

盐类对南方根结线虫迁移能力和侵入能力的影响

漆永红¹ 孟丽^{1,2} 吕和平² 曹素芳³ 陈书龙^{4*} 李敏权^{1*}

(1. 甘肃农业大学草业学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院植物保护研究所, 兰州 730070;
3. 甘肃省农业科学院林果花卉研究所, 兰州 730070; 4. 河北省农林科学院植物保护研究所, 保定 071000)

摘要: 为探讨无机盐和有机盐对南方根结线虫的作用方式, 在室内利用沙柱法和染色法测定了二者对南方根结线虫2龄幼虫迁移能力及侵入番茄根部能力的影响。结果表明, 随着各盐处理浓度的增加, 南方根结线虫2龄幼虫的迁移能力和侵入能力显著降低。在4 μg/mL KSCN、C₆H₈O₇、KCl、KH₂PO₄、KHCO₃和MnSO₄·H₂O沙柱中, 15 d后2龄幼虫的平均迁移距离最小, 分别为0、0.33、0.52、0.53、0.55和0.58 cm, 而对照为0.94 cm。2龄幼虫在BaNO₃、K₂HPO₄、KHCO₃、CsCl和KSCN各浓度沙柱中的平均迁移距离均小于0.94 cm。2 μg/mL NH₄NO₃、KH₂PO₄、(NH₄)₂CO₃、CsCl、(NH₄)₂SO₄、NaSCN和NH₄SCN处理15 d后, 2龄幼虫对番茄根部的侵入率最低, 分别为1%、2.33%、1.33%、2%、2%、1%和1.67%。表明对2龄幼虫侵入番茄根部抑制效果最明显的盐为NH₄NO₃、KH₂PO₄、(NH₄)₂CO₃、CsCl、(NH₄)₂SO₄、NaSCN和NH₄SCN。

关键词: 南方根结线虫; 无机盐; 有机盐; 迁移能力; 侵入能力

Effect of salts on motility and infectivity of *Meloidogyne incognita*

Qi Yonghong¹ Meng Li^{1,2} Lü Heping² Cao Sufang³ Chen Shulong^{4*} Li Minquan^{1*}

(1. Grassland College of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu Province, China; 2. Institute of Plant Protection, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu Province, China; 3. Institute of Fruit and Floriculture Research, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu Province, China; 4. Institute of Plant Protection, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Baoding 071000, Hebei Province, China)

Abstract: In order to determine the action mode of inorganic salts and organic salts on southern root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*, the effects of these salts on motility and infectivity of the second-stage juveniles (J2) of *M. incognita* were evaluated with a sand column and the staining method, respectively. The results showed that J2 motility and infectivity were significantly reduced with salt concentration increasing. The average migration distance of J2 reached 0, 0.33, 0.52, 0.53, 0.55 and 0.58 cm after 15 days in the sand column mixed with 4 μg/mL KSCN, C₆H₈O₇, KCl, KH₂PO₄, KHCO₃ and MnSO₄·H₂O, respectively, while it was 0.94 cm in the control. The average migration distance in the treatments with BaNO₃, K₂HPO₄, KHCO₃, CsCl and KSCN at different concentrations was less than 0.94 cm. The infectivity of J2 after treatment with 2 μg/mL NH₄NO₃, KH₂PO₄, (NH₄)₂CO₃, CsCl, (NH₄)₂SO₄, NaSCN and NH₄SCN for 15 d were 1%, 2.33%, 1.33%, 2%, 2%, 1% and 1.67%, respectively. The results indicated that the salts including NH₄NO₃, KH₂PO₄, (NH₄)₂CO₃, CsCl, (NH₄)₂SO₄, NaSCN and NH₄SCN had the strongest inhibition to the infectivity of J₂.

Key words: *Meloidogyne incognita*; inorganic salt; organic salt; motility; infectivity

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201103018), 国家自然科学基金(31000845)

* 通讯作者(Authors for correspondence), E-mail: chenshulong65@163.com, lmq@gau.edu.cn

收稿日期: 2014-07-09

根结线虫 *Meloidogyne* spp. 是植物病原线虫中种类最多、分布最广、为害最严重的一类线虫,可在土壤、病株及有机残体中度过不利环境。根结线虫病寄主包括 114 科 2 000 多种植物,主要为害葫芦科和豆科等植物根部,形成串球瘤状结,破坏根组织正常的生理分化,地上部生长受到抑制。根结线虫对作物造成的损失一般为 10% ~ 15%,严重时可达 30% ~ 40%,甚至绝收 (Sasser et al., 1983)。根结线虫不仅直接为害植物根和茎,还可诱发并加剧其它土传病害的发生,如枯萎病、黄萎病和立枯病等 (Abawi & Barker, 1984)。随着我国产业结构的调整,保护地作物种植面积逐年增加,保护地适宜的温湿度为根结线虫的发生提供了良好的环境条件,导致根结线虫病逐年加重。目前根结线虫种类主要包括南方根结线虫 *M. incognita*、北方根结线虫 *M. hapla*、爪哇根结线虫 *M. javanica* 和花生根结线虫 *M. arenaria*,其中南方根结线虫的发生面积大、寄主种类多,已成为优势种群 (Schmitz et al., 1998)。

