

刘向东,尹陈茜,陈雪峰,等.废弃物基质对高温气候下‘金丝皇菊’生长的影响[J].江西农业大学学报,2020,42(4):707-717.



废弃物基质对高温气候下 ‘金丝皇菊’生长的影响

刘向东^{1,2},尹陈茜^{1,2},陈雪峰^{1,2},甘德欣^{2,3},于晓英^{1,2*},许璐^{1,2*}

(1.湖南农业大学 园艺学院,湖南 长沙 410128;2.湖南省中亚热带优质花木繁育与利用工程技术中心,湖南 长沙 410128;3.湖南农业大学 风景园林与艺术设计学院,湖南 长沙 410128)

摘要:【目的】为解决‘金丝皇菊’在夏季高温多雨地区的正常过夏问题。【方法】采用园林废弃物和中药渣堆腐而成的两种自制基质与两种传统基质(黄壤土、泥炭土)对比‘金丝皇菊’的种植效果,分析‘金丝皇菊’在高温气候环境下的适应性,以优化‘金丝皇菊’在高温气候环境下的栽培生产。【结果】结果表明:(1)中药渣基质种植的‘金丝皇菊’的营养生长状况佳,株高38.67 cm,茎粗1.38 cm,冠幅21.33 cm,叶片数25片,园林废弃物基质次之,株高37.1 cm,茎粗1.26 cm,冠幅20.43 cm,叶片数23.67片,泥炭土株高33.97 cm,茎粗1.15 cm,冠幅19.2 cm,叶片数21.33片,和黄壤土株高30.6 cm,茎粗0.82 cm,冠幅18.6 cm,叶片数20.33片的表现较差;(2)自制基质园林废弃物和中药渣种植‘金丝皇菊’的叶片净光合速率($20.15 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 $21.19 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)、气孔导度($0.35 \text{ mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 $0.35 \text{ mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)、光饱和点($1897.71 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 $1862.12 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)、表观量子效率($0.05 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 $0.06 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)等光合指标显著高于黄壤土,光补偿点($5.15 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 $8.28 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)和暗呼吸速率($0.25 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 $0.45 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)则低于黄壤土;(3)两种传统基质种植的‘金丝皇菊’叶片快速叶绿素荧光诱导曲线较自制基质变形大,自制基质初始荧光、单位有活性反应中心吸收的光能、非光化学淬灭系数等荧光指标显著低于传统基质,而最大荧光、PSII的量子效率、光化学淬灭系数等荧光指标显著高于传统基质。【结论】由此可知,自制基质能促进光合作用,缓解高温环境对‘金丝皇菊’光化学活性和光合性能的抑制,提高光合产物的积累,促进‘金丝皇菊’的生长。

关键词:有机废弃物基质;‘金丝皇菊’;高温气候;光合特性;叶绿素荧光

中图分类号:S682.11 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2020)04-0707-11

Effects of Waste Substrates on the Growth of *Chrysanthemum Morifolium* ‘Huangju’ in High Temperature Climate

LIU Xiang-dong^{1,2}, YIN Chen-xi^{1,2}, CHEN Xue-feng^{1,2},
GAN De-xin^{2,3}, YU Xiao-ying^{1,2*}, XU Lu^{1,2*}

(1.College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2.Hunan Mid-subtropical Quality Plant Breeding and Utilization Engineering Technology Research Center, Changsha 410128, China; 3.College of Landscape Architecture and Art Design, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

收稿日期:2020-04-02 修回日期:2020-05-19

基金项目:国家自然科学基金项目(31071826)、湖南省科技计划项目(2018TP2007、2019TP1033)和湖南省教育厅项目(18A084)

Project supported by National Natural Science Foundation(31071826), Hunan Provincial Science and Technology Plan(2018TP2007、2019TP1033) and Hunan Provincial Department of Education Project(18A084)

作者简介:刘向东, orcid.org/0000-0001-8778-6699, 1125275210@qq.com; *通信作者:于晓英,教授,博士,主要从事观赏植物资源与应用研究, orcid.org/0000-0002-1831-0782, 475705701@qq.com; 许璐,博士,主要从事园林植物与观赏园艺研究, orcid.org/0000-0003-2133-095X, xulu5448@163.com。

Abstract: [Objective] To solve the problems with the normal growth of the *Chrysanthemum morifolium* ‘Huangju’ in high temperature and rainy areas in summer. [Method] In this study, two kinds of homemade substrates and two traditional substrates made from heap wastes of garden waste and traditional Chinese medicine residues were used to compare their planting effects on *Chrysanthemum morifolium* ‘Huangju’, analyze the adaptability of *Chrysanthemum morifolium* ‘Huangju’ in high temperature climate and optimize its cultivation in high temperature climate. [Result] The results showed that the vegetative growth status of *Chrysanthemum morifolium* ‘Huangju’ grown in the substrate of Chinese traditional medicine residues was the best, followed by that grown in the garden waste substrate, and the performance of peat soil and yellow loam soil was poor; the photosynthetic indicators such as net photosynthetic rate, stomatal conductance, light saturation point, and apparent quantum efficiency of leaves grown in homemade substrates were significantly higher than those on yellow loam soil, while light compensation point and dark absorption rate were lower than those on yellow loam. The fast chlorophyll fluorescence-induced kinetics curves of *Chrysanthemum morifolium* ‘Huangju’ leaves grown in the two traditional substrates were more deformed than those in the self-made substrate. The initial fluorescence, light energy absorbed by the unit with active reaction center, non-photochemical quenching coefficient and other fluorescent indicators of the self-made substrates were significantly lower than those of the traditional substrates. The fluorescence indexes such as maximum fluorescence, PSII’s quantum efficiency, and photochemical quenching coefficient were significantly higher than those of the traditional substrates. [Conclusion] It can be seen that the homemade substrate can promote photosynthesis, alleviate the inhibition of photochemical activity and photosynthetic performance of *Chrysanthemum morifolium* ‘Huangju’ by high temperature environment, improve the accumulation of photosynthetic products, and promote the growth of the *Chrysanthemum morifolium* ‘Huangju’.

