

海南热带雨林国家公园霸王岭片区蝴蝶多样性 海拔梯度格局及影响因子

陈逸^{1#}, 孙浩晏¹, 侯若楠¹, 吴晴晴¹, 吴玲兵^{1,2*}

(1. 海南大学热带农林学院, 海南 儋州 571737 中国; 2. 海南国家公园研究院, 海南 海口 570203 中国)

摘要: 为探究海南热带雨林国家公园蝴蝶多样性沿海拔梯度格局及影响因子, 在霸王岭片区沿海拔 300 ~ 1 100 m 梯度设置了 24 条样线, 于 2024 年 11 月至 2025 年 6 月系统调查了样线上蝴蝶和蜜源植物物种个体数、物种丰富度、物种组成、物种周转和物种嵌套, 并同步测量了海拔, 监测了温度、湿度的变化。结果表明: 10 次调查记录到蝴蝶 5 科 202 种, 共 15 482 头。温度和蜜源植物丰富度是决定霸王岭片区蝴蝶物种丰富度的关键因素, 而蝴蝶个体数仅与温度存在显著的非线性关系; 蝴蝶 β 多样性主要由物种周转主导, 海拔、湿度和蜜源植物是驱动这一过程的重要影响因子, 表明各海拔区间均对霸王岭片区蝴蝶多样性有独特贡献。研究结果深化了对霸王岭片区蝴蝶多样性维持机制的认识, 可为海南热带雨林国家公园的蝴蝶多样性保护提供参考。

关键词: 多样性; 海南热带雨林国家公园; 蝴蝶; 海拔梯度; 物种周转; 蜜源植物

中图分类号: Q968.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674–7054(2026)05–0843–09

陈逸, 孙浩晏, 侯若楠, 等. 海南热带雨林国家公园霸王岭片区蝴蝶多样性海拔梯度格局及影响因子[J]. 热带生物学报(中英文), 2026, 17(5): 843–851. DOI: [10.15886/j.cnki.rdswwb.20250173](https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdswwb.20250173)

CSTR: [32425.14.j.cnki.rdswwb.20250173](https://cstr.cn/32425.14/j.cnki.rdswwb.20250173)



山地生态系统在短垂直距离内拥有较强的环境异质性, 是探究生物多样性格局及其潜在生态学过程的理想研究系统^[1–2]。海拔梯度变化可通过直接改变温度、湿度等微气候条件, 也可通过调控植被类型来间接改变栖息地环境, 最终改变昆虫物种分布与群落组成差异^[3]。因此, 生物多样性海拔梯度格局研究长期以来是生态学、生物地理学和保护生物学研究领域的热点之一^[4–5]。

蝴蝶因生命周期短、对环境变化敏感且易于观测和鉴定, 被广泛用作生物多样性动态监测对象^[6–8], 其分布现状、生活史与保护模式也备受关注^[9]。目前, 有关生物多样性海拔梯度格局研究已覆盖全球主要山脉, 如东喜马拉雅^[10]、安第斯山脉^[11], 以及秦岭^[12]和高黎贡山^[1]等。这些研究揭示了蝴蝶多样性与海拔梯度间的紧密联系, 但其分布格局(如单调递减、单峰)因研究类群和系统不同而有所差异。例如, 东喜马拉雅山脉蝴蝶丰

度随海拔呈单调递减趋势^[10]; 而广东梅县阴那山蝴蝶物种数、丰富度指数随海拔呈先增后减的单峰格局, 峰值出现在 401 ~ 600 m 海拔区间^[13]。同时, 研究焦点也从不同海拔群落的物种丰富度变化(α 多样性)延伸至物种组成差异(β 多样性), 以更深入视角确定生物多样性海拔梯度格局和解析群落构建的潜在生态学过程^[3]。此外, 温度、湿度与植物资源对蝴蝶多样性的影响已被多项研究证实。东喜马拉雅山脉的研究发现, 蝴蝶丰富度主要受年均温驱动^[10]; 秦岭西段的调查发现, 环境温度 24 ~ 30℃、湿度 70% ~ 85% 时蝴蝶群落结构更稳定, 且较高的植被异质性可显著维持其多样性^[12]; 巴西塞拉多地区的研究则指出, 植物多样性和气候因子共同影响蝴蝶物种多样性海拔梯度格局^[14]。

然而, 上述研究较多以陆地型山地为对象, 针对热带岛屿型山地系统的研究仍相对匮乏。与陆地型山地相比, 热带岛屿型山地拥有独特的生物

地理历史、更高的物种特有性,且因地理隔离可能导致更强的扩散限制和不同的群落构建机制^[15],其多样性格局及驱动机制可能不同于陆地山地模式。海南热带雨林国家公园作为中国保存最完好的热带岛屿型山地之一,不仅生态系统完整、植被垂直带谱清晰^[16],更因孤立的地理属性与连续的生境梯度,为检验陆地型山地生物多样性海拔梯度格局的普适性和揭示热带岛屿型山地独特的生物多样性形成机制提供了理想的研究系统。

