

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

黄玉梅^{1,2}, 杨万勤¹, 张健^{1,*}, 卢昌泰², 刘旭¹, 王伟¹, 郭伟¹

(1. 四川农业大学林学院, 四川雅安 625014; 2. 四川农业大学都江堰分校, 四川都江堰 611830)

摘要: 受研究手段的限制, 有关森林物种组成对土壤动物群落影响的研究少有报道。采用人工除灌和除草的林地控制实验方法, 研究了亚高山人工林灌草层关键物种丧失对土壤动物群落结构的影响。结果表明: (1) 灌木层去除后土壤动物密度极显著低于对照 ($P < 0.01$); 线虫纲 (Nematoda) 优势度持续增加, 处理 15 个月时极显著高于对照 ($P < 0.01$); 土壤动物群落多样性指数极显著低于对照 ($P < 0.01$); 腐食性功能团类群数及个体数百分比有所下降。(2) 草本层去除后土壤动物密度显著低于对照 ($P < 0.05$); 线虫纲优势度持续增加, 处理 15 个月时显著高于对照 ($P < 0.05$); 土壤动物群落多样性指数极显著低于对照 ($P < 0.01$); 腐食性功能团类群数略低于对照, 个体数百分比无显著差异。综上所述, 林下灌草层去除, 尤其是灌木层去除, 导致土壤动物群落个体数量、多样性指数降低, 优势类群格局、腐食性功能团构成发生变化, 从而在一定程度上影响到森林生态系统的物质循环功能。

关键词: 亚高山; 针叶林; 灌草层去除; 土壤动物群落; 响应

Response of soil faunal community to simulated understory plant loss in the subalpine coniferous plantation of western Sichuan

HUANG Yumei^{1,2}, YANG Wanqin¹, ZHANG Jian^{1,*}, LU Changtai², LIU Xu¹, WANG Wei¹, GUO Wei¹

1 Forestry College, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China

2 Dujiangyan Campus, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, Sichuan, China

Abstract: Although numerous studies have been given to the effects of species composition and biodiversity on soil faunal communities in different ecosystems worldwide, far less information has been available on the relations between soil fauna diversity and plant species diversity in the forest ecosystem due to the limited technique. In order to understand the linkages of forest plant diversity with soil animal diversity, from July 2007 to October 2008, an experiment with herb and shrub layer removals was therefore conducted in the subalpine forest ecosystem of western Sichuan, which is sensitive to biotic and abiotic environment changes. After three months with the experiment of shrub and herb removals beneath the control plots, soil fauna density, group and diversity began to decrease significantly ($P < 0.01$), and the dominant groups were also changed. Moreover, the effect of plant removal experiment enhanced with the prolonged experiment. The removals of understory plant species made the numbers of Diplopoda, Acarina, Collembola and larvae of Diptera decrease more significantly. The effect of shrub removal on the structure of soil animal community is more significant than that of herb removal. Regardless of the treatments, the dominant groups were Nematoda, Acarina, and Collembola in the study forests. However, the removals of both herb and shrub layers significantly (RS: sig. = 0.002 < 0.01; RH: sig. = 0.039 < 0.05) increased the ratio of Nematoda in the dominant groups and density in the study plots. The ratios of the number of Nematoda to dominant groups changed from 39.5% to 60.58% after 15 months with herb layer removal in the study plot, and the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30771702;30471378); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-07-0592); 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAC01A11)

收稿日期: 2009-05-30; 修订日期: 2010-01-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: auldkgk@sicau.edu.cn

shrub layer removal made that ratio account for 78.91% of the dominant groups. Correspondingly, the removal of understory plant altered the value of A/C, because of the changes of dominance of Acarina and Collembola. Similarly, the removals of herb and shrub with 15 months significantly (RS: sig. = 0.025 < 0.05; RH: sig. = 0.014 < 0.05) decreased the indices of DG in soil animal community. Meanwhile, the herb and shrub removal experiments also altered the composition of soil animal guilds, and both the percentages of Saprozoic guilds and their individual number were decreased after shrub removals with 15 months. The results indicated that the removals of both shrub and herb layers altered the composition of soil animal community and decreased the soil animal biodiversity in the study plots, implying that plant species loss could lead to the loss of belowground biodiversity in the subalpine forest ecosystem. In addition, the present study also implied the plant species removal experiment was a useful method to investigate the interactions between above- and below-ground biodiversity, and the linkages of biodiversity with ecological process in the high-frigid forest ecosystem, owing to the sensitivity of soil biodiversity response to changed biotic environment in the fragile forest ecosystem. However, this study only provided a valuable the results of short-term herb and shrub layer removal experiment, and long-term and systematic experiment needed to carry out in the future.

