• 研究报告 •

土壤原生动物对川滇高山栎恢复时间的响应及生长季动态

李玲娟^{1,2} 熊勤犁^{1,2,3} 潘开文^{1*} 张 林^{1*}

1 (中国科学院成都生物研究所, 成都 610041)

2 (中国科学院大学, 北京 100049)

3 (四川大学生命科学学院, 成都 610064)

摘要: 青藏高原东缘生态环境脆弱, 森林频繁遭到砍伐, 生物多样性受到严重威胁, 森林砍伐后的生态恢复成为研究热点。原生动物在生态恢复中作为指示生物起着重要作用。本文就未砍伐、砍伐后不同恢复时期(20年、10年和1年)生的川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)林的土壤理化性质和原生动物在生长季的变化进行比较研究, 以探讨生长季不同月份、不同恢复期的原生动物数量变化规律, 分析土壤理化性质与其相关性。结果表明: (1)恢复10年和1年的林地的鞭毛虫数量(193个/g干土, 164个/g干土)显著高于原始林地(22个/g干土), 肉足虫在恢复1年的林地中数量最多(600个/g干土), 纤毛虫数量则随次生演替进程逐渐增多。(2)在生长季不同月份原生动物的数量呈先增加后减少的趋势。鞭毛虫和肉足虫的峰值分别出现在7月和8月, 而纤毛虫的数量在7、8、9月明显高于6月。(3)原生动物数量与土壤理化性质密切相关。鞭毛虫数量与pH值呈显著正相关($P = 0.019$), 纤毛虫数量与铵态氮($P = 0.002$)和碳氮比呈显著正相关($P = 0.022$), 肉足虫数量与硝态氮($P = 0.008$)和碳氮比($P = 0.016$)呈显著负相关。结果显示, 三种原生动物数量在生长季不同月份表现出较大的波动性, 其数量变化受土壤理化性质等多种因素调控。纤毛虫数量对川滇高山栎林砍伐恢复有正响应, 而鞭毛虫、肉足虫数量有负响应。

关键词: 川滇高山栎林, 砍伐, 生长季, 指示生物, 原生动物

The responses of soil protozoan communities to *Quercus aquifolioides*: recovery after cutting and growing season dynamics

Lingjuan Li^{1,2}, Qinli Xiong^{1,2,3}, Kaiwen Pan^{1*}, Lin Zhang^{1*}

1 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610064

Abstract: The eastern Qinghai-Tibet Plateau is fragile but offers important ecological services. Because of frequent cutting, local biodiversity is seriously threatened. This makes ecological recovery from logging become a research hot spot. Protozoa as a biological indicator in ecological restoration plays an important role. In this paper, we selected four types of *Quercus aquifolioides* forests (mature stands, clearcuts for secondary growth aged 20 years, 10 years and 1 year) to study the alteration of soil physicochemical properties and protozoa quantity along different months during growing season. The main results showed that: (1) The amount of flagellates in the second growth forests within 10 years (193 ind./g dry soil) and within 1 year (164 ind./g dry soil) were significantly higher than that in the mature stands (22 ind./g dry soil), while the amount of amoebae was the most in the second growth forest within 1 year (600 ind./g dry soil). Ciliate quantities increased gradually along with the recovery after clearcuts. (2) Protozoa community quantities first showed a significant increase and then decrease with months during the growing season, the abundance of flagellates reach a peak in July, the amount of amoebae was largest in August and ciliate abundance was much greater in

收稿日期: 2015-05-07; 接受日期: 2015-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(31100350, 30901146, 31370632)和国家科技支撑计划(2011BAC09B04-01-03)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: pankw@cib.ac.cn, zhanglin@cib.ac.cn

the other three months than June. (3) The amount of protozoa closely related to soil physicochemical properties. The amount of flagellates were positively significantly correlated to pH ($P = 0.019$), ciliate quantity was positively correlated with amino nitrogen ($P = 0.002$) and C/N ratio ($P = 0.022$), and amoebae quantity was negatively correlated with nitrate nitrogen ($P = 0.008$) and C/N ratio ($P = 0.016$). The results suggested a great fluctuation of protozoa communities in the growing season affected by soil physicochemical properties. Ciliates communities showed a positive response, while flagellate and amoebae showed a negative response, to the recovery of *Quercus aquifolioides* forest after cutting.

