

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2026.01.009

## 香豆素类化合物对南方根结线虫的杀线虫活性评价

锡道江<sup>1</sup>, 刘挺<sup>2</sup>, 刘东阳<sup>2</sup>, 江连强<sup>2</sup>, 龙岗<sup>2</sup>,  
任波<sup>1</sup>, 杨平龙<sup>1</sup>, 文诚志<sup>1</sup>, 余佳敏<sup>3</sup>

1. 西南大学植物保护学院, 重庆 400715;

2. 中国烟草总公司四川省公司凉山州公司, 四川 西昌 615000;

3. 四川省烟草科学研究所, 四川 成都 610000

**摘要:** 南方根结线虫(*Meloidogyne incognita*)为植物专性寄生病原线虫之一, 对茄科作物番茄和烟草危害严重。近年来药剂施用量增加而抗性逐渐增强, 需要筛选新的替代药剂作为杀线虫备选药剂。研究评价了11种常见香豆素类化合物对南方根结线虫的杀线虫活性。裁剪烟根根瘤孵化制备50条/100  $\mu$ L的线虫悬浮液, 经96孔板24 h和48 h后镜检药剂对南方根结线虫的杀线虫数量。试验发现: 125 mg/L香豆素、125 mg/L 6-甲基香豆素对南方根结线虫具有较好的生物活性, 对线虫24 h的 $LC_{50}$ 值分别为19.22 mg/L、39.44 mg/L; 大田试验中, 处理C1可以显著提升植株旺长期的株高、最大叶长, 显著提升打顶期株高、茎围、有效叶片数; 在调查末期, 处理C1、C3病情指数最低, 分别为23.69、25.48, 对照为41.83, 防效分别为43.37%、39.09%。本试验初步筛选出安全高效、具有良好推广应用前景的香豆素和6-甲基香豆素杀线虫药剂。

**关键词:** 南方根结线虫; 香豆素;

6-甲基香豆素; 杀线虫活性

中图分类号: S482.2+93

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2097-1354(2026)01-0083-10

## Evaluation of Nematicidal Activity of Coumarin Compounds Against *Meloidogyne incognita*

XI Daojiang<sup>1</sup>, LIU Ting<sup>2</sup>, LIU Dongyang<sup>2</sup>, JIANG Lianqiang<sup>2</sup>,

收稿日期: 2024-10-10

基金项目: 中国烟草总公司四川省公司科技专项项目“四川烟草主要病虫害绿色防控技术深化研究及体系集成”(YCQTSC202401)。

作者简介: 锡道江, 硕士研究生, 主要从事根结线虫的药剂筛选及机制研究。

通信作者: 余佳敏, 农艺师。

LONG Gang<sup>2</sup>, REN Bo<sup>1</sup>, YANG Pinglong<sup>1</sup>,  
WEN Chengzhi<sup>1</sup>, YU Jiamin<sup>3</sup>

1. College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Liangshan Prefecture Company, Sichuan Provincial Company,

China National Tobacco Corporation, Xichang, Sichuan 615000, China;

3. Sichuan Provincial Tobacco Science Research Institute, Chengdu 610000, China

**Abstract:** *Meloidogyne incognita* is one of the plant obligate parasitic pathogenic nematodes, which is seriously harmful to tomato and tobacco. In recent years, with the increase of pesticides application, the resistance of *Meloidogyne incognita* to pesticides has gradually increased, and it is necessary to screen new substitute agents as alternative nematicides. This study evaluated the bioactivity of 11 common coumarin compounds against *M. incognita* through bioassays. Root galls from tobacco roots were excised and incubated to prepare a nematode suspension at a concentration of 50 individuals/100  $\mu$ L. The number of dead nematodes treated with different compounds was microscopically examined in 96-well plates after 24 h and 48 h of treatments. Bioassay results showed that coumarin and 6-methylcoumarin exhibited excellent bioactivity against *M. incognita* at 125 mg/L, with 24 h  $LC_{50}$  value of 19.22 mg/L and 39.44 mg/L, respectively. In the field experiment, Treat C1 significantly increased the plant height and maximum leaf length during the vigorous growth stage of plants, as well as the plant height, stem diameter, and number of effective leaves during the topping stage. At the end of Treat C1 and Treat C3 had the lowest disease index (23.69 and 25.48, respectively), while the control group had a disease index of 41.83. The corresponding control efficiency was 43.37% and 39.09%, respectively. In this experiment, coumarin and 6-methylcoumarin were screened out as safe and efficient nematicides, with good application prospects.

