



徐晨伟,袁玉娟,朱佳双,等.强还原土壤灭菌法(RSD)对火龙珠连作土壤线虫群落的影响[J].黑龙江农业科学,2023(10):22-29.

强还原土壤灭菌法(RSD)对火龙珠连作土壤线虫群落的影响

徐晨伟¹,袁玉娟¹,朱佳双²,李 亚¹

(1.南通科技职业学院 环境与生物工程学院,江苏 南通 226007;2.南京师范大学 地理科学学院,江苏 南京 210023)

摘要:为寻求一种有效、快速、经济、环保的防治观赏植物线虫病害的技术方法,以强还原土壤灭菌法(Reductive soil disinfestation,RSD)为技术手段,以云南省火龙珠连作线虫病害高发土壤为研究对象,设置4个处理,即添加液体糖蜜的RSD处理($6\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,MO)、可溶性糖粉的RSD处理($3\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,SS)、甘蔗渣的RSD处理($15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,SB)和不做任何处理的对照(CK),研究RSD处理对土壤线虫数量及线虫群落的影响。结果表明,与CK相比,RSD处理均可以有效杀灭土壤中根结线虫和螺旋线虫,对螺旋线虫和根结线虫的抑制率分别为75.5%~84.4%和89.1%~93.1%。同时,RSD处理后食细菌线虫相对丰度显著上升,植食性线虫数量及相对丰度显著降低,自由生活线虫成熟指数和瓦斯乐斯卡指数显著提高,植食性线虫成熟指数显著降低,且SB处理的效果最为明显。此外,相关性分析表明RSD处理介导的土壤pH和硝态氮含量变化是影响线虫群落多样性的主要环境因子。RSD处理能够有效缓解土壤酸化、次生盐渍化,改善土壤线虫群落结构,是防治土壤线虫病害的有效农业措施。

关键词:强还原土壤灭菌法;植食性线虫;线虫群落

火龙珠(*Hypericum*)为金丝桃科、欧金丝桃属多年生灌木,植株提取物中含金丝桃素等药用成分,具有抗抑郁、镇静、抗病毒等功效,是一种中草药。此外,火龙珠也常被用作切花或观果植物,具有一定的观赏价值。目前,火龙珠在云南滇中等地区大面积种植,是当地重要的花卉产业^[1]。随着种植规模的扩大,连作年限的增长,火龙珠寄生线虫病害问题日益突出,影响了种植效益和观赏价值^[2]。

植食性线虫病害是世界上最大的作物威胁之一,几乎可以攻击植物的每个部分,包括根、茎、叶、果实和种子,每年因此造成约1 250亿美元的损失^[3]。植食性线虫通过刺穿植物细胞以获取食物,使植物对养分的吸收能力下降,从而引起作物减产和品质下降。目前研究已发现超过4 100种植食性线虫,大约占到线虫种类的10%^[4]。加上集约化耕作背景下耕地复种指数高,连年重茬种植等原因,植食性线虫病害已成为仅次于真菌病害的第二大常见植物病害。根结线虫(*Meloidogyne* spp.)具有寄生范围广、侵染率高、难以彻底根除

等特点。目前已报道的根结线虫有100多种^[5],寄主植物超5 500余种。大部分维管植物都受根结线虫的侵染,主要包括蔬菜、果树和粮食作物等^[6]。根结线虫病害发生后作物会减产10%~75%,严重时甚至绝收^[7]。螺旋线虫(*Helicotylenchus* spp.)在我国累计报道已有69种^[8],属迁移性外寄生物,少数可侵入根内,易引起植物发育受阻,对香蕉、桔梗、石榴等作物的侵染尤为常见。

目前,国内最常用的线虫防治方法是化学防治,主要利用杀线虫剂消杀土壤。此方法对高效低毒的化学药剂要求较高,长期使用容易造成土壤污染,增强线虫的抗药性,降低防治效率^[9]。土壤强还原灭菌法(Reductive soil disinfestation,RSD)是一种作物种植前的土壤处理方法,是指在高温条件下向土壤中添加大量易降解有机碳源,灌溉至田间最大持水量后覆盖薄膜以创造极端厌氧环境,从而快速杀灭土传病原菌^[10],具有操作简便、广谱杀菌和生态环保的优点。除杀灭土传病原菌外,该方法还能缓解土壤酸化、次生盐渍化,改良土壤团粒结构^[11]。目前RSD处理防治蔬菜连作土传病害的报道较多,而用于观赏植物的植食性线虫防治的报道相对较少。因此,本研究以火龙珠连作线虫病害土壤为研究对象,对3种常见有机物料RSD处理后的土壤植食性线虫的杀灭效果及土壤线虫群落进行比较分析,旨

