

种养模式下蚯蚓对西瓜连作障碍的影响

张娟琴, 郑宪清, 李双喜, 白娜玲, 张海韵, 吕卫光*, 张月*, 张翰林

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

摘要:【目的】为了探索种养模式下, 不同品种蚯蚓对连作土壤微生态及西瓜长势的影响, 阐释蚯蚓防控西瓜连作障碍机制。【方法】基于连作 6 a 的西瓜设施大棚, 以连作障碍成因为切入点, 设置不投放蚯蚓 (CK)、投放 0.6 kg m⁻² 赤子爱胜蚓 (T1)、投放 0.6 kg m⁻² 威廉环毛蚓 (T2) 3 个处理, 监测不同时期土壤微生态、西瓜长势的变化动态, 并分析它们之间的相关性。【结果】与 CK 相比, 西瓜移栽前, T1、T2 增加了土壤总养分 (23.92%~31.90%)、有效养分 (10.67%~13.70%) 的含量; 西瓜种植季, T1、T2 显著降低土壤的 pH (2.03%~8.25%)、总酚酸 (23.98%~60.80%)、容重 (3.79%~5.39%)、西瓜枯萎病原菌的数量 (22.93%~59.18%), 显著提高了细菌数量、土壤细菌/真菌比值, 显著降低了西瓜枯萎病的发病率 (10.00% 以上), 促进了主蔓生长 (增加了 71.43% 以上)。而与 T1 相比, T2 能更好的改善土壤微生态环境, 降低连作障碍的发生。【结论】蚯蚓能显著改善土壤微生态, 促进西瓜生长, 从而缓解连作障碍, 而且土壤微生态、西瓜长势均与土壤微生物密切相关。

关键词: 蚯蚓; 土壤微生态; 西瓜生长; 连作障碍; 西瓜-蚯蚓种养模式

中图分类号: S156;S181 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2023)05-1159-08

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022082602

张娟琴, 郑宪清, 李双喜, 白娜玲, 张海韵, 吕卫光, 张月, 张翰林. 种养模式下蚯蚓对西瓜连作障碍的影响 [J]. 土壤通报, 2023, 54(5): 1159-1166

ZHANG Juan-qin, ZHENG Xian-qing, LI Shuang-xi, BAI Na-ling, ZHANG Hai-yun, LV Wei-guang, ZHANG Yue, ZHANG Han-lin. Effects of Different Earthworms on Continuous Cropping Obstacles in Watermelon-Earthworm Co-culture Pattern[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(5): 1159-1166

【研究意义】我国是西瓜种植和消费大国, 随着农业发展的集约化和专业化, 设施连作栽培现象普遍, 西瓜连作障碍严重。而连作障碍的成因复杂, 主要体现为土壤微生态恶化, 如养分的非均衡性消耗、理化性质劣变、土壤微生物群落结构改变、自毒物质积累等, 导致土传病害频发、大幅减产^[1-2], 而土壤微生态复杂, 各因素间相互作用加剧了连作障碍的发生^[3-4]。目前, 连作障碍的防控措施主要有培育抗病品种、农业措施 (轮作、施肥、暴晒、嫁接)、化学防治等, 但均有一定的局限性^[5-6]。蚯蚓被称为土壤生态系统的工程师, 在促进养分循环、调控土壤生态、促进植物生长等方面具有重要影响^[7-8], 其在土壤中的数量一直被人们用于表征土壤环境健康的重要指标^[9], 因此蚯蚓具有防控连作障碍的巨大潜能。西瓜-蚯蚓种养模式为实际生产中西瓜连作障碍的防控提供了一个新思路, 同时为土壤保育提供了新途径。【前人研究进展】以往的研究

表明, 蚯蚓粪中的微生物能抑制病原真菌, 抑制效果与蚯蚓粪加入量正相关^[10]。蚯蚓堆肥显著抑制了番茄、黄瓜、西瓜枯萎病的发病率、提升了壮苗指数、改善了蔬果品质^[11-13]。现有研究主要集中在蚯蚓堆肥及蚯蚓粪生物肥料的开发和应用探索^[14-16], 仅有部分盆栽试验表明蚯蚓能有效降低草莓、西瓜枯萎病发病率^[17-19]。【研究切入点】西瓜连作导致土壤微生态恶化, 土传病害严重。目前利用蚯蚓防控连作障碍的研究处于初期阶段, 连作障碍成因复杂, 蚯蚓-西瓜种养模式下, 蚯蚓防控连作障碍的机制及关键因素尚不明确。【拟解决的关键问题】本研究在前期筛选的蚯蚓投放密度的基础上, 以连作障碍的成因 (土壤微生态) 及表征连作障碍防控效果的西瓜长势指标为切入点, 选择表居型蚯蚓赤子爱胜蚓 (*Eisenia fetida*)、上食下居型蚯蚓威廉环毛蚓 (*Pheretima guillemi*) 两种不同生态类型的蚯蚓为供试蚯蚓, 以连作 6 a 的设施大棚为试验基地, 研究不同生态类型

收稿日期: 2022-09-02; 修订日期: 2022-12-19

基金项目: 上海市农业科学院卓越团队建设计划 [沪农科卓〔2022〕008]; 上海市农业科学院卓越团队建设计划 [农科创 2017(A-03)]

