

张娟琴, 李双喜, 郑宪清, 等. 蚯蚓防控西瓜枯萎病的效果及其机理探索[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(1): 70-76.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.01.010

## 蚯蚓防控西瓜枯萎病的效果及其机理探索

张娟琴<sup>1,2,3,4,5</sup>, 李双喜<sup>1,2,3,4,5</sup>, 郑宪清<sup>1,2,3,4,5</sup>, 张翰林<sup>1,2,3,4,5</sup>, 白娜玲<sup>1,2,3,4,5</sup>,  
张海韵<sup>1,2,3,4,5</sup>, 吕卫光<sup>1,2,3,4,5</sup>

(1.上海市农业科学院生态环境保护研究所, 上海 201403; 2.上海市设施园艺技术重点实验室, 上海 201403; 3.上海市农业环境保护监测站, 上海 201403; 4.农业部上海农业环境与耕地保育科学观测实验站, 上海 201403; 5.上海低碳农业工程技术研究中心, 上海 201403)

**摘要:** 为了探明蚯蚓对西瓜枯萎病的影响机制, 开拓西瓜枯萎病防控的新思路, 本试验以西瓜连作土壤为基质, 采用盆栽试验, 研究不同密度的威廉环毛蚓 (*Pheretima guillelmi*) 和赤子爱胜蚓 (*Eisenia foetida*) 对西瓜长势、枯萎病发病率的影响, 结合西瓜专化型尖孢镰刀菌数量、土壤微生物总量(土壤微生物量碳含量)、土壤微生物活性(土壤脱氢酶活性)以及土壤总酚酸的动态变化, 探索蚯蚓对西瓜植株枯萎病的防控机理。结果表明, 西瓜定植后 45 d, 试验组的西瓜蔓长、鲜质量较不投放蚯蚓对照分别增长了 18.57%~67.27%、39.29%~87.24%。西瓜定植后 30 d、45 d, 对照的西瓜植株枯萎病发病率分别为 62.15%、85.32%, 显著高于蚯蚓试验组 ( $P<0.05$ )。在一定范围内增加蚯蚓密度能有效促进西瓜生长, 减缓枯萎病发生。在蚯蚓质量相同的情况下, 威廉环毛蚓的促生防病效果优于赤子爱胜蚓。0~45 d 的试验过程中, 试验组土壤中西瓜专化型尖孢镰刀菌 (*Fusarium oxysporum* f.sp. *niveum*) 数量、总酚酸含量较对照分别下降了 36.63%~69.39%、31.0%~77.4%, 45 d 时试验组的土壤微生物量碳含量、土壤脱氢酶活性较对照分别提高了 115.10~175.71 mg/kg、1.41~2.40  $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。蚯蚓能有效降低西瓜植株枯萎病的发病率, 促进植株生长, 其防控机理可能为: 蚯蚓的穴居、取食等活动直接抑制土壤中尖孢镰刀菌的快速繁殖, 同时蚯蚓通过降解土壤化感物质(总酚酸), 提升微生物总量和活性等方式调控土壤微生物群落结构, 改善土壤微生态环境, 从而有效防控西瓜枯萎病的发生。

**关键词:** 西瓜枯萎病; 蚯蚓; 西瓜专化型尖孢镰刀菌; 总酚酸; 土壤微生物量碳; 脱氢酶

**中图分类号:** S651; S436.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)01-0070-07

## Effects of earthworms on watermelon Fusarium wilt and its mechanism

ZHANG Juan-qin<sup>1,2,3,4,5</sup>, LI Shuang-xi<sup>1,2,3,4,5</sup>, ZHENG Xian-qing<sup>1,2,3,4,5</sup>, ZHANG Han-lin<sup>1,2,3,4,5</sup>,  
BAI Na-ling<sup>1,2,3,4,5</sup>, ZHANG Hai-yun<sup>1,2,3,4,5</sup>, LYU Wei-guang<sup>1,2,3,4,5</sup>

(1. Eco-environmental Protection Institute of Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Horticultural Technology, Shanghai 201403, China; 3. Environmental Protection Monitoring Station of Shanghai City, Shanghai 201403, China; 4. Agricultural Environment and Farmland Conservation Experiment Station, Ministry of Agriculture, Shanghai 201403, China; 5. Shanghai Low Carbon Agriculture Engineering Technology Research Center, Shanghai 201403, China)

**收稿日期:** 2019-06-03

**基金项目:** 上海市农口青年成长计划项目[沪农青字(2017)第 1-21 号]; 上海市科技兴农重大项目[沪农科推字(2018)第 4-14 号]; 上海市农业科学院卓越团队建设计划[农科创 2017 (A-03)]; 上海市科委项目(18295810500, 16391901500)

