

DOI: 10.5846/stxb201401060047

宁应之, 武维宁, 杜海峰, 王红军. 土壤纤毛虫群落对退耕还林生态恢复的响应——以侧柏林为例. 生态学报, 2016, 36(2): - .

Ning Y Z, Wu W N, Du H F, Wang H J. Response of Soil Ciliate Communities to Ecological Restoration after the Implementation of the Conversion of Cropland to Forest and Grassland Program: A Case Study of *Platyclusus orientalis* Forest. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(2): - .

土壤纤毛虫群落对退耕还林生态恢复的响应 ——以侧柏林为例

宁应之^{1,*}, 武维宁¹, 杜海峰², 王红军³

1 西北师范大学生命科学学院, 兰州 730070

2 陇南市环境监测站, 陇南 746000

3 国家林业局甘肃濒危动物保护中心, 武威 733000

摘要: 为了了解土壤纤毛虫群落对退耕还林区生态恢复下土壤环境变化的响应及尝试利用土壤纤毛虫群落特征评价退耕还林生态恢复的效果, 作者于 2010 年 3 月至 9 月采用“非淹没培养皿法”、活体观察法、蛋白银染色法和 Foissner 计数法对甘肃陇南武都退耕还林区 5 个不同恢复阶段的样点和一个荒草坡对照样点的土壤纤毛虫群落特征进行了研究, 同时测定了 pH 值、温度、含水量及速效磷、有效钾、铵态氮、有机质和有机碳含量等土壤环境因子并分析了生态恢复条件下土壤纤毛虫群落特征与土壤环境因子的相关性。研究中共鉴定到 71 种纤毛虫, 隶属于 3 纲、10 目、22 科、29 属。研究发现, 不同恢复年限的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, 物种数、种群密度和物种多样性指数总体均呈增长趋势。优势类群也发生了演替, 由恢复初期的肾形目演替到后期的下毛目。相关性分析结果表明, 在生态恢复条件下, 土壤有机质和铵态氮含量是影响土壤纤毛虫群落结构稳定性的主要因素, 不同纤毛虫类群对生态恢复的响应存在差异。冗余分析显示, 土壤纤毛虫群落很好地响应了生态恢复过程中土壤环境条件的变化。

关键词: 退耕还林; 生态恢复; 土壤纤毛虫群落; 生态响应; 侧柏林; 冗余分析

Response of Soil Ciliate Communities to Ecological Restoration after the Implementation of the Conversion of Cropland to Forest and Grassland Program: A Case Study of *Platyclusus orientalis* Forest

NING Yingzhi^{1,*}, WU Weining¹, DU Haifeng², WANG Hongjun³

1 The College of Life Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2 The Longnan Environmental Monitoring Station of Gansu Province, Longnan 746000, China

3 The Gansu Endangered Animal Protection Centre under the State Forestry Administration of China, Wuwei 733000, China

Abstract: Soil ciliates are some of the most complex and highly differentiated soil unicellular eukaryotes and play an important role in soil ecosystems. The species richness and individual abundance of soil ciliates, and their unique cell structures and physiological characteristics means that soil ciliate communities are highly sensitive to environmental conditions and therefore can be used as bioindicators in natural and human-influenced soil ecosystems.

In order to understand the response of soil ciliate communities to the soil environmental changes after the implementation of the Conversion of Cropland to Forest and Grassland Program, from March to September 2010, the community characteristics of soil ciliates in five sampling sites (*Platyclusus orientalis* forests) at different stages of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41361055)

收稿日期: 2014-01-06; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: skyb514@qq.com

restoration, together with a control sampling site (a wild grass slope). The sites were located in Wudu District, Longnan City, and were studied using the non-flooded petri dish method, observation *in vivo*, protargol impregnation, and Foissner's counting method. A total of 71 soil ciliate species were identified in this study, which belonged to 3 classes, 10 orders, 22 families, and 29 genera. Hierarchical cluster analysis showed significant differences in the distribution of soil ciliate species among the soils collected from forests at different restoration stages. Furthermore, the analysis indicated that as restoration progressed, the composition of soil ciliate species became more and more complex. The diversity of soil ciliate species in the soil samples collected from the restoration sites were all higher than that in the control soil sample. Multiple linear regression analysis revealed that there was a significant correlation between the ciliate species number and restoration stage ($\hat{y} = 2.714x^2 - 10.820x + 28.400$, $R^2 = 0.940$), and that there was an increase in the number of ciliate species as the restoration progressed. A statistical analysis of the number of the soil ciliate species showed a gradual succession of dominant soil ciliate groups over the course of ecological restoration. The dominant soil ciliate group Colpodida in earlier restoration soils was substituted by Hypotrichida in later restoration soils.

In this study, the soil environmental conditions including pH, soil temperature, soil water content, soil available phosphorus, available potassium, ammonium nitrogen, organic matter, and organic carbon in different soil samples were also investigated using potentiometric determination, angle stem earth thermometer, high-temperature drying, Olsen's method, sodium tetraphenylboron turbidimetry, indophenol blue colorimetry, and hydration heat-photoelectric colorimetry, respectively. The results of physicochemical analysis of the soil samples suggested that soil quality improved during the conversion from cropland to forestland. Bivariate correlation analysis showed that soil organic matter and ammonium nitrogen had the most important influence on soil ciliate community diversity. Finally, the redundancy analysis results suggested that the variation between soil ciliate communities had a significant correlation with changes to soil environmental conditions during the conversion from cropland to forestland. Therefore, the soil ciliates could be considered as indicator organisms for assessing the effects of ecological restoration after conversion of cropland to forest.

