

干旱风沙区柠条枯落物对土壤节肢动物群落的影响

张安宁 刘任涛* 刘佳楠 赵娟 常海涛 陈蔚

(宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021)

摘要 在干旱风沙区宁夏盐池县, 选择柠条 (*Caragana korshinskii*) 枯落物, 采用网孔分解袋法, 研究了不同大小灌丛 (极小型、小型、中型、大型) 微生境柠条枯落物分解中土壤节肢动物群落分布特征。结果表明: 灌丛增大导致枯落物残留量、磷 (P) 含量、钾 (K) 含量和土壤电导率显著升高 ($P < 0.05$), 而纤维素含量、木质素含量和土壤 pH 在不同大小灌丛间均无显著差异; 调查共获得土壤节肢动物 10 目 18 科, 其中优势类群为镰螯螨科、腾岛螨科、甲螨亚目和球角跳科, 其个体数占总个体数的 67.4%; 常见类群 4 类, 其个体数占总个体数的 27.3%; 其余 10 类为稀有类群, 其个体数占总个体数的 4.9%。在不同大小灌丛中, 柠条枯落物土壤节肢动物群落组成差异较大, 反映了土壤节肢动物对枯落物微生境变化的敏感性和适应性; 灌丛增大导致土壤节肢动物优势度指数显著升高 ($P < 0.05$), 但土壤节肢动物个体数、类群数、香农指数、均匀度指数和丰富度指数在不同大小灌丛间均无显著差异; 土壤节肢动物个体数、类群数和多样性指数均与土壤电导率、枯落物残留量、木质素、纤维素、P 和 K 含量密切相关。研究表明, 不同大小灌丛下, 枯落物残留量及质量差异导致土壤节肢动物群落组成变化较大。干旱区灌丛增大促进枯落物中某些类群聚集而导致土壤节肢动物, 其优势度指数显著升高, 但对土壤节肢动物类群数和多样性指数影响较小。

关键词 干旱风沙区; 柠条; 灌丛大小; 枯落物分解; 土壤动物; 群落结构

Effects of *Caragana korshinskii* litter on soil arthropod community in a desertified region.

ZHANG An-ning, LIU Ren-tao*, LIU Jia-nan, ZHAO Juan, CHANG Hai-tao, CHEN Wei (Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China).

Abstract: Using the litterbag method, we investigated community structure of soil arthropods during litter decomposition in microhabitats with different sizes (very small, small, medium, and large) of *Caragana korshinskii* shrubs in Yanchi County of Ningxia, northern China. The results showed that litter remaining mass, P content, K content, and soil electrical conductivity significantly increased with increasing shrub size ($P < 0.05$), whereas litter cellulose content, lignin content, and soil pH were not different among shrubs with different sizes. In total, 18 families of arthropods belonging to 10 orders were captured. Tydeidae, Tenerifidae, Oribatida, and Hypogastruridae were the dominant groups, occupying 67.4% of the total individuals. There were four common groups, occupying 27.3% of the total abundance. The remaining 10 groups were relatively rare, only accounting for 4.9% of the total abundance. Soil arthropod community composition in shrub litter was significantly different among the four types of shrub microhabitats, highlighting the sensitivity and adaptability of soil arthropods to the changes of litter microhabitats. Simpson dominance index of arthropods significantly increased with the increasing size of *C. korshinskii* shrubs ($P < 0.05$), whereas total abundance, group number, Shannon diversity index, evenness index, and richness index of soil arthropods did not significantly differ among the shrubs with different sizes. Total abundance, group number and diversity index were closely correlated with soil electrical conductivity, litter remaining mass, lignin content, cellulose content, and P and K

国家自然科学基金项目 (41867005 和 41661054) 和宁夏青年拔尖人才培养工程项目 (RQ0010) 资助。

收稿日期: 2019-10-15 接受日期: 2020-03-15

* 通讯作者 E-mail: nxuli2012@126.com

contents ($P < 0.05$). It was concluded that variations of litter remaining mass and quality (lignin content) with the increasing size of *C. korshinskii* shrubs could result in a large change in soil arthropod community composition. The increasing size of shrubs promoted the aggregation of soil arthropods, with significant increases of Simpson dominance index but minor effects on group number and other diversity indices in the desertified region.

Key words: arid aeolian sand region; *Caragana korshinskii*; shrub size; litter decomposition; soil arthropod; community structure.

柠条 (*Caragana korshinskii*) 是中国干旱风沙区重要的植被类型, 由于其能够防风固沙、增加资源环境空间异质性、调节土壤水分和“蓄种保种”而具有多种“资源岛”功能(刘任涛等, 2014)。其中, 柠条枯落物作为地上-地下生物养分循环的关键“纽带”, 是土壤有机质的主要来源, 也是碎屑食物链的起点和土壤节肢动物的重要食物来源 (Crcamo *et al.*, 2001; Carrillo *et al.*, 2011)。反过来, 土壤节肢动物作为土壤生态系统食物链中不可分割的组成部分, 担负着消费者和分解者多重角色, 是影响枯落物分解的重要生物因素, 其群落多样性及生态功能显著影响着生态系统的物质循环和能量流动过程 (Wagg *et al.*, 2014; Frouz *et al.*, 2015)。柠条枯落物分解及与土壤节肢动物间的作用关系对于灌丛“资源岛”的形成及干旱区脆弱生态系统元素平衡维持均具有重要作用 (Jiang *et al.*, 2013)。因此, 开展灌丛微生境柠条枯落物分解中土壤节肢动物群落组成及多样性变化规律研究, 对于深入认识灌丛“肥岛”效应、生物多样性保护及维持干旱区生态系统元素平衡具有重要的理论和实践意义。

