

香根草属与狼尾草属植物对 土壤线虫营养类群的影响

邵元虎^{1,2}, 夏汉平¹, 周丽霞¹, 林永标¹, 赵灿灿^{1,2}, 傅声雷^{1*}

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:对广州华南植物园香根草属泰国香根草 (*Vetiveria nemoralis*)、普通香根草 (*V. zizanioides*) 的 2 个品种 Sunshine 和 Karnataka 以及狼尾草属象草 (*Pennisetum purpureum*)、皇草 (*P. purpureum* × *P. thyphoides*) 和杂交狼尾草 (*P. americanum* × *P. purpureum*) 的地下土壤线虫各食性类群在根区和非根区的分布特征进行了对比研究, 结果表明: 线虫主要集中在 0-15 cm 的浅层土壤中, 在不同生境下食细菌和植物寄生性线虫占优势, 两类线虫的比例在香根草属植物生境下为 87.7%-97.6%, 狼尾草属植物生境下为 88.5%-94.0%, 而食真菌、捕食性和杂食性线虫数量则很少, 其相应的比例分别为 2.4%-12.3% 和 6.0%-11.5%。两属植物根区的线虫数量显著高于非根区, 但不同营养类群的线虫在根区和非根区的分布有较大差异。香根草属植物和杂交狼尾草非根区植物寄生性线虫的比例高于根区, 而食细菌线虫的比例低于根区; 但象草和皇草非根区植物寄生性线虫的比例低于根区, 而食细菌线虫的比例高于根区。除皇草外, 两属植物非根区食真菌线虫的比例一般高于根区。在所选的植物中, Karnataka 和杂交狼尾草在土壤改良和土壤生物学效应方面有更好的潜力。

关键词:土壤线虫; 营养类群; 香根草; 狼尾草; 根区

中图分类号: Q948.122.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2007)01-0001-08

Effects of Grasses of *Vetiveria* and *Pennisetum* on Trophic Groups of Soil Nematodes

SHAO Yuan-hu^{1,2}, XIA Han-ping¹, ZHOU Li-xia¹, LIN Yong-biao¹, ZHAO Can-can^{1,2}, FU Sheng-lei^{1*}

(1. South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Trophic groups of soil nematodes were investigated in the rhizosphere and non-rhizosphere of *Vetiveria* spp. and *Pennisetum* spp. in South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, in Guangzhou, Guangdong Province. Soil nematodes were aggregated mainly in the soil layer of 0-15 cm regardless of the biomass and the length of roots of *Vetiveria* and *Pennisetum*, and the densities of bacterivores and phytophages were significantly higher than those of the other three trophic groups, fungivores, omnivores and predators in all habitats. The proportions of bacterivores and phytophages were in the range of 87.7%-97.6% and 88.5%-94.0% and those of the other three trophic groups were 2.4%-12.3% and 6.0%-11.5% under grasses of *Vetiveria* spp. and *Pennisetum* spp., respectively. The total number of nematodes was much higher in the rhizosphere than in the non-rhizosphere of grasses of *Vetiveria*, but this was not so obvious under grasses of *Pennisetum*. The proportions of phytophages under *Vetiveria* and under hybrid pennisetum (*P. americanum* × *P. purpureum*) were much higher

收稿日期: 2006-06-05 接受日期: 2006-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(30630015); 中国科学院“百人计划”项目资助

* 通讯作者 Corresponding author

in the non-rhizosphere than in the rhizosphere, while the proportions of bacterivores were much higher in the rhizosphere than in the non-rhizosphere. Nevertheless, the proportions of phytophages and bacterivores under king grass (*P. purpureum* × *P. thymoides*) and elephant grass (*P. purpureum*) habitats were opposite to that under *Vetiveria*. The proportions of fungivores were higher in the non-rhizosphere than in the rhizosphere under both genera of *Vetiveria* and *Pennisetum* with the exception of king grass. Higher nematode densities were found under *V. zizanioides* cv. Karnataka and hybrid pennisetum, indicating that the two species have good potential for the improvement of soil fertility.

Key words: Soil nematode; Trophic group; Vetiver grass; Pennisetum grass; Rhizosphere

香根草属 (*Vetiveria*) 植物是多年生的高大禾草,能适应较广的气候、土壤和水文条件^[1]。由于它纵深发达的根系能牢固地附着土壤,其地上部分又簇生成丛,且分蘖迅速,因此,如果等高密植,则在较短时间内就能形成牢固而致密的绿篱带,从而产生相当理想的水土保持效果^[2]。目前国内外对香根草做了大量的研究,涉及到它的植物学、生理生态学、遗传学、工程力学等方面^[1,3-8]。然而,从目前的研究来看,关于香根草的研究主要集中在水土保持、污染控制、一些恶劣环境下的生态恢复以及香精油的提取等方面,而关于香根草地下部分的土壤动物以及它们与香根草的相互作用方面的研究还未见报道。从香根草根部分提取的香根油具有一定的驱虫作用,但是否可以说香根草根区周围土壤生物就很少?这需要实地观测香根草地下土壤微生物和土壤动物等来证实。狼尾草属 (*Pennisetum*) 为禾本科的一年生或多年生草本植物,全世界约 140 种^[9],多数原产热带非洲,广泛分布于热带和亚热带地区,个别种可分布到温带^[10]。狼尾草属的一些植物与香根草属的某些种在形态上比较接近。该属的一些种类,如象草 (*P. purpureum*)、皇草 (*P. purpureum* × *P. thymoides*) 和杂交狼尾草 (*P. americanum* × *P. purpureum*) 等都是优良的牧草,在我国南方地区被广泛栽培,而且它们还有较好的水土保持能力与生态恢复效果^[11]。但是,迄今未见到有关狼尾草属地下土壤线虫的研究报道。

