

秦岭西部不同发育阶段日本落叶松林凋落物层大型土壤动物群落特征

武均¹, 曹靖^{2①}, 张晓阳², 李世杰², 刘继亮³, 潘春林⁴ (1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃兰州 730070; 2. 兰州大学生命科学学院, 甘肃兰州 730000; 3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所临泽内陆河流域研究站, 甘肃兰州 730000; 4. 小陇山林业科学研究所, 甘肃天水 741022)

摘要: 以秦岭西部小陇山林区不同发育阶段的日本落叶松 (*Larix kaempferi*) 林为研究对象, 探讨不同发育阶段日本落叶松林凋落物层的大型土壤动物群落特征。结果表明, 10 a 日本落叶松林土壤动物密度和类群丰富度均显著高于 20 和 32 a 日本落叶松林, 而 32 a 日本落叶松林土壤动物群落密度又显著高于 20 a 日本落叶松林。不同发育阶段日本落叶松林土壤动物群落的营养功能群组成也发生了明显变化, 随栽植林龄的增加, 捕食性类群的比例先增加后降低, 而腐食性+杂食性类群的比例先降低后增加, 植食性类群的比例呈增加趋势。不同发育阶段日本落叶松林的正蚓科、线蚓科、倍足纲、螻蛄科、步甲科、蚁甲科、双翅目幼虫和蚊科土壤动物类群密度存在明显变化, 进而改变了大型土壤动物群落结构和营养功能群组成。凋落物层土壤动物对不同发育阶段日本落叶松林的环境变化十分敏感, 可以用来指示林下土壤环境变化。

关键词: 秦岭西部; 日本落叶松林; 发育阶段; 大型土壤动物; 群落结构

中图分类号: X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2013)05-0592-07

Community Characteristics of Soil Macrofauna in Forest Floors of *Larix kaempferi* Stands Different in Development Stage in West Part of the Qinling Mountains. WU Jun¹, CAO Jing², ZHANG Xiao-yang², LI Shi-jie², LIU Ji-liang³, PAN Chun-lin⁴ (1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Linze Inland River Basin Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. Xiaolongshan Research Institute of Forestry, Tianshui 741022, China)

Abstract: Japanese larch (*Larix kaempferi*) was introduced into China in the 1970s and has been planted in many parts of the country ever since, but its impact, as an alien species, on soil biodiversity is poorly documented. Field investigations were carried out in a Japanese larch plantation with stands different in development stage to explore community characteristics of the soil macrofauna community in forest floor of the plantation in the western part of the Qinling Mountains. Results demonstrate that in terms of density and richness in class group of soil macrofauna community in forest floor, the stands displayed an order of 10 a old > 32 a old > 20 a old. Significant changes also occurred in composition of the nutritional function group of the macrofauna. With rising age of the stand, the predator group increased first and then decreased in proportion, while the group of saprophagous+omnivores did reversely and the group of herbivores increased all the way. Densities of the groups of Gastropoda, Lumbricidae, Diplopoda, Lithobiomorpha, Pselaphidae, Staphylinidae, Carabidae, Curculionidae, Diptera and Formicidae varied sharply between stands different in age, thus triggering changes in structure and in composition of the nutritional function groups of soil macrofauna. Soil macrofauna in the forest floor are very sensitive to changes in environment with the age of the Japanese larch stands and hence can be used as indicator of changes in soil environment under forests.

Key words: western part of the Qinling Mountains; *Larix kaempferi*; development stage; soil macrofauna; community structure

土壤动物是地下生态系统的重要组成部分之一, 土壤动物与土壤微生物、土壤酶共同参与了凋落物和土壤有机物质的分解、矿化及腐殖质的形成等重要土壤生态过程, 在土壤碳、氮等关键元素的生物地

球化学循环, 以及土壤肥力形成和质量演变过程中

收稿日期: 2013-01-29

基金项目: 国家自然科学基金 (30671666)

① 通信作者 E-mail: caoj46@yahoo.com.cn

扮演着重要角色^{[1-2],[3]25-326}。土壤动物对土地覆被变化导致的土壤有机质、养分的富集和土壤结构的改变反应灵敏,可以作为土壤肥力和森林生态系统稳定性的生物学指标^[4-7]。与植物群落相比,土壤动物群落对气候变化和人类活动更为敏感,因而能够更好地指示全球变化背景下人类活动驱动的温带次生林生态系统结构与功能的演变特征和发展态势^[8-10]。

秦岭小陇山林区从20世纪70年代开始营造人工林,造林树种主要以乡土树种油松(*Pinus tabulaeformis*)和引进树种日本落叶松(*Larix kaempferi*)为主,秦岭地区是我国引进树种日本落叶松的主要分布区之一。在次生林砍伐后栽植日本落叶松会导致地表覆被改变,由此引起地表水文,土壤生态环境以及植物凋落物的生产、积累和分解过程变化,改变地下生物群落乃至整个土壤食物网的组成、结构和功能,进而对森林生态系统的能量、物质和水循环及资源利用效率等生态服务功能产生重要影响^[11-13]。然而,当前针对秦岭地区栽植日本落叶松如何影响土壤生物多样性演变过程的认识还很有限,对于随着日本落叶松栽植年限的增加,土壤动物群落结构和多样性的演变特征及驱动其变化的关键环境要素尚不清楚。

