

根域体积限制对芹菜幼苗生长和气体交换 及叶绿素荧光参数的影响

曲继松, 张丽娟, 冯海萍, 杨冬艳

(宁夏农林科学院 种质资源研究所, 银川 750002)

摘 要:以芹菜品种‘皇后’为试材, 采用自配育苗基质(柠条粉: 珍珠岩: 蛭石=7: 2: 1 体积比), 按照不同根域体积(110.07、67.20、39.06、26.82、19.76、12.21、7.28 cm³/穴)进行育苗, 探索在柠条混配基质条件下不同根域体积水平对芹菜幼苗生长、气体交换和叶绿素荧光动力学诱导曲线的影响, 为柠条混配基质条件下设施蔬菜育苗提供科学依据。结果表明: (1)芹菜幼苗株高、叶片数、根长、根系体积、地上部鲜质量、地上部干质量、地下部鲜质量和地下部干质量均随着根域体积的减小而降低; 根域体积最大(110.07 cm³/穴)时的净光合速率和蒸腾速率分别比根域体积最小(7.28 cm³/穴)时高出 64.13% 和 18.87%。(2)气孔导度变化总体随着根域体积的减少而减少, 胞间 CO₂ 浓度变化总体受根域体积影响不大。(3)根域体积过大(110.07 cm³/穴)或偏小(7.28 cm³/穴)都会影响 PSII 光合电子传递, 均使得 PSII 反应中心用于热耗散的能量高于用于电子传递的能量, 用于电子传递的量子产额(ϕ_{E0})、 ϕ_0 值、单位面积捕获的光能(TR_0/CS)和单位面积捕获的光能(TR_0/CS)分别在根域体积为 25.68、14.34、17.32 和 19.21 cm³/穴时达到最大。研究认为, 根域体积限制直接影响着芹菜幼苗气体交换和叶绿素荧光参数的变化, 进而影响幼苗的光合作用及生长。

关键词: 柠条基质; 根域体积; 秧苗密度; 芹菜; 光合特性; 叶绿素荧光诱导动力学曲线

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effect of Root-Zone Volume Restriction on the Growth and Gas Exchange Parameters and Chlorophyll Fluorescence Parameters of *Apillm graveolens* L. Seedling

QU Jisong, ZHANG Lijuan, FENG Haiping, YANG Dongyan

(Institute of Germplasm Resources, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science, Yinchuan 750002, China)

Abstract: The *Apillm graveolens* L. variety of ‘Queen’ and the self-made nursery matrix (Caragana powder: perlite: vermiculite=7: 2: 1 by volume) as test materials, plugs of different size (32 cells to 288 cells/plate) were used to nurture seedlings. The effects of volume size of the root domain on *A. graveolens* L. seedlings growth, gas exchange and chlorophyll fluorescence induction kinetics curves under the conditions of Caragana mixed matrix were investigated to provide the scientific basis for nurturing vegetable seedlings with Caragana mixed matrix and the resource utilization theory of Caragana. The results showed that: (1) *A. graveolens* L. plant height, leaf number, root length, root volume, shoot fresh weight, shoot dry mass, root fresh weight and root dry weight reduce with the decrease of volume of the root domain. (2) Net photosynthetic rate and transpiration rate of 110.07 cm³/hole were higher by 64.13% and 18.87% than

收稿日期: 2014-07-03; 修改稿收到日期: 2014-12-21

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(NZ12241); 宁夏科技攻关项目(2012ZYH110); 国家科技支撑项目(2014BAD05B02)

作者简介: 曲继松(1980—), 男, 硕士, 助理研究员, 从事设施环境调控和生物质资源利用研究。E-mail: qujs119@126.com

that of root volume $7.28 \text{ cm}^3/\text{hole}$; (3) Stomatal conductance reduced with the root domain volume decreases, intercellular CO_2 concentration was not much affected by the root domain volume; Root domain too large ($110.07 \text{ cm}^3/\text{hole}$) or too small ($7.28 \text{ cm}^3/\text{hole}$) would affect the PS II photosynthetic electron transfer. When the root domain volume was $25.68 \text{ cm}^3/\text{hole}$, φ_{E_0} value reached the maximum, when the root domain volume reached $14.34 \text{ cm}^3/\text{hole}$, ϕ_0 value was the maximum, when the root domain volume was $17.32 \text{ cm}^3/\text{hole}$, TR_0/CS value reached maximum; when the root domain volume reached $19.21 \text{ cm}^3/\text{hole}$, ET_0/CS value was the maximum. Therefore, the *A. graveolens* L. seedlings gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters change were directly affected by the root domain volume, and then affecting the photosynthesis and growth of the seedlings.

Key words: *Caragana* substrates; root-zone volume restriction; seedling density; *Apillm graveolens* L.; photosynthetic characteristics; chlorophyll a fluorescence transient

柠条(*Caragana korshinskii*)是蝶形花科(Papilionaceae)锦鸡儿属(*Caragana*)植物栽培种的通称,落叶灌木。柠条作为中国“三北”地区一种广泛分布的乡土灌木树种,由于其根系发达、耐旱性强已成为水土保持和防风固沙的主要灌木树种^[1-2]。对于多年生长的柠条,必须进行平茬抚育。如果不进行平茬,柠条就会出现严重的木质化现象。木质化柠条输送养分和水分的能力会越来越弱,然后逐渐干枯死亡。“三北”地区柠条种植面积广,占地面积大,估计全国柠条的生长面积至少在 133.3 万 hm^2 以上,每年需要平茬的面积大约有 33.3 万 hm^2 ,这样将会产生大量的平茬枝条。前人对柠条的研究主要集中在生理特性^[3-6]、环境条件对生长发育的影响^[7-11]及柠条利用^[12-13]等方面;本课题组在 2009~2013 年间以柠条平茬后的枝条经过粉碎的柠条粉作为育苗基质的探索性试验已经取得了初步成功,尤其是在西瓜^[14]、甜瓜^[15]、茄子^[16]、辣椒^[17]等育苗上取得较好表现。目前国外开发了椰子壳、锯末等替代草炭基质,并应用于商业化生产^[18-19],国内在以木糖渣、芦苇末、油菜秸秆、蚯蚓粪等工农业废弃物为原料开发草炭替代基质方面也作了较为深入的研究^[20-23];容器苗根域体积是固定的,容易对地下部分生长造成限制,进而影响地上部分的生长,基质与容器的筛选一直是国内外容器育苗研究的重要内容^[24-30]。

