

中国西藏墨脱药用苔藓植物资源调查及生态类型分布研究

范冰冰^{1,2,3}, 马和平^{1,2,3*}, 高智远^{1,2,3}, 吴亚轩^{1,2,3}, 呼海毅^{1,2,3}

(1. 西藏农牧大学高原生态研究所, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 西藏 林芝 860000; 3. 西藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000)

摘要: 为系统了解墨脱药用苔藓植物资源及分布规律, 丰富墨脱苔藓植物研究, 补充药用苔藓植物资源基础资料, 该研究在 2020 年、2023 年和 2024 年多次进入墨脱境内, 对中国西藏自治区墨脱县药用苔藓植物进行野外调查、标本采集并鉴定, 整理墨脱药用苔藓植物物种组成, 对墨脱药用苔藓植物进行药用功效梳理和多样性分析。结果表明: (1) 墨脱区域共发现药用苔藓植物 91 种, 隶属于 44 科 59 属, 药用苔藓植物资源物种多样性丰富。(2) 药用苔藓植物代谢物丰富, 共注释到 81 条代谢通路, 代谢物种类中参与植物次生代谢产物合成代谢通路数量最多。(3) 对 8 种生长基质种类分析, 物种丰富度指数和多样性指数由高到低依次为石生>土生>岩面薄土>树附生>腐木生>水生>土石生>腐殖质生, 其中石生苔藓种类与岩面薄土生苔藓种类相似性系数最高, 为 0.524, 两种生长基质共有种类 27 种。综上所述, 墨脱药用苔藓植物种类丰富, 墨脱区域药用苔藓种类相较其他地区数量显著较高。苔藓植物代谢物中具有多种类型的萜类化合物, 代谢物种类在植物次生代谢合成通路显著富集。8 种着生基质中石生数量最多且多样性指数最高且物种丰富度最高, 不同基质苔藓种类差异较大, 分布特征与生境有关。

关键词: 墨脱, 苔藓植物, 药用功效, 资源调查, 生长基质

Investigation of medicinal bryophyte resources and ecological type distribution in Medog, Xizang, China

FAN Bingbing^{1,2,3}, MA Heping^{1,2,3*}, GAO Zhiyuan^{1,2,3},
WU Yaxuan^{1,2,3}, HU Haiyi^{1,2,3}

(1. *Research Institute of Xizang Plateau Ecology, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, Xizang, China*; 2. *National Forest Ecosystem Observation and Research Station of Nyingchi, Xizang, Nyingchi 860000, Xizang, China*; 3. *Xizang Key Laboratory of Forest Ecology in Plateau Area, Ministry of Education, Nyingchi 860000, Xizang, China*)

Abstract: This study aims to systematically document the resources and distribution of medicinal bryophytes in Medog County, to enhance research on bryophyte diversity in the region, and to supplement fundamental information on bryophyte-derived medicinal resources. This study involved multiple field expeditions to Medog County, Xizang Autonomous Region, conducted in

基金项目: 中国科学院战略生物资源计划 CAS-TAX-24-026; 西藏自治区自然科学基金(XZ202501ZR0023); 林芝市科技计划项目(XDHz-2025-1220); 西藏农牧大学研究生教育创新计划项目(YJS2024-42)。
第一作者: 范冰冰(1999—), 硕士研究生, 主要从事苔藓植物生态学研究, (E-mail)fanbing2021@outlook.com。
***通信作者:** 马和平, 教授, 博士, 主要从事苔藓植物生态学研究, (E-mail)285477889@qq.com。

2020, 2023, and 2024. Medicinal bryophytes were collected, identified, and recorded through extensive field surveys. Species composition was systematically documented, and the medicinal properties as well as species diversity of these bryophytes were analyzed in detail. The results were as follows: (1) A total of 91 medicinal bryophyte species were identified in the Medog area, belonging to 44 families and 59 genera, indicating a remarkably high level of species diversity in medicinal bryophyte resources. (2) The metabolites of these medicinal bryophytes were highly diverse, with a total of 81 metabolic pathways annotated. The identified metabolites were significantly enriched in pathways associated with the biosynthesis of plant secondary metabolites, highlighting the potential pharmaceutical value. (3) Analysis of eight distinct substrate types showed that species richness and diversity indices ranked in descending order as follows: lithophytic > terrestrial > thin soil on rock > epiphytic > lignicolous > aquatic > saxicolous > humicolous. The highest similarity coefficient (0.524) was observed between lithophytic species and thin soil on rock species, with 27 species shared between these two substrate types, suggesting notable ecological overlap. In summary, the medicinal bryophyte flora in Medog is characterized by exceptionally high species richness and diversity, surpassing that of many other regions in both taxonomic composition and ecological complexity. The metabolites derived from these bryophytes comprise diverse terpenoids and various other secondary compounds, with significant enrichment observed in plant secondary metabolic biosynthesis pathways, indicating substantial pharmaceutical potential. Among the eight substrate types identified, lithophytic bryophytes exhibit the highest species abundance, the greatest diversity indices, and the most pronounced species richness. The distribution of bryophyte species across different substrate types displays considerable heterogeneity, and the compositional patterns as well as quantitative distributions are intimately associated with the distinctive habitat characteristics of Medog, including microclimatic conditions, moisture regimes, and substrate stability. These findings underscore the unique bryological significance of Medog and provide critical baseline data for the conservation and sustainable utilization of its medicinal bryophyte resources.

Key words: Medog, bryophytes, medicinal properties, resource survey, growth substrate

苔藓植物为第二大高等植物类群，其分布范围广泛，目前我国苔藓种类多达 3 000 余种（中国科学院植物研究所，2025）。苔藓植物是极端恶劣环境中的先锋物种，是生态系统演

进过程中的重要角色,在生态恢复、气候调节、植被演替、土壤养分循环等诸多方面具有至关重要的生态系统功能(王雅婷等,2022)。作为重要的植物资源,苔藓植物广泛应用于医疗、绿化、环境监测等方面。近年来,随着对苔藓植物药用价值的研究与开发,苔藓植物化学研究发现苔藓植物含有萜类、黄酮类和以双联苧为代表的芳香类化合物以及多种生物活性物质,是生物活性产物的重要来源,苔藓植物具有广泛的生物学活性,如抗菌、抗肿瘤等作用(娄红祥,2012)。我国苔藓植物作为药物使用在历史早有记载,最早可见《名医别录》中“垣衣”(地钱)的记载(韩国营等,2010),后续诸多医籍中多有药用苔藓植物的记录并在实践中运用。苔藓植物化学研究不断发现苔藓植物作为天然产物药物来源的特有成分及新型结构化合物,成为生物活性物质研究热点。我国苔藓植物有记载且作为药物使用的种类仅百种,各地区对药用苔藓植物的资源调查不断丰富。韩国营等(2008,2010,2013)对中国药用苔藓植物研究进行文献分析并发表了其中65种药用功效阐述。江西九岭山(陈春发等,2022)报道了28种药用种类,生态分布类型中石生种类最多;大兴安岭南端山地(萨如拉&白学良,2019)发现有34种药用苔藓并进行药用价值整理并发现湿润突生种类丰富度最高;内蒙古大冷山(郭巧兰等,2022)调查发现17种药用苔藓种类并发现其湿润土生种类最多;景宁畲族自治县(金民忠等,2022)发现77种药用种类且整理常见种类功效及生境;赛罕乌拉保护区(萨如拉等,2018)共收集到29种并发现湿润土生种类最丰富;贵州黔灵山脉(韩国营,2017)报道20种药用种类藓类植物占比较高,土生种类占绝对优势;浙江丽水市(张晓青等,2013)调查发现59种药用种类且对部分种类的生境及分布进行初步探究,多地陆续对药用苔藓植物进行了系统调查并形成药用苔藓植物名录,同时对当地药用苔藓植物功效进行整理,通过各地报道发现药用苔藓植物种类多地数量差异较大。西藏地区苔藓植物调查不断深入,但药用苔藓植物相关调查研究较少,其中,墨脱县为西藏全区植物资源最为丰富的地区,本研究主要以墨脱区域苔藓植物为研究对象,采用野外调查、室内鉴定、文献查阅和代谢物通路注释分析的方法,通过对西藏墨脱区域药用苔藓植物的调查分析,拟探讨以下问题:(1)墨脱药用苔藓植物种类数量;(2)墨脱部分药用苔藓植物代谢物探究;(3)墨脱药用苔藓植物生长基质类型分析。通过此次研究旨在丰富药用苔藓植物资源的研究,提供苔藓药用基础数据支持。

1 自然地理概况

墨脱县位于藏东南地区林芝市,地处雅鲁藏布江大峡谷地区,喜马拉雅山脉东端南麓,地形复杂,海拔变化大,地理位置特殊。位于北纬 $27^{\circ}34' \sim 29^{\circ}56'$ 、东经 $93^{\circ}46' \sim 96^{\circ}05'$,东与察隅县相邻、南与印度交界。海拔最低为200 m,最高为7782 m,海拔高差极大。年降水量超2000 mm,该地区属于喜马拉雅山脉亚热带湿润气候区,由于雅鲁藏布大峡谷的特殊地形,因此来自印度洋的暖湿气流可从出山口输入并在墨脱境内形成降水(李冉等,2024),受其影响墨脱形成了热带雨林、季雨林,降水丰沛,夏季降水集中,雨量大,冬季温暖湿润,同时又因为山地出现了由温带到寒带的垂直气候变化。墨脱主体森林为热带季雨林及半常绿阔叶林,雨热同期,特有植物数量丰富,因此,墨脱是西藏气候独特的地区之一,复杂气候和丰富的垂直植被带使得该地区的植物生境类型多样,拥有众多特有植被类型,是中国植物资源最为丰富的3个县级地区之一(王孜&彭建生,2022),湿润气候适宜苔藓植物生长,因此,该地区的苔藓植物资源也十分丰富。

