

DOI: 10.5846/stxb201904010627

贾慧, 王晟强, 郑子成, 李廷轩. 植茶年限对土壤团聚体线虫群落结构的影响. 生态学报, 2020, 40(6): 2030-2140.

Jia H, Wang S Q, Zheng Z C, Li T X. Effects of tea plantation age on soil nematode community characteristics within soil aggregate. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 2030-2140.

## 植茶年限对土壤团聚体线虫群落结构的影响

贾 慧, 王晟强, 郑子成\*, 李廷轩

四川农业大学资源学院, 成都 611130

**摘要:** 在野外调查的基础上, 采用干筛法和改良的 Baermann 漏斗法, 研究植茶年限(19 年、26 年、34 年和 56 年)对土壤团聚体线虫群落结构的影响。本研究共捕获线虫 6602 条, 隶属于 46 属, 以 *Acrobeloides* 为优势属, 食细菌线虫为优势营养类群。线虫总数和大多数营养类群数量均随植茶年限的延长先升高后降低, 在植茶 26 年时数量达到最高, 且随粒径的减小而减少。线虫类群数则随着植茶年限的延长, 虽随着粒径的减小而减少, 但对 >2 mm 粒径团聚体中响应不敏感。线虫结构指数 (Structure index, SI) 多数小于 50, 富集指数 (Enrichment index, EI) 均大于 50。随着植茶年限的延长, 茶园生态系统土壤食物网逐渐退化; 与大粒径团聚体相比, <0.25 mm 粒径团聚体中食物网受扰动相对较小。以上结果表明, 植茶 26 年土壤更适合线虫繁殖且大粒径团聚体更有利于线虫生存; 随着植茶年限的延长, 土壤食物网退化, <0.25 mm 粒径团聚体受到的干扰较少, 这一结果有助于揭示茶园土壤团聚体中线虫群落变化和土壤食物网对植茶年限的响应特征。

**关键词:** 植茶年限; 土壤团聚体; 土壤线虫

## Effects of tea plantation age on soil nematode community characteristics within soil aggregate

JIA Hui, WANG Shengqiang, ZHENG Zicheng\*, LI Tingxuan

College of Resource Science, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

**Abstract:** This study began in July 2018 at Zhongfeng long-term agricultural research site of Sichuan Agricultural University in Ya'an, Sichuan, China. The prevailing climate surrounding the study site is a subtropical monsoon climate. Mean annual temperature is 15.4°C, with the lowest and highest mean daily temperatures of 4.3°C and 35.2°C, respectively. Mean annual precipitation is 1500 mm with 72.6% of the precipitation occurring during July and September. The layer being exposed belongs to sedimentary rock predominantly formed since the Mesozoic age, with the soil being Luvisols with a texture of clay loam. "Sichuan tea" has been cultivated since 1950s, forming a large-scale tea plantation with different ages. As a useful approach, the space-for-time substitution method is often used to monitor soil changes occurring along a tea plantation chronosequence that has developed with similar soils and similar climatic conditions. Establishment of tea plantations at different times creates an opportunity for elucidating the tea planting process because the geomorphologic processes can determine soil conditions before tea planting. In order to explore the effects of tea plantation age on the soil nematode community characteristics within soil aggregate and provide theoretical basis for formulating scientific and reasonable soil management measures in tea plantations, soil samples were obtained from tea plantations with different ages (19, 26, 34 and 56 a). The four tea plantations were collected on similar geomorphologic units, slope direction and gradient, and fertilization practices. Soil aggregates were separated into four fractions: large (>2 mm), medium (2—1 mm), small macro-aggregates (1—0.25 mm), and micro-aggregates (<0.25 mm). The nematodes were extracted from 50 g fresh soil by a modified Baermann funnel methodology. In this study, a total of 6602 nematodes were captured, which belonged to 46 genera and the mean density was 421 ind · 100g<sup>-1</sup> dry soil. *Acrobeloides* was the dominant genus and

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271307); 四川省科技厅支撑计划项目(2013NZ0044)

收稿日期: 2019-04-01; 网络出版日期: 2019-12-17

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zichengzheng@aliyun.com

bacterial nematodes were the dominant trophic group. Soil aggregate-associated total nematode abundance decreased significantly with decreasing of aggregate size regardless of the tea plantation age. Additionally, the abundance of different trophic groups (including bacterivores, plant-parasites and fungivores) showed a trend similar to the abundance of total nematodes within different aggregates. In the macro-aggregates, the abundance of total nematodes as well as different trophic groups, with the exception of omnivores-predators, was significantly higher in the 26a tea plantation compared to that in other plantations. In the micro-aggregates, on the contrary, no significant differences were observed among the different aged tea plantations. Nematode structure index (SI) was less than 50, and enrichment index (EI) was more than 50. In this tea plantation ecosystem, the soil food web gradually degraded alongside plantations. Compared with the large macro-aggregates, the structure of soil food web was relatively less disturbed in the micro-aggregates. Notably, the degradation of soil food web alongside plantations underscores the need for sustainable soil management practices that would maintain soil health in the hilly area of western Sichuan in China.

**Key Words:** tea plantations; soil aggregates; soil nematodes

土壤线虫不仅是土壤生态系统中重要的生物类群<sup>[1]</sup>,同时也存在于食物网各个营养级和能量通道,占据食物网的中心位置,对于促进物质循环和能量流动具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。团聚体作为土壤结构最基本的单元,其组成比例和空间排列决定了土壤孔隙的分布与土壤的水气特征,进而影响土壤线虫的生境<sup>[4-6]</sup>。可见,土壤线虫群落结构可能与其在土壤团聚体的分布特征有关。故从土壤团聚体的角度探讨土壤线虫群落的变化,将有助于揭示土壤线虫群落变化的本质。Briar 等<sup>[7]</sup>研究发现,线虫总数在微团聚体(<0.25 mm)中数量高于 0.25—1 mm 粒径团聚体,而 Zhang 等<sup>[8]</sup>研究则认为线虫在微团聚体中数量最少。也有研究表明线虫总数在团聚体中的分布规律均是随着团聚体粒径的减小而减少,且最大值出现在>2 mm 粒径团聚体,这与 Zhang 等<sup>[9]</sup>和 Jiang 等<sup>[10]</sup>研究结果一致。可见,线虫在土壤各粒径团聚体中分布各异。

