

藏东南急尖长苞冷杉林林隙土壤线虫群落特征*

薛会英¹ 罗大庆^{2**}

(¹ 西藏大学农牧学院资源与环境学院, 西藏林芝 860000; ² 西藏大学农牧学院高原生态研究所, 西藏林芝 860000)

摘要 为了解西藏东南部急尖长苞冷杉林林隙土壤线虫群落特征,对林隙、非林隙土壤0~30 cm范围内不同深度土层的线虫群落进行调查,并用线虫个体密度、生物多样性指数和营养类群指数等特征值分析了土壤线虫群落的结构及多样性特点.结果表明:采用浅盘法分离得到土壤线虫26801条,隶属于2纲5目40科64属;线虫个体密度平均为3552条·100 g⁻¹干土,表聚性极强.垫咽属、丝垫刃属为林隙土壤线虫优势属;食细菌性线虫为主要营养类群.土壤有机质的分解兼有真菌分解和细菌分解两种途径.线虫的生物多样性及丰富度与林隙面积有关.土壤线虫群落特征表明,林隙具有异于郁闭林分和林间空地的特性,在环境指示方面具有应用潜力.

关键词 土壤动物 高山森林 生物多样性 微生境 西藏

文章编号 1001-9332(2013)09-2494-09 **中图分类号** S154 **文献标识码** A

Characteristics of soil nematode community in *Abies georgei* var. *smithii* forest gaps in south-east Tibet, China. XUE Hui-ying¹, LUO Da-qing² (¹College of Resources and Environment, College of Agriculture and Animal Husbandry, Tibet University, Linzhi 860000, Tibet, China; ²Institute of Plateau Ecology, College of Agriculture and Animal Husbandry, Tibet University, Linzhi 860000, Tibet, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(9): 2494-2502.

Abstract: In order to understand the characteristics of soil nematode community in the *Abies georgei* var. *smithii* forest gaps in southeast Tibet, an investigation was conducted to study the variations of soil nematode community at different depths of 0-30 cm soil layer in the gaps and non-gaps. The nematode individual density, diversity index, and trophic group index were taken to analyze the composition and structural characteristics of the soil nematode community. A total of 26801 soil nematodes belonging to 2 classes, 5 orders, and 64 genera were collected by shallow dish method. The nematode individual density was averagely 3552 ind · 100 g⁻¹ dry soil, and the individuals had a highly surface-gathering characteristics. In the gap soils, the dominant genera were *Tylencholaimus* and *Filenchus*, while the dominant trophic group was bacterivores. The soil organic matter was decomposed by both bacteria and fungi. The ecological index results showed that the nematodes diversity and richness were related to gap size. The characteristics of soil nematode community in the gaps were different from those in closed stand and forest open land, and this difference indicated the potential for using nematodes as the environmental indicator species.

Key words: soil animal; alpine forest; biological diversity; microhabitat; Tibet.

林隙是群落中1株及以上较大的树木衰退、死亡而形成的微生境,其有别于郁闭林分和林间空地.近年来的研究表明,在森林生态系统中,林隙对林下生物多样性^[1-3]、树种更新^[4-6]等方面有着重要的影响,是森林更新与演替的重要驱动因子,已成为现代生态学的研究领域之一.

迄今为止,我国针对林隙的研究主要集中在热带、亚热带次生林和热带雨林林隙特征^[7-9]、林隙更新^[10-11]、小气候^[12]、林下生物物种多样性^[13-16]等方面,但未见有关林隙土壤线虫群落的任何报道.

土壤线虫群落是森林生态系统的重要组成部分,不同生境中的土壤线虫群落由于其特有的环境响应机制而具有不同的特征,因此,不同生境土壤线虫的群落特征不仅可以指示环境变化,还可为深入探讨不同生境间的生态关联提供科学依据.

* 国家自然科学基金项目(31060113)资助.
* * 通讯作者. E-mail: dqluo0894@163.com
2012-12-23 收稿,2013-07-02 接受.

西藏东南部亚高山急尖长苞冷杉林是我国目前受人为干扰相对较少的原始森林之一, 对于研究森林在自然状态下不同生境的生物多样性及其维持与形成机制有着重要的意义. 本研究通过调查藏东南急尖长苞冷杉 (*Abies georgei* var. *smithii*) 林林隙大小与土壤线虫群落结构及多样性间的关系, 比较林隙、非林隙土壤线虫群落的差异, 以期在更加深入地了解该生态系统生物多样性现状和特点的同时, 探讨在高原环境下土壤线虫作为环境变化的指示物种的可行性, 为深入探讨土壤动物在生态系统中的功能和作用提供基础资料.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

试验样地位于西藏林芝地区林芝县境内的色季拉山东坡森林生态系统定位研究站永久固定标准样地 (29°48' N, 94°49' E), 海拔 3800 ~ 3900 m, 地处藏东南林区的腹心地带. 该区域属亚高山寒温性针叶林区, 根据林芝生态站多年观测资料, 该地带年平均气温 3.5 °C, 最暖月 (7 月) 平均气温 11.15 °C, 最冷月 (1 月) 平均气温 -4.1 °C; 年降水量 1095.4 mm, 降水主要集中于 6—9 月; 年平均相对湿度 83%. 土壤类型以山地暗棕壤为主, pH 4 ~ 5, 腐殖质化过程明显.

研究区乔木层以急尖长苞冷杉占绝对优势, 林龄在 200 a 左右, 是保存完好的成过熟冷杉原始林.

