

# 不同种植年限黄瓜温室土壤线虫群落 结构及多样性的比较

张雪艳<sup>1</sup>, 张亚萍<sup>1</sup>, 许帆<sup>1</sup>, 田兴武<sup>2</sup>, 刘馨<sup>1</sup>, 祁娟霞<sup>1</sup>, 李建设<sup>1\*</sup>

(1 宁夏大学农学院/宁夏现代设施园艺工程技术研究中心/宁夏大学宁夏设施园艺技术创新中心, 银川 750021;  
2 吴忠国家农业科技园区管理委员会, 宁夏吴忠 751200)

**摘要:**【目的】针对土壤连作障碍问题, 以土壤线虫群落结构和多样性为研究重点, 分析不同种植年限土壤生态系统间的差异, 进而探讨不同种植年限温室土壤的健康状况。【方法】采集 8 年、10 年、13 年和 16 年温室黄瓜土壤, 以 1 年露地土壤为对照, 采用线虫形态学鉴定方法, 分析不同种植年限土壤线虫群落结构及多样性的变化规律。【结果】不同种植年限共观测到土壤线虫属 21 个, 全部为优势属和常见属; 线虫总数和植物寄生线虫数量在不同种植年限的分布依次为 10 年 > 16 年 > 13 年 > 8 年 > 1 年, 线虫总数种植年限之间差异显著, 范围为每 100 g 干土 61~437 条; 线虫群落生态指数对种植年限有不同的响应, 土壤线虫群落多样性指数  $H'$  在不同种植年限土壤中的分布为 16 年 > 13 年 > 1 年 > 8 年 > 10 年, 均匀度指数  $J$  为 13 年 > 16 年 > 1 年 > 8 年 > 10 年, 而优势度指数  $\lambda$  的分布则为 10 年 > 16 年 > 13 年 > 8 年 > 1 年, 5 种不同种植年限土壤的 NCR 指数在 0.6~9.8 之间, WI 分布为 1 年 > 8 年 > 13 年 > 16 年 > 10 年; 线虫成熟指数 MI 在种植 16 年的温室土壤中最小, 相反 PPI/MI 值则在种植 16 年的土壤中最大; 丰富度指数 SR 随种植年限呈先升高后降低, 10 年的最低; 线虫区系分布结果显示, 除种植 10 年黄瓜土壤的样点落在第 IV 象限外, 其余种植年限黄瓜土壤的样点均落在第 I 象限。【结论】综合分析得出, 连续种植会使土壤变得贫瘠, 健康状况变差, 受干扰程度变大, 种植 10 年土壤线虫多样性、稳定性最差, 土壤环境已受胁迫。

**关键词:** 种植年限; 土壤线虫; 营养类群; 群落结构

## Comparison of soil nematodes community structure and diversity in cucumber greenhouses in different cultivation years

ZHANG Xue-yan<sup>1</sup>, ZHANG Ya-ping<sup>1</sup>, XU Fan<sup>1</sup>, TIAN Xing-wu<sup>2</sup>, LIU Xin<sup>1</sup>, QI Juan-xia<sup>1</sup>, LI Jian-she<sup>1\*</sup>

[ 1 School of Agronomy, Ningxia University / Facility Horticulture Engineering Technique Center of Ningxia / Research Center for Technological Innovation of Facility Horticulture of Ningxia (Ningxia University), Yinchuan 750021, China;

2 Management Committee of Wuzhong National Agricultural Sci-Tech Garden, Wuzhong, Ningxia 751200, China ]

**Abstract:** 【Objectives】 Aiming at the problem of soil continuous cropping obstacle, this study investigated the soil health status in greenhouses with different cultivation years, based on the community structure and diversity of soil nematode and the difference of soil ecosystems in different cultivation years. 【Methods】 Soil samples were collected in greenhouses which were continuous used for cultivation of cucumber for 8, 10, 13 and 16 years, and a control soil sample was collected in an open field nearby, in which only one season of cucumber was produced. The community structure and diversity of soil nematode were analyzed using the morphological identification method. 【Results】 There were 21 nematode genera detected in all the samples. Both the total nematode and plant-parasite nematode numbers per 100 g of dry soil were in order of 10 a > 16 a > 13 a > 8 a

收稿日期: 2016-06-17 接受日期: 2016-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31460531); 国家科技支撑计划资助项目 (2014BAD05B02); 自治区国内引才 312 计划项目资助; 宁夏自治区园艺优势特色学科 (2015-1) 资助。

作者简介: 张雪艳 (1981—), 女, 河北保定人, 副教授, 主要从事设施蔬菜栽培与生理与生态研究。

E-mail: zhangxueyan123@sina.com。\* 通信作者 E-mail: jslincn@163.com

and 1 a, and the total nematode number were significantly different among cultivation years, ranging from 61 to 437 per 100 g dry soil. The nematode ecological indices responded differently to cultivation years. The Shannon index ( $H'$ ) was in order of 16 a > 13 a > 1 a > 8 a > 10 a, while the evenness index ( $J$ ) was in order of 13 a > 16 a > 1 a > 8 a > 10 a. The dominance index ( $\lambda$ ) was in the order of 10 a > 16 a > 13 a > 8 a > 1 a. However, the Wasilewska index ( $WI$ ) was in a reverse trend. For all soils the nematode channel ratio ( $NCR$ ) was higher than 0.5, ranging from 0.6 to 9.8. The lowest nematode maturity index was found in the 16 year-soil, resulting in the highest PPI/MI ratio. The richness index ( $SR$ ) increased firstly, then decreased gradually and finally bottomed at the lowest value in the 10-year soil. The nematode in the 10-year soil distributed in the IV quadrant, while the others distributed in the I quadrant. **【 Conclusions 】** The soil in the 1-year open field is low in nematode number, showing a stable soil ecosystem. Continuous cropping leads to accumulation of nematode in number but decrease in nematode genera, the soil micro community becomes poor in health and unstable. The worst nematode diversity and stability are appeared in the 10-year soil in the tested condition.

