

临洮县不同玉米种植区域线虫数量与土壤养分相关性研究

孙会东, 温睿婷, 牟晓玲, 王 鹏
(定西市临洮农业学校, 甘肃 临洮 730500)

摘要: 为寻求通过改善土壤条件达到控制线虫数量的方法, 从2022年5月5日开始在临洮县14个不同玉米种植区域每隔30 d分别测定玉米根际土壤养分含量及线虫数量, 分析了土壤线虫随时间的变化规律以及与土壤养分之间的相关性。结果表明, 各区域玉米根际土壤中线虫数量随玉米生育期进程而显著升高; 各样地土壤养分差异显著, 土壤中全氮、有效磷、有效钾和有机质含量与线虫数量表现出一定非线性相关性。综合考虑, 可以通过调节土壤养分的含量控制线虫数量, 即土壤中有效磷低于40 mg/kg, 有效钾的含量低于200 mg/kg, 并适量增施氮肥。

关键词: 线虫; 土壤养分; 数量特征; 相关性; 临洮县

中图分类号: S513; S154.386

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2025)07-0681-06

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.07.015

Correlation Analysis of Nematode Quantity and Soil Nutrients in Different Maize Planting Areas of Lintao County

SUN Huidong, WEN Ruiting, MU Xiaoling, WANG Peng
(Lintao Agricultural School, Lintao Gansu 730500, China)

Abstract: To develop a method of controlling the number of nematodes by improving soil conditions, from May 5th, 2022, the nutrient contents and nematode numbers of maize rhizosphere soil were measured every 30 days in 14 different maize planting areas in Lintao County. The changes of soil nematodes with time and the correlation between soil nematodes and soil nutrients were analyzed. Results indicated that the number of nematodes in maize rhizosphere soil increased with the growth period of maize. Significant variations in soil nutrient levels were observed across different soils. Contents of soil total nitrogen, available phosphorus, available potassium, and organic matter exhibited nonlinear correlations with nematode abundance. Overall, nematode populations can be managed by adjusting soil nutrient levels. Specifically, maintaining available phosphorus content below 40 mg/kg, available potassium content below 200 mg/kg, and applying an appropriate amount of nitrogen fertilizer can effectively control nematode numbers.

Key words: Nematode, Soil nutrient; Quantity characteristic; Correlation, Lintao County

线虫是土壤中数量和功能类群最丰富的生物类群之一, 自然界中线虫约有50万~100万种, 其中植物线虫约占10%^[1-4]。在不同类型的土壤生态系统中, 土壤线虫的数量和生物量存在显著差异。线虫对土壤生态系统功能起到一定的调控作用, 对土壤中有机物分解、养分转化和能量传递等过程均具有重要作用^[5-6]。但当植物寄生线虫寄生于作物根部后, 会降低植株根系吸收和运输水分及养分的能力, 最终导致减产^[7-8]。同时, 线虫侵染会引发真菌和细菌的复合病害, 加重危害程度, 加

剧经济损失^[9]。玉米幼苗极易感染线虫病, 受感染的植株不仅生活力和根部生长受到影响, 植株对其他病害的抵抗能力也会降低^[10]。研究发现短体线虫(*Pratylenchus* spp.)是玉米最常见的寄生线虫, 主要在根皮层内寄生和繁殖, 严重时会导致根部变褐、腐烂, 地上部萎黄以及生长缓慢^[11-12]。

线虫可以通过轮作来防治, 但其寄主范围广泛, 供轮作的作物选择难度相对较大。采用药剂喷施或土壤熏蒸虽能有效防治线虫, 但易使线虫产生抗药性, 并且对人畜造成危害, 对环境带来

