

DOI: 10.5846/stxb201904230829

刘旻霞, 李全弟, 蒋晓轩, 夏素娟, 南笑宁. 兰州市北山不同林地春夏季土壤纤毛虫群落特征. 生态学报, 2020, 40(12): 3955-3967.

Liu M X, Li Q D, Jiang X X, Xia S J, Nan X N. Characteristics of soil ciliate communities in spring and summer in different woodlands of Beishan, Lanzhou City. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 3955-3967.

兰州市北山不同林地春夏季土壤纤毛虫群落特征

刘旻霞*, 李全弟, 蒋晓轩, 夏素娟, 南笑宁

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘要:为了研究兰州市北山绿化工程的植被恢复状况,于2016年4月和7月,对北山罗九公路绿化工程区的人工林及荒坡、半荒坡共6个样点进行野外调查采样,分析土壤纤毛虫群落组成及其影响因素。研究表明:(1)春季有10纲21目34科44属80种,夏季10纲21目38科54属104种。春夏季的优势类群均为尖毛科(Plagiocampidae),优势种为膨胀肾形虫(*Colpoda inflata*)和盘状肾形虫(*Colpoda patella*)。(2)土壤纤毛虫的丰度、物种数和多样性指数夏季高于春季,且人工林样点的土壤纤毛虫的丰度、物种数和多样性指数均高于荒坡;(3)春季土壤有机碳、土壤温度和电导率是影响土壤纤毛虫物种数分布的主要环境因子;夏季土壤有机碳、土壤温度及pH是影响土壤纤毛虫物种数分布的主要因子。总体而言,人工林土壤恢复较荒坡、半荒坡好,而人工林中杨树林和侧柏林的土壤环境质量较优。

关键词:土壤纤毛虫;土壤生态系统;季节;环境因子;兰州市

Characteristics of soil ciliate communities in spring and summer in different woodlands of Beishan, Lanzhou City

LIU Minxia*, LI Quandi, JIANG Xiaoxuan, XIA Sujuan, NAN Xiaoning

College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Vegetation restoration was studied in Beishan greening area of Lanzhou City in April and July, 2016. The composition of soil ciliate community and its influencing factors in six plantations, including barren slopes and semi-barren slopes, were analyzed by field investigation. The results showed that: (1) there were 10 classes, 21 orders, 34 families, 44 genera and 80 species in spring, and 10 species, 21 orders, 38 genera, 54 genera in summer. The dominant groups were Plagiocampidae, and the dominant species were *Colpoda inflata* and *Colpoda patella* in spring and summer. (2) The abundance, species number, and diversity index of soil ciliates were higher in summer than those in spring, and they were higher in plantations than those in barren slopes. (3) In spring, the main environmental factors affecting distribution of soil ciliate species were soil organic carbon, soil temperature, and electrical conductivity. In summer, the main environmental factors affecting distribution of soil ciliate species were soil organic carbon, soil temperature and pH. In general, the soil restoration of plantation was better than that of barren slope and semi-barren slope, while the soil environmental quality of *Populus L.* and *Platyclusus orientalis (L.)* Franco plantations was better.

Key Words: soil ciliates; soil ecosystem; season; environmental factors; Lanzhou City

土壤作为生物圈能量交换与物质迁移的重要载体,承载了绝大部分生物的生命活动,是地球生态环境的

基金项目:国家自然科学基金项目(31760135, 31360114)

收稿日期:2019-04-23; 网络出版日期:2020-04-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaminl@163.com

主要构成部分^[1]。土壤原生动物是土壤动物这一巨大生物群落的主要类群,在土壤生态系统的物质循环和能量流动方面扮演着十分重要的角色^[2]。土壤纤毛虫是土壤原生动物的三大组成类群之一,它比其他土壤生物具有更大的生物量和生产力,由于其与外界相接触的原生质细胞膜比较薄,因此土壤纤毛虫对外部环境的微小变化的响应非常敏捷,比细菌等原核生物对环境变化的响应程度更高;有大批的土壤纤毛虫类群的分布是全球性的,这有利于在不同区域之间进行互相对比^[3]。土壤纤毛虫还具有个体较小、繁殖速度快、数量巨大及在恶劣环境条件下可以生存等特点,其物种多样性特征和群落结构的变化可以很好地反应出其生存地区环境情况,因此被当作十分重要的土壤环境状况的指示生物。近年来,有利用底栖纤毛虫群落的生物性状分析和功能多样性指数进行环境状况评估^[4],取得了良好的效果。而甘肃省对土壤纤毛虫群落的研究多集中于高寒草甸地区放牧及施肥的研究,也有涉及到退耕还林与植被及土壤养分含量变化的一些研究^[5-6],针对兰州市北山不同植被类型的季节变化研究相对较少。

兰州市是我国西部地区非常典型的生态环境脆弱区,具有黄土高原典型地貌特征,大部分土地覆盖深厚黄土,沟谷地带砂砾裸露^[7]。长期以来受到自然条件和人为活动的双重影响,土地承载力逐步下降,水分和养分的流失日益加重,严重制约了兰州城市发展和社会经济的提高^[8]。为了缓解黄土高原地区日益加重的水土及养分流失状况,我国于 1999 年提出了退耕还林还草政策。2000 年,兰州市生态造林工程全面开展,城市生态建设取得了明显成效,植被绿化覆盖率和土壤恢复得到有效改善。学者们对兰州市两山的研究也逐渐开展起来。史志熠^[9]对两山的植被恢复和重建情况做了调查,调查结果显示人工造林和封山育林对两山的绿化效果十分显著。石善斌和席正英^[10]对兰州市两山的地被植物做了调查,结果显示兰州市两山地被植物具有资源丰富,但分布不均匀,垂直构成比较单调,树种单一,灌木和草本缺乏自然配置等特点。为了使两山的绿化更加科学和合理的进行,许宏刚等^[11]研究了兩山植物的群落结构、优势种构成、物种多样性特性,探究适合在兰州市南北两山面山的特定立地条件下生长的植被种类。然而对兰州市北山相关土壤纤毛虫群落特征及与生态恢复的关系的研究却仍旧缺乏。

本研究选择兰州市北山的罗九公路绿化区为研究对象,研究受人为影响较重的人工林与荒坡之间的土壤纤毛虫群落特征、土壤环境因子差异、土壤纤毛虫群落的分布与环境因子的关联关系,以及季节变化对这些因素的影响。旨在正确评估兰州市南北山的生态恢复情况;确定不同绿化植被对生态恢复影响的差别;以各样地土壤纤毛虫群落对环境因子状况的响应,指示不同样地的环境状况,寻求对土壤恢复最有利的恢复样点。本研究试图回答以下科学问题:(1)土壤纤毛虫群落出现差异的原因?(2)探究土壤纤毛虫群落不同季节的变化特征及影响因素。通过以上问题的研究可以为两山绿化工程建设提供更加经济有效的方法,为黄土高原干旱区退化生态系统恢复提供理论依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

研究区位于兰州市北山罗九公路绿化工程区附近(图 1),地理坐标为 36°03'N、103°40'E,海拔 1780—1860 m。兰州市居于内陆深处,温湿气流很难到达,雨水稀少,气候干燥,土壤主要为灰钙土。植被覆盖度在 20%—50%。主要植被有:侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、新疆杨(*Populus alba*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)及一些经济果树。

