

DOI: 10.5846/stxb202108182294

王永珍, 林永一, 冯怡琳, 赵文智, 董六文, 刘继亮. 沙障对流动沙丘区地表节肢动物分布及多样性的影响. 生态学报, 2022, 42(16): 6768-6777.

Wang Y Z, Lin Y Y, Feng Y L, Zhao W Z, Dong L W, Liu J L. Effects of sand barriers on the distribution and diversity of ground arthropods in the active sandy dune regions. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6768-6777.

沙障对流动沙丘区地表节肢动物分布及多样性的影响

王永珍^{1,2}, 林永一^{1,2}, 冯怡琳³, 赵文智^{1,2}, 董六文⁴, 刘继亮^{1,2,*}

1 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 宁夏大学, 银川 750021

4 新疆大学, 乌鲁木齐 830046

摘要:沙障作为人工固沙植被恢复与保护绿洲和道路安全的一种手段,可以有效阻止沙丘移动,改变流动沙丘地表生态水文过程,进而影响节肢动物多样性及营养结构及功能变化。鉴于此,选取临泽县中部沙带为研究区,利用陷阱法系统调查了生物、物理沙障和流动沙丘区沙丘不同部位地表节肢动物分布及多样性。研究表明,沙障营建强烈影响了流动沙丘区地表节肢动物组成,生物和物理沙障区地表节肢动物的活动密度、物种丰富度及多样性均显著高于流动沙丘区,捕食性和其它食性节肢动物较植食性节肢动物对沙障营建的响应更为敏感。沙障还改变了沙丘地表节肢动物的分布规律,生物和物理沙障区地表节肢动物的活动密度从沙丘底部到顶部依次增加,而流动沙丘区地表节肢动物主要分布在沙丘中下部。谢氏宽漠王和尖尾东鳖甲在流动沙丘区主要分布沙丘的中下部,沙障营建导致沙丘顶部谢氏宽漠王和尖尾东鳖甲的活动密度大幅提高。此外,研究还发现生物和物理沙障对地表节肢动物的影响不同,生物沙障区地表节肢动物活动密度显著高于物理沙障区,捕食性和东鳖甲等其它食性节肢动物的活动密度在生物沙障区均高于物理沙障区。总之,沙障营建及类型差异强烈影响地表节肢动物的分布及多样性,它通过资源上行效应和土壤物理环境的改变提高了地表节肢动物的多样性及营养结构,从而影响了土壤生态系统结构及功能变化过程。

关键词:生物沙障;物理沙障;地表节肢动物;多样性;营养结构

Effects of sand barriers on the distribution and diversity of ground arthropods in the active sandy dune regions

WANG Yongzhen^{1,2}, LIN Yongyi^{1,2}, FENG Yilin³, ZHAO Wenzhi^{1,2}, DONG Liuwen⁴, LIU Jiliang^{1,2,*}

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Ningxia University, Yinchuan 750021, China

4 Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Abstract: As a means of artificial sand fixation for vegetation restoration and protection for oases and road safety, sand barrier can effectively prevent the movement of sand dunes, strongly affect the distribution and diversity of ground arthropods by altering abiotic and biotic environment on the surface of the dunes. Moreover, sand barrier also impacted on the trophic structure and ecological function of ground arthropods by changing the surface eco-hydrological process of active sandy dune regions. Therefore, we select the middle sand strip as the object of study in Linze County in the middle reaches of Heihe River Basin and systematically researched on the distribution and diversity of ground arthropods using pitfall trapping in the biological sand barrier, physical sand barrier and active sandy dune regions. The key results are as follows.

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项 A(XDA23060304);国家自然科学基金项目(41771290)

收稿日期:2021-08-18; **网络出版日期:**2022-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liujl707@lzb.ac.cn

Sand barrier strongly affected the assemblage of ground arthropod community. The activity density, species richness and diversity index of ground arthropods in the biological sand barrier and physical sand barrier regions were significantly higher than those in active sandy dune regions apparently. Comparing with the phytophagous arthropods, the predatory arthropods and other arthropods response was more sensitive to sand barrier construction. Sand barrier also changed the distribution pattern of ground arthropods in the upper, middle and bottom of sandy dune. The activity density of ground arthropods in biological sand barrier and physical sand barrier regions increased from the top to the bottom of the sandy dune gradually. Conversely, it distributed in the middle and bottom of sandy dune in the active sandy dune regions which was related to the quantity changes of ground-dwelling arthropods species that preferred to move in the active sandy dune regions. More *Mantichorula semenowi* and *Anatolica mucronate* were collected at the middle of bottom of sandy dune in the active sandy dune regions, and those beetles were collected at the up of sandy dune in the biological sand barrier and physical sand barrier regions. Besides, it was also found that the influences on ground arthropod assemblage of biological sand barrier and physical sand barrier were different. The activity density of ground arthropods in the biological sand barrier regions was higher than physical sand barrier regions. A similar pattern was observed on the activity density of predatory arthropods and other arthropods like *Tentyria* sp. In conclusion, sand barrier presence and its types strongly affected on the diversity and trophic structure of ground arthropods community. It significantly improved the number of individuals and diversity of ground arthropods by bottom-up effect of resource and changes of the soil physical environment, accelerating the process of soil ecosystem structure and functional change in the desert ecosystem.

Key Words: biological sand barrier; physical sand barrier; ground arthropods; diversity; trophic structure

荒漠化是干旱、半干旱区面临的主要生态问题之一,它严重威胁天然和人工绿洲的安全与稳定^[1-4]。近年来,机械固沙、植被恢复和禁牧等生态治理和保护工程实施有效阻止了荒漠化的扩张,保护了干旱区绿洲和交通安全^[5-7]。2014 年全国荒漠化和沙化土地面积与 2009 年相比减少了 12120 km² 和 9902 km²,年均减少 2424 km²和 1980 km²(第五次全国沙漠化公报)。然而,气候变化和人类活动干扰导致一些区域天然和人工固沙植被退化威胁绿洲农田和交通安全^[7-9]。利用机械固沙技术恢复植被是当前应用较多的手段,它可以有效的保护绿洲及道路安全^[10]。麦草方格是制作沙障的主要材料,岩石、尼龙网、高密度聚乙烯网及一些植物纤维等新型材料应用于制作沙障^[5-7]。新型材料沙障的固沙效果及其对土壤结皮、土壤水分、物理结构和化学性质与植被分布及多样性的研究较多,而关于其对动物的研究较少^[11-15]。因而,急需开展生物和物理沙障对地表节肢动物多样性的影响,为理解和认识机械固沙的生态水文效应研究提供科学依据和数据支撑。

