

· 研究报告 ·

气温和根区温度对葡萄叶片光合荧光特性的影响

王浩¹, 王明¹, 梁婷², 姚玉新¹, 杜远鹏^{1*}, 高振^{1*}

¹山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东果蔬优质高效生产协同创新中心, 泰安 271018

²山东省泰安市岱岳区农业农村局, 泰安 271021

摘要 为探究气温和根区温度对葡萄(*Vitis vinifera*)叶片光合荧光特性的影响, 以一年生巨峰葡萄为试材, 设置对照、高气温、高根区温度和两者交叉作用共4组处理。结果表明, 相较于对照和高气温, 高根区温度以及交叉处理叶片最大光化学效率(F_v/F_m)降低更明显; 与对照相比, 高根区温度以及高气温与高根区温度交叉处理下光系统II (PSII)实际光化学效率 $Y(II)$ 显著降低, 非调节能量耗散的量子产量 $Y(NPQ)$ 及 Q_A 氧化还原状态($1-q_p$)值显著上升。同时, 高根区温度以及高气温与高根区温度交叉处理显著增加了J点的可变荧光(V_j), 而用于电子传递的量子产额(ϕ_{E_0})及性能指数(PI_{ABS})显著降低。此外, 高根区温度以及高气温与高根区温度交叉处理下单位面积有活性的反应中心数目(RC/CS_m)也显著下降, K点相对可变荧光(W_k)明显上升。综上所述, 高根区温度是高气温与根区高温交叉胁迫的主导因子, PSII受体侧是主要的伤害位点, 高气温加剧了高根区温度对PSII造成的伤害。

关键词 葡萄, 空气高温, 根区高温, 叶绿素荧光

王浩, 王明, 梁婷, 姚玉新, 杜远鹏, 高振 (2022). 气温和根区温度对葡萄叶片光合荧光特性的影响. 植物学报 57, 209–216.

光合作用是绿色植物基本的生命活动之一, 也是作物产量形成的基础(侯丽媛等, 2021)。植物光合作用受多种环境因素影响, 温度是其中最重要的因素之一。如果环境温度超过或低于植物进行光合作用的适宜温度范围, 植物光合作用就会受到抑制, 甚至对光合系统造成破坏(许大全等, 1992)。研究表明, 高气温胁迫主要影响光合作用中心电子传递和碳同化, 而光系统II (photosystem II, PSII)是氧化胁迫破坏的主要位点(Kyle, 1987; 郭倩倩和周文彬, 2019)。弱光条件下, 热胁迫会逐渐降低榆树(*Ulmus pumila*)苗幼叶PSII最大光化学效率(ϕ_{P_0})和最大荧光(F_m) (Jiang et al., 2006)。高气温显著降低了棉花(*Gossypium hirsutum*)完全叶PSII的最大光化学效率(F_v/F_m) (Van der Westhuizen et al., 2020)。关于高气温伤害葡萄(*Vitis vinifera*)的研究也有较多报道, 气温过高抑制葡萄叶片 F_v/F_m 和实际光化学效率, 降低PSII的光化学活性(高玉录等, 2020)。在适宜的光照条件下, 当空气温度上升至37°C及以上时, 赤霞珠葡萄叶片的PSII会发生严重的光抑制, 遭受光破坏(孙永江等,

2013)。高温诱导植物体内产生过多的活性氧(reactive oxygen species, ROS), 如超氧阴离子自由基(superoxide anion, O_2^-)、过氧化氢(hydrogen peroxide, H_2O_2)和单线态氧(singlet oxygen, 1O_2) (Yamori et al., 2014), 进而对PSII造成氧化损伤(Liu and Huang, 2000)。

高气温出现的同时往往伴随着根区高温。在夏季温室中覆盖黑色膜的土壤温度一般能超过30°C, 而在极端高温的情况下土壤温度甚至能够超过35°C (Ding et al., 2016)。研究发现, 过高的根区温度影响玉米(*Zea mays*)幼苗根系生理活动的正常进行, 导致叶片酶活性降低, 对PSII造成损伤并降低叶片的光合速率(Xia et al., 2021)。此外, 根区温度过高时玉米幼苗茎秆和叶片中的蛋白质、核酸和氨基酸等大分子有机物含量均下降, 还可显著降低叶片的叶绿素含量, 对幼苗的光合作用产生不良影响(夏镇卿等, 2020)。桃(*Prunus persica*)幼苗在根区高温环境中, 根系对水分的吸收受到抑制, 叶片的相对含水量降低(Hao et al., 2012)。这在小麦(*Triticum aestivum*)

收稿日期: 2021-07-25; 接受日期: 2021-12-28

基金项目: 国家重点研发计划(No.2019YFD1000101)、财政部和农业农村部和国家现代农业产业技术体系(No.CARS-29-zp-1)

* 通讯作者。E-mail: duyuanpeng001@163.com; gaoz89@sdau.edu.cn

(Al-Khatib and Paulsen, 1984)、冬青(*Ilex chinensis*) (Foster et al., 1991)和苹果(*Malus pumila*) (Gur et al., 1979)等物种研究中也得出相似的结论。

