

DOI: 10.5846/stxb201510312201

沈梦伟, 陈圣宾, 毕孟杰, 陈文德, 周可新. 中国蚂蚁丰富度地理分布格局及其与环境因子的关系. 生态学报, 2016, 36(23): 7732-7739.

Shen M W, Chen S B, Bi M J, Chen W D, Zhou K X. Relationships between geographic patterns of ant species richness and environmental factors in China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7732-7739.

中国蚂蚁丰富度地理分布格局及其与环境因子的关系

沈梦伟¹, 陈圣宾^{2,*}, 毕孟杰³, 陈文德¹, 周可新²

¹ 成都理工大学旅游与城乡规划学院, 成都 610059

² 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042

³ 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059

摘要:物种丰富度分布格局及其形成机制的研究对于生物多样性保护具有重要意义。为了了解中国蚂蚁物种丰富度分布格局, 利用中国省级尺度蚂蚁物种分布数据和环境信息, 结合 GIS 和数理统计方法, 探讨蚂蚁物种丰富度的地理分布格局与环境因子之间的关系。研究表明: (1) 蚂蚁丰富度随纬度增加呈逐渐递减趋势, 但缺乏显著的经度梯度。丰富度最高的地区主要集中在南方省份, 我国北方、西北干旱区和青藏高原北部地区丰富度较低; (2) 简单线性回归分析表明, 能量、水分和季节性因素中, 影响蚂蚁物种丰富度最强的因子分别为最冷月均温 (TEM_{min}) ($R_{adj}^2 = 0.532$)、年均降水量 (PREC) ($R_{adj}^2 = 0.376$) 和年温度变化范围 (TEM_{var}) ($R_{adj}^2 = 0.539$), 而单个生境异质性因子对蚂蚁物种丰富度的影响均不显著; (3) 最优模型由年均温 (TEM)、海拔变化范围 (ELE_{range}) 和年温度变化范围 (TEM_{var}) 组成, 能够解释 68.4% 的蚂蚁丰富度地理分异。鉴于海拔变化范围更多地反映与温度相关的生境异质性, 因此温度是限制中国蚂蚁分布的最重要因素。另外, 分析结果还表明, 海南、贵州、江西、四川、安徽和山西等 6 省蚂蚁区系调查最不充分, 是未来发现蚂蚁新分布的热点地区。

关键词:生物地理学; 空间分布格局; 温度; 调查强度

Relationships between geographic patterns of ant species richness and environmental factors in China

SHEN Mengwei¹, CHEN Shengbin^{2,*}, BI Mengjie³, CHEN Wende¹, ZHOU Kexin²

¹ College of Tourism and Urban-Rural planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

² Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China

³ College of Earth science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Understanding spatial patterns of species richness is a hot topic in macroecology because of its significance in biodiversity conservation. In many previous studies, current environmental variables representing energy and water availability have been considered as the main drivers of geographic diversity patterns. However, the roles of different environmental variables vary for different taxonomic groups and distinct biogeographic extents; therefore, there is no consensus among ecologists on which environmental variables are primary drivers of the spatial variation in species richness. China covers a wide range of latitudes and longitudes and has a wide range of variation in climate and vegetation (e.g., from tropical rain forest in the south to boreal forest in the northwest and desert in the north and northwest). Thus, China offers great opportunity for testing the relationships between species richness and environment. In the present study, geographic pattern of ant species richness in China and its relationships with environmental factors were investigated based on ant distribution data and environmental variables at a provincial scale. Several studies on the distribution of ants in other

基金项目:国家环境保护公益性行业科研专项(201409055); 国家科技支撑计划(2012BAC01B08)

收稿日期:2015-10-31; **修订日期:**2016-04-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chainpin@126.com

geographical areas show that temperature (energy) is the most important factor that determines ant species richness patterns. This conclusion might also apply to China. Therefore, four hypotheses were tested in the present study. (1) Compared to the mean annual precipitation, ant species richness pattern was more likely affected by the mean annual temperature. (2) Compared to the habitat heterogeneity associated with precipitation, ant species richness pattern was more affected by habitat heterogeneity associated with temperature. Since ants are ectotherms and their survivorship under low temperature in winter is critical for their populations and distribution, we further assumed that (3) compared to the mean annual temperature, mean temperature of the coldest month better explains the spatial differentiation of ant species richness. Given that precipitation seasonality and temperature seasonality are mainly determined by annual temperature range and annual precipitation range, we inferred that, (4) compared to precipitation seasonality, temperature seasonality can better explain spatial ant species richness pattern. To test these hypotheses, GIS was used to map ant species diversity and simple and multiple linear regressions were used to determine the relative roles of different environmental variables. The results showed that: (1) Ant species richness decreases significantly with latitude but not longitude; the species richness is higher in southern provinces of China than in northern and northwestern regions of China. (2) Simple linear regression analyses showed that, mean temperature of the coldest month (TEM_{\min} , $R_{\text{adj}}^2 = 0.532$), annual precipitation ($PREC$, $R_{\text{adj}}^2 = 0.376$), and annual temperature range (TEM_{var} , $R_{\text{adj}}^2 = 0.539$) are the variables that best fit energy, water, and seasonality, respectively. However, none of the factors reflecting habitat heterogeneity have significant effect on ant species richness when assessed independently. (3) Our results indicate that the best model based on the Akaike information criterion (AIC) includes the mean annual temperature (TEM), the range of elevation within a province ($ELEV_{\text{range}}$), and the annual temperature range (TEM_{var}). This model can explain 68.4% of the geographic variance in ant species richness across different provinces in China. The above four hypotheses were confirmed, and we conclude that temperature is the most important factor controlling ant distribution in China. In addition, our analysis revealed that ant fauna in Hainan, Guizhou, Jiangxi, Sichuan, Anhui, and Shanxi is poorly sampled, and these provinces are potential hot spots for new ant records.

