

不同植被恢复方式下红壤线虫数量特征

李辉信¹, 刘满强¹, 胡 锋^{1*}, 陈小云¹, 何圆球²

(1. 南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要:退化红壤不同植被恢复方式下土壤线虫数量的顺序为: 保护荒地>干扰荒地>马尾松>小叶桫>木荷>混交林(木荷-马尾松)。土壤线虫数量的季节波动明显: 春季和冬季较多, 秋季居中, 而夏季极显著少于其它季节($P<0.01$)。就线虫数量季节变异系数所体现的群落稳定性而言, 马尾松林地的变异系数最高($P<0.05$), 指示其群落最不稳定。线虫数量在土壤剖面中呈明显的垂直梯度分布。在表层土壤, 线虫数量与代表碳氮和生物活性水平的土壤质量指标, 如有机碳、全氮、速效氮磷、微生物量、潜在可矿化碳氮、基础呼吸、酶活性等, 一般呈极显著正相关($P<0.01$); 而与代表土壤物理性质及交换性能的指标, 如含水量、容重、颗粒组成、速效钾等一般没有相关性。鉴别分析(CDA)将不同植被下的样地分为 3 组, 自荒 1 和自荒 2 为 1 组, 小叶桫、木荷和混交林为 1 组, 而马尾松单独为 1 组。总之, 不同植被恢复下线虫数量的分异初步体现了线虫指示红壤质量的潜力。

关键词:退化红壤; 植被恢复; 土壤线虫; 季节波动; 土壤质量

Nematode Abundance Under Different Vegetations Restored on Degraded Red Soil

LI Hui-Xin¹, LIU Man-Qiang¹, HU Feng¹, CHEN Xiao-Yun¹, HE Yuan-Qiu², (1. College of Natural Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China) *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11): 1882~1889.

Abstract: This study was conducted from May 1999 to February 2000 in a long-term revegetation experiment established in 1989 in Yujiang County (28°15'30"N, 116°55'30"E), Jiangxi Province, China. The tested area, characterized by a warm-wet spring and a hot-dry summer, is a typical subtropical monsoon region with annual temperature of 17.8°C, and precipitation and evaporation of 1700mm and 1359mm, respectively. The soil type in the experimental station is red soil (Ultisol) derived from Quaternary red clay. Soil nematodes were investigated seasonally with four kinds of artificially restored woodlands, including deciduous broadleaf woodland (*Quercus chenii*, Qc), evergreen broadleaf woodland (*Schima superba*, Ss), coniferous woodland (*Pinus massonina*, Pm), and coniferous-broadleaf mixed woodland (*Schima superba*-*Pinus massonina*, Sm), and two grasslands, i. e. slightly disturbed grassland (G1) and undisturbed grassland (G2).

Nematode abundance differentiated distinctly under different vegetations, which was in the order of G2>G1>Pm>Qc>Ss>Sm. Nematodes showed obvious seasonal fluctuations. In general, nematode abundance was relatively high in spring and winter, followed by in autumn, and was lowest in summer. The dual-depression of high temperature and low soil moisture was attributable to the sharp decrease of nematode population in summer. Based on variation coefficients of mean abundance, the lowest nematode community stability was found in Pm. Nematode abundance showed clear stratification with depth, which

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49871046); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999011801); 中国科学院红壤生态开放实验站基金资助项目

收稿日期: 2001-12-09; 修订日期: 2002-04-06

作者简介: 李辉信(1964-), 男, 江西吉安人, 博士, 副教授。主要从事土壤生态学的教学与科研工作。

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: fenghu@njau.edu.cn

was in the order of $0 \sim 5\text{cm} > 5 \sim 10\text{cm} > 10 \sim 20\text{cm}$. Correlation analysis demonstrated that nematode abundance was highly positively correlated with soil organic C, total N, available N, available P, soil microbial biomass C, soil microbial biomass N, potential mineralizable C, potential mineralizable N, basal respiration, invertase, urease and acid phosphatase in top soil ($P < 0.01$). However, it had no relationship with soil moisture, bulk density, clay content, sand content and available K. The overall discrimination of nematode communities under different vegetations could be drawn from Canonical Discriminant Analysis and three groups were identified including the 1st group (G1 and G2) with the highest nematode abundance and the 2nd group (Qc, Ss and Sm) with the lowest nematode abundance, and the 3rd group (Pm). In addition, nematode community stability of the 1st and 2nd group was similar and higher than that of the 3rd group. It is concluded that nematode abundance is a potential indicator of red soil quality. The complex relationships between nematodes and soil moisture and vegetation types were also discussed.

