

分类号: Q819
学号: 20232106025

密级:
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



珍稀濒危药用植物雪白睡莲在不同生境下的生理生态响应及快繁体系优化研究

学位申请人	陶玲庆
指导教师	刘会良 研究员
申请学位类别	专业硕士
专业名称	生物与医药
研究领域	生物技术与工程
所在学院	生命科学学院

中国·新疆·石河子

2026年5月

分类号:

学号: 20232106025

密级:

单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



珍稀濒危药用植物雪白睡莲在不同生境下的生理生态响应及快繁体系优化研究

学位申请人	陶玲庆
指导教师	刘会良 研究员
申请学位门类级别	专业硕士
专业名称	生物与医药
研究领域	生物技术与工程
所在学院	生命科学学院

中国·新疆·石河子

2026年5月

**Physio-ecological Responses of the Rare and Endangered Medicinal
Plant *Nymphaea candida* under Different Habitats and
Optimization of Its Rapid Propagation System**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Tao Ling-qing

(Resources Plant)

Dissertation Supervisor: Researcher. Liu Hui-liang

May, 2026

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：陶玲庆

时间：2026年5月16日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：陶玲庆

时间：2026年5月16日

导师签名：刘全良

时间：2026年5月16日

摘要

雪白睡莲(*Nymphaea candida* C. Presl)为新疆特有的国家Ⅱ级重点保护野生植物,在《中国生物多样性红色名录——高等植物卷》中列为濒危物种。受环境变化与人为干扰影响,其野生种群持续退化。针对该物种生态适应机制与繁育基础研究薄弱的问题,本研究旨在阐明雪白睡莲在不同生境下的生理功能性状差异及主控因子,识别关键环境阈值的调控作用,并验证其在快繁体系中的应用,为濒危植物保护及生态修复提供科学依据。

在新疆巴州、伊犁和阿勒泰三地分布区采集样品,测定不同生境的叶片、水体、土壤理化指标,并结合2014–2024年气候数据开展综合分析。通过采用差异显著分析(ANOVA/Kruskal - Wallis)、相关性分析(Spearman)、线性混合效应模型(LMM)、条件推断树(CIT)和广义加性模型(GAM),定量评估气候与水土因子对叶片功能性状的综合影响及非线性响应阈值。依据模型结果,在组培实验中运用正交设计优化种子冷藏期、消毒方式、培养基组分与激素配比,并以阈值参数设置外源磷浓度梯度,构建“种子萌发—无菌苗生长—移栽定植”一体化繁育流程。主要研究结果如下:

(1) 不同地区雪白睡莲群体生理性状存在显著差异。巴州群体在低磷、较高盐环境中,通过提高CAT和SOD活性并维持较高叶绿素含量,表现出较强的养分效率型适应;伊犁群体在富养、较湿润条件下,叶片C、N、P含量及MDA水平均升高,表现为养分积累加快且氧化压力增强;阿勒泰群体则在偏酸、较高有机质土壤中,通过SP与POD的协同调节维持生理平衡。

(2) 叶片养分含量与土壤TPs、APs呈显著正相关。LMM分析结果表明,TPs、APs及 NH_4^+ -Ns为主要驱动因子;PHs与SP呈正相关,而与POD呈负相关;COD对Chl合成具有促进作用。此外,CIT与GAM模型进一步识别出关键生理阈值:PHs > 7.5及TPw > 0.47 mg·L⁻¹。

(3) 最优种子处理组合为“4℃冷藏9月+75%乙醇1min+2%NaClO₂5min+去皮+MS培养基+8g/L琼脂+30g/L蔗糖”,萌发率73%,污染率0%。外源磷浓度≤0.47mg·L⁻¹对萌发无显著影响;IBA与NAA各0.1mg·L⁻¹配比促进幼苗生长。移栽3–4个月形成马蹄形浮叶并可进行地下茎分株繁殖,较自然播种缩短生长期约6个月。

