



•生物编目•

浙江天目山国家级自然保护区苔藓植物多样性

陈星^{1#}, 涂淑雯^{1#}, 戴尊¹, 高爽², 王幼芳¹, 邢诗晨¹, 魏博嘉², 唐录艳³, 师瑞萍⁴, 王晓蕊⁵, 刘永英⁶, 赵东平⁷, 唐霞¹, 姚雪¹, 赵明水⁸, 吴晗星⁸, 祁祥斌⁸, 张健⁹, 李敏^{2*}, 王健^{1,10*}

1. 华东师范大学生命科学学院, 上海 200241; 2. 河北师范大学生命科学学院, 石家庄 050024; 3. 贵州师范大学生命科学学院, 贵阳 550001; 4. 上海自然博物馆(上海科技馆分馆)自然史研究中心, 上海 200041; 5. 石家庄学院资源与环境科学学院, 石家庄 050035; 6. 焦作师范学院, 河南焦作 454001; 7. 内蒙古大学生命科学学院, 呼和浩特 010021; 8. 天目山国家级自然保护区管理局, 浙江临安 311311; 9. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241; 10. 上海崇明生态研究院, 上海 202162

摘要: 苔藓植物因个体普遍细小, 更易在野外观察及采集中被忽略, 故很难获得一个客观、详尽的地区名录, 导致对其多样性的研究和保护受到极大限制。本文以浙江天目山国家级自然保护区为例, 采用区系生境调查法和样方法相结合的采样策略, 沿海拔梯度对不同生境类型内苔藓植物多样性进行了系统调查, 并结合多次历史普查资料整理出该保护区的苔藓植物名录。本研究共获得苔藓植物56科143属394种, 包括苔类植物16科30属103种, 藓类植物40科113属291种, 其中有5种为濒危物种。与该保护区历史数据相比, 本研究苔藓植物新增科4个、属31个、种182个, 包括浙江省新记录科1个、属8个、种33个。区系生境调查法和样方法分别贡献了总物种数的81%和72%, 但当调查范围只限定在树附生生境时, 采用样方法所获得的总物种数及新增物种数均大于区系生境调查法。虽然代表更大采样努力程度的8个样方/树的调查获得的物种数显著高于2个样方/树的调查结果, 但只针对树干0.3 m和1.5 m的2个样方/树的采样结果贡献了75%的物种数。鉴于本研究采集方法获得的较高苔藓植物物种丰富度及新增物种数以及物种组成在时间梯度上的巨大差异, 建议在自然保护地开展类似的调查和研究, 以期及时更新各个保护地的苔藓植物名录, 为其保护研究提供最新的详实数据。

关键词: 物种多样性; 苔藓植物; 生物编目; 亚热带森林

陈星, 涂淑雯, 戴尊, 高爽, 王幼芳, 邢诗晨, 魏博嘉, 唐录艳, 师瑞萍, 王晓蕊, 刘永英, 赵东平, 唐霞, 姚雪, 赵明水, 吴晗星, 祁祥斌, 张健, 李敏, 王健 (2023) 浙江天目山国家级自然保护区苔藓植物多样性. 生物多样性, 31, 22649. doi: 10.17520/biods.2022649.

Chen X, Tu SW, Dai Z, Gao S, Wang YF, Xing SC, Wei BJ, Tang LY, Shi RP, Wang XR, Liu YY, Zhao DP, Tang X, Yao X, Zhao MS, Wu HX, Qi XB, Zhang J, Li M, Wang J (2023) Bryophytes diversity of Tianmushan National Nature Reserve, Zhejiang Province. Biodiversity Science, 31, 22649. doi: 10.17520/biods.2022649.

Bryophytes diversity of Tianmushan National Nature Reserve, Zhejiang Province

Xing Chen^{1#}, Shuwen Tu^{1#}, Zun Dai¹, Shuang Gao², Youfang Wang¹, Shichen Xing¹, Bojia Wei², Luyan Tang³, Ruiping Shi⁴, Xiaorui Wang⁵, Yongying Liu⁶, Dongping Zhao⁷, Xia Tang¹, Xue Yao¹, Mingshui Zhao⁸, Hanxing Wu⁸, Xiangbin Qi⁸, Jian Zhang⁹, Min Li^{2*}, Jian Wang^{1,10*}

1 School of Life Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241

2 School of Life Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024

3 School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001

4 Natural History Research Center, Shanghai Natural History Museum (Branch of Shanghai Science & Technology Museum), Shanghai 200041

5 College of Resources and Environmental Science, Shijiazhuang University, Shijiazhuang 050035

6 Jiaozuo Normal College, Jiaozuo, Henan 454001

7 School of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot 010021

8 Administrative Bureau of Tianmushan National Nature Reserve, Lin'an, Zhejiang 311311

收稿日期: 2022-11-17; 接受日期: 2023-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(32070228)和百山祖国家公园科研项目(2021KFLY09)

共同第一作者 Co-first authors

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: limin@hebtu.edu.cn; jwang@bio.ecnu.edu.cn

<https://www.biodiversity-science.net>

ABSTRACT

Aims: Bryophytes are commonly overlooked in field observations and collections due to their small size, making it difficult to obtain an objective and exhaustive checklist of bryophytes in a region. As a result, there are great limitations in the general study and conservation of bryophyte diversity. Taking Tianmushan National Nature Reserve (TNNR) in Zhejiang as an example, this paper aims to investigate the diversity of bryophytes by sampling strategy combining two methods, namely floristic habitat sampling (FHS) method and plot sampling (PS) method.

Methods: Using the two sampling methods (FHS and PS), the study systematically investigated the diversity of bryophytes in different vegetation types along the elevational gradients of the reserve, and compiled a bryophyte checklist in this reserve by combining the current and historical information.

Results: There are 394 species of bryophytes obtained from 143 genera in 56 families, including 103 species of liverworts obtained from 30 genera in 16 families and 291 species of mosses obtained from 113 genera in 40 families, with 5 of these species being endangered. Compared with the historical data of the reserve, 4 families, 31 genera and 182 species were newly added in this study. Among them, 1 family, 8 genera and 33 species were newly records in Zhejiang Province. The FHS and PS methods contributed 81% and 72% of the total number of species, respectively, but when the survey was restricted to epiphytic habitats only, the total number of species and the newly added species obtained by the PS method were higher than those by the FHS method. Although the number of species from the survey of eight plots/tree (represented a high sampling effort) was significantly higher than the results of two plots/tree, the sampling results of only two plots/tree (only sampling from the 0.3 m and 1.5 m of a tree) contributed 75% of the total richness.

