

新疆天山中-西段不同垂直带蚂蚁物种多样性

农正国, 熊忠平, 徐正会, 王戌勃, 刘霞

(西南林业大学 云南省森林灾害预警与控制重点实验室/林学院, 云南昆明 650224)

摘要: 【目的】探讨新疆天山中-西段蚂蚁群落结构、物种多样性与海拔和植被的关系, 以揭示新疆天山不同垂直带蚂蚁物种多样性规律。【方法】采用样地调查法和搜索法研究新疆天山中-西段 4 个垂直带的蚂蚁群落, 并利用 Estimate S 9.1.0 进行抽样充分性检测, 计算不同垂直带蚂蚁物种多样性的各指标, 并应用 SPSS 24.0 分析蚂蚁物种多样性各指数与海拔和植被特征的相关性, 如与海拔相关性显著, 则同时使用线性 and 二项式模型进行拟合, 基于拟合系数 (R^2) 评价拟合度, 并进行显著性检验。【结果】在天山中-西段共采集到蚂蚁 136247 头, 隶属于 2 亚科 12 属 29 种, 优势种为草地铺道蚁 *Tetramorium caespitum*、黑毛蚁 *Lasius niger* 和丝光蚁 *Formica fusca*。抽样充分性分析结果表明: 此次调查样地中大多数蚂蚁物种被采集到, 抽样充分; 4 个垂直带的物种丰富度为独山子垂直带 (18 种) > 那拉提垂直带 (14 种) > 库车垂直带 (13 种) > 乌拉斯台垂直带 (10 种)。多样性分析显示: 天山中-西段蚂蚁物种多样性随海拔升高总体呈下降趋势, 4 个垂直带的蚂蚁物种数和多样性指数与海拔变化显著负相关 ($P < 0.05$), 均匀度指数与海拔的相关显著性不尽相同, 二项式和线性模型变化趋势也普遍缺乏规律, 优势度指数与海拔变化相关性不显著, 但各垂直带二项式模型分析均呈先升高后降低的变化趋势。群落相似性分析发现: 蚂蚁群落相似性系数为 0.166 7~0.600 0 (平均为 0.289 0), 处于中等不相似水平, 蚂蚁群落间分化明显。相关分析发现: 蚂蚁物种数与乔木郁闭度显著正相关 ($P < 0.05$), 多样性其他指标与植被特征相关性不显著。【结论】海拔显著影响该地区的蚂蚁物种多样性, 同时坡向、湿度、植被等也起到重要作用。新疆天山地区在植被类型以草丛和灌丛为主, 气候炎热干燥, 海拔较高且温差大等多重因素影响下, 生态系统较脆弱, 应加大对该地区的生物多样性保护。图 5 表 5 参 37

关键词: 蚁科; 生物多样性; 群落; 新疆天山

中图分类号: S718.7 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2024)00-0001-10

Ant diversity along gradient in the middle-western section of Tianshan Mountains in Xinjiang

NONG Zhengguo, XIONG Zhongping, XU Zhenghui, WANG Xubo, LIU Xia

(Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control in Yunnan Province/College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] In order to reveal the diversity of ant species in different vertical zones in Tianshan Mountains, the ant community structure, relationship between species diversity and altitude and vegetation in the middle-western section of Tianshan Mountains were studied. [Method] Ant communities in four vertical zones were surveyed by plot sampling and searching methods. The sampling adequacy was tested by Estimate S 9.1.0, and the diversity indexes in different zones were calculated. The correlations between diversity indexes and altitude and vegetation characteristics were analyzed by SPSS 24.0, if the correlation between species

收稿日期: 2024-03-19; 修回日期: 2024-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31860166, 31860615); 云南省农业基础研究联合专项面上项目 (202101BD070001-037); 云南省森林灾害预警与控制重点实验室开放基金 (ZKJS-T-202208)

作者简介: 农正国 (ORCID: 0009-0004-6833-2295), 从事蚁科昆虫多样性研究。E-mail: 1986827611@qq.com。通信作者: 刘霞 (ORCID: 0000-0001-6287-6591), 副教授, 博士, 从事昆虫学研究。E-mail: liuxia.1128@163.com

diversity and elevation was significant, both linear and binomial models were used for fitting, the fitting was evaluated based on R^2 value while the significance was tested. [Result] A total of 136 247 ants were collected, and 29 species belonging to 12 genera and 2 subfamilies were recognized. *Tetramorium caespitum*, *Lasius niger* and *Formica fusca* were the dominant species of the middle-western section of Tianshan Mountains in Xinjiang. Sampling adequacy analysis showed that the most of ant species were collected. The richness of ant species of the four vertical zones as follows: Dushanzi vertical zone (18 species) > Narathi vertical zone (14 species) > Kuqa vertical zone (13 species) > Ulatai vertical zone (10 species). Diversity analysis showed that the ant species diversity of the middle-western section of Tianshan Mountains generally decreased with the altitude increasing. The species number and diversity index of the four vertical zones were significantly negatively correlated with the altitude change. On the four vertical zones, the correlation significance between evenness index and altitude was not the same, the change trends of binomial and linear models also lacked regularity. There was no significant correlation between dominance index and elevation change, but the binomial model analysis of each vertical zone showed a trend of increasing firstly and then decreasing with the elevation increasing. Community similarity analysis found that the similarity coefficient of ant community was between 0.166 7 to 0.600 0 (average 0.289 0), which was at the medium dissimilarity level, and indicating significant differentiation among ant communities. Correlation analysis showed that the species number was significantly positively correlated with tree canopy density, while the correlation between other diversity indexes and vegetation characteristics was not significant. [Conclusion] Altitude significantly affected ant species diversity in this region, while slope, humidity and vegetation also play an important role. In the Tianshan area of Xinjiang, under the influence of multiple factors such as vegetation types mainly being grassland and shrubland, hot and dry climate, high altitude and large temperature difference, and the ecosystem in this region is relatively fragile, so the protection of biodiversity in this region should be strengthened. [Ch, 5 fig. 5 tab. 37 ref.]