综上,雪白睡莲在不同气候与水土背景下展现出较强的生理可塑性和区域性适应策略。关键环境因子及其阈值在其生长调控中起决定作用。本研究构建的“环境监测—模型识别—阈值验证—组培应用”技术体系,实现了生态机制研究与繁育实践的有效衔接,为新疆珍稀水生植物的保护利用和湿地生态修复提供了重要参考与技术支撑。

关键词: 濒危植物; 雪白睡莲; 生理功能性状; 关键阈值; 组培快繁

Abstract

Nymphaea candida C. Presl, an endangered species listed in the *China Biodiversity Red List—Higher Plants*, is a national class II protected aquatic plant endemic to Xinjiang, China. Its wild populations have undergone continuous decline due to environmental changes and anthropogenic disturbance. To address the limited understanding of its ecological adaptation and propagation mechanisms, this study aimed to elucidate the physiological functional traits and key controlling factors of *Nymphaea candida* under different habitats, identify critical environmental thresholds that regulate physiological processes, and verify their application in an optimized tissue-culture system.

Leaf, water, and soil samples were collected from three representative distribution areas—Bazhou, Yili and Altay—and analyzed together with climatic data from 2014 to 2024. A combination of analytical approaches, including one-way ANOVA/Kruskal–Wallis tests, Spearman correlation, linear mixed-effects models (LMM), conditional inference trees (CIT), and generalized additive models (GAM), was employed to quantify the integrated and nonlinear effects of climatic and edaphic factors on leaf traits. Based on model outputs, an orthogonal experimental design was applied to optimize seed storage duration, sterilization procedure, medium composition, and hormone ratios, while setting external phosphorus gradients according to the identified threshold parameters to establish an integrated system covering seed germination, aseptic seedling growth, and ex vitro transplantation. The main results are as follows:

(1) Significant differences were observed in the physiological traits of *Nymphaea candida* populations across different regions. In the low-phosphorus and relatively high-salinity environment of Bazhou, the population maintained a relatively high chlorophyll content and increased CAT and SOD activities, suggesting a strong nutrient-efficiency adaptation strategy. Under eutrophic and relatively humid conditions, the Yili population showed increases in leaf C, N, and P contents as well as MDA levels, representing a pattern of accelerated nutrient accumulation coupled with intensified oxidative stress. In slightly acidic soil with high organic matter, the Altay population exhibited synergistic regulation of soluble sugars and POD to adapt to the acidic habitat, reflecting its specific physiological regulation strategy in that environment.

(2) Leaf functional traits were significantly correlated with environmental factors. Leaf nutrient contents were positively associated with soil TPs and APs. LMM analysis revealed that TPs, APs, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were the primary drivers of phosphorus accumulation; PHs showed a positive correlation with SP and a negative correlation with POD activity; COD exerted a significant promotive effect on Chl synthesis. Furthermore, CIT and GAM models identified key physiological thresholds, with $\text{PHs} > 7.5$ and $\text{TPw} >$

0.47 mg·L⁻¹.

(3) In tissue-culture experiments, the optimal seed-treatment combination was 4 °C cold storage for 9 months + 75% ethanol 1 min + 2% NaClO 5 min + de-husking + MS medium with 8 g L⁻¹ agar and 30 g L⁻¹ sucrose, achieving a germination rate of 73% and zero contamination. External phosphorus \leq 0.47 mg·L⁻¹ had no adverse effect on germination; a mixture of IBA and NAA (0.1 mg·L⁻¹ each) promoted optimal seedling growth. Transplanted plantlets produced horseshoe-shaped floating leaves after 3–4 months and could be propagated by rhizome division, thereby shortening the growth period by approximately six months compared with natural germination.

In conclusion, *Nymphaea candida* exhibits pronounced physiological plasticity and regional adaptive strategies under varying climatic and edaphic conditions. Critical environmental factors and their thresholds play decisive roles in regulating its growth. The “environmental monitoring–model identification–threshold verification–tissue-culture application” framework established in this study effectively connects ecological mechanism research with propagation practice, providing scientific and technical support for conservation and wetland restoration of rare aquatic plants in Xinjiang.