**Key words:** cultivation year; soil nematode; trophic groups; community structure

宁夏是我国蔬菜的主产区之一,近年来,宁夏蔬菜生产发展迅速,带来了较好的经济效益和社会效益,2015年蔬菜生产面积高达127.3万亩。但是在蔬菜生产中,由于缺乏科学合理的施肥指导,普遍存在盲目过量施肥、养分比例失调、肥效不高等问题,造成蔬菜温室土壤养分富集、蔬菜品质下降现象日趋严重,部分种植年限较长的温室已不能进行蔬菜生产<sup>[1-2]</sup>,严重影响了农业持续发展及生态环境安全。

随着种植年限的增加,土壤速效氮、磷、钾以及硝态氮不断累积,水稳性团聚体含量逐渐降低,土壤平均破坏程度加重<sup>[2-3]</sup>,土壤含盐量逐年积累<sup>[4]</sup>,土壤中的速效钾、硝态氮、全氮和有机质含量显著增加,土壤微生物总量和功能多样性显著降低<sup>[5]</sup>。由于土壤微生物生物量及酶活性对土壤环境的变化十分敏感,其随着施肥年限的改变也随之改变<sup>[6-7]</sup>。土壤生物作为土壤中最具生命力的部分,能有效地评价土壤的活力和健康状况<sup>[8-9]</sup>。线虫广泛存在于各类土壤中,在土壤腐屑食物网中占有重要地位,参与调控土壤的有机质分解和养分循环<sup>[10-12]</sup>。由于土壤线虫具有数量庞大、种类丰富和营养多样等特点,其对农业管理措施和环境变化等扰动十分敏感,常被作为土壤质量健康的指示生物<sup>[13-15]</sup>。

银川军马场村温室均为连续种植黄瓜超过8年的老棚,其根结线虫发生严重,发病率达90%以上,造成春茬黄瓜5月后不能正常生产,严重制约了黄瓜的持续高效生产。因此,本研究以宁夏银川市军马场村连续种植8、10、13、16年的设施黄瓜土壤为处理,以邻近的第1年进行温室种植的露地

土壤作为对照,系统分析不同种植年限土壤的线虫群落结构及多样性的变化规律,为宁夏地区设施蔬菜可持续生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

供试土壤采集于宁夏回族自治区银川市西夏区军马场村。该地区属中温带干燥气候区,冬寒夏暑,日照充足,光能资源丰富,全年平均气温为13.1℃,年降水量介于99.7~233.1 mm之间,蒸发量远大于降水量。不同种植年限土壤养分含量见表1。

表1 不同种植年限土壤养分含量(mg/kg)

Table 1 Soil nutrient contents in different cultivation years

| 种植年限(a)          | 速效氮         | 速效钾         | 速效磷         | 铵态氮        |
|------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| Cultivation year | Available N | Available K | Available P | Ammonium-N |
| 1                | 53.7 ± 0.1  | 617 ± 5.5   | 10.0 ± 1.5  | 5.1 ± 0.02 |
| 8                | 13.2 ± 0.1  | 637 ± 5.3   | 81.5 ± 2.3  | 4.9 ± 0.17 |
| 10               | 39.3 ± 1.9  | 683 ± 18    | 99.4 ± 3.1  | 4.2 ± 0.38 |
| 13               | 30.0 ± 1.0  | 377 ± 11.3  | 96.5 ± 2.8  | 4.9 ± 0.05 |
| 16               | 38.3 ± 1.5  | 627 ± 6.1   | 152.6 ± 0.7 | 2.4 ± 0.51 |

### 1.2 试验材料及设计

军马场村温室均为种植黄瓜超过8年的老棚,试验选取相互邻近的、种植及管理模式相同的4种不同种植年限温室作为处理,分别为种植8年、10年、13年和16年的温室黄瓜土壤,以邻近的仅开垦1年并进行了第1年种植的露地土壤作为对照,每种耕作年限处理选择5个温室作为重复,温室内种植

的蔬菜种类均为黄瓜, 种植模式为一年两茬, 春茬黄瓜(2月中旬到7月上旬)—夏茬休闲—秋冬茬黄瓜(9月下旬到翌年1月下旬), 施用的基肥主要为氮磷钾复合肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 质量比为 15:15:15), 年均投入量为 0.75 t/hm<sup>2</sup>, 有机肥(鸡粪, 80% 含水量)施用量为 187.5 t/hm<sup>2</sup> (黄瓜结果期追施速效肥总量 0.75 t/hm<sup>2</sup>)。

### 1.3 土壤样品采集

取样时间为 2015 年 5 月, 每个试验温室取 15 个样点, 每个样点采集 0—30 cm 表层土壤, 将取回的鲜土样混匀后过 2 mm 筛, 保存于 4℃ 冰箱, 用于分离鉴定土壤线虫; 剩余土样风干后过 1 mm 筛用于土壤理化性状分析。

