



• CITES 50周年: 科学、政策与国际行动的融合专题 •

不同生境下甘松群落结构、生长特征及潜在资源量估算

王文琪¹, 杨永川^{1*}, 昌维¹, 胡四维¹, 牟文博¹, 曾岩^{2,3}

1. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国科学院动物研究所, 北京 100101; 3. 中华人民共和国濒危物种科学委员会, 北京 100101

摘要: 甘松(*Nardostachys jatamansi*)是青藏高原-喜马拉雅地区特有的珍贵药用植物。近年来, 甘松的需求量和国际贸易量持续增长, 因其资源完全依赖野外采集, 过度采挖、生境破坏和非法贸易等因素使其面临自然种群资源枯竭的风险。然而, 国内甘松资源的储量尚缺乏系统评估, 致使区域内甘松非致危性判定(Non-Detriment Finding, NDF)的核心数据不足, 从而影响国际贸易的出口管理。为此, 本研究选取四川省阿坝州红原县这一甘松主要产区, 在野外调查的基础上, 分析了中生型与湿润型两种生境中甘松的群落结构、生长特征及生物量, 并结合物种分布模型与资源量估算模型, 评估了甘松在该区域的潜在适生区与资源储量。结果显示: 两类生境共记录植物108种, 隶属于77属29科, 群落组成与多样性受土壤总磷含量影响而差异显著, 其中中生型生境物种多样性更高, 甘松根长更长, 且甘松黄酮含量更高。物种分布模型模拟结果表明, 其潜在适生区热点集中于麦洼乡, 资源量模型估算显示红原县拥有16,028.26 t的甘松潜在资源量, 呈现北高南低的资源分布格局, 年采挖量约占总潜在资源量的3.12%。本研究通过系统调查与模型模拟, 揭示了甘松主产区的资源现状、空间分布特征与可持续管理的挑战, 同时为高原地区药用植物的就地保护与可持续采集的精准管理提供数据依据, 为《濒危野生动植物种国际贸易公约》(CITES)的贸易非致危性判定, 及相关国家的甘松国际贸易与管理提供了方法学参考。

关键词: 甘松; 药用植物; 群落结构; 适生区模拟; CITES非致危性判定

王文琪, 杨永川, 昌维, 胡四维, 牟文博, 曾岩 (2025) 不同生境下甘松群落结构、生长特征及潜在资源量估算. 生物多样性, 33, 25382. doi: 10.17520/biods.2025382; cstr: 32101.14.biods.2025382.

Wang WQ, Yang YC, Chang W, Hu SW, Mu WB, Zeng Y (2025) Community structure, growth characteristics, and potential resource assessment of *Nardostachys jatamansi* in varied habitats. Biodiversity Science, 33, 25382. doi: 10.17520/biods.2025382; cstr: 32101.14.biods.2025382.

Community structure, growth characteristics, and potential resource assessment of *Nardostachys jatamansi* in varied habitats

Wenqi Wang¹, Yongchuan Yang^{1*}, Wei Chang¹, Siwei Hu¹, Wenbo Mu¹, Yan Zeng^{2,3}

1 Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

2 Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Endangered Species Scientific Commission, P. R. China, Beijing 100101, China

ABSTRACT

Aims: *Nardostachys jatamansi* is a precious medicinal plant endemic to the Qinghai-Tibet Plateau-Himalayan region, with growing demand and increasing international trade in recent years. As its supply currently relies entirely on wild harvesting, factors such as over-harvesting, habitat destruction, and illegal trade have placed it at risk of natural population depletion. However, there is still a lack of systematic assessment of the reserves of domestic *N. jatamansi* resources. This has led to insufficient core data for its Non-Detriment Finding (NDF) within the region, which in turn affects the export regulation in international trade. This study aims to support NDF and scientific decision-making for

收稿日期 Received: 2025-09-29; 接受日期 Accepted: 2025-12-23

基金项目: 质兰基金会资助项目(H20250432)和中国科学院战略性先导科技专项(No. XDA26010102) Supported by Zhilan Foundation Program (H20250432) and Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No. XDA26010102)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: ycyang@cqu.edu.cn

international trade under the CITES framework, provide a case study on sustainable use for the Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework, and offer scientific references for the sustainable utilization of other similar plateau herbaceous medicinal plants.

Methods: This study selected Hongyuan County in the Aba Prefecture of Sichuan Province, a major production area of *N. jatamansi*, as the research site. Based on field investigations, the community structure, growth characteristics, and biomass of *N. jatamansi* in both mesic and humid habitats were analyzed. By integrating species distribution models and resource estimation models, the potential suitable habitats and resource reserves of *N. jatamansi* in the region were assessed.

Results: A total of 108 plant species, belonging to 77 genera and 29 families, were recorded across the two habitat types. Community composition and diversity showed significant differences influenced by soil total phosphorus content. The mesic habitat exhibited higher species diversity, longer root lengths of *N. jatamansi*, and higher levels of nardosinone. Species distribution modeling results indicated that hotspots of potential suitable habitats were concentrated in Maiwa Township. Resource estimation modeling revealed that Hongyuan County possesses 16,028.26 tons of potential resources of *N. jatamansi*, showing a distribution pattern of being higher in the north and lower in the south. The annual harvesting volume accounts for approximately 3.12% of the total potential resources.

Conclusions: Through systematic investigation and model simulation, this study reveals the current resource status, spatial distribution characteristics, and challenges of sustainable management in the main production areas of *N. jatamansi*. At the same time, it provides data support for the *in-situ* conservation and precise management of sustainable harvesting of medicinal plants in plateau regions. Additionally, it offers methodological references for making NDF under the CITES and for the international trade and management of *N. jatamansi* in relevant countries.

Key words: *Nardostachys jatamansi*; medicinal plant; community structure; habitat simulation; Non-Detriment Findings of CITES

药用植物在人类健康和经济发展中扮演着关键角色, 具有不可替代的药用、文化、生态和经济价值(Hamilton, 2004)。在许多地区, 药用植物的采集为当地居民带来了较为可观的收入, 是重要的生计来源之一(Olsen & Larsen, 2003; Chauhan et al, 2018; Astutik et al, 2019; Chauhan et al, 2021)。然而, 药用植物资源的非持续性采集普遍存在, 许多地区的野生种群正在以不可逆转的速度下降, 其中甘松(*Nardostachys jatamansi*)便是此类社区依赖型高原药用植物, 但其资源现状并不明晰(Pitman & Jørgensen, 2002; Özüpek et al, 2023)。甘松是忍冬科甘松属(*Nardostachys*)的多年生草本植物。分布于中国的喜马拉雅高山地区以及不丹、尼泊尔、印度等国家, 海拔范围为2,200–5,000 m (Ghimire et al, 2005; Chauhan et al, 2011; Rehman & Ahmad, 2019; 于素玲等, 2021)。甘松在传统医学体系(如中医、藏医、阿育吠陀)中应用广泛且具有重要地位, 其根茎常用于治疗消化、神经及皮肤类疾病(傅维康, 1993; 国家药典委员会, 2020; Wang et al, 2021)。同时, 甘松还应用于宗教祭祀、芳香制品及精油生产, 兼具文化价值与经济价值(Dhiman & Bhattacharya, 2020; 张雄等, 2024)。因其用途广泛, 甘松在喜马拉雅山区拥有悠久的采集与利用历史, 并在该地区产业结

构单一、环境条件严酷、交通不便的背景下, 已成为一种与当地社区生计密切相关的重要商业采集物种(Farooquee & Saxena, 1996; Rai et al, 2000; Mulliken & Crofton, 2008)。

甘松作为药用资源完全依赖野外采集, 受过度采挖、气候变化、栖息地退化及自身繁殖特性(周期长、萌发率低)的影响而减少(Nautiyal et al, 2003; Chauhan et al, 2021)。2021年甘松被纳入我国《国家重点保护野生植物名录》二级保护植物, 在我国采集需经审批并办理采集证(<https://www.forestry.gov.cn/search/300025>)。甘松印度种群的下降是导致该物种被世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)评估为受威胁物种的主要因素, 但其种群记录并不完整, 资源量尚未得到系统估算与论证(Ved et al, 2015; Chauhan, 2021)。甘松自1997年起被列入《濒危野生动植物种国际贸易公约》(CITES)的附录II。为证明其国际贸易的可持续性, 尼泊尔与不丹均向CITES秘书处提交了甘松储量估算、国际贸易非致危性判定报告或大宗贸易回顾报告, 以支持甘松配额的申请(Department of Forests and Soil Conservation Forestry Complex, 2019; Department of Plant Resources, 2025; Wangchuk et al, 2025)。我国甘松的自然种群集中分

布在四川、甘肃、云南、西藏和青海, 主要生境包括灌丛、草地、沼泽草甸(于素玲等, 2021; 杨祎辰等, 2022)。鉴于印度、尼泊尔和不丹境内均有甘松资源呈下降趋势的报道(Chauhan et al, 2021), 未来国际市场可能增加对中国甘松的进口需求。然而, 国内尚无对该物种资源量的可靠估计, 这在一定程度上限制了CITES在国际贸易中对甘松的出口管理^①。

四川省阿坝州红原县是甘松的重要产区, 当地所产的根茎中甘松新酮、挥发油等药用活性成分含量较高, 该地区采挖历史悠久且采挖活动普遍, 每年甘松贸易量约500 t (李艳忙等, 2015; 买吾兰江 买提努尔等, 2017; 李雨繁等, 2023)。甘松作为二级保护和公约附录II植物, 在判定采集和贸易不危害其野生种群生存的前提下, 可以通过采集许可支持野生资源的可持续利用。然而, 发放采集许可以及进行非致危性判定的科学前提均依赖于对物种资源量的估算。本研究选择红原县作为研究区域, 调查甘松在不同生境下的群落结构、种群生长特征及生物量差异, 结合物种分布模型, 估算其地区资源量, 支持在CITES框架下开展非致危性判定和国际贸易科学决策, 为《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》中关于野生物种的管理及可持续利用的目标提供参考案例(雷光春, 2025), 并为其他类似高原草本药用植物的可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

