

DOI: 10.5846/stxb202006241644

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.

Liu J L, Ba Y B, Niu R X, Li F R, Zhao W Z. Ground beetle diversity and their value as bioindicators for desertification in a natural desert of the middle of the Hexi Corridor, Northwest China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5435-5445.

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

刘继亮¹, 巴义彬², 牛瑞雪³, 李锋瑞¹, 赵文智^{1,*}

1 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, 兰州 730000

2 河北大学博物馆, 保定 071002

3 兰州文理学院, 兰州 730000

摘要: 干旱、半干旱区沙漠化强烈影响动植物分布及多样性, 地表甲虫是荒漠中主要的动物类群, 它们对沙漠化引起的植被和土壤环境变化响应十分敏感。鉴于此, 以河西走廊中部张掖绿洲外围的天然固沙植被区作为研究区, 依据沙漠化发育程度选择流动沙丘(ASD)、丘间低地(IL)、半固定(SFSD)和固定沙丘(FSD)4种生境, 调查了地表甲虫群落组成及影响甲虫分布的植被和土壤环境。研究发现, 4种生境地表甲虫群落组成明显不同并存在季节变异, 5月ASD与IL、SFSD和FSD生境地表甲虫群落的相异性大于8月。5月和8月SFSD生境地表甲虫活动密度均显著高于其他生境, 8月FSD生境地表甲虫多样性指数显著高于其他生境。不同大小甲虫对沙漠化的响应模式不同, 大中型甲虫对沙漠化的响应较小型甲虫敏感, 这在5月表现尤为明显。地表甲虫与环境因子的RDA分析结果表明, 12个植被和土壤环境因子解释了49.8%的地表甲虫群落变异, 其中植被环境解释了甲虫群落变异的16.3%, 土壤环境解释了甲虫群落变异的4.2%, 植被和土壤环境相互作用解释了甲虫群落变异的29.3%。pRDA分析结果表明, 草本物种丰富度、灌木盖度、土壤有机碳含量和粗砂含量是影响地表甲虫分布的主要环境因子, 它们解释了43.7%的地表甲虫群落变异。Pearson相关分析表明, 草本物种丰富度与地表甲虫活动密度呈显著正相关, 而与地表甲虫均匀度呈显著负相关; 灌木盖度与地表甲虫多样性呈显著正相关; 地表甲虫物种丰富度与灌木盖度和草本物种丰富度均呈显著正相关。此外, 研究还发现戈壁琵甲、克氏扁漠甲、中华硯甲和甘肃齿足象可以用于指示FSD生境, 东鳖甲属昆虫可以用于指数SFSD生境, 谢氏宽漠王可以用于指示IL及ASD生境。

关键词: 河西走廊; 天然固沙植被; 沙漠化; 地表甲虫多样性; 指示种

Ground beetle diversity and their value as bioindicators for desertification in a natural desert of the middle of the Hexi Corridor, Northwest China

LIU Jiliang¹, BA Yibin², NIU Ruixue³, LI Fengrui¹, ZHAO Wenzhi^{1,*}

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

2 Museum of Hebei University, Baoding 071002, China

3 Lanzhou University of Arts and Science, Lanzhou 730000, China

Abstract: Sandy desertification strongly affected the distribution and diversity of plant and animals in arid and semiarid areas. Ground beetles were mainly animals in the sand ecosystems, and very sensitive responses to vegetation and soil environmental change derived from sandy desertification. In this study, we select a natural desert adjacent to Zhangye oasis

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2019YFC0507402); 国家自然科学基金项目(41771290, 41773086, 31670527)

收稿日期: 2020-06-24; **网络出版日期:** 2021-04-28

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

of the middle of the Hexi Corridor as a research region. The active sand dunes (ASD), interdune lowlands (IL), semi-fixed sand dunes (SFSD) and fixed sand dunes (FSD) were conducted depending on the degree of desertification development. Ground beetles in four habitats collected by pitfall trapping, and environmental aspects related to the scattering of beetles were explored. We found that ground beetle communities were significant difference among the four habitats and seasonal variation on ground beetle assemblage. The average dissimilarity of beetle community among ASD, IL, SFSD and FSD habitats in May was greater than that in August. The activity density of ground beetles in SFSD habitats was significantly higher than that in other three habitats in May and August, and diversity of ground beetles in FSD habitats was significantly higher than that in other three habitats in August. The response patterns of ground beetles to desertification were different with body sizes. The large and medium beetles response to desertification was more sensitive than small beetles, especially in May. The results of redundancy analysis (RDA) show that twelve vegetation and soil factors contributed to 49.8% of the variation in the ground beetles. Moreover, we found that vegetation, soil and the interaction between them are explained 16.3%, 4.2% and 29.3% of the variation in the ground beetles, respectively. The results of pRDA show that herbaceous species richness, shrub cover, soil coarse sand, and soil organic carbon content were fundamental environmental factors affecting the distribution of ground beetles, which contributed to 43.7% of the variation in the ground beetles. The Pearson correlation analysis shows that herbaceous species richness were significantly positive correlations with the activity density of ground beetles, and an opposite pattern was observed on the evenness index; the shrub cover was significantly positive correlation with diversity index of ground beetles; species richness of ground beetles was significantly positive correlation with herbaceous species richness and shrub cover. In addition, a strong indication of ground beetles for habitat type was found. *Blaps gobiensis*, *Cyphogenia chinensis*, *Deracanthus potanini* and *Sternotricon kraatzi* were indicator taxa for FSD habitats. *Anatolica* spp. were indicator taxa for SFSD habitats. *Mantichorula semenowi* can be used as indicator taxa for IL and ASD habitats. In short, community structure and species identity of ground beetles in the sandy desert can be used as indicator species for sandy desertification derived from vegetation and soil degradation.

Key Words: the Hexi Corridor; natural desert; sandy desertification; ground beetle diversity; indicator species

荒漠化是干旱、半干旱区面临的主要生态问题之一,它与气候变化一起驱动生物多样性及其生态功能演变,威胁天然和人工绿洲的安全与稳定^[1-4]。近年来,植被恢复、禁牧等生态治理工程实施有效阻止了荒漠化的扩张,2014 年全国沙化土地面积与 2009 年相比减少了 9 902 km²^[5]。然而,随着人类活动增强,绿洲扩张强烈影响荒漠生物多样性,严重威胁绿洲生态安全,这在荒漠绿洲过渡带表现尤为明显^[6-8]。因而,急需开展地上和地下生物多样性对沙漠化响应和适应机制研究,为绿洲外围天然和人工固沙植被区生物多样性保护及维持机制研究提供科学依据。

