

土壤线虫对深圳梧桐山毛棉杜鹃林生长的影响*

叶嘉齐¹ 肖以华² 佟富春³

(1. 广东省岭南综合勘察设计院, 广东广州 510599; 2. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东广州 510520;
3. 华南农业大学, 广东广州 510642)

摘要 文章通过线虫群落结构和生态指数分析方法, 研究了深圳梧桐山土壤线虫种类组成和群落结构对毛棉杜鹃 *Rhododendron moulmainense* 生长的影响。结果显示: (1) 从梧桐山土壤中分离出线虫 5 213 头, 隶属于 30 科 56 属, 线虫群落结构对梧桐山毛棉杜鹃生长有重要影响; (2) 辛普森优势度、密度—类群指数、香农多样性指数和均匀度指数 4 项指标均表明毛棉杜鹃生长状况与土壤线虫多样性显著相关; (3) 瓦斯勒斯卡指数和线虫通路指数均表明毛棉杜鹃生长与土壤环境以及分解主导者相关不显著; (4) 土壤生态系统成熟度是影响毛棉杜鹃生长的一个重要指标。研究表明, 当食微线虫与植食性、捕食性线虫之和的比例控制在合理范围时, 毛棉杜鹃生长良好, 而当植食性和捕食性线虫占据主导时, 毛棉杜鹃生长不良。

关键词 毛棉杜鹃; 土壤线虫; 群落结构; 线虫生态指数

中图分类号: Q946-33 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2021) 04-0082-09

Effects of Soil Nematodes to *Rhododendron moulmainense*'s Growth in Wutong Mountain, Shenzhen

YE Jiaqi¹ XIAO Yihua² TONG Fuchun³

(1. Lingnan Intergrated Exploration and Design Institute of Guangdong, Guangzhou, Guangdong 510599, China; 2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 3. South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract The effects of soil nematode species and the community structure on the growth of *Rhododendron moulmainense* in Wutong Mountain, Shenzhen were studied by means of nematode community structure and ecological index analysis. The results showed that: (1) There were 30 families 56 genus and 5 213 nematodes, the community composition was very important for the growth of *R. moulmainense*; (2) Simpson dominance index, density group index, Shannon-Wiener and Pielou evenness index all showed the significant correlation between the growth and the diversity of soil nematode; (3) Wasilewska index and Nematode pathway index showed no correlation among the growth, the soil environment and the decompose dominant; (4) The maturity of the soil ecosystem is an important index for the growth of *R. moulmainense*. Clearly, resonable proportion between microbivorous nematode and herbivores-predatory nematodes could lead better growth for *R. moulmainense*. Oppositly, the dominance of herbivores-predatory nematodes would make the growth worse.

Key words *Rhododendron moulmainense*; soil nematodes; community structure; ecological index of nematode

* 第一作者: 叶嘉齐 (1993—), 男, 助理工程师, 主要从事林业调查规划相关工作, E-mail: 934122085@qq.com。

通信作者: 佟富春 (1973—), 女, 副教授, 主要从事野生动物研究工作, E-mail: fuchuntong@scau.edu.cn。

毛棉杜鹃 *Rhododendron moulmainense*, 属杜鹃花科 Ericaceae 杜鹃属被子植物, 外形为灌木或小乔木, 伞状花序, 花冠浅紫色、粉红色或红白。花期 4~6 月, 果期 7~12 月, 是我国常见的杜鹃属园林观赏植物^[1]。线虫是线形动物的总称, 常存在于土壤生态系统中, 充当分离分解的角色, 能矿化土壤中的营养物质, 转化微生物养分、维持地下土壤生态平衡, 促进植物生长^[2]。同时, 植食性寄生线虫对植物根系的生长也会带来不良影响, 甚至诱发植物病害导致植物减产。这与土壤线虫活动及其代谢循环效应有密不可分的关系, 也跟植物寄生线虫分泌以及排泄引起植物生理生化反应有关^[3]。

土壤线虫是土壤生态系统的重要组成部分, 对土壤生态系统平衡和功能发挥至关重要^[4]。本研究从土壤生物角度入手, 研究线虫活动对植株生长的影响, 能为立地条件改良提供科学有效的生物方法, 为土壤生态系统和线虫群落研究等领域提供详实的数据参考, 对林业生产和种质培育具有积极意义。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