Key Words: subalpine; coniferous plantation; removal of shrub and herb; soil faunal community; response

植物多样性对生态系统功能及过程的影响是近年来生态学领域的研究热点和难点^[1-8]。为了揭示植物多样性、物种组成对生态系统生产力、稳定性和营养维持等关键生态系统功能及过程的影响,生态学家自 20 世纪 80 年代以来,做了大量开创性的工作,先后开展了诸如“生态箱”实验^[5]、Cedar Creek 草地多样性实验^[7]、微宇宙实验^[4,6]、欧洲草地实验^[1]等生物多样性的生态系统功能研究,得出了一批有价值的研究成果,但仍存在许多争议和不确定性。并且,受林木生长周期长和生境复杂等因素的制约,有关物种组成和多样性变化对森林生态系统功能及过程影响的研究相当少见^[9-10]。而基于人工组配实验或草地、农田生态系统得出的结论是否适用于森林生态系统? 还需要更多的科学实验予以验证。

川西亚高山针叶林位于我国青藏高原东缘和长江上游地区,在生物多样性保育、水源涵养和全球碳循环中具有十分重要的、不可替代的作用和地位^[11]。同时,地处高寒环境下的川西亚高山针叶林具有层次结构和物种丰富度相对简单、更新和演替规律十分清晰、结构和功能类型更加分化等特点^[12],这为研究森林物种组成和多样性变化对森林生态系统功能及过程的影响提供了理想的天然实验室^[13]。林下植物多样性是森林生态系统物种多样性的构成之一,对生产力、生物地球化学循环等森林生态系统过程具有十分重要的影响。而土壤生态过程又是森林生态系统过程的重要组成部分,土壤生态过程的研究有助于深入揭示森林生态系统的各项功能。因此,本研究试图通过人工除灌、除草调控植物多样性的实验方法,研究亚高山针叶林土壤动物群落对林下植物层次缺失的响应,探讨亚高山针叶林植物多样性下降对土壤生态过程的影响。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究区域位于四川省阿坝州理县毕棚沟(N 31°17'—31°20', E 102°55'—102°57'),属季风性山地气候,夏季湿润多雨,冬季寒冷干燥。年均温 6—12℃,1 月均温 -8℃,7 月均温 12.6℃,年积温为 1200—1400℃,年降水量为 600—1100mm,年蒸发量为 1000—1900mm。主要土壤类型为湿润锥形土、淋溶土和棕色冲积土等。主要植被类型是以云杉(*Picea asperata* Mast)为建群种的亚高山针叶林。乔木层以云杉占绝对优势,其他伴生树种有青杆(*Picea wilsonii*)、紫果云杉(*Picea purpurea*)、川西云杉(*Picea likiangensis* var. *balfouriana*)、鳞皮冷杉(*Abies squamata*)等针叶树种,并常有红桦(*Betula albo-sinensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)等阔叶树种的渗入。灌木层一般较发育,常以大箭竹(*Sinarundinaria chungii*)、华西箭竹(*Sinarundinaria nitida*)、陕甘花楸(*Sorbus koehneana* Schneid)、秦岭小檗(*Berberis circumserrata*)、藤山柳(*Clematoclethra lasioclada*)等为优势种。草本层一般以木坪冷蕨(*Cystopteris moupinensis*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、西伯利亚三毛草(*Trisetum*

sibiricum)等为优势种。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

2007年7月,于四川省理县毕棚沟亚高山林区选取1988年营造的自然环境条件比较均匀一致的人工混交林进行植物群落调查^[14]。在植物群落调查的基础上,设置3个面积为20m×20m的定位监测样地(表1)。