作者简介: 张娟琴 (1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤生态与土壤生物修复技术研究

*通讯作者: E-mail: lwei1217@sina.com; E-mail: zhangyuelsz@163.com

蚯蚓对连作障碍的影响。监测不同时期土壤微生态（养分、理化、自毒物质、微生物）、西瓜长势（枯萎病发病率、主蔓长）的变化动态，探索蚯蚓—西瓜种养模式下，蚯蚓防控连作障碍的机制及关键土壤因素，为西瓜连作障碍的防治及推广应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况：

试验在农业部上海耕地保育观测实验站长期定位试验基地进行，基地位于上海市奉贤区（30°53'419" N，121°23'158" E），年平均气温 15.6℃，年平均降雨量约 1178.2 mm。试验基地为设施连栋大棚，大棚内设置了多个独立试验小区（长 5.0 m，宽 4.5 m），四周用水泥垄和防渗膜隔开。2014 年 4 月起，每年种植 2 季西瓜，分别于 4 月、9 月上旬移栽定植，6 月、11 月中下旬采收。2020 年 11 月蚯蚓试验开始时，土壤 pH 7.92、有机质 17.61 g kg⁻¹、全氮 1.43 g kg⁻¹、全磷 1.53 g kg⁻¹、全钾 21.93 g kg⁻¹、速效氮 123.39 mg kg⁻¹、速效磷 53.93 mg kg⁻¹、速效钾 499.03 mg kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验自 2020 年 11 月开始至 2021 年 6 月结束。2020 年 11 月西瓜采收后，移除试验小区内瓜秧及西瓜残体，每个小区表施有机肥 50 kg，覆盖 25 kg 高温堆制水稻秸秆（秸秆长度约 7 cm），设置不投放蚯蚓（CK）、投放赤子爱胜蚓（*Eisenia fetida*）0.6 kg m⁻²（T1）、投放威廉环毛蚓（*Pheretima guillemi*）0.6 kg m⁻²（T2）3 个处理，每个处理 3 个重复，3 d 监测 1 次的土壤含水量，调节浇水量维持土壤含水量 20~25%，养殖蚯蚓培肥土壤。2021 年 4 月上旬移栽西瓜，西瓜移栽后 40 天后每个小区开沟追施 25 kg 有机肥，6 月中下旬采收西瓜。试验过程中分别在西瓜移栽前及西瓜移栽后的伸蔓期、盛花期、盛果期采用 5 点法采集耕作层（0~20 cm）土壤，测定土壤养分、理化、微生物指标，并调查试验小区西瓜枯萎病的发病率及西瓜蔓长。

供试蚯蚓：以单体重分别为 0.25~0.3 g、2~3.5 g 的赤子爱胜蚓和威廉环毛蚓为试验蚯蚓，其中表居型赤子爱胜蚓、上食下居型威廉环毛蚓分别代表优良的养殖品种、广泛存在的野生品种，两种生态类型的蚯蚓均具有较好的代表性。

供试西瓜：早春红玉（*Citrullus lanatus*），采用吊蔓种植，幼苗苗龄为 30 d，于 3~4 片真叶时选取叶片宽厚无损、色浓健壮的苗移栽定植。

供试有机肥：pH 8.98、水分含量 29.46%、有机质 412.2 g kg⁻¹、全氮 19.89 g kg⁻¹、全磷 7.95 g kg⁻¹、全钾 25.88 g kg⁻¹。

供试水稻秸秆：全氮 3.47 g kg⁻¹、全磷 2.42 g kg⁻¹、全钾 17.15 g kg⁻¹。

1.3 测定方法

土壤指标测定：pH 采用电位法（水土比 2.5:1）、土壤含水量（Soil water content）采用质量法、全氮（Total nitrogen, TN）采用凯氏定氮法、全磷（Total phosphorus, TP）采用酸溶—钼锑抗比色法、全钾（Total potassium, TK）采用氢氧化钠熔融—火焰光度计法、碱解氮（Available nitrogen, AN）采用凯氏定氮法、有效磷（Available phosphorus, AP）采用钼锑抗比色法、有效钾（Available potassium, AK）采用火焰光度计法、有机质（Soil organic matter, SOM）采用重铬酸钾容量法、阳离子交换量（Cation exchange capacity, CEC）采用乙酸铵法、水溶性总盐（Total soluble salts, TSS）采用重量法、容重（Soil bulk density, SBD）采用环刀法^[20]测定。总酚酸（Total phenolic Acid, TPA）采用比色法测定^[21]。细菌（Bacteria）、真菌（Fungi）、尖孢镰刀菌西瓜专化型（*F. oxysporum* f. sp. *niveum*, FON）采用荧光定量 PCR 法测定^[22-23]。

西瓜生长指标测定：主蔓长（Vine length, VL）采用米尺测量；西瓜枯萎病发病率（*Fusarium wilt* incidence, FWI）：统计西瓜枯萎病（枯萎叶片数≥50%）发病株数，以发病植株占总株数的百分比表示。

1.4 数据处理

试验数据结果均以平均值±标准差来表示，采用 Excel 2007 和 SPSS 18.0 统计软件进行分析。其中，差异显著性采用单因素方差分析（ANOVA）检验、Duncan 多重比较法比较，显著水平为 0.05；相关性采用双变量 Pearson、spearman 相关系数法分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对西瓜连作土壤养分的影响

