

DOI: 10.20103/j.stxb.202310122203

温辉辉, 张慧玲, 彭艳, 彭清清, 邱丹妮, 吴福忠. 亚热带森林转换对土壤无脊椎动物群落结构的影响. 生态学报, 2024, 44(10): 4254-4262.

Wen H H, Zhang H L, Peng Y, Peng Q Q, Qiu D N, Wu F Z. Effects of subtropical forest conversion on soil invertebrates community structure. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4254-4262.

亚热带森林转换对土壤无脊椎动物群落结构的影响

温辉辉¹, 张慧玲¹, 彭艳^{1,2}, 彭清清¹, 邱丹妮¹, 吴福忠^{1,2,*}

1 福建师范大学湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350117

2 福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站, 三明 365002

摘要: 受人类活动干扰的增加, 亚热带森林频繁转换为次生林和人工林, 可能显著影响土壤无脊椎动物群落结构及其生态功能, 但当前的认识并不一致。因此, 于 2022 年 7 月调查了亚热带天然常绿阔叶林转换为次生林、米楮人工林、杉木人工林后土壤无脊椎动物群落结构特征。共捕获土壤无脊椎动物 659 只, 丰度为 26540 只/m², 隶属 1 门 6 纲 13 目 59 科, 其中蚁科和球角蟬科为优势类群。森林转换改变了土壤无脊椎动物群落组成和多样性。天然林向米楮人工林和杉木人工林转换后, 土壤无脊椎动物丰度和类群均明显降低, 其中大型土壤无脊椎动物丰度的响应更为敏感, 在 2 种林型中分别显著降低了 33.58% 和 36.53%。尽管林型转换对土壤无脊椎动物群落多样性指数无显著影响, 但改变了土壤无脊椎动物群落组成, 其中天然林与杉木人工林群落组成极不相似 ($J < 0.25$), 等节蟬科为杉木人工林优势类群, 占比达到 59.84%。冗余分析显示, 土壤湿度、凋落物现存量 and 凋落物磷含量是影响土壤无脊椎动物群落的主要因子, 对土壤无脊椎动物群落的解释率为 69.30%。可见, 林型转换可能通过改变土壤理化性质和凋落物质量, 调控土壤无脊椎动物群落结构。

关键词: 森林转换; 土壤无脊椎动物; 群落特征; 环境因子

Effects of subtropical forest conversion on soil invertebrates community structure

WEN Huihui¹, ZHANG Huiling¹, PENG Yan^{1,2}, PENG Qingqing¹, QIU Danni¹, WU Fuzhong^{1,2,*}

1 Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China

2 Fujian Sanming Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Sanming 365002, China

Abstract: The frequent conversion of subtropical forests to the secondary forests and plantations due to increased human disturbance may significantly affect the community structure and ecological functions of soil invertebrates, but the current understanding is inconsistent. Therefore, this study investigated the characteristics of soil invertebrates community structure after subtropical natural evergreen broad-leaved forest was converted to the secondary forest, *Castanopsis carlesii* plantation and *Cunninghamia lanceolata* plantation in July 2022. A total of 659 soil invertebrates with an abundance of 26540 ind/m² were captured, belonging to 1 phylum, 6 classes, 13 orders and 59 families, among which Formicidae and Hypogastruridae were dominant groups. Forest conversion changed soil invertebrates community composition and diversity. After the conversion from the natural forest to the secondary forest, *Castanopsis carlesii* plantation and *Cunninghamia lanceolata* plantation, the abundance and taxonomic groups of soil invertebrates significantly decreased, and the abundance of soil macroinvertebrates was more sensitive and decreased significantly by 33.58% and 36.53% in the two forest types, respectively. Although forest conversion had no significant effect on soil invertebrates community diversity, it changed soil invertebrates community composition, and the community composition of natural forest and *Cunninghamia lanceolata*

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (32201342); 福建省自然科学基金项目 (2022J01642)

收稿日期: 2023-10-12; **网络出版日期:** 2024-02-28

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

plantation was very different ($J < 0.25$). Isotomidae was the dominant groups in *Cunninghamia lanceolata* plantation, accounting for 59.84%. Redundancy analysis showed that soil moisture, litter standing crop and litter phosphorus content were main factors affecting soil invertebrates community, and the explanation rate was 69.30%. It is concluded that forest conversion may regulate soil invertebrates community structure by changing soil physicochemical properties and litter quality.

Key Words: forest conversion; soil invertebrates; community characteristics; environmental factor

森林土壤无脊椎动物在养分循环和能量流动中发挥关键作用,并参与土壤生态系统服务^[1-2]。森林地面和表层土壤可以提供丰富的食物来源,是土壤无脊椎动物的主要栖息地^[3]。不断增加的人类活动干扰以及对自然的索求正在将天然森林转变为次生林或人工林,不仅改变了植物群落组成,而且形成差异明显的地表和土壤环境,使得土壤无脊椎动物群落结构也随着栖息环境和食物类型的变化而变化^[4-7]。例如,天然林向人工林转变后,表现出结构更加单一、林下植被发育较差、土壤肥力相对较低、生物多样性低等问题,导致食物资源和栖息地的简化和同质化,进而造成土壤无脊椎动物群落发生显著变化^[2,8-9]。Wong 等人^[10]研究发现天然林转换为人工林会降低土壤无脊椎动物的多样性,增加土壤无脊椎动物分布的异质性,减少大型土壤无脊椎动物某些功能类群的物种数;da Silva 等人^[9]研究发现将原生植被转换为桉树人工林后使得植被丰富度减少,进而显著降低了弹尾目类群的丰度、丰富度和 α 多样性;另有研究发现云杉(*Picea abies*)人工林相较于以山毛榉(*Fagus longipetiolata*)为建群种的天然林,较厚的凋落物层为中小型土壤无脊椎动物提供了更加充足且稳定的栖息环境,增加了中小型土壤无脊椎动物丰度,但相对较低质量的凋落物降低了大型土壤无脊椎动物丰度^[6]。然而,受森林植被类型和生长环境的影响,森林转换如何通过改变凋落物质量、土壤理化性质等环境因子调控土壤无脊椎动物群落结构的认识仍不一致,亟待关注。

