高等学校化学学报
CHEMICAL JOURNAL OF CHINESE UNIVERSITIES
研究论文

氨基烷基萘酚类化合物的合成及抑菌和杀线虫活性

张琦璘[1,2,3]，史衍常[2,3]，高　堃[2,3]，王林松[2,3]，宋亚东[2,3]，王郁森[2,3]，李鹏程[2,3]，刘　松[2,3]，邢荣娥[2,3]，宋　琳[1]，秦玉坤[2,3]

（1. 青岛科技大学生物工程学院，青岛 266042；
2. 中国科学院海洋研究所实验海洋生物学重点实验室，青岛 266071；
3. 青岛海洋科技中心海洋药物与生物制品功能实验室，青岛 266237）

摘要　通过一锅法三组分反应，合成了一系列氨基烷基萘酚类化合物，并对其抗植物病原真菌和杀线虫活性进行了评估. 结果表明，在200~25 μg/mL浓度范围内，化合物**8**对链格孢菌的抑制活性约为50%，且抑制效果与浓度无明显相关性. 活体抑菌实验表明，化合物**8**在50 μg/mL浓度下具有与阳性对照嘧菌酯相当的抑菌作用. 此外，在温室试管实验中，合成的化合物对南方根结线虫表现出显著的抑制活性，其中化合物**10**在10 μg/mL浓度下能显著减少根结数量，抑制率高达90.91%，与阳性对照氟吡菌酰胺相当. 综上，氨基烷基萘酚类化合物作为一种新型农药活性物质，具有潜在的抑菌和杀线虫双重功效，研究结果为开发环境友好型多靶点农药提供了新思路.

关键词　一锅法；氨基烷基萘酚；抗植物病原真菌活性；杀线虫活性

中图分类号　O625.31　　**文献标志码**　A　　doi：10.7503/cjcu20250031

Synthesis of Aminoalkyl Naphthol Analogues and Their Anti-fungal and Nematicidal Activities

ZHANG Qilin[1,2,3], SHI Yanchang[2,3], GAO Kun[2,3], WANG Linsong[2,3], SONG Yadong[2,3], WANG Yusen[2,3], LI Pengcheng[2,3], LIU Song[2,3], XING Ronge[2,3], SONG Lin[1*], QIN Yukun[2,3*]

(*1. Bioengineering College, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao* 266042, *China*;
2. Key Laboratory of Experimental Marine Biology, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, *China*;
3. Functional Laboratory for Marine Drugs and Bioproducts, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, *China*)

Abstract　A series of amino-alkyl naphthol compounds was synthesized through a one-pot three-component reaction, their antifungal activity against plant pathogenic fungi and nematicidal activity were evaluated. The results showed

收稿日期：2025-01-28. 网络首发日期：2025-03-29.

联系人简介：秦玉坤，男，博士，副研究员，主要从事生物质催化转化和新农药活性分子创制方面的研究. E-mail：ykqin@qdio.ac.cn
宋　琳，女，博士，讲师，主要从事天然活性物质和海洋分子生物学方面的研究. E-mail：03231@qust.edu.cn

基金项目：国家自然科学基金(批准号：42076126)、山东省重点研发计划重大科技创新项目(批准号：2022CXGC020413)、青岛市科技惠民示范专项项目(批准号：25-1-5-xdny-7-nsh)、中央引导地方科技发展资金项目(批准号：2024ZY0039)和现代农业产业技术体系专项项目(批准号：CARS-49)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 42076126), the Shandong Key Research and Development Plan, Major Scientific and Technological Innovation Project, China(No.2022CXGC020413), the Qingdao Science and Technology Benefit the People Demonstration Project, China(No. 25-1-5-xdny-7-nsh), the Central Guidance for Local Scientific and Technological Development Funds, China (No.2024ZY0039) and the Special Project on Modern Agricultural Industry Technology System, China(No.CARS-49).

that compound **8** exhibited about 50% inhibitory activity against *Alternaria alternate* at concentrations ranging from 200 μg/mL to 25 μg/mL, and the inhibitory effect was not significantly correlated with concentration. *In vivo* antifungal experiments indicated that compound **8** at a concentration of 50 μg/mL had a therapeutic effect comparable to the positive control pyrimethanil. Additionally, in greenhouse test tube experiments, the synthesized compounds showed significant inhibitory activity against southern root-knot nematodes, with compound **10** significantly reducing the number of galls at a concentration of 10 μg/mL, achieving an inhibition rate of 90.91%, which is comparable to the positive control fluopyram. In summary, amino-alkyl naphthol compounds, as a new type of pesticide active substance, have potential dual effects of antibiosis and nematicide, and the aforementioned research provides new ideas for the development of environmentally friendly multi-target pesticides.

Keywords One pot method; Amidoalkyl naphthol; Anti-fungal activity; Nematicidal activity

植物土传病害对农业生产构成严重威胁，尤其是由真菌和线虫引起的病害，可导致巨大的经济损失[1]. 真菌因其繁殖能力强、潜伏期短和活体寄生特性，已成为引发植物病害的主要因素[2,3]. 植物寄生线虫作为农业生产中的第二大病害因素，每年造成全球约1570亿美元的损失[4]. 植物根系受损后更易受到病原真菌侵袭，形成复合感染，使得防治工作变得困难[5]. 因此，寻找能同时防治植物病原真菌和杀灭线虫的化合物变得迫切[6]. 化学防治虽高效便捷，但存在高毒、高残留和抗药性等问题. 开发具有新颖结构和作用机制的新农药满足农业绿色发展的需求日益迫切[7].

天然产物因具有抑菌、杀虫、除草和抗病毒等生物活性，而成为绿色农药开发的研究热点[8]. 氨基烷基萘酚类化合物在制药和医药领域具有重要应用，其结构中的1,3-氨基氧合官能团和萘环结构广泛存在于多种天然产物及上市药物中，表现出抑菌、抗病毒、抗氧化和抗寄生虫等生物活性[9,10]. 此类化合物具有显著的应用潜力，但在农业领域的研究较少. 氨基烷基萘酚虽然展现出广阔的应用前景，但是传统制备工艺存在反应时间过长、催化剂成本高且难以获取等问题，近年的研究重点聚焦于优化合成效率、降低生产成本、减少环境危害及开发绿色可持续的合成策略[11]. 而多组分反应因其能在单一步骤中直接生成目标产物、无需中间体分离、简化分离纯化过程、节省时间和成本等优势，在有机合成领域受到越来越多的重视[12]. 其中，Betti反应作为苯酚、醛和胺的三组分缩合反应，在高效构建氨基烷基萘酚类化合物中彰显出突出的应用价值.

针对上述问题，本文对植物叶片来源的二萘酚结构进行修饰，基于活性拼接策略，采用一锅法三组分反应，由醛、乙腈/酰胺/尿素和2-萘酚高效合成了一系列氨基烷基萘酚类化合物[13,14]. 对合成的氨基烷基萘酚类化合物进行了抗植物病原真菌和杀线虫活性评估. 研究发现，该类化合物对多种植物病原真菌和南方根结线虫具有一定的抑制效果，表明其可作为防治作物土传病害的潜在候选化合物.

