



刘霞, 许国莲, 徐正会, 张翔, 李晓艳, 刘兰兰, 钱昱含. 喜马拉雅山错那段不同海拔梯度蚂蚁多样性 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (3): 584–593.

喜马拉雅山错那段不同海拔梯度蚂蚁多样性

刘霞, 许国莲, 徐正会*, 张翔, 李晓艳, 刘兰兰, 钱昱含

(西南林业大学生物多样性保护学院, 云南省森林灾害预警与控制重点实验室, 昆明 650224)

摘要: 为了揭示喜马拉雅山不同海拔梯度蚂蚁的多样性规律, 采用样地调查法研究了喜马拉雅山错那段北坡、南坡和山间谷地的蚂蚁群落。共采集蚂蚁标本 7 516 头, 隶属于 2 亚科、5 属、7 种。利用 EstimateS 9.1.0 程序对该地区蚂蚁物种丰富度进行估计并绘制物种累计曲线, 结果表明错那段的蚂蚁物种实际观察值等于或接近该地区蚂蚁丰富度的估计值。多样性分析显示, 错那段 3 个垂直带蚂蚁物种数目、Shannon-Wiener 多样性指数和 Fisher α 指数顺序为北坡 > 山间谷地 > 南坡, 优势度指数顺序为北坡 < 山间谷地 < 南坡, 个体密度顺序为北坡 > 南坡 > 山间谷地; 在各垂直带上蚂蚁群落物种数目、个体密度、多样性指数总体随海拔升高呈现垂直带中下部较高, 垂直带上部较低; 群落各项指标更多的表现出“多域效应”现象, 降水和海拔对蚂蚁物种丰富度和多样性起决定作用, 凋落物的质量和坡度有重要影响。相关性分析发现错那段蚂蚁物种多样性指数与草本盖度极相关, 优势度指数与灌木盖度相关性显著; 群落相似性分析表明植被类型和海拔高差对蚂蚁群落间相似性有重要作用。

关键词: 蚁科; 多样性; 垂直带; 喜马拉雅山

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2021) 03-0584-10

Diversity of ants along an elevational gradient at Cona section of Mt. Himalaya

LIU Xia, XU Guo-Lian, XU Zheng-Hui*, ZHANG Xiang, LI Xiao-Yan, LIU Lan-Lan, QIAN Yu-Han
(Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control in Yunnan Province, College of Biodiversity Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: In order to reveal ant diversity law along an elevational gradient of Mt. Himalaya, ant communities of north slope, south slope and mountain valley at Cona section were investigated by sample-plot method. Totally 7 516 individuals were observed, and 7 species belonging to 2 subfamily and 5 genera of Formicidae were recognized. Ant species richness was estimated with the help of EstimateS 9.1.0 software and species accumulation curves were drawn, it showed that observed and estimated numbers of species were very similar. Diversity analysis showed that the sequences of the ant species richness, Shannon-Wiener diversity index and Fisher α index on the 3 vertical zones were: North slope > mountain valley > south slope, the sequence of dominance index was: North slope < mountain valley < south slope, and the sequence of individual densities was: North slope > south slope > mountain valley. With the increase of the altitude, the species numbers, individual densities and diversity indices of ant communities in 3 vertical zones were generally higher on the lower and middle parts of vertical zones and lower on the

基金项目: 国家自然科学基金 (31860166, 31860615); 国家自然科学基金委员会应急管理项目子课题 (31750002); 国家科学技术部科技基础性工作专项重点项目子课题 (2015FY210300); 西南林业大学博士科研启动基金 (111405)

作者简介: 刘霞, 女, 博士, 讲师, 主要从事森林昆虫的教学与研究工作, E-mail: 40274330@qq.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 徐正会, 男, 博士, 教授, 主要研究方向为昆虫系统学, E-mail: xuzhenghui1962@163.com

收稿日期 Received: 2020-05-01; 接受日期 Accepted: 2020-06-19

upper part of the vertical zones. The indicators of ant communities commonly expressed “Multi-Domain Effect” phenomenon. That was to say, the species richness and diversity of ants were affected by rainfall, altitude, litter quality and land slope have remarkable effect to them. The correlation analysis found that the diversity index was highly correlated with the herb coverage, while the dominance index was significantly correlated with the shrub coverage. Community similarity analysis showed that vegetation types and altitude difference played an important role in ant community similarity.

Key words: Formicidae; diversity; vertical zones; Himalaya

蚂蚁隶属于膜翅目 Hymenoptera 细腰亚目 Apocrita 蚁科 Formicidae, 是自然界中种类和生物量最丰富的社会性昆虫, 在生态系统中发挥着重要生态功能。据统计, 全世界现存 17 亚科、337 属、13 684 种 (Bolton, 2020)。由于蚂蚁的物种多样性及在所有能级水平上的生态功能都非常高、且易采集、对环境变化敏感, 已经成为指示生物多样性和环境变化的关键物种 (Hoffmann, 2010; 李巧, 2015), 以蚂蚁作为指示生物对生态恢复进行评价越来越受到重视。

喜马拉雅山是中尼边境上西北-东南走向的高大山系, 也是世界最高的山脉, 其高大山体对山脉两侧的气候分异、生物多样性演化产生了深刻影响, 自约 7 000 万年前的古生代以来一直是众多特有物种的栖息地。对喜马拉雅地区的蚂蚁分类研究前人已有报道 (Forel, 1906; Menozzi, 1939; Collingwood, 1982; 唐觉和李参, 1982; Radchenko & Elmes, 1999)。蚂蚁多样性研究方面, 已报道了印度境内喜马拉雅山区 (Bharti & Shamma, 2009; Bharti *et al*, 2013)、中国境内喜马拉雅山亚东段 (莫福燕等, 2015)、珠峰段 (李文琼等, 2016)、普兰和吉隆段 (张翔等, 2018)、底雅和札达段 (刘霞等, 2020) 以及藏东南地区 (张成林等, 2011; 刘霞等, 2011; 于娜娜等, 2012; 刘霞等, 2017) 等蚂蚁多样性的研究, 这些研究丰富了喜马拉雅山区的蚂蚁研究资料。错那段位于喜马拉雅山东段、雅鲁藏布江中下游地区, 是藏东南温暖多雨地区向喜马拉雅山高寒干旱腹地过渡的典型的山原湖盆谷地, 由南坡、北坡和山间谷地组成。相较于喜马拉雅山西段的底雅和札达与普兰和吉隆段、中段的珠峰段和亚东段, 喜马拉雅山东段将演化出何种蚂蚁群落和多样性水平? 为此, 于 2018 年 8 月对喜马拉雅山错那段的蚂蚁多样性进行调查, 以期全面揭示喜马拉雅山蚂蚁群落结构和多样性规律提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样地设置

