

严祺涵,刘继亮,王永珍,等.降水减少对戈壁荒漠地表节肢动物多样性的影响[J].中国沙漠,2026,46(4):365-376.

降水减少对戈壁荒漠地表节肢动物多样性的影响

严祺涵^{1,2}, 刘继亮², 王永珍², 冯怡琳², 秦畅^{1,2},
任嘉隆^{1,2}, 辛未冬¹, 罗亚勇²

(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/国家林业和草原局山水林田湖草沙系统治理重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 戈壁荒漠降水变化强烈影响动植物的生长和繁殖,进而驱动荒漠生物多样性及其生态功能变化。本文基于该区多年降水变化数据,建立了以单株灌木为中心的模拟降水减少50%的定位观测实验平台,研究地表节肢动物多样性对降雨减少处理的响应模式及季节变异规律。结果表明:降雨减少对红砂(*Reaumuria songarica*)小区夏季和秋季地表节肢动物群落组成的影响均较小;降雨减少对泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)小区夏季地表节肢动物群落组成有显著影响,但对秋季地表节肢动物群落组成的影响较小。地表节肢动物数量对降雨减少的响应较物种丰富度敏感,红砂小区夏季和秋季地表节肢动物数量在降水减少处理和对照小区相差较小,泡泡刺小区夏季降水减少处理显著降低了地表节肢动物捕获数量,但在秋季的影响较小。泡泡刺小区降水减少处理显著降低了夏季杂食性节肢动物的捕获数量,但提高了捕食性和植食性节肢动物捕获数量;降水减少处理还显著降低了夏季大型甲虫的捕获数量,但显著提高了小型甲虫的捕获数量。此外,降雨减少处理显著提高了夏季红砂小区大甜菜象和克氏扁漠甲与秋季戈壁琵甲的捕获数量,显著降低了秋季波笨粪金龟的捕获数量。总之,降雨减少会降低戈壁荒漠以大型甲虫为主的杂食性节肢动物的数量并随着季节和灌木种类变化而变化,这会影响食物网结构及其功能。

关键词: 戈壁荒漠; 模拟降雨减少; 地表节肢动物; 多样性; 功能性状

文章编号: 1000-694X(2026)04-365-12

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00274

中图分类号: Q96

文献标志码: A

0 引言

气候变化和人类活动扰动强烈影响戈壁荒漠动植物的分布及多样性,威胁区域生态系统的健康与稳定^[1-3]。降水变化强烈影响荒漠动物生存、种群动态及多样性的维持,荒漠生态系统降水呈明显的脉动变化,降水强度、降水量及降水出现时间等均存在明显的年季变异,这会影响荒漠动物生存和繁殖,进而影响荒漠食物网结构及其功能^[4-10]。节肢动物是荒漠食物网中的关键类群,不仅是中间捕食者和主要分解者,还是脊椎动物的重要食物资源^[11-12]。目前对节肢动物响应降水变化的认知仍较有限。短期降水波动影响中小型节肢动物的数量

与多样性,而年际及季节降水变异则驱动大型节肢动物的种群动态^[9-10,13]。降水变化还会驱动资源上行效应和捕食者下行效应的转变,从而影响荒漠食物网的结构及其功能^[14-15]。此外,降水改变还会影响捕食性节肢动物、植食性节肢动物和植物之间的互作关系,进而影响植物群落的健康与稳定^[14,16-17]。因而,开展荒漠生态系统降水变化对节肢动物多样性的影响研究,可以加深对气候变化背景下荒漠动物多样性维持机制的理解和认识。

在戈壁荒漠生态系统中,水分是动物生存的关键限制因子。降水变化影响节肢动物的分布与多样性且不同的类群对此响应模式各异,并存在年际动态变化^[4]。降水偏多年份可提升蜘蛛、甲虫、蚂蚁

收稿日期:2025-07-20; 改回日期:2025-10-30

资助项目:国家自然科学基金项目(42275132,41771290)

作者简介:严祺涵(1998—),女,山西吕梁人,硕士研究生,主要研究方向为干旱区土壤动物生态地理学。E-mail: yqh05240715@163.com

通信作者:辛未冬(E-mail: xinwd@sxnu.edu.cn); 罗亚勇(E-mail: luoyy@lzb.ac.cn)

等大型节肢动物的多样性,但其数量多度对降水增加的响应存在滞后性,降水变化同时重塑了荒漠螨类、跳虫与蜘蛛之间的相互作用关系^[13,18-21]。而降水减少不仅会重构荒漠节肢动物群落,即喜湿类群衰退而耐旱类群优势度上升,更可能威胁一些节肢动物生存和繁殖,进而影响食物链长度和食物网结构^[22-24]。灌木与蚁穴作为荒漠生态系统的关键“生态系统工程师”,其形成的微生境能够有效缓冲干旱胁迫保育节肢动物,从而维持了其群落的多样性及生态功能^[25-27]。鉴于此,本文选择典型戈壁荒漠灌木红砂(*Reaumuria songarica*)和泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*),建立降雨减少50%的处理小区,研究降雨减少和灌木互作对戈壁荒漠地表节肢动物多样性的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

戈壁荒漠降雨减少长期定位监测实验场位于中国科学院临泽内陆河流域荒漠生态系统长期观测场内。该观测场2005年建立,面积约为250 m×250 m,观测中心建立100 m×100 m永久监测样地,外围为植被和土壤的破坏性采样地。观测场地是洪积-冲积形成的砾质戈壁,海拔1 350 m,土壤为

灰棕漠土,植被以旱生、超旱生灌木为主且呈明显斑块状分布。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并存在明显年季变化,夏秋季降雨增多,多年平均降雨量117.0 mm,年平均气温7.6℃,多年平均蒸发量2 390 mm。降水和温度存在明显的年季变异,2017年年降水量和年平均温度均高于2018年(图1)。2017年4、7、9月月降水量均较高,4—9月降水量占全年降水量的96.3%;2018年8、9月降水量较高,4—9月降水量占全年降水量的95.3%(图1)。

研究区地下水埋深为10~12 m,灌木以红砂和泡泡刺为主,伴生少量黄毛头(*Kalidium cuspidatum*)、沙拐枣(*Calligonum* sp.)和细枝岩黄耆(*Hedysarum scoparium*)。红砂在戈壁荒漠密度高且分布范围广,泡泡刺主要分布在冲沟两侧。草本生长受降雨变化的影响较大,多年生草本植物以沙葱(*Allium mongolicum*)、骆驼瓣(*Zygophyllum fabago*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)和戈壁针茅(*Stipa tianschanica* Roshev var. *gobica*)等为主,一年生草本主要有刺沙蓬(*Salsola ruthenica*)、盐生草(*Halogeton glomeratus*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、砂蓝刺头(*Leontopodium leontopodioides*)、小花棘豆(*Oxytropis glabra*)、虎尾草(*Chloris virgata*)、小画眉草(*Eragrostis minor*)和鹤虱(*Lappula* sp.)等。