Key words: degraded red soil; vegetation restoration; nematode abundance; seasonal fluctuation; soil quality

文章编号:1000-0933(2002)11-1882-08 中图分类号:S154.5 文献标识码:A

土壤线虫在有机质分解、养分矿化等生态过程中起着关键作用,是土壤生态系统的重要功能组分^[1,2]。由于土壤线虫类群和数量丰富,对生境变化反应灵敏,对其研究不仅有助于揭示土壤生态系统的结构,还可以提供有关土壤生态过程的独特信息^[3],因而 20 世纪 80 年代以来国外关于不同环境条件及管理措施下土壤线虫群落变化的研究得到重视,我国则从 20 世纪 90 年代开始有零星报道^[4~8]。

南方红壤地区占全国土地面积的 22.7%,由于长期人为干扰和不合理利用,红壤退化十分严重^[9]。促进植被的自然恢复和人工重建,是加速退化红壤恢复、提高红壤质量的主要措施之一^[10,11]。然而,植被重建后退化红壤生态系统演变研究多集中在理化性质上,关于生物学性状,尤其是土壤动物方面的研究很少^[12~15],而土壤线虫群落的变化尚未见报道。本文以红壤植被恢复长期定位试验为基础,着重研究了 6 种植被恢复方式下退化红壤线虫的数量特征,主要目的是了解线虫数量的分异、季节动态及其与土壤性质的关系,为下一步开展红壤生物学质量评价和生物指示意义研究提供基础资料。

1 材料和方法

1.1 样地概况

本研究在中国科学院红壤生态开放实验站进行,该站位于江西省鹰潭市余江县刘家站($28^{\circ}15'30''\text{N}$, $116^{\circ}55'30''\text{E}$),属中亚热带湿润季风气候区,年均温 17.6°C ,年均降水量 1700mm,年均蒸发量 1359mm。全年降水分配情况是:1~3 月份占 23%,4~6 月份占 48%,7~9 月份占 19%,10~12 月份占 13%。其中 7~10 月份高温干旱,月均降水量仅为 100mm,而月蒸发量达 200mm。

试验地原为侵蚀退化的疏草荒地,地形为丘陵缓坡,坡度 $5 \sim 8^{\circ}$,土壤为第四纪红粘土发育的典型红壤。1989 年启动植被恢复长期定位试验,建立了落叶阔叶林(小叶栎 *Quercus chenii*, Qc)、常绿阔叶林(木荷 *Schima superba*, Ss)、针叶林(马尾松 *Pinus massoniana*, Pm)和针阔混交林(木荷-马尾松 *Schima superba*-*Pinus massoniana*, Sm)4 种人工林地,同时还设立 2 种自然恢复的荒草地,一种是有轻度人为干扰(放牧、践踏)的荒草地(简称自荒 1, G1),另一种是隔离保护的荒草地(简称自荒 2, G2),荒草地的植被皆以刺芒野古草和狗牙根为主,自荒 2 较自荒 1 植物生长茂盛。

1.2 调查和分析方法

线虫调查于 1999 年 5 月、8 月、11 月及 2000 年 2 月(分别代表春、夏、秋、冬四季)在上述 6 种植被恢复试验区内进行。每次在各样地内分 $0 \sim 5$ 、 $5 \sim 10$ 和 $10 \sim 20\text{cm}$ 土层采集 3 个有代表性的原状土样,用离心浮选法分离线虫。由于红壤质地粘重,影响线虫的分离效率,根据反复试验确定步骤如下:①将新鲜土壤小心掰碎、混匀,挑出植物残茬;②取 30.00g 土壤放入 300ml 离心管,加 100ml 水,用带橡皮套的玻璃棒搅成匀浆;③以 2000r/min 的转速离心 5min,弃去含植物残茬的上清液;④加 100ml 浓度为 822g/L 的蔗糖溶

液(比重约为 1.30),立即充分搅匀,再次离心 5min,转速 500r/min;⑤将离心后的上清液倒入盛水的大烧杯中,用 350 目筛过滤线虫,并反复用清水冲洗以除去蔗糖。

