

DOI: 10.5846/stxb202111193261

蒋嘉瑜, 刘任涛, 张安宁, 陈蔚. 干旱与半干旱区灌丛微生境中红砂枯落物分解特征及中小型节肢动物的作用. 生态学报, 2023, 43(5): 1981-1994.
Jiang J Y, Liu R T, Zhang A N, Chen W. The decomposition process of *Reaumuria soongorica* litter and the role of microarthropods in shrub microhabitats in arid and semi-arid regions. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1981-1994.

干旱与半干旱区灌丛微生境中红砂枯落物分解特征及中小型节肢动物的作用

蒋嘉瑜^{1,2}, 刘任涛^{1,2,*}, 张安宁^{1,2}, 陈蔚^{1,2}

1 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

2 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

摘要: 在干旱区(内蒙古乌拉特后旗)和半干旱区(宁夏盐池)荒漠草原区, 选择柠条灌丛内外微生境为研究样地, 以红砂枯落物为研究对象, 利用 2 种规格网孔分解袋(30 目和 250 目网孔), 探索中小型节肢动物在红砂枯落物分解过程中的作用规律, 研究灌丛微生境中红砂枯落物质量损失变化特征及节肢动物群落的贡献。结果表明:(1) 在干旱与半干旱区, 红砂枯落物分解常数 K 均表现为灌丛内外微生境间无显著差异, 且有无节肢动物参与对 K 的影响均较小。(2) 分解至 12 个月时, 无节肢动物参与的情况下, 干旱与半干旱区红砂枯落物残留率均表现为裸地显著低于灌丛; 但有节肢动物参与时, 枯落物残留率则表现为灌丛内外微生境间无显著差异。分解至 44 个月时, 无节肢动物参与的情况下, 仅在干旱区枯落物残留率表现为裸地显著高于灌丛; 而有节肢动物参与时, 干旱与半干旱区枯落物残留率均表现为灌丛内外微生境间无显著差异。(3) 节肢动物对红砂枯落物质量损失的贡献率呈现单峰值现象, 且在分解至 24 个月时达到峰值。枯落物分解至 12 个月时, 仅半干旱区节肢动物对红砂枯落物分解的贡献率表现为裸地显著低于灌丛; 分解至 44 个月时, 仅干旱区节肢动物对红砂枯落物分解的贡献率表现为裸地显著高于灌丛。(4) 在干旱区, 节肢动物对红砂枯落物质量损失的贡献率与土壤 pH 值、土壤砂粒、土壤全碳和含水量密切相关; 而在半干旱区, 节肢动物对红砂枯落物质量损失的贡献率与土壤 pH 值、土壤砂粒、土壤碳氮比 $d(C/N)$ 和黏粉粒含量密切相关。综合表明, 干旱与半干旱区灌丛微生境红砂枯落物分解特征受到节肢动物分解作用的影响较小; 但在某些分解阶段, 灌丛内外微生境中红砂枯落物质量损失的差异性受到节肢动物分解作用的显著影响, 节肢动物的分解作用表现为弱(12 个月)-强(24 个月)-弱(44 个月)的作用规律, 而且受到气候区调节的灌丛微生境限制。

关键词: 干旱与半干旱区; 灌丛微生境; 红砂枯落物; 质量损失率; 中小型节肢动物

The decomposition process of *Reaumuria soongorica* litter and the role of microarthropods in shrub microhabitats in arid and semi-arid regions

JIANG Jiayu^{1,2}, LIU Rentao^{1,2,*}, ZHANG An'ning^{1,2}, CHEN Wei^{1,2}

1 School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: In desertified grasslands of the arid Urad Rear Banner of the Inner Mongolia and the semi-arid Yanchi of Ningxia, the *Caragana korshinskii* shrub microhabitats beneath shrub canopies and in the open spaces were setup as study sites. The litter of *Reaumuria soongorica* was used as the research object. Two sizes of mesh (30-mesh, and 250-mesh) for litter bags were used to explore the role of soil microarthropods on litter decomposition of *Reaumuria soongorica*. The

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2021AAC03047, 2020AAC02014); 宁夏重点研发计划项目(2021BEG03007); 国家自然科学基金项目(41867005)

收稿日期: 2021-11-19; **网络出版日期:** 2022-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nxuli2012@126.com

objective of present study was to probe into the mass loss of the litter and the contribution of soil microarthropod community in the shrub microhabitats. The results showed that: (1) there was no significant difference in decomposition constant K of litter between shrub canopy and open spaces; the presence or absence of microarthropods had little effect on K . (2) At decomposition stage of 12 months, there was significantly lower mass remaining rate of the litter in open spaces than beneath shrub canopy without the presence of microarthropods, but there was no significant difference between shrub canopy and open spaces in the case of microarthropods presence. At decomposition stage of 44 months, the mass remaining rate of litter was significantly higher in open spaces than beneath shrub canopy only in arid regions without the participation of microarthropods; however, there was no significant difference between both shrub microhabitats with microarthropod presence in both arid and semi-arid regions. (3) The contribution rate of microarthropods to the mass loss of litter showed a unimodal type during decomposition process, with a single peak at 24 months. At decomposition stage of 12 months, there was significantly lower contribution rate of microarthropods to the decomposition of litter in open spaces than beneath shrub canopy only in semi-arid region. At decomposition stage of 44 months, the contribution rate of microarthropods to the decomposition of litter was significantly higher in open spaces than beneath shrub canopy only in arid region. (4) In the semi-arid region, the contribution rate of microarthropods to litter mass loss was closely correlated to the group richness of microarthropod, soil sand content, soil total carbon, and water content. In the arid region, however, the contribution rate of microarthropods to the mass loss of litter was closely correlated to soil pH, soil sand, soil C/N, and clay and silt content. In conclusion, the overall litter decomposition in shrub microhabitats in arid and semi-arid regions was little affected by the role of microarthropods. However, at certain decomposition stages, the difference in mass loss of the litter between shrub microhabitats was affected remarkably by the role of microarthropods. There was a law of weak (12 months)-strong (24 months)-weak (44 months) role of microarthropods on litter decomposition that was regulated by the climatic factors.

Key Words: arid and semi-arid regions; shrub microhabitats; *Reaumuria soongorica* litter; mass loss rate; microarthropod

枯落物作为养分的基本载体,是连接地上与地下生态系统环境间的“缓冲区”^[1]。枯落物的分解是维持荒漠草原生态系统物质循环和能量流动的重要环节,受到气候、枯落物基质及枯落物分解者等生物与非生物因子的共同影响^[2]。在干旱、半干旱荒漠草原区,红砂(*Reaumuria soongorica*)具有耐旱、耐盐碱、抗逆性和集沙能力强等特点,能长期生长在干旱环境中,是维持荒漠草原脆弱生态系统稳定性极为重要的植物种^[3]。近年来,由于人类活动加剧与气候条件的变化,红砂林地严重退化,使原本脆弱的生态系统受到破坏^[4-5]。因此,为了促进红砂林地生态恢复,在退化红砂林地开展以耐旱耐寒,防风固沙能力强的柠条(*Caragana korshinskii*)为主要植物种的植被建设^[6]。随着柠条灌丛林地的生长、发育和演化,柠条和红砂镶嵌分布形成复合型灌-草系统;且柠条灌丛形成的微环境必然影响红砂枯落物的分解过程。因此,研究柠条灌丛微气候对红砂枯落物分解的调控,调节荒漠草原生态系统结构与功能有着重要作用。

降水与气温作为干旱、半干旱区枯落物分解的重要气候因素,它们可通过控制枯落物质量和分解者群落结构等间接作用于分解者对枯落物分解及其反馈结果产生影响^[6-7]。其中,土壤动物作为红砂枯落物分解者的重要参与者,是枯落物分解的主体,对枯落物分解过程起着极为重要的调控作用^[8]。红砂枯落物不但为土壤动物提供食物来源和栖居场所,也影响土壤动物的类群及数量。因此,在不同水热因子调控和灌丛微环境的双重作用下,红砂枯落物分解受到土壤动物多样性分布和枯落物本身直接或间接的影响。