茶树(*Camellia sinensis*)属山茶科山茶属,为多年生常绿木本植物。近年来,受退耕还林、经济发展、人口增长等因素的驱动,川西低山丘陵区土地利用结构发生了较大变化,退耕植茶已成为该区域主要退耕模式,在产生经济效益和社会效益的同时,其生态效益备受关注。课题组前期已对不同植茶年限土壤团聚体的有机碳、养分分布和微生物群落进行了探讨<sup>[11-13]</sup>,发现大粒径团聚体有机碳稳定性较低,土壤养分和微生物的主要载体为>2 mm 粒径团聚体,且长期植茶有助于土壤有机碳、全氮、碱解氮和有效磷的积累。有机碳、养分和微生物在各粒径团聚体分布的差异均会影响土壤线虫的繁殖和发育<sup>[7-10]</sup>,因此,长期植茶会引起土壤团聚体线虫群落分布的变化。本研究以川西低山丘陵区茶园土壤为研究对象,探讨植茶年限对土壤团聚体线虫群落结构的影响,旨在了解植茶过程中团聚体线虫群落的演变规律,为揭示土壤食物网结构对植茶年限响应机理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省雅安市名山区中峰乡万亩生态茶园(图 1),属亚热带季风性气候,年平均气温 15.4℃,无霜期 294d,年降雨量 1500 mm 左右,6—9 月份占全年降雨量的 72.6%。地貌类型以丘陵台地为主,土壤类型为第四纪老冲积物发育而成的黄壤。老川茶从 20 世纪 50 年代一直种植至今(其余品种均为引进),形成了具有规模化不同种植年限的老川茶园。

每年 10 月中旬,茶园施用猪圈肥 15000 kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>型复合肥(质量比 N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=20:8:8)750 kg/hm<sup>2</sup>,沿树冠边缘垂直下方开沟,依次加入复合肥、猪圈肥,最后覆土。每年追肥 3 次,春茶追肥时期在 2 月中旬,施用复合肥 1500 kg/hm<sup>2</sup>,尿素 600 kg/hm<sup>2</sup>;夏茶追肥时期在 5 月下旬,施用复合肥 750 kg/hm<sup>2</sup>,尿素 300 kg/hm<sup>2</sup>;秋茶追肥时期在 7 月下旬,施入复合肥 750 kg/hm<sup>2</sup>,尿素 300 kg/hm<sup>2</sup>。追肥位置与基肥相同。老川茶树修剪方式以轻修剪为主,每年修剪一次,在秋茶采摘后剪去树冠面上的突出枝条和树冠表层 3—10 cm 枝

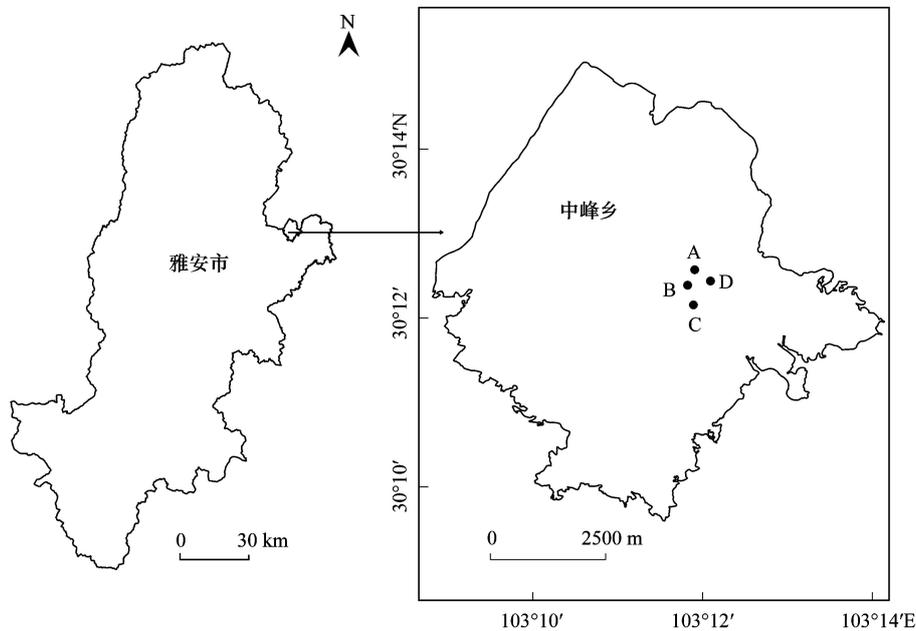


图1 研究区域位置

Fig.1 Location of the study site

A、B、C 和 D 分别代表植茶 19、26、34 和 56 年茶园

叶,然后归还土壤。

## 1.2 土样采集与处理

在野外调查的基础上,于 2018 年 7 月,综合考虑茶园的地质地貌条件和经营措施等,选择成土母质相同、地块相对集中且经营措施相似的不同植茶年限(19 年、26 年、34 年和 56 年)老川茶园土壤为采样对象。在每个茶园中按“品”字形布设 3 个典型样方(15 m×15 m),各样方间距离 50 m,每个样方内按“S”形设置 5 个采样点,具体采样位置设在树冠边缘垂直下方。将这 5 点土样混合作为 1 次重复,每个茶园重复 3 次。在 0—5 cm 采集原状土样,尽量避免挤压,以保持原状土样结构。将采集的 12 个混合土壤样品沿自然结构轻轻掰开,过 5 mm 筛除去动植物残体和小石块等,然后置于 4℃ 冰箱保存,供土壤团聚体分级和线虫的分离鉴定。采样点基本情况见表 1。

## 1.3 土壤团聚体分级

为了减少对土壤生境的破坏,在 4℃ 冰箱下风干至含水量 10% 左右,采用干筛法<sup>[14]</sup>将其分为 >2 mm、2—1 mm、1—0.25 mm 和 <0.25 mm 粒径团聚体(表 2)。

## 1.4 土壤线虫分离与鉴定

土壤线虫分离采用改良的 Baermann 漏斗法<sup>[15]</sup>,每个样品称取土样 50 g,置于烘虫箱内分离,48 h 后用离心管收集线虫,60℃ 温热杀死后,用三乙醇胺和福尔马林(TAF)固定,分离所得的土壤线虫在 OLYMPUS BX51 显微镜下直接计数。并根据土壤的自然含水量,将土壤线虫数量换算成每 100 g 干土中线虫的数量。从每个样品中随机抽取 100 条线虫在 OLYMPUS BX51 显微镜下参考《长白山森林土壤线虫》<sup>[16]</sup>、《中国淡水和土壤线虫研究》<sup>[17]</sup> 和《Soil And Freshwater Nematodes》<sup>[18]</sup> 进行科属鉴定(不足 100 条的全部鉴定)。利用 OLYMPUS BX51 显微镜及其数码显微成像系统对观测到的线虫优势属及常见属进行拍照记录。采用形态法根据线虫头部和取食生境将线虫划分为食细菌线虫(Bacterivores, Ba)、食真菌线虫(Fungivores, Fu)、植食线虫(Plant-parasites, Pp)和捕食/杂食线虫(Omnivores-Predators, OP) 4 个营养类群<sup>[19]</sup>。

