

太白山北坡小型兽类物种多样性 垂直分布格局

富裕^① 卜书海^② 张锦栋^① 郭明^③ 李先敏^③ 郑雪莉^{①*}

① 西北农林科技大学林学院 杨凌 712100; ② 西北农林科技大学生命学院 杨凌 712100;

③ 太白山国家级自然保护区管理局 杨凌 712100

摘要: 物种多样性沿海拔梯度的垂直分布格局一直是生物多样性研究的热点问题, 其中最为普遍的分布模式为中峰格局。为了解太白山北坡小型兽类物种组成和物种多样性垂直分布格局, 本研究于 2020 和 2021 年两年的 6 至 9 月采用样线法、铗日法和陷阱法对太白山北坡小型兽类物种进行调查。在海拔 780 ~ 3 767.2 m 之间, 以 200 m 为梯度, 设置采集样点 15 个, 累计布置 4 150 铗次, 陷阱 105 个, 样线 8 条。共记录小型兽类 4 目 7 科 12 属 21 种 148 只, 阔叶林中的小型兽类物种多样性普遍高于针叶林, 物种多样性在中海拔地区栓皮栎 (*Quercus variabilis*) 林、锐齿槲栎 (*Q. aliena*) 林最高, 高海拔地区秦岭冷杉 (*Abies fargesii*) 林最低。小型兽类物种多样性垂直分布格局为左偏倚中峰格局, 物种多样性在 1 500 ~ 2 300 m 海拔段内出现峰值。这种分布格局和林型中小型兽类东洋界与古北界、特有种与非特有种在太白山地区交汇有关, 太白山北坡南北纵列的山脉-沟谷地貌为南北物种扩散和迁移提供了有利条件, 在沟谷内气候和地理特征相似, 形成了规律的林型垂直带谱, 这使得小型兽类物种多样性垂直分布也具有相似的特点。

关键词: 太白山; 小型兽类; 物种多样性; 垂直分布格局

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2022) 05-678-11

Species Diversity and Distribution Pattern of Small Mammals along the Elevational Gradient on Northern Slope of Taibai Mountain

FU Yu^① BU Shu-Hai^② ZHANG Jin-Dong^① GUO Ming^③
LI Xian-Min^③ ZHENG Xue-Li^{①*}

① College of forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100; ② College of Life Science, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100; ③ Management Bureau of Taibai Mountain National Nature Reserve Yangling 712100, China

Abstract: [Objectives] Determining the elevational distribution of species diversity along altitudinal gradients is of critical importance in biodiversity and conservation research, the hump-shaped pattern of

基金项目 国家公园补助资金项目 (No. ZX2020-09-40);

* 通讯作者, E-mail: zhengxueli@nwfau.edu.cn;

第一作者介绍 富裕, 男, 硕士研究生; 研究方向: 森林保护; E-mail: 970915966@qq.com。

收稿日期: 2022-02-22, 修回日期: 2022-07-13 DOI: 10.13859/j.cjz.202205004

species diversity is the most common one. To understand the species diversity distribution pattern of Taibai Mountain, and to provide basic data and references for the study of elevational biodiversity gradient patterns. **[Methods]** We surveyed the diversity of small mammals along the elevational gradient on the northern slope of Taibai Mountain from June to September in 2020 and 2021. The elevation range of the study was 780 - 3 767.2 m, with a gradient of 200 m. Fifteen sampling points were set, with a total of 4 150 rat traps, 105 traps and 8 sample sites. Four diversity indices (Shannon-Wiener, Margalef, Simpson, Pielou) were used to compare the diversity discrepancy between different elevational forest types and used to reveal the diversity distribution pattern. All species diversity index calculation, cluster analysis was completed in SPSS 21.0 and R language. **[Results]** Our study surveyed totally 148 individuals representing 21 species that were belong to 12 genera, 7 families and 4 orders. The species diversity of *Quercus variabilis* and *Q. aliena* which in the middle altitude area was the highest, and that of *Abies fargesii* in high altitude area was the lowest. The elevational distribution pattern of species diversity of small mammals in the northern slope of Taibai Mountain Nature Reserve is a left-biased mid-peak pattern. The two non-parametric estimations of species richness Chao2 and Jackknife2 indicate that increased sampling intensity is still needed in *Betula albosinensis*. **[Conclusion]** The species diversity of small mammals in broad-leaved forest was generally higher than that in coniferous forest. This distribution pattern was mainly related to the composition of Oriental fauna and Palaearctic fauna, endemic species and non-endemic species of small and medium-sized mammals in the community. The mountain range-valley landform on the northern slope of Taibai Mountain provides favorable conditions for the diffusion and migration of northern and southern species. The climate and geographical characteristics in the valley were similar, forming a typical elevational vegetation zone, which made the distribution of species diversity of small mammals had similar characteristics.