目前,关于土壤动物群落结构及多样性分布对枯落物分解影响的研究有很多。在全球变化的大尺度下,土壤动物区系提高了枯落物的分解能力,平均增幅为 27%,并且土壤动物与气候间存在交互作用^[8]。对于水分和有机质缺乏的干旱与半干旱区,灌丛呈板块化分布,灌丛下枯落物通过聚集土壤动物数量,促进枯落物分解和养分循环,而灌丛的遮阴减少了高温胁迫,有利于保存水分,提高枯落物的分解速率^[7]。González 等^[9]在对干湿程度不同的亚热带和温带亚高山森林生态系统中研究发现,亚热带森林生态系统土壤动物对枯落物分

解速率的影响显著低于亚热带森林生态系统。而 Austin 等^[10]研究发现光照强烈的干旱环境,在光化学或物理降解的作用下,枯落物的分解速率反而快于半干旱区。综合发现,在不同的环境下,水分、温度等非生物因子和土壤动物等生物都可能成为最主要的影响因素,对枯落物分解过程产生影响。而关于不同水热条件下,天然和人工灌丛镶嵌分布的灌-草复合型荒漠草原,枯落物节肢动物对红砂枯落物分解过程中质量损失的影响缺乏研究,不同微生境枯落物节肢动物对枯落物质量损失的贡献率尚不清楚。

鉴于此,本文选择不同水热条件的宁夏盐池半干旱区和内蒙古乌拉特后旗干旱区荒漠草原为研究样地,以红砂枯落物为研究对象,采用网孔分解袋法,通过调查 2 个样地灌丛内外微生境中红砂枯落物分解过程质量损失及枯落物节肢动物在红砂枯落物分解中的作用规律,旨在深入认识水热等气候因子变化条件下枯落物节肢动物对分解功能的作用规律,为干旱、半干旱区灌丛生态效应评价及其退化生态系统恢复提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于半干旱区宁夏盐池县和干旱区内蒙古乌拉特后旗。其中,宁夏盐池县(37°49'N,107°27'E,平均海拔 1410 m),属于典型温带大陆性季风气候。年平均气温 8.5℃,年平均降雨量 281.7 mm,且全年 62% 以上的降水集中在 7—9 月。该区域地带性土壤主要为灰钙土与淡灰钙土;非地带性土壤主要为中北部广泛分布的风沙土。地表植物主要为柠条(*C. kornshinskii*)、中亚白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii* Vass.)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)等^[11—12]。

内蒙古乌拉特后旗(41°24'N,106°58'E,平均海拔 1648 m),属于典型的大陆性干旱气候。年平均气温 5.7℃,年平均降雨量 184.5 mm,全年 70% 以上降水集中在 7—8 月。该区域地带性土壤主要为灰棕漠土和棕钙土;非地带性土壤主要为风沙土。地表植物主要为柠条(*C. kornshinskii*)、红砂(*R. soongorica*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、多根葱(*Allium polyrhizum*)和小针茅(*Stipa klemenzii*)等^[13—14]。

1.2 研究方法

1.2.1 枯落物收集与枯落物袋布设

于 2017 年 9 月生长期结束后,选择盐池半干旱区和乌拉特后旗干旱区的红砂灌丛进行枯落物样品的试验布设与采集。用剪刀齐地面采集红砂灌丛的部分新鲜枝叶,带回实验室于 65℃ 下烘干至质量恒定后充分混合,以模拟自然条件下的枯落物状态。并取部分同等质量枯落物烘干样进行枯落物初始化学性质的测定(表 1)。依据地上红砂枯落物生物量分布情况、网孔分解袋以及样方面积,准确称取质量 10 g 的红砂烘干样装入枯落物分解袋(10 cm×15 cm)中,平放在选取好的试验样地内,并用铁钩四角固定,其中枯落物分解袋表面层采用 30 目(0.55 mm)和 250 目(0.058 mm),贴地面层为避免枯落物损失和地下动物的干扰,均采用 250 目的尼龙网。(30 目网孔分解袋允许中小型节肢动物和微生物进入,视为有中小型节肢动物处理;250 目网孔分解袋仅允许微生物进入,视为无中小型节肢动物的对照。)

在盐池半干旱区和乌拉特后旗干旱区荒漠草原封育试验研究样地内,分别选择 30 株高度、冠幅等形态特征无显著差异的老林龄^[11]柠条灌丛作为标准样株进行标记,每个标准样株间隔 15 m 以上,且每个标准样株下设置一个采样点,每个采样点下均放置 30 目和 250 目规格红砂枯落物分解袋各 1 袋,且在每个采样点外的裸露地同时铺设同样规格和数量的红砂枯落物分解袋作为对照,埋藏深度 0—2 cm。(为消除灌丛的干扰,灌丛外裸露地远离灌丛 10 m 以上)。于 2017 年 9 月 24 日完成两个地区分解袋的布设,共布设分解袋 240 袋。自放分解袋之日(2017 年 9 月 24 日起),分别于非生长季(2018、2021 年 5 月)在生长季(2018、2019、2020 年 9 月)进行取样,每次取样 48 袋,共取样 5 次。取样总计 240 袋(2 个地区×2 种微生境×2 种规格×6 个重复×5 次取样)。

2 个地区研究样地地势平坦、地形、植被及土壤类型基本一致,且主要以风沙土为主。其中盐池柠条灌丛平均高度为(1.04±0.05) m,冠幅平均直径为(1.96±0.06) m。乌拉特后旗柠条灌丛平均高度为(0.93±0.04) m,

冠幅平均直径为 (1.82 ± 0.05) m。

表 1 红砂枯落物基质初始化学性质 (平均值 $\pm$ 标准误)

Table 1 Initial chemical properties of *R. soongorica* litter (Mean $\pm$ SE)

养分 Nutrient	含量 Content/%	养分 Nutrient	含量 Content/%
纤维素 Cellulose	8.69 $\pm$ 0.56	全氮 Total nitrogen	1.64 $\pm$ 0.03
木质素 Lignin	11.09 $\pm$ 0.62	全磷 Total phosphorus	0.32 $\pm$ 0.01
全碳 Total carbon	35.08 $\pm$ 1.15	全钾 Total potassium	0.53 $\pm$ 0.02

1.2.2 枯落物取样与节肢动物的分离鉴定

每次分别从盐池半干旱区与乌拉特后旗干旱区灌丛内外微生境取回枯落物袋,装入信封后,保存在恒温箱中,并及时带回室内进行分析。红砂枯落物分解袋中节肢动物的分离采用干漏斗法^[15],分离时间为 24 h,分离完毕后放置于盛 75%酒精的西林瓶中,于-4℃冰箱中保存,以供后期进行制片、计数、镜检和分类鉴定。本研究中节肢动物标本主要采用双筒体视显微镜(OLYMPUS SZX16,日本)和光学显微镜(Nikon E200MV,日本)进行种类鉴定和数量统计。依据《中国土壤动物检索图鉴》^[16]、《幼虫分类学》^[17]和《蜱螨学》^[18]等分类图鉴进行分类和鉴定。分解袋中节肢动物一般鉴定到科水平,个别鉴定到属水平。

1.2.3 枯落物分析

将分离节肢动物后的枯落物样品,清除枯落物叶片表面土壤和杂质,于 65℃下烘干,并用天平(感量为 0.001 g)准确称重,计算枯落物质量损失率。

本试验中初始养分含量碳(C)、氮(N)、磷(P)、钾(K)、酸性洗涤木质素和酸性洗涤纤维素等指标的测定均在宁夏吴标检测服务研究院和杨凌启翔生物科技有限公司完成。其中枯落物中酸性洗涤纤维素(ADC)采用改进的 Van Soest 方法进行测定;酸性洗涤木质素(ADL)用范式法测定;全碳和全氮采用通过元素分析仪(意大利 DK6,UDK140 分析仪)进行测定;全钾采用氢氧化钠熔融-火焰光度计法测定;全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定^[19]。

