

甘南亚高山区步甲科昆虫群落的时序动态及与环境因子的关系*

杨 静^{1,2**} 付作霖^{1,2***} 徐红霞^{1,2} 李丹春^{1,2}
林 媛^{1,2} 齐 昊^{1,2} 雷 炜^{1,2}

(1. 甘肃省白龙江林业科学研究所, 兰州 730070;

2. 甘肃白龙江森林生态系统国家定位观测研究站, 舟曲 746300)

摘 要 【目的】探究甘南亚高山区步甲科昆虫群落特征和多样性的时序变化, 分析其对环境因子的响应, 为甘南亚高山区生态动态监测及步甲科昆虫的生物多样性的保护提供科学依据。【方法】2018-2019 年采用巴氏诱罐法在 6 月上半月、6 月下半月、7 月上半月、7 月下半月、8 月上半月、8 月下半月和 9 月上半月, 共 7 个时间采集步甲, 室内进行分类鉴定, 分析甘南亚高山区步甲科昆虫群落的时序分布和多样性特征及其与环境因子的关系。【结果】共采集步甲科成虫 2 418 头, 经鉴定隶属 16 属 33 个种。青步甲属、通缘步甲属、斯步甲属、蜗步甲属和步甲属共同构成了该地区的优势类群; 步甲科昆虫属水平物种数和多样性时序动态呈单峰型变化, 均在 7 月下半月达到最高值。时序波动对步甲个体数、物种数、Shannon 多样性(H')和 Pielou 均匀度(J)均具有显著影响($Q_{6,28}=30.994$; $P<0.000$; $F_{6,28}=111.250$, $P<0.05$; $Q_{6,28}=30.994$, $P<0.000$; $Q_{6,28}=30.994$, $P<0.001$)。步甲科昆虫群落与环境因子间 RDA 分析表明平均气温、地表温度和降雨量 3 个环境因子是影响步甲科昆虫群落时序动态分布主要因素, 相对湿度次之。地表温度和平均气温是影响步甲优势类群的主要因素。【结论】步甲科昆虫群落的特征及多样性与时序变化均存在显著线性关系, 温度是影响步甲科昆虫群落时序分布特征的最主要因素。

关键词 步甲科; 甘南亚高山区; 多样性; 时序; 环境因子

Temporal dynamics of a carabid beetle community, and the effects of climatic factors, in the subalpine forests of southern Gansu

YANY Jing^{1,2**} FU Zuo-Lin^{1,2***} XU Hong-Xia^{1,2}
LI Dan-Chun^{1,2} LIN Yuan^{1,2} QI Hao^{1,2} LEI Wei^{1,2}

(1. Institute of Bailong River Forestry in Gansu Province, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Bailong River National Forest Ecosystem Research Station, Zhouqu 746300, China)

Abstract [Aim] To investigate the temporal dynamics of carabid beetle (Carabidae) communities, and how this is affected by climatic factors, in subalpine forests of southern Gansu. [Methods] Responses of the dominant group were compared at different times to provide a scientific basis for environmental monitoring and the protection of carabid beetle diversity. Pitfall traps were used to collect beetles in first half of June (June-E), second half of June (June-L), first half of July (July-E), second half of July (July-L), first half of August (Aug.-E), second half of August (Aug.-L) and first half of September (Sept.-E) between 2018 and 2019. Captured carabid beetles were classified and identified in a laboratory, and their dominance, diversity and similarity indices determined. [Results] A total of 2 418 adult carabid beetles from 33 species and 16 genera were

*资助项目 Supported projects: 甘肃省 2024 省级人才项目“甘南亚高山鞘翅目昆虫多样性及主要蛀干害虫关键防控技术研究”; 甘肃省林业草原局科技创新项目(KJCX202401)

**第一作者 First author, E-mail: 1836912879@qq.com

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

收稿日期 Received: 2022-08-08; 接受日期 Accepted: 2023-12-02

collected and identified. Among these, *Chlaenius*, *Pterostichus*, *Straneostichus*, *Cychrus* and *Carabus* were the dominant groups. The abundance and diversity of carabid beetles underwent a unimodal change over time, with both peaking in late July. Temporal dynamics had a significant impact on the number of individuals, species, Shannon-Winner diversity index (H') and Peilou evenness index (J) ($Q_{6,28} = 30.994$; $P < 0.000$; $F_{6,28} = 111.250$, $P < 0.05$; $Q_{6,28} = 30.994$, $P < 0.000$; $Q_{6,28} = 30.994$, $P < 0.001$). A correlation analysis (RDA) indicates that climatic factors such as average air temperature, surface temperature and rainfall, followed by relative humidity, were the main factors affecting the temporal dynamics of the carabid beetle community. Surface temperature and average air temperature were the most important factors affecting the dominant groups. **[Conclusion]** There is a significant linear relationship between the species diversity, abundance and occurrence of carabid beetles in the subalpine forests of southern Gansu. Temperature is the most important factor affecting the temporal distribution of the carabid beetle community.