收稿日期: 2024-06-24; 修订日期: 2025-06-17

基金项目: 定西市市列科技项目(DX2023BY01)。

作者简介: 孙会东(1969—), 男, 甘肃临洮人, 高级讲师, 研究方向为玉米遗传育种。Email: ltshd0226@126.com。

通信作者: 温睿婷(1984—), 女, 甘肃灵台人, 研究方向为玉米遗传育种。Email: wenrtsau@163.com。

污染。目前选育抗性品种可作为防治线虫的主要手段,遗传抗性育种及分子标记技术也已广泛应用于线虫的防治与鉴定,但由于线虫种类繁多,分离鉴定工作烦琐,研究进展缓慢^[13]。土壤环境可直接影响线虫的生存状态,研究土壤中有效成分和 pH 对线虫的影响,对提高线虫的防治效果有积极作用。目前,对临洮县玉米生产的研究主要集中在栽培和施肥方面,而针对线虫在本县不同玉米种植区域其种群种类、数量及危害的研究尚少。为此,本研究对临洮县 14 个玉米主要种植区域中不同时间玉米根际线虫数量进行了调查研究,寻找土壤中大量元素含量与线虫数量的相关性,以期为该地玉米线虫防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

调查采集样地位于临洮县 9 个乡镇的 14 个村庄(表 1)。

1.2 试验设计

1.2.1 土壤样品的采集 于 2022 年 5—9 月,每隔 30 d 在玉米种植田采集玉米根部土壤进行线虫数量调查,采用 5 点法取样,随机选取 5 株玉米,每株沿 4 个方向钻取 0~20 cm 深的根际土样,混匀后去除石块,准确称取 300 g 备用,重复 3 次。

1.2.2 土壤养分测定 于 2022 年 5—9 月,每隔 30 d 取根际土壤样品,测定土壤养分。土壤有机质采用重铬酸钾滴定法进行测定,全氮采用半微量开氏法进行测定,速效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃

浸提—钼锑抗比色法进行测定,速效钾含量采用 1.0 mol/L NH₄OAc 浸提—火焰光度法进行测定,pH 使用酸度计测定^[14-15]。

1.2.3 线虫的分离 线虫采用分筛法进行分离^[16]。将 200 g 土样倒入 5 L 水桶中,加水,将大颗粒土块轻压捏碎、混匀,用急水流冲成土壤悬浮液,静置约 30 s 后,将上清液经过 0.044 mm 的分样筛,重复 3 次,收集筛上的残留物,然后结合漏斗法进行分离。24 h 后,由于趋水性和本身的重量,线虫最后都会沉降至漏斗底部的橡皮管中。打开弹簧夹,取其底部约 1 mL 的水样,其中含有大部分的线虫。如果在解剖镜下观察线虫数量少,可 3 000 r/min、2~3 min 离心后再检查。

1.2.4 线虫的处理和固定 用热杀死法处理收集到的线虫后,再用 4%福尔马林液固定,保存。

1.2.5 线虫的观测及鉴定 线虫的形态鉴定主要参照谢辉等^[17]的分类。玉米短体线虫形态学特征为口针基部球小;背食道腺口位于食道前体部的口针基部球后;唇环有 2~4 个,唇区缢缩;尾部细圆或宽圆,锥形或亚圆柱形。燕麦真滑刃线虫特征为口针较细,无基部球;中食道球大,近方形,直径近体宽,食道球瓣门发达;尾部稍向腹面弯曲,末端钝圆或宽圆。

