

DOI: 10.20103/j.stxb.202404250942

苏秋海, 罗昕裕, 尹如意, 黄相钦, 罗怡, 周昭敏. 青藏高原东缘城市蚂蚁群落体色对区域气候的生态响应. 生态学报, 2025, 45(3): 1464-1471.

Su Q H, Luo X Y, Yin R Y, Huang X Q, Luo Y, Zhou Z M. Effects of regional climate on cuticle lightness of urban ant communities from the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1464-1471.

青藏高原东缘城市蚂蚁群落体色对区域气候的生态响应

苏秋海¹, 罗昕裕¹, 尹如意¹, 黄相钦¹, 罗怡^{1,2}, 周昭敏^{1,2,*}

¹ 西华师范大学生命科学学院, 南充 637009

² 四川省环境科学与生物多样性保护重点实验室, 南充 637009

摘要: 较暗的角质层明度有助于昆虫吸收热量和减少高 UV-B 的伤害, 因此自然生境中昆虫群落体色往往呈现出地理变异。然而, 人们对城市昆虫群落体色的变异模式和影响因素仍然知之甚少。在青藏高原东缘 8 个城镇的 64 个样地 (海拔 510—3380 m), 开展地栖蚂蚁群落调查, 采集到 55890 只工蚁 (31 属 81 种)。运用线性混合效应模型, 评估了区域温度和紫外线水平对城市蚂蚁群落角质层明度的潜在影响。结果表明, 蚂蚁群落角质层明度在城镇间具有显著差异 (相比甘孜县蚂蚁群落, 元谋县蚂蚁群落的群落加权平均值高出约 39%, 群落算数平均值高出约 32%); 区域温度对蚂蚁群落角质层明度影响显著, 温度越高, 群落角质层明度值越大, 但区域 UV-B 对其没有显著影响。因此, 区域温度能够有效解释该地区的城市蚂蚁群落角质层明度变异, 而蚂蚁群落体色明度对区域 UV-B 条件的响应可能还受到其他环境因素的调节。

关键词: 城市; 群落; 角质层明度; 热黑化假说; 光保护假说

Effects of regional climate on cuticle lightness of urban ant communities from the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau

SU Qiu hai¹, LUO Xinyu¹, YIN Ruyi¹, HUANG Xiangqin¹, LUO Yi^{1,2}, ZHOU Zhaomin^{1,2,*}

¹ College of Life Sciences, China West Normal University, Nanchong 637009, China

² Key Laboratory of Environmental Science and Biodiversity Conservation of Sichuan Province, Nanchong 637009, China

Abstract: In ectotherms, the color of an individual's cuticle may have important thermoregulatory and protective consequences. For instance, the thermal melanism hypothesis predicts that cooler environments, often at higher altitudes and latitudes, favor darker individuals with more melanin, while the photo-protection hypothesis suggests that higher levels of melanin are able to protect against harmful ultraviolet radiation. These potential mechanisms have been widely supported by numerous studies on insect coloration and used to explain the geographical variation in body color among insect communities in natural habitats. Due to human activities, the microclimatic conditions in urban habitats often differ significantly from those in adjacent natural habitats. However, the predictability of body color variation in urban insect communities and the potential drivers remain unknown. We examined the ecological response of cuticle lightness in urban ants (Hymenoptera: Formicidae) to regional variations of temperature and UV-B condition. Using pitfall traps, we sampled 55,890 ground-foraging worker ants (81 species from 31 genera) from 64 urban and suburban sites across eight counties over a broad elevational range of 510—3380 m (a. s. l.) along the eastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau. Cuticle lightness of worker ants for each species was extracted from microscope photographs, which were further used to evaluate the

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (31600412); 西华师范大学青年教师科研资助项目 (19D044)

收稿日期: 2024-04-25; **网络出版日期:** 2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhouzm81@ gmail. com

community brightness in the ways of community-weighted mean and community mean. We used one-way ANOVA to assess whether the significant differences in ant community brightness existed among counties, and performed linear mixed-effects models to test the potential effects of regional temperature and UV-B on cuticle lightness of urban ant communities. We found that cuticle lightness of urban ant communities significantly differed across counties (e.g., the average values of community-weighted mean and community mean were approximately 39% and 32% higher in Yuanmou than those in Ganzi, respectively). Cuticle lightness of ant communities was greater in the regions with higher temperature, aligning with the thermal melanism hypothesis. However, the effect of regional UV-B radiation was not significant, which could not be explained by the photo-protection hypothesis. Our study highlights the sensitivity of cuticle lightness response in urban ant communities to regional temperature variation, and that urban landscapes may mediate the impacts of regional UV-B conditions on cuticle lightness of ant communities. Therefore, studies using animals with melanin-based colors as a model for the ecological response mechanisms in the context of climate change would facilitate to predict future evolutionary trends in urban biodiversity and inform the development of urban management strategies.