近些年来, 关于枯落物中土壤节肢动物的研究主要集中在枯落物种类差异对土壤节肢动物多样性的影响。李艳红等 (2013)、和润莲等 (2016) 和肖玖金等 (2018) 等对枯落物种类和土壤节肢动物多样性间的关系研究表明, 枯落物能够起到聚集和增加局部土壤节肢动物种类、数量和多样性的作用, 且不同比例的混合枯落物可改变枯落物中土壤节肢动物多度和群落组成。谭艳等 (2014) 研究发现, 灌丛大小和林地变化直接影响枯落物积累量及分解过程, 进而对土壤节肢动物类群分布产生深刻影响。刘任涛等 (2014) 研究灌丛大小对地面节肢动物类群分布的影响发现, 随着灌丛增大, 地面节肢动物类群数和多样性明显提高, 而个体间对食源条件的竞争愈发激烈, 导致土壤节肢动物个体数减少。王振海等 (2016) 研究林地变化对枯落物中土壤节肢动物群落结构的影响发现, 林地变化影响枯落物及养分元

素含量, 导致土壤节肢动物群落结构明显不同, 枯落物对甲螨亚目、辐螨亚目、等节跳虫科和鳞跳虫科起聚集效应。同时发现, 枯落物残留量和全氮 (TN)、全磷 (TP)、有机碳 (TOC) 含量是影响土壤节肢动物群落组成的主要因素 (李艳红等, 2013; 王振海等, 2016)。综上所述, 土壤节肢动物分布受生境、枯落物种类和元素含量的多重影响。但是, 关于干旱风沙区柠条枯落物中土壤节肢动物群落分布特征研究的报道较少。

中国北方干旱风沙区, 土壤动物数量少, 生物多样性较低 (刘任涛等, 2015)。在柠条灌丛不同发育阶段 (极小型、小型、中型和大型), 枯落物分解过程不同, 直接影响到参与枯落物分解过程的土壤节肢动物类群分布, 进而影响到灌丛微生境中枯落物分解与养分循环过程 (刘佳楠等, 2019)。本研究选择宁夏干旱风沙区不同发育阶段柠条枯落物为研究对象, 采用枯落物分解袋法, 研究不同大小柠条灌丛枯落物的质量损失、养分释放和土壤节肢动物群落结构及多样性变化特征, 阐明柠条枯落物分解对土壤节肢动物的影响, 旨在为该区生物多样性保护、灌丛林地管理与干旱区生态系统元素平衡维持提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究样地位于宁夏回族自治区盐池县东北部 10 km 处 (37°49'N, 107°30'E, 海拔 1348 m)。该区域处于干旱草原向半干旱草原的过渡地带, 属于中温带大陆性气候。年平均气温 8.7 °C, 最热月 (7 月) 平均气温 38.7 °C, 最冷月 (1 月) 平均气温 -8.7 °C; $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温为 2949 °C。年日照时数 2867.9 h, 日照率 65%。年平均降雨量 294 mm, 主要集中在 7—9 月, 占全年降雨量的 60% 以上, 且年际变率大; 年蒸发量 2136 mm, 是降雨量的 6~8 倍。年无霜期为 162 d。年平均风速 $2.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 冬春风沙天气较多, 每年 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的扬沙达 323 次。研究样地

地带性土壤为灰钙土、淡灰钙土,非地带性土壤主要为风沙土。土壤质地多为粉壤土、沙壤土和沙土,结构松散,肥力较低。主要植被特征以荒漠草原植被为主,并与人工柠条灌木林镶嵌分布。

利用国家气象信息中心的中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),获取2018年气象月值资料,包括平均相对湿度(%)和平均温度(°C)。将每月气象因子进行取平均值计算(图1)。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

2016年10月,在研究样地内测定柠条灌丛冠幅大小(高度×冠幅),随机选取自然生长、大小不一的灌丛植株进行标记,分别用VS、S、M、L表示极小型(71 cm×115 cm)、小型(122 cm×519 cm)、中型(155 cm×145 cm)、大型(223 cm×341 cm)柠条灌丛,每株灌丛相隔15 m以上,代表了不同发育阶段的柠条灌丛微生境变化过程。每类大小灌丛包括3株重复(3株生长健旺、高度相近的样株),共有12株标准样株(4种类型×3株重复)。

在标记柠条灌丛下布设样方,收集地表枯落物,计算单位面积柠条枯落物干物质质量,为 $5.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。并在研究样地收集新鲜柠条叶片(带叶柄),将样品带回室内65 °C烘干至恒重,依据分解袋规格(15 cm×15 cm)称取6 g装入孔径大小为表面层4 mm(允许土壤节肢动物和微生物进入)、底部(贴地面层)0.01 mm的分解袋。

在VS、S、M、L4类灌丛下布设分解袋,分解袋距灌丛根部<15 cm,用铁丝弯钩固定分解袋,使其与地表土壤紧密接触,埋藏深度为0~2 cm。于2016年12月1日完成分解袋布设,共布设分解袋24袋(3个重复×4种类型灌丛×2次取样)。

1.2.2 枯落物取样与分析

2018年5月1日(生

长季前期)和2018年7月1日(生长旺期),采集每类灌丛下枯落物分解袋各3袋样品。将收集样品装入信封,保存在恒温箱内,迅速带回室内。分离结束后,清除枯落物表面的土壤颗粒和混入的杂物,65 °C烘干至恒量,称取枯落物干质量。

将剩余枯落物样品进行粉碎,测定枯落物灰分、N、P、K、木质素和纤维素含量。枯落物灰分含量采用高温灼烧法测定;枯落物N含量采用凯氏定氮法测定;枯落物P含量采用氢氧化钾熔融-钼锑抗比色法测定;枯落物K含量采用氢氧化钠熔融-火焰光度计法测定;枯落物木质素含量采用GBT 20805—2006范氏法测定;枯落物纤维素含量采用NYT 1459—2007规定的方法测定(鲍士旦,2000;刘佳楠等,2019)。

1.2.3 土壤收集与分析

在每个取样点附近,用小铲取表层土(0~10 cm)装入自封袋带回实验室。将土样置于室内自然风干,过2 mm筛,移除石块和草根等杂质,测定土壤pH和电导率。土壤pH值(水土比悬液为2.5:1)采用PHS-3C酸度计测定。土壤电导率(水土比悬液5:1)采用雷磁DDSJ-308F测定(鲍士旦,2000)。