Key words: *Quercus aquifolioides* forest, cutting, growing season, biological indicator, soil protozoan

原生动物作为土壤食物网中重要的一环,既能捕食细菌和真菌,又能被线虫、螨类等捕食者所取食(Rønn *et al.*, 2012),从而参与土壤有机物的分解与转化,在调控土壤碳氮矿化过程中起着重要的作用(Clarholm, 1981; Bonkowski *et al.*, 2000)。由于其形态和功能多样性直接影响土壤肥力,因此有关原生动物的研究正日益受到生态学者的关注(宁应之和沈韞芬, 1996; Yang *et al.*, 2002; Usher *et al.*, 2006)。

原生动物群落对环境因子的变化十分敏感,可在土壤质量监测中作为指示生物(周可新等, 2003)。Foissner (1999)研究表明,原生动物在土层中随土壤有机质的变化有明显的垂直分布规律,在有枯枝落叶覆盖的土壤表层表现出显著的“表聚现象”。其他环境因子对原生动物的影响也不可忽视,如原生动物数量会受季节、降雨以及土地利用等的影响(Mayzlish & Steinberger, 2004; Xu *et al.*, 2005),而植被类型、土壤理化特征和海拔高度等的差异也会影响到原生动物的种类与数量(宁应之等, 2009)。近年来,部分研究证实人类活动干扰对原生动物的影响同样剧烈,如农药的使用对肉足虫有较大的毒害作用,但对鞭毛虫则有促进作用(陈素芳等, 2003)。申海香等(2009)研究表明人为干扰使森林土壤中原生动物的数量减少,物种多样性指数降低,群落结构单一化。但目前,砍伐如何影响土壤原生动物群落的研究尚未见报道。

在砍伐干扰后的不同恢复期,林下植物群落处于不同演替阶段,植物种类、群落组成以及土壤养分含量、环境因子都会发生较大变化,进而影响土壤生物的整体生存环境(陈小鸟等, 2009)。森林采伐对大中型土壤动物有较大的影响(肖玖金等, 2008)。采伐后,不同次生演替阶段的土壤节肢动物群落个体数量和多样性受森林地表凋落物数量和质量的

调控(余广彬和杨效东, 2007)。川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)林是典型的山地硬叶常绿阔叶林,主要分布于四川西部、云南西北部和西藏东南部地区,以在四川西部地区的分布面积为最大,占四川林地总面积的15%左右(四川植被协作组, 1980)。川滇高山栎林对维持该区域高海拔地区脆弱生态系统的稳定性起着重要作用。但在这些区域,因其生长快、热值高,所以经常被砍伐,是横断山区最为重要的薪炭树种之一。

有研究表明,川滇高山栎萌发能力较强,砍伐后能重新恢复成林(朱万泽等, 2010)。由于频繁砍伐,川滇高山栎林自我补偿调节能力下降,严重影响青藏高原东缘原本脆弱的生态环境,使得当地生物多样性和土壤肥力受到严重威胁(王国严和徐阿生, 2008)。目前,有关川滇高山栎林的研究相对较少,主要集中在群落结构、遗传多样性、空间格局、基株萌生以及林下植物生物量等方面(刘兴良等, 2006; 尤海舟等, 2010),而高山栎林土壤动物尤其是原生动物对砍伐的响应及其季节动态的研究尚未见报道。本文通过采集砍伐后不同恢复时期的川滇高山栎林地土壤,测定土壤样品的理化性质和原生动物的数量,研究在生长季砍伐后不同恢复林地原生动物群落的变化,旨在深入了解原生动物群落对川滇高山栎林次生演替的响应,为青藏高原东缘生态系统监测、退化植被恢复和生物多样性保护提供基础资料。

1 方法

1.1 研究区概况

研究区位于青藏高原东缘大渡河流域上游的小金县两河乡大板村(31°31.53'–31°31.76' N, 102°25.44'–102°25.68' E),海拔3,250 m左右。该区域属高原气候,日照较充足,昼夜温差大。年平均气

温4.7℃, 1月平均气温-10.3℃, 7月平均气温16.8℃。多年平均降水量为417.3 mm, 年降水分配不均, 主要集中在夏季, 5-9月降水量占全年降水量的90%; 植物的生长期约90-105 d。川滇高山栎主要分布在海拔2,850-3,970 m的范围。林下土壤为山地棕壤、暗棕壤。研究区域的原始森林以川滇高山栎为优势建群种, 混有少量川西云杉(*Picea balfouriana*)、南烛(*Lyonia ovalifolia*)、红花蔷薇(*Rosa moyesii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等, 林下植物稀少。

1.2 样品采集与实验方法

研究区域内, 高山栎林砍伐面积较大。据野外调查, 结合当地林业资料, 在海拔、坡度较为一致的西南坡选取生长100年以上的原始林(从未砍伐)和皆伐后不同恢复时期(1年、10年和20年)的川滇高山栎林(表1)作为研究样地, 每个林地类型设置4个面积为20 m × 20 m的样地。2013年6、7、8、9月分别在各个样地的四角和对角线中心点, 分0-5 cm和5-10 cm上下两层采集土壤样品, 拣出可见的植物根系和石块并过2 mm筛。土壤样品标记好后装入无菌塑料袋, 带回实验室分析测定。

土壤含水量采用烘干称重法测定; 全碳(TC)和全氮(TN)采用元素分析仪测定; pH值采用无CO₂水浸提(水土比为2.5 : 1), 酸度计测定; 铵态氮和硝态氮采用在2 mol/L的KCl溶液浸提后, 比色法测定(中国科学院南京土壤研究所, 1978)。土壤微生物群落结构采用磷脂脂肪酸(PLFA)生物标记法(Bossio *et al.*, 1998)分析。

