

常绿阔叶林不同砍伐处理下土壤动物的群落特征

陈小鸟^{1,2} 由文辉^{1,2} 王向阳^{1,2} 易 兰^{1,2*}

1 (华东师范大学环境科学系, 上海 200062)

2 (浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站, 浙江宁波 315114)

摘要: 为了解不同砍伐处理对常绿阔叶林中土壤动物群落结构的影响, 于2007年7月至2008年4月在浙江天童地区常绿阔叶林中对5个砍伐4年后的恢复样地进行四季采样。样地处理分别是: (I) 去除大树保留萌枝、(II) 去除地表植物保留枯枝落叶层、(III) 去除地表植物和10 cm表土、(IV) 清除下木层保留大树及(V)对照。结果显示: I号样地土壤动物个体数量最多, 除I号样地与III号样地差异显著外($P<0.05$), 其他样地间不存在显著差异; 各样地表层土壤动物数量均与5–10 cm、10–15 cm层有显著差异($P<0.05$); II号样地类群丰富度最高; I号样地DG指数最高, III号样地最低; 弹尾目、啮目、伪蝎目和半翅目与群落总体特征(DG指数)的相关性都达到了极显著水平($P<0.001$)。结果表明砍伐在一定程度上改变了土壤动物的类群组成, 砍伐强度越大, 土壤动物受影响越大。

关键词: 干扰, 土壤动物, 常绿阔叶林, 天童

Community traits of soil animal under different ground cover treatments in evergreen broad-leaved forest

Xiaoniao Chen^{1,2}, Wenhui You^{1,2}, Xiangyang Wang^{1,2}, Lan Yi^{1,2}

1 Department of Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062

2 Tiantong National Station of Forest Ecosystem, Chinese National Ecosystem Observation and Research Network, Ningbo, Zhejiang 315114

Abstract: To understand the effects of ground cover removal on soil animal communities, we investigated the soil fauna community in an evergreen broad-leaved forest logged four years ago at Tiantong, Zhejiang Province between July, 2007 and April, 2008. We used the five following treatments in five sites: (I) big trees with height>8 m and DBH>5 cm were removed but sprouts retained; (II) ground surface vegetation was removed but litter retained; (III) all vegetation and 0–10 cm topsoil were removed; (IV) undergrowth was removed but big trees retained; and (V) a control plot without any disturbance. Soil animal density only differed between site I and site III ($P<0.05$). The highest density was found at site I. Species richness of soil animals in the 0–5 cm layer was significantly higher than in the 5–10 cm and 10–15 cm layer ($P<0.05$). Site II was higher than the other four sites in terms of group richness. Based on the density-group index, diversity was highest at site I and lowest at site III. The density of Collembola, Psocoptera, Pseudoscorpiones and Hemiptera were correlated with changes in the density-group index ($P<0.001$). Our results indicate ground cover characteristics impact the composition of soil communities; the more intense the disturbance, the greater the influence on soil animals.

Key words: disturbance, soil animal, evergreen broad-leaved forest, Tiantong

土壤动物是森林生态系统的重要组成部分, 它们不仅影响生态系统中分解与矿化过程, 为林木生长提供营养物质, 还直接参与土壤的形成, 对土壤物质能量的迁移转化具有特殊贡献(尹文英, 1992)。

干扰是生态系统中普遍存在的现象, 其形式多样, 对土壤动物产生不同的影响, 如不同土地利用条件(Ponge *et al.*, 2003; 吴东辉等, 2006; 李淑梅等, 2008)、不同耕作方式(陈欣等, 1999; 高明等, 2004)、

收稿日期: 2008-11-19; 接受日期: 2009-03-05

基金项目: 浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站开放课题(51X1412E)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: lyi@des.ecnu.edu.cn

施肥(林英华, 2003; 徐国良等, 2006)等均能使土壤动物类群组成、数量与多样性发生变化(Bengtsson *et al.*, 2000)。砍伐作为干扰的一种形式, 是林业生产和森林经营活动的重要组成部分, 其对当地和周边地区的生态环境有较大影响, 砍伐干扰对土壤动物的影响已成为森林经营关注的热点之一(肖玖金等, 2008)。

中国是全球常绿阔叶林分布面积最大、类型最丰富、发育最典型的国家, 然而由于长期以来对常绿阔叶林不合理的开发利用, 乱砍滥伐及无节制的樵采等, 使常绿阔叶林生态系统严重退化, 不少地区呈现出“白色沙丘”或“红色沙漠”的极度退化景观(温远光, 1998)。在不同强度干扰和砍伐的影响下, 常绿阔叶林中植物群落多处于不同演替阶段, 植物种类组成和土壤养分含量也发生了相应变化(阎恩荣等, 2008)。这一系列变化中, 土壤动物受到怎样影响, 它的变化能否反映不同的干扰强度, 长期以来很少有人对此问题进行详细研究。本研究在浙江天童国家森林公园对不同砍伐处理下常绿阔叶林中的土壤动物进行调查, 探讨它们的群落特征及其对不同干扰的响应, 以期对不同干扰处理下土壤动物的研究提供资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