1.2.4 土壤节肢动物调查

将分解袋内的枯落物放置于改良的Tullgren干漏斗中分离提取中小型土壤节肢动物,分离得到的土壤节肢动物样品保存在浓度75%的酒精中(王振海等,2016)。采用体式显微镜(OLYMPUS SZX16)和生物显微镜(MOTIC DMB1-223)检计数和分类,并参照《中国土壤动物检索图鉴》鉴定到科和亚目(尹文英,1998)。根据不同地面节肢动物类群在群落总个体数中所占比例,将其划分为优势类群(占群落总个体数的10%以上)、常见类群(1%~10%)和稀有类群(<1%)。

1.2.5 气象因子数据获取

利用国家气象信息中心的中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),获取2018年气象日值资料,包括平均相对湿度(%)和平均温度(°C)。

1.3 数据分析

根据不同土壤节肢动物类群在群落总个体数中所占比例,将其划分为优势类群(占群落总个体数的10%以上)、常见类群(1%~10%)和稀有类群(<1%)(刘任涛等,2018)。统计土壤动物个体数和类群数,在此基础上进行群落多样性指标计算。包括Shannon多样性指数(H')、Pielou均匀度指数(E')、Simpson优势度指数(D')和Margalef丰富度

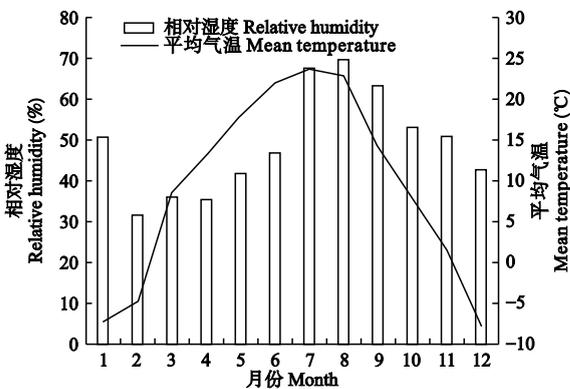


图1 气象因子分布

Fig.1 The distribution of climatic factors in 2018

表1 不同大小灌丛枯落物特征

Table 1 Litter characteristics in shrub under different sizes

月份 Month	灌丛 Shrub	枯落物残留量 Litter content (g)	纤维素含量 Cellulose content (mg·g ⁻¹)	木质素含量 Lignin content (mg·g ⁻¹)	P含量 P content (mg·g ⁻¹)	K含量 K content (mg·g ⁻¹)
5月 May	L	2.33±0.26 ab	1668.73±160.13 a	238.71±95.51 a	5.16±1.03 ab	7.78±0.21 ab
5月 May	M	2.76±0.23 a	1976.57±448.82 a	259.56±109.12 a	7.86±2.57 a	11.09±3.22 a
	S	1.99±0.69 b	1510.35±652.94 a	141.95±38.27 a	3.52±1.15 b	5.99±2.38 b
	VS	2.32±0.21 ab	1787.34±109.26 a	153.57±29.38 a	4.26±0.25 b	6.71±0.91 b
	L	2.33±0.29 a	1593.4±228.04 a	225.09±75.44 a	6.11±1.23 ab	9.97±0.56 a
7月 July	M	2.50±0.67 a	1908.88±619.90 a	187.85±75.34 a	7.40±1.32 a	10.11±3.42 a
	S	2.00±0.34 a	1607.93±379.09 a	134.76±31.38 a	4.45±0.22 b	7.31±0.98 a
	VS	2.36±0.41 a	1837.81±414.53 a	175.20±33.88 a	4.56±0.82 b	8.52±0.69 a
	L	2.33±0.29 a	1593.4±228.04 a	225.09±75.44 a	6.11±1.23 ab	9.97±0.56 a

注: 同列不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平上的显著差异性。

Note: The letter within the same column in each season mean significant difference at $P<0.05$.

(M)。计算公式如下:

$$P_i = n_i / N \quad (i = 1, 2, 3 \dots, S) \quad (1)$$

$$H = - \sum P_i \ln P_i \quad (i = 1, 2, 3 \dots, S) \quad (2)$$

$$E = H / \ln S \quad (3)$$

$$D = \sum (n_i / N)^2 \quad (i = 1, 2, 3 \dots, S) \quad (4)$$

$$M = (S - 1) / \ln N \quad (5)$$

式中, S 为土壤节肢动物类群数; P_i 为第 i 类群土壤节肢动物的相对个体数(即该动物类群个体数占群落个体数的比例), n 为第 i 类群土壤节肢动物的个体数量, N 为土壤节肢动物总个体数量。

使用 SPSS 22.0 软件单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的显著差异。使用 R 语言 corrplot 包 Pearson 相关分析土壤节肢动物群落指数与环境间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 环境特征

由表1可知,在5月和7月,枯落物中木质素和纤维素含量在4类灌丛微生境间无显著差异。并且,7月枯落物残留量及K含量亦无显著差异。但是,5月枯落物残留量及K含量受灌丛影响显著。枯落物残留量表现为M灌丛显著高于S灌丛($P<0.05$),而M、S灌丛与L、VS灌丛间无显著差异。K含量表现为M灌丛显著高于S和VS灌丛($P<0.05$),而M、S、VS灌丛与L灌丛间无显著差异。P含量在5月和7月均表现为M灌丛显著高于S和VS灌丛($P<0.05$),而M、S、VS与L灌丛间无显著差异。

由图2可知,土壤电导率在5月表现为L、M灌丛显著高于S、VS灌丛($P<0.05$),在7月表现为仅L灌丛显著高于S、VS灌丛($P<0.05$),而L、S、VS与