我国亚热带地区水热丰沛,孕育了同纬度最大面积的森林生态系统,具有非常丰富的物种多样性和土壤无脊椎动物类群。自 20 世纪 50 年代以来,大面积的天然常绿阔叶林被砍伐逐渐自然演替为次生林,或被改造成人工林,森林群落结构发生了较大的改变。当天然林被次生林和人工林取代,将改变凋落物质量以及地表和土壤环境,可能显著影响土壤无脊椎动物类群和功能^[2]。因此,依托福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站的森林转换研究平台,研究天然常绿阔叶林(下面简称天然林)转换为次生林、米槠人工林和杉木人工林后,土壤无脊椎动物群落组成、类群(Taxonomic group)、多样性等的变化,旨在深入认识森林类型与土壤无脊椎动物的生态联系,进而为区域森林可持续经营管理和生物多样性保护提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站陈大镇观测点(26.19° N, 117.36° E),以低山丘陵为主,平均海拔 300 m,坡度 25°—45°,土壤主要为花岗岩发育的红壤。该地区为亚热带季风气候,年均温 19.3 °C,年降水量为 1610 mm,降水多集中在 3—8 月。1958 年以前该地区覆盖着以米槠为建群种的天然林。自 1958 年以来,天然林逐渐被砍伐,大面积天然林被人工林和自然再生林所取代^[11]。1976 年择伐以后未经人类活动干扰。天然林和次生林乔木层以米槠(*Castanopsis carlesii*)形成单一优势树种,伴有闽粤栲(*Castanopsis fissa*)、木荷(*Schima superba*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)和新木姜子(*Neolitsea aurata*)等,杉木人工林林下植被以茂密的铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)为主。

1.2 样地设置

2011 年,在 1.1 hm²米槠成熟林内采用随机区组的方法将其划分为 12 个 20 m×5 m 的样方。其中米槠次生林以 4500—6000 株/hm²幼苗的密度保存幼苗,按照传统方法只采伐茎干,去除枝干木材,苗木从树桩上萌发,然后通过自然演替发展为次生林;米槠人工林 2011 年 12 月将成熟米槠林皆伐后,将残留物均匀地铺在地

上,经过暴晒后在 2012 年 3 月烧毁,然后以 2400 株/hm² 幼苗的密度种植;杉木人工林处理方法与米楮人工林完全一致,种植密度为 2860 株/hm²;米楮天然林 1976 年经择伐后天然更新形成。于 2022 年 7 月选择立地条件相对一致的以米楮为建群种的天然林和次生林,米楮人工林和杉木人工林为研究对象(不同林型基本概况和环境因子见表 1)。每种林型 3 个重复,共 12 个样地,每个样地再分别设置 3 个平行。

表 1 不同林型的基本概况和环境因子

Table 1 Basic situation and environmental factors of different forest types

森林类型 Forest type	天然林 Natural forest	次生林 Secondary forest	米楮人工林 <i>C.carlesii</i> plantation	杉木人工林 <i>C.lanceolata</i> plantation
坡度 Altitude/(°)	31.7	31.7	32	33
林龄 Forest age/a	46	11	11	11
平均树高 Mean Height/m	15.80	7.87	8.77	11.30
平均胸径 Mean diameter at breast height/cm	21.99	5.07	9.93	14.8
林分密度 Forest density/(株/hm ²)	3788	4233	2400	2860
土壤湿度 Soil moisture/%	8.09±0.06c	8.05±0.32c	15.38±0.55a	13.45±0.33b
土壤温度 Soil temperature/°C	26.47±0.54a	25.64±0.26a	26.89±0.53a	26.63±0.68a
土壤 pH Soil pH	4.58±0.08a	4.57±0.04a	4.60±0.04a	4.64±0.03a
土壤元素含量 Soil element content	SOC/(mg/g)	24.79±1.73ab	22.60±0.75b	25.20±0.31ab
	N/(mg/g)	1.62±0.14ab	1.88±0.08a	1.57±0.02b
	P/(mg/kg)	167.91±30.60a	180.46±27.54a	126.76±10.32a
凋落物元素含量 Litter element content	C/(mg/g)	489.86±1.40a	486.04±4.75a	486.56±9.38a
	N/(mg/g)	11.14±0.26a	10.64±0.43a	11.26±0.45a
	P/(mg/g)	0.21±0.01b	0.19±0.00b	0.24±0.02b
凋落物现存量 Litter standing crop (kg/hm ²)	3775.19±108.02a	2560.20±85.78b	1423.88±57.49c	NA

部分数据引用彭清清等^[12]; *C.carlesii* plantation: 米楮人工林 *Castanopsis carlesii* plantation; *C.lanceolata* plantation: 杉木人工林 *Cunninghamia lanceolata* plantation; 同行不同小写字母表示显著差异($P<0.05$)