作为荒漠无脊椎动物中的主要类群,地表节肢动物不仅是荒漠生态系统中的捕食者和消费者,还是兽类、鸟类和爬行类的主要食物资源^[16-17]。此外,许多节肢动物(如传粉昆虫和捕食种子昆虫)对植物繁殖和种子扩散有重要影响,它们有利于维持荒漠珍稀和特有植物多样性^[18-19]。荒漠节肢动物以蛛形纲和昆虫纲为主,它们适应极端干旱的荒漠环境,其种群数量对环境变化十分敏感,可以用于指示沙漠化变化过程^[20-21]。前期研究已经发现,人工固沙植被恢复强烈影响地表节肢动物群落结构,而天然和人工固沙植被区地表甲虫等对沙漠化也有较好的指示作用^[9,22]。鉴于此,对生物沙障和物理沙障和毗邻的流动沙丘区地表节肢动物多样性进行系统调查,确定生物和物理沙障区固沙恢复植被对地表节肢动物多样性及功能的影响,为沙漠化治理过程中生物多样性变化及其功能演变研究提供科学依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区属于大陆性干旱气候,春季干旱少雨,夏末秋初降雨逐步增加。多年平均降水量 117.0 mm,主要集中在 7、8、9 月,这 3 个月的降水量约占全年的 72%,降水存在明显的年季变化。年平均蒸发量 2390 mm,是降水量的 20 倍。年平均气温 7.6℃,≥10℃年积温 3085℃,无霜期 165 d。年均日照时数为 3045 h,太阳辐射

总量为 $611272.8 \text{ J cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。本区冬季盛行西北风, 年均风速 3.2 m/s , 最大风速可达 21.3 m/s , ≥ 8 级大风年均 15 d 左右, 且集中于 3—5 月, 这段时间风沙对绿洲的危害最大。地下水位在 3—5 m 之间。

1.2 实验设计及样品采集

临泽县位于黑河中游张掖绿洲北部, 县内有北部、中部和南部 3 条沙带, 中部沙带对绿洲中部平川灌区威胁较大, 它一直是临泽县风沙治理的关键区之一。近年来, 随着张掖市国家山水林田湖生态保护与修复工程实施(2018 年), 临泽县平川镇北部沙区麦草沙障治沙 4 km^2 , 新型材料沙障 0.67 km^2 。麦草方格和新型材料沙障均可以快速固定流动沙丘, 有利于植被快速恢复。故选择利用麦草方格的生物沙障 (biological sand barrier region, BSB) 和新型固沙材料的物理沙障 (physical sand barrier region, PSB) 栽植梭梭的固沙区作为人工固沙措施地表节肢动物调查区, 两种沙障毗邻的流动沙丘区作为对照 (active sandy dune region, ASD), 探讨生物和物理固沙措施对地表节肢动物分布及多样性的影响。生物沙障和物理沙障铺设方式相近, 在沙障中间栽植梭梭幼苗 (*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge), 使得沙丘相对稳定, 仅在沙丘顶部有部分风沙流动。此外, 在沙丘中下部还生长一些天然分布的沙拐枣属灌木 (*Calligonum* spp.)。流动沙丘区也有少量的沙拐枣属灌木, 主要分布在沙丘的中下部。人工和天然固沙植被区春季均无草本生长, 秋季降雨后沙丘上有大量沙米 (*Agriophyllum squarrosum*) 生长, 丘间低地可见雾冰藜 (*Bassia dasyphylla*)、盐生草 (*Halogeton glomeratus*)、砂蓝刺头 (*Echinops gmelini*) 和沙芥 (*Pugionium cornutum*) 等。

每种生境类型选择 4 个地点, 每个地点相距 50—100 m, 每个地点选择 1 个相对独立沙丘, 沿着沙丘走向在顶部、中部和底部采集地表节肢动物样品。地表节肢动物样品利用陷阱法收集, 沙丘顶部、中部和底部设置 3 个样品采集样线, 每条样线布设 10 个陷阱收集器, 每个陷阱收集器之间的间距大于 10 m ^[23]。2020 年选择降雨稀少的 5 月中旬和降雨较多的 8 月下旬调查地表节肢动物, 每次样品的采集时间为 3 天。之后将地表节肢动物样品带回室内, 参照相关分类资料鉴定至种或形态种, 然后统计个体数^[24–28]。地表节肢动物依据取食类型划分为捕食性、植食性和其它食性节肢动物^[24–26]。

1.3 数据处理

本研究主要研究不同固沙措施对地表节肢动物分布及多样性的影响, 故先将 5 月和 8 月在生物、物理沙障和流动沙丘区的沙丘不同部位采集的地表节肢动物样品合并, 利用 PAST 4.01 软件包绘制不同生境类型地表节肢动物物种丰富度的稀度曲线和物种累积曲线 (观测值, 基于采样数量)。然后, 将沙丘不同部位 10 个陷阱收集器收集的样品进行合并计算活动密度 (每个收集器捕获节肢动物的头数)、物种丰富度 (每个微生境捕获节肢动物的物种数) 和多样性指数 (Shannon-Wiener index)。统计捕食性、植食性和其它食性节肢动物类群活动密度和物种丰富度。

利用非度量多维尺度 (Non-metric multidimensional scaling, NMDS) 和多元方差 (Permutational multivariate analysis of variance, PERMANOVA) 分析 3 种生境类型和 3 种微生境间地表节肢动物群落差异, 然后利用相似性百分比 (Similarity percentage analysis, SIMPER) 分析确定生物、物理沙障和流动沙丘区不同部位地表节肢动物群落的平均相异性和主要节肢动物种的贡献率, 统计分析使用 PAST 4.01 软件包。利用二因素方差分析比较 3 种生境类型 (生物、物理沙障和流动沙丘) 和 3 种微生境类型 (沙丘顶部、中部和底部) 地表节肢动物群落及不同营养类群活动密度和物种丰富度及主要种活动密度的差异, 然后使用单因素方差分析比较 3 种生境不同微生境地表节肢动物群落及不同营养类群活动密度和物种丰富度及主要类群活动密度的差异, 统计分析使用 SPSS 21.0 软件包。