2018 年 8 月, 沿喜马拉雅山错那段由北向南进行调查, 海拔每升高 250 m 设置 1 块 50 m × 50 m 的样地, 在 3 个垂直带共设置 18 块样地。其中北坡乃东垂直带 (91°50′17″~92°03′16″E, 28°49′51″~29°05′43″N), 海拔 3 755 m~5 016 m, 设置 6 块样地; 山间谷地曲松-隆子垂直带 (92°02′16″~92°03′55″E, 28°23′18″~28°48′40″N), 海拔 4 010 m~4 730 m, 设置 6 块样地; 南坡错那垂直带 (91°57′05″~91°58′34″E, 27°46′38″~28°13′01″N), 海拔 3 596 m~4 755 m, 设置 6 块样地, 各样地概况见表 1。

1.2 调查方法

采用样地调查法进行调查, 在每块样地按照对角线五点取样设置 5 个样方, 样方大小 1 m × 1 m, 间距 10 m, 每个样方调查地表样、土壤样和树冠样的蚂蚁并采集标本 (徐正会, 2002)。样方调查结束后用搜索法对样地内样方外各生境中的蚂蚁进行调查与采集以补充样方调查, 并计入物种数和个体总量, 但不计入个体密度。将所采标本用 95% 乙醇保存于 2 mL 的冻存管内, 做好记录带回实验室。同一巢穴内的蚂蚁保存于同一冻存管内, 不同生境的蚂蚁分别保存于不同的冻存管中。依据主要分类学著作 (吴坚和王常禄, 1995; 周善义, 2001; 徐正会, 2002), 采用形态分类学方法对标本逐一鉴定。

1.3 多样性指标测定及相关性分析

为了比较各垂直带不同海拔梯度蚂蚁群落的组成、物种丰富度及多样性, 利用 EstimateS 9.1.0 软件对数据进行处理, 蚂蚁物种多样性采用物种数目、个体密度、Shannon-Wiener 多样性指数、Fisher α 指数、Simpson 优势度指数和 Jaccard 相似性系数进行测度 (徐正会, 2002; 李巧等, 2009),

表 1 喜马拉雅山错那段蚂蚁群落调查样地概况

Table 1 Sample plots situation for ant community survey at Cona section of Mt. Himalaya

地点 Sites	海拔 (m) Altitude	坡向 Slop direction	坡度 Slope gradient	土壤类型 Soil types	植被类型 Vegetation types	乔木郁闭度 Canopy density	盖度 (%) Coverage			地被物厚度 (cm) Litter thickness
							灌木 Shrub	草本 Herb	地被物 Litter	
乃东区卡玛勒村 Kamal village , Naidong district	3 755	E	30°	棕壤 Brown soil	矮灌丛 Low shrub	0.0	30	85	85	0.5
乃东区杰宗村 Jiezong village , Naidong district	4 009	E	25°	棕壤 Brown soil	草丛 Herb	0.0	0	80	80	0.5 ~ 1.0
乃东区江果村 Jiangguo village , Naidong district	4 264	NE	25°	棕壤 Brown soil	灌丛 Shrub	0.0	15	80	80	0.5 ~ 1.0
乃东区郭姆浅 Guomuqian , Naidong district	4 496	E	20°	棕壤 Brown soil	草丛 Herb	0.0	3	80	80	0.5 ~ 1.0
乃东区亚堆乡佰 绘村 Baihui village , Naidong district	4 749	NE	35°	棕壤 Brown soil	灌丛 Shrub	0.0	40	90	90	0.5 ~ 1.0
曲松县曲宗丫口 Quzong port , Qusum county	5 016	S	20°	棕壤 Brown soil	草丛 Herb	0.0	0	85	85	0.5
曲松县曲宗丫口下 Quzong port below , Qusum county	4 730	E	30°	棕壤 Brown soil	草丛 Herb	0.0	0	70	70	0.5
曲松县马若丫口 Maruo port , Qusum county	4 502	NE	30°	棕壤 Brown soil	灌丛 Shrub	0.0	10	80	80	0.5
隆子县日当镇下热村 Xiare village , Lhünzê county	4 486	NE	30°	棕壤 Brown soil	草丛 Herb	0.0	1	85	85	0.5
隆子县卡当村 Kadang village , Lhünzê county	4 243	E	30°	黄壤 Yellow soil	灌丛 Shrub	0.0	10	80	80	0.5 ~ 1.0
隆子县塔新村 Taxin village , Lhünzê county	4 237	E	25°	棕壤 Brown soil	草丛 Herb	0.0	0	70	70	0.5 ~ 1.0
隆子县日当村 Ridang village , Lhünzê county	4 010	E	30°	棕壤 Brown soil	草丛 Herb	0.0	0	80	80	0.5
错那县顶许 Dingxu , Cona county	4 755	E	30°	棕壤 Brown soil	草丛 Herb	0.0	0	80	80	0.5