Key words: Taibai Mountain; Small mammals; Species diversity; Elevational patterns

在多种类型的生态系统中，山地生态系统占据了全球陆地面积的 27%，其海拔跨度大、生境类型多样，覆盖了全球 50% 以上的保护区，是生物多样性热点区域的典型代表，以及物种多样性空间分布格局研究的理想场所 (Blyth 2002, Rowe et al. 2015)。在山地生态系统中，小型兽类有着其他中大型动物不具备的特点，物种数量多、种群数量大、分布范围广和繁殖周期短等特点，在能量传递和物质循环的食物链中扮演着不可缺少的角色，因此小型兽类成为垂直分布格局的重要研究对象 (Dejaco et al. 2013, Santos et al. 2014)。

目前物种多样性垂直分布格局有 4 种分布模式，单调递减、低平台后随海拔升高递减、偏峰格局及中峰格局，其中，45% 为中峰模式，而小型兽类在国内外山地生态系统研究中几乎

都表现为中峰格局 (McCain 2005, Ferro et al. 2009)。这种中峰格局的形成受多种因素影响，东洋界与古北界的交汇、中域效应 (mid-domain effect, MDE)、人为干扰及小型兽类更替分布等 (McCain 2009, 吴永杰等 2012, Hu et al. 2017, Chen et al. 2019)。在以往太白山地区小型兽类研究多为集中在 2005 ~ 2007 年间的大范围的调查，在研究中发现太白山南坡为单调递减，而北坡为中峰格局 (Shuai et al. 2017)。并且太白山地区缺少具有针对性的调查研究，调查区域未涉及到三岔峡、鳌山附近的区域，劳亚食虫目物种的发现也较少 (王立志 2008, Shuai et al. 2017)。本研究旨在对太白山保护区北坡小型兽类进行调查，明确太白山保护区北坡小型兽类物种多样性组成及其在不同林型中的分布情况，分析其垂直分布格局及成因机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西太白山国家级自然保护区 (107°22'25" ~ 107°51'30" E, 33°49'30" ~ 34°05'35" N) 位于秦岭中部, 地处华北、华中和青藏高原三区生物交汇过渡地带。最低海拔 780 m, 主峰拔仙台海拔 3 767.2 m, 相对高差 2 987.2 m。保护区内具有丰富的植被类型, 完整的植被垂直带谱, 垂直地带性明显。根据植物群落的外貌、种类组成、群落结构及环境特征, 由下向上依次分布有: (1) 落叶阔叶林带, 包括栓皮栎 (*Quercus variabilis*) 林、锐齿槲栎 (*Q. aliena*) 林、蒙古栎 (*Q. mongolica*) 林; (2) 落叶小叶林带, 包括糙皮桦 (*Betula utilis*) 林和红桦 (*B. albosinensis*) 林; (3) 针叶林带, 包括巴山冷杉 (*Abies fargesii*) 林和秦岭红杉 (*Larix potaninii*) 林; (4) 高山灌丛草甸带 (唐志尧等 2004, 王任毅等 2006, 岳明 2015, 邓晨晖等 2021)。

1.2 调查方法

于 2020 和 2021 年每年的 6 ~ 9 月, 在调查区内海拔 780 ~ 3 767.2 m 之间进行, 以 200 m 为梯度设置了 16 个连续的海拔区间, 涉及 8 条样线 (单条样线长度超过 3 km, 总长度为 72 km) 和 15 个调查点。各样点海拔分别为, 蒿坪寺 1 200 m、三岔峡 1 364 m、药王谷 1 422 m、铁甲树 1 575 m、龙洞沟 1 776 m、青峰峡 2 050 m、大殿 2 300 m、营地 2 558 m、平安寺 2 750 m、鳌山告示牌 2 831 m、老君殿 2 900 m、南天门 3 100 m、小文公 3 374 m、大爷海 3 550 m 和大文公 3 559 m (图 1)。

调查主要采用样线法和铗日法, 辅以陷阱法。铗日法以油条和油饼为诱饵, 选用中号鼠铗, 设置 5 或 6 条夹线, 铗距 5 m、行距 10 m, 并确保每个样点至少 150 铗日, 共计 4 150 铗日。仅在蒿坪寺和铁甲树两个调查样点布设陷阱 (中号垃圾桶), 放置方法与铗日法相同, 每日下午布设, 翌日清晨收回, 并对工具进行消

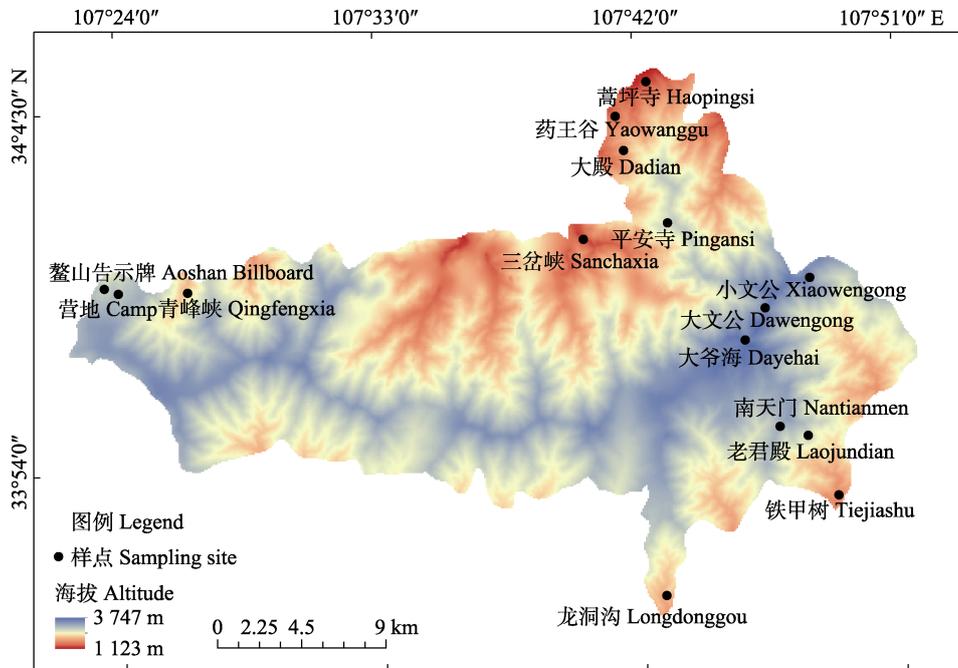


图 1 太白山北坡调查样点分布图

Fig. 1 Distribution of line sites on the northern slope of Taibai Mountain

毒除味后重新布设。对所有发现的兽类踪迹均做记录和照片拍摄, 并记录 GPS 地理坐标信息, 捕获的小型兽类进行拍照, 并测量体重、体长、耳长、后足长、耳长及耳长, 用于鉴定 (王廷正等 1992, 刘少英 2016, 蒋志刚等 2017), 使用魏辅文等 (2021) 中国兽类名录的分类系统。