在永久固定标准样地内选取 4 个面积大小不同的林隙样地, 在样地内选取 1 个郁闭林分样地, 并在永久固定标准样地旁选取 1 个林间空地样地作为对照. 6 个样地间距均约 20 m. 样地基本情况见表 1. 6 个样地的苔藓盖度分别为: 林隙 1, 53.5%; 林隙 2, 79.3%; 林隙 3, 90.3%; 林隙 4, 95.0%; 郁闭林分, 100.0%; 林间空地, 89.0%.

1.2 样品采集与处理

2012 年 9 月, 在 6 个样地内按照随机原则选取 3 个有代表性的样点, 在每个样点沿土壤剖面用土铲分别采集 A₀₀ (腐殖质层)、0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm 土层原状土样各约 2 kg, 装入聚乙烯袋中贴上标签. 6 个样地共收集土壤样品 72 个.

1.3 土壤线虫的分离与鉴定

采样当天, 每个土壤样品称取 30.0 g, 用浅盘法室温分离 48 h^[17]; 解剖镜下计数、制片. 依据文献^[18-21]利用体视显微镜对线虫分类, 鉴定到属.

线虫各属数量优势度的划分: 个体数占总捕获量 10% 以上者为优势属 (+++); 个体数占总捕获量 1% ~ 10% 为常见属 (++) ; 个体数占总捕获量 1% 以下为稀有属 (+)^[22-23].

功能团划分: 依据食性将线虫分为食细菌类线虫 (bacterivores, Ba)、食真菌类线虫 (fungivores, Fu)、植物寄生类线虫 (plant-parasites, Pp) 和杂食-捕食类线虫 (omnivores-predators, Op)^[24].

土壤含水率采用烘干法 (105 °C) 测定, 将 30 g

表 1 样地面积及植被

Table 1 Area and vegetation of the sample plots

样地 Plot	面积 Area (m ²)	植被盖度 Coverage (%)		主要建群种 Dominant species *	
		草本 Herb	灌木 Shrub	草本植物 Herb	灌木 Shrub
郁闭林分 Closed stand	30×30	100	25.0	贡山鳞毛蕨 <i>Dryopteris silaensis</i>	海绵杜鹃 <i>Rhododendron pingianum</i>
林间空地 Forest open land	>1000	89.0	32.5	杂色钟报春、沙蒿、宽叶兔儿风、贡山鳞毛蕨 <i>Primula alpicola</i> , <i>Artemisia desertorum</i> , <i>Ainsliaea latifolia</i> , <i>D. silaensis</i>	柳叶忍冬、小舌紫菀 <i>Lonicera lanceolata</i> , <i>Aster albescens</i>
林隙 1 Gap 1	230	95.6	36.0	巨伞钟报春、凉山悬钩子、贡山鳞毛蕨、粗根苔草、宽叶兔儿风 <i>Primula florindae</i> , <i>Rubus fockeanus</i> , <i>D. silaensis</i> , <i>Carex pachyrrhiza</i> , <i>A. latifolia</i>	柳叶忍冬、杯萼忍冬、冰川茶藨子、刚毛忍冬 <i>L. lanceolata</i> , <i>L. inconspicua</i> , <i>Ribes glaciale</i> , <i>Lonicera hispida</i>
林隙 2 Gap 2	75	79.3	40.0	宽叶兔儿风、五裂蟹甲草、凉山悬钩子、粗根苔草、多穗蓼 <i>A. latifolia</i> , <i>Paraseneo quinquelobus</i> , <i>R. fockeanus</i> , <i>C. pachyrrhiza</i> , <i>Polygonum polystachyum</i>	杯萼忍冬、柳叶忍冬 <i>L. inconspicua</i> , <i>L. lanceolata</i>
林隙 3 Gap 3	157	90.3	43.8	贡山鳞毛蕨 <i>D. silaensis</i>	杯萼忍冬、西南花楸、峨眉蔷薇、海绵杜鹃、水栒子、柳叶忍冬 <i>L. inconspicua</i> , <i>Sorbus rehderiana</i> , <i>Rosa omeiensis</i> , <i>R. pingianum</i> , <i>Cotoneaster multiflorus</i> , <i>L. lanceolata</i>
林隙 4 Gap 4	350	96.7	22.0	多穗蓼、粗根苔草 <i>P. polystachyum</i> , <i>C. pachyrrhiza</i>	西南花楸、柳叶忍冬 <i>S. rehderiana</i> , <i>L. lanceolata</i>

* 主要建群种是指群落内指盖度>10%的植物种类 Dominant species referred to the plant species of coverage more than 10% within the community.

鲜土分离得到的线虫个体数量转换成每 100 g 干土中含有的线虫个体数量; pH 值用酸度计法, 速效氮用 Zn-硫酸亚铁还原半微量凯氏定氮法; 速效磷用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色分光光度法, 速效钾用乙酸铵浸提原子吸收分光光度法, 有机质用重铬酸钾-硫酸氧化外加热法^[25]。

土壤线虫群落结构分析采用 Shannon 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (J)、Simpson 优势度指数 (λ)、Margalef 丰富度指数 (SR) 和成熟度指数 (maturity index, MI)^[26] 等指标:

$$H' = - \sum_{i=1}^S n_i/N \times \ln(n_i/N)$$

$$J' = H'/\ln S$$

$$\lambda = \sum (n_i/N)^2$$

$$SR = (S-1)/\ln N$$

$$MI = \sum c(i) \times P_i$$

植物寄生线虫指数 (plant parasite index, PPI):

$$PPI = \sum c(i) \times P_i$$

式中: n_i 为第 i 类群的个体数; N 为群落所有类群的个体总数; S 为类群数; $c(i)$ 为非植物寄生性 (植物寄生性) 土壤线虫第 i 类群 colonizer-persister 值^[26]; 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。