续表 1 Continued table 1

地点 Sites	海拔 (m) Altitude	坡向 Slop direction	坡度 Slope gradient	土壤类型 Soil types	植被类型 Vegetation types	乔木郁闭度 Canopy density	盖度 (%) Coverage			地被物厚度 (cm) Litter thickness
							灌木 Shrub	草本 Herb	地被物 Litter	
错那县错那村 Cona village , Cona county	4 500	E	35°	棕壤 Brown soil	高山柳灌丛 <i>Salix cupularis</i> shrub	0. 0	15	95	95	0. 5 ~ 1. 0
错那县 5 km 5 km , Cona county	4 232	SE	35°	棕壤 Brown soil	高山柳灌丛 <i>Salix cupularis</i> shrub	0. 0	80	95	95	1. 0 ~ 2. 0
错那县浪坡村 Langpo village , Cona county	4 028	SW	35°	棕壤 Brown soil	高山柳灌丛 <i>Salix cupularis</i> shrub	0. 0	60	90	90	1. 0 ~ 2. 0
错那县 22 km 22 km , Cona county	3 743	W	25°	棕壤 Brown soil	高山针叶林 Alpine conifer forest	0. 6	60	100	100	2. 0 ~ 5. 0
错那县东章瀑布 Dongzhang waterfall , Cona county	3 596	E	30°	棕壤 Brown soil	高山针叶林 Alpine conifer forest	0. 8	50	100	100	3. 0 ~ 8. 0

同时运用基于多度 (Abundance-base Coverage Estimator , ACE)、基于频数 (Incidence-base Coverage Estimator , ICE)、Chao1 (for Individual-based Abundance Data) 和 Chao2 (for Sample-based Incidence Data) 的估计方法对物种丰富度进行估计 (李巧, 2011; Colwell & Elsensohn , 2014)。依据各物种个体数占总个体数的百分比确定物种的优势等级, 等级划分: 优势度 $\geq 10.0\%$, 为优势种, 用 A 表示; $5.0\% \leq$ 优势度 $< 10.0\%$ 为常见种, 用 B 表示; $1.0\% \leq$ 优势度 $< 5.0\%$ 为较常见种, 用 C 表示; $0.1\% \leq$ 优势度 $< 1.0\%$ 为较稀有种, 用 D 表示; 优势度 $< 0.1\%$ 为稀有种, 用 E 表示 (黄钊等, 2019)。用 Pearson 相关分析方法 (双侧检验) 分析蚂蚁多样性 (物种数目、多样性指数、优势度指数) 与植被 (乔木郁闭度、灌丛盖度、草本盖、地被物盖度、地被物厚度) 的相关性 (张念念, 2014)。

(1) Shannon-Wiener 多样性指数

$H = - \sum P_i \ln P_i$, P_i 为第 i 种的个体数占群落全部物种个体数之和的比值。

(2) Simpson 优势度指数

$C = \sum_{i=1}^s (P_i)^2 = \sum_{i=1}^s (N_i / N)^2$, N_i 为第 i 种的个体数, N 为群落中全部物种的个体数之和, S 为物种数目。

(3) Jaccard 相似性系数

$q = c / (a + b - c)$, c 为两个群落的共有物种数, a 和 b 分别为群落 A 和群落 B 的物种。

2 结果与分析

2.1 蚂蚁群落组成与优势度分析

在喜马拉雅山错那段 18 块样地内共采集蚂蚁 7 516 头, 隶属于 2 亚科、5 属、7 种 (含 1 待定种)。其中切叶蚁亚科 2 属、4 种, 蚁亚科 3 属、3 种 (表 2) ; 该地区蚂蚁群落优势种有 4 个, 分别为西藏盘腹蚁 (38.69%)、岩缝红蚁 (15.35%)、光亮黑蚁 (29.24%) 和箭蚁待定种 1 (12.40%) , 其中西藏盘腹蚁的优势度最大; 较常见种 2 个, 为鲁氏红蚁 (2.61%) 和西姆森弓背蚁 (1.68%) , 亮红蚁 (0.03%) 是该地区最稀有的物种。从优势种的成分来看, 都是适应高海拔耐寒的物种。

2.2 蚂蚁群落主要指标分析

2.2.1 物种累计曲线

随着调查样地数量的增加, ICE 值先急剧上升, 随后急剧下降, 然后缓慢下降, 最后趋于水平, 实际观察物种数 (Sobs)、ACE、Chao1 和 Chao2 值先急剧上升, 后缓慢上升, 最后趋于水平

(图1)。蚂蚁物种的实际观察值 (Sobs 为 7) 与丰富度的估计值 (ACE 为 7; ICE 为 7.37; Chao1 为 7; Chao2 为 6.94) 相等或接近, 说明喜马拉雅山

错那段蚂蚁物种丰富度相对较低。实际采集到的物种数约为估计值的 94.98%~100.00%, 样地中多数物种被采集到, 抽样效果好。

表2 喜马拉雅山错那段蚂蚁种类、个体数及优势度

Table 2 Ant species, individual numbers and dominance at Cona section of Mt. Himalaya

亚科 Subfamily	属 Genus	种 Species	个体总数 (头) Individual number	占比 (%) Percentage	优势度 Dominance
切叶蚁亚科 Myrmicinae	盘腹蚁属 <i>Aphaenogaster</i>	西藏盘腹蚁 <i>A. tibetana</i>	2 908	38.69	A
		岩缝红蚁 <i>M. rupestris</i>	1 154	15.35	A
	红蚁属 <i>Myrmica</i>	鲁氏红蚁 <i>M. ruzskyana</i>	196	2.61	C
		亮红蚁 <i>M. nitida</i>	2	0.03	E
蚁亚科 Formicinae	蚁属 <i>Formica</i>	光亮黑蚁 <i>F. candida</i>	2 198	29.24	A
	箭蚁属 <i>Cataglyphis</i>	箭蚁待定种 1 <i>Cataglyphis</i> sp. 1	932	12.40	A
	弓背蚁属 <i>Camponotus</i>	西姆森弓背蚁 <i>C. siemsseni</i>	126	1.68	C
合计 Total		—	7 516	100	—

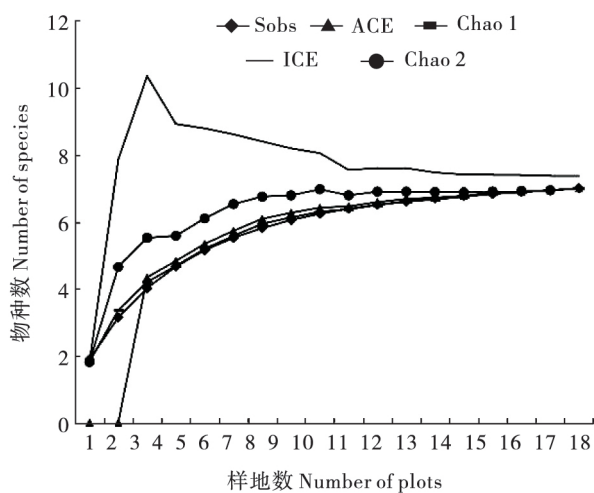


图1 喜马拉雅山错那段蚂蚁物种实测值和预测值累积曲线

Fig. 1 Accumulation curves for observed and estimated number of ant species at Cona section of Mt. Himalaya