红原县位于阿坝藏族羌族自治州中部(101°51′-103°22′ E, 31°51′-33°33′ N), 幅员面积8,439.94 km²。其地貌属川西北丘状高原, 海拔范围为3,183-4,900 m (图1)。县境气候为大陆性高原寒温带季风气候, 具有长冬无夏、春秋短促的季节特点, 气候偏冷, 年均气温仅1.4°C, 极端最低温达-36°C, 极端最高温26°C; 降水多集中在5-10月, 年平均降水量为753 mm; 太阳辐射强, 年日照时长高达2,417 h (<https://www.hongyuan.gov.cn/hyxrmzf/c100129/201909/55379068be18404087a1b56b9cc930cf.shtml>)。土壤类型主要为高山草甸土、亚高山草甸土以及草甸潮土(唐学芳等, 2013; 王敏等, 2015)。土地覆盖类型以高寒草地和亚高山草地为主, 天然草地面积广阔, 面积约7,400 km², 约占全县总面积的88% (邓榆川等, 2023; 孙剑等, 2023)。

1.2 样地布设及群落调查

2020年8-10月, 研究团队在红原县开展了预调查, 内容包括野外种群调查与当地社区访谈。野外调查时主要在山坡上或沼泽地、河漫滩中的灌丛及草地中发现集中分布的甘松种群; 社会访谈发现, 精油制造商以及中药材收购商均对生长在山坡上的甘松给予更高收购意愿与价格, 致使红原县当地居民存在明显的甘松采集偏好。当地藏族牧民把在

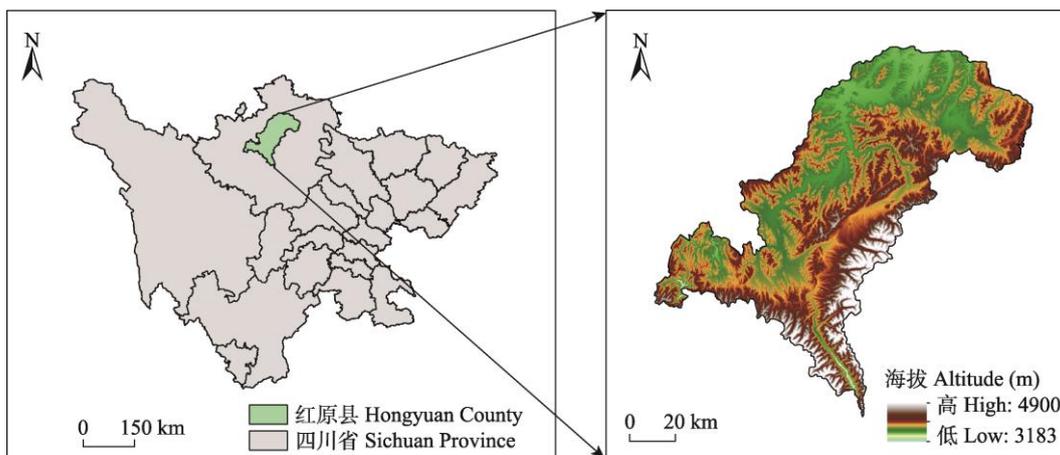


图1 四川省阿坝藏族羌族自治州红原县地理位置及高程图

Fig. 1 Location and altitude map of Hongyuan County, Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Sichuan Province

① 金乾 (2019) 藏药植物甘松的生物学研究. 硕士学位论文, 西南民族大学, 成都.

山坡上生长的甘松称为“Huauvor”, 在“沟里”(沼泽草甸和河漫滩)生长的甘松称为“Lauvor”, 二者可从外型上显著区分开。我们通过踏查对应生境, 发现其主要差异在于土壤湿度, 因此, 本研究以生境的地形及土壤湿度为划分依据, 将甘松的生境类型分为中生型和湿润型两类(表1)。

2021年6月, 在预调查的甘松种群分布点中, 以3 km为最小稀疏距离, 考虑海拔、坡度、坡向、生境类型等因素, 最终选择12处样地, 开展甘松的群落结构、生长特征及生物量调查, 通过手持GPS记录各样地的经纬度、海拔基础信息, 结合地形(坡地/山谷)及手持土壤温湿度仪判断生境类型(表1)。在各样地100 m × 100 m的区域内设置3条1 m × 100 m、能代表本样地内甘松密度分布情况的样带, 各样带间保持10 m以上的间距, 记录样带上每个1 m × 1 m小样方中甘松的株数、平均高度、盖度信息(图2)。每条样带上选取可以代表该样带甘松平均生长状况的1 m × 1 m小样方进行群落调查, 记录样方内甘松及其他物种的物种名、盖度、多度与高度等基本信息。共计完成36条样带中3,600个小样方的甘松密度调查以及36个小样方的群落调查。

1.3 样品采集与及甘松新酮含量测定

群落调查结束后采集每个小样方中的甘松全株及其余物种的地上部分带回实验室, 甘松样品进行实际株数的计数, 并称量鲜重, 室内阴干至恒重, 称量得到甘松地上、地下、全株生物量干重; 其余

各物种地上部分在105°C的烘箱中杀青15 min, 再于85°C下继续烘干至恒重, 得到地上生物量干重。选取根冠比、鲜干比、根长作为量化甘松生长特征的指标。其中, 根冠比是植物地下部分(根系)的生物量与地上部分(茎、叶、花、果等)生物量的比值, 本研究中使用甘松地下部分干重与地上部分干重的比值来表示(楼科尔等, 2024)。按照《中华人民共和国药典》(2020版), 利用高效液相色谱法测定甘松新酮的含量。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 多样性指数

选用物种丰富度指数、Shannon-Wiener指数、Pielou均匀度指数来表示植物群落的α多样性, 同时通过地上生物量计算群落中各物种的相对重要值(柏文富等, 2021; 唐思琪等, 2023), 计算公式参考《数量生态学》(张金屯, 2018)。在软件Exce1 2019中进行多样性指数的计算, 在软件Origin 2022中进行绘图, 在SPSS 27.0.1中进行不同生境下各指标的显著性分析。

物种丰富度指数(S):

$$S = \text{样方内物种数} \quad (1)$$

Shannon-Wiener指数(H'):

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

式中, P_i 指第i个物种的相对重要值, 为物种i的地上生物量与该样方总地上生物量的比值, 计算方法参考朱桂丽等(2017)的有关研究。

表1 四川省红原县甘松野外调查点位信息表

Table 1 Field survey data sheet for *Nardostachys jatamansi* in Hongyuan County, Sichuan Province

样地编号 Sample plot number	经度 Longitude (°E)	纬度 Latitude (°N)	海拔 Altitude (m)	地形 Topography	土壤湿度 Soil water content (%)	生境类型 Habitat type
HY-1	103.25	32.93	3,750	山坡坡地 Hillside	32.90 ± 2.34	中生 Mesic
HY-2	102.60	33.09	3,539	山坡坡地 Hillside	26.93 ± 2.22	中生 Mesic
HY-3	102.61	33.00	3,487	山坡坡地 Hillside	23.37 ± 3.32	中生 Mesic
HY-4	102.96	33.08	3,721	山坡坡地 Hillside	35.9 ± 7.04	中生 Mesic
HY-5	102.31	32.66	3,495	山谷洼地 Valley bottom	39.03 ± 4.52	湿润 Humid
HY-6	102.61	32.75	3,621	山坡坡地 Hillside	25.23 ± 4.24	中生 Mesic
HY-7	102.64	32.68	3,814	山坡坡地 Hillside	26.13 ± 3.54	中生 Mesic
HY-8	102.46	32.95	3,685	河漫滩 Floodplain	50.43 ± 4.33	湿润 Humid
HY-9	102.61	32.87	3,495	山谷洼地 Valley bottom	46.40 ± 8.19	湿润 Humid
HY-10	102.61	33.03	3,481	河漫滩 Floodplain	55.63 ± 3.99	湿润 Humid
HY-11	102.23	32.39	3,637	河漫滩 Floodplain	48.03 ± 8.02	湿润 Humid
HY-12	102.08	32.50	3,482	河漫滩 Floodplain	50.46 ± 4.04	湿润 Humid

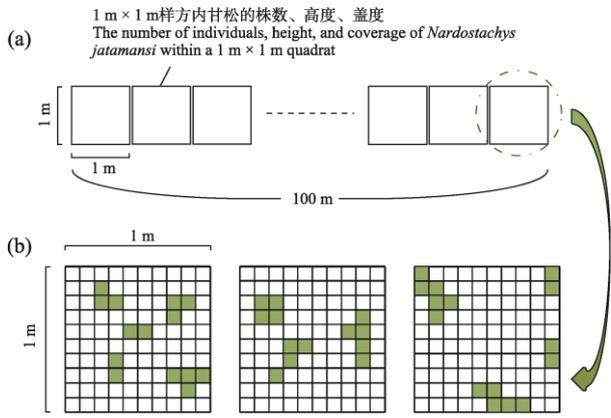


图2 甘松群落的样带调查(a)及单个样方中甘松常见分布(b)示意图。绿色格子代表有甘松, 每格对应1%盖度。
Fig. 2 Schematic diagram of transect survey of *Nardostachys jatamansi* community (a) and its common distribution pattern within a single sample plot (b). Green grids indicate the presence of *N. jatamansi*, with each grid representing 1% coverage.

