网络出版时间:2026-01-09 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.07.013

青海省设施辣椒根结线虫病分布与病原鉴定

鲍梦楠[1],张宪[2],张忠存[3],闫佳会[1]

(1 青海大学 农业病虫害综合治理重点实验室/农业农村部西宁农作物病虫害科学观测实验站,青海 西宁 810016;
2 海东市平安区蔬菜技术服务中心,青海 海东 810699;
3 格尔木农垦(集团)有限公司 农业科技技术服务中心,青海 海西 816000)

[摘 要] 【目的】明确青海省主要农业区设施辣椒根结线虫的分布及其种类,为针对性防治根结线虫病提供依据。【方法】2024年对青海省主要农业区设施辣椒上根结线虫病害的发生情况进行调查。在青海省4市(州)12县(区)的设施辣椒栽培区采集疑似感染根结线虫病的病根328份,带回实验室分离根结线虫,在显微镜下观察和测量根结线虫2龄幼虫及雌虫的体长、体宽、尾长和口针长等形态特征。并采用蛋白酶K法提取其DNA,利用根结线虫rDNA-ITS及28S rDNA引物进行PCR扩增,通过国内常见的4种根结线虫特异性引物(inc-K14-F/R、Far/Rar、Mh-F/R、Fjar/Rjar)进行鉴定。将分离获得的根结线虫悬浮液接种于真叶为6叶的健康辣椒根部,接种40 d后取辣椒根部进行染色,观察根结线虫的感染性。【结果】调查发现青海省海东市平安区、循化撒拉族自治县及海西蒙古族藏族自治州格尔木市的设施辣椒根结线虫病发生最为严重,病情指数分别为70.00,55.08和67.69,根结线虫检出率分别为75.00%,61.54%和73.08%;青海省西宁市湟中区设施辣椒根结线虫病的病情较为严重,病情指数为41.60,根结线虫检出率为56.00%;黄南藏族自治州尖扎县设施辣椒根结线虫病的病情较轻,病情指数为19.52,根结线虫检出率为38.10%;海东市民和回族土族自治县及互助土族自治县的病情指数分别为8.89和5.38,根结线虫检出率分别为27.78%和19.23%;其余县(区)均未检出根结线虫。对采集的328份疑似根结线虫病样进行检测,共检出阳性样本111份,阳性检出率为33.84%。分离所得根结线虫群体在形态学特征及体测值上均与南方根结线虫(*Meloidogyne incognita*)和花生根结线虫(*Meloidogyne arenaria*)一致。利用4种根结线虫SCAR序列特异性引物进行PCR扩增,检出南方根结线虫82份,检出率为25.00%;花生根结线虫34份,检出率为10.37%;病情严重地区存在2种线虫交叉感染现象,12份分子鉴定样本中,南方根结线虫和花生根结线虫复合侵染的占比为33.33%;北方根结线虫(*Meloidogyne hapla*)与爪哇根结线虫(*Meloidogyne javanica*)均未被检出。【结论】青海省主要农业区设施辣椒已有根结线虫发生,部分地区病情严重,病情指数达到55以上。青海省设施辣椒根结线虫病病原为南方根结线虫和花生根结线虫,且南方根结线虫为该省设施辣椒根结线虫病的病原优势种。

[关键词] 设施辣椒;根结线虫;病原鉴定;青海省

[中图分类号] S432.4 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)07-0121-10

Distribution and pathogen identification of root-knot nematode disease in facility pepper cultivation in Qinghai Province

BAO Mengnan[1],ZHANG Xian[2],ZHANG Zhongcun[3],YAN Jiahui[1]

(1 *Key Laboratory of Integrated Pest Management for Agricultural Pests/Agricultural and Rural Affairs Ministry Xining Crop Pest and Disease Scientific Observation Station,Qinghai University,Xining,Qinghai* 810016,*China*;2 *Vegetable Technology Service Center,Ping'an District,Haidong,Qinghai* 810699,*China*;3 *Agricultural Science and Technology Service Center,Golmud*

[收稿日期] 2025-06-20 [修回日期] 2025-11-24
[基金项目] 青海省中央引导地方科技发展资金项目(2024ZY025)
[作者简介] 鲍梦楠(2000—),女,河南洛阳人,在读硕士,主要从事植物病理学研究。E-mail:15737982286@163.com
[通信作者] 闫佳会(1984—),女,湖北宜昌人,副研究员,硕士生导师,主要从事植物病理学研究。E-mail:15209787170@163.com.

