北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

3种玉兰幼苗生长和生理特性对干旱胁迫的响应

冯潇 田玲 尹群 贾忠奎

Response of growth and physiological characteristics of three *Magnolia* spp. seedlings to drought stress

Feng Xiao, Tian Ling, Yin Qun, Jia Zhongkui

引用本文:
冯潇, 田玲, 尹群, 贾忠奎. 3种玉兰幼苗生长和生理特性对干旱胁迫的响应[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(9):57–67. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230312
Feng Xiao, Tian Ling, Yin Qun, Jia Zhongkui. Response of growth and physiological characteristics of three *Magnolia* spp. seedlings to drought stress[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(9):57–67. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230312

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230312

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水淹胁迫对红花玉兰苗木生长和生理生化特性的影响

Effects of waterlogging stress on growth, physiological and piochemistry characteristics of *Magnolia wufengensis*

北京林业大学学报, 2020, 42(1): 35–45. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190225

干旱胁迫对黑杨派无性系生长及生理特性的影响

Effects of drought stress on the growth and physiological characteristics of Sect. *Aigeiros* clones

北京林业大学学报, 2023, 45(10): 81–89. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220266

缺钾胁迫对核桃幼苗生长及生理特性的影响

Effects of potassium deficient stress on growth and physiological characteristics of walnut seedlings

北京林业大学学报, 2022, 44(8): 23–30. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210020

保水剂用量对胡杨幼苗生长、光合特性和抗逆生理的影响

Effects of super absorbent polymer dosage on growth, photosynthetic characteristics and stress–resistance physiology of *Populus euphratica* seedlings

北京林业大学学报, 2022, 44(3): 36–44. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210300

不同种源地沙枣幼苗对混合盐胁迫的生长及生理响应研究

Effects of mixed salt stress on the growth and physiological and biochemical characteristics of *Elaeagnus angustifolia* seedlings from different provenances

北京林业大学学报, 2021, 43(10): 9–17. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210066

镉胁迫对黑杨派无性系生理生化特性及生长的影响

Physiological and biochemical properties and growth of *Aigeiros* clones under cadmium stress

北京林业大学学报, 2020, 42(4): 12–20. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190462

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230312

3 种玉兰幼苗生长和生理特性对干旱胁迫的响应

冯 潇　田 玲　尹 群　贾忠奎
（林木资源高效生产全国重点实验室，北京林业大学红花玉兰研究中心，林业生物质能源国际科技合作基地，
国家能源非粮生物质原料研发中心，北京 100083）

摘要:【目的】研究干旱胁迫下天女木兰、望春玉兰、红花玉兰‘娇红 2 号’的生长和生理变化，揭示 3 种玉兰幼苗对干旱胁迫的响应机理，评价 3 种玉兰的抗旱性，为干旱地区引种、推广提供参考。**【方法】**以 3 种玉兰的 2 年生盆栽播种苗为试验材料，设置 4 个处理水平（土壤相对含水量 80%～90%（CK），60%～70%（T_1），40%～50%（T_2），20%～30%（T_3）），干旱胁迫 50 d 后分析生长、生理等 19 个指标的变化。**【结果】**（1）中度和重度干旱胁迫（T_2、T_3）显著降低了 3 种玉兰的地径和各器官生物量增长量，显著增大了望春玉兰和红花玉兰‘娇红 2 号’的根冠比（$P < 0.05$）；重度干旱胁迫下（T_3），红花玉兰‘娇红 2 号’的株高和各器官生物量增长量显著高于望春玉兰（$P < 0.05$）；（2）与 CK 相比，T_1 处理时红花玉兰‘娇红 2 号’叶绿素含量增加，其他干旱水平 3 种玉兰叶绿素含量逐渐降低；3 种玉兰丙二醛含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性随干旱加剧逐渐增加，T_3 与 CK 均存在显著差异；望春玉兰脯氨酸含量先降低后升高，天女木兰和红花玉兰‘娇红 2 号’脯氨酸含量随干旱加剧呈上升趋势；3 种玉兰过氧化物酶活性随干旱加剧变化规律不同，天女木兰过氧化物酶活性 T_2 处理最高，望春玉兰和红花玉兰‘娇红 2 号’T_3 处理最高。（3）红花玉兰‘娇红 2 号’T_1 处理净光合速率、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率最高，较 CK 分别高出 2.67%、1.94%、3.09%，气孔导度和水分利用效率随干旱加剧逐渐降低；重度干旱胁迫（T_3）显著降低了天女木兰和望春玉兰的净光合速率、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、气孔导度、水分利用效率（$P < 0.05$）。（4）隶属函数分析表明，3 种玉兰抗旱性强弱为天女木兰 > 红花玉兰‘娇红 2 号’ > 望春玉兰。**【结论】**干旱胁迫影响了 3 种玉兰幼苗的生长和生理活性，使叶片细胞结构受损，植株生长缓慢，但植物能通过调节渗透调节物质含量和自身保护酶活性来抵御干旱，维持自身的正常生理代谢功能。综合各指标可知，天女木兰抗旱性最强，望春玉兰最弱。

关键词：玉兰；干旱胁迫；生长特性；生理特性；隶属函数法
中图分类号：S718.43　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2024)09−0057−11
引文格式：冯潇，田玲，尹群，等. 3 种玉兰幼苗生长和生理特性对干旱胁迫的响应［J］. 北京林业大学学报，2024，46(9)：57−67. Feng Xiao, Tian Ling, Yin Qun, et al. Response of growth and physiological characteristics of three *Magnolia* spp. seedlings to drought stress［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(9): 57−67.

Response of growth and physiological characteristics of three *Magnolia* spp. seedlings to drought stress

Feng Xiao　Tian Ling　Yin Qun　Jia Zhongkui
(State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Research Center of *Magnolia wufengensis*, Base for International Science & Technology Cooperation for Forestry Biomass Energy, National Energy R&D Center for Non-food Biomass, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: ［**Objective**］This study investigated the effects of drought stress on growth and physiological changes of *Magnolia sieboldii*, *M. biondii*, *M. wufengensis* ‘Jiaohong No.2’ to explore the influence

收稿日期: 2023−11−08　**修回日期:** 2023−12−27
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项（BLX202203），红花玉兰新品种温室育苗精准施肥制度研究，国家林业和草原局科技发展中心林业植物新品种与专利保护应用项目（KJZXXP202406）。
第一作者: 冯潇。主要研究方向：林木种苗培育理论和技术。Email：Yishuhan@bjfu.edu.cn　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
责任作者: 贾忠奎，教授。主要研究方向：生态林与城市森林培育理论和技术。Email：jiazk@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

mechanism of drought stress on three *Magnolia* spp. seedlings, evaluate the drought resistance of *Magnolia* spp. seedlings, and provide a basis for the introduction and promotion of seeds in arid areas. [**Method**] The 2-year-old potted seedlings of 3 kinds of *Magnolia* spp. seedlings were used as experimental materials, 4 treatment levels (SWC80%−90% (CK), 60%−70% (T_1), 40%−50% (T_2), 20%−30% (T_3)) were set, and the changes of 19 indexes, including growth and physiology were analyzed after 50 d of drought stress. [**Result**] (1) Moderate and severe drought stress (T_2, T_3) significantly decreased the ground diameter increment and biomass increment of 3 kinds of *Magnolia* spp. seedlings, and significantly increased the root-shoot ratio of *M. biondii* and *M. wufengensis* 'Jiaohong No.2'($P < 0.05$). Under severe drought stress (T_3), the increment of plant height and biomass of *M. wufengensis* 'Jiaohong No.2' was significantly higher than that of *M. biondii* ($P < 0.05$). (2) Compared with CK, T_1 increased the chlorophyll contents of *M. wufengensis* 'Jiaohong No.2', and the content of chlorophyll in the 3 kinds of *Magnolia* spp. seedlings gradually decreased at other drought levels. With the intensification of drought, the content of malondialdehyde, soluble sugar, soluble protein and the activity of superoxide dismutase, catalase of the 3 kinds of *Magnolia* spp. seedlings gradually increased, and T_3 and CK showed significant differences. Proline content of *M. biondii* decreased first and then increased, and the proline content of *M. sieboldii* and *M. wufengensis* 'Jiaohong No.2' showed an increasing trend with the intensification of drought. The peroxidase activity of 3 kinds of *Magnolia* spp. seedlings varied with the intensities of drought. The peroxidase activity of *M. sieboldii* was the highest at T_2, and those of *M. biondii* and *M. wufengensis* 'Jiaohong No.2' were the highest at T_3. (3) The net photosynthetic rate, intercellular CO_2 concentration and transpiration rate of *M. wufengensis* 'Jiaohong No.2' were the highest at T_1, which were 2.67%, 1.94% and 3.09% higher than CK, respectively. The stomatal conductivity and water use efficiency decreased gradually with the worsening of drought. Severe drought stress (T_3) significantly reduced the net photosynthetic rate, intercellular CO_2 concentration, transpiration rate, stomatal conductivity and water use efficiency ($P < 0.05$) of *M. sieboldii* and *M. biondii*. (4) The analysis of membership function showed that the drought resistance of 3 kinds of *Magnolia* spp. seedlings was *M. sieboldii* > *M. wufengensis* 'Jiaohong No.2' > *M. biondii*. [**Conclusion**] Drought stress affects the growth and physiological activities of the 3 kinds of *Magnolia* spp. seedlings, damages the leaf cell structure and slows plant growth, but the plants could resist drought and maintain their normal physiological metabolic functions by adjusting their own osmoregulatory substance content and protective enzyme activities. Based on the indicators, the drought resistance of *M. sieboldii* is the strongest, and the drought resistance of *M. biondii* is the weakest.

