

## RRx-001衍生物的合成和抗肿瘤活性研究

吴若南, 汤文敏, 高林, 吴岳林, 罗川, 缪震元

### Synthesis and Antitumor Activity of Novel RRx-001 Derivatives

WU Ruonan, TANG Wenmin, GAO Lin, WU Yuelin, LUO Chuan, MIAO Zhenyuan

在线阅读 View online: <http://yxsj.smmu.edu.cn/cn/article/doi/10.12206/j.issn.2097-2024.202408053>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 新型Hsp90抑制剂的设计合成及其抗真菌和抗肿瘤活性研究

Design, synthesis and antifungal and antitumor activity research of novel Hsp90 inhibitors

药学实践与服务. 2025, 43(3): 124-135 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202501019](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202501019)

#### 具核梭杆菌小分子抑制剂的筛选及其抗结直肠癌活性研究

Screening and anti-colorectal activity of small molecule inhibitors of *Fusobacterium nucleatum*

药学实践与服务. 2024, 42(12): 503-507 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202405009](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202405009)

#### 黄芪甲苷衍生物治疗慢性心力衰竭小鼠的药效评价及作用机制研究

Efficacy and mechanism of astragaloside IV derivatives on chronic heart failure in mice

药学实践与服务. 2024, 42(5): 190-197 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202310004](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202310004)

#### 紫杉醇棕榈酸酯的合成及其脂质体的制备与处方研究

Synthesis of paclitaxel palmitate and the formulation optimization of its liposomes

药学实践与服务. 2024, 42(9): 379-384, 410 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202404062](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202404062)

#### 铁死亡调控蛋白GPX4的小分子抑制剂研究进展

Research progress on small-molecule inhibitors of ferroptosis regulatory protein GPX4

药学实践与服务. 2024, 42(9): 375-378 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202312075](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202312075)

#### mRNA肿瘤疫苗非病毒递送系统研究进展

Progress on mRNA tumor vaccine with non-viral delivery system

药学实践与服务. 2025, 43(3): 109-116 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202410034](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202410034)



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

· 研究报告 ·

## RRx-001 衍生物的合成和抗肿瘤活性研究

吴若南<sup>1</sup>, 汤文敏<sup>2,3</sup>, 高 林<sup>1</sup>, 吴岳林<sup>3</sup>, 罗 川<sup>1</sup>, 缪震元<sup>2</sup> (1. 安徽华润金蟾药业有限公司, 安徽 淮北 235000; 2. 海军军医大学药学院, 上海 200433; 3. 上海应用技术大学化学与环境工程学院, 上海 201418)

**[摘要]** 目的 研究引入共价结合片段后的 RRx-001 衍生物的抗肿瘤活性。方法 设计合成了 4 个目标化合物, 其结构通过<sup>1</sup>H NMR 和 HRMS 等确证; 选择人肺癌细胞株 A549 和人结肠癌细胞株 HCT116 进行体外抗肿瘤活性测试。结果 所有化合物均显示出一定的抗肿瘤活性, 其中化合物 ZM528 活性最高, 对两种肿瘤细胞株的 IC<sub>50</sub> 值分别为 (5.1±4.8) 和 (6.0±2.7) μmol/L。结论 以新的共价结合片段代替 RRx-001 的溴代乙酰基后可保持抗肿瘤活性。

**[关键词]** RRx-001; 肿瘤免疫; 共价抑制剂; 合成; 抗肿瘤。

**[文章编号]** 2097-2024(2025)00-0001-05 **[DOI]** 10.12206/j.issn.2097-2024.202408053

## Synthesis and Antitumor Activity of Novel RRx-001 Derivatives

WU Ruonan<sup>1</sup>, TANG Wenmin<sup>2,3</sup>, GAO Lin<sup>1</sup>, WU Yuelin<sup>3</sup>, LUO Chuan<sup>1</sup>, MIAO Zhenyuan<sup>2</sup> (1. Anhui Huarun Golden Frog Pharmaceutical Ltd., Anhui Huaibei 235000; 2. School of Pharmacy, Naval Medical University, Shanghai 200433; 3. School of Chemical and Environmental Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418)

**[Abstract]** **Objectives** To study the antitumor activities of RRx-001 derivatives with novel covalent fragments **Methods** Four targeted compounds were designed and synthesized. The structures were confirmed by <sup>1</sup>H NMR and HRMS. A549 and HCT116 cancer cell lines were selected for antiproliferative activity assays. **Results** All the compounds revealed antitumor activities and compound ZM528 showed the best antitumor activity against these two cell lines with IC<sub>50</sub> values of (5.1±4.8) and (6.0±2.7) μmol/L, respectively. **Conclusions** The result indicated that bromoacetyl group of RRx-001 could be substituted with other covalent fragments.

**[Key words]** RRx-001; immuno-oncology; covalent inhibitor; synthesis; antitumor

RRx-001 是一种源于航空工业的肿瘤免疫治疗药物<sup>[1]</sup>, 其化学结构中含有溴代乙酰和双硝基氮杂环丁基团, 目前处于 III 期临床试验<sup>[2]</sup>。RRx-001 作为单一药物、放疗增敏剂或免疫增敏剂<sup>[3]</sup>, 用于细胞肺癌<sup>[4]</sup>、转移性结直肠癌<sup>[5]</sup>、卵巢癌<sup>[6]</sup>和胶质母细胞瘤<sup>[7]</sup>等肿瘤的治疗, 显示出良好的疗效和安全性。研究发现, RRx-001 具有多种作用机制, 如靶向 CD47-SIRPα 信号通路, 使肿瘤相关巨噬细胞复极化, 由抗炎 M2 表型转为促炎症 M1 表型<sup>[8]</sup>; 使肿瘤血管正常化, 增加化疗药物渗透, 产生代谢产物 RONS, 导致肿瘤细胞坏死<sup>[9]</sup>; 通过表观遗传抑制活性激活抗癌基因<sup>[10]</sup>等。作为靶向 CD47 的小分子药物, RRx-001 在临床试验中未发现 CD47 抗