2 结果与分析

2.1 不同生境地表节肢动物群落组成及数量变化

生物、物理沙障和流动沙丘区沙丘顶部、中部和下部共采集 4722 头和 33 种节肢动物, 它们分属于蛛形纲和昆虫纲。鞘翅目和蚁科是主要的昆虫纲动物, 鞘翅目占节肢动物捕获总数的 90.9% 和物种数的 57.6%, 蚁

科占节肢动物捕获总数的 6.5% 和物种数的 12.1%。生物和物理沙障区采集的地表节肢动物数量 (1911 和 1411 头) 和物种数 (28 和 28 种) 高于流动沙丘区 (1320 头和 22 种)。生物和物理沙障区栽植梭梭影响了地表节肢动物群落组成, 不同采样区地表节肢动物群落组成不同。生物沙障区东鳖甲 sp. (51.7%)、谢氏宽漠王 (25.5%)、尖尾东鳖甲 (14.2%)、白刺收获蚁 (4.0%)、戈壁琵琶甲 (2.0%)、平腹蛛科 sp. (1.3%) 和克氏扁漠甲 (1.2%) 是主要的节肢动物类群; 物理沙障区东鳖甲 sp. (34.2%)、谢氏宽漠王 (28.6%)、尖尾东鳖甲 (21.3%)、戈壁琵琶甲 (3.6%)、白刺收获蚁 (2.7%)、淡色箭蚁 (1.9%)、毛衣鱼科 sp. (1.7%) 和平腹蛛科 sp. (1.1%) 是主要的节肢动物类群; 流动沙丘区尖尾东鳖甲 (相对多度为 43.7%)、谢氏宽漠王 (30.5%)、东鳖甲 sp. (9.0%)、白刺收获蚁 (8.9%)、戈壁琵琶甲 (1.1%) 和蜚金龟科 sp.1 (1.3%) 是主要的节肢动物类群。

2.2 不同生境地表节肢动物群落结构和相似性比较

地表节肢动物类群丰富度的累积和稀疏度估计曲线分析的结果表明, 3 条曲线均接近水平, 生物、物理沙障和流动沙丘区地表节肢动物采样代表性较好。3 种生境地表节肢动物物种丰富度累积曲线表明, 生物和物理沙障区地表节肢动物物种丰富度高于流动沙丘区 (图 1); 其稀度估算结果表明, 生物和物理沙障区地表节肢动物物种丰富度均高于流动沙丘区, 物理沙障区地表节肢动物物种丰富度又略高于生物沙障区 (图 1)。

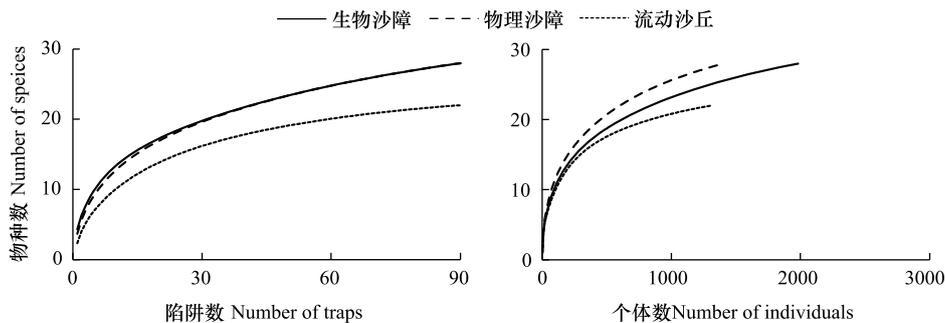


图 1 生物、物理沙障和流动沙丘区地表节肢动物物种丰富度的累积曲线和稀度估计曲线

Fig.1 Observed and estimated species richness of ground arthropods based on species accumulation curves and rarefaction methods in the biological sand barrier, physical sand barrier, and active sandy dune regions

BSB: 生物沙障 biological sand barrier; PSB: 物理沙障 physical sand barrier; ASD: 流动沙丘 active sandy dune

生境类型 (生物、物理沙障和流动沙丘区) 及微生境 (顶部、中部和下部) 二因素 PERMANOVA 分析结果表明, 生境类型和沙丘部位及二者交互均对地表节肢动物群落组成有显著影响 ($P < 0.05$), 流动沙丘区沙丘顶部地表节肢动物群落组成与中、下部位明显不同, 而生物和物理沙障区沙丘顶部地表节肢动物群落组成与中、下部位差异减小 (图 2)。

SIMPER 分析结果表明, 生物和物理沙障区地表节肢动物群落的平均相异性 (44.2%) 低于它们与流动沙丘区地表节肢动物群落的平均相异性 (72.3% 和 70.1%), 东鳖甲 sp.、尖尾东鳖甲和谢氏宽漠王贡献了 3 种生境地表节肢动物群落平均相异性的 34.6%、55.6% 和 59.9%。生物沙障区沙丘上、中、下部地表节肢动物群落平均相异性相差较小 (32.5%、47.3% 和 45.3%), 东鳖甲 sp.、尖尾东鳖甲和谢氏宽漠王解释了 3 种微生境之间地表节肢动物群落平均相异性的 28.8%、37.1% 和 34.1%; 物理沙障区沙丘中、下部地表节肢动物群落平均相异性 (32.6%) 低于它们与沙丘顶部地表节肢动物群落平均相异性 (51.4% 和 60.9%), 东鳖甲 sp.、尖尾东鳖甲和谢氏宽漠王解释了 3 种微生境之间地表节肢动物群落平均相异性的 14.9%、43.5% 和 50.5%; 流动沙丘区沙丘中、下部地表节肢动物群落平均相异性 (50.1%) 低于沙丘上部与中、下部之间地表节肢动物群落的平均相异性 (99.7% 和 99.6%), 东鳖甲 sp.、尖尾东鳖甲、谢氏宽漠王和白刺收获蚁贡献了 3 种微生境地表节肢动物群落平均相异性的 44.9%、91.2% 和 83.0%。

生境类型及微生境二因素方差分析结果表明, 生境类型和微生境对地表节肢动物活动密度、物种丰富度和多样性指数均有显著影响, 二者对 3 个群落结构参数有显著的交互影响 (表 1)。生物沙障区地表节肢动物

