

云南南部地区蕨类植物多样性与地理分布

陈柯^{1,2}, Phyo Kay Khine¹, Harald Schneider¹

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园综合保护中心, 云南 勐腊 666303;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:以云南南部地区的蕨类植物为研究对象,数字化的标本记录为数据来源,对蕨类植物的物种组成情况进行了统计分析,对蕨类植物多样性的空间分布格局进行了可视化展示,并结合环境数据探讨了蕨类植物多样性与环境变量之间的关系。结果表明:云南南部地区蕨类植物的多样性水平较高,物种组成丰富。云南南部地区共有蕨类植物 37 科 116 属 690 种,占云南蕨类植物总种数的 52.6%。云南南部地区蕨类植物的物种丰富度与系统发育多样性、物种 β 多样性与系统发育 β 多样性均有显著的正相关,空间分布格局相似。云南南部地区蕨类植物的物种丰富度和系统发育多样性与环境变量中的气候变量相关性较强,而与地形变量的相关性较弱。云南南部地区蕨类植物的物种 β 多样性、系统发育 β 多样性与地理距离和环境距离都有显著的相关性,表明扩散限制和环境过滤过程对云南南部地区蕨类植物物种 β 多样性和系统发育 β 多样性的形成都有重要的作用。

关键词:蕨类植物;物种丰富度;系统发育多样性; β 多样性

中图分类号:Q949

文献标识码:A

文章编号:1674-9944(2021)17-0120-06

DOI:10.16663/j.cnki.lskj.2021.17.033

1 引言

蕨类植物是地球上最古老的陆生维管植物,也是第二大维管植物类群,全球约分布有蕨类植物 12000 种^[1]。蕨类植物最早起源于 4 亿多年前的志留纪末期,繁盛于石炭和二叠纪,在白垩纪后逐渐衰退,现存的蕨类植物大多为伴随着被子植物兴起而新演化出的类群^[2]。蕨类植物通过孢子繁殖和扩散,不依赖于生物媒介,其多样性分布能更好的为环境变量所解释,是研究生物多样性分布的理想材料^[3]。云南南部地区位于全球生物多样性热点的交汇地带,是蕨类植物多样性分布中心,蕨类植物资源尤为丰富。独特的地理环境和地质历史,还使得该地区保存了大量珍稀濒危蕨类植物物种,如二回莲座蕨(*Angiopteris bipinnata*)、海南实蕨(*Bolbitis hainanensis*)和苏铁蕨(*Brainea insignis*)等^[4,5]。近年来,人口、环境和土地利用等问题的加剧,使得该地区蕨类植物的生存日益受到威胁^[6]。本研究利用数字化的蕨类植物标本记录,分析云南南部地区蕨类植物多样性的组成和分布情况,并结合环境数据探讨蕨类植物多样性与气候和地形变量的关系,以期为地区蕨类植物多样性的保护和相关政策的制定提供参考(图 1)。

2 数据来源和方法

2.1 研究区域概况

研究区域包括了云南南部的勐海、景洪、勐腊和

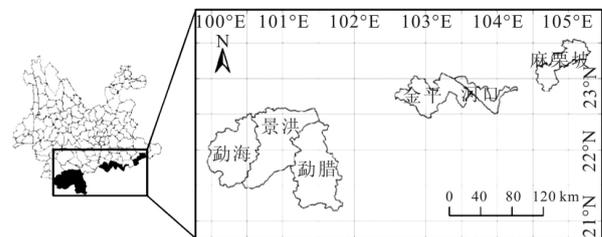


图 1 研究区域的地理位置

麻栗坡等 6 个县市(图 1)。该区域与缅甸、老挝以及越南相邻,属于亚洲热带的北缘。气候上受东南和西南季风的影响,年温差小,日温差大,年均温 20 °C;降水集中,干湿分明,年降水 1500 mm;地形地貌多样,高山、盆地、河谷、岩溶等地貌交错;植被垂直分布明显,植被类型丰富多样,以季节雨林、湿润雨林和季风常绿阔叶林为主^[7~9]。

