

戈壁日光温室限根栽培对油桃营养生长和光合特性的影响

吴鑫泉¹, 王 鸿^{1,2*}, 张 帆², 李小兰¹

(1 甘肃农业大学 园艺学院, 兰州 730070; 2 甘肃省农业科学院 林果花卉研究所, 兰州 730070)

摘 要:在河西走廊气候生态条件下,以油桃品种‘中农金辉’为试验材料设计 135 L、225 L、360 L、576 L 和 1 440 L (对照)限根体积(root restriction volume, RV)处理(RV₁₃₅、RV₂₂₅、RV₃₆₀、RV₅₇₆和 RV₁₄₄₀),测定油桃树体生长、叶绿素含量、光合气体交换参数及叶绿素荧光参数,探讨限根对油桃营养生长及光合荧光特性的影响。结果表明:(1)与对照 RV₁₄₄₀相比,RV₁₃₅和 RV₂₂₅处理的树体干径和新梢长度均显著减小;RV₃₆₀处理的树体干径显著减小,新梢长度差异不显著;RV₅₇₆处理树体干径和新梢长度均差异不显著。(2)与 RV₁₄₄₀相比,RV₁₃₅和 RV₂₂₅处理的叶片叶绿素含量及正午(14:00)的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度均显著降低,其胞间二氧化碳浓度显著升高,而 RV₃₆₀和 RV₅₇₆处理以上各光合参数均无显著差异。(3)与 RV₁₄₄₀相比,限根处理油桃叶片的 OJIP 曲线 J-I 相荧光值大幅降低;正午时分的相对可变荧光差值(ΔV_i)在 K 相小于 0,且 RV₁₃₅和 RV₂₂₅的相对可变荧光差值(ΔV_i)均显著降低;RV₁₃₅和 RV₂₂₅处理的叶绿素荧光比活性参数单位反应中心吸收的光量(ABS/RC)和单位反应中心热耗散的能量(DI_0/RC)较高,最大光化学效率(F_v/F_m)和 PSII 电子传递的量子产额(ϕE_0)较低,其综合性能参数 PI_{total} 分别比对照 RV₁₄₄₀显著降低 34.9%和 27.1%,而 RV₃₆₀和 RV₅₇₆与对照相比差异不显著。研究发现,适当限根既对戈壁日光温室栽培桃树的营养生长有一定的控制作用,但又不影响其光合作用的经济产量,且其最佳限根体积是 360 L,该研究结果为戈壁非耕地日光温室油桃限根栽培提供了理论依据。

关键词:油桃;日光温室;根域限制;光合特性;叶绿素荧光

中图分类号:Q945.79 文献标志码:A

Root Restriction Affects Growth and Photosynthetic Characteristics of Nectarine (*Prunus persica* var. *nectarina* Maxim.) Grown in Gobi Greenhouse

WU Xinquan¹, WANG Hong^{1,2*}, ZHANG Fan², LI Xiaolan¹

(1 College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2 Institute of Fruit and Floriculture Research, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Under the climatic and ecological conditions of Hexi Corridor of Gansu Province, using nectarine variety ‘Zhongnong Jinhui’ as experimental material, we designed the differences of root restriction volume 135 L, 225 L, 360 L, 576 L and control 1 440 L (RV₁₃₅, RV₂₂₅, RV₃₆₀, RV₅₇₆ and RV₁₄₄₀) and investigated the growth, chlorophyll content, photosynthetic gas exchange parameters and fluorescence parameters of nectarine tree grown in Gobi greenhouse. The effects of root restriction on vegetative growth, pho-

收稿日期:2019-09-21;修改稿收到日期:2019-12-20

基金项目:国家自然科学基金(31760558,31360467);农业农村部西北地区果树科学观测实验站项目(S-10-18);嘉峪关市科技局重大科技项目(19-21)

作者简介:吴鑫泉(1993-),男,在读硕士研究生,主要从事果树栽培生理研究。E-mail:2457463437@qq.com

* 通信作者:王 鸿,研究员,硕士研究生导师,主要从事果树栽培与育种工作。E-mail:wrh991130@126.com

tosynthetic and fluorescence characteristics of nectarine were studied. The results shown that: (1) compared with the control RV_{1440} , the stem diameter and shoots length of RV_{135} and RV_{225} treatments were significantly reduced; the stem diameter of RV_{360} treatment was decreased significantly, while the shoot length had no significant effects; both parameters of RV_{576} treatment did not shown significant difference. (2) Compared with RV_{1440} , the chlorophyll content and net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance of RV_{135} and RV_{225} were significantly reduced, and the intercellular CO_2 concentration was significantly increased at 14:00, however, RV_{360} and RV_{576} did not show differences. (3) Compared with RV_{1440} , the J-I phase fluorescence value of OJIP curve of nectarine leaves in root restriction treatments decreased significantly; at 14:00, the relative variable fluorescence difference (ΔV_t) was less than 0 in K phase, and the relative variable fluorescence difference (ΔV_t) of RV_{135} and RV_{225} was decreased significantly. The fluorescence chlorophyll specific activity parameters of RV_{135} and RV_{225} were higher in the absorption flux per reaction center (ABS/RC) and the dissipated flux per reaction center (DI_0/RC), and were lower in the maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) and the quantum yield (ϕE_0) for electron transport (ϕE_0) of PS II. Compared with RV_{1440} , comprehensive performance index PI_{total} of RV_{135} and RV_{225} were decreased by 34.9% and 27.1%, respectively, while the difference between RV_{135} and RV_{225} were not significant. It was found that proper root restriction could not only control the vegetative growth of nectarine trees, but also keep their photosynthetic characteristics and economic yield, and the optimal root restriction volume is 360 L, which provided a theoretical basis for root restriction cultivation of nectarine trees in greenhouse in gobi area.

