

DOI: 10.5846/stxb201212191822

洪波, 张锋, 李英梅, 张淑莲, 陈志杰, 高峰, 梁银丽. 基于 GIS 的南方根结线虫在陕西省越冬区划分析. 生态学报, 2014, 34(16): 4603-4611.

Hong B, Zhang F, Li Y M, Zhang S L, Chen Z J, Gao F, Liang Y L. GIS-based regional classification for overwintering of southern root-knot nematode in Shaanxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16): 4603-4611.

基于 GIS 的南方根结线虫在陕西省越冬区划分析

洪 波¹, 张 锋^{1,*}, 李英梅¹, 张淑莲¹, 陈志杰¹, 高 峰², 梁银丽³

(1. 陕西省动物研究所, 西安 710032; 2. 陕西省经济作物气象服务台, 西安 710014;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 土壤温度是影响南方根结线虫 (*Meloidogyne incognita*) 越冬的重要因子。通过自动温度记录仪, 从 2009—2012 年的每年冬季 (11 月至次年 3 月), 对陕西省延安、商洛、杨凌和大荔 4 个生态区的气温和不同种植模式下的土壤温度进行数据采集和模拟统计, 建立土温与气温关系的数学模型, 根据模型将陕西省 96 个气象站点的气温数据转换为土温数据。利用 GIS 的克里金 (Kriging) 空间插值功能, 结合实验室测得的南方根结线虫存活最低温度, 生成南方根结线虫在拱棚、地膜覆盖和露地 3 种植条件下的越冬区划图并进行分析。研究表明, (1) 0℃ 以下低温对南方根结线虫有明显抑制作用, 南方根结线虫在低于 -1℃ 低温持续 32 d 以上时无法越冬。(2) 土壤温度和气温呈线性相关关系, 4 种植条件下土壤温度 (Y) 与气温 (X) 的关系方程分别为露地: $Y = 0.8125X + 1.9325$, $R = 0.934$; 地膜覆盖: $Y = 0.7943X + 1.8563$, $R = 0.918$; 拱棚: $Y = 0.7046X + 6.2685$, $R = 0.907$; 温室: $Y = 0.302X + 14.519$, $R = 0.597$ 。(3) 最冷月土壤均温低于 -1℃ 的概率在 70%—80% 的区域可以认为是南方根结线虫的越冬界线, 越冬界线在露地、地膜覆盖和拱棚条件下依次北移, 在温室条件下可在全省范围内越冬。

关键词: GIS; 南方根结线虫; 越冬; 土壤温度; 克里金插值

GIS-based regional classification for overwintering of southern root-knot nematode in Shaanxi Province

HONG Bo¹, ZHANG Feng^{1,*}, LI Yingmei¹, ZHANG Shulian¹, CHEN Zhijie¹, GAO Feng², LIANG Yinli³

1 Shaanxi Institute of Zoology, Xi'an 710032, China

2 Shaanxi Meteorological Service Station for Economic Crops, Xi'an 710014, China

3 Institute of Soil Water and Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, 712100, China

Abstract: Southern root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*, is an important pathogen of vegetables, and was first observed in South China. With the development of indoor agricultural facilities, it was found for the first time in Shaanxi in 2000, and now is widely distributed through different ecological vegetable growing zones in Northern and Southern Shaanxi, and the Guanzhong area. *M. incognita* has become a devastating soil-borne disease, causing great economic losses in vegetable production. It survives at soil depths of 5 to 15 cm, and overwinters in the soil as eggs or second instar larvae. Soil temperature is an important factor affecting its overwintering, and this is dependent on climate and plant conditions. Air and soil temperature data for open fields can be obtained from meteorological stations, but soil temperature data for indoor agricultural facilities is not available, and thus mathematical models need to be established to simulate soil temperatures under different cultivation conditions. Each winter (November to the following March) from 2009 to 2012, air and soil temperatures in four agricultural systems in four ecological regions (Yanan, Shangluo, Yangling, and Dali) in Shaanxi

基金项目: 国家“十二五”农村领域科技计划课题 (2011BAD31B00); 国家科技支撑计划课题 (2014BAD14B006); 陕西省科学院青年人才基金项目 (2011K-16); 陕西省农业攻关项目 (2014K01-30-01)

收稿日期: 2012-12-19; **网络出版日期:** 2014-03-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 545141529@qq.com

Province were automatically recorded. Mathematical models relating air temperature to soil temperature were then developed, and air temperatures from 96 meteorological stations were converted to soil temperatures. Based on the lowest survival temperature of *M. incognita* measured in the laboratory, a regional map of nematode overwintering was developed, and analyzed for different planting conditions using the Kriging Interpolation of GIS. We found the following: (1) Overwintering of *M. incognita* was significantly restricted below 0°C. If the temperature was less than -1°C over 32 days, the nematode was not able to overwinter. (2) The relationship between soil temperature and air temperature is linear. We used the following relationship equations between soil temperature (Y) and air temperature (X) in four planting conditions: $Y=0.8125X+1.9325$, $R=0.934$ (open field); $Y=0.7943X+1.8563$, $R=0.918$ (mulched field); $Y=0.7046X+6.2685$, $R=0.907$ (plastic tunnel house); $Y=0.302X+14.519$, $R=0.597$ (greenhouse). (3) The areas where P values are between 70% and 80% (probability of the average soil temperature of the coldest month being less than -1°C) could be considered the overwintering boundary line for *M. incognita*. The order of different planting conditions from south to north is: open field, mulched field, and plastic tunnel house. In open fields, the north boundary is through Linyou-Yongshou-Chunhua-Yaozhou-Tongchuan-Baishui-Chengcheng-Hancheng; in mulched fields, the boundary is through Binxian-Xunyi-Yijun-Luochuan-Huanglong-Yichuan; and in plastic tunnel houses is Zhidan-Ganquan-Ansai-Yanan-Yanchuan-Qingjian. However, in greenhouse conditions the nematode can overwinter throughout the whole province. Using GIS and geostatistics methods, we have analyzed the northern boundaries of *M. incognita* overwintering sites and provided regional classification for open fields, mulched fields, plastic tunnel houses, and greenhouses. Our work makes clear the response of the nematode to low temperature stress, so that rapid and effective monitoring as well as theoretical and technical support for prevention and control can be developed in Shaanxi Province.