2.2 物种分布数据

本研究的物种分布数据来源于中国数字植物标本馆(<https://www.cvh.ac.cn/>)和全球生物多样性信息网络(<https://www.gbif.org/>)提供的数字化标本记录。本研究依据最新的蕨类植物 PPG I 分类系统^[1]以及《中国植物志》英文版(<http://www.iplant.cn/foc>)对所有标本记录的分类学名称进行了校对,通过 R 语言 CoordinateCleaner 包对标本记录的经纬度信息进行了校对,存在问题或信息不全的标本记录

收稿日期:2021-05-10

基金项目:中国科学院“一三五”专项(编号:2017XTBG-T03)

作者简介:陈柯(1996—),男,硕士研究生,研究方向为保护生物学。

通讯作者:Harald Schneider(1962—),男,教授,博士,主要从事陆地植物宏观进化研究。

被剔除。通过 ArcMap10.3 将研究区域划分为 332 个 10 km×10 km 的栅格,各标本记录根据经纬度信息匹配到相应的栅格中,每个栅格中只保留每个物种的唯一出现记录,重复的记录被删除。最后,共保留标本记录 3784 条用于本次研究。

2.3 系统发育树

为了计算云南南部地区蕨类植物的系统发育多样性,本研究基于叶绿体 *rbcL* 基因片段构建了云南南部地区蕨类植物的系统发育树。用于系统发育树构建的 *rbcL* 分子序列数据来自于 GenBank 数据库 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) 以及测序实验。测序所用分子材料取自蕨类植物叶片标本。本研究采用北京全式金生物科技有限公司的 Plant Genomic DNA Kit 试剂盒对蕨类植物的总 DNA 进行了提取,并参照 Schuettpelz 和 Pryer^[10] 的方法对目标片段进行了扩增,扩增产物被送至测序公司完成测序。最后,所有的序列在 Geneious 8.1.3 软件中完成比对、校正和排序,利用 RAxML 插件程序构建出系统发育树。

2.4 生物多样性指数

本研究中各栅格的物种丰富度(SR)和系统发育多样性(PD)由 R 语言 *picante* 包计算产生,物种 β 多样性及其周转和嵌套组分($\beta_{sor, tax}$ 、 $\beta_{sim, tax}$ 和 $\beta_{sne, tax}$)和系统发育 β 多样性及其周转和嵌套组分($\beta_{sor, phy}$ 、 $\beta_{sim, phy}$ 和 $\beta_{sne, phy}$)由 R 语言 *betapart* 包计算产生。各多样性指数的空间分布格局,通过 ArcMap10.3 在地图中进行了可视化展示。

2.5 环境变量数据

本研究共选取了 22 个环境变量,用于分析蕨类植物多样性与环境变量的关系。其中,20 个气候变量的数据来自于地球陆地表面高分辨率气候数据库 (<https://chelsea-climate.org/>),分别为 Bio1 ~ Bio19 和年潜在蒸散量(PET)。2 个地形变量数据提取自 CGLAR - CSI SRTM 的高程数据 (<https://srtm.csi.cgiar.org/>),分别为海拔(Alt)和坡度(Slope)。

2.6 统计分析

本研究通过 Spearman 相关分析检验了物种丰富度(species richness, SR)、系统发育多样性(phylogenetic diversity, PD)与各环境变量的相关性,通过 Mantel test 相关分析检验了物种 β 多样性及其周转和嵌套组分($\beta_{sor, tax}$ 、 $\beta_{sim, tax}$ 和 $\beta_{sne, tax}$)、系统发育 β 多样性及其周转和嵌套组分($\beta_{sor, phy}$ 、 $\beta_{sim, phy}$ 和 $\beta_{sne, phy}$)与地理距离(Geog. dist)和环境距离的相关性。地理距离(Geog. dist)为两两栅格地理中心之间的欧几里得距离。环境距离,包括气候距离(Clim. dist)和地形距离

(Topo. dist),为两两栅格间气候和地形变量的欧几里得距离。使用 LOWESS 局部加权回归分析获取了系统发育多样性(PD)关于物种丰富度(SR)的回归模型。

