

定位试验地耕层土壤植物寄生线虫空间分布特征

梁文举¹, 姜 勇¹, 李 琪^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:采用经典统计学与地统计学相结合的方法, 对中国科学院沈阳生态实验站定位试验地耕层土壤中植物寄生线虫的空间分布特征进行研究。结果表明, 在田间尺度下螺旋属 (*Helicotylenchus*)、垫刃属 (*Tylenchus*) 是上下两层土壤中植物寄生线虫的优势属, 矮化属 (*Tylenchorhynchus*) 为下层土壤中的优势属, 这 3 个属线虫数量占植物寄生线虫总数的 92%。除下层矮化属线虫外, 上下两层土壤中植物寄生线虫空间变异为 48% ~ 100%, 其空间自相关范围为 35 ~ 91 m。克里格插值分析表明, 上层土壤中植物寄生线虫总数与螺旋属线虫数量、上下层土壤中垫刃属线虫数量呈现出相似的空间分布格局。这些结果反映了不同属的植物寄生线虫沿水平和垂直方向活动性上的差异; 由此可以进一步推测垫刃属和矮化属线虫向下迁移能力强于螺旋属线虫。

关键词:定位试验; 耕层土壤; 植物寄生线虫; 空间分布特征; 地统计学

文章编号: 1000-0933(2006)01-0033-07 中图分类号: Q149, Q958, S154.38*6 文献标识码: A

Spatial distribution characteristics of plant-parasitic nematodes in cultivated horizon of a site-specific experimental field

LIANG Wen-Ju^{1,*}, JIANG Yong¹, LI Qi^{1,2} (1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 33 ~ 39.

Abstract: Understanding the spatial distribution of plant-parasitic nematodes in a cultivated horizon is important to the management of plant-parasitic nematodes in agricultural soils. Nematode distribution in the field has been described as aggregated, which implies underlying spatial dependence in nematode data. Conventional statistics are generally inadequate to describe data that are spatially correlated. However, geostatistics has become a powerful tool for analyzing the spatial distribution of nematodes. Recent studies on the spatial variability of soils have focused on soil nutrients, heavy metals, and nematode trophic groups in Northeast China, however, there is no information on the spatial distribution of plant-parasitic nematodes in Chinese agroecosystems. The objectives of this study were to describe the field-scale spatial distribution of total plant-parasitic nematodes and their dominant genera in a Chinese Ecosystem Research Network (CERN) site in Northeast China, and develop maps illustrating their horizontal and vertical distribution patterns.

The spatial distribution characteristics of plant-parasitic nematodes in a cultivated horizon of a site-specific experimental field at the Shenyang Experimental Station of Ecology, Chinese Academy of Sciences, was investigated using traditional statistics combined with geostatistics. A 42m × 30 m plot was divided into grids with 7m × 5 m spacing including 49 sampling points. Soil samples were collected from depths of 0 ~ 10 cm and 10 ~ 20 cm. The results showed that genera of *Helicotylenchus* and *Tylenchus* were the most dominant plant-parasitic nematodes at both depths and *Tylenchorhynchus* was the dominant genus at the 10 ~ 20 cm depth, with the three genera together representing 92% of total plant-parasitic nematodes on average. Geostatistical analysis indicated that a major part of this variability was spatially-dependent; variograms suggest that 48% ~ 100% of sample population variance was related to spatial autocorrelation over ranges of 35 ~ 91 m at both depths except *Tylenchorhynchus* at a depth of 10 ~

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30270271, 30570337)

收稿日期: 2004-10-17; 修订日期: 2005-04-11

作者简介: 梁文举 (1964 ~), 男, 黑龙江人, 博士, 研究员, 主要从事农业生态学和土壤生态学研究. E-mail: liangwj@iae.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30270271, 30570337)

Received date: 2004-10-17; Accepted date: 2005-04-11

Biography: LIANG Wen-Ju, Ph. D., Professor, mainly engaged in agroecology and soil ecology. E-mail: liangwj@iae.ac.cn

20 cm. The mean numbers of total plant-parasitic nematodes, *Helicotylenchus*, *Tylenchus*, and *Tylenchorchychus*, were higher at the 0 ~ 10 cm depth than at the 10 ~ 20 cm depth. Similar distributions of total plant-parasitic nematodes and *Helicotylenchus* at each depth were observed, while *Tylenchus* and *Tylenchorchychus* nematodes exhibited a similar spatial trend for both depths. Our results reflect possible stronger dispersion of *Tylenchus* and *Tylenchorchychus* nematodes in vertical distribution. The maps obtained with kriging illustrate horizontal and vertical distribution patterns of plant-parasitic nematodes at the field scale.