截至目前,海南热带雨林国家公园有关蝴蝶的研究集中于资源勘查^[17-18],多样性分布格局及影响因子鲜有报道。本研究以海南热带雨林国家公园霸王岭片区为研究区域,于2024年11月至2025年6月在海拔300~1100 m梯度设置24条样线,系统调查蝴蝶与蜜源植物的数量、物种丰富度及群落组成,并同步记录其影响因子如海拔、温度、湿度的变化。本研究聚焦蝴蝶群落 α 多样性(物种丰富度、个体数)与 β 多样性(不同海拔群落物种组成差异),旨在:1)揭示霸王岭片区蝴蝶多样性海拔梯度格局,检验其是否符合经典的陆地型山地物种多样性海拔梯度格局;2)明确平均温度、平均湿度与蜜源植物对蝴蝶 α 、 β 多样性的相对重要性;3)评估环境过滤与生物相互作用在霸王岭片区蝴蝶群落构建中的作用。研究结果有助于理解霸王岭片区蝴蝶多样性维持机制,并为海南热带雨林国家公园蝴蝶多样性保护与管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况 海南热带雨林国家公园是中国设立的第一批国家公园,属岛屿型热带雨林,也是中国分布最集中、保存最完好、连片面积最大的热带雨林^[19]。霸王岭片区位于海南省昌江黎族自治县,总面积约880 km²,其中核心保护区为690 km²。霸王岭片区的生物资源丰富,已记录野生维管植物约2523种,陆生脊椎动物约416种、昆虫2100余种;该区域属热带海洋性季风气候,年均温约21.3℃,年降水量达1657 mm。该片区拥有从低地沟谷雨林到高山苔藓矮林的完整垂直带谱,是研究生物多样性沿海拔梯度分布格局的理想研究系统;同时,该片区也是极危物种海南长臂猿全球唯一分布地,生物本底资料相对丰富,人

为干扰较少,有利于解析蝴蝶多样性海拔梯度格局的构建机制。研究期间,在该区域拍摄到典型蝴蝶生态行为(图1),反映了该区域蝴蝶群落丰富的觅食策略和栖息地利用方式。



图1 黑绢斑蝶(蛱蝶科)吸食蜜源植物假臭草(左)和绿带燕凤蝶(凤蝶科)在溪流旁摄取水(右)

Fig. 1 A butterfly *Tirumala melanea* (Nymphalidae) feeding on a nectar plant *Praxelis clematidea* (left) and a butterfly *Lamproptera meges* (Papilionidae) exhibiting water imbibition at the stream margin (right)

1.2 调查方法

1.2.1 蝴蝶多样性调查 本研究采用样线法(line-transect method)对海拔300~1100 m范围内蝴蝶多样性进行调查。以100 m为海拔间隔,将300~1100 m海拔范围划分为8个连续的海拔调查区间,在每个100 m海拔区间内,结合山体地形,植被类型的典型性与野外采样可达性,均匀设置3条长度1000 m的调查样线(表1)。调查人员于2024-11-26—2025-06-27沿上述样线调查时(约1 km·h⁻¹),记录样线两侧宽3 m、上方5 m范围内所见的蝴蝶种类及其个体数。

对于无法现场识别的个体,使用捕虫网(网口直径38 cm,网深70 cm)进行捕获,用数码相机(佳能SX70HS)拍摄前后翅正反面和触角等关键形态特征后原地释放。物种鉴定参考inaturalist网站^[20],物种分科参考《中国蝴蝶生活史图鉴》^[21]。所有调查均在天气晴朗、风力微弱(小于3级)且日间气温较高的时段(9:00—16:00)进行,以便提高蝴蝶物种多样性覆盖度。为避免调查顺序对蝴蝶多样性的影响,所有样线采用随机顺序进行调查,研究周期内所有样线均调查10次,平均每次间隔约13 d。

1.2.2 蜜源植物多样性调查 为探究植物资源对蝴蝶多样性的影响,本研究在进行每条蝴蝶样线调查的同时,记录样线两侧3 m范围内所有蜜源植物的种类与数量。蜜源植物包括能为以花蜜、花粉为主要营养来源的访花动物(如蝴蝶)提供可利用的花蜜、花粉或其他甜汁类分泌物的植物,蜜源植物的物种鉴定主要参考《海南植物志》^[22]和《中

表 1 各样线海拔、温度、湿度、蜜源植物个体数和丰富度、蝴蝶个体数、丰富度和调查覆盖度

Tab. 1 Elevation, temperature, humidity, individuals and richness of nectar plants, and individuals, richness and sample coverage of butterfly species for each transect