3 研究结果

3.1 蕨类植物物种组成情况

标本记录的统计结果显示,云南南部地区共有蕨类植物 37 科 116 属 690 种,占云南蕨类植物总种数的 52.6%。其中,含 50 种以上的科有 5 科,分别是水龙骨科 *Polypodiaceae*、鳞毛蕨科 *Dryopteridaceae*、凤尾蕨科 *Pteridaceae*、金星蕨科 *Thelypteridaceae* 和蹄盖蕨科 *Athyriaceae*,这 5 个科共有 402 种,占地区总种数的 58.3%,是该地区主要的优势科。含 30 种以上的属共有 5 属,分别是铁角蕨属 *Asplenium*、凤尾蕨属 *Pteris*、三叉蕨属 *Tectaria*、双盖蕨属 *Diplazium* 和卷柏属 *Selaginella*,这 5 个属共有 175 种,占地区总种数的 25.4%,是该地区主要的优势属。该地区出现频率较高的物种有薄叶卷柏 *Selaginella delicatula*、黑顶卷柏 *Selaginella picta*、攀缘卷柏 *Selaginella helferi*、垂穗石松 *Palhinhaea cernua*、金毛狗 *Cibotium barometz*、截裂毛蕨 *Cyclosorus truncatus*、乌毛蕨 *Blechnum oriental*、线羽凤尾蕨 *Pteris arisanensis*、半月形铁线蕨 *Adiantum philippense* 和裸叶石韦 *Pyrrosia nudae* 等。

3.2 蕨类植物多样性的空间分布格局

云南南部地区蕨类植物物种丰富度(SR)的空间分布如图 2(a)所示,物种丰富度(SR)的高值区域主要出现在勐海县的勐海镇、勐宋乡和布朗山地区,景洪市的纳板村、勐养以及勐宋村地区,勐腊县的勐仑镇、补蚌和尚勇地区,金平县的勐拉镇和金河镇地区,河口县的南溪镇地区以及麻栗坡县的下金厂乡、八布乡和老君山地区。

系统发育多样性(PD)的空间分布格局与物种丰富度(SR)相似(图 2b)。物种丰富度(SR)较高的区域,系统发育多样性(PD)也相对较高,而物种丰富度(SR)较低的区域,系统发育多样性(PD)也相对较低。相关性分析显示,物种丰富度(SR)与系统发育多样性(PD)之间具有很强的正相关($r = 0.98$)。

系统发育多样性(PD)关于物种丰富度(SR)回归模型残差的空间分布格局如图 2(c)所示,部分物种丰富度(SR)高的区域系统发育多样性(PD)却相对偏低(残差小于 0),如河口县的南溪镇、勐腊县的补蚌和尚勇等地区;部分物种丰富度(SR)高的区域系统发育多样性(PD)也较高(残差大于 0),如勐海县的勐宋