收稿日期:2023-06-14

基金项目:江苏高校“青蓝工程”资助;南通市科技计划项目(JC2021155,MS12021088)。

第一作者:徐晨伟(1989—),男,硕士,讲师,从事连作障碍土壤修复相关研究。E-mail:ntkyxcw@163.com。

在寻求一种有效、快速、经济、环保的防治观赏植物线虫病害的技术方法。

1 材料与方法

1.1 材料

田间试验设置于昆明市安宁市安丰营镇的火龙珠生产基地(24°58'N,102°17'E),海拔 1 800 m,属于亚热带高原季风气候,年平均气温 14.7℃,年均降雨量 1 000 mm。该基地已连续种植火龙珠 5 a,田间出现了严重的植食性线虫病害,每 100 g 干土壤中线虫总数约 900 条,其中植物寄生线虫达 600 多条。该土壤基本理化性质为 pH4.48,电导率 241.47 μS·cm⁻¹,有机碳含量 23.77 g·kg⁻¹,有机氮含量 0.57 g·kg⁻¹。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验共设 4 个处理:①空白对照(CK);②液体有机物料 RSD 处理(MO),即通过喷灌均匀添加 6 t·hm⁻²糖蜜(C/N:21);③粉剂有机物料 RSD 处理(SS),即在土壤表面均匀撒施 3 t·hm⁻²可溶性糖粉(C/N: 35);④固体有机物料 RSD 处理(SB),在土壤中均匀添加 15 t·hm⁻²甘蔗渣(C/N:94),通过旋耕机将有机物料与耕作层土壤充分混匀。然后参照王宝英等^[12]“覆膜+淹水”操作,整个处理持续 30 d,期间土壤温度保持 25~40℃。每个处理 3 次重复,按随机排列分布,各小区面积 60 m²(3 m×20 m),小区间用 60 cm 深,30 cm 宽

的水泥梗隔开。

1.2.2 土壤样品采集及预处理 RSD 处理结束后,各小区按“S”形路线多点取土样,采样深度 20 cm,共 8 个点,混合均匀后去除杂质,过 2 mm 筛。用于测定土壤理化性质及线虫分离鉴定的土样 4℃保存,用于提取土壤 DNA 的土样-80℃保存。

1.2.3 土壤理化性质测定 采用 S220K pH 计(Mettler, Switzerland)按水土比 2.5:1.0 测定土壤 pH;用 DDS-320 电导率仪(Dapu, China)按水土比 5:1 测定电导率(EC);用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳(TOC);土壤中的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 用 2 mol·L⁻¹的 KCl 浸提,过滤后用流动分析仪(Skalar San++, The Netherlands)测定。

1.2.4 土壤 DNA 提取和荧光定量 PCR 分析 称取保存于-80℃冰箱的土壤 0.5 g,用试剂盒 FastDNA[®] SPIN Kit for Soil(MP Biomedicals, USA)提取土壤总 DNA。在 CFX96[™] Real-Time System(Bio-Rad Laboratories Inc., USA)进行荧光定量 PCR 反应,扩增体系为 10 μL SYBR[®] PremixEx Taq[™](2×, Takara, 中国大连),正、反引物各 1 μL,2 μL 的 DNA 模板和 6 μL 无菌去离子水。定量细菌 16S rRNA、真菌基因的引物及扩增条件如表 1。各基因的标准曲线参照文献^[13-16]的方法构建。

表 1 定量 PCR 所用引物及扩增条件引物

引物	序列(5'~3')	扩增条件	参考文献
Eub338F	ACTCCTACGGGAGGCAGCAG	94℃预变性 2 min,95℃解链 5 s,	[14]
Eub518R	ATTACCGCGGCTGCTGG	60℃低温退火延伸 30 s,39 个	[15]
ITS1F	CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA	循环	[16]
ITS2R	GCTGCGTTCCTCATCGATGC		

1.2.5 土壤线虫的分离鉴定 称取新鲜土样 100 g,采用浅盘-蔗糖离心浮选法分离土壤线虫^[17]。在显微镜下计数,并折算成每 100 g 干土中线虫的数量。参照尹文英^[18]线虫分类鉴定标准鉴定到属,根据线虫食性划分成 4 个营养类群:食细菌类、食真菌类、植物寄生类和杂食/捕食类,并根据线虫的食性和生活策略赋予其对应的 c-p (colonizer-persister)值^[19]。

1.2.6 线虫生态指数评价 (1)Margalef 丰富度指数:SR=(S-1)/lnN,式中 S 为所鉴定属的总数,N 为土壤线虫群落中所有类群的总数量。(2)Shannon 多样性指数^[20]:H'=-∑P_i(lnP_i),其中 P_i 为第 i 个分类单元中个体占线虫总数量的比例。(3)成熟度指数^[21]:自由生活线虫成熟指数(Maturity Index, MI)和植食性线虫成