**Key words:** *Meloidogyne incognita*; coumarin; 6-methylcoumarin; nematocidal activity

南方根结线虫(*M. incognita*)是一种专化性寄生线虫,分布广泛<sup>[1]</sup>,危害严重。南方根结线虫在烟草的各个时期都可以侵染,其中在幼苗期侵染危害较大。随着连作年限的增加,土壤中线虫数量越积越多,在连作年限12年的蔬菜大棚中调查,土壤中根结线虫数量达到861.8条/100 g干土<sup>[2]</sup>。线虫在土壤中的聚集,严重危害农田作物生长。当前常用的根结线虫的防控药剂为阿维菌素(Abamectin, ABA)、噻唑膦(Fosthiazate, FST)等药剂,长期使用使线虫产生了抗性。吴青松<sup>[3]</sup>测定了南方根结线虫中抗性种群和敏感种群对噻唑膦的耐受能力,抗性种群 $LC_{50}$ 为152.18 mg/L,敏感种群 $LC_{50}$ 为55.54 mg/L,抗性种群抗性倍数是敏感种群的2.74倍。抗性种群的乙酰胆碱酯酶比活力降低,噻唑膦对线虫神经系统的抑制降低。氟吡菌酰胺对根结线虫病、烟草黑胫病具有较好的防控能力,但价格较高,生产上应用较少。武文卿等<sup>[4]</sup>发现:苜蓿田喷施5%阿维菌素乳油20 mL/667 m<sup>2</sup>会在短期内缩短蜜蜂访花时间并降低访花效率;经过1 h、2 h、4 h、24 h处理后,蜜蜂乙酰胆碱酯酶活力、羧酸酯酶活力、谷胱甘肽转移酶活力均比对照显著升高。

化学药剂作为田间主要的防治手段,常年单一使用容易使线虫形成抗性种群,为延缓抗性产生,需搭配多种化学药剂<sup>[5]</sup>或生物菌剂如淡紫拟青霉<sup>[3, 6]</sup>等进行综合防治。田间操作上,种植抗病品种<sup>[7]</sup>、作物轮作<sup>[8-9]</sup>、翻耕土地<sup>[10]</sup>等也能部分抑制根结线虫病的发生。目前也有一些植物源农药对线虫具有较好的防效,如异硫氰酸烯丙酯、黄酮类化合物杀线虫活性较高<sup>[8, 10]</sup>。

周源<sup>[11]</sup>发现,万寿菊制剂、万寿菊间作、克线灵制剂防治烟草根结线虫病时,万寿菊制剂防效达到 63.76%,间作达到 62.00%。

香豆素类化合物作为植物源天然产物,具有抗肿瘤、抗病毒、抗氧化、降压等多种生物活性<sup>[12-13]</sup>。香豆素化合物是一类含有苯骈  $\alpha$ -吡喃酮母核结构的芳香含氧杂环化合物,这种结构赋予其良好的生物活性和分子可塑性。香豆素类化合物来源广泛,其广泛存在于伞形科、豆科、菊科、芸香科等多种植物中。例如,伞形科的蛇床子、白芷,豆科的紫苜蓿,菊科的茵陈蒿等植物,均是香豆素类化合物的重要来源<sup>[14-16]</sup>。香豆素类化合物在松材线虫(*Bursaphelenchus xylophilus*)的活性研究较多,无花果中的甲醇提取物补骨脂素<sup>[17]</sup>,当归中的乙酸乙酯提取物蛇床子素、二氢欧山芹醇当归酸酯、佛手柑内酯和花椒毒素<sup>[18]</sup>均对松材线虫(*B. xylophilus*)有较好的杀线虫活性。在狼毒根乙醇提取物的乙酸乙酯层中分离得到 8 种活性物质,其中狼毒素 C 对松材线虫 72 h 的  $LC_{50}$  为 2.7  $\mu\text{mol/L}$ ,狼毒色原酮对线虫具有更强的杀线虫活性, $LC_{50}$  为 0.003  $\mu\text{mol/L}$ <sup>[19]</sup>。

Pan 等<sup>[20]</sup>对香豆素骨架中 C4 和 C7 位置进行靶向设计后,测试了衍生物对南方根结线虫(*M. incognita*)、腐烂茎线虫(*Ditylenchus destructor*)、松材线虫(*B. xylophilus*)和拟松材线虫(*Bursaphelenchus mucronatus*)的生物活性,找到 4 种杀线虫能力较好的衍生物,其中 72 h 时对南方根结线虫的  $LC_{50}$  分别为 64.0  $\mu\text{mol/L}$ 、37.4  $\mu\text{mol/L}$ 、5.1  $\mu\text{mol/L}$ 、42.4  $\mu\text{mol/L}$ 。Wang 等<sup>[21]</sup>从白亮独活的根提取物中分离到 3 种对松材线虫具有毒杀活性的化合物分别为 8-香叶草氧基补骨脂素、欧前胡素、独活内酯,72 h 的  $LC_{50}$  分别为 188.3 mg/L、161.7 mg/L、114.7 mg/L。蛇床子和白芷根的乙酸乙酯提取物对松材线虫具有显著的杀线虫活性,同时抑制卵孵化,降低线虫取食和繁殖能力,也能抑制松材线虫的 AChE 和  $Ca^{2+}$ -ATP 酶<sup>[20]</sup>。本文从香豆素类化合物对南方根结线虫的生物活性测定出发,筛选出对根结线虫具有防控潜力的化合物,以常规药剂阿维菌素作为对照,为田间控病试验提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验仪器:BSA124S-CW 电子天平(上海齐欣科学仪器有限公司)、DHP-9162 电热恒温培养箱(德国 Sartorius 公司)、CCT-3320 纯水机(成都威思达智能科技有限责任公司)、BDS400 倒置光学显微镜(重庆奥特光学仪器有限公司)。

