

DOI: 10.11766/trxb202110090441

袁访, 邓承佳, 唐静, 宋理洪. 不同土地利用方式下土壤动物对凋落物的分解作用及影响因素[J]. 土壤学报, 2023, 60 (2): 568–576.
YUAN Fang, DENG Chengjia, TANG Jing, SONG Lihong. Contributions and Influencing Factors of Soil Fauna to Litter Decomposition under Different Land-use Patterns[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 (2): 568–576.

不同土地利用方式下土壤动物对凋落物的分解作用及影响因素*

袁 访, 邓承佳, 唐 静, 宋理洪[†]

(贵州大学农学院, 贵阳 550025)

摘 要: 土壤动物通过掘穴、取食等活动对凋落物分解起着重要作用。除凋落物本身质量外, 气候因子是影响土壤动物对凋落物分解的重要外界因素。然而, 目前尚不清楚不同土地利用方式下土壤动物在凋落物分解中的贡献大小是否具有差异, 以及气候因子对这一过程的调控作用是否相同。本文运用 Meta 分析方法, 量化土壤动物群对凋落物分解率的影响大小, 提取了中国地理范围内 56 篇文献的 308 条研究 (检索论文发表时间截至 2021 年 5 月 31 日), 研究气候因子调控不同土地利用方式下土壤动物对凋落物分解速率的影响。结果表明, 土壤动物平均增加了 8.10% 凋落物的分解。在林地、草地和耕地等不同土地利用方式间, 土壤动物对凋落物分解的促进作用均达显著水平 ($P < 0.01$), 其中在耕地的促进作用最强 (12.36%)。土壤动物对凋落物分解的效应值与温度、降水量、海拔、凋落物袋尺寸、试验时长等因素相关。在林地, 土壤动物的效应值随低温月 (1 月)、高温月 (7 月) 平均温度及年均温的增加显著增加 ($P < 0.01$); 在草地, 土壤动物效应值与低温月、高温月平均温度及年均温的相关关系均不显著 ($P > 0.05$), 但却表现出随低温月、高温月平均温度及年均温的增加降低的趋势。土壤动物对凋落物分解的效应值与年降水量正相关, 与海拔负相关。此外, 随凋落物袋尺寸的增加和试验时长的增长, 土壤动物对凋落物分解的效应值分别表现出增加和降低的趋势 ($P < 0.01$)。

关键词: 整合分析; 凋落物分解; 土壤动物; 土地利用方式; 温度

中图分类号: S714 **文献标志码:** A

Contributions and Influencing Factors of Soil Fauna to Litter Decomposition under Different Land-use Patterns

YUAN Fang, DENG Chengjia, TANG Jing, SONG Lihong[†]

(College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: [Objective] Soil fauna play an important role in litter decomposition processes through activities such as burrowing and feeding. Besides the quality of litter, climate parameters have been identified as major factors affecting the role of soil fauna on litter decomposition. However, the contribution of soil fauna in litter decomposition and the role of climatic parameters under

* 国家自然科学基金项目 (41807055) 和贵州省科技厅项目 (黔科合后补助[2020]3001) 共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41807055) and the Project of Guizhou Provincial Department of Science and Technology (No. [2020]3001)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lihong_song@qq.com

作者简介: 袁 访 (1997—), 女, 贵州赤水人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态方面研究。E-mail: 1809316074@qq.com

收稿日期: 2021-10-09; 收到修改稿日期: 2021-12-09; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-02-15

different land-use patterns are still not clear. 【 Method 】 In this paper, meta-analysis was used to quantify the effect sizes of soil fauna on litter decomposition rates. We established a meta-analysis database by collecting the results of 56 publications both in Chinese and English in China from papers published until May 31, 2021. The effect size of soil fauna on litter decomposition rates among three different land-use patterns (i.e., forest, grassland, and farmland), was further tested by a random-effects model. Correlations were tested between environmental factors - temperature, precipitation, litterbag size, latitude, and experimental duration - and the effect size of soil fauna on litter decomposition rates. 【 Result 】 Soil fauna increased litter decomposition rate by an average of 8.10%, reaching a significant level among different land-use patterns. Among the three different land-use patterns, the effect of soil fauna on litter decomposition rates was strongest in the farmland (12.36%). Environmental factors were closely correlated with the effect size of soil fauna on litter decomposition rates. 【 Conclusion 】 In the forest, effect size significantly increased with temperature, including the average temperature in January and July, and the mean annual temperature ($P < 0.01$). In grassland, however, the effect size of soil fauna decreased with temperature ($P > 0.05$). The effect size significantly increased with mean annual precipitation but significantly decreased with altitude ($P < 0.01$). Besides, with the increase of litterbag size and experimental duration, the effect size values of soil fauna on litter decomposition significantly increased and decreased, respectively.

