

中国两个气候过渡区森林土壤线虫群落的比较研究

刘滔^{1,2}, 邵元虎², 时雷雷^{1,2}, 傅声雷^{1*}

(1. 中国科学院华南植物园, 中国科学院退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, 广州 510650; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为比较不同气候过渡区地带性森林土壤线虫群落结构和多样性, 以南亚热带向中亚热带气候过渡区的石门台常绿阔叶林和北亚热带向暖温带气候过渡区的鸡公山落叶阔叶林为样地, 探讨不同气候区土壤微食物网能流方式的差异。结果表明, 石门台土壤线虫群落属数(*S*)、生物量(*Biomass*)、多样性指数(*H'*)、丰富度指数(*SR*)、成熟度指数(*MI*)和结构指数(*SI*)在表层土壤(0~10 cm)均显著高于鸡公山。石门台的土壤线虫通路指数(*NCR*)均值高于 0.5, 而鸡公山的 *NCR* 均值小于 0.5, 说明前者土壤食物网可能偏向于细菌能流通道, 而后者偏向于真菌能流通道, 这也与食细菌线虫、食真菌线虫生物量的计算结果一致。可见线虫群落结构确实存在明显的南北差异, 并较好地指示了土壤能流和养分循环状况。

关键词: 线虫; 土壤食物网; 真菌线虫能流通道; 细菌线虫能流通道

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.02.010

Differences in Soil Nematode Community Structure between an Evergreen Broad-leaved Forest and a Deciduous Broad-leaved Forest of China

LIU Tao^{1,2}, SHAO Yuan-hu¹, SHI Lei-lei^{1,2}, FU Sheng-lei^{1*}

(1. Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, South China Botanical Garden of Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Nematode abundance, diversity and functional indices were investigated at a subtropical evergreen broad-leaved forest in southern China and a temperate deciduous broad-leaved forest in central China to illustrate the effects of climate and vegetation on energy pathways and nematode diversity in soil food webs. The results showed that the biomass, indexes of *MI*, *SI*, *PPI*, *H'* and *SR* at 0–10 cm soil depth, and *SI* index at 10–20 cm soil depth in southern China were greater than those in central China. Besides, the *NCR* index was greater than 0.5 at a subtropical evergreen broad-leaved forest in southern China, but it was less than 0.5 at a temperate deciduous broad-leaved forest in central China, indicating that bacterial energy channel dominated in the former forest ecosystem and the fungal energy channel dominated in the latter. Overall, there was a difference in nematode community between two forest ecosystems, and nematodes could be used as bio-indicators for soil nutrient status and energy channel pathway.

Key words: Nematode; Soil food web; Bacterial energy channel; Fungal energy channel

收稿日期: 2014-05-16 接受日期: 2015-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(31100385, 31210103920); NSFC-广东省联合基金项目(U1131001); 中德合作项目(31210103920)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31100385, 31210103920), the Joint Fund of NSFC-Guangdong Province (Grant No. U1131001), and Cooperative Project of Chinese and Germany (Grant No. 31210103920).

作者简介: 刘滔(1988~), 男, 硕士, 研究方向为土壤生态学。E-mail: 461768966@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: sfu@scbg.ac.cn

地上与地下生物的相互作用深刻影响着陆地生态系统的结构与功能^[1], 植被为地下生物提供能量来源, 而地下生物又对地上植被产生反馈作用^[2]。土壤线虫是土壤食物网的重要组成部分^[3], 主要分为植物寄生线虫(主要以根系为食源)、食微线虫(食细菌线虫和食真菌线虫)和捕食杂食类线虫^[4]。一方面, 线虫的活动可以调节微生物群落结构、改变养分矿化速率, 从而对植被生长产生重要影响; 另一方面, 植物生长通过根系分泌物以及凋落物影响土壤微生物与土壤动物的生存^[5-6]。因此, 较高的地上植物多样性可能会驱动较高的土壤生物多样性^[7], 而且, 因为土壤线虫同时占据多个营养级且与植物和土壤微生物均有密切关系, 土壤线虫群落特征可能较好地反映土壤食物网的状况。

