

任嘉隆,刘继亮,王永珍,等.戈壁荒漠地表节肢动物聚集对降水及温度的响应[J].中国沙漠,2024,44(2):207-219.

戈壁荒漠地表节肢动物聚集对降水及温度的响应

任嘉隆¹,刘继亮²,王永珍²,方静²,冯怡琳³,
高安岭⁴,宋媛霞⁴,辛未冬¹

(1.山西师范大学 地理科学学院,山西 太原 030031; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院 临泽内陆河流域研究站,甘肃 兰州 730000; 3.宁夏大学 生态环境学院,宁夏 银川 750021; 4.内蒙古额济纳胡杨林国家级自然保护区管理局,内蒙古 额济纳 735400)

摘要: 地表节肢动物是荒漠生态系统食物网中的主要类群,降水脉动引发的资源变化会影响地表节肢动物聚集,从而影响荒漠生态系统的结构及功能。本文于2018—2020年1—12月在中国科学院临泽内陆河流域荒漠生态系统长期观测场内利用陷阱法对72个样点进行地表节肢动物样品采集并对小气候进行连续观测,系统探讨了降水及温度年和月波动影响下戈壁荒漠地表节肢动物及主要科的空间分布格局。结果表明:(1) 2018—2020年共捕获地表节肢动物24 834头45科,优势科由拟步甲科、象甲科、叶甲科、平腹蛛科、粪金龟科和蚁科组成。(2) Moran's I 指数分析结果表明戈壁荒漠地表节肢动物个体数在16 m的空间尺度上多为显著正相关,而在56-96 m的空间尺度上为显著的负相关性;半方差函数和普通克里格插值表明在特定的空间尺度内地表节肢动物科会形成集群,在不同时间尺度上表现为强空间异质性特征。(3) 象甲科、粪金龟科、平腹蛛科和蚁科空间分异多由结构性因素控制,拟步甲科和叶甲科空间分异由结构性因素和随机性因素共同调控。(4) 年降水量增加对拟步甲科、象甲科、叶甲科和粪金龟科的空间群落聚集具有正相关影响,而对平腹蛛科和蚁科的群落聚集则有负相关影响,温度与地表节肢动物空间聚集和扩展存在正相关关系。总之,降水变化改变了戈壁荒漠地表节肢动物对灌木及蚁穴塑造的微生境的响应模式及依赖程度,进而影响了不同年份地表节肢动物在空间上的聚集变化。

关键词: 戈壁荒漠; 降水变化; 地表节肢动物聚集; 群落动态; 空间格局

文章编号: 1000-694X(2024)02-207-13

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00103

中图分类号: Q959.22

文献标志码: A

0 引言

生物多样性的分布格局及其影响机制是宏观生态学和生物地理学的基本问题和研究热点,空间异质性可以为不同物种提供生态位,从而增加生物多样性,这在干旱少雨、植被稀疏的荒漠生态系统表现尤为明显^[1-2]。降水是戈壁荒漠生态系统动植物生存的主要限制因子,不仅影响着木本和草本植物的生长与脊椎、无脊椎动物的栖居和繁殖,还间接控制了捕食者生态位的宽度和对被捕食者水分的摄取,这对维持戈壁荒漠生态系统具有重要意义

义^[3]。干旱区、半干旱区降水及养分限制植被呈明显的斑块状分布,灌木及蚁穴塑造的微生境富集食物资源,改善土壤环境并抵御天敌捕食等维持了荒漠生态系统动物多样性及食物链的长度^[4]。单株灌木和蚁穴形成的斑块对地表节肢动物及土栖节肢动物有聚集作用,但这种影响存在明显的季节变异和地域差异^[5-7]。灌木种类及土壤异质性会影响灌木对甲虫等节肢动物的聚集作用^[8-10],降水引发的土壤水分及温度季节、年变化会影响地表节肢动物对灌木的依赖性^[11]。戈壁荒漠灌木的斑块状分布格局十分明显,土壤结构也存在异质性,降水驱动

收稿日期:2023-08-22; 改回日期:2023-11-15

资助项目:甘肃省自然科学基金项目(21JR7RA055);国家自然科学基金项目(41771290,41701287)

作者简介:任嘉隆(2000—),男,山西长治人,硕士研究生,研究方向为土壤动物生态学。E-mail: rr18735570109@163.com

通信作者:辛未冬(E-mail: xiny-2005@163.com)

的植被和土壤要素的短期和长期变化会强烈影响地表节肢动物栖居环境、食物资源及天敌捕食强度等,进而影响地表节肢动物的时空分布格局。地表节肢动物的挖掘活动还会影响荒漠植物种子的分布,影响土壤水分及养分循环和转化过程,进而影响荒漠植物的分布格局。因而,从不同时空尺度研究荒漠生态系统植物和动物的分布格局及其与环境要素的关系,对理解和认识荒漠生态系统动物多样性的维持机制据具有重要意义。戈壁荒漠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,地表由砾石覆盖的荒漠景观^[12]。河西走廊中部戈壁植被盖度不足5%,建群种为红砂和泡泡刺等旱生、超旱生灌木,草本植物仅在水分条件和降水频繁的时间段生长^[13]。蜘蛛、甲虫和蚂蚁是戈壁荒漠主要的节肢动物类群,它们对灌木和蚁穴微生境存在依赖,这种依赖有明显的季节和种间差异^[14]。降水通过影响植物生长和土壤水分有效性直接或间接影响地表节肢动物生存和繁殖,木本植物还可为地表节肢动物提供躲避天敌、极端温度胁迫和适宜的栖居和繁殖生境。地表节肢动物与它们的捕食者鸟类、兽类和爬行类在不同时空尺度存在复杂的营养和非营养关系,从而适应气候和人类活动影响,维持荒漠生态系统的健康与稳定。近年来,地表和土栖节肢动物种群分布格局及其对生物多样性维持的影响已经引起了一些学者重视,森林、农田和草地生态系统螨类及甲虫等土壤动物的空间分布格局及自相关性已经开展了研究,而关于荒漠生态系统的研究还十分有限^[15-19]。戈壁荒漠是主要的荒漠类型,蜘蛛、甲虫和蚂蚁等节肢动物数量及多样性对气候变化和人类活动扰动响应十分敏感,地表节肢动物空间分布格局研究可以为戈壁荒漠动物多样性保护及维持机制研究提供理论依据和数据支撑。鉴于此,本文基于戈壁荒漠地表节肢动物时空分布对降水变化长期响应监测数据,确定不同年降水及温度背景下地表节肢动物空间分布格局及其影响要素,补充和完善荒漠生态系统土壤动物分布格局与多样性维持机制研究。

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,该地于2005年建立保护区,目的是防止土地沙化和保护珍稀荒漠动植物资源。研究区海拔1 350 m,属于温带大陆性干旱荒漠气候,降水年际变化大,冬春季节降水稀少,降水普遍集中于夏季,多年平均降水量为117.0 mm,年平均气温7.6 °C,年蒸发量较大,可达2 390 mm,地下水埋藏深度10 m。研究区的地带性土壤为灰棕漠土,植被多为旱生、超旱生灌木,以红砂(*Reaumuria songarica*)和泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)等耐旱植被为主,呈明显斑块状和条带状分布。戈壁动物脊椎动物主要有荒漠沙蜥(*Phrynocephalus przewalskii*)、喜鹊(*Pica pica*)、沙鹀(*Oenanthe isabellina*)、漠鹀(*Oenanthe deserti*)、楔尾伯劳(*Lanius sphenocercus*)、黑尾地鸦(*Podoces hendersoni*)、大耳猬(*Hemiechinus auritus*)和沙狐(*Vulpes corsac*)等,节肢动物是它们重要的食物资源。戈壁地表节肢动物对降水变化响应的长期监测样地位于沙化土地封禁保护区内,2018—2020年降水年变化显著(图1),2018年降水量较少(81.6 mm),2019年降水量增多(130.7 mm),2020年降水量(105 mm)接近多年平均降水量(117 mm)。