乡、勐腊县的勐仑镇、金平县的勐拉镇和麻栗坡县的老君山等地区。

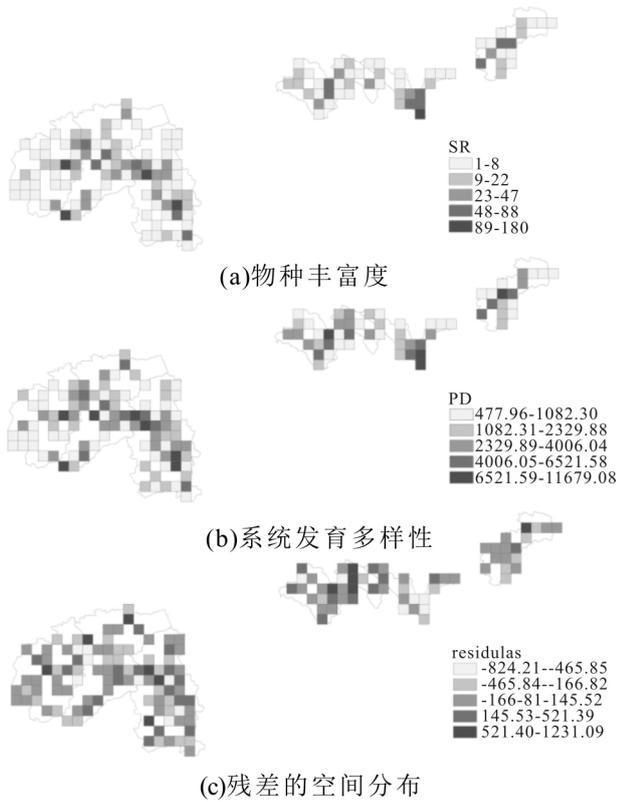


图2 云南南部地区蕨类植物(a)物种丰富度、(b)系统发育多样性和(c)残差的空间分布

云南南部地区蕨类植物的物种 β 多样性和系统发育 β 多样性 ($\beta_{sor, tax}$ 、 $\beta_{sor, phy}$) 及其周转组分 ($\beta_{sim, tax}$ 、 $\beta_{sim, phy}$) 和嵌套组分 ($\beta_{sne, tax}$ 、 $\beta_{sne, phy}$) 的空间分布格局如图3和图4所示。云南南部地区所有栅格的物种 β 多样性 ($\beta_{sor, tax}$) 及其周转组分 ($\beta_{sim, tax}$) 和嵌套组分 ($\beta_{sne, tax}$) 的平均值分别为 0.96 ± 0.03 、 0.87 ± 0.09 和 0.08 ± 0.07 ，系统发育 β 多样性 ($\beta_{sor, phy}$) 及其周转组分 ($\beta_{sim, phy}$) 和嵌套组分 ($\beta_{sne, phy}$) 的平均值分别为 0.64 ± 0.07 、 0.34 ± 0.13 和 0.31 ± 0.09 。物种 β 多样性 ($\beta_{sor, tax}$) 及其周转组分 ($\beta_{sim, tax}$) 高于系统发育 β 多样性 ($\beta_{sor, phy}$) 及其周转组分 ($\beta_{sim, phy}$)，而物种 β 多样性的嵌套组分 ($\beta_{sne, tax}$) 低于系统发育 β 多样性嵌套组分 ($\beta_{sne, phy}$)。物种 β 多样性的周转组分 ($\beta_{sim, tax}$) 远高于嵌套组分 ($\beta_{sne, tax}$)，而系统发育 β 多样性的周转组分 ($\beta_{sim, phy}$) 和嵌套组分 ($\beta_{sne, phy}$) 相当。