Pielou均匀度指数(J):

$$J = \frac{H'}{\ln S} \quad (3)$$

1.4.2 不同生境下群落物种组成及结构差异分析

基于物种相对重要值数据, 进行除趋势对应分析(DCA), 根据排序轴的最大值选择适宜的排序方法。DCA排序结果显示, 前4个轴中的最大值小于3, 故选择冗余分析(RDA)排序方法, 探究不同生境下环境变量对群落物种组成及结构差异的影响(刘咏梅等, 2024)。根据已有高原草原生态系统的相关研究(王建林等, 2014; 张锦涛等, 2023; Wang et al, 2024), 整合影响植物物种组成的相关因素, 初步筛选出地理、气候和土壤3大类的10种环境变量, 分别为海拔(altitude)、年均温(bio1)、最冷月最低温(bio6)、年降水量(bio12)、最干月降水量(bio14)、太阳辐射、土壤类型、土壤水分(SM)、土壤有机质(SOM)、土壤总磷(TP)(数据来源见附录1)。结合方差膨胀因子值和置换检验得出各环境变量在RDA模型中的共线性和显著性, 剔除共线性大(VIF > 10)且无显著影响($P > 0.05$)的冗余环境变量。最终筛选出年降水量、最干月降水量、土壤水分、土壤有机质和土壤全磷5个对甘松野外群落组成及结构存在显著影响的环境变量进行RDA排序, 并利用方差分解, 判定不同类型的环境变量对群落格局的影响及其交互作用(郑东升和刘琪璟, 2023)。该部分利用R 4.3.3中的vegan v2.6-8程序包实现。

1.4.3 甘松潜在分布区模拟

以四川省为建模区, 基于MaxEnt模型(最大熵模型)对甘松自然种群进行潜在分布区模拟(Phillips et al, 2006)。物种分布数据源于文献检索(Web of Science, <http://www.webofknowledge.com>; 中国知网, <http://www.cnki.net>)、线上标本数据库(中国数字植物标本馆, <https://www.cvh.ac.cn>; 教学标本资源共享平台, <http://mnh.scu.edu.cn/>)、物种分布数据库(全球生物多样性信息网络, <https://www.gbif.org>)及野外调查。在全国范围内, 从相关文献中筛选出70个有效经纬度数据, 各数据库中提取99个有效经纬度数据, 其中, 位于四川省内的甘松分布数据点共计76个。本团队在四川省野外调查中共获取甘松分布点148个, 其中红原县57个。最终, 共收集到四川省甘松分布点位224个(附录6)。随后, 因野外调查时已确认该物种仅分布于草地和灌丛生境, 因此剔除了文献和数据库中落在其他生境类型上的分布点。为避免空间采样偏差和过度拟合造成影响, 将多来源获得的甘松分布点数据在不同空间尺度(3 km、5 km、10 km)上进行稀疏处理以用于初步建模(Aiello-Lammens et al, 2015)。

环境数据包括地理地形数据、生物气候数据和土壤数据。此外, 由于研究过程中确定了研究对象偏好草地和灌丛生境, 故在环境数据中加入土地覆盖类型数据。共30层环境数据, 代码及来源见附录1。将稀疏处理后的分布点数据(其中75%为训练集, 25%为预测集)与30层环境数据导入MaxEnt建模软件, 在特征组合(feature combination, FC)与正则化参数(regularization multiplier, RM)默认设置(FC = LQPH, RM = 1)下进行四川省境内甘松自然种群潜在分布区的初步建模。结合10次模拟结果后平均模型的AUC和 R 指标, 本研究最终选择5 km稀疏处理后的103个分布点数据用于正式建模(附录2)。模型结果中还包括所有环境变量的平均贡献度值和平均重要度值。采用Pearson相关性检验对所选择的环境变量进行筛选, 剔除由Jack-knife检验出的对建模贡献度和重要度均小于0.5%和Pearson相关系数大于0.8的环境变量(赵佳芮等, 2025)。最终选取土地覆盖类型、海拔、坡度、坡向、太阳辐射、bio1、bio2、bio3、bio4、bio6、bio7、bio12、土壤类型、土壤水分和土壤有机质共15个环境变量用于模型的正式

构建。

将上述筛选得到的103个分布点数据和15个环境数据作为模型输入数据,完成90种不同FC和RM的参数组合下的四川省甘松潜在分布区的模拟(Aarts et al, 2012)。据AIC准则、高AUC值和低遗漏率,筛选出的最优FC和RM设置分别为: $FC = LQ$, $RM = 1$ (附录3)。优化的以四川省为建模区的甘松自然种群潜在分布区模型的10次重复建模模拟平均AUC = 0.968 ± 0.004 。随后,依托ArcGIS重分类技术完成甘松自然种群低、中、高分布概率的划分,对应的概率范围依次为[0, 0.5)、[0.5, 0.7)和[0.7, 1),将中适生区和高适生区视为甘松的潜在适生区。该部分中的适生区模拟使用MaxEnt 3.4.4,其中模型的部分优化步骤借助R 4.3.3中的sp Thin v0.2.0、ENMeval v2.0.5程序包。

1.4.4 甘松潜在资源量模拟

已有研究调查发现,甘松自然种群多呈丛生片状分布,空间上呈现集群分布特征。本研究利用样带上甘松的株数、高度、盖度信息,以及代表性样方内甘松的生物量信息,推算得出1 m × 100 m样带上甘松生物量信息,计算公式如下:

$$Mass_{(linePi)} = Mass_{(plot)} \times \frac{NI_{(linePi)}}{NI_{(plot)}} \times \frac{H_{(linePi)}}{H_{(plot)}} \times \frac{C_{(linePi)}}{C_{(plot)}} \times CI \quad (4)$$

式(4)中, $Mass_{(linePi)}$ 为1 m × 100 m样带上第*i*个样方甘松的干生物量(g/m^2), $Mass_{(plot)}$ 为对应群落代表性样方中甘松的干生物量(g/m^2), NI 为株数, H 为平均高度, C 为盖度, CI 为株数的校正指数(定义为代表性样方中甘松室内准确株数与野外调查株数的比值)。由于甘松属丛生型草本植物,多个地上叶簇或抽生茎往往来源于同一地下根茎系统,仅依据野外可见的地上部分数量容易高估个体数,因此需要通过 CI 对株数进行校正,以提高密度和生物量估计的准确性。

完成样带生物量计算后,结合前期适生区模拟筛选出的环境变量(去掉土地覆盖类型)进行全子集回归,构建最优的多元线性回归方程(柴婷婷等, 2019)。在构建方程过程中,构建全子集回归模型,以检验所有可能的变量组合模型(Kabacoff, 2015),同时综合考虑模型的总体解释度、所选环境变量间

的共线性问题,以及各环境变量在多元线性回归模型中的显著性与相对重要度权重,筛选出最佳模型变量组合用于构建回归方程。

$$mass = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (5)$$

$$MASS = mass \times R \quad (6)$$

式(5)中, $mass$ 为1 m × 100 m样带上甘松单位面积干生物量(g/m^2), x_1, x_2, \dots, x_n 为筛选出来的环境变量, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 为对应的拟合回归系数, β_0 为拟合的截距。为计算红原县甘松自然资源量,运用ArcGIS中的栅格计算器结合回归方程公式对各栅格内甘松生物量进行估算。同时,基于前期潜在分布区模拟结果,在潜在适生区(中适生区与高适生区)的甘松的分布概率(R)作为权重值纳入资源量计算中(式6), $MASS$ 代表空间栅格内甘松的自然资源量(t/km^2)。最终选取海拔、年均温、等温性,最冷月最低温、气温年较差、年降水量、坡向和土壤水分8个环境变量构建多元线性回归方程模型(附录4)。甘松潜在资源量的计算和绘图在ArcGIS 10.8.1中进行,通过R 4.3.3中的leaps v3.2程序包构建全子集回归模型。

2 结果

2.1 不同生境下甘松群落组成与结构特征

随本研究调查样方数量增加,物种累积曲线变化趋势愈来愈缓,曲线斜率愈来愈小,可收敛至0,表明本研究的抽样样方能较为全面地反映出当地甘松自然种群生境内群落的物种组成(李巧, 2011)(附录5)。红原县36个甘松自然群落样方中共记录到108种植物,隶属29科77属,出现频率前三位的物种为甘松、嵩草(*Carex myosuroides*)和早熟禾(*Poa annua*),出现频率前20位的植物中有17种具有药用价值(表2)。其中,菊科、毛茛科、龙胆科和蔷薇科包含物种数最多,分别有15种、11种、9种和9种;在植物属水平上,包含物种数较多的分别为:风毛菊属(*Saussurea*),有6种;龙胆属(*Gentiana*)、棘豆属(*Oxytropis*)和马先蒿属(*Pedicularis*),均含有5种;银莲花属(*Anemone*)有4种。

湿润型生境中共出现25科55属65种植物,其中,莎草科的嵩草以及禾本科的早熟禾和发草(*Deschampsia cespitosa*)为主要伴生种;中生型生境中共出现27科66属89种植物,优势种为莎草科的嵩草以及蓼科的珠芽蓼(*Bistorta vivipara*)等。在两类

生境中, 群落的物种丰富度指数、Shannon多样性指数以及Pielou均匀度指数均有显著差异(图3), 中生型生境中各指数显著高于湿润型生境。

RDA排序分析结果显示, 5个环境因子的解释度达32.09%, 前两轴的解释度分别为17.86%和10.86% (图4a)。与第一排序轴呈正相关的环境因子仅土壤含水量, 即沿第一排序轴从左到右年降水量、土壤总磷、土壤有机质、最干月降水量降低, 土壤含水量增加。与第二轴呈正相关的是年降水量、