地表甲虫是沙漠中主要的无脊椎动物类群,它们是联系植物和土壤之间的纽带,对鸟类等脊椎动物生存和繁殖有重要的意义^[9-10]。此外,地表甲虫还是沙漠碎屑食物网的关键组分,影响着凋落物分解和养分的循环过程^[11]。一些研究已经发现,人工植被恢复强烈影响地表甲虫等昆虫群落组成和结构,随着植被盖度的增加和土壤环境的改善,拟步甲科昆虫的多样性逐步降低,而步甲科昆虫的多样性随之增加^[12-16]。拟步甲科昆虫是沙漠中的主要甲虫类群,它对植被和土壤环境响应十分敏感,这可能与其生存和繁殖等对灌木和土壤环境的依赖有关^[17-19]。不同沙化阶段生境植被和土壤物理环境明显不同,它会引起地表甲虫多样性及其生态功能变化。鉴于此,我们在河西走廊中段张掖绿洲外围天然固沙植被区选取流动沙丘、丘间低地、半固定和固定沙丘 4 种生境,解析不同沙化阶段地表甲虫群落组成,确定植被和土壤环境变化对地表甲虫的影响及贡献率,评估它对沙漠化的指示作用,为该区沙漠化对土壤生物多样性及其功能影响研究提供依据。

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,冬季降雪稀少并存在明显年变化。多年平均降水量 117.0 mm,主要集中在 7、8、9 月,3 个月的降水量约占全年的 72%,但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 °C, ≥ 10 °C 年积温 3085 °C,无霜期 165 d。年均日照时数为 3045 h,太阳辐射总量为 611272.8 J cm⁻² 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 级以上大风年均 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

张掖绿洲外围荒漠绿洲过渡带位于甘肃省河西走廊中部黑河北岸,它是巴丹吉林沙漠西南边缘延伸出来深入走廊的流沙带(39.21°—39.23° N, 100.09—100.10° E),宽度几十公里。该条沙带的扩张会威胁张掖绿洲的安全和稳定,绿洲外围利用灌溉维持乔木林带和自然降雨维持的灌木林带能有效阻止流沙带扩张。然而,荒漠绿洲过渡区盲目的垦荒和放牧引起部分区域天然和人工灌木林退化、土壤沙化,绿洲边缘的天然固沙植被区是沙漠化监测的重点区域。从绿洲边缘到沙带内部流动沙丘(Active sand dunes, ASD)、流动沙丘之间的丘间低地(Interdune lowlands, IL)、半固定沙丘(Semi-fixed sand dunes, SFSD)和固定沙丘(Fixed sand dunes, FSD)依次分布。流动沙丘位于沙带内部,沙丘和丘间低地交错分布,沙丘走向和大小存在明显年季变化,这在春季表现尤为明显。降雨出现后在夏末和秋初沙丘上出现大量一年生草本植物沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*),它主要分布在沙丘迎风和背风坡。丘间低地位于沙丘之间,生长少量的沙拐枣属灌木,草本主要在秋季生长,以沙蓬(*A. squarrosum*)和雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)为主。固定和半固定沙丘靠近绿洲边缘,植被盖度较高,木本植物以泡泡刺和沙拐枣属灌木为主,草本以沙蓬(*A. squarrosum*)、雾冰藜(*B. dasyphylla*)、盐生草(*Halogeton arachnoideus*)和砂蓝刺头(*E. gmelini*)为主。半固定沙丘受放牧影响,植被盖度降低,泡泡刺(*N. sphaerocarpa*)和小果白刺(*N. sibirica*)沙堆均出现不同程度退化。

每种生境类型我们选择 4 个地点,每个地点相聚 100—200 m,每个地点选择 3 个沙丘或丘间低地。地表甲虫样品利用陷阱收法收集,陷阱沿着沙丘走向布设,每个沙丘或丘间低地设置 3 个地表甲虫样品采集区,每个样品采集区布设 5 个陷阱收集器,每个陷阱收集器之间的间距大于 10 m^[20]。2014 年选择降雨稀少的 5 月和降雨较多的 8 月下旬调查地表甲虫群落组成,每次甲虫样品的采集时间为 3 天。地表甲虫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^[18,21]。每个甲虫种或属选取 1—10 头标本测定体长,依据体长划分大(体长大于 15 mm)、中(体长介于 10—15 mm 之间)和小型甲虫(体长小于 10 mm),统计不同大小甲虫活动密度及物种丰富度^[22]。

2014 年 8 月采用样方法调查每种生境灌木密度、盖度、草本盖度和物种丰富度,每个动物样品采集区随机选取 1 个 10 m×10 m 和 5 个 1 m×1 m 的灌木和草本样方。利用硬度计测定土壤硬度,100 cm³ 环刀采集 0—20 cm 土壤测定容重并带回室内测定土壤理化性质。土壤机械组成利用干筛法测定,计算土壤粗砂(>2 mm)、细砂(0.05—0.25 mm)和粘粉粒(<0.05 mm)的比例,使用重铬酸钾氧化—分光光度法测定有机碳含量,半微量凯氏法测定全氮含量。植被和土壤环境特征见表 1。

1.3 数据处理

每个地表甲虫样品采样区 5 个陷阱收集器合并统计,计算 5 月和 8 月每种生境类型地表甲虫活动密度(每个陷阱地表甲虫的数量)、物种丰富度(每个样品采集区地表甲虫的物种数)、多样性(Shannon-Wiener index)和均匀度指数(Pielou index)。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 5 月和 8 月 4 种生境间地表昆虫群落差异,然后利用相似性百分比(Similarity percentage analysis, SIMPER)分析确定流动沙丘、丘间低地、半固

定沙丘和固定沙丘地表甲虫群落的平均相异性和主要甲虫种的贡献率,统计分析使用 PAST 4.01 软件包。利用二因素方差分析比较 2 个采样期 4 种生境类型地表甲虫群落及不同大小甲虫活动密度和物种丰富度的差异,然后使用单因素方差分析比较 5 月和 8 月 4 种生境类型地表甲虫群落及不同大小甲虫活动密度和物种丰富度的差异。4 种生境类型植被和土壤环境差异采用单因素方差分析比较,统计分析使用 SPSS 21.0 软件包。

表 1 流动沙丘、丘间低地、半固定沙丘和固定沙丘植被和土壤环境特征

Table 1 Vegetation and soil properties (Mean±SE) across active sand dunes (ASD), interdune lowlands (IL), semi-fixed sand dunes (SFSD) and fixed sand dunes (FSD)

环境变量 Environmental variables	流动沙丘 ASD	丘间低地 IL	半固定沙丘 SFSD	固定沙丘 FSD
灌木密度 Shrub density/(株/100m ²)	0±0c	3.17±0.91b	3.00±0.87b	4.67±1.35a
灌木物种丰富度 Shrub species richness	0±0c	1.00±0.29b	1.25±0.36b	1.92±0.55a
灌木盖度 Shrub cover/%	0±0c	2.33±0.67b	2.25±0.65b	18.42±5.32a
草本物种丰富度 Herbaceous species richness	0±0c	1.00±0.29b	1.83±0.53a	1.67±0.48a
草本盖度 Herbaceous cover/%	0±0d	2.00±0.58c	3.00±0.87b	4.33±1.25a
土壤容重 Soil bulk density/(g/cm ³)	1.62±0.47a	1.62±0.47a	1.61±0.46ab	1.58±0.46b
土壤粗砂含量 Coarse sand content/%	13.53±3.91b	13.33±3.85b	29.89±8.63a	32.68±9.43a
土壤细砂含量 Fine sand content/%	86.39±24.94a	86.49±24.97a	69.93±20.19b	66.94±19.32b
土壤粘粉粒含量 Silt and clay content/%	0.08±0.02b	0.19±0.05ab	0.18±0.05ab	0.38±0.11a
土壤硬度 Soil hardness/mm	3.08±0.89c	6.67±1.92b	7.11±2.05b	10.57±3.05a
土壤有机碳含量 Soil organic carbon/(g/kg)	1.27±0.37b	0.70±0.20c	0.71±0.21c	1.46±0.42a
土壤全氮含量 Total nitrogen/(g/kg)	0.06±0.02c	0.07±0.02bc	0.08±0.02ab	0.09±0.03a