Key Words: GIS; *Meloidogyne incognita*; overwintering; soil temperature; Kriging Interpolation

南方根结线虫 (*Meloidogyne incognita*) 是蔬菜上一种重要的病原线虫,最早发生于我国南方各省,随着设施农业的发展,目前在北京、辽宁、山东、河北、黑龙江、山西等北方省区的设施蔬菜产区均有分布^[1-3]。陕西省于 2000 年首次发现,现已广泛分布于陕北、陕南及关中不同蔬菜生态区,严重时会造成产量损失高达 50% 以上,已成为设施蔬菜生产上的一种毁灭性土传病害^[4]。南方根结线虫主要存活于 5—15 cm 的土层深处,以卵或 2 龄幼虫在土壤中越冬^[5]。因此,对于其越冬区划的研究,有助于我们进一步研究南方根结线虫越冬区的气候因子与病害流行的关系。对于南方根结线虫的耐寒性及越冬区划问题,国外已有相关的研究和报道^[6-12],而国内在这方面报道相对较少^[13-14],南方根结线虫在陕西不同蔬菜种植区的越冬界线目前尚不明确。

设施农业的兴起使蔬菜根结线虫病害的发生日益严重,但温室大棚的可控条件使得温湿度研究更具有意义。土壤温度是影响南方根结线虫在土壤中越冬的重要因素^[15]。土壤温度主要决定于气候状况和种植模式,由于气象站点发布的数据仅包括气

温和露地条件下的土壤温度,无法包括温室、拱棚等设施环境下根结线虫生存所需的土壤温度数据,因此,需要通过数学建模方法模拟出各种种植条件下的土壤温度数据。本研究利用地理信息系统 (GIS) 和地统计学技术,对南方根结线虫在陕西省温室、拱棚、地膜覆盖和露地 4 种植条件下的越冬北界和越冬区划进行分析,目的在于研究南方根结线虫对低温胁迫的响应,对南方根结线虫在全省的为害情况进行快速有效的监控,为陕西省蔬菜根结线虫的防治体系提供技术支撑和理论依据。

1 数据与方法

1.1 南方根结线虫越冬的区划指标选择

影响南方根结线虫越冬的主要因素有寄主和环境因子 2 个方面,而在环境因子中温度又是最为关键的因子。从每年的 12 月到次年 1 月为陕西省全年的温度最低时期,也是根结线虫能否越冬的关键时期,因此将这 2 个月中最冷月的平均土壤温度作为越冬区划的温度指标,找出南方根结线虫存活 30 d 左右时的致死温度,作为该虫的越冬界线温

度 T_0 [16]。

1.2 试验数据及来源

1.2.1 矢量图数据

本研究采用的矢量图数据包括陕西省 1:25 万陕西省县(市)级行政区矢量地图,以及陕西省 96 个县(市)的气象站点经纬度坐标(来源于国家基础地理信息中心, <http://nfgis.nsd.gov.cn>),利用地理信息软件 ArcGIS9.2 转化为矢量点导入地图,与行政区矢量图叠加(图 1)。

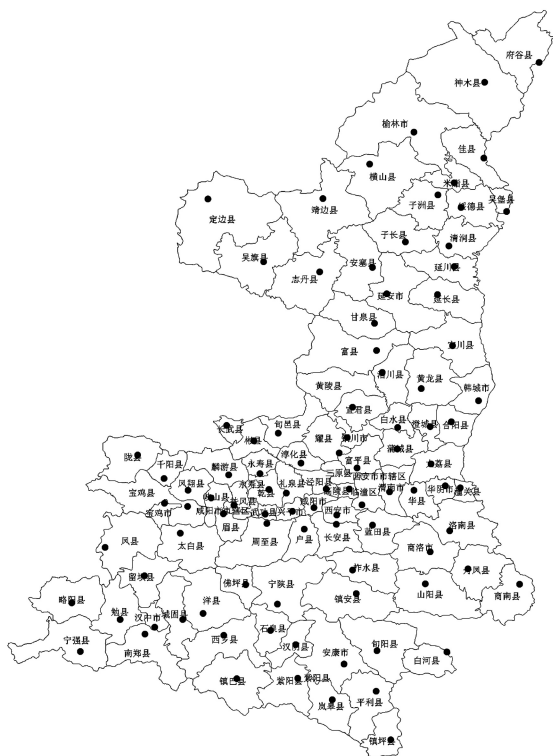


图 1 陕西省行政区和 96 个气象站点分布示意图

Fig.1 Distribution map of Shaanxi administrative area and 96 meteorological stations