Conclusion: The results indicated the sampling strategy in this study obtained a high number of newly-added bryophyte species. Further, since the species composition indicates great differences in the temporal gradient, it is recommended to conduct similar surveys and studies in other nature reserves in an effort to update the bryophytes checklist of each reserve, and to provide the latest detailed information for researching bryophyte conservation.

Key words: species diversity; bryophytes; biodiversity inventory; subtropical forests

生物物种名录是一个自然地理区域或行政单元生物区系本底性的基础资料, 及时更新的生物物种名录是进行生物多样性研究的起点, 也是制定生物多样性保护优先区域的重要基础(Mueller et al, 2007; Westgate et al, 2014; 马克平, 2015)。然而, 即使对于像维管植物和脊椎动物这些研究较为充分的类群, 对其多样性及分布的精确描述也是不足的(Hurlbert & Jetz, 2007; Costello et al, 2013)。由于采样努力程度不够, 植物在野外调查中被不完全观测和采集是一个普遍的现象(Chen et al, 2013), 很难获得一个详尽的物种名录(Sastre & Lobo, 2009)。

苔藓植物(包括苔类、藓类和角苔类)是生物多样性的一个重要组成部分, 全世界估计有17,900种(Magill, 2010; Söderström et al, 2016), 其多样性在高等植物中仅次于被子植物。在生态系统中, 苔藓植物在影响土壤物理性质、水分保持、植物定植、种子萌发、幼苗生长和森林更新方面发挥着重要作用(Beringer et al, 2001; Delach & Kimmerer, 2002; Uchida et al, 2002; Turetsky, 2003; Soudzilovskaia et al, 2013)。但是, 相比于维管植物, 苔藓植物个体普

遍细小, 更容易在野外观察及采集中被忽略(陈雅涵等, 2009), 故很难获得一个客观、详尽的地区名录, 导致对其多样性的研究和保护受到极大限制。

物种的发现概率一般随采样努力程度的增加而增加(Nilsson & Nilsson, 1985; Archaux et al, 2006; Archaux, 2009)。另外, 采样方法对结果也有重要影响, 制定合理的采样方案对获得一个地区内完整的物种多样性非常关键(Vanderpoorten et al, 2010)。苔藓植物的调查和取样常用3种方法, 即样线(line intercept, LI)法、样方(plot sampling, PS)法和区系生境(floristic habitat sampling, FHS)调查法(Ilić et al, 2018)。样线法的主要问题是容易遗漏个体较小的类群(Stehn et al, 2010), 样方法特别适合采集和获取最常见的物种并评估其出现频率及分布, 但常会忽略稀有种(Vanderpoorten et al, 2010), 而区系生境调查法则能提高稀有物种的获取率(Tu et al, 2020)。Newmaster等(2005)根据对样方法和区系生境调查法的比较, 发现区系生境调查法能够获得更高的物种丰富度。

浙江天目山国家级自然保护区位于我国东部

中亚热带北缘,是我国首批设立的20个国家级自然保护区之一,也是世界生物圈保护区的网络成员(丁炳扬等,2009)。复杂的高山深谷地形蕴藏着丰富的物种多样性资源。自20世纪70年代以来,国内苔藓植物学家对浙江天目山国家级自然保护区的苔藓植物进行了大量采集和研究。经对历史数据的核对与修正,胡人亮和王幼芳(1981)首次记录了该保护区苔类植物25科34属65种,藓类植物45科121属214种。随后,李粉霞等(2006)根据对该保护区不同海拔的5个100 m²样地的调查,记录了苔类植物8科9属24种,藓类植物33科73属152种,在胡人亮和王幼芳(1981)的基础上新增了101种;汪岱华等(2012)根据对该保护区7种主要森林植被类型进行调查,获得苔类植物12科21属32种,藓类植物31科67属109种,在前两次调查的基础上又新增了23种;汪岱华等(2013)按照胡人亮和王幼芳(1981)的采集路线进行了重新采集,获得苔类植物18科28属49种,藓类植物41科112属216种,在前3次的基础上又新增了47种。综合4次采集结果,加上一些零星报道(Zhu, 1995; Zhu et al, 1998; So, 2001; Hang et al, 2009; Zheng & Zhu, 2009; He & Zhu, 2011),浙江天目山国家级自然保护区共有苔藓植物74科185属456种,分别占到浙江省苔藓植物科、属、种的71%、58%和38%。

尽管相对于国内其他自然保护区,浙江天目山国家级自然保护区的苔藓植物调查和研究已相当系统和深入,代表了较高的采样努力程度,但此前的采集在采样范围和采样方法上还具有一定的局限性,比如胡人亮和王幼芳(1981)及汪岱华等(2013)两次的采样路线都是采用样线法沿着登山道两侧进行采集,采集区域受人为影响较为严重,同时所采用的样线法很容易忽略个体细小的种类。李粉霞等(2006)和汪岱华等(2012)虽然选择了偏离登山道的不同植被类型作为调查区域,但主要采用样方法进行,有可能低估物种丰富度且容易遗漏稀有种类。为检验采样方法对一个区域苔藓植物物种多样性的影响,本研究以浙江天目山国家级自然保护区为研究区域,采用区系生境调查法和样方法相结合的调查策略,在偏离登山道两侧的不同植被型内沿海拔梯度共布设了37个20 m × 20 m样地进行苔藓植物多样性的系统调查,目的在于评估不同采样方

法及采样努力程度对苔藓植物丰富度的影响。同时,鉴于我国大多数苔藓植物的调查和研究都是基于保护地开展的,而浙江天目山国家级自然保护区又代表了苔藓植物调查和研究相对充分的地区,因此本研究的另一个目的是评估我国当前在保护区尺度上苔藓植物名录的详尽性,以期为自然保护地苔藓植物多样性保护提供科学依据,并为其他地区的苔藓植物采样提供参考。

1 材料与方法

1.1 标本采集和鉴定

本研究的野外样地设定及调查是基于山地生物多样性长期监测网络(Biodiversity along Elevational gradients: Shifts and Transitions, BEST)开展。BEST聚焦于我国气候变化和土地利用影响下的多类群生物多样性长期动态监测,已在我国热带及亚热带地区十余个不同山体设置生物多样性研究的长期固定样地,开展多类群的生物多样性调查工作,以全面了解各个类群的生物多样性概况及其在海拔上的分布格局和驱动因素(<https://BEST-mountains.org>)。本研究团队在浙江天目山国家级自然保护区沿海拔273–1,467 m范围共设置了37个长期固定样地(图1)。通过实地勘测及当地专家经验,并结合遥感图像数据等,尽可能选取具有地带性代表植被、人工干扰少、海拔连续的区域,采用闭合导线法设置样地,并尽可能选择成熟林,避免人工林和次生林。每两个海拔梯度样地的高差约为100 m,样地面积为20 m × 20 m。