Key words: nectarine; greenhouse; root restriction; photosynthetic characteristics; chlorophyll fluorescence

中国耕地资源紧缺^[1]。甘肃省以戈壁为主的河西走廊地区,具有光照充足、日照时间长、光质好等发展设施果树产业的优势自然气候条件^[2]。戈壁是粗砂、砾石所覆盖的荒漠地带,在其上发展设施桃产业,需要清除戈壁表面 80 cm 深的沙砾,然后挖取周边的耕地进行客土回填。因此在戈壁建造一座日光温室,会对当地的原耕地及生态环境造成破坏^[3]。

桃(*Prunus persica* L.)属蔷薇科落叶果树,喜光^[4]。日光温室中的桃生长旺盛,通常会影响到光照,进而影响光合作用、果实品质等^[2,5]。一般采用修剪枝条的方式来控制树势,不仅耗时费工,使管理成本增加,并会造成生理性病害^[2,5]。根域限制(rooting restriction),也称限根,是另一种控制桃树体生长的有效方法^[6-8],通过介质把根系控制在一定空间内,限制根系体积和数量、改变根系的分布和结构,进而调节整个植株的生长发育,以达到树体优质高效生产的目的^[9-10]。此外,戈壁日光温室油桃采用限根栽培技术,将大幅减少温室建设时的客土用量,保护当地生态环境。有研究表明,适当限根可控制树体营养生长、提高果实产量和品质,但限根体积过小则会对树体生长产生抑制作用^[11-12]。因此,这项技术的应用首先需要研究确定适宜的限根体积。

光合作用是地球上最重要的化学反应^[13-14],在柑橘^[15]、樱桃^[16]、苹果^[17-18]等树种限根效应研究中,净光合速率、气孔导度和蒸腾速率等参数均是光

合作用特性研究的重要指标。此外,在光合作用过程中,叶绿体光合色素在光能的吸收、传递和转换过程中起着关键作用^[19-20]。受光激发的叶绿素所产生的荧光是研究光合作用的有效探针,叶绿素荧光、光合作用能量转换和热能量耗散三者源于同一激发态,因此可以通过叶绿素荧光的变化探测光合机构的变化及光合作用受环境等的影响情况^[21-23]。叶绿素 a 快相荧光动力学曲线(OJIP 曲线)能全面反映光系统 II (PS II) 的光反应过程、效率和结构^[24]。OJIP 曲线在荧光上升阶段有 O、J、I、P 等相,它反映了光合电子传递链中电子的传递情况,其中 O-J 对光强特别敏感,在胁迫条件下会出现一个峰值 K,而变成 O-K-J 曲线^[25-26],从而可通过对电子传递过程中量子效率等信息的评估,实现无损条件下对叶片光合性能的有效监测^[25,27]。

目前,关于限根对桃光合荧光特性的影响未见报道。本研究通过测定不同限根体积油桃树体营养生长、光合指标及叶绿素 a 快相荧光动力学曲线参数,分析不同限根处理树体的光合荧光特性,确定适宜的限根体积,为戈壁日光温室油桃生产提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料与试验设计

试验地设在甘肃省嘉峪关市新城镇野麻湾村非耕地设施产业园区新建的日光温室内(E 98°22'22",

N 39°55'8")。嘉峪关市位于甘肃西北部,该地原貌为戈壁滩,气候属大陆性季风型,特征为冬季严寒干燥,夏季高温少雨。年日照时数 3 100 h 左右,年平均有效积温($\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) 2 600 $^{\circ}\text{C}$,正常年份无霜期 135 d。

试验材料为油桃品种‘中农金辉’(*Prunus persica* cv. Zhongnongjinhui),砧木为山桃 [*Prunus davidiana* (Carr.) Franch]。该品种于 2012 年 8 月完成芽接,同年 12 月进行芽苗定植,株行距 0.9 m \times 2 m,南北走向,主干形树型,主干离地面 50 cm 以下不留结果枝,栽培管理技术按照王鸿等^[28]的技术操作。

苗木定植前,在温室内原戈壁地表上机械辅助开沟,不同限根处理的长度固定为 0.9 m,宽度 \times 深度(限根体积 L)分别为 0.5 m \times 0.3 m(135 L)、0.5 m \times 0.5 m(225 L)、0.8 m \times 0.5 m(360 L)和 0.8 m \times 0.8 m(576 L),分别表示为 RV₁₃₅、RV₂₂₅、RV₃₆₀和 RV₅₇₆,以土工布作为限根材料。以当地“客土”栽培模式为对照处理,即将原地表下 80 cm 戈壁砂石清除后回填土壤,宽度 \times 深度为 2 m \times 0.8 m(1 440 L),记为 RV₁₄₄₀。对照设独立小区,顺序排列,重复 3 次;其余各处理均按照随机区组试验设计分布,重复 3 次,每重复 2 株,区组面积 150 m²。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 树体生长状况 (1)干径:2014~2016 年,每年 4 月用游标卡尺对嫁接口上 20 cm 处的干径进行测量,每处理各选 3 株树。(2)重回缩修剪前、后新梢长度:每处理各选 3 株树,每株随机选 20 个新梢进行测量。2015 年 4 月中旬重回缩修剪前测量一年生新梢长度;5 月中旬采用重回缩修剪的方法对采果后的油桃进行树体修剪,留树枝条平均长度

为 10 cm。之后于 7 月 14 日、8 月 14 日、9 月 14 日连续对不同处理的修剪枝长度进行测量。

1.2.2 叶绿素含量 在果实收获前 10 d 选 3 株树取样,每株树同一高度选取四个方向枝条的第 5~7 片的功能叶各 1 片混合作为 1 个样,重复 3 次。采用 95%乙醇提取法测定叶绿素含量^[29]。

1.2.3 光合气体交换参数 在果实收获前 10 d 选择连续的晴天进行光合气体交换参数的测定,测定前每处理各选 3 株树,在同一高度的阳面选 1 个枝并做标记。使用 Li-6400XT 型(Li-COR, Linco ln, USA)便携式光合仪在自然光下配合 CO₂ 注入系统测其 8:00 和 14:00(日光温室桃光合作用胁迫响应最敏感时期^[3])的光合气体交换参数,每个时间点重复 3 次。参照温室内自然光合有效辐射,为消除系统误差,采用红蓝光源设定测定期内 8:00 和 14:00 的光合有效辐射(PAR)分别为 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 1 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,CO₂ 注入浓度为 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,叶室温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,记录净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、细胞间 CO₂ 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)。