1.2 试验设计与样品采集

于 2016 年 4 月(春季)、7 月(夏季)在 2 个大样区(每个样区约 65 万 m²)进行野外重复调查采样,该研究样区在最近几年均引入了喷灌、滴灌,所以在设置的样地和对照地内都能进行人工灌溉。每个样区设置大小为 30 m×30 m 的样地 10 个,2 个大样区共设置 20 个 30 m×30 m 的样地(表 1),同时的调查了样地坡度、坡向、海拔、植被及土壤温度等环境因子,同时用直径为 3.5 cm 的土钻,采用“梅花五点法”在每个样地取 0—

10 cm 土壤 5 份,每个季节取 50 份土样,2 季共采 100 份土样。去除土壤表面的凋落物以及石块后,立即装入自封袋带回实验室做后续实验。

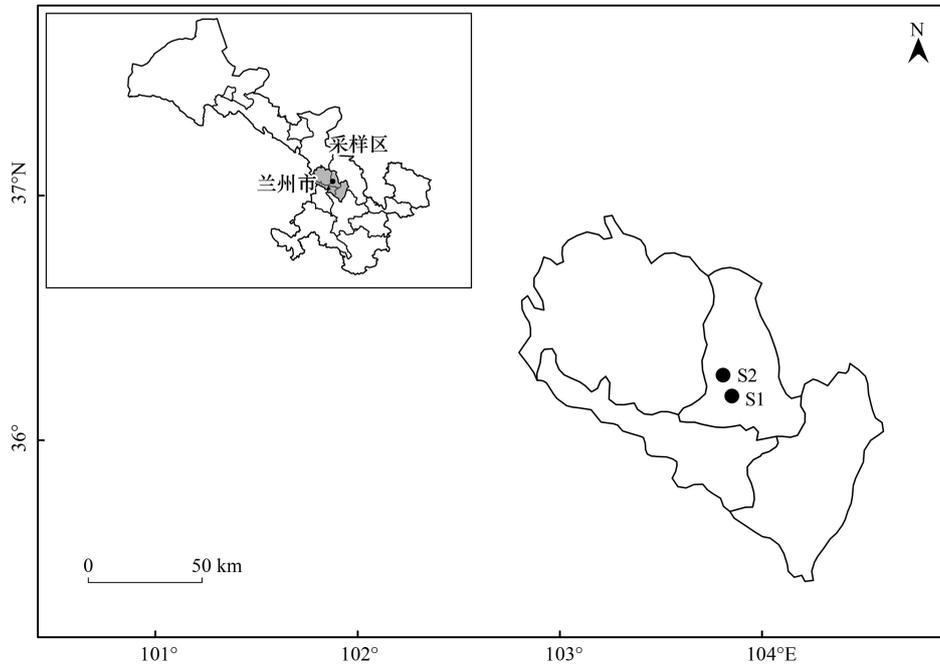


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location map of study area

S1: 样区 1 Sample1; S2: 样区 2 Sample2

表 1 样地生境概况

Table 1 Survey of sample plots

样地 Sample plot	林型 Forest type	海拔/m Altitude	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	坡度/(°) Slope	郁闭度/% Canopy density	坡向 Aspect
N1	白蜡林	1794±8	103.7900	36.0822	40	80	东北
N2	杨树林	1792±3	103.7886	36.0825	25	70	东南
C1	荒坡	1786±3	103.7900	36.0825	35	30	东北
N3	侧柏林	1826±6	103.7811	36.0928	40	70	西南
N4	杨树山桃混交林	1845±8	103.7814	36.0925	40	65	西南
C2	半荒坡	1837±12	103.7814	36.0925	35	45	西北

N1: 样地 1 Number 1; N2: 样地 2 Number 2; C1: 对照 1 Contrast 1; N3: 样地 3 Number 3; N4: 样地 4 Number 4; C2: 对照 2 Contrast 2

1.3 室内处理及方法

1.3.1 土壤理化性质的测定

土壤全氮用半微量凯氏定氮法,土壤全磷用硫酸-高氯酸消煮法,土壤有机碳用硫酸消煮-重铬酸钾外加热法,土壤 pH 值用水浸提电位法,土壤含水量用烘干法(重复 3 次),土壤温度用土温计测定。

1.3.2 土壤纤毛虫的鉴定

从每份新鲜土样中取适量等体积的 3 份至于培养皿中,采用“非淹没培养皿法”(non-flooded petridish method)培养鉴定土壤纤毛虫。即在加有土样的培养皿中加入土壤浸出液,将土壤充分润湿,但不被淹没,在 25℃ 的恒温下培养土壤纤毛虫^[12-13],在培养后的第 2、4、7、11、14、21、30 天放置于光学显微镜下鉴定土壤纤毛虫的物种,并记录每个物种的个体数。土壤纤毛虫的物种鉴定技术采用“活体观察法”和“固定染色法”,固定染色技术主要依据 Fernandez-Galiano 等^[14-16]的蛋白银染色法。物种鉴定依据文献^[17-19]。采用 Foissner 计数

法^[20]对纤毛虫进行培养计数,即将已风干 30 g 土壤样品置于直径为 5 cm 的培养皿中,加入蒸馏水使其略微高出土壤表面,25℃恒温培养 9 d,在第 10 天时使培养皿倾斜 45 度 5 min,吸取土壤浸出液并用波恩液固定,取 1 mL 摇匀的上述液体于显微镜下计数。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 多样性指数计算

(1)多样性指数(Shannon-Wiener)公式:

$$H' = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i) \quad (1)$$

(2)均匀度指数(Pieluo)公式:

$$E = H' / \ln S \quad (2)$$

(3)优势度指数(Simpson)公式:

$$C = \sum_{i=1}^n P_i^2 \quad (3)$$

(4)丰富度指数(Margalef)公式:

$$D = \frac{(S - 1)}{\ln N} \quad (4)$$

式中, H' 为物种的多样性指数; P_i 为第*i*类群的个体数比, $P_i = N_i/N$, N_i 为第*i*类群的个体数, N 为总个体数; S 为所有类群数。

C/P 系数:肾形纲土壤纤毛虫(*r*对策者)的物种数与异毛纲、旋毛纲和瓶纤纲土壤纤毛虫(*k*对策者)物种数总和的比值。C/P 系数的数值大小能在一定水平上体现出土壤纤毛虫所生存的生境的环境恶劣状况,在环境质量相对较好的土壤生境中 $C/P \leq 1$,而在无法衡量的环境质量较差的土壤生境中 $C/P > 1$ ^[21]。

1.4.2 相似性指数计算

对各样点土壤纤毛虫群落特征的相似性研究用 Jaccard 相似性指数。公式: $q = c / (a + b - c)$ 式中, c 用来表示两个群落中的共有物种数, a 和 b 分别用来表示两个群落各自独立的物种数。当 q 值在 0.00—0.25 范围时,为极不相似;当 q 值在 0.25—0.50 范围时,为中等不相似;当 q 值在 0.50—0.75 范围时,为中等相似;当 q 值在 0.75—1.00 范围时,为极相似^[22]。