根结线虫的防治仍是生产上的一个难题,线虫以 2 龄幼虫或卵在土壤中度过不良环境,一旦食物和环境条件适宜,线虫能够侵入寄主并建立寄生关系。利用无机盐和有机盐破坏线虫与植物寄生关系中的任何一个环节均可有效控制其为害。Devine & Jones (2003) 报道,施入土壤中的盐类及肥料在供植物吸收的同时也显著影响线虫的行为,从而间接影响其在田间的发病情况。这是由于土壤中施加的盐类容易被作物吸收而提高植物的抗性,更重要的是有些盐在土壤中产生对线虫迁移和侵入具有抑制作用的物质,遏制其为害,在某种程度上起到一定的防治作用。如 Castro et al. (1990) 报道 NH_4^+ 、 Cs^+ 、 NO_3^- 和 Cl^- 对南方根结线虫迁移和侵入有抑制作用,表明盐类具有防治植物寄生线虫的潜能。目前,国内外已见关于盐类 (Prot, 1978; 吕和平等, 2012)、酸碱度 (Jairajpuri & Azmi, 1978)、温度 (El-Sherif & Mai, 1969)、微生物 (彭双等, 2012) 等对根结线虫卵孵化、2 龄幼虫迁移和侵入影响的相关报道。研究不同盐类对根结线虫的行为影响对于开发新型防控技术具有重要的现实意义。因此,本研究在预试验的基础上,测试不同无机盐和有机盐对南方根结线虫 2 龄幼虫迁移能力和侵入能力的影响,以期为利用盐类防治根结线虫提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试线虫:采自甘肃省武威市发放镇日光温室内发病的番茄根系,经鉴定后确定为南方根结线虫 (高贊等, 2009)。采用 Giannakou et al. (2005) 方法获得卵、卵囊及 2 龄幼虫,将病根洗净,剪成 0.5~1 cm 的小段,在 1% 次氯酸钠溶液中漂洗 4 min,利用 200 目与 500 目网筛冲洗并收集线虫卵。在解剖镜下从番茄根系挑取新鲜卵囊,放入直径 9 cm 培养皿内,用 0.5% 次氯酸钠表面消毒 3 min,无菌水清洗 3 次后备用。同时将消毒后的卵囊放入 24 孔培养板中,室温 25℃ 左右孵化 2 龄幼虫,每隔 24 h 换水 1 次,保证每次选用的 2 龄幼虫活力一致。

无机盐和有机盐:参照预试验结果,选取具有代表性的 8 类盐,分别为硝酸盐 NH_4NO_3 、 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 和 $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$;磷酸盐 KH_2PO_4 和 K_2HPO_4 ;碳酸盐 Na_2CO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 和 KHCO_3 ;有机酸盐 $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$ 、 $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ 和 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$;氯盐 KCl 、 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 CsCl ;硫酸盐 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$;硫氰盐 NH_4SCN 、 KSCN 和 NaSCN ;氢氧化盐 NaOH 和 KOH 。以上盐均为分析纯,购自天津市恒兴化学试剂厂。

仪器:奥林巴斯 IX83 倒置显微镜,日本奥林巴斯株式会社。

1.2 方法

1.2.1 盐类对南方根结线虫 2 龄幼虫迁移能力的影响

将 8 类共 21 种盐,每种盐设 4 个浓度,分别为 0.5、1、2 和 4 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。参照 Davies et al. (1991) 的沙柱法略有改进。将供试盐按一定剂量与 250~425 μm 细沙混匀,以无菌水处理为对照。将盐沙填充于有机玻璃管中(用透明胶带将 7 个直径 20 mm、长 10 mm 的小管组合成一个长 70 mm 的沙柱,图 1)。沙柱的最终含水量为 20%,在沙柱的一端接 500 头 2 龄幼虫,并用 Parafilm 膜将口封好,另一端定植 1 株 20 d 苗龄的番茄幼苗。每处理重复 3 次,将沙柱水平放置于 25℃ 人工气候箱(相对湿度 >

