

DOI: 10.5846/stxb201810102192

张阿娟, 张健, 李金金, 刘志刚, 张丹桔. 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, 2020, 40(3): 808-821.

Zhang A J, Zhang J, Li J J, Liu Z G, Zhang D J. Characteristics of soil faunal community structure before and after the rotation period of *Eucalyptus grandis* plantations with various densities. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(3): 808-821.

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

张阿娟, 张 健, 李金金, 刘志刚, 张丹桔*

四川农业大学生态林业研究所林业生态工程省级重点实验室, 成都 611130

摘要: 在前期巨桉 (*E. grandis*) 人工林土壤生物多样性在轮伐期前 (4 年左右) 降低, 此后随林龄显著升高的研究基础上, 在四川省丹棱县选择轮伐期前即 4 年和轮伐期后即 8 年的不同密度 (D1: 2000, D2: 1600, D3: 1200 株/hm²) 巨桉人工林, 研究了其土壤动物群落结构特征。结果显示: 1) 共捕获土壤动物 2904 只, 隶属于 4 门 8 纲 22 目 70 科, 其中大型土壤动物 541 只, 以蚁科和康叭科为优势类群; 中小型土壤动物 2363 只, 以大翼甲螨科、等节蟻科和线虫为优势类群。2) 土壤动物类群数、个体数和密度随林分密度和林龄具有显著差异, 4 年生林地大型土壤动物个体数随密度降低显著增加, 8 年生巨桉人工林中中小型土壤动物个体数及类群数随密度降低均显著增加; 土壤动物个体数及类群数除 D1 密度时 4 年高于 8 年, 其余密度均表现为 8 年高于 4 年。3) 林分密度对土壤动物多样性指数有显著影响, 4 年生林地大型土壤动物 Margalef 丰富度指数随密度降低显著增加, 8 年巨桉人工林中中小型土壤动物 Shannon-wiener 指数及 Margalef 丰富度指数随密度降低显著升高。4) 巨桉人工林大型土壤动物以杂食性为主, 枯食性次之, 中小型土壤动物以腐食性为主, 杂食性次之。5) RDA 分析显示, 林分密度、土壤含水量和土壤 pH 为对土壤动物的主要作用环境因子, 4 年时对奥甲螨科、长角长蟻科、寄蟻科、隐翅甲科、丽甲蟻科等类群影响较大; 8 年时对线虫、蜚蠊科、康叭科、厉蟻科、棘蟻科等类群影响较大。为此, 延长轮伐期、降低林分密度可改善巨桉人工林土壤动物生境、增加土壤动物多样性、促进土壤动物群落结构稳定性。

关键词: 巨桉人工林; 轮伐期; 林分密度; 土壤动物群落特征

Characteristics of soil faunal community structure before and after the rotation period of *Eucalyptus grandis* plantations with various densities

ZHANG Ajuan, ZHANG Jian, LI Jinjin, LIU Zhigang, ZHANG Danju*

Institute of Ecology & Forestry, Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering in Sichuan Province, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract: Our previous studies found that biodiversity in soil of *Eucalyptus grandis* plantations gradually decreased at the initial four years after afforestation, but then significantly increased. Therefore, in this study, we studied the community structure of soil fauna at the stand age of four and at the age of eight, which is usually considered to be a regular rotation period for *E. grandis*. Three densities (D1: 2000, D2: 1600, D3: 1200 ind/hm²) were selected to compare community structure of soil fauna among above age groups. Picking up, Tullgren funnel and Baermann methods were used to collect the macro, meso and micro soil fauna in Danling County, Sichuan Province. The results showed that: 1) in total, 2904 individuals of soil fauna were collected, which belonged to 4 phyla, 8 classes, 22 orders, and 70 families. There were 541

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31300528)

收稿日期: 2018-10-10; 网络出版日期: 2019-11-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zdj_8080573@sohu.com

macro individuals dominated by Formicidae and Campodeidae, and 2636 individuals of meso-micro fauna dominated by Galumnidae, Isotomidae and Nemata. 2) There were differences in group numbers, individual numbers, and densities of soil fauna between forest ages and stand densities. The individual numbers of soil macro fauna in 4-year old *E. grandis* plantation increased significantly with the decrease of density. Both group and individual numbers of meso-micro fauna in 8-year old *E. grandis* plantation increased significantly with the decrease of density. Both group and individual numbers of soil fauna in D1 density were higher in 4-year old stand than those in 8-year old stand. The remaining density was the opposite. 3) The soil fauna diversity indexes were significantly affected by forest density. The Margalef richness index of soil macro fauna in 4-year old *E. grandis* plantation increased significantly as forest density decreased. While the shannon-wiener index and Margalef richness index of soil meso-micro fauna in 8-year old *E. grandis* plantation increased significantly with the decrease of density. 4) The soil macro fauna in the *E. grandis* plantation were mainly omnivores, followed by debris-feeder's. The soil meso-micro fauna were mainly saprozoic, followed by omnivores. 5) RDA analysis indicated that the soil faunal communities were mainly affected by following environmental factors: forest density, soil moisture content, soil pH, and total nitrogen content. Soil fauna belonged to Oppiidae, Orchesellidae, Parasitidae, Staphylinidae, and Liacaridae were greatly affected by above factors at 4-year old of *E. grandis* plantation, while those belonged to Nemata, Blattidae, Campodeidae, Lacclapidae, and Onychiuridae were greatly affected by above factors at 8-year old of *E. grandis* plantation. Therefore, prolonging rotation period and reducing the forest density appropriately is necessary to improve the stability, increase biodiversity of soil fauna, and thus promote the stability of community structure of soil fauna in *E. grandis* plantation.

Key Words: *Eucalyptus grandis* plantation; rotation period; forest density; soil faunal community structure

土壤动物不仅是森林土壤生态系统结构和功能的重要组成部分,而且是森林生态系统生物元素的储存者以及生物元素循环和土壤形成与发育的积极参与者^[1]。土壤动物与土壤微生物在非生物因子作用下,在维持森林生态系统物质循环和能量流动中起着不可替代的作用,也是指示植被演替、环境干扰及气候变化等的重要生物学指标^[2]。我国是世界人工林发展最快、面积最大的国家,总面积已达 6933 万 hm^2 ,人工林在为区域社会和经济做出巨大贡献的同时,也带来了生物多样性下降、地力衰退等颇具争议的生态环境问题^[3]。人工林生态系统在为土壤动物群落提供生存环境的同时,随着其演替及经营措施的改变等方面都会对人工林土壤生物产生深远影响^[4]。人工林植被群落的层次结构变化可明显改变土壤水热环境,影响土壤动物群落的生存和繁衍;这些结构和环境的变化还能显著改变土壤动物食物有效性和生存环境,从而影响土壤动物群落结构和功能^[4-7]。因此研究土壤动物群落结构和功能对人工林系统可持续经营和发展具有重要意义。