线虫在体视镜下计数,线虫数量换算为条/g 干土。土壤性质的测定皆采用常规方法:土壤含水量,烘干法;土壤容重,环刀法;土壤颗粒组成,吸管法;土壤有机碳,重铬酸钾氧化法;全氮,开氏法;全磷,钼锑抗比色法;速效氮,碱解扩散法;速效磷,盐酸氟化铵浸提钼锑抗比色法;速效钾,乙酸铵浸提原子吸收法;阳离子交换量,乙酸铵交换法;pH,水土比 2.5,酸度计测定;微生物量碳氮,氯仿熏蒸提取法;潜在可矿化氮,呼吸瓶好气培养(22 C、28d),比色法测定矿质氮含量;潜在可矿化碳,碱液吸收测定 28d 累积释放的碳量;基础呼吸,20~44h 土壤呼吸速率的平均值;转化酶,二硝基水杨酸比色法;脲酶,蒸馏法;酸性磷酸酶,磷酸苯二钠比色法。

1.3 数据统计分析

T 检验、方差分析、相关分析及典型鉴别分析均在 SPSS 软件上进行。

2 结果与分析

2.1 土壤线虫数量及其在不同植被恢复方式下的分异

根据 4 个季节的调查资料,土壤线虫的数量范围为 1.3~18.1 条/g 干土,其中 0~5cm 土层的范围是 1.9~23.5 条/g 干土,5~10cm 土层是 1.0~15.3 条/g 干土,10~20cm 土层是 0.6~11.0 条/g 干土。尽管波动较大,但不同恢复植被下土壤线虫数量呈现出较明显的分异规律。

从 0~5cm 土层的情况看(图 1),不同恢复植被下 4 个季节线虫数量一般为自荒 2(G2)>自荒 1(G1)>马尾松(Pm)>小叶栎(Qc)>木荷(Ss)>木荷-马尾松混交林(Sm),即荒草地高于林地,以自荒 2 最高,显著高于混交林、木荷和小叶栎($P<0.05$);而马尾松林地的线虫数量则在林地中最高,混交林最低。只有夏季马尾松(3.30 ± 0.50)稍低于小叶栎(4.13 ± 0.58)、秋季小叶栎(6.54 ± 2.01)稍低于混交林(6.26 ± 2.06)属于例外。

5~10cm 土层线虫数量(图 2)在不同样地的分异趋势与表土层基本相同,仍是自荒 2>自荒 1>马尾松>小叶栎>木荷>混交林(夏季自荒 1>自荒 2 例外)。但不同样地 10~20cm 土层线虫数量没有一致的分异规律(图 3)。

从季节平均值可以更清楚地看出线虫数量在不同样地间的分异。由表 1 可知,线虫数量平均值在 3 个土层均表现为自荒 2>自荒 1>马尾松>小叶栎>木荷>(或=)混交林,只是 0~5cm 和 5~10cm 土层内样地之间的差异更为明显。

表 1 不同植被恢复方式下各土层线虫数量的平均值(条/g 干土)

Table 1	Average nematode abundance in different soil layers under six vegetations (Num/g dry soil)					
土层 Soil layer	小叶栎 Qc	木荷 Ss	马尾松 Pm	混交林 Sm	自荒 1 G1	自荒 2 G2
0~5 cm	8.2±3.8ab*	6.8±3.1ab	11.1±6.7bc	5.3±2.6a	13.2±6.7c	15.5±7.0c
5~10 cm	3.9±1.5ab	3.8±1.9ab	6.2±3.8b	3.4±1.7a	10.1±4.0c	11.2±4.2c
10~20 cm	3.0±1.4a	2.1±1.1a	4.1±4.0a	2.1±1.4a	4.4±2.1ab	6.4±4.2b

* 行中字母若相同,表明差异不显著,下同 ($P<0.05, n=12$, 邓肯法)In a row, means followed by the same letter indicates no significant differences between different vegetations ($P<0.05$ by Duncan's method, $n=12$), the same below

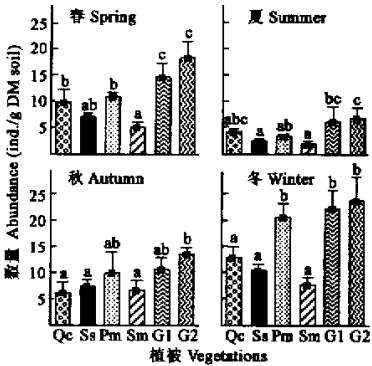


图 1 不同植被恢复方式下线虫数量(0~5cm)

Fig. 1 Nematode abundance under six vegetations a, b, ab, bc, c 同表 1 The same as table 1; 下同 The same below