Key words: site-specific experiment; cultivated horizon; plant-parasitic nematodes; spatial distribution characteristics; geostatistics

大多数植物寄生线虫都存活于土壤耕层中,特别是根际土壤中线虫数量最多^[1]。因此,开展耕层土壤中植物寄生线虫空间分布特征研究对于定位管理(site-specific management)这类线虫具有十分重要的意义^[2]。以数理统计和概率论为基础的经典统计分析方法在描述空间相关方面具有很大的局限性^[3, 4],进而使地统计学方法成为研究土壤养分异质性、土壤生物空间分布特征等成为有用的工具^[5-17]。近 10a 来,随着地统计学方法在土壤学和生态学领域的广泛应用,土壤线虫空间分布特征研究也日益受到国内外学者的重视^[6-9, 13, 16]。以往的学者大多侧重研究土壤线虫总数及其营养类群的空间分布格局^[6, 9, 16],而对线虫优势属的空间分布特征则少有研究^[2, 8],尤其在中国针对耕层土壤中植物寄生线虫属的空间分布格局所开展的研究尚未见文献报道。

本文以中国科学院沈阳生态实验站土壤要素综合长期观测场为研究对象,采用经典统计学与地统计学相结合的分析方法,开展耕层土壤中植物寄生线虫属的水平与垂直分布特征研究,为下辽河平原农田生态系统中植物寄生线虫定位管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 土壤采样地点概况

采样地位于沈阳市苏家屯区十里河镇的中国科学院沈阳生态实验站土壤要素综合长期观测场(41°31'N, 123°22'E)。该站位于下辽河平原,属暖温带大陆性气候,年平均气温 7 ~ 8℃,年平均降雨量 650 ~ 700 mm, ≥ 10℃活动积温 3300 ~ 3400℃,无霜期 147 ~ 164 d。供试土壤为砂壤质潮棕壤,耕层土壤(0 ~ 20 cm)有机碳 10.50 g/kg、全氮 1.08 g/kg、全磷 0.40 g/kg、容重 1.25 g/cm³、pH 5.5 ~ 6.5。采样区为玉米-大豆轮作区,面积 1260 m²(42m × 30m),采样网格为 7 m × 5 m。上茬作物为玉米(*Zea mays* L.),年平均施肥量分别为 N 225 kg/hm²、P 60 kg/hm²、K 112 kg/hm²。每个采样点土壤由样点 1 m 内 8 个小样组成;分上层(0 ~ 10 cm)和下层(10 ~ 20 cm)进行土壤取样,每层 49 个土样。采样时间为 2004 年 4 月 20 日,大豆播种前^[18]。

1.2 植物寄生线虫分离鉴定方法

每个土样称取 300 g,采用淘洗-过筛-蔗糖离心法分离植物寄生线虫^[19, 20]。用 60℃ 温水杀死线虫并加 TAF 固定后,参照线虫分类检索图鉴将植物寄生线虫鉴定到属^[1, 21]。依据土壤湿度,将其种群数量折算成每 100 g 干土含有线虫的条数^[20, 22, 23]。

1.3 统计方法

经典统计学采用 SPSS 10.0 分析;地统计学采用 GS+ 分析。

地统计学中用于估计变异函数的公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中, $\gamma(h)$ 为半方差变异函数; h 为样点的空间间隔距离,称为步长; $N(h)$ 为间隔距离为 h 的样点数; $z(x_i)$ 和 $z(x_i + h)$ 分别是区域化变量 $z(x)$ 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 处的实测值。插值分析采用 3 × 3 块段克里格法进行空间内插^[3, 18]。

F 检验决定系数的计算公式为:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \times \frac{N - k}{k - 1} \quad (2)$$