为了解森林生态系统内灌草层关键物种对土壤动物群落的影响,设置了人工除灌除草的林地控制实验。人工除灌实验(RS):选择上述3个定位监测样地中的一个,拔除样地内所有林下灌木植物,但保存草本植物,并将收割剩余物捡至样地外;人工除草实验(RH):选择上述3个定位监测样地中的一个,拔除样地内所有林下草本植物,但保存灌木植物,并将收割剩余物捡至样地外;另外一个定位监测样地不作任何去除处理,用作对照(CK)。为保证处理效果,以后每月中旬定期清除林下萌生的灌木植物和新生的草本植物。

表1 样地自然环境条件

Table 1 Natural conditions of the study plots

样地 Plots	海拔/m Altitude	坡向/(°) Orientation	坡度/(°) Slope	郁闭度 Canopy closure	土壤类型 Soil type	土壤有机质/% Soil organic matter content	土壤 pH 值 Soil pH	土层厚度/cm Soil depth
CK	3030	西偏北 30	14	0.8	湿润锥形土	11.5	5.2	40
RH	3030	西偏北 28	15	0.8	湿润锥形土	11.4	5.6	40
RS	3030	西偏北 28	14	0.8	湿润锥形土	11.6	5.8	40

1.2.2 采样方法

2007年7月、2007年10月和2008年10月(林地控制实验3个月和15个月)分别进行3个样地的土壤动物群落调查与取样分析。首先,在每个样地内随机设置3个50cm×50cm的小样方,分凋落物层、0—5cm、5—10cm、10—15cm 4个层次,采用手捡法调查大型土壤动物,并将所得大型土壤动物分大类登记后放入盛有酒精的容器中。其次,在每个样地内取6份(3份干生,3份湿生)10cm×10cm面积的凋落物,用100目尼龙网包好,放入黑布袋,带回室内进行中小型干生和湿生土壤动物的分离;另外,再于各样地内随机挖土壤剖面3个,分0—5cm、5—10cm、10—15cm 3层每层用100mL和25mL取样器取土,用于分离中小型干生和湿生土壤动物。中小型干生土壤动物用Tullgren干漏斗分离,中小型湿生土壤动物用Baermann湿漏斗分离。分离时间24h,分离温度35—40℃^[15]。

1.2.3 数据分析

(1) 优势类群划分

个体数量占全部捕获量10%以上为优势类群,介于1%—10%之间为常见类群,介于0.1%—1%为稀有类群,0.1%以下为极稀有类群^[15]。

(2) 多样性指数计算

采用密度-类群指数^[16](Density-Group Index,简称DG指数)作为土壤动物群落多样性指标:

$$DG = (g/G) \sum_{i=1}^g (D_i C_i / D_{imax} C)$$

式中, D_i 为第*i*类群个体数, D_{imax} 为各群落中第*i*类群的最大个体数, g 为群落中的类群数, G 为各群落所包含的总类群数, C_i/C 为相对次数,即在*C*个群落中第*i*个类群出现的比率。

(3) 差异显著性检验

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较(LSD),检验除灌、除草对土壤动物群落的影响。

2 结果与分析

2.1 林下植物去除对土壤动物个体数量的影响

3次调查共获大中小型土壤动物8057头(不包括原生动物),分属6门13纲,合计20类群。各样地处理前后土壤动物群落组成及多样性指数列于表2。

表 2 样地处理前后土壤动物群落组成
Table 2 The composition of soil animal community in the study plots after herb and shrub removal experiments