植物的一个重要外界环境是植物根部附近的土壤生物区,土壤线虫就是这个生物区中非常活跃的一类生物群体^[12]。通常,线虫被分成了 5 个功能类群,即食细菌线虫、食真菌线虫、植物寄生性线虫 (J2 阶段)、捕食性线虫和杂食性线虫^[13-17]。土壤线虫对有机物的分解、养分转化和能量传递起到关键的作用,是土壤生态系统的重要组成部分^[18-19]。因为

土壤线虫具有以下特点^[20]:数量多,它是所有土壤多细胞生物中数量最多的一类,占全部多细胞生物数量的 80%;可以生活在任意一个可提供有机碳源的环境里;食性复杂,在土壤食物网的主要营养级上均有分布;容易提取和鉴定,提取只需简易的湿漏斗便可,而且其身体透明,易鉴定;结构与功能关系密切相关,处于低营养级的对肥力变化反应敏感,而处于高营养级的对环境干扰变化敏感等,所以经常被用作评价生态系统的土壤生物学效应、土壤健康水平、生态系统演替或受干扰程度的一种代表指示生物来研究^[20-24]。20 世纪 80 年代以来国际上有关不同环境条件及管理措施下土壤线虫群落变化的研究日益得到重视,但我国从 20 世纪 90 年代才开始有零星报道^[25]。香根草是热带亚热带地区很重要的退化生态系统恢复的先锋植物,狼尾草属的很多种类又是热带亚热带地区的重要牧草。本文通过比较香根草属与狼尾草属植物地下土壤线虫营养类群,以进一步了解香根草属和狼尾草属植物在土壤生物学方面的一些特性,从而为更加科学合理地开发利用香根草属与狼尾草属植物提供理论依据。

1 研究地自然概况

研究地位于广州市东北郊的中国科学院华南植物园百草园内,约位于北纬 23°11',东经 113°21',海拔 30 m。这里属于亚热带季风湿润性气候,夏季炎热潮湿,秋冬温暖干旱,一般无霜冻,1 月平均气温 13.6℃,极低温 -0.8℃,7 月平均气温 28.9℃,极高温 39.2℃,年积温为 6 400-6 500℃,年降雨量为 1 700 mm,其中 4-9 月为雨季。该试验地土壤属于赤红壤,pH 为 4.29,土壤养分含量较低,其中有机质含量为 18.9 g kg⁻¹,全 N 0.55 g kg⁻¹,全 P (P₂O₅) 0.26 g kg⁻¹,全 K (K₂O) 3.00 g kg⁻¹。

2 材料和方法

2.1 供试植物

选取狼尾草属的 3 个种: 象草 (*Pennisetum purpureum*)、皇草 (*P. purpureum* × *P. thyphoides*) 和杂交狼尾草 (*P. americanum* × *P. purpureum*), 和香根草属中的泰国香根草 (*Vetiveria nemoralis*) 和普通香根草 (*V. zizanioides*) 的 2 个品种 Sunshine 和 Karnataka 为材料。选取的 6 种 (品种) 植物都是高秆禾草, 具有类似的形态而且根系发达, 均于 2002 年同时种植, 年龄约 3 a。上述植物中, Sunshine 是目前热带亚热带地区引种栽培最广的一个香根草品种, 源自美国; Karnataka 是香根草属中生长最矮的一个品种, 秋冬季节仍能基本保持青绿状态, 有广泛的应用前景, 源自印度^[20]; 泰国香根草引自泰国, 相对较为耐荫, 但目前对它的研究还比较少。象草、皇草和杂交狼尾草都是比较优良的牧草, 象草原产于非洲, 皇草原产于美洲大陆, 而杂交狼尾草是象草与美洲狼尾草的杂交种。