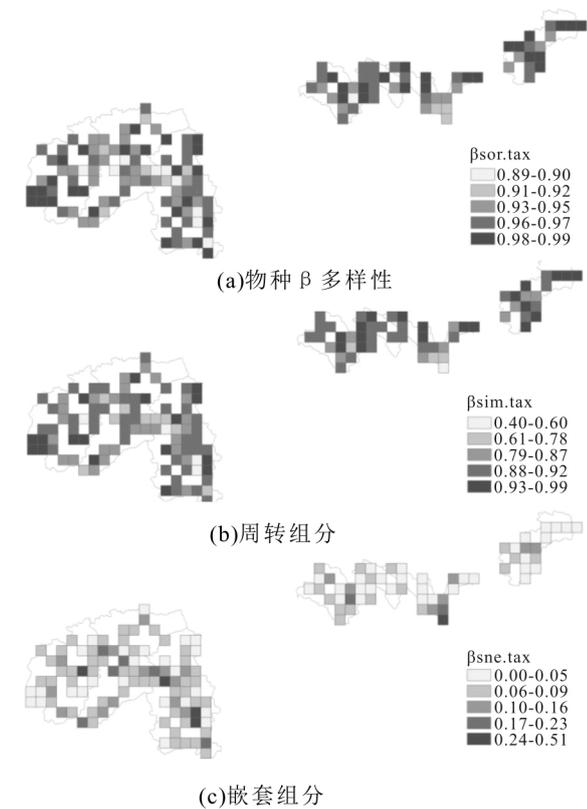


图3 云南南部地区蕨类植物(a)物种 β 多样性及其(b)周转和(c)嵌套组分的空间分布

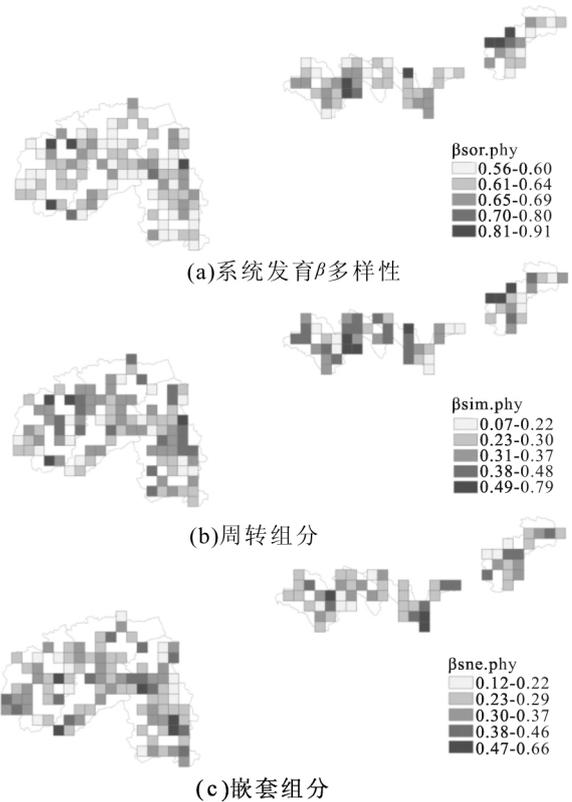


图4 云南南部地区蕨类植物(a)系统发育 β 多样性及其(b)周转和(c)嵌套组分的空间分布

物种 β 多样性和系统发育 β 多样性 ($\beta_{sor, tax}$ 、 $\beta_{sor, phy}$) 与其周转组分 ($\beta_{sim, tax}$ 、 $\beta_{sim, phy}$) 和嵌套组分 ($\beta_{sne, tax}$ 、 $\beta_{sne, phy}$) 的相关分析结果显示，物种 β 多样性和系统发育 β 多样性 ($\beta_{sor, tax}$ 、 $\beta_{sor, phy}$) 与其周转组分 ($\beta_{sim, tax}$ 、 $\beta_{sim, phy}$) 均有极显著的正相关 ($r = 0.88, P < 0.001$; $r = 0.35, P < 0.001$)；物种 β 多样性 ($\beta_{sor, tax}$) 与其嵌套组分 ($\beta_{sne, tax}$) 有极显著的负相关 ($r = -0.69, P < 0.001$)，系统发育 β 多样性 ($\beta_{sor, phy}$) 与其嵌套组分

($\beta_{sne, phy}$)的负相关不显著($r = -0.10, P > 0.05$);物种 β 多样性和系统发育 β 多样性的周转组分($\beta_{sim, tax}$ 、 $\beta_{sim, phy}$)与其嵌套组分($\beta_{sne, tax}$ 、 $\beta_{sne, phy}$)均有极显著的负相关($r = -0.93, P < 0.001$; $r = -0.94, P < 0.001$)。

3.3 蕨类植物多样性与环境变量的关系

云南南部地区蕨类植物的物种丰富度(SR)和系统发育多样性(PD)与环境变量的 Spearman 相关分析结果如表 1 所示。物种丰富度(SR)和系统发育多样性(PD)与气候变量的相关性较强,与地形变量的

相关性较弱。物种丰富度(SR)与年均温(Bio1)、最冷月最低温(Bio6)、最暖月均温(Bio10)以及最冷季降水(Bio19)的相关性最强,系统发育多样性(PD)与最冷月最低温(Bio6)以及最冷季降水(Bio19)的相关性最强。物种丰富度(SR)和系统发育多样性(PD)与降水的季节性(Bio15)均有显著的负相关。物种丰富度(SR)和系统发育多样性(PD)与海拔(Alt)和坡度(Slope)两个地形变量均只有较弱的负相关。

表 1 云南南部地区蕨类植物物种丰富度和系统发育多样性与环境变量的关系

环境变量	物种丰富度 SR		系统发育多样性 PD	
	r	P	r	P
年均温 Bio1	0.27	< 0.001	0.25	< 0.01
平均月温差 Bio2	-0.03	> 0.05	-0.04	> 0.05
等温性 Bio3	0.07	> 0.05	0.07	> 0.05
温度的季节性 Bio4	0.02	> 0.05	0.03	> 0.05
最暖月最高温 Bio5	0.25	< 0.01	0.22	< 0.01
最冷月最低温 Bio6	0.27	< 0.001	0.26	< 0.01
气温年较差 Bio7	-0.06	> 0.05	-0.07	> 0.05
最湿季均温 Bio8	0.26	< 0.01	0.24	< 0.01
最干季均温 Bio9	0.19	< 0.05	0.17	< 0.05
最暖月均温 Bio10	0.27	< 0.001	0.25	< 0.01
最冷月均温 Bio11	0.23	< 0.01	0.2	< 0.05
年降水 Bio12	0.26	< 0.01	0.23	< 0.01
最湿润月降水 Bio13	0.1	> 0.05	0.08	> 0.05
最干旱月降水 Bio14	0.12	> 0.05	0.12	> 0.05
降水的季节性 Bio15	-0.17	< 0.05	-0.17	< 0.05
最湿润季降水 Bio16	0.2	< 0.05	0.17	< 0.05
最干旱季降水 Bio17	0.22	< 0.01	0.21	< 0.01
最暖季降水 Bio18	-0.09	> 0.05	-0.07	> 0.05
最冷季降水 Bio19	0.27	< 0.001	0.26	< 0.01
年潜在蒸散量 PET	0.18	< 0.05	0.17	< 0.05
海拔 Alt	-0.03	> 0.05	-0.02	> 0.05
坡度 Slope	-0.07	> 0.05	-0.07	> 0.05

