

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.94191

研究简报

马铃薯不同品种(系)和稻、薯轮作模式对根结线虫病的防治效果

武超 刘贤文 张炜 王琼* 郭华春*

云南农业大学农学与生物技术学院薯类作物研究所, 云南昆明 650201

摘要: 根结线虫病是马铃薯连作减产的主要原因之一。为研究根结线虫病的农艺防治措施, 本文开展了品种抗性评价、稻、薯轮作和土壤淹水下的线虫消减动态研究。抗性评价试验表明, 18 个品种(系)中没有筛选到同时抗南方根结线虫和爪哇根结线虫的材料, 品系 1002-1 和品种丽薯 6 号相对抗性较好, 青薯 9 号和合作 88 相对敏感。马铃薯根结线虫发病土壤中可同时检测到卵、幼虫和成虫等不同形态。水旱轮作试验表明, 经一茬水稻栽培可使土壤中根结线虫虫态完全消失, 再种植马铃薯也不再发生根结线虫病, 且马铃薯有效产量显著提高, 青薯 9 号、合作 88 和丽薯 6 号的单株有效产量较对照分别提高 50.5%、43.7%和 26.0%, 差异均极显著, 1002-1 单株有效产量与对照差异不显著。由此可见, 稻、薯轮作根结线虫防治效果明显。为进一步探索水旱轮作的防治机制, 观察了土壤淹水进程中各种虫态消减动态。结果表明, 在淹水过程中, 根结线虫的卵、幼虫和成虫不同虫态此消彼长, 要淹水 60 d 以上, 土壤中才检测不到所有形态虫体。水旱轮作中水稻生长期淹水时间足够长, 满足防治线虫的淹水条件。因此结合抗病品种选用进行稻、薯轮作是防治马铃薯根结线虫病既绿色环保又可持续有效的方法。

关键词: 马铃薯; 品种(系); 稻、薯轮作; 根结线虫病; 防治效果

Control effects of different potato varieties (lines) and rice-potato rotation system on root-knot nematode

WU Chao, LIU Xian-Wen, ZHANG Wei, WANG Qiong*, and GUO Hua-Chun*

Tuber and Root Crops Research Institute, College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China

Abstract: Root-knot nematode disease, induced by *Meloidogyne incognita* and *Meloidogyne javanica*, is one of the main reasons of crop failure in potato continuous cropping in Yunnan province. Variety resistance evaluation, rice-potato rotation model and dynamic changes were studied in order to assess the protect-and-control treatment of potato root-knot nematode disease. Variety resistance evaluation, rice-potato rotation model and dynamic changes were all studied in order to evaluate the protect-and-control treatment of potato root-knot nematode disease. The results from the variety resistance evaluation indicated that among the 18 potato cultivars (lines) no resistant materials were screened resistant to both *Meloidogyne incognita* and *Meloidogyne javanica*, whereas the 1002-1 line and Lishu 6 displayed better disease resistance, Qingshu 9 and Cooperation 88 were more sensitive to potato root-knot nematode disease. All kinds of the egg, larva and imago of root-knot nematodes were simultaneously detected in soil with the root-knot nematodes disease. However, after rice-potato rotation, the egg, larva and imago of root-knot nematodes were to disappear entirely in soil, and the root knot nematode disease was no longer occurred in the following potato planting process. Furthermore, the tuber yield per plant of Qingshu 9, Cooperation 88 and Lishu 6 compared with control were significantly different increased by 50.5%, 43.7%, and 26.0%, respectively. These results suggested rice-potato rotation could be an effective way to control potato root knot nematode disease. In addition, to further analyzed the mechanism of rice-potato rotation inhibiting root-knot nematode survival, we observed the dynamic changes of the amount on root knot nematodes in the case of soil flooding. The results showed that no different states of the insect state were detected until submerged more than 60 days. Therefore, we speculated prolonged soil flooding may be the main reason for inhibiting the growth of root-knot nematodes. It is a sustainable and effective method to control potato root-knot nematode by selecting rice-potato rotation with disease-resistant varieties.

本研究由国家现代农业产业技术体系建设专项(马铃薯, CARS-09-15P)资助。

This study was supported by the China Agriculture Research System (Potato, CARS-09-15P).

* 通信作者(Corresponding authors): 王琼, E-mail: 468050753@qq.com; 郭华春, E-mail: ynghc@126.com

第一作者联系方式: E-mail: 1371757245@qq.com

Received (收稿日期): 2019-12-09; Accepted (接受日期): 2020-04-15; Published online (网络出版日期): 2020-05-08.

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200508.1635.004.html>

Keywords: potatoes; varieties (lines); rice-potato rotation cropping; root-knot nematode; control effect

马铃薯因其产量高、适应性强、营养丰富等特点,又兼备粮食、蔬菜、饲料和工业原料等用途,使其成为世界第三大淀粉原料作物和第四大粮食作物^[1]。在中国,马铃薯经济效益相比其他作物要高,使其种植面积不断扩大而出现连作现象,进而使连作引起的土传病害随之增加。根结线虫病就是连作病害之一,近年云南等马铃薯产区根结线虫病有日趋加重趋势。根结线虫主要危害马铃薯地下部分的根和块茎,在根部及块茎形成根瘤,严重影响马铃薯产量和外观品质^[2]。根结线虫病还会加重枯萎病、根腐病症状,复合侵染进一步影响马铃薯生产^[3]。