土壤动物类群 Groups	2007-07				2007-10				2008-08			
	个体数 Individuals				个体数 Individuals				个体数 Individuals			
	CK	RH	RS	CK	RH	RS	CK	RH	RS	CK	RH	RS
轮虫纲 Rotatoria (Pr)	28 + + +	61 + + +	37 + + +	3 + +	4 + +	4 + +	1 + +	1 + +	1 + +	1 + +	1 + +	1 + +
线虫纲 Nematoda (S)	451 + + + +	594 + + + +	464 + + + +	402 + + + +	373 + + + +	338 + + + +	416 + + + +	478 + + + +	374 + + + +	416 + + + +	478 + + + +	374 + + + +
线蚓科 Enchytraeidae (S)	8 + +	12 + + +	25 + + +	29 + + +	41 + + +	8 + + +	14 + + +	11 + + +	16 + + +	14 + + +	11 + + +	16 + + +
后孔寡毛目 Oligochaetaopisthopora (S)		1 + +					1 + +		1 + +			1 + +
腹足纲 Gastropoda (S)			1 +			1 + +						
缓步动物门 Tardigrada (Pr)	1 + +	1 + +	6 + +	2 + +	21 + + +	9 + + +	2 + +		5 + + +			
蛭纲 Hirudinea (S)	130 + + + +	72 + + +	272 + + + +	407 + + + +	126 + + + +	139 + + + +	314 + + + +	137 + + + +	41 + + +			
蜘蛛目 Araneae (Pr)	1 + +	1 + +	7 + +	1 +		1 + +	1 + +					
猛水蚤目 Harpacticoida (Pr)	158 + + + +	4 + +		3 + +		1 + +	2 + +					
地蜈蚣目 Geophilomorpha (Pr)	7 + +	15 + + +	8 + +	1 +	1 + +	1 + +	5 + +	1 + +	1 + +			
石蜈蚣目 Lithobiomorpha (Pr)	4 + +		1 +	1 +		1 + +	2 + +					
倍足纲 Diplopoda (S)	57 + + +	49 + + +	93 + + +	25 + + +	33 + + +	16 + + +	38 + + +	10 + + +	9 + + +			
综合目 Symphyla (S)			1 +				1 + +					
弹尾目 Collembola (S)	81 + + +	55 + + +	152 + + + +	271 + + + +	214 + + + +	248 + + + +	235 + + + +	136 + + + +	14 + + +			
双尾目 Diplura (Pr)			1 +		1 + +							
啮目 Psocoptera (S)	3 + +	6 + +	3 + +	1 +					1 + +			
隐翅甲科 Staphylinidae (Pr)	2 + +	5 + +	2 + +	2 + +	2 + +	2 + +	2 + +	4 + +	1 + +			
金龟甲科幼虫 Scarabaeidae larvae (Ph)	2 + +	6 + +	3 + +	2 + +	2 + +	2 + +	2 + +	4 + +	1 + +			
双翅目幼虫 Diptera larvae (S)	14 + + +	22 + + +	11 + + +	20 + + +	37 + + +	2 + +	15 + + +	7 + +	9 + + +			
蚊科 Formicidae (Pr)		1 + +	6 + +									
类群数合计 Total group number	15	16	18	15	12	15	16	10	13			
个体数合计 Total individual number	947	905	1093	1170	855	773	1051	789	474			
DG 指数 DG index	3.7792	4.8817	6.8949	2.5044	2.1077	1.7082	3.2053	1.1997	1.4823			

S: 腐食性 Saprophagous; Pr: 捕食性 Predators; Ph: 植食性 Phytophaga
+ + + + + : >10% ; + + + : 1%—10% ; + + : 0.1%—1% ; + : <0.1%

表 2 显示,林下植物去除后不同体型土壤动物响应有所不同,但总的趋势表现为个体数量下降。川西亚高山针叶林中,大型土壤动物优势类群为倍足纲,林下植物去除后,倍足纲土壤动物响应明显,表现为个体数量下降,尤其是处理 15 个月后,趋势更为明显;中小型土壤动物以蜉蝣目、弹尾目、双翅目幼虫响应明显,个体数量均有所下降,并且随处理时间延长,下降程度不断加深;中小型湿生土壤动物——线虫是川西亚高山针叶林土壤动物群落的绝对优势类群,除灌除草后,线虫纲个体数量略有下降,但优势度直线上升。

林下植物去除后,土壤动物密度显著降低(图 1),并且随土层加深,下降趋势更为明显。其中,处理 3 个月时各样地土壤动物密度出现显著差异,以对照显著高于除灌和除草处理(RS: sig. = 0.001 < 0.01; RH: sig. = 0.019 < 0.05),而除灌和除草间无显著差异;处理 15 个月时各样地土壤动物密度仍以对照最高,对照(sig. = 0.004 < 0.01)与除草(sig. = 0.009 < 0.01)显著高于除灌处理。表明,除灌除草后样地内植物多样性下降,尤其是落叶灌木的去除,直接影响到秋季凋落物的种类及数量,从而导致以凋落物为栖息地和食物来源的土壤动物数量的急剧降低。