Key Words: biogeography; spatial distribution pattern; temperature; sampling effort

大尺度的物种组成、分布及其成因一直是生物地理学和生物多样性科学的核心问题^[1]。已有的研究主要以高等动植物为对象^[2-5]。昆虫是地球上物种多样性最高的多细胞生物类群,但大多数物种(或类群)的地理分布数据仍然缺乏;因此,与其高度的多样性相比,昆虫生物地理学研究严重不足^[6]。蚂蚁是膜翅目(Hymenoptera)蚁科(Formicidae)社会性昆虫的俗称,种类繁多、分布广泛。据不完全统计,全球已知蚂蚁约为15700余种和亚种,并且不断有新物种被发现^[7]。已有研究表明蚂蚁物种丰富度随纬度增加明显降低^[8-13],且主要受能量的制约^[14-15],其次为降水量、生境异质性和外来物种入侵等^[12]。本文在省级尺度上,探讨中国蚂蚁物种丰富度的地理格局及其与环境因子,特别是温度(能量)的关系。基于其他地理区域的研究结果^[14-15],温度可能是影响中国省级尺度蚂蚁物种丰富度的主要因素,具体为以下4个科学问题:(1)相比年降水量,年均温对蚂蚁丰富度的空间分异影响更大;(2)相比降水相关的生境异质性,蚂蚁丰富度更多受温度相关生境异质性的影响;(3)相比年均温,最冷月均温能更好地解释蚂蚁丰富度的空间分异;(4)相比降水季节性,温度季节性能更好地解释蚂蚁丰富度空间分异。

1 材料与方法

1.1 研究区及数据来源

本研究区域范围包括中国34个省、自治区、直辖市以及香港和澳门两个特别行政区。由于直辖市和特别行政区面积较小,将北京市和天津市并入河北省;将上海市并入浙江省;将重庆市并入四川省;将香港和澳门特别行政区并入广东省(图1)。