线虫通路比值 (nematode channel ratio, NCR)^[27]:

$$NCR = Ba / (Ba + Fu)$$

式中: Ba 和 Fu 分别代表食细菌类线虫和食真菌类

线虫的数量。

数据采用 SPSS 13.0 软件进行单因变量多因素 ANOVA 分析, Tukey 多重检验及平均值计算, 用 Excel 2003 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 样地土壤理化性质

不同样地土壤理化性质指标测定结果的平均值见表 2, 表中林隙、非林隙样地结果为每个样地 3 个重复全部土层的平均值; 林隙土层结果为 4 个林隙样地相同土层的平均值。从表 2 可以看出, 4 个林隙样地间的土壤含水量、有机质及速效氮、钾含量均无明显差异 ($P > 0.05$), 速效磷含量、pH 则出现了一定的分异。林隙、林间空地及郁闭林分间土壤含水量、有机质及速效氮、磷、钾含量均无明显差异, 郁闭林分的 pH 明显低于林间空地和林隙 ($P < 0.05$)。4 个林隙样地的土壤含水量、有机质及速效氮、磷、钾含量均是从表层往下逐渐降低, 枯枝落叶层远高于其他 3 个土层 ($P < 0.01$), 而除枯枝落叶层以外的 3 个土层间无明显差异; pH 值则随土壤深度的加深而增大, 枯枝落叶层和 0 ~ 10 cm 层明显低于 20 ~ 30 cm 层。

从调查结果看, 林隙、郁闭林分及林间空地间由于植被、光照等原因对土壤理化性质造成了一定的分异, 但未达到显著水平, 仅 pH 值变化较为明显。

2.2 急尖长苞冷杉林林隙土壤线虫群落的组成及数量

从 6 个样地共分离获得土壤线虫 26801 条, 平

表 2 样地主要土壤理化性质

Table 2 Major soil physical-chemical properties of sample plots (mean ± SE)

样地 Plot	含水量 Moisture content (%)	速效氮 Available N (mg · kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg · kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g · kg ⁻¹)	pH
I 林隙 1 Gap 1	45.8 ± 16.9a	315.5 ± 283.7a	16.0 ± 24.4a	168.3 ± 218.9a	174.3 ± 233.5a	4.67 ± 0.41a
林隙 2 Gap 2	45.3 ± 12.3a	280.2 ± 265.2a	10.6 ± 15.7ab	93.7 ± 118.9a	103.1 ± 132.6a	5.01 ± 0.38ab
林隙 3 Gap 3	40.6 ± 14.7a	259.9 ± 220.4a	6.8 ± 12.5b	113.8 ± 162.2a	126.6 ± 145.1a	5.31 ± 0.42b
林隙 4 Gap 4	46.5 ± 17.9a	255.2 ± 208.3a	10.1 ± 18.2ab	135.6 ± 167.6a	135.6 ± 152.8a	4.65 ± 0.42a
II A ₀₀	66.6 ± 11.2a	650.7 ± 142.3a	38.6 ± 13.4a	386.7 ± 125.7a	388.6 ± 143.1a	4.64 ± 0.40a
0 ~ 10 cm	41.0 ± 8.0b	188.7 ± 61.3b	2.5 ± 3.2b	64.7 ± 23.7b	62.8 ± 20.1b	4.67 ± 0.44a
10 ~ 20 cm	37.4 ± 3.9b	164.0 ± 56.5b	0.8 ± 0.6b	34.6 ± 12.8b	48.8 ± 12.6b	5.00 ± 0.40ab
20 ~ 30 cm	33.1 ± 3.4b	107.3 ± 46.5b	1.6 ± 3.3b	25.4 ± 17.5b	39.3 ± 8.0b	5.33 ± 0.37b
III 林隙 Gap	44.5 ± 15.0a	277.7 ± 235.4a	10.9 ± 17.6a	127.9 ± 164.6a	134.9 ± 164.3a	4.91 ± 0.48b
郁闭林分 Closed stand	41.3 ± 12.3a	269.0 ± 295.8a	11.6 ± 22.4a	135.7 ± 218.4a	145.6 ± 166.7a	4.45 ± 0.56a
林间空地 Forest open land	42.9 ± 11.6a	249.7 ± 227.8a	6.1 ± 10.2a	82.2 ± 99.9a	101.0 ± 96.1a	4.99 ± 0.47b

I: 林隙样地 Sample plots of gap; II: 林隙土层 Soil layers of gap soil; III: 林隙、非林隙间对比 Composition in gap and non-gap. 同列同组数据后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different letters in the same column indicated significant differences in the same group at 0.05 level by Tukey method. 下同 The same below.

均密度 3552 条 · 100 g⁻¹ 干土, 隶属于 2 纲 5 目 40 科 64 属。垫咽属 (*Tylencholaimus*) 在 6 个样地中均为优势属, 其个体数量占到了线虫总数的 28.5%; 常见属包括丝垫刃属 (*Filenchus*) 等 21 个属, 共占线虫总数的 61.2%; 鹿角唇属 (*Cervidellus*) 等 42 属为稀有属, 共占线虫总数的 12.1% (表 3)。

林隙 1: 共分离获得土壤线虫 5177 条, 平均密度为 4643 条 · 100 g⁻¹ 干土, 分属于 39 属。其中垫咽属、绕线属 (*Plectus*)、真矛线属 (*Eudorylaimus*)、克拉克属 (*Clarkus*)、丝垫刃属是优势属, 分别占该样地线虫总数的 19.1%、10.2%、12.1%、12.1%、10.8%; 滑刃属 (*Aphelenchoides*) 等 15 属为常见属, 共占该样地线虫总数的 27.9%; 膜皮属 (*Diphtherophora*) 等 19 属, 共占该样地线虫总数的 7.9%。