马铃薯根结线虫病是一种全球性病害,在美国、加拿大、俄罗斯、荷兰、日本、苏里南等国均有发生^[4]。Garcia 等^[5]利用 3 个来自阿根廷的野生马铃薯品种对花生根结线虫(*Meloidogyne arenaria*)进行抗性研究发现,马铃薯品种之间对线虫感染的反应存在很大差异。而国内马铃薯根结线虫研究较少,报道称检测到过中华根结线虫(*Meloidogyne Sinensis*)和北方根结线虫(*Meloidogyne hapla*)^[6]、繁峙根结线虫(*Meloidogyne fanzhiensis*)^[4]、哥伦比亚根结线虫(*Meloidogyne chitwoodi*)^[7]等。毛彦芝等^[8]用 28 份马铃薯材料对北方根结线虫抗性进行了初步筛选,发现白头翁对北方根结线虫抗性较好,会-2 和红参根部耐病,青薯 3 号和 608 Kennebec 可作为感病对照。王晓强等^[9]在云南省开远市发现南方根结线虫(*Meloidogyne incognita*)和爪哇根结线虫(*Meloidogyne javanica*)危害马铃薯,但尚未看到开展马铃薯抗南方根结线虫和爪哇根结线虫品种间差异相关研究。

水旱轮作是中国南方主要的轮作方式之一,不仅可以提高自身产量和品质,还可以减少相关病虫害。水旱轮作可以防治茄子青枯病^[10]、彻底消灭百合鳞茎蚜虫^[11]、降低草莓叶斑病和果实炭疽病发病率^[12]、降低番茄青枯病、枯萎病、根结线虫病及病毒病的发病率^[13],有效减少多种地下害虫和土传病害的发生。稻、薯轮作是南方马铃薯

薯冬作区广泛采用的水旱轮作种植模式,可提高复种指数,充分利用冬闲田,但水旱轮作对根结线虫防治效果研究未见报道。为此,本研究对云南农业大学薯类作物研究所保有的 18 份马铃薯品种(系)进行了南方和爪哇根结线虫的抗性鉴定,同时开展了稻、薯轮作的水旱栽培模式对根结线虫防病效果的试验,以期对马铃薯根结线虫抗性品种选育及田间防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 抗性品种(系)筛选 采用马铃薯品种(系) 18 份,由云南农业大学薯类作物研究所提供,包括云南省主栽品种丽薯 6 号、青薯 9 号和合作 88,引进品种(系)中薯 18 号、中薯 20 号、西海 35 (来自于日本),引自国际马铃薯中心的 CIP 50、CIP 57、CIP 58、CIP 64、CIP 81、CIP 88、CIP 164,自育的品种(系) 1002-1、3S-24、2013-16D1、滇薯 701 和滇同薯 1 号,种薯为 50 g 大小的原原种。

南方根结线虫和爪哇根结线虫均由云南省烟草科学研究院馈赠。线虫基数:含南方根结线虫的土壤干土中线虫总密度为(6.7±0.6)条 g⁻¹;含爪哇根结线虫的土壤干土中线虫总密度为(8.5±0.4)条 g⁻¹。

1.1.2 稻、薯轮作 马铃薯选用丽薯 6 号、1002-1、青薯 9 号和合作 88 号 50 g 大小的原原种,由云南农业大学薯类所提供。水稻选用滇杂 36 号,由云南农业大学稻作所提供。取自生产上多年连作马铃薯且严重发生根结线虫病的土壤,经会阴花纹镜检表明,土壤中含大量南方根结线虫和爪哇根结线虫,也有少量花生根结线虫,干土中线虫总密度为(5.1±0.5)条 g⁻¹。

1.1.3 土壤淹水下的线虫消减动态研究 选取 3 份前期水旱轮作试验中含根结线虫的背景土壤,每克土壤中根结线虫数量见表 1。

表 1 每克土壤中根结线虫基数(条 g⁻¹)
Table 1 Root-knot nematode base per gram of soil (strip g⁻¹)

样品编号 Number of samples	雌虫 Female worms	幼虫和雄虫 Larvae and male worms	卵 Eggs	总数 Total
土样 1 Soil samples 1	0.5±0.1	2.2±0.9	3.0±0.4	5.7±0.6
土样 2 Soil samples 2	0.8±0.3	1.8±0.4	2.7±0.4	5.3±0.4
土样 3 Soil samples 3	0.5±0	1.3±0.2	2.2±0.2	4.0±0.2

1.2 试验方法

1.2.1 抗性品种(系)筛选 试验于 2016 年在云南省玉溪市研和镇烟草科学研究院大棚进行,11 月 21 日将含有南方根结线虫的土壤和爪哇根结线虫的土壤分别装入 15 cm × 10 cm 的花盆中,将每个品种(系)在 2 种含有根结线虫的土壤中各种 30 盆,每盆播 50 g 左右大小的原原种 1 粒。出苗后每 10 d 定期观察植株长相、症状及长势。收获时取出根系及块茎,检测发病情况。管理措施按马铃薯

常规栽培方式进行。

1.2.2 稻、薯轮作 试验于 2017 年 4 月在云南农业大学薯类作物研究所温室进行。4 月 21 日将取自多年连作发病严重含有根结线虫的土壤充分混匀后,分装入 25 cm × 20 cm 的小水桶中,作为对照连作试验,每个小桶播种 1 粒种薯;每个品种种植 30 株;另外 120 个小桶土壤浸水,2 d 后将提前育好的秧苗栽入。马铃薯出苗后每 10 d 定期观察植株长相、症状及长势,收获时取出根系及块茎,检测

发病情况,测定产量(马铃薯单株产量为马铃薯收获时单株实际收获产量,单株有效产量为马铃薯收获的实际产量减去被根结线虫侵染的产量);水稻生长期观测生长情况,成熟后收获也取出根系检测发病情况;马铃薯和水稻均在收获后取土样观察土壤中线虫情况。11月中旬将4个马铃薯品种分别种入上季收获完马铃薯和水稻的土壤中,管理措施和检测方法同上。2018年4月和11月上茬种植土壤进行上年同期试验。管理措施按马铃薯和水稻生长常规栽培方式进行。