1 实验部分

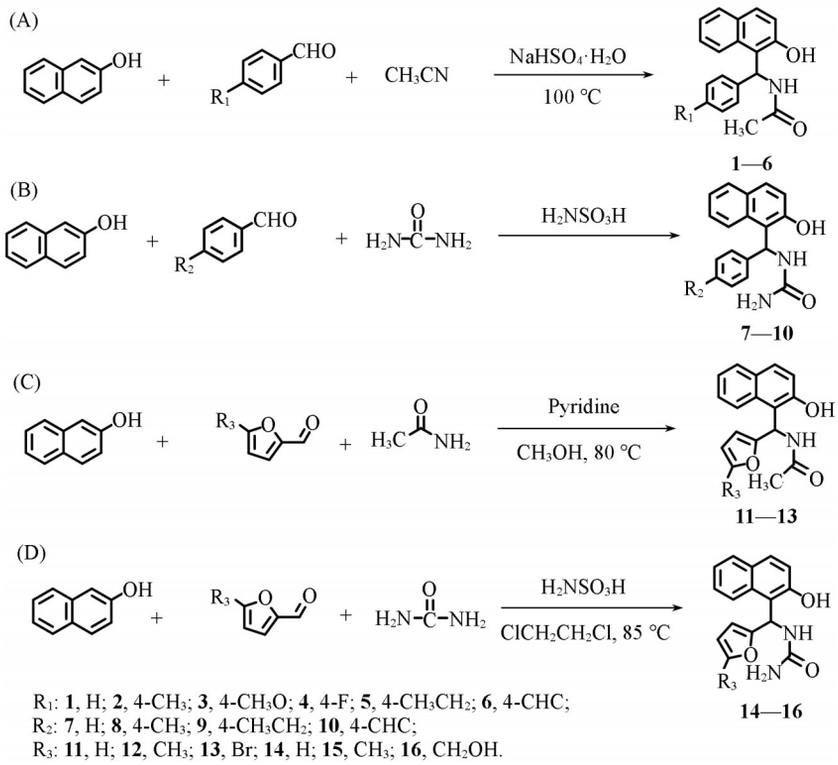
1.1 试剂与仪器

取代苯甲醛、取代糠醛、乙酰胺、尿素、乙腈、1,2-二氯乙烷、吡啶、氨基磺酸和硫酸氢钠，分析纯，上海泰坦科技股份有限公司；2-萘酚，分析纯，上海源叶生物科技有限公司；乙酸乙酯(EA)、石油醚(PE)、甲醇和二氯乙烷，分析纯，上海祁安化工有限公司.

BRUKER-600型核磁共振波谱仪(NMR)，德国Bruker公司；SU8020型扫描电子显微镜(SEM)，日本日立公司；LTQ Orbitrap XL型液相色谱-质谱联用仪，美国Thermo Fisher公司；SGW-X4型显微熔点仪，上海仪电物理光学仪器有限公司；ZF-7型三用紫外分析仪，上海弘毅仪器设备有限公司；Heidolph旋转蒸发仪，海道尔夫仪器设备(上海)有限公司；BXM-30R型立式压力蒸汽灭菌锅，青岛创合胜科教仪器设备有限公司；RXZ型智能人工气候室，宁波江南仪器厂.

1.2 实验过程

目标化合物**1**~**16**的合成路线如Scheme 1所示.



Scheme 1　Synthetic routes of target compounds 1—16

1.2.1　化合物**1~6**的合成　参照文献[15]方法，化合物**1~6**的合成路线如Scheme 1(A)所示．将2-萘酚(5 mmol)、取代苯甲醛(5 mmol)和乙腈(50 mL)既作为反应物又作为溶剂，硫酸氢钠(0.5 mmol)作为催化剂，将上述物料加入150 mL耐压瓶中，于100 ℃搅拌反应20 h．通过薄层色谱(TLC)[V(EA)∶V(PE)=1∶2]监测反应进程．待反应完成后，过滤回收催化剂，反应液依次用饱和碳酸氢钠溶液和水(100 mL)洗涤至水层无色，分液后获得有机层，将其经无水硫酸镁干燥后过滤，旋转蒸发得到粗品，为粉红色油状物[14]．再使用硅胶色谱柱[V(EA)∶V(PE)=1∶10~1∶1]梯度洗脱进行纯化分离，最终得到目标产物．

1.2.2　化合物**7~10**的合成　参照文献[16]方法，化合物**7~10**的合成路线如Scheme 1(B)所示．称取2-萘酚(5 mmol)、取代苯甲醛(5 mmol)和尿素(5.5 mmol)，加入150 mL耐压瓶中，加入催化剂0.1 mmol氨基磺酸和溶剂50 mL 1,2-二氯乙烷，在85 ℃下搅拌反应20 h．通过TLC[V(EA)∶V(PE)=1∶2]监测反应进程．待反应完成后，反应液依次用饱和碳酸氢钠溶液和水(100 mL)洗涤至水层无色，分液后获得有机层，将其经无水硫酸镁干燥后过滤，旋转蒸发得到粗品，为黄色油状物．使用硅胶色谱柱[V(EA)∶V(PE)=1∶10~1∶1]梯度洗脱进行纯化分离，最终得到目标产物．

1.2.3　化合物**11~13**的合成　参照文献[17]方法，化合物**11~13**的合成路线如Scheme 1(C)所示．称取2-萘酚(5 mmol)、取代糠醛(5 mmol)和乙酰胺(5 mmol)，加入150 mL耐压瓶中，再加入催化剂0.1 mmol吡啶和溶剂50 mL甲醇，在80 ℃下搅拌反应20 h．通过TLC[V(EA)∶V(PE)=1∶2]监测反应进程．待反应完成后，旋蒸除去甲醇，反应物料中加入100 mL二氯甲烷，依次用饱和碳酸氢钠溶液和水(100 mL)洗涤至水层无色，分液后获得有机层，将其经无水硫酸镁干燥后过滤，旋转蒸发得到粗品，为黄色油状物．使用硅胶色谱柱[V(EA)∶V(PE)=1∶2]梯度洗脱，进行纯化分离，最终得到目标产物．

1.2.4　化合物**14~16**的合成　参照文献[18]方法，化合物**14~16**的合成路线如Scheme 1(D)所示．称取2-萘酚(5 mmol)、取代糠醛(5 mmol)和尿素(5 mmol)，加入150 mL耐压瓶中，再加入催化剂0.1 mmol氨基磺酸和溶剂50 mL 1,2-二氯乙烷，在85 ℃下搅拌反应20 h．通过TLC[V(EA)∶V(PE)=1∶2]监测反应进程．待反应完成后，反应物料中加入100 mL二氯甲烷，依次用饱和碳酸氢钠溶液和水(100 mL)洗涤至水层无色，分液后获得有机层．有机层经无水硫酸镁干燥后过滤，旋转蒸发得到粗品，为黄色油状物．使用硅胶色谱柱[V(EA)∶V(PE)=1∶2]梯度洗脱，进行纯化分离，最终得到目标产物．

1.2.5 化合物的表征 参照文献[19]方法，化合物**1~16**的结构经^{1}H NMR，^{13}C NMR和LC-MS确证．化合物**1~16**的理化性质和表征数据如表1和表2所示，其完整结构式见本文支持信息图S1，相关谱图见本文支持信息图S2~S33.