式中, k 为回归模型中自变量的个数, R^2 为决定系数^[12]。

2 结果与分析

2.1 植物寄生线虫的描述性统计分析

样地上层、下层土壤中分别鉴定出植物寄生线虫 12 和 8 个属(表 1), 其中螺旋属(*Helicotylenchus*)和垫刃属(*Tylenchus*)是上下两层土壤中植物寄生线虫的优势属, 矮化属(*Tylenchorchychus*)为下层土壤中植物寄生线虫的优势属, 这 3 个属线虫数量占植物寄生线虫总数的 92%。上层土壤中植物寄生线虫总数及 3 个优势属线虫数量高于下层土壤中的数量。对于植物寄生线虫总数、螺旋属和垫刃属的变异系数而言, 上层比下层变异小; 矮化属在两层上的变异接近。植物寄生线虫总数及所有属数量的频度分布趋向于正偏(表 1)。

表 1 植物寄生线虫的描述性统计分析结果

Table 1 Results of plant-parasitic nematodes (PP, individuals per 100 g dry soil) for descriptive statistics

植物寄生线虫属 Genera of plant-parasitic nematodes	平均值 Mean	标准差 S. D.	变异系数 CV (%)	相对丰度 RA (%)	优势度 Dominance	最小值 Minimum	最大值 Maximum	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
0~10 cm 土层 At 0~10 cm depth									
植物寄生线虫总数 PP	695.2	680.93	97.98			23	3378	2.01	5.01
丝尾属 <i>Filenchus</i>	0.3	1.86	700.00	0.04	+	0	13	7.00	49.00
浅根属 <i>Hirschmanniella</i>	0.4	2.57	700.08	0.06	+	0	18	7.00	49.00
螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	522.0	594.25	113.83	75.09	+++	0	3002	2.17	6.06
长针属 <i>Longidorus</i>	1.9	5.68	302.58	0.27	+	0	28	3.28	10.81
大节片属 <i>Macroposthonia</i>	9.2	30.65	332.23	1.32	++	0	163	4.02	16.69
新平滑属 <i>Neosilenchus</i>	0.8	5.43	700.01	0.12	+	0	38	7.00	49.00
平滑属 <i>Psilenchus</i>	27.6	40.59	147.21	3.97	++	0	211	2.48	7.97
盘旋属 <i>Rotylenchus</i>	4.7	19.52	417.62	0.68	+	0	119	4.92	26.06
头属 <i>Tetylenchus</i>	3.0	11.60	391.91	0.43	+	0	62	4.16	17.23
腭属 <i>Telotylenchus</i>	4.5	18.56	413.43	0.65	+	0	102	4.62	21.27
垫刃属 <i>Tylenchus</i>	76.1	75.50	99.18	10.95	+++	0	294	1.51	1.48
矮化属 <i>Tylenchorchychus</i>	44.7	63.66	142.42	6.43	++	0	244	1.70	1.98
10~20 cm 土层 At 10~20 cm depth									
植物寄生线虫总数 PP	309.4	339.88	109.87			4	1530	2.08	4.41
螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	212.1	299.70	141.27	68.55	+++	0	1363	2.20	4.90
长针属 <i>Longidorus</i>	0.4	2.22	517.36	0.13	+	0	14	5.54	31.76
大节片属 <i>Macroposthonia</i>	11.8	56.63	480.88	3.81	++	0	379	6.08	38.89
平滑属 <i>Psilenchus</i>	10.2	21.32	208.14	3.30	++	0	131	4.26	21.93
盘旋属 <i>Rotylenchus</i>	0.2	1.29	699.89	0.06	+	0	9	7.00	49.00
头属 <i>Tetylenchus</i>	1.0	4.22	421.80	0.32	+	0	27	5.37	31.49
垫刃属 <i>Tylenchus</i>	37.2	40.31	108.34	12.02	+++	0	189	2.28	5.66
矮化属 <i>Tylenchorchychus</i>	36.5	51.53	141.29	11.08	+++	0	216	1.79	2.71

+++ 优势属 Dominant genus, RA (relative abundance) > 10; ++ 常见属 Ordinary genus, 1 ≤ RA ≤ 10; + 稀有属 Rare genus, RA < 1