Key Words: Conversion of cropland to forest; Ecological restoration; Soil ciliate communities; Ecological response; *Platyclus orientalis* Forest; Redundancy analysis

退耕还林是指在水土流失严重或粮食产量低而不稳定的坡耕地和沙化耕地以及生态地位重要的耕地,退出粮食生产并植树或种草。陇南市武都区在 1995—2011 年间,林地转入最为剧烈,一直是全省、市退耕还林还草的试点地区之一,并且在短短十几年里,已经产生了显著的经济和生态效益。土壤动物与土壤生态系统的环境要素密切相关,探明土壤动物与环境要素之间的相互关系对深刻认识土壤生态系统的运行机制、评价土壤生态系统功能具有重要意义^[1]。迄今为止,对生态恢复的评价尚无统一的指标体系。土壤是生态系统诸多生态过程(如营养物质循环、水平衡、凋落物分解)的参与者,土壤营养状况直接影响生物群落的组成,决定着生态系统的结构、功能和生产力水平,是生态系统功能恢复与维持的关键指标之一。多数研究表明,对于一个已退化的生态系统,其恢复程度可以通过土壤理化性质和物种多样性的恢复两个方面进行表征。长期以来,人工林营造植被恢复被广泛应用于退化生态系统的恢复,这不仅构建了退化生态系统的初始植物群落,进而促进改善区域生态和环境,从而有利于土壤动物的生存和繁殖,促进土壤动物群落的复杂化。

纤毛虫是最复杂和最高等的单细胞动物,是土壤生态系统中十分重要的动物类群之一,因其物种繁多、现存量 and 生产量巨大、个体微小、细胞膜纤薄、生长繁殖快、群落演替迅速、分布广泛等特点而对生态环境变化十分敏感,是理想的环境指示生物^[2]。目前,纤毛虫已被广泛应用于监测、评价和预报土壤、人工湿地和淡水等生态系统的环境状况^[3-6]。关于纤毛虫群落特征对退耕还林后生态系统的评价,目前仅见于宁应之等人有关甘肃定西华家岭退耕还林的研究工作^[7]。本文基于研究结果分析了研究区退耕还林生态恢复下的土壤纤毛虫群落特征及其与土壤环境因子间的相关关系,并利用纤毛虫群落特征参数评价了退耕还林生态恢复的效

果,旨在为该区环境和生物多样性保护、退耕还林效果的生物学评价体系建立及退耕还林后续工程的优化设计与实施提供基础资料和理论依据。

1 材料和方法

1.1 样区概况

陇南市武都区位于甘肃省东南部,属长江流域嘉陵江中游,秦巴山系结合部,陕、甘、川三省交通要道。总地势为西北高,东南低,最高峰擂鼓山海拔 3 600 m,最低裕河曲家庵海拔 660 m。地形特点是沟谷发育、切割强烈、地表起伏大、山势陡峻、相对高差大(相对高差 1 000—1 500 m),坡度大。区内主要地貌类型包括侵蚀堆积河谷、侵蚀构造高中山和侵蚀构造溶蚀丛峰中山。年平均气温 14.7 °C,年降水量 400 mm 左右,无霜期 210—240 d,属亚热带半湿润气候。地理坐标为 32°47′48″—33°42′25″ N,104°34′25″—105°38′28″ E,年平均湿度 61 %,9 月相对湿度最大为 72 %,2 月最小为 53 %。

该地区因长期人类活动的破坏,导致水土流失严重、生态环境退化及生物多样性严重丧失。为改变人类活动对本地区造成的生态环境破坏现状,该区以花椒树、油橄榄、核桃树、柏树和落叶松等为植被恢复的主要树种进行了大规模生态恢复与经济造林。经近十年的努力,武都区造林达 32333 万 m²,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

所选样地位于武都区南山区和北山区(33°22′13.41″—33°22′47.6″ N,104°55′22.57″—104°55′43.1″ E),依生态恢复时间的不同,在甘肃陇南武都退耕还林区选择了 5 个不同恢复阶段的小生境和 1 个未恢复的荒草坡作为对照(图 1),其中 I 号为未恢复的北山荒草坡,其草本复杂,有火绒草(*Leontopodium alpinum*)、早熟禾(*Poa annua*)和一些旱生草本;II 号为恢复年限 3 年的砚台山退耕还林 1 区,其优势植物主要为侧柏(*Platycladus orientalis*)和耐旱灌木,其中刺型灌木丛较多,地上凋落物层不足 1 cm。III 号为恢复年限 5 年的砚台山退耕还林 2 区,侧柏为优势植物,林下草本主要为菊科蒿属(*Artemisia*)和禾本科狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)等,凋落物层厚 1—2 cm。IV 号为恢复年限 7 年的北山农田退耕区,其优势植物为侧柏,林下草本有火绒草、冰草(*Agropyron*)和一些旱生草本。凋落物层厚 2—3 cm。V 为恢复年限 8 年的北山绿化区,侧柏为优势植物,林下分布有复杂草本,如火绒草等。凋落物厚 2—3 cm。VI 号为恢复年限 10 年的砚台村退耕还林区十年侧柏树林,林下草本复杂,凋落物层厚 4—5 cm。

土样采集于 2010 年 2 月底。在样点面积约 400 m²的范围内,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 个进行混合,采集前拣去表面上的新鲜凋落物,并进行经纬度和植被状况等相关记录。土样带回实验室后,分两部分处理:一部分新鲜土样做直接观察、土壤含水量和 pH 值的测定之用;剩余土样于牛皮纸上使之自然风干,期间用透气纸遮盖土样,并关闭门窗以防止外界空气中纤毛虫包囊进入