1.2 地表节肢动物样品采集及环境要素监测

2012年在甘肃省临泽县北部的国家级干旱荒漠化土地封禁保护区内的中国科学院内陆河流域观测场内建立戈壁荒漠地表节肢动物分布的长期监测样地。选择60 m×120 m的区域作为荒漠地表节肢动物的多样性调查区,在观测场内划分出一块96 m×48 m的区域,在该区域核心处设置72个8 m×8 m的小区,以8 m为间隔设置6条样线(间距8 m),每条样线之间等距布设12个陷阱收集器(间距8 m),一共72个陷阱收集器收集地表节肢动物样品(图2)。2018年1月至2020年12月利用改进式陷阱收集器逐月收集地表节肢动物样品,每次样品的采集时间为7天,每3天添加一次保存液^[20],保存液为75%酒精溶液。采集的地表节肢动物样品保存在装有75%酒精溶液的PET采样瓶中,带回室内在体式显微镜下鉴定种属组成和统计个体数量。地表节肢动物样品中蛛形纲、鞘翅目和蚁科等节肢动物参照相关分类资料鉴定至种或属,部分类群鉴定至科,在科的水平统计每一类群个体数量^[21-24]。此外,一些难以鉴定的节肢动物样品请国内相关分类专家鉴定。利用HOBO U30小型气象站监测研究

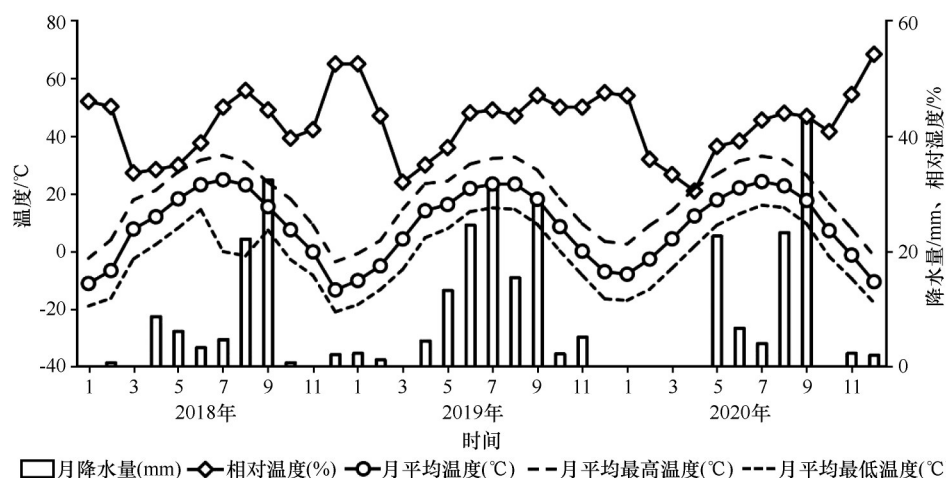
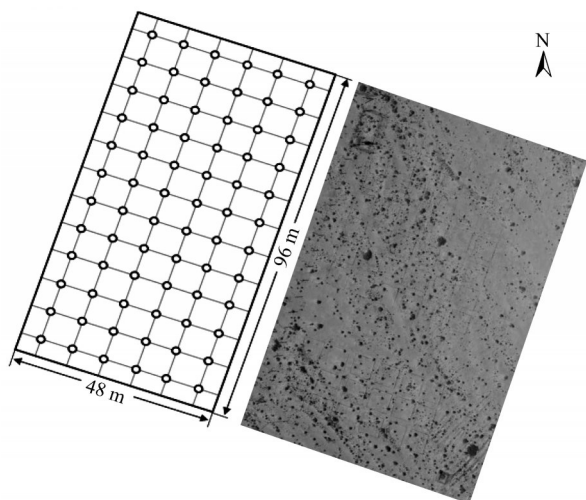


图1 2018—2020年1—12月研究区月降水量、相对湿度、月平均温度、月平均最高温度和月平均最低温度

Fig.1 Monthly precipitation, monthly relative humidity, monthly mean temperature, monthly mean maximum temperature, and monthly mean minimum temperature in the study area from January to December in 2018 to 2020



注:图中空心圆点为采样点

图2 戈壁荒漠地表节肢动物长期监测采样点示意图和生态系统长期观测场航拍照片

Fig.2 Schematic diagram of sampling points for long-term monitoring of ground arthropods and aerial photographs of long-term observation sites in the gobi desert

区温度、降水、辐射、风速和风向等气象要素变化;每个月地表节肢动物采样期利用土钻采集陷阱收集器附近土壤,采用烘干法测定10 cm土壤含水量,纽扣式温度记录仪记录10 cm土壤温度。2018—2020年秋季利用样方法调查每个8 m×8 m小区灌木种类、盖度、草本盖度及物种丰富度等,采集土壤样品带回室内测定土壤理化性质。

1.3 数据分析

采用稀疏曲线来分析戈壁地表节肢动物物种丰富度的年变化规律,统计分析使用PAST4.01软件

包。2018—2020年逐月采集的地表节肢动物按年统计,依据地表节肢动物个体数在群落总个体数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%)。每年12个月采集的地表节肢动物样品合并统计,计算地表节肢动物的活动密度(每个陷阱收集器捕获的地表节肢动物的个体数)、科丰富度(每个陷阱收集器捕获的地表节肢动物的科数)和多样性指数(Shannon-Wiener index),统计分析使用PAST4.01软件包。使用相关分析确定地表节肢动物群落和主要类群与月降水量和平均温度的相关性,统计分析使用SPSS 21.0软件包。2018—2020年地表节肢动物聚集和主要类群活动密度变化(不包括叶蝉科和长蝽科)使用半方差函数和Moran's I 指数计算。半方差函数可以表征地表节肢动物群落和主要科空间变异特征的程度。半方差函数中块金值(C_0)是间隔距离小于采样间距时的测量误差或空间变异;基台值(C_0+C)是变量在研究范围内最大的变异程度;结构比 $C/(C_0+C)$ 用来揭示变量的空间自相关部分引起的空间异质程度,它反映了空间自相关性的程度和随机性或结构性因素引起的空间变异占总变异的比值。结构比比值<25%表明空间相关性较弱,群落空间变异主要由随机性因素导致;比值在25%~75%表明具有中等的空间相关性,群落空间变异由结构性和随机性因素共同控制;比值>75%表明空间相关性很强,群落空间变异主要由结构性因素导致(影响群落多样性及分布由确定性因素控制)^[25]。半方差函数中步长是表示距离的尺度单位,变程(自相关

尺度, A_0)表示区域化变量存在空间自相关特性的平均最大距离,反映群落自相关的空间范围,在自相关尺度内群落具有空间自相关性,自相关尺度以外具有其空间独立性。普通克里格(Ordinary Kriging)插值是在变异函数的基础上,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计,利用普通克里格插值绘制地表节肢动物群落参数在区域上的空间分布格局图(Kriging map),比较不同年份地表节肢动物群落参数的斑块形状、大小及其变化的空间格局分布特征,半方差函数的计算和半变异函数图以及空间克里格插值图使用GS+9.0软件包完成。利用Moran's I 指数进行空间自相关分析,定量描述地表节肢动物群落和主要科在空间上的依赖关系以及判断样地内地表节肢动物群落是否存在空间聚集。Moran's I 指数的值域为 $[-1, 1]$,其值为0时,代表地表节肢群落均匀分布,不存在空间自相关性;其值 > 0 时,说明地表节肢群落存在正的空间自相关性,呈现聚集的空间格局;其值 < 0 时,说明地表节肢群落存在负的空间自相关性,呈现离散的空间格局,绝对值越大说明其空间自相关程度越大^[26]。Moran's I 指数的计算和绘图使用R4.2.2软件的spdep、vegan、ade4和sp软件包完成。