Agricultural Reclamation (Group) Co., Ltd., Haixi, Qinghai 816000, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aims to investigate the distribution pattern and identify the species of *Meloidogyne* spp. in the major agricultural regions of Qinghai Province, specifically in pepper crops, to provide a basis for the development of targeted control measures for root-knot nematode diseases in the province. 【Method】 In 2024, a survey was conducted to assess the occurrence of root-knot nematode (*Meloidogyne* spp.) disease in facility-grown pepper (*Capsicum annuum* L.) across major agricultural regions of Qinghai Province, China. A total of 328 suspected infected root samples were collected from pepper production greenhouse in 12 counties/districts across 4 prefecture-level regions. Root-knot nematodes were isolated from diseased roots, and the morphological characteristics of 2nd-instar larvae and females, including body length, body width, tail length, and stylet length, were examined under a microscope. Genomic DNA was extracted by using the proteinase K method, and PCR amplification was performed with universal primers targeting the rDNA-ITS and 28S rDNA regions, followed by validation using species-specific primers (inc-K14-F/R, Far/Rar, Mh-F/R, and Fjar/Rjar) for four common root-knot nematode species in China. Pathogenicity was confirmed by inoculating nematode suspensions onto roots of six-leaf-stage healthy pepper plants, with the infection condition verified through root staining approximately 40 days post-inoculation. 【Result】 The highest incidence of root-knot nematode disease in facility-cultivated peppers was recorded in Ping'an district and Xunhua Salar Autonomous county of Haidong city, as well as Golmud city of Haixi Mongol and Tibetan Autonomous Prefecture, with disease index of 70.00, 55.08, and 67.69, and root-knot nematode detection rates of 75.00%, 61.54%, and 73.08%, respectively. A moderately high disease incidence was observed in Huangzhong district of Xining city, with a disease index of 41.60 and a detection rate of 56.00%. In Jianzha county of Huangnan Tibetan Autonomous Prefecture, the disease incidence was relatively low, with a disease index of 19.52 and a detection rate of 38.10%. In Minhe Hui and Tu Autonomous county and Huzhu Tu Autonomous county of Haidong city, the disease indices were 8.89 and 5.38, with corresponding detection rates of 27.78% and 19.23%, respectively. No root-knot nematode disease was detected in the remaining surveyed regions. Among a total of 328 suspected pepper root samples, 111 were tested as positive for root-knot nematodes, resulting in an overall detection rate of 33.84%. The morphological characteristics of the isolated nematodes, including measurements, were consistent with those of *M. incognita* (southern root-knot nematode) and *M. arenaria* (peanut root-knot nematode). SCAR-specific primers for root-knot nematodes were used for PCR amplification, and 82 positive samples of *M. incognita* (detection rate was 25.00%) and 34 positive samples of *M. arenaria* (detection rate was 10.37%) were identified. Co-infection of both nematode species was observed in regions with severe infection conditions. Among the 12 molecular identification samples, the samples co-infected by *M. incognita* and *M. incognita* accounted for 33.33 %. Neither *Meloidogyne hapla* (northern root-knot nematode) nor *Meloidogyne javanica* (java root-knot nematode) was detected. 【Conclusion】 Root-knot nematodes have been identified in facility vegetable-growing regions of Qinghai Province, with severe infection conditions observed in certain areas, where the disease index exceeds 55. Morphological and molecular analyses confirmed that the root-knot nematode disease in facility-grown peppers across Qinghai Province was caused by *M. incognita* and *M. arenaria*, with *M. incognita* identified as the predominant species.

Key words: facility peppers; *Meloidogyne* spp.; pathogen identification; Qinghai Province

近年来,我国辣椒种植面积和总产量呈逐年上升趋势,其消费量在国内蔬菜消费中居首位[1]。设施辣椒栽培可采用错季生产技术,实现春季提前上市和秋季延后采收,从而有效延长生产周期,显著提高单位面积产量,并为农户带来较高的经济效益[2]。

根结线虫属(*Meloidogyne* spp.)具有全球性分布特征,可寄生于所有维管植物[3]。其中南方根结线虫(*Meloidogyne incognita*)、爪哇根结线虫(*Meloido-*

gyne javanica）、北方根结线虫（*Meloidogyne hapla*）和花生根结线虫（*Meloidogyne arenaria*）是目前我国最主要的4种根结线虫[4]，广泛分布于北方温带地区和南方热带地区。其寄主范围极广，包括蔬菜、水果及多种园林植物[5-7]。根结线虫原本广泛分布于我国热带和亚热带地区[8-10]，但随着设施蔬菜产业的迅速发展，尤其是日光温室的大面积推广，以及复种指数提高和重茬种植的普遍发生，为根结线虫提供了适宜的生长和繁殖环境，导致土壤中线虫数量剧增，并呈现逐渐向北扩散的趋势[11-12]。郭靖宇等[13]报道了2012－2021年内蒙古自治区赤峰市设施蔬菜大棚内南方根结线虫在土壤内的动态发生规律。2018－2019年宫远福[14]针对东北地区根结线虫发生情况进行调查及种类鉴定，发现东北地区有南方根结线虫、北方根结线虫及花生根结线虫发生。马少军等[15]于2020年9月至2021年5月鉴定出新疆兵团第十四师四十七团设施蔬菜根结线虫种类均为南方根结线虫，不存在其他线虫复合侵染的情况。旺珍[16]在2021年发现西藏林芝市设施蔬菜上有南方根结线虫发生，并总结了根结线虫的生物学特征、传播途径及防治措施。上述研究说明根结线虫的发生逐渐向高纬度高海拔地区扩散。

青海省因其特殊的地理位置和气候条件，露地作物中鲜有根结线虫发生。茄科作物多为喜温性作物，适宜生长温度为25 ℃，空气相对湿度需保持在60%～70%[17-18]，这一环境条件与根结线虫最适生长温湿度相近[19]，这为根结线虫的侵染和繁殖提供了有利条件。近年来，随着设施蔬菜产业的不断发展，根结线虫病在青海省呈逐年加重趋势。目前缺乏针对青海省设施辣椒根结线虫病分布及种群鉴定的系统性研究。为此，本研究对青海省4市（州）12县（区）设施辣椒的根结线虫发生情况进行调查，并对其种类进行鉴定，旨在明确危害青海省设施辣椒的主要根结线虫种类，为后续开展有针对性的防控提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　青海省设施辣椒根结线虫病害调查

2024年5月对青海省主要农业区设施辣椒基地开展根结线虫病害调查。每个调查基地随机选择6个种植大棚，每棚随机抽查15株辣椒。调查内容包括：观察辣椒植株地上部生长状况；挖开表层土壤检查根系是否形成根结；采集具有典型发病症状的植株完整根系，置于自封袋内带回实验室备用。样品采集于西宁市、海东市、黄南藏族自治州和海西蒙古族藏族自治州，采集样本数分别为46，148，42和92份，合计328份。

根据刘伟中等[20]的分级标准统计根结线虫发病情况，具体分级标准如下。

0级，整个根系没有根结；1级，根系轻微感染，根结数少于10个，根结百分率小于10%；2级，根系根结明显，根结数10～50个，根结百分率11%～25%；3级，根结百分率26%～50%；4级，根结百分率51%～75%；5级，根结百分率75%～100%。

病情指数＝100×（∑（各级病株数×各级代表值））/（调查总株数×最高级代表值）。

1.2　根结线虫的分离、纯化及扩繁

参考刘丽等[21]的方法分离、收集根结线虫雌虫、2龄幼虫及卵囊。将卵囊置于超纯水中，28 ℃恒温培养箱中培养孵化，2～3 d后可观察到2龄幼虫。参考石明明等[22]的方法将其接种到具有6片真叶且长势一致的健康辣椒植株根部，用以纯化及扩繁。