目前柠条基质配型筛选研究已经基本确定了柠条基质的复混配比类型,但是使用柠条复混基质进行多种蔬菜育苗过程中的穴盘选择存在一定不确定性,因此本研究以芹菜为样本,不同穴数标准穴盘为试材,测定分析不同根域体积限制对芹菜幼苗生长、气体交换和叶绿素荧光动力学诱导曲线的影响,以判断何种规格穴盘更适宜柠条基质芹菜育苗,为柠条资源合理利用和工厂化育苗生产提供理论依据和技术支撑,提高沙产业的经济效益和生态效益。

1 材料和方法

1.1 试验地点

试验地点设在宁夏银川市宁夏农林科学院园林场试验基地育苗专用温室内,位于 $106^{\circ}09'00.55''\text{E}$, $38^{\circ}38'57.89''\text{N}$,海拔 1117 m 。银川市属典型的中温带大陆性气候,四季分明,春迟夏短,秋早冬长,昼夜温差大,雨雪稀少,蒸发强烈,气候干燥,风大沙多等。年平均气温 8.5°C 左右,年平均日照时数 $2800 \sim 3000 \text{ h}$,年平均降水量 200 mm 左右,无霜期 185 d 左右。

1.2 试验材料

供试芹菜品种为‘皇后’,引自于法国 Tezier 公司,供试柠条粉购自宁夏回族自治区盐池县源丰草产业有限公司, 1 m^3 柠条粉加入 2.0 kg 尿素、 5 kg 商品有机肥($\text{N}:\text{P}:\text{K}=12:8:9$),高温静态发酵 90 d 后,加入珍珠岩和蛭石(柠条粉:珍珠岩:蛭石= $7:2:1$,体积比),作为育苗基质使用。

1.3 试验设计

试验时间为 2013 年 10 月 20 日~2014 年 1 月 10 日,试验在 10 m 大跨度育苗专用日光温室内进行。试验采用 $29 \text{ cm} \times 58 \text{ cm}$ 标准穴盘,设置 7 个不同规格的标准穴盘,以确保每个处理的根域体积、秧苗密度不同(具体规格见表 1),每个处理重复 3 次。

表 1 各处理基本状况

Table 1 The basic situation of each treatment

处理 Treatment	穴盘规格 Plug size /(Hole/Plug)	根域体积 Root-zone volume /(cm^3/Hole)	秧苗密度 Seedling density /(Plant/ m^2)
I	32	110.07	190.25
II	50	67.20	297.27
III	72	39.06	428.06
IV	98	26.82	582.64
V	128	19.76	761.00
VI	200	12.21	1189.06
VII	288	7.28	1712.25

所有穴盘在育苗床架上摆放,每个穴盘按照南北方向摆放,所有穴盘横向并排一字排开,与温室前沿平行,距离温室前沿 3 m。将配制后的柠条粉基质装填入 7 种不同规格的育苗穴盘进行芹菜育苗试验,水分管理采用见干见湿方法管理,待处理Ⅲ的 90% 幼苗第五片真叶完全展开后进行幼苗的植株生长、气体交换及叶绿素荧光参数的测定。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 生长指标 生长指标于出苗后第 60 天测定。幼苗株高、根长用直尺测量,根系体积采用排水法测定,根系活力测定采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法^[31],根冠比=地下部干重(g)/地上部干重(g)^[14],每个处理测量 5 株,样株随机选择。

1.4.2 气体交换参数 净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔限制值(L_s)、水分利用效率(WUE)等光合参数采用 TPS-2 便携式光合作用测定系统测定,测定时育苗温室内部光照强度为 $(1\ 000 \pm 50)\ \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, CO_2 浓度为 $(400 \pm 20)\ \mu mol \cdot mol^{-1}$ 。测定叶片为秧苗最高一片完全展开功能叶,每个处理测量 3 片叶片,随机选择取样。

1.4.3 叶绿素荧光参数 使用英国 Hansatech 公司生产的连续激发式荧光仪 Handy PEA 测定芹菜幼苗叶片的荧光参数,测定前暗适应 30 min,利用配套软件对数据进行处理分析。其中,初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、可变荧光(F_v)、PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)、性能指数(PI)直接从系统导出,其余参数根据公式计算。主要包括:单位反应中心吸收的光能(ABS/RC)= $M_o \cdot (1/V_j) \cdot (1/\varphi_{P_0})$,单位反应中心捕获的用于还原 Q_A 的能量(TR_o/RC)= $M_o \cdot (1/V_j)$,单位反应中心捕获的用于电子传递的能量(ET_o/RC)= $Mo \cdot (1/V_j) \cdot \phi_o$,单位反应中

心耗散掉的能量(DI_o/RC)= $(ABS/RC) - (TR_o/RC)$;初始最大光化学效率(φ_{P_0})= TR_o/ABS ,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 的其它电子受体的激子占用来推动 Q_A 还原激子的比率(ϕ_o)= ET_o/TR_o ,用于电子传递的量子产额(φ_{E_0})= ET_o/ABS ,用于热耗散的量子比率(φ_{D_0})= $1 - \varphi_{P_0}$;单位面积吸收的光能(ABS/CS) $\approx F_0$,单位面积内有活性的反应中心数目(RC/CS)= $\varphi_{P_0} (V_j/M_o) \cdot (ABS/CS)$,单位面积捕获的光能(TR_o/CS)= $\varphi_{P_0} \cdot (ABS/CS)$,单位面积内用于电子传递的光能(ET_o/CS)= $\varphi_{E_0} \cdot (ABS/CS)$,单位面积内热耗散的光能(DI_o/CS)= $(ABS/CS) - (TR_o/CS)$ ^[32]。测定于晴天上午 10:00~12:00 之间进行,测定叶片为秧苗最高一片完全展开功能叶,每个处理测量 3 片叶片,样品随机选择。

1.5 数据分析

每个样本测量 3 次,结果取平均值。数据处理和作图采用 DPS 3.01 软件 Duncan 新复极差法和 Excel 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 根域体积限制对芹菜幼苗生长和生物量积累的影响