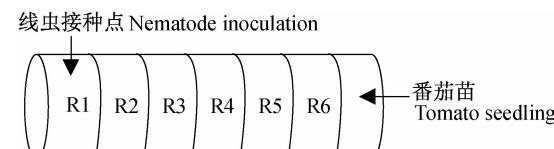


图 1 南方根结线虫 2 龄幼虫迁移能力测试的沙柱示意图

Fig. 1 Sand column for testing the motility of *Meloidogyne incognita* J2

90%), 15 d 后采用洗涤法将每段小管中的线虫洗出, 计算线虫的平均迁移距离。平均迁移距离 = $(N_1 \times 0 + N_2 \times 1 + N_3 \times 2 + N_4 \times 3 + N_5 \times 4 + N_6 \times 5) / (N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6)$, 其中每段小管 R1、R2、R3、R4、R5、R6 中的线虫数量分别为 N1、N2、N3、N4、N5、N6, 线虫在管 R1、R2、R3、R4、R5、R6 中的移动距离分别为 0、1、2、3、4、5 cm。

1.2.2 盐类对南方根结线虫 2 龄幼虫侵入能力的影响

将 8 类共 21 种盐, 每种盐设 4 个浓度, 分别为 0.25、0.5、1 和 2 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。参照 Kim & Ferris (2002) 方法略有改进。将盐用去离子水配制成不同的浓度梯度, 取 0.5 mL 盐液和 0.5 mL 线虫液加到 1.5 mL 离心管(121℃高压灭菌 30 min)中充分混合。每一浓度处理重复 3 次, 以无菌水处理为对照。置于 25℃培养箱中处理 48 h 后离心, 去除线虫体表盐液, 4 h 后将线虫接种于 20 d 苗龄的番茄幼苗上, 每株接种约 1 500 头线虫, 15 d 后将番茄的根染色, 调查侵入根内的线虫数量。根组织中线虫的染色方法: 将根组织放入煮沸的染色剂(甘油: 乳酸: 0.05% 酸性品红 = 1:1:1)中 3 min, 然后放入脱色液(甘油: 蒸馏水 = 1:1)中脱色 4~6 h。

1.3 数据分析

采用 DPS 3.1.0.1 软件进行数据分析, Duncan 氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 盐类对南方根结线虫 2 龄幼虫迁移能力的影响

不同浓度的盐类对南方根结线虫 2 龄幼虫的迁移能力均具有抑制作用, 随着盐浓度的增加, 线虫的迁移距离减少。处理 15 d 后 2 龄幼虫在对照中的平均迁移距离可达 0.94 cm, 而 2 龄幼虫在 BaNO_3 、 K_2HPO_4 、 KHCO_3 、 CsCl 和 KSCN 各浓度处理中的平均迁移距离均小于 0.94 cm, 表明这些盐不同浓度处理均对线虫的迁移具有抑制作用。线虫在高浓度(4 $\mu\text{g}/\text{mL}$) KSCN 、 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ 、 KCl 、 KH_2PO_4 、 KHCO_3 和 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 处理中的迁移距离最小, 分别为 0、0.33、0.52、0.53、0.55 和 0.58 cm, 显著低于对照的 0.94。线虫在低浓度(0.5 $\mu\text{g}/\text{mL}$) NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 、 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 、 $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$ 、 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4SCN 处理中的迁移距离最大, 分别达到 1.14、1.09、1.50、1.52、1.55、1.04 和 1.25 cm, 均高于对照, 但差异不显著, 表明这些盐在该浓度下对线虫的迁移能力影响不大(表 1)。

表 1 不同盐类对南方根结线虫 2 龄幼虫在沙柱中迁移能力的影响

Table 1 Effects of different salts on the motility of *Meloidogyne incognita* J2 in a sand column