Key words: Formicidae; biodiversity; community; Tianshan Mountains in Xinjiang

蚂蚁作为膜翅目 Hymenoptera 蚁科 Formicidae 昆虫, 在自然界中具有不可忽视的作用, 具备改良土壤、分解有机质、促进土壤碳氮循环、维持微生态平衡等重要作用^[1-2], 常被用作各类环境生物多样性的指示物种^[3-4]。全世界已记载的蚂蚁共有 16 亚科 342 属 14 187 种^[5], 蚂蚁是地球上分布最广、种类及数量最多的社会性昆虫^[6]。

当前, 中国的蚂蚁群落研究集中在西南地区^[7-9], 而对西北地区蚂蚁群落研究报道较少。在新疆地区蚂蚁研究方面, 吴坚等^[10] 记录了新疆地区 2 亚科、5 属、14 种; 夏永娟等^[11-12] 记录了新疆地区 3 亚科、16 属、43 种, 其中 1 新种; COLLINGWOOD 等^[13] 报道准葛尔盆地及其邻近山区的蚂蚁 46 种, 其中 27 种为中国新纪录种; 黄人鑫等^[14] 报道了新疆蚂蚁 42 种新纪录种。通过上述研究共记载了新疆蚂蚁 3 亚科 20 属 118 种, 其中分布于天山的种类仅 46 种。可见, 对新疆蚂蚁的研究, 尤其是天山地区的研究还十分有限, 且仅限于区系和分类, 缺乏蚂蚁物种多样性的研究。近期, 翟奖等^[15] 研究了新疆天山东部与邻近地区蚂蚁分布规律, 共报道 2 亚科、14 属、29 种, 发现蚂蚁物种主要集中在土壤温润、树木高大的人工林内; 杨林等^[16] 对新疆天山中部的蚂蚁物种多样性进行了分析, 共报道蚂蚁 2 亚科 27 种, 北坡的蚂蚁物种多样性显著高于南坡, 且中海拔区域的物种多样性最高。这些研究丰富了天山地区蚂蚁分布和物种多样性的研究, 也使分布于天山的物种增加至 50 种。

天山中-西段主要位于克拉玛依的奎屯至阿克苏地区的库车一线区域, 由北坡、山间谷地和南坡组成, 于 2022 年 7—8 月对新疆天山中-西段的蚂蚁多样性进行调查, 探讨蚂蚁群落结构、物种多样性与海拔和植被的关系等问题, 并与天山中部的蚂蚁多样性进行比较, 以全面揭示干旱区蚂蚁物种多样性随着海拔和植被的变化如何变化, 以期为该地区的生物多样性保护提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 样地设置

新疆天山中-西段海拔为 781~3 235 m，依地形划分为北坡独山子垂直带、山间起伏盆地的乌拉斯台和那拉提 2 个垂直带及南坡的库车垂直带，共 4 个垂直带。海拔每上升 250 m，选取植被典型的 1 块 50 m×50 m 样地进行调查，共设置 33 块样地，其中垂直带中海拔最低的 1 块样地位于奎屯市独山子区天景颐园，海拔为 781 m。各垂直带调查样地的位置及自然概况见表 1。受野外自然条件限制，选定样地的海拔会有一定误差，控制在±50 m 内。

表 1 新疆天山中-西段蚂蚁群落调查样地概况

Table 1 Survey sites of ant communities in the middle-western section of Tianshan Mountains in Xinjiang

垂直带	样地编号	海拔/m	纬度(N)	经度(E)	土壤类型	土壤湿度	植被类型	乔木郁闭度	盖度/%			地被物厚度/cm
									灌木	草本	地被物	
独山子	1	781	44°19'01.12"	84°52'42.12"	黄壤	潮湿	落叶阔叶林	0.5	0	70	70	1.0~2.0
	2	1 050	44°12'39.95"	84°50'46.69"	黄壤	干燥	落叶阔叶林	0.3	5	75	75	0.5~1.0
	3	1 278	44°09'56.52"	84°49'39.46"	黄沙土	干燥	灌丛	0	30	80	80	0.5~1.0
	4	1 540	44°07'11.10"	84°49'31.52"	黄沙土	干燥	灌丛	0	30	70	70	0.5~1.0
	5	1 726	44°06'08.44"	84°48'15.93"	黄沙土	潮湿	灌丛	0	40	60	60	1.0~2.0
	6	2 029	43°53'15.47"	84°29'59.35"	黄壤	湿润	草丛	0	0	95	95	0.5~1.0
	7	2 285	43°50'12.22"	84°28'14.13"	棕黄壤	湿润	灌丛	0	30	80	80	2.0~3.0
	8	2 549	43°47'27.07"	84°27'51.96"	棕壤	湿润	草丛	0	0	95	95	1.0~2.0
	9	2 773	43°46'43.76"	84°27'21.36"	灰黄壤	湿润	锦鸡儿灌丛	0	30	95	95	1.0~2.0
	10	3 023	43°45'14.16"	84°26'13.54"	黄沙土	湿	草甸	0	0	95	95	1.0~2.0
	11	3 235	43°44'21.20"	84°24'57.72"	灰棕壤	湿	草甸	0	0	85	85	1.0~2.0
乌拉斯台	11	3 235	43°44'21.20"	84°24'57.72"	灰棕壤	湿	草甸	0	0	85	85	1.0~2.0
	12	3 024	43°42'27.20"	84°26'51.60"	棕壤	湿	草丛	0	0	80	80	1.0~2.0
	13	2 760	43°41'15.80"	84°23'57.55"	棕壤	湿	柏木灌丛	0	50	90	90	1.0~2.0
	14	2 533	43°40'02.69"	84°24'24.03"	棕壤	湿润	灌丛	0	30	90	95	0.5~1.0
	15	2 295	43°37'57.52"	84°18'48.52"	棕壤	湿润	云杉林	0.6	20	70	100	2.0~3.0
	16	2 000	43°21'36.52"	84°22'00.32"	棕壤	湿润	草丛	0	0	100	100	0.5~1.0
	17	1 798	43°20'12.98"	84°21'30.23"	棕壤	湿润	针阔混交林	0.4	0	95	95	1.0~2.0
	18	1 802	43°13'43.85"	84°19'15.64"	棕壤	湿润	针阔混交林	0.5	30	95	95	2.0~3.0
那拉提	19	2 020	43°13'31.38"	84°19'24.66"	棕壤	湿润	针阔混交林	0.5	70	50	100	1.0~2.0
	20	2 288	43°11'26.28"	84°19'42.82"	棕壤	湿润	草丛	0	0	100	100	1.0~2.0
	21	2 548	43°10'06.98"	84°21'04.21"	棕壤	湿润	高山柳灌丛	0	90	100	100	2.0~3.0
	22	2 547	42°41'24.77"	83°41'18.64"	棕壤	湿润	草丛	0	0	100	100	0.5~1.0
	23	2 785	42°34'51.52"	83°36'53.84"	棕壤	湿润	草丛	0	10	95	95	1.0~2.0
	24	3 055	42°30'50.27"	83°28'54.46"	棕壤	湿	草丛	0	0	70	70	1.0~2.0
	25	3 058	42°28'36.91"	83°26'04.32"	棕壤	湿	草丛	0	0	95	95	1.0~2.0
	26	2 759	42°27'50.54"	83°24'29.82"	黄壤	湿润	灌丛	0	50	95	95	1.0~2.0
库车	27	2 508	42°27'38.24"	83°23'21.49"	暗棕壤	湿润	云杉林	0.5	20	95	100	2.0~3.0
	28	2 233	42°26'31.70"	83°15'21.55"	黄壤	湿润	草丛	0	0	90	90	1.0~2.0
	29	2 052	42°25'05.20"	83°16'01.70"	黄壤	湿润	草丛	0	10	98	98	1.0~2.0
	30	1 773	42°13'34.37"	83°13'57.53"	黄沙土	湿润	灌丛	0	40	50	50	0.5~1.0
	31	1 539	42°07'16.52"	83°09'02.09"	红壤	干燥	灌丛	0	30	10	30	0.5
	32	1 269	41°51'24.16"	82°49'08.19"	黄沙土	干燥	疏灌丛	0	10	10	10	0.5
	33	1 009	41°44'01.62"	82°55'43.37"	黄沙土	干燥	落叶阔叶林	0.2	30	30	30	0.5

