第 37 卷第 4 期
2019 年 7 月
干 旱 地 区 农 业 研 究
Agricultural Research in the Arid Areas
Vol.37 No.4
Jul. 2019
文章编号:1000-7601(2019)04-0171-07
doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.04.23

干旱胁迫对藜麦幼苗生长和叶绿素荧光特性的影响

刘文瑜[1],杨发荣[1],黄 杰[1],魏玉明[1],李健荣[2]

(1.甘肃省农业科学院畜草与绿色农业研究所,甘肃 兰州 730070;2.宁夏农业技术推广总站,宁夏 银川 750001)

摘 要:以甘肃省农业科学院自育品种陇藜 1 号(L-1)、2 号(L-2)、3 号(L-3)和 4 号(L-4)及外引品种白藜(BL)幼苗为试验材料,采用盆栽人工控水法,共设置轻度干旱胁迫(LD,土壤含水量为田间持水量的 50%~60%)、中度干旱胁迫(MD,土壤含水量为田间持水量的 30%~40%)和重度干旱胁迫(SD,土壤含水量为田间持水量的 10%~20%)3 个水分梯度,以正常浇水为对照(CK,土壤含水量为田间持水量的 70%~80%),干旱胁迫 15 d 后,通过测定幼苗株高、根长、生物量及叶片叶绿素含量、初始荧光(*Fo*)、最大荧光(*Fm*)、PSⅡ最大光化学效率(*Fv/Fm*)、PSⅡ潜在活性(*Fv/Fo*)及非光化学猝灭系数(*NPQ*),研究干旱胁迫对藜麦幼苗生长和叶绿素荧光特性的影响。结果表明:(1)随干旱胁迫程度的加剧,参试藜麦品种幼苗株高、地上部分鲜重和地上部分干重呈逐渐降低的变化趋势,SD 处理下,各供试品种株高分别降低了 30.64%、28.36%、32.67%、37.88%和 38.09%,地上部分鲜重分别下降了 63.60%、6073%、59.74%、55.92%和 61.74%,地上部分干重分别下降了 62.96%、52.63%、29.41%、35.71%和 60.00%;(2)5 个藜麦品种幼苗叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素及叶绿素 a/b 随着干旱胁迫程度的加剧而呈现先升高后降低的趋势,SD 处理下,品种 L-2、L-3 和 L-4 叶绿素 a 分别比 CK 降低了 28.48%、33.66%和 17.99%,叶绿素 b 分别比 CK 降低了 47.80%、45.08%和 13.90%,总叶绿素含量分别比 CK 降低了 33.22%、36.20%和 15.99%;(3)随干旱胁迫程度的加剧,各供试藜麦品种 *Fo*、*Fm*、*Fv/Fm* 和 *Fv/Fo* 均呈下降趋势,SD 处理下,各供试品种 *Fo* 分别较 CK 下降了 30.61%、14.56%、31.28%、24.39%、24.16%,*Fm* 下降了 19.11%、16.56%、16.76%、17.67%、22.19%,*Fv/Fm* 分别下降了 5.73%、4.29%、7.81%、4.58%和 3.85%,*Fv/Fo* 分别下降了 19.40%、14.93%、24.02%、11.34%和 12.11%;(4)5 个供试品种叶片 *NPQ* 随干旱胁迫程度的加剧呈升高趋势,SD 处理下,各供试品种 *NPQ* 较 CK 升高了 74.79%、161.54%、104.55%、200.00%和 196.00%。综上所述说明中度和重度干旱胁迫下,植物细胞失水,叶绿体遭到破坏,光合作用降低,叶绿素合成受到抑制,光合产物减少,从而抑制幼苗生长,地上部分生物量下降。在幼苗生长和叶绿素荧光特性等方面,藜麦品种 L-2 表现优于其他品种,表明其在干旱胁迫下较其他供试品种具有更强的适应能力。

关键词:藜麦;幼苗生长;干旱胁迫;叶绿素荧光;叶绿素含量

中图分类号:S519 **文献标志码**:A

Effects of drought stresson chlorophyll fluorescence properties and seedling growth of quinoa seedlings

LIU Wen-yu[1], YANG Fa-rong[1], HUANG Jie[1], WEI Yu-ming[1], LI Jian-rong[2]

(1.*Institute of Pasture and Green Agriculture*, *Gansu Academy of Agricultural Sciences*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*; 2. *Ningxia Agricultural Technology Extension Station*, *Yinchuan*, *Ningxia* 750001, *China*)

Abstracts: Using quinoa varieties Longli No.1, No.2, No.3, No.4 and Baili seedlings as experimental materials, we conducteda pot experiment with a set of different degreesof drought stress.After 15 days, plant height, root length, biomass, leaf chlorophyll contents, *Fo*, *Fm*, *Fv/Fm*, *Fv/Fo*, and other indexes were determined to study the effects of drought stress on chlorophyll fluorescence properties and seedling growth. The results showed that: (1) with aggravation of drought stress, plant height, aboveground fresh weight, and dryweight decreased compared

收稿日期:2018-06-11 **修回日期**:2018-09-05

基金项目:国家自然科学基金(31660357);甘肃省科技厅重点研发项目(18YF1WA093);兰州市科技支撑计划(2017-2-5);甘肃省农业科学院农业科技创新专项计划(2017GASS66);甘肃省青年科技人才托举工程项目