Table 1 Appearances, melting points(m. p.) and LC-MS data of compounds 1—16

Compd.	Appearance	m. p./℃	LC-MS		
			Formula	Calcd.	Found
1	White solid	218.5—220.7	$C_{19}H_{17}NO_2$	291.35	291.1
2	White solid	224.9—227.4	$C_{20}H_{19}NO_2$	305.37	305.8
3	White solid	194.7—195.5	$C_{20}H_{19}NO_3$	322.37	322.1
4	White solid	232.4—234.6	$C_{19}H_{16}FNO_2$	310.34	310.8
5	White solid	214.7—215.7	$C_{21}H_{21}NO_2$	320.40	320.7
6	Brown solid	256.2—258.3	$C_{21}H_{17}NO_2$	316.37	316.2
7	White solid	173.6—176.5	$C_{18}H_{16}N_2O_2$	293.33	293.0
8	White solid	180.4—183.9	$C_{19}H_{18}N_2O_2$	307.36	307.1
9	White solid	220.2—221.8	$C_{20}H_{20}N_2O_2$	321.39	321.2
10	White solid	233.6—235.7	$C_{20}H_{16}N_2O_2$	317.36	317.1
11	Yellow solid	206.9—210.3	$C_{17}H_{15}NO_3$	282.31	282.9
12	White solid	205.9—208.7	$C_{18}H_{17}NO_3$	296.33	296.0
13	Yellow liquid	—	$C_{17}H_{14}BrNO_3$	361.20	361.9
14	White solid	171.2—173.4	$C_{16}H_{14}N_2O_3$	283.29	283.0
15	Yellow solid	169.6—173.8	$C_{17}H_{16}N_2O_3$	297.32	297.8
16	Yellow liquid	—	$C_{17}H_{16}N_2O_4$	313.32	313.9

Table 2 ^{1}H NMR and ^{13}C NMR data of compounds 1—16

Compd.	^{1}H NMR(600 MHz, DMSO-d_6)	^{13}C NMR(150 MHz, DMSO-d_6)
1	8.40(d, *J*=8.4 Hz, 1H, —NH), 7.8—37.67(m, 3H, Ar—H), 7.34—7.24(m, 1H, Ar—H), 7.24—7.14(m, 4H, Ar—H), 7.09(dd, *J*=14.0, 7.8 Hz, 4H, Ar—H, —C_3H), 1.92(s, 3H, —CH_3)	169.80, 153.69, 143.14, 132.85, 129.78, 129.07, 128.52, 126.57, 122.92, 119.36, 48.32, 23.19
2	9.93(s, 1H, Ar—H), 8.38(d, *J*=8.4 Hz, 1H, —NH), 7.84—7.74(m, 2H, Ar—H), 7.72(d, *J*=8.8 Hz, 1H, Ar—H), 7.32(t, *J*=7.8 Hz, 1H, Ar—H), 7.22(t, *J*=7.5 Hz, 1H, Ar—H), 7.18(d, *J*=8.8 Hz, 1H, Ar—H), 7.06(d, *J*=8.4 Hz, 1H, —C_3H), 7.01(s, 4H, Ar—H), 2.20(s, 3H, —CH_3), 1.94(s, 3H, —CH_3)	169.62, 153.55, 140.04, 135.48, 132.78, 129.60, 129.01, 126.71, 122.82, 119.46, 118.94, 48.07, 23.15, 21.02
3	9.63(s, 1H, Ar—H), 8.08(d, *J*=8.5 Hz, 1H, —NH), 7.45(dd, *J*=8.2, 1.4 Hz, 1H, Ar—H), 7.40(d, *J*=8.8 Hz, 1H, Ar—H), 6.91(t, *J*=7.4 Hz, 1H, Ar—H), 6.87(d, *J*=8.8 Hz, 1H, Ar—H), 6.75—6.70(m, 3H, Ar—H), 6.46(d, *J*=8.8 Hz, 2H, Ar—H, —C_3H), 3.03(d, *J*=1.5 Hz, 3H, —CH_3), 1.62(s, 3H, —CH_3)	169.56, 158.14, 153.52, 134.87, 132.75, 129.57, 128.99, 127.72, 126.71, 122.83, 119.44, 118.96, 113.88, 55.46, 47.90, 23.17
4	10.56(s, 1H, Ar—H), 8.99(d, *J*=8.3 Hz, 1H, —NH), 8.37—8.26(m, 2H, Ar—H), 7.90(t, *J*=7.7 Hz, 1H, Ar—H), 7.83—7.77(m, 1H, Ar—H), 7.74(d, *J*=8.8 Hz, 2H, Ar—H), 7.69(dd, *J*=8.6, 5.5 Hz, 2H, Ar—H), 7.66—7.55(m, 2H, Ar—H, —C_3H), 3.02(p, *J*=1.8 Hz, 3H, —CH_3)	169.77, 161.97, 160.37, 153.61, 139.16, 132.68, 129.84, 129.05, 128.34, 126.88, 118.92, 115.07, 47.81, 23.10
5	9.98(d, *J*=2.4 Hz, 1H, Ar—H), 8.43(d, *J*=8.3 Hz, 1H, —NH), 7.81(dd, *J*=8.2, 3.2 Hz, 1H, Ar—H), 7.76(dd, *J*=8.9, 3.0 Hz, 1H, Ar—H), 7.24(ddd, *J*=25.1, 8.5, 3.6 Hz, 3H, Ar—H), 7.09(dd, *J*=12.1, 5.7 Hz, 5H, Ar—H), 2.51(dd, *J*=4.1, 2.2 Hz, 2H, —CH_2), 1.98(d, *J*=2.9 Hz, 3H, —CH_3), 1.13(td, *J*=7.8, 3.5 Hz, 3H, —CH_3)	169.57, 153.55, 141.96, 140.27, 132.81, 129.59, 128.95(d, *J*=12.0 Hz), 127.84, 126.75, 126.58, 122.82, 119.43, 118.96, 48.16, 28.19, 23.15, 16.18
6	9.99(s, 1H, Ar—H), 8.42(d, *J*=8.1 Hz, 1H, —NH), 7.78—7.68(m, 2H, Ar—H), 7.35—7.28(m, 2H, Ar—H), 7.21(t, *J*=7.4 Hz, 1H, Ar—H), 7.17(d, *J*=8.7 Hz, 1H, Ar—H), 7.09(dd, *J*=19.6, 8.3 Hz, 4H, Ar—H, —C_3H), 4.04(d, *J*=1.3 Hz, 1H, —CH), 1.94(d, *J*=1.3 Hz, 3H, —CH_3)	169.92, 153.68, 144.33, 132.71, 131.89, 129.95, 129.06, 126.75, 122.93, 119.84, 118.86, 84.00, 80.77, 48.14, 23.07