原生动动物数量分析采用改进的Stout和Singh“3级10倍”环式稀释法(土壤动物研究方法手册编写组, 1998)。称取2 g风干土样, 加198 mL蒸馏水, 充分震荡1 h, 得到稀释度为10²的土壤悬浮液。吸取2

mL悬浮液, 加入18 mL无菌水, 充分摇匀, 此时稀释度为10³。按此方法配制稀释度为10⁴的土壤悬浮液。每级各取1 mL接种于各自的培养环内, 每级稀释液接种2个培养皿10个环。将培养皿置于25℃光照培养箱中培养, 分别在第4、7、11天于显微镜下镜检, 并依据“3级10倍”环式稀释法原生动动物密度换算表计算每克烘干土壤中鞭毛虫、纤毛虫和肉足虫的数量。

1.3 数据分析

将0-5 cm和5-10 cm土层所测各组数据合并, 用SPSS 17.0软件对实验数据进行统计分析, Origin软件进行图形制作。对各样地的土壤理化性质和原生动动物数量进行正态分布(用Shapiro-Wilk test检验)和方差齐性(用Levene's test检验)检验。在数据符合正态分布且方差齐性的前提下, 经球形检验(Mauchly's test of sphericity), *P*<0.05, 采用线性模型(general linear model)的Repeated-Measure ANOVA对生长季砍伐后不同恢复林地的土壤理化性质和原生动动物数量进行重复测量方差分析, 用Duncan多重比较检验实现各处理的两两比较。通过Pearson法检验土壤原生动动物数量与理化性质的相关性。

2 结果

2.1 土壤理化性质在生长季内的变化

土壤理化性质在整个生长季内不同月份的变化规律不一致(表2, 3)。不同林地的土壤含水率在生长季均表现为先降低后升高的趋势。土壤pH值在各林地变化不同: 原始林和恢复1年的林地中pH值均逐渐升高, 但原始林在9月有所下降; 恢复10年和20年的林地pH值表现为缓慢地下降后升高再下降。铵态氮的波动幅度较大, 在恢复20年和10年林地中

表1 川滇高山栎林各林地概况
Table 1 General situations of *Quercus aquifolioides* forests in Xiaojin, Sichuan Province, China

处理 Treatment	坡度 Slope (°)	海拔 Altitude (m)	灌丛盖度 Shrub canopy coverage	灌丛高度 Shrub height (m)
原始林 Mature stand (O)	23 ± 3	3,280	0.92 ± 0.06 ^a	4.13 ± 0.27 ^a
恢复20年 20 yr second forest (T)	23 ± 3	3,265	0.84 ± 0.05 ^b	2.45 ± 0.19 ^b
恢复10年 10 yr second forest (N)	23 ± 3	3,270	0.76 ± 0.05 ^b	1.98 ± 0.23 ^c
恢复1年 1 yr second forest (R)	23 ± 3	3,250	0.02 ± 0.00 ^c	0.08 ± 0.03 ^d

表中同列中不同字母表示差异显著
Different letters in each column indicate significant difference (*P* < 0.05).

表2 土壤理化性质及磷脂脂肪酸含量的平均值
Table 2 Means of soil physicochemical properties and phospholipid fatty acid (PLFA)