1.2.2 气温及土温数据

从陕西省经济作物气象服务台收集陕西省 96 个县(市)的气象站点 2000—2011 年的日平均气温数据,经过整理建立相应的数据库。

利用便携式自动温度记录仪 (TR-51S/TR-52S),在陕西延安、商洛、杨凌和渭南大荔(分别代表陕北、陕南、关中中西部和关中东部不同地形区)4 个设施蔬菜生态区进行温室(普通日光温室,尺寸约 50 m×10 m×3 m)、拱棚(塑料大棚,尺寸约 30 m×6 m×2.5 m)、地膜(地膜覆盖)和露地种植条件下距地面 0—20 cm 深度土壤温度及气温的监测采集,采

集时间为 2009—2012 年,从每年 11 月初到次年 3 月底,温度数据每隔 1 h 更新 1 次,每天记录 24 个数据,自动存储于温度记录仪芯片中,数据处理时以 excel 数据表形式导出。

1.3 区划方法

由于气温和土壤温度有较强的线性关系 [17-19],通过数学建模方法,由 2000—2011 年陕西省 96 个站点各旬平均气温计算出各站点各年度最冷月平均土壤温度 T_N ,统计各站点 11a 间 T_N 低于南方根结线虫的越冬界线温度 T_0 的概率,利用地统计法的变异函数分析空间相关性 [20],若具有中等或高等空间相关性,则选择合适的 Kriging 插值法生成南方根结线虫在陕西省的越冬区划图。

2 数据处理

2.1 南方根结线虫致死低温及所需时间

供试作物为易感根结线虫病的黄瓜品种,供试土壤取自陕西省科学院大荔基地,为种植温室黄瓜的垆土土壤,确保土壤无根结线虫病危害。使用发病较重的黄瓜病根,在其根结上挑取根结线虫卵块。将卵悬浮液置于培养皿中,25℃下纯化培养使卵孵化。收集 2 龄幼虫,将幼虫悬浮液调至 500 条幼虫/mL 备用。用电子天平称取消毒土壤 50 g,置于培养皿中,同时加入线虫悬浮液 4 mL,加无菌水并确定含水量,称总重量后用封口膜密封。

在实验室低温培养箱 (KRC-250CA) 设置 7 个温度梯度 (0—11℃),相对湿度保持在 30% 左右,每个处理组合 3 次重复,将南方根结线虫二龄幼虫接入土壤后进行低温处理并在人工气候箱内模拟越冬试验,气候箱内温湿度和光照为最适于南方根结线虫发育条件 [13] (温度 15—25℃,土壤含水量 15%—25%,光照 14h:10h)。待黄瓜幼苗发育 30 d 后,将苗从土中取出清洗根部,统计根结数量,并计算受害株率和根结指数。当植株的根结指数为 0 时线虫无侵染,认为线虫已经死亡 [21-22]。找出不同温度处理条件下根结指数为 0 时的处理天数即为南方根结线虫的低温致死时间,试验结果由表 1 所示。

由表 1 可知,随着温度的降低,线虫达到致死积温的时间依次缩短,表明温度与致死时间呈非线性关系 [23-25]。根据各处理温度根结线虫根结指数为 0 时的处理时间,拟合出温度 (x) 和低温致死时间 (y)

的关系模型曲线(图2): $y = 1457.8 \times e^{0.4647x}$, $R^2 = 0.989$,说明所建立的模型拟合度较好。因此,当温度在-1℃持续32 d时,南方根结线虫无法存活;而温度在-3℃持续16 d时,根结指数为0,根结线虫死亡不再造成危害。根据温度和低温致死时间的关

系模型推算可知,在0℃时需要处理时间在61 d(1458 h)时才能达到死亡^[26-27]。由此可知,南方根结线虫在-1℃土壤温度条件下持续30 d左右将无法越冬,其越冬界线温度 T_0 为-1℃。

表 1 不同处理时间和温度下南方根结线虫的根结指数

温度/℃ Temperature	不同处理天数 Days/d										
	0.5	1	2	4	8	12	16	20	24	28	32
0	86.7	75	52	45	36	30	32	25	28	24	22.9
-1	73	64	52	32	23.3	25	13.3	16	12	8	0
-3	53.3	33.3	48.6	24	16	20	0	0	0	0	0
-5	34.3	22.5	24	14.3	0	0	0	0	0	0	0
-7	12	3.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-9	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

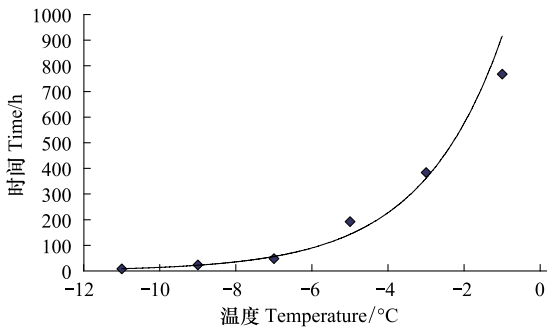


图 2 南方根结线虫处理温度与低温致死时间的关系

Fig.2 The relationship of treatment temperature and lethal time of *M. incognita*