不同处理显著地改变了土壤养分含量（表 1），试验不同时期，T1、T2 各养分含量均高于 CK，3 个试验处理其养分的变化动态均呈倒 N 字形。西瓜

表 1 不同处理土壤养分含量的变化
Table 1 Soil nutrient dynamics of different treatments

时期 Period	处理 Treatment	全氮 (g kg ⁻¹) TN	全磷 (g kg ⁻¹) TP	全钾 (g kg ⁻¹) TK	碱解氮 (mg kg ⁻¹) AN	有效磷 (mg kg ⁻¹) AP	有效钾 (mg kg ⁻¹) AK	有机质 (g kg ⁻¹) SOM
移栽前	CK	1.46 ± 0.01 b	1.55 ± 0.07 b	23.25 ± 0.35 bc	127.02 ± 0.7 e	54.02 ± 5.64 d	505.00 ± 7.07 c	17.81 ± 0.14 d
	T1	1.53 ± 0.01 a	1.65 ± 0.06 a	29.25 ± 0.35 a	141.58 ± 3.13 c	68.77 ± 7.65 bc	550.00 ± 14.14 a	22.55 ± 0.35 b
	T2	1.56 ± 0.01 a	1.71 ± 0.06 a	31.49 ± 0.01 a	150.82 ± 2.33 b	70.32 ± 3.70 b	560.00 ± 28.28 a	23.82 ± 0.45 a
伸蔓期	CK	1.47 ± 0.03 b	1.52 ± 0.16 b	21.64 ± 0.82 c	122.38 ± 5.02 e	53.32 ± 1.27 d	501.33 ± 15.28 c	17.74 ± 0.05 d
	T1	1.49 ± 0.02 b	1.57 ± 0.03 ab	24.67 ± 1.61 b	135.04 ± 6.85 d	61.57 ± 2.51 c	546.67 ± 20.82 a	20.43 ± 1.04 c
	T2	1.51 ± 0.04 ab	1.61 ± 0.1 ab	26.33 ± 1.26 b	144.28 ± 2.93 c	64.15 ± 2.41 c	548.00 ± 19.70 a	21.24 ± 0.36 c
盛花期	CK	1.50 ± 0.01 ab	1.52 ± 0.01 b	25.76 ± 0.78 b	133.15 ± 5.56 d	70.55 ± 1.00 b	518.51 ± 17.68 b	18.15 ± 0.35 d
	T1	1.53 ± 0.01 a	1.59 ± 0.01 ab	29.65 ± 0.21 a	155.24 ± 2.1 b	76.54 ± 1.36 b	551.50 ± 7.78 a	21.10 ± 0.85 c
	T2	1.56 ± 0.01 a	1.64 ± 0.03 a	33.15 ± 0.21 a	162.12 ± 9.31 a	82.72 ± 2.64 a	560.00 ± 14.14 a	22.01 ± 0.43 b
盛果期	CK	1.50 ± 0.01 ab	1.51 ± 0.01 b	23.75 ± 0.35 bc	129.57 ± 3.74 de	67.38 ± 2.60 c	505.00 ± 21.21 c	17.71 ± 0.14 d
	T1	1.51 ± 0.05 ab	1.51 ± 0.03 b	24.92 ± 0.30 b	148.45 ± 3.66 c	70.49 ± 4.66 b	512.50 ± 0.71 b	18.45 ± 0.21 d
	T2	1.52 ± 0.04 a	1.53 ± 0.01 b	26.75 ± 0.81 ab	150.79 ± 7.77 bc	73.62 ± 4.59 b	515.00 ± 12.73 b	18.65 ± 0.21 d

注: CK: 不投放蚯蚓; T1: 投放赤子爱胜蚓 0.6 kg m⁻²; T2 投放威廉环毛蚓 0.6 kg m⁻²。表中数据为 3 个数值的平均值 ± 标准差。同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

移栽前, 与 CK 相比, T1、T2 显著的提升了土壤的养分含量, 其中总养分(全氮 + 全磷 + 全钾 + 有机质)提升了 23.92% ~ 31.90%、有效养分(碱解氮 + 有效磷 + 有效钾)提升了 10.67% ~ 13.70%; 与 T1 相比, T2 显著的增加了碱解氮、有机质含量。与 CK 相比, T1、T2 在伸蔓期, 显著增加土壤全钾、碱解氮、有效磷、有效钾和有机质的含量; 在盛花期、盛果期, 显著提升土壤碱解氮、有效钾的含量。因西瓜长势不同, 不同处理养分的变化趋势不同, 但土壤养分的变化动态显示投放蚯蚓的 T1、T2 较 CK 均能提升养分的含量, 而与 T1 相比, T2 能更好的提高土壤的养分含量。

2.2 不同处理对西瓜连作土壤理化性质、总酚酸的影响

不同蚯蚓对连作土壤理化性质和总酚酸的影响

如表 2 所示。投放蚯蚓试验组 T1、T2 显著降低了土壤 pH、总酚酸、容重 ($P < 0.05$)。整个试验过程中 T1、T2 的 pH 值、容重比 CK 分别下降了 2.03% ~ 8.25%, 3.79% ~ 5.39%; 而 CK 的 pH 值、容重相对稳定, 分别为 7.90 ~ 7.94、1.32 g·cm⁻³ ~ 1.30 g·cm⁻³, 不同时期的差异不显著。土壤酚酸为西瓜连作障碍的化感物质, 与土传病害及西瓜生长密切相关, 与 CK 相比, T1、T2 的总酚酸在移栽前、伸蔓期、盛花期、盛果期分别下降了 23.98% ~ 33.82%、28.92% ~ 37.50%、37.77% ~ 44.39%、49.83 ~ 60.80%, 不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。而与 CK 相比, T1、T2 的水溶性总盐在西瓜移栽前差异显著 ($P < 0.05$)、阳离子交换量在盛果期差异显著 ($P < 0.05$), 其它时期差异均不显著。