表 1 不同植茶年限土壤理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties in the four tea plantations with different ages

指标 Item	植茶年限 Tea plantation age/a			
	19	26	34	56
容重 Bulk density/(g/cm <sup>3</sup> )	1.25±0.06ab	1.22±0.04b	1.27±0.08ab	1.29±0.03a
pH	4.19±0.01a	4.18±0.01a	4.13±0.02b	3.97±0.01c
砂粒 Sand/%	35.01±0.18a	36.42±0.10a	35.78±0.14a	34.37±0.18a
粉粒 Silt/%	30.94±0.10a	30.71±0.13a	30.72±0.18a	31.01±0.08a
黏粒 Clay/%	34.05±0.07a	32.87±0.19a	33.50±0.10a	34.62±0.08a
有机碳 Organic C/(g/kg)	15.01±0.38c	17.63±0.29b	19.05±0.35a	19.68±0.20a
全氮 Total N/(g/kg)	0.62±0.02c	0.62±0.01c	0.68±0.01b	0.80±0.01a
碱解氮 Available N/(mg/kg)	33.94±0.64c	37.78±1.09b	39.78±0.87ab	41.25±1.43a
有效磷 Available P/(mg/kg)	20.82±0.79c	20.55±1.47c	23.00±1.10b	26.30±1.41a
速效钾 Available K/(mg/kg)	56.74±1.40a	46.80±0.58b	45.61±1.40b	36.60±1.03c

同行不同小写字母表示数据在不同植茶年限间差异达 5% 显著水平

表 2 不同植茶年限土壤团聚体组成

Table 2 Composition of soil aggregates under different tea plantation years

植茶年限 Tea plantation age/a	土壤团聚体组成 Composition of soil aggregate fractions/%			
	>2 mm	2—1 mm	1—0.25 mm	<0.25 mm
19	47.27±0.02A <sup>d</sup>	24.39±0.02B <sup>a</sup>	23.89±0.02B <sup>a</sup>	4.46±0.01C <sup>a</sup>
26	77.52±0.03A <sup>a</sup>	10.89±0.01B <sup>c</sup>	8.50±0.01BC <sup>b</sup>	3.09±0.01C <sup>a</sup>
34	69.37±0.05A <sup>b</sup>	15.04±0.02B <sup>bc</sup>	11.18±0.02B <sup>b</sup>	4.41±0.01C <sup>a</sup>
56	56.85±0.05A <sup>c</sup>	19.58±0.02B <sup>ab</sup>	18.43±0.02B <sup>a</sup>	5.14±0.01C <sup>a</sup>

同行不同大写字母表示数据在不同粒径团聚体间差异达 5% 显著水平, 同列不同上标字母表示数据在不同植茶年限间差异达 5% 显著水平

## 1.5 数据处理

各类群数量优势度的划分: 个体数量占总捕获量 10% 以上者为优势类群, 个体数占总捕获量 1%—10% 为常见类群, 个体数占总捕获量 <1% 以下为稀有类群<sup>[16]</sup>。试验鉴定出线虫属的数量作为线虫的类群数。

根据 Bongers 划分线虫的不同生活史 c-p (colonizer-persister) 值。线虫的生态指数按以下公式<sup>[20]</sup> 计算:

$$\text{富集指数 (Enrichment index, EI)} = 100 \times e / (e + b)$$

$$\text{结构指数 (Structure index, SI)} = 100 \times s / (b + s)$$

式中, e 为食物网中的富集成分, 主要指食细菌线虫中 c-p 值为 1 和食真菌线虫 c-p 值为 2 的类群; b 代表食物网中的基础成分, 主要指食细菌线虫和食真菌线虫中 c-p 值为 2 的类群; s 代表食物网中的结构成分, 分别为食细菌线虫、食真菌线虫和杂食/捕食线虫中 c-p 值为 2 的类群。

采用 DPS 11.0 进行试验数据统计分析, 采用双因素方差分析 (two-way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 比较不同植茶年限团聚体线虫多度、类群数量和营养类群的差异; 图表制作采用 Excel 2010 和 Origin 9.0。各图表中数据均为平均值±标准误。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤团聚体线虫群落组成

本研究共捕获线虫 6602 条, 隶属于 46 属, 平均为 421 条/(100g) 干土。其中, 食细菌线虫 17 属, 食真菌线虫 6 属, 植食线虫 17 属, 杂食/捕食线虫 6 属。拟丽突属 *Acroboloides* 为优势属, 相对多度达 33.3%—53.3%, 盆咽属 *Panagrolaimus* 和小杆属 *Rhabditis* 等为常见属, 矛线属 *Dorylaimus* 和瘤咽属 *Tylencholaimellus* 等为稀有属 (表 3)。

表 3 不同植茶年限土壤团聚体中线虫属的相对多度/%  
Table 3 The relative abundance of various nematodes within soil aggregates under different tea plantation years