从表 2 可以看出,芹菜幼苗株高、叶片数、根长、根系体积和根系活力均随着根域体积的减小而逐渐降低,且处理之间大多达到显著差异水平,如处理Ⅶ的各指标分别比处理 I 显著降低 38.68%、42.86%、63.83%、77.14%、58.00%。可见,根域体积限制显著抑制了芹菜幼苗的生长,并且对幼苗根系指标的影响更大,尤其是根系体积。

同时,根域体积限制也对芹菜幼苗干物质积累产生了显著的影响(表 3)。其中,幼苗地上部干鲜

表 2 根域体积限制对芹菜幼苗生长的影响

Table 2 Effect of root-zone volume on growth of *A. graveolens* L. seedling in *Caragana* substrate

处理 Treatment	株高 Plant height /cm	叶片数 Leaf number	根长 Root length /cm	根系体积 Root volume /mL	根系活力 Root vitality /($\mu g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$)
I	21.2±0.8a	8.4±0.6a	18.8±3.2a	3.50±0.50a	0.431±0.031a
II	18.6±1.2b	8.2±1.2b	13.3±3.3b	2.50±0.35b	0.415±0.033b
III	18.1±0.9bc	6.6±1.6c	12.8±3.8c	1.75±0.30c	0.391±0.051c
IV	17.8±1.8c	6.2±1.2d	10.8±2.2d	1.40±0.20d	0.374±0.022d
V	17.0±2.0d	6.2±1.4d	10.8±1.4d	1.25±0.25e	0.364±0.038e
VI	15.6±1.6e	5.6±0.6e	8.0±0.6e	1.15±0.10f	0.261±0.011f
VII	13.0±2.0f	4.8±1.2f	6.8±1.2f	0.80±0.20g	0.181±0.019g

注: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: Different letters in a column indicate a significant difference among treatments at 0.05 level; The same as below.

质量、地下部干鲜质量、全株干鲜质量基本都随根域体积的减小而逐渐降低,而其根冠比却表现出增加后降低的趋势,并在处理Ⅲ时达到最大值,且各处理之间大多达到显著差异水平。如处理Ⅶ以上各生物量比处理Ⅰ显著降低 79.01%、70.9%、79.67%、71.15%、79.15%、70.95%,以上结果说明,根域体积限制也显著抑制了芹菜幼苗生物量的积累。

2.2 根域体积对芹菜幼苗叶片气体交换参数影响

根域体积大小对芹菜幼苗叶片气体交换参数的部分参数影响达到差异显著水平(表 4)。在净光合速率方面总体变化趋势均为随着根域体积的减少而各参数减少,各处理之间达到差异显著水平,处理Ⅶ以上各净光合速率比处理Ⅰ显著降低 39.07%、26.21%、22.20%、17.78%、21.08%和 1.82%;各处理蒸腾速率差异显著,变化规律与净光合速率类似,处理Ⅶ的蒸腾速率比处理Ⅰ降低了 15.87%。蒸腾速率亦随着根域体积的减小而降低,在气孔导度也是如此,总体趋势为随着根域体积的减少而减少。

在胞间 CO_2 浓度方面,处理Ⅲ、处理Ⅴ、处理Ⅵ之间差异不显著,处理Ⅱ和处理Ⅳ差异不显著,处理Ⅰ至处理Ⅶ总体变化趋势无显著规律;在气孔限制值方面,各处理之间差异显著,总体变化趋势不规

律;在各处理之中,处理Ⅱ的水分利用效率值最高,为 2.628 6,处理Ⅶ为 1.816 9,为处理Ⅰ的 69.12%,其它处理均在 2.000 0~2.599 9 之间,与根域体积不构成相关关系。

2.3 根域体积对芹菜幼苗叶绿素荧光参数的影响

2.3.1 基本参数 不同根域体积限制下芹菜幼苗叶片叶绿素荧光基本参数 F_0 、 F_m 和 F_v 变化较大(表 5),且各处理达到差异显著水平,其中处理Ⅲ的 F_0 值最大,达到 546.75,比处理Ⅶ高出 7.63%,但与根域体积不构成相关关系。 F_m 和 F_v 在处理Ⅳ时值最高,分别为 2 608.25 和 2 074.5,当根域体积大于或小于 $26.82 \text{ cm}^3/\text{穴}$ (处理Ⅳ)时, F_m 和 F_v 均呈现逐渐降低的趋势,各处理之间达到差异显著水平。

F_v/F_m 是表明光化学反应状况的 1 个重要参数, F_v/F_m 反映了荧光诱导动力学曲线上升过程的 O-P 段的 PSⅡ 光合电子传递能力,从其大小关系可以发现根域体积过大或偏小都会影响 PSⅡ 光合电子传递,而且根域体积过小(处理Ⅶ, $7.28 \text{ cm}^3/\text{穴}$)对 PSⅡ 光合电子传递的影响要明显大于根域体积过大(处理Ⅰ, $110.07 \text{ cm}^3/\text{穴}$)的影响; PI 可以准确反映植物光合机构的状态,适当根域体积(处理Ⅳ, $26.82 \text{ cm}^3/\text{穴}$)芹菜幼苗光合原初反应显著高于根域体积过大(处理Ⅰ, $110.07 \text{ cm}^3/\text{穴}$)或偏小(处理

表 3 根域体积限制对芹菜幼苗干物质积累的影响

Table 3 Effect of root-zone volume on accumulation of dry matter of *A. graveolens* L. seedling in *Caragana* substrate

处理 Treatment	地上部鲜质量 Up ground fresh matter/g	地上部干质量 Up ground dry matter/g	地下部鲜质量 Under ground fresh matter/g	地下部干质量 Under ground dry matter/g	全株鲜质量 Total fresh matter/g	全株干质量 Total dry matter/g	根冠比 Root/shoot
I	8.697 8±0.832 4a	0.630 6±0.064 5b	2.431 9±0.678 3ab	0.122 7±0.035 7b	11.129 7±1.12 31a	0.753 4±0.077 8b	0.194 6±0.050 1e
II	8.136 5±0.546 7b	0.720 9±0.044 9a	2.323 4±0.654 5b	0.160 2±0.032 7a	10.459 9±1.213 2b	0.881 1±0.080 8a	0.222 2±0.037 6c
III	4.783 9±0.645 3c	0.404 3±0.051 7c	2.449 1±0.347 4a	0.118 8±0.017 3c	7.233 0±0.897 4c	0.523 2±0.056 1c	0.293 9±0.034 7a
IV	4.252 8±0.354 6f	0.394 9±0.029 6d	1.773 5±0.412 3de	0.093 5±0.020 6d	6.023 6±0.343 6d	0.488 4±0.022 9d	0.236 7±0.026 8b
V	3.835 2±0.521 1d	0.366 9±0.042 7e	1.255 5±0.230 1c	0.079 0±0.012 1e	5.090 7±0.867 5e	0.445 9±0.056 6e	0.215 3±0.028 7d
VI	2.777 0±0.425 6e	0.294 9±0.035 4f	0.882 3±0.233 5e	0.069 8±0.012 2f	3.659 3±0.483 7f	0.364 6±0.030 2f	0.236 6±0.024 3b
VII	1.825 6±0.516 3g	0.183 5±0.043 1g	0.494 4±0.224 8f	0.035 4±0.011 2g	2.320 0±0.511 3g	0.218 9±0.015 3g	0.193 0±0.024 9e