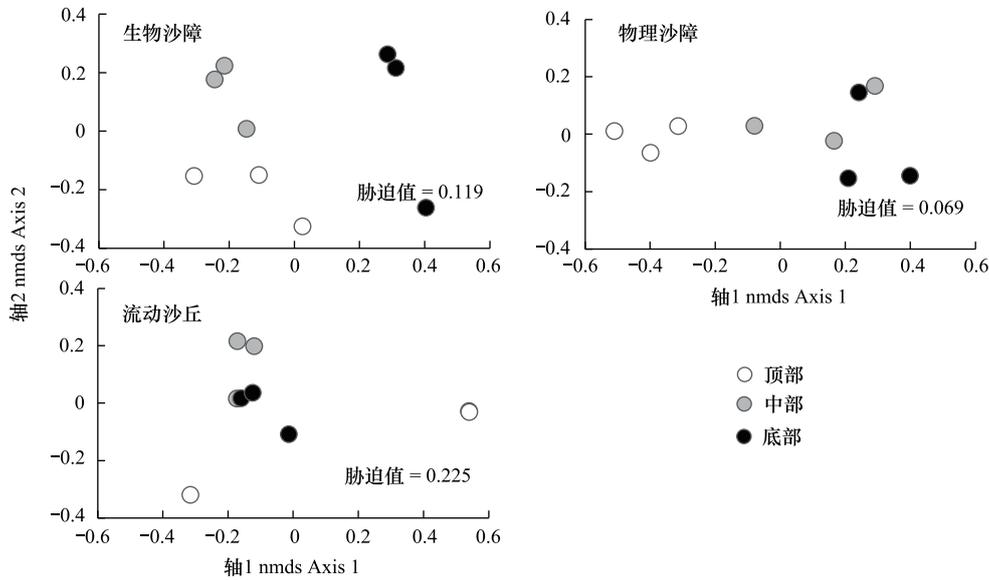


图2 生物、物理沙障和流动沙丘区不同部位地表节肢动物 NMDS 排序图

Fig.2 NMDS plots indicating 2-dimensional distances of ground arthropods at up, middle, and bottom of the biological sand barrier, physical sand barrier, and active sandy dune regions

NMDS: 非度量多维尺度 Non-metric multidimensional scaling

活动密度显著高于物理沙障区,而物理沙障区地表节肢动物活动密度又显著高于流动沙丘区;生物和物理沙障区从沙丘顶部到底部地表节肢动物活动密度呈降低的趋势,而流动沙丘区沙丘不同部位地表节肢动物活动密度变化趋势相反(图3)。生物和物理沙障区地表节肢动物物种丰富度和多样性指数均显著高于流动沙丘区。生物和物理沙障区沙丘不同部位地表节肢动物物种丰富度相差较小,而流动沙丘区地表节肢动物物种丰富度从坡顶到坡底依次增加;生物沙障区沙丘底部地表节肢动物多样性指数显著高于坡中,流动沙丘区地表节肢动物多样性指数从沙丘顶部到底部依次增加(图3)。

2.3 不同生境地表节肢动物群落营养结构比较

生物、物理沙障和流动沙丘区不同部位捕食性、植食性和其它食性节肢动物活动密度和物种丰富度变化不同。草方格沙障区捕食性节肢动物活动密度及物种丰富度均显著高于流动沙丘区(表1),生物和物理沙障区沙丘不同部位捕食性节肢动物活动密度及物种丰富度相差较小,流动沙丘区沙丘顶部捕食性节肢动物活动密度及物种丰富度显著低于沙丘中、底部(图4)。植食性节肢动物对固沙措施和微地形变化响应与捕食性不同,生物沙障区植食性节肢动物物种丰富度显著高于流动沙丘区,物理沙障区植食性节肢动物活动密度及物种丰富度均从沙丘顶部到底部依次降低,而它们在流动沙丘区的变化趋势相反(表1、图4)。生物和物理沙障区其它食性节肢动物活动密度及物种丰富度均显著高于流动沙丘区,生物沙障区其它食性节肢动物活动密度又显著高于物理沙障区(表1)。生物和物理沙障区沙丘顶部其它食性节肢动物活动密度显著高于沙丘底部,流动沙丘区沙丘中和底部其它食性节肢动物活动密度及物种丰富度均显著高于沙丘顶部(图4)。

2.4 不同生境主要地表节肢动物种活动密度比较

生物、物理沙障和流动沙丘区不同部位主要节肢动物种活动密度变化不同,3种生境尖尾东螯甲、谢氏宽漠王和白刺收获蚁活动密度相差较小,生物、物理沙障区东螯甲 sp.活动密度显著高于流动沙丘区,生物沙障区东螯甲 sp.活动密度又显著高于物理沙障区(表1、图5)。生物和物理沙障区沙丘顶部尖尾东螯甲和谢氏宽漠王的活动密度较高,其中尖尾东螯甲在物理沙障区和谢氏宽漠王在两种沙障区沙丘顶部活动密度均显著高于沙丘中部和底部(图5)。东螯甲 sp.和白刺收获蚁与尖尾东螯甲和谢氏宽漠王变化不同,东螯甲 sp.在流动沙丘区和白刺收获蚁在生物沙障区沙丘底部的活动密度显著高于中部和上部(图5)。

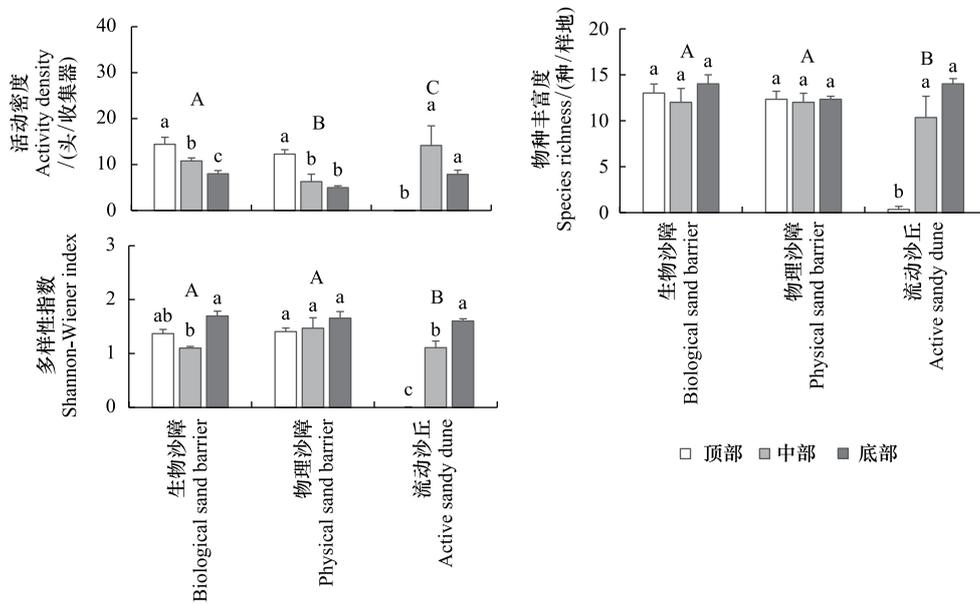


图 3 生物、物理沙障和流动沙丘区沙丘不同部位地表节肢动物活动密度、物种丰富度和多样性比较

Fig.3 The activity density, species richness and Shannon-Wiener index at up, meddle, and bottom of the biological sand barrier, physical sand barrier, and active sandy dune regions