M灌丛间无显著差异。土壤pH值在生长季5月和7月均表现为在4类灌丛间无显著差异。

2.2 枯落物中土壤节肢动物群落组成

4类灌丛微生境枯落物分解袋中共获取土壤节肢动物326只,隶属于10目18科(表2)。其中,优势类群为镰螯螨科、腾岛螨科、甲螨亚目和球角跳科,其个体数分别占总个体数的14.7%、22.7%、15.6%和14.4%;常见类群为矮蒲螨科、肉食螨科、虱啮科和跳虫科,其个体数分别占总个体数的9.5%、5.5%、4.3%和8.0%;其余10个类群为稀有类群,其个体数仅占总个体数4.9%。

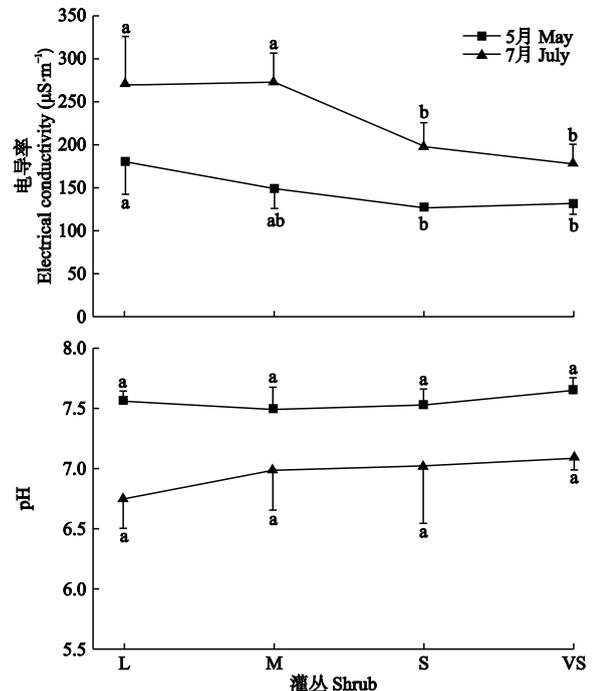


图2 不同大小灌丛土壤性状

Fig.2 Soil characteristics in shrub under different sizes

注: 不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平上的显著差异性。

Note: The different letters mean significant difference at $P<0.05$.

表 2 不同大小灌丛微生物环境枯落物中土壤节肢动物平均个体数

Table 2 Average individuals of soil arthropods in shrub under different sizes (ind · bag⁻¹)

动物类群 Faunal group	5月 May				7月 July				优势度 Dominance
	L	M	S	VS	L	M	S	VS	
吸螨科 Bdellidae	-	-	-	0.33(7.69)	-	-	-	-	+
跗线螨科 Tarsonemidae	-	0.33(2.44)	-	-	-	-	-	-	+
镰螯螨科 Actinedida	4.33(38.23)	-	1.00(9.09)	0.33(7.69)	0.67(6.67)	2.67(7.69)	1.00(17.65)	6.00(33.33)	+++
腾岛螨科 Teneriffidae	1.33(11.76)	0.66(4.88)	0.33(3.03)	-	0.67(6.67)	17.67(50.96)	2.33(41.18)	1.67(9.26)	+++
矮蒲螨科 Pymphoridae	1.33(11.76)	-	0.66(6.06)	-	4.00(40.00)	4.00(11.54)	-	0.34(1.85)	++
肉食螨科 Cheyletidae	0.33(2.94)	1.33(9.76)	1.33(12.12)	0.66(15.38)	2.00(20.00)	0.33(0.96)	-	-	++
绒螨科 Trombididae	-	-	-	-	-	0.33(0.96)	0.33(5.88)	-	+
甲螨亚目 Oribatida	2.00(17.64)	2.00(14.63)	1.33(12.12)	0.66(15.38)	1.33(13.33)	5.33(15.38)	0.34(5.88)	4.33(24.07)	+++
球角跳科 Hypogastruridae	0.66(5.88)	5.66(41.46)	4.00(36.36)	0.66(15.38)	-	1.00(2.88)	0.67(11.76)	3.00(16.67)	+++
跳虫科 Poduridae	0.33(2.94)	3.00(21.95)	2.00(18.18)	1.00(23.07)	-	0.33(0.96)	1.00(17.65)	1.00(5.56)	++
土蟠科 Cydnidae	-	-	-	-	-	-	-	0.67(3.70)	+
虱啮科 Liposcelididae	-	0.33(2.44)	0.33(3.03)	-	1.00(10.00)	3.00(8.65)	-	-	++
象甲科 Curculionidae	0.33(2.94)	-	-	-	-	-	-	-	+
步甲科幼虫 Carabidae larvae	0.33(2.94)	-	-	0.33(7.69)	0.33(3.33)	-	-	-	+
鳞翅目幼虫 Lepidoptera	0.33(2.94)	0.33(2.44)	-	-	-	-	-	-	+
摇蚊科 Chironomidea	-	-	-	-	-	-	-	0.67(3.70)	+
蚁科 Formicidae	-	-	-	0.33(7.69)	-	-	-	-	+
土蜂科 Scoliidae	-	-	-	-	-	-	-	0.33(1.85)	+
个体数 Individual	11.33±13.65a	13.67±16.25a	11.00±6.557a	4.33±4.51a	10.00±11.27a	34.67±48.09a	5.67±4.73a	18.00±9.17a	
类群数 Richness	4.33±3.21a	3.33±2.08a	4.67±1.52a	3.33±3.05a	3.33±1.52a	4.67±2.08a	2.67±0.57a	4.67±0.57a	

注:同行不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平上的显著差异性; - 表示无此类土壤节肢动物出现, +, 稀有类群, ++, 常见类群, +++, 优势类群。弧内数据表示个体数占群落个体数的百分比(%)。

Note: The letter within the same row mean significant difference at $P<0.05$. -, no ground-active arthropods were captured. +, Rare group; ++, Common group; +++, Dominant group. Bracket data mean the percentage of the total number of individual.