### 1.4 分析方法

1.4.1 土壤理化指标的测定 土壤速效氮采用碱解扩散法测定; 速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定; 速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定; 铵态氮采用靛酚蓝比色法测定<sup>[16]</sup>。

1.4.2 土壤线虫的测定方法 从 100 g 新鲜土样中利用改良的浅盘法对土壤线虫进行分离提取<sup>[17]</sup>。线虫总数通过解剖镜直接计数, 最终折算成 100 g 干土中土壤线虫的数量。随机抽取 100 条线虫(不足 100 的全部鉴定), 在光学显微镜下进行科属的鉴定。根据线虫的取食习性和食道特征将其分成以下 4 个营养类群: 食细菌类(bacterivores, BF)、食真菌类(fungivores, FF)、植物寄生类(plant parasites, PP)、捕食/杂食类(omnivores/predators, OP), 土壤线虫的分类鉴定参照 Bongers<sup>[18]</sup>的分类图进行。

1.4.3 分析方法 依据 Bongers<sup>[18]</sup>划分线虫的不同的生活史 *c-p* 值。线虫生态指数按以下公式进行计算:

1) 食真菌线虫与食细菌线虫比例 (F/B) = FF/BF, 其中 FF 和 BF 分别为食真菌和食细菌线虫的相对多度<sup>[19]</sup>;

2) 线虫通路比值 (NCR) = BF/(FF + BF)<sup>[20]</sup>;

3) Shannon 多样性 (diversity) 指数 ( $H'$ ) =  $-\sum P_i(\ln P_i)$ , 其中  $P_i$  是第  $i$  个物种的个体数占个体总数的比例<sup>[21]</sup>;

4) Simpson 优势度指数 ( $\lambda$ ) =  $\sum P_i^2$ <sup>[20]</sup>;

5) Pielou 均匀度指数 ( $J$ ) =  $H/\ln S$ , 其中  $S$  为分类单元数<sup>[21]</sup>;

6) 丰富度指数 (SR) =  $(S - 1)/\ln N$ , 其中  $N$  为线虫的个体总数<sup>[21]</sup>;

7) 瓦斯乐斯卡指数 (wasilewska index, WI) = (BF + FF)/PP, BF 为食细菌线虫多度, FF 为食真菌线虫多度, PP 为食植物类线虫的相对多度<sup>[20]</sup>;

8) 自由生活线虫成熟度指数 (maturity index, MI) 和植物寄生线虫指数 (plant parasite index, PPI) =  $\sum_{i=1}^n v(i) \cdot f(i)$ , 其中,  $v(i)$  为根据自由生活线虫(植物寄生线虫)在生态演替中的不同生活策略分别赋予的 *c-p* 值,  $f(i)$  为第  $i$  种线虫的个体数占群落总个体数的比例<sup>[18]</sup>;

9) 富集指数 (enrichment index, EI) =  $100 \times e/(b + e)$ ;

10) 结构指数 (structure index, SI) =  $100 \times s/(b + s)$ , 其中  $e$  (enrichment) 代表食物网中的富集成分, 主要指 *cp* 值为 1 和 2 的食细菌和食真菌线虫;  $b$  (basal) 代表食物网中的基础成分, 主要指 *cp* 值为 2 的食细菌和食真菌线虫;  $s$  (structure) 代表食物网中的结构成分, 包括 *cp* 值为 3~5 的食细菌、食真菌、植物寄生性和捕食/杂食性线虫<sup>[22]</sup>。

### 1.5 数据分析

采用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件进行统计分析。采用单因素方差分析进行不同种植年限之间平均值的比较, 平均值 ± 标准差表示样本的分散程度, 采用  $F$  检验评价 5 个不同种植年限之间的各项指标差异,  $P < 0.05$  为达到显著水平。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤线虫数量

从线虫总数上来看, 不同种植年限下黄瓜土壤线虫的总数存在显著的差异性, 不同种植年限下线虫的总数为 10 a > 16 a > 13 a > 8 a > 1 a, 种植年限为 10 a 的黄瓜土壤线虫总数显著高于其他种植年限的, 达到了每 100 g 干土 437 条, 而种植 1 年的露地土壤线虫总数最少, 仅有 61 条(图 1)。

### 2.2 土壤线虫群落组成及营养类群结构

通过对不同种植年限土壤线虫进行调查, 共鉴定 21 个线虫属, 其中食细菌线虫 13 个属, 食真菌线虫 2 个属, 植物寄生线虫 3 个属, 捕食杂食线虫 3 个属。种植年限为 1、8、10、13 和 16 的土壤线虫属的数目分别为 12、15、8、8、14 个。

优势属共计 6 种, 分别为食细菌线虫板屑属 (*Chiloplacus*)、丽突属 (*Acrobeles*) 和原杆属 (*Protorhabditis*), 食真菌线虫真滑刃属 (*Aphelenchus*)

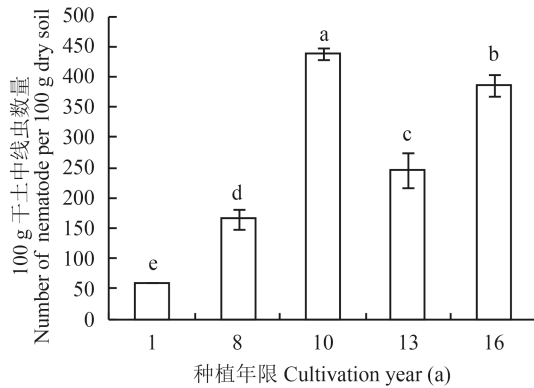


图 1 不同种植年限黄瓜土壤线虫总数

Fig. 1 Total nematode numbers of cucumber soil in different cultivation years

[注 (Note): 方柱上不同字母表示不同种植年限间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different letters above the bars mean significance among different cultivation years ( $P < 0.05$ ).]

