

气温升高与干旱胁迫对灵武长枣 叶绿素荧光特性的影响

秦 芳, 曹 兵, 宋 丽 华

(宁夏大学 农学院, 宁夏 银川 750021)

摘 要:以 4 年生灵武长枣为试材,采用红外线辐射器控制模拟增温环境、土壤自动灌溉系统控制土壤水分水平,设置 2 个大气温度水平、3 个土壤水分水平的 6 个组合,处理灵武长枣植株,测定其叶绿素荧光动力学参数,研究灵武长枣在日间气温升高与土壤干旱胁迫长期交互处理下叶绿素荧光参数的变化。结果表明:处理 40 d 时,灵武长枣在大气温度增高 2 ℃ 左右的环境下,随着土壤干旱水平的加剧,初始荧光(F_0)、原初光能转化率(F_v/F_m)和 PSII 的潜在活性(F_v/F_0)、光化学猝灭系数(q_P)均有下降趋势;处理 80 d 时,增温环境下,随着土壤干旱水平的加剧, F_0 有升高趋势,而 F_v/F_m 、 F_v/F_0 明显下降,相对电子传递速率(ETR)呈先升高后降低的趋势,而非光化学猝灭系数(NPQ)随处理时间的延长始终高于常温环境。因此,气温升高 2 ℃ 左右可缓解灵武长枣因土壤干旱引起的光抑制和电子传递速率的下降,并能提高土壤干旱胁迫下灵武长枣的光保护能力。

关键词:气温升高;干旱胁迫;灵武长枣;叶绿素荧光动力学参数

中图分类号:S 665.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)15-0005-06

因大气 CO_2 浓度升高所导致的“温室效应”使大气温度以每 10 年 0.2~0.3 ℃ 的幅度增加^[1],据预测,到 21 世纪末,气温将升高 1.5~4.5 ℃^[2]。温度是大多数植物生长发育的主要驱动因子,气候变暖加速了植物的生育

进程,影响植物的光合作用与形态生长,气候变化对植物生长与生理的影响受到极大关注^[3-6]。全球气候变暖将使不同地区的降水格局发生变化,水资源增加或减少^[7]。西北地区是我国生态环境的脆弱区,干旱是最大的限制性因子,随着气温的升高,土壤蒸发有可能增加,可能使得干旱化趋势更加严重^[3]。宁夏地区的气候在全球气候变化的背景下也发生了显著变化。40 多年来,宁夏的年平均气温在波动中持续上升,增温幅度高于全国平均值,宁夏秋季降水有下降趋势,冬季降水存在上升趋势,宁夏气候有变干的趋势^[8]。

随着温度的上升,植物的株高、地径、分枝数、总生

第一作者简介:秦芳(1993-),女,硕士研究生,研究方向为果树栽培生理。E-mail:1358053881@qq.com.

责任作者:宋丽华(1969-),女,硕士,教授,硕士生导师,现主要从事旱区造林和经济林栽培等教学与研究工作。E-mail:slh382@126.com.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31260171)。

收稿日期:2016-04-15

Abstract: Applied the meteorological, cherry production data of Bai Luyuan, Hong Qing mountain in Baqiao and surroundings, through methods of short-term meteorological data revision, gross solar radiation calculation and climate yield, formed climate analysis database of Baqiao cherry for 10 years range. On the basis of this, compared to the meteorological conditions of the big cherry required. The results showed that, the fine climate resources of Bai Luyuan, Hongqing mountain in Baqiao provided a suitable environment for cherry growth; the climate resources in Bai Luyuan prevailed that of Hong Qing mountain and both demonstrate their characteristics on the premise of satisfying Baqiao cherry growth. Over the process of growth and development of Baqiao cherry, there existed low temperature and rains in blooming date, spring drought in young fruit hardening period, continuous rains in mature stage, of which the low temperature and rains in blooming date was the severest; it therefore should be attached great importance to, and fortify the awareness of defense as well as the abilities to prevent.

