

肉苁蓉寄生对梭梭光合特性的影响

于霞霞<sup>1</sup>, 郭晔红<sup>1\*</sup>, 杜 骏<sup>2</sup>, 贾存勤<sup>3</sup>, 李 欠<sup>1</sup>, 马兴东<sup>1</sup>, 马旭东<sup>1</sup>  
(1. 甘肃农业大学农学院中药材研究所, 甘肃省中药材规范化生产技术创新重点实验室, 甘肃省药用植物栽培育种工程研究中心, 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃中医药大学药学院, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃汇勤生物科技有限公司, 甘肃 白银 730600)

**摘要:** **目的** 探讨肉苁蓉在生长的关键时期(出土期、开花结实期、枯萎期)对其寄主梭梭光合特性的影响。**方法** 选 4 年生梭梭为研究对象,用 LI-6400 光合仪分别测定寄生肉苁蓉的梭梭和未寄生肉苁蓉的梭梭的光合作用,测定指标包括净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度(Ci),并测定光合相关指标-叶绿素。**结果** 3 个测定时期内,肉苁蓉的寄生使梭梭的净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)、水分利用率(WUE)、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度(Ci)日均值和对照组相比均降低;多指标综合评价肉苁蓉的寄生对梭梭光合能力的影响,发现肉苁蓉的寄生使梭梭的光合能力减弱。冗余分析(RDA)表明,3 个时期中,寄生了肉苁蓉梭梭的种-环境的相关性都小于未寄生肉苁蓉的梭梭。**结论** 肉苁蓉生长的 3 个关键时期中,它的寄生使梭梭的光合能力减弱,与净光合速率呈正相关的光合生理及其相关指标也减弱;肉苁蓉的寄生使环境对梭梭的影响作用减弱,寄生肉苁蓉的梭梭植株对环境因子表现出“迟钝型”响应。  
**关键词:** 肉苁蓉;梭梭;寄生;光合特性;环境因子;冗余分析  
**中图分类号:** R282.2      **文献标志码:** B      **文章编号:** 1001-1528(2021)09-2570-07  
**doi:** 10.3969/j.issn.1001-1528.2021.09.057

肉苁蓉 *Cistanche deserticola* Ma 是我国名贵中药材“大芸”的基原植物,寄生在梭梭的根部,其生长所需的营养物质全部由梭梭供给;梭梭 *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge 属藜科梭梭属多年生灌木或小乔木,为国家濒危三级保护植物<sup>[1]</sup>,具有耐旱、耐寒、抗盐碱的特性,是西北地区重要的防风固沙先锋树种。全世界约有梭梭 10 种,是古地中海区系的遗留种,分布于地中海至中亚地区,构成亚洲荒漠区分布最广泛的荒漠植被类型<sup>[2]</sup>,中国有梭梭和白梭梭 *Haloxylon persicum* Bunge ex Boiss. et Buhsee 2 种,主要分布在内蒙古、新疆、甘肃、青海、宁夏等地,是西北荒漠半荒漠区珍贵的植物资源<sup>[3]</sup>。由于自然作用和人为因素对荒漠植被的严重破坏,使天然梭梭林大面积减少,人工梭梭林已成为当今梭梭群落存在的主要形式。

光合作用是植物的重要生理生态学特性之一<sup>[4]</sup>,它是植物生长发育的基础,也是植物长势优劣的决定性因素,植物对环境条件变化具有十分敏感的生理响应<sup>[5]</sup>。梭梭作为肉苁蓉的能量供应源,其制造有机物的光合作用至关重要,近年来有关梭梭的研究,主要集中在梭梭群落生长、林分结构、生物学特性等方面<sup>[6-10]</sup>,而关于梭梭光合生理方面的研究则少有报道。鞠强等<sup>[11]</sup>研究了梭梭光合生理生态过程与干旱环境的相互关系,有关寄生肉苁蓉后对其寄主植物光合生理的影响,郭东锋<sup>[12]</sup>、杨太新等<sup>[13]</sup>研究了

管花肉苁蓉寄生对寄主柽柳光合特性的影响,而关于荒漠肉苁蓉寄生对寄主梭梭光合作用特性的影响以及环境因子与光合特性之间的相互关系则罕见报道。本实验研究了寄生荒漠肉苁蓉对梭梭光合特性的影响以及环境因子对梭梭光合生理指标影响的程度,旨在探明梭梭光合生理指标对肉苁蓉寄生的响应机制及其对环境的适应程度,为荒漠化综合治理和肉苁蓉产业持续发展提供科学依据。

**1 材料与方 法**

1.1 试验地概况 试验点设在甘肃靖远糜滩乡,东经 104°68′,北纬 36°59′,海拔 1 450 m,属温带干旱半干旱气候,年均气温 9.2 ℃左右,年极端最高气温 35.1 ℃,年均降水量 240 mm,年蒸发量 1 634 mm,平均日照时数 2 696 h,无霜期 120 d。

1.2 材料 供试植物为甘肃靖远县长势良好的 4 年生人工栽培梭梭,小区和管理水平与大田栽培相同。采用梅花点取样法选取寄生和未寄生肉苁蓉的梭梭植株各 5 株,每株梭梭分别在上、中、下(依次距地面 75、50、25 cm 处)部选取生长一致的各功能叶片进行测定,并每次在梭梭上、中、下测定光合的叶片处采集叶片测定叶绿素,每株重复 3 次。将所取样品立即置于液氮罐中贮藏,带回实验室于 -80 ℃超低温冰箱中冷藏备用。

1.3 方法 试验于 2018 年 5 月 4~6 日(苁蓉出土期)、

收稿日期: 2020-05-08  
基金项目: 国家自然科学基金(31860349); 甘肃省科技计划(18YF1NA072)  
作者简介: 于霞霞(1992—),女,硕士,讲师,研究方向为药用植物规范化栽培。E-mail: yuxiaxia@joincare.com  
\* 通信作者: 郭晔红(1968—),女,博士,副教授,从事药用植物资源利用研究。E-mail: guoyh@gsau.edu.cn

