

火烧和垦殖对黔南喀斯特土壤跳虫的影响*

董逸夕** 叶 婷 曹 宇 李 灿 杨大星***

(贵阳学院生物与环境工程学院, 贵州省山地珍稀动物与经济昆虫重点实验室,
贵州省山地生物资源保护与高效利用工程中心, 贵阳 550005)

摘 要 【目的】明确喀斯特地区不同干扰形式对土壤跳虫群落组成和多样性的影响, 为深入认识干扰引起的生态退化提供科学资料。【方法】于 2016 年 10 月、2017 年 1 月和 4 月在黔南选取火烧迹地、农田和火烧后经济林分别代表火烧、农业活动和火烧后垦殖 3 种干扰形式, 以马尾松人工林为对照 (CK), 利用干漏斗 (Tullgren) 法调查土壤跳虫。【结果】共获得土壤跳虫 1 836 头, 优势类群为等节跳科 (Isotomidae) 和棘跳科 (Onychiuridae)。主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 结果显示, 火烧迹地、农田和火烧后经济林土壤跳虫群落组成与马尾松人工林存在差异。火烧迹地、农田和火烧后经济林土壤跳虫类群数和 Shannon-Wiener 指数 (H') 显著低于马尾松人工林 ($P<0.05$), 马尾松人工林秋季和冬季土壤跳虫 Shannon-Wiener 指数 (H') 显著高于春季 ($P<0.05$), 其余类群数、密度和 Shannon-Wiener 指数 (H') 无显著季节差异。土壤跳虫类群数、密度和 Shannon-Wiener 指数 (H') 与全钾显著正相关 ($P<0.05$), 密度与有效钾显著正相关 ($P<0.05$)。冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 结果表明, 有效钾是影响土壤跳虫分布的主要土壤因子。【结论】火烧、农业活动和火烧后垦殖能改变土壤跳虫群落组成, 降低土壤跳虫多样性。

关键词 喀斯特; 土壤跳虫; 干扰; 火烧; 垦殖

The effect of burning vegetation and land reclamation on soil collembola in southern Guizhou

DONG Yi-Xi** YE Ting CAO Yu LI Can YANG Da-Xing***

(Guizhou Provincial Key Laboratory for Rare Animal and Economic Insects of the Mountainous Region, Guizhou Provincial Engineering Research Center for Biological Resources Protection and Efficient Utilization of the Mountainous Region, College of Biology and Environment Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China)

Abstract [Aim] To assess the effects of burning vegetation and land reclamation practices on the soil collembola community composition and diversity in a Karst district, and thereby assess the degree of ecological degradation of this community resulting from such disturbance. [Methods] A burned area (representing fire disturbance), farmland (representing agricultural activity), a post-fire commercial forest (representing post-fire reclamation) and a *Pinus massoniana* plantation (control) were chosen as study sites in southern Guizhou province. The soil collembola communities of each site were investigated using the Tullgren method in October 2016 and in January and April 2017. [Results] A total of 1 836 individual soil collembola were collected. The dominant families were the Isotomidae and Onychiuridae which comprised 79.63% of the total. Principal component analysis (PCA) indicates that soil collembolan community composition in the *P. massoniana* plantation differed significantly from that in the disturbed sites. The richness and Shannon-Wiener index (H') of soil

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金项目 (31760130); 贵州省高层次创新型人才培养计划项目 (黔科合人才 (2016) 4020 号); 贵州省一流学科建设项目贵阳学院生态学学科建设项目 (黔教科研发[2017]85 号); 贵州省教育厅创新群体项目 (黔教合 KY 字[2021]013 号); 贵阳市科技局支持贵阳学院专项经费 (GYKJ-GUY[2021]); 研究生教育项目(2021-xk06); 研究生课题 (GYU-YJS[2021]-76)

**第一作者 First author, E-mail: dyx15362748685@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: ydaxing@163.com

收稿日期 Received: 2022-09-15; 接受日期 Accepted: 2022-11-21

collembola in the *P. massoniana* plantation were significantly higher than in the burned area, farmland or post-fire commercial forest ($P<0.05$). The Shannon-Wiener index (H') of the *P. massoniana* plantation was significantly greater in autumn and winter than in spring ($P<0.05$). Richness, density and Shannon-Wiener index (H') were significantly and positively correlated with TK ($P<0.05$), and there was also a significant positive correlation between the density of soil collembola and AK ($P<0.05$). Redundancy analysis (RDA) indicated that AK significantly affected the distribution of the soil collembolan community. [Conclusion] Burning, agriculture and post-fire reclamation decreased the richness and diversity of soil collembola in southern Guizhou.

Key words Karst; soil collembolan; disturbance; burning; reclamation

跳虫是生态系统物质分解与转化的再加工者,不仅在凋落物分解和土壤微环境的塑造等方面具有突出的作用(Rusek, 1998; 张阿娟等, 2020),并且具有环境变化指示功能,能有效表征干扰对环境的影响(Heisler and Kaiser, 1995; Rusek, 1998; 李孝刚等, 2014; Hasegawa *et al.*, 2015)。干扰是生态系统群落结构和组成的重要驱动者,干扰特征的变化如类型、频率、大小和强度等对生态系统的性质和过程影响明显(Wikars and Schimmel, 2001; Čuchta *et al.*, 2012; Wehr *et al.*, 2020)。研究表明,不合理干扰破坏土壤动物的栖息地和食物源,通常被认为是土壤动物多样性下降的重要原因之一(黄旭等, 2010; Wehner *et al.*, 2021)。

各种干扰类型中,火烧是研究最多的干扰因素(周道玮和钟秀丽, 1996),农业活动的影响也有大量的报道(Bedano *et al.*, 2006; John *et al.*, 2021; Menezes-Oliveira *et al.*, 2021)。火烧干扰通过破坏地表植被,清除林下凋落物,改变土壤持水能力和土壤结构的复杂性等方式影响环境条件,继而影响土壤动物的结构与数量(邓晓保等, 2003; Kamczyc *et al.*, 2017; 刘发林等, 2019)。火烧干扰的影响因土壤节肢动物种类和土层而异,如身体骨化程度高的螨类在火灾中拥有更高存活率(Coyle *et al.*, 2017),而深层的土壤节肢动物则由于土壤的热量缓冲作用受到的影响较小(Wikars and Schimmel, 2001)。农业活动使生境植物单一化,由于单一植被的定向选择,土壤动物群落组成定向改变,区系平衡被打破,多样性下降(吴东辉等, 2007; 毕艳孟和孙振钧, 2018)。干扰的影响一直是土壤动物生态学研究的重要内容,但主要以单一干扰形式为主(Dress and Boerner, 2004; Silveira *et al.*, 2013;

Bosch-Serra *et al.*, 2014; Zaitsev *et al.*, 2014; Khalil *et al.*, 2016),不同干扰之间的叠加或协同作用较少关注。在以全球气候变暖为主的气候变化和人口持续增长背景下,未来火烧和农业活动干扰作用可能还会增强。因此,研究火烧和农业活动干扰对土壤跳虫的影响特征,对于受干扰生态系统稳定性的维持和生物多样性保护具有重要意义。

喀斯特生态系统由于其独特的地质特征,生态环境极其脆弱,自20世纪40年代以来,在不同形式的人为干扰影响下,喀斯特生态系统出现了以植被减少、结构简单化和服务功能丧失为特征的退化过程(彭晚霞等, 2008; 魏亚伟等, 2010)。由于干扰对土壤动物动态调控作用的复杂性和不同类群响应模式的差异性导致目前对喀斯特土壤动物干扰响应机制的认识仍然存在较大的不足。在喀斯特地区,关于土壤节肢动物与干扰关系的研究已有少量探索(杨大星等, 2013, 2019),但不同干扰尤其是多重干扰对土壤跳虫的影响还缺乏规律性的认识。