本团队于2017–2018年间采用区系生境调查法和样方法相结合的方法对每个样地内的苔藓植物进行调查。区系生境调查法原意是对一个山体中的所有生境类型(如崖壁、水沟等)进行调查(Vanderpoorten et al, 2010),本研究将该方法引申为对每个20 m × 20 m样地内每个微生境(如树附生、土生、石生、岩面薄土生、腐木生等)进行全面调查,采集并记录每种微生境类型中的苔藓植物,记录观察到的每种苔藓植物的样地编号、种类及生境类型等信息。样方法是在每个样地内随机选取15棵胸径大于15 cm的乔木,在树干北朝向上距离地面高度0.3 m(树基)和1.5 m(树干)处,使用20 cm × 20 cm的微样方框进行微样方采样。微样方框被划分为

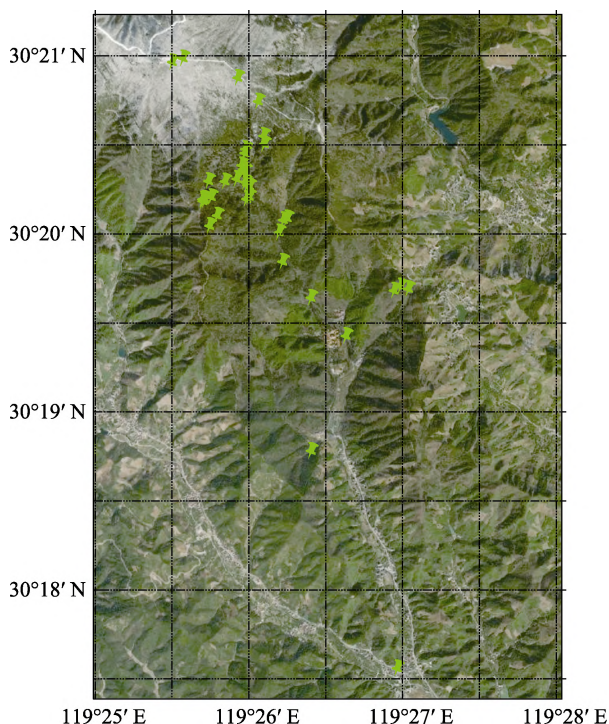


图1 浙江天目山国家级自然保护区37个样地分布图
Fig. 1 Distribution of the 37 plots in Tianmushan National Nature Reserve, Zhejiang Province

100个 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的小网格,用以估算苔藓植物的盖度。每种苔藓植物采集适量标本放于标本袋中,同时记录每份标本的样地编号、乔木编号、采集编号、树干高度及生境类型等信息。

为检验采样努力程度对苔藓植物物种丰富度的贡献,于2020年夏季又按每100 m海拔间隔从37个样地中选取12个样地,每个样地随机选择10棵胸径大于15 cm的乔木,参考中华人民共和国生态环境部(2015)颁发的《生物多样性观测技术导则 地衣和苔藓(HJ 710.2-2014)》中的调查方案,对每棵树距离地面0.3 m、1.1 m、1.5 m和1.8 m共4个高度分别进行南、北两个朝向的微样方苔藓植物多样性调查。同时,为了保证对苔类和藓类植物的采样充分性,每一次的野外采集均有苔类和藓类两方面的专家共同参与调查。采集到的标本分别由国内苔类和藓类专家进行鉴定,部分疑难标本请国内相关类群专家协助鉴定。所有凭证标本存放在华东师范大学生物博物馆(HSNU)。

1.2 数据处理

整理野外采集及标本鉴定信息,分析物种多样

性组成及优势科属,对照《华东苔藓植物多样性编目》(吴玉环等, 2023)和《中国生物物种名录(第一卷)·植物·总名录(上册)》(王利松等, 2018)确定浙江省新记录物种,对照《中国高等植物受威胁物种名录》(覃海宁等, 2017)确定受威胁物种;依据最新的世界苔类植物分类系统(Söderström et al, 2016)及其他专科专属分类处理,整理浙江天目山国家级自然保护区历史采集记录(胡人亮和王幼芳, 1981; 李粉霞等, 2006; 汪岱华等, 2012, 2013),并比较历次采集对该保护区苔藓植物物种丰富度的贡献;分析两种采样方法对本次采集新增物种的贡献;基于不同生境类型分析新增物种在不同海拔的分布情况,分析今后采样需要重点关注的海拔段;基于12个样地内针对树附生苔藓植物不同采集密度结果比较,分析采样努力程度对苔藓植物丰富度的贡献。

2 结果

2.1 苔藓植物种类组成及优势科属

本次调查共采集苔藓植物标本5,272份标本,其中苔类1,801份,藓类3,471份,隶属于56科143属394种,其中苔类植物16科30属103种,藓类植物40科113属291种。

将苔藓植物种数位于前5位的科定义为优势科,则此次采集的优势科有6个(表1),共包含41属141种,分别占该保护区所采集苔藓植物总属数和总种数的28.7%和35.8%,其中青藓科所含的种数最多,为32种,占总种数的8.1%。将种数位于前5位的属定义为优势属,则此次采集的优势属有10个(表1),共包含121种,占该保护区所采集苔藓植物总种数的30.7%,其中绢藓属(*Entodon*)和光萼苔属(*Porella*)所含种数最多,均为17种,各占总种数的4.3%。

2.2 受威胁物种组成及海拔分布

该保护区受威胁苔藓植物共5种,其中滇西高领藓(*Glyphomitrium minutissimum*)为极危(CR),主要分布在高海拔处的树干上。白绿细鳞苔(*Lejeunea pallide-virens*)、平齿平藓(*Neckera laevidens*)、翠平藓(*N. perpinnata*)和长肋异齿藓(*Regmatodon longinervis*)为易危(VU),其中白绿细鳞苔和翠平藓主要分布在中高海拔处,而平齿平藓和长肋异齿藓则主要分布在较低海拔处(表2)。

表1 浙江天目山国家级自然保护区苔藓植物优势科和优势属

Table 1 The dominant families and genera of bryophytes in Tianmushan National Nature Reserve, Zhejiang Province