试验试剂:香豆素(Coumarin)、6-甲基香豆素(6-Methylcoumarin)、7-甲基香豆素(7-Methylcoumarin)、东莨菪内酯(Scopoletin)、瑞香素(7, 8-Dihydroxycoumarin)、秦皮乙素(6, 7-Dihydroxycoumarin)、秦皮素(7, 8-dihydroxy-6-methoxycoumarin)、6-硝基香豆素(6-Nitrocoumarin)、蛇床子素(Osthole)、滨蒿内酯(Scoparone)、7-羟基-4-甲基香豆素(4-Methylumbelliferone)。丙酮、吐温-80。

试验生物材料:带有根结的发病烟根,根据前期的研究结果,线虫种类已经鉴定为南方根结线虫,田间移栽苗为大棚育苗 65~75 d 的烟苗。

### 1.2 试验设计

#### 1.2.1 二龄幼虫悬浮液准备

在育苗棚内选取发病严重并有大量根结的烟根(图 1),将烟根附着的土壤清洗干净后带回天然产物农药研究室。将根结剪短后放入平板培养皿中,培养皿中垫一层滤纸,加入少量 RO

水润湿滤纸和浸没根结,之后将平板放入 25~28 °C 恒温培养箱中。孵化 1~2 d 后将含线虫的水溶液吸入离心管中。离心浓缩后取 100  $\mu\text{L}$  在 96 孔板进行计数,3 孔计数的平均值为悬浮液中的线虫浓度,大致为 50 条/100  $\mu\text{L}$ <sup>[22-24]</sup>。

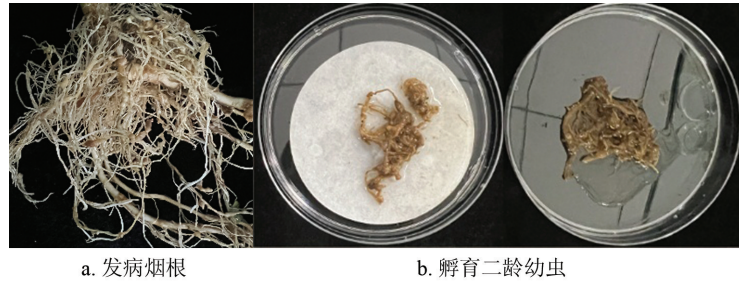


图 1 发病烟根及孵育二龄幼虫

香豆素类化合物不溶于水,借助丙酮和吐温-80 使香豆素类化合物溶于水。2 000 mg/L 药剂配制方法:(1)0.1%吐温-80 水溶液的配制。枪头吸取 10 mg 吐温-80 于烧杯中,加入 10 mL RO 水,置于超声机内超声 10 min,制成 0.1%吐温-80 水溶液。(2)万分之一天平称取 4 mg 的药,置于 2 mL 离心管中,同时用枪头吸取 4 mg 吐温-80 于离心管中。(3)向离心管中加入 10~30  $\mu\text{L}$  丙酮,快速搅拌,使香豆素类物质溶解于丙酮中,加入 2 mL 0.1%吐温-80 水溶液,搅拌均匀后,置于超声波内振荡 10 min。

### 1.2.2 室内试验处理

吸取 100  $\mu\text{L}$ (约 50 条 J2)的南方根结线虫悬浮液于 96 孔细胞培养板中,将香豆素类化合物配制成 2 000 mg/L、1 000 mg/L、500 mg/L、250 mg/L、125 mg/L、62.5 mg/L、31.25 mg/L 的水溶液,各取 100  $\mu\text{L}$  加入盛有线虫液的 96 孔板内混匀。每个浓度设置 8 个孔位,24 h 和 48 h 各观察 4 孔。每个药剂不同时间和不同批次线虫状态下进行 3 次试验,确保数据可再现。

试验开始时,评估 0.1%吐温-80、丙酮、RO 水对线虫的杀虫活性,确认无杀虫活性或活性较低。在 25~28 °C 静置 24 h 后于倒置显微镜下统计 4 个孔内的线虫情况,48 h 统计另外 4 孔。线虫死亡鉴定标准统一为“僵直不动”,为预防线虫假死,统计死亡数量时在 96 孔板中加入 1 mol/L 的 NaOH 100  $\mu\text{L}$ ,观察线虫对刺激的反应,未对刺激做出反应则默认为死亡。计算线虫校正死亡率,计算方法如下:

$$\text{死亡率} = \frac{\text{死亡线虫数}}{\text{处理线虫数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{校正死亡率} = \frac{\text{处理死亡率} - \text{对照死亡率}}{1 - \text{对照死亡率}} \times 100\% \quad (2)$$

### 1.3 田间试验验证

根据初筛中 125 mg/L 对南方根结线虫的室内杀虫活性,选择香豆素和 6-甲基香豆素作为田间试验药剂,设置 100 mg/L 和 300 mg/L 作为田间处理浓度。配制 5% 香豆素乳油和 5% 6-甲基香豆素乳油,后续按 166 倍稀释灌根和 500 倍稀释灌根。按照当地常规方式进行育苗、施肥、移栽和管理,试验共设计 6 个处理,每个处理设置 3 个小区,每小区 60 株烟、18 个小区、1 080 株烟,外围设置保护行。试验地点位于四川凉山州会理市黎溪镇横塘坝村烟草种植基地单元。该地常年种植烟草作物,前茬作物为小麦。烟草育苗时间为 2024 年 2 月 21 日—4 月 26