和丝尾垫刃属 (*Filenchus*), 植物寄生线虫类群的根结属 (*Meloidogyne*)。种植 1 年露地土壤中的优势线虫属为板唇属、原杆属、真滑刃属和丝尾垫刃属, 相对多度分别为 22.2%、21.2%、18.2% 和 10.1%; 种植年限为 8 年温室黄瓜土壤的优势线虫属为板唇属、丽突属和根结属, 相对多度分别为 18.5%、18.8% 和 33.7%; 种植年限为 10 年温室黄瓜土壤的优势线虫属仅有相对多度高达 84.0% 的根结属; 种植年限为 13 年温室黄瓜土壤的优势线虫属为板唇属、丽突属、原杆属和根结属, 相对多度分别为 18.9%、13.3%、13.3% 和 41.1%; 种植年限为 16 年温室黄瓜土壤的优势线虫属为板唇属和根结属, 相对多度分别为 24% 和 51.0% (表 2)。

由图 2 可知, 植物寄生线虫在不同种植年限差异显著, 依次为  $10\text{ a} > 16\text{ a} > 13\text{ a} > 8\text{ a} > 1\text{ a}$ , 在种植 10 年的土壤中达到了每 100 g 干土 380 条, 不同种植年限食细菌线虫数量存在显著差异, 分别为  $16\text{ a} > 13\text{ a} > 8\text{ a} > 10\text{ a} > 1\text{ a}$ , 食真菌线虫在种植 1 a 和 13 a 土壤中的数量分别为每 100 g 干土 21 条和 11 条, 在其余种植年限中的数量均不足 10 条, 不同种植年限土壤中捕食/杂食类线虫数量 100 g 干土在 0~9 条之间, 种植 13 年温室黄瓜土壤中未检测到。

将捕获的线虫分为 4 个营养类群, 由图 3 可以看出, 植物寄生线虫在多年种植土壤中均为优势类群, 在 8、10、13 和 16 年种植土壤中所占比例分别为 33.7%、87.0%、41.1% 和 51.0%; 不同种植年限土壤中的食细菌线虫均为优势类群, 所占比例最高和最低分别出现在种植 13 年和 10 年的土壤中, 与

种植 1 年的露天土壤相比, 分别增加了 1.0%, 降低了 43.4%; 食真菌线虫除在种植 1 年的露天土壤中为优势类群外, 在其余种植年限土壤中所占比例在 1.0%~4.4% 之间; 不同种植年限土壤中捕食/杂食类线虫所占比例均较小, 在 0~3.0% 之间。

### 2.3 土壤线虫群落结构评价

表 3 给出了不同种植年限下的土壤线虫生态指数, 其中, F/B 在 0.02~0.66 之间, 在连续种植 8 年、13 年和 16 年的土壤中均小于 0.1, 并在种植 16 年的土壤中最小, 说明在连续种植 16 年的土壤中食真菌线虫最少。

多样性指数  $H'$ 、均匀度指数  $J$ 、优势度指数  $\lambda$  是被用来衡量线虫群落多样性的常用指标<sup>[17]</sup>。从表 3 可以看出, 不同种植年限土壤线虫的多样性指数  $H'$  为  $16\text{ a} > 13\text{ a} > 1\text{ a} > 8\text{ a} > 10\text{ a}$ , 均匀度指数  $J$  为  $13\text{ a} > 16\text{ a} > 1\text{ a} > 8\text{ a} > 10\text{ a}$ , 其中种植年限为 10 a 的温室黄瓜土壤线虫多样性指数和均匀度指数均显著低于其他种植年限, 分别为 0.72 和 0.35, 而优势度指数正相反, 种植年限为 10 a 的温室黄瓜土壤线虫优势度指数为 0.71, 显著高于其他种植年限, 其余为  $16\text{ a} > 13\text{ a} > 8\text{ a} > 1\text{ a}$ 。优势度指数  $\lambda$  可显示优势种群的存在及其特征, 其值越小, 表明土壤线虫群落越稳定。种植 10 a 的温室黄瓜土壤中的线虫群落多样性和稳定性小于其他种植年限, 土壤线虫群落趋于单一化。

采用线虫通道指数 NCR、瓦斯乐斯卡指数 WI、成熟指数 MI 和植物寄生线虫成熟指数 PPI 来表达土壤线虫类群和生活史的多样性<sup>[22]</sup>。由表 3 可知, 5 种不同种植年限土壤的 NCR 指数在 0.60~0.98 之间。不同种植年限黄瓜土壤的 WI 指数之间差异显著, 种植 1 年的露地土壤 WI 指数极显著高于其他种植年限, 为 11.0, 最低的是种植 10 年的, WI 指数为 0.13。MI 值为  $13\text{ a} > 8\text{ a} > 1\text{ a} > 10\text{ a} > 16\text{ a}$ , 而 PPI/MI 值相反, 在种植 16 a 的土壤中最大, 13 a 土壤中最小, SR 随着种植年限的增加变化不规律, 不同种植年限下丰富度之间存在显著差异, 种植 8 a 的温室土壤线虫种类最丰富, 10 年的最单一。