2 研究方法

查阅《中国苔藓志(1~10卷)》(高谦,1994;高谦,1996;黎兴江,2000;吴鹏程,2002;高谦,2003;吴鹏程&贾渝,2004;胡人亮&王幼芳,2005;黎兴江,2006;高谦&吴玉环,2008;吴鹏程&贾渝,2011)《西藏苔藓植物志》(黎兴江,1985)《中国生物物

种名录》（第 1 卷）（王利松，2018）等文献，并进行苔藓植物野外调查、标本采集。2020 年 11—12 月至 2023 年 7—9 月、2024 年 6—9 月前后多次进入墨脱境内进行野外标本采集，以环境变化和苔藓植物分布为主线，采用样线法和样地法结合调查并进行标本采集。主要选择基质种类丰富的环境，共设置 13 个主要样地（10 m×10 m）（表 1），在每个样地中随机均匀选取不同基质样方（1m×1m）共 25 个，记录标本采集信息并保存带回，共采集标本 7 000 余份。保存的标本根据相关参考书籍在实验室进行种类鉴定，疑难标本送至专家鉴定，确保准确性。参考药用苔藓植物的相关文献及资料（江苏省植物研究所，1988；韩国营 & 赵遵田，2008；丁恒山，2010；艾铁民，2021），确定其种类及药用价值，数据统计参照物种 2000 中国节点（<http://www.sp2000.org.cn/download>）（刘冰等，2025），基于采集的标本形成墨脱药用苔藓植物名录。

对其中的 12 种苔藓进行色谱-质谱联用技术（LC-MS）代谢物检测及全谱分析，参照 KEGG 数据库对苔藓植物代谢物进行通路富集分析，利用 origin 软件对得到的数据进行处理。

对墨脱药用苔藓植物 8 种基质进行α多样性指数及 Sorensen 相似性系数统计分析。

表 1 样地基本信息及植被组成

样地编号	经纬度	地点	海拔	植被类型	主要物种
No.	Latitude and longitude	Place	Elevation (m)	Vegetation type	Major species
MT1	95° 15' 23.82" E 29° 16' 55.22" N	亚让村	638	河谷热带季节性雨林	2、5、6、7、25、 27、31
		Yarang		River valley tropical	
		Village		seasonal rainforest	
MT2	95° 24' 23.81" E 29° 25' 4.34" N	米日村	856	河谷热带季节性雨林	1、2、3、4、5、 6、7、8、9
		Miri Village		River valley tropical	
				seasonal rainforest	
MT3	95° 10' 28.39" E 29° 14' 41.9" N	背崩乡	889	河谷热带季节性雨林	10、11、12、13、 14、15、16、17、 18、19、20、21、 22
		Beibeng		River valley tropical	
		Village		seasonal rainforest	
MT4	95° 10' 10.23" E 29° 16' 31.18" N	马尼翁	912	河谷热带季节性雨林	12、15、17、18、 22
		Maniweng		River valley tropical	
		Village		seasonal rainforest	
MT5	95° 20' 2.04" E 29° 19' 37.66" N	仁钦崩寺	1 118	河谷热带季节性雨林	23、24、25、26、 27、28、29、30、 31、32
		Renqin		River valley tropical	
		Beng		seasonal rainforest	

		Temple			
MT6	95° 19' 55.02" E	墨脱县城		河谷热带季节性雨林	1、2、5、6、25、
	29° 19' 41.07" N	Medog	1 131	River valley tropical	29、30
		County		seasonal rainforest	
MT7	95° 10' 14.64" E	格林村		亚热带低山常绿阔叶	33、34、35、36、
	29° 13' 0.93" N	Gelin	1 791	林 Subtropical low	37、38、39、40、
		Village		mountain evergreen	41、42、43
MT8	95° 39' 56.87" E	占根卡村		针阔混交林 Mixed	4、5、13、37、
	29° 26' 5.4" N	Zhangenka	1 926	coniferous and	38、41、44、45
		village		broad-leaved forest	
MT9	95° 7' 39.73" E	汗密 Khan		针阔混交林 Mixed	
	29° 22' 1.99" N	Mi	2 157	coniferous and	25、26、27、31
				broad-leaved forest	
MT10	95° 29' 3.63" E			针阔混交林 Mixed	47、48、49、50、
	29° 39' 24.92" N	80k	2 221	coniferous and	51、52、53、54、
				broad-leaved forest	55、56
MT11	95° 34' 55.26" E			针叶林 Coniferous	
	29° 42' 35.58" N	62k	2 812	forest	57、58、59、60
MT12	95° 40' 37.12" E			针叶林 Coniferous	
	29° 44' 17.69" N	52k	3 443	forest	57、58、61、62
MT13	95° 41' 10.92" E	嘎隆拉隧道			
	29° 45' 17.73" N	Galonla	4 345	高山灌丛 Alpine scrub	63、64
		Tunnel			

Table 1 Basic information and vegetation composition of the sample plot

注: 1. 小果紫薇 *Lagerstroemia subcostata*; 2. 壳菜果 *Mytilaria laosensis*; 3. 野蕉 *Musa balbisiana*; 4. 大眼竹 *Bambusa eutuldoides*; 5. 斜叶榕 *Ficus tinctoria*; 6. 抱石莲 *Lepidogrammitis drymoglossoides*; 7. 下田菊 *Adenostemma lavenia*; 8. 大蝎子草 *Girardinia diversifolia*; 9. 书带蕨 *Vittaria flexuosa*; 10. 芭蕉 *Musa basjoo*; 11. 钩锥 *Castanopsis tibetana*; 12. 日本杜英 *Elaeocarpus japonicus*; 13. 台湾榕 *Ficus formosana*; 14. 尼泊尔水东哥 *Saurauia napaulensis*; 15. 藏瓜 *Indofevillea khasiana*; 16. 水同木 *Ficus fistulosa*; 17. 马比木 (藤本) *Nothapodytes pittosporoids*; 18. 鸦胆子 *Brucea javanica*; 19. 栲树 *Koelreuteria paniculata*; 20. 山油麻 *Trema dielsiana*; 21. 丛枝蓼 *Polygonum caespitosum*; 22. 海南山姜 *Alpinia hainanensis*; 23. 枹

菊木 *Nouletia insignis*; 24. 楝木 *Swida macrophylla*; 25. 茜树 *Aidia cochinchinensis*; 26. 风藤 *Piper kadsura*; 27. 杭州榆 *Ulmus changii*; 28. 苏铁蕨 *Brainea insignis*; 29. 齿尖蹄盖蕨 *Athyrium dentilobum*; 30. 变豆菜 *Sanicula chinensis*; 31. 矛叶荩草 *Arthraxon lanceolatus*; 32. 中华里白 *Diplopterygium chinensis*; 33. 斯里兰卡天料木 *Homalium zeylanicum*; 34. 乔松 *Pinus griffithii*; 35. 香果树 *Emmenopterys henryi*; 36. 白桫欏 *Sphaeropteris brunoniana*; 37. 云南土沉香 *Excoecaria acerifolia*; 38. 针毛蕨 *Macrothelypteris oligophlebia*; 39. 白酒草 *Conyza japonica*; 40. 双蝴蝶 *Tripterospermum chinense*; 41. 留兰香 *Mentha spicata*; 42. 南方荚蒾 *Viburnum fordiae*; 43. 寒兰 *Cymbidium kanran*; 44. 木奶果 *Baccaurea ramiflora*; 45. 不丹松 *Pinus bhutanica*; 46. 墨脱百合 *Lilium medogense*; 47. 尖叶桂樱 *Laurocerasus undulata*; 48. 棘茎槐木 *Aralia echinocaulis*; 49. 西域青荚叶 *Helwingia himalaica*; 50. 金珠柳 *Maesa montana*; 51. 白叶莓 *Rubus innominatus*; 52. 四蕊朴 *Celtis tetrandra*; 53. 覆盆子 *Rubus idaeus*; 54. 姬蕨 *Hypolepis punctata*; 55. 墨脱悬钩子 *Rubus metoensis*; 56. 独牛 *Begonia henryi*; 57. 墨脱冷杉 *Abies delavayi* var. *motuoensis*; 58. 云南铁杉 *Tsuga dumosa*; 59. 小圆叶冬青 *Ilex nothofagifolia*; 60. 云南冬青 *Ilex yunnanensis*; 61. 急尖长苞冷杉 *Abies georgei* var. *smithii*; 62. 长果报春 *Bryocarpum himalaicum*; 63. 高山杜鹃 *Rhododendron lapponicum*; 64. 红景天 *Rhodiola rosea*。