1.3　根结线虫的形态学鉴定

根结线虫雌虫会阴花纹样片制作：参考段玉玺[23]的方法，将根结线虫雌虫置于含45%乳酸的载玻片上，使用手术刀小心切下虫体后部，清洗内部内容物。随后将处理过的虫体后部移至另一滴纯甘油上，铺平并展开，制成临时玻片[24]，在显微镜下进行观察并拍照及体值测量。

根结线虫2龄幼虫形态观察：参考1.2节中的纯化方法，培养卵囊2～3 d后随机挑取20条2龄幼虫置于载玻片上，以超纯水作为浮载剂。将载玻片置于70 ℃恒温金属加热板上处理10 s，显微镜下观察虫体形态变化。若虫体由弯曲状态恢复为直线形态，则判定为死亡。随后立即加入一滴等量的TAF固定液进行固定，制成临时玻片[25]。参考谢辉[26]的方法进行形态学观察和体值测量。

1.4　根结线虫的分子生物学鉴定

参照杨艳梅等[27]的蛋白酶K法提取根结线虫DNA，以DNA粗提液为模板，根据魏佩瑶等[28]和陈京环等[29]报道的根结线虫通用引物rDNA-ITS（TTGATTACGTCCCTGCCCTTT/TTTCACTCGCCGTTACTACGG）和28S rDNA D2A/D3B（ACAAGTACCGTGAGGGAAAGTTG/TCGGAAGGAACCAGCTAC）分别进行扩增。回收阳性扩增产物并送至杨凌天润奥科生物科技有限公司

测序,将测序结果上传至GenBank数据库与根结线虫序列进行比对。利用国内常见的4种根结线虫SCAR序列的特异性引物[30]进行验证,引物信息详见表1。

表1 国内4种主要根结线虫SCAR序列特异性引物

Table 1 SCAR primer sequences for four major root-knot nematode species in China

根结线虫种类 *Meloidogyne* spp.	引物序列(5′→3′) Primer sequence	扩增长度/bp Amplification length	退火温度/℃ Annealing temperature	退火时间/s Annealing time
南方根结线虫 *M. incognita*	inc-K14-F:GGGATGTGTAAATGCTCCTG inc-K14-R:CCCGCTACACCCTCAACTTC	399	64	27
北方根结线虫 *M. hapla*	Mh-F:GAATAGTCTCAACGTTTATC Mh-R:ATGTGACAGCGAAAAGAATT	457	52	27
花生根结线虫 *M. arenaria*	Far:TCGGCGATAGAGGTAAATGAC Rar:TCGGCGATAGACACTACAACT	420	61	27
爪哇根结线虫 *M. javanica*	Fjav:GGTGCGCGATTGAACTGAGC Rjav:CAGGCCCTTCAGTGGAACTATAC	670	64	42

1.5 接种验证

选取具有6片真叶且生长势一致的健康辣椒幼苗,移栽于18 cm×19 cm的塑料盆中,每盆栽植2株,共10盆,在温室自然光条件下培养(温度范围20~25 ℃)1周后,将从新鲜根结中分离纯化的根结线虫悬浮液(2 000条/mL)以每盆2 mL的接种量进行接种,共接种6盆,其余4盆以无菌水处理作为空白对照,观察植株发病情况。接种40 d后,参考段玉玺等[23]的方法,利用体积分数0.15%酸性品红溶液对发病植株的根部进行染色,以确定接种成功。从发病根系中重新分离线虫,并进行种群鉴定,以验证其与接种线虫群体一致。

1.6 数据处理

利用Excel 2019及SPSS 27.0进行试验数据统计与分析。

2 结果与分析

2.1 青海省设施辣椒根结线虫病害的发生情况

调查发现,与健康辣椒植株(图1-A)相比,根结线虫侵染初期辣椒植株地上部表现出类似于缺素的症状(图1-B),主要表现为叶片黄化,茎秆细长,整体生长缓慢,并在中午出现萎蔫症状。挖取根系发现主根较弱或不明显,须根与毛细根异常增生,根系表面分布有大小不等的球形根结(图1-C)。发病初期,根结表面光滑且呈白色瘤状;随着病程发展,由于线虫侵入引发其他病原交叉感染,根部逐渐褐变腐烂(图1-E)。剖开根结,可观察到乳白色或半透明针头状的雌成虫。



A. 健康辣椒植株;B. 发病前期地上部表现缺素;C. 地下根部出现根结;D. 健康辣椒植株根部;E. 发病后期根部变褐并腐烂。

A. Healthy pepper plant;B. The aboveground part showed deficiency in the early stage of disease;C. Root knots appear in the underground root;D. Healthy pepper plant roots;E. The root became brown and began to rot in the late stage of the disease.

图1 青海省设施辣椒根结线虫病的发病症状

Fig. 1 Symptoms of root-knot nematode disease in Qinghai Province facility peppers

对青海省主要农业区设施辣椒的调查结果(表2)表明,海东市平安区、循化撒拉族自治县以及海西蒙古族藏族自治州格尔木市设施辣椒根结线虫病发生最为严重,检出率分别为75.00%,61.54%

和 73.08%，病情指数分别为 70.00，55.08 和 67.69；西宁市湟中区的设施辣椒根结线虫病病情较重，病情指数为 41.60，检出率为 56.00%；黄南藏族自治州尖扎县的设施辣椒根结线虫病病情较轻，病情指数为 19.52，检出率为 38.10%；海东市民和回族土族自治县及互助土族自治县的设施辣椒根结线虫病病情指数分别为 8.89 和 5.38，检出率分别为 27.78% 和 19.23%；其余各县（区）均未发现根结线虫病。

