

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第15期 Vol.32 No.15 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 15 期

2012 年 8 月 (半月刊)

目 次

放牧对青藏高原东部两种典型高寒草地类型凋落物分解的影响.....	张艳博, 罗 鹏, 孙 庚, 等 (4605)
北京地区外来入侵植物分布特征及其影响因素.....	王苏铭, 张 楠, 于琳倩, 等 (4618)
温带混交林碳水通量模拟及其对冠层分层方式的响应——耦合的气孔导度-光合作用-能量平衡模型	施婷婷, 高玉芳, 袁凤辉, 等 (4630)
洞庭湖景观格局变化及其对水文调蓄功能的影响	刘 娜, 王克林, 段亚锋 (4641)
大辽河口水环境污染生态风险评估.....	于 格, 陈 静, 张学庆, 等 (4651)
标准化方法筛选参照点构建大型底栖动物生物完整性指数	渠晓东, 刘志刚, 张 远 (4661)
不同年龄段大连群体菲律宾蛤仔 EST-SSR 多样性	虞志飞, 闫喜武, 张跃环, 等 (4673)
基于地统计分析西印度洋黄鳍金枪鱼围网渔获量的空间异质性	杨晓明, 戴小杰, 朱国平 (4682)
广东罗坑自然保护区鳄蜥生境选择的季节性差异.....	武正军, 戴冬亮, 宁加佳, 等 (4691)
甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质.....	魏 强, 凌 雷, 柴春山, 等 (4700)
短轮伐期毛白杨不同密度林分土壤有机碳和全氮动态.....	赵雪梅, 孙向阳, 康向阳, 等 (4714)
放牧对呼伦贝尔草地植物和土壤生态化学计量学特征的影响.....	丁小慧, 官 立, 王东波, 等 (4722)
UV-B 辐射增强对抗除草剂转基因水稻 CH ₄ 排放的影响	娄运生, 周文麟 (4731)
基于核磁共振波谱的盐芥盐胁迫代谢组学分析.....	王新宇, 王丽华, 于 萍, 等 (4737)
广西甘蔗根际高效联合固氮菌的筛选及鉴定.....	胡春锦, 林 丽, 史国英, 等 (4745)
不同稻蟹生产模式对土壤活性有机碳和酶活性的影响.....	安 辉, 刘鸣达, 王耀晶, 等 (4753)
大兴安岭火烧迹地恢复初期土壤微生物群落特征.....	白爱芹, 傅伯杰, 曲来叶, 等 (4762)
川西北冷杉林恢复过程中土壤动物群落动态.....	崔丽巍, 刘世荣, 刘兴良, 等 (4772)
内生真菌角担子菌 B6 对连作西瓜土壤尖孢镰刀菌的影响	肖 逸, 戴传超, 王兴祥, 等 (4784)
西江颗粒直链藻种群生态特征.....	王 超, 赖子尼, 李跃飞, 等 (4793)
大型人工湿地生态可持续性评价.....	张依然, 王仁卿, 张 建, 等 (4803)
孢粉、炭屑揭示的黔西高原 MIS3b 期间古植被、古气候演变	赵增友, 袁道先, 石胜强, 等 (4811)
树干径流对梭梭“肥岛”和“盐岛”效应的作用机制	李从娟, 雷加强, 徐新文, 等 (4819)
豆科作物-小麦轮作方式下旱地小麦花后干物质及养分累积、转移与产量的关系	杨 宁, 赵护兵, 王朝辉, 等 (4827)
一次陆源降雨污水引起血红哈卡藻赤潮的成因.....	刘义豪, 宋秀凯, 靳 洋, 等 (4836)
盐城国家级自然保护区景观格局变化及其驱动力.....	王艳芳, 沈永明 (4844)
城市屋顶绿化资源潜力评估及绿化策略分析——以深圳市福田区为例.....	邵天然, 李超骥, 曾 辉 (4852)
黄河三角洲区域生态经济系统动态耦合过程及趋势.....	王介勇, 吴建寨 (4861)
重庆市生态功能区蝴蝶多样性参数	李爱民, 邓合黎, 马 琦 (4869)
专论与综述	
干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展.....	王新源, 李玉霖, 赵学勇, 等 (4890)
土壤呼吸的温度敏感性——全球变暖正负反馈的不确定因素.....	栾军伟, 刘世荣 (4902)
森林土壤甲烷吸收的主控因子及其对增氮的响应研究进展.....	程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 等 (4914)
湖泊氮素氧化及脱氮过程研究进展	范俊楠, 赵建伟, 朱端卫 (4924)
研究简报	
刈割对人工湿地风车草生长及污水净化效果的影响.....	吕改云, 何怀东, 杨丹菁, 等 (4932)
学术信息与动态	
全球气候变化与粮食安全——2012 年 Planet Under Pressure 国际会议述评	安艺明, 赵文武 (4940)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-08



封面图说: 水杉是中国特有种, 国家一级保护植物, 有植物王国“活化石”之称, 是 1946 年由中国的植物学家在湖北的利川磨刀溪发现的。水杉曾广泛分布于北半球, 第四纪冰期以后, 水杉属的其他种类全部灭绝, 水杉确在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存, 成为旷世奇珍。水杉耐水, 适应力强, 生长极为迅速, 其树干通直挺拔, 高大秀颀, 树冠呈圆锥形, 姿态优美, 枝叶繁茂, 入秋后叶色金黄。自发现后被人们在中国南方广泛种植, 成为著名的绿化观赏植物, 现在中国水杉的子孙已遍及中国和世界 50 多个国家和地区。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201111171746

崔丽巍, 刘世荣, 刘兴良, 吴鹏飞, 张洪芝, 何先进. 川西北冷杉林恢复过程中土壤动物群落动态. 生态学报, 2012, 32(15): 4772-4783.

Cui L W, Liu S R, Liu X L, Wu P F, Zhang H Z, He X J. Changes of soil faunal communities during the restoration progress of *Abies faxoniana* Forests in Northwestern Sichuan. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4772-4783.

川西北冷杉林恢复过程中土壤动物群落动态

崔丽巍¹, 刘世荣², 刘兴良³, 吴鹏飞^{1,*}, 张洪芝¹, 何先进¹

(1. 西南民族大学生命科学与技术学院, 成都 610041; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091;

3. 四川省林业科学研究院, 成都 610081)

摘要: 为了掌握川西北冷杉林群落恢复过程中土壤动物群落的变化动态, 2008 年 4 月对川西北地区的原始冷杉林和 50a 冷杉林的土壤动物群落进行了调查。共捕获大型土壤动物 287 个, 33 科(类); 中小型土壤动物 4681 个, 57 科(类)。50a 冷杉林大型土壤动物群落的类群数和密度显著高于原始冷杉林($P < 0.05$); 中小型土壤动物群落的类群数和密度分别显著低于($P < 0.05$)和高于原始林($P < 0.05$)。PCA 排序结果表明两个不同年龄段间的大型和中小型土壤动物群落结构均存在明显差异, 但大型土壤动物群落间的相似性系数小于中小型土壤动物群落, 表明大型土壤动物群落的恢复速度慢于中小型土壤动物群落; 且大型和中小型土壤动物群落间的 Sørensen 相似性均低于 Morisita-Horn 相似性, 进一步表明群落物种组成的恢复速度较慢, 而优势类群及常见类群的数量恢复较快。50a 冷杉林的大型和中小型土壤动物的多样性指数 H' 、丰富度指数 D 和优势度指数 C 均高于原始冷杉林, 而均匀度指数 E 则低于原始冷杉林, 但仅大型土壤动物的丰富度指数 D 存在显著差异($P < 0.05$)。以上研究结果表明, 冷杉林的恢复过程可显著提高大型土壤动物群落多样性, 且土壤动物群落的组成恢复较慢, 而优势类群和常见类群的个体数量恢复较快。

关键词: 土壤动物; 多样性; 群落结构; 冷杉林

Changes of soil faunal communities during the restoration progress of *Abies faxoniana* Forests in Northwestern Sichuan

CUI Liwei¹, LIU Shirong², LIU Xingliang³, WU Pengfei^{1,*}, ZHANG Hongzhi¹, HE Xianjin¹