高气温和根区高温同步出现给农业生产带来了巨大的挑战,两者交叉胁迫对植物造成的影响逐渐受到重视。与适宜温度相比,35°C气温和35°C根区温度组合下翦股颖(*Agrostis stolonifera*)叶片的光合速率、叶绿素含量及光化学效率显著下降;在保持空气温度不变的条件下逐渐降低根区温度,叶片的光合速率、叶绿素含量和光化学效率均有明显提高(Xu et al., 2002)。目前,尚未发现针对短时间内气温与根区温度交叉胁迫对葡萄叶片叶绿素荧光特性的报道,对于高气温与根区高温交叉胁迫的主导因子不明确。因此,本研究以巨峰葡萄为材料,研究不同气温/根区组合对叶片叶绿素荧光特性的影响,旨在明确短时间内高气温与根区高温交叉胁迫的主导因子,为葡萄的种植管理提供依据。

1 材料与amp;方法

1.1 实验材料

实验于2021年5月在山东农业大学园艺科学与工程学院完成。以1年生巨峰葡萄(*Vitis vinifera* L. × *V. labrusca* L. Kyoho)为试材,种植所用双色盆直径17 cm、高15 cm,栽培基质按蛭石:草炭:牛粪:蚯蚓土=1:1:1:1 (v/v/v/v)的比例进行混合。葡萄苗于山东农业大学南校区园艺实验站日光温室培养,白天温度维持在22–28°C,夜晚温度维持在15–20°C,相对湿度日变化在40%–55%之间,晴天白天光照强度平均为650 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。待植株长至8–10片完全叶时进行温度处理。

1.2 方法

选取长势一致的葡萄植株转移至人工气候箱,用LED冷光源植物灯(型号SP501-N, 405 W, 上海三澎机电有限公司)进行照光,光照强度设定为(1 000±100) $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。利用人工气候箱进行空气温度控制,利用水浴锅(型号HH-4, 300W, 国华仪器制造有限公司)对根区温度进行控制,用11号自封袋套住双色盆将其置于水浴锅中。以土壤表面没入水面之下为标准,用水银温度计监测土壤表面下5–8 cm处的温度。共设

置对照(CK)、高气温(T1)、高根区温度(T2)和两者交叉作用(T3)四组处理,各处理时长均为3小时。实验设置5次生物学重复,选择第4节位的完全展开叶测定荧光参数。

1.2.1 叶绿素荧光淬灭参数的测定

使用Dual-PAM-100叶绿素荧光仪(Walz, 德国)进行饱和脉冲分析,在测量之前将植株置于人工气候箱并在原处理环境中暗适应30分钟。测定暗适应后初始荧光(F_0)和PSII最大荧光产量(F_m)以及P700中最大氧化量子产量(P_m)。然后打开光化光测定诱导曲线,共设置7个光照强度,从低到高分别为0、43、115、289、567、782和1 217 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,每60秒打开1次饱和脉冲(10 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),对荧光参数进行测定,记录不同光化光强度下荧光参数及光曲线拟合参数的变化。参照仪器使用说明手册以及Kramer等(2004)的方法分析不同叶绿素荧光参数:PSII最大光化学效率 $F_v/F_m=(F_m-F_0)/F_m$; PSII实际光化学量子产量 $Y(II)=(F_m'-F_s)/F_m'$; 非调节性能量耗散的量子产量 $Y(NO)=1/(NPQ+1+q_L(F_m/F_0-1))$; 调节性能量耗散的量子产量 $Y(NPQ)=1-Y(II)-1/(NPQ+1+q_L(F_m/F_0-1))$; 光化学淬灭 $q_p=(F_m'-F_s)/(F_m'-F_0)$; Q_A 氧化还原状态 $1-q_p$; 环式电子传递的有效量子产量 $Y(CEF)=Y(I)-Y(II)$ 。

1.2.2 叶绿素荧光诱导动力学OJIP曲线的测定及JIP-text分析

用连续激发式荧光仪(Handy PEA, Hansatech, 英国)对不同处理后的葡萄叶片充分暗适应30分钟,然后测定快速叶绿素荧光诱导动力学曲线(OJIP),OJIP曲线由3 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 红光诱导,测定时间为1秒。从OJIP曲线中可以得到以下参数(Strasser, 1997): F_0 : 初始(20–50微秒)荧光; F_k : K点(300微秒)的荧光; F_j : 2毫秒时J点的荧光; F_i : 30毫秒时的荧光; F_m : 0.3–2秒时的最大荧光。

对原始的OJIP曲线按 $V_i=(F_i-F_0)/(F_m-F_0)$ 进行JIP-text处理后得到相对荧光变化曲线,并可获得如下参数(Strasser, 1997; 李鹏民等, 2005; Wu et al., 2021): J点的相对可变荧光($V_j)=(F_j-F_0)/(F_m-F_0)$; 单位面积内有活性的反应中心数量(RC/CS_m)= $F_m\cdot\phi_{P_0}\cdot(V_j/M_0)$; 用于电子传递的量子产额(ϕ_{E_0})= $ET_0/$

