



•研究报告• 土壤动物多样性: 物种与群落研究专辑

# 河西走廊中部戈壁地表甲虫群落动态变化及其影响因素

林永一<sup>1</sup>, 王永珍<sup>1</sup>, 冯怡琳<sup>2</sup>, 赵文智<sup>1,2</sup>, 高俊伟<sup>3</sup>, 刘继亮<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院西北生态环境资源研究院中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站, 兰州 730000; 2. 宁夏大学生态环境学院西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地/西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021; 3. 临泽县治沙实验站, 甘肃张掖 734200

**摘要:** 地表甲虫是戈壁主要的地表昆虫类群, 但我们对其中种属组成和活动节律的认识还很有限。2018–2020年1–12月我们利用陷阱法对河西走廊中部典型砾质戈壁地表甲虫种类及数量进行了连续观测, 并测定了该区降水和温度。本文研究发现: (1) 戈壁地表甲虫由步甲科、叶甲科、象甲科、粪金龟科和拟步甲科5科21种组成, 阿小螯甲(*Microdera kraatzi alashanica*)、戈壁琵甲(*Blaps gobiensis*)和波笨粪金龟(*Lethrus potanini*)是优势地表甲虫种; (2) 戈壁地表甲虫活动节律存在明显年季变异, 地表甲虫的活动期在3–10月, 地表甲虫活动密度的最大值出现在4–7月, 而物种丰富度的最大值均在5月出现; (3) 降水增多的2019年地表甲虫的活动密度明显增加, 且2019年地表甲虫物种丰富度和多样性指数显著高于2018年; (4) 地表甲虫的取食类型和个体大小影响它们的活动节律, 降水增多的年份提高了植食性的象甲科和部分拟步甲科的活动密度, 而一些拟步甲科的活动密度对降水的响应存在一定的滞后性; (5) 降水和温度变化强烈影响地表甲虫活动节律, 地表甲虫的个体数和物种数与月降水量和月平均温度呈显著的二次曲线和指数关系, 植食性和捕食性甲虫对降水及温度变化响应较腐食性甲虫敏感, 大甲虫对降水变化的响应较中甲虫和小甲虫敏感。总之, 降水及温度变化影响了戈壁地表甲虫的活动节律, 而不同地表甲虫种对二者的响应因其生理生态特征不同而异, 从而影响了地表甲虫群落动态变化规律。

**关键词:** 河西走廊中部; 戈壁; 地表甲虫; 群落动态; 功能性状

林永一, 王永珍, 冯怡琳, 赵文智, 高俊伟, 刘继亮 (2022) 河西走廊中部戈壁地表甲虫群落动态变化及其影响因素. 生物多样性, 30, 22343. doi: 10.17520/biods.2022343.

Lin YY, Wang YZ, Feng YL, Zhao WZ, Gao JW, Liu JL (2022) Dynamic change of ground-dwelling beetle community in a gobi desert of the middle of Hexi Corridor and its influencing factors. Biodiversity Science, 30, 22343. doi: 10.17520/biods.2022343.

## Dynamic change of ground-dwelling beetle community in a gobi desert of the middle of Hexi Corridor and its influencing factors

Yongyi Lin<sup>1</sup>, Yongzhen Wang<sup>1</sup>, Yilin Feng<sup>2</sup>, Wenzhi Zhao<sup>1,2</sup>, Junwei Gao<sup>3</sup>, Jiliang Liu<sup>1\*</sup>

1 Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

2 School of Ecology and Environment, Ningxia University Breeding Base for State Key Lab of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China/Key Lab of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, Yinchuan 750021

3 Linze Desertification Control Basin Research Station, Zhangye, Gansu 734200

### ABSTRACT

**Aims:** The purpose of the study is to further understand the species/genus composition and activity rhythms of ground-dwelling beetles of gobi.

**Methods:** From January to December during 2018 and 2020, the number of individuals and species of ground-dwelling beetles in a gobi desert of the Hexi Corridor were continuously observed with pitfall traps, and the climatic elements of

收稿日期: 2022-06-21; 接受日期: 2022-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(41771290)

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: liujl707@lzb.ac.cn

<https://www.biodiversity-science.net>

the region were observed.

**Results:** (1) Ground-dwelling beetles of the gobi were composed of 21 species from 5 families, including carabid, chrysomelid, curculionid, geotrupid and tenebrionid, and *Microdera kraatzi alashanica*, *Blaps gobiensis* and *Lethrus potanini* were the dominant species; (2) The activity rhythm of ground-dwelling beetles in gobi had obvious seasonal variations. The activity period of ground-dwelling beetles were from March to October, the activity density of ground-dwelling beetles peaked in April to July, and the species richness of ground-dwelling beetles peaked in May; (3) The activity density of ground-dwelling beetles increased significantly in 2019 with increased precipitation, and the species richness and diversity index of ground-dwelling beetles decreased significantly in 2018 with decreased precipitation; (4) The type of feeding and individuals size of ground-dwelling beetles affected their activity rhythm. The years of increased precipitation increased the activity density of the curculionid of phytophagous and some species of the tenebrionid, and the response of the activity density of some species of tenebrionid showed a certain hysteresis with precipitation; (5) The change of precipitation and temperature strongly affected the activity rhythm of ground-dwelling beetles. The number of individuals and species of ground-dwelling beetles had a significant quadratic and exponential relationship with monthly average precipitation and temperature. The response of phytophagous and predatory beetles to the change of precipitation and temperature were more sensitive than those of beetles of saprophagy, the response of large beetles to the change of precipitation were more sensitive than those of medium and small beetles.

**Conclusion:** The change of precipitation and temperature affect the activity rhythm of gobi ground-dwelling beetles, and the responses of different ground-dwelling beetle species to them are different due to their different physiological and ecological characteristics, which affect the dynamic changes of the ground-dwelling beetles communities.

**Key words:** the middle of Hexi Corridor; gobi; ground-dwelling beetles; community dynamics; functional traits

戈壁是指在干旱或极端干旱区受长期、强烈的风蚀或物理风化作用,广泛分布于地势开阔地带,地表由砾石覆盖的一类荒漠景观(冯益明等, 2013)。戈壁是我国西北地区典型的自然环境景观单元,主要分布在甘肃省和新疆维吾尔自治区,面积约66.1万km<sup>2</sup>,约占我国国土总面积的6.9% (冯益明等, 2014)。甘肃河西走廊是我国戈壁的主要分布区之一,属于温性干旱极干旱戈壁区,总面积为14.5万km<sup>2</sup> (申元村等, 2016)。戈壁区虽然生态环境十分脆弱,但由于多样而特殊的环境条件,其生物多样性较为丰富,且具有重要的特殊生物资源,是重要的动植物基因资源库(于琳倩等, 2014; 申元村等, 2016)。然而,由于本底资料匮乏和研究手段限制,我们对一些戈壁动物(主要是无脊椎动物)的认识还很有限。因此,亟待加强对戈壁荒漠无脊椎动物多样性及其生态功能对气候变化的响应研究,这对保护荒漠动植物多样性及科学评估气候变化对荒漠生态系统结构和功能的影响具有重要意义。

戈壁年均降水不足200 mm, 植被盖度在5%左右, 极端环境限制了原生动物、线虫螨类和跳虫等中小型无脊椎动物的多样性及其活动期。拟步甲科等地表昆虫是戈壁主要的无脊椎动物类群, 它们适应干旱少雨的极端环境, 广泛分布在各种类型的戈壁生境。一些研究已经发现, 步甲科、拟步甲科、