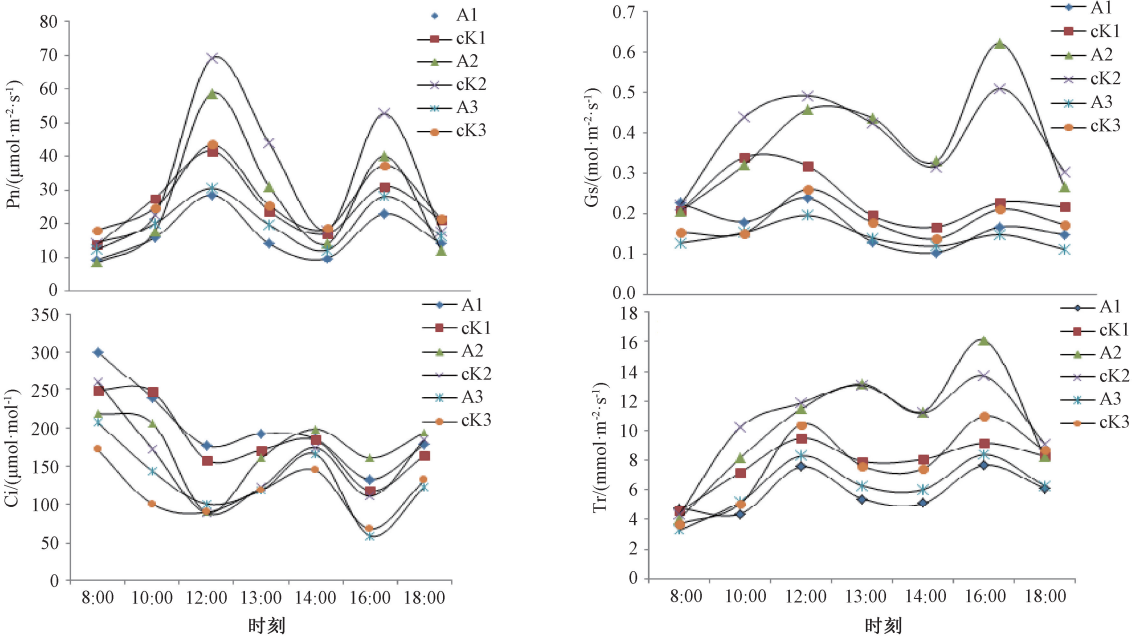
5月27~29日（开花结实期）、6月19~21日（枯萎期）3个时间段进行，以开始测定日期作为测定日期，每次连测3d，求得3d的平均值作为该测定期的值，求得3d中每个时刻的平均值绘制光合指标日变化曲线，所选日期晴朗无风，用LI-6400型光合仪对梭梭叶片进行活体测定，每天测定时间为8:00~18:00，每隔2h测定1次，中午加测1次，每个处理选取5株，每株重复3次，取其平均值。测定项目包括梭梭的净光合速率（Pn）、气孔导度（Gs）、蒸腾速率（Tr）、胞间CO<sub>2</sub>浓度（Ci）、水分利用率（WUE=Pn/Tr）等各项光合生理指标，以及空气温度（Ta）、空气相对湿度（RH）、叶片温度（Tl）、大气压亏缺（Vpd）、光合有效辐射（PAR）、大气CO<sub>2</sub>浓度（CO<sub>2</sub>）等环境因子。将Pn、Tr、Gs、Ci、WUE作为物种数据源；将Tl、RH、Vpd、Ta、PAR、CO<sub>2</sub>作为环境因子数据源，分析其光合生理指标与环境因子间的相关性。在每个时期进行测定光合作用的3d中，连续3d进行取样，测定叶绿素的含量，求得平均值作为该时期的测定值，叶绿素含量的测定采用丙酮法<sup>[14]</sup>。

1.4 统计分析 采用SPSS 19.0对寄生和未寄生肉苁蓉的梭梭叶片的光合生理指标采用One-way ANOVA中的LSD和Duncan法分析，Excel及CanoDraw法绘图，采用Canoco 4.5软件先进行DCA分析后选择RDA分析并排序，RDA

排序图中的环境因子（Tl、RH、Vpd、Ta、PAR、CO<sub>2</sub>）用带箭头的虚线表示，光合生理指标（Pn、Tr、Gs、Ci、WUE）用带箭头的实线表示。

2 结果与分析

2.1 肉苁蓉的寄生对梭梭光合生理指标的影响 3个测量时期中，每个时期寄生和未寄生肉苁蓉梭梭的净光合速率（Pn）、气孔导度（Gs）、蒸腾速率（Tr）随时间的变化均有一致的变化规律，均呈双峰型曲线，表现出明显的光合午休现象。Pn从8:00开始逐渐升高，12:00出现第1个峰值，随后大幅度降低，在14:00降至最低，之后有所回升，在16:00达到第2次峰值，随后又逐渐下降，且每个时期寄生和未寄生肉苁蓉的梭梭第1个峰值均大于第2个峰值。除5月4日未寄生肉苁蓉梭梭的Gs、5月27日寄生和未寄生肉苁蓉梭梭的Tr，其他时间寄生和未寄生肉苁蓉梭梭的Gs、Tr与Pn的峰值时间一致，但2个峰值的大小则无明显的规律，见图1。每个时期梭梭Pn日均值都表现为未寄生肉苁蓉的梭梭>寄生肉苁蓉的梭梭，其中5月4日和5月27日未寄生肉苁蓉梭梭的Pn日均值高于寄生肉苁蓉的梭梭（P<0.05）；各个时期梭梭的Gs和Tr日均值都表现为未寄生肉苁蓉的梭梭>寄生肉苁蓉的梭梭，但未达到显著性水平，见表1。