1.2.4 土壤样品的收集与分析

每次枯落物分解袋取回后,在不同规格分解袋贴地表处用铝盒取 0—10 cm 的土壤样品各 1 个,测定土壤质量含水量;并用小铲取混合土壤样品 1 个,放在自封袋中带回实验室以供后续土壤指标测定。混合土壤样品经自然风干后,去除叶、茎、根系和石块等杂物,部分过 2 mm 土壤筛,用于土壤 pH、电导率和粒径组成的测定(附表 1);另一部分土壤样品研磨后过 0.01 mm 筛,用于土壤全碳(TC)和土壤全氮(TN)的测定(附表 1)。其中土壤养分含量(TC、TN)在杨凌启翔生物科技有限公司完成。

土壤 pH 值和电导率(μ S/cm),则采用 1:5 的土水比浸提后,静置一夜取上清液,分别使用便携式酸度计(雷磁 PHBJ-260 型,上海)和便携式电导率仪(齐威 DDB-11A,杭州)在实验室进行测定。土壤粒径组成采用 Mastersizer 3000 激光衍射粒度分析仪进行其粒径体积百分含量的测定。土壤全碳(%)和全氮(%)通过元素分析仪(意大利 DK6,UDK140 分析仪)来测定^[19]。

1.3 数据处理与统计分析

根据连续取样称取枯落物干物质的重量,计算各孔径枯落物质量损失率(ML)和质量残留率(R_m),枯落物分解速率采用改进的 Olson 负指数衰减模型,其中 K 值越大,枯落物分解速率越快。公式如下^[20]:

$$ML(\%) = \frac{(M_0 - M_t)}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\frac{M_t}{M_0} = ae^{-Kt} \quad (2)$$

$$R_m(\%) = 1 - ML \quad (3)$$

式(1)、(2)和(3)中, ML 为枯落物质量损失率(%), R_m 为质量残留率(%), M_t 为各孔径枯落物分解 t 时间后

剩余的质量(g), M_0 为枯落物初始质量(g), a 为拟合参数, K 为分解常数($\text{g g}^{-1} \text{m}^{-1}$), t 为分解时间(month)。

节肢动物优势度的划分依据:个体数量占群落总个体数 10% 以上为优势类群, 占 1%—10% 为常见类群, 不足 1% 为稀有类群^[21]。

采用 SPSS 25 软件进行统计分析。采用独立样本 t 检验法比较分解时间下微生境差异与网孔处理对枯落物质量损失的影响。Pearson 相关性分析探究枯落物节肢动物对枯落物质量损失的贡献率与土壤理化性质间的相关性。采用 Origin 2018 和 R 4.1.0 语言中 corplot 软件包作图。由于本研究试验周期长, 难控制的因素较多, 实验误差可能较大, 采用双尾检测, 显著水平为 $P=0.1$ 。图表中数据均为平均值 $\pm$ 标准误差。

2 结果与分析

2.1 红砂枯落物中节肢动物群落特征

盐池半干旱区研究样地红砂枯落物分解袋中, 共获取节肢动物 956 只, 34 个类群(附表 2)。其中, 优势类群为球角蛱科、小真古蛱科和矮蒲蛱科共 3 类, 其个体数分别占总个体数的 35.36%、23.12%、10.70%; 常见类群为垂盾甲蛱属、疣蛱科、绒蛱科、镰螯蛱科、派盾蛱科、肉食蛱科共 6 类, 其个体数分别占总个体数的 9.41%、6.17%、2.62%、1.88%、1.88%、1.15%; 其余 25 个类群为稀有类群, 其个体数仅占总个体数的 7.74%。

乌拉特后旗干旱区研究样地红砂枯落物分解袋中, 共获取节肢动物 647 只, 19 个类群(附表 3)。其中, 优势类群为垂盾甲蛱属、矮蒲蛱科和镰螯蛱科共 3 类, 其个体数分别占总个体数的 34.93%、19.32%、11.28%; 常见类群为巨须蛱科、球角蛱科、等节蛱科、吸蛱科、小真古蛱科、盖头甲蛱属和下盾甲蛱属共 7 类, 其个体数分别占总个体数的 7.42%、7.10%、4.17%、3.25%、3.25%、3.09% 和 1.70%; 其余 9 个类群为稀有类群, 其个体数仅占总个体数的 4.48%。

如图 1 所示, 仅红砂枯落物分解至 12 月时, 枯落物袋中节肢动物个体数在盐池半干旱区表现为裸地显著高于灌丛, 而在乌拉特后旗干旱区表现为裸地显著低于灌丛($P<0.1$); 枯落物袋中节肢动物类群数仅在盐池半干旱区表现为裸地显著高于灌丛($P<0.1$)。

2.2 灌丛微生境红砂枯落物分解常数及其质量残留率变化

不同微生境、网孔和分解时间对枯落物质量损失率的重复测量方差分析发现(表 2), 分解时间、网孔及二者的交互作用在盐池半干旱区和乌拉特后旗干旱区均对红砂枯落物质量损失率产生显著影响($P<0.1$); 而微生境与分解时间的交互作用仅在乌拉特后旗干旱区红砂枯落物质量损失率均产生显著影响($P<0.1$)。一方面说明分解时间和基于网孔的节肢动物是否参与分解均影响红砂枯落物质量损失, 同时也说明了节肢动物对枯落物质量损失的影响受到分解时间的调控, 且微生境对红砂枯落物质量损失的影响也受到分解时间和地区的影响。

如图 2 所示, 根据 Olson 分解模型拟合不同微生境枯落物质量残留率随分解时间动态变化及计算分解常数。不同微生境处理下, 有无节肢动物的参与, 枯落物分解常数 K 在盐池半干旱区和乌拉特后旗干旱区灌丛内外均无显著差异($P>0.1$)。

表 2 不同微生境、网孔和分解时间对枯落物质量损失率的重复测量方差分析

差异来源 Source of difference	半干旱区(盐池) Semi-arid zone(Yanchi)		干旱区(乌拉特后旗) Arid zone(Urat Rear Banner)	
	F	P	F	P
微生境 Microhabitats(M)	2.954	0.101	0.337	0.568
网孔 Sizes(S)	10.255	0.004	6.370	0.020
分解时间 Time(T)	118.428	0.001	184.384	0.001
M×S	1.781	0.197	0.144	0.709
M×T	0.824	0.528	4.603	0.011
S×T	7.330	0.001	16.227	0.001
M×S×T	1.794	0.177	1.654	0.207

