



袁一凡, 卢志兴, 张翔, 李巧, 陈又清. 不同环境因子对蝗虫群落功能性状多样性海拔分布格局的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2026, 48 (2): 489–500. YUAN Yi-Fan, LU Zhi-Xing, ZHANG Xiang, LI Qiao, CHEN You-Qing. Effects of different environmental factors on altitude distribution pattern of functional trait diversity in locust communities [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2026, 48 (2): 489–500.

不同环境因子对蝗虫群落功能性状多样性 海拔分布格局的影响

袁一凡¹, 卢志兴^{2,3}, 张翔^{2,3}, 李巧^{1*}, 陈又清^{2,3*}

(1. 西南林业大学, 昆明 650224; 2. 中国林业科学研究院高原林业研究所, 昆明 650224;

3. 国家林业和草原局资源昆虫培育与利用重点实验室, 昆明 650224)

摘要:【目的】性状特征是物种与生态系统关系的具体体现, 探究物种功能性状多样性的海拔格局是揭示生物多样性空间分布格局和形成机制的重要研究内容。海拔梯度下以气候和土地利用变化等环境因子是影响蝗虫群落分布格局及构建机制的重要因素, 当前蝗虫群落的功能性状垂直分布格局的系统研究任然非常缺乏。【方法】本研究于2022年6月至9月, 在金沙江流域永仁地区1 200~2 400 m海拔范围内开展调查, 基于设置84样地中使用扫网法捕获的蝗虫数据, 利用线性和二次回归模型探索并比较了蝗虫功能性状(个体大小、相对翅长、体色、生活型、食性)的群落加权平均性状多样性指数沿海拔梯度的分布特征, 并使用随机森林模型解析海拔梯度下气候、土壤、植被生产力和土地利用变量对蝗虫性状多样性垂直分布格局的影响。【结果】结果显示:(1)中等个体大小、禾草型食性的性状多样性沿海拔梯度呈显著的“U”型分布格局;短翅型相对翅长和绿色型体色性状多样性沿海拔梯度呈显著的线性递减分布格局;兼食型食性的性状多样性沿海拔梯度呈显著的单峰型分布格局。(2)功能丰富度指数、功能均匀度指数、功能离散度指数沿海拔梯度均呈显著的线性递减趋势。(3)随机森林模型分析结果表明,蝗虫不同性状对环境因子响应程度不一致,草地面积占比、NDVI植被归一化指数、水蒸气压是较多性状的关键解释因子。【结论】综上,金沙江干热河谷地区,蝗虫功能性状多样性海拔格局存在差异,不同自然环境梯度和土地利用类型分布是主要影响因子。本研究结果可为金沙江干热河谷地区生物多样性保护和生态恢复提供理论基础。

关键词: 生物多样性; 功能性状; 海拔分布格局; 干热河谷

中图分类号: Q968.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2026) 02-0489-12

Effects of different environmental factors on altitude distribution pattern of functional trait diversity in locust communities

YUAN Yi-Fan¹, LU Zhi-Xing^{2,3}, ZHANG Xiang^{2,3}, LI Qiao^{1*}, CHEN You-Qing^{2,3*} (1. Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Institute of Plateau Forestry, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, China; 3. Key Laboratory of Breeding and Utilization of Resource Insects of National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650224, China)

Abstract: 【Aim】 Functional traits are the concrete embodiment of the relationship between species and ecosystems, and exploring the altitudinal pattern of functional trait diversity of species is an important part of the study to reveal the spatial distribution pattern and formation mechanism of biodiversity. Environmental factors such as climate and land-use changes under altitudinal gradients are important

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (CAFYBB2023MB014)

作者简介: 袁一凡, 男, 硕士研究生, 主要从事昆虫学研究, E-mail: juandijigui@qq.com

*共同通讯作者 Author for correspondence: 李巧, 女, 博士, 教授, 主要从事昆虫学研究, E-mail: lqfcb@126.com; 陈又清, 男, 博士, 研究员, 主要从事昆虫生态学研究, E-mail: cyqcaif@126.com

收稿日期 Received: 2024-04-10; 修回日期 Revision received: 2024-07-28; 接受日期 Accepted: 2024-07-31

factors affecting the distribution pattern and assembly mechanism of locust communities. However, there is a lack of systematic research on the vertical distribution pattern of functional traits in locust communities. **【Methods】** In this study, we conducted a survey from June to September 2022 in the Yongren area of the Jinsha River Basin within the altitude range of 1 200 m to 2 400 m. Based on the data of locusts collected in 84 sample plots by sweep net method, we explored and compared the distribution characteristics of locust community-weighted average trait diversity indices along the altitude gradient of functional traits (individual size, relative wing length, body colour, life type, and feeding habit) by using linear and quadratic regression models. We also used a random forest model to analyse the effects of climate, soil, vegetation productivity and land-use variables on the vertical distribution pattern of locust trait diversity along the altitudinal gradient. **【Results】** The results showed that: (1) The diversity of traits among medium-sized and graminivorous feeding habits locusts followed a significant 'U'-shaped distribution pattern along the altitude gradient. The diversity of traits among brachypterous relative wing length and green body color locusts showed a significant linear decrease along the altitude gradient. Finally, the diversity of traits among mixed-feeding feeding habits locusts showed a significant single-peak distribution pattern along the altitude gradient. (2) The altitudinal gradient was found to have a significant linear decreasing effect on the functional richness index, functional homogeneity index, and functional dispersion index. (3) The analysis of the random forest model revealed inconsistent responses of different locust traits to environmental factors. The proportion of grassland area, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), and water vapour pressure were identified as the common key explanatory factors for multiple traits. **【Conclusion】** In conclusion, the study found that the altitudinal pattern of locust functional trait diversity varied in the Jinsha River dry-hot valley, and that the distribution of different natural environmental gradients and land-use types were the main influencing factors. These results provide a theoretical basis for biodiversity conservation and ecological restoration in the Jinsha River valley.

Key words: Biodiversity; functional traits; altitudinal distribution pattern; dry-hot valley

海拔的综合环境梯度效应对昆虫群落结构和多样性沿海拔梯度垂直分布格局具有重要影响 (Lomolino, 2017; 谢致敬, 2022)。从水热条件、资源分布、土地利用等多方面影响因素, 在扩散、食物链、微生境多个层次限制和影响物种的发育和群落的发展 (刘晔和沈泽昊, 2011)。而物种通过功能性状的分化来响应环境变化 (Dziok et al., 2011)。因此探究生物群落的功能性状及其多样性的海拔分布格局, 是揭示生物多样性空间分布格局和背后形成机制的重要研究内容 (Supriya et al., 2019)。

海拔梯度在较小的空间范围中能反映广泛的生物与非生物因素的快速变化 (Perrigo et al., 2020), 是研究环境要素与生物多样性空间格局关系的重要方法 (Sundqvist et al., 2013)。气候和土地利用是海拔梯度变化中影响生物多样性海拔格局的重要因素 (Parmesan and Yohe, 2003; Sharma et al., 2020)。其中气候因子 (如降水和气温) 通常随海拔呈连续变化趋势 (Rahbek, 2005), 物种丰富度最大值多出现在气候适中的中

等海拔地区 (Thomas et al., 2024)。而昆虫性状在气候变化的胁迫下, 通常具有规律性的海拔变化趋势 (Ciplak et al., 2008)。不同海拔的土地利用格局多受到农业实践和城镇化建设影响 (Dengler et al., 2014; Feurdean et al., 2018), 通常低海拔地区的人类活动更为密集和频繁, 因此土地利用变化的扰动程度更加剧烈 (Nogués-Bravo et al., 2008)。土地利用强度驱使生境的质量和可用性发生同质化, 是直翅目昆虫沿海拔梯度分布格局的重要影响因素 (Löffler et al., 2019; Illich and Zuna-Kratky, 2022)。