Key words: *Magnolia* spp.; drought stress; growth characteristics; physiological characteristics; membership function method

干旱是世界上危害最广泛、最严重的自然灾害之一，也是制约林业发展的重要因素[1]。在气候变化和人类活动的影响下，我国干旱灾害事件频发，受灾区域逐渐由我国北部地区向南部地区蔓延，目前我国干旱半干旱地区面积约占全国总面积的一半以上[2]。干旱是植物生长过程中的重要限制因素，会导致植物的生长减缓、光合速率降低、渗透压失衡、膜系统损伤等，严重影响植物生长阶段中的各个代谢过程[3−4]；同时外部环境的变化也激发了植物在干旱胁迫下的响应机制，包括形态生理和基因表达等[5−6]。

天女木兰(*Magnolia sieboldii*)是珍贵的孑遗植物，具有观花、观果、观叶等优良特性[7]；望春玉兰(*M. biondii*)是木兰科(Magnoliaceae)多年生落叶乔木，常用作嫁接的砧木，具有良好的园林绿化应用价值[8]；红花玉兰(*M. wufengensis*)是马履一等[9]于2004年在湖北省五峰县发现的木兰科玉兰亚属植物，红花玉兰'娇红2号'(*M. wufengensis* 'Jiaohong No.2')是红花玉兰新品种，花瓣呈荷花型，内外均为红色，腹面颜色略浅，花被12～13片，具有较高的观赏价值[10−11]。干旱是限制木兰科植物应用推广的逆境条件之一，研究木兰科植物在干旱条件下的生理特性变化有利于木兰科抗旱机制的揭示，为抗旱育种打下基础。前人[12−13]对部分木兰科植物进行抗旱性研究，发现干旱胁迫下武当木兰(*M. sprengeri*)、红花木莲(*M. insignis*)、乐昌含笑(*Michelia chapensis*)、乐东拟单性木兰(*Parakmeria lotungensis*)的生长受到不同程度的抑制，且有害物质累积增多，保护酶活性逐渐增强，表明木兰科植物可以通过调节自身的

形态、保护酶系统以及渗透调节物质含量来减轻胁迫的伤害，维持正常生理代谢功能。此外，研究[14−15]发现红花玉兰抗旱性高于白玉兰(*M. denudata*)、二乔玉兰(*M. soulangeana*)和天目木兰(*M. amoena*)。目前关于天女木兰、望春玉兰和红花玉兰‘娇红 2 号’对干旱胁迫的响应机制尚不明确，尤其是对于红花玉兰新品种苗的抗旱性能还未开展相关研究。鉴于此，本文研究天女木兰、望春玉兰和红花玉兰‘娇红 2 号’3 种玉兰的 2 年生播种苗在干旱胁迫下生长和生理特性的响应规律，以探究其干旱胁迫适应机制，筛选抗旱性较强的品种，为其在干旱地区引种和推广提供理论参考。

1　研究地概况与研究方法

1.1　研究地概况

本试验在北京林业大学鹫峰试验林场温室内(39°48′N，116°28′E)完成，海拔高度 130 m，属温带湿润季风气候，年平均气温为 12.5 ℃，年平均降水量 628.9 mm，年日照数 2 662 h，无霜期 211 d。温室大棚内配套设施完善，具有保温、降温、遮光、增湿等多重功能。

1.2　研究材料

本研究供试材料为生长均匀、长势良好、无病虫害的 2 年生天女木兰、望春玉兰、红花玉兰‘娇红 2 号’，苗木平均株高为 17.90 cm，平均地径为 2.72 mm。于 2021 年 3 月进行移植盆栽，选用直径 10 cm、高 17 cm 的塑料容器，每盆装土 0.8 kg(草炭土与蛭石混合，体积比为 3∶1)。移植后置于温室内缓苗，期间进行常规水肥管理，缓苗后进行干旱胁迫处理。

1.3　研究方法

1.3.1　试验设计

2021 年 6 月初，采用完全随机设计。将每种幼苗分为 4 组，土壤相对含水量(土壤含水量与田间持水量的比值)分别为 80% ~ 90%(CK)，60% ~ 70%(T_1)，40% ~ 50%(T_2)，20% ~ 30%(T_3)。每个处理 15 盆，每种幼苗 60 盆，3 种幼苗共 180 盆。6 月中下旬所有盆栽材料达到预定含水量时开始控水，期间每隔 1 d 上午 09∶00—10∶00 称质量，通过直接注水缓慢补充失去水分，避免土壤龟裂或结块，将土壤质量(分度值 0.01 g 的电子天平)换算成对应的土壤含水量，最终控制土壤相对含水量达到设定范围的最大值，确保试验期间每个处理的土壤相对含水量在设定范围之间。50 d 后测定各项指标。

1.3.2　生长指标的测定

干旱胁迫第 1 天和第 50 天时，每处理选 5 株测定株高、地径，其中苗高指自地径处到顶芽的苗干长度，地径指距离地面 5 cm 处的苗干直径。干旱胁迫第 1 天和第 50 天，每个处理选 3 株平均标准株进行全株取样，洗净并分为根、茎、叶 3 部分后装袋，在 105 ℃ 烘箱杀青 30 min 后在 75 ℃ 烘箱中烘干至质量恒定，并计算株高、地径以及各器官质量的增长量和胁迫第 50 天的根冠比，本研究中以各器官质量的变化来表征生物量的变化。

1.3.3　生理指标的测定

干旱胁迫第 50 天时，每个处理随机选 3 株平均标准株，自上而下选取第 3 ~ 5 叶位成熟叶片进行各项生理指标的测定。其中，叶绿素采用乙醇提取法，可溶性糖采用蒽酮法，可溶性蛋白采用考马斯亮蓝法，脯氨酸采用茚三酮法，丙二醛采用硫代巴比妥酸法，超氧化物歧化酶采用 NBT 还原法，过氧化物酶采用愈创木酚显色法，过氧化氢酶采用紫外线分光光度计法。

干旱胁迫第 50 天时，上午 09∶00—11∶00 选择植物上层成熟健康功能叶，采用美国 LI-COR 公司生产的 Li-6400 光合系统仪，设置红蓝光源强度为 1 000 μmol/(m^2·s)[16]，叶室温度为(25 ± 1) ℃，CO_2 浓度为 400 μmol/(m^2·s)，测定净光合速率(P_n)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)，并计算水分利用效率(WUE)。

$$\mathrm{WUE} = P_n / T_r \tag{1}$$

1.4　数据处理和分析

选择重度干旱(T_3)处理的数据，采用隶属函数法[15]对 3 种玉兰抗旱能力进行综合评价，计算公式为

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min})/(X_{\max} - X_{\min}) \tag{2}$$

$$U(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min})/(X_{\max} - X_{\min}) \quad i = 1, 2, 3, \cdots, 19 \tag{3}$$

