

# 甘肃定西华家岭土壤纤毛虫群落对生态恢复的响应

宁应之<sup>1,\*</sup>, 王红军<sup>1</sup>, 禹娟红<sup>2</sup>, 杜海峰<sup>1</sup>

(1. 西北师范大学 生命科学学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 定西师范高等专科学校 生化系, 甘肃 定西 743000)

**摘要:** 为了解土壤纤毛虫群落对生态恢复下的土壤环境的响应, 于 2007 年 9 月—2008 年 8 月用活体观察法和“三级十倍环式稀释法”对甘肃定西华家岭 5 个不同恢复阶段的人工云杉林和 1 个荒草坡对照点的土壤纤毛虫群落以及季节动态进行了研究, 探讨了土壤纤毛虫群落组成对生态恢复下土壤环境的相关性。共鉴定到 127 种纤毛虫, 隶属于 3 纲 9 目 34 科 50 属。研究发现, 各不同恢复年限土样中土壤纤毛虫的物种分布存在明显差异, 并随恢复时间的延长, 样点间物种相似性减小, 群落组成复杂化, 丰度、物种数和物种多样性指数均呈上升趋势。优势类群也发生了响应, 由 I 号对照样点和恢复初期 II 号样点的肾形目变为恢复后期样点的下毛目。结果显示, 土壤纤毛虫群落动态很好地响应了生态恢复过程中土壤环境条件的变化。土壤纤毛虫群落可用于陆地生态恢复评价, 但要建立有效可行的、具有普遍意义的评价指标体系, 尚需大量的和系统的工作。

**关键词:** 华家岭; 生态恢复; 土壤纤毛虫群落; 生态响应; 季节动态

**中图分类号:** Q959.114.3; Q958.152 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-5853-(2011)02-0223-09

## Response of the soil ciliate community to ecological restoration in Huajialing, Dingxi, Gansu

NING Ying-Zhi<sup>1,\*</sup>, WANG Hong-Jun<sup>1</sup>, YU Juan-Hong<sup>2</sup>, DU Hai-Feng<sup>1</sup>

(1. College of Life Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. Department of Biology and Chemistry, Dingxi Teachers College, Dingxi 743000, China)

**Abstract:** To obtain a better understanding of the responses of soil ciliate communities to ecological restoration, a quarterly survey of the soil ciliate community and seasonal dynamics across five sampling sites of artificial spruce forest was undertaken. A contrast sampling site of wild grassland was used and live observation ciliates and the three level ten-fold dilution method was used in Huajialing, Dingxi, Gansu. A total of 127 species were identified, belonging to three classes, nine orders, 34 families and 50 genera. Results show that the species distribution had obvious differences across the sampling sites, the community structure of soil tended to be complicated and species comparability decreased gradually with the number of restoration years, and abundance, species richness and species diversity index showed an upward trend. The dominant groups of soil ciliates changed during ecological restoration. Colpodida was the dominant group in sampling site I and site II, whereas Hypotrichida was the dominant group in the late recovery sampling sites. This study shows that the dynamics of the soil ciliate community better respond to soil condition changes in the ecological restoration process. Although the soil ciliate community can be used to evaluate the effect of ecological restoration of terrestrial ecosystems, plenty of further systematic research to establish an effective and feasible evaluation index system is required.

**Key words:** Huajialing; Ecological restoration; Soil ciliate community; Ecological response; Seasonal dynamics

针对西部生态环境持续恶化的严峻形势, 我国于 1999 年开始实施的以退耕还林 (草) 为主的生态保护和建设工程, 目前已取得了明显的生态效应和经济效益。植被类型及其发育状况决定了生态

系统中其它成分的组成和结构特征, 已有大量植被状况与土壤动物群落相关关系的研究 (Chen & Yin, 2000; Zhang et al, 1999; Liao et at, 1997), 证明土壤动物群落组成结构与植被状况是密切相关的。伴随

收稿日期: 2010-10-08; 接受日期: 2011-02-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30870273; 30470208)

\*通讯作者(Corresponding author), E-mail: ningyz@nwnu.edu.cn

生态恢复下植被群落的演替,土壤有机质、pH值、有效磷、土壤含水量、水解氮等发生不同程度的改变,使得土壤理化性质不断得到改善,而这些又是影响土壤动物生长繁殖的主要环境因子 (Su et al, 1995),故而对土壤动物的群落组成及多样性产生显著影响。目前,土壤动物对生态恢复的响应研究被很多学者所关注,但主要集中在对大型土壤动物的研究 (Adl et al, 2006; Xu et al, 2005; Xu et al, 2006)。土壤纤毛虫对生态恢复响应方面的研究尚属空白。

土壤纤毛虫作为土壤生态系统微型生物群落 (microbiota community) 的重要组成部分,在土壤生态系统的物质循环和能量流动中发挥着重要作用。由于土壤纤毛虫具有对环境变化十分敏感的特点,故可用土壤纤毛虫的环境效应参数(群落组成、丰度及多样性等)来评价、监测和预报土壤环境的变化 (Ning et al, 2007)。Petz & Foissner (1989) 研究发现农药林丹 (六氯化苯) 对土壤纤毛虫有急性致毒效应,且纤毛虫的数量和种群结构发生明显改变。Xu & Mo (2001) 对李坑垃圾填埋场垃圾渗滤液淋灌的土壤中的原生动物群落进行研究,即使是较低浓度的垃圾渗滤液,对土壤原生动物群落也造成了较大的伤害。Liu et al (2007) 研究了兰州市东岗地区污染土壤中原生动物后认为其物种多样性和群落组成特征可以初步评价土壤的污染状况。作者于 2007 年 9 月至 2008 年 8 月,对甘肃定西华家岭生态恢复区土壤纤毛虫群落以及土壤环境质量进行了研究,旨在了解华家岭生态恢复区土壤纤毛虫在生态恢复与未恢复生境下其群落的演替变动特征,进而为利用土壤纤毛虫评价退耕还林区生态恢复过程中土壤环境质量提供基础资料。