1.2.4 叶绿素 a 快相荧光动力学参数 与光合气体交换参数同期测定。分别在 8:00、10:00、12:00、14:00、16:00 和 18:00 利用植物效率分析仪(Handy-PEA, Hansatech Instruments Ltd, UK)测定油桃叶片叶绿素 a 快相荧光动力学曲线(OJIP)。与光合气体交换参数选取的 3 株树一致,所有处理叶片测定前均暗适应 30 min,每株树测 3 个重复。参照 Strasser^[30]的方法对 OJIP 曲线进行 JIP-test 分析。相对可变荧光(V_t)计算公式为: $V_t = (F_t - F_0) / (F_m - F_0)$ 。相对可变荧光值差值(ΔV_t) = $V_{t(\text{treatment})} - V_{t(\text{control})}$,

表 1 叶绿素 a 快相荧光动力学曲线提取的参数及意义

Table 1 The parameters and their meanings extracted from the fast fluorescence transient OJIP curve

参数 Parameter	涵义 Meaning
F_0	初始荧光强度 Minimal recorded fluorescence intensity
F_m	最大荧光强度 Maximal recorded fluorescence intensity
F_t	任意时刻的荧光值 Fluorescence value at any time
F_v/F_m	最大光化学效率 Maximal photochemical efficiency
ABS/RC	单位反应中心吸收的光能 Absorption flux per RC
DI ₀ /RC	单位反应中心热耗散的能量 Dissipated energy flux per RC (at $t=0$)
$\Phi E_0 = ET_0/ABS$	用于电子传递的量子产额(在 $t=0$ 时)Quantum yield for electron transport (at $t=0$)
$\phi_0 = ET_0/TR_0$	反应中心捕获的激子中用来推动电子传递到电子传递链中超过 Q _A 的其他电子受体的激子占用来推动 Q _A 还原激子的比率(在 $t=0$ 时)Probability that a trapped exciton moves an electron into the electron transport chain beyond Q _A ⁻ (at $t=0$)
PI _{total}	综合性能指数 Comprehensive performance index

对照处理 RV_{1440} 的 $\Delta V_t = 0$ 。OJIP 曲线上相关参数的涵义见表 1。

1.3 数据处理

所有数据均采用 SPSSV17.0 软件进行数理统计分析,对组间数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA),显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。采用 Excel 2007 制图。

2 结果与分析

2.1 限根处理对油桃树体生长的影响

2.1.1 干径 在连续 3 年的限根实验中,各处理油桃树体干径的表现基本一致(表 2)。随着树龄的增加,各处理油桃树体干径均逐渐增加。与客土回填栽培模式对照 RV_{1440} 相比,同期 RV_{576} 限根处理的干径稍有降低,但差异未达到显著水平;而同期 RV_{360} 、 RV_{225} 和 RV_{135} 限根处理的干径均显著低于对照,但同期 3 处理间无显著差异,它们的干径降幅在 2014、2015、2016 年分别为 25.30%~29.76%、17.09%~31.87%、26.36%~30.39%。可见,过小的限根体积(135~360 L)均显著抑制了油桃干径的加粗生长,且抑制效应有随树龄增大而加重的趋势;而适宜的限根体积(576 L)则不会显著抑制干径加粗。

2.1.2 夏季新梢生长量 各限根处理油桃果实成熟期及重回缩修剪后营养生长期枝条的长度调查结

表 2 不同限根处理下油桃树干径生长的变化

Table 2 The stem diameter of nectarine trees grown in soil volumes with different root restriction treatments

处理 Treatment	干径 Stem diameter/mm		
	2014	2015	2016
RV_{1440} (CK)	39.21±1.91a	42.83±4.22a	52.62±4.21a
RV_{576}	37.91±1.67a	40.65±5.05a	49.12±2.85a
RV_{360}	29.06±1.20b	35.51±4.71b	38.75±5.42b
RV_{225}	29.29±1.88b	32.32±2.47b	36.68±3.54b
RV_{135}	27.54±1.12b	29.18±4.81b	36.63±3.71b

注: RV_{1440} 为当地客土回填栽培模式对照,限根体积 1 440 L; RV_{576} 、 RV_{360} 、 RV_{225} 、 RV_{135} 均为限根处理,限根体积分别为 576、360、225、135 L;表中数值为平均值±SE;同列不同字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异;下同

Note: RV_{1440} is the contrast of local soil backfilling cultivation mode, and the volumes of root restriction is 1 440 L; RV_{576} , RV_{360} , RV_{225} and RV_{135} are all root restriction treatments, which the volumes of root restriction are 576, 360, 225 and 135 L respectively; Values are means ±SE; Values followed by different normal letters within same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same as below

果如图 1 所示。在果实发育期,各限根处理的油桃一年生枝条长度与对照(RV_{1440})相比均显著缩短,且缩短幅度随根域限制程度的增强而增加。其中, RV_{225} 和 RV_{135} 限根处理的一年生枝条长度不到 35 cm,这在目前的栽培技术中无法和长枝修剪栽培技术结合应用,会在一定程度上影响树体整体的产量; RV_{576} 和 RV_{360} 两个限根处理的一年生枝条长度虽也受到一定程度的影响,但达到了 35 cm,对于栽培上来讲是比较理想的长度。日光温室油桃在 5 月中旬重回缩修剪后进入营养生长期(6 月~11 月,重回缩修剪后到落叶前的花芽形成期),枝条生长呈现先缓慢后迅速的趋势。营养生长期调查发现,各限根处理间的枝条长度前期生长缓慢,在 7 月中旬差异不显著;而后生长加快,8 月中旬以后 RV_{225} 和 RV_{135} 处理的新梢长度比对照(RV_{1440})显著降低,而 RV_{360} 和 RV_{576} 处理的新梢长度与对照差异不显著。以上结果说明,过小的限根体积(225 L、135 L)会显著抑制新梢在营养生长期的生长,而 360 L 则是保证日光温室油桃正常营养生长的最小限根体积。