象甲科和粪金龟科是戈壁主要的地表昆虫类群, 它们的个体数量及生物量占地表节肢动物总量的50%以上(刘继亮等, 2010; Paknia et al, 2013; Pfeiffer & Enkhmunkh, 2013)。气候、植被和土壤是影响荒漠拟步甲昆虫在不同时空尺度行为变化的主要环境因子(娄巧哲等, 2011; Liu et al, 2012; 贾龙等, 2019)。然而, 我们对一些典型戈壁区拟步甲科等地表昆虫行为节律的认识还很有限。鉴于此, 本文以河西走廊中部山前戈壁为研究区, 解析戈壁地表昆虫种属组成及月动态变化规律, 为戈壁昆虫多样性保护及维持机制研究提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省张掖市临泽县北部干旱荒漠国家沙化土地封禁保护区内, 该保护区2005年开始围封禁牧, 抑制土壤沙化和保护珍稀动植物资源。研究区属于山前冲击形成的戈壁, 海拔1,350 m, 地势平坦, 植被以旱生、超旱生灌木为主且呈明显条带状分布。气候属于温带大陆性干旱荒漠气候, 冬季降雪和春季降雨稀少, 夏秋季降雨增多, 年均降水量为117.0 mm, 年平均温度7.6°C, 年平均蒸发量2,390 mm, 干燥度高达20.4。2018–2020年月降雨及温度变化如图1所示, 2019年年降水增多(高

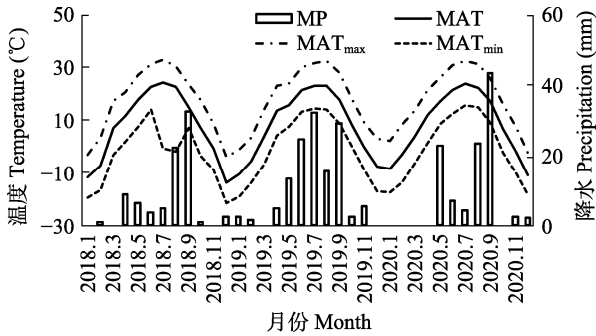


图1 2018–2020年1–12月研究区月降水量(MP)、月平均温度(MAT)、月平均最高温度(MAT<sub>max</sub>)和月平均最低温度(MAT<sub>min</sub>)

Fig. 1 Monthly precipitation (MP), monthly average temperature (MAT), monthly average maximum temperature (MAT<sub>max</sub>) and minimum temperatures (MAT<sub>min</sub>) at the study area from January to December during 2018 and 2020

达130.7 mm), 年平均温度也较高(9.0°C), 2018年年降水量较低(81.6 mm), 而2020年年降水量接近多年平均降水量。

研究区的地带性土壤为灰棕漠土, 土壤异质性较高。地下水位埋深为10 m左右, 植被主要以红砂(*Reaumuria songarica*)、泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)等耐旱的灌木和半灌木为主, 呈明显的条带状或斑块状分布, 而草本生长受降雨影响较大。研究区脊椎动物主要由爬行类、兽类和鸟类组成, 它们中许多以甲虫等节肢动物为食。大型食草动物有鹅喉羚(*Gazella subgutturosa*), 食肉动物有沙狐(*Vulpes corsac*)、兔狲(*Otocolobus manul*)等。鸟类主要有喜鹊(*Pica pica*)、黑尾地鸦(*Podoces hendersoni*)、沙鸚(*Oenanthe isabellina*)、漠鸚(*O. deserti*)、短趾百灵(*Calandrella cheleensis*)、楔尾伯劳(*Lanius sphenocercus*)等, 它们的物种多样性及活动频率在8月达到峰值。鸟类、兽类和爬行类动物主要在生长季活动, 野外观察和动物粪便检查确定大耳猬(*Hemiechinus auritus*)、沙狐、兔狲和大多数鸟类排泄物内有鞘翅残体, 说明这些动物取食拟步甲科等昆虫。鸟类是该区主要脊椎动物, 它们大多以甲虫等节肢动物为食, 8–9月鸟类的种类及活动频率达到最大。

## 1.2 地表甲虫样品收集及环境因素监测

在封禁保护区北部的中国科学院临泽内陆河流域观测场内选择60 m × 120 m的区域作为荒漠地表甲虫分布及多样性调查区。在样区内设置6条平行样线(间距8 m), 每条样线等距离布设12个陷阱

收集器(间距8 m), 一共72个陷阱收集器。2018年1月至2020年12月逐月监测地表甲虫的种属组成及数量变化, 每月下旬布设陷阱收集器, 每次样品采集时间为7天(刘继亮等, 2010)。采集的地表甲虫样品保存在75%的酒精溶液中, 带回室内依据相关分类资料(任国栋和于有志, 1999; 郑乐怡和归鸿, 1999; 梁宏斌和虞佩玉, 2000)鉴定至种或属并统计数量。利用游标卡尺测量不同种甲虫个体大小, 依据资料和野外观察确定不同地表甲虫的食性(郑乐怡和归鸿, 1999; Elek & Lövei, 2007)。研究区降雨及空气温度变化利用HOBO小型气象站测定。

## 1.3 数据分析

2018–2020年地表甲虫样品主要在3–10月收集, 其余月均未采集到地表甲虫样品。依据地表甲虫种或属在群落总个体数中所占比例多少将其划分为优势类群(> 10%)、常见类群(1%–10%)和稀有类群(> 1%)。2018–2020年3–10月72个陷阱收集的样品合并统计, 采用稀疏曲线和Chao-1指数来分析地表甲虫物种丰富度的年变化规律; 计算地表甲虫的活动密度(每个收集器获得的甲虫个体数)、物种数(每个收集器获得的甲虫物种数)、多样性指数(Shannon-Wiener index)和均匀度指数(Pielou's evenness index)与不同取食类型和个体大小甲虫个体数和物种数, 统计分析使用PAST4.01软件。利用单因素方差分析比较3年地表甲虫群落、营养结构、个体大小和主要类群间的差异, 统计分析使用SPSS21.0软件包。2018–2020年地表甲虫群落的相似性利用PERMANOVA多元方差分析和SIMPER相似性分析确定它们之间的差异及主要甲虫种的贡献率, 统计分析使用PAST4.01软件。地表甲虫群落及主要类群活动密度月动态变化与温度和降水的关系利用Spearman相关分析和曲线拟合确定, 统计分析使用SPSS21.0软件包。

## 2 结果

### 2.1 地表甲虫的种类组成及数量变化

2018–2020年1–12月72个收集器一共捕获到8,537头21种地表甲虫种, 隶属于步甲科、象甲科、叶甲科、粪金龟科和拟步甲科(附录1)。阿小鳖甲(*Microdera kraatzi alashanica*)、戈壁琵甲(*Blaps gobiensis*)和波笨粪金龟(*Lethrus potanini*)是优势种,

大甜菜象 (*Cleonus verrucosus*)、洛氏脊漠甲 (*Pterocomma loczyi*)、深洼齿足象 (*Deracanthus jakovlevi*)、宽突东鳖甲 (*Anatolica sternalis*)、中华砚甲 (*Cyphogenia chinensis*)和克氏扁漠甲 (*Sternotricon kraatzii*)是常见种,稀有甲虫有13种,它们的个体数仅占2.83%。2019年(3,985头19种)和2020年(2,972头19种)采集的地表甲虫的个体数和物种数均高于2018年(1,580头18种),主要地表甲虫种中戈壁琵甲和阿小鳖甲在2018年的比例高于2019年和2020年,而波笨粪金龟和大甜菜象的比重变化趋势相反。戈壁地表甲虫种的活动期在3–10月间,大多数步甲科、象甲科和粪金龟科甲虫种在夏秋季活动,而拟步甲科甲虫种主要在春夏季,这些甲虫种的活动期均存在年变化。此外,研究还发现洛氏脊漠甲在4–7月间活动,其活动期年变化较小;星步甲 (*Calosoma maderae*)、红角婪步甲 (*Harpalus amplicollis*)和维氏漠王 (*Platyope victori*)仅在2019年或2020年采集到。

## 2.2 地表甲虫的年动态变化规律

2018–2020年地表甲虫物种丰富度估算曲线接近水平,说明地表甲虫物种丰富度估算结果代表性好,2020年和2019年地表甲虫的物种丰富度高于2018年(图2);2019年(19.5种)和2020年(19.0种)地表甲虫的Chao-1指数高于2018年(18.5种)。