巨桉(*Eucalyptus grandis*),桃金娘科,桉树属植物。由于其生长快、干形好、用途广泛等特点被中国广泛引种栽培,已成为中国南方速生丰产林的战略树种^[8]。四川经过多年引种筛选并营建了大面积的巨桉人工林,轮伐期多在 5—7 年。本课题组前期在四川省丹棱县研究了一个年龄序列巨桉人工林(1—10 年)植物和土壤生物多样性演化特征,发现随林龄增长,土壤动物多样性呈现 4 年左右降低此后随林龄显著升高的变化趋势,这可能与巨桉人工林随林龄的增加林内和土壤环境的变化有关。前期研究还发现 4 年和 8 年可能是巨桉产生化感物质的重要时间节点,4 年时巨桉分泌化感物质较多,而进入到土壤中的化感物质可在土壤非生物因子作用下直接或通过影响土壤微生物群落结构等间接影响土壤动物群落^[9-13]。然而,轮伐期前(4 年左右)巨桉人工林土壤动物多样性降低的生态作用机制还不清楚。为此,本研究在前期研究基础上,以四川省丹棱县不同密度的轮伐期前(4 年)和轮伐期后(8 年)巨桉人工林为研究对象,通过手捡、Tullgren 及 Baermann 法分离土壤动物并分析其群落结构特征,旨在探究巨桉人工林土壤动物群落结构动态变化的生态影响因素,为巨桉人工林的科学经营和管理提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于四川省丹棱县杨场镇(102°57′—103°04′ E, 29°55′—29°59′ N),属于亚热带湿润季风气候,海拔 550—560 m,年均温 17.5 °C,年降雨量 1397 mm,相对湿度 82%;土壤为铁铝土性质老冲积黄壤。该地具有大面积处于不同生长阶段(1—10 年)和不同密度的巨桉人工林,各林龄林分面积均大于 10 hm²。研究地地势平坦(坡度小于 5°),通过向当地土地所有者咨询,研究地在巨桉造林前为耕作土壤,其耕作系统以及管理强度在当地具备典型性,耕地轮作制度在巨桉造林前持续多年,因此巨桉人工林样地的土壤基质和原耕作土壤类似;种植巨桉后未经过任何施肥或杂草处理,低林龄林分未经疏伐。该地巨桉人工林轮伐期为 5—7 年。

2 材料与方法

2.1 样地设置

2017 年,选择立地类型相同(轻中壤立地类型)的巨桉人工林,在原有密度基础上通过间伐形成不同密度(D1, 2000; D2, 1600; D3, 1200 株/hm²)的轮伐期前(4 年)和轮伐期后(8 年)巨桉人工林,每个密度设置 3 个重复样地,每个 1 hm²。2018 年 4 月,在每个样地设置一个 20 m×20 m 的标准地,样方边界离林缘不小于 10 m。采用 5 点法在各样地采取 0—15 cm 土样并混合,带回实验室用于测定土壤理化特性,样地基本概况如表 1。

表 1 4 年和 8 年不同密度巨桉人工林样地概况(平均值±标准误)

Table 1 Characteristics of study sites in 4-year old and 8-year old *Eucalyptus grandis* plantations with different densities

样地 Plot	初始密度 Initial density/ (株/hm ²)	处理密度 Treatment density/ (株/hm ²)	海拔 Altitude/m	含水量 Moisture content/%	土壤 pH Soil pH	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	有机碳 Soil organic carbon/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)
4D1	2000	2000	529±12	0.22±0.03ab	3.74±0.01c	1.16±0.06c	2.30±0.36c	0.77±0.02bc	0.22±0.04b
4D2	2000	1600	543±8	0.19±0.02ab	4.06±0.03b	1.34±0.04ab	2.67±0.66c	0.66±0.01d	0.31±0.03b
4D3	2000	1200	555±12	0.19±0.00ab	4.35±0.09a	1.30±0.04abc	4.33±0.94abc	0.83±0.04b	0.60±0.01a
8D1	2000	2000	538±6	0.24±0.01a	4.01±0.05b	1.33±0.04ab	5.45±0.83ab	0.75±0.03bc	0.26±0.07b
8D2	1600	1600	535±8	0.17±0.01b	3.76±0.05c	1.45±0.08a	3.66±0.63abc	0.71±0.01cd	0.24±0.01b
8D3	1400	1200	535±8	0.19±0.01ab	3.64±0.01c	1.23±0.05bc	7.36±0.67a	1.16±0.02a	0.23±0.01b

同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$); 4, 8: 林龄; D1: 密度 2000 株/hm²; D2: 密度 1600 株/hm²; D3: 密度 1200 株/hm²

2.2 样品采集与分离

2018 年 4 月,在每个标准地内随机设置 3 个样点,彼此间隔 10 m 以上,样点选择较为平坦、人为活动少且避开斜坡地、洼地、岩石、倒木和大树根。按凋落物层、0—5 cm、5—10 cm 和 10—15 cm 土壤层采集样品。大型土壤动物采样面积为 50 cm×50 cm(0.25 m²),用手拣法将收集到的土壤动物放入盛有浓度为 75% 的酒精容器中杀死,带回实验室在解剖镜下分类计数。采用湿漏斗法(Baermann 法)收集小型湿生土壤动物,采用干漏斗法(Tullgren 法)收集中小型节肢动物。在采样地各样点收集 10 cm×10 cm(0.01 m²)面积的枯落物,再用环刀($R=5\text{ cm}, v=100\text{ cm}^3$)自下往上顺次取土,每层取两个土样,用白布袋包好后装入黑布袋,带回实验室分别用 Tullgren 干漏斗和 Baermann 湿漏斗分离样品中的土壤动物,其中用于分离湿生的土壤样品采用“四分法”取四分之一进行分离^[14]。对分离出的土壤动物进行分类鉴定并计数。

土壤动物的分类鉴定,将捕获所得的土壤动物置于双目解剖镜(Leica, EZ4HD)下观察,主要采用《中国土壤动物检索图鉴》^[14]、《中国亚热带土壤动物》^[15]、《昆虫分类学》^[16]和《幼虫分类学》^[17]进行分类鉴定,除湿生土壤动物外,其余物种均鉴定至科水平。

2.3 数据处理与分析

土壤动物类群数量等级划分依据:个体数量大于捕获总量的 10.0% 以上者为优势类群(+++),占 1.0%—

10.0%者为常见类群(++),不足 1.0%者为稀有类群(+)

土壤动物功能类群划分依据:本研究将土壤动物功能类群划分为枯食性、捕食性、腐食性、杂食性、植食性、菌食性、尸食性。由于受限线虫在分类过程中并未鉴定至科属,本文参考林英华^[20-21]等将线虫统一划分为杂食性。

群落多样性分析:土壤动物多样性特征主要采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J)和 Simpson 优势度指数(C)来计算。式中: N_i 为第 i 类群的个体数; N 为群落中所有类群的个体数; $P_i = N_i/N$, S 为类群数。

Shannon-Wiener 多样性指数(H'):

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$$

Simpson 优势度指数(C):

$$C = \sum_{i=1}^n (P_i)^2$$

Pielou 均匀度指数(E):

$$E = H' / \ln S$$

Margalef 丰富度指数(D):

$$D = \ln S / \ln N$$

采用双因素方差分析(two-way ANOVA)检验林龄和造林密度及其交互作用对土壤动物个体数、类群数、密度和多样性指数的影响;采用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较不同密度林地土壤动物个体数、类群数、土壤动物密度和多样性的差异,采用最小显著差异法(LSD)进行两两比较,差异显著性水平为 $P < 0.05$;同一密度不同林龄样地土壤动物个体数、类群数、土壤动物密度和多样性指数差异显著性采用独立样本 t -测验(Independent-Sample t -test)。DCA 分析显示 4 个轴的梯度最大值小于 3,因此使用 RDA 分析更为合适(置换系数 499),用 Canoco for Windows 4.5 软件中的冗余分析(Redundancy analysis, RDA)对土壤动物主要类群和主要环境因子进行相关性分析。数据的整理与分析主要采用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件,采用 Origin 8.5 绘制图形。