样线 Transect	海拔区间 Elevational range	海拔/m Elevation	蝴蝶个体数/头 Butterfly individuals	蝴蝶丰富度 Butterfly richness	蜜源植物丰富度 Nectarplant richness	温度/℃ Temperature	湿度/% Humidity	调查覆盖度 Sample coverage
S1	300 ~ 400	378	1 289	55	22	22.780	28.2	0.997
S2		386	503	48	30	22.188	26.1	0.994
S3		395	1 068	54	31	/	/	0.993
S4	400 ~ 500	417	395	41	18	22.280	26.1	0.990
S5		446	416	35	26	/	/	0.981
S6		480	325	33	23	22.178	28.7	0.985
S7	500 ~ 600	517	595	45	27	22.126	29.0	0.997
S8		548	596	52	24	21.755	31.8	0.990
S9		580	561	42	23	21.336	30.0	0.995
S10	600 ~ 700	616	472	45	43	21.199	27.2	0.994
S11		645	790	47	41	20.623	28.1	0.998
S12		680	651	59	44	21.513	30.2	0.989
S13	700 ~ 800	715	768	51	37	20.879	29.9	0.996
S14		748	669	45	35	21.052	32.2	0.996
S15		783	749	48	27	20.789	32.5	0.997
S16	800 ~ 900	815	579	43	35	19.767	32.0	0.998
S17		848	635	43	33	20.368	34.0	0.995
S18		882	656	50	34	20.333	28.0	0.994
S19	900 ~ 1 000	917	511	43	40	/	/	0.996
S20		949	563	43	28	19.455	31.3	0.993
S21		982	607	43	42	18.116	35.3	0.995
S22	1 000 ~ 1 100	1 011	739	39	32	19.895	37.3	0.997
S23		1 026	775	46	32	19.828	37.6	0.994
S24		1 041	570	34	34	18.919	31.4	0.997

注: “/”表示因设备损坏而缺失的数据。

Note: “/” indicates data not available due to equipment failure.

国植物志》^[23]。本研究中的“蜜源植物丰富度 (richness of nectar plant, RichN)”定义为每条样线两侧 3 m 范围内记录到的所有蜜源植物的物种数。

1.2.3 其他影响因子测定 除蜜源植物多样性之外, 海拔 (elevation)、温度 (temperature) 和湿度 (humidity) 也可能对蝴蝶多样性产生影响^[11]。本研究以奥维互动地图 v10.3.6 (北京元生华网软件有限公司, 精度± 4 m) 记录每条样线起点和终点海

拔, 取每条样线起点、终点海拔的算术平均值作为该样线的海拔。以每条样线上该算术平均值所在点为基准, 使用土壤温湿度测量仪 (TMS, TOMST company, Czech Republic) 监测调查期间该点温度和湿度的变化, 将该点温度和湿度的算术平均值作为该样线的平均温度 (以下简称温度) 和平均湿度 (以下简称湿度) 用于后续数据分析。

1.3 数据分析 本研究所有数据分析均在 R

v4.5.1 软件中进行^[24]。先使用 iNEXT 软件包^[25] 计算各样线蝴蝶物种调查覆盖度以评估其群落调查完整性。为减少稀有物种对群落多样性分析的干扰以期提升模型稳健性,本研究剔除了所有样线累计个体数少于 3 的物种^[26]。

为探究蝴蝶群落 α 多样性(物种丰富度和总个体数)的驱动因素,本研究构建了以海拔、温度、湿度、蜜源植物丰富度为自变量的线性和非线性回归模型。分析前所有线性模型的残差均通过 Shapiro-Wilk 检验进行正态性检验,同时计算方差膨胀因子(VIF)检验多重共线性,确保所有纳入模型的变量 $VIF < 10$ 。利用 MuMIn 软件包^[27],基于修正的赤池信息量准则(AICc)进行模型选择。此外,为检验线性假设是否成立,使用 mgcv 软件包构建了广义加性模型(GAM)^[28](REML 拟合),判断上述自变量与多样性指数是否存在显著非线性关系。

为探究沿海拔梯度蝴蝶群落物种组成和蜜源植物物种组成的变化,使用 betapart 软件包^[29] 计算 Sørensen 多群落和成对群落相异性指数(β_{SOR} 和 β_{sor})、物种周转(β_{SIM} 和 β_{sim})和嵌套(β_{SNE} 和 β_{sne})组分;其中, $\beta_{SOR} = \beta_{SIM} + \beta_{SNE}$, $\beta_{sor} = \beta_{sim} + \beta_{sne}$ 。为解析影响因子对蝴蝶群落组成的影响,使用 vegan 软件包^[30] 进行 Mantel 检验;先将影响因子转换成欧氏距离矩阵,再检验其与成对蝴蝶群落相异性指数的相关性。

2 结果与分析

2.1 科级蝴蝶个体数组成概况 本研究共记录蝴蝶 15 482 头,隶属 5 科 202 种。各样线的蝴蝶累计个体数 325 ~ 1 289 头,调查覆盖度为 0.981 ~ 0.998(表 1),显示本研究中 24 条样线调查完整性较好。

调查到的蝴蝶以蛱蝶科(Nymphalidae)、粉蝶科(Pieridae)和灰蝶科(Lycaenidae)为主,其个体数占蝴蝶总数的比例分别为 65.6%、17.0% 和 12.8%,其他科为凤蝶科(Papilionidae)和弄蝶科(Hesperiidae),占比共计 4.5%(图 2)。