近年来引进物种对生物多样性的影响已经引起越来越多的关注,国内大量研究已经证实引进物种中的有害生物〔如紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum*)和互花米草(*Spartina alterniflora*)〕严重威胁土著生态系统的多样性与稳定性,降低群落物种多样性,改变群落结构^[14-18]。然而,这些研究多集中在地上生态系统,而关于引进物种对地下生态系统的影响还缺乏足够认识,特别是一些木本植物对土壤生态系统的长期影响还缺少系统研究。因此,以秦岭西部小陇山林区栽植年限分别为10、20和32 a的人工日本落叶松林作为研究对象,探讨日本落叶松林凋落物层大型土壤动物群落结构及多样性的演变特征,旨在为秦岭森林土壤生物多样性保护、合理开发利用森林资源与实现森林生态系统的可持续发展提供科学依据和理论支持。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

甘肃小陇山林区位于秦岭西部(34°00'~34°40' N, 105°30'~106°30' E),林区内地形起伏变化较大,海拔高度700~3 330 m。该区域属暖温带与亚热带的过渡地带,为半湿润大陆性季风气候区,多年平

均气温7.10~12.10℃,极端最高气温39.12℃,极端最低气温-22.40℃,≥10℃有效积温2 484℃,多年平均降水量757 mm,且降水主要集中于7—9月,降水年际变化较大,年平均蒸发量1 012.2 mm,年平均相对湿度78%,年平均日照时间1 553 h,年无霜期120~218 d。地带性土壤以山地褐土为主,土层厚度30~60 cm,土壤质地多为壤土和轻壤土。

小陇山林区经过几十年的营建,原始的地带性植被已被次生林和人工针叶林所替代,林区内分布着大面积的人工日本落叶松林和油松林等。目前,林区对日本落叶松的经营已经探索出一套规范的管理模式,造林初期为保证幼苗成活,栽植较密,中期和后期通过逐渐间伐减小密度。针对这一特征,在林区选择不同栽植年限的日本落叶松人工林作为研究对象。日本落叶松林下植被特征因栽植年限不同而不同。10 a日本落叶松林林冠郁闭度约为0.89,落叶松密度约为3 300株·km⁻²,林下灌木和草本较多,灌木密度约为6 100株·hm⁻²,草本盖度约为70%。20 a日本落叶松林林冠郁闭度约为0.75,经过1次间伐管理日本落叶松林中落叶松密度约为2 295株·km⁻²,由于林下割灌割草管理,林下灌木较少,密度约为1 700株·hm⁻²,林下草本较多,盖度约为80%。32 a日本落叶松林林冠郁闭度约为0.60,经过2次间伐管理日本落叶松林中落叶松密度约为450株·km⁻²,灌木密度约为6 700株·hm⁻²,林下草本较多,盖度约为60%。

1.2 研究方法

结合前期的造林资料及林区内日本落叶松林的分布特征,小陇山李子园林场主要有造林年限近10、20和32 a的日本落叶松人工林,且日本落叶松林斑主要分布在地势相对平坦的沟谷地段。在林区内分别选取5块造林年限近10、20和32 a的人工日本落叶松林斑作为研究样地,每个林斑的面积至少大于1 000 m²。在每个林斑内选取10 m×10 m土壤动物采样区,在每个采样区随机选取5个1 m×1 m采样点,在每个采样点采集1个50 cm×50 cm样方。于2009年8月采集凋落物层土壤动物样品,具体采集方法:在野外采用手检法分离大型土壤动物,将采集到的土壤动物标本保存在酒精溶液(φ为75%)中。在采集土壤动物样品的同时,采用样方法调查植被群落特征,包括群落郁闭度、乔木密度、灌木和草本盖度以及凋落物厚度等。

在实验室内利用体视显微镜和生物显微镜对土壤动物样品进行分类鉴定和数量统计。因研究区采集的土壤动物群落中腹足纲、倍足纲、蜘蛛目

和双翅目幼虫动物类群生态功能接近,故不作进一步划分,其余类群均鉴定到科,分别统计大型土壤动物幼虫和成虫。土壤动物分类鉴定主要依据文献[19-20]。

1.3 数据分析

将每个动物采样区5个采样点的土壤动物数据进行合并统计。将捕获的23类土壤动物划分为捕食性、植食性和腐食性+杂食性3个营养功能群^[1-2],并计算各样地每种营养功能群的个体密度和类群丰富度,然后计算不同生境土壤动物类群的相对多度和土壤动物群落结构参数。