作者简介:刘文瑜(1985-),女,甘肃兰州人,博士,助理研究员,主要从事作物逆境生态生理研究。E-mail:yu850721.lemon@163.com

通信作者:杨发荣(1964-),男,甘肃宁县人,研究员,主要从事藜麦栽培育种研究。E-mail:lzyfr08@163.com

with CK. The plant height of five quinoa varieties decreased by 30.64%、28.36%、32.67%、37.88%, and 38.09%, respectively, under SD treatment.The aboveground fresh weight decreased by 63.60%,6073%, 59.74%,55.92%, and 61.74%, respectively, and the aboveground dry weight decreased by 62.96%,52.63%, 29.41%, 35.71%and 60.00%, respectively. Root length, underground fresh weight, and drought weight increased and then decreased. (2) The contents of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll, and chlorophyll a/b of five different quinoa varieties seedlings increased and then decreased, unde SD treatment, the contents of chl a in quinoa variety of 'L-2','L-3' and 'L-4' were decreased 28.48%,33.66% and 17.99%, the contents of chl b were decreased 47.80%,45.08% and 13.90%, the chl contents were decreased 33.22%,36.20% and 15.99. (3) With aggravation of drought stress, *Fo* , *Fm Fv/Fm* and *Fv/Fo* of quinoa seedlings leaves decreased compared with CK, *Fo* decreased by 30.61%,14.56%, 31.28%,24.39%,24.16% and *Fm* decreased 19.11%,16.56%,16.76%,17.67%,22.19% under SD treatment,respectively. *Fv/Fm* and *Fv/Fo* of different quinoa varieties were also decreased with the aggravation of drought stress, compared with CK, *Fv/Fm* and *Fv/Fo* decreased by 5.73%,4.29%,7.81%,4.58%,3.85% and 19.40%,14.93%,24.02%, 11.34%,12.11%under SD treatments, respectively. (4) *NPQ* of different quinoa varieties increased compared with CK.It increased by 74.79%,161.54%,104.55%,200.00%, and 196.00%under SD treatments,respectively. In conclusion, because chloroplast was damaged, chlorophyll biosynthesis was inhibited and photosynthetic yield reduced, seedling growth was inhibited and aboveground biomass decreased. In aspects of seedling growth and chlorophyll fluorescence properties in seedling leaves of different quinoa varieties, the performance of quinoa variety L-2 was better than other varieties, so indicated that Longli No.2 had a stronger ability to adapt the drought stress.

Keywords: quinoa; seedling growth; drought stress; chlorophyll fluorescence; chlorophyll content

干旱是当前制约全球农业生产发展的一个严峻问题,特别是随着全球气候变化和水资源匮乏而引起的干旱强度和频率增加已成为限制农业生产高效发展的重要因素之一[1]。干旱胁迫下植物光合作用和光合能力下降[2]。此种情况下,由于植物不能将过量的光能用于光合作用,因此增加了植物对光抑制的敏感度[3]。干旱胁迫可通过影响作物农艺性状、形态特征、生理生化指标及代谢物含量等,最终使得产量降低[4-5]。叶绿素荧光动力学参数被视为揭示植物光合作用与环境关系的内在探针[6-7],是研究植物光合生理与干旱胁迫关系的有力证据[7-8]。前人对水稻[9]、棉花[10]、玉米[11]、马铃薯[12]等作物研究发现,干旱胁迫下水稻超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)活性升高,丙二醛(MDA)含量有一定程度的降低;叶绿素荧光参数(如最小荧光(*Fo*)、非光化学猝灭系数(*NPQ*)等)随干旱胁迫的持续加剧而升高,最大光化学效率(*Fv/Fm*)随干旱胁迫持续加剧而下降。但有关干旱胁迫对藜麦叶绿素荧光特性的影响尚未见报道。

藜麦是原产于南美洲安第斯山区的苋科藜亚科藜属一年生双子叶草本植物[13]。藜麦的原产国主要有秘鲁、玻利维亚、厄瓜多尔、智利、巴西等[14],目前,在甘肃、青海、山西、浙江等省均有种植[15]。藜麦籽粒富含多种营养物质,其蛋白质含量高达16%~22%,另外含有 9 种人体必需氨基酸及矿物质、维生素、膳食纤维等,且低脂、低糖、不含胆固醇和麸质[16]。近年来,有关藜麦的研究主要集中于其耐盐生理[17]、功能成分提取[18]及遗传多样性[19]等方面,而鲜见有关干旱胁迫对其影响的报道。

甘肃省地处黄土高原,水资源匮乏,山旱地占耕地面积的 70%,且省内缺乏可种植的耐旱作物品种。藜麦具有耐寒、耐旱、耐盐碱及耐瘠薄的生物学特性,适宜在甘肃省种植,但不同品种的耐旱性不同。本试验以甘肃省栽培的 5 个藜麦品种为材料,采用盆栽控水法,设置轻度干旱胁迫(土壤含水量为田间持水量的 50%~60%)、中度干旱胁迫(土壤含水量为田间持水量的 30%~40%)、重度干旱胁迫(土壤含水量为田间持水量的 10%~20%),以正常浇水为对照(CK,土壤含水量为田间持水量的 70%~80%),处理 15 d 后,通过测定幼苗株高、根长、地上部分鲜重、干重、地下部分鲜重、干重等生长指标及初始荧光、最大荧光、可变荧光等叶片叶绿素荧光参数,探究干旱胁迫对不同品种藜麦幼苗生长和叶绿素荧光特性的影响,以期初步明确藜麦幼苗叶片响应干旱胁迫的光合生理机制,筛选出耐旱性好的藜麦品种。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料 5 份,均来自甘肃省农业科学院畜草与绿色农业研究所,其中陇藜 1 号(L-1)、陇藜 2 号

(L-2)、陇藜 3 号(L-3)和陇藜 4 号(L-4)为该所自育品种，白藜(BL)为外引品种，千粒重分别为 2.49、2.72、2.97、2.85 g 和 2.78 g。