优势科 Dominant families			优势属 Dominant genera								
苔藓植物 Bryophytes			新增苔藓植物 Newly added bryophytes			苔藓植物 Bryophytes			新增苔藓植物 Newly added bryophytes		
科 Family	种数 No. of species	百分比 Percent	科 Family	种数 No. of species	百分比 Percent	属 Genus	种数 No. of species	百分比 Percent	属 Genus	种数 No. of species	百分比 Percent
青藓科 Brachytheciaceae	32	8.12%	细鳞苔科 Lejeuneaceae	18	9.89%	绢藓属 <i>Entodon</i>	17	4.31%	棉藓属 <i>Plagiothecium</i>	8	4.40%
细鳞苔科 Lejeuneaceae	26	6.60%	平藓科 Neckeraceae	17	9.34%	光萼苔属 <i>Porella</i>	17	4.31%	耳叶苔属 <i>Frullania</i>	7	3.85%
平藓科 Neckeraceae	26	6.60%	棉藓科 Plagiotheciaceae	14	7.69%	耳叶苔属 <i>Frullania</i>	16	4.06%	细鳞苔属 <i>Lejeunea</i>	7	3.85%
提灯藓科 Mniaceae	20	5.08%	提灯藓科 Mniaceae	11	6.04%	凤尾藓属 <i>Fissidens</i>	12	3.05%	光萼苔属 <i>Porella</i>	7	3.85%
棉藓科 Plagiotheciaceae	19	4.82%	灰藓科 Hypnaceae	9	4.95%	棉藓属 <i>Plagiothecium</i>	12	3.05%	平藓属 <i>Neckera</i>	6	3.30%
绢藓科 Entodontaceae	18	4.57%				青藓属 <i>Brachythecium</i>	10	2.54%	绢藓属 <i>Entodon</i>	5	2.75%
						匐灯藓属 <i>Plagiomnium</i>	10	2.54%	树平藓属 <i>Homaliodendron</i>	5	2.75%
						灰藓属 <i>Hypnum</i>	9	2.28%	疣鳞苔属 <i>Cololejeunea</i>	4	2.20%
						细鳞苔属 <i>Lejeunea</i>	9	2.28%	凤尾藓属 <i>Fissidens</i>	4	2.20%
						羽藓属 <i>Thuidium</i>	9	2.28%	灰藓属 <i>Hypnum</i>	4	2.20%
								匐灯藓属 <i>Plagiomnium</i>	4	2.20%	
								多褶苔属 <i>Spruceanthus</i>	4	2.20%	
总计 Total	141	35.79%	总计 Total	69	37.91%	总计 Total	121	30.71%	总计 Total	65	35.71%

表2 浙江天目山国家级自然保护区苔藓濒危种

Table 2 The endangered bryophytes in Tianmushan National Nature Reserve, Zhejiang Province

物种 Species	濒危等级 Endangered level	标本数量 No. of specimen	海拔 Elevation	生境 Habitat
滇西高领藓 <i>Glyphomitrium minutissimum</i>	极危 Critically Endangered (CR)	1	1,439 m	树干 Tree trunk
白绿细鳞苔 <i>Lejeunea pallide-virens</i>	易危 Vulnerable (VU)	3	950–1,360 m	树干、树基 Tree trunk, tree base
平齿平藓 <i>Neckera laevidens</i>	易危 Vulnerable (VU)	1	665.62 m	树干 Tree trunk
翠平藓 <i>Neckera perpinnata</i>	易危 Vulnerable (VU)	4	1,083–1,085 m	树干、树基、朽木 Tree trunk, tree base, rotten wood
长肋异齿藓 <i>Regmatodon longinervis</i>	易危 Vulnerable (VU)	1	431.95 m	树干 Tree trunk

2.3 天目山国家级自然保护区及浙江省苔藓植物新记录

根据对历史资料的整理, 浙江天目山国家级自然保护区历史记录有苔藓植物74科(角苔类1科, 苔类26科, 藓类47科) 185属(角苔类1属, 苔类39属, 藓类145属) 456种(角苔类1种, 苔类102种, 藓类353种)。其中有1种角苔类植物、48种苔类植物和195种藓类植物在本研究中未采集到。而对比历史记录, 本研究新增天目山苔藓植物182种(苔类14科21属49

种, 藓类33科76属133种), 新增科4个(苔类1科, 藓类3科), 新增属31个(苔类6属, 藓类25属); 浙江省新记录科1个, 即拟薄罗藓科; 新记录属8个, 即隐蒴藓属(*Cryphaea*)、单齿藓属(*Dozya*)、腐木藓属(*Heterophyllum*)、拟同叶藓属(*Isopterygiopsis*)、叉羽藓属(*Leptopterigynandrum*)、多毛藓属(*Lescurea*)、疣齿藓属(*Scabridens*)和细鳞藓属(*Solmsiella*); 新记录种33个, 包括苔类3种(2科2属), 藓类30种(17科25属) (附录1)。

在新增种类中, 种数位于前5位的优势科、属所包含的物种数分别占到所有新增物种数的38%和36%, 代表了新增苔藓植物的主要类群。其中, 细鳞苔科、平藓科、棉藓科和提灯藓科, 以及棉藓属(*Plagiothecium*)、耳叶苔属(*Frullania*)、细鳞苔属(*Lejeunea*)和光萼苔属(*Porella*)的种类最为丰富(表1)。综合历史数据及本研究结果, 天目山保护区共有苔藓植物78科217属638种(附录1)。

2.4 历次采集对苔藓植物丰富度的贡献

基于最新的分类系统整理浙江天目山国家级自然保护区历史名录, 并统计5次采集新增的物种数(图2), 发现随着采集时间的推移, 物种数呈“U”形分布, 即随着采集次数的增加, 物种数呈现先下降然后又增加的趋势。自1981年首次报道该保护区苔藓名录后, 每次采集的新增物种数逐渐下降, 但自2013年又开始上升, 至本研究增加幅度最大, 达182种, 高于此前历次采集新增物种数之和。

2.5 两种采样方法对物种丰富度及新增种类的贡献

本研究采用区系生境调查法获得了322种苔藓植物(苔类植物88种, 藓类植物234种), 采用样方法获得了283种苔藓植物(苔类植物77种, 藓类植物

206种)。新增苔藓植物中, 采用区系生境调查法获得了135种(苔类植物38种, 藓类植物97种), 采用样方法获得了127种苔藓植物(苔类植物35种, 藓类植物92种)。

由于区系生境调查法调查了样地内的所有生境类型, 而样方法只针对树附生苔藓植物进行调查, 为了比较两种调查法对所获得的苔藓植物总物种数及新增物种数的贡献, 将区系生境调查法所获得的物种分为树附生生境和其他生境两种类型, 并分别与样方法进行比较(图3)。可以看出, 在苔藓植物总物种数(图3a)和新增物种数(图3b)上, 无论是对于树附生苔类植物还是藓类植物, 样方法的贡献均高于区系生境调查法。在区系生境调查法中, 树附生苔类植物的物种数及新增物种数均高于其他生境, 而树附生藓类植物的物种数及新增物种数则均低于其他生境。