1 Life Sciences and Technologies of Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, China

2 The Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China

Abstract: *Abies faxoniana* forests create a zone of vegetation in the northwestern Sichuan alpine valley area and are important ecologically and as a center of biodiversity. This zone is sensitive to global climate change and is located in the eastern portion of the Qinghai-Tibet Plateau and the upper reaches of Yangtze River. After long-term extensive logging on a broad scale, the extent of these forests has been greatly reduced and the forests themselves degraded. More recently, forest restoration and regeneration are being emphasized in the region including old growth natural forests, plantation forests and natural secondary forests. Wolong Nature Reserve and Miyaluo Forest District were selected as an area to study soil faunal dynamics during the restoration of *A. faxoniana* forests. The study was conducted in old-growth *A. faxoniana* forest (OAFF) and 50-year-old *A. faxoniana* forest (50AFF) in April 2008. This study was conducted in northwestern Sichuan

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(40801092); 四川省青年基金(2012JQ0030); 四川省科技支撑项目(2010SZ0126); 教育部科学技术研究重点项目(209154); 中央高校基本科研业务费专项(11NZYTH01, 11ZYXS21)和西南民族大学研究生学位点建设项目(2011XWD-S071012)资助

收稿日期: 2011-11-17; 修订日期: 2012-04-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wupf@swun.cn

Province ($27^{\circ}57'—34^{\circ}21'N$, $97^{\circ}26'—104^{\circ}27'E$), China. A total of 287 soil macrofauna individuals and 4681 soil meso-microfauna individuals, belonging to 33 and 57 families, respectively, were collected during the study. Three dominant groups, the Doratodesmidae, Paradoxosomatidae and Curculionidae, accounted for 62.02% of the soil macrofauna individuals. Nematoda dominated the soil meso-microfauna, accounting for 81.01% of the individuals. The number of taxonomic groups and the individual density of soil macrofauna in the 50AFF were significantly higher than those of the OAFF ($P<0.05$). The number of taxonomic groups of soil meso-microfauna in the 50AFF were significantly lower and the individual density was significantly higher than those of the OAFF ($P<0.05$). PCA ordination suggests the community structures of the two soil macrofauna communities were more different than those of the soil meso-microfauna communities. The similarities between the two soil macrofauna communities were lower than those of soil meso-microfauna, and the values of the Sørensen Index were lower than those of the Morisita-Horn Index. This implies the recovery rate is slower for the soil macrofauna than the soil meso-microfauna, and the restorative process has a relatively stronger influence on the taxonomic compositions of the soil macrofauna community than on the individual densities of the dominant and common taxonomic groups. Several ecological indices, such as species richness, abundance, and a diversity index, were analyzed. The Shannon (H), Margalef (D) and Simpson (C) indices of soil meso-microfauna communities in 50AFF were higher and the Pielou Index (E) was lower than that of the OAFF. But a significant difference ($P<0.05$) between the two soil macrofauna communities was only recorded with the Margalef Index (D). Correlation analysis suggests the group number and mean density of the soil macrofauna were remarkably positively correlated with organic matter content ($P<0.05$); the group number was remarkably positively correlated with litter depth content, but was also markedly negatively correlation with total N content ($P<0.05$). The group number and mean density of the soil meso-microfauna were only positively correlated with soil bulk density content ($P<0.05$). All results above showed the restoration of *A. faxoniana* forests can significantly improve soil macrofauna diversity; the taxonomic composition of the soil fauna community recovered slowly, but the individuals of the dominant and common taxonomic groups recovered rapidly.

Key Words: soil fauna; diversity; community structure; *Abies faxoniana* forests

土壤动物作为森林生态系统的重要组成部分^[1],对森林土壤生态系统的物质循环和能量流动,及地上植物群落的结构、功能和演替起着重要调控作用^[2-3]。不同的植被类型有着与其相适应的土壤动物群落^[4],同一植物群落不同恢复阶段土壤动物群落也各不相同。土壤动物能够敏感地反映生境的优越程度,对植被变化具有一定的指示作用^[5]。因此,近年来土壤动物群落与地上植被之间的关系已成为国际生态学领域的研究热点^[6-7]。

川西北亚高山林区地处我国青藏高原东缘和长江上游地区,是世界生物多样性分布的热点之一^[8]。冷杉(*Abies faxoniana*)是该地区暗针叶林分中的主要组成部分,也是一个巨大的土壤碳库^[9]。自 20 世纪 50 年代中期以来,该林区的天然暗针叶林被大规模采伐,导致植被覆盖率急剧减小,针叶林退化严重,生态功能减弱^[10],至 1998 年川西森林全面禁伐封育^[11]。此后,在采伐迹地上实行了自然恢复和人工造林等多种方式的植被恢复措施,目前,植被得到了不同程度的发展,呈现出森林景观。许多学者对该区森林植被恢复情况进行了大量的研究^[12-13],也有关于土壤动物多样性的报道^[14-16],但关于冷杉恢复过程中土壤动物群落的变化情况还不清楚。

本文通过对川西北林区的原始冷杉林和 50a 左右恢复期冷杉林土壤动物群落多样性特征的调查,研究结果可以掌握川西北冷杉林林区土壤动物群落的区系特征和生态地理规律,为恢复生态学研究提供更多的土壤动物学的科学依据,也可以揭示冷杉林发育过程中地下食物网结构和碳汇功能的变化动态及相互关系,为评价森林生态系统对全球变化的调控功能提供科学依据。

1 研究区概况

研究区域位于青藏高原的东部川西北地区。位于东经 97°26′—104°27′, 和北纬 27°57′—34°21′。1 月气温 -5℃—3℃, 7 月 15—20℃。年降水量 700—800 mm, 冬季为干季, 降水较集中于夏季。林下土壤主要为山地棕色暗针叶林土壤。该区植被垂直分异明显, 所调查的植被类型是以分布于海拔 2500—4500 m 冷杉为主的亚高山针叶林。川西亚高山森林经历大规模采伐、人工更新及实施封育之后, 形成了原始林、次生林和人工林等多种森林类型共存的格局。

2 研究方法

2.1 样地的选取

2008 年 4 月间在川西北的卧龙和米亚罗两地分别选取了原始冷杉林 (OAFF) 和 50a 冷杉林 (50AFF), 每个样地再随机设置 6 个重复。所有样地的土壤类型为暗棕壤, 原始冷杉林 (30°51′41.0″N, 102°58′21.0″E) 主要植物类型是岷江冷杉 (*Abies faxoniana*), 林下主要有华西箭竹 (*Fargesia nitida*)、陇塞忍冬 (*Lonicera tangutica*)、鞘柄菝葜 (*Smilix sians*) 和钝齿楼梯草 (*Elatostema obtusum*) 等, 林下相对光照强度为 54.9%。50a 冷杉林 (31°44′23.1″N, 102°44′24.8″E) 以冷杉为主、少量的落叶松 (*Larix kaempferi*) 和青杆 (*Picea wilsonii*), 林下有箭竹 (*Sinarundinaria nitida*) 和悬钩子 (*Rubus*spp.) 等, 林下相对光照强度为 48.3%。两样地的环境因子见表 1。

表 1 研究样地基本情况

Table 1 Basic information of two study areas

样地 Sample	海拔 Elevation /m	植被盖度 Vegetation coverage /%	坡度 Slope degree /(°)	容重 Bulk density /(g/cm ³)	有机质 Organic matter /(g/kg)	全氮 Total Nitrogen /(g/kg)	全磷 Total Phosphorus /(g/kg)	土壤含水量 Soil water content /%	凋落物 Litter depth /cm
OAFF	2805	75	15	0.72±0.08	83.27±14.11	4.45±1.61	1.01±0.11	61.0±12.35	3.30±0.20
50AFF	3033	60	20	0.88±0.28	88.80±21.90	3.40±0.60	0.95±0.07	48.2±11.58	5.20±0.40

OAFF: Old-growth *Abies faxoniana* forest; 50AFF: 50-year-old *Abies faxoniana* forest

2.2 土壤动物调查方法

2.2.1 大型土壤动物

每样地选取 6 个 50 cm×50 cm 的样方, 每个样方间隔 5 m 左右, 分 0—5 cm、5—10 cm 和 10—15 cm 三层调查大型土壤动物。采用手拣法分层获取, 放入有标号的塑料瓶内, 并用 5% 的福尔马林溶液固定保存, 带回室内鉴定。