Key Words: urban; community; cuticle lightness; the thermal melanin hypothesis; the photo-protection hypothesis

动物体色多样,具有广泛的生态功能^[1]。作为变温动物,昆虫对生境的温度和紫外线条件非常敏感。根据热黑化假说(the thermal melanism hypothesis, TMH),体色较深的昆虫通常具有较高的黑色素水平^[2],有利于吸收更多的太阳热量,能够在寒冷的环境中较好地维持体温^[3];较浅的体色则可以反射更多的太阳辐射,有助于在炎热的环境中避免体温过热^[4]。例如,在北美洲和欧洲,寒冷地区的蝴蝶群落通常比温暖地区的蝴蝶群落体色更深^[5];在英国,蜻蜓群落的体色在季节初期和季节末期因太阳辐射较低而表现较暗,在季节中期因太阳辐射较高而表现较亮^[6]。根据光保护假说(the photo-protection hypothesis, PPH),黑色素还可以防止高 UV-B 渗透到生物的皮肤和组织深层,从而保护皮肤细胞和 DNA 免受损害^[7]。例如,栖息在安第斯山脉高海拔溪流中的无脊椎动物具有更高的黑色素浓度,使它们能够应对高 UV-B 环境^[8]。

通过人为改造,城市生境的微气候条件往往与周边的自然生境存在显著差异,进而影响到城市昆虫的群落特征^[9-11]。例如,人工绿地灌溉使沙漠城市中的蚂蚁物种丰度高于城市周边区域^[12];大量开花植物的引入能够使城市蜜蜂具有更高的物种丰富度和花朵访问率^[13]。因此,检验自然条件下动物群落性状的地理变异模式是否依然适用于城市生态系统,成为了近年来的研究热点^[14-15]。然而,关于城市昆虫群落体色对区域气候生态响应的研究却依然匮乏。

蚂蚁(Hymenoptera: Formicidae)是最主要的陆地分类群之一,具有非常高的体色多样性,在全球范围内分布广泛。此外,蚂蚁群落对气候变化^[16-18]和城市化^[19-20]非常敏感,是检验自然和城市间昆虫群落体色变异模式一致性的理想材料。在大空间尺度上开展的研究表明,在气温较低或 UV-B 较高的地区,自然生境蚂蚁群落的角质层明度较低^[17,21-22]。本研究调查了青藏高原东缘 8 个城镇的蚂蚁群落,以检验区域温度和紫外线条件是否可以有效解释城市蚂蚁体色的变化,即(1)区域温度越高,蚂蚁群落角质层越亮,(2)区域 UV-B 越高,蚂蚁群落角质层越暗。

1 材料与方法

1.1 调查地概况

在青藏高原东缘 8 个县级政府所在的城镇(图 1)开展了广泛采样:绥江县(103.98E, 28.60N, 海拔 510 m)、平武县(104.56E, 32.42N, 海拔 850 m)、元谋县(101.88E, 25.71N, 海拔 1090 m)、九寨沟县(104.25E, 33.26N, 海拔 1340 m)、永仁县(101.67E, 26.06N, 海拔 1540 m)、玉龙纳西族自治县(100.24E, 26.83N, 海拔 2390 m)、康定市(101.96E, 30.00N, 海拔 2840 m)和甘孜县(100.00E, 31.63N, 海拔 3380 m)。甘孜县、康定市、九寨沟县主要受高原季风气候控制,夏季凉爽,冬季寒冷;平武县属亚热带山地季风气候,夏季温暖多雨,

冬季寒冷干燥;玉龙县、永仁县、元谋县、绥江县受南亚季风气候的影响较大,主要表现为亚热带高原季风气候,干雨季分明^[23]。

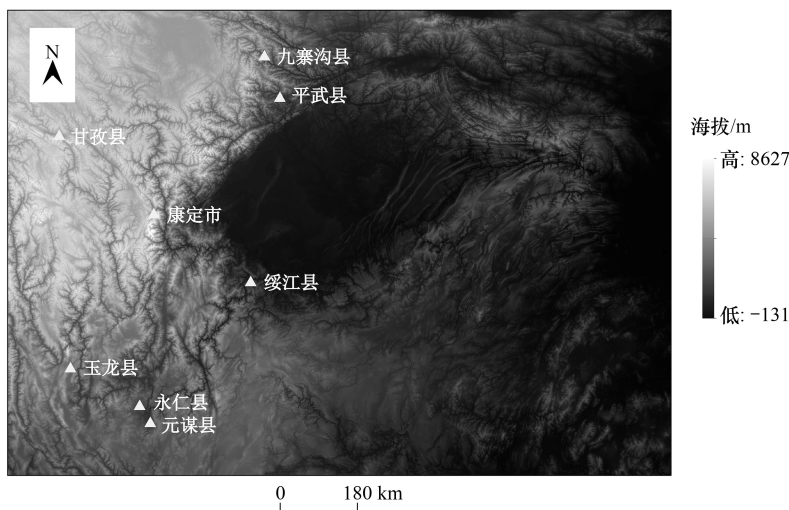


图1 采样地所在城镇在青藏高原东缘的分布

Fig.1 Locations of the principal cities of eight sampling counties along the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau

1.2 样品采集

在2020年和2021年的夏季,对觅食工蚁开展采样。此时是该区域蚂蚁觅食活动的高峰期^[19]。在每个城镇设置8个40 m×40 m的样地(共64个样地)。样地最小间距为0.2 km(九寨沟县),单个城镇的样地最大间距为10.2 km(玉龙县)。我们选择多种土地利用类型设置样地:次生草地(9个样地)、次生林地(16个)、农耕地(13个)和城市公园(26个)。上述土地利用类型划分不能准确反映样地间在植被、破碎化程度和土壤质地等生境量化指标上的差异,但有助于提高采样的代表性。本研究在每个样地设置16个陷阱,以10 m为间距,按4×4的采样网格排列。每个陷阱都是由2个250 mL,内径为45 mm的航空杯叠套组成,放置在杯口与地面齐平的位置,杯中注入150 mL的丙二醇溶液^[20]。由于每个样地最多有4个陷阱被人类活动破坏,因此,为了平衡取样,本研究从每个样地中随机选取12个陷阱收集蚂蚁标本。

利用LEICA M205C体视显微镜进行蚂蚁形态特征观察,并根据文献^[24–28],鉴定标本种类。此外,徐正会教授(西南林业大学)和冉浩先生为疑难物种的鉴定提供了帮助。除了损坏和无法确定种类的103只蚂蚁个体,共采集5个亚科31个属81种(55890只)^[20]。分类后蚂蚁样本低温保存在75%乙醇溶液中,存放于西华师范大学。

1.3 蚂蚁群落体色明度

角质层明度被用于评价蚂蚁体色^[29]。明度是描述颜色亮度的属性,明度高表示颜色较亮,明度低表示颜色较暗。对于采集到的81个蚂蚁物种,本研究从Antweb(<https://www.antweb.org>)下载了72种蚂蚁的侧面照。参照Antweb的成像指南,对Antweb缺少的9种蚂蚁,本研究运用LEICA M205C体视显微镜(配备LEICA 10450028镜头)拍摄标本侧面照。使用Adobe Photoshop 2022软件中的对象选择工具和套索工具建立蚂蚁选区(蚂蚁所暴露的全部身体,去除背景和反光点),在图像窗口下的Lab颜色通道模式中将图片从RGB通道转换为Lab颜色模型,从直方图明度通道(L)提取标本的明度平均值^[30]。各物种的角质层明度由6个标本的平均值代表。

单个样地中采集到的蚂蚁样本被认为是来自一个独立的蚂蚁群落($n=64$),所有分析都在群落水平上进行。明度的群落加权平均值(community weighted mean, CWM)计算公式如下:

$$CWM = \sum_{i=1}^S p_i x_i$$

式中, S 为样地内所有物种的数量, p_i 为物种 i 的相对丰度, x_i 为物种 i 的角质层明度。

本研究还将明度的群落算数平均值 (community mean, CM) 作为响应变量纳入模型, 因为 (1) 考虑到采样方式与蚂蚁巢穴及陷阱的空间关系可能影响各物种的相对多度信息; (2) 不同城镇之间物种更替程度可能存在较大差异; (3) 以及不同蚂蚁物种间单个繁殖群的个体数差异可能很大。计算公式如下:

$$CM = \frac{\sum_{i=1}^S x_i}{S}$$

式中, S 为样地内所有物种的数量, x_i 为物种 i 的角质层明度。

1.4 气候数据获取

本研究从 WorldClim 数据集获取 1970—2000 年的区域温度数据 (年平均温度 BIO1、最热月份最高温 BIO5、最冷月份最低温 BIO6、最热季度的平均温度 BIO10 和最冷季度的平均温度 BIO11), 从 glUV 数据集获取 2004—2013 年的区域 UV-B 数据 (年平均 UV-B 辐射 UVB1、最高月份的平均 UV-B 辐射 UVB3、最低月份的平均 UV-B 辐射 UVB4、UV-B 辐射最高季度月平均总和 UVB5 和 UV-B 辐射最低季度的月平均总和 UVB6), 分辨率均为 2.5 弧分, 气候变量的提取在 ArcMap 10.8 中完成。

运用主成分分析 (PCA), 经过 Kaiser 正态化最大方差法旋转, 提取出初始特征值累计方差为 98.38% 的 2 个主成分: 第一主成分 (PC1) 主要反映了研究区域内的温度状况, 其中高荷载率的因子为 BIO1 (0.99)、BIO5 (0.92)、BIO6 (0.98)、BIO10 (0.92) 和 BIO11 (0.99); 第二主成分 (PC2) 主要反映了研究区域内的 UV-B 状况, 其中高荷载率的因子为 UVB1 (0.92)、UVB3 (0.77)、UVB4 (0.97)、UVB5 (0.78) 和 UVB6 (0.99) (图 2)。