3 结果与分析

3.1 药用苔藓种类资源状况

根据本次采集结果,结合前期团队采集标本整理得出,墨脱典型区域苔藓植物共有 101 科 299 属 1 016 种,苔类植物 43 科 82 属 317 种,藓类植物 58 科 217 属 699 种。经查阅相关文献资料及采集的标本,整理鉴定统计,共发现墨脱药用种类 91 种,隶属于 44 科 59 属,包括藓类 25 科 39 属 66 种,苔类 19 科 20 属 25 种(表 2)。药用种类数量分别占墨脱区域科属种数量的 43.56%、19.73%、8.96%,占墨脱藓类科属种的 43.10%、17.97%、9.44%,占苔类科属种的 44.19%、24.39%、7.89%。单科单属种类有 25 种,仅占总种数的 27.47%。相较于其他地区的报道,墨脱药用苔藓植物种类丰富,药用苔类较其他地区数量具有明显优势,药用藓类科属种数量丰富(图 1)。

表 2 墨脱药用苔藓植物名录

Table 2 List of medicinal bryophytes in Medog

科 Family	属数 No. of genus	种数 No. of species
绿片苔科 Aneuraceae	1	1
疣冠苔科 Aytoniaceae	1	1
蛇苔科 Conocephalaceae	2	2
毛地钱科 Dumortieraceae	1	1
小叶苔科 Fossombroniaceae	1	1
耳叶苔科 Frullaniaceae	1	3
剪叶苔科 Herbertaceae	1	1
叶苔科 Jungermanniaceae	1	1
细鳞苔科 Lejeuneaceae	1	1
指叶苔科 Lepidoziaceae	1	1
齿萼苔科 Lophocoleaceae	1	1
地钱科 Marchantiaceae	1	3
须苔科 Mastigophoraceae	1	1
溪苔科 Pelliaceae	1	1
羽苔科 Plagiochilaceae	1	1

扁萼苔科 Radulaceae	1	2
合叶苔科 Scapaniaceae	1	1
管口苔科 Solenostomataceae	1	1
魏氏苔科 Wiesnerellaceae	1	1
柳叶藓科 Amblystegiaceae	1	1
珠藓科 Bartramiaceae	3	5
真藓科 Bryaceae	2	3
曲尾藓科 Dicranaceae	1	3
牛毛藓科 Ditrichaceae	1	1
绢藓科 Entodontaceae	1	1
凤尾藓科 Fissidentaceae	1	4
葫芦藓科 Funariaceae	2	3
紫萼藓科 Grimmiaceae	1	2
虎尾藓科 Hedwigiaceae	1	1
塔藓科 Hylocomiaceae	1	1
灰藓科 Hypnaceae	2	2
薄罗藓科 Leskeaceae	3	5
白齿藓科 Leucodontaceae	1	1
蔓藓科 Meteoriaceae	3	3
提灯藓科 Mniaceae	1	5
平藓科 Neckeraceae	1	1
棉藓科 Plagiotheciaceae	1	1
金发藓科 Polytrichaceae	4	8
丛藓科 Pottiaceae	2	3
蕨藓科 Pterobryaceae	1	1
金灰藓科 Pylaisiaceae	1	1
粗石藓科 Rhabdoweisiaceae	2	2
泥炭藓科 Sphagnaceae	1	6
鳞叶藓科 Taxiphyllaceae	1	2
合计 Total 44	59	91

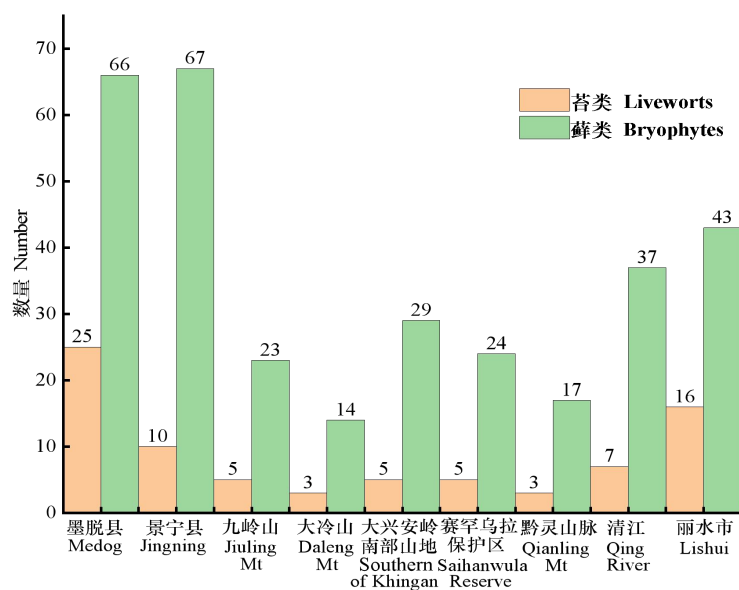


图 1 不同地区药用苔藓数量统计

Fig. 1 Statistics of the number of medicinal bryophytes in different regions

3.2 药用功效

通过查阅文献资料及报道，明晰了墨脱药用苔藓的主要功效及用途（表 3）。药用苔藓植物主要具有清热解毒、消炎止痛、止血生肌、镇静安神、化瘀消肿、抗癌、抗菌等功效。泥炭藓属多数植物体粗大而柔软，吸水能力强，消毒处理后可用作医用敷料。此外，部分药用苔藓所含代谢物成分具有药用功效。

表 3 墨脱药用苔藓植物药用功效

Table 3 Medicinal efficacy of medicinal bryophytes in Medog

种 Species	药用功效 Medicinal properties
片叶苔 <i>Riccardia multifida</i>	对 KB 细胞有抑制活性 Displays inhibitory activity against KB cells
石地钱 <i>Reboulia hemisphaerica</i>	治跌打肿痛、外伤出血等 Treat bruises, swelling, pain, external bleeding, etc
蛇苔 <i>Conocephalum conicum</i>	治毒蛇咬伤、痈疮肿毒、烫伤、骨折、烧伤等 Treat snakebites, abscesses, scalds, fractures, burns, etc
小蛇苔 <i>Sandea japonica</i>	具有消毒止痛、解毒的功能。用于治痈疖、疔疮、毒蛇咬伤等 Possesses disinfectant, analgesic, and detoxifying functions. Used for carbuncles, furuncles, snakebites, etc
毛地钱 <i>Dumortiera hirsuta</i>	药效同蛇苔 Similar to <i>conocephalum conicum</i> in medicinal effect
小叶苔 <i>Fossombronina pusilla</i>	抗菌 Antibacterial
列胞耳叶苔 <i>Frullania moniliata</i>	清心明目、补肾，用于目赤肿痛，眼雾 Clear the heart ,brighten vision, nourish the kidneys, and use it

种 Species	药用功效 Medicinal properties
盔瓣耳叶苔 <i>Frullania muscicola</i>	for red, swollen and painful eyes, and fog in the eyes 抗菌, 消炎, 治腮腺炎 Antibacterial, anti-inflammatory, treats mumps
欧耳叶苔 <i>Frullania tamarisci</i>	对 KB 细胞有抑制作用 Displays inhibitory activity against KB cells
樱井剪叶苔 <i>Herbertus sakuraii</i>	促进神经元生长和增强胆碱乙酰转移酶活性 Promotes neurite outgrowth and enhances choline acetyltransferase activity
锥叶狭叶苔 <i>Lioclaena subulata</i>	抗氧化 Antioxidant
南亚顶鳞苔 <i>Acrolejeunea sandvicensis</i>	对 KB 细胞有抑制活性 Display inhibitory activity against KB cells
东亚指叶苔 <i>Lepidozia fauriana</i>	抗菌、抗真菌、抗癌活性 Antibacterial, antifungal, anticancer activity
裂萼苔 <i>Chiloscyphus polyanthus</i>	抗癌 Anti-cancer
东亚地钱 <i>Marchantia emarginata</i> subsp. <i>tosana</i>	抗鼻咽癌, 抗菌, 抗真菌, 肌肉松弛 Anti-nasopharyngeal cancer antibacterial, antifungal, muscle relaxation
粗裂地钱 <i>Marchantia paleacea</i>	用于治疗黏膜炎 Treat mucositis
地钱 <i>Marchantia polymorpha</i>	药效同蛇苔 Similar to <i>conocephalum conicum</i> in medicinal effect
硬须苔 <i>Mastigophora diclados</i>	促进神经元生长和增强胆碱乙酰转移酶活性 Promotes neurite outgrowth and enhances choline acetyltransferase activity
异溪苔 <i>Apopellia endiviifolia</i>	抗肿瘤 Anti-tumor
刺叶羽苔 <i>Plagiochila sciophila</i>	加速神经轴突生长 Accelerate axonal growth
扁萼苔 <i>Radula complanata</i>	拮抗血管紧张 Antagonizes angiotensin
直瓣扁萼苔 <i>Radula perrottetii</i>	抗菌、抗真菌、抗癌活性 Antibacterial, antifungal, anticancer activity
弯瓣合叶苔 <i>Scapania parvixeta</i>	抗氧化 Antioxidant
偏叶管口苔 <i>Solenostoma comatum</i>	抑制凝血酶活性 Inhibition of thrombin activity
柑皮苔 <i>Wiesnerella denudata</i>	对 KB 细胞有抑制活性 Display inhibitory activity against KB cells
牛角藓 <i>Cratoneuron filicinum</i>	养心安神, 治心悸、心跳、神经衰弱等 Nourishes the heart and calms the mind, treats palpitations, heartbeat, neurasthenia, etc
直叶珠藓 <i>Bartramia ithyphylla</i>	治中风不语、癫痫等, 镇静安神 Treat stroke and speechlessness, epilepsy, etc., and calm the nerves
梨蒴珠藓 <i>Bartramia pomiformis</i>	对淋巴细胞白血病和神经胶质细胞瘤有抑制作用 Inhibits lymphocytic leukemia and glioma cells
泽藓 <i>Philonotis fontana</i>	清热解毒, 治疮疖、扁桃体炎、喉炎、上呼吸道炎 症等 Clear heat and detoxifies, treat boils, tonsillitis, laryngitis, upper respiratory tract inflammation, etc
东亚泽藓 <i>Philonotis turneriana</i>	清热止血, 利尿消肿, 用于咽喉肿痛, 水肿, 外伤