注: Sobs 表示实际观察的物种数; ACE 表示基于多度 (个体数量) 的预测值; ICE 表示基于频数 (发生率) 的预测值; Chao1、Chao2 表示用 Chao1、Chao2 方法预测值。Note: Sobs indicated number of species observed; ACE indicated abundance (individual)-base coverage estimator; ICE indicated incidence-base coverage estimator; Chao1 and Chao2 indicated Chao1 and Chao2 estimator.

2.2.2 物种数目

从物种的实测值来看, 喜马拉雅山错那段北坡、山间谷地和南坡 3 个区域蚂蚁的物种数都接

近或等于估计值 ACE 和 Chao1 值, 说明这 3 个区域内的蚂蚁物种丰富度低 (表 3)。其中北坡山顶 5 016 m 的草丛样地和南坡海拔 4 500 m 高山柳灌丛、4 755 m 草丛样地中未发现有蚂蚁活动。

错那段 3 个垂直带蚂蚁物种数目顺序为: 北坡 (7 种) > 山间谷地 (5 种) > 南坡 (3 种)。北坡各样地物种数目在 0~4 种之间, 物种数目随着海拔升高先升高后降低, 峰值出现在山坡中下部海拔 4 009 m 的草丛和 4 264 m 的灌丛样地中 (4 种)。山间谷地各样地物种数目在 1~4 种之间, 物种数目随海拔升高呈现先升高后降低的规律, 但在坡面顶部海拔 4 730 m 的草丛样地中又出现第二峰值。南坡各样地物种数目在 0~2 种之间, 蚂蚁物种数目随海拔升高总体呈现降低的规律, 但在海拔 4 028 m 高山柳灌丛出现第二峰值 (2 种)。

2.2.3 个体密度

错那段 3 个垂直带上蚂蚁平均个体密度顺序为: 北坡 (12.3 头/m²) > 南坡 (5.4 头/m²) > 山间谷地 (3.5 头/m²)。北坡各样地个体密度为 0.0~23.4 头/m², 个体密度随海拔升高基本呈现先升高后降低的规律, 在海拔 4 264 m 的灌丛 (23.4 头/m²) 和 4 749 m 的灌丛 (18.8 头/m²) 样地出现 2 个峰值。山间谷地各样地个体密度在 0.6~6.4 头/m² 之间, 个体密度在海拔 4 010 m 草丛、4 243 m 灌丛和 4 502 m 灌丛样地出现 3 个弱的峰值。南坡各样地个体密度在 0.0~22.6 头/m²

之间, 个体密度随海拔升高依次出现 2 个峰值。

2.2.4 多样性指数

错那段 3 个垂直带 Shannon–Wiener 多样性指数顺序为: 北坡 (0.9430) > 山间谷地 (0.5383) > 南坡 (0.3031)。随海拔的升高, 北坡的多样性指数先升高后降低, 再升高后降低, 在海拔 4 009 m 草丛 (0.5545) 和海拔 4 496 m 草丛样地 (0.6167) 中出现 2 个峰值; 山间谷地的 Shannon–Wiener 多样性指数随海拔升高先升高后降低, 再升高, 在海拔 4 243 m 灌丛 (0.8634) 和 4 730 m 草丛 (0.7926) 样地中出现 2 个峰值; 南坡的 Shannon–Wiener 多样性指数最高值出现在坡面中部海拔 4 028 m 高山柳灌丛样地。

表 3 喜马拉雅山错那段蚂蚁群落多样性指标

Table 3 Diversity indexes of ant community at Cona section of Mt. Himalaya

坡向 Slope	海拔 (m) Altitude	植被类型 Vegetation types	物种数 Species numbers	ACE (mean)	Chao1 (mean ± SD)	个体密度 (头/m ²) ID	Shannon– Wiener 多样性指数 SWI	Fisher α 指数 (mean ± SD) FI	优势度 指数 DI
北坡 North slope	3 755	矮灌丛 Low shrub	2	2	2 ± 0.00	5.0	0.3127	0.27 ± 0.06	0.8290
	4 009	草丛 Herb	4	4	4 ± 0.00	17.6	0.5545	0.54 ± 0.09	0.7389
	4 264	灌丛 Shrub	4	5	4 ± 0.24	23.4	0.1293	0.53 ± 0.09	0.9520
	4 496	草丛 Herb	3	3	3 ± 0.00	9.0	0.6167	0.42 ± 0.09	0.6300
	4 749	灌丛 Shrub	2	2	2 ± 0.00	18.8	0.0979	0.24 ± 0.05	0.9609
	5 016	草丛 Herb	0	0	0 ± 0.00	0.0	–	0.00 ± 0.00	–
	3 755 ~ 5 016	–	7	7	7 ± 0.34	12.3	0.9430	0.84 ± 0.10	0.4846
山间 谷地 Mountain valley	4 730	草丛 Herb	3	3	3 ± 0.08	0.6	0.7926	0.56 ± 0.14	0.5062
	4 502	灌丛 Shrub	1	1	1 ± 0.00	3.4	0.0000	0.11 ± 0.03	1.0000
	4 486	草丛 Herb	1	1	1 ± 0.00	1.4	0.0000	0.11 ± 0.03	1.0000
	4 243	灌丛 Shrub	4	4	4 ± 0.48	6.4	0.8634	0.55 ± 0.10	0.4958
	4 237	草丛 Herb	2	2	2 ± 0.00	4.2	0.4965	0.27 ± 0.06	0.6834
	4 010	草丛 Herb	2	2	2 ± 0.00	5.2	0.1403	0.27 ± 0.07	0.9388
	4 010 ~ 4 730	–	5	5	5 ± 0.00	3.5	0.5383	0.58 ± 0.08	0.7682
南坡 South slope	4 755	草丛 Herb	0	0	0 ± 0.00	0.0	–	0.00 ± 0.00	–
	4 500	高山柳灌丛 <i>Salix cupularis</i> shrub	0	0	0 ± 0.00	0.0	–	0.00 ± 0.00	–
	4 232	高山柳灌丛 <i>Salix cupularis</i> shrub	1	1	1 ± 0.00	0.6	0.0000	0.17 ± 0.07	1.0000
	4 028	高山柳灌丛 <i>Salix cupularis</i> shrub	2	2	2 ± 0.00	22.6	0.2193	0.24 ± 0.05	0.8921
	3 743	高山针叶林 Alpine conifer forest	1	1	1 ± 0.00	4.0	0.0000	0.17 ± 0.07	1.0000
	3 596	高山针叶林 Alpine conifer forest	2	2	2 ± 0.48	5.4	0.0342	0.31 ± 0.08	0.9890
	3 596 ~ 4 755	–	3	3	3 ± 0.48	5.4	0.3031	0.37 ± 0.07	0.8391