本研究在黔南喀斯特地区以马尾松人工林为对照,选择火烧、农业活动和火烧后垦殖3种干扰形式调查土壤跳虫,分析不同干扰方式下土壤跳虫群落组成和多样性的变化趋势,进而揭示土壤跳虫对不同干扰的响应特征,为喀斯特地区生物多样性保护提供科学资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省黔南州惠水县境内(106°32'-106°56'E, 26°01'-26°05'N),区内地

势北高南低,属典型的喀斯特地貌区,地形以高原山地和高原丘陵为主。海拔 666-1 691 m,平均海拔 1 100 m,属亚热带季风湿润气候。无霜期 278-300 d,年平均降雨量 1 154-1 214 mm,年平均相对湿度 80%-83%,年平均气温 15.7-16.3 °C,年积温 $\geq 5\,769\text{ }^{\circ}\text{C}$,10 °C积温在 4 199-4 838 °C, $\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温在 1 330-2 369 °C(邓廷飞等,2014;许玉凤和陈娴,2017)。植物主要有马尾松 *Pinus massoniana*、柏木 *Cupressus funebris*、枫香 *Liquidambar formosana*、香椿 *Toona sinensis*、化香 *Platycarya strobilacea*、金毛狗脊 *Cibotium barometz* 和芒萁 *Dicranopteris dichotoma* 等。土壤类型主要包括黄壤、黄棕壤、

石灰土、红壤、草甸土和水稻土等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 于 2016 年 10 月(秋季)、2017 年 1 月(冬季)和 2017 年 4 月(春季)在样区选取火烧迹地、农田和火烧后经济林分别代表火烧、农业活动和火烧后垦殖 3 种干扰方式,同时选择马尾松人工林作为对照(CK),研究土壤跳虫对不同干扰的响应。每种干扰方式及马尾松人工林分别选择 3 个重复样地,同类型样地距离在 500 m 以上。每个样地随机设置 5 个样方,样方间距离大于 5 m。各样地主要环境特征如表 1 所示。

表 1 样地基本概况
Table 1 Basic characteristics of the plots

因素 Factors	火烧迹地 Burned area	农田 Farmland	火烧后经济林 Post-fire economic forest	马尾松林人工林 <i>Pinus massoniana</i> plantation
经纬度 Longitude and latitude	106°32'43"-106°32'44"E, 26°1'37"-26°1'51"N	106°32'44"-106°32'52"E, 26°1'21"-26°1'56"N	106°32'45"-106°32'47"E, 26°1'3"-26°1'43"N	106°32'8"-106°32'10"E, 26°1'43"-26°1'46"N
海拔(m) Elevation (m)	1 061-1 094	1 003-1 077	1 060-1 091	1 012-1 026
坡度 Slope	20°-50°	0°-10°	5°-15°	30°-40°
土壤类型 Soil type	黄壤 Yellow soil	黄壤 Yellow soil	黄壤 Yellow soil	黄壤 Yellow soil
主要植被 Dominant vegetation species	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> , 茅栗 <i>Castanea seguinii</i> 和 芒萁 <i>Dicranopteris dichotoma</i> 等	玉米 Maize 和 莴笋 Cabbage Lettuce/白菜 轮作	主要种植核桃 <i>Juglans regia</i> 和桃 <i>Prunus persica</i> , 果树下杂草主要有果树下主要有马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i> , 狗尾草 <i>Setaria viridis</i> 和鼠曲草 <i>Gnaphalium affine</i>	马尾松 <i>Pinus massoniana</i> , 油茶 <i>Camellia oleifera</i> , 青冈 栎 <i>Cyclobalanopsis glauca</i> 和芒萁 <i>Dicranopteris dichotoma</i> 等

1.2.2 土壤跳虫采集和鉴定 每个样方取面积为 5 cm×5 cm,深度为 0-15 cm 的土样 2 份,分别用于土壤跳虫分离和理化指标测定。在室内使用 Tullgren 法连续分离 24 h 获取土壤跳虫,获得的土壤跳虫根据《中国土壤动物检索图鉴》(尹文英,1998)进行分类鉴定,一般鉴定到科水平,并统计个体数量。采用电位法测定 pH 值(水土比 2.5:1);高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定有机质;凯氏定氮法测定全氮;钼锑抗比色法测定全磷;火焰分光光度法测定全钾;FeSO₄-Zn

还原-碱解扩散法测定有效氮;钼锑抗比色法测定有效磷;火焰分光光度法测定有效钾(鲁如坤,2000)。

1.2.3 数据分析处理 采用 Shannon-Wiener 多

样性指数 $H' = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$ 分析土壤跳虫多样性, P_i 为第 i 类群的百分比。

数据进行 $\log(x+1)$ 转换降低非正态性后使用重复测量方差分析(Repeated measures ANOVA)检验干扰类型和取样季节及其交互作

用对土壤跳虫的影响。若差异显著则用LSD法(方差齐性)和Tamhane’s T2(M)法(方差不齐)进行多重比较。

土壤跳虫除趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)显示, Axis lengths 最大值均小于 3, 响应变化更适合于使用线性模型主成分分析(Principal component analysis, PCA)和冗余分析(Redundancy analysis, RDA)排序, 因此本研究使用 PCA 检验不同干扰对土壤跳虫群落组成的影响, 使用 RDA 和蒙特卡洛检验确定显著影响土壤跳虫群落结构的环境因子, 排序前删除仅出现 1 次的类群(山丹, 2020; 蒋嘉瑜等, 2022)。

类群数量等级划分标准: 密度占总密度的 10%以上为优势类群, 密度占总密度的 1%-10%之间的为常见类群, 密度占总密度的 1%以下为稀有类群(刘任涛等, 2011)。

使用 SPSS16.0 对数据进行统计分析, 使用 Origin 2016 制作柱形图, 在 R 语言使用 Vegan

包(Oksanen *et al.*, 2020)进行 PCA 和 RDA 分析, 使用 ggplot2 包(Wickham, 2016)将排序结果可视化。

2 结果与分析

2.1 土壤跳虫群落组成

调查共获得土壤跳虫 1 836 头, 隶属 7 科(表 2)。优势类群为等节跳科(Isotomidae)和棘跳科(Onychiuridae), 占总密度的 79.63%; 常见类群为长角跳科(Entomobryidae)、疣跳科(Neanuridae)、球角跳科(Hypogastruridae)和圆跳科(Sminthuridae)4 类, 占总密度的 20.32%; 稀有类群为鳞跳科(Tomoceridae), 占总密度的 0.05%。

主成分分析(PCA)表明, 火烧迹地、农田和火烧后经济林土壤跳虫群落组成与马尾松人工林明显不同, 且受季节变化的影响(图 1)。

表 2 不同干扰方式下土壤跳虫组成
Table 2 Compositions of soil collembolan under different disturbances

类群 Taxa	火烧迹地 Burned area	农田 Farmland	火烧后经济林 Post-fire economic forest	马尾松人工林 <i>Pinus massoniana</i> plantation	平均 Average
	密度(头/m ²) Density(ind./m ²)	密度(头/m ²) Density(ind./m ²)	密度(头/m ²) Density(ind./m ²)	密度(头/m ²) Density(ind./m ²)	密度(头/m ²) Density(ind./m ²)
等节跳科 Isotomidae	675.56 (34.23)	2 417.78 (47.64)	2 835.56 (75.24)	1 662.22 (30.21)	1 897.78 (46.51)
棘跳科 Onychiuridae	773.33 (39.19)	1 280.00 (25.22)	657.78 (17.45)	2 693.33 (48.95)	1 351.11 (33.12)
长角跳科 Entomobryidae	35.56 (1.80)	888.89 (17.51)	62.22 (1.65)	497.78 (9.05)	371.11 (9.10)
疣跳科 Neanuridae	382.22 (19.37)	115.56 (2.28)	142.22 (3.77)	595.56 (10.82)	308.89 (7.57)
球角跳科 Hypogastruridae	80.00 (4.05)	240.00 (4.73)	17.78 (0.47)		84.44 (2.07)
圆跳科 Sminthuridae	26.67 (1.35)	133.33 (2.63)	44.44 (1.18)	53.33 (0.97)	64.44 (1.58)
鳞跳科 Tomoceridae			8.89 (0.24)		2.22 (0.05)
总类群数 Richness	6	6	7	5	7
总个体数 Individual number	222	571	424	619	1 836

括号内的数值为类群百分比。The value in parentheses is percentage of taxa.