Key words: endangered plant; *Nymphaea candida*; physiological functional traits; critical thresholds; tissue culture propagation

目录

摘要	I
Abstract	II
第 1 章 前言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.2.1 濒危植物	2
1.2.2 濒危植物的生理特性与环境适应性	3
1.2.3 濒危植物组织培养与快繁技术研究现状	7
1.3 睡莲属研究现状	8
1.4 雪白睡莲研究现状及科学问题提出	9
1.5 研究目的及内容	10
1.5.1 研究目的	10
1.5.2 研究内容	10
1.5.3 技术路线	11
第 2 章 不同生境雪白睡莲生理适应策略与阈值分化	12
2.1 材料与方法	12
2.1.1 研究区概况	12
2.1.2 研究区雪白睡莲生长状况	12
2.1.3 方法	14
2.1.4 数据分析	16
2.2 结果与分析	16
2.2.1 不同生境下植物性状与环境因子的差异格局	16
2.2.2 植物功能性状与环境因子的相关性分析	19
2.2.3 关键环境驱动因子的识别与响应模式：基于线性混合模型分析	20
2.2.4 生理响应阈值的识别：基于条件推断树的非线性分析	21
2.2.5 响应曲线的定量建模与形态解析：基于 GAM 与 LOESS 的非线性建模	23
2.3 讨论	24
2.3.1 水体总磷 (TP _w) 是雪白睡莲生理响应的关键驱动因子	24
2.3.2 土壤和气候因子对响应模式的调节作用	25

2.3.3 APATS 框架下的功能权衡解释	26
2.4 小结	26
第 3 章 雪白睡莲种子的离体培养研究	28
3.1 材料与方法	28
3.1.1 种子材料	28
3.1.2 种子的表面灭菌处理	28
3.1.3 种子萌发培养基筛选	29
3.1.4 无菌苗生长培养基筛选	30
3.1.5 无菌苗移栽条件筛选	31
3.1.6 数据分析	33
3.2 结果与分析	33
3.2.1 不同表面灭菌处理及冷藏时间方式对雪白睡莲种子污染率的影响	33
3.2.2 磷源添加对睡莲种子萌发的影响	35
3.2.3 不同生长调节剂对比对雪白睡莲无菌苗生长状态的影响	36
3.2.4 不同土壤类型对雪白睡莲生长状况的影响	38
3.3 讨论	40
3.3.1 种子消毒方法的优化及其对萌发活性的影响	40
3.3.2 低温贮藏对休眠解除的生理调控机制	41
3.3.3 磷源添加的影响	42
3.3.4 生长调节剂配比的优化	43
3.3.5 从组培到移栽：人工干预下的表型可塑性与适应性演化	45
3.4 小结	46
第 4 章 结论和展望	47
4.1 结论	47
4.2 展望	48
参考文献	49
附录	58
致谢	62
作者简介	63
石河子大学硕士研究生学位论文导师评阅表	64

第 1 章 前言

1.1 研究背景及意义

全球变化和人类活动对植物的影响越来越显著，植物对环境模式变化的响应存在不确定性，这种不确定性给生态系统的稳定性和生物多样性保护带来了挑战。生物多样性是生态平衡的基础，物种的消失和灭绝会直接影响到生态系统的平衡。一种植物的灭绝将会引起 10~30 种其他伴生物种的丢失^[1]，保护生物多样性、确保生态系统的稳定和健康具有重要意义。濒危植物对环境变化较敏感主要是因为濒危植物的生存和繁衍受到多种环境因素的影响。在此背景下，探究濒危植物的生理生态适应性不仅有助于我国预测濒危植物在未来环境变化下的生存状况，也能指导我们制定相应的生态保护措施。

近年来科学家们对濒危植物生理生态适应性的研究仍聚焦在叶片上，因为叶片作为植物进行光合作用的主要器官，其形态、结构和生理功能的变化可以直接反映植物对环境变化的响应。比如，濒危植物的叶片功能性状，如叶面积、叶厚度、叶绿素含量等，会随着环境条件的变化而发生相应的调整，以适应不同的生态位和生存策略^[2]。同时，叶片养分含量（氮、磷）及其化学计量比(N/P)可以反映植物的生存策略并预测生态系统生产力对环境变化的响应^[3]。因此，探究濒危植物在不同环境压力下的生理生态响应，这将有助于实施精准的生态恢复方案，制定相应的保护措施。