注：1、2、3分别代表5月4日、5月27日、6月19日。A为寄生了肉苁蓉的梭梭，cK为未寄生肉苁蓉的梭梭。

图1 肉苁蓉不同寄生时期梭梭光合生理特性日变化

3个测量时期中，每个时期寄生和未寄生肉苁蓉梭梭的Ci随时间的变化趋势一致，且与各自Pn、Gs、Tr变化趋势相反，呈倒双峰型曲线，在8:00、14:00、18:00 Ci值较高，Ci出现峰值的时间与Gs、Tr、Pn出现谷值的时间一致。除5月4日外，其他2个时期梭梭Ci日均值与Gs、Tr、Pn日均值相反，为寄生肉苁蓉的梭梭>未寄生肉苁蓉的梭梭，5月4日未寄生肉苁蓉的梭梭Ci仅高于寄生肉苁蓉

梭梭1.20 μmol/mol，见图1C、表1。

2.2 肉苁蓉的寄生对梭梭水分利用效率及叶绿素含量的影响 水分利用效率是反映植物水分利用特性的重要参数，荒漠植物具有较高的水分利用效率，尤其是在水分亏缺时能以高水分利用效率来抵御干旱胁迫<sup>[15]</sup>，逆境胁迫会影响植物光合色素的合成<sup>[16]</sup>。梭梭WUE测量的3个时期中，各自的寄生肉苁蓉梭梭和未寄生肉苁蓉梭梭日变化趋势一

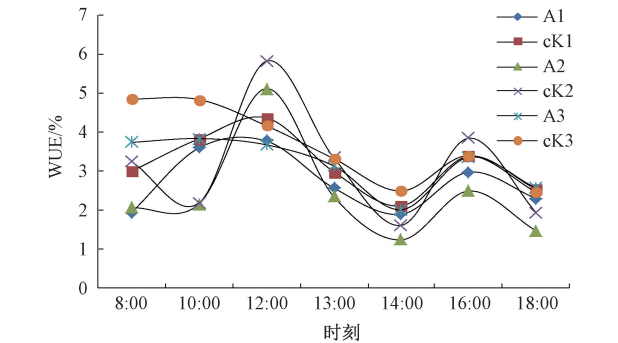
表 1 肉苁蓉寄生对梭梭光合参数日均值的影响

| 日期       | 处理 | 光合参数日均值                                                              |                                                                  |                                                                      |                                                                   |                              |
|----------|----|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------|
|          |    | 净光合速率 Pn/<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 气孔导度 Gs/<br>( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 Ci/<br>( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) | 蒸腾速率 Tr/<br>( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 水分利用效率<br>WUE/%              |
| 5 月 4 日  | A  | 16.288 4±0.593 1 <sup>cC</sup>                                       | 0.170 7±0.005 6 <sup>bB</sup>                                    | 201.041 9±7.191 9 <sup>a</sup>                                       | 5.865 9±0.197 6 <sup>bB</sup>                                     | 2.790 0±0.197 3 <sup>a</sup> |
|          | cK | 23.729 3±1.806 8 <sup>bBC</sup>                                      | 0.256 3±0.016 2 <sup>bAB</sup>                                   | 202.239 3±15.338 1 <sup>a</sup>                                      | 8.677 8±0.883 9 <sup>abAB</sup>                                   | 2.819 9±0.434 2 <sup>a</sup> |
| 5 月 27 日 | A  | 25.980 8±2.998 4 <sup>bABC</sup>                                     | 0.377 2±0.062 9 <sup>aA</sup>                                    | 175.826 4±64.091 8 <sup>a</sup>                                      | 10.372 2±1.664 7 <sup>aAB</sup>                                   | 2.687 4±0.594 3 <sup>a</sup> |
|          | cK | 33.992 6±3.909 1 <sup>aA</sup>                                       | 0.394 5±0.068 4 <sup>aA</sup>                                    | 149.131 9±57.192 0 <sup>a</sup>                                      | 10.655 7±1.454 8 <sup>aA</sup>                                    | 3.383 2±0.735 2 <sup>a</sup> |
| 6 月 19 日 | A  | 19.810 2±0.237 2 <sup>bcBC</sup>                                     | 0.142 3±0.007 4 <sup>bB</sup>                                    | 131.566 3±14.203 4 <sup>a</sup>                                      | 6.250 4±0.246 5 <sup>bAB</sup>                                    | 3.180 2±0.141 6 <sup>a</sup> |
|          | cK | 26.954 9±0.217 1 <sup>bAB</sup>                                      | 0.181 1±0.005 8 <sup>bB</sup>                                    | 118.378 9±8.009 2 <sup>a</sup>                                       | 7.718 9±0.436 0 <sup>abAB</sup>                                   | 3.512 2±0.179 5 <sup>a</sup> |

注:小写字母表示在  $P<0.05$  的水平上差异显著,大写字母表示在  $P<0.01$  的水平上差异极显著。A 为寄生了肉苁蓉的梭梭,cK 为未寄生肉苁蓉的梭梭。

致,不同生长期,WUE 日变化趋势有差异。WUE 日变化趋势在 5 月 4 日和 5 月 27 日大体相同,均为双峰型曲线,峰值时间与 Pn 的一致,12:00 达到一天中的最大值,14:00 为一天中的最小值。与其不同,6 月 19 日梭梭 WUE 日变化曲线呈降-升-降的趋势,在 8:00~14:00 逐渐降低,14:00 后 WUE 有所回升,到 16:00 达到一个峰值,随后又下降。最大值出现在 8:00,最小值出现的时间与其他 2 个时期一致,为 14:00。同一测量时期梭梭 WUE 日均值表现为未寄生肉苁蓉梭梭>寄生肉苁蓉梭梭,但未达到显著性水平,表明肉苁蓉的寄生降低了梭梭的 WUE,但不改变日变化趋势,见图 2、表 1。3 个测量时期,梭梭叶绿素 a 和叶绿素 b 含量在每个测量期均为未寄生肉苁蓉梭梭>寄生肉苁蓉梭梭,但未达到显著性水平。6 月 19 日,总叶绿素含量寄生肉苁蓉梭梭(0.10)略大于未寄生肉苁蓉梭梭(0.09),叶绿素 a/b 在 5 月 4 日为寄生肉苁蓉梭梭>未寄生肉苁蓉梭梭,其他 2 个时期,总叶绿素与叶绿素 a/b 均表现为未寄生肉苁蓉梭梭>寄生肉苁蓉梭梭,但未达到显著