进入土壤食物网的能量经常被分为细菌能流通道和真菌能流通道, 这两种能流方式与养分循环和周转速率密切相关^[8]。细菌与真菌相比, 有较低的碳同化效率和更快的周转速率^[9], 所以相应的细菌能流通道比真菌能流通道更快^[10-11]。准确理解土壤食物网的主要能流方式对了解其动态和养分循环十分重要。一般来说, 高温高湿的气候区养分循环与周转速率相对较快^[12-15]。南亚热带向中亚热带气候过渡区的石门台常绿阔叶林与北亚热带向暖温带气候过渡区的鸡公山落叶阔叶林相比较而言, 前者的养分循环与周转速率比后者更快以及植物多样性和丰富度更高, 所以我们假设: (1) 石门台常绿阔叶林下土壤线虫生物多样性高于鸡公山落叶阔叶林; (2) 石门台常绿阔叶林下土壤食细菌线虫能流通道的相对权重高于鸡公山落叶阔叶林。本研究以南亚热带向中亚热带气候过渡区的石门台常绿阔叶林和北亚热带向暖温带气候过渡区的鸡公山落叶阔叶林为实验样地, 研究不同气候区地带性森林土壤线虫群落结构、个体密度、多样性指数、功能类群指数等, 探索两种气候带内地带性森林的土壤线虫群落结构和生态功能的差异, 为研究不同气候带的植物-土壤线虫-土壤微生物互作及其对土壤养分循环的贡献奠定基础。

1 研究地自然概况

石门台国家级自然保护区地处 113°15'E, 24°35'N, 位于广东省中北部的英德市, 总面积 33555 hm², 平均海拔 800 m, 最高海拔 1586.8 m。

保护区年均温为 20.8℃, 年降雨量为 2364.7 mm, 降雨主要集中在 4 月。保护区地处南岭山脉南缘, 为南亚热带向中亚热带过渡地带, 亚热带季风气候特征明显。土壤具有明显垂直变化, 从低海拔到高海拔依次分布着赤红壤、山地红壤、山地黄壤和山地草甸土。在 20 m×20 m 样方内有乔木物种 13 种, 平均密度为 0.0875 ind. m⁻², 主要为樟科(Lauraceae)的厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)、山茶科(Theaceae)的荷木(*Schima* spp.); 灌木有 18 种, 平均密度为 0.3025 ind. m⁻², 主要为茜草科(Rubiaceae)的香楠(*Aidia canthioides*)、鼠刺科(Iteaceae)的鼠刺(*Itea chinensis*)和山矾科(Symplocaceae)的多花山矾(*Symplocos ramosissima*)。

鸡公山国家级自然保护区地处 114°05'E, 31°50'N, 位于河南省信阳市南 38 km 的豫、鄂两省交界处, 面积 2917 hm², 侵蚀基准面海拔高度 100 m, 最高海拔 830 m, 年均温 15.2℃, 极端最高温(7月)达 40.9℃, 极端最低温(1月)为 -20.0℃, 无霜期 220 d, 年均降水量为 1118.7 mm。由于地处北亚热带边缘、秦岭山系西端的浅山区, 受东亚季风气候影响, 具有典型的北亚热带向暖温带气候过渡和山地气候特征, 四季分明。区内岩石以花岗岩为主, 土壤以黄棕壤、黄褐土为主, pH 为 5~6。

两个研究样地均位于自然保护区实验区内, 在林子的上、中、下设置 4 个 20 m×20 m 的样方。在样方内有乔木物种 10 种, 平均密度为 0.0375 ind. m⁻², 主要为金缕梅科(Hamamelidaceae)的枫香(*Liquidambar formosana*)、槭树科(Aceraceae)的三角枫(*Acer buergerianum*)和壳斗科(Fagaceae)的栓皮栎(*Quercus variabilis*); 灌木物种有 12 种, 平均密度为 0.1 ind. m⁻², 主要为大戟科(Euphorbiaceae)的野桐(*Mallotus japonicus*)和樟科的山胡椒(*Lindera glauca*)。

2 方法

2.1 土壤样品采集

2013 年 8 月, 用直径 3 cm 的土钻在样方内随机选 5 个点按 0~10 cm, 10~20 cm 取样, 5 个点的土混合为一个土样, 共采集用于提取土壤线虫的土壤样品 16 份。并于 24 h 内带回实验室 4℃ 冰箱保存。

2.2 线虫的分离和鉴定

用 Baermann 湿漏斗法提取线虫^[16], 利用线虫

没有自主游泳能力,在浸水环境中会因重力作用下沉到漏斗底部的橡胶管中,方便收集。称取50 g新鲜土样,提取的线虫用热福尔马林溶液(4%甲醛)杀死固定,然后在倒置显微镜下计数,在显微镜下鉴定营养类群和科属,每个土样随机对100条线虫进行鉴定,不足100条的全部进行鉴定,并根据土壤湿度折算为每100 g干土含有的线虫条数[条(100 g干土)⁻¹]。线虫鉴定主要参考Bongers^[17]的方法,线虫生物量依据平均值进行估算(http://plpnemweb.ucdavis.edu/nemaplex/Ecology/158nematode_weights.htm)。

2.3 数据统计和处理

各类群数量优势度划分:个体数占总捕获量10%以上者为优势类群(+++),个体数占总捕获量1%~10%的为常见类群(++),个体数占总捕获量1%以下的为稀有类群(+)