**作者简介:** 张娟琴(1982-), 女, 山西吉县人, 硕士, 助理研究员, 主要从事环境监测及土壤改良研究。(E-mail) zhjuanqin501@163.com

**通讯作者:** 吕卫光, (E-mail) lwei1217@sina.com

**Abstract:** In order to explore the influence mechanism of *Pheretima guillelmi* and *Eisenia foetida* on watermelon Fusarium wilt and develop new ideas for the controlling, pot experiments were conducted to study the effects of different densities of *Pheretima guillelmi* and *Eisenia foetida* on watermelon vine length, fresh weight and incidence of Fusarium wilt. In addition, the control mechanism was explored by combining with the dynamic changes of

*Fusarium oxysporum* f.sp. *niveum*, total phenolic acid, microbial biomass carbon and dehydrogenase activity in soil. The results showed that the vine length and fresh weight of watermelon in the experimental groups increased by 18.57%–67.27% and 39.29%–87.24% compared with those in control group at the 45th day after planting. At the 30th and 45th days, the wilt incidence of watermelon in the control group was 62.15% and 85.32%, respectively, which was significantly higher than that in the earthworm experimental groups ( $P < 0.05$ ). Increasing the earthworm density in a certain range could effectively promote the growth of watermelon and inhibit *Fusarium* wilt. Under the same weight, the growth and disease prevention effect of *Pheretima guillelmi* was better than that of *Eisenia foetida*. During the 0–45 days, the number of *Fusarium oxysporum* f.sp. *niveum* and total phenolic acid content in the soil of the earthworm experimental group decreased by 36.63%–69.39% and 31.0%–77.4%, respectively. At the 45th day, soil microbial biomass carbon and dehydrogenase activity in the earthworm experimental groups increased by 115.10–175.71 mg/kg and 1.41–2.40  $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$  compared with those in control group. *Pheretima guillelmi* and *Eisenia foetida* could effectively reduce the incidence of watermelon *Fusarium* wilt and promote plant growth. The mechanism may be that activities (burrowing and feeding) of earthworms directly inhibited the rapid propagation of *Fusarium oxysporum* in soil, and earthworms controlled soil microbial community structure by degrading soil allelochemicals (total phenols), increasing total microbial biomass and microbial activity. In conclusion, the soil micro-ecological environment was improved, and the occurrence of watermelon *Fusarium* wilt was effectively controlled.

**Key words:** watermelon *Fusarium* wilt; earthworm; *Fusarium oxysporum* f.sp. *niveum*; total phenolic acid; soil microbial biomass carbon; dehydrogenase

随着耕地面积的减少,连作现象普遍增加,而连作模式破坏了土壤微生态环境,引起微生物群落结构的改变,导致严重的连作障碍<sup>[1-2]</sup>。西瓜连作障碍的主要病害为枯萎病,严重制约西瓜种植业的发展。目前,西瓜枯萎病的防治措施主要包括嫁接换根、化学防治、生物防治以及培育抗病品种等<sup>[3-5]</sup>,虽然有一定效果,但均存在一定的局限性,如西瓜品质差,易造成二次污染等。

作为土壤生态系统工程师,蚯蚓在改善土壤理化性质,推动养分循环,调控土壤微生物活性、群落结构和功能等方面均具有重要作用<sup>[6]</sup>。蚯蚓可以促进植物生长,其数量也是表征土壤健康的重要指标<sup>[7-8]</sup>。关于蚯蚓对土壤微生态调控的研究很多,但是关于蚯蚓防控连作障碍的研究相对较少,并且主要集中在蚯蚓粪的功效研究<sup>[9]</sup>。Szczech<sup>[10]</sup>报道,生长介质中蚯蚓粪的加入量与其对病原真菌的抑制效果正相关,但经高温灭菌后,蚯蚓粪的抑病性丧失,表明是生物因素在发挥作用。蚯蚓堆肥能明显降低西瓜和番茄的枯萎病发病率,提高壮苗指数,改善品质<sup>[11-12]</sup>。毕艳孟<sup>[13]</sup>通过研究蚯蚓对草莓枯萎病的防控效应,发现蚯蚓能有效降低草莓枯萎病的病情指数。西瓜连作后土壤微生态环境恶化,不利于西瓜生长。本试验拟选取正蚓科食碎屑类表栖型的赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)和巨蚓科食土类深栖型的威廉环毛蚓(*Pheretima guillelmi*) 2种蚯蚓<sup>[6,14]</sup>,二者亲缘关系较

