

横断山高寒球宿根植物资源评估与活体研究体系构建

李海雁¹, 杨思琪¹, 涂泽英¹, 田汶艳¹, 林雨蓉¹, 龙维彪^{1*}, 孙文光^{2*}
(1. 云南师范大学 生命科学学院, 昆明 650500; 2. 云南师范大学 云南特色生物资源高值化
利用教育部工程研究中心, 昆明 650500)

摘要: 为了解决气候变化背景下高寒植物保护和利用的两大难题, 该文以横断山区高寒球宿根植物为研究对象, 系统调查并评估了该区域球宿根植物的多样性及其经济价值, 首次构建了基于活体种质的迁地保存与研究体系。主要结果如下: (1) 统计结果表明该区域共有 47 科 164 属 479 种球宿根植物, 采用层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 对物种的引种潜力进行科学量化排序, 明确了优先保护与利用的对象。(2) 揭示了球宿根植物适应极端高寒环境的内在机制, 重点探讨了地下贮藏器官在无性繁殖和环境适应中的作用, 并利用其特性建立了活体研究体系, 突破传统依赖种子萌发获取实验材料的瓶颈, 不仅提升了实验材料的稳定供应和利用效率, 还为濒危物种迁地保护与后续分子遗传学、代谢组学研究提供了重要平台。(3) 分析了当前评估模型与活体保存技术的局限, 提出结合多学科技术提升资源评估精准性及扩大活体体系应用范围的未来方向。该研究结果为应对气候变化和人为干扰背景下高寒球宿根植物资源的保护、开发与可持续利用提供了科学依据和技术支撑。

关键词: 横断山区, 球宿根植物, 资源评估, 层次分析法, 迁地保护, 活体种质

中图分类号: Q949

文献标识码: A

文章编号:

Assessment of bulbous perennial plants resources and development of a living germplasm research framework in the Hengduan Mountains

LI Haiyan¹, YANG Siqi¹, TU Zeying¹, TIAN Wenyan¹, LIN Yurong¹,
LONG Weibiao^{1*}, SUN Wenguang^{2*}

(1. College of Life Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. Engineering
Research Center for Valorization of Unique Bio-Resources in Yunnan, Ministry of Education,
School of Life Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: To address the dual challenges of conserving and utilizing alpine plant resources in the context of climate change, this study focuses on alpine bulbous perennial plants in the Hengduan Mountains through a systematic investigation and evaluation of their diversity and economic value. A novel ex-situ conservation and research system based on living germplasm was established. The main results are as follows: (1) Statistical analyses revealed the presence of 479 species of bulbous perennial plants, representing 164 genera across 47 families in this region. Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) model, the introduction potential was quantitatively assessed by integrating ecological factors and economic indicators, thereby identifying priority species for

基金项目: 云南省重点研发计划项目(202403AC100028); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2024OZKK0200); 云南省基础研究专项-面上项目(202401AT070102)。

第一作者: 李海雁(2002—), 硕士研究生, 主要从事植物学研究方向, (E-mail) sea11232021@163.com。

***通信作者:** 龙维彪, 讲师, 研究方向为植物组织培养 (E-mail) 615579078@qq.com; 孙文光, 博士, 讲师, 研究方向为植物系统与进化 (E-mail) sunwenguang@vip.163.com。

conservation and utilization. (2) The research elucidates the intrinsic adaptation mechanisms of bulbous perennial plants to extreme alpine environments, highlighting the role of underground storage organs in clonal reproduction and environmental resilience, thus overcoming the traditional propagation bottleneck associated with seed germination. The living germplasm system enhances the stable supply and utilization efficiency of experimental materials and serves as a critical platform for *ex-situ* conservation of endangered species as well as for subsequent molecular genetics and metabolomic studies. (3) Limitations of the current evaluation model and living preservation techniques are critically analyzed, and future directions are proposed, including the integration of multidisciplinary technologies to improve resource assessment accuracy and broaden the application scope of the living system. This work provides scientific foundation and technical support for the conservation, development, and sustainable utilization of alpine bulbous perennial plants resources amid the challenges posed by climate change and human interference.

Key words: Hengduan Mountains, bulbous perennial plants, resource assessment, analytic hierarchy process (AHP), *ex-situ* conservation, living germplasm

球宿根植物泛指具有地下贮藏器官（如球茎、块茎、根茎等）的多年生草本植物。该类群不仅是重要的观赏、药用和食用资源，其独特的生命周期与适应性策略也使其成为科学研究的重要材料。当前研究多集中于商业化球宿根植物的引种栽培与产量提升，并在多个领域取得显著进展。大量研究表明，球茎繁殖受到外植体类型、光周期、光质量、温度、植物生长调节剂等多重因素的影响，为优化繁殖体系提供了重要依据（Li et al., 2023）。在育种技术方面，多倍体诱导为种质创新开辟了新途径，通过秋水仙素诱导获得了四倍体植株姜（*Zingiber officinale*）（Kumar et al., 2024）；对球茎大麦多年生分子调控机制的解析为培育多年生谷物奠定了理论基础（Fuerst et al., 2021）。在繁殖技术领域，通过优化植物激素配比，实现了珍稀濒危物种齐加纳三肋果（*Tripleurospermum ziganaense*）的高效微繁殖（Cuce & Inceer, 2024），展现了生物技术在资源保护与利用中的广阔应用前景。然而对野生球宿根植物，特别是分布于高山极端环境下的类群，其基础生物学特性与种质资源保护研究存在明显不足，濒危物种的不合理采集导致其种质资源面临严重威胁（Ren et al., 2017）。因此，将研究视野转向高山地区的野生球宿根植物具有重要科学意义。