根据线虫的科属水平再把它们分成4个营养类群:食细菌类(Bacterivores)、食真菌类(Fungivores)、植物寄生类(Plant parasites)、杂食/捕食类(Omnivores/Predators)^[4]。

多样性指数计算:采用Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数、Margalef丰富度指数和Simpson优势度指数表征土壤线虫群落多样性^[18]。

Shannon-Wiener多样性指数 $H' = -\sum n_i/N \times \ln(n_i/N)$, 式中, n_i 为第*i*个类群的个体数, N 为群落中所有类群的个体数。

Pielou均匀度指数 $J = H'/\ln S$, 式中, S 为类群数。

Margalef丰富度指数 $SR = (S-1)/\ln N$, 式中, N 为土壤线虫群落全部类群的个体总数。

Simpson优势度指数 $\lambda = \sum P_i^2$, 式中, $P_i = n_i/N$ 。

功能类群指数计算:采用成熟度指数(Maturity index, MI)^[19]、富集指数(Enrichment index, EI)、结构指数(Structure index, SI)、植物寄生线虫成熟度指数(Plant parasite index, PPI)^[20]、线虫通路指数(Nematode channel ratio, NCR)^[21]表征不同生境土壤线虫群落功能结构特征。

$$MI \text{ 指数}(PPI \text{ 指数}): MI (PPI) = \sum_{i=1}^n cp_i \times p_i$$

式中, cp_i 为非植物寄生性(植物寄生性)土壤线虫第*i*类群 cp 值; n 为非植物寄生性(植物寄生性)土壤线虫类群数; P_i 为土壤线虫群落非植物寄生性(植物

寄生性)土壤线虫第*i*类群的个体数占群落总个体数的比例。 cp 值从1到5对应r-策略者到K-策略者的过渡, cp 值低的线虫如小杆目线虫通常是具有较短的生命周期,繁殖数量大的r-策略者; cp 值高的线虫如矛线目线虫通常是具有较长的生命周期,繁殖数量少的K-策略者。

结构指数 $SI = 100 \times s/(s+b)$;富集指数 $EI = 100 \times e/(e+b)$, 式中, b 为食物网中的基础成分, e 为食物网中的富集成分, s 为食物网中的结构成分。根据计算出的结构指数 SI 和富集指数 EI ,可以将线虫区系分为A、B、C、D共4个象限。当处于A象限时,说明土壤环境受干扰程度较高;处于B象限时,说明土壤养分状况较好且受干扰较少;处于C象限时,说明土壤养分状况较差,但受干扰少;处于D象限时,土壤养分状况差且受干扰程度高。

线虫通路指数 $NCR = b/(b+f)$, 式中, b 和 f 分别为食细菌线虫和食真菌线虫占线虫总数的相对多度。 NCR 在1(分解过程完全由细菌控制)和0(分解过程完全由真菌控制)之间波动^[21]。

以上数据均采用Microsoft Excel 2007和SPSS 13.0 (SPSS Inc., Chicago, IL)统计软件分析。石门台和鸡公山线虫群落指标、生物量对比采用独立样本*t*检验。

3 结果和分析

3.1 土壤线虫物种组成及数量分异特征

3.1.1 土壤线虫物种组成

石门台亚热带常绿阔叶林捕获土壤线虫47属830条,优势属为拟丽突属(*Acrobeloides*)、针属(*Paratylenchus*)和*Hoplotylus*,个体数占总数的54.22%;常见属有丝尾垫刃属(*Filenchus*)等16属,共占总数的32.65%;稀有属有头垫刃属(*Cephalenchus*)等28属,占总数的12.77%;未知3条,占总数的0.36%。

鸡公山暖温带落叶阔叶林捕获土壤线虫36属658条。优势属为真滑刃属(*Aphelenchoides*)、巴兹尔属(*Basiria*)和拟丽突属,个体数占总数的56.84%;常见属有针属(*Paratylenchus*)等9属,个体数共占总数的36.47%;稀有属有真单宫属(*Eumonyhystera*)等24属,个体数占总数的6.69%(表1)。两地共有的优势属为*Acrobeloides*(食细菌线虫),鸡公山特有优势属为*Basiria*(植食性线虫)。综合土