说明：乌拉斯台垂直带在该海拔梯度内可选择的典型植被类型样地较少，为更直观地揭示蚂蚁物种数量变化，选择独山子垂直带海拔为 3 235 m 的样地（编号 11）为乌拉斯台垂直带起始点。灌丛指多种灌木组成的灌丛，高于 1.0 m，区别于单树种灌丛；疏灌丛指盖度小于 10% 的灌丛。锦鸡儿 *Caragana sinica*；柏木 *Cupressus funebris*；云杉 *Picea asperata*；高山柳 *Salix cupularis*。土壤湿度以含水量 < 12% 为干燥，12%~15% 为湿润，15%~20% 为潮湿，> 20% 为湿。

1.2 调查及标本制作方法

参考文献[1], 在新疆天山中-西段不同海拔采用样地调查法和搜索法进行蚂蚁群落调查, 在选定样地内沿对角线选取5个1 m×1 m的样方, 每个样方间隔10 m, 在采集地表蚂蚁前, 先测量每个样方内地被物的厚度。分别采集样地地表样、土壤样和树冠样的蚂蚁, 并将蚂蚁保存至装有无水乙醇的离心管, 贴上标签。样方调查结束后, 5人同时对样地内样方外周围地表、石下、树冠和朽木等微生境进行搜索调查, 时间为1 h。将采集到的蚂蚁装入离心管并作标签和记录。依据同种同巢、同种形态相同原则对采集的标本进行归类、编号、登记, 将每号标本制作成不超过9头的三角纸干制标本, 多余的个体用无水乙醇浸渍保存, 依据相关分类学文献^[1, 10]鉴定蚂蚁标本, 尽可能鉴定到种。

1.3 群落结构分析方法

按照黄钊等^[8]的方法, 以各类蚂蚁物种个体数占群落物种总数的比例(β)来揭示群落结构特征, 采用常规划分标准分为5个类型, 即类型A为 $\beta \geq 10.0\%$, 优势种; 类型B为 $5.0\% \leq \beta < 10.0\%$, 常见种; 类型C为 $1.0\% \leq \beta < 5.0\%$, 较常见种; 类型D为 $0.1\% \leq \beta < 1.0\%$, 较稀有种; 类型E为 $\beta < 0.1\%$, 稀有种。

1.4 多样性指标测定方法

利用Estimate S 9.1.0对数据进行处理^[17-18], 采用5项主要指标测定物种多样性: 物种数目、Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数、Simpson优势度指数、Jaccard相似性系数^[1, 19], 利用SPSS软件中的one-way ANOVA对各垂直带蚂蚁多样性的各个指数进行方差分析并进行多重比较; 采用Pearson相关分析方法^[20]分析蚂蚁群落多样性各个指数与海拔的相关性, 若存在显著相关性, 则使用线性和二项式模型进行拟合, 基于拟合系数(R^2)评价拟合度, 并进行显著性 t 检验, 同时分析蚂蚁群落多样性指标与植被特征的相关性。

2 结果与分析

2.1 蚂蚁群落的结构分析

在新疆天山中-西段4个垂直带共采集蚂蚁136 247头, 经鉴定共29种, 隶属于2亚科12属。其中优势种3种, 分别为草地铺道蚁*Tetramorium caespitum*、黑毛蚁*Lasius niger*和丝光蚁*Formica fusca*; 常见种3种, 分别是黄毛蚁*L. flavus*、光亮黑蚁*F. candida*和工匠收获蚁*Messor structor*; 角结红蚁*Myrmica angulinodis*、红林蚁*F. sinae*等10种为较常见种; 凹唇蚁*F. sanguinea*、喜马拉雅蚁*L. himalayanus*和纹头原蚁*Proformica striaticeps*3种为较稀有种; 诺斯铺道蚁*T. nursei*、堆土细胸蚁*Leptothorax acervorum*等10种为稀有种(表2), 较常见种和稀有种种类较多。

表2 新疆天山中-西段蚂蚁群落结构

Table 2 Ant community structure of the middle-western section of Tianshan Mountains in Xinjiang

编号	物种名称	N/头	$\beta/\%$	物种类型	编号	物种名称	N/头	$\beta/\%$	物种类型
1	草地铺道蚁 <i>Tetramorium caespitum</i>	31 856	23.38	优势种	16	弯角红蚁 <i>Myrmica lobicornis</i>	1 411	1.04	较常见种
2	黑毛蚁 <i>Lasius niger</i>	22 629	16.61	优势种	17	凹唇蚁 <i>Formica sanguinea</i>	1 002	0.74	较稀有种
3	丝光蚁 <i>Formica fusca</i>	17 991	13.20	优势种	18	喜马拉雅蚁 <i>Lasius himalayanus</i>	736	0.54	较稀有种
4	黄毛蚁 <i>Lasius flavus</i>	12 247	8.99	常见种	19	纹头原蚁 <i>Proformica striaticeps</i>	139	0.10	较稀有种
5	光亮黑蚁 <i>Formica candida</i>	10 500	7.71	常见种	20	诺斯铺道蚁 <i>Tetramorium nursei</i>	129	0.09	稀有种
6	工匠收获蚁 <i>Messor structor</i>	9 688	7.11	常见种	21	堆土细胸蚁 <i>Leptothorax acervorum</i>	128	0.09	稀有种
7	角结红蚁 <i>Myrmica angulinodis</i>	4 406	3.23	较常见种	22	蒙古原蚁 <i>Proformica mongolica</i>	116	0.08	稀有种
8	红林蚁 <i>Formica sinae</i>	4 023	2.95	较常见种	23	长柄心结蚁 <i>Cardiocondyla elegans</i>	12	0.01	稀有种
9	阿富汗红蚁 <i>Myrmica afghanica</i>	3 903	2.86	较常见种	24	广布弓背蚁 <i>Camponotus herculeanus</i>	5	0	稀有种
10	艾箭蚁 <i>Cataglyphis aenescens</i>	3 695	2.71	较常见种	25	吉市红蚁 <i>Myrmica jessensis</i>	4	0	稀有种
11	满斜结蚁 <i>Plagiolipsis manczshurica</i>	3 030	2.22	较常见种	26	婀娜收获蚁 <i>Messor aralocaspius</i>	3	0	稀有种
12	草地蚁 <i>Formica pratensis</i>	3 009	2.21	较常见种	27	蒙古切胸蚁 <i>Temnothorax mongolicus</i>	3	0	稀有种
13	类干蚁 <i>Formica approximans</i>	2 043	1.50	较常见种	28	针毛收获蚁 <i>Messor aciculatus</i>	1	0	稀有种
14	掘穴蚁 <i>Formica cunicularia</i>	1 933	1.42	较常见种	29	条纹切胸蚁 <i>Temnothorax striatus</i>	1	0	稀有种
15	中亚凹头蚁 <i>Formica mesasiatica</i>	1 604	1.18	较常见种	合计		136 247	100	

