

引用:贺鸿飞,开林峰,秦超,等. 独脚金内酯类似物的合成及其生物活性[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2026, 39(1): 148-158.

Citation: HE Hongfei, KAI Linfeng, QIN Chao, LÜ Pei. Synthesis and bioactivity of strigolactone analogues[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2026, 39(1): 148-158.

文章编号 1672-6634(2026)01-0148-11

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025040017

独脚金内酯类似物的合成及其生物活性

贺鸿飞, 开林峰, 秦超, 吕培

(安徽农业大学 资源与环境学院, 农产品质量安全危害因子与风险控制安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230036)

摘要 独脚金内酯是一种具有促进种子生长和调控植物生理功能的植物激素。通过取代苯甲酸和苯甲酰氯与 5-羟基-3-甲基-2(5H)-呋喃酮酯化, 设计合成了 20 个独脚金内酯类似物, 其结构经 ^1H 、 ^{13}C NMR 和高分辨质谱(HR-MS)确证。通过玉米、高粱的根、芽生长促进率以及向日葵根部的生长促进率评价了目标化合物对种子生长促进作用。结果显示大部分化合物对玉米、高粱和向日葵种子具有生长促进作用, 其中化合物 3i 在 1 mg/L 的浓度下对玉米和高粱种子根(芽)的生长促进率分别为 43.6%(36.5%)和 44.5%(51.7%), 在 10 mg/L 的浓度下对向日葵种子根的生长促进率为 56.3%, 明显优于阳性对照 GR24 的促进效果。玉米种子内源激素的定量分析发现 3i 通过调节种子内源脱落酸(ABA)、赤霉素(GA)和细胞分裂素(CTK)的含量变化促进其生长; 分子对接显示 3i 和 GR24 与独脚金内酯受体蛋白 OsD14 都具有较好的结合模式, 形成稳定的复合物。本文为独脚金内酯类似物对作物种子生长促进研究提供了一定的依据。

关键词 独脚金内酯; 植物激素; 分子对接; 生长促进率

中图分类号 TQ452

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Synthesis and bioactivity of strigolactone analogues

HE Hongfei, KAI Linfeng, QIN Chao, LÜ Pei

(School of Resource and Environment, Anhui Provincial Key Laboratory of Hazard Factors and Risk Control for Quality and Safety of Agricultural Products, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract Strigolactones are a class of plant hormones known for promoting seed germination and regulating plant physiological functions. In this study, twenty strigolactone analogues were designed and synthesized through the esterification of substituted benzoic acids and benzoyl chlorides with 5-hydroxy-3-methyl-2(5H)-furanone. Their structures were confirmed by ^1H NMR, ^{13}C NMR, and high-resolution mass spectrometry (HR-MS). The promotion effect of the target compounds was evaluated by the root and shoot growth promotion rates of corn and sorghum, as well as the root growth promotion rate of sunflower. The results indicated that most compounds exhibited growth-promoting effects on corn, sorghum, and sunflower seeds. Compound 3i demonstrated a significant promoting effect. 3i had 43.6% (36.5%) and

收稿日期: 2025-04-28

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(31901906); 安徽省教育厅科研重大项目(2023AH040141); 安徽省自然科学基金项目(2308085MC93)资助

通信作者: 吕培, 男, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向: 新农药创制, E-mail: lvpei@ahau.edu.cn。

44.5% (51.7%) promotion rate on root (shoot) growth in corn and sorghum seeds at a concentration of 1 mg/L, while it showed 56.3% promotion rate on sunflower root growth at 10 mg/L, higher than that of the positive control GR24. Quantitative analysis of endogenous hormone content showed that **3i** regulated abscisic acid (ABA), gibberellins (GA), and cytokinins (CTK) during germination. Molecular docking indicated stable binding modes for both **3i** and GR24 with the strigolactone receptor protein OsD14. This study provides foundational insights into the application of strigolactone analogs in enhancing crop seed germination.

Keywords strigolactone; plant hormone; molecular docking; growth promotion rate

0 引言

植物激素是植物协调细胞分裂、器官生成及环境适应的内源性信号分子,其动态平衡直接决定植物的形态建成与生态适应性。从种子萌发到衰老的整个生命周期中,激素网络通过精确的时空调控来介入植物根系构型优化、茎秆生长、叶片扩展以及生殖转换等关键生物学过程^[1]。近年来,随着分子生物学与系统生物学技术的突破,植物激素的功能研究已从单一表型描述深入到多维度调控网络的解析,揭示了其在植物生命周期中的核心地位。

在植物的生长发育过程中,植物激素的动态平衡与时空特异性分布决定了植物的形态建成与生理功能。例如,生长素(IAA)在根尖分生组织形成浓度梯度,通过 PIN 家族转运蛋白的极性分布,激活 PLT/SCR 转录因子,维持干细胞稳态并调控侧根原基的时空定位^[2, 3];赤霉素(GA)通过降解 DELLA 蛋白(如 RGA、GAD),解除其对 PIF 转录因子的抑制,促进下胚轴伸长与种子萌发^[4, 5];细胞分裂素(CTK)与生长素的拮抗作用则决定顶端优势,生长素通过激活 ARR5 基因反馈抑制 CTK 信号,形成动态平衡^[6, 7]。深入解析植物激素与植物体之间的相互作用机制,不仅为作物种植方法改良提供了新思路,也为进一步揭示植物环境适应性进化奠定了理论基础。

独脚金内酯(Strigolactones, SLs)是一类由植物根系分泌的类胡萝卜素衍生化合物,最初因其诱导寄生植物独脚金种子萌发的特性而被发现^[8]。近年研究表明,SLs 不仅是植物与丛枝菌根真菌(AFM)共生信号的关键分子,更具有调控植物分枝、根系发育及非生物胁迫响应等生理学功能,在植物生理生态学与农业应用中具有重要价值,被誉为“第六大植物激素”^[9-11]。目前已有 30 多种独脚金内酯从不同植物的根部被分离出来,还有相当一部分化合物的结构有待进一步确定。天然的独脚金内酯由于自然含量极低且结构复杂,通过分离提取的方法获取难度较大,所以合成具有天然独脚金内酯骨架的类似物展开一系列的结构与功能的研究具有重要的价值^[12-14]。