天童国家森林公园(29°48'N, 121°47'E)位于浙江省宁波市鄞州区, 距离宁波市区28 km。属典型的亚热带季风气候, 年平均温度为16.2℃。年均降雨量为1,374.7 mm, 主要集中在夏季(6-8月)。年平均相对湿度在83%左右。土壤类型为山地黄红壤(宋永昌和陈小勇, 2007)。

研究地位于天童放羊山东南坡, 海拔260 m, 坡度20°-30°。沿用宋永昌等(宋永昌和陈小勇, 2007)2003年设置的5个20 m×20 m永久样地, 其中I、II、III号样地位于山路上方, 样地间相距5 m, IV、V号样地位于下山路下方, 两者之间相距近100 m(图1)。为研究常绿阔叶林受破坏后的群落动态和恢复过程, 2003年10月, 根据当地的森林干扰频度和强度情况, 人工模拟4种不同强度的干扰进行采伐: (1) 在样地I中对高度大于8 m, 胸径大于5 cm的大树进行择伐(保留萌枝); (2) 在样地II中将地上植物全部清除, 保留枯枝落叶层; (3) 在样地III中, 清除

地上全部植物, 并清除枯枝落叶层和表层土(0-10 cm); (4) 在样地IV中仅清除下木层和草本层, 保留大树; (5) 样地V为对照, 未经任何处理。经过4年恢复, I号样地中优势植物^①为木荷(*Schima superba*)、米楮(*Castanopsis carlesii*)、石栎(*Lithocarpus glaber*)、格药枥(*Eurya muricata*)、毛柄连蕊茶(*Camellia fraterna*)、老鼠矢(*Symplocos stellaris*)、山矾(*S. sumuntia*)、四川山矾(*S. setchuensis*)、海桐山矾(*S. heishanensis*)和窄基红褐枥(*Eurya rubiginosa var. attenuata*); II号样地优势植物为木荷、米楮、茅栗(*Castanea seguinii*)、栲(*Castanopsis fargesii*)、小叶青冈(*Cyclobalanopsis myrsinifolia*)、石栎、细叶青冈(*C. gracilis*)、杨梅(*Myrica rubra*)、格药枥和毛柄连蕊茶; III号样地中优势植物为木荷、米楮、细叶青冈、石栎、枫香(*Liquidambar formosana*)、苦楮(*Castanopsis sclerophylla*)、杨梅、老鼠矢、格药枥和栲; IV号样地优势植物为木荷、马尾松(*Pinus massoniana*)、石栎、米楮、茅栗、细叶青冈、枫香、海桐山矾、苦楮和东南石栎; V号样地优势植物为木荷、石栎、米楮、青冈、枫香、白栎(*Quercus fabric*)、苦楮、老鼠矢、花榈木和格药枥。

1.2 土壤动物采样、分离和鉴定

1.2.1 土壤动物采集

2007年7月至2008年4月对以上5个样地按春(4月)、夏(7月)、秋(10月)、冬(1月)四季进行大、中、小型土壤动物调查, 每个样地随机取5个点, 每点相距5 m以上。根据土壤的断面结构, 按凋落物层和其下的真土层(忻介六, 1986; 尹文英, 2000a)分别进行采样。

凋落物层: 用直径为30 cm圆形采集框进行采样, 所采样品用布袋带回实验室立即进行大、中型土壤动物的分离。

真土层: (1)大型土壤动物: 在采集完凋落物的样点下, 挖取直径为30 cm, 深15 cm的土样, 就地手拣放入70%酒精中带回; (2)中型土壤动物: 在大型土壤动物采集样点附近, 用直径为5 cm的不锈钢采样器按0-5 cm、5-10 cm、10-15 cm分层采集土样, 每点每层采集100 cm³土样; (3)小型土壤动物: 用直径为3.6 cm的不锈钢采样器按0-5 cm、5-10 cm、10-15 cm分层采集土样, 每点每层采集50 cm³土样。

