.
- [8] 叶正伟. 江苏沿海开发地区近 50 年来降水演变特征与趋势[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 176-180.
- YE Zhengwei. Precipitation change and its trend in recent 50 years in the coastal region of Jiangsu Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(1): 176-180.
- [9] GONZÁLEZ J A, GALLARDO M, HILAL M, et al. Physiological responses of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*) to drought and waterlogging stresses: Dry matter partitioning[J]. Botanical Studies, 2009, 50(1): 35-42.
- [10] SAM G, DIRK R, MAGALI G, et al. Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*). European Journal of Agronomy, 2007, 28(3).
- [11] 潘澜, 薛立. 植物淹水胁迫的生理学机制研究进展[J]. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2 662-2 672.
- PAN Lan, XUE Li. Plant physiological mechanisms in adapting to waterlogging stress: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(10): 2 662-2 672.
- [12] 谭淑端, 朱明勇, 张克荣, 等. 植物对水淹胁迫的响应与适应[J]. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1 871-1 877.
- TAN Shuduan, ZHU Mingyong, ZHANG Kerong, et al. Response and adaptation of plants to submergence stress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(9): 1 871-1 877.
- [13] 田计均, 唐媛, 董雨, 等. 水分胁迫对不同发育时期藜麦生理的影响. 生物学杂志, 2020, 37(2): 6-10.
- TIAN Jijun, TANG Yuan, DONG Yu, et al. Effects of water stress on physiology of quinoa in different developmental stages[J]. Journal of Biology, 2020, 37(2): 6-10.
- [14] 岳凯. 不同品系藜麦抗旱性及种子主要次生物质的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- YUE Kai. Study on drought resistance and main secondary metabolites in seeds of different species quinoa[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.
- [15] 张治安, 陈展宇. 植物生理学实验技术 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2008.
- ZHANG Zhian, CHEN Zhanyu. Guidance on experimental plant physiology[M]. Changchun: Jilin University Press, 2008.
- [16] 朱建强, 欧光华, 张文英, 等. 涝渍相随对棉花产量与品质的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(9): 1 050-1 056.
- ZHU Jianqiang, OU Guanghua, ZHANG Wenying, et al. Influence of subsurface waterlogging followed by surface waterlogging on yield and quality of cotton[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(9): 1 050-1 056.
- [17] 李佐同, 靳学慧, 张亚玲, 等. 水稻幼苗可溶性糖及可溶性蛋白含量与抗瘟性的关系[J]. 北方水稻, 2009, 39(4): 6-9.
- LI Zuotong, JIN Xuehui, ZHANG Yaling, et al. The relationship between soluble protein, soluble sugar content and rice blast resistance of rice seedlings[J]. North Rice, 2009, 39(4): 6-9.
- [18] 周琴, 董艳, 卞雅姣, 等. 不同渍水时间对苗期和花期大豆生长及碳氮代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1 577-1 584.
- ZHOU Qin, DONG Yan, BIAN Yajiao, et al. Influence of different duration of waterlogging on the growth and C and N metabolism of soybean at seedling and flowering stages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(6): 1 577-1 584.
- [19] 杨长琴, 刘瑞显, 张国伟, 等. 花铃期渍水对棉铃对位蔗糖代谢及铃重的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(5): 908-914.
- YANG Changqin, LIU Ruixian, ZHANG Guowei, et al. Effects of waterlogging on sucrose metabolism of the subtending leaf of cotton boll and boll weight during flowering and boll-forming stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(5): 908-914.
- [20] 姚有华, 白羿雄, 吴昆仑. 亏缺灌溉对藜麦光合特性、营养品质和产量的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(5): 713-722.
- YAO Youhua, BAI Yixiong, WU Kunlun. Effects of deficient irrigation on the photosynthetic characteristics, nutritional quality and yield of quinoa[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2019, 28(5): 713-722.
- [21] 孙云飞, 张文明, 巢建国, 等. 盐胁迫对茅苍术叶绿素含量及叶绿素荧光参数的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(4): 146-149.
- SUN Yunfei, ZHANG Wenming, CHAO Jianguo, et al. Impacts of salt stress on chlorophyll contents and chlorophyll fluorescence parameters of *Atractylodes lancea*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(4): 146-149.
- [22] 高华东, 晏军, 苏荣瑞, 等. 渍水对油菜抽薹期叶片光合参数及产量的影响[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(10): 39-44.
- GAO Huadong, YAN Jun, SU Rongrui, et al. Effects of waterlogging on leaf photosynthetic parameters and yields of oilseed rape at the bolting stage[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2018, 57(10): 39-44.
- [23] 杨威, 朱建强, 吴启侠, 等. 花铃期短期渍水和高温对棉花叶片光合特性、膜脂过氧化代谢及产量的影响[J]. 棉花学报, 2016, 28(5): 504-512.
- YANG Wei, ZHU Jianqiang, WU Qixia, et al. The effect of short-term waterlogging and high temperature on photosynthesis, membrane lipid peroxidation metabolism, and yield during cotton flowering and boll-forming[J]. Cotton Science, 2016, 28(5): 504-512.
- [24] 吴进东, 李金才, 魏凤珍, 等. 花后渍水高温交互效应对冬小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(6): 1 071-1 079.
- WU Jindong, LI Jincai, WEI Fengzhen, et al. Effect of interaction of waterlogging and high temperature after anthesis on photosynthetic