式中：X_i 为某一指标的测定值/对照值，$X_{\min}$ 为 X_i 中最小值，$X_{\max}$ 为 X_i 中最大值。若指标与抗旱性呈正相关，用公式(2)，反之用公式(3)。

使用 Microsoft Excel 2019 进行数据统计、隶属函数分析，使用 SPSS26 进行方差分析，使用 Origin 2018 进行图表绘制。

2　结果与分析

2.1　干旱胁迫对 3 种玉兰幼苗生长特性的影响

2.1.1　株高、地径增长量

表 1 显示：随干旱加剧，3 种玉兰幼苗株高、地径增长量大多呈下降趋势。与 CK 相比，各处理下天女木兰的株高、地径增长量显著下降($P < 0.05$)，T_2、T_3 处理下望春玉兰株高增长量显著下降($P < 0.05$)，各处理下红花玉兰‘娇红 2 号’的地径增长量显著下

表 1 干旱胁迫对 3 种玉兰幼苗株高、地径增长量的影响

Tab. 1 Effects of drought stress on height increment and ground diameter increment of three *Magnolia* spp. seedlings

树种 Tree species	株高增长量 Plant height increment/cm				地径增长量 Ground diameter increment/mm			
	CK	T_1	T_2	T_3	CK	T_1	T_2	T_3
天女木兰 *Magnolia sieboldii*	7.260 ± 2.352Aa	4.080 ± 1.031Ab	1.920 ± 1.778Abc	1.100 ± 0.768ABb	0.740 ± 0.317Aa	0.460 ± 0.085Ab	0.320 ± 0.068ABb	0.190 ± 0.113Ab
望春玉兰 *M. biondii*	5.620 ± 0.756Aa	3.260 ± 0740Ab	1.800 ± 0.925Abc	0.800 ± 0.592Bb	0.740 ± 0.317Aa	0.490 ± 0.152Aab	0.262 ± 0.058Bbc	0.184 ± 0.117Ac
红花玉兰‘娇红2号’ *M. wufengensis* ‘Jiaohong No.2’	5.180 ± 2.466Aa	5.660 ± 3.480Aa	3.340 ± 2.405Aa	2.060 ± 0.953Aa	1.180 ± 0.379Aa	0.710 ± 0.411Ab	0.400 ± 0.125Ab	0.330 ± 0.125Ab

注：不同小写字母表示相同树种中不同干旱处理之间差异显著（$P < 0.05$）；不同大写字母表示相同干旱处理下不同树种之间差异显著（$P < 0.05$）。下同。Notes: different lowercase letters indicate significant differences between varied drought treatments at the same tree species ($P < 0.05$); different capital letters indicate significant differences between varied tree species under the same drought treatment ($P < 0.05$). The same below.

降（$P < 0.05$）。T_3 处理下，红花玉兰‘娇红 2 号’的株高增长量显著高于望春玉兰（$P < 0.05$）；T_2 处理下，红花玉兰‘娇红 2 号’的地径增长量显著高于望春玉兰（$P < 0.05$）。T_3 处理下，望春玉兰株高和地径增长量较 CK 下降最大，分别为 85.77% 和 75.14%，一定程度上反映了望春玉兰的抗旱性较弱。

2.1.2 各器官生物量增长量

表 2、3 显示：与 CK 相比，天女木兰根增长量在 T_2、T_3 处理下分别显著降低 14.08%、16.38%，叶增长量在 T_2、T_3 处理下分别显著降低 40.96%、58.43%，茎增长量在 T_3 处理下显著降低 63.14%，根冠比在 T_3 处理下显著增加 51.72%（$P < 0.05$）。与 CK 相比，望春玉兰各干旱处理下的根、茎、叶增长量以及根冠比发生显著变化（$P < 0.05$），T_1、T_2、T_3 处理下根增长量分别显著降低 9.34%、11.45%、21.08%，茎增长量显著降低 25.78%、49.22%、78.13%，叶增长量显著降低 13.92%、47.47%、64.56%，根冠比显著增加 8.16%、30.61%、56.46%。与 CK 相比，红花玉兰‘娇红 2 号’根增长量在 T_2、T_3 处理下显著下降 14.99%、23.98%，茎增长量在 T_2、T_3 处理下显著下降 32.90%、60.00%，根冠比在 T_2、T_3 处理下显著增加 40.00%、32.09%（$P < 0.05$）。在 CK 和 T_1、T_3 处理下，望春玉兰的根、茎、叶增长量显著低于红花玉兰‘娇红 2 号’，根冠比显著高于‘娇红 2 号’（$P < 0.05$）。以上结果表明：干旱胁迫抑制了 3 种幼苗生物量的积累，对地上部分的抑制作用高于对地下部分的抑制作用，3 种玉兰通过提高根冠比增强了对干旱的抵抗作用，有效减少了水分的散失。

2.2 干旱胁迫对 3 种玉兰幼苗生理特性的影响

2.2.1 叶绿素含量的变化

图 1 显示：干旱胁迫对 3 种玉兰叶绿素含量均产生一定的影响。随干旱加剧，天女木兰和望春玉

表 2 干旱胁迫对 3 种玉兰幼苗根、茎增长量的影响

Tab. 2 Effects of drought stress on root increment and stem increment of three *Magnolia* spp. seedlings

树种 Tree species	根增长量 Root increment/g				茎增长量 Stem increment/g			
	CK	T_1	T_2	T_3	CK	T_1	T_2	T_3
天女木兰 *M. sieboldii*	3.480 ± 0.047Ba	3.470 ± 0.039Aa	2.990 ± 0.056Ab	2.910 ± 0.091Ab	1.400 ± 0.015Ba	1.210 ± 0.117Ba	1.190 ± 0.615Aa	0.516 ± 0.038ABb
望春玉兰 *M. biondii*	3.320 ± 0.120Ba	3.010 ± 0.100Bb	2.940 ± 0.133Ab	2.620 ± 0.660Bc	1.280 ± 0.053Ca	0.950 ± 0.058Cb	0.650 ± 0.118Ac	0.280 ± 0.167Bd
红花玉兰‘娇红2号’ *M. wufengensis* ‘Jiaohong No.2’	3.670 ± 0.083Aa	3.580 ± 0.091Aa	3.120 ± 0.139Ab	2.790 ± 0.840Ac	1.550 ± 0.043Aa	1.440 ± 0.486Aa	1.040 ± 0.008Ab	0.620 ± 0.103Ac

表 3 干旱胁迫对 3 种玉兰幼苗叶增长量、根冠比的影响

Tab. 3 Effects of drought stress on leaf increment and root-shoot ratio of three *Magnolia* spp. seedlings

树种 Tree species	叶增长量 Leaf increment/g				根冠比 Root-shoot ratio			
	CK	T_1	T_2	T_3	CK	T_1	T_2	T_3
天女木兰 *M. sieboldii*	1.660 ± 0.011ABa	1.600 ± 0.878Aa	0.980 ± 0.257Bb	0.690 ± 0.068Bc	1.450 ± 0.008Ab	1.520 ± 0.007Ab	1.660 ± 0.274Ab	2.200 ± 0.028Ba
望春玉兰 *M. biondii*	1.580 ± 0.064Ba	1.360 ± 0.057Bb	0.830 ± 0.058Cb	0.560 ± 0.539Cc	1.470 ± 0.019Ad	1.590 ± 0.042Ac	1.920 ± 0.028Ab	2.300 ± 0.128Aa
红花玉兰‘娇红2号’ *M. wufengensis* ‘Jiaohong No.2’	1.760 ± 0.070Aa	1.660 ± 0.073Aa	1.270 ± 0.047Ab	0.930 ± 0.589Ac	1.340 ± 0.055Bc	1.390 ± 0.087Bc	1.610 ± 0.033Ab	1.770 ± 0.072Ca