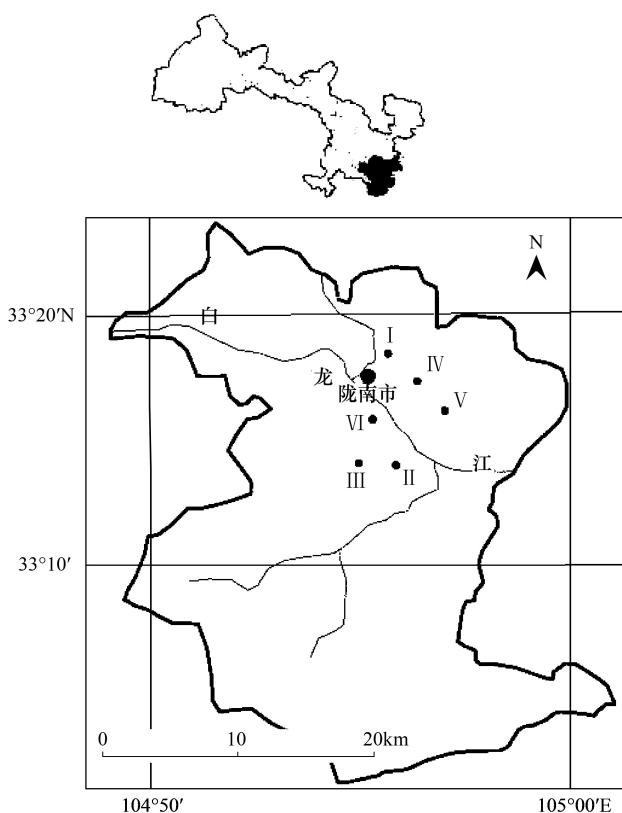


图 1 土壤纤毛虫采样点示意图

Fig. 1 The sampling sites of soil ciliates

I: 北山荒草坡; II: 砚台山退耕还林 1 区; III: 砚台山退耕还林 2 区;
IV: 北山农田退耕区; V: 北山绿化区; VI: 砚台村退耕还林区

土样,风干后土样分别装袋标号供理化因子测定和土壤纤毛虫培养观察之用。

1.3 土壤理化因子测定

土温利用曲管地温计(温度范围为: -10—60 ℃)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;土壤速效磷量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;有机质测定采用水合热-光电比色法;速效钾测定采用四苯硼钠比浊法;铵态氮测定采用不用硝普钠的靛酚兰比色法。测定仪器为 TFW-II 土壤养分多功能分析仪(武汉市天联科教仪器发展有限公司)。

1.4 纤毛虫研究方法

定性研究采用“非淹没培养皿法”^[8]。每份风干土样取 50 g,分别置于直径 15 cm 的培养皿中,25 ℃ 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^[9]。物种鉴定所用文献资料见参考文献^[10-21]。定量研究采用 Foissner 计数法^[22]进行纤毛虫的培养计数。

1.5 统计分析

对鉴定到的各级分类单元进行统计并划分优势类群和次优势类群,将物种数最多的目(order)定义为优势类群,物种数次多的目定义为次优势类群。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^[23]。称取已风干过 2 mm 筛的土壤 30 g,置于直径为 5 cm 的培养皿中,加蒸馏水,使其土壤略饱和(110 %),25 ℃ 恒温培养 9 d,这时纤毛虫通常能达到最大多样性和密度,在第 10 d 时培养皿倾斜 45° 约 5 min,吸取土壤上清液,取 0.1 mL 摇匀的上述液体用 Bouin 氏液固定于显微镜下计数,最后换算成 1 mL 的纤毛虫密度^[22]。所有数据均用 SPSS 16.0 处理,对环境因子和群落结构参数进行分层聚类进行分析。使用软件 Canoco4.5 进行冗余分析(Redundancy Analysis, RDA),对纤毛虫物种数据和土壤环境因子数据进行 $\lg(x+1)$ 处理(pH 值不进行数据处理)后进行排序分析,得到环境因子间的相关性。利用 GPS 获得的经纬度数据在地图上定位后,用 Arcview gis 3.3 绘制采样图;折线、柱状图等均采用 Origin 8.0 绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤理化因子对生态恢复的响应

研究区各样点的土壤理化因子详见表 1。从表中可以看出,土壤含水量在 I 号对照样点较高,恢复初期速减,恢复后期开始回升,总体呈增长趋势。土壤 pH 值随着恢复期限增加而呈现增加趋势,中期土壤呈碱性,后降低到恢复后期呈偏酸性稳定趋势。有机质、速效磷和铵态氮均呈增长趋势,都在恢复 10 年期 VI 号样点达最高值。速效钾在 II、III 号样点高于 IV、V 号样点,VI 号样点的速效钾含量最高。

表 1 各样点的土壤环境因子

Table 1 The soil environmental factors in various sampling sites

样点 Sampling sites	恢复年限 Restoration years	pH (无量纲)	土壤温度 Soil temperature/ (℃)	含水量 Water content/%	速效磷 Available phosphorus/ (g/kg)	速效钾 Available potassium/ (g/kg)	铵态氮 Ammonium nitrogen/ (g/kg)	有机质 Organic matter/ (g/kg)	有机碳 Organic carbon/ (g/kg)
I	0	6.89	13.00	3.52	0.006	0.355	0.00315	2.438	10.71
II	3	6.93	9.90	1.37	0.007	0.462	0.00245	2.967	13.04
III	5	6.87	10.05	5.51	0.008	0.472	0.00270	3.036	13.34
IV	7	7.53	17.00	2.64	0.005	0.343	0.00330	2.806	12.33
V	8	6.90	19.00	3.24	0.005	0.373	0.00375	4.554	20.01
VI	10	6.89	11.00	9.01	0.038	0.492	0.00410	8.648	38.00

应用 SPSS 16.0 统计软件,对 6 个样点中土壤理化因子的 7 个指标(含水量、土温、pH 值、有机质、速效磷、速效钾、铵态氮)进行分层聚类分析(图 2)。图 2 结果显示,I、III 和 V 号最先聚为一类,然后又 II 和 IV 号汇合,VI 号独立成为一类,这也说明土壤环境状况在生态恢复下随着恢复年限产生了明显差异。