不同小写字母表示同一沙丘不同部位之间存在显著差异性 ($P < 0.05$); 不同大写字母代表不同处理沙丘之间存在显著差异性 ($P < 0.05$)

表 1 生物、物理沙障和流动沙丘区沙丘不同部位地表节肢动物群落结构及营养结构的二因素方差分析

Table 1 The results of two-way ANOVAS on community structure and trophic groups of ground arthropods at up, meddle, and bottom of the biological sand barrier, physical sand barrier, and active sandy dune regions

	生境 Habitats	微生境 Microhabitats	生境 × 微生境 Habitats × Microhabitats
群落 Community			
活动密度 Activity density	22.95 ***	9.70 ***	39.54 ***
物种丰富度 Species richness	44.71 ***	40.00 ***	39.36 ***
多样性指数 Shannon-Wiener index	59.48 ***	63.65 ***	41.13 ***
营养结构 Trophic function groups			
捕食性节肢动物 Predatory arthropods			
活动密度 Activity density	5.21 *	6.81 **	0.71 n.s.
物种丰富度 Species richness	3.79 *	6.74 **	2.52 n.s.
植食性节肢动物 Phytophagous arthropods			
活动密度 Activity density	2.21 n.s.	0.06 n.s.	3.15 *
物种丰富度 Species richness	3.66 *	0.47 n.s.	6.11 **
其它食性节肢动物 Other arthropods			
活动密度 Activity density	20.60 ***	8.68 **	37.64 ***
物种丰富度 Species richness	22.92 ***	28.85 ***	21.82 ***
4 个主要节肢动物种 Four key arthropod species			
尖尾东鳖甲 <i>Anatolica mucronata</i>	2.41 n.s.	1.33 n.s.	18.02 ***
东鳖甲 <i>Anatolica</i> sp.	61.91 ***	1.78 n.s.	6.28 **
谢氏宽漠王 <i>Mantichoru lasemenowi</i>	1.61 n.s.	2.80 n.s.	10.24 ***
白刺收获蚁 <i>Messor desertora</i>	0.29 n.s.	1.76 n.s.	1.85 n.s.

*** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, n.s. 不显著

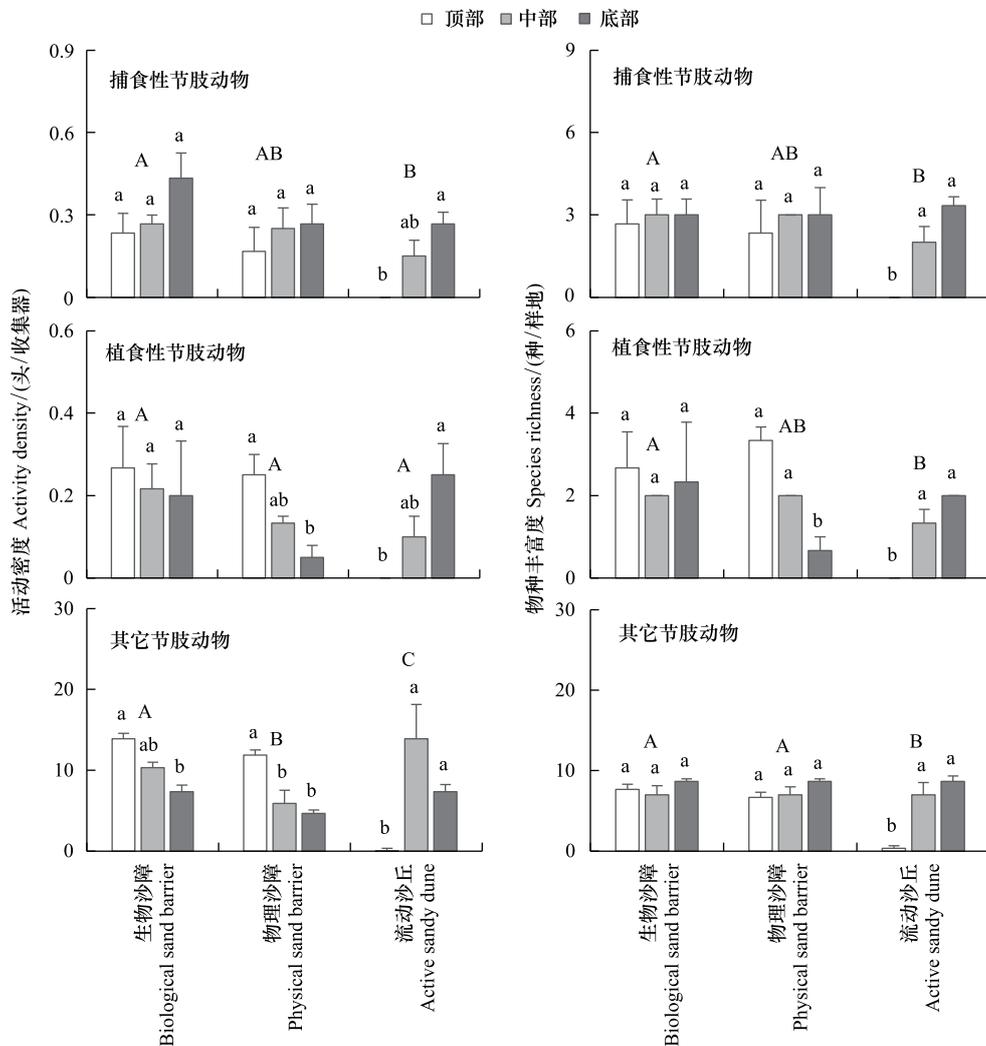


图4 生物、物理沙障和流动沙丘区沙丘不同部位捕食性、植食性和其它食性地表节肢动物活动密度和物种丰富度比较

Fig.4 The activity density, species richness of predatory, phytophagous, and other arthropods at up, middle, and bottom of the biological sand barrier, physical sand barrier, and active sandy dune regions