表 4 根域体积限制对芹菜幼苗叶片气体交换参数的影响

Table 4 Effect of root-zone volume on gas exchange parameters in leaves of *A. graveolens* L. seedling in *Caragana* substrate

处理 Treatment	净光合速率 P_n $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	蒸腾速率 T_r $/(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	气孔导度 G_s $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	胞间 CO_2 浓度 C_i $/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	气孔限制值 L_s	水分利用效率 WUE
I	14.23±1.23a	5.67±0.23a	0.456±0.042b	359.33±3.26b	0.059 5±0.004 3d	2.508 8±0.210 5b
II	13.97±1.56b	5.31±0.34cd	0.461±0.044a	354.33±1.19c	0.074 7±0.003 5bc	2.628 6±0.351 2a
III	11.23±1.15d	5.42±0.24b	0.416±0.029c	363.67±3.35a	0.050 6±0.004 2e	2.073 8±0.324 7d
IV	11.70±0.87c	5.34±0.71c	0.392±0.051d	354.00±2.64c	0.078 3±0.006 2b	2.081 7±0.452 6d
V	11.07±0.44de	5.28±0.57d	0.367±0.044e	363.00±5.10a	0.060 9±0.004 9c	2.097 3±0.257 4d
VI	10.50±0.97e	4.66±0.26f	0.322±0.037f	363.33±4.55a	0.059 6±0.002 2d	2.253 2±0.368 2c
VII	8.67±1.04f	4.77±0.46e	0.284±0.021g	352.67±3.76d	0.089 5±0.003 1a	1.816 9±0.444 2e

Ⅶ, 7.28 cm³/穴)。

2.3.2 光系统Ⅱ反应中心活性参数 由表6可以看出,芹菜幼苗叶片单位反应中心吸收(*ABS/RC*)、捕获的用于还原 *Q_A* (*TR_o/RC*)、捕获的用于电子传递(*ET_o/RC*)及热耗散掉(*DI_o/RC*)的能量的4个活性参数与根域体积既不呈现线性相关,也不呈现非线性相关,说明光系统Ⅱ(PSⅡ)反应中心活性参数受根域限制的影响不大。但无论是何种根域体积条件下都呈现出 *ABS/RC*>*TR_o/RC*>*ET_o/RC* 的趋势,这表明随着电子传递链的延伸热耗散增加,光能利用率降低。而且处理Ⅰ和处理Ⅶ的 *ET_o/RC* 均比 *DI_o/RC* 小,其余各处理均为 *ET_o/RC*>*DI_o/RC*,说明根域体积过大或偏小均使得PSⅡ反应中心用于热耗散的能量高于用于电子传递的能量。

2.3.3 光系统Ⅱ能量分配比率 在PSⅡ受体侧的几个指标中(表7),初始最大光化学效率(φ_{P_0})、用于热耗散的量子比率(φ_{D_0})与根域体积既不呈线性相关,也不呈现非线性相关,PSⅡ的功能活性受根域

体积影响不大;用于电子传递的量子产额(φ_{E_0})和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* 的其它电子受体的激子占用来推动 *Q_A* 还原激子的比率(ϕ_0)主要反映了PSⅡ受体侧的变化, φ_{E_0} 与根域体积既不呈线性相关,也不呈现非线性相关, ϕ_0 与 φ_{E_0} 变化规律极其相似;说明根域体积过大(处理Ⅰ,110.07 cm³/穴)或偏小(处理Ⅶ,7.28 cm³/穴)使得芹菜幼苗叶片用于 *Q_A* 下游电子传递的量子不断减少,PSⅡ反应中心捕获的激子中用于 *Q_A* 下游电子传递的激子占捕获激子总数的比例不断减少,PSⅡ受体侧 *Q_A* 下游的电子传递接收的能量占总能量的比例值都是不断降低的。

2.3.4 光系统Ⅱ光能利用效率 对叶绿素快速荧光诱导动力学曲线的数据分析表明,处理Ⅴ的单位面积内反应中心数目(*RC/CS*)值最高,且各处理达到差异显著水平,比最低的处理Ⅶ高出31.68%,同时处理Ⅴ的单位面积捕获的光能(*TR_o/CS*)比最低值处理Ⅶ高出8.67%;而单位面积内用于电子传递

表5 根域体积限制对芹菜幼苗叶绿素荧光参数的影响

Table 5 Effect of root-zone volume on chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *A. graveolens* L. seedling in *Caragana* substrate

处理 Treatment	<i>F₀</i>	<i>F_m</i>	<i>F_v</i>	<i>F_v/F_m</i>	<i>PI</i>
Ⅰ	527.75±57.25d	2 492.50±514.50d	1 964.75±521.50d	0.788 3±0.056 3c	0.693 8±0.101 2e
Ⅱ	522.50±87.50e	2 511.25±602.25c	1 988.75±540.25c	0.791 9±0.028 9b	0.701 0±0.085 2d
Ⅲ	546.75±43.25a	2 553.75±128.50b	2 007.00±121.50b	0.785 9±0.037 4d	0.779 8±0.112 3c
Ⅳ	533.75±50.25c	2 608.25±501.50a	2 074.50±553.25a	0.795 4±0.069 1a	0.927 8±0.221 3b
Ⅴ	521.50±71.25e	2 506.50±232.25c	1 985.00±213.50c	0.791 9±0.059 1b	1.085 8±0.201 9a
Ⅵ	541.75±84.25b	2 503.50±180.00c	1 965.75±248.00d	0.783 6±0.046 2f	0.672 0±0.121 1f
Ⅶ	508.00±33.50f	2 355.25±422.25e	1 847.25±423.50e	0.784 3±0.033 2e	0.487 3±0.210 5g

注:*F₀*, 初始荧光;*F_m*, 最大荧光;*F_v*, 可变荧光;*F_v/F_m*, PSⅡ最大光化学效率;*PI*, 性能指数。

Note:*F₀*, Minimal recorded fluorescence intensity;*F_m*, Maximal recorded fluorescence intensity;*F_v*, Variable recorded fluorescence intensity;*F_v/F_m*, Maximal quantum yield for PSⅡ photochemistry;*PI*, Performance indexes.