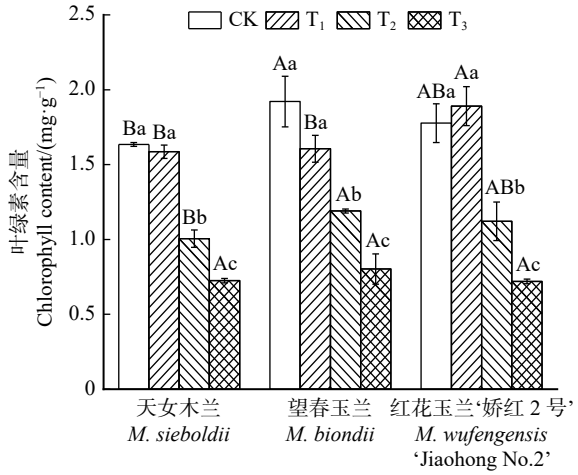


图 1　干旱胁迫对 3 种玉兰幼苗叶绿素含量的影响

Fig. 1　Effects of drought stress on chlorophyll content of three *Magnolia* spp. seedlings

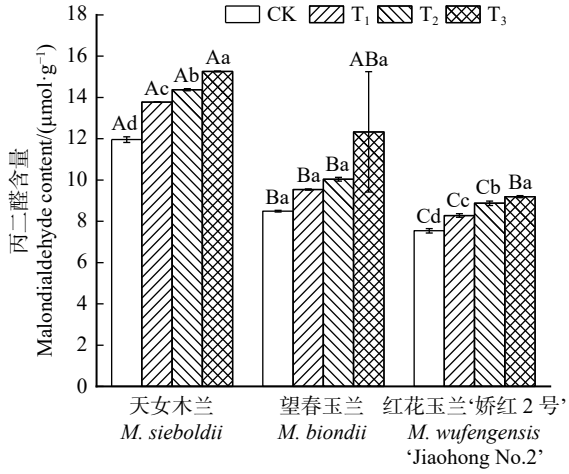


图 2　干旱胁迫对 3 种玉兰幼苗丙二醛含量的影响

Fig. 2　Effects of drought stress on malondialdehyde content of three *Magnolia* spp. seedlings

兰叶绿素含量逐渐减小，红花玉兰‘娇红 2 号’叶绿素含量在 T_1 处理下最大，比 CK 高出 6.78%。T_2、T_3 处理下 3 种幼苗的叶绿素含量均显著低于 CK（$P < 0.05$）。在 CK 和 T_2 处理下，望春玉兰叶绿素含量显著高于天女木兰（$P < 0.05$）；在 T_1 处理下，红花玉兰‘娇红 2 号’叶绿素含量显著高于望春玉兰和天女木兰（$P < 0.05$）。以上结果表明：轻度干旱促进了红花玉兰‘娇红 2 号’叶绿素的合成，中度和重度干旱显著降低了 3 种玉兰叶绿素的合成。

2.2.2　丙二醛含量的变化

图 2 显示：随干旱加剧，3 种玉兰丙二醛含量均逐渐增加。天女木兰和红花玉兰‘娇红 2 号’在各处理下丙二醛含量与 CK 差异均显著（$P < 0.05$），其中天女木兰在 T_1、T_2、T_3 处理下丙二醛含量较 CK 分别增加了 15.19%、20.22%、27.58%，红花玉兰‘娇红 2 号’在 T_1、T_2、T_3 处理下丙二醛含量较 CK 分别增加了 9.80%、17.68%、21.96%。在 CK、T_1、T_2 处理下，3 种玉兰的丙二醛含量差异显著（$P < 0.05$），平均值大小排序为天女木兰 > 望春玉兰 > 红花玉兰‘娇红 2 号’。丙二醛会引起植物体内蛋白质、核酸等物质的聚合反应，具有细胞毒性，含量越高越加剧细胞膜的损伤程度，以上结果表明：干旱胁迫加强了 3 种玉兰的膜脂过氧化作用，以及膜系统受破坏的程度。

2.2.3　渗透调节物质的变化

图 3A 显示：干旱胁迫显著增加了 3 种玉兰的可溶性糖含量（$P < 0.05$），且增速相对平稳，在 T_3 达到最大值，天女木兰、望春玉兰、红花玉兰‘娇红 2 号’可溶性糖含量较 CK 分别升高 67.56%、35.12%、79.91%。在 T_1、T_2、T_3 处理下，红花玉兰‘娇红 2 号’可溶性糖含量均显著高于另外两种玉兰（$P < 0.05$）。

图 3B 显示：随干旱加剧，3 种玉兰幼苗可溶性蛋白含量逐渐增加，在 T_3 达到最大值，天女木兰、望春玉兰、红花玉兰‘娇红 2 号’可溶性蛋白含量较 CK 分别增加 103.43%、55.86%、68.21%；T_2、T_3 处理下，天女木兰和红花玉兰‘娇红 2 号’可溶性蛋白含量均显著高于 CK（$P < 0.05$），各干旱处理下，望春玉兰可溶性蛋白含量均显著高于 CK（$P < 0.05$）。各干旱处理中，红花玉兰‘娇红 2 号’可溶性蛋白含量均显著高于另外两种玉兰（$P < 0.05$）。

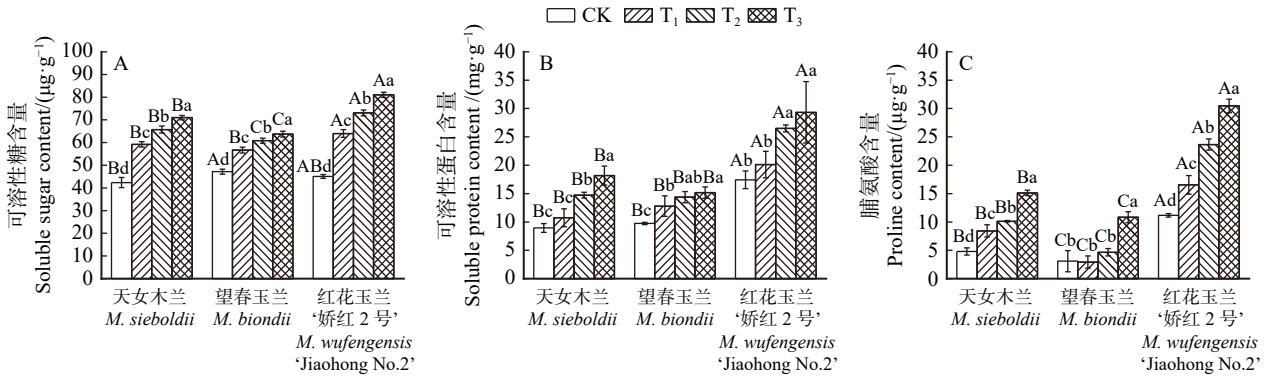


图 3　干旱胁迫对 3 种玉兰幼苗渗透调节物质含量的影响

Fig. 3　Effects of drought stress on osmoregulating substance content of three *Magnolia* spp. seedlings

图 3C 显示：随干旱加剧，天女木兰和红花玉兰‘娇红 2 号’脯氨酸含量均显著增加（$P < 0.05$），T_3 处理下最大，较 CK 分别增加 214.50%、172.54%；望春玉兰脯氨酸含量随干旱加剧表现为先减小后增加，T_3 处理下脯氨酸含量显著升高 251.74%（$P < 0.05$）。各干旱处理下，3 种玉兰脯氨酸含量差异显著（$P < 0.05$），平均值大小排序为红花玉兰‘娇红 2 号’ > 天女木兰 > 望春玉兰。

综合以上渗透调节物质含量结果发现：干旱胁迫下，3 种玉兰可通过积累可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量，结合更多的水分来提高溶解度，降低细胞渗透压，保证细胞膨压处于正常水平，维持自身正常的生长发育。

2.2.4 保护酶活性的变化

图 4A 显示：随干旱加剧，3 种玉兰幼苗的超氧化物歧化酶活性均显著增加（$P < 0.05$），T_3 处理下最大，天女木兰、望春玉兰、红花玉兰‘娇红 2 号’较 CK 分别增加 32.27%、24.34%、16.36%。各干旱处理下，3 种玉兰的超氧化物歧化酶活性差异显著（$P < 0.05$），平均值大小排序为红花玉兰‘娇红 2 号’ > 望春玉兰 > 天女木兰。