字母不同表示不同生境间环境变量存在显著差异

采用冗余度(Redundancy analysis,RDA)分析植被与土壤生态环境因子对地表甲虫群落影响的贡献率。利用变量分割确定植被和土壤及二者交互对地表甲虫分布的影响及贡献率,使用逐步向前选择(Interactive-forward-selection)确定 9 个植被和土壤环境因子的相对贡献量,利用蒙特卡洛置换检验(Monte-Carlo permutation test 999)。排序分析使用地表甲虫个体数量的数据,分析前所有数据进行 log(x+1)转换,统计分析使用通用的排序软件 CANOCO 5.0。使用 Pearson 相关分析确定排序轴与环境因子和地表甲虫的关系与主要环境因子与地表甲虫群落及主要甲虫种的相关性,统计分析使用 SPSS 21.0 软件包。利用指示种分析(Indicator Species Analysis, ISA)确定每个地表甲虫的 IV(Indicator value, IV)值及显著程度,用来评估地表甲虫种对不同沙化程度生境的指示性,统计分析使用 PC-ORD 5.0 软件包。

2 结果与分析

2.1 流动沙丘、丘间低地、半固定沙丘和固定沙丘地表甲虫群落组成

ASD、IL、SFSD 和 FSD 4 种生境 2 个采样期一共收集地表甲虫 8900 头,它们分属 10 科 19 属或种。4 种生境地表甲虫群落组成略有不同,ASD 生境捕获地表甲虫 1388 头(12 种或属),东鳖甲属、谢氏宽漠王和戈壁琵甲是主要甲虫种,它们的数量占甲虫总捕获量的 98.2%。IL 生境捕获地表甲虫 1885 头(12 种或属),东鳖甲属、谢氏宽漠王和戈壁琵甲是主要甲虫种,它们的数量占甲虫总捕获量的 99.9%。SFSD 生境捕获地表甲虫 3840 头(13 种或属),东鳖甲属、谢氏宽漠王和克氏扁漠甲是主要甲虫种,它们的数量占甲虫总捕获量的 98.8%。FSD 生境捕获地表甲虫 1787 头(12 种或属),东鳖甲属、谢氏宽漠王、戈壁琵甲、克氏扁漠甲和甘肃齿足象是主要甲虫种,它们的数量占甲虫总捕获量的 98.2%。

2.2 流动沙丘、丘间低地、半固定沙丘和固定沙丘地表甲虫群落比较

5 月和 8 月地表甲虫群落的 NMDS 排序结果较好的反映了 4 种生境之间地表甲虫群落组成的相似性,2 个采样期 4 种生境地表甲虫群落组成均存在一定差异(图 1)。2 个采样期 4 种生境 PERMANOVA 分析结果表明,采样期、生境类型及二者交互均对地表甲虫群落组成有显著影响(P<0.05)。5 月 4 种生境地表甲虫群

落组成明显不同($P<0.05$),4种生境之间地表甲虫群落组成明显不同($P<0.05$)。5月4种生境之间地表甲虫群落 SIMPER 分析结果表明,ASD 和 IL 生境之间地表甲虫群落的平均相异性(26.7%)低于 ASD 与 SFSD 和 FSD 生境(57.5%和 57.7%),ASD 与 IL、SFSD 和 FSD 生境甲虫群落差异的主要贡献类群为东鳖甲属、克氏扁漠甲和谢氏宽漠王,它们累积贡献了地表甲虫群落差异的 95.4%—99.2%。8月4种生境地表甲虫群落组成明显不同($P<0.05$),ASD 与 IL、SFSD 和 FSD 生境地表甲虫群落组成明显不同($P<0.05$)。8月4种生境之间地表甲虫群落 SIMPER 分析结果表明,ASD 和 IL 生境之间地表甲虫群落的平均相异性(23.9%)低于 ASD 与 SFSD 和 FSD 生境(37.3%和 41.5%),ASD 与 IL、SFSD 和 FSD 生境甲虫群落差异的主要贡献类群为东鳖甲属、戈壁琵甲和甘肃齿足象,它们累积贡献了地表甲虫群落差异的 86.1%—90.3%。

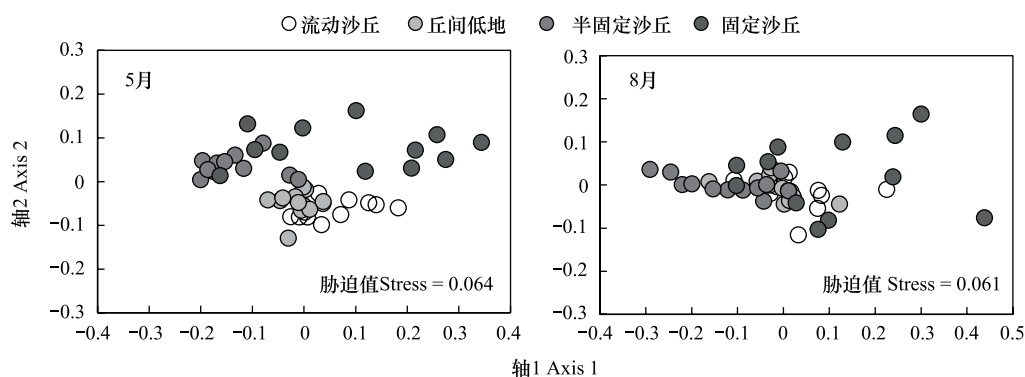


图1 5月和8月流动沙丘、丘间低地、半固定沙丘和固定沙丘地表甲虫的非度量多维尺度排序图

Fig.1 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) plots indicating 2-dimensional distances of ground beetles of the active sand dunes (ASD), interdune lowlands (IL), semi-fixed sand dunes (SFSD) and fixed sand dunes (FSD) in May and August

图中 ASD 代表流动沙丘 Active sand dunes (ASD), IL 代表丘间低地 Interdune lowlands (IL), SFSD 代表半固定沙丘 Semi-fixed sand dunes (SFSD), 代表固定沙丘 Fixed sand dunes (FSD)