表1 石门台和鸡公山土壤线虫物种组成

Table 1 Species composition of soil nematode in Shimentai and Jigongshan

属 Genus	石门台 Shimentai		鸡公山 Jigongshan		功能类群 Functional guild
	数量 Number	优势度 Dominance	数量 Number	优势度 Dominance	
<i>Hoplotylus</i>	239	+++	1	+	Pl ₂
<i>Acrobeloides</i>	106	+++	83	+++	Ba ₂
<i>Paratylenchus</i>	105	+++	39	++	Pl ₂
<i>Aphelenchooides</i>	35	++	191	+++	Fu ₂
<i>Basiria</i>			100	+++	Pl ₂
<i>Filenchus</i>	58	++	21	++	Fu ₂
<i>Heterocephalobus</i>	20	++	24	++	Ba ₂
<i>Ditylenchus</i>			24	++	Fu ₂
<i>Paraphelenchus</i>			18	++	Fu ₂
<i>Eucephalobus</i>	18	++	12	++	Ba ₂
<i>Criconema</i>	17	++			Pl ₃
<i>Eudorylaimus</i>	15	++	2	+	Om ₄
<i>Mesodorylaimus</i>	15	++			Om ₅
<i>Trichodorus</i>	13	++			Pl ₄
<i>Plectus</i>	12	++	5	+	Ba ₂
<i>Malenchus</i>	12	++			Fu ₂
<i>Brevibucca</i>	10	++			Ba ₁
<i>Aphanolaimus</i>	10	++			Ba ₃
<i>Tripyla</i>	10	++			Pr ₃
<i>Pellioditis</i>	9	++			Ba ₁
<i>Iotonchus</i>	9	++			Pr ₄
<i>Prismatolaimus</i>	8	++			Ba ₃
<i>Boleodorus</i>	7	+	53	++	Pl ₂
<i>Wilsonema</i>	6	+	38	++	Ba ₂
<i>Cervidellus</i>	2	+	11	++	Ba ₂
<i>Cephalenchus</i>	7	+			Pl ₂
<i>Diplogasteritus</i>	7	+			Ba ₁
<i>Microdorylaimus</i>	7	+	2	+	Om ₄
<i>Pungentus</i>	7	+			Om ₄
<i>Merlinius</i>	7	+			Pl ₃
<i>Eumonhystera</i>			6	+	Ba ₂
<i>Alaimus</i>	6	+			Ba ₄
<i>Tylencholaimus</i>	5	+			Fu ₄
<i>Aporcelaimellus</i>	5	+	4	+	Om ₅
<i>Protorhabditis</i>	4	+			Ba ₁
<i>Rhabditidae</i>	4	+			Ba ₁
<i>Diptherophora</i>	4	+			Fu ₃
<i>Aglenchus</i>	4	+			Pl ₂
<i>Xiphinema</i>	4	+			Pl ₅
<i>Rhabditoides</i>	3	+			Ba ₁
<i>Paractionlaimus</i>	3	+	3	+	Om ₅
<i>Pristonchus</i>	2	+			Ba ₁
<i>Bursaphelenchus</i>	2	+	1	+	Fu ₂
<i>Loofia</i>	2	+	1	+	Pl ₃
<i>Rotylenchus</i>	2	+			Pl ₃
<i>Rhabdolaimus</i>	1	+	2	+	Ba ₃
<i>Tyloaimophorus</i>	1	+			Fu ₃
<i>Coomansus</i>	1	+	2	+	Pr ₄
<i>Epidorylaimus</i>	1	+			Om ₄
<i>Dorylaimellus</i>	1	+			Om ₅
<i>Macroposthonia</i>	1	+			Pl ₃
<i>Criconemoides</i>			2	+	Pl ₃
<i>Cephalobus</i>			2	+	Ba ₂
<i>Panagrellus</i>			1	+	Ba ₁
<i>Rhabditis</i>			1	+	Ba ₁

续表(Continued)

属 Genus	石门台 Shimentai		鸡公山 Jigongshan		功能类群 Functional guild
	数量 Number	优势度 Dominance	数量 Number	优势度 Dominance	
<i>Macrotriphurus</i>			1	+	Pl ₃
<i>Chiloplacus</i>			1	+	Ba ₂
<i>Monhystera</i>			1	+	Ba ₂
<i>Teratocephalus</i>			1	+	Ba ₃
<i>Trischistoma</i>			1	+	Pr ₃
<i>Thonus</i>			1	+	Om ₄
<i>Thornia</i>			1	+	Om ₄
<i>Prodorylaimus</i>			1	+	Om ₅
<i>Helicotylenchus</i>			1	+	Pl ₃
Unknown	3				
合计 Total	830		658		

Om: 杂食类线虫; Pr: 捕食类线虫; Pl: 植物寄生类线虫; Ba: 食细菌类线虫; Fu: 食真菌类线虫; 功能类群后的数字为 *cp* 值。

Om: Omnivores; Pr: Predators; Pl: Plant parasites; Ba: Bacterivores; Fu: Fungivores; data followed functional groups are *cp* values.