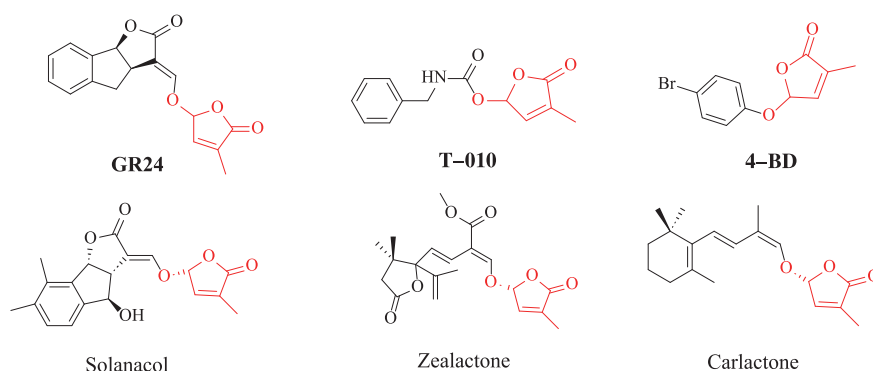


图1 天然独脚金内酯及其类似物结构

Fig. 1 Structures of strigolactone and analogus

天然的独脚金内酯大多都具有 ABCD 环结构,其中 D 环与烯醇醚键是保证其生物活性的关键骨架^[15, 16]。人工合成的独脚金内酯类似物在保留其核心结构(ABC 环形骨架)和立体构型的基础上,通过化

学修饰其天然结构,改变部分官能团或者骨架结构,已得到具有类似或更高生物活性的衍生物^[17, 18],如 GR24、T-010、4-BD 等(图 1)。为进一步研究独脚金内酯骨架化合物的结构和活性关系,本文设计与合成了一系列芳基结构代替 A、B、C 骨架的独脚金内酯类似物,并进行种子生长促进活性和结构关系(SAR)研究,以期发现新型种子生长调节剂的先导化合物。

1 结果与讨论

1.1 目标化合物的合成路线

在酸性条件下(110 °C),甲基丙二酸与乙二醛经环化反应生成中间体 5-羟基-3-甲基-2(5H)-呋喃酮;该中间体分别与取代苯甲酰氯和苯甲酸酯化合成独脚金内酯类似物(图 2),所合成的 20 个目标化合物及中间体的化学结构均经¹H, ¹³C NMR 和高分辨质谱确证。

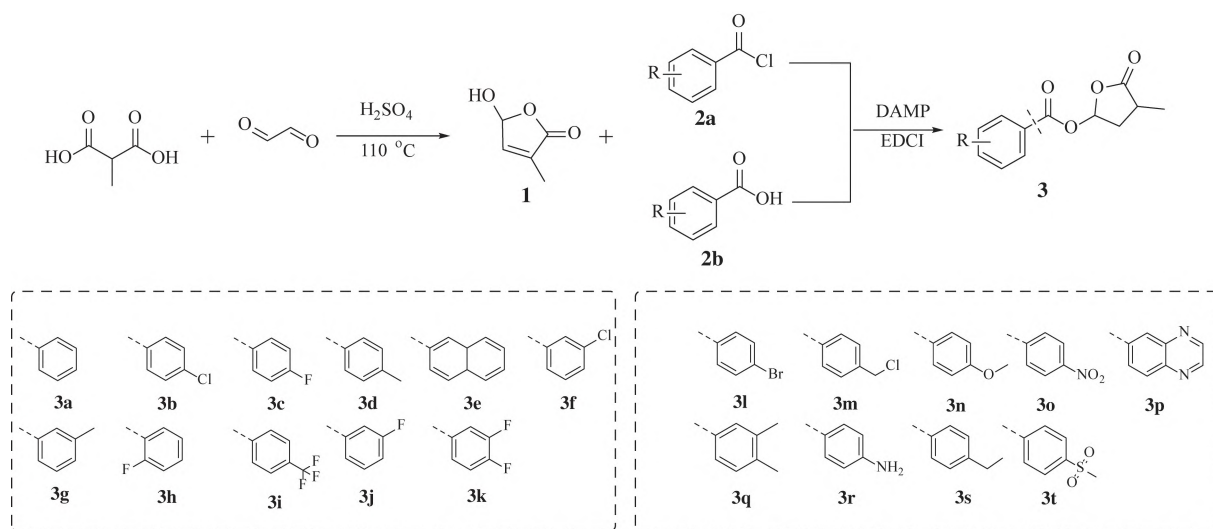


图 2 目标化合物3a-3t的合成路线

Fig. 2 Synthetic route of target compounds 3a-3t

1.2 目标化合物的生物活性测试

为评估目标化合物对作物种子根和芽生长的调控潜力,通过玉米、高粱的根、芽生长促进率以及向日葵根部的生长促进率,初步测定其对种子的生长促进活性。

1.2.1 目标化合物对玉米种子根和芽生长效果的影响。如表 1 所示,大部分目标化合物对玉米种子根(芽)的生长都具有促进作用。在 1 mg/L 的浓度下,化合物3i 和3q 对玉米种子根的生长促进率为 43.6%和 36.9%,效果高于阳性对照 GR24 的 32.8%;在 10 mg/L 的浓度下,化合物3b 和 GR24 对玉米种子根的生长促进率为 47.8%和 45.6%;在 100 mg/L 的浓度下,大部分化合物对玉米种子根的生长促进作用明显低于 1 mg/L 和 10 mg/L。目标化合物对玉米种子芽的生长促进率显示化合物3b 和3i 在 1 mg/L 浓度下对芽的生长促进率 28.6%和 36.5%,高于 GR24 的 25.6%;在 10 mg/L 浓度下,化合物3b 对芽的生长促进率为 50.2%,和 GR24(48.6%)活性相当;在 100 mg/L 浓度下,大部分的化合物对玉米种子芽的生长促进作用低于 1 mg/L 和 10 mg/L 浓度下的促进作用。化合物3i 和3b 分别在 1 mg/L 和 10 mg/L 的浓度下对玉米根(芽)均具有显著生长促进作用。

初步构效关系分析表明,在苯环上引入氯、氟或甲基取代基均能增加目标化合物对玉米种子根(芽)的生长促进活性,且取代基的位置对活性具有重要影响。值得注意的是,卤素(氯、氟)取代时,对位取代化合物 3b、3c 的生长促进活性均高于其相应的间位取代化合物 3f、3h 和 3j。与卤素取代规律相反,甲基取代时,间位甲基化合物 3g 的活性高于对位甲基化合物 3d。此外,引入甲氧基或氨基等给电子基团时,目标化合物的生长促进活性降低。

1.2.2 目标化合物对向日葵根生长的影响效果。如表 2 所示,在 1 mg/L 浓度下,化合物 3f、3h 和 3l 对向

日葵种子根的生长促进率为 40.3%、49.5%和 44.6%,效果均高于 GR24 的 39.7%;在 10 mg/L 的浓度下,化合物3h和3i对根的生长促进率为 45.2%和 56.3%,其中化合物3h的生长促进活性和 GR24(42.6%)相当,化合物3i对根的生长促进活性显著高于 GR24;在 100 mg/L 的浓度下,所有目标化合物对向日葵根的生长促进作用低于 1 和 10 mg/L。