1.3 数据分析

采用 Excel 2016 软件进行数据统计,采用 SPSS Statistics 22.0 软件分析数据之间的相关性,绘制相关性图。

表 1 不同玉米种植区域概况

试验地	海拔 /m	地理坐标	土壤类型
红旗乡石板湾村	1 706.3	E 103.595°、N 35.788°	灰钙土
红旗乡茨滩村	1 723.5	E 103.529°、N 35.795°	灰钙土
红旗乡出不啦村	1 789.6	E 103.597°、N 35.768°	灰钙土
太石镇何家湾村	1 727.7	E 103.663°、N 35.709°	灰钙土
洮阳镇马家窑村	1 872.3	E 103.817°、N 35.310°	黄绵土
衙下集镇岳家河村	1 906.0	E 103.808°、N 35.239°	黑垆土
衙下集镇杨家单庄	1 933.7	E 103.817°、N 35.187°	黑垆土
南屏镇靳家泉村	1 920.7	E 103.817°、N 35.162°	黑垆土
衙下集镇毛家坪村	1 933.7	E 103.815°、N 35.209°	黑垆土
辛店镇裴家湾村	1 765.3	E 103.775°、N 35.628°	黄绵土
新添镇三十墩村	1 807.2	E 103.858°、N 35.507°	黄绵土
八里铺镇刘家崖村	1 837.9	E 103.869°、N 35.432°	黄绵土
玉井镇岚张家窑村	1 923.6	E 103.840°、N 35.249°	黄绵土
玉井镇岚墩下村	1 933.1	E 103.834°、N 35.257°	黄绵土

2 结果与分析

2.1 不同玉米种植区域土壤养分

由表 2 可知, 土壤全氮含量以衙下集镇杨家单庄、玉井镇张家窑村较高, 分别为 1.39、1.37 g/kg, 除与南屏镇靳家泉村和八里铺镇刘家崖村无显著差异外, 显著高于其余区域; 其中衙下集镇杨家单庄土壤全氮含量是红旗乡出不啦村(全氮含量最低)的 2.53 倍。土壤中有效磷含量以太石镇何家湾村、辛店镇裴家湾村较高, 分别为 73.27、67.71 mg/kg, 显著高于其余区域, 其中太石镇何家湾村有效磷含量是衙下集镇岳家河村(有效磷含量最低)的 9.36 倍。土壤有效钾含量以玉井镇张家窑村最高, 为 330.46 mg/kg, 显著高于其余区域, 是辛店镇裴家湾村(有效钾含量最低)的 5.13 倍。土

壤中有机质含量以衙下集镇杨家单庄、八里铺镇刘家崖村、玉井镇张家窑村较高, 分别为 20.98、20.80、20.69 g/kg, 显著高于其余区域, 其中衙下集镇杨家单庄是红旗乡出不啦村(有机质含量最低)的 1.98 倍。各区域土壤 pH 为 7.87~8.60, 其中红旗乡出不啦村土壤 pH 最高, 衙下集镇毛家坪村最低。

2.2 不同玉米种植区域土壤线虫数量随时间的变化

由表 3 可以看出, 不同区域线虫数量随时间的推移变化显著, 均呈现逐渐增多的趋势, 且各地 9 月的线虫数量均达最多。不同地块中, 衙下集镇毛家坪村 8 月和 9 月的玉米根际土壤线虫数量均明显高于其他地块, 9 月的线虫数量最多, 高达 3 840 头/100 g 土壤, 为该地块 5 月初线虫数量的 59.08 倍, 且线虫数量于 8、9 月骤增。线虫数