Keywords: cherry; high production and quality; climate adaptability; Baqiao in Xi'an

物量及组分生物量(根、茎、叶质量)等参数值显著增加^[9];大多数植物的适宜生长温度通常在 10~30 ℃^[10],当植物处于高温环境时,植株光合酶活性降低,电子传递链遭到破坏,引发光抑制,从而导致光合速率下降^[11-15],对植物的正常生理会造成严重影响,但不同植物对温度的响应不同。叶绿素荧光动力学技术在测定叶片光合作用过程中光系统对光能的吸收、传递、耗散、分配等方面具有独特的作用,与“表观性”的气体交换指标相比,叶绿素荧光参数更具有反映“内在性”特点,被称为测定叶片光合功能快速、无损伤的探针^[16-17]。且叶绿素荧光和光合作用中各个反应过程密切相关,土壤水分胁迫对光合作用各个过程产生的影响都可通过体内叶绿素荧光诱导动力学变化反映出来。因此,叶绿素荧光参数可作为逆境下植物抗逆反应的指标之一,也是植物水分胁迫危害的理想监测手段之一^[18-19]。目前对大气 CO₂ 浓度与温度升高或干旱胁迫的交互作用影响已有较为深入的研究^[2,5,14-18]。但关于温度升高与干旱胁迫的交互影响,特别是气候变化对本本植物光合机理与品质影响的研究较少^[19-21]。

灵武长枣(*Zizyphus jujube* Mill. cv. Lingwu changzao)属鼠李科枣属的落叶乔木,适应性强,果实鲜美多汁,口感酥脆,可食率和营养价值较高,富含各种矿物质和维生素,在宁夏已有 800 多年的栽培历史,是宁夏经过自然筛选而传承下来的最具地方特色的优良鲜食枣品,有显著的生态、社会与经济效益。该研究采用红外线辐射器模拟增温法^[22]、自动节灌装置控制土壤水分,研究温度升高与干旱胁迫对灵武长枣叶绿素荧光动力学参数的影响,以揭示全球气候变化对灵武长枣生理的影响机制。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在宁夏大学试验农场进行。该农场位于宁夏永宁县(北纬 38°47'07",东经 106°04'00",海拔高度 1 116.8 m),属中温带干旱气候区,年均气温 8.5 ℃,年均日照时数 3 000 h、日温差 13 ℃,年均≥10 ℃积温 3 300 ℃,无霜期 140~160 d,年降水量 180~200 mm,土壤为灌淤土。

1.2 试验材料

供试灵武长枣试验田株行距为 2 m×3 m,树龄 4 年生,平均树高 1.7 m。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计 试验采用双因素嵌套试验设计,气温升高设置 2 个水平:自然环境温度(T2),升高的大气温度(T1)=自然环境温度+2.0 ℃;干旱胁迫设置 3 个水平:正常土壤供水条件(土壤含水量为田间持水量的 70%~80%,CK),中度干旱胁迫(田间持水量的 50%~60%,MDS),重度干旱胁迫(田间持水量的 30%~40%,

HDS)^[8,14],共 6 个处理,每处理重复 3 次,共 18 株枣树,采用太阳能土壤水分控制器、感应器、电磁阀、滴管设备等组成的土壤水肥自动控制系统控制土壤干旱水平。

1.3.2 红外线辐射器法控制模拟升温环境 根据牛书丽等^[22]对目前研究全球变暖与陆地生态系统研究中的野外增温装置的综述研究,该试验拟采用红外线辐射法控制模拟升温环境。在宁夏大学实验农场选避风试验田地,采用红外线辐射法控制模拟升温环境,在每株幼树冠幅四周,均匀安装 3 根 1 m 长 800 W 功率可散发红外线辐射的碳纤维加热管(共 27 根加热管)来模拟增温,同时安装近地层温度监测仪,以进行校正与记录。升温控制时间为每天 08:00—20:00。

1.4 项目测定

采用 OS5P 型便携式脉冲调制叶绿素荧光仪(Optiscience, USA)在 Yield 和 Kinetic 模式下,于 09:00—11:00 分别对灵武长枣成熟叶片的叶绿素荧光进行测定。Kinetic 模式下测定前,叶片暗处理 15~20 min。

1.5 数据分析

试验数据采用 DPS、Excel 等软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣叶绿素初始荧光(Fo)的影响