表 1 化合物3a-3t对玉米种子的生长促进率

Tab. 1 Growth-promoting rate of 3a-3t on corn seeds

药剂名称	1 mg/L		10 mg/L		100 mg/L	
	根	芽	根	芽	根	芽
3a	9.2 ± 0.6d	-12.4 ± 0.9d	22.8 ± 1.5c	10.8 ± 1.2c	7.2 ± 1.1d	-4.8 ± 0.5d
3b	34.6 ± 1.2b	28.6 ± 2.2b	47.8 ± 2.9a	50.2 ± 2.7a	11.6 ± 1.4c	32.7 ± 1.7a
3c	22.6 ± 0.7c	23.9 ± 1.3c	36.7 ± 1.8b	26.7 ± 1.3b	29.5 ± 2.5b	7.8 ± 1.3c
3d	2.4 ± 0.3e	14.2 ± 0.9d	24.2 ± 0.7c	8.9 ± 0.6d	18.6 ± 1.4c	3.8 ± 0.6d
3e	13.6 ± 1.5d	19.7 ± 1.7c	20.3 ± 1.4d	17.6 ± 1.2c	28.6 ± 1.5b	-6.5 ± 0.8d
3f	28.4 ± 0.9c	16.7 ± 0.8d	16.6 ± 0.9d	12.9 ± 1.5d	5.4 ± 0.9d	12.6 ± 1.4c
3g	20.5 ± 1.1c	16.6 ± 1.5d	29.7 ± 1.3b	35.2 ± 2.8b	23.6 ± 1.7c	26.9 ± 2.1b
3h	8.7 ± 0.9d	18.9 ± 0.6c	20.5 ± 2.6d	22.6 ± 1.3b	18.7 ± 1.3c	11.5 ± 1.7c
3i	43.6 ± 2.5a	36.5 ± 2.2a	32.6 ± 1.8b	19.7 ± 1.2c	21.5 ± 1.6b	6.7 ± 1.3c
3j	6.8 ± 0.5e	12.4 ± 1.9d	16.9 ± 1.7d	27.5 ± 2.5b	13.6 ± 0.9d	18.6 ± 1.5c
3k	19.6 ± 1.1c	-7.4 ± 1.6d	4.3 ± 0.5e	-23.6 ± 1.4d	-1.5 ± 0.3e	-5.4 ± 0.7d
3l	8.1 ± 1.3d	13.6 ± 1.5d	15.6 ± 0.9d	7.3 ± 1.2d	6.8 ± 0.7d	-9.6 ± 0.4d
3m	13.8 ± 1.2d	5.4 ± 0.5e	9.6 ± 0.3e	-13.9 ± 1.4d	-24.2 ± 1.8e	-22.5 ± 1.8d
3n	2.7 ± 0.3e	18.8 ± 0.7c	8.2 ± 1.3e	23.6 ± 1.7b	11.5 ± 1.3c	16.9 ± 1.5c
3o	15.6 ± 0.8d	7.7 ± 1.6e	8.9 ± 0.6e	16.7 ± 1.4c	0.7 ± 0.2e	19.6 ± 1.4d
3p	27.2 ± 1.5c	12.6 ± 1.2d	7.7 ± 0.9e	-8.6 ± 0.9d	2.3 ± 0.5e	-16.2 ± 1.1d
3q	36.9 ± 2.3b	16.4 ± 1.4d	22.1 ± 1.8c	-8.4 ± 1.1d	15.6 ± 1.3c	-20.6 ± 1.8d
3r	1.5 ± 0.2e	8.7 ± 0.6d	18.8 ± 1.4d	16.9 ± 1.3c	8.8 ± 0.9d	27.1 ± 1.6b
3s	17.7 ± 1.6c	9.6 ± 1.3e	12.2 ± 0.9e	18.9 ± 1.5c	0.9 ± 0.3e	26.3 ± 1.3b
3t	8.6 ± 0.8d	-4.5 ± 0.5e	-3.7 ± 0.8e	7.6 ± 0.3d	-12.8 ± 1.3e	3.4 ± 0.4d
GR24	32.8 ± 1.3b	25.6 ± 1.6b	45.6 ± 2.8a	48.6 ± 2.8a	29.1 ± 1.6a	32.4 ± 1.5a

注:数据表示为促进率平均值±标准偏差($n=3$),同列不同小写字母表示差异达到显著水平($p<0.05$)。

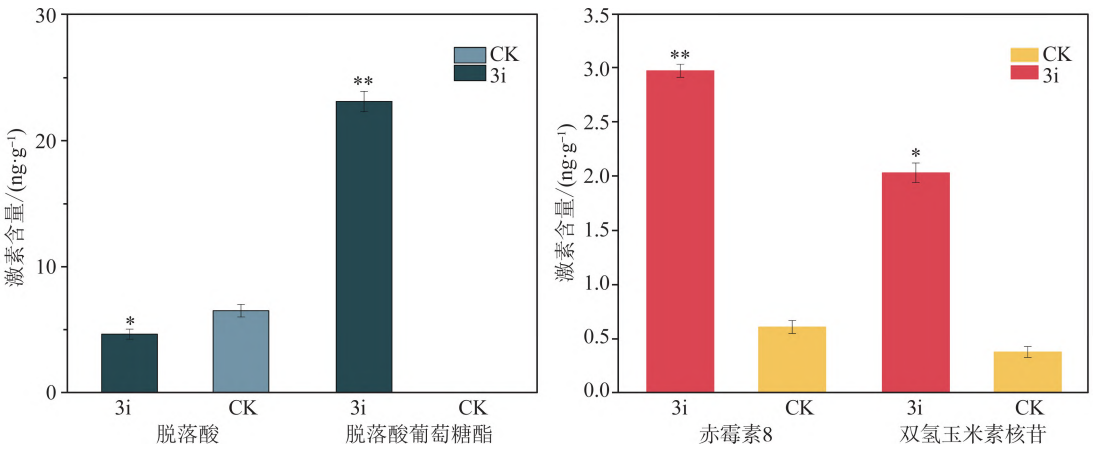
初步构效关系分析表明,在苯环上引入氟原子或三氟甲基取代基可显著增强化合物的生长促进活性。目标化合物3c、3h、3i和3k对向日葵根的生长促进作用均高于化合物3a。此外,引入甲基也能一定程度提升活性,化合物3d的生长促进作用同样高于3a。

1.2.3 目标化合物对高粱根芽生长的影响效果。从目标化合物对高粱种子根(芽)的生长促进作用来看,大部分化合物对高粱种子生长具有明显的促进作用。在 1 mg/L 的浓度下,化合物3i和3p对根的生长促进率为 44.5%和 46.8%,对芽的生长促进率为 52.4%和 51.7%,均高于阳性对照 GR24 的 42.7%和 49.6%;在 10 mg/L 和 100 mg/L 的浓度下,大部分化合物对高粱的根和芽的生长促进作用要明显低于 1 和 10 mg/L;目标化合物在处理的浓度下对高粱芽的生长促进作用要高于其对根的生长促进作用。结构活性关系表明,利用喹啉取代苯环有利于提高目标化合物对高粱种子生长促进活性。