2.2 蝴蝶群落 α 多样性 模型选择结果显示,在解释蝴蝶物种丰富度时,同时包含温度(temperature)和蜜源植物丰富度(RichN)组合的模型具有最低的 AICc 值和最高的权重(表 2)。多变量线性回归

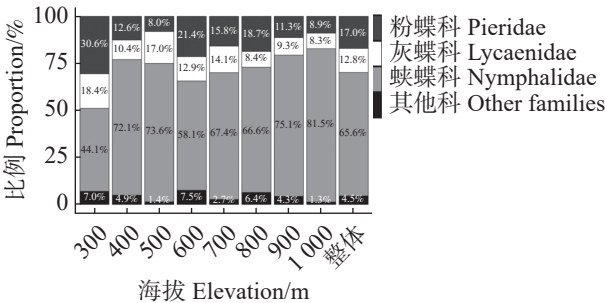


图 2 不同海拔科级蝴蝶个体数的比例
Fig. 2 Proportion of butterfly individuals at family level within elevation

表 2 蝴蝶物种丰富度影响因子的模型选择结果
Tab. 2 Model selection results for factors influencing butterfly richness

模型 Model	AICc	Δ AICc	权重 Weight
温度+蜜源植物丰富度 Temperature + RichN	137.6	0.00	0.445
空模型 Empty model	139.8	2.23	0.146
温度 Temperature/°C	140.1	2.49	0.128

进一步证实,温度和蜜源植物丰富度均对蝴蝶物种丰富度有显著的正影响,模型整体解释度为 24.3%(表 3)。广义加性模型分析结果与多元线性分析的结果一致。

对于蝴蝶总个体数,模型选择结果显示零模型具有最低的 AICc 值和最高的权重(表 4)。简单线性回归分析显示,所有影响因子与蝴蝶总个体数之间均不存在显著的线性关系(表 5)。广义加性模型分析显示,温度对蝴蝶总个体数存在显著的非线性影响($edf=7.031$, $P<0.01$),模型解释度为 74.1%(图 3)。

2.3 蝴蝶群落 β 多样性 Sørensen 多群落相异性指数结果显示,蝴蝶群落间总物种组成相异性

表 3 蝴蝶物种丰富度单变量与多变量回归模型
Tab. 3 Univariate and multivariate regression models for butterfly richness

	单变量模型			多变量模型		
	Univariate model			Multivariate model		
	回归系数 Coefficient	P	R ²	回归系数 Coefficient	P	R ²
蜜源植物 丰富度 RichN	0.185	0.339	0.002	0.446	0.031	
温度/°C Temperature	1.707	0.139	0.065	3.097	0.016	
模型整体 Overall model					0.031	0.243

表 4 蝴蝶个体数影响因子的模型选择结果

Tab. 4 Model selection for factors influencing butterfly individuals			
模型Mode	AICc	ΔAICc	权重Weight
空模型 Null, intercept only	283.9	0.00	0.612
湿度 Humidity	285.9	1.97	0.228
温度 Temperature	286.6	2.69	0.160

表 5 蝴蝶个体数与影响因子的简单线性回归分析结果

Tab. 5 Simple linear regression between butterfly individuals and influencing factors			
	回归系数 Coefficient	P	R ²
海拔 Elevation	0.034	0.869	-0.051
温度 Temperature	8.291	0.821	-0.050
湿度 Humidity	1 108.0	0.409	-0.015
蜜源植物丰富度 RichN	0.785	0.897	-0.052

(β_{SOR}) 为 0.887, 其中物种周转组分 (β_{SIM}) 占总 β 多样性的 98.1%。

Mantel 检验显示, 海拔 ($r=0.558, P<0.01$)、温度 ($r=0.394, P<0.01$) 和湿度 ($r=0.291, P<0.01$) 与蝴蝶群落 β_{sim} 呈显著正相关; 海拔 ($r=0.614, P<0.01$)、温度 ($r=0.455, P<0.01$)、湿度 ($r=0.244, P<0.05$) 和蜜源植物 β_{sor} ($r=0.334, P<0.01$) 与蝴蝶群落 β_{sor} 呈显著正相关; 蝴蝶群落 β_{sne} 与所有影响因子均无显著相关 (图 4)。

3 讨论

3.1 蝴蝶 α 多样性格局的驱动机制：温度与蜜源植物丰富度的关键作用 本研究发现, 海拔本身与蝴蝶物种丰富度及个体数均未呈现显著的直接线性或非线性关系, 其生态效应可能主要通过改变热量条件和蜜源植物间接实现^[31]。霸王岭片区海拔效应的弱化, 凸显了热带岛屿山地生态系统的特殊性, 即海拔作为复合背景梯度, 通过与温度、植物资源的紧密耦合, 间接塑造蝴蝶多样性格局^[32]。本研究结果表明, 海拔对海南热带雨林国家公园霸王岭片区山地蝴蝶多样性的调控依赖具体影响因子的中介作用, 其通过调控温度、蜜源植物丰富度间接塑造蝴蝶的多样性格局。