2.6 采样努力程度对苔藓植物丰富度的贡献

根据对12个样地内代表不同采样努力程度的调查发现, 代表南北两个朝向、4个高度的调查(8个样方/树)共获得树附生苔藓植物122种(苔类植物54种, 藓类植物68种)。其中, 只代表北朝向、2个高度的调查(2个样方/树)共获得树附生苔藓植物92种(苔类植物42种, 藓类植物50种), 占南北两个朝向、4个高度总物种数的75% (苔类植物占78%, 藓类植物占74%) (图4a)。而且, 代表更大采样努力程度的8个样方/树的调查所获得的物种数显著高于2个样方/树(图4b)。

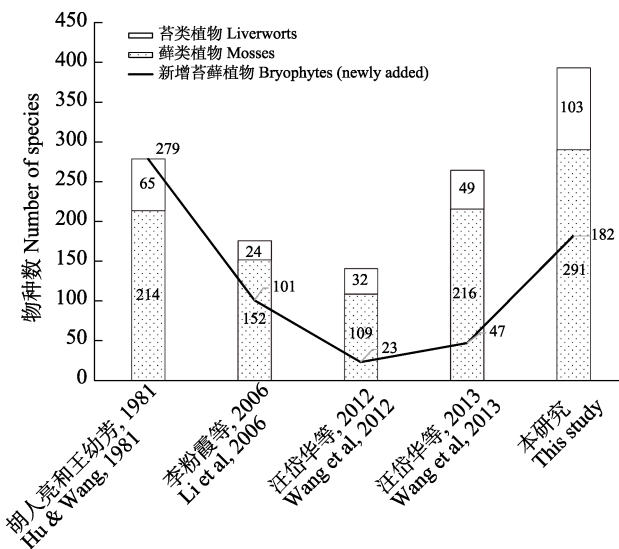


图2 浙江天目山国家级自然保护区苔藓植物历次采集物种数及新增物种数统计
Fig. 2 Statistics of historical collected and newly added species of bryophytes in Tianmushan National Nature Reserve, Zhejiang Province

3 讨论

近年来, 在苔藓学家的不断努力下, 我国的苔藓植物分类与多样性编目取得了显著成绩, 依据《中国生物物种名录(2022版)》公布的数据, 我国目前有苔藓植物160科632属3,108种(The Biodiversity Committee of Chinese Academy of Sciences, 2022)。但是, 我国苔藓植物在省级水平上的物种多样性调查及编目仍非常匮乏(朱瑞良等, 2022), 而省级水平的物种多样性数据则主要来自各个自然保护区的贡献。尽管保护地以外的区域对苔藓植物同样具有不可或缺的价值(邢诗晨等, 2022), 但分类学家一般更倾向于对自然保护地内的调查和采集(Aranda et al, 2010)。综合区系生境调查法和样方法, 本研究共

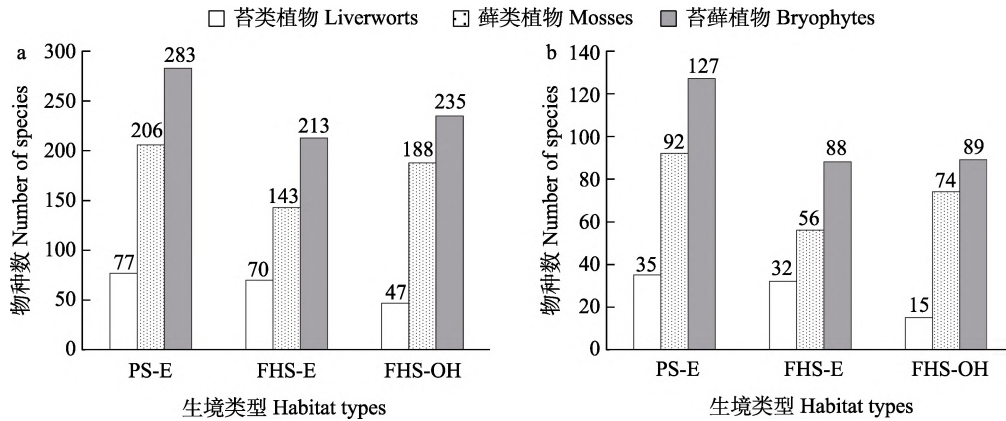


图3 区系生境调查法和样方法对物种丰富度(a)和新增物种数(b)的贡献。PS-E和FHS-E分别表示样方法和区系生境调查法调查的树附生生境, FHS-OH表示区系生境调查法调查的其他生境。

Fig. 3 The contribution of floristic habitat sampling (FHS) method and plot sampling (PS) method to species richness (a) and newly added species (b). PS-E and FHS-E represent epiphytic habitat investigated by plot sampling method and floristic habitat sampling method, respectively, FHS-OH represents other habitats investigated by floristic habitat sampling method.

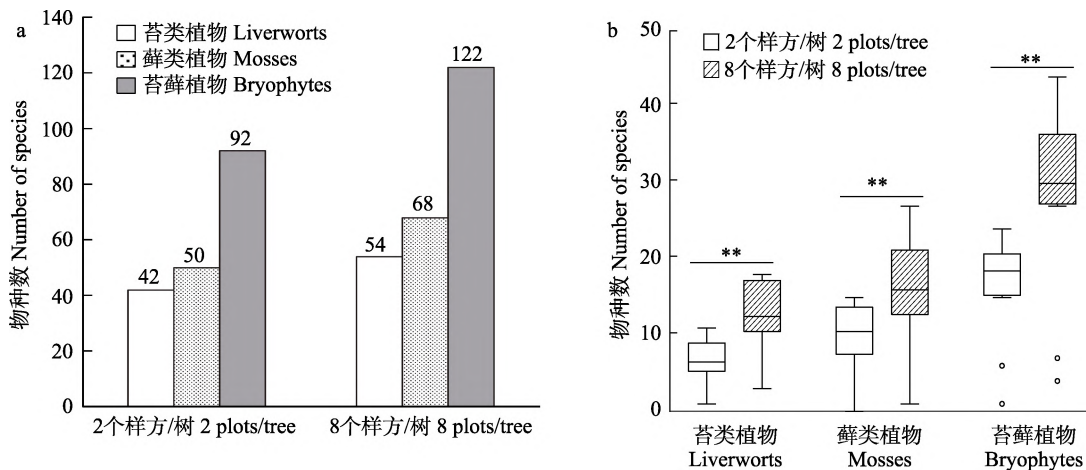


图4 本研究12个样地内树干北朝向2个高度(2个样方/树)及南、北朝向4个高度(8个样方/树)树附生苔藓植物物种数(a)和每个样地多样性箱型图(b) (箱中实线表示中值, ** $P < 0.01$)