表 2 化合物3a-3t对向日葵根的生长促进率
Tab. 2 Growth-promoting rate of 3a-3t on Sunflower root

药剂名称	1 mg/L	10 mg/L	100 mg/L
	根		
3a	17.2±1.6d	8.1±1.3d	-1.2±0.8e
3b	35.4±1.3b	13.4±1.5c	5.6±1.1d
3c	28.9±1.4c	9.7±1.2d	-7.6±1.3e
3d	35.4±1.9b	22.1±2.3b	11.4±0.9c
3e	38.7±1.2b	27.3±1.8b	10.2±1.5c
3f	40.3±2.3b	23.8±0.9b	9.8±1.4c
3g	36.4±1.6b	15.1±1.1c	-4.6±0.8e
3h	49.5±1.4a	45.2±2.6a	21.9±1.6b
3i	39.8±2.4b	56.3±1.9a	29.4±1.2c
3j	30.5±1.8c	16.9±1.5c	12.3±1.4c
3k	24.6±1.9c	39.5±1.4b	30.3±2.7b
3l	44.6±1.5a	38.6±0.9b	15.9±1.7c
3m	34.6±1.5c	21.7±1.1c	8.9±1.2d
3n	39.5±1.7b	20.7±0.8c	11.3±1.3c
3o	25.4±1.2c	35.6±2.3b	26.4±2.5b
3p	33.4±1.1c	15.4±1.6d	6.2±1.4c
3q	35.2±1.8b	20.2±1.7c	5.7±0.8c
3r	25.4±0.7c	16.9±0.4c	7.6±1.3c
3s	34.5±1.6c	23.1±2.5d	14.6±2.1d
3t	33.4±1.9c	12.3±0.9c	4.3±1.6d
GR24	39.7±1.5b	42.6±1.6b	28.8±1.3b

注:数据表示为促进率平均值±标准偏差(n=3),同列不同小写字母表示差异达到显著水平(p<0.05)。



注: * 和 * * 分别表示 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平上显著差异。

图 3 玉米种子体内激素的含量

Fig. 3 Content of hormones in corn seeds

1.3 化合物3i对玉米种子激素含量的影响

为探讨目标化合物对玉米种子的生长促进作用机理,采用 UPLC-MS 测定了化合物3i对玉米种子内源激素脱落酸(ABA)、赤霉素(GA)和双氢玉米素核苷含量的影响。结果显示(图 3),化合物3i处理过的玉米

种子体内 ABA 的含量为 4.65 ng/g,明显低于对照组体内 ABA 的含量(6.51 ng/g),并且其体内脱落酸葡萄糖苷(ABA-GE)的含量显著高于空白对照。ABA-GE 是 ABA 在植物体内代谢产物,也是 ABA 的贮存和长距离运输的非活性形态,可以降低 ABA 对植物的生长影响。双氢玉米素核苷属于细胞分裂素的一种,它能够促进细胞分裂、延长叶片寿命、促进芽的生长和抑制衰老,化合物3i 处理后的玉米种子体内双氢玉米素核苷的含量为 0.61 ng/g,明显高于对照组的 0.38 ng/g。化合物3i 处理组和对照组玉米种子体内赤霉素 8 的含量分别为 2.97 ng/g 和 2.03 ng/g,这表明化合物3i 处理后玉米种子处于生长发育活跃阶段。

表 3 化合物3a-3t 对高粱种子的生长促进率

Tab. 3 Growth-promoting rate of 3a-3t on sorghum seeds

药剂名称	1 mg/L		10 mg/L		100 mg/L	
	根	芽	根	芽	根	芽
3a	-6.9±0.9e	17.6±1.9d	-29.9±1.2e	8.4±1.2d	-37.4±2.2e	-3.7±0.7d
3b	-12.4±1.2e	21.2±1.5c	-21.4±1.7d	10.6±1.3d	-30.6±1.1d	2.9±0.6c
3c	-11.5±1.9e	10.2±0.8e	-27.8±1.8e	-3.7±0.6e	-37.2±2.1e	-16.8±1.3e
3d	25.8±1.6c	39.8±2.4b	11.2±0.7c	28.6±2.2b	4.1±0.3c	9.4±1.1c
3e	32.5±1.7b	18.9±1.2d	22.3±2.2b	6.9±1.1d	10.6±1.4b	-4.7±0.9d
3f	36.4±1.8b	35.1±1.3b	28.3±2.1a	22.3±1.8c	9.9±1.1b	11.6±1.5b
3g	22.3±2.4c	24.1±1.2c	4.4±0.7d	19.6±1.7c	-8.6±0.9e	10.2±1.4c
3h	29.6±1.2b	25.6±1.7c	17.6±1.2c	13.7±1.4d	7.3±1.5c	6.1±1.2c
3i	44.5±2.6a	51.7±2.8a	18.6±1.3c	34.6±2.6b	6.6±1.7c	16.3±1.7b
3j	22.4±1.9c	26.1±1.3c	17.2±1.5c	20.9±1.8c	6.7±1.3c	7.5±1.6c
3k	31.4±1.8b	38.6±1.2b	18.4±1.1c	27.5±2.1b	8.4±1.6b	9.7±1.3c
3l	17.3±1.4d	40.5±1.9b	10.6±1.3c	32.6±1.5b	-3.5±0.9d	18.1±1.4b
3m	14.3±1.7d	41.2±2.6b	9.5±1.8c	30.1±1.7b	-2.3±0.5d	17.3±1.1b
3n	11.6±1.3d	35.3±1.4b	5.7±0.7d	20.6±1.3c	-10.6±1.2d	9.2±1.2c
3o	17.4±1.5d	38.9±1.1b	4.9±1.1d	31.2±1.1b	-8.7±1.6e	12.8±1.9b
3p	46.8±1.2a	52.4±1.7a	23.5±2.5b	41.3±2.7a	9.5±0.7b	28.4±1.5a
3q	29.4±2.3b	44.7±2.5a	13.5±1.1c	35.6±1.4b	6.4±0.9c	14.4±0.9b
3r	31.4±1.8b	37.5±1.6b	16.8±1.6c	23.8±1.6c	7.2±1.4c	7.4±0.6c
3s	28.8±1.1b	40.4±2.7b	14.2±1.5c	32.5±2.3b	6.8±0.7c	20.9±1.9a
3t	26.7±1.4b	33.1±1.9c	15.8±1.8c	22.7±1.2c	5.9±0.6c	13.1±0.8b
GR24	42.7±1.5a	49.6±1.5a	27.2±1.6a	38.7±1.9a	16.5±1.1a	26.8±1.4a