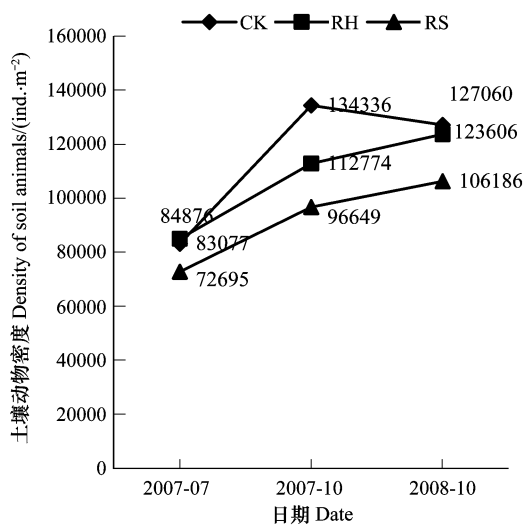


图 1 土壤动物密度对林下植物去除的响应

Fig. 1 Response of soil animal density to understory plant removals

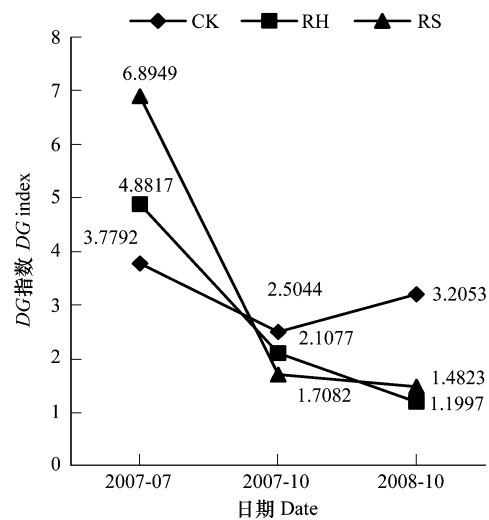


图 2 土壤动物多样性对林下植物去除的响应

Fig. 2 Response of soil animal diversity to understory plant removals

2.2 林下植物去除对土壤动物优势类群的影响

林下植物去除不仅减少了土壤动物个体数量,同时对土壤动物区系组成,尤其是优势类群格局也产生影响。处理前,各样地优势类群排序均为线虫纲、蜉蝣目、弹尾目,线虫纲所占百分比约为 40%。处理 3 个月后,对照样地优势类群排序为线虫纲、蜉蝣目、弹尾目,线虫纲所占百分比为 34.37%,而除草样地优势类群排序为线虫纲、弹尾目、蜉蝣目,线虫纲所占百分比为 43.62%,除灌样地优势类群排序为线虫纲、弹尾目、蜉蝣目,线虫纲所占百分比为 43.73%,各样地间线虫纲百分比无显著差异,表明除灌、除草 3 个月后,线虫纲优势度变化不大,弹尾目优势度有所上升,A/C 值(蜉蝣目与弹尾目数量之比)有所下降。处理 15 个月后,对照样地优势类群排序为线虫纲、蜉蝣目、弹尾目,线虫纲所占百分比为 39.58%,除草样地优势类群排序为线虫纲、蜉蝣目、弹尾目,线虫纲所占百分比为 60.58%,除灌样地优势类群排序为线虫纲、蜉蝣目、弹尾目,线虫纲所占百分比为 78.91%,除灌、除草样地线虫纲百分比显著高于对照(RS: sig. = 0.002 < 0.01; RH: sig. = 0.039 < 0.05),表明除灌、除草 15 个月后,线虫纲优势度急剧上升,导致土壤动物群落分布呈现两极分化,但弹尾目优势度有所下降,A/C 值较处理之初有所增加。

2.3 林下植物去除对土壤动物多样性的影响

图 2 显示,林下植物去除后土壤动物群落多样性显著降低。其中,处理 3 个月时各样地间 DG 指数尚无显著差异,处理 15 个月时,除灌、除草样地土壤动物群落 DG 指数均显著低于对照(RS: sig. = 0.025 < 0.05;