表 2 不同处理土壤理化性质、总酚酸含量的变化
Table 2 Dynamics of physicochemical properties and total phenolic acids under different treatments

时期 Period	处理 Treatment	pH	水溶性总盐 (%) TSS	阳离子交换量 (cmol kg ⁻¹) CEC	总酚酸 (mg g ⁻¹) TPA	容重 (g cm ⁻³) SBD
移栽前	CK	7.90 ± 0.04 a	0.17 ± 0.05 c	14.30 ± 0.63 d	52.46 ± 3.34 c	1.32 ± 0.01 a
	T1	7.74 ± 0.14 b	0.13 ± 0.00 d	14.97 ± 0.99 d	39.88 ± 0.38 d	1.27 ± 0.01 b
	T2	7.5 ± 0.05 cd	0.13 ± 0.02 d	16.99 ± 0.44 c	34.72 ± 0.77 f	1.25 ± 0.01 bc
伸蔓期	CK	7.92 ± 0.07 a	0.17 ± 0.01 c	16.97 ± 0.79 c	55.42 ± 0.56 b	1.30 ± 0.01 a
	T1	7.62 ± 0.04 bc	0.16 ± 0.01 c	18.75 ± 1.87 c	39.39 ± 0.56 d	1.25 ± 0.02 bc
	T2	7.58 ± 0.12 c	0.15 ± 0.03 cd	18.28 ± 1.20 c	34.64 ± 2.06 f	1.24 ± 0.01 bc
盛花期	CK	7.91 ± 0.02 a	0.20 ± 0.01 bc	17.11 ± 0.94 c	58.96 ± 1.25 b	1.30 ± 0.01 a
	T1	7.59 ± 0.06 c	0.16 ± 0.03 c	18.36 ± 0.83 c	36.69 ± 0.71 d	1.25 ± 0.01 bc
	T2	7.42 ± 0.06 de	0.17 ± 0.01 c	19.06 ± 0.11 c	32.79 ± 1.48 e	1.23 ± 0.01 cd
盛果期	CK	7.94 ± 0.03 a	0.27 ± 0.02 a	18.27 ± 0.97 c	67.07 ± 1.62 a	1.30 ± 0.01 a
	T1	7.62 ± 0.01 bc	0.23 ± 0.05 ab	23.48 ± 0.71 b	33.65 ± 1.39 e	1.24 ± 0.01 cd
	T2	7.29 ± 0.01 e	0.21 ± 0.05 bc	28.34 ± 2.11 a	26.29 ± 2.18 g	1.23 ± 0.01 d

2.3 不同处理对西瓜连作土壤微生物数量的影响

投放蚯蚓显著地改变了土壤细菌、真菌、西瓜枯萎病病原菌数量（表 3），随着试验的推进，同一处理细菌、真菌、病原菌的数量均呈现上升趋势，不同处理间细菌差异显著（ $P < 0.05$ ），而 T1 与 T2 之间真菌、病原菌差异均不显著。与 CK 相比，T1、T2 的西瓜枯萎病病原菌数量在西瓜移栽前、伸蔓期、盛花期、盛果期分别下降了 35.56% ~ 46.67%、

22.93% ~ 29.30%、48.81% ~ 50.00%、57.82% ~ 59.18%。T1、T2 细菌与真菌的比值范围分别为 358.52 ~ 526.76、549.75 ~ 766.41，显著高于 CK（176.20 ~ 202.02）。盛花期土壤病原菌、细菌、真菌数量明显增加，说明追加有机肥能显著增加土壤微生物的总量，而蚯蚓能促进有机物的转化，进一步提升细菌/真菌比值。

表 3 不同处理土壤细菌、真菌及西瓜枯萎病病原菌的变化
Table 3 Dynamics of soil bacteria, fungi and *F. oxysporum* f. sp. niveum under different treatments

时期 Period	处理 Treatment	病原菌 FON x10 ⁴ Copies g ⁻¹	细菌 Bacteria x10 ⁹ Copies g ⁻¹	真菌 Fungi x10 ⁷ Copies g ⁻¹	细菌/真菌比值 Ratio of Bacteria to Fungi
移栽前	CK	1.35 ± 0.04 b	6.8 ± 0.18 g	3.84 ± 0.73 b	177.08
	T1	0.87 ± 0.05 d	8.88 ± 0.72 f	2.29 ± 0.35 cd	358.52
	T2	0.72 ± 0.04 d	10.83 ± 0.68 e	1.97 ± 0.17 d	549.75
伸蔓期	CK	1.57 ± 0.06 b	6.96 ± 0.29 g	3.95 ± 0.29 b	176.20
	T1	1.21 ± 0.04 c	10.36 ± 0.71 e	2.45 ± 1.53 c	422.86
	T2	1.11 ± 0.03 c	13.65 ± 0.89 d	2.03 ± 0.27 d	672.41
盛花期	CK	2.52 ± 0.06 a	10.02 ± 0.59 e	4.96 ± 0.67 a	202.02
	T1	1.26 ± 0.06 c	14.96 ± 1.29 cd	2.84 ± 0.39 bc	526.76
	T2	1.29 ± 0.02 bc	19.85 ± 1.46 b	2.59 ± 0.34 c	766.41
盛果期	CK	2.94 ± 0.06 a	10.4 ± 0.64 e	5.17 ± 0.74 a	201.16
	T1	1.24 ± 0.04 c	16.38 ± 0.73 c	3.35 ± 0.56 b	488.96
	T2	1.20 ± 0.03 c	22.39 ± 2.41 a	2.93 ± 0.14 b	764.16