注:数据表示为促进率平均值±标准偏差($n=3$),同列不同小写字母表示差异达到显著水平($p<0.05$)。

1.4 目标化合物的分子对接

为了进一步研究独脚金内酯类似物对种子生长促进的作用机制,使用 AutoDock-1.5.7 对独脚金内酯受体蛋白 OsD14 与 GR24 和化合物3i 进行对接模拟。结果显示 GR24 与 OsD14 结合能为 -7.66 kcal/mol,残基 VAL-148、VAL-244、PHE-245、PHE-176、PHE-186、VAL-194、HIS-297、PHE-78 参与疏水作用,PHE-176 与 GR24 形成 π -阳离子的相互作用,HIS-287 与 GR24 形成盐桥,同时 TPR-205 与 GR24 形成一个氢键。从目标化合物3i 与 OsD14 对接结果中来看,化合物3i 与 GR24 的结合能为 -7.82 kcal/mol,残基 ALA-276、VAL-271、ASP-268、ARG-267、ALA-273、GLN-264 参与疏水作用,同时 ASP-206 和 ALA-273 与目标化合物形成两个氢键。化合物3i 相比 GR24 与 OsD14 结合所需的能量更低,更容易与独脚金内酯受体蛋白结合,并且氢键数目也比 GR24 多一个,这使所结合形成的复合体结构更加稳定。

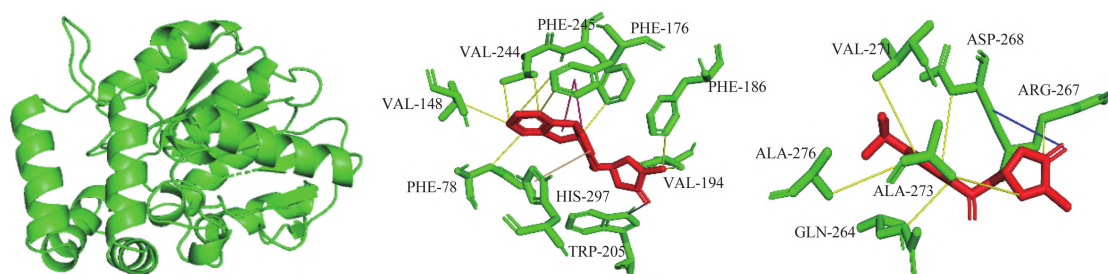


图4 目标化合物3i和GR24与OsD14蛋白的复合结构

Fig. 4 Complex structures of target compounds 3i and GR24 with OsD14 protein

2 实验部分

2.1 仪器和试剂

本实验所用试剂纯度均为分析纯,分别购于上海皓鸿生物医药科技有限公司和安徽优昇生物科技有限公司。所用氘代试剂均购买于上海阿达玛斯试剂有限公司,实验所用溶剂均购于安徽优昇生物科技有限公司,分析纯。仪器:美国 Agilent 科技有限公司 DD2 型 600 MHz 核磁共振仪,美国赛默飞世尔科技有限公司组合型四极杆-静电场轨道阱液质联用仪。

2.2 目标化合物的合成

2.2.1 化合物 1(5-羟基-3-甲基呋喃-2(5H)-酮)的合成。将 7.0 g 甲基丙二酸与 9.3 mL 乙二醛放入干燥的茄型瓶中,依次加入 60 mL 水和 7 滴浓硫酸,在 110 °C 下加热回流反应 12 h,反应结束后依次加入饱和食盐水和乙酸乙酯,萃取,收集有机相,旋转蒸发仪除去溶剂,最后通过硅胶柱层析提纯得到化合物 1。

2.2.2 目标化合物 3a-3t 的合成。方法一:将 5-羟基-3-甲基-2(5H)-呋喃酮(200.0 mg, 1.03 mmol)和 4-二甲基氨基吡啶(DMAP, 251.7 mg, 2.06 mmol)放入干燥的茄型瓶中。随后加入 10 mL 二氯甲烷溶解,在冰浴下进行充分搅拌,缓慢滴加取代苯甲酰氯(1.03 mmol),加入完毕后室温搅拌 3 h。反应结束后依次用 50 mL 乙酸乙酯饱和 30 mL 食盐水萃取,有机相加入无水 Na_2SO_4 干燥,抽滤,旋干,柱层析得到目标产物。

方法二:将 5-羟基-3-甲基-2(5H)-呋喃酮(200.0 mg, 1.03 mmol)和 4-二甲基氨基吡啶(DMAP, 251.7 mg, 2.06 mmol)放入干燥的茄型瓶中,随后加入二氯甲烷(10 mL)溶解。在冰浴中充分搅拌后,缓慢滴加 N-乙基 N-[3-(二甲氨基)丙基]碳二亚胺盐酸盐(EDCI, 394.9 mg, 2.06 mmol)和取代苯甲酸,加入完毕后移除冰浴,25 °C 下搅拌 24 h,反应结束后用 50 mL NaHCO_3 、30 mL NaHCO_3 有机相加入无水 Na_2SO_4 干燥,抽滤,旋干,柱层析得到目标产物。

5-羟基-3-甲基-2(5H)-呋喃酮(中间体):黄色固体,熔点 103~108 °C。产率,85%。 ^1H NMR (600 MHz, CDCl_3) δ 6.93~6.81 (m, 1H), 6.13~6.03 (m, 1H), 1.93 (s, 3H). ^{13}C NMR (150 MHz, CDCl_3) δ 170.78, 145.92, 131.87, 85.21, 10.38. HRMS[ESI⁺] for $\text{C}_5\text{H}_6\text{O}_3$ [(M+H)⁺], m/z Calcd: 114.0322; Found: 114.0325.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基苯甲酸酯(3a):白色固体,熔点 122~126 °C。产率,89%。 ^1H NMR (600 MHz, CDCl_3) δ 8.05 (d, J = 7.1 Hz, 2H), 7.63~7.59 (m, 1H), 7.47 (d, J = 7.6 Hz, 2H), 7.12 (s, 1H), 7.03 (s, 1H), 2.03 (s, 3H). ^{13}C NMR (151 MHz, CDCl_3) δ 171.07, 164.74, 142.12, 134.57, 133.99, 130.05, 128.58, 128.43, 93.03, 10.64. HRMS[ESI⁺] for $\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{O}_4$ [(M+H)⁺], m/z Calcd: 218.0584; Found: 218.0590.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基 4-氯苯甲酸酯(3b):白色固体,熔点 142~145 °C。产率,91%。 ^1H NMR (600 MHz, CDCl_3) δ 7.98 (d, J = 8.7 Hz, 2H), 7.44 (d, J = 8.7 Hz, 2H), 7.10 (s, 1H), 7.02 (s, 1H), 2.04 (s, 3H). ^{13}C NMR (151 MHz, CDCl_3) δ 170.87, 163.91, 141.86, 140.63, 134.73, 131.40, 128.99, 126.88, 93.08, 10.62. HRMS[ESI⁺] for $\text{C}_{12}\text{H}_9\text{ClO}_4$ [(M+H)⁺], m/z Calcd:

252.0194; Found: 252.0189.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基 4-氟苯甲酸酯(3c):白色固体,熔点 143~149 °C。产率,85%。¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ 8.07 (d, *J* = 3.3 Hz, 2H), 7.19~7.06 (m, 3H), 7.02 (s, 1H), 2.03 (s, 3H). ¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃) δ 170.93, 167.21, 165.51, 163.75, 141.94, 134.68, 132.70, 124.67, 115.93, 115.78, 93.03, 10.61. HRMS[ESI⁺] for C₁₂H₉FO₄ [(M+H)⁺], *m/z* Calcd: 236.0490; Found: 236.0486.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基 4-甲基苯甲酸酯(3d):白色固体,熔点 124~128 °C。产率,92%。¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ 7.94 (d, *J* = 8.5 Hz, 2H), 7.27 (d, *J* = 8.4 Hz, 2H), 7.12 (s, 1H), 7.04 (s, 1H), 2.43 (s, 3H), 2.04 (s, 3H). ¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃) δ 171.14, 164.76, 144.95, 142.25, 134.47, 130.10, 129.30, 125.65, 125.65, 92.95, 21.71, 10.63. HRMS[ESI⁺] for C₁₃H₁₂O₄ [(M+H)⁺], *m/z* Calcd: 232.0741; Found: 232.0736.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基-2-萘甲酸酯(3e):白色固体,熔点 135~138 °C。产率,94%。¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ 8.62 (s, 1H), 8.04 (d, *J* = 8.8 Hz, 1H), 7.96 (d, *J* = 8.1 Hz, 1H), 7.90 (t, *J* = 7.3 Hz, 2H), 7.63 (t, *J* = 7.5 Hz, 1H), 7.57 (t, *J* = 7.7 Hz, 1H), 7.19 (s, 1H), 7.09 (s, 1H), 2.06 (s, 3H). ¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃) δ 171.07, 164.91, 142.15, 135.96, 134.62, 132.38, 132.02, 129.46, 128.84, 128.46, 127.81, 126.92, 125.61, 125.08, 93.16, 10.66. HRMS[ESI⁺] for C₁₆H₁₂O₄ [(M+H)⁺], *m/z* Calcd: 268.0748; Found: 268.0748.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基-3-氯苯甲酸酯(3f):白色固体,熔点 149~155 °C。产率,81%。¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ 8.02 (s, 1H), 7.94 (d, *J* = 7.7 Hz, 1H), 7.59 (d, *J* = 7.9 Hz, 1H), 7.42~7.40 (m, 1H), 7.10 (s, 1H), 7.03 (s, 1H), 2.04 (s, 3H). ¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃) δ 170.78, 145.92, 131.87, 85.20, 10.40. HRMS[ESI⁺] for C₁₂H₉ClO₄ [(M+H)⁺], *m/z* Calcd: 252.0194; Found: 252.0201.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基 3-甲基苯甲酸酯(3g):白色固体,熔点 166~172 °C。产率,86%。¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ 7.84 (d, *J* = 10.3 Hz, 2H), 7.42 (d, *J* = 7.7 Hz, 1H), 7.36~7.33 (m, 1H), 7.12 (s, 1H), 7.03 (s, 1H), 2.40 (s, 3H), 2.03 (s, 3H). ¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃) δ 171.20, 164.39, 164.23, 142.33, 134.41, 132.24, 120.63, 113.89, 92.90, 55.49, 10.63. HRMS[ESI⁺] for C₁₃H₁₂O₄ [(M+H)⁺], *m/z* Calcd: 232.0741; Found: 232.0747.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基-2-氟苯甲酸酯(3h):白色固体,熔点 162~166 °C。产率,84%。¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ 7.95~7.93 (m, 1H), 7.60~7.56 (m, 1H), 7.25~7.14 (m, 2H), 7.11 (s, 1H), 7.03 (s, 1H), 2.03 (s, 3H). ¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃) δ 170.98, 163.15, 162.34, 162.31, 161.41, 141.94, 135.69, 135.63, 134.65, 132.34, 124.17, 124.15, 117.25, 117.11, 117.02, 116.95, 92.95, 10.63. HRMS[ESI⁺] for C₁₂H₉FO₄ [(M+H)⁺], *m/z* Calcd: 236.0490; Found: 236.0495.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基 4-(三氟甲基)苯甲酸酯(3i):黄色油状,熔点 155~160 °C。产率,85%。¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ 8.16 (d, *J* = 7.9 Hz, 2H), 7.73 (d, *J* = 7.9 Hz, 2H), 7.12 (s, 1H), 7.04 (s, 1H), 2.05 (s, 3H). ¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃) δ 170.76, 163.62, 141.66, 135.54, 134.92, 131.68, 130.45, 125.64, 93.21, 92.31, 10.65. HRMS[ESI⁺] for C₁₃H₉F₃O₄ [(M+H)⁺], *m/z* Calcd: 286.0458; Found: 286.0453.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基-3-氟苯甲酸酯(3j):白色固体,熔点 162~168 °C。产率,88%。¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ 7.85~7.83 (m, 1H), 7.72~7.79 (m, 1H), 7.45~7.43 (m, 1H), 7.32~7.30 (m, 1H), 7.11 (s, 1H), 7.03 (s, 1H), 2.04 (s, 3H). ¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃) δ 170.89, 163.66, 161.71, 141.72, 134.78, 130.55, 125.92, 121.06, 116.73, 93.03, 10.58. HRMS[ESI⁺] for

