•研究报告•

三江并流区树线生境小型兽类多样性多维度评价及其保护启示

宋文宇^{1,2}, 李学友¹, 王洪娇¹, 陈中正^{3,1}, 何水旺¹, 蒋学龙^{1*}

1. 中国科学院昆明动物研究所遗传资源与进化国家重点实验室, 昆明 650201; 2. 大理大学病原与媒介生物研究所, 云南省自然疫源性疾病防控技术重点实验室, 云南大理 671003; 3. 安徽师范大学生态与环境学院, 皖江流域退化生态系统的恢复与重建省部共建协同创新中心, 安徽芜湖 241002

摘要: 三江并流区具有极高的环境异质性和丰富的生物多样性, 树线以上的高山生境是该地区的核心景观之一。本研究拟通过物种、系统发育和功能多样性对高山小型兽类多样性进行评价, 并从保护生物学的角度讨论生物多样性多维度评价的意义。2013年9月至2018年11月对三江并流区树线区域展开规范化野外调查, 收集小型兽类群落信息。从野外采集的组织样品中提取、扩增、测定线粒体 $CYTB$ 基因序列, 构建小型兽类物种系统发育树。通过 α 多样性的不同维度以及功能冗余度评价了三江并流区树线生境小型兽类多样性。结果显示, 使用不同数据类型(出现/缺失数据和多度数据)的结果并不一致, 说明仅使用传统的丰富度指数对于描述多样性分布存在较大局限。物种和系统发育多样性在不同地点间的分布相似, 但功能多样性的分布与这两者有所差异, 从另一角度说明综合评价生物多样性的不同维度对于全面保护演化历史和生态功能的必要性。与高黎贡山、云岭相比较, 怒山山脉在5个样带尺度的多样性指数上呈现最高水平, 且具有最低的功能冗余度, 说明怒山的研究和保护力度均亟待加强。

关键词: 天空之岛; α 多样性; 生态系统功能; 气候变化; 生物多样性保护

宋文宇, 李学友, 王洪娇, 陈中正, 何水旺, 蒋学龙 (2021) 三江并流区树线生境小型兽类多样性多维度评价及其保护启示. 生物多样性, 29, 1215–1228. doi: 10.17520/biods.2021006.

Song WY, Li XY, Wang HJ, Chen ZZ, He SW, Jiang XL (2021) Multi-dimensional evaluation of small mammal diversity in tree line habitats across the Three Parallel Rivers of Yunnan Protected Areas: Implications for conservation. Biodiversity Science, 29, 1215–1228. doi: 10.17520/biods.2021006.

Multi-dimensional evaluation of small mammal diversity in tree line habitats across the Three Parallel Rivers of Yunnan Protected Areas: Implications for conservation

Wenyu Song^{1,2}, Xueyou Li¹, Hongjiao Wang¹, Zhongzheng Chen^{3,1}, Shuiwang He¹, Xuelong Jiang^{1*}

1 State Key Laboratory of Genetic Resources and Evolution, Kunming Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650201

2 Institute of Pathogens and Vectors, Yunnan Provincial Key Laboratory for Zoonosis Control and Prevention, Dali University, Dali, Yunnan 671003

3 Collaborative Innovation Center of Recovery and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Wanjiang Basin Co-founded by Anhui Province and Ministry of Education, School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241002

ABSTRACT

Aim: To evaluate multi-dimensional biodiversity levels of small mammals in tree line habitats across the Three Parallel Rivers of Yunnan Protected Areas (TPR), and discuss their implication for conservational strategies.

Methods: Between September 2013 and November 2018, we conducted standardized field investigations along tree line across the TPR to collect small mammals. We sequenced $CYTB$ gene and obtained morphological measurements from field samples to calculate frequently used taxonomic, phylogenetic, and functional diversity metrics.

收稿日期: 2021-01-06; 接受日期: 2021-06-17

基金项目: 第二次青藏高原综合考察研究专题(2019QZKK0501)、国家重点研发计划课题(2017YFC0505200)和生物多样性调查观测与评估(2019HB2096001006)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: jiangxl@mail.kiz.ac.cn

Results: We found that indices derived using presence/absence and abundance-based data gave discrepant results, indicating using traditional richness metrics are limited in describing diversity distribution patterns. Taxonomic and phylogenetic diversity showed similar distribution patterns, whereas different distribution was found for functional diversity. Compared with Gaoligong and Yunling mountains, Nushan showed the highest diversity levels in most of the metrics and dimensions at the transect scale, and lowest level in functional redundancy.

Conclusions: To comprehensively preserve evolutionary history and ecological functions requires simultaneous consideration of multi-dimensional biodiversity. Further research and conservational efforts should be imposed in the Nushan area. The study contributed to bridge knowledge gap of alpine ecosystems in the TPR, providing insight of the conservation of alpine biomes under contemporary climate change.

Key words: sky island; α -diversity; ecosystem functioning; climate change; biodiversity conservation

生物多样性与人类的生存、生活和生产息息相关(Cardinale et al, 2012)。然而, 当前生物多样性正经历快速丧失, 对其进行合理的管理和保护是21世纪的迫切需求(Brubaker et al, 1995; Ceballos et al, 2015)。制定管理和保护措施首先需要对生物多样性进行评估。生物多样性包括物种多样性、反映演化历史的系统发育多样性和反映生态系统功能的功能多样性等不同维度(Brum et al, 2017; Nakamura et al, 2020)。近年来, 生态学者意识到传统意义上的物种多样性将所有物种等同(Magurran, 2003), 显然忽视了物种在演化历史和生态功能上的差异(Mouchet et al, 2010), 因此, 系统发育和功能多样性受到了极大关注(Cavender-Bares et al, 2009; Funk et al, 2017; Nakamura et al, 2020)。从不同维度评价生物多样性不但有助于理解群落构建过程(Webb et al, 2002; Mouchet et al, 2010)和生物多样性格局形成机制(Pavoine & Bonsall, 2011), 而且有助于针对不同地区制定相应的保护措施(Brum et al, 2017), 同时, 生物多样性的不同维度本身就是值得保护的對象和目标(Lean & Maclaurin, 2016)。综合考虑生物多样性的不同维度, 有助于评估未来物种灭绝造成的演化历史或生态功能损失, 并最大限度地发挥保护效能的潜力(Smiley et al, 2020)。自生物多样性的多维性概念被正式提出以来(Stevens & Tello, 2014), 已有一些研究综合不同维度对生物多样性水平进行评价。例如, Brum等(2017)发现兽类不同维度多样性热点在全球重叠程度较低, 仅关注1–2个维度难以同时对它们进行保护; Ochoa-Ochoa等(2020)发现两栖类多样性的不同维度在空间上互相不匹配, 因此, 应避免仅基于单个维度(如物种)开展保护工作; Smiley等(2020)对啮齿类开展的研究同样说明综合评价生物多样性不同维度对保护工作具有重

要意义。

山地是全球生物多样性最为集中的地区(Rahbek et al, 2019), 也是生物多样性研究和保护的关键区域(Mittermeier et al, 2011)。高山生态系统(alpine ecosystem; Körner, 2008)普遍存在于所有大陆和纬度, 通常具有较高的特有种比例(张瑞等, 2013), 对气候变化和干扰极为敏感(刘洋等, 2009), 而且有助于促进物种分化(Knowles, 2001; He & Jiang, 2014)。据统计, 高山占据了全球陆地(除南极洲外)总面积的2.64% (约3.56百万km²) (Testolin et al, 2020)。树线是高山生态系统的天然分界线(Körner et al, 2017)。然而, 近年来研究者观察到气候变化情景下树线发生了广泛上移现象(Baker & Moseley, 2007; Gottfried et al, 2012; Sigdel et al, 2020), 这可能会对高山生态系统造成很大影响(Wershow & Dechaine, 2018; Lyons & Kozak, 2020)。因此, 高山生态系统和树线近年来受到了极大关注。

中国西南的横断山区是全球生物多样性热点地区之一(Mittermeier et al, 2011), 三江并流区位于横断山区腹地, 是联合国教科文组织(UNESCO)评定的世界自然遗产地。高山生境是三江并流区的核心景观之一(王文礼, 2014)。该区域树线以上的生物多样性研究大多集中在植物方面(戴君虎和崔海亭, 1999; 刘洋等, 2009; 陈建国等, 2011), 例如高山植物多样性调查(邓敏和周浙昆, 2004; 徐波等, 2014)等。此区域的动物类群虽然也已得到较多研究, 但通常仅关注单个多样性维度或海拔垂直梯度变化(李栋和龚正达, 2011; Wu et al, 2013; Wen et al, 2014; Du et al, 2017; Chen et al, 2020), 专门针对三江并流区树线生境动物类群开展的研究很少。高歌等(2017)通过红外相机技术对高黎贡山的高山鸟兽生物多样性进行了专项调查, 拍摄到11种国家重点保护动

物和8种IUCN名录物种; Song等(2020)发现树线附近的小型兽类的物种和功能 β 多样性受到不同生态机制驱动。除此以外, 目前尚未见专门关注三江并流区树线生境小型兽类群落(Barnett & Dutton, 1995)并综合不同维度对其多样性水平进行评价的研究。

据此, 为了弥补对树线生境小型兽类多样性研究的不足, 通过多维度评价促进高山生物多样性保护工作, 本研究拟对三江并流区树线生境开展规范化野外调查, 采集小型兽类群落数据, 从物种、系统发育和功能的角度对其多样性的水平分布格局进行评价, 并初步探讨其保护生物学意义。

1 研究区域及方法

1.1 研究区域概况

通常所指的三江并流区大致位于云南省西北部, 与西藏自治区和四川省接壤。该地区的山脉由青藏高原东南缘延伸而成, 原本东西走向的山脉在此转为南北向, 形成了“四山夹三江”的地理景观, 从西至东依次为高黎贡山-怒江-怒山-澜沧江-云岭-金沙江-沙鲁里山(张荣祖, 1997)。该地区地形复杂, 山脉和峡谷间形成了巨大的海拔落差, 被认为是典型的“天空之岛”(简称“天岛”)地形(He & Jiang, 2014), 环境和植被在垂直方向上呈现显著的梯度变化(杨勤业和沈康达, 1984), 孕育并保存了极高的生物多样性(杨家伟, 2002), 是生物学研究和保护的热点和关键区域。该区域的许多地点已被纳入自然保护区管理范围, 如高黎贡山、白马雪山和云龙天池等国家级自然保护区及多个省级自然保护区。

据统计, 三江并流区位于树线以上的面积约8,800 km², 约为三江并流世界自然遗产地面积的一半(王文礼, 2014)。整体来看, 三江并流区在5-10月为雨季, 11月至次年4月为旱季(Wen et al, 2014)。由于巨大的海拔落差和来自印度洋的暖湿气流的作用, 该地区的气候在海拔、南北以及东西方向均有不同程度的梯度变化(刘淑珍和柴宗新, 1986; 明庆忠, 2006; Sherman et al, 2008)。三江并流区不同地点树线以上区域的气候差异与河谷地区相比较小, 树线位置的年均温约2.5℃(王文礼, 2014), 降水在不同山脉之间较为均匀, 年均降水量约1,100 mm(Wang et al, 2013)。植被方面, 三江并流区的树线生境普遍由暗针叶林向高山灌丛、草甸、流石滩、水体和积雪过渡(Sherman et al, 2008)。