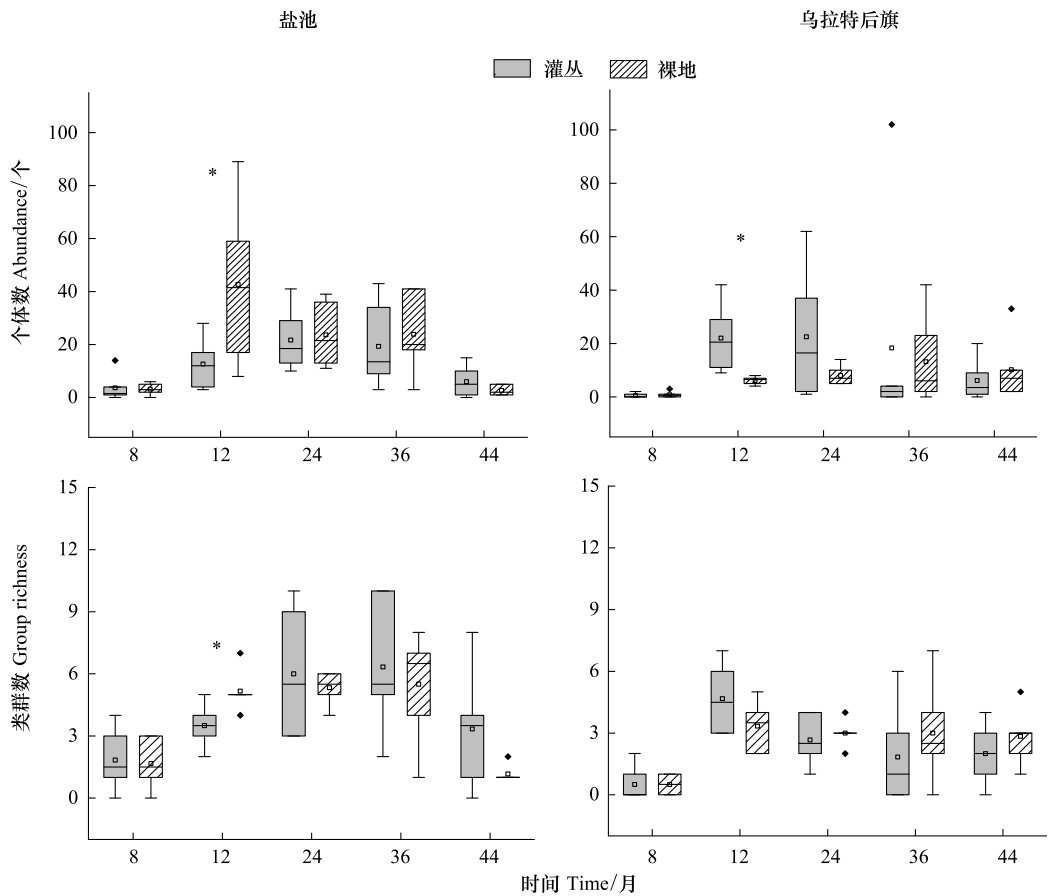


图 1 红砂枯落物中小型节肢动物个体数和类群数变化

Fig.1 Changes in the abundance and group richness of *R. soongorica* litter microarthropods

* 代表不同微生境间的差异性 ($P < 0.1$). 箱线图中 ◆ 代表异常值; □ 代表平均值

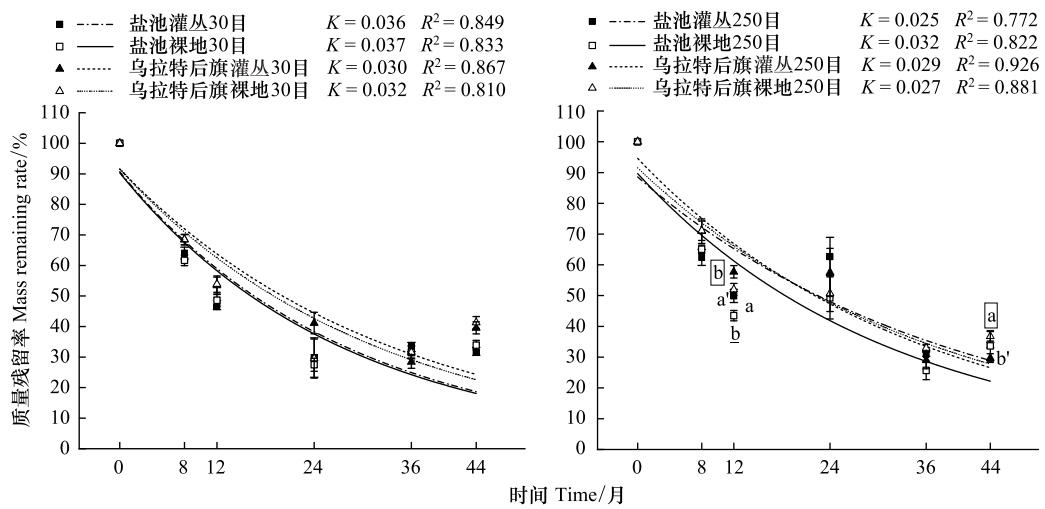


图 2 不同微生境红砂枯落物质量残留率及分解常数 K 的变化

Fig.2 Changes in the mass remaining rate and decomposition constant K of *R. soongorica* litter in different microhabitats

用 x 代表图中显著性字母, x, x', x, x' 符号分别表示盐池灌丛、乌拉特后旗灌丛、盐池裸地和乌拉特后旗裸地的显著性字母标记 ($P < 0.1$)

红砂枯落物分解至 12 个月,在盐池半干旱区和乌拉特后旗干旱区,无节肢动物参与时,枯落物质量残留率均表现为裸地显著低于灌丛($P<0.1$),其中盐池半干旱区灌丛内外分别为 43.47%和 49.90%,乌拉特后旗干旱区灌丛内外分别为 52.00%和 57.72%;而有节肢动物参与时,枯落物残留率表现为灌丛内外微生境间无显著差异。红砂枯落物分解至 44 个月,仅在乌拉特后旗干旱区,无节肢动物参与时,枯落物质量残留率表现为裸地显著高于灌丛($P<0.1$),分别为 36.78%和 29.69%;而有节肢动物参与时,灌丛内外无显著差异。红砂枯落物分解至 8 个月、24 个月和 36 个月,在盐池半干旱区和乌拉特后旗干旱区,无论有无节肢动物的参与,枯落物质量残留率在灌丛内外均表现为无显著差异($P>0.1$)。

2.3 节肢动物对红砂枯落物质量损失的贡献率变化

如表 3 所示,整体上看,节肢动物对红砂枯落物质量损失的贡献率呈现单峰值现象,且在分解至 24 个月时达到峰值,但同时又受到分解时间和灌丛微生境的影响而呈现不同正效应或负效应。

在盐池半干旱区,裸地微生境中节肢动物对红砂枯落物分解的贡献率在分解至 8 和 24 个月时呈现正效应,而在分解至 12、24 和 36 个月时呈现负效应;但在灌丛微生境中节肢动物对红砂枯落物分解的贡献率在分解至 12、24 和 44 个月时呈现正效应,而在分解至 8 和 36 个月时,表现为负效应。

在乌拉特干旱区,裸地微生境中节肢动物对红砂枯落物分解的贡献率在分解至 8、24 和 36 个月时呈现正效应,而在分解至 12 和 36 个月时呈现负效应;但在灌丛微生境中节肢动物对红砂枯落物分解的贡献率在分解 8—36 个月时,均表现为正效应,而在随后分解过程至 44 个月时呈现负效应。

在红砂枯落物分解至 12 个月时,盐池半干旱区节肢动物对红砂枯落物质量损失的贡献率表现为裸地微生境显著低于灌丛微生境($P<0.1$)。在红砂枯落物分解至 44 个月时,乌拉特后旗干旱区节肢动物对红砂枯落物质量损失的贡献率表现为裸地微生境显著高于灌丛微生境($P<0.1$)。

表 3 中小型节肢动物对不同微生境红砂枯落物质量损失的贡献率变化

Table 3 Changes in the contribution rate of microarthropods to the mass loss of *R. soongorica* litter in different microhabitats

地区 Areas	微生境 Microhabitat	贡献率/% Contribution rate				
		8 个月 (2018-05)	12 个月 (2018-09)	24 个月 (2019-09)	36 个月 (2020-09)	44 个月 (2021-05)
半干旱区(盐池)	灌丛	-5.66±8.11a	4.47±6.51a	41.30±14.83a	-3.77±2.79a	2.83±2.46a
Semi-arid zone(Yanchi)	裸地	8.20±4.82a	-10.25±2.56b	29.45±10.30a	-9.27±6.49a	-0.97±8.61a
干旱区(乌拉特后旗)	灌丛	5.72±13.90a	8.20±5.33a	25.17±17.61a	0.25±5.48a	-16.67±2.87b
Arid zone(Urat Rear Banner)	裸地	2.41±10.43a	-6.17±8.07a	22.65±16.45a	1.61±2.70a	-8.06±2.85a

() 内为取样时间,不同小写字母表示不同微生境间差异显著($P<0.1$)