线虫属 (c-p 值) Nematode Genera/Family (c-p value)	植茶年限 Tea plantation age/a															
	19				26				34				56			
	>2	2-1	1-0.25	<0.25	>2	2-1	1-0.25	<0.25	>2	2-1	1-0.25	<0.25	>2	2-1	1-0.25	<0.25
盆咽属 <i>Panagrolaimus</i> (Ba1)	6.7	13.5	6.5	20.0	7.0	9.0	5.1	12.9	3.3	10.0	8.7	12.8	2.3	6.7	8.1	9.9
原杆属 <i>Protorhabditis</i> (Ba1)	2.7	7.3	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	5.0	4.3	0.0	0.3	1.3	0.0	5.3
小杆属 <i>Rhabditis</i> (Ba1)	4.3	0.0	14.6	0.0	3.0	9.7	4.4	9.7	1.7	5.6	6.3	7.7	1.0	8.0	7.7	7.0
扭钩属 <i>Plectonchus</i> (Ba1)	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
中杆属 <i>Mesorhabditis</i> (Ba1)	0.0	7.8	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
三等齿属 <i>Pelodera</i> (Ba1)	0.7	0.5	0.0	0.0	0.0	1.3	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
广杆属 <i>Caenorhabditis</i> (Ba1)	11.3	0.0	0.0	8.9	10.0	0.0	0.0	0.0	10.0	3.3	0.0	6.0	13.0	0.0	2.1	2.3
拟丽突属 <i>Acrobeloides</i> (Ba2)	45.7	45.8	45.5	33.3	47.0	49.0	50.2	44.1	50.3	48.7	49.3	42.7	53.3	52.0	49.1	46.8
头叶属 <i>Cephalobus</i> (Ba2)	3.3	5.2	7.3	0.0	2.0	6.0	6.1	1.1	3.3	3.3	3.0	3.4	1.7	2.0	3.2	0.6
威尔斯属 <i>Wilsonema</i> (Ba2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	1.1	0.0
连胃属 <i>Chronogaster</i> (Ba2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
真头叶 <i>Eucephalobus</i> (Ba2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
板唇属 <i>Chiloplacus</i> (Ba2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
板环属 <i>Placodra</i> (Ba3)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
梭咽属 <i>Prismatolaimus</i> (Ba3)	18.3	11.5	13.0	0.0	15.0	6.7	7.1	0.0	14.3	19.3	20.0	0.0	13.3	13.7	21.1	0.0
真崎头属 <i>Euterocephalus</i> (Ba3)	0.0	0.0	0.0	22.2	0.0	1.3	4.7	14.0	0.0	0.0	0.0	19.7	0.0	0.0	0.4	22.2
崎头属 <i>Teraocephalus</i> (Ba3)	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
假海矛属 <i>Pseudhalenchus</i> (Fu2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0
茎属 <i>Ditylenchus</i> (Fu2)	0.3	1.0	2.4	2.2	6.0	7.3	7.4	3.2	3.0	2.0	0.7	1.7	4.3	3.3	1.1	1.8
滑刃属 <i>Aphelenchoides</i> (Fu2)	0.0	2.1	0.0	0.0	2.0	0.7	3.7	3.2	1.7	1.0	1.3	0.9	2.0	2.3	1.4	2.9
真滑刃属 <i>Aphelenchus</i> (Fu2)	0.7	0.0	1.6	2.2	1.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.7	0.0	0.6
膜皮属 <i>Diphtherophora</i> (Fu3)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
瘤咽属 <i>Tylencholaimellus</i> (Fu4)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.7	0.0
垫刃属 <i>Tylenchus</i> (Pp2)	1.0	0.5	2.4	0.0	3.0	2.0	1.7	5.4	1.7	1.7	1.0	2.6	5.0	3.0	0.7	1.8
叉针属 <i>Boleodorus</i> (Pp2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	1.1	0.0	0.7	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
针属 <i>Paratylenchus</i> (Pp2)	0.0	0.5	0.0	4.4	0.0	0.7	0.3	0.0	3.3	0.7	1.3	0.0	0.3	1.3	0.7	0.0
丝尾垫刃属 <i>Filenchus</i> (Pp2)	0.3	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.3	0.0	1.3	0.0	0.7	0.0	0.7	0.0	0.0	2.9
野外垫刃属 <i>Aglenchus</i> (Pp2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
裸矛属 <i>Psilenchus</i> (Pp2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0

续表

线虫属 (c-p 值) Nematode Genera/Family (c-p value)	植茶年限 Tea plantation age/ a															
	19				26				34				56			
	>2	2-1	1-0.25	<0.25	>2	2-1	1-0.25	<0.25	>2	2-1	1-0.25	<0.25	>2	2-1	1-0.25	<0.25
粒属 <i>Angitia</i> (Pp2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
细纹垫刃属 <i>Laelochus</i> (Pp2)	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
具脊垫刃属 <i>Costenchus</i> (Pp2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
头垫刃属 <i>Cephalenchus</i> (Pp2)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
柄端球属 <i>Paurodontus</i> (Pp3)	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
矮化属 <i>Tylenchothynchus</i> (Pp3)	0.3	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.3	0.7	0.0	0.0
拟盘旋属 <i>Paratrylenchus</i> (Pp3)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
短体属 <i>Pratylenchus</i> (Pp3)	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
盘旋属 <i>Roylenchus</i> (Pp3)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
中轮属 <i>Criconemoides</i> (Pp3)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
剑属 <i>Xiphinema</i> (Pp5)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0
真矛线属 <i>Eudorylaimus</i> (OP4)	1.0	1.6	4.1	6.7	0.7	0.7	1.0	3.2	0.0	0.7	0.3	2.6	1.0	0.3	1.8	0.6
中矛线属 <i>Mesodorylaimus</i> (OP4)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
矛线属 <i>Dorylaimus</i> (OP4)	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.0
金线属 <i>Chrysonema</i> (OP4)	0.0	1.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.6
锯齿属 <i>Myloenchus</i> (OP4)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
穿咽属 <i>Nygodaimus</i> (OP5)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

c-p:生活史策略 colonizer-persister; Ba:食细菌线虫 Bacterivores; Fu:食真菌线虫 Fungivores; Pp:植食线虫 Plant-parasites; OP:捕食/杂食线虫 Omnivores-Predators; Bax, Fux, Ppx, OPx, x 指 c-p 值

由图 2 可知,随着植茶年限的延长,>0.25 mm 各粒径团聚体土壤线虫数量呈单峰的变化趋势,且在植茶 26 年时显著高于其他年限,而<0.25 mm 团聚体线虫数量则随着植茶年限的延长逐渐增加。各植茶年限土壤线虫数量随粒径的增大而增加,在>2 mm 粒径团聚体中最高。

由图 2 可知,随着植茶年限的延长,线虫类群数在>2 mm 粒径中均未达到显著差异,在 2—1 mm 和<0.25 mm 粒径团聚体中逐渐升高,在 1—0.25 mm 粒径中则先升高后降低。而随着粒径的减小,各植茶年限线虫类群数均逐渐减少。