2.2 土壤纤毛虫群落对退耕还林生态恢复的响应

2.2.1 物种分布

71 种纤毛虫在各样点的分布情况见图 4。恢复 10 年的 VI 号样点物种最为丰富,分布有 65 种,占物种总数的 92%;IV 号和 V 号样点各分布有 27 种和 36 种,分别占 38 %和 50 %;II 号、III 号样点各 22 种和 23 种,均占物种总数的 30%。I 号样点 17 种,占 20 %。回归分析表明,物种数和恢复年限呈良好的多元线性回归关系,回归方程为 $\hat{y} = 2.714x^2 - 10.820x + 28.400$ ($R^2 = 0.940$),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 16.0 统计软件对各样点的土壤纤毛虫物种分布进行分层聚类分析(图 3),结果表明,对照样点 I 号与恢复中期的 III 号和 VI 号最先聚为一类,再与恢复初期的 II 号汇合聚为一类,然后它们又与恢复 8 年的 V 号聚合,最后恢复 10 年的 VI 号样点独立为一类。聚类分析显示恢复期的 I 号、III 号和 IV 号样点的土壤纤毛虫物种分布最为相似,它们与 II 号样点较相似,而与 V 号和 VI 号样点物种相似性较小,尤其恢复 10 年的 VI 号样点与其它样点几乎没有相似性。由此可见,6 个样点的土壤纤毛虫物种分布存在显著差异,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,群落组成随着生态恢复年限增加而差异越大。

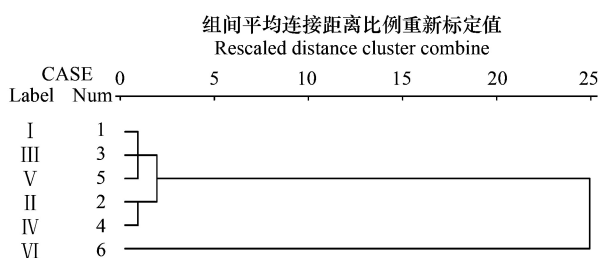


图 2 不同样点的土壤环境因子聚类分析图

Fig. 2 Cluster analysis dendrogram of the soil environmental factors in various sampling sites

I:北山荒草坡;II:砚台山退耕还林 1 区;III:砚台山退耕还林 2 区;
IV:北山农田退耕区;V:北山绿化区;VI:砚台村退耕还林区

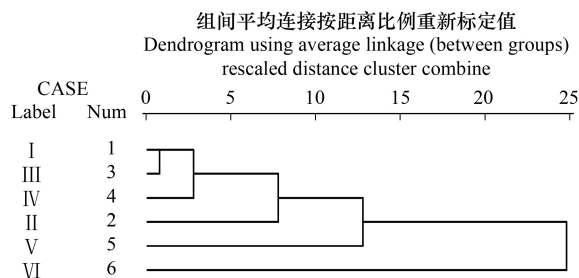


图 3 各样点土壤纤毛虫物种分布聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis dendrogram of species distribution of soil ciliates in various sampling sites

2.2.2 群落组成

研究中鉴定到 71 种纤毛虫,分别隶属于 3 纲、10 目、22 科、29 属。图 4 和表 2 所示的是土壤纤毛虫群落组成情况,从中可以看出:(1)I 号对照样点群落组成较为简单,II 号、III 号样点已与对照样点有较大差别,IV—VI 号样点目、科、属和种的数目明显增加。这说明,随着退耕还林的实施和退耕还林年限的增加,土壤环境条件逐渐改善,越来越适合土壤纤毛虫生存,纤毛虫群落组成逐渐复杂化。(2)随着退耕还林年限的增加,土壤纤毛虫群落中的优势类群发生了演替。总体演替趋势是由对照点和早期退耕点的 r -对策者(篮口目 Nassulida,肾形目 Colpodida 和盾纤目 Scuticociliatida)逐渐演替为后期退耕点的 k -对策者(下毛目

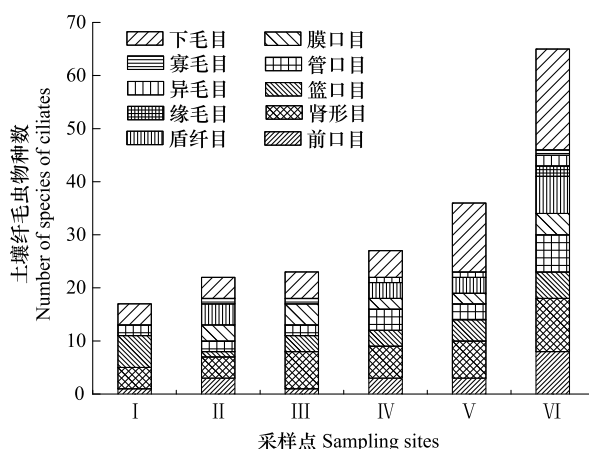


图 4 各样点土壤纤毛虫群落组成

Fig. 4 The community composition of soil ciliates in various sampling sites

Hypotrichida)。这也说明,随着退耕还林的实施和退耕还林年限的延长,土壤环境条件逐渐得到改善。

表 2 各样点土壤纤毛虫群落组成

Table 2 The community composition of soil ciliates in various sampling sites

样点 Sampling sites	纲 Classes	目 Orders	科 Families	属 Genera	种 Species	优势类群和次优势类群 Dominant and subdominant groups
I	3	5	8	10	17	篮口目(Nassulida) 6 种;肾形目(Colpodida) 和下毛目(Hypotrichida) 各 4 种
II	3	8	13	14	22	肾形目(Colpodida)、盾纤目(Scuticociliatida) 和下毛目(Hypotrichida) 各 4 种
III	3	7	12	14	23	肾形目(Colpodida) 7 种;下毛目(Hypotrichida) 5 种
IV	3	8	14	16	27	肾形目(Colpodida) 6 种;下毛目(Hypotrichida) 5 种
V	3	8	15	20	36	下毛目(Hypotrichida) 13 种;肾形目(Colpodida) 7 种
VI	3	10	22	29	65	下毛目(Hypotrichida) 19 种;肾形目(Colpodida) 10 种