Keywords: organic growing medium; *Chrysanthemum morifolium* ‘Huangju’; hot climate; photosynthetic characteristics; chlorophyll fluorescence

【研究背景】栽培基质是植物生长的一个重要生态因子,直接影响植物的生长和产量。黄壤土和泥炭土是最常见的两种基质,泥炭为不可再生资源,黄壤土质地黏重、养分含量较单一且易板结。【前人研究进展】有研究认为添加生物炭和有机肥可提高植物的生长,增强光捕获能力并促进其光合作用^[1-2]。腐熟有机废弃物作基质能促进植物生长发育,有机废弃物不但养分含量齐全而且腐殖质含量高,很多学者已开展有机废弃物作基质对农作物、园艺植物等方面的研究。【研究意义】‘金丝皇菊’(*Chrysanthemum morifolium* ‘Huangju’)花大、色艳,富含黄酮、氨基酸和微量元素,具有较高的观赏和药用价值。同时作为茶用菊在湖南等地区广泛栽培生产,具有极高的经济价值^[3-4]。‘金丝皇菊’最适生长温度为20~25℃,生长期温度超过35℃植株停止生长进入休眠状态,超过40℃植株易灼伤。我国大部分地区夏季高温,尤其是湖南地区的中午高温时段,温度高达40℃,对‘金丝皇菊’生长影响极大。光合作用是植物生长发育的基础,对高温胁迫极其敏感。高温环境下,在植物其他表性症状还未出现时光合作用就被部分抑制甚至完全抑制,植物生长速率也随之下降^[5]。植物的光响应曲线能反映自身光合速率随光照强度变化的特性,植物净光合速率对光照强度的响应曲线是评价植物光合能力的有力工具^[6]。因此,测定植物的光响应曲线对于判定植物的光合能力具有重要意义。叶绿素荧光参数与叶肉细胞光合作用中各种反应过程密切相关,是评估PSII状态良好与否的指标^[7]。【本研究切入点】目前,关于‘金丝皇菊’的研究在国内外少见,且研究的内容主要是关于‘金丝皇菊’的盐胁迫和品质评价,近几年湖南及周边地区大量涌现‘金丝皇菊’种植基地,‘金丝皇菊’在本地区的高温越夏问题也亟待解决。【拟解决的关键问题】本文以堆腐后的中药渣与园林废弃物为自制基质,与黄壤土和泥炭土对比,研究高温条件下不同栽培基质对‘金丝皇菊’营养生长的影响,通过分析自制基质对‘金丝皇菊’的光合指标和叶绿素荧光的调控作用,探究自制基质能否提高夏季高温地区的‘金丝皇菊’营养生长积累,从而进一步提高‘金丝皇菊’的产量。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地点位于湖南农业大学观赏园艺研究所(N28°10'46.99", E113°04'35.90"), 海拔34 m, 属于亚热带季风性湿润气候, 夏季平均气温在38℃左右, 且降水充沛, 雨热同期。

1.2 试验材料准备

自制有机废弃物基质包括园林废弃物基质和中药渣基质, 园林废弃物为试验地所在校园香樟(*Cinnamomum camphora*)、杜仲(*Eucommia ulmoides*)、垂柳(*Salix babylonica*)、柿树(*Diospyros kaki*)的凋落叶, 中药渣成分包括甘草、党参、当归、黄芪、川木通等。将收集的园林废弃物和中药渣晾干后用粉碎机粉碎、过筛, 然后堆制发酵。将彻底发酵完成后的中药渣与园林废弃物耙松备用。选择两种常见基质(黄壤土、泥炭土)作为对照组。

以株高12 cm、茎粗0.3 cm、冠幅8 cm、5片叶、生长健壮的‘金丝皇菊’扦插苗为植物材料作盆栽实验。

1.3 试验设计

‘金丝皇菊’于5月8日换上统一规格的硬质塑料盆, 试验共4个不同处理(黄壤土、园林废弃物基质、中药渣基质、泥炭土), 每个处理15盆, 每盆1株, 采用随机区组设计。放置在全光照环境下养护, 除基质条件不同, 其他栽培环境与肥水管理均一致。

盆栽后的第一个月每隔7 d, 后3个月每隔14 d检测生长指标。‘金丝皇菊’生长3个月后, 于高温期检测其光合指标。

1.4 指标测定

基质容重、总孔隙度、持水能力测定采用郭世荣方法测定; pH和EC用水浸, 水土比为2.5:1, 分别用PB-10酸度计和电导率仪测定^[8]; 基质全氮采用元素分析仪测定(2400II CHNS/O Elemental Analyzer, Perkin-Elmer, USA); 全钾采用氢氧化钠碱-火焰光度法; 全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法; 有效磷采用氟化铵浸提-钼锑抗比色法测定, 有效钾采用乙酸铵浸提-原子吸收法测定^[9]; 碱解氮采用碱解扩散法测定; 氨态氮和硝态氮用1 mol/L的氯化钾浸提, 流动注射分析仪测定(FIAstar 5000 Analyzer, Foss Tecator, Denmark); 有机碳采用重铬酸钾容量法-外加热法测定; 腐殖质、富里酸、胡敏酸采用焦磷酸钠浸提-重铬酸钾氧化法, 用产地日本的总有机碳分析仪测定。

光合作用采用LI-6400光合仪测定, 09:00—11:00选择晴朗无风少云的天气, 测植株的光合作用。测定时选择植株生长点下第3片叶的净光合速率(net photosynthetic rate, P_n)、气孔导度(stomatal conductance, G_s)、胞间CO₂浓度(intercellular CO₂ concentration, C_i)、蒸腾速率(transpiration rate, T_r)等参数。同时, 采用LI-6400光合仪自动光曲线程序测定‘金丝皇菊’的光合-光响应曲线。设定光合有效辐射梯度(PAR)为: 2 000, 1 800, 1 600, 1 400, 1 200, 1 000, 800, 600, 400, 200, 150, 100, 50, 20, 0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 流速设定为500 $\mu\text{mol}/\text{s}$ 。根据叶子飘^[10]的方法拟合光响应曲线, 并计算出最大净光合速率(maximum net photosynthetic rate, A_{max})、光补偿点(light compensation point, LCP)、光饱和点(light saturation point, LSP)、暗呼吸速率(dark breathing rate, R_d)和表观量子效率(apparent quantum efficiency, AQY); 并比较不同基质种植‘金丝皇菊’的光合差异。叶绿素荧光采用FluorPen FP110手持式叶绿素荧光仪, 用叶片夹暗适应30 min后测定初始荧光(initial fluorescence, F_o)、最大荧光(maximum fluorescence, F_m)、最大光化学效率(maximum photochemical efficiency, F_v/F_m)、荧光瞬变初始斜率(M_o)、PSII的量子效率(F_v/F_o); 能量分配比率参数: 电子传递的量子产额(Phi_{Eo})、捕获的激子将电子传递至超过QA的其它电子受体的概率(Psi_o)、用于热耗散的量子比率(the quantum rate of heat dissipation, Phi_{Do}); PS II比活性参数: 捕获用于还原QA的能量(TRo/RC)、吸收的光能(ABS/RC)、捕获用于电子传递的能量(ETo/RC)、耗散的能量(DIo/RC); 用叶片夹暗适应20 min后测定非光化学淬灭系数(non-photochemical quenching coefficient, NPQ)和光化学淬灭系数(photochemical quenching coefficient, qP)。