说明: N为个体数, β 为各类蚂蚁物种个体数占群落物种总数的比例。

2.2 蚂蚁群落的多样性指标分析

2.2.1 物种累积曲线分析 随着调查样地的增加，实际观察物种数 (S)、基于多度 (个体数量) 的预测值 (ACE)、Chao 1 和 Chao 2 值均先急剧上升，后缓慢上升，最后趋于稳定 (图 1)。蚂蚁物种 S 为 29，与丰富度估计值 (ACE 值为 30.03，Chao1 值为 30，Chao 2 值为 29.97) 相接近，实际采集到的物种数约为预测值的 96.57%~96.76%，可见抽样充分。

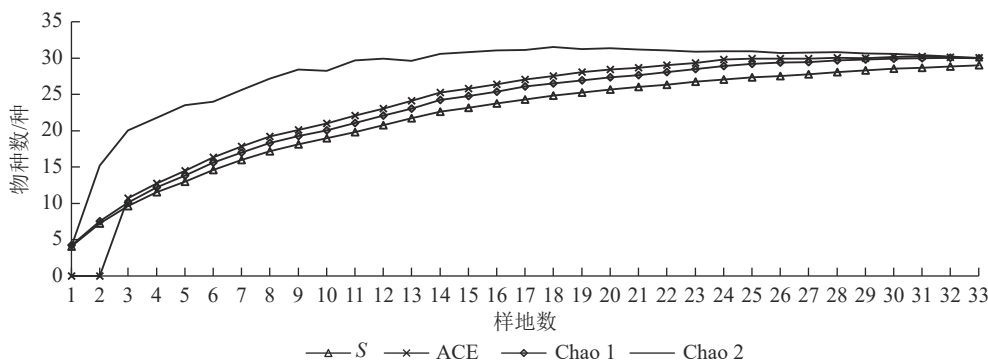


图 1 新疆天山中-西段蚂蚁物种实测值和预测值累积曲线

Figure 1 Cumulative curve of measured and predicted ant species in the middle-western section of Tianshan Mountains in Xinjiang

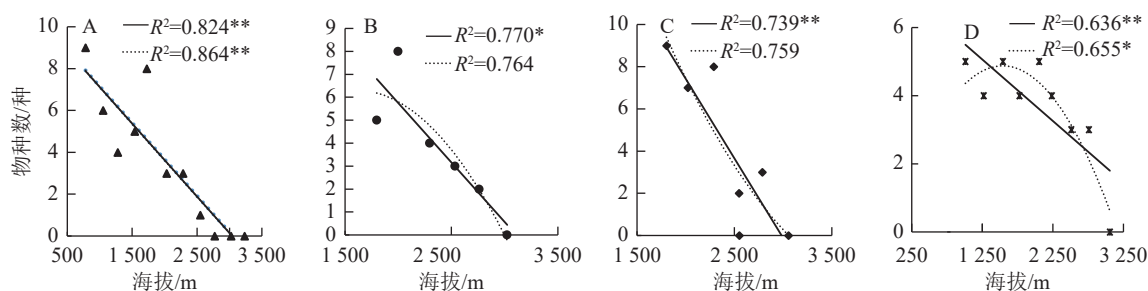
2.2.2 物种数 从物种的实测值来看，新疆天山中-西段 4 个垂直带的蚂蚁物种数都接近或等于 ACE 估计值 (表 3)，其中独山子垂直带海拔 2 773 m 锦鸡儿灌丛、3 023 m 草甸、3 235 m 草甸，乌拉斯台垂直带海拔 3 024 m 草丛，那拉提垂直带海拔 2 548 m 高山柳灌丛、3 055 m 草丛及库车垂直带 3 058 m 草丛样地均未发现蚂蚁。4 个垂直带蚂蚁物种数顺序为：独山子垂直带 (18 种) > 那拉提垂直带 (14 种) > 库车垂直带 (13 种) > 乌拉斯台垂直带 (10 种)。如图 2 所示：各垂直带的蚂蚁物种数与海拔存在显著 ($P < 0.05$) 相关性。总体来看，各垂直带的蚂蚁物种数随海拔升高基本呈下降趋势。独山子、乌拉斯台和那拉提垂直带蚂蚁物种数与海拔的二项式变化趋势与线性变化趋势基本一致，线性模型显示乌拉斯台和那拉提垂直带的蚂蚁物种数与海拔分别呈显著 ($R^2=0.770$, $P=0.022$) 和极显著 ($R^2=0.739$, $P=0.013$) 负相关关系，二项式变化同线性分析趋势一致，但无显著相关性 ($P > 0.05$)；而库车垂直带物种数与海拔的二项式模型呈现随海拔升高先升高后下降的单峰曲线。

表 3 各垂直带蚂蚁群落多样性指标

Table 3 Diversity indexes of ant communities in different vertical zones

垂直带	物种数/种	ACE估计值	Shannon-Wiener多样性指数	Pielou均匀度指数	Simpson优势度指数
独山子	18	20.10±0.00	0.515 2±0.153 9 a	0.313 8±0.095 8 a	0.446 3±0.107 8 a
乌拉斯台	10	10.00±0.00	0.539 9±0.221 6 a	0.348 9±0.121 5 a	0.403 7±0.135 8 a
那拉提	14	16.54±1.49	0.596 7±0.265 9 a	0.329 9±0.139 0 a	0.316 8±0.132 5 a
库车	13	13.60±0.00	0.505 8±0.119 1 a	0.408 6±0.103 2 a	0.611 0±0.096 0 a