2.2 采样方法

整个实验由 7 个样地组成, 包括 3 个狼尾草属样地, 3 个香根草属样地和 1 个林地作对照样地。狼尾草属和香根草属每个样地面积约为 8 m² (2 m × 4 m), 两属植物株距和行距约为 20 cm × 40 cm。在狼尾草属和香根草属样地周围十几米处为林地, 是人工种植的混交林, 距今已有几十年, 主要种类为大叶相思 (*Acacia auriculaeformis*)、荷木 (*Schima superba*)、藜蒴 (*Castanopsis fissa*) 等, 林下植物为九节 (*Psychotria rubra*)、黄栀子 (*Gardenia jasminoides*)、梅叶冬青 (*Ilex asprella*)、双唇蕨 (*Lindsaea ensifolia*)、三叶新月蕨 (*Pronephrium triphyllum*) 等, 种植后基本上没有大的人为干扰, 目前林地冠层高度约为 10–15 m。狼尾草属和香根草属每个样地内分为根区土和非根区土两部分进行采样, 每一部分随机设 3 个重复采样点, 其中用于测定土壤线虫的非根区土依土壤深度分 6 层取样, 即 0–5、5–10、10–15、15–30、30–60、60–100 cm, 采集根区土时不进行分层处理。对照样地按同样方法分 6 层取样, 随机设 5 个重复采样点, 但只采非根区土。收集的土壤样品放在 4℃ 冰箱保存并在 2 d 内完成土壤线虫的提取。用于测定土壤微生物量碳的土壤在根区和非根区采样时都不分层。野外采样时间为 2005 年 4 月 17–26 日。

2.3 测定方法

用 Baermann 湿漏斗法提取线虫^[27]。Baermann 湿漏斗法的主要原理是利用线虫没有主动的游泳能力, 所以在浸水的情况下, 土壤中的线虫便会因为重力作用沉没在漏斗底部, 于是在漏斗下方收集。实验时应用立体显微镜记数线虫的总数量, 用倒置显微镜在 400–1 000 倍下鉴定线虫营养类群。营养类群包括: 食细菌类、食真菌类、植物寄生类、捕食类、杂食类。

土壤微生物量碳参照 Vance^[28]的方法测定。称过筛 (筛孔 < 4 mm) 的新鲜土壤 20 g 置于 50 ml 小烧杯中, 用氯仿蒸汽处理, 另称取 20 g 鲜土置于 50 ml 小烧杯中, 不经氯仿处理作为对照。用氯仿处理时, 将盛有土壤的烧杯至于真空干燥器中, 内铺一张湿润滤纸, 上面放一个盛有 50 ml 不含乙醇的氯仿的烧杯, 然后将干燥器抽真空至氯仿溶液剧烈沸腾为止, 再关闭活塞, 并置于暗处 48 h。然后取出盛氯仿溶液的烧杯和湿润的滤纸, 再将此干燥器用反复抽真空法除去土壤中残存的氯仿蒸汽。将土壤转移到 150 ml 的方塑料瓶中, 加入 60 ml 0.5 mol/L 的 K₂SO₄ 溶液, 在振荡机上中速振荡 1 h, 然后静置并过滤。滤液用 TOC 仪进行总有机碳含量分析。未能及时分析的样品置冰箱 -20℃ 保存。对照样品除不经氯仿熏蒸处理外, 其他处理步骤相同。所有土壤样品在处理之前首先要测土壤含水量。

微生物量碳用如下公式计算:

$$\text{微生物量碳 (mg kg}^{-1}\text{ dry soil)} = (\text{熏蒸样品总有机碳} - \text{对照样品总有机碳}) \times (0.06 + \text{土壤样品水体积}) / (0.33 \times \text{土壤样品干重})。$$

2.4 数据统计分析

数据分析采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 13.0 数据分析软件对所得数据进行处理。

3 结果和分析

3.1 不同样地不同土壤深度下非根区土壤线虫总数

各样地线虫数量一般都集中在 0–15 cm 的表层土中, 该土层线虫数量占整个土层 (0–100 cm) 的 80.0% (杂交狼尾草) 至 95.4% (Karnataka) (表 1), 这可能主要与土壤表层的有机质状况有关。香根草属与狼尾草属植物地下土壤线虫的数量都较多, 但线虫的总数量差别不大, 总的来说多于对照

样地。在香根草属植物中,源自印度的 Karnataka 地下土壤线虫数量最多,显著高于源自美国的 Sunshine 和源自泰国的 *V. nemoralis*,说明从生物学效应来看 Karnataka 品种有很好的应用前景。另外,杂交狼尾草土壤线虫数量高于皇草和象草,表明在开发利用狼尾草属这几种植物方面,杂交狼尾草也是很好的候选种类(图 1)。

3.2 根区和非根区线虫总数、不同营养类群线虫的百分比和土壤微生物量

不同样地的线虫总数量都是根区的大于非根

区的,香根草属植物根区与非根区线虫总数量之间的差别比较大,其中 Sunshine 差别最大,根区线虫数量约为 10.8 条 g^{-1} 干土,非根区线虫数量约为 2.1 条 g^{-1} 干土,而狼尾草属几种植物之间的差别要小一些,差别最小的是杂交狼尾草,根区线虫数量约为 5.4 条 g^{-1} 干土,非根区线虫数量约为 5.2 条 g^{-1} 干土(图 2a)。从几个样地土壤微生物碳量的结果来看,土壤线虫总数与土壤微生物量碳之间并没有显著的相关性(图 2 b)。

图 3 显示无论是根区还是非根区每个样地植物寄生性线虫和食细菌线虫都是优势类群。在香根

表 1 不同样地非根区土层线虫数量及其特征

Table 1 The nematode individuals and character in soil in non-rhizosphere of the different field plots