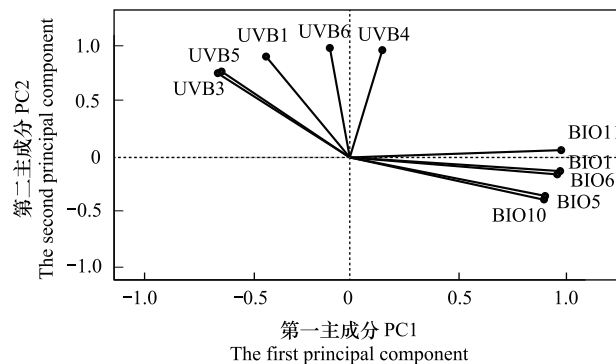


图 2 Kaiser 正态化最大方差法旋转后的主成分空间荷载图

Fig.2 Principal component spatial load map after a varimax rotation with Kaiser normalization

BIO1: 年平均温度; BIO5: 最热月份最高温; BIO6: 最冷月份最低温; BIO10: 最热季度的平均温度; BIO11: 最冷季度的平均温度; UVB1: 年平均 UV-B 辐射; UVB3: 最高月份的平均 UV-B 辐射; UVB4: 最低月份的平均 UV-B 辐射; UVB5: UV-B 辐射最高季度月平均总和; UVB6: UV-B 辐射最低季度月平均总和

1.5 数据分析

经过 Shapiro-Wilk test 检验和 Levene's test 检验, 各城镇内蚂蚁群落角质层明度的 CWM 和 CM 均满足正态分布和方差齐性。采用单因素方差分析 (One-Way Analysis of Variance, ANOVA), 分别检验城镇间 CWM 和 CM 的差异显著性。使用 Tukey's HSD test, 分别对 CWM 和 CM 进行城镇间的多重比较。使用线性混合效应模型 (Linear mixed model, LMM) 评估区域温度和区域 UV-B 对蚂蚁群落明度影响的显著性。其中, 将 CWM 和 CM 分别设为因变量, PC1 和 PC2 作为固定效应, 城镇作为随机效应。

我们测试了所有可能的模型组合, 并根据偏差校正后赤池信息准则 (Akaike information criterion, AICc)

分别确定解释 CWM 和 CM 变异的最优模型。采用 Type III Wald 卡方检验 (Type III Wald chi-square test) 评估最优模型中各固定因子影响的显著性。显著性标准均设定为 0.05。统计在 R 4.2.3 中完成。

2 结果

所采集 81 种蚂蚁的工蚁中,角质层明度值范围从 75.20 (*Aphaenogaster* sp.) 至 166.37 (埃氏尼兰蚁 *Nylanderia emmae*)。CWM ($F=23.185, df=7, P<0.001$) 和 CM ($F=35.492, df=7, P<0.001$) 在城镇间均存在显著差异,而在城镇内差异相对较小 (CWM 组间均方为 938.493, 组内均方为 40.479; CM 组间均方为 677.794, 组内均方为 19.097)。CWM 和 CM 在城市间的差异具有一致性:元谋县蚂蚁群落的角质层明度大于绥江县 ($P<0.001$)、平武县 ($P=0.006$)、九寨沟县 ($P<0.001$)、玉龙县 ($P<0.001$)、康定市 ($P=0.004$) 和甘孜县 ($P<0.001$), 甘孜县蚂蚁群落角质层明度小于其他 7 个城市 ($P<0.05$), 绥江县、平武县、九寨沟县、永仁县、玉龙县和康定市之间的蚂蚁群落角质层明度均无显著差异 ($P>0.05$) (图 3)。8 个城镇中,元谋县的区域温度最高 (BIO1 为 21.41℃), 而康定市的区域温度最低 (BIO1 为 5.81℃); 玉龙县的区域 UV-B 辐射最高 (UVB1 为 6089.26 J m⁻² d⁻¹), 而平武县的区域 UV-B 辐射最低 (UVB1 为 2766.96 J m⁻² d⁻¹)。

解释 CWM 和 CM 的最优线性混合效应模型都包含了第一主成分和第二主成分两个预测变量 (表 1)。其中,第一主成分对 CWM 和 CM 分别具有显著影响,而第二主成分对 CWM 和 CM 的影响均不显著 (表 2)。在温度 (第一主成分) 更高的区域,城市蚂蚁群落的角质层明度值更高;城市蚂蚁群落角质层明度没有随着区域 UV-B (第二主成分) 发生趋势性变化 (图 4)。

表 1 线性混合效应模型的比较和汇总统计

Table 1 Comparison and summary statistics of linear mixed models						
类型 Type	模型 Model	自由度 <i>df</i>	最大对数似然 LL	偏差校正后 赤池信息准则 AICc	边际 R^2 R^2_m	条件 R^2 R^2_c
群落加权平均值 Community weighted mean (CWM)	~PC1+PC2	5	-212.76	436.56	0.29	0.75
	~PC1	4	-214.93	438.54	0.30	0.73
	~PC2	4	-216.69	442.60	0.01	0.76
群落算数平均值 Community mean (CM)	~PC1+PC2	5	-190.63	392.29	0.33	0.83
	~PC1	4	-192.60	393.88	0.35	0.82
	~PC2	4	-194.71	398.09	0.01	0.83