- characteristics of flag leaf and yield in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(6): 1 071-1 079.
- [25] 刘文瑜, 杨发荣, 黄杰, 等. 干旱胁迫对藜麦幼苗生长和叶绿素荧光特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(4): 171-177.
- LIU Wenyu, YANG Farong, HUANG Jie, et al. Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence properties and seedling growth of quinoa seedlings[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(4): 171-177.
- [26] GARCIA M, RAES D, JACOBSEN S E. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian Highlands[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 60(2): 119-134.
- [27] 杨威, 朱建强, 吴启侠, 等. 油菜对渍涝胁迫的响应及排水指标研究[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(10): 27-30.
- YANG Wei, ZHU Jianqiang, WU Qixia, et al. Response of oilseed rape to waterlogging and drainage index determination[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(10): 27-30.

Response of Physiological Traits and Yield of Different Quinoa Cultivars to Waterlogging at Flowering Stage in Saline Soil

YAN Jun, WANG Weiyi, FEI Yueyue, CUI Bibo, SHI Pibiao,
MA Mengmeng, LI Bin, CHEN Manxia, LI Yafang, GU Minfeng*

(Xinyang Experimental Station of Jiangsu Institute of Agricultural Sciences in Coastal Areas, Yancheng 224049, China)

Abstract: 【Background】 Quinoa is a dicotyledonous herbaceous plant in the genus of Chenopodiaceae. It originates from the Andes of South America and can tolerate abiotic stresses induced by low temperature, drought and salinity. FAO consider it the only plant which can meet the essential nutritional requirements of human body. As such, quinoa has attracted increased attention over the past decade, but there is a lack of understanding of how it responds to waterlogging. The eastern coastal areas in China are rich in tidal flats, and given the nutritional value of the quinoa and its high tolerance to abiotic stresses, these tidal flats are ideal places for quinoa in developing sustainable agricultural structure in these regions. 【Objective】 The objective of this paper is to experimentally investigate how different quinoa cultivars in these regions respond to waterlogging occurring at its anthesis stage. 【Method】 The experiments were conducted in pots and compared four cultivars which are abbreviated as SL 21, SL 44, SL 24, SL 45. The waterlogging was instigated at the anthesis stage and lasted for 4, 8 and 12 days respectively, with non-waterlogging taken as the control (CK). In each treatment we measured the physiological and yield traits of the plant, as well as the associated drainage indexes. 【Result】 Increasing waterlogging duration increased MDA of the quinoa leaves but reduced Chl(a+b), SP, SS, photosynthetic parameters (P_n , T_r , G_s , C_i) and chlorophyll fluorescence parameters (F_v/F_o , F_v/F_m). Compared to the CK, waterlogging for four days significantly increased the MDA in all four cultivars and reduced Chl(a+b) and SS in SL21 and SL24, with P_n , F_v/F_o and F_v/F_m not showing significant change. The waterlogging impacted the photosynthetic parameters of SL 24 and SL 45 more significantly than that of SL 21 and SL 44. Compared with the CK, waterlogging for 12 days significantly reduced the physiological indexes of all four cultivars and damaged their physiological metabolism. In terms of yield, the main spike yield of each plant accounted for more than 65% of its total yield. Waterlogging for four days significantly reduced the yield of each plant in the four cultivars, with the yield ranked in the order of SL 44>SL 21>SL 24>SL 45. Waterlogging for 8 days significantly reduced the main spike yield and the 1 000-grain weight; and waterlogging for 12 days failed the branch yield. 【Conclusion】 Among the four cultivars, SL44 is most resistant to waterlogging. For waterlogging occurring at the flowering stage, if taking yield reduction of 15%~20% as the standard for designing the drainage system, the allowable waterlogging duration should be less than 4.1 days.

Key words: quinoa; waterlogging; physiological characteristics; yield; drainage index

责任编辑: 赵宇龙