2.2 植物寄生线虫空间分布特征

图 1 是各变量的实验和理论半方差图, 表 2 是理论半方差理论模型及相应的参数。上层土壤植物寄生线虫总数变异函数的最佳理论模型为线性模型, 螺旋属符合球状模型, 垫刃属和矮化属符合指数模型; 下层土壤植物寄生线虫总数符合指数模型, 螺旋属符合线性模型, 垫刃属和矮化属符合球状模型(表 2)。经公式(2)对表 2 中的决定系数进行 F 检验, 除下层土壤中植物寄生线虫总数和螺旋属线虫之外均达到极显著水平, 说明理论模型较好地反映了植物寄生线虫变量的空间结构特征。与系统内总变异基台值($C_0 + C$)相比, 上下两层土壤中垫刃属和矮化属线虫理论模型的块金值(C_0)较小, 表明其由随机性因素引起的空间变异所占比例较小。上层土壤中植物寄生线虫总数及上下层土壤螺旋属线虫的 $C_0/(C_0 + C)$ 为 100%, 属于存块金效应; 上下层土壤垫刃属及上层土壤矮化属具有中等的空间自相关性, 说明其空间相关性较强。下层土壤中矮化属线

虫的 $C_0/(C_0 + C)$ 为 0%, 表明其变异是由结构性因素引起的。

表 2 各向同性下变异函数理论模型及相应的参数

Table 2 Parameters of the best-fitted semivariogram model for isotropic variogram

项目 Item	理论模型 Model	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill $C_0 + C$	块金/基台 $C_0/(C_0 + C) (\%)$	变程 Range A , (m)	决定系数 Model R^2	F 值 F value
上层土壤 0 ~ 10 cm depth							
植物寄生线虫总数 PP	线性 Linear	544282	544282	100.0	35.4	0.355	3.224 **
螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	球状 Spherical	420234	420234	100.0	35.4	0.377	3.544 **
垫刃属 <i>Tylenchus</i>	指数 Exponential	5219	10421	50.0	91.0	0.483	5.472 **
矮化属 <i>Tylenchorhynchus</i>	指数 Exponential	2796	5593	50.0	68.7	0.610	9.161 **
下层土壤 10 ~ 20 cm depth							
植物寄生线虫总数 PP	指数 Exponential	98100	196300	50.0	91.0	0.077	0.483
螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	线性 Linear	91669	91669	100.0	35.4	0.125	0.837
垫刃属 <i>Tylenchus</i>	球状 Spherical	1164	2398	48.5	78.7	0.422	4.276 **
矮化属 <i>Tylenchorhynchus</i>	球状 Spherical	1	2750	0.0	17.9	0.800	23.429 **

** 代表 F 检验 $\alpha = 0.01$ 的显著水平 Significant at $\alpha = 0.01$ level, $F_{0.01} = 3.040$

上下层土壤中植物寄生线虫总数及其各优势属的变程处于 17.9 ~ 91.0 m 之间(表 2)。上层矮化属的变程显著高于下层,而垫刃属的变程在上下层比较接近。说明不同属的植物寄生线虫的空间自相关范围具有较大的差异。

克里格插值分析表明,上层土壤中植物寄生线虫总数与螺旋属线虫数量具有极为相似的空间分布格局,表现出由东南-西北渐次降低的趋势(图 2);上下层土壤中垫刃属线虫数量空间分布特征相似,由东-西渐次降低,西北侧数量最高;上下层土壤中矮化属线虫数量也存在相似的分布规律,呈现出镶嵌状分布。

3 讨论

在田间尺度下,上下层土壤中植物寄生线虫总数的变异系数在 98% ~ 110% 之间,低于美国密执安州 Kellogg 生物试验站报道的结果(131%)^[6],高于在中科院海伦农业生态试验站发表的结果(67%)^[16]。这说明不论在美国还是在黑龙江海伦植物寄生线虫的变异性很大,而且不同属植物寄生线虫的变异性存在着较大差异。

在不同地区农业生态系统中,耕层土壤中植物寄生线虫的变程存在较大差异。本项研究的上层土壤中植物寄生线虫总数的变程为 35.4 m,低于美国明尼苏达大学 Grand Rapids 试验站取得的结果(66.4 m)^[4],高于我们在中科院海伦农业生态试验站发表的结果(7.8 m)^[16]。这说明本研究中植物寄生线虫的空间活动范围比海伦试验站大。与海伦试验站结果相比较,发现二者试验条件有较多相似之处,如取样日期较接近(海伦试验的取样日期为 2001 年 4 月 26 日),前茬作物均为玉米,在这一季节,沈阳地区农田土壤的温湿度均高于海伦,说明这一时期沈阳地区土壤的温湿度条件更适宜于土壤中植物寄生线虫的迁移活动。这一对比研究结果对于进一步研究植物线虫对土壤温湿度的响应及土壤线虫的生物学特性(如生长发育)有一定的借鉴意义。