从图 4 可见, 不同种植年限黄瓜土壤线虫的 SI 值均小于 50, EI 值在 49~69 之间, 在种植 1 年的露地土壤中最大, 10 年温室土壤最小, 随着种植年限的增加, 线虫区系分布逐渐从第 I 象限向第 IV 象限方向靠拢, 温室种植年限超过 10 年后, 又开始回到第 I 象限, 只有种植 10 年黄瓜土壤的样点落在第 IV 象限。

表 2 不同种植年限黄瓜土壤线虫的群落组成

Table 2 Nematode communities of cucumber soil in different cultivation years

| 线虫属<br>Nematode genera              | c-p | 1 a  |     | 8 a  |     | 10 a |     | 13 a |     | 16 a |     |
|-------------------------------------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
|                                     |     | RA   | Dom | RA   | Dom | RA   | Dom | RA   | Dom | RA   | Dom |
| 食细菌线虫 Bacterial-feeders             |     | 53.4 |     | 39.6 |     | 10.0 |     | 54.4 |     | 46.0 |     |
| 板唇属 <i>Chiloplacus</i>              | 2   | 22.2 | +++ | 18.5 | +++ | 3.3  | ++  | 18.9 | +++ | 24.0 | +++ |
| 头叶属 <i>Cephalobus</i>               | 2   | 2.0  | ++  | 4.0  | ++  |      |     | 3.3  | ++  |      |     |
| 小杆属 <i>Rhabditis</i>                | 1   | 5.1  | ++  | 6.2  | ++  | 1.0  | ++  | 3.3  | ++  | 1.0  | ++  |
| 丽突属 <i>Acrobeles</i>                | 2   |      |     | 18.8 | +++ | 4.7  | ++  | 13.3 | +++ | 3.0  | ++  |
| 棱咽属 <i>Prismatolaimus</i>           | 3   |      |     | 2.0  | ++  |      |     |      |     | 2.0  | ++  |
| 三等齿属 <i>Pelodera</i>                | 1   |      |     | 4.0  | ++  | 1.1  | ++  |      |     | 2.0  | ++  |
| 鹿角纯属 <i>Cervidellus</i>             | 2   |      |     | 1.0  | ++  |      |     |      |     | 2.0  | ++  |
| 拟丽突属 <i>Acrobeloides</i>            | 2   |      |     | 2.0  | ++  |      |     |      |     | 1.0  | ++  |
| 绕线属 <i>Plectus</i>                  | 2   |      |     |      |     |      |     | 2.2  | ++  |      |     |
| 中杆属 <i>Mesorhabditis</i>            | 1   |      |     |      |     |      |     |      |     | 1.0  | ++  |
| 真头叶属 <i>Eucephalobus</i>            | 2   | 3.0  | ++  | 1.0  | ++  |      |     |      |     | 2.0  | ++  |
| 伪双胃属 <i>Pseudodip logasteroides</i> | 1   |      |     | 3.0  | ++  |      |     |      |     | 2.0  | ++  |
| 原杆属 <i>Protorhabditis</i>           | 1   | 21.2 | +++ | 2.0  | ++  |      |     | 13.3 | +++ | 6.0  | ++  |
| 食真菌线虫 Fungal-feeders                |     | 35.4 |     | 3.0  |     | 1.0  |     | 4.4  |     | 1.0  |     |
| 滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>           | 2   | 7.1  | ++  |      |     | 1.0  | ++  |      |     | 1.0  | ++  |
| 真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>             | 2   | 18.2 | +++ |      |     |      |     |      |     |      |     |
| 长尾滑刃属 <i>Seinura</i>                | 4   |      |     | 2.0  | ++  |      |     |      |     |      |     |
| 丝尾垫刃属 <i>Filenchus</i>              | 2   | 10.1 | +++ | 1.0  | ++  |      |     | 4.4  | ++  |      |     |
| 植物寄生线虫 Plant-parasites              |     | 8.1  |     | 33.7 |     | 87.0 |     | 41.2 |     | 51.0 |     |
| 螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>          | 3   | 3.0  | ++  |      |     | 3.0  | ++  |      |     |      |     |
| 根结属 <i>Meloidogyne</i>              | 3   | 5.1  | ++  | 33.7 | +++ | 84.0 | +++ | 41.1 | +++ | 51.0 | +++ |
| 捕食-杂食线虫 Predators-omnivores         |     | 3.0  |     | 1.0  |     | 2.0  |     |      |     | 2.0  |     |
| 真矛线属 <i>Eudorylaimus</i>            | 4   | 2.0  | ++  | 1.0  | ++  | 2.0  | ++  |      |     | 2.0  | ++  |
| 盘咽属 <i>Discolaimus</i>              | 5   | 1.0  | ++  |      |     |      |     |      |     |      |     |

注 (Note): c-p—线虫的生活史策略 Nematode life history strategy; RA—相对多度 Relative abundance (%); Dom—优势度 Dominance; +++—RA > 10% 优势属 Dominant genera; ++—1% ≤ RA ≤ 10% 常见属 Common genera; +—RA < 1% 稀有属 Rare genera.