在草地生态系统中, 以蝗虫 Acrididae 为代表的直翅目昆虫是常见和重要的食草动物, 承担生态系统能量传递的重要功能 (Branson, 2006; Branson, 2014)。其对生态系统的变化十分敏感, 同时还可以影响许多草地生态系统过程, 包括生产力 (Laws and Joern, 2013)、营养循环 (Belovsky and Slade, 2000)、土壤微生物呼吸 (Hawlena et al., 2012; Strickland et al., 2013) 和

酶功能 (Prather *et al.*, 2017), 是研究生态系统有力工具。蝗虫的功能性状 (如体型大小、相对翅长、体色) 是对栖息环境的长期适应所形成的特定生存策略 (Hodkinson, 2003; Gladstone-Gallagher *et al.*, 2019)。因此探究功能性状是了解蝗虫沿海拔梯度响应环境因子变化的重要渠道 (McCain and Colwell, 2011)。如有研究发现锥蝗属和斑翅蝗属两种蝗虫 *Chorthippus vagans* 和 *Oedipoda miniata* 的体型大小、生殖器大小、头长和后足股节长等结构, 在海拔梯度上变化具有一致性 (Ciplak *et al.*, 2008)。同时, 海拔引起的气温和植被生产力变化驱使直翅目昆虫的相对翅长、后足股节长度和眼睛大小等性状随海拔高度上升而逐渐缩小, 不同海拔区域的直翅目昆虫在繁殖、扩散、逃脱和资源利用上具有显著差异 (Tiede *et al.*, 2018)。在土地利用强度梯度的影响下, 蝗虫的相对翅长、生殖器大小与数量具有明显的空间梯度分布格局。是蝗虫在环境扰动下对繁殖与扩散生存策略权衡的具体体现 (Dziocik *et al.*, 2011)。功能性状与环境因子具有很强的关联性, 在海拔梯度下以气候和土地利用为主的环境梯度效应对功能性状具有显著的过滤作用 (Statzner *et al.*, 2001; Bonada *et al.*, 2007)。当前, 对于蝗虫群落功能性状多样性与环境因子共同作用的机制尚不明确, 对其海拔分布格局也缺乏相关研究。

永仁县地处金沙江干热河谷区, 该区域由于地质结构特殊形成了西南地区特有的地理气候类型 (金振洲等, 1987)。干热失调的气候特点导致该区域植被分布差异明显, 谷底 (海拔约 1 100 m) 植被以热带性质的稀树灌草丛为主, 而河谷顶部 (海拔约 2 100 m) 分布多为亚热带成分的常绿阔叶林 (余娇娥等, 2018), 表现出明显的物种更替现象。由于独特的地理结构, 土地利用类型在海拔梯度上分布差异显著 (许英杰等, 2023)。干热河谷的独特地理和气候条件孕育着丰富的昆虫生物多样性, 但目前该地区对蝗虫群落性状的研究比较缺乏。本研究通过采集和分析永仁县地区不同海拔蝗虫的性状数据, 以解答如下科学问题: (1) 揭示蝗虫群落功能性状和多样性沿海拔变化的分布格局; (2) 海拔梯度是如何影响蝗虫群落的功能性状; (3) 蝗虫功能性状受到那些环境因子影响。最终为干热河谷生物多样性研究提供数据积累, 为干热河谷地形昆虫多样性的海拔格局及其构建机制研究提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

永仁县位于云南省中北部, 地处东经 101°14'~101°49', 北纬 25°51'~26°30', 总面积 2 189 km², 属内陆高原区, 位于滇中红色高原北缘。全县境内山脉属云岭余脉白草岭山系, 多南北走向, 地势西北高, 东南低, 中部和南部地区是丘陵状高原面。平均海拔 1 530~1 700 m。年均温 17.8°C, 多年平均降雨量 833.9 mm。全县森林资源丰富, 森林覆盖率占 81.9%, 其中以林地和灌木林地为主 (罗洁, 2007)。县域内生境丰富, 草原总面积 91.81 km², 主要为热性草丛、热性灌草丛、山地草甸、干热稀树草原。于 2022 年 6 月至 9 月进行了两次系统调查, 依据科学性、全面性、可达性原则和多生境采样原则在 1 200~2 400 m 海拔区间共设置 84 个样地, 其中 1 200~1 500 m 设置 25 个, 1 500~1 800 m 设置 27 个, 1 800~2 100 m 设置 17 个, 2 100~2 400 m 设置 15 个 (图 1)。依据调查样地主要植被覆盖划分出 4 类蝗虫生境类型, 分别为林地、草地、灌丛、农业用地。调查发现低海拔地区为金沙江岸边到河谷陡坡一带, 生境多为干热草地、灌丛。中海拔地区多位于坝区, 人口密集, 为生境过度带且是农业用地的主要集中区。高海拔地区主要是山地地形, 生境以天然林和次生林为主。

1.2 数据采集

1.2.1 物种采集

选择扫网作为采样方法, 因为它被广泛采用, 速度快, 并且可以可靠地估计蝗虫栖息地中物种群落的相对丰度和物种组成 (Doxon *et al.*, 2011)。

在每个样地中选取 10 个 100 m 长、左右相距约 6 m 的样带, 使用网扫法匀速进行、左右扫网。每个样带扫网不少于 25 次。调查时间选取蝗虫活动频繁的 10:00~18:00, 在没有降雨的晴天进行。将采集的标本保存在 75% 酒精中, 调查时记录采集地点、样线编号、采集人、采集时间、生境类型、人为干扰因素、GPS 信息等。将采集到的标本带回实验室进行鉴定并统计数量。鉴定时参考《中国动物志第四卷直翅目蝗总科癩蝗科 瘤锥蝗科 锥头蝗科》、《云南蝗虫区系分布格局及适应特征》、《云南森林昆虫》等相关文献鉴定到种。

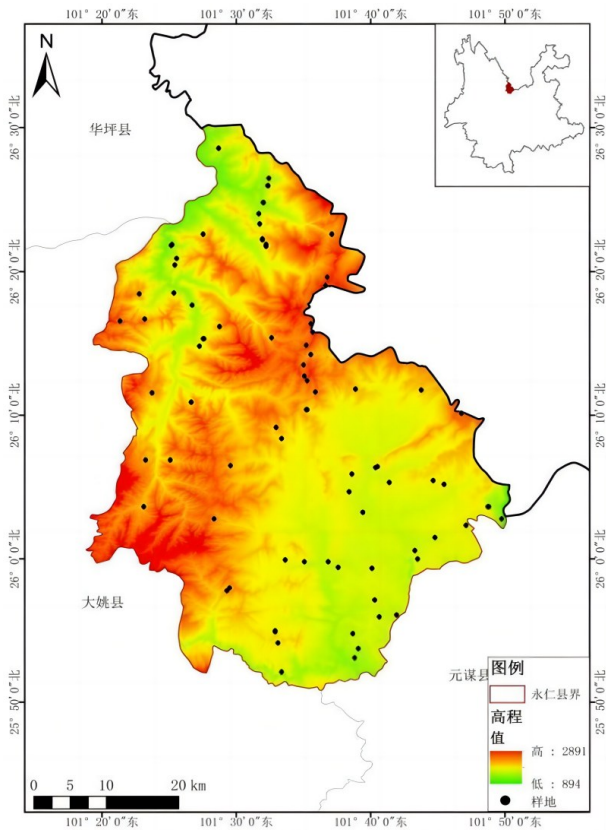


图1 永仁县采样点示意图

Fig. 1 Location map of the sampling sites in Yongren County

1.2.2 环境因子获取

以实地调查记录数据为基础根据每个样地的

经纬度信息，利用 ArcGIS 10.8 软件处理基于 WorldClim (<https://www.worldclim.org/>) 2020 年发布的 1970–2000 年历史气候数据，提取平均日温差、等温性、年降水量、平均风速、水蒸气压、月平均温、调查月最高温。土壤数据来源于世界土壤数据库 (<https://www.fao.org/soils-portal/en/>) 于 2023 年发布的 HWSO v2.0 数据，提取 0–30 cm 的土壤酸碱度、土壤有机碳含量表层土壤数据，空间分辨率为 250 m。土地利用数据获取从 EarthEnv-Landcover 下载土地利用覆盖数据，以每个采集样地为基础，建立直径为 1 km 的圆形缓冲区，获取每个样地的森林面积占比、农业用地面积占比、草地面积占比、灌丛面积占比等土地覆盖数据。本研究使用植被归一化差异指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI) 作为植被生产力的估计 (Röder *et al.*, 2017; Wallis *et al.*, 2017)，其在生态学研究被经常使用，是根据电磁光谱的近红外的部分反射率来计算绿色的度量，利用反射率的差异来区分植被覆盖。NDVI 指数从中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>) 下载精度为 30 m 的数字高程数据 (Digital elevation model, DEM)，通过 ENVI 5.6 对数据进行处理获取各样点缓冲区的 NDVI 植被归一化差异指数。