1.2 小型兽类采集

本研究选择了三江并流区内的18个地点作为调查样地(图1, 附录1)。由于样地较多且较分散, 研究区域内雨季强烈的降水和旱季的积雪导致野外工作无法进行, 因此本研究大部分野外调查开展于每年的雨季前(4-6月)和雨季后(9月下旬至11月)(附录1)。玉龙雪山的调查时间为2013年9月, 其他17座山峰的调查开展于2016年12月至2018年11月。本研究参考王文礼(2014), 将树线定义为高海拔森林斑块(树高 > 3 m)上部边界的连线。考虑到树线代表了树木生活型向非树木生活型过渡的区域, 而且通常呈锯齿形分布(王文礼, 2014), 在树线附近、略高于和略低于树线的区域分别设置了调查样带。野外采样遵循以下规范: (1)同一样点内的每条样带间保持固定的海拔间隔(200 m); (2)样带尽量沿等高线设置; (3)所有样带具有相近的采样强度; (4)在样带内放置采样工具的间隔大致固定(Chen et al, 2020)。

在峰顶高于树线200 m以上的样地设置3条样带, 分别为树线以上200 m、树线附近、树线以下200 m。在峰顶略高于树线的样地设置2条样带, 分别在峰顶附近及以下200 m。为了使每条样带具有相近的采样强度(约1,000铗日数), 在样带内设置4-6条样线。使用的采集工具为: (1) Sherman活体兽类采集器(或称鼠笼: 7.62 cm × 8.89 cm × 22.86 cm, H. B. Sherman Traps, Inc., Tallahassee, USA); (2)铁质鼠夹(10 cm × 6 cm); (3)小桶(Ø20 cm × 20 cm)。在样带内, 以1个鼠夹和1个鼠笼(间隔1-2 m)为1对, 间隔8-10 m放置1对, 在鼠笼内投放适量无糖燕麦片、在鼠夹上使用花生米作为诱饵。根据目标动物痕迹和活动特点, 在其可能利用的通道上埋放0-10个小桶。所有采集工具首日放置后, 于次日检查捕捉情况, 补充诱饵, 并进行位置调整。放置2晚后, 将所有采集工具收回并转移到下一条样线, 重复上述步骤直到每条样带的铗日数达到1,000左右。参考潘清华等(2007)的方法在野外测量个体的体重、头体长、尾长、后足长及耳长。选择头骨完整、皮毛状况好的个体, 每个样地的每个形态种至少制作1个假剥制凭证标本。剪取适量肌肉和肝脏, 置入Biologix 81-8204 (2 mL)冻存管中, 经99.7%的酒精脱水后, 重新加入99.7%的酒精保存, 回到室内后冻存于-80℃冰柜中。所有标本和组织样品均存放在中国科学院昆明动物研究所动物博物馆。

图1 三江并流区地形及18个小型兽类调查点示意图

Fig. 1 Terrains of the three parallel rivers areas and the 18 alpine sites

根据外形测量值和头骨特征将标本鉴定到种(附录2)。对鉴定困难或有疑问的物种,使用*CYTB*基因进行DNA条形码辅助鉴定(何锴等, 2013)。物种名与分类系统主要依据《云南省生物物种名录(2016版)》(蒋学龙等, 2017)。

1.3 系统发育树构建

对在各样地采集的每个形态种选取了2个个体(只采集到1个个体的情况除外)扩增了*CYTB* (1,140 bp)序列。总DNA提取使用Omega生产的组织DNA提取试剂盒(SQ Tissue DNA Kit D6032, Omega Bio-tek, Inc., Norcross)。PCR流程参考Koju等(2017), 兔形目物种引物使用L14724和H15913 (Koju et al, 2017), 其他物种的引物为 L14724_hk3 及 H15915_hk3 (He et al, 2010)。PCR产物通过电泳割胶回收, 并经UNIQ-10柱式DNA胶回收试剂盒(上海生工生物工程有限公司)纯化后送北京擎科新业生物技术有限公司在ABI 3730测序仪中进行双向测序。

本研究共计扩增了470个个体的*CYTB*序列, 这批序列已经上传至GenBank数据库(<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>, accession numbers: MW 682345–MW682814)。使用Geneious 11.1.5 (<https://www.geneious.com>)对原始测序结果进行拼接和比对。将比对后的*CYTB*序列导入jModeltest软件包(Posada, 2008)检验分子进化模型, 根据结果选择了GTR+gamma模型。通过BEAST 2.6软件包(Bouckaert et al, 2019)基于贝叶斯法(Bayesian inference, BI)构建小型兽类的*CYTB*系统发育树。抽样方法使用马尔科夫链蒙特卡洛算法(Markov Chain Monte Carlo, MCMC), 链长设置为400,000,000代, 每40,000代进行1次抽样, 最终抽样10,000次。使用Tracer v1.7.1 (Rambaut et al, 2018)进行统计以确定所有参数都有大于200的有效统计样本(effective sample sizes, ESSs)。统计时舍弃前10%的MCMC。使用BEAST 2.6软件包中附带的TreeAnnotator构建最终系统发育树。

1.4 功能性状获取

本研究通过形态学和生态学性状计算小型兽类功能 α 多样性。形态学性状包括5个在野外测量的数值: 体重、头体长、尾长、后足长和耳长, 以及1个通过计算获得的形态学指标(尾长占比: 尾长与头体长的比值) (Du et al, 2017)。生态学性状包括食性(草食herbivore、杂食omnivore、肉食carnivore)、活动节律(昼行diurnal、夜行nocturnal、兼行both)和生活型(掘洞fossorial、地表terrestrial、半掘洞semi-fossorial、树栖arboreal、半水栖semi-aquatic)。这些性状综合反映了小型兽类对环境的适应及能量获取策略。食性资料获取自在线数据库Combined MammalDIET and MammalDIET 2 (Kissling et al, 2014; Gainsbury et al, 2018)。活动节律和生活型参考已有出版物(潘清华等, 2007; Smith和靳焱, 2009)。形态学测量指标为每个物种所有个体的平均值; 生态学特征作为分类变量处理(附录3)。

1.5 α 多样性计算

在计算 α 多样性之前, 计算了18个样地和4个主要山脉的物种累积曲线、稀疏曲线、ChaoRichness指数和Coverage指数以评估对这些地区物种采样的充分程度。物种累积曲线以1日为一个样本, 通过1,000次随机抽样获得95%置信区间。稀疏曲线基于每个样本的总个体数计算。ChaoRichness是不断累积取样强度后的最终物种丰富度期望值。Coverage指数即采样覆盖率(sample completeness) (Chao et al, 2014), 反映了观察到的个体在所有物种(被观察到和未被观察到的)中所占的比例, Coverage指数达到90%说明代表群落中所有物种的90%的个体已被采集到, 本研究将此作为判断样本已得到充分采样的依据(Ramírez- Bautista & Williams, 2019)。

累积曲线通过vegan包(Oksanen et al, 2019)中的specaccum函数计算。稀疏曲线、Coverage指数和ChaoRichness指数使用iNEXT包(Hsieh et al, 2019)中的相关函数计算。18个样地中, 除亚坪垭口、绵绵山和玉龙雪山外, 15个样地的物种累积曲线和稀疏曲线已趋于平缓(附录4, 5)。4个主要山脉的物种累积曲线和物种稀疏曲线均已基本趋于平缓(附录6, 7)。ChaoRichness指数显示白马雪山、梅里雪山和玉龙雪山等少数样地的观测物种丰富度与最终期望值仍有差距(附录8), 但不同山脉的物种观测值已接近最终期望值(附录9)。18个样地和4个主要山脉

的Coverage指数分别高于98%和99.7% (附录1)。

本研究使用物种丰富度(species richness, SR)和Simpson多样性指数(D) (Simpson, 1949)作为物种 α 多样性的评价指标。Simpson指数的计算公式为:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2 \quad (1)$$

式中, S 为总物种数, p_i 为第 i 个物种在群落中所占的比例。

系统发育 α 多样性使用系统发育多样性指数(Faith's phylogenetic diversity, PD) (Faith, 1992)和种间平均配对距离(mean pairwise distance, MPD) (Webb et al, 2002)进行评价。其中, PD是取样单位中包含的物种在系统发育树中进化分支的长度之和(Faith, 1992), MPD是取样单位中所有物种的平均进化距离(Webb et al, 2002)。

功能 α 多样性使用功能丰富度(functional richness, FRic) (Villéger et al, 2008)和Rao的二次熵(Rao's quadratic entropy, Q) (Botta-Dukát, 2005)进行评价。FRic是功能性状在多维空间中的最小凸包体积(convex hull), 可被视为群落中物种占据的总生态位空间(Villéger et al, 2008)。 Q 是两个随机选择个体间的性状差异的平均距离。计算时, 首先使用原始性状列表计算物种的Gower配对距离, 然后使用PCoA重新获得体现功能性状分布的主坐标, 最后使用PCoA得到的结果代替原始性状列表(Villéger et al, 2008)。为了减少计算时间, 仅保留PCoA结果的前4轴, 代表了原始性状列表69.2%的信息。

SR、FD和FRic都不考虑物种多度, 是单纯的丰富度指数。 D 、MPD和 Q 基于多度数据计算, 是综合丰富度、均匀度和离散度的生物多样性指数(Ricotta, 2007; Vellend et al, 2011), 当物种数相同时, D 、MPD和 Q 越大表示物种多度分布越均匀。本研究没有使用MPD作为基于多度数据的功能多样性指标, 因为学者指出通过树形结构计算的功能多样性指数可能存在方法上的缺陷(Villéger et al, 2017)。此外, Q 、 D 和MPD之间具有密切的关系, 可视为同类型的生态学指数(Botta-Dukát, 2005; De Bello et al, 2016)。

上述指数均在R 4.0.3语言环境中计算, D 由vegan包提供的diversity函数计算(Oksanen et al, 2019); PD和MPD通过picante包中的pd和mpd函数计算(Kembel et al, 2010); FRic和 Q 使用FD包中的dbFD函数计算(Laliberté et al, 2014)。最后, 根据

Ricotta 等 (2016) 计算了各样带的功能冗余度 (functional redundancy, R)。 R 是用 D 经过功能差异程度 (Q) 标准化后的补数, 该指数反映了群落中物种的相似程度, R 越大说明群落中的物种越相似, 通过 `adiv` 包 (Pavoine, 2020) 中的 `uniqueness` 函数计算。计算公式为:

$$R = 1 - \frac{Q}{D} \quad (2)$$

1.6 α 多样性评价

为了使结果基于相同的采样强度, 本研究使用样带尺度的群落数据对 α 多样性进行比较和评价。本研究的调查在不同季节开展, 因此我们首先比较了 α 多样性在不同季节间的整体差异。除雨季后的 FRic 外, 各多样性指数在不同季节间符合正态分布 ($P > 0.05$, Shapiro-Wilk test), 上述比较通过单因素方差分析 (ANOVA) 进行。本研究将 18 个样地归入 4 个主要山脉 (张荣祖, 1997), 然后根据不同地点和不同山脉对样带尺度的多样性指数进行汇总, 使用平均值 ($\text{mean} \pm \text{SD}$) 评价上述各多样性指数在 18 个样地和 4 个主要山脉 (图 1) 的水平。除沙鲁里山的 FRic 外, 其余各项多样性指数均符合正态分布 ($P > 0.05$, Shapiro-Wilk test), 因此使用 ANOVA 检验各山脉多样性差异的统计显著性。