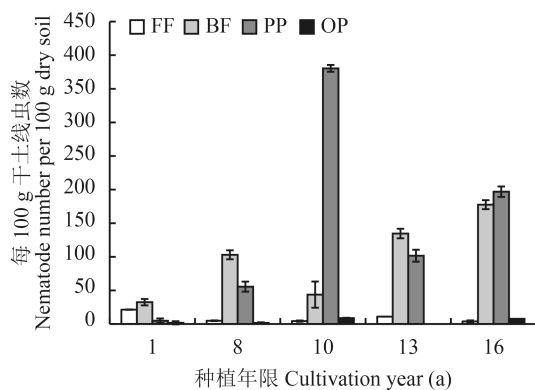


图 2 不同种植年限土壤线虫各营养类群数量

Fig. 2 Nematode number of different genera in soil of different cultivation years

[注 (Note): BF—食细菌类 Bacterivores; FF—食真菌类 Fungivores; PP—植物寄生类 Plant parasites; OP—捕食/杂食类 Omnivores/predators.]

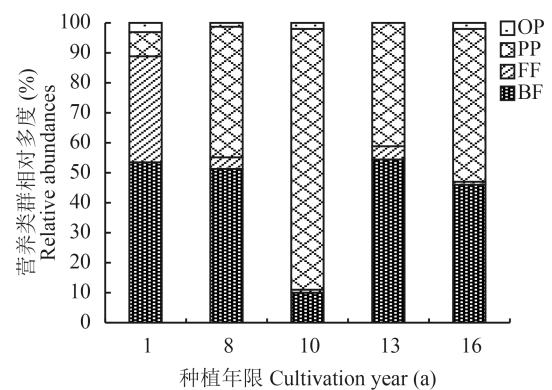


图 3 不同种植年限土壤线虫营养类型相对多度

Fig. 3 Relative abundances of the four genera of nematode in soils under different cultivation years

[注 (Note): BF—食细菌类 Bacterivores; FF—食真菌类 Fungivores; PP—植物寄生类 Plant parasites; OP—捕食/杂食类 Omnivores/predators.]

表 3 不同种植年限土壤线虫群落的生态指数

Table 3 Values of nematode ecological indices in soils at different cultivation years

| 生态指数 Ecological index               | 1 a    | 8 a    | 10 a   | 13 a   | 16 a   |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 食真菌与食细菌线虫比例 F/B                     | 0.66 a | 0.05 d | 0.10 b | 0.08 c | 0.02 e |
| 多样性指数 Shannon index ( $H'$ )        | 2.11 c | 1.94 d | 0.72 e | 2.91 b | 3.10 a |
| 均匀度指数 Evenness index ( $J$ )        | 0.89 c | 0.72 d | 0.35 e | 1.40 a | 1.18 b |
| 优势度指数 Dominance ( $\lambda$ )       | 0.15 e | 0.19 d | 0.71 a | 0.24 c | 0.33 b |
| 线虫通道指数 Nematode channel ratio (NCR) | 0.60 b | 0.95 a | 0.91 a | 0.92 a | 0.98 a |
| 瓦斯乐斯卡指数 Wasilewska index (WI)       | 11.0 a | 1.94 b | 0.13 e | 1.43 c | 0.92 d |
| 自由生活线虫成熟指数 Maturity index (MI)      | 1.79 c | 1.96 b | 1.77 d | 3.49 a | 1.68 e |
| 植物寄生线虫指数 Plant parasite index (PPI) | 3.00 a | 3.00 a | 3.00 a | 3.00 a | 3.00 a |
| PPI/MI                              | 1.67 c | 1.53 d | 1.70 b | 0.86 e | 1.79 a |
| 丰富度指数 Richness index (SR)           | 2.68 b | 2.74 a | 1.15 e | 1.27 d | 2.18 c |

注 (Note): 同行数据后不同字母表示同一指标不同年限土壤间差异显著 Values followed by different letters in a row are significantly different for the same index among the soils under different cropping years ( $P > 0.05$ ).

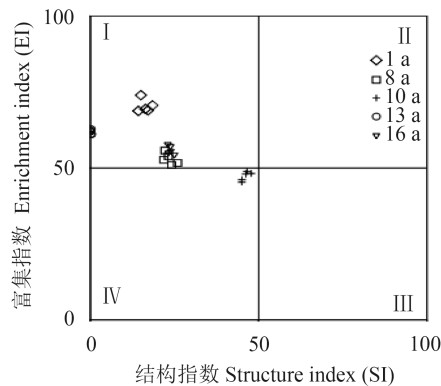


图 4 不同种植年限土壤线虫区系分布

Fig. 4 Nematode faunal analysis of cucumber soil in different cultivation years

### 3 讨论

不同种植年限下黄瓜土壤线虫数量、群落组成和营养类群结构上都存在一定的差异。从线虫数量上来看, 种植 10 年的温室土壤由于根结线虫的大量增加而导致线虫数量显著高于其他种植年限, 仅种植 1 年的露地土壤线虫数量最低。Wall 等<sup>[23]</sup>研究表明, 土壤中线虫数量与土壤中的各种养分存在密切的相关性。本研究结果显示, 随着种植年限的增加, 不断的施用有机肥、化肥等农业耕作以及植物根系在土壤中积累, 为植物寄生线虫提供生存环境, 使得植物寄生线虫大量增加, 进而增加线虫总数, 而温室种植年限超过 10 年后, 随着种植年限的增加, 土壤食物网中微生物捕食者的数量也随之降