1.5 数据分析

用Excel 2010整理数据,用Origin Pro2018作图,采用SPSS Statistics 17.0进行方差分析,多重比较采用Duncan法, $P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 4种基质的理化性质比较

表1显示,各基质容重由大到小依次为黄壤土、泥炭土、园林废弃物基质和中药渣基质,都在 $0.41\sim 0.53\text{ g/cm}^3$,符合一般栽培基质容重要求;园林废弃物基质、中药渣基质、泥炭土总孔隙度在理想栽培基质70%~90%,而黄壤土略低于理想基质^[11]范围;各基质持水能力在61.9%~75.68%,符合花卉对栽培基质的理化指标的要求^[11];pH值达到农业应用要求pH 7.0~8.5^[12]。 EC 值在植物生长安全范围 $0.75\sim 2.6\text{ ms/cm}$ ^[13]。

表1 4种基质的理化性质

Tab.1 Physical and chemical properties of the four matrices

基质理化性质 Growing medium physical and chemical properties	黄壤土 Yellow loam	园林废弃物基质 Garden waste substrate	中药渣基质 Chinese medicine residue matrix	泥炭土 Peat
容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) Bulk density	$0.53\pm 0.002^{\text{Aa}}$	$0.43\pm 0.01^{\text{Bb}}$	$0.41\pm 0.02^{\text{Bb}}$	$0.51\pm 0.01^{\text{Aa}}$
总孔隙度/% Total porosity	$61.50\pm 0.01^{\text{Cc}}$	$79.00\pm 0.01^{\text{Aa}}$	$71.83\pm 0.01^{\text{Bb}}$	$70.53\pm 0.002^{\text{Bb}}$
持水能力/% Water holding capacity	$75.68\pm 0.02^{\text{Aa}}$	$61.90\pm 0.01^{\text{Bb}}$	$69.09\pm 0.07^{\text{ABab}}$	$73.44\pm 0.03^{\text{ABa}}$
$EC/(\text{ms}\cdot\text{cm}^{-1})$	$2.04\pm 0.05^{\text{Aa}}$	$2.19\pm 0.07^{\text{Aa}}$	$2.12\pm 0.08^{\text{Aa}}$	$2.06\pm 0.02^{\text{Aa}}$
pH	$7.00\pm 0.02^{\text{Dd}}$	$8.28\pm 0.06^{\text{Aa}}$	$7.24\pm 0.10^{\text{Cc}}$	$7.60\pm 0.04^{\text{Bb}}$

数据为平均值±标准差; $P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著

The data are mean±standard deviation; $P<0.05$ indicates a significant difference, $P<0.01$ indicates a significant difference

表2 4种基质的有效养分含量

Tab.2 Available nutrient contents of four substrates

基质养分含量 Matrix nutrient content	黄壤土 Yellow loam	园林废弃物基质 Garden waste substrate	中药渣基质 Chinese medicine residue matrix	泥炭土 Peat
全氮/% Total N	$0.04\pm 0.002^{\text{Dd}}$	$1.93\pm 0.02^{\text{Bb}}$	$3.30\pm 0.16^{\text{Aa}}$	$0.81\pm 0.01^{\text{Cc}}$
全磷/% Total P	$0.07\pm 0.01^{\text{Bb}}$	$0.31\pm 0.02^{\text{Aa}}$	$0.31\pm 0.02^{\text{Aa}}$	$0.32\pm 0.02^{\text{Aa}}$
全钾/% Total K	$3.18\pm 0.03^{\text{Cc}}$	$13.15\pm 0.69^{\text{Bb}}$	$15.36\pm 0.35^{\text{Aa}}$	$15.30\pm 0.57^{\text{Aa}}$
碱解氮/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Alkaline nitrogen	$8.983\pm 0.12^{\text{Dd}}$	$714.23\pm 5.89^{\text{Bb}}$	$883.17\pm 3.93^{\text{Aa}}$	$437.27\pm 9.92^{\text{Cc}}$
速效磷/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Available P	$14.60\pm 1.12^{\text{Cc}}$	$72.93\pm 1.36^{\text{Aa}}$	$68.53\pm 3.79^{\text{Aa}}$	$37.43\pm 1.16^{\text{Bb}}$
速效钾/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Available K	$305.67\pm 7.43^{\text{Dd}}$	$1716.80\pm 20.09^{\text{Bb}}$	$821.87\pm 22.99^{\text{Cc}}$	$2510.93\pm 17.02^{\text{Aa}}$
硝态氮/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Nitrate nitrogen	$31.34\pm 2.40^{\text{Bb}}$	$279.31\pm 35.76^{\text{Aa}}$	$5.14\pm 0.54^{\text{Bb}}$	$8.29\pm 0.32^{\text{Bb}}$
氨态氮/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Ammonia nitrogen	$0.77\pm 0.05^{\text{Dd}}$	$120.62\pm 12.41^{\text{Aa}}$	$18.20\pm 0.71^{\text{Cc}}$	$37.03\pm 0.24^{\text{Bb}}$
有机碳/% Organic carbon	$0.50\pm 0.03^{\text{Dd}}$	$25.12\pm 0.11^{\text{Bb}}$	$32.32\pm 0.91^{\text{Aa}}$	$17.61\pm 0.58^{\text{Cc}}$
腐殖质/% HS	$0.49\pm 0.06^{\text{Dd}}$	$21.22\pm 0.37^{\text{Bb}}$	$24.86\pm 0.18^{\text{Aa}}$	$11.16\pm 0.20^{\text{Cc}}$
富里酸/% FA	$0.42\pm 0.06^{\text{Dd}}$	$19.16\pm 0.32^{\text{Bb}}$	$22.52\pm 0.14^{\text{Aa}}$	$9.90\pm 0.16^{\text{Cc}}$
腐植酸/% HA	$0.07\pm 0.004^{\text{Dd}}$	$2.07\pm 0.05^{\text{Bb}}$	$2.34\pm 0.04^{\text{Aa}}$	$1.26\pm 0.04^{\text{Cc}}$

数据为平均值±标准差; $P<0.05$ 表示差异显著, $P<0.01$ 表示差异极显著

The data are mean±standard deviation; $P<0.05$ indicates a significant difference, $P<0.01$ indicates a significant difference