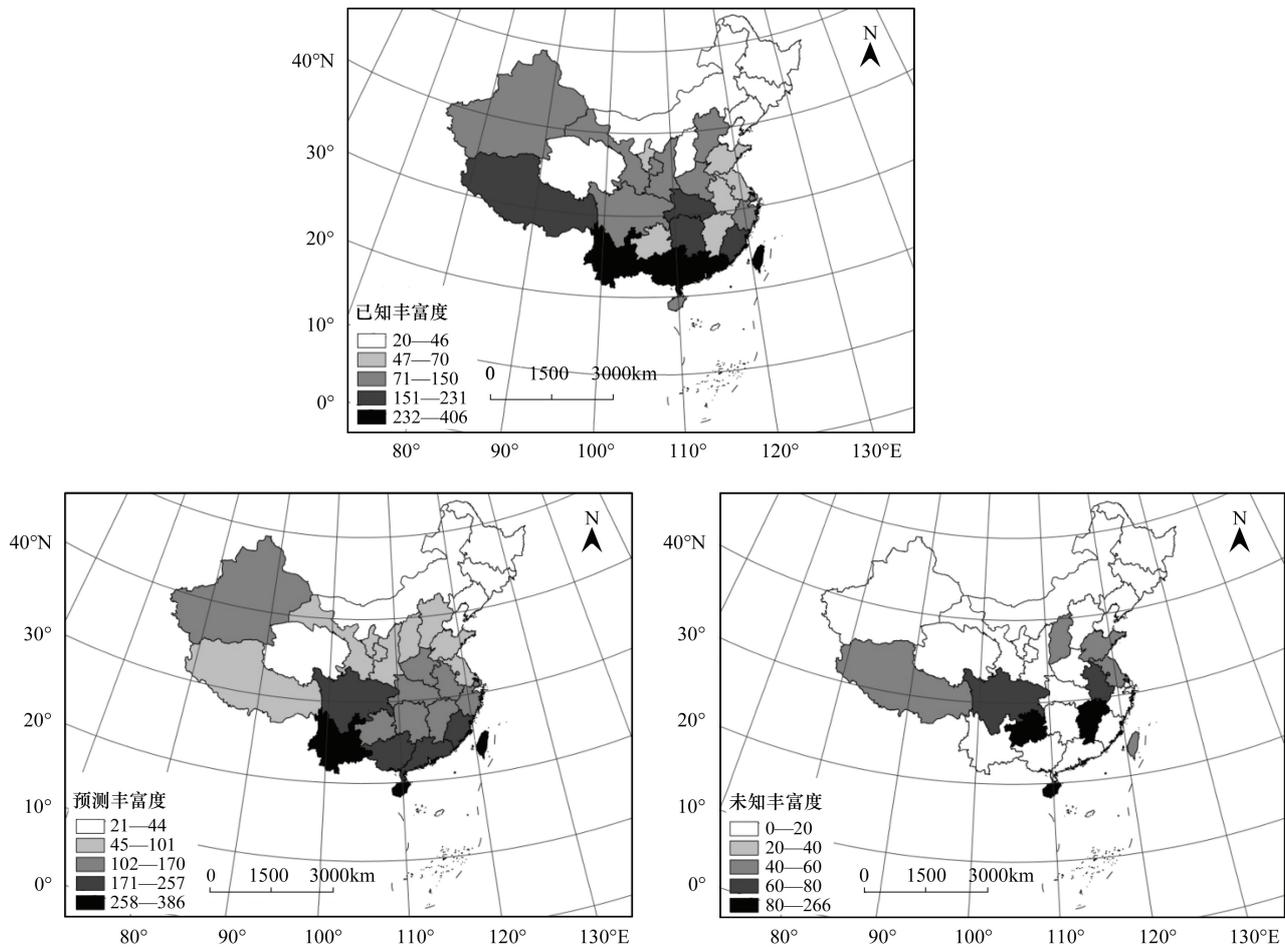


图1 中国省级行政区尺度蚂蚁丰富度和最优模型预测丰富度和未知丰富度

Fig.1 The geographic pattern of observed ant richness, predicted ant richness from the best model, and unsampled at richness at provincial scale in China

北京市和天津市并入河北省;将上海市并入浙江省;重庆市并入四川省;香港和澳门特别行政区并入广东省

Guénard 和 Dunn 在 2012 年系统整理了中国各省蚂蚁名录^[16],成为本文数据的主要来源。整合了刘霞等人 2011 年发表的数据^[17],以弥补西藏地区调查强度的相对不足。以“1”或“0”记录某种蚂蚁在某省份的分布与否,建立中国蚂蚁分布数据库,进而计算各省份蚂蚁的物种丰富度。

本研究共选用 15 个环境因子(表 1),分为 4 大类:能量、降水、生境异质性和季节性因子(表 1)。能量因子包括年均温(TEM)、最冷月均温(TEM_{min})、最暖月均温(TEM_{max})和年潜在蒸发量(PET);水分因子包括年降雨量(PRE)、夏季降水量(PREC_{sum})、水分亏缺指数(WD;即 PET 与 AET 的差值)和湿润指数(MI;即 AET/PET);季节性因子包括年温度变化范围(TEM_{var};即 TEM_{max} 和 TEM_{min} 的差值)、月均温标准差(TEM_{sd})、年降水量变化范围(PREC_{var},即最大和最小月均降水量的差值)、月均降水量标准差(PREC_{sd});生境异质性子因子包括各省的海拔变化范围(ELEV_{range})、年均温空间变化范围(TEM_{range})和年降水量空间变化范围(TEM_{range})(表 1)。

其中温度和降水量相关数据来源于 WorldClim (<http://www.worldclim.org>),年潜在蒸发量(PET)和年实际蒸发量(AET)数据来自 Ahn 和 Tateishi^[18]。利用 ArcGIS 9.3 将中国矢量地图切割成 3844 个 0.5 度像元,提取每个像元中心点经纬度,通过运用 DIVA-GIS 软件,获取每个中心点的环境数据。各省内各像元环境因子的均值代表其平均环境条件,而各省海拔、年均温和年均降水量的相应最大值和最小值之差代表其生境异质性。

表 1 中国省级行政区尺度蚂蚁丰富度与每个环境因子的线性回归关系

Table 1 Linear regression of ant richness against each environmental variable at province scale in China

| 变量 Variable | 解释量 R_{adj}^2 |
|---|---------------------|
| (1) 热量因素 Energy availability | |
| 年均温 Mean annual temperature(TEM) | 0.406 ** |
| 最冷月均温 Temperature of the coldest month(TEM _{min}) | 0.532 ** |
| 最暖月均温 Temperature of the warmest month(TEM _{max}) | 0.098 * |
| 年潜在蒸发量 Annual potential evapotranspiration(PET) | 0.499 ** |
| (2) 水分因素 Water availability | |
| 年均降水量 Annual precipitation(PREC) | 0.376 ** |
| 夏季降水量 Summer precipitation(PREC _{sum}) | 0.364 ** |
| 水分亏缺指数 Water deficit(WD) | 0.054 ^{ns} |
| 湿润指数 Moisture index(MI) | 0.093 ^{ns} |
| (3) 季节性变化因素 Seasonality | |
| 年温度变化范围 Annual temperature range(TEM _{var}) | 0.539 ** |
| 月均温标准差 The standard deviation of mean monthly temperature(TEM _{sd}) | 0.536 ** |
| 年降水量变化范围 Annual precipitation range(PREC _{var}) | 0.192 * |
| 月均降水量标准差 The standard deviation of mean monthly precipitation(PREC _{sd}) | 0.247 ** |
| (4) 生境异质性因素 Habitat heterogeneity | |
| 海拔变化范围 The range of elevation within a province(ELE _{range}) | 0.040 ^{ns} |
| 年均温空间变化范围 The range of mean annual temperature within a province(TEM _{range}) | 0.001 ^{ns} |
| 年降水量空间变化范围 The range of annual precipitation within a province(PREC _{range}) | 0.007 ^{ns} |