3 讨论

生物和物理沙障营建快速改变了沙丘表层土壤物理结构、增加土壤硬度和降低土壤砂砾含量,而栽植梭梭增加植被盖度,提高了植物和凋落物等节肢动物食物资源的数量及质量。相关研究表明,在流动沙丘区设置纱网沙障,其防风效能较好,使得地表粗糙度增加,近地表的风速相对下降^[29],且细粒沙物质堆积使得植物种子被埋存起来,为地表节肢动物提供充足的食物和适宜的栖息地^[30],提高节肢动物的数量和多样性。不同材料沙障防护效益明显,其可以改变气流的紊动特性,减弱风沙流^[31]。李晓佳等^[32]通过研究腾格里沙漠地区四种沙障材料,得出沙障可以改变土壤性质,对土壤质量的恢复也起到积极的作用;机械沙障可以促进土壤的改良,通过改变下垫面结构和性质而达到固沙的效果,对局地小气候产生一定的影响^[33],这些均与成聪聪^[34]的研究结论相似,他通过研究布袋沙障对流动沙丘区植被恢复的影响,发现了土壤理化性状会随着沙障的设置而日益改善。屈建军等^[35]研究得出新型固沙材料的防风固沙效果较好,其使得沙丘底部的植物的成活率最高,其次为顶部,中部的成活率最低。这些都与之前在临泽县中部沙带研究有一定的相似性,沙障防风固沙能力强,可以阻止沙丘移动,改变地表生态水文过程,促进植被恢复,对地表节肢动物的分布及多样性产

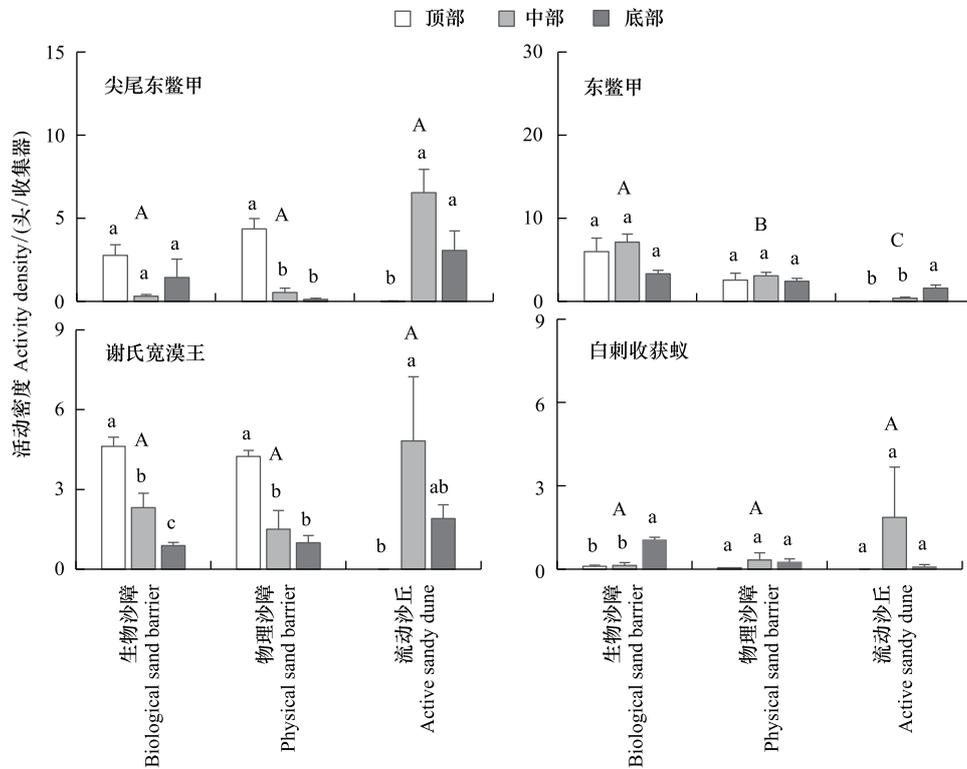


图5 生物、物理沙障和流动沙丘区沙丘不同部位4个主要地表节肢物种活动密度比较

Fig.5 The activity density of four key arthropod species at up, middle, and bottom of the biological sand barrier, physical sand barrier, and active sandy dune regions

生影响。

研究发现,生物和物理沙障区地表节肢动物活动密度、物种丰富度及多样性指数均显著高于流动沙丘区,说明生物和物理沙障恢复植被,增加了资源上行效应,提升了地表节肢动物的数量及多样性^[36]。人工固沙植被恢复可以提升地表节肢动物多样性,而生物和物理沙障加快了人工固沙植被和土壤环境的恢复进程,改变了地表节肢动物群落营养结构,提高了捕食性、植食性和其它食性节肢动物的数量或多样性,这与人工固沙植被恢复过程中地表节肢动物群落结构变化略有不同。人工固沙植被恢复提升捕食性和杂食性动物的数量及多样性,而一些腐食性和植食性类群活动密度大幅降低甚至消失^[22],天然固沙植被区一些典型的沙丘区活动的拟步甲昆虫种(尖尾东鳖甲和谢氏宽漠王)活动密度也随着沙化程度的增加而增加^[9]。此外,研究还发现生物和物理沙障改变了沙丘微地形对地表节肢动物分布的影响。流动沙丘区从沙丘底部到顶部地表节肢动物的数量、物种丰富度及多样性依次降低,而生物和物理沙障区的变化趋势与之相反,这可能与沙丘表面土壤物理环境的改变有关。生物和物理沙障改变沙丘中下部表面土壤物理结构,抑制了在流动沙丘栖居的尖尾东鳖甲和谢氏宽漠王等甲虫种的活动,而其它甲虫等节肢动物种的活动频率随之增加;而沙丘上部受风沙影响大,沙障营建对土壤影响相对较小,这些流动沙丘活动的甲虫种趋于在沙丘顶部活动,从而改变了沙丘微地形变化对甲虫等节肢动物分布的影响^[37-38]。不同地表节肢动物种对沙障恢复植被的响应模式不同,生物和物理沙障显著提高了东鳖甲属1种的活动密度,而东鳖甲属1种在沙丘不同部位活动密度的差异较小;生物和物理沙障对谢氏宽漠王、尖尾东鳖甲和白刺收获蚁的活动密度的影响较小,在其沙丘顶部谢氏宽漠王和尖尾东鳖甲的活动密度大幅增加,这与流动沙丘区二种甲虫活动密度分布规律不同。沙丘顶部、中部和底部土壤硬度、机械组成和草本盖度及组成不同,它强烈影响谢氏宽漠王等昆虫种在流动沙丘栖居和繁殖,生物和物理沙障改变了土壤硬度及机械组成从而导致谢氏宽漠王和尖尾东鳖甲等甲虫种在沙丘顶部活动^[39]。此外,研