图 4B 显示：随干旱加剧，过氧化物酶活性在 3 种玉兰幼苗中呈现不同的变化。天女木兰过氧化物酶活性表现为先增加后减小，在 T_2 达到最大值，与 CK 相比，T_2 和 T_3 显著增加 87.27%、25.82%（$P < 0.05$）。望春玉兰表现为过氧化物酶活性先减小后增加，T_3 处理下最大，较 CK 显著增加 21.38%（$P < 0.05$）。红花玉兰‘娇红 2 号’过氧化物酶活性表现为随干旱加剧逐渐增加，T_1、T_2、T_3 较 CK 分别显著增加 99.07%、177.72%、261.36%（$P < 0.05$）。

图 4C 显示：随干旱加剧，天女木兰和望春玉兰过氧化氢酶活性均显著增加（$P < 0.05$），T_3 处理下最大，较 CK 分别增加 110.46%、147.23%；红花玉兰‘娇红 2 号’过氧化氢酶活性在 T_2、T_3 处理下显著增加，较 CK 分别增加 33.19%、46.74%（$P < 0.05$）。各干旱处理下，3 种玉兰的过氧化氢酶活性差异显著（$P < 0.05$），平均值大小排序为天女木兰 > 望春玉兰 > 红花玉兰‘娇红 2 号’。

综合以上保护酶活性结果发现：3 种玉兰能够通过增强保护酶活性来适应干旱。重度干旱下（T_3）红花玉兰‘娇红 2 号’超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性最高，天女木兰过氧化氢酶活性最高。

2.2.5 光合参数的变化

图 5A 显示：随干旱加剧，天女木兰和望春玉兰净光合速率均显著降低（$P < 0.05$），天女木兰净光合速率在 T_1、T_2、T_3 处理下较 CK 分别降低 18.80%、22.22%、38.89%，望春玉兰净光合速率在 T_1、T_2、T_3 处理下较 CK 分别显著降低 15.72%、27.67%、28.30%；红花玉兰‘娇红 2 号’净光合速率表现为先增大后大幅度下降，在 T_2、T_3 处理下较 CK 分别显著降低 34.60%、70.24%（$P < 0.05$）。在 CK 和 T_1、T_2 处理下，红花玉兰‘娇红 2 号’净光合速率显著高于另外两种玉兰（$P < 0.05$）；在 T_3 处理下，天女木兰净光合速率显著高于另外两种玉兰（$P < 0.05$）。

图 5B 显示：随干旱加剧，天女木兰和望春玉兰胞间 CO_2 浓度均显著降低（$P < 0.05$），天女木兰胞间 CO_2 浓度在 T_1、T_2、T_3 处理下较 CK 分别降低 6.13%、8.64%、10.03%，望春玉兰胞间 CO_2 浓度在 T_1、T_2、T_3 处理下较 CK 分别降低 6.81%、12.38%、19.81%；红花玉兰‘娇红 2 号’胞间 CO_2 浓度表现为先增大后减小。在 CK 和 T_1、T_2 处理下，天女木兰胞间 CO_2 浓度显著高于另外两种玉兰（$P < 0.05$）；在 T_3 处理下，天女木兰和红花玉兰‘娇红 2 号’胞间 CO_2 浓度显著高于望春玉兰（$P < 0.05$）。

图 5C 显示：随干旱加剧，天女木兰和望春玉兰蒸腾速率逐渐降低，天女木兰蒸腾速率在 T_3 处理下较 CK 显著降低 13.94%（$P < 0.05$），望春玉兰蒸腾速率在 T_2、T_3 处理下较 CK 显著降低 16.37%、16.37%

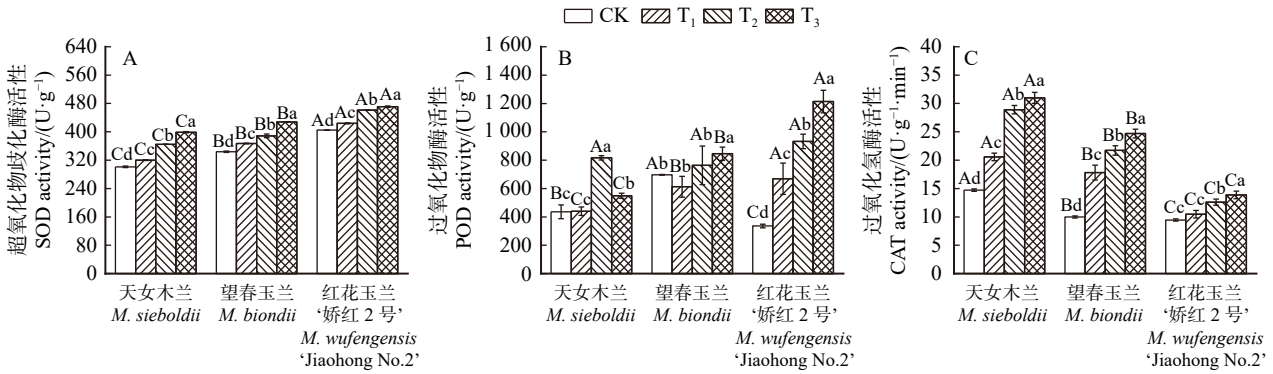


图 4 干旱胁迫对 3 种幼苗保护酶活性的影响

Fig. 4 Effects of drought stress on protecting enzyme activities of three *Magnolia* spp. seedlings

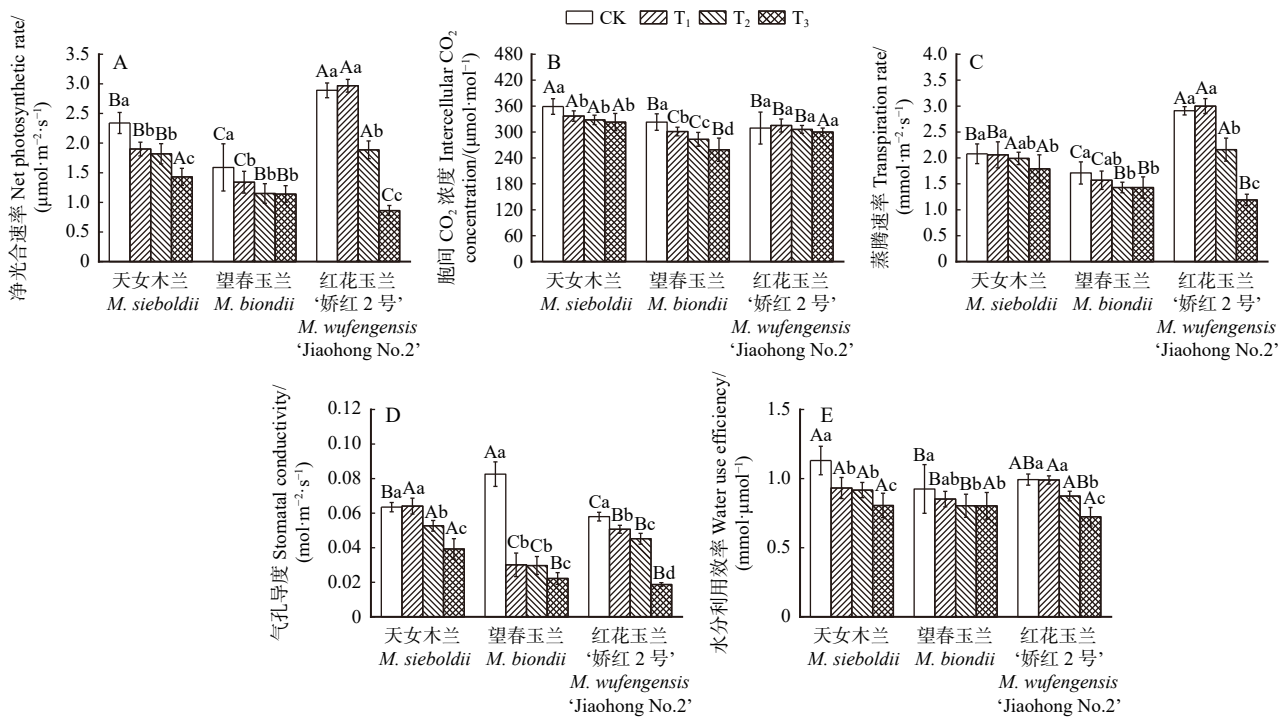


图 5　干旱胁迫对 3 种幼苗光合参数的影响

Fig. 5　Effects of drought stress on photosynthetic parameters of three *Magnolia* spp. seedlings