3 结果与分析

3.1 土壤动物群落组成

本次实验共捕获土壤动物 2904 只,隶属于 4 门 8 纲 22 目 70 科。其中大型土壤动物 541 只,隶属于 2 门 7 纲 15 目 30 科(表 2),优势类群为蚁科和康叭科,占大型动物总捕获量的 38.08%;常见类群为跳虫科、鼠妇虫科、疣蚧科、蜚蠊科等,占大型总捕获量的 57.49%,其余 4.44%为稀有类群。共捕获中小型土壤动物 2363 只,隶属于 4 门 8 纲 16 目 54 科(表 3),以大翼甲螨科、等节蚧科和线虫为优势类群,占中小型动物总捕获量的 48.07%;以蚁科、派盾螨科、美绥螨科、康叭科、棘蚧科等为常见类群,占中小型土壤动物捕获量的 41.64%;稀有类群占 10.29%。不同密度 4 年和 8 年生巨桉人工林土壤动物群落组成不同。在 4 年生巨桉人工林 D1 密度,大型土壤动物以蚁科、跳虫科、卵形蛛科、康叭科为优势类群(59.26%),中小型以线虫、寄螨科、等节蚧科、大翼甲螨科为优势类群(63.01%);D2 大型以康叭科、蚁科、疣蚧科为优势类群(46.74%),中小型以等节蚧科和线虫为优势类群(40.84%);D3 大型以蚁科和鼠妇虫科为优势类群(39.42%),中小型土壤动物以线虫、等节蚧科、大翼甲螨科为优势类群(52.46%)。8 年生巨桉人工林 D1 密度大型土壤动物以疣蚧科、蚁科、鼠妇虫科为优势类群(42.42%),中小型以线虫、派盾螨科、大翼甲螨科为优势类群(66.22%);D2 大型土壤动物以蚁科和康叭科为优势类群(46.07%),中小型以线虫、派盾螨科、等节蚧科、大翼甲螨科为优势类群(57.34%);D3 大型土壤动物以康叭科、跳虫科、蚁科为优势类群(46.07%),中小型以等节蚧科、蚁科、线虫为优势类群(50.23%)(表 2, 3)。

表 2 4 年和 8 年巨桉人工林不同密度大型土壤动物群落组成

Table 2 Community composition of macro soil fauna in 4-year old and 8-year old *Eucalyptus grandis* plantations with different densities

类群 Taxa	4D1			4D2			4D3			8D1			8D2			8D3			合计			功能群 Functional group		
	个体数 /个	百分比 /%	个体数/个	百分比/%	个体数/个	百分比/%	个体数/个	百分比/%	个体数/个	百分比/%	个体数/个	百分比/%	个体数/个	百分比/%	个体数/个	百分比/%	个体数/个	百分比/%	个体数/个	百分比/%	Abundance			
栲足蛛科 Genidae	—	—	—	—	—	—	1	1.52	3	3.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	0.74	+	Pr
正蚓科 Lumbricida	2	3.70	—	—	—	—	2	3.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11	2.03	++	S
蛭总科 Tetrigoidea	1	1.85	—	—	—	—	2	3.03	2	2.25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11	2.03	++	Ph
原缺爪科 Projapygidae	—	—	—	—	—	—	—	—	2	2.25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	0.37	+	O
疣跳科 Neanuridae	3	5.56	14	15.22	3	2.88	7	10.61	2	2.25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	35	6.47	++	O
蚁甲科 Pselaphidae	1	1.85	3	3.26	2	1.92	2	3.03	1	1.12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11	2.03	++	D
隐翅甲科 Staphylinidae	1	1.85	6	6.52	2	1.92	4	6.06	3	3.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19	3.51	++	S
蚁科 Formicidae	7	12.96	18	19.57	26	25.00	12	18.18	24	26.97	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	143	26.43	+++	O
草蚊科 Mycetophilidae	3	5.56	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	0.55	+	F
螳螂科 Gorrillidae	—	—	2	2.17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	0.74	+	Ph
蟹科 Termitidae	3	5.56	3	3.26	—	—	3	4.55	8	8.99	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20	3.70	++	D
跳蛛科 Salticidae	—	—	1	1.09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0.18	+	Pr
跳虫科 Poduridae	10	18.52	8	8.70	6	5.77	4	6.06	2	2.25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	47	8.69	++	O
苔甲科 Scydmaenidae	—	—	3	3.26	2	1.92	3	4.55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8	1.48	++	S
鼠妇虫科 Procellionidae	—	—	7	7.61	15	14.42	9	13.64	7	7.87	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	45	8.32	++	D
红蟻科 Pyrrhocoridae	—	—	—	—	—	—	—	—	2	2.25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	0.37	+	Ph
球蛛科 Theridiidae	1	1.85	2	2.17	1	0.96	—	—	1	1.12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8	1.48	++	Pr
奇蟻科 Entocolephalidae	—	—	1	1.09	2	1.92	1	1.52	1	1.12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	1.11	++	Ph
拟步甲科 Tenebrionidae	2	3.70	—	—	1	0.96	1	1.52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	0.74	+	Ph
皿蛛科 Linyphiidae	—	—	—	—	1	0.96	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0.18	+	Pr
卵形蛛科 Oonopidae	8	14.81	9	9.78	10	9.62	5	7.58	3	3.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	35	6.47	++	Pr
漏斗蛛科 Agelenidae	—	—	—	—	1	0.96	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0.18	+	Pr
康叭科 Campodeidae	7	12.96	11	11.96	10	9.62	1	1.52	17	19.10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	63	11.65	+++	O
奇蟻科 Parasitidae	—	—	—	—	2	1.92	1	1.52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7	1.29	++	S
肥螋科 Anisolabididae	—	—	1	1.09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0.18	+	O
蜚蠊科 Blattidae	2	3.70	2	2.17	1	0.96	4	6.06	5	5.62	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20	3.70	++	O
地蜈蚣科 Geophilidae	1	1.85	—	—	2	1.92	1	1.52	4	4.49	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11	2.03	++	Pr
粗脉毛蚊科 Pachyneuridae	1	1.85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0.18	+	S
潮虫科 Oniscidae	1	1.85	1	1.09	5	4.81	2	3.03	2	2.25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11	2.03	++	D
步甲科 Carabidae	—	—	—	—	5	4.81	1	1.52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	1.11	++	Pr
总个体数 Total individuals	54	—	92	—	104	—	66	—	89	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	541	—	—	—
总类群数 Total group number	17	—	17	—	21	—	20	—	18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16	—	—	—

—表示无或未采集到, ++为优势类群, +++为优势类群, +为常见类群, +为稀有类群; D: 枯食性 Debris-feeder's; S: 腐食性 Saprozoic; Pr: 捕食性 Predators; O: 杂食性 Omnivores; Ph: 植食性 Phytophage

表 3 4 年和 8 年巨桉人工林不同密度中小型土壤动物群落组成
Table 3 Community Composition of Meso or micro Soil Fauna in 4-year old and 8-year old *Eucalyptus grandis* plantations with different densities

类群 Taxa	4D1			4D2			4D3			8D1			8D2			8D3			合计			功能群 Functional group			
	个体数 Individual /个	百分比 Percentage /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个		百分比 /%	Abundance	
足角螨科 Podocnidae	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	S
沼嗜科 Elipsocidae	2	0.43	—	—	1	0.29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	O
长须螨科 Stigmaeidae	—	—	5	1.91	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	S
长角长螨科 Orcheselidae	23	4.95	2	0.76	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	++	F
葬甲科 Silphidae	2	0.43	2	0.76	3	0.87	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Ca
圆虱科 Sminthurinae	4	0.86	3	1.15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Ph
原铗叭科 Projapygidae	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	O
疣蚰科 Neanuridae	11	2.37	—	—	5	1.45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	++	O
幽灵蛛科 Pholcidae	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Pr
苔甲科 Seydinaeidae	—	—	1	0.38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	S
隐翅甲科 Staphylinidae	—	—	2	0.76	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	S
蚁科 Formicidae	12	2.58	23	8.78	16	4.64	6	4.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	++	O
蚁甲科 Pselaphidae	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Ph
蕈蚊科 Mycetophilidae	—	—	—	—	4	1.16	1	0.68	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	S
线蚓科 Enchytraeidae	7	1.51	10	3.82	33	9.57	14	9.46	6	4.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	++	Ph
线虫 Nemata	55	11.83	73	27.86	67	19.42	42	28.38	56	11.11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+++	O
吸螨科 Bdellidae	—	—	2	0.76	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	S
跳虫科 Poduridae	8	1.72	—	—	1	0.29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	O
始蛭科 Protentomidae	—	—	—	—	1	0.29	3	2.03	2	0.40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	F
肉食螨科 Cheyletridae	—	—	1	0.38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	S
绒螨科 Trombididae	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	S
球蛛科 Theridiidae	—	—	1	0.38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Pr
球角蚰科 Hypogastruridae	—	—	2	0.76	3	0.87	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	F
奇蛭科 Entococephalidae	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Ph
平腹蛛科 Gnaphosidae	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Pr
派盾螨科 Parholaspidae	35	7.53	16	6.11	26	7.54	24	16.22	60	11.90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	++	S
美绥螨科 Ameroseiidae	9	1.94	6	2.29	4	1.16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	++	S
罗甲螨科 Lohmannidae	—	—	2	0.76	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	++	S
轮虫 Rotifera	2	0.43	3	1.15	4	1.16	2	1.35	6	1.19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	++	Pr