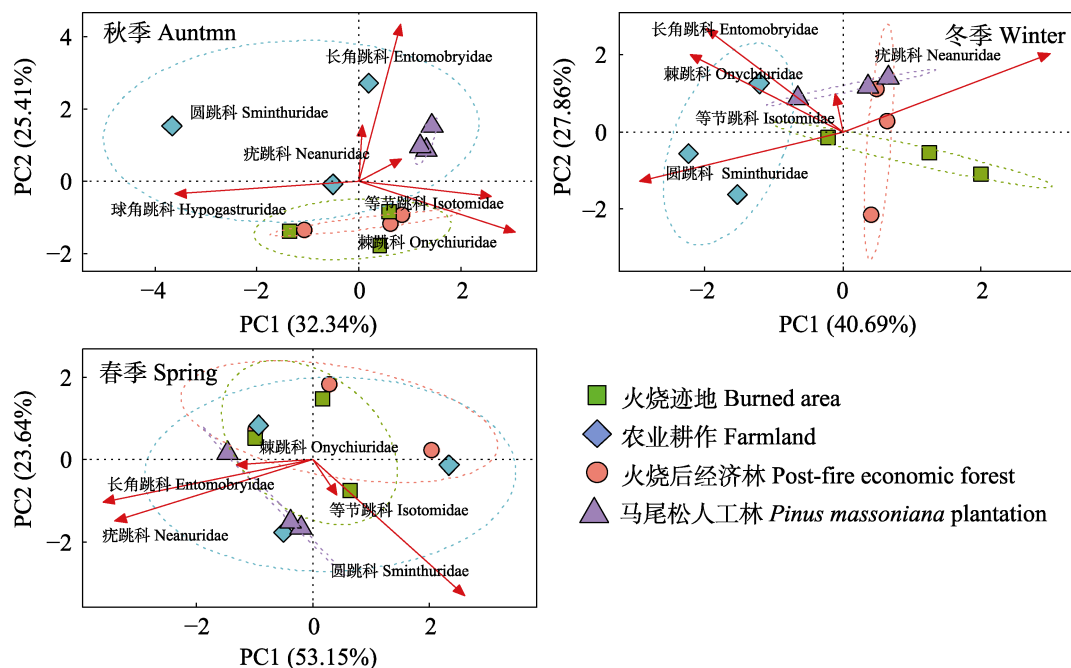


图 1 土壤跳虫 PCA 排序分析

Fig. 1 Principal component analysis (PCA) of soil collembolan community composition

秋季马尾松人工林与火烧迹地、农田和火烧后经济林土壤跳虫群落组成差异明显, 冬季马尾松人工林与火烧迹地和农田土壤跳虫群落组成有明显不同, 春季马尾松人工林与火烧后经济林和火烧迹地土壤跳虫群落组成有显著区别。不同季节影响土壤跳虫群落组成的类群有所不同。秋季在第 1 轴(横轴)上影响土壤跳虫群落组成的主要类群为球角跳科, 在第 2 轴(纵轴)是主要影响类群为长角跳科; 冬季在第 1 轴上影响土壤跳虫群落组成的主要类群为圆跳科, 在第 2 轴是主要影响类群为长角跳科; 春季在第 1 轴上影响土壤跳虫群落组成的主要类群为长角跳科, 在第 2 轴是主要影响类群为圆跳科。

2.2 土壤跳虫群落密度与多样性变化

各季节土壤跳虫类群数和 Shannon-Wiener 指数 (H') 均以马尾松人工林高于火烧迹地、农田和火烧后经济林, 除冬季外, 其余季节土壤跳虫密度均以马尾松人工林最高 (图 2: A-C)。重复测量方差分析表明, 马尾松人工林类群数和 Shannon-Wiener 指数 (H') 与火烧迹地、农田和火烧后经济林差异显著 ($P < 0.05$), 生境对密度影响无显著影响; 季节变化对类群数和密度影

响不明显, 但显著影响 Shannon-Wiener 指数 (H') ($P < 0.05$)。进一步分析显示, 马尾松人工林 Shannon-Wiener 指数 (H') 季节差异显著 ($F = 5.45$, $P < 0.05$), 火烧迹地、农田和火烧后经济林 Shannon-Wiener 指数 (H') 季节波动不明显。

2.3 环境因子与土壤跳虫的关系

土壤主要化学性质的空间变化如表 3 所示。马尾松人工林土壤 pH 值、有效磷含量显著低于农田 ($P < 0.05$), 土壤全钾含量以马尾松人工林显著高于火烧迹地、农田和火烧后经济林 ($P < 0.05$), 土壤全磷含量以农田显著高于火烧迹地和火烧后经济林 ($P < 0.05$), 土壤有效钾含量则以马尾松人工林和农田显著高于火烧迹地 ($P < 0.05$), 其余无显著不同。

相关性分析 (表 4) 显示, 土壤跳虫类群数、密度和 Shannon-Wiener 指数 (H') 与土壤全钾含量显著正相关, 密度与土壤有效钾含量显著正相关 ($P < 0.05$), 其余无显著相关性。

RDA 分析表明 (图 3), 第 1 轴和第 2 轴对土壤跳虫和土壤因子关系的解释率为 77.30%, 所有轴 ($F = 3.36$, $P < 0.05$) 和第 1 轴 ($F = 31.59$,