2 结果

2.1 地表节肢动物群落组成及数量变化

2018—2020年1—12月72个陷阱器共捕获24 834头45科地表节肢动物,蛛形纲节肢动物12科,个体数占5.7%;昆虫纲节肢动物33科,个体数占94.2%,昆虫纲中拟步甲科和蚁科捕获的个体数占26.0%和49.3%。地表节肢动物群落主要由平腹蛛科、长蝽科、叶蝉科、拟步甲科、象甲科、叶甲科、粪金龟科和蚁科组成,它们的个体数占捕获总个数的95.4%,稀

有类群38科,其数量仅占捕获总个数的4.6%。

2018、2019、2020年地表节肢动物基于个体数和陷阱数的稀度曲线均接近水平,2019年地表节肢动物科丰富度高于2018、2020年(图3)。2019年捕获的地表节肢动物科数(38科)高于2020、2018年(33科和32科),2020年和2019年捕获的地表节肢动物个体数(9 996头和8 431头)均高于2018年(6 407头)。主要地表节肢动物科在3年的捕获数量也存在一定变化,平腹蛛科和蚁科在3年的捕获数量相差较小;象甲科、叶甲科和粪金龟科在2019年捕获的数量远高于2018年和2020年;长蝽科和叶蝉科在2020年捕获的数量远高于2018年和2019年;2019年和2020年捕获的拟步甲科的数量略高于2018年。地表节肢动物群落中稀有科的年变化十分明显,鳃金龟科仅在2018年捕获到;猎蝽科、盲蝽科、叩甲科、隐翅虫科、蚁形甲科、薪甲科、葬甲科、食蚜蝇科和食虫虻科9个科仅在2019年捕获到;痂蝗科、阎甲科和花金龟科3个科仅在2020年捕获到。

2.2 不同年份地表节肢动物群落空间变化

通过对2018—2020年戈壁荒漠地表节肢动物个体数进行半方差函数分析,得到在相应拟合模型下的半方差函数各参数值。不同地表节肢动物群落的个体数及优势类群个体数的块金值均较小,这说明本实验的空间尺度和样地设置相对合理。地表节肢动物群落最优模型以指数模型、高斯模型、球状模型和线性模型拟合,不同年份之间群落的结构比普遍大于75%,说明这些群落主要受确定性因素所控制(表1)。不同年份下地表节肢动物活动密度的变化差异较小,在空间尺度上表现为正相关,2019年空间分布格局上斑块聚集显著,而2020年斑块聚集不显著,群落结构比均大于75%,说明活动密度的空间变异程度主要受确定性因素影响,不同

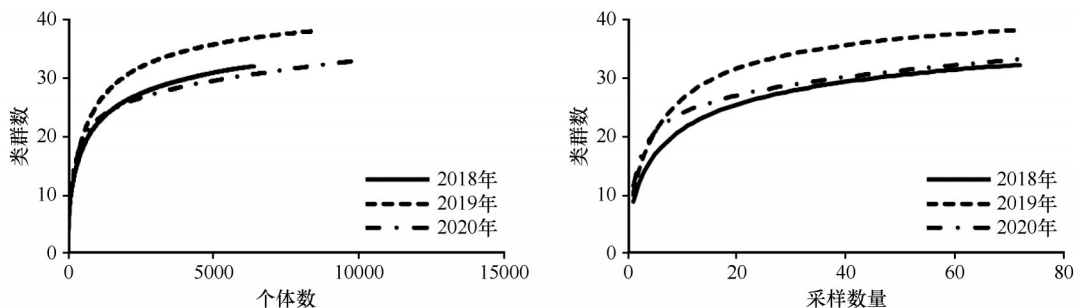


图3 2018—2020年戈壁荒漠地表节肢动物类群丰富度的稀度估计曲线

Fig.3 Estimated families richness of ground arthropods using rarefaction methods in gobi desert from 2018 to 2020

表 1 2018—2020 戈壁地表节肢动物活动密度、科丰富度和多样性指数半方差函数分析
Table 1 The activity density, family richness and diversity index of ground arthropods
using semivariance function analysis in gobi desert from 2018–2020

群落结构	年份	模型	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	变程/m	结构比[$C/(C_0+C)$]
活动密度	2018	球状模型	0.01	0.25	17.85	0.95
	2019	球状模型	0.00	0.18	12.24	0.98
	2020	高斯模型	0.01	0.12	9.17	0.87
科丰富度	2018	高斯模型	0.01	0.10	7.55	0.86
	2019	球状模型	0.00	0.11	10.92	0.99
	2020	球状模型	0.01	0.11	9.54	0.96
多样性指数	2018	指数模型	0.00	0.04	6.13	0.85
	2019	指数模型	0.00	0.04	9.54	0.90
	2020	指数模型	0.00	0.03	11.75	0.96

年份之间群落活动密度存在很强的空间自相关性。科丰富度不同年份半方差函数结果变化差异不显著,3年均由确定性因素控制,相较于2018、2020年,2019年空间聚集性显著增强。多样性指数的半方差函数分析显示不同年份之间空间变异较为稳定,其最优模型均为指数模型,群落结构比均大于75%,空间变异由确定性过程控制,在空间分布上2019年和2020年聚集显著。在空间分布格局上,活动密度和科丰富度之间具有相似的分布规律,而多样性指数具有相异性(图4)。这说明地表节肢动物群落结构在活动密度、科丰富度和多样性指数3个方面存在空间变异性,地表节肢动物活动密度、科丰富度和多样性指数在戈壁荒漠环境下,受制于降水及温度等因素影响导致其空间异质性在年和月尺度上发生改变。

2.3 不同年份主要地表节肢动物科空间变化

Moran's *I* 指数表明戈壁荒漠地表节肢动物优势科的活动密度随样点距离的增加,空间自相关性具有明显的波动性,在空间相关性表现为具有复杂性。地表节肢动物中优势科个体数在16 m的空间尺度表现为一定程度正的空间正相关,在56~96 m的空间尺度上几乎不存在空间自相关性。拟步甲科2018年在12、24、48 m空间尺度上为显著聚集;2019年空间聚集滞后,在40 m和56 m趋于显著聚集;2020年趋于稳定且在24 m的距离范围内为显著聚集(图5)。平腹蛛科2018年在32 m的空间尺度内为正的空间相关性关系,在此距离范围内呈聚集分布;而2019年空间聚集减少,只有在12 m的空间

尺度上呈点状聚集分布;2020年在32 m的空间尺度上有显著聚集分布。蚁科不同年份空间聚集趋于稳定,2018年在16 m内和48 m的空间尺度上为显著聚集,2019年在16、24 m和40 m的空间分布上趋于聚集,而在56 m的空间尺度上为负的空间相关关系,2020年在32 m的空间尺度范围内表现为显著聚集分布。拟步甲科、平腹蛛科和蚁科2018—2020年在某一空间尺度上表现为正或负的空间自相关性,且多为正相关关系,说明蚁科在对应的空间尺度范围内为空间聚集分布。2018—2020年,象甲科、叶甲科和硬体盲蛛科与拟步甲科群落的空间聚集变化规律相近,相较于2018年和2020年,在2019年空间距离尺度延长且空间聚集分布增多。粪金龟科、长蝽科与平腹蛛科的空间聚集变化规律近似,相较于2018年和2019年,2020年类群的空间聚集分布滞后。这说明地表节肢动物在某一个或多个尺度范围内随降水年变化表现为不同的空间自相关关系,空间尺度上表现为动态变化性和季节波动性。