日,烟草移栽时间为 4 月 27 日。

试验设置 6 个处理。C1: 香豆素灌根, 20 g/667 m<sup>2</sup>, 100 mL; C2: 香豆素灌根, 60 g/667 m<sup>2</sup>, 100 mL; C3: 6-甲基香豆素灌根, 20 g/667 m<sup>2</sup>, 100 mL; C4: 6-甲基香豆素灌根, 60 g/667 m<sup>2</sup>, 100 mL; C5: 阿维菌素, 800 倍液灌根; CK: 清水对照。实验室配制成 5% 香豆素和 5% 6-甲基香豆素乳油后, 离心管分装并锡纸避光包装后带入田间。

#### 1.4 农艺性状和病害调查

按《烟草农艺性状调查测量方法》(YC/T 142—2010)标准测定农艺性状, 主要包括烟株的株高、茎围、有效叶片数、最大叶长、最大叶宽, 每小区测定烟株 5 株, 根据公式计算叶面积。烟草病害发生情况按《烟草病虫害分级及调查方法》(GB/T 23222—2010)国家标准调查。结合当地的病害发生特点, 主要对根结线虫病进行调查, 调查每个小区的发病株数及发病级数, 计算发病率, 病害调查可与测定烟草农艺性状同步进行。根据根结线虫病的发生情况, 在发病初期开始调查, 每隔 5 d 调查 1 次, 连续调查 4 次以上。

$$\text{叶面积} = 0.6345 \times \text{叶长}(\text{cm}) \times \text{叶宽}(\text{cm}) \quad (3)$$

$$\text{病情指数} = \frac{\sum(\text{发病株数} \times \text{该病级代表值})}{\text{调查总株数} \times \text{最高级代表值}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{防控效果} = \frac{\text{对照病情指数} - \text{处理病情指数}}{\text{对照病情指数}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{病情进展曲线下面积(AUDPC)} = \sum \left( \frac{X_i + X_{i-1}}{2} \right) \times (t_i - t_{i-1}) \quad (6)$$

在公式中,  $X_i$  和  $X_{i-1}$  分别表示  $t_i$  和  $t_{i-1}$  的病情指数,  $t_i - t_{i-1}$  代表后一次调查时间与前一次调查时间的间隔。

#### 1.5 数据分析

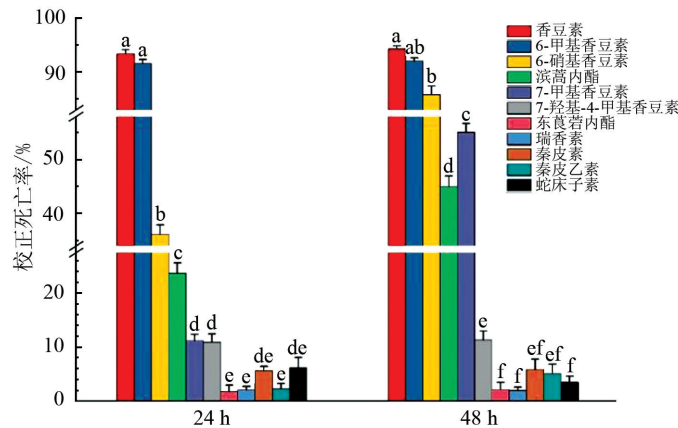
依据生物活性测定试验的校正死亡率及其药剂浓度对数, 使用 Excel 2016 软件得出毒力回归方程  $y = a + bx$ , 用 SPSS 27.0 计算供试药剂的  $LC_{50}$  及其相应置信区间。田间试验中用 Duncan 新复极差法对不同处理进行多重比较。用 Origin 21 进行试验数据绘图。不同小写字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 11 种香豆素类化合物的室内杀虫活性比较

在现有的 11 种香豆素化合物在 125 mg/L 条件下对南方根结线虫的杀虫活性测试如图 2 所示, 阴性对照和 RO 水(空白对照)死亡率均低于 5%。多数香豆素类化合物, 如 7-羟基-4-甲基香豆素、秦皮乙素、秦皮素、东莨菪内酯在 1 000 mg/L 时 24 h 和 48 h 对线虫致死率较低, 不符合预期。500 mg/L 瑞香素在 24 h 时对线虫校正死亡率仅为 43.03%, 500 mg/L 蛇床子素在 24 h 时对线虫致死率为 0。测试发现, 香豆素、6-甲基香豆素、6-硝基香豆素在 125 mg/L 对线虫具有较好的杀虫活性, 香豆素和 6-甲基香豆素在 125 mg/L、24 h 时对南方根结线虫具有 90% 以上的校正死亡率, 与其他化合物存在显著性差异。6-硝基香豆素和 7-甲基香豆素 24 h 时杀虫活性较低, 48 h 时校正死亡率分别为 85.77% 和 55.06%。滨蒿内酯在 125 mg/L 时对线虫有一定致死率, 但效果较差, 48 h 校正死亡率仅为 45.00%, 其他药剂在 125 mg/L 时对南方根结线虫的杀虫活性较低, 24 h 和 48 h 内均未表现出较好的杀线虫活性。据此, 选择 125 mg/L