## 1 材料和方法

### 1.1 样区概况

甘肃定西华家岭人工云杉林恢复区——华家岭林带(35°22'54"~35°43'40"N, 104°52'48"~105°28'06"E),地处黄土高原丘陵沟壑区,位于祁连山东部陇西旋卷构造体系内回旋褶皱带,海拔 2 000~2 586 m。华家岭属南温带半湿润—中温带干旱区气候区,年均气温 3.6~6.3℃,年降水量 350~550 mm;大气相对湿度 60%~70%,干燥度 0.8~1.2;年平均日照时数 2 500.1 h,无霜期 148 d。主要土地类型是黑垆土。

20 世纪 70 年代末,为改变人类活动对生态和

环境的破坏,该地区开始人工营造“华家岭林带”,以云杉、落叶松、油松作为该区植被恢复的主要树种,进行了大规模造林。经近 30 年的努力,植被恢复已显示出一定的生态和环境效应。

### 1.2 样地设置和采样

所选样地位于华家岭林业站大牛试验场附近(35°22'071"~35°23'387"N,105°01'362"~105°03'657"E,海拔 2 271~2 386 m)。实验按照恢复时间的不同在定西华家岭人工云杉林生态恢复区选择了 5 个不同恢复阶段的样点,并另选 1 个人为破坏但未恢复的荒草坡样点作为对照 (图 1),选择样点和对照区时考虑海拔、坡向和土壤类型等方面的因素以选择相似的生境。其研究区海拔、凋落物和植被情况和见表 1。

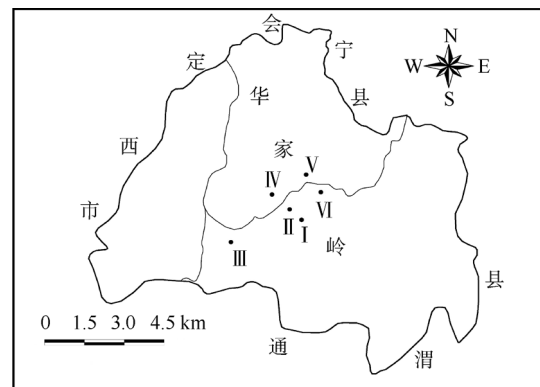


图 1 华家岭土壤纤毛虫采样点示意图

Fig. 1 Sampling sites of soil ciliates of Huajialing

I: 蛤蟆石 (对照样点) [Hamashi (contrast sampling site)]; II: 王家梁 (6 年生云杉林) [Wangjialiang (6 year-old spruce forest)]; III: 小牛沟 (12 年生云杉林) [Xiaoniugou (12 year-old spruce forest)]; IV: 南家屯 (17 年生云杉林) [Nanjiatun (17 year-old spruce forest)]; V: 黄家尧 (22 年生云杉林) [Huangjiayao (22 year-old spruce forest)]; VI: 大牛试验场 (27 年生云杉林) [Daniu shiyanchang (27 year-old spruce forest)]. 图中粗线: 华家岭界限; 细线: 公路 (heavy line symbolized the border of Huajialing; hairline symbolized the road).

土样采集分别于 2007 年 10 月(秋季)、2008 年 1 月(冬季)、2008 年 4 月(春季)、2008 年 7 月(夏季)的月初进行。在每个样点面积约 400 m<sup>2</sup> 的范围内,拣去表面上的新鲜凋落物,用 15 mL 圆筒形采样器依棋盘式采样法采集 0~5 cm 土壤层的土样 25 个并进行相关记录(表 1)。剩余土样倒入白瓷盘中,纱布盖住自然风干。在此过程中,紧闭门窗并用透气草纸覆盖土样,以防止外界空气中的纤毛虫孢囊进入土样。土壤温度、含水量和 pH 测定的样品均为湿样,4℃ 保存备用。营养元素的测定样品为自然风干土。

表 1 各样点环境因子  
Tab. 1 Environment factors in various sites

样点 Sampling sites	海拔 Altitude (m)	植被状况 Status of vegetation	凋落物 Litters (cm)	季节 Seasons	温度 Temperature (°C)	含水量 Water content (%)	有机质含量 Organic matter (%)	总氮量 Total nitrogen (%)	总磷量 Total phosphorus (%)	pH 值 pH
I 蛤峡石 Hamashi	2 271	荒草坡, 无乔木层和灌木层, 草本主要有白草、冰草和小黄菊等, 人为干扰较强, 植被总盖度 10% 以下。	< 1	秋	19	8.43	4.000	0.390	0.048	7.22
				冬	0	5.10	4.528	0.398	0.043	7.22
				春	10	5.24	3.690	0.389	0.046	7.21
				夏	23	12.36	4.245	0.460	0.048	7.22
II 王家梁 Wangjialiang	2 313	6 年生云杉林, 云杉平均高度约为 1 m。由于放牧等人干扰减少, 草本长势良好, 但种类单一, 总盖度 90% 以上。	< 1	秋	19	12.42	2.094	0.234	0.045	7.23
				冬	0	9.63	2.747	0.254	0.043	7.22
				春	10	9.72	2.068	0.211	0.034	7.21
				夏	23	17.03	4.330	0.387	0.039	7.21
III 小牛沟梁 Xiaoniugouliang	2 386	12 年生云杉林, 云杉平均高度约为 3 m。早生草本频度降低, 出现较杂的林下植物种类, 林分已形成乔、灌、草等 3 层结构, 总盖度 90% 以上。	1~2	秋	17	24.49	3.888	0.391	0.037	7.21
				冬	-1	13.40	3.962	0.416	0.039	7.21
				春	9	15.05	3.962	0.381	0.036	7.21
				夏	22	23.61	4.132	0.388	0.035	7.21
IV 南家屯梁 Nanjiatunliang	2 359	17 年生云杉林, 林分演化为乔灌为主的复合结构, 乔木以云杉为主, 平均高度约为 5 m, 灌木以沙棘为主, 林下草本种类较复杂, 总盖度约 95% 以上。	3~4	秋	18	27.34	3.956	0.406	0.040	7.22
				冬	0	14.56	4.641	0.421	0.047	7.21
				春	8.5	24.95	5.066	0.495	0.042	7.21
				夏	21.5	24.92	4.471	0.423	0.044	7.20
V 黄家尧梁 Huangjiayaoliang	2 336	22 年生云杉林, 乔木层和灌木层繁茂, 人为干扰基本消除, 云杉平均高度 6~7 m, 灌木以沙棘为主, 盖度 80% 以上, 林下早生草本基本退化。	4~5	秋	16	28.76	4.754	0.466	0.032	7.20
				冬	-1	16.24	5.405	0.480	0.042	7.20
				春	8	26.85	5.094	0.508	0.052	7.20
				夏	21	25.41	5.218	0.497	0.039	7.20
VI 大牛试验场 Daniu shiyanchang	2 325	27 年生云杉林, 乔木层和灌木层繁茂, 林分密集, 人为干扰基本消除, 云杉平均高度约为 8 m, 灌木以沙棘为主, 乔、灌总盖度 90% 以上, 林下草本基本退化。	5~6	秋	18.5	29.07	5.349	0.481	0.048	7.19
				冬	-1	17.72	5.807	0.555	0.042	7.20
				春	8	29.17	5.525	0.512	0.050	7.21
				夏	21	27.40	5.632	0.498	0.043	7.21