表1 研究区采样点位环境因子概况

Table 1 Overview of environmental factors at sampling points in the study area

| 环境变量 Environmental variables | 平均值 Mean | 标准差 SD | 最小值 Min | 最大值 Max |
|------------------------------------------------|----------|--------|---------|---------|
| 海拔 (m) Elevation | 1 725.3 | 360.4 | 1 141.1 | 2 432.6 |
| 农业用地面积百分比 (%) Agriculture area | 26.8 | 17.9 | 0.0 | 89.0 |
| 草地面积百分比 (%) Grassland area | 11.6 | 13.1 | 0.0 | 60.0 |
| 灌木面积百分比 (%) Brush area | 22.3 | 15.1 | 0.0 | 50.0 |
| 森林面积百分比 (%) Forest area | 22.9 | 16.1 | 0.0 | 70.0 |
| 平均日温差 (°C) Mean daily temperature difference | 11.6 | 0.6 | 10.3 | 12.6 |
| 等温性 Isothermality | 47.4 | 0.7 | 46.2 | 49.2 |
| 月平均温 (°C) Mean monthly temperature | 21.2 | 2.6 | 11.3 | 25.7 |
| 当月最高温 (°C) Maximum monthly temperature | 25.6 | 2.84 | 16.8 | 30.6 |
| 年降水量 (mm) Annual precipitation | 753.2 | 38.2 | 669.0 | 837.0 |
| NDVI 指数 Normalized difference vegetative index | 145.3 | 43.1 | 65.0 | 235.0 |
| 平均风速 (m/s) Average wind velocity | 1.6 | 0.2 | 1.2 | 2.1 |

续表 1 Continued table 1

| 环境变量 Environmental variables | 平均值 Mean | 标准差 SD | 最小值 Min | 最大值 Max |
|-----------------------------------------|----------|--------|---------|---------|
| 水蒸气压 (kpa) Water vapor pressure | 1.8 | 0.2 | 0.9 | 2.0 |
| 土壤酸碱度 Soil pH | 5.4 | 0.8 | 4.8 | 8.2 |
| 土壤有机碳含量 (%) Soil organic carbon content | 1.5 | 0.4 | 0.3 | 3.1 |

1.3 功能性状选取

功能性状选取及划分均参考已发表的相关文献 (Ciplak *et al.*, 2008; PicaudandPetit, 2008; 毛本勇等, 2011; Gámez-Virúés *et al.*, 2015; 乔茗瑛, 2020)。选择成熟个体体长 (Body size)、翅长 (Wing length)、体色 (Skin color)、生活型 (Life form)、食性 (Feeding habits) 共 5 个对环境变化响应敏感连续型和离散型生物性状, 依据毛本勇的蝗虫划分标准将体型划分为小体型 (雄性 < 20 mm, 雌性 < 25 mm)、中等体型 (20 mm ≤ 雄性 ≤ 25 mm, 25 mm ≤ 雌性 ≤ 35 mm)、大体型 (雄性 > 25 mm, 雌性 > 35 mm), 体色划分为暗色 (主要体色由褐色、土灰色构成)、绿色 (主要体色由绿色构成) 体色鲜艳 (主要体色 > 3 种)。根据 Colzani 等 (2013) 提出的方法, 使用离散数字 1、2、3... 对每个性状类别进行赋分。本研究共划分为共 16 个性状类别, 用于功能多样性指数计算, 所用功能性状及其赋值主要从已发表文献资料获取 (Dzioc *et al.*, 2011; Birkhofer *et al.*, 2015)。

1.4 数据分析

1.4.1 功能多样性指数计算

功能多样性指数表征群落物种功能性状组成和结构特征 (Villéger *et al.*, 2008), 本文选用功能丰富度 (Functional richness, FRic)、功能均匀度 (Functional evenness, FEve)、功能离散度 (Functional divergence, FDiv)、群落加权平均性状多样性指数 (Community-level weighted means, CWM) 4 个指数体现蝗虫的功能和性状多样性。功能丰富度指数指的是物种在群落内所占据功能空间的大小, 能够反映群落的稳定性; 功能均匀度描述了在性状空间层面上物种性状的分布规律, 其值越高意味着物种性状的分布越均匀; 功能离散度测量的群落中物种特征值的空间异质性, 能够反映群落功能性状的多度分布在性状空间中的离散程度; CWM 指数基于性状组成和分类单元的相对多度定量测定群落组成性状多样性, 对于评

表 2 蝗总科昆虫功能性状及其类别

Table 2 Functional traits and categories of acridoid communities

| 性状 Trait | 类别 Category | 赋分 Score | 代码 Code |
|----------------------|-------------------|----------|----------|
| 个体大小 Body size | 小体型 Small size | 1 | size1 |
| | 中等体型 Median size | 2 | size2 |
| | 大体型 Large size | 3 | size3 |
| 翅长 Wing length | 鳞翅 Scaly wing | 1 | wing1 |
| | 短翅 Brachypterous | 2 | wing2 |
| | 长翅 Macropterous | 3 | wing3 |
| 体色 Skin color | 暗色 Crineous | 1 | color1 |
| | 绿色 Green | 2 | color2 |
| | 体色鲜艳 Multicolor | 3 | color3 |
| 生活习性 Life form | 地栖类 Terricolous | 1 | habit1 |
| | 树栖类 Arboricolous | 2 | habit2 |
| | 草栖类 Herbicolous | 3 | habit3 |
| | 禾栖类 Graminicolous | 4 | habit4 |
| 食性 Feeding habits | 兼食型 Mixed-feeding | 1 | feeding1 |
| | 禾草型 Graminivorous | 2 | feeding2 |
| | 阔叶型 Forbivorous | 3 | feeding3 |

价群落的动态及生态系统特性具有重要意义 (Mason *et al.*, 2005; Lavorel *et al.*, 2008)。功能多样性指数采用 R 4.2.3 软件, 通过 FD 功能包的 dbFD 函数计算功能多样性指数 (Laliberté and Legendre, 2010)。具体计算公式如下:

功能丰富度指数 (FR_{ic}):

$$FR_{ic} = \frac{SF_{ic}}{R_c}$$

功能均匀度指数 (FE_{ve}):

$$FE_{ve} = \frac{\sum_{i=1}^{S-1} \min(PEW_i \frac{1}{S-1}) - \frac{1}{S-1}}{1 - \frac{1}{S-1}}$$

功能离散度指数 (FD_{iv}):

$$FDiv = \sum_{i=1}^s \sum_{j=i}^s d_{ij} p_i p_j$$

群落加权平均性状多样性指数 (CWM):

$$CWM = \sum_{i=1}^s p_i \times trait_i$$

式中: SF_{ic} 群落内物种所占据的生态位空间, R_c 为性状 c 的绝对范围, S 为群落物种数, PEW_i 为物种 i 的加权均匀度, P_i 、 P_j 指物种 i 、 j 的相对多度; d_{ij} 指物种 i 和物种 j 性状之间的差异, P_i 为分类单元 i 的相对多度, $trait_i$ 为分类单元 i 的性状类别特征值 (性状存在即为 1, 不存在则为 0), S 是调查样点内分类单元的数量。