1.2　试验设计

试验于 2017 年 3 月在甘肃省农业科学院温室及畜草与绿色农业研究所实验室进行。供试土壤为营养土，土壤基础养分为全氮 0.95 g · kg^{-1}、全磷 0.93 g · kg^{-1}、碱解氮 87.5 mg · kg^{-1}，速效磷 10.9 mg · kg^{-1}，速效钾 107.5 mg · kg^{-1}，有机质 40.5 g · kg^{-1}，播种前不施肥，试验期内不追肥。挑选饱满、大小一致且无病虫害的 L-1、L-2、L-3、L-4 及 BL 藜麦种子播种于装有 2 kg 营养土的花盆中，每盆播种 50 粒，播种后覆蛭石，放置于温室中，正常浇水。待幼苗长至 6~8 叶期时进行定苗，每盆留苗 10 株，并进行干旱胁迫处理，试验共设 3 个干旱胁迫梯度，分别为轻度干旱胁迫(LD，土壤含水量为田间持水量的 50%~60%)、中度干旱胁迫(MD，土壤含水量为田间持水量的 30%~40%)、重度干旱胁迫(SD，土壤含水量为田间持水量的 10%~20%)，以正常浇水为对照(CK，土壤含水量为田间持水量的 70%~80%)。每个处理重复 3 次，每 24 h 采用称重法补充各盆栽的水分。于处理后的 15 d 分别取全株及叶片进行生长指标及叶绿素含量的测定。

1.3　测定指标

1.3.1　生物量　干旱胁迫处理 15 d 后，将植株连根取出，洗净根部泥土，后用滤纸吸干根部及叶面水分，将其分成地上和地下两部分，分别用直尺测定其株高、根长、地上部分及地下部分鲜重。然后将植株鲜样放入 105℃ 烘箱中杀青 15 min 后，在 70℃ 下烘至恒重，取出分别测定其地上部分和地下部分干重。每个指标重复测定 5 次。

1.3.2　叶绿素含量　取植株从上向下数第 2 片新展开叶片，用乙醇丙酮法[20]测定叶绿素含量。

1.3.3　叶绿素荧光参数　使用 FluorPen 1.0.5.1 荧光仪测定叶绿素荧光参数，选取幼苗植株顶部新展开叶片 3 片，暗适应 30 min 后，测定初始荧光(*Fo*)，最大荧光(*Fm*)，PSⅡ最大光化学效率(*Fv/Fm*)和非光化学猝灭系数(*NPQ*)。

1.4　数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 整理数据并作图，结果以“平均值 ±标准误”表示，采用 SPSS 17.0 对数据进行方差分析。

2　结果与分析

2.1　干旱胁迫对藜麦幼苗生长的影响

随干旱胁迫程度的加剧，5 个藜麦品种幼苗的株高和地上部分生物量均呈逐渐降低的趋势，因品种不同，降低幅度不同(表 1)。与对照 CK 相比，LD 处理对藜麦地上部分生长影响较小，5 个藜麦品种幼苗的株高仅分别下降了 0.73%、2.94%、3.41%、10.38% 和 3.27%，地上部分鲜重分别下降了 23.55%、5.94%、19.48%、5.92%和 11.41%，地上部分干重分别下降了 22.22%、10.53%、5.88%、14.29%和 24.00%；SD 处理下，藜麦幼苗萎蔫，叶片卷曲，地上部分生长受到抑制，5 个藜麦品种幼苗的株高分别下降了 30.64%、28.36%、32.67%、37.88%和38.09%，地上部分鲜重分别下降了 63.60%、6073%、59.74%、55.92% 和 61.74%，地上部分干重分别下降了 62.96%、52.63%、29.41%、35.71%和 60.00%。

另外，随干旱胁迫程度的加剧，5 个藜麦品种幼苗的根长逐渐增加，而地下部分生物量呈先升高后下降的趋势，因品种不同，变化程度不同(表 1)。LD 处理促进藜麦幼根的生长及地下部分生物量的积累，与 CK 相比，5 个藜麦品种幼苗的根长分别升高了 7.47%、17.33%、14.17%、27.29% 和 3.53%，地下部分鲜重分别升高了 7.14%、12.50%、40.86%、42.86% 和 5.00%，地下部分干重分别升高了 14.29%、14.29%、44.44%、100.00% 和 100.00%。SD 处理下虽促进藜麦根部的生长，但是生物量的积累受到抑制，与 CK 相比，5 个藜麦品种幼苗的地下部分鲜重分别下降了 71.83%、71.43%、57.14%、42.86% 和 50.00%，地下部分干重分别下降了 42.86%、41.67%、44.44%、12.50%和 85.71%。

2.2　干旱胁迫对藜麦幼苗叶片叶绿素含量的影响

如图 1 所示，随着干旱胁迫程度的加剧，5 个藜麦品种幼苗叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量均呈现先升高后下降的变化趋势。LD 和 MD 处理下，均能促进叶绿素的积累，且在 MD 处理下 5 个藜麦品种的幼苗叶片上述各指标均达到最大值，其中叶绿素 a 分别比 CK 升高了 38.93%、41.26%、8.56%、13.89%和 70.77%，叶绿素 b 分别比 CK 升高了 30.49%、2.69%、34.88%、23.19%和100.50%，总叶绿素含量分别比 CK 升高了 84.36%、31.81%、7.43%、17.07%和 26.91%；SD 处理下，5 个藜麦品种中 L-2、L-3 和 L-4 材料的幼苗叶片叶色变黄，叶绿素含量下降，其中叶绿素 a 分别比 CK 降低了 28.48%、33.66%和 17.99%，叶绿素 b 分别比 CK 降低了 47.80%、45.08%和 13.90%，总叶绿素含量分别比 CK 降低了 33.22%、36.20%和 15.99%，而 L-1 和 BL 藜麦幼苗叶片叶绿素含量升高，分别比 CK 升高了 29.4%和 14.29%。