指标 Index	处理 Treatment	6月 June	7月 July	8月 August	9月 September
土壤含水率 Soil moisture (%)	O	48.58 ± 3.70	37.38 ± 2.83	39.59 ± 2.03	52.67 ± 4.19
	T	45.26 ± 1.37	33.19 ± 2.31	37.55 ± 2.45	47.59 ± 2.48
	N	39.01 ± 4.01	33.06 ± 3.60	29.26 ± 2.76	42.12 ± 2.58
	R	39.43 ± 1.07	31.64 ± 0.58	38.16 ± 0.27	47.40 ± 0.47
pH	O	4.25 ± 4.25	4.45 ± 4.45	5.13 ± 5.13	4.92 ± 4.92
	T	4.86 ± 0.13	4.82 ± 0.13	5.08 ± 0.10	4.58 ± 0.16
	N	5.69 ± 0.29	5.33 ± 0.16	5.54 ± 0.08	5.27 ± 0.28
	R	5.03 ± 0.36	5.22 ± 0.31	6.23 ± 0.12	6.99 ± 0.16
铵态氮 Amino nitrogen (mg/kg)	O	13.09 ± 1.13	4.30 ± 0.42	9.55 ± 0.54	34.18 ± 2.96
	T	10.63 ± 1.15	13.13 ± 0.97	10.75 ± 1.16	40.75 ± 1.77
	N	3.59 ± 0.80	9.54 ± 1.14	6.91 ± 0.81	12.20 ± 1.71
	R	4.51 ± 0.11	0.23 ± 0.10	4.14 ± 0.19	4.82 ± 0.27
硝态氮 Nitrate nitrogen (mg/kg)	O	25.96 ± 1.45	3.14 ± 0.68	29.26 ± 2.62	11.91 ± 2.56
	T	31.27 ± 3.78	11.23 ± 2.94	36.21 ± 2.01	22.27 ± 4.61
	N	30.59 ± 2.40	9.05 ± 1.37	13.12 ± 2.25	43.11 ± 3.32
	R	20.06 ± 2.61	6.11 ± 1.19	33.39 ± 2.32	52.12 ± 2.11
全氮 Total N (g/kg)	O	6.08 ± 0.09	5.00 ± 0.07	4.55 ± 0.08	5.89 ± 0.11
	T	4.58 ± 0.04	4.07 ± 0.02	4.43 ± 0.03	4.50 ± 0.03
	N	3.80 ± 0.04	3.52 ± 0.05	3.87 ± 0.03	3.99 ± 0.03
	R	4.79 ± 0.02	4.78 ± 0.01	5.37 ± 0.01	5.62 ± 0.01
全碳 Total C (g/kg)	O	82.27 ± 1.65	64.99 ± 1.11	55.52 ± 1.32	78.49 ± 2.03
	T	59.33 ± 0.58	51.77 ± 0.37	56.66 ± 0.42	54.73 ± 0.27
	N	42.44 ± 0.55	40.11 ± 0.75	43.27 ± 0.45	42.82 ± 0.51
	R	39.88 ± 0.17	40.95 ± 0.08	44.06 ± 0.06	49.79 ± 0.09
碳氮比 C/N ratio	O	13.23 ± 0.80	12.78 ± 0.52	12.50 ± 2.28	12.88 ± 0.79
	T	12.94 ± 0.20	12.71 ± 0.42	12.77 ± 0.33	12.18 ± 0.36
	N	11.10 ± 0.24	11.15 ± 0.63	11.12 ± 0.28	10.64 ± 0.74
	R	8.32 ± 0.03	8.58 ± 0.09	8.21 ± 0.11	8.86 ± 0.08
土壤温度 Soil temperature (°C)	O	11.78 ± 1.03	13.58 ± 1.07	11.75 ± 1.37	9.64 ± 1.22
	T	11.57 ± 1.10	13.46 ± 1.14	11.88 ± 1.39	9.76 ± 1.18
	N	11.85 ± 1.11	13.68 ± 1.15	11.69 ± 1.39	9.59 ± 1.19
	R	12.15 ± 1.13	14.67 ± 1.21	12.83 ± 1.35	10.55 ± 1.44
磷脂脂肪酸表征的微生物生物量 Phospholipid fatty acid (PLFA) (nmol/g)	O	12.87 ± 2.95	9.87 ± 0.73	7.60 ± 0.83	5.14 ± 0.32
	T	4.46 ± 0.63	9.08 ± 1.28	5.18 ± 0.56	5.04 ± 0.55
	N	9.75 ± 2.04	12.50 ± 1.30	4.84 ± 1.02	3.70 ± 0.49
	R	8.44 ± 0.40	8.35 ± 1.15	9.55 ± 1.45	4.78 ± 0.44

各处理的代号同表1
The meanings of O, T, N, and R are the same as those in Table 1.

表现为先升高后降低再明显升高的趋势，原始林和恢复1年林地7月含量最低，到8、9月明显升高。硝态氮在4种林地中整体呈现先降低后升高的趋势，原始林和恢复20年的林地在9月硝态氮再次下降。与碳氮比相似，不同林地全氮、全碳在生长季的变化不明显(原始林除外)，原始林地表现为先下降后

升高。土壤温度在生长季呈先升高后降低的趋势，各林地7月温度平均达到最高(13.85℃)。
砍伐后不同恢复林地的土壤理化性质有显著变化(表2, 3)。原始林土壤含水率平均为51.72%，显著高于各个恢复期。pH值则相反，随着恢复时间的增加逐渐降低，恢复20年的林地(4.84)显著低于恢

表3 土壤理化性质的方差分析
Table 3 ANOVA of soil physicochemical properties

指标 Index	处理 Treatment		月份 Month		处理×月份 Treatment × Month	
	F	P	F	P	F	P
含水率 Soil moisture	4.267	0.029	6.186	0.029	0.686	0.578
pH值	25.600	0.000	40.044	0.000	34.024	0.000
铵态氮 Amino nitrogen	959.806	0.000	261.049	0.000	45.771	0.000
硝态氮 Nitrate nitrogen	1,337.074	0.000	20.403	0.001	14.887	0.000
全氮 Total N	437.802	0.000	3.700	0.020	1.711	0.122
全碳 Total C	214.283	0.000	0.017	0.898	0.659	0.593
碳氮比 C/N ratio	28.127	0.000	0.555	0.471	0.362	0.781
土壤温度 Soil temperature	8.174	0.000	94.545	0.000	0.404	0.751

复1年的林地(5.87)。铵态氮差异显著, 表现为恢复20年>原始林>恢复10年>恢复1年。而硝态氮则在恢复1年林地显著增加, 为所有处理类型中最高(27.92 mg/kg), 原始林地最低, 仅17.57 mg/kg。全氮、全碳均在原始林地中最高, 分别为5.38 g/kg和70.03 g/kg。恢复10年和原始林地两种类型的碳氮比平均值为12.73, 显著高于恢复1年林地(8.49)。土壤温度在恢复1年林地最高, 为12.55℃。