Fig. 4 Species number of epiphytic bryophytes (a) and box plot of diversity for each plot (b) at two heights in the north-facing trunk (2 plots/tree) and four heights in the south and north-facing trunks (8 plots/tree) in 12 plots of this study (solid lines in boxes show median values, ** $P < 0.01$)

获得天目山国家级自然保护区苔藓植物56科143属394种, 在历史名录的基础上新增科4个、属31个、种182个, 贡献了浙江省新记录科1个属8个以及新记录种33个。这一结果表明, 尽管该保护区的苔藓植物调查和研究开展较早且相对系统和充分, 但制定合理的采样策略仍然可以获得较高的物种多样性。

由于苔藓植物个体细小, 主要依赖于传统的采样方法很容易导致采集的疏漏而低估被调查地区的物种多样性(朱瑞良等, 2022)。在本研究中, 采用

区系生境调查法和样方法获得的物种数分别占总物种数的81%和72%。虽然区系生境调查法对物种数的贡献度更高, 但是其包含了一个样地内的所有微生境类型, 而样方法只包括了树附生类型。当将调查范围只限定在树附生类型上时, 采用样方法所获得的总物种数及新增物种数均高于区系生境调查法。这一结论与已有的研究正好相反, Newmaster等(2005)的研究表明, 区系生境调查法相对于样方法能够获得更高的物种丰富度。推测原因可能在于本研究中采用的样方法主要调查一棵树的0.3 m树

基和1.5 m的树干处, 能够获得更高的物种丰富度, 而区系生境调查法则主要针对这两个高度以外的树干区域进行调查, 获得的物种数相对较少。这一推测也得到了本研究基于12个样地代表不同采样努力程度分析结果的支持, 即只针对树干0.3 m和1.5 m的2个样方/树采样结果占到了代表4个高度2个朝向(8个样方/树)采样结果的75%。当然, 样方法相对于区系生境调查法能够获得更高的树附生苔藓植物物种多样性, 也有可能是由于区系生境调查法更多根据采集者的经验而很容易遗漏个体细小的类群, 而样方法由于要完成对一个微样方内(20 cm × 20 cm)所有物种的记录和采集而不会忽略细小的物种。这一结论表明, 在时间和精力投入有限的情况下, 只针对树干0.3 m和1.5 m的样方调查即可获得较高的物种多样性。

在区系生境调查结果中, 树附生苔类植物的物种数及新增物种数均高于其他生境, 而树附生藓类植物物种数及新增物种数均低于其他生境。这一结论表明, 在我国亚热带森林样地中, 树附生是苔类植物的主要生长环境, 而像土生、石生等其他生境则主要被藓类植物所占据。同时, 由于落叶的覆盖导致可供苔藓植物生长的土生、石生等其他生境不多且呈不连续的斑块型分布, 很难针对这些生境开展系统的沿海拔梯度的样方法取样。鉴于本研究中样方法和区系生境调查法各自对物种数的较高贡献率, 推荐在其他亚热带地区进行苔藓植物森林样地调查和采集时, 可以采用样方法(针对树附生苔藓植物)和区系生境调查法(针对树附生以外生境的苔藓植物)相结合的采样策略, 有利于获得更高的物种多样性。













尽管采用区系生境调查法和样方法相结合的采样策略贡献了较高的物种多样性和新增种类, 但历史名录中仍有244种苔藓植物在本研究中未被采集到。推测有两方面原因: 一是本研究的采集范围为偏离登山道的森林样地内, 而此前对物种丰富度贡献较大的采集主要为沿登山道的两侧, 前后不同的采集区域由于受到人为干扰程度不同而可能导致物种多样性组成差异较大。此前研究表明, 随着干扰强度逐渐接近中等干扰强度, 浙江天目山国家级自然保护区苔藓植物物种数急剧增加, 大量先锋种和广布种出现, 丛藓科、葫芦藓科等土著先锋种


和伴人种类增加, 而一些对环境较为敏感的物种, 如卷柏藓科和蔓藓科蔓藓属(*Meteorium*)则消失(汪岱华等, 2013)。因此, 位于登山道两侧代表较大程度的人为干扰, 而远离登山道的森林环境则代表较小的人为干扰, 这有可能导致二者的物种组成差异较大。另一方面, 本研究距离最近的一次调查已经过去将近10年, 时间梯度上的差异也有可能导物种组成的差异。基于1977–1980年和2010–2011年对该保护区苔藓植物的调查结果, 苔藓植物物种组成在30年中有较大的变化, 有34%的物种组成发生了改变(汪岱华等, 2013)。尤其是在当前气候变化更为剧烈的背景下, 具有较强远距离传播性能同时又对气候变化极为敏感的苔藓植物可能会迅速调整其分布范围。2017年, 我们在浙江天目山国家级自然保护区首次发现了5种叶附生苔类植物, 并推测可能与气候变暖有关(Tang et al, 2018)。这些结果也进一步表明在气候变化背景下及时更新自然保护区的名录对生物多样性的保护极为关键。


综上, 本研究采用区系生境调查法和样方法相结合的采样策略在亚热带地区能够获得较高的苔藓植物多样性, 体现了较高的采样效率, 对自然保护地苔藓植物多样性编目工作具有重要借鉴意义。同时, 鉴于物种组成在时间梯度上的差异, 建议在我国其他自然保护地开展类似的调查和研究, 以期对苔藓植物的保护工作提供最新的详实数据。


致谢: 感谢李仁贵、李易衡、刘建昌、姜建祖、吕璇、祝鹏菲、陈若曦等在野外采集过程中提供的帮助, 感谢程夏芳(华东师范大学)、张莉娜(海南大学)在疑难标本鉴定过程中的指导。


ORCID


陈星  <https://orcid.org/0000-0002-3746-7101>
涂淑雯  <https://orcid.org/0000-0001-9219-7231>
戴尊  <https://orcid.org/0000-0001-8229-5348>
高爽  <https://orcid.org/0000-0002-9097-2414>
王幼芳  <https://orcid.org/0000-0002-7799-5961>
邢诗晨  <https://orcid.org/0000-0002-1544-3432>
魏博嘉  <https://orcid.org/0000-0002-9884-6025>
唐录艳  <https://orcid.org/0000-0001-6378-1391>
师瑞萍  <https://orcid.org/0000-0003-4918-2418>
王晓蕊  <https://orcid.org/0000-0003-1610-2944>
刘永英  <https://orcid.org/0000-0001-6369-4589>
赵东平  <https://orcid.org/0000-0002-2784-6052>