深圳梧桐山国家森林公园位于 113°17'E~114°18'E, 22°23'N~22°43'N, 为丘陵地带, 东北部高、西南部低, 地质结构主要由花岗岩、砂岩和一些变质岩组成, 泥土由砂壤土和中壤土组成^[5]。梧桐山是亚热带季风气候, 年平均气温为 22.5℃, 年平均降水量为 1 966.5 mm^[6]。

梧桐山是南亚热带典型的常绿阔叶林, 生物多样性丰富, 共有野生动物 24 目 64 科 196 种, 高等植物 232 科 762 属 1 378 种。乔木层包括黎蒴 *Castanopsis fissa*、浙江润楠 *Machilus chekiangensis*、枫香 *Liquidambar formosana* 等, 下木层主要是毛棉杜鹃、银柴 *Aporosa dioica* 和九节 *Psychotria rubra* 等^[7], 植物种类丰富, 景观价值较高。

在深圳梧桐山毛棉杜鹃林分更新的研究中, 通过设置标准地和幼苗样方进行乔木层和更新层样方调查, 发现 6 块样方地中仅有 2 块出现幼苗, 表明其天然更新能力较差^[8]。

1.2 研究方法

梧桐山土壤线虫调查取样时间为 2018 年 11 月 23 日—28 日, 根据毛棉杜鹃植株死亡率的差

异, 选择 4 种不同生长类型的毛棉杜鹃林, 即好 (死亡率 ≤ 25%)、中 (50% ≤ 死亡率 < 25%)、差 (100% < 死亡率 < 50%)、极差 (死亡率 = 100%) 4 种样地, 对应 A、B、C、D 样地, 样地面积 10 m × 10 m。

获取土样品的时候选择环刀 ($d=5$ cm), 任意选取采样点, 分别在凋落物层、0~10 cm 层、10~20 cm 3 个层次的土壤中取样, 重复 3 次。每一个样本约 250 g, 放入标记袋后快速送回实验室。每份样品取 100 g, 用贝尔曼漏斗法^[9]分离, 选择倒置显微镜对线虫分类, 并鉴定其属。按照土壤水分, 将土壤线虫数量换算成每 100 g 干土的土壤线虫数量。

按照线虫的食性或消化道种类将其分为以下 4 个营养组: 食细菌组 (BF)、食真菌组 (FF)、植食性组 (PF)、捕食性组 (PP)。优势地位在各个群体数量中分为: 个体数量占总捕获量十分之一以上的是优势属 (+++), 占总捕获量百分之一到十分之一的是普通属 (++) , 占总捕获量不到百分之一的是稀有属 (+)^[10]。

1.3 数据处理

1.3.1 土壤线虫群落优势度 ①样地线虫属比例: $GP=D_i/S_i$, 即 4 个样地各属线虫占样地线虫总数的比例。②样地线虫营养类群比例: $NP=N_i/S_i$, 即 4 种样地中各营养类群占样地线虫总数的比例。

1.3.2 土壤线虫生态学指数 ①辛普森优势度指数 (Simpson dominance index): $C=\sum P_i^2$, 是用来表达群落组成状况的指标, C 值越大, 则表示群落个体越集中, 相反则表示越分散^[11]。

②密度—类群指数 (Density-group index): $DG=(g/G)\sum D_iC_i/D_{i,max}C$, 值越大则表明土壤生物多样性越大。

③香农多样性指数 (Shannon-Wiener): $H'=-\sum P_i \ln P_i$, H' 越大时, 群落多样性越大。

④ Pielou 均匀度指数 (Pielou evenness index): $J=H'/H'_{max}$, 其中 $H'_{max}=\ln S$, 表示香农多样性指数在保持数目不发生更改的情况下所能达到的最高值。

⑤瓦斯勒斯卡指数 (Wasilewska index): $WI=(BF+FF)/PF$, 在 WI 大于 1 的情况下, 其值越高, 土壤就越健康; 在 WI 的值为 1 时, 土壤健康水平为普通; 在 WI 小于 1 的情况下, 其值越小,

土壤健康水平越差。

⑥线虫通路指数 (Nematode channel ratio): $NCR=BF/(BF+FF)$, 当其值为 0 时表示分解过程完全由真菌控制, 当其值为 1 是则表示分解过程完全由细菌控制^[12]。

⑦自由生活线虫成熟度指数 (Maturity index): $MI=\sum cpi \cdot pi$, c-p 值指的是线虫生活对策指标, 数值上分为 1-5, c-p1 类线虫比较能够忍受干扰, 生活史极短, 卵量巨大; c-p2 也叫机会主义者, 生活史较短, 卵量大, 较耐污染和环境压力; c-p3 生活史较长, 对环境压力较敏感; c-p4 生活史长, 对环境压力敏感; c-p5 则为典型的对策者, 生活史很长, 卵量小, 对污染和环境压力极为敏感。较大的 MI 值表示土壤生态系统拥有较大的成熟程度, 而较低的 MI 值为生态系统破坏和退化的征兆。