由表 3 可知,5 月调查时,VS 灌丛共有 8 个类群,优势类群、常见类群的类群数分别为 4、4。随着灌丛增大,其优势类群数无明显变化,而常见类群数呈上升趋势,M 灌丛增加到 5 个常见类群,L 灌丛增加到 7 个常见类群。其优势度表现为随着灌丛增大(由 VS 到 L),优势类群呈上升趋势,而常见类群呈下降趋势。4 类灌丛均无稀有类群。7 月调查时,VS 灌丛共有 9 个类群,优势类群、常见类群的类群数分别为 3、6。随着灌丛增大,其优势类群数无变

表 3 土壤节肢动物不同类群的类群数与优势度分布

Table 3 Distribution of group richness and dominance of soil arthropods

月份 Month shrub	灌丛	类群数 Taxon richness			优势度 Dominance (%)		
		优势类群 Dominant	常见类群 Common	稀有类群 Rare	优势类群 Dominant	常见类群 Common	稀有类群 Rare
5月	L	4	7	0	76.45	23.55	0
May	M	3	5	0	78.04	21.96	0
	S	4	4	0	78.78	21.22	0
	VS	4	4	0	69.21	30.79	0
7月	L	3	4	0	73.33	26.67	0
July	M	3	3	3	77.88	19.22	2.88
	S	3	3	0	70.59	29.41	0
	VS	3	6	0	74.07	25.93	0

化,而常见类群数呈下降趋势,M 灌丛和 S 灌丛下降到 3 个类群,L 灌丛下降到 4 个类群。其优势度表现为优势类群和常见类群均呈上升趋势。仅在 M 灌丛出现 3 个稀有类群,其优势度为 2.88%。

2.3 枯落物中土壤节肢动物群落多样性

由表 4 可知,土壤节肢动物优势度指数仅在 5 月表现为 M 灌丛显著高于 VS 灌丛($P<0.05$),而 M、VS 灌丛和 L、S 灌丛间无显著差异。由表 2 和表

表 4 不同大小灌丛土壤节肢动物群落多样性

Table 4 Diversity of soil arthropod community in shrub under different sizes

月份 Month	灌丛 Shrub	优势度指数 Shannon index	均匀度指数 Evenness index	丰富度指数 Margalef index	Shannon 指数 Shannon index
5月	L	0.38±0.11 ab	0.91±0.12 a	1.60±0.46 a	1.12±0.46 a
May	M	0.56±0.38 a	0.55±0.48 a	0.87±0.76 a	0.82±0.71 a
	S	0.29±0.07 ab	0.91±0.04 a	1.61±0.16 a	1.36±0.28 a
	VS	0.15±0.13 b	0.66±0.57 a	1.48±1.28 a	1.04±0.92 a
7月	L	0.43±0.11 a	0.88±0.09 a	1.21±0.27 a	0.98±0.31 a
July	M	0.37±0.03 ab	0.83±0.16 a	1.47±0.31 a	1.19±0.14 a
	S	0.41±0.08 ab	0.97±0.03 a	1.24±0.35 a	0.93±0.21 a
	VS	0.33±0.11 ab	0.84±0.10 a	1.36±0.42 a	1.30±0.25 a

注:不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平上的显著差异性。

Note: The different letters mean significant difference at $P<0.05$.

表 5 枯落物中土壤节肢动物群落指数与枯落物分解特征间的相关关系

Table 5 Correlation between soil arthropod community index and litter characteristics

	个体数 Individual	类群数 Richness	优势度指数 Simpson index	均匀度指数 Evenness index	丰富度指数 Margalef index	Shannon 指数 Shannon index
土壤 pH Soil pH	0.22	0.10	-0.09	0.23	0.06	0.16
电导率 Electrical conductivity	-0.06	0.08	0.25	-0.41 *	-0.17	-0.15
枯落物残留量 Litter content	0.53 *	0.35	0.05	-0.12	0.04	0.18
木质素含量 Lignin content	0.03	0.01 *	0.34 *	0.00	0.01	-0.09 *
纤维素含量 Cellulose content	0.58 **	0.37	-0.09	-0.14	0.02	0.22
P 含量 P content	0.47 *	0.14	0.13	-0.08 *	-0.14 *	0.00
K 含量 K content	0.63 **	0.32	0.15	-0.08 *	-0.13	0.12

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Note: * was significantly 0.05 level (bilateral), ** was significantly 0.01 level (bilateral).

3 可知,在 5 月和 7 月,土壤节肢动物个体数、类群数、均匀度指数、丰富度指数和 Shannon 指数在 4 类不同大小灌丛间均无显著差异。

2.4 枯落物中土壤节肢动物群落多样性与环境特征间的关系

由表 5 可以看出,土壤节肢动物个体数与枯落物残留量、纤维素含量、P 含量和 K 含量间呈正相关 ($P < 0.05$)。土壤节肢动物类群数和优势度指数与木质素含量间呈正相关 ($P < 0.05$)。土壤节肢动物均匀度指数与土壤电导率、枯落物 P 含量、K 含量间呈负相关 ($P < 0.05$)。土壤节肢动物丰富度指数仅与 P 含量间呈负相关 ($P < 0.05$)。土壤节肢动物 Shannon 指数仅与木质素含量呈负相关 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 环境特征

以往研究表明,枯落物及其元素含量受生境、枯落物质量和土壤生物的综合控制,而灌丛大小会引起灌丛下微生境变化,进而对枯落物残留量产生显著影响 (Ekschmitt *et al.*, 2005)。本研究发现,5 月枯落物残留量表现为 M 灌丛显著高于 S 灌丛,且枯落物中 K 含量表现为 M 灌丛显著高于 S、VS 灌丛。这与侯玲玲等 (2012) 和周虹等 (2016) 研究结果相似,随着灌丛冠幅增大,降雨对灌丛下枯落物影响减弱,导致灌丛下枯落物残留量高于灌丛间残留率。枯落物及养分含量流失主要受前期淋溶作用的影响,较大冠幅对降雨具有缓冲作用,可以有效截流降雨,削弱降雨对枯落物的淋溶作用,致使 M 灌丛可溶性有机质保留较多,而 S、VS 灌丛的冠幅较小,受淋溶作用强烈,导致枯落物中可溶性有机质与 K 离子流失殆尽 (Atkinson *et al.*, 2001; 陈婷等, 2016; 杨贵军等, 2016)。而生长旺期枯落物残留量及 K 含