新疆地区拥有独特的生态系统，并孕育了丰富的珍稀植物资源。在这些资源中，雪白睡莲(*Nymphaea candida*)作为新疆特有的珍稀濒危药用植物，其存在具有极高的生态与科研价值。雪白睡莲不仅被列为我国珍稀濒危物种，更是国家重点保护植物之一，其保护与研究工作显得尤为重要。野生资源仅仅分布在中国新疆地区，由于环境和气候变化以及人为的采挖，野生数量稀少，成熟个体数少于 10000 株，并且种群持续减少，因而在 1999 年被列入《国家重点保护野生植物名录（第一批）》重点保护，保护级别为 II 级。2013 年被列入《世界自然保护联盟濒危物种红色名录》(IUCN)，级别为濒危(EN)。

雪白睡莲主要分布在新疆三个地区的居群：伊犁地区伊犁河谷的沼泽湿地，阿尔泰山地区额尔齐斯河科克苏湿地内的沼泽湿地、河流湿地与湖泊湿地和巴州地区博斯腾湖的湖泊湿地。前期调查发现，塔里木河流域的雪白睡莲叶、花与果等生长量指标明显高于其他两区域，伊犁河流域的雪白睡莲对应生长量指标最小，额尔齐斯河流域的雪白睡莲对应生长量指标介于二者之间^[4]，这一现象可能与当地的气候条件、土壤湿度及水质等

因素密切相关，然而，雪白睡莲的生理特性与生态性状之间的关系及其对环境变化的响应机制仍有待进一步明确。同时，植物组织培养技术作为濒危植物保护与扩繁的重要手段，在该物种中的应用尚处于起步阶段，尚未形成稳定的再生体系。因此，本研究通过测定不同生境条件下雪白睡莲叶片的生理特性，分析其生态性状与生理性状之间的关系，并探讨其与环境因子的相互作用过程，以期深化对该物种生理适应性的认识；在此基础上，结合相关生理响应特征开展组织培养研究，构建雪白睡莲的快速繁殖体系，为其保护与开发利用提供理论依据和技术支持。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 濒危植物

1.2.1.1 濒危植物概况

濒危植物是指由于环境的变化而面临绝种危机的植物，作为生物多样性及生态系统中不可或缺的关键组成部分，其生存状况正受到多重因素的严峻挑战。其中，传粉效率低下、种子存在缺陷、遗传多样性偏低等自然因素，以及植物间复杂的对抗关系、对特定生长环境的独特需求等生态特性，均对濒危植物的存续构成了显著威胁。此外，人类活动的不断加剧，如栖息地破坏、资源过度开采等，更是进一步加剧了濒危植物的生存危机^[5]。因此，保护濒危植物已成为维护生物多样性和生态系统稳定的重要任务。

为了保护濒危植物资源，1984年国务院环境保护委员会公布了珍稀濒危植物名录，共列出濒危、渐危、稀有植物354种，并分别规定了每种植物的保护级别。其中，一级保护的8种，二级保护的143种，三级保护的203种。1999年8月4日，由国务院批准并由国家林业局和农业部发布中华人民共和国《国家重点保护野生植物名录（第一批）》^[6]。2021年8月7日正式向社会发布调整后的《国家重点保护野生植物名录》，新调整的《国家重点保护野生植物名录》，共列入国家重点保护野生植物455种和40类，包括国家一级保护野生植物54种和4类，国家二级保护野生植物401种和36类^[7]。

1.2.1.2 濒危植物的研究方法

濒危植物具有显著的经济、科研及生态价值，因此深入开展濒危植物相关研究具有重要意义。关于濒危植物的研究主要集中在繁殖生态学，种群生态学，生理生态学等方面。特别在生理生态学研究领域，综合了生态系统生态学、微气象学、植物生理学、生物化学等多学科的理论与方法，通过探讨濒危植物如何获取资源，以及这些资源如何被用于其生长、竞争、生殖和自我保护等生理过程，揭示濒危植物在维持生态平衡和促进生态系统功能中的关键作用，帮助科学家们预测濒危植物种群数量动态的变化，评估保