2个采样期4种生境地表甲虫活动密度和均匀度指数的二因素方差分析结果表明,采样期和生境类型对二者均有显著影响($P<0.05$),而采样期和生境类型对二者的影响均不显著($P>0.05$)。5月和8月 SFSD 生境地表甲虫的活动密度均显著高于其他生境,8月它与其他生境的差异随着活动密度的降低而减小(图2)。5月4种生境地表甲虫均匀度指数相差不显著($P>0.05$),8月 FSD 生境地表甲虫均匀度指数显著高于 SFSD 生境(图2)。2个采样期4种生境地表甲虫多样性指数与物种丰富度与活动密度和均匀度指数不同,采样期和生境类型及二者交互对地表甲虫多样性指数均有显著影响($P<0.05$),生境类型对地表甲虫物种丰富度有显著影响($P<0.05$),这种影响又随采样期的变化而变($P<0.05$)。5月 ASD 和 FSD 生境地表甲虫多样性指数显著高于 SFSD 生境,8月 FSD 生境地表甲虫多样性指数显著高于其他生境(图2)。5月4种生境地表甲虫物种丰富度相差不显著,8月 FSD 生境地表甲虫物种丰富度显著高于 IL 生境(图2)。

2.3 流动沙丘、丘间低地、半固定沙丘和固定沙丘不同大小甲虫群落比较

2个采样期4种生境大型甲虫活动密度及物种丰富的二因素方差分析结果表明,采样期、生境类型及二者的交互均对大型甲虫的活动密度及物种丰富度有显著影响($P<0.05$)。5月 SFSD 和 FSD 生境大型甲虫的活动密度显著高于 IL 和 ASD 生境,8月 FSD 生境大型甲虫的活动密度显著高于其他生境;5月 SFSD 和 FSD 生境大型甲虫的物种丰富度显著高于 IL 和 ASD 生境,8月4种生境间大型甲虫的物种丰富度相差不显著(图3)。采样期和生境类型对中型甲虫活动密度有显著影响($P<0.05$),采样期对中型甲虫的物种丰富度有显著影响($P<0.05$),生境类型对中型甲虫物种丰富度的影响随着采样期的变化而变($P<0.05$)。5月和8月 SFSD 生境中型甲虫的活动密度显著高于其他生境,而中型甲虫物种丰富度仅在5月发现 IL 生境显著高于 ASD 生境(图3)。采样期和生境类型对小型甲虫活动密度及物种丰富度的影响均不显著($P>0.05$),但二者的交互对小型甲虫活动密度及物种丰富度有显著影响($P<0.05$)。8月 FSD 生境小型甲虫活动密度显著高于

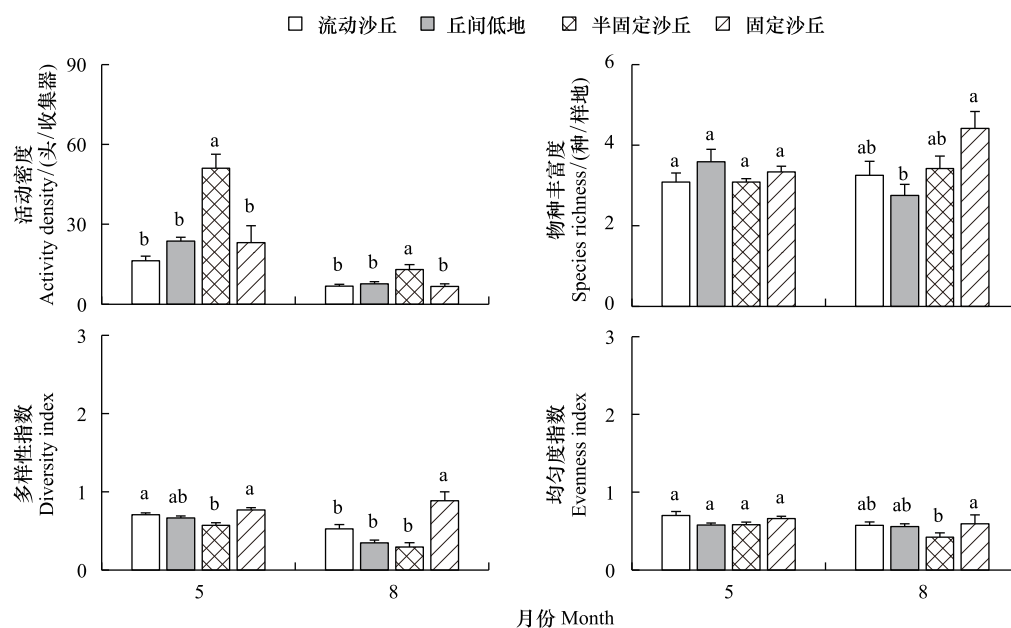


图2 5月和8月流动沙丘、丘间低地、半固定沙丘和固定沙丘地表甲虫活动密度、物种丰富度、多样性和均匀度指数比较

Fig.2 The activity density, species richness, diversity and evenness index of ground beetles across active sand dunes (ASD), interdune lowlands (IL), semi-fixed sand dunes (SFSD) and fixed sand dunes (FSD) in May and August