1.3 数据处理及分析

本研究采用 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀性指数作为分析物种多样性的重要参考指标 (孙儒泳 2001)。采用物种累计曲线图来验证物种捕获是否完全, 并根据实际调查情况使用 Chao2 和 Jackknife2 两个参数来进行非参数多样性估计, 验证调查取样是否充分 (Heaney 2001, McCain 2004)。

Shannon-Wiener 多样性指数 H , $H = -\sum_{i=1}^S (P_i)(\log_2 P_i)$; Margalef 丰富度指数 R , $R = (S - 1) / \ln N$; Simpson 优势度指数 D , $D = 1 - \sum_{i=1}^S (P_i)^2$; Pielou 均匀性指数 E , $E = H / \ln S$, 式

中, S 为林型中物种数, P_i 为林型中 i 物种个体的比例, N 为林型中所有物种个体数。所有物种多样性指数计算、聚类分析均在 SPSS 21.0、EstimateS 9.0 和 R 语言等软件中完成。

2 结果

2.1 物种组成

本次调查共捕获个体 148 只, 总捕获率为 3.6%。其中, 鼠铗捕获 137 只个体, 占总捕获量的 92.6%; 陷阱放置 105 个, 捕获 11 只个体, 占 7.4%。另外, 通过样线法发现 6 种小型兽类。上述共记录小型兽类 4 目 7 科 21 种, 包括 12 种古北界物种和 9 种东洋界物种, 太白山自然保护区共计小型兽类 4 目 15 科 56 种。

样线法共发现 6 种小型兽类, 分别为啮齿目 (Rodentia) 的岩松鼠 (*Sciurotamias davidianus*)、珀氏长吻松鼠 (*Dremomy spernyi*)、

花鼠 (*Tamias sibiricus*) 和蹶鼠 (*Sicista concolor*), 翼手目 (Chiroptera) 的中菊头蝠 (*Rhinolophus affinis*) 和灰大耳蝠 (*Plecotus auritus*)。

采用鼠铗法捕获啮齿目 (仓鼠科、鼯鼠亚科、鼠科) 9 种, 其中, 北社鼠 (*Niviventer confucianus*) 数量最多, 占总数量的 20.4%; 兔形目 (Lagomorpha) 鼠兔科 2 种, 捕获量占总数量的 16.1%; 劳亚食虫目 (Eulipotyphla) 4 种, 捕获量占总数量的 2.2%, 分别为四川短尾鼯 (*Anourosorex squamipes*)、喜马拉雅水麝鼯 (*Chimarrogale himalayica*)、鼯鼯 (*Uropsilus soricipe*) 及小纹背鼯鼯 (*Sorex bedfordiae*)。

陷阱法捕获 11 只, 占总捕获量的 7.4%, 为啮齿目苛岚绒鼠 (*Caryomys inez*), 劳亚食虫目四川短尾鼯。

2.2 小型兽类群落特征

在鼠铗捕获的小型兽类中, 栓皮栎林的小型兽类物种多样性指数最高, 出现了 9 种小型兽类, 占有所有种类的 60%。其次是锐齿槲栎林和糙皮桦林, 分别捕获 7 种、6 种; 然后是秦岭红杉林 4 种、红桦林 5 种和蒙古栎林 3 种 (表 1)。高山草甸和冷杉林物种多样性指数最低, 并且均小于 1。同时, 物种多样性指数较高的林型, 丰富度等其他指数也相对较高 (表 2)。

在除去栓皮栎林和锐齿槲栎林中使用陷阱法捕获小型兽类后, 仅对鼠铗法捕获的数据进行物种多样性指数计算, 发现栓皮栎林和锐齿槲栎林的物种多样性指数均有不同程度下降, 但走势与总体相近 (表 2)。

2.3 小型兽类垂直分布

本次调查捕获的 15 种小型兽类表现出明显的垂直分布差异 (图 2), 小型兽类物种多样性在 1 500 ~ 2 300 m 海拔段内出现峰值, 随着海拔继续升高而降低, 显示出中峰格局特点 (图 3)。从海拔梯度上看, 针毛鼠 (*N. fulvescens*) 和川西白腹鼠 (*N. excelsior*) 垂直分布林型种类最多, 在多个海拔区间内均有分布, 涉及 6 个不同林型, 最高达到 2 800 m。其次是高山

表 1 基于鼠铗法的不同林型小型兽类组成

Table 1 Composition of small animals in different forest types based on the rat traps