Continued

Compd.	^{1}H NMR(600 MHz, DMSO-d_6)	^{13}C NMR(150 MHz, DMSO-d_6)
7	8.81(d, *J*=3.1 Hz, 1H, —NH), 7.89(d, *J*=8.9 Hz, 1H, Ar—H), 7.86—7.82(m, 1H, Ar—H), 7.74—7.71(m, 1H, Ar—H), 7.38(ddd, *J*=8.4, 6.9, 1.5 Hz, 1H, Ar—H), 7.34(ddd, *J*=8.0, 6.8, 1.2 Hz, 1H, Ar—H), 7.30(d, *J*=8.9 Hz, 1H, Ar—H), 7.26—7.20(m, 4H, Ar—H), 7.17—7.13(m, 1H, Ar—H), 6.12 (d, *J*=3.1 Hz, 1H, —C_3H)	154.58, 152.66, 148.10, 135.64, 135.46, 134.17, 134.12, 133.85, 133.24, 132.58, 132.20, 130.29, 128.32, 122.09, 119.27, 59.04
8	8.78(d, *J*=3.1 Hz, 1H, —NH), 7.92(d, *J*=8.9 Hz, 1H, Ar—H), 7.88(d, *J*=8.0 Hz, 1H, Ar—H), 7.74(d, *J*=8.3 Hz, 1H, Ar—H), 7.44—7.35(m, 2H, Ar—H), 7.32(d, *J*=8.9 Hz, 1H, Ar—H), 7.14(d, *J*=7.9 Hz, 2H, Ar—H), 7.06(d, *J*=7.9 Hz, 2H, Ar—H), 6.09(d, *J*=3.1 Hz, 1H, —C_3H), 2.15(s, 3H, —CH_3)	149.82, 147.84, 140.47, 137.78, 130.87, 130.60, 129.90, 129.37, 129.07, 127.77, 127.34, 125.50, 123.59, 117.32, 114.65, 54.01, 21.08
9	8.79(d, *J*=3.1 Hz, 1H, —NH), 7.96(d, *J*=8.9 Hz, 1H, Ar—H), 7.92(d, *J*=8.0 Hz, 1H, Ar—H), 7.79(d, *J*=8.3 Hz, 1H, Ar—H), 7.46(ddt, *J*=8.3, 6.8, 1.2 Hz, 1H, Ar—H), 7.42(ddd, *J*=8.0, 6.9, 1.2 Hz, 1H, Ar—H), 7.36(d, *J*=8.9 Hz, 1H, Ar—H), 7.20(d, *J*=8.0 Hz, 2H, Ar—H), 7.13(d, *J*=8.0 Hz, 2H, Ar—H), 6.13(d, *J*=3.1 Hz, 1H, —C_3H), 2.53—2.46(m, 2H, —CH_2), 1.08(td, *J*=7.6, 1.0 Hz, 3H, —CH_3)	149.83, 147.83, 144.09, 140.74, 130.87, 130.59, 129.36, 129.07, 128.76, 127.80, 127.39, 125.52, 123.60, 117.33, 114.69, 53.99, 28.23, 15.96
10	8.86(d, *J*=3.2 Hz, 1H, .—NH), 7.93(d, *J*=9.0 Hz, 1H, Ar—H), 7.88(d, *J*=8.0 Hz, 1H, Ar—H), 7.73(d, *J*=8.4 Hz, 1H, Ar—H), 7.40(dd, *J*=17.4, 8.1 Hz, 4H, Ar—H), 7.32(d, *J*=8.9 Hz, 1H, Ar—H), 7.27(d, *J*=7.9 Hz, 2H, Ar—H), 6.18(d, *J*=3.1 Hz, 1H, —C_3H), 4.11(s, 1H, —CH)	149.68, 147.95, 143.93, 132.81, 130.89, 129.29, 129.14, 127.87 (d, *J*=16.3 Hz), 125.63, 123.49, 121.88, 117.36, 114.01, 83.44, 81.71, 53.85
11	9.95(s, 1H, Ar—H), 8.50(d, *J*=8.2 Hz, 1H, —NH), 7.91(d, *J*=8.6 Hz, 1H, Ar—H), 7.71(d, *J*=8.1 Hz, 1H, Ar—H), 7.67(d, *J*=8.8 Hz, 1H, Ar—H), 7.39 (s, 1H, Ar—H), 7.31 (t, *J*=7.7 Hz, 1H, Ar—H), 7.19 (t, *J*=7.4 Hz, 1H, Ar—H), 7.13(d, *J*=8.8 Hz, 1H, Ar—H), 7.03(d, *J*=8.2 Hz, 1H, Ar—H), 6.26 (t, *J*=2.4 Hz, 1H, Ar—H), 6.02(s, 1H, —C_3H), 1.85 (s, 3H, —CH_3)	168.88, 154.82, 153.28, 141.58, 132.37, 129.36, 128.43, 126.20, 122.98, 122.33, 118.39, 116.57, 110.30, 106.01, 43.48, 22.52
12	9.92(s, 1H, Ar—H), 8.47(d, *J*=8.3 Hz, 1H, —NH), 7.94(d, *J*=8.7 Hz, 1H, Ar—H), 7.72—7.68(m, 1H, Ar—H), 7.65(d, *J*=8.9 Hz, 1H, Ar—H), 7.33—7.28(m, 1H, Ar—H), 7.20—7.16(m, 1H, Ar—H), 7.11(d, *J*=8.8 Hz, 1H, Ar—H), 6.95(d, *J*=8.2 Hz, 1H), 5.84(dd, *J*=3.2, 1.3 Hz, 1H, Ar—H), 5.81(dd, *J*=3.0, 1.3 Hz, 1H, —C_3H), 2.06(s, 3H, —CH_3), 1.81(d, *J*=2.7 Hz, 3H, —CH_3)	169.26, 153.78, 153.37, 150.80, 132.92, 129.82, 128.88, 126.68, 122.87, 118.97, 117.27, 107.64, 106.85, 44.00, 23.11, 13.90
13	10.09(s, 1H, Ar—H), 8.61(d, *J*=8.1 Hz, 1H, —NH), 7.97(d, *J*=8.6 Hz, 1H, Ar—H), 7.79(dd, *J*=17.1, 8.5 Hz, 2H, Ar—H), 7.41(t, *J*=7.8 Hz, 1H, Ar—H), 7.28(t, *J*=7.4 Hz, 1H, Ar—H), 7.20(d, *J*=8.8 Hz, 1H, Ar—H), 7.09—7.01(m, 1H, Ar—H), 6.44(d, *J*=3.3 Hz, 1H, Ar—H), 6.13(dd, *J*=3.4, 1.4 Hz, 1H, —C_3H), 1.17(t, *J*=7.1 Hz, 3H, —CH_3)	169.43, 157.51, 153.91, 132.76, 130.17, 129.03, 128.77, 126.89, 123.12 (d, *J* = 45.8 Hz), 119.69, 118.84, 116.09, 112.79, 109.65, 43.85, 22.96
14	8.83(d, *J*=3.1 Hz, 1H, —NH), 7.99—7.95(m, 2H, Ar—H), 7.95—7.91 (m, 2H, Ar—H), 7.55— 7.52(m, 1H, Ar—H), 7.51(t, *J*=2.6 Hz, 1H, Ar—H), 7.45 (t, *J*=7.5 Hz, 1H, Ar—H), 7.31(d, *J*=8.9 Hz, 1H, Ar—H), 6.43 (d, *J*=3.3 Hz, 1H, Ar—H), 6.34(dd, *J*=3.3, 1.8 Hz, 1H, Ar—H), 6.31(d, *J*=3.1 Hz, 1H, —C_3H)	154.19, 150.33, 148.01, 143.60, 130.76 (d, *J*=7.6 Hz), 129.32, 129.06, 127.87, 125.60, 123.28, 117.28, 112.46, 111.00, 107.71, 47.71
15	9.64(d, *J*=3.1 Hz, 1H, Ar—H), 8.90—8.73(m, 3H, Ar—H), 8.53—8.36 (m, 1H, —NH), 8.30(t, *J*=7.5 Hz, 1H, Ar—H), 8.16(d, *J*=8.9 Hz, 1H, Ar—H), 7.10(dd, *J*=17.7, 3.1 Hz, 2H, Ar—H), 6.79(d, *J*=3.1 Hz, 1H, —C_3H), 4.19(s, 2H, —NH_2), 2.95(s, 3H, —CH_3)	152.55, 152.35, 150.38, 148.07, 130.78, 129.44, 129.11, 127.88, 125.63, 123.38, 117.39, 112.55, 108.66, 107.12, 47.89, 13.86
16	8.86—8.78(m, 1H, —NH), 7.99—7.87(m, 3H, Ar—H), 7.52(t, *J*=7.8 Hz, 1H, Ar—H), 7.44(t, *J*=7.5 Hz, 1H, Ar—H), 7.30(d, *J*=8.9 Hz, 1H, Ar—H), 6.29 (dd, *J*=25.1, 3.1 Hz, 2H, Ar—H), 6.15(d, *J*=3.1 Hz, 1H, Ar—H), 5.72 (d, *J*=1.5 Hz, 1H, —C_3H), 5.12(t, *J*=5.7 Hz, 1H, -OH), 4.21(d, *J*=5.5 Hz, 2H, —CH_2)	156.12, 153.39, 150.23, 148.04, 130.76, 129.38, 129.06, 127.84, 125.58, 123.29, 117.34, 112.33, 108.46, 108.22, 55.98, 47.89

1.3 抗植物病原真菌活性测试

1.3.1 *抑菌活性初筛* 采用菌丝生长速率法测定了氨基烷基萘酚类化合物对4种真菌的防治效果[20].