Note: ID , Individual density (heads/m²); SWI , Shannon–Wiener diversity index; FI , Fisher α index; DI , Dominance index.

在 3 个垂直带上, Fisher α 指数顺序表现为: 北坡 (0.84 ± 0.10) > 山间谷地 (0.58 ± 0.08) > 南坡 (0.37 ± 0.07)。北坡的 Fisher α 指数随海拔升高先升高后降低, 峰值出现在海拔 4 009 m 草丛样地中 (0.54 ± 0.09)。山间谷地的 Fisher α 指数随海拔升高先升高后降低, 再升高, 在海拔 4 243 m 灌丛 (0.55 ± 0.10) 和 4 730 m 草丛 (0.56 ± 0.14) 样地出现两个峰值。

2.2.5 优势度指数

在错那段 3 个垂直带上, 优势度指数顺序为: 南坡 (0.8391) > 山间谷地 (0.7682) > 北坡 (0.4846), 与物种数目、Shannon-Wiener 多样性指数和 Fisher α 指数顺序相反。北坡各样地优势度指数随着海拔的升高, 依次在海拔 3 755 m 矮灌丛

(0.8290)、4 264 m 灌丛 (0.9520) 和 4 749 m 灌丛 (0.9609) 样地中出现 3 个峰值。山间谷地各样地优势度指数随海拔升高依次在海拔 4 010 m 草丛 (0.9388)、4 486 m 草丛 (1.0000) 和 4 502 m 灌丛 (1.0000) 样地中出现 3 个峰值。南坡各样地的优势度指数随海拔的升高依次出现 2 个峰值。

2.3 蚂蚁多样性与植被的相关分析

喜马拉雅山错那段蚂蚁多样性与植被的相关性如表 4 所示, 其中多样性指数与草本盖度 ($P < 0.01$) 极显著正相关, 与乔木郁闭度、灌木盖度、地被物盖度和地被物厚度相关性不显著; 优势度指数与灌木盖度 ($P = 0.046$) 显著相关, 与乔木郁闭度、草本盖度、地被物盖度和地被物厚度相关性不显著; 物种数目与植被相关性不显著。

表 4 蚂蚁多样性与植被特征相关分析

Table 4 Correlation analysis between ant diversity and vegetation feature

植被特征 Vegetation feature	蚂蚁 Ant		
	物种数目 Species number	多样性指数 Diversity index	优势度指数 Dominance index
乔木郁闭度 Canopy density	0.015	0.263	0.290
灌木盖度 Shrub coverage	0.082	0.365	0.475*
草本盖度 Herb coverage	0.334	0.620**	0.202
地被物盖度 Litter coverage	0.334	0.058	0.202
地被物厚度 Litter thickness	0.058	0.243	0.353

注: 表中数值为 Pearson 相关系数, ** 表示在 0.01 水平上显著相关, * 表示在 0.05 水平上显著相关。Note: Numbers in table are Pearson correlation coefficient, ** represents significant correlation at the 0.01 level, while * represents significant correlation at the 0.05 level.

2.4 蚂蚁群落相似性

根据 Jaccard 相似性原理, 当 $0.00 \leq q < 0.25$, 两群落间极不相似; 当 $0.25 \leq q < 0.50$, 两群落间中等不相似; 当 $0.50 \leq q < 0.75$, 两群落间中等相似; 当 $0.75 \leq q \leq 1.00$, 两群落间极相似。错那段北坡、山间谷地和南坡蚂蚁群落间相似系数为 0.4286 ~ 0.7143, 处于中等不相似至中等相似水平; 平均值 0.5810, 显示中等相似水平。其中南坡与北坡间达到中等不相似水平, 北坡与山间谷地、山间谷地与南坡间处于中等相似水平 (表 5)。可见, 喜马拉雅山错那段各垂直带蚂蚁群落间的相似性较高, 群落间分化不明显。

表 5 喜马拉雅山错那段各垂直带蚂蚁群落间相似性系数 (q)

Table 5 Similarity coefficients (q) between ant communities from the vertical zones at Cona section of Mt. Himalaya

垂直带 Vertical zones	北坡 North slope	山间谷地 Mountain valley
山间谷地 Mountain valley	0.7143	
南坡 South slope	0.4286	0.6000
平均 Average	0.5810	

3 结论与讨论

在以往山地蚂蚁研究中, 蚂蚁物种丰富度大多呈现南坡 > 北坡 (莫福燕等, 2015; 李文琼等, 2016; 刘霞等, 2017; 张翔等, 2018; 刘霞等, 2020)、东坡 > 西坡的规律 (徐正会等, 2001a, 徐正会等, 2001b; 于娜娜, 2012), 主要是由水热条件和坡面长短导致。在本研究, 蚂蚁物种丰富度北坡 (7 种) > 南坡 (3 种), 这是因为南坡处于西南季风的迎风坡, 降雨多, 土壤湿度过大, 且坡面较短, 北坡处于背风坡, 降雨相对较少, 土壤相对干燥, 蚂蚁喜欢温暖干燥、阳光充足的环境, 因此南坡的蚂蚁物种丰富度低。