表6 根域体积限制对芹菜幼苗叶片PSⅡ反应中心活性参数的影响

Table 6 Effect of root-zone volume on specific energy fluxes of PSⅡ reaction center of *A. graveolens* L. seedling in *Caragana* substrate

处理 Treatment	<i>ABS/RC</i>	<i>TR_o/RC</i>	<i>ET_o/RC</i>	<i>DI_o/RC</i>
Ⅰ	2.652 1±0.115 3de	2.090 5±0.201 3e	0.544 3±0.035 8e	0.561 5±0.002 1e
Ⅱ	2.891 3±0.219 4bc	2.289 7±0.195 2c	0.622 3±0.061 5c	0.601 6±0.015 4d
Ⅲ	2.869 5±0.136 2c	2.255 1±0.348 2cd	0.664 2±0.019 5b	0.614 4±0.021 5c
Ⅳ	2.578 5±0.251 4e	2.050 9±0.274 6f	0.619 2±0.024 8cd	0.527 7±0.021 3f
Ⅴ	2.692 9±0.512 3d	2.132 6±0.591 2d	0.663 6±0.025 9b	0.560 3±0.033 2e
Ⅵ	3.052 6±0.412 3b	2.392 0±0.556 2b	0.685 9±0.031 4a	0.660 6±0.034 6b
Ⅶ	3.221 6±0.214 6a	2.526 7±0.182 5a	0.610 4±0.039 1d	0.694 9±0.029 5a

注:*ABS/RC*, 单位反应中心吸收的能量;*TR_o/RC*, 单位反应中心捕获的用于还原 *Q_A* 的能量;*ET_o/RC*, 单位反应中心捕获的用于电子传递的能量;*DI_o/RC*, 单位反应中心耗散掉的能量。

Note:*ABS/RC*, Absorption flux per reaction center;*TR_o/RC*, Trapped energy flux per reaction center;*ET_o/RC*, Electron transport flux per reaction center;*DI_o/RC*, Dissipated energy flux per reaction center.

表 7 根域体积限制对芹菜幼苗叶片光系统 II 能量分配比率的影响

Table 7 Effect of root-zone volume on flux ratios of PS II reaction center of *A. graveolens* L. seedling in *Caragana* substrate

处理 Treatment	ψ_0	φP_o	φE_o	φD_o
I	0.260 4±0.003 15f	0.788 3±0.056 3c	0.205 2±0.022 6e	0.211 7±0.004 9b
II	0.271 8±0.042 5e	0.791 9±0.028 9b	0.215 2±0.034 8d	0.208 1±0.015 6c
III	0.294 5±0.032 3c	0.785 9±0.037 4d	0.231 5±0.041 5b	0.214 1±0.026 8ab
IV	0.301 9±0.025 8b	0.795 4±0.069 1a	0.240 1±0.008 5ab	0.204 6±0.005 8d
V	0.311 2±0.046 9a	0.791 9±0.059 1b	0.246 4±0.019 6a	0.208 1±0.051 2c
VI	0.286 7±0.012 1d	0.783 6±0.046 2f	0.224 7±0.009 1c	0.216 4±0.034 5a
VII	0.241 6±0.039 1g	0.784 3±0.033 2e	0.189 5±0.034 7f	0.215 7±0.009 5a

注: ψ_0 . 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 的其它电子受体的激子占用来推动 Q_A 还原激子的比率; φP_o . 初始最大光化学效率; φE_o . 用于电子传递的量子产额; φD_o . 用于热耗散的量子比率。

Note: ψ_0 . Probability that a trapped excitation moves an electron into the electron transport chain beyond Q_A ; φP_o . Maximal quantum yield for primary photochemistry; φE_o . Quantum yield for electron transport; φD_o . Quantum rate for heat dissipation.

表 8 根域体积限制对芹菜幼苗叶片单位面积叶片光能利用效率的影响

Table 8 Effect of root-zone volume on light use efficiency per unit leaf area of maize ear leaf of *A. graveolens* L. seedling in *Caragana* substrate

处理 Treatment	RC/CS	TR _o /CS	ET _o /CS	DI _o /CS
I	189.00±13.00c	416.01±53.22d	108.31±21.03e	111.74±8.91c
II	180.71±21.23d	413.79±25.21de	112.47±29.88d	108.71±15.66e
III	190.54±15.47c	429.69±24.65b	126.56±43.15b	111.06±21.63c
IV	193.00±51.44b	424.52±10.55c	128.17±19.21a	109.23±31.44d
V	207.65±26.37a	433.00±33.64a	128.51±16.58a	108.50±33.26e
VI	177.47±16.82e	424.52±22.51c	121.72±42.35c	117.23±18.45b
VII	157.69±25.57f	398.43±19.54e	96.25±21.16f	119.57±25.64a

注: RC/CS. 单位面积内有活性的反应中心数目; TR_o/CS. 单位面积捕获的光能; ET_o/CS. 单位面积内用于电子传递的光能; DI_o/CS. 单位面积内热耗散的光能。

Note: RC/CS. Density of PS II reaction centers per excited cross-section; TR_o/CS. Trapped energy flux per cross-section; ET_o/CS. Electron transport flux per cross-section; DI_o/CS. Dissipated energy flux per cross-section.