2.2 原生动物的数量变化

鞭毛虫、纤毛虫和肉足虫的数量在生长季变化明显, 整体表现为先升高后降低的趋势(图1)。其中, 鞭毛虫在8月数量最多(图1a)。纤毛虫数量在不同林地的变化不一致, 原始林中随生长季表现为先升高后降低再升高的趋势, 恢复20年和1年的林地在8月数量最多, 而恢复10年的林地在7月数量最多(图1b)。肉足虫占原生动物数量的大部分, 在生长季的变化规律表现为7、8、9月明显高于6月, 其中, 原始林表现为先升高后降低再升高的趋势(图1c)。

川滇高山栎林下土壤鞭毛虫、纤毛虫和肉足虫的数量占总数的比例分别为24.56%、5.14%和70.31%。三类原生动物在不同恢复林地数量差异显著(图1)。其中, 鞭毛虫在恢复10年的林地数量最多, 为193个/g干土。恢复10年和1年林地的鞭毛虫数量显著高于恢复20年和原始林地(图1a)。纤毛虫数量普遍较少, 恢复1年的林地数量最少, 仅14个/g干土。随着恢复时间的增加, 其数量逐渐增多, 到恢复20年林地达到35个/g干土(图1b)。肉足虫在林地砍伐后数量迅速升高, 恢复1年林地的数量最多, 为600个/g干土; 随着恢复时间的增加, 肉足虫数量

图1 生长季不同处理原生动物的数量变化。不同大写字母表示不同林地类型间差异显著, 处理代号同表1。
Fig. 1 Change in protozoa individuals in different treatment plots during growing season. Letters indicate significant difference among different types. The meanings of O, T, N, and R are the same as those in Table 1.

表4 土壤原动物数量与理化性质的相关关系
Table 4 Correlations between physicochemical properties of soils and abundance of soil protozoa

	土壤含水率 Soil moisture	pH	铵态氮 Amino nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	全氮 Total N	全碳 Total C	碳氮比 C/N ratio	鞭毛虫 Flagellates	纤毛虫 Ciliates	肉足虫 Amoebas
pH	-0.040									
铵态氮 Amino nitrogen	0.465**	-0.341**								
硝态氮 Nitrate nitrogen	0.401**	0.481**	-0.107							
全氮 Total N	0.387**	0.124	0.149	0.127						
全碳 Total C	0.389**	-0.196	0.349**	-0.015	0.834**					
碳氮比 C/N ratio	0.249*	-0.482**	0.394**	-0.114	0.130	0.639**				
鞭毛虫 Flagellates	-0.304*	0.293*	-0.172	0.001	-0.027	-0.154	-0.218			
纤毛虫 Ciliates	0.057	-0.113	0.388**	-0.125	0.127	0.271*	0.286*	-0.040		
肉足虫 Amoebas	-0.405**	0.084	-0.229	-0.328**	-0.026	-0.183	-0.300*	0.145	-0.103	
原动物 Protozoa	-0.472**	0.193	-0.253*	-0.281*	-0.029	-0.211	-0.337*	0.554*	-0.067	0.904*

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

逐渐降低,在林地恢复20年后,数量降为208个/g干土,与纤毛虫变化的趋势相反(图1c)。

2.3 土壤理化性质与原动物数量的相关性分析

Pearson相关性检验表明,原动物数量与土壤含水率呈极显著负相关($P < 0.001$),与铵态氮($P = 0.044$)、硝态氮($P = 0.025$)和碳氮比($P = 0.007$)呈显著负相关。鞭毛虫数量与土壤含水率呈显著负相关($P = 0.015$),与pH值呈显著正相关($P = 0.019$)。纤毛虫数量与铵态氮呈极显著正相关($P = 0.002$),与全碳($P = 0.030$)和碳氮比($P = 0.022$)呈显著正相关。肉足虫与土壤含水率($P = 0.001$)和硝态氮($P = 0.008$)呈极显著负相关,与碳氮比($P = 0.016$)呈显著负相关(表4)。

3 讨论

3.1 砍伐后不同恢复时期林地的原动物群落特征

在川滇高山栎林土壤中,鞭毛虫、纤毛虫、肉足虫的数量所占比例分别为24.56%、5.14%、70.31%,与吉林长白山地区土壤原动物各类群所占的比例相似(宁应之和沈韞芬,1998)。这说明在高海拔地区,肉足虫和鞭毛虫这两个类群在土壤原动物数量上占主导地位,而肉足虫数量上的主导地位更为重要(宁应之和沈韞芬,1998)。

本研究显示原动物数量并不是在原始林最多,而是出现在恢复1年的林地。这与余广彬和杨效东(2007)对土壤节肢动物群落的研究结果相似,其数量最高值并非出现在顶极阶段的群落。砍伐后恢