2.4 节肢动物对枯落物质量损失率的贡献率与及土壤理化性质间的关系

对干旱、半干旱区红砂枯落物 5 次采样时间的数据进行 Pearson 相关分析发现(图 3),在盐池半干旱,节肢动物对红砂枯落物质量损失的贡献率与节肢动物类群数、土壤砂粒含量呈显著正相关性($P<0.05$),而与土壤全碳和含水量呈极显著负相关性($P<0.01$)。在乌拉特后旗干旱区,节肢动物对红砂枯落物质量损失的贡献率与土壤 pH 值、土壤砂粒含量呈显著正相关性($P<0.05$),而与土壤碳氮比、黏粒和粉粒含量呈极显著负相关性($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 灌丛微生境对红砂枯落物质量损失的影响及节肢动物的贡献

本研究发现,无论有无节肢动物参与,干旱、半干旱区灌丛内外微生境差异均对红砂枯落物分解常数 K 的影响较小(本研究使用分解常数 K 来表征整个分解过程的分解速率)。这可能是由于本研究区强烈的干旱条件和较差的土壤微环境(例如低温),导致生物多样性低下,中小型节肢动物的分解功能在灌丛微生境较差,进而对红砂枯落物分解过程的促进作用较弱的缘故^[22]。

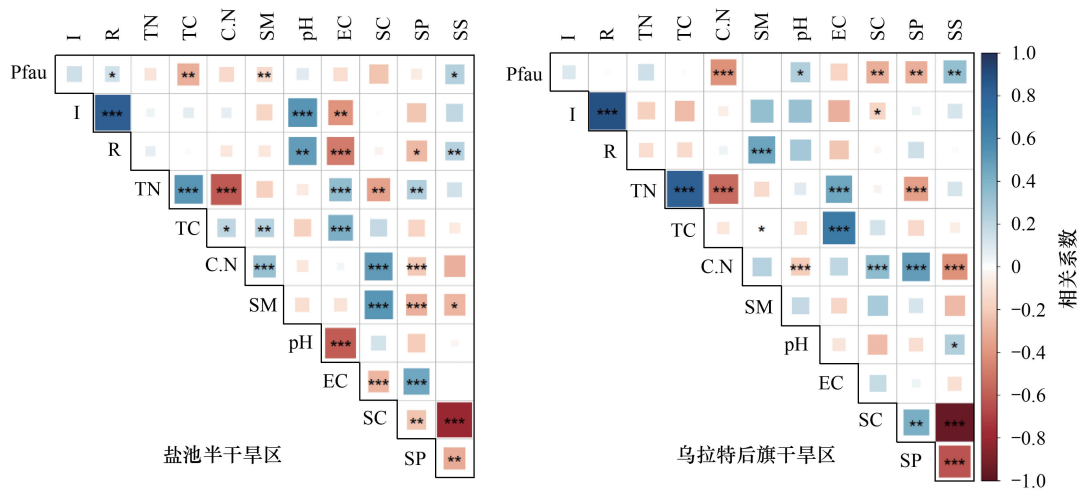


图3 干旱与半干旱区中小型节肢动物对红砂枯落物质量损失的贡献率与土壤理化性质间的相关性

Fig.3 Correlation between the contribution of arid and semi-arid microarthropods to the mass loss of *R. soongorica* litter and soil physical and chemical properties

蓝色方框表示正相关,红色方框表示负相关性.T * $P < 0.1$; * * $P < 0.05$; * * * $P < 0.01$.P_{fau}:中小型节肢动物贡献率 Microarthropod contribution rate;I:个体数 Abundance;R:类群数 Group richness;TC:土壤全碳 Soil total carbon;TN:土壤全氮 Soil total nitrogen;SM:土壤含水量 Soil moisture content;; EC:土壤电导率 Soil electrical conductivity;SC:土壤黏粒 Soil clay content;SP:土壤粉粒 soil silt content;SS:土壤砂粒 Soil sand content

Taylor 等^[23]研究表明,枯落物质量变化可以指示不同分解时期枯落物分解的快慢。而中小型节肢动物对枯落物分解具有重要贡献,但通常由于类群食性的差异对温度和湿度的敏感性而存在不同的响应^[24]。通过对干旱与半干旱区灌丛微生境红砂枯落物分解过程中,节肢动物对枯落物质量损失的贡献率变化研究发现(表3),在整个红砂枯落物分解过程(0—44个月)中,整体上在干旱与半干旱区中小型节肢动物对红砂枯落物质量损失的贡献率均呈现出裸地低于灌丛。原因是灌丛作为干旱与半干旱区生态系统重要的一种植被类型,存在多种“资源岛”的功能,对节肢动物的多样性具有保育效应,故中小型节肢动物对灌丛枯落物分解的影响较大,但这种影响因分解时间而异^[21]。

红砂枯落物分解至12个月时,无节肢动物参与的情况下,2个研究区红砂枯落物质量损失均表现为裸地高于灌丛;而有节肢动物参与时,灌丛内外则表现为无显著差异。说明在无节肢动物参与,即仅有微生物活动参与枯落物分解时,虽已有研究表明,灌丛内土壤微生物数量高于灌丛外裸地,但灌丛内较多的土壤微生物分布并未有效促进红砂枯落物分解,结果仍是灌丛内红砂枯落物分解较慢,分析原因可能是由于红砂枯落物分解初期主要是受到非生物环境因素的主导作用,灌丛冠层可以有效的截留降雨,削弱光辐射引起的光降解和降雨的淋溶作用,使灌丛下枯落物受光和降水的影响较小^[25—26]。但在中小型节肢动物参与枯落物分解时,灌丛内外微生境中红砂枯落物质量损失反而未表现出差异性,这与中小型节肢动物参与红砂枯落物分解过程产生的影响有关。本研究中,在红砂枯落物分解至12个月时,仅盐池半干旱区枯落物节肢动物贡献率表现为灌丛显著高于裸地。这是由于盐池半干旱区降水相对丰富,灌丛削弱了光降解和降雨的淋溶作用,中小型节肢动物的作用对灌丛下枯落物的分解作用尤为重要,故中小型节肢动物对枯落物分解的贡献率表现为正效应;而裸地无植被遮挡,受光分解和降水的淋溶作用强,相对而言,节肢动物对枯落物分解的作用较弱,贡献率低,反而造成了抑制作用,表现为负效应^[27]。而在乌拉特干旱区,气候条件恶劣,中小型节肢动物个体数和类群数均低,灌丛内中小型节肢动物个体数较多可能是加快红砂枯落物分解(图1)。在枯落物分解初期,中小型节肢动物主要是机械破碎分解枯落物,在分解后期,节肢动物主要是通过取食枯落物碎屑参与分解,故在分解初期节肢动物的个体数决定了枯落物分解的速度^[28]。

在枯落物分解中期(24个月)时,2个研究区灌丛内外微生境节肢动物对枯落物质量损失的分解作用尤为强烈,其贡献率均达到峰值。这是由于枯落物分解中期,处于生长季末期,气温高、湿度大,中小型节肢动物活性增强,活动最为频繁,中小型节肢动物个体数和类群数也达到峰值,导致中小型节肢动物对枯落物质量损失的贡献率最高^[29]。

分解至44个月时,无节肢动物参与的情况下,枯落物质量损失率在乌拉特后旗干旱区表现为裸地低于灌丛,而在盐池半干旱区则表现为灌丛内外无显著差异。这是由于枯落物分解后期质量损失以生物降解过程为主,春季低温使质量损失过程缓慢。灌丛可以改变土壤质量和局部小气候,将有机物集中于其冠层下和周围草本的土壤中,改变了养分循环和空间分布格局,形成“沃岛”效应,导致灌丛下的微生物数量和生物量等较高,进而加速了灌丛下枯落物的质量损失^[30];且有研究表明,在干旱与半干旱区,干旱是影响微生物活性及群落多样性的主要胁迫因子,而干旱程度的增加,使微生物对环境的响应更加明显^[31]。而有节肢动物参与时,枯落物分解末期,2个研究区红砂枯落物质量损失率均表现为灌丛内外间无显著差异。仅乌拉特后旗干旱区中小型节肢动物对质量损失的贡献率表现为裸地显著高于灌丛,且灌丛和裸地均为负值。原因是枯落物分解至44个月时,处于春季,气温低,湿度小,不利于节肢动物的生存,节肢动物数量和活动性均低,部分休眠复苏的节肢动物优先通过营养级间的级联效应捕食微生物或者与微生物竞争食物来保证正常的生命活动,导致节肢动物对枯落物质量损失产生抑制作用^[32]。但相较于灌丛,裸地枯落物中节肢动物优势类群大多为矮蒲螨科、甲螨亚目等植食性或腐食性类群,且中小型节肢动物个体数较高(附表2),因此,节肢动物对枯落物的分解作用较为明显^[33]。