表 2　青海省主要农业区设施辣椒根结线虫的发生情况

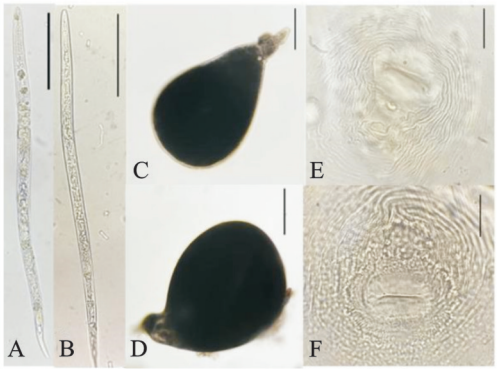
Table 2　Occurrence of pepper root-knot nematodes in major agricultural areas of Qinghai Province

采样地点 Sampling location	病情指数 Disease index	采集样本数 Number of collected samples	阳性检出数 Number of positive detections	检出率/% Detection rate
西宁市大通县 Datong county，Xining city	0	21	0	0
西宁市湟中区 Huangzhong district，Xining city	41.60	25	14	56.00
海东市平安区 Ping'an district，Haidong city	70.00	16	12	75.00
海东市乐都区 Ledu district，Haidong city	0	23	0	0
海东市民和回族土族自治县 Minhe Hui and Tu Autonomous county，Haidong city	8.89	18	5	27.78
海东市互助土族自治县 Huzhu Tu Autonomous county，Haidong city	5.38	26	5	19.23
海东市循化撒拉族自治县 Xunhua Salar Autonomous county，Haidong city	55.08	65	40	61.54
黄南藏族自治州尖扎县 Jianzha county，Huangnan Tibetan Autonomous prefecture	19.52	42	16	38.10
海西蒙古族藏族自治州格尔木市 Golmud city，Haixi Mongol and Tibetan Autonomous prefecture	67.69	26	19	73.08
海西蒙古族藏族自治州都兰县 Dulan county，Haixi Mongol and Tibetan Autonomous prefecture	0	14	0	0
海西蒙古族藏族自治州德令哈市 Delingha city，Haixi Mongol and Tibetan Autonomous prefecture	0	24	0	0
海西蒙古族藏族自治州乌兰县 Ulan county，Haixi Mongol and Tibetan Autonomous prefecture	0	28	0	0
合计 Total		328	111	33.84

2.2　青海省设施辣椒根结线虫的形态学特征

民和回族土族自治县及尖扎县分离所得的设施辣椒根结线虫群体 2 龄幼虫整体呈细长的蠕虫状，平均体长为 456.05 μm；头部圆、尾部尖（图 2-A），平均尾长为 32.01 μm；口针发达，平均口针长为 10.95 μm，口针基部球明显。雌虫整体呈梨形，颈部突出，主体呈椭圆状（图 2-C），腔内含有卵囊，平均体长和平均体宽分别为 529.52 和 418.82 μm。中食道球前可见排泄孔，通常位于口针基部球附近。其会阴花纹表现为高而方的背弓，由平滑的线纹构成，部分线纹在侧面呈分叉状，但无明显侧线，且部分线纹弯向阴门（图 2-E），基本符合谢辉[26]所描述的南方根结线虫的形态特征（表 3）。

互助土族自治县设施辣椒根结线虫群体 2 龄幼虫形态（图 2-B）与尖扎县设施辣椒根结线虫群体类似，平均体长为 413.53 μm。其雌虫虫体（图 2-D）较民和群体偏圆，平均体长和平均体宽分别为 571.33 和 403.45 μm；会阴花纹特征略有不同，表现为低背弓，肛尾间无点斑，侧面具有分叉的破碎纹（图 2-F），基本符合谢辉[26]所描述的花生根结线虫的形态特征（表 4）。



A. 民和县及尖扎县根结线虫 2 龄幼虫；B. 互助县根结线虫 2 龄幼虫；C. 民和县及尖扎县根结线虫雌虫；D. 互助县根结线虫雌虫；E. 民和县及尖扎县根结线虫会阴花纹；F. 互助县根结线虫会阴花纹。比例尺：A－D 为 100 μm；D－F 为 10 μm。

A. 2nd instar larvae of root-knot nematodes from Minhe county and Jianzha county；B. 2nd instar larvae of root-knot nematodes from Huzhu county；C. Female of root-knot nematodes from Minhe county and Jianzha county；D. Female of root-knot nematodes from Huzhu county；E. Anus pattern of root-knot nematodes from Minhe county and Jianzha county；F. Anus pattern of root-knot nematodes from Huzhu county. Scale bars：A－D is 100 μm；E－Fis 10 μm.

图 2　青海省设施辣椒根结线虫的形态学特征

Fig. 2　Morphological characteristics of *Meloidogyne* spp. from facility pepper in Qinghai Province

表3 民和县及尖扎县设施辣椒根结线虫群体雌虫和2龄幼虫体值测量结果

Table 3 Measurement values of female and 2nd-instar larvae (J2) nematodes of *Meloidogyne* spp. from facility pepper in Minhe county and Jianzha county

指标 Index	民和县及尖扎县根结线虫群体测量值 Measurement values of root-knot nematode populations from Minhe county and Jianzha county		南方根结线虫标准值 Standard values for *Meloidogyne incognita*	
	雌虫 Female	2龄幼虫 2nd-instar larvae	雌虫 Female	2龄幼虫 2nd instar larvae
线虫数 Nematode population	20	20	—	—
体长/μm Body length	529.52±58.56	456.05±36.94	470～860	346～463
体宽/μm Body width	418.82±36.67	—	270～510	—
口针长/μm Stylet length	11.56±1.79	10.95±2.01	15～17	10～12
尾长/μm Tail length	—	32.01±2.64	—	42～63

注:—. 表示无数据。表4同。

Note: —. Indicates not applicable. The same as in table 4.