的光能(ET_o/CS)处理 V 值仍然为最高值, 同样处理 VII 最低, 仅为处理 V 的 74.90%; 单位面积内热耗散的光能(DI_o/CS)方面, 处理 V 最小, 比最高值处理 VII 降低 9.26%。

3 讨论

3.1 根域体积限制对柠条基质芹菜幼苗生长和干物质积累的影响

无论是何种苗龄定植, 均表现为穴盘孔数越少, 蔬菜幼苗生长势越强^[33], 孙磊玲等认为高密度低根域体积的栽培, 虽然可以使经济学产量较高, 但商品性较差^[34]; 本研究得出: 株高随着根域体积的减小而降低; 叶片数、根长、根系体积表现结果与株高相同, 说明根域体积大小对芹菜幼苗株高、叶片数、根长、根系体积等形态指标的影响大于秧苗密度的影响, 而且从试验结果分析得出, 根域体积越大对芹菜幼苗形态指标越有利, 这与张海利等的结果相一致^[35]。

3.2 根域体积限制对柠条基质芹菜幼苗气体交换参数的影响

根域体积限制对芹菜幼苗叶片气体交换参数的影响差异显著, 孙磊玲等研究认为净光合速率随着单株根域体积的减小呈现递减趋势, 高密度栽培会影响普通幼苗对光能的吸收、营养的分配, 进而影响其叶绿素的合成和叶面积的增大^[34], 这与本试验研究结果相一致。

植物通过光合作用合成碳水化合物, 积累干物质, 积累量的大小直接反映在植株的生长量上。光合作用是作物形成生物学产量和经济产量的基础。光合强度不但与叶片的生理状况有关, 而且和根系的发育密切相关。虽有限根对植株光合无影响的报道^[36], 但极极限根会使光合速率下降^[37]。

3.3 根域体积限制对柠条基质芹菜幼苗叶绿素荧光参数的影响

叶绿素荧光测定技术作为一种无损伤的快速探针用于植物的抗逆生理研究已有大量报道^[38-41]。

F_v/F_m 反映了荧光诱导动力学曲线上升过程的 O-P 段的 PS II 光合电子传递能力(表 5),根域体积过大(处理 I, $110.07 \text{ cm}^3/\text{穴}$)或偏小(处理 VII, $7.28 \text{ cm}^3/\text{穴}$)都会影响 PS II 光合电子传递,而且根域体积过小(处理 VII, $7.28 \text{ cm}^3/\text{穴}$)对 PS II 光合电子传递的影响要明显大于根域体积过大(处理 I, $110.07 \text{ cm}^3/\text{穴}$)的影响,这可能是由于根域体积较小时,根域体积与秧苗密度共同作用的结果,但其影响的主效因子的确定有待于进一步研究。

根据 Strasser 等^[42]的能量流动模型,植物叶片吸收的总能量(ABS),一部分以荧光的形式释放,大部分被反应中心(RC)捕获(TR),被反应中心捕获的能量中有一部分通过 Q_A 的还原氧化导致电子传递(ET);另一部分以热耗散的形式释放(DI)。 ABS/RC 、 TR_o/RC 和 DI_o/RC 的值不断增加,说明叶片受胁迫时单位反应中心承担的光能转换任务更多^[43]。本试验得出芹菜幼苗叶片 PS II 反应中心活性参数 ABS/RC 、 TR_o/RC 、 ET_o/RC 及 DI_o/RC 受根域限制的影响不大,但无论是何种根域体积条件下都呈现出 $ABS/RC > TR_o/RC > ET_o/RC$ 的趋势,这表明随着电子传递链的延伸热耗散增加,光能利用率降低;而且处理 I 和处理 VII 的 ET_o/RC 均比 DI_o/RC 小,其它各处理均为 $ET_o/RC > DI_o/RC$,说明根域体积过大或偏小均使得 PS II 反应中心用于热耗散的能量高于用于电子传递的能量,这也体现了热耗散对 PS II 具有较强的保护能力^[44]。

用于电子传递的量子产额(φ_{E_0})和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 的其它电子受体的激子占用来推动 Q_A 还原激子的比率(ϕ_o)主要反映了 PS II 受体侧的变化, ϕ_o 是对 PS II 电子传递的综合评价之一,受 PS II 供体侧的电子供应能力和受体侧(包括 PS I)接收电子的能力制约^[45]。当根域体积为 $25.68 \text{ cm}^3/\text{穴}$ 时, φ_{E_0} 值达到最大;当根域体积达到 $14.34 \text{ cm}^3/\text{穴}$ 时, ϕ_o 值达到最大。说明根域体积超过 $25.68 \text{ cm}^3/\text{穴}$ 或小于 $14.34 \text{ cm}^3/\text{穴}$ 时,使得芹菜幼苗叶片用于 Q_A 下游电子传递的量子不断减少,PS II 反应中心捕获的激子中用于 Q_A 下游电子传递的激子占捕获激子总数的比例不断减少,PS II 受体侧 Q_A 下游的电子传递接收的能量占总能量的比例值都是不断降低的。

当根域体积达到 $17.32 \text{ cm}^3/\text{穴}$ 时, TR_o/CS 值达到最大;当根域体积达到 $19.21 \text{ cm}^3/\text{穴}$ 时, ET_o/CS 值达到最大。说明根域体积超过 $19.21 \text{ cm}^3/\text{穴}$ 或小于 $17.32 \text{ cm}^3/\text{穴}$ 时,芹菜叶片单位面积叶片从光能捕获(TR_o/CS)和用于电子传递(ET_o/CS)的能力开始下降,并导致光能过剩及活性氧浓度上升,损害 OEC^[46]。

在穴盘规格($29 \text{ cm} \times 58 \text{ cm}$)确定的前提下,根域体积、穴盘规格、秧苗密度三者相互制约,本研究结果是在三者同时作用下得到的结论,而三者对芹菜幼苗生长发育、光合及叶绿素荧光参数方面的单效影响,以及互作关系过程中主效因素的确定有待于进一步研究。