说明：同列相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。数值为平均值±标准误。

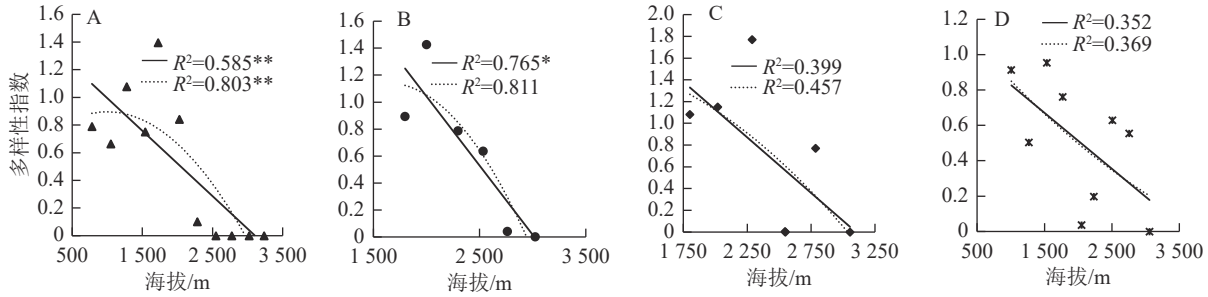


A. 独山子垂直带; B. 乌拉斯台垂直带; C. 那拉提垂直带; D. 库车垂直带。— 线性; 多项式。
 **, $P < 0.01$; *, $P < 0.05$; 未标注, $P > 0.05$ 。

图 2 物种数目与海拔的关系

Figure 2 Relationship between species number and altitude

2.2.3 多样性指数 新疆天山中-西段4个垂直带蚂蚁群落多样性指数顺序为：那拉提垂直带(0.596 7)>乌拉斯台垂直带(0.539 9)>独山子垂直带(0.515 2)>库车垂直带(0.505 8)，但4个垂直带的蚂蚁多样性指数差异不显著(表3)。如图3所示：在4个垂直带上，独山子和乌拉斯台垂直带的蚂蚁多样性指数与海拔存在显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)相关性，而那拉提和库车垂直带的蚂蚁多样性指数与海拔的相关性不显著($P>0.05$)。总体来看，各垂直带的蚂蚁多样性指数随海拔升高而呈现降低的趋势，二项式变化趋势与线性变化趋势基本一致。其中线性模型显示乌拉斯台垂直带蚂蚁多样性指数与海拔呈显著负相关($P<0.05$)，二项式变化趋势与线性分析一致，但无相关性。

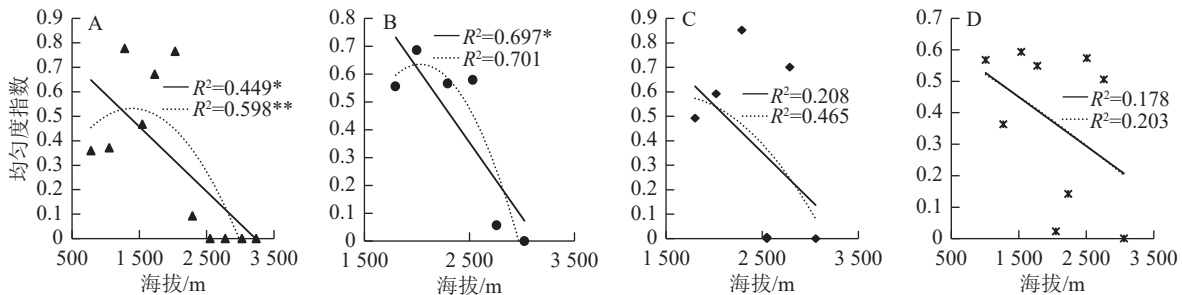


A. 独山子垂直带; B. 乌拉斯台垂直带; C. 那拉提垂直带; D. 库车垂直带。— 线性; 多项式。
**. $P<0.01$; *. $P<0.05$; 未标注. $P>0.05$ 。

图3 多样性指数与海拔的关系

Figure 3 Relationship between diversity index and altitude

2.2.4 均匀度指数 新疆天山中-西段4个垂直带的蚂蚁群落均匀度指数变化顺序为：库车垂直带(0.408 6)>乌拉斯台垂直带(0.348 9)>那拉提垂直带(0.329 9)>独山子垂直带(0.313 8)，但4个垂直带的蚂蚁均匀度指数差异不显著(表3)。如图4所示：在4个垂直带上，独山子和乌拉斯台垂直带的蚂蚁均匀度指数与海拔存在显著相关性($P<0.05$)，而那拉提和库车垂直带的蚂蚁均匀度指数与海拔关系不显著($P>0.05$)。其中在独山子垂直带，均匀度指数与海拔的线性模型显著负相关($P<0.05$)，二项式模型呈现极显著负相关($P<0.01$)，二项式和线性模型变化趋势不一致；线性模型显示乌拉斯台垂直带蚂蚁群落均匀度指数与海拔化显著负相关($R^2=0.697$, $P<0.05$)，二项式和线性模型变化趋势不一致，且相关性不显著($P>0.05$)；线性和二项式模型显示，那拉提和库车垂直带的蚂蚁群落均匀度指数与海拔变化相关性均不显著($P>0.05$)，但二项式和线性模型变化趋势基本一致。



A. 独山子垂直带; B. 乌拉斯台垂直带; C. 那拉提垂直带; D. 库车垂直带。— 线性; 多项式。
**. $P<0.01$; *. $P<0.05$; 未标注. $P>0.05$ 。

图4 均匀度指数与海拔的关系

Figure 4 Relationship between Pielou index and altitude

2.2.5 优势度指数 新疆天山中-西段4个垂直带蚂蚁群落优势度指数变化顺序为：库车垂直带(0.611 0)>独山子垂直带(0.446 3)>乌拉斯台垂直带(0.403 7)>那拉提垂直带(0.316 8)，与多样性指数的变化趋势正相反，但4个垂直带的蚂蚁群落优势度指数差异不显著(表3)。相关分析发现：各垂直带的蚂蚁群落优势度指数与海拔的相关性不显著($P>0.05$)；4个垂直带的线性模型和二项式模型的变化趋势不一致，二项式模型分析均呈先升高后降低的变化趋势(图5)，仅独山子垂直带的二项式模型呈显著性($R^2=0.846$, $P<0.01$)。