2.2.3 优势种

将各样点中种群相对密度最大和次大的纤毛虫物种作为优势种。总体来看,优势种的响应情况是:(1) 适应性较强、适应范围较广的拟肾形虫属(*Paracolpoda*) 和肾形虫属(*Colpoda*) 的种类(如 齿脊拟肾形虫 *Paracolpoda steini*, 膨胀肾形虫 *Colpoda inflata*, 僧帽肾形虫 *Colpoda cucullus* 和肾状肾形虫 *Colpoda reniformis* 等) 在大部分样点成为优势种,其中齿脊拟肾形虫和肾状肾形虫在对照样点和所有恢复样点均为优势种;大口薄咽虫(*Leptopharynx eurostoma*) 在恢复早期至中后期的 II—V 号样点均为优势种;阔柱片尾虫(*Urosoma macrostyla*) 在恢复后期的 V 号和 VI 号样点均为优势种。(2) 对照样点优势种较为单一,随着恢复年限的延长,优势种总体呈增多趋势并且作为 k -对策者的下毛目种类(如有尾片尾虫 *Urosoma caudata*, 苔藓尖毛虫 *Oxytrichia nuscorum*, 四棘毛管膜虫 *Cyrtohymena tetracirrata*, 颗粒尖毛虫 *Oxytricha granulifera*, 叶绿尖毛虫 *Oxytricha chlorelligera*, 差异瘦尾虫 *Uroleptus dispar*, 阔柱片尾虫和近亲游仆虫 *Euplotes affinis* 等) 所占比例增大。

2.2.4 广布种和特有种

有 5 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 7.04 %,分别是齿脊拟肾形虫、水藓单镰虫(*Drepanomonas sphagni*)、巴维尼亚斜管虫(*Chilodonella barvariensis*)、钩刺斜管虫(*Chilodonella uncinata*) 和乙状全列虫(*Holosticha sigmoidea*);对照样点中特有种只有 1 种,占纤毛虫物种总数的 1.41 %;恢复样点的特有种有 14 种,占纤毛虫物种总数的 19.72 %。随着恢复年限的增加,特有种呈现逐渐增加的趋势。

2.2.5 物种数、丰度和多样性指数

各样点的纤毛虫物种数、丰度和物种多样性指数见图 5。可以看出,I 号对照样点的物种数最少,为 17 种,恢复后期 VI 号样点物种最为丰富,有 65 种。宁应之等研究发现有机质对土壤原生动物的生长发育和繁殖均有影响^[24];Finlay 等和 Beaver 等的研究也表明纤毛虫物种数随营养的增加而增加^[25-26]。在本研究中,I 号对照样点有机质最低,物种数也最少;在 II—VI 号恢复样点,有机质、速效磷和铵态氮含量逐渐升高,物种数亦逐渐增加。

土壤纤毛虫丰度在 I 号对照样点较低,为 70 ind./g;侧柏林恢复初期丰度出现了上升,恢复 3 年的 II 号样点丰度为 733 ind./g;但是随着恢复时间的延长丰度出现波动,恢复 5 年和 8 年的 III 号和 V 号样点丰度呈现下降,分别为 80 ind./g 和 200 ind./g;然而恢复 10 年的 VI 号样点丰度出现急剧上升,为 3357 ind./g。纤毛虫丰度总的变化趋势是随着恢复年限逐渐波动式上升。

物种多样性指数与物种数的变化规律基本一致,即恢复样点均高于对照样点,且随着恢复时间的延长,多样性指数逐渐升高。I 号对照样点多样性指数最低,为 2.09;VI 号样点多样性指数最高,为 5.57;IV 号样点多样性指数出现波动,为 2.50,比 III 号样点的(2.83)低。这表明,经过近 10 年的生态恢复,各不同恢复阶段样点的土壤纤毛虫物种多样性均高于 I 号对照样点,且随着恢复时间的延长,物种多样性升高,群落结构趋于更