⑧植食性线虫成熟度指数 (Plant-parasites maturity index): $PPI=\sum cpi \cdot pi$, 较高的数值表示遭遇干扰, MI/PPI 数值会随着干扰加剧而增大^[13]。

ANOVA 分析和线性相关性分析采用 SPSS 13.0 软件进行。当 P 小于 0.05 时, ANOVA 分析认为差异显著, 当 $P < 0.01$ 时, ANOVA 分析认为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 土壤线虫群落分析

4 种样地共分离鉴定出土壤线虫 5 213 头, 分属 30 科 56 属, 包括食细菌线虫 18 属, 食真菌线虫 8 属, 植食性线虫 14 属, 捕食性线虫 16

属。优势属为盆咽属 *Panagrolaimus*, 占总捕获量 12.90%; 常见属包括绕线属 *Plectus*、丽突属 *Acrobeles* 和头叶属 *Cephalobus* 等 27 属, 占捕获个体总数 77.96%; 稀有属包括拟丽突属 *Acrobeloide*、板唇属 *Chilopacus* 和双胃属 *Diplogaster* 等 28 属, 占捕获个体总数 9.14%。

在生长情况为“好”的样地 (记为 A) 中, 共有 44 属 1 699 头, 包括食细菌线虫 18 属、食真菌线虫 7 属、植食性线虫 7 属和捕食性线虫 12 属。食细菌线虫比例最高, 植食性线虫的体量与捕食性线虫相当, 食微线虫 (包括食细菌线虫和食真菌线虫) 比例高出植食性和捕食性线虫总数 14.66% (图 1、表 1)。

生长情况为“中”的样地 (记为 B) 中, 共有 31 属 1 430 头线虫, 食细菌线虫 11 属、食真菌线虫 5 属、植食性线虫 5 属、捕食性线虫 10 属。食细菌线虫比例最大, 相较样地 A, 生长情况中等的样地 B 植食性线虫比例更低, 捕食性线虫比例更高, 食微线虫比例较植食性和捕食性线虫比例之和高出 20.42% (表 2 和图 1)。

生长情况为“差”的样地 (记为 C) 中, 共有 22 属 702 头线虫, 食细菌线虫 8 属、食真菌线虫 2 属、植食性线虫 2 属、捕食性线虫 8 属。优势属的柄端球属 *Paurodontus* 和前矛线属 *Prodorolaimus* 分别属于植食性和捕食性线虫, 此两类线虫占比最大。食微线虫仅占 22.5%, 比植食性和捕食性线虫比例之和低 55% (表 3 和图 1)。