Key words: Meta-analysis; Litter decomposition; Soil animals; Land use patterns; Temperature

凋落物分解是生态系统物质循环和能量流动的主要途径,也是全球碳循环的关键过程^[1-2],对维持生物地球化学循环具有重要影响,是连接地上和地下生态系统的重要载体。凋落物在分解过程中,受多种生物因素(凋落物性质、土壤微生物、土壤动物)和非生物因素(气候、土地利用方式)的影响^[3]。土壤动物作为影响凋落物分解的重要生物因子,通过破碎、掘穴、取食和刺激微生物活动等直接或者间接影响凋落物分解^[4]。大型、中型土壤动物通过直接取食、排泄和破碎凋落物来改变土壤微生物群落的结构和功能,从而影响凋落物的分解;而小型土壤动物通过取食直接参与凋落物的分解^[5]。温度和降水量等气候条件通常在凋落物分解过程中起着至关重要的作用^[6-8]。此外,土壤动物活动受低温和湿度等环境条件的影响强烈^[9]。水分的限制可能导致土壤动物的摄食活动减少^[10-11],从而降低其对凋落物分解的影响。目前,气候因子如何影响土壤动物对凋落物的分解尚不完全清楚,因而深入研究气候因子介导下土壤动物与凋落物分解之间的关系将有助于预测在持续的全球环境变化下土壤动物在土壤功能中的作用。

土地利用方式是影响大型土壤动物分布的主要因素^[12],不同土地利用方式具有不同的土地管理方式与经营强度;合理的土地利用方式、强度和管理有利于改善土壤动物的生境^[13],从而提高土壤动物多样性^[14]。一方面,大型土壤动物相比小型土壤动

物(线虫和原生动物)更容易受到土地利用方式的限制^[15],另一方面,土地利用方式对土壤微生物区系的组成与结构会产生不同影响^[16]。土壤生物/动物类群变化,势必会导致其生态功能的改变。Meta分析可以实现定量整合,通过对同一主题多个小样本研究结果的综合,来提高原结果的统计效能,解决研究结果的不一致性,改善效应估计值,探究现有文献发表偏倚的程度,提出新的研究问题,为进一步研究指明方向。因此,本研究采用Meta分析方法,研究气候因子调控不同土地利用方式下土壤动物对凋落物分解速率的影响具有重要的科学意义,以期对未来关于土壤动物凋落物分解的研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 文献的收集

基于中国知网(CNKI)和Web of Science数据库,以下列中英文关键词的组合:分解、残留和凋落物、枯枝落叶和土壤动物、土壤无脊椎动物、小型节肢动物、中型节肢动物、大型节肢动物((decomposition)and(litter or leaf or foliar)and(soil animal* or soil invertebrate* or microarthropod* or mesoarthropod* or macroarthropod*))进行文献搜索,检索发表截至2021年5月31日,并设置筛选标准如下:(1)凋落物分解试验必须采用凋落物袋法。此方法是研究凋落物分解最常规、使用最广

泛的方法。凋落物袋法简化了解析过程,其质量损失是分解的物理过程和生物化学过程的共同结果^[17-18]。(2)当同一篇文献中出现的凋落物种类不同时,分别考虑各类型凋落物的分解。(3)不含土壤动物的凋落物袋(指凋落物袋孔径尺寸不允许土壤动物进入,对照组)及含土壤动物的凋落物袋(指凋落物袋孔径尺寸允许土壤动物进入,处理组)要求位于同一试验小区,以保证研究间的试验效应是受土壤动物的影响,而不是不同处理方法、小气候、土壤类型等的影响。如果研究中加入了其他处理(如氮素添加、灌溉等),则只提取无任何其他处理的研究结果。(4)数据收集需同时满足平均值、标准差和重复数($n \geq 3$)这三项指标,进而可以进行数据的加权整合分析。(5)只选择室外研究进行数据收集,且选择凋落物袋放置于地表的研究。(6)研究地点在中国地理范围内。

1.2 数据提取

根据以上筛选标准,最后共有 56 篇文献、83 种凋落物种类的 308 条研究符合要求。由于有的文章包括了一个以上的地点,或几篇文章在同一个地点,全国范围内共分布 50 个研究地点。这些研究地点主要分布在我国东北地区和华中西南地区(主要集中在四川省、江苏省和吉林省等地,少数在贵州省、云南省、广东省和内蒙古自治区等地)。研究时间从 90 天至 1 095 天不等,80%的研究持续了 1 年及以上;其中,中文文献 44 篇 252 条研究结果,英文文献 12 篇 56 条研究结果。所收集数据直接从论文文本或图表中提取,包括研究地点、经纬度、年均温、七月均温、一月均温、海拔、年降水、土地利用方式、凋落物的物种名、凋落物分解袋尺寸、试验时长等。因大多数文章中均无凋落物质量数据(C、N、P 等含量),故本文所提取数据库未包含凋落物质量数据。使用 Web Plot Digitizer 软件提取图片中的数据,同时提取每一条研究的不含土壤动物以及含土壤动物的凋落物分解率、重复次数以及标准差。参照原文献的描述并结合《土地利用现状分类》GB/T21010-2017 和《中华人民共和国土地管理法》“三大类”,将每条研究的土地利用方式分为林地、耕地和草地三个类别。