$TR_o=(1-V_j)$; 单位面积吸收的光能(ABS/CS_m) $\approx F_m$; 单位面积捕获的光能(TR_o/CS_m) $=\phi_{P_o}\cdot(ABS/CS_m)$; 单位面积电子传递的量子产额(ET_o/CS_m) $=\phi_{E_o}\cdot(ABS/CS_m)$; 单位反应中心吸收的光能(ABS/RC) $=M_o\cdot(1/V_j)\cdot(1/\phi_{P_o})$; 单位反应中心捕获的用于电子传递的能量(ET_o/RC) $=M_o\cdot(1/V_j)\cdot\phi_{E_o}$; 用(F_m-F_o)进行标准化后K点相对可变荧光的变化(W_k) $=(F_t-F_o)/(F_m-F_o)$; 用于热耗散的量子比率(ϕ_{D_o}) $=1-\phi_{P_o}=(F_o/F_m)$; 性能指数(PI_{ABS}) $=RC/ABS\cdot(\phi_{P_o}/(1-\phi_{P_o}))\cdot(\psi_o/(1-\psi_o))$ 。

1.3 统计分析

使用Microsoft Excel 2013软件进行数据处理和作图。

用SPSS 17.0软件进行方差分析。采用Duncan's法进行多重比较, 显著水平为0.05。

2 结果与讨论

2.1 不同温度组合处理对葡萄叶片 F_v/F_m 及PSII光能分配的影响

PSII最大光化学效率(F_v/F_m)代表PSII反应中心内原初光能转化效率, 能够反映植物PSII的胁迫程度, 数值越低表明植物受到的伤害越严重(赵秀婷等, 2021)。与CK相比, T1和T2处理材料的 F_v/F_m 无显著变化, T3处理较CK下降了3.7%, 且达到显著水平(图1A)。

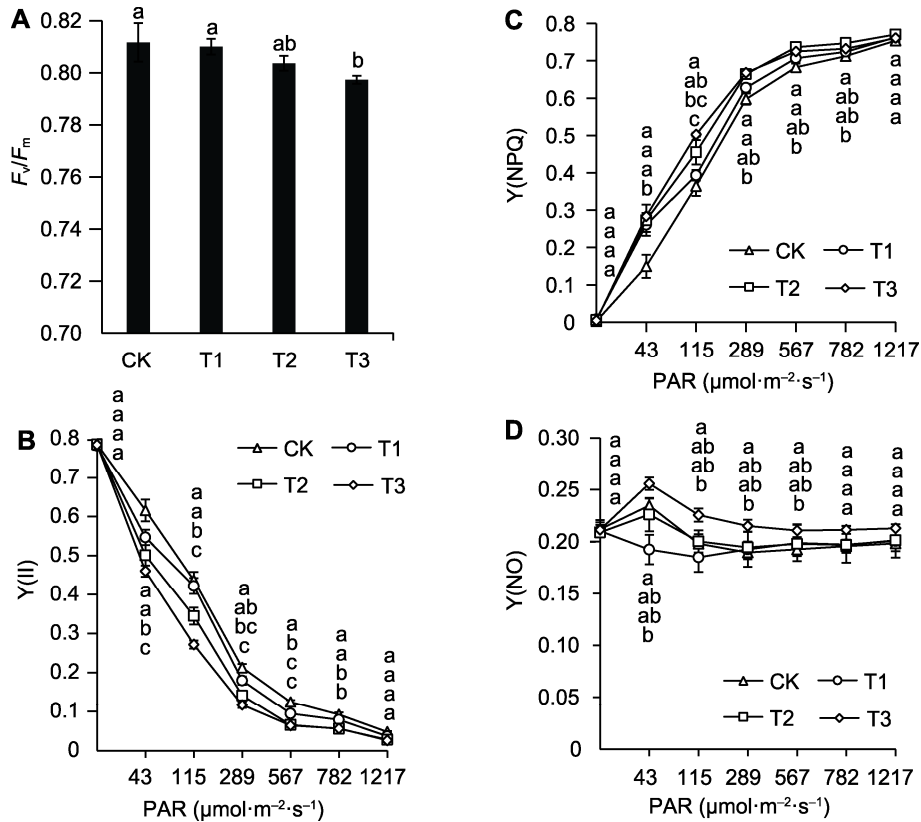


图1 不同空气温度/根区温度处理对巨峰葡萄叶片 F_v/F_m (A)、 $Y(II)$ (B)、 $Y(NPQ)$ (C)和 $Y(NO)$ (D)的影响

不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。 F_v/F_m : PSII最大光化学效率; $Y(II)$: PSII实际光化学量子产量; $Y(NPQ)$: 调节性能量耗散的量子产量; $Y(NO)$: 非调节性能量耗散的量子产量; PAR: 光合有效辐射; CK: 对照; T1: 高温; T2: 高根区温度; T3: 高温和高根区温度交叉作用

Figure 1 The influence of different air temperature/root zone temperature treatments on the F_v/F_m (A), $Y(II)$ (B), $Y(NPQ)$ (C) and $Y(NO)$ (D) of Kyoho grape leaves

Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$). F_v/F_m : PSII maximum photochemical efficiency; $Y(II)$: PSII actual photochemical quantum yield; $Y(NPQ)$: Regulated energy dissipation quantum yield; $Y(NO)$: Non-regulated energy dissipation quantum yield; PAR: Photosynthetically active radiation; CK: Control; T1: High air temperature; T2: High root zone temperature; T3: Cross processing of high air temperature and high root zone temperature

由图1B可知, T2和T3处理叶片PSII的实际光化学量子产量 $Y(II)$ 较CK均显著下降, 且皆在光强为 $567 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时差异达到最大值, 分别下降了47.3%和48.3%。而T1处理 $Y(II)$ 值变化不显著, 表明根区高温对 $Y(II)$ 造成的抑制作用强于空气高温。T1处理调节性能量耗散的量子产量 $Y(NPQ)$ 值较CK无显著变化; T2处理在光强为 $115 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 $Y(NPQ)$ 较CK显著上升, 并在此光照强度下差异达到最大值, 上升了24.8%; T3处理在光强为 $43 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 $Y(NPQ)$ 已较CK显著上升, 且在此光强下差异达到最大值, 上升了89.8% (图1C)。但随着光强的升高, 3组处理 $Y(NPQ)$ 值与CK之间的差异逐渐减小, 其中T3处理在 $1217 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强时较CK上升0.9%。非调节性能量耗散的量子产量 $Y(NO)$ 是光破坏的重要指标(陈景玲等, 2014)。由图1D可知, 与CK相比, T1和T2处理的 $Y(NO)$ 均无显著变化, 而T3处理在光强为 289 和 $567 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 $Y(NO)$ 值较CK显著上升, 在光强为 $25 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时上调最为显著, 升高了13.4%。

由图2A可知, 在光照强度达到 $567 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之前, 3组处理环式电子传递的有效量子产量 $Y(\text{CEF})$ 值相较于CK都有不同程度的上升, 且均在光强为 $115 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时达到最大值, 分别上升了30.0%、76.1%和113%。在光强达 $567 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 后, T2和T3处理的 $Y(\text{CEF})$ 值低于CK, T2处理在光强为 $782 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时与CK差异最大, 降低了8.6%; T3处理在光强为 $1217 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时与CK差异最大, 降低了15.6%。而T1处理 $Y(\text{CEF})$ 值与CK相比无显著差异。 Q_A 氧化还原状态($1-q_P$)能够反映关闭的反应中心占全部反应中心的比例。由图2B可知, T2处理的 $1-q_P$ 值在光强为 $115 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时较CK差异最大, 上升了52.7%; 而T3处理则在光强为 $43 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时与CK差异最显著, 上升了101%。T1处理与CK相比无显著差异。

2.2 不同温度组合处理对葡萄叶片快速叶绿素荧光曲线及参数的影响

OJIP曲线能反映多种关于PSII的光化学信息, 因此荧光检测分析技术广泛应用于PSII的活性检验(Baker, 2008; Mehta et al., 2010)。由图3A原始OJIP曲线可知, T1处理OJIP曲线相较于CK无显著变化, T2和T3处理P点(300–1 000毫秒)最大荧光产量

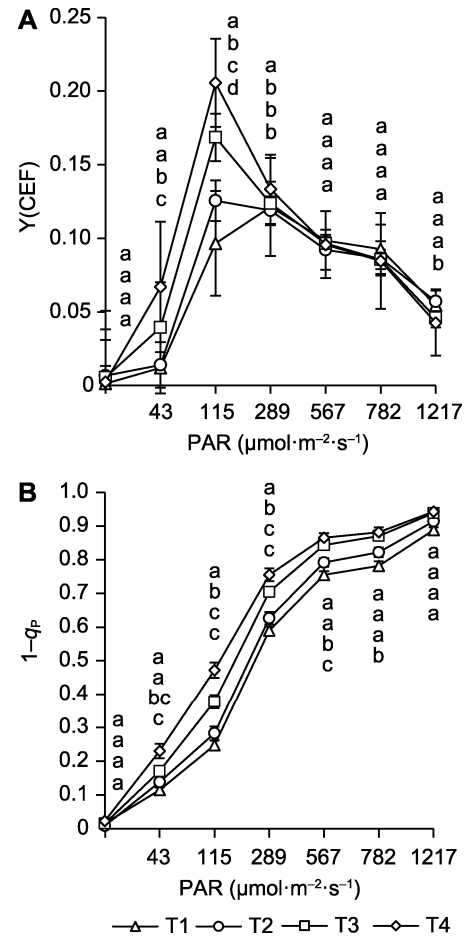


图2 不同空气温度/根区温度处理对巨峰葡萄叶片 $Y(\text{CEF})$ (A)和 $1-q_P$ (B)的影响

不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。Y(CEF): 环式电子传递的有效量子产量; $1-q_P$: Q_A 氧化还原状态; PAR、CK及T1–T3同图1。

Figure 2 The influence of different air temperature/root zone temperature treatments on the $Y(\text{CEF})$ (A) and $1-q_P$ (B) of Kyoho grape leaves

Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$). Y(CEF): Circular electron transfer effective quantum yield; $1-q_P$: Q_A redox state; PAR, CK and T1–T3 are shown in Figure 1.