生长情况为“极差”的样地 (记为 D), 毛棉杜鹃植株已经死亡。检测出土壤线虫共计 33 属

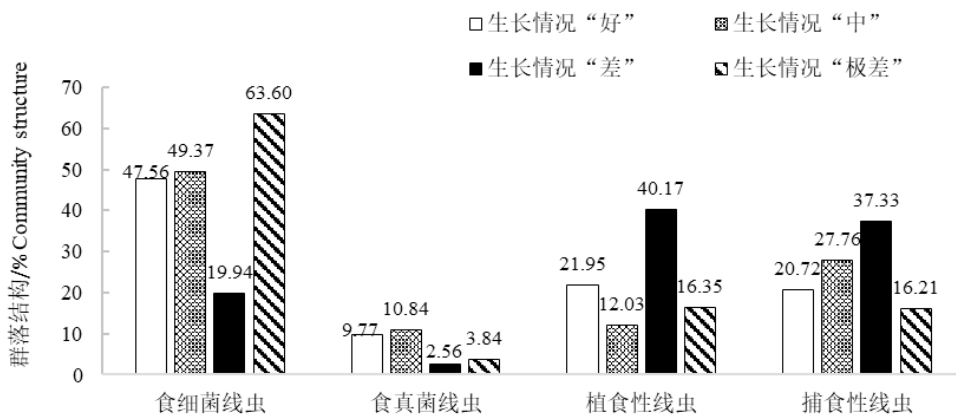


图 1 各样地土壤线虫营养类型统计

Figure 1 Statistics of soil nematode's nutrition types in the plots

表 1 样地 A 土壤线虫优势度
Table 1 Soil nematode's dominance of plot A

营养类型 Nutrition type	属 Genus	相对多度 /% Relative abundance	优势度 Dominance	营养类型 Nutrition type	属 Genus	相对多度 /% Relative bundance	优势度 Dominance
BF	绕线属 <i>Plectus</i>	1.82	++	FF	独壁齿属 <i>Campydora</i>	0.12	+
BF	盆咽属 <i>Panagrolaimus</i>	10.36	+++	FF	细齿属 <i>Leptonchus</i>	0.18	+
BF	丽突属 <i>Acrobeles</i>	5.53	++	FF	瘤咽属 <i>Tylencholaimellus</i>	1.06	++
BF	拟丽突属 <i>Acrobeloides</i>	2.06	++	PP	垫刃属 <i>Tylenchus</i>	11.07	+++
BF	板唇属 <i>Chilopacus</i>	0.41	+	PP	短体属 <i>Pratylenchus</i>	0.47	+
BF	头叶属 <i>Cephalobus</i>	0.59	+	PP	伪垫刃属 <i>Nothotylenchus</i>	6.53	++
BF	真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	0.41	+	PP	散香属 <i>Beleodorus</i>	1.59	++
BF	鹿角唇属 <i>Cervidellus</i>	2.30	++	PP	高杯侧属 <i>Amphidelus</i>	0.12	+
BF	小杆属 <i>Rhabditis</i>	4.83	++	PP	拟毛刺属 <i>Paratrichodorus</i>	0.12	+
BF	中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	5.47	++	PP	鞘属 <i>Hemicycliophora</i>	2.06	++
BF	棱咽属 <i>Prismatolaimus</i>	2.35	++	PF	伊龙属 <i>Ironus</i>	0.65	+
BF	双胃属 <i>Diplogaster</i>	1.65	++	PF	三孔属 <i>Tripyla</i>	0.18	+
BF	伪双胃属 <i>Pseudodiplogasteroides</i>	1.12	++	PF	矛线属 <i>Dorylaimus</i>	0.94	+
BF	原杆属 <i>Protorhabditis</i>	1.35	++	PF	基齿属 <i>Iotonchus</i>	1.24	++
BF	畸头叶属 <i>Teratocephalus</i>	0.18	+	PF	真矛线属 <i>Eudorylaimus</i>	1.65	++
BF	无咽属 <i>Alaimus</i>	4.06	++	PF	前矛线属 <i>Prodorylaimus</i>	6.59	++
BF	异双胃属 <i>Displogasteriana</i>	0.41	+	PF	中矛线属 <i>Mesodorylaimus</i>	0.65	+
BF	张伯赛线虫属 <i>Chambersiella</i>	2.65	++	PF	膜皮属 <i>Diphtherophoridae</i>	0.29	+
FF	滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	2.06	++	PF	锉齿属 <i>Mylonchulus</i>	0.12	+
FF	真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>	3.18	++	PF	拟桑尼属 <i>Thorneella</i>	1.12	++
FF	茎属 <i>Ditylenchus</i>	2.00	++	PF	拱唇属 <i>Labronema</i>	0.29	+
FF	短矛属 <i>Oriverutus</i>	1.17	++	PF	色矛属 <i>Chromadorita</i>	7.00	++

注：BF：食细菌组、FF：食真菌组、PF：植食性组、PP：捕食性组。+++：优势属、++：普通属、+：稀有属。

Note: BF: bacterial-feeding nematode, FF: fungal-feeding nematodes, PF: plant-feeding nematode, PP: predacious parasites.
+++: donimant genus、++: common genus、+: rare genus.