	栓皮栎林 <i>Quercus variabilis</i>	锐齿槲栎林 <i>Q. aliena</i>	蒙古栎林 <i>Q. mongolica</i>	红桦林 <i>Betula albosinensis</i>	糙皮桦林 <i>B. utilis</i>	冷杉林 <i>Abies fargesii</i>	秦岭红杉 <i>Larix potaninii</i>	高山草甸 Alpine meadows
捕获数 No of capture (ind)	42	25	4	10	25	13	8	10
捕获率 Capture rate (%)	6.80	2.80	1.30	5.10	4.10	4.30	2.70	1.30
川西白腹鼠 <i>Niviventer excelsior</i> *	11 (26.2%)	5 (20.0%)	1 (25.0%)	1 (10.0%)	1 (4.0%)	2 (15.4%)	0	0
北社鼠 <i>N. confucianus</i>	10 (23.8%)	7 (28.0%)	0	2 (20.0%)	9 (36.0%)	0	0	0
针毛鼠 <i>N. fulvescens</i>	6 (14.3%)	6 (24.0%)	0	1 (10.0%)	3 (12.0%)	1 (7.6%)	0	1 (10.0%)
大足鼠 <i>Rattus nitidus</i>	1 (2.4%)	0	1 (25.0%)	0	0	0	0	0
大林姬鼠 <i>Apodemus peninsulae</i>	0	0	0	0	4 (16.0%)	0	0	0
高山姬鼠 <i>A. chevrieri</i> *	10 (24.0%)	1 (4.0%)	2 (50.0%)	0	2 (8.0%)	0	2 (25.0%)	0
中华姬鼠 <i>A. draco</i>	1 (2.4%)	4 (16.0%)	0	5 (50.0%)	6 (24.0%)	0	0	0
苛岚绒鼠 <i>Carsumys inez</i>	2 (4.8%)	0	0	0	0	0	0	2 (20.0%)
秦岭鼯鼠 <i>Myospalax rufescens</i> *	1 (2.4%)	0	0	0	0	0	0	0
四川短尾鼯 <i>Anourosorex squamipes</i>	0	1 (4.0%)	0	0	0	0	0	0
喜马拉雅水麝鼯 <i>Chimarrogale himalayica</i>	0	1 (4.0%)	0	0	0	0	1 (12.5%)	0
小纹背鼯鼠 <i>Sorex bedfordiae</i>	1 (2.4%)	0	0	0	0	0	0	0
鼯鼠 <i>Uropsilus soricipes</i> *	0	0	0	0	0	0	1 (12.5%)	0
间颅鼠兔 <i>Ochotona cansus</i> *	0	0	0	0	0	10 (77.0%)	4 (50.0%)	7 (70.0%)
藏鼠兔 <i>O. xunhuaensis</i> *	0	0	0	1 (10.0%)	0	0	0	0

“*” 代表我国特有种；括号内数字为在该物种在林型中所占比例。

“*” represents the endemic species in China, the number in brackets is the proportion of the species in the forest type.

表 2 基于鼠铗法的各林型中的生物多样性指数

Table 2 Biodiversity indices of forest types based on the rat traps

林型 Forests types	物种数 Species richness	捕获数 No of capture (ind)	多样性指数 Shannon-Wiener index	丰富度指数 Margalef index	均匀度指数 Pielou index	优势度指数 Simpson index
栓皮栎林 全部 All	9	47	1.909	2.056	0.869	0.831
<i>Quercus variabilis</i> 鼠铗捕获 Rat traps	9	42	1.834	2.140	0.834	0.786
锐齿槲栎林 全部 All	9	31	1.986	2.330	0.904	0.845
<i>Q. aliena</i> 鼠铗捕获 Rat traps	7	25	1.700	1.864	0.874	0.793
蒙古栎林 <i>Q. liaotungensis</i>	3	4	1.040	1.443	0.946	0.625
红桦林 <i>Betula albosinensis</i>	5	10	1.359	1.737	0.845	0.680
糙皮桦林 <i>B. utilis</i>	6	25	1.589	1.553	0.887	0.765
冷杉林 <i>Abies fargesii</i>	3	13	0.687	0.780	0.625	0.379
秦岭红杉 <i>Larix potaninii</i>	4	8	1.213	1.443	0.875	0.656
高山草甸 Alpine meadows	3	10	0.919	0.869	0.836	0.790