以动物群落密度表示土壤动物群落的多度,以类群数表示其类群丰富度,以Shannon-Winner多样性指数(H')表示其多样性,以Pielou均匀度指数(E)表示其均匀度。

采用单因素方差分析比较不同发育阶段日本落叶松林的土壤动物密度、类群丰富度、Shannon-Winner多样性指数、Pielou均匀度指数、营养功能群密度和类群丰富度、主要动物类群密度(动物密度占有所有动物密度的比例大于1%)的差异。为保证试验数据满足正态分布,对动物密度、类群丰富度、Shannon-Winner多样性指数、Pielou均匀度指数和土壤动物类群密度进行 $\lg(x+1)$ 转换。采用SPSS 16.0软件进行方差分析,采用Tukey法进行多重分析。

采用主成分分析法(principal component analysis, PCA)分析不同发育阶段日本落叶松林土壤动物群落的分布格局。首先进行除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA),根据计算出的DCA排序轴梯度长度(lengths of gradient, LGA)选择适宜的排序方法。动物群落DCA分析结果表明,LGA值为1.48,小于3,故可以采用PCA法分析土壤动物群落的分布格局。应用CANOCO 4.5软件进行分析运算,并在分析前将土壤动物密度数据进行 $\lg(x+1)$ 转换,然后采用Pearson相关分析检验每一动物类群与排序轴1和排序轴2的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同发育阶段日本落叶松林土壤动物群落种类和数量组成

由表1可见,在10 a日本落叶松林生境共采集17类大型土壤动物,主要动物类群为石蜈蚣科、蚁科和倍足纲等,正蚓科是10 a日本落叶松林生境特有动物类群;在20 a日本落叶松林生境共采集17

类大型土壤动物,主要动物类群为石蜈蚣科、隐翅虫科成虫和蚁科,长蜡科是20 a日本落叶松林生境特有动物类群;在32 a日本落叶松林生境共采集20类大型土壤动物,主要动物类群为石蜈蚣科和蚁科,拟步甲科幼虫和瓢甲科幼虫是32 a日本落叶松林生境特有动物类群。

2.2 不同发育阶段日本落叶松林土壤动物类群分布特征

由表1可见,方差分析结果表明,不同发育阶段日本落叶松林正蚓科、线蚓科、倍足纲、么蚣科、步甲科、蚁甲科、双翅目幼虫和蚁科动物类群密度存在显著差异,其余类群密度差异均不显著。随日本落叶松林栽植年限的增加,正蚓科、线蚓科、么蚣科和蚁甲科密度均呈降低趋势,20和32 a日本落叶松林正蚓科、线蚓科、倍足纲和双翅目幼虫密度显著低于10 a日本落叶松林。随着日本落叶松林栽植年限的增加,步甲科密度呈先增加后减少的变化趋势,10和32 a日本落叶松林步甲科密度显著低于20 a日本落叶松林。蚁科动物密度变化与其余类群不同,20 a日本落叶松林蚁科密度显著低于10和32 a日本落叶松林。

2.3 不同发育阶段日本落叶松林土壤动物群落营养功能群组成

捕获的土壤动物样品被区分为捕食性、植食性和腐食性+杂食性3个营养功能群。其中捕食性动物类群数量占捕获土壤动物群落数量的43.0%,分属9个科,优势类群为石蜈蚣科和隐翅虫科成虫,分别占捕食性动物总数的49.8%和17.9%。植食性动物类群数量占捕获土壤动物群落数量的6.2%,分属7个科,优势类群为金龟子科幼虫、叶甲科幼虫和蜡科,分别占植食性动物总数的47.2%、16.7%和13.9%。腐食性+杂食性动物类群数量占捕获土壤动物群落数量的50.8%,分属7个科,优势类群为蚁科、倍足纲和双翅目幼虫,分别占腐食性+杂食性动物总数的47.1%、22.6%和14.5%。

方差分析结果表明,不同发育阶段日本落叶松林的捕食性类群密度($F_{2,14} = 5.32, P < 0.05$)、腐食性+杂食性类群密度($F_{2,14} = 21.50, P < 0.001$)和类群丰富度($F_{2,14} = 11.67, P < 0.01$)存在显著差异,而捕食性类群丰富度($F_{2,14} = 3.38, P = 0.068$)、植食性类群密度($F_{2,14} = 1.19, P = 0.338$)及类群丰富度($F_{2,14} = 2.67, P = 0.110$)差异则不显著。

由图1可见,10 a日本落叶松林捕食性类群密度显著高于20和32 a日本落叶松林,而32 a日本落叶松林捕食性类群密度又显著高于20 a日本落

叶松林。随日本落叶松林龄的增加,捕食性类群丰富度呈降低趋势,但方差分析结果显示并未达显著水平。腐食性+杂食性类群密度变化规律与捕食性类群一致,但类群丰富度的变化略有不同,10 a 日本