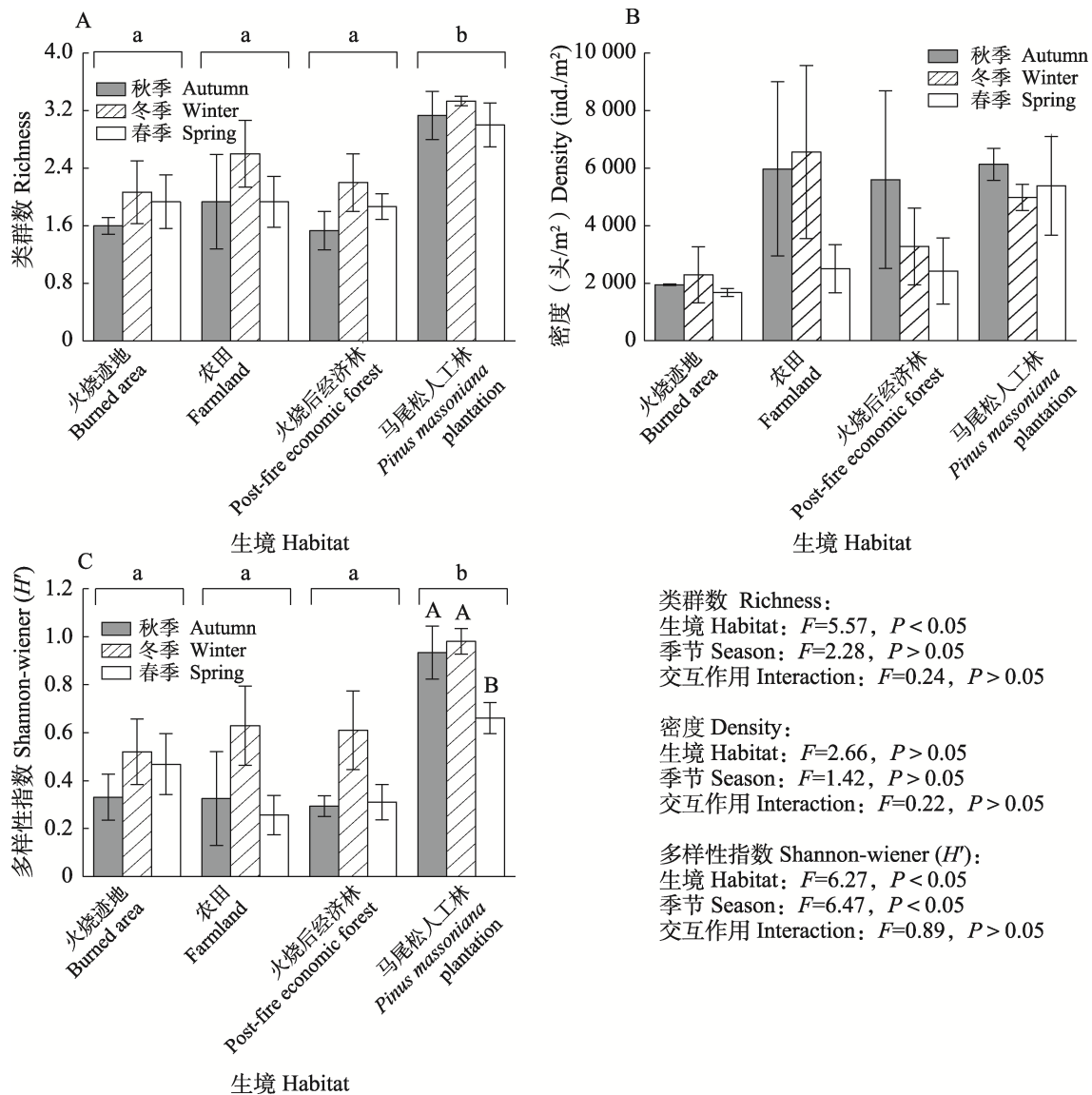


图2 土壤跳虫群落密度与多样性差异
 Fig. 2 Differences in density and diversity of soil collembolan communities

A. 类群数; B. 密度; C. 多样性指数。

A. Richness; B. Density; C. Diversity index.

柱上不同小写字母表示空间差异显著 ($P < 0.05$, LSD 检验), 大写字母不同表示时间差异显著 ($P < 0.05$, LSD 检验)。
 Different lowercase letters above bars indicate significant difference between disturbance types at $P < 0.05$ level by LSD's test, different uppercase letters indicate significant difference between seasons at $P < 0.05$ level by LSD's test.

$P < 0.05$) 在统计学上达显著水平。蒙特卡洛检验显示, 土壤跳虫的分布主要受土壤有效钾含量的影响 ($P < 0.01$)。

3 讨论

大量研究表明, 植物群落与土壤节肢动物群落关系密切 (何振等, 2017; 刘继亮和李锋瑞,

2018; Vilardo *et al.*, 2018), 简单的植被类型会降低生境异质性, 影响养分供给, 对节肢动物群落不利 (于晓东等, 2006; 张萌等, 2020)。火烧干扰破坏植被结构, 降低植物群落盖度和多样性, 加快林下水分的散失速度, 土壤易干燥, 不利于土壤动物的生存繁衍 (党香宁等, 2021), 而森林冠层闭合对跳虫群落的恢复有促进作用,

表 3 主要土壤化学性质空间变化
Table 3 Spatial variation of main soil chemical properties

项目 Item	火烧迹地 Burned area	农田 Farmland	火烧后经济林 Post-fire economic forest	马尾松人工林 <i>Pinus massoniana</i> plantation	<i>F</i>	<i>P</i>
pH	4.22±0.03 b	5.31±0.54 a	4.47±0.04 b	4.28±0.03 b	4.13	< 0.05
SOM (g/kg)	65.99±12.89	36.44±9.23	23.91±0.40	35.02±8.29	4.02	NS
TN (g/kg)	1.83±0.45	1.54±0.29	1.02±0.12	1.68±0.17	1.75	NS
TP (g/kg)	0.39±0.08 b	1.03±0.28 a	0.40±0.06 b	0.87±0.14 ab	4.40	< 0.05
TK (g/kg)	2.34±0.19 d	7.04±0.88 a	3.96±0.57 c	20.77±1.72 b	70.92	< 0.01
AN (mg/kg)	133.44±25.36	116.23±18.84	72.94±5.27	124.57±26.79	2.24	NS
AP (mg/kg)	1.40±0.31 b	21.11±9.17 a	3.48±2.25 b	0.54±0.02 b	6.89	< 0.05
AK (mg/kg)	38.00±3.77 a	120.83±49.10 b	72.67±10.14 ab	100.83±10.92 b	4.58	< 0.05

SOM: 土壤有机质; TN: 全氮; AN: 碱解氮; TP: 全磷; AP: 有效磷; TK: 全钾; AK: 有效钾。图 3 同。数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, LSD 检验), NS 表示无显著差异。
SOM: Soil organic matter; TN: Total nitrogen; AN: Available nitrogen; TP: Total phosphorus; AP: Available phosphorus; TK: Total potassium; AK: Available potassium. The same for Fig. 3. Data followed by the different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level by LSD's test, NS denotes no significant difference.

表 4 土壤跳虫相关性分析
Table 4 Pearson correlation analysis on the relationships between soil collembolan and environmental factors

项目 Item	pH	SOM	TN	TP	TK	AP	AN	AK
类群数 Richness	- 0.38	- 0.12	0.40	0.49	0.82**	0.38	- 0.16	0.38
密度 Density	- 0.18	- 0.45	- 0.04	0.36	0.59*	0.02	0.09	0.58*
多样性指数 Shannon-Wiener (<i>H'</i>)	- 0.49	0.00	0.45	0.35	0.76**	0.42	- 0.31	0.19

*表示显著相关 ($P<0.05$, Pearson 相关性分析), **表示极显著相关 ($P<0.01$, Pearson 相关性分析)。* indicates significant correlation at 0.05 level by Pearson correlation analysis, ** indicates significant correlation at 0.01 level by Pearson correlation analysis.