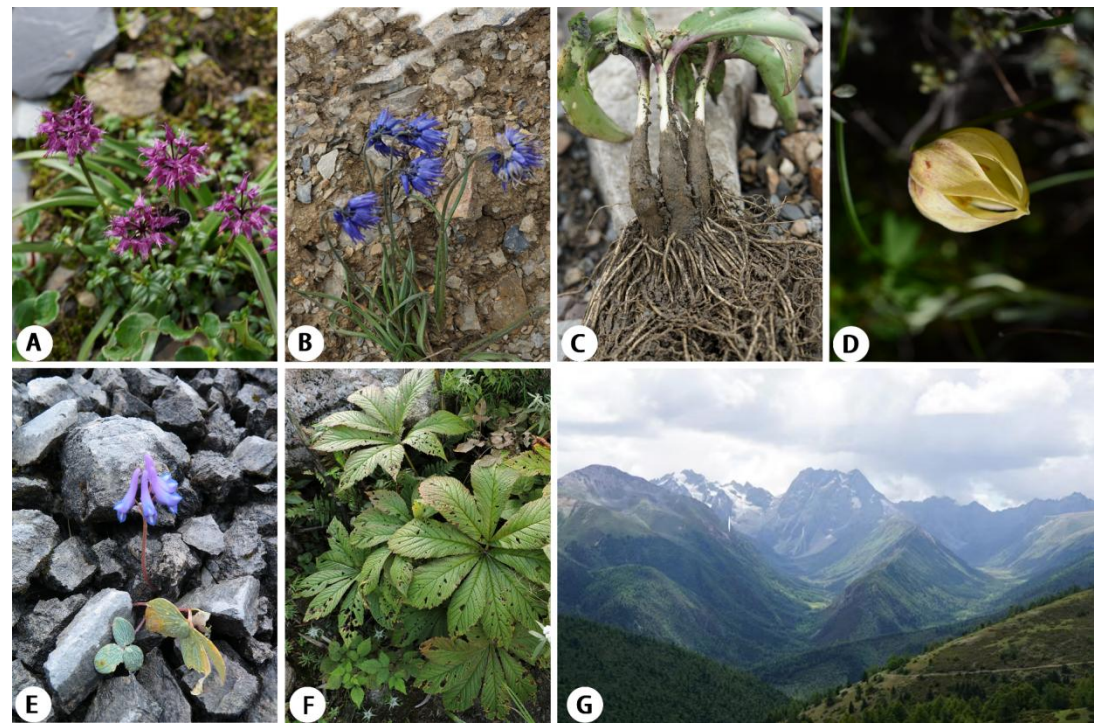
横断山区主体位于喜马拉雅山脉东段，地跨我国西藏自治区东部、四川省西部及云南省西北部，向北延伸至青海省东南部与甘肃省西南部，向南涵盖缅甸北部地区（李炳元，1987）。横断山巨大的海拔落差导致了景观、温度、降水及植被的剧烈变化，形成了昼夜温差大、积雪时间长，霜冻事件频繁且严重的极端环境（张谊光，1998）。低温、强辐射、传粉媒介稀少等恶劣的环境条件限制了植物的生长与繁殖（Mäkinen et al., 2002; Takahashi et al., 2011），但也塑造了独特的适应性特征。一方面，部分高海拔植物类群通过展示更大的花朵和延长花朵寿命来吸引稀有的传粉昆虫，确保异花授粉繁殖，例如绿绒蒿属（*Meconopsis*）、报春花属（*Primula*）、杜鹃花属（*Rhododendron*）等；另一方面，在授粉受限且环境极端恶劣的区域，部分高山植物类群依赖无性繁殖来弥补有性繁殖的不足（Maruo & Imura, 2020），例如葱属（*Allium*）、百合属（*Lilium*）、紫堇属（*Corydalis*）及鬼灯檠属（*Rodgersia*）等。

无性繁殖为其在恶劣环境中提供了稳定的种群维持与拓展能力（Hörandl, 2023），在高山极端生境中生存具有关键作用。例如，野草莓（*Fragaria vesca*）可以通过匍匐茎进行无性繁殖，形成新的植株，温暖环境可诱导野草莓无性系发生持久的表观遗传与转录组变化，影响其匍匐茎性状，暗示了无性繁殖在快速适应气候变化中的潜在作用（Zhang et al.,

2023)；长期低温则促进高山南芥 (*Arabis alpina*) 形成不定根，以支持克隆生长 (Mishra et al., 2021)。这些发现从机制层面揭示了无性繁殖是高山球宿根植物适应环境的重要策略。无性繁殖特性不仅为高山植物的野外生存提供了保障，也为其实验室迁地保育与研究提供了便利。

高寒球宿根植物的深入研究面临多重挑战。在生态层面，脆弱的高山生态系统正遭受气候变化和人类活动的双重压力，物候期改变间接影响了植物的繁殖成功率 (Zhang et al., 2024)，加剧了种质资源的丧失 (Körner, 2023)。在技术层面，其种子普遍存在深休眠特性，萌发率受海拔和生境异质性影响显著 (Ge et al., 2020; Wang et al., 2024)，导致基于种子的传统资源收集、保存与萌发研究遭遇瓶颈。夏秋季节采集具有营养器官的球宿根活体植物到实验室进行引种栽培，既能避免野外过度挖掘，又可利用其根尖作为科学研究材料，突破种子萌发的技术瓶颈。而且活体根尖可多次取材用于细胞学实验，为染色体计数、核型分析等研究提供可靠基础，还能减少实验对植物原生生境的干扰。同时也能为后续科学研究提供活体来源，助力引种驯化、濒危物种保护及资源可持续开发等。