远,同时前者为常见的养殖种,后者为自然环境中常见的野生种,具有一定的典型性和代表性。采用不同密度的赤子爱胜蚓和威廉环毛蚓,在连作5年的西瓜土壤中预培育90 d后移栽西瓜苗,调查西瓜长势和枯萎病的发病率,同时监测土壤微生物量碳含量、脱氢酶活性、总酚酸含量、西瓜专化型尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum* f.sp. *niveum*)数量等的动态变化,旨在探索蚯蚓对西瓜枯萎病的防控效果及其机理,以期对西瓜枯萎病的防控提供理论依据和新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤取自上海市农业科学院庄行试验站西瓜连作5年的大棚,西瓜连作障碍严重,其西瓜枯萎病的发病率在60%以上。在2018年3月取0~20 cm土壤,按照一定比例(土壤:牛粪=9:1,质量比)在连作土壤中添加牛粪,为蚯蚓和西瓜的生长提供饵料和养分。试验土壤基本性状:pH 7.72、电导率 1.18 mS/cm、有机质含量 18.1 g/kg、全氮含量 1.46 g/kg、全磷含量 2.04 g/kg、全钾含量 15.83 g/kg、速效氮含量 80.39 mg/kg、速效磷含量 85.93 mg/kg、速效钾含量 640.03 mg/kg。牛粪基本性状:水分含量 39.46%、有机质含量 42.20 g/kg、全氮含量 8.82 g/kg、全磷含量 7.38 g/kg、全钾含量 5.88 g/kg。

供试蚯蚓赤子爱胜蚓(太平2号)购自江苏无锡

的养殖基地,威廉环毛蚓取自于上海市农业科学院崇明试验基地。试验前先将2种蚯蚓放入试验土壤中预培养7 d,以便蚯蚓适应试验土壤环境,同时用试验土壤替代蚯蚓体内原有的内容物,减少试验误差。挑选长势均匀,单体质量分别为3.0~3.5 g的威廉环毛蚓和0.3~0.4 g的赤子爱胜蚓为试验蚯蚓。

采用直径30 cm、高40 cm的圆柱形铁桶作为试验容器,底部打4个孔,四周打6个孔,底部和四周打孔处内附50目细纱网,铁桶上口同样采用50目细纱网覆盖,防止蚯蚓爬出。

供试西瓜品种为早春红玉,幼苗苗龄为30 d,具有3~4片真叶时选取叶片宽厚无损、色浓健壮的西瓜苗进行定植。温室温度20~30℃,西瓜苗大概每隔5 d浇一次水,保证土壤含水量在20%左右。

## 1.2 试验设计

每个试验容器底部放入100 g水稻秸秆(长约5 cm)和1 kg新鲜菜叶后,加入5 kg试验土壤,加入1 000 ml水,平衡24 h后投放蚯蚓。试验中蚯蚓密度的设置,以15 d 1 kg土壤中蚯蚓存活率超过99%的密度为上限,结合田间蚯蚓密度调查结果,同时为减少蚯蚓单体质量差异和个体数量的影响,选用单体质量分别为3.0~3.5 g的威廉环毛蚓和0.3~0.4 g的赤子爱胜蚓为试验蚓种,并且以条数为蚯蚓密度的计量单位,具体试验设置如下:不投放蚯蚓(CK),1 kg土壤投放1条、3条、5条威廉环毛蚓的P1、P3、P5处理,1 kg土壤投放5条、10条、15条赤子爱胜蚓E5、E10、E15的处理。由于2种蚯蚓单体质量差异较大,设置了一组(P1和E10)2种蚯蚓质量相同的试验处理,以便进行对比,投放蚯蚓后在容器表面放置20 g水稻秸秆(长约5 cm),为蚯蚓提供遮光环境,温室温度为25~30℃,相对湿度为70%~80%。培育90 d后,选取长势相似的西瓜幼苗移栽至试验盆中,每盆5株,每个处理15盆。西瓜定植0 d起,间隔15 d采用5点法采集0~20 cm的试验土壤,测定相关指标,同时从西瓜定植15 d起,每15 d统计一次西瓜长势和枯萎病发病率,当对照的发病率达到80%以上时,结束试验。

## 1.3 测定方法

1.3.1 西瓜植株长势指标的测定 随机取3盆西瓜,采用米尺测量主蔓长,同时将西瓜苗整体挖出后,洗净根部土壤,用滤纸吸干西瓜植株上的水分,然后称量鲜质量。

1.3.2 西瓜枯萎病发病率的测定 西瓜枯萎病参照文献[15]的方法进行鉴别,并记录西瓜枯萎病(枯萎叶片数 $\geq 50\%$ )发病株数,以发病植株占总株数的百分比表示发病率。

1.3.3 土壤测定项目与方法 西瓜专化型尖孢镰刀菌采用荧光定量PCR法测定<sup>[16]</sup>,土壤微生物量碳采用熏蒸提取-重铬酸钾氧化法测定<sup>[17]</sup>,土壤脱氢酶活性采用2,3,5-氯化三苯四氮唑(TTC)分光光度法测定<sup>[18]</sup>,土壤总酚酸含量采用福林酚比色法测定<sup>[13,19]</sup>。