1.3 数据分析

数据分析采用加权随机效应模型。对于单个研

究,采用响应比(lnR)作为无标准平均差,即效应大小的估计。响应比(效应值)的值,在负无穷到正无穷之间,可以通过其值的大小来评估变量的效应大小。计算公式为^[19]:

$$\text{响应比: } \ln R = \ln (X_c / X_c)$$

$$\text{方差: } V(\ln R) = S_c^2 / (N_c \times X_c^2) + S_c^2 / (N_c \times X_c^2)$$

式中, X_c 和 X_c 为试验组和对照组凋落物分解率的平均值; S_c 和 S_c 为试验组和对照组的标准差; N_c 和 N_c 为试验组和对照组的样本数。

$\ln R > 0$,表示土壤动物促进凋落物的分解; $\ln R < 0$,表示土壤动物抑制凋落物的分解; $\ln R = 0$,表示土壤动物对凋落物分解没有影响。通过 lnR 计算平均效应值 Es (Mean Effect Size),当 Es 的 95% 置信区间(CI)不包含 0 时,土壤动物对凋落物的分解有显著影响。通过不同土地利用方式下效应值的变化情况,探讨土地利用方式下土壤动物对凋落物分解效应的影响。

采用漏斗图和失安全数法来进行文献发布偏移的检验。当失安全系数 $> 5n + 10$ (n 是研究的样本数),通常认为研究结果是有意义的^[20]。所有数据分析和作图均采用 R 语言进行。

2 结果

2.1 土壤动物对凋落物分解速率的影响

分别对 308 条研究进行了响应值大小及 95% 置信区间计算,结果显示除少数几条研究的置信区间较宽、误差较大外,大多数研究趋于正常值范围(图 1)。随机效应模型计算平均效应值 Es 的 95% 置信区间均大于零($Es = 0.17$, $95\%CI = 0.158 \sim 0.192$),表明土壤动物显著促进凋落物的分解($Q_{total} = 975$, $df = 307$, $P < 0.01$)。

2.2 不同土地利用方式下土壤动物对凋落物分解速率的影响

土壤动物显著促进凋落物分解(图 1),且其作用在林地、草地和耕地等不同土地利用方式下存在显著性差异($Q_{between} = 17.4$, $df = 2$, $P < 0.01$)。在土壤动物作用下,凋落物的分解速率平均提升了

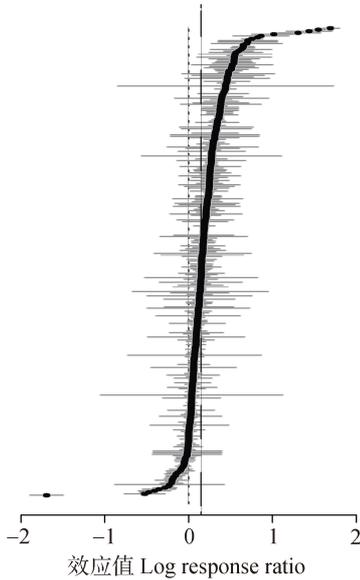
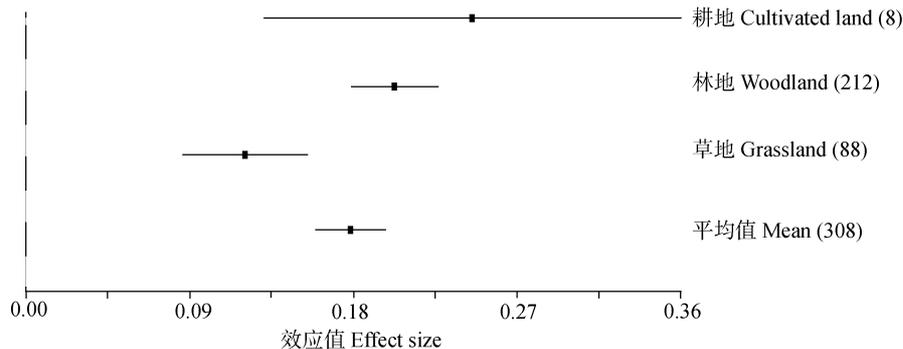


图 1 土壤动物对凋落物分解效应的随机森林图
Fig. 1 Random forest plot of the effect of soil fauna on litter decomposition

8.10%，其中林地 8.75%，草地 6.15%，耕地 12.36%。林地、草地和耕地下，平均效应值 E_s 均大于 0，且



注：括号内为研究条数，灰色虚线：效应值=0。Note: The number of studies in parentheses, the gray dashed line: effect size = 0.