戈壁荒漠地表节肢动物的主要类群,常常在环境中起着环境构建作用,决定地表节肢动物群落聚集对降水及温度的响应。模型显示,跳蛛科、蛎科、蚁蛉科、鳃金龟科和瓢甲科3年的结构比为25%~75%,说明这些群落受结构性过程和随机性过程共同控制。对2018—2020年地表节肢动物优势科进行半方差函数分析,拟步甲科在2018—2020年模型拟合均为球状模型,2018年结构比为25%~75%,2019年和2020年结构比大于75%,这说明拟步甲科在2019年和2020年的空间变异性较强。叶甲科变

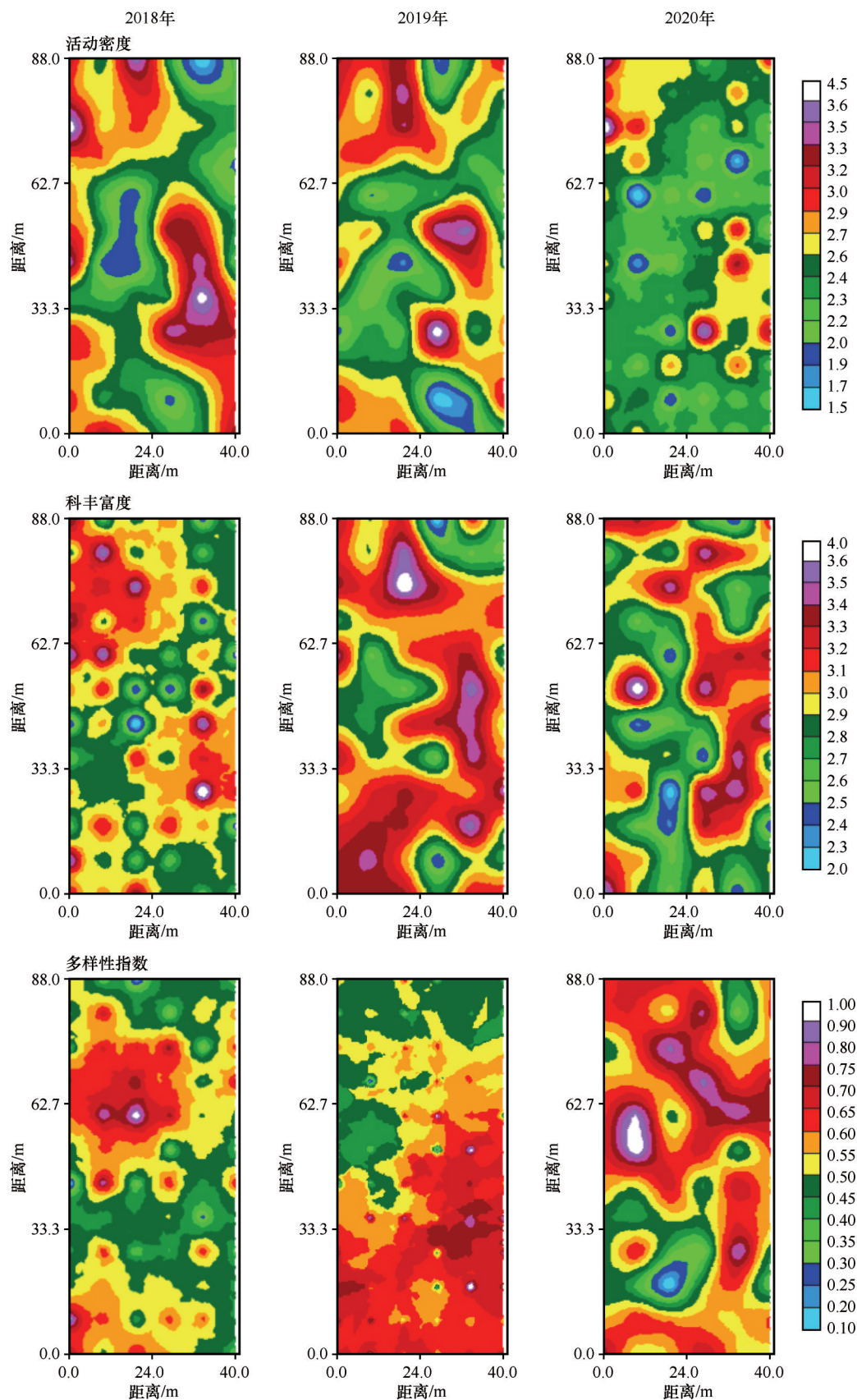
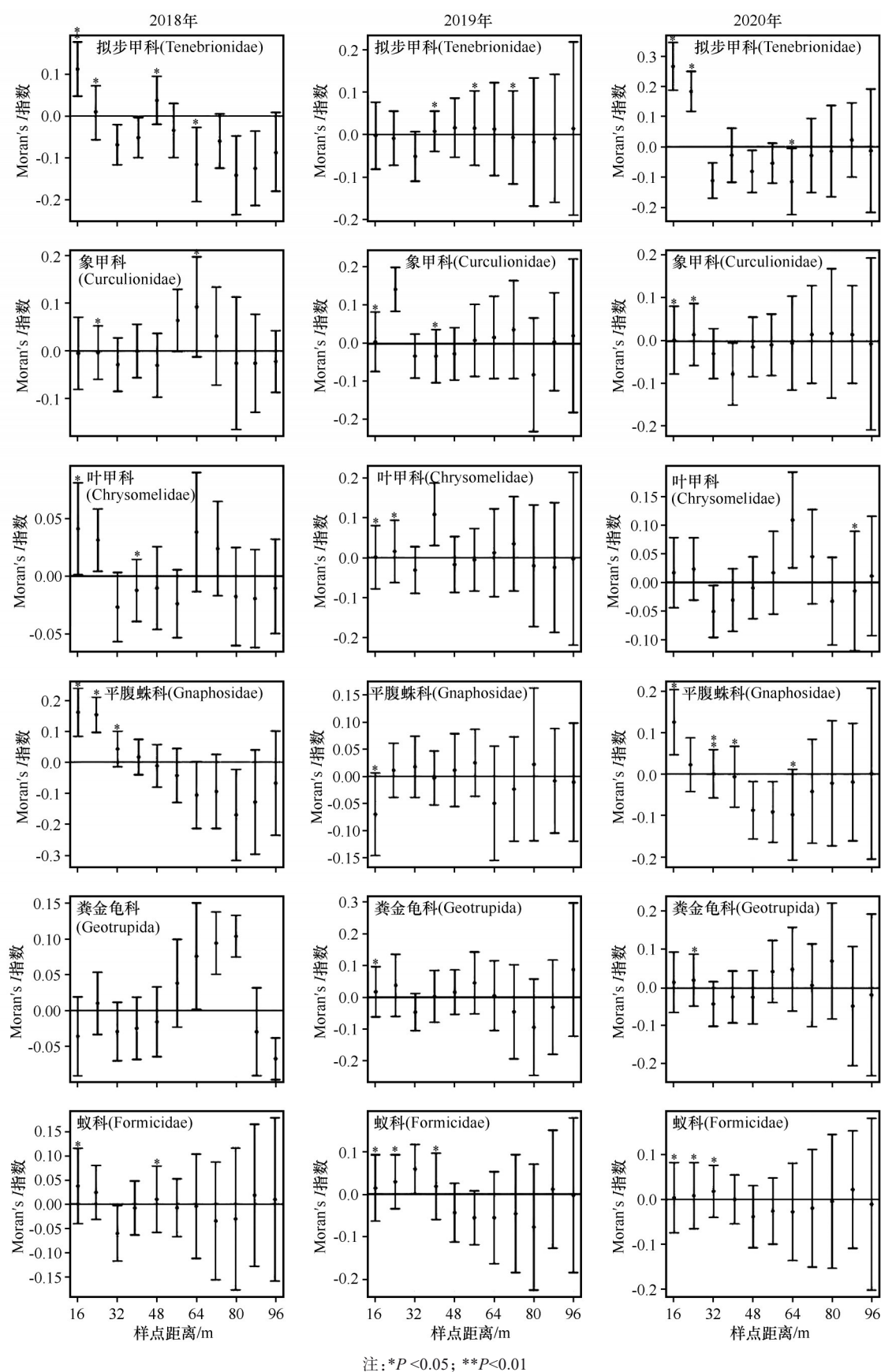