上述结果表明,经过 10a 恢复,6 种植被下土壤线虫数量发生了较为明显的分异;植被对线虫数量的影响主要体现在表层和亚表层土壤。

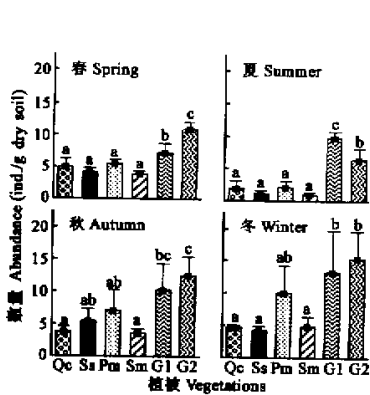


图 2 不同植被恢复方式下线虫数量(5~10cm)
Fig. 2 Nematode abundance under six vegetations

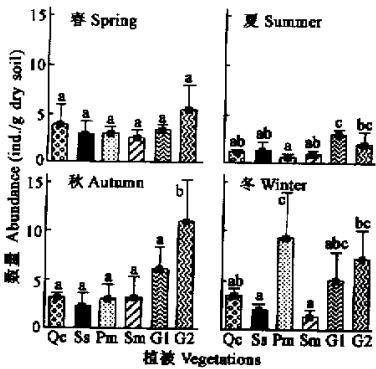


图 3 不同植被恢复方式下线虫数量(10~20cm)
Fig. 3 Nematode abundance under six vegetations

2.2 线虫数量的季节变化及稳定性

从图 1~3 还可以看出,线虫数量有明显的季节波动,总的趋势是春、冬 2 季较高,其次是秋季,而夏季的线虫数量皆显著低于其它季节($P<0.01$)。统计结果显示,在 0~5cm 土层,季节之间的差异都达到显著($P<0.05$)或极显著水平($P<0.01$);在 5~10cm 土层,除了春季与秋、冬季之间外,其它季节之间都达到极显著差异($P<0.01$);而 10~20cm 土层内只有夏季和其他季节的差异达到极显著水平($P<0.01$),说明季节的影响也体现在表层土壤。

进一步对各土层不同季节的线虫数量进行两两相关分析,结果发现 0~5cm 与 5~10cm 土层季节之间线虫数量都达到极显著正相关($P<0.01$),而 10~20cm 土层仅有春季和秋季的相关性较高($P<0.05$),反映出季节没有改变不同恢复植被之间线虫数量的基本差异趋势。

线虫数量的季节变异系数(即季节平均值与标准差之比)可以近似表征线虫群落的稳定性^[16]。表 2 中,0~5cm 土层马尾松林地的变异系数显著高于其它样地($P<0.05$),而其它样地间没有显著差异;5~10cm 土层仍是马尾松的变异系数最高,自荒 1、2 及小叶栎较低,并显著低于马尾松($P<0.05$);在 10~20cm,依然是马尾松显著最高($P<0.05$),而其它样地之间无显著差异。以上结果表明,马尾松内线虫群落最不稳定,而其它样地的稳定性基本相近。显然,群落稳定性的差异主要取决于夏季线虫数量的下降幅度(图 1~图 3)。

2.3 不同土层线虫数量的分布

由图 1~3 和表 1 容易看出,土壤线虫数量呈现明显的垂直梯度分布:0~5cm > 5~10cm > 10~20cm,表层 0~5cm 的线虫数量分别是 5~10cm 和 10~20cm 的 1.3~2.1 和 2.4~3.2 倍。进一步通过 T 检验发现(表 3),除了夏季的自荒 1 外,不同土层之间都达到极显著差异($P<0.01$, $n=72$)。对于特定季节,各样地线虫数量的垂直分布有所不同,春、冬季线虫垂直梯度尤为明显,而夏、秋季不明显。

表 2 不同植被恢复方式下线虫数量的季节变异系数^a

Table 2 Variation coefficients of nematode abundance under six vegetations

土层 Soil layer	小叶栎 Qc	木荷 Ss	马尾松 Pm	混交林 Sm	自荒 1 G1	自荒 2 G2
0~5 cm	0.463a	0.488a	0.637b	0.477a	0.517a	0.460a
5~10 cm	0.347a	0.481ab	0.542b	0.509ab	0.246a	0.336a
10~20 cm	0.397a	0.294a	0.929b	0.499ab	0.329a	0.575ab