低, 从而破坏了土壤微生态环境, 线虫总数也有所减少。

食真菌与食细菌线虫比例 F/B 和线虫通路比值 NCR, 常被用于评价土壤腐屑食物网有机质的分解途径<sup>[24]</sup>, 土壤线虫的 F/B 在 0.02~0.66 之间, 均低于 1, 而 NCR 处于 0.60~0.98 之间, 均高于 0.5, 说明不同种植年限的土壤食物网以食细菌通道为主, 土壤有机质以细菌分解途径为主, 这与董道峰等<sup>[25]</sup>的日光温室土壤食物网以食细菌通道为主的结果一致。虽然种植 10 年温室黄瓜土壤线虫总数显著高于其它种植年限的, 但群落趋于单一化, 多样性和稳定性较差, 而其他种植年限温室黄瓜土壤线虫群落的多样性指数 ( $H'$ )、均匀度指数 ( $J$ ) 和优势度指数 ( $\lambda$ ) 均有显著性差异, 其多样性和稳定性随种植年限的增加, 呈先降低后增加的趋势。丰富度指数 SR 是反映线虫物种丰富程度的又一多样性指标, SR 值越高, 表明线虫的种类越丰富, 多样性越好<sup>[26]</sup>。在本研究的土壤中, 随着种植年限的增加, 线虫属数目与线虫总数的变化趋势并不一致, 在种植 10 年的温室土壤中由于真头叶属、原杆属、拟丽突属等部分食细菌线虫的消失, 使得其 SR 值显著低于其他种植年限。WI 指数用于分析土壤食物网的矿化途径和健康状况, 以 1 为分界点, WI 值越大, 表明土壤健康状况越好, WI 值越小, 表明土壤健康程度越差, 低的 WI 值表明矿化途径是从植物到植食性线虫, 而高的 WI 值表明矿化途径主要由食细菌性线虫和食真菌性线虫参与<sup>[27]</sup>, 本研究 WI 分布为 1 a > 8 a > 13 a > 16 a >

10 a, 这说明种植 10 年的温室土壤健康状况最差, 继续种植土壤状况又有所改善, 连续种植使土壤食物网的矿化途径由食细菌线虫和食真菌线虫为主要参与者转变为由植物寄生线虫为主要参与者。MI 指数和 PPI 指数反映土壤线虫群落功能结构特征, 用以评价人类干扰活动对土壤线虫群落的影响<sup>[24]</sup>, MI 指数反映自由生活线虫的成熟度, PPI 指数反映植物寄生线虫的成熟度, 低的 MI 值和高的 PPI 值表明土壤生态系统扰动强烈, 反之则表明土壤生态系统趋于稳定<sup>[18]</sup>。在本研究中, 线虫成熟指数 MI 在种植 13 年的土壤中最大, 在种植 16 年的温室土壤中最小, 与之相反, PPI/MI 在种植 13 年的土壤中最小, 在种植 16 年的土壤中最大, 表明种植 16 年的土壤生态系统受到的扰动最强, PPI/MI 多用于评价不同土壤的营养状况<sup>[18]</sup>, 种植 16 年的温室土壤中的 PPI/MI 值最大, 表明其土壤贫瘠, 线虫主要从植物获取营养。而连续种植了 13 年的土壤生态系统所受干扰最小, 出现这一现象的原因可能是不同种植年限中线虫种群差异较大, 从而对微生物和养分代谢循环的影响也不同, 最终影响了土壤的生态系统。

富集指数 EI 被用来评估食物网对可利用资源的响应, 而结构指数 SI 是用于揭示在人为干扰或生态恢复过程中土壤食物网结构变化的指标, 两者结合可更好的反映土壤环境所受到的扰动和土壤食物网的状况<sup>[28]</sup>。本研究结果表明, 除了种植 10 年的温室黄瓜土壤的样点落在第 IV 象限外, 其余种植年限黄瓜土壤的样点均落在第 I 象限, 且随着种植年限的增加, 线虫区系分布从第 I 象限逐渐向第 IV 象限方向靠拢, 说明随着种植年限的延长, 土壤养分逐渐变差, 所受干扰程度也变大, 当温室种植达到 10 年时, 土壤环境已受到胁迫, 而继续种植, 养分状况和土壤环境又有所改善。

## 4 结论

1) 随着种植年限的增加, 土壤线虫总数、植物寄生线虫数变化大致可分为大幅度增长和趋于稳定两个阶段, 以种植 10 年为分界点, 食细菌线虫数变化则恰恰相反, 多年种植下食真菌线虫数量极少。