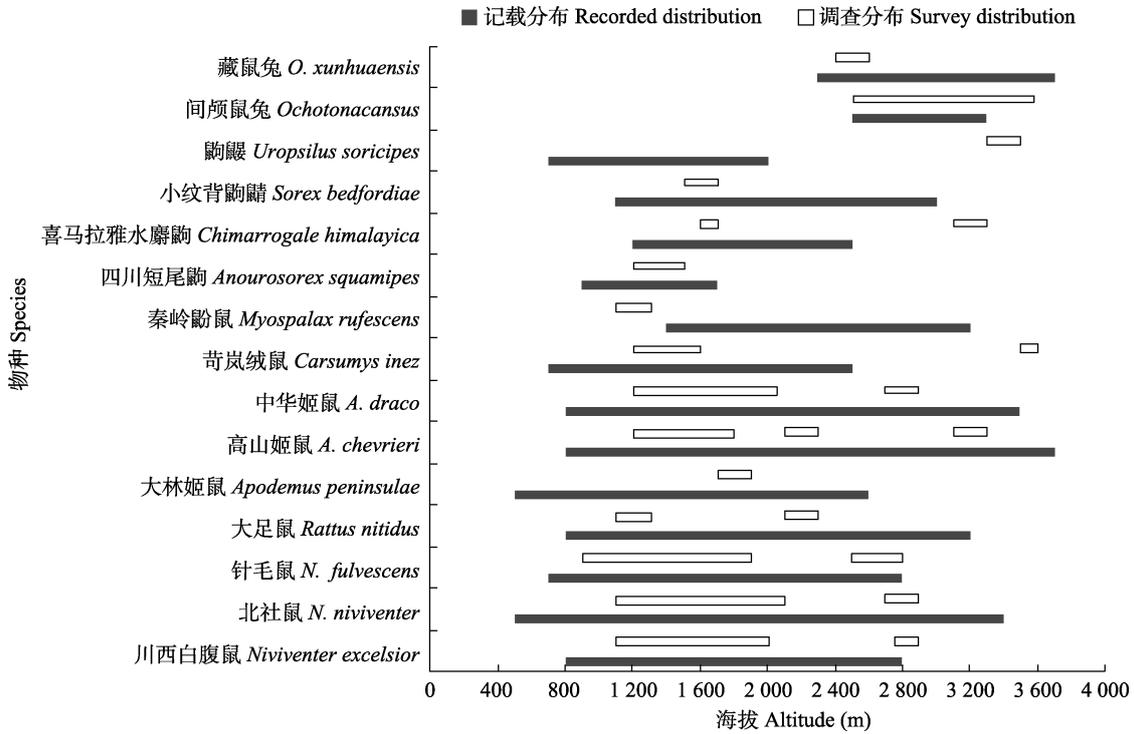


图 2 小型兽类垂直分布范围

Fig. 2 The elevational distribution range of small mammals

记载分布资料来自王任毅等 (2006)、王立志 (2008) 和 Shuai 等 (2017)。Data from Wang et al. (2006), Wang (2008) and Shuai et al. (2017).

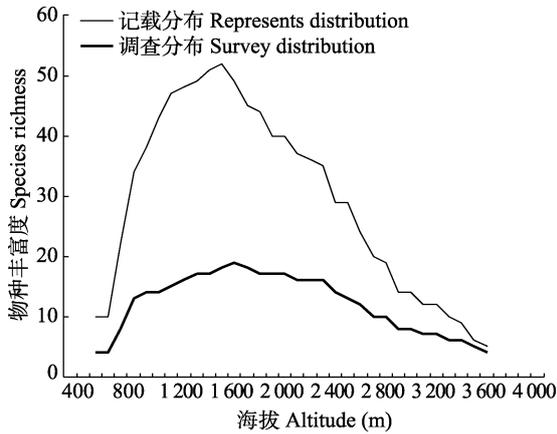


图 3 物种丰富度垂直分布格局

Fig. 3 The elevational patterns of species richness

资料来自王任毅等 (2006)、王立志 (2008) 和 Shuai 等 (2017)。Data from Wang et al. (2006), Wang (2008), Shuai et al. (2017).

姬鼠 (*Apodemus chevrieri*)、北社鼠及中华姬鼠 (*A. draco*) 在 4 或 5 个林型中有分布。鼯鼠、

四川短尾鼯鼠、喜马拉雅水麝鼠和小纹背鼯鼠出现林型种类较少, 仅有 1 或 2 种。间颅鼠兔虽然分布海拔范围较广, 但均处于高海拔植被单一地区, 所以涉及林型种类较少。可以看出, 在实际调查中有 8 种小型兽类为不连续分布, 7 种为连续分布。此外, 喜马拉雅水麝鼠、鼯鼠、苟岚绒鼠、间颅鼠兔及川西白腹鼠均在超出以往记录的海拔范围内捕获, 刷新了海拔分布的区间。

根据在 8 个林型中的取样调查结果, 统计物种按天数的累计曲线 (图 4)。有 7 种林型的物种累计曲线在第 3 天后丰富度趋于平缓, 仅红桦林在第 3 天后还有显著上升, 说明除红桦林以外的其他林型中物种取样充足, 数据较为完全。除红桦林以外其他林型中的实际调查物种丰富度与插值矫正丰富度及两种非参数估计丰富度的差异不明显 (表 3)。

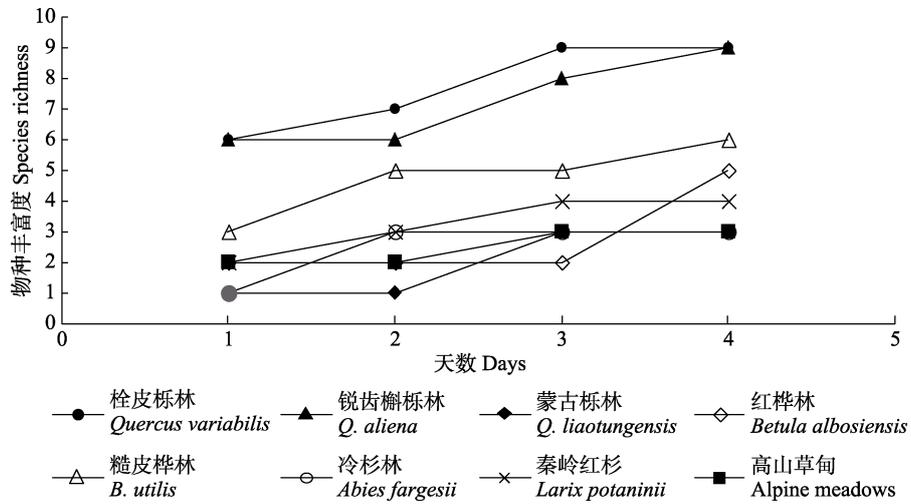


图 4 物种累计随天数变化

Fig. 4 Cumulative curve of species in each forest type

表 3 各林型实际物种丰富度、非参数估计丰富度和插值矫正物种丰富度

Table 3 Observed richness, non-parametric estimated richness Chao2 ± SD, non-parametric estimated richness Jackknife2 and interpolated richness of different forest types