2018–2020年地表甲虫PERMANOVA多元方差分析结果表明,3年地表甲虫群落组成明显不同( $F = 43.87, P < 0.001$ )。SIMPER分析结果表明,2018年和2019年地表甲虫群落的平均相异性(55.28%)高于2018年和2020年(47.48%)与2019年和2020年(47.30%),阿小鳖甲、波笨粪金龟、戈壁琵甲和大甜菜象解释了2018年和2019年地表甲虫群落差异的81.36%;阿小鳖甲、戈壁琵甲、洛氏脊漠甲和宽

突东鳖甲解释了2018年和2020年地表甲虫群落差异的70.28%;阿小鳖甲、波笨粪金龟、戈壁琵甲和大甜菜象解释了2019年和2020年地表甲虫群落差异的70.59%。2018–2020年3年地表甲虫活动密度、物种数、多样性指数、均匀度指数、优势度指数和丰富度指数均存在显著差异( $P < 0.05$ ),2019年地表甲虫的活动密度达到峰值,且显著高于2018年和2020年。2018–2020年地表甲虫的物种丰富度逐年上升,且2019年和2020年均显著高于2018年。2018年地表甲虫的均匀度指数达到峰值,且与2019年、2020年均存在显著性差异。戈壁9个主要地表甲虫种在3年的活动密度均存在显著差异( $P < 0.05$ ),波笨粪金龟、大甜菜象和阿小鳖甲的活动密度变化趋势相近(图3)。深洼齿足象、中华砚甲、洛氏脊漠甲和克氏扁漠甲活动密度在3年的变化趋势一致,2020年这4个甲虫的活动密度显著高于2018年和2019年(图4)。戈壁琵甲和宽突东鳖甲的活动密度变化趋势相近,2019年和2020年这2个甲虫种显著高于2018年,2019年宽突东鳖甲的活动密度又显著高于2018年(图4)。

## 2.3 地表甲虫的月动态变化规律

地表甲虫活动密度的月动态变化规律存在明显的年季差异,2018年和2020年3–10月地表甲虫活动密度变化均呈单峰型,2018年7月和2020年5月地表甲虫活动密度达到最大值;2019年3–10月地表甲虫活动呈三峰型,4月、6月和8月地表甲虫为盛发期,4月地表甲虫的活动密度最高(图5)。2018–2020年3–10月地表甲虫的物种丰富度变化呈单峰型,它们的物种丰富度均在5月达到最大(图5)。

地表甲虫群落中主要甲虫种月动态变化规律不同,这与它们的取食类型和个体大小不同有关。2018–2020年3–10月波笨粪金龟和大甜菜象2种大型植食性甲虫的活动密度在2019年明显增高,波笨粪金龟活动密度在2019年4月达到最大,大甜菜象的活动密度在2019年6–8月间均较高(图6)。深洼齿足象属于中型植食性甲虫,它的活动期在7–10月间呈单峰型,9月深洼齿足象的活动密度达到最大(图6)。戈壁琵甲、中华砚甲和克氏扁漠甲是3种大型腐食性甲虫,中华砚甲的活动密度在2019年增多并在4–9月间呈单峰型,它在6月的活动密度达到最大;克氏扁漠甲的活动密度在4–9月间呈单峰型,它的

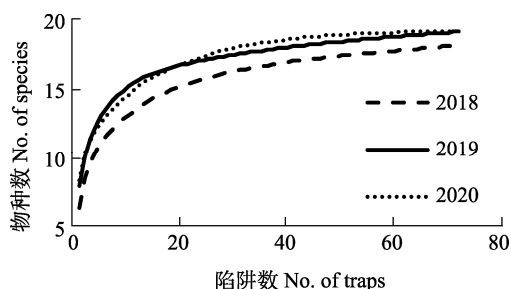
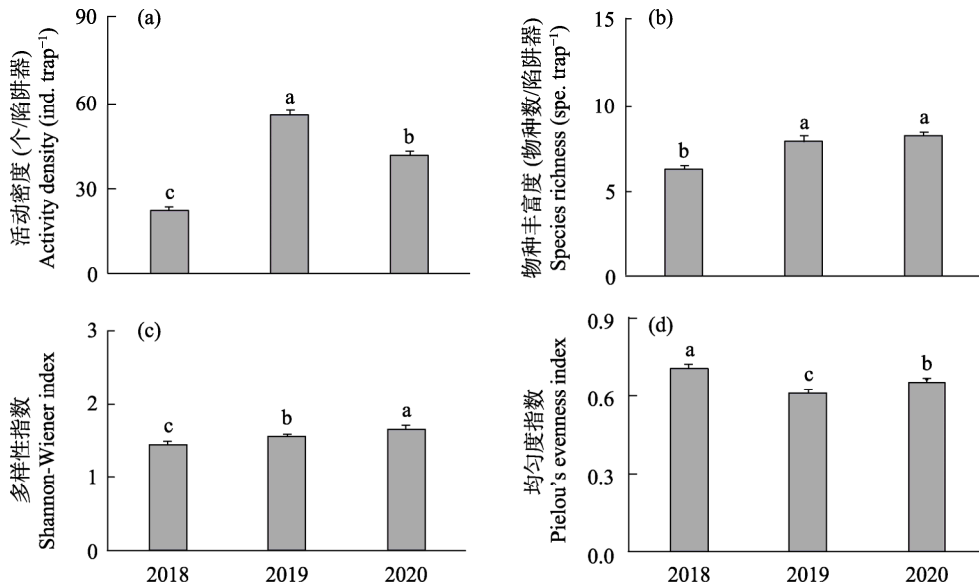
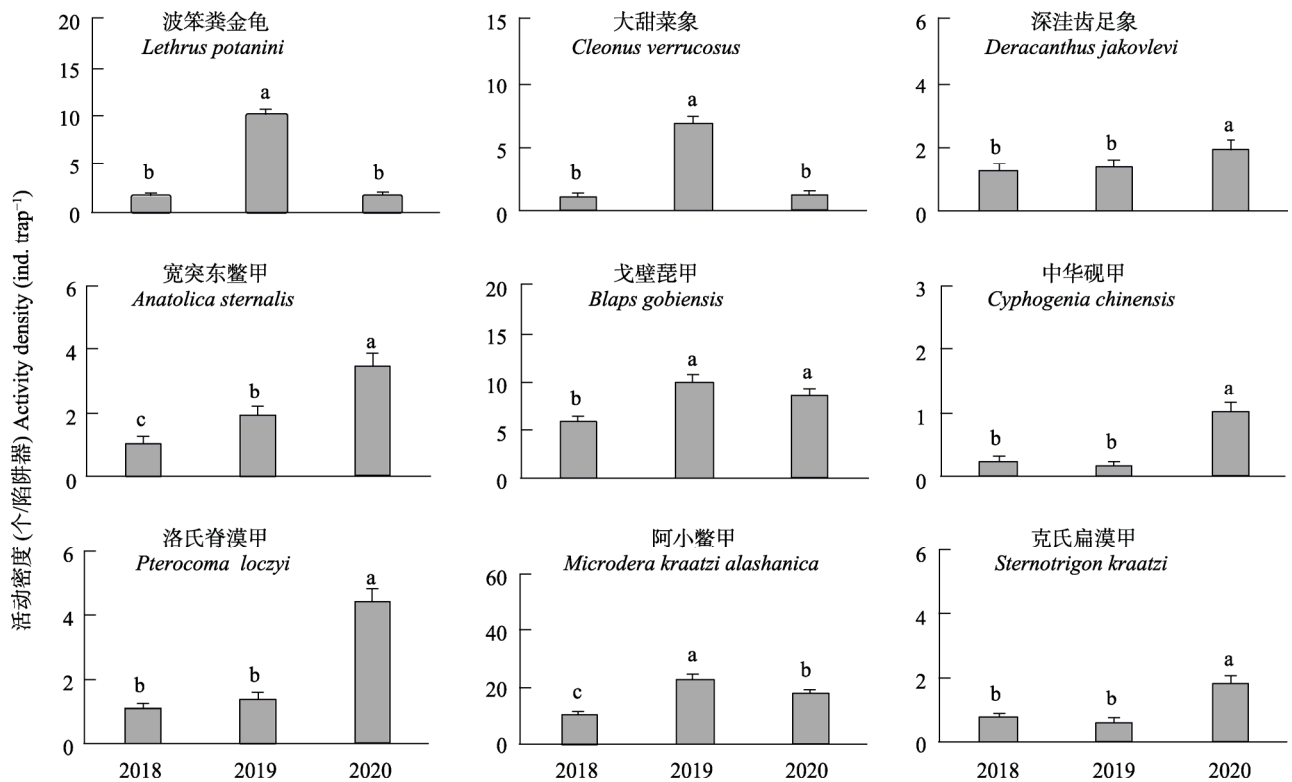