2.2 限根处理对树体叶片叶绿素含量及光合气体交换参数的影响

表 3 显示,限根处理 RV_{360} 和 RV_{576} 油桃具有较高的叶绿素含量,且其叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量均与对照 RV_{1440} 差异不显著,而 RV_{135} 和 RV_{225} 处理叶绿素含量则均比对照及 RV_{360} 、 RV_{576} 处理显著降低, RV_{135} 和 RV_{225} 处理的总叶绿素含量分别比对照降幅显著降低 25.52% 和 32.34%。同时,在控制条件(CO_2 浓度 $400 \mu mol \cdot mol^{-1}$) 下测定的叶片光合气体交换参数结果(表 3)表明,油桃叶片在 8:00 时的净光合速率(P_n)、胞间 CO_2 浓度

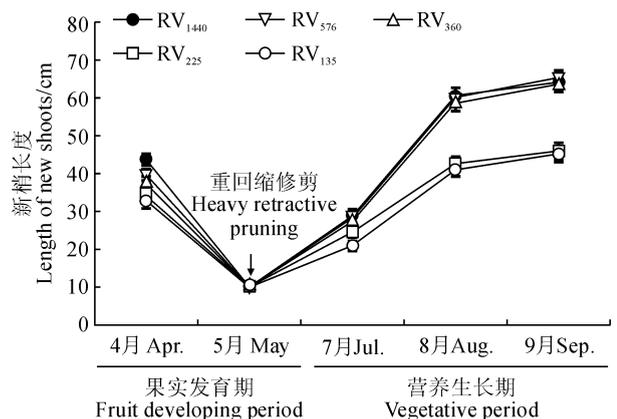


图 1 不同限根处理下油桃对新梢长度的变化
Fig. 1 The length of new shoots of nectarines under soil volumes in different root restriction treatments

(C_i)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)在各限根处理及对照间均差异不显著;随着温度升高和光照的增强,14:00时各光合参数在各处理间均表现出显著差异。其中,在14:00时,随着限根体积的减小,油桃叶片 P_n 、 T_r 和 G_s 有逐渐减小的趋势,而其 C_i 却表现出逐渐增大的趋势;此时 RV_{135} 和 RV_{225} 处理的 P_n 、 T_r 和 G_s 均比对照显著降低,而其 C_i 比对照显著增加;而此时 RV_{576} 和 RV_{360} 处理的 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 均与对照无显著差异。另外,与8:00时相应处理比较,各处理14:00油桃叶片 P_n 、 T_r 和 G_s 均明显增加,而同期 C_i 则明显减少。以上结果说明油桃叶片光合作用过程在适当限根条件下(576、360 L)可像对照一样正常进行,但在过小的限根体积下受到显著抑制。

表3 不同限根处理下油桃叶绿素含量及光合气体交换参数的变化

Table 3 The chlorophyll content and photosynthetic gas exchange parameters of nectarine under different root restriction treatments

处理 Treatment	叶绿素 a Chl a/(mg·g ⁻¹)	叶绿素 b Chl b/(mg·g ⁻¹)	总叶绿素 Total Chl/(mg·g ⁻¹)	净光合速率 P_n /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	
				8:00	14:00
RV_{1440}	2.61±0.01a	0.76±0.07a	3.37±0.08a	6.96±0.34a	13.58±0.63a
RV_{576}	2.49±0.21a	0.71±0.05a	3.2±0.26a	6.85±0.33a	13.81±0.64a
RV_{360}	2.33±0.01a	0.78±0.03a	3.11±0.03a	6.34±0.21a	13.68±0.68a
RV_{225}	2.03±0.12b	0.48±0.03b	2.51±0.13b	6.35±0.25a	11.60±0.51b
RV_{135}	1.76±0.07c	0.52±0.02b	2.28±0.09b	6.25±0.5a	10.35±0.60b

处理 Treatment	胞间 CO ₂ 浓度 C_i /($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)		蒸腾速率 T_r /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		气孔导度 G_s /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	
	8:00	14:00	8:00	14:00	8:00	14:00
RV_{1440}	334.71±10.35a	259.91±3.17b	3.31±0.32a	8.66±0.41a	0.22±0.01a	0.40±0.02a
RV_{576}	325.79±16.04a	257.09±2.04b	2.98±0.28a	8.57±0.11a	0.21±0.03a	0.40±0.01a
RV_{360}	327.15±8.03a	264.17±6.62ab	2.87±0.25a	8.50±0.34a	0.2±0.02a	0.38±0.01a
RV_{225}	324.22±7.03a	285.11±8.29a	2.87±0.02a	7.69±0.19b	0.2±0.01a	0.36±0.01b
RV_{135}	326.61±5.72a	296.87±3.77a	2.64±0.39a	7.52±0.45b	0.18±0.02a	0.34±0.02b

2.3 限根处理对树体叶绿素 a 快相荧光动力学特征的影响

油桃在不同限根处理下早晨(8:00)和中午(14:00)的叶绿素 a 快相荧光动力学曲线(OJIP)如图2所示。在早晨时,各限根处理间油桃叶片 OJIP 曲线差异不明显;在中午时,各限根处理间 OJIP 曲线偏离程度从 K 相开始明显增加,各处理的最大荧光值整体降低, RV_{135} 和 RV_{225} 处理在 P 相的荧光值降低幅度更大,并与对照相比差异显著。为了更清楚地观察各相荧光的差异,以对照 RV_{1440} 的相对可变荧光值(V_i)绘制的 OJIP 曲线为参照,然后用其他4个限根处理与对照曲线的相对可变荧光差值 ΔV_i 重新作图(图3, a、b)。结果显示,各限根处理油桃叶片的 OJIP 曲线中 K 相皆低于对照;在中午