($P < 0.05$)；红花玉兰‘娇红 2 号’蒸腾速率表现为先增大后减小，T_2、T_3 处理较 CK 分别显著降低 25.77%、59.10%($P < 0.05$)。在 CK 和 T_1 处理下，红花玉兰‘娇红 2 号’蒸腾速率显著高于另外两种玉兰($P < 0.05$)；在 T_2 处理下，天女木兰和红花玉兰‘娇红 2 号’的蒸腾速率显著高于望春玉兰($P < 0.05$)；在 T_3 处理下，天女木兰蒸腾速率显著高于另外两种玉兰($P < 0.05$)。

图 5D 显示：随干旱加剧，天女木兰气孔导度表现为先增大后减小，T_2、T_3 处理下较 CK 分别显著降低 15.87%、38.10%($P < 0.05$)；望春玉兰气孔导度表现为先急剧下降后平稳下降，T_1、T_2、T_3 处理较 CK 分别显著降低 63.86%、63.86%、73.49%($P < 0.05$)；红花玉兰‘娇红 2 号’气孔导度显著降低($P < 0.05$)，T_1、T_2、T_3 处理较 CK 分别降低 12.07%、22.41%、67.24%。在 CK 处理下，望春玉兰气孔导度显著高于另外两种玉兰($P < 0.05$)；在 T_1、T_2、T_3 处理下，天女木兰的气孔导度显著高于望春玉兰和红花玉兰‘娇红 2 号’($P < 0.05$)。

图 5E 显示：随干旱加剧，天女木兰水分利用效率显著降低($P < 0.05$)，T_1、T_2、T_3 处理较 CK 分别显著降低 17.70%、18.58%、28.32%($P < 0.05$)；望春玉兰和红花玉兰‘娇红 2 号’水分利用效率逐渐降低，望春玉兰水分利用效率在 T_2、T_3 处理下较 CK 显著降低 13.04%、13.04%($P < 0.05$)，红花玉兰‘娇红 2 号’水分利用效率在 T_2、T_3 处理下较 CK 显著降低 12.12%、27.27%($P < 0.05$)。水分利用效率作为衡量作物产量和用水量关系的一种指标，干旱胁迫下水分利用效率更高的植物通常更耐旱。在 CK、T_1、T_2 处理下，天女木兰和红花玉兰‘娇红 2 号’的水分利用效率显著高于望春玉兰($P < 0.05$)，一定程度上表明了望春玉兰的抗旱性较弱。

2.3　抗旱性评价

选择重度干旱(T_3)处理的数据，采用隶属函数法[15]对 3 种玉兰抗旱能力进行综合评价。表 4 显示：天女木兰、望春玉兰、红花玉兰‘娇红 2 号’的隶属函数平均值分别为 0.581、0.417、0.437，根据隶属函数值越大，抗旱性越强的特点，可知 3 种玉兰幼苗抗旱性强弱为天女木兰 > ‘娇红 2 号’ > 望春玉兰。

3　讨　　论

3.1　不同干旱胁迫对 3 种玉兰幼苗生长生理特性的影响

植物抗旱性通常表现在多个方面，包括生长特性[17]、生理生化[18]、光合特性[19]、解剖特征[20−21]等，且每个方面有多个指标用于植物的抗旱性综合评价，说明植物通过多指标协同综合来应对干旱胁迫。耐旱和御旱是表征植物抗旱性的两种方式，二者通常在干旱逆境下综合起作用[22]。耐旱性指植物维持生长和忍耐脱水的能力，植物会通过增加渗透调节物质，降低植物渗透势，增强抵御干旱的能力[23]，通过提高抗氧化酶活性，减少膜脂过氧化对植物的损伤[24−25]。御旱性指植物通过节水方式保持植物的高水势，主要通过改变植物原有的物质分配策

表 4 干旱胁迫下 3 种玉兰幼苗隶属函数值

Tab. 4 Subordinate function values of three *Magnolia* spp. seedlings under drought stress

指标 Index	天女木兰 *M. sieboldii*	望春玉兰 *M. biondii*	红花玉兰‘娇红2号’ *M. wufengensis* ‘Jiaohong No.2’
株高增长量 Plant height increment	0.238	1.000	0.000
地径增长量 Ground diameter increment	0.000	1.000	0.067
根增长量 Root increment	1.000	0.000	0.595
茎增长量 Stem increment	0.701	0.000	1.000
叶增长量 Leaf increment	0.361	0.000	1.000
根冠比 Root-shoot ratio	0.825	1.000	0.000
叶绿素 Chlorophyll	0.060	1.000	0.000
可溶性糖 Soluble sugar	0.418	0.000	1.000
可溶性蛋白 Soluble protein	0.213	0.000	1.000
脯氨酸 Proline	0.218	0.000	1.000
丙二醛 Malondialdehyde	1.000	0.518	0.000
超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase	0.000	0.398	1.000
过氧化物酶 Peroxidase	0.000	0.447	1.000
过氧化氢酶 Catalase	1.000	0.632	0.000
净光合速率 Net photosynthetic rate	1.000	0.489	0.000
胞间 CO_2浓度 Intercellular CO_2 concentration	1.000	0.000	0.641
气孔导度 Stomatal conductivity	1.000	0.150	0.000
蒸腾速率 Transpiration rate	1.000	0.391	0.000
水分利用效率 Water use efficiency	1.000	0.889	0.000
平均值 Average value	0.581	0.417	0.437
抗旱性排序 Drought resistance ranking	1	3	2

略[26−28]，调节生长速率[29]，调节气孔开闭[16]来应对干旱胁迫。本研究中，不同玉兰树种耐旱性和御旱性共同作用，在干旱胁迫下均通过减缓生长速率和降低生物量减少水分蒸腾，提高根冠比增强植株的抗性；通过提高叶片中可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量等含量调节渗透平衡；通过提高抗氧化物质超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性来清除植物体内过多的超氧自由基，维持自由基含量稳定；通过关闭气孔蒸腾等方式提高抗旱性。

随着干旱程度加剧，3 种玉兰幼苗株高、地径以及各器官增长量呈减小趋势，根冠比逐渐增大，叶绿素含量呈下降趋势（天女木兰和望春玉兰逐渐下降，红花玉兰‘娇红 2 号’先增大后减小），丙二醛、渗透调节物质、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性随干旱加剧逐渐增大，过氧化物酶活性变化规律不明显，光合指标整体下降。干旱胁迫下苗木生长指标和光合指标协同作用，干旱导致气孔关闭，切断了外界向叶绿体提供 CO_2 的途径[30]，从而引起光合速率的下降，而光合速率的降低与幼苗株高、地径、生物量积累的减少之间有着密切联系。丙二醛含量高低反应植物膜受伤害的程度，植物体内丙二醛含量的累积可使叶片中的蛋白质复合体失去选择透过性造成叶绿素降解增加，进而影响光合速率[31−32]，同时和渗透物质相互协调，控制细胞渗透压，有助于保护植物免受脱水损伤和其他环境压力的影响[33]。抗氧化酶活性在干旱胁迫下的增高，可以减少丙二醛含量造成的植物膜脂过氧化对植物的损伤[34−35]。水分利用效率可作为判定某一树种的抗旱性[36]，植物通常会提高自身的水分利用效率来增强对干旱的耐受性[37]，而本研究 3 种玉兰水分利用效率随干旱加强逐渐下降，与朱婧等[38]的研究一致，说明干旱胁迫下净光合速率下降的幅度大于蒸腾速率下降的幅度。

3.2 不同玉兰幼苗的抗旱策略对比及评价

各玉兰树种对干旱胁迫的响应既有相似之处又各有特点。脯氨酸具有较强的水和作用，溶解度高于其他渗透调节物质，植物通过积累较多的脯氨酸调节细胞渗透势、降低细胞凝固点，降低细胞酸性[39−40]。本研究发现，望春玉兰在轻度干旱处理下（T_1）脯氨酸含量较 CK 降低，而天女木兰和红花玉兰‘娇红 2 号’的脯氨酸含量较 CK 增加，这可能是轻度干旱激发了望春玉兰脯氨酸脱氢酶的产生，加强脯氨酸氧化降解酶的作用，从而减少了脯氨酸的含