准确称取50 mg合成化合物，溶解于1 mL含有1%(体积分数)吐温-80的二甲亚砜溶液中，经振荡并充分溶解，配制成50000 μg/mL的母液，备用．实验时，量取30 μL母液加入15 mL PDA培养基中，配制成100 μg/mL含药液培养基．以二甲亚砜作为阴性对照，商品化杀菌剂嘧菌酯和咯菌腈作为阳性对照．将直径5 mm的植物病原真菌菌丝盘接种在含药PDA平板上，培养皿倒置于25 ℃恒温培养箱中黑暗培养，待不含药平板上的菌饼菌丝生长至快要接触时，采用十字交叉法测量每个菌饼的直径．所有实验均设置3组平行对照，实验数据均重复测定3次．采用菌丝生长速率法评估其抑制效果，其抑制区直径菌丝生长抑制率(%)=(对照菌落直径－处理菌落直径)/(对照菌落直径－菌饼直径)×100%

1.3.2 *化合物* **8** *梯度浓度实验* 采用菌丝生长速率法测定了不同浓度化合物**8**在对链格孢菌的防治效果．将50000 μg/mL母液逐级稀释制成200，100，50，25，10和5 μg/mL的含药PDA平板，冷却凝固后接种直径5 mm的链格孢菌菌丝盘，将培养皿倒置于25 ℃恒温培养箱中黑暗培养，待不含药平板上的菌饼菌丝生长至快要接触时，采用十字交叉法测量每个菌饼的直径．所有实验均设置3组平行对照，实验数据均重复测定3次．采用菌丝生长速率法评估其抑制效果，以嘧菌酯作为阳性对照，实验操作步骤同目标化合物．

1.3.3 *化合物* **8** *菌丝形态的扫描电子显微镜观察* 参照文献[21]方法，用PD培养液(马铃薯200 g+葡萄糖20 g，于121 ℃灭菌20 min)稀释化合物**8**母液至浓度为200 μg/mL，加入培养7 d的链格孢菌落边缘取出的直径5 mm的菌饼，5 d后从真菌团上切下菌丝块(5.0 mm×4.0 mm)，设置空白组和阳性对照组(嘧菌酯浓度为200 μg/mL)．所有样品用3%(质量分数)戊二醛处理4 h，用0.01 mol/L PBS缓冲液(pH=7.2)浸泡3次，每次10 min，随后，每个样品用分级乙醇系列(体积分数30%，50%，70%，80%，90%和100%)脱水10 min．最后，将样品置换到醋酸异戊酯中进样观察．

1.3.4 *化合物* **8** *对链格孢菌的活体抑菌防效* 根据体外抑菌实验结果，进一步对化合物**8**在蚕豆叶片上进行了抑菌测试[22]．将化合物**8**和阳性对照嘧菌酯用无菌水配成浓度为100和50 μg/mL的溶液；对于蚕豆叶片用灭菌后的接种针给予机械损伤，伤口面积为5 mm，将伤口浸药2 min，置于光照培养箱中处理24 h后，将链格孢菌的菌饼菌丝面向内贴敷在伤口上，用保鲜膜密封．置于人工气候箱内，在25 ℃，95%湿度，光照5000 Lx条件下培养1 d后，撤去保鲜膜，再于光暗交替(12 h/12 h)环境下继续培养7 d，测量病斑的直径，计算病情级数及防治效果．

1.4 南方根结线虫的温室试管实验

参照文献[23]方法，准确配制10 μg/mL药物10 mL待用；阳性对照为商品化杀线虫剂路富达(氟吡菌酰胺)和噻唑啉；沙土和试管分别经120 ℃高温高压灭菌后，在每个试管中加入5 mL沙土；每个药物设置3个重复，试管中加入1.6 mL药液使沙土完全浸湿，每个试管加入150~200条线虫，于黑暗处放置48 h．黄瓜种子催芽：在9 cm一次性培养皿中放入润湿的滤纸，加入提前用清水洗净并用10%磷酸氢钠消毒的黄瓜种子，置于25 ℃黑暗环境下培养1~2 d，待种子露白后进行下一步实验．在药物处理线虫48 h后，每个试管加入一粒露白的黄瓜种子，于黑暗处培养2 d，随后置于人工气候室光照/黑暗(16 h/8 h)培养4周，期间定期管理．相对根结抑制率(%)=[(对照组根结数－实验组根结数)/对照组根结数]×100%．

2 结果与讨论

2.1 目标化合物的合成及结构表征

Betti反应作为苯酚、醛和胺的三组分缩合反应，在有机合成领域具有显著的研究价值和应用前景．2010年，Naso等[24]对Betti反应的关键进展进行了总结，特别强调了在绿色化学理念指导下，对可回收催化剂和试剂以及新反应条件的探索．在布氏和路易斯催化剂及促进剂的作用下，2-萘酚与芳香族、杂芳香族醛类以及多种酰胺的Betti反应能够高效生成1-氨基烷基-2-半萘酚．

1-氨基烷基-2-半萘酚可经水解反应转化为具有显著生物活性的衍生物，这些衍生物中的1,3-氨基氧合官能团广泛存在于众多重要的生物活性天然产物和高效药物中．因此，合成氨基烷基萘酚的重要

性再次成为研究焦点，并且已经报道了多种改进的合成方法．1-氨基烷基-2-半萘酚的制备可通过芳基醛/糠醛、2-萘酚与乙腈或乙酰胺在路易斯酸或勃氏酸催化剂[如蒙脱石K10粘土、$Ce(SO_4)_2$、碘、$K_5CoW_{12}O_{40}$-$3H_2O$、*p*-TSA、氨基磺酸、阳离子交换树脂和二氧化硅-硫酸]存在下进行的缩合反应来实现[25]．然而，现有制备方法多存在反应时间过长、催化剂成本高昂且难以获取等问题．鉴于这些问题，开发一种高效、通用的制备氨基烷基萘酚的方法显得尤为必要．本研究在成本低廉且易于获取的催化剂(硫酸氢钠/吡啶/氨基磺酸)存在下，通过2-萘酚、醛和乙腈/乙酰胺/尿素的三组分反应，实现了Betti反应高效合成目标化合物，为制备1-氨基烷基-2-萘酚衍生物提供了实用且经济的方法．

以目标化合物**2**的结构表征数据解析为例进行深入分析．在化合物**2**的核磁共振氢谱(^{1}H NMR)中，δ 9.93处的单峰归属于萘环上的质子氢；δ 8.38处的单峰归属于仲胺基团上质子氢的化学位移；δ 7.84~7.18区间的信号峰对应萘环上的6个质子氢；δ 7.06处的单峰归属于叔碳原子上质子氢的化学位移；δ 7.01处的四重峰代表苯环上的质子氢信号；δ 2.20处的单峰则对应苯环甲基上的3个质子氢；δ 1.94处的单峰归属于酰胺甲基上的3个质子氢．在化合物**3**的核磁共振碳谱(^{13}C NMR)中，δ 169.62处的吸收峰为酰胺羰基碳的化学位移；δ 153.55至118.94区间内的吸收峰对应萘环碳和苯环碳的化学位移；δ 48.07处的吸收峰为叔碳原子的化学位移；δ 23.15和21.02处的吸收峰分别归属于苯环上甲基碳和酰胺上甲基碳的化学位移．