护措施的效果，进而为濒危植物的保护和管理提供科学依据。

1.2.2 濒危植物的生理特性与环境适应性

近年来，基于功能性状的生态学研究（*trait-based ecology*）已成为解析植物适应策略与环境响应机制的重要理论框架。该方法通过量化植物功能性状及其与环境因子的关系，主要揭示植物在不同生态梯度下的资源获取、能量分配及生理调控策略，生态阈值（*ecological threshold*）与非线性响应（*nonlinear response*）逐渐成为研究热点，强调植物对环境变化的响应并非线性累积，而可能在特定区间发生突变或转折。

在陆生生态系统中，叶片经济谱（*Leaf Economics Spectrum, LES*）为解释植物功能性状之间的协同与权衡关系提供了重要理论支撑。然而，水生植物由于其生长环境长期处于高水分、低气体扩散及养分空间异质性较强的条件下，功能性状的构建机制及资源分配策略可能显著不同于陆生植物。因此，直接套用陆生植物的理论框架存在一定局限，有必要在借鉴 *LES* 理论的基础上，探讨水生植物在特定生态环境中的功能性状协同与权衡模式（*plant functional trade-off*），以揭示其独特的适应机制（*aquatic plant adaptation*）。

在上述理论框架下，植物对环境变化的适应本质上体现为一系列生理过程的动态调节。植物生理适应性通常表现为对水分、光照、温度及土壤条件等关键环境因子的响应与调控，其通过改变代谢活动、资源分配及抗逆机制，以维持个体的生长与繁殖。对于濒危植物而言，由于其生境条件往往较为特殊或受扰动较强，其生理适应过程更为敏感且具有特异性，易受到气候变化、土壤理化性质、水分供给及人类活动等多重因素的共同影响。

1.2.2.1 气候适应性

气候条件包括温度、光照、湿度等，对植物的生长有着至关重要的影响，且对植物叶片的影响是多方面的，包括叶片的形态、结构、生理功能以及生物化学成分等。研究表明，气候条件的变化（例如全球变暖和变暗/变亮、风力减弱以及降水和相对湿度/水汽压差的变化）通过调节水分和能量条件主导了某些地区的蒸散量变化^[8]，这些变化可能会影响植物的生长、繁殖和生存能力，尤其是对于珍稀濒危植物而言，许多濒危植物对气候变化极为敏感。

例如在干旱条件下，濒危植物叶片会启动一系列复杂的生理反应来应对水分亏缺。叶片也会通过减少气孔导度来降低蒸腾作用，从而减少水分的散失。同时，叶片的抗氧化系统会被激活，以清除因干旱而产生的过多活性氧，防止细胞膜和细胞器的损伤。此外，叶片中的渗透调节物质如脯氨酸、可溶性糖等也会积累，以提高细胞的保水能力，增强植物的抗旱性^[9]。根据杨瑛斌^[10]的研究结果，在干旱胁迫条件下，小沙冬青叶片中

的可溶性糖、Pro 含量以及叶片光合色素含量均呈现上升趋势。同时，SOD（超氧化物歧化酶）和 POD（过氧化物酶）对干旱环境表现出迅速的响应，其活性显著增加。

盐碱环境则对濒危植物叶片构成了另一种挑战。高盐浓度会导致叶片细胞内的水分外渗，引起渗透胁迫。为了应对这种胁迫，植物叶片会合成并积累更多的有机溶质，以降低细胞内的水势，从而保持细胞的正常功能。此外，叶片的抗氧化系统同样会被激活，以清除因盐碱胁迫而产生的过多活性氧。例如薛焱^[11]等研究发现，高浓度盐会抑制濒危盐生植物长叶红砂的生长，改变植物体内渗透调节物质。