量。叶绿素是植物进行光合作用所必需的色素，其合成与分解受植物自身功能、外界环境条件等多因素的共同影响[27]。干旱胁迫对不同树种叶绿素的影响不尽相同，紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)[41]研究发现叶绿素含量随干旱胁迫的加强而增加；武当木兰、红花木莲、乐昌含笑和乐东拟单性木兰[13]的叶绿素含量则逐渐降低。本研究发现，天女木兰和望春玉兰叶绿素含量随干旱胁迫增加而降低，而红花玉兰‘娇红 2 号’在轻度干旱处理下(T_1)叶绿素含量高于对照，中度干旱和重度干旱处理下(T_2、T_3)叶绿素含量显著低于 CK，这可能是在轻度干旱时，红花玉兰‘娇红 2 号’减少自身光合作用对叶绿素的消耗以抵御干旱，而中度和重度干旱时，产生大量毒害离子损害了叶片细胞结构，叶绿素合成受阻[42]。本研究中，红花玉兰‘娇红 2 号’在轻度干旱处理下(T_1)株高增长量、净光合速率、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率略有提高，随着干旱胁迫加强进而降低，降势逐渐增大，而天女木兰和望春玉兰并未出现先增后减的现象，说明红花玉兰‘娇红 2 号’在轻度干旱处理下(T_1)生长和光合受到的影响较小，植物还未通过提高御旱性对应干旱胁迫，株高增长量提高可能是由于轻度干旱激发红花玉兰‘娇红 2 号’某种相关基因或酶的表达，增加了细胞的分裂和生长速度[43]。望春玉兰在轻度干旱处理下(T_1)气孔导度急剧下降 63.56%，且下降幅度比光合速率大，干旱胁迫加强后下降幅度和光合速率一致，可能是由于干旱导致气孔阻力大，气孔调节是望春玉兰应对干旱的主要措施。相关研究表明，气孔因素和非气孔因素均为干旱胁迫下净光合速率降低的原因，当净光合速率、胞间 CO_2 浓度、气孔导度变化一致，则认为净光合速率降低主要受气孔因素的影响，反之认为是非气孔因素[44]。本研究中，天女木兰和红花玉兰‘娇红 2 号’轻度干旱处理下(T_1)是非气孔因素，中度和重度干旱处理下(T_2、T_3)是气孔因素；望春玉兰各种干旱胁迫下均为气孔因素。天女木兰干旱胁迫下各生长指标的变化程度小，渗透调节物质和酶活性等变化幅度较大，表明天女木兰维持自身的正常生理代谢功能的能力更强。利用隶属函数法分析 3 种玉兰的抗旱性发现，3 种玉兰的抗旱性由强到弱为天女木兰 > ‘娇红 2 号’ > 望春玉兰。

4　结　　论

随干旱加剧，红花玉兰‘娇红 2 号’在株高增长量、叶绿素含量、净光合速率、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率表现出先增大后减小，而天女木兰和望春玉兰随干旱程度增加逐渐减小。中度和重度干旱处理降低了 3 种玉兰的株高增长量、地径增长量、各器官增长量、叶绿素含量以及光合参数，增大了根冠比、丙二醛、渗透调节物质以及保护酶活性。天女木兰通过增加渗透调节物质和酶活性维持自身正常生长的能力最强，红花玉兰‘娇红 2 号’在轻度干旱下受到的影响较小，望春玉兰调节能力最弱且气孔调节是其主要的调节方式。隶属函数法分析，3 种玉兰幼苗抗旱性强弱为天女木兰 > ‘娇红 2 号’ > 望春玉兰。

参　考　文　献

[1] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望 [J]. 气象学报, 2020, 78(3): 500−521.
Zhang Q, Yao Y B, Li Y H, et al. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 500−521.

[2] Liu J, Zhang R, Zhang G, et al. Effects of soil drought on photosynthetic traits and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* seedlings[J]. Journal of Forestry Research, 2017, 28(2): 9.

[3] 马福林, 马玉花. 干旱胁迫对植物的影响及植物的响应机制 [J]. 宁夏大学学报 (自然科学版), 2022, 43(4): 391−399.
Ma F L, Ma Y H. Effects of drought stress on plants and plant response mechanisms[J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2022, 43(4): 391−399.

[4] Sun C H, Li X H, Hu Y L, et al. Proline, sugars, and antioxidant enzymes respond to drought stress in the leaves of strawberry plants[J]. Korean Journal of Horticultural Science & Technology, 2015, 33(5): 625−632.

[5] Kumar M, Patel M K, Kumar N, et al. Metabolomics and molecular approaches reveal drought stress tolerance in plants[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(17): 9108.

[6] Banik P, Zeng W P, Tai H, et al. Effects of drought acclimation on drought stress resistance in potato (*Solanum tuberosum* L.) genotypes[J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, 126: 76−89.

[7] 王志杰. 天女花生物学特性观察初报 [J]. 河北林学院学报, 1996(2): 176−178.
Wang Z J. Observations on biological characteristics of *Magnolia sieboldll*[J]. Journal of Heibei Foerstry College, 1996(2): 176−178.

[8] 郭乐, 康永祥, 邢振杰, 等. 望春玉兰种质资源遗传多样性 ISSR 分析 [J]. 植物研究, 2014, 34(4): 465−473.
Guo L, Kang Y X, Xing Z J, et al. Genetic diversity of *Mangolia biondii* assessed by ISSR polymorphisms[J]. Bulletin of Botanical Research, 2014, 34(4): 465−473.

[9] 马履一, 王罗荣, 贺随超, 等. 中国木兰科木兰属一新变种 (英文)[J]. 植物研究, 2006(5): 516−519.
Ma L Y, Wang L R, He S C, et al. A new variety of *Magnolia* (Magnoliaceae) from Hubei, China[J]. Bulletin of Botanical Research, 2006(5): 516−519.

[10] 肖爱华. 红花玉兰花被片形态建成及调控机理研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.

Xiao A H. Study on the morphogenesis and regulation mechanism of the perianth flakes of *Magnolia wufengensis*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.

[11] 桑子阳, 马履一, 陈发菊, 等. 五峰红花玉兰种质资源保护现状与开发利用对策 [J]. 湖北农业科学, 2011, 50(8): 1564−1567.
Sang Z Y, Ma L Y, Chen F J. et al. Protection status and utilization countermeasure of germplasm resources of the *Magnolia wufengensis* in Wufeng County[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(8): 1564−1567.

[12] 蔡锡安, 孙谷畴, 赵平, 等. 土壤水分对单性木兰幼苗光合特性的影响 [J]. 热带亚热带植物学报, 2004, 12(3): 207−212.
Cai X A, Sun G C, Zhao P, et al. The effects of soil water content on photosynthesis in leaves of *Kmeria septentrionalis* seedlings[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2004, 12(3): 207−212.

[13] 马斌, 张娅, 吴毅, 等. 干旱胁迫对 4 种木兰科树种生理特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(11): 93−99.
Ma B, Zhang Y, Wu Y, et al. Effects of drought stress on physiological characteristics of four Magnoliaceae species[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(11): 93−99.

[14] 张梦飞, 李爽, 李运盛, 等. 9 种绿化树种幼苗抗旱性评价 [J]. 中国农学通报, 2022, 38(20): 38−46.
Zhang M F, Li S, Li Y S, et al. Evaluation on the drought resistance of seedlings of nine greening tree species[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(20): 38−46.

[15] 张庆宝. 木兰属植物资源收集和天目木兰种苗特性与抗性研究 [D]. 杭州: 浙江林学院, 2009.
Zhang Q B. The resource collection of the *Magnolia* species and the study on the seedings characteristics and adaption of *M. amoena*[D]. Hangzhou: Zhejiang Forestry Uuniversity, 2009.

[16] 赵秀婷, 王延双, 段劼, 等. 盐胁迫对红花玉兰嫁接苗生长和光合特性的影响 [J]. 林业科学, 2021, 57(4): 43−53.
Zhao X T, Wang Y S, Duan J, et al. Effects of salt stress on growth and photosynthetic characteristics of *Magnolia wufengensis* grafted seedlings[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(4): 43−53.