^a 标准差/季节平均值 Standard deviation / means of nematode abundance of four seasons

表 3 土层之间线虫数量具有显著差异($P < 0.05$)的样地

Table 3 Plots in which nematode abundance are significantly different ($P < 0.05$) between soil layers							
春 Spring		夏 Summer		秋 Autumn		冬 Winter	
0~5cm		0~5cm		0~5cm		0~5cm	
5~10cm	Qc, Ss, Pm, G1, G2	Qc, Sm, G1				Qc, Ss, Pm, Sm, G2	
10~20cm	Qc, Ss, Pm, Sm, G1, G2	Qc, Pm, Sm, G1		Qc, Ss, Pm		Qc, Ss, Pm, Sm, G1, G2	

2.4 线虫数量与土壤质量的关系

相关分析表明(表 4): (1)线虫数量与有关碳、氮和生物活性水平的土壤质量指标,如土壤有机碳、全氮、速效氮、速效磷、微生物量碳和氮、潜在可矿化碳和氮、基础呼吸、转化酶、脲酶和酸性磷酸酶的正相关程度高,在表层 0~5cm 一般都达到极显著水平($P < 0.01$); (2)线虫数量与土壤物理(包括有关交换性能)指标,如土壤含水量、容重、土壤粘粒、砂粒含量、速效钾等无相关性; (3)伴随土层的加深,线虫数量与土壤性质的联系减弱。另外,线虫数量与土壤含水量也未表现出预期的正相关关系。

表 4 线虫数量与土壤质量指标的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between nematode abundance and soil quality indices							
土壤质量指标 Soil quality indices	土层 Soil layer			土壤质量指标 Soil quality indices	土层 Soil layer		
	0~5cm	5~10cm	10~20cm		0~5cm	5~10cm	10~20cm
土壤含水量 Soil water content	-0.121	-0.325	-0.196	pH	0.401	0.194	-0.390
土壤容重 Bulk density	0.108	-0.088	0.149	微生物量碳 Soil Microbial Biomass C	0.779**	0.835**	0.012
粘粒含量 Clay content	-0.222	0.514*	0.462*	微生物量氮 Soil Microbial Biomass N	0.740**	0.755**	0.366
砂粒含量 Sand content	0.151	0.371	0.411	颗粒有机物碳 Particulate organic matter C	0.753**	0.462*	-0.119
土壤有机碳 Soil Organic C	0.813**	0.713**	0.484*	颗粒有机物氮 Particulate organic matter N	0.514*	0.325	-0.311
全氮 Total N	0.698**	0.662**	0.415	潜在可矿化碳 Potential Mineralizable C	0.758**	0.754**	0.555*
全磷 Total phosphorus	0.474*	0.494*	0.425	潜在可矿化氮 Potential Mineralizable N	0.687**	0.314	0.273
速效氮 Available N	0.814**	0.809**	0.281	土壤基础呼吸 Basal respiration	0.851**	0.705**	0.277
速效磷 Available P	0.643**	0.256	-0.502*	转化酶 Invertase	0.641**	0.840**	0.581*
速效钾 Available K	-0.295	0.429	0.453	脲酶 Urease	0.722**	0.826**	0.310
阳离子交换量 Cation exchange capacity	-0.704**	-0.373	-0.113	酸性磷酸酶 Acid Phosphatase	0.535*	0.771**	0.547*

春季数据 Data in spring; ** 极显著水平 Significant level at $P < 0.01$; * 显著水平 Significant level at $P < 0.05$, $n = 18$

2.5 不同植被恢复方式下线虫数量的鉴别分析

借助鉴别分析可以比较不同植被下土壤线虫数量的整体分异。图 4 是 4 个季节所有层次线虫数量的鉴别分析结果,典型变量 1、2 轴分别解释了总方差的 93.8%和 4.4%;根据线虫数量在变量 1、2 上的负载大小,变量 1 主要代表了春、夏、秋、冬 4 季的影响,而变量 2 代表了夏季的影响。因此,样地变量 1 值越大,则意味着线虫数量越高;而结合前面(2.2)的分析,由于夏季线虫数量陡降是其季节波动的主要原因,变量 2 值在一定程度上体现了线虫群落的稳定性水平。由此,图 4 中样地可分为 3 组:自荒 1 和自荒 2 为 I 组,线虫数量最多;小叶栎、木荷和混交林为 II 组,线虫数量最低;马尾松单独为第 III 组,其线虫数量仅次于第 I 组。另外,图 4 提供的信息还包括, I 组和 II 组线虫群落稳定性相似,都较高,而 III 组线虫群落的稳定性最低。可见,线虫数量的鉴别分析能够清楚地体现不同恢复植被下线虫群落的分异。