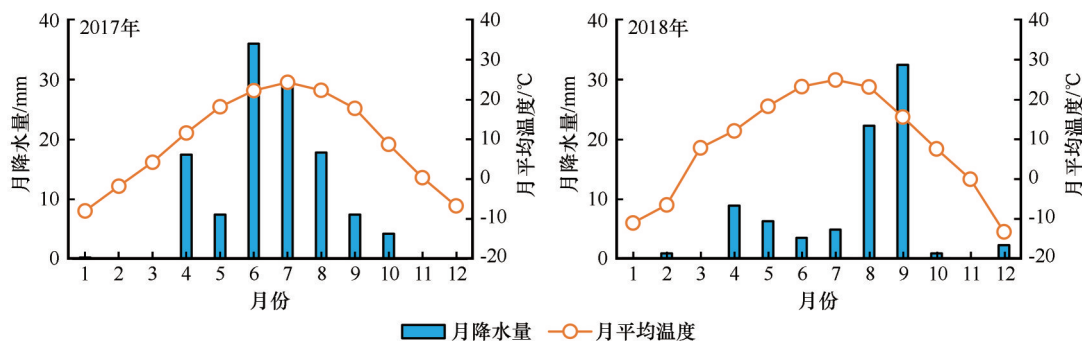


图1 研究区月降水量和月平均温度变化

Fig.1 Monthly precipitation and average temperature at the study area

爬行类、兽类和鸟类是研究区主要的脊椎动物,其中啮齿类和爬行类动物栖居在灌丛下或边缘,许多种以蛛形纲和昆虫纲等表栖类节肢动物为食^[28-29]。爬行动物主要有花条蛇(*Psammophis lineolatus*)、荒漠沙蜥(*Phrynocephalus przewalskii*)和虫纹麻蜥(*Eremias vermiculata*),啮齿类动物有五趾跳鼠(*Allactaga sibirica*)、大沙鼠(*Rhombomys opimus*)和小毛足鼠(*Phodopus roborovskii*),食虫目动物有

大耳猬(*Hemiechinus auritus*)和鼯鼠(*Sorex* sp.)等。啮齿类和食虫类动物是戈壁荒漠主要的挖掘动物,它们栖居在泡泡刺下,野外可以在灌丛沙堆发现这些动物的巢穴。鹅喉羚(*Gazella subgutturosa*)、沙狐(*Vulpes corsac*)和兔狲(*Otocolobus manul*)是主要的植食性和捕食性兽类,红隼(*Falco tinnunculus*)、喜鹊(*Pica pica*)、黑尾地鸦(*Podoces hendersoni*)、沙鸻(*Oenanthe isabellina*)、漠鸻(*O. deserti*)和短趾百

灵(*Calandrella cheleensis*)等鸟类活动频率较高。

1.2 降雨减少实验设计及地表节肢动物样品收集

红砂和泡泡刺是戈壁荒漠主要的灌木种,以灌木为中心建立面积为 3 m×3 m 的降水减少处理小区。在荒漠生态系统长期观测场内选择 16 株成年红砂和 16 株泡泡刺灌丛,8 株红砂或是泡泡刺灌丛搭建遮雨棚遮挡 50% 面积实现降雨减少 50% 处理,8 株红砂或泡泡刺灌丛为对照小区(图 2)。遮雨棚由不锈钢框架支撑,前面高度 120 cm,后面高度 150 cm,顶部使用 15 条宽度为 10 cm 的“V”型有机玻璃板遮挡小区上部 50% 的面积(图 2)。截留的降雨收集在塑料桶中,降雨后使用喷壶将收集的降雨添加到增雨小区。2018 年 4 月建立降雨减少 50%

和对照处理小区并埋设陷阱收集器,每个处理小区在灌丛下和灌丛边缘布设 1 个陷阱收集器。2018 年 5—9 月按月收集不同处理小区地表节肢动物样品,每次样品采集的时间为 7 d,陷阱保存液为 75% 的酒精溶液。每 2 d 检查一次陷阱收集器并补充保存液,采集的节肢动物样品保存在 75% 的酒精溶液中带回室内鉴定。地表节肢动物样品鉴定主要依据《昆虫分类》《中国荒漠、半荒漠拟步甲科昆虫》《Spider of China》等,主要地表节肢动物类群依据形态特征鉴定至属或种,部分类群数量少和个体小的类群鉴定至科。地表节肢动物依据取食类型划分成捕食性、植食性和杂食性节肢动物 3 个营养类群;甲虫是戈壁荒漠中主要的节肢动物类群,按照体长划分成大型、中型和小型甲虫^[25]。

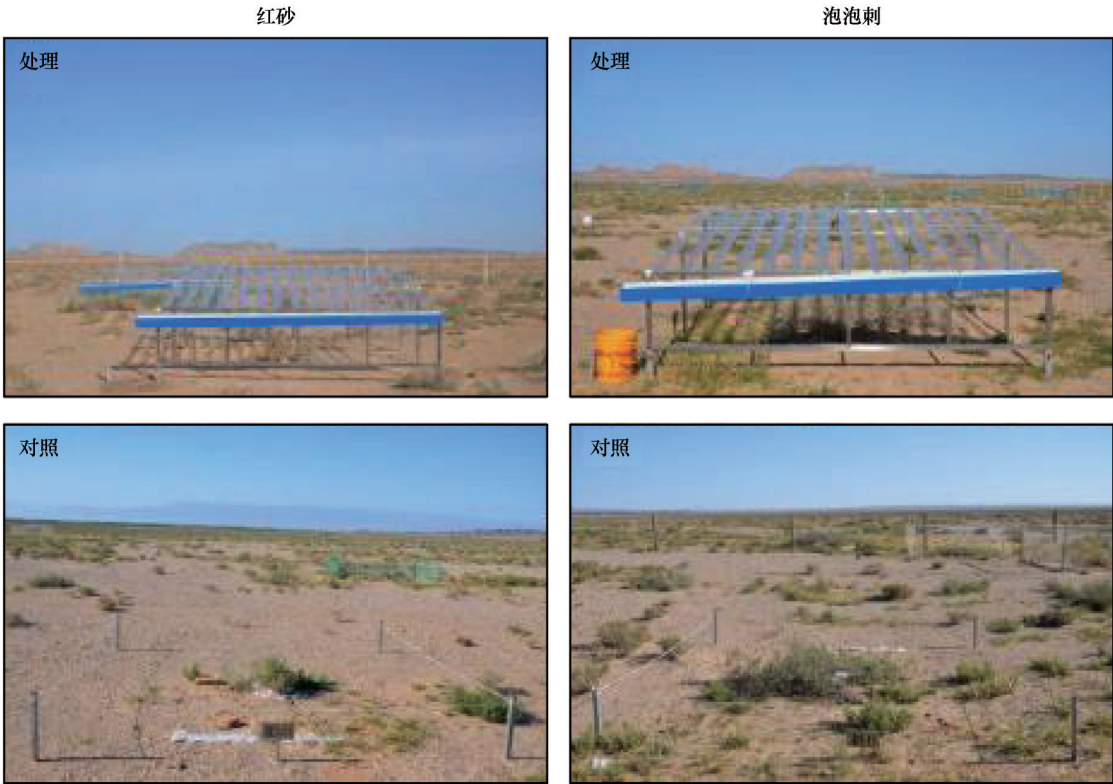


图 2 红砂和泡泡刺小区减少处理和对照小区
Fig.2 Simulated reduced precipitation treatment and control plots at *Reaumuria songarica* and *Nitraria sphaerocarpa* plots

1.3 数据分析

2018 年 5—9 月获得降水减少处理和对照小区内 2 个陷阱采集地表节肢动物样品合并统计数量及物种数,计算每个节肢动物种相对多度。夏季(5—7 月)和秋季(8—9 月)分别统计红砂和泡泡刺处理和对照小区捕获的地表节肢动物数量并计算相对

多度,统计不同小区夏季和秋季地表节肢动物群落数量和物种丰富度与营养结构(捕食性、植食性和杂食性)和个体大小甲虫(大、中和小甲虫)等功能群及主要类群捕获数量。此外,计算捕食性节肢动物与植食性和杂食性节肢动物捕获数量的比值变化,衡量捕食强度变化^[26]。使用独立 *t* 检验确定地表节肢动物群落、营养结构和个体大小等功能群及

主要类群数量的差异,统计分析使用 SPSS21.0 软件包。红砂和泡泡刺降水减少处理和对照小区夏季和秋季地表节肢动物群落组成差异利用单因素和二因素 PERMANOVA 方差分析和 NMDS 确定,统计分析使用 PAST 4.13 软件包。