### 1.3 土壤理化因子的测定

土温利用曲管地温计 (温度范围为:  $-10\sim 60^{\circ}\text{C}$ ) 测定; 土壤 pH 值采用电位测定法, (土: 水 = 1: 2.5) 用 TSS-851 土壤湿度酸度计测定; 土壤含水量采用烘干法测定; 有机质含量采用硫酸、重铬酸钾氧化-容量法测定; 土壤全氮量采用硒粉-硫酸铜-硫酸消化法 (凯氏法) 进行消化处理, 然后在自动离子分析仪 (Quikchem) 上测定; 土壤全磷量用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定。

### 1.4 定性与定量研究

定性研究采用“非淹没培养皿法” (Foissner, 1992; Foissner et al, 2002) 取每份风干土样 50 g, 分别置于直径 15 cm 的培养皿中,  $25^{\circ}\text{C}$  下培养 24 h 后即可镜检以鉴定物种。每份土样重复培养若干次, 直到未检出新见物种为止。鉴定技术包括活体观察和染色制片 (Wilbert, 1975)。物种鉴定参考文献见: Berger, 1999; Corliss, 1979; Foissner, 1987; Foissner, 1998; Foissner, 2005; Foissner et al, 2002; Kahl, 1930; Kahl, 1935; Lee et al, 1985; Lee et al, 2000; Shen & Ning, 2000。定量研究采用“三级十倍环式稀释法” (the writing group of a handbook for the research methods of soil animals, 1998) 进行纤毛虫的培养计数, 本实验采用稀释倍数  $10^1\sim 10^3$ 。

### 1.5 统计分析

对鉴定到的各级分类单元及物种进行统计并划分优势类群和罕见类群, 将物种数最多的目 (order) 定义为优势类群; 次多的目定义为次优势类群; 单种的目定义为罕见类群。多样性指数依据 Margalef 多样性指数公式:  $d = (S-1) / \ln N$  计算。式中  $d$  为多样性指数;  $S$  为物种数;  $N$  为个体总数。 $d$  值的大小表示物种多样性的高低 (Shen et al, 1990)。所有数据均用 SPSS 13.0 处理, 对环境因子和群落组成参数进行分层聚类分析; 利用物种数、丰度及物种多样性指数进行样点-季节间的无重复双因子方差分析。

## 2 结果

### 2.1 土壤理化性质对生态恢复的响应

定西华家岭 6 个样点的土壤理化因子数据 (表 1) 表明: 恢复样点的土壤含水量在四个季节均高于对照样点, 且随恢复时间的延长呈明显增长趋势; 土壤 pH 值从偏碱性降低更趋向于中性; 土壤有机质含量在恢复初期迅速下降, 6 年后其含量又不断

增加, 恢复 17 年后有机质含量就高出了对照样点; 植被恢复过程中土壤总氮量、总磷量的变化与有机质含量的变化均呈先减后增趋势, 但总磷量与有机质和总氮量不同的是恢复 12 年的 III 号样点总磷量最低 (四季平均值为 0.037%), I 号对照样点和恢复 27 年的 VI 号样点最高 (四个季节平均值均为 0.046%), II、III、IV 和 V 号的恢复样点的总磷量均低于 I 号对照样点。

应用 SPSS 13.0 统计软件对 6 个样点中土壤理化因子的 6 个指标 (含水量、土温、pH 值、有机质含量、总氮量、总磷量) 进行分层聚类分析 (图 2)。V、VI 和 IV 号样点在欧氏距离 1 处最先聚为一类, 在 4 处又与 III 号样点聚为一类; I 号和 II 号样点在欧氏距离 5 处聚为一类。从 6 个样点的土壤理化因子来看, IV、V 和 VI 号样点相似性最大, III 号样点又与它们 3 个样点较为相似; I 号对照样点与 II 号样点相似性较大, 但与其他样点相似性均很低。这说明恢复时间间隔越长, 样点土壤环境之间的相似性越小。

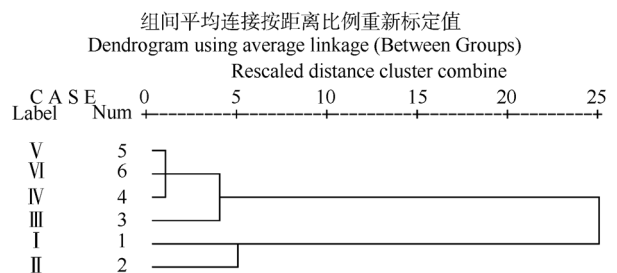


图 2 不同样点的土壤环境因子聚类分析图

Fig. 2 Dendrogram of cluster analysis on Environmental factors in various sites

### 2.2 土壤纤毛虫群落组成对生态恢复的响应

2.2.1 物种分布 127 种纤毛虫在各样点的分布见图 4。I 号对照样点和恢复 6 年的 II 号样点各分布有 38 种和 39 种, 分别占总物种数的 29.92% 和 30.71%; III 号样点 55 种, 占 43.31%; IV 号和 V 号样点各分布有 68 种和 69 种, 分别占 53.54% 和 54.33%; 恢复 27 年的 VI 号样点物种最为丰富, 分布有 87 种, 占物种总数的 68.50%。回归分析表明, 物种数和恢复年限成良好的线性回归关系, 回归方程为  $\hat{y} = 10.029x + 24.400 (R^2=0.9558)$ , 可见随着恢复时间的延长土壤纤毛虫的物种数呈增多趋势。