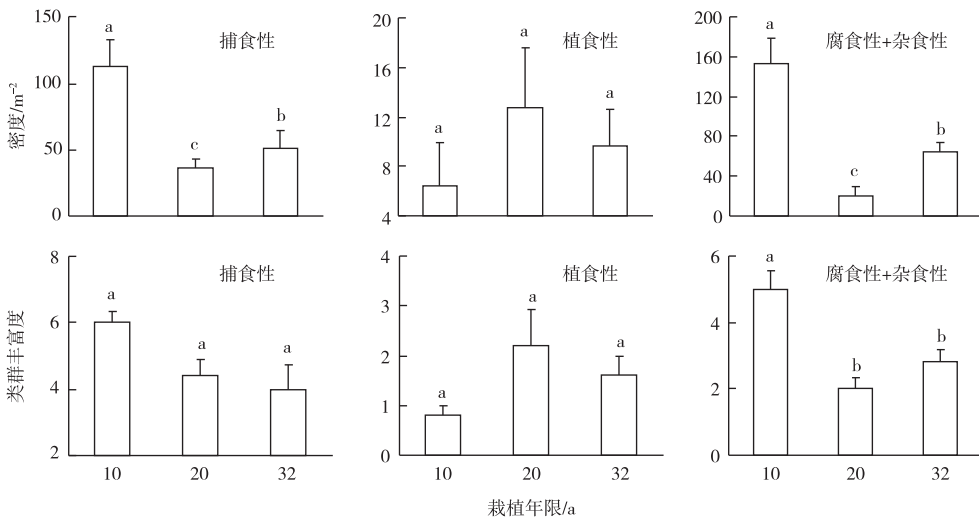
落叶松林腐食性+杂食性类群丰富度显著高于 20 和 32 a 日本落叶松林,而 20 和 32 a 日本落叶松林腐食性+杂食性类群丰富度差异不显著。

表 1 不同发育阶段日本落叶松林土壤动物密度和相对多度

Table 1 Densities and relative abundance of soil macrofauna in the forest floor relative to age of the Japanese larch stand

土壤动物	10 a 日本落叶松		20 a 日本落叶松		32 a 日本落叶松		$F_{2,14}$ 值
	密度/ m^{-2}	相对多度/%	密度/ m^{-2}	相对多度/%	密度/ m^{-2}	相对多度/%	
腹足纲 (Gastropoda)	5.6±3.9 ^a	2.05	6.4±3.7 ^a	9.20	0±0 ^a	0	1.94
正蚓科 (Lumbricidae)	6.4±1.6 ^a	2.35	0±0 ^b	0	0±0 ^b	0	96.49 ^{***}
线蚓科 (Enchytraeidae)	15.2±10.4 ^a	5.57	0.8±0.8 ^b	1.15	2.4±2.4 ^b	1.92	3.01 [*]
倍足纲 (Diplopoda)	45.6±18.7 ^a	16.72	1.6±1.0 ^c	2.30	6.4±1.6 ^b	5.13	3.36 [*]
地蜈蚣科 (Geophilidae)	5.6±3.7 ^a	2.05	3.2±2.3 ^a	4.60	0.8±0.8 ^a	0.64	0.91
石蜈蚣科 (Lithobiidae)	60.8±18.9 ^a	22.29	13.6±3.7 ^a	19.54	25.6±7.9 ^a	20.51	1.67
幺蚣科 (Scolopendrellidae)	8.8±1.5 ^a	3.23	0±0 ^b	0	1.6±1.6 ^b	1.28	18.74 ^{***}
蜘蛛目 (Araneae)	5.6±2.0 ^a	2.05	6.4±1.6 ^a	9.20	4.0±2.5 ^a	3.21	1.28
长蝽科 (Lygaeidae)	0±0	0	0.8±0.8	1.15	0±0	0	
蝽科 (Pentatomidae)	0.8±0.8	0.29	2.4±1.6	3.45	0.8±0.8	0.64	
叶蝉总科 (Cicadelloidea)	0±0	0	0.8±0.8	1.15	0.8±0.8	0.64	
步甲科 (Carabidae)	0.8±0.8 ^b	0.29	4.0±1.3 ^a	5.75	0.8±0.8 ^b	0.64	3.41 [*]
隐翅虫科 (Staphylinidae)	18.4±5.9 ^a	6.74	7.2±4.3 ^a	10.34	10.4±2.7 ^a	8.33	2.66
蚁甲科 (Pselaphidae)	9.6±4.1 ^a	3.52			0.8±0.8 ^b	0.64	7.86 ^{**}
象甲科 (Curculionidae)	0±0	0	0.8±0.8	1.15	0.8±0.8	0.64	
拟步甲科 (Tenebrionidae) 幼虫	0±0	0	0±0	0	0.8±0.8	0.64	
瓢甲科 (Coccinellidae) 幼虫	0±0	0	0±0	0	0.8±0.8	0.64	
隐翅虫科幼虫	3.2±1.5 ^a	1.17	2.4±1.0 ^a	3.45	6.4±2.0 ^a	5.13	0.84
叶甲科 (Chrysomelidae) 幼虫	1.6±1.0 ^a	0.59	2.4±1.6 ^a	3.45	0.8±0.8 ^a	0.64	0.32
金龟子科 (Scarabaeoidea) 幼虫	4.0±4.0 ^a	1.47	5.6±2.7 ^a	8.05	4.0±2.2 ^a	3.21	0.79
象甲科幼虫	0±0 ^a	0	0±0 ^a	0	2.4±2.4 ^a	1.92	1.00
双翅目 (Diptera) 幼虫	25.6±3.0 ^a	9.38	4.0±3.1 ^b	5.75	4.8±3.9 ^b	3.85	7.61 ^{**}
蚁科 (Formicidae)	55.2±7.9 ^a	20.23	7.2±6.2 ^b	10.34	49.6±11.3 ^a	39.74	11.55 ^{***}