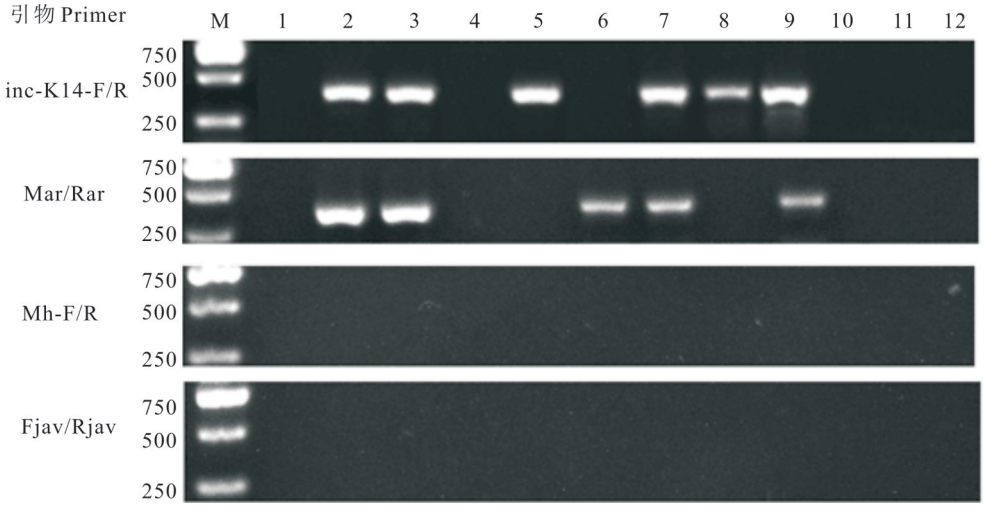
表4 互助县设施辣椒根结线虫群体雌虫和2龄幼虫体值测量

Table 4 Measurement values of female and 2nd instar larvae (J2) nematodes of *Meloidogyne* spp. from facility pepper in Huzhu county

指标 Index	互助县根结线虫群体测量值 Measurement values of root-knot nematode populations from Huzhu county		花生根结线虫标准值 Standard values for *Meloidogyne arenaria*	
	雌虫 Female	2龄幼虫 2nd-instar larvae	雌虫 Female	2龄幼虫 2nd-nstar larvae
线虫数 Nematode population	20	20	—	—
体长/μm Body length	571.33±78.61	413.53±32.64	440～960	398～605
体宽/μm Body width	403.45±59.21	—	260～810	—
口针长/μm Stylet length	12.48±1.50	11.30±1.80	13～17	10～12
尾长/μm Tail length	—	31.19±2.97	—	44～69

2.3 青海省设施辣椒根结线虫的分子生物学鉴定

经扩增与测序,得到所分离线虫群体的rDNA-ITS和28S rDNA D2A/D3B片段单一序列,并分别上传至GenBank数据库获取登录号。通过BLAST与数据库内根结线虫序列进行比对,并利用国内4种常见根结线虫的特异性SCAR引物进行验证。结果(图3)表明,民和回族土族自治县设施辣椒根结线虫群体与尖扎县设施辣椒根结线虫群体仅检测出南方根结线虫;互助土族自治县设施辣椒根结线虫群体仅检测出花生根结线虫;西宁市湟中区,海东市平安区、循化撒拉族自治县,海西蒙古族藏族自治州格尔木市、德令哈市设施辣椒根结线虫群体则检测出南方根结线虫和花生根结线虫复合侵染。



M. DNA Marker DL2000。1～12. PCR检测序号,与表5一致。

M. DNA Marker DL2000. 1—12. The PCR detection number is consistent with table 5.

图3 青海省设施辣椒根结线虫的分子生物学鉴定结果

Fig 3 Molecular biological identification results of facility pepper root-knot nematodes in Qinghai Province

本研究共采集青海省设施辣椒根结线虫疑似病样328份，其中通用引物检出根结线虫阳性样本111份，阳性检出率为33.84%。其中南方根结线虫特异性引物检测阳性样本数82份，检出率为25.00%；花生根结线虫阳性样本34份，检出率为10.37%（表5）。

由表6可知，12份分子鉴定样本中，南方根结线虫和花生根结线虫复合侵染占比为33.33%，仅有南方根结线虫或花生根结线虫侵染的占比分别16.67%和8.33%。表明南方根结线虫是青海省设施辣椒根结线虫病的优势病原种，而北方根结线虫和爪哇根结线虫均未被检出。

表5　青海省设施辣椒根结线虫检出结果

Table 5　Root-knot nematode detection in facility peppers in Qinghai Province

PCR序号 PCR sequence number	采样地点 Sampling location	南方根结线虫 *M. incognita*	北方根结线虫 *M. hapla*	花生根结线虫 *M. arenaria*	爪哇根结线虫 *M. javanica*
1	西宁市大通县 Datong county，Xining city	0	0	0	0
2	西宁市湟中区 Huangzhong district，Xining city	10	0	5	0
3	海东市平安区 Ping'an district，Haidong city	9	0	5	0
4	海东市乐都区 Ledu district，Haidong city	0	0	0	0
5	海东市民和回族土族自治县 Minhe Hui and Tu Autonomous county，Haidong city	5	0	0	0
6	海东市互助土族自治县 Huzhu Tu Autonomous county，Haidong city	0	0	5	0
7	海东市循化撒拉族自治县 Xunhua Salar Autonomous county，Haidong city	26	0	15	0
8	黄南藏族自治州尖扎县 Jianzha county，Huangnan Tibetan Autonomous prefecture	16	0	0	0
9	海西蒙古族藏族自治州格尔木市 Golmud city，Haixi Mongol and Tibetan Autonomous prefecture	16	0	4	0
10	海西蒙古族藏族自治州都兰县 Dulan county，Haixi Mongol and Tibetan Autonomous prefecture	0	0	0	0
11	海西蒙古族藏族自治州德令哈市 Delingha city，Haixi Mongol and Tibetan Autonomous prefecture	0	0	0	0
12	海西蒙古族藏族自治州乌兰县 Ulan county，Haixi Mongol and Tibetan Autonomous prefecture	0	0	0	0
	阳性检出数 Number of positive detections	82	0	34	0
	检出率/% Detection rate	25.00	0	10.37	0