续表

类群 Taxa	4D1			4D2			4D3			8D1			8D2			8D3			合计			功能群 Functional group		
	个体数 Individual /个	百分比 Percentage /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个	百分比 /%	个体数 /个		百分比 /%	Abundance
卵形蛛科 Oonopidae	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Pr
丽甲螨科 Liacaridae	—	—	2	0.76	10	2.90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	++	S
厉螨科 Laeciapidae	3	0.65	2	0.76	1	0.29	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Pr
鞭甲螨科 Nothridae	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	S
枯叶蛾科 Lasiocampidae	—	—	1	0.38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Ph
康叭科 Campodeidae	3	0.65	11	4.20	7	2.03	1	0.68	1	0.68	7	1.39	1	0.94	6	0.94	35	1.48	35	1.48	35	1.48	++	O
卷叶蛛科 Dictynidae	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Pr
卷叶蛾科 Tortricidae	—	—	1	0.38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Ph
卷甲螨科 Phthiracaridae	9	1.94	19	7.25	9	2.61	5	3.38	29	5.75	31	4.85	102	4.32	102	4.32	56	2.37	56	2.37	56	2.37	++	S
尖眼覃蚊科 Sciaridae	2	0.43	3	1.15	3	0.87	1	0.68	4	0.79	9	1.41	22	0.93	22	0.93	5	0.21	5	0.21	5	0.21	+	F
寄螨科 Parasitidae	57	12.26	3	1.15	16	4.64	1	0.68	17	3.37	20	3.13	114	4.82	114	4.82	56	2.37	56	2.37	56	2.37	++	S
棘跳科 Onychiuridae	18	3.87	7	2.67	4	1.16	1	0.68	5	0.99	21	3.29	56	2.37	56	2.37	5	0.21	5	0.21	5	0.21	++	Ph
管蓟马科 Phlaeothripidae	—	—	2	0.76	1	0.29	—	—	2	0.40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Ph
管巢蛛科 Clubionidae	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Pr
古甲螨科 Palaeacaridae	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	S
缝甲螨科 Hypochthoniidae	2	0.43	2	0.76	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	S
地蜈蚣科 Geophilidae	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Pr
土伪蝎科 Clithoniidae	2	0.43	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Pr
等节螺科 Isotomidae	64	13.76	34	12.98	79	22.90	12	8.11	51	10.12	119	18.62	359	15.19	359	15.19	3	0.13	3	0.13	3	0.13	+++	F
大翼甲螨科 Galumnidae	117	25.16	18	6.87	35	10.14	32	21.62	122	24.21	55	8.61	379	16.04	379	16.04	3	0.13	3	0.13	3	0.13	+++	S
虫齿科 Psocidae	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	O
赤螨科 Erythraeidae	3	0.65	—	—	1	0.29	—	—	8	1.59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	Pr
半虫齿科 Hemipsocidae	1	0.22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	O
奥甲螨科 Oppiidae	6	1.29	2	0.76	4	1.16	—	—	4	0.79	2	0.31	18	0.76	18	0.76	—	—	—	—	—	—	+	S
矮蒲螨科 Pygmephoridae	8	1.72	1	0.38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	S
总个体数 Total individuals	465		262		345		148		504		639		2363		2363		54		54		54			
总类群数 Total group number	26		32		27		16		40		34		54		54		54		54		54			

—表示无或未采集到, +++为优势类群, ++为常见类群, +为稀有类群; F: 菌食性 Fungivorous forms; S: 腐食性 Saprozoic; Pr: 捕食性 Predators; O: 杂食性 Omnivores; Ph: 植食性 Phytophage; Ca: 尸食性 Cadavericoles

3.2 土壤动物群落分布特征

双因素方差分析显示(表4),造林密度对大型土壤动物个体数具有显著影响,对中小型土壤动物类群数有显著影响,同时林龄和密度对中小型土壤动物具有显著的交互作用。林龄和林分密度对大型土壤动物密度有显著影响,但对中小型土壤动物密度无显著影响,二者交互作用对土壤动物密度无显著影响。大型土壤动物类群数及中小型土壤动物个体数、类群数在4年不同密度间均无显著差异;8年生巨桉人工林大型土壤动物个体数及类群数在不同密度无显著差异,中小型土壤动物个体数及类群数随密度降低都显著增大。4年巨桉人工林中小型土壤动物类群数在D1密度显著高于8年,个体数在D1密度以4年高于8年,但其余密度不同林龄之间土壤动物个体数及类群数均表现为8年高于4年(图1)。

大型土壤动物密度在不同土壤层次随林分密度无显著差异。4年生凋落物层中小型土壤动物密度随林分密度降低先显著降低后有所增加;5—10 cm层显著增加,其余层次无显著变化;8年生林地中小型土壤动物密度在凋落物层、0—5及5—10 cm层随林分密度降低均显著增加。在凋落物层,8年巨桉人工林中小型土壤动物密度在D3密度显著高于4年,在其余不同土壤层次,相同密度不同林龄之间土壤动物密度均无显著差异(表5)。

表4 林龄及造林密度对土壤动物作用的双因素方差分析

Table 4 Two-way ANOVA of variance of forest age and afforestation density on soil fauna

土壤动物 Soil fauna	因子 Factor	df	个体数 Individual F	类群数 Number of group F	C	H'	E	D
大型 Macro	林龄	1	0.62	0.19	1.56	0.76	1.07	1.10
	密度	2	3.96*	0.79	1.40	0.09	4.39*	4.44*
	林龄×密度	2	0.34	0.29	1.71	0.90	0.88	0.57
中小型 Meso or micro	林龄	1	0.90	1.64	0.02	0.01	0.02	0.57
	密度	2	1.95	12.69**	3.05	6.01*	0.11	7.46**
	林龄×密度	2	6.42*	7.70**	1.36	2.58	0.78	2.22

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; H': 多样性指数 Shannon-Wiener index; C: 优势度指数 Simpson index; E: 均匀度指数 Pielou index; D: 丰富度指数 Margalef index

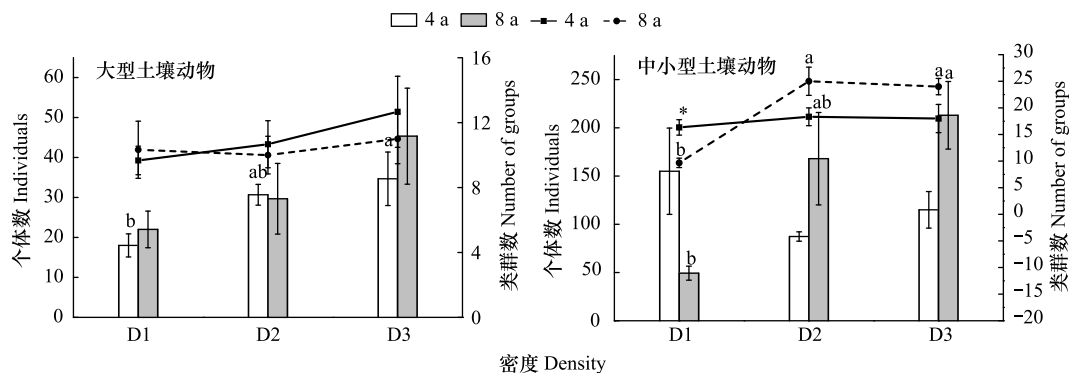


图1 4年和8年不同密度巨桉人工林土壤动物个体数和类群数

Fig. 1 The individual number and group number of soil fauna in 4-year old and 8-year old *Eucalyptus grandis* plantations with different densities