*、** 和 *** 分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 。同一行数据后英文小写字母不同表示不同发育阶段日本落叶松林间土壤动物密度差异显著 ($P<0.05$)。



同一幅图中直方柱上方英文小写字母不同表示不同发育阶段日本落叶松林间某指标差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 不同发育阶段日本落叶松林土壤动物群落营养功能群密度和类群丰富度
Fig. 1 Density of nutritional function group and richness of class group of soil macrofauna community in the forest floor relative to age of the Japanese larch stand

由图2可见,随日本落叶松林龄的增加,捕食性类群的比例先增加后降低,而腐食性+杂食性类群的比例先降低后增加,植食性类群的比例呈增加趋势。10 a日本落叶松林腐食性+杂食性类群密度和类群丰富度分别为20 a日本落叶松的7.7和2.4倍,为32 a日本落叶松的2.5和1.8倍,10 a日本落叶松林捕食性类群密度分别为20和32 a日本落叶松林的3.1和2.2倍。此外,10、20和30 a日本落叶松林土壤动物群落捕食性类群、植食性类群和腐食性+杂食性类群之间的比值分别为1:0.72:0.02、1:1.44:0.28和1:0.75:0.08。若将捕食性和植食性类群视为消费者,将腐食性+杂食性类群视为分解者,则上述3种生境消费者/分解者比值分别为1:0.74、1:1.72和1:0.83。显而易见,由于日本落叶松林龄增加导致地面凋落物数量和质量发生变化,土壤动物群落中消费者所占比例先减少后增加,而分解者所占比例先增加后减少。

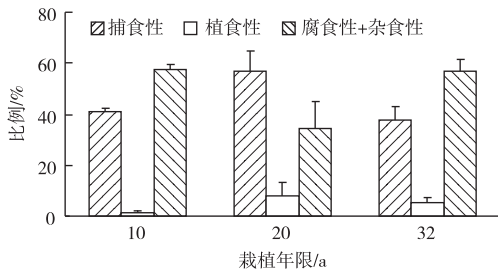


图2 不同发育阶段日本落叶松林土壤动物群落营养功能群组成

Fig. 2 Composition of the nutritional function group of soil macrofauna community in the forest floor relative to age of the Japanese larch stand

2.4 不同发育阶段日本落叶松林土壤动物群落结构特征

方差分析表明,不同发育阶段日本落叶松林间土壤动物群落密度 ($F_{2,14} = 12.05, P < 0.001$) 和类群丰富度 ($F_{2,14} = 4.58, P < 0.05$) 均存在显著差异,而多样性指数 ($F_{2,14} = 3.79, P = 0.053$) 和均匀度指数 ($F_{2,14} = 3.05, P = 0.058$) 差异不显著。由表2可见,10 a日本落叶松林土壤动物密度显著高于32 a日本落叶松林,而32 a日本落叶松林土壤动物密度又显著高于20 a日本落叶松林,10 a日本落叶松林土壤动物群落密度分别为20和32 a日本落叶松林的3.9和2.2倍。不同发育阶段日本落叶松林土壤动物类群丰富度变化规律与动物密度相似,10 a日本落叶松林土壤动物群落类群丰富度分别为20和32 a日本落

叶松林的1.4和1.4倍。

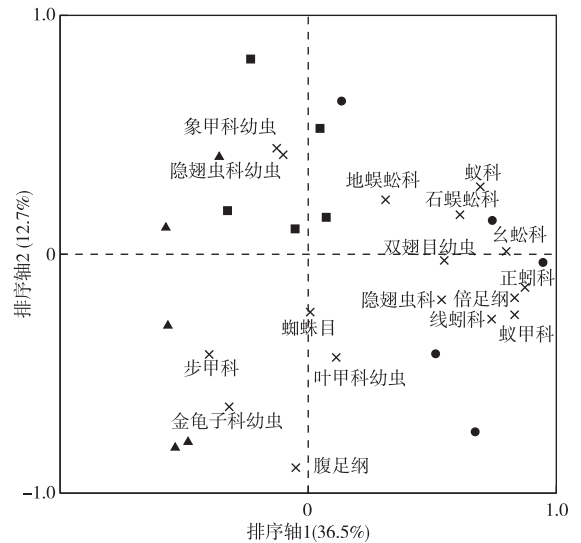
表2 不同发育阶段日本落叶松林土壤动物群落密度、类群丰富度、多样性指数和均匀度指数