Key words Carabidae; subalpine forests of southern Gansu; diversity; temporal dynamic; environmental factors

昆虫属于变温动物, 对环境胁迫的调节能力是决定该物种地理分布和群落结构的重要因素 (Terblanche *et al.*, 2011)。步甲科昆虫作为陆生甲虫的重要组成部分, 其物种丰富, 食性多样, 广泛分布于各生态系统中 (任国栋等, 2005)。同时, 步甲世代周期短, 更新快, 能够快速响应环境变化, 对局部尺度生态环境变化很敏感, 是很好的生态指示类群, 可用来监测生态环境的质量及变化趋势 (Eyre *et al.*, 1996; 于晓东等, 2002)。Rainio (2013) 研究表明基于时序的季节性变化与步甲科物种分布和多样性间存在强烈的正相关关系; Baker 等 (2000) 和 Bayoh 等 (2001) 在对法国和非洲南部的粪金龟子群落对气候响应的研究中发现可通过温度和降雨量预测金龟子的分布和物种丰富度的变化。Battisti 等 (2005) 研究发现时序变化是影响甲虫个体数和物种数变化的主要因素。党志浩等 (2011) 表明降雨作为调节自然水分的重要方式之一, 可通过改变环境温湿度来影响昆虫的生长发育。

甘南亚高山区地处甘肃省东南部 (E 102°30'-104°45', N 32°56'-34°20'), 属于青藏高原东部边缘与西秦岭地槽褶皱系交错地带, 属典型的甘南亚高山大陆性气候, 有明显的干冷(11月-翌年4月)和暖湿(5-10月)季节 (邱祖青等, 2007)。研究区域海拔 2 100-3 200 m, 夏季温度高降雨多, 冬季温度低降雨少, 年均气温为 6-14.9 °C, 降雨量介于 400-850 mm 之间, 流域内森林覆盖度较高, 植被类型多样 (王毓森等, 2018; 柳冬青等, 2020)。国内以步甲科昆虫为

重点的研究中, 主要集中在生态分布、群落结构、生境差异的多样性以及人为活动等对步甲科昆虫的影响 (于晓东等, 2002; 姜双林等, 2005; Jia *et al.*, 2011; 朱纪元等, 2016; 付作霖等, 2021), 而对于甘南亚高山区步甲科昆虫群落的时序分布及对环境因子的响应的研究较少。本次研究在整个步甲活跃期连续采集标本, 对比分析不同时序中步甲群落的分布特征, 以揭示甘南亚高山区步甲群落及多样性的时序分布格局, 及其对环境因子的响应关系, 为甘南亚高山区步甲的监测、指示种的研究以及不同习性甲虫的保护和利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

依据甘肃省甘南藏族自治州迭部县和舟曲县研究区域内 (32°56'-34°20'N, 102°30'-104°45'E) 步甲的活跃期, 选择海拔在 2 200-3 120 m 之间, 坡度、坡向及土壤等环境条件基本一致的林分, 设置 5 块 300 m × 400 m 样地, 每个样方采用 5 点取样法, 从 2018 年 6 月上半月至 2019 年 9 月下半月, 对步甲科昆虫的群落结构及多样性在 7 个时序的分布状况进行调查。利用甘肃白龙江森林生态系统国家定位观测研究站提供统计平均每半月的气温、降雨量、相对湿度及地表温度 4 个环境因子数据 (表 1), 分析步甲群落的时序分布特征及对环境因子的响应关系。

表 1 甘南亚高山区不同环境因子数据统计表
Table 1 Statistical table of different environmental factors in the subalpine forests of southern Gansu

季节 Season	平均气温 (°C) AT (°C)	平均降雨量 (mL) AR (mL)	地表温度 (°C) GT (°C)	空气湿度 (%) RH (%)
6 月上半月 June-E	11.06 ± 0.72	40.70 ± 3.91	15.04 ± 0.62	76.86 ± 4.00
6 月下半月 June-L	13.18 ± 2.08	48.40 ± 1.23	15.68 ± 0.47	84.60 ± 3.08
7 月上半月 July-E	13.98 ± 0.83	48.60 ± 0.85	18.36 ± 0.71	84.18 ± 1.88
7 月下半月 July-L	14.52 ± 0.60	60.90 ± 0.64	18.38 ± 0.71	87.20 ± 1.79
8 月上半月 Aug.-E	14.70 ± 1.36	49.10 ± 3.88	17.46 ± 0.63	86.08 ± 3.88
8 月下半月 Aug.-L	12.64 ± 1.30	55.40 ± 0.74	14.20 ± 0.41	89.18 ± 1.60
9 月上半月 Sept.-E	11.50 ± 1.07	73.10 ± 3.96	12.64 ± 1.28	88.30 ± 3.29

E: First half of the month; L: Second half of the month; AT: Average temperature; AR: Average rainfall; GT: Ground temperature; RH: Relative humidity. 下表和下图同。The same below.