$C_{12}H_9FO_4[(M+H)^+]$, m/z Calcd: 236.0490; Found: 236.0495.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基 3,4-二氟苯甲酸酯(**3k**): 白色固体, 熔点 155~159 °C。产率: 83%。 1H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ 7.89~7.81 (m, 2H), 7.27~7.23 (m, 1H), 7.05~7.07 (m, 1H), 7.02~7.00 (m, 1H), 2.03 (s, 3H). ^{13}C NMR (151 MHz, $CDCl_3$) δ 170.79, 162.89, 155.08, 153.46, 151.07, 149.32, 141.59, 134.88, 127.28, 119.26, 93.05, 10.72. HRMS[ESI $^+$] for $C_{12}H_8F_2O_4[(M+H)^+]$, m/z Calcd: 254.0396; Found: 254.0394.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基 4-溴苯甲酸酯(**3l**): 白色固体, 熔点 124~127 °C。产率: 82%。 1H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ 7.90 (d, $J = 8.7$ Hz, 2H), 7.61 (d, $J = 8.7$ Hz, 2H), 7.10 (s, 1H), 7.02 (s, 1H), 2.04 (s, 3H). ^{13}C NMR (151 MHz, $CDCl_3$) δ 170.91, 164.08, 141.88, 134.75, 132.01, 131.50, 129.36, 127.32, 93.08, 10.66. HRMS[ESI $^+$] for $C_{12}H_9BrO_4[(M+H)^+]$, m/z Calcd: 295.9689; Found: 296.9685.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基 4-氯甲基苯甲酸酯(**3m**): 白色固体, 熔点 162~168 °C。产率: 84%。 1H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ 8.04 (d, $J = 8.3$ Hz, 2H), 7.49 (d, $J = 7.9$ Hz, 2H), 7.12 (s, 1H), 7.03 (s, 1H), 4.62 (s, 2H), 2.04 (s, 3H). ^{13}C NMR (151 MHz, $CDCl_3$) δ 171.01, 164.25, 143.45, 141.92, 134.65, 130.57, 128.71, 92.98, 45.12, 10.59. HRMS[ESI $^+$] for $C_{13}H_{11}ClO_4[(M+H)^+]$, m/z Calcd: 266.0351; Found: 266.0356.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基 4-甲氧基苯甲酸酯(**3n**): 白色固体, 熔点 153~158 摄氏度。产率: 92%。 1H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ 8.00 (d, $J = 8.8$ Hz, 2H), 7.11 (s, 1H), 7.02 (s, 1H), 6.93 (d, $J = 9.0$ Hz, 2H), 3.87 (s, 3H), 2.03 (s, 3H). ^{13}C NMR (151 MHz, $CDCl_3$) δ 171.20, 164.39, 164.23, 142.33, 134.41, 132.24, 120.63, 113.89, 92.90, 55.49, 10.63. HRMS[ESI $^+$] for $C_{13}H_{12}O_5[(M+H)^+]$, m/z Calcd: 248.0690; Found: 248.0684.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基-4-硝基苯甲酸酯(**3o**): 白色固体, 熔点 177~182 °C。产率: 84%。 1H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ 8.31 (d, $J = 8.9$ Hz, 2H), 8.23 (d, $J = 8.9$ Hz, 2H), 7.13 (s, 1H), 7.05 (s, 1H), 2.05 (s, 3H). ^{13}C NMR (151 MHz, $CDCl_3$) δ 171.02, 164.25, 143.45, 142.03, 134.66, 130.49, 128.65, 93.06, 45.13, 10.66. HRMS[ESI $^+$] for $C_{12}H_9NO_6[(M+H)^+]$, m/z Calcd: 263.0453; Found: 263.0459.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基喹啉-2-羧酸酯(**3p**): 白色固体, 熔点 112~126 °C。产率: 82%。 1H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ 8.95 (s, 2H), 8.86 (d, $J = 2.0$ Hz, 1H), 8.37 (dd, $J = 8.8, 2.0$ Hz, 1H), 8.20 (d, $J = 8.8$ Hz, 1H), 7.19 (s, 1H), 7.09 (s, 1H), 2.07 (s, 3H). ^{13}C NMR (151 MHz, $CDCl_3$) δ 141.98, 137.59, 134.96, 130.83, 130.59, 129.61, 129.20, 127.63, 121.24, 93.74, 10.75. HRMS[ESI $^+$] for $C_{14}H_{10}N_2O_4[(M+H)^+]$, m/z Calcd: 270.0641; Found: 270.0598.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基 3,4-二甲基苯甲酸酯(**3q**): 白色固体, 熔点 165~177 °C。产率: 85%。 1H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ 7.80 (s, 1H), 7.77 (d, $J = 7.9$ Hz, 1H), 7.21 (d, $J = 7.9$ Hz, 1H), 7.11 (s, 1H), 7.02 (s, 1H), 2.31 (d, $J = 12.2$ Hz, 6H), 2.03 (s, 3H). ^{13}C NMR (151 MHz, $CDCl_3$) δ 171.20, 164.94, 143.66, 142.31, 137.05, 134.43, 131.04, 129.87, 127.69, 125.89, 92.94, 20.07, 19.59, 10.64. HRMS[ESI $^+$] for $C_{14}H_{14}O_4[(M+H)^+]$, m/z Calcd: 246.0897; Found: 246.0893.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基 4-氨基苯甲酸酯(**3r**): 白色固体, 熔点 154~161 °C。产率: 77%。 1H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ 7.84 (d, $J = 8.7$ Hz, 2H), 7.10 (s, 1H), 7.00 (s, 1H), 6.63 (d, $J = 8.7$ Hz, 2H), 4.17 (s, 2H), 2.01 (s, 3H). ^{13}C NMR (151 MHz, $CDCl_3$) δ 171.37, 164.59, 151.85, 142.59, 134.22, 132.32, 117.42, 113.79, 92.80, 10.63. HRMS[ESI $^+$] for $C_{12}H_{11}NO_4[(M+H)^+]$,

m/z Calcd: 233.0693; Found: 233.0699.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基 4-乙基苯甲酸酯(**3s**):白色固体,熔点 144~148 °C。产率,82%。¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ 7.96 (d, J = 8.2 Hz, 2H), 7.30 - 7.26 (m, 2H), 7.12 (s, 1H), 7.03 (s, 1H), 2.71 (q, J = 7.6 Hz, 2H), 2.03 (s, 3H), 1.26 (t, J = 7.6 Hz, 3H). ¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃) δ 171.14, 164.78, 151.11, 142.24, 134.47, 130.22, 128.12, 125.84, 92.96, 29.00, 15.06, 10.64. HRMS[ESI⁺] for C₁₄H₁₄O₄[(M+H)⁺], m/z Calcd: 246.0897 Found: 246.0893.

4-甲基-5-氧代-2,5-二氢呋喃-2-基 4-(甲磺酰基)苯甲酸酯(**3t**):白色固体,熔点 127~132 °C。产率,86%。¹H NMR (600 MHz, CDCl₃) δ 8.24 (d, J = 8.2 Hz, 2H), 8.05 (d, J = 8.3 Hz, 2H), 7.12 (s, 1H), 7.04 (s, 1H), 3.09 (s, 3H), 2.05 (s, 3H). ¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃) δ 170.72, 163.27, 145.27, 141.58, 135.03, 133.17, 130.99, 127.69, 93.28, 44.25, 10.68. HRMS[ESI⁺] for C₁₃H₁₂O₆S[(M+H)⁺], m/z Calcd: 296.0360; Found: 296.0355.