2 结果

2.1 物种名录

野外调查期间共调查了 48 条样带, 整体捕获率为 11.74%, 共捕获小型兽类 5,686 只, 经形态学和 DNA 条形码技术鉴定为 3 目 6 科 20 属 44 种, 包括 3 个待定物种和 2 个云南省新纪录 (附录 2)。啮齿目是三江并流区树线生境小型兽类的优势类群, 占有物种的 70.75%, 其次为劳亚食虫目 (26.17%) 和兔形目 (3.08%)。个体数量最多的前三个物种依次为西南绒

鼠 (*Eothenomys custos*) (占总捕获数的 19.66%)、澜沧江姬鼠 (*Apodemus ilex*) (12.59%) 和小纹背鼯鼠 (*Sorex bedfordiae*) (11.68%)。3 个待定物种分别为松田鼠属一种 (*Neodon* sp.)、鼯鼠属一种 (*Sicista* sp.) 和长尾鼯鼠属一种 (*Scaptonyx* sp.)。有 2 个采自香格里拉地区的物种通过形态学比对和 DNA 条形码技术被鉴定为云南省物种新纪录: 藏鼯鼠 (*Sorex thibetanus*) 和甘肃鼯鼠 (*S. cansulus*) (宋文字等, 2021)。基于 *CYTB* 基因构建的物种 BI 树显示物种间均有较高的支持率, 劳亚食虫目动物聚为单系, 但啮齿目中的丽松鼠亚科和鼯鼠待定种 (*Sicista* sp.) 与兔形目的鼠兔属 (*Ochotona*) 聚为一支 (图 2)。

2.2 α 多样性分布格局

结果显示, 雨季前样带尺度的 SR 、 PD 、 FRic 和 Q 略高于雨季后, 而前者的 MPD 略低于后者 (表 1), 但上述差异在两季之间均不显著 ($P > 0.05$)。仅使用出现/缺失数据的指数 (丰富度) 显示 (附录 10), SR 、 PD 最高的地点是雪蒙山 ($\text{SR} = 14.00 \pm 4.24$, $\text{PD} = 1.69 \pm 0.52$), FRic 最高的地点为苍山 (0.43 ± 0.16), 最低的地点均为熊荣雪山 ($\text{SR} = 5.67 \pm 1.15$, $\text{PD} = 0.81 \pm 0.22$, $\text{FRic} = 0.03 \pm 0.04$)。使用多度数据的指数 (兼顾丰富度和均匀度) 显示 (附录 10), D 和 MPD 最高的地点是高黎贡山噶瓦嘎普 ($D = 0.84 \pm 0.06$, $\text{MPD} = 0.28 \pm 0.02$), Q 最高的地点为梅里雪山 (0.08 ± 0.01)、哈巴雪山 (0.08 ± 0.01) 和苍山 (0.08 ± 0.02), 最低的地点均为高黎贡山片马听命湖 ($D = 0.46 \pm 0.18$, $\text{MPD} = 0.16 \pm 0.06$, $Q = 0.05 \pm 0.02$)。

在 4 个主要山脉间, 怒山在样带尺度上的 SR 、 PD 、 FRic 、 D 和 Q 上均具有最高水平 (表 2), 仅 MPD 略低于高黎贡山; 云岭和沙鲁里山的多样性指数大多低于怒山和高黎贡山 (表 2)。ANOVA 结果显示, SR 和 PD 在不同山脉的样带间具有显著差异 (SR : $P = 0.016$; PD : $P = 0.0191$), 其他样带尺度的多样性指

表 1 不同季节 18 个样带样带尺度的 α 多样性比较 ($\text{mean} \pm \text{SD}$)

Table 1 Comparison of transect level α -diversity measurements in the 18 studied sites between different seasons ($\text{mean} \pm \text{SD}$)

		多样性指数 Diversity index					
		SR	<i>D</i>	PD	MPD	FRic	<i>Q</i>
雨季前	Before wet season	10.04 ± 2.68	0.68 ± 0.14	1.36 ± 0.30	0.22 ± 0.05	0.27 ± 0.18	0.07 ± 0.02
雨季后	After wet season	8.92 ± 2.52	0.68 ± 0.14	1.24 ± 0.29	0.23 ± 0.05	0.18 ± 0.16	0.06 ± 0.02

SR: 物种丰富度; D: Simpson 指数; PD: Faith's 系统发育多样性; MPD: 种间平均配对距离; FRic: 功能丰富度; Q: Rao 的二次熵。

SR, Species richness; D: Simpson's index; PD, Faith's phylogenetic diversity; MPD, Mean pairwise distance; FRic, Functional richness; Q, Rao's quadratic entropy.

山最低, 差异不显著($P = 0.983$) (表2)。

3 讨论

3.1 生物多样性不同维度的评估及其保护生物学意义

从采集到的物种来看, 权寿瑛等(2010)的统计结果显示云南省境内横断山区4,000 m以上的生境中有小型兽类28种, 4,500 m以上的生境中仅有7种。刘正祥等(2013)在香格里拉县4,200–4,500 m的生境中只采集到小型兽类6种。本研究在三江并流区树线生境共记录到44种小型兽类, 包括3个待定物种和2个云南省新纪录, 其中在4,000 m及以上生境中记录到34种, 在4,400 m的样带中记录到14种。由此可见, 三江并流区树线生境的研究力度仍存在不足, 随着调查强度的增加, 仍可能有更多物种在三江并流区的高山生境附近被发现。

生物多样性可以通过丰富度或多度加权多样性(如物种多样性中常见的Shannon和Simpson多样性指数)进行评价(Magurran, 2003), 前者基于物种出现/缺失数据计算, 后者需要考虑物种多度信息(Ricotta, 2007)。由于多度加权多样性是由丰富度和多度分布共同决定的(Ricotta, 2007), 因此使用不同数据类型可能会得到不同的结果。何种数据类型更有助于理解群落结构一直是生态学关注的问题。有学者认为, 仅使用出现/缺失数据会丢失部分群落结构信息(Veech, 2018); 但是也有许多研究认为这两种数据类型可以从不同角度提供群落结构的信息(Vellend et al, 2011; Chalmandrier et al, 2015)。例如, López-Delgado等(2020)发现使用出现/缺失数据比多度数据更好地区分了环境和空间因素的作用。本研究结果显示, 使用不同数据类型计算得到的生物多样性不同维度最高值和最低值都出现在不同地点。从物种多样性来看, 这是因为物种数最多的样地中, 优势种倾向于具有更多的个体数量, 而稀有物种数量较多。例如, 在物种数最多的雪蒙山($SR = 19$), 个体数排名前三的物种占据了总个体数的55.7%, 但是只有1个个体的物种有4种; 而在 D 值最高的噶瓦嘎普($SR = 15$), 个体数前三的物种仅占据总个体数的43.3%, 且所有物种的个体数都多于1个。从系统发育和功能多样性的角度来看, 这说明基于多度数据计算得到的系统发育和功能多样性指数同样受到均匀度的影响。上述结果提示, 仅考

虑丰富度或由多度数据得到的多样性指数难以正确反映保护生物学热点地区, 因为丰富度较高的群落可能具有较低的均匀度, 反之亦然。

物种和系统发育 α 多样性的最高值和最低值出现在相同的样地, 但功能 α 多样性与这两者结果并不一致。这可能是由于性状反映了物种对环境的适应以及它们对环境的作用, 即生态系统功能(Lavorel & Garnier, 2002), 因此该结果说明三江并流天岛地区的物种演化历史和生态功能过程间存在一定差异。传统的生物多样性热点通常仅考虑物种数量(Mittermeier et al, 2011; Rahbek et al, 2019)。近年来, 随着系统发育多样性和功能多样性的提出, 综合保护生物多样性不同维度已成为当前保护生物学的趋势。而且, 由于生物多样性不同维度的热点区域通常不是重合的, 仅针对一个或两个维度进行保护往往难以覆盖整体。例如, 统计结果显示全球哺乳动物的物种、系统发育和功能多样性热点在全球的重合度仅有4.6%, 其中只有1%得到了有效保护(Brum et al, 2017)。基于物种、系统发育和生态功能对北美洲啮齿类多样性进行评价, 结果显示生物多样性不同维度的空间分布不一致, 尤其是系统发育和功能多样性不存在相关性, 提示了综合不同维度开展保护工作的重要性(Smiley et al, 2020)。因此, 未来的保护策略应综合考虑生物多样性的不同维度, 从而更有效地保护物种演化历史和生态系统功能。

3.2 α 多样性水平分布格局及保护生物学启示

大多数情况下, 雨季的降水促进植物的生长, 有利于小型兽类的繁殖(Ramírez-Bautista & Williams, 2019), 因此雨季后的种群数量和物种丰富度通常高于雨季前。但是本研究结果显示包括物种丰富度在内的大部分 α 多样性指数在雨季前略高于雨季后, 与Wen等(2014)在横断山区的研究结果不同。由于本研究对不同样地的采样开展于不同季节, 因此该结果可能是由两个原因导致的。第一, 三江并流区树线以上的高山区域在雨季尚未完全结束的10月下旬即开始降雪, 积雪可持续至次年6月甚至更久(Sherman et al, 2008)。期间冰雪不断融化缓解了旱季降水较少的情况。因此, 树线区域在旱季仍可保持较为充足的水分。第二, 可能是因为部分雨季前采样的样地小型兽类多样性本身就较高, 例如位于怒山的样地。这些原因可能导致三江并流区树线生

境小型兽类多样性在不同季节间并无显著差异。由于人力资源所限,我们未能在相同季节对不同样地(18个高山样地)同时采样,或在不同季节对相同样地进行重复采样。因此,该现象仍有待进一步研究。

本研究中部分样地(玉龙雪山、亚坪垭口和绵绵山)的物种稀疏曲线仍未达到完全平缓,4个山脉实际捕获的物种数与期望物种数仍有1-2个物种的差距,这可能是由于树线区域触及到许多物种的分布边缘,小型兽类的种群数量已经非常低,能够被捕获的概率也很低,因此稀有种数量较多。在此情况下,要使物种稀疏曲线达到完全平缓是非常困难的(Chao et al, 2014)。但是,本研究的Coverage指数已经达到很高的水平,说明代表群落中所有物种的绝大部分个体已经被采集到。从相近的采样强度(样带平均值)来看,虽然各 α 多样性指数在不同样地间差异相对较大(附录10),但在不同山脉之间只存在微小的差异(表2)。小型兽类对生存环境的依赖性多种多样(潘清华等, 2007; Smith和解焱, 2009),因此其多样性容易受到微生境的影响(Dueser & Shugart, 1978)。本研究不同样地间的多样性指数差异可能是由它们各自的微生境决定的。但是,目前对许多小型兽类,尤其是生活在树线附近的小型兽类生活史了解较少(Smith和解焱, 2009),我们没有获取足够的微生境信息用于解释多样性指数在不同样地间的差异。本研究的小型兽类均采自高山树线附近,气候和生境总体上较为相似(Körner, 2008; Sherman et al, 2008)。因此,在山脉尺度,小生境对功能多样性的影响受到了稀释,在结果中体现为SR和PD在不同山脉的样带间存在显著差异,而功能多样性指数FRic和Q不存在显著差异。该结果支持了环境与功能多样性之间的相关性(Díaz et al, 2007; Pavoine & Bonsall, 2011)。