3 讨论 万方数据

本调查在 6 种植被恢复方式的红壤样地中获得线虫数量为 1.3~18.1 条/g 干土,处于多数报道的范

围内,如在瑞典针叶林内获得线虫数量 14~28.5 条/g 干土^[17];在欧洲草地中线虫数量 16.3~74.0 条/g 干土^[18];在某些典型农田生态系统是 0.51~80.54 条/g 干土^[19~21]。

线虫数量在不同植被恢复方式下的明显分异及其与土壤碳、氮和生物活性水平的高度相关性,均体现了退化红壤恢复过程中植被对土壤线虫群落发展的重要影响。虽然线虫群落的长期变化与生境发展联系的资料较少,但现有的结果表明,线虫群落与植被的生态演替一般都是对应的。如 De Goede 等对流沙植被初级演替中线虫群落的系统研究表明,植被演替阶段与线虫群落的发展密切相关,林地与非林地差异尤其明显,他们认为植被影响下的有机物层及微生境差异是主导因素^[22~24]。而最近 Panesar 等报道了花旗松林地不同林龄(8a、42a、93a 和 296a)下线虫数量的分异,也表明线虫数量发展与植被演替的时间序列一致,线虫数量由林龄最低的再生林(8a)向着老成熟林(296 a)增多,线虫数量可以指示再生林向成熟林的恢复过程^[25]。

联系本研究,不同植被下有机体残体归还土壤的数量和质量差异及其对土壤线虫微生境的影响应是线虫数量分异的主要原因。草地与林地能量和养分的分配格局不同,前者表土层根系丰富,根系死亡和分泌物为线虫提供了数量及质量都很高的食物资源^[26]。Yeates 认为,即使包括植物寄生线虫,根系重量与线虫数量呈正相关也是合理的^[27];Sohlenius 等在研究 4 种耕作制度下线虫动态时,也观察到线虫数量与根系重量呈极显著正相关($r=0.96, p<0.01$)^[28]。林地之间比较,落叶林小叶桫线虫数量高于常绿林木荷和混交林可能是由于前者凋落物数量和养分含量都比后者高。出乎意料的是,马尾松林地郁闭度低、凋落物层薄、且针叶质量也差,线虫数量却高于其它林地。根据研究期间的定性观察,可能是线虫群落结构变化所致,在其它林地内发现较高比例的食细菌线虫,而在马尾松内的食真菌和杂食性线虫比例很高。此外,马尾松内线虫群落不稳定也表明其生态对策上的特殊性。

线虫数量与土壤物理性质等相关性较差的主要原因可能是,退化红壤恢复过程中土壤物理性质恢复相对较慢^①。

季节变化对线虫的影响主要是通过温度、湿度、食物供应、种群内竞争及捕食作用等造成的^[29,30]。在红壤地区,严重的水热不均抑制线虫数量的重要因素。本研究中,土壤含水量和线虫的相关性较弱表明线虫与土壤水分之间的复杂关系。经过长期的演化,红壤地区线虫对干旱的适应性比想象的要强,线虫可能具备脱水滞育适应干旱的能力^[31];且不同种类的线虫对含水量的反应也不一样^[32],如 *Prismatolaimus* 与含水量就呈负相关^[33];值得注意的是,夏秋 2 季土壤含水量相近,但秋季线虫数量比夏季增加显著,由于该地区夏季(月均温 29℃)比秋季温度(12℃)高得多,所以推测线虫在高温条件下对土壤水分的反应更敏感,高温与干旱的双重抑制最终导致线虫数量在夏季陡降。不过,虽然水热状况对线虫数量影响很大,但总体上不同季节各恢复植被之间线虫数量的大小顺序未变,表明植被类型比气候对线虫数量分异的影响更大^[28],这使利用线虫指示红壤质量具备坚实的基础。

线虫“表聚”特点与前人结果一致^[4,6]。对于特定季节,线虫垂直分布的差异不仅取决于食物来源,可能

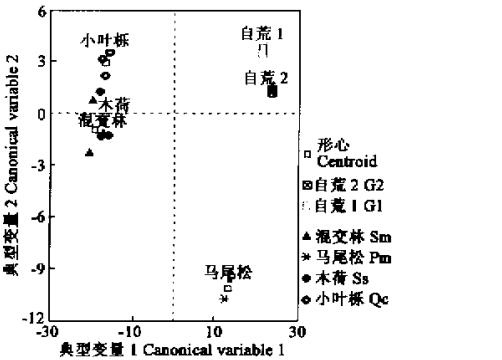


图 4 土壤线虫数量鉴别分析典型变量 1、2 的样地散点图

Fig. 4 The Canonical discriminant analysis of nematode communities under different vegetations

① 刘满强, 2014. 不同植被恢复方式下退化红壤质量的分异及土壤质量的生物指标研究. 硕士论文. 南京: 南京农业大学.