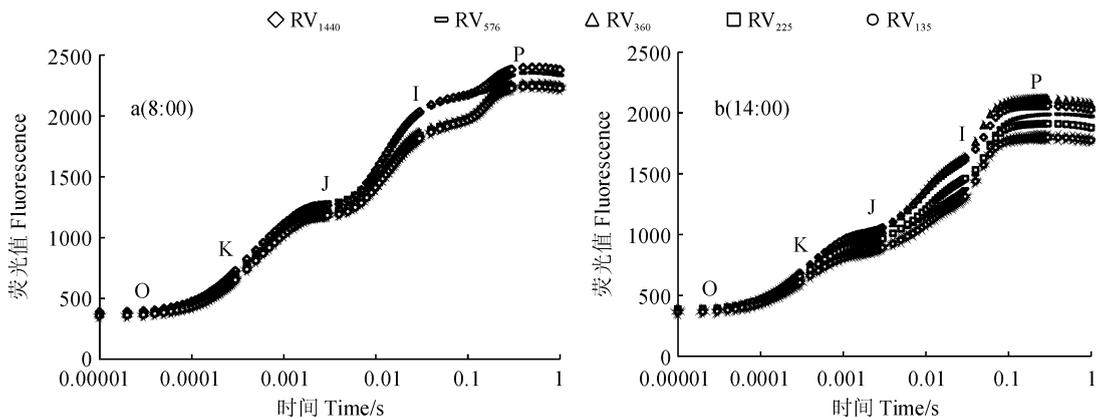


图2 不同限根处理下油桃叶片 OJIP 曲线的变化

Fig. 2 The OJIP curves of nectarine leaves under different root restriction treatments

时,各限根处理的 OJIP 曲线 K-I 相均比对照明显降低,且 K 相的相对可变荧光差值 $\Delta V_k < 0$; 与对照 RV_{1440} 相比,限根处理 RV_{135} 和 RV_{225} 的 ΔV_i 显著降低(图 3, b)。

同时,不同限根处理油桃叶片叶绿素 a 荧光动力学参数的日变化曲线(图 4)显示,最大光化学效率(F_v/F_m)呈现先减小后增大的趋势,并在正午时分(12:00)达到最小值;PS II 电子传递的量子产额

(ET_0/ABS)、电子传到电子传递链中 Q_A^- 下游的电子受体的概率(ET_0/TR_0)和综合性能指数(PI_{total})先增加至 10:00 时达到最大值,然后开始减小,14:00 后又开始增大;单位反应中心吸收的光能(ABS/RC)和单位反应中心热耗散的能量(DI_0/RC)表现出先增大后减小的趋势。

另外,进一步分析发现,各限根处理油桃叶片叶绿素荧光参数在 8:00~10:00 没有表现出显著差异,

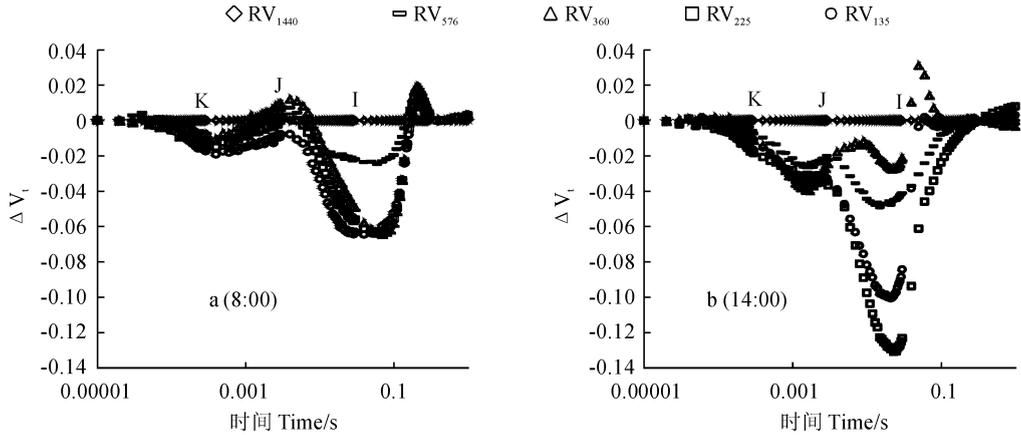


图 3 不同限根处理下油桃叶片相对可变荧光差值 ΔV_i 的变化

Fig. 3 The relative variable fluorescence difference ΔV_i in leaves of nectarine under different rooting restriction treatments

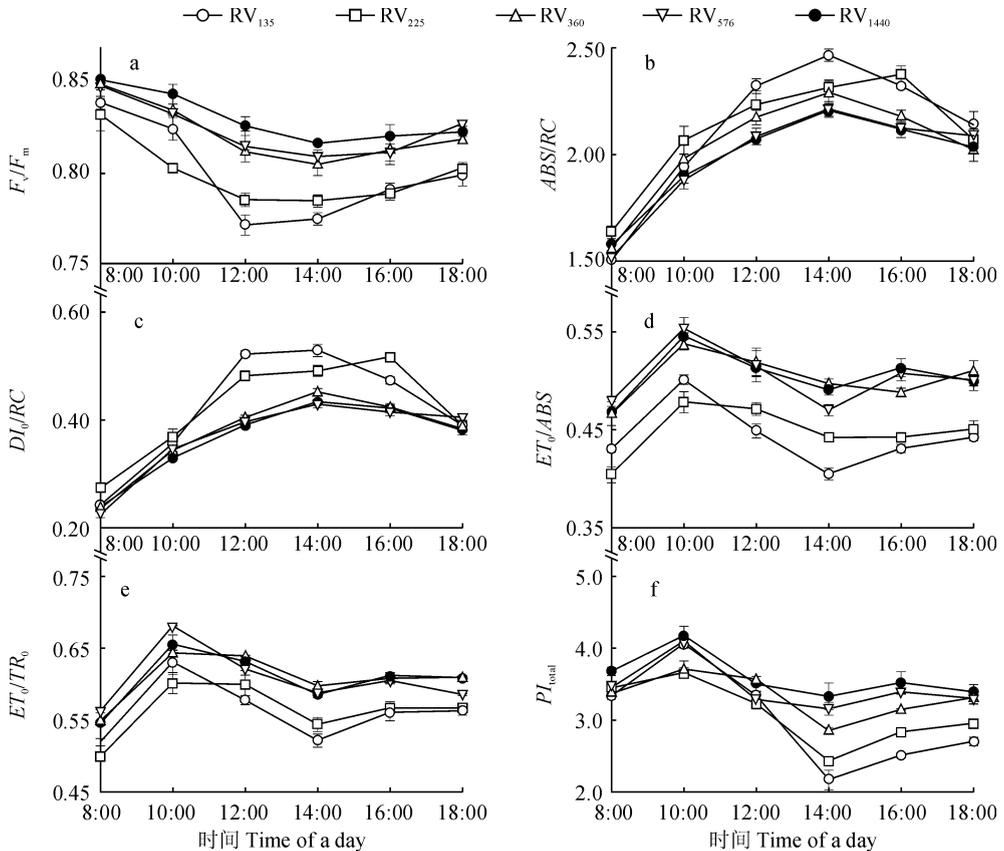


图 4 不同限根处理下油桃叶片 OJIP 叶绿素荧光参数日变化

Fig. 4 Diurnal variations of the OJIP Chl a fluorescence transients in leaves of nectarine under different rooting restriction treatments