图 2 不同土地利用方式下土壤动物对凋落物分解的平均效应值
Fig. 2 The average effect size of soil fauna on litter decomposition under different land-use patterns

土壤动物对凋落物分解的效应值在不同年降水量和海拔下也表现出一定差异：土壤动物对凋落物分解的效应值与年降水量正相关（林地：斜率 > 0 , $P = 0.15$ ；草地：斜率 > 0 , $P = 0.18$ ）；而与海拔负相关（林地：斜率 < 0 , $P < 0.01$ ；草地：斜率 < 0 , $P = 0.80$ ）（图 4）。

土壤动物对凋落物分解的效应值与凋落物袋尺寸有显著线性关系：随凋落物袋尺寸的增加显著增加（林地：斜率 > 0 , $P < 0.01$ ；草地：斜率 > 0 , $P < 0.01$ ）。研究时长也影响土壤动物对凋落物的分解作用：林地条件下，土壤动物对凋落物分

它们的置信区间均不包含 0，表明三种土地利用方式下土壤动物均显著促进凋落物分解（图 2）。

不同土地利用方式内的平均效应值也存在显著差异（ $Q_{\text{within}} = 762.7$, $df = 305$, $P < 0.01$ ）。308 条研究中，林地占 212 条，草地占 88 条，耕地占 8 条。由于耕地的研究较少，后续的分析 and 讨论将主要围绕林地和草地开展。

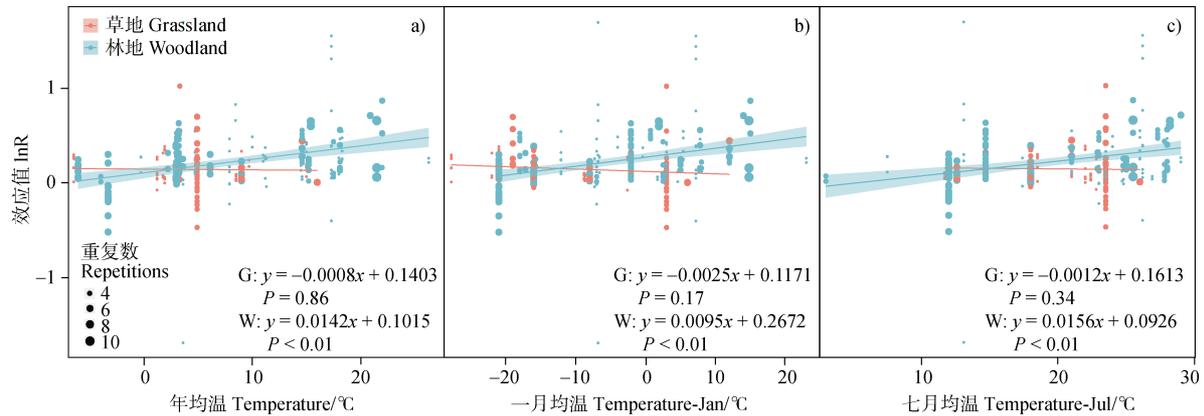
2.3 不同土地利用方式下土壤动物对凋落物分解的影响因素

土壤动物对凋落物分解的效应值与年均温显著相关（图 3），林地土壤动物的效应值随年均温的增加显著增加，草地效应值随年均温的增加而降低（林地：斜率 > 0 , $P < 0.01$ ，草地：斜率 < 0 , $P = 0.86$ ）。林地土壤动物的效应值随低温月（1 月）的平均温度增加显著增加（斜率 > 0 , $P < 0.01$ ），而草地效应值随低温月（1 月）的平均温度增加而降低（斜率 < 0 , $P = 0.17$ ），且其与高温月（7 月）平均温度表现出相同特征（林地：斜率 > 0 , $P < 0.01$ ；草地：斜率 < 0 , $P = 0.34$ ）。

解的效应值随试验时长的增加而显著降低（斜率 < 0 , $P < 0.01$ ）；草地条件下正好相反，土壤动物的效应值与试验时长正相关（斜率 > 0 , $P = 0.17$ ）（图 5）。

2.4 发表偏倚

发表偏倚检验是对 Meta 分析结果是否可靠的重要评估手段。基于效应值和方差的漏斗图显示无明显的偏度（图 6），表明无发表偏倚。罗森塔尔法的总体的失安全数为 48 480，远远大于常规安全数（ $5n + 10 = 1 550$ ）。因此，本文无发表偏倚，研究结果是安全、可信的。



注: G: 草地; W: 林地。下同。Note: G: Grassland; W: woodland. The same below.

图3 土壤动物对凋落物分解的效应值与年均温、低温月(1月)均温、高温月(7月)均温的关系

Fig. 3 The relationship between the effect size of soil fauna on the litter decomposition and the average annual temperature, the average temperature in January and July