^① 杨徐烽(2008)天童国家森林公园不同受损程度常绿阔叶林恢复初期研究: 植物群落与生境动态. 华东师范大学硕士学位论文。

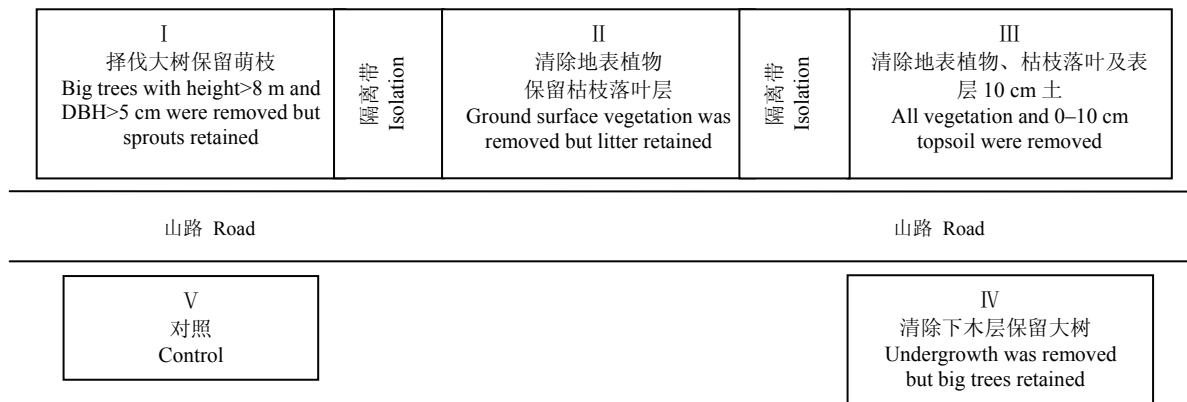


图1 样地设置示意图

Fig. 1 Distribution of the experimental sites

1.2.2 土壤动物的分离和鉴定

凋落物中大型土壤动物用手拣法, 中型土壤动物用塔式分离装置; 真土层中中型土壤动物用干漏斗法(Tullgren法)分离, 以上收集的样品均用75%酒精保存。小型土壤动物用湿漏斗法(Baermann法)分离提取, 进行活体镜检。

分离的样品在解剖镜下鉴定、计数, 所用鉴定工具书主要有《中国亚热带土壤动物》(尹文英, 1992)、《中国土壤动物检索图鉴》(尹文英, 2000b)、《昆虫分类图谱》(钟觉民, 1985)、《幼虫分类学》(钟觉民, 1990)等, 鉴定到目。

采集土壤样品时, 同时采集一份土样用于理化分析, 主要测定土壤pH、有机质(OC)、总氮(TN)和总磷(TP)含量。测定方法参见中科院南京土壤所《土壤理化分析》(1978)。

1.3 数据处理

土壤动物群落多样性采用以下几个指数进行计算(宋永昌和陈小勇, 2007):

(1) 密度—类群指数(DG):

$$DG = (g/G) \times \sum (D_i C_i / D_{\max} C)$$

式中 g 为所测定的某群落的实有类群数; G 为总类群数; D_{\max} 为第 i 类群的最多个体数; C_i/C 为第 i 个类群在 C 个群落中出现的比率。

(2) Shannon-Wiener指数(H'):

$$H' = -\sum n_i / N \ln(n_i / N)$$

式中 n_i 为第 i 个类群的个体数; N 为群落中所有类群的个体总数。

(3) Pielou均匀度指数: $J_s = H' / \ln S$

式中 S 为类群数

(4) Simpson优势度指数: $C = \sum P_i^2$ 式中 $P_i = n_i / N$

(5) Margalef丰富度指数: $D = (S - 1) / \ln N$

各类群数量优势度的划分: 占总密度10%以上者为优势类群, 1-10%为常见类群, 1%以下为稀有类群(易兰和由文辉, 2006)。统计分析时, 对土壤动物与总氮、总磷、有机质和pH值的关系进行了Pearson线性相关分析。各样地、各类群的差异用one-way ANOVA进行分析。上述分析通过SPSS11.5软件完成。

2 结果

2.1 土壤动物总体特征

5个样地4个季节共捕获土壤动物49,844只, 隶属于6门15纲33目(表1), 优势类群为线虫纲, 占总密度的77.82%; 常见类群为蜉蝣目、弹尾目、线蚓科及双翅目幼虫, 占总密度的19.83%; 其余28目为稀有类群, 仅占总密度的3.35%。其中凋落物层共获土壤动物23,906只, 隶属于8纲26目。优势类群为蜉蝣目(52.75%)和弹尾目(35.80%); 常见类群为双翅目幼虫和膜翅目, 分别占6.12%和1.85%; 其余22目为稀有类群, 占3.48%, 主要有缨翅目、鳞翅目幼虫、原尾虫和等足目。真土层共获大型土壤动物1,063只, 隶属于7纲22目, 中型土壤动物5,498只, 隶属于7纲27目, 小型土壤动物19,377只, 线虫纲占95.88%, 线蚓科占3.22%, 还有少量轮虫纲与涡虫纲动物。其中大型土壤动物中优势类群为等翅目(34.05%)、膜翅目(33.11%)和等足目(10.06%), 常见

表1 不同砍伐样地土壤动物类群组成(ind./m², Mean±SE)
Table 1 Composition of soil animal community in different sites