壤线虫物种组成比较来看, 两地 0~10 cm 土层和 10~20 cm 土层的土壤线虫群落属数目均有极显著差异 ($P < 0.01$) (表 2)。除此之外, 线虫类群属数在两种森林类型中均随土层深度增加而呈现递减的趋势。

3.1.2 线虫生物量分异特征

石门台和鸡公山的土壤线虫总生物量分别为 668.6 和 216.8 μg (100 g 干土)⁻¹。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层, 石门台食细菌线虫 (Ba) 生物量都高于鸡公山, 但是食真菌线虫 (Fu) 生物量却低于鸡公山 (图 1)。与表 2 的线虫通路指数 (NCR) 结果表现出一

致的规律。

3.2 土壤线虫群落结构特征

群落多样性 采用多样性指数 (H')、均匀度指数 (J)、丰富度指数 (SR) 和优势度指数 (λ) 表征两种森林类型的土壤线虫群落多样性。从表 2 数据可以看出, 0~10 cm 和 10~20 cm 土层石门台亚热带常绿阔叶林土壤线虫群落的多样性指数 (H')、均匀度指数 (J)、丰富度指数 (SR) 均大于鸡公山暖温带落叶阔叶林土壤线虫群落, 并且 0~10 cm 土层多样性指数

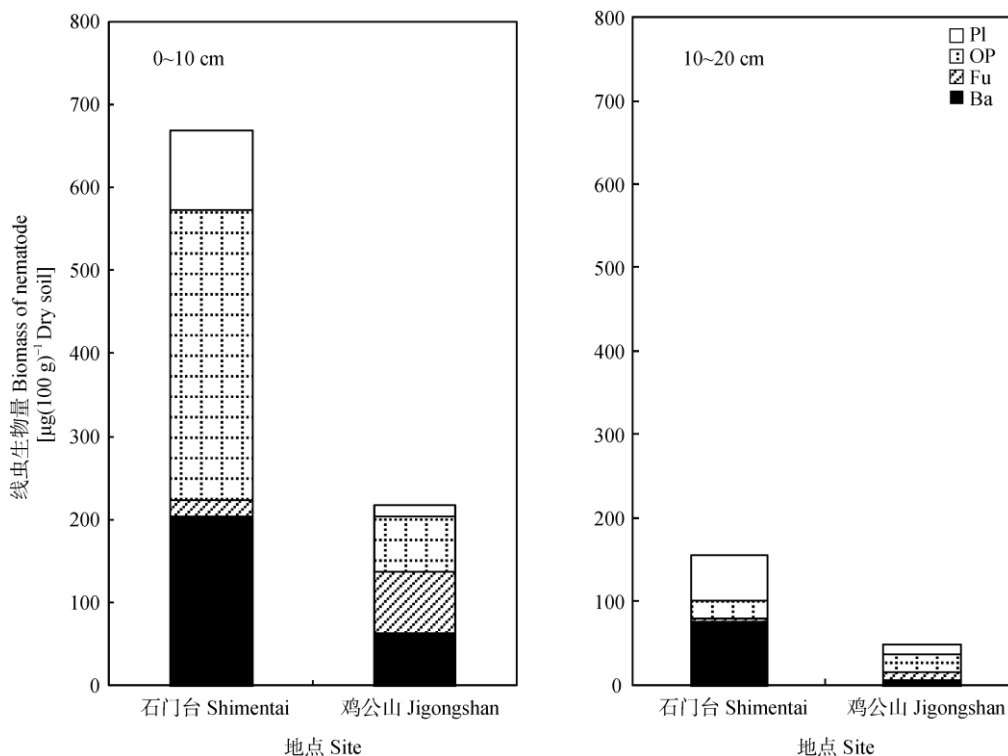


图 1 不同地点的线虫生物量。OP: 杂食/捕食类线虫; PL: 植物寄生类线虫; Ba: 食细菌类线虫; Fu: 食真菌类线虫。

Fig. 1 Biomass of soil nematode in two sites. OP: Omnivores/Predators; PL: Plant parasites; Ba: Bacterivores; Fu: Fungivores.

表2 土壤线虫群落多样性与功能类群指标

Table 2 Diversity and functional indices of soil nematode communities at two sites