## 1.4 数据处理

试验数据采用Excel 2007和SPSS 16.0统计软件进行分析,均值比较采用最小显著性差异法(LSD)进行分析,显著水平为0.05。

# 2 结果与分析

## 2.1 蚯蚓对西瓜长势的影响

图1显示,2种蚯蚓对西瓜主蔓长和鲜质量均有显著的促进作用,45 d时试验组主蔓长、鲜质量较对照分别增加了18.57%~67.27%、39.29%~87.24%。西瓜的长势与蚯蚓的密度和种类相关,同种蚯蚓,高密度处理的西瓜长势优于低密度处理( $P<0.05$ ),但是P3与P5、E5与E10处理间的差异均不显著。蚯蚓质量相同情况下,威廉环毛蚓(P1)处理的西瓜长势优于赤子爱胜蚓(E10)处理。

## 2.2 蚯蚓对西瓜植株枯萎病发病率的影响

图2显示,西瓜定植后15 d,植株枯萎病的发病率低于3.00%,定植后30 d的发病率高于34.93%,其中CK的发病率为62.15%,显著高于蚯蚓试验组( $P<0.05$ );定植后45 d,CK的西瓜植株枯萎病发病率增长至85.32%,而试验组的发病率较30 d时仅略有增长。枯萎病的发病率与蚯蚓的密度成反比,但是P3与P5、E5与E10处理间的差异均不显著。蚯蚓质量相同情况下,威廉环毛蚓处理(P1)的枯萎病发病率低于赤子爱胜蚓(E10)处理。

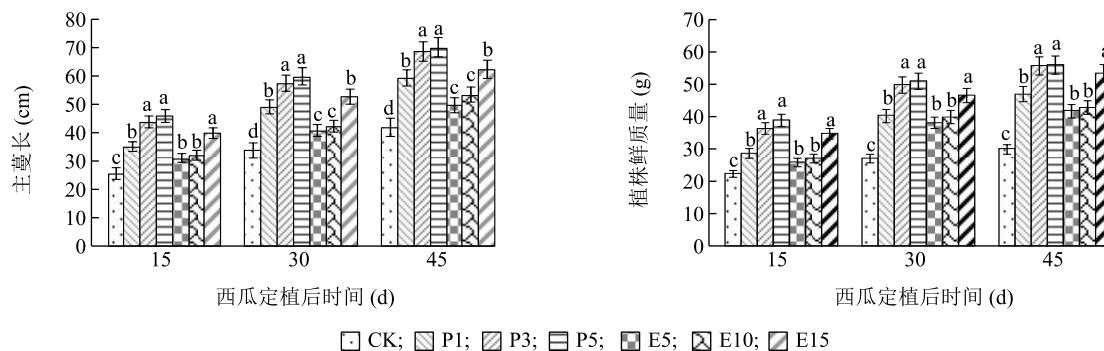
## 2.3 蚯蚓对土壤中西瓜专化型尖孢镰刀菌数量的影响

图3显示,在0~45 d的试验过程中,蚯蚓试验组土壤中的西瓜专化型尖孢镰刀菌数量较对照下降了36.63%~69.39%。土壤中西瓜专化型尖孢镰刀菌的数量与蚯蚓的密度总体成反比,但是P3与P5、E5与E10处理间的差异均不显著。45 d时,蚯蚓质



量相同情况下,P1 处理的土壤中西瓜专化型尖孢镰

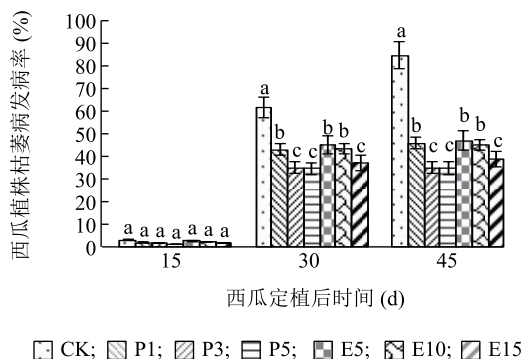
刀菌数量较 E10 处理降低了 19.76%。



CK:不投放蚯蚓,对照;P1、P3、P5 分别为 1 kg 土壤中投放 1 条、3 条、5 条威廉环毛蚓;E5、E10、E15 分别为 1 kg 土壤中投放 5 条、10 条、15 条赤子爱胜蚓。图中不同小写字母表示相同时间下不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 1 不同蚯蚓处理对西瓜植株蔓长及植株鲜质量的影响