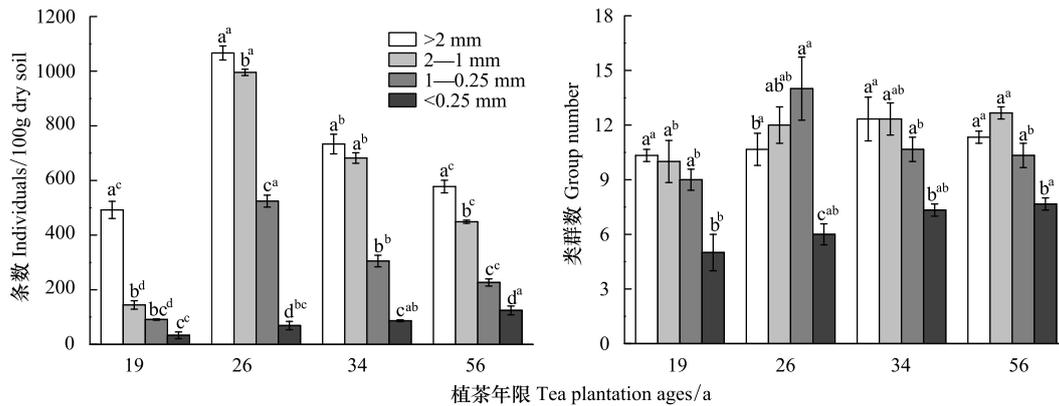


图 2 不同植茶年限土壤团聚体中线虫多度和类群数

Fig.2 Abundance of total nematodes and the group number of nematodes genera within aggregate fractions under the four tea plantations with different ages

不同小写字母表示数据在不同粒径团聚体间差异达 5% 显著水平,不同上标字母表示数据在不同植茶年限间差异达 5% 显著水平

## 2.2 土壤团聚体线虫营养类群结构

由图 3 可知,土壤线虫各营养类群数量差异明显。不同植茶年限土壤团聚体食细菌线虫数量最高(896—28.1 条/(100g)),占土壤线虫总数的 83%—96%;其次是食真菌线虫和植食线虫,其数量分别为 1.5—96 条/(100g)和 1.5—64 条/(100g),分别占土壤线虫总数的 1%—11%和 1.6%—8%;而杂食/捕食线虫数量最少(1.5—10.7 条/(100g)),占土壤线虫总数的 1%—6.7%。可见,在本研究中食细菌线虫在不同营养类群中占绝对优势。

与土壤线虫总数相似,食细菌线虫、食真菌线虫和植食线虫在>0.25 mm 各粒径团聚体数量呈现单峰的变化趋势,在植茶 26 年时显著高于其他年限;而在<0.25 mm 粒径团聚体中,食细菌线虫数量逐渐升高,食真菌线虫和植食线虫数量差异不显著。随着粒径的减小,各植茶年限食细菌线虫、食真菌线虫和植食线虫数量逐渐减少。杂食/捕食线虫数量在各植茶年限和粒径间,均未达到显著差异。

## 2.3 土壤团聚体线虫群落生态指数

由图 4 可知,SI 值多数均小于 50(除<0.25 mm 粒径),EI 值均大于 50。随着植茶年限的延长,>2 mm 粒径团聚体中线虫区系分布逐渐从 B 象限向 D 象限方向靠拢;2—0.25 mm 粒径团聚体中线虫区系分布不一,而<0.25 mm 粒径团聚体中线虫分布逐渐从 A 象限向 B 象限方向靠拢。各植茶年限均随着粒径的减小,线虫区系分布逐渐从 A 象限向 B 象限方向靠拢。

## 3 讨论

### 3.1 土壤团聚体线虫群落组成

土壤线虫总数的变化体现了土壤资源的总体有效性<sup>[21]</sup>。在本研究中,除<0.25 mm 粒径团聚体外,其余粒径在植茶 26 年时线虫数量显著高于其他年限,这主要因为植茶 26 年茶树凋落物中易分解组分相对较多<sup>[11]</sup>,土壤活性有机碳有所积累,进而有利于大粒径团聚体的形成与稳定;其次,该植茶年限土壤微生物量在

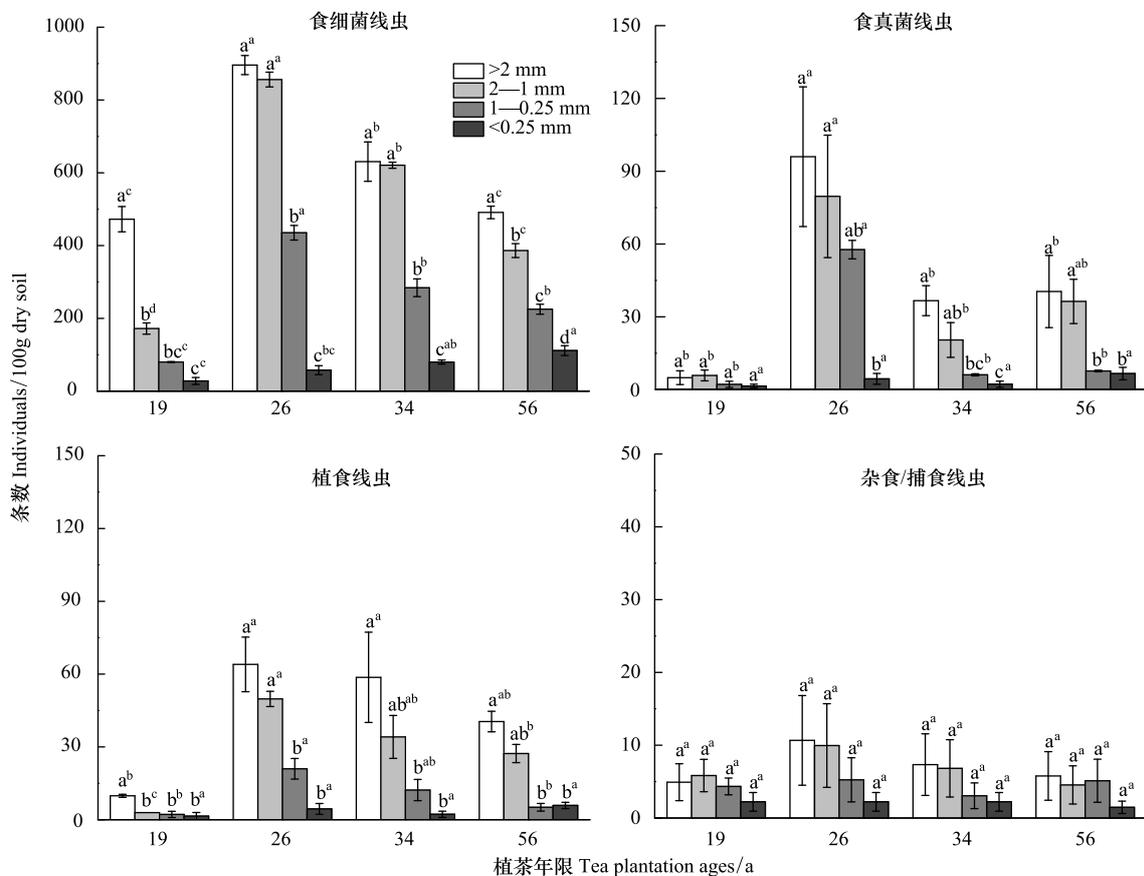


图3 不同植茶年限土壤团聚体中线虫营养类群的多度

Fig.3 Abundance of nematode trophic groups within aggregate fractions under the four tea plantations with different ages