我们注意到,虽然怒山3个样地的采样时间为雨季前,但是在大多数 α 多样性指数中,怒山山脉中的梅里雪山和雪蒙山的样带都位于前列,碧罗雪山大多处于中等水平。在不同山脉间,怒山的样带除MPD外的5个多样性指数均略高于其他山脉,包括雨季后采样的高黎贡山。该结果无法由该区域小型兽类群落季节性变化规律来解释(Wen et al, 2014),这说明怒山树线生境的小型兽类在本研究的取样单元尺度上表现出较为丰富的多样性。此外,功能冗余度在不同山脉的各样带间差异不显著,同

样是因为树线生境在环境上较为相似(Sherman et al, 2008)。但是,怒山在样带尺度上同样具有最低的功能冗余度。虽然该差异不具有统计学显著性,但一定程度上提示怒山地区的保护工作不应受到忽视。功能冗余度越高的群落越稳定,当一个物种消失时,其他具有相似生态功能的物种可以进行补充(Walker, 1992; Ricotta et al, 2016)。由此可见,冗余度低的群落也更脆弱,需要更多的保护。怒山两侧(包括沙鲁里山)已建立多个国家级和省级自然保护区。然而,怒山位于云南省境内的部分至今尚未建立任何自然保护区。

以往研究结果表明,受保护区域的生物多样性通常高于相邻的未受保护的区域(Obersler et al, 2020),而本研究的生物多样性指数在不同山脉的样带间相差并不大,而且只关注了树线生境的小型兽类,尚不清楚其他海拔区间(如中、低海拔)和其他类群(如大中型兽类、鸟类、两栖类、爬行类以及植物等)是否存在同样的情况。同时,本研究不同山脉之间的比较是从样带的尺度进行的,可能无法代表这几个山脉的整体情况。因此,有必要加强对怒山生物多样性的研究和保护工作。目前,对高黎贡山和白马雪山的生物多样性已有大量研究,并已出版有《白马雪山国家级自然保护区》(云南省林业厅等, 2003)、《高黎贡山自然保护区》(西南林学院等, 1995)等专著。统计结果显示,仅1996-2016年间,与白马雪山国家级自然保护区相关的文献(不限生物学方向)就有160篇(代万等 2017)。截至2020年9月,在中国知网(CNKI, www.cnki.net/)以“高黎贡山+生物多样性”可以搜到197条相关记录;使用“白马雪山+生物多样性”可以搜到58条;但以“怒山+生物多样性”或“碧罗雪山+生物多样性”进行搜索总共仅获得7条记录。这说明,对怒山生物多样性的研究仍十分匮乏。

3.3 小结

本研究结果补充了三江并流区树线生境小型兽类群落资料,初步探讨了从不同维度评价生物多样性的保护生物学意义。然而,由于研究工作量较大,受时间、精力等条件限制,仍存在许多不足。例如,使用单基因构建的系统发育树没有正确反映啮齿目部分物种和兔形目的关系,要解决此问题可能需要增加其他基因数据。还有,本研究结果的采样时间开展于不同季节,对生物多样性的评价仍可

能存在局限性。最后,虽然本研究设计的调查样地大致均匀分布在三江并流区,但相对整个研究区域来说数量仍然较少,难以完全反映该区域的小型兽类多样性。由于树线以上的高山区域通达性较差,而且环境严酷(Barry, 2008),物种数量和密度通常较低,因此容易受到研究者忽视(McCain & Grytnes, 2010)。然而近年来研究发现三江并流区的高山生境具有较高的珍稀物种(高歌等, 2017)和特有种(Chen et al, 2020)比例,提示其具有重要的研究和保护价值。同时,气候变化已对全球树线分布造成了显著的影响,如欧洲大陆(Gottfried et al, 2012)和喜马拉雅山区(Sigdel et al, 2020)。1955–1995年间,滇西北高山树线上移、冰川消退现象已有所报道(Baker & Moseley, 2007),最终可能导致许多高山生境彻底消失(Wershow & DeChaine, 2018; Lyons & Kozak, 2020)。在此情境下,对这些区域生物多样性的研究和保护亟待加强。

ORCID

宋文字 <https://orcid.org/0000-0003-1274-259X>

蒋学龙 <https://orcid.org/0000-0003-2052-2490>

参考文献

- Baker BB, Moseley RK (2007) Advancing treeline and retreating glaciers: Implications for conservation in Yunnan, P. R. China. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 39, 200–209.
- Barnett A, Dutton J (1995) *Expedition Field Techniques: Small Mammals (excluding bats)*, 2nd edn. Expedition Advisory Centre, London.
- Barry RG (2008) *Mountain Weather and Climate*, 3rd edn. Cambridge University Press, Cambridge.
- Botta-Dukát Z (2005) Rao's quadratic entropy as a measure of functional diversity based on multiple traits. *Journal of Vegetation Science*, 16, 533–540.
- Bouckaert R, Vaughan TG, Barido-Sottani J, Duchêne S, Fourment M, Gavryushkina A, Heled J, Jones G, Kühnert D, De Maio N, Matschiner M, Mendes FK, Müller NF, Ogilvie HA, du Plessis L, Poppinga A, Rambaut A, Rasmussen D, Siveroni I, Suchard MA, Wu CH, Xie D, Zhang C, Stadler T, Drummond AJ (2019) BEAST 2.5: An advanced software platform for Bayesian evolutionary analysis. *PLoS Computational Biology*, 15, e1006650.
- Brubaker LB, Anderson PM, Hu FS (1995) Arctic tundra biodiversity: A temporal perspective from Late Quaternary pollen records. In: *Arctic and Alpine Biodiversity: Patterns, Causes and Ecosystem Consequences* (eds Chapin FS, Körner C), pp. 111–125. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Brum FT, Graham CH, Costa GC, Hedges SB, Penone C, Radeloff VC, Rondinini C, Loyola R, Davidson AD (2017) Global priorities for conservation across multiple dimensions of mammalian diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 114, 7641–7646.
- Cardinale BJ, Duffy JE, Gonzalez A, Hooper DU, Perrings C, Venail P, Narwani A, Mace GM, Tilman D, Wardle DA, Kinzig AP, Daily GC, Loreau M, Grace JB, Larigauderie A, Srivastava DS, Naeem S (2012) Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486, 59–67.
- Cavender-Bares J, Kozak KH, Fine PVA, Kembel SW (2009) The merging of community ecology and phylogenetic biology. *Ecology Letters*, 12, 693–715.
- Ceballos G, Ehrlich PR, Barnosky AD, García A, Pringle RM, Palmer TM (2015) Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1, e1400253.
- Chalmandrier L, Münkemüller T, Lavergne S, Thuiller W (2015) Effects of species' similarity and dominance on the functional and phylogenetic structure of a plant meta-community. *Ecology*, 96, 143–153.
- Chao A, Gotelli NJ, Hsieh TC, Sander EL, Ma KH, Colwell RK, Ellison AM (2014) Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: A framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecological Monographs*, 84, 45–67.
- Chen JG, Yang Y, Sun H (2011) Advances in the studies of responses of alpine plants to global warming. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 17, 435–446. (in Chinese with English abstract) [陈建国, 杨扬, 孙航 (2011) 高山植物对全球气候变暖的响应研究进展. *应用与环境生物学报*, 17, 435–446.]
- Chen ZZ, Li XY, Song WY, Li Q, Onditi K, Khanal L, Jiang XL (2020) Small mammal species richness and turnover along elevational gradient in Yulong Mountain, Yunnan, Southwest China. *Ecology and Evolution*, 10, 2545–2558.
- Dai JH, Cui HT (1999) A review on the studies of alpine timberline. *Scientia Geographica Sinica*, 19, 243–249. (in Chinese with English abstract) [戴君虎, 崔海亭 (1999) 国内外高山林线研究综述. *地理科学*, 19, 243–249.]
- Dai W, Li CY, Zhou SF, Wang YB (2017) Research overview on Baimaxueshan National Nature Reserve from 1996 to 2016. *Forest Inventory and Planning*, 42, 96–103. (in Chinese with English abstract) [代万, 李春叶, 周顺福, 王有兵 (2017) 近20年白马雪山国家级自然保护区研究综述. *林业调查规划*, 42, 96–103.]
- De Bello F, Carmona CP, Lepš J, Szava-Kovats R, Pärtel M (2016) Functional diversity through the mean trait dissimilarity: Resolving shortcomings with existing paradigms and algorithms. *Oecologia*, 180, 933–940.
- Deng M, Zhou ZK (2004) Seed plant diversity on slopes from