地统计学分析中的基台值为 2398 ~ 544282,对应的标准差为 48.97 ~ 737.75 条/100 g 干土。这一数值略高于植物寄生线虫总数及优势属的经典统计学分析的标准差(40.31 ~ 680.93 条/100 g 干土)。有关土壤养分空间分析的结果表明,利用地统计学方法得出的基台值所对应的标准差有时可能会略低于经典统计的标准差^[12, 24],造成这种结果的主要原因是土壤养分含量主要受元素生物地球化学循环的影响,在成土母质、土壤类型、利用方式接近的条件下土壤营养元素含量的变异相对较小,在进行地统计学分析时,由于大量增加了估值的数量从而降低了估值的方差^[17]。与土壤养分的空间分布不同,土壤中植物寄生线虫的分布具有较强的集聚性,往往具有较强的空间分布格局,考虑到距离因素,从而增加了地统计学估值的方差。在黑龙江海伦站的试验也得出了相似的结果^[16]。然而,正是由于土壤线虫空间集聚性的特点,在利用地统计学方法研究变异时充分考虑到距离因素的影响,进而更加客观地反映了土壤线虫的分布状况和空间分布格局。

不同植物寄生属具有不同的垂直分布格局。对于螺旋属线虫而言,上下层的空间分布特征存在很大差

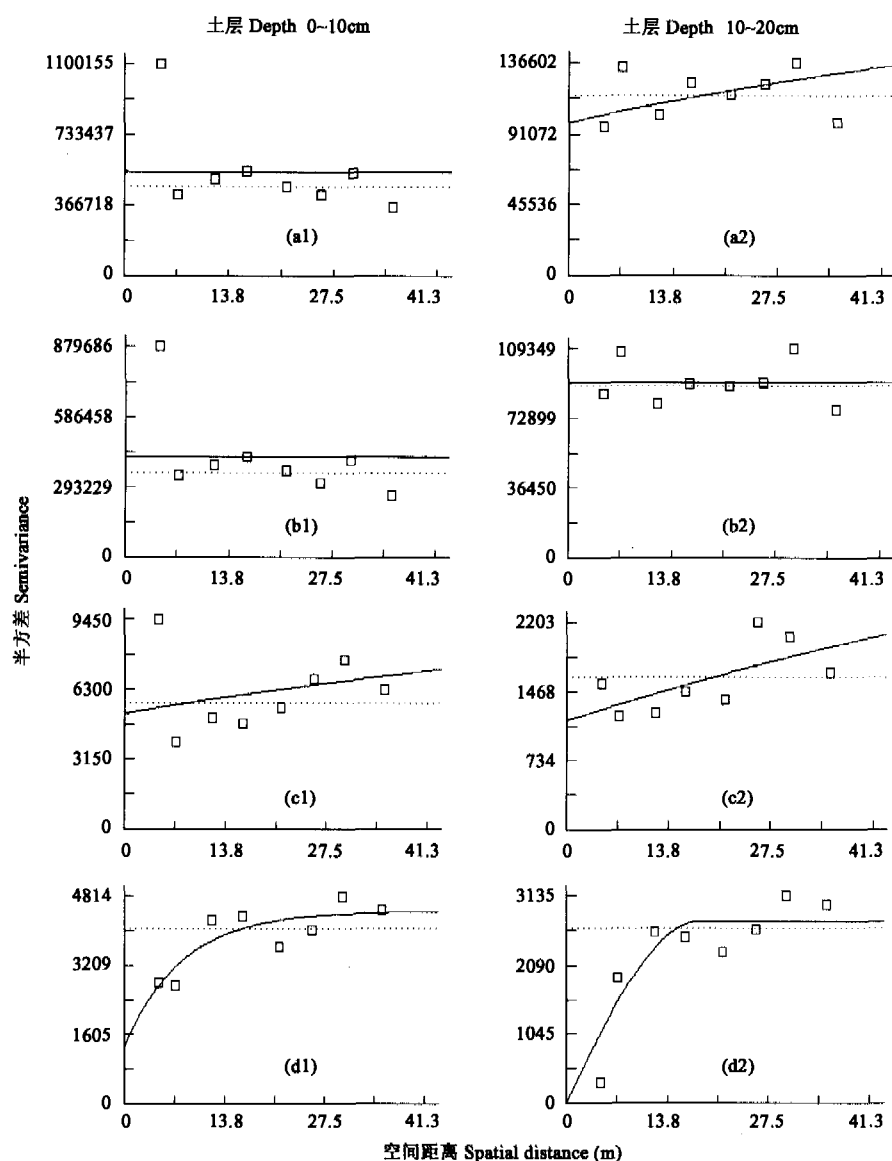


图 1 0~10 cm 和 10~20 cm 土层植物寄生线虫空间变异半方差图

Fig.1 Semivariograms for plant-parasitic nematodes at the depths of 0~10 cm and 10~20 cm