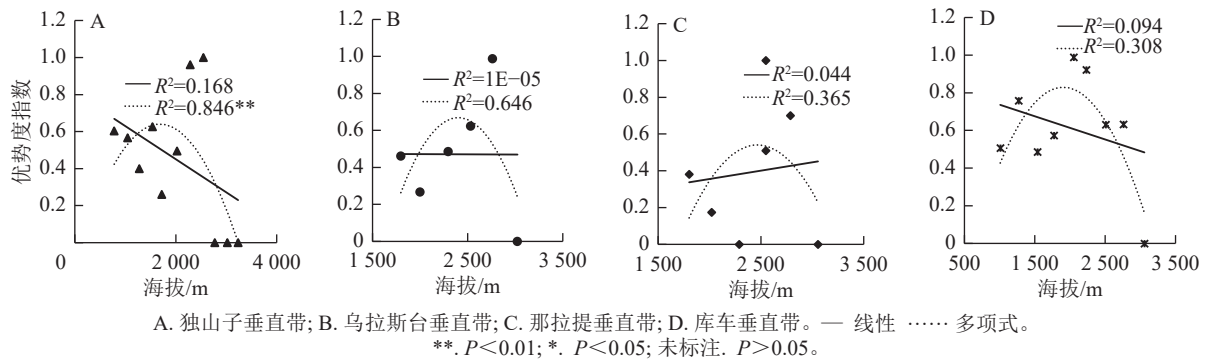


图 5 优势度指数与海拔的关系

Figure 5 Relationship between diversity index and altitude

2.3 蚂蚁群落相似性分析

新疆天山中-西段各垂直带蚂蚁群落间相似性系数为 0.166 7~0.600 0(表 4)，处于极不相似至中等相似水平；平均值 0.289 0，显示中等不相似水平。其中同处于山间盆地的那拉提与乌拉斯台垂直带的蚂蚁群落间相似性最大(0.600 0)，乌拉斯台与独山子垂直带的蚂蚁群落间相似性最小(0.166 7)，库车与那拉提垂直带之间相似性较低，处于中等不相似水平，其余垂直带间相似性低，处于极不相似水平。总体来说，新疆天山中-西段蚂蚁群落之间相似性较低，群落结构差异较大。

2.4 蚂蚁群落多样性指标与植被特征相关分析

如表 5 所示：新疆天山中-西段蚂蚁物种数与乔木郁闭度显著正相关($P < 0.05$)，但与灌木盖度、草本盖度、地被物盖度和地被物厚度相关性不显著；多样性指数、均匀度指数和优势度指数与植被特征的相关性均不显著。

表 4 新疆天山中-西段各垂直带蚂蚁群落间相似性系数

Table 4 Similarity coefficients of ant communities in the middle-western section of Tianshan Mountains in Xinjiang

垂直带	垂直带 <i>q</i>		
	乌拉斯台	那拉提	库车
独山子	0.166 7	0.230 8	0.240 0
乌拉斯台		0.600 0	0.210 5
那拉提			0.285 7
平均值		0.289 0	

说明：*q* 为相似性系数， $1 \geq q \geq 0.75$ ，极相似； $0.75 > q \geq 0.50$ ，中等相似； $0.50 > q \geq 0.25$ ，中等不相似； $0.25 > q \geq 0$ ，极不相似。

表 5 蚂蚁多样性与植被特征相关分析

Table 5 Correlation analysis between ant diversity and vegetation feature

植被特征	物种数	多样性指数	均匀度指数	优势度指数
乔木郁闭度	0.424*	0.296	0.285	0.095
灌木盖度	0.049	0.099	0.114	-0.015
草本盖度	-0.226	-0.234	-0.234	-0.072
地被物盖度	-0.161	-0.143	-0.137	-0.075
地被物厚度	-0.148	-0.240	-0.256	-0.071

说明：数值为 Pearson 相关系数，*表示在 0.05 水平上显著相关。

3 讨论

在新疆天山中-西段 4 个垂直带共采集蚂蚁 136 247 头，隶属于 2 亚科 12 属 29 种，物种数略高于新疆天山中段^[16](2 亚科 15 属 27 种)，与天山东段^[15](2 亚科 14 属 29 种)相等，但明显高于临近的祁连山国家公园青海片区^[21](2 亚科 6 属 13 种)，可能是因为天山中部和祁连山国家公园海拔较高，海拔落差较大，其物种丰富度较低，而新疆天山中-西段和东段由于平均海拔较低，蚂蚁物种丰富度较高，相对海拔高度对蚂蚁物种丰富度也有着重要影响。与同为干旱区的伊朗中部相比，新疆天山中-西段的蚂蚁物种数明显低于伊朗中部^[22](8 亚科 12 属 34 种)，可能是伊朗中部纬度和海拔均低于新疆天山，表明耐热性较低的物种更喜欢聚集在中部高海拔区域^[22]，而伊朗中部因适合蚂蚁生存的海拔跨度较大造成物种多样性较高，新疆天山中-西段由于低海拔炎热干燥，高海拔温度过低，适合蚂蚁生存的海拔跨度较小而使多样性较低。

目前，全球蚂蚁物种多样性沿海拔梯度变化主要呈现 5 种模式^[23]：①随海拔升高蚂蚁多样性呈递减

的趋势(物种多样性最高出现在低海拔区域)^[24]; ②低高原模式(300 m以下最低海拔的高多样性); ③单峰模式,即在中海拔区域物种多样性最高,可用“中域效应”来解释(海拔高于300 m)^[25]; ④随海拔升高蚂蚁多样性呈现升高的趋势^[26]; ⑤无规律模式。研究表明:在沿海拔梯度的5种模式中,最常见的是单峰模式和递减模式^[27-29]。中海拔地区的物种丰富度较高是由于高海拔或低海拔地区的气候严酷和高海拔地区资源的可利用性有限^[30-31];物种丰富度随海拔升高而下降,原因是海拔升高,温度和生产力下降^[32]。通过对新疆天山中-西段4个垂直带的物种数和多样性指数分析发现:蚂蚁物种多样性沿海拔梯度变化总体呈现随海拔升高而降低的趋势,主要原因是随着海拔的升高气温会逐渐降低而影响蚂蚁的生存;4个垂直带的物种数和多样性指数与海拔变化显著相关,均匀度指数和优势度指数与海拔的相关显著性不尽相同,这与天山中部南北坡的蚂蚁多样性变化规律一致^[16]。除了气温以外,还可能受到湿度的制约。与藏东南、四川西部大凉山和云南地区自然保护区不同,新疆天山位居中国内陆,印度洋季风因受到喜马拉雅山脉的阻挡而无法到达,太平洋季风虽可以到达,但距离较远,因此新疆天山常年较干旱,雨水较少,湿度较低,植被类型多以草地及灌木为主,蚂蚁物种丰富度也较低;从4个垂直带来看,蚂蚁物种数独山子垂直带(18种)>那拉提垂直带(14种)>库车垂直带(13种)>乌拉斯台垂直带(10种),独山子垂直带位于天山北坡,库车垂直带位于天山南坡,可见天山的北坡蚂蚁物种数比南坡要多,可能是因为新疆天山位于北半球,南坡为阳坡,北坡为阴坡,南坡日照时间长,水分蒸发量大,土壤湿度低,蚂蚁物种较少,这与天山中部南北坡的蚂蚁物种分布一致^[16]。因此湿度也成为制约蚂蚁物种多样性的因素之一。同时温度和湿度也影响着植被类型、土壤结构和微生境等,故蚂蚁物种多样性受到多种因素的影响。