样地 Field plot	A (individuals g^{-1} dry soil)	B (individuals g^{-1} dry soil)	A/B (%)
香根草 Karnataka	28.8±8.4*	30.2±8.6	95.4
香根草 Sunshine	10.4±0.7	12.4±1.4	84.1
泰国香根草 <i>V. nemoralis</i>	5.2±0.5	6.4±0.6	80.9
象草 Elephant grass	10.8±1.0	11.8±1.1	91.7
皇草 King grass	19.0±1.5	21.7±2.5	87.5
杂交狼尾草 Hybrid pennisetum	24.9±5.6	31.1±6.4	80.0
林地 Forest land	4.6±1.2	4.9±1.1	93.9

A: 0-15 cm 土层 0-15 cm soil depth; B: 0-100 cm 土层 0-100 cm soil depth. * 平均值±标准误 Mean±SE

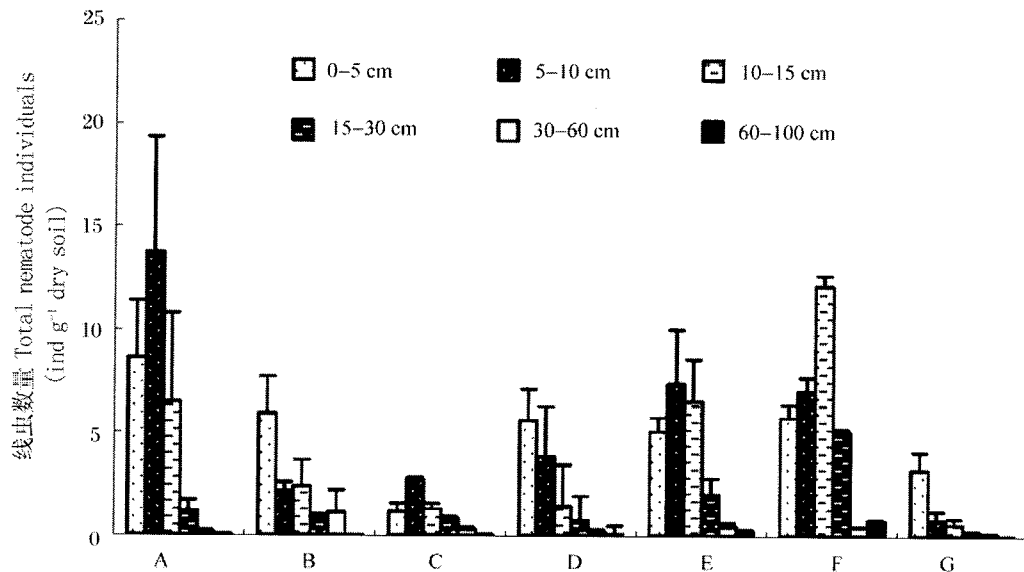


图 1 不同样地不同土层深度下非根区土壤线虫数量

Fig. 1 The total nematode individuals in non-rhizosphere at different soil depths under the seven field plots

A: 香根草 Karnataka; B: 香根草 Sunshine; C: 泰国香根草 *V. nemoralis*; D: 象草 Elephant grass; E: 皇草 King grass; F: 杂交狼尾草 Hybrid pennisetum; G: 林地 Forest land.

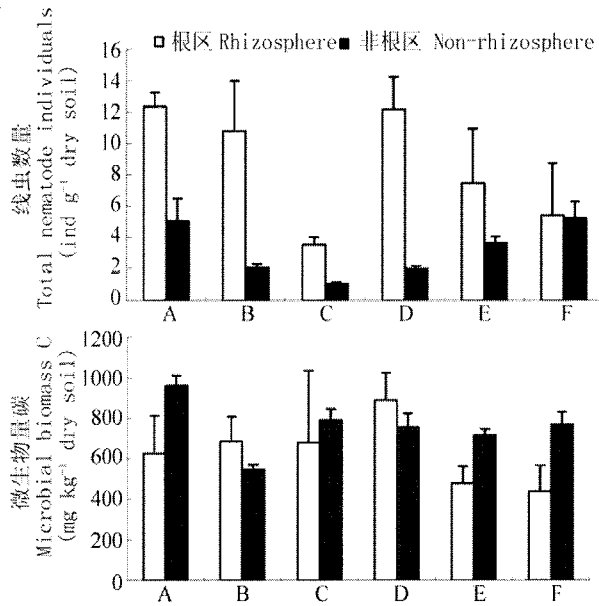


图 2 根区与非根区土壤线虫总数及土壤微生物量碳的比较
Fig. 2 Total nematode individuals and the microbial biomass C in the rhizosphere and the non-rhizosphere

A: 香根草 Karnataka; B: 香根草 Sunshine; C: 泰国香根草 *V. nemoralis*; D: 象草 Elephant grass; E: 皇草 King grass; F: 杂交狼尾草 Hybrid pennisetum.