复1年和10年的川滇高山栎林土壤鞭毛虫的数量最多,且恢复1年林地中,肉足虫数量显著升高。这可能是由于在恢复初期,川滇高山栎林郁闭度较小,林下光照强,林下植物生长旺盛,为鞭毛虫和肉足虫提供了充足的食物和适宜的生活环境,有利于其生长和繁殖(申海香等,2009)。反之,鞭毛虫和肉足虫对微生物的捕食又能够提高微生物的产量和营养物的矿化,间接地促进林下植物生长(Clarholm,1985)。肉足虫在林地恢复初期数量急剧增加,表明肉足虫对砍伐处理的响应更为敏感。

纤毛虫的数量虽少,但其生物量较高,在原动物群落中的地位不可忽视(宁应之和沈韞芬,1996)。恢复20年林地土壤中的纤毛虫数量显著高于恢复初期林地,与原始林接近(图1b),表明森林演替越趋于稳定阶段越有利于纤毛虫的生长。这与甘肃定西华家岭土壤纤毛虫对生态恢复响应的研究一致,因为纤毛虫群落存在明显演替,在恢复初期群落组成较为简单,随着环境的改变,其群落结构趋于复杂,对生态恢复发生了积极的响应(宁应之等,2011)。鉴于原动物常被用来表征森林植被破坏和土壤环境的变化(Foissner,1997),纤毛虫或许能够作为川滇高山栎林恢复状况的指示生物,但仍需深入研究。

3.2 生长季土壤原动物数量动态特征

原动物数量在生长季呈先增加后减少的趋势(图1),这主要与原动物的生理特点和自然环境条件(土壤温度、pH值、食物来源等)有关(Ingham *et*

al., 1985)。在这一区域, 6月植物刚进入生长季, 原生动物食物资源还不够充足, 数量普遍较少。7、8月是植物快速生长时期, 大量根系分泌物和凋落物分解均能促进土壤微生物活性, 有助于微生物生物量的积累(Rønn *et al.*, 2012), 从而为原生动物提供了充足的食物。本研究中, 川滇高山栎林微生物生物量在生长季呈先增加后减少的趋势, 并在7月达到峰值(另文发表), 与原生动物数量的动态变化基本一致。这意味着是微生物为原生动物提供了丰富的食物来源(陈素芳和徐润林, 2003), 从而导致原生动物的数量增加。

具体来看, 肉足虫数量在7月达到峰值后逐渐减少(图1c), 与微生物的变化趋势相似, 意味着肉足虫与土壤微生物的关系更为密切($F = 0.939$, $P = 0.010$), 与Adl和Guptta(2006)的研究结果一致。鞭毛虫数量在8月出现峰值(图1a), 与肉足虫相比, 鞭毛虫对生长季环境变化的响应存在一定的滞后性。纤毛虫在整个生长季数量逐渐增加, 且7、8、9月明显多于6月(图1b), 这可能是受到纤毛虫食物来源的影响。赵玉娟等(2012)研究表明, 纤毛虫与鞭毛虫、肉足虫存在捕食与被捕食关系, 这可能导致纤毛虫在整个生长季数量增加, 而鞭毛虫、肉足虫数量达到峰值后逐渐减少。

3.3 环境变量驱动土壤原生动物群落的变化

有文献表明, 土壤温度、水分以及土壤理化性质等环境因子能有效调控原生动物的数量(陈素芳和徐润林, 2003)。7月土壤温度最高, 且在原生动物可适生范围之内(廖庆玉等, 2009), 能促进原生动物的活动以及新陈代谢, 有利于其生长和繁殖(陈素芳和徐润林, 2003), 从而导致原生动物数量在这一时间段达到峰值。其中, 土壤温度变化与肉足虫数量的变化趋势最为相似, 这表明肉足虫受温度的影响更为显著($F = 0.482$, $P < 0.01$)。

本研究发现砍伐对土壤理化性质的影响较大。原始林下的土壤含水率显著高于其余三块砍伐后的林地, 这可能是因为原始林的郁闭度高, 减少了土壤蒸腾, 有较好的保水作用。而砍伐后, 土壤地表径流增加, 导致含水率有所降低。鞭毛虫和肉足虫数量与土壤含水率呈显著负相关, 这一结果与Verhoeven (2001)、宁应之和沈韞芬(1998)的研究结果不一致。其原因可能是川滇高山栎林的土壤含水率普遍较高(31.64–52.67%), 超出了鞭毛虫和肉足

虫对水分需求的阈值, 从而不利于其生长。本研究中, 鞭毛虫数量与土壤pH值呈显著正相关(表4), pH值越接近中性, 鞭毛虫的数量越多, 与宁应之等(1998)的研究结果一致, 表明鞭毛虫适中性生境, 在酸性接近中性环境中其生长和繁殖更好。另外, pH值也会影响鞭毛虫的代谢、生殖与发育等生命活动^①。随着砍伐后川滇高山栎林的恢复, 凋落物的输入及根系分泌物增加, 有机质分解作用增强(张四海等, 2011), 土壤碳氮比降低, 有利于有机质分解过程中的养分释放, 促进土壤中有效氮的增加(王建林等, 2014), 从而促进微生物生长, 使肉足虫的数量增多。因此, 肉足虫与碳氮比呈负相关, 这与长白山肉足虫群落分布的研究结果一致(刘芳等, 2014)。纤毛虫的数量与铵态氮、全碳、碳氮比呈显著正相关。Forge等(2003)的研究也表明, 在一定范围内, 有效氮的含量越高, 纤毛虫的数量越多, 与本研究结果一致。

致谢: 感谢邓铭瑞博士在野外采样过程中给予的大力帮助和支持!