	土层 Soil depth (cm)	石门台 Shimentai	鸡公山 Jigongshan
属数 Number of genus (<i>S</i>)	0~10	23.75±1.44**	14.25±1.49
	10~20	16.75±2.50**	8.50±2.10
多样性指数 Diversity index (<i>H'</i>)	0~10	2.62±0.04**	1.88±0.14
	10~20	1.86±0.35	1.38±0.30
均匀度指数 Evenness index (<i>J</i>)	0~10	0.83±0.02	0.72±0.07
	10~20	0.65±0.09	0.52±0.12
丰富度指数 Richness index (<i>SR</i>)	0~10	3.50±0.17**	2.07±0.27
	10~20	2.80±0.47	1.51±0.33
优势度指数 Dominance index (λ)	0~10	0.11±0.01	0.24±0.05
	10~20	0.32±0.11	0.39±0.13
成熟度指数 Maturity index (<i>MI</i>)	0~10	2.49±0.12**	2.10±0.05
	10~20	2.15±0.07	2.08±0.04
结构指数 Structure index (<i>SI</i>)	0~10	64.48±3.95**	16.18±6.77
	10~20	45.68±1.90**	15.09±6.65
富集指数 Enrichment index (<i>EI</i>)	0~10	47.09±6.34	33.52±5.75
	10~20	49.84±7.72	38.69±5.92
植物寄生线虫成熟度指数 Plant parasite index (<i>PPI</i>)	0~10	2.27±0.07*	2.01±0.01
	10~20	2.13±0.07	2.02±0.01
线虫通路指数 Nematode channel ratio (<i>NCR</i>)	0~10	0.61±0.04	0.48±0.12
	10~20	0.75±0.03	0.36±0.17

$n=4$; **: $P<0.01$; *: $P<0.05$.

(*H'*)、丰富度指数(*SR*)的差异达极显著水平($P<0.01$), 石门台土壤线虫群落的群落优势度指数 λ 小于鸡公山土壤线虫群落。

功能类群特征 采用成熟指数(*MI*)、富集指数(*EI*)、结构指数(*SI*)、植物寄生线虫成熟指数(*PPI*)、线虫通路指数(*NCR*)研究不同生境土壤线虫群落功能结构特征差异(表2)。功能类群的划分和c-p值的确定见表1。石门台亚热带常绿

阔叶林土壤线虫群落的成熟指数(*MI*)、富集指数(*EI*)、结构指数(*SI*)、植物寄生线虫成熟指数(*PPI*)、线虫通路指数(*NCR*)均大于鸡公山暖温带落叶阔叶林土壤线虫群落, 并且0~10 cm土层的成熟指数(*MI*)和结构指数(*SI*)的差异达到极显著水平($P<0.01$), 植物寄生线虫成熟指数(*PPI*)的差异达到显著水平($P<0.05$); 10~20 cm土层的结构指数(*SI*)的差异也达极显著水平($P<$