性水平,见表 2。由于梭梭的叶绿素含量较低,且在不同时期寄生和未寄生肉苁蓉梭梭的总叶绿素含量大小比较不一致,因此肉苁蓉的寄生是否降低了梭梭的总叶绿素含量还需做进一步的研究。



注:1、2、3 分别代表 5 月 4 日、5 月 27 日、6 月 19 日。A 为寄生了肉苁蓉的梭梭,cK 为未寄生肉苁蓉的梭梭。

图 2 肉苁蓉不同寄生时期梭梭 WUE 日变化

表 2 肉苁蓉寄生对梭梭叶绿素含量的影响

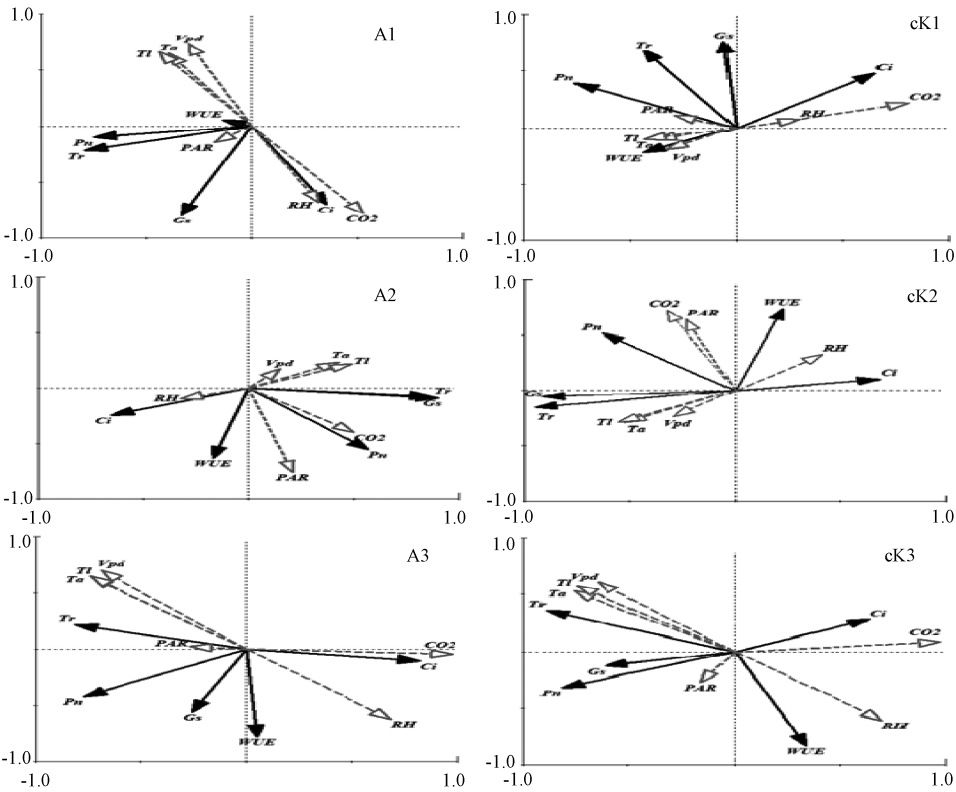
| 日期       | 处理 | 叶绿素/(mg·g <sup>-1</sup> ) |                           |                           |                         |
|----------|----|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
|          |    | 叶绿素 a                     | 叶绿素 b                     | 总叶绿素                      | 叶绿素 a/b                 |
| 5 月 4 日  | A  | 0.75±0.04 <sup>aA</sup>   | 0.23±0.01 <sup>bcAB</sup> | 0.09±0.02 <sup>cB</sup>   | 3.39±0.22 <sup>aA</sup> |
|          | cK | 0.78±0.07 <sup>aA</sup>   | 0.27±0.05 <sup>abAB</sup> | 0.13±0.04 <sup>bC</sup>   | 3.33±0.25 <sup>aA</sup> |
| 5 月 27 日 | A  | 0.31±0.02 <sup>deCD</sup> | 0.20±0.01 <sup>cdBC</sup> | 0.15±0.01 <sup>bcAB</sup> | 1.57±0.12 <sup>bB</sup> |
|          | cK | 0.38±0.03 <sup>cdBC</sup> | 0.23±0.02 <sup>bcAB</sup> | 0.17±0.02 <sup>abAB</sup> | 1.78±0.23 <sup>bB</sup> |
| 6 月 19 日 | A  | 0.21±0.03 <sup>eD</sup>   | 0.13±0.01 <sup>cC</sup>   | 0.10±0.01 <sup>cB</sup>   | 1.57±0.18 <sup>bB</sup> |
|          | cK | 0.32±0.05 <sup>deCD</sup> | 0.15±0.01 <sup>deC</sup>  | 0.09±0.00 <sup>cB</sup>   | 2.04±0.22 <sup>bB</sup> |

注:小写字母表示在  $P<0.05$  的水平上差异显著;大写字母表示在  $P<0.01$  的水平上差异极显著。A 为寄生了肉苁蓉的梭梭,cK 为未寄生肉苁蓉的梭梭。