低温和高温环境也会对濒危植物叶片产生显著影响。低温条件下，叶片的光合作用和呼吸作用会受到抑制，导致植物的生长速率下降。为了应对低温胁迫，植物叶片会积累更多的抗寒物质，如可溶性糖和脂肪酸等，以提高细胞的抗寒性^[12]。例如刘婷婷^[13]研究表明，中华水韭沉水叶片在 0℃ 低温胁迫中受到一定程度的伤害，但能通过调节自身的膜透性、渗透调节物质含量和保护酶活性系统来减轻低温伤害，维持其正常生理代谢功能。相反，高温条件下，叶片的光合作用会增强，但同时也会增加呼吸作用的速率，导致植物能量的消耗增加。而为了应对高温胁迫，植物叶片会启动热激蛋白等保护机制，以维持细胞的正常结构和功能。刘璐^[14]研究的中，濒危植物景宁木兰在高温逆境条件下，其外观形态、细胞膜系统、光合系统及糖代谢等生理生化过程均遭受了不同程度的损伤。当植物受到持续的高温胁迫长达 120 小时后，观察到植株中有三分之二的叶片面积出现了显著的变色和发黑现象，同时伴随着叶片的萎蔫，这表明高温逆境对景宁木兰的生长和发育产生了显著的负面影响。袁刚毅^[15]对濒危植物豹皮樟的研究中发现，豹皮樟叶片表型与气候因子之间有着很强的相关性，且气候变量对叶片性状具有协同影响，并指出温度是影响豹皮樟分布的主要环境因子。

随着气候变化的加剧，我们需要更加重视气候变化对濒危植物及其生态系统长期的影响。通过研究气候条件对濒危植物生长的影响，可以更好地理解濒危植物如何适应环境变化，以及对于预测气候变化对生物多样性的影响具有重要意义。

1.2.2.2 地理适应性

地理位置变化通过影响环境因子，对珍稀濒危植物叶片的形态和生理功能性状产生影响，而濒危植物通过调整叶片性状来适应这些变化。

随着纬度的增加，光照强度和温度逐渐降低，这对叶片的形态产生了显著影响。高纬度地区的植物叶片往往更加紧凑且厚实，以减少热量的散失和保持内部温度的稳定性。同时，这些叶片的表皮细胞可能含有更多的蜡质层，以抵御严寒和干燥的环境条件。相比之下，低纬度地区的植物叶片则更加宽大且薄，以便更有效地进行光合作用和气体交换^[16]。宋帅帅^[2]研究显示，濒危植物永瓣藤的叶片形态随着纬度的升高而逐渐呈现出

更宽更圆的特征。此外，该植物的叶片磷含量相对较低，这可能表明其生长受到了一定程度的磷元素限制。为了适应当前的环境条件，永瓣藤的叶片功能性状通过一定的种内变异和性状组合，与气候、土壤因子等相互作用，形成了特定的生态适应策略。

除了纬度因素外，海拔高度的变化也对叶片特征产生了重要影响。随着海拔的升高，温度逐渐降低，空气湿度和气压也发生相应变化。这些环境因素的综合作用导致高山植物的叶片通常具有较小的表面积和较厚的角质层，以减少水分蒸发和适应低温环境。此外，高山植物的叶片还可能含有特殊的适应性物质，如抗冻蛋白和抗氧化剂，以增强其对极端环境的抵抗力^[17]。例如，吴尚明^[18]探讨了不同海拔梯度对濒危植物珙桐叶片的具体影响。其研究结果显示，随着海拔梯度的逐步上升，珙桐不同海拔种群中与光合特性紧密相关的光合色素含量呈现出下降趋势。同时，尽管叶绿体结构在不同海拔间并未展现出显著差异，但叶绿体内的淀粉积累却随着海拔的升高而有所增加。此外，与中等海拔种群相比，高海拔和低海拔种群的碳氮比均有所降低。王文韬^[19]研究结果显示，海拔、光照强度、植被恢复年限、水网密度为影响珍稀濒危植物分布的主要因子，例如花榈木倾向于海拔相对较高、植被恢复年限久、光照相对较弱、水分条件较好的生境。而浙江马鞍树的生境条件则呈现出低海拔、植被恢复年限短、光照较强、水分相对较弱的点。