类群 Group	I		II		III		IV		V		平均密度 Average density	百分比 (%)
	密度 Density	百分比 (%)	密度 Density	百分比 (%)	密度 Density	百分比 (%)	密度 Density	百分比 (%)	密度 Density	百分比 (%)		
线虫纲 Nematoda	77,967.24 ± 235.09	77.71	56,868.46 ± 206.76	78.57	57,605.31 ± 214.82	83.40	51,988.87 ± 119.25	74.82	52,561.98 ± 125.44	74.72	59,398.37	77.82
蜱螨目 Acarina	9,752.75 ± 16.18	9.72	5,858.54 ± 6.59	8.09	3,967.49 ± 10.99	5.74	8,724.07 ± 20.70	12.6	8,595.14 ± 19.03	12.2	7,379.60	9.67
弹尾目 Collembola	5,892.55 ± 11.66	5.87	4,229.42 ± 8.44	5.84	2,615.88 ± 8.56	3.79	4,019.31 ± 11.80	5.78	3,802.15 ± 7.33	5.41	4,111.86	5.39
线蚓科 Enchytraeidae	2,305.76 ± 6.67	2.30	1,533.43 ± 5.95	2.12	2,555.12 ± 11.19	3.70	1,720.52 ± 4.52	2.48	1,979.08 ± 5.84	2.81	2,018.78	2.65
双翅目幼虫 Diptera larvae	2,180.47 ± 6.00	2.17	1,503.38 ± 1.79	2.08	1,356.35 ± 1.30	1.96	1,214.04 ± 3.61	1.75	1,845.94 ± 1.76	2.62	1,620.04	2.12
轮虫纲 Rotatoria	540.36 ± 1.70	0.54	704.10 ± 4.24	0.97	196.49 ± 1.13	0.28	589.48 ± 2.32	0.85	638.60 ± 2.96	0.91	533.81	0.70
膜翅目 Hymenoptera	482.43 ± 1.24	0.48	317.61 ± 1.52	0.44	395.42 ± 3.45	0.57	474.65 ± 1.35	0.68	292.14 ± 1.18	0.42	392.45	0.51
等翅目 Isoptera	268.10 ± 1.45	0.27	618.95 ± 2.93	0.86	51.64 ± 0.13	0.07	50.93 ± 0.40	0.07	87.82 ± 0.66	0.12	215.49	0.28
原尾目 Protura	310.04 ± 1.84	0.31	245.56 ± 0.73	0.34	103.27 ± 0.42	0.15	148.55 ± 0.86	0.21	135.92 ± 0.60	0.19	188.67	0.25
啮目 Psocoptera	110.35 ± 0.63	0.11	138.65 ± 0.82	0.19	74.98 ± 0.45	0.11	70.73 ± 0.40	0.10	62.25 ± 0.39	0.09	91.39	0.12
综合纲 Symphyla	87.01 ± 0.65	0.09	61.54 ± 0.51	0.09	27.69 ± 0.26	0.04	121.67 ± 0.76	0.18	56.59 ± 0.08	0.08	70.90	0.09
鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae	74.27 ± 0.15	0.07	43.15 ± 0.15	0.06	16.98 ± 0.08	0.02	48.81 ± 0.03	0.07	31.12 ± 0.08	0.04	42.87	0.06
四螨目 Tetramerocera	45.98 ± 0.17	0.05	18.39 ± 0.11	0.03	8.49 ± 0.08	0.01	41.03 ± 0.24	0.06	53.76 ± 0.23	0.08	33.53	0.04
等足目 Isopoda	42.44 ± 0.25	0.04	58.71 ± 0.38	0.08	19.81 ± 0.08	0.03	24.05 ± 0.14	0.03	5.66 ± 0.03	0.01	30.13	0.04
缨翅目 Thysanoptera	37.49 ± 0.12	0.04	45.27 ± 0.19	0.06	14.15 ± 0.05	0.02	16.27 ± 0.11	0.02	21.22 ± 0.13	0.03	26.88	0.04
鞘翅目 Coleoptera	39.61 ± 0.17	0.04	29.00 ± 0.18	0.04	14.85 ± 0.09	0.02	33.95 ± 0.03	0.05	14.85 ± 0.09	0.02	26.46	0.03
鳞翅目幼虫 Lepidoptera larvae	56.80 ± 0.46	0.06	17.68 ± 0.10	0.02	9.90 ± 0.04	0.01	16.27 ± 0.09	0.02	19.81 ± 0.11	0.03	24.09	0.03
伪蝎目 Pseudoscorpiones	54.47 ± 0.10	0.05	16.27 ± 0.15	0.02	0.71 ± 0.01	0.00	32.54 ± 0.29	0.05	11.31 ± 0.08	0.02	23.06	0.03
涡虫纲 Turbellaria	—	—	16.37 ± 0.16	0.02	—	—	65.50 ± 0.66	0.09	16.37 ± 0.16	0.02	19.65	0.03
同翅目 Homoptera	28.30 ± 0.25	0.03	26.17 ± 0.17	0.04	2.12 ± 0.01	0.00	9.20 ± 0.09	0.01	27.59 ± 0.16	0.04	18.67	0.02
蜘蛛目 Araneae	10.61 ± 0.05	0.01	6.37 ± 0.03	0.01	3.54 ± 0.02	0.01	36.78 ± 0.22	0.05	29.00 ± 0.15	0.04	17.26	0.02
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	4.95 ± 0.02	0.00	—	—	1.41 ± 0.01	0.00	11.32 ± 0.08	0.02	21.22 ± 0.11	0.03	7.78	0.01
双尾目 Diplura	0.71 ± 0.01	0.00	—	—	17.68 ± 0.17	0.03	11.32 ± 0.10	0.02	0.71 ± 0.01	0.00	6.08	0.01
盲蛛目 Opiliones	0.71 ± 0.01	0.00	—	—	—	—	—	—	26.17 ± 0.25	0.04	5.38	0.01
地蜈蚣目 Geophilomorpha	9.20 ± 0.08	0.01	0.71 ± 0.01	0.00	9.90 ± 0.09	0.01	3.54 ± 0.03	0.01	1.41 ± 0.01	0.00	4.95	0.01
蜚蠊目 Blattoptera	9.90 ± 0.08	0.01	2.12 ± 0.02	0.00	2.12 ± 0.01	0.00	4.95 ± 0.03	0.01	2.12 ± 0.01	0.00	4.24	0.01
蜈蚣目 Scolopendromorpha	8.49 ± 0.09	0.01	9.90 ± 0.08	0.01	—	—	—	—	—	—	3.68	0.00
倍足纲 Diplopoda	8.49 ± 0.08	0.01	0.71 ± 0.01	0.00	—	—	—	—	1.41 ± 0.01	0.00	2.12	0.00
半翅目 Hemiptera	2.83 ± 0.01	0.00	2.83 ± 0.02	0.00	0.71 ± 0.01	0.00	2.12 ± 0.02	0.00	—	—	1.70	0.00
后孔寡毛目 Oligochaeta opisthoptera	0.71 ± 0.01	0.00	1.41 ± 0.001	0.00	1.41 ± 0.01	0.00	4.24 ± 0.03	0.01	0.71 ± 0.01	0.00	1.70	0.00
裂盾目 Schizomida	—	—	8.49 ± 0.08	0.01	—	—	—	—	—	—	1.70	0.00
直翅目 Orthoptera	—	—	—	—	1.41 ± 0.01	0.00	0.711 ± 0.01	0.00	—	—	0.42	0.00
中腹足目 Mesogastropoda	—	—	0.71 ± 0.01	0.00	—	—	0.71 ± 0.01	0.00	—	—	0.28	0.00
类群数 Number of groups	29		29		27		29		28		33	