种 Species	药用功效 Medicinal properties
	出血 Clear heat and stop bleeding, diuresis and swelling. Used for sore throat, edema, trauma and bleeding
平珠藓 <i>Plagiopus oederianus</i>	药效同直叶珠藓 Similar to <i>bartramia ithyphylla</i> in medicinal effect
真藓 <i>Bryum argenteum</i>	清热解毒, 治细菌性痢疾、鼻窦炎等 Clear heat and detoxifies, treat bacterial dysentery, sinusitis, etc
	养心安神, 清肝明目, 壮阳补肾。治冠心病, 结石, 目赤, 刀伤等 Nourishing the heart and calming the mind, clearing the liver and eyes, aphrodisiac and nourishing the kidneys. Used for coronary heart disease, calculi, conjunctival congestion, knife wounds, etc
暖地大叶藓 <i>Rhodobryum giganteum</i>	
阔边大叶藓 <i>Rhodobryum laxelimbatum</i>	药效同暖地大叶藓 Similar to <i>rhodobryum giganteum</i> in medicinal effect
棕色曲尾藓 <i>Dicranum fuscescens</i>	药效同梨朔珠藓 Similar to <i>bartramia pomiformis</i> in medicinal effect
多蒴曲尾藓 <i>Dicranum majus</i>	止咳, 清热, 解毒。用于肺热咳嗽 Relieve cough, clear heat, remove toxicity. Used for cough due to lung heat
曲尾藓 <i>Dicranum scoparium</i>	治老年虚咳、跌打损伤、风湿麻木 Treat cough, bruises, rheumatism and numbness in the elderly
黄牛毛藓 <i>Ditrichum pallidum</i>	镇惊, 治小儿惊风 Treat convulsions in children
柱蒴绢藓 <i>Entodon challengerii</i>	利尿, 止血。用于水肿病, 鼻出血 Diuretic, hemostatic. Used for edema and epistaxis
卷叶凤尾藓 <i>Fissidens dubius</i>	清热解毒。用于咽喉肿痛, 鼻炎 Clear heat and detoxifies. Used for sore throat, rhinitis
裸萼凤尾藓 <i>Fissidens gymnogynus</i>	清热解毒。用于咽喉肿痛, 鼻炎 Clear heat and detoxifies. Used for sore throat, rhinitis
大凤尾藓 <i>Fissidens nobilis</i>	药效同卷叶凤尾藓 Similar to <i>fissidens dubius</i> in medicinal effect
鳞叶凤尾藓 <i>Fissidens taxifolius</i>	清热解毒。用于咽喉肿痛, 鼻炎 Clear heat and detoxifies. Used for sore throat, rhinitis
狭叶葫芦藓 <i>Funaria attenuata</i>	利尿, 镇痛, 消肿。用于跌打损伤, 水肿。并可熏治诸疮 Diuretic, analgesic, and swelling. Used for bruises, edema and also be smoked to treat various sores
	祛风除湿, 舒筋活血, 镇痛止血。治肺热吐血、跌打损伤、湿气脚痛、鼻窦炎、关节炎 Dispel wind and dehumidify, relax tendons and activate blood, analgesic and stop bleeding. Treat lung heat and vomiting blood, bruises, dampness and foot pain, sinusitis, arthritis
葫芦藓 <i>Funaria hygrometrica</i>	

种 Species	药用功效 Medicinal properties
立碗藓 <i>Physcomitrium sphaericum</i>	消肿，镇痛，利尿。用于水肿，跌打肿痛 Reduce swelling, analgesic, and diuretic. Used for edema, bruising and pain
尖顶紫萼藓 <i>Grimmia fuscolutea</i>	利尿，治水肿 Diuresis and treatment of edema
卵叶紫萼藓 <i>Grimmia ovalis</i>	利尿，治水肿 Diuresis and treatment of edema
虎尾藓 <i>Hedwigia ciliata</i>	抗菌 Antibacterial
	止血消炎，治外伤出血、胃肠出血、肺咯血等 Hemostatic and anti-inflammatory, treat traumatic bleeding, gastrointestinal bleeding, pulmonary
小蔓藓 <i>Meteoriella soluta</i>	hemoptysis, etc
	消炎止痛、退热，治咽喉炎、肺炎、盲肠炎 Anti-inflammatory, pain-relieving, antipyretic, treating
尖叶灰藓 <i>Hypnum callichrom</i>	pharyngitis, pneumonia, appendicitis
毛梳藓 <i>Ptilium crista-castrensis</i>	药效同梨蒴珠藓 Similar to <i>bartramia pomiformis</i> in medicinal effect
	清热解毒。用于烧、烫伤，丹毒 Clear heat and detoxifies. Used for burns, scalds, erysipelas
山羽藓 <i>Abietinella abietina</i>	止痛消炎，治尿路感染、胃肠炎、乳腺炎、肺炎、咽喉炎等 Relieve pain and reduce inflammation, treat
狭叶小羽藓 <i>Haplocladium angustifolium</i>	urinary tract infections, gastroenteritis, mastitis, pneumonia, pharyngitis, etc
细叶小羽藓 <i>Haplocladium microphyllum</i>	药效同狭叶小羽藓 Similar to <i>haplocladium angustifolium</i> in medicinal effect
	祛腐生肌、清热解毒，治烧烫伤。有效抑制肺炎球菌 Remove decay and muscle growth, clear heat and detoxify, and treat burns. Effectively inhibits
大羽藓 <i>Thuidium cymbifolium</i>	pneumococcus
	抗菌消炎，有效抑制金黄色葡萄球菌、痢疾杆菌、大肠杆菌、枯草杆菌 Antibacterial and
短肋羽藓 <i>Thuidium kanedae</i>	anti-inflammatory, effectively
	inhibiting ,taphylococcus aureus, dysentery bacillus, escherichia coli, and bacillus subtilis
偏叶白齿藓 <i>Leucodon secundus</i>	散瘀消肿，治吐血、跌打肿痛 Disperse blood stasis and reduce swelling, treat vomiting blood, bruises, swelling and pain
	清热消炎，治烧伤 Clear heat and reduces
毛扭藓 <i>Aerobryidium filamentosum</i>	inflammation, and treat burns
丝带藓 <i>Floribundaria floribunda</i>	治外伤出血及胃肠出血 Treat traumatic bleeding and
	gastrointestinal bleeding
	止血消炎，治外伤出血、胃肠出血、肺咯血等 Stop bleeding, reduces inflammation. Used for external
新丝藓 <i>Neodictyella pendula</i>	bleeding, gastrointestinal hemorrhage, pulmonary

种 Species	药用功效 Medicinal properties
	hemoptysis, etc
匐灯藓 <i>Plagiomnium cuspidatum</i>	清热, 止血。治鼻出血、崩漏、抗肝毒 Clear heat and stop bleeding. Treat nosebleeds, leakage, and anti-liver
	toxin
阔边匐灯藓 <i>Plagiomnium ellipticum</i>	为五倍子蚜虫第二寄主 Serves as the secondary host for <i>schlechtendalia chinensis</i> (Chinese sumac aphid)
侧枝匐灯藓 <i>Plagiomnium maximoviczii</i>	为五倍子蚜虫第二寄主 Serves as the secondary host for <i>schlechtendalia chinensis</i> (Chinese sumac aphid)
具喙匐灯藓 <i>Plagiomnium rhynchophorum</i>	止血、凉血, 治鼻衄和崩漏等 Stop bleeding, cool blood, treat epistaxis and leakage, etc
圆叶匐灯藓 <i>Plagiomnium vesicatum</i>	为五倍子蚜虫第二寄主 Serves as the secondary host for <i>schlechtendalia chinensis</i> (Chinese sumac aphid)
扁枝藓 <i>Homalia trichomanoides</i>	抗真菌 Antifungal
波叶棉藓 <i>Plagiothecium undulatum</i>	药效同梨朔珠藓 Similar to <i>bartramia pomiformis</i> in medicinal effect
仙鹤藓 <i>Atrichum undulatum</i>	用于淋巴腺炎症, 抗癌 Used for inflammation of the lymph glands, anti-cancer
扭叶小金发藓 <i>Pogonatum contortum</i>	清热解毒, 治疮毒溃疡、背疽 Clear heat and detoxifies, treat ulcers and back abscesses
东亚小金发藓 <i>Pogonatum inflexum</i>	镇静安神, 治心悸怔忡、神经衰弱、胸闷及心绞痛等 Calm the mind and treat palpitations, neurasthenia, chest tightness and angina
	消肿散瘀、排石止痛, 治胆囊积石等 Reduce swelling and stasis, relieve pain by removing stones, treat gallbladder stones, etc
小口小金发藓 <i>Pogonatum microstomum</i>	用于疮疖肿毒, 烫伤, 无名肿毒, 小儿发热, 惊厥 Used for boils, boils, burns, nameless swelling and poison, fever and convulsions in children
拟金发藓 <i>Polytrichastrum alpinum</i>	清热镇惊。用于小儿惊风 The clear heat is shocking. Used for pediatric strokes
拟金发藓原变种 <i>Polytrichastrum alpinum var. alpinum</i>	收敛, 发汗, 强壮 Astringent, sweating, and strengthening
台湾拟金发藓 <i>Polytrichastrum formosum</i>	通便、收敛止血、清热解毒补肾。用于刀伤出血、鼻出血、吐血、便血、血崩、肺癆、痈毒、抗癌 Laxative, astringent and hemostasis, clearing away heat and detoxifying the kidneys. Used for knife wound bleeding, nosebleeding, vomiting blood, blood in the stool, blood collapse, tuberculosis, carbuncle, and anti-cancer
金发藓 <i>Polytrichum commune</i>	清热止痢, 治细菌性痢疾 Clear heat and stop dysentery, treats bacterial dysentery
砂地石灰藓 <i>Barbula arcuata</i>	清热解毒, 治急慢性鼻炎、鼻窦炎 Clear heat and detoxifies, treat acute and chronic rhinitis and sinusitis
扭口藓 <i>Barbula unguiculata</i>	