0~10 cm 土层 0~10 cm depth: (a1) 植物寄生线虫总数 Total plant-parasitic nematodes; (b1) 螺旋属 *Helicotylenchus*; (c1) 垫刃属 *Tylenchus*; (d1) 垫刃属 *Tylenchorhynchus*; 10~20 cm 土层 10~20 cm depth: (a2) 植物寄生线虫总数 Total plant-parasitic nematodes; (b2) 螺旋属 *Helicotylenchus*; (c2) 垫刃属 *Tylenchus*; (d2) 垫刃属 *Tylenchorhynchus*

异;而垫刃属和矮化属线虫在上下层则表现出相似的空间分布格局。这种现象反映了不同属的植物寄生线虫沿垂直方向活动性上的差异。由此可以进一步推测垫刃属和矮化属线虫向下迁移能力强于螺旋属线虫。

相似的空间插值图表明了不同属植物寄生线虫不同的空间分布格局,同时也反映了线虫在耕层土壤水平和垂直方向上的活动特性。从矮化属线虫在上下层土壤中的分布格局(图 1 d1, d2)可以看出,矮化属线虫在上下层的分布有较强的相似性,且表现出很直观的“窝居”现象,在上下两层中,各有约 1/2 面积表现出较强的同质性(矮化属线虫数量 < 34 条/100 g 干土)。大部分植物寄生线虫具有作物致病作用,在田间往往表现为成片出现病害的现象^[1]。因此,植物寄生线虫空间格局分析对于在田间尺度下定位防治相关作物病害有一定的指导作用。