图4 2018—2020年戈壁荒漠地表节肢动物活动密度、科丰富度和多样性指数普通克里格插值图

Fig.4 Ordinary kriging map on activity density, family richness, and diversity index of ground arthropods from 2018 to 2020 in the gobi desert

图5 戈壁荒漠优势地表节肢动物科数量的Moran's I 系数Fig.5 Moran's I coefficient of dominant ground arthropods in the gobi desert

化差异较大,2018年和2020年结构比为25%~75%,2019年结构比大于75%,说明2019年叶甲科群落空间变异受确定性过程控制(表2)。其余优势科空间变异具有相似性,结构比均大于75%,空间变异主

要由确定性过程影响,空间尺度上具有很强的空间自相关性。戈壁荒漠地表节肢动物优势科的块金值均大于0,即存在采样误差微尺度空间差异等因素引起的块金方差。

表 2 2018—2020 年戈壁荒漠主要地表节肢动物科半方差函数理论模型和空间异质性参数
Table 2 Semi-variance function model and spatial heterogeneity parameters of dominant ground arthropods from 2018 to 2020 in the gobi desert

科	年份	模型	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	变程/m	结构比[$C/(C_0+C)$]
拟步甲科 (Tenebrionidae)	2018	球面模型	0.41	0.96	38.68	0.58
	2019	球面模型	0.04	1.01	9.54	0.96
	2020	球面模型	0.05	0.35	33.22	0.85
象甲科 (Curculionidae)	2018	指数模型	0.00	0.03	4.34	1.00
	2019	高斯模型	0.08	1.32	1.50	1.00
	2020	球面模型	0.00	0.45	12.25	0.99
叶甲科 (Chrysomelidae)	2018	球面模型	0.00	0.02	9.10	0.74
	2019	球面模型	0.00	0.04	9.54	0.94
	2020	高斯模型	0.07	0.15	34.50	0.53
平腹蛛科 (Gnaphosidae)	2018	指数模型	0.03	0.49	7.37	0.94
	2019	球面模型	0.04	1.01	9.54	0.96
	2020	指数模型	0.03	0.46	3.67	0.95
粪金龟科 (Geotrupidae)	2018	指数模型	0.01	0.03	10.10	0.75
	2019	指数模型	0.00	0.06	5.04	0.93
	2020	指数模型	0.01	0.06	4.85	0.88
蚊科 (Formicidae)	2018	球面模型	0.01	0.26	17.23	0.95
	2019	球面模型	0.00	0.38	9.54	0.97
	2020	球面模型	0.09	2.64	12.67	0.97

空间插值结果表明不同年份地表节肢动物优势科群落之间的空间分布格局具有一定差异,不同优势科之间梯度特征明显,形成高值斑块和低值斑块镶嵌分布的空间格局分布。拟步甲科的空间分布格局表现为2018年拟步甲科的空间分布格局较单一,而2019年拟步甲科的空间分布格局表现为高值区在中心区域斑块,聚集区域斑块呈点状分布,2020年拟步甲科的空间分布主要趋于样地灌木盖度较高区域。蚊科的空间分布格局在2018—2020年内变化差异较小,相较于2018年和2020年,2019年蚊科空间格局分布主要表现为样点中心区域斑块为低值区间,样点四周为高值区间。拟步甲科和蚊科这两个戈壁荒漠代表性科数量的空间变化规律相似,在2019年空间格局呈片状且斑块向样地四周扩散(图6)。平腹蛛科和叶甲科的空间分布格局

具有相似性,2019年空间格局呈点状且斑块向样地中心聚集。其余优势科群落不同年份之间的空间分布并不完全一致,优势科群落在2019年表现为具有复杂的空间分布格局,形成较多高值斑块和低值斑块交错镶嵌分布。

2.4 地表节肢动物群落及主要类群活动密度与降水及温度变化的关系

2018—2020年年降水量出现明显变化,年平均温度也略有差异,这也导致2018、2019、2020年地表节肢动物活动密度、科丰富度和多样性指数及一些主要类群活动密度存在显著差异,降水多的年份地表节肢动物活动密度和科丰富度高于降水较少的年份。地表节肢动物活动密度、科丰富度与月降水量和月平均温度的相关性具有相似