种 Species	药用功效 Medicinal properties
小石藓 <i>Weissia controversa</i>	清热解毒，治急慢性鼻炎、鼻窦炎 Clear heat and detoxifies, treat acute and chronic rhinitis and sinusitis
急尖耳平藓 <i>Calypothecium hookeri</i>	清热解毒。用于咽喉肿痛，疮疖痈肿 Clear heat and detoxifies. Used for sore throat, boils and abscesses
大灰藓 <i>Calohypnum plumiforme</i>	清热凉血，用于治烧伤、鼻衄、咯血、吐血、血崩等 Clear heat and cools blood, and used for treat burns, epistaxis, hemoptysis, vomiting blood, blood collapse, etc
曲背藓 <i>Oncophorus wahlenbergii</i>	祛风湿，清热止血。用于风湿麻木，外伤出血 Dispell rheumatism, clear heat and stops bleeding. Used for rheumatism numbness, trauma bleeding
山毛藓 <i>Oreas martiana</i>	祛风湿、安神、镇痛。治风湿麻木、寒凝腹痛、外伤出血 Treat rheumatism, calming the nerves, and analgesic. Treat rheumatism numbness, cold coagulation abdominal pain, and traumatic bleeding
尖叶泥炭藓 <i>Sphagnum capillifolium</i>	主治急性结膜炎 Indications for acute conjunctivitis
白齿泥炭藓 <i>Sphagnum girgensohnii</i>	治目生云翳、皮肤病、虫叮瘙痒、消毒后可代脱脂棉 Treat corneal opacity, skin disorders, and insect bite itching. After disinfection, can be used as an absorbent cotton substitute
暖地泥炭藓 <i>Sphagnum junghuhnianum</i>	清热明目，止痒。用于目生云翳，皮肤病，虫叮瘙痒 Clear heat and brighten the eyes, relieve itching. Used for eye clouds, skin diseases, and insect bites
泥炭藓 <i>Sphagnum palustre</i>	止痒、止血；治角膜白斑、目赤肿痛、皮肤病，可用于医药敷料 Antipruritic, hemostatic; treat corneal opacity, conjunctival congestion, and skin disorders. Applicable as medical dressing material
粗叶泥炭藓 <i>Sphagnum squarrosum</i>	功效同白齿泥炭藓 Similar to <i>sphagnum girgensohnii</i> in medicinal effect
细叶泥炭藓 <i>Sphagnum teres</i>	清热、消肿、明目、退云翳，治角膜白斑、目赤肿痛等 Clear heat, reduce swelling, brighten the eyes, reduce clouds, treat corneal leukoplakia, redness, swelling and pain, etc
钝头鳞叶藓 <i>Taxiphyllum arcuatum</i>	清热明目，退翳消肿。用于角膜白斑，目赤肿痛。 Clear heat and brightens the eyes, reduce darkness and swelling. Used for corneal leukoplakia, redness, swelling and pain
鳞叶藓 <i>Taxiphyllum taxirameum</i>	消炎，止血 Anti-inflammatory, hemostatic

3. 3KEGG 代谢通路注释分析

基于整理的墨脱药用苔藓植物名录对墨脱药用苔藓植物进行代谢物研究，选择墨脱药用苔藓中药用功效记载明晰且在其他地区常见种类为代表，选择苔类植物毛地钱、小蛇苔和藓类植物大羽藓、鳞叶藓、新丝藓、泥炭藓、暖地大叶藓、大灰藓、金发藓、匍灯藓、曲尾藓、泽藓进行 LC-MS 代谢物检测。12 种药用苔藓植物代谢物成分相似，基于 KEGG 数据库对鉴

定到的代谢物进行注释和分类，通过 KEGG 通路分析对 12 种苔藓植物代谢物进行共同通路富集，对其代谢物结果进行富集分析，结果表明，共注释到 204 个代谢物，分布在 81 条代谢通路上，其中前 20 个富集通路为 ABC 转运体（12 个）、植物次生代谢产物生物合成（20 个）、单环酰胺生物合成（6 个）、氰基氨基酸代谢（7 个）、D-氨基酸代谢（11 个）、类黄酮生物合成（13 个）、 β -丙氨酸代谢（6 个）、苯丙烷类生物合成（11 个）、苯丙氨酸代谢（10 个）、黄酮和黄酮醇生物合成（11 个），缬氨酸、亮氨酸和异亮氨酸生物合成（5 个）、 α -亚麻酸代谢（10 个）、亚油酸代谢（7 个）、柠檬酸盐循环（TCA 循环）（5 个）、氧化磷酸化（4 个）、氨酰基生物合成（14 个），苯丙氨酸、酪氨酸和色氨酸生物合成（10 个），角质、软脂和蜡生物合成（8 个），精氨酸生物合成（7 个），丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸代谢（10 个）。代谢物数量最多的代谢通路为植物次生代谢产物生物合成，包括天冬氨酸(aspartate)、色氨酸(tryptophan)、苯丙氨酸(phenylalanine)、酪氨酸(tyrosine)、预苯酸(prephenic acid)、吲哚(indole)、莽草酸(shikimic acid)、佛手酚(bergaptol)、甲羟松(medrysone)、佛手苷内酯(bergapten)、东莨菪碱(scopoletin)、2-羟基肉桂酸(2-hydroxycinnamic acid)、5-羟基-8-甲氧基补骨脂素(5-hydroxyxanthotoxin)、七叶内酯(aesculetin)、秦皮素(fraxetin)、滨蒿内酯(scoparone)、伞形酮(umbelliferone)、齐墩果酸(oleanolic acid)、异莨菪碱(isoscopoletin)、王草酚(osthenol)，参与植物次生代谢产物生物合成的代谢物显著富集（图 2）。

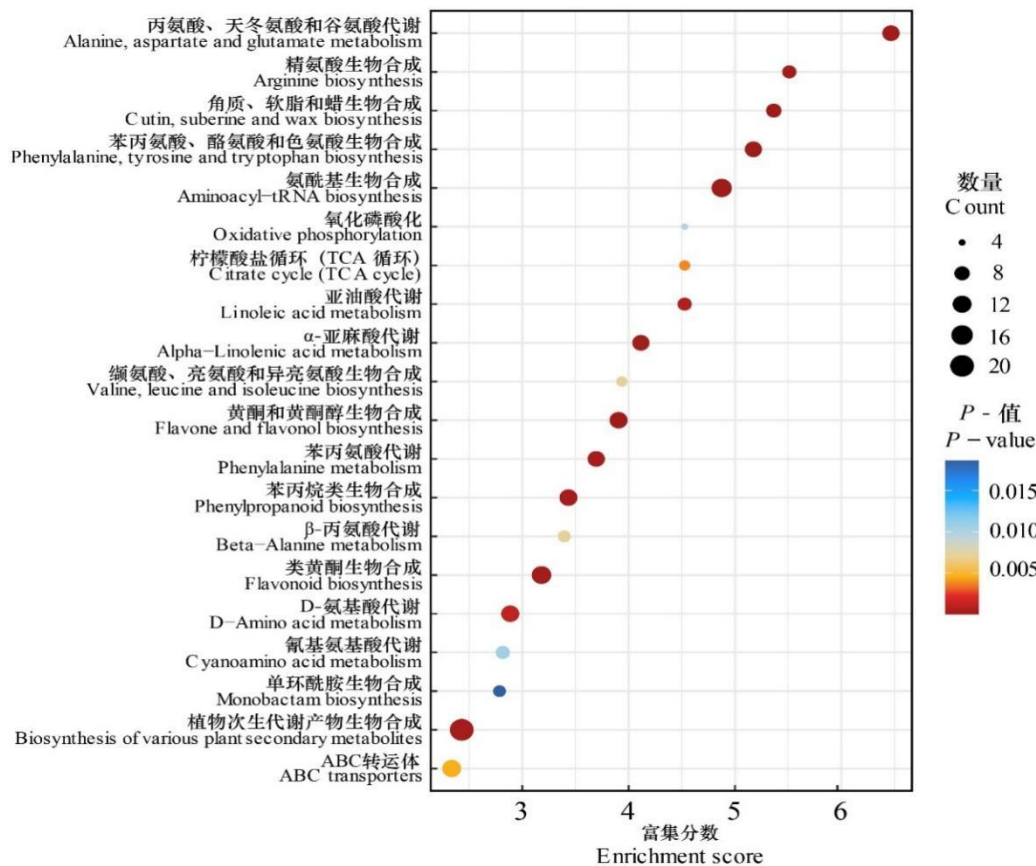


图 2 KEGG 代谢物富集图

Fig. 2 KEGG metabolite enrichment map

3.4 墨脱药用苔藓植物生长基质统计

苔藓植物的根主要为支撑固定的作用，其营养摄取方式主要为体表直接吸收，但苔藓植物生长基质对其体内化学元素种类与含量具有一定影响（毛祝新等，2021），苔藓植物与土壤、岩石、树木等不同生长基质之间有联系，不同性状的基质影响苔藓植物的种类与分布情