3.2 节肢动物对灌丛微生境红砂枯落物质量损失的贡献率与土壤理化性质间的关系

本研究中,中小型节肢动物对红砂枯落物质量损失贡献率在盐池半干旱区与类群数呈正相关性。这与李艳红等^[34]、王振海等^[35]研究结果相似。这是由于盐池半干旱区红砂枯落物中节肢动物优势类群为矮蒲螨科、小真古螨科、球角螨科等植食性或腐食性类群,枯落物为其提供了丰富的食物资源,节肢动物类群通过直接破碎、取食枯落物,促进细菌和真菌的分解活动,从而加速枯落物的分解^[34-35]。中小型节肢动物对红砂枯落物质量损失贡献率在盐池半干旱区与含水量呈负相关性。这是由于分解袋网孔小,通气性差,当水分含量高时,将分解者与空气隔离,分解者活性差,使得节肢动物对枯落物质量损失的作用受到影响^[36]。两个研究区中小型节肢动物对枯落物质量损失的贡献率也与土壤养分含量密切相关,进而影响枯落物质量损失率。其原因是枯落物的分解和枯枝落叶等有机质对土壤输入,能够增加节肢动物和微生物的活性,使得土壤的矿化作用增强,导致土壤中的碳、氮含量降低^[37]。此外,有研究发现,枯落物在分解过程中,节肢动物、微生物活动及植物的生长都可能竞争枯落物输入土壤的养分,导致土壤养分呈现出不同的变化规律^[38]。节肢动物对枯落物质量损失的贡献率仅在乌拉特后旗干旱区与土壤pH值呈显著正相关。这是由于本研究中,与半干旱区相比,干旱区灌丛内外微生境分解袋下土壤pH值相对较高(附表1);且有研究表明,土壤pH可以调节细胞渗透压,在一定碱性范围内,pH值增大使节肢动物群落的胁迫压力减小,能够提高土壤系统的稳定性,为节肢动物生存提供较为稳定的生存环境,从而增加节肢动物的个体数;而过高或过碱的土壤pH可直接抑制节肢动物的摄食活动和代谢^[39]。中小型节肢动物对枯落物质量损失的贡献率在盐池半干旱区和乌拉特后旗干旱区均与土壤砂粒含量呈显著正相关性,仅在乌拉特后旗干旱区与土壤黏粉粒含量呈显著负相关性。原因是枯落物的分解、有机质等养分元素的输入、降水等作用使得土壤中细颗粒物沉降下来^[40];增加土壤保水能力,影响节肢动物的生存和繁殖,但研究区年平均降雨量低且多风,风蚀严重造成土壤堆积不稳定,故节肢动物受到土壤粒径组成的影响波动较大,对枯落物质量损失的贡献率也在不同分解时间存在一定差异^[41]。

4 结论

(1) 干旱和半干旱区灌丛微生境红砂枯落物分解特征受到节肢动物分解作用因时间而异,中小型节肢动物的分解作用表现为弱(12个月)-强(24个月)-弱(44个月)的作用规律,而且受到气候区调节的灌丛微生物

境限制。

(2) 中小型节肢动物对红砂枯落物质量损失率的贡献率在半干旱区与节肢动物类群数、土壤全碳、含水量和砂粒含量密切相关,而在干旱区与土壤 C/N 和粒径组成密切相关。

参考文献 (References):

- [1] 曲浩, 赵学勇, 赵哈林, 王少昆. 陆地生态系统凋落物分解研究进展. 草业科学, 2010, 27(8): 44-51.
- [2] 伍六斤, 张傲冬, 牟凌, 李羿桥, 李晗, 游成铭, 张丽, 谭波, 徐振锋. 川西地区 7 种常见彩叶树种凋落物分解. 应用与环境生物学报, 2021, 27(3): 625-631.
- [3] 马阔东, 高丽, 闫志坚, 阿斯嘎, 富兰格. 库布齐沙漠不同类型沙地上植物群落根系研究. 草业科学, 2010, 27(5): 1-9.
- [4] 万敏, 郭永平, 郭映光, 祁俊华. 乌拉特草原植被恢复主要途径的研究. 内蒙古草业, 2004, 16(4): 49-51.
- [5] 唐庄生. 半干旱荒漠草原沙化过程中植被退化机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [6] Li J R, Okin G S, Alvarez L, Epstein H. Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities. Biogeochemistry, 2008, 88(1): 73-88.
- [7] 王新源, 赵学勇, 李玉霖, 连杰, 曲浩, 岳祥飞. 环境因素对干旱半干旱区凋落物分解的影响研究进展. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3300-3310.
- [8] Wall D H, Bradford M A, St John M G, Trofymow J A, Behan-Pelletier V, Bignell D E, Dangerfield J M, Parton W J, Rusek J, Voigt W, Wolters V, Gardel H Z, Ayuke F O, Bashford R, Beljakova O I, Bohlen P J, Brauman A, Flemming S, Henschel J R, Johnson D L, Jones T H, Kovarova M, Kranabetter J M, Kutny L, Lin K C, Maryati M, Masse D, Pokarzhevskii A, Rahman H, Sabarú M G, Salamon J A, Swift M J, Varela A, Vasconcelos H L, White D, Zou X M. Global decomposition experiment shows soil animal impacts on decomposition are climate-dependent. Global Change Biology, 2008, 14(11): 2661-2677.
- [9] González G, Seastedt T R. Soil fauna and plant litter decomposition in tropical and subalpine forests. Ecology, 2001, 82(4): 955-964.
- [10] Austin A T, Ballaré C L. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems. PNAS, 2010, 107(10): 4618-4622.
- [11] 杨志敏. 放牧、封育对沙地灌丛内外节肢动物群落的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2017.
- [12] 杨强, 郑西楠, 何立恒. 基于 HadCM3 模式的我国主要气候区划界线时空预测研究. 干旱区地理, 2017, 40(1): 17-25.
- [13] 赵生龙, 左小安, 张铜会, 吕朋, 岳平, 张晶. 乌拉特荒漠草原群落多样性和生物量关系对放牧强度的响应. 干旱区研究, 2020, 37(1): 168-177.
- [14] 耿庆玲. 西北旱区农业水土资源利用分区及其匹配特征研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2014.
- [15] 张安宁, 刘任涛, 刘佳楠, 赵娟, 常海涛, 陈蔚. 干旱风沙区柠条枯落物对土壤节肢动物群落的影响. 生态学杂志, 2020, 39(7): 2383-2391.
- [16] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [17] 钟觉民. 幼虫分类学. 北京: 农业出版社, 1990.
- [18] 李隆术, 李云瑞. 蜚蠊学. 重庆: 重庆出版社, 1988.
- [19] 刘佳楠, 赵娟, 常海涛, 张安宁, 陈蔚, 刘任涛. 基于网孔分解袋法的荒漠草原柠条枯落物分解过程中的养分变化. 草业科学, 2019, 36(6): 1624-1633.
- [20] 夏磊, 吴福忠, 杨万勤, 谭波. 川西亚高山森林凋落物分解初期土壤动物对红桦凋落叶质量损失的贡献. 应用生态学报, 2012, 23(2): 301-306.
- [21] 蒋嘉瑜, 连学, 唐希明, 刘任涛, 张安宁. 干旱与半干旱区红砂枯落物分解初期节肢动物群落结构特征. 草业学报, 2022, 31(5): 156-168.
- [22] 黄锦学, 黄李梅, 林智超, 陈光水. 中国森林凋落物分解速率影响因素分析. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5(3): 56-63.
- [23] Taylor B R, Parkinson D, Parsons W F J. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: a microcosm test. Ecology, 1989, 70(1): 97-104.
- [24] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, Setälä H, van der Putten W H, Wall D H. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. Science, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [25] 王德凯, 李颖, 王跃棠, 梅续芳, 解李娜, 李清芳, 马成仓. 荒漠草原中间锦鸡儿灌丛的土壤微生物多样性. 天津师范大学学报: 自然科学版, 2018, 38(4): 43-49.
- [26] 黄刚, 周丽, 唐立松, 李彦, 赵红梅. 荒漠植物凋落物光降解特征随降水梯度的变化. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2574-2582.
- [27] 许洪军. 辽东山区三种林型土壤动物群落特征及其在凋落物分解中的作用研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2015.