1.3 研究方法

2022 年 7 月,在不同林型下采用对角线法选取 3 个样方作为平行样。采用不同采样方法采集土壤无脊椎动物样本;大型土壤无脊椎动物采集时先捡取地表层的土壤无脊椎动物(>2 mm,如步甲、蜈蚣等)再采用 0.25 m×0.25 m 的木框采集 0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm 深度的土壤样品;中小型土壤无脊椎动物(<2 mm,如跳虫、螨虫等)用内径 5 cm 的土钻采集 0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm 深度的土样,将样品装入已编号的黑色透气袋中,低温保存及时带回实验室,所有样本提取前需保存于 5 °C 储藏室。采用 Tullgren 漏斗法提取 72 h,提取土样中的土壤无脊椎动物^[2,13],用 75%酒精保存土壤无脊椎动物样本。在双目体式显微镜(Leica Microsystems Schweia AG LED2500)下进行形态学分类、鉴定、计数,鉴定至科,主要参照《中国土壤动物检索图鉴》^[14]、《中国昆虫生态大图鉴》^[15]及相关昆虫分类书籍对所采集的土壤无脊椎动物进行鉴定。土壤温、湿度采用野外站布设的温湿度记录仪逐时记录。

1.4 数据处理

(1) Shannon 多样性指数^[16]

$$H = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i) = - \sum_{i=1}^S \left(\frac{N_i}{N} \ln \frac{N_i}{N} \right)$$

式中: $P_i = N_i/N$, N_i 为每个类群的个体数; N 为总的个体数; S 为类群数(类群统一以科为水平计算各个指数,下同)。

(2) Pielou 均匀度指数^[17]

$$J = H / \ln S$$

式中: H 为 Shannon 多样性指数; S 为类群数。

(3) Simpson 优势度指数^[18]

$$C = \sum_i^n \sum (P_i)^2 = \sum_i^n \sum (N_i/N)^2$$

式中: $P_i = N_i/N$, N_i 为每个类群的个体数, N 为总的个体数。

(4) Margalef 丰富度指数^[19]

$$D = (S-1)/\ln N$$

式中: S 为类群数; N 为全部类群的个体总数。

(5) 土壤无脊椎动物丰度^[20]

$$A = I/M$$

式中: I 为实际捕获个体数; M 为采样面积。

(6) Jaccard 相似性系数^[21]

$$J = c/a+b-c$$

式中, c 为林型共有类群数, a 为林型 a 的类群数, b 为林型 b 的类群数。 J 值在 0—0.25 为极不相似, 0.25—0.5 之间为中等不相似, 0.5—0.75 为中等相似, 0.75—1 之间为极相似。

(7) 土壤无脊椎动物类群等级划分: 个体数占总数的比例 (R) 划分, $R \geq 10\%$ 为优势类群, $1\% < R < 10\%$ 为常见类群, $R \leq 1\%$ 为稀有类群^[2]。

采用 SPSS 22 和 Excel 2010 对数据进行统计分析并用 Origin 2022 进行作图。对土壤无脊椎动物群落各参数进行正态性检验, 发现 Simpson 优势度指数、Shannon 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度不符合正态分布则采用非参数检验; 用 Kruskal-Wallis 单因素 (ANOVA) 对不同林型的土壤无脊椎动物相关指数进行显著性检验, 土壤无脊椎动物丰度、类群数符合正态分布则采用单因素 (ANOVA) 方差分析, 并用最小显著差法 (LSD) 或非参数检验 (Tamhane's T2) 进行多重比较 ($\alpha = 0.05$)。采用 Canoco 5 进行冗余分析 (RDA), 分析不同林型土壤无脊椎动物与环境因子之间的关系。所有数据均为平均值 $\pm$ 标准误 ($n = 3$)。

2 结果与分析

2.1 不同林型下土壤无脊椎动物群落组成和类群特征

共捕获土壤无脊椎动物 659 只 (总丰度 26540 只/ m^2), 中小型土壤无脊椎动物的丰度为 25095 只/ m^2 , 大型土壤无脊椎动物的丰度为 1445 只/ m^2 , 隶属 1 门 6 纲 13 目 59 科。其中天然林土壤无脊椎动物群落优势类群为蚁科 (Formicidae)、球角蟬科 (Hypogastruridae) 和木白蚁科 (Kalotermitidae) 分别占比 26.10%、17.24% 和 11.82%; 次生林土壤无脊椎动物群落优势类群为蚁科、管蓟马科 (Phlaeothripidae) 分别占比 47.78%、10.84%; 米楮人工林土壤无脊椎动物群落优势类群为球角蟬科、蚁科和长角蟬科 (Entomobryidae) 分别占比 40.77%、22.30% 和 10.00%; 杉木人工林土壤无脊椎动物群落优势类群为等节蟬科 (Isotomidae) 占比 59.84%。

如图 1 所示, 天然林转换为米楮人工林和杉木人工林, 大型土壤无脊椎动物丰度显著降低 ($P < 0.05$), 分别降低了 33.58% 和 36.53%。天然林向次生林和人工林转换后, 总的土壤无脊椎动物、大型土壤无脊椎动物、中小型土壤无脊椎动物类群均明显减少。其中, 天然林向杉木人工林转换后, 总的土壤无脊椎动物、大型土壤无脊椎动物和中小型土壤无脊椎动物类群分别显著减少了 15.48%、22.22% 和 12.05%。

2.2 不同林型下土壤无脊椎动物群落垂直分布特征

林型转换一定程度上影响了土壤无脊椎动物的垂直分布 (图 2)。林型转换后, 总的土壤无脊椎动物和中小型土壤无脊椎动物垂直分布呈现相似的特征。其中, 除了天然林转换为米楮人工林和杉木人工林, 20—40 cm 深度总的土壤无脊椎动物丰度显著降低了 32.14% 和 46.43% ($P < 0.05$), 其余土层受林型转换的影响不显著 ($P > 0.05$)。然而, 林型转换对大型土壤无脊椎动物垂直分布的影响更明显 (图 2), 具体表现为: 天然林向次生林转换后, 10—20 cm 深度土壤无脊椎动物丰度显著降低了 45.95% ($P < 0.05$); 天然林向人工林转换