量均表现 4 类不同大小灌丛间无显著差异。这是因为生长季期间降雨量大,在长时间淋溶作用下, M 灌丛枯落物中可溶性物质持续流失减少。5 月和 7 月枯落物中 P 含量均表现为 M 灌丛显著高于 S、VS 灌丛。这与马露莎等 (2014) 在宁南山区草原研究柠条枯落物分解特征结果相似,可能与分解者对 P 源的固定有关。在枯落物分解阶段,微生物生存、活动需要 P 元素的参与,随着灌丛生长,灌丛下微生物多样性增加,进而影响到枯落物中 P 元素的含量。表明灌丛微生境的复杂程度会影响枯落物的养分含量变化。5 月和 7 月枯落物中纤维素含量和木质素含量在 4 类灌丛微生境间无显著差异。这是因为木质素和纤维素是枯落物中难分解物质,其二者分解之间相互联系 (张雪梅等, 2017), 仅有特定的微生物才能将木质素分解,并且这种特定的微生物丰富度与灌丛微生境无关 (薛志婧等, 2017)。

土壤电导率在 5 月和 7 月均表现为 L 灌丛显著高于 S、VS 灌丛,这与刘佳楠等 (2018) 研究柠条灌丛对土壤理化性质的影响结果相似。柠条是豆科灌丛,在灌丛生长过程中,根部大量的根瘤菌固定游离态 N,致使根系泌盐作用增强,导致大型灌丛电导率偏高 (刘佳楠等, 2018)。但土壤 pH 值在 4 类灌丛微生境间无显著差异。说明灌丛对土壤酸碱度产生相似的影响规律,且灌丛大小对土壤酸碱度影响较小。

3.2 枯落物中土壤节肢动物群落组成及其多样性特征

不同灌丛微生境影响枯落物分解特征的同时,亦对栖居其内的土壤节肢动物群落组成产生显著影响。通过比较不同大小灌丛下土壤节肢动物优势类群组成,发现 5 月和 7 月 4 类灌丛枯落物中优势类群均以蜱螨目为主,且优势类群数无明显变化,但优

势类群组成各不相同,这与张丹桔等(2013)的研究结果相似。一方面,表明干旱区土壤节肢动物优势类群组成具有一定的稳定性,蜚蠊目是枯落物分解主要的土壤节肢动物类群(张丹桔等,2013),一旦灌丛定居,其枯落物对蜚蠊目类群产生相似的影响规律。同时,该动物类群抗干扰能力较弱,受环境影响较大,枯落物分解过程中养分元素的变化能够改变其群落的组成(Huang *et al.*; 2005; 何振等, 2018)。5月常见类群随灌丛增大表现为增加趋势,而7月常见类群随灌丛增大表现为减少趋势。这与何振等(2018)研究结果相似,5月土壤节肢动物类群数增多,反映了土壤节肢动物对枯落物微生境变化的敏感性和适应性。在5月,土壤冻融、气温回升,属于土壤节肢动物复苏期,动物类群较少。随灌丛增大,灌丛微生境中枯落物残留量高,腐殖质及养分元素丰富,且土壤动物生存压力小(何振等, 2018)。良好的微生境和更多的食物资源促进土壤节肢动物在大灌丛下生存、聚集和繁殖,致使5月常见类群随灌丛大小呈相似分布规律(谭艳等, 2014)。而7月常见群落分布则与之相反,在7月属于降雨集中的时期,潮湿土壤为土壤节肢动物生存提供了良好的栖息环境。其中,小灌丛属于灌丛生长初期,首先吸引迁移能力强的摇蚊科和土蜂科前来定居,导致小灌丛常见类群较多,而随着灌丛增大,枯落物积累量增多,部分枯落物中生存的类群迅速繁殖,种群数量大幅增加,优势集中显著突出,常见类群减少(刘任涛等,2016)。另外,仅7月出现稀有类群,一方面表明,5月属于土壤节肢动物的休眠结束期,竞争压力小,允许更多的土壤节肢动物类群生存,而随着生长季进行,部分土壤节肢动物对环境条件具有强烈适应性而迅速生存、繁殖,种间竞争激烈,致使适应性差的类群逐渐完成生活史过程退出群落(刘任涛等,2016)。

灌丛枯落物可以为土壤节肢动物提供食物来源和栖息地,直接影响土壤节肢动物存活(殷秀琴等, 2002)。本研究中,土壤节肢动物个体数随灌丛增大而呈增加趋势,但未达到显著水平。同时,土壤节肢动物均匀度指数、丰富度指数和多样性指数均无显著差异。一方面说明土壤节肢动物对灌丛增大、枯落物积累产生了积极反应,土壤节肢动物个体数增加。另一方面说明,干旱区气候干旱少雨,土壤节肢动物类群较少,一旦灌丛定居,灌丛微生境对土壤节肢动物多样性产生相似的影响规律(刘任涛等,

2016)。土壤节肢动物优势度指数仅在5月表现为M灌丛显著高于VS灌丛,这与谭艳等(2014)研究结果相似。在土壤节肢动物复苏初期,优势类群环境适应性强,随着灌丛枯落物残留量增多,优势类群迅速繁殖,优势度升高,迅速占据生态位,导致土壤节肢动物优势度指数升高(何振等,2018)。