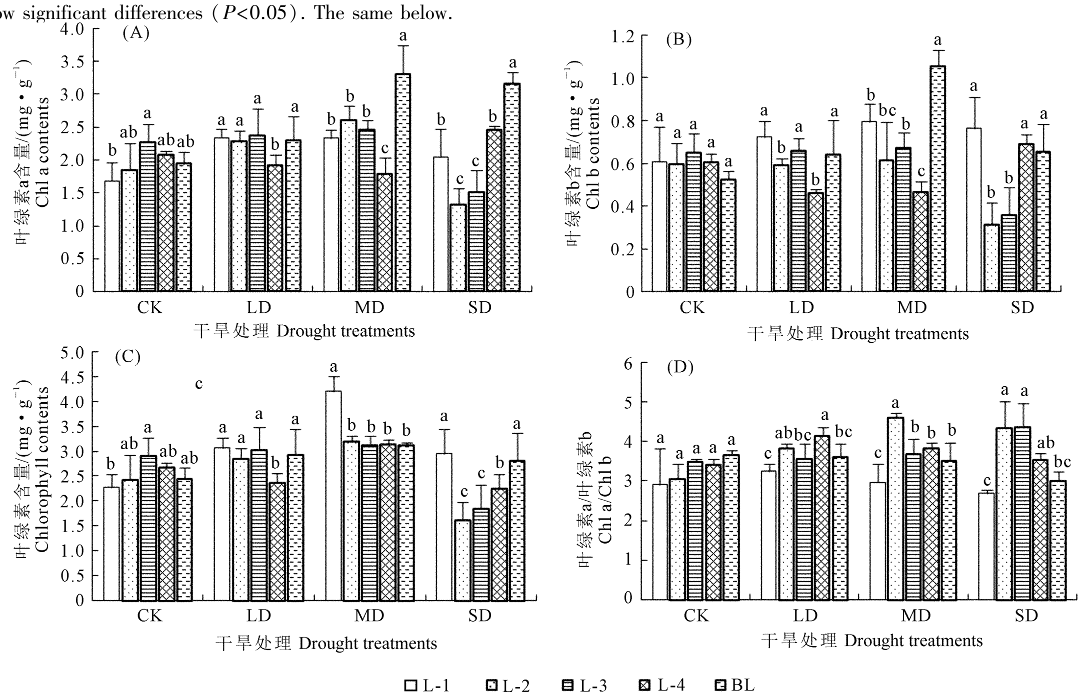
表1 干旱胁迫对藜麦幼苗生长的影响

Table 1 Effects of drought stress on seedling growth of quinoa

指标 Index	品种 Variety	干旱处理 Drought treatment			
		CK	LD	MD	SD
株高/cm Stem height	L-1	23.17±0.65a	23.00±0.50a	19.53±0.87a	16.07±1.76a
	L-2	21.40±0.72b	20.77±1.53ab	20.33±1.56a	15.33±1.19ab
	L-3	21.67±0.76b	20.93±2.27ab	18.37±1.50a	14.57±0.92ab
	L-4	21.20±0.00b	19.00±0.70b	18.43±0.67a	13.17±1.70b
	BL	21.37±0.32b	20.67±0.57ab	18.83±0.87a	13.23±1.08b
根长/cm Root length	L-1	8.87±0.70a	9.50±0.40a	10.83±0.71a	12.20±0.46a
	L-2	5.77±0.91c	6.77±0.64b	7.53±1.12c	10.47±0.81b
	L-3	6.07±0.06c	6.93±0.60b	7.20±0.79c	8.70±0.61c
	L-4	5.13±0.61c	6.53±1.00b	6.97±0.96c	8.97±1.25c
	BL	7.37±0.46b	7.63±0.57b	9.33±0.61b	9.77±0.46bc
地上部分鲜重/g Aboveground fresh weight	L-1	2.73±0.28a	2.36±0.08a	1.22±0.16a	0.99±0.16a
	L-2	2.19±0.11b	2.06±0.37b	1.44±0.22a	0.86±0.25ab
	L-3	1.54±0.31c	1.51±0.26b	1.46±0.42a	0.62±0.09b
	L-4	1.52±0.16c	1.43±0.21b	1.21±0.16a	0.67±0.10b
	BL	1.49±0.18c	1.32±0.30b	1.12±0.13a	0.57±0.19b
地下部分鲜重/g Underground fresh weight	L-1	0.14±0.00a	0.15±0.01a	0.10±0.02a	0.04±0.00a
	L-2	0.08±0.00b	0.09±0.02b	0.07±0.00b	0.03±0.00b
	L-3	0.07±0.01c	0.10±0.01b	0.06±0.02b	0.03±0.01b
	L-4	0.07±0.00c	0.10±0.00b	0.07±0.00b	0.04±0.01a
	BL	0.06±0.00c	0.09±0.02b	0.05±0.01b	0.03±0.00b
地上部分干重/g Aboveground dry weight	L-1	0.27±0.03a	0.21±0.00a	0.14±0.02ab	0.10±0.01ab
	L-2	0.19±0.02b	0.17±0.01c	0.12±0.00b	0.09±0.00b
	L-3	0.17±0.01bc	0.16±0.01c	0.16±0.02a	0.12±0.02a
	L-4	0.14±0.01c	0.12±0.02d	0.12±0.01ab	0.09±0.10b
	BL	0.25±0.02a	0.19±0.00b	0.15±0.03ab	0.10±0.02ab
地下部分干重/g Underground dry weight	L-1	0.014±0.00a	0.016±0.00a	0.012±0.00ab	0.008±0.00a
	L-2	0.012±0.00a	0.014±0.00a	0.011±0.00abc	0.007±0.00a
	L-3	0.009±0.00b	0.013±0.00a	0.009±0.00bc	0.005±0.00a
	L-4	0.008±0.00b	0.016±0.00a	0.013±0.00a	0.007±0.00a
	BL	0.007±0.00b	0.014±0.00a	0.007±0.00c	0.001±0.00a