柱状图代表个体数,折线图代表类群数; *表示同一密度不同林龄间差异显著($P < 0.05$); 不同小写字母表示同一林龄不同密度间显著差异($P < 0.05$)

表 5 轮伐期前后不同密度巨桉人工林凋落物和各土层土壤动物密度

土壤动物 Soil fauna	土层 Soil layer	4D1	4D2	4D3	8D1	8D2	8D3
		密度 Density/(株/hm ²)					
大型 Macro	凋落物层	69.33±8.74	109.33±13.53	125.33±33.33	84±18.33	110.67±34.97	161.33±43.72
	0—5 cm	25.33±5.33	41.33±2.67	40±6.11	32±4	33.33±6.67	44±8.33
中小型 Meso or micro	凋落物层	12333.33±4159.06a	2733.33±240.37b	4066.67±592.55ab*	1266.67±376.59b	11866.67±4696.57a	13733.33±3152.42a
	0—5 cm	11500±1500	24166.67±1424.00	26833.33±9858.72	14000±2020.73b	17166.67±2848.00ab	25000±2020.73a
	5—10 cm	2833.33±600.93b	3833.33±333.33b	8333.33±927.96a	2833.33±726.48c	5166.67±440.96b	8000±763.76a

不同小写字母表示同一林龄不同密度间显著差异($P<0.05$); *表示同一密度不同林龄间差异显著

3.3 土壤动物群落多样性指数

双因素方差分析显示,林分密度对大型土壤动物均匀度指数和 Margalef 丰富度指数有显著影响;对中小型土壤动物 Shannon-wiener 指数及 Margalef 丰富度指数有显著影响,林龄及林龄与密度的交互作用不显著(表 4)。

4 年生巨桉人工林大型土壤动物 Margalef 丰富度指数随密度降低显著增加,其他多样性指数及中小型土壤动物多样性指数随密度降低无显著变化;8 年巨桉人工林大型土壤动物多样性指数随密度降低无显著变化,中小型土壤动物 Shannon-wiener 指数及 Margalef 丰富度指数随密度降低显著升高。4 年巨桉人工林大型土壤动物 Pielou 指数在 D3 密度显著高于 8 年,4 年巨桉人工林中小型土壤动物 Shannon-wiener 指数在 D1 密度显著高于 8 年,在其他密度则无显著变化(表 6)。

表 6 4 年和 8 年不同密度人工林土壤动物多样性指数

Table 6 Diversity features of soil fauna in 4-year old and 8-year old *Eucalyptus grandis* plantations with different densities

土壤动物 Soil fauna	多样性指数 Diversity features	4D1	4D2	4D3	8D1	8D2	8D3
		密度 Density/(株/hm ²)					
大型 Macro	<i>C</i>	0.14±0.03	0.15±0.03	0.15±0.01	0.22±0.01	0.16±0.03	0.13±0.02
	<i>H'</i>	2.23±0.19	2.12±0.15	2.09±0.08	1.91±0.07	2.04±0.19	2.17±0.19
	<i>E</i>	0.63±0.03	0.62±0.05	0.73±0.01*	0.51±0.02	0.63±0.09	0.71±0.06
	<i>D</i>	13.20±1.74a	12.71±1.19a	7.44±0.98b	18.25±3.92	12.47±3.77	9.08±1.73
中小型 Meso or micro	<i>C</i>	0.15±0.00	0.13±0.02	0.13±0.02	0.18±0.02	0.12±0.03	0.11±0.01
	<i>H'</i>	2.25±0.05*	2.42±0.10	2.35±0.16	1.91±0.10b	2.57±0.20a	2.57±0.12a
	<i>E</i>	0.81±0.01	0.84±0.02	0.82±0.03	0.85±0.05	0.80±0.04	0.81±0.03
	<i>D</i>	3.08±0.13	3.88±0.35	3.61±0.55	2.25±0.29b	4.83±0.75a	4.33±0.41a

*表示同一密度不同林龄间差异显著($P<0.05$); 不同小写字母表示同一林龄不同密度间显著差异($P<0.05$)

3.4 土壤动物功能类群特征

研究区域土壤动物营养功能群范围较广,其中大型土壤动物以杂食性为主,占 42.42%—75.00%,其次是枯食性(7.35%—21.21%),捕食性(4.41%—19.23%),腐食性(3.45%—15.15%),植食性(4.60%—9.09%)。中小型土壤动物以腐食性为主,占 31.30%—52.78%,其次是杂食性(19.78%—40.84%),菌食性(11.03%—24.93%),植食性(4.56%—12.46%),捕食性(0—4.56%),尸食性(0—0.87%)(图 2)。

3.5 土壤动物与土壤环境因子 RDA 分析

将 4 年和 8 年生不同密度巨桉人工林的主要土壤动物类群与环境因子进行 RDA 排序。在 4 年巨桉人工林,土壤含水量与第一排序轴显著正相关,土壤 pH、林分密度与第一排序轴呈极显著负相关(图 3)。前两个排序轴对物种数据的累计贡献率达 54.1%,表明前两个排序轴可以在一定程度上反映不同土壤动物类群与环境因子的关系。8 年生巨桉人工林,第一排序轴与林分密度、含水量、土壤 pH 均呈极显著负相关,与土壤全 N 显著正相关($P<0.05$),第二排序轴与环境因子无显著相关性,前两个排序轴对物种数据的累积贡献率是 67.9%,表明前两个排序轴可以在一定程度上反映不同土壤动物类群与环境因子的关系。在 RDA 排序图中,

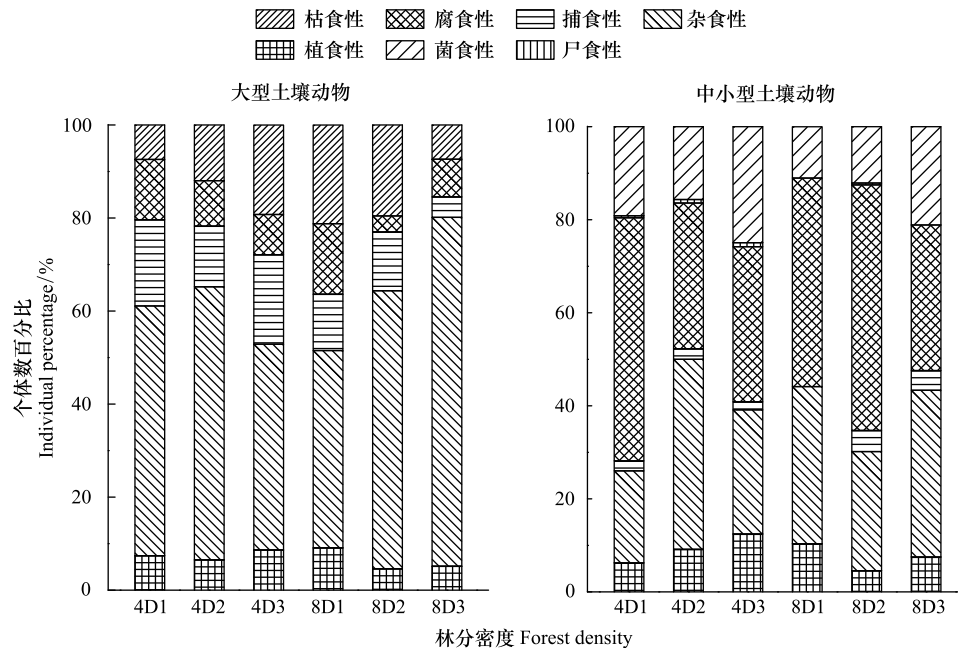


图 2 4 年和 8 年不同密度巨桉人工林土壤动物功能类群

Fig.2 Functional group of soil fauna in 4-year old and 8-year old *Eucalyptus grandis* plantations with different densities