对 CWM 和 CM 分别构建模型,解释变量包括 PC1 和 PC2; PC1: 第一主成分 the first principal component; PC2: 第二主成分 the second principal component; *df*: 自由度 the degrees of freedom; LL: 最大对数似然 maximum log-likelihood; AICc: 修正后的赤池信息准则 Akaike's bias corrected information criterion; R^2_m : 边际 R^2 Marginal R^2 ; R^2_c : 条件 R^2 Conditional R^2 ; R^2_m 是由固定效应解释的变异性, R^2_c 是由固定效应和随机效应解释的变异性

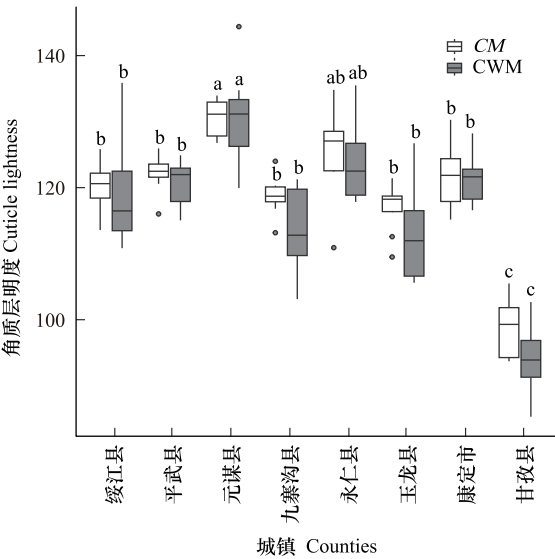


图 3 不同城镇间的蚂蚁群落角质层明度变异

Fig.3 The variations of cuticle lightness of urban ant communities across counties

根据 Tukey's HSD test 多重比较结果,按照字母标记法对各城镇的 CM 和 CWM 分别进行标记;不同小写字母表示不同城镇间蚂蚁群落明度差异显著 ($P<0.05$)。CM: 群落算数平均值 community mean; CWM: 群落加权平均值 community weighted mean

表 2 最优模型的 Type III Wald 卡方检验结果

Table 2 Results of Type III Wald chi-square tests for the optimal models

类型 Type	变量 Variable	检验统计量 χ^2	自由度 <i>df</i>	显著性 <i>P</i>
群落加权平均值 Community weighted mean (CWM)	PC1	4.545	1	0.033
	PC2	0.214	1	0.644
群落算数平均值 Community mean (CM)	PC1	5.201	1	0.023
	PC2	0.146	1	0.702

χ^2 : 检验统计量 Test statistics

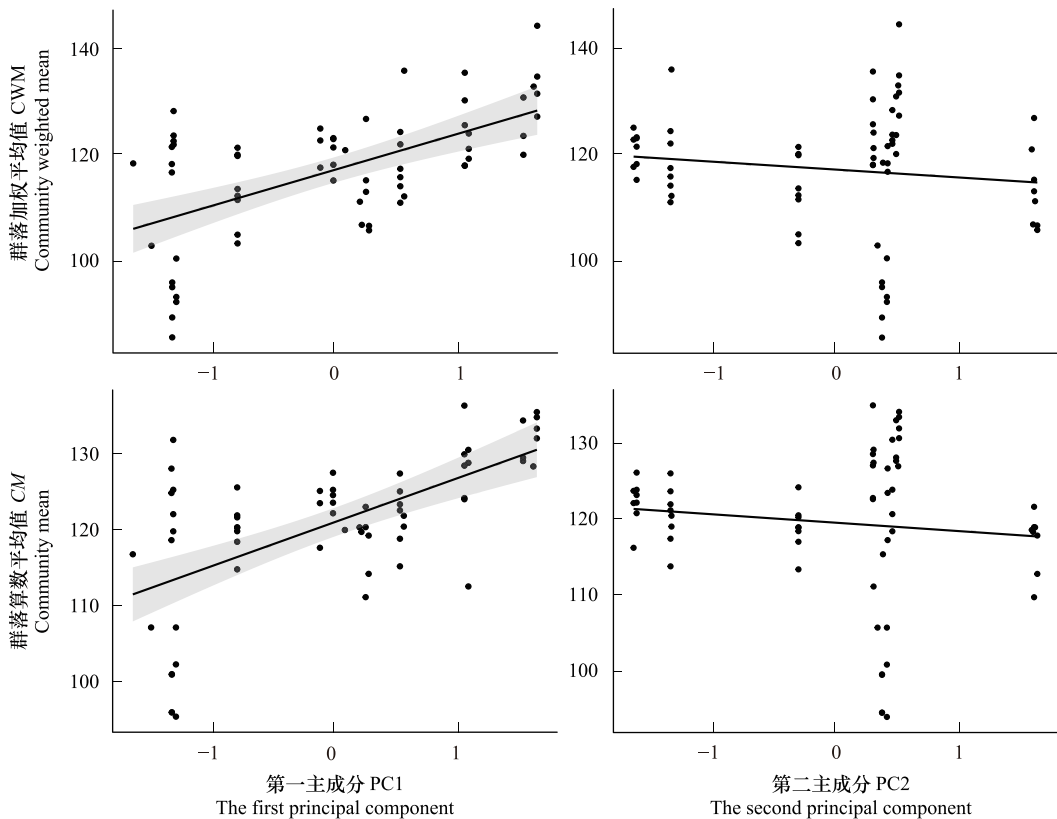


图 4 城市蚂蚁群落角质层明度 CWM/CM 与 PC1/PC2 之间的关系

Fig.4 Scatter plot shows the relationship between cuticle lightness CWM/CM of urban ant community and PC1/PC2