Fo 是 PSII 反应中心处于完全开放时的荧光产量,Fo 的升高一般认为是 PSII 中心遭到破坏的结果,而其降低是 PSII 中心受到抑制,非化学能量耗散增加造成的^[23]。由图 1、2 可以看出,处理 40 d 后和处理 80 d 后时灵武长枣,增温环境下 Fo 均小于常温环境;处理 40 d 的灵武长枣常温和增温环境下,随着土壤干旱水平的加剧,Fo 均呈下降趋势,增温环境下,与 CK 相比,MDS 和 HDS 干旱水平下 Fo 分别下降了 10.34%、14.43%,常温环境下分别下降了 1.37%、4.70%,即大气温度升高 2 ℃时,加速了干旱胁迫对 Fo 下降幅度,气温升高使灵武长枣的 Fo 下降,其影响呈极显著差异($P=0.000\ 4<0.01$);处理 80 d 后,增温环境下,与 CK 相比,干旱处理后的 Fo

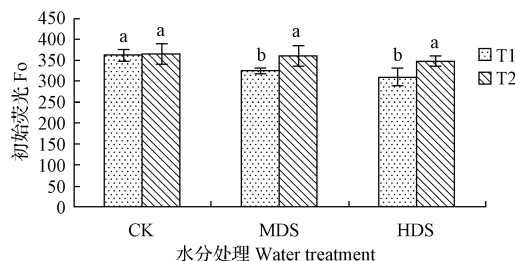


图 1 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣 Fo 的影响(处理后 40 d)

Fig. 1 Effect of elevated temperature and drought stress on Fo of Lingwu long jujube(dealed with 40 days)

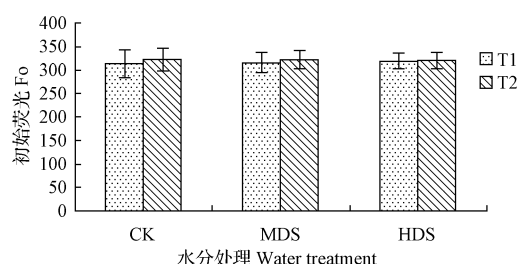


图2 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣
Fo的影响(处理后80 d)

Fig. 2 Effect of elevated temperature and drought stress on

Fo of Lingwu long jujube(dealed with 80 days)

有所增加,其中 MDS 和 HDS 处理的 Fo 分别升高了 0.63%、1.70%,常温环境下随着干旱胁迫的加剧,Fo 下降,但大气温度对 3 种干旱水平下 Fo 的影响差异不显著($P=0.9776>0.05$)。

2.2 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣叶绿素原初光能转化率(Fv/Fm)的影响

Fv/Fm 表示暗适应下 PSII 反应中心原初光能转化效率,显示光合机构把吸收的光能用于化学反应的最大效率,是表示绿色植物叶片光化学反应状况高低的一个非常重要的参数,在非胁迫条件下该参数极少变化,而受到环境胁迫时,该指标会明显下降,被认为是反映光抑制的可靠指标,植物受到胁迫时 Fv/Fm 降幅越小,发生光抑制的程度越小^[24-25]。由图 3、4 可以看出,处理 40 d 后,增温处理后 Fv/Fm 高于常温处理,平均增高 1.05%,而处理 80 d 后,增温处理后 Fv/Fm 却低于常温处理,平均下降 1.20%,但大气温度对灵武长枣 Fv/Fm 的影响差异不显著($P_{40d}=0.0904>0.05$, $P_{80d}=0.2489>0.05$);3 种土壤干旱水平相比,处理 40 d 后,常温和增温条件下,MDA 和 HDS 下 Fv/Fm 均高于 CK,增温处理后,MDS 和 HDS 处理下分别高出了 1.34%、2.33%;处理 80 d 时,增温和常温处理后,MDS 水平下的 Fv/Fm 均高于 HDS 和 CK 水平;试验表明,气温升高和干旱胁迫交互作用对灵武长枣叶绿素荧光参数 Fv/Fm 的影响

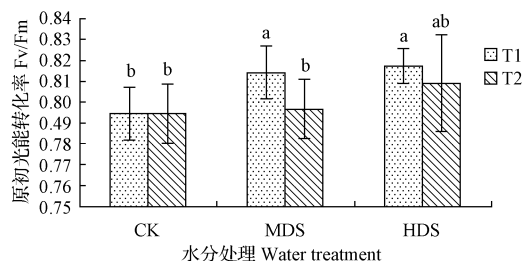


图3 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣
Fv/Fm的影响(处理后40 d)

Fig. 3 Effect of elevated temperature and drought stress on
Fv/Fm of Lingwu long jujube(dealed with 40 days)