时生物测定活性较好的香豆素和 6-甲基香豆素进行复筛。



注:不同小写字母表示不同药剂的测定活性评价存在显著差异( $p < 0.05$ )。

图2 11种香豆素类化合物在 125 mg/L 对南方根结线虫的生物测定活性评价

## 2.2 香豆素和 6-甲基香豆素对二龄幼虫生物活性测定拟合方程

根据前期的香豆素药剂杀线虫活性评价发现,在 125 mg/L 时,香豆素和 6-甲基香豆素对根结线虫均具有较好的杀虫活性。在 3.75 mg/L、7.5 mg/L、15 mg/L、30 mg/L、60 mg/L、120 mg/L 等 6 个浓度梯度下筛选对线虫的致死率,并与常规药剂阿维菌素对比,其  $LC_{50}$ 、毒力回归方程等如表 1 所示。

表 1 香豆素、6-甲基香豆素及阿维菌素对二龄幼虫生物活性测定的回归方程

药剂	时间/h	$LC_{50}/(mg \cdot L^{-1})$	毒力回归方程	$R^2$	95%置信区间
香豆素	24	19.215	$y = 51.235x - 15.884$	0.980 6	17.637-20.916
	48	17.444	$y = 55.659x - 19.627$	0.984 1	16.135-18.837
6-甲基香豆素	24	39.435	$y = 71.117x - 62.536$	0.958 0	36.943-42.162
	48	26.751	$y = 69.664x - 49.884$	0.993 5	24.997-28.609
阿维菌素	24	17.410	$y = 63.803x - 30.210$	0.970 1	16.306-18.576
	48	13.605	$y = 60.215x - 19.368$	0.951 3	12.132-15.194

120 mg/L 香豆素和 6-甲基香豆素处理 24 h 后线虫的生存状况(如图 3 所示),在 RO 水中,线虫活性较高,经香豆素、6-甲基香豆素、阿维菌素处理后,加入 1 mol/L 的 NaOH 刺激,线虫僵直,说明经香豆素、6-甲基香豆素、阿维菌素处理后的线虫已经死亡。

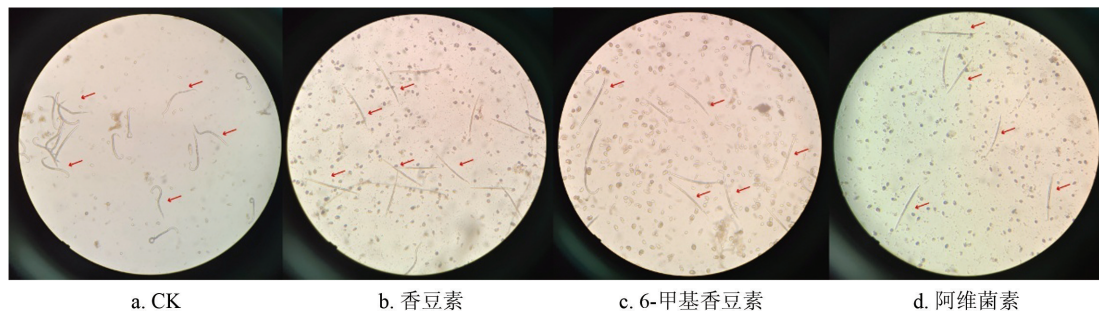


图3 线虫在显微镜下的状态

## 2.3 不同处理对烟草农艺性状的影响

### 2.3.1 不同处理对植株旺长期农艺性状的影响

对植株旺长期的农艺性状调查发现(表 2), 处理 C1 株高显著提升为 60.61 cm, CK 株高 52.74 cm, 处理 C1 与 CK 存在显著性差异, 提升了 14.92%; 处理 C1、C2、C3 植株的最大叶长显著提升, 与 CK 存在显著性差异, 分别为 76.00 cm、76.00 cm、76.07 cm, 提升了 6.35%、6.35%、6.45%; 其余的农艺性状与 CK 差异不显著。

表 2 香豆素处理旺长期农艺性状

处理	株高/cm	最大叶长/cm	最大叶宽/cm	最大叶面积/cm <sup>2</sup>	茎围/cm	有效叶片数/片
C1	60.61±1.21a	76.00±1.13a	28.82±0.72a	1 391.57±44.08a	12.40±0.33a	18.53±0.58a
C2	57.95±0.68ab	76.00±1.59a	27.69±0.68a	1 342.40±57.07ab	11.58±0.20bc	17.53±0.45ab
C3	52.95±0.93c	76.07±1.25a	28.35±0.86a	1 374.68±59.16a	12.08±0.23ab	17.40±0.40ab
C4	57.65±1.40b	70.91±0.78b	26.52±0.68a	1 195.37±38.42b	11.49±0.31bc	17.73±0.33ab
C5	53.83±0.71c	67.72±1.93b	27.63±0.79a	1 191.78±53.78b	11.22±0.21c	17.00±0.28b
CK	52.74±0.79c	71.46±1.93b	27.94±0.92a	1 275.43±67.73ab	11.41±0.27bc	18.47±0.52a