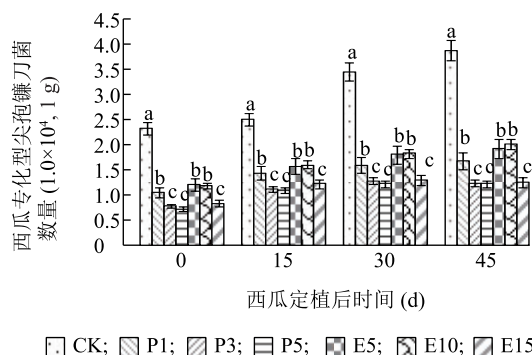
Fig.1 Effects of two earthworm species on vine length and fresh weight



CK、P1、P3、P5、E5、E10、E15 见图 1 注。图中不同小写字母表示相同时间下不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 2 不同蚯蚓处理对西瓜植株枯萎病发病率的影响

Fig.2 Effects of two earthworm species on the incidence of *Fusarium wilt*



CK、P1、P3、P5、E5、E10、E15 见图 1 注。图中不同小写字母表示相同时间下不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 3 不同蚯蚓处理对土壤中西瓜专化型尖孢镰刀菌数量的影响

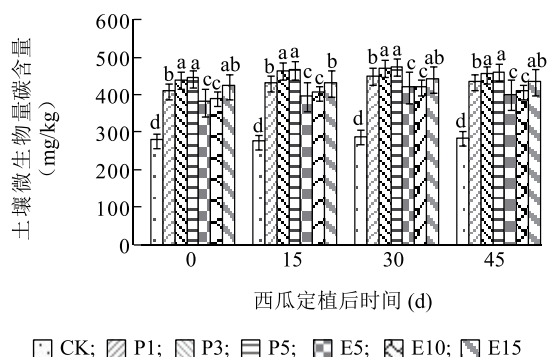
Fig.3 Effects of two earthworm species on the number of *Fusarium oxysporum f.sp. niveum* in soil

## 2.4 蚯蚓对土壤微生物总量和微生物活性的影响

分别以土壤微生物量碳含量、土壤脱氢酶活性表征土壤微生物总量、土壤微生物活性,结果(图 4、图 5)显示,CK 的土壤微生物量碳含量、土壤脱氢酶活性与试验组差异显著 ( $P < 0.05$ )。45 d 时,蚯蚓试验组土壤微生物量碳含量、土壤脱氢酶活性较 CK 提高了 115.10~175.71 mg/kg、1.41~2.40  $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。在整个试验过程中,CK 的土壤微生物量碳含量、土壤脱氢酶活性分别为 273.49~287.31 mg/kg、2.76~2.97  $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。0~45 d 的取样过程中,蚯蚓试验组土壤微生物量碳含量总体呈先上升后下降的趋势,而土壤脱氢酶活性呈上升趋势,但 30 d 后 P3、P5 处理的土壤脱氢酶活性呈平稳状态。土壤微生物量碳含量和脱氢酶活性与蚯蚓的种类和密度相关,同种蚯蚓土壤微生物量碳含量和脱氢酶活性总体随蚯蚓密度的增大而升高,但是 P3 与 P5、E5 与 E10 处理间的差异均不显著。蚯蚓质量相同情况下,P1 处理的土壤微生物量碳含量和脱氢酶活性均高于 E10 处理。

## 2.5 蚯蚓对土壤总酚酸含量的影响

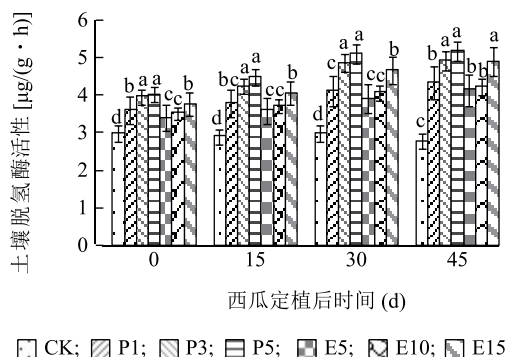
图 6 显示,整个试验过程中,蚯蚓试验组土壤中总酚酸含量较 CK 下降了 31.0%~77.4%,随时间增加,CK 的土壤总酚酸含量呈上升趋势,尤其 30 d 土壤总酚酸含量上升明显,这可能与 30 d 时 CK 的西瓜植株枯萎病发病率大幅增加,西瓜植株腐解产生酚类物质有关。比较 2 种蚯蚓处理组之间的土壤总酚酸含量,发现蚯蚓质量相同情况下,威廉环毛蚓处理 P1 的土壤总酚酸含量低于赤子爱胜蚓处理 E10。



CK、P1、P3、P5、E5、E10、E15 见图1注。图中不同小写字母表示相同时间下不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图4 不同蚯蚓处理对土壤微生物量碳含量的影响