2.2 土温与气温关系模型的建立

将1.1.2中所述4个生态区记录的温度数据进行整理,计算出冬季(11月15日—3月15日)日均气温,通过气象站点的温度数据校正后,和相应的露

地、地膜、拱棚和温室4种植条件下的日均土壤温度建立序列,分析其回归关系,模拟出数学模型,回归关系曲线和方程分别由图3和表2所示。

利用土温与气温关系的数学模型和2012年1—3月的日均气温数据,预测出各种种植条件下的日均土壤温度值,并与实测值进行比较(表2),除温室条件下相对误差为16.5%外,其它3种植方式的相对误差都在10%以下,表明模型预测效果较好,能够用于模拟陕西地区多年日均土壤温度。

由表2可知,露地、地膜和拱棚3种植条件下,土温和气温关系呈线性极显著相关, R 值都达到了0.9以上;由于温室内温度受人为因素影响较大,因此土壤温度与气温的线性关系相对于其它3种植条件较弱, R 值较低,仅为0.597,但也呈线性显著相关。

表 2 土温与气温的关系方程及与实测值对比分析

种植条件 Planting condition	土温(Y)与气温(X)关系方程 Equations between soil temperature (Y) and air temperature(X)	与实测值绝对 误差/℃ Absolute error	与实测值相对误差/% Relative error
露地 Open field	$Y=0.8125X+1.9325, R=0.934^{**}$	8.9×10^{-5}	3.7
地膜 Mulched field	$Y=0.7943X+1.8563, R=0.9184^{**}$	7.1×10^{-5}	4.2
拱棚 Plastic tunnel house	$Y=0.7046X+6.2685, R=0.9074^{**}$	5.4×10^{-5}	8.4
温室 Greenhouse	$Y=0.302X+14.519, R=0.597^{*}$	2.3×10^{-4}	16.5

* * 表示相关性在0.01水平上显著,*表示相关性在0.05水平上显著

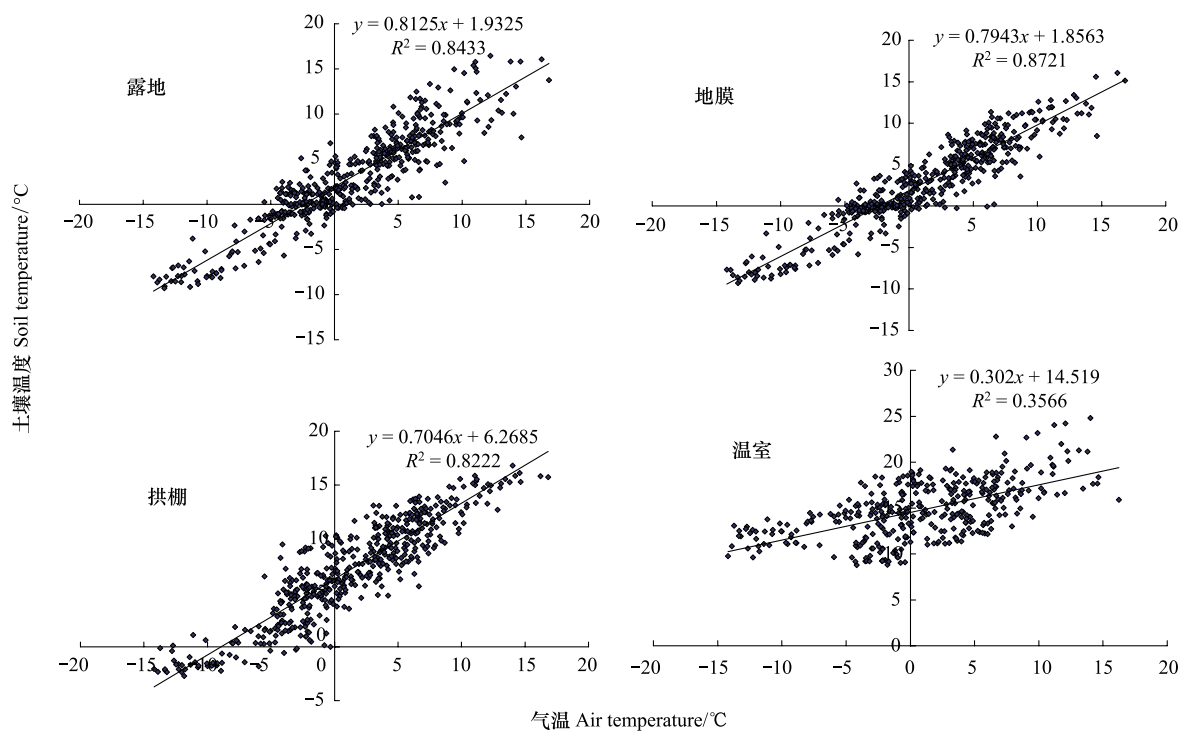


图3 陕西省不同种植条件下土温与气温的回归关系曲线

Fig.3 Regression curves between soil temperature and temperature under different planting conditions in Shaanxi

2.3 陕西省各年度最冷月平均土壤温度的计算

将 96 个气象站点 2000—2011 年的冬季日均气温数据进行整理,根据土温与气温关系模型,计算出相应的日均土壤温度数据,再转化为各年度最冷月的平均土壤温度 T_N 。通过计算可知,温室种植条件下,环境密闭保温条件良好,全省最北部的府谷县和神木县各年最冷月平均土壤温度都在 12℃ 以上,远远高于-1℃,并且能够满足黄瓜、番茄等喜温作物

的生长要求,因此南方根结线虫在陕西省各地的日光温室都可顺利越冬。其它 3 种植植条件下,统计各站点 11a 间 $T_N < T_0$ (-1℃) 的概率,并利用变异函数分析温度概率值的空间相关性。变异函数的计算公式^[20,28]:

$$r_{(h)} = \frac{1}{2N_{(h)}} \sum_{i=1}^{N_{(h)}} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