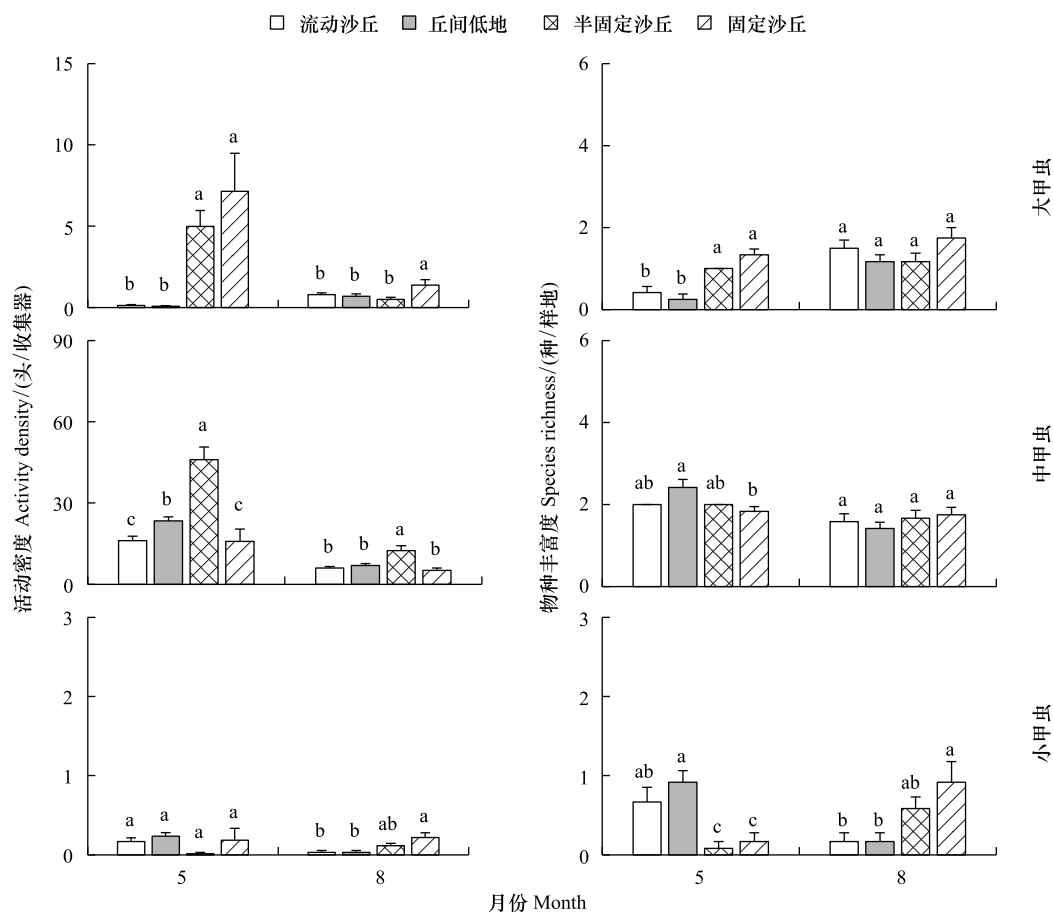


图3 5月和8月流动沙丘、丘间低地、半固定沙丘和固定沙丘大、中和小甲虫活动密度和物种丰富度比较

Fig.3 The activity density and species richness of large, medium and small beetles across active sand dunes (ASD), interdune lowlands (IL), semi-fixed sand dunes (SFSD) and fixed sand dunes (FSD) in May and August

ASD 和 IL 生境,5 月 ASD 和 IL 生境小型甲虫的物种丰富度显著高于 SFSD 和 FSD 生境,8 月 FSD 生境小型甲虫的物种丰富度显著高于 ASD 和 IL 生境(图 3)。

2.4 流动沙丘、丘间低地、半固定沙丘和固定沙丘地表甲虫分布与环境因子的关系

4 种生境地表甲虫与环境因子的排序结果表明,12 个植被和土壤环境因子解释了 49.8% 的地表甲虫群落变异($F=19.60, P<0.001$)。地表甲虫与植被和土壤环境变量分割结果表明,植被环境解释了甲虫群落变异的 16.3%,土壤环境解释了甲虫群落变异的 4.2%,植被和土壤环境交互解释了甲虫群落变异的 29.3%。pRDA 分析发现,草本物种丰富度(20.6%)、灌木盖度(15.3%)、土壤有机碳含量(5.3%)和粗砂含量(2.5%)是影响地表甲虫分布的主要环境因子,它们解释了 43.7% 的地表甲虫群落变异。

第 1 轴解释了 28.6% 的地表甲虫群落变异,它与草本物种丰富度、灌木盖度和土壤粗砂含量呈显著正相关,它将 SFSD 和 FSD 与 ASD 和 IL 生境分开;第 2 轴解释了 18.2% 的地表甲虫群落变异,与土壤有机碳含量呈显著负相关,它将 IL 和 SFSD 生境与 ASD 和 FSD 生境分开(图 4)。地表甲虫种对生境变化响应模式不同,东鳖甲与排序轴 1 呈正相关,与排序轴 2 呈正相关,它们主要分布在 SFSD 生境;克氏扁漠甲与排序轴 1 呈正相关,它主要分布在 SFSD 和 FSD 生境;谢氏宽漠王与排序轴 1 呈负相关,与排序轴 2 呈正相关,它主要分布在 IL 生境;甘肃齿足象和中华砚甲与排序轴 1 呈正相关,与排序轴 2 呈负相关,它主要分布在 FSD 生境(图 4)。

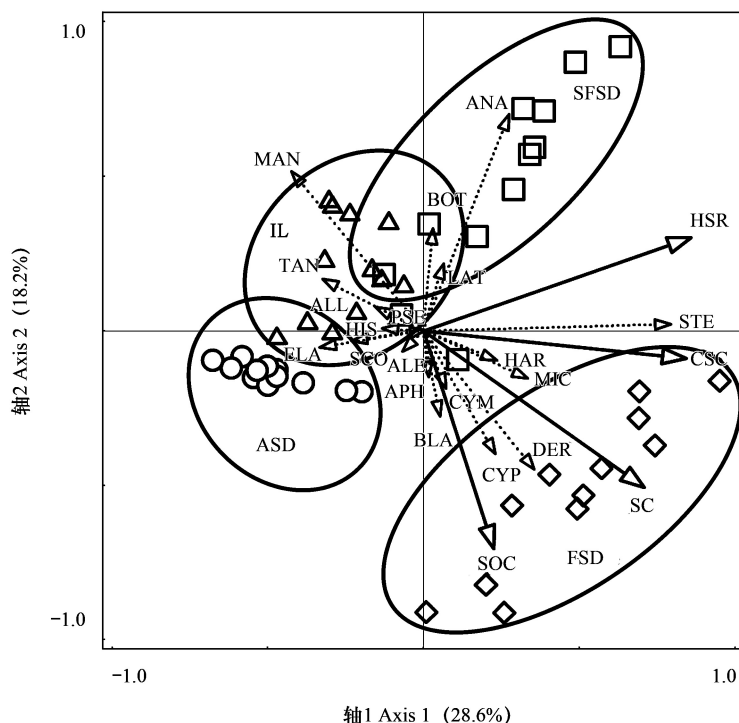


图 4 流动沙丘、丘间低地、半固定沙丘和固定沙丘地表甲虫分布与主要环境因子的 RDA 排序图

Fig.4 The RDA two-dimensional ordination diagram of ground beetles with explanatory variables across active sand dunes (ASD), interdune lowlands (IL), semi-fixed sand dunes (SFSD) and fixed sand dunes (FSD)

图中○代表流动沙丘 Active sand dunes (ASD), □代表丘间低地 Interdune lowlands (IL), △代表半固定沙丘 Semi-fixed sand dunes (SFSD), ◇代表固定沙丘 Fixed sand dunes (FSD); HSR 代表草本物种丰富度 Herbaceous species richness (HSR), SC 代表灌木盖度 Shrub cover (SC), CSC 代表土壤粗砂含量 Coarse sand content (CSC), SOC 代表土壤有机碳含量 Soil organic carbon (SOC); APH-蜉金龟 *Aphodius* spp., PSE-伪葬步甲属 *Pseudotaphoxenus* sp., CYM-猛步甲属 *Cymindis* sp., HAR-异色瓢虫 *Harmonia axyridis*, BOT-甜菜象属 *Bothynoderes* sp., DER-甘肃齿足象 *Deracanthus potanini*, TAN-黄褐纤毛象 *Tanymericus urbanus*, ELA-叩甲科 *Elatridae* sp., HIS-阎甲科 *Histeridae* sp., LAT-薪甲科 *Latridiidae* sp., SCO-小蠹科 *Scolytidae* sp., ALE-前角隐翅虫属 *Aleochara* sp., ALL-朽木甲亚科 *Alleculinae* sp., ANA-东鳖甲属 *Anatolica* spp., BLA-壁蝼甲 *Blaps gobiensis*, CYP-中华砚甲 *Cyphogenia chinensis*, MAN-谢氏宽漠王 *Mantichorula semenowi*, MIC-阿小鳖甲 *Microdera kraatzii alashanica*, STE-克氏扁漠甲 *Sternotricon kraatzii*.