Fig.4 Effects of two earthworm species on microbial biomass carbon in soil



CK、P1、P3、P5、E5、E10、E15 见图1注。图中不同小写字母表示相同时间下不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图5 不同蚯蚓处理对土壤脱氢酶的影响

Fig.5 Effects of two earthworm species on the dehydrogenase in soil

同种蚯蚓处理之间土壤总酚酸含量与蚯蚓密度呈负相关,但是 P3 与 P5、E5 与 E10 处理间差异均不显著。

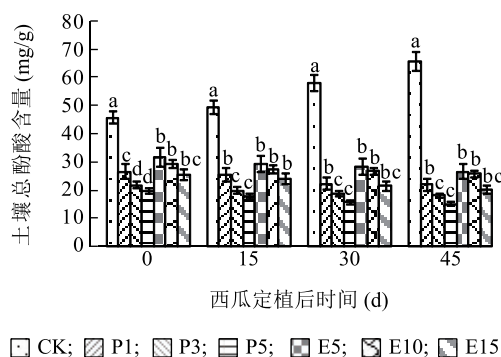
### 3 讨论

#### 3.1 蚯蚓选取及生存状况

试验结束后,土壤表面有大量蚓粪,统计土壤中蚯蚓的数量发现投放赤子爱胜蚓的土壤中存在大量幼蚓,而投放威廉环毛蚓的土壤中蚯蚓数量基本没有变化,间接说明各个密度的蚯蚓均能很好地适应试验土壤。

#### 3.2 蚯蚓对西瓜长势和枯萎病发病率的影响

蚯蚓对植物生长有促进作用<sup>[20-22]</sup>。目前的报



CK、P1、P3、P5、E5、E10、E15 见图1注。图中不同小写字母表示相同时间下不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图6 不同蚯蚓处理对土壤总酚酸含量的影响

Fig.6 Effects of two earthworm species on total phenolic acid content in soil

道主要集中在蚯蚓粪功效的研究,将蚯蚓直接应用于植物连作障碍防治的研究相对较少。有研究结果<sup>[11-12,23]</sup>表明,蚯蚓堆肥能促进植物生长,降低发病率。本试验发现,在西瓜连作土壤系统中,蚯蚓不仅促进了西瓜的生长,还降低了枯萎病的发病率,这与毕艳孟<sup>[13]</sup>的结论一致。蚯蚓促进植物生长主要通过增加养分的可利用性<sup>[22]</sup>,以及提高植物光合速率<sup>[13]</sup>等途径来实现。蚯蚓密度与西瓜长势正相关,与枯萎病的发病率负相关,但 P3 与 P5 处理间差异不显著,说明环境的容纳能力有限,威廉环毛蚓防控效果不会随密度的增大无限放大。赤子爱胜蚓 E15 处理的防控效果明显优于 E5 处理和 E10 处理,而 E5 处理与 E10 处理间差异不显著,说明枯萎病防控的最佳密度与蚯蚓的品种相关,这可能与蚯蚓的生活型有关。蚯蚓质量相同情况下,威廉环毛蚓 P1 处理的西瓜长势及枯萎病防控效果均优于赤子爱胜蚓 E10 处理,这也间接验证了枯萎病防控的最佳密度与蚯蚓种类相关的这一结论。

#### 3.3 蚯蚓防控西瓜连作障碍的机理初探

在连作环境中,连作障碍的发生与化感物质的积累以及土壤微生物群落失衡有关<sup>[24-25]</sup>。西瓜连作障碍的主要病害为西瓜专化型尖孢镰刀菌引起的枯萎病,在0~45 d 的试验过程中,西瓜专化型尖孢镰刀菌的数量呈上升趋势,但是蚯蚓试验组西瓜专化型尖孢镰刀菌的数量显著低于 CK,这可能与蚯蚓活动以及取食偏好有关。Shan 等<sup>[26]</sup>通过同位素标记法证实,相对于细菌,威廉环毛蚓偏好取食真菌,除了取食外,蚯蚓的穴居同样扰动了真菌菌丝体的

生长<sup>[27]</sup>。西瓜定植后 15 d,同一处理在不同取样时间下的西瓜专化型尖孢镰刀菌数量差异不显著,而西瓜枯萎病在西瓜定植后 30 d 左右暴发,之后蚯蚓试验组的发病率较平稳,这可能与蚯蚓影响土壤微生物群落结构有关。枯萎病的发病率与尖孢镰刀菌数量直接相关,但是发病相对滞后,这可能与病原菌侵染过程中土壤微生态环境的影响及西瓜植株防御反应有关。