- [28] 陈婷, 郝敏, 孔范龙, 李悦, 庞立华. 枯落物分解及其影响因素. 生态学杂志, 2016, 35(7): 1927-1935.
- [29] Bokhorst S, Bjerke J W, Melillo J, Callaghan T V, Phoenix G K. Impacts of extreme winter warming events on litter decomposition in a sub-Arctic heathland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(4): 611-617.
- [30] 顾继雄, 郭天斗, 王红梅, 李雪颖, 梁丹妮, 杨青莲, 高锦月. 宁夏东部荒漠草原向灌丛地转变过程土壤微生物响应. 草业学报, 2021, 30(4): 46-57.
- [31] 李燕. 鄱阳湖湿地土壤微生物群落对干化—干湿转化过程的响应[D]. 南昌: 江西师范大学, 2018.
- [32] 蓝丽英, 杨万勤, 吴福忠, 刘育伟, 杨帆, 郭彩虹, 湛亚, 谭波. 川西亚高山森林土壤动物对杨树和箭竹凋落物分解过程中微生物群落的影响. 应用生态学报, 2019, 30(9): 2983-2991.
- [33] 刘瑞龙, 李维民, 杨万勤, 谭波, 王文君, 徐振锋, 吴福忠. 土壤动物对川西高山/亚高山森林凋落物分解的贡献. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3354-3360.
- [34] 李艳红, 杨万勤, 罗承德, 吴福忠, 胡杰. 桉-栎不同混合比例凋落物分解过程中土壤动物群落动态. 生态学报, 2013, 33(1): 159-167.
- [35] 王振海, 殷秀琴, 张成蒙. 土壤动物在长白山臭冷杉凋落物分解中的作用. 林业科学, 2016, 52(7): 59-67.
- [36] 吕梦渊. 典型草原凋落物分解对干旱的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
- [37] 王云霞. 黄土丘陵区人工林刺槐和油松凋落叶分解特征及其对土壤养分影响的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [38] 杨轩, 李娅芸, 安韶山, 曾全超. 宁南山区典型植物根系分解特征及其对土壤养分的影响. 生态学报, 2019, 39(8): 2741-2751.
- [39] Owojori O J, Reinecke A J, Voua-Otomo P, Reinecke S A. Comparative study of the effects of salinity on life-cycle parameters of four soil-dwelling species (*Folsomia candida*, *Enchytraeus doerjesi*, *Eisenia fetida* and *Aporrectodea caliginosa*). *Pedobiologia*, 2009, 52(6): 351-360.
- [40] 董雪, 郝玉光, 辛智鸣, 段瑞兵, 黄雅茹, 李新乐, 马媛, 刘芳. 浑善达克沙地 3 种灌木土壤分形特征与养分关系. 草业学报, 2020, 29(6): 172-181.
- [41] 郭威星. 乌拉特中旗荒漠草原优势灌丛地上生物量分析及预测模型[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.

附表 1 干旱与半干旱区不同微生物枯落物袋下土壤理化性质随分解时间的变化(平均值±标准误差)

Attached Table 1 Changes in the physical and chemical properties of soil beneath litter bags in different microhabitats in arid and semi-arid regions with decomposition time (Mean±SE)											
地区 Areas	月份/(数/月) Month	微生物 Microhabitat	土壤指标 Soil index								
			TN/%	TC/%	SM/%	pH	EC/(μs/cm)	SC/%	SP/%	SS/%	
半干旱区(盐池) Semi-arid zone(Yanchi)	0 个月	灌丛	0.06±0.01a	0.95±0.04b	3.89±0.18b	7.36±0.07b	94.44±6.63a	17.56±0.56b	27.32±0.77a	55.11±1.27a	
		裸地	0.06±0.01a	1.42±0.10a	4.65±0.29a	7.92±0.08a	90.41±2.08a	22.73±1.58a	25.05±0.87b	52.23±1.45a	
	8 个月	灌丛	0.09±0.01a	1.63±0.10a	5.19±0.35a	7.57±0.01a	162.96±3.71a	19.82±0.76a	25.59±0.63b	54.59±1.08a	
		裸地	0.07±0.01b	1.35±0.02b	4.61±0.13a	7.49±0.02b	162.83±2.09a	19.38±0.41a	27.73±0.40a	52.89±0.77a	
	12 个月	灌丛	0.09±0.01a	1.60±0.05b	2.43±0.24b	7.77±0.02a	149.66±3.60a	18.41±0.58b	28.31±0.45a	53.29±0.76a	
		裸地	0.08±0.01b	1.90±0.08a	4.74±0.46a	7.80±0.03a	118.76±2.17b	26.81±0.74a	27.56±0.49a	45.63±0.63b	
	24 个月	灌丛	0.07±0.01a	1.23±0.04a	4.53±0.38a	7.91±0.04b	92.00±2.92a	19.53±0.47b	26.80±0.44a	53.67±0.87a	
		裸地	0.07±0.01a	1.24±0.05a	4.17±0.21a	8.08±0.01a	76.42±2.47b	26.67±0.74a	24.21±0.31b	49.12±0.91b	
	36 个月	灌丛	0.07±0.01a	1.17±0.07b	4.64±0.22b	7.86±0.02a	82.08±1.03a	20.30±0.75b	26.79±0.63a	52.92±1.31a	
		裸地	0.05±0.01b	1.55±0.03a	7.49±0.25a	7.80±0.02b	82.21±1.54a	29.30±0.75a	18.63±0.44b	52.07±1.06a	
	44 个月	灌丛	0.06±0.01a	1.18±0.04b	5.19±0.37a	7.68±0.05a	100.73±2.00a	20.30±0.75b	29.50±0.38a	44.21±0.73a	
		裸地	0.05±0.01b	1.45±0.04a	5.13±0.19a	7.77±0.04a	100.38±1.12a	29.30±0.75a	25.04±0.61b	40.61±0.45b	
	干旱区(乌拉特后旗) Arid zone(Urad Rear Banner)	0 个月	灌丛	0.06±0.01a	0.65±0.05a	0.82±0.11b	7.73±0.04a	89.78±4.15a	17.15±0.61b	17.11±0.65b	65.75±1.17a
			裸地	0.06±0.01a	0.71±0.06a	1.18±0.14a	7.82±0.08a	89.47±1.82a	26.43±1.97a	18.46±0.44a	55.11±2.21b
		8 个月	灌丛	0.07±0.01b	0.91±0.03b	0.17±0.04a	7.81±0.02a	134.5±3.65a	22.29±1.16b	17.68±0.50a	60.02±1.37a
			裸地	0.09±0.01a	1.07±0.05a	0.18±0.03a	7.74±0.01b	135.12±2.04a	29.59±1.35a	18.46±0.3a	51.95±1.54b
12 个月		灌丛	0.06±0.01b	0.91±0.03b	3.18±0.42a	7.93±0.02a	122.73±4.26a	23.57±0.77a	18.94±0.65a	57.49±0.91a	
		裸地	0.08±0.01a	1.11±0.09a	2.68±0.41a	7.91±0.03a	121.32±5.45a	25.53±1.72a	18.22±0.69a	56.25±2.09a	
24 个月		灌丛	0.07±0.01b	0.61±0.05a	0.67±0.03b	7.99±0.02a	84.69±2.04a	22.34±1.13a	17.72±0.84a	59.95±1.72a	
		裸地	0.08±0.01a	0.62±0.05a	0.89±0.10a	7.97±0.01a	87.23±1.92a	23.15±1.78a	18.36±0.49a	58.49±2.03a	
36 个月		灌丛	0.04±0.01a	0.55±0.04a	1.14±0.17a	7.71±0.02b	85.2±1.45a	22.03±1.09b	19.2±0.98a	58.78±1.92a	
		裸地	0.05±0.01a	0.62±0.04a	1.68±0.28a	7.77±0.01a	81.85±1.96a	34.89±2.58a	17.88±0.36a	47.23±2.80b	
44 个月		灌丛	0.04±0.01a	0.57±0.05a	0.83±0.07a	7.85±0.03a	103.61±2.80a	30.75±1.20a	22.68±0.87a	46.57±1.82a	
		裸地	0.03±0.01b	0.46±0.03a	0.92±0.16a	7.9±0.05a	99.01±3.50a	35.88±3.28a	22.57±0.65a	41.56±3.12a	