应用 SPSS 13.0 统计软件对 6 个样点的土壤纤毛虫物种分布进行分层聚类分析 (图 3), 恢复初

期的 II 号样点与恢复中期的 III、IV 号样点最先聚为一类，再与恢复 22 年的 V 号样点汇合聚为一类，然后它们又与 I 号对照样点聚合，说明恢复期的 II、III 和 IV 号样点的土壤纤毛虫物种分布最为相似，它们与 V 号样点较相似，而与 I 和 VI 号样点物种相似性较小。可见，6 个样点的物种分布有显著差异。且随生态恢复时间的延长，样点间土壤纤毛虫物种的相似性逐渐减小。

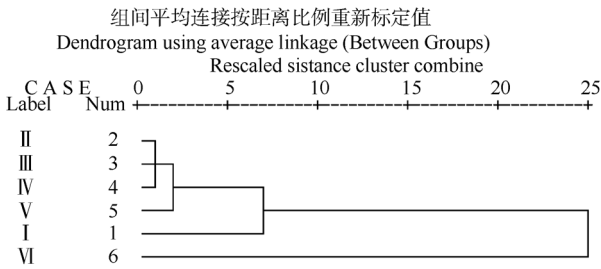


图 3 样点间土壤纤毛虫群落组成参数聚类分析  
Fig. 3 Dendrogram of cluster analysis on community structure index of soil ciliates in various sites

**2.2.2 群落组成** 已鉴定到的 127 种纤毛虫，分别隶属于 3 纲 9 目 34 科 50 属。土壤纤毛虫群落组成见图 4，华家岭土壤纤毛虫群落组成以下毛目 (Hypotrichida) 46 种为优势类群，占纤毛虫物种总数的 36.22%；肾形目 (Colpodida) 25 种，占 19.69%，为次优势类群；缘毛目 (Peritrichida) 只有 1 种，为罕见类群，占物种总数的 0.79%；常见类群包括：前口目 (Prostomatida)、篮口目 (Nassulida)、管口目 (Cyrtophorida)、膜口目 (Hymenostomatida)、盾纤目 (Scuticociliatida) 和异毛目 (Heterotrichida)，其中以前口目种类较多，占土壤纤毛虫总数的 14.17%。

图 4 显示，I 号对照样点群落组成较为简单；II 号样点与对照样点差别不大；III~VI 号样点目、

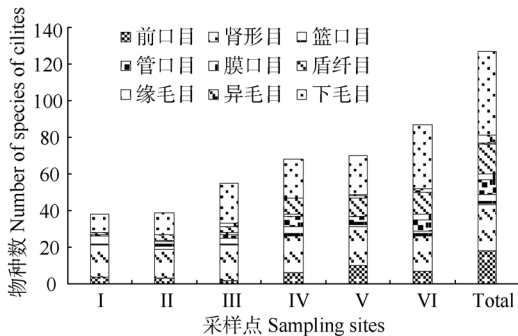


图 4 各样点土壤纤毛虫群落组成  
Fig. 4 Community structure of soil ciliates in various sites

科、属和种的数目明显增加。优势类群由 I、II 号样点的肾形目逐渐演替为后期的下毛目。将未恢复的对照样点和各生态恢复阶段下的土壤纤毛虫的群落组成、物种数和优势类群做一对比总结：

I 号未恢复对照样点分布有 3 纲 6 目 13 科 18 属 38 种。其中肾形目 (Colpodida) 17 种，占纤毛虫物种总数的 44.74%，为优势类群；下毛目 (Hypotrichida) 10 种，占 26.32%，为次优势类群；管口目 (Cyrtophorida) 和盾纤目 (Scuticociliatida) 各只有 1 种，分别占物种总数的 2.63%，为罕见类群；常见类群为前口目 (Prostomatida) 和篮口目 (Nassulida)。

恢复 6 年的 II 号样点分布有 3 纲 6 目 14 科 18 属 39 种。其中肾形目 16 种，占纤毛虫物种总数的 41.03%，为优势类群；下毛目 12 种，占 30.77%，为次优势类群；管口目仅有 1 种，占物种总数的 2.56%，为罕见类群；常见类群包括：前口目、篮口目和盾纤目。

恢复 12 年的 III 号样点分布有 3 纲 8 目 18 科 24 属 55 种。其中下毛目 22 种，占纤毛虫物种总数的 40.00%，为优势类群；肾形目 19 种，占 34.55%，为次优势类群；膜口目 (Hymenostomatida) 只有 1 种，占物种总数的 1.82%，为罕见类群；常见类群包括：前口目、篮口目、管口目、盾纤目和异毛目 (Heterotrichida)。

恢复 17 年的 IV 号样点分布有 3 纲 7 目 20 科 28 属 68 种。其中下毛目 21 种，占纤毛虫物种总数的 30.88%，为优势类群；肾形目 20 种，占 29.41%，为次优势类群；膜口目只有 1 种，占物种总数的 1.47%，为罕见类群；常见类群包括：前口目、篮口目、管口目、盾纤目和异毛目。

恢复 22 年的 V 号样点分布有 3 纲 8 目 24 科 31 属 70 种。其中下毛目和肾形目各有 21 种，分别占纤毛虫物种总数的 30%，并列为优势类群；前口目和盾纤目各有 10 种，分别占 14.29%，并列为次优势类群；缘毛目 (Peritrichida) 和异毛目各有 1 种，分别占物种总数的 0.79%，为罕见类群；常见类群包括为篮口目和管口目。

恢复 27 年的 VI 号样点分布有 3 纲 8 目 29 科 38 属 87 种。其中下毛目 35 种，占纤毛虫物种总数 40.23%，为优势类群；肾形目 19 种，占 21.84%，为次优势类群；常见类群包括：前口目、篮口目、管口目、膜口目、盾纤目和异毛目。