表 2 样地 B 土壤线虫优势度
Table 2 Soil nematode's dominance of plot B

营养类型 Nutrition type	属 Genus	相对多度 /% Relative abundance	优势度 Dominance	营养类型 Nutrition type	属 Genus	相对多度 /% Relative abundance	优势度 Dominance
BF	绕线属 <i>Plectus</i>	1.89	++	PP	垫刃属 <i>Tylenchus</i>	0.35	+
BF	盆咽属 <i>Panagrolaimus</i>	16.78	+++	PP	短体属 <i>Pratylenchus</i>	1.26	++
BF	丽突属 <i>Acrobeles</i>	6.64	++	PP	柄端球属 <i>Paurodontus</i>	5.94	++
BF	头叶属 <i>Cephalobus</i>	0.84	+	PP	散香属 <i>Beleodorus</i>	1.19	++
BF	真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	2.17	++	PP	鞘属 <i>Hemicycliophora</i>	3.28	++
BF	鹿角唇属 <i>Cervidellus</i>	2.94	++	PF	矛线属 <i>Dorylaimus</i>	4.76	++
BF	小杆属 <i>Rhabditis</i>	0.21	+	PF	单齿属 <i>Mononchus</i>	1.33	++
BF	中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	12.10	+++	PF	基齿属 <i>Iotonchus</i>	3.71	++
BF	棱咽属 <i>Prismatolaimus</i>	0.98	+	PF	真矛线属 <i>Eudorylaimus</i>	1.54	++
BF	原杆属 <i>Protorhabditis</i>	0.56	+	PF	前矛线属 <i>Prodorylaimus</i>	9.29	++
BF	无咽属 <i>Alaimus</i>	4.26	++	PF	中矛线属 <i>Mesodorylaimus</i>	0.56	+
FF	滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	1.54	++	PF	丝尾属 <i>Oxydirus</i>	2.24	++
FF	短矛属 <i>Oriverutus</i>	5.31	++	PF	锉齿属 <i>Mylonchulus</i>	1.26	++
FF	细齿属 <i>Leptonchus</i>	2.03	++	PF	拟桑尼属 <i>Thorneella</i>	1.47	++
FF	垫咽属 <i>Tylencholaimus</i>	0.56	+	PF	色矛属 <i>Chromadorita</i>	1.61	++
FF	瘤咽属 <i>Tylencholaimellus</i>	1.40	++				

1 382 头, 其中食细菌线虫 12 属, 食真菌线虫 2 属, 植食性线虫 11 属, 捕食性线虫 8 属。样地 D 的食细菌线虫所占比例最大, 超过 50%, 食微线虫占绝对主导且较样地 A、B 分别高出 10.11% 和 7.23%; 植食性线虫跟捕食性线虫比例接近, 但较样地 A、B 低。样地中食微线虫比其它两类线虫比例之和高出 34.78% (表 4 和图 1)。

2.2 土壤线虫生态指数分析

在进行土壤线虫生态指数分析时, 发现样地 D 的情况较为特殊, 样地中的毛棉杜鹃已经死亡, 指数相关度与另外 3 个样地存在显著差异, 因此在生态指数分析中将样地 D 进行区别讨论。A、

B、C 3 块样地的线虫生态指数分析结果如下。

2.2.1 辛普森优势度指数分析 A、B、C3 个样地辛普森优势度指数分别为 0.05、0.07、0.14, 即 $C_C > C_B > C_A$ 。样地 A 集中度最低, 毛棉杜鹃生长情况最好, 样地 C 集中度最高, 毛棉杜鹃生长情况较差。方差分析 $P=0.003$, 小于 0.01, 表示值之间的差异极显著, 可以认为土壤线虫优势度大小对毛棉杜鹃生长有较大的影响, 优势度越大, 土壤线虫集中度越高, 毛棉杜鹃生长情况越差。

2.2.2 密度—类群指数分析 土壤动物群落组成极其复杂, 各群体之间存在一定程度的克制, 然而更为重要的是互相依赖和互不干涉, 多样性分

表 3 样地 C 土壤线虫优势度
Table 3 Soil nematode's dominance of plot C

营养类型 Nutrition type	属 Genus	相对多度 /% Relative abundance	优势度 Dominance	营养类型 Nutrition type	属 Genus	相对多度 /% Relative abundance	优势度 Dominance
BF	盆咽属 <i>Panagrolaimus</i>	6.13	++	PP	柄端球属 <i>Paurodontus</i>	26.29	+++
BF	头叶属 <i>Cephalobus</i>	3.56	++	PP	散香属 <i>Beleodorus</i>	6.84	++
BF	真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	0.99	+	PP	鞘属 <i>Hemicycliophora</i>	2.42	++
BF	小杆属 <i>Rhabditis</i>	0.85	+	PF	矛线属 <i>Dorylaimus</i>	7.98	++
BF	中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	5.56	++	PF	单齿属 <i>Mononchus</i>	0.43	+
BF	棱咽属 <i>Prismatolaimus</i>	0.71	+	PF	真矛线属 <i>Eudorylaimus</i>	2.85	++
BF	原杆属 <i>Protorhabditis</i>	0.99	+	PF	前矛线属 <i>Prodorylaimus</i>	20.09	+++
BF	无咽属 <i>Alaimus</i>	1.15	++	PF	中矛线属 <i>Mesodorylaimus</i>	0.43	+
FF	滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	0.57	+	PF	拟杯咽属 <i>Paracyatholaimus</i>	0.28	+
FF	细齿属 <i>Leptonchus</i>	1.99	++	PF	拟桑尼属 <i>Thorneella</i>	3.70	++
PP	垫刃属 <i>Tylenchus</i>	1.99	++	PF	色矛属 <i>Chromadorita</i>	4.20	++