(maximal fluorescence, F_m)明显低于CK, 而初始荧光(initial fluorescence, F_o)强度无显著变化, 说明T2和T3处理PSII发生了可逆性失活, 叶片单位面积吸收光能的能力显著降低。

从相对荧光变化曲线可知, T1处理相较于CK无显著变化, T2和T3处理J点(2毫秒)相对可变荧光显著高于CK (图3B), 表明电子从 Q_A 向 Q_B 的传递受到限制。

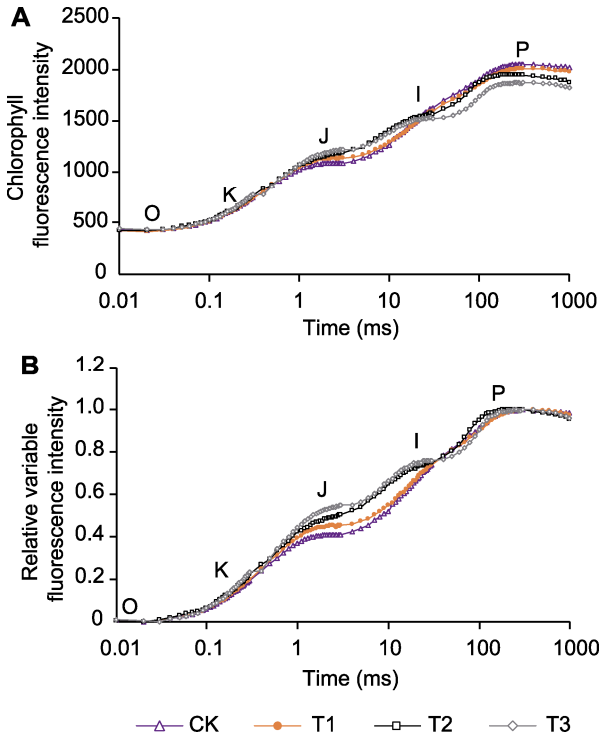


图3 不同空气温度/根区温度处理对实际叶绿素荧光诱导曲线(A)和相对叶绿素荧光诱导曲线(B)的影响
CK及T1-T3同图1。

Figure 3 Effect of different air temperature/root zone temperature treatments on the actual chlorophyll fluorescence induction curve (A) and the relative variable chlorophyll fluorescence induction curve (B)
CK and T1-T3 are the same as shown in Figure 1.

与CK相比, T1和T2处理的单位面积有活性的反应中心数量(RC/CS_m)无显著变化, T3处理的 RC/CS_m 值显著降低, 降幅为5.2% (图4A)。3组处理用于电子传递的量子产额(ϕ_{E0})与CK相比均显著下降, 分别降低了3.1%、7.7%和13.2% (图4B)。K点相对可变荧光的变化(W_k)能够反映PSII供体侧放氧复合体(OEC)的伤害程度(罗海波等, 2010), 3组处理中仅T3处理较CK相比显著上升, 升高了6.9% (图4C)。J点的相对可变荧光(V_j)可反映PSII受体侧受伤程度, T1处理相较于CK无显著变化, T2和T3处理则分别显著上升了8.0%和13.1% (图4D)。性能指数(PI)是所有荧光参数中最敏感的参数, PI_{ABS} 能够反映出植物光合效率的高低, T2和T3处理的 PI_{ABS} 较CK分别下降18.7%和28.5%, T1处理未发生显著变化(图4E)。3组处理中仅T3处理用于热耗散的量子比率(ϕ_{D0})较CK显著上升(上

升了7.2%) (图4F)。

2.3 讨论

温度逆境是植物常遭受的非生物胁迫之一, 气温和根区温度的异常变化均会对植物造成不良影响。当气温和根区温度超过植物的耐受阈值时, 就会对光合过程产生抑制作用, 甚至造成破坏(孙永江等, 2013; Xia et al., 2021)。本研究表明, 3小时的温度胁迫处理后, 高气温和高根区温度处理叶片 F_v/F_m 未出现显著变化, 而高气温与高根区温度交叉处理叶片 F_v/F_m 显著降低, 表明在两者交叉作用下, 葡萄叶片PSII原初电子转化效率受到严重影响, 这与Xu和Huang (2000)的研究结果一致。PSII吸收的光能主要包括3条分路, 其能量分别流向Y(II)、Y(NPQ)和Y(NO) (向芬等, 2014)。本研究表明, 高气温、高根区温度和两者交叉处理下的Y(II)均较对照有所下降, 其中两者交叉处理Y(II)受到的抑制效应最强, 高根区温度处理对Y(II)的抑制效应强于高气温处理。在3组处理Y(II)下降的同时, Y(NPQ)呈现同步上升的趋势, 高Y(NPQ)值表示植物具有较高的可调控性生理代谢, 可以通过提高热耗散等方式来消耗由于Y(II)下降而产生的过剩激发能, 这与吉首蒲儿根(*Sinosenecio jishouensis*)在遭到强光胁迫时的能量分配方式相同(向芬等, 2014)。此外, 叶片还可通过提高Y(CEF)以及 $1-q_p$ 来减少过剩激发能的产生。虽然植物体的光化学能量转换及热耗散等保护性调节机制能够在一定程度上维持PSII结构的稳定, 但这些保护性调节机制不足以将过剩的能量耗散掉, 因此导致高气温与高根区温度交叉处理下的Y(NO)上升。