注:CK、LD、MD、SD分别为土壤含水量为田间持水量的70%~80%、50%~60%、30%~40%和10%~20%;L-1、L-2、L-3、L-4、BL分别为陇藜1号、2号、3号、4号和白藜。同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。下同。

Note: CK, LD, MD, SD indicate that the soil moisture content is 70%~80%, 50%~60%, 30%~40% and 10%~20% of the field water holding capacity, respectively; L-1, L-2, L-3, L-4, BL indicate that Longli No.1, No.2, No.3, No.4 and white quinoa, separately. Different letters in the same column show significant differences (P<0.05). The same below.



注:不同字母表示相同处理不同品种间差异显著(P<0.05),下同。

Note: Different letters indicate that there are significant differences among different quinoa varieties under the same treatment (P<0.05), the same below.

图1 干旱胁迫下藜麦幼苗叶片叶绿素含量的变化

Fig.1 Effects of drought stress on the contents of chlorophyll of quinoa seedlings

综上所述，轻度干旱胁迫和中度干旱胁迫促进了不同藜麦品种幼苗叶片叶绿素的积累，重度干旱胁迫下部分藜麦品种的幼苗叶片失水，细胞受损，叶绿素合成受到抑制，但品种 L-1 和 BL 叶片叶绿素含量升高，且 L-1 的升高幅度大于 BL，说明 L-1 的耐旱性强于其它 4 个品种。

2.3 干旱胁迫对藜麦幼苗叶片叶绿素初始荧光和最大荧光产量的影响

如图 2A 所示，与对照 CK 相比，随着干旱胁迫程度的加剧，5 个藜麦品种幼苗叶片叶绿素初始荧光 *Fo* 逐渐降低。LD 处理下，除藜麦品种 L-2 外，其余 4 个藜麦品种叶片叶绿素初始荧光 *Fo* 较 CK 分别降低了 10.92%、12.50%、6.66%和 13.70%，各品种间差异不显著（$P>0.05$）。MD 处理下，5 个藜麦品种叶片叶绿素 *Fo* 较 CK 降幅较大，分别降低了 15.16%、6.85%、16.47%、13.94%和 21.10%。SD 处理下，5 个藜麦品种叶片叶绿素 *Fo* 值最小，较 CK 分别降低了 30.61%、14.56%、31.28%、24.39%和 24.16%，且 L-2、BL 与其它 3 个品种间差异显著。

如图 2B 所示，随干旱胁迫程度的加剧，供试藜麦品种叶片叶绿素最大荧光 *Fm* 逐渐降低。LD 处理下，供试藜麦品种叶片叶绿素 *Fm* 较 CK 降幅较小，分别降低了 6.03%、5.1%、5.46%、3.52%和 5.59%。MD 处理下，供试藜麦品种叶片叶绿素 *Fm* 降低，L-1、L-3 与其他 3 个品种间差异显著（$P<0.05$），而 L-2、L-4 和 BL 间差异不显著（$P>0.05$），其中 BL 降幅较大，较 CK 降低了 20.34%。SD 处理下，供试藜麦品种叶片叶绿素 *Fm* 最低，较 CK 分别下降了19.11%、16.56%、16.76%、17.67%和 22.19%，品种 L-1 和 L-2 间差异显著（$P<0.05$），而 L-1 与 L-3 及 L-4 与 BL 间差异不显著（$P>0.05$）。

2.4 干旱胁迫对藜麦叶片PSⅡ最大光化学效率的影响

如图 3 所示，随干旱胁迫程度的加剧，藜麦各供试品种叶片 PSⅡ最大光化学效率（*Fv/Fm*）较 CK 均逐渐降低。LD 处理下，L-1、L-2、L-3、L-4 和 BL 品种叶片 *Fv/Fm* 较 CK 分别下降了 2.64%、1.01%、4.47%、3.19%和 2.68%。MD 处理下，上述 5 个供试品种叶片 *Fv/Fm* 较 CK 分别降低了 3.54%、1.59%、4.79%、3.93%和3.43%，L-1 与其他 4 个品种间差异显著（$P<0.05$），而 L-2 与 BL 及 L-3 与 L-4 间差异不显著（$P>0.05$）。SD 处理下，上述 5 个供试品种叶片 *Fv/Fm* 最低，较 CK 分别降低了 5.73%、4.29%、7.81%、4.58%和3.85%，L-1 与其他品种间差异显著（$P<0.05$）。