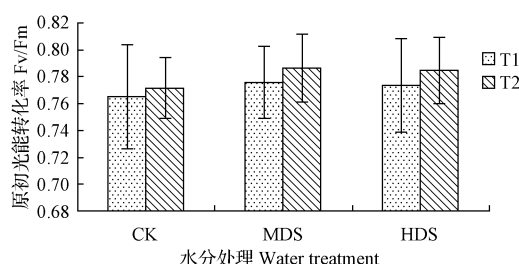


图4 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣
Fv/Fm的影响(处理后80 d)

Fig. 4 Effect of elevated temperature and drought stress on

Fv/Fm of Lingwu long jujube(dealed with 80 days)

作用差异不显著($P_{40d}=0.3682>0.05$, $P_{80d}=0.9621>0.05$)。

2.3 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣叶绿素 PSII 的潜在活性(Fv/Fo)的影响

Fv/Fo 常用于度量 PSII 的潜在活性^[24-25]。由图 5、6 可以看出,试验处理 40 d 后,增温环境下 Fv/Fo 高于常温环境下,平均增高 7.53%,而处理 80 d 时,增温环境下 Fv/Fo 却低于常温环境,平均下降 1.33%,但大气温度对不同干旱水平下 Fv/Fo 的影响差异不显著($P_{40d}=0.01<0.0246<0.05$, $P_{80d}=0.3561>0.05$);3 种土壤干旱水平相比,处理 40 d 后,在 2 种大气温度下,MDS 和 HDS 干旱水平下 Fv/Fo 均高于 CK,增温环境下,MDS 和 HDS 处理下 Fv/Fo 分别高出了 11.04%、14.84%;处理 80 d 后,在 2 种大气温度下,MDS 处理下的 Fv/Fo 均高于 HDS 和 CK,说明干旱胁迫使得灵武长枣的 Fv/Fo 有所增高,但随着干旱水平的加重 Fv/Fo 随之降低,但土壤干旱水平对 Fv/Fo 的影响差异不显著($P_{40d}=0.0066<0.01$, $P_{80d}=0.4226>0.05$)。随着时间的延长,与处理 40 d 相比,80 d 后灵武长枣 Fv/Fo 下降,3 种干旱水平下,气温升高处理后 CK、MDS、HDS 条件下 Fv/Fo 的下降幅度分别为 13.65%、21.46%、21.85%,而常温处理后下降的幅度为 7.74%、5.19%、12.55%。但气温升高和干旱胁迫交互作用对灵武长枣叶绿素荧光

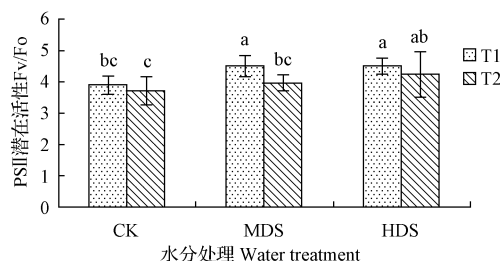


图5 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣
Fv/Fo的影响(处理后40 d)

Fig. 5 Effect of elevated temperature and drought stress on
Fv/Fo of Lingwu long jujube(dealed with 40 days)

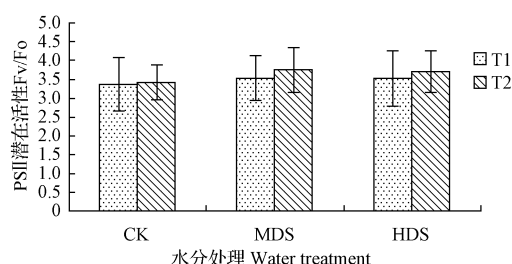


图6 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣 Fv/Fo 的影响(处理后 80 d)

Fig. 6 Effect of elevated temperature and drought stress on

Fv/Fo of Lingwu long jujube(dealed with 80 days)

参数 Fv/Fo 的影响作用差异不显著($P_{40d}=0.553\ 5>0.05$, $P_{80d}=0.918\ 8>0.05$)。

2.4 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣叶绿素 PSII 相对电子传递速率(ETR)的影响