模型选择与多变量回归结果均显示, 温度与蜜源植物丰富度共同驱动了霸王岭片区的蝴蝶物种丰富度。温度作为关键的热量指标, 直接影响

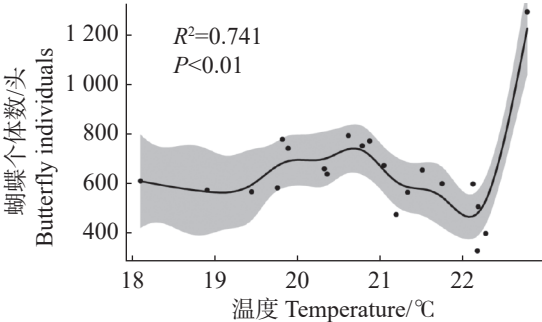


图 3 温度与蝴蝶个体数的非线性关系
Fig. 3 Nonlinear relationship between temperature and butterfly individuals

注: 阴影部分代表 95% 置信区间, 方程为 butterfly individuals = 642.24 + s(temperature) + ϵ , butterfly individuals 为蝴蝶个体数, s(temperature) 代表温度的平滑项, ϵ 代表残差。

Note: The shaded area represents the 95% confidence interval. The equation is butterfly individuals = 642.24 + s (temperature) + ϵ , where butterfly individuals denotes total butterfly individuals for each transect. s (temperature) denotes the smooth term for temperature, and ϵ denotes the residual.

蝴蝶的生理代谢与生存阈值^[33]。阿尔卑斯山的研究证实低温环境通过环境过滤作用排除非耐低温型物种, 调控蜜蜂群落丰富度^[34]。蜜源植物的关键作用可能源于其提供的双重资源, 既为成蝶提供花蜜 (能量来源), 也为蝴蝶幼虫提供寄主植物 (繁殖基础), 通过创造多样化生态位支撑物种共存^[35]。西班牙热带海岸带的研究也指出, 植物作为食物资源直接影响蝴蝶物种的分布与多样性^[36], 进一步印证了蜜源植物资源在蝴蝶物种丰富度中的决定作用。

与物种丰富度不同, 蝴蝶个体数仅与温度呈显著非线性增加, 与其他影响因子无显著线性关系。这一结果可能与蝴蝶的生理特性有关。Kingsolver 等^[37] 在野外监测蝴蝶的飞行时发现, 大多数蝴蝶需要维持较高的体温才能飞行, 这通常依赖外部热源 (如太阳辐射) 来实现。亚马逊地区的蝴蝶群落在高温和中等降雨的月份具有最高的蝴蝶物种丰富度和个体数^[38]。这些结论为本研究结果中温度对蝴蝶个体数非线性决定提供了机制支撑, 进一步验证温度是决定蝴蝶个体数的关键影响因子之一。

3.2 蝴蝶 β 多样性的主导因素：海拔与环境筛选作用 本研究明确, 海拔是塑造霸王岭片区蝴蝶 β 多样性空间格局的核心因素之一, 其通过整合温度、湿度、蜜源植物 β 多样性形成强烈的环境筛选, 驱动蝴蝶群落以物种周转为主要生态过程的 β 多样性分异。这与 Dewan 等^[39] 在东喜马拉雅