地理条件的变化可以通过多种途径影响濒危植物的生长，在探讨叶片对地理变化的响应时，还需要关注土壤条件、水分状况以及人类活动等因素的综合影响，比如这些因素可能通过影响植物的营养吸收、生长速率和生理代谢等途径，间接作用于叶片特征的改变。因此，在进行相关研究时，需要综合考虑多种环境因子的相互作用，以便更准确地揭示濒危植物叶片特征变化与地理变化之间的内在联系。

1.2.2.3 水体环境适应性

水生生态系统，包括河流、湖泊及水库等，在陆地碳的储存与转化过程中扮演着重要角色，作为显著的碳汇与活跃的“生物反应器”，其在全球碳循环与气候变化中的影响不容小觑^[20-21]。水体环境的变化会对植物的生长周期产生深远影响，如延迟或促进植物种子的萌发、调整植物的生长速率，并引发植物体内光合色素含量、蒸腾作用、叶片气体交换活动及资源利用效率等一系列生理生化特性的调整^[22]。

水体环境变化对濒危水生植物影响尤为显著。首先濒危水生植物是淡水生态系统中的关键组成部分，它们通过影响营养物质去除、固碳和食物供给等功能，对维持生物多样性和提供生态系统服务起着至关重要的作用。例如富营养化现象的出现会显著改变水生生态系统的基本结构与功能，进而引发水生生物多样性的显著下降^[23]。相关研究表明，由于水体污染、干旱、水位下降、人类的过度采捞等原因，导致濒危水生植物海菜花的数量急剧下降^[24]。

pH 值是衡量水体酸碱度的指标，它直接影响水生生物的生存和水生植物的生长。濒危水生植物对水体 pH 值的变化非常敏感，pH 值的异常变化可能会破坏水体中的生物群落平衡，导致水生生物的死亡和生态系统崩溃。例如，濒危植物云贵水韭的种群生活于受水稻田流水影响的山沟浅水沼泽中，其种群数量可能受到水体 pH 值升高的影响。研究发现，云贵水韭所在的水体 pH 值由 6.30 升高到 6.81，电导率也有所增加，这可能是导致云贵水韭种群数目减少和规模缩小的重要原因之一^[25]。而一般水体中的 pH 值变化与藻类的光合作用有关，藻类光合作用强烈，消耗水中大量 CO₂，pH 值升高，叶绿素 a 浓度也随之增加。兰奕等人^[26]研究发现天池水体叶绿素 a 浓度与 pH 呈显著正相关，与硫酸盐、硝酸盐、氯化物呈线性负相关，与水位呈显著正相关，与降水量呈高度正相关。冯家成^[27]等研究发现在长江安徽段水质研究中发现水体中 pH 的变化是驱动 DO 变化的关键因素，同时当光合作用活跃时，水生植物通过吸收水体中的二氧化碳并释放氧气，降低了水体中的二氧化碳含量，进而提高了 pH 值。

水体环境的质量对濒危植物的生存至关重要，污染或生态失衡都会对这些濒危植物造成严重影响，因此探讨濒危水生植物对水体环境变化的适应性可以揭示濒危植物的生态适应关系，为水生生态修复和生物多样性保护提供策略。

1.2.2.4 土壤适应性

从植物个体生态学的视角出发，植物体维持其存续主要依赖两大界面以汲取环境资源：其一为叶片及其他光合组织，负责捕获光合有效辐射；其二为根系及类似根结构，负责从土壤中吸收矿质营养元素^[28]。土壤条件对濒危植物的生长和分布具有重要影响，土壤的物理和化学特性，如质地、肥力、水分和 pH 值，直接影响植物的根系发展、养分吸收和整体健康状态。此外，土壤中的重金属污染会对植物造成毒害作用，引起株高、主根长度、叶面积等一系列生理特征的改变，影响植物的生长发育和生态系统服务功能。土壤基质的物理结构对固着型水生植物的生长具有至关重要的作用。相关研究表明，过于紧密的粘土基质不利于其根系的附着，尤其是水生植物，更偏好生长于松软的淤泥环境之中^[29]。