而在 14:00 呈显著变化(图 4)。其中,在 14:00 时,与对照 RV₁₄₄₀ 相比,限根处理 RV₁₃₅ 和 RV₂₂₅ 油桃叶片的 F_v/F_m 分别降低了 5.14% 和 3.92%(图 4, a), ABS/RC 分别增加了 11.8% 和 4.9%(图 4, b), DI_0/RC 分别增加了 33.8% 和 23.6%(图 4, c), 且均差异达到显著水平,而限根处理 RV₃₆₀ 和 RV₅₇₆ 与对照相比差异不显著;与此同时,限根处理 RV₁₃₅ 和 RV₂₂₅ 油桃叶片的 φE_0 分别比同期对照 RV₁₄₄₀ 降低了 17.5% 和 9.8%(图 4, d), ϕ_0 分别降低了 10.9% 和 7.1%(图 4, e), PI_{total} 分别降低了 34.9% 和 27.1%, 而限根处理 RV₃₆₀ 和 RV₅₇₆ 的相关叶绿素荧光参数与同期对照差异不显著(图 4, f)。以上结果说明,油桃叶片的荧光参数受限根体积影响,中午尤为明显; F_v/F_m 和 PI_{total} 在适当限根处理(360 L 和 576 L)下变化不显著,而在过度限根处理(135 L 和 225 L)下显著降低,且会对放氧复合体和反应中心造成伤害。

3 讨论

限根栽培通过对根系限制生长来调节植株的生长发育,从而达到优质高产高效的栽培目的^[2]。本研究中, RV₁₃₅ 和 RV₂₂₅ 限根处理显著减弱了油桃的树体生长; RV₃₆₀ 处理虽然显著降低了干径的生长,但对新梢长度影响不大; RV₅₇₆ 处理的干径和新梢长度均未出现显著抑制。说明适度限根处理对油桃树体生长影响不大,过度限根则对其造成胁迫,严重抑制了树体的营养生长,这与赵宝龙等^[17,31]的研究结果一致。

光合作用是植物对逆境最敏感的生理过程之一^[26]。本研究中,同一限根体积处理下,油桃叶片的 P_n 、 T_r 和 G_s 均表现为中午大于早上,而其 C_i 表现为中午小于早上。这是因为早上光照强度弱,光合作用弱,叶片同化 CO_2 的能力弱,导致 C_i 较高。同时,早上油桃叶片的 P_n 、 C_i 、 T_r 和 G_s 在各处理间均无显著差异;在中午时, RV₁₃₅ 和 RV₂₂₅ 处理的 P_n 、 C_i 、 T_r 和 G_s 与对照差异显著,而此时处理 RV₃₆₀ 和 RV₅₇₆ 的各指标与对照差异不显著。处理 RV₁₃₅ 和 RV₂₂₅ 的 T_r 和 G_s 较低,这可能是因为限根体积过小使根域环境的缓冲能力减弱^[16],特别在中午高温条件下,更易造成水分、温度等参数的变化^[32],致使根系的吸水能力减弱,从而叶片 T_r 降低,对高温强光条件的适应性变弱,造成气孔关闭, G_s 下降。中午时,随着限根体积减小,各处理油桃叶片 P_n 逐渐减小,而其 C_i 却逐渐增加,这可能是因为 T_r 降低引起叶温的升高,使光合作用的 RuBP 羧化酶活性降低,

导致 CO_2 的同化能力下降,从而使得 C_i 增大,这与秦嗣军^[16]的研究结果一致。而徐红霞^[15]研究大小盆栽处理的柑橘光合特性时发现,小盆栽虽然使柑橘叶片气孔导度下降,但仍然能维持正常的光合作用, C_i 保持不变,这与本研究中处理 RV₃₆₀ 的表现相似。叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,其含量直接反映植物的营养状况和光合能力^[33]。本研究中,与对照 RV₁₄₄₀ 相比,限根处理 RV₁₃₅ 和 RV₂₂₅ 的油桃叶片总叶绿素含量均显著降低,而限根处理 RV₃₆₀ 和 RV₅₇₆ 的总叶绿素含量无显著变化,各限根处理的叶绿素含量与 P_n 表现相同的变化趋势,这和张秋英等^[34-35]的研究结果一致。

光合作用的光系统 II (PS II) 位于叶绿体类囊体膜上,是电子传递链中最敏感的部位^[26]。当其受到伤害时,在极短的时间内叶绿素荧光强度上升, K 点出现,从而使 OJIP 曲线变成 OKJIP 曲线^[36-37]。K 点的出现是由水裂解系统被抑制和 Q_A 之前受体侧的部分被抑制造成的,这会导致放氧复合体(OEC)受损害^[37-38]。本研究中,在 14:00 时,各限根处理的油桃叶片 OJIP 曲线 J-I 相大幅下降, K 相的相对可变荧光差值 ΔV_i 均低于 0, 其中限根处理 RV₁₃₅ 和 RV₂₂₅ 的 ΔV_i 处于最低水平, RV₃₆₀ 处理的叶片 ΔV_i 最接近于 0。说明正午高温强光胁迫条件下, RV₃₆₀ 处理的油桃叶片未受到伤害,而 RV₁₃₅ 和 RV₂₂₅ 处理的叶片放氧复合体受伤,电子在供体侧和受体侧的传递受到抑制^[38], 导致其 P_n 显著降低。同时,限根处理使 OJIP 曲线的最大荧光值下降,这与高温胁迫下 OJIP 曲线的变化趋势一致^[25]。