表观光合电子传递速率(ETR)是反映实际光强条件下的表观电子传递速率^[24-25]。由图 7、8 可以看出,不同干旱水平相比,在试验处理 40 d 后,大气温度升高 2℃ 环境下 ETR 高于常温环境下,平均增高 3.10%;处理 80 d 后,增温环境下 ETR 却低于常温环境,平均下降 2.9%,但大气温度对灵武长枣的 ETR 影响无显著差异($P_{40d}=0.372\ 5>0.05$, $P_{80d}=0.618\ 6>0.05$);3 种土壤干旱水平相比,处理 40 d 后,常温和增温环境下,干旱处理下 ETR 均高于 CK,增温环境下,MDS 和 HDS 处理下分别高出了 4.06%、9.00%,处理 80 d 后,增温和常温环境下,MDS 处理下的 ETR 均高于 HDS 和 CK,说明干旱胁迫下灵武长枣叶片的 ETR 有所增高,可随着干旱水平的加剧 ETR 随之下降。气温升高和干旱胁迫交互作用对灵武长枣叶绿素荧光参数 ETR 的影响作用差异不显著($P_{40d}=0.933\ 1>0.05$, $P_{80d}=0.959\ 4>0.05$)。

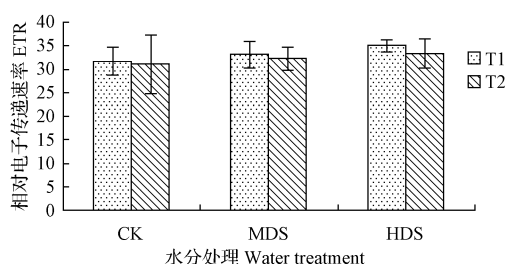


图7 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣 ETR 的影响(处理后 40 d)

Fig. 7 Effect of elevated temperature and drought stress on

ETR of Lingwu long jujube(dealed with 40 days)

2.5 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣光化学猝灭系数(qP)的影响

qP 表示 PSII 天线色素吸收的光能用于化学电子传递的比例,是由质体醌 QA 等再氧化所造成的,因而它

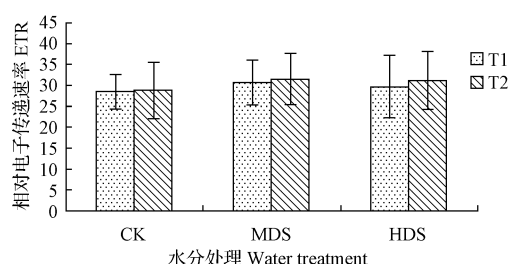


图8 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣 ETR 的影响(处理后 80 d)

Fig. 8 Effect of elevated temperature and drought stress on

ETR of Lingwu long jujube(dealed with 80 days)

与电子传递、光合氧化等过程直接相关。qP 越大 PSII 的电子传递活性越大^[25-26]。由图 9、10 可以看出,3 种土壤干旱水平条件下,在试验处理 40 d 和 80 d 后,增温环境 qP 均低于常温环境下,平均下降值分别为 11.77% 和 1.20%,处理 40 d 后大气温度对灵武长枣 qP 的影响呈显著差异($P_{40d}=0.01<0.047\ 3<0.05$),处理 80 d 后差异不显著($P_{80d}=0.884\ 0>0.05$);3 种土壤干旱水平相比,处理 40 d 和处理 80 d 后,常温和增温环境下,MDS 和 HDS 干旱处理下 qP 均低于 CK,增温环境下,MDS 和 HDS 处理下 40 d 时 qP 分别下降了 12.08%、26.15%,处理 80 d 时分别下降了 3.29%、6.42%,说明土壤干旱胁迫使灵武长枣的 qP 有所降低,但干旱水平对 qP 的影响无显著差异($P_{40d}=0.076\ 0>0.05$, $P_{80d}=0.847\ 4>0.05$),随着试验处理时间的延长和干旱胁迫的加剧,大气温度升高可缓解干旱胁迫时 qP 的下降幅度。可见,气温升高和干旱胁迫交互作用对灵武长枣叶绿素荧光参数 qP 的影响作用差异不显著($P_{40d}=0.340\ 1>0.05$, $P_{80d}=0.996\ 1>0.05$)。