+正相关,-负相关;* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, ns: 不显著

1.2 统计分析

本研究采用基于普通最小二乘法(Ordinary Least Squares, OLS)的一元线性回归模型考察各环境因子对蚂蚁丰富度的解释能力。然后采用前进法(Forward Selection),根据 Akaike 信息量准则(Akaike Information Criterion, AIC)筛选出最优模型(其 AIC 值最小)及其所包含的变量^[19-20]。采用偏残差图分析当模型同时包括其他自变量时,某一自变量与因变量之间的关系^[21]。

基于上述筛选的最优模型,笔者根据环境因子计算各省蚂蚁丰富度的预测值,并与实际丰富度进行对比。预测丰富度比实际丰富度多 10 种以上的 8 个省份是调查最不充分的。然后,利用其它 20 个调查相对充分的省份的数据,再次运行上述最优模型,确定所选环境因子的回归系数,并利用此回归系数计算全部省份蚂蚁丰富度的估计值。对于调查不充分的省份而言,此预测丰富度与实际丰富度的差异即为尚未调查到的蚂蚁物种数。由于总体而言蚂蚁区系调查尚不完全,实际开展蚂蚁区系调查所能发现的新记录很可能高于上述估计值。

为了满足数据的正态性,将各省物种数进行以 10 为底的对数转换。由于各省面积对蚂蚁物种丰富度的影响极低($R_{adj}^2 = 0.019$),因此,面积不作为影响因子进行分析。由于蚂蚁丰富度和环境因子均存在显著的空间自相关,不符合统计的样本独立性假设,从而导致 I 类错误风险增加^[22],本文采用改进的 t 检验方法^[23]进行显著性检验。依据调整后的判定系数(R_{adj}^2)评估各环境因子和模型对物种丰富度地理的解释能力。采用 Spearman 相关性(r_s)分析检验某些自变量之间的共线性。以上统计分析均在 R 中完成^[24]。

2 结果

2.1 物种分布格局

中国蚂蚁物种丰富度热点地区主要集中在南方省份,而北方、西北干旱区和青藏高原的北部(青海)等省份物种丰富度较低(图 1)。云南蚂蚁丰富度最高(406 种),其次是台湾、广西、广东和湖南等省份,均在 200

种以上。蚂蚁丰富度最低的省份是山西,其次是内蒙古、黑龙江、吉林和辽宁等省份,均在 40 种以下。蚂蚁物种丰富度没有明显的经度梯度,而在纬度梯度上空间变异明显,即随纬度增加,物种丰富度显著降低(图 2)。

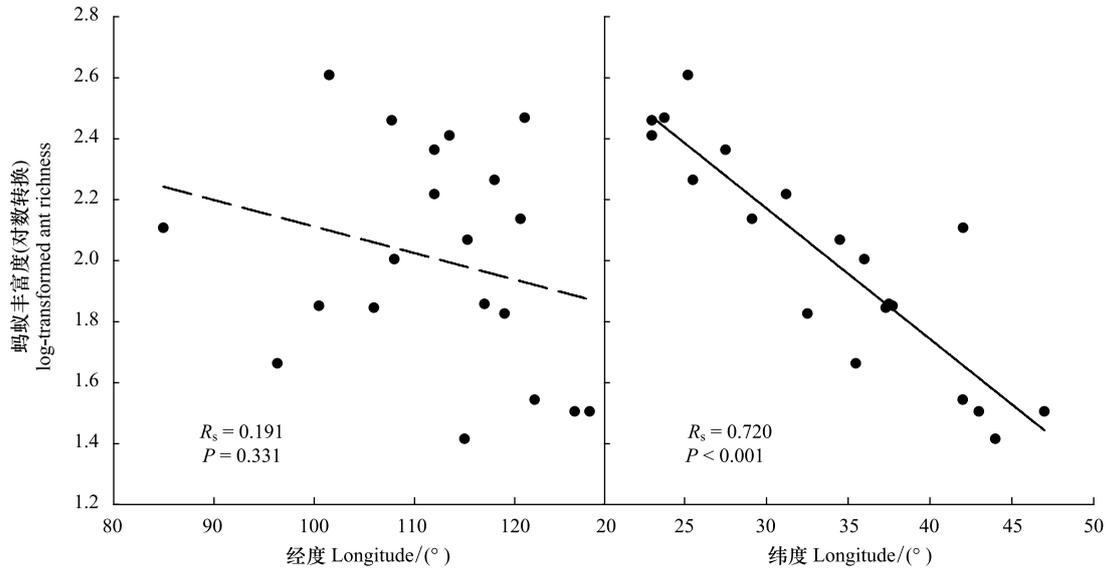


图 2 中国省级行政区尺度蚂蚁丰富度与经度 (a) 和纬度 (b) 的关系

Fig.2 The relationships between ant richness and longitude (a) and latitude (b) at province scale in China