1.4.2 功能多样性海拔格局

使用线性模型和二次回归模型拟合功能多样性指数和不同性状的 CWM 指数对不同点位海拔的响应, 选择赤池系数 (Akaike information criterion, AIC) 和贝叶斯信息准则 (Bayesian information criterions, BIC) 较小且 ANOVA 检验显著 ($P < 0.05$) 的模型为最佳拟合模型, 使用 “ggplot2” 程序包图像化。

1.4.3 不同性状对环境因子的响应

使用随机森林 (Random forest, RF) 模型解析环境因子变化对蝗虫各个性状的影响。RF 模型基于 bootstrap 抽样法抽取响应变量 (即性状 CWM 值) 和解释变量 (即环境因子) 的训练样本。采用向后筛选法剔除重要性较低的解释变量, 利用最终的解释变量组合构建最终模型。同时利用袋外样本 (Out of bag) 计算总解释量, 评估 RF 模型的精确度及最终解释变量的重要性。RF 模型具有很高的模型准确率, 对异常值和噪声具有高容忍度, 不易出现过拟合, 同时响应变量的共线性不会对计算结果产生影响 (Breiman, 2001; Cutler *et al.*, 2007)。利用 R 软件的 randomForest 包构建 RF 模型, 每个 RF 模型分别构建 1 000 棵回归树。

2 结果与分析

2.1 蝗虫物种组成

经鉴定和统计, 84 个样地共采集蝗总科昆虫 1 094 头, 隶属于 6 科 34 属 49 种。其中斑翅蝗科 Oedipodidae (6 属 9 种, 446 头)、斑腿蝗科 Catantopidae (17 属 22 种, 306 头)、网翅蝗科

Arcypteridae (5 属 8 种, 236 头) 物种数和个体数整体占比最高, 剑角蝗科 Acrididae (4 属 7 种, 92 头)、瘤锥蝗科 Chrotogonidae (1 属 1 种, 7 头)、锥头蝗科 Pyrgomorphidae (1 属 2 种, 7 头) 个体数和物种数较少。具体见网络版增强出版材料附表 1。

2.2 蝗虫群落功能性状多样性海拔分布格局

所选取蝗虫性状的海拔格局中, 中等体型、短翅型相对翅长、绿色体色、兼食型食性和禾草型食性呈显著的线性或二次相关关系 (图 2)。中等体型的蝗虫性状多样性呈现显著的 “U” 型海拔格局 ($R^2 = 0.133$, $P < 0.05$), 在 1 700 m 海拔左右最低; 短翅型蝗虫在整体相对翅长中占较低比例, 其性状多样性呈线性的单调递减海拔格局 ($R^2 = 0.061$); 绿色体色蝗虫广泛分布于各个海拔段, 其性状多样性呈显著线性单调递减趋势 ($R^2 = 0.108$); 食性性状中, 兼食型蝗虫性状多样性呈呈显著的单峰型海拔趋势 ($R^2 = 0.069$), 在 1 750 m 左右达到最大值, 而禾草型蝗虫性状多样性呈现明显的 “U” 型海拔格局在 1 750 m 左右最低 ($R^2 = 0.092$)。蝗虫功能多样性指数海拔格局中, 功能丰富度、功能均匀度、功能离散度均呈现显著的递减趋势 (图 3)。

2.3 性状对环境因子的响应

蝗虫不同性状对环境因子响应程度不一致。随机森林模型显示解释蝗虫个体大小的关键环境因子是森林面积比例、草地面积比例、NDVI 指数、等温性和土壤有机含碳量, 其解释量为 0~22.8%。影响相对翅长的关键环境因子是月平均温、土壤酸碱度、年降水量、水蒸气压、NDVI 指数、草地面积比例, 解释量为 10.32%~18.59%。解释生活型的关键环境因子是平均风速、年降水量、平均日温差、水蒸气压、草地面积比例, 解释量为 5.34%~24.22%。蝗虫食性的关键环境因子是平均日温差、等温性、月最高温、水蒸气压, 解释量为 0%~12.61%, 其中中等体型、阔叶型食性和所有体色性状多样性的随机森林模型无任何解释量 (表 3)。

3 结论与讨论

每个物种都具有独特的形态、生理和行为特征 (De Queiroz, 2007)。这些性状影响着个体的环境适应能力 (McGill *et al.*, 2006; Violle *et al.*,

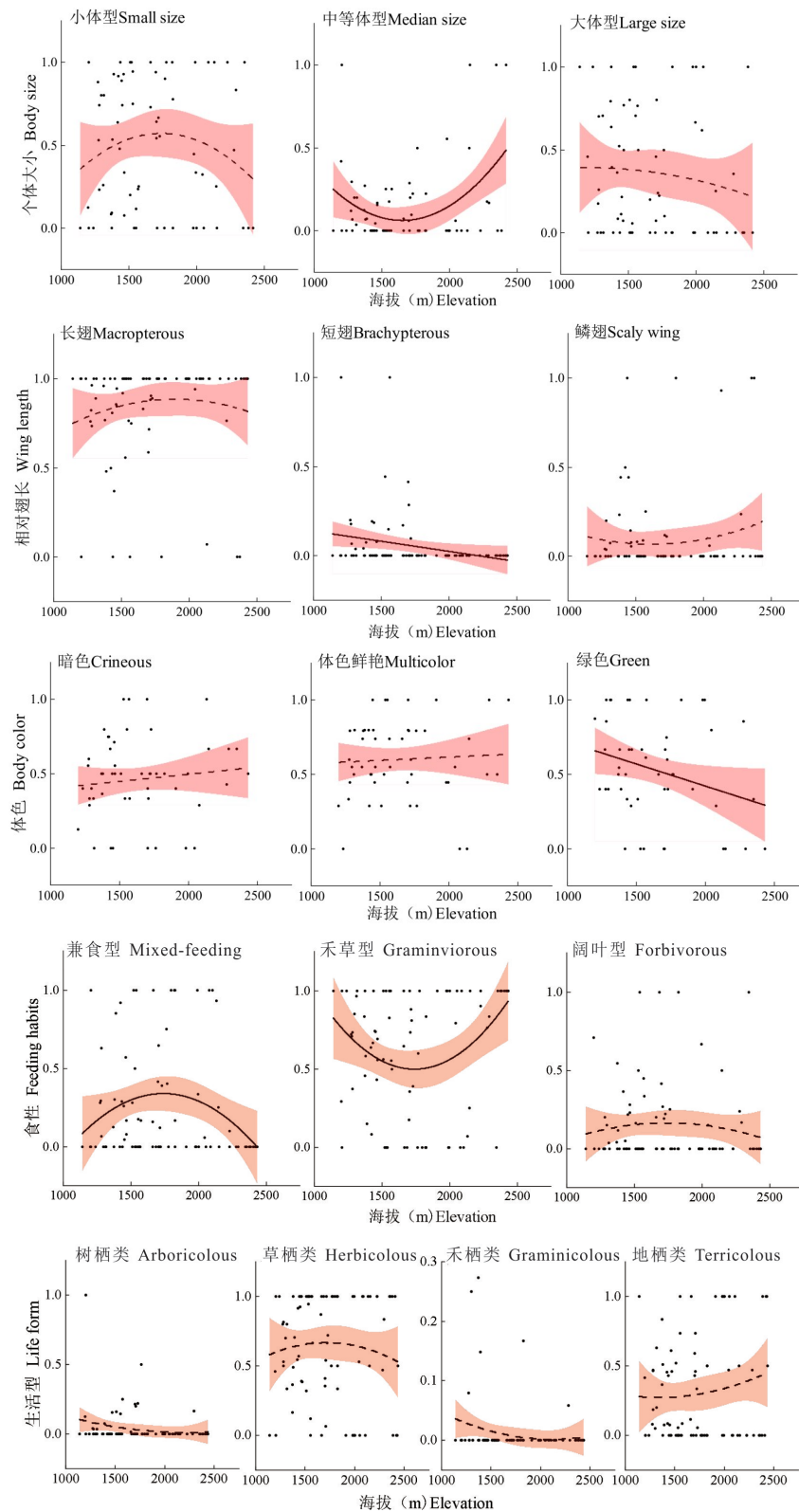


图2 蝗总科昆虫性状多样性海拔格局

Fig. 2. Altitudinal patterns of insect functional trait diversity of acridoid communities

注：黑色实线表示群落加权平均性状多样性指数（*CWM*）海拔分布格局的线性或二次相关关系显著（ $P < 0.05$ ），黑色虚线表示不显著（ $P > 0.05$ ）。红色区域为 95% 置信区间。Note: The solid black line indicated significant linear or quadratic correlation ($P < 0.05$) for the altitudinal pattern of the community-weighted mean (*CWM*) trait value, while the dashed black line indicated non-significant correlation ($P > 0.05$). The red shaded areas represented 95% confidence intervals.