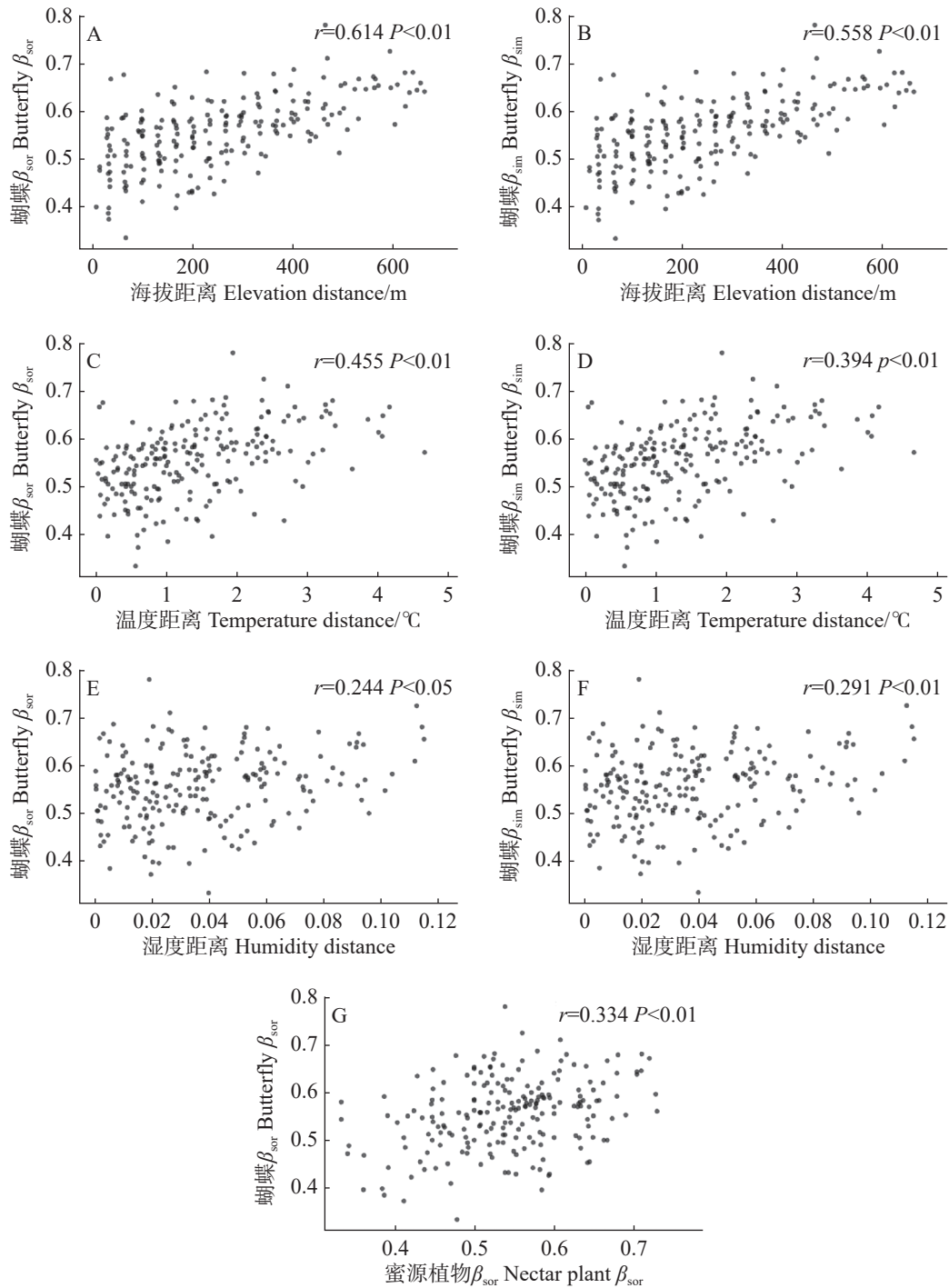


图4 蝴蝶群落相异性指数 β_{sor} (A、C、E)、物种周转 β_{sim} (B、D、F) 与影响因子距离矩阵 (海拔、温度、湿度) 及蜜源植物相异性指数 β_{sor} (G) 显著性相关分析结果

Fig. 4 Significant results of Mantel tests between butterfly community dissimilarity index β_{sor} (A, C, E), species turnover β_{sim} (B, D, F), and distance of influencing factors (elevation, temperature, humidity) and nectar plant β_{sor} (G)

300 ~ 3 000 m 梯度的发现高度呼应, 两地均证实海拔介导的环境异质性是群落分异的核心, 且物种周转贡献远超地理隔离效应。蜜源植物群落 β_{sim} 对蝴蝶 β_{sim} 未表现出显著影响, 其仅对蝴蝶总 β 多样性 (β_{sor}) 存在极显著正向效应, 且该效应的作用强度显著低于海拔、温度对蝴蝶对应 β 多

样性指数的驱动效应, 蜜源植物 β_{sor} 虽对蝴蝶 β_{sor} 存在显著影响 ($r = 0.334$, $P < 0.01$), 但其作用强度低于海拔 ($r = 0.614$, $P < 0.01$) 与温度 ($r = 0.455$, $P < 0.01$) 的效应, 这与 Zellweger 等^[40] 对欧洲中部山地的研究结论一致: 该研究证实植物 β 多样性虽能提升蝴蝶 β 多样性的预测精度, 但以温度为

核心的影响因子与海拔通过环境过滤作用驱动的群落分异,仍是蝴蝶 β 多样性形成的首要动力,植物群落的更替更多是环境筛选作用下的伴随结果。综上所述,海拔作为复合环境梯度载体,其整合的温度、湿度和蜜源植物 β 多样性等形成的环境筛选效应共同塑造了海南热带雨林国家公园霸王岭片区蝴蝶群落 β 多样性的海拔梯度格局。

4 结 论

本研究发现,海南热带雨林国家公园霸王岭片区温度与蜜源植物丰富度共同塑造蝴蝶群落物种丰富度,蝴蝶个体数量与温度呈显著非线性增加;海拔通过整合温度、湿度和蜜源植物 β 多样性形成环境筛选,主导以物种周转为核心的蝴蝶群落 β 多样性分异,表明各海拔带均对霸王岭片区蝴蝶多样性有独特贡献。本研究可为海南热带雨林国家公园蝴蝶物种多样性保护提供一定参考。

致谢: 海南热带雨林国家公园霸王岭分局对本研究予以了大力支持;海南大学热带农林学院曾驰博士在野外调查期间提出了建设性意见;在此一并感谢。

支撑材料: 附表1,附图1,2。 <https://rdswxb.hainanu.edu.cn/article/doi/10.15886/j.cnki.rdsxb.20250173>

参考文献:

- [1] 易浪,董亚坤,苗白鸽,等. 云南高黎贡山地区蝴蝶群落多样性[J]. *生物多样性*, 2021, 29(7): 950–959. <https://doi.org/10.17520/biods.2020486>
- [2] 刘鹏,春批边姆,张庆,等. 哈巴雪山不同海拔梯度哺乳动物群落谱系及功能多样性[J]. *生态学报*, 2025, 45(7): 3461–3473. <https://doi.org/10.20103/j.stxb.202401020012>
- [3] Villaseñor-Amador D, Benites P, Sandoval-Becerra F M, et al. Unravelling high insect diversity and community turnover along a tropical-temperate elevation gradient: a metabarcoding approach [J]. *PLoS One*, 2025, 20(7): e0327884. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0327884>
- [4] 孙昊田,陈文武,郝永荣,等. 秦岭漓河不同海拔和环境因子对生物多样性及群落结构的影响[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(11): 2702–2711. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202311.019>
- [5] 臧建成,宋美成,黄智,等. 西藏色季拉山(阳坡)不同海拔土壤动物群落多样性时空分布特征[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(5): 189–199. <https://doi.org/10.11841/j.issn.1007-4333.2023.05.17>
- [6] Nowicki P, Settele J, Henry P Y, et al. Butterfly monitoring methods: the ideal and the real world [J]. *Israel Journal of Ecology & Evolution*, 2008, 54(1): 69–88. <https://doi.org/10.1560/IJEE.54.1.69>
- [7] Kumar S, Simonson S E, Stohlgren T J. Effects of spatial heterogeneity on butterfly species richness in Rocky Mountain National Park, CO, USA [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2009, 18(3): 739–763. <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9536-8>
- [8] Forister M L, McCall A C, Sanders N J, et al. Compounded effects of climate change and habitat alteration shift patterns of butterfly diversity [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(5): 2088–2092. <https://doi.org/10.1073/pnas.0909686107>
- [9] Pinkert S, Farwig N, Kawahara A Y, et al. Global hotspots of butterfly diversity are threatened in a warming world [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2025, 9(5): 789–800. <https://doi.org/10.1038/S41559-025-02664-0>
- [10] Acharya B K, Vijayan L. Butterfly diversity along the elevation gradient of Eastern Himalaya, India [J]. *Ecological Research*, 2015, 30(5): 909–919. <https://doi.org/10.1007/s11284-015-1292-0>
- [11] Cómbita J L, Giraldo C E, Escobar F. Environmental variation associated with topography explains butterfly diversity along a tropical elevation gradient [J]. *Biotropica*, 2022, 54(1): 146–156. <https://doi.org/10.1111/btp.13040>
- [12] 张超,李娟,程海云,等. 秦岭西段地区蝴蝶群落多样性与环境因子相关性[J]. *生物多样性*, 2023, 31(1): 215–240. <https://doi.org/10.17520/biods.2022272>
- [13] 李保铨,李柳红,周露露,等. 广东梅县阴那山省级自然保护区蝶类多样性及其区系分析[J]. *林业调查规划*, 2024, 49(1): 51–57. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-3168.2024.01.010>
- [14] Beirão M V, Neves F S, Fernandes G W. Climate and plant structure determine the spatiotemporal butterfly distribution on a tropical mountain [J]. *Biotropica*, 2021, 53(1): 191–200. <https://doi.org/10.1111/btp.12860>
- [15] 李歌,凌少军,陈伟芳,等. 昌化江河谷隔离对海南岛特有植物盾叶苣苔遗传多样性的影响[J]. *广西植物*, 2020, 40(10): 1505–1513. <https://doi.org/10.11931/guihaia.gxzw201808024>
- [16] Wang G Q, Scherson R A, Vera D, et al. Spatial patterns and drivers of native plant diversity in Hainan, China [J]. *Journal of Systematics and Evolution*, 2024, 62(4): 603–620. <https://doi.org/10.1111/jse.13017>
- [17] 陈天鹏. 海南岛蝴蝶生物多样性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2021. <https://doi.org/10.27152/d.cnki.gshanu.2021.001366>
- [18] 谭舜云. 海南省鹦哥岭自然保护区蝶类资源调查与多样性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2021. <https://doi.org/10.27152/d.cnki.gshanu.2021.000964>
- [19] 中国新闻网. 何以中国·行走海南 | 寻幽探秘雨林中 [EB/OL]. [2025-06-10]. <https://www.chinanews.com/tp/hd2011/2025/06-10/1154636.shtml> [2026-07-08].
- [20] iNaturalist. iNaturalist [DB/OL]. [2026-02-17]. <https://www.inaturalist.org/observations>.