- northwest Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica*, 26, 23–34. (in Chinese with English abstract) [邓敏, 周浙昆 (2004) 滇西北高山流石滩植物多样性. *云南植物研究*, 26, 23–34.]
- Díaz S, Lavorel S, Chapin FS, Tecco PA, Gurvich DE, Grigulis K (2007) Functional diversity—At the crossroads between ecosystem functioning and environmental filters. In: *Terrestrial Ecosystems in a Changing World* (eds Canadell JG, Pataki DE, Pitelka LF), pp. 81–91. Springer, Berlin.
- Du YB, Wen ZX, Zhang JL, Lv X, Cheng JL, Ge DY, Xia L, Yang QS (2017) The roles of environment, space, and phylogeny in determining functional dispersion of rodents (Rodentia) in the Hengduan Mountains, China. *Ecology and Evolution*, 7, 10941–10951.
- Dueser RD, Shugart HH Jr (1978) Microhabitats in a forest-floor small mammal fauna. *Ecology*, 59, 89–98.
- Faith DP (1992) Conservation evaluation and phylogenetic diversity. *Biological Conservation*, 61, 1–10.
- Funk JL, Larson JE, Ames GM, Butterfield BJ, Cavender-Bares J, Firn J, Laughlin DC, Sutton-Grier AE, Williams L, Wright J (2017) Revisiting the Holy Grail: Using plant functional traits to understand ecological processes. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 92, 1156–1173.
- Gainsbury AM, Tallowin OJS, Meiri S (2018) An updated global data set for diet preferences in terrestrial mammals: Testing the validity of extrapolation. *Mammal Review*, 48, 160–167.
- Gao G, Wang B, He CX, Luo X (2017) Biodiversity of birds and mammals in alpine habitat of Mt. Gaoligong, Lushui County, Yunnan. *Biodiversity Science*, 25, 332–339. (in Chinese with English abstract) [高歌, 王斌, 何臣相, 罗旭 (2017) 云南泸水高黎贡山高山生境的鸟兽多样性. *生物多样性*, 25, 332–339.]
- Gottfried M, Pauli H, Futschik A, Akhalkatsi M, Barančok P, Benito Alonso JL, Coldea G, Dick J, Erschbamer B, Fernández Calzado MR, Kazakis G, Krajčič J, Larsson P, Mallaun M, Michelsen O, Moiseev D, Moiseev P, Molau U, Merzouki A, Nagy L, Nakhutsrishvili G, Pedersen B, Pelino G, Púscas M, Rossi G, Stanisci A, Theurillat JP, Tomaselli M, Villar L, Vittoz P, Vogiatzakis I, Grabherr G (2012) Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Climate Change*, 2, 111–115.
- He K, Jiang XL (2014) Sky Islands of southwest China. I: An overview of phylogeographic patterns. *Chinese Science Bulletin*, 59, 585–597.
- He K, Li YJ, Brandley MC, Lin LK, Wang YX, Zhang YP, Jiang XL (2010) A multi-locus phylogeny of Nectogalini shrews and influences of the paleoclimate on speciation and evolution. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 56, 734–746.
- He K, Wang WZ, Li Q, Luo PP, Sun YH, Jiang XL (2013) DNA barcoding in surveys of small mammal community: A case study in Lianhuashan, Gansu Province, China. *Biodiversity Science*, 21, 197–205. (in Chinese with English abstract) [何锴, 王文智, 李权, 罗培鹏, 孙悦华, 蒋学龙 (2013) DNA条形码技术在小型兽类鉴定中的探索: 以甘肃莲花山为例. *生物多样性*, 21, 197–205.]
- Hsieh TC, Ma KH, Chao A (2019) iNEXT: iNterpolation and Extrapolation for Species Diversity. R Package Version 2.0.20. <https://cran.r-project.org/web/packages/iNEXT/index.html>. (accessed on 2021-06-28)
- Jiang XL, Li Q, Chen ZZ, Zhang B, Li XY, Wan T (2017) Mammals. In: *Yunnan Sheng Shengwu Wuzhong Minglu* (2016) (eds Gao ZW, Sun H), pp. 583–598. Yunnan Scientific Publishing Press, Kunming. (in Chinese) [蒋学龙, 李权, 陈中正, 张斌, 李学友, 万韬 (2017) 哺乳类. 见: *云南省生物物种名录(2016版)* (高正文, 孙航主编), 583–598页. 云南科技出版社, 昆明.]
- Kembel SW, Cowan PD, Helmus MR, Cornwell WK, Morlon H, Ackerly DD, Blomberg SP, Webb CO (2010) Picante: R tools for integrating phylogenies and ecology. *Bioinformatics*, 26, 1463–1464.
- Kissling WD, Dalby L, Fløjgaard C, Lenoir J, Sandel B, Sandom C, Trøjelsgaard K, Svenning JC (2014) Establishing macroecological trait datasets: Digitalization, extrapolation, and validation of diet preferences in terrestrial mammals worldwide. *Ecology and Evolution*, 4, 2913–2930.
- Knowles LL (2001) Did the Pleistocene glaciations promote divergence? Tests of explicit refugial models in montane grasshoppers. *Molecular Ecology*, 10, 691–701.
- Koju NP, He K, Chalise MK, Ray C, Chen ZZ, Zhang B, Wan T, Chen SD, Jiang XL (2017) Multilocus approaches reveal underestimated species diversity and inter-specific gene flow in pikas (*Ochotona*) from southwestern China. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 107, 239–245.
- Körner C (2008) Alpine ecosystems and the high-elevation treeline. In: *Encyclopedia of Ecology* (eds Jørgensen SE, Fath BD), pp. 138–144. Elsevier, Amsterdam.
- Körner C, Jetz W, Paulsen J, Payne D, Rudmann-Maurer KR, Spehn EM (2017) A global inventory of mountains for bio-geographical applications. *Alpine Botany*, 127, 1–15.
- Laliberté E, Legendre P, Shipley B (2014) FD: Measuring Functional Diversity from Multiple Traits, and Other Tools for Functional Ecology. R Package Version 1.0-12. <https://cran.r-project.org/web/packages/FD/index.html>. (accessed on 2021-06-28)
- Lavorel S, Garnier E (2002) Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: Revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology*, 16, 545–556.
- Lean C, Maclaurin J (2016) The value of phylogenetic diversity. In: *Biodiversity Conservation and Phylogenetic Systematics: Preserving Our Evolutionary Heritage in an Extinction Crisis* (eds Pellens R, Grandcolas P), pp. 19–37. Springer, Cham.
- Li D, Gong ZD (2011) Research advance on the fauna and diversity of small mammals in Yunnan Province. *Chinese*

Journal of Vector Biology and Control, 22, 89–93, 97. (in Chinese with English abstract) [李栋, 龚正达 (2011) 云南省小型兽类区系与多样性的研究概况. 中国媒介生物学及控制杂志, 22, 89–93, 97.]

- Liu SZ, Chai ZX (1986) Geomorphologic characteristics in Hengduan Mountain region. *Discovery of Nature*, 5(15), 139–143. (in Chinese with English abstract) [刘淑珍, 柴宗新 (1986) 横断山区地貌特征. 大自然探索, 5(15), 139–143.]
- Liu Y, Zhang J, Yang WQ (2009) Responses of alpine biodiversity to climate change. *Biodiversity Science*, 17, 88–96. (in Chinese with English abstract) [刘洋, 张健, 杨万勤 (2009) 高山生物多样性对气候变化响应的研究进展. 生物多样性, 17, 88–96.]
- Liu ZX, Hong M, Yang GR, Song ZZ, Gao ZH, Sun SH, Xu YY (2013) Preliminary study on vertical spatial niche of small mammals in Shangrila County of Yunnan Province. *Chinese Journal of Zoology*, 48, 619–625. (in Chinese with English abstract) [刘正祥, 洪梅, 杨桂荣, 宋志忠, 高子厚, 孙绍华, 徐友谊 (2013) 香格里拉县小型兽类垂直空间生态位初步研究. 动物学杂志, 48, 619–625.]
- López-Delgado EO, Winemiller KO, Villa-Navarro FA (2020) Local environmental factors influence beta-diversity patterns of tropical fish assemblages more than spatial factors. *Ecology*, 101, e02940.
- Lyons MP, Kozak KH (2020) Vanishing islands in the sky? A comparison of correlation- and mechanism-based forecasts of range dynamics for montane salamanders under climate change. *Ecography*, 43, 481–493.
- Magurran AE (2003) *Measuring Biological Diversity*. Blackwell Publishing, Oxford.
- McCain CM, Grytnes JA (2010) Elevational gradients in species richness. In: *Encyclopedia of Life*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.
- Ming QZ (2006) The landform Development and Environment Effects of Three Parallel Rivers in the North of Longitudinal Range-gorge Region (LRGR). PhD dissertation, Lanzhou University, Lanzhou. (in Chinese with English abstract) [明庆忠 (2006) 纵向岭谷北部三江并流区河谷地貌发育及其环境效应研究. 博士学位论文, 兰州大学, 兰州.]
- Mittermeier RA, Turner WR, Larsen FW, Brooks TM, Gascon C (2011) Global biodiversity conservation: The critical role of hotspots. In: *Biodiversity Hotspots: Distribution and Protection of Conservation Priority Areas* (eds Zachos FE, Habel JC), pp. 3–22. Springer, Berlin.
- Mouchet MA, Villéger S, Mason NWH, Mouillot D (2010) Functional diversity measures: An overview of their redundancy and their ability to discriminate community assembly rules. *Functional Ecology*, 24, 867–876.
- Nakamura G, Gonçalves LO, Duarte LDS (2020) Revisiting the dimensionality of biological diversity. *Ecography*, 43, 539–548.
- Obersoler V, Tenan S, Zipkin EF, Rovero F (2020) Poor management in protected areas is associated with lowered tropical mammal diversity. *Animal Conservation*, 23, 171–181.
- Ochoa-Ochoa LM, Mejía-Domínguez NR, Velasco JA, Dimitrov D, Marske KA (2020) Dimensions of amphibian alpha diversity in the New World. *Journal of Biogeography*, 47, 2293–2302.
- Oksanen J, Blanchet FGB, Friendly MF, Kindt R, Legendre PM, Minchin PR, O'Hrar RB, Simpson GL, Solymos P, Stevens MHH, Szoecs E, Wagner H (2019) *vegan: Community Ecology Package*. R Package Version 2.5-7. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>. (accessed on 2021-06-28)
- Pan QH, Wang YX, Yan K (2007) *A Field Guide to the Mammals of China*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [潘清华, 王应祥, 岩崑 (2007) 中国哺乳动物彩色图鉴. 中国林业出版社, 北京.]
- Pavoine S (2020) *adiv: An R package to analyse biodiversity in ecology*. *Methods in Ecology and Evolution*, 11, 1106–1112.
- Pavoine S, Bonsall MB (2011) Measuring biodiversity to explain community assembly: A unified approach. *Biological Reviews*, 86, 792–812.
- Posada D (2008) *jModelTest: Phylogenetic model averaging*. *Molecular Biology and Evolution*, 25, 1253–1256.
- Quan SY, Yue RP, Zhang LY, Lian HY, Zang YH, Bian CL, Li D, Ju JK, Gong ZD (2010) The composition and spatial distribution of small mammals in the Hengduan Mountains of Yunnan, China. *Chinese Journal of Vector Biology and Control*, 21, 16–22. (in Chinese with English abstract) [权寿瑛, 岳仁苹, 张丽云, 连宏宇, 臧颖惠, 边长玲, 李栋, 琚俊科, 龚正达 (2010) 云南省横断山区小型兽类的组成及空间分布. 中国媒介生物学及控制杂志, 21, 16–22.]
- Rahbek C, Borregaard MK, Antonelli A, Colwell RK, Holt BG, Nogues-Bravo D, Rasmussen CMØ, Richardson K, Rosing MT, Whittaker RJ, Fjeldsø J (2019) Building mountain biodiversity: Geological and evolutionary processes. *Science*, 365, 1114–1119.
- Rambaut A, Drummond AJ, Xie D, Baele G, Suchard MA (2018) Posterior summarization in Bayesian phylogenetics using Tracer 1.7. *Systematic Biology*, 67, 901–904.
- Ramírez-Bautista A, Williams JN (2019) The importance of productivity and seasonality for structuring small rodent diversity across a tropical elevation gradient. *Oecologia*, 190, 275–286.
- Ricotta C (2007) A semantic taxonomy for diversity measures. *Acta Biotheoretica*, 55, 23–33.
- Ricotta C, de Bello F, Moretti M, Caccianiga M, Cerabolini BEL, Pavoine S (2016) Measuring the functional redundancy of biological communities: A quantitative guide. *Methods in Ecology and Evolution*, 7, 1386–1395.
- Sherman R, Mullen R, Li HM, Fang ZD, Wang Y (2008) Spatial patterns of plant diversity and communities in alpine