2.2 环境因子的影响

线性回归分析表明,最冷月均温(TEM_{min})是对蚂蚁物种丰富度的影响最强的能量因子($R_{adj}^2 = 0.532$),其次为年潜在蒸发量(PET)($R_{adj}^2 = 0.499$)。在水分因子中,年均降水量(PREC)对蚂蚁物种丰富度的影响最强($R_{adj}^2 = 0.376$);其次为夏季降水量($PREC_{sum}$)($R_{adj}^2 = 0.364$)。总体而言,平均每个能量因子对蚂蚁丰富度的解释度为 38.4%,大于水分因子的平均解释度(22.2%)。季节性因子中,年温度变化范围(TEM_{var})($R_{adj}^2 = 0.539$)和月均温标准差(TEM_{sd})($R_{adj}^2 = 0.536$)远高于降水季节性对蚂蚁物种丰富度的影响。单个生境异质性因子对蚂蚁物种丰富度的影响均不显著(表 2)。

表 2 采用前进法,基于 Akaike 信息量准则(AIC)筛选出的中国省级行政区蚂蚁丰富度最优模型

Table 2 The best model selected based on Akaike Information Criterion (AIC) through forward selection for ant richness at province scale in China

| 变量 Variable | 标准回归系数 Standardized regression coefficient | P |
|--|---|-------|
| 全部 28 个省份 | | |
| 年均温 mean annual temperature(TEM) | 0.780 | * * |
| 海拔变化范围 the range of elevation within a province(ELE_{range}) | 0.515 | * * |
| 年温度变化范围 annual temperature range(TEM_{var}) | -0.114 | ns |
| R^2 | 0.684 | * * * |
| 调查相对充分的 20 个省份 | | |
| 年均温 mean annual temperature(TEM) | 0.755 | * * * |
| 海拔变化范围 the range of elevation within a province(ELE_{range}) | 0.401 | * * * |
| 年温度变化范围 annual temperature range(TEM_{var}) | -0.246 | * |
| R^2 | 0.950 | * * * |

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$, ns: 不显著

根据 Akaike 信息量准则(AIC)筛选出最优模型包含年均温(TEM)、年温度变化范围(TEM_{var})和海拔变

化范围($ELEV_{range}$) 3 个变量,能够解释蚂蚁丰富度空间变异的 68.4% (表 2)。其中最重要的预测因子是 TEM 和 $ELEV_{range}$,分别能够解释偏残差的 65.9% 和 45.7%,而 TEM_{var} 仅能解释偏残差的 4.0% (图 3)。