2.2.2 中小型土壤动物取样

在原始冷杉林和 50a 冷杉林样地内随机设置 6 个样点, 每个样点间隔在 10 m 左右, 用容积为 400 cm³ (Φ101 mm×50 mm) 的环刀按 0—5 cm、5—10 cm 和 10—15 cm 层取土样, 置于有标签的自封袋内, 带回实验室。所取的土样用 Tullgren 漏斗法和 Baermann 漏斗法分离中小型土壤动物。

根据《中国土壤动物检索图鉴》^[17] 在体视镜 (OLYMPUS SZX16) 和光学显微镜 (Leica DM4000 B) 下对土壤动物进行鉴定。一般鉴定到科, 少数种类鉴定到目, 并统计个体数量。

2.3 数据处理与统计分析

物种优势度的划分 一个体数占 10% 以上的类群为优势类群, 用+++代表; 1%—10% 之间的为常见类群, 用++代表; 1% 以下的为稀有类群, 用+代表。

群落结构分析 对土壤动物的个体密度进行 $\log(x+1)$ 转换, 然后对土壤动物群落结构组成进行主成分分析。分析过程中剔除稀有类群以降低对群落排序结果的影响。

群落多样性计算 采用以下几个参数来分析土壤动物群落多样性。

Shannon 多样性指数 (H): $H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$; Pielou 均匀度指数 (E): $E = H/\ln S$; Simpson 优势度指数 (C):

$C = \sum_{i=1}^s (n_i/N)$; Margalef 丰富度指数 (D): $D = (S - 1) / \ln N$ 。式中 $P_i = n_i/N$, n_i 为每个类群的个体数, N 为群落总个体数, H 为 Shannon 多样性指数, S 为物种数。

群落相似性分析群落物种组成的定性分析采用 Sørensen 群落相似性系数 (S): $S = 2 \times \frac{C}{A + B}$, 式中 C 为两个群落的共有类群数, A 和 B 分别为两个群落中各自的土壤动物类群数, $0 < S < 0.25$ 为极不相似, $0.25 \leq S < 0.5$ 为中等不相似, $0.5 \leq S < 0.75$ 为中等相似, $0.75 \leq S < 1.0$ 为极为相似。群落物种组成的定量分析采用 Morisita-Horn 指数: $C_{MH} = 2 \sum (a_i b_i) / (d_a + d_b) N_a N_b$, 式中, N_a 为样地 A 的物种数目, N_b 为样地 B 的物种数目, a_i 和 b_i 为 A 和 B 样地中第 i 种的个体数目, $d_a = \sum a_i^2 / N_a^2$, $d_b = \sum b_i^2 / N_b^2$ 。该系数主要是对群落物种组成及其个体数进行定量分析。

采用单因素方差分析和 t -检验对两个不同阶段土壤动物群落的差异性进行统计分析。分析前对数据进行正态检验, 如果不符合正态分布则进行 $\log(x + 1)$ 转换。对转换后仍不符合正态分布的数据, 改用非参数检验获得显著性以后, 采用 LSD 法或 Mann-Whitney U test 法进行多重比较。另外, 采用主成分分析 (PCA) 对土壤动物群落进行排序, 以分析两个土壤动物群落结构的差异。数据分析采用 SPSS17.0 和 CANOCO 4.5 软件进行完成。

3 结果与分析

3.1 土壤动物群落组成

在卧龙原始冷杉林和米亚罗 50a 冷杉林两种样地中共捕获大型土壤动物 287 个, 隶属于 2 门 7 纲 11 目 33 科 (类) (表 2)。优势类群是矛带马陆科 (Doratomyrmecidae)、奇马陆科 (Paradoxosomatidae) 和象甲科 (Curculionidae) 3 类, 个体数占总捕获量的 62.02%; 常见类群有线蚓科 (Enchytraeidae)、长角沼甲科 (Ptilodactylidae) 和尖眼覃蚊科 (Sciaridae) 等 6 类, 占总捕获量的 27.53%; 稀有类群有正蚓目 (Lumbricida)、步甲科 (Carabidae) 和金龟甲科 (Scarabaeidae) 等 24 类, 占 10.45%。优势类群和常见类群占总捕获量的 89.55%, 是该地区大型土壤动物的主要组成部分。

两种森林土壤动物调查中共捕获中小型土壤动物 4681 个, 隶属于 4 门 11 纲 12 目 57 科 (类) (表 3)。在纲分类阶元上, 优势类群是线虫纲 (Nematoda), 占总捕获量的 81.01%; 常见类群有寡毛纲 (Oligochaeta)、弹尾纲 (Collembola)、蛛形纲 (Arachnida) 和昆虫纲 (Insecta) 4 类, 占总捕获量的 18.71%; 稀有类群有唇足纲 (Chilopoda)、倍足纲 (Diplopoda) 和综合纲 (Symphyla) 等 6 类, 占总捕获量的 0.28%。

3.2 土壤动物群落结构差异

两种森林大型土壤动物群落组成存在差异 (表 2)。首先, 原始冷杉林大型土壤动物群落的类群数 ($t = 3.61, P < 0.05$) 和密度 ($z = 2.01, P < 0.05$) 均显著低于 50a 冷杉林。其次, 原始林的优势类群为象甲科等 4 类, 占总捕获量的 75.31%; 常见类群有线蚓科等 12 类, 占总捕获量的 24.69%; 稀有类群无。50a 冷杉林的优势类群是矛带马陆科 3 类, 占总捕获量的 65.05%; 常见类群有线蚓科等 4 类, 占总捕获量的 23.30%; 其余 20 类为稀有类群, 占总捕获量的 11.65%。群落组成表明 50a 冷杉林的大型土壤动物群落结构相对复杂。利用主成分分析 (PCA) 对大型土壤动物群落排序, 结果如图 1A。原始冷杉林的各样方主要分布在上部, 而 50a 冷杉林群落各样方主要分布在下部, 表明大型土壤动物群落结构在不同恢复阶段发生了明显变化。

中小型土壤动物群落组成在两个恢复阶段的森林之间存在差异 (表 3)。原始冷杉林中小型土壤动物群落的类群数显著高于 50a 冷杉林 ($t = 2.55, P < 0.05$), 而密度则显著低于 50a 冷杉林 ($z = 2.55, P < 0.05$)。原始冷杉林的优势类群为线虫纲, 占总捕获量的 83.77%; 常见类群有寡毛纲等 4 类, 占总捕获量的 15.81%; 其余 3 类为稀有类群, 占总捕获量的 0.42%。50a 冷杉林的优势类群为线虫纲和弹尾纲, 占总捕获量的 91.78%; 常见类群有蛛形纲等 3 类, 占总捕获量的 8.02%; 稀有类群有唇足纲的等 4 类, 占总捕获量的 0.20%。中小型土壤动物群落的 PCA 排序结果见图 1B。原始冷杉林中小型土壤动物的各样方主要分布在下部和右上部,

50a 冷杉林群落各样方主要分布在左上部,表明 50a 冷杉林 6 个样方的差异性低于原始冷杉林。从总体上看,两个阶段间中小型土壤动物群落结构的差异性比大型土壤动物低。

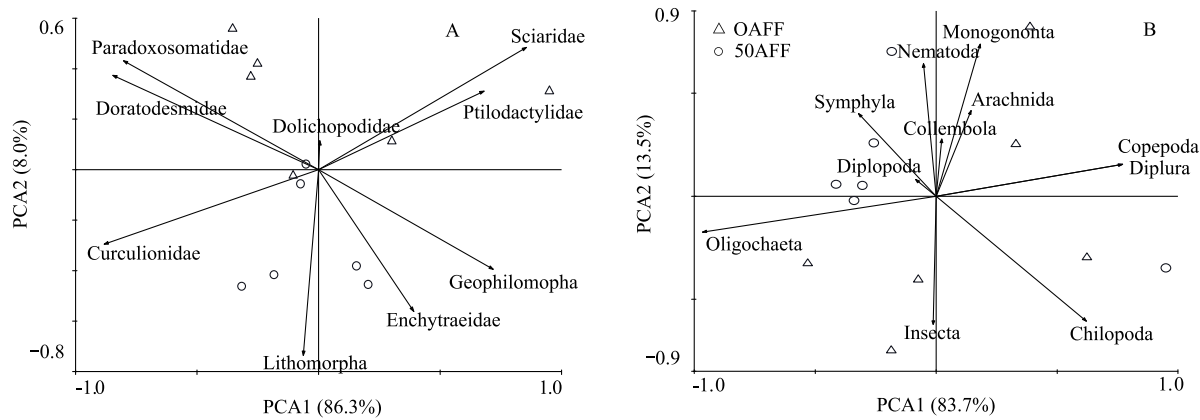


图 1 土壤动物群落结构的主成分分析

Fig. 1 Principle components analysis ordination diagrams of soil fauna communities