- ecosystems of the Hengduan Mountains, northwest Yunnan, China. *Journal of Plant Ecology*, 1, 117–136.
- Sigdel SR, Liang EY, Wang YF, Dawadi B, Camarero JJ (2020) Tree-to-tree interactions slow down Himalayan treeline shifts as inferred from tree spatial patterns. *Journal of Biogeography*, 47, 1816–1826.
- Simpson, E.H. (1949) Measurement of Diversity. *Nature*, 163, 688–688.
- Smiley TM, Title PO, Zelditch ML, Terry RC (2020) Multi-dimensional biodiversity hotspots and the future of taxonomic, ecological and phylogenetic diversity: A case study of North American rodents. *Global Ecology and Biogeography*, 29, 516–533.
- Smith AT, Xie Y (2009) A Guide to the Mammals of China. Hunan Education Press, Hunan. (in Chinese) [Smith AT, 解焱 (2009) 中国兽类野外手册. 湖南教育出版社, 长沙.]
- Song WY, Li XY, Chen ZZ, Li Q, Onditi KO, He SW, Jiang XL (2020) Isolated alpine habitats reveal disparate ecological drivers of taxonomic and functional beta-diversity of small mammal assemblages. *Zoological Research*, 41, 670–683.
- Song WY, Wang HJ, Li YX, He SW, Jiang XL (2021) New records of Tibetan shrew (*Sorex thibetanus* Kastschenko, 1905) and Gansu shrew (*Sorex cansulus* Thomas, 1912) in Yunnan Province. *Acta Theriologica Sinica*, 41, 352–360. (in Chinese with English abstract) [宋文字, 王洪娇, 李奔仙, 何水旺, 蒋学龙 (2021) 云南省两种兽类新纪录——藏鼯䟽(*Sorex thibetanus* Kastschenko, 1905)和甘肃鼯䟽(*Sorex cansulus* Thomas, 1912). 兽类学报, 41, 352–360.]
- South-west Forestry College, Yunnan Forestry Survey Planning and Design Institute, Yunnan Provincial Forestry Department (1995) The Gaoligong National Nature Reserve. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese) [西南林学院, 云南省林业调查规划设计院, 云南省林业厅 (1995) 高黎贡山国家自然保护区. 中国林业出版社, 北京.]
- Stevens RD, Tello JS (2014) On the measurement of dimensionality of biodiversity. *Global Ecology and Biogeography*, 23, 1115–1125.
- Testolin R, Attorre F, Jiménez-Alfaro B (2020) Global distribution and bioclimatic characterization of alpine biomes. *Ecography*, 43, 779–788.
- Veech JA (2018) Measuring biodiversity. In: *Encyclopedia of the Anthropocene*, pp. 287–295. Elsevier, Amsterdam.
- Vellend M, Cornwell WK, Magnuson-Ford K, Mooers AØ (2011) Measuring phylogenetic biodiversity. In: *Biological Diversity: Frontiers in Measurement and Assessment*, pp. 194–207. Oxford University Press, Oxford.
- Villéger S, Maire E, Leprieur F (2017) On the risks of using dendrograms to measure functional diversity and multidimensional spaces to measure phylogenetic diversity: A comment on Sobral et al. (2016). *Ecology Letters*, 20, 554–557.
- Villéger S, Mason NWH, Mouillot D (2008) New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. *Ecology*, 89, 2290–2301.
- Walker BH (1992) Biodiversity and ecological redundancy. *Conservation Biology*, 6, 18–23.
- Wang WL (2014) Alpine Treeline Patterns and Its Formation Causes in the Three Parallel Rivers Region, NW Yunnan. PhD dissertation, Yunnan University, Kunming. (in Chinese with English abstract) [王文礼 (2014) 滇西北“三江并流”区高山树线的分布格局及其形成机制. 博士学位论文, 云南大学, 昆明.]
- Wang WL, Körner C, Zhang ZM, Wu RD, Geng YP, Shi W, Ou XK (2013) No slope exposure effect on alpine treeline position in the Three Parallel Rivers Region, SW China. *Alpine Botany*, 123, 87–95.
- Webb CO, Ackerly DD, McPeck MA, Donoghue MJ (2002) Phylogenies and community ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, 475–505.
- Wen ZX, Wu YJ, Du YB, Xia L, Ge DY, Yang QS, Chen LM (2014) Seasonal change of species diversity patterns of non-volant small mammals along three subtropical elevational gradients. *Biotropica*, 46, 479–488.
- Wershow ST, DeChaine EG (2018) Retreat to refugia: Severe habitat contraction projected for endemic alpine plants of the Olympic Peninsula. *American Journal of Botany*, 105, 760–778.
- Wu YJ, Yang QS, Wen ZX, Xia L, Zhang Q, Zhou HM (2013) What drives the species richness patterns of non-volant small mammals along a subtropical elevational gradient? *Ecography*, 36, 185–196.
- Xu B, Li ZM, Sun H (2014) Seed Plants of the Alpine Subnival Belt from the Hengduan Mountains, SW China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [徐波, 李志敏, 孙航 (2014) 横断山高山冰缘带种子植物. 科学出版社, 北京.]
- Yang JW (2002) Status and solutions of biodiversity protection in northwest Yunnan. *Forest Resources Management*, (3), 61–65. (in Chinese with English abstract) [杨家伟 (2002) 滇西北地区生物多样性保护现状与对策. 林业资源管理, (3), 61–65.]
- Yang QY, Shen KD (1984) On vertical zonation of the northwestern Yunnan. *Acta Geographica Sinica*, 39, 141–147. (in Chinese with English abstract) [杨勤业, 沈康达 (1984) 滇西北横断山地区的垂直自然带. 地理学报, 39, 141–147.]
- Yunnan Provincial Forestry Department, People's Government of Diqing Tibetan Autonomous Prefecture, Administrative Bureau of the Baima Snow Mountain National Nature Reserve, Diqing Tibetan Autonomous Prefecture Forestry Bureau, Yunnan Institute of Forest Inventory and Planning (2003) The Baima Snow Mountain National Nature Reserve. Yunnan Ethnic Publishing House, Kunming. (in Chinese) [云南省林业厅, 迪庆藏族自治州人民政府, 白马雪山国

家级自然保护区管理局, 迪庆藏族自治州林业局, 云南省林业调查规划院 (2003) 白马雪山国家级自然保护区. 云南民族出版社, 昆明.]

Zhang R, Huang B, Zhou RL (2013) Endemic terrestrial mammal species to China and their spatial distribution patterns. *Yunnan Geographic Environment Research*, 25, 65–70. (in Chinese) [张瑞, 黄贝, 周汝良 (2013) 中国陆

栖哺乳动物特有种及其空间分布格局. 云南地理环境研究, 25, 65–70.]

Zhang RZ (1997) *Physical Geography of Hengduan Mountains*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [张荣祖 (1997) 横断山区自然地理. 科学出版社, 北京.]

(责任编辑: 肖治术 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 18个高山调查地点的保护现状、经纬度、调查海拔跨度、铁日数、物种数及物种Coverage指数

Appendix 1 Conservational status and sampling information of the 18 alpine sites

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021006-1.pdf>

附录2 本研究获得的三江并流区树线生境小型兽类物种名录

Appendix 2 Species list of small mammals captured around tree line habitats in the Three Parallel Rivers of Yunnan Protected Areas

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021006-2.pdf>

附录3 用于计算功能 α 多样性的小型兽类性状

Appendix 3 Trait data used to calculate functional α -diversity

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021006-3.pdf>

附录4 18个样地物种数随采集日增长的累积曲线。95%置信区间由1,000次随机抽取计算得出。

Appendix 4 Species accumulation curves against sampling days of the 18 alpine sites. 95% confidence intervals were calculated from randomly drawing the sample date with 1,000 permutations

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021006-4.pdf>

附录5 基于样本覆盖度的18个样地物种稀疏(实线)和外推(虚线)曲线

Appendix 5 Coverage-based rarefaction (solid line) and extrapolation (dotted line) curves of the 18 sites

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021006-5.pdf>

附录6 4个主要山脉物种数随采集日增长的累积曲线。95%置信区间由1,000次随机抽样计算得出。

Appendix 6 Species accumulation curves against sampling days of the four major mountains. 95% confidence intervals were calculated from randomly drawing the sample date with 1000 permutations

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021006-6.pdf>

附录7 基于样本覆盖度的4个主要山脉物种稀疏(实线)和外推(虚线)曲线

Appendix 7 Coverage-based rarefaction (solid line) and extrapolation (dotted line) curves of the four major mountains

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021006-7.pdf>

附录8 18个样地的ChaoRichness指数

Appendix 8 ChaoRichness estimator in the 18 sites

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021006-8.pdf>

附录9 4个主要山脉的ChaoRichness指数

Appendix 9 ChaoRichness estimator in the four major mountains

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021006-9.pdf>

附录10 18个样地小型兽类多维度 α 多样性及功能冗余度水平

Appendix 10 Multi-dimensional evaluation of α -diversity and functional redundancy in 18 sites (mean $\pm$ SD)

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2021006-10.pdf>

附录1 18个高山调查地点的保护现状、经纬度、调查海拔跨度、诱日数、物种数及物种Coverage指数

Appendix 1 Conservational status and sampling information of the 18 alpine sites

山脉 Mountain	样地 Site	保护区级别 Conservation policy	经纬度 Coordinate	调查时间 Survey time	海拔 Elevational (m)	诱日数 Trap nights	物种数 Species richness	样本覆盖 度 Coverage
高黎贡 Mt. Gaoligong	担当力卡 Mt. Dandanglika	国家级	28.095°N- 98.206°E	2018 年 10 月	3,600~4,000	2,920	10	1.000
	嘎瓦嘎普 Mt. Gawagapu	国家级	27.946°N- 98.499°E	2018 年 9 月	3,400~3,800	3,188	15	1.000
	亚坪垭口 Yaping	国家级	27.207°N- 98.709°E	2018 年 10 月	3,400~3,600	1,980	15	0.986
	片马 Pianma	国家级	26.054°N- 98.682°E	2018 年 11 月	3,400~3,600	2,040	11	0.995
怒山 Mt. Nushan	梅里雪山 Mt. Meili	无	28.262°N- 98.730°E	2017 年 6 月	3,800~4,200	3,018	15	0.988
	碧罗雪山 Mt. Biluo	无	26.575°N- 99.014°E	2017 年 5 月	3,600~4,000	3,102	16	0.998
	雪蒙山 Mt. Xuemeng	无	25.952°N- 98.949°E	2017 年 4 月	3,400~3,600	2,080	19	0.984
云岭 Mt. Yunling	白马雪山 Mt. Baima	国家级	28.337°N- 98.989°E	2017 年 6 月	4,000~4,400	3,012	15	0.987
	康普后山 Kangpu	国家级	27.614°N- 99.096°E	2018 年 6 月	3,600~3,800	3,084	16	0.996
	老君山 Mt. Laojun	省级	26.849°N- 99.624°E	2018 年 5 月	3,800~4,000	2,058	10	1.000
	龙马山 Mt. Longma	省级	26.195°N- 99.201°E	2016 年 12 月	3,400~3,600	2,265	12	0.997
	苍山 Mt. Cangshan	国家级	25.674°N- 100.092°E	2017 年 5 月	3,600~4,000	3,015	15	0.993
沙鲁里 Mt. Shaluli	熊荣雪山 Mt. Xiongrong	无	28.463°N- 99.314°E	2017 年 9 月	4,000~4,400	3,014	10	0.981
	浪都山 Mt. Langdu	无	28.127°N- 99.880°E	2017 年 10 月	4,000~4,400	3,046	13	0.992
	石卡雪山 Mt. Shika	无	27.781°N- 99.609°E	2017 年 10 月	3,800~4,200	2,925	13	0.992
	玉龙雪山 Mt. Yulong	省级	27.017°N- 100.175°E	2013 年 9 月	3,800~4,200	2,940	12	0.981
	哈巴雪山 Mt. Haba	省级	27.345°N- 100.090°E	2018 年 5 月	3,800~4,200	3,064	16	0.987
	绵绵山 Mt. Mianmian	省级	27.576°N- 100.641°E	2018 年 5 月	3,800~4,000	2,000	8	0.990
合计 Total						48,751		