Takahashi和Badger (2011)认为, 植物叶片受到光抑制的主要原因是光系统破坏速率高于修复速率, 导致PSII受到损伤, 活性下降。利用JIP-text可以对PSII各部分受伤程度进行分析(李鹏民等, 2005)。研究表明, 在适光下逐渐升高气温, 能够显著降低葡萄叶片的 RC/CS_m 和 V_j (孙永江等, 2013)。而与适宜的根区温度相比, 根区高温对玉米幼苗叶片PSII反应中心造成严重损伤, 并显著降低其电子传递速率(Xia et al., 2021)。本研究也得到相似的结论, 高气温、高根区温度和两者交叉处理反应中心PSII的电子传递性能显著下降, 线性电子传递受到抑制。其中, 高根区

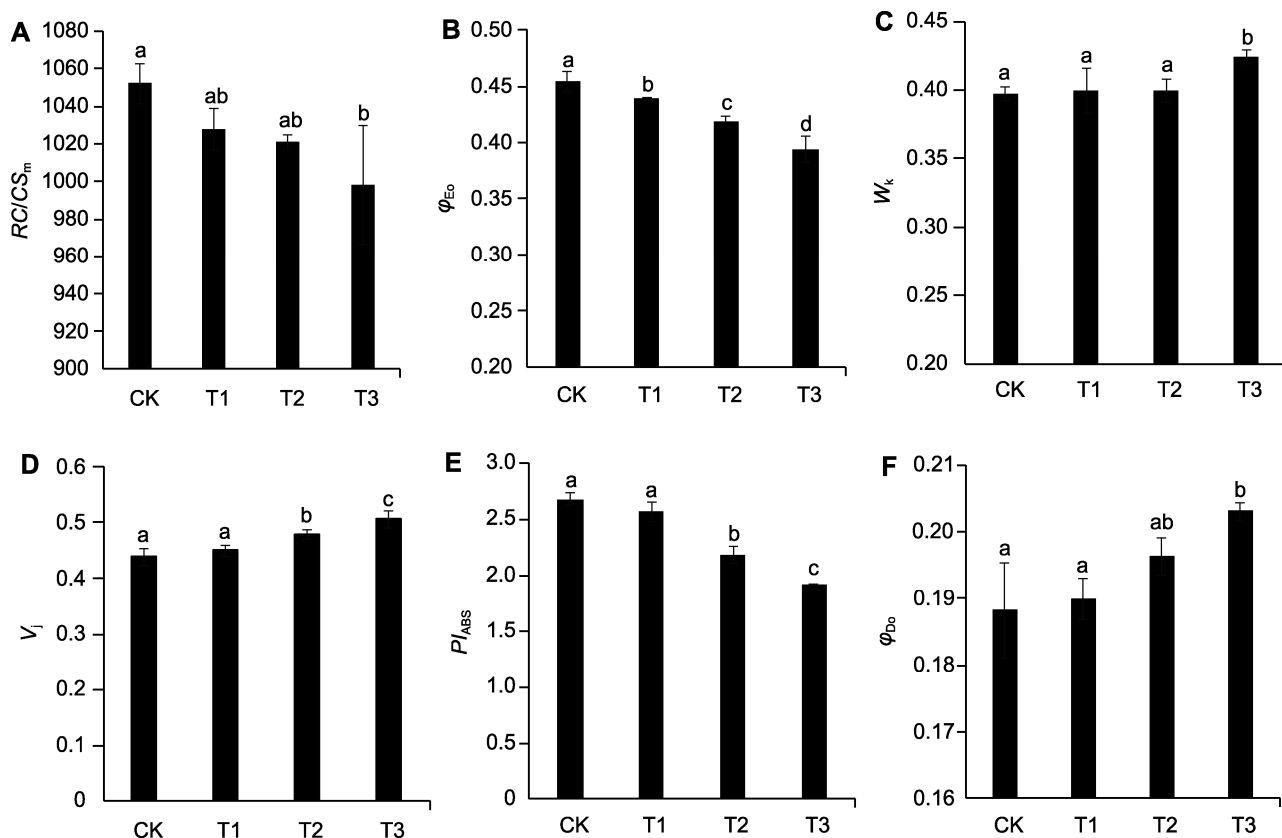


图4 不同空气和根区温度处理对巨峰葡萄叶片 RC/CS_m (A)、 ϕ_{Eo} (B)、 W_k (C)、 V_j (D)、 PI_{ABS} (E)和 ϕ_{Do} (F)的影响。不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。 RC/CS_m : 单位面积内有活性的反应中心数量; ϕ_{Eo} : 用于电子传递的量子产额; W_k : K点相对可变荧光的变化; V_j : J点的相对可变荧光; PI_{ABS} : 性能指数; ϕ_{Do} : 用于热耗散的量子比率; CK及T1–T3同图1。

Figure 4 The effect of different air and root zone temperature treatments on the RC/CS_m (A), ϕ_{Eo} (B), W_k (C), V_j (D), PI_{ABS} (E) and ϕ_{Do} (F) of Kyoho grape leaves

Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$). RC/CS_m : The number of active reaction centers per unit area; ϕ_{Eo} : Quantum yield used for electron transfer; W_k : Relatively variable fluorescence of K point; V_j : Relatively variable fluorescence of J point; PI_{ABS} : The performance index; ϕ_{Do} : Quantum ratio used for heat dissipation; CK and T1–T3 are shown in Figure 1.