图2 2018–2020年戈壁地表甲虫物种丰富度估算曲线  
Fig. 2 Estimation curves of species richness of ground-dwelling beetles in gobi from 2018 to 2020



**图3** 2018–2020年戈壁地表甲虫活动密度(a)、物种数(b)、多样性指数(c)和均匀度指数(d)比较。柱形图上方的a、b、c代表是否存在显著性差异( $P < 0.05$ ), 字母相同代表无显著性差异, 字母不同代表存在显著性差异。  
 Fig. 3 Comparison of activity density (a), species number (b), diversity index (c) and evenness index (d) of ground-dwelling beetles in gobi from 2018 to 2020. The letters above the bar chart, a, b and c represent whether there are significant differences ( $P < 0.05$ ). The same letters indicate no significant differences, while different letters indicate significant differences.



**图4** 2018–2020年戈壁主要地表甲虫种活动密度比较。图中柱形图上方的a、b、c代表是否存在显著性差异( $P < 0.05$ ), 字母相同代表无显著性差异, 字母不同代表存在显著性差异。  
 Fig. 4 Comparison of activity densities of nine major ground-dwelling beetle species in gobi from 2018 to 2020. The letters above the bar chart, a, b and c represent whether there are significant differences ( $P < 0.05$ ). The same letters indicate no significant differences, while different letters indicate significant differences.

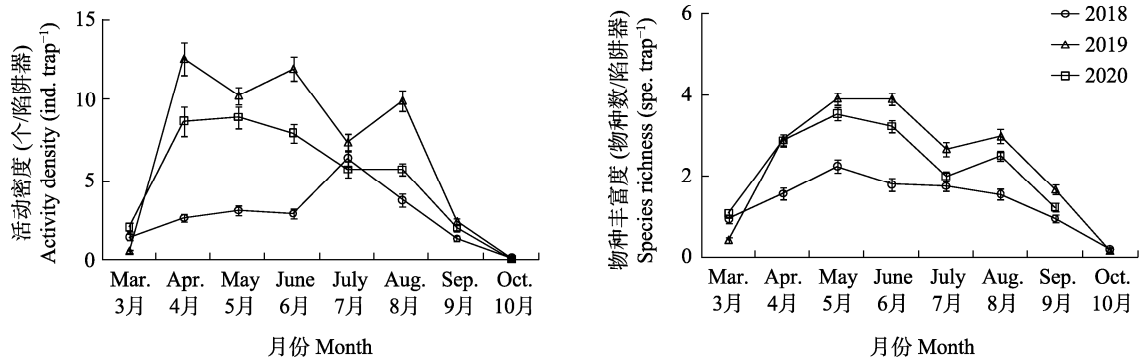


图5 2018–2020年3–10月地表甲虫活动密度和物种丰富度变化  
Fig. 5 Changes in activity density and species richness of ground-dwelling beetles from March to October during 2018 and 2020

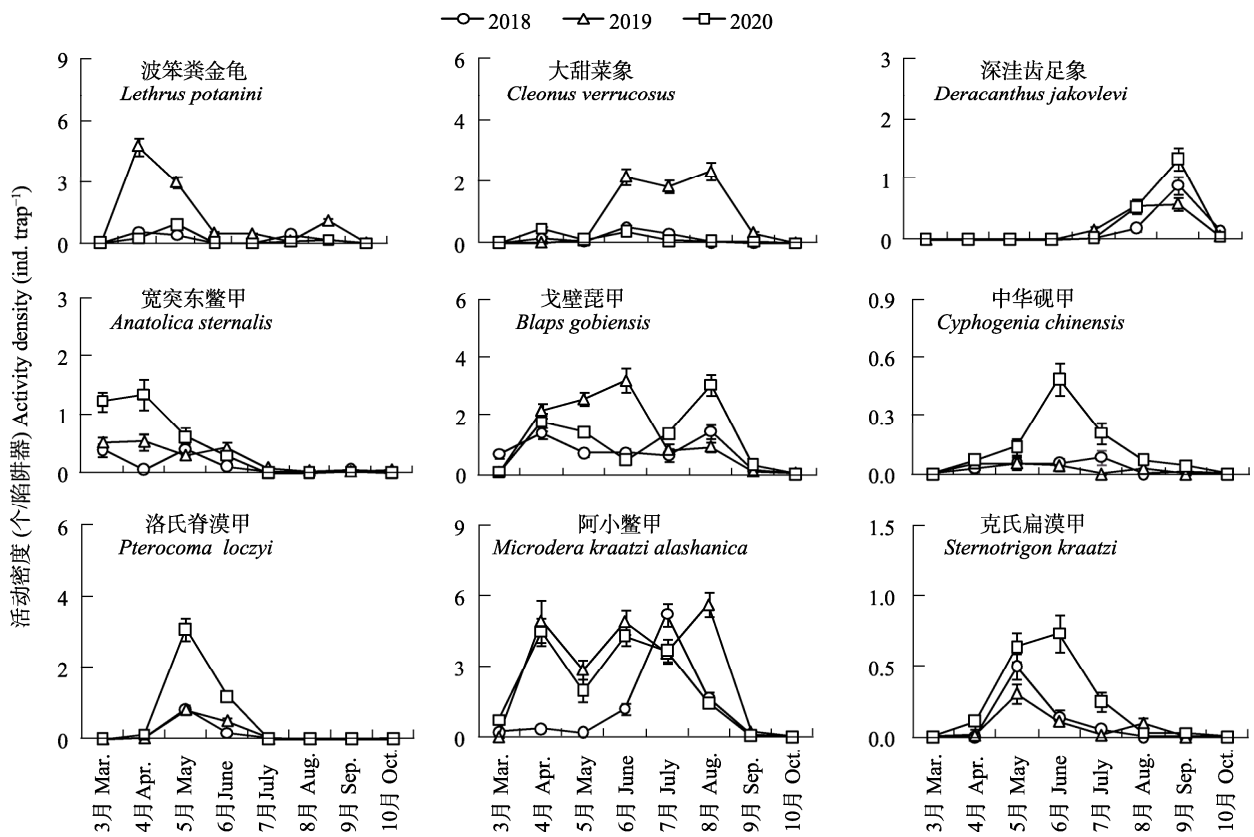


图6 2018–2020年3–10月9种主要地表甲虫活动密度变化  
Fig. 6 Changes in activity density of nine major ground-dwelling beetles from March to October during 2018 and 2020

活动密度在2018年5月、2019年5月和2020年6月达到最大；戈壁琵甲活动密度在2019年3–10月间呈单峰型，但在2018和2020年3–10月间呈双峰型，它的活动密度在2018年8月、2019年6月和2020年8月达到最大(图6)。宽突东鳖甲和洛氏脊漠甲是2种中型腐食性甲虫，宽突东鳖甲的活动密度在3–6月间均较高，它在4–5月间活动密度达到最大；洛氏脊漠甲的活动密度在4–7月间呈单峰型，它的活动密度

在5月达到最大(图6)。阿小鳖甲是小型腐食性甲虫，它的活动密度在3–9月间呈单峰型、双峰型和三峰型，它的活动密度在2018年7月、2019年8月和2020年4月达到最大(图6)。

#### 2.4 降水及温度变化对地表甲虫群落动态的影响

2018–2020年3–10月地表甲虫个体数和物种数呈显著的对数关系，地表甲虫的个体数随着物种数的增加而增加( $R^2 = 0.71, P < 0.001$ )。地表甲虫个体