况。通常苔藓植物主要附着在土、石、树、水和腐木等生境上。对墨脱区域 91 种药用苔藓植物进行统计,按生长基质划分可分为土生、石生、土石生、岩面薄土、树附生、腐木生、水生、腐殖质生共 8 种生长基质类型(表 4)。墨脱药用苔藓植物土生群落数量占总数的 52.75%。土生群落种类有蛇苔、小叶苔、平珠藓、匍灯藓等,多数在原始林林下湿润土壤,湿度较高,部分为亚热带常绿阔叶林下及林缘,且墨脱区域森林植物物种丰富,郁闭度高,是喜阴苔藓种类的优势生长环境。石生群落有扁萼苔、柑皮苔、尖顶紫萼藓、虎尾藓等,占总种数的 64.84%,因山地森林湿润多雨,相较于其他植物,苔藓的生长及营养摄取方式对附着石头生长具有优势,分布于该基质的药用苔藓植物种类占比最多。树附生群落有平叶异萼苔、刺叶羽苔、狭叶小羽藓、丝带藓等,占总数的 29.67%。腐木生群落有盔瓣耳叶苔、弯瓣合叶苔、曲尾藓、尖叶灰藓等,占总种数的 29.67%。墨脱山地气候生境类型多样,区域内森林植被类型丰富,采集区域海拔主要为 600~4 000 m 区间内,采集区域植被大部分为热带季雨林及亚热带常绿阔叶林,为降水丰沛区域,且土壤含水率高,林下有许多阴湿环境,郁闭度高且产生倒木数量多。热带季雨林中苔藓植物大片丛生,附生种类极为丰富。土石生群有毛地钱、东亚地钱、大灰藓等,占总数的 10.99%。土石生基质为土壤与碎石、砾石的混合物,多为砂质土,与岩面薄土的土壤附着积累石块上不同。土石生群落主要为针阔混交林和针叶林林下、林缘、路边、村庄周围及房屋周边等干燥环境,植被覆盖度低,生境较为干燥,苔藓种类较少。岩面薄土群落有东亚指叶苔、地钱、暖地大叶藓、立碗藓等,占总数的 48.35%。该基质多为林下、灌木丛下石缝、岩面等,岩石表面有薄土层附着。水生群落有小蛇苔、地钱、泥炭藓等,占 10.99%,腐殖质群落有阔边大叶藓、毛梳藓、白齿泥炭藓等,占 10.99%。水生环境主要为溪边或沼泽地,腐殖质主要为凋落物、动物粪便等,水生和腐殖质生因生长基质类型受限,因此种类较少。

对药用苔藓植物的多样性指数进行分析(表 4),8 种基质类型的 Margalef 丰富度指数及 Shannon 多样性指数依次为石生>土生>岩面薄土>树附生>腐木生>水生>土石生>腐殖质生。Pielou 均匀度指数变化幅度较小,表明不同基质类型中药用苔藓植物个体数分布频率较为接近。Simpson 优势度指数数值变化较小且数值较低,表明 8 种基质类型物种优势度均较低。通过对不同基质生长物种的相似性分析得出不同基质苔藓种类差异较大(表 5),其中岩面薄土生苔藓种类与石生苔藓种类相似性系数最高,两种基质共有种类 27 种。墨脱岩面薄土生苔藓主要生境为湿润林下,与石生苔藓生长环境较为相似,两种基质湿度、光照等因素差异较小。腐木生和水生、土石生和腐殖质生相似性系数最低,种类差异大,主要原因为生长基质受限制,环境差异显著。

表 4 8 种基质苔藓多样性指数分析

Table 4 Diversity index analysis of eight substrate bryophytes

类型 Type	土生 Terrestrial	石生 Lithophytic	土石生 Saxicolous	岩面薄土 Thin soil on rock	树附生 Epiphytic	腐木生 Lignicolous	水生 Aquatic	腐殖质生 Humicolous
种数 Species	48	59	10	44	27	27	10	10
Margalef 丰富度	10.445	13.274	3.509	9.785	7.255	7.001	3.753	3.323
Shannon 多样性指数	3.744	3.981	2.245	3.623	3.184	3.064	2.272	2.176
Pielou 均匀度	0.967	0.976	0.975	0.957	0.966	0.930	0.987	0.945

指数								
Simpson								
优势度	0.016	0.008	0.038	0.020	0.021	0.040	0.018	0.067
指数								

表 5 8 种基质苔藓种类相似性系数分析

Table 5 Analysis of similarity coefficients of 8 substrate moss species

土生	石生	土石生	岩面薄土	树附生	腐木生	水生	腐殖质生
Terrestrial	Lithophytic	Saxicolous	Thin soil on rock	Epiphytic	Lignicolous	Aquatic	Humucolous
土生	0.523	0.207	0.500	0.373	0.320	0.310	0.172
Terrestrial							
石生	—	0.232	0.524	0.395	0.372	0.174	0.1734
Lithophytic							
土石生	—	—	0.222	0.054	0.216	0.100	0
Saxicolous							
岩面薄土	—	—	—	0.254	0.338	0.148	0.111
Thin soil on rock							
树附生	—	—	—	—	0.222	0.216	0.054
Epiphytic							
腐木生	—	—	—	—	—	0	0.216
Lignicolous							
水生	—	—	—	—	—	—	0.300
Aquatic							
腐殖质生	—	—	—	—	—	—	—
Humucolous							

4 讨论

4.1 物种多样性分析

墨脱药用苔藓植物 44 科 59 属 91 种，占墨脱苔藓植物科、属、种的 41.58%、19.06%、8.48%，科、属、种占比较高，多种科数量较多。药用苔类植物数量较其他地区占绝对优势，苔类植物对环境敏感度更高，墨脱具有多种高异质植被类型，能提供更为多样的生长条件，微生境极发达。近饱和且稳定的空气湿度使苔类植物的水分胁迫几乎消除。苔类植物中的丰富的次生代谢产物尤其是萜类及油类，这些物质使其在微生物极多的湿润森林中抗菌抗虫，具有化感作用。因此墨脱药用苔藓植物尤其是苔类物种多样性较高。药用藓类植物中粗叶泥炭藓为国家二级保护植物，阔边大叶藓属易危物种（VU）（生态环境部等，2020），药用苔藓植物尤其是药用苔类多数为单科单属单种，对苔藓植物药用资源开发时需注重苔藓植物种质资源的保护。司孟鑫等（2024）报道的墨脱苔类 8 个优势科中 7 个科发现药用苔类，5 个优势属中 3 个存在药用苔类。马和平等（2025）报道墨脱藓类植物 12 个优势科中 11 个优势科发现药用藓类植物。苔藓植物种类多且体型小，鉴定困难，药用苔藓同属近缘种多数具有相似的药用功效，可进一步对同属种类研究，丰富药用苔藓植物种类资源。