盐种类 Salt type	盐 Salt	浓度 ($\mu\text{g}/\text{mL}$) Concentration	平均线虫数量 Average number of juveniles			平均迁移距离 (cm) Average migration distance
			1 cm	2 cm	3 cm	
硝酸盐 Nitrate	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	0.5	38.00 ± 1.27 a	49.67 ± 1.32 a	27.00 ± 1.00 a	0.90 ± 0.02 ghijkl
		1.0	25.00 ± 3.00 a	44.67 ± 1.66 ab	14.67 ± 2.08 b	0.88 ± 0.08 efghijk
		2.0	35.83 ± 6.56 a	36.67 ± 3.61 a	16.17 ± 2.89 b	0.78 ± 0.11 efghijk
		4.0	46.67 ± 5.51 a	28.67 ± 4.04 b	17.67 ± 2.52 b	0.69 ± 0.08 defghijk
NH ₄ NO ₃	NH_4NO_3	0.5	22.67 ± 2.08 a	26.33 ± 3.79 b	34.33 ± 3.06 b	1.14 ± 0.06 abcdefg
		1.0	23.00 ± 2.65 a	31.00 ± 6.25 a	31.00 ± 10.39 a	1.09 ± 0.14 bedefgh
		2.0	33.33 ± 5.86 a	52.00 ± 12.29 a	30.00 ± 9.00 a	0.97 ± 0.06 cdefghijk
		4.0	46.00 ± 6.56 a	28.33 ± 4.51 b	32.00 ± 3.61 b	0.87 ± 0.07 efghijk
磷酸盐 Phosphates	KH_2PO_4	0.5	23.67 ± 5.03 a	27.33 ± 5.51 b	31.00 ± 3.00 c	1.09 ± 0.04 bedefgh
		1.0	24.67 ± 2.52 a	23.33 ± 2.52 a	18.00 ± 4.58 a	0.90 ± 0.08 efghijk
		2.0	41.67 ± 12.50 a	35.67 ± 16.07 a	18.33 ± 4.04 a	0.77 ± 0.09 fghijkl
		4.0	66.33 ± 37.11 a	41.33 ± 26.63 a	19.33 ± 6.66 a	0.66 ± 0.13 hijkl
K_2HPO_4	K_2HPO_4	0.5	23.67 ± 20.79 a	27.00 ± 8.00 a	17.67 ± 3.06 a	1.02 ± 0.37 cdefghij
		1.0	50.67 ± 3.51 a	24.67 ± 4.51 b	17.33 ± 2.08 b	0.64 ± 0.08 hijkl
		2.0	39.00 ± 2.65 a	28.33 ± 5.69 ab	25.33 ± 5.03 b	0.85 ± 0.03 efgijk
		4.0	85.67 ± 38.59 a	25.00 ± 1.73 b	22.67 ± 3.21 b	0.55 ± 0.14 kl
碳酸盐 Carbonate	$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	0.5	8.00 ± 1.73 b	3.33 ± 1.53 b	29.33 ± 15.37 a	1.50 ± 0.09 ab
		1.0	28.67 ± 7.51 a	43.00 ± 18.52 a	30.67 ± 8.50 a	1.02 ± 0.01 cdefghij
		2.0	37.00 ± 19.16 a	46.00 ± 18.52 a	30.67 ± 13.05 a	0.98 ± 0.24 cdefghijk