2.4 不同处理对西瓜枯萎病发病率、长势的影响

本研究中以西瓜枯萎病的发病率、主蔓长表征西瓜连作障碍的防控效果。枯萎病为西瓜连作障碍的主要病害，如图 1a 所示，投放蚯蚓能显著降低西瓜枯萎病的发病率。伸蔓期 CK、T1、T2 的发病率分别为 18.18 %、16.36%、9.09%，到西瓜花期时 CK、T1、T2 3 个处理枯萎病的发病率显著的增加，较伸蔓期分别上升了 27.27%、12.78%、12.73%。到盛果期时，CK 发病率迅速上升至 69.09%。西瓜种植季 T1、T2 西瓜枯萎病的发病率较 CK 降低了 10.00 ~ 63.16%。主蔓长与西瓜植株的生物量显著正相关，非破坏试验中可较客观的反应西瓜的长势，其变化动态如图 1b 所示，T1、T2 西瓜的主蔓长显著高于 CK。与 CK 相比，伸蔓期、盛花期、盛果期 T1、T2 主蔓长比 CK 分别增长 71.43% ~ 84.31%、90.88% ~ 266.38%、73.95% ~ 110.36%，且 T2 的西瓜主蔓长显著高于 T1（ $P < 0.05$ ）。

2.5 不同处理西瓜长势与土壤微生态因子的相关性

以西瓜长势（主蔓长、枯萎病防病率）指标表征连作障碍防控效果，西瓜—蚯蚓种养模式下，西

瓜长势指标与土壤理化性质、微生物等的相关性如图 4 所示，病原菌的数量对发病率的影响最显著。枯萎病的发病率与病原菌及真菌的数量呈显著正相关（ $P < 0.01$ ），同时总酚酸也显著影响着发病率（ $P < 0.05$ ）。西瓜主蔓长与阳离子交换量、细菌数量显著正相关（ $P < 0.01$ ），与土壤氮素、有机质显著正相关（ $P < 0.05$ ），而与土壤总酚酸显著负相关（ $P < 0.05$ ）。相关性分析结果显示：西瓜—蚯蚓种养模式下，蚯蚓防控西瓜连作障碍的关键因素为土壤微生物，同时化感物质（总酚酸）、土壤肥力水平（氮素、有机质、阳离子交换量）也显著影响着连作障碍的防控效果。

3 讨论

西瓜移栽前，投放蚯蚓试验组其土壤经过 4 个月的培肥，土壤表面有大量的新鲜蚓粪。投放赤子爱胜蚓的试验组，其土壤里有大量的幼蚓存在，说明蚯蚓生长良好。试验结束时土壤表面的新鲜蚓粪有所减少，说明蚯蚓活动或者数量减少，这可能与气温较高、西瓜种植期供水减少相关。因本试验为

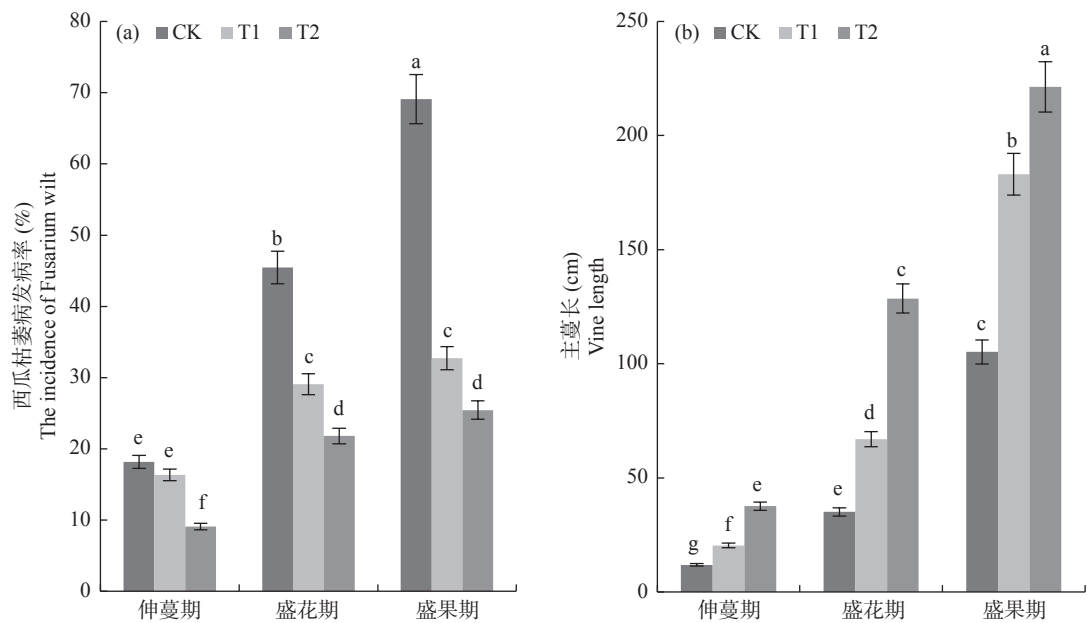


图1 不同处理西瓜枯萎病发病率(a)及西瓜植株蔓长(b)的变化
Fig.1 Dynamics of the incidence of Fusarium wilt (a) and vine length (b) under different treatments