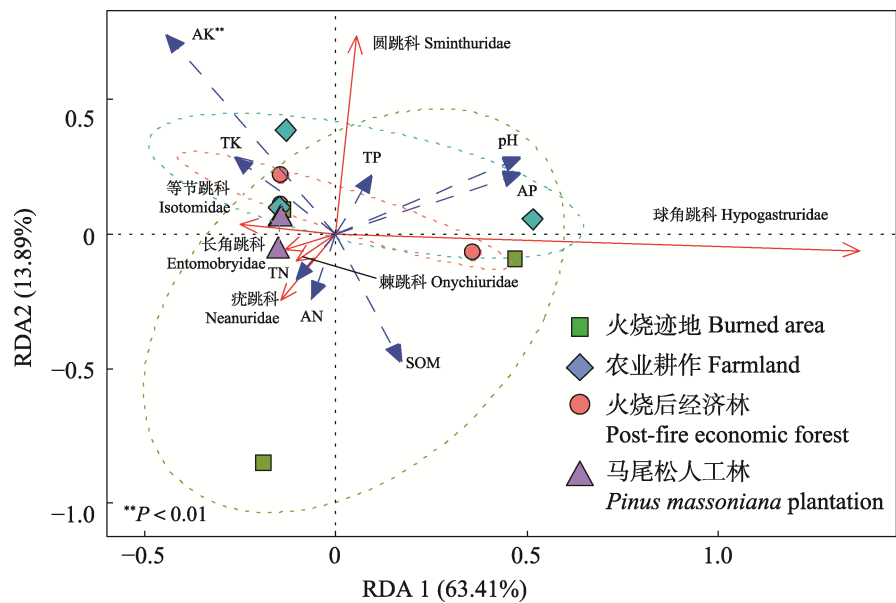


图 3 土壤跳虫与土壤因子的 RDA 二维排序图
Fig. 3 Two-dimensional diagram of RDA between soil collembolan and soil factors

一定范围内,冠层开度越低对恢复越有利 (Sterzyńska and Skłodowski, 2018)。火烧迹地经过 6.5 年恢复,已生长出大量灌丛,植被盖度增加,环境条件有一定的改善,但土壤跳虫的类群数和多样性仍显著低于马尾松人工林,这与杨大星等 (2019) 对大型土壤节肢动物的研究结果不同,跳虫和大型土壤节肢动物移动能力不同可能是产生差异的原因。大型土壤节肢动物的强扩散能力能有效躲避不利影响,火烧干扰后也能迅速进入火烧迹地定殖,故大型土壤节肢动物恢复速度较快 (张雪萍等, 2006; Coyle *et al.*, 2017)。火烧迹地与马尾松人工林优势类群一致,均为等节跳科、棘跳科和疣跳科,表明等节跳科、棘跳科和疣跳科对火烧干扰的耐受能力较其他类群更强或恢复速度更快,但三者密度仍与马尾松人工林有较大差距,这也说明火烧干扰对土壤跳虫优势类群密度的影响较为持久,土壤跳虫的恢复将是一个长期的过程。

自然林转为农田对土壤动物有负面影响 (Menezes-Oliveira *et al.*, 2021), 周期性的农业管理活动使农田植被结构趋于简单,环境异质性降低,导致对环境变化敏感的类群密度降低甚至消失,是农田土壤动物多样性维持在较低水平的重要原因 (于晓东等, 2006; 吴东辉等, 2007; 赵娟等, 2019)。此外,农业翻耕主导的物理扰动对土壤跳虫的食物源真菌、细菌等微生物会产生致死作用 (Heisler and Kaiser, 1995; 邓晓保等, 2003; 张阿娟等, 2020), 食物资源减少进一步加剧跳虫多样性下降。相关研究也指出,耕作活动使环境稳定性降低,农田环境的高度单一化并不利于较多物种共存 (于晓东等, 2003)。与马尾松人工林相比,农田等节跳科和长角跳科优势地位提升,棘跳科和疣跳科呈相反变化,说明农业活动对等节跳科和长角跳科有利。

对于火烧后经济林而言,火烧干扰对地表凋落物的清除切断了跳虫的营养源,而垦殖过程中对土壤的翻耕则进一步恶化了土壤跳虫生存的物理环境。虽然在火烧后垦殖双重干扰的影响下类群数和 Shannon-Wiener 指数 (H') 明显降低,

但并未与单一的火烧迹地和农田产生明显的不同。这与已有的研究认为双重干扰较单一的干扰对土壤动物的负面作用更强 (Wikars and Schimmel, 2001; Battigelli *et al.*, 2004) 有不同,干扰形式不同可能是产生差别的原因。火烧后经济林存在杂草修剪清理活动,但清理后的杂草并未清除,而是以还田的形式重新进入养分循环过程,这种管理措施不仅有利于增加有机质的输入和改善环境条件,同时也丰富了土壤跳虫的食源 (徐国良等, 2006; Jiang *et al.*, 2018), 可一定程度减弱火烧后垦殖双重干扰所引起的负面影响,降低其与单一的火烧或农业活动干扰之间土壤跳虫群落的差异性。火烧后垦殖改变了环境条件,也改变了土壤跳虫群落优势类群组成,火烧后经济林优势类群为等节跳科和棘跳科,与马尾松人工林有一定差异,等节跳科优势地位较马尾松人工林有大幅度提升,棘跳科变化趋势相反,反映出等节跳科对火烧后经济林的适应能力强于棘跳科。

土壤跳虫的分布不仅与植被有关,还受到土壤理化性质的制约 (Setälä *et al.*, 1995; 侯春雨等, 2022)。本研究发现土壤全钾与类群数、密度和多样性指数显著正相关,与李雨等 (2019) 的研究结果一致;有效钾与密度正相关,与孙彩彩等 (2022) 的研究结果类似;RDA 分析结果也显示,土壤有效钾是影响土壤跳虫群落分布的重要因素,但跳虫密度并未表现出显著性的改变 (图 3)。相比之下,全钾对土壤跳虫的空间分布影响更大。钾是多种酶的辅助因子,具有激活参与细胞呼吸作用和光合作用相关酶活性的作用 (李海涛等, 2007), 能提高 CO_2 的同化率,促进光合产物向存储器官运输 (王玉琴等, 2019), 低钾胁迫或土壤钾含量的降低会影响植物对氮磷元素的吸收,限制植物生物量积累,间接影响土壤跳虫生长繁殖和群落结构 (韩德梁等, 2009; 刘文辉等, 2010; 夏颖等, 2013; 蒋嘉瑜等, 2022)。在干扰的影响下,土壤全钾含量不同程度的降低,对土壤跳虫群落抑制作用明显 (表 3, 表 4), 是导致土壤跳虫多样性下降的重要因素之一。这说明干扰不仅可以通过改变植

被影响土壤跳虫,也可以通过影响土壤性质进而实现对土壤跳虫空间分布的调控。

受温度、水分和凋落物等因素的影响,节肢动物通常具有显著季节变化(李娜等, 2013; 何振等, 2018; Jiang *et al.*, 2018; 常海涛等, 2020)。本研究中,在干扰的影响下,跳虫类群数、密度和 Shannon-Wiener 指数 (H') 并未表现出明显的季节波动,这可能与凋落物有关。凋落物的覆盖能土壤保持相对稳定温度和水分,为土壤动物构建相对稳定的生存环境,降低温湿度季节变化所带来的影响。火烧迹地有一定量的凋落物存在,而火烧后经济林的割草还田管理活动为土壤增加了覆盖物,减弱了季节变化对火烧迹地和火烧后经济林生境土壤跳虫类群数、密度和 Shannon-Wiener 指数 (H') 的影响。农田虽受扰动频繁,凋落物极少,但土壤跳虫依然保持了季节稳定,这可能是农田靠近路边,受边缘效应的影响所致(吴东辉等, 2005; 2006)。马尾松人工林凋落物丰富,但跳虫类群数、密度和 Shannon-Wiener 指数 (H') 季节变化并未表现出一致性,Shannon-Wiener 指数 (H') 仍有明显的季节波动,原因不明。

火烧、农业活动和火烧后垦殖的干扰显著降低土壤跳虫多样性,明显影响土壤跳虫多样性季节动态,改变土壤跳虫群落组成。土壤全钾是影响土壤跳虫多样性的主要土壤因子。研究结果为进一步认识喀斯特生态系统退化机制提供科学依据。