草属植物中, 无论是根区土壤还是非根区土壤, Karnataka 样地中植物寄生性线虫所占的百分比最大, 食细菌线虫所占的百分比最小, 泰国香根草地下植物寄生性线虫所占的百分比最小, 食细菌线虫所占的百分比最大, 而 Sunshine 品种这两种线虫的百分比居中。无论是根区还是非根区土壤中, 狼尾草属中的植物寄生性线虫所占百分比的大小顺序依次是皇草>杂交狼尾草>象草, 食细菌线虫所占的百分比顺序则恰好相反。无论是根区还是非根区, 各种样地中捕食性和杂食性线虫所占的百分比都非常小。

各样地根区植物寄生性线虫的数量高于非根区的(杂交狼尾草除外), 其中二者相差最大的是象草, 根区线虫与非根区的相差约 12.3 倍, 而杂交狼尾草根区与非根区线虫的数量没有明显差别(图 4a)。香根草属非根区土中植物寄生性线虫所占的百分比高于根区土中植物寄生性线虫所占的百分比, 但是, 狼尾草属中象草非根区土中植物寄生性线虫所占的百分比小于根区土中植物寄生性线虫所占的百分比, 杂交狼尾草和皇草根区和非根区植物寄生性线虫所占的百分比差别不明显(图 4b)。

香根草属和狼尾草属各样地根区食细菌线虫的数量均大于非根区的, 差别最大的是象草, 根区食细菌线虫数量约为 4.3 条 g⁻¹ 干土, 非根区食细菌线虫数量约为 1.2 条 g⁻¹ 干土, 差别最小的是杂交狼尾草, 根区食细菌线虫数量约为 1.5 条 g⁻¹ 干土, 非根区食细菌线虫数量约为 1.2 条 g⁻¹ 干土(图 4c)。Karnataka 非根区食细菌线虫数所占的百分比与根区没有明显差别, 泰国香根草和 Sunshine 非根区食细菌线虫所占百分比低于根区的, 狼尾草属杂交狼尾草非根区食细菌线虫所占的百分比小于根区, 象草非根区食细菌线虫所占的百分比大于根区, 而皇草非根区与根区食细菌线虫所占的百分比没有明显差别(图 4d)。总的来说, 狼尾草属几种植物非根区与根区食细菌线虫所占的百分比没有明显的规律。可能是因为当初种植这几种植物时植株之间的间距不够大, 导致狼尾草属植物根系分布在根区与非根区的差异不明显有关。

在数量上香根草(Karnataka)和象草、杂交狼尾草根区食真菌线虫数量都是非根区高于根区, 而其它 3 种样地食真菌线虫数量为非根区低于根区(图 4e)。但是, 各植物种类非根区食真菌线虫所占

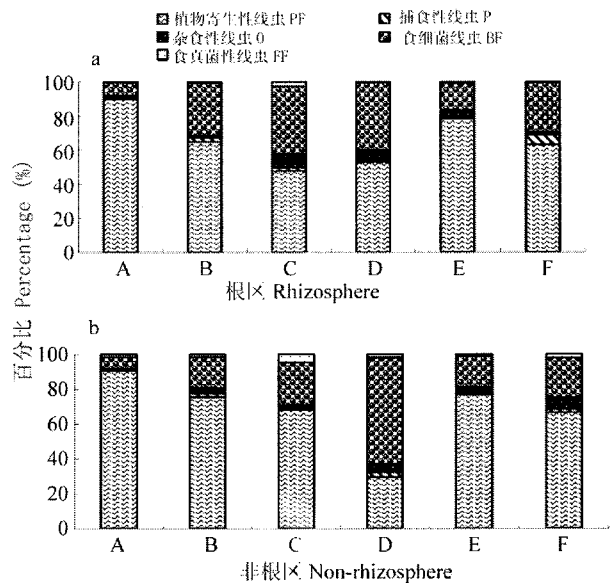


图 3 不同样地根区(a)和非根区(b)各类食性线虫所占的百分比
Fig. 3 Distribution of nematode trophic groups in the rhizosphere and non-rhizosphere under the six field plots

PF: Plant-feeding nematode; P: Predators; O: Omnivore; BF: Bacterial-feeding nematode; FF: Fungal-feeding nematode; A: 香根草 Karnataka; B: 香根草 Sunshine; C: 泰国香根草 *V. nemoralis*; D: 象草 Elephant grass; E: 皇草 King grass; F: 杂交狼尾草 Hybrid pennisetum.