表4 西瓜-蚯蚓种养模式下, 西瓜生长指标与土壤微生态因子的相关性
Table 4 Correlation analysis between watermelon growth indicators and soil factors

	相关性系数 Coefficient	pH	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	碱解氮 AV	有效磷 AP	有效钾 AK	有机质 SOM	水溶性 总盐 TSS	阳离子 交换量 CEC	总酚酸 TPA	容重 SBD	病原菌 FON	细菌 Bacteria	真菌 Fungi
发病率	Pearson	0.533	-0.097	-0.528	-0.277	-0.322	0.11	-0.497	-0.548	0.569	-0.065	0.704*	0.578	0.891**	-0.221	0.820**
	Spearman	0.427	0.076	-0.664	-0.167	-0.1	0.383	-0.333	-0.583	0.529	0.233	0.670*	0.352	0.819**	0.05	0.817**
主蔓长	Pearson	-0.605	0.731*	-0.17	0.264	0.674*	0.577	0.184	0.720*	0.531	0.894**	-0.687*	-0.164	-0.525	0.833**	-0.073
	Spearman	-0.536	0.715*	-0.05	0.417	0.667*	0.539	0.1	0.683*	0.529	0.900**	-0.667*	-0.217	-0.596	0.917**	0.033

注: **和*分别表示 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平显著相关。

小型田间试验, 无法准确统计蚯蚓的数量及重量, 但前期的盆栽试验已证实蚯蚓能很好的适应西瓜—蚯蚓种养环境^[18]。本研究中, 与 CK 相比, 西瓜移栽前, 土壤的养分水平显著提升。西瓜移栽后土壤养分的变化与西瓜长势相关, 但投放蚯蚓的试验组显著提升了碱解氮、有效钾的含量, 说明蚯蚓能促进有机物腐解, 增加养分有效性, 这与其他研究人员的研究结果相似^[18,24-25]。在有机物质丰富(西瓜移栽前、盛花期)时, 与赤子爱胜蚓相比, 威廉环毛蚓显著的提升了土壤碱解氮、有机质的含量, 加快了养分的转化, 这可能与两种生态类型的蚯蚓的体内酶、微生物及取食偏好相关^[26-27]。本研究中西瓜长势与土壤微生态的相关性系数及西瓜对氮、磷、钾的平均吸收比例($N:P_2O_5:K_2O$ 为 $1.0:0.3:1.2$)^[28], 均显示全磷出现了轻微积累, 生产中可通过调整养分的比例, 消除养分非均衡性消耗的影响。

本研究结果显示: 投放蚯蚓试验组显著降低了

土壤 pH 值、总酚酸、容重。已有研究表明, 蚯蚓的活动能增加基质中氮循环细菌的活跃度, 使铵态氮和硝态氮浓度相对平衡, pH 向中性趋近; 蚯蚓活动也增加土壤有机物的含量和稳定性团聚体的占比, 降低土壤容重^[29-30]; 同时蚯蚓活动亦促进了酚酸的降解^[31], 与本研究结论一致。说明投放蚯蚓能显著改善土壤理化性质, 同时与赤子爱胜蚓处理相比, 威廉环毛蚓处理显著降低了土壤总酚酸的含量, 与盆栽试验结论一致^[18]。

以往研究表明, 土壤微生物数量对其发挥生态功能具有重要作用, 某种微生物的数量往往是决定其功能的关键^[32-34]。土壤中细菌与真菌的比重被作为土壤质量的重要生物指标, 细菌比重大的土壤其质量更好、肥力水平更高、真菌类土传病害更少^[35]。蚯蚓活动促进了有机物质从植物源向微生物源转化, 显著调控着土壤微生物的活性和总量^[27,36]。蚯蚓原位堆肥可以提高土壤肥力和增加土壤微生物数量, 同

时降低番茄连作障碍病原菌的数量^[12,16], 本研究结果亦显示蚯蚓能增加土壤微生物的数量, 显著降低真菌、病原菌的比重, 从而降低了西瓜枯萎病的发病率。土壤细菌/真菌比值增加, 与有机肥、秸秆的施用有关, 蚯蚓能促进有机物质碎片化、腐植酸化, 更利于细菌的繁殖^[36-37]。