变异函数模型各参数如表 3 所示。

表 3 不同种植条件下变异函数模型参数表

Table 3 The parameters of variogram model under different planting conditions

种植条件 Plant condition	模型 Model	块金值 Nugget	基台值 Sill	块金值/基台值/% Nugget/sill	变程 Range	决定系数 r^2
露地 Open field	高斯型 Gaussian	70	3250	2.2	5.47	0.968
地膜 Mulched field	高斯型 Gaussian	80	3270	2.4	5.51	0.945
拱棚 Plastic tunnel house	高斯型 Gaussian	10	3112	0.3	7.42	0.944

从表 3 可以看出,3 种植植条件下模型的决定系数都在 0.9 以上,表明模型拟合程度较好,且块金值/基台值都小于 25%,表明温度概率值有很强的空间相关性,可以进行 Kriging 空间插值^[28-30]。

3 结果与分析

根据 2.3 确定的参数指标选择高斯 (Gaussian)

模型,利用 ArcGIS 的普通 Kriging 法进行插值^[31],结合越冬界线温度 T_0 (-1℃) 的多年平均等温线,生成露地、地膜和拱棚 3 种植植条件下的南方根结线虫越冬区划图 (图 4)。

(1) 露地条件下,南方根结线虫最冷月土壤均温低于-1℃ 的概率图见图 4,其中概率值为 70%—80% 的区域与-1℃ 的年均等温线最接近,这一区域

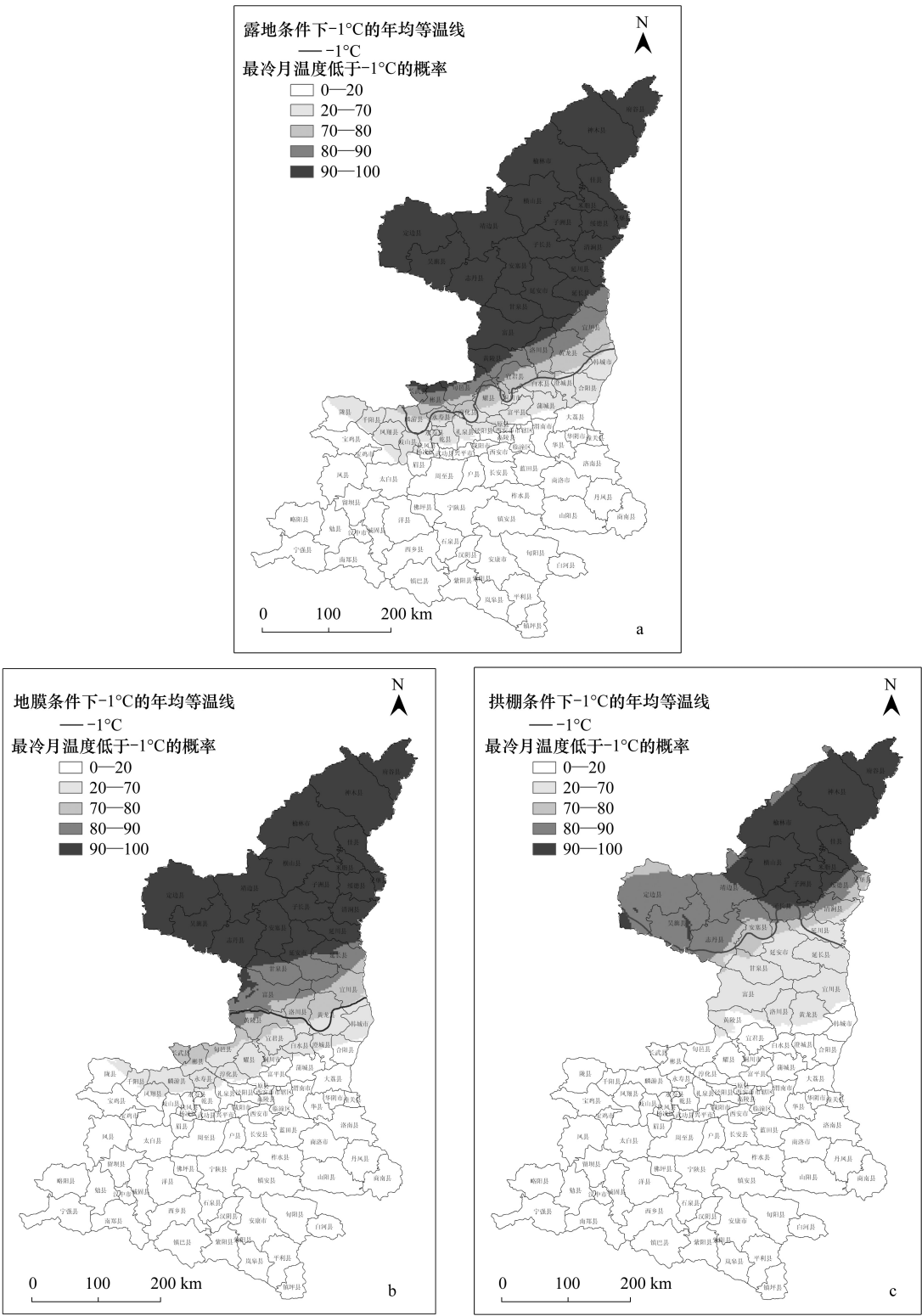


图4 不同种植条件下南方根结线虫越冬区划图

Fig.4 Overwintering regional classification map of *M. incognita* in different plant conditions