2) F/B 均小于 1, 线虫通道比值 NCR 均大于 0.5, 所有种植年限黄瓜土壤食物网都以食细菌通道为主。

3) 线虫群落的多样性和稳定性随着种植年限延长逐渐变差, 当温室种植年限达到 10 年时, 虽然土壤中线虫总数最多, 但其线虫属数最少, 丰富度

低, 群落单一, 多样性和稳定性最差, 土壤环境已受到胁迫, 种植超过 10 年后, 多样性和稳定性又有所缓和。

4) 温室土壤连续种植 10 年以后, 土壤性质发生较大程度的改变, 土壤生态系统结构单一化发展。种植 10 年的温室土壤处于土壤生态系统最恶劣的界点。

## 参 考 文 献:

- [1] 余海英, 李廷轩, 张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征[J]. 中国农业科学, 2010, 43(3): 514-522.  
Yu H Y, Li T X, Zhang X Z. Nutrient budget and soil nutrient status in greenhouse system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(3): 514-522.
- [2] 杜新民, 吴忠红, 张永清, 等. 不同种植年限日光温室土壤盐分和养分变化研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 78-80.  
Du X M, Wu Z H, Zhang Y Q, et al. Study on changes of soil salt and nutrient in greenhouse of different planting years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(2): 78-80.
- [3] 刘建霞, 马理, 李博文, 等. 不同种植年限黄瓜温室土壤理化性质的变化规律[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 164-168.  
Liu J X, Ma L, Li B W, et al. Variation of soil physicochemical properties in cucumber greenhouse under different cultivating years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 164-168.
- [4] Yao H Y, Ji X D, Wu F Z. Effects of continuous cucumber cropping and alternative rotations under protected cultivation on soil microbial community diversity[J]. Plant and Soil, 2006, 284(1-2): 195-203.
- [5] 张雪艳, 田蕾, 吴萍, 等. 30年不同设施条件和栽培方式下土壤养分和微生物群落功能多样性的变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1581-1589.  
Zhang X Y, Tian L, Wu P, et al. Changes of soil nutrients and microbial community diversity in responses to different growth environments and cultivation practices in 30 years[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(6): 1581-1589.
- [6] 黄容, 万毅林, 高明. 种植年限对菜地土壤微生物生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(20): 4903-4907.  
Huang R, Wan Y L, Gao M. Effects of planting years on soil microbial carbon, nitrogen and enzyme activity of vegetable fields[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(20): 4903-4907.
- [7] Tian Y Q, Zhang X Y, Liu J, et al. Effects of summer cover crop and residue management on cucumber growth in intensive Chinese production systems: soil nutrients, microbial properties and nematodes[J]. Plant and Soil, 2011, 339(1-2): 299-315.
- [8] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality[J]. Applied Soil Ecology, 2000, 15(1): 3-11.
- [9] 梁文举, 闻大中. 土壤生物及其对土壤生态学发展的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 137-140.  
Liang W J, Wen D Z. Soil biota and its role in soil ecology[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(1): 137-140.
- [10] 胡宁, 娄翼来, 梁雷. 保护性耕作对土壤线虫c-p类群及功能团的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2349-2353.

- Hu N, Lou Y L, Liang L. Effects of the conservation tillage on soil nematode c-p groups and functional guilds[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2349–2353.
- [11] Neher D A. Role of nematodes in soil health and their use as indicators[J]. *Journal of Nematology*, 2001, 33(4): 161–168.
- [12] 李玉娟, 吴纪华, 陈慧丽, 等. 线虫作为土壤健康指示生物的方法及应用[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(8): 1541–1546.
- Li Y J, Wu J H, Chen H L, *et al.* Nematodes as bioindicator of soil health: methods and application[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1541–1546.
- [13] Bongers T, Ferris H. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1999, 14(6): 224–228.
- [14] 张薇, 宋玉芳, 孙铁珩, 等. 土壤线虫对环境污染的指示作用[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1973–1978.
- Zhang W, Song Y F, Sun T H, *et al.* Soil nematode as a bioindicator of environment pollution[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1973–1978.
- [15] Yang X X, Zhou Q X, Wang T L. Connotation and ecological indicators of soil health and its research prospect[J]. *Ecological Science*, 2007, 26(4): 374–380.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 39–114.
- Bao S D. *Soil agrochemical analysis (Third edition)* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 39–114.
- [17] Goodfriend W L, Olsen M W, Frye R J. Soil microfloral and microfaunal response to *Salicornia bigelovii* planting density and soil residue amendment[J]. *Plant and Soil*, 2000, 223(1–2): 23–32.
- [18] Bongers T. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition[J]. *Oecologia*, 1990, 83(1): 14–19.
- [19] Dickinson C H, Pugh G J F. *Biology of plant litter decomposition* [M]. London: Academic Press, 2012.
- [20] Yeates G W. Nematodes as soil indicators: Functional and biodiversity aspects[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(4): 199–210.
- [21] Yeates G W, Bongers T. Nematode diversity in agroecosystems[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1999, 74(1): 113–135.
- [22] Ferris H, Bongers T, De Goede R G M. A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept[J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18(1): 13–29.
- [23] Wall J W, Skene K R, Neilson R. Nematode community and trophic structure along a sand dune succession[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 293–301.
- [24] Yeates G W, Newton P C D, Ross D J. Significant changes in soil microfauna in grazed pasture under elevated carbon dioxide[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38(5): 319–326.
- [25] 董道峰, 胡诚, 曹志平. 不同农业管理措施对土壤线虫的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(1): 80–85.
- Dong D F, Hu C, Cao Z P. Effect of different agricultural management systems on soil nematode community and structure[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(1): 80–85.
- [26] Yeates G W, King K L. Soil nematodes as indicators of the effect of management on grass-lands in the New England Tablelands (NSW): comparison of native and improved grasslands[J]. *Pedobiologia*, 1997, 41(6): 526–536.
- [27] Chen G, Qin J, Shi D, *et al.* Diversity of soil nematodes in areas polluted with heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Lanzhou, China[J]. *Environmental Management*, 2009, 44(1): 163–172.
- [28] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes[J]. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10(3): 239–251.