1.2 标本采集与鉴定

利用巴氏诱罐法采集步甲 (Martin *et al.*, 1978), 在每个样地按对角线平行布设 5 条长 30 m 的样带, 样带间距 100 m; 在样带内每相距 2 m 处布设 1 个诱杯, 每样带 15 个诱杯, 以样带为统计单位。诱杯利用一次性 PP 材质的塑料口杯, 高 9 cm, 口径 7.3 cm, 每个诱杯中倒入 50-60 mL 诱剂 (约诱杯的 2/3), 诱剂成分质量比为 2 : 1 : 1 : 20 的醋、糖、75%医用酒精和水的混合物。采集时间为 2018 年及 2019 年的 6 月上半月至 9 月上半月, 采集时间间隔为 15 d, 共 14 次, 每次采集将每条样线上 15 个诱杯的诱捕结果合并处理带回实验室, 制成针插标本与 75%酒精浸泡标本, 进行分类鉴定和数量统计。标本初步鉴定主要依据参考现已出版的各类步甲相关分类资料, 部分标本由中国科学院动物研究所梁红斌老师协助鉴定。

1.3 调查时间

调查时间为 2018-2019 年, 每年的 6 月上半月至 9 月下半月, 涵盖了整个步甲活跃期, 步甲具体标本回收时间为 6 月上半月 (June-E)、6 月下半月 (June-L)、7 月上半月 (July-E)、7 月下半月 (July-L)、8 月上半月 (Aug.-E)、8 月下半月 (Aug.-L) 和 9 月上半月 (Sept.-E), 共 7 个时间。为了防止野外调查过程中环境干扰导致的

数据误差, 我们将 2 年的数据按上述 7 个时序进行合计统计分析。

1.4 数据统计与分析

1.4.1 类群数量等级划分 步甲类群的优势度采用 Berger-Parker 指数 (W) 划分, 其计算公式为: $W=N_{\max}/N$, 其中 $N_{\max}$ 为优势类群的个体数, N 为个体总数。当 $W \geq 10\%$ 时为优势类群, $1\% \leq W < 10\%$ 为常见类群, $W < 1\%$ 时为稀有类群。

1.4.2 多样性分析 采用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、和 Pielou 均匀度指数 (J) 对不同时序步甲群落进行多样性分析 (马克平和刘玉明, 1994)

$$H' = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i; J = H' / \ln S.$$

式中: $P_i=n_i/N$, n_i 为第 i 个时间分组的个体数, N 为所有时间的个体总数, S 为时间分组数。

1.4.3 数据处理 采用 Excel 2010 和 SPSS 21.0 软件进行数据处理和分析, 用 Origin 9.1 绘图, 单因素方差分析 (One-way ANOVA) 对各时序步甲类群结构和多样性进行差异显著性检验, 如果差异显著则用最小显著差法 (Least significant difference, LSD) 进行多重比较, 显著性水平设定为 $P < 0.05$; 如果仍不服从正态分布, 则进行 Kruskal-Wallis H 非参数检验。对步甲类群结构与环境因子之间的冗余对应分析 (RDA)。

2 结果与分析

2.1 时序变化中步甲的群落分布特征

本研究采用巴氏罐法采集步甲,采集时间贯穿整个步甲活跃期,共采集昆虫成虫 2 418 头,隶属于 16 属(表 2)。青步甲属 *Chlaenius*、通缘步甲属 *Pterostichus*、斯步甲属 *Straneostichus*、蜗步甲属 *Cychrus* 和步甲属 *Carabus* 为属水平分类中该地区的优势类群。在属水平,步甲属、青步甲属和通缘步甲在各时间都被采集到,其类群分布的时间跨度较大,活跃时间长。斯步甲属

Straneostichus 和艳步甲属 *Trigonognatha* 只在 6 月上半月未被采集到,类山丽步甲属 *Aristochrooides* 和蜗步甲属在 6 月上半月和 9 月上半月未被采集;安步甲属 *Andrewesius*、盘步甲属 *Metacolpodes* 和弧缘步甲属 *Archastes* 只在 7 月上半月到 8 月上半月被采集到,活跃期较短;脊角步甲属(*Poecilus*)只在 6 月上半月到 7 月上半月被采集到,其活跃时间较早且短;梨须步甲属 *Synuchus* 和婪步甲属 *Harpalus* 只在 7 月下半月到 8 月下半月被采集到,活跃期较晚;锯步甲属 *Pristosia* 和湿步甲属 *Notiophilus* 活跃期最短,只在 7 月下半月被采集到。

表 2 不同时期步甲科昆虫的个体数量 (2018-2019)

Table 2 The number of individuals of carabid beetle with genus and species levels in different time series (2018-2019)