2.2 目标化合物的抑菌活性

2.2.1 *目标化合物的抑菌活性与构效关系* 通过一种高效的合成技术制备了16种氨基烷基萘酚类化合物，并对其结构与生物活性之间的相关性进行了分析[26]．实验中对这些化合物进行了体外抑菌活性的评估，主要针对立枯丝核菌、肉红镰刀菌、链格孢菌和灰葡萄孢菌等病原真菌，所得数据列于表3．

Table 3 *In vitro* antifungal activities of 1-amidoalkyl-2-naphthol derivatives against four phytopathogenic fungi at 100 μg/mL*

Compd.	Inhibition rate±SD(%)			
	R. solani	*A. alternate*	*F. rhododendron*	*B. cinerea*
1	13.77±0.05	2.04±0	14.85±0.05	26.32±0.05
2	24.64±0	32.65±0.05	17.82±0.07	49..47±0.06
3	15.22±0	17.69±0.04	20.79±0.05	7.37±0.08
4	26.09±0.05	55.10±0	50.50±0.08	23.16±0.09
5	40.58±0.06	49.66±0.05	51.49±0.04	25.26±0.11
6	37.68±0	66.67±0.04	43.56±0.05	17.89±0.10
7	36.96±0.02	39.46±0.04	37.62±0.05	16.84±0.07
8	54.35±0.01	66.67±0.07	55.45±0.05	56.84±0.17
9	17.39±0	3.40±0.05	14.85±0.10	+
10	54.81±0.07	15.22±0.05	16.79±0.08	20.35±0.30
11	34.81±0	18.12±0.04	13.14±0.04	12.39±0.24
12	43.70±0.05	27.54±0.05	25.55±0.06	62.83±0.06
13	39.26±0.05	42.03±0.05	29.2±0.07	58.41±0.07
14	48.15±0	49.28±0.05	62.77±0.05	60.18±0.10
15	34.81±0.01	22.46±0.04	14.60±0.05	68.14±0.14
16	30.37±0.04	17.39±0.05	15.33±0.05	50.44±0.22
DMSO	4.87±0.05	2.80±0	4.92±1.08	+
Fludioxonil	100±0	100±0	61.00±0	100±0
Azoxystrobin	100±0	57.82±0.05	100±0	41.05±0.08

* "+" The diameter of the mycelial disks exceeds that of the blank group.

在100 μg/mL浓度水平下，目标化合物对链格孢菌属和灰葡萄孢菌属等植物病原体表现出显著的抑制作用．链格孢菌抑制实验结果显示，化合物**6**和**8**的抑制率分别达到66.67%和67.35%，均超过了阳性对照嘧菌酯(在100 μg/mL浓度下的防治效果为57.82%)；灰葡萄孢菌抑菌活性实验中，化合物**12**，**14**和**15**的体外抑制率分别为62.83%，60.18%和68.14%，均高于阳性对照嘧菌酯，但低于阳性对

照咯菌腈(100 μg/mL浓度下的防治效果为100%).

在100 μg/mL离体初筛试验中，苯环取代的化合物(**1~6**)比无取代基化合物显示出更优的抗真菌活性. 化合物**5**因含给电子基团，其整体活性明显超过化合物**4**和**6**. 值得注意的是，化合物**1~6**的活性水平普遍低于化合物**7~10**，尤其化合物**8**对4种测试真菌均表现出广谱抑制能力，其暴露的氨基结构(对比化合物**2**和**8**，**11**和**15**)被证实能显著增强抗菌效果. 苯环取代的化合物**8**的活性显著强于呋喃环取代的化合物**15**，表明不同芳香环类型对抑菌性能具有重要影响. 值得关注的是，化合物**12~16**对灰葡萄孢菌展现出特异性抑制优势，其效果超越苯环取代类化合物. 该系列对链格孢菌的强效抑制作用，为其作为新型农用杀菌剂的开发提供了重要研究依据.

2.2.2 化合物**8**的梯度浓度抑菌活性 依据100 μg/mL的体外活性初步筛选结果，化合物**8**对立枯丝核菌、肉红镰刀菌、链格孢菌和灰葡萄孢菌显示出显著的抑菌活性，其抑制率分别达到54.35%，54.45%，66.67%和56.84%. 鉴于化合物**8**对链格孢菌展现出较为突出的抑菌效果，进一步对其进行了针对链格孢菌的浓度梯度实验[27]. 实验结果(图1)显示，在200~25 μg/mL浓度范围内，化合物**8**的抑制率维持在约50%，未表现出明显的浓度依赖性. 同时，阳性对照药剂嘧菌酯亦呈现出相似的抑制效果.

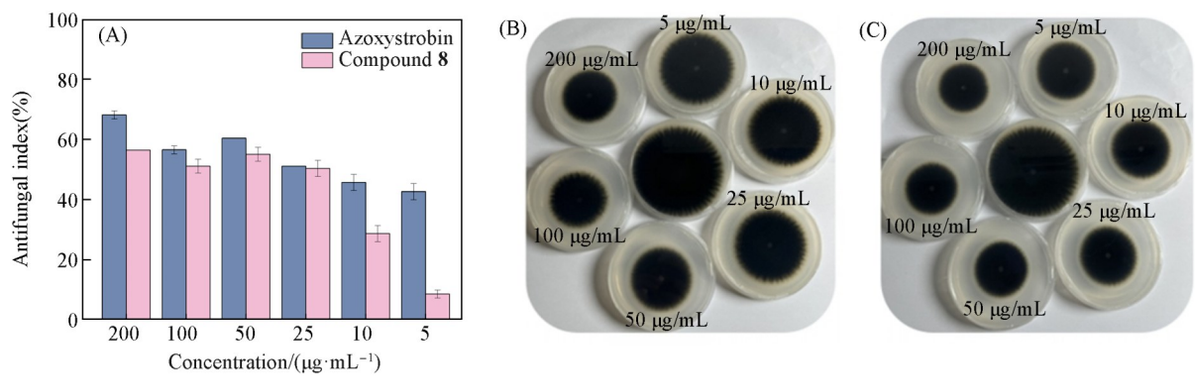


Fig. 1 ***In vitro*** **gradient concentration activity for compound 8(A) and anti-*A. alternate* effects of compound 8(B) and positive control(C)**

2.2.3 化合物**8**对链格孢菌丝形态的影响 为深入探讨化合物**8**对链格孢菌的作用机制，采用200 μg/mL的化合物**8**及阳性对照嘧菌酯对菌丝进行处理，并采用扫描电子显微镜对其结构变化进行了观察[28]. 结果表明，相较于规则、光滑、均匀的对照菌丝[图2(A)和(D)]，经阳性对照嘧菌酯处理的菌丝