析应首先采用密度—类群指数分析方法^[11]。计算结果显示，3个样地土壤线虫密度—类群指数分别为15.01、9.14、3.12，即 $DG_A > DG_B > DG_C$ ，该结果在一定程度上反映出毛棉杜鹃生长：样地A的DG指数最高，毛棉杜鹃生长最好；样地B的DG指数次之，毛棉杜鹃生长情况为“中”；样地C的DG值较另外两个样地的低，对应的毛棉杜鹃生长情况为差。方差分析发现 $P=0.026 < 0.05$ ，可认为土壤线虫的类群—密度指数与毛棉杜鹃生长显著相关。

2.2.3 多样性指数和均匀度指数分析 香农多样性指数是以种类数量和个体数量分配因素为基础的多样性分析方法^[11]。类群内群体分布的一致性体现类群多样性的一个重要标志。生态系统稳定性会随着物种丰富度和物种多样性的上升而增加^[14]，物种多样性能提升生态系统的抵抗力和更新能力，对于促进生态系统功能的发挥和系统中各个物种的生长具有不可替代的重要意义^[15]。

从表5得出的结果来看，A、B、C3个样地香农多样性指数大小依次为 $H'_A > H'_B > H'_C$ ，而分别对应的毛棉杜鹃生长情况为好、中和差，方差分析发现 $P=0.001 < 0.01$ ，即差异极显著，可以认为随着香农多样性指数的提高，毛棉杜鹃生长情况逐渐得到改善。对于均匀度指数，样地A、B数值接近，而样地C数值明显低于样地A、B，对均匀度指数作方差分析，得出 $P=0.019 < 0.05$ ，数值表明3个样地均匀度与毛棉杜鹃生长显著相关。

2.2.4 瓦斯勒斯卡指数分析 瓦斯勒斯卡指数(WI)是反映土壤线虫种群结构组成与土壤健康程度的数据^[16]。计算结果显示A、B、C这3个样地中，瓦斯勒斯卡指数分别为2.61、5.01、0.56，即 $WI_B > WI_A > WI_C$ ，体现了各个样地的土壤健康状况：4个样地中只有样地C数值小于1，说明其土壤健康状况最差，对应毛棉杜鹃生长情况为差；其次是样地A和样地B，这两个样地数值均大于1，土壤健康状况良好，毛棉杜鹃生长情况乐观。

表 4 样地 D 土壤线虫优势度
Table 4 Soil nematode's dominance of plot D

营养类型 Nutrition type	属 Genus	相对多度 /% Relative abundance	优势度 Dominance	营养类型 Nutrition type	属 Genus	相对多度 /% Relative abundance	优势度 Dominance
BF	绕线属 <i>Plectus</i>	0.94	+	PP	柄端球属 <i>Paurodontus</i>	4.63	++
BF	盆咽属 <i>Panagrolaimus</i>	15.41	+++	PP	散香属 <i>Beleodorus</i>	2.17	++
BF	丽突属 <i>Acrobeles</i>	11.58	+++	PP	盘旋属 <i>Rotylenchus</i>	0.36	+
BF	头叶属 <i>Cephalobus</i>	0.94	+	PP	矮化属 <i>Tylenchorhynchus</i>	0.80	+
BF	真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	3.76	++	PP	纽带属 <i>Hoplolaimus</i>	0.36	+
BF	鹿角唇属 <i>Cervidellus</i>	2.68	++	PP	鞘属 <i>Hemicycliophora</i>	2.03	++
BF	小杆属 <i>Rhabditis</i>	2.46	++	PP	螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	0.80	+
BF	中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	6.37	++	PF	穿孔属 <i>Radopholus</i>	0.29	+
BF	棱咽属 <i>Prismatolaimus</i>	3.84	++	PF	矛线属 <i>Dorylaimus</i>	2.82	++
BF	原杆属 <i>Protorhabditis</i>	4.85	++	PF	单齿属 <i>Mononchus</i>	0.65	+
BF	畸头叶属 <i>Teratocephalus</i>	4.05	++	PF	中矛线属 <i>Mesodorylaimus</i>	3.55	++
BF	无咽属 <i>Alaimus</i>	6.73	++	PF	拟杯咽属 <i>Paracyatholaimus</i>	3.33	++
FF	滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	2.88	++	PF	丝尾属 <i>Oxydirus</i>	3.69	++
FF	真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>	0.94	+	PF	拟桑尼属 <i>Thorneella</i>	0.51	+
PP	垫刃属 <i>Tylenchus</i>	1.08	++	PF	桑尼属 <i>Thornia</i>	0.51	+
PP	轮属 <i>Criconrmoides</i>	0.51	+	PF	色矛属 <i>Chromadorita</i>	1.16	++
PP	伪垫刃属 <i>Nothotylenchus</i>	3.33	++				