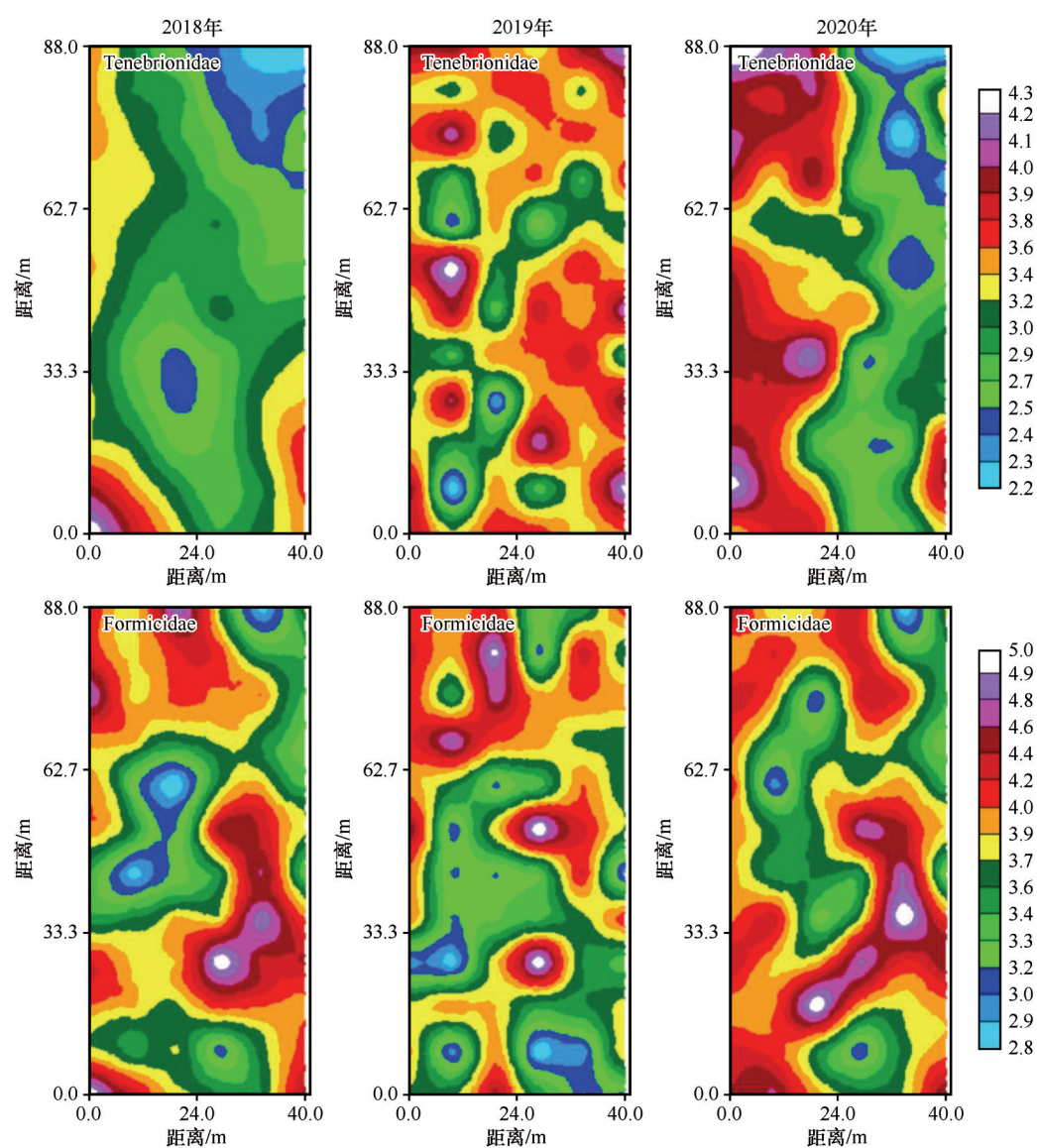


图6 2018—2020年戈壁荒漠地表节肢动物拟步甲科(Tenebrionidae)和蚁科(Formicidae)普通克里格插值图

Fig.6 Ordinary kriging map on Tenebrionidae and Formicidae of ground arthropods from 2018 to 2020 in the gobi desert

性,部分表现为显著正相关,而地表节肢动物多样性指数与降水量和温度的相关性相对较小(表3)。温度和降水对主要地表节肢动物活动密度有正的影响,不同地表节肢动物科的活动密度与月降水量和月平均温度的相关性存在一定差异。拟步甲科、象甲科和粪金龟科活动密度与月降水量呈显著正相关,平腹蛛科、拟步甲科、象甲科和粪金龟科活动密度与月平均温度呈显著正相关,叶甲科和蚁科与月降水量和月平均温度的相关性均较小。平腹蛛科、拟步甲科、象甲科、叶甲科、蚁科与活动密度对降水量和温度的相关性程度相近,而叶甲科与地表节肢动物多样性指数对降水量和温度的相关性具有相似性。

3 讨论

地表节肢动物是戈壁荒漠生态系统食物网的重要组成部分,它们在不同时间和空间尺度上聚集与扩散分布对戈壁生态系统的结构和功能具有显著影响。戈壁荒漠灌木和蚁穴塑造的微生境强烈影响地表节肢动物的时空分布格局,而降水波动引起土壤水分及温度的季节变异性会影响不同地表节肢动物类群对灌木和蚁穴微生境的响应模式,从而影响地表节肢动物的聚集及动态^[7,27]。本研究发现不同时间尺度下戈壁荒漠地表节肢动物群落结构随着空间距离变化表现为较强的时空变异性,表明时空分布格局中不同尺度研究是揭示戈壁荒漠结构性特征的重要方法和手段^[28]。戈壁荒漠不

表3 地表节肢动物群落主要科活动密度与降水量及温度的Spearman相关系数

Table 3 Spearman correlation coefficient between the activity density of main families of ground arthropods community and precipitation and temperature

科与指标	降水量/mm		温度/°C	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
活动密度	0.49	0.108	0.68	0.015
科丰富度	0.66	0.018	0.78	0.003
多样性指数	0.32	0.305	0.51	0.091
平腹蛛科(Gnaphosidae)	0.50	0.097	0.69	0.013
拟步甲科(Tenebrionidae)	0.76	0.004	0.94	<0.001
象甲科(Curculionidae)	0.63	0.029	0.86	<0.001
叶甲科(Chrysomelidae)	0.23	0.464	0.56	0.059
粪金龟科(Geotrupidae)	0.65	0.023	0.67	0.017
蚁科(Formicidae)	0.50	0.097	0.49	0.106

同年份空间异质性差异显著,半方差函数分析结果表明,降水波动对不同地表节肢动物类群的空间结构性具有影响,它们的空间结构对降水波动的响应模式不同。降水增加情况下地表节肢动物的空间自相关性增强,空间聚集斑块显著并呈片状分布,初步研究推断聚集斑块主要与降水及温度引发的食物资源和环境因素变化有关^[8-10]。近年来,对森林、农田和草地生态系统土壤动物的空间分布格局及自相关性研究已经开展,孙佳欢等^[26]在小麦-玉米轮作农田研究中发现土壤螨在不同空间尺度上的聚集性表现为随着距离的增加而空间自相关性降低。王敏^[29]在贺兰山荒漠草地研究中发现地表甲虫群落除优势类群具有较强的空间自相关性外,其余群落只表现为小尺度空间自相关性,这与本文空间自相关的研究结果相近。戈壁荒漠降水及温度变化会对地表节肢动物时空聚集产生影响,本研究表明戈壁荒漠地表节肢动物在5~50 m的空间内存在空间相关性,这与其他生境相比其空间相关性距离较低,这可能是由于其独特的地理环境所致,戈壁气候干旱少雨,灌木覆盖率低。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^[30-34]。红砂和泡泡刺两种典型戈壁灌木所形成的微生境强烈影响着地表节肢动物的分布,通过植被灌木资源的上行效

应改变了地表节肢动物的多样性及分布,因而环境筛选和种间作用可能成为荒漠地表节肢动物分布的影响因素。大尺度上的水热条件被认为是地带性植被与生物多样性地理分布格局形成的决定性因素^[35],因此不同地表节肢动物会随着降水及温度变化形成不同的响应模式。

对优势科而言,拟步甲科2019年结构比显著大于2018年和2020年,空间格局表现为斑块在样地中心聚集分布且呈空间正相关关系,这可能由于降水增加驱动了食物资源的累积从而促进了拟步甲科的生长和繁殖,水分对于拟步甲科种群的产卵和孵化以及幼虫的发育十分重要,降水增加了微生物的活性,提高了拟步甲的消化率,从而提升其产卵量^[36]。不同年份拟步甲科的空间格局分布变化差异显著,2018年相较于另外两年,在空间尺度上样地中心聚集程度低,只有小尺度范围内呈聚集分布,半方差函数结果显示2018年拟步甲科由确定性因素和随机性因素共同控制,这可能与灌木、温度和土壤水分等因素有关。2018年降水稀少及2017年白刺夜蛾和白刺萤叶甲爆发导致灌木生长受到限制(野外观察发现部分泡泡刺枯死),从而减少了提供给拟步甲科的食物资源、栖息和繁殖空间。另外,持续的高温使得土壤水分偏低,而幼虫发育过程中对水分的需求较高,导致土壤水分不能满足其发育需求,说明戈壁生态系统下高温降低了甲虫的活动频率与繁殖,与Thomas^[37]在美国莫哈维荒漠的研究结果一致。平腹蛛科主要受确定性因素控制且不同年份间的变化差异不大,空间尺度在2019年降水波动影响下斑块趋于聚集分布,这说明蛛形纲与降水波动有着显著的关系,降水驱动食物的数量减少及质量的降低会导致蛛形纲的个体数小幅度减少,这与Kwok等^[38]在澳大利亚辛普森荒漠(The Simpson Desert)的研究结果相近。叶甲科在2019年主要由确定性因素控制,降水波动导致其个体数大幅度增加,在空间尺度上斑块呈显著聚集分布,这可能与食物资源变化有关,该地区的叶甲科以白刺萤叶甲为主,主要取食泡泡刺叶片,它们的个体数量与泡泡刺的生长变化关系密切。2019年降水增加导致泡泡刺大量生长而引起白刺夜蛾和白刺萤叶甲等植食性昆虫数量增加,这些植食性昆虫对降雨及温度的季节变异响应十分敏感,它的爆发会导致泡泡刺种群的衰退^[39-40]。在常见地表节肢动