数和物种数与月降水量均呈显著的二次曲线关系, 它们均随着月降水量的增加先升后降(图7)。月降水量达到19.4 mm和26.8 mm时, 地表甲虫的个体数和物种数达到最大, 为559.2头和12.2种。地表甲虫的个体数与月平均温度呈显著的指数关系, 它随着温度的升高逐步增加; 地表甲虫的物种数与月平均温度呈显著的二次曲线关系, 月平均温度达到19.4°C时, 地表甲虫的物种数达到最大, 为11.8种(图7)。

2018–2020年3–10月地表甲虫活动密度和物种丰富度与月平均温度均呈显著正相关, 地表甲虫物种丰富度与月降水量呈显著正相关(表1)。捕食性甲虫活动密度和物种丰富度与月降水量和月平均温度均呈显著正相关; 植食性甲虫活动密度和物种丰富度与月降水量均呈显著正相关, 植食性甲虫物种丰富度与月平均温度呈显著正相关; 腐食性甲虫活动密度和物种丰富度与月平均温度呈显著正相关, 而与月降水量的相关性较小(表1)。大甲虫的活动密度和物种丰富度均与月降水量和月平均温度呈显著正相关; 中甲虫的活动密度和物种丰富度均与月降水量和月平均温度的相关性较小; 小甲虫的活动密度和物种丰富度与月平均温度呈显著正相关, 它们与月降水量的相关性较小(表1)。9种主要地表甲虫种中仅有波笨粪金龟、大甜菜象和深洼齿足象3种植食性甲虫种的活动密度与月降水量呈显著正相关, 其余6种腐食性甲虫种的活动密度与月降水

量的相关性较小(表1)。大甜菜象、戈壁琵甲、中华砚甲、克氏扁漠甲和阿小鳖甲5个大或小型甲虫种的活动密度与月平均温度呈显著正相关, 而波笨粪金龟、深洼齿足象、宽度东鳖甲和洛氏脊漠甲4种大型和中型的甲虫种与月平均温度的相关性较小(表1)。

### 3 讨论

地表甲虫是荒漠生态系统重要的无脊椎动物类群, 其物种数和个体数及生物量在碎屑食物网中的比例较高, 它们不仅是荒漠生态系统凋落物分解过程的参与者, 还作为食物资源会影响脊椎动物的种类及多样性(Polis, 1991; Bartholomew et al, 2018)。戈壁地表甲虫由拟步甲科、步甲科、象甲科、叶甲科和粪金龟科甲虫种组成, 物种丰富度高于毗邻的沙漠, 这与土壤质地及植被盖度变化有关(Liu et al, 2015)。戈壁地表甲虫群落中戈壁琵甲、阿小鳖甲属和波笨粪金龟是主要的地表甲虫类群, 而毗邻巴丹吉林沙漠边缘沙漠的地表甲虫主要由谢氏宽漠王和东鳖甲属甲虫组成(刘继亮等, 2015)。本文关于河西走廊戈壁地表甲虫组成的研究结果与杨贵军等(2012)在宁夏盐池荒漠草地的研究结果相近, 而与徐养诚等(2013)在新疆古尔班通古特沙漠的研究结果不同, 这说明植被和土壤质地驱动的景观格局变化影响了以拟步甲科为主的荒漠地表甲虫

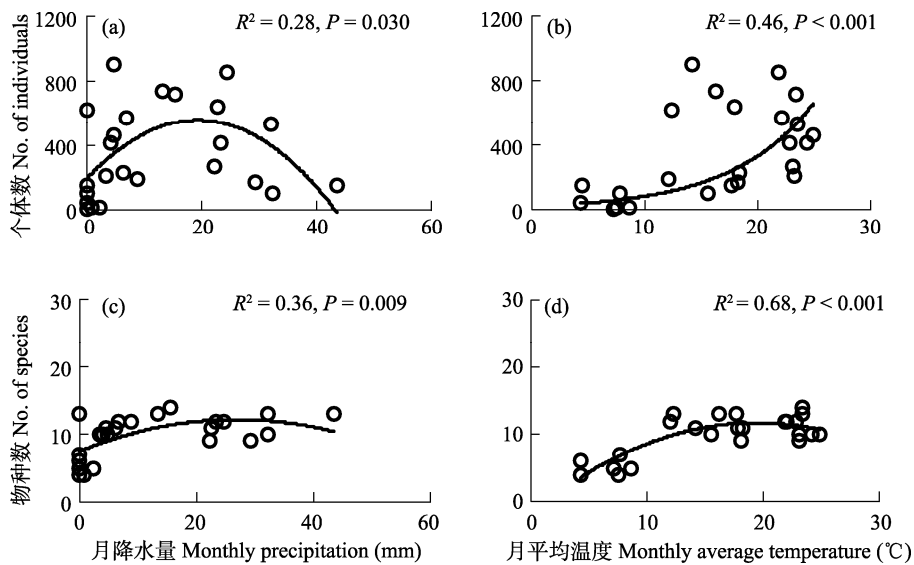


图7 地表甲虫个体数和物种数与月降水量和月平均温度的关系

Fig. 7 Relationship between the number of individuals and species of ground-dwelling beetles and monthly precipitation and monthly average temperature

**表1 地表甲虫群落、营养功能群、个体大小及主要类群与月降水量和平均温度的Spearman相关系数。MP表示月降水量, MAT表示月平均温度。黑色加粗数字表示存在显著性差异,  $P < 0.05$ 。**

Table 1 Spearman correlation coefficients between the community, trophic groups, body sizes, and dominant taxa of ground-dwelling beetles and monthly precipitation (MP) and monthly average temperature (MAT). Bold black numbers indicate significant difference,  $P < 0.05$

| 地表甲虫<br>Ground-dwelling beetles          | 月降水量<br>MP |                   | 月平均温度<br>MAT |                   |
|--|------------|-------------------|--------------|-------------------|
|  | <i>r</i>   | <i>P</i>          | <i>r</i>     | <i>P</i>          |
| <b>群落 Community</b>                      |            |                   |              |                   |
| 所有地表甲虫                                   |            |                   |              |                   |
| 活动密度 Activity density                    | 0.33       | 0.116             | 0.56         | <b>0.005</b>      |
| 物种丰富度 Species richness                   | 0.40       | 0.052             | 0.56         | <b>0.005</b>      |
| 捕食性甲虫 Predatory beetles                  |            |                   |              |                   |
| 活动密度 Activity density                    | 0.69       | <b>&lt; 0.001</b> | 0.69         | <b>0.001</b>      |
| 物种丰富度 Species richness                   | 0.69       | <b>&lt; 0.001</b> | 0.66         | <b>&lt; 0.001</b> |
| 植食性甲虫 Herbivorous beetles                |            |                   |              |                   |
| 活动密度 Activity density                    | 0.72       | <b>&lt; 0.001</b> | 0.37         | 0.076             |
| 物种丰富度 Species richness                   | 0.76       | <b>&lt; 0.001</b> | 0.44         | <b>0.032</b>      |
| 腐食性甲虫 Detritivorous beetles              |            |                   |              |                   |
| 活动密度 Activity density                    | 0.17       | 0.435             | 0.49         | <b>0.015</b>      |
| 物种丰富度 Species richness                   | 0.14       | 0.525             | 0.45         | <b>0.029</b>      |
| <b>个体大小 Body size</b>                    |            |                   |              |                   |
| 大甲虫 Large beetles                        |            |                   |              |                   |
| 活动密度 Activity density                    | 0.43       | <b>0.035</b>      | 0.50         | <b>0.013</b>      |
| 物种丰富度 Species richness                   | 0.45       | <b>0.028</b>      | 0.49         | <b>0.016</b>      |
| 中甲虫 Medium beetles                       |            |                   |              |                   |
| 活动密度 Activity density                    | 0.28       | 0.193             | -0.10        | 0.646             |
| 物种丰富度 Species richness                   | 0.37       | 0.076             | -0.02        | 0.929             |
| 小甲虫 Small beetles                        |            |                   |              |                   |
| 活动密度 Activity density                    | 0.19       | 0.369             | 0.64         | <b>&lt; 0.001</b> |
| 物种丰富度 Species richness                   | 0.21       | 0.333             | 0.73         | <b>&lt; 0.001</b> |
| <b>主要甲虫种 Dominant beetle species</b>     |            |                   |              |                   |
| 波笨粪金龟 <i>Lethrus potanini</i>            | 0.60       | <b>0.002</b>      | 0.13         | 0.552             |
| 大甜菜象 <i>Cleonus verrucosus</i>           | 0.45       | <b>0.029</b>      | 0.71         | <b>&lt; 0.001</b> |
| 深洼齿足象 <i>Deracanthus jakovlevi</i>       | 0.54       | <b>0.007</b>      | 0.26         | 0.214             |
| 宽突东鳖甲 <i>Anatolica sternalis</i>         | -0.25      | 0.232             | -0.34        | 0.105             |
| 戈壁琵甲 <i>Blaps gobiensis</i>              | 0.34       | 0.107             | 0.45         | <b>0.028</b>      |
| 中华砚甲 <i>Cyphogenia chinensis</i>         | 0.15       | 0.498             | 0.51         | <b>0.011</b>      |
| 洛氏脊漠甲 <i>Pterocomma loczyi</i>           | 0.04       | 0.837             | 0.17         | 0.420             |
| 阿小鳖甲 <i>Microdera kraatzi alashanica</i> | 0.20       | 0.340             | 0.64         | <b>&lt; 0.001</b> |
| 克氏扁漠甲 <i>Sternotrigon kraatzi</i>        | 0.19       | 0.375             | 0.57         | <b>0.004</b>      |