土壤营养盐对植物的生长和发育也起着决定性的作用。根据国外学者的研究表明，表层土壤中所蕴含的大量有机质，其内部的 C:N、C:P 以及 N:P 比例关系，能够作为评估土壤在发育阶段中养分状况的一个有效且重要的指示参数^[30]。朱文杰^[31]的研究工作也进一步揭示了缺钾现象可能是影响东方水韭种群数量减少、健康状况恶化的一个关键土壤因素。

此外，土壤中的 pH 值也会影响土壤中养分的有效性和可利用性，例如大多数植物适宜在微酸性至中性土壤中生长^[32]，而对于濒危植物而言，土壤 pH 的不适宜可能是导

致其濒危的因素之一。孙亚菲^[33]在针对濒危植物裸果木的研究中明确指出，裸果木所处的生境土壤面临养分极度稀缺以及 pH 值显著偏高的挑战。具体而言，土壤 pH 值的过高状态可能阻碍裸果木有效吸收必要的微量元素，影响到土壤中养分的整体有效性，进而造成裸果木的濒危。王明彬^[34]在探讨濒危植物红豆树生长与环境的相关性中指出，土壤 pH 及土壤全磷速、速效磷及有机质含量对红豆树群落群落特征的影响最为显著。

土壤条件通过多种途径影响植物的生长，是濒危植物生长和生态系统健康的关键因素之一。探讨土壤条件对濒危植物生长的影响有利于揭示濒危植物特征变化与土壤环境变化之间的内在联系。

1.2.3 濒危植物组织培养与快繁技术研究现状

濒危植物的栖息地正受到人类活动和环境变化的严重威胁。由于这类植物具有独特的生态适应性和生物学特性，其保护与恢复显得尤为重要。然而，传统的原地保护和迁地保护方法均面临周期长、成本高、繁殖效率低等问题，因此亟需探索更高效的保护途径。

植物组织培养技术作为实现濒危植物快速繁殖（快繁）的重要手段，已广泛应用于珍稀濒危植物的保护与利用研究中。快繁技术通常建立在组织培养体系基础上，通过调控植物生长调节剂的种类与浓度以及培养条件，实现植株的高效再生与规模化繁育。因此，了解濒危植物组织培养技术的发展现状，对于构建其快繁体系具有重要的参考意义。

植物的组织培养（又称离体培养）是指在无菌条件下，将植物体的组织、器官、细胞或原生质体分离出来，接种于含有营养物质及植物激素的人工培养基中进行培养，从而获得再生植株或生产具有经济价值的代谢产物的技术。狭义的组织培养多指利用植物的形成层、薄壁组织、叶肉组织、胚乳等进行的培养，以愈伤组织的诱导与再分化为主要手段来实现植株再生。植物组织培养技术已广泛应用于植物脱毒、快速繁殖、遗传改良、细胞工程、次生代谢物生产及工厂化育苗等多个领域^[35]。

目前植物组织培养技术的在濒危植物保护中的应用已经取得了显著成效，且研究者一般通过通过调整植物生长调节剂的种类和浓度来改善愈伤组织的诱导和分化^[36]，这些措施有助于提高濒危植物组织培养的成功率。例如在濒危药用植物大花石蝴蝶的组培方案中，研究者通过从大花石蝴蝶的不同部位（如叶片和茎段）获取外植体，通过使用不同的培养基和生长调节剂显著提高了大花石蝴蝶的再生率^[37]。在濒危植物穿心莲的组培研究中，结果表明茎部外植体比中脉外植体在再生诱导方面表现更好，并且在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NAA和 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BA的组合下获得了最好的再生效果^[38]。颜坤元^[39]筛选了适于濒危植物五小叶槭的外植体灭菌方法和培养基配方，并表示腋芽诱导效果最佳的培养基为 NN69 + IBA ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)，建立了五小叶槭快速繁殖体系，为五小叶槭后期保护与繁育