灰色区域表示平滑线的 95%置信区间

3 讨论

本研究结果表明,蚂蚁群落角质层明度在青藏高原东缘的城市间具有显著性差异;区域温度能够解释该区域城市蚂蚁群落体色变异,与热黑化假说相符;而区域 UV-B 辐射不能解释该区域城市蚂蚁群落体色变异,不符合光保护假说。因此,与自然生境的蚂蚁群落相似,城市蚂蚁群落同样受到区域气候条件的影响,但也可能具有一定的独特性。

3.1 温度对城市蚂蚁群落体色的影响

青藏高原东缘城市蚂蚁群落的体色变异与自然生境中蚂蚁群落体色对区域温度的响应模式(热黑化假说)相符。作为一种人为极度改变的环境,城市微生境的温度通常会显著高于周边的自然生境,即“热岛效应”。当城市区域的平均温度高于周边的乡村或自然区域时,城市生物的热收支收到影响^[31],其体色也可能会发生转变^[32—33]。然而,热岛效应的形成受到城市规模和人口密度的影响。大城市和人口密集的地区更容

易出现热岛效应,而农村和郊区的热岛效应明显减弱^[34]。此外,热岛效应还与城市的扩展程度相关,小型且扩展程度较大的城市中很难观察到明显的热岛效应^[35]。本研究的采样地所在城镇地处于山间盆地或河谷地带,具有规模小和带状延伸的特征,可能尚未形成明显的城市热岛效应。因此,该区域的城市蚂蚁群落体色对区域温度的生态响应未能受到显著干扰。

3.2 UV-B 对城市蚂蚁群落体色的影响

青藏高原东缘城市蚂蚁群落的体色变异与自然生境中蚂蚁群落体色对区域 UV-B 辐射的响应模式(光保护假说)不符。城市中的植被和建筑可能会干扰昆虫群落对区域 UV-B 的生态响应。UV-B 辐射在树冠层中的散失可以高达 58%至 75%,并且能够使蚂蚁群落角质层明度呈现出明显的垂直分层特征:地面和地下的蚂蚁群落角质层明度是冠层和亚冠层群落的两倍^[36]。UV-B 辐射在灌木层的散失也可以达到 16%至 57%^[37]。在多伦多市的校园和公园中,开放场地紫外线强度是树冠下紫外线强度的 1.3—3.4 倍^[38]。在香港市区,建筑物的阻挡使照射至行人层面的 UV-B 照射量率降低 88%^[39]。因此,复杂的城市景观会导致微生境气候与区域气候在 UV-B 上的潜在差异。后续研究则需要将冠层郁闭度、草本覆盖度和破碎化程度等诸多微生境指标纳入考量,从而更细致地评估城市景观对城市蚂蚁群落体色的调节作用。

3.3 蚂蚁体色的其他影响因素

除了温度和 UV-B,蚂蚁体色还可能受到区域干旱程度和种间关系的影响。根据黑化干燥假说(the melanism-desiccation hypothesis),黑色素有助于降低角质层渗透性,从而提高昆虫的抗干旱能力^[40]。许多群居昆虫的体色还具有警戒、模仿和伪装等功能^[41]。例如,欧洲胡蜂(*Polistes dominula*)的体色越艳丽,毒性越强^[42];分布在沙巴州的一种举腹蚁(*Crematogaster inflata*)在受到攻击时能释放毒液,而同域分布的一种弓背蚁(*Camponotus* sp.)能够模仿 *C. inflata* 的黄-黑双体色,以躲避捕食者^[43]。许多蚂蚁物种的体色与树皮、土壤或岩石相近,可能具有伪装功能^[41]。然而,目前尚不清楚这些因素能否在群落层面影响蚂蚁的体色性状。

4 结论

气候变化和城市化是两种主要的全球变化形式。有的物种受益于气候变化,从而在生态系统中占据更加主导地位;有的物种则可能因此出现种群衰退,甚至灭绝。这些变化的累积可能导致生态系统中昆虫群落结构和功能性状的转变,进而对生态系统的结构和功能产生深远影响。相比自然生境,在气候变化与城市化的共同作用下,城市昆虫群落的生态响应机制可能更加复杂。在气候变化背景下,开展城市昆虫群落的生态响应机制研究,有助于预测未来城市生物多样性的演化趋势,并制定相应的科学管理策略。这对于提高城市绿地的生态服务功能和推进城市生态系统的可持续发展至关重要。