[17] 徐飞, 郭卫华, 徐伟红, 等. 刺槐幼苗形态、生物量分配和光合特性对水分胁迫的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(1): 24−30.
Xu F, Guo W H, Xu W H, et al. Effects of water stress on morphology biomass allocation and photosynthesis in *Robinia pseudoacacia* seedlings[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(1): 24−30.

[18] Oskuei B K, Bandehagh A, Farajzadeh D, et al. Morphological, biochemical, and physiological responses of canola cultivars to drought stress[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2023, 20(12): 13551−13560.

[19] 谢乾瑾, 夏新莉, 刘超, 等. 水分胁迫对不同种源蒙古莸光合特性与生长的影响 [J]. 林业科学研究, 2010, 23(4): 567−573.
Xie Q J, Xia X L, Liu C, et al. Effects of water stress on photosynthetic and growth characteristics of different *Caryopteris mongholica* provenances[J]. Forest Research, 2010, 23(4): 567−573.

[20] 张翠梅, 师尚礼, 刘珍, 等. 干旱胁迫对不同抗旱性苜蓿品种根系形态及解剖结构的影响 [J]. 草业学报, 2019, 28(5): 79−89.
Zhang C M, Shi S L, Liu Z, et al. Effects of drought stress on the root morphplogy and anatomical structure of *Medicago sativa* varieties with differing drought-tolerance[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(5): 79−89.

[21] 邵畅畅, 罗仙英, 丁贵杰, 等. 干旱对马尾松茎叶水力特征及解剖特性的影响 [J]. 植物生理学报, 2022, 58(5): 937−945.
Shao C C, Luo X Y, Ding G J, et al. Effffects of drought on hydraulic and anatomical characteristics of stem and leaf in *Pinus massoniana*[J]. Plant Physiology Journal, 2022, 58(5): 937−945.

[22] Levitt J. Response of plants to environmental stress. vol 1[J]. Journal of Range Management, 1973, 1(5): 3642−3645.

[23] 何小三. 不同油茶品种对干旱胁迫的响应机制 [D]. 南京: 南京林业大学, 2019.
He X S. *Camellia oleifera*'s response mechanism to drought stress[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2019.

[24] 王宇超, 王得祥, 彭少兵, 等. 干旱胁迫对木本滨藜生理特性的影响 [J]. 林业科学, 2010, 46(1): 61−67.
Wang Y C, Wang D X, Peng S B, et al. Effects of drought stress on physiological characteristics of woody saltbush[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(1): 61−67.

[25] Gill S S, Anjum N A, Gill R, et al. Superoxide dismutase-mentor of abiotic stress tolerance in crop plants[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(14): 10375−10394.

[26] Zwetsloot M J, Bauerle T L. Repetitive seasonal drought causes substantial species: pecific shifts in fine-root longevity and spatio-temporal production patterns in mature temperate forest trees[J]. New Phytologist, 2021, 231(3): 974−986.

[27] Olmo M, Lopez-Lglesias B, Villar R. Drought changes the structure and elemental composition of very fine roots in seedlings of ten woody tree species: implications for a drier climate[J]. Plant and Soil, 2014, 384(1/2): 113−129.

[28] Zhu L, Li A, Sun H, et al. The effect of exogenous melatonin on root growth and lifespan and seed cotton yield under drought stress[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 204: 117344.

[29] 周自云, 梁宗锁, 刘启明. 不同土壤水分条件对酸枣生物量与耗水特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报, 2010, 38(8): 90−96.
Zhou Z Y, Liang Z S, Liu Q M. Effects of soil water content on biomass and water consumption characteristics of wild jujube (*Zizyphus jujuba* Mill var. *spinosus* (Bunge) Hu ex H. F. Chou)[J]. Journal of Northwest A&F University, 2010, 38(8): 90−96.

[30] 侯立伟, 鲁绍伟, 李少宁, 等. 城市绿化灌木耐旱性评价及灌溉制度研究进展 [J]. 世界林业研究, 2023, 36(1): 45−51.
Hou L W, Lu S W, Li S N, et al. Review of research on drought tolerance evaluation and irrigation regime of urban greening shrubs[J]. World Forestry Research, 2023, 36(1): 45−51.

[31] 喻晓丽, 邸雪颖, 宋丽萍. 水分胁迫对火炬树幼苗生长和生理特性的影响 [J]. 林业科学, 2007, 43(11): 57−61.
Yu X L, Di X Y, Song L P. Effects of water stress on the growth and eco-physiology of seedlings of the *Rhus typhina*[J]. Scientia

Silvae Sinicae, 2007, 43(11): 57−61.

[32] 彭远英, 颜红海, 郭来春, 等. 燕麦属不同倍性种质资源抗旱性状评价及筛选 [J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2478−2491.
Peng Y Y, Yan H H, Guo L C, et al. Evaluation and selectionon drought-resistance of germplasm resources of *Avena* species with different types of ploidy[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(9): 2478−2491.

[33] Toscano S, Ferrante A, Tribuloto A, et al. Leaf physiological and anatomical responses of *Lantana* and *Ligustrum* species under different water availability[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 127: 380−392.

[34] 梁建萍, 贾小云, 刘亚令, 等. 干旱胁迫对蒙古黄芪生长及根部次生代谢物含量的影响 [J]. 生态学报, 2016, 36(14): 4415−4422.
Liang J P, Jia X Y, Liu Y L, et al. Effects of drought stress on seedling growth and accumulation of secondary metabolites in the roots of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(14): 4415−4422.

[35] 吴永波, 叶波. 高温干旱复合胁迫对构树幼苗抗氧化酶活性和活性氧代谢的影响 [J]. 生态学报, 2016, 36(2): 403−410.
Wu Y B, Ye B. Effects of combined elevated temperature and drought stress on anti-oxidative enzyme activities and reactive oxygen species metabolism of *Broussonetia papyrifera* seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(2): 403−410.

[36] Xiong S F, Wang Y D, Chen Y C, et al. Effects of drought stress and rehydration on physiological and biochemical properties of four oak species in China[J]. Plants, 2022, 11(5): 679.

[37] 张婵, 洪希群, 吴承祯, 等. 干旱胁迫对闽北几种乡土树种耗水及光合特性的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(1): 212−219.
Zhang C, Hong X Q, Wu C Z, et al. Effects of drought stress on water consumption and photosynthetic characteristics of native tree species in northern Fujian[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023, 29(1): 212−219.

[38] 朱婧, 聂水, 刘思, 等. 4 种木本园林植物水分胁迫生理响应及耐旱性评价 [J]. 分子植物育种, 2023, 21(23): 7867−7883.
Zhu J, Nie S, Liu S, et al. Physiological response and drought tolerance evaluation of seedlings of four woody garden plants under water stress[J]. Molecular Plant Breeding, 2023, 21(23): 7867−7883.

[39] 杨虎臣. 干旱胁迫对幼苗期甜菜脯氨酸 (Pro) 代谢通路的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Yang H C. The effect of drought stress influence in the proline metabolism pathways of seedling period of sugay beet[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[40] 周玲, 王乃江. 干旱胁迫下文冠果幼苗叶片的生理响应 [J]. 西北林学院学报, 2012, 27(3): 7−11.
Zhou L, Wang N J. Physiological responses of *Xanthoceras sorbifolia* seedling leaves under soil drought stress[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(3): 7−11.

[41] 颜淑云, 周志宇, 邹丽娜, 等. 干旱胁迫对紫穗槐幼苗生理生化特性的影响 [J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 139−145.
Yan S Y, Zhou Z Y, Zou L N, et al. Effect of drought stress on physiological and biochemical properties of *Amorpha fruticosa* seedlings[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(1): 139−145.

[42] 郭春爱, 刘芳, 许晓明. 叶绿素 b 缺失与植物的光合作用 [J]. 植物生理学通讯, 2006, 42(5): 967−973.
Guo C A, Liu F, Xu X M. Chlorophyll-b deficient and photosynthesis in plants[J]. Plant Physiology Journal, 2006, 42(5): 967−973.

[43] Yamaguchi-Shinozaki S K. Gene networks involved in drought stress response and tolerance[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(2): 221.

[44] Chen W, Feng C, Guo W, et al. Comparative effects of osmotic-, salt- and alkali stress on growth, photosynthesis, and osmotic adjustment of cottonplants[J]. Photosynthetica, 2011, 49(3): 417−425.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　马履一）