续表1

盐种类 Salt type	盐 Salt	浓度 ($\mu\text{g}/\text{mL}$) Concentration	平均线虫数量 Average number of juveniles			平均迁移距离 (cm) Average migration distance
			1 cm	2 cm	3 cm	
有机酸盐 Organic acid salt	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$	4.0	37.33 \pm 9.71 a	31.67 \pm 4.73 a	18.67 \pm 2.52 b	0.79 \pm 0.06 efgijk
		0.5	25.00 \pm 3.00 a	11.00 \pm 5.57 c	17.67 \pm 2.52 b	0.86 \pm 0.07 efgijk
		1.0	29.33 \pm 1.53 a	12.67 \pm 3.51 c	17.00 \pm 3.00 b	0.79 \pm 0.06 fghijkl
		2.0	38.67 \pm 6.51 a	16.33 \pm 7.09 b	15.00 \pm 3.00 b	0.66 \pm 0.15 hijkl
		4.0	26.67 \pm 2.52 a	15.67 \pm 1.53 b	5.33 \pm 2.52 c	0.55 \pm 0.07 kl
	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$	0.5	0.33 \pm 0.58 a	10.00 \pm 4.36 a	12.67 \pm 6.43 a	1.52 \pm 0.25 a
		1.0	27.00 \pm 9.64 a	27.33 \pm 6.66 a	41.67 \pm 17.56 a	1.15 \pm 0.19 abcdef
		2.0	44.33 \pm 18.50 a	8.00 \pm 4.73 a	15.00 \pm 1.15 a	0.63 \pm 0.32 ijk
		4.0	26.33 \pm 25.42 a	5.33 \pm 10.58 a	8.33 \pm 13.53 a	0.57 \pm 0.46 jkl
		0.5	11.33 \pm 6.66 b	7.67 \pm 5.51 b	53.00 \pm 24.52 a	1.55 \pm 0.13 a
氯盐 Chloride	CsCl	1.0	23.00 \pm 21.66 a	20.00 \pm 1.73 a	25.00 \pm 13.11 a	1.09 \pm 0.44 bcdefgh
		2.0	20.67 \pm 21.01 a	33.33 \pm 18.82 a	17.00 \pm 18.68 a	0.97 \pm 0.54 cdefghijk
		4.0	43.33 \pm 17.95 a	11.00 \pm 9.64 b	4.00 \pm 4.00 b	0.35 \pm 0.17 lm
		0.5	20.33 \pm 3.51 a	15.33 \pm 4.04 a	16.67 \pm 5.03 a	0.92 \pm 0.04 defghijk
	KCl	1.0	24.67 \pm 8.50 a	3.67 \pm 2.08 b	12.67 \pm 3.06 ab	0.72 \pm 0.19 fghijkl
		2.0	40.00 \pm 4.00 a	24.33 \pm 21.13 a	20.67 \pm 3.06 a	0.76 \pm 0.08 fghijkl
		4.0	19.00 \pm 3.61 a	6.67 \pm 5.77 a	6.67 \pm 6.51 a	0.63 \pm 0.30 ijk
		0.5	12.33 \pm 5.51 b	14.67 \pm 12.74 b	32.33 \pm 8.39 a	1.38 \pm 0.23 ab
硫酸盐 Sulphate	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	1.0	12.33 \pm 2.52 a	20.67 \pm 10.21 a	12.00 \pm 3.00 a	0.99 \pm 0.01 cdefghijk
		2.0	17.33 \pm 15.63 a	16.00 \pm 4.00 a	13.00 \pm 14.93 a	0.95 \pm 0.45 cdefghijk
		4.0	47.33 \pm 14.57 a	33.67 \pm 10.69 a	5.67 \pm 7.37 b	0.54 \pm 0.18 kl
		0.5	23.33 \pm 3.00 ab	11.67 \pm 1.00 b	25.00 \pm 3.61 a	1.04 \pm 0.02 cdefghi
	$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.0	19.00 \pm 2.52 a	15.00 \pm 2.89 a	21.00 \pm 17.09 a	0.96 \pm 0.31 cdefghijk
		2.0	14.00 \pm 1.00 a	15.00 \pm 2.00 a	8.67 \pm 1.53 b	0.86 \pm 0.08 efgijk
		4.0	22.67 \pm 4.04 a	20.67 \pm 3.06 a	11.67 \pm 8.14 b	0.78 \pm 0.13 fghijkl
		0.5	7.67 \pm 8.33 b	15.00 \pm 15.00 ab	40.00 \pm 7.94 a	1.52 \pm 0.19 a
硫氰盐 Thiocyanate	KSCN	1.0	16.67 \pm 13.65 a	8.67 \pm 2.00 a	10.33 \pm 13.75 a	0.72 \pm 0.19 fghijkl
		2.0	25.67 \pm 6.81 a	20.00 \pm 3.06 a	12.00 \pm 10.50 a	0.71 \pm 0.32 fghijkl
		4.0	52.67 \pm 3.62 a	21.67 \pm 1.53 a	10.33 \pm 6.35 a	0.58 \pm 0.34 ijk
		0.5	6.00 \pm 2.00 a	11.67 \pm 9.29 a	18.00 \pm 7.00 a	1.35 \pm 0.22 hijkl
	NH_4SCN	1.0	27.33 \pm 11.68 a	21.00 \pm 1.00 a	17.00 \pm 22.11 a	0.76 \pm 0.37 fghijkl
		2.0	24.67 \pm 11.15 a	11.67 \pm 2.52 a	12.00 \pm 16.64 a	0.68 \pm 0.57 abed
		4.0	0.00 \pm 0.00 a	0.00 \pm 0.00 a	0.00 \pm 0.00 a	0.00 \pm 0.00 m
		0.5	14.00 \pm 7.00 ab	10.00 \pm 3.46 b	25.00 \pm 6.08 a	1.25 \pm 0.19 efgijk
对照 CK		1.0	20.00 \pm 4.00 a	12.67 \pm 9.71 a	16.00 \pm 0.00 a	0.92 \pm 0.08 defghijk
		2.0	21.00 \pm 5.57 a	10.33 \pm 8.08 a	13.00 \pm 7.21 a	0.80 \pm 0.18 abcde
		4.0	34.67 \pm 2.37 a	11.00 \pm 4.36 b	15.00 \pm 5.00 b	0.72 \pm 0.24 fghijkl
			45.00 \pm 1.43 a	31.00 \pm 2.21 a	38.00 \pm 5.10 a	0.94 \pm 0.05 cdefghijk

表中数据为平均数 \pm 标准差。平均线虫数量内同行不同小写字母或线虫平均迁移距离后所列不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Data are mean \pm SD. Different letters within the same row or column indicate significant differences in average number of juveniles or average migration distance at $P < 0.05$ level by Duncan's new multiple range test, respectively.

2.2 盐类对南方根结线虫2龄幼虫侵入能力的影响

0.25 $\mu\text{g}/\text{mL}$ K_2HPO_4 、 $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$ 、 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 KOH 对南方根结线虫2龄幼虫侵入番茄的抑制效果最差, 侵入率与对照差异不显著, 其它盐在该浓度下的抑制效果较好, 侵入率均显著小于对照。0.5、1和2 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 盐类处理对南方根结线虫2龄幼虫侵入番茄有显著的抑制作用, 且随着盐浓度的增加其侵入率降低, 均显著低于对照。对南

方根结线虫2龄幼虫侵入番茄抑制效果最明显的盐类有 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 、 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 、 CsCl 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NaSCN 和 NH_4SCN , 2 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 处理下线虫侵入率分别为1%、2.33%、1.33%、2%、2%、1%和1.67%, 表明这些盐在2 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时能够有效抑制线虫对番茄根部的侵入。与其它盐类相比, 有机酸盐和氢氧盐对线虫的侵入抑制能力相对较弱(表2)。