类别 Categories		个体数 Number of individuals							合计 Total
属 Genus	种 Species	6 月上半月 June-E	6 月下半月 June-L	7 月上半月 July-E	7 月下半月 July-L	8 月上半月 Aug.-E	8 月下半月 Aug.-L	9 月上半月 Sept.-E	
步甲属 <i>Carabus</i>	微大步甲 <i>Carabus exiguus</i> Semenov	0	2	8	5	4	0	1	20
	宽胸大步甲 <i>Carabus latro</i> Semenov	1	46	44	17	15	7	0	130
	甘肃大步甲 <i>Carabus gansuensis</i> Semenov	0	0	18	11	0	0	0	29
	圆粒步甲指名亚种 <i>Carabus formosus</i>	0	46	23	4	0	0	0	73
	小计 Subtotal	1	94	93	37	19	7	1	252
青步甲属 <i>Chlaenius</i>	淡足青步甲 <i>Chlaenius pallipes</i>	1	99	51	49	36	26	17	279
	小黄缘青步甲 <i>Chlaenius circumdatus</i>	0	0	7	0	11	15	21	54
	脊青步甲 <i>Chlaenius costiger</i>	0	0	24	14	0	0	0	38
	逗斑青步甲 <i>Chlaenius virgulifer</i>	1	81	36	42	12	0	0	172
	毛青步甲 <i>Chlaenius allipes</i>	0	0	0	6	5	0	0	11
	其他 Other	0	2	0	0	3	1	0	6
	小计 Subtotal	2	182	118	111	67	42	38	560
斯步甲属 <i>Straneostichus</i>	紫背斯步甲 <i>Straneostichus vignai</i> Sciaky	0	9	38	108	61	72	31	319
类山丽步甲属 <i>Aristochrooides</i>	瑞类山丽步甲 <i>Aristochrooides reginae</i> Marcilhac	0	1	13	43	55	11	0	123
	其他 Other	0	0	0	24	11	5	0	40
	小计 Subtotal	0	1	13	67	66	16	0	163

续表 2 (Table 2 continued)

类别 Categories		个体数 Number of individuals							
属 Genus	种 Species	6 月 上半月 June-E	6 月 下半月 June-L	7 月 上半月 July-E	7 月 下半月 July-L	8 月 上半月 Aug.-E	8 月 下半月 Aug.-L	9 月 上半月 Sept.-E	合计 Total
长步甲属 <i>Dolichus</i>	赤胸长步甲 <i>Dolichus halensis</i>	1	0	2	1	5	10	0	19
婪步甲属 <i>Harpalus</i>	大毛婪步甲 <i>Harpalus ussuniensis</i>	0	0	0	4	8	10	0	22
	中华婪步甲 <i>Harpalus sinicus</i>	0	0	0	1	0	5	0	6
	婪步甲 <i>Harpalus coreanus</i>	0	0	0	2	1	0	0	3
	小计 Subtotal	0	0	0	7	9	15	0	31
脊角步甲属 <i>Poecilus</i>	格脊角步甲 <i>Poecilus gebleri</i>	6	5	1	0	0	0	0	12
艳步甲属 <i>Trigonognatha</i>	斯氏大通缘步甲 <i>Trigonognatha straneoi</i> Sciaky	0	2	18	41	15	14	2	92
	其他 Other	0	0	6	8	0	0	0	14
	小计 Subtotal	0	2	24	49	15	14	2	106
通缘步甲属 <i>Pterostichus</i>	重通缘步甲 <i>Pterostichus gravis</i> Jedlicka	1	82	44	109	44	12	5	297
	山通缘步甲 <i>Pterostichus oreophilus</i>	0	36	23	6	5	0	0	70
	暗通缘步甲 <i>Pterostichus haptoderoides</i>	0	0	0	0	7	0	0	7
	其他 Other	0	0	0	9	9	3	0	21
	小计 Subtotal	1	118	67	124	65	15	5	395
盘步甲属 <i>Metacolpodes</i>	布氏盘步甲 <i>Metacolpodes buchanani</i> (Hope)	0	0	35	18	9	0	0	62
	其他 Other	0	0	0	0	2	0	0	2
	小计 Subtotal	0	0	35	18	11	0	0	64
蜗步甲属 <i>Cychrus</i>	岷山蜗步甲 <i>Cychrus minshanicola</i> Deuve	0	39	34	71	71	0	0	215
	卡氏蜗步甲 <i>Cychrus kalabi</i> Deuve	0	23	0	0	26	26	0	75
	小计 Subtotal	0	62	34	71	97	26	0	290
安步甲属 <i>Andrewesius</i>	茹安步甲 <i>Andrewesius rougemonti</i> Movan	0	0	20	53	24	0	0	97
湿步甲属 <i>Notiophilus</i>	<i>Notiophilus</i> sp.	0	0	0	17	0	0	0	17
锯步甲属 <i>Pristosia</i>	<i>Pristosia</i> sp.	0	0	0	6	1	0	0	7
弧缘步甲属 <i>Archastes</i>	<i>Archastes</i> sp.	0	0	8	29	10	0	0	47
梨须步甲属 <i>Synuchus</i>	<i>Synuchus</i> sp.	0	0	0	14	25	0	0	39
合计 Total		11	473	453	712	475	217	77	2 418

2.2 时序变化中步甲多样性的动态分析

步甲个体数、属水平类别数、Shannon 多样性指数 (H') 和 Pielou 均匀度指数 (J) 的时间动态见图 1 (A-D)。步甲科昆虫个体数在各个时间所占比重各不同, 自 6 月上半月开始增加, 6 月下半月至 7 月上半月基于平稳, 出现第一个峰值, 7 月上半月至 7 月下半月增加至最大值, 7 月下半月步甲科昆虫个体数量达到高峰, 8 月上半月开始下降, 9 月上半月时下降至最低值 (图 1: A)。各时序步甲的个体数具有显著性差异 ($Q_{6,28}=30.994$; $P<0.000$); 属水平类别数时序动