1.2.3 土壤淹水下的线虫消减动态研究 取3份水旱轮作试验中含根结线虫的背景土壤各40 kg放入100 cm × 60 cm × 50 cm的塑料框中,加入15 cm深的清水进行室温淹水浸泡,每隔10 d取土样观察根结线虫卵、幼虫和成虫的数量动态变化。

1.3 根结线虫病病情分级标准及抗性标准

1.3.1 病情分级标准 按杨云峰等^[14]方法进行病情分级。0级:无侵染,没有根结;1级:极轻微感染,1%~15%块茎或根系有根结;2级:轻微感染,16%~25%块茎或根系有根结;3级:中度感染,26%~50%块茎或根系有根结;4级:严重感染,51%~75%块茎或根系有根结;5级:76%以上的块茎或根系有根结。

根系发病率(%)=发病根系数/调查总株数×100%;

块茎发病率(%)=发病块茎数/调查总块茎数×100%;

根系病情指数=[∑(病级值×各级病根系数)/(调查总根系数×最高病级值)]×100%;

块茎病情指数=[∑(病级值×各级块茎数)/(调查总块茎数×最高病级值)]×100%。

1.3.2 抗性评价标准 参考烟草品种抗病性鉴定国家标准^[15]。根据马铃薯病情指数,将马铃薯对根结线虫抗性分为5类,病情指数0为免疫,病情指数<25.0为高抗,25.1~50.0为中抗,50.1~75.0为中感,75.0以上为高感。

1.4 测定项目与方法

土壤样品中干物质含量根据烘干法^[16]测定;土壤线虫密度:采用四分法取土壤表层2~3 cm以下的100 mL土壤分成2份,1份测土壤干物质含量,另1份采用蔗糖悬浮离心法^[17]分析测定线虫含量,结合土壤干物质含量占比折算出每克土壤中的线虫密度;土壤干物质含量占比(%)=土壤烘干重量/土壤取样重量×100%;每克土壤线虫密度=观察到的线虫数量/(观察土壤湿×土壤干物质含量占比);单株有效产量=单株实际产量-单株侵染产量;相对防治效果(%)=(连作线虫数-轮作线虫数)/连作线虫数×100%。

1.5 数据分析

采用Microsoft Excel 2003整理数据,用SPSS 20.0统计软件的LSD法统计分析,WPS Office 2016制作图表。

2 结果与分析

2.1 抗性品种筛选

由表2可知,南方根结线虫侵染比爪哇根结线虫严重,

根系侵染比块茎侵染严重,18份品种(系)均未对南方根结线虫和爪哇根结线虫同时表现免疫。其中只有1002-1对南方根结线虫病表现不发病,其余17份材料不同程度发病;爪哇根结线虫发病品种(系)少,只有青薯9号、中薯20号、中薯18号和1002-1发病,其余14份材料表现为免疫。品系1002-1对南方根结线虫表现不发病,爪哇根结线虫根系感病率为11.11%,块茎感病率仅为2.4%;丽薯6号的南方根结线虫发病率根系为20%,块茎为4.33%,2个品系综合表现较好。青薯9号对2种根结线虫都有较高感病率,对南方根结线虫发病率根系为90%,块茎为36.54%,爪哇根结线虫根系感病率为30%,块茎感病率仅为8.91%;合作88对爪哇根结线虫表现不发病,南方根结线虫根系感病率为71.43%,块茎感病率仅为22.09%,其属于云南省主栽品种,在大田生产中有根结线虫存在的地段感染较其他品种(系)严重,青薯9号和合作88两个品种综合表现较敏感。

2.2 水旱轮作对根结线虫防治效果及马铃薯产量的影响

将前期筛选抗性较好的1002-1、丽薯6号和抗性相对较差的青薯9号、合作88与水稻进行水旱轮作。结果表明,在多年连作马铃薯且含有大量根结线虫的土壤上种植一季水稻后,水稻根系和土壤中均无根结线虫。轮作土壤再种植马铃薯,无论是抗性较好还是抗性相对较差品种,马铃薯块茎、根系和土壤中均无根结线虫。水旱轮作对根结线虫的防治效果与连作马铃薯相比达到100%(表3)。

水旱轮作与马铃薯连作相比,马铃薯单株产量无显著性差异(图1-A)。但除去侵染块茎后的马铃薯单株有效产量中,青薯9号、合作88和丽薯6号的单株有效产量分别为(307.24±12.55)、(306.09±4.45)和(293.87±6.25) g,分别高于对照50.5%、43.7%和26.0%,有显著差异,1002-1单株有效产量为(298.00±4.87) g,低于对照6.3%,差异不显著(图1-B)。马铃薯单株结薯数水旱轮作略高于对照,青薯9号、丽薯6号和1002-1分别为(8.7±0.8)、(7.7±0.5)和(10.8±0.7)个,分别高于对照11.1%、2.2%和12.6%,合作88单株结薯数为(11.1±0.7)个,低于对照6.3%,差异均不显著(图1-C)。水旱轮作块茎侵染率均为0,连作模式中青薯9号、合作88、丽薯6号和1002-1的侵染率分别为(37.37±5.84)%、(20.18±5.38)%、(19.37±3.45)%和(8.10±3.25)%。水旱轮作侵染率均显著低于对照(图1-D)。

2.3 土壤淹水下的线虫消减动态

为进一步探讨水旱轮作抗根结线虫的机制及明确淹水时长,观察了3份含根结线虫土样随浸水时间延长根结线虫密度动态变化。由图2可知,3份土壤原始密度不相同,但变化规律基本类似,随着浸水时间的延长,无论是幼虫与雄虫、雌虫、卵还是总虫数的密度,总体呈现逐渐下降的趋势,浸水至60 d时根结线虫已经明显减少,70 d时几近灭绝,80 d时完全消失。但40 d时较30 d有所回升,雌虫密度从0 d以后开始呈现下降趋势,至20 d以后开始