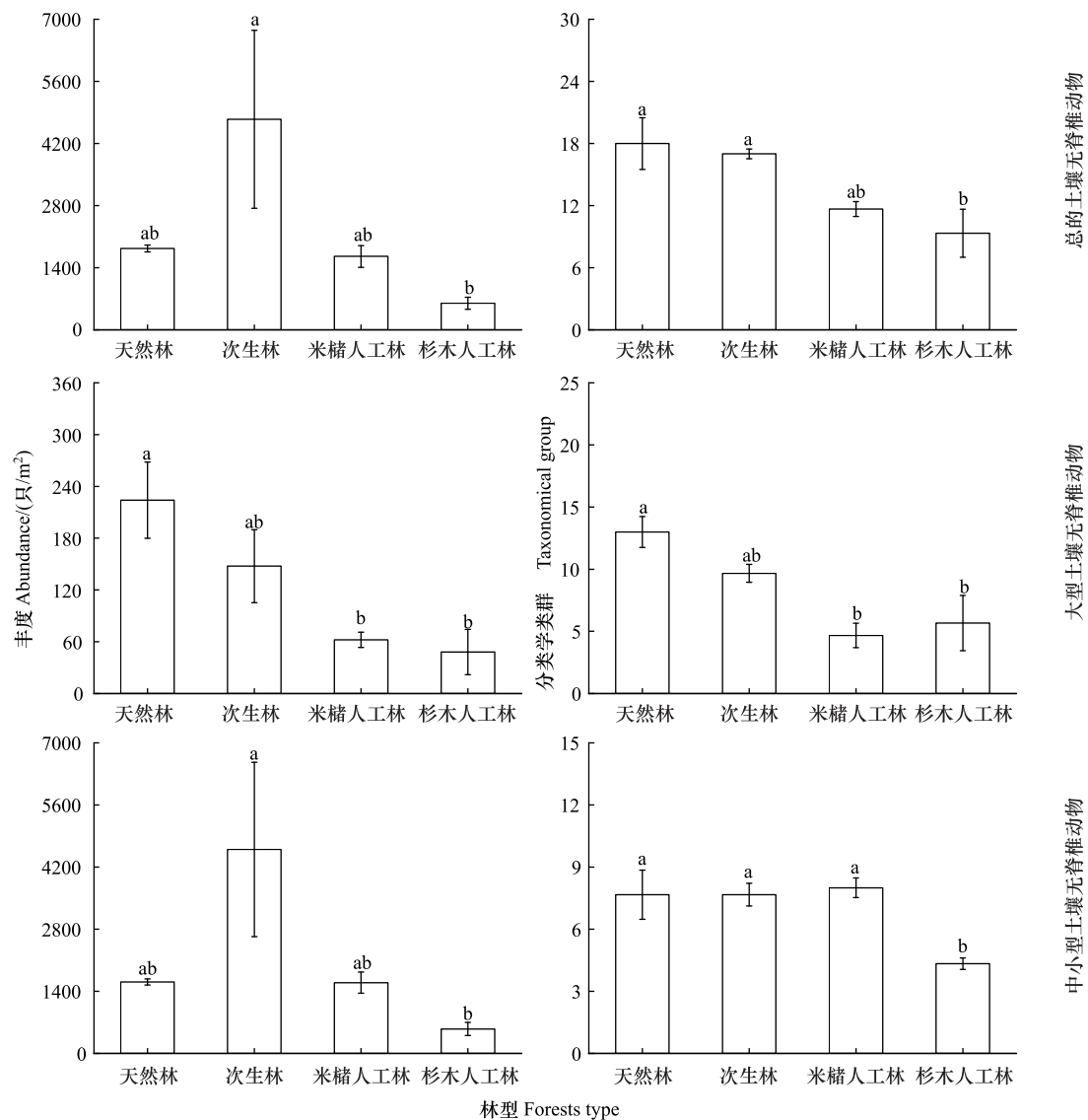


图1 亚热带不同林型下土壤无脊椎动物丰度和类群

Fig.1 Abundance and taxonomic groups of soil invertebrates under different forest types in subtropical

图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

后, 0—10 cm、10—20 cm 深度土壤无脊椎动物丰度均显著降低 ($P < 0.05$), 米槠人工林分别降低了 30.10% 和 54.05%, 杉木人工林分别降低了 31.07%、59.46%; 20—40 cm 深度土壤无脊椎动物丰度受林型转换影响较小。

2.3 不同林型下土壤无脊椎动物群落多样性和相似性特征

如图 3 所示, 天然林向次生林和人工林转换对总的土壤无脊椎动物群落多样性影响并不显著 ($P > 0.05$), 但对大型和中小型土壤无脊椎动物 Margalef 丰富度指数、Shannon 多样性指数有明显的影响。其中天然林向米槠人工林转换后, 大型土壤无脊椎动物 Margalef 丰富度指数显著下降 ($P < 0.05$), 且 Shannon 多样性指数在四个林型间最低; 天然林向杉木人工林转换后, 中小型土壤无脊椎动物 Shannon 多样性指数显著下降 ($P < 0.05$), 且 Margalef 丰富度指数在四个林型间最低。

此外, 四个林型间总的土壤无脊椎动物群落 Jaccard 相似性系数介于 0.19—0.42 (图 4), 表现为不相似。其中, 天然林与杉木人工林土壤无脊椎动物群落组成表现为极不相似 ($J < 0.25$), 天然林与次生林和米槠人工林土壤无脊椎动物群落组成均表现为中等不相似 ($0.25 < J \leq 0.50$), 并且从 Jaccard 相似性系数上看, 林型转换