OAFF: Old-growth *Abies faxoniana* forest; 50AFF: 50-year-old *Abies faxoniana* forest

表 2 大型土壤动物群落组成

Table 2 Compositions of Soil Macrofauna Community

类群 Groups	OAFF			50AFF			合计 Total		
	Old-growth <i>Abies faxoniana</i> forest ;			50-year-old <i>Abies faxoniana</i> forest					
	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	多度 Abundance	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	多度 Abundance	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	多度 Abundance
寡毛纲 Oligochaeta									
线蚓科 Enchytraeidae	1	1.23	++	15	7.28	++	16.00	5.57	++
正蚓目 Lumbricida				2	0.97	+	2.00	0.70	+
象甲科 Curculionidae	14	17.28	+++	92	44.66	+++	106	36.93	+++
长角沼甲科 Ptilodactylidae	2	2.47	++	2	0.97	+	4	1.39	++
步甲科 Carabidae				1	0.49	+	1	0.35	+
金龟甲科 Scarabaeidae	1	1.23	++				1	0.35	+
水龟甲科 Hydrophilidae	1	1.23	++				1	0.35	+
古瘦隐甲科 Archeocrypticidae				1	0.49	+	1	0.35	+
粗角叩甲科 Throscidae				1	0.49	+	1	0.35	+
郭公虫科 Cleridae	1	1.23	++				1	0.35	+
隐翅甲科 Staphylinidae				1	0.49	+	1	0.35	+
锯谷盗科 Silvanidae				1	0.49	+	1	0.35	+
尖眼罩蚊科 Sciaridae	12	14.81	+++	1	0.49	+	13	4.53	++
长足虻科 Dolichopodidae				3	1.46	++	3	1.05	++
舞虻科 Empididae	1	1.23	++	1	0.49	+	2	0.7	+
鹬虻科 Rhagionidae				2	0.97	+	2	0.7	+
大蚊科 Tipulidae				1	0.49	+	1	0.35	+
毛蠓科 Psychodidae	1	1.23	++				1	0.35	+
水虻科 Stratiomyidae				1	0.49	+	1	0.35	+
蚜蝇科 Syrphidae				1	0.49	+	1	0.35	+
叶蝇科 Milichiidae				1	0.49	+	1	0.35	+
蚤蝇科 Phoridae				1	0.49	+	1	0.35	+
管蓟马科 Phlaeothripidae	1	1.23	++				1.00	0.35	+
海蟑螂科 Ligiidae	2	2.47	++				2.00	0.70	+
弹尾纲 Collembola									
跳虫科 Poduridae	1.00	1.23	++	1.00	0.49	+	2.00	0.70	+

续表

类群 Groups	OAFF			50AFF			合计 Total		
	Old-growth <i>Abies faxoniana</i> forest ;			50-year-old <i>Abies faxoniana</i> forest					
	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	多度 Abundance	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	多度 Abundance	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	多度 Abundance
等节蜱科 Isotomidae				2	0.97	+	2.00	0.70	+
地蜈蚣目 Geophilomorpha	7	8.64	++	21	10.19	+++	28.00	9.76	++
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	1	1.23	++	14	6.80	++	15.00	5.23	++
倍足纲 Diplopoda									
带马陆目 Polydesmida									
矛带马陆科 Doratodesmidae	19	23.46	+++	21	10.19	+++	40.00	13.94	+++
奇马陆科 Paradoxosomatidae	16	19.75	+++	16	7.77	++	32.00	11.15	+++
光盔蛛科 Liocranidae				1.00	0.49	+	1.00	0.35	+
近管蛛科 Anyphaenidae				1.00	0.49	+	1.00	0.35	+
卵形蛛科 Oonopidae				1.00	0.49	+	1.00	0.35	+
类群数 Group number	16.00			27.00			33.00		
个体数 Individual number	81.00			206.00			287.00		
平均密度 Mean density / (个/m ²)	54.00± 31.87a			136.00± 85.68b			191.33		

同一行内不同小写字母表示林地间差异显著 ($P < 0.05$, $n = 6$)

表 3 中小型土壤动物组成

Table 3 Compositions of Soil Meso-microfauna community

类群 Groups	OAFF			50AFF			合计 Total		
	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	多度 Abundance	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	多度 Abundance	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	多度 Abundance
线虫纲 Nematoda	1394	83.77	+++	2398	79.48	+++	3792	81.01	+++
寡毛纲 Oligochaeta	41	2.46	++	14	0.46	+	55	1.17	
线蚓科 Enchytraeidae	41	2.46	++	14	0.46	+	55	1.17	++
弹尾纲 Collembola	52	3.13	++	371	12.30	+++	423	9.04	
等节蜱科 Isotomidae	11	0.66	+	101	3.35	++	112	2.39	++
长角蜱科 Entomobryidae	17	1.02	++	40	1.33	++	57	1.22	++
长角长蜱科 Orchesellidae				30	0.99	+	30	0.64	+
球角蜱科 Hypogastruridae	2	0.12	+	54	1.79	++	56	1.20	++
鳞蜱科 Tomoceridae				2	0.07	+	2	0.04	+
疣蜱科 Neanuridae	18	1.08	++	54	1.79	++	72	1.54	++
棘蜱科 Onychiuridae				52	1.72	++	52	1.11	++
圆蜱科 Sminthuridae	1	0.06	+	2	0.07	+	3	0.06	+
跳虫科 Poduridae	3	0.18	+	36	1.19	++	39	0.83	+
蛛形纲 Arachnida	42	2.52	++	105	3.48	++	147	3.14	
奥甲螨科 Oppiidae	4	0.24	+	9	0.30	+	13	0.28	+
真卷甲螨科 Euphthiracaridae	1	0.06	+				1	0.02	+
盲甲螨科 Malaconothridae	1	0.06	+				1	0.02	+
裂板鳃甲螨科 Plasmobatidae	1	0.06	+				1	0.02	+
跳甲螨科 Zetorchestidae	1	0.06	+	1	0.03	+	2	0.04	+
副大翼甲螨科 Parakalumnidae	3	0.18	+	3	0.10	+	6	0.13	+
鲜甲螨科 Cepheidae	1	0.06	+				1	0.02	+
珠甲螨科 Damaeidae	6	0.36	+	17	0.56	+	23	0.49	+
杆棱甲螨科 Mochlozetidae	1	0.06	+	8	0.27	+	9	0.19	+
单翼甲螨科 Haplozetidae				1	0.03	+	1	0.02	+
尖棱甲螨科 Ceratozetidae	4	0.24	+	1	0.03	+	5	0.11	+