本研究中试验基地的西瓜已连作6年, 枯萎病严重, 盛果期对照组枯萎病的发病率达到69.09%, 测产已没有意义, 因此以西瓜主蔓长、枯萎病的发病率表征西瓜连作障碍的防控效果。相关性分析结果表明: 西瓜-蚯蚓种养模式下, 土壤微生物(病原菌、细菌、真菌)对长势指标的影响最显著($P < 0.01$), 同时化感物质(总酚酸)、土壤肥力水平(氮素、有机质、阳离子交换量)也显著影响着连作障碍的防控效果($P < 0.05$)。以往的研究亦证实盐渍化、酚酸类自毒物质、病原菌及真菌的数量^[38-41]与连作障碍严重程度正相关。本研究中有有机肥、秸秆的施用降低土壤盐分累积的进程, 增加了土壤有机质的含量, 蚯蚓的活动直接或间接影响土壤微生物数量和群体结构(细菌/真菌比值), 同时通过土壤微生物影响土壤肥力水平、理化性质以及化感物质的含量, 从而减缓土壤连作障碍的发生。

4 结论

(1) 西瓜移栽前, 蚯蚓显著提升了土壤的养分水平。西瓜移栽后土壤养分的变化因西瓜长势不同, 变化趋势不尽相同, 但投放蚯蚓显著提升了碱解氮、有效钾的含量, 说明蚯蚓能增加土壤养分有效性, 促进西瓜的生长。

(2) 蚯蚓显著降低了土壤(碱性)pH值、总酚酸、容重, 提升了阳离子交换量, 显著改善了土壤理化性质。

(3) 蚯蚓能增加土壤微生物的数量, 显著降低真菌、病原菌的比重, 从而降低了西瓜枯萎病的发病率。

(4) 相关性分析结果表明: 西瓜-蚯蚓种养模式下, 土壤微生物(病原菌、细菌、真菌)对长势指标的影响最显著($P < 0.01$), 蚯蚓影响连作障碍的关键因素为土壤微生物。

(5) 蚯蚓的活动直接或间接影响土壤微生物数量和群体结构(细菌/真菌比值), 同时通过土壤微生物影响土壤肥力水平、理化性质以及化感物质的

含量, 从而减缓土壤连作障碍的发生。与赤爱胜蚓相比, 威廉环毛蚓能更好的防控西瓜连作障碍。

参考文献:

- [1] 吴凤芝, 赵凤艳, 刘元英. 设施蔬菜连作障碍原因综合分析防治措施[J]. *东北农业大学学报*, 2000, 31(3): 241-247.
- [2] Huang L F, Song L X, Xia X, et al. Plant-soil feedbacks and soil sickness: from mechanisms to application in agriculture[J]. *Journal of chemical ecology*, 2013, 39: 232-242.
- [3] 魏晓明, 赵银平, 杨瑞平. 设施西瓜连作障碍及防治措施研究进展[J]. *中国瓜菜*, 2016, 29: 1-5.
- [4] 胡琴琴. 防放线菌筛选及对西瓜连作障碍修复机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [5] 喻景权, 杜尧舜. 蔬菜设施栽培可持续发展中的连作障碍问题[J]. *沈阳农业大学学报*, 2000, 31(1): 124-126.
- [6] 周开胜. 强还原土壤消毒防控连作障碍效果及影响因素研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2021.
- [7] Edwards C A, Fletcher K E. 1988. Interactions between earthworms and microorganisms in organic-matter breakdown[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1988, 24: 235-47.
- [8] 王 斌, 李 根, 陈 欢, 焦加国, 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.
- [9] 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.
- [10] Szczzech M M. Suppressiveness of vermicompost against Fusarium wilt of tomato[J]. *Journal of Phytopathology*, 2010, 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(08): 212-216.
- [12] Zhao H T, Li T P, Zhang Y, Hu J, et al. Effects of vermicompost amendment as a basal fertilizer on soil properties and cucumber yield and quality under continuous cropping conditions in a greenhouse[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17: 1-13.
- [13] 曹云娥, 尹 翠, 吴泽帅, 等. 蚯蚓原位堆肥提升番茄连作土壤质量研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(02): 247-259.
- [14] Goswami L, Nath A, Sutradhar S. Application of drum compost and vermicompost to improve soil health, growth, and yield parameters for tomato and cabbage plants[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 200: 243-252.
- [15] Ding Z L, Kheir A M S, Ali O A M, et al. A vermicompost and deep tillage system to improve saline-sodic soil quality and wheat productivity[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277: 111388.
- [16] 申佳丽, 安明远, 魏延凤, 等. 三种不同土壤改良剂对黄瓜根际微生物数量和群落代谢功能多样性的影响[J/OL]. *微生物学通报*: 1-15[2022-05-13].
- [17] 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.