表 2 不同玉米种植区域土壤养分含量

试验地	全氮 /(g/kg)	有效磷 /(mg/kg)	有效钾 /(mg/kg)	有机质 /(g/kg)	pH
红旗乡石板湾村	0.97±0.02 c	30.60±0.81 c	207.82±1.55 bc	15.42±0.35 d	8.30±0.00 b
红旗乡茨滩村	0.95±0.03 c	30.07±0.27 c	199.40±0.74 c	14.44±0.59 d	8.31±0.09 b
红旗乡出不啦村	0.55±0.03 e	11.84±0.10 e	183.19±0.85 c	10.61±0.21 e	8.60±0.04 a
太石镇何家湾村	1.07±0.04 bc	73.27±0.40 a	237.86±1.99 b	18.72±0.35 b	8.13±0.03 c
洮阳镇马家窑村	1.05±0.06 bc	22.14±0.24 d	167.23±0.91 d	16.82±0.41 d	7.94±0.08 de
衙下集镇岳家河村	0.87±0.05 d	7.83±0.09 f	102.25±0.94 e	13.68±0.59 d	8.36±0.49 b
衙下集镇杨家单庄	1.39±0.02 a	26.62±0.74 d	103.48±0.57 e	20.98±0.12 a	8.18±0.04 c
南屏镇靳家泉村	1.31±0.02 ab	47.47±0.49 b	255.70±1.50 b	18.28±0.78 b	7.96±0.04 de
衙下集镇毛家坪村	1.12±0.02 b	7.86±0.06 f	68.51±8.63 f	15.15±0.77 c	7.87±0.06 e
辛店镇裴家湾村	0.99±0.04 c	67.71±0.87 a	64.40±0.41 f	16.72±0.40 c	8.51±0.07 a
新添镇三十墩村	0.73±0.03 d	43.58±0.46 b	66.84±0.15 f	11.38±0.30 e	8.00±0.05 d
八里铺镇刘家崖村	1.29±0.03 ab	50.75±0.41 b	261.94±4.63 b	20.80±0.71 a	8.13±0.03 c
玉井镇岚张家窑村	1.37±0.05 a	30.46±0.48 c	330.46±0.83 a	20.69±0.86 a	8.37±0.04 b
玉井镇岚墩下村	1.12±0.05 b	34.46±0.50 c	162.09±0.32 d	16.06±0.15 c	8.04±0.05 d

表 3 不同月份中各玉米种植区域线虫的数量

试验地	头/100 g 土壤				
	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
红旗乡石板湾村	11	86	367	487	1 114
红旗乡茨滩村	55	202	347	465	752
红旗乡出不啦村	97	163	766	1 133	1 527
太石镇何家湾村	33	63	195	839	2 864
洮阳镇马家窑村	77	177	310	505	738
衙下集镇岳家河村	11	44	338	739	901
衙下集镇杨家单庄	11	42	131	264	705
南屏镇靳家泉村	37	71	126	256	797
衙下集镇毛家坪村	65	140	215	1 881	3 840
辛店镇裴家湾村	116	209	449	1 029	2 908
新添镇三十墩村	11	76	257	351	611
八里铺镇刘家崖村	22	43	99	374	1 273
玉井镇岚张家窑村	110	152	270	997	1 613
玉井镇岚墩下村	66	184	293	333	811

量相对较低的区域为衙下集镇杨家单庄, 9 月的线虫数量为 705 头/100 g 土壤。由表 3 可以看出, 不同区域 5 个月的线虫数量变化趋势基本一致, 其中平均线虫数量最多的为衙下集镇毛家坪村, 为 1 228 头/100 g 土壤; 辛店镇裴家湾村次之, 为 942 头/100 g 土壤; 衙下集镇杨家单庄最低, 为 231 头/100 g 土壤。

2.3 线虫数量与土壤养分的相关性

不同区域线虫数量与土壤的相关性分析(图1)表明, 全氮含量与线虫数量之间呈非线性相关, 回归方程为 $y = -4.98E3 + 1.25E4x + 5.81E3x^2$ ($R^2 = 0.169$)。表明并非土壤中全氮含量越高线虫数量就会越多。其中太石镇何家湾村、辛店镇裴家湾村、衙下集镇毛家坪村土壤中全氮含量分别为 1.07、0.99、1.12 g/kg, 位于线虫数量曲线峰值处。土壤中有有效磷含量与线虫数量呈非线性相关, 回归方程为 $y = 2.67E3 - 1.08E2x + 1.57x^2$ ($R^2 = 0.469$)。表明随土壤中有有效磷含量增加线虫含量显著减少, 但当有效磷含量高于 60 mg/kg, 线虫数量显著升高。14 个