熟指数(Plant-Parasite Index, PPI)。MI(PPI)=∑v_if_i,式中 v_i 为第 i 属自由生活(植物寄生)线虫的 c-p 值,f_i 为第 i 属自由生活(植物寄生)线虫在线虫群落中所占的比例。(4)瓦斯乐斯卡指数^[22]:WI=(BF+FF)/PP,其中 BF、FF 和 PP 分别是食细菌、食真菌和植食性线虫数量;线虫通路比值^[23]:NCR=BF/(BF+FF)。

1.2.7 统计分析 采用 SPSS 19.0 进行单因素 ANOVA 检验分析差异性,用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性检验(P<0.05)。对土壤理化性质与土壤线虫群落进行相关性分析。采用主成分分析法(PCA)和聚类分析(Cluster Analysis)揭示不同有机物料 RSD 处理间土壤线虫群落的组成差异,用置换多因素方法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

如表2所示,与CK相比,RSD处理均能显著提升土壤pH,且SS和SB处理的土壤pH显著高于MO处理。从电导率看,SB处理的EC值较CK显著降低,SS处理最高,显著高于其他处理,而MO处理与CK相比对土壤EC值无显著影响。同时,RSD处理均能显著降低土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量,显著增加 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量。其中,SB处理的土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量最低,为 $11.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,SB、MO和SS处理的土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量较CK分别下降67.1%,

51.9%和48.0%;而SS处理的土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量最高,为 $120.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较CK值提高205.2%,MO处理次之(156.4%),SB处理最低(48.8%)。从土壤有机碳看,只有SS处理的TOC值显著高于CK。结果表明,RSD处理可有效缓解火龙珠连作土壤酸化和盐渍化问题,且SB处理的效果要优于SS和MO处理。原因可能是SB处理甘蔗渣的添加量较大,且成分相对复杂,反硝化过程会消耗更多的 H^+ 。同时,甘蔗渣较糖蜜和糖粉的移动性差,且更难分解,能更长时间存留在土层中发挥还原作用,强化了 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除作用。

表2 不同RSD处理对土壤理化性质的影响

处理	pH	EC	$\text{NH}_4^+ \text{-N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\text{NO}_3^- \text{-N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	TOC/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	$4.48 \pm 0.04 \text{ c}$	$241.47 \pm 7.24 \text{ b}$	$39.59 \pm 1.70 \text{ d}$	$34.24 \pm 3.45 \text{ a}$	$23.77 \pm 0.28 \text{ b}$
MO	$4.77 \pm 0.02 \text{ b}$	$247.60 \pm 6.46 \text{ b}$	$101.49 \pm 0.15 \text{ b}$	$16.46 \pm 1.13 \text{ b}$	$24.11 \pm 0.69 \text{ ab}$
SS	$4.84 \pm 0.02 \text{ a}$	$437.87 \pm 10.90 \text{ a}$	$120.82 \pm 0.40 \text{ a}$	$17.80 \pm 1.34 \text{ b}$	$24.87 \pm 0.23 \text{ a}$
SB	$4.84 \pm 0.01 \text{ a}$	$153.30 \pm 1.51 \text{ c}$	$58.91 \pm 0.67 \text{ c}$	$11.28 \pm 1.03 \text{ c}$	$23.19 \pm 0.65 \text{ b}$

注:表中数据为平均值±标准误($n=3$);同列数据后不同字母代表处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 土壤细菌和真菌数量

由图1A可知,与CK相比,SB处理能显著增加土壤细菌的数量,而MO和SS处理较CK差异不显著。由图1B可知,MO和SB处理能显著增加土壤真菌的数量,而SS处理较CK差异不显著。

2.3 土壤线虫总数和各营养类群数量

由图2可知,CK处理的土壤线虫数量达 $8.99 \text{ 条} \cdot \text{g}^{-1}$,与CK相比,RSD处理均能显著降低土壤线虫的数量,且SS处理的效果最为明显,SS与MO处理间差异不显著。其中,SS、MO和SB处理的土壤线虫数量较CK分别降低71.4%,67.58%和53.2%。