物群落中,长蝽科在2020年个体数显著增加且主要受确定性过程控制,温度和降雨可能对成虫的个体数影响较大^[41]。巨膜长蝽是荒漠中主要的长蝽虫,巨膜长蝽在宁夏一年可发生2代,它在28~35℃下存活率、增长指数和繁殖力较高。戈壁荒漠植食性地表节肢动物对降水波动的响应较为敏感,并且空间分布规律具有相似性,不同生理生态特征差异决定了它们对微生境、降水及温度的响应模式。

2018—2020年戈壁地表节肢动物中大部分类群具有显著的空间自相关性,说明不同类群之间具有空间异质性特征,基于生态位理论的环境筛选和种间竞争(确定性过程)及基于中性理论的扩散限制(非确定性过程)被认为是调控这种空间异质性的重要机制^[42]。普通克里格插值图结果显示,在不同的年份,部分高值和低值聚集区虽有变异性,但是在不同年份空间格局具有相对稳定性,这与戈壁荒漠内的灌木空间分布格局有关。耐旱灌木存在提供了相对低温且食物资源相对丰富的微生境,从而给地表节肢动物提供了适宜的栖息和繁殖的场所^[43]。环境胁迫及捕食强度增加会促使地表节肢动物对灌木的依赖性增加(抵御环境和捕食),同时降水驱动的食物资源增加会增加它们对灌木的依赖性^[44-45]。对于戈壁地表节肢动物月动态的研究表明,优势科普遍受温度和降水等因素影响,拟步甲科仅出现在3—9月,在这些月份主要由确定因素控制,空间相关性强且时间聚集程度显著,表明降水和温度作为驱动因素促进了该类群的繁殖和发育。粪金龟科(波笨粪金龟)活跃期在4—5月,2019年降水波动导致活跃期4—9月相对数量增多,空间聚集程度增强,这可能与它的繁殖有关,春季成虫孵化在地表活动频率很高,秋季降水还会有繁殖的成虫出现。本文研究结果与高梅香等^[46]对三江平原土壤螨类研究结果不同的是戈壁内物种的结构比普遍大于75%,说明群落普遍受确定性因素控制,可能是由于独特的干旱生境所致。不同地表节肢动物活动密度与温度和降水存在显著正相关关系,可能是由于种间营养和非营养作用导致群落在不同降水和温度背景下,种间作用关系增强。总之,降水波动影响下不同地表节肢动物类群呈现复杂的空间分布格局,不同空间格局的研究可以揭示戈壁群落生物多样性的分布特征,进而影响戈壁荒漠生态系统的组成。

4 结论

戈壁地表节肢动物主要由拟步甲科、象甲科、叶甲科、粪金龟科、平腹蛛科和蚁科组成,它们在不同空间尺度上的聚集决定了地表节肢动物群落结构的变化特征。在局地尺度上,受降水和温度变化影响,地表节肢动物群落呈聚集分布并存在年际变化,不同年份之间聚集程度存在明显差异。2018—2020年调查年份内地表节肢动物在不同空间尺度上表现出显著的正相关或负相关关系,在时间尺度上空间自相关的尺度依赖性较为显著,即地表节肢动物在不同年份随样地距离的增加,空间自相关性具有明显的波动性。地表节肢动物优势科随着年降水量的增加,空间分布较密集,斑块结构显著,物种之间互作程度增强;拟步甲科、叶甲科和粪金龟科在2019年降水增多情况下斑块聚集明显,呈空间自相关性正相关关系,而平腹蛛科和蚁科在降水增多的情况下聚集性减弱。降水和温度强烈影响地表节肢动物的活动密度、科丰富度和多样性指数,Spearman相关系数表明月降水量和月平均温度与优势科活动密度和科丰富度之间存在显著正相关。总之,戈壁荒漠地表节肢动物群落有着复杂的空间自相关性,地表节肢动物聚集的时间变化与降水和温度变化有关,降水及温度对地表节肢动物分布格局的短期和长期影响还需要深入研究。

参考文献:

- [1] Gaston K J. Global patterns in biodiversity [J]. *Nature*, 2000, 405: 220-227.
- [2] Green J, Bohannan B J M. Spatial scaling of microbial biodiversity [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2006, 21: 501-507.
- [3] Aguiar M R, Sala O E. Patch structure dynamics and implications for the functioning of arid ecosystems [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1999, 14: 273-277.
- [4] Alper J. Ecosystem 'engineers' shape habitats for other species [J]. *Science*, 1998, 280(5367): 1195-1196.
- [5] Zhao H L, Zhou R L, Su Y Z, et al. Shrub facilitation of desert land restoration in the Horqin Sand Land of Inner Mongolia [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 31: 1-8.
- [6] 刘任涛. 沙地灌丛的“肥岛”和“虫岛”形成过程、特征及其与生态系统演替的关系 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33: 3463-3469.
- [7] 冯怡琳, 王永珍, 林永一, 等. 戈壁生态系统蚁穴微生境对大型土壤动物多样性的影响 [J]. *生物多样性*, 2022, 30: 88-98.
- [8] Shelef O, Groner E. Linking landscape and species: effect of shrubs on patch preference of beetles in arid and semi-arid ecosystems [J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75 (10):