加复杂和稳定。

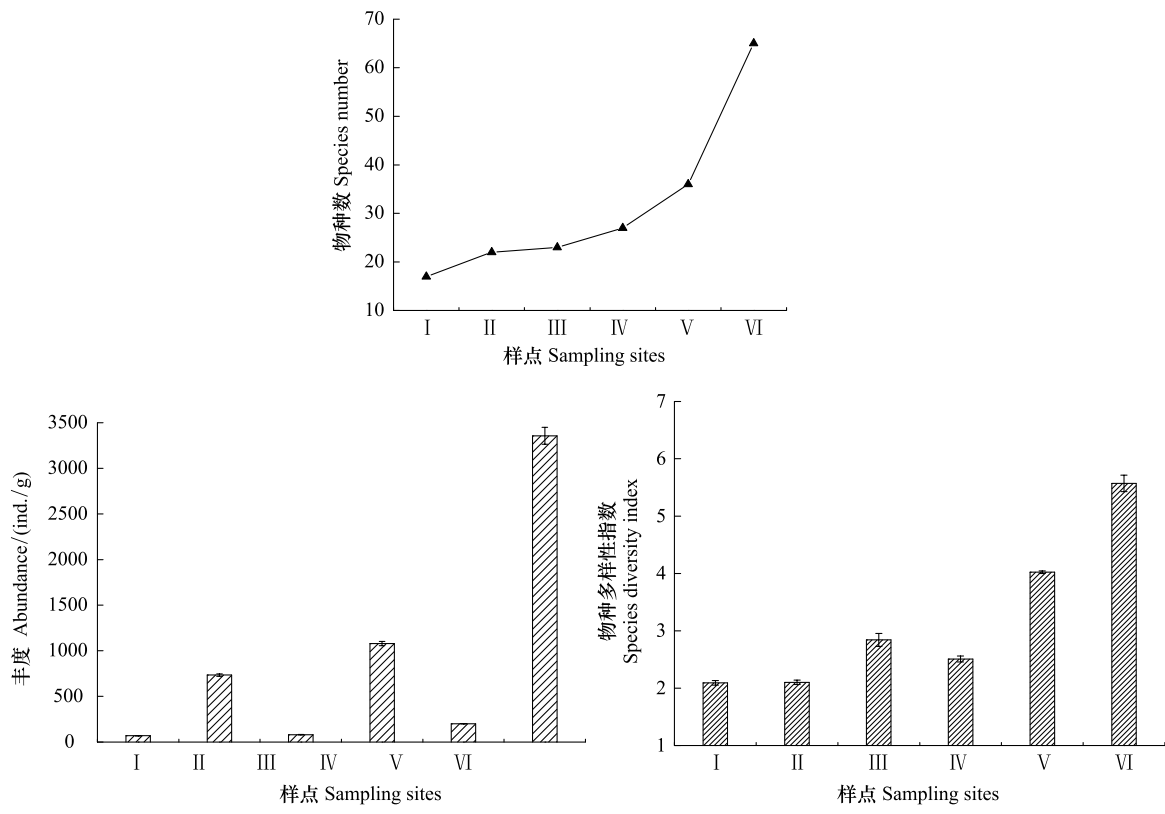


图 5 各样点的纤毛虫物种数 (A)、丰度 (B) 和物种多样性指数 (C)
Fig. 5 The species number (A), abundance (B) and species diversity index (C) in various sampling sites

2.3 土壤纤毛虫群落特征参数与土壤环境因子的相关性

应用 SPSS 16.0 统计软件将恢复年限、各样点的主要土壤环境因子(含水量、有机质、铵态氮、速效磷和速效钾含量)和纤毛虫群落特征参数(物种数、丰度和多样性指数)作为源变量,进行二元变量的相关性分析,结果见表 3。相关性分析显示,物种数与恢复年限、铵态氮和速效磷呈显著的正相关($P<0.05$);物种数和物种多样性指数均与有机质呈极显著的正相关($P<0.01$);多样性指数与恢复年限和铵态氮呈显著的正相关($P<0.05$),而与速效磷呈显著的负相关($P<0.05$);丰度与速效磷呈极显著的正相关($P<0.01$),与有机质呈显著的正相关($P<0.05$)。可见在所测得的土壤环境因子中,对纤毛虫的群落影响较大的是铵态氮量和有机质含量。

表 3 土壤纤毛虫群落特征参数与土壤环境因子的相关性分析(皮尔森相关性系数)

Table 3 Correlations between the community characteristic parameters of soil ciliates and the soil environmental factors (Pearson's correlation coefficient)

指标 Index	物种数 Species number	丰度 Abundance	物种多样性指数 Species diversity index
恢复年限 Restoration years	0.829 *	0.656	0.837 *
土温 Soil temperature	- 0.011	- 0.227	0.073
含水量 Water content	- 0.432	- 0.199	- 0.501
pH 值 pH value	- 0.420	- 0.331	- 0.412
有机质含量 Organic matter content	0.989 **	0.880 *	0.964 **
铵态氮量 Ammonia nitrogen content	0.813 *	0.617	0.843 *
速效磷量 Available phosphorus content	0.911 *	0.933 **	- 0.834 *
速效钾量 Available potassium content	0.457	0.481	0.425

* 表示 0.05 水平上的相关性 * Correlation at the 0.05 level; ** 表示 0.01 水平上的相关性 ** Correlation at the 0.01 level.

2.4 土壤纤毛虫与土壤环境因子的排序

利用 Canoco for Windows 4.5 对土壤纤毛虫和土壤环境因子进行分析,得到二维 RDA 排序图(图 6)。前二个排序轴的特征值分别是 0.388 和 0.207,累计达到总特征值的 38.8 %和 59.5 %,土壤纤毛虫群落组成与土壤环境因子排序轴(第 1 排序轴和第 2 排序轴)的相关系数高达 1.000,可见,排序能较好地反映土壤纤毛虫和环境因子的变化。土壤纤毛虫群落的物种分布响应了土壤环境因子的变化(表 4)。第 1 排序轴(Axis 1)与恢复年限、含水量、有机质含量、铵态氮量、速效磷量和速效钾量呈正相关,与 pH 值呈负相关,且与有机质含量的相关系数最大,与速效磷含量和铵态氮含量的次之。第 2 排序轴(Axis 2)与土温呈正相关。

表 4 土壤环境因子与排序轴的相关系数、特征值和纤毛虫物种与土壤环境因子的相关性

Table 4 Correlation coefficients between the soil environmental factors and ordination axes of RDA, eigenvalue for RDA axis and ciliate species-soil correlation

指标 Index	第一排序轴 Axis 1	第二排序轴 Axis 2	第二排序轴 Axis 3	第四排序轴 Axis 4
恢复年限 Restoration years	0.8212	0.0054	-0.2383	0.1021
土温 Soil temperature	0.0166	0.5727	-0.2732	-0.5434
含水量 Water content	0.7541	0.0400	-0.3131	0.4430
pH 值 pH value	-0.2233	-0.3355	-0.6614	-0.3802
有机质含量 Organic matter content	0.9873	-0.0487	-0.0338	0.0548
铵态氮量 Ammonia nitrogen content	0.8076	0.3748	-0.3503	-0.2903
速效磷量 Available phosphorus content	0.8749	-0.2649	-0.1274	0.1375
速效钾量 Available potassium content	0.4641	-0.4396	0.3804	0.6449
特征值 Eigenvalue	0.3880	0.2070	0.1730	0.1260
物种与环境因子的相关性 Ciliate species-soil correlation	1.000	1.000	1.000	1.000
累计百分比 Cumulative percentage	38.800	59.500	76.800	89.400

图 6 反映出生态恢复下的 5 个样点和对照样点与土壤环境因子的关系,不同恢复年限的样点沿排序轴趋势分布,与对照点 I 号比较,各恢复年限样点差异性由小到大排列依次为 III 号、IV 号、II 号、V 号和 VI 号,由此可见,随着恢复年限的增加各样点的土壤纤毛虫群落差异性越大。这和聚类分析的结果相吻合,很好地相互印证了土壤纤毛虫群落对退耕还林生态恢复的响应。