喜马拉雅山错那段位于藏东南地区向喜马拉雅山腹地过渡的谷地, 在海拔 3 596 ~ 5 016 m 的范围内 (高差 1 420 m) 共采集蚂蚁 2 亚科 5 属 7 种, 其物种丰富度与靠近欧亚内陆的喜马拉雅山西段的底雅和札达段相同 (2 亚科 5 属 7 种, 海拔 2 975 ~ 5 183 m, 高差 2 208 m) (刘霞等, 2020), 但明显低于西段的吉隆 (3 亚科 9 属 14 种, 海拔 2 742 ~ 5 005 m, 高差 2 263 m) (张翔等, 2018)、中段的亚东 (2 亚科 8 属 12 种, 海拔 2 760 ~ 5 049 m, 高差 2 289 m) (莫福燕等, 2015) 和珠峰段 (3 亚科 13 属 23 种, 海拔 1 840 ~ 5 260 m, 高差 3 420 m) (李文琼等, 2016), 更显著低于同纬度藏东南的德姆拉及察隅河谷 (5 亚科 31 属 95 种, 海拔 1 590 ~ 4 776 m, 高差 3 186 m) (于娜娜, 2012) 和嘎隆拉及墨脱河谷 (8 亚科 45 属 96 种, 海拔 740 ~ 4 208 m, 高差 3 468 m) (刘霞等, 2017)。在喜马拉雅山区, 自东南向西北, 降雨依次减少, 气候由亚热带半湿润气候向高原温带干旱、寒带干旱气候过渡。靠近欧亚内陆的底雅和札达, 由于降水少、气候寒冷干燥, 影响了蚂蚁物种丰富度, 只有对极寒气候适应的物种分布。错那段与亚东段、珠峰段和吉隆段的纬度相近, 但蚂蚁物种丰富度最低, 这主要是由错那段的海拔高差小、最低海拔高及降雨多造成的。可见, 降水和海拔高差对物种丰富度有重要影响。此外, 凋落物的质量对蚂蚁物种丰富度和多样性有影响, 凋落物质量越高, 森林生态环境越好, 其种群越丰富 (Theunis *et al.*, 2005)。喜马拉雅山亚东段、吉隆段、珠峰段、藏东南地区德姆拉及察隅河谷、嘎隆拉及墨脱河谷样地凋落物和生

态环境总体上优于错那段, 导致错那段的物种丰富度和多样性相对低。

在过去的研究中, 蚂蚁物种多样性沿海拔梯度变化规律大致呈三种类型: (1) 蚂蚁多样性随海拔升高而降低, 可用 Rapoport 效应假说解释 (Janzen *et al.*, 1976; 徐正会等, 2001a; Majer *et al.*, 2001; Colwell *et al.*, 2008; Kwon *et al.*, 2014); (2) 物种多样性随海拔升高呈单峰曲线, 可用“中域效应” (Mid-domain effect) 解释 (Fisher, 1996; Samson *et al.*, 1997; Sanders, 2002); (3) 蚂蚁多样性随海拔升高而升高 (Sanders *et al.*, 2003)。已报道的藏东南地区色季拉山的蚂蚁多样性研究支持 Rapoport 效应假说 (张成林等, 2011); 印度境内喜马拉雅山区、中国境内喜马拉雅山亚东段蚂蚁多样性研究支持“中域效应” (Bharti *et al.*, 2013; 莫福燕等, 2015)。珠峰段、吉隆段的蚂蚁群落研究显示, 在坡面上不仅出现 1 个峰值, 而是出现多个峰值, 这种现象被称为多域效应 (Multi-domain effect), 多域效应是中域效应在山体坡面上的重复出现 (李文琼等, 2016; 张翔等, 2020)。在本研究中, 喜马拉雅山错那段 3 个垂直带上, 物种数目、个体密度和多样性指数随海拔升高总体呈现垂直带中、下部较高, 垂直带上部较低, 说明海拔对多样性具有重要影响。北坡蚂蚁物种数目随海拔升高呈单峰曲线, 表现出中域效应现象, 其他各指标随海拔的升高, 在坡面上出现 2 个或 2 个以上的峰值, 更多的表现出多域效应现象。

在海拔主导因素的作用下, 蚂蚁群落各指标可能还受地形因子的影响。地形因子主要包括坡度、坡位和坡向 (王移等, 2010), 坡度、坡位和坡向不同, 接收的热量和降水条件不同, 可影响具体样地的小生境, 进而影响蚂蚁的物种丰富度和多样性。其中坡度还影响土壤的含水量和养分流失程度 (Zingg, 1940), 进而对土壤动物的群落结构、多样性及主要类群的密度产生影响 (何先进等, 2012), 蚂蚁作为重要的土壤节肢动物, 其群落结构、多样性和个体密度也会受到坡度的影响。在喜马拉雅山错那段, 蚂蚁物种丰富度、多样性指数和个体密度总体上随坡度的增大而降低。

地表植被也是影响蚂蚁种群的重要因素之一。植被是微气候生境的重要调节者, 主要改变了温度而直接影响了蚂蚁的分布、代谢和觅食 (Jensen & Hoolm, 1980; Nielsen, 1986; López *et al.*, 1992)。

有研究表明植被结构简单的栖境中蚂蚁物种数少,从而降低了蚂蚁物种多样性 (Pacheco & Vasconcelos, 2012), 而良好的植被状况能够为更多蚂蚁物种提供更丰富和更优质的食物资源、筑巢地及隐蔽地 (Buczowski & Richmond, 2012)。在本研究, 蚂蚁多样性指数与草本盖度显著相关, 优势度指数与灌木盖度显著相关。较好的草本盖度给蚂蚁提供了良好的筑巢环境, 有利于蚂蚁的繁殖; 较高的草本盖度说明样地内人畜活动少, 受干扰小, 有利于蚂蚁种群的繁衍扩大。较多的灌木为蚂蚁提供了更多的栖居和觅食场所, 并可躲避其他捕食者的捕食, 使能爬上灌木的蚁种优势地位突出。