1.4.3 数据统计与分析

在 Excel 2010 中进行数据的整理与计算,在 SPSS 18.0 中进行环境因子与土壤纤毛虫的相关分析与单因素方差分析,运用 CANOCO 4.5 软件对土壤纤毛虫与环境因子进行冗余分析(RDA),运用 Sigmaplot 12.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同样地土壤环境因子的季节变化

图 2 显示,土壤全氮、全磷、有机碳含量在荒坡地显著低于人工林样地,而在人工林样地中,侧柏纯林又明显低于其他人工林。春季不同人工林样地间、人工林与荒坡间的土壤全磷量有显著差异($P < 0.05$)。夏季白蜡纯林、侧柏纯林与荒坡、半荒坡间的全磷含量有显著差异($P < 0.05$)。土壤有机碳和土壤全氮在不同样地之间变化趋势相同,杨树纯林、杨树-山桃混交林及半荒坡的土壤有机碳和全氮含量较高,而侧柏纯林和荒坡较低。夏季土壤温度和土壤含水量高于春季,但是土壤 pH 高于春季。夏季荒坡的土壤温度最低,其次是半荒坡,春季荒坡的土壤温度在所有样点中最高。土壤含水量人工林高于荒坡对照。春季的侧柏纯林、杨树-山桃林和半荒坡之间土壤含水量差异较大。夏季的白蜡树林与其他样点呈极显著差异($P < 0.01$),荒坡与侧柏纯林含水量的差异性显著($P < 0.05$),而与其他样点的差异性达到极显著($P < 0.01$)。

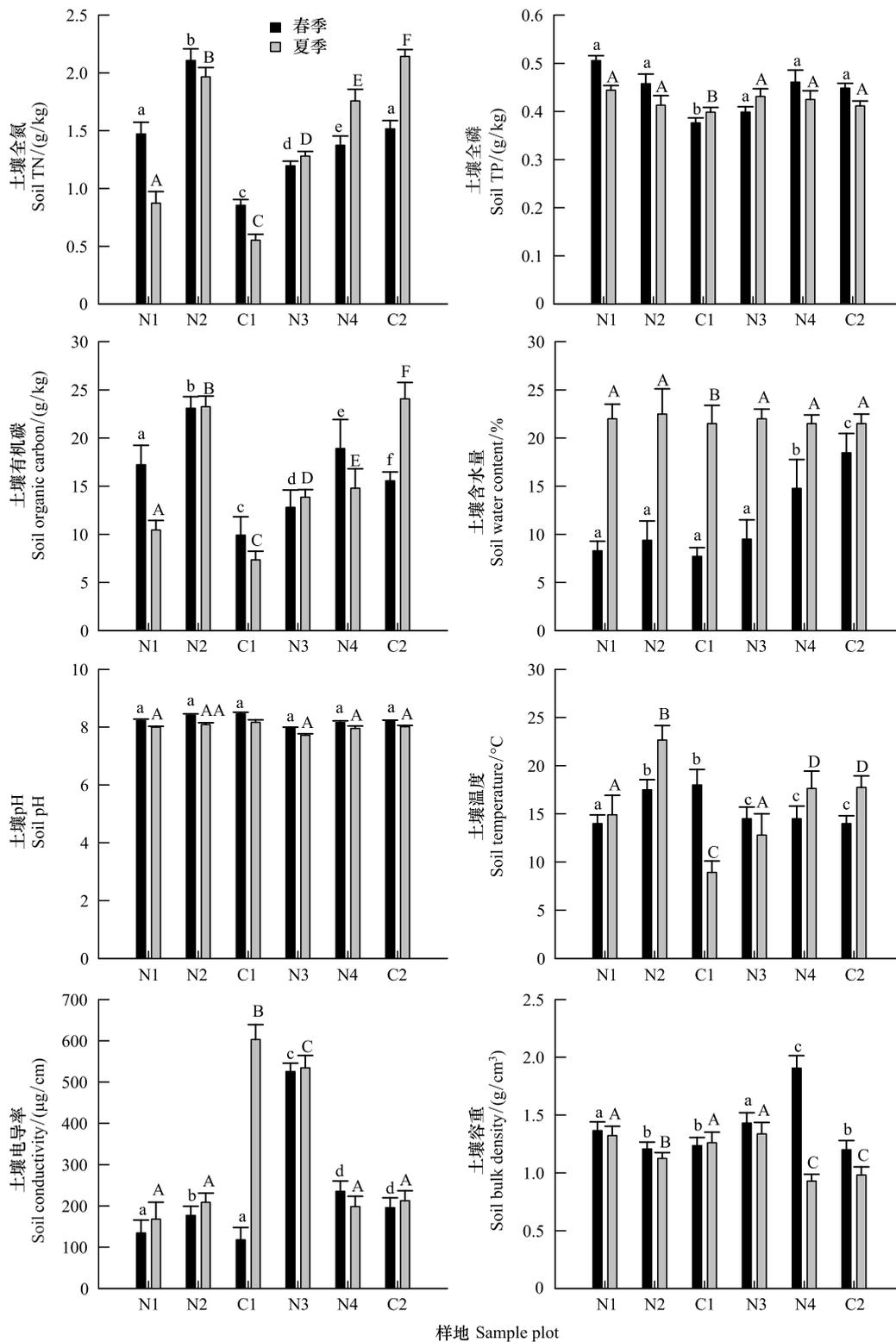


图2 不同样地土壤环境因子的季节变化

Fig.2 Seasonal variation of soil environmental factors in different plots

不同小写字母表示春季不同样地间差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示夏季不同样地间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 土壤纤毛虫群落结构

兰州市北山共鉴定出土壤纤毛虫 10 纲 21 目 39 科 62 属 157 种(表 2)。其中旋毛纲有 5 目 12 科 25 属 48 种,占总种类数 30.57%;裂口纲有 1 目 4 科 10 属 28 种,占总种类数 17.83%;肾形纲 2 目 3 科 5 属 21 种,占总种类数 13.38%;寡膜纲 4 目 6 科 6 属 19 种,占总种类数 12.1%。春季有土壤纤毛虫 10 纲 21 目 34 科 44 属 80 种。旋毛纲有 5 目 10 科 16 属 24 种,占总种类数 30.00%;裂口纲有 1 目 4 科 7 属 14 种,占总种类数 17.50%;肾形纲 2 目 2 科 3 属 11 种,占总种类数 13.75%;寡膜纲 4 目 5 科 5 属 8 种,占总种类数 10.00%。夏季有土壤纤毛虫 10 纲 21 目 38 科 54 属 104 种。旋毛纲有 5 目 11 科 20 属 33 种,占总种类数 31.73%;裂口纲有 1 目 4 科 8 属 18 种,占总种类数 17.31%;肾形纲 2 目 3 科 4 属 13 种,占总种类数 12.50%;寡膜纲 4 目 6 科 6 属 12 种,占总种类数 11.54%。夏季的物种数明显多于春季,尤其是前管目、嗜污目及固着目的数量大大增加,由罕见类变为常见类。纺锤全列虫(*Holosticha kessleri*)春季在人工林 N1、N2、N3 及 N4 为常见种,而夏季只有 N3 中作为偶见种出现,其他样地均没有;扭曲管叶虫(*T. sigmoides*)、巴维利亚斜管虫(*C. barvariensis*)、钩刺斜管虫(*Chilodonella uncinata*)在夏季的 N1、N2;N1、N2、N3;N4 中为常见种,在春季的人工林中没有出现。大喙纤虫(*Loxodes magnus*)、速体虫(*Tachysoma pelliellum*)及似织毛虫(*Histiculus similes*)春季分别在 N1、N2、N4;N1、N3; N2、N3、N4 中是常见种,在夏季的人工林中数量减少,变为偶见种。