表 2 不同马铃薯品种(系)对 2 种根结线虫抗性鉴定结果

Table 2 Identification results of resistance to root-knot nematodes from two different potato varieties (lines)

品种(系) Variety (lines)	线虫类型 Type of <i>Meloidogyne</i> spp.	根系 Root			块茎 Tuber		
		感病率 Susceptibility rate (%)	病情指数 Susceptible index	抗性 Resistance level	感病率 Susceptibility rate (%)	病情指数 Susceptible index	抗性 Resistance level
1002-1	<i>M.i</i>	0	0	IM	0	0	IM
	<i>M.j</i>	11.11	16.67	HR	2.40	1.60	HR
CIP 81	<i>M.i</i>	44.44	37.04	MR	3.40	2.49	HR
	<i>M.j</i>	0	0	IM	0	0	IM
CIP 88	<i>M.i</i>	40	27.50	MR	3.68	3.07	HR
	<i>M.j</i>	0	0	IM	0	0	IM
CIP 164	<i>M.i</i>	30	26.67	MR	3.42	3.08	HR
	<i>M.j</i>	0	0	IM	0	0	IM
丽薯 6 号	<i>M.i</i>	20	20	HR	4.35	4.35	HR
Lishu 6	<i>M.j</i>	0	0	IM	0	0	IM
CIP 50	<i>M.i</i>	40	33.33	MR	10.19	5.09	HR
	<i>M.j</i>	0	0	IM	0	0	IM
CIP 58	<i>M.i</i>	50	43.33	MR	15.22	9.06	HR
	<i>M.j</i>	0	0	IM	0	0	IM
CIP 57	<i>M.i</i>	50	36.67	MR	10.10	9.60	HR
	<i>M.j</i>	0	0	IM	0	0	IM
合作 88	<i>M.i</i>	71.43	61.90	MS	22.09	12.79	HR
Cooperation 88	<i>M.j</i>	0	0	IM	0	0	IM
CIP 64	<i>M.i</i>	90	67.50	MS	33.88	21.21	HR
	<i>M.j</i>	0	0	IM	0	0	IM
青薯 9 号	<i>M.i</i>	90	66.67	MS	36.54	22.60	HR
Qingshu 9	<i>M.j</i>	30	26.67	MR	8.91	7.92	HR
西海 35 Xihai 35	<i>M.i</i>	80	62.50	MS	27.55	25.00	HR
	<i>M.j</i>	0	0	IM	0	0	IM
2013-16D1	<i>M.i</i>	60	60	MS	29.63	27.78	MR
	<i>M.j</i>	0	0	IM	0	0	IM
中薯 20 号	<i>M.i</i>	100	73.33	MS	42.31	28.85	MR
Zhongshu 20	<i>M.j</i>	40	30	MR	7.69	7.69	HR
3S-24	<i>M.i</i>	100	85.00	HS	41.77	29.11	MR
	<i>M.j</i>	0	0	IM	0	0	IM
中薯 18 号	<i>M.i</i>	100	88.89	HS	51.39	33.10	MR
Zhongshu 18	<i>M.j</i>	80	70	HS	6.56	8.20	HR
滇薯 701	<i>M.i</i>	70	55.00	MS	39.53	38.37	MR
Dianshu 701	<i>M.j</i>	0	0	IM	0	0	IM
滇同 1 号	<i>M.i</i>	100	83.33	HS	42.86	39.29	MR
Diantong 1	<i>M.j</i>	0	0	IM	0	0	IM

M.i: 南方根结线虫; *M.j*: 爪哇根结线虫; IM: 免疫, 病情指数 0; HR: 高抗, 病情指数 < 25.0; MR: 中抗, 病情指数 25.1~50.0; MS: 中感, 病情指数 50.1~75.0; HS: 高感, 病情指数 > 75.0。

M.i: *Meloidogyne incognita*; *M.j*: *Meloidogyne javanica*; IM: immune resistance, disease index 0; HR: highly resistance, disease index < 25.0; MR: moderately resistance, disease index 25.1~50.0; MS: moderately susceptibility, disease index 50.1~75.0; HS: highly susceptibility, disease index > 75.0.

表 3 水旱轮作后块茎、根系和土壤中根结线虫情况统计

Table 3 Statistics of root-knot nematodes in tubers, roots, and soil after crop rotation

作物 Crops		块茎线虫 Nematodes of tuber	根系线虫 Nematodes of root	土壤线虫 Nematodes of soil	相对防治效果 Relative control effect (%)
一茬 First crop Apr., 2017	青薯 9 号-青薯 9 号 Qingshu 9-Qingshu 9	+	+	+	
	滇杂 36-青薯 9 号 Yunnan miscellaneous 36-Qingshu 9		-	-	100
	合作 88-合作 88 Cooperation 88-Cooperation 88	+	+	+	
	滇杂 36-合作 88 Yunnan miscellaneous 36-Cooperation 88		-	-	100
	丽薯 6 号-丽薯 6 号 Lishu 6-Lishu 6	+	+	+	
	滇杂 36-丽薯 6 号 Yunnan miscellaneous 36-Lishu 6		-	-	100
二茬 Second crop Nov., 2011	1002-1-1002-1	+	+	+	
	滇杂 36-1002-1 Yunnan miscellaneous 36-1002-1		-	-	100
	青薯 9 号-青薯 9 号 Qingshu 9-Qingshu 9	+	+	+	
	滇杂 36-青薯 9 号 Yunnan miscellaneous 36-Qingshu 9	-	-	-	100
	合作 88-合作 88 Cooperation 88-Cooperation 88	+	+	+	
	滇杂 36-作 88 Yunnan miscellaneous 36-Cooperation 88	-	-	-	100
三茬 Third crop Apr., 2018	丽薯 6 号-丽薯 6 号 Lishu 6-Lishu 6	+	+	+	
	滇杂 36-丽薯 6 号 Yunnan miscellaneous 36-Lishu 6	-	-	-	100
	1002-1-1002-1	+	+	+	
	滇杂 36-1002-1 Yunnan miscellaneous 36-1002-1	-	-	-	100
	青薯 9 号-青薯 9 号 Qingshu 9-Qingshu 9	+	+	+	
	滇杂 36-青薯 9 号 Yunnan miscellaneous 36-Qingshu 9	-	-	-	100
四茬 The fourth crop Nov., 2018	合作 88-合作 88 Cooperation 88-Cooperation 88	+	+	+	
	滇杂 36-合作 88 Yunnan miscellaneous 36-Cooperation 88	-	-	-	100
	丽薯 6 号-丽薯 6 号 Lishu 6-Lishu 6	+	+	+	
	滇杂 36-丽薯 6 号 Yunnan miscellaneous 36-Lishu 6	-	-	-	100
	1002-1-1002-1	+	+	+	
	滇杂 36-1002-1 Yunnan miscellaneous 36-1002-1	-	-	-	100