唐霞  <https://orcid.org/0000-0002-5646-5558>

姚雪  <https://orcid.org/0000-0002-3805-6486>

张健  <https://orcid.org/0000-0003-0589-6267>

李敏  <https://orcid.org/0000-0002-4025-6807>

王健  <https://orcid.org/0000-0003-4309-0176>

参考文献

- Aranda SC, Gabriel R, Borges PAV, Lobo JM (2010) Assessing the completeness of bryophytes inventories: An oceanic island as a case study (Terceira, Azorean archipelago). *Biodiversity and Conservation*, 19, 2469–2484.
- Archaux F (2009) Could we obtain better estimates of plot species richness from multiple-observer plant censuses? *Journal of Vegetation Science*, 20, 603–611.
- Archaux F, Gosselin F, Bergès L, Chevalier R (2006) Effects of sampling time, species richness and observer on the exhaustiveness of plant censuses. *Journal of Vegetation Science*, 17, 299–306.
- Berlinger J, Lynch AH, Chapin FS, Mack M, Bonan GB (2001) The representation of Arctic soils in the land surface model: The importance of mosses. *Journal of Climate*, 14, 3324–3335.
- Chen YH, Tang ZY, Fang JY (2009) Distribution of nature reserves and status of biodiversity protection in China. *Biodiversity Science*, 17, 664–674. (in Chinese with English abstract) [陈雅涵, 唐志尧, 方精云 (2009) 中国自然保护区分布现状及合理布局的探讨. *生物多样性*, 17, 664–674.]
- Chen GK, Kéry M, Plattner M, Ma KP, Gardner B (2013) Imperfect detection is the rule rather than the exception in plant distribution studies. *Journal of Ecology*, 101, 183–191.
- Costello MJ, May RM, Stork NE (2013) Can we name Earth's species before they go extinct? *Science*, 339, 413–416.
- Delach A, Kimmerer RW (2002) The effect of *Polytrichum piliferum* on seed germination and establishment on iron mine tailings in New York. *The Bryologist*, 105, 249–255.
- Ding BY, Fu CX, Yang SZ (2009) Practice Handbook of Botany in Tianmushan, 2nd edn. Zhejiang University Press, Hangzhou. (in Chinese) [丁炳扬, 傅承新, 杨淑贞 (2009) 天目山植物学实习手册(第二版). 浙江大学出版社, 杭州.]
- Hang H, Zheng M, Zhu RL (2009) IAPT/IOPB chromosome data 8. *Taxon*, 58, E23–E25.
- He Q, Zhu RL (2011) Spore output in selected species of Lejeuneaceae (Marchantiophyta) from China. *Cryptogamic Bryologie*, 32, 107–112.
- Hu RL, Wang YF (1981) Survey of bryophytes in West Tianmu Mountain, Zhejiang Province. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, [0](1), 85–104. (in Chinese with English abstract) [胡人亮, 王幼芳 (1981) 浙江天目山苔藓植物的调查研究. *华东师范大学学报(自然科学版)*, (1), 85–104.]
- Hurlbert AH, Jetz W (2007) Species richness, hotspots, and the scale dependence of range maps in ecology and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 104, 13384–13389.
- Ilić M, Igić R, Ćuk M, Vukov D (2018) Field sampling methods for investigating forest-floor bryophytes: Microcoenose vs. random sampling. *Archives of Biological Sciences*, 70, 589–598.
- Li FX, Wang YF, Liu L, Yang SZ (2006) Species diversity of bryophytes in West Tianmu Mountain of Zhejiang Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17, 192–196. (in Chinese with English abstract) [李粉霞, 王幼芳, 刘丽, 杨淑贞 (2006) 浙江天目山苔藓植物物种多样性的研究. *应用生态学报*, 17, 192–196.]
- Magill RE (2010) Moss diversity: New look at old numbers. *Phytotaxa*, 9, 167–174.
- Ma KP (2015) Biodiversity monitoring in China: From CForBio to Sino BON. *Biodiversity Science*, 23, 1–2. (in Chinese) [马克平 (2015) 中国生物多样性监测网络建设: 从CForBio到Sino BON. *生物多样性*, 23, 1–2.]
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China (2015) Technical Guidelines for Biodiversity Monitoring: Lichens and Bryophytes (HJ 710.2-2014). China Environmental Science Press, Beijing. (in Chinese) [中华人民共和国生态环境部 (2015) 生物多样性观测技术导则 地衣和苔藓(HJ 710.2-2014). 中国环境科学出版社, 北京.]
- Mueller GM, Schmit JP, Leacock PR, Buyck B, Cifuentes J, Desjardin DE, Halling RE, Hjortstam K, Iturriaga T, Larsson KH, Lodge DJ, May TW, Minter D, Rajchenberg M, Redhead SA, Ryvarden L, Trappe JM, Watling R, Wu QX (2007) Global diversity and distribution of macrofungi. *Biodiversity and Conservation*, 16, 37–48.
- Newmaster SG, Belland RJ, Arsenault A, Vitt DH, Stephens TR (2005) The ones we left behind: Comparing plot sampling and floristic habitat sampling for estimating bryophyte diversity. *Diversity and Distributions*, 11, 57–72.
- Nilsson IN, Nilsson SG (1985) Experimental estimates of census efficiency and pseudo-turnover on islands: Error trend and between-observer variation when recording vascular plants. *Journal of Ecology*, 73, 65–70.
- Qin HN, Yang Y, Dong SY, He Q, Jia Y, Zhao LN, Yu SX, Liu HY, Liu B, Yan YH, Xiang JY, Xia NH, Peng H, Li ZY, Zhang ZX, He XJ, Yin LK, Lin YL, Liu QR, Hou YT, Liu Y, Liu QX, Cao W, Li JQ, Chen SL, Jin XH, Gao TG, Chen WL, Ma HY, Geng YY, Jin XF, Chang CY, Jiang H, Cai L, Zang CX, Wu JY, Ye JF, Lai YJ, Liu B, Lin QW, Xue NX (2017) Threatened species list of China's higher plants. *Biodiversity Science*, 25, 696–744. (in Chinese and in English) [覃海宁, 杨永, 董仕勇, 何强, 贾渝, 赵莉娜, 于胜祥, 刘慧圆, 刘博, 严岳鸿, 向建英, 夏念和, 彭华, 李振宇, 张志翔, 何兴金, 尹林克, 林余霖, 刘全儒, 侯元同, 刘演, 刘启新, 曹伟, 李建强, 陈世龙, 金效华, 高天刚, 陈文俐, 马海英, 耿玉英, 金孝锋, 常朝阳, 蒋宏, 蔡蕾, 臧春鑫, 武建勇, 叶建飞, 赖阳均, 刘冰, 林素文, 薛纳新 (2017) 中国高等植物受威胁物种名录. *生物多样性*, 25, 696–744.]
- Sastre P, Lobo JM (2009) Taxonomist survey biases and the unveiling of biodiversity patterns. *Biological Conservation*, 142, 462–467.