表2表明,中药渣基质的全氮、全钾、碱解氮、有机碳、腐殖质、富里酸、胡敏酸含量极显著高于其他3种基质($P<0.01$)。黄壤土的全磷含量极显著低于其他基质($P<0.01$)。园林废弃物基质的速效磷含量最高为72.93 mg/kg,泥炭土的速效钾含量极显著高于其他基质($P<0.01$)。园林废弃物基质的硝态氮和氨态氮含量明显高于其他3种基质。由理化性质分析结果可知,园林废弃物和中药渣基质的养分含量最高,泥炭土次之,黄壤土最低,自制基质的有效养分含量均高于传统基质。

2.2 不同基质对‘金丝皇菊’营养生长的影响

不同基质对‘金丝皇菊’株高影响的差异显著($P<0.05$)。5—6月株高生长快,7—9月株高生长速度减缓。6月5日开始各个处理的‘金丝皇菊’株高表现出显著性差异,中药渣基质对‘金丝皇菊’株高生长有明显的促进作用,园林废弃物基质次之。9月4日,种植于自制有机废弃物基质的‘金丝皇菊’株高均明显高于对照组(图1)。

6月26日前茎粗生长缓慢,6月26日后‘金丝皇菊’茎增粗速度快。栽种1个月,园林废弃物和中药渣基质无显著性差异,但与黄壤土和泥炭土有显著性差异($P<0.05$)。9月4日中药渣基质栽种的‘金丝皇菊’茎粗最粗为1.38 cm,黄壤土栽种的‘金丝皇菊’茎粗最细为0.82 cm(图2)。

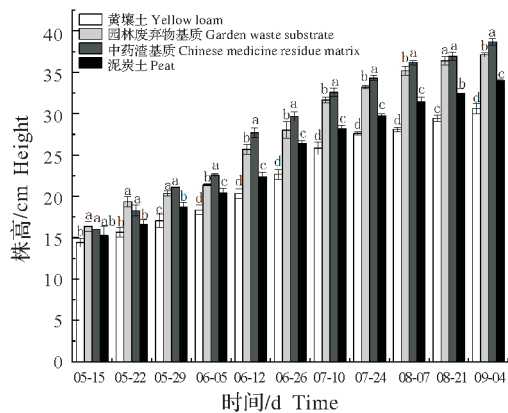


图1 基质对高温环境下‘金丝皇菊’株高的影响
Fig.1 Effect of substrate on plant height of *H. chrysanthemum* under high temperature

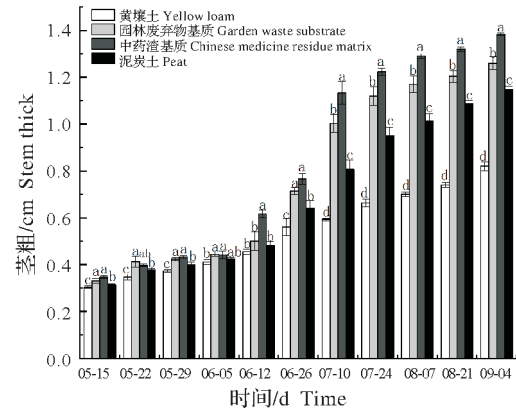


图2 基质对高温环境下‘金丝皇菊’茎粗的影响
Fig.2 Effect of substrate on stem thickness of *H. chrysanthemum* under high temperature

‘金丝皇菊’前期冠幅生长速度相对于后期快,中药渣和园林废弃物基质有利于冠幅的生长,泥炭土和黄土较弱。9月4日,中药渣基质种植‘金丝皇菊’冠幅显著高于其他基质(图3)。

‘金丝皇菊’生长前期叶片生长缓慢,后期生长加快。自制有机废弃物基质种植‘金丝皇菊’的叶片数显著高于传统基质($P<0.05$)(图4)。

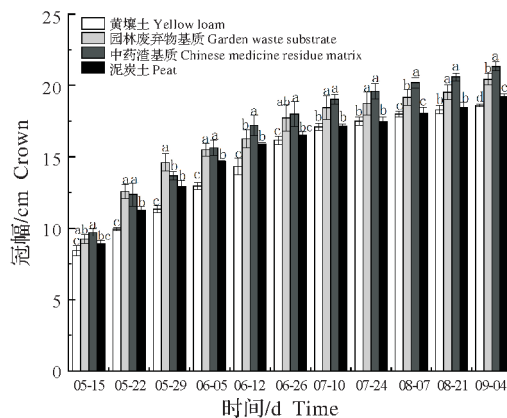


图3 基质对高温环境下‘金丝皇菊’冠幅的影响
Fig.3 Effect of substrate on crown width of *H. chrysanthemum* under high temperature

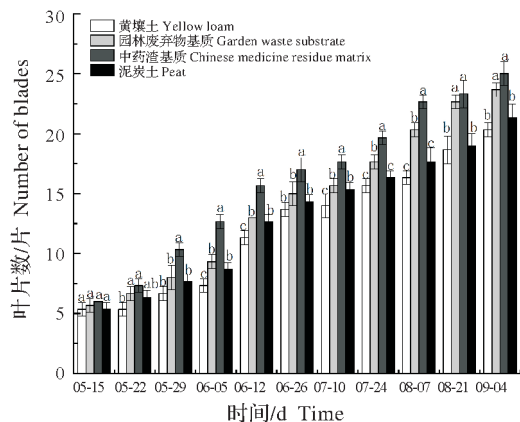


图4 基质对高温环境下‘金丝皇菊’叶片数的影响
Fig.4 Effect of substrate on leaf number of *H. chrysanthemum* under high temperature

2.3 基质对‘金丝皇菊’光合生理的影响

2.3.1 基质对‘金丝皇菊’光合-光响应曲线的影响

不同基质种植下‘金丝皇菊’叶片对光照强度的响应不同,‘金丝皇菊’叶片净光合速率均随光照强度增大而增大,达到一定程度后趋于稳定(图 5)。泥炭土和自制有机废弃物基质栽种的‘金丝皇菊’暗呼吸速率(RD)、光补偿点(LCP)低于黄壤土,而最大净光合速率($P_{n\max}$)、光饱和点(LSP)、表观量子效率(AQY)高于黄壤土。4 个处理中,中药渣基质的最大净光合速率最大,黄壤土最低。黄壤土光饱和点最低为 $1\,748.592\,1\,\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,园林废弃物基质光饱和点高(表 3)。

2.3.2 基质对‘金丝皇菊’叶片光合特性的影响

光合作用是植物生长过程中的重要生理活动,净光合速率反映了植物光合作用中有机物的积累速度^[14]。由表 4 可知, P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 、 WUE 之间呈正比。4 种基质的 P_n 由大到小依次为中药渣基质、园林废弃物基质、泥炭土和黄壤土,说明养分齐全且通透性好的基质能提高植物净光合速率,养分含量较少的黄壤土对植物的净光合作用有一定抑制作用。自制有机废弃物基质能显著提高‘金丝皇菊’叶片 G_s 、 C_i 、 T_r 和 WUE ,进而能提高叶片光合作用促进有机物不断积累。