RH: sig. =0.014 <0.05)。表明,持续的灌草层缺失(定期清除萌生的灌木和草本)将导致土壤动物群落类群数的减少和个别土壤动物类群(主要是线虫)优势度的上升,从而影响土壤动物群落分布的均匀性,并最终引起土壤动物群落多样性的降低。

2.4 林下植物去除对土壤动物功能团的影响

将各样地处理前后土壤动物功能团类群数及个体数百分比进行统计,结果列于表 3。CK 样地未作任何处理,3 次取样表现出的土壤动物功能团构成变化可以认为是受物候影响。为消除物候效应,凸现灌草层去除对土壤动物功能团影响,将 RH、RS 样地与同季节 CK 样地进行比较。结果显示,处理前 RH、RS 样地腐食性功能团类群数及个体数百分比均高于 CK 样地,处理后 CK 样地腐食性功能团类群数及个体数百分比略高于 RH、RS 样地。表明,灌草层去除不仅对土壤动物个体数量、优势类群及多样性指数产生影响,同时对土壤动物功能团构成也产生一定作用,其中以腐食性功能团类群数对植物多样性下降的响应较为迅速,而腐食性功能团个体数百分比的响应则相对滞后。

表 3 各样地处理前后土壤动物功能团变化
Table 3 Changes in soil animal guilds after understory plant removal

样 地 Plots		2007-07			2007-10			2008-10		
		S	Pr	Ph	S	Pr	Ph	S	Pr	Ph
CK	类群数	7	7	1	7	7	1	8	7	1
	%	78.56	21.23	0.21	98.70	1.13	0.17	98.37	1.44	0.19
RH	类群数	8	7	1	6	5	1	6	3	1
	%	89.61	9.78	0.61	96.37	3.4	0.23	98.72	0.77	0.51
RS	类群数	9	8	1	7	7	1	8	4	1
	%	93.5	6.27	0.23	97.28	2.46	0.26	98.11	1.68	0.21

3 讨论与结论

3.1 林下植物去除对土壤动物群落结构的影响

林下植物去除,导致林内土壤动物密度、多样性指数降低,优势类群格局和功能团构成发生变化。这种影响主要通过两个方面得以实现,一方面是灌草层去除后,凋落物种类和数量急剧减少,另一方面是灌草层去除后,根系分泌物成分发生变化,其中尤以第 1 个因素影响最为巨大。凋落物不仅是土壤动物的食物来源,同时还为土壤动物提供安全的栖居场所。凋落物的种类、数量和质量(例如 C/N、纤维素含量、木质素含量、单宁含量、酚类物质含量、蛋白质和氨基酸含量等),在很大程度上决定着土壤动物群落的区系组成、种类、数量和丰富度等特征^[12]。

林下植物去除后,凋落物种类、数量和质量发生显著变化,导致一些以特定种类凋落物为食的土壤动物类群和数量急剧减少,而线虫纲虽个体数量有所下降,但其受影响程度低于其他土壤动物类群,因此优势度大大增加,从而导致土壤动物群落多样性整体下降。林下植物去除后,对蜱螨目、弹尾目优势度也有一定影响。傅荣恕^[17]认为在人为干扰较少的生境中,蜱螨目数量明显多于弹尾目,A/C 值较大,而在人为干扰较大的生境中,弹尾目数量大大增加,A/C 值较小。Connell 的中度干扰假说认为,物种对干扰的忍受能力和它的竞争能力之间存在一个平衡,高竞争力物种被认为是最易受干扰影响的物种^[18]。蜱螨目和弹尾目均是川西亚高山针叶林土壤动物群落中的优势类群,但蜱螨目竞争能力似乎高于弹尾目。灌草层去除之前,各样地蜱螨目个体数量均高于弹尾目;灌草层去除之初,林内生境变化剧烈,蜱螨目由于抗干扰能力差,个体数量急剧下降,而弹尾目优势度迅速上升,A/C 值减小;但随时间推移,当生境逐渐趋于平稳时,蜱螨目强的竞争能力重新得以巩固,优势度增加,A/C 值上升。

林下植物去除,对土壤动物功能团构成也产生一定影响。土壤动物功能团一般包括三大类:腐食性、捕食性、植食性。腐食性功能团在土壤生态系统中的作用是:碎裂枯落物,为下一步分解作准备;吞食有机质和泥土,并充分混合以形成结构良好的土壤团粒;取食真菌,通过控制微生物的数量来控制整个生态系统物质循环