2 结果与分析

2.1 地表节肢动物群落组成变化

红砂和泡泡刺降水减少处理和对照小区共捕获地表节肢动物 2 969 头,49 属或种,泡泡刺降水减少和对照小区捕获的节肢动物数量略高于红砂,但物种数变化相反(表 1)。捕获的节肢动物以蛛形纲和昆虫纲为主(13%和 87%),蛛形纲中东亚钳蝎和平腹蛛是主要种,昆虫纲中巨膜长蝽、大青叶蝉和戈壁琵琶甲等 15 个种是主要昆虫种。降水减少降低了红砂和泡泡刺小区主要节肢动物种的捕获数量,提高了红砂小区稀有地表节肢动物种(相对多度<1%)的数量及物种丰富度,泡泡刺小区仅有数量略有提高。降水减少处理对主要地表节肢动物种比重的影响随着灌木种和采样季节的变化而变化。红砂小区夏季降水减少提高了深洼齿足象、中华砚甲的比重,降低了巨膜长蝽和艾箭蚁的比

表 1 红砂和泡泡刺小区降雨减少处理和对照小区捕获的地表节肢动物数量

Table 1 Number of individuals of ground arthropod species captured at the reduction in rainfall and control plots of *Reaumuria songarica* and *Nitraria sphaerocarpa* shrubs

地表节肢动物	红砂		泡泡刺	
	处理	对照	处理	对照
东亚钳蝎(<i>Mesobuthus martensii</i>)	11	3	16	15
双刺拉基盲蛛(<i>Lacinius bidens</i>)	7	5	3	5
避日(<i>Eusimonia</i> spp.)	1			2
蟹蛛(<i>Xysticus</i> spp.)		2	1	8
舍氏艾狼蛛(<i>Evipa sjostedti</i>)	1		7	4
平腹蛛(<i>Gnaphosa</i> spp.)	49	59	74	74
白斑肥腹蛛(<i>Steatoda albomaculata</i>)		4	1	2
园蛛科(<i>Araneidae</i> sp.)		1		
逍遥蛛属(<i>Philodromus</i> spp.)	5		6	4
跳蛛科(<i>Salticidae</i> sp.)	3	1	2	
皿蛛亚科(<i>Linyphiinae</i> sp.)	6		2	2
小长蝽(<i>Nysius ericae</i>)	4	2	10	5

续表 1

地表节肢动物	红砂		泡泡刺	
	处理	对照	处理	对照
北姬蝽(<i>Nabis reuter</i>)	4			
叶缘长蝽(<i>Emblethis</i> sp.)	10	2	2	
巨膜长蝽(<i>Jakowleffia setulosa</i>)	7	23	7	8
无翅猎蝽(<i>Coranus dilatatus</i>)	1			
大青叶蝉(<i>Cicadella viridis</i>)	8	21	14	17
蚜科(<i>Aphididae</i> sp.)		1		
红角婪步甲(<i>Harpalus amplicollis</i>)		1	1	
暗步甲(<i>Amara potanini</i>)		1		
半猛步甲(<i>Cymindis semenowi</i>)		2	4	1
伪葬步甲(<i>Pseudotaphoxenus originalis</i>)	3	2	2	1
戈壁琵琶甲(<i>Blaps gobiensis</i>)	108	83	108	246
中华砚甲(<i>Cyphogenia chinensis</i>)	10	16	13	20
克氏扁漠甲(<i>Sternotrigon kraatzi</i>)	18	8	30	32
宽突东鳖甲(<i>Anatolica sternalis</i>)	15	19	23	21
波氏东鳖甲(<i>Anatolica potanini</i>)		4		1
洛氏脊漠甲(<i>Pterocomma loczyi</i>)	104	89	92	117
阿小鳖甲(<i>Microdera kraatzi alashanica</i>)	64	77	93	37
朽木甲(<i>Alleculinae</i> sp.)	1			1
墨黑覆葬甲(<i>Nicrophorus morio</i>)			1	
梨象属(<i>Apion</i> sp.)			1	
船象属(<i>Baris</i> sp.)	1			
黄褐纤毛象(<i>Tanymecus urbanus</i>)	1			1
齿足象属(<i>Deracanthus</i> sp.)	1		1	
深洼齿足象(<i>Deracanthus jakovlevi</i>)	8	10	8	11
大甜菜象(<i>Cleonus verrucosus</i>)	25	13	14	12
波笨粪金龟(<i>Lethrus potanini</i>)	7	29	11	11
蜉金龟(<i>Aphadius</i> sp.1)	3	2	4	6
蜉金龟(<i>Aphadius</i> sp.2)	1			
白星花金龟(<i>Postosia brevitarsis</i>)	1	1		
锯谷盗科(<i>Silvanidae</i> sp.)	1			
前角隐翅虫(<i>Aleochara</i> sp.)	1	1		1
一角甲(<i>Notoxus</i> sp.)	1	1	1	2
皮蠹科(<i>Dermestidae</i> sp.)				1
白刺萤叶甲(<i>Diorhabda rybakowi</i>)			24	
异色瓢虫(<i>Harmonia axyridis</i>)				1
荒漠收获蚁(<i>Messor desertora</i>)	97	106	98	110
艾箭蚁(<i>Cataglyphis aenescens</i>)	70	117	69	83

重;秋季降水减少提高了深洼齿足象的比重,降低了大青叶蝉、阿小鳖甲和艾箭蚁的比重(图3)。泡泡刺小区夏季降水减少提高了平腹蛛和克氏扁漠甲的比重,降低了深洼齿足象的比重;秋季降水减少提高了克氏扁漠甲的比重,降低了平腹蛛、大青

叶蝉的比重。此外,研究还发现红砂处理小区夏季降水减少小区大甜菜象和克氏扁漠甲的捕获数量显著高于对照;秋季戈壁琵甲捕获数量在降水减少小区显著高于对照,而波笨粪金龟捕获数量变化相反(表2)。