2.3 肉苁蓉寄生对梭梭光合生理指标与环境因子相关性的影响 梭梭作为强旱生盐生植物,对环境有着超强的适应能力<sup>[17]</sup>。本研究第一排序轴对物种的解释量最大,故以第 1 排序轴为主分析环境因子与光合生理指标的相关性。5 月 4 日和 6 月 9 日,影响寄生和未寄生肉苁蓉梭梭的主要环境因子排序一致,为 CO<sub>2</sub>>Tl>Ta,见图 3。对 CO<sub>2</sub> 与光合生理指标的相关性(相关系数)进行分析,5 月 4 日,寄生肉苁蓉梭梭为 0.444,未寄生肉苁蓉梭梭为 0.698 ( $P<0.01$ ),6 月 19 日,寄生肉苁蓉梭梭和未寄生肉苁蓉梭梭依次为 0.906、0.927 ( $P<0.01$ ),见表 3,表明肉苁蓉的寄

生使梭梭主要光合生理指标与环境因子的相关性减弱。5 月 27 日,寄生肉苁蓉梭梭和未寄生肉苁蓉梭梭的光合生理指标与环境因子的相关性相反,其中 Tl 对寄生和未寄生肉苁蓉梭梭的光合生理指标的影响作用最大,相关系数依次为 0.415、-0.502 ( $P<0.01$ ),见表 3,表明肉苁蓉的寄生使梭梭光合生理指标与环境因子的促进与抑制作用变得相反,且每个时期种—环境的相关性都表现为未寄生肉苁蓉的梭梭>寄生肉苁蓉的梭梭。

2.4 梭梭光合指标与叶绿素含量的相关性分析 Pearson 相关性分析(表 4)表明,梭梭 Pn 与 Ci、叶绿素 a 及叶绿



注：A、cK 分别代表寄生和未寄生肉苁蓉的梭梭。1、2、3 分别代表 5 月 4 日、5 月 27 日、6 月 19 日。

图 3 寄生与未寄生肉苁蓉梭梭的光合生理指标与环境因子的 RDA 二维排序图

表 3 第一排序轴与环境因子的冗余分析

| 环境因子            | 解释量 | 5 月 4 日           |                    | 5 月 27 日          |                   | 6 月 19 日          |                   |
|-----------------|-----|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                 |     | A1                | cK1                | A2                | cK2               | A3                | cK3               |
|                 |     | SPEC AX1<br>36.9% | SPEC AX1<br>39.35% | SPEC AX1<br>41.6% | SPEC AX1<br>47.3% | SPEC AX1<br>58.8% | SPEC AX1<br>53.9% |
| Vpd             |     | -0.253            | -0.284             | 0.128             | -0.263            | -0.634            | -0.614            |
| Ta              |     | -0.332            | -0.332             | 0.364 *           | -0.475            | -0.682 **         | -0.714 **         |
| Tl              |     | -0.368            | -0.375 *           | 0.415             | -0.502 **         | -0.686 **         | -0.727 **         |
| CO <sub>2</sub> |     | 0.444             | 0.698 **           | 0.423 **          | -0.290            | 0.906 **          | 0.927 **          |
| RH              |     | 0.267             | 0.258              | -0.273 *          | 0.375 **          | 0.639             | 0.667             |
| PAR             |     | -0.150            | -0.250             | 0.178             | -0.210            | -0.248            | -0.151            |
| 物种-环境相关性        |     | 0.841             | 0.864              | 0.848             | 0.902             | 0.926             | 0.953             |

注：1、2、3 分别代表 5 月 4 日、5 月 27 日、6 月 19 日。A 为寄生了肉苁蓉的梭梭，cK 为未寄生肉苁蓉的梭梭。\*\*  $P<0.01$ ，\*  $P<0.05$ 。

表 4 梭梭光合指标及叶色素含量的相关性分析

| 相关系数    | 净光合速率<br>Pn | 气孔导度<br>Gs | 胞间 CO <sub>2</sub><br>浓度 Ci | 蒸腾速率<br>Tr | 水分利用效率<br>WUE | 叶绿素 a    | 叶绿素 b | 总叶绿素   | 叶绿素<br>a/b |
|---------|-------------|------------|-----------------------------|------------|---------------|----------|-------|--------|------------|
| Pn      | 1.000       |            |                             |            |               |          |       |        |            |
| Gs      | 0.759       | 1.000      |                             |            |               |          |       |        |            |
| Ci      | -0.382      | 0.171      | 1.000                       |            |               |          |       |        |            |
| Tr      | 0.859 *     | 0.961 **   | 0.018                       | 1.000      |               |          |       |        |            |
| WUE     | 0.517       | -0.133     | -0.864 *                    | 0.014      | 1.000         |          |       |        |            |
| 叶绿素 a   | -0.383      | -0.123     | 0.850 *                     | -0.210     | -0.524        | 1.000    |       |        |            |
| 叶绿素 b   | 0.113       | 0.470      | 0.843 *                     | 0.372      | -0.520        | 0.806    | 1.000 |        |            |
| 总叶绿素    | 0.764       | 0.969 **   | 0.124                       | 0.935 **   | -0.079        | -0.162   | 0.454 | 1.000  |            |
| 叶绿素 a/b | -0.496      | -0.323     | 0.752                       | -0.390     | -0.436        | 0.976 ** | 0.662 | -0.367 | 1.000      |

注：\*\*  $P<0.01$ ，在 0.01 水平（双侧）上显著相关；\*  $P<0.05$ ，在 0.05 水平（双侧）上显著相关。



素 a/b 呈负相关，但未达到显著性水平；与 Tr 呈显著正相关 ( $r=0.859$ ,  $P<0.05$ )，其他指标中与 Pn 相关性较大的依次是总叶绿素、Gs、WUE，相关系数依次为 0.764、0.759、0.517，表明蒸腾速率对净光合速率具有强烈的促进作用；梭梭 Gs 与 Tr 及总叶绿素、Tr 与总叶绿素、总叶绿素与叶绿素 a/b 呈极显著正相关 ( $P<0.01$ )，相关系数依次为 0.961、0.969、0.935、0.976，表明这些指标之间相互促进的程度最大。

2.5 肉苁蓉寄生对梭梭光合特性影响的综合排序 对不同生长期所测梭梭光合及其相关指标用下式求各指标的具体隶属函数值。

$$X(\mu) = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

(1)

或

$$X(-\mu) = 1 - \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

(2)