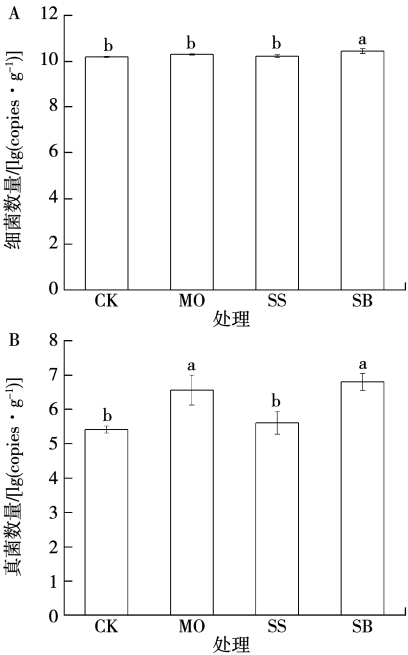


图1 不同RSD处理对土壤细菌(A)和真菌(B)数量的影响

注:误差线表示标准误($n=3$);不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

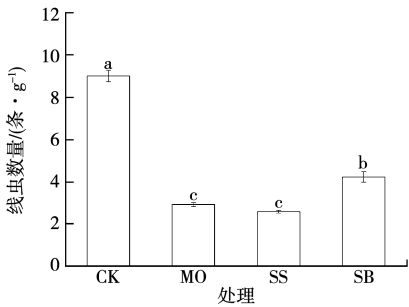


图2 不同RSD处理对土壤线虫数量的影响

由图3可知,RSD处理均能显著降低土壤中植食性线虫的数量,且SB处理的效果最为明显。SB处理的植食性线虫为 $0.93 \text{ 条} \cdot \text{g}^{-1}$,较CK处理的 $6.09 \text{ 条} \cdot \text{g}^{-1}$ 降低了84.7%,MO和SS处理分别降低82.9%和79.8%,说明RSD处理对土壤中植食性线虫具有较好的抑制效果。同时,不同有机物料作用的RSD处理对线虫其他营养类群数量的影响也存在差异。其中,SB处理较CK处理显著增加土壤中食真菌线虫数量,但对于食

细菌线虫的数量无显著影响。而 MO 和 SS 处理的食细菌和食真菌线虫数量均较 CK 处理显著降低,原因可能是糖蜜和可溶性糖粉在厌氧分解过程中产生的醇类、酸类物质等不仅可以杀灭植食性线虫,也会减少其他种类线虫的数量和丰度,引起线虫总数量下降。

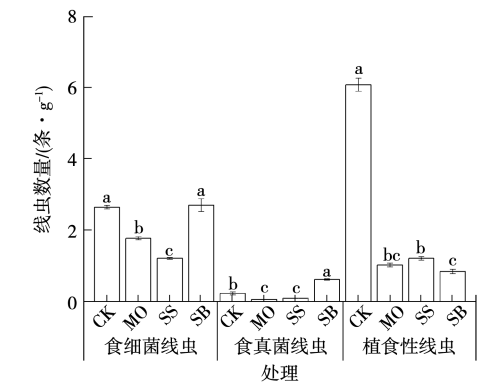


图 3 不同 RSD 处理对不同营养类群线虫数量的影响

2.4 土壤螺旋线虫和根结线虫数量

如图 4 所示,与 CK 相比,RSD 处理的土壤螺旋线虫和根结线虫数量均显著降低。其中 SB 处理对螺旋线虫的抑制率最高(84.4%),高于 MO 处理(78.3%)和 SS 处理(75.5%)。MO 处理对根结线虫的抑制率最高(93.1%),高于 SS 处理(89.7%)和 SB 处理(89.1%)。表明不同有机物料 RSD 处理均有效抑制土壤中植食性线虫,且对根结线虫的抑制率要高于螺旋线虫。

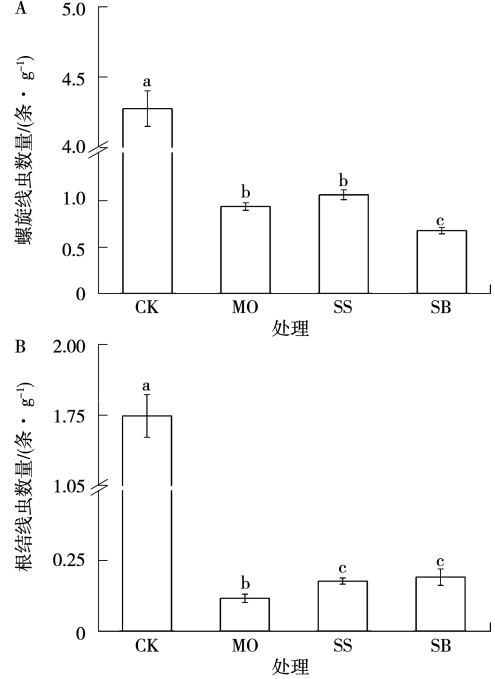


图 4 不同 RSD 处理对土壤螺旋线虫(A)和根结线虫(B)数量的影响

2.5 土壤线虫群落结构和组成

PCA 分析(结果图 5A)表明,不同有机物料 RSD 处理均能极显著改变土壤线虫群落结构,其中 SB 处理对线虫群落结构的影响为显著。聚类分析结果(图 5B)进一步表明,RSD 处理后的土壤线虫群落结构更为相似,聚在一个 Cluster 上,与 CK 显著分开;而 MO 和 SB 处理聚在一个 Cluster 上,表明这两个处理间的线虫群落结构更为相似。