林隙 2: 共分离获得土壤线虫 5001 条, 平均密度为 3693 条 · 100 g⁻¹ 干土, 分属于 40 属。其中, 垫咽属、丝垫刃属、螺旋属 (*Helicotylenchus*) 是优势属, 分别占该样地线虫总数的 22.6%、15.2%、10.0%; 滑刃属等 19 属为常见属, 共占该样地线虫总数的 46.5%; 无咽属 (*Alaimus*) 等 18 属为稀有属, 共占该样地线虫总数的 5.7%。

林隙 3: 共分离获得土壤线虫 6098 条, 平均密度为 4529 条 · 100 g⁻¹ 干土, 分属于 40 属。其中垫咽属、丝垫刃属是优势属, 分别占该样地线虫总数的 20.8%、11.5%; 滑刃属等 20 属为常见属, 共占该样地线虫总数的 60.7%; 膜皮属等 19 属为稀有属, 共占该样地线虫总数的 7.0%。

林隙 4: 共分离获得土壤线虫 4481 条, 平均密度为 4534 条 · 100 g⁻¹ 干土, 分属于 43 属。其中, 垫咽属、丝垫刃属是优势属, 分别占该样地线虫总数的 22.7%、13.0%; 滑刃属等 21 属为常见属, 共占该样地线虫总数的 58.1%; 膜皮属等 20 属为稀有属, 共占该样地线虫总数的 6.2%。

郁闭林分: 共分离获得土壤线虫 3387 条, 平均密度为 2231 条 · 100 g⁻¹ 干土, 分属于 26 属。其中, 垫咽属、绕线属、真矛线属是优势属, 分别占该样地线虫总数的 41.5%、10.8%、14.6%; 垫咽属等 12 属为常见属, 共占该样地线虫总数的 28.0%; 畸头属 (*Teratocephalus*) 等 10 属为稀有属, 共占该样地线虫总数的 5.2%。

林间空地: 共分离获得土壤线虫 2657 条, 平均密度为 1680 条 · 100 g⁻¹ 干土, 分属于 31 属。其中, 垫咽属是优势属, 占该样地线虫总数的 39.8%; 滑刃属等 18 属为常见属, 共占该样地线虫总数的

54.6%; 畸头属等 12 属为稀有属, 共占该样地线虫总数的 5.5%。

根据以上调查结果, 林隙与郁闭林分及林间空地间无论是线虫个体密度还是属数均存在一定的差异。对 6 个样地的土壤线虫密度进行单因变量多因素方差分析, 结果显示, 林隙、郁闭林分、林间空地间土壤线虫密度差异明显 ($P < 0.05$), 主要表现在 A₀₀ 层; 林隙的线虫属数明显高于郁闭林分和林间空地 ($P < 0.01$); 6 个样地 A₀₀ 层的线虫数量均远远高于其他 3 个土层 ($P < 0.01$), 而其他 3 个土层间无明显差异 ($P > 0.05$)。

2.3 急尖长苞冷杉林林隙土壤线虫群落的营养类群结构

从图 1 可以看出, 林隙土壤线虫的营养类群构成一般是食细菌性线虫个体数量大于食真菌性线虫个体数量 (林隙 2 例外), 与郁闭林分和林间空地的情况相反。4 个林隙样地间, 以林隙 4 的食细菌性线虫个体数量最多, 占林隙样地食细菌性线虫总数的 41.5%, 林隙 4 的食真菌性线虫和植食性线虫的个体数量分别占林隙样地食真菌性线虫总数和植食性线虫总数的 36.3% 和 35.1%。总体来说, 林隙土壤的食细菌性线虫数量 > 食真菌性线虫 > 杂食/捕食性线虫 > 植食性线虫。

各样地的各营养类群均具有较强的表聚性 (图 2), 主要分布在 A₀₀ 层和 0 ~ 10 cm 层, 随土壤深度加深, 数量急剧减少, 而植食性线虫在不同样地中均出现了 10 ~ 20 cm 层数量上升的情况, 这可能和植物根系的分布有关, 但总体上依然符合随土壤深度

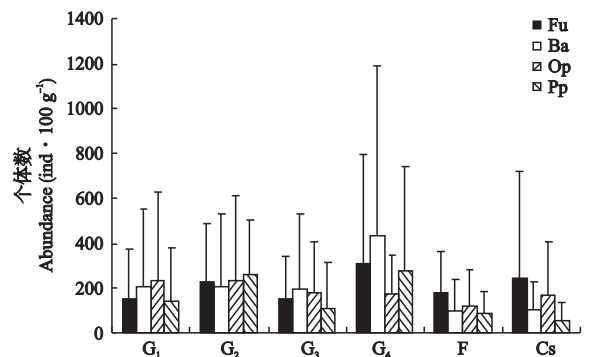


图 1 林隙、非林隙土壤线虫群落的营养类群结构
Fig. 1 Soil nematode trophic group structure in gaps and non-gaps.

Fu: 食真菌类性线虫 Fungivores; Ba: 食细菌类线虫 Bacterivores; Op: 杂食-捕食类线虫 Omnivores-predators; Pp: 植物寄生类线虫 Plant parasites. 下同 The same below. G₁: 林隙 1 Gap 1; G₂: 林隙 2 Gap 2; G₃: 林隙 3 Gap 3; G₄: 林隙 4 Gap 4; F: 林间空地 Forest open land; Cs: 郁闭林分 Closed stand.