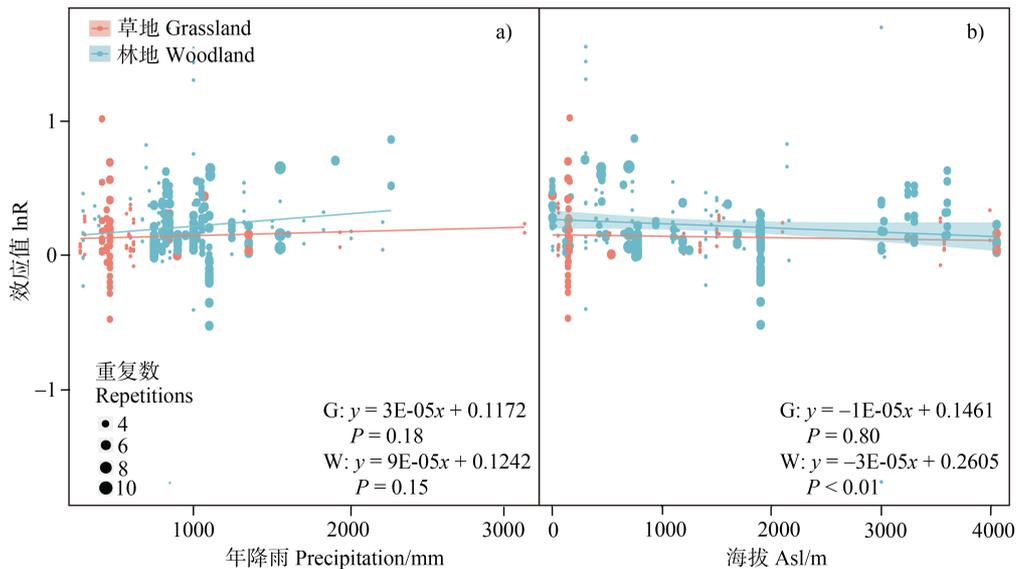


图4 土壤动物对凋落物分解的效应值与年降水、海拔的关系

Fig. 4 Relationship between effect size of soil fauna on litter decomposition and annual precipitation and altitude

3 讨论

3.1 不同土地利用方式下土壤动物对凋落物分解速率的影响

土壤动物是影响凋落物分解的主要生物因素之一。本研究结果表明, 全国范围内土壤动物平均增加了 8.10% 凋落物的分解。基于全球的 Meta 分析结果表明土壤动物作用下凋落物分解速率平均提升了 35%^[3]。与本文的数据差距可能是因为 García-Palacios 等^[3]这篇文章中湿热森林的研究数所占比例较高, 而本文中相对干冷气候研究地点比例较高,

土壤动物对凋落物分解的促进作用较弱。

土壤动物对凋落物分解的促进作用在林地、草地和耕地均达显著水平(图 2)。不同土地利用方式会改变土壤动物栖息的环境条件, 进而影响土壤动物的群落特征及其对凋落物的分解^[21-22]。本文研究结果显示, 在林地土壤动物对凋落物分解的效应值大于草地, 即土壤动物对凋落物分解的促进作用在林地强于草地。林地凋落物分解受土壤动物影响较大, 与其复杂的生境有关, 土壤动物在食物网丰富的条件下可能会对凋落物分解发挥更大的作用。

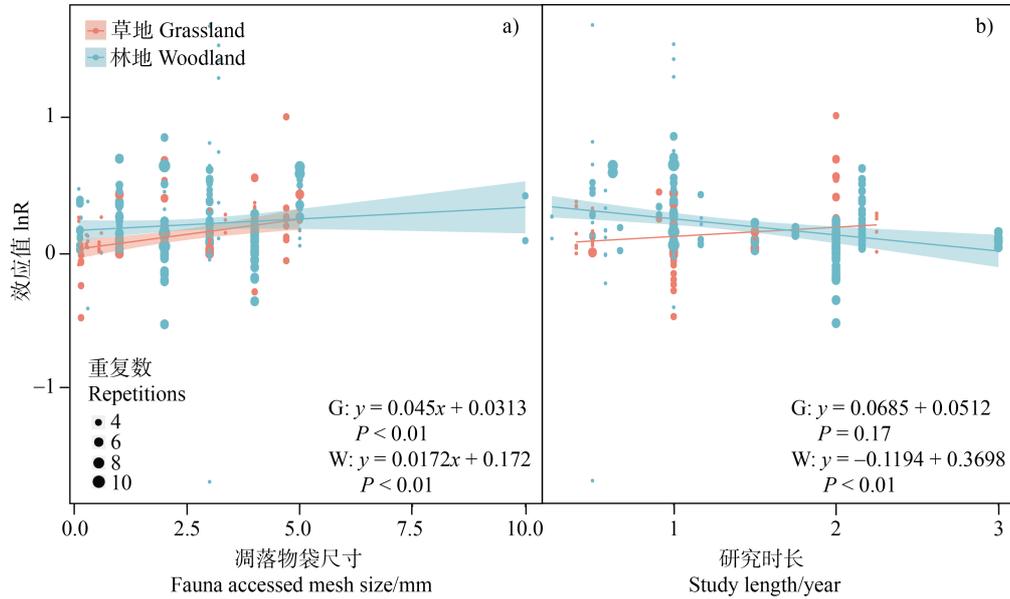


图 5 土壤动物对凋落物分解的效应值与凋落物袋尺寸、研究时长的关系

Fig. 5 The relationship between effect size of soil fauna on litter decomposition and litterbag size and the experimental duration