土壤总磷、土壤有机质、土壤含水量, 仅最干月降水量呈负相关, 即沿第二排序轴从下至上, 年降水量、土壤总磷、土壤有机质、土壤含水量增加, 最干月降水量降低。代表土壤总磷的箭头最长, 说明土壤磷含量可能是影响野外甘松群落结构的最重要因素。其中土壤类环境因子的解释部分为17%, 气候类环境因子的解释部分为9%, 共同解释部分为6%, 即两种类型的环境因子之间存在一定的交互作用(图4b)。

表2 甘松自然群落调查中出现频率前20位的物种

Table 2 Top 20 most frequently encountered species in natural *Nardostachys jatamansi* communities

物种 Species	频次 Count	频率 Frequency (%)	是否药用 Medicinal/Non-medicinal
甘松 <i>Nardostachys jatamansi</i>	36	3.85	是 Medicinal
嵩草 <i>Carex myosuroides</i>	36	3.85	否 Non-medicinal
早熟禾 <i>Poa annua</i>	34	3.64	是 Medicinal
委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>	32	3.42	是 Medicinal
条叶银莲花 <i>Anemone coelestina</i> var. <i>linearis</i>	30	3.21	是 Medicinal
喜湿龙胆 <i>Gentiana helophila</i>	29	3.10	否 Non-medicinal
老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i>	27	2.89	是 Medicinal
川西风毛菊 <i>Saussurea dzeurensis</i>	26	2.78	是 Medicinal
狼毒 <i>Stellera chamaejasme</i>	25	2.67	是 Medicinal
卵萼花锚 <i>Halenia elliptica</i>	25	2.67	是 Medicinal
高原唐松草 <i>Thalictrum cultratum</i>	23	2.46	是 Medicinal
矮金莲花 <i>Trollius farreri</i>	22	2.35	是 Medicinal
珠芽蓼 <i>Bistorta vivipara</i>	22	2.35	是 Medicinal
草玉梅 <i>Anemone rivularis</i>	19	2.03	是 Medicinal
高原毛茛 <i>Ranunculus tanguticus</i>	19	2.03	是 Medicinal
深红龙胆 <i>Gentiana rubicunda</i>	18	1.93	是 Medicinal
火绒草 <i>Leontopodium leontopodioides</i>	17	1.82	是 Medicinal
米口袋 <i>Gueldenstaedtia verna</i>	16	1.71	是 Medicinal
羊茅 <i>Festuca ovina</i>	16	1.71	否 Non-medicinal
藜草 <i>Phalaris arundinacea</i>	16	1.71	是 Medicinal

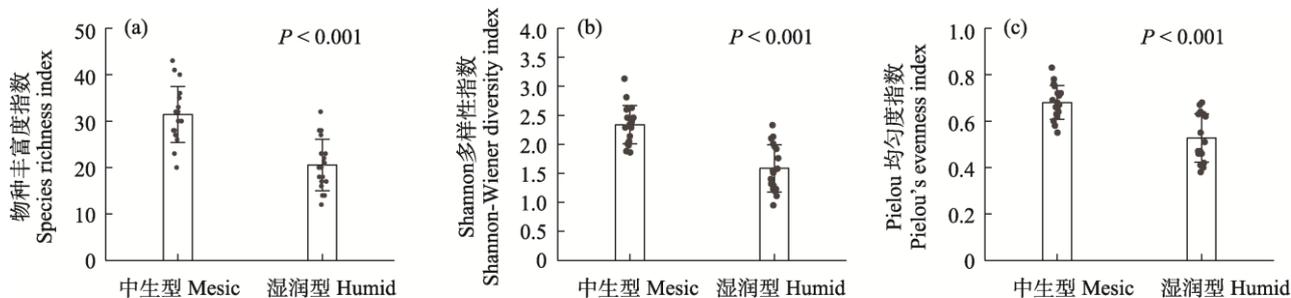


图3 不同生境下的甘松群落多样性特征。P < 0.001表示差异显著。

Fig. 3 Diversity characteristics of *Nardostachys jatamansi* communities across varied habitats. A P-value of < 0.001 indicates that the difference was statistically significant.

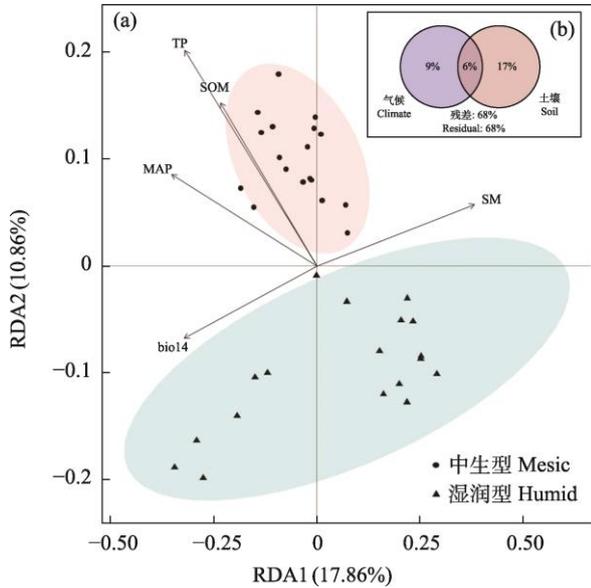


图4 甘松自然群落物种组成的RDA排序图(a)和影响物种组成的环境因子的方差分解(b)。TP: 土壤总磷; SOM: 土壤有机质; SM: 土壤含水量; MAP: 年降水量; bio4: 最干月降水量。
Fig. 4 RDA ranking diagram of species composition in natural *Nardostachys jatamansi* communities (a) and variation partitioning of environmental factors affecting species composition (b). TP, Total phosphorus; SOM, Soil organic matter; SM, Soil water content; MAP, Mean annual precipitation; bio4, Precipitation of driest month.

2.2 不同生境下甘松生长特征及甘松新酮含量差异

两类生境中, 甘松平均单位面积干生物量为 24.07 ± 16.73 g, 平均根冠比为 2.20 ± 0.97 , 平均鲜干比为 5.37 ± 0.72 。比较结果显示(图5), 不同生境下甘松的根冠比存在差异显著($P < 0.05$), 在湿润型生境中更高。生物量以及鲜干比未表现出显著差异, 但中生型生境中甘松的鲜干比及生物量均略大于湿润型生境。甘松平均根长为 7.59 ± 2.45 cm, 甘松新酮含量为 $1.57\% \pm 0.67\%$, 比较结果显示, 中生型生境中甘松根长以及甘松新酮含量均显著高于湿润型生境($P < 0.05$, 图6)。

2.3 甘松潜在资源量模拟

优化模型后得到四川省红原县甘松自然种群的潜在适生区分布概率图及适生区分布图(图7)。其中, 低适生区面积 $4,048.47$ km², 中适生区面积 $2,733.01$ km², 高适生区面积 $1,658.46$ km², 中、高适生区纳入潜在适生范围, 共计 $4,391.47$ km², 占红原县面积的52.03%。

筛选环境变量构建红原县甘松生物量多元线性回归方程模型: $mass = 291.93 \times MAT - 0.20 \times$

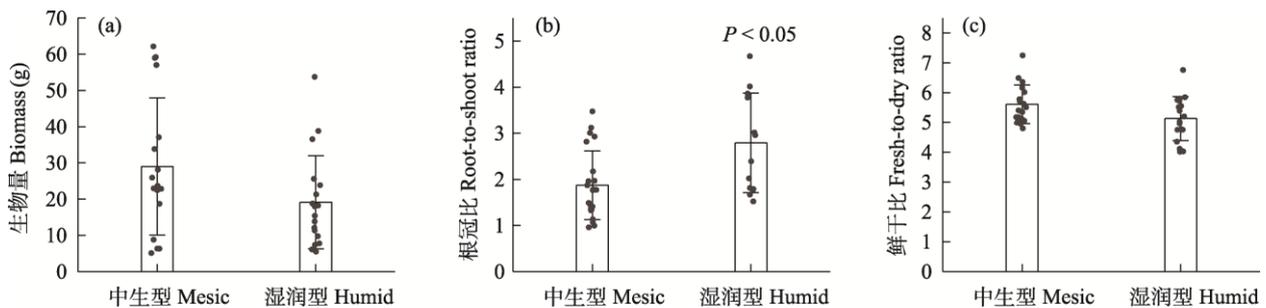


图5 不同生境下甘松单位面积干生物量(a)、根冠比(b)和鲜干比(c)的比较。P < 0.05表示差异显著。

Fig. 5 Comparison of biomass (a), root-to-shoot ratio (b), and fresh weight to dry weight ratio (c) of *Nardostachys jatamansi* in varied habitats. A P-value of < 0.05 indicates that the difference was statistically significant.

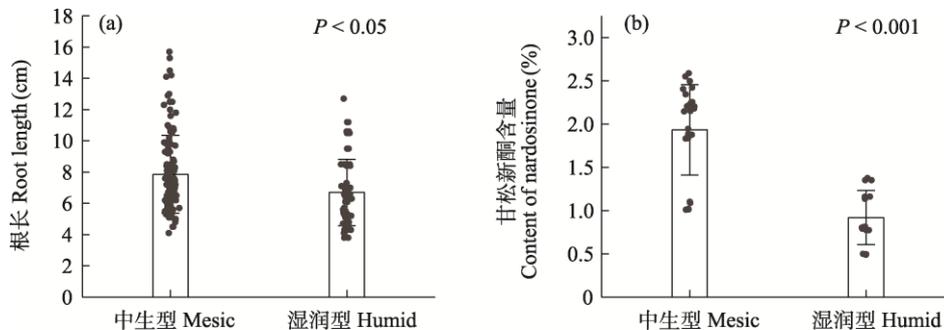


图6 不同生境下甘松根长(a)及甘松新酮含量(b)的比较。P < 0.05表示差异显著。

Fig. 6 Comparison of root length of *Nardostachys jatamansi* (a) and nardosinone content (b) in varied habitats. A P-value of < 0.05 indicates that the difference was statistically significant.