表 3 土壤线虫群落组成及数量

Table 3 Soil nematode community composition and quantity

类型 Type	属 Genus	郁闭林分 Closed stand		林间空地 Forest open land		林隙 1 Gap 1		林隙 2 Gap 2		林隙 3 Gap 3		林隙 4 Gap 4	
		Quantity	Dominance	Quantity	Dominance	Quantity	Dominance	Quantity	Dominance	Quantity	Dominance	Quantity	Dominance
Fu	滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	0	-	11	++	33	++	27	++	32	++	15	++
	垫咽属 <i>Tylencholaimus</i>	363	+++	335	+++	168	+++	323	+++	215	+++	297	+++
	膜皮属 <i>Diphtherophora</i>	0	-	-	-	3	+	0	-	2	+	3	+
	长尾线虫属 <i>Seinura</i>	0	-	-	-	0	-	17	++	0	-	15	++
	瘤咽属 <i>Tylencholaimellus</i>	9	++	0	-	0	-	15	++	0	-	0	-
Ba	绕线属 <i>Plectus</i>	95	+++	48	++	90	+++	74	++	77	++	59	++
	畸头属 <i>Teratocephalus</i>	8	+	5	+	21	++	54	++	15	++	14	++
	无咽属 <i>Alaimus</i>	5	+	11	++	14	++	8	+	20	++	35	++
	素矛属 <i>Achromadora</i>	5	+	11	++	11	++	29	++	27	++	47	++
	Metaaterocephallus <i>Metateratocephallus</i>	5	+	12	++	11	++	12	+	44	++	39	++
	杆咽属 <i>Rhabdolaimus</i>	0	-	9	++	30	++	18	++	12	++	116	++
	小杆属 <i>Rhabditis</i>	0	-	3	+	15	++	18	++	6	+	5	+
	巴氏属 <i>Bastiania</i>	3	+	4	+	8	+	11	+	14	++	5	+
	齿咽属 <i>Odontolaimus</i>	2	+	18	++	3	+	9	+	2	+	2	+
	威尔斯属 <i>Wilsonema</i>	23	++	18	++	15	++	35	++	14	++	30	++
	头叶属 <i>Cephalobus</i>	17	++	5	+	2	+	0	-	5	+	0	-
	棱咽属 <i>Prismatolaimus</i>	11	++	2	+	20	++	17	++	59	++	24	++
	隐咽属 <i>Aphanolaimus</i>	0	-	8	+	3	+	0	-	0	-	0	-
	单宫属 <i>Monhystera</i>	0	-	0	-	2	+	0	-	5	+	14	++
	真单宫属 <i>Eumonhystera</i>	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	5	+
	鹿角唇属 <i>Cervidellus</i>	0	-	0	-	0	-	3	+	11	++	41	++
	原杆属 <i>Protorhabditis</i>	0	-	0	-	0	-	2	+	0	-	2	+
	筛咽属 <i>Ethmolaimus</i>	0	-	0	-	0	-	2	+	2	+	0	-
	<i>Pristionchus</i>	0	-	0	-	0	-	0	-	5	+	0	-
	三孔属 <i>Tripyla</i>	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	2	+
	丘陵属 <i>Bunonema</i>	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	9	+
Op	<i>Paractinolaimus</i>	2	+	21	++	5	+	24	++	65	++	3	+
	矛线属 <i>Dorylaimus</i>	0	-	5	+	3	+	2	+	8	+	5	+
	中矛线属 <i>Mesodorylaimus</i>	128	+++	2	+	0	-	0	-	0	-	0	-
	真矛线属 <i>Eudorylaimus</i>	11	++	57	++	107	+++	125	++	75	++	89	++
	穿咽属 <i>Nygolaimus</i>	32	++	23	++	2	+	23	++	2	+	21	++
	克拉克属 <i>Clarkus</i>	0	-	60	++	107	+++	69	++	50	++	57	++
	孔咽属 <i>Aporcelaimus</i>	45	++	0	-	0	-	2	+	5	+	6	+

续表 3

Table 3 Continued

类型 Type	属 Genus	郁闭林分 Closed stand		林间空地 Forest open land		林隙 1 Gap 1		林隙 2 Gap 2		林隙 3 Gap 3		林隙 4 Gap 4	
		Quantity	Dominance	Quantity	Dominance	Quantity	Dominance	Quantity	Dominance	Quantity	Dominance	Quantity	Dominance
	小孔咽属 <i>Aporcelaimellus</i>	6	+	11	++	8	+	33	++	27	++	26	++
	异矛线属 <i>Alldorylaimus</i>	0	-	0	-	2	+	36	++	39	++	0	-
	厚唇属 <i>Labrolaimus</i>	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	3	+
	拟矛线属 <i>Dorylaimoides</i>	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	17	++
	大矛属 <i>Enchodelun</i>	0	-	0	-	2	+	0	-	0	-	0	-
	缢咽属 <i>Axonchium</i>	8	+	0	-	6	+	11	+	3	+	2	+
	锯齿属 <i>Prionchulus</i>	14	++	74	++	11	++	0	-	5	+	2	+
	锉齿属 <i>Mylonchulidae</i>	0	-	27	++	9	++	2	+	5	+	14	++
	等齿属 <i>Miconchus</i>	0	-	0	-	6	+	0	-	0	-	2	+
	单齿属 <i>Mononchus</i>	0	-	0	-	0	-	0	-	3	+	0	-
Pp	短体长针属 <i>Longidorella</i>	18	++	9	++	2	+	5	+	11	++	11	+
	剑垫刃属 <i>Malenchus</i>	18	++	27	++	18	++	18	++	15	++	35	++
	毛刺属 <i>Tichodorus</i>	0	-	15	++	0	-	6	+	14	++	0	-
	丝垫刃属 <i>Filenchus</i>	33	++	5	+	95	+++	216	+++	119	+++	170	+++
	小环线虫属 <i>Criconemella</i>	5	+	3	+	0	-	2	+	0	-	0	-
	米卡垫刃属 <i>Miculenchus</i>	0	-	5	+	0	-	0	-	0	-	0	-
	螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	0	-	2	+	8	+	143	+++	6	+	0	-
	具脊垫刃属 <i>Coslenchus</i>	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-
	胞囊属 <i>Heterodera</i>	17	++	0	-	2	+	20	++	6	+	38	++
	垫刃属 <i>Tylenchus</i>	0	-	0	-	9	++	15	++	11	++	21	++
	头垫刃属 <i>Cephalenchus</i>	0	-	0	-	20	++	0	-	0	-	11	+
	短体属 <i>Pratylenchus</i>	0	-	0	-	2	+	0	-	0	-	0	-
	类突腔唇属 <i>Ecpthyadophoroides</i>	0	-	0	-	12	++	0	-	0	-	0	-
	针属 <i>Paratylenchus</i>	0	-	0	-	0	-	2	+	0	-	0	-
	长针属 <i>Longidorus</i>	0	-	0	-	0	-	3	+	0	-	0	-
	剑属 <i>Xiphinema</i>	0	-	0	-	5	+	0	-	0	-	0	-
	环线虫属 <i>Criconema</i>	0	-	0	-	0	-	2	+	0	-	6	+
	轮属 <i>Criconemoides</i>	0	-	0	-	0	-	3	+	6	+	0	-
	盘小环线虫属 <i>Discocriconemella</i>	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	2	+
	半轮属 <i>Hemicriconemoides</i>	0	-	0	-	0	-	0	-	2	+	0	-
	垫刃科 1 属 A genus of Tylenchidae	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	2	+
	合计 Total	883		846		890		1436		1044		1322	