分布格局(王晶等, 2016)。步甲科、象甲科和叶甲科也是研究区重要的地表甲虫类群, 大多数种属在新疆和宁夏荒漠草地区也有发现(贺奇等, 2011; 娄巧

哲等, 2011)。此外, 我们的研究还发现波笨粪金龟是研究区重要的地表甲虫种(它是古北区特有粪金龟科昆虫种), 主要分布在戈壁, 它们以草本植物和红砂嫩枝为食(野外观察), 能挖掘巢穴栖居和繁殖(Bezborodov, 2015)。戈壁地表甲虫群落组成存在明显的年季波动, 主要地表甲虫的数量存在明显变化, 而降水增多的年份不仅可以提高一些主要地表甲虫种的捕获数量, 还可以提高稀有地表甲虫种的物种多样性。

水分是干旱、半干旱区动物分布的重要限制因子, 降水的短期和长期脉动变化会强烈影响蜘蛛、甲虫和蚂蚁等大型无脊椎动物的多样性变化, 不同无脊椎动物类群对降水的响应不同并存在明显的地域差异(Langlands et al, 2006; Barrows, 2012; Nielsen & Ball, 2015; Kwok et al, 2016; Gibb et al, 2019)。本研究发现戈壁不同年份地表甲虫群落组成明显不同, 降水增多显著提高了地表甲虫的活动密度, 降水减少则显著降低地表甲虫的物种数, 地表甲虫的多样性指数也随着年降水量的增加而增加并存在一定的遗留效应, 而地表甲虫群落的均匀度指数的变化与多样性指数相反, 这与一些主要地表甲虫种数量的增加有关。以上研究结果与Kwok等(2016)在澳大利亚荒漠关于地表节肢动物的研究结果相近。降水增多的年份提高戈壁波笨粪金龟、大甜菜象、戈壁琵甲和阿小鳖甲的活动密度, 一些捕食性甲虫种的种类和数量也随之增多, 从而提高了地表甲虫群落的数量及多样性(Langlands et al, 2006; Barrows, 2012; Nielsen & Ball, 2015)。捕食性和植食性甲虫对降水增加的响应比较敏感, 这与Langlands等(2006)和Barrows (2012)关于蜘蛛和甲虫对降水响应的研究结果相近。此外, 研究还发现一些腐食性的拟步甲科昆虫种对年降水量的增加有滞后性, 这些腐食性甲虫对降水变化的响应不敏感, 说明降水增加驱动资源变化对这些甲虫种的影响存在滞后效应或遗留效应, 降水驱动枯落物资源的累积促进了这些甲虫种的繁殖, 从而提高了它们的数量及多样性(Langlands et al, 2006; Barrows, 2012)。

戈壁地表甲虫成虫活动期监测发现, 地表甲虫活动期均在3月和10月之间, 这与温度变化密切相关, 春季和秋季温度变化可能是限制地表甲虫成虫



活动的主要限制因子(Thomas, 1979; Cloudsley-Thompson, 2001; de Los Santos et al, 2006)。大多数地表甲虫种的活动期因其生活史周期、取食类型及个体大小不同存在明显的变化,并随着年季变异。腐食性的拟步甲科甲虫种主要在春夏季出现盛发期,而步甲科和象甲科甲虫种主要在夏秋季节出现盛发期,降雨增多的年份会提高步甲科、象甲科和粪金龟科等捕食性和植食性甲虫种的数量及多样性。降水增加通过影响戈壁植物碎屑资源的累积数量,这会对一些腐食性甲虫种(如宽突东鳖甲、洛氏脊漠甲、中华砚甲和克氏扁漠甲)产生遗留效应或滞后效应,从而导致它们活动密度在降水增加之后的一年达到最高。地表甲虫活动密度的月动态变化存在年季差异,其盛发期呈单峰或多峰型,2018–2020年地表甲虫的活动密度的峰值在7月、4月和5月出现;地表甲虫物种丰富度变化规律接近,2018–2020年地表甲虫物种丰富度均在5月达到最大,随后呈波动式下降。拟步甲科甲虫是戈壁主要的地表甲虫类群,它们的种类及数量对降水年、月变化的响应模式决定地表甲虫群落动态。以上研究结果与杨贵军等(2012)在宁夏盐池荒漠草地拟步甲科群落动态的研究结果接近。大多数拟步甲科活动期接近,这与宁夏盐池荒漠草地、色列内盖夫荒漠和欧洲地中海沙丘系统和美国克罗拉多荒漠草地、莫哈维荒漠和草地关于拟步甲科的研究结果一致,但不同拟步甲科种成虫的盛发期不同(Whicker & Tracy, 1987; Krasnov & Ayal, 1995; Stapp, 1997; Carpaneto & Fattorini, 2001; 杨贵军等, 2012)。阿小鳖甲是个体较小、夜间活动的拟步甲科昆虫,它在研究区的活动期在3–9月间,盛发期呈单峰和多峰型;戈壁琵甲是一种个体较大夜间活动的拟步甲科昆虫,它的活动期在4–10月,6–8月活动密度达到最高。戈壁琵甲的生活史周期在2–3年,其盛发期可能存在年变化,阿小鳖甲生活史周期短,降雨及温度的短期变化可能对其成虫影响较大(张建英等, 2004; de Los Santos et al, 2006)。2018–2020年洛氏脊漠甲、宽突东鳖甲、克氏扁漠甲和中华砚甲等拟步甲科种的月动态变化规律相近,它们受降水年季波动的影响较小。步甲科和象甲科是研究区两种主要的捕食性和植食性甲虫,它们的盛发期与拟步甲科不同,大多数种在夏秋季节,这可能与其生理生态特征和食物

资源变化有关(Duncan & Dickman, 2001)。深洼齿足象主要取食泡泡刺叶片,它们的数量与泡泡刺的生长变化有关,因而受降水年季波动的影响较小。贺奇等(2011)在宁夏盐池草地步甲科昆虫的研究发现,步甲科的个体数量在8月最大,直角通缘步甲盛发期为8月,径婪步甲发生的高峰期为8月和9月,短翅伪葬步甲在5月和8月,蒙古伪葬步甲7–10月个体数量均较多。我们的研究区步甲科的数量较低,主要在夏、秋季节采集到。大星步甲是主要的步甲科昆虫,它的成虫活动期在4–8月,与夜蛾和天蛾科等蛾类幼虫的盛发期相近;大甜菜象是研究区主要的象甲科昆虫,幼虫栖居在盐生草等草本植物的根部,成虫取食盐生草等草本植物的叶片,它的盛发期与盐生草等草本植物的生长密切相关(个人观察)。波笨粪金龟是研究区一种植食性的粪金龟科昆虫,它可能以成虫越冬,盛发期在4月,随后降低,而在8月其活动频率又略有提高,这可能与8月波笨粪金龟蛹成虫羽化有关(鲁挺等, 2001)。