从群落相似性来看,那拉提与乌拉斯台垂直带的蚂蚁群落间相似性较高,其原因可能是这2个垂直带地理位置相邻,海拔高度和植被类型相似,相同的生境提供了相同的栖息场所和食物资源,从而孕育了较多相同的蚂蚁种类;而其余各垂直带间的群落相似性较低,处于极不相似至中等不相似水平,蚂蚁群落组成差异明显。相关性分析表明:天山中-西段蚂蚁群落的物种数与多样性指数与海拔变化呈显著负相关,海拔梯度显著影响该区域的蚂蚁物种多样性。有研究表明:凋落物覆盖率增高可增加蚂蚁的物种丰富度^[33],但蚂蚁物种丰富度与凋落物的数量间无显著相关性,本研究中各垂直带蚂蚁物种数与草本盖度、地被物的盖度和厚度负相关,但相关性不显著,与前人研究结果一致^[34];物种数与乔木郁闭度呈显著正相关,在四川王朗自然保护区^[35]、青藏高原西南坡^[36]和西北坡^[37]等地区的研究也存在这种相关关系,可能是高大的乔木给蚂蚁提供了较理想的栖息场所、食物来源,蚂蚁群落得以发展。从栖息生境来看,天山中-西段的植被多为草丛和灌丛,仅在海拔相对较低的地方分布有阔叶林、针阔混交林,生态系统脆弱,保护和利用好区域内的昆虫生物多样性,对维持和改善生态系统具有重要意义。

4 结论

在新疆天山中-西段4个垂直带共记录到蚂蚁2亚科12属29种,优势种为草地铺道蚁、黑毛蚁和丝光蚁。新疆天山中-西段的蚂蚁物种多样性明显高于祁连山国家公园青海片区,与天山东段和中段接近,低于同为干旱区的伊朗中部。整体而言,天山中-西段4个垂直带蚂蚁群落多样性指数随海拔升高而呈现降低趋势。物种数和多样性指数与海拔显著负相关,且物种数与乔木郁闭度显著正相关,海拔显著影响该地区的蚂蚁物种多样性,同时坡向、湿度、植被等也起到重要作用。各垂直带间的蚂蚁群落相似性总体较低,表明蚂蚁群落分化明显。

5 致谢

感谢西南林业大学图书馆房华老师和研究生杨蕊、韩秀、杨林、钱怡顺在标本采集和样地调查,本科生杨润娇、何丽华、杨洋和潘宇航在标本整理与制作中的帮助。

6 参考文献

[1] 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.

XU Zhenghui. *Study on Biodiversity of Formicidae in Xishuangbanna Nature Reserve*[M]. Kunming: Yunnan Science and

- Technology Press, 2002.
- [2] ZHANG Xuehui, XIN Yuan, ZHANG Zhongsheng, *et al.* Effects of ant colonies on molecular characteristics of dissolved organic matter in peatland soils, Northeast China [J/OL]. *Applied Soil Ecology*, 2022, **171**: 104298[2024-03-01]. doi: 10.1016/j.apsoil.2021.104298.
- [3] HOFFMANN B D. Using ants for rangeland monitoring: global patterns in the responses of ant communities to grazing [J]. *Ecological Indicators*, 2010, **10**(2): 105 – 111.
- [4] 李巧, 卢志兴, 张威, 等. 地表蚂蚁在云南萨王纳地区植被恢复过程中的指示作用[J]. *生态学报*, 2015, **35**(18): 6199 – 6207.
LI Qiao, LU Zhixing, ZHANG Wei, *et al.* Ground-dwelling ants as bioindicators during 30-year vegetation restoration in a Savanna area, Yunnan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(18): 6199 – 6207.
- [5] BOLTON B. *An Online Catalog of the Ants of the World* [EB/OL]. (2024-02-10)[2023-11-28]. <https://antcat.org>.
- [6] HOLLODOBIER B, WILSON E O. *The Ants* [M]. Cambridge: Belknap Press of Harvard University Press, 1990.
- [7] 刘春, 谢谷艾, 熊彩云, 等. 云南省绿春县不同人工林树栖蚂蚁多样性研究[J]. *生物灾害科学*, 2018, **41**(3): 225 – 229.
LIU Chun, XIE Gu'ai, XIONG Caiyun, *et al.* Research about diversity of arboreal ants in different plantations in Lüchun County [J]. *Biological Disaster Science*, 2018, **41**(3): 225 – 229.
- [8] 黄钊, 徐正会, 刘霞, 等. 滇东北地区的蚂蚁物种多样性[J]. *生态学杂志*, 2019, **38**(12): 3697 – 3705.
HUANG Zhao, XU Zhenghui, LIU Xia, *et al.* Ant species diversity of northeastern Yunnan [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(12): 3697 – 3705.
- [9] 和玉成, 徐正会, 张新民, 等. 四川大凉山西部蚂蚁的物种多样性[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2020, **40**(3): 104 – 115.
HE Yucheng, XU Zhenghui, ZHANG Xinmin, *et al.* Ant species diversity of western Daliangshan in Sichuan Province [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Science Edition)*, 2020, **40**(3): 104 – 115.
- [10] 吴坚, 王常禄. *中国蚂蚁* [M]. 北京: 中国林业出版社, 1995.
WU Jian, WANG Changlu. *Ants of China* [M]. Beijing: China Forestry Press, 1995.
- [11] 夏永娟, 郑哲民. 新疆蚁科昆虫调查[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 1997, **25**(2): 64 – 66.
XIA Yongjuan, ZHENG Zhemin. A survey of Formicidae from Xinjiang [J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 1997, **25**(2): 64 – 66.
- [12] 夏永娟, 郑哲民. 新疆蚁属一新种记述(膜翅目: 蚁科)[J]. *湖北大学学报(自然科学版)*, 1997, **19**(4): 391 – 392.
XIA Yongjuan, ZHENG Zhemin. Description of a new species of *Formica* from Xinjiang (Hymenoptera: Formicidae) [J]. *Journal of Hubei University (Natural Science Edition)*, 1997, **19**(4): 391 – 392.
- [13] COLLINGWOOD C, HEATWOLE H. Ants from northwestern China (Hymenoptera, Formicidae) [J]. *Psyche*, 2000, **103**(1/2): 1 – 24.
- [14] 黄人鑫, 欧阳彤, 吴卫, 等. 新疆蚁科昆虫 42 种中国新记录[J]. *昆虫分类学报*, 2004, **26**(2): 156 – 160.
HUANG Renxin, OUYANG Tong, WU Wei, *et al.* Forty two new record species of family Formicidae (Hymenoptera: Formicoidea) from Xinjiang, China [J]. *Entomotaxonomia*, 2004, **26**(2): 156 – 160.
- [15] 翟奖, 李彪, 徐正会, 等. 新疆天山东部与邻近地区蚂蚁种类及其分布规律[J]. *森林与环境学报*, 2021, **41**(4): 431 – 438.
ZHAI Jiang, LI Biao, XU Zhenghui, *et al.* Ant species and distribution pattern in eastern Tianshan Mountain and adjacent area of Xinjiang [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2021, **41**(4): 431 – 438.
- [16] 杨林, 熊忠平, 刘霞, 等. 新疆天山中部蚂蚁物种多样性[J]. *林业科学*, 2023, **59**(6): 102 – 111.
YANG Lin, XIONG Zhongping, LIU Xia, *et al.* Species diversity of ants in the middle of Tianshan Mountain, Xinjiang [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2023, **59**(6): 102 – 111.
- [17] 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 Qiao. Species accumulation curves and its application [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2011, **48**(6): 1882 – 1888.
- [18] COLWELL R K, ELSENJOHN J E. EstimateS turns 20: statistical estimation of species richness and shared species from samples, with non-parametric extrapolation [J]. *Ecography*, 2014, **37**(6): 609 – 613.
- [19] 王宗英, 路有成, 王慧芙. 九华山土壤螨类的生态分布[J]. *生态学报*, 1996, **16**(1): 58 – 64.