式中， $X$  为梭梭某一光合及其相关指标测定值， $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$  分别为梭梭该指标测定值内的最大值和最小值。若所测指标与光合作用呈正相关，用式 (1)；若所测指标与光

合作用呈负相关，用式 (2)。把每个时期每个处理梭梭光合及其相关指标的隶属值进行累加，并求其平均值，根据各处理平均值大小确定光和能力的强弱。

光合能力的强弱一般用净光合速率表示，本研究中通过对梭梭光合及其相关指标进行相关性分析，见表 4，将与净光合速率呈正相关的指标用式 (1) 求隶属函数值，将与净光合速率呈负相关的指标用式 (2) 求隶属函数值，即 Gi、叶绿素 a、叶绿素 a/b 用式 (2)，其他指标用式 (1)。

光合特性是多个光合生理指标综合作用的结果，根据寄生与未寄生肉苁蓉梭梭的各光合生理及其相关指标的隶属函数值求得平均隶属函数值并进行排序，可得不同生长期不同处理梭梭的光合能力的强弱顺序。表 5 显示，同一生长期，光合及其相关指标的平均隶属函数值均表现为未寄生肉苁蓉的梭梭>寄生肉苁蓉的梭梭，表明肉苁蓉的寄生使梭梭光合能力减弱。不同生长期的同一处理梭梭的平均隶属函数值的综合排序为 5 月 27 日>6 月 19 日>5 月 4 日，与 Pn 日均值的排序一致，进一步表明 Pn 是光合生理的代表性指标。

表 5 肉苁蓉不同寄生时期梭梭光合作用综合排序

| 光合及其相关指标 | 5 月 4 日 |      | 5 月 27 日 |      | 6 月 19 日 |      |
|----------|---------|------|----------|------|----------|------|
|          | A       | cK   | A        | cK   | A        | cK   |
| Pn       | 0.13    | 0.25 | 0.29     | 0.42 | 0.19     | 0.31 |
| Gs       | 0.13    | 0.29 | 0.53     | 0.56 | 0.07     | 0.15 |
| Gi       | 0.41    | 0.41 | 0.52     | 0.63 | 0.70     | 0.76 |
| Tr       | 0.20    | 0.42 | 0.55     | 0.57 | 0.23     | 0.34 |
| WUE      | 0.34    | 0.35 | 0.32     | 0.47 | 0.42     | 0.50 |
| 叶绿素 a    | 0.37    | 0.34 | 0.80     | 0.73 | 0.89     | 0.79 |
| 叶绿素 b    | 0.22    | 0.29 | 0.17     | 0.22 | 0.05     | 0.07 |
| 总叶绿素     | 0.16    | 0.24 | 0.29     | 0.33 | 0.18     | 0.16 |
| 叶绿素 a/b  | 0.34    | 0.36 | 0.80     | 0.75 | 0.80     | 0.68 |
| 平均隶属函数值  | 0.26    | 0.33 | 0.47     | 0.52 | 0.39     | 0.42 |
| 综合排序     | 6       | 5    | 2        | 1    | 4        | 3    |

注：A、cK 分别代表寄生和未寄生肉苁蓉的梭梭。

3 讨论

植物在受到胁迫后，会产生逆境生理<sup>[18-19]</sup>，肉苁蓉的寄生给寄主梭梭造成了胁迫的环境，对寄主保护酶系统及渗透调节系统产生了明显的伤害，并降低了寄主梭梭的抗旱性<sup>[20]</sup>。肉苁蓉寄生对梭梭产生的逆境生理使类囊体膜系统及酶蛋白受损，导致叶绿素分解大于合成，表现为叶绿素（叶绿素 a、叶绿素 b）含量降低<sup>[21-22]</sup>，本研究得出，肉苁蓉的寄生使寄主梭梭叶绿素 a、叶绿素 b 含量降低。

植物在受到胁迫时，植物的光合作用场所类囊体薄膜受损和叶绿体基质代谢紊乱<sup>[23]</sup>，光合作用减弱，表现为单位时间、单位叶面积吸收 CO<sub>2</sub> 的量或放出 O<sub>2</sub> 的量减小<sup>[24-25]</sup>，当光合过程受阻，气孔导度降低，水分代谢失调，植物的蒸腾速率下降<sup>[26]</sup>，因此，认为有效的形态调节和较强的气孔控制是其维持光合作用能力以及适应干旱的主要机制<sup>[27]</sup>。水分利用效率可以反映植物对干旱环境适应

能力的强弱<sup>[28-29]</sup>，植物在受到胁迫后，水分利用效率和生物产量降低，甚至出现由于含水量下降而萎蔫的现象<sup>[30]</sup>。本研究中，梭梭在受到肉苁蓉的寄生胁迫后，净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、水分利用效率降低，胞间 CO<sub>2</sub> 升高，但肉苁蓉的寄生未改变梭梭光合特性的日变化趋势。相关性分析表明，蒸腾速率与净光合速率之间相互促进，总叶绿素含量最大程度的促进气孔导度、蒸腾速率和叶绿素 a/b。

光合能力是多指标综合作用的结果，其光合指标之间具有相关性，因此需用光合生理及其相关指标综合评价植物的光合能力<sup>[31]</sup>，环境中的光、温、水、气等生态因子变化可引起植物生理因子变化，外在生态环境条件和内在生理因子共同影响植物光合作用特性<sup>[32]</sup>。本实验结果与前人有关棉花、菠菜大豆和酸枣的研究一致<sup>[33-36]</sup>，经冗余分析（RDA）寄生与未寄生肉苁蓉梭梭的光合指标与环境因子

的相关性,表现为肉苁蓉的寄生使梭梭光合指标与环境因子的相关性减弱,寄生肉苁蓉的梭梭植株对环境因子表现出“迟钝型”响应。多指标综合评价寄生与未寄生肉苁蓉梭梭的光合能力强弱,其结果与单一指标评价的结果一致,表现为肉苁蓉的寄生使梭梭的光合能力减弱。

参考文献:

[ 1 ] 张 维,赵文勤,谢双全,等. 模拟降水和氮沉降对准噶尔盆地南缘梭梭光合生理的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(1): 106-115.