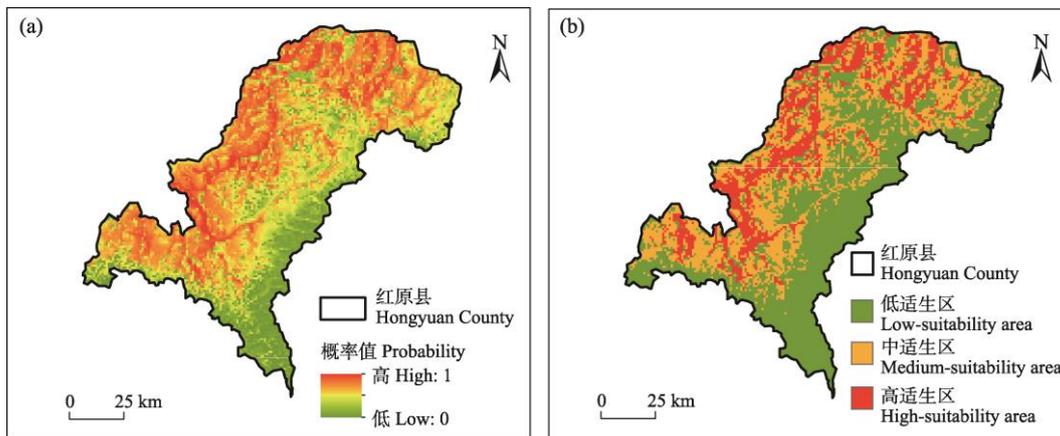


图7 红原县甘松自然种群的潜在适生区分布概率图(a)及潜在适生区分布图(b)
Fig. 7 Potential habitat suitability probability map (a) and potential habitat distribution map (b) of the natural *Nardostachys jatamansi* population in Hongyuan County

altitude - 22.78 × bio3 - 306.33 × bio6 - 180.91 × bio7 + 0.83 × MAP - 0.16 × aspect + 365.24 × SM + 1389.38 (表3)。回归模型整体显著, 校正R²为47.59%。结合红原县潜在适生区中甘松的分布概率(图7), 得到红原县甘松的潜在自然资源量分布图(图8), 单位面积内资源量最高达14.28 t/km², 全县潜在资源量为16,028.26 t。

3 讨论

3.1 不同生境下甘松群落结构差异及其生长特性

本研究结果显示, 不同生境类型下甘松的群落结构呈现显著差异。中生型生境下的伴生种达12种, 如嵩草、珠芽蓼、川西风毛菊、狼毒等, 多样性指数更高, 群落结构更加复杂、生态系统更加稳定。湿润型生境伴生种较少, 主要为嵩草、早熟禾、发草, 群落结构相对简单。其中, 嵩草在两种生境中均为绝对优势伴生种, 其耐寒耐旱的特性对高原草地生态系统具有重要意义(周春丽等, 2020)。RDA排序分析表明, 中生型生境拥有较为优越的水热条件及土壤养分, 更利于建立能更好地抵御外界干扰的高多样性植物群落(廖慧璇等, 2021)。

此外, 受土壤水分条件影响, 川西银莲花(*Anemone prattii*)、矮地榆(*Sanguisorba filiformis*)、驴蹄草(*Caltha palustris*)等共17种植物仅出现在湿润型生境中, 这些物种偏好湿润环境, 多生长在沼泽地、湿地、河滩等区域(邵非凡等, 2023)。

表3 红原县甘松单位面积生物量的多元线性回归方程
Table 3 Multivariate linear regression equation for biomass per unit area of *Nardostachys jatamansi* in Hongyuan County

变量 Independent variable	估计值 Estimate	标准误 Std. error	t	P
(Intercept)	1389.38	441.78	3.145	<0.001
altitude	-0.20	0.12	-1.691	0.094
MAT	291.93	86.42	3.378	<0.001
bio3	-22.78	9.97	-2.284	0.024
bio6	-306.33	67.71	-4.524	<0.001
bio7	-180.91	43.40	-4.168	<0.001
MAP	0.83	0.47	1.761	0.081
aspect	-0.16	0.05	-3.293	<0.001
SM	365.24	263.41	1.387	0.169

各变量的中文释义及单位见附录1。Please refer to Appendix 1 for detailed Chinese explanations and measurement units of each variable.

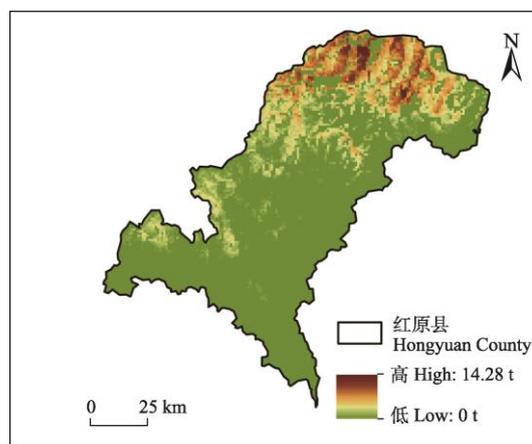


图8 红原县甘松潜在自然资源量图
Fig. 8 Map of potential natural resources of *Nardostachys jatamansi* in Hongyuan County

不同生境中甘松生长特征和功能性状特征的差异反映了甘松对水分和环境胁迫的适应策略。在湿润型生境中更高的根冠比,可能是由于根部缺氧需要消耗更多能量去维持呼吸(如形成通气组织),导致根部生物量占比上升,根冠比增加(张明锦等, 2015)。中生型生境中甘松的根长显著大于湿润型生境,表明在水分受限条件下根系倾向于向更深层土壤延伸以获取更多资源(张苏州, 2014)。甘松的鲜干比在两种生境中并无显著差异,但中生型生境中的甘松鲜干比值略高,可能是植物对短期干旱胁迫的储水适应策略(王丽等, 2008)。药用植物的产量及有效化学成分的含量会因为地理环境、气候、生物等因素的影响而产生差异(徐良, 2001; 何丙辉和钟章成, 2003; Liu et al, 2016; 牛天增等, 2022)。在本研究中,两种生境下甘松新酮含量表现出显著差异,表明中生型生境下轻度的水分缺乏可能促进甘松新酮这类倍半萜类化合物的合成与积累(孙金等, 2021)。

上述研究结果印证并解释了利益相关者更倾向于收购来源于山坡的甘松这一现象,最主要的原因是山坡上甘松的有效物质含量更高(图5b)。然而,不同生境下采挖强度和资源量的差异,有可能会造成局部甘松资源量下降,破坏种群的连续性、年龄结构及繁殖策略,最终损害种群的更新能力及当地甘松产出质量(淮虎银和刘爱忠, 2013)。

3.2 红原县甘松资源量与采集配额

本研究通过结合MaxEnt物种分布模型以及资源量估算模型,初步估算出红原县甘松潜在资源量为16,028.26 t,空间上呈现北多南少的格局,北部麦洼乡资源最为集中,往南逐渐减少,南部刷经寺镇几乎无潜在适生区域。生境类型和水热条件是驱动这一格局的关键因素,此分布特征与现有研究结果相似(陈玉林等, 2019)。海拔3,400–3,500 m被认为是甘松最适生长范围,此区域的土壤养分(如磷)可能更充足(金乾等, 2018),这与本研究中红原县北部资源分布较多的结果一致。我国甘松主要分布于生物多样性热点且生态环境脆弱的青藏高原地区(王晓峰等, 2023; 裴向军, 2024),特定的栖息地要求、较大的贸易需求以及非可持续性的采集使甘松的野生资源持续衰退。尽管已有国家开展甘松人工栽培研究,但仍未形成产业规模(Chauhan & Nautiyal,

2005; Ghimire et al, 2008; Bose et al, 2016; 于素玲, 2021)。未来应加强人工培育技术的集成研发,减少对野生资源的依赖;依法遏制非法采挖与交易,同时提升社区保护意识,探索社区治理,支持开展多种形式的民间甘松野生资源的就地保护。

目前,我国甘松野生资源的采集配额及相关监管制度尚不完善,其采集行为在甘松正式列入《国家重点保护野生植物名录》前基本不受约束。在CITES框架下,尼泊尔近5年来平均甘松及其副产品出口配额为440.8 t (https://www.speciesplus.net/species#/taxon_concepts/29093/legal),但相关研究指出尼泊尔目前的配额仍可能超出可持续采收的阈值(Ghimire et al, 2005)。据前期调研,红原县每年的甘松贸易量在500 t左右,不足本研究所估算潜在资源量的4%,理论上处于可持续范围内。然而,这500 t的采挖活动可能高度集中于交通便利且人类可达性较高的区域,这可能导致局部种群的过度利用。同时,潜在资源量并非可采集资源量,位于保护区、水源涵养地等生态功能重要区域的部分资源量不应纳入配额管理决策中,且甘松生长缓慢、更新能力差,即使是低采收率,也可能在长期累积下导致种群的不可持续。此外,考虑到还存在小额及非法贸易等难以溯源的交易类型、模型估算的局限性,我国应谨慎限定可持续采挖配额,本研究推荐红原县的采挖强度控制在2%内,即年配额约320 t。同时建议参考尼泊尔等国家的监管经验,实施季节性采集、分区轮采、按时向监管方提交采集进度表等管理制度(Department of Forests and Soil Conservation Forestry Complex, 2019)。