还与不同植被类型下表层土壤温湿度有关,夏秋季节凋落物层薄的样地(如自荒 1、2),线虫趋于向土壤温湿度相对恒定的下层转移。

典型鉴别分析是评价不同环境对生物群落影响的有力工具^[19],借助它可较好的发现不同恢复植被下线虫数量的整体分异。联系线虫数量与有关土壤性质的高度相关性,线虫具有指示不同植被方式对红壤质量影响的潜力。

最后需要补充说明的是,线虫数量一般都能够很好地区分试验处理的差异^[17,19,21],甚至在某些情况下比线虫群落结构和多样性的区分能力更高^[25],但为了深入探讨不同植被恢复方式下线虫在红壤生态过程中的作用及其生物指示意义,进一步对线虫进行功能群分类或物种鉴定是必要的,限于篇幅这方面的研究结果将在后续论文中报道。

参考文献

[1] Freckman D W. Bacterivorous nematodes and organic matter decomposition. *Agric. Ecosyst. Environ*,1988,**24**:195~217.

[2] Hu F (胡锋),Li H-X(李辉信),Xie L-Q(谢澍琪), *et al.* Interactions of bacterivorous nematode and bacteria and their effects on mineralization-immobilization of nitrogen and phosphorus. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese) (生态学报),1999,**19**(6):914~920.

[3] Ritz K,Trudgill D L. Utility of nematode community analysis as an integrated measure of the functional state of soils; perspective and challenges. *Plant and Soil*,1999,**212**(1):1~11.

[4] Wang Z Z(王振中),Zhang Y M(张友梅),Wu H S(伍惠生). Study towards the eco-geographic community of Mountain soil Nematoda in the middle of Hunan. *Acta Sci. Nat. Univ. Norm. Hunan*(in Chinese)(湖南师范大学自然科学学报),1992,**15**(3):72~78.

[5] Wu H S(伍惠生),Sun X D(孙希达). Nematoda. In:Yin W Y(尹文英), *et al* ed. *Subtropical soil animals of China*. (in Chinese) Beijing:Science Press,161~189.

[6] Hu F(胡锋),Lin M S(林茂松),Wu S M(吴珊眉). Characteristics of nematode population in low-hill red soil ecosystems in central Jiangxi province, subtropical China. In: Wang M Z(王明珠),Zhang T L(张桃林),He Y Q(何圆球) ed. *Research on Red Soil Ecosystem* (in Chinese) Ⅱ (红壤生态系统研究,第二集). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press,1993.177~182.

[7] Zhang Y M(张云美),Xu C G(徐成钢),Chen J Y(陈建英) *et al.* Characteristics of soil fauna composition and distribution of soil nematodes in different zones of China. In:Yin W Y(尹文英) ed. *Soil animals of China* (in Chinese). Beijing: Science Press,2000.149~182.

[8] Liang W J(梁文举),Zhang W M(张万民),Li W G(李维光), *et al.* Effect of chemical fertilizer on nematode community composition and diversity in the Black Soil Region. *Biodiversity Science*(in Chinese)(生物多样性),2001,**9**(3):237~240.

[9] Zhao Q G(赵其国). Degradation problems of red soil in China. *Soils*(in Chinese)(土壤),1995,**27**(6):281~285.

[10] Zhong J H(钟继洪),Tan J(谭军),Guo Q R(郭庆荣) *et al.* Comparative study on structure characteristic of hilly latored soils under different vegetation in south subtropica. *Chin. J. Appl. Ecol.* (in Chinese)(应用生态学报),1998,**9**(4):359~364.

[11] Kong D Z(孔德珍). Study on the restoration approach of degeneration vegetation in Qianyanzhou red earth hilly region. In: *Ecosystem restoration and agriculture sustainable development of hilly red soil*(in Chinese) Ⅱ (红壤丘陵生态系统恢复与农业持续发展研究,第二集). Beijing: Meteorological Press. 1998. 44~51.