温度、高温与高根区温度交叉处理 V_j 值显著上升,表明其PSII受体侧受到损伤, Q_A 到 Q_B 的电子传递受到显著抑制。这可能是高根区温度及高温与高根区温度交叉处理下光合效率和PSII电子传递性能下降的主要原因。此外,高温与高根区温度交叉处理 RC/CS_m 显著降低, W_k 显著上升,表明在两者交叉处理下叶片的有活性反应中心数目较CK显著减少,同时PSII供体侧放氧复合体(OEC)也遭到一定程度的破坏。由此表明,在高温和高根区温度的交叉胁迫中,高根区温度是葡萄叶片PSII受损的主导因子,高温加剧了高根区温度对叶片PSII造成的损伤。

综上所述,高根区温度是高温与高根区温度交

叉胁迫的主导因子,PSII受体侧是主要伤害位点,严重影响光合电子传递,高温加剧了高根区温度对PSII造成的伤害。

参考文献

- 陈景玲,王静,王谦,吴明作,袁远,赵勇(2014). 基于叶绿素荧光的荆条灌丛对栓皮栎幼苗庇荫效应研究. 西北林学院学报 29(4), 46–53.
- 高玉录,全亚军,杨兴旺,翟衡,杜远鹏,孙永江(2020). 乙酸及ABA对田间高温胁迫下‘摩尔多瓦’葡萄叶片光抑制的影响. 中外葡萄与葡萄酒 (5), 1–5.
- 郭倩倩,周文彬(2019). 植物响应联合胁迫机制的研究进展.