- So ML (2001) The genus *Plagiochila* (Hepaticae, Plagiochilaceae) in China. Systematic Botany Monographs, 60, 1–214.
- Söderström L, Hagborg A, von Konrat M, Bartholomew-Began S, Bell D, Briscoe L, Brown E, Cargill DC, Costa DP, Crandall-Stotler BJ, Cooper ED, Dauphin G, Engel JJ, Feldberg K, Glenny D, Gradstein SR, He XL, Heinrichs J, Hentschel J, Ilkiu-Borges AL, Katagiri T, Konstantinova NA, Larraín J, Long DG, Nebel M, Pócs T, Puche F, Reiner-Drehwald E, Renner MAM, Sass-Gyarmati A, Schäfer-Verwimp A, Segarra-Moragues JG, Stotler RE, Sukkharak P, Thiers BM, Uribe J, Vána J, Villarreal JC, Wigginton M, Zhang L, Zhu RL (2016) World checklist of hornworts and liverworts. PhytoKeys, 59, 1–828.
- Soudzilovskaia NA, van Bodegom PM, Cornelissen JH (2013) Dominant bryophyte control over high - latitude soil temperature fluctuations predicted by heat transfer traits, field moisture regime and laws of thermal insulation. Functional Ecology, 27, 1442–1454.
- Stehn SE, Webster CR, Glime JM, Jenkins MA (2010) Ground-layer bryophyte communities of post-adelgid *Picea-Abies* forests. Southeastern Naturalist, 9, 435–452.
- Tang X, Gradstein SR, Sun LW, Zhu MJ, Shi RP, Wei QQ, Chen YQ, Zhou XX, Wang J (2018) A contribution to the knowledge of epiphyllous bryophytes in Tianmushan National Nature Reserve (Zhejiang, China), with remarks on climate warming and nature conservation. Lindbergia, 41, 01103.
- The Biodiversity Committee of Chinese Academy of Sciences (2022) Catalogue of Life China: 2022 Annual Checklist. Beijing. <http://www.sp2000.org.cn/CoLChina/>. (accessed on 2022-11-09)
- Tu SW, Shi RP, Tang LY, Li YH, Tang X, Dai Z, Xing SC, Shi XQ, Gradstein SR, Wang J (2020) Floristic habitat sampling yielded *Spruceanthus planifolius* (Lejeuneaceae, Marchantiophyta) new to China. Phytotaxa, 455, 229–234.
- Turetsky MR (2003) The role of bryophytes in carbon and nitrogen cycling. The Bryologist, 106, 395–409.
- Uchida M, Muraoka H, Nakatsubo T, Bekku Y, Ueno T, Kanda H, Koizumi H (2002) Net photosynthesis, respiration, and production of the moss *Sanionia uncinata* on a glacier foreland in the high Arctic, Ny-Ålesund, Svalbard. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 34, 287–292.
- Vanderpoorten A, Papp B, Gradstein R (2010) Sampling of bryophytes. Manual on field recording techniques and protocols for all taxa biodiversity inventories and monitoring. ABC Taxa, 8, 331–345.
- Wang DH, Wang YF, Zuo Q, Li M, Wu WY, Huang JH, Zhao MS (2012) Bryophyte species diversity in seven typical forests of the West Tianmu Mountain in Zhejiang, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 36, 550–559. (in Chinese with English abstract) [汪岱华, 王幼芳, 左勤, 李敏, 吴文英, 黄建花, 赵明水 (2012) 浙江西天目山主要森林类型的苔藓多样性比较. 植物生态学报, 36, 550–559.]
- Wang DH, Wang YF, Zuo Q, Li M, Wei QQ, Li XQ, Zhao MS (2013) Comparison of bryophyte diversity in West Tianmu Mountain from 1977 to 2011. Biodiversity Science, 21, 170–176. (in Chinese with English abstract) [汪岱华, 王幼芳, 左勤, 李敏, 魏倩倩, 李晓芹, 赵明水 (2013) 浙江西天目山30年来苔藓物种多样性变化. 生物多样性, 21, 170–176.]
- Wang LS, Jia Y, Zhang XC, Qin HN (2018) Species Catalogue of China (Vol. 1)•Plants•A Synoptic Checklist (I). Science Press, Beijing. (in Chinese) [王利松, 贾渝, 张春春, 覃海宁 (2018) 中国生物物种名录(第一卷)•植物•总名录(上册). 科学出版社, 北京.]
- Westgate MJ, Barton PS, Lane PW, Lindenmayer DB (2014) Global meta-analysis reveals low consistency of biodiversity congruence relationships. Nature Communications, 5, 3899.
- Wu YH, Wang J, Wang YF (2023) A Catalog of Bryophytes in East China (in press). Zhejiang University Press, Zhejiang. (in Chinese) [吴玉环, 王健, 王幼芳 (2023) 华东苔藓植物多样性编目(印刷中). 浙江大学出版社, 浙江.]
- Xing SC, Tang LY, Dai Z, Tu SW, Chen X, Zhang JH, Li HQ, Peng T, Wang J (2022) Bryophyte diversity in Shitai County and Qingyang County, Anhui Province. Biodiversity Science, 30, 21186. (in Chinese with English abstract) [邢诗晨, 唐录艳, 戴尊, 涂淑雯, 陈星, 张建行, 李宏庆, 彭涛, 王健 (2022) 安徽石台县与青阳县苔藓植物多样性. 生物多样性, 30, 21186.]
- Zheng M, Zhu RL (2009) Karyological studies on some species of *Radula* (Radulaceae, Jungermanniopsida, Marchantiophyta). Nova Hedwigia, 88, 229–244.
- Zhu RL (1995) Notes on some species of the genus *Cololejeunea* (Lejeuneaceae, Hepaticae) in China. Journal of the Hattori Botanical Laboratory, 78, 83–109.
- Zhu RL, Ma XY, Cao C, Cao ZY (2022) Advances in research on bryophyte diversity in China. Biodiversity Science, 30, 22378. (in Chinese with English abstract) [朱瑞良, 马晓英, 曹畅, 曹子寅 (2022) 中国苔藓植物多样性研究进展. 生物多样性, 30, 22378.]
- Zhu RL, So ML, Ye LX (1998) A synopsis of the hepatic flora of Zhejiang, China. Journal of the Hattori Botanical Laboratory, 84, 159–174.

(责任编辑: 朱瑞良 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 浙江天目山国家级自然保护区苔藓植物名录

Appendix 1 A checklist of bryophytes in Tianmushan National Nature Reserve, Zhejiang Province

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022649-1.pdf>