的南线大致经过麟游县—永寿县—淳化县—耀县—铜川市—白水县—澄城县—韩城县,可以认为是南方根结线虫在露地条件下的越冬界线,该线以西和

以北的地区温度偏低,不适宜南方根结线虫越冬。

(2)地膜条件下最冷月土壤均温低于-1℃的概率图见图4,其中概率值为70%—80%的区域与

-1℃的年均等温线最接近,这一区域的南线大致经过彬县—旬邑县—宜君县—洛川县—黄龙县—宜川县,可以认为是南方根结线虫在地膜条件下的越冬界线,该线以西和以北的地区不适宜南方根结线虫越冬。

(3)拱棚条件下最冷月土壤均温低于-1℃的概率图见图4,其中概率值为70%—80%的区域与-1℃的年均等温线最接近,这一区域的南线大致经过志丹县—甘泉县—安塞县—延安市—延川县—清涧县,可以认为是南方根结线虫在拱棚条件下的越冬界线,在这条界线以北的地区不适宜南方根结线虫越冬。

综上可知,南方根结线虫的越冬界线在露地、地膜和拱棚种植条件下依次北移,而在温室条件下可在全省范围内越冬。露地条件下南方根结线虫的越冬界线处于关中平原北部,此界线以东以南地势较低(海拔800 m以下)的关中平原,以及陕南的汉中、安康和商洛地区,冬季月均土壤温度都在0℃以上,适宜南方根结线虫越冬;地膜条件下的越冬界线相对于露地略有北移,处于渭北高原南缘,此区域海拔800—1200 m,冬季月均土壤温度低于关中平原1—2℃;拱棚条件下的越冬界线横穿延安地区5县市(除宜君县),位于陕北黄土高原区,冬季月均土壤温度低于关中平原4—5℃,此界线以北地区南方根结线虫能够越冬的概率较低。

4 讨论

本研究利用GIS技术对南方根结线虫在陕西省的越冬进行了气候区划,是基于多年气象数据,根据土温与气温关系模型并利用地统计学的空间插值法,推算出全省大尺度范围下的土壤温度。陕西省地势南北高,中间低,由北向南横跨黄土高原、关中平原和秦巴山地3大地貌,按照不同生态功能分为长城沿线风沙草原生态区、黄土高原农牧生态区、渭河谷地农业生态区、秦巴山地落叶阔叶和常绿阔叶混交林生态区4个生态区^[32],因此本研究选取延安、杨凌、大荔和商洛4个采样点分别能够代表各个生态区(长城沿线风沙草原生态区不适于种植蔬菜,杨凌和大荔分别代表渭河谷地的中西部和东部)的自然环境、气候及农业特征,用于全省范围的分析预测。这种方法更精确完成了由已知点到未知点的估

计,在地图上表现为由点到面的转化,相对于以前的研究方法更加科学、方便与合理^[16]。

研究证明了南方根结线虫在-1℃土壤温度条件下持续32 d将无法越冬,并推导出该虫在0℃持续低温条件下61 d时才能达到死亡,这与Sayre的研究结果较为接近,研究表明南方根结线虫加拿大安大略省西南部地区0℃土壤中持续45—90 d时将无法越冬^[8]。但结合实地调查情况来看,全省冬季土壤温度在0℃的地区已经发现线虫顺利越冬,且由于0℃持续时间长,预测精确度低,误差较大,而选用最冷月平均温度更为直接和准确,因此确定-1℃为越冬界线温度。Ploegde等的研究表明,南方根结线虫在土壤中的发育起点温度是10.1℃^[7],远高于越冬界线温度-1℃。在土壤温度低于10.1℃时,南方根结线虫虽不进行生长繁殖,但仍可存活于土壤或植物病残体内顺利越冬,在第2年土壤温度升高至10.1℃时重新开始发育。根据南方根结线虫的全省采样调查数据可知,该虫已在渭南大荔县和西安等地的露地条件下顺利越冬,在榆林神木县、绥德县的温室条件下也能够越冬,而在绥德县以北地区的拱棚中没有发现能够越冬的南方根结线虫^[33],且4个采样点中1月土壤均温低于-1℃的地区均未发现南方根结线虫越冬,说明本研究结果与已知调查点的实际分布情况比较一致,也说明在大田条件下卵和二龄幼虫的耐寒性没有显著差异(室内条件下南方根结线虫卵的耐寒性略强于2龄幼虫^[13])。

本研究从温度条件明确了陕西省不同种植模式下南方根结线虫的越冬区划,可以为制定不同越冬区治理方案提供依据,也能够根据实际条件因地制宜在不同种植方式下开展不同防治措施。陕南秦巴山地及关中平原地区南方根结线虫可在各种种植条件下越冬,这些地区温室条件下光热条件较好,可在夏季进行温室土壤高温处理,能够对南方线虫发生起到一定的抑制作用^[4];而陕北洛川、黄龙、宜川各县及其以北只能在拱棚或温室条件下越冬的地区,可在作物休闲期时撤掉棚膜,使南方根结线虫由于土壤温度低和缺乏寄主无法越冬,从而降低土壤中的线虫基数,这些非化学防治方法对于蔬菜生态区的作物生产都具有指导意义。本研究仅考虑了温度因素对南方根结线虫越冬的影响,实际条件下,土壤湿