- 植物学报 **54**, 662–672.
- 侯丽媛, 董艳辉, 李亚莉, 王育川, 赵佳, 刘江, 秦永军, 吴慎杰 (2021). 藜麦抗旱性研究进展与展望. 江苏农业科学 **49**(11), 22–28.
- 李鹏民, 高辉远, Strasser RJ (2005). 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用. 植物生理与分子生物学学报 **31**, 559–566.
- 罗海波, 马苓, 段伟, 李绍华, 王利军 (2010). 高温胁迫对‘赤霞珠’葡萄光合作用的影响. 中国农业科学 **43**, 2744–2750.
- 孙永江, 付艳东, 杜远鹏, 翟衡 (2013). 不同温度/光照组合对‘赤霞珠’葡萄叶片光系统II功能的影响. 中国农业科学 **46**, 1191–1200.
- 夏镇卿, 司雷勇, 金岩, 扶亚芳, 王奇, 路海东 (2020). 根区增温对玉米幼苗主要代谢物傅里叶红外光谱特性及叶绿素含量的影响. 光谱学与光谱分析 **40**, 1283–1288.
- 向芬, 周强, 田向荣, 陈功锡, 肖艳 (2014). 不同生境吉首蒲儿根叶片形态和叶绿素荧光特征的比较. 生态学报 **34**, 337–344.
- 许大全, 张玉忠, 张荣铨 (1992). 植物光合作用的光抑制. 植物生理学通讯 **28**, 237–243.
- 赵秀婷, 王延双, 段劼, 马履一, 何宝华, 贾忠奎, 桑子阳, 朱仲龙 (2021). 盐胁迫对红花玉兰嫁接苗生长和光合特性的影响. 林业科学 **57**, 43–53.
- Al-Khatib K, Paulsen GM (1984). Mode of high temperature injury to wheat during grain development. *Physiol Plant* **61**, 363–368.
- Baker NR (2008). Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis *in vivo*. *Annu Rev Plant Biol* **59**, 89–113.
- Ding XT, Jiang YP, He LZ, Zhou Q, Yu JZ, Hui DF, Huang DF (2016). Exogenous glutathione improves high root-zone temperature tolerance by modulating photosynthesis, antioxidant and osmolytes systems in cucumber seedlings. *Sci Rep* **6**, 35424.
- Foster WJ, Ingram DL, Nell TA (1991). Photosynthesis and root respiration in *Ilex crenata* ‘rotundifolia’ at supraoptimal root-zone temperatures. *HortScience* **26**, 535–537.
- Gur A, Hepner J, Shulman Y (1979). The influence of root temperature on apple trees. IV. The effect on the mineral nutrition of the tree. *J Hort Sci* **54**, 313–321.
- Hao HP, Jiang CD, Zhang SR, Tang YD, Shi L (2012). Enhanced thermal-tolerance of photosystem II by elevating root zone temperature in *Prunus mira* Koehne seedlings. *Plant Soil* **353**, 367–378.
- Jiang CD, Jiang GM, Wang XZ, Li LH, Biswas DK, Li YG (2006). Increased photosynthetic activities and thermostability of photosystem II with leaf development of elm seedlings (*Ulmus pumila*) probed by the fast fluorescence rise OJIP. *Environ Exp Bot* **58**, 261–268.
- Kramer DM, Johnson G, Kiirats O, Edwards GE (2004). New fluorescence parameters for the determination of Q_A redox state and excitation energy fluxes. *Photosynth Res* **79**, 209–218.
- Kyle DJ (1987). The biochemical basis for photoinhibition of photosystem II. In: Kyle DJ, Osmond CB, Arntzen CJ, eds. *Photoinhibition*. Amsterdam: Elsevier. pp. 197–226.
- Liu XZ, Huang BR (2000). Heat stress injury in relation to membrane lipid peroxidation in creeping bentgrass. *Crop Sci* **40**, 503–510.
- Mehta P, Allakhverdiev SI, Jajoo A (2010). Characterization of photosystem II heterogeneity in response to high salt stress in wheat leaves (*Triticum aestivum*). *Photosynth Res* **105**, 249–255.
- Strasser BJ (1997). Donor side capacity of photosystem II probed by chlorophyll a fluorescence transients. *Photosynth Res* **52**, 147–155.
- Takahashi S, Badger MR (2011). Photoprotection in plants: a new light on photosystem II damage. *Trends Plant Sci* **16**, 53–60.
- van der Westhuizen MM, Oosterhuis DM, Berner JM, Boogaers N (2020). Chlorophyll a fluorescence as an indicator of heat stress in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *S Afr J Plant Soil* **37**, 116–119.
- Wu HY, Liu LA, Shi L, Zhang WF, Jiang CD (2021). Photosynthetic acclimation during low-light-induced leaf senescence in post-anthesis maize plants. *Photosynth Res* **150**, 313–326.
- Xia ZQ, Si LY, Jin Y, Fu YF, Wang Q, Lu HD (2021). Effects of root zone temperature increase on physiological indexes and photosynthesis of different genotype maize seedlings. *Russ J Plant Physiol* **68**, 169–178.
- Xu QZ, Huang BR (2000). Growth and physiological responses of creeping bentgrass to changes in air and soil temperatures. *Crop Sci* **40**, 1363–1368.
- Xu QZ, Huang BR, Wang ZL (2002). Photosynthetic responses of creeping bentgrass to reduced root-zone temperatures at supraoptimal air temperature. *J Am Soc Hort Sci* **127**, 754–758.
- Yamori W, Hikosaka K, Way DA (2014). Temperature response of photosynthesis in C_3 , C_4 , and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. *Photosynth Res* **119**, 101–117.

Effects of High Air and Root Zone Temperature on Photosynthetic Fluorescence Characteristics of Grape Leaves

Hao Wang¹, Ming Wang¹, Ting Liang², Yuxin Yao¹, Yuanpeng Du^{1*}, Zhen Gao^{1*}

¹Collaborative Innovation Center of Fruit & Vegetable Quality and Efficient Production in Shandong, State Key Laboratory of Crop Biology, College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

²Daiyue District Bureau of Agriculture and Rural Areas, Tai'an City, Shandong Province, Tai'an 271021, China

Abstract In order to explore the effects of different air and root zone temperature stress on the fluorescence characteristics of grape (*Vitis vinifera*) leaves, we treated potted annual Kyoho seedlings under four different temperature conditions: control (C), high air temperature (HA), high root zone temperature (HR), and combined treatment (CT) of HA and HR. Our results showed that the maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) under HR and CT treatments was more significantly reduced than under C and HA conditions. The actual quantum efficiency Y(II) of the PSII under HR and CT were significantly reduced, while the quantum yield Y(NPQ) of the non-adjusted energy dissipation, and the redox state of $Q_A(1-q_p)$ were significantly increased compared with the control. At the same time, the variable fluorescence (V_j) of the J point was increased significantly under HR and CT treatments, while the quantum yield (ϕ_{E_0}) used for electron transfer and the performance index based on absorption of light energy (PI_{ABS}) were significantly reduced. In addition, the number of active reaction centers per unit area (RC/CS_m) under HR and CT treatments was decreased significantly, while the relative variable fluorescence (W_k) after normalization was increased significantly. Taken together, our study indicated that high temperature in root zone is a key stress affecting leaf fluorescence characteristics by causing damage on the PSII receptor side. High air temperature aggravated the damage on PSII caused by high root zone temperature.

Key words grapes, high air temperature, high root zone temperature, chlorophyll fluorescence

Wang H, Wang M, Liang T, Yao YX, Du YP, Gao Z (2022). Effects of high air and root zone temperature on photosynthetic fluorescence characteristics of grape leaves. *Chin Bull Bot* **57**, 209–216.

* Authors for correspondence. E-mail: duyuanpeng001@163.com; gaoz89@sdau.edu.cn

(责任编辑: 朱亚娜)