表 2 土壤纤毛虫群落结构

Table 2 Soil ciliates community in structure

纲 Class	目 Order	科 Family	属 Genus	种 Species	比例 Percentage/%
核残基纲 Karyorelictea	核残基纲 Karyorelictea	喙纤虫科 Loxodidae	1	2	1.95
		原口目 Protostomatida	颈毛虫科 Trachelocercae	1	1
异毛纲 Hererotrichea	异毛目 Hererotrichida	旋口虫科 Spirostomidae	1	1	2.6
		赭虫科 Blepharismidae	1	3	
旋毛纲 Spirotrichea	游仆虫目 Euplotida	游仆虫科 Euplotidae	1	3	2.6
		旋毛科 Dysteriidae	1	1	
	排毛目 Sporadotrichida	角毛科 Keronidae	1	2	2.6
		卡尔科 Kahliellidae	2	2	
	盾纤目 Scuticociliatida	纤袋虫科 Histiobalantiidae	1	1	1.95
		楯纤科 Aspidiscidae	1	2	
	散毛目 Sporadotrichia	弹跳科 Halteriidae	1	1	19.48
		角毛科 Keronidae	1	2	
		卡尔科 Kahliellidae	2	2	
		尖毛科 Oxytrichidae	9	23	
管柱科 Trachelostylidae		1	2		
尾柱虫目 Urostylida		尾柱虫科 Urostylidae	3	7	4.55
瓶纤纲 Armophorea	瓶纤目 Armophorida	扭头科 Metopidake	1	5	3.25
裂口纲 Litostomatea	刺钩目 Haptorida	斜吻虫科 Enchelyidae	1	2	18.18
		刀口虫科 Spathidiidae	2	9	
		管叶科 Trachelophyllidae	4	8	
		圆口虫科 Tracheliidae	3	9	
篮口纲 Nassophorea	篮口目 Nassulida	圆纹虫科 Furgasoniidae	1	3	3.9
		篮口科 Nassulidae	1	1	
	侧口目 Pleurostomatida	漫游科 Litonotidae	1	1	0.065
	小胸目 Microthoracidae	小胸科 Microthoracidae	2	4	3.25
肾形纲 Colpodea	肾形目 Colpodida	拟小胸科 Pseudomicrothoracidae	1	1	
		肾形科 Colpodidae	2	14	9.09
		篮环目 Cyrtolophosidida	匙口科 Platyophryidae	1	2
前管纲 Prostomatea	前管目 Prorodontida	篮环科 Cyrtolophosidae	2	5	
		裸口虫科 Holophryidae	1	4	7.14
		前管虫科 Prorodontidae	2	6	
		斜板科 Plagiocampidae	1	1	

续表

纲 Class	目 Order	科 Family	属 Genus	种 Species	比例 Percentage/%	
寡膜纲 Oligohymen-ophorea	帆口目 Pleuronematida	膜袋科 Cyclidiidae	1	6	5.84	
		康纤科 Cohnilebidae	1	3		
	嗜污目 Philaslasterida	映毛虫科 Cinetochilidae	1	2	1.3	
		四膜目 Tetrahymenida	瞬目科 Glaucomidae	1	2	2.6
		四膜科 Tetrahymenidae	1	2		
固着目 Sessilida	钟虫科 Vorticellidae	1	4	2.6		
叶咽纲 Phyl-lopharyngea	齿管目 Chlamyodontida	斜管科 Chilodonellidae	2	8	5.2	

2.3 土壤纤毛虫多样性和 C/P 系数变化

图 3 显示,纤毛虫物种数、丰度、香农指数及 Margalef 丰富度指数均是夏季高于春季;均匀度指数及优势度指数则是春季高于夏季。在不同样地中,人工林的土壤纤毛虫物种数、丰度及多样性指数均高于荒坡对照样点;而均匀度指数和优势度指数则是荒坡高于人工林。春季杨树林与对照样地荒坡的物种分布存在极显著差异($P<0.01$);夏季不同人工林之间、人工林和荒坡对照间有极显著差异($P<0.01$);可见人工林对土壤恢复状况良好,使得土壤纤毛虫物种数分布相比荒坡和半荒坡有明显的优势。春季白蜡纯林和侧柏纯林的土壤纤毛虫丰度最高,夏季杨树纯林和侧柏纯林的丰度最高。Margalef 丰富度指数人工林的土壤纤毛虫物种多样性指数明显高于对照样地荒坡和半荒坡。

各样地的土壤纤毛虫群落 C/P 系数春季(0.38)>夏季(0.33)。不同样地土壤纤毛虫群落 C/P 系数随季节变化差异较大,其 C/P 系数的动态变化为:春季蒿子-灌丛半荒坡(0.55)>杨树-山桃林(0.53)>侧柏-柠条林(0.45)>荒坡(0.44)>白蜡树林(0.43)>杨树林(0.36),夏季蒿子-灌丛半荒坡(0.64)>侧柏-柠条林(0.46)>白蜡树林(0.41)>杨树林(0.37)>杨树-山桃林(0.36)>荒坡(0.33)。

2.4 土壤纤毛虫群落相似性特征

表 3 显示,春季不同样地间的相似性系数范围为 0.39—0.58,在中等相似和中等不相似之间,人工林与荒坡之间的相似性除白蜡林与荒坡、杨树-山桃林以及杨树与侧柏林、混交林为中等相似外,其他均为中等不相似;夏季不同样地间的相似性系数在 0.40—0.79 之间,在中等不相似到极相似之间,人工林与荒坡之间表现为中等不相似,其他样点之间均表现为中等相似,白蜡树林与杨树林表现为极相似。

表 3 土壤纤毛虫群落相似性

Table 3 Similarity of soil ciliates

样地 Sampling plot	春季 Spring		夏季 Summer	
	共有种 Common species	相似性系数 Similarity coefficient	共有种 Common species	相似性系数 Similarity coefficient
N1-N2	37	0.48	77	0.79
N1-C1	33	0.54	39	0.4
N2-C1	31	0.44	41	0.43
N3-N4	32	0.43	54	0.59
N3-C2	26	0.39	44	0.57
N4-C2	26	0.42	42	0.48
N1-N3	36	0.5	60	0.62
N1-N4	38	0.58	65	0.65
C1-C2	22	0.39	30	0.43
N2-N3	40	0.53	58	0.59
N2-N4	39	0.53	64	0.63