青薯 9 号、合作 88、丽薯 6 号和 1002-1 是马铃薯品种(系), 滇杂 36 为水稻品种; 一茬和三茬的轮作作物为水稻, 二茬和四茬轮作作物为对应马铃薯品种, 连作作物均为对应马铃薯品种; +: 有根结线虫; -: 无根结线虫。

Qingshu 9, Cooperation 88, Lishu 6 and 1002-1 are potato varieties (lines), Yunnan miscellaneous 36 is rice variety; the first crop and the third crop were rice, the second crop and the fourth crop were potato varieties; +: yes; -: no.

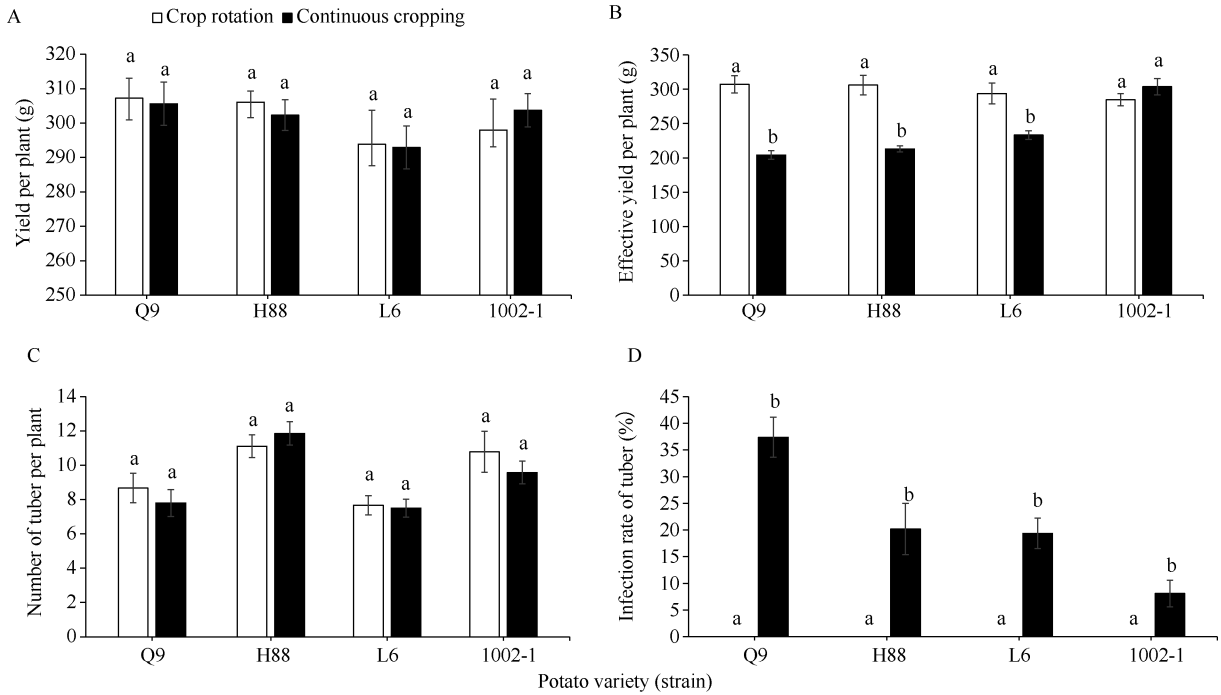


图 1 水旱轮作对马铃薯单株产量、单株有效产量、单株结薯数、块茎感染率的影响

Fig. 1 Effects on yield per plant, effective yield per plant, number of tubers per plant and infection rate of tuber in irrigation and drought rotation

A: 水旱轮作对马铃薯单株产量的影响; B: 水旱轮作对马铃薯单株有效产量的影响; C: 水旱轮作对马铃薯结薯数的影响; D: 水旱轮作对马铃薯块茎感染率的影响。Q9: 青薯 9 号; H88: 合作 88; L6: 丽薯 6 号。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。计算结果为第二茬和第四茬两季的平均值。

A: effects of yield level per plant from irrigation and drought rotation; B: effects of effective yield level per plant from irrigation and drought rotation; C: effects of number of tubers per plant from irrigation and drought rotation; D: effects of infection rate of tuber from irrigation and drought rotation. Q9: Qingshu 9; H88: Cooperation 88; L6: Lishu 6. Different lowercase letters indicate significantly different among treatments at $P < 0.05$. The results are the averages of the second and fourth crops.