态呈单峰型变化, 从 6 月上半月开始增加, 7 月下半月达到最高值, 9 月上半月下降至最低 (图 1: B), 各时序在属水平的类别数具有统计学差异 ($F_{6,28}=111.250$, $P<0.05$); 步甲科昆虫多样性指数时序变化呈单峰型, 最高出现在 7 月下半月, 其次是 8 月上半月, 而 9 月上半月时最低 (图 1: C); 各时序均匀度指数呈先下降后上升再下降的波浪形曲线, 最高出现在 6 月上半月, 其次是 8 月上半月, 9 月上半月最低 (图 1: D); 经检验时序动态对步甲多样性指数、均匀度指数均具有显著性影响 ($Q_{6,28}=30.994$, $P<0.000$; $Q_{6,28}=30.994$, $P<0.001$)。

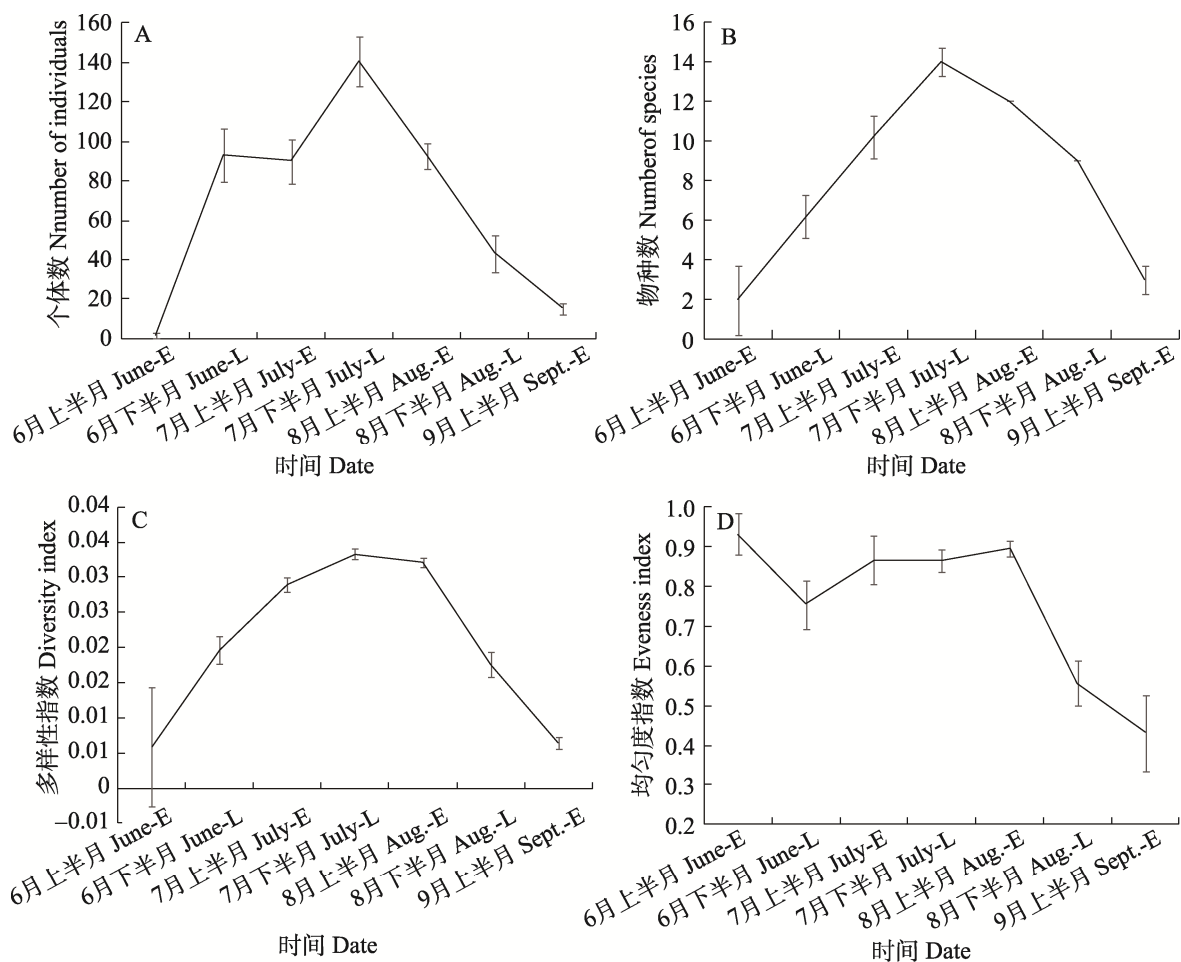


图 1 甘南亚高山区不同时序步甲群落多样性动态分析

Fig. 1 Dynamic analysis of carabid beetle diversity with different time series in the subalpine forests of southern Gansu