方差分析结果显示 $P=0.07>0.05$, 瓦斯勒斯卡指数 WI 所反映的土壤健康状况跟毛棉杜鹃生长情况相关不显著。

2.2.5 线虫通路指数分析 线虫通路指数 (NCR) 是一个体现由线虫在土壤中的分解过程起主导作用的指标, 反映出不同分解路径中的相对重要性, 通过以细菌为食的线虫和以真菌为食的线虫的比

值来所构成。线虫通路指数值域为 $NCR \in \{0,1\}$, 求得 NCR 值都接近 1, 即分解过程均由细菌主导。方差分析得出 $P=0.496>0.05$, 线虫通路指数与毛棉杜鹃生长相关不显著。

2.2.6 线虫成熟度指数分析 线虫的成熟指数由两个指标组成: 自由生活线虫的成熟指数 (MI) 和植食性线虫的成熟指数 (PPI), 是土壤扰动和

表 5 样地香农多样性指数和均匀度指数
Table 5 Shannon-Wiener and Pielou evenness index of the plots

样地 Plots	香农多样性指数 Shannon-Wiener	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	
		H'_{max}	J
生长情况“好”	3.21	3.78	0.85
生长情况“中”	2.96	3.43	0.86
生长情况“差”	2.37	3.09	0.77
生长情况“极差”	8.99	3.06	0.88

表 6 样地线虫成熟度指数
Table 6 Nematode maturity index of sample plots

样地 Plots	自由生活线虫成熟度指数 Maturity index	植食性线虫成熟度指数 Plant-parasites maturity index	MI/PPI
生长情况“好”	1.94	0.60	3.23
生长情况“中”	2.29	0.35	6.45
生长情况“差”	2.06	1.09	1.89
生长情况“极差”	1.91	0.49	3.90

表 7 4 个样地 8 项线虫生态指数分析结果
Table 7 Analysis results of 8 nematode ecological indexes in 4 sample plots

分析指标 Analysis indicators	A Plot A	B Plot B	C Plot C	D Plot D	P -value
辛普森优势度 C	0.05	0.07	0.14	0.06	0.003
密度—类群指数 DG	15.01	9.14	3.12	8.99	0.026
香农多样性 H'	3.21	2.96	2.37	3.06	0.001
Pielou 均匀度 J	0.85	0.86	0.77	0.88	0.019
瓦斯勒斯卡指数 WI	2.61	5.01	0.56	4.12	0.070
线虫通路指数 NCR	0.83	0.82	0.89	0.94	0.496
自由生活线虫成熟度 MI	1.94	2.29	2.06	1.91	0.053
植食性线虫成熟度 PPI	0.60	0.35	1.09	0.49	0.034

外部压力的指数。自由生活线虫是一类营自由方式生活、对植物或动物不会造成严重危害的一类线虫^[17]，根据营养种类的不同，分为食细菌线虫、食真菌线虫和捕食性线虫。

分析 A、B、C3 个有毛棉杜鹃生长的样地，表 6 计算结果显示自由生活线虫成熟度指数大小为 $MI_B > MI_A > MI_C$ ，方差分析 $P=0.053 > 0.05$ ，可以认为毛棉杜鹃生长情况与自由生活线虫成熟度指数相关不显著。植食性线虫成熟度指数大小为 $PPI_C > PPI_A > PPI_B$ ，方差分析 $P=0.034 < 0.05$ ，即认为毛棉杜鹃生长情况与植食性线虫成熟度指数显著

相关。

3 结论与讨论

3.1 当食微线虫与植食-捕食性线虫的比例差控制在一个合理的范围内时，有利于毛棉杜鹃生长，食细菌线虫可以提高土壤原始氮，促进植物生长^[18]；而当植食性跟捕食性线虫占据绝对主导时，毛棉杜鹃生长不良。毛棉杜鹃死亡时，食微线虫比例最大，这跟食微线虫代谢分解和对土壤二氧化碳、甲烷等具有吸收和排放作用有密切关系^[19]，土壤碳、氮、磷等元素会导致植物多样性产生明