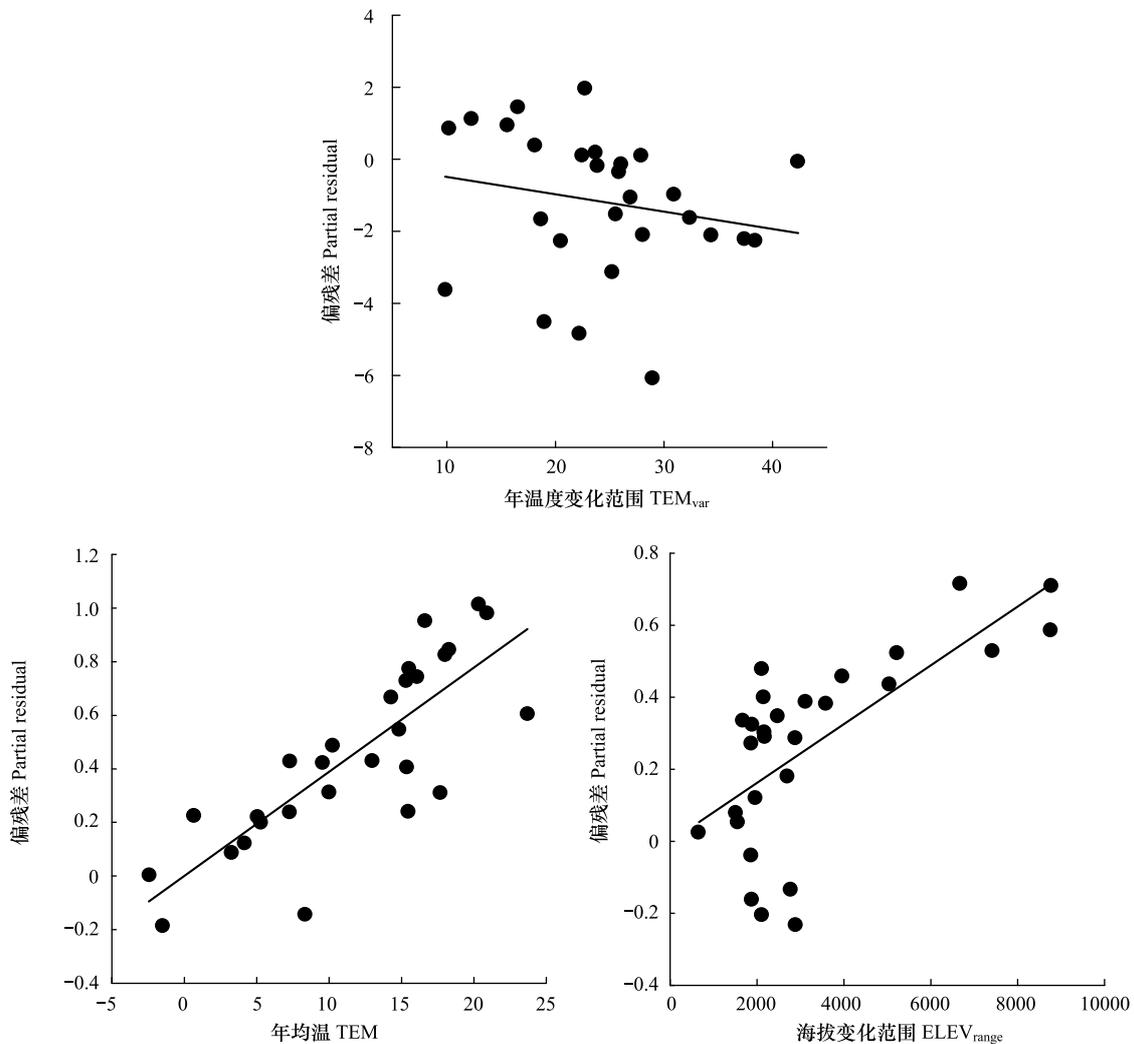


图 3 最优模型中年温度变化范围(TEM_{var})、年均温(TEM)和海拔变化范围($ELEV_{range}$)的偏残差图

Fig.3 Partial residuals plots for TEM_{var} , TEM, and $ELEV_{range}$ in the best model of provincial ant richness

2.3 未知蚂蚁丰富度

基于上述最优环境模型,安徽、贵州、海南、江西、山东、山西、四川和西藏 8 个省级行政区的已知蚂蚁物种数均低于预测值 10 种以上,因此对其他调查相对充分的 20 个省级行政区进行再次分析。年均温(TEM)、年温度变化范围(TEM_{var})和海拔变化范围($ELEV_{range}$)3 个变量能解释 20 省份蚂蚁丰富度空间变异的 95.0% (表 2)。根据所获得的回归系数计算全部 28 个省份蚂蚁的预测丰富度,并与已知蚂蚁丰富度进行对比,发现海南、贵州和江西蚂蚁区系调查最不足,分别有至少 266 种、117 种和 115 种蚂蚁未被记录;四川、安徽和山西未记录蚂蚁物种数在 50—100 之间(图 1)。

3 讨论

本文结果表明,在省级行政区尺度上,中国蚂蚁物种丰富度随纬度的增加而降低,这与其他地区的研究结果一致^[8-11,13,25-26]。由于海拔变化范围($ELEV_{range}$)与年均温空间变化范围(TEM_{range})的相关性($r_s=0.791$, $P<0.001$)远高于与年降水量空间变化范围($PREC_{range}$)的相关性($r_s=0.383$, $P=0.008$),因此,海拔变化范围更多

地反映与温度相关的生境异质性。基于 AIC 所筛选出的最优模型包括了年均温 (TEM)、海拔变化范围 (ELEV_{range}) 和年温度变化范围 (TEM_{var}), 因此认为, 温度是限制中国蚂蚁分布的最重要的因素。

相比水分因子, 热量因子对蚂蚁丰富度的平均解释能力更高; 而且, 基于 AIC 所筛选出的最优模型所包含的因子全部与温度密切相关, 而与水分的相关性较弱, 即相比水分因素, 温度对蚂蚁丰富度空间分异的影响更大。Gaston 认为, 植物可能受能量和水分的共同影响; 而动物主要受能量的影响, 水分的作用较小^[27]。依据生态学代谢理论, 物种丰富度的对数与绝对温度的倒数呈显著线性关系^[28], 即温度较高的地区, 其物种丰富度也较高。尤其对蚂蚁而言, 生理活动受环境温度影响较大, 较高的温度, 可降低其世代时间和提高突变速率, 进而提高物种形成的速率和物种多样性。另外, Sanders 等认为, 温度也可通过对蚂蚁取食行为的限制而产生间接影响, 从而成为影响蚂蚁海拔梯度分布的重要因子^[15]。

相比降水相关的生境异质性, 蚂蚁丰富度更多受温度相关生境异质性的影响。如前所述, 海拔变化范围更多地反映与温度相关的生境异质性, 笔者将最优模型中的 ELEV_{range} 替代为 TEM_{range}, 其解释能力为 65.3%, 略低于最优模型的 68.4%; 而将 ELEV_{range} 替代为 PREC_{range} 时, 其解释能力下降为 58.6%。Sanders 等发现不同蚂蚁仅在一定海拔范围内出现, 从而导致蚂蚁群落物种组成随海拔发生显著变化, 特别是高海拔与低海拔蚂蚁群落组成截然不同^[15]。最近, Smith 等发现蚂蚁群落间物种组成的相似性随海拔距离增加而降低^[29]。因此与温度相关的生境异质性是区域尺度蚂蚁物种多样性维持的重要机制。