综上所述，本研究以横断山区高寒山地球宿根植物为研究对象，拟探讨以下科学问题：（1）在气候变化和人为干扰加剧背景下，如何深入研究并有效利用横断山区高寒山地的球宿根植物资源；（2）如何突破传统种质资源保存瓶颈，建立可持续的活体研究体系以支持基础研究和资源保护。



A. 太白韭；B. 锡金韭；C. 短茎韭；D. 尖被百合；E. 半荷包紫堇；F. 西南鬼灯檠；G. 高山环境。
A. *Allium prattii*; B. *A. sikkimense*; C. *A. nanodes*; D. *Lilium lophophorum*; E. *Corydalis hemidicentra*;
F. *Rodgersia sambucifolia*; G. Alpine environment.

图 1 高寒山地球宿根植物代表类群及生活环境

Fig. 1 Representative groups and habitats of alpine bulbous perennial plants

1 材料与方法

为探明横断山区球宿根类植物的资源本底资料、引种潜力及可持续研究途径，本研究设计了从资源评估到引种探索最后通过实验验证的具体开展方案，进行活体研究体系的构

建，主要包括以下内容：（1）通过数据库构建与层次分析法，从宏观上筛选出具有高引种潜力的广布种，为后续活体采集提供科学依据。（2）依据上述评估结果，针对性采集目标物种的活体材料进行实验室迁地栽培，以解决种子萌发困难导致材料获取瓶颈。（3）利用成功培育的活体材料，建立基于营养器官根尖的细胞学研究体系，验证该体系在基础研究中的可行性。

1.1 横断山区球宿根植物资源调查与数据库构建

1.1.1 目标植物名录构建

系统查清横断山区球宿根植物的资源本底量化其引种潜力，为后续的活体采集对象选择提供决策支持。整合《横断山区维管植物》（王文采等，1993, 1994）、植物智（iPlant）、植物科学数据中心（PlantPlus）等多个数据库的信息。经数据清洗与校验后，提取并标准化每个物种的拉丁学名、形态特征、营养器官类型、经济价值、已知引种记录以及保护等级（依据《国家重点保护野生植物名录（2021 版）》）。同时，从 GBIF 获取物种分布点数据，并从 World Clim 数据库提取对应的 19 项生物气候变量，重点关注年均温、年降水量及海拔梯度，为后续的生态适应性分析提供数据基础。

1.1.2 综合引种驯化潜力评估

依据资源调查构建数据库中物种生境类型描述及特点分析，构建以下分类标准，见表 1。物种引种驯化潜力评价采用层次分析法（analytic hierarchy process, AHP）（Saaty & Vargas, 2012）。基于从云南省气象局（<http://yn.cma.gov.cn>）获取的昆明市呈贡区 2023 年气候数据（年均温 15.6 °C、年降水 818.4 mm），构建生态适应性指数模型。权重分配参考专家建议，经一致性检验后取值，见表 2。

表 1 生境类型分类标准
Table 1 Criteria for classification of habitat types

等级	生境类型	生境特点
Rating	Habitat type	Habitat characteristic
A	林缘、灌丛、草地、疏林下、河滩、田边、村旁 Forest edge, shrub, grassland, understory, riverbanks, field margins, village side	光照充足，土壤湿润肥沃，易于人工模拟 Sufficient light, moist and fertile soil, easy to simulate artificially
	林下（阔叶林/针叶林/混交林）、沟谷、溪边、山坡灌丛、草甸、沼泽	需特定遮荫或湿度条件，但可通过人工调控实现栽培
B	Under the forest (broadleaf forest/coniferous forest/mixed forest), gully, stream side, hillside shrub, meadow, marsh	Requires specific shading or humidity conditions, but can be cultivated through artificial regulation
C	高山草甸（3 000~4 000 m）、石隙、石灰岩地、干热河谷、沙地、岩壁	需要特殊基质或微气候环境，引种需针对性改造生境
	Alpine meadow (3 000~4 000 m) , rock crevice, limestone land, dry-hot valley, sandy land, rock wall	Special substrates or microclimate environments are required, and the introduction needs targeted habitat modification
D	高山流石滩、冰川遗迹区、永久冻土层、极端干旱岩壁、云冷杉林上限区域	极端低温、强辐射、贫瘠基质，自然生境难以人工模拟，引种存活率极低
	Alpine stream stone beach, glacial relict area, permafrost layer, extremely arid rock wall, upper limit area of cloud fir forest	Extreme low temperatures, strong radiation, and barren substrates make it difficult to artificially simulate natural habitats, resulting in extremely low survival rates for transplanted species

表 2 物种引种驯化潜力评价指标体系与权重分配

Table 2 Evaluation index system and weight allocation for species introduction and domestication potential