Fu: 食真菌类性线虫 Fungivores; Ba: 食细菌类线虫 Bacterivores; Op: 杂食-捕食类线虫 Omnivores-predators; Pp: 植物寄生类线虫 Plant parasites.

+++; 优势属 Dominant genus; ++; 常见属 Common genus; +; 稀有属 Rare genus; -; 未出现 No observed.

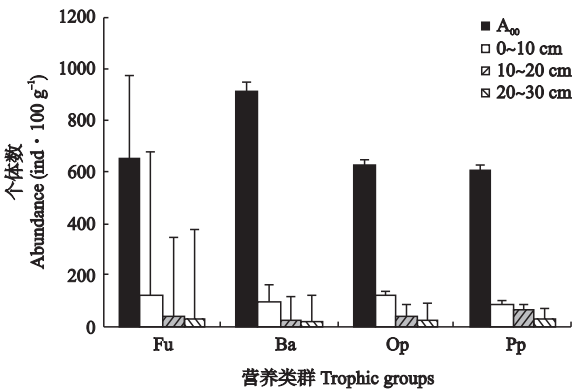


图2 林隙土壤线虫各营养类群在土壤中的垂直分布
Fig.2 Vertical distribution of soil nematode trophic group in gaps.

加深数量减少的规律。

对各样地不同营养类群个体数量进行方差分析,结果显示,4个林隙样地间的各营养类群个体数量虽有一定的差异,但未达到明显的水平;林隙样地与林间空地及郁闭林分间也未达到明显差异水平;各营养类群在A₀₀层的数量均明显高于其他3个土层($P < 0.01$),除A₀₀层外的3个土层间差异不显著。

2.4 急尖长苞冷杉林林隙土壤线虫群落的生态指数

用Shannon多样性指数(H')、Pielou均匀度指数(J)、Simpson优势度指数(λ)、Margalef丰富度指数(SR)、成熟度指数(MI)、植物寄生线虫指数

(PPI),以及NCR来说明急尖长苞冷杉林林隙土壤线虫群落的多样性特征。

从表4可以看出,4个林隙样地间各生态指数有一定的差异, H' 、 SR 指数的变化趋势为:林隙1 < 林隙3 < 林隙4 < 林隙2; J 值则是林隙1 < 林隙2 < 林隙4 < 林隙3; λ 值在林隙1最高,林隙2最低。上述4个生态指数值均未达到显著差异水平。林隙4的NCR平均值大于5,其他3个林隙样地都小于5。 MI 值以林隙2最高,林隙3次之,林隙1最低; PPI 值为林隙2最高、林隙1最低,但4个样地间未表现出明显的差异。

H' 、 SR 指数值均随土壤深度的加深而显著降低($P < 0.05$); J 、 λ 、 MI 、 PPI 等4个生态指数在土层间的变化不明显。

与林隙、非林隙间相比,除了 PPI 在林间空地和林隙、郁闭林分间存在显著差异外,其他指数均未在3个样地间表现出明显的差异。

2.5 样地间土壤线虫群落的相似性分析

采用Jaccard指数比较急尖长苞冷杉林林隙、非林隙土壤线虫群落的相似性,结果见表5。从中可以看出,4个林隙样地间的相似性较好;郁闭林地与林隙的相似性较差;林间空地与林隙1、2、3的相似性较好,而与林隙4的相似性较差。