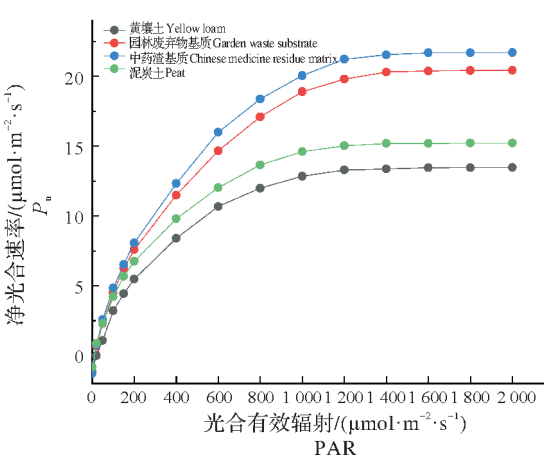


图5 ‘金丝皇菊’光合-光响应曲线
Fig.5 Net photosynthetic rate–light response curves in leaves of *H. chrysanthemum*

表 3 基质对高温环境下‘金丝皇菊’叶片光响应曲线特征参数的影响

Tab.3 Effects of substrates on the characteristic parameters of light response curves of the *H. chrysanthemum* leaves under high temperature

基质 Growing medium	表观量子效率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) AQY	光饱和点/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) LSP	最大净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) $P_{n\max}$	光补偿点/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) LCP	暗呼吸速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) RD
黄壤土 Yellow loam	0.046 8	1 748.592 1	13.536 3	21.595 9	0.966 0
园林废弃物基质 Garden waste substrate	0.049 7	1 897.712 6	20.574 3	5.149 9	0.253 9
中药渣基质 Chinese medicine residue matrix	0.055 5	1 862.118 1	21.843 9	8.280 8	0.453 8
泥炭土 Peat	0.053 0	1 855.539 6	15.325 7	6.156 0	0.321 4

数据为平均值±标准差, $P<0.05$ 表示差异显著
The data are mean±standard deviation, $P<0.05$ indicates a significant difference

2.4 不同基质对‘金丝皇菊’叶片叶绿素荧光的影响

高温气候环境下,黄壤土栽种‘金丝皇菊’叶片 OJIP 曲线发生变形较于其他基质大(图 6)。黄壤土栽种的‘金丝皇菊’叶片 F_m 最低,园林废弃物基质栽种的‘金丝皇菊’叶片的 F_m 最高。黄壤土和泥炭土 F_o 显著高于园林废弃物和中药渣基质(图 7)。

对快速叶绿素荧光诱导动力学曲线的信息进行数学解析,可得多个荧光参数。阶荧光相对变量(V_j)各处理之间无显著性差异。 F_v/F_o 可反映 PS II 潜在活性,高温环境下黄壤土和泥炭土种植的‘金丝皇菊’ F_v/F_o 值显著低于园林废弃物和中药渣基质。黄壤土基质种植的‘金丝皇菊’ M_o 显著高于其他基质(表 5)。

表 4 基质对高温环境下‘金丝皇菊’叶片光合特性影响的单因素分析
Tab.4 Single factor analysis of the effects of substrates on the photosynthetic characteristics of *H. chrysanthemum*

基质 Growing medium	净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) P_n	气孔导度/ ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) G_s	胞间二氧化碳浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) C_i	蒸腾速率/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) T_r	瞬间水分利用率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) WUE
黄壤土 Yellow loam	13.24±0.46 ^d	0.31±0.08 ^a	235.76±19.5 ^b	9.23±0.46 ^a	1.4±0.14 ^b
园林废弃物基质 Garden waste substrate	20.15±0.21 ^b	0.35±0.02 ^a	271.54±4.93 ^a	9.79±0.63 ^a	1.91±0.17 ^a
中药渣基质 Chinese medicine residue matrix	21.19±0.52 ^a	0.35±0.04 ^a	286.33±1.63 ^a	9.82±0.64 ^a	2.03±0.19 ^a
泥炭土 Peat	15.11±0.69 ^c	0.26±0.04 ^a	243.59±4.76 ^b	9.26±0.21 ^a	1.63±0.1 ^b

数据为平均值±标准差, $P<0.05$ 表示差异显著
The data are mean±standard deviation, $P<0.05$ indicates a significant difference

由表 5 可知,高温环境下,自制有机废弃物基质栽种的‘金丝皇菊’叶片 F_v/F_m 和 Phi_Eo 显著高于泥炭土和黄壤土,说明高温环境下泥炭土和黄壤土种植的‘金丝皇菊’电子传递受到严重抑制,光反应活性显著下降,同时 Phi_Do 高。以有活性的反应中心(RC)为基础,高温环境下园林废弃物基质和中药渣基质显著低于黄壤土和泥炭土基质种植的‘金丝皇菊’ ABS/RC 、 TRo/RC 和 Dio/RC 的数值,说明中药渣基质和园林废弃物基质优化了高温环境下叶片光能的分配,增强了电子传递的能力,从而缓解高温环境诱导的伤害。园林废弃物和中药渣基质栽种的‘金丝皇菊’ ETo/RC 显著低于黄壤土和泥炭土基质,说明园林废弃物和中药渣基质栽种的‘金丝皇菊’叶片减少用于电子传递的能量份额,而增加热耗散的能量份额以减少高温引起的伤害。

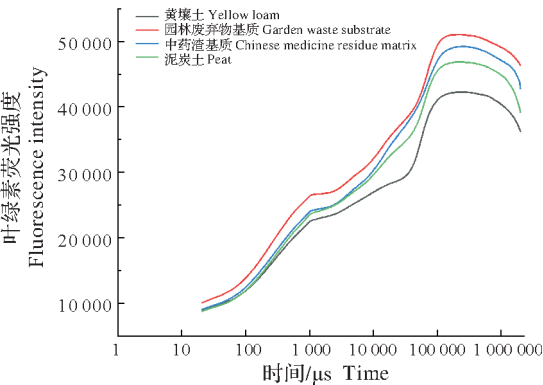


图 6 基质对高温环境下‘金丝皇菊’叶片快速叶绿素荧光诱导动力学曲线的影响
Fig. 6 Effects of substrates on fast chlorophyll fluorescence-induced kinetics curves(OJIP)of *H. chrysanthemum* leaves under high temperature