2.3 目标化合物的生物活性测试

2.3.1 材料准备。选用体型和饱满程度近似的玉米、高粱和向日葵种子,所有的种子均在 70%的乙醇溶液内消毒 10 min,消毒完毕后用纯水洗净。采用 DMSO 和无菌水为溶剂,配制 1 000 mg/L 的目标化合物的母液,再将母液梯度稀释到 100、10、1 mg/L。采用 GR24 为阳性对照,DMSO 为阴性对照,纯水为空白对照。

2.3.2 发芽实验^[19, 20]。在直径在 80 mm 的培养皿底部铺上两张滤纸,每个培养皿内加入 10 粒种子,取 100 μ L 的目标化合物溶液溶解到 5 mL 的纯水中,用涡旋仪震荡 30 s 倒入培养皿内,再向培养皿中加入 5 mL 纯水,在温度为 26 °C湿度为 70%的培养箱中培养 3 天,每个浓度梯度实验设置三组重复。

2.3.3 生长促进率计算公式。实验以 GR24 为阳性对照,DMSO 为阴性对照,纯水为空白对照,每个浓度梯度实验设置三组重复,三天后分别测定根、芽长度,及时记录数据并且计算促进率。定义为:处理组根(芽)平均长度为 l_a ,空白组根(芽)平均长度为 l_b ,根(芽)长的生长促进率为 β_p ,其计算公式如

$$\beta_p = \frac{l_a - l_b}{l_b} \times 100\%。$$

2.4 分子对接

本研究通过 RCSB PDB 数据库获取独脚金内酯受体蛋白 OsD14 的三维结构(PDB 格式),在 PyMOL 中去除水分子并添加氢原子,利用 AutoDock Tools 将其转换为 PDBQT 格式作为受体;配体小分子通过 ChemDraw 生成三维结构并导出为 PDB 格式,经 PyMOL 去水加氢后,使用 AutoDock Tools 设定扭转键并保存为 PDBQT 格式;在 AutoDock Tools 中以 OsD14 活性口袋为中心设置对接盒子,生成格点参数文件(GPF),通过 AutoGrid4 计算能量格点;最终采用 AutoDock Vina 进行分子对接(能量评估函数评分),对接结果通过 PyMOL 可视化分析结合模式与相互作用。

3 结论

本文以甲基丙二酸和乙二醛为原料,在 110 °C酸性条件下反应生成中间体 5-羟基-3-甲基呋喃-2(5H)-酮,再和取代的苯甲酸和苯甲酰氯酯化得到独脚金内酯类似物**3a-3t**。通过对玉米、高粱、向日葵种子生长实验发现大部分化合物对玉米、高粱和向日葵的种子生长具有较好的促进作用。在 1 mg/L 的浓度下,化合物**3i**对玉米根和芽的生长促进作用为 43.6%和 36.5%,明显高于 GR24 的 32.8%和 25.6%;同时对高粱种子的根(芽)的生长促进作用为 44.5%和 51.7%,也要高于 GR24。化合物**3i**在 10 mg/L 的浓度下对向日葵的根的生长促进作用达到了 56.3%,高于 GR24 的 42.6%。通过植物内源激素含量分析,发现化合物**3i**能调节内源性激素脱落酸向脱落酸葡萄糖酯代谢从而降低脱落酸的含量,并且调控赤霉素以及细胞分裂素生物合成,促进作物种子的生长发育。分子对接模拟结果显示化合物**3i**和 GR24 都可以与独脚金内酯类似物蛋白 OsD14 稳定结合,形成稳定复合体。

参 考 文 献

- [1] WAADT R, SELLER C A, HSU P K, et al. Plant hormone regulation of abiotic stress responses[J]. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2022, 23(10): 680-694.
- [2] LAVY M, ESTELLE M. Mechanisms of auxin signaling[J]. *Development*, 2016, 143(18): 3226-3229.
- [3] GOMES G L B, SCORTECCI K C. Auxin and its role in plant development: structure, signalling, regulation and response mechanisms [J]. *Plant Biology*, 2021, 23(6): 894-904.
- [4] LI K L, YU R B, FAN L M, et al. DELLA-mediated PIF degradation contributes to coordination of light and gibberellin signalling in *Arabidopsis*[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 11868.
- [5] FUKAZAWA J, OHASHI Y, TAKAHASHI R, et al. DELLA degradation by gibberellin promotes flowering via GAF1-TPR-dependent repression of floral repressors in *Arabidopsis*[J]. *The Plant Cell*, 2021, 33(7): 2258-2272.
- [6] NASEEM M, KALTDORF M, DANDEKAR T. The nexus between growth and defence signalling: auxin and cytokinin modulate plant immune response pathways[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(16): 4885-4896.
- [7] SCHALLER G E, BISHOPP A, KIEBER J J. The Yin-Yang of hormones: cytokinin and auxin interactions in plant development[J]. *The Plant Cell*, 2015, 27(1): 44-63.
- [8] 陈彩艳, 邹军煌, 张淑英, 等. 独角金内酯能抑制植物的分枝并介导植物与根枝真菌及寄生植物间的相互作用[J]. *中国科学(C辑:生命科学)*, 2009, 39(6): 525-533.
- [9] MITRA D, B E G S, KHOSHROU B, et al. Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on rice growth, development, and stress management with a particular emphasis on strigolactone effects on root development[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2021, 52(14): 1591-1621.
- [10] SHARMA P, JHA A B, DUBEY R S. Strigolactones: coordination with other phytohormones and enhancement of abiotic stress responses[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2024, 223: 105782.
- [11] PAPNAI G, JOSHI N, NAUTIYAL P. Unravelling diverse roles of strigolactones in stimulating plant growth and alleviating various stress conditions: a review[J]. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2019, 8(5): 396-404.
- [12] XIE X N, YONEYAMA K, YONEYAMA K. The strigolactone story[J]. *Annual Review of Phytopathology*, 2010, 48(1): 93-117.
- [13] GE Y H, CHEN X Y, KHAN S N, et al. Synthesis and germination activity study of novel strigolactam/ strigolactone analogues[J]. *Tetrahedron Letters*, 2023, 115: 154315.
- [14] ZORRILLA J G, RIAL C, VARELA R M, et al. Strategies for the synthesis of canonical, non-canonical and analogues of strigolactones, and evaluation of their parasitic weed germination activity[J]. *Phytochemistry Reviews*, 2022, 21(5): 1627-1659.
- [15] DUN E A, BREWER P B, BEVERIDGE C A. Strigolactones: discovery of the elusive shoot branching hormone[J]. *Trends in Plant Science*, 2009, 14(7): 364-372.
- [16] ARITE T, UMEHARA M, ISHIKAWA S, et al. d14, a strigolactone-insensitive mutant of rice, shows an accelerated outgrowth of tillers[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2009, 50(8): 1416-1424.
- [17] BENNETT T, LEYSER O. Strigolactone signalling: standing on the shoulders of DWARFs[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2014, 22: 7-13.
- [18] YONEYAMA K, XIE X N, YONEYAMA K, et al. Strigolactones: structures and biological activities[J]. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science*, 2009, 65(5): 467-470.
- [19] 赵晨云, 郭小丽, 陈亚轲, 等. 生长素和独角金内酯参与磷素调控水稻分蘖的机制初探[J]. *河南农业科学*, 2022, 51(1): 21-26.
- [20] 赵玉欢, 黄晓宇, 关环, 等. 独角金内酯对黄芩幼苗根系发育的影响[J]. *植物生理学报*, 2023, 59(3): 505-514.

(责任编辑:刘庆松)