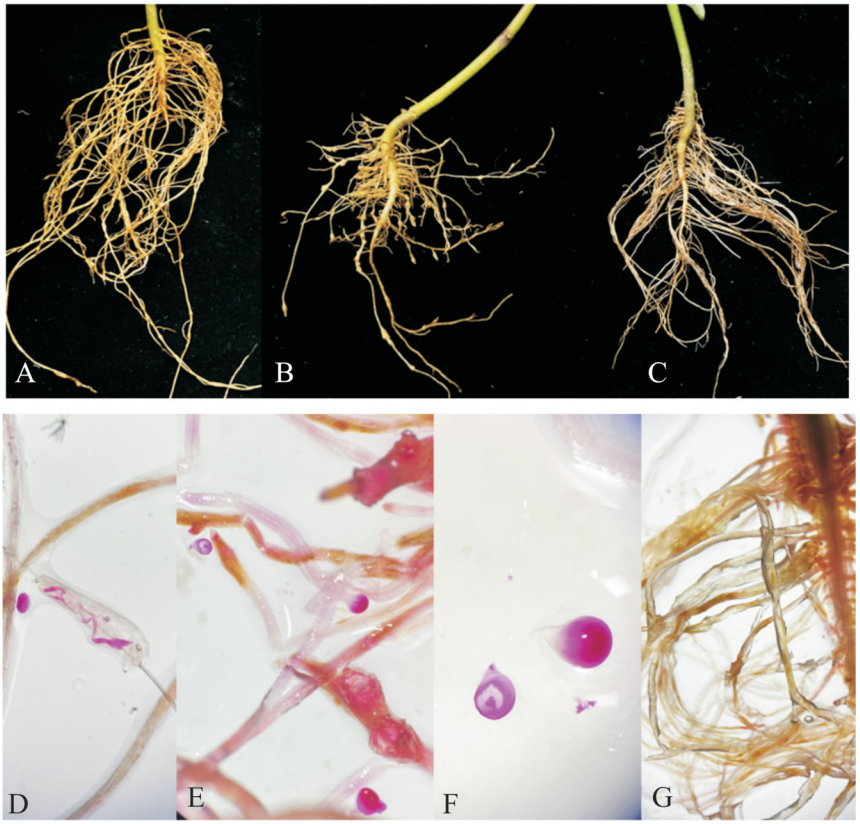
表6　青海省设施辣椒不同种类根结线虫复合侵染情况

Table 6　Co-infection of multiple root-knot nematode species in facility peppers in Qinghai Province

线虫种类 Types of nematodes	阳性样本数 Number of positive samples	PCR阳性占比/% Positive proportion of PCR
南方根结线虫 *M. incognita*	2	16.67
花生根结线虫 *M. arenaria*	1	8.33
北方根结线虫 *M. hapla*	0	0
爪哇根结线虫瓜 *M. javanica*	0	0
南方根结线虫＋花生根结线虫 *M. ubcigbutam*＋*M. arenaria*	4	33.33

2.4　接种症状观察

接种40～60 d后，所有接种组辣椒植株的根系均出现典型根结症状（图4-A，B），其形态特征与田间发病植株完全一致，染色后在体式显微镜下可清晰发现虫体（图4-D～F）。相比之下，对照组健康辣椒植株根系发育正常，未见任何根结形成（图4-C，G）。从接种发病根系中分离获得的根结线虫，经形态学与分子生物学鉴定，其特征与接种线虫完全一致。表明所采集病根上的根结线虫病病原为南方根结线虫和花生根结线虫。



A. 侵染 40 d 辣椒根部;B. 侵染 60 d 辣椒根部;C. 健康辣椒根部;D~F. 发病根部染色;G. 健康根部染色。
A. Pepper root infected for 40 days;B. Pepper root infected for 60 days;C. Healthy plant root;D－F. Staining of diseased roots;
G. Staining of healthy roots

图 4 盆栽辣椒接种根结线虫后根部症状和根部染色结果

Fig. 4 Symptoms and root staining results of potted pepper after inoculation with root-knot nematodes

3 讨论与结论

本研究采用形态学与分子生物学相结合的方法,对青海省主要农业区 4 市(州)12 县(区)设施辣椒根结线虫病的发生情况进行了系统调查。结果表明南方根结线虫和花生根结线虫在调查区域内均有检出,其中南方根结线虫为青海省设施辣椒根结线虫病的病原优势种;北方根结线虫和爪哇根结线虫均未检测到。

本课题组于 2015 年对青海省设施辣椒根结线虫病发生情况进行了系统调查,未发现根结线虫危害症状。但近年来随着种苗跨区域调运频率增加,根结线虫病害在青海省的发生程度明显加重。本次调查发现,海西蒙古族藏族自治州格尔木市、海东市平安区及循化撒拉族自治县为根结线虫病害重发区,普遍存在南方根结线虫与花生根结线虫复合侵染现象。调查结果表明,携带病原的种苗是青海省设施辣椒根结线虫病的主要初侵染源。因此,加强种苗检疫、规范种苗调运管理,对于遏制该病害的蔓延具有重要意义。根结线虫作为设施蔬菜的重要病原之一,在青海省设施蔬菜栽培区具有持续扩散与蔓延的潜在风险。本次调查还发现,即使在弃耕 6~12 个月后的严重发病土壤中,仍可分离出活体根结线虫,说明根结线虫在土壤中具有较强的存活能力。因此,有必要进一步扩大普查与监测范围,评估其潜在扩散区及危害风险区,为制定科学有效的防控策略提供依据。

辣椒作为青海省重要的经济作物之一,具有较高的经济效益。由于辣椒株型较高且养分需求量大,其正常生长发育直接取决于根系对水分和矿质营养的有效吸收与转运。一旦根系严重受损会导致植株因水分和养分供应不足而生长受阻,甚至死亡。根结线虫 2 龄幼虫侵染根系后,会通过取食活动引起根系组织破坏,导致植株生长缓慢、果实发育不良,从而造成减产并严重影响经济效益[31]。2008 年张峰等[32]针对陕西省设施蔬菜上根结线虫进行种类鉴定及分布调查,发现南方根结线虫为棚室蔬菜致病的绝对优势种;2015－2017 年张丽等[33]

在河北省设施蔬菜主产区进行根结线虫普查，发现南方根结线虫为河北省蔬菜上主要发生的种群；2016－2017年蔡毓新等[34]针对河南设施蔬菜主产区进行土壤采样及线虫病害调查鉴定，结果表明侵染河南省设施保护地香茄、黄瓜、甜瓜的主要根结线虫种群属于南方根结线虫1号小种。综上所述，南方根结线虫在北方多省设施蔬菜中均为优势病原种，其危害呈加剧趋势。