参考文献(References):

- [1] Cuthill I C, Allen W L, Arbuckle K, Caspers B, Chaplin G, Hauber M E, Hill G E, Jablonski N G, Jiggins C D, Kelber A, Mappes J, Marshall J, Merrill R, Osorio D, Prum R, Roberts N W, Roulin A, Rowland H M, Sherratt T N, Skelhorn J, Speed M P, Stevens M, Stoddard M C, Stuart-Fox D, Talas L, Tibbetts E, Caro T. The biology of color. *Science*, 2017, 357(6350): eaan0221.
- [2] Cordero R J B, Casadevall A. Melanin. *Current Biology*, 2020, 30(4): R142-R143.
- [3] Rezende E L, Bacigalupe L D. Thermoregulation in endotherms: physiological principles and ecological consequences. *Journal of Comparative Physiology B, Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, 2015, 185(7): 709-727.
- [4] Shi N N, Tsai C C, Camino F, Bernard G D, Yu N F, Wehner R. Thermal physiology. Keeping cool: Enhanced optical reflection and radiative heat dissipation in Saharan silver ants. *Science*, 2015, 349(6245): 298-301.
- [5] Stelbrink P, Pinkert S, Brunzel S, Kerr J, Wheat C W, Brandl R, Zeuss D. Colour lightness of butterfly assemblages across North America and Europe. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1760.
- [6] Novella-Fernandez R, Brandl R, Pinkert S, Zeuss D, Hof C. Seasonal variation in dragonfly assemblage colouration suggests a link between thermal melanism and phenology. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 8427.
- [7] Zamudio Díaz D F, Busch L, Kröger M, Klein A L, Lohan S B, Mewes K R, Vierkotten L, Witzel C, Rohn S, Meinke M C. Significance of melanin distribution in the epidermis for the protective effect against UV light. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 3488.
- [8] Loayza-Muro R A, Marticorena-Ruiz J K, Palomino E J, Merritt C, Breeuwer J A J, Kuperus P, Kraak M H S, Admiraal W. Ultraviolet-B-driven pigmentation and genetic diversity of benthic macroinvertebrates from high-altitude Andean streams. *Freshwater Biology*, 2013, 58(8): 1710-1719.
- [9] 杨欢, 杨焮, 曹雯星, 张韬, 顾俊杰, 岳艳丽. 城市绿地昆虫群落结构及多样性——以成都市为例. *环境昆虫学报*, 2022, 44(5):