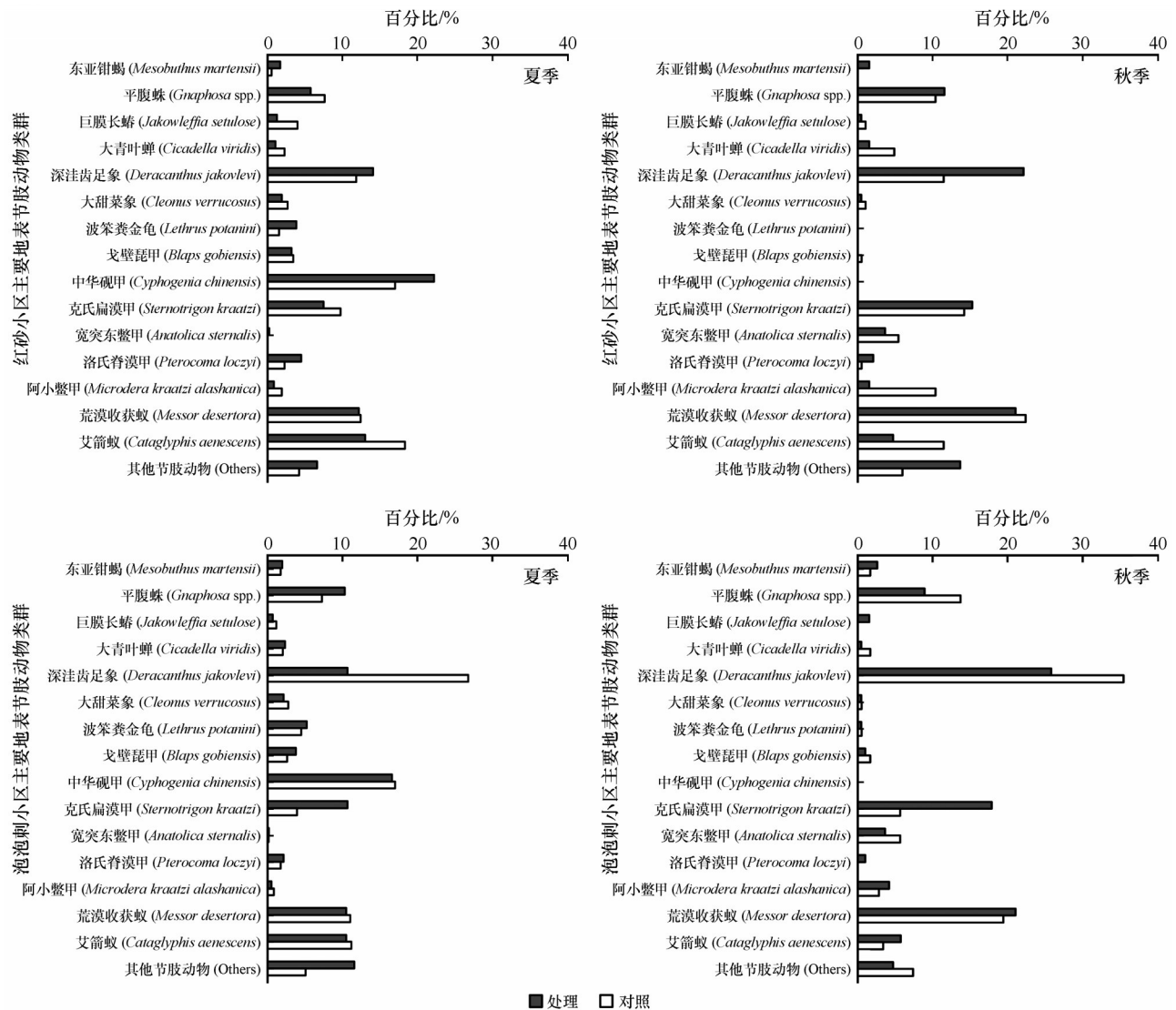


图3 降雨减少处理对主要地表节肢动物类群相对多度的影响

Fig.3 Relative abundance of ground arthropod groups in the summer and autumn at the reduction in rainfall and control plots of *Reaumuria songarica* and *Nitraria sphaerocarpa* shrubs

2.2 地表节肢动物群落多样性变化

红砂小区采样季节和处理对地表节肢动物群落组成的二因素 PERMANOVA 分析结果表明,采样季节对地表节肢动物群落组成有显著影响 ($P < 0.05$),降水减少处理及其与采样季节的交互对地表节肢动物群落组成的影响较小 ($P > 0.05$)。红砂小区夏季和秋季降水减少处理和对照小区地表节肢动

物群落组成差异不显著 ($P > 0.05$),处理和对照小区地表节肢动物群落组成相近(图4)。泡泡刺小区采样季节和处理对地表节肢动物群落组成的二因素 PERMANOVA 分析结果表明,采样季节对地表节肢动物群落组成有显著影响 ($P < 0.05$),降水减少处理及其与采样季节的交互对地表节肢动物群落组成的影响较小 ($P > 0.05$)。泡泡刺小区夏季降水减少处

表 2 红砂和泡泡刺小区降雨减少处理和对照小区夏季和秋季主要节肢动物种捕获数量比较

Table 2 Abundance of dominant arthropod species captured in the summer and autumn in the reduction in rainfall and control plots of *Reaumuria songarica* and *Nitraria sphaerocarpa* shrubs

主要地表节肢动物种	红砂				泡泡刺			
	夏季		秋季		夏季		秋季	
	处理	对照	处理	对照	处理	对照	处理	对照
东亚钳蝎(<i>Mesobuthus martensii</i>)	0.33±0.09 ^a	0.13±0.09 ^a	0.19±0.13 ^a	0±0 ^a	0.46±0.18 ^a	0.50±0.13 ^a	0.31±0.09 ^a	0.19±0.13 ^a
平腹蛛(<i>Gnaphosa</i> spp.)	1.13±0.34 ^a	1.67±0.30 ^a	1.38±0.40 ^a	1.19±0.33 ^a	2.38±0.61 ^a	2.08±0.28 ^a	1.06±0.24 ^a	1.50±0.40 ^a
巨膜长蜚(<i>Jakowleffia setulosa</i>)	0.25±0.08 ^a	0.88±0.42 ^a	0.06±0.06 ^a	0.13±0.13 ^a	0.17±0.09 ^a	0.33±0.11 ^a	0.19±0.13 ^a	0±0 ^a
大青叶蝉(<i>Cicadella viridis</i>)	0.21±0.14 ^a	0.50±0.21 ^a	0.19±0.09 ^a	0.56±0.37 ^a	0.54±0.23 ^a	0.58±0.18 ^a	0.06±0.06 ^a	0.19±0.13 ^a
深洼齿足象(<i>Deracanthus jakovlevi</i>)	0.04±0.04 ^a	0±0 ^a	0.44±0.18 ^a	0.63±0.23 ^a	0.04±0.04 ^a	0.04±0.04 ^a	0.44±0.11 ^a	0.63±0.21 ^a
大甜菜象(<i>Cleonus verrucosus</i>)	0.88±0.50^a	0.50±0.15^b	0.25±0.13 ^a	0.06±0.06 ^a	0.50±0.18 ^a	0.50±0.15 ^a	0.13±0.08 ^a	0±0 ^a
波笨粪金龟(<i>Lethrus potanini</i>)	0.17±0.06 ^a	0.42±0.15 ^a	0.19±0.13^b	1.19±0.58^a	0.13±0.09 ^a	0.25±0.16 ^a	0.50±0.16 ^a	0.31±0.16 ^a
戈壁琵琶甲(<i>Blaps gobiensis</i>)	2.75±1.09 ^a	2.58±0.62 ^a	2.63±0.58^a	1.31±0.43^b	2.46±0.38 ^a	7.67±2.88 ^a	3.06±0.95 ^a	3.88±0.61 ^a
中华砚甲(<i>Cyphogenia chinensis</i>)	0.38±0.12 ^a	0.58±0.16 ^a	0.06±0.06 ^a	0.13±0.13 ^a	0.50±0.13 ^a	0.79±0.46 ^a	0.06±0.06 ^a	0.06±0.06 ^a
克氏扁漠甲(<i>Sternotrigon kraatzi</i>)	0.75±0.21^a	0.33±0.09^b	0±0 ^a	0±0 ^a	1.21±0.41 ^a	1.29±0.17 ^a	0.06±0.06 ^a	0.06±0.06 ^a
宽突东鳖甲(<i>Anatolica sternalis</i>)	0.63±0.15 ^a	0.75±0.18 ^a	0±0 ^a	0.06±0.06 ^a	0.88±0.17 ^a	0.75±0.23 ^a	0.13±0.08 ^a	0.19±0.09 ^a
洛氏脊漠甲(<i>Pterocoma loczyi</i>)	4.33±0.73 ^a	3.71±0.47 ^a	0±0 ^a	0±0 ^a	3.83±0.55 ^a	4.88±0.99 ^a	0±0 ^a	0±0 ^a
阿小鳖甲(<i>Microdera kraatzi alashanica</i>)	1.46±0.30 ^a	2.13±0.54 ^a	1.82±0.49 ^a	1.63±0.69 ^a	2.46±0.65 ^a	1.13±0.18 ^a	2.13±1.39 ^a	0.63±0.28 ^a
荒漠收获蚁(<i>Messor desertora</i>)	2.38±0.48 ^a	2.71±0.63 ^a	2.50±0.79 ^a	2.56±0.65 ^a	2.42±0.66 ^a	3.17±0.59 ^a	2.50±1.30 ^a	2.13±0.65 ^a
艾箭蚁(<i>Cataglyphis aenescens</i>)	2.54±0.74 ^a	4.00±0.73 ^a	0.56±0.49 ^a	1.31±0.53 ^a	2.42±1.00 ^a	3.21±0.48 ^a	0.69±0.47 ^a	0.38±0.21 ^a