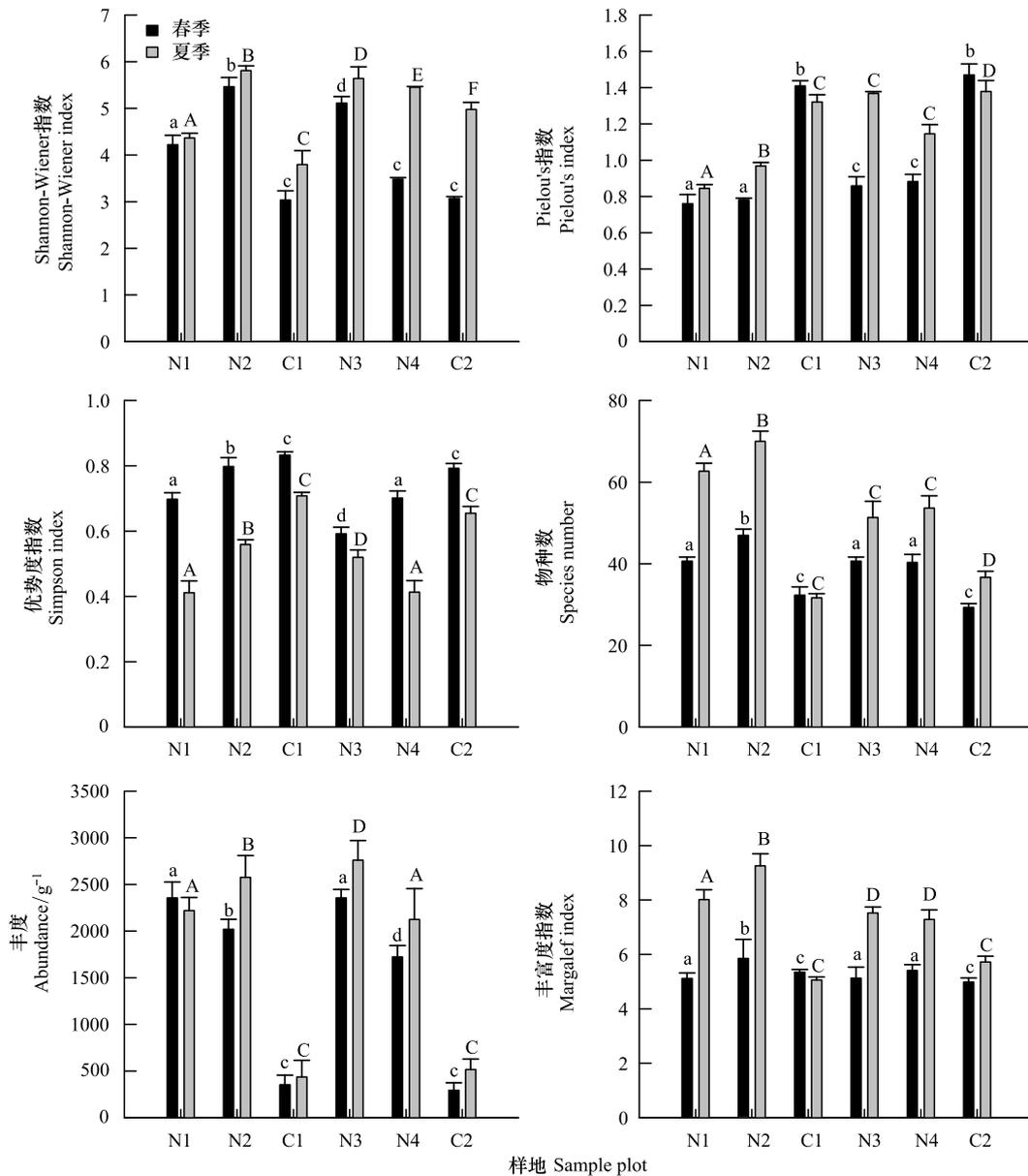


图3 不同样地土壤纤毛虫多样性

Fig.3 Diversity of soil ciliates in different plots

不同小写字母表示春季不同样地间差异显著 ($P < 0.05$) ;不同大写字母表示夏季不同样地间差异显著 ($P < 0.05$)

图4表明,春季不同样地土壤纤毛虫种类组成在欧式距离1.0处杨树纯林和侧柏纯林首先聚为一类,在欧氏距离6.0处与杨树-山桃混交林聚为一类,在欧氏距离13.0处与白蜡纯林聚为一类,荒坡与半荒坡在欧氏距离3.0处聚为一类后与人工林在25.0处聚为一类。图4显示,夏季侧柏纯林和杨树-山桃林混交林在欧氏距离2.0处聚为一类,荒坡和半荒坡在欧氏距离7.0处聚为一类,接着在欧氏距离10.0处聚为一类,最后与在欧氏距离1.5处聚为一类后与白蜡树林和杨树林在欧氏距离25.0处聚为一类。表明荒坡的生态恢复较差,半荒坡的土壤恢复状况较荒坡好,其次是侧柏林和杨树-山桃混交林,白蜡树林和杨树林的土壤恢复情况最好。

2.5 土壤理化性质与土壤纤毛虫的相关关系

本研究采用冗余分析(RDA)方法,图中实线箭头代表土壤纤毛虫群落,虚线箭头代表各环境因子;实线与虚线之间的夹角代表土壤纤毛虫与各环境因子之间的相关性。图5显示,春季大多数土壤纤毛虫与土壤电

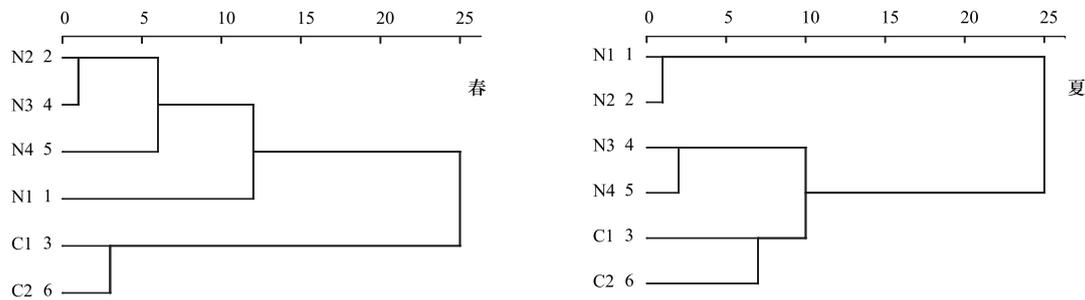


图4 土壤纤毛虫的聚类分析

Fig.4 Cluster analysis of soil ciliates

导率、土壤温度、有机碳等呈正相关关系,与土壤含水量呈负相关关系,且大多是纤毛虫都分布在人工林样地,荒坡和半荒坡对照样地分布数量较少。斜板科和斜吻虫科土壤纤毛虫受环境因子的影响最小。图5表明,夏季土壤纤毛虫土壤全氮、有机碳及电导率正相关,与其他环境因子呈负相关关系,除尾柱虫科、篮口科及裸口虫科的少数种外,绝大多数土壤纤毛虫同样分布在人工林样地。这些均表明经过多年的人工林培育,其土壤环境明显优于荒坡和半荒坡。表4为各物种RDA第一、二排序轴与环境因子的相关系数,由表4可以看出,环境因子对土壤纤毛虫的前2轴的累积解释量占特征值的总和分别为62.90%和74.70%,表明排序轴可有效反映兰州北山土壤及不同样地环境因子的梯度变化特征。