的百分比一般高于根区（除皇草外）（图 4f）。

4 讨论

香根草属与狼尾草属植物土壤线虫的数量都明显高于林地，说明这两属植物对土壤生物环境的改良作用都很好。如果单从土壤线虫的数量方面进行评价的话，源自印度的香根草 Karnataka 可能比泰国香根草和 Sunshine 有更理想的应用前景；而对狼尾草属的几种植物开发利用，杂交狼尾草可能是首选。

实例显示由于施肥或其它导致加速分解的扰动会使微生物活动增加，而微生物活动增加又会导致食微生物线虫数量的增加^[29-33]。与此相似的是，植物根系分泌的一些氨基酸、糖和有机酸等有机复合物容易被吸收，会刺激微生物的生长和活动而导致微生物种群和活动的增加^[34-39]，结果以微生物为食物的土壤动物类群数量也会增加。因此，根区土壤微生物和土壤动物丰度均高于非根区土^[40-42]，这也就

是所谓的根际效应^[43]。在本研究中，我们观测到香根草属根区的土壤线虫总数确实高于非根区，但是根区与非根区的土壤微生物量却没有明显差异，也就是说土壤线虫总数与土壤微生物量并没有显著的相关性。我们认为，土壤线虫与土壤微生物的食性关系并不是一种简单的数量线性关系，各营养类群线虫与微生物种类组成变化的关系更微妙。事实上，香根草地下食细菌线虫所占的百分比在根区大于非根区，而食真菌线虫的百分比在根区低于非根区，这种负相关关系也说明了根区的根际分泌物可能适于细菌和食细菌线虫生长，非根区的有机质适于真菌和食真菌线虫生长。也就是说，根区土壤有机质成分与非根区的不同，导致了食细菌线虫和食真菌线虫分布的差异。所以，进一步研究根区与非根区土壤有机质化学成分的差别，将有助于阐明各营养类群线虫数量与土壤有机质成分的关系。另外一种可能是因为根区微生物活动主要刺激了食细菌线虫的增加，而非根区食细菌线虫的数量有所

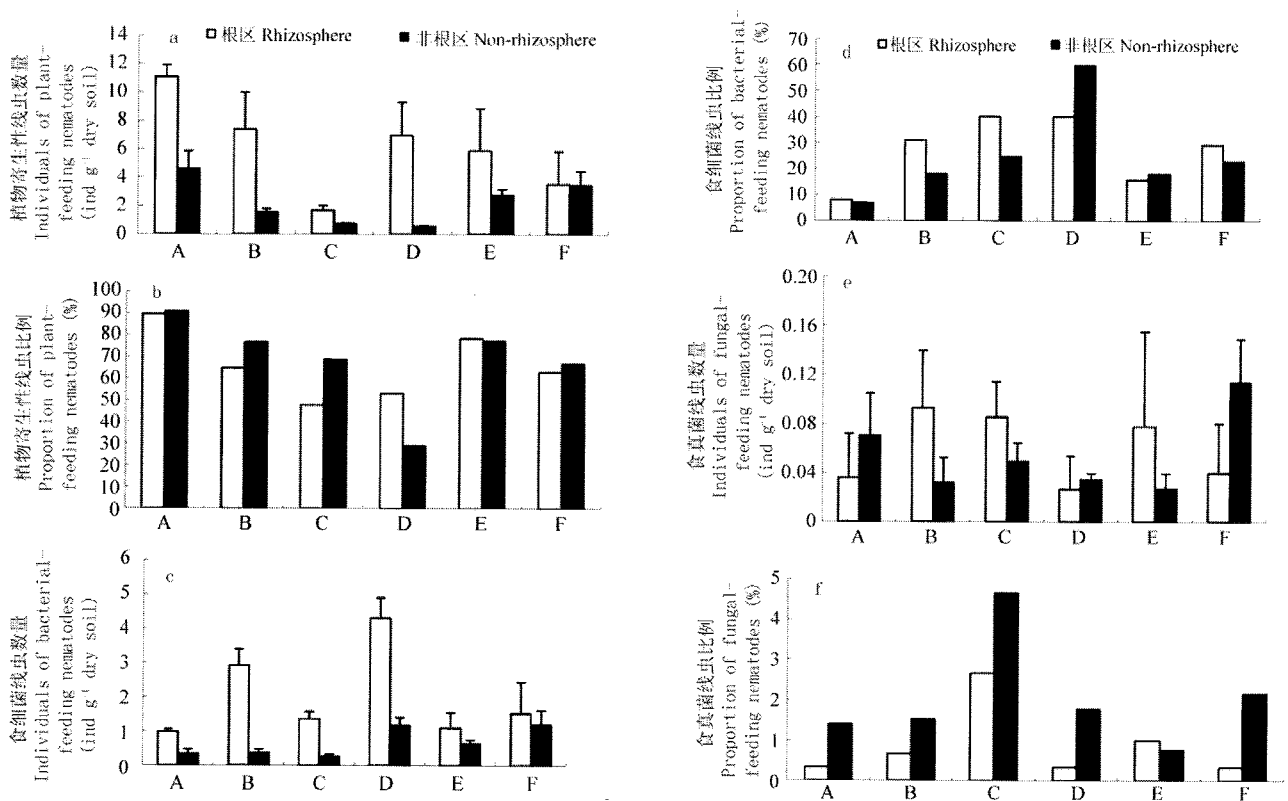


图 4 根区和非根区不同营养类群线虫数量及其所占百分比

Fig. 4 Individuals and the proportion of different trophic groups of soil nematodes

A: 香根草 Karnataka; B: 香根草 Sunshine; C: 泰国香根草 *V. nemoralis*;

D: 象草 Elephant grass; E: 皇草 King grass; F: 杂交狼尾草 Hybrid pennisetum.