ISA (Indicator Species Analysis, ISA) 分析结果表明, 甘肃齿足象 ($IV = 63.9, P < 0.001$)、戈壁琵甲 ($IV = 39.8, P = 0.033$)、中华砚甲 ($IV = 25.0, P = 0.050$) 和克氏扁漠甲 ($IV = 58.4, P < 0.001$) 等昆虫可以用于指示 FSD 生境; 东鳖甲属昆虫 ($IV = 48.2, P < 0.001$) 可以用于指示 SFSD 生境; 谢氏宽漠王 ($IV = 36.8, P = 0.028$) 可以用于指示 IL 生境。

灌木盖度、草本物种丰富度和土壤粗砂含量均呈显著正相关 ($P < 0.05$), 它们与土壤有机碳含量的相关性较小 ($P > 0.05$)。地表甲虫活动密度与草本物种丰富度呈显著正相关, 而与土壤有机碳含量呈显著负相关; 地表甲虫物种丰富度与灌木盖度和草本物种丰富度均呈显著正相关; 地表甲虫多样性指数与灌木盖度和土壤有机碳含量呈显著正相关; 地表甲虫均匀度与草本物种丰富度呈显著负相关, 而与土壤有机碳含量呈显著正相关 (表 2)。不同地表甲虫种对主要植被和土壤环境变化的响应模式不同。东鳖甲属与草本物种丰富度呈显著正相关, 而与土壤有机碳含量呈显著负相关; 戈壁琵甲仅与土壤有机碳含量呈显著正相关, 中华砚甲仅与灌木盖度呈显著正相关; 谢氏宽漠王与土壤粗砂和有机碳含量呈显著负相关; 克氏扁漠甲与灌木盖度、草本物种丰富度和土壤粗砂含量均呈显著正相关, 甘肃齿足象与灌木盖度、土壤粗砂和有机碳含量均呈显著正相关 (表 2)。

表 2 地表甲虫群落及主要甲虫种与 4 个环境因子的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson correlation of ground beetles and dominant species with four environmental variables

地表甲虫 Ground beetles	SC	HSR	CSC	SOC
群落 Community				
活动密度 Activity density	-0.076 n.s.	0.491 ***	0.207 n.s.	-0.415 **
物种丰富度 Species richness	0.395 **	0.328 *	0.228 n.s.	-0.001 n.s.
多样性指数 Diversity density	0.397 **	-0.080 n.s.	0.035 n.s.	0.626 ***
均匀度指数 Evenness index	-0.080 n.s.	-0.392 **	-0.185 n.s.	0.501 ***
主要类群 Dominant species				
东鳖甲属 <i>Anatolica</i> spp.	-0.127 n.s.	0.472 ***	0.213 n.s.	-0.504 ***
戈壁琵甲 <i>Blaps gobiensis</i>	0.199 n.s.	-0.010 n.s.	-0.086 n.s.	0.298 *
中华砚甲 <i>Cyphogenia chinensis</i>	0.432 **	0.133 n.s.	0.247 n.s.	0.234 n.s.
甘肃齿足象 <i>Deracanthus potanini</i>	0.514 **	0.200 n.s.	0.334 *	0.356 *
谢氏宽漠王 <i>Mantichorula semenowi</i>	-0.602 ***	-0.236 n.s.	-0.476 ***	-0.353 **
克氏扁漠甲 <i>Sternotrigon kraatzi</i>	0.529 ***	0.675 ***	0.633 ***	0.216 n.s.

SC: 灌木盖度 Shrub cover, HSR: 草本物种丰富度 Herbaceous species richness, CSC: 土壤粗砂含量 Coarse sand content, SOC: 土壤有机碳含量 Soil organic carbon; *** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, n.s. $P > 0.05$.

3 讨论

荒漠绿洲过渡带天然固沙植被区 4 种生境构成沙漠化梯度, 从 ASD 到 FSD 生境, 灌木和草本盖度及物种丰富度均呈增加的趋势, 土壤容重及细砂含量亦随之降低, 而土壤硬度、粗砂、粘分离及碳氮含量呈增加的趋势 (表 1), 这与赵哈林等^[23]在科尔沁沙地的研究结果一致。沙漠化导致植被盖度及多样性降低, 而土壤养分也随之降低, 人工植被恢复又可以改善土壤环境, 提高植物和昆虫多样性^[12,23]。研究发现, 河西走廊荒漠绿洲过渡区人工固沙植被恢复导致地表甲虫的活动密度及多样性降低, 而提高了蜘蛛等其他地表节肢动物类群的活动密度及多样性^[24]。荒漠绿洲过渡带天然固沙植被区生境退化, 地表甲虫活动密度呈先增后降的趋势, 但甲虫物种丰富度和多样性呈降低的趋势, 这与人工固沙植被恢复过程中地表甲虫群落变化略有不同^[15,24-25]。随着土壤沙化程度的增加和灌木及草本盖度的降低, 地表甲虫的活动密度呈先增后降的趋势, 而 FSD 生境地表甲虫物种丰富度、多样性和均匀度指数均高于 IL 和 SFSD 生境, 这在 8 月表现尤为明显。SFSD 生境地表甲虫的活动密度显著高于其他生境, 这与一些拟步甲科种对环境的偏好有关。东鳖甲和谢氏宽漠王偏好在 ASD 和 IL 生境活动, 而克氏扁漠甲偏好在 SFSD 和 FSD 生境活动, 这与拟步甲科等地表甲虫的生存和

繁殖对灌木及土壤质地等微生境的需求有关^[15,26-27]。杨贵军等^[15]在宁夏柠条-荒漠草地交错区研究发现,克小鳖甲的分布趋向于沙生荒漠环境,弯齿琵琶甲的分布趋向于柠条灌丛;常见种蒙古漠王、小皮鳖甲的分布偏向于喜好荒漠草地;异距琵琶甲、奥氏真土甲、网目土甲和淡红毛隐甲的分布则偏向于喜好柠条灌丛。Stapp 等^[26]在美国科罗拉多州草地研究发现,灌木与毗邻草地生境相比夜行性拟步甲科昆虫种类居多,拟步甲科物种丰富度、活动密度及一些常见种与灌木盖度呈负相关,但在土壤粗砂含量高的区域较高。吕昭智等^[27]在新疆沙漠的研究发现,中华漠王更喜欢在沙丘上活动,它在沙丘背风坡的种群数量大于迎风坡,中华漠王对微生境的选择与洞穴建立的难易程度有关,而洞穴的建立与土壤机械组成和硬度密切相关。Liu 等^[19]在黑河中游的研究发现,沙拐枣灌木下东鳖甲属甲虫的活动密度高于灌丛间裸地,而泡泡刺沙堆上戈壁琵琶甲、克氏扁漠甲和甘肃齿足象等地表甲虫的活动密度较高。研究还发现,流动沙丘及丘间低地以谢氏宽漠王和东鳖甲属甲虫为主,它们均在白天活动,可以在细砂含量较高、硬度低的流动沙丘及丘间低地快速挖掘巢穴躲避高温,这证实了土壤物理结构对一些地表甲虫的栖居行为有重要影响。此外,流动沙丘上汇集大量植物碎屑,这也为谢氏宽漠王等拟步甲科甲虫提供了丰富的食物。