从相似性系数来看, 错那段 3 个垂直带间蚂蚁群落相似性较高, 达到中等相似水平。喜马拉雅山错那段除南坡少数样地的植被为针叶林外, 北坡、南坡和山间谷地的植被多为灌丛和草地, 生态环境较简单, 且最低海拔超过 3 500 m, 海拔落差小, 其间栖息的蚂蚁物种多数是适应高海拔环境的古北界物种, 因此 3 个垂直带蚂蚁群落间相似性较高。可见, 植被和海拔高差对蚂蚁群落间相似性有重要作用。

总体而言, 喜马拉雅山错那段的蚂蚁物种丰富度和多样性较低, 主要受降水、海拔高差、坡度和植被的共同影响。作为能较好指示生物多样性和环境变化的关键物种 (Hoffmann, 2010; 李巧, 2015), 从蚂蚁的物种组成和分布来看, 该地区的生物资源十分有限, 环境脆弱, 因此有必要采取措施保护该地区的环境和生物多样性。

参考文献 (References)

- Bharti H, Sharma YP, Bharti M, *et al.* Ant species richness, endemism and functional groups, along an elevational gradient in the Himalaya [J]. *Asian Myrmecology*, 2013, 5 (1): 79–101.
- Bharti H, Sharma YP. Diversity and abundance of ants along an elevational gradient in Jammu – Kashmir Himalaya [J]. *Halteres*, 2009, 1 (1): 10–24.
- Bolton B. An online catalog of the ants of the world [EB/OL] (2020–03–22). <http://www.antcat.org>.
- Buczowski G, Richmond DS. The effect of urbanization on ant abundance and diversity: A temporal examination of factors affecting biodiversity [J]. *PLoS ONE*, 2012, 7 (8): e41729.
- Collingwood CA. Himalaya ants of the genus *Lasius* (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Systematic Entomology*, 1982, 7 (3): 283–296.
- Colwell RK, Brehm G, Cardelús CL, *et al.* Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics [J]. *Science*, 2008, 322 (5899): 258–261.
- Colwell RK, Elsensohn JE. EstimateS turns 20: Statistical estimation of species richness and shared species from samples, with non-parametric extrapolation [J]. *Ecography*, 2014, 37: 609–613.
- Fisher BL. Ant diversity patterns along an elevational gradient in the Reserve Naturelle Intégrale d'Andohahela, Madagascar [J]. *Fieldiana Zoology*, 1999, 94: 129–148.
- Forel A. Les fourmis de l'Himalaya [J]. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, 1906, 42: 79–94.
- He XJ, Wu PF, Cu LW, *et al.* Effects of slope gradient on the community structures and diversities of soil fauna [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (12): 3701–3713. [何先进, 吴鹏飞, 崔丽巍, 等. 坡度对农田土壤动物群落结构及多样性的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32 (12): 3701–3713]
- Hoffmann BD. Using ants for rangeland monitoring: Global patterns in the responses of ant communities to grazing [J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10 (2): 105–111.
- Huang Z, Xu ZH, Liu X, *et al.* Ant species diversity of northeastern Yunnan [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38 (12): 3697–3705. [黄钊, 徐正会, 刘霞, 等. 滇西北地区的蚂蚁物种多样性 [J]. 生态学杂志, 2019, 38 (12): 3697–3705]
- Janzen DJ, Ataroff M, Fariñas M, *et al.* Changes in the arthropod community along an elevational transect in the Venezuelan Andes [J]. *Biotropica*, 1976, 8 (3): 193–203.
- Jensen TF, Hoolm – Jensen I. Energetic cost of running in workers of three ant species, *Formica fusca* L., *Formica rufa* L. and *Camponotus herculeanus* L. (Hymenoptera, Formicidae) [J]. *Journal of Comparative Physiology*, 1980, 137: 151–156.
- Kwon TS, Kim SS, Chun JH. Pattern of ant diversity in Korea: An empirical test of Rapoport altitudinal rule [J]. *Journal of Asia Pacific Entomology*, 2014, 17 (2): 161–167.
- Li Q, Chen YQ, Wang SM, *et al.* Diversity of ants in subtropical evergreen broadleaved forest in Pu'er City, Yunnan [J]. *Biodiversity Science*, 2009, 17 (3): 233–239. [李巧, 陈又清, 王思铭, 等. 普洱市亚热带季风常绿阔叶林区蚂蚁多样性 [J]. 生物多样性, 2009, 17 (3): 233–239]
- Li Q, Lu ZX, Zhang W, *et al.* Gound – dwelling ants as bioindicators during 30 – year vegetation restoration in a savanna area, Yunnan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (18): 6199–6207. [李巧, 卢志兴, 张威, 等. 云南萨王纳地区植被恢复 30 年: 地表蚂蚁在恢复过程中的指示作用 [J]. 生态学报, 2015, 35 (18): 6199–6207]
- Li Q. Species accumulation curves and its application [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2011, 48 (6): 1882–1888. [李巧. 物种累计曲线及其应用 [J]. 应用昆虫学报, 2011, 48 (6): 1882–1888]
- Li WQ, Xu ZH, Zhou XY, *et al.* Ant species diversity of Mount Everest section of the Himalaya Mountains [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2016, 36 (1): 114–120. [李文琼, 徐正会, 周雪英, 等. 喜马拉雅山珠峰段的蚂蚁多样性 [J]. 西南林业大学学报, 2016, 36 (1): 114–120]