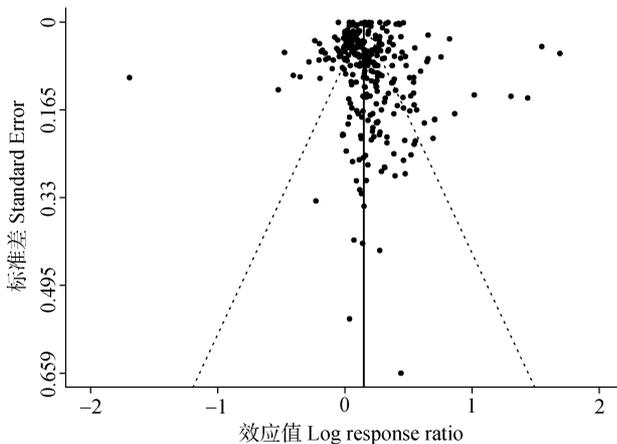


图 6 发表偏倚检验漏斗图

Fig. 6 Funnel plot of publication bias test

3.2 不同土地利用方式下土壤动物对凋落物分解的影响因素分析

气候是影响小区域土壤温度、湿度的直接因素^[23]。本文研究结果表明，土壤动物对凋落物分解的效应值与温度密切相关（图 3）：林地土壤动物的效应值与年均温显著正相关；在草地虽然土壤动物对凋落物分解的效应值与年均温的关系不显著，但却表现出随温度增加而降低的趋势。进一步就土壤动物的凋落物分解效应与林地和草地最低温月（1 月）和最高温月（7 月）平均气温分别进行相关分析，也表现出相同的规律（图 3）。表明一定温度范围内，温度升高增加了林地土壤动物对凋落物分解

的促进作用，而减弱了草地中土壤动物对凋落物分解的促进作用。土壤动物对环境变化极为敏感，土壤温度的细微变化将显著影响土壤动物群落组成、多样性和营养结构特征^[24]，进而影响其生态功能。林地土壤动物数量多、多样性高且食物网丰富。长白山地区土壤动物的研究显示随土壤温度的升高，土壤动物类群数和密度呈增大趋势^[25]。因而，在林地土壤动物对凋落物分解的促进作用随温度的升高而增加。本研究中，草地多分布于高纬度或者高海拔地区。这些地区降水量较少，且随着温度升高水分蒸发加快，干旱程度加剧^[26]。可能是导致土壤动物对凋落物分解效应值降低的主要原因之一。一项在草地生态系统中研究显示，温度升高影响土壤动物的生活史过程，导致土壤螨类和跳虫的丰富度降低^[27]。南非野外增温试验中同样发现，温度升高降低了草地中土壤动物丰富度^[28]。土壤动物需在繁殖前经历寒冷期，温度升高将破坏土壤动物休眠期，致使土壤动物冬眠存活率降低，影响土壤动物的种群密度和丰富度^[29-30]。土壤动物类群的生态学特征差异，对温度敏感度不同，体型小的土壤动物具备发育繁殖快和生生活活动小的特征，对温度变化更为敏感^[24]。在内蒙古荒漠草原生态系统增温试验中，弹尾目、前气门亚目和螨类的密度和类群数在增温处理下降低，而中气门亚目在增温处理下升高^[31]。温度升高对土壤动物食物网的影响表现为“热级联”

效应改变“捕食者/猎物”比率,放大捕食效应,加强捕食者的“下行效应”,进而改变食物网结构^[24]。地面节肢动物蜘蛛和甲虫等活跃在枯落物-土壤界面,温度升高增加了捕食者对螨类和跳虫的捕食作用^[32]。在草地条件下土壤动物数量少且多样性低,捕食类群的细微变化均将导致营养级效应,温度的变化将显著改变土壤动物群落组成及多样性分布,使草地土壤动物对凋落物分解促进作用减弱。

本研究发现,土壤动物对凋落物分解的效应值随年降水量的增加而增加,随海拔的升高而降低。绝大多数土壤动物生存在土壤孔隙中,其生命活动和生活史过程均依赖于土壤或枯落物水分^[33]。降水增加了土壤动物所赖以生存的水分,从而增加了土壤动物的数量和活性,加剧了凋落物的物理破碎,增强土壤动物对凋落物分解的促进作用^[34-36]。有研究显示,随着海拔高度的上升,凋落物袋中土壤动物群落多样性及其对凋落物分解的贡献呈显著的减少趋势^[37]。海拔升高对微气候的影响显著,降水减少,温度降低,土壤动物生存环境受显著影响。

本研究表明,凋落物袋尺寸和研究时长也影响土壤动物对凋落物的分解作用:其效应值随凋落物袋尺寸的增加显著增加。节肢动物、蚯蚓等这些大型土壤动物对凋落物的粉碎影响显著^[38]。凋落物袋尺寸越大土壤动物越多,能进入的大型土壤动物越多,其对凋落物分解的促进作用越强。林地条件下,土壤动物对凋落物的分解作用随试验时长的增加而显著降低;草地条件下正好相反,土壤动物的分解作用与试验时长正相关。可能的原因为:林地大型土壤动物数量多,试验前期土壤动物通过破碎、取食直接影响凋落物分解,其对凋落物分解的促进作用较强,而在后期凋落物残留量很少,多半被粉碎及分解,土壤动物在此时的促进作用减弱;草地多为小型、微型土壤动物,试验前期对凋落物分解破碎作用不强,试验后期其通过排泄等刺激微生物活动,对凋落物分解促进作用加强。