林型 Forest types	实际调查丰富度 Observed richness	非参数估计丰富度 Non-parametric estimated richness Chao2 ± SD	非参数估计丰富度 Non-parametric estimated richness Jackknife2	插值矫正丰富度 Interpolated richness
栓皮栎林 <i>Quercus variabilis</i>	9	10.67 ± 2.24	13.50	10
锐齿槲栎林 <i>Q. aliena</i>	9	9.90 ± 1.46	12.67	10
蒙古栎林 <i>Q. liaotungensis</i>	3	3.25 ± 0.74	4.00	5
红桦林 <i>Betula albosinensis</i>	5	10.00 ± 5.14	6.50	10
糙皮桦林 <i>B. utilis</i>	6	6.22 ± 0.67	7.67	6
冷杉林 <i>Abies fargesii</i>	3	3.00 ± 0.75	3.00	4
秦岭红杉 <i>Larix potaninii</i>	4	4.22 ± 0.67	4.67	5
高山草甸 Alpine meadows	3	3.80 ± 1.73	4.80	4

2.4 林型划分

通过对鼠铗法捕获的小型兽类进行聚类分析发现,当欧式距离为 10 时可明显分为低物种多样性组和高物种多样性组,高物种多样性组包括锐齿槲栎林、糙皮桦林和栓皮栎林,低物种多样性组为其余 5 种林型(图 5)。

3 讨论

3.1 物种多样性组成

本次太白山北坡调查共发现小型兽类 21

种,与 2005 年太白山综考记录物种基本符合(王任毅等 2006,王立志 2008,Shuai et al. 2017)。其中,翼手目物种中菊头蝠和灰大耳蝠、劳亚食虫目小纹背鼯鼯和喜马拉雅水麝鼯,均为太白山调查首次记录。

与 Shuai 等(2007)对太白山北坡调查获得的 18 种兽类相比,本次调查中增加了秦岭鼯鼠(*Eospalax rufescens*)、大林姬鼠(*A. peninsulae*)、大足鼠(*Rattus nitidus*)、针毛鼠、四川短尾鼯、小纹背鼯鼯、喜马拉雅水麝鼯及

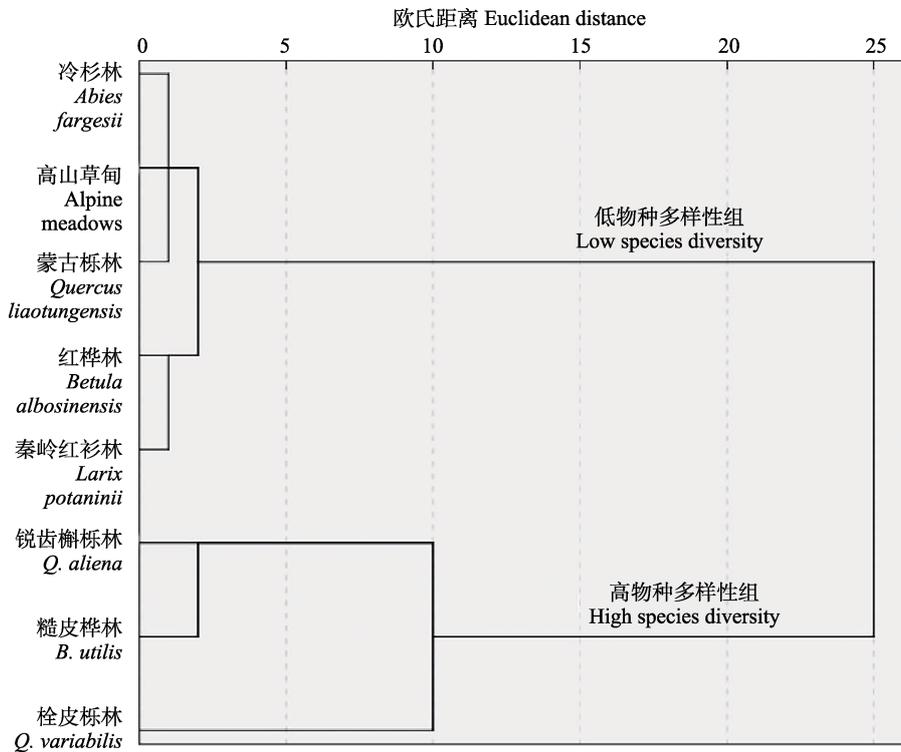


图 5 林型聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis of forest types

鼯鼠。本次调查发现小型兽类新分布的主要原因有两点，一是与调查地点的选取有关，Shuai 等（2007）的调查多集中在蒿坪寺至大爷海沿线，未对三岔峡、青峰峡、鳌山的营地和鳌山告示牌等 4 处调查相对困难的北坡西段地点进行调查，并在调查中规避了部分人为干扰较大的区域，而人为活动可以为部分鼠科物种创造适宜的生存环境；二是其使用的中号鼠夹无法捕获劳亚食虫目的四川短尾鼯、喜马拉雅水麝鼯等体型小的物种，陷阱法可以针对劳亚食虫目起到补充作用（Chen et al. 2019）。考虑到陷阱法对不同类群的小型兽类的调查效果不同，因此在不同林型的物种多样性比较中并未包含陷阱捕获的数据。

本次调查中太白山北坡小型兽类包括 12 种古北界、9 种东洋界，与以往研究中太白山古北界物种较为丰富的结论相似（王立志 2008）。在北坡中低海拔地区物种区系组成差异