度、土壤类型、耕作制度、有无寄主等各方面因素对南方根结线虫的越冬均有不同程度的影响,有关这一方面有待进一步研究。

致谢:陕西省经济作物气象服务台高峰工程师提供有关气象资料,特此致谢。

References:

- [1] Sun Y D, Wang X J. Occurrence characteristics and comprehensive control of Root-knot Nematode in vegetable field. *China Vegetables*, 1996, (6): 36-37.
- [2] Peng D L. Integrated control of vegetable pests (10): Occurrence and control of vegetable nematode. *China Vegetables*, 1998, (4): 57-58.
- [3] Zhao L, Duan Y X, Bai C M, Chen L J, Zhu X F, Sun X M. Identification and distribution of root-knot nematode in Liaoning province. *Hubei Agricultural Sciences*, 2010, 49(4): 865-868.
- [4] Chen Z J, Zhang F, Liang Y L, Zhang E S, Xu F L, Du S N, Wang Q. Epidemic factors and control countermeasures of root-knot nematodes in install vegetables of Shaanxi. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2004, 14(3): 32-37.
- [5] Liao Y H, Chen X W. Studies on the occurrence of vegetable Root knot Nematode. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 1996, 18(1): 101-105.
- [6] Tsai B Y. Effect of temperature on the survival of *Meloidogyne incognita*. *Plant Pathology Bulletin*, 2008, 17(3): 203-208.
- [7] Ploeg A T, Maris P C. Effects of temperature on the duration of the life cycle of a *Meloidogyne incognita* population. *Nematology*, 1999, 1(4): 389-393.
- [8] Sayre R M. Winter survival of root-knot nematodes in Southwestern Ontario. *Canadian Journal of Plant Science*, 1963, 43(3): 361-364.
- [9] Sayre R M. Cold-hardiness of nematodes I. Effects of rapid freezing on the eggs and larvae of *Meloidogyne incognita* and *M. hapla*. *Nematologica*, 1964, 10(1): 168-179.
- [10] Johnson P W, Potter J W. Winter survival of Root-knot Nematodes (*Meloidogyne incognita* and *M. Hapla*) under selected host crops in Southern Ontario. *Canadian Journal of Plant Science*, 1980, 60(1): 203-207.
- [11] Barker K R, Nusbaum C J, Nelson L A. Effects of storage temperature and extraction procedure on recovery of plant-parasitic nematodes from field soils. *Journal of Nematology*, 1969, 1(3): 240-247.
- [12] Hogger C H, Johnson A W, Estey R H. Failure of *Meloidogyne incognita* to overwinter in Quebec. *Canadian Journal of Plant Science*, 1979, 59(1): 271-273.
- [13] Chen L J, Wei F, Duan Y X, Bai C M, Huo J X, Zhu X F. Effects of temperature and moisture on egg hatching and the second instars of *Meloidogyne incognita*. *Plant Protection*, 2009, 35(2): 48-52.
- [14] Chen L J, Wei F, Chen J S, Duan Y X. Effects of temperature and humidity on the infectivity of *Meloidogyne incognita*. *Hubei Agricultural Sciences*, 2009, 48(6): 1375-1377.
- [15] Liu W Z. *Plant Nematology*. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [16] Shi S D. Climate-Based Regional Classification for Oversummering and Overwintering of *Puccinia striiformis* and Spatio-Temporal Dynamic Analysis in China with GIS [D]. Beijing: China Agriculture University, 2004.
- [17] Zhang Z H, Shi X Z, Yu D S, Wang H J, Zhao Y C, Sun W X, Huang B R. Seasonal and regional variations of soil temperature in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2): 227-234.
- [18] Zhang Z H, Shi X Z, Yu D S, Wang H J, Zhao Y C, Sun W X, Huang B R. Spatial prediction of soil temperature in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 1-8.
- [19] Jiang H F, Liao S H, Ye E K J, A P E. Statistical analysis on relationship between soil surface temperature and air temperature. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2004, 25(3): 1-4.
- [20] Wang Z Q. *Geostatistics and Its Application in Ecology*. Beijing: Science Press, 1999.
- [21] Santmeyer P H. A comparison of the thermal death time of two dissimilar species of nematodes: *Panagrellus redivivus* (Linn, 1767) Goodey 1945, and *Meloidogyne incognita* var. The Helminthological Society of Washington, 1955, 22(1): 16-21.
- [22] Chen Z J, Zhang S L, Zhang F, Wang Q, Yan P. Control effects of different temperature on the cucumber root knot nematodes disease in solar greenhouse. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2008, 17(4): 177-180.
- [23] Jing X H, Kang L. Overview and evaluation of research methodology for insect cold hardiness. *Entomological Knowledge*, 2004, 41(1): 7-10.
- [24] Wang R S, Lan Z X, Ding Y Q. Studies on Mathematical models of the relationship between insect development and temperature. *Acta Ecologica Sinica*, 1982, 2(1): 47-56.
- [25] Dai S M, Chen X Y, Xiao Q M, Xie B Y. Research progress in Nematode cold tolerance. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 26(11): 3885-3890.
- [26] Wang L. The Study on instant lethal temperature of Pine Wood Nematode. *Anhui Forestry Science and Technology*, 2006, (1): 8-10.
- [27] Zhang J P, Cai X. Temperature's biological effect to Pine Wood Nematode. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2007, 28(5): 69-72.
- [28] Guo X D, Fu B J, Chen L D, Ma K M, Li J R. The spatio-temporal variability of soil nutrients in Zunhua plain of Hebei province: Semivariogram and kriging analysis. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 555-566.