4 结论

Meta 分析发现土壤动物对凋落物分解的促进作用在不同土地利用方式下存在差异。环境因子调控土壤动物对凋落物的分解作用因不同土地利用方式而异。林地土壤动物的效应值随低温月(1月)、高温月(7月)平均温度及年均温的增加显著增加。

草地土壤动物效应值与低温月、高温月平均温度及年均温的相关关系均不显著,但却表现出随低温月、高温月平均温度及年均温的增加降低的趋势。随年降水量和凋落物袋尺寸的增加,土壤动物对凋落物分解的效应值增加,而随海拔和试验时长的增长,土壤动物对凋落物分解的效应值显著降低。国内的相关研究多集中于林地和草地,对耕地的研究相对较少;研究地点不够广泛,主要集中在东北地区和华中西南地区,多数地区尚未涉及。未来研究应更进一步对不同土地利用方式下土壤动物对凋落物分解的影响研究,地理涉及范围扩展至其他尚未涉及领域,且研究应同时考虑气候因子和凋落物质量等。

参考文献 (References)

- [1] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, et al. Ecological linkages between aboveground and belowground biota[J]. *Science*, 2004, 304 (5677): 1629—1633.
- [2] Bonan G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. *Science*, 2008, 320 (5882): 1444—1449.
- [3] García-Palacios P, Maestre F T, Kattge J, et al. Climate and litter quality differently modulate the effects of soil fauna on litter decomposition across biomes[J]. *Ecology Letters*, 2013, 16 (8): 1045—1053.
- [4] Frouz J. Effects of soil macro- and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization[J]. *Geoderma*, 2018, 332: 161—172.
- [5] Xia L, Wu F Z, Yang W Q, et al. Contribution of soil fauna to the mass loss of *Betula albosinensis* leaf litter at early decomposition stage of subalpine forest litter in western Sichuan[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (2): 301—306. [夏磊, 吴福忠, 杨万勤, 等. 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[J]. *应用生态学报*, 2012, 23 (2): 301—306.]
- [6] Cleveland C C, Townsend A R, Taylor P, et al. Relationships among net primary productivity, nutrients and climate in tropical rain forest: A pan-tropical analysis[J]. *Ecology Letters*, 2011, 14 (9): 939—947.
- [7] Berg B. Decomposition patterns for foliar litter - A theory for influencing factors[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 78: 222—232.
- [8] Amani M, Graça M A S, Ferreira V. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on litter decomposition in streams: A meta-analysis[J]. *International Review of Hydrobiology*, 2019, 104 (1/2): 14—25.
- [9] Barajas-Guzmán G, Alvarez-Sánchez J. The relationships