不明显，当海拔达到 2 000 m 以上时，东洋界物种 10 种，多于古北界的 8 种，当海拔 3 000 m 以上时，古北界物种有 4 种，多于东洋界的 2 种，在中低海拔东洋界物种较为优势，而高海拔地区古北界物种较为优势（胡一鸣等 2018）。这种小型兽类区系组成可能与秦岭山脉是动物地理区划上东洋界与古北界的天然界限有关，太白山地区有着南北纵列的山脉-沟谷地貌，在漫长历史进程中，其南坡的东洋界兽类和北坡的古北界兽类在海拔梯度上扩散形成一个生态交汇区，在不同林型中分散分布。喜马拉雅山地区的兽类也表现出相似的过渡现象，因此东洋界与古北界过渡带假说可以解释太白山地区小型兽类物种多样性组成及垂直分布格局（张荣祖 2011，Hu et al. 2017）。

3.2 物种多样性垂直分布格局

目前在较多山地生态系统中物种多样性垂直分布格局为中峰模式（Wu et al. 2013a，Lee

et al. 2017, Musila et al. 2019)。Shuai 等 (2017) 在研究中发现, 太白山小型兽类分布格局沿南坡为单调递减模式, 北坡为中峰格局, 物种多样性随海拔上升, 在海拔 1 600 m 处达到峰值, 后随海拔升高而降低。本研究结果与北坡中峰格局类似, 但本次调查峰值 (19 种) 明显高于其研究中的峰值 (8 种)。与太白山邻近喜马拉雅-横断山区中小型兽类的相关研究也多符合中峰格局。在喜马拉雅山地区 313 种小型兽类在海拔 900 ~ 1 400 m 之间物种多样性最高, 呈左偏倚的中峰格局 (胡一鸣等 2018); 贡嘎山地区的 25 种小型兽类则在海拔 2 000 ~ 3 200 m 之间最高, 呈中峰格局 (吴永杰等 2012); 在云南玉龙雪山调查发现的 23 种小型兽类中, 同样在中海拔地区的 3 200 ~ 3 400 m 之间出现峰值 (Chen et al. 2019)。

太白山北坡非特有种小型兽类占总数的 61.9%, 对物种多样性垂直分布格局贡献较大, 特有种和非特有种的分布格局差异可能是影响物种分布格局的潜在因素 (胡一鸣等 2018)。以往研究表明, 特有种的扩散主要受环境因素影响, 其适应性和扩散能力均较弱, 分布区则相对较小, 而非特有种适应性、扩散能力强, 其分布区大, 限制其分布的因素往往是气候、生境类型和生境异质性等影响其生理需求的环境因子 (Fu et al. 2006, Sanders et al. 2011, Wu et al. 2013b, Chen et al. 2017)。此外, 纯空间多种因素 (面积、中域效应等) 同样会影响非特有种的分布, 分布幅较广的物种在分布区中间重叠的概率较分布幅狭窄的物种要高, 往往会在分布空间的中间形成物种多样性的峰值 (吴永杰等 2012, Hu et al. 2017, Shuai et al. 2017, Chen et al. 2019)。

按照海拔梯度进行系统聚类分析发现, 阔叶林中的小型兽类物种多样性较针叶林高, 并且小型兽类的分布与林型的垂直分布具有协同性, 存在相互依存和协同进化的关系 (Sanders et al. 2011, Chen et al. 2017)。本研究区域中, 栓皮栎林等阔叶林多生于低山带, 以次生林和

人工林为主, 林相复杂, 植物群落结构和物种组成比较复杂, 也是秦岭地区降水、温度、土壤条件组合最好的地区, 因此小型兽类物种多样性最高, 主要以川西白腹鼠等鼠科物种为优势种; 桦木林带处于中山带, 是暖温带阔叶林和寒温带针叶林的过渡地带, 其中红桦林为多雨地带, 而适应性强的糙皮桦林下接红桦林, 上与冷杉在过渡地带形成混交林, 植物类型复杂, 形成了小型兽类分布的过渡区, 物种多样性高于相邻林型; 而在海拔 2 600 m 以上的冷杉林等高山带针叶林中, 林分简单, 生境相似程度较高, 多以纯林、灌木形式存在, 并且气温低、湿度大, 常伴有强风, 因而小型兽类物种组成较为单一, 多以间颅鼠兔为优势种 (岳明 2015)。林型中林分的丰富度与降水呈负相关关系, 与温度呈正相关, 小型兽类丰富度随水分、温度的变化与林分的变化相似 (苏凯等 2018, 陈超男等 2019)。

本文目前对于太白山保护区小型兽类物种多样性垂直分布格局的研究只涉及了北坡, 并且在调查过程中有部分地区取样强度不同, 在后续研究中应尽量保证各调查样点取样强度接近, 并在红桦林、蒙古栎林研究中适当延长调查时间和增加抽样强度, 丰富调查方法。除此以外还需要综合南坡物种数据进行更仔细的调查, 并加入植被归一化指数、水系、人为干扰等环境变量, 分析研究不同生境因子对物种分布格局的影响。

致谢 感谢太白山保护区管理局、蒿坪保护站、厚畛子保护站及鸚鵡保护站对野外调查工作给予的大力支持; 感谢野外科考队伍所有调查队员的帮助。

参 考 文 献

- Blyth S. 2002. Mountain Watch: Environmental Change and Sustainable Developmental in Mountains. London: UNEP/ Earthprint.
- Chen Z Z, He K, Cheng F, et al. 2017. Patterns and underlying mechanisms of non-volant small mammal richness along two contrasting mountain slopes in southwestern China. *Scientific*