调查区域中太石镇何家湾村和辛店镇裴家湾村有效磷含量分别为 73.27, 67.71 mg/kg, 显著高于其余区域, 9 月份测得的线虫数量也显著高于其余区域。衙下集镇毛家坪村有效磷含量为 7.87 mg/kg, 显著低于其余区域, 但该区域线虫数量最多。土壤中有有效钾含量与线虫数量呈非线性相关, 回归方程为 $y = 3.51E3 - 26.31x + 0.07x^2$ ($R^2 = 0.205$)。当土壤中有有效钾含量小于 50 mg/kg 或大于 300 mg/kg, 线虫数量增多。土壤中有有效钾含量相对较高的太石镇何家湾村、南屏镇靳家泉村、八里铺镇刘家崖村、玉井镇张家窑村 9 月份线虫数量显著高于其余区域。土壤中有效钾含量与玉米根际线虫数量呈非线性相关, 回归方程为 $y = -0.81E3 + 1.14E3x - 33.23x^2$ ($R^2 = 0.164$)。各区域线虫数量与有机质含量相关性分析, 决定系数反应 4% 的数据可被描述, 且数据分散程度高, 无线性相关性。非线性

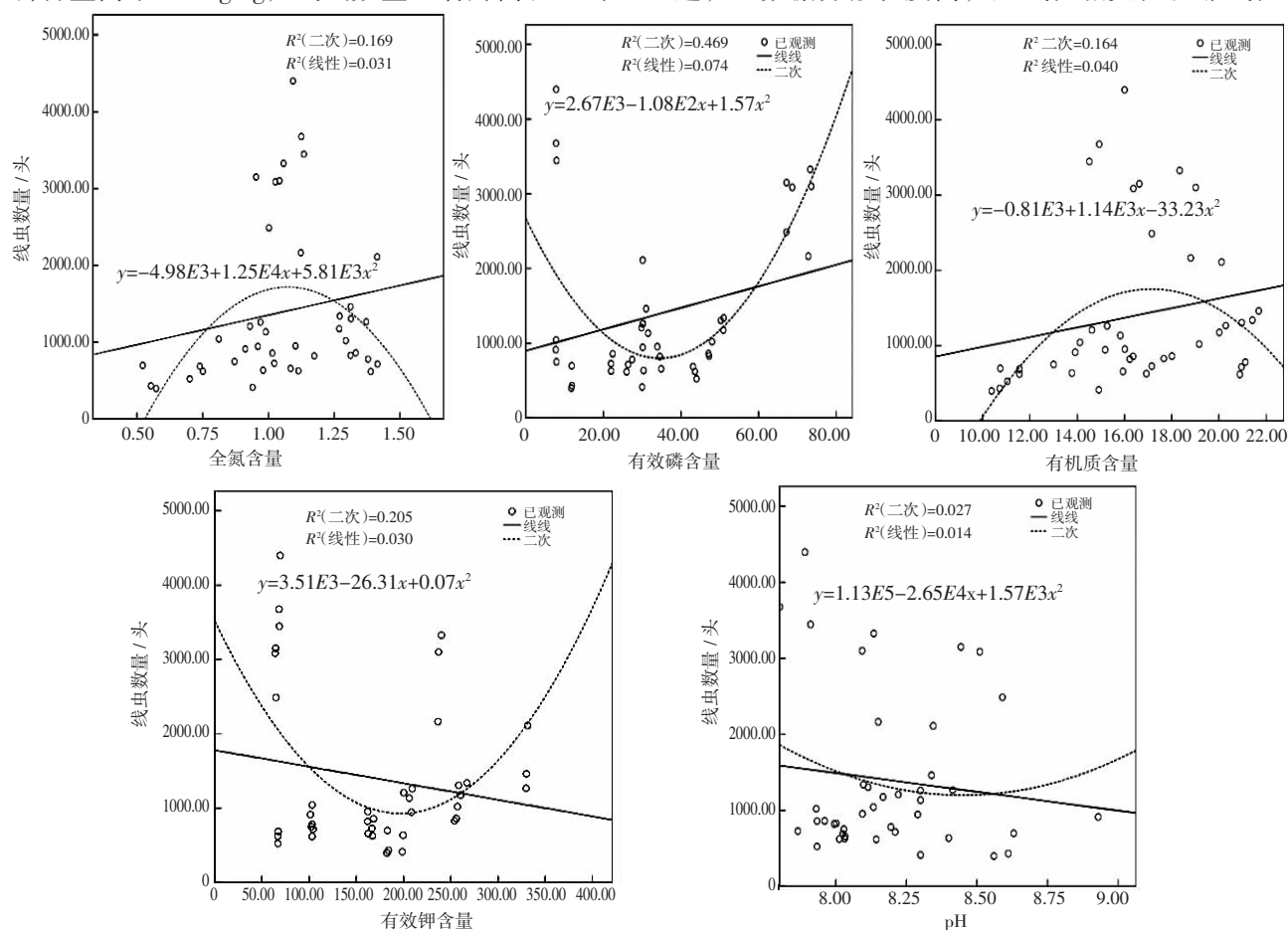


图1 土壤中养分含量与根际线虫数量相关性

曲线拟合度达 16.4%, 非线性相关程度高。土壤 pH 与玉米根际线虫数量之间无显著线性相关和非线性相关性, 本试验调查样地 pH 为 7.87 ~ 8.60, 属于偏碱性土壤。pH 与线虫数量之间的关系不显著, 不能作为当地影响线虫数量的主要因素。

2.4 临洮各区域线虫种类鉴定

对各区域的线虫进行形态学鉴定, 发现本地线虫以燕麦真滑刃线虫为主要群体(图 2)。燕麦真滑刃线虫头部低, 前端平圆, 不缢缩; 口针基部增厚, 无口针基部球, 食道前体柱状。食道峡部细而明显; 阴门位置较厚, 尾部端钝圆, 符合真滑刃线虫的形态特征。

3 讨论与结论