- Liu X, Xu ZH, Yu NN, *et al.* Ant species diversity of Mount Galongla and Medogvella in Southeastern Tibet [J]. *Forest Research*, 2017, 30 (1): 34–40. [刘霞, 徐正会, 于娜娜, 等. 藏东南嘎隆拉和墨脱河谷蚂蚁群落研究 [J]. 林业科学研究, 2017, 30 (1): 34–40]
- Liu X, Xu ZH, Zhou XY, *et al.* Ant communities of west slope of Mount Demola and Bomi valley in southeastern Tibet [J]. *Forest Research*, 2011, 24 (4): 458–463. [刘霞, 徐正会, 周雪英, 等. 藏东南德姆拉山西坡及波密河谷蚂蚁群落研究 [J]. 林业科学研究, 2011, 24 (4): 458–463]
- Liu X, Xu ZH, Zhang X, *et al.* Ant species diversity of Diyag and Zanda sections of Himalayas [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2020, 40 (3): 313–320. [刘霞, 徐正会, 张翔, 等. 喜马拉雅山底雅段和札达段蚂蚁多样性 [J]. 森林与环境学报, 2020, 40 (3): 313–320]
- López F, Serrano JM, Acosta FJ. Temperature – vegetation structure interaction: The effect on the activity of ant *Messor barbarus* (L.) [J]. *Vegetation*, 1992, 100: 119–128.
- Majer JD, Kitching RL, Heterick BE, *et al.* North – south patterns within arboreal ant assemblages from rain forests in Eastern Australia [J]. *Biotropica*, 2001, 33 (4): 643–661.
- Menozi C. Formicidae dell'Himalaya del Karakorum raccolte dalla Spedizione Italiana comandata da S. A. R. il Duca di Spoleto (1929) [J]. *Atti della Società Italiana di Scienze Naturali*, 1939, 78: 285–345.
- Mo FY, Xu ZH, Song Y, *et al.* Ant communities in Yadong section of Mt. Himalaya [J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences), 2015, 39 (3): 85–90. [莫福燕, 徐正会, 宋扬, 等. 喜马拉雅亚东段蚂蚁群落研究 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2015, 39 (3): 85–90]
- Nielsen MG. Respiratory rates of ants from different climatic areas [J]. *Journal of Insect Physiology*, 1986, 32: 125–131.
- Radchenko AG, Elmes GW. Ten new species of *Myrmica* from the Himalaya [J]. *Vestnik Zoologii*, 1999, 33 (3): 27–46.
- Samson DA, Rickart EA, Gonzales PC. Ant diversity and abundance along an elevational gradient in the Philippines [J]. *Biotropica*, 1997, 29 (3): 349–363.
- Sanders NJ, Moss J, Wagner D, *et al.* Patterns of ant species richness along elevational gradients in an arid ecosystem [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2003, 12 (2): 93–102.
- Sanders NJ. Elevational gradients in ant species richness: Area, geometry, and Rapoport's rule [J]. *Ecography*, 2002, 25 (1): 25–32.
- Tang J, Li S. Hymenoptera: Formicidae. In: Huang FS, ed. *Insect of Xizang* [C]. Beijing: Science Press, 1982: 371–374. [唐觉, 李参. 膜翅目蚁科. 见: 黄复生主编, 西藏昆虫 [C]. 北京: 科学出版社, 1982: 371–374]
- Theunis L, Gilbert M, Roisin Y, *et al.* Spatial structure of litter – dwelling ant distribution in a subtropical dry forest [J]. *Insectes Sociaux*, 2005, 52 (4): 366–377.
- Wang Y, Wei W, Yang XZ, *et al.* Interrelationships between soil fauna and soil environmental factors in China: Research advance [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21 (9): 2441–2448. [王移, 卫伟, 杨兴中, 等. 我国土壤动物与土壤环境要素相互关系研究进展 [J]. 应用生态学报, 2010, 21 (9): 2441–2448]
- Wu J, Wang CL. *China Ant* [M]. Beijing: China Forestry Press, 1995: 1–214. [吴坚, 王常禄. 中国蚂蚁 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1995: 1–214]
- Xu ZH, Jiang XC, Chen ZQ, *et al.* Study on ant communities of the vertical band on east slope of the Gaoligongshan Mountains nature reserve [J]. *Forest Research*, 2001a, 14 (2): 115–124. [徐正会, 蒋兴成, 陈志强, 等. 高黎贡山自然保护区东坡垂直带蚂蚁群落研究 [J]. 林业科学研究, 2001a, 14 (2): 115–124]
- Xu ZH, Li JG, Fu L, *et al.* Study on ant communities of west slope ant different elevation of the Gaoligongshan Mountain nature reserve in Yunnan, China [J]. *Zoological Research*, 2001b, 22 (1): 58–63. [徐正会, 李继乖, 付磊, 等. 高黎贡山自然保护区西坡垂直带蚂蚁群落研究 [J]. 动物学研究, 2001b, 22 (1): 58–63]
- Xu ZH. A Study on the Biodiversity of Formicidae Ants of Xishuangbanna Nature Reserve [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2002: 1–181. [徐正会. 西双版纳自然保护区蚁科昆虫生物多样性研究 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 2002: 1–181]
- Yu NN, Xu ZH, Zhang CL, *et al.* Ant communities from east slope of Mount Demola to Zayu valley in south-eastern Tibet [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48 (10): 163–169. [于娜娜, 徐正会, 张成林, 等. 藏东南德姆拉山东坡及察隅河谷蚂蚁群落研究 [J]. 林业科学, 2012, 48 (10): 163–169]
- Zhang CL, Xu ZH, Yang BL, *et al.* Species composition and diversity of ant communities in Mount Sejila in south-eastern Tibet [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39 (7): 79–82. [张成林, 徐正会, 杨比伦, 等. 藏东南色季拉山蚂蚁群落的物种组成及多样性 [J]. 东北林业大学学报, 2011, 39 (7): 79–82]
- Zhang NN. Responses of Leaf – litter Ant Species Diversity and Functional Diversity to Land Use [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry Master Thesis, 2014. [张念念. 枯落物层蚂蚁物种多样性及功能多样性对土地利用的响应 [D]. 北京: 中国林业科学研究院硕士论文, 2014]
- Zhang X, Xu ZH, Li WQ, *et al.* Ant species diversity of Burang and Gyirong sections of Mt. Himalaya [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2018, 38 (1): 103–109. [张翔, 徐正会, 李文琼, 等. 喜马拉雅山普兰段和吉隆段蚂蚁物种多样性研究 [J]. 西南林业大学学报, 2018, 38 (1): 103–109]
- Zhou SY. *Ants of Guangxi* [M]. Guilin: Guangxi Normal University Press, 2001: 1–255. [周善义. 广西蚂蚁 [M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 2001: 1–255]
- Zingg AW. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff [J]. *Agricultural Engineering*, 1940, 21 (2): 59–64.