目标层	准则层	方案层	权重	评分规则
Target layer	Criterion layer	Plan layer	Weight	Scoring rule
物种引种适应性评估 Adaptability assessment of species introduction	生态适应性 Ecological adaptability	年平均温度 Average annual temperature	0.2	$e^{(-0.5 \times AT)}$
		年平均降水量 Average annual precipitation	0.15	$e^{(-0.005 \times AP)}$
		平均海拔 Average elevation	0.15	$e^{(-0.001 \times AH)}$
		生境适配等级 Habitat adaptation grade	0.20	生境等级 A/B/C/D 对应 5.0/3.5/2/0.5 分 Habitat levels A/B/C/D correspond to 5.0/3.5/2/0.5 points
	经济与功能 Economy and function	价值类型 Type of value	0.10	药用 (2); 食用 (1.5); 观赏/含淀粉/可作饲料 (1) Medicinal use (2); edible use (1.5); ornamental/starch-containing/forage purposes (1)
	繁殖与驯化 Reproduction and domestication	驯化状态 Domestication status	0.05	良好 (5); 未知 (3); 引种失败/无记录 (1) Successful (5); unknown (3); failed/unrecorded (1)
		保护等级 Level of protection	0.05	非保护 (5); 二级保护 (2) Unprotected (5); Class II protected (2)

注：实验物种名单与中国外来入侵物种比对后无重合物种，因此不考虑生态风险。

Note: After comparing the list of experimental species with the list of alien invasive species in China, there are no overlapping species, so ecological risk is not considered.

1.2 野外考察与活体养护方法

基于引种潜力评估结果，通过野外考察筛选出在横断山区广泛分布、生境适配度等级较高且具有良好经济或科研价值的 4 属 6 种球宿根植物移栽到云南省昆明市呈贡区云南师范大学生命科学学院温室进行活体保存养护，实验材料明细如表 3。

表 3 本研究开展的部分球根类植物采集信息

Table 3 Collection information for the studied bulbous and perennial plant species

物种名称	凭证标本号	采集地	海拔
Name of species	Voucher number	Location	Altitude (m)
太白韭 <i>Allium prattii</i>	MXG23-24	四川乡城仁堆 Rendui, Xiangcheng, Sichuan	3 438
卵叶韭 <i>A. ovalifolium</i>	MXG23-47	四川松潘黄龙 Huanglong, Songpan, Sichuan	3 042
锡金韭 <i>A. sikkimense</i>	MXG23-49	四川丹巴牦牛谷 Maoniugu, Danba, Sichuan	3 990
尖被百合 <i>Lilium lophophorum</i>	YNNU-19-124	云南香格里拉大雪山 Shangri-La Daxue Mountain, Yunnan	4 354
半荷包紫堇 <i>Corydalis hemidicentra</i>	SYSZ-084	云南德钦白马雪山 Baima Snow Mountain, Deqin, Yunnan	4 513
西南鬼灯檠 <i>Rodgersia sambucifolia</i>	MS-065	云南福贡亚坪 Yaping, Fugong, Yunnan	3 200

野外考察使用手持 GPS 记录采集点的经纬度、海拔和生境信息，为实验室养护提供精确的环境参数。活体采集时，采取以下关键措施以保障移栽成活率：（1）小心挖掘鳞茎或

块根，并保留其原生根际土壤；（2）剪除部分老叶和病叶以减少蒸腾；（3）使用通风保湿的容器运输。抵达实验室后，移栽操作如下：使用腐殖土与原土混合作为栽培基质，并将采集的伴生苔藓覆盖于表面以保湿和模拟原生境。植株置于遮荫处，每周浇水 1~2 次，在低温季节移入温室养护，并定期观察、防治病虫害。

1.3 活体植物在染色体制片上的运用

以成功存活的 6 种植物根尖为材料开展染色体研究，验证该体系可以突破种子萌发的限制，为后续基础研究提供可持续的实验材料。具体方法如下：上午 7:00~10:00 切取长约 1~2 cm 的幼嫩根尖，立即用 0.002 mol·L⁻¹ 8-羟基喹啉与 0.1%秋水仙素（1：1）混合液进行预处理。预处理后的根尖经蒸馏水洗净，用卡诺固定液（无水乙醇：冰乙酸=3：1）于 4℃固定 24 h。固定后的材料经蒸馏水清洗，用预热至 60℃的 1 mol·L⁻¹ HCl 解离。解离完成后，用蒸馏水彻底清洗根尖，以 20%卡宝品红染液于避光条件下染色 24 h。最后，采用常规压片法制片，并于光学显微镜下观察（李懋学和张敦方，1991）。

2 结果与分析

研究通过资源评估-活体保存-技术验证的研究路径，系统评估了横断山区球宿根植物的资源潜力，并成功建立了一套基于活体营养器官的可持续研究体系。主要结果如下。

2.1 引种驯化潜力评估结果

2.1.1 横断山球宿根植物资源构成

本研究共统计了 47 科 164 属 479 个球宿根植物物种，详细记载了物种的营养繁殖器官、生境海拔、在横断山地区的分布点以及经济用途和保护等级等信息（表 4）。从统计结果来看，横断山区蕴藏着丰富多样的球宿根植物资源，经济价值显著，但保护形势严峻。药用价值的物种占比高达 20.6%，显著高于其他用途类型。具有食用价值物种占比为 1.9%，其他经济价值用途的物种占比较低。此外，4.2%的物种同时具备两种以上经济功能，在经济价值上展现出更大的综合开发潜力。但是实验数据收集仅基于已有记载，而且植物的经济价值界定受地域及基础研究是否完善的限制，人为主观因素也会影响界定。实际具备经济价值的物种比例可能被低估，特别是高海拔物种中 23%尚无用途记录，具有巨大的开发价值。