根结线虫几乎能寄生于所有的维管束植物, 在植物根部的延长区孵化出 2 龄幼虫侵染寄主, 一般可采用化学手段或改善田间管理等措施来减少线虫数量^[18-19]。线虫生活周期受土壤类型、温度、湿度及土壤中离子含量等的影响, 其中温度对其存活率影响显著^[20]。对不同作物的根系根结线虫卵孵化的适宜温度研究表明, 番茄、马铃薯、香蕉根系适宜线虫孵化温度分别为 15 ~ 30、24 ~ 35、15 ~ 30 ℃, 35 ℃ 以上的高温对线虫的孵化和 2 龄幼虫存活均有抑制作用^[21]。在本研究中临洮地区 5 月初平均气温较低, 线虫在深层土壤活动且线虫孵化率较低, 作物根际测定线虫数量少, 并且 5—7 月份增幅缓慢主要是因为线虫基数小, 而且追施尿素的管理措施对线虫的增加存在一定抑制作用; 7 月开始进入夏季高温季节, 临洮地区温度超过 30 ℃, 最高可达 36 ℃, 玉米植株需水量增加, 同时高温引起土壤水分蒸发量增加, 水分匮乏抑制了线虫的活性, 不利于繁殖; 9 月初气温逐渐降低至 30 ℃ 以下, 玉米生理活动下降, 需

水量降低, 土壤水分蒸发量也逐渐降低, 水分充足、温度适宜是导致玉米根际线虫数量显著升高的主要因素。线虫对不同地域环境适应性不同, 本研究在玉米生长季中, 随时间推移, 各种植区线虫数量均表现出逐渐增多的趋势, 表现出对温度变化的适应性, 该结果与伏召辉等^[20]的研究结果相符。临洮 14 个玉米种植区中, 红旗乡 3 个村庄、太石镇 1 村庄土壤类型为灰钙土, 衙下集镇 3 个村庄、南屏镇 1 村庄为黑垆土, 其余 6 个村庄为黄绵土。同一土壤类型下不同区域的线虫数量存在显著差异, 说明土壤性质对线虫数量和生活周期的影响不显著, 也可能是环境因素、土壤水分含量以及玉米品种相互作用的结果, 在后期研究中应该加入土壤水分与线虫分布及数量的研究。