附录2 本研究获得的三江并流区树线生境小型兽类物种名录
Appendix 2 Species list of small mammals captured around tree line habitats in the Three Parallel Rivers of Yunnan Protected Areas

物种 Species	中国特有* Endemic to China	个体数 Numbers of individuals	个体数占比 Proportion
劳亚食虫目 Eulipotyphla			
I 鼯鼠科 Soricidae			
1 微尾鼯 <i>Anourosorex squamipes</i>		56	0.98%
2 淡灰黑齿鼯 <i>Blarinella griselda</i>		2	0.04%
3 狭颅黑齿鼯 <i>Blarinella wardi</i>		58	1.02%
4 灰腹水鼯 <i>Chimarrogale styani</i>		1	0.02%
5 烟黑缺齿鼯 <i>Chodsigoa furva</i>		1	0.02%
6 川西缺齿鼯 <i>Chodsigoa hypsibia</i>	√	1	0.02%
7 西南中麝鼯 <i>Crocidura vorax</i>		3	0.05%
8 褐腹长尾鼯 <i>Episoriculus caudatus</i>		9	0.16%
9 大长尾鼯 <i>Episoriculus leucops</i>		78	1.37%
10 小长尾鼯 <i>Episoriculus macrurus</i>		172	3.02%
11 小纹背鼯 <i>Sorex bedfordiae</i>		664	11.68%
12 甘肃鼯 <i>Sorex cansulus</i>	√	21	0.37%
13 纹背鼯 <i>Sorex cylindricauda</i>	√	92	1.62%
14 云南鼯 <i>Sorex excelsus</i>		16	0.28%
15 藏鼯 <i>Sorex thibetanus</i>	√	29	0.51%
II 鼯科 Talpidae			
16 白尾鼯 <i>Parascaptor leucura</i>		2	0.04%
17 长尾鼯 <i>Scaptonyx fuscicaudus</i>		82	1.44%
18 长尾鼯鼯待定种 <i>Scaptonyx</i> sp.		7	0.12%
19 贡山鼯 <i>Uropsilus investigator</i>	√	20	0.35%
20 雪山鼯 <i>Uropsilus nivatus</i>		174	3.06%
兔形目 Lagomorpha			
III 鼠兔科 Ochotonidae			
21 灰颈鼠兔 <i>Ochotona forresti</i>		30	0.53%
22 大耳鼠兔 <i>Ochotona macrotis</i>		8	0.14%
23 藏鼠兔 <i>Ochotona thibetana</i>		137	2.41%
啮齿目 Rodentia			
IV 仓鼠科 Cricetidae			
24 克钦绒鼠 <i>Eothenomys cachinus</i>		452	7.95%
25 西南绒鼠 <i>Eothenomys custos</i>	√	1118	19.66%
26 大绒鼠 <i>Eothenomys miletus</i>	√	21	0.37%
27 昭通绒鼠 <i>Eothenomys olitor</i>	√	72	1.27%
28 克氏松田鼠 <i>Neodon clarkei</i>		185	3.25%
29 云南松田鼠 <i>Neodon forresti</i>		221	3.89%
30 高原松田鼠 <i>Neodon irene</i>	√	428	7.53%
31 松田鼠待定种 <i>Neodon</i> sp.		85	1.49%
V 鼠科 Muridae			
32 高山姬鼠 <i>Apodemus chevrieri</i>	√	31	0.55%

宋文字, 李学友, 王洪娇, 陈中正, 何水旺, 蒋学龙 (2021) 三江并流区树线生境小型兽类多样性多维度评价及其保护启示. 生物多样性, 29, 1215–1228.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021006>

物种 Species	中国特有* Endemic to China	个体数 Numbers of individuals	个体数占比 Proportion
33 澜沧江姬鼠 <i>Apodemus ilex</i>	√	716	12.59%
34 大耳姬鼠 <i>Apodemus latronum</i>		333	5.86%
35 红耳巢鼠 <i>Micromys erythrotis</i>		7	0.12%
36 安氏白腹鼠 <i>Niviventer andersoni</i>	√	36	0.63%
37 社鼠 <i>Niviventer confucianus</i>		9	0.16%
38 灰腹鼠 <i>Niviventer eha</i>		221	3.89%
39 川西白腹鼠 <i>Niviventer excelsior</i>	√	42	0.74%
40 鼯鼠待定种 <i>Sicista</i> sp.		1	0.02%
41 滇攀鼠 <i>Vernaya fulva</i>		2	0.04%
VI 松鼠科 Sciuridae			
42 红颊长吻松鼠 <i>Dremomys lokriah</i>		1	0.02%
43 珀氏长吻松鼠 <i>Dremomys pernyi</i>		24	0.42%
44 隐纹花鼠 <i>Tamias swinhoi</i>		18	0.32%
总计 Total		5686	100.00%

*中国特有种根据《Mammal Species of the World. A Taxonomic and Geographic Reference (3rd ed)》(Wilson & Reeder, 2005)对物种分布的描述、《中国哺乳动物彩色图鉴》附录 I 《中国哺乳动物分类名录与分布》(潘清华等, 2007)以及《中国哺乳动物多样性(第 2 版)》(蒋志刚等, 2017)等已出版资料判断。如有不一致则以最新资料为准。

Whether endemic to China were referenced from the species distribution described in the Mammal Species of the World. A Taxonomic and Geographic Reference (3rd ed) (Wilson & Reeder, 2005)、A field guide to the mammals of China: Appendix I Species list and distribution of the mammals in China (Pan et al, 2007) and “China’s mammal diversity (2nd edition)” (Jiang et al, 2017). Newer literature was adopted if not congruent.

附录3 用于计算功能 α 多样性的小型兽类性状

Appendix 3 Trait data used to calculate functional α -diversity

物种 Species	食性 Diet	节律 Rhythm	生活型 Lifeform	体重 BW (g)	体长 HB (mm)	尾长 TL (mm)	后足长 HF (mm)	耳长 EL (mm)	尾体比
<i>Anourosorex squamipes</i>	肉食	兼行	掘洞	16.28	92.63	14.87	12.98	0.00	16.15
<i>Apodemus chevrieri</i>	草食	日行	地表	26.61	100.80	86.13	21.17	15.77	85.61
<i>Apodemus ilex</i>	杂食	日行	地表	20.21	93.23	96.22	22.14	17.72	106.68
<i>Apodemus latronum</i>	杂食	日行	地表	27.80	102.62	102.67	23.87	21.82	105.94
<i>Blarinella griselda</i>	杂食	兼行	半掘洞	8.50	76.50	36.00	11.25	5.00	47.07
<i>Blarinella wardi</i>	杂食	兼行	半掘洞	6.47	68.63	39.29	11.15	4.86	57.32
<i>Chimarrogale styani</i>	肉食	兼行	半水栖	15.80	92.00	80.00	20.00	4.00	86.96
<i>Chodsigoa furva</i>	杂食	兼行	地表	5.60	69.00	84.00	16.00	8.00	121.74
<i>Chodsigoa hypsibia</i>	杂食	兼行	地表	9.00	78.00	70.00	14.00	9.00	89.74
<i>Crocidura vorax</i>	肉食	兼行	地表	7.23	68.33	42.67	11.67	8.33	62.51
<i>Dremomys lokriah</i>	杂食	日行	树栖	186.50	189.00	110.00	42.00	23.00	58.20
<i>Dremomys pernyi</i>	杂食	日行	树栖	170.20	194.09	145.61	44.39	25.43	75.23
<i>Eothenomys cachinus</i>	杂食	兼行	半掘洞	27.03	111.66	56.69	18.96	14.61	51.44
<i>Eothenomys custos</i>	杂食	兼行	半掘洞	22.89	102.44	45.42	17.03	13.63	44.67
<i>Eothenomys miletus</i>	杂食	兼行	半掘洞	25.87	106.10	40.15	16.58	13.25	37.89
<i>Eothenomys olitor</i>	杂食	兼行	半掘洞	14.02	90.49	24.94	12.95	8.20	27.61
<i>Episoriculus caudatus</i>	肉食	兼行	地表	5.72	62.67	57.67	12.56	7.78	92.16
<i>Episoriculus leucops</i>	肉食	兼行	地表	8.20	69.65	71.79	14.65	8.57	103.23
<i>Episoriculus macrurus</i>	肉食	兼行	地表	5.86	61.52	90.63	15.14	9.24	147.64
<i>Micromys erythrotis</i>	杂食	兼行	地表	6.09	63.43	64.14	14.29	10.14	101.20
<i>Neodon clarkei</i>	草食	兼行	半掘洞	32.07	114.10	60.84	20.24	15.49	53.52
<i>Neodon forresti</i>	草食	兼行	半掘洞	30.28	112.27	37.44	18.56	14.65	33.38
<i>Neodon irene</i>	草食	兼行	半掘洞	25.47	103.65	32.32	17.24	13.83	31.29

宋文宇, 李学友, 王洪娇, 陈中正, 何水旺, 蒋学龙 (2021) 三江并流区树线生境小型兽类多样性多维度评价及其保护启示. 生物多样性, 29, 1215–1228.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021006>

物种 Species	食性 Diet	节律 Rhythm	生活型 Lifeform	体重 BW (g)	体长 HB (mm)	尾长 TL (mm)	后足长 HF (mm)	耳长 EL (mm)	尾体比
<i>Neodon</i> sp	草食	兼行	半掘洞	28.76	107.47	39.06	19.09	15.42	36.43
<i>Niviventer andersoni</i>	杂食	夜行	地表	109.72	172.79	234.86	34.02	28.67	136.17
<i>Niviventer confucianus</i>	杂食	夜行	地表	48.94	129.00	152.71	26.57	23.71	118.26
<i>Niviventer eha</i>	杂食	夜行	地表	39.01	116.76	181.59	27.54	21.59	164.12
<i>Niviventer excelsior</i>	杂食	夜行	地表	74.26	149.77	191.93	30.53	26.97	128.15
<i>Ochotona forresti</i>	草食	日行	地表	91.20	167.70	0.00	27.47	26.27	0.00
<i>Ochotona macrotis</i>	草食	日行	地表	148.73	269.13	0.00	31.13	30.25	0.00
<i>Ochotona thibetana</i>	草食	日行	地表	71.69	158.99	0.00	26.15	23.89	0.00
<i>Parascaptor leucura</i>	肉食	兼行	掘洞	38.00	103.00	15.50	14.25	0.00	15.07
<i>Scaptonyx fuscicaudus</i>	肉食	夜行	掘洞	13.72	83.69	34.99	13.63	0.00	41.90
<i>Scaptonyx</i> sp	肉食	夜行	掘洞	13.65	81.33	47.50	14.42	0.00	58.38
<i>Sicista</i> sp.	草食	夜行	地表	10.70	76.00	131.00	19.00	15.00	172.37
<i>Sorex bedfordiae</i>	肉食	兼行	地表	5.48	63.57	55.88	12.20	6.36	90.22
<i>Sorex cansulus</i>	肉食	兼行	地表	7.96	72.05	47.71	13.10	8.00	74.15
<i>Sorex cylindricauda</i>	肉食	兼行	地表	8.31	72.31	53.46	13.04	7.63	79.98
<i>Sorex excelsus</i>	肉食	兼行	地表	5.52	65.69	52.44	12.50	6.69	66.61
<i>Sorex thibetanus</i>	肉食	兼行	地表	3.18	54.54	38.11	10.13	4.93	71.17
<i>Tamiops swinhoei</i>	杂食	日行	树栖	79.00	142.19	108.00	32.06	16.44	76.02
<i>Uropsilus investigator</i>	肉食	夜行	地表	10.52	75.75	69.80	14.73	10.13	92.17
<i>Uropsilus nivatus</i>	肉食	夜行	地表	9.49	71.65	70.13	14.62	9.71	97.97
<i>Vernaya fulva</i>	杂食	夜行	树栖	10.90	72.00	130.50	17.50	16.00	181.42