I代表择伐大树的样地; II代表清除植物, 保留枯枝落叶层的样地; III代表去除地上全部植物及地表10 cm土层的样地; IV代表清除下木层和草本层, 保留大树的样地; V代表对照样地。

I, big trees with height>8 m and DBH>5 cm were removed but root collar sprouts were retained; II, ground surface vegetation was removed but litter was retained; III, all vegetation and 0–10 cm topsoil were removed; IV, undergrowth was removed but big trees were retained; V, Control

类群为双翅目幼虫和鞘翅目幼虫, 其余为稀有类群。中型土壤动物中优势类群为蜚蠊目(55.73%)和弹尾目(31.03%), 常见类群为双翅目幼虫、膜翅目、原尾虫和等翅目, 其余为稀有类群。

对0-15 cm土层中小型土壤动物的垂直分布进行分析, 结果表明: 土壤动物群落在空间上存在明显的成层现象, 0-5 cm层为23类, 5-10 cm层为15类, 10-15 cm层达到18类。0-15 cm土层中小型土壤动物数量表现为向下递减的趋势, 且0-5 cm层与5-10 cm、10-15 cm层有极显著差异($F=81.67, P<0.001$), 中型土壤动物68.26%生存于0-5 cm土层, 小型土壤动物65.59%生存于0-5 cm土层。

2.2 不同砍伐处理下土壤动物的类群组成与数量分布

由表1可知, 不同砍伐样地中土壤动物的类群数较接近, 但类群组成不同。线虫在5个样地中均为优势类群, 蜚蠊目在IV、V号样地中为优势类群, 而在I-III号样地中为常见类群。弹尾目、线蚓、双翅目幼虫在5个样地中均为常见类群。除上述的优势类群与常见类群外, 聚集在I号样地的其他类群最多, III号样地较少。

5个样地中, I号样地土壤动物数量较多, 占总数的26.29%, 其余4个样地间没有较大差别, 均在18%左右。其中, 优势类群线虫在I号样地中最多, 占26.25%, 在其他4个样地中均在17-19%之间; 蜚蠊目与弹尾目也是在I号样地最多, 分别达到26.43%和28.66%, III号样地最少, 仅为10.75%和12.72%。

对不同样地土壤动物主要类群的密度进行显著性分析发现, 蜚蠊目、弹尾目和鞘翅目幼虫在I、III号样地中有显著性差异, 其 F 值分别为8.85、5.13

和10.92($P<0.05$), 而在其他样地中无显著性差异。

2.3 不同砍伐处理下土壤动物群落多样性

应用不同多样性指数对土壤动物群落多样性的水平分布进行测度。结果显示(表2), 各个指数在不同的砍伐样地中差别不明显, Shannon-Wiener指数与Pielou均匀度指数在各样地中变化是 $V>IV>II>I>III$, 密度-类群指数则是 $I>IV>II>V>III$, 优势度指数在V号样地中达到最高, I号样地最低; 丰富度指数在II号样地最高, V号样地最低。

2.4 不同砍伐处理下土壤动物与环境因子的关系

如表3所示, 各样地凋落物层总氮没有显著性差异; 有机质存在显著性差异($F = 3.95, P<0.05$), IV、V号样地较接近, 在5个样地中最高, 分别为57.23 mg/g和56.47 mg/g, II号样地最低, 仅为44.47 mg/g; pH也存在显著性差异($F = 5.94, P<0.001$), II号样地最高, 为4.48, 其余4个样地较接近。0-15 cm土层中总氮、总磷无显著性差异, 均在I号样地中达到最高; 有机质存在显著差异($F = 4.76, P<0.001$), 在I号样地最高, 达到4.38 mg/g, III号样地最低, 仅为2.98 mg/g; pH也存在显著性差异($F = 11.38, P<0.001$), 其中III号样地最高, 达到3.98 mg/g, V号样地最低, 仅为3.77 mg/g。总体上讲, III号样地土壤养分含量比其他4个样地都低。