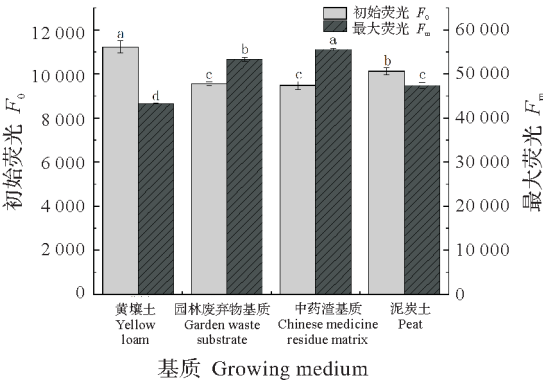


图 7 基质对高温环境下‘金丝皇菊’初始荧光(F_0)和最大荧光(F_m)的影响
Fig.7 Effect of substrates on *H. chrysanthemum* F_0 and F_m under high temperature environment

在高温环境下传统基质种植的‘金丝皇菊’NPQ 显著高于自制基质,而 qP 显著低于自制基质(图 8),说明高温环境下传统基质种植造成‘金丝皇菊’叶片 PSII 不可逆转的损伤,而自制基质种植的‘金丝皇菊’通过提高叶片电子传递活性,缓解高温环境下多余能量对 PSII 的抑制,从而提高高温环境下‘金丝皇菊’叶片的光化学效率。

表5 基质对高温环境下‘金丝皇菊’比活性和能量分配的影响

Tab.5 Effects of substrate on specific activity and energy distribution of *H. chrysanthemum*

基质 Growing medium	V_j	F_j/F_0	M_0	F_j/F_m	Psi_o	Phi_{Eo}	Phi_{Do}	ABS/RC	TRo/RC	ETo/RC	DIo/RC
黄壤土 Yellow loam	0.38±0.01 ^a	2.88±0.07 ^c	0.87±0.00 ^a	0.75±0.00 ^c	0.62±0.01 ^a	0.46±0 ^d	0.26±0.01 ^a	3.11±0.05 ^a	2.33±0.04 ^a	1.46±0.04 ^a	0.78±0.00 ^a
园林废弃物基质 Garden waste substrate	0.38±0.00 ^a	4.49±0.05 ^a	0.74±0.00 ^c	0.8±0.01 ^a	0.62±0.00 ^a	0.51±0.00 ^b	0.18±0.00 ^c	2.4±0.05 ^b	1.93±0.03 ^c	1.19±0.03 ^c	0.47±0.03 ^c
中药渣基质 Chinese medicine residue matrix	0.38±0.00 ^a	5.86±0.08 ^a	0.71±0.00 ^d	0.78±0.00 ^b	0.62±0.00 ^a	0.52±0.00 ^a	0.17±0.00 ^d	2.4±0.03 ^b	1.86±0.02 ^d	1.16±0.02 ^c	0.54±0.01 ^b
泥炭土 Peat	0.38±0.01 ^a	3.4±0.07 ^b	0.86±0 ^{bbb}	0.73±0.01 ^d	0.62±0.01 ^a	0.48±0.01 ^c	0.21±0.00 ^b	3.06±0.10 ^a	2.22±0.05 ^b	1.37±0.05 ^b	0.84±0.06 ^a

数据为平均值±标准差, $P<0.05$ 表示差异显著

The data are mean±standard deviation, $P<0.05$ indicates a significant difference

3 结论与讨论

3.1 自制裁培基质的氮元素和总腐植酸对‘金丝皇菊’高温越夏的影响

栽培基质的主要功能是固定植物,供水、供应养分、调节供氧气,栽培基质的理化性质将直接影响植物生长^[15-16]。氮是植物生长和发育需要的大量营养元素之一,是调节陆地生态系统生产量、结构和功能的关键因素^[17]。前人研究认为氮素能促进植物的生长,促进植物光合作用^[18-21]。有机废弃物基质可增加植物氮质量分数,可有效促进植物对氮元素的吸收^[22]。腐植酸不仅能提高基质肥力,提高植物光合速率,还有抗菌和抗病毒作用^[23]。李英浩等^[24]研究认为在干旱胁迫程度下,喷施腐植酸后,燕麦叶片的 P_n 提高,增强光合产物积累,延缓植株衰老,抗旱性增强。李茂松等^[25]研究表明,富里酸抗蒸腾剂可提高小麦光合速率,减小气孔开度、降低蒸腾强度,起到促进小麦生长和减少水分散失的作用。本试验的中药渣基质和园林废弃物基质富含腐殖质、富里酸、腐植酸且养分齐全,其有机氮源经微生物矿化后以硝态氮、铵态氮、碱解氮等形态被‘金丝皇菊’吸收所利用,促成‘金丝皇菊’的生长发育^[26]。所以两种自制有机废弃物基质种植的‘金丝皇菊’营养生长佳,且叶片净光合速率大,说明两种自制基质对‘金丝皇菊’叶片净光合速率有促进作用。

3.2 栽培基质水分对‘金丝皇菊’净光合速率的影响

基质水分条件是影响植物生长及光合生理的重要因素^[27]。水分胁迫引起植物光合作用减弱是导致作物减产的一个关键因素^[28-29]。由于‘金丝皇菊’忌旱怕涝,受湖南高温多雨天气的影响,7月中上旬连绵多雨,7月底至8月份高温干旱,黄壤土持水能力强,透水性差,7月中上旬盆土积水严重,黄壤土质地黏重,8月份高温干旱盆土易板结,所以黄壤土种植的‘金丝皇菊’受环境和基质影响 P_n 随着 G_s 的减小而降低。本研究发现,黄壤土和泥炭土种植的‘金丝皇菊’ G_s 明显下降,叶片气孔发生关闭,减少蒸发的同时阻碍了外界 CO_2 进入叶肉细胞,导致植物 P_n 降低,此时光合作用受限是由气孔限制引起的,与前人研究一致^[30-32]。本研究中,自制有机废弃物基质理化性质好,显著提高了‘金丝皇菊’叶片光饱和点,且光补偿点低,‘金丝皇菊’叶片进行光合作用的时效延长,有利于叶片对光能的转化,合成的光合产物增加,促进光合作用的进行。