Table 2 Total density, group richness, diversity index and evenness index of soil macrofauna community in the forest floor relative to age of the Japanese larch stand

栽植年限/a	密度/m ⁻²	类群丰富度	多样性指数	均匀度指数
10	272.8±46.7 ^a	11.8±0.5 ^a	2.0±0.1 ^a	0.80±0.02 ^a
20	69.6±13.2 ^c	8.6±0.9 ^b	1.9±0.1 ^a	0.90±0.01 ^a
32	124.8±21.0 ^b	8.4±0.9 ^b	1.7±0.1 ^a	0.80±0.03 ^a

同一列数据后英文小写字母不同表示不同栽植年限日本落叶松林间某指标差异显著 ($P < 0.05$)。

不同发育阶段日本落叶松林土壤动物群落的PCA排序分析结果见图3。



● 10 a日本落叶松林; ▲ 20 a日本落叶松林; ■ 32 a日本落叶松林。

图3 不同发育阶段日本落叶松林土壤动物群落的PCA排序图

Fig. 3 PCA two-dimensional ordination diagram of soil macrofauna community in the forest floor relative to age of the Japanese larch stand

由图3可见,前2个排序轴累积解释了49.2%的动物群落变化。4个排序轴累积解释了70.6%的动物群落变化,这表明排序结果可以反映不同发育阶段日本落叶松林土壤动物群落的分布格局。排序轴1明显将20和32 a日本落叶松林与10 a日本落叶松林生境区分开来,而排序轴2则将20和32 a日本落叶松林生境区分开来。不同动物类群的分布也存在明显差异,如正蚓科 ($R = 0.827, P < 0.001$)、线蚓科 ($R = 0.634, P < 0.05$)、倍足纲 ($R = 0.736, P < 0.01$)、石蜈蚣科 ($R = 0.793, P < 0.001$)、

么蛭科 ($R = 0.728, P < 0.001$)、蚁甲科 ($R = 0.676, P < 0.01$)、双翅目幼虫 ($R = 0.627, P < 0.05$)、蚁科 ($R = 0.739, P < 0.001$) 分别与排序轴 1 呈显著正相关, 它们主要分布在 10 a 日本落叶松林中; 腹足纲与排序轴 2 呈显著负相关 ($R = -0.820, P < 0.001$), 且主要分布在 10 和 20 a 日本落叶松林中。

3 讨论

日本落叶松林原产于日本中部, 是北半球温带地区广泛引种的人工针叶树种之一^[21]。近年关于引进树种日本落叶松林的凋落物分解、土壤微生物活性及土壤质量演变过程的研究已有报道^[11-12, 22-24], 但关于不同发育阶段日本落叶松林土壤动物群落特征的研究报道还较少。随着栽植年限的增加, 次生林区人工栽种日本落叶松林凋落物的数量和质量逐渐发生变化, 凋落层土壤动物组成也随之发生变化, 进而改变土壤动物群落的结构和营养功能群组成。笔者研究结果表明不同发育阶段日本落叶松人工林凋落物层大型土壤动物群落密度和类群丰富度均存在明显差异。10 a 日本落叶松林处于林木生长发育前期, 林下植被繁盛, 土壤养分含量较高^[12], 土壤动物群落密度和类群丰富度也较高。随栽植年限增加, 日本落叶松密度和林下植物多样性降低, 20 a 日本落叶松林土壤动物群落密度最低, 32 a 日本落叶松林土壤动物群落类群丰富度最低。经过实行间伐、割灌和割草管理措施, 随木本和草本植物盖度降低, 不同发育阶段日本落叶松林土壤动物群落密度呈先降低后升高的变化趋势, 这是地表植被(包括日本落叶松和灌草)和人为干扰综合影响的结果, 这与杨鑫等^[12]和常成虎等^[23]的研究结果相似。HWANG 等^[25]在韩国中部地区的研究发现, 近 44 a 的人工日本落叶松林经过 2 a 间伐后, 土壤有机碳含量明显增加; 王宏星等^[26]对小陇山日本落叶松人工林的研究发现, 经过间伐后土壤养分明显增加; MALEQUE 等^[27]对日本中部日本落叶松人工林的研究也发现, 间伐管理导致森林地表甲虫的物种多样性增加。以上研究结果均表明, 人工林间伐管理可降低日本落叶松密度, 导致土壤养分和土壤生物多样性明显增加, 间伐也会增强土壤微生物活性^[26, 28-29], 总之, 间伐管理有利于提高日本落叶松人工林的土壤生态系统可持续性。20 a 日本落叶松林土壤动物群落密度最低, 这可能与研究区日本落叶松林的割灌与割草措施有关, 强烈的植被扰动过程减缓了土壤养分和凋落物层大型土壤动物群落的恢复过程^[30]。很多研究表