物种与环境因子线夹角的余弦值可以表征二者的相关性,4 年生巨桉人工林的林分密度、土壤 pH、含水量对奥甲螨科、长角长蚋科、寄螨科、隐翅甲科、丽甲螨科等影响较大;8 年生巨桉人工林,密度、土壤含水量、pH 对线虫、蜚蠊科、康叭科、厉螨科、棘蚋科等土壤动物影响较大。

表 7 环境变量与排序轴的相关性

Table 7 Correlation of environmental variables with axes

4 年环境变量 Environment variables of 4-year old	排序轴 Ordination axes		8 年环境变量 Environment variables of 8-year old	排序轴 Ordination axes	
	第一排序轴 Axis1	第二排序轴 Axis2		第一排序轴 Axis1	第二排序轴 Axis2
容重 Bulk density	-0.4398	-0.2860	容重 Bulk density	-0.2310	0.4052
含水量 Moisture	0.6550 *	0.2345	含水量 Moisture	-0.7608 **	-0.1065
土壤 pH	-0.7464 **	0.0354	土壤 pH	-0.9583 **	-0.1515
密度 Density	0.7493 **	0.0981	密度 Density	-0.9736 **	-0.0176
有机碳 Soil organic carbon	-0.4528	-0.2892	有机碳 Soil organic carbon	0.3878	0.2873
全 N Total nitrogen	0.1276	-0.0981	全 N Total nitrogen	0.7292 *	0.0212
全 P Total phosphorus	-0.4976	0.0555	全 P Total phosphorus	-0.2321	0.1951

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

4 讨论

一般来说,土壤生物的动态变化应该取决于其所需资源的可利用性^[18]。巨桉在造林初期,草本植物的迅速发展形成了巨桉人工林的最初净生产力,此后随着林龄的增长,林下植物的生长与死亡成为土壤中 C、N 和其他营养成分输入的重要来源^[18-19]。因此,由植物提供的可利用性资源决定着土壤的生物多样性。前期研究发现,巨桉人工林植物多样性在 1—3 年升高,4 年左右降低此后随林龄增长而升高;土壤微生物数量和土壤动物多样性呈现 1—4 年降低,此后随林龄显著升高的变化趋势^[9-10]。本研究中,轮伐期前(4 年)后(8 年)巨桉人工林共捕获土壤动物 2904 只,分属 4 门 8 纲 22 目 70 科。土壤动物群落特征随林龄和密度具有一定差异。

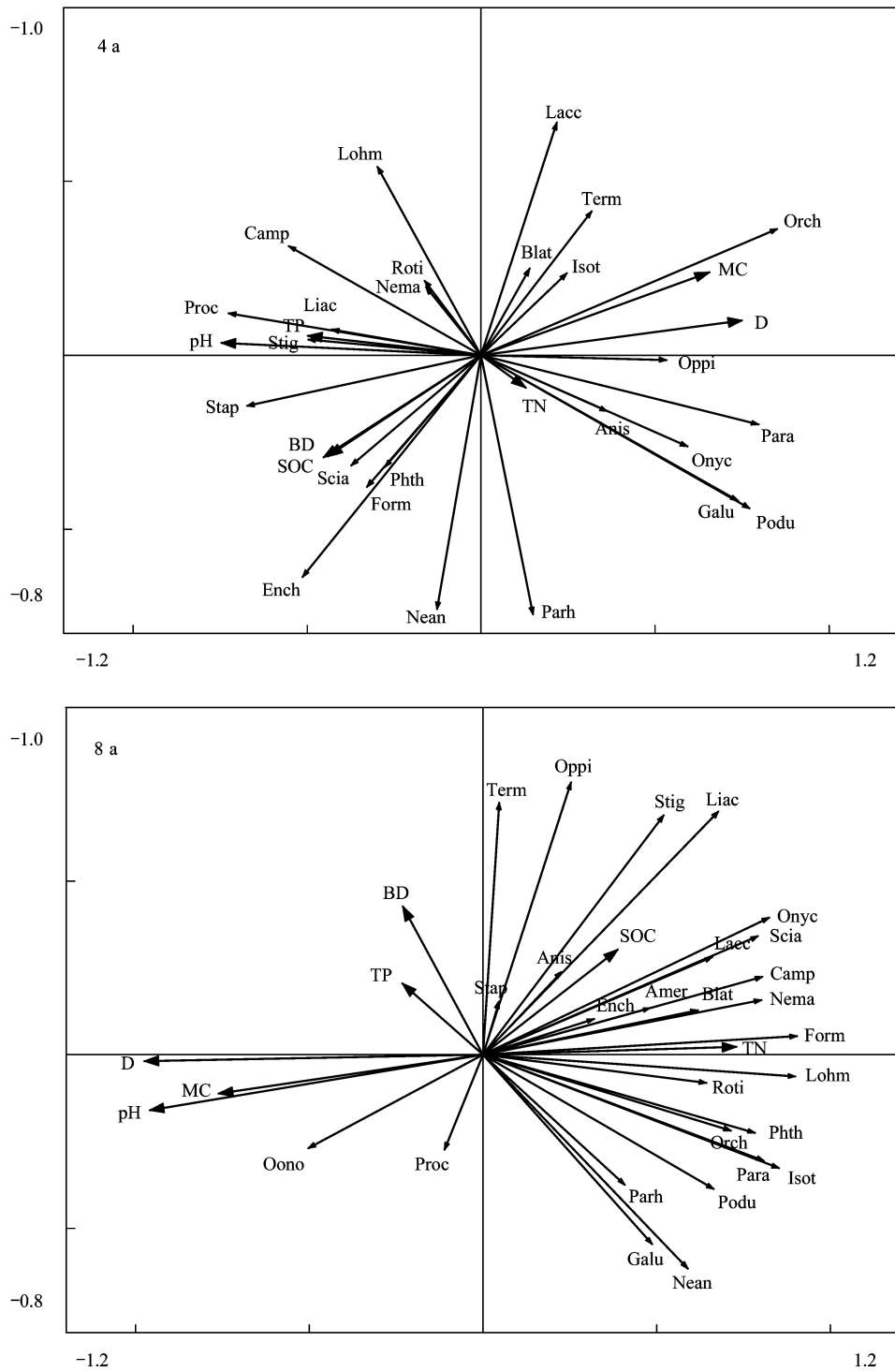


图 3 4 年和 8 年不同密度巨桉人工林土壤动物与环境因子 RDA 二维排序图

Fig.3 A two-dimensional graph of RDA ordination for soil fauna and the environmental factors in 4-year old and 8-year old *Eucalyptus grandis* plantations with different densities

D: 密度 Density; MC: 含水量 Moisture content; pH: 土壤 pH; BD: 容重 Bulk density; TP: 全磷 Total phosphorus; SOC: 有机碳 Soil organic carbon; TN: 全氮 Total nitrogen; Stig: 长须螨科 Stigmaeidae; Orch: 长角长姚科 Orchesellidae; Nean: 疣蚰科 Neanuridae; Stap: 隐翅甲科 Staphylinidae; Form: 蚁科 Formicidae; Ench: 线蚓科 Enchyraeidae; Nema: 线虫 Nemata; Term: 蟹科 Termitidae; Podu: 跳虫科 Poduridae; Proc: 鼠妇虫科 Procellionidae; Parh: 派盾螨科 Parholaspididae; Amer: 美绥螨科 Ameroseiidae; Lohm: 罗甲螨科 Lohmannidae; Roti: 轮虫 Rotifera; Oono: 卵形蛛科 Oonopidae; Liac: 丽甲螨科 Liacaridae; Lacc: 厉螨科 Lacclapidae; Camp: 康叭科 Campodeidae; Phth: 卷甲螨科 Phthiracaridae; Scia: 尖眼蕈蚊科 Sciaridae; Para: 寄螨科 Parasitidae; Onyc: 棘蚰科 Onychiuridae; Anis: 肥螞科 Anisolabidae; Blat: 蜚蠊科 Blattidae; Isot: 等节蚰科 Isotomidae; Galu: 大翼甲螨科 Galummidae; Oppi: 奥甲螨科 Oppiidae