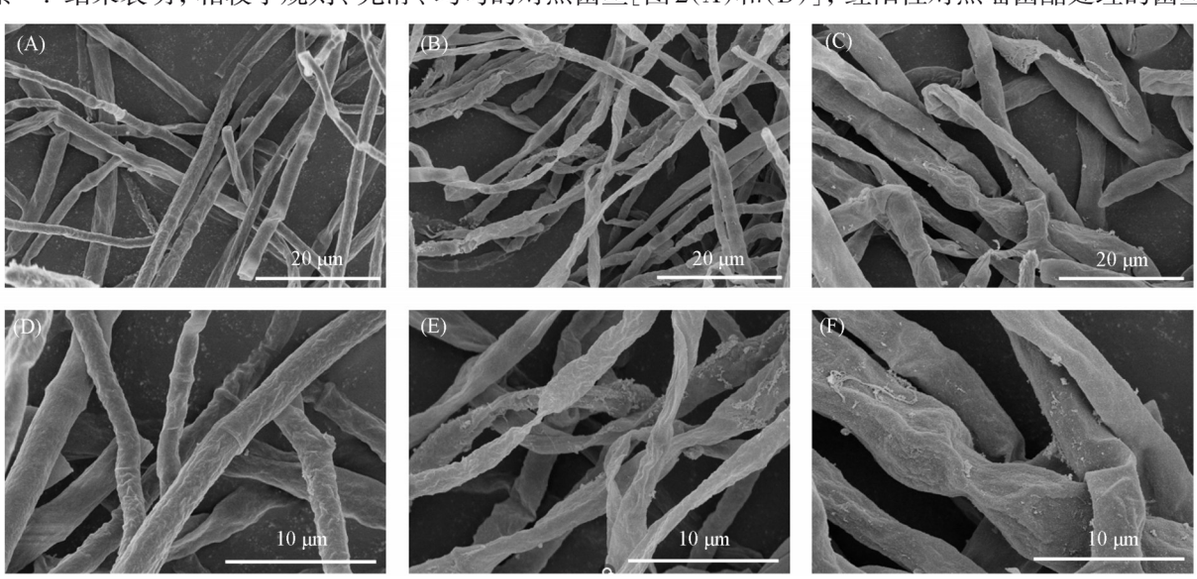


Fig. 2 **Sanning electron micrographs of *A. alternate* hyphae in the untreated control(A, D) and 200 μg/mL of compound 8(B, E) and 200 μg/mL of positive control(C, F)**

皱缩现象更为显著[图2(C)和(F)]，显示出化合物与阳性对照在抑菌效果上存在差异．同时，由化合物**8**处理后的菌丝亦表现出塌陷、萎缩、皱褶等形态变化[图2(B)和(E)]，这些现象说明化合物**8**具备一定的抑菌活性．进一步分析表明，小分子化合物可能通过破坏菌丝细胞膜，导致细胞内容物泄露并干扰细胞物质的正常运输，从而发挥其抑菌作用．

2.2.4　化合物**8**对链格孢菌的活体抑菌效果　通过离体抑菌效果的分析，筛选出化合物**8**，其表现出最强的抗真菌活性．鉴于化合物**8**对链格孢菌的抑制效果最为突出，进一步对其进行了体内活性研究[29,30]．如图3所示，化合物**8**在蚕豆叶片上的治疗效果与嘧菌酯相当．在实验的第3天，观察到空白组与实验组之间，链格孢菌在叶片上的病斑直径差异不大，防治效果不显著；至第7天，空白组病斑直径明显扩大，而给药组的病斑面积显著小于空白对照组，这说明化合物**8**具有一定的防治效果，在50 μg/mL浓度下的治疗效果与阳性对照嘧菌酯相当．

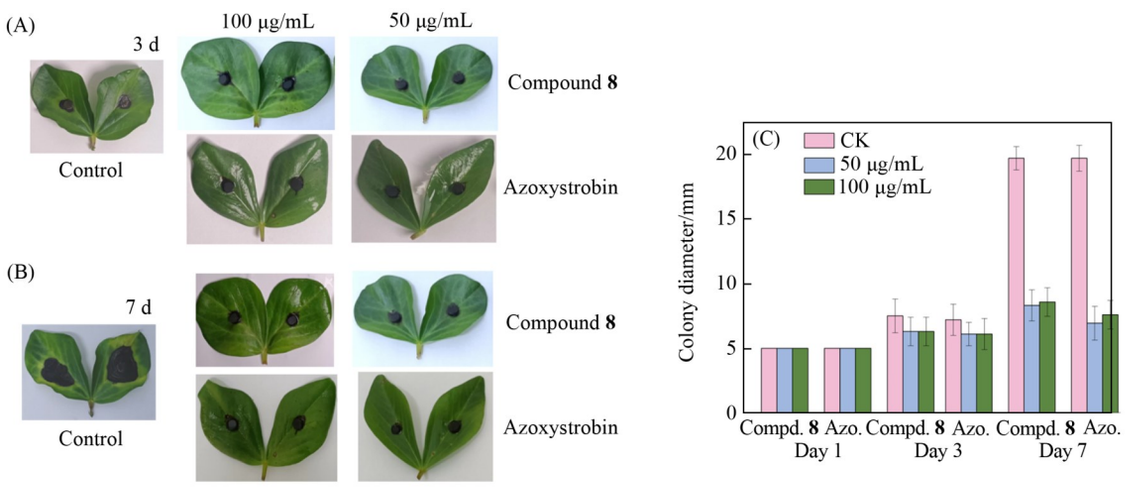


Fig. 3　*In vivo* curative antifungal activities of compound 8 and azoxystrobin against *A. alternate*(A, B) and colony diameter Statistics of compound 8 and positive control treatments after 3 and 5 days(C)

2.2.5　对南方根结线虫的防治效果　采用温室试管法对氨基烷基萘酚类化合物在土壤环境中的防治效果进行了评估，其相对根结抑制率见图4[31]．如图5所示，在10 μg/mL浓度下，化合物**10**[图5(D)]表现出显著的防治效果，其对根结的抑制率达到了90.91%，与阳性对照噻唑啉[图5(B)]和路富达[图5(C)]的防治效果相当；化合物**8**[图5(E)]和**4**[图5(F)]在相同浓度下的相对根结抑制率分别为84.00%和83.33%，显示出一定的防治效果．与对照组黄瓜幼苗[图5(A)]相比，实验组对黄瓜幼苗的叶片大小、茎长、根长等生长指标未表现出明显的负面效应．以上结果表明，在有效浓度下氨基烷基萘酚类化合物对寄主黄瓜的毒性较低(图5)．因此，该类物质在植物根结病害的防治中具有潜在的应用前景．

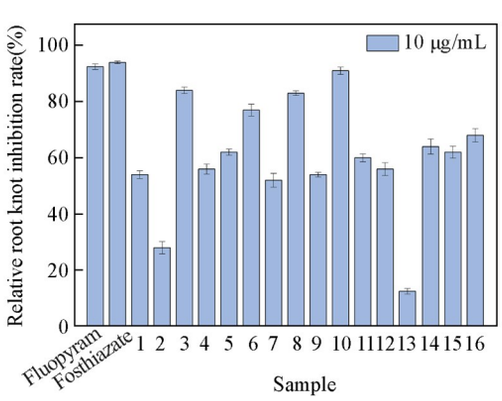


Fig. 4　Relative root knot inhibition of aminoalkyl-naphthol analogs and positive control

3　结　　论

运用一锅法多组分合成技术，合成了一系列氨基烷基萘酚类化合物，并对其抗真菌和杀线虫活性进行了评估．在体外真菌抑制实验中，目标化合物对多种植物病原真菌，如立枯丝核菌(*Rhizoctonia*



Fig. 5 Efficacy of amino alkyl naphthol analogs against root-knot nematodes in the untreated control(A) and 10 μg/mL(D—F) of compound 10(D), 8(E), 4(F) and 10 μg/mL of positive control(B, C)

Solani)、灰葡萄孢(*Botrytis cinerea*)和链格孢菌(*Alternaria alternata*)等，展现了显著的抑制作用. 特别地，在200~25 μg/mL浓度区间内，化合物**8**对链格孢菌的抑制率约为50%，表明其抑菌活性并不随浓度的增加而增强. 进一步的活体抑菌实验显示，在50 μg/mL浓度下，化合物**8**的治疗效果与阳性对照组相当. 因此，化合物**8**被选为研究对象，初步的抑菌机制研究揭示，在200 μg/mL浓度下，链格孢菌的菌丝出现塌陷、萎缩和皱褶，菌丝生长受到显著破坏，这证实了化合物**8**的抑菌活性. 此外，线虫试管实验结果表明，在10 μg/mL浓度下，目标化合物对根结线虫具有显著的抑制活性，其中化合物**10**的相对根结抑制率高达90. 91%. 研究结果表明，氨基烷基萘酚类化合物是防治作物病害的潜在有效候选物. 目前，针对这些化合物的结构优化和详细作用机制的研究正在进行中.