2.2.3 优势种 将各季度、各样点中出现频次相对较高的物种作为优势种。齿脊拟肾形虫 (*Paracolpoda steini*) 在 2007 年秋季的 4 个样点 (III、IV、V、VI)、2007 年冬季的 3 个样点 (III、IV、VI)、2008 年春季的 3 个样点 (I、II、IV) 和 2008 年夏季的 5 个样点 (I、II、III、IV、VI) 中均为优势种; 刚毛胃纤虫 (*Homalogastra setosa*) 在 2007 年秋季 5 个样点 (I、III、IV、V、VI)、2007 年冬季和 2008 年春季的 3 个样点 (IV、V、VI) 以及 2008 年夏季的 V 和 VI 号样点中均为优势种; 大口薄咽虫 (*Leptopharynx eurostoma*) 在 2007 年秋季的 4 个样点 (I、II、III、V)、2007 年冬季的 3 个样点 (I、II、V)、2008 年春季的 I 号样点和 2008 年夏季的 I 和 IV 号样点中均为优势种。由此看出, 齿脊拟肾形虫、刚毛胃纤虫和大口薄咽虫所适应的环境范围较为广泛。

从各样点优势种来看, I 号对照样点优势种类单一, 基本都是以上分布较广的 3 种纤毛虫: 齿脊拟肾形虫、刚毛胃纤虫和大口薄咽虫, 只有在 2008 年夏季莫氏拟肾形虫 (*Paracolpoda maupasi*) 上升到优势种之列。恢复 6 年的 II 号样点以齿脊拟肾形虫、大口薄咽虫、僧帽肾形虫 (*Colpoda cucullus*) 和膨胀肾形虫 (*Colpoda inflata*) 为优势种; 恢复 12 年的 III 号样点优势种为: 齿脊拟肾形虫、刚毛胃纤虫、大口薄咽虫、膨胀肾形虫、背沟肾形虫

(*Colpoda henneguyi*) 和粗糙拟肾形虫 (*Paracolpoda aspera*); 恢复 17 年的 IV 号样点优势种为: 齿脊拟肾形虫、刚毛胃纤虫、大口薄咽虫、膨胀肾形虫、僧帽肾形虫、被发袋虫 (*Cristigera vestita*) 和伪尖毛虫 (*Oxytricha fallax*); 恢复 22 年的 V 号样点优势种为: 齿脊拟肾形虫、刚毛胃纤虫、大口薄咽虫、膨胀肾形虫、苔藓膜袋虫 (*Cyclidium muscicola*)、苔藓嗜腐虫 (*Sathrophilus muscorum*)、背沟肾形虫和莫氏拟肾形虫; 恢复 27 年的 VI 号样点优势种为: 齿脊拟肾形虫、刚毛胃纤虫、膨胀肾形虫、苔藓嗜腐虫、巴维利亚斜管虫 (*Chilodonella barvariensis*) 和苔藓游仆虫 (*Euplotes muscicola*)。

2.2.4 广布种和特有种 有 37 种纤毛虫在所有样点都出现, 为广布种, 占纤毛虫物种总数的 29.13%; 对照样点中特有种只有 1 种, 占纤毛虫物种总数的 0.79%; 恢复样点的特有种有 89 种, 占纤毛虫物种总数的 70.08%。

2.2.5 生态恢复下土壤纤毛虫物种数、丰度和物种多样性指数季节动态 从纤毛虫物种数的季节动态看(图 5), 夏季纤毛虫物种数最多, 冬季最少。其顺序为: 夏季>秋季>春季>冬季。I 号对照样点四个季节的物种数均最少, 分别为 19 (秋)、13 (冬)、18 (春) 和 21 (夏) 种; VI 号样点物种数四个季节均达到最高, 分别为 42 (秋)、38 (冬)、40 (春) 和 41 (夏) 种。

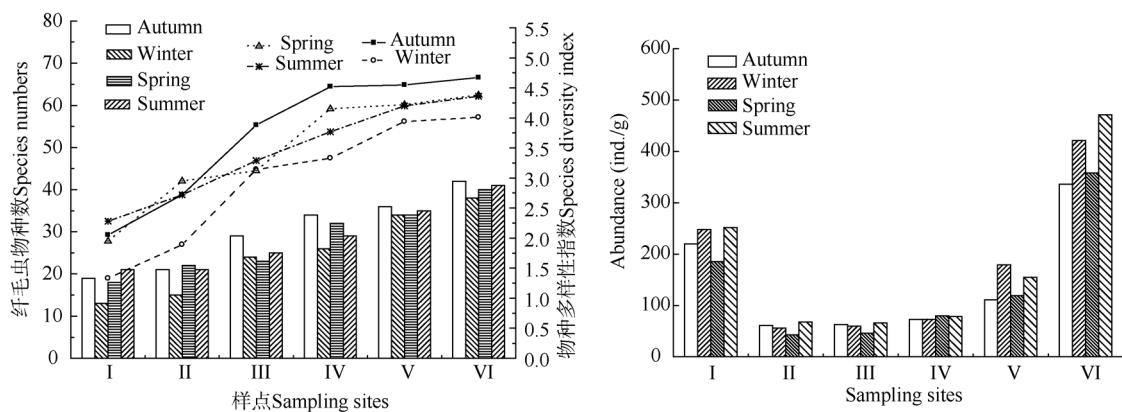


图 5 各样点的土壤纤毛虫物种数、丰度及物种多样性指数  
Fig. 5 Species numbers, species diversity index and abundance of soil ciliates in various sites

土壤纤毛虫丰度的季节动态(图 5), 其 6 个样点丰度平均值由大到小的顺序为: 夏季>冬季>秋季>春季, 最高峰出现在夏季, 次高峰出现在冬季。土壤纤毛虫丰度在对照样点 I 号较高, 分别为 220 ind./g (秋)、248 ind./g (冬)、185 ind./g (春)、252 ind./g

(夏); 恢复初期丰度出现了骤降, 恢复 6 年的 II 号样点丰度除夏季以外, 均最低, 分别为 61 ind./g (秋)、56 ind./g (冬)、43 ind./g (春)、43 ind./g (夏); 随着恢复时间的延长又逐渐升高, 恢复 27 年的 VI 号样点丰度最高, 分别为 336 ind./g (秋)、421 ind./g

(冬)、358 ind./g (春)、471 ind./g (夏)。

物种多样性指数在四个季节中, I 号对照样点多样性指数均最低, 分别为 2.05 (秋)、1.33 (冬)、1.95 (春) 和 2.28 (夏); VI 号样点多样性指数最高, 分别为 4.67 (秋)、4.01 (冬)、4.38 (春) 和 4.36 (夏)。