4 结 论

根域体积大小对芹菜幼苗株高、叶片数、根长、根系体积、地上部鲜质量、地上部干质量、地下部鲜质量和地下部干质量等指标的影响较大。在净光合速率随着根域体积的减少而各参数减少,净光合速率与根域体积呈线性正相关,蒸腾速率变化规律与净光合速率相似,气孔导度总体变化趋势为随着根域体积的减少而减少,胞间 CO_2 浓度总体变化受根域体积影响不大。根域体积限制会影响 PS II 光合电子传递,适当根域体积时($26.82 \text{ cm}^3/\text{穴}$)性能指数(PI)值较高。根域体积过大($110.07 \text{ cm}^3/\text{穴}$)或偏小($7.28 \text{ cm}^3/\text{穴}$)均使得 PS II 反应中心用于热耗散的能量高于用于电子传递的能量。当根域体积超过 $25.68 \text{ cm}^3/\text{穴}$ 或小于 $14.34 \text{ cm}^3/\text{穴}$ 时,使得芹菜幼苗叶片用于 Q_A 下游电子传递的量子不断减少,PS II 反应中心捕获的激子中用于 Q_A 下游电子传递的激子占捕获激子总数的比例不断减少,PS II 受体侧 Q_A 下游的电子传递接收的能量占总能量的比例值不断降低。根域体积超过 $19.21 \text{ cm}^3/\text{穴}$ 或小于 $17.32 \text{ cm}^3/\text{穴}$ 时,芹菜叶片单位面积叶片从光能捕获(TR_o/CS)和用于电子传递(ET_o/CS)的能力开始下降。通过对芹菜幼苗生长、气体交换和叶绿素荧光参数的综合分析得出,建议在使用柠条基质穴盘培育芹菜时使用 128 穴/盘,即根域体积为 $19.76 \text{ cm}^3/\text{穴}$ 的穴盘进行育苗操作。

参考文献:

- [1] ZHANG ZH W(张振万), YANG SH X(杨淑性). Plant of *Caragana* Favr. in Shaanxi[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物研究), 1983, **3**(1): 21—31(in Chinese).
- [2] ZENG CH(曾 辰), SHAO M A(邵明安). Soil moisture variation of young *Caragana korshinskii* artificial shrubland in the wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2006, **24**(6): 155—158(in Chinese).
- [3] MA C C, GAO Y B, GUO H Y, *et al.* Photosynthesis, transpiration, and water use efficiency of *Caragana microphylla*, *C. intermedia*, and *C. korshinskii*[J]. *Photosynthetica*, 2004, **42**(1): 65—70.
- [4] ZHENG Y R, RIMMINGTON G M, XIE Z X, *et al.* Responses to air temperature and soil moisture of growth of four dominant species on sand dunes of central Inner Mongolia[J]. *J. Plant Res.*, 2008, **121**(5): 473—482.
- [5] FANG X W, LI Y B, XU D H, *et al.* Activities of starch hydrolytic enzymes and starch mobilization in roots of *Caragana korshinskii* following above-ground partial shoot removal[J]. *Trees*, 2007, **21**(1): 93—100.
- [6] ZHANG Z S, LI X R, LIU L C, *et al.* Distribution, biomass, and dynamics of roots in a revegetated stand of *Caragana korshinskii* in the Tengger Desert, northwestern China[J]. *J. Plant Res.*, 2009, **122**(1): 109—119.
- [7] CHENG X R, HUANG M B, SHAO M G, *et al.* A comparison of fine root distribution and water consumption of mature *Caragana korshinskii* Kom grown in two soils in a semiarid region, China[J]. *Plant Soil*, 2009, **315**(1/2): 149—161.
- [8] ALAMUSAANDI, JIANG D M. Characteristics of soil water consumption of typical shrubs (*Caragana microphylla*) and trees (*Pinus sylvestris*) in the Horqin Sandy Land area, China[J]. *Front For China*, 2009, **4**(3): 330—337.
- [9] WANG Z Q, LIU B Y, LIU G. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau[J]. *Sci. China Ser D-Earth Sci.*, 2009, **52**(6): 835—842.
- [10] ZHENG Y R, XIE Z X, GAO Y, *et al.* Germination responses of *Caragana korshinskii* Kom. to light, temperature and water stress[J]. *Ecological Research*, 2004, **19**(5): 553—558.
- [11] YIN J, HE F, QIU G Y, *et al.* Characteristics of leaf areas of plantations in semiarid hills and gully loess regions[J]. *Front For China*, 2009, **4**(3): 351—357.
- [12] LI X R, KONG D S, TAN H J, *et al.* Changes in soil and vegetation following stabilization of dunes in the southeastern fringe of the Tengger Desert, China[J]. *Plant Soil*, 2007, **300**(1/2): 221—231.
- [13] AWANG Y, ISMAILI M. The growth and flowering of some annual ornamentals on coconut dust[J]. *Acta Hort.*, 1997, **450**(2): 31—38.
- [14] QU J S(曲继松), GUO W ZH(郭文忠), ZHANG L J(张丽娟), *et al.* Influence on the growth and accumulation of dry matter of watermelon seedlings based on *Caragana*-straw as nursery substrate[J]. *Transactions of the CSAE* (农业工程学报), 2010, **26**(8): 291—295(in Chinese).
- [15] ZHANG L J(张丽娟), QU J S(曲继松), FENG H P(冯海萍), *et al.* Influence on the quality of muskmelon seedlings utilize caragana-straw as nursery substrate[J]. *Northern Horticulture* (北方园艺), 2010, (15): 165—167(in Chinese).
- [16] QU J S(曲继松), ZHANG L J(张丽娟), FENG H P(冯海萍), *et al.* Influence of caragana-straw as component of mixed substrate on growth of eggplant seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica* (西北农业学报), 2012, **21**(11): 162—167(in Chinese).
- [17] QU J S(曲继松), ZHANG L J(张丽娟), FENG H P(冯海萍), *et al.* Caragana-straw as component of mixed substrate for pepper seedling growth[J]. *Jiangsu J. of Agr. Sci.* (江苏农业学报), 2012, **28**(4): 846—850(in Chinese).
- [18] OSTOS J C, LÓPEZ G R, MURILLO J M, *et al.* Substitution of peat for municipal solid waste and sewage sludge-based composts in nursery growing media: Effects on growth and nutrition of the native shrub *Pistacia lentiscus* L. [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(6): 1 793—1 800.
- [19] GRUDA N, SCHNITZLER W H. Suitability of wood fiber substrates for production of vegetable transplants II [J]. *Scientia Horticulturae*, 2004, **100**: 333—340.
- [20] LAN SH L(兰时乐), CAO X ZH(曹杏芝), DAI X Y(戴小阳), *et al.* The changes of nutrition elements during the composting chicken manure and rape straw under higher temperature[J]. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2009, **28**(3): 564—569(in Chinese).
- [21] CHENG F(程 斐), SUN ZH H(孙朝晖), ZHAO Y G(赵玉国), *et al.* Analysis of physical and chemical properties of reed residue substrate[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University* (南京农业大学学报), 2001, **24**(3): 19—22(in Chinese).
- [22] SHANG X H(尚秀华), XIE Y J(谢耀坚), PENG Y(彭 彦). Rice-husk composting as seedling medium boosted by sugar refinery wastewater[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology* (中南林业科技大学学报), 2009, **29**(2): 78—81(in Chinese).
- [23] SHANG Q M(尚庆茂), ZHANG ZH G(张志刚). Experimental studies on fertilizer-adding amount in eggplant plug seedling production with vermicom post-based media[J]. *Transactions of the CSAE* (农业工程学报), 2005, **21**(S): 129—132(in Chinese).
- [24] DENG Y(邓 煜), LIU ZH F(刘志峰). Study on growth medium and growth law for containerized seeding stocks grown in Greenhouse