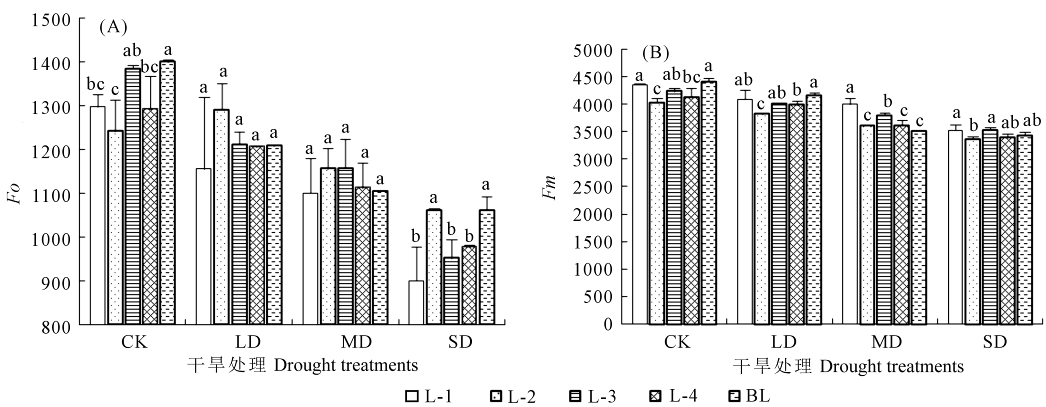


图 2　干旱胁迫对藜麦幼苗叶片叶绿素初始荧光（*Fo*）和最大荧光（*Fm*）的影响

Fig.2　Effects of drought stress on *Fo* and *Fm* of quinoa leaves

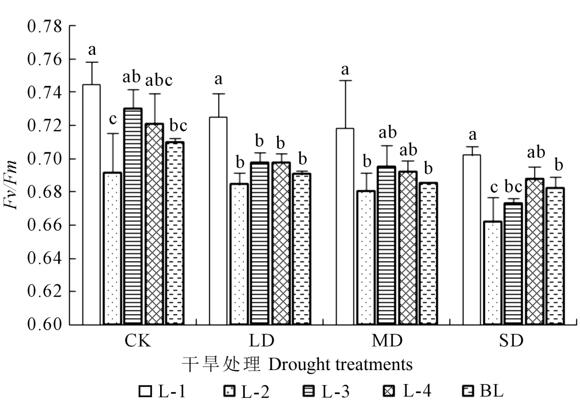


图 3　干旱胁迫对藜麦幼苗叶片PSⅡ最大光化学效率的影响

Fig.3　Effects of drought stress on *Fv/Fm* of quinoa leaves

2.5 干旱胁迫对藜麦叶片 PSⅡ潜在活性的影响

如图 4 所示，随着干旱胁迫程度的加剧，5 个供试藜麦品种叶片 PSⅡ潜在活性（*Fv/Fo*）较 CK 均降低。LD 处理下，藜麦品种 L-1、L-2、L-3、L-4 和 BL 叶片 *Fv/Fo* 较 CK 降低了 9.83%、6.13%、14.90%、7.12%和 8.76%，L-1 与其他品种间差异显著（$P<0.05$）。MD 处理下，5 个供试藜麦品种叶片 *Fv/Fo* 呈降低趋势，较 CK 降低了 11.93%、7.72%、15.59%、9.38%和 10.85%，品种 L-1 与 L-3 和 BL 间差异显著（$P<0.05$），而 L-2 与 BL 及 L-3 与 L-4 间差异不显著（$P>0.05$）。SD 处理下，藜麦品种 L-

1、L-2、L-3、L-4 和 BL 叶片 *Fv/Fo* 最低，较 CK 分别降低了 19.40%、14.93%、24.02%、11.34% 和 12.11%。

2.6 干旱胁迫对藜麦叶片 PSⅡ非光化学猝灭系数的影响

由图5可知，随着干旱胁迫程度的加剧，供试藜麦品种叶片 PSⅡ非光化学猝灭系数(*NPQ*)呈逐渐升高的变化趋势。LD 处理下，各供试品种叶片 *NPQ* 较 CK 升高，其中藜麦品种 L-4 和 BL 增幅明显，分别较 CK 升高了 87.95% 和 154.67%。MD 处理下，各供试藜麦品种叶片 *NPQ* 较 CK 增幅明显，分别升高了 61.34%、57.69%、65.91%、162.65% 和 173.33%。SD 处理下，各供试藜麦品种叶片 *NPQ* 达到最大，分别较 CK 升高了 74.79%、161.54%、104.55%、200.00% 和 196.00%。