Pearson相关分析表明, 凋落物层土壤动物的总密度与pH($r = 0.275, P<0.05$)、总氮($r = 0.224, P<0.05$)呈显著正相关, 而与有机质、总磷相关性不显著($P > 0.05$)。而真土层中土壤动物总密度与pH($r = 0.184, P<0.001$)、有机质($r = 0.401, P<0.001$)和总氮($r = 0.170, P<0.001$)呈显著正相关, 与总磷相关性不显著。凋落物层与土层中土壤动物主要类群与一些环境因子有显著相关(表4)。

表2 5样地不同土壤动物群落多样性指数的比较

Table 2 Comparison of diversity indices of soil animal community in five sites

样地 Sites	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index (H')	密度-类群指数 Density-Group index (DG)	均匀度指数 Pielou evenness index (Js)	优势度指数 Simpson dominant index (C)	丰富度指数 Margalef abundance index (D)	类群总数 Total number of groups	数量 Percentage (%)
I	0.849	18.826	0.266	0.382	2.924	29	26.29
II	0.901	14.303	0.268	0.372	3.075	29	18.98
III	0.726	8.410	0.220	0.398	2.980	27	18.10
IV	0.956	15.224	0.284	0.420	3.043	29	18.20
V	0.958	11.635	0.288	0.422	2.921	28	18.43

样地代号同表1

Site codes are the same as in Table 1.

表3 不同样地凋落物层和土层理化因子($n = 20$, Mean \pm SE)的比较

Table 3 Comparison for physicochemical factors in the litter and 0–15 cm soil layer of different sites

样地 Sites	凋落物层 Litter layer				0–15 cm土层 Soil of 0–15 cm depth			
	pH	有机质 OC (mg/g)	总氮 TN (mg/g)	总磷 TP (mg/g)	pH	有机质 OC (mg/g)	总氮 TN (mg/g)	总磷 TP (mg/g)
I	4.23 \pm 0.07 ^b	45.95 \pm 2.77 ^b	15.56 \pm 0.75 ^a	0.38 \pm 0.02 ^a	3.87 \pm 0.02 ^b	4.38 \pm 0.28 ^a	2.50 \pm 0.59 ^a	0.15 \pm 0.03 ^a
II	4.48 \pm 0.05 ^a	44.47 \pm 3.20 ^b	16.22 \pm 0.93 ^a	0.34 \pm 0.02 ^{ab}	3.85 \pm 0.02 ^b	3.98 \pm 0.21 ^{ab}	2.20 \pm 0.10 ^a	0.12 \pm 0.01 ^a
III	4.16 \pm 0.05 ^b	48.81 \pm 3.86 ^{ab}	15.55 \pm 1.11 ^a	0.29 \pm 0.02 ^b	3.98 \pm 0.03 ^a	2.98 \pm 0.13 ^c	1.68 \pm 0.08 ^a	0.12 \pm 0.01 ^a
IV	4.27 \pm 0.05 ^b	57.23 \pm 2.37 ^a	16.70 \pm 0.88 ^a	0.35 \pm 0.02 ^{ab}	3.87 \pm 0.02 ^b	3.70 \pm 0.23 ^{ab}	1.99 \pm 0.11 ^a	0.11 \pm 0.01 ^a
V	4.18 \pm 0.04 ^b	56.47 \pm 2.47 ^a	14.95 \pm 0.68 ^a	0.35 \pm 0.01 ^{ab}	3.77 \pm 0.02 ^c	3.63 \pm 0.29 ^b	1.86 \pm 0.12 ^a	0.12 \pm 0.01 ^a

样地代号同表1, 同列中上标字母不同表示差异显著[Duncan检验]

Site codes are the same as in Table 1. Different superscripts in the same column show the significant difference.

表4 凋落物层与土层中主要类群与环境因子的相关性

Table 4 Relationship between main groups and physicochemical factors in litter and 0–15 cm soil layer

动物类群 Groups	凋落物层 Litter layer				0–15 cm土层 Soil of 0–15 cm depth			
	pH	有机质 OC	总氮 TN	总磷 TP	pH	有机质 OC	总氮 TN	总磷 TP
线虫纲 Nematoda					+	+	+	n
蜱螨目 Acarina	+	n	+	n	n	+	+	+
弹尾目 Collembola	+	n	n	n	n	+	+	n
总密度	+	n	+	n	+	+	+	n

+代表正相关, n代表不相关($P < 0.05$) + represents positive correction, n represents uncorrelation.