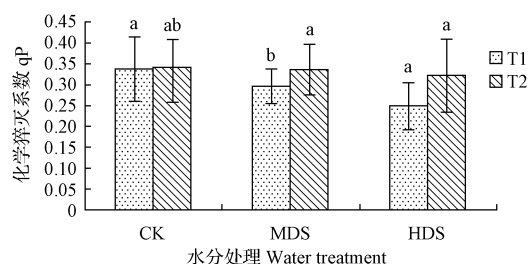


图9 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣 qP 的影响(处理后 40 d)

Fig. 9 Effect of elevated temperature and drought stress on

qP of Lingwu long jujube(dealed with 40 days)

2.6 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣非光化学猝灭系数(NPQ)的影响

NPQ 为叶绿体吸收来的光能以热能形式散去的部分,在强光条件下它对保护 PSII 的结构有重要的作用^[23,27-30],它可以用来反映高温胁迫下,植物耗散过剩光

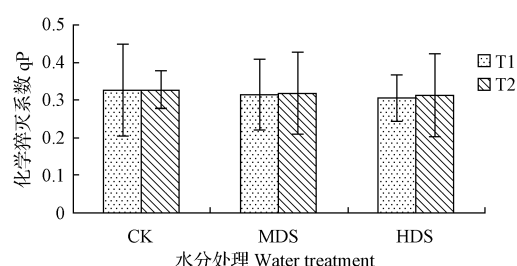


图 10 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣 qP 的影响(处理后 80 d)

Fig. 10 Effect of elevated temperature and drought stress on qP of Lingwu long jujube(dealed with 80 days)

能为热能的能力,即植物的光保护能力。由图 11、12 可以看出,3 种土壤含水量水平,在试验处理 40 d 和 80 d 时,增温环境下 NPQ 均高于常温环境,平均增高 7.54% 和 6.43%,处理 40 d 和 80 d 后,大气温度对灵武长枣 NPQ 的影响均呈显著差异($P_{40d}=0.019\ 2<0.05$, $P_{80d}=0.039\ 7<0.05$);处理 40 d 和处理 80 d 后,常温和增温条件下,MDS 和 HDS 干旱处理下 NPQ 均低于 CK,增温环境下,MDS 和 HDS 处理下 40 d 时 NPQ 分别下降了 0.97%、8.80%,处理 80 d 时分别下降了 2.14%、2.72%,说明干旱胁迫使灵武长枣的 NPQ 有所降低,但干旱水平对灵武长枣 NPQ 的影响无显著差异($P_{40d}=0.152\ 0>0.05$, $P_{80d}=0.662\ 6>0.05$),气温升高和干旱胁迫交互作用对灵武长枣 NPQ 的影响差异不显著($P_{40d}=0.774\ 4>0.05$, $P_{80d}=0.933\ 7>0.05$)。

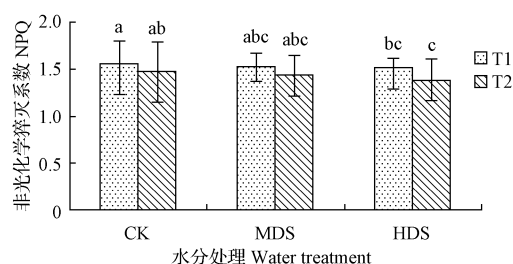


图 11 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣 NPQ 的影响(处理后 40 d)

Fig. 11 Effect of elevated temperature and drought stress on NPQ of Lingwu long jujube(dealed with 40 days)

3 结论与讨论

由于近年来“温室效应”的日益严重,带来全球气候的变化,直接影响了灵武长枣生长及生理指标的变化。初始荧光(F_0)是 PSII 反应中心处于完全开放时的荧光产量。 F_0 的减少表明光合色素的热耗散增加,而增加则表明 PSII 反应中心受到一定程度的破坏^[24]。该试验中,相对增高 2℃ 和常温 2 种大气温度环境下,随着土壤干旱水平的加剧, F_0 均呈现先下降后上升的规律,增温环境下下降的幅度大于常温环境,灵武长枣在年生长后

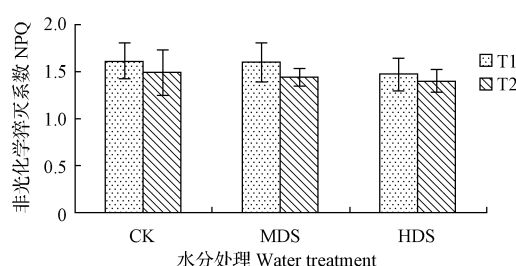


图 12 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣 NPQ 的影响(处理后 80 d)