表2 不同盐类对南方根结线虫2龄幼虫侵入番茄根部能力的影响

Table 2 Effects of different salts on the infectivity of *Meloidogyne incognita* J2 to tomato roots

盐种类 Salt type	盐 Salt	平均侵入率 The average infectivity rate (%)			
		0.25 μg/mL	0.5 μg/mL	1 μg/mL	2 μg/mL
硝酸盐 Nitrate	Ba(NO ₃) ₂	12.33 ± 2.52 aEFG	9.33 ± 1.15 bEFG	6.33 ± 0.58 cEFGH	3.00 ± 1.00 dCDEF
	NH ₄ NO ₃	10.67 ± 1.15 aFG	7.33 ± 1.15 bGH	3.33 ± 1.15 cGHIJ	1.00 ± 1.00 cF
磷酸盐 Phosphates	Mn(NO ₃) ₂	14.00 ± 1.00 aCDEF	10.33 ± 0.58 bCDEF	7.00 ± 1.00 cCDEFG	2.67 ± 1.15 dCDEF
	KH ₂ PO ₄	15.67 ± 0.58 aBCDEF	9.33 ± 1.15 bEFG	6.33 ± 1.53 cBCDEF	2.33 ± 1.53 dDEF
碳酸盐 Carbonate	K ₂ HPO ₄	19.33 ± 0.58 aAB	12.67 ± 1.15 bBC	7.33 ± 1.15 cBCDEF	3.33 ± 0.58 dDEF
	Na ₂ CO ₃	13.67 ± 1.53 aDEF	10.33 ± 1.53 bCDEF	6.67 ± 1.15 cDEFG	3.67 ± 0.58 dBCDEF
KHCO ₃	(NH ₄) ₂ CO ₃	13.00 ± 1.73 aDEF	8.67 ± 0.58 bFG	6.00 ± 1.00 cEFGH	1.33 ± 0.58 dF
	KHCO ₃	13.00 ± 1.00 aDEF	9.33 ± 1.15 bEFG	7.33 ± 1.53 bBCDEF	1.67 ± 0.58 cEF
有机酸 Organic acid	C ₆ H ₅ O ₆	19.00 ± 2.00 aABC	13.67 ± 1.15 bB	11.00 ± 1.73 bB	3.67 ± 1.53 cBCDEF
	C ₆ H ₈ O ₃	16.33 ± 2.08 aABCDE	13.67 ± 1.53 abB	10.33 ± 2.52 bBCD	5.33 ± 2.08 cBCD
氯盐 Chloride	CsCl	15.00 ± 1.73 aBCDEF	9.33 ± 1.15 bEFG	5.67 ± 0.58 cFGHIJ	2.00 ± 2.00 dDEF
	CuCl ₂ · 2H ₂ O	19.00 ± 1.00 aABC	12.00 ± 1.00 bBCD	10.67 ± 3.06 bBC	5.00 ± 1.00 cBCDE
硫酸盐 Sulphate	(NH ₄) ₂ SO ₄	13.33 ± 1.53 aDEF	9.67 ± 0.58 bDEFG	6.00 ± 2.00 cEFGH	2.00 ± 0.00 dDEF
	MnSO ₄ · H ₂ O	17.67 ± 0.58 aABCD	11.67 ± 0.58 bBCDE	7.33 ± 1.15 cBCDEF	3.67 ± 0.58 dBCDEF
硫氰盐 Thiocyanate	NaSCN	12.67 ± 1.53 aDEFG	8.67 ± 0.58 bFG	2.67 ± 1.15 cHIJ	1.00 ± 1.00 cF
	KSCN	11.33 ± 1.15 aEFG	8.00 ± 0.00 bFGH	6.33 ± 1.53 bEFGH	3.67 ± 0.58 cBCDEF
氢氧化盐 Hydroxide salt	NH ₄ SCN	7.67 ± 0.58 aG	6.00 ± 0.00 aH	2.33 ± 0.58 bJ	1.67 ± 1.53 bEF
	KOH	17.67 ± 0.58 aABCD	12.33 ± 1.53 bBC	10.67 ± 1.15 bBC	6.67 ± 1.53 cB
对照 CK	NaOH	16.00 ± 2.65 aBCD	9.67 ± 1.53 bDEFG	9.67 ± 2.52 bBCDE	6.00 ± 2.00 bBC
		22.33 ± 3.06 aA	26.00 ± 3.61 aA	23.00 ± 5.57 aA	23.67 ± 5.86 aA

表中数据为平均数 ± 标准差。同行不同小写字母或同列不同大写字母均表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Data are mean ± SD. Different lowercase letters in the same row or uppercase letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