支持信息见http：//www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/20250031.

参 考 文 献

[1] Niu B., Wang W. X., Yuan Z. B., Sederoff R. R., Sederoff H., Chiang V. L., Borriss R., *Front. Microbiol.*, **2020**, *11*, 585404
[2] Chen W., Lan Y. X., Jin Y. X., Chen Y., Wu R., Chu C. W., Gao Y. F., *Chem. J. Chinese Universities*, **2023**, *44*(10), 20230179(陈伟, 兰雨欣, 金彦西, 陈阳, 吴润, 储承文, 高嫣凤. 高等学校化学学报, **2023**, *44*(10), 20230179)
[3] Salvatore M. M., Andolfi A., *Toxins*, **2021**, *13*(10), 689
[4] Burns A. R., Baker R. J., Kitner M., Knox J., Cooke B., Volpatti J. R., Vaidya A. S., Puumala E., Palmeira B. M., Redman E. M., Snider J., Marwah S., Chung S. W., MacDonald M. H., Tiefenbach J., Hu C., Xiao Q., Finney C. A. M., Krause H. M., MacParland S. A., Stagljar I., Gilleard J. S., Cowen L. E., Meyer S. L. F., Cutler S. R., Dowling J. J., Lautens M., Zasada I., Roy P. J., *Nature*, **2023**, *618*(7963), 102—109
[5] Maqsood A., Aslam M. N., Khaliq H., Shakeel M. T., Wu H. Y., Fahad S., *J. Plant Growth Regul.*, **2024**, *43*(7), 2454—2469
[6] Zou Y., Zhu M., Zhu Z. N., Du T. T., Liu X., Jiang Y. J., Chen J. X., *J. Agric. Food Chem.*, **2025**, *73*(8), 4534—4543
[7] Peng J., Zhang Y., Yang J. G., Zhou L. L., Zhang S. D., Wu X., Chen J. X., Hu D. Y., Gan X. H., *J. Agric. Food Chem.*, **2024**, *72*(28), 15561—15571
[8] Zhang M. H., Feng S., Chen S., Zhou Y. X., Gong C. Y., Xue W., *Pest Manag. Sci.*, **2023**, *79*(12), 4795—4808
[9] Larwood D. J., *J. Fungi*, **2020**, *6*(4), 261
[10] Abd El-Wahab A. H. F., *Pharmaceuticals-Base*, **2012**, *5*(7), 745—757
[11] Petkov H., Simeonov S. P., *Appl. Sci.-Basel*, **2023**, *13*(11), 6616
[12] Cimarelli C., *Molecules*, **2019**, *24*(13), 2372
[13] Zhang X., Hu Z., Wang S., Yin F. M., Wei Y. Y., Xie J., Sun R. F., *J. Agric. Food Chem.*, **2023**, *71*(36), 13209—13219
[14] Olyaei A., Sadeghpour M., *Rsc Advances*, **2020**, *10*(12), 7011—7011
[15] Shaterian H. R., Yarahmadi H., *Arkivoc*, **2008**, 105—114
[16] Mulla S. A. R., Salama T. A., Pathan M. Y., Inamdar S. M., Chavan S. S., *Tetrahedron Lett.*, **2013**, *54*(7), 672—675

[17] Patil S. B., Singh P. R., Surpur M. P., Samant S. D., *Ultrason. Sonochem.*, **2007**, *14*(5), 515—518
[18] Sapkal S. B., Shelke K. F., Madje B. R., Shingate B. B., Shingare M. S., *Bull. Korean Chem. Soc.*, **2009**, *30*(12), 2887—2889
[19] Wang X. B., Dong X., Wang R. Y., Zhang J., Wang M. Q., Zhang Z. Q., Yang T. Y., Xu M. H., *Chem. J. Chinese Universities*, **2024**, *45*(2), 20230444(王晓斌, 董雪, 王瑞颖, 张娟, 王濛琪, 张宗群, 杨婷玉, 许梦寒. 高等学校化学学报, **2024**, *45*(2), 20230444)
[20] Duanis-Assaf D., Alkan N., Shimshoni J. A., *Food Control*, **2023**, *154*, 110041
[21] Hu Z. X., Zhang J., Zhang T., Tian C. Y., An Q., Yi P., Yuan C. M., Zhang Z. K., Zhao L. H., Hao X. J., *J. Agric. Food Chem.*, **2024**, *72*(14), 8225—8236
[22] Li Y., Ma T. G., Yang Y., Zhong X., Zhu G. F., Wang J. T., Chen W. Z., Fan J. D., Tang L., Liu W. J., Fan L. L., *J. Agric. Food Chem.*, **2024**, *72*(48), 26983—26995
[23] Wang L. S., Qin Y. K., Fan Z. Q., Gao K., Zhan J., Xing R. E., Liu S., Li P. C., *J. Agric. Food Chem.*, **2022**, *70*(15), 4644—4657
[24] Cardellicchio C., Capozzi M. A. M., Naso F., *Tetrahedron-Asymmetr.*, **2010**, *21*(5), 507—517
[25] Shaterian H. R., Azizi K., Fahimi N., *Arab. J. Chem.*, **2017**, *10*, S42—S55
[26] Liu Y., Tian J., Zeng W., Wang Y. H., Hu C. M., Luo X. P., Qiu Y. J., Pu H. T., Wu Y. J., Xue W., *J. Agric. Food Chem.*, **2024**, *72*(43), 23766—23775
[27] Shanbhag G., Naik M., Wagh D., Autkar S., Hagalavadi M. V., Wachendorff U., Pabba J., Klausener A., *Pest Manag. Sci.*, **2024**, https://doi.org/10.1002/ps.8431
[28] Yuan Q. L., Fu W., Li X. Y., Xu Z. P., Liu X. L., Li Z., Shao X. S., *J. Agric. Food Chem.*, **2024**, *72*(29), 16112—16127
[29] Wang X., Gao D. M., Li J., Wang X. X., Xu J. L., Zhang H., Gao Y. Q., Wu H., Ma Z. Q., *J. Agric. Food Chem.*, **2024**, *72*(39), 21869—21876
[30] Chen X. F., Ren T., Mei D. H., Wei X. H., Guo Y. S., Li Y. Z., Nan Z. B., Song Q. Y., *J. Agric. Food Chem.*, **2025**, *73*(11), 6711—6723
[31] Fan Z. Q., Qin Y. K., Liu S., Xing R. E., Yu H. H., Chen X. L., Li K. C., Li R. F., Wang X. Q., Li P. C., *Carbohydr. Polym.*, **2019**, *224*, 115155

(Ed.: L, V, K)