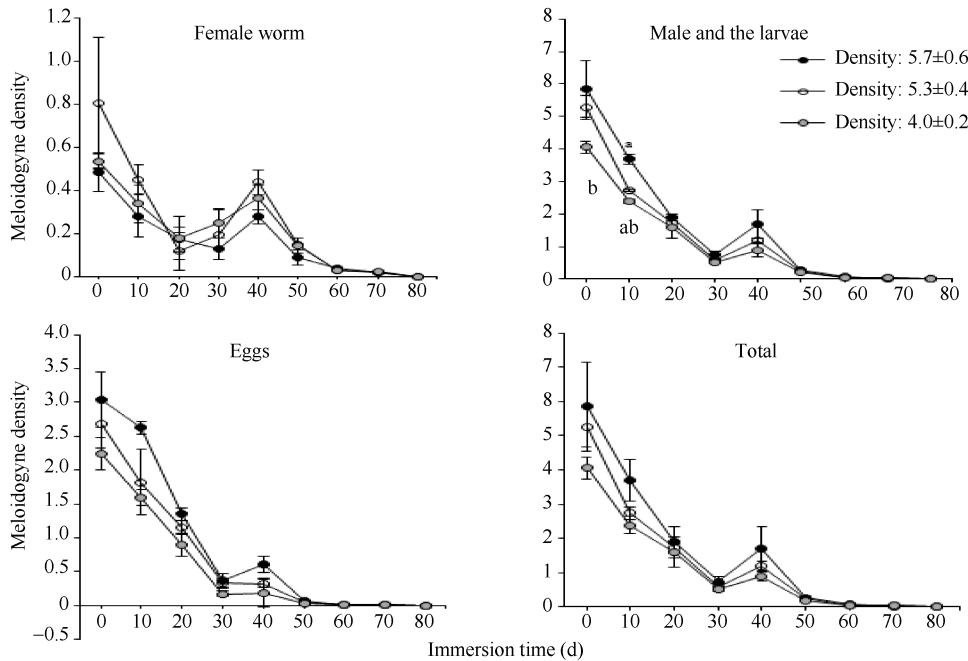


图 2 土壤中根结线虫密度随浸水时间的动态变化

Fig. 2 Dynamic variation of density of root-knot nematodes with immersion time in soil

Density 数字±数字: 根结线虫基础密度。

Density number ± number: the base density of root knot nematod.

呈现上升趋势, 40 d 时达到最高密度, 40 d 以后再度呈现下降趋势, 直至灭绝; 根结线虫雄虫与幼虫密度、虫卵密度和总密度的变化趋势大致相同, 从 0 d 以后呈现下降趋势, 至 30 d 时达到最低密度, 30 d 以后开始呈现上升趋势, 40 d 时达到最高密度, 40 d 以后再度呈现下降趋势, 直至灭绝, 密度上升时间均比雌虫密度上升时间晚 10 d。

3 讨论

通过抗线虫病种质资源的鉴定选育出抗/耐根结线虫病品种, 是目前防治根结线虫病经济有效的方式之一^[18-19]。温室盆栽接种鉴定较大田栽种鉴定而言, 具有容易控制发病条件, 能排除其他种或生理小种的根结线虫的干扰, 可快速得出鉴定结果的特点^[20], 因此本试验用温室盆栽的方式对 18 份马铃薯资源进行了抗性评价。18 份资源分别种植于含纯化线虫的土壤中, 未发现既对南方根结线虫免疫又对爪哇根结线虫免疫的品种(系), 对爪哇根结线虫抗性表现好于对南方根结线虫, 与王晓强等^[9]发现爪哇根结线虫为马铃薯块茎侵染的优势种群的研究结果相反, 主要是因为其选择的马铃薯品种只是单一品种, 且其是在田间复合侵染的情况下测定。大田内几乎是 2 种及以上种类线虫共存, 而连作地中根结线虫的群体结构更加复杂多样, 更加重了线虫对作物的危害程度^[8], 品种和复合侵染均可对试验结果造成影响。综合对 2 种线虫的抗性, 丽薯 6 号和 1002-1 表现较好。对多年连作马铃薯的土壤检测中, 不但检测到了大量南方根结线虫和爪哇根结线虫, 而且也检测到了少量花生根结线虫, 后续需要对花生根结线虫抗性进行评价, 而且对复合侵染的影响也需进一步的研究。

马铃薯植株生长需要根系从土壤中吸收大量的水分和养分, 根系被根结线虫侵染后会降低根系活力, 从而降低马铃薯的产量和品质。本试验结果表明根系侵染比薯块侵染严重, 块茎抗性优于根系。其主要原因可能是根系在土壤中存在时间比块茎长, 受侵染的时间比较长, 有些块茎未侵染就已经收获, 从而使得薯块只是被侵染了所结薯的其中一部分, 甚至有些植株只有根系侵染而未侵染薯块。

孔祥义等^[21]报道了用净水漫灌染病冬闲田 40~100 d 致使根结线虫窒息死亡。计路芬^[22]证实白萝卜根结线虫严重地块灌水 2 个月, 可有效减少线虫数量。根结线虫的生长繁殖周期受土壤温湿度、pH 值、透气性等的影响有所差异, 各种条件都适宜时完成一代只需要 17 d, 土壤湿度 40%~70%繁殖发育快, 土壤湿度过高且不透气时发病轻甚至不发病^[23-25]。本试验表明, 土壤浸水后根结线虫虫体密度呈下降趋势, 由于土壤浸水后土壤透气性严重下降, 土壤湿度高, 使根结线虫的生长周期达到了 30 d 左右。淹水后在根结线虫彻底消失之前, 虽然虫体活动和生长周期都受到影响, 虫体也逐渐减少, 但活雌虫仍会继续产卵, 活虫卵会孵化为幼虫, 活幼虫进而成长为成虫, 各种虫体密度会有波动, 只有淹水到 60 d 以后根结线虫才几近灭绝。因此淹