地表甲虫的活动密度及物种丰富度均与月平均温度和降水量呈显著正相关,说明戈壁温度及降雨变化对地表甲虫成虫活动及多样性的维持有重要影响。我们的研究结果与Thomas (1979)在美国莫哈维荒漠、Pfeiffer和Bayannasan (2013)在蒙古国的研究结果相近,而与Sackmann和Flores (2009)在阿根廷西北部的研究结果不同,这说明温度和降雨的日、月动态变化会影响拟步甲科等地表甲虫的活动及物种多样性,但这种影响存在明显的地域差异。此外,我们的研究还发现地表甲虫活动密度及物种丰富度在4月或5月后呈降低的趋势,而8月又略有提高,这与Carpaneto和Fattorini (2001)在欧洲地中海沙丘生态系统关于拟步甲科昆虫的研究结果一致,说明夏季高温降低了大多数甲虫种的活动频率。此外,本研究还发现大甜菜象与温度及降雨呈正显著相关,而阿小鳖甲与温度呈显著正相关,这可能与温度及降雨促进了幼虫发育或蛹孵化为成虫有关。月平均温度及降雨量还影响土壤温度及含水量变化,4月地表甲虫活动密度与土壤温度呈显著负相关,而10月土壤水分与地表甲虫活动密度及物种丰富度均呈显著正相关,这可能与不同甲虫类群对土壤温度及含水量的响应模式不同。拟步甲科甲虫主要在春、夏季活动,戈壁琵甲、克氏扁漠甲

和宽突东鳖甲对小尺度土壤温度变化响应比较敏感, 高温抑制了它们的活动, 而象甲科和步甲科主要在夏秋季活动, 它们对小尺度土壤水分变化的响应比较敏感, 这可能与土壤水分影响植被及一些植食性昆虫的分布有关, 它是象甲科和步甲科物种的主要食物来源。

#### 4 结论

河西走廊中部戈壁地表甲虫由拟步甲科、象甲科、步甲科、粪金龟科和叶甲科组成, 阿小鳖甲、戈壁琵甲、宽突东鳖甲、洛氏脊漠甲、中华砚甲、克氏扁漠甲、波笨粪金龟、大甜菜象和深洼齿足象是戈壁主要的甲虫种。年降水量增加会显著提高戈壁地表甲虫的活动密度, 而年降水量降低会显著降低地表甲虫的物种丰富度和多样性指数, 步甲科、象甲科和粪金龟科等捕食性和植食性甲虫种对降水变化的响应敏感, 而一些腐食性拟步甲科种对降水增加的响应存在一定的滞后性。戈壁地表甲虫的活动期在3–10月, 活动密度的盛发期呈单峰或多峰型, 6–7月间出现峰值; 物种丰富度的盛发期呈单峰型, 在5月份出现峰值。拟步甲科等甲虫种主要在春夏季活动, 步甲和象甲科等甲虫种主要在夏秋季活动, 波笨粪金龟则在春秋活动, 部分种类的活动期和盛发期存在明显的年季差异。大多数地表甲虫种的盛发期呈单峰或多峰型, 而洛氏脊漠甲和深洼齿足象的盛发期呈单峰型, 它们对降水变化的响应模式不同决定了地表甲虫群落动态。

戈壁生长季降水和温度变化强烈影响地表甲虫的个体数和物种数, 它们与月降水量及月平均温度呈显著二次曲线和指数关系, 地表甲虫的个体数和物种数随着月降水量的增加先升后降。月平均温度对捕食性、植食性和腐食性甲虫的活动密度或物种丰富度均有显著的影响, 而月降水量仅与捕食性和植食性甲虫的活动密度和物种丰富度呈显著正相关。大甲虫的活动密度和物种丰富度与月降水量呈显著正相关, 大甲虫和小甲虫的活动密度和物种丰富度与月平均温度呈显著正相关, 中甲虫的活动密度和物种丰富度与月平均温度和降水的相关性均较小。总之, 戈壁降水及温度的年和月变化强烈影响地表甲虫的数量及多样性, 捕食性和植食性甲虫对降水增加的响应比较敏感, 而腐食性甲虫对降

水增加的响应存在滞后性, 不同甲虫种的生理生态特征及生活史周期不同决定它们对降水及温度变化的响应模式。

#### ORCID

刘继亮  <https://orcid.org/0000-0002-5463-686X>

#### 参考文献

- Barrows C (2012) Temporal patterns of abundance of arthropods on sand dunes. *The Southwestern Naturalist*, 57, 262–266.
- Bartholomew A, El Moghrabi J (2018) Seasonal preference of darkling beetles (Tenebrionidae) for shrub vegetation due to high temperatures, not predation or food availability. *Journal of Arid Environments*, 156, 34–40.
- Bezborodov V, Shabalin S (2015) Lamellicorn beetles (Coleoptera: Scarabaeoidea) of Sakhalin Island: Taxonomical structure, fauna, ecology and zoogeography. *Caucasian Entomological Bulletin*, 11, 317–325.
- Carpaneto GM, Fattorini S (2001) Spatial and seasonal organisation of a darkling beetle (Coleoptera, Tenebrionidae) community inhabiting a Mediterranean coastal dune system. *Italian Journal of Zoology*, 68, 207–214.
- Cloudsley-Thompson JL (2001) Thermal and water relations of desert beetles. *Naturwissenschaften*, 88, 447–460.
- de Los Santos A, Ferrer F, de Nicolás JP, Crist TO (2006) Thermal habitat and life history of two congeneric species of darkling beetles (Coleoptera: Tenebrionidae) on Tenerife (Canary Islands). *Journal of Arid Environments*, 65, 363–385.
- Duncan FD, Dickman CR (2001) Respiratory patterns and metabolism in tenebrionid and carabid beetles from the Simpson Desert, Australia. *Oecologia*, 129, 509–517.
- Elek Z, Lövei GL (2007) Patterns in ground beetle (Coleoptera: Carabidae) assemblages along an urbanisation gradient in Denmark. *Acta Oecologica*, 32, 104–111.
- Feng YM, Wu B, Yao AD, Cao XY, Cong RC, Yao B, Wang F, Lu Q (2014) A study on classification system and inventory of gobi. *Acta Geographica Sinica*, 69, 391–398. (in Chinese with English abstract) [冯益明, 吴波, 姚爱冬, 曹晓阳, 丛日春, 姚斌, 王锋, 卢琦 (2014) 戈壁分类体系与编目研究. *地理学报*, 69, 391–398.]
- Feng YM, Wu B, Zhou N, Che TT, Wang F, Cong RC, Cao YL, Lu Q (2013) Gobi classification system based on remote sensing image recognition. *Journal of Desert Research*, 33, 635–641. (in Chinese with English abstract) [冯益明, 吴波, 周娜, 车腾腾, 王锋, 丛日春, 曹燕丽, 卢琦 (2013) 基于遥感影像识别的戈壁分类体系研究. *中国沙漠*, 33, 635–641.]
- Gibb H, Grossman BF, Dickman CR, Decker O, Wardle GM (2019) Long-term responses of desert ant assemblages to