表4 土壤线虫群落结构特征指数

Table 4 Characteristic indices of soil nematode community structure

样地 Plot	H'	J	λ	SR	MI	PPI	NCR
I 林隙1 Gap 1	1.54±0.92a	0.67±0.29a	0.28±0.31a	1.56±1.08a	2.94±1.26a	1.74±1.16b	0.39±0.28a
林隙2 Gap 2	2.14±0.35a	0.77±0.06a	0.17±0.09a	2.47±0.56a	3.59±0.24a	2.65±0.40a	0.40±0.15a
林隙3 Gap 3	1.88±0.63a	0.82±0.06a	0.19±0.11a	1.99±1.05a	3.50±0.58a	1.97±1.25a	0.38±0.22a
林隙4 Gap 4	2.11±0.45a	0.81±0.11a	0.19±0.11a	2.31±0.82a	3.48±1.55a	2.24±1.01a	0.52±0.17a
II A ₀₀	2.49±0.25a	0.78±0.05a	0.13±0.04a	2.95±0.32a	3.35±0.21a	2.20±0.30a	0.56±0.14a
0~10 cm	2.01±0.42ab	0.76±0.08a	0.22±0.12a	2.32±0.88ab	3.54±0.23a	2.71±0.42a	0.42±0.17a
10~20 cm	1.70±0.74b	0.73±0.03a	0.29±0.30a	1.68±0.83bc	3.73±0.31a	2.03±1.27a	0.30±0.20a
20~30 cm	1.48±0.62b	0.79±0.11a	0.21±0.12a	1.38±0.76c	2.88±1.39a	1.65±1.44a	0.40±0.25a
III 林隙 Gap	1.92±0.64a	0.77±0.16a	0.21±0.18a	2.08±0.93a	3.37±0.76a	2.15±1.02a	0.42±0.21a
郁闭林分 Closed stand	1.69±0.73a	0.71±0.31a	0.31±0.29a	1.64±0.74a	3.59±0.49a	2.25±0.99a	0.48±0.30a
林间空地 Forest open land	1.70±0.55a	0.77±0.15a	0.28±0.17a	1.70±0.75a	3.75±0.53a	3.45±1.09b	0.31±0.26a

表5 林隙、非林隙土壤线虫群落 Jaccard 相似性分析

Table 5 Similarity analysis of soil nematode community by Jaccard in gaps and non-gaps

	林隙1 Gap 1	林隙2 Gap 2	林隙3 Gap 3	林隙4 Gap 4	郁闭林分 Closed stand	林间空地 Forest lawn
林隙1 Gap1	1					
林隙2 Gap2	0.549					
林隙3 Gap3	0.646	0.667	1			
林隙4 Gap3	0.577	0.566	0.596	1		
郁闭林分 Closed stand	0.477	0.467	0.500	0.438	1	
林间空地 Forest lawn	0.628	0.578	0.614	0.480	0.500	1

3 讨 论

色季拉山急尖长苞冷杉林林隙土壤线虫个体密度为 40 ~ 22567 条 · 100 g⁻¹ 干土, 最大值出现在 A₀₀ 层, 表聚性同前人的研究结果一致^[28]. 林隙线虫个体密度高于郁闭林分, 也高于林间空地, 并且林隙的线虫属数明显高于郁闭林分和林间空地, 由此表现出林隙分异于郁闭林分及林间空地, 具有一定的特殊性, 而林隙与非林隙间的土壤理化性质并没有表现出明显的差异.

4 个林隙样地的各营养类群构成并不一致, 可能和地表植被、林隙面积、形成时间等有关. 但总的来说, 食细菌性线虫所占比例较高, 显示出林隙与郁闭林分的分异: 郁闭林分土壤线虫中食真菌性线虫所占比例较大, 土壤有机质的分解以真菌分解途径为主; 而林隙兼有真菌分解和细菌分解两种途径. NCR 的结果也说明了这一点. 林间空地的土壤线虫营养群落结构更接近于郁闭林分, 调查前预测的林间空地的土壤线虫营养结构会更接近于面积最大的林隙 4, 其食细菌性线虫和植食性线虫比例会较大, 但调查结果是林间空地线虫营养结构更接近于郁闭林分, 原因有待于进一步调查确证.

面积最小的林隙 2, 其 H' 、SR 指数值最大, 其次是面积最大的林隙 4, 而面积介于林隙 2、4 之间的两块样地的值则较小. J 值、 λ 值有相反的趋势, 林隙 1 是个例外. 罗大庆等^[11]在对色季拉山急尖长苞冷杉原始林林隙更新研究中发现, 林隙大小在 100 m² 左右, 最适合于更新幼苗生存; 超过 100 m², 更新幼苗则随着林隙面积的增大而减少; 林隙大小在 300 m² 左右, 最适合冷杉幼树和小径木的生存. 李兵兵等^[4]在对燕山山地油松人工林林隙的研究中也提到, 林隙面积为 60 ~ 80 m², 草本多样性最大. 这些研究结果与本研究的生态指数结果出现了一致性. 林隙 2 的面积约 75 m², 线虫的生物多样性及丰富度均最大, 林隙 1、3 的面积在 100 ~ 300 m² 之间, 多样性和丰富度均出现了有规律的下降, 林隙 4 的面积为 350 m², 多样性和丰富度增加. 一定面积的林隙可以提供适宜的光照和荫蔽条件, 并保持林隙内一定的空气湿度, 由此决定了地表草本、灌木的生长种类和长势情况, 而地表植被与土壤线虫关系密切. MI、PPI 值均以林隙 2 最高, 林隙 1 最低, 与上述生态指数结果一致.

林间空地的 PPI 值和林隙、郁闭林分间存在显著差异, 林隙和郁闭林分间差异不显著. 其他指数均

未在 3 个样地间表现显出明显的差异.

Jaccard 指数的群落间相似性分析结果较清晰地表明了 4 个林隙样地间有较大的相似性, 而林隙与郁闭林分、林间空地间则有不同程度的分异.

调查结果表明, 林隙具有异于郁闭林分和林间空地的性质独特性. 用常规的土壤理化性质指标、地表植被等因素来反映林隙形成后的特性有一定的局限性, 而土壤线虫群落能较敏感地指示出环境的变化, 在环境指示方面具有不可忽视的应用潜力.