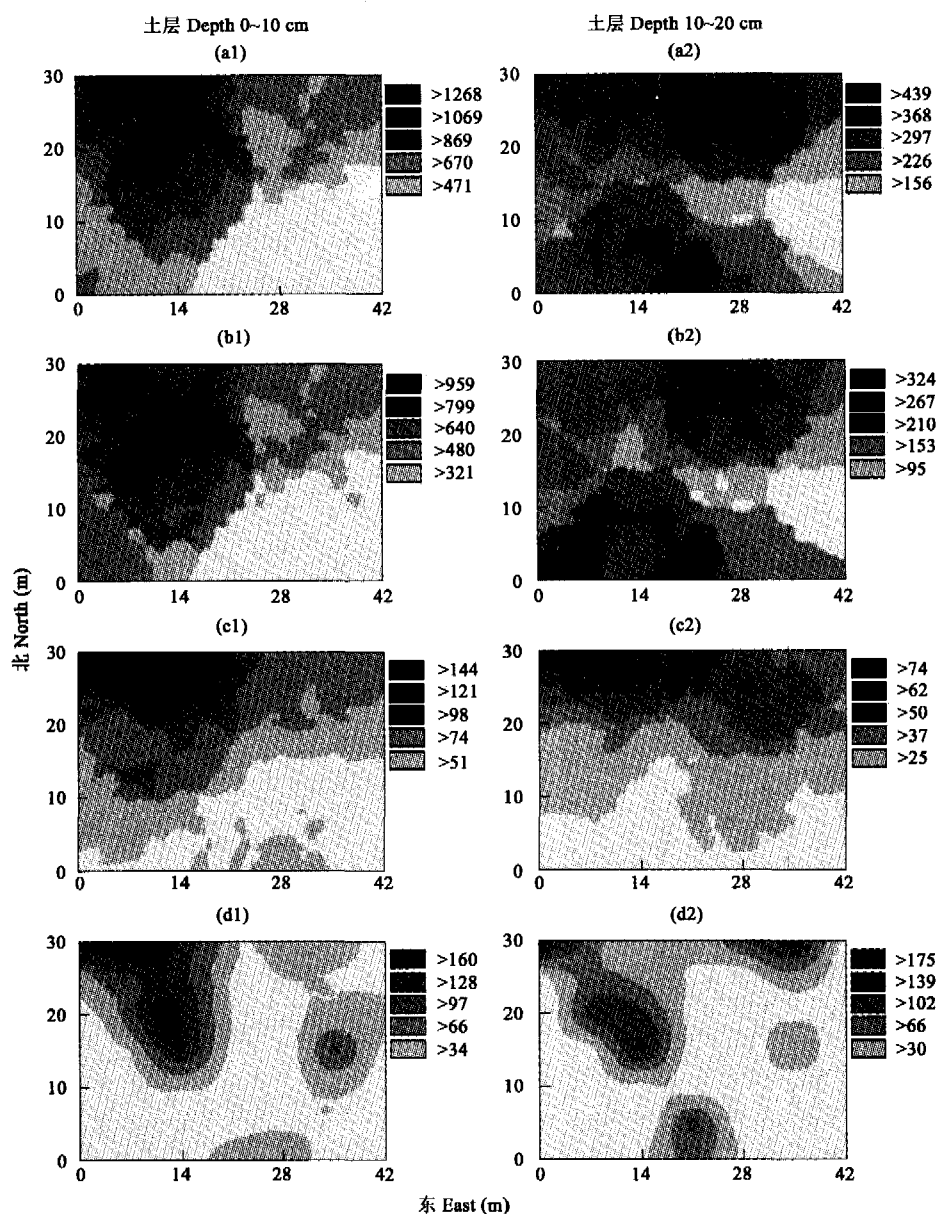


图2 0~10 cm 和 10~20 cm 土层植物寄生线虫空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of plant-parasitic nematodes at the depths of 0~10 cm and 10~20 cm

图注同图 1 the note is the same as Fig. 1

统计分析结果表明,耕层土壤中植物寄生线虫数量与土壤理化因子之间没有存在显著的相关性^[25]。Ettema 等^[15, 16]在美国佐治亚州河岸湿地研究食细菌线虫空间分布特征时也获得相似的结果。在海伦试验站开展的线虫营养类群空间分布格局研究结果也支持上述结论^[4]。这表明不论在美国还是中国的农田尺度上线虫空间分布格局与土壤理化指标不具有显著的相关关系。

总之,地统计学方法为研究土壤中植物寄生线虫空间分布格局提供了一种重要的手段。通过土壤线虫空间异质性分析,可以认识植物寄生线虫在农田尺度上水平分布与垂直分布格局,可为植物寄生线虫的定位监测,以及与植物寄生线虫有关的作物病害防治等提供科学依据。

References:

- [1] Liu W Z. Description of the Species of Plant Parasitic Nematodes. Beijing: China Agricultural Press, 2004. 26~282.