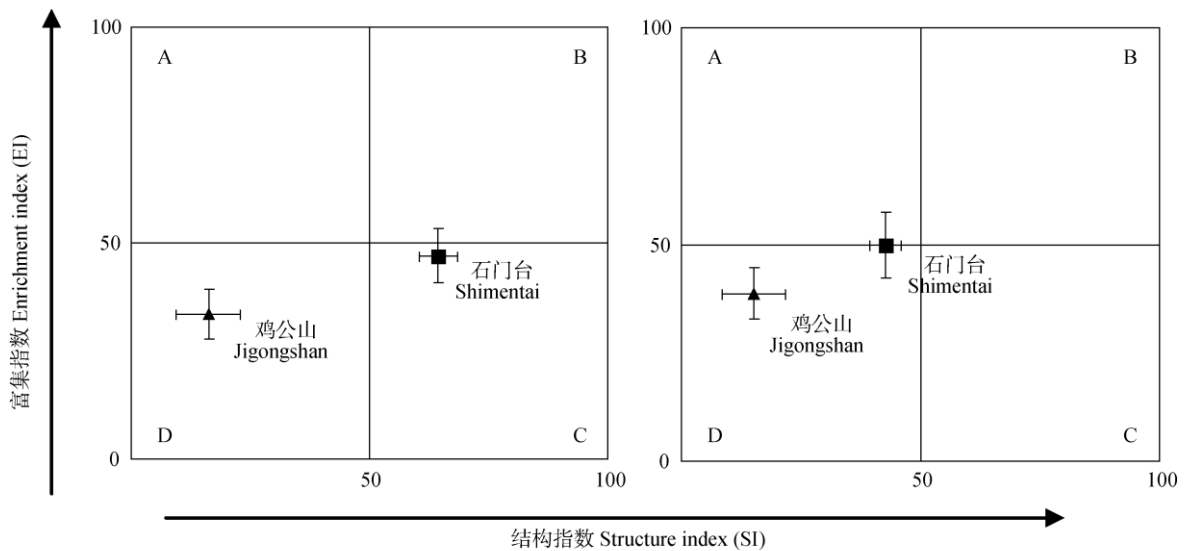


图2 线虫的区系分析

Fig. 2 Faunal analysis for two sites

0.01)。线虫区系分析结果显示0~10 cm土层的石门台亚热带常绿阔叶林土壤线虫群落处于C象限; 鸡公山暖温带落叶阔叶林土壤线虫群落处于D象限(图2)。

4 讨论

土壤食物网能量的主要来源是土壤中的有机质碎屑^[22]。土壤中的分解途径由于有机物分解的难易程度不同分为真菌途径和细菌途径。真菌途径为慢周转方式, 偏好低营养、难分解以及高碳氮比的有机物, 循环时间较长^[10], 细菌途径主要发生在有机质较多且容易分解的土壤里, 有较快的碳周转和养分循环速度^[11]。线虫通路指数(NCR)可以指示土壤食物网两种有机质分解途径的相对权重^[21]。对于植物和地上大型动物, 从高纬度带到低纬度带生物多样性有逐渐升高的趋势, 并且在赤道附近的热带雨林生物多样性达到最高^[23], 有学者认为植物多样性能促进土壤生物多样性^[24]。土壤线虫作为土壤健康指示生物, 利用各个食性的线虫的数量计算线虫群落成熟指数(MI)、富集指数(EI)、结构指数(SI)、植物寄生线虫成熟指数(PPI)可以敏感地反映土壤环境受胁迫程度以及土壤食物网情况^[21,25]。成熟指数MI表明石门台亚热带常绿阔叶林土壤线虫群落K-对策者比例较高, 处于演替阶段后期; 也表明石门台的土壤环境相比鸡公山的更稳定。土壤线虫群落区系分析显示石门台亚热带常绿阔叶林土壤养分富集状况较差但受干扰程度较小; 而鸡公山暖温带落叶阔叶林土壤养分状况较差, 受干扰程度较高且受到胁迫, 食物网退化^[25]。

热量和水分是决定植被成带分布的主要因素, 我国从南至北依次分布着热带雨林区、亚热带常绿阔叶林区、温带落叶阔叶林区和寒温带针叶林区, 表现出明显的纬度地带性^[26]。因此石门台常绿阔叶林植物多样性比鸡公山落叶阔叶林高, 符合纬度地带性。土壤线虫群落的多样性指数(H')、均匀度指数(J)、丰富度指数(SR)和优势度指数(λ)的计算结果表明石门台亚热带常绿阔叶林森林土壤线虫群落物种多样性更高, 群落结构更稳定, 且线虫种类组成比例更均衡, 也符合本文的假设。de Deyn等也报道植物物种多样性越高, 线虫多样性也越高^[27], 较高的植物多样性可以为土壤食物网提供更多样的资源(凋落物和根系分泌物)^[28]。但Boag报道, 与

植物和大型动物不同, 土壤线虫表现为在温带地区达到物种多样性的最高点^[29], 这可能是研究地点的差异性导致的, 更大尺度范围的研究有待开展。

线虫通路指数(NCR)和线虫生物量的结果表明南亚热带向中亚热带气候过渡区的石门台常绿阔叶林倾向于细菌分解通道, 而北亚热带向暖温带气候过渡区的鸡公山落叶阔叶林倾向于真菌分解通道(表2)。这个结果符合本文之前的假设, 可能与石门台常绿阔叶林高温高湿的环境有关, 土壤有机质丰富且分解较快, 因而倾向于快周转方式的细菌能流通道^[11]; 而鸡公山8月份土壤干燥, 养分循环较慢, 所以倾向于慢周转方式的真菌能流通道^[10]。气候可能是导致这种分解途径差异的原因, 正如Berg^[13]报道, 大尺度上气候对于凋落物分解有明显影响, 凋落物质量主要在地区内起作用。

总之, 线虫群落个体密度和类群组成的变化是由森林内部微环境以及植物根系、凋落物共同影响的; 气候影响森林发育和发展, 而植物种类又影响凋落物质量和数量以及根系分泌物。因而土壤线虫作为指示生物可以在一定程度上反映不同森林生态系统土壤食物网的结构差异和能量流动差异。

参考文献

- [1] SHAO Y H, FU S L. The diversity and functions of soil nematodes [J]. Biodiv Sci, 2007, 15(2): 116–123.
邵元虎, 傅声雷. 试论土壤线虫多样性在生态系统中的作用 [J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 116–123.
- [2] WARDLE D A, BARDGETT R D, KLIRONOMOS J N, et al. Ecological linkages between aboveground and belowground biota [J]. Science, 2004, 304(5677): 1629–1633.
- [3] FRECKMAN D W. Bacterivorous nematodes and organic-matter decomposition [J]. Agri Ecosyst Environ, 1988, 24(1/2/3): 195–217.
- [4] YEATES G W, BONGERS T, DEGOEDE R G M, et al. Feeding habits in soil nematode families and genera: An outline for soil ecologists [J]. J Nematol, 1993, 25(3): 315–331.
- [5] BARDGETT R D, WARDLE D A, YEATES G W. Linking above-ground and below-ground interactions: How plant responses to foliar herbivory influence soil organisms [J]. Soil Biol Biochem, 1998, 30(14): 1867–1878.
- [6] WARDLE D A. The influence of biotic interactions on soil biodiversity [J]. Ecol Lett, 2006, 9(7): 870–886.
- [7] GRIFFITHS B S. A comparison of microbial-feeding nematodes and protozoa in the rhizosphere of different plants [J]. Biol Fertil Soils,