TN: 土壤全氮 Soil total nitrogen; TC: 土壤全碳 Soil total carbon; SM: 土壤含水量 Soil moisture content; EC: 土壤电导率 Soil electrical conductivity; SC: 土壤黏粒 Soil clay content; SP: 土壤粉粒 soil silt content; SS: 土壤砂粒 Soil sand content. () 内为取样时间. 不同小写字母表示同一地区不同微生物境的差异显著 ($P<0.1$); 表中月份数全部以 2017 年 9 月起累积

附表 2 半干旱区不同微生境枯落物节肢动物个体数随分解时间的变化

Attached Table 2 Change the abundance of litter arthropods between different microhabitats in semi-arid regions with decomposition time													
类群 Group	8 个月			12 个月			24 个月			36 个月			优势度 Dominance
	灌丛 Shrub	裸地 Open space	灌丛 Shrub	裸地 Open space	灌丛 Shrub	裸地 Open space	灌丛 Shrub	裸地 Open space	灌丛 Shrub	裸地 Open space	灌丛 Shrub	裸地 Open space	
垂盾甲属 <i>Scutovortex</i>	10	7	9	35	3	7	4	12	3	0	0	++	
下盾甲属 <i>Hypovortex</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	+	
盖头甲属 <i>Tectocephus</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	+	
矮蒲螋科 <i>Pygmephoridae</i>	4	2	12	25	10	15	18	12	4	0	0	+++	
小真古螋科 <i>Eupalopsellidae</i>	2	2	2	0	60	53	7	75	6	14	0	+++	
肉食螋科 <i>Cheyletidae</i>	0	0	0	0	0	0	8	0	3	0	0	++	
绒螋科 <i>Trombididae</i>	0	3	1	21	0	0	0	0	0	0	0	++	
隐颚螋科 <i>Cryptognathidea</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	+	
腾岛螋科 <i>Teneriffidae</i>	0	0	0	2	4	1	1	0	0	0	0	+	
巨螯螋科 <i>Macrochelidae</i>	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0	0	+	
吸螋科 <i>Bdellidae</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	+	
镰螯螋科 <i>Tydeidae</i>	0	0	0	0	1	1	4	12	0	0	0	++	
派盾螋科 <i>Parholaspididae</i>	0	0	0	0	1	0	6	8	3	0	0	++	
异小黑螋科 <i>Enocaligonellidae</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	+	
小黑螋科 <i>Caligonellidae</i>	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	+	
巨须螋科 <i>Cunaxidae</i>	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	+	
莓螋科 <i>Rhagidiidae</i>	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	+	
球角蛱科 <i>Hypogastruridae</i>	6	4	47	159	34	30	45	7	6	0	0	+++	
等节蛱科 <i>Isotomidae</i>	0	0	0	0	0	2	3	1	0	2	0	+	
棘蛱科 <i>Onychiuridae</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	+	
园蛱科 <i>Sminthuridae</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	+	
疣蛱科 <i>Neanuridae</i>	0	0	0	11	22	5	9	12	0	0	0	++	
虱蛱科 <i>Liposcelididae</i>	0	0	0	1	0	4	0	0	1	0	0	+	
鳞蛱科 <i>Lepidopsocidae</i>	0	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	+	
伪大蚊科 <i>Anisopodidae</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	+	
摇蚊科 <i>Chironomidae</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	+	
草柄蚊科 <i>Bolitophilidae</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	+	
瘦蚊科幼虫 <i>Cecidomyiidae</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	4	0	0	+	
网蛱科幼虫 <i>Tingidae</i>	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	+	
膜螋科幼虫 <i>Hebridae</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	+	
缘螋科幼虫 <i>Coreidae</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	+	
蚜科 <i>Aphididae</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	+	
花蝇科幼虫 <i>Anthomyiidae</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	+	
步甲科幼虫 <i>Carabidae</i>	0	0	1	0	1	3	0	0	0	0	0	+	
个体数 Abundance	22	19	76	256	142	130	116	143	36	16	0	+	
类群数 Group richness	4	6	10	9	12	16	17	10	11	2	0		

() 内为取样时间, ++表示稀有类群, +++表示优势类群;表中月份数全部以 2017 年 9 月起累积

附表 3 干旱区不同微生境枯落物节肢动物个体数随分解时间的变化

Attached Table 3 Change the abundance of litter arthropods between different microhabitats in arid regions with decomposition time													
类群 Group	8 个月			12 个月			24 个月			36 个月			优势度 Dominance
	灌丛 Shrub	裸地 Open space	灌丛 Shrub	裸地 Open space	灌丛 Shrub	裸地 Open space	灌丛 Shrub	裸地 Open space	灌丛 Shrub	裸地 Open space	灌丛 Shrub	裸地 Open space	
垂盾甲螨属 <i>Scutovertex</i>	0	4	40	16	80	28	0	31	4	23		+++	
下盾甲螨属 <i>Hyponerx</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10		++	
盖头甲螨属 <i>Tectocephus</i>	0	0	3	0	0	1	15	1	0	0		++	
小真古螨科 Eupalopsellidae	0	0	5	3	0	1	0	10	1	1		++	
矮蒲螨科 Pygmephoridae	0	0	46	9	12	7	7	15	7	22		+++	
吸螨科 Bdellidae	1	0	4	0	0	1	2	10	2	1		++	
腾岛螨科 Teneriffidae	1	0	2	1	0	1	0	0	0	0		+	
长须螨科 Stigmaeidae	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0		+	
隐颚螨科 Cryptognathidea	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0		+	
巨须螨科 Cunaxidae	0	0	18	5	17	2	4	2	0	0		++	
镰螯螨科 Tydeidae	0	0	0	0	1	0	72	0	0	0		+++	
小黑螨科 Caligonellidae	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0		+	
厚厉螨科 Pachylaelapidae	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		+	
派盾螨科 Parholaspidae	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0		+	
球角蟧科 Hypogastruridae	0	0	7	0	23	7	2	6	1	0		++	
等节蟧科 Isotomidae	0	0	0	0	0	0	0	3	20	4		++	
鳞嗜螨科 Lepidopsocidae	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0		+	
虱嗜科 Liposcelididae	0	0	0	1	0	0	4	0	0	0		+	
蟪科幼虫 Pentatomidae	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0		+	
个体数 Abundance	2	5	129	34	135	48	106	79	37	61			
类群数 Group richness	3	2	11	7	6	8	9	9	8	6			

表中月份数全部以 2017 年 9 月起累积