注: 不同小写字母表示不同处理的烟株农艺性状差异显著( $p < 0.05$ ), 下同。

### 2.3.2 不同处理对植株打顶期农艺性状的影响

对植株打顶 7 d 的农艺性状调查发现(表 3): 处理 C1 提高了植株多项农艺性状, 株高、茎围、有效叶片数分别为 90.38 cm、12.44 cm、21.33 片, CK 为 79.70 cm、11.73 cm、18.00 片, 与对照均存在显著性差异, 分别提升了 13.40%、6.05%、18.33%, 其他处理差异不显著; 处理 C2 和处理 C3 最大叶长显著增加, 分别为 80.65 cm、79.97 cm, CK 仅为 74.30 cm, 提升了 8.55%、7.63%; 处理 C2 还显著增加了植株的最大叶面积为 1 556.82 cm<sup>2</sup>, CK 为 1 389.33 cm<sup>2</sup>, 提升了 12.06%。

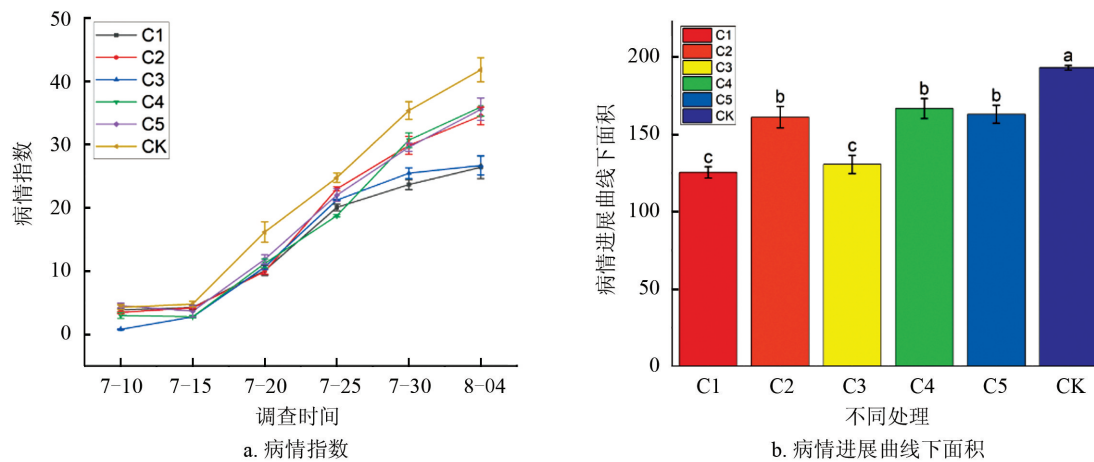
表 3 香豆素处理打顶期 7 d 农艺性状

处理	株高/cm	最大叶长/cm	最大叶宽/cm	最大叶面积/cm <sup>2</sup>	茎围/cm	有效叶片数/片
C1	90.38±2.12a	76.34±1.73bc	30.03±0.55a	1 458.98±51.99ab	12.44±0.18a	21.33±0.32a
C2	82.57±1.95b	80.65±1.33a	30.41±0.54a	1 556.82±39.46a	12.19±0.28ab	19.07±0.45b
C3	78.70±1.82bc	79.97±1.34ab	29.13±0.47a	1 476.99±30.53ab	12.26±0.22ab	18.73±0.34bc
C4	81.23±1.37b	74.13±1.84c	29.87±0.45a	1 404.49±39.69b	11.84±0.20ab	19.13±0.31b
C5	75.96±0.78c	73.69±0.74c	30.48±0.56a	1 424.55±27.97b	11.91±0.20ab	17.60±0.31d
CK	79.70±1.19bc	74.30±0.90c	29.49±0.62a	1 389.33±31.56b	11.73±0.20b	18.00±0.24cd

## 2.4 不同处理对烟草根结线虫病的防治效果

2024 年 7 月初进入根结线虫发病期。7 月 10 日调查(图 4a), 处理 C3 和 C4 可以有效抑制病情指数, 处理 C3 和 C4 病情指数最低为 0.78 和 2.96, CK 为 4.29, 防效为 81.82%和 31.00%。7 月 20 日调查, 处理 C3 和 C4 病情指数最低为 9.95 和 10.09, CK 病情指数为 16.17, 二者与 CK 存在显著性差异, 防效分别为 38.47%和 37.60%。8 月 4 日调查末期, 发现处理 C1 和 C3 可以有效抑制病情进展, 在所有对照和处理中病情指数最低, 为 23.69 和 25.48, 对照为 41.83, 相关防效为 43.37%和 39.09%。

基于7月30日到8月4日的病情进展曲线下面积表明(图4b),处理C1、C3分别为125.27和130.48,CK为193.00,与CK间存在显著性差异,处理C1和C3延缓了植株的病情进展。



注:不同字母表示组间数据具有显著差异( $p < 0.05$ )。

图4 不同处理病情指数和病情进展曲线下面积

### 3 结论与讨论

本试验评价了11种常见香豆素类化合物对南方根结线虫的致死率,发现香豆素和6-甲基香豆素在125 mg/L时可以有效杀死线虫,校正死亡率达到90%以上。在大田试验中,处理C1可以有效提升植株旺长期的株高、最大叶长,在打顶期仍然能维持株高、茎围、有效叶片数优势。在调查末期,处理C1和处理C3在所有对照和处理中病情指数最低,为23.69和25.48。