- between litter fauna and rates of litter decomposition in a tropical rain forest[J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 24 (1): 91—100.
- [10] Collison E J, Riutta T, Slade E M. Macrofauna assemblage composition and soil moisture interact to affect soil ecosystem functions[J]. *Acta Oecologica*, 2013, 47: 30—36.
- [11] Riutta T, Clack H, Crockatt M, et al. Landscape-scale implications of the edge effect on soil fauna activity in a temperate forest[J]. *Ecosystems*, 2016, 19(3): 534—544.
- [12] Emmerling C. Long-term effects of inundation dynamics and agricultural land-use on the distribution of soil macrofauna in fluvisols[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 20 (2): 130—136.
- [13] Geissen V, Peña-Peña K, Huerta E. Effects of different land use on soil chemical properties, decomposition rate and earthworm communities in tropical Mexico[J]. *Pedobiologia*, 2009, 53 (1): 75—86.
- [14] Ammer S, Weber K, Abs C, et al. Factors influencing the distribution and abundance of earthworm communities in pure and converted Scots pine stands[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 33 (1): 10—21.
- [15] Postma-Blaauw M B, de Goede R G M, Bloem J, et al. Soil biota community structure and abundance under agricultural intensification and extensification[J]. *Ecology*, 2010, 91 (2): 460—473.
- [16] de Vries F T, Hoffland E, van Eekeren N, et al. Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen management[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38 (8): 2092—2103.
- [17] Bradford M A, Tordoff G M, Eggers T, et al. Microbiota, fauna, and mesh size interactions in litter decomposition[J]. *Oikos*, 2002, 99 (2): 317—323.
- [18] Cotrufo M F, Ngao J, Marzaioli F, et al. Inter-comparison of methods for quantifying above-ground leaf litter decomposition rates[J]. *Plant and Soil*, 2010, 334(1/2): 365—376.
- [19] Berthrong S T, Jobbágy E G, Jackson R B. A global meta-analysis of soil exchangeable cations, pH, carbon, and nitrogen with afforestation[J]. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2009, 19 (8): 2228—2241.
- [20] Cooper H M, Rosenthal R. Statistical versus traditional procedures for summarizing research findings[J]. *Psychological Bulletin*, 1980, 87 (3): 442—449.
- [21] Koehler H, Born H. The influence of vegetation structure on the development of soil mesofauna[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1989, 27 (1/2/3/4): 253—269.
- [22] Deng X B, Zou S Q, Fu X H, et al. The impacts of land use practices on the communities of soil fauna in the Xishuangbanna rainforest, Yunnan, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (1): 130—138. [邓晓保, 邹寿青, 付先惠, 等. 西双版纳热带雨林不同土地利用方式对土壤动物个体数量的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23 (1): 130—138.]
- [23] Wang Y, Wei W, Yang X Z, et al. Interrelationships between soil fauna and soil environmental factors in China: Research advance[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21 (9): 2441—2448. [王移, 卫伟, 杨兴中, 等. 我国土壤动物与土壤环境要素相互关系研究进展[J]. *应用生态学报*, 2010, 21 (9): 2441—2448.]
- [24] Zhang H, Wu H T. Research progresses in effects of climate warming on soil fauna community structure[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39 (2): 655—664. [张慧, 武海涛. 气候变暖对土壤动物群落结构的影响机制[J]. *生态学杂志*, 2020, 39 (2): 655—664.]
- [25] Li H Y, Yin X Q, Ma C, et al. Ecological distribution of soil fauna communities in hilly regions of the Changbai mountains relative to land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (4): 1018—1028. [李红月, 殷秀琴, 马辰, 等. 长白山地丘陵区不同土地利用方式土壤动物群落生态分布特征[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (4): 1018—1028.]
- [26] Liu X D, Ma Q H, Yu H Y, et al. Climate warming-induced drought constrains vegetation productivity by weakening the temporal stability of the plant community in an arid grassland ecosystem[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 307: 108526.
- [27] Yin X Q, Zhong W Y, Wang H X, et al. Decomposition of forest defoliation and role of soil animals in Xiao Hinggan mountains[J]. *Geographical Research*, 2002, 21 (6): 689—699. [殷秀琴, 仲伟彦, 王海霞, 等. 小兴安岭森林落叶分解与土壤动物的作用[J]. *地理研究*, 2002, 21 (6): 689—699.]
- [28] Bokhorst S, Convey P, Huiskes A, et al. Dwarf shrub and grass vegetation resistant to long-term experimental warming while microarthropod abundance declines on the Falkland Islands[J]. *Austral Ecology*, 2017, 42 (8): 984—994.
- [29] David J F, Handa I T. The ecology of saprophagous macroarthropods (millipedes, woodlice) in the context of global change[J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2010, 85 (4): 881—895.
- [30] Huang Y M, Yang W Q, Zhang J, et al. Response of soil faunal community to simulated understory plant loss in the subalpine coniferous plantation of western Sichuan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (8): 2018—2025. [黄玉梅, 杨万勤, 张健, 等. 川西亚高山针叶林土壤动物群落对模拟林下植物丧失的响应[J]. *生态学报*, 2010, 30 (8): 2018—2025.]
- [31] De H S, Hong M, Zhao B, et al. Effect of simulated warming and N addition on soil mesofauna community in desert steppe of Inner Mongolia[J]. *Journal of Arid Land*

- Resources and Environment, 2016, 30 (6): 122—128. [德海山, 红梅, 赵巴音那木拉, 等. 模拟增温、施氮对荒漠草原土壤中小型动物群落的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30 (6): 122—128.]
- [32] Koltz A M, Classen A T, Wright J P. Warming reverses top-down effects of predators on belowground ecosystem function in Arctic tundra[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115 (32): E7541-E7549.
- [33] Neher D A, Weicht T R, Moorhead D L, et al. Elevated CO₂ alters functional attributes of nematode communities in forest soils[J]. Functional Ecology, 2004, 18(4): 584—591.
- [34] Hou L L, Sun T, Mao Z J, et al. Litter decomposition and nutrient dynamic of *Betula platyphylla* secondary forest with different stand ages in Xiaoxing'an mountains[J]. Bulletin of Botanical Research, 2012, 32(4): 492—496. [侯玲玲, 孙涛, 毛子军, 等. 小兴安岭不同林龄天然次生白桦林凋落物分解及养分变化[J]. 植物研究, 2012, 32 (4): 492—496.]
- [35] He R L, Chen Y M, Deng C C, et al. Litter decomposition and soil faunal diversity of two understory plant debris in the alpine timberline ecotone of western Sichuan in a snow cover season[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26 (3): 723—731. [和润莲, 陈亚梅, 邓长春, 等. 雪被期川西高山林线交错带两种地被物凋落物分解与土壤动物多样性[J]. 应用生态学报, 2015, 26 (3): 723—731.]
- [36] Ye H, Hong M, Zhao B, et al. Effects of water and nitrogen treatments on root decomposition in a *Stipa breviflora* desert steppe[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(5): 1169—1175. [叶贺, 红梅, 赵巴音那木拉, 等. 水氮控制对短花针茅荒漠草原根系分解的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26 (5): 1169—1175.]
- [37] Wang S J. Effects of soil fauna on leaf litter decomposition along an elevation gradient in the Wuyi mountains[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009. [王邵军. 武夷山不同海拔土壤动物对凋落物分解的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.]
- [38] Usher M B. The biology of soil: A community and ecosystem approach[J]. Soil Use and Management, 2006, 22 (3): 323.

(责任编辑: 卢 萍)