参考文献

- [1] Tian J (田 军), Sun H-J (孙海静), Yu S-F (于树峰), et al. Effects of different measures on the species diversity of the undergrowth vegetations of *Larix principis-rupprechtii* Mayr. plantation. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research* (河北林业研究), 2012, **27** (3): 260-264 (in Chinese)
- [2] Zang R-G (臧润国), Liu J-Y (刘静艳), Dong D-F (董大芳). Gap Dynamics and Forest Biodiversity. Beijing: China Forestry Press, 1999 (in Chinese)
- [3] Wang J-H (王家华), Li J-D (李建东). Advances in study on forest gaps. *World Forestry Research* (世界林业研究), 2006, **19**(1): 27-30 (in Chinese)
- [4] Li B-B (李兵兵), Qin Y (秦 琰), Liu Y-X (刘亚茜), et al. Effects of gap size on regeneration of *Pinus tabulaeformis* plantation in the Yanshan Mountain. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2012, **48**(6): 147-151 (in Chinese)
- [5] Runkle JR. Gap regeneration in some old-growth forests of the eastern United States. *Ecology*, 1981, **62**: 1041-1051
- [6] Wright SJ, Muller-Landau HC, Condit R, et al. Gap-dependent recruitment, realized vital rates, and size distributions of tropical trees. *Ecology*, 2003, **84**: 3174-3185
- [7] Zhang C-Y (张春雨), Zhao X-H (赵秀海), Zheng J-M (郑景明). Size structure of canopy gaps in broadleaved Korean pine forests in the Changbai Mountains. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2006, **28**(4): 34-38 (in Chinese)
- [8] Han L (韩 路), Wang H-Z (王海珍), Chen J-L (陈加利), et al. Disturbance regimes and gaps characteristics of the desert riparian forest at the middle reaches of Tarim River. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(16): 4699-4708 (in Chinese)
- [9] Li M (李 猛), Duan W-B (段文标), Chen L-X (陈立新), et al. Geostatistical analysis on spatiotemporal distribution pattern of soil water content of forest gap in *Pinus koraiensis* dominated broadleaved mixed forest. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32** (5): 1396-1402 (in Chinese)
- [10] Zang R-G (臧润国), Yu S-X (余世孝), Liu J-Y (刘静艳), et al. The gap phase regeneration in a tropical montane rain forest in Bawangling, Hainan Island. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1999, **19**(2): 151-158 (in Chinese)
- [11] Luo D-Q (罗大庆), Guo Q-S (郭泉水), Xue H-Y

- (薛会英), *et al.* A research of gap regeneration of virgin fir forest in Mount Sejila in Tibet. *Forest Research* (林业科学研究), 2002, **15**(5): 564–569 (in Chinese)
- [12] Feng J (冯 静), Duan W-B (段文标), Chen L-X (陈立新). Effects of forest gap size and within-gap position on the microclimate in *Pinus koraiensis*-dominated broadleaved mixed forest. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(7): 1758–1766 (in Chinese)
- [13] Xia L (夏 磊), Zhang J (张 健), Yang W-Q (杨万勤), *et al.* Diversity of soil animal community in microhabitats of alpine coniferous forest at early stage of growing season. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2012, **18**(2): 303–308 (in Chinese)
- [14] Bianba D-J (边巴多吉), Guo Q-S (郭泉水), Ci B (次 柏), *et al.* Effects of gap in primitive subalpine fir forest on diversity of herb and shrub in Tibet. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(2): 191–194 (in Chinese)
- [15] Wang Z-P (王周平), Li X-G (李旭光), Shi S-Y (石胜友), *et al.* A comparison study on the species diversity between the gap and non-gap in Jinyun Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(1): 7–10 (in Chinese)
- [16] Xue H-Y (薛会英), Luo D-Q (罗大庆), Yu B-Z (于宝政). Community characteristics of soil nematode in *Abies georgei* var. *smithii* forest in Sejila Mountain of Tibet, Southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(12): 3402–3408 (in Chinese)
- [17] Mao X-F (毛小芳), Li H-X (李辉信), Chen X-Y (陈小云), *et al.* Extraction efficiency of soil nematodes by different methods. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2004, **23**(3): 149–151 (in Chinese)
- [18] Bongers T. Nematodes of Netherland. Utrecht: Pirola Schoorl, 1988
- [19] Yin W-Y (尹文英). Pictorial Keys to Soil Animals of China. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
- [20] Xie H (谢 辉). Taxonomy of Plant Nematodes. 2nd Ed. Beijing: Higher Education Press, 2005 (in Chinese)
- [21] Jairajpuri MS, Ahmad W. Dorylaimida: Free-living, Predaceous and Plant-parasitic Nematodes. New Delhi: Pauls Press, 1992
- [22] 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. *Chinese Biodiversity* (生物多样性), 2001, **9**(3): 237–240 (in Chinese)
- [23] Wu D-H (吴东辉), Yin W-Y (尹文英), Yan R-Q (阎日青). Effects of vegetation recovery practices on the characteristics of soil nematode communities on seriously degraded grasslands in Songnen Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(12): 2783–2790 (in Chinese)
- [24] Yeates GW, Bongers T, de Goede RGM, *et al.* Feeding habits in soil nematode families and genera: An outline for soil ecologists. *Journal of Nematology*, 1993, **25**: 315–331
- [25] Liu G-S (刘光崧). Soil Physics and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles. Beijing: China Standards Press (in Chinese)
- [26] Bongers T. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 1990, **83**: 14–19
- [27] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes. *Applied Soil Ecology*, 1998, **10**: 239–251
- [28] Li H-X (李辉信), Liu M-Q (刘满强), Hu F (胡锋), *et al.* Nematode abundance under different vegetations restored on degraded red soil. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(11): 1882–1889 (in Chinese)

作者简介 薛会英,女,1970年生,副教授,博士研究生。主要从事土壤生态学研究。E-mail: 472425717@qq.com

责任编辑 肖 红