目前，国内对根结线虫的防治仍以化学农药为主。杨甜等[35]研究表明，41.7%氟吡菌酰胺对甜瓜苗期根结线虫具有较好的防治效果；凌文政等[36]利用静电纺丝技术制备的氟吡菌酰胺纳米纤维剂对南方根结线虫2龄幼虫及卵均表现出较高活性，具有较大的应用潜力。与此同时，生防菌剂作为环境友好且不易产生抗性的防治措施也逐渐成为研究热点。吴蔚然等[37]研究表明，芽孢杆菌Sneb2550和Sneb2556不仅可以促进黄瓜植株生长，而且对南方根结线虫2龄幼虫具有较强触杀活性，并能有效抑制其卵的孵化，为根结线虫的生物防治提供了新的潜在资源；匡超等[38]研究发现，淡紫紫孢菌可作为根结线虫的生防菌，且可通过水肥系统实现应用，为构建水肥药一体化的绿色防控模式提供了新思路。

根结线虫传播速度快、寄主范围广，可通过农事操作在设施内扩散至其他大棚，并迅速蔓延至整个种植区域。因此，应加强农户对根结线虫防控知识的宣传与普及，定期开展农业技术培训，同时规范化学药剂的使用，结合绿色防控措施，以有效遏制其传播与危害。

[参考文献]

[1] 王孟伟，何泽佳，白丽，等. 中国辛辣蔬菜国际竞争力比较分析[J]. 中国蔬菜，2024(8)：1-8.
WANG M W，HE Z J，BAI L，et al. Comparative analysis on international competitiveness of spicy vegetables in China[J]. China Vegetables，2024(8)：1-8.

[2] 张发梅. 青海地区辣椒日光温室高产栽培技术[J]. 现代农业，2017(3)：12-13.
ZHANG F M. High-yield cultivation techniques of pepper in solar greenhouses in Qinghai region[J]. Modern Agriculture，2017(3)：12-13.

[3] JOHNES J T，HAEGEMAN A，DANCHIN E G J，et al. Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology[J]. Molecular Plant Pathology，2013，14(9)：946-961.

[4] 安丽婷，石明明，倪春辉，等. 甘肃省胡萝卜根结线虫病病原鉴定[J]. 西北农业学报，2024，33(1)：183-190.
AN L T，SHI M M，NI C H，et al. Identification of carrot root-knot nematode pathogen in Gansu Province[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica，2024，33(1)：183-190.

[5] 徐建华，李红梅，沈培垠，等. 南方根结线虫群体间致病性变异的生物测定[J]. 南京农业大学学报，1999，22(3)：33-36.
XU J H，LI H M，SHEN P Y，et al. Biological test of pathogenic variation among populations of *Meloidogyne incognita* from China[J]. Journal of Nanjing Agricultural University，1999，22(3)：33-36.

[6] 郭衍银，徐坤，王秀峰，等. 生姜根结线虫病原鉴定及发生规律[J]. 植物保护学报，2004，31(3)：241-246.
GUO Y Y，XU K，WANG X F，et al. Pathogen identification and occurrence law of ginger root-knot nematode disease[J]. Journal of Plant Protection，2004，31(3)：241-246.

[7] 冯辉，赵敏，周冬梅，等. 南方根结线虫中国分离群体种内变异分析[J]. 植物保护学报，2021，48(2)：423-433.
FENG H，ZHAO M，ZHOU D M，et al. Intraspecific variability of the southern root-knot nematode *Meloidogyne incognita* in China[J]. Journal of Plant Protection，2021，48(2)：423-433.

[8] LONG H B，SUN Y F，CHEN Y，et al. Occurrence of root-knot nematode (*Meloidogyne* spp.) on peppers in Hainan，China，and *M. enterolobii* and *M. incognita* resistance of common cultivars[J]. Plant Disease，2023，107(10)：3148-3154.

[9] XU C L，ZHAO C B，DING S，et al. First report of root-knot nematode *Meloidogyne arenaria* infesting roots of *Anubias barteri* in Guangdong，China[J]. Plant Disease，2012，96(5)：773.

[10] CAO Y，LI C B，MA G M，et al. First report of *Meloidogyne arenaria* infecting maize in Guizhou Province of China[J]. Plant Disease，2023，107(10)：3221.

[11] 顾晓慧，王立浩，毛胜利，等. 辣椒根结线虫防治与抗性育种研究进展[J]. 中国蔬菜，2006，(5)：33-36.
GU X H，WANG L H，MAO S L，et al. Research progress on control and resistance breeding of root-knot nematodes in pepper[J]. China Vegetables，2006(5)：33-36.

[12] 杜宾，李敏，葛坤. 山西省主要设施蔬菜根结线虫种类和分布[J]. 中国植保导刊，2025，45(1)：50-55.
DU B，LI M，GE K. Species and distribution of root-knot nematodes in main greenhouse vegetables in Shanxi Province[J]. China Plant Protection，2025，45(1)：50-55.

[13] 郭靖宇，王燕春，徐佳，等. 赤峰市设施土壤中南方根结线虫动态分布[J]. 安徽农业科学，2024，52(14)：100-104.
GUO J Y，WANG Y C，XU J，et al. Dynamic distribution of southern root-knot nematode under protected cultivation soil in Chifeng city[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences，2024，52(14)：100-104.

[14] 宫远福. 东北地区根结线虫的种类分布及南方根结线虫氯离子通道基因分析[D]. 沈阳：沈阳农业大学，2020.
GONG Y F. Species distribution of root-knot nematodes in Northeast China and analysis of chloride channel genes of root-knot nematodes in South China[D]. Shenyang：Shenyang Agricultural University，2020.

[15] 马少军，刘佳伟，金玉华，等. 兵团第十四师四十七团设施蔬

菜根结线虫种类鉴定[J]. 新疆农垦科技,2022,45(4):37-39.
MA S J, LIU J W, JIN Y H, et al. Species identification of root-knot nematodes in facility vegetables of the 47th regiment of the 14th division of the corps[J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2022, 45(4): 37-39.