各样点纤毛虫群落物种数、丰度及物种多样性指数的季节变化(图 5)表明, 物种多样性指数和物种数变化一致, 随着生态恢复的年限逐渐增大, 对照样点纤毛虫的丰度除少于恢复 27 年的样点外, 都大于其他恢复期的 4 个样点, 而在生态恢复期, 纤毛虫丰度也是随着生态恢复的年限逐渐增大。利用物种数、丰度及物种多样性指数数据 SPSS13.0 进行样点-季节间的无重复双因子方差分析, 结果如下: 华家岭区土壤纤毛虫物种数季节间差异极显著 ( $F_{3,8} = 92.455, P < 0.01$ ), 各样点间之间差异极显著 ( $F_{3,8} = 8.586, P < 0.01$ ); 丰度季节间差异极显著 ( $F_{3,8} = 109.606, P < 0.01$ ), 各样点间之间差异极显著 ( $F_{3,8} = 4.176, P < 0.01$ ); 物种多样性季节间差异极显著 ( $F_{3,8} = 76.566, P < 0.01$ ), 各样点间之间差异极显著 ( $F_{3,8} = 12.956, P < 0.01$ )。

### 2.3 土壤纤毛虫群落结构参数与土壤理化因子的相关性

应用 SPSS 13.0 统计软件将各样点的主要环境因子 (土温、含水量、pH 值、有机质含量、总氮量、总磷量) 和纤毛虫群落结构参数 (物种数、丰度、多样性指数) 作为源变量, 进行二元变量的相关性分析(表 2)。相关性分析显示, 物种数和物种多样性指数均与含水量、有机质及总氮量呈极显著的正相关 ( $P < 0.01$ ), 而与 pH 值呈极显著的负相关 ( $P < 0.01$ ), 与土温和总磷量之间没有明显的相关性 ( $P > 0.05$ )。丰度与有机质含量和总氮量呈极显著的正相关 ( $P < 0.01$ ), 与总磷量呈显著的正相关 ( $P < 0.05$ ), 而与土温、含水量及 pH 值之间无明显的相关性 ( $P > 0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 土壤纤毛虫群落组成对生态恢复的响应

华家岭生态恢复区伴随植被的恢复通过改变土壤性质而对土壤生物群落产生影响, 其物种多样性的提高, 使群落内的其他生物协同产生相应响应。随着生态恢复年限增加, 样点的植被和覆盖度的状况发生明显改善, 地表掉落层也由恢复初期不足 1~2 cm 到恢复后期的 5~6 cm, 凋落物层的增

表 2 土壤纤毛虫群落结构参数与土壤环境因子的相关性分析(皮尔森相关性系数)

Tab. 2 Relationships between structural parameters of soil ciliates community and environmental factors of soil using Pearson's correlation coefficient

环境因子 Environment factors	物种数 Species numbers	丰度 Abundance	物种多样性指数 Species diversity index
恢复年限 Restoration stages	0.949**	0.404	0.916**
土温 Soil temperature	0.128	-0.009	0.167
含水量 Water content	0.863*	0.169	0.919**
pH 值 pH	-0.571**	-0.106	-0.583**
有机质含量 Organic matter	0.716**	0.632**	0.579**
总氮量 Total nitrogen	0.713**	0.591**	0.593**
总磷量 Total phosphorus	0.072	0.434*	-0.092

\*  $P < 0.05$  显著性水平; \*\*  $P < 0.01$  显著水平。

\* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed); \*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

加使土壤营养化水平提高, 并丰富了土壤纤毛虫生长繁殖所需的营养和生存条件。土壤纤毛虫群落存在明显演替, 恢复初期群落组成较为简单, 变化较小, 但伴随着土壤纤毛虫所处土壤环境的改善, 其群落组成明显趋于复杂, 对生态恢复的发生了积极响应。

土壤纤毛虫优势类群由 I、II 号样点的肾形目逐渐演替为恢复后期的下毛目。优势种类亦逐渐增多并趋于复杂, 说明随着植被的恢复与土壤环境的改善, 有更多的纤毛虫物种适应环境并成为优势种。从优势种的分类阶元上来看, 肾形目种类最多, 这与肾形目对恶劣环境有强烈的适应性有关, 肾形目能在人为破坏严重、植被覆盖率低的土壤环境中占优势; 但是随着植被的恢复和土壤环境的改善, 下毛目所占比例逐渐增加并成为优势类群, 这是因为下毛目多为食细菌者, 植被恢复使得凋落物层加厚、土壤中腐殖质增多、细菌大量繁殖, 从而为其提供较为丰富的食物来源, 丰厚的凋落物也为其提供了丰富的趋触界面。

物种数、丰度和物种多样性指数等结构参数均能客观地反映土壤状况及其变化趋势。其中物种多样性指数可直接反映生物群落本身结构的复杂程度、稳定性大小和生态环境质量的优劣。研究区经过近 30 年的恢复, 与对照的退化生态系统相比, 5

个不同恢复阶段的人工云杉林样点土壤纤毛虫物种数和物种多样性指数均高于对照样点,且随着恢复时间的延长而升高,表明土壤纤毛虫群落更趋于复杂和稳定。物种丰度、物种多样性指数均在恢复 27 年的 VI 号样点出现高峰,并与物种数量峰值相吻合,表明该时期所设样点在所有样点纤毛虫多样性较高,土壤环境综合状况较好。由此可见,土壤纤毛虫对在生态恢复下土壤环境的改善发生响应,显示出对土壤生态系统生态恢复的指示作用。

### 3.2 生态恢复下土壤纤毛虫群落组成与土壤环境因子的关系

土壤纤毛虫物种数的季节动态与土温和含水量的季节动态是相一致的,在 6 个样点中,夏季和冬季分别是四季中土温和含水量最高与最低的季节,对应的物种数也分别是四季中最高点和最低点,故纤毛虫物种数的季节动态与土温和含水量的季节变化关系密切。此外,夏季又是四季中有机质和总氮量最高的季节,这也可能是该季节物种数最多的原因之一。I 号对照样点四个季节的物种数均最少,VI 号样点物种数四个季节均达到最高。Ning & Shen (1998) 研究发现土壤含水量、有机质含量和总氮量对土壤原生动物的生长发育和繁殖均有影响;Finlay et al (1986)、Beaver & Crisman (1990) 也研究发现,纤毛虫物种数随营养的增加而增加。在本研究中,I 号对照样点含水量最低,物种数也最少;在 II~VI 号恢复样点,含水量、有机质含量和总氮量均逐渐升高,物种数亦逐渐增加。