4.2 药用功效分析

苔藓植物次生代谢产物是其药用功效的主要来源，其他地区药用苔藓植物资源调查仅对

当地药用苔藓植物功效记载进行整理,本研究进一步选取部分常见药用苔藓植物进行代谢物检测。目前文献研究发现,苔藓植物尤其是苔类植物基本具有生物活性天然产物的所有结构类型,且主要特征化合物为萜类和联苳类化合物。基于对代谢物检测结果统计,本研究发现,墨脱 12 种药用苔藓中毛地钱、新丝藓、暖地大叶藓、大灰藓、匍灯藓、曲尾藓、泽藓萜类化合物中单萜类化合物 4 种,二萜类化合物 14 种,三萜类化合物 19 种,倍半萜类化合物 9 种,其余萜类 5 种,其余苔藓种类萜类化合物较少。萜类是苔藓植物抗炎及抑制癌细胞的有效化学成分。因此对苔藓植物的化学成分进行医药应用,是药用苔藓植物进一步广泛应用的关键。注释代谢通路可了解苔藓植物代谢物生物合成途径。苔藓植物富含植物次生代谢产物,多种已被证实具有抗菌、抗炎的作用。苯丙烷、天冬氨酸、苯丙氨酸、预苯酸、莽草酸等是苔藓植物代谢物的重要中间产物(曹小汉等, 2022), 与之前报道的苔藓植物化学成分研究一致,其中参与苯丙烷类生物合成、苯丙氨酸代谢的代谢物富集,是联苳类化合物和黄酮类化合物的来源(张教真&姜红祥, 2019)。参与植物次生代谢产物生物合成等代谢通路的代谢物,其中的生物碱类代谢物相对较少,例如东莨菪碱、异莨菪碱及吲哚、佛手苷内酯等具有抗菌、抗癌的临床效果,部分也具有神经活性,也是中草药的主要药效成分(王斌等, 2021)。斛皮苷、金合欢素、芹菜素、木犀草素、大波斯菊苷、异槲皮苷、山柰酚-7-O-葡萄糖苷、荭草苷、野漆树苷等大量天然黄酮类化合物具有抗菌、抗肿瘤的效果,黄酮类代谢物为酚类化合物,是植物抗病作用的重要化合物,也是苔藓植物作为医药的药效来源。本研究通过对代谢物的检测,发现药用苔藓植物种类与其自身代谢物具有一定联系,生物碱、有机酸等次生代谢产物是其药用效果的基础。相较于目前我国 3 000 余种苔藓植物,对苔藓植物次生代谢产物的研究种类数量较少。分析苔藓植物次生代谢物的代谢通路,明确苔藓植物代谢物的代谢产物合成途径、功能和代谢合成通路的起始源,加强对药用苔藓活性成分进行筛选和提取研究,为研究苔藓植物代谢物临床药用及中药炮制,进一步发展苔藓植物医药开发提供基础材料。

4.3 生长基质分析

苔藓植物对生长环境变化敏感,可着生于不同基质,所处生态环境影响其生境分布范围。墨脱药用苔藓植物单一基质着生的有 12 种,多种基质着生的有 79 种,3 种及 3 种以上的有 43 种,苔藓植物生长基质多样,表明墨脱区域生境适宜苔藓植物生长且受人为干扰因素小。在基质分布中,蛇苔、小蛇苔、毛地钱、真藓、小石藓这几种所分布的基质为 5 种及以上,说明这些苔藓种类在墨脱地区生长适应良好,在墨脱区域属于广幅性苔藓种类,生态幅较宽。墨脱基质分布类型多样,与其地形及植被有直接联系,巨大的地形高差使得其拥有从热带雨林到针叶林的多种植被类型,为不同海拔及坡向提供更多样化的基质及微生境,且灌木及草本的植被盖度极高,植被郁闭度高使其局部温湿度变化较小,苔藓植物生长环境更稳定。在墨脱植被环境十分适宜的情况下,苔藓植物对基质的要求会降低,分布更具有随机性(Henriques et al., 2017),显著增加苔藓植物物种多样性。本次研究将生长基质细分为 8 种,与其他地区的基质划分相比,墨脱苔藓植物生长基质主要依据附着材料情况划分。石生基质苔藓物种数量在药用苔藓植物资源中占绝对优势,这与墨脱区域地理环境有关。与其他基质环境相比,石生基质为稳定的生长环境,其他着生植物少,且墨脱地区常年为湿热气候,为石生苔藓提供适宜的生长条件。墨脱地区森林植被为原始森林,保存较为完整,以常绿阔叶林为主,苔藓基于原始植被生长,林木稳定,且凋落物深厚,形成大量苔藓附生基质。基质为岩面薄土苔藓种类较多,仍依赖于墨脱地区原始森林覆盖面积较广且较为完整,林下岩石基质中苔藓与其他物种竞争较小,苔藓植物易存活,使岩石局部形成小生境,生境稳定,苔藓群落不断发展,还可使其他生物进入并发展,岩石表面土壤经过不断累积形成薄土层,从而形成大量岩面薄土群落(李婷婷等, 2022)。附生苔藓在该区域数量丰富。森林生态系统的完整性是苔藓植物物种多样性的重要因素。基质是影响苔藓植物分布的重要因子,不同基

质下局部小气候温湿度条件不同, 微生境中的生长基质如石生、岩面薄土、树附生等基质持水能力较弱, 此类受环境因子如温度、湿度影响较大, 苔藓层较薄, 其自身保水能力较弱, 树附生种类对局部小气候变化尤为敏感, 苔藓生长的主要限制性因素为水分条件, 且附生基质较为稳定, 无凋落物覆盖且无薄土层, 水热变化是影响附生苔藓生长的主要因素, 树附生苔藓多样性高体现墨脱降水丰富, 这些生长基质的水分来源主要为所处植被类型及气候变化, 但墨脱药用苔藓植物种类中所占比例较多, 尤其是石生分布类型数量占据明显优势, 墨脱相较于西藏其他区域, 植被类型条件、季节性的气候变化条件及海拔、温度等, 使得其生态分布类型中石生基质占据优势, 空气湿度极高使暴露在外的基质表面保持湿润, 同时, 还有所处生境特殊的溪边、河滩、瀑布岩面, 另外, 充沛的降水使岩面更快形成薄土层和腐殖质, 这也为苔藓种类基质过渡提供了便捷的途径。

墨脱苔藓种类生长分布与其地理环境具有较大联系, 该区域苔藓植物生境异质性极大, 空间上具有湿度极高、郁闭度极高、海拔差极大的多种条件叠加, 使几乎所有微生境都能被特化种类占据。本质上是墨脱地形、植被和水热条件所共同作用, 该区域环境提供了多种基质类型, 同时创造了持续且适宜的生长条件, 两种因素的耦合使墨脱成为苔藓植物多样性发达的关键。维护完整的森林植被结构和水文气候过程是保护墨脱苔藓植物多样性的核心。

5 结论

墨脱药用苔藓植物种类丰富, 共 44 科 59 属 91 种, 苔类植物 19 科 20 属 25 种, 藓类植物 25 科 39 属 66 种。与此前近十年报道的其他地区相比, 墨脱药用苔藓植物种类数量最多, 为墨脱区域药用苔藓植物物种数量提供基础数据, 丰富了药用苔藓植物种类资源。通过查阅相关文献明晰 91 种苔藓植物药用效果, 主要为清热解毒、消炎止痛、止血生肌、镇静安神、化瘀消肿等功效, 部分药用苔藓具有临床药用功效。通过 12 种苔藓植物代谢物 KEGG 富集分析, 结果表明代谢物主要分布于 81 条代谢通路中, 苔藓植物中代谢通路显著富集的为植物次生代谢产物生物合成通路, 苔藓植物次生代谢产物具有较大药用价值且具有种类丰富的萜类化合物。墨脱药用苔藓植物 8 种生长基质中, 石生种类物种数最多且 α 多样性指数最高, 多种基质着生种类极多, 通过物种相似性系数分析得出不同基质苔藓种类差异较大。

参考文献:

- Ai T M, 2021. Medicinal flora of China (Vol. 1) [M]. Beijing: Peking University Medical Press: 1-234. [艾铁民, 2021. 中国药用植物志 (第一卷) [M]. 北京: 北京大学医学出版社: 1-234.]
- Cao X H, Mao H M, Ren L P, 2022. Application of metabolomics technology in the study of plant secondary metabolites [J]. Agriculture and Technology, 42(11): 1-3. [曹小汉, 毛惠敏, 任莉萍, 2022. 代谢组学技术在植物次生代谢产物研究中的应用 [J]. 农业与技术, 42(11): 1-3.]
- Chen C F, Zhang C H, Tu K, et al., 2022. Diversity and ecological types of medicinal bryophytes in Jiuling Mountain [J]. Chinese Wild Plant Resources, 41(9): 79-83. [陈春发, 张朝晖, 涂昆, 等, 2022. 九岭山药用苔藓植物多样性及生态类型 [J]. 中国野生植物资源, 41(9): 79-83.]
- Ding H S, 2010. Compendium of medicinal spore plant resources from China and abroad [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House Co., Ltd: 1-453. [丁恒山, 2010. 中外药用孢子植物资源志要 [M]. 贵阳: 贵州科技出版社: 1-453.]
- Gao C, 2003. Flora bryophytorum sinicorum: Vol. 9 [M]. Beijing: Science press: 1-323. [高谦, 2003. 中国苔藓志 (第九卷) [M]. 北京: 科学出版社: 1-323.]