下降,而食真菌线虫比例则相应增加。狼尾草属植物根区与非根区土壤线虫和微生物的变化规律不很明显,这可能与狼尾草属根系分布在根区与非根区的差异不明显有关。

另外,不同生境中捕食性和杂食性线虫的数量都很少,主要原因是它们处于较高的营养级水平而且个体较大。捕食性和杂食性线虫的生活史策略一般为 K- 对策,它们对环境受到干扰的反应比 R- 对策的食细菌和食真菌线虫更敏感,所以它们占线虫总数的比例是评价某一生境群落是否稳定的更好指标^[7]。具体这个比例范围是多少才表明生境的健康和稳定,还有待于进一步研究。

总之,通过比较香根草属和狼尾草属植物地下土壤线虫总数和营养类群的研究,我们以土壤线虫为代表从土壤动物的角度阐明了香根草属的可应用价值,并且也为今后合理开发利用狼尾草提供了依据,为下一步开展两种植物的土壤生物学质量评价和生物指示意义研究提供了基础资料,在今后的研究中我们还将对两种植物的土壤微生物进行深入的研究,以期更全面地评价这两种植物的土壤生物学效应。

参考文献

- [1] National Research Council. *Vetiver Grass: A Thin Green Line against Erosion* [M]. Washington, DC: National Academy Press, 1993. 1-93.
- [2] Xia H P (夏汉平), Ao H X (敖惠修), Liu S Z (刘世忠). The vetiver eco-engineering — A biological technique for realizing sustainable development [J]. *Chin J Ecol*(生态学杂志), 1998, 17(6):44-50.(in Chinese)
- [3] Xia H P(夏汉平), Ao H X(敖惠修), He D Q(何道泉). Effect of environmental factors on vetiver grass growth [J]. *Chin J Ecol*(生态学杂志), 1994, 13(2):23-26.(in Chinese)
- [4] Xia H P(夏汉平), Liu(刘世忠), Ao H X (敖惠修). Comparative study on salt resistance of *Vetiveria zizanioides*, *Paspalum notatum* and *Alternanthera philoxeroides* [J]. *Chin J Appl Environ Biol*(应用与环境生物学报), 2000, 6(1):7-17.(in Chinese)
- [5] Truong P N V, Baker D E. Vetiver grass for rehabilitation of acid sulphate soils [J]. *Vetiver Newslet*, 1996, (16):45-46.
- [6] Ma G H(马国华), Xia H P(夏汉平), Xian Y L(羡蕴兰). Somatic embryogenesis and shoot formation from explants of *Vetiveria zizanioides* [J]. *J Trop Subtrop Bot*(热带亚热带植物学报), 2000, 8(1):55-59.(in Chinese)
- [7] Ma Z R(马镇荣), Liu W(刘卫), Wang C H(王昌虎), et al. Cytology observation and formation conditions of somatic embryogenesis in *Vetiveria zizanioides* [J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), 2003, 23(7):290-1296.(in Chinese)
- [8] Cheng H(程洪), Zhang X Q(张新全). An experimental study on herb plant root system for strength principle of soil-fixation [J]. *Soil Conserv Bull*(水土保持通报), 2002, 22(5):20-23.(in Chinese)
- [9] *Delectis Florae Republicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae Edita* (中国科学院中国植物志编辑委员会). *Florae Republicae Popularis Sinicae Tomus 10(1)* [M]. Beijing: Science Press, 1990. 361-375.(in Chinese)
- [10] Xie X M (解新明), Lu X L (卢小良). Analysis of genetic relationships of cultivars in *Pennisetum* by RAPD markers [J]. *Acta Pratacul Sin*(草业学报), 2005, 14(2):52-56.(in Chinese)
- [11] Wang P Q (王凭青), Duan C R (段传人), Wang B C (王伯初), et al. Study of *Pennisetum pureum* on function of soil and water conservation [J]. *J Soil Water Conserv*(水土保持学报), 2005, 19(1):114-116, 135.(in Chinese)
- [12] Hoeksema J D, Lussenhop J, Teeri J A. Soil nematodes indicate food web responses to elevated atmospheric CO₂?[J] *Pedobiologia*, 2000, 44(6):725-735.
- [13] McSorley R. Relationship of crop and rainfall to soil nematode community structure in perennial agroecosystems [J]. *Appl Soil Ecol*, 1997, 6(2):147-159.
- [14] Freckman D W. Bacterivorous nematodes and organic matter decomposition [J]. *Agri Ecosys Environ*, 1988, 24:195-212.
- [15] Fu S L, Coleman D C, Hendrix P F, et al. Responses of trophic groups of soil nematodes to residue application under conventional tillage and no-till regimes [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32(11-12):1731-1741.
- [16] Fu S L, Kisselle K W, Coleman D C, et al. Short-term impacts of aboveground herbivory (grasshopper) on the abundance and ¹⁴C activity of soil nematodes in conventional tillage and no-till agroecosystems [J]. *Soil Biol Biochem*, 2001, 33(9):1253-1258.
- [17] McSorley R, Frederick J J. Effect of subsurface clay on nematode communities in a sandy soil [J]. *Appl Soil Ecol*, 2002, 19(1):1-11.
- [18] Coleman D C, Cole C V, Elliot E T. Decomposition, organic matter turnover, and nutrient dynamics in agroecosystems [A]. In: Lowrance R, Stinner B R, House G J. *Agricultural Ecosystems Unifying Concepts* [M]. New York: Wiley, 1984. 83-104.
- [19] Liang W J (梁文举), Ge T K (葛亭魁), Duan Y X (段玉玺). Bioindication of soil fauna to soil health [J]. *J Shenyang Agri Univ*(沈阳农业大学学报), 2001, 32(1):70-72.(in Chinese)
- [20] Bongers T, Ferris H. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring [J]. *Trends Ecol Evol*, 1999, 14(6):224-228.
- [21] Bongers T. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition [J]. *Oecologia*, 1990, 83:14-19.
- [22] Bongers T, van der Meulen H, Korthals G. Inverse relationship between the nematode maturity index and plant-parasite index under enriched nutrient conditions [J]. *Appl Soil Ecol*, 1997, 6:

- 195–199.
- [23] Zhang W(张薇), Song Y F(宋玉芳), Sun T H(孙铁珩), et al. Soil nematode as a bioindicator of environment pollution [J]. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 2004, 15(10):1973–1978. (in Chinese)
- [24] 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 [J]. *Biodiv Sci(生物多样性)*, 2001, 9(3):237–240. (in Chinese)
- [25] 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 [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2002, 22(11):1882–1889. (in Chinese)
- [26] Xia H P(夏汉平), Liu S Z(刘世忠). Study on screening for excellent ecotypes of *Vetiveria zizanioides* [J]. *Acta Pratacul Sin(草业学报)*, 2003, 12(2):97–105. (in Chinese)
- [27] McSorley R. Extraction of nematodes and sampling methods [A]. In: Brown R H, Kerry B R. *Principles and Practice of Nematode Control in Crops* [M]. Sydney, Australia: Academic Press, 1987. 13–41.
- [28] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biol Biochem*, 1987, 19(6):703–707.
- [29] Huhta V, Ikonen E, Vilkkamaa P. Succession of invertebrate populations in artificial soil made of sewage sludge and crushed bark [J]. *Ann Zool Fennici*, 1979, 16:223–270.
- [30] Wasilewska L, Paplinska E, Zielinski J. The role of nematodes in decomposition of plant material in a rye field [J]. *Pedobiologia*, 1981, 21:182–191.
- [31] Sohlenius B, Bostrom S. Colonization, population development and metabolic activity of nematodes in buried barley straw [J]. *Pedobiologia*, 1984, 27:67–78.
- [32] Dmowska E, Kozłowska J. Communities of nematodes in soil treated with semi-liquid manure [J]. *Pedobiologia*, 1988, 32:323–330.
- [33] Ettema C H, Bongers T. Characterization of nematode colonization and succession in disturbed soil using the maturity index [J]. *Biol Fertil Soils*, 1993, 16:79–85.
- [34] Rovira A D. Biology of the soil-root interface [A]. In: Harley J L, Scott-Russell R. *The Soil Root Interface* [M]. New York: Academic Press, 1979. 145–160.
- [35] Grayston S J, Vaughan D, Jones D. Rhizosphere carbon flow in trees in comparison with annual plants: the importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability [J]. *Appl Soil Ecol*, 1997, 5:29–56.
- [36] Jones D L. Organic acids in the rhizosphere: a critical review [J]. *Plant Soil*, 1998, 205:25–44.
- [37] Hertenberger G, Zampach P, Bachmann G. Plant species affect the concentration of free sugars and free amino acids in different types of soil [J]. *J Plant Nutr Soil Sci — Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde*, 2002, 165(5):557–565.
- [38] Krafczyk I, Trolldenier G, Beringer H. Soluble root exudates of maize: Influence of potassium supply and rhizosphere microorganisms [J]. *Soil Biol Biochem*, 1984, 16(4):315–322.
- [39] Lynch J M, Whipps J M. Substrate flow in the rhizosphere [J]. *Plant Soil*, 1990, 129(1):1–10.
- [40] Norton J M, Smith J L, Firestone M K. Carbon flow in the rhizosphere of ponderosa pine seedlings [J]. *Soil Biol Biochem*, 1990, 22(4):449–455.
- [41] Cheng W, Zhang Q, Coleman D C. Is available carbon limiting microbial respiration in the rhizosphere? [J]. *Soil Biol Biochem*, 1996, 28:1283–1288.
- [42] Alpei J, Bonkowski M, Scheu S. Protozoa, nematoda and lumbriidae in the rhizosphere of *Hordelymus europaeus* (Poaceae): Faunal interactions, response of microorganisms and effects on plant growth [J]. *Oecologia*, 1996, 106(1):111–126.
- [43] Fu S, Cheng W. Rhizosphere priming effects on the decomposition of soil organic matter in C₄ and C₃ grassland soils [J]. *Plant Soil*, 2002, 238:289–294.