土壤动物的生态功能主要通过与其他生物相互作用而得以发挥(贺纪正等, 2015),仅依靠研究土壤跳虫来理解干扰的生态效应还不够全面,尤其是在环境高度变异的喀斯特环境。所以在今后研究中,将不同土壤生物如土壤跳虫和微生物同时考虑,相互印证,可能是深入认识干扰驱动喀斯特生态退化机制的关键。

参考文献 (References)

- Battigelli JP, Spence JR, Langor DW, Berch SM, 2004. Short-term impact of forest soil compaction and organic matter removal on soil mesofauna density and oribatid mite diversity. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(5): 1136–1149.
- Bedano JC, Cantú MP, Doucet ME, 2006. Influence of three different land management practices on soil mite (Arachnida: Acari) densities in relation to a natural soil. *Applied Soil Ecology*, 32(3): 293–304.
- Bi YM, Sun ZJ, 2018. Mechanisms of earthworms to alleviate continuous cropping obstacles through regulating soil microecology. *Biodiversity Science*, 26(10): 1103–1115. [毕艳孟, 孙振钧, 2018. 蚯蚓调控土壤微生态缓解连作障碍的作用机制. 生物多样性, 26(10): 1103–1115.]
- Bosch-Serra ÀD, Padró R, Boixadera-Bosch RR, Orobitg J, Yagüe MR, 2014. Tillage and slurry over-fertilization affect oribatid mite communities in a semiarid Mediterranean environment. *Applied Soil Ecology*, 84: 124–139.
- Chang HT, Liu JN, Zhao J, Zhang J, Luo YX, Liu RT, Zuo XA, 2020. Seasonal distribution of ground-active arthropod community in *Reaumuria soongorica* shrubbery land in Urat desert steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 40(9): 3121–3130. [常海涛, 刘佳楠, 赵娟, 张静, 罗雅曦, 刘任涛, 左小安, 2020. 乌拉特荒漠草原红砂(*Reaumuria soongorica*)灌丛林地地面节肢动物群落季节分布特征. 生态学报, 40(9): 3121–3130.]
- Coyle DR, Nagendra UJ, Taylor MK, Campbell JH, Cunard CE, Joslin AH, Mundepi A, Phillips CA, Callahan Jr MA Jr, 2017. Soil fauna responses to natural disturbances, invasive species, and global climate change: Current state of the science and a call to action. *Soil Biology & Biochemistry*, 110: 116–133.
- Čuchta P, Miklisová D, Kováč L, 2012. A three-year study of soil Collembola communities in spruce forest stands of the High Tatra Mts (Slovakia) after a catastrophic windthrow event. *European Journal of Soil Biology*, 50: 151–158.
- Dang XN, Xiao JJ, Wei QW, Tu CW, Chen LH, Ma YW, 2021. Influence of forest gap reconstruction on the soil fauna community of a *Pinus massoniana* plantation. *Journal of Forest and Environment*, 41(1): 66–75. [党香宁, 肖玖金, 韦晴雯, 涂程伟, 陈良华, 马月伟, 2021. 林窗改造对马尾松人工林土壤动物群落的影响. 森林与环境学报, 41(1): 66–75.]
- Deng TF, Liu Y, Yan QX, He TB, Gao AQ, 2014. Mechanical composition and soil nutrient characteristics and their relationships in typical *Lonicera cinfusa* soil of Guizhou. *Journal of Soil and Water Conservation*, 28(5): 209–214. [邓廷飞, 刘彦, 颜秋晓, 何腾兵, 高安勤, 2014. 贵州典型山银花土壤机械组成与养分特性及其关系. 水土保持学报, 28(5): 209–214.]
- Deng XB, Zou SQ, Fu XH, Yao TQ, Sheng CY, Bai ZL, 2003. The impacts of land use practices on the communities of soil fauna in the Xishuangbanna rainforest, Yunnan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 23(1): 130–138. [邓晓保, 邹寿青, 付先惠, 姚天全, 盛才余, 白智林, 2003. 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. 生态学报, 23(1): 130–138.]
- Dress WJ, Boerner REJ, 2004. Patterns of microarthropod abundance in oak-hickory forest ecosystems in relation to prescribed fire and landscape position. *Pedobiologia*, 48(1): 1–8.
- Han DL, Xu ZM, Ai L, Han LB, 2009. Effect of fertilization on the forage biomass and quality of aged leafy *Elymus sibiricus*. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 15(6): 1486–1490. [韩德梁, 徐智明, 艾琳, 韩烈保, 2009. 磷肥和钾肥对老龄多叶老芒麦牧草生物量和品质的影响. 植物营养与肥料学报, 15(6): 1486–1490.]
- Hasegawa M, Sasaki T, Sato H, Abe S, 2015. Effects of roads on collembolan community structure in subtropical evergreen forests on Okinawa Island, southwestern Japan. *Pedobiologia*, 58(1): 13–21.
- He Z, Zhao Q, Li DQ, Li M, 2018. Seasonal dynamics of community structure and diversity of soil collembolan in Badagong mountains. *Forest Research*, 31(3): 68–77. [何振, 赵琴, 李迪强, 李密, 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 JZ, Lu YH, Fu BJ, 2015. Frontier of Soil Biology. Beijing: Science Press. 327–342. [贺纪正, 陆雅海, 傅伯杰, 2015. 土壤生物学前沿. 北京: 科学出版社. 327–342.]
- He Z, Zhao Q, Li DQ, Li M, Gu ZR, 2017. Structure and diversity of soil collembolan and aboveground arthropod communities under different habitats. *Journal of Beijing Forestry University*, 39(5): 98–108. [何振, 赵琴, 李迪强, 李密, 谷志容, 2017. 不同生境土壤跳虫及地表节肢动物群落结构和多样性特征. 北京林业大学学报, 39(5): 98–108.]
- Heisler C, Kaiser EA, 1995. Influence of agricultural traffic and crop management on collembola and microbial biomass in arable soil. *Biology and Fertility of Soils*, 19(2): 159–165.
- Hou CY, Wei X, Wu PF, 2022. Effects of cultivating *Coptis chinensis* and *Paris polyphylla* on soil microarthropod communities. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 33(3): 813–820. [侯春雨, 魏雪, 吴鹏飞, 2022. 种植黄连和重楼对小型土壤节肢动物群落的影响. 应用生态学报, 33(3): 813–820.]
- Huang X, Zhang J, Yang WQ, Liu Y, Yan BG, Hu FJ, Su JF, 2010. Soil fauna diversity of the subalpine forest-pasture ecotone in western Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 30(19): 5161–5173. [黄旭, 张健, 杨万勤, 刘洋, 闫帮国, 胡方洁, 苏江峰, 2010. 川西亚高山林牧交错区土壤动物多样性. 生态学报, 30(19): 5161–5173.]
- Jiang JY, Lian X, Tang XM, Liu RT, Zhang AN, 2022. The arthropod community structure in *Reaumuria soongorica* litter at the early stage of its decomposition in arid and semi-arid regions. *Acta Prataculturae Sinica*, 31(5): 156–168. [蒋嘉瑜, 连学, 唐希明, 刘任涛, 张安宁, 2022. 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, 31(5): 156–168.]
- Jiang YF, Ma N, Chen ZW, Xie HT, 2018. Soil macrofauna assemblage composition and functional groups in no-tillage with corn stover mulch agroecosystems in a mollisol area of northeastern China. *Applied Soil Ecology*, 128: 61–70.
- John K, Zaitsev AS, Wolters V, 2021. Soil fauna groups respond differentially to changes in crop rotation cycles in rice production systems. *Pedobiologia*, 84: 150703.
- Kamczyc J, Urbanowski C, Pers-Kamczyc E, 2017. Mite communities (Acari: Mesostigmata) in young and mature coniferous forests after surface wildfire. *Experimental & Applied Acarology*, 72(2): 145–160.
- Khalil MA, Al-Assiuty AN IM, van Straalen NM, Al-Assiuty BA, 2016. Changes in soil oribatid communities associated with conversion from conventional to organic agriculture. *Experimental and Applied Acarology*, 68(2): 183–196.
- Li HT, Yu GR, Li JY, Liang T, Chen YR, 2007. Dynamics of litter decomposition and phosphorus and potassium release in Jinggang Mountain region of Jiangxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18(2): 233–240. [李海涛, 于贵瑞, 李家永, 梁涛, 陈永瑞, 2007. 井冈山森林凋落物分解动态及磷、钾释放速率. 应用生态学报, 18(2): 233–240.]
- Li N, Zhang XP, Zhang LM, 2013. Spatial and temporal variation of soil macro-fauna community structure in three temperate forests. *Acta Ecologica Sinica*, 33(19): 6236–6245. [李娜, 张雪萍, 张利敏, 2013. 三种温带森林大型土壤动物群落结构的时空动态. 生态学报, 33(19): 6236–6245.]
- Li XG, Ding CF, Wang XX, 2014. Effects of heavy metal pollution on soil microarthropods in upland red soil. *Acta Ecologica Sinica*, 34(21): 6198–6204. [李孝刚, 丁昌峰, 王兴祥, 2014. 重金属污染对红壤旱地小节肢类土壤动物群落结构的影响. 生态学报, 34(21): 6198–6204.]
- Li Y, Wu PF, Long W, Ma JH, 2019. Effects of different forage species on soil arthropod communities on the Qinghai-Tibetan plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 39(20): 7697–7708. [李雨, 吴鹏飞, 龙伟, 马金豪, 2019. 高寒地区种植不同种类牧草对土壤节肢动物群落的影响. 生态学报, 39(20): 7697–7708.]
- Liu FL, Chen XW, Zeng SP, Peng ZZ, 2019. Progress of the effects of fire disturbance on forest soil water repellency. *Acta Ecologica Sinica*, 39(5): 1846–1852. [刘发林, 陈小伟, 曾素平, 彭早珍, 2019. 火干扰对森林土壤斥水性的影响研究进展. 生态学报, 39(5): 1846–1852.]
- Liu JL, Li FR, 2018. Effects of oasis expansion regimes on ecosystem function and dominant functional groups of soil biota