- Gao C, 1996. *Flora bryophytorum sinicorum*: Vol. 2 [M]. Beijing: Science Press: 1-293. [高谦, 1996. 中国苔藓: 第二卷 [M]. 北京: 科学出版社: 1-293.]
- Gao C, 1994. *Flora bryophytorum sinicorum*: Vol. 1 [M]. Beijing: Science Press: 1-368. [高谦, 1994. 中国苔藓志: 第一卷 [M]. 北京: 科学出版社: 1-368.]
- Gao C, Wu Y H, 2008. *Flora bryophytorum sinicorum*: Vol. 10 [M]. Beijing: Science Press: 1-464. [高谦, 吴玉环, 2008. 中国苔藓志: 第十卷 [M]. 北京: 科学出版社: 1-464.]
- Guo Q L, Sa R L, An M, et al., 2022. Investigation of medicinal bryophytes resources in Dalengshan mountain [J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 41(1): 90-95, 102. [郭巧兰, 萨如拉, 安明, 等, 2022. 大冷山药用苔藓植物资源调查研究 [J]. 中国野生植物资源, 41(1): 90-95, 102.]
- Han G Y, 2017. Investigation of medicinal bryophyte resources of traditional Chinese medicine in Qianling Mountain range of Guizhou [J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 28(3): 705-706. [韩国营, 2017. 贵州省黔灵山脉药用苔藓中药资源调查 [J]. 时珍国医国药, 28(3): 705-706.]
- Han G Y, Song P L, He X G, 2010. Literatures of chinese medicinal bryophytes(I) [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 38(3): 29-31. [韩国营, 宋培浪, 何先贵, 2010. 中国药用苔藓植物研究的文献分析 (I) [J]. 贵州农业科学, 38(3): 29-31.]
- Han G Y, Song P L, Yu M L, et al., 2013. Literatures of chinese medicinal bryophytes (II) [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 41(3): 11-15. [韩国营, 宋培浪, 于美玲, 等, 2013. 中国药用苔藓植物研究的文献分析 (II) [J]. 贵州农业科学, 41(3): 11-15.]
- Han G Y, Zhao Z T, 2008. Medicinal efficacy of important medicinal bryophytes in China [J]. *Biology Teaching* (12): 4-6. [韩国营, 赵遵田, 2008. 我国重要药用苔藓植物的药用功效 [J]. 生物学教学(12): 4-6.]
- Henriques D S G, Borges P A V, Gabriel R, 2017. Regional processes drive bryophyte diversity and community composition in a small oceanic island[J]. *Community Ecology*, 18: 193-202.
- Hu R L, Wang Y F, 2005. *Flora bryophytorum sinicorum*: Vol. 7 [M]. Beijing: Science press, 1-287. [胡人亮, 王幼芳, 2005. 中国苔藓志: 第七卷 [M]. 北京: 科学出版社: 1-287.]
- Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, 1990. *Xinhua bencao gangyao*(A compendium of Xinhua herbal) [M]. Shanghai: Science and technology of China press: 764-773. [江苏省植物研究所, 1990. 新华本草纲要 [M]. 上海: 科学技术出版社: 764-773.]
- Jin Z M, Hou J H, He H R, et al., 2022. Investigation on medicinal bryophyte resources in Jingning She Autonomous County [J]. *Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology*, 63(5): 55-60. [金民忠, 侯建花, 何海荣, 等, 2022. 景宁畲族自治县药用苔藓植物资源调查 [J]. 宁夏农林科技, 63(5): 55-60.]
- Li R, Wang G L, Zhang Y H, et al., 2024. Study on precipitation characteristics in Medog, southeastern Tibetan plateau [J]. *Meteor Mon*, 50(3): 303-317. [李冉, 王改利, 张永华, 等, 2024. 藏东南墨脱地区降水特征分析 [J]. 气象, 50(3): 303-317.]
- Liu B, et al, 2025, China Checklist of Higher Plants [DB/OL]. In the Biodiversity Committee of Chinese Academy of Sciences ed., *Catalogue of Life China: 2025 Annual Checklist*: Beijing. [刘冰等, 2025. 中国高等植物物种名录 [DB/OL]. 中国科学院生物多样性委员会主编, 中国生物物种名录: 2025 年度名: 北京.] <https://doi.org/10.59717/j.xinn-life.2025.100141>.
- Li X J, 2006. *Flora bryophytorum sinicorum*: Vol. 4 [M]. Beijing: Science press: 1-263. [黎兴江, 2006. 中国苔藓志: 第四卷 [M]. 北京: 科学出版社: 1-263.]

- Li X J, 2000. Flora bryophytorum sinicorum: Vol. 3 [M]. Beijing: Science Press: 1-157. [黎兴江, 2000. 中国苔藓志: 第三卷 [M]. 北京: 科学出版社: 1-157.]
- Li X J, 1985. Tibetan bryophyte sinicorum [M]. Beijing: Science Press: 1-458. [黎兴江, 1985. 西藏苔藓植物志[M]. 北京: 科学出版社: 1-458.]
- Li T T, Jiang Y, DENG X Y, et al., 2022. Investigation on species and communities of *Bryophytes* in Fuquan Chahe National Wetland Park [J]. Journal of Green Science and Technology, 24(3): 95-99. [李婷婷, 蒋娅, 邓欣妍, 等, 2022. 福泉岔河国家湿地公园苔藓植物种类与群落调查 [J]. 绿色科技, 24(3): 95-99.]
- Lou H X, 2012. Chemistry and Biology of Bryophytes [M]. Beijing: Press of Science and Technology, 61-159. [娄红祥, 2012. 苔藓化学与生物学 [M]. 北京: 科学技术出版社: 61-159.]
- Ma H P, Si M X, Wang B, et al., 2023. A preliminary study of mosses diversity and life-form composition in Motuo of Xizang, China [J]. Journal of Plateau Agriculture, 9(1): 16-24, 149. [马和平, 司孟鑫, 王彪, 等, 2025. 西藏墨脱藓类植物多样性及其生活型组成初步研究 [J]. 高原农业, 9(1): 16-24, 149.]
- Mao Z X, Wang Y C, Lu Y, 2021. Effects of environmental factors on growth of bryophyte [J]. Guangxi Forestry Science, 50(6): 748-752. [毛祝新, 王宇超, 卢元, 2021. 环境因子对苔藓植物生长的影响 [J]. 广西林业科学, 50(6): 748-752.]
- Ministry of Ecology and Environment, Chinese Academy of Sciences, 2020. Chinese biodiversity red list — higher plants volume [DB/OL]. Information Center of Ministry of Ecology and Environment, 1-50. [生态环境部 中国科学院, 2020. 中国生物多样性红色名录——高等植物卷 [DB/OL]. 中华人民共和国生态环境部信息中心: 1-50. (2023-05-19) [2024-8-26]]
- Sa R L, Bai X L, 2019. Diversity of medicinal bryophytes in the southern Greater Khingan mountains [J]. Molecular Plant breeding, 17(18): 6186-6197. [萨如拉, 白学良, 2019. 大兴安岭南部山地药用苔藓植物多样性 [J]. 分子植物育种, 17(18): 6186-6197.]
- Sa R L, Shi S L, Bai Y C, et al., 2018. Investigation of medicinal bryophyte resources in Saihanwula nature reserve [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 29(4): 979-983. [萨如拉, 石松利, 白迎春, 等, 2018. 赛罕乌拉自然保护区药用苔藓植物资源调查 [J]. 时珍国医国药, 29(4):979-983.]
- Si M X, Chen L I, Ma H P, et al., 2024. Flora of liverworts in typical area of Motuo, Xizang [J]. Journal of Forest and Environment, 44(2): 207-216. [司孟鑫, 陈利, 马和平, 等, 2024. 西藏墨脱典型区域苔类植物区系研究 [J]. 森林与环境学报, 44(2): 207-216.]
- Wang B, Zhang T X, ZHAO Q, et al., 2021. Application progress of plant metabolomics in medicinal plants [J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 39(5): 28-31. [王斌, 张腾霄, 赵倩, 等, 2021. 植物代谢组学在药用植物中的应用进展 [J]. 中华中医药学刊, 39(5): 28-31.]
- Wang L S, Jia Y, Zhang X C, et al., 2018. Species catalogue of China. Volume 1 Plants : Bryophyte [M]. Beijing: Science Press: 1-141. [王利松, 贾渝, 张宪春, 等, 2018. 中国生物物种名录.第 1 卷植物: 苔藓植物 [M]. 北京: 科学出版社: 1-141.]
- Wang Y T, Zheng J M, Peng X W, 2022. A review on ecological functions of bryophytes in extreme environments [J]. Plant Physiology Journal, 58(1): 101-108. [王雅婷, 郑景明, 彭霞薇, 2022. 极端环境中苔藓植物的生态功能研究进展 [J]. 植物生理学报, 58(1): 101-108.]

- Wang Z, Peng J S, 2022. The rich treasury of the Medog primitival forest [J]. Forest and Humankind (7): 62-75. [王孜, 彭建生, 2022. 墨脱原始森林的富藏 [J]. 森林与人类 (7): 62-75.]
- Wu P C, 2002. Flora bryophytorum sinicorum: Vol. 6 [M]. Beijing: Science Press: 1-290. [吴鹏程, 2002. 中国苔藓志: 第六卷 [M]. 北京: 科学出版社: 1-290.]
- Wu P C, JIA Y, 2011. Flora bryophytorum sinicorum: Vol. 5 [M]. Beijing: Science Press: 1-493. [吴鹏程, 贾渝, 2011. 中国苔藓志: 第五卷 [M]. 北京: 科学出版社: 1-493.]
- Wu P C, JIA Y, 2004. Flora bryophytorum sinicorum: Vol. 8 [M]. Beijing: Science Press, 1-482. [吴鹏程, 贾渝, 2004. 中国苔藓志: 第八卷 [M]. 北京: 科学出版社: 1-482.]
- Zhang J Z, Lou H X, 2019. Research progress on the chemicals and biological functions in bryophytes [J]. World Science and Technology - Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica, 21(6): 1202-1208. [张教真, 娄红祥, 2019. 苔藓植物化学生物学研究进展 [J]. 世界科学技术-中医药现代化, 21(6): 1202-1208.]
- Zhang X Q, Wang J F, JI J N, 2013. Investigation on medicinal bryophyte resources in Lishui City, Zhejiang Province [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 41(5): 1928-1930, 2011. [张晓青, 王军峰, 纪佳娜, 2013. 丽水市药用苔藓植物资源调查 [J]. 安徽农业科学, 41(5): 1928-1930, 2011.]