3.3 土壤节肢动物群落与枯落物分解特征的关系

Carcamo等(2001)和Carrillo等(2011)研究表明,灌丛下枯落物为土壤节肢动物提供食物来源和栖息地,与土壤节肢动物类群组成紧密相关。本研究中,土壤节肢动物个体数、类群数和多样性指数均与土壤电导率、枯落物残留量、木质素、纤维素、P和K含量密切相关。这是因为干旱区气候恶劣,对高温、干旱环境适应性强的动物类群较少,食源的多寡及质量直接影响土壤节肢动物的生存及生活史过程(Wagg *et al.*, 2014)。表明枯落物对土壤节肢动物有聚集效应,不同大小灌丛通过改变枯落物质量及含量,进而影响到土壤节肢动物个体分布和群落组成。

4 结 论

干旱风沙区,灌丛逐渐增大,枯落物残留量、P含量、K含量及土壤电导率均显著升高。

不同大小灌丛将改变枯落物残留量及质量,导致土壤节肢动物类群对生境选择性表现出不同的响应模式,不同大小灌丛土壤节肢动物群落组成变化较大。

干旱区气候恶劣,土壤节肢动物类群较少,灌丛增大促进枯落物某些类群聚集而导致土壤节肢动物优势度指数显著升高,但对土壤节肢动物类群数和多样性指数影响较小。

参考文献

- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社. [Bao SD. 2000. Soil Agrochemical Analysis (Third Edition). Beijing: China Agricultural Publishing House.]
- 陈婷, 郝敏, 孔范龙, 等. 2016. 枯落物分解及其影响因素. 生态学杂志, **35**(7): 1927–1935. [Chen T, Xi M, Kong FL, *et al.* 2016. A review on litter decomposition and influence factors. *Chinese Journal of Ecology*, **35**(7): 1927–1935.]
- 何振, 赵琴, 李迪强, 等. 2018. 八大公山土壤跳虫群落结构与多样性的季节动态. 林业科学研究, **31**(3): 68–77. [He Z, Zhao Q, Li DQ, *et al.* 2018. Seasonal dynamics of community structure and diversity of soil collembolan

- in Badagong Mountains. *Forest Research*, **31**(3): 68–77.]
- 和润莲, 陈亚梅, 邓长春, 等. 2016. 川西高山林线三种灌木凋落叶分解中的无脊椎动物多样性. *生态学报*, **36**(17): 5497–5507. [He RL, Chen YM, Deng CC, et al. 2016. Invertebrate diversity in foliar litter of three shrubs in the alpine timberline of western Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, **36**(17): 5497–5507.]
- 侯玲玲, 孙涛, 毛子军, 等. 2012. 小兴安岭不同林龄天然次生白桦林凋落叶分解及养分变化. *植物研究*, **32**(4): 492–496. [Hou LL, Sun T, Mao ZJ, et al. 2012. Litter decomposition and nutrient dynamic of *Betula platyphylla* secondary forest with different stand ages in Xiaoxing' an Mountains. *Bulletin of Botanical Research*, **32**(4): 492–496.]
- 李艳红, 杨万勤, 罗承德, 等. 2013. 桉-栎不同混合比例凋落叶分解过程中土壤动物群落动态. *生态学报*, **33**(1): 159–167. [Li YH, Yang WQ, Luo CD, et al. 2013. Dynamics on soil faunal community during the decomposition of mixed eucalypt and alder litters. *Acta Ecologica Sinica*, **33**(1): 159–167.]
- 刘佳楠, 刘任涛, 赵娟, 等. 2018. 沙地柠条锦鸡儿灌丛枯落叶输入特征及对土壤理化性质的影响. *干旱区资源与环境*, **32**(11): 169–175. [Liu JN, Liu RT, Zhao J, et al. 2018. Leaf litter input of *Caragana kornshinskii* and its effect on soil properties in desertified grassland. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, **32**(11): 169–175.]
- 刘佳楠, 赵娟, 常海涛, 等. 2019. 基于网孔分解袋法的荒漠草原柠条锦鸡儿枯落叶分解过程中的养分变化. *草业科学*, **36**(6): 1624–1633. [Liu JN, Zhao J, Chang HT, et al. 2019. Detection of changes in litter nutrients in *Caragana korshinskii* following the decomposition process in desertified grassland ecosystems using the litter bag method. *Pratacultural Science*, **36**(6): 1624–1633.]
- 刘任涛, 王少昆, 周娟. 2015. 科尔沁和毛乌素沙地灌丛“虫岛”效应比较. *中国沙漠*, **35**(6): 1599–1606. [Liu RT, Wang SK, Zhou J. 2015. Comparison of “Arthropod Island” of shrub effect between two sandy grasslands in Northern China. *Journal of Desert Research*, **35**(6): 1599–1606.]
- 刘任涛, 郝伟华, 刘佳楠, 等. 2018. 沙地柠条锦鸡儿(*Caragana*)灌丛微生境节肢动物群落特征. *中国沙漠*, **38**(1): 117–125. [Liu RT, Xi WH, Liu JN, et al. 2018. Spatial distribution of arthropod community between *Caragana* shrub microhabitats. *Journal of Desert Research*, **38**(1): 117–125.]
- 刘任涛, 郝伟华, 朱凡. 2016. 宁夏荒漠草原地面节肢动物群落组成及季节动态特征. *草业学报*, **25**(6): 126–135. [Liu RT, Xi WH, Zhu F. 2016. Community composition and seasonal dynamics of ground-dwelling arthropods in the desertified steppe of Ningxia. *Acta Prataculturae Sinica*, **25**(6): 126–135.]
- 刘任涛, 朱凡, 柴永青. 2014. 干旱区不同年龄灌丛斑块地面节肢动物的聚集效应. *应用生态学报*, **25**(1): 228–236. [Liu RT, Zhu F, Chai YQ. 2014. Assemblage effect of ground arthropod community in desert steppe shrubs with different ages. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **25**(1): 228–236.]
- 刘任涛, 朱凡. 2016. 流动沙地人工种植灌丛对地面节肢动物多样性与功能群结构的影响. *林业科学*, **52**(2): 91–98. [Liu RT, Zhu F. 2016. Effect of afforested shrubs on ground-dwelling arthropod diversity and trophic structure in desertified grassland ecosystems. *Scientia Silvae Sinicae*, **52**(2): 91–98.]
- 马露莎. 2014. 宁南山区草原六种典型植物枯落叶分解特征研究(硕士学位论文). 陕西杨凌: 西北农林科技大学. [Ma LS. 2014. Decomposition Characteristics of 6 Typical Plant Litters in the South Area Grassland of Ningxia (Master Thesis). Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University.]
- 谭艳, 王邵军, 阮宏华, 等. 2014. 不同林龄杨树人工林土壤动物群落结构特征. *南京林业大学学报(自然科学版)*, **38**(3): 8–12. [Tan Y, Wang SJ, Ruan HH, et al. 2014. Community structure of soil fauna in different age poplar plantations. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, **38**(3): 8–12.]
- 王振海, 殷秀琴, 张成蒙. 2016. 土壤动物在长白山臭冷杉凋落叶分解中的作用. *林业科学*, **52**(7): 59–67. [Wang ZH, Yin XQ, Zhang CM. 2016. Effects of soil fauna communities on decomposition of *Abies nephrolepis* litter in Changbai Mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, **52**(7): 59–67.]
- 肖玖金, 赵波, 周开伦, 等. 2018. 野青茅根系和叶分解过程中土壤动物群落特征. *应用与环境生物学报*, **24**(5): 1179–1184. [Xiao JJ, Zhao B, Zhou KL, et al. 2018. Community characteristics of the soil fauna associated with decomposing roots and litter of *Deyeuxia arundinacea*. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, **24**(5): 1179–1184.]
- 薛志婧. 2015. 黄土丘陵区草地生态系统典型植物枯落叶分解特征研究(博士学位论文). 陕西杨凌: 西北农林科技大学. [Xue ZQ. 2015. The decomposition Characteristics of Typical Plant Litters on Grassland Ecosystem on Loess Hilly-gully Region (Ph. D. Thesis). Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University.]
- 杨贵军, 王新谱, 贾彦霞, 等. 2016. 人工柠条锦鸡儿-荒漠草地交错带拟步甲昆虫群落多样性. *生态学报*, **36**(3): 608–619. [Yang GJ, Wang XP, Jia YX, et al. 2016. Diversity of darkling beetle community in the artificial cultivation *Caragana intermedia* shrub-desert grassland ecotone in Yanchi County, Ningxia, China. *Acta Ecologica Sinica*, **36**(3): 608–619.]
- 殷秀琴, 仲伟彦, 王海霞, 等. 2002. 小兴安岭森林落叶分解与土壤动物的作用. *地理研究*, (6): 689–699. [Yin XQ, Zhong WY, Wang HX, et al. 2002. Decomposition of forest defoliation and role of soil animals in Xiao Hingan Mountains. *Geographical Research*, (6): 689–699.]
- 尹文英. 1998. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社. [Yin WY. 1998. Pictorial Keys to Soil Animal of China.