- in arid regions. *Biodiversity Science*, 26(10): 1116–1126. [刘继亮, 李锋瑞, 2018. 干旱区绿洲扩张方式对土壤生物优势类群及功能的影响. 生物多样性, 26(10): 1116–1126.]
- Liu RT, Zhao HL, Zhao XY, 2011. Changes in functional groups of soil macro-faunal community in degraded sandy grassland under post-grazing natural restoration in Hoqin sand land. *Ecology and Environmental Sciences*, 20 (12): 1794–1798. [刘任涛, 赵哈林, 赵学勇, 2011. 放牧干扰后自然恢复沙质草地大型土壤动物功能群变化特征. 生态环境学报, 20(12): 1794–1798.]
- Liu WH, Zhou QP, Jia ZF, Liang GL, 2010. Effects of potassium fertilization on fodder yield and root system of *Avea sativa* cv. Qingyin No.1. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 16(2): 419–424. [刘文辉, 周青平, 贾志锋, 梁国玲, 2010. 施钾对青引1号燕麦草产量及根系的影响. 植物营养与肥料学报, 16(2): 419–424.]
- Lu RK, 2000. *Agricultural Chemical Analytical Methods for Soil*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. 12–193. [鲁如坤, 2000. 土壤农业化学分析法. 北京: 中国农业科技出版社. 12–193.]
- Menezes-Oliveira VB, Bianchi MO, Espíndola ELG, 2021. Changes in soil mesofauna structure due to different land use systems in south Minas Gerais, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(7): 431.
- Oksanen J, Blanchet FG, Friendly M, Kindt R, Legendre P, McGlinn D, Minchin PR, O'Hara RB, Simpson GL, Solymos P, Stevens MHH, Szoecs E, Wagner H, 2020. Vegan: Community ecology package. R package version 2.5–7[CP/OL]. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- Peng WX, Wang KL, Song TQ, Zeng FP, Wang JR, 2008. Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable Karst ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 28(2): 811–820. [彭晚霞, 王克林, 宋同清, 曾馥平, 王久荣, 2008. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. 生态学报, 28(2): 811–820.]
- Rusek J, 1998. Biodiversity of Collembola and their functional role in the ecosystem. *Biodiversity and Conservation*, 7(9): 1207–1219.
- Setälä H, Marshall VG, Trofymow JA, 1995. Influence of micro- and macro-habitat factors on collembolan communities in Douglas-fir stumps during forest succession. *Applied Soil Ecology*, 2(4): 227–242.
- Shan D, 2020. Spatio-temporal response of grassland ecosystem to climate and grazing in Hulun Buir grassland. Doctor dissertation. Beijing: Chinese Academy of Forestry. [山丹, 2020. 呼伦贝尔草原生态系统对气候和放牧作用的时空响应. 博士学位论文. 北京: 中国林业科学研究院.]
- Silveira JM, Barlow J, Andrade RB, Louzada J, Mestre LA, Lacau S, Zanetti R, Numata I, Cochrane MA, 2013. The responses of leaf litter ant communities to wildfires in the Brazilian Amazon a multi-region assessment. *Biodiversity and Conservation*, 22(2): 513–529.
- Sterzyńska M, Skłodowski J, 2018. Divergence of soil microarthropod (Hexapoda: Collembola) recovery patterns during natural regeneration and regeneration by planting of windthrown pine forests. *Forest Ecology and Management*, 429: 414–424.
- Sun CC, Dong QM, Liu WT, Feng B, Shi G, Liu YZ, Yu Y, Zhang CP, Zhang XF, Li CD, Yang ZZ, Yang XX, 2022. Effects of grazing modes on the community structure and diversity of soil arthropod in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 31(2): 62–75. [孙彩彩, 董全民, 刘文亨, 冯斌, 时光, 刘玉祯, 俞畅, 张春平, 张小芳, 李彩弟, 杨增增, 杨晓霞, 2022. 放牧方式对青藏高原高寒草地土壤节肢动物群落结构和多样性的影响. 草业学报, 31(2): 62–75.]
- Vilardo G, Tognetti PM, González-Arzac A, Yahdjian L, 2018. Soil arthropod composition differs between old- fields dominated by exotic plant species and remnant native grasslands. *Acta Oecologica*, 91: 57–64.
- Wehr NH, Litton CM, Lincoln NK, Hess SC, 2020. Relationships between soil macroinvertebrates and nonnative feral pigs (*Sus scrofa*) in Hawaiian tropical montane wet forests. *Biological Invasions*, 22(2): 577–586.
- Wang YQ, Yin YL, Li SX, 2019. Physicochemical properties and enzymatic activities of alpine meadow at different degradation degrees. *Ecology and Environmental Sciences*, 28(6): 1108–1116. [王玉琴, 尹亚丽, 李世雄, 2019. 不同退化程度高寒草甸土壤理化性质及酶活性分析. 生态环境学报, 28(6): 1108–1116.]
- Wehner K, Simons NK, Blüthgen N, Heethoff M, 2021. Drought, windthrow and forest operations strongly affect oribatid mite communities in different microhabitats. *Global Ecology and Conservation*, 30: e01757.
- Wei YW, Su YR, Chen XB, He XY, 2010. Responses of soil properties to ecosystem degradation in Karst region of northwest Guangxi, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21(5): 1308–1314. [魏亚伟, 苏以荣, 陈香碧, 何寻阳, 2010. 桂西北喀斯特土壤对生态系统退化的响应. 应用生态学报, 21(5): 1308–1314.]
- Wickham H, 2016. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis[CP/OL]. <https://cran.r-project.org/package=ggplot2>.
- Wikars LO, Schimmel J, 2001. Immediate effects of fire-severity on soil invertebrates in cut and uncut pine forests. *Forest Ecology and Management*, 141(3): 189–200.
- Wu DH, Zhang B, Chen P, 2007. Community structure characteristics of soil coleoptera under different land uses in Changchun city. *Scientia Geographica Sinica*, 27(3): 420–425. [吴东辉, 张柏,