大粒径团聚体中处于较高水平<sup>[22]</sup>,为线虫繁殖发育提供了大量的食源。此外,该植茶年限茶树凋落物 C:N 为 15.72<sup>[22]</sup>,易于形成品质好的软腐殖质。而土壤腐殖质品质影响线虫数量的多少,Yeates<sup>[23]</sup>研究表明,凋落物 C:N 等于 13.8 时,土壤线虫密度为  $4224 \times 10^3$  条/(100m<sup>2</sup>),当 C:N 升高到 18.3 时,土壤线虫密度则降低到  $2133 \times 10^3$  条/(100m<sup>2</sup>)。可见,植茶 26 年土壤含有更多适宜线虫生长繁殖的较大粒径团聚体,并且可以提供其生长繁殖的大量食源,故线虫在该植茶年限土壤中易于聚集。

Briar 等<sup>[7]</sup>研究发现,线虫总数在团聚体中的分布状况因管理方式的不同而异,如常规种植番茄,线虫总数的最大值出现在>1 mm 粒径团聚体,而在有机种植条件下线虫总数的最大值出现在<1 mm 粒径团聚体。而在本研究中,各植茶年限在>0.25 mm 粒径团聚体中土壤线虫数量随着粒径的减小而减少。表明植茶年限不影响线虫在团聚体中的分布情况,这和 Zhang 等<sup>[9]</sup>研究结果一致。不同粒径团聚体导致土壤空隙状况差异,进而影响土壤线虫分布。Hassink 等<sup>[24]</sup>发现线虫的数量和土壤中 30—90 μm 的孔隙数量成正相关;Briar 等<sup>[7]</sup>发现土壤线虫在 0.25—1 mm 粒径团聚体中密度低。而本研究却发现>2 mm 粒径团聚体中线虫总数最高,表明大粒径团聚体更适合线虫生存。一方面是因为大粒径团聚体中包裹着较多数量的新鲜有机质<sup>[22]</sup>;另一方面大粒径团聚体孔隙度好,良好的通气性,为线虫的繁殖提供了适宜的生存环境。表明>2 mm 粒径团聚体的形成与稳定对于维持茶园土壤线虫群落数量具有重要意义。

在本研究中,拟丽突属作为该区域的绝对优势属,和 Zhang 等<sup>[9]</sup>研究黑土区域的结果一致。这主要是因为表层土壤有机质丰富,为其提供了良好的繁殖环境。自然选择的作用使该类群繁殖力增强,通过提高某些线虫类群的线虫个体数量来替代一些在该环境中不易生存的线虫的作用,从而维持整个土壤生态系统的稳定,这与 Walker<sup>[25]</sup>提出的“冗余种”假说一致。

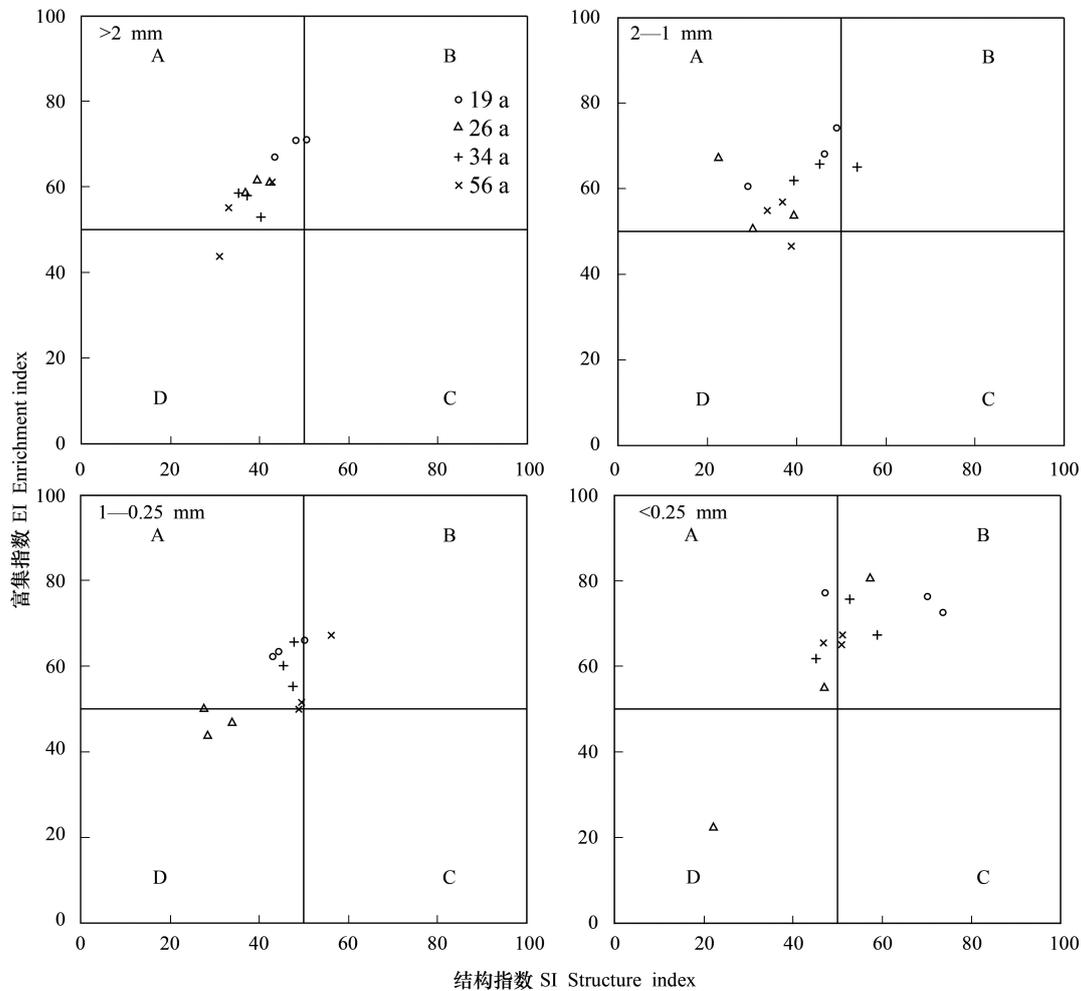


图4 不同植茶年限土壤团聚体中线虫区系分析

Fig.4 Nematode faunal analysis of cucumber within aggregate fractions under the four tea plantations with different ages