参考文献

- Adl MS, Gupta VVSR (2006) Protists in soil ecology and forest nutrient cycling. *Canadian Journal of Forest Research*, **36**, 1805–1817.
- Bonkowski M, Cheng WX, Griffiths BS, Alpehi J, Scheu S (2000) Microbial–faunal interactions in the rhizosphere and effects on plant growth. *European Journal of Soil Biology*, **36**, 135–147.
- Bossio DA, Scow KM, Guanapala N, Graham KJ (1998) Determinants of soil microbial communities: effects of agricultural management, season, and soil type on phospholipid fatty acid profiles. *Microbial Ecology*, **36**, 1–12.
- Chen SF (陈素芳), Xu RL (徐润林), Wang YJ (王勇军), Zan QJ (曾启杰), Liao WB (廖文波) (2003) Effect of chemical prevention and cure of *Mikania micrantha* on soil protozoan community in Neilingding Island. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **9**, 422–428. (in Chinese with English abstract)
- Chen SF (陈素芳), Xu RL (徐润林) (2003) Advances of studies on the soil protozoa. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni* (中山大学学报(自然科学版)), **42**, 187–194. (in Chinese with English abstract)
- Chen XN (陈小鸟), You WH (由文辉), Wang XY (王向阳), Yi L (易兰) (2009) Community traits of soil animal under

^① 侯来利 (2007) 淮南市高塘湖水域浮游动物群落特征研究, 硕士学位论文, 安徽理工大学, 淮南.

- different ground cover treatments in evergreen broad-leaved forest. *Biodiversity Science* (生物多样性), **17**, 160–167. (in Chinese with English abstract)
- Clarholm M (1981) Protozoan grazing of bacteria in soil—impact and importance. *Microbial Ecology*, **7**, 343–350.
- Clarholm M (1985) Interactions of bacteria, protozoa and plants leading to mineralization of soil-nitrogen. *Soil Biology and Biochemistry*, **17**, 181–187.
- Committee of Handbook of Soil Fauna Research Methods (土壤动物研究方法手册编写组) (1998) *Handbook of Soil Fauna Research Methods* (土壤动物研究方法手册), pp. 63–70. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese)
- Foissner W (1997) Protozoa as bioindicators in agroecosystems, with emphasis on farming practices, biocides, and biodiversity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **62**, 93–103.
- Foissner W (1999) Soil protozoa as bioindicators: pros and cons, methods, diversity, representative examples. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **74**, 95–112.
- Forge TA, Hogue E, Neilsen G, Neilsen D (2003) Effects of organic mulches on soil microfauna in the root zone of apple: implications for nutrient fluxes and functional diversity of the soil food web. *Applied Soil Ecology*, **22**, 39–54.
- Ingham RE, Trofymow JA, Ingham ER, Coleman DC (1985) Interactions of bacteria fungi and their nematode grazers: effects on nutrient cycling and plant growth. *Ecological Monographs*, **55**, 119–140.
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南京土壤研究所) (1978) *Soil Physical and Chemical Analysis* (土壤理化分析). Shanghai Scientific and Technical Publishers, Shanghai. (in Chinese)
- Liao QY (廖庆玉), Zhang JH (章金鸿), Li M (李玫), Lu Y (卢彦), Huang XS (黄晓珊), Xu RL (徐润林) (2009) The application of acidolysis-extrusion and fenton reagent on treatment of ink sewage from touch panel making. *Guangzhou Environmental Sciences* (广州环境科学), **24**(4), 41–46. (in Chinese with English abstract)
- Liu F (刘芳), Li Q (李琪), Shen CC (申聪聪), Chu HY (褚海燕), Liang WJ (梁文举) (2014) Distribution of gymnamoebae communities along an elevational gradient in Changbai Mountains. *Biodiversity Science* (生物多样性), **22**, 608–617. (in Chinese with English abstract)
- Liu XL (刘兴良), Liu SR (刘世荣), Su YM (宿以明), Cai XH (蔡小虎), Ma QY (马钦彦) (2006) Aboveground biomass of *Quercus aquifolioides* shrub community and its responses to altitudinal gradients in Balangshan Mountain, Sichuan Province. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), **42**(2), 1–7. (in Chinese with English abstract)
- Mayzlish E, Steinberger Y (2004) Effects of chemical inhibitors on soil protozoan dynamics in a desert ecosystem. *Biology and Fertility of Soils*, **39**, 415–421.
- Ning YZ (宁应之), Shen YF (沈韞芬) (1998) Soil protozoa in typical zones of China. II. Ecological study. *Acta Zoologica Sinica* (动物学报), **44**, 271–276. (in Chinese with English abstract)
- Ning YZ (宁应之), Shen YF (沈韞芬) (1996) Ecological studies on the forest soil protozoa of Mount Luojiashan and exploration of quantitative methods for soil protozoa. *Zoological Research* (动物学研究), **17**, 225–232. (in Chinese with English abstract)
- Ning YZ (宁应之), Wang HJ (王红军), Yu JH (禹娟红), Du HF (杜海峰) (2011) Response of the soil ciliate community to ecological restoration in Huajialing, Dingxi, Gansu. *Zoological Research* (动物学研究), **32**, 223–231. (in Chinese with English abstract)
- Ning YZ (宁应之), Wang XJ (王晓景), Li QL (李琦路), Yu JH (禹娟红), Ma ZX (马正学) (2009) Community characteristics of soil ciliates in the National Forest Park of the Taibai Mountains. *Journal of Northwest Normal University* (西北师范大学学报), **45**, 82–88. (in Chinese with English abstract)
- Rønn R, Vestergard M, Ekelund F (2012) Interactions between bacteria, protozoa and nematodes in soil. *Acta Protozoologica*, **51**, 223–235.
- Shen HX (申海香), Ma ZX (马正学), Ma SS (马尚盛), Ning YZ (宁应之), Wang J (王娟) (2009) Community characteristics of soil sarcodinid and flagellate in Taohuagou Forest Park in Xiaolongshan Mountains of Gansu. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **28**, 38–44. (in Chinese with English abstract)
- Sichuan Vegetation Group (四川植被协作组) (1980) *Sichuan Vegetation* (四川植被). Sichuan People's Publishing House, Chengdu. (in Chinese)
- Usher MB, Sier ARJ, Hornung M, Millard P (2006) Understanding biological diversity in soil: the UK's Soil Biodiversity Research Programme. *Applied Soil Ecology*, **33**, 101–113.
- Verhoeven R (2001) Response of soil microfauna to organic fertilisation in sandy virgin soils of coastal dunes. *Biology and Fertility of Soils*, **34**, 390–396.
- Wang GY (王国严), Xu AS (徐阿生) (2008) A review of researches on *Quercus aquifolioides*. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology* (四川林业科技), **29**(2), 23–34. (in Chinese with English abstract)
- Wang JL (王建林), Zhong ZM (钟志明), Wang ZH (王忠红), Chen BX (陈宝雄), Yu CQ (余成群), Hu XX (胡兴祥), Shen ZX (沈振西), Daci ZG (大次卓嘎), Zhang XZ (张宪洲) (2014) Soil C/N distribution characteristics of alpine steppe ecosystem in Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **34**, 6678–6691. (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