- climate. *Journal of Animal Ecology*, 88, 1549–1563.
- He Q, Wang XP, Yang GJ (2011) Species diversity of carabid beetles in desert-steppe in Yanchi of Ningxia, China. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 923–932. (in Chinese with English abstract) [贺奇, 王新谱, 杨贵军 (2011) 宁夏盐池荒漠草原步甲物种多样性. *生态学报*, 31, 923–932.]
- Jia L, Zhang JY, Ren GD (2019) Spatial distribution pattern of Tenebrionidae and its relationships with meteorological factors in Alxa Plateau, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30, 3316–3326. (in Chinese with English abstract) [贾龙, 张建英, 任国栋 (2019) 阿拉善高原拟步甲空间分布格局及其与气象因子的关系. *应用生态学报*, 30, 3316–3326.]
- Krasnov B, Ayal Y (1995) Seasonal changes in darkling beetle communities (Coleoptera: Tenebrionidae) in the Ramon erosion cirque, Negev Highlands, Israel. *Journal of Arid Environments*, 31, 335–347.
- Kwok ABC, Wardle GM, Greenville AC, Dickman CR (2016) Long-term patterns of invertebrate abundance and relationships to environmental factors in arid Australia. *Austral Ecology*, 41, 480–491.
- Langlands PR, Brennan KEC, Pearson DJ (2006) Spiders, spinifex, rainfall and fire: Long-term changes in an arid spider assemblage. *Journal of Arid Environments*, 67, 36–59.
- Liang HB, Yu PY (2000) Species of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) predating oriental armyworm (Lepidoptera: Notuidae) in China. *Natural Enemies Insects*, 22, 160–167. (in Chinese with English abstract) [梁宏斌, 虞佩玉 (2000) 中国捕食粘虫的步甲种类检索. *昆虫天敌*, 22, 160–167.]
- Liu JL, Li FR, Liu CG, Liu QJ (2012) Influences of shrub vegetation on distribution and diversity of a ground beetle community in a Gobi desert ecosystem. *Biodiversity and Conservation*, 21, 2601–2619.
- Liu JL, Li FR, Liu QJ, Niu RX (2010) Seasonal variation of ground dwelling arthropod communities in an arid desert of the middle Heihe River Basin. *Acta Prataculturae Sinica*, 19, 161–169. (in Chinese with English abstract) [刘继亮, 李锋瑞, 刘七军, 牛瑞雪 (2010) 黑河中游干旱荒漠地面节肢动物群落季节变异规律. *草业学报*, 19, 161–169.]
- Liu JL, Zhao WZ, Li FR (2015) Distribution of ground arthropod community in arid desert in the middle reaches of Heihe River. *Arid Zone Research*, 32, 1192–1200. (in Chinese with English abstract) [刘继亮, 赵文智, 李锋瑞 (2015) 黑河中游荒漠地面节肢动物分布特征. *干旱区研究*, 32, 1192–1200.]
- Liu JL, Zhao WZ, Li FR (2015) Effects of shrub presence & shrub species on ground beetle assemblages (Carabidae, Curculionidae and Tenebrionidae) in a sandy desert, northwestern China. *Journal of Arid Land*, 7, 110–121.
- Lou QZ, Xu YC, Ma JH, Lü ZZ (2011) Diversity of ground-dwelling beetles within the southern Gurbantunggut Desert and its relationship with environmental factors. *Biodiversity Science*, 19, 441–452. (in Chinese with English abstract) [娄巧哲, 徐养诚, 马吉宏, 吕昭智 (2011) 古尔班通古特沙漠南缘地表甲虫物种多样性及其与环境的关系. *生物多样性*, 19, 441–452.]
- Lu T, Wang HZ, Wang X, Chen TF, Yang SW, Zhang XM (2001) Study on the biological properties of *Lethrus apterus*. *Acta Agrestia Sinica*, 9, 287–289, 295. (in Chinese with English abstract) [鲁挺, 王辉珠, 汪玺, 陈天福, 杨生武, 张新民 (2001) 无翅大头粪金龟生物学特性研究. *草地学报*, 9, 287–289, 295.]
- Nielsen UN, Ball BA (2015) Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems. *Global Change Biology*, 21, 1407–1421.
- Paknia O, Grundler M, Pfeiffer M (2013) Species richness and niche differentiation of darkling beetles (Coleoptera: Tenebrionidae) in Mongolian steppe ecosystems. In: *Steppe Ecosystems: Biological Diversity, Management and Restoration* (eds Prieto MBM, Diaz JT), pp. 47–72. Nova Science Publishers, New York.
- Pfeiffer M, Enkhmunkh B (2013) Diversity and community pattern of darkling beetles (Coleoptera: Tenebrionidae) in arid Mongolia. *Wissenschaftliche Beiträge Der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg*, 12, 251–266.
- Polis G (1991) Complex trophic interactions in deserts: An empirical critique of food-web theory. *The American Naturalist*, 138, 123–155.
- Ren GD, Yu YZ (1999) The Darkling Beetles from Deserts and Semi-deserts of China (Coleoptera: Tenebrionidae). Hebei University Publishing House, Baoding. (in Chinese) [任国栋, 于有志 (1999) 中国荒漠半荒漠的拟步甲科昆虫. 河北大学出版社, 保定.]
- Sackmann P, Flores GE (2009) Temporal and spatial patterns of tenebrionid beetle diversity in NW Patagonia, Argentina. *Journal of Arid Environments*, 73, 1095–1102.
- Shen YC, Wang XH, Cheng WM, Wu JF, Lu Q, Feng YM (2016) Integrated physical regionalization of stony deserts in China. *Progress in Geography*, 35, 57–66. (in Chinese with English abstract) [申元村, 王秀红, 程维明, 吴金凤, 卢琦, 冯益明 (2016) 中国戈壁综合自然区划研究. *地理科学进展*, 35, 57–66.]
- Stapp P (1997) Microhabitat use and community structure of darkling beetles (Coleoptera: Tenebrionidae) in shortgrass prairie: Effects of season shrub and soil type. *The American Midland Naturalist*, 137, 298–311.
- Thomas DB (1979) Patterns in the abundance of some tenebrionid beetles in the Mojave Desert. *Environmental Entomology*, 8, 568–574.
- Wang J, Lü ZZ, Yin F (2016) The influence of landscape heterogeneity on diversity of ground beetles in arid regions. *Journal of Environmental Entomology*, 38, 67–76. (in Chinese with English abstract) [王晶, 吕昭智, 殷飞

- (2016) 干旱区景观异质性地表甲虫多样性的影响. 环境昆虫学报, 38, 67–76.]
- Whicker AD, Tracy CR (1987) Tenebrionid beetles in the shortgrass prairie: Daily and seasonal patterns of activity and temperature. *Ecological Entomology*, 12, 97–108.
- Xu YC, Lou QZ, Ma JH, Lü ZZ (2013) Darkling beetles diversity in southern marginal zone of the Gurbantonggut desert. *Arid Zone Research*, 30, 674–680. (in Chinese with English abstract) [徐养诚, 娄巧哲, 马吉宏, 吕昭智 (2013) 古尔班通古特沙漠南缘拟步甲的物种多样性. 干旱区研究, 30, 674–680.]
- Yang GJ, He HM, Wang XP (2012) The time structure and population dynamics of the desert-steppe darkling beetle community in Yanchi, Ningxia, China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49, 1610–1617. (in Chinese with English abstract) [杨贵军, 贺海明, 王新谱 (2012) 盐池荒漠草地拟步甲昆虫群落时间结构和动态. 应用昆虫学报, 49, 1610–1617.]
- Yu LQ, Li JW, Li JQ, Cong RC, Lu Q (2014) Classification and specialty of the natural resources in the desert and Gobi ecosystem in China. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 35, 59–66. (in Chinese with English abstract) [于琳倩, 李景文, 李俊清, 丛日春, 卢琦 (2014) 中国沙漠、戈壁自然资源分类体系及其组成特点. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 35, 59–66.]
- Zhang JY, Jia L, Yu YZ (2004) The biological characteristics of blaps gobiensis (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)*, 25, 264–267. (in Chinese with English abstract) [张建英, 贾龙, 于有志 (2004) 戈壁琵甲(鞘翅目: 拟步甲科)生物学特性的研究. 宁夏大学学报(自然科学版), 25, 264–267.]
- Zheng LY, Gui H (1999) *Insect Classification*. Nanjing Normal University Press, Nanjing. (in Chinese) [郑乐怡, 归鸿 (1999) 昆虫分类. 南京师范大学出版社, 南京.]

(责任编辑: 朱朝东 责任编辑: 李会丽)

## 附录 Supplementary Material

### 附录 1 2018–2020 年戈壁捕获的地表甲虫数量及其功能性状

Appendix 1 Number of individuals of ground-dwelling beetles and function traits collected at a gobi desert of the Hexi Corridor from 2018 to 2020

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2022343-1.pdf>