注：字母不同代表处理和对照存在显著差异， $P<0.1$ 。

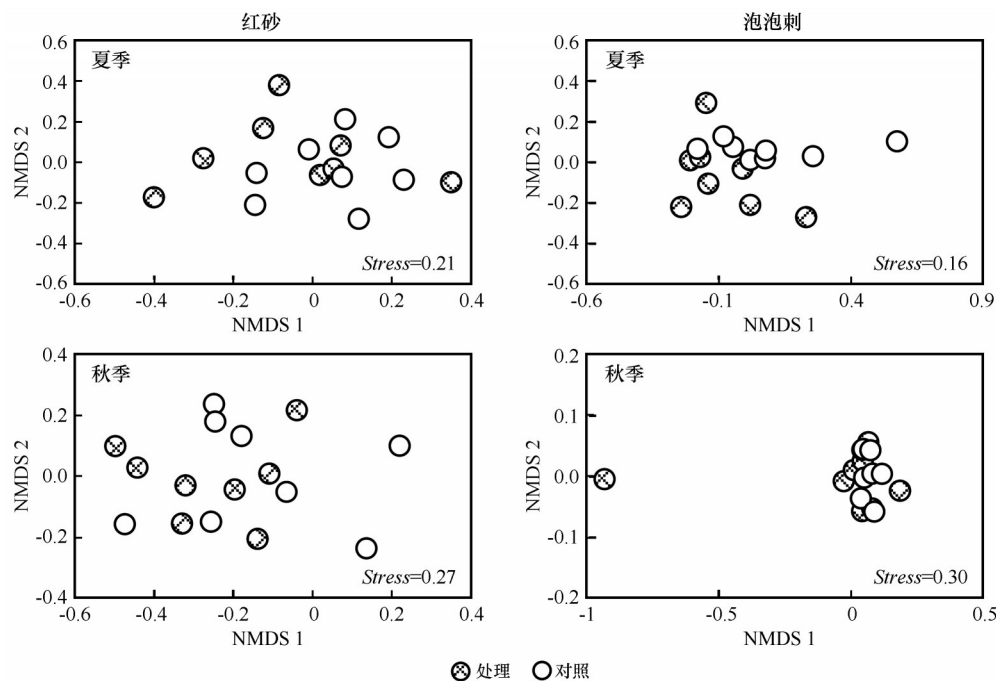


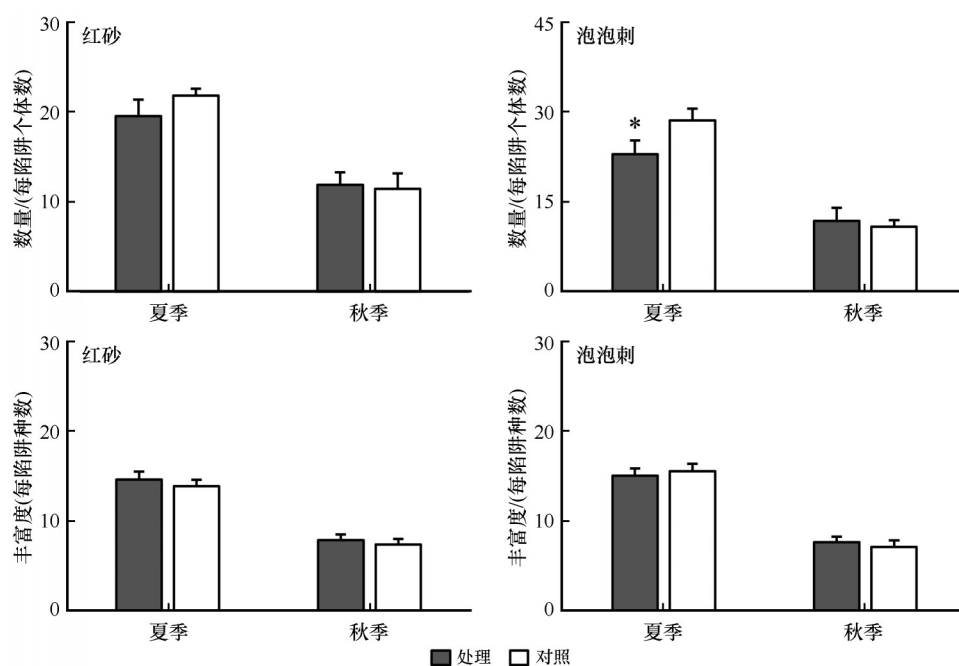
图 4 红砂和泡泡刺小区降雨减少处理和对照小区夏季和秋季地表节肢动物群落组成 NMDS 排序

Fig.4 NMDS plots indicating 2-dimensional distances of ground arthropod community at the reduction in the summer and autumn in rainfall and control plots of *Reaumuria songarica* and *Nitraria sphaerocarpa* shrubs

理和对照小区地表节肢动物群落组成明显不同($P < 0.05$),处理和对照小区地表节肢动物群落组成差异较大;秋季降水减少处理和对照小区地表节肢动物群落组成差异不显著($P > 0.05$),处理和对照小区地表节肢动物群落组成差异较小。

夏季红砂和泡泡刺小区降水减少会降低地表

节肢动物数量,但对物种丰富度的影响较小;秋季降水减少对红砂和泡泡刺小区地表节肢动物数量和物种丰富度的影响均较小(图5)。泡泡刺小区降水减少显著降低了夏季地表节肢动物的捕获数量,对照小区地表节肢动物捕获数量是处理小区的1.2倍。



注: *表示差异显著, $P < 0.05$

图5 红砂和泡泡刺小区降雨减少处理和对照小区夏季和秋季地表节肢动物捕获数量和物种丰富度比较。

Fig.5 Abundance and species richness of ground arthropods in the summer and autumn at the reduction in rainfall and control plots of *Reaumuria songarica* (RSP) and *Nitraria sphaerocarpa* shrubs