3.3 各甘松分布国家的NDF方法学协调

甘松的可持续利用与国际贸易管理以科学的非致危性判定(Non-Detriment Finding, NDF)为基础,而其中的核心在于建立可靠的资源储量估算体系,以支持可持续的采集配额管理。今年,尼泊尔与不丹均向CITES提交了甘松的NDF报告,完成了全国范围内甘松储量估算。尼泊尔作为甘松出口贸易大国,在《地区森林管理计划》(District Forest Management Plan, DFMP)的实施下,基于各区上报的甘松可用资源量对甘松的全国可用资源量进行估算,其结果显示2019年可用资源量为19,203 t, 2025年为24,188 t;并据此设置5年轮采周期及15%

的可持续采收率,最近一次尼泊尔向CITES提交的年度总收获配额为725.6 t (https://www.speciesplus.net/species#/taxon_concepts/29093/legal; Department of Plant Resources, 2025)。不丹在Jigme Dorji国家公园、Jigme Khesar区自然阿波湖区和Bumdeling野生动植物避难所等9个片区内进行甘松分布区及样地调查,使用单株植物计数和占地面积来确定每块地的植物密度和全国的总体数量,调查估算得到全国约27,603,770株甘松个体,进一步通过单株重量推算得到全国范围内甘松的干重储量约350 t,并认为国际贸易配额精油371 kg、干根14 t是可持续的收获量(Wangchuk et al, 2025)。上述方法主要基于传统的野外样地调查与密度、生物量等基础参数推估。然而,单纯地面调查存在固有局限性,在人员、经费与时间等约束条件下,很难在区域甚至国家尺度上实现全面且具有代表性的资源量评估,从而不可避免地影响估算结果的准确性与完整性。

相比之下,本研究在系统野外调查的基础上,引入适生区模型与资源量估算模型,将实地监测数据与空间环境格局相结合,实现了从局部样地信息向区域尺度资源储量的科学推断。当然,本研究的资源量估算方法并非完全严密,受牲畜啃食、种间竞争、人为干扰以及模型误差等多重因素的影响,本研究对甘松潜在资源量的估算结果与实际值之间必然存在一定的偏差。然而,在评估甘松及相关高原药用植物资源量方面,目前国内外均存在方法缺失与规范不足的问题,本研究旨在探索一种在现有数据条件和政策约束下相对更稳健、透明且可推广的资源量评估路径,以阐明相关方法建设的必要性与紧迫性。未来,我们将通过扩大实地调查范围、引入高分辨率无人机遥感技术、优化模型拟合方法等途径,持续提升估算精度,为科学制定采集配额提供数据支撑与决策参考。

本研究所提供的甘松潜在分布、资源总量、转换率等生态学数据,是出具NDF报告所需的重要核心数据,支持国家及地方设置科学的采收配额,从而推动地方政府走向更基于数据的精细化、常态化管理,为甘松等喜马拉雅药用芳香植物国际贸易问题的主动管理提供科学依据,进而加强中国的CITES履约能力建设,以提升国际话语权。此外,本研究所提供的具有尝试性的资源量估计办法,有望

借助即将召开的2026年尼泊尔可持续论坛(International Kathmandu Sustainability Forum),加强区域间科研机构与管理部门的协作,推动方法学协调统一,共同建立一个科学、可比较、可长期应用的甘松资源量评估体系,以更好支撑其可持续利用与国际贸易管理。

致谢: 感谢重庆第二师范学院魏培老师、绵阳师范学院李艳老师对本研究的帮助与指导;感谢课题组成员崔卓皓、胡迅、邓静雯、敬莉莎、雷慧芳、陈媛在野外工作及数据整理工作中的辛勤付出;以及特别感谢当地的翻译及向导人员,为获取真实、详尽的一手资料奠定了坚实基础。

ORCID

杨永川  <https://orcid.org/0000-0001-7627-7776>

曾岩  <https://orcid.org/0000-0002-1474-0873>

参考文献

- Aarts G, Fieberg J, Matthiopoulos J (2012) Comparative interpretation of count, presence-absence and point methods for species distribution models. *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 177–187.
- Aiello-Lammens ME, Boria RA, Radosavljevic A, Vilela B, Anderson RP (2015) spThin: An R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, 38, 541–545.
- Astutik S, Pretzsch J, Kimengsi JN, Astutik S, Pretzsch J, Kimengsi JN (2019) Asian medicinal plants' production and utilization potentials: A review. *Sustainability*, 11, 5483.
- Bai WF, Yu L, Li JH, Nie DL, Yan JW, Wu SZ, Li JC, Xiao JD (2021) Structure and species diversity of *Cerasus* community in Dawei Mountain of Hunan, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32, 1201–1212. (in Chinese with English abstract) [柏文富, 禹霖, 李建辉, 聂东伶, 严佳文, 吴思政, 李继承, 肖金顶 (2021) 大围山樱属植物群落结构及物种多样性. *应用生态学报*, 32, 1201–1212.]
- Bose B, Kumaria S, Choudhury H, Tandon P (2016) Assessment of genetic homogeneity and analysis of phytomedicinal potential in micropropagated plants of *Nardostachys jatamansi*, a critically endangered, medicinal plant of alpine Himalayas. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 124, 331–349.
- Chai TT, Li ZW, Zhang L, Qin JM (2019) Multivariate statistical regression model to forecast the break-up date of Mohe Station. *Mathematics in Practice and Theory*, 49(4), 124–128. (in Chinese with English abstract) [柴婷婷, 李卓伟, 张丽, 秦建敏 (2019) 多元线性回归模型的漠河站开

- 河预测. 数学的实践与认识, 49(4), 124–128.]
- Chauhan HK (2021) *Nardostachys jatamansi*. The IUCN Red List of Threatened Species 2021. e.T50126627A88304158. (accessed on 2025-09-23)
- Chauhan HK, Bisht AK, Bhatt ID, Bhatt A, Gallacher D, Santo A (2018) Population change of *Trillium govanianum* (Melanthiaceae) amid altered indigenous harvesting practices in the Indian Himalayas. *Journal of Ethnopharmacology*, 213, 302–310.
- Chauhan HK, Oli S, Bisht AK, Meredith C, Leaman D (2021) Review of the biology, uses and conservation of the critically endangered endemic Himalayan species *Nardostachys jatamansi* (Caprifoliaceae). *Biodiversity and Conservation*, 30, 3315–3333.
- Chauhan RS, Nautiyal MC (2005) Commercial viability of cultivation of an endangered medicinal herb *Nardostachys jatamansi* at three different agroclimatic zones. *Current Science*, 89, 1481–1488.
- Chauhan RS, Nautiyal MC, Kumar A (2011) Analysis of variabilities in populations of *Nardostachys jatamansi* DC. in Garhwal Himalaya, India. *International Journal of Plant Breeding and Genetics*, 3, 190–194.
- Chen YL, Dai W, Ma JH, Ma L (2019) Thoughts on the status quo and countermeasures of the development of Chinese-Tibetan medicine industry in Hongyuan County. *South China Agriculture*, 13(28), 56–59. (in Chinese with English abstract) [陈玉林, 戴维, 马家骅, 马林 (2019) 红原县中藏药产业发展现状及对策思考. *南方农业*, 13(28), 56–59.]
- China Pharmacopoeia Committee (2020) Pharmacopoeia of the People's Republic of China. Part 1. China Medical Science and Technology Press, Beijing. (in Chinese) [国家药典委员会 (2020) 中华人民共和国药典(一部). 中国医药科技出版社, 北京.]
- Deng YC, Jiang Z, Zhu YQ, Yang CT, Cheng MJ, Wu WD, Tang WQ, Rong J, He PP, Li HQ (2023) Countermeasures of soil testing and fertilization for artificially planted gramineous grasses in pastoral areas of northwest Sichuan—A case study of Hongyuan County, Sichuan Province. *Journal of Grassland and Forage Science*, (2), 52–56. (in Chinese) [邓榆川, 姜臻, 朱永群, 杨春桃, 程明军, 伍文丹, 唐玮琦, 荣璟, 何佩佩, 李洪泉 (2023) 川西北牧区人工种植禾本科牧草测土施肥对策——以四川省红原县为例. *草学*, (2), 52–56.]
- Department of Forests and Soil Conservation Forestry Complex (2019) National Quota Fixation for Jatamansi (*Nardostachys jatamansi* DC) Ensuring Sustainable Management and Conservation in Nepal. <https://cites.org/sites/default/files/eng/com/sc/71/E-SC71-12-A5.pdf>. (accessed on 2025-09-23)
- Department of Plant Resources (2025) Non-Detriment Findings for *Nardostachys jatamansi* (D. Don) DC. from Nepal. https://cites.org/sites/default/files/ndf_material/NDF%20Nardostachys%20jatamansi.pdf. (accessed on 2025-09-23)
- Dhiman N, Bhattacharya A (2020) *Nardostachys jatamansi* (D. Don) DC. Challenges and opportunities of harnessing the untapped medicinal plant from the Himalayas. *Journal of Ethnopharmacology*, 246, 112211.
- Farooque NA, Saxena KG (1996) Conservation and utilization of medicinal plants in high hills of the central Himalayas. *Environmental Conservation*, 23, 75–80.
- Fu WK (1993) History of Traditional Chinese Medicines. Bashu Publication, Chengdu, China. (in Chinese) [傅维康 (1993) 中药学史. 巴蜀书社, 成都.]
- Ghimire SK, Gimenez O, Pradel R, McKey D, Aumeeruddy-Thomas Y (2008) Demographic variation and population viability in a threatened Himalayan medicinal and aromatic herb *Nardostachys grandiflora*: Matrix modelling of harvesting effects in two contrasting habitats. *Journal of Applied Ecology*, 45, 41–51.
- Ghimire SK, McKey D, Aumeeruddy-Thomas Y (2005) Conservation of Himalayan medicinal plants: Harvesting patterns and ecology of two threatened species, *Nardostachys grandiflora* DC. and *Neopicrorhiza scrophulariiflora* (Pennell) Hong. *Biological Conservation*, 124, 463–475.
- Hamilton AC (2004) Medicinal plants, conservation and livelihoods. *Biodiversity and Conservation*, 13, 1477–1517.
- He BH, Zhong ZC (2003) Study on variation dynamics of modular population of *Ginkgo biloba* under different conditions of environmental stress. *Journal of Southwest Agricultural University*, 25, 7–10. (in Chinese with English abstract) [何丙辉, 钟章成 (2003) 不同环境胁迫下银杏构件种群药用成分变化的研究. *西南农业大学学报*, 25, 7–10.]
- Huai HY, Liu AZ (2013) Effects of selective harvesting on target plants and the related ecosystems. *Plant Diversity and Resources*, 35, 180–186. (in Chinese with English abstract) [淮虎银, 刘爱忠 (2013) 选择性采集对植物及生态系统的效应. *植物分类与资源学报*, 35, 180–186.]
- Jin Q, Li Y, Xiao F, Ke YX, Liu Z, Liu Y (2018) Multidimensional statistical analysis of inorganic elements in above ground parts of *Nardostachys jatamansi* from different producing areas and different elevations. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 24(13), 54–61. (in Chinese with English abstract) [金乾, 李莹, 肖芳, 克永霞, 刘哲, 刘圆 (2018) 不同产地、不同海拔地区的甘松地上部分无机元素的多维统计分析. *中国实验方剂学杂志*, 24(13), 54–61.]
- Kabacoff RI (2015) R in Action: Data Analysis and Graphics with R, 2nd edn. Manning Publications, Greenwich.
- Lei GC (2025) Goals of Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework and solutions by China's Biosphere Reserve Network. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 40, 1536–1545. (in Chinese with English abstract) [雷光春 (2025) 《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》目标及中国生物圈保护区网络解决方案. *中国科学院院刊*, 40,