表4 排序轴与土壤因子的RDA分析

Table 4 RDA analysis of ordination axes and soil factors

环境因子 Environmental factor	春季 Spring		夏季 Summer	
	轴 1 AX1	轴 2 AX2	轴 1 AX1	轴 2 AX2
土壤全氮 TN	0.0754	0.7824	0.1851	-0.5162
土壤全磷 TP	0.1624	0.4253	-0.0809	-0.769
土壤有机碳 SOC	0.311	0.6781	0.3678	-0.5081
土壤含水量 SWC	-0.0118	0.7418	-0.3883	-0.7093
土壤电导率 SEC	0.2662	-0.3556	0.2059	0.7432
土壤容重 SVW	0.0218	0.1651	-0.2511	0.329
土壤酸碱度 pH	0.0316	0.0629	-0.4215	0.5447
土壤温度 ST	0.2578	-0.3178	-0.6834	-0.2527
物种-环境因子相关性累积变化率 CCSE	43.60%	62.90%	50.40%	74.70%

CCSE: 物种-环境因子相关累积变化率 Cumulative change rate of correlation between species and environmental factors; TN: 土壤全氮 Total nitrogen; TP: 土壤全磷 Total phosphorus; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; SWC: 土壤含水量 Soil water content; SEC: 土壤电导率 Soil electrical conductivity; SVW: 土壤容重 Soil volume-weight; pH: 土壤酸碱度 Soil pH; ST: 土壤温度 Soil temperature

3 讨论

兰州市属于干旱区,全年降雨较少,季节温度变化较大。而温度是调节陆地生态系统生物化学过程的重要环境因子,碳和氮循环的主要过程,包括植物光合与呼吸作用、凋落物的积累与分解作用、土壤呼吸与CO₂释放,土壤动物的取食活动与代谢等都受土壤温度的调节^[23]。土壤水分是土壤原生动物生存、繁殖和分布的主要限制因子^[24],大多数土壤生物生活于土壤孔隙中,其活动依赖于水分的可获得性^[25-26]。研究区不同样地间的土壤理化因子差异明显(图2),表现为人工林样地的养分含量普遍高于荒坡对照样地,这表明兰州市经过多年的退耕还林改造,土壤环境条件已经得到了大大的改善。而季节变化中,夏季降水偏多,温度高,导致土壤含水量较多、土壤温度较高,但土壤pH减小,这与土壤含水量增大,土壤偏酸性的研究结果一致^[27]。

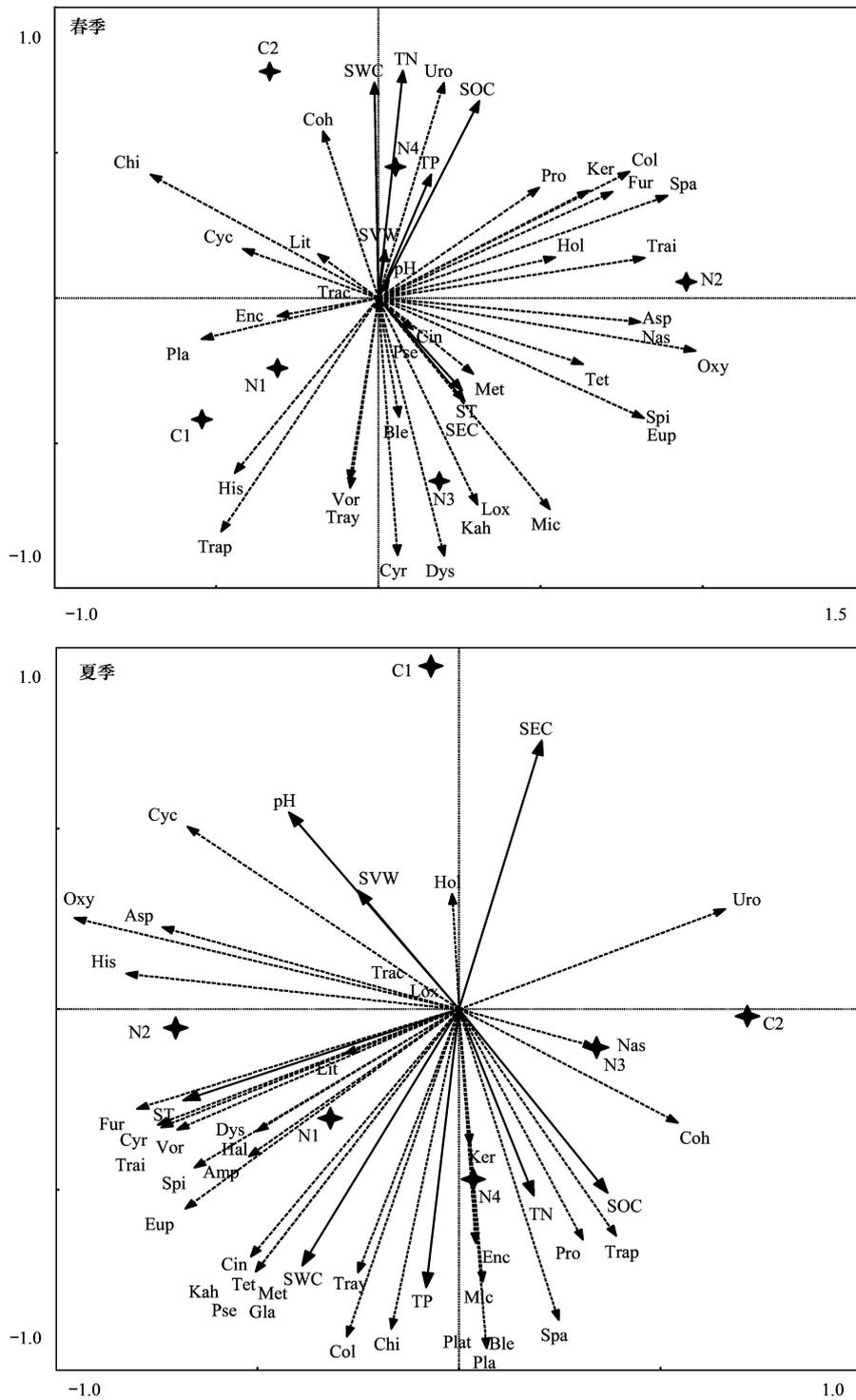


图5 土壤纤毛虫与环境因子的冗余分析

Fig.5 Redundancy analysis of soil ciliates and environmental factors

Lox: 喙纤虫科 Loxodidae; Trac: 颈毛虫科 Trachelocercae; Spi: 旋口虫科 Spirostomidae; Ble: 赭虫科 Blepharismidae; Eup: 游仆虫科 Euplotidae Ehrenberg; Dys: 旋纤虫科 Dysteriidae Claparède; Ker: 角毛科 Keronidae; Kah: 卡尔科 Kahliellidae; Amp: 小双虫科 Amphiselliidae; Hal: 弹跳科 Halteriidae; Asp: 楯纤科 Aspidiscidae; His: 纤袋虫科 Histiobalantiidae; Oxy: 尖毛科 Oxytrichidae; Tray: 管柱科 Trachelostylidae; Uro: 尾柱虫科 Urostylidae; Met: 扭头科 Metopidake; Enc: 斜吻虫科 Enchelyidae; Spa: 刀口虫科 Spathidiidae; Trap: 管叶科 Trachelophyllidae; Trai: 圆口虫科 Tracheliidae; Fur: 圆纹虫科 Furgasoniidae; Nas: 篮口科 Nassulidae; Lit: 漫游科 Litonotidae; Mic: 小胸科 Microthoracidae; Pse: 拟小胸科 Pseudomicrothoracidae; Col: 肾形科 Colpodidae; Plat: 匙口科 Platyophryidae; Cyr: 篮环科 Cyrtolophosidae; Hol: 裸口虫科 Holophryidae; Pro: 前管虫科 Prorodontidae; Pla: 斜板科 Plagiocampidae; Cyc: 膜袋科 Cyclidiidae; Coh: 康纤科 Cohnilemebidae; Cin: 映毛虫科 Cinetochilidae; Gla: 瞬目科 Glaucomididae; Tet: 四膜科 Tetrahymenidae; Vor: 钟虫科 Vorticellidae; Chi: 斜管科 Chilodonellidae; TN- Total nitrogen; 土壤全氮; TP- Total phosphorus; 土壤全磷; SOC- Soil organic carbon; 土壤有机碳; SWC: 土壤含水量; SEC: 土壤电导率; SVW: 土壤容重; pH: pH 值; ST: 土壤温度