2.3 地表节肢动物功能性状多样性变化

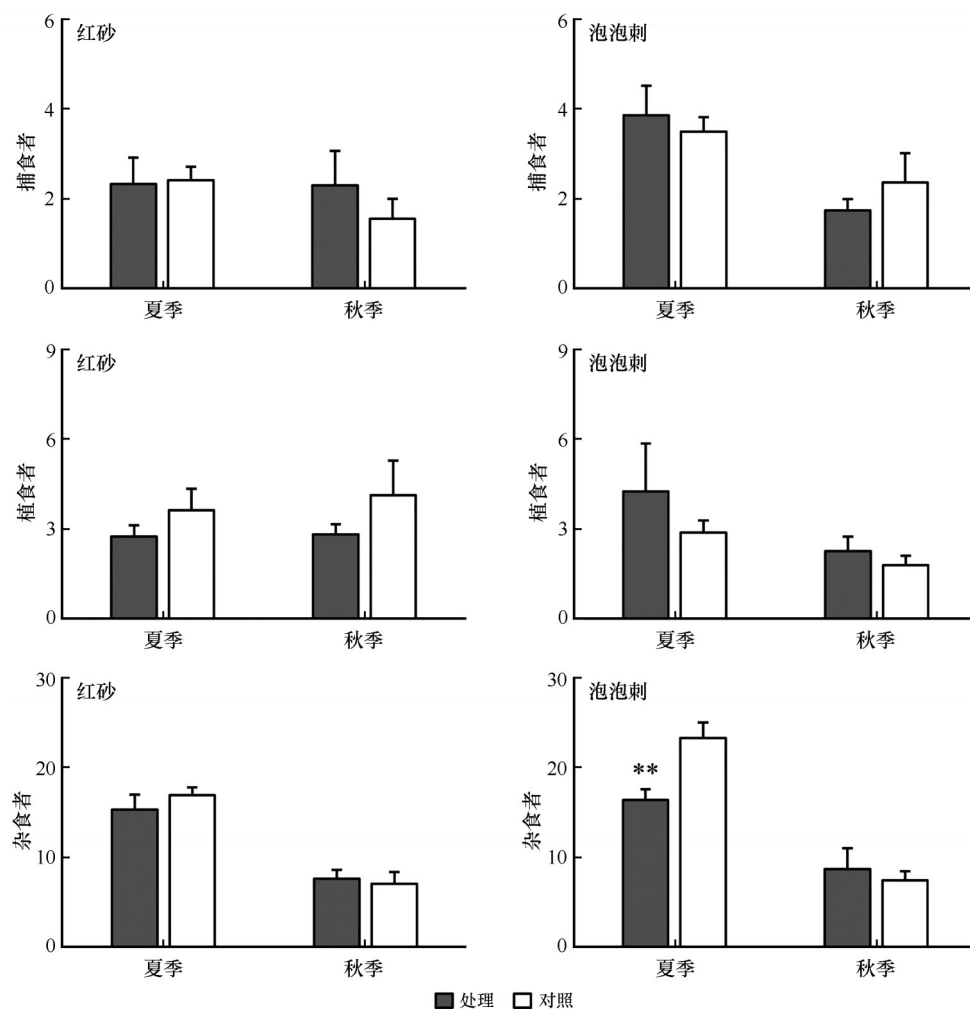
红砂小区降水减少处理均会降低植食性节肢动物的捕获数量,秋季降水减少处理也会降低捕食性节肢动物的捕获数量,但处理和对照间的差异均不显著(图6)。夏季降水减少处理会显著降低杂食性节肢动物数量,但会提高捕食性和植食性节肢动物的数量;秋季降水减少处理会降低捕食性节肢动物数量,但提高了植食性和杂食性节肢动物的数量。降水减少处理还会提高夏季和秋季红砂小区捕食性与植食性和杂食性节肢动物比值,但泡泡刺小区变化略有不同。夏季降水减少处理会提高泡泡刺小区捕食性与植食性和杂食性节肢动物比值,秋季变化则相反(图7)。

降水减少处理对红砂小区夏季和秋季大型、中型和小型甲虫捕获数量的影响均较小(图8)。降水减少对泡泡刺小区大型和小型甲虫捕获数量有影

响,但中型甲虫捕获数量的影响不大。夏季降水减少处理显著降低了大型甲虫捕获数量,对照小区大型甲虫捕获数量是处理小区的2.2倍;秋季降水减少处理对大型甲虫捕获数量的影响较小。夏季和秋季降水减少处理均提高了小型甲虫的捕获数量,处理小区小型甲虫数量是对照小区的2.6倍和2.5倍;夏季降水减少和对照小区小型甲虫的捕获数量存在显著差异。

3 讨论

荒漠降水存在明显的年季变异,这也导致地表节肢动物多样性、主要种数量及生物量存在季节和年变异^[13,19,29]。本研究发现,泡泡刺小区地表节肢动物多样性对降雨减少的响应存在明显的季节变异,夏季地表节肢动物群落组成存在显著差异,但秋季地表节肢动物群落组成对降雨减少的响应不敏感。前期研究已经发现,单次降雨后戈壁荒漠蠕



注:**表示差异显著, $P < 0.01$

图6 红砂和泡泡刺小区降雨减少处理和对照小区夏季和秋季捕食性、植食性和杂食性地表节肢动物捕获数量比较

Fig.6 Abundance of predatory, herbivorous, and omnivorous arthropods in the summer and autumn at the reduction in rainfall and control plots of *Reaumuria songarica* and *Nitraria sphaerocarpa* shrubs

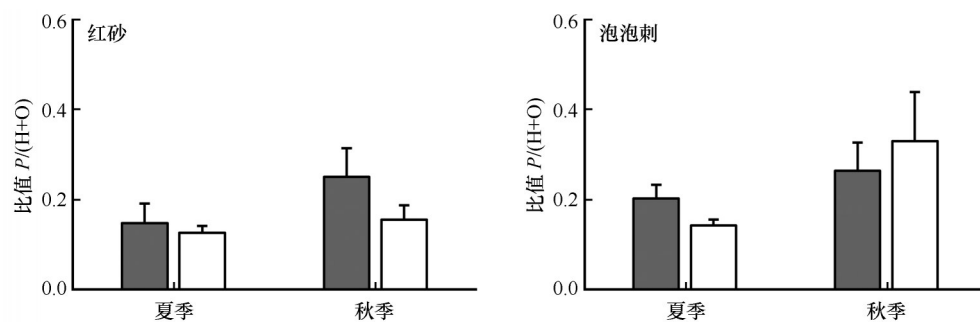
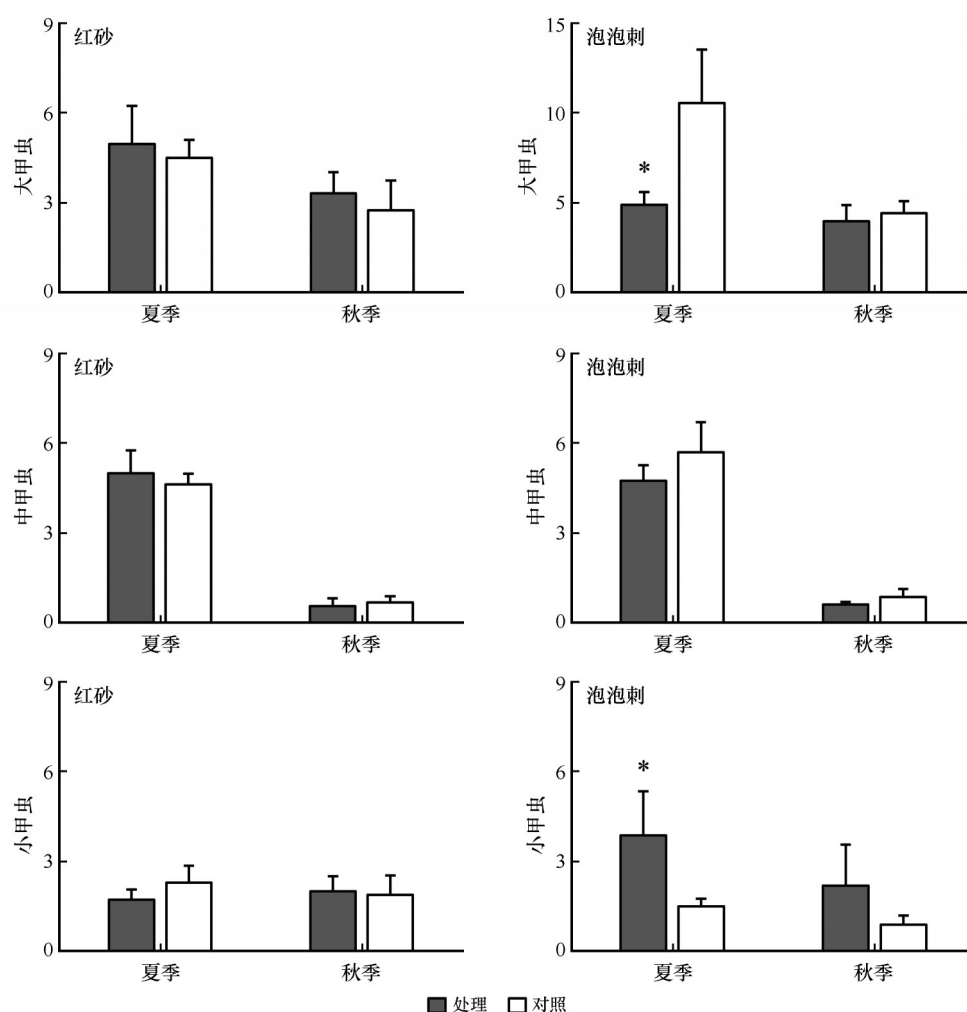