和能量流动的速率^[19-20],因此,腐食性功能团常作为衡量生态系统功能强弱与土壤肥力高低的生物指标之一。林下植物去除后,易分解的阔叶凋落物数量大大减少,从而导致腐食性功能团类群数及个体数百分比随之降低。

综上所述,灌木层和草本层去除,均对土壤动物群落产生不利影响,但以灌木层去除对土壤动物群落影响更大,可能的原因是灌木层为多年生落叶阔叶树种,凋落量巨大,而草本层为1年生草本植物,生物量小,因此,草本层去除后对土壤动物群落的影响小于灌木层。

3.2 林下植物缺失的人工林生态系统功能恢复途径

通过人工除灌、除草,模拟自然界林下植物缺失对土壤动物群落结构的影响,探讨层次单一的人工林生态系统功能恢复途径与方式。土壤生态系统是森林生态系统中极为重要的组成部分,是森林生态系统结构与功能的基础,而土壤动物群落又是土壤生态系统中不可或缺的生物组分之一,通过参与土壤有机物主要是凋落物的分解,推动整个自然界的物质循环和能量流动^[21-25],是森林土壤肥力的重要生物学指标^[26]。灌草层去除所引发的土壤动物群落各种响应,最终将在一定程度上导致人工林生态系统物质循环功能退化,继而进一步影响到其他生态功能。因此,从生物多样性与生态系统功能的角度出发,恢复退化森林生态系统的一条行之有效的途径是,提高植物多样性,增加层次结构,丰富凋落物组成,通过地上——地下生物互动,提高土壤生物多样性,从而增强生态系统各项功能。

致谢:在野外调查中,得到了四川农业大学林学院刘洋、黄旭、何勇、刘洋、刘凯、陈秀兰、赵瑜等的帮助,特此致谢。

References:

- [1] Hector A, Schmid B, Beierkuhnlein C, Caldeira M C, Diemer M, Dimitrakopoulos P G, Finn J A, Freitas H, Giller P S, Good J, Harris R, Höglberg P, Huss-Danell K, Joshi J, Jumpponen A, Körner C, Leadley P W, Loreau M, Minns A, Mulder C P H, O'Donovan G, Otway S J, Pereira J S, Prinz A, Read D J, Scherer-Lorenzen M, Schulze E. D, Siamantziouras A S D, Spehn E M, Terry A C, Troumbis A Y, Woodward F I, Yachi S, Lawton J H. Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. *Science*, 1999, 286: 1123-1127.
- [2] Hector A, Hooper R. Darwin and the first ecological experiment. *Science*, 2002, 295: 639-640.
- [3] Kennedy T A, Naeem S, Howe K M, Knops J M H, Tilman D, Reich P. Biodiversity as a barrier to ecological invasion. *Nature*, 2002, 417: 636-638.
- [4] McGrady-Steed J, Harris P M, Morin P J. Biodiversity regulates ecosystem predictability. *Nature*, 1997, 390: 162-165.
- [5] Naeem S, Thompson L J, Lawler S P, Lawton J H, Woodfin R M. Declining biodiversity can alter the performance of ecosystems. *Nature*, 1994, 368: 734-737.
- [6] Naeem S, Li S. Biodiversity enhances ecosystem reliability. *Nature*, 1997, 390: 507-509.
- [7] Tilman D, Downing J A. Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 1994, 367: 363-365.
- [8] Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature*, 1996, 379: 718-720.
- [9] Wardle D A, Zackrisson O. Effect of species and functional group loss on island ecosystem properties. *Nature*, 2005, 435: 806-810.
- [10] Becky A B, Mark A B, Dave C C, Mark D H. Linkages between below and aboveground communities: Decomposer responses to simulated tree species loss are largely additive. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 30: 1-9.
- [11] Liu Q. Ecological Research on Subalpine Coniferous Forests in China. Chengdu: Sichuan University Press, 2002: 1-5.
- [12] Wang K Y, Yang W Q, Song G Y. Research on Ecosystem Process of Subalpine Forests in Western Sichuan, China. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science & Technology, 2004: 1-5.
- [13] Yang W Q. Advances in soil ecosystem process of subalpine forest in Western Sichuan. *World Science-Technology R & D*, 2003, 25(5): 33-40.
- [14] Song Y C. Vegetation Ecology. Shanghai: Publishing House of East China Normal University, 2001: 35-47.
- [15] Compiled by Team of Handbook of Soil Fauna Research Methods. Handbook of Soil Fauna Research Methods. Beijing: China Forest Press, 1998: 20-61.
- [16] Liao C H, Li J X, Huang H T. Soil animal community diversity in the forest of the southern subtropical region. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 549-555.
- [17] Fu R S, Yin W Y. The primitive study of soil animals in funiu mountain area, henan province. *Zoological Research*, 1999, 20(5): 396-398.