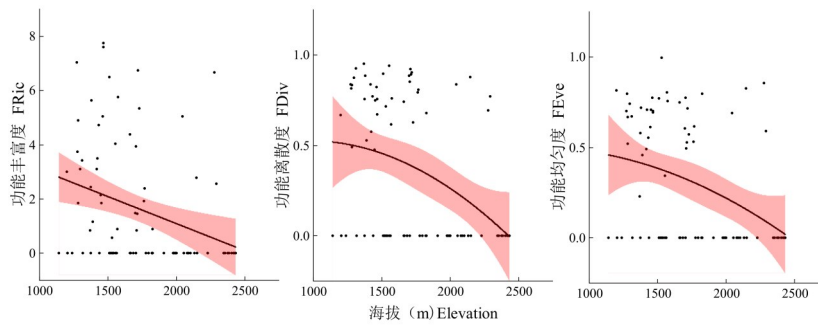


图3 蝗总科昆虫功能多样性指数海拔格局

Fig. 3 Altitude patterns of the functional diversity index of acridoid communities

注：黑色实线表示功能多样性指数海拔分布格局的线性或二次相关关系显著 ($P < 0.05$)，黑色虚线表示不显著 ($P > 0.05$)。红色区域为 95% 置信区间。Note: The solid black line indicated significant linear or quadratic correlation ($P < 0.05$) for the altitudinal pattern of the community-weighted mean (CWM) trait value, while the dashed black line indicated non-significant correlation ($P > 0.05$). The red shaded areas represented 95% confidence intervals.

表3 蝗总科昆虫群落加权平均性状多样性指数 (CWM) 对环境因子响应的随机森林模型

Table 3 Random forest model of the responses of community-weighted mean (CWM) trait values to environmental factors in acridoid community

| 性状 Trait | 性状类别T rait modality | 解释量RF (%) Variation | 解释变量 Explanatory variables |
|----------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 个体大小 Body size | 小 Small | 2.85 | 森林面积比例+草地面积比例+NDVI指数+等温性 Forest area + Grassland area + NDVI + Isothermality |
| | 中等 Medium | 0 | NA |
| | 大 Large | 22.80 | 土壤有机含碳量 Soil organic carbon content |
| 相对翅长 Wing length | 鳞翅 Aptera | 10.32 | 月平均温+土壤酸碱度 Mean monthly temperature + Soil pH |
| | 短翅 Brachypterous | 14.76 | 年降水量+水蒸气压+NDVI指数+草地面积比例 Annual precipitation + Water vapor pressure + NDVI + Grassland area |
| | 长翅 Mecopterous | 18.59 | 草地面积比例+NDVI指数 Grassland area + NDVI |
| 体色 Skin color | 暗色 Crineous | 0 | NA |
| | 绿色 Green | 0 | NA |
| | 体色鲜艳 Multicolor | 0 | NA |
| 生活型 Life form | 地栖类 Terricolous | 5.34 | 平均风速+年降水 Average wind velocity + Annual precipitation |
| | 树栖类 Arboricolous | 15.19 | 平均日温差+水蒸气压+草地面积比例 Mean diurnal temperature range + Water vapor pressure + Grassland area |
| | 草栖类 Herbicolous | 9.792 | 年均降水 Annual precipitation |
| | 禾栖类 Graminicolous | 24.22 | 平均日温差 Mean diurnal temperature range |
| 食性 Feeding habits | 兼食型 Mixed-feeding | 12.61 | 等温性+月最高温 Isothermality + Maximum monthly temperature |
| | 禾草型 Graminivorous | 4.32 | 月最高温+水蒸气压 Maximum monthly temperature + Water vapor pressure |
| | 阔叶型 Forbivorous | 0 | NA |

注：NA 表示无有效解释变量。Note: NA meant none applicable explanatory variables.

2007; Webb *et al.*, 2010; Nock *et al.*, 2016), 是物种与生物和非生物环境因子之间相互作用的基础。本研究通过探讨蝗虫功能性状多样性响应气候、土壤、植被生产力和土地利用变化的垂直空间分布格局, 有助于深入地更清晰地理解群落构建的生态学过程及其形成机制, 认识生物群落功能性状组成和分布在环境变化下如何响应。研究结果表明, 不同性状多样性的海拔分布格局存在差异, 而且对不同环境因子的响应程度也不一致。整体上草地面积占比、NDVI植被归一化指数、水蒸气压是解释较多性状的关键环境因子。随海拔梯度的变化, 气候和土地利用因子的综合作用, 可能是塑造蝗虫性状多样性海拔分布格局差异的最重要因素。此外, 土壤因子、植被生产力、平均风速分别在体型、相对翅长、生活型等性状的海拔分布上具有显著的影响。

体型是影响动物环境适应性的最重要特征 (LaBarbera, 1989), 它影响生理过程的速率和非生物环境的交互效率 (Gaston and Lawton, 1990)。当前在昆虫研究领域, 个体大小沿纬度和海拔梯度的普遍性仍然存在较大分歧, 其潜在机制仍然知之甚少 (Chown and Gaston, 2010; Watt *et al.*, 2010; Shelomi, 2012; Zeuss *et al.*, 2017)。本研究中, 蝗虫的中等个体大小在海拔上呈现显著“U”型分布, 在海拔1700 m左右的中海拔地区取得最小值。可能的原因是随海拔高度的升高, 地理环境上从干热河谷区过度到坝区, 温度降雨等气候因素发生了显著变化。同时, 随海拔梯度的升高草地占比显著下降, 蝗虫食物资源获取减少生存环境逐渐恶劣, 影响了蝗虫的生态适应性 (如繁殖力、体温调节能力和抗旱性)。而在昆虫类群中大体型物种通常具有更强的环境适应能力 (Whitman, 2008; Schellenberger *et al.*, 2017), 大体型物种的能量利用效率、饥饿抵抗力和世代延长时间都比小体型物种更有利生存 (Gibb *et al.*, 2017)。短翅型蝗虫在海拔上呈显著线性递减趋势, 而高海拔蝗虫群落的翅长性状几乎被长翅型或鳞翅型性状占据。这可能表明随海拔梯度的上升蝗虫的短翅型性状不利于适应高海拔环境, 因而数量呈减少趋势。推测高海拔蝗虫翅长的增加和减少现象, 可能是应对资源获取风险的不同应对策略。因为伴随海拔的攀升蝗虫相对翅长的减少或失去是长期适应草栖生活环境的结果