3 讨论

Bird(1958)研究认为,土壤中自由生活的线虫利用特定的识别机制发现寄主或被捕食物,寄生线虫通过化学感应定殖于寄主。一些研究认为,盐类可以抑制线虫的迁移,Oka et al. (2007)研究发现,亚磷酸盐可抑制燕麦孢囊线虫 *Heterodera avenae* 和马里兰根结线虫 *M. marylandi* 在谷类作物上的蔓延;本试验结果表明,不同浓度的 K₂HPO₄ 可以抑制南方根结线虫 2 龄幼虫在沙柱中的移动,表明 K₂HPO₄ 对其迁移具有抑制作用。Wuyts et al. (2006)研究表明,水杨酸等有机酸对南方根结线虫 2 龄幼虫的迁移具有抑制作用;本试验中 C₆H₈O₃ 也对南方根结线虫 2 龄幼虫的迁移具有抑制作用。Bakonyi et al. (2003)认为,重金属及微量元素长期暴露可影响线虫的种群密度;Wang & Wang (2008)发现低浓度 Ba²⁺ 可导致秀丽小杆线虫 *Caenorhabditis elegans* 发育不良和生殖障碍,高浓度 Ba²⁺ 可使其迁移性、行为可塑性产生严重缺陷;本试验中对南方根结线虫 2 龄幼虫迁移抑制效果最明显的为 Ba-

NO₃、CsCl 和 MnSO₄ · H₂O,表明含重金属元素 Ba、Cs、Mn 的盐类在一定程度上也能够抑制南方根结线虫的活动。试验还发现,不同浓度盐处理对南方根结线虫 2 龄幼虫的迁移能力不同,随着盐浓度的增加,线虫的迁移距离减少,KSCN、C₆H₈O₃、KCl、KH₂PO₄、KHCO₃ 和 MnSO₄ · H₂O 只有在高浓度 4 μg/mL 时才对其迁移具有抑制作用,低浓度 0.5 μg/mL 对其迁移无抑制作用,表明线虫的迁移不仅由盐本身的特性决定,还受其浓度的影响。

盐类不但能够影响线虫的迁移能力,还能够影响线虫的侵入能力。Zasada et al. (2007)研究表明,利用 N 离子改良土壤对南方根结线虫 2 龄幼虫侵染有一定的抑制作用;Coyne et al. (2004)发现 N、P、K、Ca、Mg、Zn、Fe、Mn 和 Cu 等无机肥料的施用和添加可影响线虫对寄主的侵染;本试验中对南方根结线虫 2 龄幼虫侵入番茄抑制效果最明显的硝酸盐为 NH₄NO₃、磷酸盐为 KH₂PO₄、碳酸盐为 (NH₄)₂CO₃、氯盐为 CsCl、硫酸盐为 (NH₄)₂SO₄、硫氰盐为 NaSCN 和 NH₄SCN。Oka et al. (2006)发现,用 (NH₄)₂SO₄ 处理土壤能够显著降低南方根结线

虫对番茄的侵染,而铵盐不具有杀线性,但可以形成氨气,在碱性环境中铵盐对线虫有毒,可影响其侵入,与本试验结果一致,即与其它盐类相比,2 μg/mL $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 处理中南方根结线虫的侵入率较低,15 d 后仅为2%;而2 μg/mL NH_4SCN 能够抑制线虫对番茄根部的侵入,硫氰盐是具有毒杀线虫作用的阳离子 NH_4^+ 和阴离子 SCN^- 组成的化合物,或许比单独含有具杀线作用的阳离子或阴离子的化合物更具有杀线活性,其相互作用还需进一步研究。

本研究通过室内试验筛选出可抑制南方根结线虫2龄幼虫在土壤中迁移的盐为 BaNO_3 、 K_2HPO_4 、 KHCO_3 、 CsCl 和 KSCN ,对其侵入番茄根部抑制效果明显的盐为 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 、 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 、 CsCl 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NaSCN 和 NH_4SCN 。一些盐在生产上可作为化学肥料,在提供作物营养的同时也可防治根结线虫,具有重要的实用价值,关于这些盐对根结线虫的田间防治效果还有待进一步研究。

参考文献 (References)