云南南部地区蕨类植物的物种 β 多样性和系统发育 β 多样性($\beta_{sor, tax}$ 、 $\beta_{sor, phy}$)及其周转组分($\beta_{sim, tax}$ 、 $\beta_{sim, phy}$)和嵌套组分($\beta_{sne, tax}$ 、 $\beta_{sne, phy}$)与地理距离(Geog. dist)、气候距离(Clim. dist)以及地形距离(Topo. dist)的 Mantel test 相关分析的结果如表 2 所示。物种 β 多样性和系统发育 β 多样性($\beta_{sor, tax}$ 、 $\beta_{sor, phy}$)与地理距离(Geog. dist)、气候距离(Clim. dist)以及地形

距离(Topo. dist)均表现出一定的相关性,但物种 β 多样性($\beta_{sor, tax}$)与各距离矩阵的相关性更强。物种 β 多样性的周转组分($\beta_{sim, tax}$)与各距离矩阵也有较强的相关性,系统发育 β 多样性的周转组分($\beta_{sim, phy}$)只与地理距离(Geog. dist)有一定的相关性。物种 β 多样性和系统发育 β 多样性的嵌套组分($\beta_{sne, tax}$ 、 $\beta_{sne, phy}$)与各距离矩阵的相关性都不强。

表 2 云南南部地区蕨类植物 β 多样性与地理距离、气候距离及地形距离的关系

距离矩阵	$\beta_{sor, tax}$	$\beta_{sim, tax}$	$\beta_{sne, tax}$	$\beta_{sor, phy}$	$\beta_{sim, phy}$	$\beta_{sne, phy}$
	r	r	r	r	r	r
地理距离 Geog. dist	0.14***	0.16***	-0.14	0.07**	0.06*	-0.01
气候距离 Clim. dist	0.12***	0.14***	-0.12	0.07*	0.06	0
地形距离 Slop. dist	0.09**	0.09**	-0.09	0.03	0.01	0

注:***表示 $P < 0.001$,**表示 $P < 0.01$,*表示 $P < 0.05$

4 讨论

研究结果显示,云南南部地区的蕨类植物多样性水平较高,物种组成丰富。云南南部地区位于亚洲热带的北缘,是印度—缅甸生物多样性热点地区的重要组成部分,分布有大量的蕨类植物。云南南部地区虽然只占云南总面积的7%,但是却拥有云南一半以上的蕨类植物物种。因此,该地区是云南蕨类植物多样性研究和保护的地区。

相关分析表明,云南南部地区蕨类植物的物种丰富度(SR)和系统发育多样性(PD)有具很强的正相关($r=0.98$)。表现在空间分布上,即物种丰富度(SR)和系统发育多样(PD)具有相似的空间分布格局。云南南部地区的勐宋乡、勐仑镇、勐拉镇和老君山等地区,既是蕨类植物物种丰富度(SR)的高值区域,也是系统发育多样性(PD)的高值区域。也有部分物种丰富度(SR)较高的区域,系统发育多样性(PD)却相对偏低,如南溪镇、补蚌和尚勇等地区。有研究发现,云南南部地区的历史气候稳定,在第四纪受冰期影响较小,保存了很多古老的谱系,如观音座莲属 *Angiopteris* 等^[11]。同时,云南南部地区的季风气候和局域特殊地形加速了地区的物种分化,又使得该地区成为了生物进化的前沿^[12,13]。因此,云南南部地区既保存了很多进化历史久远的古老谱系,是蕨类植物多样性的博物馆,也拥有大量亲缘关系较年轻的年轻谱系,是蕨类植物多样性的摇篮。