Fig. 12 Effect of elevated temperature and drought stress on NPQ of Lingwu long jujube(dealed with 80 days)

期,进入 8 月,受到长期的干旱胁迫后,PSII 反应中心开始遭到破坏而受到抑制,可能是因为 7 月底到 8 月宁夏气温过高,光系统受到影响;暗适应后叶片的 F_v/F_m 是植物是否发生光抑制的判断指标, F_v/F_m 的降低常被作为判断是否发生光抑制的标准^[25-26],3 种土壤干旱水平处理 40 d 后,大气温度升高 2℃ 时, F_v/F_m 、 F_v/F_0 、ETR 均大与常温环境,而处理时间延长到 80 d 后均低于常温环境,土壤干旱胁迫加剧可促使 F_v/F_m 不断上升,说明干旱对灵武长枣的光合机构造成了损伤,发生了光抑制,降低了光能转化率,但大气温度升高 2℃ 时可缓解干旱造成的这种抑制作用;ETR 在增温环境下,随着土壤干旱水平的加剧增加幅度大于常温环境,说明大气温度升高 2℃,可缓解干旱导致灵武长枣电子传递速率的下降;生长前期,qP 在 2 种大气温度环境下,随着土壤干旱水平的加剧越来越小,说明干旱胁迫显著影响灵武长枣的光化学电子传递,增温环境下降的幅度大于常温环境,8 月以后差距减小;根据 NPQ 的结果分析,大气温度提高 2℃ 环境下,灵武长枣在不同的土壤干旱水平下的光保护能力均显著提高。

该试验是一个生长季节的测定结果,长期、持续的大气升温及干旱胁迫对灵武长枣光合作用的影响还需进一步验证研究。

参考文献

- [1] MITCHELL J F B,JOHNS T C,GREGORY J M. Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulfate aerosols[J]. Nature,1995,376:501-504.
- [2] KOVÁCS F. Problems in the relationship between CO₂ emissions and global warming[J]. Acta Montanistica Slovaca,2005,10(1):9-18.
- [3] 王连喜,李菁,李剑萍,等. 气候变化对宁夏农业的影响综述[J]. 中国农业气象,2011,32(2):155-160.
- [4] LEWIS J D,LUCASH M,OLSZYK D M. Relationships between needle nitrogen concentration and photosynthetic responses of Douglas-fir seedlings to elevated CO₂ and temperature[J]. New Phytologist,2004,162:355-364.
- [5] HIMANEN S J,NERG A M,NISSINEN A,et al. Effects of elevated carbon dioxide and ozone on volatile terpenoid emissions and multitrophic communication of transgenic insecticidal oilseed rape (*Brassica napus*) [J]. New Phytologist,2009,181:174-186.