- 陈鹏, 2007. 长春市不同土地利用生境土壤甲虫群落结构特征. *地理科学*, 27(3): 420–425.]
- Wu DH, Zhang B, Chen P, 2005. Ecological distributions and community compositions of the soil macro-animals in the mid-west plain of Jilin Province. *Zoological Research*, 26(4): 365–372. [吴东辉, 张柏, 陈鹏, 2005. 吉林省中西部平原区大型土壤动物群落组成与生态分布. *动物学研究*, 26(4): 365–372.]
- Wu DH, Zhang B, Chen P, 2006. Community composition and distribution of soil macro-arthropods under agricultural environment in the black soil region of Jilin province. *Scientia Agricultura Sinica*, 39(1): 125–131. [吴东辉, 张柏, 陈鹏, 2006. 吉林省黑土区农业生境大型土壤节肢动物群落组成与生态分布. *中国农业科学*, 39(1): 125–131.]
- Xia Y, Jiang CC, Wang X, Chen F, 2013. Effects of low potassium stress on the photosynthesis and photosynthate partitioning of cotton. *Chinese Journal of Ecology*, 32(6): 1476–1482. [夏颖, 姜存仓, 汪宵, 陈防, 2013. 低钾胁迫对棉花光合作用和光合产物分配的影响. *生态学杂志*, 32(6): 1476–1482.]
- Xu GL, Zhou GY, Mo JM, 2006. Changes of soil fauna during forest restoration in subtropical China. *Zoological Research*, 27(1): 23–28. [徐国良, 周国逸, 莫江明, 2006. 南亚热带退化植被重建中土壤动物群落变化. *动物学研究*, 27(1): 23–28.]
- Xu YF, Chen X, 2017. Spatial-temporal variation of vegetation cover based on RS—a case study of Huishui county. *Journal of Qiannan Normal University for Nationalities*, 37(4): 44–48. [许玉凤, 陈娴, 2017. 基于 RS 的植被覆盖时空变化——以惠水县为例. *黔南民族师范学院学报*, 37(4): 44–48.]
- Yang DX, Li C, Yang MF, 2019. Response of Karst soil mites to burning and reclamation in south Guizhou. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 25(6): 1335–1343. [杨大星, 李灿, 杨茂发, 2019. 黔南喀斯特土壤螨类对火烧和垦殖的响应. *应用与环境生物学报*, 25(6): 1335–1343.]
- Yang DX, Yang MF, Xu J, Shang XL, 2013. Soil meso-and micro arthropod community diversity in the burned areas of *Pinus massoniana* plantation at different restoration stages. *Acta Ecologica Sinica*, 33(8): 2531–2544. [杨大星, 杨茂发, 徐进, 尚小丽, 2013. 马尾松人工林火烧迹地不同恢复阶段中小型土壤节肢动物多样性. *生态学报*, 33(8): 2531–2544.]
- Yang DX, Yang WJ, Ye T, Li C, 2019. Effects of fire disturbance on soil macroarthropod community in the Karst region. *Chinese Journal of Ecology*, 38(3): 680–688. [杨大星, 杨文佳, 叶婷, 李灿, 2019. 火烧干扰对喀斯特地区大型土壤节肢动物群落的影响. *生态学杂志*, 38(3): 680–688.]
- Yin WY, 1998. Pictorial Keys to Soil Animals of China. Beijing: Science Press. 1–756. [尹文英, 1998. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社. 1–756.]
- Yu XD, Luo TH, Zhou HZ, 2006. Effects of forestry practices and forest fragmentation on beetle diversity and conservation strategies. *Acta Entomologica Sinica*, 49(1): 126–136. [于晓东, 罗天宏, 周红章, 2006. 林业活动和森林片断化对甲虫多样性的影响及保护对策. *昆虫学报*, 49(1): 126–136.]
- Yu XD, Luo TH, Zhou HZ, 2003. Species diversity of litter-layer beetles in the Fengtongzhai national nature reserve, Sichuan Province. *Acta Entomologica Sinica*, 46(5): 609–616. [于晓东, 罗天宏, 周红章, 2003. 四川蜂桶寨自然保护区地表甲虫物种多样性. *昆虫学报*, 46(5): 609–616.]
- Zaitsev AS, Gongalsky KB, Persson T, Bengtsson J, 2014. Connectivity of litter islands remaining after a fire and unburnt forest determines the recovery of soil fauna. *Applied Soil Ecology*, 83: 101–108.
- Zhang AJ, Zhang J, Li JJ, Liu ZG, Zhang DJ, 2020. Characteristics of soil faunal community structure before and after the rotation period of *Eucalyptus grandis* plantations with various densities. *Acta Ecologica Sinica*, 40(3): 808–821. [张阿娟, 张健, 李金金, 刘志刚, 张丹桔, 2020. 轮伐期前后不同密度巨桉(*Eucalyptus grandis*)人工林土壤动物群落结构特征. *生态学报*, 40(3): 808–821.]
- Zhang M, Feng Y, Wu XG, Zhang XH, Yu C, Zhou HY, Tang TW, Zhang FY, Zhang L, Sun XM, Pan KW, 2020. Distribution of millipede (Diplopoda) and its influencing factors in the soils of typical forest ecosystems in chengdu longquan mountain urban forest park. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 26(5): 1200–1206. [张萌, 冯毅, 伍小刚, 张兴华, 虞超, 周泓杨, 唐天文, 张凤英, 张林, 孙晓铭, 潘开文, 2020. 成都龙泉山城市森林公园典型森林群落马陆分布特征及影响因素. *应用与环境生物学报*, 26(5): 1200–1206.]
- Zhang XP, Zhang SH, Li JK, 2006. Eco-geographical analysis of soil animals in burned forest areas in Greater Hinggan Mountains. *Geographical Research*, 25(2): 327–334. [张雪萍, 张淑花, 李景科, 2006. 大兴安岭火烧迹地土壤动物生态地理分析. *地理研究*, 25(2): 327–334.]
- Zhao J, Liu RT, Liu JN, Chang HT, Luo YX, Zhang J, 2019. Effect of conversion of cropland to agroforestry land versus natural grassland on ground-active arthropods in an agro-pasture zone of northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 39(5): 1653–1663. [赵娟, 刘任涛, 刘佳楠, 常海涛, 罗雅曦, 张静, 2019. 北方农牧交错带退耕还林与还草对地面节肢动物群落结构的影响. *生态学报*, 39(5): 1653–1663.]
- Zhou DW, Zhong XL, 1996. Fundamental concepts of disturbance ecological theory and framework of disturbance ecology. *Journal of Northeast Normal University*, 28(1): 90–96. [周道玮, 钟秀丽, 1996. 干扰生态理论的基本概念和扰动生态学理论框架. *东北师大学报 (自然科学版)*, 28(1): 90–96.]