南方根结线虫作为一种根系寄生物种,只有依赖植株才能完成整个的生命历程。烟草作为一种经济作物,根系容易遭受线虫侵害,当前市场上的阿维菌素、噻唑膦等药剂,常年使用容易产生抗药性<sup>[25-26]</sup>,同时聚集在土壤中不易分解,加剧土壤酸化<sup>[27]</sup>。6-甲基香豆素对苹果树腐烂病菌(*Valsa mali*)和疏忽拟盘多毛孢菌(*Pestalotiopsis neglecta*)的抑菌活性分别为94.6%和76.9%<sup>[28]</sup>。香豆素类化合物作为植物分泌的苯丙烷类衍生物,不仅具有直接抑制作物病原体的活性,还被证实可调控微生物组结构而间接增强植物系统性抗性。在香豆素诱导的化感胁迫下,有益菌群在多花黑麦草(*Lolium multiflorum*)根际定植<sup>[29]</sup>。香豆素可通过调控鞘脂单胞菌属(*Sphingomonas*)和链霉菌属(*Streptomyces*)的丰度,激活其合成几丁质酶或抗生素的基因簇<sup>[30-31]</sup>,香豆素可通过干扰微生物群体感应系统,抑制革兰氏阴性细菌生物膜形成<sup>[32-33]</sup>。Rastija等<sup>[34]</sup>研究了9种香豆素类衍生物对尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)、禾谷镰孢菌(*Fusarium culmorum*)、菜豆壳球孢菌(*Macrophomina phaseolina*)和核盘菌(*Sclerotinia sclerotiorum*)的抗菌活性,发现这些衍生物可通过抑制内切-1,4- $\beta$ -葡聚糖酶I和果胶酶等细胞壁降解酶的活性而干扰真菌的侵染过程。部分香豆素类化合物能诱导植株抗性基因的表达<sup>[35-37]</sup>,干扰细菌的群体感应<sup>[38]</sup>。总之,利用香豆素的杀虫能力和对土壤病原菌的抑制能力,可促进烟株健康生长。

## 参考文献:

- [1] 赵洪海,刘维志,王东昌.根结线虫分类手段的研究概况[J].莱阳农学院学报,2000(4):250-261.
- [2] 时立波,王振华,吴海燕,等.连作年限对番茄根围土壤根结线虫二龄幼虫与自由生活线虫数量的影响[J].植物病理学报,2010,40(1):81-89.
- [3] 吴青松.南方根结线虫对噻唑膦的抗药性分析及其抗性治理策略初探[D].北京:中国农业科学院,2016.
- [4] 武文卿,贺娟,宋怀磊,等.苜蓿花期喷施阿维菌素对蜜蜂及野生传粉昆虫的影响[J].中国植保导刊,2021,41(12):9-13.
- [5] 余亚琳,谷星慧,李红娟,等.2种杀线剂对烤烟根系生长和根结线虫的影响[J].安徽农业科学,2021,49(17):130-135.
- [6] 张晓英,徐宇飞,王洪凤,等.宛氏拟青霉提取物与阿维菌素配施对番茄根结线虫病的防治效果[J].中国蔬菜,2024(2):92-99.
- [7] 喻盛甫,胡先奇,王扬.云南烟草根结线虫优势种群动态规律研究[J].云南农业大学学报,1998,13(1):52-58.
- [8] 吴凤芝,田昱铭,白晶芝,等.分蘖洋葱鳞茎中黄酮类化合物分析及其与番茄根结线虫病发生的关系[J].东北农业大学学报,2021,52(9):19-28.
- [9] 黄光荣.烟草轮作增产增效的作用与评价[D].贵阳:贵州大学,2008.
- [10] 查宏波,赵芳,陈旭,等.翻耕深度对连作烟地土壤物理特性、烤烟生长发育及产质量的影响[J].华北农学报,2019,34(S1):250-254.
- [11] 周源.几种杀线药剂对烟草根结线虫的防效研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)农业科学,2023(5):106-108.
- [12] 刘阳,卢年华,冯亭亭,等.瑞香狼毒中香豆素类化合物的研究进展[J].河北北方学院学报(自然科学版),2020,36(2):48-51.
- [13] 周蕙祯,罗伟,陈爽,等.瑞香狼毒花中香豆素成分及生物活性研究[J].中草药,2021,52(4):943-950.
- [14] 吕华伟,梁慧敏,朱梦迪,等.香豆素类化合物的生物合成关键酶及活性研究进展[J].中国中药杂志,2024,49(14):3693-3705.
- [15] 董熠,刘丽佳,韩璐雯,等.香豆素类化学成分的药理作用及毒性机制研究进展[J].中草药,2023,54(16):5462-5472.
- [16] 王玉新,刘艳阳,黄玲,等.芸香中香豆素类化学成分研究[J].湖南中医药大学学报,2024,44(3):395-400.
- [17] NGUYEN D N, WANG S L, NGUYEN A D, et al. Potential Application of Rhizobacteria Isolated from the Central Highland of Vietnam as an Effective Biocontrol Agent of Robusta Coffee Nematodes and as a Bio-Fertilizer[J]. Agronomy-Basel, 2021, 11(9): 1887. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091887>
- [18] SILVA F J, CAMPOS V P, OLIVEIRA D F, et al. Chalcone Analogues: Synthesis, Activity Against *Meloidogyne Incognita*, and in Silico Interaction with Cytochrome P450[J]. Journal of Phytopathology, 2019, 167(4): 197-208.
- [19] CUI H Y, JIN H, LIU Q, et al. Nematicidal Metabolites from Roots of *Stellera Chamaejasme* Against *Bursaphelenchus xylophilus* and *Bursaphelenchus mucronatus*[J]. Pest Management Science, 2014, 70(5): 827-835.
- [20] PAN L, LI X Z, SUN D, et al. Design and Synthesis of Novel Coumarin Analogs and Their Nematicidal Activity Against Five Phytonematodes[J]. Chinese Chemical Letters, 2016, 27(3): 375-379.
- [21] WANG X B, LI G H, LI Li, et al. Nematicidal Coumarins from *Heracleum Candicans* Wall[J]. Natural Product Research, 2008, 22(8): 666-671.
- [22] 李星星,尚嘉彦,袁海琪,等.不同药剂对南方根结线虫的室内生物活性测定[J].农业灾害研究,2023,13(8):31-33.
- [23] 黄小芳,刘文义,梅明鹏,等.五种药剂对松材线虫生殖发育的胁迫作用[J].中国森林病虫,2024,43(3):14-20.