- Abawi GS, Barker KR. 1984. Effects of cultivar, soil temperature, and population levels of *Meloidogyne incognita* on root necrosis and *Fusarium* wilt of tomatoes. *Phytopathology*, 74(4): 433–438.
- Bakonyi G, Nagy P, Kádár I. 2003. Long-term effects of heavy metals and microelements on nematode assemblage. *Toxicology Letters*, 140/141: 391–401.
- Bird AF. 1958. The attractiveness of roots to the plant parasitic nematodes *Meloidogyne javanica* and *M. hapla*. *Nematologica*, 4(4): 322–335.
- Castro CE, Belser NO, McKinney HE, Thomason IJ. 1990. Strong repellency of the root knot nematode, *Meloidogyne incognita* by specific inorganic ions. *Journal of Chemical Ecology*, 16(4): 1199–1205.
- Coyne DL, Sahrawat KL, Plowright RA. 2004. The influence of mineral fertilizer application and plant nutrition on plant-parasitic nematodes in upland and lowland rice in Côte d'Ivoire and its implications in long term agricultural research trials. *Experimental Agriculture*, 40(2): 245–256.
- Davies KG, Laird V, Kerry BR. 1991. The motility development and infection of *Meloidogyne incognita* encumbered with spores of the obligate hyperparasite *Pasteuria penetrans*. *Revue de Nématologie*, 14(4): 611–618.
- Devine KJ, Jones PW. 2003. Investigations into the chemoattraction of the potato cyst nematodes *Globodera rostochiensis* and *G. pallida* towards fractionated potato root leachate. *Nematology*, 5(1): 65–75.
- El-Sherif M, Mai WF. 1969. Thermotactic response of some plant parasitic nematodes. *Journal of Nematology*, 1(1): 43–48.
- Gao Y, Qi YH, Liu YG, Du H, Lü HP. Identification of the root-knot nematode on tomato in Hexi region of Gansu Province. *Plant Protection*, 35(3): 127–129 (in Chinese) [高贊, 漆永红, 刘永刚, 杜蕙, 吕和平. 2009. 甘肃河西地区番茄根结线虫病害原鉴定. 植物保护, 35(3): 127–129].
- Giannakou IO, Karpouzas DG, Anastasiades I, Tsipopoulos NG, Georgiadou A. 2005. Factors affecting the efficacy of non-fumigant nematicides for controlling root-knot nematodes. *Pest Management Science*, 61(10): 961–972.
- Jairajpuri MS, Azmi MI. 1978. Aggregation and repulsion of nematodes at pH gradients. *Nematologia Mediterranea*, 6: 107–112.
- Kim DG, Ferris H. 2002. Relation between crop losses and initial population densities of *Meloidogyne arenaria* in winter-grown oriental melon in Korea. *Journal of Nematology*, 34(1): 43–49.
- Lü HP, Qi YH, Cao SF, Du H, Li MQ, Shen HM. 2012. Effects of inorganic salts on eggs, egg masses hatching and second stage juvenile survival of *Meloidogyne incognita*. *Journal of Plant Protection*, 39(5): 449–455 (in Chinese) [吕和平, 漆永红, 曹素芳, 杜蕙, 李敏权, 沈慧敏. 2012. 四种无机盐对南方根结线虫卵囊、卵孵化以及其幼虫存活的影响. 植物保护学报, 39(5): 449–455].
- Oka Y, Tkachi N, Mor M. 2007. Phosphite inhibits development of the nematodes *Heterodera avenae* and *Meloidogyne marylandi* in cereals. *Phytopathology*, 97(4): 396–404.
- Oka Y, Tkachi N, Shuker S, Rosenberg R, Suriano S, Roded L, Fine P. 2006. Field studies on the enhancement of nematicidal activity of ammonia-releasing fertilizer by alkaline amendments. *Nematology*, 8(6): 881–893.
- Peng S, Yang R, Yan SZ, Chen SL. 2012. Control effect of the antinematode endophytic bacteria and rhizosphere actinomycetes to root-knot nematodes of tomato plant. *Journal of Plant Protection*, 39(1): 63–69 (in Chinese) [彭双, 杨茹, 闫淑珍, 陈双林. 2012. 杀线虫植物内生细菌和根际放线菌对根结线虫的防效. 植物保护学报, 39(1): 63–69].
- Prot JC. 1978. Behaviour of juveniles of *Meloidogyne javanica* in salts gradients. *Revue de Nématologie*, 1(2): 135–142.
- Sasser JN, Eisenback JD, Carter CC, Triantaphyllou AC. 1983. The international *Meloidogyne* project—its goals and accomplishments. *Annual Review of Phytopathology*, 21: 271–288.
- Schmitz B, Burgermeister W, Braasch H. 1998. Molecular genetic classification of central European *Meloidogyne chitwoodi* and *M. fallax* populations. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 50(12): 310–317.
- Wang DY, Wang Y. 2008. Phenotypic and behavioral defects caused by barium exposure in nematode *Caenorhabditis elegans*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 54(3): 447–453.
- Wuyts N, Swennen R, de Waele D. 2006. Effect of plant phenylpropanoid pathway products and selected terpenoids and alkaloids on the behaviour of the plant-parasitic nematodes *Radopholus similis*, *Pratylenchus penetrans* and *Meloidogyne incognita*. *Nematology*, 8(1): 89–101.
- Zasada I, Rogers S, Sardanelli S. 2007. Application of alkaline stabilised biosolids for *Meloidogyne incognita* suppression in micro-plots. *Nematology*, 9(1): 123–129.

(责任编辑:李美娟)