沙漠化过程中 ASD、IL、SFSD 和 FSD 地表甲虫群落组成明显不同并存在季节变异,8 月 4 种生境类型之间地表甲虫群落差异变小。SIMPER 分析结果表明,5 月 ASD 生境与 IL 生境地表甲虫群落的相异性低于它与 SFSD 和 FSD 生境,东鳖甲、克氏扁漠甲和谢氏宽漠王是春季主要的地表甲虫种,它们决定了不同生境间地表甲虫群落的差异。8 月 4 种生境地表甲虫群落组成与 5 月不同,从 ASD 到 FSD 生境地表甲虫群落的平均相异性逐步增大,但这种相异性低于 5 月采样期,戈壁琵琶甲、甘肃齿足象和东鳖甲是主要甲虫种它们决定了 4 种生境地表甲虫群落的相似性。研究发现,荒漠甲虫等地表节肢动物群落组成存在明显的季节变异,拟步甲科等甲虫主要在春季活动,而夏秋季象甲科和步甲科等甲虫的活动密度增加^[20]。甘肃齿足象主要取食白刺属灌木叶片、栖居在白刺灌丛沙堆上(野外观察),而戈壁琵琶甲和东鳖甲的活动也与沙拐枣和白刺属灌木有关,这与它们的取食、繁殖和栖居需求有关^[17,19]。地表甲虫个体大小不同对植被和土壤环境变化的响应模式不同,戈壁琵琶甲和克氏扁漠甲等大型拟步甲科昆虫偏好在 SFSD 和 FSD 生境,它们的栖居和繁殖离不开灌木^[17,19]。谢氏宽漠王等中型拟步甲科昆虫主要在 ASD 和 IL 生境活动,甘肃齿足象等中型甲虫与阿小鳖甲等小型甲虫主要在 FSD 生境活动,这与它对泡泡刺的灌木依赖有关^[17,28]。此外,灌木的存在还可以为地表甲虫提供栖居和繁殖地,减少极端环境和鸟类捕食对它们的影响^[19,29-31]。大型拟步甲科昆虫对灌木生境的依赖性较高,中、小型拟步甲科昆虫对灌木生境的依赖性也相应减小^[30]。常见的拟步甲科种偏好在土壤结构疏松的生境活动,而个体较小的拟步甲科昆虫是草地区域的优势种,这可能与它们需要栖居生境较小有关^[26]。地表甲虫等节肢动物的个体大小、取食等行为特征影响了其对植被恢复过程的响应,Schirmel 等^[32]研究发现步甲的个体大小随着 coastal heathland 群落的恢复时间延长而增大,这与关于拟步甲科对沙漠化响应的研究结果相近。总之,拟步甲科等地表甲虫活动存在明显的季节变异,5 月地表甲虫对沙漠化的响应较 8 月敏感,个体大小不同决定了它们对沙漠化的响应模式。

地表甲虫与 12 个植被和土壤环境变量的排序结果表明,沙漠化过程中植被变化对地表甲虫分布的影响大于土壤,但二者对甲虫分布的影响均低于植被和土壤的交互作用,这与前期关于人工固沙植被区地表甲虫分布的研究结果一致^[14]。pRDA 排序结果表明,灌木盖度、草本多样性、土壤粗砂和有机碳含量是影响地表昆虫分布的主要环境因子,这与娄巧哲等^[33]在新疆古尔班通古特沙漠和李岳诚等^[34]在宁夏荒漠草地的研究结果相近。从 FSD 到 ASD 生境,灌木盖度、草本物种丰富度、土壤粗砂和有机碳含量降低,这改变了土壤物理性质、食物资源和栖居环境等驱动了地表甲虫群落中大型拟步甲科昆虫活动密度及物种丰富度降低,而一些东鳖甲、克氏扁漠甲和谢氏宽漠王等中小型地表甲虫种活动密度大幅增加,这导致不同沙化程度生境地表甲虫群落组成明显不同。从 FSD 到 ASD 生境,地表甲虫的活动密度仅与草本的物种丰富度呈正相关,而与土壤有机碳含量呈显著负相关,这与娄巧哲等^[33]在新疆古尔班通古特沙漠的研究结果不同。地表甲虫的物种丰富度和多样性指数均与植被盖度呈显著正相关,这与娄巧哲等^[33]在新疆古尔班通古特沙漠的研究结果相近,

说明灌木盖度变化对荒漠拟步甲科等昆虫有重要影响。不同地表甲虫种对植被和土壤环境变化的响应模式不同,它们决定了不同沙化阶段地表甲虫群落的聚集结构。克氏扁漠甲、中华砚甲、戈壁琵甲和甘肃齿足象与植被和土壤环境变化趋势相近,它们可以用于指示 FSD 生境,东鳖甲属昆虫可以用于指示 SFSD 生境,而谢氏宽漠王可以用于指示 IL 生境。拟步甲科和象甲科甲虫种对沙漠化驱动的植被和土壤环境变化变化响应敏感,它们可以指示生境环境变化,这与前期关于固沙植被恢复研究与张大治等^[35]与李迎运和张大治^[36]在宁夏的研究结果相近。此外,我们研究还发现谢氏宽漠王是流动沙丘及丘间低地的典型种,土壤粗砂含量和植被盖度增加会导致其活动密度大幅降低,这与其繁殖和栖居需求有关^[28]。总之,地表甲虫群落中一些优势拟步甲科和象甲科昆虫种对沙漠化驱动的植被和土壤环境敏感,它们可以用于监测天然固沙植被区植被退化或放牧引起的土壤沙化程度^[37]。

4 结论

荒漠绿洲过渡带天然固沙植被区流动沙丘(ASD)、丘间低地(IL)、半固定沙丘(SFSD)和固定沙丘(FSD)构成了理想的沙漠化梯度,灌木和草本盖度及多样性与土壤理化性质均随着沙漠化程度增加而降低,不同生境地地表甲虫群落结构也明显不同并存在季节变异。5月 ASD 与 IL、SFSD 和 FSD 生境地地表甲虫群落相异性为 26.7%、57.5%和 57.7%,东鳖甲属、克氏扁漠甲和谢氏宽漠王等甲虫种贡献了 ASD 与其他生境甲虫群落之间差异的 95.4%—99.2%;8月 ASD 与 3 种生境之间甲虫群落的相异性为 23.9%、37.3%和 41.5%,东鳖甲属、戈壁琵甲和甘肃齿足象等甲虫种贡献了 ASD 与其他生境甲虫群落之间差异的 86.1%—90.3%。5月和 8月 SFSD 生境地地表甲虫活动密度显著高于其他生境,8月 FSD 生境地地表甲虫多样性指数显著高于其他生境。研究还发现,不同大小甲虫对沙漠的响应模式不同,5月 SFSD 和 FSD 生境大型甲虫活动密度显著高于 ASD 和 IL 生境,8月 FSD 生境大型甲虫活动密度显著高于其他生境;5月和 8月 SFSD 生境中型甲虫活动密度显著高于其他生境;小型甲虫活动密度仅在 8月发现 FSD 生境显著高于 ASD 和 IL 生境。