A. 个体数; B. 属水平类别数; C. Shannon 多样性指数; D. Peilou 均匀度指数。

A. The number of individuals; B. The number of genus species;

C. Shannon-Winner diversity index; D. Peilou Evenness index.

2.3 时序变化中步甲群落与环境因子间的冗余对应 (RDA) 分析

物种类群与环境因子之间的关系在一定程度上能够反映该类群对环境的适应性。如图 2 所示步甲类群数与环境因子之间的冗余对应分析 (RDA), 第一个和第二个轴中所解释的物种-环境关系为 95.2%, 表明降雨量、相对湿度、平均气温和地表温度 4 个环境因子对不同时期步甲的类群数起着不可忽视的重要意义。从 6 月上半月到 9 月上半月各时期按逆时针排列, 沿轴 1 方向, 地表温度的箭头长度较长, 夹角较小, 反映了地表温度因子对群落分布和物种组成的影响较大, 其次为平均气温, 其环境因子与 RDA 的相关系数分别为 0.883 3 和 0.846 6。因此, RDA 轴 1 是一个地表温度和平均气温梯度变化轴。降雨量因子与轴 2 的夹角较小, 说明降雨量对不同时期步甲群落和物种分布有着重要的影响, 降雨量与 RDA 的相关系数为 0.972 4。因此, 可以认为 RDA 轴 2 是一个降雨量梯度变化轴。优势类群与平均气温和地表温度间的垂直距离最小, 表示平均气温和地表温度因子是影响步甲优势类群时序波动的主要因素。

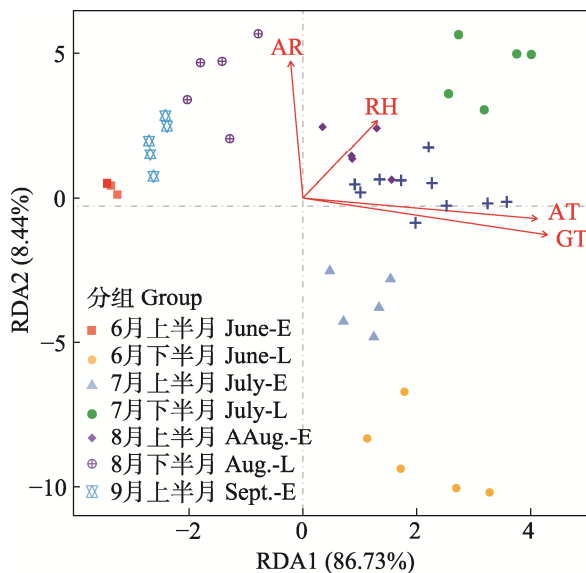


图 2 不同时期步甲群落与环境因子间 RDA 分析
Fig. 2 The RDA analysis of the relationship between the carabid beetle communities and environmental factors in different time series

3 讨论

昆虫对生存环境条件的变化十分敏感, 具有广泛的生物地理学和生态学探针的功能 (Cameron and Leather, 2012; Ernst *et al.*, 2016)。本研究表明时序波动对甘南亚高山区步甲科昆虫的群落结构及多样性变化具有重要的影响。步甲在不同时期中物种数和个体数存在显著性差异, 二者时序动态曲线大致都呈单峰型变化, 高峰期都出现在 7 月下半月, 个别种类对环境变化比较敏感, 随时序的变化波动较大。本结果与朱纪元等 (2016) 等对小兴安岭阔叶红松林步甲群落时间波动的研究结果规律一致, 本试验调查时间间隔和林分条件与上述研究较为相似, 同时森林优势种和生态环境也较为相似, 因此二者研究结果一致; 与刘生冬等 (2018) 等在吉林蛟河阔叶红松林步甲群落时序动态的研究 7 月上半月个体数达到最大值有一定差异, 甘南亚高山属于季风气候, 海拔高, 气温回暖较慢, 步甲昆虫发育相对较慢, 可能导致步甲科昆虫个体数及物种数高峰值出现在 7 月下半月。但与刘云慧 (2004) 等对北京农田景观步甲个体数的高峰期出现在 8 月的研究结果存在差异, 森林和农田景观生态环境差异较大, 导致步甲对时序动态变化的响应变化不同, 同时森林生境的空间异质性高、植被的垂直结构复杂及栖息地环境稳定使森林生境中步甲个体数的高峰期早于农田景观。

时序波动对步甲多样性指数具有显著性影响。步甲科昆虫多样性指数时序动态变化呈单峰型。均匀度指数时序变化为多峰型, 研究结果与大兴安岭地区兴安落叶松林和国外对步甲的研究结果有差异 (Aldhafer *et al.*, 2016; 马美轩等, 2021), 该变化模式可能受林区温度、降雨量、林分及生境差异等环境因子和步甲繁殖休眠等的影响, 甘南亚高山区属于青藏高原与西秦岭交错地带, 属典型大陆性气候, 6 月上半月温度较低, 降雨量少, 低温和干燥不利于步甲卵的孵化及取食, 导致这一时期成虫数量较少, 因此研究结果表现出步甲科昆虫个体数、物种数及多样性指数偏低而均匀度指数偏高。随着时序的气