总体来看,巨桉人工林造林密度显著影响了大型土壤动物个体数和土壤动物多样性指数,林龄显著影响了大型土壤动物密度,且这两个因素具有一定的交互作用;8年生林地土壤动物个体及类群数显著高于4年。在土壤生态系统中,土壤动物与微生物一起在非生物因子的共同作用下影响地上植物的生长^[20]。而植被的组成及其结构变化常常决定着生态系统中其他成分的组成和结构特征^[21]。大量研究表明,土壤动物群落结构与植被状况密切相关,植物群落变化过程中土壤动物群落也发生着改变。因此,土壤动物群落组成和结构对生态系统植被结构和演替具有重要的指示作用^[1-2]。在人工林生态系统中,由于生长阶段或林分密度的不同,改变了系统的植被组成结构,相应地引起林内微环境的变化,包括光照、空气湿度、土壤含水量、地温的日变化和空间分布规律,以及降水的再分配等^[21]。张柳桦等研究发现林分密度对桉树的生物量影响显著^[22]。林分密度的降低使巨桉人工林林内光照增强,进而导致土壤温度的升高,加快了土壤有机质的分解,使土壤速效养分增加,从而提高了人工林土壤肥力^[22-24]。土壤环境因子的变化引起土壤动物个体数及类群分布差异,决定了林分密度的变化也会影响到土壤生态系统中土壤动物的群落结构组成^[25-26]。本研究在 D1 密度中小型土壤动物类群数表现为4年显著高于8年,个体数在 D1 密度为4年高于8年,但其余密度类群数及个体数均以8年较高,且总体来看8年巨桉人工林土壤动物个体数及类群数较4年较高。巨桉在轮伐期前4年左右生长迅速,林分对土壤养分和水分竞争较大,林下植被较少,但巨桉的凋落物量较大,此时巨桉可能通过挥发、雨雾淋溶、凋落物分解和此时较为旺盛的根分泌释放较多的化感物质,这些都会对土壤动物有一定的毒害作用^[1,12,27],这些因素都会导致4年时林分群落结构不稳定从而使得土壤动物群落尤其是中小型土壤动物个体、类群及多样性等方面波动较为明显;而随着林龄的增长,林下植被群落结构逐渐稳定,由于巨桉树皮和叶片凋落使得林分此时的光照水平得到改善,促进了土壤微生物群落的发展,加快了土壤有机质分解,这些都有利于提高土壤动物群落的多样性和稳定性^[9,28-31]。

本研究中,轮伐期前后不同密度巨桉人工林环境因子与土壤动物优势类群的相关性分析显示,轮伐期前(4年)林分密度、土壤含水量和 pH 值为对土壤动物的主要环境作用因子,奥甲螨科、长角长跗科、寄螨科、隐翅甲科、丽甲螨科等受影响较大;轮伐期后(8年)林分密度、土壤含水量和 pH 值、土壤 N 含量是主要作用因子,对线虫、蜚蠊科、康叭科、厉螨科、棘跗科等土壤动物影响较大。说明轮伐期前这些环境因子主要对中小型腐食性土壤动物影响较大,而轮伐期后这些环境因子主要影响杂食性土壤动物,在 8D3 样地中,由于其林分密度最低,有机质、全氮含量均较高,该地土壤动物个体数、类群数也高于其他样地,这可能是较低的密度使林内光照增强导致土温升高,促进了土壤微生物群落发展,加速了有机质的分解,有利于中小型杂食性、腐食性和菌食性土壤动物的生存^[27],增加了一些对环境敏感的稀有物种的生存能力,出现了诸如原铗叭科、奇蝽科、管巢蛛科、足角螨科等的稀有物种。研究表明较低林分密度更有利于保持土壤动物群落多样性和稳定性,而轮伐期前后土壤动物均受林分密度、土壤含水量和 pH 影响,说明林分密度的改变使植被群落结构发生变化从而对土壤动物群落结构有显著影响。

土壤动物多样性反映土壤中食物资源和生境的多样性,多样性指数比个体数及类群数更能体现群落的结构,在理论和实践中具有重要意义^[32-34]。不同密度4年和8年生巨桉人工林土壤动物多样性具有显著差异,这种差异与生境的异质性紧密相关。一般来说,生境的空间异质性越高,可提供的小生境及小气候条件越丰富,也就意味着更高的生物多样性^[35]。本研究中双因素方差分析显示林分密度对大型土壤动物和中小型土壤动物都有显著影响,并且进一步 LSD 多重比较表明4年生巨桉人工林大型土壤动物 Margalef 丰富度指数随密度降低显著增加;8年巨桉人工林中小型土壤动物 Shannon-wiener 指数及 Margalef 丰富度指数随密度降低显著升高。随着林分密度的降低,土壤温度升高,土壤微生物数量和活性有所升高,能为不同功能群的土壤动物提供多样化的栖息环境和食物源,因而较低林分密度的巨桉人工林土壤动物多样性指数较高。

营养结构是物种群落类群间和物种间相互关系的外在体现,其结构决定着群落功能的发挥^[36]。本研究中大型土壤动物以杂食性为主,枯食性和捕食性次之,中小型土壤动物以腐食性为主,杂食性和菌食性次之。一般认为中小型土壤动物对环境变化的反应较为敏感,大型土壤动物移动力较强,营养结构更为复杂,受环境

因子影响反应不如中小型土壤动物敏感^[9,37-39]。本研究中,中小型土壤动物以大翼甲螨科、等节蛭科和线虫为优势类群,占中小型动物总捕获量的 48.07%。大翼甲螨科是甲螨亚目常见的腐食性土壤动物,以取食菌类、藻类、腐烂的植物为生,对有机质的分解具有重要作用。等节蛭科为弹尾目菌食性昆虫,通称跳虫,主要生活在有机质较高的土壤表层,多以真菌为生,是生态系统物质分解与转化的再加工者。土壤线虫种类丰富,数量繁多,分布广泛,是土壤动物中十分重要的杂食性类群,它们在土壤生态系统中占有多个营养级,与其他土壤生物形成复杂的食物链网,在维持生态系统稳定、促进物质循环和能量流动方面起着不容忽视的作用^[1,40]。杂食性和腐食性功能群的生态功能是分解枯落物、促进土壤团粒结构的形成、取食微生物以调控整个生态系统物质循环和能量流动的速率等,杂食性土壤动物生态位广泛,生存适应能力强,腐食性功能群常被作为土壤肥力高低的指标之一^[1,41-42]。

5 结论

本研究中,不同密度轮伐期前后即 4 年和 8 年生巨桉人工林土壤动物群落特征随林龄和林分密度的改变具有差异。轮伐期后较轮伐期前土壤动物个体数、类群数及多样性指数提高,土壤动物营养结构更为合理,这与轮伐期前后巨桉的生长及林内环境特征如土壤含水量、pH 和土壤 N 含量等有关,轮伐期前后巨桉人工林土壤动物以杂食性和腐食性为主。随着林分密度的降低,土壤动物群落多样性和丰富度均显著提高。建议适当延长巨桉人工林轮伐期并降低林分密度可以改善土壤动物生境、多样性及群落结构的稳定性,将有助于巨桉人工林的科学经营和管理。

参考文献 (References):