- [29] Lei N Z, Jiang J G, Huang D P. Spatial variance of total nitrogen and organic matter of soil in Hangbu river watershed. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2008, 47(2): 300-304.
- [30] Shi S D, Ma Z H, Wang H G, Zhao Z H, Jiang Y Y. Climate-based regional classification for overwintering of *Puccinia striiformis* in China with GIS and geostatistics. Acta Phytophylacica Sinica, 2005, 32(1): 29-32.
- [31] Tang G A, Yang X. ArcGIS Spatial Analysis Experiments. Beijing: Science Press, 2006.
- [32] Ecological Function Zoning in Shaanxi Province (2004-11-17) [2013-02-18]. <http://www.shaanxi.gov.cn/0/104/2627.htm>, <http://wenku.baidu.com/view/cda79be85ef7ba0d4a733b3e.html>.
- [33] Zhang F, Zhang Y L, Hong B, Li Y M, Zhang S L, Chen Z J. Species identification and distribution of root knot nematodes on greenhouse vegetables in Shaanxi province. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2011, 20(12): 178-182.
- 参考文献:
- [1] 孙运达, 王献杰. 蔬菜地根结线虫病的发生特点及综防技术. 中国蔬菜, 1996, (6): 36-37.
- [2] 彭德良. 蔬菜病虫害的综合治理(十)—蔬菜线虫病害的发生和防治. 中国蔬菜, 1998, (4): 57-58.
- [3] 赵磊, 段玉玺, 白春明, 陈立杰, 朱晓峰, 孙晓铭. 辽宁省根结线虫发生种类与分布. 湖北农业科学, 2010, 49(4): 865-868.
- [4] 陈志杰, 张锋, 梁银丽, 张恩顺, 徐福利, 杜社妮, 王琦. 陕西设施蔬菜根结线虫病流行因素与控制对策. 西北农业学报, 2004, 14(3): 32-37.
- [5] 廖月华, 陈须文. 蔬菜根结线虫病发生规律研究. 江西农业大学学报, 1996, 18(1): 101-105.
- [13] 陈立杰, 魏峰, 段玉玺, 白春明, 霍璟珣, 朱晓峰. 温湿度对南方根结线虫卵孵化和二龄幼虫的影响. 植物保护, 2009, 35(2): 48-52.
- [14] 陈立杰, 魏峰, 陈井生, 段玉玺. 土壤温湿度对南方根结线虫侵染能力的影响. 湖北农业科学, 2009, 48(6): 1375-1377.
- [15] 刘维志. 植物病原线虫学. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 石守定. 基于 GIS 的小麦条锈病菌越冬越冬气候区划及时空动态分析 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [17] 张慧智, 史学正, 于东升, 王洪杰, 赵永存, 孙维侠, 黄宝荣. 中国土壤温度的季节性变化及其区域分异研究. 土壤学报, 2009, 46(2): 227-234.
- [18] 张慧智, 史学正, 于东升, 王洪杰, 赵永存, 孙维侠, 黄宝荣. 中国土壤温度的空间预测研究. 土壤学报, 2009, 46(1): 1-8.
- [19] 姜会飞, 廖树华, 叶尔克江, 阿帕尔. 地面温度与气温关系的统计分析. 中国农业气象, 2004, 25(3): 1-4.
- [20] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999.
- [22] 陈志杰, 张淑莲, 张锋, 王琦, 严攀. 温度处理对温室黄瓜根结线虫病的控制效果研究. 西北农业学报, 2008, 17(4): 177-180.
- [23] 景晓红, 康乐. 昆虫耐寒性的测定与评价方法. 昆虫知识, 2004, 41(1): 7-10.
- [24] 王如松, 兰仲雄, 丁岩钦. 昆虫发育速率与温度关系的数学模型研究. 生态学报, 1982, 2(1): 47-56.
- [25] 戴素明, 成新跃, 肖启明, 谢丙炎. 线虫耐寒性研究进展. 生态学报, 2006, 26(11): 3885-3890.
- [26] 王林. 松材线虫瞬间致死温度的研究. 安徽林业科技, 2006, (1): 8-10.
- [27] 张建平, 蔡新. 温度对松材线虫的生物效应. 四川林业科技, 2007, 28(5): 69-72.
- [28] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征—变异函数与 Kriging 插值分析. 地理学报, 2000, 55(5): 555-566.
- [29] 雷能忠, 蒋锦刚, 黄大鹏. 杭埠河流域土壤全氮和有机质的空间变异特征. 厦门大学学报: 自然科学版, 2008, 47(2): 300-304.
- [30] 石守定, 马占鸿, 王海光, 赵中华, 姜玉英. 应用 GIS 和地统计学研究小麦条锈病菌越冬范围. 植物保护学报, 2005, 32(1): 29-32.
- [31] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程. 北京: 科学出版社, 2006.
- [32] 陕西省生态功能区划 (2004-11-17) [2013-02-18]. <http://www.shaanxi.gov.cn/0/104/2627.htm>, <http://wenku.baidu.com/view/cda79be85ef7ba0d4a733b3e.html>.
- [33] 张锋, 张彦龙, 洪波, 李英梅, 张淑莲, 陈志杰. 陕西设施蔬菜根结线虫的种类鉴定及分布. 西北农业学报, 2011, 20(12): 178-182.