- 姐) (2008) Short-term response of soil fauna community to harvesting disturbance in *Eucalyptus grandis* plantation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **28**, 4531–4539. (in Chinese with English abstract)
- Xu MQ, Cao H, Xie P, Deng DG, Feng WS, Xu J (2005) The temporal and spatial distribution, composition and abundance of protozoa in Chaohu Lake, China: relationship with eutrophication. *European Journal of Protistology*, **41**, 183–192.
- Yang WQ, Wang KY, Song GY, He YR (2002) Preliminary study on biological characteristics of degraded soil ecosystems in dry hot valley of the Jinsha River. *Pedosphere*, **12**, 365–372.
- You HZ (尤海舟), Liu XL (刘兴良), Miao N (缪宁), He F (何飞), Ma QY (马钦彦) (2010) Individual association and scale effect of spatial pattern of *Quercus aquifolioides* populations along the elevation gradients. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **30**, 4004–4011. (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 forests. *Biodiversity Science* (生物多样性), **15**, 188–198. (in Chinese with English abstract)
- Zhao YJ (赵玉娟), Li FC (李凤超), Zhang Q (张强), Zhang Y (张彦) (2012) Abundance and biomass of heterotrophic flagellates in Baiyangdian Lake, as well as their relationship with environmental factors. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **32**, 6819–6827. (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH (张四海), Cao ZP (曹志平), Hu CJ (胡婵娟) (2011) Effect of added straw carbon on soil microbe and protozoa abundance. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), **19**, 1283–1288. (in Chinese with English abstract)
- Zhou KX (周可新), Xu MQ (许木启), Cao H (曹宏), Ning YZ (宁应之) (2003) Soil protozoa as monitors of the environment. *Chinese Journal of Zoology* (动物学杂志), **38**(1), 80–84. (in Chinese with English abstract)
- Zhu WZ (朱万泽), Wang SG (王三根), Hao YQ (郝云庆) (2010) Dynamics of nutrient supply to sprouts from the roots and soil during sprouting of *Quercus aquifolioides* shrublands, western Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), **34**, 1185–1195. (in Chinese with English abstract)

(责任编辑: 吴东辉 责任编辑: 闫文杰)