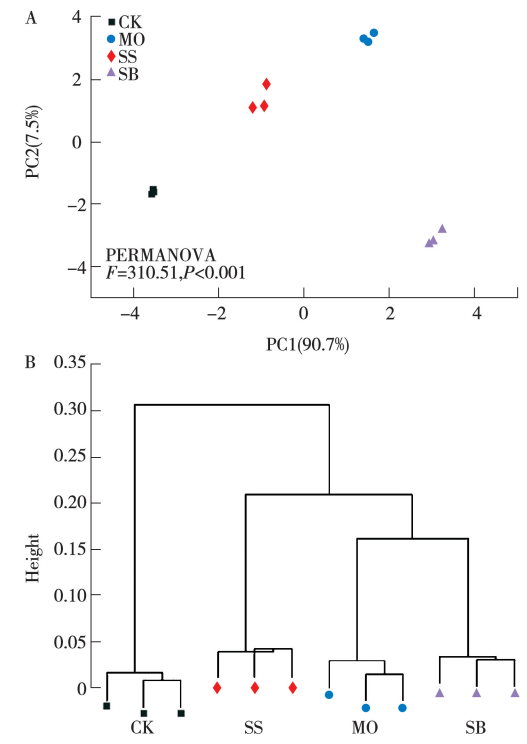


图 5 不同 RSD 处理对土壤线虫群落结构的影响

由表 3 可知,不同有机物料 RSD 处理对土壤线虫群落相对丰度的影响存在差异。与 CK 相比,RSD 处理均能显著提高土壤食细菌线虫相对丰度,显著降低植食性线虫相对丰度。各 RSD 处理中,食细菌线虫均占最大比例,但不同处理间其相对丰度差异显著,排序为 SB(64.46%)>MO(61.41%)>SS(47.80%)>CK(29.57%);植食性线虫相对丰度排序为 CK(67.71%)>SS(47.80%)>MO(35.76%)>SB(20.42%);土壤食真菌线虫的相对丰度 SB(15.12%)和 SS(4.40%)处理较 CK(2.71%)显著提升,而 MO 处理对食真菌线虫的相对丰度无显著影响。

不同 RSD 处理对土壤线虫优势属的影响不同。CK 优势属为螺旋属(47.57%)、根结属(19.43%)和拟丽突属(18.71%);MO 处理后优势属为拟丽突属(55.76%)和螺旋属(31.76%);SS 处理后优势属为螺旋属(40.88%)和拟丽突属(35.85%);SB 处理后优势属为拟丽突属

(58.41%)、螺旋属(15.88%)和滑刃属(13.80%)。结果表明,RSD处理对根结线虫的抑制效果显著,各处理的土壤根结线虫不再是优势属,螺旋属线虫的相对丰度也表现为不同程度的降低,且SB处理的效果最为明显。同时,拟丽突属作为食细菌线虫群落变化的最大变量,其相对丰度显著提升。

表 3 不同 RSD 处理对土壤线虫群落组成及其相对丰度的影响

营养类群	科	属	c-p 值	相对丰度/%			
				CK	MO	SS	SB
食细菌线虫				29.57 d	61.41 b	47.80 c	64.46 a
	小杆科 Phabditidae	原杆属	1	9.86(+)	3.53(+)	5.66(+)	2.46+
		小杆属 Rhabditis	1	0	0	0	0.76
	头叶科 Cephalobidae	头叶属	2	1.00(+)	1.41(+)	4.40(+)	2.46+
		Cephalobus	2				
		真头叶属	2	0	0.71	1.89(+)	0.38
		Eucephalobus	2				
		拟丽突属	2	18.71(++)	55.76(++)	35.85(++)	58.41(++)
		Acrobeloides	2				
食真菌线虫				2.71 c	2.83 c	4.40 b	15.12 a
	滑刃科 Aphelenchoididae	滑刃属	2	1.00(+)	1.88(+)	3.14(+)	13.80(++)
		Aphelenchoides	2				
	真滑刃科 Aphelenchidae	真滑刃属	2	1.00(+)	0.24	1.26(+)	1.32+
		Aphelenchus	2				
	垫刃科 Tylenchidae	丝尾垫刃属	2	0.71	0.71	0	0
		Filenchus	2				
植食性线虫				67.71 a	35.76 c	47.80 b	20.42 d
	纽带科 Hoplolaimidae	螺旋属	3	47.57(++)	31.76(++)	40.88(++)	15.88(++)
		Helicotylenchus	3				
	短体科 Pratylenchidae	短体属	3	0.71	0	0	0
		Pratylenchus	3				
	异皮科 Heteroderidae	根结属	3	19.43(++)	4.00(+)	6.92(+)	4.54(+)
		Meloidogyne	3				

注:++为优势属(平均相对丰度≥10%);+为常见属(1%≤平均相对丰度<10%)。

2.6 土壤线虫生态指数

由表 4 可知,RSD处理的自由生活线虫成熟指数(MI)均显著高于CK,植食性线虫成熟指数(PPI)均显著低于CK,且SB处理的效果更为明显。各处理瓦斯乐斯卡指数(WI)大小顺序为SB>MO>SS>CK,且各处理间差异显著,自由生活线虫成熟指数(MI)也呈现相同的变化趋势。