蚯蚓对土壤微生物总量和活性有重要的调控作用<sup>[12]</sup>。大量研究结果表明,蚯蚓的活动能增加土壤微生物总量并增强其活性<sup>[1,13,20,23,28-29]</sup>,本试验也得出了相似的结果。但是,微生物总量和活性与蚯蚓的密度和品种相关,一定范围内提高蚯蚓密度能增加土壤微生物总量和活性,这可能与相同生态环境对不同生活型蚯蚓的容纳能力不同有关。蚯蚓质量相同时,威廉环毛蚓 P1 试验组土壤微生物总量和活性均显著高于赤子爱胜蚓 E10 试验组,这与前人的研究结果<sup>[13]</sup>相似。但也有研究结果表明,蚯蚓活动会降低土壤微生物总量,如 Zhang 等<sup>[30]</sup>指出,在土壤中接种威廉环毛蚓和赤子爱胜蚓 24 h 后,土壤中微生物量均显著下降;Gomez-Brandon 等<sup>[31]</sup>研究安德爱胜蚓肠道时,发现粪便中微生物量低于食物中的量,这可能与研究时长及研究环境不同有关。

植物根系分泌及其残体腐解产生的化感物质会影响土壤微生物群落结构<sup>[32-33]</sup>,而酚酸类物质作为土壤中重要的化感物质对土壤病原菌的生长有促进作用<sup>[9]</sup>。Bi 等<sup>[34]</sup>报道,蚯蚓能显著降低连作草莓土壤中酚酸含量,这与本试验的结果一致。本试验中,随着时间的延长,对照的土壤总酚酸含量呈上升趋势,西瓜定植后 45 d 时总酚酸含量高于西瓜定植后 30 d 时总酚酸含量,这可能与西瓜定植后 30 d 左右暴发式发病后,残体增多有关。试验组土壤总酚酸含量呈下降趋势,这可能与蚯蚓培育土壤过程中持续降解酚酸,使土壤总酚酸含量维持在较低水平有关,蚯蚓是通过调控土壤微生物来降解酚酸类物质的<sup>[34]</sup>,因此土壤总酚酸含量在一定水平内维持相对稳定,可以减弱其对病原菌的促生诱导。

综上所述,西瓜连作土壤系统中西瓜、土壤微生物、蚯蚓相互影响,蚯蚓防控西瓜的连作障碍,可能主要是通过降解化感物质,减缓西瓜分泌物或残体降解物(酚酸类)对病原微生物的定向促进,同时通过穴居、取食等活动抑制病原菌的快速繁殖,加速有

机物质转化,促进微生物总量和活性的增加,进而改善土壤微生物群落结构来实现的。Janvier 等<sup>[35]</sup>认为,在健康土壤中,植物病原菌受到土壤生态系统内部各种作用的制约,种群不会无限制扩大,因此不会引起植物大规模病害的暴发,与本试验的结论一致。

威廉环毛蚓和赤子爱胜蚓能有效降低西瓜枯萎病的发病率,促进植株生长。在一定范围内增加蚯蚓密度能更好地促进植物生长,降低西瓜枯萎病的发病率,并且在蚯蚓质量相同的情况下,威廉环毛蚓的防控效果优于赤子爱胜蚓。

## 参考文献:

- [1] HUANG L F, SONG L X, XIA X J, et al. Plant-soil feedbacks and soil sickness: from mechanisms to application in agriculture [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2013, 39(2): 232-242.
- [2] TESTE F P, KARDOL P, TURNER B L, et al. Plant-soil feedback and the maintenance of diversity in Mediterranean-climate shrublands [J]. *Science*, 2017, 355: 173-176.
- [3] 黄春艳,卜元卿,单正军,等.西瓜连作病害机理及生物防治研究进展[J].*生态学杂志*, 2016, 35(6): 1670-1676.
- [4] 吴风芝,赵风艳,刘元英.设施蔬菜连作障碍原因综合分析与防治措施[J].*东北农业大学学报*, 2000, 31(3): 241-247.
- [5] 杨瑞平.西瓜连作障碍缓解技术及其机理研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [6] 王斌,李根,陈欢,等.蚯蚓作用下土壤化学组成和性状的动态变化[J].*水土保持学报*, 2013, 27(3): 273-277.
- [7] DORAN J W, ZEISS M R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality [J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15: 3-11.
- [8] EDWARDS C A, FLETCHER K E. Interactions between earthworms and microorganisms in organic-matter breakdown [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1988, 24(1/3): 235-247.
- [9] 毕艳孟,孙振钧.蚯蚓调控土壤微生物生态缓解连作障碍的作用机制[J].*生物多样性*, 2018, 26(10): 1103-1115.
- [10] SZCZECZAK M M. Suppressiveness of vermicompost against Fusarium wilt of tomato [J]. *Journal of Phytopathology*, 1999, 147(3): 155-161.
- [11] 柏彦超,周雄飞,赵学辉,等.蚓粪基质克服西瓜连作障碍的应用效果研究[J].*中国农学通报*, 2011, 27(8): 212-216.
- [12] 吴盼盼.蚓粪对设施内番茄连作土壤微生物区系的调节[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [13] 毕艳孟.蚯蚓缓解草莓连作障碍的效应及机理研究[D].北京:中国农业大学,2016.
- [14] 徐琴,肖能文.中国陆栖蚯蚓[M].北京:中国农业出版社,2010: 54-68.
- [15] 郭书普.西瓜、甜瓜病虫害鉴别与防治技术图解[M].北京:化学工业出版社,2012:15-27.
- [16] 赵爽,罗佳,凌宁,等.基因宏阵列和荧光定量 PCR 方法对