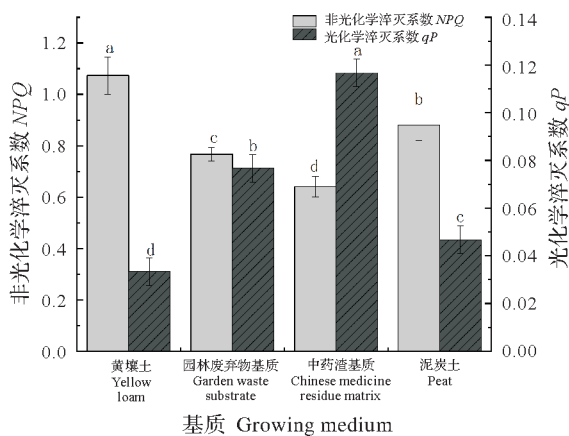


图8 基质对高温环境下‘金丝皇菊’非光化学淬灭系数和光化学淬灭系数的影响

Fig.8 Effect of matrix on *H. chrysanthemum* NPQ and qP under high temperature

3.3 高温环境下‘金丝皇菊’的叶绿素荧光特性

叶绿素荧光可检测量化光合器官在逆境条件下受到的损害,尤其是PSII的功能和活性的变化^[33]。前人已利用叶绿素荧光技术反应其他植物在干旱、高温、施肥、盐胁迫等方面受到的影响^[34-36]。本试验利用快速叶绿素荧光技术来反映高温环境下基质对‘金丝皇菊’营养生长期光合器官结构和性能的影响。两种自制基质较对照组基质理化性质佳,通透性好,‘金丝皇菊’的 F_m 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 显著高于对照组, F_o 值显著低于对照组,因为在高温环境下,对照组‘金丝皇菊’由于高温加强叶绿体呼吸,导致部分QA发生还原作用,对照组中的‘金丝皇菊’PSII光反应中心受到伤害。 NPQ 和 qP 两个指标表示植物耗散过量光能的能力,是反映植物光保护能力的重要指标^[7]。本研究中两种自制基质 qP 值显著高于对照组,而 NPQ 值显著低于对照组。这说明对照组的‘金丝皇菊’通过耗散的形式将过的光能释放以避免对植物的损害^[37]。高温环境下以黄壤土和泥炭土为基质种植的‘金丝皇菊’的光系统结构和功能受到破坏,一定程度上抑制了营养生长,而自制有机废弃物基质有保护叶片中光合色素效果,稳定光合反应中心分子结构,并保持电子传递链畅通,增强电子传递效率的能力,有助于促进光化学活性和光合性能的提高以及能量的高效分配,从而缓解高温胁迫对光合器官结构和功能的伤害,增强‘金丝皇菊’的热稳定性,能有效促进‘金丝皇菊’的营养生长。

综上,本研究认为中药渣基质和园林废弃物基质可促进‘金丝皇菊’夏季高温环境营养生长,促进其光合作用的进行,为今后夏季高温地区生产‘金丝皇菊’提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 李影,李斌,柳东阳,等.生物炭配施菌肥对植烟土壤养分和可溶性有机碳氮光谱特征的影响[J].华北农学报,2018,33(6):227-234.
Li Y, Li B, Liu D Y, et al. Effects of bio-bacteria-fertilizer combined with biochar on soil properties and dissolved soil N and C UV spectral characteristics in tobacco growing soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2018, 33(6): 227-234.
- [2] 张进红,吴波,王冉,等.生物炭施用量对紫花苜蓿叶片PS II光化学特性的影响[J].山东农业科学,2018,50(9):66-71.
Zhang J H, Wu B, Wang R, et al. Effect of biochar application amount on photosynthetic system II photochemical characteristics of *Alfalfa* leaves[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018, 50(9): 66-71.
- [3] 国家药典委员会.中华人民共和国药典一部[M].北京:中国医药科技出版社,2015:310.
National Pharmacopoeia Committee. Pharmacopoeia of the People's Republic of China [M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2015: 310.
- [4] 王磊,赵鹏飞,逯久幸,等.茶用菊品种金丝皇菊对盐胁迫的响应[J].河南农业科学,2019,48(2):112-119.
Wang L, Zhao P F, Lu J X, et al. The salt-tolerance mechanism of chrysanthemum cultivar Jinsihuangju [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(2): 112-119.
- [5] 杨建伟,赵丹,孙桂芳,等.干旱胁迫对天目琼花光合特征的影响[J].河北大学学报(自然科学版),2019,39(5):529-535.
Yang J W, Zhao D, Sun G F, et al. Effect of drought stress on *Viburnum sargentii* Koehne photosynthetic characteristics [J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2019, 39(5): 529-535.
- [6] 张向前,白岚方,路战远,等.种植密度对春玉米灌浆期光合特性日变化和光响应曲线及产量的影响[J].华北农学报,2019,34(4):96-103.
Zhang X Q, Bai L F, Lu Z Y, et al. Light-response curves and yield of maize in grain-filling period [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(4): 96-103.
- [7] 夏璐,赵蕊,王怡针,等.干旱胁迫对夏玉米光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J].华北农学报,2019,34(3):102-110.
Xia L, Zhao R, Wang Y Z, et al. Effects of drought stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of summer maize [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(3): 102-110.
- [8] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,2000.
Lu R K. Soil agricultural chemical analysis method [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [9] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