[12] Hu F,Li H X,Wu S M. Differentiation of soil fauna in conventional tillage and no-tillage red soil ecosystems. *Pedosphere*,1997,**7**(4):339~348.

[13] Liao C H(廖崇惠),Li J X(李健雄)and Huang H T(黄海涛). Soil animal community diversity in the forest of the Southern region, China. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(生态学报),1997,**17**(5):549~545.

[14] Liu M Q(刘满强),Hu F(胡锋),Li H X(李辉信), *et al.* Soil arthropod communities under different artificial

woodland restored on degraded red soil. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese) (生态学报),2002,**22**(1):54~61.

[15] Liu M Q(刘满强),Hu F(胡锋),Chen X Y(陈小云) *et al.* Population dynamics of earthworms under different vegetations restored on degraded red soil. *Chin. J. Appl. Ecol.* (in Chinese)(应用生态学报),2002.

[16] Tilman D. Biodiversity:Population versus ecosystem stability. *Ecology*, 1996,**77**(2):350~363.

[17] Sohlenius B. Fluctuations of nematode populations in pine forest soil. Influence by clear-cutting. *Fundamental and Applied Nematology*,1997,**20**(2):103~114.

[18] Ekschimit K, Bakonyi G, Bongers M, *et al.* Effects of the nematofauna on microbial energy and matter transformation rates in European grassland soils. *Plant and Soil*,1999,**212**(1):45~61.

[19] Freckman D W and Ettema C H. Assessing nematode communities in agroecosystems of varying human intervention. *Agric. Ecosyst. Environ*,1993,**45**:239~261.

[20] Yeates G W ,Bird A F. Some observations on the influence of agricultural practices on the nematode faunae of some South Australian soils. *Fundam. appl. Nematol.* ,1994,**17**:133~145.

[21] Liang W J,Lavian I, Steinberger Y. Dynamics of nematode community composition in potato field. *Pedobiologia* , 1999,**43**:459~469.

[22] De Goede R G M,Georgieva S S,Verschoor B C,*et al.* Changes in nematode community structure in a primary succession of blown-out areas in a drift sand landscape. *Fundam. appl. Nematol.* ,1993,**16**(6):501~513.

[23] De Goede R G M,Verschoor B,Georgieva S S,*et al.* Nematode distribution, trophic structure and biomass on a primary succession of blown-out areas in a drift sand landscape. *Fundam. appl. Nematol.* ,1993,**16**(6):525~538.

[24] De Goede R G M,Bongers T. Nematode community structure in relation to soil and vegetation characteristics. *Applied Soil Ecology*,1994,**1**(1):29~44.

[25] Panesar T S, Marshall V G,Barclay H J. Abundance and diversity of soil nematodes in chronosequences of coastal Douglas-fir forests on Vancouver island, British Columbia. *Pedobiologia*,2001,**45**:193~212.

[26] Harris W F,Santantonio D,Mcginty D. The dynamic of belowground ecosystem. In: Waring R H ed. *Forests: Fresh Perspectives from Ecosystem Analysis*. Oregon:Oregon State Univ. Press. 1980. 119~129.

[27] Yeates G W. How plant affect nematodes. *Advances in Ecological Research*,1987,**17**:63~113.

[28] Sohlenius B,Boström S,Sandor A. Long-term dynamics of nematode communities in arable soil under four cropping systems. *Journal of Applied Ecology*,1987,**24**:131~144.

[29] Freckman D W,Baldwin J G. Nematoda. In: Dindal, D L. ed. *Soil biology guide*. John Wiley&Sons, New York, 1990. 155~200.

[30] Gupta V V S R and Yeates G W. Soil microfauna as bioindicators of soil health. In: Pankhurst C. *et al.* ed. *Biological Indicators of Soil Health*. CAB International,1997. 201~233.

[31] Freckman D W. ed. *Nematodes in soil ecosystems*. Univ. Taxes Press, Austin. pxi. ,1982.

[32] Sohlenius B,Boström S. Effects of global warming on nematode diversity in a Swedish tundra soil-a soil transplantation experiment. *Nematology*,1999,**1**(7,8):695~709.

[33] Ettma C H, Coleman D C, Vellidis G, *et al.* Spatiotemporal distributions of bacterivorous nematodes and soil resources in a restored riparian wetland. *Ecology*,1998,**79**:2721~2734.