植物的叶绿素荧光参数可以更确切地反映光合器官对光能的吸收、转化和耗散等情况^[24,36]。本研究发现, RV₁₃₅ 和 RV₂₂₅ 限根处理的油桃随着正午温度升高和光照增强,其叶片 DI_0/RC 和 ABS/RC 均高于对照 RV₁₄₄₀。这可能是由于随着温度升高, PS II 的反应中心(RC, 在 JIP-测定中有活性的反应中心^[36])逐渐失活,从而使 Q_A^- 的数量明显减少,降低了每个 PS II 吸收光能的天线色素的 $RC_s(RC/ABS)$, 导致 ABS/RC 值随着限根体积减小而增大,同时 PS II 的 $RC(DI_0/RC)$ 也伴随着增加。说明在 RV₁₃₅ 和 RV₂₂₅ 限根处理下油桃叶片单位反应中心吸收和捕获的光能和用于热耗散的能量增加,而用于电子传递的光能和有活性的反应中心数量减少。

综合性能参数 PI_{total} 主要用于研究光系统间的电子传递活性及光系统 I (PS I) 的相关性能^[36-37]。本研究中,不同限根处理油桃叶片的 PI_{total} 在 14:00

出现明显变化, RV_{135} 和 RV_{225} 处理分别比对照 RV_{1440} 降低了 34.9% 和 27.1%, 而 RV_{360} 和 RV_{576} 分别比对照降低了 14.3% 和 5.1%。说明限根处理减弱了油桃叶片的光反应活性, 且限根体积过小 (RV_{135} 和 RV_{225}) 会引起严重的胁迫效应, 导致其 PI_{total} 降低^[26]。本研究中 RV_{135} 和 RV_{225} 处理对桃树的生长有严重的限制作用, 且在高温强光下更易对

放氧复合体和反应中心造成伤害, 从而使叶片光合速率及荧光特性减弱; 而 RV_{360} 处理对桃树的营养生长有一定的控制作用, 但又不影响其光合作用和经济产量^[2]。综合上述分析可知, 在保证温室油桃正常生长和高产的前提下, 360 L 是适宜的限根栽培体积, 与常规栽培 1 440 L 的根系体积相比, 可使客土量减少 70% 以上, 达到保护当地生态环境的目的。

参考文献:

- [1] 余振国, 胡小平. 我国粮食安全与耕地的数量和质量关系研究[J]. 地理与地理信息科学, 2003, **19**(3): 45-49.
YU Z G, HU X P. Research on the relation of food security and cultivated land's quantity and quality in China[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2003, **19**(3): 45-49.
- [2] 牛茹萱, 王晨冰, 赵秀梅, 等. 非耕地日光温室油桃根域限制对冠层特征及果实品质的影响[J]. 果树学报, 2017, **34**(1): 26-32.
NIU R X, WANG C B, ZHAO X M, *et al.* Effects of root restriction on canopy characteristics and fruit quality of greenhouse-grown nectarine in non-arable land [J]. *Journal of Fruit Science*, 2017, **34**(1): 26-32.
- [3] WANG H, WANG C B, WANG F L, *et al.* Root restriction effects of nectarines grown in a non-arable land greenhouse [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, **250**: 399-404.
- [4] 贾浩, 郝建博, 曹洪波, 等. 遮荫对‘保佳红’桃树叶快速叶绿素荧光诱导动力学曲线的影响[J]. 西北植物学报, 2015, **35**(9): 1861-1867.
JIA H, HAO J B, CAO H B, *et al.* Effects of shading on fast chlorophyll fluorescence induction dynamics of ‘Baojiahong’ peach leave [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, **35**(9): 1 861-1 867.
- [5] MILLER S S. Root pruning and trunk scoring have limited effect on young bearing apple trees[J]. *HortScience*, 1995, **30**(5): 981-984.
- [6] EREZ A, RAN Y, BAR-YOSEF B. The effect of restricted root volume on the development, yield and dry-matter partitioning in young fruiting peach trees[J]. *Acta Horticulturae*, 1992, **322**: 199-214.
- [7] RAN Y, HABIB R, BAR-YOSEF B, *et al.* Root volume effects on nitrogen uptake and partitioning in peach trees[J]. *Agronomy Journal*, 1994, **86**: 530-534.
- [8] BOLAND A M, JERIE P H, *et al.* Long-term effects of restricted root volume and regulated deficit irrigation on peach: II. Productivity and water use[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2000, **125**(1): 143-148.
- [9] 杨洪强, 李林光, 接玉玲. 园艺植物的根系限制及其应用[J]. 园艺学报, 2001, **28**: 705-710.
YANG H Q, LI L G, JIE Y L. Root restriction of horticultural plant and its application[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2001, **28**: 705-710.
- [10] 王世平, 张才喜, 罗菊花, 等. 果树根域限制栽培研究进展[J]. 果树学报, 2002, **19**(5): 298-301.
WANG S P, ZHANG C X, LUO J H, *et al.* Advances in research of rooting-zone restricted fruit growing[J]. *Journal of Fruit Science*, 2002, **19**(5): 298-301.
- [11] WILLIAMSON J G, COSTON D C, CORNELL J A. Root restriction affects shoot development of peach in a high-density orchard[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1992, **117**(3): 362-367.
- [12] MANDRE O, RIEGER M, MYERS S C, *et al.* Interaction of root confinement and fruiting in peach[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1995, **120**(2): 228-234.
- [13] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 16-21.
- [14] 栗媛. 绿洲生境轮台白杏光合生理生态特征[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
- [15] 徐红霞, 张慧琴, 谢鸣, 等. 盆栽对柑橘叶片光合和叶绿素荧光特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2010, **22**(4): 433-438.
XU H X, ZHANG H Q, XIE M, *et al.* Effects of pot cultivation on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics in leaves of citrus [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2010, **22**(4): 433-438.
- [16] 秦嗣军, 吕德国, 刘国成, 等. 盆栽樱桃植株的光合特性[J]. 园艺学报, 2007, **34**(1): 35-38.
QIN S J, LÜ D G, LIU G C, *et al.* Photosynthetic characteristics of cherry grown in pot[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2007, **34**(1): 35-38.
- [17] 王伯花. 限根栽培对苹果苗木质量的影响及相关生理机制研究[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2016.
- [18] 马慧丽, 吕德国, 秦嗣军, 等. 寒富苹果不同限根栽培植株的光合特性比较[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, **38**(6): 792-795.
MA H L, LÜ D G, QIN S J, *et al.* Photosynthetic characteristics of Hanfu apple tree in different root-zone space[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2007, **38**(6): 792-795.
- [19] 赵会杰, 邹琦, 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.
ZHAO H J, ZOU Q, YU Z W. Chlorophyll fluorescence analysis technique and its application to photosynthesis of plant [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2000, **34**(3): 248-251.