- [6] WALLACE J S. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2000, 82: 105-119.
- [7] 常兆丰, 韩福贵, 仲生年. 甘肃民勤荒漠区 18 种乔木物候与气温变化的关系[J]. 植物生态学报, 2009, 33(2): 311-319.
- [8] 郑广芬, 陈晓光, 孙银川, 等. 宁夏气温、降水、蒸发的变化及其对气候变暖的响应[J]. 气象科学, 2006, 26(4): 412-418.
- [9] 董瑜, 汪学华, 杨倩. 气候变化对植物影响的研究进展[J]. 广东农业科学, 2013, 25(2): 34-36.
- [10] 裴伟, 谭浩, 翟衡. 干旱胁迫对不同葡萄砧木光合特性和荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 835-838.
- [11] 陈屏昭, 王磊. 缺硫对脐橙叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(5): 503-506.
- [12] 张乐华, 周广, 孙宝腾. 高温胁迫对两种常绿杜鹃属植物幼苗生理生化特性的影响[J]. 植物科学学报, 2011, 29(3): 362-369.
- [13] 黄锦文. 结缕草温度胁迫的生理响应及其分子机制研究[D]. 厦门: 福建农林大学, 2009.
- [14] 刘瑞侠, 李艳辉, 陈绍宁, 等. 干旱高温协同胁迫对玉米幼苗抗氧化防护系统的影响[J]. 河南农业大学学报, 2008, 42(4): 363-366.
- [15] 柯世省, 金则新. 水分胁迫和温度对夏蜡梅叶片气体交换和叶绿素荧光特性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 43-49.
- [16] 宋丽华, 周利伟. 气温升高对枸杞苗木生长的影响[J]. 林业科技, 2010, 35(2): 62-64.
- [17] KIM H Y, LIM S S, KWAK J H, et al. Dry matter and nitrogen accumulation and partitioning in rice (*Oryza sativa* L.) exposed to experimental warming with elevated CO₂[J]. Plant Soil, 2011, 342: 59-71.
- [18] CHOI E Y, SEO T C, LEE S G, et al. Growth and physiological responses of Chinese cabbage and radish to long-term exposure to elevated carbon dioxide and temperature[J]. Hor Environ Biotechnol, 2011, 52(4): 376-386.
- [19] REDDY A R, RASINENI G K, RAGHAVENDRA A S. The impact of global elevated CO₂ concentration on photosynthesis and plant productivity[J]. Current Science, 2010, 99(1): 46-57.
- [20] KGOPE B S, BOND W J, MIDGLEY G F. Growth responses of African savanna trees implicate atmospheric [CO₂] as a driver of past and current changes in savanna tree cover[J]. Austral Ecology, 2010, 35(4): 451-463.
- [21] 杨金艳, 杨万勤, 王开运, 等. 木本植物对 CO₂ 浓度和温度升高的相互作用的响应[J]. 植物生态学报, 2003, 27(3): 304-310.
- [22] 牛书丽, 韩兴国, 马克平, 等. 全球变暖与陆地生态系统研究中的野外增温装置[J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 262-271.
- [23] 赵会杰, 邹内琦, 于振文. 叶绿素荧光分析技术及其在植物光合机理研究中的应用[J]. 河南农业大学学报, 2000, 34(3): 248-251.
- [24] 张会慧, 张秀丽, 胡彦波, 等. 碱性盐胁迫对桑树幼苗叶片叶绿素荧光和激发能分配的影响[J]. 经济林研究, 2012, 30(1): 6-12.
- [25] 陈建明, 俞晓平, 程家安. 叶绿素荧光动力学及其在植物抗逆生理研究中的应用[J]. 浙江农业学报, 2006, 18(1): 51-55.
- [26] 卢广超, 许建新, 薛立, 等. 低温胁迫对 4 种幼苗的叶绿素荧光特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(2): 44-49.
- [27] 王艺陶, 周宇飞, 李丰先, 等. 干旱胁迫对高粱叶绿素荧光参数的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(4): 398-403.
- [28] DEMMIG B, BJORKMAN O. Comparison of the effect of excessive light on chlorophyll fluorescence (77K) and photon yield of O₂ evolution of leaves of higher plants[J]. Planta, 1987, 171(2): 171-184.
- [29] BJORKMAN O, DEMMIG B. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence at 77K among vascular plants of diverse origins[J]. Planta, 1987, 170: 489-504.
- [30] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 444-448.

Effect of Elevated Air Temperature on Chlorophyll Fluorescence Parameters in *Zizyphus jujube* Mill. cv. Lingwu changzao Under Different Soil Drought Stress

QIN Fang, CAO Bing, SONG Lihua

(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021)

Abstract: Taking 4-year-old *Zizyphus jujube* Mill. cv. Lingwu changzao (Lingwu long jujube) as test material, using infrared radiation equipment to control simulating elevated temperature environment, and automatic irrigation system to control soil water levels, the chlorophyll fluorescence parameters of Lingwu long jujube was tested that treated by two air temperature levels and three soil water levels to study the effect of elevated air temperature and soil drought stress on chlorophyll fluorescence parameters in Lingwu long jujube. The results showed that when treated 40 days, Fo, Fv/Fm, Fv/Fo, qP were decreased with the increasing of soil drought stress under elevated air temperature 2 °C. When treated 80 days, Fo was increased and Fv/Fm, Fv/Fo were decreased with the increasing of soil drought stress under elevated air temperature, while NPQ was higher than that of ambient temperature treatment. All these indicated that elevated air temperature relieved decreasing of ETR and light inhibition in Lingwu long jujube caused by soil drought, and improved its light protection capable under soil drought stress.

Keywords: elevated air temperature; drought stress; *Zizyphus jujube* Mill. cv. Lingwu changzao; chlorophyll fluorescence parameters