水时间要在 60 d 以上才能有效防治根结线虫。

水旱轮作是我国重要的环保绿色的作物种植制度, 对全国粮食生产尤其南方稻区的粮食安全具有重大影响^[26]。根结线虫不耐长时间淹水和缺氧^[27], 水旱轮作刚好满足这 2 个条件。试验中水旱轮作后根结线虫虫体消失, 马铃薯单株产量增加, 单株有效产量极显著高于马铃薯连作。水旱轮作对根结线虫的防治效果极好, 且不用杀线虫剂等化学农药, 是绿色环保的栽培模式。水旱轮作对马铃薯其他线虫病害是否也有同样的防治效果有待进一步研究。

References

- [1] 潘柱, 梁石林, 梁冰. 信宜冬种马铃薯的气候条件分析. 气象研究与应用, 2012, 33(S1): 188-189.
Pan Z, Liang S L, Liang B. Analysis of climate conditions of winter potato in Xinyi. *J Meteorol Res Appl*, 2012, 33(S1): 188-189 (in Chinese with English abstract).
- [2] 蒙美莲. 中国马铃薯栽培生理研究进展. 见: 中国作物学会马铃薯专业委员会主编. 中国马铃薯学术研讨会与第五届世界马铃薯大会论文集. 中国作物学会马铃薯专业委员会: 中国作物学会, 2004. p 1.
Meng M L. Research progress of potato cultivation physiology in China. In: Potato Professional Committee of Chinese Crop Society, eds. Symposium on Chinese Potato and Proceedings of the Fifth World Potato Congress. Potato Professional Committee of Chinese Crop Society: The Crop Science Society of China, 2004. p 1 (in Chinese).
- [3] 张绍升. 植物线虫病诊断与防治. 福州: 福建科学技术出版社, 1999. p 102.
Zhang S S. Diagnosis and Control of Plant Nematodes. Fuzhou: Fujian Science and Technology Press, 1999. p 102 (in Chinese).
- [4] 陈品三, 彭德良, 郑经武. 马铃薯繁峙根结线虫新种 (*Meloidogyne fanzhiensis* sp.) 之发现描述. 山西农业大学学报 (自然科学版), 1990, 10(1): 55-60.
Chen P S, Peng D L, Zheng J W. Description of the Discovery of a new species of potato nematodes (*Meloidogyne fanzhiensis* sp.). *J Shanxi Agric Univ* (Nat Sci Edn), 1990, 10(1): 55-60 (in Chinese with English abstract).
- [5] Garcia L E, Segura D M, Masuelli R W, Sanchezpuerta M V. Evaluating root-knot nematode infection in wild potatoes. *Nematropica*, 2014, 44: 31-36.
- [6] 张云美. 我国根结线虫属 (*Meloidogyne* Goeld, 1887) 一新种. 山东大学学报(理学版), 1983, (2): 88-95.
Zhang M Y. A new species of root knot nematodes (*Meloidogyne* Goeld, 1887) from China. *J Shandong Univ* (Nat Sci), 1983, (2): 88-95 (in Chinese with English abstract).
- [7] 杜宇, 丁元明, 寸东义, 曹云华, 周力兵, 刘忠善, 和捷. 输华马铃薯上哥伦比亚根结线虫风险分析. 植物保护, 2007, 33(4): 45-49.
Du Y, Ding Y M, Cun D Y, Cao Y H, Zhou L B, Liu Z S, He J. Risk analysis of Columbia root-knot nematode *Meloidogyne chitwoodii* potatoes in China. *Plant Prot*, 2007, 33(4): 45-49 (in Chinese with English abstract).
- [8] 毛彦芝, 李春杰, 胡岩峰, 华萃, 尤佳, 王鑫鹏, 刘喜才, 杨耿斌, 王从丽. 评价黑龙江省主栽马铃薯品种及重要育种材料对北方根结线虫的抗性. 作物学报, 2017, 43: 1864-1869.
Mao Y Z, Li C J, Hu Y F, Hua C, You J, Wang X P, Liu X C,