[ 2 ] Xu G Q, Yu D D, Xie J B, *et al.* What makes *Haloxylon persicum* grow on sand dunes while *H. ammodendron* grows on interdune lowlands: a proof from reciprocal transplant experiments[J]. *J Arid Land*, 2014, 6(5): 581-591.

[ 3 ] Huang G, Su Y G, Zhu L, *et al.* The role of spring ephemerals and soil microbes in soil nutrient retention in a temperate desert [J]. *Plant Soil*, 2016, 406: 43-54.

[ 4 ] 赵华军,王 立,赵 明,等. 沙尘暴粉尘对不同作物气体交换特征的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 202-206.

[ 5 ] 李玉洁,赵 娜,曹月娥,等. 干旱区典型植物梭梭与怪柳的光响应曲线模型拟合[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(22): 179-182.

[ 6 ] Wu X, Zheng X J, Li Y, *et al.* Varying responses of two *Haloxylon* species to extreme drought and groundwater depth [J]. *Environ Sci Technol*, 2019, 158: 63-72.

[ 7 ] Zhao W Q, Lv X H, Li Y G, *et al.* Future N deposition and precipitation changes will be beneficial for the growth of *Haloxylon ammodendron* in Gurbantunggut Desert, northwest China[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 1-10.

[ 8 ] Luo Q H, Chen Q M, Ning H S. Chronosequence-based population structure and natural regeneration of *Haloxylon ammodendron* plantation in the southern edge of the Gurbantunggut Desert, Northwestern China[J]. *Russ J Ecol*, 2017, 48(4): 364-371.

[ 9 ] 丁爱强,徐先英,刘江,等. 民勤绿洲自然稀疏人工梭梭林土壤水分动态[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 192-198.

[ 10 ] 高志娟,谢双全,吕新华,等. 梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 居群间系统发育关系[J]. 中国沙漠, 2017, 37(3): 462-468.

[ 11 ] 鞠 强,贡 璐,杨金龙,等. 梭梭光合生理生态过程与干旱环境的相互关系[J]. 干旱区资源与环境, 2005(4): 201-204.

[ 12 ] 郭东锋,郭玉海,黄 勇. 管花肉苁蓉的寄生对怪柳光合特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(23): 11293-11295.

[ 13 ] 杨太新,杜艳华,刘国库,等. 管花肉苁蓉寄生对一年生怪柳光合特性及生长的影响[J]. 中国现代中药, 2015, 17(4): 375-378; 386.

[ 14 ] 李 胜,陈 刚. 植物生理学实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.

[ 15 ] Cui Y Q, Ma J Y, Feng Q, *et al.* Water sources and water-use

efficiency of desert plants in different habitats in Dunhuang, NW China[J]. *Ecol Res*, 2017, 32(2): 243-248.

[ 16 ] 黄 轩,李琬婷,黄晓霞,等. 铅胁迫对中华常春藤叶绿素含量及荧光特性的影响[J]. 分子植物育种, 2019, 17(16): 5469-5475.

[ 17 ] 杨司睿,范井伟,孙永强,等. 罗布泊腹地人工植被梭梭的光学特性及其对干旱胁迫的响应[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 379-386.

[ 18 ] 殷东生,魏晓慧. 干旱胁迫对风箱果幼苗生长、光合生理和抗氧化酶活性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(1): 26-29; 34.

[ 19 ] 蔡永萍. 植物生理学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.

[ 20 ] 李 霞,马永清,宋玉霞,等. 肉苁蓉寄生对梭梭幼苗保护酶活性及渗透调节物质的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1531-1536.

[ 21 ] 谭德远,郭泉水,刘玉军,等. 梭梭被肉苁蓉寄生后的生理代谢反应[J]. 林业科学研究, 2007(4): 495 - 499.

[ 22 ] 郑 岩. 风铃草属植物的引种栽培及适应性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.

[ 23 ] Kelly B, Silvia R, Andres P. A genome-scale metabolic model of potato late blight suggests a photosynthesis suppression mechanism[J]. *BMC Genomics*, 2018, 19(3): 323-329.

[ 24 ] 王珮琳,徐大平,杨曾奖,等. 移植和钾肥对降香黄檀光合特性与叶绿素含量的影响[J]. 植物科学学报, 2018, 36(6): 879-887.

[ 25 ] 姚嘉龙,郭 蓓,谢 皓,叶绿素合成关键酶基因表达的半定量 RT-PCR 分析[J]. 基因组学与应用生物学, 2015, 34(3): 593-598.

[ 26 ] Campostrini E, Yamanishi O K, Martinez C. Leal gas exchange characteristics of four papaya genotypes during different stages of development[J]. *Rev Bras Frutic*, 2001, 23(3): 522-525.

[ 27 ] 杨淇越,赵文智. 梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 叶片气孔导度与气体交换对典型降水事件的响应[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2): 419-425.

[ 28 ] Fuente M, Linares R, Lissarrague J R. Canopy management and water use efficiency in vineyards under Mediterranean semiarid conditions[J]. *BIO Web of Conferences*, 2015, 5(01005): 1-6.

[ 29 ] Jorge G V, Acacio R S, Adriano N N, *et al.* Age-related mechanism and its relationship with secondary metabolism and abscisic acid in *Aristotelia chilensis* plants subjected to drought stress[J]. *Plant Physiol Bioch*, 2018, 124: 136-145.

[ 30 ] 彭素琴,刘郁林,谢双喜. 干旱胁迫对不同金银花水分利用效率及细胞膜透性的影响[J]. 北方园艺, 2011(10): 156-158.

[ 31 ] 杨育苗,蒋志荣,安 力,等. 旱砂地两种籽瓜光合日变化及光响应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(5): 47-53.