附录4 18个样地物种数随采集日增长的累积曲线。95%置信区间由1,000次随机抽取计算得出
Appendix 4 Species accumulation curves against sampling days of the 18 alpine sites. 95% confidence intervals were calculated from randomly drawing the sample date with 1,000 permutations

附录5 基于样本覆盖度的18个样地物种稀疏（实线）和外推（虚线）曲线。a) 基于样本量的物种稀疏曲线；b) 样本量与样本覆盖度曲线；c) 基于样本覆盖度的物种稀疏曲线
Appendix 5 Rarefaction and extrapolation curves of small mammal sampling in the 18 sites. a) sample-size-based rarefaction curves; b) correlation between sample size and sample coverage; c) coverage-based rarefaction curves

附录6 4个主要山脉物种数随采集日增长的累积曲线。95%置信区间由1 000次随机抽样计算得出
Appendix 6 Species accumulation curves against sampling days of the 4 major mountains. 95% confidence intervals were calculated from randomly drawing the sample date with 1000 permutations

附录7 基于样本覆盖度的4个主要山脉物种稀疏(实线)和外推(虚线)曲线

Appendix 7 Coverage-based rarefaction (solid line) and extrapolation (dotted line) curves of the four major mountains

宋文字, 李学友, 王洪娇, 陈中正, 何水旺, 蒋学龙 (2021) 三江并流区树线生境小型兽类多样性多维度评价及其保护启示. 生物多样性, 29, 1215–1228.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021006>

附录8 18个样地的ChaoRichness指数

Appendix 8 ChaoRichness estimator in the 18 sites

	观测物种丰富度 Observed species richness	估计物种丰富度 Estimate species richness	标准误 S.E.	95%置信区间下 限 95% Lower confidence interval	95%置信区间上 限 95% Upper confidence interval
白马雪山 Mt. Baima	15	19.481	7.165	15.493	55.753
碧罗雪山 Mt. Biluo	16	16.499	1.321	16.03	24.428
苍山 Mt. Cangshan	14	16.993	4.524	14.353	39.374
担当力卡 Mt. Dandanglika	10	10	0.408	10	11.006
噶瓦嘎普 Mt. Gawagapu	15	15	0.408	15	16.001
哈巴雪山 Mt. Haba	15	20.98	7.185	15.938	53.132
康普后山 Kangpu	16	17.996	3.735	16.18	38.088
浪都山 Mt. Langdu	13	13.996	2.275	13.07	27.09
老君山 Mt. Laojun	10	10	0.586	10	11.599
龙马山 Mt. Longma	11	11.166	0.535	11.008	14.525
梅里雪山 Mt. Meili	15	19.482	7.166	15.493	55.762
绵绵山 Mt. Mianmian	8	9.99	3.724	8.18	30.028
片马听命湖 Mt. Pianma	11	11.998	1.867	11.09	22.042
石卡雪山 Mt. Shika	13	13.996	2.275	13.07	27.092
熊荣雪山 Mt. Xiongrong	10	10.66	1.295	10.056	17.745
雪蒙山 Mt. Xuemeng	19	22.984	5.272	19.555	47.617
亚坪垭口 Yaping	15	16.493	2.282	15.174	27.833
玉龙雪山 Mt. Yulong	12	29.944	23.55	14.524	139.574

宋文字, 李学友, 王洪娇, 陈中正, 何水旺, 蒋学龙 (2021) 三江并流区树线生境小型兽类多样性多维度评价及其保护启示. 生物多样性, 29, 1215–1228.
<http://www.biodiversity-science.net/CN/10.17520/biods.2021006>

附录9 4个主要山脉的ChaoRichness指数
Appendix 9 ChaoRichness estimator in the 4 major mountains

	观测物种丰富度 Observed	估计物种丰富度 Estimator	标准误 S.E.	95%置信区间下限 95% Lower confidence interval	95%置信区间上限 95% Upper confidence interval
高黎贡山 Mt. Gaoligong	18	19.999	3.739	18.181	40.116
怒山 Mt. Nushan	24	24.666	1.304	24.057	31.799
沙鲁里山 Mt. Shaluli	26	28.665	3.483	26.377	44.851
云岭 Mt. Yunling	23	24.999	3.74	23.181	45.116

附录10 18个样地的多维度 α 多样性及功能冗余度水平

Appendix 10 Multi-dimensional evaluation of α -diversity and functional redundancy in 18 sites (mean $\pm$ SD)

样地 Site	丰富度指数 Richness indices			均匀度指数 Evenness indices			功能冗余度 Functional redundancy
	SR	PD	FRic	<i>D</i>	MPD	<i>Q</i>	
白马雪山 Mt. Baima	8.67 $\pm$ 1.53	1.23 $\pm$ 0.18	0.23 $\pm$ 0.20	0.64 $\pm$ 0.11	0.21 $\pm$ 0.02	0.07 $\pm$ 0.02	0.54 $\pm$ 0.03
碧罗雪山 Mt. Biluo	10.33 $\pm$ 2.52	1.34 $\pm$ 0.20	0.18 $\pm$ 0.03	0.61 $\pm$ 0.34	0.20 $\pm$ 0.11	0.06 $\pm$ 0.03	0.57 $\pm$ 0.03
苍山 Mt. Cangshan	10.00 $\pm$ 2.00	1.48 $\pm$ 0.22	0.43 $\pm$ 0.16	0.69 $\pm$ 0.11	0.23 $\pm$ 0.05	0.08 $\pm$ 0.02	0.55 $\pm$ 0.01
担当力卡 Mt. Dandanglika	7.67 $\pm$ 1.15	1.16 $\pm$ 0.14	0.09 $\pm$ 0.06	0.72 $\pm$ 0.05	0.25 $\pm$ 0.01	0.07 $\pm$ 0.00	0.56 $\pm$ 0.02
嘎瓦嘎普 Mt. Gawagapu	12.00 $\pm$ 2.65	1.55 $\pm$ 0.35	0.28 $\pm$ 0.24	0.84 $\pm$ 0.06	0.28 $\pm$ 0.02	0.07 $\pm$ 0.01	0.60 $\pm$ 0.01
哈巴雪山 Mt. Haba	9.67 $\pm$ 3.51	1.35 $\pm$ 0.42	0.31 $\pm$ 0.20	0.75 $\pm$ 0.08	0.26 $\pm$ 0.03	0.08 $\pm$ 0.01	0.54 $\pm$ 0.01
康普后山 Kangpu	10.67 $\pm$ 3.06	1.40 $\pm$ 0.39	0.27 $\pm$ 0.18	0.67 $\pm$ 0.06	0.20 $\pm$ 0.02	0.05 $\pm$ 0.00	0.61 $\pm$ 0.02
浪都山 Mt. Langdu	9.00 $\pm$ 3.00	1.17 $\pm$ 0.31	0.17 $\pm$ 0.15	0.71 $\pm$ 0.12	0.23 $\pm$ 0.04	0.06 $\pm$ 0.01	0.59 $\pm$ 0.02
老君山 Mt. Laojun	9.00 $\pm$ 1.41	1.24 $\pm$ 0.18	0.13 $\pm$ 0.06	0.61 $\pm$ 0.11	0.19 $\pm$ 0.04	0.06 $\pm$ 0.00	0.57 $\pm$ 0.02
龙马山 Mt. Longma	9.00 $\pm$ 1.41	1.31 $\pm$ 0.15	0.07 $\pm$ 0.05	0.71 $\pm$ 0.02	0.24 $\pm$ 0.01	0.06 $\pm$ 0.00	0.59 $\pm$ 0.00
梅里雪山 Mt. Meili	11.33 $\pm$ 1.53	1.52 $\pm$ 0.17	0.39 $\pm$ 0.10	0.73 $\pm$ 0.15	0.25 $\pm$ 0.04	0.08 $\pm$ 0.01	0.54 $\pm$ 0.04
绵绵山 Mt. Mianmian	6.50 $\pm$ 0.71	0.93 $\pm$ 0.04	0.04 $\pm$ 0.03	0.59 $\pm$ 0.08	0.17 $\pm$ 0.01	0.06 $\pm$ 0.00	0.54 $\pm$ 0.03
片马听命湖 Pianma	9.00 $\pm$ 1.41	1.32 $\pm$ 0.19	0.11 $\pm$ 0.09	0.46 $\pm$ 0.18	0.16 $\pm$ 0.06	0.05 $\pm$ 0.02	0.56 $\pm$ 0.01
石卡雪山 Mt. Shika	10.67 $\pm$ 0.58	1.43 $\pm$ 0.13	0.40 $\pm$ 0.13	0.76 $\pm$ 0.14	0.25 $\pm$ 0.05	0.07 $\pm$ 0.02	0.60 $\pm$ 0.02
熊荣雪山 Mt. Xiongrong	5.67 $\pm$ 1.15	0.81 $\pm$ 0.22	0.03 $\pm$ 0.04	0.65 $\pm$ 0.07	0.20 $\pm$ 0.05	0.06 $\pm$ 0.03	0.58 $\pm$ 0.08
雪蒙山 Mt. Xuemeng	14.00 $\pm$ 4.24	1.69 $\pm$ 0.52	0.36 $\pm$ 0.30	0.80 $\pm$ 0.12	0.24 $\pm$ 0.06	0.07 $\pm$ 0.03	0.62 $\pm$ 0.05
亚坪垭口 Yaping	11.00 $\pm$ 1.41	1.48 $\pm$ 0.06	0.36 $\pm$ 0.06	0.70 $\pm$ 0.16	0.24 $\pm$ 0.05	0.07 $\pm$ 0.02	0.57 $\pm$ 0.01
玉龙雪山 Mt. Yulong	7.00 $\pm$ 2.00	1.04 $\pm$ 0.22	0.10 $\pm$ 0.07	0.52 $\pm$ 0.12	0.17 $\pm$ 0.03	0.05 $\pm$ 0.01	0.56 $\pm$ 0.02

参考文献

Jiang ZG, Liu SY, Wu Y, Jiang XL, Zhou KY (2017) China's mammal diversity (2nd edition). Biodiversity Science. 25(8):886-895. (in Chinese)[蒋志刚, 刘少英, 吴毅, 蒋学龙, 周开亚 (2017) 中国哺乳动物多样性 (第2版). 生物多样性, 25, 886-895.]

Pan QH, Wang YX, Yan K (2007) A field guide to the mammals of China. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese)[潘清华, 王应祥, 岩崑 (2007) 中国哺乳动物彩色图鉴. 中国林业出版社, 北京.]

Wilson DE, Reeder DM (2005) Mammal Species of the World. A Taxonomic and Geographic Reference (3rd ed), p. 2142. Johns Hopkins University Press, Baltimore.