- 1536–1545.]
- Li Q (2011) Species accumulation curves and its application. Chinese Journal of Applied Entomology, 48, 1882–1888. (in Chinese with English abstract) [李巧 (2011) 物种累积曲线及其应用. 应用昆虫学报, 48, 1882–1888.]
- Li YF, Li S, Zhao WJ, Li J, Yang XW, Jia GF, Chen YH (2023) Content analysis and antioxidant activity of chemical components in *Nardostachys jatamansi* DC. from different sources. Journal of Chengdu Medical College, 18, 545–548. (in Chinese with English abstract) [李雨繁, 李双, 赵文吉, 黎剑, 杨兴无, 贾国夫, 陈宇航 (2023) 不同来源甘松化学成分含量分析与抗氧化活性研究. 成都医学院学报, 18, 545–548.]
- Li YM, Liu GL, Qiao J, Liu S, Zhang Y, Qin ZX, Liu Y (2015) Simultaneous determination of chlorogenic acid and nardosinone in *Nardostachys chinensis* DC. from different producing areas by HPLC. Information on Traditional Chinese Medicine, 32(6), 27–30. (in Chinese with English abstract) [李艳忙, 刘国林, 乔晶, 刘爽, 张瑜, 秦振娴, 刘勇 (2015) HPLC同时测定不同产地甘松中绿原酸和甘松新酮的含量. 中医药信息, 32(6), 27–30.]
- Liao HX, Zhou T, Chen BM, Chen EJ, Zhang HJ, Peng SL (2021) Ecological control of exotic invasive plants. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 60(4), 1–11. (in Chinese with English abstract) [廖慧璇, 周婷, 陈宝明, 陈恩健, 张海杰, 彭少麟 (2021) 外来入侵植物的生态控制. 中山大学学报(自然科学版), 60(4), 1–11.]
- Liu W, Yin DX, Li N, Hou XG, Wang DM, Li DW, Liu JJ (2016) Influence of environmental factors on the active substance production and antioxidant activity in *Potentilla fruticosa* L. and its quality assessment. Scientific Reports, 6, 28591.
- Liu YM, Dong XZ, Li XY, Zhu ZM, Li YY (2024) Spatial pattern of degraded alpine communities invaded by *Stellera chamaejasme* and environmental interpretation in the central Qilian Mountain. Journal of Plant Protection, 51, 1248–1258. (in Chinese with English abstract) [刘咏梅, 董幸枝, 李潇雨, 朱志梅, 李艳莹 (2024) 祁连山中段段狼毒入侵退化草甸群落格局及环境解释. 植物保护学报, 51, 1248–1258.]
- Lou KE, Qu WJ, Wang L, Wang X, Gao YG, Zhang B, You WX, Yang XG (2024) Root architecture characteristics of four dominant annual herbs in Tengger Desert, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 35, 3015–3022. (in Chinese with English abstract) [楼科尔, 曲文杰, 王磊, 王兴, 郜永贵, 张波, 尤万学, 杨新国 (2024) 腾格里沙漠地区4种优势一年生草本植物根构型特征. 应用生态学报, 35, 3015–3022.]
- Maitinuer MWLJ, Dong TX, Zhan HQ, Aisa AJAKBE (2017) Analysis of HPLC fingerprints and determination of nardosinone of *Nardostachyos* Radix et Rhizoma from *Nardostachys jatamansi* DC. Herald of Medicine, 36, 1298–1302. (in Chinese with English abstract) [买吾兰江·买提努尔, 董婷霞, 詹华强, 阿吉艾克拜尔·艾萨 (2017) 甘松药材高效液相色谱指纹图谱及甘松新酮含量测定. 医药导报, 36, 1298–1302.]
- Mulliken T, Crofton P (2008) Review of the status, harvest, trade and management of seven Asian CITES-listed medicinal and aromatic plant species. BfN-Skripten, 227.
- Nautiyal BP, Chauhan R, Prakash V, Purohit H, Nautiyal MC (2003) Population studies for the evaluation of germplasm and threat status of the alpine medicinal herb *Nardostachys jatamansi*. Plant Genetic Resources Newsletter, 136, 34–39.
- Niu TZ, Wang YL, Hou QW, Xiao SX, Luo HM, Liu AK (2022) Correlation between functional components in *Codonopsis pilosula* roots and soil factors. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 28(11), 164–172. (in Chinese with English abstract) [牛天增, 王玉龙, 侯沁文, 肖淑贤, 骆红梅, 刘阿克 (2022) 党参功效成分含量与土壤因子相关性分析. 中国实验方剂学杂志, 28(11), 164–172.]
- Olsen CS, Larsen HO (2003) Alpine medicinal plant trade and Himalayan Mountain livelihood strategies. The Geographical Journal, 169, 243–254.
- Özipek B, Pekacar S, Orhan DD (2023) Evaluation of phytochemical contents and biological activities of *Salvia officinalis* and *Salvia triloba* grown with organic farming. Fabad Journal of Pharmaceutical Sciences, 48, 125–138.
- Pei XJ (2024) Mechanisms of geological environment disturbance and ecological restoration technical systems for major engineering projects on the Tibetan Plateau. Journal of Engineering Geology, 32, 1737–1758. (in Chinese with English abstract) [裴向军 (2024) 青藏高原重大工程地质环境扰损机制及生态修复技术体系. 工程地质学报, 32, 1737–1758.]
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 190, 231–259.
- Pitman NCA, Jørgensen PM (2002) Estimating the size of the world's threatened flora. Science, 298, 989.
- Rai LK, Prasad P, Sharma E (2000) Conservation threats to some important medicinal plants of the Sikkim Himalaya. Biological Conservation, 93, 27–33.
- Rehman T, Ahmad S (2019) *Nardostachys chinensis* Batalin: A review of traditional uses, phytochemistry, and pharmacology. Phytotherapy Research, 33, 2622–2648.
- Shao FF, Chen YH, Cui Y, Liu HB, Yang LP, Chen XZ, Huang WJ, Luo FL (2023) Plant community characteristics under low and high soil moisture conditions in typical marsh wetlands in northern China. Acta Ecologica Sinica, 43, 8692–8703. (in Chinese with English abstract) [邵非凡, 陈禹含, 崔圆, 刘华兵, 杨梨萍, 陈炫铮, 黄文军, 罗芳丽 (2023) 北方典型沼泽湿地高低土壤水分下植物群落特征. 生态学报, 43, 8692–8703.]
- Sun J, Du Z, Lin YZ, Wang J (2023) Inversion of aboveground biomass of grassland on the eastern margin of the