3 讨论和小结

退耕还林生态恢复最为显著的生态效应首先表现为植被恢复与重建,并由此产生一系列连锁反应,引发局部气候、土壤生态环境、涵养水源、净化空气和生物多样性等方面的效应,并且随着退耕还林生态恢复年限的延长,这些方面的效应更加显著。其中,土壤生态环境效应主要体现在土壤理化性质,如表层腐殖质、土壤质地、团粒结构、相对密度、孔隙度、土壤肥力、pH 值和含水量等的改变^[27-28]。本研究的结果表明,较之对照样点,退耕还林生态恢复各样点的土壤平均含水量及平均速效磷、速效钾、铵态氮、有机质和有机碳的量分别提高了 19.15%, 52.38%, 17.13%, 3.37%, 44.62% 和

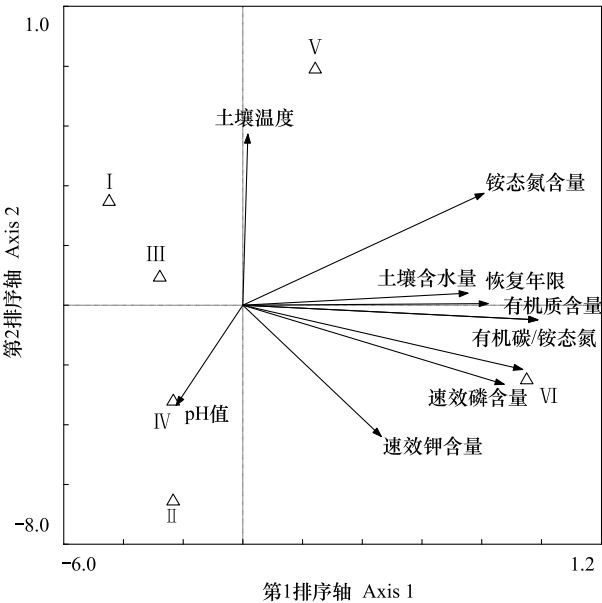


图 6 样点和土壤环境因子的 RDA 排序图

Fig. 6 RDA Ordination diagram of the sampling sites and soil environmental factors

44.63%。这说明,退耕还林生态恢复后,土壤环境状况有了显著或较显著的改善,而且恢复年限越长,改善程度越明显。

退耕还林生态恢复导致的土壤环境状况的改善必然引起土壤动物群落在组成、结构和功能上的响应,环境敏感动物群落的响应会尤为积极而显著。本研究的研究对象纤毛虫是最复杂和最高等的单细胞动物,是土壤生态系统中极为重要的动物类群之一,因其物种繁多、现存量 and 生产量巨大、个体微小、细胞膜纤薄、生长繁殖快、群落演替迅速、分布广泛等特点而对生态环境的变化十分敏感,因而可通过考察其群落的各项特征参数及其动态来反映生态环境的变化^[2, 12]。从本研究的结果来看,研究区的土壤纤毛虫群落从物种分布、群落组成、优势种、广布种、特有种、物种数、丰度和多样性指数等方面对退耕还林生态恢复做出了积极响应,主要体现在:随着退耕还林的实施和退耕还林年限的延长,纤毛虫群落组成逐渐复杂化,群落结构的稳定性持续提高,具体表现为纤毛虫物种和特有种呈增多趋势、丰度波动式上升、多样性指数逐渐升高及优势类群和优势种发生良性演替。

如上所述,退耕还林生态恢复的土壤生态环境效应主要体现在土壤理化性质的改变上,而土壤理化性质的改变导致了土壤纤毛虫群落各项特征的相应变化。相关性分析及 RDA 排序结果表明,土壤纤毛虫群落主要特征参数(物种数、丰度和多样性指数)与恢复年限及土壤主要环境因子(含水量、有机质、铵态氮、速效磷和速效钾含量)之间存在显著或极显著的相关关系,各环境因子中对纤毛虫群落影响较大的是铵态氮量和有机质含量。

综合所有研究结果和分析讨论,可以得到如下结论:研究区的土壤纤毛虫群落显著地响应了因退耕还林生态恢复所导致的土壤生态环境效应并与相关的土壤环境因子之间有着显著或极显著的相关关系。基于此结论,可以认为,土壤纤毛虫是退耕还林生态恢复效果的良好指示生物,土壤纤毛虫群落的各项特征参数可作为退耕还林生态恢复效果理想的评价指标。

近年来,随着生态恢复进程的加速和规模的扩大,陆续有对生态恢复区土壤动物的研究,其中包括土壤动物对退耕还林生态恢复的响应的研究^[29-31]。这些研究从不同动物类群、不同层面和不同角度做了大量十分有意义的工作,但它们都只涉及中、小型动物类群(如扁形动物、线虫动物、轮形动物、环节动物、缓步动物及节肢动物蛛形纲、甲壳纲、多足纲和昆虫纲等)。有关土壤原生动物(包括土壤纤毛虫)的研究工作甚少,而且或为尝试性工作^[7],或是在其他方面的研究中附带有少量相关内容^[32]。较之已有的相关研究,本研究在深度和系统性方面有了加强,但仍然存在许多不足,如研究范围较小、退耕还林模式仅涉及较单一的侧柏恢复林、土壤环境因子及其与纤毛虫群落的关系方面未涉及植被详情及其盖度、凋落物数量和土壤孔隙度等,这些不足将在后续的大量研究工作中得到弥补和改进。

致谢:中国动物学会原动物学分会秘书长、中国科学院水生生物研究所缪伟研究员为本文的英文摘要进行了润色工作,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] 王移, 卫伟, 杨兴中, 陈利项, 杨磊. 我国土壤动物与土壤环境要素相互关系研究进展. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2441-2448.
- [2] Foissner W. Soil protozoa as bioindicators: pros and cons, methods, diversity, representative examples. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1999, 74(1): 95-112.
- [3] Lee S, Basu S, Tyler C W, Wei I W. Ciliate populations as bio-indicators at Deer Island Treatment Plant. Advances in Environmental Research, 2004, 8: 371-378.
- [4] Madoni P. Ciliated protozoan communities and saprobic evaluation of water quality in the hilly zone of some tributaries of the Po River (northern Italy). Hydrobiologia, 2005, 541(1): 55-69.
- [5] Puigagut J, Salvadó H, García J. Effect of soluble and particulate organic compounds on microfauna the community in subsurface flow constructed wetlands. Ecological Engineering, 2007, 29(3): 280-286.
- [6] Chen Q H, Tam N F Y, Shin P K S, Cheung S G, Xu R L. Ciliate communities in a constructed mangrove wetland for wastewater treatment.