(Hodkinson, 2005; 毛本勇等, 2011), 高海拔地区的低温、低空气密度、风速大, 会导致低代谢率、增加热能进而损失影响飞行性能 (Dillon *et al.*, 2006; Peters *et al.*, 2016)。长翅物种则是特化飞行能力, 以适应高海拔的低资源环境有利于追踪资源和定殖新的栖息地 (Denno *et al.*, 1991; Picaud and Petit, 2008)。蝗虫体色绿色型性状多样性呈显著线性递减海拔分布格局。在高原地区蝗虫体色研究中, 蝗虫体色多匹配环境颜色起保护色作用 (印象初, 1984), 随海拔升高蝗虫的体色由鲜艳类型分化成暗色和暗褐色的类型, 以适应高海拔地区的干旱、风大、气压低、紫外线强等环境特点 (欧晓红等, 2007)。同时, 由于海拔的温度梯度, 有效的体温调节会受到角质层颜色的影响 (Bishop *et al.*, 2016), 而蝗虫角质层的绿色体色并不利于吸收热量 (Zeuss *et al.*, 2014)。食性的特化是蝗虫对不同食物的长期适应性的体现, 在食性上表现为具有相同的选择性 (刘海霞, 2015; 王鹏, 2019)。本研究中兼食型和禾草型蝗虫性状在海拔格局上分别呈现显著单峰型和“U”型趋势, 且都在海拔1750 m左右有最值, 这种趋势可能表示拥有这两种性状的蝗虫在海拔梯度上可能分化出了相反的适应力。植被的分布可能是主要影响因素, 因为食物是影响昆虫最为重要的生物因素, 不仅为昆虫提供营养影响着昆虫的生长发育和繁殖, 还限制着种群的数量和群落分布, 是昆虫赖以生存的基础 (Goggin, 2007; Labandeira, 2013)。研究区内土地利用海拔分布存在差异, 中海拔地区气候适宜人为活动频繁, 各种生境分布较均衡是植被类型最丰富的地区。而低海拔地区和高海拔地区的气候或干热或湿冷, 植被覆盖也分别以草地、乔木林地占主体, 蝗虫的可获取食物资源类型数量相对较少, 因此蝗虫的不同食性在海拔梯度上呈现相反分布格局。

与世界其他地方蝗虫性状海拔研究的结果相比, 本研究在金沙江干热河谷地区蝗虫性状对海拔梯度下环境因子的响应存在异同。Tiede等 (2018) 在坦桑尼亚乞力马扎罗山海拔790~4410 m的蝗虫研究中发现, 高低海拔地区的气候和植物生产力水平差异显著, 低温 (高海拔) 条件相对于高温 (低海拔) 条件下, 蝗虫性状具有体型更大、长翅物种更多的特点。Bishop等 (2016) 探讨了昆虫体型和体色组合在不同环境温度上的变化,

发现深色大体型物种在低温环境中占据主导地位。

本研究聚焦海拔梯度下气候、土壤、植被生产力、土地利用等环境因子对蝗虫个体大小、相对翅长、体色、生活型、食性5个性状的影响,探讨蝗虫在长期进化历程下表现的生态策略。同时为构建我国蝗虫性状数据库提供有效资料,为干热河谷地区生物多样性保护和生态恢复提供科学依据。

参考文献 (References)

- Belovsky GE, Slade JB. Insect herbivory accelerates nutrient cycling and increases plant production [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, 97(26): 14412-14417.
- Birkhofer K, Smith HG, Weisser WW, et al. Land-use effects on the functional distinctness of arthropod communities [J]. *Ecography*, 2015, 38 (9): 889-900.
- Bishop TR, Robertson MP, Gibb H, et al. Ant assemblages have darker and larger members in cold environments [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2016, 25 (12): 1489-1499.
- Bonada N, Dolédec S, Statzner B. Taxonomic and biological trait differences of stream macroinvertebrate communities between mediterranean and temperate regions: implications for future climatic scenarios [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13 (8): 1658-1671.
- Branson DH. Influence of a large late summer precipitation event on food limitation and grasshopper population dynamics in a northern Great Plains grassland [J]. *Environmental Entomology*, 2014, 37 (3): 686-695.
- Branson DH. Life-history responses of *Ageneotettix deorum* (Scudder) (Orthoptera: Acrididae) to host plant availability and population density [J]. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 2006, 79 (2): 146-155.
- Breiman L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001, 45: 5-32.
- Chown SL, Gaston KJ. Body size variation in insects: a macroecological perspective [J]. *Biological Reviews*, 2010, 85 (1): 139-169.
- Ciplak B, Sirin D, Taylan MS, et al. Altitudinal size clines, species richness and population density: case studies in Orthoptera [J]. *Journal of Orthoptera Research*, 2008, 17 (2): 157-163.
- Cutler DR, Edwards JTC, Beard KH, et al. Random forests for classification in ecology [J]. *Ecology*, 2007, 88 (11): 2783-2792.
- De Queiroz K. Species concepts and species delimitation [J]. *Systematic Biology*, 2007, 56 (6): 879-886.
- Dengler J, Janišová M, Török P, et al. Biodiversity of Palaearctic grasslands: a synthesis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 182: 1-14.
- Denno RF, Roderick GK, Olmstead KL, et al. Density-related migration in planthoppers (Homoptera: Delphacidae): the role of habitat persistence [J]. *The American Naturalist*, 1991, 138 (6): 1513-1541.
- Dillon ME, Frazier MR, Dudley R. Into thin air: Physiology and evolution of alpine insects [J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2006, 46 (1): 49-61.
- Doxon ED, Davis CA, Fuhlendorf SD. Comparison of two methods for sampling invertebrates: vacuum and sweep-net sampling [J]. *Journal of Field Ornithology*, 2011, 82 (1): 60-67.
- Dziok F, Gerisch M, Siegert M, et al. Reproducing or dispersing? Using trait based habitat template models to analyse Orthoptera response to flooding and land use [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 145 (1): 85-94.
- Feurdean A, Ruprecht E, Molnár Z, et al. Biodiversity-rich European grasslands: ancient, forgotten ecosystems [J]. *Biological Conservation*, 2018, 228: 224-232.
- Gámez-Virués S, Perović DJ, Gossner MM, et al. Landscape simplification filters species traits and drives biotic homogenization [J]. *Nature Communications*, 2015, 6 (1): 8568.
- Gaston KJ, Lawton JH. Effects of scale and habitat on the relationship between regional distribution and local abundance [J]. *Oikos*, 1990, 58 (3): 329-335.
- Gibb H, Sanders NJ, Dunn RR, et al. Habitat disturbance selects against both small and large species across varying climates [J]. *Ecography*, 2018, 41 (7): 1184-1193.
- Gladstone-Gallagher RV, Pilditch CA, Stephenson F, et al. Linking traits across ecological scales determines functional resilience [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2019, 34 (12): 1080-1091.
- Goggin FL. Plant-aphid interactions: Molecular and ecological perspectives [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2007, 10 (4): 399-408.
- Hawlena D, Strickland MS, Bradford MA, et al. Fear of predation slows plant-litter decomposition [J]. *Science*, 2012, 336 (6087): 1434-1438.
- Hodkinson ID. Metabolic cold adaptation in arthropods: A smaller-scale perspective [J]. *Functional Ecology*, 2003, 17 (4): 562-567.
- Hodkinson ID. Terrestrial insects along elevation gradients: Species and community responses to altitude [J]. *Biological Reviews*, 2005, 80 (3): 489-513.
- Illich I, Zuna-Kratky T. Population dynamics of an alpine grasshopper (Orthoptera) community over 30 years and the effects of climate warming and grazing [J]. *Journal of Insect Conservation*, 2022, 26 (3): 435-451.
- Jin ZZ, Ou XK, Zhou Y. The general situation of natural vegetation in dry-hot river valley of Yuanmou, Yunnan Province [J]. *Journal of Plant Ecology and Geobotany*, 1987, 4: 308-317. [金振洲, 欧晓昆, 周跃. 云南元谋干热河谷植被概况 [J]. 植物生态学与地植物学学报, 1987, 4: 308-317]
- Labandeira CC. A paleobiologic perspective on plant-insect interactions [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2013, 16 (4): 414-421.
- LaBarbera M. Analyzing body size as a factor in ecology and evolution [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1989, 20 (1): 97-117.