明土壤动物对环境变化响应敏感^[10, 31-32]。可见, 次生林区栽种日本落叶松可显著改变凋落物层土壤动物群落结构, 但人为干扰(间伐管理和割灌、割草管理)可能减弱了日本落叶松林对土壤生态系统的影响。

不同发育阶段日本落叶松林 3 个营养功能群的密度和类群丰富度也存在明显差异。随着日本落叶松林龄的增加, 腐食性+杂食性类群密度、类群丰富度和捕食性类群密度均显著下降, 消费者/分解者比值则先增加后减少。这与日本落叶松林凋落物的数量与质量变化密切相关, 它们调控着凋落物分解过程, 进而影响林下土壤质量的演变过程^[21, 33]。

不同发育阶段日本落叶松林主要土壤动物类群密度存在明显变化, 并且主要动物类群的组成随着栽植年限的增加也发生了明显变化。不同土壤动物类群变化对日本落叶松林发育阶段的响应主要存在 3 种类型: 第 1 种类型包括腹足纲、正蚓科、线蚓科、倍足纲、么蛭科、蚁甲科和双翅目幼虫, 随着日本落叶松栽植年限的增加, 类群密度呈降低趋势; 第 2 种类型包括步甲科, 其类群密度随日本落叶松栽植年限的增加呈先增加后减少的趋势; 第 3 种类型包括蚁科, 其类群密度随着日本落叶松栽植年限的增加呈先减少后增加的趋势。研究表明, 腹足纲、正蚓科、线蚓科、倍足纲、么蛭科和双翅目幼虫均属腐食性类群, 对凋落物和土壤微生物等食物资源变化非常敏感, 而步甲科(捕食性)和蚁科(杂食性)对日本落叶松林间伐管理十分敏感^{[3]25-326}。不同动物类群对环境变化的响应模式和适应机理存在明显差异, 这充分反映了它们在生活史、营养方式、繁殖特征和生物学特性等方面的综合性差异, 这些差异决定了不同发育阶段日本落叶松人工林凋落物层土壤动物群落结构的演变^{[3]25-326, [34-35]}。

参考文献:

- [1] PETERSEN H, LUXTON M. A Comparative Analysis of Soil Fauna Populations and Their Role in Decomposition Processes [J]. *Oikos*, 1982, 39(3): 288-388.
- [2] BRUSSAARD L. Soil Fauna, Guilds, Functional Groups and Ecosystem Processes [J]. *Applied Soil Ecology*, 1998, 9(1/2/3): 123-135.
- [3] COLEMAN D C, CROSSLEY D A, HENDRIX P F. *Fundamentals of Soil Ecology* [M]. 2nd ed. New York, USA: Elsevier, 2004.
- [4] MOLDENKE A R, LATTIN J D. Density and Diversity of Arthropods as "Biological Probes" of Complex Soil Phenomena [J]. *Northwest Environmental Journal*, 1990, 6(2): 408-409.
- [5] KNOEPP J D, COLEMAN D C, CROSSLEY D A, et al. Biological