云南南部地区蕨类植物物种 β 多样性($\beta_{sor, tax}$)和系统发育 β 多样性($\beta_{sor, phy}$)也有很强的正相关。表现在空间分布上,即物种 β 多样性($\beta_{sor, tax}$)和系统发育 β 多样性($\beta_{sor, phy}$)的空间分布格局有较强的相似性。同时,本研究还发现,云南南部地区各栅格蕨类植物的物种 β 多样性($\beta_{sor, tax}$)普遍大于系统发育 β 多样性($\beta_{sor, phy}$)。而且,云南南部地区蕨类植物物种 β 多样性($\beta_{sor, tax}$)主要来自于周转组分($\beta_{sim, tax}$),嵌套组分($\beta_{sne, tax}$)对物种 β 多样性($\beta_{sor, tax}$)的贡献较小,系统发育 β 多样性的两个组分($\beta_{sim, phy}$ 、 $\beta_{sne, phy}$)对系统发育 β 多样性($\beta_{sor, phy}$)的贡献则相当。这些研究结果都表明,云南南部地区蕨类植物 β 多样性的形成,主要来自于亲缘关系较近的物种在空间上的交换,而不是亲缘关系较远的物种

研究结果显示,云南南部地区蕨类植物的物种丰富度(SR)和系统发育多样性(PD)与环境变量中的气候变量相关性较显著,而与地形变量相关性不显著。气候变量反映了地区水热条件的差异,根据水热动态

假说,水分和热量条件与植物的生理活动密切相关,是影响植物多样性分布的主要因子^[14]。蕨类植物由于自身生理和生殖结构的特殊性,对水分和热量条件的响应更为明显^[15]。因此,蕨类植物的多样性与降水和温度等气候变量往往会有更显著的相关性。海拔和坡度等地形变量是衡量地区生境异质性的指标,根据生境异质性假说,地形越复杂、生境异质性越高的地区,所拥有的生态位也越多,植物多样性也更加丰富^[16]。但是,本研究却发现,云南南部地区蕨类植物的多样性与地形或生境异质性没有显著的相关性,这可能与研究的尺度有关。生境异质性对多样性的影响通常会随着研究尺度的减小而降低^[17],本研究使用的 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$ 的栅格尺度相对较小,无法反映大尺度的生境异质性特征对植物多样性的影响。同时,研究数据的完整性也会对分析结果产生影响,很多研究都发现标本记录数据普遍存在采集不完整和地理偏差等问题^[18~20]。因此,在之后的研究分析中,研究者需要对数据的完整性进行评估,并通过野外考察对相关数据进行补充,已获得更准确的分析结果。

研究结果还显示,云南南部地区蕨类植物的物种 β 多样性、系统发育 β 多样性与地理距离和环境距离都有显著的相关性。表明了扩散限制和环境过滤过程对云南南部地区蕨类植物物种 β 多样性和系统发育 β 多样性的形成都有重要的作用。同时,地理距离与物种 β 多样性有更强的相关性,反映了扩散限制过程对云南南部地区蕨类植物物种 β 多样性的形成有更重要的作用。

参考文献:

- [1]PPGL. A community-derived classification for extant lycophytes and ferns[J]. *Journal of Systematics and Evolution*, 2016, 54(6): 563~603.
- [2]Schneider H, Schuettpeiz E, Pryer K M, et al. Ferns diversified in the shadow of angiosperms[J]. *Nature*, 2004, 428(6982): 553~7.
- [3]Hernández-Rojas A C, Kluge J, Kr?mer T, et al. Latitudinal patterns of species richness and range size of ferns along elevational gradients at the transition from tropics to subtropics[J]. *Journal of Biogeography*, 2020, 47(6): 1383~1397.
- [4]马丽娟, 余东, 徐成东, 等. 云南蕨类植物多样性分布格局及区系分化[J]. *西部林业科学*, 2015, 44(4): 12~17.
- [5]Dong S Y, Zuo Z Y, Yan Y H, et al. Red list assessment of lycophytes and ferns in China[J]. *Biodiversity Science*, 2017, 25(7): 765~773.
- [6]Li R, Yue J. A phylogenetic perspective on the evolutionary processes of floristic assemblages within a biodiversity hotspot in eastern Asia[J]. *Journal of Systematics and Evolution*, 2020, 58