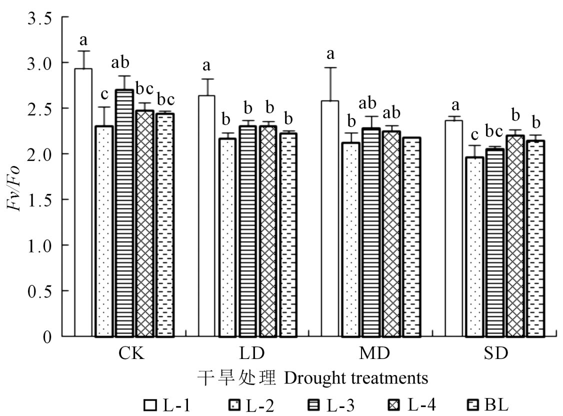


图4 干旱胁迫对藜麦幼苗叶片 PSⅡ潜在活性的影响

Fig.4 Effects of drought stress on *Fv/Fo* of quinoa leaves

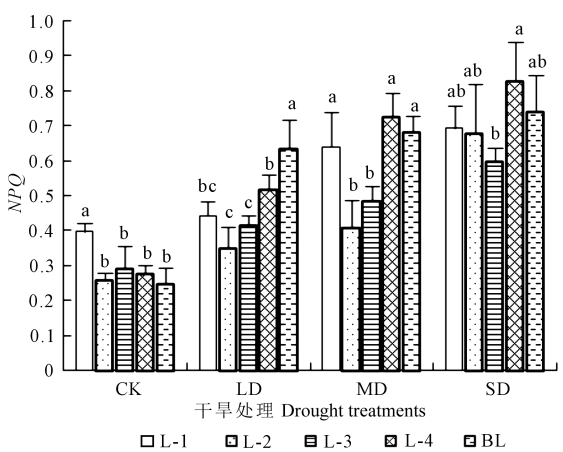


图5 干旱胁迫对藜麦幼苗叶片 PSⅡ非光化学猝灭系数的影响

Fig.5 Effects of drought stress on *NPQ* of quinoa leaves

3 讨论

3.1 藜麦幼苗生长和叶绿素含量对干旱胁迫的响应

水是植物生命之源，是物质合成、转化和运输的载体[21]。光合作用是绿色植物体内有机物质和能量的最终来源，是植物生物产量形成和生理代谢的基础，而水分是影响光合作用的重要因素[22-23]。高等植物生长进程中，对干旱胁迫最敏感的过程是光合作用[24]。植物叶片叶绿素含量的变化能够反映植物对水分胁迫的敏感性，并直接影响光合产量[25-26]。张彦妮等[27]研究表明当黄连花幼苗受到干旱胁迫影响时，幼苗株高降低，叶绿素含量减少。刘建新等[28]研究表明干旱胁迫处理下燕麦幼苗生物量降低。罗杰等[26]研究表明随着干旱胁迫时间的延长和胁迫程度的加剧，润楠幼苗叶片叶绿素 a，叶绿素 b 及叶绿素 a/b 呈先增加后降低的趋势。本试验结果发现随着干旱胁迫程度的加剧，供试各品种藜麦幼苗株高和地上部分生物量降低，而根长和地下部分生物量先增加后降低，LD 处理促进幼苗根的生长及生物量的积累。5个品种藜麦幼苗叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素及叶绿素 a/b 随着干旱胁迫程度的加剧而呈现先升高后降低的趋势。分析其原因主要是中度和重度干旱胁迫下，植物细胞失水，叶绿体遭到破坏，光合作用降低，叶绿素合成受到抑制，光合产物减少，从而抑制幼苗生长，地上部分生物量下降。

3.2 藜麦幼苗叶绿素荧光特性对干旱胁迫的响应

叶绿素荧光作为光合作用的探针，不仅能够反映光能吸收、激发能传递和光化学反应等光合作用过程，而且与 ATP 合成和 CO_2 固定等过程密切相关，几乎所有光合作用过程的变化均可通过叶绿素荧光表现出来。当环境变化时，叶绿素荧光的变化可在一定程度上反映环境因子对植物的影响[29]。在叶绿素荧光参数中，*Fo* 是测量光下荧光强度，它可以反映 PSⅡ天线色素内的最初激发子密度、天线色素之间以及天线色素到 PSⅡ反应中心的激发能传递几率的结构状态[30-31]；*Fv/Fm* 可代表 PSⅡ原始光能转化效率，其下降表明 PSⅡ反应中心受到损伤，植物受到光抑制[23,32]；非光化学猝灭系数 *NPQ* 反映了天线色素吸收的光能能否用于光化学电子传递，而用于热耗散的部分[23,33]。杨霞等[34]研究表明，干旱胁迫下，供试品种的非顺序衰老小麦旗叶 PSⅡ实际光化学效率、*Fv/Fm*、*Fv/Fo* 均呈下降趋势。路之娟等[35]采用盆栽控水法研究表明，随干旱

胁迫的加剧，参试苦荞品种叶片 *Fv/Fm* 和 *Fv/Fo* 均下降，不同品种下降幅度不同。Guo 等[36]研究表明随干旱胁迫程度的加剧，黑果枸杞叶片 *Fo* 和 *Fv/Fm* 呈下降趋势，*NPQ* 呈升高趋势。本试验研究发现，随干旱胁迫程度的加剧，各供试藜麦品种 *Fo*、*Fm*、*Fv/Fm* 和 *Fv/Fo* 均呈下降趋势，其中藜麦品种 L-2 下降幅度较小，而 L-3 下降幅度较大；另外，5 个供试品种叶片 NPQ 随干旱胁迫程度的加剧呈升高趋势，L-2 升高幅度较小，BL 升高幅度较大。说明 L-2 叶片 PSⅡ反应中心受干旱胁迫影响较小，而 L-3 和 BL 受干旱胁迫影响较大，初步推断品种 L-2 耐旱性强于其余 4 个供试品种，5 个供试品种中 L-3 和 BL 耐旱性较差。

参 考 文 献：

[1] 邵瑞鑫，李蕾蕾，郑会芳，等.外源一氧化氮对干旱胁迫下玉米幼苗光合作用的影响[J].中国农业科学，2016，49(2)：251-259.

[2] Dias M C，Bruggemann W. Limitations of photosynthesis in Phaseolus vulgaris under drought stress：gas exchange，chlorophyllfluorescence and Calvin cycle enzymes[J]. Photosynthetica，2010，48(1)：96-102.

[3] Flexas J，Medrano H. Drought-inhibition of photosynthesis in C3 plants：stomatal and non-stomatal limitation revisited[J]. Annuals of Botany，2002，89(2)：183-189.

[4] Cochard H，Coll L，Roux XL，et al. Unraveling theeffects of plant hydraulics on stomatal closer during water stressin walnut[J]. Plant Physiology，2002，128：282-290.

[5] Pour-Aboughadareh A，Ahmadi J，Mehriabi A A，et al. Physiological responses to drought stress in wild relativesof wheat：implications for wheat improvement [J]. Acta Physiologiae Plantarum，2017，39(4)：106-122.

[6] 张雷明，上官周平，毛明策.长期施氮对旱地小麦灌浆期叶绿素荧光参数的影响[J].应用生态学报，2003，14(5)：695-698.