- [2] Avendaño F, Schabenberger O, Pierce F J. Geostatistical analysis of field spatial distribution patterns of soybean cyst nematode. *Agron. J.*, 2003, 95: 936 ~ 948.
- [3] Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, *et al.* Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecol. Monogr.*, 1992, 62: 277 ~ 314.
- [4] Wallace M K, Hawkins D M. Applications of geostatistics in plant nematology. *J. Nematol.*, 1994, 26: 626 ~ 634.
- [5] Webster R, Boag B. Geostatistical analysis of cyst nematodes in soil. *J. Soil Sci.*, 1992, 43: 583 ~ 595.
- [6] Robertson G P, Freckman D W. The spatial distribution of nematode trophic groups across a cultivated ecosystem. *Ecology*, 1995, 76: 1425 ~ 1432.
- [7] Rossi J P, Delaville L, Queneherve P. Microspatial structure of a plant-parasitic nematode community in a sugarcane field in Martinique. *Appl. Soil Ecol.*, 1996, 3: 17 ~ 26.
- [8] Ettema C H, Coleman D C, Vellidis G, *et al.* Spatiotemporal distributions of bacterivorous nematodes and soil resources in a restored riparian wetland. *Ecology*, 1998, 79: 2721 ~ 2734.
- [9] Klironomos J N, Rillig M C, Allen M F. Designing belowground field experiments with the help of semi-variance and power analysis. *Appl. Soil Ecol.*, 1999, 12: 227 ~ 238.
- [10] Paz-Gonzalez A, Vieira S R, Taboada Castro M T. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *Geoderma*, 2000, 97: 273 ~ 292.
- [11] Jiang C, Yang L P, Jin J Y, *et al.* Soil nutrients variability and rational sampling quantity. *Plant Nutr. Fertil. Sci.*, 2001, 7: 262 ~ 270.
- [12] Wang J, Fu B J, Qiu Y, *et al.* Spatial heterogeneity of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau. *Acta Ecol. Sin.*, 2002, 22: 1173 ~ 1178.
- [13] Ettema C H, Wardle D A. Spatial soil ecology. *Trends Ecol. Evol.*, 2002, 17: 77 ~ 183.
- [14] Jiang Y, Zhang Y G, Liang W J, *et al.* Spatial variability of soil nutrients in cultivated surface soil of Sujiatun District, Shenyang City. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2003, 14: 1673 ~ 1676.
- [15] Gao L P, Liang W J, Chen W B, *et al.* Effects of cultivation on the spatial variability of soil organic carbon and total nitrogen in black soil. In: Ji L., Chen G. X., Schnug E., *et al.* eds. *Fertilization in the Third Millenium-Fertilizer, Food Security and Environmental Protection, Proceedings Vol. II.* Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2003. 885 ~ 891.
- [16] Liang W J, Li Q, Jiang Y, *et al.* Effect of cultivation on spatial distribution of nematode trophic groups in black soil. *Pedosphere*, 2003, 13: 97 ~ 102.
- [17] Jiang Y, Liang W J, Wen D. Middle- and Micro-elements in Cultivated Soils of Shenyang Suburbs. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2003. 88 ~ 98.
- [18] Jiang Y, Zhuang Q L, Liang W J, *et al.* Application of spatial variability in long-term observatory study of soil properties and sampling strategy. *Chin. J. Soil Sci.*, 2005, 36: 472 ~ 476.
- [19] Ingham R E. Nematodes. In: Weaver R. W., Angle S., Bottomley P., *et al.* eds. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties.* Madison: Soil Science Society of America Book Series no. 5, 1994. 459 ~ 490.
- [20] Liang W J, Zhang W M, Li W G, *et al.* Effect of chemical fertilizer on nematode community composition and diversity in the black soil region. *Biodiver. Sci.*, 2001, 9: 237 ~ 240.
- [21] Yin W Y. Pictorial Keys to Soil Animals of China. Beijing & New York: Science Press, 2000. 51 ~ 85.
- [22] Liang W J, Lavian I, Steinberger Y. Dynamics of nematode community composition in a potato field. *Pedobiologia*, 1999, 43: 459 ~ 469.
- [23] Liang W J, Lavian I, Steinberger Y. Effect of agricultural management on nematode communities in a Mediterranean agroecosystem. *J. Nematol.*, 2001, 33: 208 ~ 213.
- [24] White J G, Welch R M, Norvell W A. Soil zinc map of the USA using geostatistics and geographic information systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61: 185 ~ 194.
- [25] Liang W J, Shi C J, Jiang Y. Spatial variability of soil nitrogen in cultivated horizon and its application in a long-term local trial field. *J. Soil Water Conserv.*, 2005, 19: 79 ~ 83.

参考文献:

- [1] 刘维志主编. 植物线虫志. 北京: 中国农业出版社, 2004. 26 ~ 282.
- [11] 姜城, 杨俐苹, 金继运, 等. 土壤养分变异与合理取样数量. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7: 262 ~ 270.
- [12] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄土高原小流域土壤养分的空间异质性. *生态学报*, 2002, 22: 1173 ~ 1178.
- [14] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 等. 沈阳市苏家屯区耕层土壤养分空间变异性研究. *应用生态学报*, 2003, 14: 1673 ~ 1676.
- [17] 姜勇, 梁文举, 闻大中. 沈阳郊区农业土壤中微量元素. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2003. 88 ~ 98.
- [18] 姜勇, 庄秋丽, 梁文举, 等. 空间变异在土壤性质长期定位观测及取样中的应用. *土壤通报*, 2005, 36: 472 ~ 476.
- [20] 梁文举, 张万民, 李维光, 等. 施用化肥对黑土地区线虫群落组成及多样性产生的影响. *生物多样性*, 2001, 9: 237 ~ 240.
- [25] 梁文举, 施春健, 姜勇. 长期定位试验地耕层土壤氮素空间变异性及其应用. *水土保持学报*, 2005, 19: 79 ~ 83.