温升高、降雨量增加,步甲科昆虫多样性指数在7月下半月出现高峰,这个时间段生境气候适宜,食物资源相对充沛,植被郁闭度较高有利于躲避天敌,雨热同期的气候有利于步甲的生存,此时步甲的多样性最高。

降雨量、相对湿度、平均气温和地表温度4个环境因子与不同时序步甲群落结构的相关性分析中,平均气温、降雨量和地表温度3个环境因子对不同时序步甲的群落分布具有重要的影响,相对湿度次之;同时,温度是影响步甲群落的时序变化及其优势种的重要因素。研究结果与 Sahito 等(2020)基于时序的环境因子变化对巴基斯坦南部步甲群落影响的研究结果一致,表明温度和降雨量等非生物因素是影响步甲物种多样性及丰富度的关键因素;同时也与 Ernst 等(2016)在北极地区甲虫及蜘蛛种群数量及多样性的研究中,发现气候因素(湿度,降雨,温度)与甲虫及蜘蛛种群数量之间存在强烈且显著的相关性的结论一致。甘南亚高山区以针叶林为优势种的森林植被垂直结构复杂、郁闭度高及空间异质性强,而步甲科昆虫多为陆生,生活于植物或地面,生态位较低,降雨的冲刷影响相对较小,则温度对步甲科昆虫的种群结构及多样性的影响的更大。

4 结论

甘南亚高山步甲群落及多样性在时序上的波动反映了该种群对环境具有积极的动态响应。步甲的物种数、个体数及多样性指数均在7月达到最高值,同时通缘步甲属、步甲属和青步甲属优势属也表现出较高的适应能力。气温、地表温度和降雨量三个气候因素对不同时序步甲物种分布具有重要的影响,其中温度是影响步甲科昆虫群落时序分布特征的最主要因素。但有关步甲与环境的响应机制尚未有报道,有待进一步研究。

参考文献 (References)

- Aldhafer HM, Abdel-Dayem MS, Aldryhim YN, Fadl HH, El-Torkey AM, Elgharrawy AA, Setyaningrum H, 2016. Diversity and composition of ground-dwelling beetle assemblages (Insecta: Coleoptera) in Rawdhat Khorim National Park. *Journal of Arid Environments*, 127: 187–191.
- Baker RHA, Sansford CE, Jarvis CH, Cannon RJC, MacLeod A, Walters KFA, 2000. The role of climatic mapping in predicting the potential geographical distribution of non-indigenous pests under current and future climates. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 82(1/3): 57–71.
- Bayoh MN, Thomas CJ, Lindsay SW, 2001. Mapping distributions of chromosomal forms of *Anopheles gambiae* in West Africa using climate data. *Medical and Veterinary Entomology*, 15(3): 267–274.
- Battisti A, Stastny M, Netherer S, Robinet C, Schopf A, Roques A, Larsson S, 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, 15(6): 2084–2096.
- Cameron KH, Leather SR, 2012. How good are carabid beetles (Coleoptera, Carabidae) as indicators of invertebrate abundance and order richness? *Biodiversity & Conservation*, 21(3): 763–779.
- Dang ZH, Chen FJ, 2011. Responses of insects to rainfall and drought. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(5): 1161–1169. [党志浩, 陈法军, 2011. 昆虫对降雨和干旱的响应与适应. *应用昆虫学报*, 48(5): 1161–1169.]
- Eyre MD, Lott DA, Garside A, 1996. Assessing the potential for environmental monitoring using ground beetles (Coleoptera: Carabidae) with riverside and Scottish data. *Annales Zoologici Fennici*, 33: 157–163.
- Ernst CM, Loboda S, Buddle CM, 2016. Capturing northern biodiversity: Diversity of arctic, subarctic and north boreal beetles and spiders are affected by trap type and habitat. *Insect Conservation and Diversity*, 9(1): 63–73.
- Eyre MD, Lott DA, Garside A, 1996. Assessing the potential for environmental monitoring using ground beetles (Coleoptera: Carabidae) with riverside and Scottish data. *Annales Zoologici Fennici*, 33: 157–163.
- Fu ZL, Yang J, Li DC, Ding QD, Qi H, Zhang WY, 2021. Community structure and diversity of ground-dwelling beetles in typical subalpine forests of southern Gansu. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 49(5): 47–55. [付作霖, 杨静, 李丹春, 丁全定, 齐昊, 张文宇, 2021. 甘南亚高山区典型森林生境地表步甲的群落结构及多样性分析. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 49(5): 47–55.]
- Jia Y, Zhao X, Meng Q, 2011. Composition and diversity of ground-dwelling beetles (Coleoptera) along a succession gradient

Aldhafer HM, Abdel-Dayem MS, Aldryhim YN, Fadl HH, El-Torkey AM, Elgharrawy AA, Setyaningrum H, 2016.