2.1.2 引种潜力综合评估结果

研究从物种经济价值、生态适应性与生境条件 3 个层面对 276 个横断山球宿根植物物种进行量化评分排序。总分排名前 50 的物种中，石蒜科出现频次最高，为 7 次；百合科出现 5 次；天门冬科、天南星科和兰科均出现 4 次；唇形科、葫芦科、薯蓣科和毛茛科出现 3 次。从出现频次来看，横断山区的球宿根植物中石蒜科、百合科表现较为突出。选取总分排名前 10 的物种与后 10 名的物种进行对比分析，前 10 名物种的总分均值是后 10 名物种总分均值的 3.95 倍，两者之间存在显著差距。

对标注了保护等级的植物进行引种栽培时，需要遵守《野生植物保护条例》，向省级林业或农业农村部门申请许可，不得未经审批擅自采集或进行人工繁殖。因此，实际资源开发需要提供合法来源证明和技术方案等材料。此外，尽管实验评估的所有物种与中国外来入侵物种比对后无重合物种，但实际引种仍需实时关注物种在引种地的生长和扩张情况，防范入侵风险避免对本地生态造成压力。

表 4 横断山球宿根植物资源特征（主要科统计）

Table 4 Characteristics of bulbous and perennial plants resources in the Hengduan Mountains
(statistics of major families)

科名 Name of family	物种数目 Number of species	主要经济用途 Main economic use	保护数量 Number of protected items	海拔范围 Altitude range (m)	典型生境 Typical habitat
兰科 Orchidaceae	172	药用 Medicinal use	17	500~4 800	山坡、常绿阔叶林下 Hillsides, and evergreen broad-leaved forests
毛茛科 Ranunculaceae	99	药用 Medicinal use	0	1 350~5 400	山地、草坡 Mountain slopes, and meadows
百合科 Liliaceae	46	药用、食用 Medicinal use, and edible use	8	90~4 700	高山草地、山坡林下 Alpine meadows, and hillside forests
石蒜科 Amaryllidaceae	29	食用、药用 Edible use, and medicinal use	0	1 000~5 400	山坡、草地、林下 Hillsides, meadows, and forests
唇形科 Lamiaceae	14	药用 Medicinal use	0	500~3 800	山坡、草地 Hillsides, and meadows
石竹科 Caryophyllaceae	13	无 None	0	2 000~4 750	高山草甸 Alpine meadows
天南星科 Araceae	10	药用、富含淀粉 Medicinal use, and starch-containing	0	1 100~3 850	林边 Forest edges
虎耳草科 Saxifragaceae	10	药用 Medicinal use	0	1 800~4 600	高山草甸、岩石隙 Alpine meadows, and alpine rock crevices
葫芦科 Cucurbitaceae	10	药用 Medicinal use	0	400~3 000	山坡、林下 Hillsides, and forests

注：由于篇幅限制，479 个物种的完整名录及分布点信息已从正文中移除，可联系作者获取。

Note: Due to space limitations, the complete list of 479 species and their distribution information have been removed from the main text and can be obtained by contacting the corresponding author.

表 5 横断山球宿根植物引种潜力评估结果（前 10 名）

Table 5 The top 10 species of bulbous and perennial plants in the Hengduan Mountains ranked by introduction potential

物种名称 Name of species	生境评级 Grade of habitat	经济用途 Economy use	引种状态 Domestication status	保护等级 Level of protection	得分 Score
野百合 <i>Lilium brownii</i>	A	药用，食用，富含淀粉 Medicinal use, medicinal use, and starch-containing	良好 Successful	无 Unprotected	2.334
云南鼠尾草 <i>Salvia yunnanensis</i>	A	药用 Medicinal use	良好 Successful	无 Unprotected	2.188
淡黄花百合 <i>Lilium sulphureum</i>	A	药用 Medicinal use	良好 Successful	无 Unprotected	2.188
凹叶景天 <i>Sedum emarginatum</i>	A	药用 Medicinal use	良好 Successful	无 Unprotected	2.166
羊齿天门冬 <i>Asparagus filicinus</i>	A	药用 Medicinal use	良好 Successful	无 Unprotected	2.157
保山乌头 <i>Aconitum nagarum</i>	A	药用 Medicinal use	良好 Successful	无 Unprotected	2.116
半夏 <i>Pinellia ternata</i>	A	药用 Medicinal use	良好 Successful	无 Unprotected	2.106
川百合	A	食用	良好	无	2.097

<i>Lilium davidii</i>		Edible use	Successful	Unprotected	
中华栝楼	A	药用	良好	无	2.096
<i>Trichosanthes rosthornii</i>		Medicinal use	Successful	Unprotected	
绶草	A	药用	良好	无	2.088
<i>Spiranthes sinensis</i>		Medicinal use	Successful	Unprotected	

注：完整物种评估得分表可联系作者获取。

Note: The complete evaluation score table in this study can be obtained by contacting the corresponding author.