- Beijing: Science Press.]
- 张丹桔, 张健, 杨万勤, 等. 2013. 一个年龄序列巨桉人工林植物和土壤生物多样性. 生态学报, **33**(13): 3947–3962. [Zhang DJ, Zhang J, Yang WQ, *et al.* 2013. Plant's and soil organism's diversity across a range of *Eucalyptus grandis* plantation ages. *Acta Ecologica Sinica*, **33**(13): 3947–3962.]
- 张雪梅. 2017. 沙漠公路防护林主要植物种凋落物的分解特征(博士学位论文). 乌鲁木齐: 新疆大学. [Zhang XM. 2017. Litter Decomposition Characteristics of Main Species in Tarim Desert Highway Shelterbelt(Ph.D. Thesis). Urumqi: Xinjiang University.]
- 周虹. 2016. 高寒沙区小叶锦鸡儿凋落物的分解及土壤微生物动态变化规律研究(硕士学位论文). 西宁: 青海大学. [Zhou H. 2016. Research of the Litter Decomposition Rules of *Caragana microphylla* and Changes of Soil Microbial in Alpine Desert Area(Master Thesis). Xining: Qinghai University.]
- Atkinson RB, Cairns J. 2001. Plant decomposition and litter accumulation in depressional wetlands, functional performance of two wetland age classes that were created via excavation. *Wetlands*, **21**: 354–362.
- Carcamo HA, Prescott CE, Chanway CP, *et al.* 2001. Do soil fauna increase rates of litter breakdown and nitrogen release in forests of British Columbia, Canada? *Canadian Journal of Forest Research*, **31**: 1195–1204.
- Carrillo Y, Ball BA, Bradford MA, *et al.* 2011. Soil fauna alter the effects of litter composition on nitrogen cycling in a mineral soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **43**: 1440–1449.
- Ekschmitt K, Liu M, Vetter S, *et al.* 2005. Strategies used by soil biota to overcome soil organic matter stability. Why is dead organic matter left over in the soil? *Geoderma*, **128**: 167–176.
- Frouz J, Roubickova A, Hedenec P, *et al.* 2015. Do soil fauna really hasten litter decomposition? A meta-analysis of enclosure studies. *European Journal of Soil Biology*, **68**: 18–24.
- Huang YM, Zhang J, Yang WQ, *et al.* 2010. Response of soil faunal community to simulated understory plant loss in the subalpine coniferous plantation of western Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, **30**: 2018–2025.
- Jiang YF, Yin XQ, Wang FB. 2013. The influence of litter mixing on decomposition and soil fauna assemblages in a *Pinus koraiensis* mixed broad-leaved forest of the Changbai Mountains, China. *European Journal of Soil Biology*, **55**: 28–39.
- Slade EM, Riutta T. 2012. Interacting effects of leaf litter species and macrofauna on decomposition in different litter environments. *Basic and Applied Ecology*, **13**: 423–431.
- Wagg C, Bender SF, Widmer F, *et al.* 2014. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **111**: 5266–5270.
-
- 作者简介 张安宁,男,1995年生,硕士研究生,主要研究方向土壤动物生态学和恢复生态学。E-mail: nxuzan@126.com
责任编辑 魏中青
-