- [24] LIU F F, YANG Z S, ZHENG X, et al. Nematicidal Coumarin from *Ficus Carica* L[J]. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2011, 14(1): 79-81.
- [25] GUO Q Q, DU G C, LI Y X, et al. Nematotoxic Coumarins from *Angelica pubescens* Maxim. f. biserrata Shan et Yuan Roots and Their Physiological Effects on *Bursaphelenchus xylophilus* [J]. Journal of Nematology, 2018, 50(4): 559-568.
- [26] FENG J L, QIN C L, LIU X H, et al. Nematicidal Coumarins from *Cnidium Monnieri* Fruits and *Angelica Dahurica* Roots and Their Physiological Effect on Pine Wood Nematode (*Bursaphelenchus xylophilus*) [J]. Molecules, 2023, 28(10): 4109.
- [27] PANTELELIS I, KARPOUZAS D G, MENKISSOGLU-SPIROUDI U, et al. Influence of Soil Physicochemical and Biological Properties on the Degradation and Adsorption of the Nematicide Fosthiazate[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(18): 6783-6789.
- [28] CHEN Y Z, WANG S R, LI T, et al. Antifungal Activity of 6-Methylcoumarin Against *Valsa Mali* and Its Possible Mechanism of Action[J]. Journal of Fungi, 2022, 9(1): 5
- [29] YANG Y, XU J, LI Y, et al. Effects of Coumarin on Rhizosphere Microbiome and Metabolome of *Lolium Multiflorum* [J]. Plants, 2023, 12(5): 1096.
- [30] POJER F, LI S M, HEIDE L. Molecular Cloning and Sequence Analysis of the Clorobiocin Biosynthetic Gene Cluster: New Insights into the Biosynthesis of Aminocoumarin Antibiotics[J]. Microbiology, 2002, 148(Pt 12):3901-3911.
- [31] LI S M, HEIDE L. New Aminocoumarin Antibiotics from Genetically Engineered Streptomyces Strains[J]. Current Medicinal Chemistry, 2005, 12(4): 419-427.
- [32] QAIS F A, KHAN M S, AHMAD I, et al. Coumarin Exhibits Broad-Spectrum Antibiofilm and Antiquorum Sensing Activity Against Gram-Negative Bacteria; In Vitro and in Silico Investigation[J]. ACS Omega, 2021, 6(29): 18823-18835.
- [33] GUTIÉRREZ-BARRANQUERO J A, REEN F J, MCCARTHY R R, et al. Deciphering the Role of Coumarin as a Novel Quorum Sensing Inhibitor Suppressing Virulence Phenotypes in Bacterial Pathogens[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, 99(7): 3303-3316.
- [34] RASTIJA V, VRANDEČIĆ K, ČOSIĆ J, et al. Effects of Coumarinyl Schiff Bases Against Phytopathogenic Fungi, the Soil-Beneficial Bacteria and Entomopathogenic Nematodes: Deeper Insight into the Mechanism of Action[J]. Molecules, 2022, 27(7): 2196
- [35] STRINGLIS I A, DE JONGE R, PIETERSE C M J. The Age of Coumarins in Plant-Microbe Interactions[J]. Plant and Cell Physiology, 2019, 60(7): 1405-1419.
- [36] SIEGRIST J, MÜHLENBECK S, BUCHENAUER H. Cultured Parsley Cells, a Model System for the Rapid Testing of Abiotic and Natural Substances as Inducers of Systemic Acquired Resistance[J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 1998, 53(4): 223-238.
- [37] KAUSS H, THEISINGER-HINKEL E, MINDERMAN R, et al. Dichloroisonicotinic and Salicylic Acid, Inducers of Systemic Acquired Resistance, Enhance Fungal Elicitor Responses in Parsley Cells[J]. The Plant Journal, 1992, 2(5): 655-660.
- [38] FENG Y M, QI P Y, XIAO W L, et al. Fabrication of Isopropanolamine-Decorated Coumarin Derivatives as Novel Quorum Sensing Inhibitors to Suppress Plant Bacterial Disease[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(20): 6037-6049.