- Laliberté E, Legendre P. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits [J]. *Ecology*, 2010, 91 (1): 299–305.
- Lavorel S, Grigulis K, McIntyre S, *et al.* Assessing functional diversity in the field – methodology matters! [J]. *Functional Ecology*, 2008, 22 (1): 134–147.
- Laws AN, Joern A. Predator–prey interactions in a grassland food chain vary with temperature and food quality [J]. *Oikos*, 2013, 122 (7): 977–986.
- Liu HX. Functional Analysis of Hexamerin Gene Family in *Locusta migratoria manilensis* [D]. Baoding: Hebei University Master Thesis, 2015. [刘海霞. 东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* 昆虫储存蛋白基因家族的功能分析 [D]. 保定: 河北大学硕士论文, 2015]
- Liu Y, Shen ZH. The altitudinal pattern of insect species richness in the Three Gorge Reservoir Region of the Yangtze River: effects of land cover, climate and sampling effort [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (19): 5663–5675. [刘晔, 沈泽昊. 长江三峡库区昆虫丰富度的海拔梯度格局——气候、土地覆盖及采样效应的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31 (19): 5663–5675]
- Löffler F, Poniatowski D, Fartmann T. Orthoptera community shifts in response to land–use and climate change—Lessons from a long-term study across different grassland habitats [J]. *Biological Conservation*, 2019, 236: 315–323.
- Lomolino MV, Riddle B, Whittaker R. Biogeography: Biological Diversity Across Space and Time [M]. 2017.
- Luo J. Analysis of forest landscape pattern in Yongren County, Yunnan Province [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology Master Thesis, 2007. [罗洁. 云南省永仁县森林景观格局分析 [D]. 昆明: 昆明理工大学硕士论文, 2007]
- Mao BY, Ren GD, Ou XH. Fauna, Distribution Pattern and Adaptability on Acridoidea from Yunnan [C]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011: 217–287. [毛本勇, 任国栋, 欧晓红. 云南蝗虫区系, 分布格局及适应特性 [C]. 北京: 中国林业出版社, 2011: 217–287]
- Mason NW, Mouillot D, Lee WG, *et al.* Functional richness, functional evenness and functional divergence: The primary components of functional diversity [J]. *Oikos*, 2005, 111 (1): 112–118.
- McCain CM, Colwell RK. Assessing the threat to montane biodiversity from discordant shifts in temperature and precipitation in a changing climate [J]. *Ecology Letters*, 2011, 14 (12): 1236–1245.
- McGill BJ, Enquist BJ, Weiher E, *et al.* Rebuilding community ecology from functional traits [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21 (4): 178–185.
- Nock CA, Vogt RJ, Beisner BE. Functional traits [J]. *eLS*, 2016: 1–8.
- Nogués-Bravo D, Araújo MB, Romdal T, *et al.* Scale effects and human impact on the elevational species richness gradients [J]. *Nature*, 2008, 453 (7192): 216–219.
- Olalla-Tárraga MÁ. “Nullius in Bergmann” or the pluralistic approach to ecogeographical rules: A reply to Watt *et al.* (2010) [J]. *Oikos*, 2011, 120 (10): 1441–1444.
- Ou XH, Liu Q, Zheng ZM. Two new species of the genus *Caryanda* (Orthoptera, Catantopridae) from Yuannan Province China [J]. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 2007, 4: 758–762. [欧晓红, 柳青, 郑哲民. 卵翅蝗属云南省二新种记述 (直翅目, 斑腿蝗科) [J]. 动物分类学报, 2007, 4: 758–762]
- Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. *Nature*, 2003, 421 (6918): 37–42.
- Perrigo A, Hoorn C, Antonelli A. Why mountains matter for biodiversity [J]. *Journal of Biogeography*, 2020, 47 (2): 315–325.
- Peters MK, Peisker J, Steffan-Dewenter I, *et al.* Morphological traits are linked to the cold performance and distribution of bees along elevational gradients [J]. *Journal of Biogeography*, 2016, 43 (10): 2040–2049.
- Picaud F, Petit DP. Body size, sexual dimorphism and ecological succession in grasshoppers [J]. *Journal of Orthoptera Research*, 2008, 17 (2): 177–181.
- Prather C, Strickland MS, Laws A, *et al.* Herbivore species identity and composition affect soil enzymatic activity through altered plant composition in a coastal tallgrass prairie [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 112: 277–280.
- Qiao YM. The Study on the Mandible Structure and Feeding Habits of Dominant Grasshopper in Xinjiang Grassland [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University Master Thesis, 2020. [乔茗瑛. 新疆草原优势蝗类的上颚结构和食性的研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学硕士论文, 2020]
- Rahbek C. The role of spatial scale and the perception of large-scale species–richness patterns [J]. *Ecology Letters*, 2005, 8 (2): 224–239.
- Röder J, Detsch F, Otte I, *et al.* Heterogeneous patterns of abundance of epigeic arthropod taxa along a major elevation gradient [J]. *Biotropica*, 2017, 49 (2): 217–228.
- Schellenberger Costa D, Classen A, Feger S, *et al.* Relationships between abiotic environment, plant functional traits, and animal body size at Mount Kilimanjaro, Tanzania [J]. *PLoS ONE*, 2017, 12 (3): e0174157.
- Sharma K, Acharya BK, Sharma G, *et al.* Land use effect on butterfly alpha and beta diversity in the Eastern Himalaya, India [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105605.
- Shelomi M. Where are we now? Bergmann’s rule sensu lato in insects [J]. *The American Naturalist*, 2012, 180 (4): 511–519.
- Statzner B, Hildrew AG, Resh VH. Species traits and environmental constraints: Entomological research and the history of ecological theory [J]. *Annual Review of Entomology*, 2001, 46 (1): 291–316.
- Strickland MS, Hawlena D, Reese A, *et al.* Trophic cascade alters ecosystem carbon exchange [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110 (27): 11035–11038.
- Sundqvist MK, Sanders NJ, Wardle DA. Community and ecosystem responses to elevational gradients: processes, mechanisms, and insights for global change [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2013, 44 (1): 261–280.

- Supriya K, Moreau CS, Sam K, *et al.* Analysis of tropical and temperate elevational gradients in arthropod abundance [J]. *Frontiers of Biogeography*, 2019, 11 (2): e43104.
- Thomas J, Segar ST, Cherrill AJ. Species richness of Orthoptera declines with elevation while elevational range of individual species peaks at mid elevation [J]. *Ecology and Evolution*, 2024, 14 (2): e10985.
- Tiede Y, Hemp C, Schmidt A, *et al.* Beyond body size: consistent decrease of traits within orthopteran assemblages with elevation [J]. *Ecology*, 2018, 99 (9): 2090–2102.
- Villéger S, Mason NWH, Moullot D. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology [J]. *Ecology*, 2008, 89 (8): 2290–2301.
- Violle C, Navas ML, Vile D, *et al.* Let the concept of trait be functional! [J]. *Oikos*, 2007, 116 (5): 882–892.
- Wallis CIB, Brehm G, Donoso DA, *et al.* Remote sensing improves prediction of tropical montane species diversity but performance differs among taxa [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 83: 538–549.
- Wang P. Behavioral Response of Locusts Driven by Plant Volatile Sensing at Different Range [D]. China Agricultural University, 2019. [王鹏. 飞蝗感受不同范围的植物挥发物的行为反应 [D]. 中国农业大学, 2019]
- Webb CO, Slik JWF, Triono T. Biodiversity inventory and informatics in Southeast Asia [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2010, 19: 955–972.
- Whitman DW. The significance of body size in the Orthoptera: a review [J]. *Journal of Orthoptera Research*, 2008, 17 (2): 117–134.
- Xie ZJ. Community assembly of Isotomidae (Collembola) along an elevational gradient in the Changbai Mountains [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2023, 4: 134. [谢致敬. 长白山垂直自然带等节跳生物多样性格局及其群落构建机制 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2023, 4: 134]
- Xu YJ, Yang SW, Zhang JM, *et al.* Topographic effect of county-level land-use landscape pattern in the dry-hot valley of Jinsha River, Yunnan Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42 (8): 1982–1992. [许英杰, 杨绍微, 张峻铭, 等. 云南金沙江干热河谷县域土地利用景观格局的地形效应 [J]. 生态学杂志, 2023, 42 (8): 1982–1992]
- Yin XC. Four new genera and seven new species of grasshoppers from Hengduanshan range of China [J]. *Zoological Research*, 1983, 1: 35–46, 111. [印象初. 横断山脉地区的蝗虫四新属七新种 [J]. 动物学研究, 1983, 1: 35–46, 111]
- Yu JR, Si HM, Wu XT, *et al.* Characteristics of plant communities in Yuanmou Dry-hot Valley under different elevation gradients [J]. *Journal of Ecological Environment*, 2018, 27 (11): 2017–2022. [余娇娥, 司宏敏, 吴雪涛, 等. 海拔梯度下元谋干热河谷植物群落特征 [J]. 生态环境学报, 2018, 27 (11): 2017–2022]
- Zeuss D, Brandl R, Brändle M, *et al.* Global warming favours light-coloured insects in Europe [J]. *Nature Communications*, 2014, 5 (1): 3874.
- Zeuss D, Brunzel S, Brandl R. Environmental drivers of voltinism and body size in insect assemblages across Europe [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 26 (2): 154–165.