- (4): 413~422.
- [7]Yang Y M, Tian K, Hao J M, et al. Biodiversity and biodiversity conservation in Yunnan, China[J]. Biodiversity and Conservation, 2004, 13(4): 813~826.
- [8]Zhu H. The floras of southern and tropical southeastern Yunnan have been shaped by divergent geological histories[J]. PLoS One, 2013, 8(5):64213.
- [9]陆树刚. 云南主要植被类型中的蕨类植物[J]. 生态学杂志, 2001, 20(z1): 73~76.
- [10]Schuettpeiz E, Pryer K M. Fern phylogeny inferred from 400 leptosporangiate species and three plastid genes[J]. Taxon, 2007, 56(4): 1037~1050.
- [11]王崇云, 杨 斌, 和兆荣, 等. 云贵高原及横断山区莲座蕨科植物地理分布特征及其格局成因初探[J]. 植物分类与资源学报, 2012, 34(4): 317~325.
- [12]De Bruyn M, Stelbrink B, Morley R J, et al. Borneo and Indochina are major evolutionary hotspots for Southeast Asian biodiversity[J]. Systematic Biology, 2014, 63(6): 879~901.
- [13]姜 超, 任明迅, 谭 珂. 季风对亚洲热带植物分布格局的影响[J]. 植物生态学报, 2017, 41(10): 1103~1112.
- [14]Obrien E M. Climatic gradients in woody plant species richness: towards an explanation based on an analysis of southern Africa's woody flora[J]. Journal of Biogeography, 1993, 20(2): 181~198.
- [15]Kreft H, Jetz W, Mutke J, et al. Contrasting environmental and regional effects on global pteridophyte and seed plant diversity[J]. Ecography, 2010, 33(2): 408~419.
- [16]Shmida A, Wilson M V. Biological determinants of species diversity[J]. Journal of Biogeography, 1985, 12(1): 1~20.
- [17]He F L, Legendre P, Bellehumeur C, et al. Diversity pattern and spatial scale: A study of a tropical rain forest of Malaysia[J]. Environmental and Ecological Statistics, 1994, 1(4): 265~286.
- [18]Soria—Auza R W, Kessler M. The influence of sampling intensity on the perception of the spatial distribution of tropical diversity and endemism: a case study of ferns from Bolivia[J]. Diversity and Distributions, 2008, 14(1): 123~130.
- [19]阳文静. 中国植物采集的地理偏差及其对生物多样性格局分析的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [20]尹朝露, 刘雨晴, 肖 翠. 国家标本资源共享平台兰科植物标本记录采集地理偏差及其环境因子解释[J]. 科研信息化技术与应用, 2018, 9(5): 64~71.

Diversity and Geographical Distribution of Pteridophytes in Southern Yunnan

Chen Ke^{1,2}, Phyto Kay Khine¹, Harald Schneider¹

(1. Center for Integrative Conservation, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Science, Mengla, Yunnan 666303, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Pteridophytes of southern Yunnan were chosen as the research object. Digital specimen records of pteridophytes as the data source to firstly analyze the species composition of pteridophytes and visualize the spatial patterns of diversity. At the same time, relationship between diversity of pteridophytes and environmental variables were tested by correlation analysis in southern Yunnan. The results show relatively high diversity and complex composition of pteridophytes in southern Yunnan. According to the digital specimen records, there are 690 species of pteridophytes belonging to 116 *genera* and 37 families in southern Yunnan, accounting for more than half of the total number in Yunnan. Species richness shows the same pattern with phylogenetic diversity with a significant positive correlation between them. And it is the same with species β diversity and phylogenetic β diversity. The species richness and phylogenetic diversity of pteridophytes in southern Yunnan show strong correlation with climatic variables, while weak correlation with topographical variables. Species β diversity and phylogenetic β diversity of pteridophytes in southern Yunnan show a significant correlation between geographical distance and environmental distance, indicating that dispersal limitation and environmental filtering process have great influence on the formation of species β diversity and phylogenetic β diversity of pteridophytes in southern Yunnan.

Key words: pteridophytes; species richness; phylogenetic diversity; β diversity