- [18] Connell J H. Diversity in tropical rain forest and coralreefs. *Science*, 1978, 199:1302-1310.
- [19] Yin W Y. *Subtropical Soil Animals of China*. Beijing: Science Press, 1992:1-20.
- [20] Zhang X P, Hou W L, Chen P. Soil animal guilds and their ecological distribution in the northeast of China. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2001, 7(4):370-374.
- [21] Fu B Q, Chen W, Dong X H, Xing Z M, Gao W. The Composition and Structure of the Four Soil Macrofaunas in Songshan Mountain in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(2):215-223.
- [22] Yan S K, Wang S L, Hu Y L, Gao H, Zhang X Y. A comparative study on soil fauna in native secondary evergreen broad-leaved forest and Chinese fir plantation forests in subtropics. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10):1792-1796.
- [23] Yin W Y. *Soil Animals of China*. Beijing: Science Press, 2000:1-20.
- [24] Yin X Q, Zhang G R. Correlation between forest litter and soil macroanimals. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1993, 4(2):167-173.
- [25] Zhang X P, Cui G F, Chen P. Biomass of soil animals in Larch plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(2):150-154.
- [26] Yang W Q, Wang K Y, Song G Y, He Y R. Preliminary study on biological characteristics of degraded soil ecosystems in dry hot valley of Jinsha River. *Pedosphere*, 2002, 12(4):365-372.

参考文献:

- [11] 刘庆. 亚高山针叶林生态学研究. 成都:四川大学出版社,2002:1-5.
- [12] 王开运,杨万勤,宋光煜. 川西亚高山森林生态系统过程研究. 成都:四川科学技术出版社,2004:1-5.
- [13] 杨万勤. 川西亚高山针叶林土壤生态过程的研究. *世界科技研究与发展*, 2003,25(5):33-40.
- [14] 宋永昌. *植被生态学*. 上海:华东师范大学出版社,2001:35-47.
- [15] 《土壤动物研究方法手册》编写组. *土壤动物研究方法手册*. 北京:中国林业出版社,1998:20-61.
- [16] 廖崇惠,李健雄,黄海涛. 南亚热带森林土壤动物群落多样性研究. *生态学报*, 1997,17(5):549-555.
- [17] 傅荣恕,尹文英. 伏牛山地区土壤动物群落的初步研究. *动物学研究*, 1999,20(5):396-398.
- [19] 尹文英. *中国亚热带土壤动物*. 北京:科学出版社,1992:1-20.
- [20] 张雪萍,候威岭,陈鹏. 东北森林土壤动物同功能种团及其生态分布. *应用与环境生物学报*, 2001,7(4):370-374.
- [21] 傅必谦,陈卫,董晓晖,邢忠民,高武. 北京松山四种大型土壤动物群落组成和结构. *生态学报*, 2002,22(2):215-223.
- [22] 颜绍馥,汪思龙,胡亚林,高洪,张秀永. 亚热带天然次生常绿阔叶林与杉木人工林土壤动物群落特征比较. *应用生态学报*, 2004,15(10):1792-1796.
- [23] 尹文英. *中国土壤动物*. 北京:科学出版社,2000:1-20.
- [24] 殷秀琴,张桂荣. 森林凋落物与大型土壤动物相关关系的研究. *应用生态学报*, 1993,4(2):167-173.
- [25] 张雪萍,崔国发,陈鹏. 人工落叶松林土壤动物生物量的研究. *应用生态学报*, 1996,7(2):150-154.