### 3.2 土壤团聚体线虫营养类群结构

土壤线虫营养类群反映了土壤线虫食物资源组成比例,资源的有效性增加可以导致微生物数量的增加,并进一步在土壤食物网内的更高营养级上反映出来,符合资源影响食物网结构的“上行效应”趋势<sup>[21]</sup>。土壤团聚体的空间分布和形状大小不同,从而导致不同粒径团聚体中水热条件存在差异,进而影响团聚体中线虫营养类群的分布特征。在本研究中,食细菌线虫、食真菌线虫和植食线虫数量的分布规律相似,均是随着植茶年限的延长先升高后降低,在植茶 26 年时数量较高,且在>2 mm 粒径团聚体中数量最多。这与土壤微生物在各植茶年限土壤团聚体的变化趋势基本一致<sup>[22]</sup>。此外,由于食细菌线虫在该研究区域营养类群占据主导地位,从而导致线虫总数在团聚体中的分布规律与食细菌线虫相似。可见,土壤线虫的分布会因植茶阶段的不同而发生改变,且分布存在临界年限。表明在茶园生态系统中,植茶 26 年的土壤更有利于线虫总数和大部分营养类群的繁殖。由于土壤线虫的群落结构和食物资源的变化、有机物的分解途径及能量流动等生态过程密切相关<sup>[26]</sup>。因此,植茶 26 年土壤食物网物质循环和能量流动周转速率可能较高。

食细菌线虫是土壤中最主要的自由生活线虫,也是土壤线虫中优势的营养类群<sup>[27]</sup>。在农田生态系统中达 60%以上,在根际土壤的比例可达 90%以上<sup>[28-29]</sup>。研究表明,一条成熟的食细菌线虫每天大约可取食  $10^5$ — $10^6$  个细菌来维持其生长<sup>[30]</sup>。在本研究中,食细菌线虫占据主导优势且在植茶 26 年时最高。其根本原因是细菌为该区域的优势类群且植茶 26 年时细菌生物量相较于其他年限多。值得注意的是,植茶 26 年时,

植食线虫数量也相对较高。一般认为,植食线虫与植物根系生长情况有关<sup>[31]</sup>。植食线虫生存的场所主要是根际,它们以新鲜细根为食物,依赖根系生存。植茶26年时茶龄相对较短,发达的幼根为植食线虫提供了更多的取食位点。这与Cepelle等<sup>[32]</sup>和Liu等<sup>[33]</sup>研究结果一致。杂食/捕食线虫是决定土壤食物网复杂性的关键生物类群<sup>[34]</sup>。而在本研究中,其数量最少且在团聚体和年限变化间均未达到显著差异,可能跟该类群营养类群c-p值高,体型较大,处于较高的营养级有关<sup>[35]</sup>。

### 3.3 土壤团聚体线虫群落生态指数

Ferris等<sup>[20]</sup>在线虫功能团划分的基础上提出了线虫区系分析的方法用来反应土壤食物网结构、土壤养分富集状况和分解途径等信息。EI主要用于评估食物网对可利用资源的响应,EI数值越高,表明食物资源丰富,有机质的分解以细菌通道为主。SI主要用于评价食物网的长度及关联度。SI值越高,表明食物网的长度越长,关联度越复杂,食物网越稳定。二者结合可以更好地指示土壤环境所受到的扰动和土壤食物网情况。本研究发现随着植茶年限的延长,>2 mm粒径团聚体中,富集指数和结构指数逐渐降低且线虫区系分布从B象限向D象限方向靠拢。表明随着植茶年限的延长,土壤食物资源减少,食物网结构变得简单,使得土壤养分富集状况变差,食物网逐渐退化。而随着团聚体粒径的变化,富集指数和结构指数在各植茶年限均有增加的趋势,且<0.25 mm粒径团聚体中逐渐向B象限靠拢,这表明相较>0.25 mm粒径团聚体,<0.25 mm粒径团聚体食物资源丰富,受到的干扰少,食物网较稳定。由于土壤食物网的调控方式以自下而上为主,自上而下为辅,即作为土壤食物网能量来源的碎屑,其数量和质量决定了食物网的结构和功能。因此,土壤食物网管理主要通过连续不断的补充外源有机质,来维持食物网的稳定<sup>[3]</sup>。故研究区在退耕植茶工程的实施过程中,应在植茶后期注意对有机肥的合理配施,保持茶园土壤的肥力和土壤食物网结构,以实现茶园土壤的可持续利用。同时,土地利用方式、耕作制度等土地管理措施的影响首先体现在大团聚体中,故在植茶后期也应加强对土地管理等措施的改善,尽量减少大粒径团聚体的人为干扰。

## 4 结论

(1)不同植茶年限土壤团聚体线虫群落以拟丽突属 *Acroboloides* 为优势属,线虫总数随植茶年限的延长呈先升高后降低的变化趋势,植茶26年数量最高,随粒径的减小而减少。随着植茶年限的延长,线虫类群数在>2 mm粒径团聚体中响应不敏感;随着粒径的减小,各植茶年限线虫类群数均减少。

(2)不同植茶年限土壤团聚体线虫群落以食细菌线虫为主,多数线虫营养类群数量均随植茶年限的延长呈先升高后降低的变化趋势,在植茶26年数量最高,且随粒径的减小而减少。表明植茶26年土壤更适合线虫繁殖且大粒径土壤团聚体更有利于线虫生存。