随生态恢复,土壤纤毛虫丰度呈现剧降后,逐渐升的变化趋势,这与土壤总氮、总磷和有机质的含量变化均呈先减后增趋势相吻合。土壤氮主要来自有机质的分解,其含量的变化与土壤有机质的变化有着密切的关系。此外,土温也是影响土壤纤毛虫生长繁殖的重要生态因子之一。许多研究表明,在一定范围之内,土壤原生动物的丰度与温度、有机质含量和总氮量均呈正相关关系 (Opperman et al, 1989)。中国典型地带土壤原生动物丰度一年中有 1 个或 2 个高峰,大都出现在夏季 (Ning & Shen, 1998),本实验也得到同样的结论,从 4 个季节的土壤理化因子来看,2008 年夏季,土温、含水量、有机质含量和总氮量均达到了全年最高,因而该季度土壤纤毛虫丰度达到了最高峰;2007 年冬季有机质和总氮量也较高,故丰度相应出现次高峰。此外,相关性分析发现土壤有机质含量和总氮量对土壤

纤毛虫丰度影响极显著,总磷量对其影响显著,皮尔森相关性系数大小显示土壤有机质对土壤纤毛虫丰度影响比总氮大,这与 Ning & Shen (1998) 利用逐步回归分析北热带云南西双版纳的土壤原生动物丰度与有机质、总氮和总磷的关系后得出的结论相一致。

土壤纤毛虫物种数、物种多样性指数随着恢复年限呈增长趋势,这与生态恢复下有机质及总氮含量都呈极显著的正相关,说明生态恢复下,土壤环境的有机质及总氮含量是影响微食物网中群落组成稳定性的主要因素。此外,其物种数、丰度和物种多样性指数与多个环境因子存在明显的相关性,也显示出土壤纤毛虫群落对生态恢复下土壤环境的指示作用。各生态恢复样点的土壤纤毛虫群落组成间的相似性以及参数变化显示出其群落组成的演替,并且很好的响应了生态恢复下土壤环境的变化。

### 3.3 土壤纤毛虫在生态恢复评价中的应用

土壤纤毛虫作为土壤生态系统微型生物群落的重要组成部分,具有个体微小、现存量高、生活周期短、分布广、形态和遗传分化低、对土壤环境变化敏感性高等特点。土壤纤毛虫群落可用于陆地生态恢复评价,因而可以用土壤纤毛虫群落结构及参数来评价生态恢复效果。本研究中,随着生态恢复时间的延长和植被的恢复,一些较为敏感且不受季节影响的土壤纤毛虫,如背沟肾形虫 (*Colpoda henneguyi*)、纺锤康纤虫 (*Cohnilembus fusiformis*)、蝶形康纤虫 (*Cohnilembus vexillarius*)、有尾片尾虫 (*Urosoma caudata*)、活动恩氏虫 (*Engelmanniella mobilis*) 等在恢复初期开始出现;有些也开始适应土壤环境形成优势种。所以,这些土壤纤毛虫可以作为土壤环境生态恢复初期的指示种。此外,苔藓嗜腐虫 (*Sathrophilus muscorum*)、椭圆嗜腐虫 (*Sathrophilus ovatus*)、苔藓膜袋虫 (*Cycludium muscicola*)、苔藓瘦尾虫 (*Uroleptus muscorum*)、尖锐尖毛虫 (*Oxytricha acuta*)、念珠角毛虫 (*Keronopsis monilata*)、苔藓游仆虫 (*Euplotes muscicola*)、近亲游仆虫 (*Euplotes affinis*) 等对土壤环境变化敏感性高且不受季节影响物种常存在于土壤含水量、土壤营养化水平较高的生态恢复后期样点中;有些适应此时的土壤环境并且形成恢复后期的优势种,故可利用这些敏感型土壤纤毛虫对生态恢复后期的土壤质量进行初步的评价和预测。