究还发现沙障加快了沙丘固化过程,从而导致地表节肢动物群落结构转变。沙障区一些偏好流动沙丘生境的谢氏宽漠王和东鳖甲属甲虫活动密度因土壤物理结构(如硬度和机械组成)的转变而降低并趋于向沙丘顶部活动,而一些偏好固定和半固定沙丘生境的东鳖甲属甲虫的活动密度则大幅增加,改变地表节肢动物的聚集结构^[37-41]。

生物和物理沙障固沙材料不同,它对土壤水分、理化性质和植被有一定影响,沙障会促进植被的恢复^[42],也会影响地表节肢动物的分布及多样性^[13-14,43]。生物和物理沙障区地表节肢动物群落的平均相异性为44.2%,东鳖甲属1种、谢氏宽漠王和尖尾东鳖甲解释了2种生境地表节肢动物群落差异的34.6%。相比于物理沙障,生物沙障的地形适应性更强,防护效益也会更好^[44],生物沙障地表节肢动物活动密度也显著高于物理沙障,而生物和物理沙障间地表节肢动物物种丰富度和多样性相差均较小。生物沙障区的其它食性节肢动物活动密度显著高于物理沙障区,而两种沙障区捕食性和植食性节肢动物活动密度及物种丰富度相差较小。腐食性和杂食性节肢动物既受土壤环境变化影响,也受食物资源数量和质量变化的影响,当天然草地转变成人工林和农田后,土壤环境发生改变,捕食性和植食性类群明显增加,而腐食性和杂食性的比例相对减少^[45],麦草方格组成的生物沙障与物理沙障相比丰富了捕食性、植食性以外其它食性节肢动物的食物资源。生物沙障区东鳖甲属1种昆虫活动密度显著高于物理沙障区,生物沙障区谢氏宽漠王和白刺收获蚁活动密度均高于物理沙障区,这些昆虫种活动密度变化可能与食物资源变化有关。生物和物理沙障区沙丘不同部位地表节肢动物活动密度变化趋势相近,但不同节肢动物种变化略有不同。物理沙障区沙丘顶部尖尾东鳖甲活动密度显著高于沙丘中下部位,而生物沙障区沙丘3个部位尖尾东鳖甲活动密度相差较小;生物沙障区沙丘底部白刺收获蚁活动密度显著高于沙丘其它部位,而物理沙障区沙丘3个部位白刺收获蚁活动密度相差较小。

4 结论

沙障营建会强烈影响流动沙丘地表节肢动物的分布及多样性,生物和物理沙障区捕获的地表节肢动物活动密度、物种丰富度及多样性均高于流动沙丘区。生物和物理沙障增加植被盖度和富集植物碎屑等,通过资源上行效应提升了蜘蛛等捕食性与拟步甲科等腐食性或杂食性地表节肢动物的活动密度及物种多样性,从而改变了地表节肢动物群落营养结构。沙障还改变沙丘不同部位地表节肢动物的分布格局,生物和物理沙障区从坡底到坡顶地表节肢动物的活动密度、物种丰富度及物种多样性均呈增加的趋势,而流动沙丘区地表节肢动物主要分布在沙丘的中下部,谢氏宽漠王、尖尾东鳖甲、东鳖甲和白刺收获蚁等节肢动物对沙障及地形部位变化的响应模式不同决定了3种生境地表节肢动物聚集结构。此外,研究还发现两种沙障间地表节肢动物组成略有不同,生物沙障区地表节肢动物活动密度显著高于物理沙障区,蜘蛛等捕食性和东鳖甲属等其它食性节肢动物的活动密度在生物沙障区高于物理沙障区,而植食性节肢动物对沙障营建的短期响应不敏感。由此可见,地表节肢动物对沙障营建及沙障类型的响应较敏感,它可以用于反映及评估沙障对区域生物多样性及其生态功能的影响。

参考文献 (References):

- [1] Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, Turner II B L, Mortimore M, Batterbury S P J, Downing T E, Dowlatabadi H, Fernández R J, Herrick J E, Huber-Sannwald E, Jiang H, Leemans R, Lynam T, Maestre F T, Ayarza M, Walker B. Global desertification: building a science for dryland development. *Science*, 2007, 316(5826): 847-851.
- [2] Wang X M, Chen F H, Hasi E, Li J C. Desertification in China: an assessment. *Earth-Science Reviews*, 2008, 88(3/4): 188-206.
- [3] D'Odorico P, Bhattachan A, Davis K F, Ravi S, Runyan C W. Global desertification: drivers and feedbacks. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 326-344.
- [4] Cheng L L, Lu Q, Wu B, Yin C B, Bao Y S, Gong L Y. Estimation of the costs of desertification in China: a critical review. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(4): 975-983.
- [5] 屈建军, 凌裕泉, 刘宝军, 陈广庭, 王涛, 董治宝. 我国风沙防治工程研究现状及发展趋势. *地球科学进展*, 2019, 34(3): 225-231.
- [6] 徐先英, 赵鹏, 唐进年, 纪永福, 马新兵. 我国治沙机械研发现状与展望. *木材加工机械*, 2020, 1(2): 21-25.
- [7] 顿耀权, 屈建军, 康文岩, 王涛. 包兰铁路沙坡头段防护体系研究综述. *中国沙漠*, 2021, 41(3): 66-74.