- Bao S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [10] 叶子飘. 光合作用对光和CO₂响应模型的研究进展[J]. 植物生态学报, 2010, 34(6): 727-740.
- Ye Z P. A review on modeling of responses of photosynthesis to light and CO₂[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(6): 727-740.
- [11] DB11/T770-2010 花卉栽培基质[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2010.
- DB11/T770-2010 Growth media for ornamental plants[S]. Beijing: Beijing local standards. 2010.
- [12] Masó M A, Blasi A B. Evaluation of composting as a strategy for managing organic wastes from a municipal market in Nicaragua[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(11): 5120-5124.
- [13] 刘方春, 马海林, 马丙尧, 等. 菇渣用作无纺布容器育苗成型机配套基质的研究[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 477-481.
- Liu F C, Ma H L, Ma B Y, et al. Use of used mushroom cultivation medium as raw material in making seedling pots of non-woven fabric[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(5): 477-481.
- [14] 张银荣, 兰再平, 秘洪雷, 等. 滴灌施肥条件下氮磷钾对龙脑香樟幼苗生长及光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(6): 39-45.
- Zhang Y R, Lan Z P, Mi H L, et al. The growth and photosynthetic characteristics of *Cinnamomum camphora* seedlings under different N, P, and K by level drip fertilization[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2019, 43(6): 39-45.
- [15] 马义胜, 洪春来, 王卫平, 等. 铁皮石斛栽培废料和菇渣配制基质对草莓生长、产量及品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(7): 1175-1181.
- Ma Y S, Hong C L, Wang W P, et al. Effects of substrates prepared from *Dendrobium officinale* cultivation waste and mushroom residue on growth, yield and quality of strawberry[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2018, 30(7): 1175-1181.
- [16] Paul L R, Chapman B K, Chanway C P. Nitrogen fixation associated with *suillus tomentosus* tuberculate ectomycorrhizae on *Pinus contorta* var. *latifolia*[J]. Annals of Botany, 2007, 99: 1101-1109.
- [17] Chen J, Chen J, Xiao G, et al. Soil nitrogen transformation responses to seasonal precipitation changes are regulated by changes in functional microbial abundance in a subtropical forest[J]. Biogeosciences, 2017, 14(9): 2513-2525.
- [18] 孙明慧, 常笑超, 刘勇, 等. 园林废弃物堆肥不同施肥量对雄性毛白杨栽植效果的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(9): 24-27.
- Sun M H, Chang X C, Liu Y, et al. Effects of different amounts of garden waste compost on planting male *Populus tomentosa*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(9): 24-27.
- [19] Wang L, Chen Y, Du L, et al. Research on influencing factors for UV photolysis of benzotriazole[J]. Open Journal of Nature Science, 2015, 3(4): 105-112.
- [20] 刘福妹, 劳庆祥, 庞圣江, 等. 不同氮素水平对米老排苗期生长和叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(1): 62-67.
- Liu F M, Lao Q X, Pang S J, et al. Effects of nitrogen fertilization on growth performance and chlorophyll fluorescence parameters of *Mytilaria laosensis* seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(1): 62-67.
- [21] 胡嘉伟, 刘勇, 马履一, 等. 园林废弃物堆肥替代油松容器苗基质材料的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(5): 81-86.
- Hu J W, Liu Y, Ma L Y, et al. Effects of garden waste compost additive in growing medium on *Pinus tabulaeformis* container seedlings[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015, 39(5): 81-86.
- [22] 卞赛男, 常鹏杰, 王宁杭, 等. 氮素形态对喜树叶片生长、叶绿素荧光参数及叶绿体相关基因表达的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(5): 908-916.
- Bian S N, Chang P J, Wang N H, et al. Leaf growth, chlorophyll fluorescence characteristics, and expression of photosystem-related genes in *Camptotheca acuminata* with different N forms' fertilization[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2019, 36(5): 908-916.
- [23] 郭茹, 洪坚平. 生物炭腐植酸对盆栽油菜铬污染土壤化学性状及铬含量的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(5): 192-200.
- Guo R, Hong J P. Effects of biochar and humic acid on chemical properties and chromium contents of chromium-contaminated soil in potted rape[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(5): 192-200.
- [24] 李英浩, 刘景辉, 朱珊珊, 等. 干旱胁迫下腐植酸对燕麦叶片光合性能的调控效应[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(11): 1385-1391.

- Li Y H, Liu J H, Zhu S S, et al. Effect of spraying humic acid on photosynthetic characteristics of oat leaves under drought stress[J]. Journal of Triticeae Crops, 2019, 39(11): 1385-1391.
- [25] 李茂松, 李森, 张述义, 等. 灌浆期喷施新型FA抗蒸腾剂对冬小麦的生理调节作用研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(4): 703-708.
- Li M S, Li S, Zhang S Y, et al. Physiological effect of new fa antitranspirant on winter wheat at ear filling stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(4): 703-708.
- [26] 王小龙, 刘凤之, 史祥宾, 等. 不同有机肥对葡萄根系生长和土壤养分状况的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(5): 177-184.
- Wang X L, Liu F Z, Shi X B, et al. Effects of organic fertilizers on root growth and soil nutrition of grape[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(5): 177-184.
- [27] 苏玉琦, 龚馨旭, 高青海. 高温季节草莓育苗栽培基质筛选[J]. 牡丹江师范学院学报(自然科学版), 2016(2): 51-54.
- Su Y Q, Gong X X, Gao Q H. The screening of strawberry seedlings cultivation medium in high temperature seasons[J]. Journal of Mudanjiang Normal University (Natural Sciences Edition), 2016(2): 51-54.
- [28] Legg B J, Day W, Lawlor D W, et al. The effects of drought on barley growth: models and measurements showing the relative importance of leaf area and photosynthetic rate[J]. Journal of Agricultural Science, 1979, 92(3): 703-716.
- [29] 姚春娟, 郭圣茂, 马英超, 等. 干旱胁迫对4种决明属植物光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(9): 1880-1888.
- Yao C J, Guo S M, Ma Y C, et al. Effect of drought stress on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of four species of Cassia[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(9): 1880-1888.
- [30] 方霞, 柏志靛, 周生财, 等. 大叶桉楠和小叶桉楠光合生理特性比较[J]. 园艺学报, 2019, 46(5): 964-974.
- Fang X, Bai Z L, Zhou S C, et al. The photosynthetic characteristics of two types of *Phoebe zhennan*[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2019, 46(5): 964-974.
- [31] 张继红, 丁雪丹, 梅雅茹, 等. 干旱胁迫对5种花境植物光合生理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(4): 92-98.
- Zhang J H, Ding X D, Mei Y R, et al. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics of five flower border plants[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(4): 92-98.
- [32] Guidi L, Calatayud A. Non-invasive tools to estimate stress-induced changes in photosynthetic performance in plants inhabiting Mediterranean areas[J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, 103: 42-52.
- [33] 刘莉娜, 张卫强, 黄芳芳, 等. 盐胁迫对银叶树幼苗光合特性与叶绿素荧光参数的影响[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(6): 601-607.
- Liu L N, Zhang W Q, Huang F F, et al. Effects of NaCl stress on the photosynthesis and chlorophyll fluorescence of *Heritiera littoralis* seedlings[J]. Journal of Forest and Environment, 2019, 39(6): 601-607.
- [34] 徐新翔, 侯昕, 王芬, 等. 低钾胁迫对苹果砧木M9T337幼苗光合荧光特性及¹³C吸收分配的影响[J]. 园艺学报, 2020, 47(3): 529-540.
- Xu X X, Hou X, Wang F, et al. Effects of low potassium stress on photosynthetic fluorescence characteristics and ¹³C absorption and distribution of M9T337 seedlings[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2020, 47(3): 529-540.
- [35] 胡慧, 马帅国, 田蕾, 等. 脱硫石膏改良盐碱土对水稻叶绿素荧光特性的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(12): 2439-2450.
- Hu H, Ma S G, Tian L, et al. Effects of saline-alkali soil improved by desulfurized gypsum on chlorophyll fluorescence characteristics of rice[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(12): 2439-2450.
- [36] Jemâa E, Sridharan G, Saïda A, et al. Enhanced sensitivity of the photosynthetic apparatus to heat stress in digalactosyl-diacylglycerol deficient *Arabidopsis*[J]. Environmental and Experimental Botany, 2012: 80.
- [37] 彭晨, 苏晓琼, 杜静, 等. 外源亚精胺对高温胁迫下黄瓜幼苗快速叶绿素荧光诱导动力学特性的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(2): 260-265.
- Peng C, Su X Q, Du J, et al. Effects of exogenous spermidine on fast chlorophyll fluorescence induction dynamics in cucumber seedlings under heat stress[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(2): 260-265.