续表

类群 Groups	OAFF			50AFF			合计 Total		
	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	多度 Abundance	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	多度 Abundance	个体数 Individuals	百分比 Percent/%	多度 Abundance
盾螨科 Scutacaridae	1	0.06	+	4	0.13	+	5	0.11	+
跗线螨科 Tarsonmidae	1	0.06	+	4	0.13	+	5	0.11	+
巨须螨科 Cunaxidae	1	0.06	+	8	0.27	+	9	0.19	+
腾岛螨科 Teneriffidae				11	0.36	+	11	0.23	+
微离螨科 Microdispidae	8	0.48	+	31	1.03	++	39	0.83	+
矮蒲螨科 Pygmephoridae				1	0.03	+	1	0.02	+
隐颚螨科 Cryptognathidae				2	0.07	+	2	0.04	+
莓螨科 Rhagidiidae	3	0.18	+				3	0.06	+
绒螨科 Trombidiidae	2	0.12	+				2	0.04	+
寄螨科 Parasitidae	1	0.06	+	1	0.03	+	2	0.04	+
绥螨科 Sejidae	1	0.06	+				1	0.02	+
(虫穴)螨科 Zerconidae				2	0.07	+	2	0.04	+
美绥螨科 Ameroseiidae				1	0.03	+	1	0.02	+
真伊螨科 Eviphididae	1	0.06	+				1	0.02	+
昆虫纲 Insecta	128	7.69	++	123	4.08	++	251	5.36	
鹬虻科 Rhagionidae				1	0.03	+	1	0.02	+
尖眼罩蚊科 Sciaridae	70	4.21	++	58	1.92	++	128	2.73	++
长足虻科 Dolichopodidae	1	0.06	+				1	0.02	+
舞虻科 Empididae	10	0.60	+	18	0.60	+	28	0.60	+
蚤蝇科 Phoridae	1	0.06	+	18	0.60	+	19	0.41	+
长角毛蚊科 Hesperinidae	1	0.06	+				1	0.02	+
毛蚊科 Bibionidae	13	0.78	+	11	0.36	+	24	0.51	+
摇蚊科 Chironomidae	10	0.60	+	9	0.30	+	19	0.41	+
蝇科 Muscidae	16	0.96	+	4	0.13	+	20	0.43	+
拟步甲科 Tenebrionidae	1	0.06	+				1	0.02	
隐翅甲科 Staphylinidae	3	0.18	+	2	0.07	+	5	0.11	+
出尾蕈甲科 Scaphidiidae	1	0.06	+				1	0.02	+
古瘦隐甲科 Archeocrypticidae	1	0.06	+				1	0.02	+
缨甲科 Ptiliidae				2	0.07	+	2	0.04	+
唇足纲 Chilopoda	6	0.36	+	3	0.10	+	9	0.19	
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	4	0.24	+	3	0.10	+	7	0.15	+
地蜈蚣目 Geophilomorpha	1	0.06	+				1	0.02	+
倍足纲 Diplopoda	1	0.06	+				1	0.02	
矛带马陆科 Doratodesmidae	1	0.06	+				1	0.02	+
综合纲 Symphyla				1	0.03	+	1	0.02	+
桡足纲 Copepoda				1	0.03	+	1	0.02	
猛水蚤目 Harpacticoida				1	0.03	+	1	0.02	+
双尾纲 Diplura				1	0.03	+	1	0.02	
八孔(虫八)科 Octostigmatidae				1	0.03	+	1	0.02	+
单巢纲 Monogononta	1	0.06	+				1	0.02	
椎轮科 Notommatidae	1	0.06	+				1	0.02	+
类群数 Group number	43			41			57		
个体数 Individual number	1664			3017			4681		
平均密度	34666.67±			62854.17±			97520.83		
Mean density/(个/m ²)	13805.95a			29144.62b					

3.3 土壤动物群落相似性

大型土壤动物群落间的 Sørensen 和 Morisita-Horn 相似性系数分别为 0.47 和 0.56, 均低于中小型土壤动物的群落间的相似性指数(分别为 0.64 和 0.85), 表明在两个不同恢复阶段的冷杉林中, 大型土壤动物群落结构的差异性高于中小型土壤动物, 中小型土壤动物群落的恢复速度较快或受森林采伐活动的影响较小。此外, 大型土壤动物及中小型土壤动物群落的 Sørensen 相似性系数均低于 Morisita-Horn 相似性系数, 表明在原始冷杉林和 50a 冷杉林两个群落间, 土壤动物的组成类群差异均较大, 而优势类群及常见类群的数量差异较小。

3.4 土壤动物群落多样性

土壤动物群落的多样性情况如表 4。50a 冷杉林的大型和中小型土壤动物的 Shannon 多样性指数 H' 、丰富度指数 D 和优势度指数 C 均高于原始冷杉林, 而均匀度指数 E 则低于原始冷杉林。统计分析结果表明仅大型土壤动物群落的丰富度指数 D 在两个群落间存在显著差异 ($t=0.035, P<0.05$), 其它多样性指数均无显著差异 ($P>0.05$)。由多样性指数的差异可知, 处于恢复阶段的冷杉林能够显著提高大型土壤动物的丰富度, 但对中小型土壤动物丰富度影响不显著。

表 4 土壤动物多样性(平均值±标准差)

Table 4 Diversity indexes of two soil fauna communities (Mean±SD)

多样性指数 Diversity index	大型土壤动物 Soil macrofauna				中小型土壤动物 Soil meso-microfauna			
	OAFF	50AFF	t	P	OAFF	50AFF	t	P
多样性指数 Shannon index (H')	1.17±0.63a	1.79±0.45a	1.97	0.077	0.66±0.46a	0.81±0.50a	0.55	0.594
丰富度指数 Margalef index (D)	0.71±0.35a	0.81±0.16b	2.44	0.035	0.24±0.13a	0.28±0.13a	0.41	0.687
均匀度指数 Pielou index (E)	0.25±0.14a	0.24±0.15a	0.55*	0.596	0.76±0.19a	0.71±0.18a	0.51	0.621
优势度指数 Simpson index (C)	1.35±0.90a	2.55±0.80a	0.60	0.953	2.26±1.22a	2.54±1.09a	0.39	0.707

* 为非参数检验

3.5 土壤动物垂直分布动态

原始冷杉林与 50a 冷杉林大型和中小型土壤动物的类群数均随土壤剖面的增加而下降, 但垂直递减幅度不同(图 2)。原始冷杉林大型土壤动物的类群数和个体数在 3 层间均无显著差异 ($P>0.05$); 而 0—5 cm 层的中小型土壤动物类群数和个体数均显著高于 5—10 cm 和 10—15 cm 层 ($P<0.01$)。50a 冷杉林群落中, 0—5 cm 层的大型土壤动物类群数和个体数均极显著高于 5—10 cm 和 10—15 cm 两层 ($P<0.01$) 其中后两者间的个体数差异显著 ($P<0.05$) (图 2)。0—5 cm 层的中小型土壤动物的类群数和个体数显著高于 5—10 cm 和 10—15 cm 层 ($P<0.01$)。此外, 不同群落间同一层次的土壤动物类群数和个体数所占百分比无显著差异 ($P>0.05$)。由此可知, 在原始冷杉林和 50a 冷杉林中, 大型和中小型土壤动物的垂直分布均具有表聚性, 但冷杉林的恢复过程对土壤动物的垂直分布影响不明显。

3.6 土壤环境对土壤动物的影响

在川西北冷杉林, 大型土壤动物的总类群数、平均密度与土壤有机质有显著正相关 ($P<0.05$) (表 5); 总类群数、多样性指数、优势度指数与全氮有显著负相关 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$); 多样性指数、优势度指数与全磷有显著负相关 ($P<0.01$); 总类群数与凋落物厚度有显著正相关 ($P<0.05$); 优势度指数与土壤容重有显著正相关 ($P<0.05$); 总类群数、平均密度和多样性指数与土壤含水量均无显著相关关系 ($P>0.05$)。中小型土壤动物的总类群数、平均密度仅与土壤容重有显著正相关 ($P<0.05$), 其它多样性指数与土壤理化性质均无显著相关关系 ($P>0.05$)。

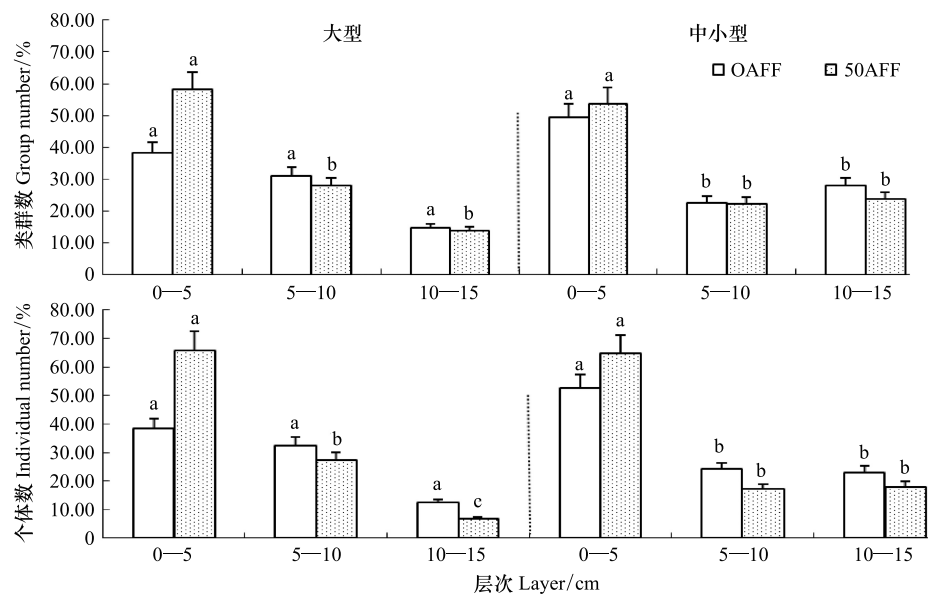


图2 土壤动物垂直分布

Fig.2 Vertical distribution of soil fauna on the soil profile

不同字母表示同一样地土层间差异显著 ($P<0.05$)