MO处理的线虫通路比值(NCR)最大为0.96,说明此时土壤有机质分解以分解速率较快的细菌分解途径为主。与CK相比,MO和SB处理的多样性指数(H')显著降低,而SS处理与CK之间无显著差异。各处理间的丰富度指数(SR)不存在显著差异。

表 4 不同 RSD 处理对土壤线虫生态指数的影响

线虫生态指数	生态指数			
	CK	MO	SS	SB
丰富度指数(SR)	1.47±0.01 a	1.41±0.00 a	1.43±0.11 a	1.35±0.01 a
多样性指数(H')	1.42±0.01 a	1.15±0.02 c	1.45±0.07 a	1.31±0.02 b
自由生活线虫成熟指数(MI)	0.55±0.00 d	1.25±0.01 b	0.99±0.01 c	1.56±0.02 a
植食性线虫成熟指数(PPI)	2.03±0.00 a	1.07±0.03 c	1.43±0.02 b	0.61±0.02 d
PPI/MI	3.71±0.03 a	0.86±0.03 c	1.45±0.03 b	0.39±0.02 d
瓦斯乐斯卡指数(WI)	0.48±0.00 d	1.80±0.07 b	1.09±0.03 c	3.90±0.15 a
线虫通路比值(NCR)	0.92±0.01 b	0.96±0.00 a	0.92±0.01 b	0.81±0.01 c

2.7 线虫群落结构与土壤理化性质的相关性分析

由表 5 可知,线虫总数、植食性线虫数量与 pH,食细菌线虫数量与 EC,线虫总数、食细菌线虫数量与 NH_4^+ -N 含量呈极显著负相关;而线虫

总数、植食性线虫数量与 NO_3^- -N 含量呈极显著正相关。线虫生态指数中 MI 与 pH 呈极显著正相关,与 NO_3^- -N 呈极显著负相关;而 PPI 、 PPI/MI 则表现出相反的趋势; WI 与 NO_3^- -N 呈极显著负相关,与 pH 呈显著正相关,与 EC 呈显著负相关。

表 5 线虫群落结构与土壤理化性质的相关性分析

项目	pH	EC	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	TOC
线虫总数	-0.924 **	-0.359	-0.865 **	0.842 **	-0.200
食细菌线虫	-0.484	-0.873 **	-0.955 **	0.249	-0.719 **
食真菌线虫	0.161	-0.696 *	-0.597 *	-0.334	-0.656 *
植食性线虫	-0.963 **	-0.101	-0.682 *	0.952 **	0.037
SR	-0.544	0.343	-0.055	0.639 *	0.236
H'	-0.275	0.474	-0.160	0.459	0.385
MI	0.807 **	-0.393	0.231	-0.933 **	-0.457
PPI	-0.799 **	0.406	-0.213	0.928 **	0.466
PPI/MI	-0.919 **	0.136	-0.497	0.976 **	0.239
WI	0.612 *	-0.606 *	-0.116	-0.784 **	-0.639 *
NCR	-0.285	0.476	0.445	0.387	0.477

注: * 表示相关性显著($P<0.05$); ** 表示相关性极显著($P<0.01$)。

3 讨论

植食性线虫作为植物侵染性病害的重要病原物之一,在全球范围内对粮食和经济作物造成减产的现象普遍存在^[24]。同时,植物线虫病害又加剧了枯萎病、根腐病等土传真菌病害的发生^[25],严重制约了设施农业的可持续发展。

3.1 RSD 处理能有效抑制植食性线虫

RSD 处理通过创造高温、厌氧、富含易降解有机质的环境,作为一种环保高效的非化学手段防控作物土传病害已得到广泛应用,其对于致病菌尤其是对植物寄生的植食性线虫具有较高的致死效果。郭晨曦等^[26]以紫花苜蓿为有机物料开展设施蔬菜连作障碍强还原土壤灭菌处理,研究发现 RSD 处理对番茄根结线虫病的防治效果可达 91.11%。石磊等^[27]以酒糟和芥蓝秸秆为有机物料开展强还原土壤灭菌处理,有效抑制了根结线虫的繁殖。本研究以液态糖蜜、粉剂糖粉和甘蔗渣为有机物料开展 30 d 的 RSD 处理,RSD 处理后植食性线虫总数量减少了 79.8%~84.7%,其中根结线虫和螺旋线虫的数量及其占比显著降低,对螺旋线虫的抑制率达 75.5%~84.4%,对根结线虫的抑制率达 89.1%~93.1%。