线虫作为土壤生态系统的指示生物, 可以对土壤的健康水平、土壤的生物学效应、生态系统掩体及受害程度等做以评价^[22]。线虫数量在不同土壤条件下差异显著, 从土壤中主要物质的含量与线虫的相关性曲线分析, 说明可以通过控制土壤肥力促进植株生长, 在一定程度上还有效抑制线虫数量的作用。有研究发现土壤中有有效磷不超过 60 mg/kg, 有效钾的含量控制在 200 mg/kg, 可有效控制线虫数量, 减少线虫对玉米植株的危害^[23]。本研究中太石镇何家湾村样地中土壤有效磷含量(73.27 mg/kg)及有效钾含量(237.86 mg/kg)均较高, 同时在最适宜线虫生长的 9 月份该地线虫数量达 2 864 头, 除衙下集镇毛家坪村、辛店镇裴家湾村外, 显著高于其他区域线虫数量, 说明在一定程度上, 土壤中有有效磷和有效钾含量超出一定范围会促进线虫数量增加。土壤中全氮、有效磷、有效钾和有机质含量与线虫数量表现出一定非线性相关性。土壤全氮含量和线虫数量相关性分析表

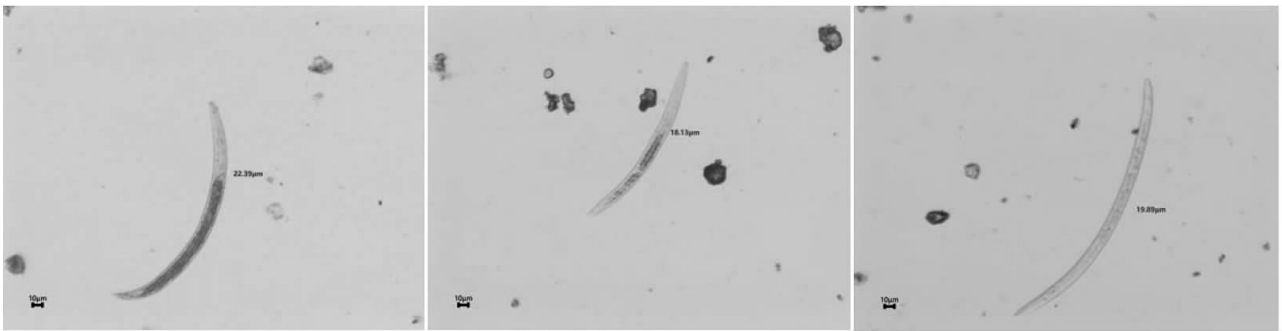


图 2 线虫形态鉴定

明,全氮含量在 1.00 g/kg 以上线虫数量逐渐减少,表明适当增加氮肥施用量可限制线虫数量。土壤有效磷、有效钾含量和线虫数量相关性分析表明,土壤中有效磷含量低于 40 mg/kg,有效钾的含量低于 200 mg/kg 可进一步限制线虫数量。临洮地区大部分区域土壤 pH 为 7.87~8.60,呈弱碱性,适宜线虫的生长^[20,24]。且该地玉米根际线虫以玉米短体线虫为主,在 8 月和 9 月根据线虫形态学观察发现燕麦真滑刃线虫(*Aphelenchus avenae* Bastian),但数量极少,说明临洮县玉米根际土壤并不是其生长发育的主要环境区域。本研究将对不同栽培管理制度下线虫数量的控制提供支撑,也将对临洮地区线虫的分类学研究提供理论基础。后期我们将进一步研究土壤养分梯度与线虫分布及数量的相关性,以更好地说明线虫分布与数量的受限因素,为该地区控制玉米病虫害提供理论依据。

参考文献:

- [1] 杜 宾. 根结线虫分类鉴定的原理和方法[J]. 太原学院学报(自然科学版), 2022, 40(1): 75-79.
- [2] 谢 辉, 冯志新. 植物线虫的分类现状[J]. 植物病理学报, 2000(1): 1-6.
- [3] 卓 侃, 廖金铃. 植物线虫分子鉴定研究进展[J]. 植物保护, 2015, 41(6): 1-8.
- [4] 乔月静, 刘 琪, 曾昭海, 等. 轮作方式对甘薯根际土壤线虫群落结构及甘薯产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(1): 20-29.
- [5] 秦 鑫, 王亚东, 李红梅, 等. 中国小麦短体线虫种类的分子鉴定及地理分布[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(2): 251-259.
- [6] 杜 宇, 邓宗汉, 丁元明, 等. 四种短体线虫的形态和分子生物学鉴定[J]. 植物病理学报, 2020, 50(1): 28-39.
- [7] THOMPSON J P, O'REILLY M M, CLEWETT T G. Resistance to the root-lesion nematode *Pratylenchus thornei* in wheat landraces and cultivars from the West Asia and North Africa (WANA) region[J]. Crop & Pasture Science, 2009, 60: 1209-1217.
- [8] 贺雨轩, 张钰杭, 张若冰, 等. 豫西黄土高原果园自然生草对土壤线虫群落及结构的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(3): 798-805.
- [9] JONES J T, HAEGEMAN A, DANCHIN E G, et al. Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology[J]. Molecular Plant Pathology, 2013, 14(9): 946-961.
- [10] 刘炎琨, 王 硕, 徐菲菲, 等. 山西长治玉米根腐线虫病原鉴定及致病性测定[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(10): 78-86.
- [11] 李成清, 郑经武. 4 种短体线虫形态及 rDNA-ITS 的 PCR-RFLP 鉴定[J]. 植物病理学报, 2013, 43(4): 444-448.
- [12] CHENDEV Y G, BURRAS C L, SAUER T J. Transformation of forest soils in Iowa(United States) under the impact of long-term agricultural development[J]. Eurasian Soil Science, 2012, 45: 357-367.
- [13] CEREVKOV A, MIKLISOV D, CAGAN L. Effects of experimental insecticide applications and season on soil nematode communities in a maize field[J]. Crop Protection, 2017, 92: 1-15.
- [14] 康恩祥, 张玉鑫, 蒯佳琳, 等. 不同覆砂年限果园土壤水盐及矿质元素变化与砂田衰退关系研究[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(12): 1118-1123.
- [15] 李百云, 许泽华, 郭鑫年, 等. 宁夏不同生态类型区土壤养分状况比较分析[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(5): 434-440.
- [16] BOAG B, EVANS K, YEATES G, et al. Global potential distribution of European longidorid virus-vector nematodes[J]. Nematologica, 1997, 43: 99-106.
- [17] 谢 辉, 冯志新. 植物线虫分类系统概述[J]. 云南农业大学学报, 1999(S1): 17-36.
- [18] CHOWDHURY I A, YAN G, KANDEL H, et al. Population development of the root-lesion nematode *Pratylenchus dakotaensis* on soybean cultivars[J]. Plant Disease, 2022, 106(8): 2117-2126.
- [19] GERMAN E, MAURICIO T, EDUARDO S, et al. Chemical control of *Meloidogyne* spp. in grapevines (*Vitis vinifera*) [J]. Journal of Applied Biosciences, 2019, 136(1): 13896-13908.
- [20] 伏召辉, 杜 超, 仵均祥. 温湿度及酸碱度对南方根结线虫生长发育的影响[J]. 北方园艺, 2012(6): 137-140.
- [21] 吴晓晶. 北方根结线虫对温度和无机化合物适应性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [22] 刘方明, 孟维韧, 刘今子, 等. 不同土地利用方式下土壤线虫群落的垂直分布分析[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(19): 4266-4269.
- [23] 倪雪蓉. 长期施不同量化肥对黑土区旱田土壤线虫、细菌群落及微食物网络结构的影响[D]. 中国科学院大学, 2024.
- [24] 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[J]. 生物多样性, 2001(3): 237-240.