表5 土壤动物群落多样性与环境因子的相关系数 ($n=12$)

Table 5 Correlations between soil fauna diversities and environmental factors($n=12$)							
	群落多样性 Community diversities	容重 Bulk density	有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	土壤含水量 Soil water content	凋落物厚度 Litter depth
大型土壤动物 Soil macrofauna	总类群数 Group number	0.561	0.677 *	-0.643 *	-0.555	-0.481	0.728 **
	平均密度 Mean density	0.178	0.702 *	-0.422	-0.270	-0.438	0.562
	多样性指数 Shannon index	0.546	0.335	-0.673 *	-0.721 **	-0.391	0.499
	丰富度指数 Margalef index	0.258	0.138	-0.389	-0.453	-0.140	0.144
	均匀度指数 Pielou index	-0.257	0.321	-0.056	0.102	-0.010	-0.023
	优势度指数 Simpson index	0.640 *	0.335	-0.747 **	-0.789 **	-0.496	0.572
中小型土壤动物 Soil meso-micro fauna	总类群数 Group number	0.663 *	-0.218	-0.289	-0.254	-0.262	0.042
	平均密度 Mean density	0.600 *	0.195	-0.403	-0.381	-0.482	0.369
	多样性指数 Shannon index	0.558	-0.247	-0.258	-0.242	-0.058	-0.041
	丰富度指数 Margalef index	0.508	-0.209	-0.264	-0.247	0.019	-0.038
	均匀度指数 Pielou index	-0.480	0.218	0.224	0.200	-0.047	0.072
	优势度指数 Simpson index	0.560	-0.393	-0.218	-0.190	-0.182	-0.116

* $P<0.05$, ** $P<0.01$

4 结论与讨论

植物群落的恢复一方面表现在植物物种多样性的变化,另一方面不同植被类型会导致土壤物理环境和营养环境的变化,影响土壤动物群落的结构和数量^[18],已有大量的研究证明土壤动物群落特征及多样性对植被生态系统的不同恢复阶段具有重要的指示作用^[19]。本研究显示,50a 冷杉林内大型土壤动物群落的类群和

密度均高于原始冷杉林,并且结构差异也较大,群落间的相似性较低。导致这种结果的原因是原始林中环境稳定,物种间的因竞争排斥作用的时间较长,导致部分类群被完全排斥掉,即稀有类群消失。因此,适度干扰有利于提高大型土壤动物多样性^[20]。同时,可以确定在植被恢复过程中,适度人为干扰对次生演替群落的形成产生了积极效应。

相对于大型土壤动物,两个中小型土壤动物群落在组成结构上的差异性较小,相似性程度相对较高。产生这种结果的原因可能有两种:一是森林采伐活动对大型土壤动物的干扰作用强于中小型土壤动物;二是中小型土壤动物群落的恢复速度比大型土壤动物快,能够提前恢复到干扰前的状态。吴鹏飞等^[21]研究表明地震次生灾害所形成的泥石流和滑坡区大型土壤动物全部消失,中小型土壤动物个体数量下降,说明中小型土壤动物的抗干扰能力强于大型土壤动物。而颜绍堃等^[22]研究发现雨雪冰冻灾害后的大型土壤动物的多度相对于灾前大幅下降,而中小型土壤动物如线虫的多度增加,则说明中小型土壤动物对干扰作用具有较快的自我恢复能力,其原因可能是中小型土壤动物的生活史较短,而繁殖速度快。

在本研究中,50a 冷杉林的大型和中小型土壤动物的类群数和个体数均高于原始冷杉林,但群落内各物种的个数差异较大,使均匀性指数最低,而 Shannon-Wiener 多样性指数、丰富度指数和优势度指数均高于原始冷杉林。植物是土壤动物直接或间接的食物来源^[23],植物群落的盖度、种类和凋落物的差异可导致土壤动物的栖息环境和食源改变,从而影响土壤动物群落结构和功能,并涉及生态恢复速度^[7],不同植物的凋落物可能对大型土壤动物产生影响^[24]。本文的相关分析结果(表 5)也表明,凋落物厚度与大型土壤动物类群数有显著相关关系。所以在森林砍伐后的生态恢复过程中注意保护凋落物层,不仅有助于土壤动物多样性的恢复,还可以改善土壤养分状况。此外,森林砍伐后,树种不断更新,物种多样性随着森林的恢复呈增加趋势,在森林演替至 50a 左右时,森林植物种类丰富度出现最大值^[25],而此时土壤动物群落也进入恢复过程^[26]。已有的研究表明植物多样性与土壤动物多样性间有显著的正相关关系^[27],因此 50a 冷杉林的土壤动物群落多样性处于一个较高水平。杨效东等^[26]的研究发现森林砍伐或火烧后,演替至 40a 左右时,土壤动物群落的类群数和个体数量达到较高水平,初、中期演替阶段的群落多样性也高于顶级阶段。廖崇惠等^[28]对人工阔叶混交林土壤动物群落的研究也有类似的发现。

不同恢复阶段土壤动物群落的类群数和个体数均存在明显的垂直分布,这主要因为土壤动物的垂直分布受土壤理化性质和营养状况的制约。本研究相关分析结果也表明,土壤有机质与大型和中小型土壤动物类群之间有显著相关关系。土壤有机质、全氮、全磷、总孔隙度、温度和营养状况随着土层的加深而减少,而土壤 pH 值和含盐量则随着土层的加深而升高^[29]。50a 冷杉林的大型和中小型土壤动物的个体数、类群数表聚性明显($P < 0.01$),而原始冷杉林的大型土壤动物类群数和个体数表聚性不明显($P > 0.05$)。50a 冷杉林是受人为干扰而形成的次生演替群落,群落内部变化不同于原始冷杉林,同时随着海拔的升高(OAFF 海拔 2805 m < 50AFF 海拔 3033 m),地温下降,林下枯枝落叶分解会变慢,形成较厚的凋落物层。原因是凋落物及其形成的腐殖质可以为土壤动物提供丰富的食物资源;另一方面,凋落物层十分疏松,具有比土壤层更大的空隙,其温湿条件更适合土壤动物的生存^[30]。因此,50a 冷杉林地表的土壤动物个体数和类群数相对原始冷杉林丰富^[31]。此外,采伐活动对原有的森林环境特别是土壤结构及理化性质和结构未造成较大影响,因此原始冷杉林和 50a 冷杉林相同层次土层间的土壤动物分布无显著差异。

森林土壤作为陆地生态系统中最大的碳库,在全球碳循环中发挥着极其重要的作用^[32]。土壤动物可以通过多种直接和间接作用影响土壤有机碳含量^[33]。如蚯蚓能够改变土壤有机碳库的大小和分布^[34],弹尾目通过与菌根真菌相互作用干扰了植物有机碳向土壤有机碳库中的分配^[35]。从这个意义上说,处于恢复阶段冷杉林较高的土壤动物多样性则能够促进生态系统碳储量的增加速度,从而对全球变暖起到调控作用。

References:

- [1] Noble J C, Whitford W G, Kaliszewski M. Soil and litter microarthropod populations from two contrasting ecosystems in semi-arid eastern Australia. *Journal of Arid Environments*, 1996, 32(3): 329-346.