3 讨论

森林土壤动物群落的组成和分布,一方面与森林立地和土壤条件有关,另一方面受森林植被类型的影响(余广彬和杨效东, 2007)。已有大量研究表明土壤动物群落组成是与植被状况密切相关的(廖崇惠等, 1995, 1997; 张雪萍等, 1999)。本研究调查的5块样地砍伐强度不同, 样地中植被恢复程度不同, 土壤动物类群组成虽然相似, 但优势类群发生了改变, 群落个体数及多样性也有所差异, 然而最高值并非出现在未受干扰的V号样地, 这与余广彬和杨效东(2007)对西双版纳不同演替阶段土壤动物的比较结果类似, 森林经过砍伐后, 土壤动物群落即进入恢复过程, 群落中土壤动物类群数和个体数量随演替时间而逐步增加, 此时树种成分不断更新, 丰富的凋落物为土壤动物的生存和发展提供了条件, 因此群落多样性在恢复初期高于稳定期。

III号样地土壤动物群落多样性明显低于其他4个样地, 主要是因为III号样地不仅清除了地上全部植物, 还清除了枯枝落叶层和表层土(0–10 cm), 而表层土是营养物质含量最高的部分, 土壤动物多生

活于表层土中。一些研究也表明土壤养分、pH值等与土壤动物群落有密切的联系(殷秀琴等, 2003; 葛宝明等, 2005; 刘继亮等, 2008), III号样地土壤有机质含量、总氮、总磷等营养物质较之另外4个样地均低, 因此III号样地土壤动物多样性最低。

各样地之间总氮、总磷没有显著性差异, 有机质差异明显。各理化因子与土壤动物相关性分析结果表明pH值、总氮与土壤动物密度呈显著正相关。刘继亮等(2008)在左家自然保护区对大型土壤动物与环境因子的关系研究中, 得出土壤有机质、pH、全氮、全磷对蚯蚓、线蚓、石蜈蚣、双翅目幼虫、鞘翅目成虫、缨翅目、柄眼目的分布影响较大, 其余类群的分布受土壤环境因子影响较小, 环境因子的差异影响了大型土壤动物在空间上的分布。本研究得出线虫、蜱螨目和弹尾目与有机质均呈显著正相关, 这可能是各理化因子对土壤动物的影响并不是最主要的, Reeleder等(2006)研究得出不同土壤类型对土壤动物的影响是凌驾于其他理化因子之上的。因此土壤中的理化因子虽有差异, 但是其本底土壤类型无异, 并不能由此做出土壤动物受何种理化因子影响的论断。

综上所述,我们认为I、II、IV号样地适度的干扰不仅不会降低土壤动物多样性,相反还能增加多样性。这三个样地虽受不同程度的干扰,但干扰强度较低,仅对地上植物进行处理,或清除下木层,或清除大树,并没有破坏土壤动物赖以生存的生境,这三个样地的土壤动物多样性均较未经处理的V号对照样地高;III号样地受干扰程度较大,不仅清除了地上植物部分,且去除最适宜土壤动物生存的10 cm表层土,这在很大程度上改变了土壤动物生存的微环境,即使经过四年的恢复,土壤动物多样性也较其他样地低。