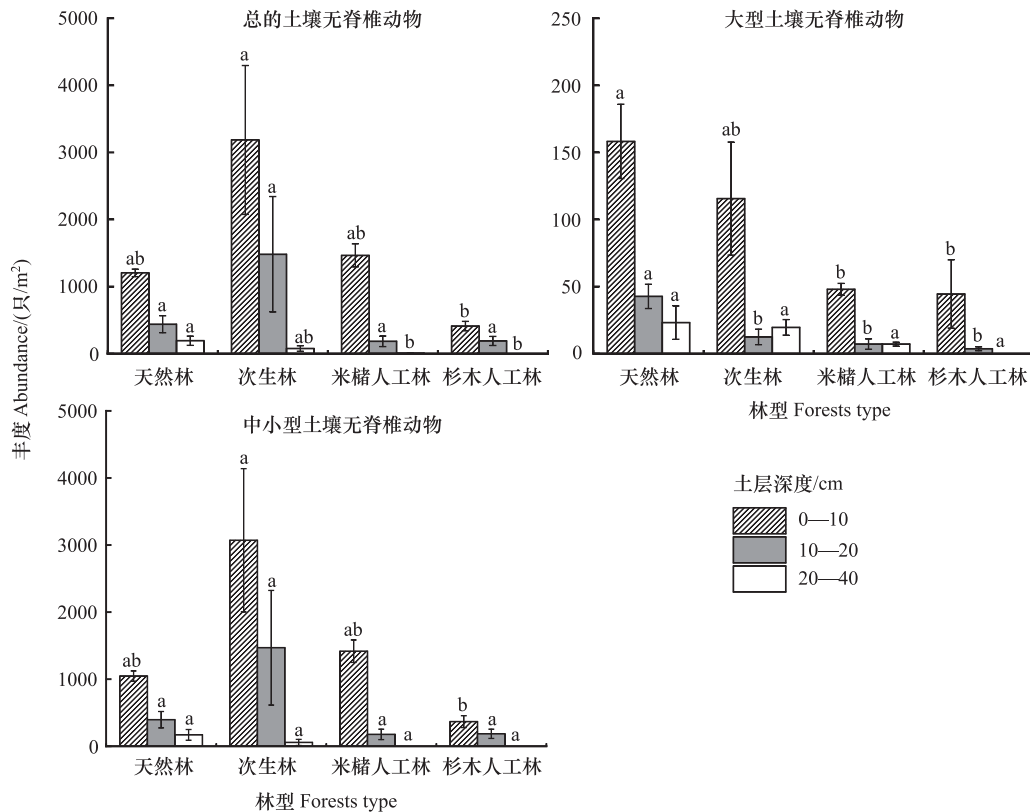


图2 亚热带不同林型下不同土层土壤无脊椎动物丰度

Fig.2 Soil invertebrates abundance in different soil layers under different forest types in subtropical

图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

对大型土壤无脊椎动物影响较大。

2.4 不同林型下土壤无脊椎动物群落结构与环境因子的相关性

如图5所示,总的土壤无脊椎动物、大型土壤无脊椎动物和中小型土壤无脊椎动物丰度均与凋落物碳含量、土壤有机碳、磷和氮含量呈正相关,与土壤湿度、凋落物磷和氮含量呈显著负相关 ($P < 0.05$);大型土壤无脊椎动物 Margalef 丰富度指数、中小型土壤无脊椎动物 Shannon 多样性指数、总的土壤无脊椎动物和大型土壤无脊椎动物类群与凋落物现存量呈显著正相关 ($P < 0.05$),与土壤湿度和凋落物磷含量呈显著负相关 ($P < 0.05$);而中小型土壤无脊椎动物类群与各环境因子的相关性较小。第一排序轴主要解释变异的 58.82%;第二排序轴主要解释变异的 28.34%,表明两个排序轴可以在一定程度上反映土壤无脊椎动物群落结构与环境因子的关系,其中土壤湿度、凋落物磷和凋落物现存量为显著性变量 ($P < 0.05$),累计解释率达 69.30%,是影响土壤无脊椎动物群落的主要环境因子。

3 讨论

土壤无脊椎动物群落在生态系统物质循环等关键功能中具有至关重要的作用,但不同林分下调落物质量和微环境差异可能调控着土壤无脊椎动物群落结构^[22]。本研究发现,天然林向人工林转换后,土壤无脊椎动物丰度和类群显著降低。这可能是因为林型转换后,树种多样性的减少导致食物资源和栖息地的简化和同质化,进而影响土壤无脊椎动物丰度和类群^[2]。同时,冗余分析表明土壤湿度、凋落物现存量和凋落物磷是影响土壤无脊椎动物群落结构的主要环境因子。Ma 等人^[2]研究也证实土壤湿度是影响土壤无脊椎动物群落结构的重要因素;Sauvade^[23]和 Peng 等人^[20]的研究也表明凋落物质量可以直接或间接地影响土壤无脊椎动