- [J]. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2000, **36**(5): 33—39 (in Chinese).
- [25] GINWAL H S, RAWAT D S, SHARMA S, *et al.* Standardization of proper volume/size and type of root trainer for raising *Acacia nilotica* seedlings: Nursery evaluation and field trail[J]. *Indian Forestry*, 2001, 127: 920—928.
- [26] BASHIR A, QAISAR K N, KHAN M A, *et al.* Standardization of growing media for raising *Pinus wallichiana* seedlings under root trainer production system in nursery[J]. *Environment and Ecology*, 2009, **27**(1A): 381—384.
- [27] AGBOGIDI O M, ENUJEKE E C, ESHEGBEYI O F. Germination and seedling growth of African pear (*Dacryodes edulis* Don. G. Lam. H. J.) as affected by different planting media[J]. *American Journal of Plant Physiology*, 2007, **2**(4): 282—286.
- [28] GOPAL S, SUMIT C, DEY A N. Effect of growing media on germination and initial seedling growth of *Albizia procera* (Roxb) Benth. in Terai zone of West Bengal[J]. *Environment and Ecology*, 2007, **25**(S2): 406—407.
- [29] WANG Y SH (王月生), ZHOU ZH CH (周志春), JIN G Q (金国庆), *et al.* Growth of *Taxus chinensis* var. *mairei* for container seedlings in different media mixtures and for bare-root versus container seedlings in a young stand[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College* (浙江林学院学报), 2007, **24**(5): 643—646 (in Chinese).
- [30] ZHANG J M (张纪卯). Studies on effect of different medium and container size on growth of *Keteleeria fartunei* container seedling? [J]. *Journal of Fujian College of Forestry* (福建林学院学报), 2001, **21**(2): 176—180 (in Chinese).
- [31] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 207—208.
- [32] LI P M (李鹏民), GAO H Y (高辉远), RETO J S. Application of the chlorophyll fluorescence induction dynamics in photosynthesis study [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology* (植物生理学与分子生物学学报), 2005, **31**(6): 559—566 (in Chinese).
- [33] CHEN H (陈 慧), LIANG ZH H (梁朝晖), XIE Y Q (谢燕青), *et al.* Effects of different specification plug seedling on growth and yield of Chinese cabbage[J]. *Journal of Changjiang Vegetables* (长江蔬菜), 2011, 12: 38—40 (in Chinese).
- [34] SUN L L (孙磊玲), HUANG D F (黄丹枫), ZHANG K (张 凯), *et al.* Effects of rooting-zone volume on packchoi growth in greenhouse [J]. *China Vegetables* (中国蔬菜), 2012, 18: 116—121 (in Chinese).
- [35] ZHANG H L (张海利), SUN J (孙 娟), PANG Z Q (庞子千). Effects of different specifications of tray on growth and development of tomato seedlings[J]. *Journal of Changjiang Vegetables* (长江蔬菜), 2012, 8: 42—43 (in Chinese).
- [36] KHARKINA T G, ROSENQVIST E, OTTOSEN C O. Effects of root restriction on the growth and physiology of cucumber plants[J]. *Physiologia Plantarum*, 1999, **105**(3): 434—441.
- [37] WILL R E, TESKEY R O. Effect of elevated carbon dioxide concentration and root restriction on net photosynthesis, water relations and foliar carbohydrate status of loblolly pine seedlings[J]. *Tree Physiol.*, 1997, **17**(10): 655—661.
- [38] GUO Y P (郭延平), ZHOU H F (周慧芬), ZENG G H (曾光辉), *et al.* Effects of high temperature stress on net photosynthetic rate and photosystem activity in *Citrus*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(6): 867—870 (in Chinese).
- [39] WU H Y (吴韩英), SHOU S Y (寿森炎), ZHU ZH J (朱祝军), *et al.* Effects of high temperature stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in sweet pepper[J]. *Acta Horticulture Sinica* (园艺学报), 2001, **28**(6): 517—521 (in Chinese).
- [40] YAMANE Y, KASHINO Y, KOIKE H, *et al.* Increases in the fluorescence level and F_0 level and reversible inhibition of photosystem II reaction center by high temperature treatment in higher plants[J]. *Photosynthesis Research*, 1997, 52: 57—64.
- [41] YOSHIHIRO Y, YASUHIRO K, HIROYUKI K, *et al.* Effects of high temperatures on the photosynthetic systems in spinach: Oxygen-evolving activities, fluorescence characteristics and the denaturation process[J]. *Photosynthesis Research*, 1998, 57: 51—59.
- [42] STRASSER R J, TSIMILLI M M, SRIVASTAVA A. The Fluorescence Transient as A Tool to Characterise and Screen Photosynthetic Samples[M]//YUNUS M, PATHRE U, MOHANTY E. Probing Photosynthesis: Mechanisms, Regulation and Adaptation. London: Taylor & Francis, 2000.
- [43] HAN B (韩 彪), CHEN G X (陈国祥), GAO ZH P (高志萍), *et al.* The changes of PS II chlorophyll fluorescence dynamic characteristic during leaf senescence of ginkgo[J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2010, **37**(2): 173—178 (in Chinese).
- [44] WANG M (王 梅), GAO ZH K (高志奎), HUANG R H (黄瑞虹), *et al.* Heat stress characteristics of photosystem II in eggplant[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(1): 63—68 (in Chinese).
- [45] KRAUSE G H, WEIS E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basis[J]. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 1991, 42: 313—349.
- [46] LI G (李 耕), GAO H Y (高辉远), ZHAO B (赵 斌), *et al.* Effects of drought stress on activity of photosystems in leaves of maize at grain filling stage[J]. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2009, **35**(10): 1 916—1 922 (in Chinese).

(编辑: 裴阿卫)