- in broad-leaved and Korean pine mixed forest in the changbai mountains, China. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 17(6): 797–802.
- Jiang SL, Wang GW, Zhou TL, 2005. The diversity and relationship with habitat of Carabine groups in Ziowuling forest area. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 33(10): 37–41. [姜双林, 王根旺, 周天林, 2005. 子午岭林区步甲类群多样性及其与生境的关系. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 33(10): 37–41.]
- Liu YH, Yu ZR, Liu Y, 2004. Temporal and structure of carabid community in agricultural landscape of Dongbeiwang Beijing. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15(1): 85–90. [刘云慧, 宇振荣, 刘云, 2004. 北京东北旺农田景观步甲群落结构的时空动态比较. 应用生态学报, 15(1): 85–90.]
- Liu DQ, Cao EJ, Zhang JQ, Gong J, Yan LL, 2020. Spatiotemporal pattern of water conservation and its influencing factors in Bailongjiang watershed of Gansu. *Journal of Natural Resources*, 35(7): 1728–1743. [柳冬青, 曹二佳, 张金茜, 巩杰, 燕玲玲, 2020. 甘肃白龙江流域水源涵养服务时空格局及其影响因素. 自然资源学报, 35(7): 1728–1743.]
- Liu SD, Meng QF, Gao WT, Li Y, Zhao HR, Li TQ, 2018. An analysis of temporal of litter-layer beetles in broad-leaved Korean pine forest in Jiaohe, Jilin Province. *Acta Ecologica Sinica*, 38(7): 2462–2470. [刘生冬, 孟庆繁, 高文韬, 李燕, 赵红蕊, 李天琦, 2018. 吉林蛟河阔叶红松林地地表甲虫多样性时间动态分析. 生态学报, 38(7): 2462–2470.]
- Martin JEH, 1978. The insects and arachnids of Canada (Part 1: Collecting, preparing and preserving insects, mites, and spiders). *Revista do Instituto de Medicina Tropical de so Paulo*, 34(5): 409–419.
- Ma KP, Liu YM, 1994. Measuring method of biodiversity of biological community: I α measuring diversity method. *Biodiversity Science*, 2(3): 231–239. [马克平, 刘玉明, 1994. 生物群落多样性的测度方法: I α 多样性的测度方法 (下). 生物多样性, 2(3): 231–239.]
- Ma MX, Song YX, Sang WG, Axmacher J, 2021. Temporal-dynamics of ground beetles in *Larix gmelinii* forest in Greater Khingan Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 41(24): 9910–9919. [马美轩, 宋悦心, 桑卫国, Jan Axmacher, 2021. 大兴安岭地区兴安落叶松林步甲群落多样性时间动态分析. 生态学报, 41(24): 9910–9919.]
- Qiu ZQ, Yang YH, Cao XW, Sun PJ, Sun XG, 2007. Species diversity and floristic characteristics of woody plants in the dry valley of the Bailong River, China. *Journal of Gansu Agricultural University*, 42(5): 115–119. [邱祖青, 杨永红, 曹秀文, 孙培坚, 孙学刚, 2007. 白龙江干旱河谷木本植物多样性及其区系地理特征. 甘肃农业大学学报, 42(5): 115–119.]
- Rainio J, 2013. Seasonal variation of carabid beetle (Coleoptera: Carabidae) abundance and diversity in Ranomafana National Park, Madagascar. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 1(5): 92–98.
- Ren GD, Zhang RZ, Shi FM, 2005. Insect Classification and Diversity. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. 133–142. [任国栋, 张润志, 石福明, 2005. 昆虫分类与多样性. 北京: 中国农业科学技术出版社. 133–142.]
- Sahito R, Memon N and Amur A, 2020. Seasonal variation and diversity of carabid beetles fauna (Coleoptera: Carabidae) in coastal areas of Sindh, Pakistan. *Pure and Applied Biology*, 9(2): 1556–1567.
- Terblanche JS, Hoffmann AA, Mitchell KA, Rako L, le Roux PC, Chown SL, 2011. Ecologically relevant measures of tolerance to potentially lethal temperatures. *The Journal of Experimental Biology*, 214(22): 3713–3725.
- Wang YS, Zhang DD, Chen XL, Chen K, Wu YZ, 2018. Research on the impact of human activities and climate change on Bailong river runoff. *Ground Water*, 40(4): 191–193. [王毓森, 张德栋, 陈学林, 陈凯, 吴彦昭, 2018. 人类活动和气候变化对白龙江径流的影响研究. 地下水, 40(4): 191–193.]
- Yu XD, Zhou HZ, Luo TH, 2002. Distribution patterns and their seasonal changes of *carabus* beetles in dongling mountain region near Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 22(10): 1724–1733. [于晓东, 周红章, 罗天宏, 2002. 东灵山地区大步甲属物种分布和季节变化的多样性格局. 生态学报, 22(10): 1724–1733.]
- Zhu JY, Li JK, Cheng SS, Yan L, Hu YY, Cao Y, Ni JP, Liu J, Wang JF, Gao MX, 2016. Community structure of adult coleoptera on local scale in a mixed broadleaved Korean pine forest in the xiaoxing'an mountains. *Journal of Northeast Forestry University*, 44(12): 57–63. [朱纪元, 李景科, 程赛赛, 闫龙, 胡媛媛, 曹阳, 倪娟平, 刘俊, 王继富, 高梅香, 2016. 小兴安岭阔叶红松林局地尺度地表鞘翅目成虫群落结构. 东北林业大学学报, 44(12): 57–63.]