- [18] 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.
- [19] 张娟琴, 郑宪清, 李双喜, 等. 西瓜连作土壤微生态环境对生物耕作的动态响应[J]. *上海农业学报*, 2021, 37(2): 81 – 87.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版, 1998: 308-365.
- [21] 吴 粤, 徐 宁, 温美娟. 磷钼酸—磷酸盐比色法测定土壤中总酚酸含量[J]. *环境化学*, 2000, (1): 67 – 72.
- [22] Fierer N, Jackson J A, Vilgalys R, Jackson R B. Assessment of soil microbial community structure by use of taxon-specific quantitative PCR assays[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(7): 4117 – 4120.
- [23] 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.
- [24] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between microaggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1): 7 – 31.
- [25] Ngo P T, Rumpel C, Doan T T, et al. The effect of earthworms on carbon storage and soil organic matter composition in tropical soil amended with compost and vermicompost[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 50(9): 214 – 220.
- [26] 张宝贵. 蚯蚓与微生物的相互作用[J]. *生态学报*, 1997, (5): 106 – 110.
- [27] 张宝贵, 李贵桐, 孙 钊, 王建奎. 两种生态类型蚯蚓几种消化酶活性比较研究[J]. *生态学报*, 2001, (6): 978 – 981.
- [28] 郭亚雯, 崔建钊, 孟 延, 等. 设施早熟西瓜和甜瓜的化肥施用现状及减施潜力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(5): 858 – 868.
- [29] Scullion J, Malik A. Earthworm activity affecting organic matter, aggregation and microbial activity in soil restored after opencast mining for coal[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 119 – 126.
- [30] Hooper D U, Chapin F S, Ewel J J, et al. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge[J]. *Ecological Monographs*, 2005, 75(1): 3 – 35.
- [31] 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.
- [32] Zhou, X, Wu, F. Dynamics of the diversity of fungal and Fusarium communities during continuous cropping of cucumber in the greenhouse[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, 80: 469 – 478.
- [33] Stokell J R, Hamp T J, Steck T R. Examining changes in bacterial abundance in complex communities using next-generation sequencing is enhanced with quantitative PCR[J]. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 2016, 109: 1161 – 1166.
- [34] Props R, Kerckhof F M, Rubbens P, et al. Absolute quantification of microbial taxon abundances[J]. *The ISME Journal*, 2017, 11(2): 584 – 587.
- [35] Li X G, Ding C F, Hua K, et al. Soil sickness of peanuts is attributable to modifications in soil microbes induced by peanut root exudates rather than to direct allelopathy[J]. *Soil Biol Biochem*, 2014, 78: 149 – 159.
- [36] 郎立娜, 孙正晓, 陈元晖, 等. 蚯蚓和细菌对秸秆混粪改良苏打盐碱土碳转化及微生物群落的影响[J/OL]. *农业资源与环境学报*: 1-13[2022-05-13].
- [37] Wardle D A. The influence of biotic interactions on soil biodiversity[J]. *Ecology Letter*, 2006, 9: 870 – 886.
- [38] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008 – 1010.
- [39] Martyn R D. Fusarium wilt of watermelon: 120 years of research[J]. *Horticultural Reviews*, 2014, 42: 349 – 442.
- [40] Xiong W, Zhao Q Y, Zhao J, et al. Different continuous cropping spans significantly affect microbial community membership and structure in a Vanilla-grown soil as revealed by deep pyrosequencing[J]. *Microbial Ecology*, 2015, 70: 209 – 218.
- [41] 卢维宏, 张乃明, 包 立, 等. 我国设施栽培连作障碍特征与成因及防治措施的研究进展[J]. *土壤*, 2020, 52(4): 651 – 658.

Effects of Different Earthworms on Continuous Cropping Obstacles in Watermelon-Earthworm Co-culture Pattern

ZHANG Juan-qin, ZHENG Xian-qing, LI Shuang-xi, BAI Na-ling, ZHANG Hai-yun,
LV Wei-guang*, ZHANG Yue*, ZHANG Han-lin

(Eco-environmental Protection Institute of Shanghai Academy of Agricultural Science, Shanghai Key Laboratory of Horticultural Technology, Environmental Protection Monitoring Station of Shanghai City, Agricultural Environment and Farmland Conservation Experiment Station of Ministry of Agriculture, Shanghai Low Carbon Agriculture Engineering Technology Research Center, Shanghai 201403, China)

Abstract: [Objective] Continuous cropping resulted in soil microbial deterioration and serious soil-borne diseases. Earthworms could improve soil quality, however, there are few studies on the effect of earthworms to alleviate continuous cropping obstacles. This study determined how earthworms affected soil microecology and watermelon growth and the underlying mechanisms in the watermelon-earthworm co-culture pattern. [Method] Based on a six-year watermelon continuous cropping system, three treatments were selected: no earthworms (CK), inoculated *Eisenia fetida* with 0.6 kg m⁻² (T1), inoculated *Pheretima guillemi* with 0.6 kg m⁻² (T2). The changes of soil microecology nutrients, physicochemical properties, allelochemicals, microorganisms, and watermelon growth in different periods were monitored, and the correlation between them was analyzed. [Result] The results showed that soil total nutrients and available nutrients of T1 and T2 were significantly higher than CK (23.92%-31.90%, 10.67%-13.70%, respectively) at the transplanting period of watermelon seedlings. Compared with CK, T1 and T2 significantly reduced soil pH (2.03%-8.25%), total phenolic acid (23.98%-60.80%), bulk density (3.79%-5.39%), the number of *F. oxysporum f. sp. niveum* (22.93%-59.18%), and significantly increased the number of bacteria and the ratio of bacteria to fungi. At the same time, T1 and T2 significantly promoted the growth of watermelon (the incidence of *Fusarium* wilt was reduced by more than 10.00%, and the length of the main vine was increased by more than 71.43%) compared with CK. Compared with T1, T2 was more effective in alleviating continuous cropping obstacles. Correlation analysis showed that soil microorganisms were the primary factor for earthworms to alleviate watermelon continuous cropping obstacles. [Conclusion] Earthworms significantly improve soil microecology and promote the growth of watermelon, which will alleviate continuous cropping obstacles. Moreover, soil microecology and watermelon growth are closely related to soil microorganisms.

Key words: Earthworm; Soil microecology; Watermelon growth; Continuous cropping obstacle; Watermelon-earthworm co-culture

[责任编辑: 刘轶飞]