北山是兰州市两山绿化的重要地区,人为的有利干扰(比如植树造林)对土壤纤毛虫群落分布有较显著影响,受人工长期对环境的调控使其土壤环境条件更适宜土壤纤毛虫生存。本次研究中在该样区共计鉴定出土壤纤毛虫 10 纲 21 目 39 科 62 属 157 种(表 2),与甘南玛曲县的沼泽化草甸^[4] 8 纲 17 目 30 科 39 属 105 种相比,明显可以看出兰州市绿化工程区的土壤纤毛虫物种数较高,这说明该绿化工程区的环境有一定的独特性,且土壤改良也在向好的方向转变。春夏两季土壤纤毛虫的优势种均为膨胀肾形虫和盘状肾形虫,这与肾形目对较贫瘠环境的适应性有关,肾形目能在人为干扰较多、植被覆盖率较低的土壤环境中占优势,说明兰州市南北两山经过多年的植被恢复与土壤环境的改善,仍然没有恢复到理想状态,生态环境的改善工作依然任重而道远。另有研究表明,造成原生动物的种群出现差异的主要原因是温度和降水^[28]。当地面温度在 14.3 到 24.3℃ 之间时是适宜土壤动物生存的最佳温度^[29]。宁应之^[5] 等的研究表明,土壤原生动物的丰度一年中有 1 个或 2 个高峰,大都出现在夏季。本研究中土壤纤毛虫的丰度、物种数及多样性指数均是夏季高于春季(图 3),主要原因是本研究地的夏季土壤环境比较适宜大多数土壤纤毛虫的生存,因此土壤纤毛虫的物种数量较大。另一方面,植物也是生态系统初级生产者,植被的存在形式以及其发育状况决定着生态系统的组成成分和结构特征^[30]。植被恢复能促进该地区栖息和繁衍的土壤生物种类增多,土壤动物的数量也会明显增加^[31]。本研究中人工林样点的土壤纤毛虫的物种数、丰度和多样性均高于荒坡、半荒坡对照样地,这与对退耕还林区土壤动物的动态变化的研究结果一致^[32]。荒坡植被覆盖率低(表 1),恶劣环境的冲击影响较重,这导致对环境条件需求较高的土壤纤毛虫类群无法生存或大量繁殖,而人工林样地中受人们维护的影响,植被和土壤逐渐恢复,能够为土壤纤毛虫直接或间接的食物来源,提供生存繁殖所需要的营养条件,因此土壤纤毛虫的多样性、丰度及物种数较荒坡高。异毛纲、旋毛纲、瓶纤土土壤纤毛虫生存为 K-对策,肾形纲土壤纤毛虫生存为 R-对策。C/P 系数越大,则说明肾形纲在该生境中越占据较高的优势,即生存为 R-对策占据优势,该生境环境质量越差^[33]。兰州市罗九公路绿化工程区各样点中蒿子-灌丛半荒坡的 C/P 系数在春夏两季均较高,肾形纲的种类较多,这与肾形纲对较贫瘠环境的适应性有关,肾形纲能在人为破坏较重、植被覆盖率较低的土壤环境中占优势。这说明蒿子灌丛半荒坡的土壤环境质量较差,杨树林、侧柏林等生境的土壤质量恢复程度较高。两季人工林样点的土壤纤毛虫多样性指数较高均是杨树林和侧柏林,这也表明了杨树林和侧柏林对土壤的恢复效果较好。

Jaccard 相似性系数评价不同生境之间的相似性与差异性^[22]。本研究显示(表 3),春季不同样点间的相似性系数的范围为 0.39—0.58,人工林样点与对照点的相似性系数在 0.39—0.54 之间,相似性系数最高的为白蜡纯林和杨树-山桃混交林(0.58),说明春季土壤纤毛虫群落受各样点的影响差异较大,白蜡林和杨树-山桃林的植被覆盖度较高,土壤表面凋落层较厚,因而土壤环境差异小;夏季不同样点间的相似性系数在 0.40—0.79 之间,人工林样点与对照样点的相似性系数范围为 0.40—0.57,人工林样点之间的相似性系数较高,说明夏季土壤纤毛虫群落受人工林的影响差异不大。马正学等^[34]对甘肃太统-崆峒山自然保护区的研究中,油松林、沙棘灌丛、蔷薇灌丛和荒坡之间的相似性系数在 0.275—0.292 之间,远低于兰州市北山绿化区白蜡树林、杨树林和荒坡之间的相似性系数,表明崆峒山森林自然保护区的土壤环境质量明显较高,与对照荒坡之间差异较大。这也同样证明了兰州市绿化工程区的人工林样地的土壤恢复程度还未达到最好的程度。聚类分析结果(图 4)表明,两季中均是人工林之间先聚为一类,最后与对照样地聚为一类。说明人工林的土壤质量和荒坡还是有明显差异。不同人工林之间的土壤纤毛虫群落存在一定的差异性,这是因为人工林之间的树种、盖度以及坡向的差异(表 1),引起不同季节的温度、光照、土壤含水量及养分等的差异,这与刘旻霞等^[35]在甘南高寒草甸坡向梯度的研究结果一致。

土壤动物与其生存的环境之间有着复杂的相互关系,动物能够通过其生命活动过程促进营养元素在凋落物和土壤系统中的循环,尤其在土壤营养元素特别是氮、磷元素的循环中起着重要作用^[36-37]。张雪萍等^[38]的研究结果显示,土壤动物的种类、数量和生物量与土壤有机质、全氮和全磷的含量正相关。在本研究中,春季有机碳、土壤温度及电导率等与土壤纤毛虫正相关,与其他环境因子负相关(图 5);夏季是动植物的快速生

长繁殖的时期,对土壤营养元素的竞争激烈,研究显示土壤纤毛虫物种分布与土壤有机碳和电导率等正相关,与其他环境因子呈负相关关系(图 5)。纵观春夏两季,土壤有机碳对土壤纤毛虫群落的影响较大。主要原因是土壤有机碳是指示土壤健康的关键指标,其不仅是植物养分循环的中心,而且影响水分关系和土壤被侵蚀的潜力,是表征土壤结构的关键因子^[38];另一方面,是因为研究区不同人工林之间的植被种类不同,土壤表面上的凋落物也不同,不同凋落物分解的难易程度就会出现差别^[39],加之春夏两季的土温及含水量差异较大,其纤毛虫的物种分布就不同。