[7] 董果，戴勐，赵勇，等.侧柏叶温及叶绿素荧光特性对土壤水分胁迫的响应[J].中国水土保持科学，2014，12(1)：68-74.

[8] 李绍长，胡昌浩，龚江.低磷胁迫对磷不同利用效率玉米叶绿素荧光参数的影响[J].作物学报，2004，30 (4)：365-370.

[9] 刘海艳，杨丽洁，丁艳锋，等.NO 对水稻孕穗期干旱胁迫下叶片光合及产量的影响[J].南京农业大学学报，2017，40(2)：195-202.

[10] 解卫海，马淑杰，祁琳，等. Na^+吸收对干旱导致的棉花叶片光合系统损伤的缓解作用[J].生态学报，2015，35 (19)：6549-6556.

[11] 孙杨，吴春胜，谷岩.氮肥对半干旱区膜下滴灌玉米叶片叶绿素荧光特性及产量的影响[J].玉米科学，2017，25(1)：133-138，146.

[12] 卢福顺，石瑛，王风义.干旱和复水对马铃薯叶绿素荧光参数的影响[J]. 中国马铃薯，2013，27(4)：203-207.

[13] 黄杰，杨发荣，李敏权，等.13 个藜麦材料在甘肃临夏旱作区适应性的初步评价[J]. 草业学报，2016，25(3)：191-201.

[14] 黄杰，刘文瑜，魏玉明，等.4 个藜麦品种在陇东旱作区幼苗生长量及生理生化指标分析[J].甘肃农业科技，2017，(10)：35-38.

[15] 刘文瑜，杨发荣，黄杰，等.NaCl 胁迫对藜麦幼苗生长和抗氧化酶活性的影响[J].西北植物学报，2017，37(9)：1797-1804.

[16] 杨发荣，刘文瑜，黄杰，等.不同藜麦品种对盐胁迫的生理响应及耐盐性评价[J].草业学报，2017，26(12)：77-88.

[17] 杨宏伟，刘文瑜，沈宝云，等.NaCl 胁迫对藜麦种子萌发和幼苗生理特性的影响[J].草业学报，2017，26(8)：146-153.

[18] 冯焕琴，徐雪风，杨宏伟，等.藜麦种子皂苷不同提取方法的比较研究[J].食品工业科技，2016，37 (21)：216-222.

[19] 陆敏佳，蒋玉蓉，陆国权，等.利用 SSR 标记分析藜麦品种的遗传多样性[J].核农学报，2015，29(2)：0260-0269.

[20] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京：高等教育出版社，2002：62-174.

[21] 谢瑞娟，张小晶，刘金平，等.遮阴和干旱对莩草光合特性影响的协同作用[J].草业学报，2017，26(10)：64-76.

[22] Reddy A R，Chaitanya K V，Virekanandan M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants [J]. Journal of Plant Physiology，2004，161(1)：1189-1202.

[23] 田又升，谢宗铭，张建新，等.干旱复水对棉花苗期抗氧化系统及光合荧光参数的影响[J].干旱地区农业研究，2016，34(6)：209-214.

[24] Mo Y，Yang R，Liu L，et al. Growth，photosynthesis and adaptive responses of wild and domesticated watermelon genotypes to drought stress and subsequent re-watering[J]. Plant Growth Regulation，2016，79(2)：229-241.

[25] 邹春静，韩士杰，徐文铎，等.沙地云杉生态型对干旱胁迫的生理生态响应[J].应用生态学报，2003，14(9)：1446-1550.

[26] 罗杰，周光良，胡庭兴，等.干旱胁迫对润楠幼苗生长和生理生化指标的影响[J].应用与环境生物学报，2015，21(3)：563-570.

[27] 张彦妮，雷蕾，夏斌.干旱胁迫及复水对黄连花幼苗生长和生理特性的影响[J].草业科学，2016，33 (9)：1681-1689.

[28] 刘建新，王金成，王瑞娟，等.干旱胁迫下一氧化氮对燕麦幼苗生长和生理特性的影响[J].中国草地学报，2015，37 (2)：41-45.

[29] 吴金芝，王志敏，李友军，等.不同冬小麦品种旗叶叶绿素荧光特性及其对干旱胁迫的响应[J].麦类作物学报，2015，35(5)：699-706.

[30] 卢从明，张其德，匡廷云.水分胁迫对小麦光系统Ⅱ的影响[J].植物学报，1994，36(2)：93-98.

[31] 周宇飞，王德权，陆章镳，等.干旱胁迫对持绿性高粱光合特性和内源激素 ABA、CTK 含量的影响[J].中国农业科学，2014，47(4)：655-663.

[32] 陈友根，陈劲枫，李为观.甜瓜属不同倍性异源多倍体光合特性及超微结构研究[J].南京农业大学学报，2010，33(1)：32-36.

[33] 丁在松，王春艳，关东明，等.旱稻×稗草杂交后代 YF2.1 光合作用气体交换、叶绿素荧光和抗氧化酶系统对渗透胁迫的响应[J].作物学报，2011，37(5)：876-881.

[34] 杨霞，李毅博，白月梅，等.干旱条件下叶片飞顺序衰老小麦顶二叶叶绿素荧光特性[J].干旱地区农业研究，2016，34(1)：173-179.

[35] 路之娟，张永清，张楚，等.水分胁迫对不同基因型苦荞苗期根系生理特性及产量的影响[J].干旱地农业研究，2018，36(2)：124-130，136.

[36] Guo Y Y，Yu H Y，Kong D S，et al. Effects of drought stress on growth and chlorophyll fluorescence of *Lyciumruthenicum Murr*. Seedlings[J]. Photosynthetica，2016，54(4)：524-531.