显的空间异质^[20]。

辛普森优势度指数、密度—类群指数、香农多样性指数、Pielou 均匀度指数,反映了土壤线虫群落的多样性。在方差分析中4项指标均为差异显著,可认为毛棉杜鹃生长情况跟土壤线虫群落多样性有密切的关联。

瓦斯勒斯卡指数 WI 和线虫通路指数 NCR,根据这两项指数的 *P*-value,在数值上认为土壤健康程度和分解途径对毛棉杜鹃生长相关不显著。

根据自由生活线虫成熟度与植食性线虫成熟度指数方差分析,毛棉杜鹃生长显然与后者更为显著相关。植食性线虫成熟度指数 PPI 指数越大,毛棉杜鹃生长情况越不乐观。

3.2 样地 D 在营养类型组成、优势度、密度—类群指数和香农多样性指数均接近于 A、B 样地水平,而均匀度、线虫通路指数和线虫成熟度指数等指标则没有明显规律。两项分析均不符合毛棉杜鹃生长情况的理论预期。

进一步分析样地 D 土壤线虫的群落组成,发现食细菌线虫比例异常过高,表明土壤细菌含量在某个时间内明显升高。当毛棉杜鹃死亡后,根系开始腐烂分解,细菌和真菌数量上升的同时增加了食微线虫的数量,从而导致该样地土壤线虫比例失衡,造成营养类型在数量上过度集中而导致样地土壤生态系统的退化^[21]。

参考文献

- [1] 庄雪影. 园林树木学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 223-225.
- [2] 吴纪华, 宋慈玉, 陈家宽. 食微线虫对植物生长及土壤养分循环的影响[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 124-133.
- [3] 刘维志. 植物线虫志[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 29-33, 39-53.
- [4] HOOGEN J, GEISEN S, ROUTH D, et al. Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale[J]. *Nature*, 2019, 572: 194-198.
- [5] 刘仲健. 深圳市梧桐山风景区总体规划[J]. 广东园林, 1989(4): 17-20.
- [6] 孙晓玲, 李辉. 深圳市气候特征和主要灾害性天气 [EB/OL]. 百度文库, (2020-6-4)[2021-4-20]. <https://wenku.baidu.com/view/c0bc076601d8ce2f0066f5335a-8102d276a261c8.html>.
- [7] 许建新, 刘永金, 王定跃, 等. 深圳梧桐山风景区主要植物群落结构特征分析[J]. 林业调查规划, 2009, 34(2): 29-36.
- [8] 刘永金, 陈世清, 袁银, 等. 深圳梧桐山毛棉杜鹃林天然更新调查[J]. 亚热带植物科学, 2015, 44(1): 42-46.
- [9] 毛小芳, 李辉信, 陈小云, 等. 土壤线虫三种分离方法效率比较[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3): 149-151.
- [10] 佟富春, 肖以华, 岑亚美, 等. 广州长岗山森林土壤线虫群落的功能结构特征[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(1): 11-20.
- [11] 廖崇惠, 李健雄. 华南热带与亚热带地区森林土壤动物群落生态[M]. 广州: 广东科技出版社, 2009: 1-24; 27-28.
- [12] 李琪, 梁文举, 姜勇. 农田土壤线虫多样性研究现状及展望[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 134-141.
- [13] 薛会英, 胡峰, 罗大庆. 藏北高寒草甸植物群落对土壤线虫群落功能结构的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1482-1494.
- [14] 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.
- [15] 李俊清. 森林生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 232-236.
- [16] 江春, 黄菁华, 李修强, 等. 长期施用有机肥对红壤旱地土壤线虫群落的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1235-1241.
- [17] 李立伟, 潘沧桑. 自由生活线虫的研究进展[J]. 武夷科学, 1999, 15: 184-189.
- [18] 徐文思. 土壤食细菌线虫对植物促生菌促生能力的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [19] 朱海. 线虫对土壤CO₂、CH₄、N₂O排放/吸收的影响[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2012.
- [20] 谭琳, 刘梦芸, 甘先华, 等. 深圳市级自然保护区土壤化学计量特征与植物多样性的相关性[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(6): 20-25.
- [21] 林敏. 浅谈植物寄生线虫的危害[J]. 福建农业科技, 1995(3): 25.