3.2 RSD 处理能改善土壤线虫群落结构及生态功能

RSD 处理的强还原环境和产生的杀线物质使土壤环境发生改变,微生物对环境改变的适应性生存策略使微生物群落发生改变^[28],进而对土壤线虫群落起到一定的调节作用。RSD 处理有利于驱动形成健康的土壤微生物群落^[29]。本研究表明,RSD 处理后土壤线虫群落中食细菌线虫相对丰度显著提高,植食性线虫相对丰度显著降低。各处理 MI 值显著提高, PPI 值显著下降,且 SB 处理的效果最为显著,综合表明土壤生态受外界干扰能力在增强,土壤状态向趋于稳定的方向发展。各处理 WI 值均大于 1,显著高于 CK,说明倾向于植物寄生线虫的土壤矿化途径已发生转变,土壤健康状况提高。MO 和 SB 处理的 H' 显著低于 CK,各 RSD 处理的 SR 较 CK 也没有发生显著变化,原因可能是 RSD 处理的时间相对较短,同时该土壤中原有线虫的种属较少仅为 9 种,所以短期内线虫群落丰富度和多样性尚未对 RSD 处理形成明显的响应。而 MO 和 SB 处理的拟丽突属线虫显著增加,可能是物料降解过程中某类细菌大量繁殖,拟丽突属线虫对该

细菌具有取食偏好引起的。从土壤线虫群落相对丰度来看,MO 和 SB 处理的群落结构也更为相似。

3.3 RSD 处理介导的土壤性质变化与线虫群落之间的联系

RSD 处理介导的土壤环境因子变化也会对线虫群落造成差异性影响。本研究 RSD 处理后土壤 NO_3^- -N 含量显著降低, NH_4^+ -N 含量显著升高,土壤 pH 显著提升。相关性分析表明,土壤 pH 和硝态氮含量是影响 RSD 处理后线虫群落多样性的主要环境因子。其中,pH 与线虫总数、植食性线虫数量、PPI 和 PPI/MI 极显著负相关,与 MI、WI 显著正相关。硝态氮累积是土壤酸化的关键影响因素, NO_3^- -N 与土壤线虫群落的相关性分析表现出与 pH 完全相反的趋势,再次验证 RSD 处理能通过提高土壤 pH,抑制植食性线虫生长,改善土壤线虫群落结构,这与研究中各 RSD 处理后根结线虫和螺旋线虫的数量显著降低是一致的。

4 结论

本试验探究了不同有机物料 RSD 处理对火龙珠连作土壤线虫群落结构的影响。结果表明 RSD 处理能显著提高土壤 pH,降低土壤 NO_3^- -N 含量,有效抑制根结线虫和螺旋线虫的数量,还能提高食细菌线虫的相对丰度,改善土壤线虫群落结构。因此,糖蜜、糖粉和甘蔗渣均可以作为 RSD 处理的良好原材料,且以甘蔗渣为有机物料的 RSD 处理对于促进土壤肥力提高和重构健康的土壤线虫群落具有更为显著的效果。所以,RSD 处理是缓解火龙珠栽培土壤连作障碍的有效方法。

参考文献:

- [1] 杨世先,张军云,李晓亮,等.云南滇中地区火龙珠扦插育苗技术[J].农业科技通讯,2021(2):255-257.
- [2] 李卫芬,黄新动,胡先奇,等.云南花卉寄生线虫初步调查[J].云南农业大学学报(自然科学版),2005,20(2):196-200.
- [3] CHITWOOD D J. Research on plant-parasitic nematode biology conducted by the United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service[J]. Pest Management Science, 2003,59(6-7):748-753.
- [4] 谢辉,冯志新.植物线虫的分类现状[J].植物病理学报,2000,30(1):1-6.
- [5] 罗宁,焦阳,郭振川,等.木霉菌对根结线虫和孢囊线虫防治机理研究进展[J].生物技术通报,2023,39(2):35-50.
- [6] VERMA A,LEE C,MORRIS S,et al. The novel cyst nematode effector protein 30D08 targets host nuclear functions to alter gene expression in feeding sites[J]. New Phytologist,2018,219(2):697-713.
- [7] SASSER J N,EISENBACK J D,CARTER C C,et al. The international meloidogyne project-its goals and accomplishments[J]. Annual Review of Phytopathology,1983,21(1):271-288.
- [8] 刘唐玉,吴慧平,胡培,等.安徽省合肥市大蜀山风景区植物根际螺旋线虫种类记述[J].植物保护,2017,43(4):97-103.
- [9] 江春,张谨华,杨艳君,等.不同植物秸秆对番茄及南方根结线虫的影响[J].植物保护,2015,41(4):165-170.
- [10] 蔡祖聪,张金波,黄新琦,等.强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究[J].土壤学报,2015,52(3):469-476.
- [11] 夏青,罗晨,曾粮斌,等.强还原土壤处理对再植龙牙百合生长不利因子的消减作用[J].土壤学报,2022,59(1):183-193.
- [12] 王宝英,李金泽,黄新琦,等.土壤强还原处理对连作芥蓝产量、微生物数量及活性的影响[J].土壤,2019,51(2):316-323.
- [13] ZHAO J,NI T,LI J,et al. Effects of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields,soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system[J]. Applied Soil Ecology,2016,99(18):1-12.
- [14] DORSCH M,LANE D,STACKEBRANDT E. Towards a phylogeny of the genus *Vibrio* based on 16S rRNA sequences[J]. International Journal of Systematic Bacteriology,1992,42(1):58-63.
- [15] MUYZER G,de WAAL E C,UITTERLINDEN A G. Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gelelectrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA[J]. Applied and Environmental Microbiology,1993,59(3):695-700.
- [16] DURÁN P,THIERGART T,GARRIDO-OTER R,et al. Microbial interkingdom interactions in roots promote *Arabidopsis* survival[J]. Cell,2018,175(4):973-983.
- [17] 毛小芳,李辉信,陈小云,等.土壤线虫三种分离方法效率比较[J].生态学杂志,2004,23(3):149-151.
- [18] 尹文英.中国土壤动物学研究 10 年进展[J].中国科学基金,1997,11(1):48-51.
- [19] 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.
- [20] SIMPSON E H. Measurement of diversity[J]. Nature,1949,163(4148):688.
- [21] BONGERS T. The maturity index:an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition[J]. Oecologia,1990,83(1):14-19.
- [22] WASILEWSKA L. The effect of age of meadows on succession and diversity in soil nematode communities[J]. Pedobiologia,