综上所述,兰州市北山不同植被类型下土壤纤毛虫的分布不同,且这些分布与环境因子的季节变化各有不同,最终使得土壤纤毛虫群落出现差异。探究土壤纤毛虫群落在不同季节、不同生境的变化特征及影响因素,可为黄土高原干旱区退化生态系统恢复提供理论依据。

参考文献 (References):

- [1] 宋长青, 吴金水, 陆雅海, 沈其荣, 贺纪正, 黄巧云, 贾仲君, 冷疏影, 朱永官. 中国土壤微生物学研究 10 年回顾. 地球科学进展, 2013, 28(10): 1087-1105.
- [2] Foissner W. Soil protozoa as bioindicators: pros and cons, methods, diversity, representative examples. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1999, 74(1/3): 95-112.
- [3] 李琦路, 宁应之. 土壤生态环境中纤毛虫的研究与应用. 西北师范大学学报: 自然科学版, 2008, 44(3): 82-87.
- [4] Xu Y, Stoeck T, Forster D, Ma Z H, Zhang L Q, Fan X P. Environmental status assessment using biological traits analyses and functional diversity indices of benthic ciliate communities. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 131: 646-654.
- [5] 宁应之, 杨元罡, 苏荃, 陈凌云, 杜国祯. 放牧对沼泽化草甸土壤纤毛虫群落的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(6): 1614-1621.
- [6] 宁应之, 王婷婷, 武维宁, 陈凌云, 杜国祯. 甘南高寒草甸土壤纤毛虫对磷酸氢二铵添加的响应. *应用生态学报*, 2017, 28(5): 1668-1678.
- [7] 钟芳, 柴晓虹, 王国基, 段争虎. 植被恢复方式对黄土丘陵区土壤理化性质及微生物特性的影响. *中国沙漠*, 2014, 34(4): 1064-1072.
- [8] 赵瑾, 张丽华, 钟芳, 孙荣高. 兰州市郊干旱半干旱黄土丘陵区不同立地条件土壤微生物区系特征. *中国沙漠*, 2010, 30(5): 1160-1165.
- [9] 史志熠. 兰州市南北两山植被恢复和重建. *甘肃科技*, 2005, 21(3): 8-9.
- [10] 石善斌, 席正英. 兰州市南北两山地被植物调查. *甘肃农业科技*, 2015, (10): 12-14.
- [11] 许宏刚, 黄蓉, 张建旗, 程晓月, 吴永华. 兰州市南北两山面山植物群落多样性及配置模式初探. *甘肃林业科技*, 2017, 42(3): 27-31.
- [12] Foissner W. Estimating the species richness of soil protozoa using the "non-flooded petri dish method"//Lee J J, Soldo A T, eds. *Protocols in Protozoology*. Lawrence: Allen Press; 1992: B-10.1-B-10.2.
- [13] 《土壤动物研究方法手册》编写组编. 土壤动物研究方法手册. 北京: 中国林业出版社, 1998: 56-57, 63-72, 109-109.
- [14] Fernandez-Galiano D. Silver impregnation of ciliated protozoa: procedure yielding good results with the pyridinated silver carbonate method. *Transactions of the American Microscopical Society*, 1976, 95(4): 557-560.
- [15] 宋微波, 徐奎栋. 纤毛虫原生动动物形态学研究的常用方法. *海洋科学*, 1994, (6): 6-9.
- [16] Wilbert N. Eine verbesserte technik der protargolimprägung für ciliaten. *Mikrokosmos*, 1975, 64: 171-179.
- [17] 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.
- [18] Berger H. *Monograph of the Oxytrichidae (Ciliophora, Hypotrichia)*. Dordrecht: Springer, 1999.
- [19] Lynn D H. *The Ciliated Protozoa: Characterization, Classification, and Guide to the Literature*. 3rd ed. New York: Springer, 2011: 1-605.
- [20] Foissner W, Agatha S, Berger H A. Soil Ciliates (Protozoa, Ciliophora) from Namibia (Southwest Africa), with Emphasis on Two Contrasting Environments, the Etosha Region and the Namib Desert. *Denisia; Museum of Upper Austria*, 2002: 1064-1459
- [21] 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 & Conservation*, 2005, 14(3): 617-701.
- [22] Jaccard P. Nouvelles recherches sur la distribution florale. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, 1908, 44: 223-270
- [23] 邹涛, 申海香, 宁应之, 马正学. 甘肃小陇山麻沿林区土壤纤毛虫群落特征. *动物学杂志*, 2009, 44(6): 64-73.
- [24] Schlesinger W H. *Biogeochemistry: an Analysis of Global Change*. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1997.
- [25] Kardol P, Reynolds W N, Norby R J, Classen A T. Climate change effects on soil microarthropod abundance and community structure. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47(1): 37-44.
- [26] ALSayed A, Fergala A, Eldyasti A. Influence of biomass density and food to microorganisms ratio on the mixed culture type I methanotrophs enriched from activated sludge. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 70: 87-96.
- [27] Reth S, Reichstein M, Falge E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux-A modified model. *Plant and Soil*, 2005, 268(1): 21-33.
- [28] 杨效东, 唐建维. 西双版纳不同演替状态热带次生林土壤节肢动物群落特征. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 988-994.
- [29] 徐国良, 周国逸, 莫江明, 周小勇, 彭闪江. 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*, 2005, 25(7): 1670-1677.
- [30] 禹娟红. 华家岭生态恢复区人工低产林改造对土壤纤毛虫群落的影响. *林业实用技术*, 2013, (11): 6-10.
- [31] 秦钟, 章家恩, 李庆芳. 城市化地区不同生境下中小型土壤动物群落结构特征. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 3049-3056.
- [32] 李涛, 刘苑秋, 郭圣茂, 柯国庆, 张钊, 肖绪宝, 刘武. 瑞昌石灰岩红壤区退耕还林土壤动物群落特征. *应用生态学报*, 2012, 23(4): 910-916.
- [33] 王超, 徐润林. 鼎湖山不同森林类型土壤纤毛虫群落比较研究. *土壤*, 2017, 49(4): 725-732.
- [34] 马正学, 秦洁, 刘有斌, 宁应之. 甘肃太统-崆峒山国家级自然保护区土壤纤毛虫群落特征 I. *动物学杂志*, 2009, 44(1): 63-73.
- [35] 刘旻霞, 连依明, 李文. 微地形对优势种群点格局和关联性的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(5): 1569-1575.
- [36] 殷秀琴, 宋博, 邱丽丽. 红松阔叶混交林凋落物-土壤动物-土壤系统中 N、P、K 的动态特征. *生态学报*, 2007, 27(1): 128-134.
- [37] Jung J H, Park K M, Kim S. Morphology and molecular phylogeny of the soil ciliate *Anteholosticha rectangula* sp. nov. from king George island, maritime Antarctica. *Acta Protozoologica*, 2016, 55(2): 89-99.
- [38] 张雪萍, 李春艳, 殷秀琴, 陈鹏. 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*, 1999, 5(1): 26-31.
- [39] 陈德来, 普布, 巴桑, 马正学, 陈凌云. 西藏拉鲁湿地夏季土壤线虫群落特征. *动物学杂志*, 2014, 49(5): 744-753.