- 1071-1087.
- [10] Luo X Y, Newman C, Luo Y, Zhou Z M. Comparing ant assemblages and functional groups across urban habitats and seasons in an East Asia monsoon climate area. *Animals: an Open Access Journal from MDPI*, 2022, 13(1): 40.
- [11] 殷利华, 巩思凝, 李良, 沈正豪, 邱爽, 邓心怡, 韩依纹. 城市昆虫传粉生境营建研究进展及思考. *中国城市林业*, 2024, 22(1): 77-86.
- [12] Miguelena J G, Baker P B. Effects of urbanization on the diversity, abundance, and composition of ant assemblages in an arid city. *Environmental Entomology*, 2019, 48(4): 836-846.
- [13] Theodorou P, Radzevičiūtė R, Lentendu G, Kahnt B, Husemann M, Bleidorn C, Settele J, Schweiger O, Grosse I, Wubet T, Murray T E, Paxton R J. Urban areas as hotspots for bees and pollination but not a panacea for all insects. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 576.
- [14] Shochat E, Lerman S B, Anderies J M, Warren P S, Faeth S H, Nilon C H. Invasion, competition, and biodiversity loss in urban ecosystems. *BioScience*, 2010, 60(3): 199-208.
- [15] Barot S, Abbadie L, Auclerc A, Barthélémy C, Bérille E, Billet P, Clergeau P, Consales J N, Deschamp-Cottin M, David A, Devigne C, Dham V, Dusza Y, Gaillard A, Gonzalez E, Hédont M, Labarraque D, Le Bastard A M, Morel J L, Petit-Berghem Y, Rémy E, Rochelle-Newall E, Veyrières M. Urban ecology, stakeholders and the future of ecology. *Science of the Total Environment*, 2019, 667: 475-484.
- [16] 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.
- [17] Bishop T R, Robertson M P, Gibb H, van Rensburg B J, Brashler B, Chown S L, Foord S H, Munyai T C, Okey I, Tshivhandekano P G, Werenkraut V, Parr C L. Ant assemblages have darker and larger members in cold environments. *Global Ecology and Biogeography*, 2016, 25(12): 1489-1499.
- [18] Parr C L, Bishop T R. The response of ants to climate change. *Global Change Biology*, 2022, 28(10): 3188-3205.
- [19] Luo Y, Wei Q M, Newman C, Huang X Q, Luo X Y, Zhou Z M. Variation in *Pheidole nodus* (Hymenoptera: Formicidae) functional morphology across urban parks. *PeerJ*, 2023, 11: e15679.
- [20] Yin R Y, Luo X Y, Huang X Q, Zhao Z X, Newman C, Luo Y, Zhou Z M. Opportunist ant species dominate metropolitan microhabitats: Evidence from the eastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 191: 109326.
- [21] Klunk C L, Fraton R O, Rivadeneira C D, Schaedler L M, Perez D M. Climate and body size have differential roles on melanism evolution across workers in a worldwide ant genus. *Oecologia*, 2022, 199(3): 579-587.
- [22] Gibb H, Contos P, Photakis M, Okey I, Dunn R R, Sanders N J, Jones M M. Morphological strategies in ant communities along elevational gradients in three mountain ranges. *Diversity*, 2024, 16(1): 48.
- [23] 熊敏, 桑语, 黄相钦, 罗怡, 周昭敏. 青藏高原东缘城市绿地表层土壤汞污染现状及风险评估. *西华师范大学学报: 自然科学版*, 2023, 44(4): 333-341.
- [24] 吴坚, 王常禄. 中国蚂蚁. 北京: 中国林业出版社, 1995.
- [25] Bolton B. A New General Catalogue of the Ants of the World. Massachusetts: Harvard, 1995.
- [26] 冯丽. 中国举腹蚁属和红蚁属分类研究(膜翅目: 蚁科: 切叶蚁亚科)[D]. 桂林: 广西师范大学, 2007.
- [27] 潘扬莎. 中国大头蚁属和盘腹蚁属(膜翅目: 蚁科: 切叶蚁亚科)昆虫系统分类研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2007.
- [28] 钱芳. 中国铺道蚁属红蚁属昆虫系统学研究(膜翅目: 蚁科: 切叶蚁亚科)[D]. 桂林: 广西师范大学, 2008.
- [29] Lopez V M, Azevedo Tosta T A, da Silva G G, Bartholomay P R, Williams K A, Guillermo-Ferreira R. Color lightness of velvet ants (Hymenoptera: Mutillidae) follows an environmental gradient. *Journal of Thermal Biology*, 2021, 100: 103030.
- [30] Yin R Y, Ye Y C, Newman C, Buesching C D, MacDonald D W, Luo Y, Zhou Z M. China's online parrot trade: Generation length and body mass determine sales volume via price. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01047.
- [31] Kaiser A, Merckx T, Van Dyck H. The Urban Heat Island and its spatial scale dependent impact on survival and development in butterflies of different thermal sensitivity. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(12): 4129-4140.
- [32] Badiane A, Ropars L, Flacher F, Schurr L, Zakardjian M, Affre L, Deschamps-Cottin M, Gachet S, Robles C, Geslin B. Urbanisation impacts the diversity, coloration, and body size of wild bees in a Mediterranean city. *Regional Environmental Change*, 2024, 24(2): 41.
- [33] Ferrari A, Polidori C. Temperature differently affects body pigmentation of the paper wasp *Polistes dominula* along an urban and a wider geographical gradient. *Journal of Thermal Biology*, 2024, 121: 103840.
- [34] Manoli G, Faticchi S, Schläpfer M, Yu K L, Crowther T W, Meili N K, Burlando P, Katul G G, Bou-Zeid E. Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 2019, 573(7772): 55-60.
- [35] Zhou B, Rybski D, Kropp J P. The role of city size and urban form in the surface urban heat island. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 4791.
- [36] Law S J, Bishop T R, Eggleton P, Griffiths H, Ashton L, Parr C. Darker ants dominate the canopy: Testing macroecological hypotheses for patterns in colour along a microclimatic gradient. *Journal of Animal Ecology*, 2020, 89(2): 347-359.
- [37] Predick K I, Archer S R, Aguilon S M, Keller D A, Throop H L, Barnes P W. UV-B radiation and shrub canopy effects on surface litter decomposition in a shrub-invaded dry grassland. *Journal of Arid Environments*, 2018, 157: 13-21.
- [38] Priya U K, Senthil R. A review of the impact of the green landscape interventions on the urban microclimate of tropical areas. *Building and Environment*, 2021, 205: 108190.
- [39] Wai K M, Yu P K N, Chan P M. Urban UV environment in a sub-tropical megacity: A measurement and modelling study. *Results in Physics*, 2017, 7: 2705-2710.
- [40] Kalmus H. Physiology and ecology of cuticle colour in insects. *Nature*, 1941, 148(3762): 693-694.
- [41] Badejo O, Skaldina O, Gilev A, Sorvari J. Benefits of insect colours: a review from social insect studies. *Oecologia*, 2020, 194(1/2): 27-40.
- [42] Vidal-Cordero J M, Moreno-Rueda G, López-Orta A, Marfil-Daza C, Ros-Santaella J L, Ortiz-Sánchez F J. Brighter-colored paper wasps (*Polistes dominula*) have larger poison glands. *Frontiers in Zoology*, 2012, 9(1): 20.
- [43] Ito F, Hashim R, Huei Y S, Kaufmann E, Akino T, Billen J. Spectacular Batesian mimicry in ants. *Die Naturwissenschaften*, 2004, 91(10): 481-484.