(3)线虫区系分析表明,随着植茶年限的延长,土壤养分变差,食物网退化;相较>0.25 mm粒径团聚体,<0.25 mm粒径团聚体受到的干扰少。

### 参考文献 (References):

- [1] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10(3): 239-251.
- [2] Neher D A. Role of Nematodes in Soil Health and Their Use as Indicators. *Journal of Nematology*, 2001, 33(4): 161-168.
- [3] 陈云峰, 韩雪梅, 李钰飞, 胡诚. 线虫区系分析指示土壤食物网结构和功能研究进展. *生态学报*, 2014, 34(5): 1072-1084.
- [4] Sánchez-Moreno S, Jiménez L, Alonso-Prados J L, García-Baudín J M. Nematodes as indicators of fumigant effects on soil food webs in strawberry crops in Southern Spain. *Ecological Indicators*, 2010, 10(2): 148-156.
- [5] Thomasson A J, Jones F G W. Bulk Density as an indicator of pore space in soils usable by nematodes. *Nematologica*, 1976, 22(2): 133-137.
- [6] Jiang X, Wright A L, Wang J, Li Z. Long-term tillage effects on the distribution patterns of microbial biomass and activities within soil aggregates. *CATENA*, 2011, 87(2): 276-280.
- [7] Briar S S, Fonte S J, Park I, Six J, Scow K, Ferris H. The distribution of nematodes and soil microbial communities across soil aggregate fractions and farm management systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(5): 905-914.
- [8] Zhang Z Y, Zhang X K, Mahamood M, Zhang S Q, Huang S M, Liang W J. Effect of long-term combined application of organic and inorganic

- fertilizers on soil nematode communities within aggregates. *Scientific Reports*, 2016, 6: 31118.
- [ 9 ] Zhang S X, Li Q, Lü Y, Zhang X P, Liang W J. Contributions of soil biota to C sequestration varied with aggregate fractions under different tillage systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 62: 147-156.
- [ 10 ] Jiang Y J, Sun B, Jin C, Wang F. Soil aggregate stratification of nematodes and microbial communities affects the metabolic quotient in an acid soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 60: 1-9.
- [ 11 ] Li W, Zheng Z C, Li T X, Zhang X Z, Wang Y D, Yu H Y, He S Q, Liu T. Effect of tea plantation age on the distribution of soil organic carbon fractions within water-stable aggregates in the hilly region of Western Sichuan, China. *CATENA*, 2015, 133: 198-205.
- [ 12 ] Wang S Q, Li T X, Zheng Z C. Effect of tea plantation age on the distribution of soil organic carbon and nutrient within micro-aggregates in the hilly region of western Sichuan, China. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 113-119.
- [ 13 ] Wang S Q, Li T X, Zheng Z C. Distribution of microbial biomass and activity within soil aggregates as affected by tea plantation age. *CATENA*, 2017, 153: 1-8.
- [ 14 ] Gartzia-Bengoetxea N, González-Arias A, Merino A, de Arano I M. Soil organic matter in soil physical fractions in adjacent semi-natural and cultivated stands in temperate Atlantic forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(8): 1674-1683.
- [ 15 ] Zhang Z Y, Zhang X K, Zhao J S, Zhang X P, Liang W J. Tillage and rotation effects on community composition and metabolic footprints of soil nematodes in a black soil. *European Journal of Soil Biology*, 2015, 66: 40-48.
- [ 16 ] 张晓珂, 梁文举, 李琪. 长白山森林土壤线虫. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [ 17 ] 吴纪华. 中国淡水和土壤线虫的研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 1999.
- [ 18 ] Goodey T. Soil and freshwater nematodes; a monograph. *JAMA*, 1951, 146(11): 1085-1086.
- [ 19 ] Yeates G W, Bongers T, De Goede R G, Freckman D W, Georgieva S S. Feeding habits in soil nematode families and genera-an outline for soil ecologists. *Journal of Nematology*, 1993, 25(3): 315-331.
- [ 20 ] Ferris H, Bongers T, de Goede R G M. A framework for soil food web diagnostics; extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18(1): 13-29.
- [ 21 ] 刘雨迪, 陈小云, 刘满强, 秦红涛, 李辉信, 胡锋. 不同稻作年限下土壤微生物学性质和线虫群落特征的变化. *生物多样性*, 2013, 21(3): 334-342.
- [ 22 ] Wang S Q, Li T X, Zheng Z C. Response of soil aggregate-associated microbial and nematode communities to tea plantation age. *CATENA*, 2018, 171: 475-484.
- [ 23 ] Yeates G W. Diversity of nematode faunae under three vegetation types on a pallic soil in Otago, New Zealand. *New Zealand Journal of Zoology*, 1996, 23(4): 401-407.
- [ 24 ] Hassink J, Bouwman L A, Zwart K B, Brussaard L. Relationships between habitable pore space, soil biota and mineralization rates in grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(1): 47-55.
- [ 25 ] Walker B H. Biodiversity and Ecological Redundancy. *Conservation Biology*, 1992, 6(1): 18-23.
- [ 26 ] 潘凤娟, 韩晓增, 邹文秀. 春大豆长期连作对土壤线虫群落结构和食物网的影响. *大豆科学*, 2017, 36(4): 606-613.
- [ 27 ] 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. *生物多样性*, 2007, 15(2): 124-133.
- [ 28 ] Sohlenius B, Sandor A. Vertical distribution of nematodes in arable soil under grass (*Festuca pratensis*) and barley (*Hordeum distichum*). *Biology and Fertility of Soils*, 1987, 3(1/2): 19-25.
- [ 29 ] Bouwman L A, Bloem J, Van Den Boogert P H J F, Bremer F, Hoenderboom G H J, de Ruiter P C. Short-term and long-term effects of bacterivorous nematodes and nematophagous fungi on carbon and nitrogen mineralization in microcosms. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, 17(4): 249-256.
- [ 30 ] Ingham R E, Trofymow J A, Ingham E R, Coleman D C. Interactions of bacteria, fungi, and their nematode grazers: effects on nutrient cycling and plant growth. *Ecological Monographs*, 1985, 55(1): 119-140.
- [ 31 ] 陈利, 刘金梁, 谷加存, 王政权. 水曲柳和落叶松人工林土壤线虫密度的季节动态. *林业科学*, 2011, 47(12): 69-77.
- [ 32 ] van Capelle C, Schrader S, Brunotte J. Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota: A review with a focus on German data. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 50: 165-181.
- [ 33 ] Liu M Q, Chen X Y, Qin J T, Wang D, Griffiths B, Hu F. A sequential extraction procedure reveals that water management affects soil nematode communities in paddy fields. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40(2): 250-259.
- [ 34 ] Polis G A, Strong D R. Food web complexity and community dynamics. *American Naturalist*, 1996, 147(5): 813-846.
- [ 35 ] Forge T A, Bittman S, Kowalenko C G. Responses of grassland soil nematodes and protozoa to multi-year and single-year applications of dairy manure slurry and fertilizer. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(10): 1751-1762.