致谢: 感谢环境科学系阎恩荣副教授对文章写作方面给予指导,在野外工作中得到天童国家生态站老师与同学的帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- Andrés P, Mateos E (2006) Soil mesofaunal responses to post-mining restoration treatments. *Applied Soil Ecology*, **33**, 67–68.
- Bengtsson J, Nilsson SG, Franc A, Menozzi P (2000) Biodiversity, disturbances, ecosystem function and management of European forests. *Forest Ecology and Management*, **132**, 39–50.
- Chen X (陈欣), Tang JJ (唐建军), Wang ZQ (王兆骞) (1999) The impacts of agricultural activities on biodiversity. *Chinese Biodiversity* (生物多样性), **7**, 234–239. (in Chinese with English abstract)
- Gao M (高明), Zhou BT (周保同), Wei CF (魏朝富), Xie DT (谢德体), Zhang L (张磊) (2004) Effect of tillage system on soil animal, microorganism and enzyme activity in paddy field. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **15**, 1177–1181. (in Chinese with English abstract)
- Ge BM (葛宝明), Kong JM (孔军苗), Cheng HY (程宏毅), Zheng X (郑祥), Bao YX (鲍毅新) (2005) Community structure of soil macrofauna in different using types of soils in autumn. *Zoological Research* (动物学研究), **26**, 272–278. (in Chinese with English abstract)
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (中科院南京土壤研究所) (1978) *Soil Physical and Chemical Analysis* (土壤理化分析). Shanghai Scientific and Technical Publishers, Shanghai. (in Chinese)
- Li SM (李淑梅), Ma KS (马克世), Li JP (李季平) (2008) Study on the biodiversity of soil fauna in different land use type. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), **36**, 695–696, 744. (in Chinese with English abstract)
- Liao CH (廖崇惠), Lin SM (林少明), Li JX (李健雄) (1995) A comparative study of soil animals on litter decomposition in varied types of artificial forest. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **15**(Suppl.), 197–203. (in Chinese with English abstract)
- Liao CH (廖崇惠), Li JX (李健雄), Huang HT (黄海涛) (1997) Soil animal community diversity in the forest of the southern subtropical region, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **17**, 549–555. (in Chinese with English abstract)
- Lin YH (林英华) (2003) *Effect of Long-term Fertilization in Agricultural Soil Fauna Community and its Evaluation* (长期施肥对农田土壤动物群落影响及安全评价). PhD dissertation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing. (in Chinese with English summary)
- Liu JL (刘继亮), Yin XQ (殷秀琴), Qiu LL (邱丽丽) (2008) Large-sized soil fauna and soil factors in Zuojia Nature Reserve. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), **45**, 130–136. (in Chinese with English abstract)
- Ponge JF, Gillet S, Dubs F, Fedoroff E, Haese L, Sousa JP, Lavelle P (2003) Collembola communities as bioindicators of land use intensification. *Soil Biology & Biochemistry*, **35**, 813–826.
- Reeleder RD, Miller JJ, Ball Coelho BR, Roy RC (2006) Impacts of tillage, cover crop, and nitrogen on populations of earthworms, microarthropods, and soil fungi in a cultivated fragile soil. *Applied Soil Ecology*, **33**, 243–257.
- Song YC (宋永昌), Chen XY (陈小勇) (2007) *Degradation Mechanism and Ecological Restoration of Evergreen Broad-leaved Forest Ecosystem in East China* (中国东部常绿阔叶林生态系统退化机制与生态恢复). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Wen YG (温远光) (1998) Restorative tend and rate of the species diversity of recovering process in degraded ecosystem of evergreen broad-leaved forest. *Journal of Guangxi Agricultural University* (广西农业大学学报), **17**, 93–106. (in Chinese with English abstract)
- Wu DH (吴东辉), Hu K (胡克) (2003) Large soil animals indicator functions of reclamation of ecological environment in iron-mine abandoned of Dagushan, Anshan City. *Journal of Jilin University(earth science edition)* (吉林大学学报(地球科学版)), **33**, 213–216. (in Chinese with English abstract)
- Wu DH (吴东辉), Zhang B (张柏), Chen P (陈鹏) (2006) Community structure and composition of soil macrofauna under different land use in Changchun City. *Acta Zoologica Sinica* (动物学报), **52**, 279–287. (in Chinese with English abstract)
- Xiao JJ (肖玖金), Zhang J (张健), Yang WQ (杨万勤), Huang YM (黄玉梅), Yang L (杨鲁), Li JW (李纪伟), Yan D (严姘) (2008) Short-term response of soil fauna community to harvesting disturbance in *Eucalyptus garndis* plantation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **28**, 4531–4539. (in Chinese with English abstract)
- Xin JL (忻介六) (1986) *The Knowledge of Soil Animal* (土壤动物知识). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Xu GL (徐国良), Mo JM (莫江明), Zhou GY (周国逸) (2006)

- Effects of N deposition on soil fauna: a summary for one year. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), **28**(3), 1–7. (in Chinese with English abstract)
- Xu GL (徐国良), Zhou GY (周国逸), Mo JM (莫江明), Zhou XY (周小勇), Peng SJ (彭闪江) (2005) The responses of soil fauna composition to forest restoration in Heshan. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **25**, 1670–1677. (in Chinese with English abstract)
- Yan ER (阎恩荣), Wang XH (王希华), Zhou W (周武) (2008) N:P stoichiometry in secondary succession in evergreen broad-leaved forest, Tiantong, East China. *Journal of Plant Ecology(Chinese Version)* (植物生态学报), **32**, 13–22. (in Chinese with English abstract)
- Yi L (易兰), You WH (由文辉) (2006) Community structure and seasonal change of soil animals in *Castanopsis fargesii* forest at Tiantong, Zhejiang Province. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*(华东师范大学学报(自然科学版)), **2**, 112–120. (in Chinese with English abstract)
- Yin WY (尹文英) (1992) *Subtropical Soil Animals of China* (中国亚热带土壤动物). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Yin WY (尹文英) (2000a) *Soil Animals of China* (中国土壤动物). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Yin WY (尹文英) (2000b) *Pictorial Keys to Soil Animals of China* (中国土壤动物检索图鉴). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Yin XQ (殷秀琴), Wang HX (王海霞), Zhou DW (周道玮) (2003) Characteristics of soil animals' communities in different agricultural ecosystem in the Songnen grassland of China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **23**, 1071–1078. (in Chinese with English abstract)
- Yu GB (余广彬), Yang XD (杨效东) (2007) Characteristics of litter and soil arthropod communities at different successional stages of tropical forest. *Biodiversity Science* (生物多样性), **15**, 188–198. (in Chinese with English abstract)
- Zhang XP (张雪萍), Li CY (李春艳), Yin XQ (殷秀琴), Chen P (陈鹏) (1999) Relation between soil animals and nutrients in the differently used forest lands. *Chinese Journal of Applied and Environment Biology* (应用与环境生物学报), **5**, 26–31. (in Chinese with English abstract)
- Zhong JM (钟觉民) (1985) *Insects Classification Map* (昆虫分类图谱). Jiangsu Science and Technology Press, Nanjing. (in Chinese)
- Zhong JM (钟觉民) (1990) *Taxology of Larva* (幼虫分类学). China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese)

(责任编辑: 傅声雷 责任编辑: 闫文杰)