- Reports, 7(1): 3–13.
- Chen Z Z, Li X Y, Song W Y, et al. 2019. Small mammal species richness and turnover along elevational gradient in Yulong Mountain, Yunnan, Southwest China. *Ecology and Evolution*, 10(5): 2545–2558.
- Dejaco C E, Batzli G O. 2013. Palatability of plants to small mammals in nonnative grasslands of east central Illinois. *Journal of Mammalogy*, 94(2): 427–435.
- Ferro L I, Barquez R M. 2009. Species richness of nonvolant small mammals along elevational gradients in northwestern Argentina. *Biotropica*, 41(6): 759–767.
- Fu C Z, Hua X, Li J, et al. 2006. Elevational patterns of frog species richness and endemic richness in the Hengduan Mountains, China: Geometric constraints, area and climate effects. *Ecography*, 29(6): 919–927.
- Heaney L R. 2001. Small mammal diversity along elevational gradients in the Philippines: an assessment of patterns and hypotheses. *Global Ecology and Biogeography*, 10(1): 15–39.
- Hu Y M, Jin K, Huang Z W, et al. 2017. Elevational patterns of non-volant small mammal species richness in Gyirong Valley, Central Himalaya: evaluating multiple spatial and environmental drivers. *Journal of Biogeography*, 44(12): 2764–2777.
- Lee, J K, Hwang H S, Eum T K, et al. 2017. Cascade effects of slope gradient on ground vegetation and small-rodent populations in a forest ecosystem. *Animal Biology*, 70(2): 203–213.
- McCain C M. 2004. The mid-domain effect applied to elevational gradients: Species richness of small mammals in Costa Rica. *Journal of Biogeography*, 31(1): 19–31.
- McCain C M. 2005. Elevational gradients in diversity of small mammals. *Ecology*, 86(2): 366–372.
- McCain C M. 2009. Global analysis of bird elevational diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 18(3): 346–360.
- Musila S, Chen Z Z, Li Q, et al. 2019. Diversity and distribution patterns of non-volant small mammals along different elevation gradients on Mt. Kenya, Kenya. *Zoological Research*, 40(1): 53–60.
- Rowe R J, Heaney L R, Rickart E A. 2015. Scale effects on the pattern and predictors of small mammal diversity along a local elevational gradient in the Great Basin. *Journal of Biogeography*, 42(10): 1964–1974.
- Sanders N J, Rahbek C. 2011. The patterns and causes of elevational diversity gradients. *Ecography*, 35(1): 1–3.
- Santos M J, Thorne J H, Craig M. 2014. Synchronicity in elevation range shifts among small mammal and vegetation over the last century is stronger for omnivores. *Ecography*, 38(6): 556–568.
- Shuai L Y, Ren C L, Yan W B, et al. 2017. Different elevational patterns of rodent species richness between the southern and northern slopes slopes. *Scientific Reports*, 7(1): 101–109.
- Wu Y J, Colwell R K, Rahbek C, et al. 2013a. Explaining the species richness of birds along a subtropical elevational gradient in the Hengduan Mountains. *Journal of Biogeography*, 40(12): 2310–2323.
- Wu Y J, Yang Q S, Wen Z X, et al. 2013b. What drives the species richness patterns of non-volant small mammals along a subtropical elevational gradient? *Ecography*, 36(2): 185–196.
- 陈超男, 朱连奇, 田莉, 等. 2019. 秦巴山区植被覆盖变化及气候因子驱动分析. *生态学报*, 39(9): 3257–3266.
- 邓晨晖, 白红英, 马新萍, 等. 2021. 2000–2017年秦岭山地植被物候变化特征及其南北差异. *生态学报*, 41(3): 1068–1080.
- 胡一鸣, 梁健超, 金崑, 等. 2018. 喜马拉雅山哺乳动物物种多样性垂直分布格局. *生物多样性*, 26(2): 191–201.
- 蒋志刚, 马勇, 吴毅, 等. 2017. 中国哺乳动物多样性. *生物多样性*, 23(3): 351–364.
- 刘少英, 吴毅. 2016. 中国兽类图鉴. 福州: 海峡书局, 435–445.
- 苏凯, 白红英, 张扬, 等. 2018. 基于树轮-气候资料的 160 多年来秦岭太白山降水变化特征重建. *生态学杂志*, 37(5): 1467–1475.
- 孙儒泳. 2001. 动物生态学原理. 3 版. 北京: 北京师范大学出版社, 394–402.
- 唐志尧, 方精云, 张玲. 2004. 秦岭太白山木本植物物种多样性的梯度格局及环境解释. *生物多样性*, 12(1): 115–122.
- 王立志. 2008. 太白山小型兽类物种多样性与区系的垂直分布格局. *陕西农业科学*, (1): 31–34.
- 王任毅, 刘明时, 田联会, 等. 2006. 太白山自然保护区生物多样性研究与管理. 北京: 中国林业出版社, 355–357.
- 王廷正, 许文贤. 1992. 陕西啮齿动物志. 西安: 陕西师范大学出版社, 175–190.
- 魏辅文, 杨奇森, 吴毅, 等. 2021. 中国兽类名录(2021 版). 兽类

- 学报, 41(5): 487-501.
- 吴永杰, 杨奇森, 夏霖, 等. 2012. 贡嘎山东坡非飞行小型兽类物种多样性的垂直分布格局. *生态学报*, 32(14): 4318-4328.
- 岳明. 2015. 秦岭植物垂直带谱完整复杂. *森林与人类*, (2): 76-81.
- 张荣祖. 2011. *中国动物地理*. 北京: 科学出版社, 273-277.