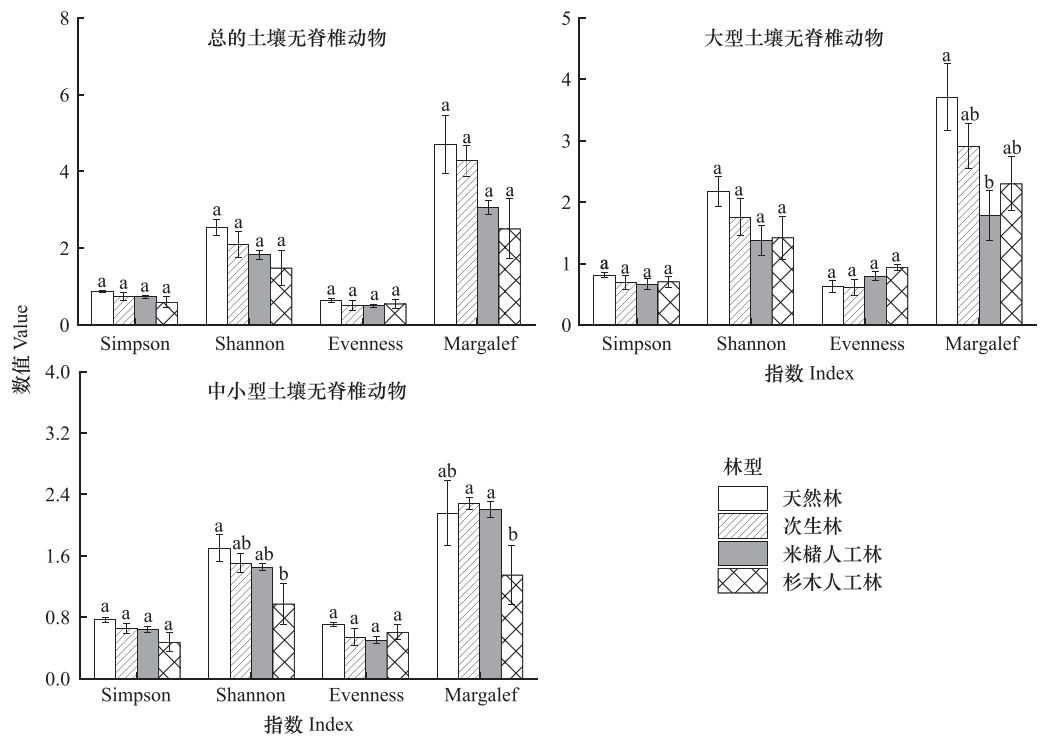


图3 亚热带不同林型下土壤无脊椎动物多样性

Fig.3 Soil invertebrates diversity under different forest types in subtropical
图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

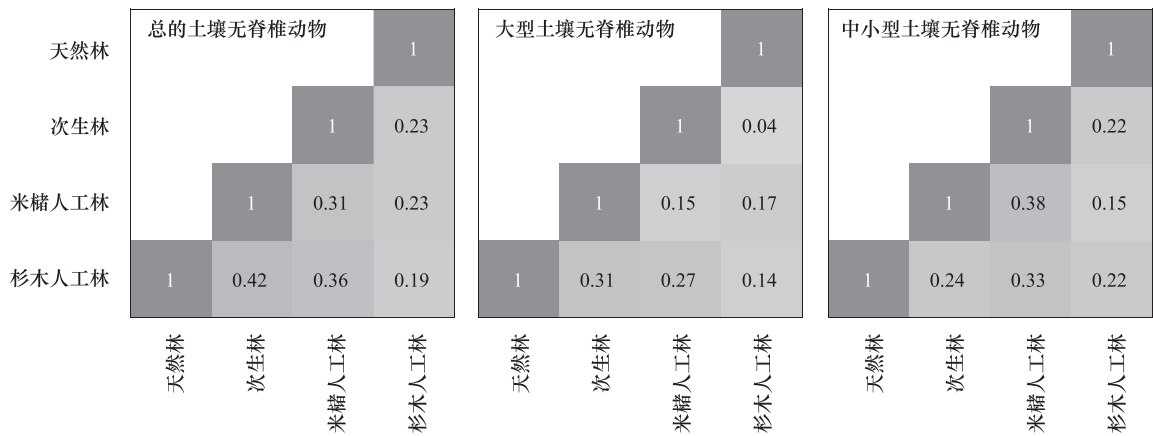


图4 亚热带不同林型下土壤无脊椎动物相似性

Fig.4 Soil invertebrates similarity under different forest types in subtropical

物丰度。可见,森林转换可能通过影响土壤理化性质和凋落物质量,进而调控土壤无脊椎动物群落结构。

当天然林转变为人工林时,树种组成和栖息地的变化会导致土壤无脊椎动物群落组成的变化^[24]。本研究发现,林型转换显著影响土壤无脊椎动物丰度和类群。首先,天然林向杉木人工林转换后,土壤无脊椎动物丰度和类群显著降低。这可能是因为针叶林凋落物质量较低^[6],而土壤无脊椎动物直接或间接以凋落物为食,进而造成土壤无脊椎动物丰度降低;另外,也可能是由于相对于针叶,阔叶更加宽大柔软有利于土壤无脊椎动物附着其上定居繁衍^[25-26]。这与 Zhang^[27] 和 Ganault 等人^[5]的研究结果相似,即低质量凋落物会降低土壤无脊椎动物丰度和多样性。其次,大型土壤无脊椎动物相较于与中小型土壤无脊椎动物对林型转换的响应更为敏感。表现为天然林向人工林转换后,虽然土壤无脊椎动物丰度和类群均明显降低,但大型土壤无脊椎

动物丰度和类群降低更为显著且群落组成极不相似。这可能是因为大型土壤无脊椎动物更依赖凋落物质量,由于天然林向单一人工林转换使得树种组成单一和凋落物种类单一^[2],导致食物资源简化,从而影响土壤食物网初级资源的可用性和结构。Ganault 等人^[5]的研究也表明大型土壤无脊椎动物更直接依赖于凋落物质量且对环境变量的响应更大,而中小型无脊椎土壤动物受凋落物影响并不显著。最后,本研究也证实了土壤无脊椎动物群落垂直分布具有明显的表聚性^[28],同时深层土的中小型土壤无脊椎动物受林型转换的影响较小。