- [1] 张健, 杨万勤. 短轮伐期巨桉人工林生态系统. 成都: 四川科学技术出版社, 2008.
- [2] 谭波, 吴福忠, 杨万勤, 张健, 徐振锋, 刘洋, 苟小林. 不同林龄马尾松人工林土壤节肢动物群落结构. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1118-1124.
- [3] 刘世荣, 杨子静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营. 生态学报, 2018, 38(1): 1-10.
- [4] 周泓杨, 张丹桔, 张捷, 赵燕波, 赵波, 魏大平, 张健. 马尾松人工林郁闭度对大型土壤动物功能群的影响. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1860-1868.
- [5] 王振海, 殷秀琴, 蒋云峰. 长白山苔原带土壤动物群落结构及多样性. 生态学报, 2014, 34(2): 755-765.
- [6] 宋理洪, 王可洪, 闫修民. 基于 Meta 分析的中国西南喀斯特地区土壤动物群落特征研究. 生态学报, 2018, 38(3): 984-990.
- [7] 邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 王晓丽, 傅声雷. 土壤动物多样性及其生态功能. 生态学报, 2015, 35(20): 6614-6625.
- [8] 黄玉梅, 张健, 杨万勤. 巨桉人工林中小型土壤动物类群分布规律. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2327-2331.
- [9] 张丹桔, 张健, 杨万勤, 吴福忠, 黄玉梅, 张志伟, 王旭, 王小强, 朱琳. 一个年龄序列巨桉人工林植物和土壤生物多样性. 生态学报, 2013, 33(13): 3947-3962.
- [10] 余俊里, 张健, 汤智群, 王春子, 钱丽芝, 张丹桔. 一个年龄序列巨桉人工林土壤对赤子爱胜蚓生长和生理指标的影响. 生态学杂志, 2017, 36(1): 124-131.
- [11] Zhang D J, Zhang J, Yang W Q, Wu F Z. Effects of afforestation with *Eucalyptus grandis* on soil physicochemical and microbiological properties. Soil Research, 2012, 50(2): 167-176.
- [12] Tang Zhiqun, Zhang Jian, Yu Junli, Wang Chunzi, Zhang Danju. Allelopathic effects of volatile organic compounds from *Eucalyptus grandis* rhizosphere soil on *Eisenia fetida* assessed using avoidance bioassays, enzyme activity, and comet assays. Chemosphere, 2017(173), 307-317.
- [13] Zhang D J, Zhang J, Yang W Q, Wu F Z, Huang Y M. Plant and soil seed bank diversity across a range of ages of *Eucalyptus grandis* plantations afforested on arable lands. Plant and Soil, 2014, 376(1/2): 307-325.
- [14] 尹文英. 中国土壤动物. 北京: 科学出版社, 2000.
- [15] 尹文英. 中国亚热带土壤动物. 北京: 科学出版社, 1992.
- [16] 钟觉民. 幼虫分类学. 北京: 农业出版社, 1990.
- [17] 袁锋, 张雅林, 冯纪年, 花保祯. 昆虫分类学(第二版). 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [18] Cao Y S, Fu S L, Zou X M, Cao H L, Shao Y H, Zhou L X. Soil microbial community composition under *Eucalyptus* plantations of different age in

- subtropical China. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(2): 128-135.
- [19] 王玲, 赵广亮, 杨雨果, 耿玉清, 孙玉军, 周红娟. 北京八达岭地区油松人工林土壤动物群落特征研究. *西北农林科技大学学报*, 2018, 46(9): 41-50.
- [20] 林英华, 杨学云, 张夫道, 古巧珍, 孙本华, 马路军. 陕西黄土区不同施肥条件下农田土壤动物的群落组成和结构. *生物多样性*, 2005, 13(3): 188-196.
- [21] 林英华, 贾旭东, 徐演鹏, 李慧仁, 刘学爽, 徐永波, 韦昌雷, 刘三章, 王立中. 大兴安岭典型森林沼泽类型地表土壤动物群落与生态位分析. *林业科学*, 2015, 51(12): 53-62.
- [22] 张柳桦, 齐锦秋, 柳莘玉, 周楷玲, 李雪, 李琪, 郝建锋. 林分密度对桉树人工林群落结构和物种多样性的影响. *西北植物学报*, 2018, 38(1): 166-175.
- [23] 郝建锋, 王德艺, 李艳, 姚小兰, 张逸博, 朱云航, 齐锦秋. 不同林分密度下川北白夹山地区喜树人工林的群落结构和物种多样性. *植物研究*, 2015, 35(5): 772-778.
- [24] 周树平, 梁坤南, 杜健, 李碧均, 周再知, 黄桂华. 不同密度柚木人工林林下植被及土壤理化性质的研究. *植物研究*, 2017, 37(2): 200-210.
- [25] Zhang C L, Li X W, Chen Y Q, Zhao J, Wan S Z, Lin Y B, Fu S L. Effects of *Eucalyptus* litter and roots on the establishment of native tree species in *Eucalyptus* plantations in South China. *Forest Ecology and Management*, 2016, 375: 76-83.
- [26] 周泓杨, 张健, 张丹桔, 张捷, 魏大平, 赵燕波, 赵波, 李川北. 不同郁闭度控制下马尾松 (*Pinus massoniana*) 人工林土壤动物群落特征. *生态学报*, 2017, 37(6): 1939-1955.
- [27] 张丹桔. 一个年龄序列巨桉人工林地上/地下生物多样性[D]. 成都: 四川农业大学, 2010.
- [28] 朱新玉, 刘洁, 贺振, 吴东辉. 耕作方式对玉-豆轮作地表节肢动物多样性及其营养结构的影响. *生态学报*, 2018, 38(20): 7242-7253.
- [29] Belovsky G E, Slade J B. Dynamics of two Montana grasshopper populations: relationships among weather, food abundance and intraspecific competition. *Oecologia*, 1995, 101(3): 383-396.
- [30] Zhu X Y, Chang L, Liu J, Zhou M H, Li J J, Gao B, Wu D H. Exploring the relationships between soil fauna, different tillage regimes and CO₂ and N₂O emissions from black soil in china. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 103: 106-116.
- [31] 李艳红, 罗承德, 杨万勤, 胡杰, 吴福忠. 桉-栉混合凋落物分解及其土壤动物群落动态. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 851-856.
- [32] 王利峰, 和润莲, 杨林, 陈亚梅, 刘洋, 张健. 川西高山林线交错带土壤动物对岷江冷杉和高山杜鹃凋落物分解的贡献. *应用生态学报*, 2016, 27(11): 3689-3697.
- [33] 肖玖金, 张健, 杨万勤, 黄玉梅, 杨鲁, 李纪伟, 严姐. 巨桉 (*Eucalyptus grandis*) 人工林土壤动物群落对采伐干扰的初期响应. *生态学报*, 2008, 28(9): 4531-4539.
- [34] 刘鹏飞, 红梅, 常菲, 高海燕, 李志新, 马玺. 秸秆还田对黑土区西部农田中小型土壤动物群落的影响. *生态学杂志*, 2018, 37(1): 139-146.
- [35] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, Setälä H, van der Putten W H, Wall D H. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [36] 靳士科, 王娟娟, 朱莎, 张琪, 黎翔, 郑文静, 由文辉. 上海市不同类型城市森林中小型土壤动物群落结构特征. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2363-2371.
- [37] 程赛赛, 倪娟平, 高梅香, 李景科. 小兴安岭森林地表鞘翅目成虫对不同干扰梯度的响应. *生态学报*, 2018, 38(9): 3097-3109.
- [38] 曹阳, 高梅香, 张雪萍, 董承旭. 黑龙江省不同纬度梯度农田大型土壤动物群落分布特征. *生态学报*, 2017, 37(5): 1677-1687.
- [39] 宋英石, 李晓文, 李锋, 李海梅. 北京市奥林匹克公园不同地表类型对土壤动物多样性的影响. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1130-1136.
- [40] 韩慧莹, 殷秀琴, 寇新昌. 长白山地低山区土壤动物群落特征及其对环境因子变化的响应. *生态学报*, 2017, 37(7): 2197-2205.
- [41] 李娜, 张雪萍, 张利敏. 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*, 2013, 33(19): 6236-6245.
- [42] 刘任涛, 赵哈林, 赵学勇. 科尔沁沙地不同造林类型对土壤动物多样性的影响. *应用生态学报*, 2012, 23(4): 1104-1110.