然而,与利用纤毛虫及其它水生原生动物群落



结构和功能参数评价水质相比, 纤毛虫用于生态恢复效果评价的研究才刚刚起步。要建立有效可行

的、具有普遍意义的评价指标体系, 尚需大量的和系统的工作。

## 参考文献:

- Adl SM, Coleman DC, Read F. 2006. Slow recovery of soil biodiversity in sandy loam soils of Georgia after 25 years of no-tillage management [J]. *Agric Ecosyst Environ*, **114**: 323-334.
- Beaver JR, Crisman TL. 1990. Seasonality of planktonic ciliated protozoa in 20 subtropical Florida lakes of varying trophic state [J]. *Hydrobiologia*, **190**(2): 127-135.
- Berger H. 1999. Monograph of the Oxytrichide (Ciliophora, Hypotrichia) [M]//Dumont HJ, Werger MJA. *Monographiae Biologicae*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, **78**: 1-1079.
- Chen YB, Yin XQ. 2000. The study of soil animals community in difference forest type in Liangshui Zone [J]. *J Shanghai Teach Univ. Nat Sci.* **29**(2): 79-84. [陈颖彪, 殷秀琴. 2000. 凉水地区不同林型土壤动物群落研究. 上海师范大学学报: 自然科学版, **29**(2): 79-84.]
- Corliss JO. 1979. The Ciliated Protozoa: Characterization, Classification and Guide to the Literature [M]. 2nd ed. Oxford: Pergamon Press, 1-455.
- Finlay BJ, Fenchel T, Gardner S. 1986. Oxygen perception and O<sub>2</sub> toxicity in the fresh-water ciliates protozoa Loxodes [J]. *J Protozool*, **33**(2): 157-165.
- Foissner W. 1987. Soil Protozoa: Fundamental problems, ecological significance, adaptations in ciliates and testaceans, bioindicators and guide to the literature [J]. *Progr Protistol*, **2**: 69-212.
- Foissner W. 1992. Estimating the Species Richness of Soil Protozoa Using the "Non-Flooded Petri Dish Method" [M]// Lee J J, Soldo A T eds. *Protocols in Protozoology*. Lawrence: Allen Press, B-10.1-B-10.2.
- Foissner W. 1998. An updated compilation of world soil ciliates (Protozoa, Ciliophora), with ecological notes, new records, and descriptions of new species [J]. *Europ J Protistol*, **34**: 195-235.
- Foissner W, Agatha S, Berger HA. 2002. Soil Ciliates (Protozoa, Ciliophora) from Namibia (Southwest Africa), with Emphasis on Two Contrasting Environments, the Etosha Region and the Namib Desert [M]. *Denisia: Museum of Upper Austria*, **5**: 1064-1459.
- Foissner W. 2005. Two new "flagship" ciliates (Protozoa, Ciliophora) from Venezuela: *Sleighophrys pustulata* and *Luporinophrys micelae* [J]. *Europ J Protistol*, **41**(2): 99-117.
- Kahl A. 1930. Urtiere oder Protozoa I: Wimpertiere oder Ciliata (Infusoria) 1. Allgemeiner Teil and Prostomata [M]. *Dahl: Tierwelt Deutschlands*, **18**: 1-180.
- Kahl A. 1935. Urtiere oder Protozoa I: Wimpertiere oder Ciliata (Infusoria) 4. Peritricha and Chonotricha; Nachtrag I [M]. *Dahl: Tierwelt Deutschlands*, **30**: 651-886.
- Lee JJ, Hutner SH, Bovee EC. 1985. An Illustrated Guide to the Protozoa [M]. Lawrence: Soicety of Protozoologists, 480-482.
- Lee JJ, Leedale GF, Bradbury P. 2000. An Illustrated Guide to the Protozoa [M]. Lawrence: Allen Press Inc., 690-1432.
- Liao CH, Li JX, Huang HT. 1997. Soil animal community diversity in the forest of the southern subtropical region, China [J]. *Acta Ecol Sin*, **17**(5): 549-555. [廖崇惠, 李建雄, 黄海涛. 1997. 亚热带森林土壤动物群落多样性研究. 生态学报, **17**(5): 549-555.]
- Liu N, Ning YZ, Ma ZX, Li C. 2007. Species diversity of protozoa of contaminated soil in Donggang District of Lanzhou [J]. *Gansu Sci Technol*, **23**(4): 9-10. [刘娜, 宁应之, 马正学, 李昌. 2007. 兰州市东岗区污染土壤中的原生动物物种多样性. 甘肃科技, **23**(4): 9-10.]
- Ning YZ, Shen YF. 1998. Soil protozoa in typical zones of China: II. Ecological study [J]. *Acta Zool Sin*, **44**(3): 271-276. [宁应之, 沈韞芬. 1998. 中国典型地带土壤原生动物: II. 生态学. 动物学报, **44**(3): 271-276.]
- Ning YZ, Wang J, Liu N, Ma ZX, Cheng X. 2007. Species Diversity of Soil ciliates in scenic spots and historic sites of Maijishan, Tianshui, Gansu [J]. *Zool Res*, **28**(4): 367-373. [宁应之, 王娟, 刘娜, 马正学, 程晓. 2007. 甘肃天水麦积山风景名胜区土壤纤毛虫的物种多样性. 动物学研究, **28**(4): 367-373.]
- Opperman MH, Wood M, Harris PJ. 1989. Changes in microbial populations following the application of cattle slurry to soil at two temperatures [J]. *Soil Biol Biochem*, **21**(2): 263-268.
- Petz W, Foissner W. 1989. The effects of mancozeb and lindane on the soil microfauna of a spruce forest: a field study using a completely randomized block design [J]. *Biol Fertil Soils*, **7**(3): 225-231.
- Shen YF, Ning YZ. 2000. Protozoa [M]//Yin WY et al. *Pictorial Keys to Soil Animals of China*. Beijing: Science Press, 7-42, 393-427.
- Shen YF, Zhang ZS, Gong XJ, Gu MR, Shi ZX, Wei YX. 1990. Modern Biomonitoring Techniques Using Freshwater Microbiota [M]. *China Architecture and Building Press*, 1-524. [沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 顾曼如, 施之新, 魏印心. 1990. 微型生物监测新技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1-524.]
- Su YC, Zhang CB, Gou YB. 1995. Relationship between seasonal quantitative variation of soil animals in wheat field and environmental factors in northeast heavy frigid region of China [J]. *Chn J Ecol*, **14**(3): 10-14. [苏永春, 张崇邦, 勾影波. 1995. 东北高寒地区麦田土壤动物数量的季节变化与环境因素关系的研究. 生态学杂志, **14**(3): 10-14.]
- The Writing Group of a Handbook for the Research Methods of Soil Animals. 1998. A Handbook for the Research Methods of Soil Animals [M]. Beijing: Chinese Forestry Publishing House, 63-73. [土壤动物研究方法手册编写组. 1998. 土壤动物研究方法手册[M]. 北京: 中国林业出版社, 63-73.]
- Wilbert N. 1975. Eine verbesserte Technik der Protargolimpregnation für Ciliaten [J]. *Mikrokosmos*, **64**: 171-179.
- Xu GL, Zhou GY, Mo JM. 2005. The responses of soil fauna composition to forest restoration in Heshan [J]. *Acta Ecol Sin*, **25**(7): 1670-1677. [徐国良, 周国逸, 莫江明. 2005. 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, **25**(7): 1670-1677.]
- Xu GL, Zhou GY, Mo JM. 2006. Changes of soil fauna during forest restoration in Subtropical China [J]. *Zool Res*, **27**(1): 23-28. [徐国良, 周国逸, 莫江明. 2006. 亚热带退化植被重建中土壤动物群落变化. 动物学研究, **27**(1): 23-28.]
- Xu RL, Mo Y. 2001. Effect of irrigation of landfill leachate on soil protozoan communities [J]. *Chn J Appl Envir Biol*, **7**(1): 41-44. [徐润林, 莫燕. 2001. 垃圾渗滤液浇灌对红壤原生动物群落的影响. 应用与环境生物学报, **7**(1): 41-44.]
- Zhang XP, Li CY, Yin XQ, Chen P. 1999. Relation between soil animals and nutrients in the differently used forest lands [J]. *Chn J Appl Envir Biol*, **5**(1): 26-31. [张雪萍, 李春艳, 殷秀琴, 陈鹏. 1999. 不同使用方式林地的土壤动物与土壤营养元素的关系. 应用与环境生物学报, **5**(1): 26-31.]