- Marine Pollution Bulletin, 2009, 58(5): 711-719.
- [7] 宁应之, 王红军, 禹娟红, 杜海峰. 甘肃定西华家岭土壤纤毛虫群落对生态恢复的响应. 动物学研究, 2011, 32(2): 223-231.
- [8] Foissner W. Estimating the species richness of soil protozoa using the “non-flooded petri dish method” // Lee J J, Soldo A. Protocols in Protozoology. Lawrence: Allen Press, 1992.
- [9] Wilbert N. Eine verbesserte Technik der Protargolimpragnation für Ciliaten. Mikrokosmos, 1975, 6: 171-179.
- [10] Berger H. Monograph of the Oxytrichidae (Ciliophora, Hypotrichia). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999: 1-1080.
- [11] Lynn D. The Ciliated Protozoa: Characterization, Classification, and Guide to the Literature. 3rd ed. New York: Springer Publishing Company, 2011: 1-605.
- [12] Foissner W. Soil protozoa: fundamental problems, ecological significance, adaptations in ciliates and testaceans, bioindicators, and guide to the literature. Progress in Protistology, 1987, 2: 69-212.
- [13] Foissner W. An updated compilation of world soil ciliates (Protozoa, Ciliophora), with ecological notes, new records, and descriptions of new species. European Journal of Protistology, 1998, 34(2): 195-235.
- [14] Foissner W. Two new “flagship” ciliates (Protozoa, Ciliophora) from Venezuela: *Sleighophrys pustulata* and *Luporinophrys micelae*. European Journal of Protistology, 2005, 41(2): 99-117.
- [15] Foissner W, Agatha S, Berger H. Soil ciliates (Protozoa, Ciliophora) from Namibia (Southwest Africa), with emphasis on two contrasting environments, the Etosha Region and the Namib Desert. Denisia, 2002, 5: 1-1459.
- [16] Kahl A. Urtiere oder Protozoa I: Wimpertiere oder Ciliata (Infusoria) 1. Allgemeiner Teil und Prostomata // Dahl F eds. Die Tierwelt Deutschlands 18. Jena: Verlag von Gustav Fischer, 1930: 1-180.
- [17] Kahl A. Urtiere oder Protozoa I: Wimpertiere oder Ciliata (Infusoria) 2. Holotricha außer den im 1. Teil behandelten Prostomata // Dahl F eds. Die Tierwelt Deutschlands 21. Jena: Verlag von Gustav Fischer, 1931: 181-398.
- [18] Kahl A. Urtiere oder Protozoa I: Wimpertiere oder Ciliata (Infusoria) 3. Spirotricha // Dahl F eds. Die Tierwelt Deutschlands 25. Jena: Verlag von Gustav Fischer, 1932: 399-650.
- [19] Kahl A. Urtiere oder Protozoa I: Wimpertiere oder Ciliata (Infusoria) 4. Peritricha und Chonotricha // Dahl F eds. Die Tierwelt Deutschlands 30. Jena: Verlag von Gustav Fischer, 1935: 651-886.
- [20] Lee J J, Leedale G F, Bradbury P. An Illustrated Guide to the Protozoa. 2nd ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2000: 1-1475.
- [21] Shen Y F, Ning Y Z. Protozoa // Yin W Y, Hu S H, Shen Y F. Pictorial Keys to Soil Animals of China. Beijing: Science Press, 2000: 7-42, 393-427.
- [22] Foissner W, Berger H, Xu K, Zechmeister-Boltenstern S. A huge, undescribed soil ciliate (Protozoa: Ciliophora) diversity in natural forest stands of Central Europe. Biodiversity and Conservation, 2005, 14(3): 617-701.
- [23] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 顾曼如, 施之新, 魏印心. 微型生物监测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 1-524.
- [24] 宁应之, 沈韞芬. 中国典型地带土壤原生动物: I. 区系特征和物种分布. 动物学报, 1998, 44(1): 5-10.
- [25] Finlay B J, Fenchel T, Gardener S. Oxygen perception and oxygen toxicity in the freshwater ciliated protozoan *Loxodes*. Journal of Protozoology, 1986, 33: 157-165.
- [26] Beaver J R, Crisman T L. Seasonality of planktonic ciliated protozoa in 20 subtropical Florida lakes of varying trophic state. Hydrobiologia, 1990, 190: 127-135.
- [27] 曾辉, 袁春良, 胡振全. 辽宁风沙区退耕还林生态效应的初步研究. 辽宁师专学报, 2007, 9(2): 73-75.
- [28] 仝小林, 马丽, 毕俊国, 郝文芳, 梁超. 延安市退耕还林生态效益评价. 江西农业学报, 2009, 21(2): 123-126.
- [29] 王邵军, 蔡秋锦, 阮宏华. 土壤线虫群落对闽北森林植被恢复的响应. 生物多样性, 2007, 15(4): 356-364.
- [30] 张伟东, 尚艳芳, 王雪峰. 土壤线虫群落对大连石门山森林植被恢复的响应. 生态学报, 2010, 30(4): 0878-0886.
- [31] 向昌国, 冯国禄, 潘根兴, 张平究. 西南岩溶地区土壤动物多样性及其对生态恢复的响应——以云南省弥勒县白龙洞地区为例. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2007, 33(3): 324-327.
- [32] Li J, Liao Q Y, Li M, Zhang J H, Tam N F, Xu R L. Community structure and biodiversity of soil ciliates at Dongzhaigang Mangrove Forest in Hainan Island, China. Applied and Environmental Soil Science, 2010 [DOI: 10.1155/2010/103819].