单个异质性因子对蚂蚁丰富度的解释能力都较低, 但却被选入最优模型 (如 ELEV_{range}); 而且, TEM 和 TEM_{var} 组成的模型解释能力为 57.4%, 当加入 ELEV_{range}, 其解释能力增加了 11% 至 68.4%; 再者, ELEV_{range} 对偏残差的解释能力仅次于 TEM, 而大大高于 TEM_{var}。因此, 异质性的度量方式可能是导致这种现象的重要原因。例如, 对于温度较低的省份而言, 区域内最高年均温与最低年均温的空间差异可能高估了温度异质性, 因为处于活性温度以上的区域较少, 从而导致南方省份异质性程度与北方类似。与此同理, 北方省份的 ELEV_{range} 和 PREC_{range} 也可能被高估。因此, 只有在去除年均温的影响后, 也就是说模型已包括 TEM 的情况下, 异质性的效应才显示出来。这可以解释为什么解释能力低的 ELEV_{range} 反而进入最优模型。

就单个因子而言, 最冷月均温 (TEM_{min}, $R_{adj}^2 = 0.532$) 比年均温 (TEM, $R_{adj}^2 = 0.406$) 能更好地解释蚂蚁丰富度空间分异。寒冷忍耐假说认为, 在较为寒冷的地区, 物种由于不能忍受冬季的低温而无法存活, 导致其物种多样性减少^[28]。TEM_{min} 不仅与 TEM 具有显著的正相关 ($r_s = 0.977$, $P < 0.001$), 而且具有很强的限制性, 对蚂蚁的生理机能是一种考验。因此, 相比年均温, 最冷月均温能更好地解释蚂蚁丰富度的空间分异。

无论就单个因子的解释能力还是从最优模型的构成, 结果均显示, 相比降水季节性, 温度季节性能更好地解释蚂蚁丰富度空间分异, 而且年温度变化范围 (TEM_{var}) 进入了最优模型。较高的温度季节性不仅意味着冬季低温, 还可能包括夏季高温。对蚂蚁而言, 冬季低温是冷害或冻害胁迫, 而夏季高温则是干旱胁迫^[30]。由于蚂蚁个体较小, 对于干旱胁迫更为敏感, 特别是在低纬度地区^[30]。并且, 相比降水缺乏, 高温导致蚂蚁受到干旱胁迫的可能性更高, 因为蚂蚁不仅面临着环境干旱, 还会由于温度升高而新陈代谢加快导致的体内缺水^[28]。虽然 TEM_{var} 与 TEM_{min} 具有显著的负相关 ($r_s = -0.857$, $P < 0.001$), 但与 TEM 没有显著的相关性 ($r_s = -0.758$, $P = 0.06$); 况且 TEM_{var} 能比 TEM_{min} 表达更多的环境信息, 因此, 最优模型包含了 TEM_{var} 而非 TEM_{min}。

因为纬度与温度密切相关, 而温度对物种丰富度的分布具有重要影响^[28, 31], 所以我国蚂蚁多样性热点地区主要分布在东南沿海和西南等省份的热带和亚热带地区, 而北方地区的温带、寒温带物种丰富度较低。某些纬度相似省份间蚂蚁物种丰富度的差异也可由温度的差异来解释。例如, 贵州蚂蚁物种数低于基本处在相同纬度的湖南, 可能是由于贵州地处云贵高原, 年均温低于湖南省 1.2°C。虽然都处于内陆干旱区, 新疆蚂蚁丰富度远高于纬度相似的内蒙古, 可能是由于新疆年均温高于内蒙古 3.0°C, 而温度季节性却较低。

研究还表明, 海南、贵州、江西、四川、安徽和山西等 6 省蚂蚁区系调查最不充分, 应该作为未来野外蚂蚁采集和编目的重点区域, 而且每省的新分布记录极有可能在 50 种以上。

参考文献 (References):