- 960–967.
- [9] Liu J L, Zhao W Z, Li F R. Effects of shrub presence and shrub species on ground beetle assemblages (Carabidae, Curculionidae and Tenebrionidae) in a sandy desert, northwestern China [J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7: 110–121.
- [10] Liu J L, Li F R, Liu C A, et al. Influences of shrub vegetation on distribution and diversity of a ground beetle community in a Gobi desert ecosystem [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2012, 21(10): 2601–2619.
- [11] Bartholomew A, El Moghrabi J. Seasonal preference of darkling beetles (Tenebrionidae) for shrub vegetation due to high temperatures, not predation or food availability [J]. *Journal of Arid Environments*, 2018, 156: 34–40.
- [12] 冯益明, 吴波, 姚爱冬, 等. 戈壁分类体系与编目研究 [J]. *地理学报*, 2014, 69(3): 391–398.
- [13] 林永一, 王永珍, 冯怡琳, 等. 河西走廊中部戈壁地表甲虫群落动态变化及其影响因素 [J]. *生物多样性*, 2022, 30(12): 76–87.
- [14] 刘继亮, 赵文智, 李锋瑞, 等. 人工固沙植被恢复对地表节肢动物群落组成及多样性的影响 [J]. *生态学报*, 2018, 38(4): 1357–1365.
- [15] 王涛. 荒漠化治理中生态系统、社会经济系统协调发展问题探析: 以中国北方半干旱荒漠区沙漠化防治为例 [J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7045–7048.
- [16] 朱纪元, 李景科, 高梅香, 等. 帽儿山红松人工林鞘翅目成虫群落小尺度空间异质性变化特征 [J]. *生态学报*, 2017, 37(6): 1975–1986.
- [17] 胡媛媛, 朱纪元, 闫龙, 等. 温带落叶阔叶林小尺度空间地表鞘翅目成虫群落多样性 [J]. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2016, 32(6): 67–73.
- [18] 高梅香, 张超, 乔志宏, 等. 小兴安岭阔叶红松林地表甲虫 Metacommunity 格局 [J]. *生态学报*, 2018, 38(16): 5636–5648.
- [19] 高梅香, 林琳, 常亮, 等. 土壤动物群落空间格局和构建机制研究进展 [J]. *生物多样性*, 2018, 26(10): 1034–1050.
- [20] 刘继亮, 李锋瑞, 刘七军, 等. 黑河中游干旱荒漠地面节肢动物群落季节变异规律 [J]. *草业学报*, 2010, 19: 161–169.
- [21] 郑乐怡, 归鸿. 昆虫分类 [M]. 南京: 南京师范大学出版社, 1999.
- [22] 任国栋, 于有志. 中国荒漠半荒漠的拟步甲科昆虫 [M]. 保定: 河北大学出版社, 1999.
- [23] 任国栋, 巴义彬. 中国土壤拟步甲志 (第二卷) 鳖甲类 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [24] 任国栋. 中国动物志: 昆虫纲 第六十三卷 鞘翅目 拟步甲科 (一) [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [25] 胡媛媛, 朱纪元, 闫龙, 等. 温带落叶阔叶林地表鞘翅目成虫小尺度空间格局动态分析 [J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1841–1851.
- [26] 孙佳欢, 刘冬, 朱家祺, 等. 小麦–玉米轮作农田土壤螨多样性空间分布格局 [J]. *生物多样性*, 2022, 30(12): 110–126.
- [27] Li F R, Liu J L, Liu C A, et al. Shrubs and species identity effects on the distribution and diversity of ground-dwelling arthropods in a gobi desert [J]. *Journal of Insect Conservation*, 2013, 17: 319–331.
- [28] Petr Zajicek, Ellen A R, Welti N J, et al. Long-term data reveal unimodal responses of ground beetle abundance to precipitation and land use but no changes in taxonomic and functional diversity [J]. *Scientific Report*, 2021, 11: 17468.
- [29] 王敏. 贺兰山荒漠草地地表甲虫集合群落空间格局及其与环境因子关系 [D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [30] Langlands P R, Brennan K E C, Pearson D J. Spiders, spinifex, rainfall and fire: long-term changes in an arid spider assemblage [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 67: 36–59.
- [31] Barrows C. Temporal patterns of abundance of arthropods on sand dunes [J]. *The Southwestern Naturalist*, 2012, 57: 262–266.
- [32] Nielsen U N, Ball B A. Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21: 1407–1421.
- [33] Kwok W G M, Greenville A C. Long-term patterns of invertebrate abundance and relationships to environmental factors in arid Australia [J]. *Austral Ecology*, 2016, 41: 480–491.
- [34] Gibb H, Grossman B F, Dickman C R, et al. Long-term responses of desert ant assemblages to climate [J]. *Journal of Animal Ecology*, 2019, 88: 1549–1563.
- [35] 杨贵军, 贺海明, 王新谱. 盐池荒漠草地拟步甲昆虫群落时间结构和动态 [J]. *应用昆虫学报*, 2012, 49: 1610–1617.
- [36] Robert H, Morgan H, Katja G, et al. Shrub encroachment is not always land degradation: Insights from ground-dwelling beetle species niches along a shrub cover gradient in a semi-arid Namibian savanna [J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30(1): 14–24.
- [37] Thomas Jr D B. Patterns in the abundance of some tenebrionid beetles in the Mojave Desert [J]. *Environmental Entomology*, 1979, 8: 568–574.
- [38] Kwok A B C, Wardle G M, Greenville A C. Long-term patterns of invertebrate abundance and relationships to environmental factors in arid Australia [J]. *Austral Ecology*, 2016, 41: 480–491.
- [39] 胡发成, 白晶晶. 河西走廊荒漠草原白刺夜蛾生活习性及防治研究 [J]. *畜牧兽医杂志*, 2011, 30(6): 40–42.
- [40] 刘宁云, 勾文山, 马维新, 等. 温度对白茨粗角萤叶甲生长发育及繁殖的影响 [J]. *植物保护*, 2023, 49(2): 220–226.
- [41] 何嘉, 高立原, 张蓉, 等. 温度对巨膜长蝽生长发育与繁殖的影响 [J]. *昆虫学报*, 2014, 57(8): 935–942.
- [42] Ingimarsdóttir M, Caruso T, Ripa J. Primary assembly of soil communities: disentangling the effect of dispersal and local environment [J]. *Oecologia*, 2012, 170: 745–754.
- [43] Cloudsley-Thompson J L. Thermal and water relations of desert beetles [J]. *Die Naturwissenschaften*, 2001, 88(11): 447–460.
- [44] 冯志荣, 陈有城, 彭艳琼, 等. 生态网络分析: 从集合群落到集合网络 [J]. *生物多样性*, 2023, 31(8): 135–146.

- [45] 李海东, 吴新卫, 肖治术. 种间互作网络的结构、生态系统功能及稳定性机制研究[J]. 植物生态学报, 2021, 45(10): 1049–1063.
- [46] 高梅香, 刘冬, 张雪萍, 等. 三江平原农田地表和地下土壤螨类丰富度与环境因子的空间关联性[J]. 生态学报, 2016, 36: 1782–1792.

Response of ground arthropod assemblages to precipitation and temperature changes in the gobi desert

Ren Jialong¹, Liu Jiliang², Wang Yongzhen², Fang Jing², Feng Yilin³,
Gao Anling⁴, Song Yuanxia⁴, Xin Weidong¹

(1. College of Geographic Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China; 2. Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. Inner Mongolia Ejina Populus Euphratica National Nature Reserve Management Bureau, Ejina 735400, Inner Mongolia, China)

Abstract: Ground arthropods are the main group in the food web of gobi desert ecosystem, the changes of resources caused by precipitation fluctuation will affect the aggregation of ground arthropods, thus affecting the structure and function of desert ecosystem. In this article, we conducted a series of microclimate observations using the trap method at a long-term observation site of the desert ecosystem in the Linze Inland River Basin from January to December 2018 to December 2020, as well as the spatial distribution patterns of ground arthropods in the gobi desert under the influence of annual and month of precipitation and temperature changes. The results indicate that: (1) From 2018 to 2020, a total of 24 834 individuals and 45 families of ground arthropods were caught. The dominant families consisted of Tenebrionidae, Curculionidae, Chrysomelidae, Gnaphosidae, Geotrupidae and Formicidae. (2) The results of Moran's *I* index analysis showed that the number of ground arthropods was positively correlated at the spatial scale of 16 m and negatively correlated at the spatial scale of 56 m to 96 m, the semi-variance function and ordinary Kriger interpolation indicated that the ground arthropod families formed clusters and showed strong spatial heterogeneity at different time scales. (3) The spatial differentiation of Curculionidae, Geotrupidae, Gnaphosidae and Formicidae was mainly controlled by structural factors, while that of Tenebrionidae and Chrysomelidae was controlled by both structural and random factor. (4) The increase of precipitation had a positive correlation to the spatial community aggregation of the Tenebrionidae, Curculionidae, Chrysomelidae, and Geotrupidae, and a negative correlation to the community aggregation of the Gnaphosidae and Formicidae, there was a positive correlation between temperature and spatial aggregation and expansion of ground arthropods. In a word, the change of precipitation changed the response pattern and dependence degree of ground arthropods to the micro-habitat constructed by shrubs and ant nests, and then affected the spatial aggregation of ground arthropods in different years.

Key words: gobi desert; precipitation changes; ground arthropod assemblages; community dynamics; spatial pattern