- Indices of Soil Quality: An Ecosystem Case Study of Their Use [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 138(1/2/3): 357-368.
- [6] FRANKLIN E N, MORAIS J W, SANTOS E M R. Density and Biomass of Acari and Collembola in Forest Primary, Secondary Regrowth and Polycultures in Central Amazonia [J]. *Andrias*, 2001, 15(1): 141-154.
- [7] YAN S, SINGH A N, FU S, *et al.* A Soil Fauna Index for Assessing Soil Quality [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 47: 158-165.
- [8] 余广彬, 杨效东. 不同演替阶段热带森林地表凋落物和土壤节肢动物群落特征 [J]. *生物多样性*, 2007, 15(2): 188-198.
- [9] BARBERCHECK M E, NEHER D A, ANAS O, *et al.* Response of Soil Invertebrates to Disturbance Across Three Resource Regions in North Carolina [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 152(1/2/3/4): 283-298.
- [10] YIN X Q, SONG B, DONG W H, *et al.* A Review on the Eco-Geography of Soil Fauna in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(3): 333-346.
- [11] 陈琦, 尹粉粉, 曹靖, 等. 秦岭西部不同发育阶段油松和日本落叶松人工林土壤酶活性变化和分布特征 [J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(5): 466-471.
- [12] 杨鑫, 曹靖, 董茂星, 等. 外来树种日本落叶松对森林土壤质量及细菌多样性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2109-2116.
- [13] COLEMAN D C, WHITMAN W B. Linking Species Richness, Biodiversity and Ecosystem Function in Soil Systems [J]. *Pedobiologia*, 2005, 49(6): 479-497.
- [14] 刘志磊, 徐海根, 丁晖. 外来入侵植物紫茎泽兰对昆明地区土壤动物群落的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(2): 31-35.
- [15] 曾艳, 田广红, 陈蕾伊, 等. 互花米草入侵对土壤生态系统的影响 [J]. *生态学杂志*, 2011, 30(9): 2080-2087.
- [16] 李博, 马克平. 生物入侵: 中国学者面临的转化生态学机遇与挑战 [J]. *生物多样性*, 2011, 18(6): 529-532.
- [17] 类延宝, 肖海峰, 冯玉龙. 外来植物入侵对生物多样性的影响及本地生物的进化响应 [J]. *生物多样性*, 2010, 18(6): 622-630.
- [18] CHEN H L, LI B, FANG C M, *et al.* Exotic Plant Influences Soil Nematode Communities Through Litter Input [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(7): 1782-1793.
- [19] 尹文英, 胡圣豪, 沈蕴芬. 中国土壤动物检索图鉴 [M]. 北京: 科技出版社, 1998: 1-756.
- [20] 郑乐怡, 归鸿. 昆虫分类 [M]. 南京: 南京师范大学出版社, 1999: 1-1070.
- [21] 刘增文, 段而军, 付刚, 等. 秦岭北山几种典型人工纯林土壤性质极化问题研究 [J]. *土壤*, 2008, 40(6): 997-1001.
- [22] NAKAMURA Y, KRESTOV P V. Coniferous Forests of The Temperate Zone of Asia [M] // ANDERSSON F. *Ecosystems of the World: Coniferous Forests*. Amsterdam, Holland: Elsevier, 2005: 163-220.
- [23] 常成虎, 巨天珍, 王勤花, 等. 甘肃小陇山日本落叶松人工林土壤养分特征分析 [J]. *福建林业科技*, 2005, 32(3): 55-61.
- [24] 常雅军, 陈琦, 曹靖, 等. 甘肃小陇山不同针叶林凋落物量、养分储量及持水特性 [J]. *生态学报*, 2011, 31(9): 2392-2400.
- [25] HWANG J, SON Y. Short-Term Effects of Thinning and Liming on Forest Soils of Pitch Pine and Japanese Larch Plantations in Central Korea [J]. *Ecological Research*, 2006, 21(5): 671-680.
- [26] 王宏星, 孙晓梅, 陈东升, 等. 甘肃小陇山日本落叶松人工林不同发育阶段土壤理化性质的变化 [J]. *林业科学研究*, 2012, 25(3): 294-301.
- [27] MALEQUE M A, ISHII H T, MAETO K, *et al.* Line Thinning Enhances the Diversity of Coleoptera in Overstocked Cryptomeria Japonica Plantations in Central Japan [J]. *Arthropod: Plant Interactions*, 2007, 1(3): 175-185.
- [28] 林娜, 刘勇, 李国雷, 等. 抚育间伐对人工林凋落物分解的影响 [J]. *世界林业研究*, 2010, 23(3): 44-47.
- [29] INAGAKI Y, KURAMOTO S, TORII A, *et al.* Effects of Thinning on Leaf-fall and Leaf-Litter Nitrogen Concentration in Hinoki Cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher) Plantation Stands in Japan [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(5/6): 1859-1867.
- [30] 肖玖金, 张健, 黄玉梅, 等. 采伐干扰前后巨桉人工林土壤动物群落比较 [J]. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(1): 73-77.
- [31] FIERER N, STRICKLAND M, LIPTZIN D, *et al.* Global Patterns in Belowground Communities [J]. *Ecology Letters*, 2009, 12(11): 1238-1249.
- [32] 殷秀琴, 蒋云峰, 陶岩, 等. 长白山红松阔叶混交林土壤动物生态分布 [J]. *地理科学*, 2011, 31(8): 935-940.
- [33] 李锋瑞, 刘继亮, 化伟, 等. 地面节肢动物营养类群对土地覆被变化和管理扰动的响应 [J]. *生态学报*, 2011, 31(15): 4169-4181.
- [34] YAACOBI G, ZIV Y, ROSENZWEIG M. Effects of Interactive Scale-Dependent Variables on Beetle Diversity Patterns in a Semi-Arid Agricultural Landscape [J]. *Landscape Ecology*, 2007, 22(5): 687-703.
- [35] 刘继亮, 李锋瑞. 坡向和微地形对大型土壤动物空间分布格局的影响 [J]. *中国沙漠*, 2008, 28(6): 1104-1112.

作者简介: 武均(1989—), 男, 甘肃敦煌人, 硕士生, 主要研究方向为土壤生态学。E-mail: wujunonly@163.com