- [21] 朱建青, 谷宇, 陈志兵, 等. 中国蝴蝶生活史图鉴[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2018, 1-4.
- [22] 陈焕镛. 海南植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1964.
- [23] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [24] R Core Team. R: a language and environment for statistical computing [CP/OL]. (2025-06-13) [2025-11-09]. <http://www.R-project.org/>.
- [25] Chao A N, Gotelli N J, Hsieh T C, et al. Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies [J]. *Ecological Monographs*, 2014, 84(1): 45–67. <https://doi.org/10.1890/13-0133.1>
- [26] Poos M S, Jackson D A. Addressing the removal of rare species in multivariate bioassessments: the impact of methodological choices [J]. *Ecological Indicators*, 2012, 18: 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.10.008>
- [27] Bartoň K. MuMIn: multi-model inference [CP/OL]. (2025-04-01)[2025-11-09]. <https://doi.org/10.32614/cran.package.mumin>.
- [28] Wood S N. Generalized additive models: an introduction with R [M]. 2nd ed. New York: Chapman and Hall/CRC, 2017:325–404. <https://doi.org/10.1201/978131537-0279>
- [29] Baselga A. Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(1): 134–143. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00490.x>
- [30] Dixon P. Vegan, a package of R functions for community ecology [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2003, 14(6): 927–930. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2003.tb02228.x>
- [31] Pires A C V, Barbosa M, Beiroz W, et al. Altitudinal variation in butterfly community associated with climate and vegetation [J]. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 2020, 92(S2): e20190058. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020190058>
- [32] Gallou A, Baillet Y, Ficetola G F, et al. Elevational gradient and human effects on butterfly species richness in the French Alps [J]. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(11): 3672–3681. <https://doi.org/10.1002/ece3.2803>
- [33] Molleman F, Moore M E, Halali S, et al. Larval growth rate is not a major determinant of adult wing shape and eyespot size in the seasonally polyphenic butterfly *Melanitis leda* [J]. *PeerJ*, 2024, 12: e18295. <https://doi.org/10.7717/peerj.18295>
- [34] Hoiss B, Krauss J, Potts S G, et al. Altitude acts as an environmental filter on phylogenetic composition, traits and diversity in bee communities [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2012, 279(1746): 4447–4456. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1581>
- [35] Dennis R L H, Shreeve T G, van Dyck H. Habitats and resources: the need for a resource-based definition to conserve butterflies [J]. *Biodiversity & Conservation*, 2006, 15(6): 1943–1966. <https://doi.org/10.1007/s10531-005-4314-3>
- [36] Sánchez-Dávila J, Traveset A, Colom P. Effects of food availability on butterfly diversity and network specialization across altitudinal levels in a Mediterranean landscape [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2024, 33(1): 239–256. <https://doi.org/10.1007/s10531-023-02745-1>
- [37] Kingsolver J G. Thermal ecology of *Pieris* butterflies (Lepidoptera: Pieridae): a new mechanism of behavioral thermoregulation [J]. *Oecologia*, 1985, 66(4): 540–545. <https://doi.org/10.1007/bf00379347>
- [38] Checa M F, Barragán A, Rodríguez J, et al. Temporal abundance patterns of butterfly communities (Lepidoptera: Nymphalidae) in the Ecuadorian Amazonia and their relationship with climate [J]. *Annales de la Société Entomologique de France(N. S.)*, 2009, 45(47): 470–486. <https://doi.org/10.1080/00379271.2009.10697630>
- [39] Dewan S, Sanders N J, Acharya B K. Turnover in butterfly communities and traits along an elevational gradient in the eastern Himalaya, India [J]. *Ecosphere*, 2022, 13(3): e3984. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3984>
- [40] Zellweger F, Roth T, Bugmann H, et al. Beta diversity of plants, birds and butterflies is closely associated with climate and habitat structure [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 26(8): 898–906. <https://doi.org/10.1111/geb.12598>

Diversity patterns of butterfly assemblages along an elevational gradient and influencing factors in the Bawangling region of Hainan Tropical Rainforest National Park

Chen Yi^{1#}, Sun Haoyan¹, Hou Ruonan¹, Wu Qingqing¹, Wu Lingbing^{1,2*}

(1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Danzhou, Hainan 571737, China;

2. Hainan Institute of National Park, Haikou, Hainan 570203, China)

Abstract: To explore the distribution patterns of butterfly diversity and influencing factors along an elevational gradient in Hainan Tropical Rainforest National Park, 24 line transects were established along a 300–1 100 m gradient in the Bawangling region to make a systematical survey of the number of individuals, species richness, species composition, species turnover and species nestedness of butterflies and nectar plants within each transect from November 2024 to June 2025. The elevation and variations in temperature and humidity were simultaneously monitored for each transect. A total of 15 482 butterfly individuals belonging to 202 species and 5 families were recorded during 10 surveys. The results showed that temperature and nectar plant richness were the key influencing factors determining the butterfly richness in the Bawangling region, while the number of butterfly individuals only exhibited a significant non-linear increasing with temperature. Butterfly β -diversity was primarily driven by species turnover, which was determined by distance of elevation, temperature, humidity and nectar plant. This suggested that each elevation makes its unique contribution to butterfly diversity of the Bawangling region. These findings deepen the understanding of the mechanisms structuring butterfly diversity in the Bawangling region and provide a scientific basis for conservation of butterfly diversity in Hainan Tropical Rainforest National Park.

Keywords: diversity; Hainan Tropical Rainforest National Park; butterfly; elevational gradient; species turnover; nectar plant

(责任编辑: 钟云芳)