- Yang G B, Wang C L. Resistance evaluation of potato cultivars and germplasms to *Meloidogyne hapla* in Heilongjiang Province. *Acta Agron Sin*, 2017, 43: 1864–1869 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王晓强, 崔华栋, 谢勇, 董莹, 卫环宇, 王扬. 危害马铃薯块茎的根结线虫种类鉴定. 见: 中国植物病理学会病原线虫专业委员会主编. 第十二届全国植物线虫学术研讨会论文集. 中国植物病理学会病原线虫专业委员会: 中国植物病理学会, 2014. pp 105–110.
Wang X Q, Cui H D, Xie Y, Dong Y, Wei H Y, Wang Y. Species identification of root knot nematodes on potato tubers. In: Special Committee of Pathogenic Nematodes of Chinese society of Plant Pathology, eds. Proceedings of the 12th National Symposium on Plant Nematodes. Special Committee of pathogenic nematodes of Chinese society for Plant Pathology: Chinese Society for Plant Pathology, 2014. pp 105–110 (in Chinese).
- [10] 钟伟荣, 郑国组, 朱建军. 水旱轮作防治茄子青枯病. *上海蔬菜*, 2000, (1): 44.
Zhong W R, Zheng G Z, Zhu J J. Control of eggplant bacterial wilt by crop rotation. *Shanghai Vegetables*, 2000, (1): 44 (in Chinese).
- [11] 李泽森, 何卫蓉, 彭建波, 钟艳红, 蔡道辉, 黄增富, 向富勇, 杨顺华. 水旱轮作对龙山百合病虫害的控制效应. *现代园艺*, 2013, (18): 9–10.
Li Z S, He W R, Peng J B, Zhong Y H, Cai D H, Huang Z F, Xiang F Y, Yang S H. Effects of flood and drought rotation on control of Lily Disease, insect infestation and grass infestation in Longshan. *Modern Hortic*, 2013, (18): 9–10 (in Chinese).
- [12] 曾光辉, 王法格. 单季稻——大棚草莓水旱轮作栽培技术. *现代园艺*, 2010, (5): 30–31.
Zeng G H, Wang F G. Single cropping rice—cultivation techniques of greenhouses strawberry crop rotation. *Modern Hortic*, 2010, (5): 30–31 (in Chinese).
- [13] 王海霞, 殷俊, 凌须美, 丁玉祥, 何静. 水旱轮作对设施番茄生长影响的初探. *农业装备技术*, 2011, 37(4): 43–44.
Wang H X, Yan J, Ling X M, Ding Y X, He J. Study on the effect of crop rotation between flood and drought on tomato growth. *Agric Equip Technol*, 2011, 37(4): 43–44 (in Chinese).
- [14] 杨云峰, 王伟男, 王克安, 谭德云, 吕晓惠, 张宝贤, 孙建磊, 刘红光. 蓖麻粕防治番茄根结线虫病探讨. *农业科技通讯*, 2017, (1): 41–43.
Yang Y F, Wang W N, Wang K A, Tan D Y, Lyu X H, Zhang B X, Sun J L, Liu H G. Study on prevention and treatment of tomato root knot nematode by castor meal. *Agric Sci Technol Commun*, 2017, (1): 41–43 (in Chinese).
- [15] 烟草品种抗病性鉴定. 中华人民共和国烟草行业标准, YC/T41-1996. p 2.
Identification of Disease Resistance of Tobacco Varieties. Tobacco Industry Standard of the People's Republic of China, YC/T41-1996. p 2 (in Chinese).
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000. pp 22–24.
Bao S D. Agrochemical Analysis of Soil. Beijing: China Agriculture Press, 2000. pp 22–24 (in Chinese).
- [17] 刘维志. 植物病原线虫学. 北京: 中国农业出版社, 2000. p 379.
Liu W Z. Plant Pathogen Nematology. Beijing: China Agriculture Press, 2000. p 379 (in Chinese).
- [18] 吴杨, 周会, 潘大仁. 甘蔗线虫病抗性基因的 PCR 检测研究. *作物学报*, 2006, 32: 939–942.
Wu Y, Zhou H, Pan D R. PCR detection of nematode resistant gene in Sugarcane. *Acta Agron Sin*, 2006, 32: 939–942 (in Chinese with English abstract).
- [19] 李梅云, 焦芳婵, 曾建敏, 王丙武, 宋中邦, 吴兴富, 李永平, 高玉龙, 李文正. 不同类型烟草新品种(系)对南方根结线虫的抗性鉴定. *烟草科技*, 2017, 50(11): 22–26.
Li M Y, Jiao F C, Zeng J M, Wang B W, Song Z B, Wu X F, Li Y P, Gao Y L, Li W Z. Characterization of *Meloidogyne incognita* resistance in new tobacco varieties (lines). *Tob Sci Technol*, 2017, 50(11): 22–26 (in Chinese with English abstract).
- [20] 席先梅, 白全江, 李玉民. 不同番茄品种抗根结线虫评价. *北方农业学报*, 2016, 44(4): 50–52.
Xi X M, Bai Q J, Li Y M. Evaluation of tomato resistance to root knot nematodes. *J North Agric*, 2016, 44(4): 50–52 (in Chinese with English abstract).
- [21] 孔祥义, 陈绵才. 根结线虫病防治研究进展. *热带农业科学*, 2006, 26(2): 83–88.
Kong X Y, Chen M C. A review of control of root knot nematodes disease. *Chin J Trop Agric*, 2006, 26(2): 83–88 (in Chinese with English abstract).
- [22] 计路芬. 白萝卜根结线虫的防治办法. *农业开发与装备*, 2019, (5): 219.
Ji L F. Control method of root knot nematode of white radish. *Agric Develop Equip*, 2019, (5): 219 (in Chinese).
- [23] 高忠奎, 蒋菁, 唐秀梅, 刘菁, 钟瑞春, 韩柱强, 熊发前, 黄志鹏, 吴海宁, 李战, 贺梁琼, 唐荣华. 水旱轮作条件下花生品种筛选及土壤特性变化分析. *南方农业学报*, 2018, 49: 2403–2409.
Gao Z K, Jiang J, Tang X M, Liu J, Zhong R C, Han Z Q, Xiong F Q, Huang Z P, Wu H N, Li Z, He L Q, Tang R H. Peanut varieties selection and soil properties changes under paddy-upland rotation. *J Southern Agric*, 2018, 49: 2403–2409 (in Chinese with English abstract).
- [24] 刘海霞. 大棚番茄根结线虫病的发病原因及防治措施. *植物医生*, 2011, 24(3): 10–11.
Liu H X. The causes and control measures of tomato root knot nematode in greenhouse. *Plant Doctor*, 2011, 24(3): 10–11 (in Chinese).
- [25] 张传功, 张吉民, 王璐, 刘清瑞. 番茄根结线虫病的发生特点与综合防治. *种业导刊*, 2014, (11): 20–21.
Zhang C G, Zhang J M, Wang L, Liu Q R. Occurrence characteristics and comprehensive control of tomato root knot nematode. *J Seed Ind Guide*, 2014, (11): 20–21 (in Chinese).
- [26] 肖克, 唐静, 李继福, 邹家龙, 朱建强. 长期水稻-冬油菜轮作模式下钾肥的适宜用量. *作物学报*, 2017, 43: 1226–1233.
Xiao K, Tang J, Li J F, Zou J L, Zhu J Q. Optimum amount of potassium fertilizer applied under continuous rice-rapeseed rotation. *Acta Agron Sin*, 2017, 43: 1226–1233 (in Chinese with English abstract).
- [27] 刘维志. 植物病原线虫学. 北京: 中国农业出版社, 2000. pp 93–96.
Liu W Z. Plant Pathogen Nematology. Beijing: China Agriculture Press, 2000. pp 93–96 (in Chinese).