林型转换对土壤无脊椎动物群落多样性和相似性造成一定的影响。一方面,天然林向人工林转换后大型土壤无脊椎动物 Margalef 丰富度指数和中小型土壤无脊椎动物 Shannon 多样性指数显著下降。这可能是因为林型转换后,凋落物现存量显著减少,导致凋落物提供的栖息地空间和食物资源减少,进而导致土壤无脊椎动物多样性和丰富度减少。袁志忠等^[29]也证实,森林凋落物的数量是影响土壤无脊椎动物群落结构和多样性的主要因素。此外,冗余分析显示,大型土壤无脊椎动物丰富度指数与土壤 N 呈正相关。这可能因为凋落物质量的差异不仅直接影响栖息生境和物质能量来源,还将通过凋落物分解和系统养分循环影响土壤养分含量^[30],进而影响土壤动物群落结构。另一方面,研究发现天然林与杉木人工林土壤无脊椎动物群落组成极不相似。从冗余分析上看,林型转换可能通过改变土壤湿度、凋落物现存量和凋落物磷,进而调控土壤无脊椎动物群落结构。以往的研究也发现林型转换导致土壤理化性质^[31]、凋落物输入^[10]以及微环境^[6]发生改变,是影响土壤无脊椎动物群落结构的重要因素。而次生林与天然林土壤无脊椎动物群落组成较为相似,可能是因为天然林与次生林共有一些树种,在凋落物质量和生境特征上较为相似。这与 Lassau 等^[32]研究结果相似。然而,本研究目前仅考虑了土壤环境和凋落物两个主要因素,还未探讨不同林型塑造的根系分泌物、微生物群落结构和活性等微环境对土壤无脊椎动物的调控作用,今后将进一步完善。

4 结论

亚热带森林转换改变了土壤无脊椎动物群落组成和多样性。相对于其他林型,天然林转换为杉木人工林后,土壤无脊椎动物丰度和类群降低更加显著;相较于中小型土壤无脊椎动物,大型土壤无脊椎动物对林型转换的响应更为敏感;林型转换主要通过改变土壤湿度、凋落物现存量和凋落物磷含量调控土壤无脊椎动物群落结构。这些研究结果有助于深入认识森林类型与土壤无脊椎动物的生态联系,为亚热带森林可持续经营管理和生物多样性维持提供理论依据。

参考文献 (References):

- [1] Bardgett R D, van der Putten W H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 2014, 515(7528): 505-511.

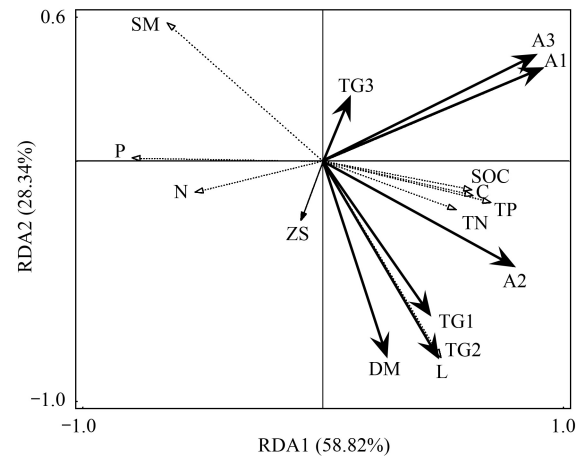


图5 亚热带不同林型下土壤无脊椎动物群落与环境因子的冗余分析

Fig.5 Redundancy analysis of soil invertebrates community and environmental factors under different forest types in subtropical

A1: 总的土壤无脊椎动物丰度 Total soil invertebrates abundance; A2: 大型土壤无脊椎动物丰度 Macroinvertebrates abundance; A3: 中小型土壤无脊椎动物丰度 Meso-microinvertebrates abundance; TG1: 总的土壤无脊椎动物类群 Total soil invertebrates taxonomical group; TG2: 大型土壤无脊椎动物类群 Macroinvertebrates taxonomical group; TG3: 中小型土壤无脊椎动物类群 Meso-microinvertebrates taxonomical group; ZS: 中小型土壤无脊椎动物多样性指数 Meso-microinvertebrates diversity index; DM: 大型土壤无脊椎动物丰富度指数 Macroinvertebrates richness index; SOC: 土壤有机碳含量 Soil organic carbon content; TN: 土壤全氮含量 Soil total nitrogen content; TP: 土壤全磷含量 Soil total phosphorus content; SM: 土壤湿度 Soil moisture; C: 凋落物碳含量 Litter carbon content; N: 凋落物氮含量 Litter nitrogen content; P: 凋落物磷含量 Litter phosphorus content; LSC: 凋落物现存量 Litter standing crop