[16] 旺珍. 西藏高原根结线虫的发生与防治[J]. 西藏农业科技,2021,43(4):58-60.
WANG Z. Occurrence and control of root-knot nematode in Tibet[J]. Tibet Journal of Agricultural Sciences, 2021, 43(4): 58-60.

[17] 薛雪. 大棚辣椒种植及管理技术要点[J]. 现代农村科技,2025(4):49.
XUE X. Key points of pepper planting and management in greenhouse[J]. Modern Rural Technology, 2025(4): 49.

[18] 陈明远,于静湜,韩立红,等. 北京地区春秋大棚茄果类蔬菜轻简化栽培模式[J]. 中国蔬菜,2023(10):126-130.
CHEN M Y, YU J S, HAN L H, et al. Light and simplified cultivation mode of solanaceous vegetables in spring and autumn greenhouse in Beijing area[J]. China Vegetables, 2023(10): 126-130.

[19] 陈立杰,魏峰,段玉玺,等. 温湿度对南方根结线虫卵孵化和2龄幼虫的影响[J]. 植物保护,2009,35(2):48-52.
CHEN L J, WEI F, DUAN Y X, et al. Effects of temperature and moisture on egg hatching and the second instars of *Meloidogyne incognita*[J]. Plant Protection, 2009, 35(2): 48-52.

[20] 刘伟中,王宏宝,毛佳,等. 黄瓜根结线虫病病情指数分级方法研究[J]. 福建农业学报,2014,29(9):887-890.
LIU W Z, WANG H B, MAO J, et al. The study of cucumber root-knot nematode disease index classification method [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2014, 29(9): 887-890.

[21] 刘丽,颜世翠,姚良同,等. 一种番茄根结线虫人工培养和保存的优化方法[J]. 山东农业科学,2012,44(11):117-120.
LIU L, YAN S C, YAO L T, et al. An optimized artificial culture and preservation method for tomato root-knot nematodes [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2012, 44(11): 117-120.

[22] 石明明,李惠霞,刘永刚,等. 甘肃省党参根结线虫病发生、分布及病原种类鉴定[J]. 植物保护,2022,48(3):181-191.
SHI M M, LI H X, LIU Y G, et al. Occurrence, distribution and species identification of the root-knot nematode disease of *Codonopsis pilosula* in Gansu, China [J]. Plant Protection, 2022, 48(3): 181-191.

[23] 段玉玺. 植物线虫学[M]. 北京:科学出版社,2011:95-146.
DUAN Y X. Plant nematology[M]. Beijing: Science Press, 2011: 95-146.

[24] 陈昆圆,文艺,许相奎,等. 河南省丹参根结线虫病原种类鉴定[J]. 河南农业大学学报,2022,56(6):998-1006.
CHEN K Y, WEN Y, XU X K, et al. Species identification of root-knot nematode pathogen on *Salvia miltiorrhiza* in Henan Province[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2022, 56(6): 998-1006.

[25] 张绍升. 植物线虫病害诊断与防治[M]. 福建:科学技术出版社,1999:84-88.
ZHANG S S. Diagnosis and management of plant nematode diseases[M]. Fujian: Science & Technology Publishing House, 1999: 84-88.

[26] 谢辉. 植物线虫分类学[M]. 北京:高等教育出版社,2005:243-247.
XIE H. Taxonomy of plant nematodes[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005: 243-247.

[27] 杨艳梅,刘沛,董涵,等. 云南省紫茎泽兰根结线虫病病原种类鉴定[J]. 植物保护学报,2020,47(3):657-665.
YANG Y M, LIU P, DONG H, et al. Pathogen identification of *Eupatorium adenophorum* root-knot nematode disease in Yunnan Province[J]. Journal of Plant Protection, 2020, 47(3): 657-665.

[28] 魏佩瑶,潘嵩,刘晨,等. 西安市鄠邑区设施西瓜根结线虫种类鉴定及药剂防治研究[J]. 中国农学通报,2024,40(1):83-90.
WEI P Y, PAN S, LIU C, et al. Pathogen identification and chemical control techniques against root-knot nematode disease of facility watermelon in Huyi district of Xi'an city[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(1): 83-90.

[29] 陈京环,石明明,乔万强,等. 甘肃省黄芩根结线虫病病原种类鉴定[J]. 植物保护,2024,50(2):202-210.
CHEN J H, SHI M M, QIAO W Q, et al. Identification of pathogens of root-knot nematode disease of *Scutellaria baicalensis* in Gansu Province[J]. Plant Protection, 2024, 50(2): 202-210.

[30] 罗佳,杭晓宁,汝学娟,等. 重庆番茄根结线虫病的病原种类鉴定[J]. 分子植物育种,2024,22(2):512-516.
LUO J, HANG X N, RU X J, et al. Identification of pathogen species of root-knot nematode on tomato in Chongqing [J]. Molecular Plant Breeding, 2024, 22(2): 512-516.

[31] 赵鸿,彭德良,朱建兰. 根结线虫的研究现状[J]. 植物保护,2003,29(6):6-9.
ZHAO H, PENG D L, ZHU J L. Reviews on the root-knot nematodes[J]. Plant Protection, 2003, 29(6): 6-9.

[32] 张锋,张彦龙,洪波,等. 陕西设施蔬菜根结线虫的种类鉴定及分布[J]. 西北农业学报,2011,20(12):178-182.
ZHANG F, ZHANG Y L, HONG B, et al. Species identification and distribution of root knot nematodes on greenhouse vegetables in Shaanxi Province[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2011, 20(12): 178-182.

[33] 张丽,郑晨露,王睿文,等. 河北省设施蔬菜根结线虫病发生现状及化学防治技术初探[J]. 河北农业,2019(2):30-34.
ZHANG L, ZHENG C L, WANG R W, et al. Occurrence status and chemical control techniques of root-knot nematode in protected vegetables in Hebei Province[J]. Hebei Agriculture, 2019(2): 30-34.

(下转第140页)