地表甲虫与植被和土壤环境因子的 RDA 分析结果表明,12 个植被和土壤环境因子解释了 49.8%的地表甲虫群落变异,其中植被环境解释了甲虫群落变异的 16.3%,土壤环境解释了甲虫群落变异的 4.2%,植被和土壤环境相互作用解释了甲虫群落变异的 29.3%。pRDA 分析结果表明,草本物种丰富度、灌木盖度、土壤有机碳含量和粗砂含量是影响地表甲虫分布的主要环境因子,它们解释了 43.7%的地表甲虫群落变异。灌木盖度和草本物种丰富度是影响地表甲虫群落变化的主要环境因子,随着沙漠化程度的增加,灌木盖度和草本物种丰富度呈降低的趋势,而地表甲虫物种丰富度和多样性亦随之降低。此外,研究还发现沙漠化过程中一些地表甲虫种对植被或土壤环境响应十分敏感,可以用于指示生境变化。戈壁琵甲、克氏扁漠甲、中华砚甲和甘肃齿足象可以用于指示 FSD 生境,东鳖甲属昆虫可以用于指示 SFSD 生境,谢氏宽漠王可以用于指示 IL 及 ASD 生境。总之,地表甲虫群落及优势甲虫种对环境变化响应敏感,其群落结构及优势种类活动密度变化可以用于指示天然固沙植被区沙漠化。

参考文献(References):

- [1] Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, Turner I 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] 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.
- [3] 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.
- [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] 国家林业局.第五次中国荒漠化和沙化状况公报.北京:国家林业局,2015.
- [6] 王根绪,王建,仵彦卿.近 10 年来黑河流域生态环境变化特征分析. *地理科学*, 2002, 22(5): 527-534.

- [7] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 张小由, 李玉霖, 刘立超. 我国西北干旱区的荒漠化过程及其空间分异规律. 中国沙漠, 2011, 31(1): 1-8.
- [8] 赵文智, 杨荣, 刘冰, 杨淇越, 李芳. 中国绿洲化及其研究进展. 中国沙漠, 2016, 36(1): 1-5.
- [9] Whitford W G. Animal feedbacks in desertification; an overview. *Revista Chilena de Historia Natural*, 1993, 66(3): 243-251.
- [10] Whitford W G. Desertification and animal biodiversity in the desert grasslands of North America. *Journal of Arid Environments*, 1997, 37(4): 709-720.
- [11] Polis G A. Complex trophic interactions in deserts; an empirical critique of food-web theory. *The American Naturalist*, 1991, 138(1): 123-155.
- [12] 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.
- [13] Liu R T, Zhu F, An H, Steinberger Y. Effect of naturally vs manually managed restoration on ground-dwelling arthropod communities in a desertified region. *Ecological Engineering*, 2014, 73: 545-552.
- [14] Liu J L, Li F R, Sun T S, Ma L F, Liu L L, Yang K. Interactive effects of vegetation and soil determine the composition and diversity of carabid and tenebrionid functional groups in an arid ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 2016, 128: 80-90.
- [15] 杨贵军, 王新谱, 贾彦霞, 张大治. 人工柠条-荒漠草地交错带拟步甲昆虫群落多样性. 生态学报, 2016, 36(3): 608-619.
- [16] 王晶, 吕昭智, 殷飞. 干旱区景观异质性地表甲虫多样性的影响. 环境昆虫学报, 2016, 38(1): 67-76.
- [17] 张大治, 张峰举, 于有志. 六种拟步甲行为初探. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2003, 24(1): 94-96.
- [18] 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.
- [19] 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. *Journal of Arid Land*, 2015, 7: 110-121.
- [20] 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.
- [21] 郑乐怡, 归鸿. 昆虫分类. 南京: 南京师范大学出版社, 1999.
- [22] Elek Z, Lövei G L. Patterns in ground beetle (Coleoptera: Carabidae) assemblages along an urbanisation gradient in Denmark. *Acta Oecologica*, 2007, 32(1): 104-111.
- [23] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 李玉霖, 苏永中. 北方农牧交错区沙漠化的生物过程研究. 中国沙漠, 2002, 22(4): 309-315.
- [24] 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.
- [25] 贺奇, 殷延勃, 曾乐, 张文银. 盐池四墩子荒漠草原拟步甲昆虫群落多样性研究. 环境昆虫学报, 2013, 35(6): 713-719.
- [26] Stapp P. Microhabitat use and community structure of darkling beetles (Coleoptera: Tenebrionidae) in Shortgrass prairie: effects of season shrub and soil type. *The American Midland Naturalist*, 1997, 137(2): 298-311.
- [27] 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.
- [28] 张大治, 于有志, 任建治. 谢氏宽漠王的生物学特性及行为. 昆虫知识, 2003, 40(4): 334-339.
- [29] Liu J L, Li F R, Liu C A, Liu Q J. Influences of shrub vegetation on distribution and diversity of a ground beetle community in a Gobi desert ecosystem. *Biodiversity and Conservation*, 2012, 21(10): 2601-2619.
- [30] Groner E, Ayal Y. The interaction between bird predation and plant cover in determining habitat occupancy of darkling beetles. *Oikos*, 2001, 93(1): 22-31.
- [31] Bartholomew A, El Moghrabi J. Seasonal preference of darkling beetles (Tenebrionidae) for shrub vegetation due to high temperatures, not predation or food availability. *Journal of Arid Environments*, 2018, 156: 34-40.
- [32] Schirmel J, Blindow I, Buchholz S. Life-history trait and functional diversity patterns of ground beetles and spiders along a coastal heathland successional gradient. *Basic and Applied Ecology*, 2012, 13(7): 606-614.
- [33] 娄巧哲, 徐养诚, 马吉宏, 吕昭智. 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, 2011, 19(4): 441-452.
- [34] 李岳诚, 张大治, 贺达汉. 荒漠景观固沙柠条林地地表甲虫多样性及其与环境因子的关系. 林业科学, 2014, 50(5): 109-117.
- [35] 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.
- [36] 李迎运, 张大治. 荒漠生境拟步甲科指示性昆虫的初步筛选. 生态科学, 2016, 35(1): 67-74.
- [37] Rubinstein Y, Groner E, Yizhaq H, Svoray T, Bar (Kutiel) P. An eco-spatial index for evaluating stabilization state of sand dunes. *Aeolian Research*, 2013, 9: 75-87.