附录：附表1 不同海拔段蝗虫组成

详细数据见网络版增强出版材料 (<http://hjkcxh.alljournals.net/>)

附表 1 不同海拔段蝗虫组成

Appendix table 1 Composition of locusts at various altitudes

| 属名 Genus | 种名 Specise | 种拉丁名 Latin | 物种数 (个体数) Species (Individual) | | | | 总计 Total |
|----------|------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|----------|
| | | | 海拔段I (1200~1500 m) | 海拔段II (1200~1500 m) | 海拔段III (1200~1500 m) | 海拔段IV (1200~1500 m) | |
| 车蝗属 | 云斑车蝗 | <i>Gastrimargus marmoratus</i> | 75 | 12 | 102 | 2 | 191 |
| | 黄股车蝗 | <i>Gastrimargus parvulus</i> | 9 | - | 2 | 2 | 13 |
| | 黑股车蝗 | <i>Gastrimargus nubilus</i> | 21 | - | 4 | 6 | 31 |
| 夏蝗属 | 二色夏蝗 | <i>Gonista bicolor</i> | - | - | 4 | - | 4 |
| | 云南夏蝗 | <i>Gonista yunnan</i> | - | - | 11 | - | 11 |
| | 小夏蝗 | <i>Paragonista infumata</i> | - | 4 | - | - | 4 |
| 拟凹背蝗属 | 相岭拟凹背蝗 | <i>Pseudoptigonotus xianglingensis</i> | 21 | 4 | 3 | 14 | 42 |
| | 突缘拟凹背蝗 | <i>Pseudoptigonotus prominemargins</i> | - | 4 | - | - | 4 |
| | 金沙拟凹背蝗 | <i>Pseudoptigonotus jinshaensis</i> | - | 8 | - | - | 8 |
| 剑角蝗属 | 短膝剑角蝗 | <i>Acrida curtinema</i> | - | 6 | - | - | 6 |
| | 线剑角蝗 | <i>Acrida lineata</i> | 5 | 26 | 2 | - | 33 |
| 暗蝗属 | 无斑暗蝗 | <i>Dnopherula svenhedini</i> | 3 | 1 | - | - | 4 |
| | 条纹暗蝗 | <i>Dnopherula taeniatus</i> | 40 | 64 | 53 | - | 157 |
| 板胸蝗属 | 西藏板胸蝗 | <i>Spathosternum prasiniferum xizangensis</i> | 3 | - | - | - | 3 |
| | 长翅板胸蝗 | <i>Spathosternum prasiniferum</i> | 8 | 10 | 6 | 6 | 30 |

| | | | | | | | |
|-------|--------|----------------------------------|----|----|---|----|----|
| 稻蝗属 | 中华稻蝗 | <i>Oxya chinensis</i> | 3 | - | - | - | 3 |
| | 黄股稻蝗 | <i>Oxya flavefemora</i> | 11 | - | - | 1 | 12 |
| 绿纹蝗属 | 绿纹蝗 | <i>Aiolopus thalassinus</i> | 3 | - | 1 | - | 4 |
| | 芒康绿纹蝗 | <i>Aiolopus markamensis</i> | 1 | - | - | - | 1 |
| 负蝗属 | 云南负蝗 | <i>Atractomorpha yunnanensis</i> | - | - | 1 | - | 1 |
| | 短额负蝗 | <i>Atractomorpha sinensis</i> | 5 | - | 1 | - | 6 |
| 黄脊蝗属 | 小黄脊蝗 | <i>Patanga humilis</i> | - | 1 | - | - | 1 |
| | 日本黄脊蝗 | <i>Patanga japonica</i> | 3 | - | 1 | 4 | 8 |
| 牧草蝗属 | 红股牧草蝗 | <i>Omocestus enitor</i> | 17 | 3 | - | - | 20 |
| | 老君山牧草蝗 | <i>Omocestus laojunshanensis</i> | - | 18 | 8 | - | 26 |
| 佛蝗属 | 中华佛蝗 | <i>Phlaeoba sinensis</i> | 1 | 1 | 1 | - | 3 |
| 刺胸蝗属 | 塔达刺胸蝗 | <i>Cyrtacanthacris tatarica</i> | 5 | 1 | 4 | 3 | 13 |
| 卡蝗属 | 云南卡蝗 | <i>Carsula yunnana</i> | 2 | - | - | - | 2 |
| 卵翅蝗属 | 云南卵翅蝗 | <i>Caryanda yunnana</i> | - | - | 2 | - | 2 |
| 厚蝗属 | 厚蝗 | <i>Pachyacris vinosa</i> | - | 2 | - | - | 2 |
| 外斑腿蝗属 | 大斑外斑腿蝗 | <i>Xenocatantops humilis</i> | 5 | 7 | 3 | - | 15 |
| 异距蝗属 | 小异距蝗 | <i>Heteropternis micronus</i> | 6 | 9 | 7 | 21 | 43 |
| 彝蝗属 | 蓝翅彝蝗 | <i>Yiacris cyanoptera</i> | 3 | - | - | - | 3 |

| | | | | | | | |
|-------|--------|--------------------------------------|-----|-----|-----|----|-------|
| 异裸蝗属 | 篮胫异裸蝗 | <i>Conophymella cyanipes</i> | 19 | 1 | - | 13 | 33 |
| 斑腿蝗属 | 西姆拉斑腿蝗 | <i>Catantops simlae</i> | - | - | - | 2 | 2 |
| 直斑腿蝗属 | 长角直斑腿蝗 | <i>Stenocatantops splendens</i> | 14 | - | - | - | 14 |
| 金沙蝗属 | 元谋金沙蝗 | <i>Kinshaties yuanmowensis</i> | 59 | 32 | 22 | 1 | 114 |
| 竹蝗属 | 思茅竹蝗 | <i>Ceracris fasciata szemaoensis</i> | 5 | - | - | - | 5 |
| 芋蝗属 | 思茅芋蝗 | <i>Gesonula szemao</i> | - | - | 3 | - | 3 |
| 束颈蝗属 | 束颈蝗 | <i>Sphingonotus</i> | - | 10 | 8 | - | 18 |
| 棉蝗属 | 棉蝗 | <i>Chondracris rosea</i> | 26 | 29 | 11 | 1 | 67 |
| 疣蝗属 | 疣蝗 | <i>Trilophidia annulata</i> | 8 | 8 | 12 | 3 | 31 |
| 长腹蝗属 | 绿长腹蝗 | <i>Leptacris taeniata</i> | 25 | 6 | - | - | 31 |
| 梭蝗属 | 鱼形梭蝗 | <i>Tristria pisciforme</i> | 3 | - | - | 4 | 7 |
| 黄星蝗属 | 黄星蝗 | <i>Aularches miliaris scabiosus</i> | - | 4 | 3 | - | 7 |
| 斜翅蝗属 | 大斜翅蝗 | <i>Eucoptacra bingham</i> | 1 | - | - | - | 1 |
| 雏蝗属 | 雪山雏蝗 | <i>Chorthippus xueshanensis</i> | - | 17 | 3 | - | 20 |
| 黑背蝗属 | 筱翅黑背蝗 | <i>Eyprepocnemis perbrevipennis</i> | 8 | 1 | 7 | - | 16 |
| 龙川蝗属 | 绿龙川蝗 | <i>Longchuanacris viridus</i> | 16 | 3 | - | - | 19 |
| 合计 | | | 434 | 292 | 285 | 83 | 1 094 |

注：-代表无物种分布。Note: - represented without species.