2.2 活体养护及管理结果

基于资源评估结果，研究成功将筛选出的 6 种球宿根植物从横断山高寒生境迁地栽培至实验室，移栽植株在实验室条件下可存活 1 至 2 年，并且长势较好，可满足细胞学实验需要。实验结果表明，通过环境模拟与养护管理，实现高山球宿根植物的实验室活体保存具有可行性。

存活实验材料 8—10 月为花果期，冬季地上部分枯萎，初春萌芽。植物根系的生长和地上部分的生长有密切的联系，根系的生长高峰期过去后，地上部分的生长高峰期出现。反之，地上部分生长缓慢，则根系的生长高峰期出现。冬季后，温度上升，植物地上部分长势良好，植物地下部分根系生长状况较冬季低温时长势差。在栽培过程中，成功识别并防治了主要害虫马陆。实验中将吡虫啉稀释 1 000 倍之后喷洒在土壤中，每周一次，喷洒 3 次之后得到良好成效，大部分马陆死亡。



A、E. 锡金韭; B、F. 太白韭; C、G. 卵叶韭; D、H. 马陆。

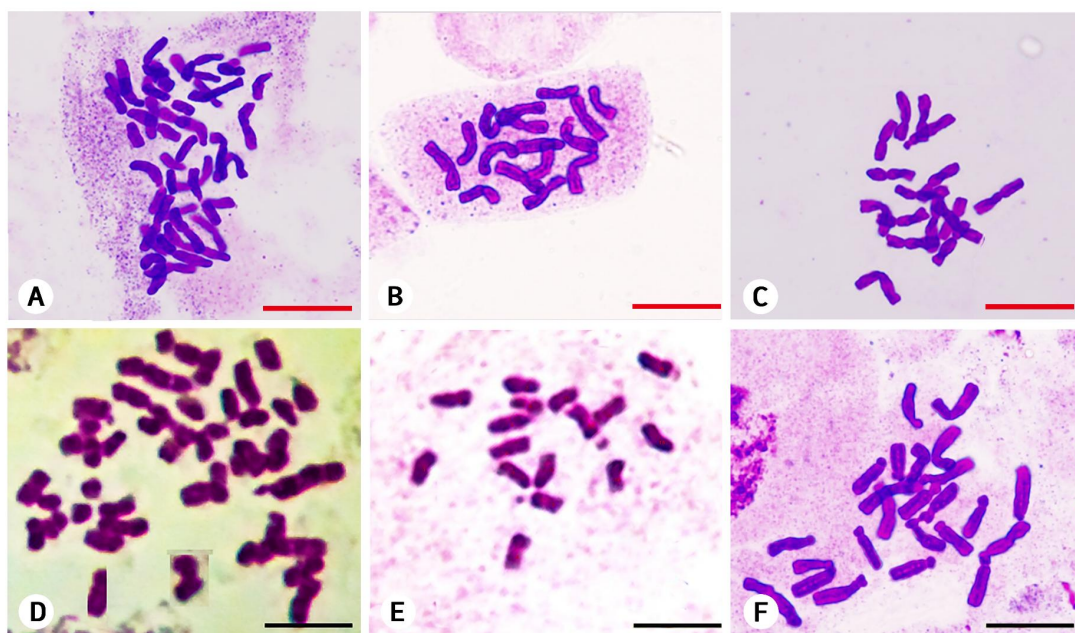
A、E. *Allium sikkimense*; B、F. *A. prattii*; C、G. *A. ovalifolium*; D、H. Millipede.

图 2 葱属活体植株生长状况及栽培过程中出现的马陆

Fig. 2 Growth status of living *Allium* plants and millipede found while cultivating plants

2.3 活体物种细胞学实验结果

本研究利用成功保存的活体材料的营养繁殖器官根尖进行细胞学实验，获得了染色体分散良好、着丝粒清晰的中期染色体图像，为这些物种的核型分析、倍性鉴定等基础研究提供了可靠的数据。实验结果证实，以活体营养器官为材料的研究路径，能够规避高海拔球宿根植物种子深度休眠、萌发率低的技术瓶颈，为建立可持续的研究体系以支持基础研究提供有效解决方案。



A. 锡金韭; B. 卵叶韭; C. 太白韭; D. 西南鬼灯檠; E. 半荷包紫堇; F. 尖被百合。

A. *Allium sikkimense*; B. *A. ovalifolium*; C. *A. prattii*; D. *Rodgersia sambucifolia*; E. *Corydalis hemidicentra*; F. *Lilium lophophorum*。

图 3 6 种球宿根植物的根尖细胞有丝分裂中期染色体形态 (标尺 = 5 μm)

Fig. 3 Somatic chromosome morphology at metaphase in root tip cells of six perennial herbaceous species (scale = 5 μm)

3 讨论

本研究对全球生物多样性热点地区之一的横断山区的高寒球宿根植物资源进行了系统性的清查与评估, 构建了基于活体种质的迁地研究体系, 解决了高山植物研究中材料获取难题和种子萌发瓶颈, 实现了资源基础数据与科学研究的有机结合。研究结果揭示了该区域丰富的球宿根植物多样性及其巨大的经济潜力, 还通过层次分析法 (AHP) 为这些资源的优先保护和可持续利用提供了科学的决策依据。

3.1 横断山区球宿根植物资源的适应机制及利用潜力

横断山区独特的地理和气候条件孕育了丰富的球宿根植物物种群落, 本研究共记录到 47 科 164 属 479 种球宿根植物, 这些物种具备较好的植物资源开发潜力, 也反映了其独特的生态适应机制。高寒环境下, 强紫外线辐射、低温及水分限制促使球宿根植物积累大量次生代谢产物, 这些物质不仅保护植物细胞免受胁迫, 还可能作为调控基因表达和信号传导的重要介质 (Purohit, 2019), 揭示了植物对极端环境的复杂响应机制。发达的地下贮藏器官是球宿根植物适应寒冷季节和环境波动的关键结构, 保障了其脱离原生境后依然保持较强的再生能力和无性繁殖潜力 (Zhang et al., 2021), 这为引种驯化提供了重要生物学基础。然而, 约 23% 的高海拔球宿根植物尚未被充分开发, 反映出当前研究存在物种选择偏差, 忽视了潜在具有生态和经济价值的高海拔物种。深入揭示这些物种的生态功能和适应机制, 对于理解高寒生态系统的演替及其对气候变化的响应具有重要意义 (Kelly & Goulden, 2008; Li & Zhou, 2025)。通过系统的资源调查和功能研究, 能够为高寒球宿根植物的保护优先级排序及其合理利用提供科学依据, 推动区域生态与经济的协调发展。