图7 红砂和泡泡刺小区降雨减少处理和对照小区夏季和秋季捕食性与植食性和杂食性地表节肢动物捕获数量比值

Fig.7 Ratio of predatory arthropods and herbivorous and omnivorous arthropods in the summer and autumn at the reduction in rainfall and control plots of *Reaumuria songarica* and *Nitraria sphaerocarpa* shrubs

类和跳虫等小型节肢动物存在短期响应,但不同季节变化规律不同,这与本文的研究结果相近^[13]。灌木对戈壁荒漠地表节肢动物有保育作用,但这种影响存在明显的季节变异,春季和夏季红砂和泡泡刺

对地表节肢动物聚集的影响大于秋季^[25-26]。泡泡刺对戈壁荒漠拟步甲科聚集的影响大于红砂^[25]。泡泡刺小区地表节肢动物对降雨减少的响应较红砂敏感,夏季降雨减少处理降低了地表节肢动物的捕



注: *表示差异显著, $P < 0.1$

图8 红砂和泡泡刺小区降雨减少处理和对照小区夏季和秋季大型、中型和小型甲虫捕获数量比较
Fig.8 Abundance of large beetles, medium beetles and small beetles in the summer and autumn at the reduction in rainfall and control plots of *Reaumuria songarica* and *Nitraria sphaerocarpa* shrubs

获数量,这与 Fischer 等^[8]和 Ball 等^[27]的研究结果相近。Ball 等^[27]发现,植物覆盖显著影响了土壤节肢动物,深根性常绿植物(*Larrea tridentata*)比耐旱性落叶植物(*Ambrosia deltoidea*)更能增加植株间土壤中节肢动物的丰富度和多样性。Fischer 等^[8]发现,干旱、半干旱区季节性降雨量和植物盖度决定节肢动物群落组成,而土壤质地对节肢动物群落组成的影响较小。由此可见,荒漠降雨减少和灌木互作驱动地表节肢动物群落变化。总之,夏季降雨减少对戈壁荒漠地表节肢动物群落组成和多样性的影响大于秋季,这在灌幅较大的泡泡刺处理小区表现尤为明显。

地表节肢动物营养功能群对降雨减少的响应模式不同,夏季降雨减少提高了泡泡刺小区捕食性和植食性节肢动物的数量,显著降低了杂食性节肢

动物的数量,这与 Fischer 等^[8]研究结果相近。Fischer 等^[8]研究发现,降雨出现后植物、植食性和捕食性动物的响应时间依次增加,杂食性动物对降雨出现的响应滞后 23 d。Ren 等^[9-10]发现,拟步甲科和蚁科等杂食性节肢动物对年降水量变化的响应存在一定滞后性。春、夏季泡泡刺灌丛下捕获的地表节肢动物数量比红砂灌丛下高,拟步甲科是主要的杂食性节肢动物类群^[26,28]。降雨减少处理降低了一些拟步甲科种的捕获数量,这些拟步甲科种主要在泡泡灌丛栖居和繁殖,降雨减少处理导致土壤水分匮乏和泡泡生长衰退等抑制了拟步甲科活动,从而降低了杂食性节肢动物的数量。灌木存在可以提高地表节肢动物对降雨减少引起的干旱胁迫的抵御能力^[25,27]。然而,戈壁荒漠泡泡刺受 2017 年秋季白刺夜蛾暴发的影响,2018 年部分泡泡灌丛处于休眠状

态,夏季泡泡刺种子的数量也大幅下降。泡泡刺生长减缓降低了夏季拟步甲科和蚁科等杂食性节肢动物对降雨减少处理引起的干旱胁迫的抵御能力,降低了杂食性节肢动物的数量^[9-10]。Buchholz等^[30-31]发现,蜘蛛对小尺度干旱胁迫处理的响应不敏感,这与本文的研究结果相近。植食性节肢动物数量对降雨减少处理的响应也不敏感,这与Fischer等^[8]的研究结果略有不同。降雨减少还提高了夏季红砂和泡泡刺小区捕食性与植食性和杂食性节肢动物数量的比值,这与Lensing等^[32]、Ferguson等^[33]和McCluney等^[22]的研究结果相近。干旱胁迫会导致捕食或植食性节肢动物通过增加取食量获取水分和能量,从而抵御干旱环境胁迫对生存的影响,这也是荒漠动物适应极端环境的一种生存策略。杂食性节肢动物是荒漠主要的节肢动物类群,减雨减少降低了杂食性节肢动物数量,这会对捕食性节肢动物、爬行类、兽类及鸟类多样性^[21,29]。

本文研究还发现主要地表节肢动物中甲虫个体大小对降雨减少响应不同,大中型甲虫在降雨减少泡泡刺小区捕获数量降低,其中大型甲虫的捕获数量显著降低。与大型甲虫变化相反,小型甲虫在降雨减少小区捕获数量明显增加,这可能与捕食强度下降有关。降雨减少导致一些大型节肢动物种捕获数量下降,进而导致捕食强度和食物资源竞争下降,从而提高了小型甲虫的捕获数量^[25,34]。大型荒漠甲虫对泡泡刺小区降雨减少处理的响应更敏感,这与Kwok等^[24]研究结果相近。螨类、蚂蚁和鞘翅目昆虫的丰富度随着长期降雨量的增加而增加,而蜘蛛类群则表现出相反的模式。地表节肢动物取食类型和个体大小及其生物学特征等均会影响他们对降水变化的响应模式和敏感程度^[8,24,30]。此外,研究还发现红砂和泡泡刺小区大、中和小型甲虫对降水减少的处理略有不同,夏季大、中型甲虫对降雨减少处理的响应相反。本文研究还发现,夏季降雨减少显著提高了红砂小区克氏扁漠甲捕获数量,秋季降雨减少显著降低了红砂小区波笨粪金龟的数量,而显著提高了红砂小区戈壁琵甲的捕获数量。不同甲虫对降雨减少处理的响应模式不同,随着季节和灌木种的变化而变,决定了群落和营养功能群的变化规律^[35]。

4 结论

模拟降雨减少50%对戈壁荒漠地表节肢动物

多样性的影响受灌木种类和季节调控。夏季降雨减少对红砂处理小区地表节肢动物群落组成影响较小,而泡泡刺处理小区地表节肢动物群落组成发生明显变化。在群落水平,降雨减少显著降低了夏季泡泡刺小区地表节肢动物的捕获数量。在功能群水平,降雨减少显著降低了夏季泡泡刺小区杂食性节肢动物的数量;降雨减少还显著降低了夏季泡泡刺小区大型甲虫的捕获数量,但显著提高了小型甲虫的捕获数量。在种水平,降雨减少显著提高了夏季红砂小区大甜菜象和克氏扁漠甲数量;秋季显著提高了戈壁琵甲的捕获数量,但显著降低了波笨粪金龟的数量。总之,降雨短期减少会引起地表节肢动物多样性变化并随着灌木种类和季节变化而变化,从而改变食物网结构及其功能。

参考文献:

- [1] Holmgren M, Stapp P, Dickman C R, et al. Extreme climatic events shape arid and semiarid ecosystems[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(2): 87-95.
- [2] Sun Y, Sun Y, Yao S R, et al. Impact of climate change on plant species richness across drylands in China: from past to present and into the future[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108288.
- [3] Tariq A, Sardans J, Zeng F J, et al. Impact of aridity rise and arid lands expansion on carbon-storing capacity, biodiversity loss, and ecosystem services[J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(4): e17292.
- [4] Blankinship J C, Niklaus P A, Hungate B A. A meta-analysis of responses of soil biota to global change[J]. *Oecologia*, 2011, 165(3): 553-565.
- [5] 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(4): 1407-1421.
- [6] Flesch A D, Rosen P C, Holm P. Long-term changes in abundances of Sonoran Desert lizards reveal complex responses to climatic variation[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(12): 5492-5508.
- [7] Wise D H, Lensing J R. Impacts of rainfall extremes predicted by climate-change models on major trophic groups in the leaf-litter arthropod community[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2019, 88(10): 1486-1497.
- [8] Fischer C, Gerstmeier R, Wagner T C. Seasonal and temporal patterns of rainfall shape arthropod community composition and multi-trophic interactions in an arid environment[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 3742.
- [9] Ren J L, Feng Y L, Wang Y Z, et al. Spatial and temporal distribution patterns of ants (Hymenoptera: Formicidae) in gobi des-

- ert ecosystems, northwest China[J]. *Research in Cold and Arid Regions*, 2024, 16(5): 229–238.
- [10] Ren J L, Zhao W Z, He Z B, et al. Spatiotemporal variations of tenebrionid beetles (Coleoptera: Tenebrionidae) in the gobi desert, northwest China[J]. *Journal of Arid Land*, 2025, 17(1): 112–129.
- [11] Whitford W G. Abiotic controls on the functional structure of soil food webs[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1989, 8(1): 1–6.
- [12] 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(5): 161–169.
- [13] 刘继亮, 李锋瑞, 赵文智, 等. 干旱荒漠螨类和跳虫对降雨的响应[J]. *中国沙漠*, 2017, 37(3): 439–445.
- [14] Bang C, Faeth S H, Sabo J L. Control of arthropod abundance, richness and composition in a heterogeneous desert city[J]. *Ecological Monographs*, 2012, 82(1): 85–100.
- [15] McCluney K E. Disentangling the multiple effects of precipitation on arthropod biomass: a commentary on Newell et al. (2022)[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(2): 294–295.
- [16] Souza L, Zelikova T J, Sanders N J. Bottom-up and top-down effects on plant communities: nutrients limit productivity, but insects determine diversity and composition[J]. *Oikos*, 2016, 125(4): 566–575.
- [17] Gibb H, Wardle G M, Greenville A C, et al. Top-down response to spatial variation in productivity and bottom-up response to temporal variation in productivity in a long-term study of desert ants[J]. *Biology Letters*, 2022, 18: 20220314.
- [18] 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(1): 36–59.
- [19] 刘继亮, 赵文智, 李锋瑞, 等. 河西走廊中部砾质戈壁蛛形纲节肢动物群落特征[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(3): 155–164.
- [20] 刘继亮, 赵文智, 李锋瑞. 干旱荒漠土壤动物分布格局对降水脉动的响应研究进展[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(5): 1337–1342.
- [21] 秦畅, 刘继亮, 任嘉隆, 等. 干旱荒漠蜘蛛、螨类和跳虫对降雨增加的短期响应[J]. *中国沙漠*, 2025, 45(1): 141–150.
- [22] McCluney K E, Belnap J, Collins S L, et al. Shifting species interactions in terrestrial dryland ecosystems under altered water availability and climate change[J]. *Biological Reviews*, 2012, 87(3): 563–582.
- [23] McCluney K E. Implications of animal water balance for terrestrial food webs[J]. *Current Opinion in Insect Science*, 2017, 23: 13–21.
- [24] Kwok A B C, Wardle G M, Greenville A C, et al. Long-term patterns of invertebrate abundance and relationships to environmental factors in arid Australia[J]. *Austral Ecology*, 2016, 41(5): 480–491.
- [25] 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.
- [26] Liu J L, Li F R, Liu L L, et al. Responses of different Collembola and mite taxa to experimental rain pulses in an arid ecosystem[J]. *Catena*, 2017, 155: 53–61.
- [27] Ball B A, Bergin K, Morrison A. Vegetation influences desert soil arthropods and their response to altered precipitation[J]. *Journal of Arid Environments*, 2023, 208: 104873.
- [28] Feng Y L, Wang Y Z, Ren J L, et al. Ground arthropod assemblages shaped by ant nests and shrub microhabitats in Gobi Desert ecosystems[J]. *Applied Soil Ecology*, 2025, 212: 106118.
- [29] 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): 22343.
- [30] Buchholz S, Rolfsmeier D, Schirmel J. Simulating small-scale climate change effects-lessons from a short-term field manipulation experiment on grassland arthropods[J]. *Insect Science*, 2013, 20(5): 662–670.
- [31] Buchholz S. Simulated climate change in dry habitats: do spiders respond to experimental small-scale drought?[J]. *The Journal of Arachnology*, 2010, 38(2): 280–284.
- [32] Lensing J R, Todd S, Wise D H. The impact of altered precipitation on spatial stratification and activity-densities of springtails (Collembola) and spiders (Araneae)[J]. *Ecological Entomology*, 2005, 30(2): 194–200.
- [33] Ferguson S H, Joly D O. Dynamics of springtail and mite populations: the role of density dependence, predation, and weather[J]. *Ecological Entomology*, 2002, 27(5): 565–573.
- [34] Chang C C, Todd P A. Reduced predation pressure as a potential driver of prey diversity and abundance in complex habitats[J]. *npj Biodiversity*, 2023, 2: 1.
- [35] Polis G A. Complex trophic interactions in deserts: An empirical critique of food-web theory[J]. *The American Naturalist*, 1991, 138(1): 123–155.

Effects of simulated reduced precipitation on ground arthropod diversity in gobi desert ecosystems

Yan Qihan^{1,2}, Liu Jiliang², Wang Yongzhen², Feng Yilin², Qin Chang^{1,2},
Ren Jialong^{1,2}, Xin Weidong¹, Luo Yayong²

(1.College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China; 2.Linze Inland River Basin Research Station / Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on "Mountain-River-Forest-Farmland-Lake-Grassland-Desert System Governance", Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In the gobi desert, precipitation variability has a profound impact on the growth and reproduction of plants, arthropods, and vertebrates, which in turn drives changes in desert biodiversity and its ecological functions. Leveraging long-term precipitation data from this region, we established a fixed-plot experimental platform centered on individual shrubs to simulate a 50% reduction in precipitation. This study examines how ground arthropod diversity responds to reduced precipitation and explores the seasonal patterns of these responses. The results showed that in the *Reaumuria songarica* plots, reduced precipitation had a minimal impact on the composition of ground arthropod communities in both summer and autumn. In contrast, in the *Nitraria sphaerocarpa* plots, reduced precipitation significantly altered the composition of ground arthropod communities in summer but had a lesser effect in autumn. In the *N. sphaerocarpa* plots, the reduced precipitation treatment significantly decreased the abundance of omnivorous arthropods in summer but increased the abundance of predatory and herbivorous arthropods. Additionally, the reduced precipitation treatment led to a significant decline in the abundance of large beetles in summer, while the abundance of small beetles increased significantly. Moreover, the study also found that the reduced precipitation treatment significantly increased the abundance of *Cleonus verrucosus* and *Sternotrigon kraatzi* during summer and the abundance of *Blaps gobiensis* during autumn in the *R. songarica* plots, while significantly decreasing the abundance of *Lethrus potanini* in autumn. In summary, reduced precipitation in the gobi desert results in decreased abundance of large omnivorous arthropods, particularly beetles, with the extent of this reduction varying by season and shrub species. These shifts can profoundly affect the structure and function of food webs.

Key words: gobi desert; simulated reduced precipitation; ground arthropods; diversity; functional traits