- Qinghai-Tibet Plateau combined with Sentinel-1 and Sentinel-2 data. *Pratacultural Science*, 40, 1977–1987. (in Chinese with English abstract) [孙剑, 杜忠, 林用智, 王杰 (2023) 联合Sentinel-1与Sentinel-2数据的青藏高原东缘草地地上生物量反演. *草业科学*, 40, 1977–1987.]
- Sun J, Weng LL, Xiao CP, Zhou XL, Jiang YX (2021) Effects of drought stress on accumulation of three sesquiterpenoids and gene expression of key enzymes in biosynthesis of *Atractylodes chinensis*. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 44, 812–817. (in Chinese with English abstract) [孙金, 翁丽丽, 肖春萍, 周秀丽, 姜雨昕 (2021) 干旱胁迫对北苍术3种倍半萜类成分积累及生物合成关键酶基因表达的影响. *中药材*, 44, 812–817.]
- Tang SQ, Suo ZW, Lai ZS, Shi YT, Zhou XQ, Xue MX, Li XJ (2023) Community structural characteristics and species diversity of endangered medicinal plant *Striga asiatica*. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 46, 2958–2963. (in Chinese with English abstract) [唐思琪, 索宗武, 赖政松, 施咏滔, 周秀芹, 薛梦鑫, 李小军 (2023) 濒危药用植物独脚金群落结构特征及物种多样性. *中药材*, 46, 2958–2963.]
- Tang XF, Liu DM, Wan T, Xi H, Tu WG, Li YD, Yang YC (2013) Research on soil characteristics of alpine desertification grassland and treatment model in Hongyuan County, northwest Sichuan. *Sichuan Environment*, 32(6), 11–15. (in Chinese with English abstract) [唐学芳, 刘冬梅, 万婷, 席欢, 涂卫国, 李裕东, 杨一川 (2013) 川西北高寒草地沙化土壤特征及治理模式探讨——以阿坝州红原县为例. *四川环境*, 32(6), 11–15.]
- Ved D, Saha D, Ravikumar K, Haridasan K (2015) *Nardostachys jatamansi*. The IUCN Red List of Threatened Species 2015. e.T50126627A50131395. (accessed on 2025-09-23)
- Wang JL, Zhong ZM, Wang ZH, Yu CQ, Zhang XZ, Hu XX, Shen ZX, Daci ZG (2014) Distribution characteristics and influence factors of vegetation phosphorus content of alpine grassland ecosystem in Qinhai-Tibet Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, (1), 27–38. (in Chinese with English abstract) [王建林, 钟志明, 王忠红, 余成群, 张宪洲, 胡兴祥, 沈振西, 大次卓嘎 (2014) 青藏高原高寒草原生态系统植被磷含量分布特征及其影响因素. *草地学报*, (1), 27–38.]
- Wang L, Hu JM, Song CC, Yang T (2008) Influences of water gradients on the aboveground biomass of a typical wetland plant (*Calamagrostis angustifolia*) in the Sanjiang Plain. *Acta Prataculturae Sinica*, 17(4), 19–25. (in Chinese with English abstract) [王丽, 胡金明, 宋长春, 杨涛 (2008) 水分梯度对三江平原典型湿地植物小叶章地上生物量的影响. *草业学报*, 17(4), 19–25.]
- Wang LN, Gesang Q, Luo JF, Wu XL, Rebi A, You YG, Zhou JX (2024) Drivers of plant diversification along an altitudinal gradient in the alpine desert grassland, Northern Tibetan Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 53, e02987.
- Wang M, Gao XH, Chen SY, Feng QS, Liang TG (2015) The land use classification based on Landsat 8 remote sensing image—A case study of Anqu demonstration community in Hongyuan County of Sichuan Province. *Pratacultural Science*, 32, 694–701. (in Chinese with English abstract) [王敏, 高新华, 陈思宇, 冯琦胜, 梁天刚 (2015) 基于Landsat 8遥感影像的土地利用分类研究——以四川省红原县安曲示范区为例. *草业科学*, 32, 694–701.]
- Wang M, Yang TT, Rao Y, Wang ZM, Dong XQ, Zhang LH, Han LF, Zhang Y, Wang T, Zhu Y, Gao XM, Li TX, Wang HY, Xu YT, Wu HH (2021) A review on traditional uses, phytochemistry, pharmacology, toxicology and the analytical methods of the genus *Nardostachys*. *Journal of Ethnopharmacology*, 280, 114446.
- Wang XF, Yao WJ, Feng XM, Jia ZX, Zhang XR, Ma JH, Zhou JT, Tu Y, Sun ZC (2023) Changes and driving factors of ecosystem services supply and demand on the Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 43, 6968–6982. (in Chinese with English abstract) [王晓峰, 尧文洁, 冯晓明, 贾子续, 张欣蓉, 马嘉豪, 周继涛, 涂又, 孙泽冲 (2023) 青藏高原生态系统服务供需变化及其驱动因素. *生态学报*, 43, 6968–6982.]
- Wangchuk S, Shacha N, Gyeltshen N, Wangmo K, Dukpa K, Sangay, Tshering T, Tshering D (2025) Non-Detrimental Findings of *Nardostachys jatamansi* (D. Don) DC. https://cites.org/sites/default/files/ndf_material/NJ_NDF_Web.pdf. (accessed on 2025-09-23)
- Xu L (2001) Cultivation of Traditional Chinese Medicinal Plants. Guizhou Science and Technology Publishing House, Guiyang. (in Chinese) [徐良 (2001) 中药栽培学. 贵州科技出版社, 贵阳.]
- Yang YC, Wang EH, Wang JQ, Dang YN, Sun ZZ, An L, Liu TT, Ma CD (2022) The history of Chinese medicine *Nardostachyos* Radix et Rhizoma. *Chinese Journal of Ethnomedicine and Ethnopharmacy*, 31(14), 45–52. (in Chinese with English abstract) [杨祎辰, 王二欢, 王继强, 党艳妮, 孙珍珍, 安莉, 刘腾恬, 马存德 (2022) 中药甘松的历史沿革. *中国民族民间医药*, 31(14), 45–52.]
- Yu SL, Ye X, Jia GF, He ZJ, Sun P, Zhang CB, Zhao WJ (2021) *Nardostachys jatamansi*, a medicinal plant from Qinghai-Tibet Plateau: A review. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 27(19), 243–250. (in Chinese with English abstract) [于素玲, 叶霄, 贾国夫, 何正军, 孙佩, 张昌兵, 赵文吉 (2021) 青藏高原药用植物甘松研究进展. *中国实验方剂学杂志*, 27(19), 243–250.]
- Zhang JT (2018) *Quantitative Ecology*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张金屯 (2018) 数量生态学. 科学出版社, 北京.]
- Zhang JT, Zhao FX, Chen JH, Li Y, Sun J (2023) Correlations of species diversity and biomass with environmental factors in alpine grasslands across the Qingzang Plateau. *Pratacultural Science*, 40, 616–626. (in Chinese with English

- abstract) [张锦涛, 赵峰侠, 陈俊合, 李洋, 孙建 (2023) 青藏高原不同类型高寒草地物种多样性与生物量的关系及影响要素. 草业科学, 40, 616–626.]
- Zhang MJ, Chen LH, Hu XW, Xu R, Zhang J (2015) Effects of water and fertilizer on growth and photosynthetic pigments of *Puelia sinense*. Acta Prataculturae Sinica, 24(5), 75–83. (in Chinese with English abstract) [张明锦, 陈良华, 胡相伟, 徐睿, 张健 (2015) 水肥耦合对巨能草生长和光合色素的影响. 草业学报, 24(5), 75–83.]
- Zhang SZ (2014) Effect of drought stress on growing development and physiological characteristics of *Pennisetum setaceum*. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 29, 752–756. (in Chinese with English abstract) [张苏州 (2014) 干旱胁迫对‘紫叶’狼尾草生长发育及生理特性的影响. 福建农业学报, 29, 752–756.]
- Zhang X, Feng HW, Wang J, Lin L, Wang YH (2024) Ethnobotanical survey and research on bsang plants in Xizang Autonomous Region. Guihaia, 44, 1961–1975. (in Chinese with English abstract) [张雄, 冯浩文, 王瑾, 蔺蕾, 王雨华 (2024) 西藏煨桑植物的民族植物学调查研究. 广西植物, 44, 1961–1975.]
- Zhao JR, Wang PS, Gou Y, Zeng Y, Jin XM, Liu G, Qimei LM, Zhou JQ (2025) Prediction of the near-modern and future potential distribution of *Poa pratensis* L. in response to climate change based on the MaxEnt model. Acta Agrestia Sinica, 33, 2992–3002. (in Chinese with English abstract) [赵佳芮, 王鹏森, 苟扬, 曾园, 金雪梅, 刘刚, 其美拉姆, 周冀琼 (2025) 基于MaxEnt模型预测近现代和未来草地早熟禾的适宜分布区. 草地学报, 33, 2992–3002.]
- Zheng DS, Liu QJ (2023) Effects of environmental factors on forest community distribution in Changbai Mountain Nature Reserve of northeastern China. Journal of Beijing Forestry University, 45(8), 57–64. (in Chinese with English abstract) [郑东升, 刘琪璟 (2023) 环境因子对长白山自然保护区森林群落分布的影响. 北京林业大学学报, 45(8), 57–64.]
- Zhou CL, Lin L, Peng CJ, Li YK, Cao GM (2020) Differentiation characteristics of plant functional groups in alpine *Kobresia* meadow under different succession states. Journal of Gansu Agricultural University, 55(1), 136–144, 152. (in Chinese with English abstract) [周春丽, 林丽, 朋措吉, 李以康, 曹广民 (2020) 不同演替状态下高寒嵩草草甸植物功能群分异特征. 甘肃农业大学学报, 55(1), 136–144, 152.]
- Zhu GL, Li J, Wei XH, He NP (2017) Longitudinal patterns of productivity and plant diversity in Tibetan alpine grasslands. Journal of Natural Resources, 32, 210–222. (in Chinese with English abstract) [朱桂丽, 李杰, 魏学红, 何念鹏 (2017) 青藏高原高寒草地植被生产力与生物多样性的经度格局. 自然资源学报, 32, 210–222.]

(责任编辑: 周玉荣)

附录 Supplementary Material

<https://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2025382>