1994,38:1-11.

[23] YEATES G W. Nematodes as soil indicators: functional and biodiversity aspects [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003,37(4):199-210.

[24] SINGH S,SINGH B,SINGH A P. Nematodes;a threat to sustainability of agriculture[J]. *Procedia Environmental Sciences*,2015,29:215-216.

[25] 陈志杰,张淑莲,张锋. 设施蔬菜根结线虫防治基础与技术[M]. 北京:科学出版社,2013.

[26] 郭晨曦,周桂芳,陈碧华,等. 强还原土壤灭菌法(RSD)对大棚连续三茬蔬菜生长、产量和病虫害的影响[J]. *河南农业科学*,2020,49(11):98-109.

[27] 石磊,赵洪海,李明亮,等. 土壤强还原处理对根结线虫数量、番茄生长及土壤性质的影响[J]. *生态学杂志*,2018,37(6):1865-1870.

[28] 魏光钰,陈芳,胡勇,等. 不同有机物料强还原处理对植烟土壤微生物群落的影响[J]. *土壤通报*,2022,53(5):1056-1066.

[29] 赵军,张晶清,林于蓝,等. 强还原土壤处理驱动的微生物群落稳定性与功能的关联性[J/OL]. *土壤学报*: 1-15 (2022-10-11) [2023-01-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20221010.1447.002.html>.

Effects of Reductive Soil Disinfestation on Nematode Community in Continuous Cropping Soil of *Hypericum*

XU Chenwei¹, YUAN Yujuan¹, ZHU Jiashuang², LI Ya¹

(1. Faculty of Environment and Bioengineering, Nantong College of Science and Technology, Nantong 226007, China; 2. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Plant-parasites nematodes are one of the most important diseases threatening crop growth. In order to seek an effective, fast, economical, and environmentally friendly technical method for controlling nematode diseases in ornamental plants, reductive soil disinfestation(RSD) as a technology of soil treatment, the soil with high incidence of nematode disease after continuous cultivation of *Hypericum* in Yunnan Province were taken as the research object, the effects of RSD treatments on soil nematode abundance and nematode community were studied. Four treatments were set up in the experiment including RSD incorporated with liquid molasses (6 t•ha⁻¹, MO), soluble sugar powder (3 t•ha⁻¹, SS), solid bagasse (15 t•ha⁻¹, SB) and control without any treatment(CK). Results showed that, RSD treatments could effectively reduced both *Meloidogyne* spp. and *Helicotylenchus* spp., the inhibition rates were 89.1%-93.1% and 75.5%-84.4%, respectively. RSD treatments effectively increased the relative abundance of bacterivores and decreased the relative abundance of fungivores. The values of *MI* and *WI* increased significantly, while the *PPI* decreased significantly, and the effect of SB treatment was the most obvious. In addition, the results of correlation analysis showed that the changes of soil pH and nitrate content mediated by RSD treatments were the main environmental factors affecting the diversity of nematode communities. Therefore, it can be concluded that RSD can effectively relieve soil acidification and secondary salinization, improve the nematode community structure, which is an effective agricultural measure to control soil nematode disease.

Keywords: reductive soil disinfestation; plant-parasites nematodes; nematode community

著作权使用声明

本刊已许可中国知网、维普网、万方数据、博看网、长江文库、超星等知识服务平台以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

黑龙江农业科学编辑部