- [1] Beck J, Ballesteros-Mejia L, Buchmann C M, Dengler J, Fritz S A, Gruber B, Hof C, Jansen F, Knapp S, Kreft H, Schneider A K, Winter M, Dormann C F. What's on the horizon for macroecology?. *Ecography*, 2012, 35(8): 673-683.
- [2] Chen S B, Jiang G M, Ouyang Z Y, Xu W H, Xiao Y. Relative importance of water, energy, and heterogeneity in determining regional pteridophyte and seed plant richness in China. *Journal of Systematics and Evolution*, 2011, 49(2): 95-107.
- [3] 于晓东, 罗天宏, 周红章. 长江流域鱼类物种多样性大尺度格局研究. *生物多样性*, 2005, 13(6): 473-495.
- [4] Wu Y J, Colwell R K, Han N J, Zhang R Y, Wang W J, Quan Q, Zhang C L, Song G, Qu Y H, Lei F M. Understanding historical and current patterns of species richness of babblers along a 5000-m subtropical elevational gradient. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(11): 1167-1176.
- [5] Wu Y J, Colwell R K, Rahbek C, Zhang C L, Quan Q, Wang C K, Lei F M. Explaining the species richness of birds along a subtropical elevational gradient in the Hengduan Mountains. *Journal of Biogeography*, 2013, 40(12): 2310-2323.
- [6] Diniz-Filho J A F, De Marco Jr P, Hawkins B A. Defying the curse of ignorance: perspectives in insect macroecology and conservation biogeography. *Insect Conservation and Diversity*, 2010, 3(3): 172-179.
- [7] 郭萧, 林强, 崔晋波, 高冬梅, 许姗姗, 盛忠雷. 重庆市茶园蚂蚁物种多样性及空间分布格局. *中国生态农业学报*, 2014, 22(5): 585-593.
- [8] Dunn R R, Agosti D, Andersen A N, Arnan X, Bruhl C A, Cerdó X, Ellison A M, Fisher B L, Fitzpatrick M C, Gibb H, Gotelli N J, Gove A D, Guenard B, Janda M, Kaspari M, Laurent E J, Lessard J P, Longino J T, Majer J D, Menke S B, McGlynn T P, Parr C L, Philpott S M, Pfeiffer M, Retana J, Suarez A V, Vasconcelos H L, Weiser M D, Sanders N J. Climatic drivers of hemispheric asymmetry in global patterns of ant species richness. *Ecology Letters*, 2009, 12(4): 324-333.
- [9] Terayama M. Structure of ant communities in East Asia. I. Regional differences and species richness. *Bulletin of the Biogeographical Society of Japan*, 1992, 47(4): 1-31.
- [10] Schlick-Steiner B C, Steiner F M, Pautasso M. Ants and people: a test of two mechanisms potentially responsible for the large-scale human population-biodiversity correlation for Formicidae in Europe. *Journal of Biogeography*, 2008, 35(12): 2195-2206.
- [11] Del Toro I. Diversity of Eastern North American Ant communities along environmental gradients. *PLoS One*, 2013, 8(7): e67973.
- [12] Gotelli N J, Arnett A E. Biogeographic effects of red fire ant invasion. *Ecology Letters*, 2000, 3(4): 257-261.
- [13] Kaspari M. Using the metabolic theory of ecology to predict global patterns of abundance. *Ecology*, 2004, 85(7): 1800-1802.
- [14] Kusnezov N. Numbers of species of ants in faunas of different latitudes. *Evolution*, 1957, 11(3): 298-299.
- [15] Sanders N J, Lessard J P, Fitzpatrick M C, Dunn R R. Temperature, but not productivity or geometry, predicts elevational diversity gradients in ants across spatial grains. *Global Ecology and Biogeography*, 2007, 16(5): 640-649.
- [16] Guénard B, Dunn R R. A checklist of the ants of China. *Zootaxa*, 2012, 3558: 1-77.
- [17] 刘霞, 徐正会, 周雪英, 于娜娜, 张成林. 藏东南德姆拉山西坡及波密河谷蚂蚁群落研究. *林业科学研究*, 2011, 24(4): 458-463.
- [18] Ahn C H, Tateishi R. Development of Global 30-minute grid potential evapotranspiration data set. *Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1994, 33(2): 12-21.
- [19] 蔡波, 黄勇, 陈跃英, 胡军华, 郭宪光, 王跃招. 中国蛇类物种丰富度地理格局及其与生态因子的关系. *动物学研究*, 2012, 33(4): 343-353.
- [20] 宋喜芳, 李建平, 胡希远. 模型选择信息量准则 AIC 及其在方差分析中的应用. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(2): 88-92.
- [21] Legendre P, Legendre L. *Numerical Ecology*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Science, 1998.
- [22] Diniz-Filho J A F, Bini L M, Hawkins B A. Spatial autocorrelation and red herrings in geographical ecology. *Global ecology and Biogeography*, 2003, 12(1): 53-64.
- [23] Dutilleul P, Clifford P, Richardson S, Hemon D. Modifying the t test for assessing the correlation between two spatial processes. *Biometrics*, 1993, 49(1): 305-314.
- [24] R Development Core Team. R: a language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing. Vienna, (2012). <http://www.r-project.org/>. (2015-3-08)
- [25] Cushman J H, Lawton J H, Manly B F J. Latitudinal patterns in European ant assemblages: variation in species richness and body size. *Oecologia*, 1993, 95(1): 30-37.
- [26] Gotelli N J, Ellison A M. Biogeography at a regional scale: determinants of ant species density in New England bogs and forests. *Ecology*, 2002, 83(6): 1604-1609.
- [27] Gaston K J. Global patterns in biodiversity. *Nature*, 2000, 405(6783): 220-227.
- [28] 王志恒, 唐志尧, 方精云. 物种多样性地理格局的能量假说. *生物多样性*, 2009, 17(6): 613-624.
- [29] Smith M A, Hallwachs W, Janzen D H. Diversity and phylogenetic community structure of ants along a Costa Rican elevational gradient. *Ecography*, 2014, 37(8): 720-731.
- [30] 戈峰. *昆虫生态学原理与方法*. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [31] Evans K L, Greenwood J J D, Gaston K J. Dissecting the species-energy relationship. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, 272(1577): 2155-2163.