- [2] Reichle D E. The role of soil invertebrates in nutrient cycling//Lohm U, Persson T, eds. Soil Organisms as Components of Ecosystems. Ecological Bulletins, 1977, (25): 145-156.
- [3] Lin Y H, Zhang F D, Zhang J Q, Ouyang X J, Mo D S, Zhou G Y. Preliminary investigation on temporal and spatial variation of structure of soil fauna community in different natural vegetations of Dinghushan. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2616-2622.
- [4] Loranger-Merciris G, Imbert D, Bernhard-Reversat F, Ponge J F, Lavelle P. Soil fauna abundance and diversity in a secondary semi-evergreen forest in Guadeloupe (Lesser Antilles): influence of soil type and dominant tree species. Biology and Fertility of Soils, 2007, 44(2): 269-276.
- [5] Goralczyk K. Nematodes in a coastal dune succession: indicators of soil properties? Applied Soil Ecology, 1998, 9(1/3): 465-469.
- [6] Bradford M A, Jones T H, Bardgett R D, Black H I J, Boag B, Bonkowski M, Cook R, Eggers T, Gange A C, Grayston S J, Kandeler E, McCaig A E, Newington J E, Prosser J I, Setälä H, Staddon P L, Tordoff G M, Tschërko D, Lawton J H. Impacts of soil faunal community composition on model grassland ecosystems. Science, 2002, 298(5593): 615-618.
- [7] 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.
- [8] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, da Fonseca G A B, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature, 2000, 403(6772): 853-858.
- [9] Deng R J, Yang W Q, Zhang J, Hu J L, Feng R F, Jian Y, Lin J. Carbon, nitrogen and phosphorus storage in soil organic layer of the Subalpine forests in Western Sichuan. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2007, 13(4): 492-496.
- [10] Liu Q, Wu Y, He H. Ecological Problems of Subalpine Coniferous Forest in the Southwest of China. World Sci-Tech R and D, 2001, 23(2): 63-69.
- [11] Zhang Y D, Liu S R, Ma J M, Shi Z M, Liu X L. Woodland hydrological effects of birch forests in sub-alpine region of western Sichuan, China. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2939-2946.
- [12] Zhang Y D, Liu S R, Zhao C M. Spatial pattern of sub-alpine forest restoration in west Sichuan. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(9): 1706-1710.
- [13] Ma J M, Liu S R, Shi Z M, Zhang Y D, Miao N. Natural Regeneration of *Abies Faxoniana* along restoration gradients of subalpine dark coniferous forest in Western Sichuan, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(4): 646-657.
- [14] Huang X, Wen W Q, Zhang J, Yang W Q, Liu Y, Yan B G, Huang Y M. Soil faunal diversity under typical alpine vegetations in West Sichuan. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(1): 181-190.
- [15] Huang Y M, Yang W Q, Zhang J, Lu C T, Liu X, Wang W, Guo W. Response of soil faunal community to simulated understory plant loss in the subalpine coniferous plantation of western Sichuan. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(8): 2018-2025.
- [16] Wu P F, Liu X L, Liu S R. Spatial distributions of soil macrofauna in winter in Miyaluo forest area northwestern Sichuan, China. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(3): 659-664.
- [17] Yin W Y. Pictorial Keys to Soil Animals of China. Beijing: Science Press, 1998.
- [18] Laossi K R, Barot S, Carvalho D, Desjardins T, Lavelle P, Martins M, Mitja D, Rendeiro A C, Rousseau G, Sarrazin M, Velasquez E, Grimaldi M. Effects of plant diversity on plant biomass production and soil macrofauna in Amazonian pastures. Pedobiologia, 2008, 51(5/6): 397-407.
- [19] Xu G L, Zhou G Y, Mo J M, Zhou X Y, Peng S J. The responses of soil fauna composition to forest restoration in Heshan. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7): 1670-1677.
- [20] Cole L, Buckland S M, Bardgett R D. Influence of disturbance and nitrogen addition on plant and soil animal diversity in grassland. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(2): 505-514.
- [21] Wu P F, Liu S R. Impacts of secondary geological disasters induced by Wenchuan earthquake on soil fauna community. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(9): 115-123.
- [22] Yan S K, Zhang W D, Liu Y X, Fu S L, Li Y L, Wang S L. Impact of heavy snow storm and freezing rain disasters on soil fauna in Chinese fir plantation in southern China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(1): 65-70.
- [23] Huang L R, Zhang X P. Community characteristics of mid-micro soil animals in cold-temperate zone of the Daxing'an Mountains, China. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2008, 14(3): 388-393.
- [24] Wardle D A, Bonner K I, Barker G M. Linkages between plant litter decomposition, litter quality, and vegetation responses to herbivores. Functional Ecology, 2002, 16(5): 585-595.
- [25] Ma J M, Liu S R, Shi Z M, Zhang Y D, Kang B, Chen B Y. Changes of species composition and diversity in the restoration process of sub-alpine dark brown coniferous forests in Western Sichuan, China. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(5): 17-23.
- [26] Yang X D, Tang Y, Tang J W. Change in structure and diversity of soil arthropod communities after Slash-and-burn of secondary forest in Xishuangbanna, Yunnan Province. Biodiversity Science, 2001, 9(3): 222-227.

- [27] Crisp P N, Dickinson K J M, Gibbs G W. Does native invertebrate diversity reflect native plant diversity? A case study from New Zealand and implications for conservation. *Biological Conservation*, 1998, 83(2): 209-220.
- [28] Liao C H, Chen M Q. Secondary succession of soil animal community and its development process in tropical artificial forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1990, 1(1): 53-59.
- [29] Wu D H, Yin W Yi, Bu Z Y. Changes among soil nematode community characteristics in relation to different vegetation restoration practices in the moderate degraded grasslands of Songnen. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 1-12.
- [30] Yang X D, Tang Y, Tang J W. Change on the composition and distribution of soil arthropod community before and after burning in the secondary forest of Xishuangbanna. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 20(5): 32-35.
- [31] Lin Y H, Nie B H, Zheng S F, He H Y, Xiao W F. Diversity of ground-dwelling invertebrate at Wulipo nature reserve area in Chongqing. *Forest Research*, 2009, 22(2): 219-225.
- [32] Potter C S. Terrestrial biomass and the effects of deforestation on the globe carbon cycle. *BioScience*, 1999, 49(10): 769-778.
- [33] Wolters V. Invertebrate control of soil organic matter stability. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31(1): 1-19.
- [34] Bohlen P J, Pelletier D M, Groffman P M, Fahey T J, Fisk M C. Influence of earthworm invasion on redistribution and retention of soil carbon and nitrogen in northern temperate forests. *Ecosystems*, 2004, 7(1): 13-27.
- [35] Johnson D, Kresk M, Wellington E M H, Stott A W, Cole L, Bardgett R D, Read D J, Leake J R. Soil invertebrates disrupt carbon flow through fungal networks. *Science*, 2005, 309(5737): 1047-1047.

参考文献:

- [3] 林英华, 张夫道, 张俊清, 欧阳学军, 莫定生, 周国逸. 鼎湖山不同自然植被土壤动物群落结构时空变化. *生态学报*, 2005, 25(10): 2616-2622.
- [9] 邓仁菊, 杨万勤, 张健, 胡建利, 冯瑞芳, 简毅, 林静. 川西亚高山森林土壤有机层碳、氮、磷储量特征. *应用与环境生物学报*, 2007, 13(4): 492-496.
- [10] 刘庆, 吴彦, 何海. 中国西南亚高山针叶林的生态学问题. *世界科技研究与发展*, 2001, 23(2): 63-69.
- [11] 张远东, 刘世荣, 马姜明, 史作民, 刘兴良. 川西亚高山桦木林的林地水文效应. *生态学报*, 2005, 25(11): 2939-2946.
- [12] 张远东, 刘世荣, 赵常明. 川西亚高山森林恢复的空间格局分析. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1706-1710.
- [13] 马姜明, 刘世荣, 史作民, 张远东, 缪宁. 川西亚高山暗针叶林恢复过程中岷江冷杉天然更新状况及其影响因子. *植物生态学报*, 2009, 33(4): 646-657.
- [14] 黄旭, 文维全, 张健, 杨万勤, 刘洋, 闫帮国, 黄玉梅. 川西高山典型自然植被土壤动物多样性. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 181-190.
- [15] 黄玉梅, 杨万勤, 张健, 卢昌泰, 刘旭, 王伟, 郭伟. 川西亚高山针叶林土壤动物群落对模拟林下植物丧失的响应. *生态学报*, 2010, 30(8): 2018-2025.
- [16] 吴鹏飞, 刘兴良, 刘世荣. 米亚罗林区冬季大型土壤动物空间分布特征. *土壤学报*, 2011, 48(3): 659-664.
- [17] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [19] 徐国良, 周国逸, 莫江明, 周小勇, 彭闪江. 鹤山丘陵退化生态系统植被恢复的土壤动物群落结构. *生态学报*, 2005, 25(7): 1670-1677.
- [21] 吴鹏飞, 刘世荣. 汶川地震次生灾害对土壤动物群落的影响. *林业科学*, 2010, 46(9): 115-123.
- [22] 颜绍馥, 张伟东, 刘燕新, 傅声雷, 李媛良, 汪思龙. 雨雪冰冻灾害干扰对杉木人工林土壤动物的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(1): 65-70.
- [23] 黄丽荣, 张雪萍. 大兴安岭寒温带地区中小型土壤动物群落特征. *应用与环境生物学报*, 2008, 14(3): 388-393.
- [25] 马姜明, 刘世荣, 史作民, 张远东, 康冰, 陈宝玉. 川西亚高山暗针叶林恢复过程中群落物种组成和多样性的变化. *林业科学*, 2007, 43(5): 17-23.
- [26] 杨效东, 唐勇, 唐建维. 热带次生林刀耕火种过程中土壤节肢动物群落结构及多样性的变化. *生物多样性*, 2001, 9(3): 222-227.
- [28] 廖崇惠, 陈茂乾. 热带人工林土壤动物群落的次生演替和发展过程探讨. *应用生态学报*, 1990, 1(1): 53-59.
- [29] 吴东辉, 尹文英, 卜照义. 松嫩草原中度退化草地不同植被恢复方式下土壤线虫的群落特征. *生态学报*, 2008, 28(1): 1-12.
- [30] 杨效东, 唐勇, 唐建维. 热带次生林火烧前后土壤节肢动物群落组成和分布特征的变化. *生态学杂志*, 2001, 20(5): 32-35.
- [31] 林英华, 聂必红, 郑士凤, 何亨晔, 肖文发. 重庆五里坡自然保护区地表无脊椎动物群落多样性. *林业科学研究*, 2009, 22(2): 219-225.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.32 ,No.15 August ,2012(Semimonthly)

CONTENTS

Effects of grazing on litter decomposition in two alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibet Plateau	ZHANG Yanbo, LUO Peng, SUN Geng, et al (4605)
Distribution pattern and their influencing factors of invasive alien plants in Beijing	WANG Suming, ZHANG Nan, YU Linqian, et al (4618)
Simulation of CO ₂ and H ₂ O fluxes over temperate mixed forest and sensitivity analysis of layered methods: stomatal conductance-photosynthesis-energy balance coupled model	SHI Tingting, GAO Yufang, YUAN Fenghui, et al (4630)
Analysis on the responses of flood storage capacity of Dongting Lake to the changes of landscape patterns in Dongting Lake area	LIU Na, WANG KeLin, DUAN Yafeng (4641)
Integrated water risk assessment in Daliao River estuary area	YU Ge, CHEN Jing, ZHANG Xueqing, et al (4651)
Discussion on the standardized method of reference sites selection for establishing the Benthic-Index of Biotic Integrity	QU Xiaodong, LIU Zhigang, ZHANG Yuan (4661)
Genetic diversity analysis of different age of a Dalian population of the Manila clam <i>Ruditapes philippinarum</i> by EST-SSR	YU Zhifei, YAN Xiwu, ZHANG Yuehuan, et al (4673)
Geostatistical analysis of spatial heterogeneity of yellowfin tuna (<i>Thunnus albacares</i>) purse seine catch in the western Indian Ocean	YANG Xiaoming, DAI Xiaojie, ZHU Guoping (4682)
Seasonal differences in habitat selection of the Crocodile lizard (<i>Shinisaurus crocodilurus</i>) in Luokeng Nature Reserve, Guangdong	WU Zhengjun, DAI Dongliang, NIN Jiajia, et al (4691)
Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu	WEI Qiang, LING Lei, CHAI Chunshan, et al (4700)
Dynamics of soil organic carbon and total nitrogen contents in short-rotation triploid <i>Populus tomentosa</i> plantations	ZHAO Xuemei, SUN Xiangyang, KANG Xiangyang, et al (4714)
Grazing effects on eco-stoichiometry of plant and soil in Hulunbeir, Inner Mongolia	DING Xiaohui, GONG Li, WANG Dongbo, et al (4722)
Effect of elevated ultraviolet-B (UV-B) radiation on CH ₄ emission in herbicide resistant transgenic rice from a paddy soil	LOU Yunsheng, ZHOU Wenlin (4731)
NMR spectroscopy based metabolomic analysis of <i>Thellungiella salsuginea</i> under salt stress	WANG Xinyu, WANG Lihua, YU Ping, et al (4737)
Screening and identification of associative nitrogen fixation bacteria in rhizosphere of sugarcane in Guangxi	HU Chunjin, LIN Li, SHI Guoying, et al (4745)
Effects of different rice-crab production modes on soil labile organic carbon and enzyme activities	AN Hui, LIU Mingda, WANG Yaojing, et al (4753)
The characteristics of soil microbial communities at burned forest sites for the Great Xingan Mountains	BAI Aiqin, FU Bojie, QU Laiye, et al (4762)
Changes of soil faunal communities during the restoration progress of <i>Abies faxoniana</i> Forests in Northwestern Sichuan	CUI Liwei, LIU Shirong, LIU Xingliang, et al (4772)
The effects of the endophytic fungus <i>Ceratobasidium stevensii</i> B6 on <i>Fusarium oxysporum</i> in a continuously cropped watermelon field	XIAO Yi, DAI Chuanchao, WANG Xingxiang, et al (4784)
Population ecology of <i>Aulacoseira granulata</i> in Xijiang River	WANG Chao, LAI Zini, LI Yuefei, et al (4793)
Evaluation of ecosystem sustainability for large-scale constructed wetlands	ZHANG Yiran, WANG Renqing, ZHANG Jian, et al (4803)
MIS3b vegetation and climate changes based on pollen and charcoal on Qianxi Plateau	ZHAO Zengyou, YUAN Daoxian, SHI Shengqiang, et al (4811)
The effects of stemflow on the formation of "Fertile Island" and "Salt Island" for <i>Haloxylon ammodendron</i> Bge	LI Congjuan, LEI Jiaqiang, XU Xinwen, et al (4819)
Accumulation and translocation of dry matter and nutrients of wheat rotated with legumes and its relation to grain yield in a dryland area	YANG Ning, ZHAO Hubing, WANG Zhaohui, et al (4827)
Occurrence characteristics of <i>akashiwo sanguinea</i> bloom caused by land source rainwater	LIU Yihao, SONG Xiukai, JIN Yang, et al (4836)
Analysis on landscape pattern change and its driving forces of Yancheng National Natural Reserve	WANG Yanfang, SHEN Yongming (4844)
Resource potential assessment of urban roof greening and development strategies: a case study in Futian central district, Shenzhen, China	SHAO Tianran, LI Chaosu, ZENG Hui (4852)
Analysis of the dynamic coupling processes and trend of regional eco-economic system development in the Yellow River Delta	WANG Jieyong, WU Jianzhai (4861)
The diversity parameters of butterfly for ecological function divisions in Chongqing	LI Aimin, DENG Heli, MA Qi (4869)
Review and Monograph	
Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas	WANG Xinyuan, LI Yulin, ZHAO Xueyong, et al (4890)
Temperature sensitivity of soil respiration: uncertainties of global warming positive or negative feedback	LUAN Junwei, LIU Shirong (4902)
The primary factors controlling methane uptake from forest soils and their responses to increased atmospheric nitrogen deposition: a review	CHENG Shulan, FANG Huajun, YU Guirui, et al (4914)
The research progresses on biological oxidation and removal of nitrogen in lakes	FAN Junnan, ZHAO Jianwei, ZHU Duanwei (4924)
Scientific Note	
Cutting effects on growth and wastewater purification of <i>Cyperus alternifolius</i> in constructed wetland	LÜ Gaiyun, HE Huaidong, YANG Danjing, et al (4932)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 15 期 (2012 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 15 (August, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元