3.2 AHP 模型在球宿根植物引种潜力评估中的创新应用及展望

本研究创新地采用层次分析法 (AHP) 将生态因子 (如年均温、降水、海拔) 与经济

价值、驯化状态等多维指标整合，构建了科学、客观的引种潜力评价体系。该模型克服了传统基于经验判断的局限，实现了球宿根植物引种潜力的多指标量化排序，明确了优先开发的物种，为后续资源利用与保护提供了清晰的路径。

物种的评估结果显示，石蒜科和百合科在引种潜力排名中表现突出，前10%与后10%物种得分差异达3.95倍，显示出良好的区分度，为横断山球宿根类植物资源的开发利用提供优先级参考。相较于传统的单一物种栽培试验，研究建立的模型将引种决策从基于经验的定性判断转变为基于多指标量化的科学排序，为资源优先序的确定提供了透明、可重复的框架。

然而，AHP模型在权重赋值上仍依赖专家经验，未能充分考虑局部微气候变异和物种内在遗传多样性，对长期适应性的预测能力有限。未来研究可融合机器学习算法与分子生物学数据（如基因组测序、基因表达谱），提升模型的动态调整能力和预测精度，增强对复杂环境下物种适应潜力的把握（Hebelstrup et al., 2023）。这种多学科交叉的评估方法不仅有助于精准筛选适合引种和驯化的物种，还能为高寒地区作物资源创新与气候韧性培育提供理论支持。

3.3 活体研究体系的构建

高寒球宿根植物种子休眠期长、生长周期缓慢等特性，限制了传统依赖种子繁殖的研究与保存方式。为此，本研究创新建立了“野外采集-实验室移栽-营养器官取材”的活体研究体系，成功实现了6种球宿根植物的迁地活体保存，验证了该体系在基础细胞学研究中的可行性，显著提高了实验材料的可获得性，降低了对野生种群的采集压力。该活体体系利用了球宿根植物地下贮藏器官强大的无性繁殖能力，突破了种子萌发难题，为细胞遗传学、基因组学、代谢组学等多层次科学研究提供了稳定物质基础。其不仅是重要的迁地保护策略，也是未来濒危物种种群恢复和人工繁育的关键支撑平台（Grigoriadou et al., 2019; Dhyani et al., 2022）。基于此体系，未来可开展高寒适应基因及调控网络的解析，揭示无性繁殖及生态适应的分子机制；开展活体材料的野外回归试验，验证驯化效果，构建从资源采集、保存到利用的完整保护利用闭环，推动区域生物多样性保护与资源可持续利用。

细胞学作为研究高山植物遗传背景的重要手段，有助于我们揭示其内部适应性机制，为植物的分类鉴定提供依据，此外细胞学研究对于植物育种和种质资源保护也具有指导意义。传统依赖种子萌发的方法常因高山植物种子野外鉴定困难、成熟时间不一致、活力随采集时间快速衰减等问题而受限（Connolly, 2021; Mondoni et al., 2011）。本研究建立的活体体系直接利用营养器官取材，有效规避了上述不确定性，显著提升了实验材料的可获得性并降低了野外采集压力，为球宿根植物资源的长期科学研究与保护提供了新思路。

本研究虽取得了横断山地区球宿根植物的基础资料，建立了活体研究体系，但仍存在不足，一是物种清查受限于野外调查范围和数据完整性，需结合遥感、GIS和DNA条形码等现代技术，深化资源数据库建设；二是AHP模型权重赋值尚存主观因素，未来需融合更多实证数据和先进算法提升评估科学性；三是活体移植规模有限，其在更多物种上的适用性和长期稳定性有待持续跟踪和验证。后续研究将从以下方向展开：完善动态更新的多维度资源数据库，涵盖物种分布、遗传、化学和民族植物学信息；扩大活体种质资源圃建设，制定规范化栽培管理方案，开展长期适应性和物候学研究；跨学科开展基因组学、代谢组学及药理学研究，挖掘高寒植物功能基因和活性成分，推动科学成果转化；结合保护生物学，针对濒危物种制定科学繁育与野外回归策略，实现生物多样性保护与资源利用的良性互动。

参考文献:

- CONNOLLY BM, 2021. Collection age and seed mass influence germination and seedling growth in midwestern White Spruce accessions [J]. *Forest Science*, 67(6): 637-641.
- CUCE M, INCEER H, 2024. Micropropagation and reintroduction of the endemic *Tripleurospermum ziganaense* (Asteraceae) to its natural habitat [J]. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 60(5): 646-658.
- DHYANI A, NAUTIYAL BP, NAUTIYAL MC, 2022. Seedling performance, phenotypic traits and growing media for domestication of *Lilium polyphyllum* [J]. *Plants People Planet*, 4(6): 685-695.
- FUERST D, SHERMEISTER B, MANDEL T, et al., 2022. Decoupling the molecular regulation of perennality and flowering in bulbous barley (*Hordeum bulbosum*) [J]. *BioRxiv*, 11: 468190.
- GE WJ, BU HY, WANG XJ, et al., 2020. Inter- and intra-specific difference in the effect of elevation and seed mass on germinability of eight *Allium* species [J]. *Global Ecology and Conservation*, 22: e01016.
- GRIGORIADOU K, KRIGAS N, SARROPOULOU V et al., 2019. *In vitro* propagation of medicinal and aromatic plants: the case of selected Greek species with conservation priority [J]. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 55(6): 635-646.
- HEBELSTRUP K, AZARIADIS A, CORDES A, et al., 2023. Prehistoric plant exploitation and domestication: an inspiration for the science of de novo domestication in present times [J]. *Plants*, 12(12): 2310.
- HÖRANDL E, 2023. Geographical parthenogenesis in alpine and arctic plants [J]. *Plants*, 12(4): 844.
- KELLY AE, GOULDEN ML, 2008. Rapid shifts in plant distribution with recent climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(33):11823-11826.
- KÖRNER C, 2023. Concepts in alpine plant ecology [J]. *Plants*, 12(14): 2666.
- KUMAR K, THAKUR L, THAKUR M, et al., 2024. *In vitro* polyploidy induction in ginger (*Zingiber officinale* Rosc.) cv. Himgiri: Morpho-physiological, biochemical, and molecular evaluation of Regenerants [J]. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 60(5): 693-710.
- LI BY, 1987. On the boundaries of the Hengduan mountains [J]. *Mountain Research*, 5(2): 74-82. [李炳元, 1987. 横断山脉范围探讨 [J]. *山地研究*, 5(2): 74-82.]
- LI K, REN HH, ZHAO W, et al., 2023. Factors affecting bulblet multiplication in bulbous plants [J]. *Scientia Horticulture*, 312: 111837.
- LI MX, ZHANG XF, 1991. Techniques for plant chromosome research [M]. Harbin: Northeast Forestry University Press: 15-30. [李懋学, 张敦方, 1991. 植物染色体研究技术 [M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社: 15-30.]
- LI XP, ZHOU GY, 2025. Spatiotemporal dynamics and conservation status of medicinal Aconitum species on the Qinghai-Tibet Plateau under climate change [J]. *Global Ecology and Conservation*, 64: e03937.
- MÄKINEN H, NÖJD P, KAHLE HP, et al., 2002. Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe [J]. *Forest Ecology and Management*, 171(3): 243-259.

- MARUO F, IMURA S, 2020. Restriction of sexual reproduction in the moss *Racomitrium lanuginosum* along an elevational gradient [J]. *Ecology and Evolution*, 10(18): 10066-10075.
- MISHRA P, ROGGEN A, LJUNG K, et al, 2024. Adventitious rooting in response to long-term cold: a possible mechanism of clonal growth in alpine perennials [J]. *Frontiers in Plant Science*, 15: 1352830.
- MONDONI A, PROBERT RJ, ROSSI G, et al., 2011. Seeds of alpine plants are short lived: implications for long-term conservation [J]. *Annals of Botany*, 107(1): 171-179.
- PUROHIT AN, 2019. Biodiversity in mountain medicinal plants and possible impacts of climatic change [M]// *Mountain Biodiversity*. London: Routledge: 267-273.
- REN ZM, XIA YP, ZHANG D, et al., 2017. Cytological analysis of the bulblet initiation and development in *Lycoris* species [J]. *Scientia Horticulturae*, 218: 72-79.
- SAATY TL, VARGAS L, 2012. Models, methods, concepts & application of the analytic hierarchy process [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1-13.
- TAKAHASHI K, OKUHARA I, TOKUMITSU Y, et al., 2011. Responses to climate by tree-ring widths and maximum latewood densities of two *Abies* species at upper and lower altitudinal distribution limits in central Japan [J]. *Trees*, 25(4): 745-753.
- WANG WC, WU SG, LANG KY, et al., 1993. Vascular plants of the Hengduan Mountains area: Vol.1 [M]. Beijing: Science Press. [王文采, 武素功, 郎楷永, 等, 1993. 横断山区维管植物: 上册 [M]. 北京: 科学出版社.]
- WANG WC, WU SG, LANG KY, et al., 1994. Vascular plants of the Hengduan Mountains area: Vol.2 [M]. Beijing: Science Press. [王文采, 武素功, 郎楷永, 等, 1994. 横断山区维管植物: 下册 [M]. 北京: 科学出版社.]
- WANG XJ, ZHOU XH, ZHANG MT, et al., 2024. Climate and plant traits alter the relationship between seed dispersal and seed dormancy in alpine environment [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 219: 105660.
- ZHANG TW, CHEN YY, YANG XR, et al., 2024. Indirect effects of warming via phenology on reproductive success of alpine plants [J]. *Journal of Ecology*, 113(1): 180-193.
- ZHANG YF, CHEN T, YUN HB, et al., 2021. Below-ground growth of alpine plants, not above-ground growth, is linked to the extent of its carbon storage [J]. *Plants*, 10(12): 2680.
- ZHANG YG, 1998. Several issues concerning vertical climate of the Hengduan Mountains [J]. *Resources Science*, 20(3): 14-21. [张谊光, 1998. 横断山区垂直气候的几个问题 [J]. 资源科学, 20(3): 14-21.]
- ZHANG YP, FAN G, TOIVAINEN T, et al., 2023. Warmer temperature during asexual reproduction induce methylome, transcriptomic, and lasting phenotypic changes in *Fragaria vesca* ecotypes [J]. *Horticulture Research*, 10(9): 156.