- 西瓜枯萎病害土壤中央孢镰刀菌的快速检测和定量[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 703-708.
- [17] LI L J, HAN X Z. Changes of soil properties and carbon fractions after long-term application of organic amendments in Mollisols[J]. Catena, 2016, 143: 140-144.
- [18] CASIDA JR L E, KLEIN D A, SANTORO T. Soil dehydrogenase activity[J]. Soil Science, 1964, 98(6): 371-376.
- [19] BOX J D. Investigation of the Folin-Ciocalteu phenol reagent for the determination of polyphenolic substances in natural waters[J]. Water Research, 1983, 17(5): 511-525.
- [20] CAO J, WANG C, HUANG Y. Interactive impacts of earthworms (*Eisenia fetida*) and arbuscular mycorrhizal fungi (*Funneliformis mosseae*) on the bioavailability of calcium phosphates[J]. Plant and Soil, 2015, 396(1/2): 45-57.
- [21] LI H, WANG C, LI X, et al. Inoculating maize fields with earthworms (*Aporrectodea trapezoides*) and an arbuscular mycorrhizal fungus (*Rhizophagus intraradices*) improves mycorrhizal community structure and increases plant nutrient uptake[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(8): 1167-1178.
- [22] WU D, LIU M, SONG X, et al. Earthworm ecosystem service and dis-service in an N-enriched agroecosystem: Increase of plant production leads to no effects on yield-scaled N<sub>2</sub>O emissions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 82: 1-8.
- [23] 曾令涛, 王东升, 常江杰, 等. 蚯蚓堆肥与益生菌配施对西瓜生长和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(1): 103-110.
- [24] MAZZOLA M, MANICI L M. Apple replant disease: role of microbial ecology in cause and control[J]. Annual Review of Phytopathology, 2012, 50: 45-65.
- [25] 马宁宁, 李天来. 设施番茄长期连作土壤微生物群落结构及多样性分析[J]. 园艺学报, 2013, 40(2): 255-264.
- [26] SHAN J, LIU J, WANG Y, et al. Digestion and residue stabilization of bacterial and fungal cells, protein, peptidoglycan, and chitin by the geophagous earthworm *Metaphire guillelmi*[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 64: 9-17.
- [27] 张宝贵. 蚯蚓与微生物的相互作用[J]. 生态学报, 1997, 17(5): 556-560.
- [28] BI Y M, TIAN G L, WANG C, et al. Differential effects of two earthworm species on Fusarium wilt of strawberry[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 126: 174-181.
- [29] 李欢, 杜志勇, 刘庆, 等. 蚯蚓菌根互作对土壤酶活、甘薯根系生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 209-215.
- [30] ZHANG B G, LI G T, SHEN T S, et al. Changes in microbial biomass C, N, and P and enzyme activities in soil incubated with the earthworms *Metaphire guillelmi* or *Eisenia fetida*[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2055-2062.
- [31] GÓMEZ-BRANDÓN M, AIRA M, LORES M, et al. Epigeic earthworms exert a bottleneck effect on microbial communities through gut associated processes[J]. PLoS ONE, 2011, 6(9): e24786.
- [32] VAITAUSKIENE K, ŠARAUSKIS E, NAUJOKIENE V, et al. The influence of free-living nitrogen-fixing bacteria on the mechanical characteristics of different plant residues under no-till and strip-till conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 154: 91-102.
- [33] ZHANG N, WANG D, LIU Y, et al. Effects of different plant root exudates and their organic acid components on chemotaxis, biofilm formation and colonization by beneficial rhizosphere-associated bacterial strains[J]. Plant and Soil, 2014, 374(1/2): 689-700.
- [34] BI Y M, TIAN G L, WANG C, et al. Application of leaves to induce earthworms to reduce phenolic compounds released by decomposing plants[J]. European Journal of Soil Biology, 2016, 75: 31-37.
- [35] JANVIER C, VILLENEUVE F, ALABOUVETTE C, et al. Soil health through soil disease suppression: which strategy from descriptors to indicators? [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(1): 1-23.

(责任编辑:王妮)