- [2] Ma S J, Wang Q C, Zhang Y, Yan L M, Cui D H, Xu L Q. Effects of natural forest conversion and plantation tree species composition on soil macrofauna communities in Northeast China Mountains. *Journal of Forestry Research*, 2023, 34: 1475-1489.
- [3] Reich P B, Oleksyn J, Modrzynski J, Mrozinski P, Hobbie S E, Eissenstat D M, Chorover J, Chadwick O A, Hale C M, Tjoelker M G. Linking litter calcium, earthworms and soil properties: a common garden test with 14 tree species. *Ecology Letters*, 2005, 8(8): 811-818.
- [4] Berger T W, Berger P. Greater accumulation of litter in spruce (*Picea abies*) compared to beech (*Fagus sylvatica*) stands is not a consequence of the inherent recalcitrance of needles. *Plant and Soil*, 2012, 358(1): 349-369.
- [5] Ganault P, Nahmani J, Hättenschwiler S, Gillespie L M, David J F, Henneron L, Iorio E, Mazzia C, Muys B, Pasquet A, Prada-Salcedo L D, Wambsganss J, Decaëns T. Relative importance of tree species richness, tree functional type, and microenvironment for soil macrofauna communities in European forests. *Oecologia*, 2021, 196(2): 455-468.
- [6] Pollierer M M, Klarner B, Ott D, Dögel C, Ehnes R B, Eitzinger B, Erdmann G, Brose U, Maraun M, Scheu S. Diversity and functional structure of soil animal communities suggest soil animal food webs to be buffered against changes in forest land use. *Oecologia*, 2021, 196: 195-209.
- [7] Zhu Y, Wang Y F, Chen L D. Effects of non-native tree plantations on the diversity of understory plants and soil macroinvertebrates in the Loess Plateau of China. *Plant and Soil*, 2020, 446: 357-368.
- [8] Korboulewsky N, Heiniger C, De Danieli S, Brun J J. Effect of tree mixture on Collembola diversity and community structure in temperate broadleaf and coniferous forests. *Forest Ecology and Management*, 2021, 482: 118876.
- [9] da Silva C D D, Bellini B C, Rigotti V M, Nunes R C, da Silva Menezes L, Winck B R. Diversity loss of epigeic Collembola after grassland conversion into *Eucalyptus* forestry in Brazilian Pampa Domain. *Diversity*, 2022, 14(6): 490.
- [10] Wong M K, Tsukamoto J, Yusuyin Y, Tanaka S, Iwasaki K, Tan N P. Comparison of soil macro-invertebrate communities in Malaysian oil palm plantations with secondary forest from the viewpoint of litter decomposition. *Forest Ecology and Management*, 2016, 381: 63-73.
- [11] Yang Y S, Wang L X, Yang Z J, Xu C, Xie J S, Chen G S, Lin C F, Guo J F, Liu X F, Xiong D C, Lin W S, Chen S D, He Z M, Lin K M, Jiang M H, Lin T C. Large ecosystem service benefits of assisted natural regeneration. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(2): 676-687.
- [12] 彭清清, 张耀艺, 张慧玲, 彭艳, 倪祥银, 吴福忠. 中亚热带 4 种类型森林叶片非生物重金属元素重吸收及累积动态. *生态学杂志*, 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230209.1753.022.html>.
- [13] Taneja K, Dutta J. The relationship between soil arthropod abundance and edaphic factors in Haryana agricultural ecosystem. *Journal of Entomological Research*, 2023, 47(2): 417-421.
- [14] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [15] 张巍巍, 李元胜. 中国昆虫生态大图鉴. 重庆: 重庆大学出版社, 2011.
- [16] Shannon C E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.
- [17] 李建, 李晓宇, 曹静, 谭凌照, 赵秀海. 长白山次生针阔混交林群落结构特征及群落动态. *生态学报*, 2020, 40(4): 1195-1206.
- [18] Simpson E H. Measurement of diversity. *Nature*, 1949, 163(4148): 688.
- [19] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(上). *生物多样性*, 1994, 2(3): 231-239.
- [20] Peng Y, Holmström M, Schmidt I K, De Schrijver A, Schelfhout S, Hedénec P, Zheng H F, Bachega L R, Yue K, Vesterdal L. Litter quality, mycorrhizal association, and soil properties regulate effects of tree species on the soil fauna community. *Geoderma*, 2022, 407: 115570.
- [21] 王壮壮, 李天顺, 朱时应, 黄倩, 贺凯, 索南措, 普布. 热振森林大型土壤动物群落特征及其影响因素. *中国环境科学*, 2022, 42(7): 3392-3402.
- [22] 温辉辉, 吴福忠, 张慧玲, 彭清清, 邱丹妮, 彭艳. 亚热带森林不同树种下土壤动物群落结构特征. *应用生态学报*, 2023, 34(10): 2797-2804.
- [23] Sauvadet M, Chauvat M, Brunet N, Bertrand I. Can changes in litter quality drive soil fauna structure and functions? *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 107: 94-103.
- [24] Tsukamoto J, Sabang J. Soil macro-fauna in an *Acacia mangium* plantation in comparison to that in a primary mixed dipterocarp forest in the Lowlands of Sarawak, Malaysia. *Pedobiologia*, 2005, 49(1): 69-80.
- [25] Aubert M, Margerie P, Ernoult A, Decaëns T, Bureau F. Variability and heterogeneity of humus forms at stand level: comparison between pure beech and mixed beech-hornbeam forest. *Annals of Forest Science*, 2006, 63(2): 177-188.
- [26] Slade E M, Riutta T. Interacting effects of leaf litter species and macrofauna on decomposition in different litter environments. *Basic and Applied Ecology*, 2012, 13(5): 423-431.
- [27] Zhang H Y, Lin Q X, Huang T S, Feng Y, Zhang S J. Distribution patterns of soil fauna in different forest habitat types of North Hebei Mountains, China. *Sustainability*, 2022, 14(10): 5934.
- [28] 金涛涛, 张佛耀, 郑伟斌, 薛华健, 罗天宇, 张渺, 刘玮, 王琼. 南昌城乡不同绿地中小型土壤动物群落多样性及其影响因素. *应用生态学报*, 2023, 34(5): 1404-1414.
- [29] 袁志忠, 胡颖圆. 添加凋落物对土壤跳虫群落的影响. *土壤通报*, 2014, (4): 841-846.
- [30] Caravaca F, Ruess L. Arbuscular mycorrhizal fungi and their associated microbial community modulated by Collembola grazers in host plant free substrate. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 69: 25-33.
- [31] Ayoubi S, Mirbagheri Z, Mosaddeghi M R. Soil organic carbon physical fractions and aggregate stability influenced by land use in humid region of northern Iran. *International Agrophysics*, 2020, 34(3): 343-353.
- [32] Lassau S A, Hochuli D F. Effects of habitat complexity on ant assemblages. *Ecography*, 2004, 27(2): 157-164.