- [20] 张国盛, 郝蕾, 闫子娟, 等. 6种树种叶片叶绿素荧光动力学参数对土壤水分变化的响应[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(11): 3 079-3 085.
ZHANG G S, HAO L, YAN Z J, *et al.* The responses of chlorophyll fluorescence kinetics parameters of six tree species to soil moisture changes [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(11): 3 079-3 085.
- [21] SAYED O H. Chlorophyll fluorescence as a tool in cereal crop research[J]. *Photosynthetica*, 2003, **41**(3): 321-330.
- [22] 王发林. 温室内外杏、油桃的光合特性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [23] 徐澜, 高志强, 安伟, 等. 冬麦春播条件下旗叶光合特性、叶绿素荧光参数变化及其与产量的关系[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(1): 133-142.
XU L, GAO Z Q, AN W, *et al.* Flag leaf photosynthetic characteristics, change in chlorophyll fluorescence parameters, and their relationships with yield of winter wheat sowed in spring[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(1): 133-142.
- [24] 孟鹏, 安宇宁, 白雪峰. 沙地赤松光合及叶绿素a快相荧光动力学特性[J]. 生态学报, 2016, **36**(11): 3 469-3 478.
MENG P, AN Y N, BAI X F. Photosynthetic characteristics and chlorophyll a fluorescence induction parameters of *Pinus densiflora* on sandy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(11): 3 469-3 478.
- [25] 张溢, 王慧娟, 于长青. 超旱生植物沙冬青高温胁迫下的快速叶绿素荧光动力学特征[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(6): 2 272-2 277.
ZHANG M, WANG H J, YU C Q. The examination of high temperature stress of *Ammopiptanthus mongolicus* by chlorophyll fluorescence induction parameters[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(6): 2 272-2 277.
- [26] 赵和丽, 杨再强, 王明田, 等. 高温高湿胁迫及恢复对番茄快速荧光诱导动力学的影响[J/OL]. 生态学杂志, 2019: 1-11 [2019-09-17]. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201908.029>.
ZHAO H L, YANG Z Q, WANG M T, *et al.* Effects of high temperature and high humidity stress and restoration on the fast fluorescence induction dynamic of tomato leaves[J/OL]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019: 1-11 [2019-09-17]. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201908.029>.
- [27] DEMMIG-ADAMS B, III WWA. 1996. The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis [J]. *Trends in Plant Science*, 1996, **1**(1): 21-26.
- [28] 王鸿, 李宽莹, 陈建军, 等. 非耕地日光温室桃根域限制栽培关键技术[J]. 甘肃农业科技, 2015, **8**: 93-94.
WANG H, LI K Y, CHEN J J, *et al.* Key techniques of peach root zone restriction cultivation in non-arable solar greenhouse[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2015, **8**: 93-94.
- [29] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 71-77.
- [30] STRASSER R J, SRIVASTAVA A, TSIMILLI-MICHAEL M. Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient[M]. //PAPAGEORGIOU G C, GOVINDJEE. Chlorophyll A Fluorescence: A Signature of Photosynthesis, Advances in Photosynthesis and Respiration Series. 19. Berlin: Springer, 2004: 321-362.
- [31] 赵宝龙, 孙军利. 不同限根方式及程度对3年生蟠桃生长结果的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2011, **29**(3): 282-285.
ZHAO B L, SUN J L. Effects of root confinement on growth and development of flat peach (*Prunus persica* var. *comprens*a Bean) [J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2011, **29**(3): 282-285.
- [32] 方金豹, 顾红, 陈锦永, 等. 根域限制对幼年桃树生长发育的影响[J]. 中国农业科学, 2006, **39**(4): 779-785.
FANG J B, GU H, CHEN J Y, *et al.* Effects of restricted root volume on growth and development of young peach trees [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, **39**(4): 779-785.
- [33] 吴久赞, 廉苇佳, 曾晓燕, 等. 不同品种葡萄对高温的生理响应及耐热性评价[J]. 西北植物学报, 2019, **39**(6): 1 075-1 084.
WU J Y, LIAN W J, ZENG X Y, *et al.* Physiological response to high temperature and heat tolerance evaluation of different grape cultivar[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(6): 1 075-1 084.
- [34] 张秋英, 李发东, 刘孟雨. 冬小麦叶片叶绿素含量及光合速率变化规律的研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, **13**(3): 95-98.
ZHANG Q Y, LI F D, LIU M Y. Changing laws of chlorophyll content and photosynthetic rate in winter wheat leaves [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, **13**(3): 95-98.
- [35] 赵通, 程丽, 王城, 等. 不同苹果砧穗组合的生长及光合特性[J]. 西北植物学报, 2018, **38**(9): 1 707-1 716.
ZHAO T, CHENG L, WANG C, *et al.* Effect of different apple scion-rootstock combinations on growth and photosynthesis characteristics[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, **38**(9): 1 707-1 716.
- [36] 李鹏民, 高辉远, STRASSER R J. 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[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005, **31**(6): 559-566.
LI P M, GAO H Y, STRASSER R J. Application of the fast chlorophyll fluorescence induction dynamics analysis in photosynthesis study[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2005, **31**(6): 559-566.
- [37] CHEN H X, LI W J, AN S Z, *et al.* Characterization of PS II photochemistry and thermostability in salt-treated *Rumex* leaves[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2004, **161**(3): 257-264.
- [38] STEFANOVA D, PETKOVAB V, DENEVC I D. Screening for heat tolerance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) lines and cultivars using JIP-test[J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, **128**: 1-6.