[ 32 ] 柴仲平,王雪梅,孙 霞,等. 红枣光合特性与水分利用效率日变化研究[J]. 西南农业学报, 2010, 23(1): 168 -172.

[ 33 ] 曹 林,吴玉环,章 艺,等. 外源水杨酸对铅胁迫下菊芋

光合特性及耐铝性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29 (24): 260-266.

[34] 薛忠财, 高辉远, 柳 洁. 野生大豆和栽培大豆光合机构对 NaCl 胁迫的不同响应[J]. 生态学报, 2011, 31 (11): 3101-3109.

[35] 杨淑萍, 危常州, 梁永超. 盐胁迫对不同基因型海岛棉光合作用及荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 42(8): 1585-1593.

[36] 赵 澍, 廖里平, 张宏武, 等. 盐胁迫对酸枣幼苗光合生理特性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32 (5): 149-153.

# 辛夷、辛夷仁和辛夷外苞片中非挥发性成分比较

渠亚蓉<sup>1</sup>, 胡 静<sup>1</sup>, 周 琪<sup>1</sup>, 张 敏<sup>2</sup>, 章弘扬<sup>1</sup>, 胡 坪<sup>1\*</sup>  
(1. 华东理工大学化学与分子工程学院, 上海市功能性材料化学重点实验室, 上海 200237; 2. 华东理工大学药学院, 上海市新药设计重点实验室, 上海 200237)

**摘要:** **目的** 比较分析辛夷全花蕾、辛夷仁和辛夷外苞片中非挥发性成分的差异。**方法** 依照 2020 年版《中国药典》测定木兰脂素含量, 建立辛夷的 UHPLC 指纹图谱, 利用液质联用技术对色谱峰进行鉴定, 结合化学计量学对指纹图谱分析结果进行数据挖掘。**结果** 辛夷、辛夷仁和外苞片中木兰脂素的平均含量分别为 4.25%、10.30%、1.07%, 从指纹图谱中鉴定出 21 种化学成分, 结合主成分分析筛选出辛夷不同部位的 4 种差异性成分。**结论** 辛夷仁所含非挥发性成分种类与辛夷一致, 但有效成分的含量远高于辛夷全花蕾, 经典名方以辛夷仁入药具有科学性。  
**关键词:** 辛夷; 辛夷仁; 非挥发性成分; UHPLC; 液质联用  
**中图分类号:** R284.1 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-1528(2021)09-2576-05  
**doi:** 10.3969/j.issn.1001-1528.2021.09.058

辛夷, 为望春花 *Magnolia biondii* Pamp.、玉兰 *Magnolia denudate* Desr. 或武当玉兰 *Magnolia sprengeri* Pamp. 的干燥花蕾<sup>[1]</sup>, 其性温味辛, 归肺胃经, 可以散风寒、通鼻窍<sup>[2]</sup>。从部位角度, 可将辛夷全花蕾可分为外苞片和辛夷仁两部分。明、清之前, 含有辛夷的古方中一般以辛夷仁入药, 如宋代《严氏济生方》<sup>[3]</sup>所载“辛夷散”。至明、清时期, 诸多含辛夷仁的经典名方历经时代演变, 逐步以辛夷代替辛夷仁, 如《惠直堂经验方》<sup>[4]</sup>中“辛夷散”。近年来, 古代经典名方的开发受到国家高度重视, 其中不乏含辛夷仁的方剂<sup>[5-6]</sup>, 而辛夷仁是否能用当前市场上流通的辛夷取代还值得商榷。

辛夷中的化学成分种类繁多, 可分为挥发油类、生物碱类、黄酮苷类和木脂素类等<sup>[7]</sup>。其中挥发油和木脂素是辛夷的主要药效成分<sup>[8-10]</sup>。本课题组前期已对辛夷、辛夷仁、辛夷苞片中的挥发性成分进行对比研究, 发现辛夷仁所含挥发性成分种类与辛夷一致, 但含量远高于辛夷<sup>[11]</sup>。

本实验进一步对辛夷及辛夷仁的非挥发性成分展开研究, 建立辛夷非挥发性成分的超高效液相色谱指纹图谱, 利用 LC-MS 对其中的主要色谱峰进行鉴定, 结合主成分分

析和 PLS-DA 寻找辛夷不同部位的差异性成分, 旨在为经典名方中辛夷的合理使用提供科学依据。

## 1 材料

Waters Acquity 超高效液相色谱仪 (美国 Waters 公司); Agilent 1290 UHPLC-6530 QTOF-MS/MS 液质联用仪 [安捷伦科技 (中国) 有限公司]; EPED-E2-10TF 实验室超纯水机 (南京易普易达科技发展有限公司); CPA225D 型分析天平 [赛多利斯科学仪器 (北京) 有限公司]。乙腈和甲酸均为色谱纯、磷酸为分析纯 (上海泰坦科技有限公司)。木兰脂素 (110882-201708, 中国食品药品检定研究院)。辛夷药材由神威药业集团有限公司提供, 并经河北省食品药品检验院孙宝惠主任中药师鉴定为望春花 *Magnolia biondii* Pamp. 干燥花蕾。

## 2 方法与结果

2.1 木兰脂素含量测定 对来自 3 个不同产地共 15 批的辛夷药材进行手工处理, 获得对应批次的辛夷仁和辛夷苞片, 测得辛夷仁在辛夷全花蕾中所占比例约为 30%~35%。木兰脂素的含量测定参照 2020 年版《中国药典》方法进行, 采用外标法进行定量分析, 木兰脂素的回归方程为  $Y=$

收稿日期: 2020-05-08  
基金项目: 国家自然科学基金 (81973285)  
作者简介: 渠亚蓉 (1995—), 女, 硕士生, 从事天然产物分离与分析研究。Tel: (021) 64252844, E-mail: yarongdd@163.com  
\* 通信作者: 胡 坪 (1970—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 从事天然产物分离与分析研究。Tel: (021) 64252844, E-mail: huping@ecust.edu