- 1990, 9(1): 83–88.
- [8] MOORE J C, HUNT H W. Resource compartmentation and the stability of real ecosystems [J]. *Nature*, 1988, 333(6170): 261–263.
- [9] ADU J K, OADES J M. Physical factors influencing decomposition of organic materials in soil aggregates [J]. *Soil Biol Biochem*, 1978, 10(2): 109–115.
- [10] BLAGODATSKAYA E V, ANDERSON T H. Interactive effects of pH and substrate quality on the fungal-to-bacterial ratio and qCO_2 of microbial communities in forest soils [J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, 30(10/11): 1269–1274.
- [11] INGWERSEN J, POLL C, STRECK T, et al. Micro-scale modelling of carbon turnover driven by microbial succession at a biogeochemical interface [J]. *Soil Biol Biochem*, 2008, 40(4): 864–878.
- [12] VITOUSEK P M. Beyond global warming: Ecology and global change [J]. *Ecology*, 1994, 75(7): 1861–1876.
- [13] BERG B, BERG M P, BOTTLNER P, et al. Litter mass loss rates in pine forests of Europe and Eastern United States: some relationships with climate and litter quality [J]. *Biogeochemistry*, 1993, 20(3): 127–159.
- [14] HORNSBY D C, LOCKABY B G, CHAPPELKA A H. Influence of microclimate on decomposition in loblolly pine stands: A field microcosm approach [J]. *Can J For Res*, 1995, 25(10): 1570–1577.
- [15] SINGH K P, SINGH P K, TRIPATHI S K. Litterfall, litter decomposition and nutrient release patterns in four native tree species raised on coal mine spoil at Singrauli, India [J]. *Biol Fertil Soils*, 1999, 29(4): 371–378.
- [16] BARKER K R. Nematode extraction and bioassays [C]// BARKER K R, CARTER C C, SASSER J N. *An Advanced Treatise on Meloidogyne. Methodology*, Vol. II. North Carolina: North Carolina State University Graphics, 1985: 19–35.
- [17] BONGERS T. *De Nematoden van Nederland* [M]. 2nd ed. Uitgeverij Pirola, Schoorl, Netherlands: Vormgeving en Technische Realisatie, 1994.
- [18] YEATES G W, BONGERS T. Nematode diversity in agroecosystems [J]. *Agri Ecosyst Environ*, 1999, 74(1/2/3): 113–135.
- [19] BONGERS T. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition [J]. *Oecologia*, 1990, 83(1): 14–19.
- [20] FERRIS H, BONGERS T, de GOEDE R G M. A framework for soil food web diagnostics: Extension of the nematode faunal analysis concept [J]. *Appl Soil Ecol*, 2001, 18(1): 13–29.
- [21] YEATES G W. Nematodes as soil indicators: Functional and biodiversity aspects [J]. *Biol Fert Soils*, 2003, 37(4): 199–210.
- [22] MOORE J C, ZWETSLOOT H J C, de RUITER P C. Statistical analysis and simulation modeling of the belowground food webs of two winter wheat management practices [J]. *Neth J Agri Sci*, 1990, 38(3): 303–316.
- [23] WILLIG M R, KAUFMAN D M, STEVENS R D. Latitudinal gradients of biodiversity: Pattern, process, scale, and synthesis [J]. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2003, 34: 273–309.
- [24] Stephan A, Meyer A H, Schmid B. Plant diversity affects culturable soil bacteria in experimental grassland communities [J]. *J Ecol*, 2000, 88(6): 988–998.
- [25] BONGERS T, FERRIS H. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring [J]. *Trends Ecol Evol*, 1999, 14(6): 224–228.
- [26] QU Z X, WU Y S, WANG H X, et al. *Plant Ecology* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 1983: 236–238.
曲仲湘, 吴玉树, 王焕校, 等. *植物生态学* [M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1983: 236–238.
- [27] de DEYN G B, RAAIJMAKERS C E, van RUIJVEN J, et al. Plant species identity and diversity effects on different trophic levels of nematodes in the soil food web [J]. *Oikos*, 2004, 106(3): 576–586.
- [28] HANSEN R A. Effects of habitat complexity and composition on a diverse litter microarthropod assemblage [J]. *Ecology*, 2000, 81(4): 1120–1132.
- [29] BOAG B, YEATES G W. Soil nematode biodiversity in terrestrial ecosystems [J]. *Biodiv Conserv*, 1998, 7(5): 617–630.