- WANG Zongying, LU Youcheng, WANG Huihu. The ecological distribution of soil mites in Jiuhua Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **16**(1): 58 – 64.
- [20] BUCZKC W G, RICHMOND D S. The effect of urbanization on ant abundance and diversity: a temporal examination of factors affecting biodiversity [J/OL]. *PLoS One*, 2021, **7**(8): e41729 [2024-03-01]. doi: [10.1371/journal.pone.0041729](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041729).
- [21] 熊忠平, 和秋菊, 徐正会, 等. 祁连山国家公园青海片区蚂蚁物种多样性研究[J]. *环境昆虫学报*, 2021, **43**(1): 93 – 103.
XIONG Zhongping, HE Qiuju, XU Zhenghui, *et al.* Ant species diversity of Qinghai part, Qilian Mountain National Park [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2021, **43**(1): 93 – 103.
- [22] MARYAM H, SABER S, ZOHREH E B. Ant diversity and species assemblages along an elevational gradient in the arid area of Central Iran [J]. *Journal of Insect Biodiversity and Systematics*, 2024, **10**(1): 143 – 159.
- [23] SZEWCZYK T, MCCAIN C M. A systematic review of global drivers of ant elevational diversity [J/OL]. *PLoS One*, 2016, **11**(5): e0155404 [2024-03-01]. doi: [10.1371/journal.pone.0155404](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155404).
- [24] KWON T S, KIM S S, CHUN J H. Pattern of ant diversity in Korea: an empirical test of Rapoport altitudinal rule [J]. *Journal of Asia Pacific Entomology*, 2014, **17**(2): 161 – 167.
- [25] SANDERS N J. Elevational gradients in ant species richness: area, geometry, and Rapoport's rule [J]. *Ecography*, 2002, **25**(1): 25 – 32.
- [26] HALIAN M, SADEGHI S, BARZOKI Z E, *et al.* Ant diversity and species assemblages along an elevational gradient in the arid area of central Iran [J]. *Journal of Insect Biodiversity and Systematics*, 2024, **10**(1): 143 – 159.
- [27] COLWELL R K, BREHM G, CARDELÚ C L, *et al.* Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics [J]. *Science*, 2008, **5899**(322): 258 – 261.
- [28] BHARTI H, SHARMA Y P. Diversity and abundance of ants along an elevational gradient in Jammu-Kashmir Himalaya [J]. *Halteres*, 2009, **1**(1): 10 – 24.
- [29] 莫福燕, 徐正会, 宋扬, 等. 喜马拉雅山东段蚂蚁群落研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, **39**(3): 85 – 90.
MO Fuyan, XU Zhenghui, SONG Yang, *et al.* Ant communities in Yadong section of Mt. Himalaya [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2015, **39**(3): 85 – 90.
- [30] MCCOY E D. The distribution of insects along elevational gradients [J]. *Oikos*, 1990, **58**: 313 – 332.
- [31] BHARTI H, SHARMA Y P, BHARTI M, *et al.* Ant species richness, endemism and functional groups, along an elevational gradient in the Himalayas [J]. *Asian Myrmecology*, 2013, **5**(1): 79 – 101.
- [32] RAHBK C. The elevational gradient of species richness: a uniform pattern [J]. *Ecography*, 1995, **18**(2): 200 – 205.
- [33] SKARBK C J, NOACK M, BRUELHEIDE H, *et al.* A tale of scale: plot but not neighbourhood tree diversity increases leaf litter ant diversity [J]. *The Journal of Animal Ecology*, 2020, **89**(2): 299 – 308.
- [34] MANN H R, ROWE E, SELFRIDGE J, *et al.* Leaf litter and arboreal ants (Hymenoptera: Formicidae) in a mid-Atlantic forest [J]. *Northeastern Naturalist*, 2018, **25**(2): 341 – 354.
- [35] 罗成龙, 徐正会, 熊忠平, 等. 四川王朗自然保护区及临近地区蚂蚁物种的分布格局[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, **36**(4): 638 – 645.
LUO Chenglong, XU Zhenghui, XIONG Zhongping, *et al.* Distribution pattern of ant species in Wanglang Nature Reserve and adjacent areas of Sichuan Province [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, **36**(4): 638 – 645.
- [36] 李彪, 熊忠平, 徐正会, 等. 雅鲁藏布河谷上游及青藏高原西南坡蚂蚁物种的分布格局[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, **39**(3): 590 – 597.
LI Biao, XIONG Zhongping, XU Zhenghui, *et al.* Distribution pattern of ant species in Upper Yarlung Zangbo Valley and southwest slope of Tibetan Plateau [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, **39**(3): 590 – 597.
- [37] 钱怡顺, 熊忠平, 徐正会, 等. 青藏高原西北坡及邻近地区蚂蚁物种多样性[J]. *生态学杂志*, 2023, **42**(7): 1721 – 1730.
QIAN Yishun, XIONG Zhongping, XU Zhenghui, *et al.* Ant species diversity in the northwest slope of the Tibetan Plateau and its adjacent areas [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, **42**(7): 1721 – 1730.