- [8] 黄磊, 张余, 何明珠, 安志山. 腾格里沙漠东南缘风沙环境及其对交通干线生态防护体系的影响. 水土保持通报, 2018, 38(2): 135-139, 147-147.
- [9] 刘继亮, 巴义彬, 牛瑞雪, 李锋瑞, 赵文智. 河西走廊天然固沙植被区地表甲虫多样性及其对沙漠化的指示作用. 生态学报, 2021, 41(13): 5435-5445.
- [10] 李飞鹏. 风沙突害对铁路运输的影响及机械沙障防护效应研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- [11] Li X J, Zhou R P, Jiang H T, Zhou D D, Zhang X W, Xie Y H, Gao W B, Shi J, Wang Y H, Wang J, Dong R, Byambaa G, Wang J, Wu Z B, Hai C X. Quantitative analysis of how different checkerboard sand barrier materials influence soil properties: a study from the eastern edge of the Tengger Desert, China. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(13): 481.
- [12] Zhao Y, Wang J. Mechanical sand fixing is more beneficial than chemical sand fixing for artificial cyanobacteria crust colonization and development in a sand desert. Applied Soil Ecology, 2019, 140: 115-120.
- [13] 王逸敏, 刘康, 屈建军. 沙障对流动沙地植被和土壤养分的影响. 中国沙漠, 2019, 39(3): 56-65.
- [14] 李敏岚, 屈建军, 唐希明, 顿耀权, 陈晓莹, 吴婷, 宋乃平. 高密度聚乙烯(HDPE)蜂巢式沙障对土壤水分的影响. 中国沙漠, 2020, 40(1): 136-144.
- [15] Xie Y H, Dang X H, Zhou Y J, Hou Z H, Li X J, Jiang H T, Zhou D D, Wang J, Hai C X, Zhou R P. Using sediment grain size characteristics to assess effectiveness of mechanical sand barriers in reducing erosion. Scientific Reports, 2020, 10(1): 14009.
- [16] Polis G A. Complex trophic interactions in deserts: an empirical critique of food-web theory. The American Naturalist, 1991, 138(1): 123-155.
- [17] Whitford W G. The importance of the biodiversity of soil biota in arid ecosystems. Biodiversity & Conservation, 1996, 5(2): 185-195.
- [18] Rundel P, Gibson A. Arthropods//Rundel P W, Gibson A C, eds. Ecological Communities and Processes in a Mojave Desert Ecosystem. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 214-255.
- [19] Shachak M, Gosz J R, Pickett S T A, Perevolotsky A. Biodiversity in Drylands: Toward a Unified Framework (Long-Term Ecological Research Network Series). New York: Oxford University Press, 2005.
- [20] Cloudsley-Thompson J L. Ecophysiology of Desert Arthropods and Reptiles. Berlin: Springer, 1991.
- [21] Punzo F. Desert Arthropods: Life History Variations. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000.
- [22] 刘继亮, 赵文智, 李锋瑞, 巴义彬. 天然和人工固沙灌木林蜘蛛和甲虫分布与环境因子的关系. 生态学报, 2020, 40(21): 7987-7996.
- [23] 刘继亮, 李锋瑞, 刘七军, 牛瑞雪. 黑河流域荒漠生态系统地面土壤动物群落的组成与多样性. 中国沙漠, 2010, 30(2): 342-349.
- [24] 郑乐怡, 归鸿. 昆虫分类. 南京: 南京师范大学出版社, 1999.
- [25] Song D X, Zhu M S, Chen J. The Spiders of China. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press, 1999.
- [26] 任国栋, 于有志. 中国荒漠半荒漠的拟步甲科昆虫. 保定: 河北大学出版社, 1999.
- [27] 任国栋, 巴义彬. 中国土壤拟步甲志(第二卷) 鳖甲类. 北京: 科学出版社, 2010.
- [28] 任国栋. 中国动物志: 昆虫纲 第六十三卷 鞘翅目 拟步甲科(一). 北京: 科学出版社, 2016.
- [29] 闫德仁, 袁立敏, 黄海广, 胡小龙, 杨制国. 乌兰布和沙漠流动沙丘沙网沙障防风效能研究. 水土保持研究, 2021, 28(2): 198-202.
- [30] 李生宇, 雷加强. 草方格沙障的生态恢复作用——以古尔班通古特沙漠油田公路扰动带为例. 干旱区研究, 2003, 20(1): 7-10.
- [31] 张克存, 屈建军, 俎瑞平, 方海燕. 不同结构的尼龙网和塑料网防沙效应研究. 中国沙漠, 2005, 25(4): 483-487.
- [32] 李晓佳, 姜洪涛, 周瑞平, 武志博, 海春兴. 腾格里沙漠东缘沙障布设方式对土壤理化性质的影响. 水土保持研究, 2020, 27(5): 50-58.
- [33] 李红悦, 哈斯额尔敦. 机械沙障固沙效应及生态效应的研究综述. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2020, 56(1): 63-67.
- [34] 成聪聪. 布袋沙障对流动沙丘植被恢复及土壤性质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2014.
- [35] 屈建军, 洪贤良, 李芳, 冯筱, 孟一江, 丁伊央, 杨明全. 聚乳酸(PLA)网格沙障耐老化性能及防沙效果. 中国沙漠, 2021, 41(2): 51-58.
- [36] 李新荣, 肖洪浪, 刘立超, 张景光, 王新平. 腾格里沙漠沙坡头地区固沙植被对生物多样性恢复的长期影响. 中国沙漠, 2005, 25(2): 173-181.
- [37] 吕昭智, 钟晓英, 苏延乐, 梁红斌. 中华漠王 *Platyope proctoleuca chinensis*(鞘翅目: 拟步甲科)对微生境的选择. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2199-2203.
- [38] 刘继亮, 赵文智, 李锋瑞, 方静. 微地形变化对沙质荒漠拟步甲科昆虫分布的影响. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1388-1394.
- [39] 刘继亮, 赵文智, 李锋瑞, 潘成臣. 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. 生态学报, 2018, 38(4): 1357-1365.
- [40] 张大治, 陈曦, 贺达汉. 荒漠景观拟步甲科昆虫多样性及其对生境的指示作用. 应用昆虫学报, 2012, 49(1): 229-235.
- [41] 徐养诚, 娄巧哲, 马吉宏, 吕昭智. 古尔班通古特沙漠南缘拟步甲的物种多样性. 干旱区研究, 2013, 30(4): 674-680.
- [42] 袁立敏, 高永, 李谦, 党晓宏, 王春颖, 张延旭. 沙袋沙障对沙丘植被特征的影响. 水土保持通报, 2011, 31(5): 80-84, 195-195.
- [43] 党晓宏, 高永, 虞毅, 李谦, 王珊, 吴昊, 王红霞, 赵鹏宇. 新型生物可降解 PLA 沙障与传统草方格沙障防风效益. 北京林业大学学报, 2015, 37(3): 118-125.
- [44] 马学喜, 王海峰, 李生宇, 康向光, 孙娜. 两种固沙方格沙障的防护效益及地形适应性对比. 水土保持通报, 2015, 35(3): 344-349.
- [45] 李锋瑞, 刘继亮, 化伟, 牛瑞雪, 刘七军, 刘长安. 地面节肢动物营养类群对土地覆被变化和管理扰动的响应. 生态学报, 2011, 31(15): 4169-4181.