体药物常见的嗜血综合征, 表现出优于抗体大分子药物的安全性<sup>[11]</sup>。但 RRx-001 也存在明显的输注部位反应, 因而临床需要采用特殊的注射器材, 通过血液共同输注方式给药。

RRx-001 结构中的溴代乙酰基为共价结合片段, 也是其产生活性的药效基团<sup>[1]</sup>。为进一步探讨 RRx-001 的构效关系, 本文拟采用骨架跃迁的药物设计策略, 以不同的共价结合片段代替溴代乙酰基, 分析其对抗肿瘤活性的影响, 从而为后续基于 RRx-001 骨架的药物设计研究提供借鉴(图 1)。

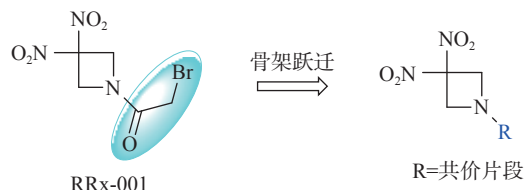


图 1 RRx-001 化学结构及其衍生物设计策略

**[作者简介]** 吴若南, 工程师, 研究方向: 抗肿瘤药研究与开发, Tel: 0561-3152858, Email: wurn521@163.com

**[通信作者]** 吴岳林, 副教授, 研究方向: 药物设计及药物合成工艺研究, Email: wylldragon@sit.edu.cn; 罗川, 教授级高级工程师, 研究方向: 基于传统中药材的抗肿瘤天然产物研究, Tel: 0561-3152858, Email: luoch51@126.com

### 1 仪器及试剂

实验所用试剂分别采购自泰坦、毕得、乐研等

公司, 各类试剂均为市售分析纯或化学纯。核磁共振仪采用的是德国 Bruke 的 600、400 和 300 MHz 型, 采用 TMS 作为内标, DMSO- $d_6$ 、 $CDCl_3$  或  $D_2O$  等为溶剂。耦合常数( $J$ )和化学位移( $\delta$ )单位分别用 Hz 和 ppm 来表示。高分辨质谱为德国 Bruke micrOTOF 10257, 抗肿瘤活性测试所用仪器为 Biotek Synergy H2 多功能酶标仪。薄层色谱(TLC)使用的硅胶板为 GF254(中国青岛海洋化学), 柱层析使用的是 200~300 目硅胶(中国青岛海洋化学)。

## 2 实验方法

### 2.1 关键中间体 3, 3-二硝基氮杂环丁烷 (7) 的合成

#### 2.1.1 3-叔丁基-5-羟甲基-5-硝基-四氢-1, 3-噁嗪 (1) 的合成<sup>[12]</sup>

将多聚甲醛(24.1 g, 0.8 mol)加入 250 ml 三颈烧瓶中, 然后加入 0.16% 氢氧化钠水溶液(40 ml), 升温至 40 °C。缓慢滴加硝基甲烷(10.6 ml, 0.2 mol), 滴加结束后升温至 60 °C, 滴加叔丁胺(21.2 ml, 0.2 mol), 滴加结束后继续反应 10 min。反应液冷却至室温后过滤, 水洗, 干燥得 38.8 g 白色固体 **1**, 收率 89.4%, mp: 136.1~138.2 °C。<sup>1</sup>H NMR(400 MHz, DMSO- $d_6$ ) $\delta$ : 5.35(t,  $J$ =5.8 Hz, 1 H), 4.42(t,  $J$ =10.0 Hz, 2 H), 3.81(d,  $J$ =7.9 Hz, 1 H), 3.63~3.51(m, 4 H), 2.59(d,  $J$ =12.3 Hz, 1 H), 0.95(s, 9 H)。

#### 2.1.2 2-叔丁胺基甲基-2-硝基-1, 3-丙二醇盐酸盐 (2) 的合成<sup>[12]</sup>

两颈烧瓶中依次加入 500 ml 无水乙醇、12 ml 浓盐酸和化合物 **1**(20.0 g, 0.09 mol), 加热回流反应 6 h。反应结束后, 减压蒸去溶剂, 加入异丙醇搅拌 0.5 h, 过滤, 洗涤, 干燥得 17.0 g 白色晶体 **2**, 收率 78.2%, mp: 175.5~178.3 °C。<sup>1</sup>H NMR(400 MHz,  $D_2O$ ) $\delta$ : 4.12(d,  $J$ =12.5 Hz, 2 H), 3.88(d,  $J$ =12.5 Hz, 2 H), 3.76(s, 2H), 1.36(s, 9 H)。

#### 2.1.3 1-叔丁基-3-羟甲基-3-硝基氮杂环丁烷盐酸盐(3)的合成<sup>[12]</sup>

在氮气保护下, 将化合物 **2**(5.0 g, 0.02 mol)加入到 250 ml 三颈烧瓶中, 分别加入 50 ml 无水四氢呋喃和偶氮二甲酸二异丙酯(5.6 g, 0.03 mol), 升温至 60 °C。然后, 将溶有三苯基磷(7.4 g, 0.03 mol)的四氢呋喃溶液(15 ml)滴加到反应液中, 滴加结束后继续反应 5 h。反应液冷却至室温后过滤, 洗涤, 干燥得 3.9 g 白色固体 **3**, 收率 86.6%, mp: 165.3~174.0 °C。<sup>1</sup>H NMR(400 MHz,  $D_2O$ ) $\delta$ : 4.74

(s, 2 H), 4.43(s, 2 H), 4.16(s, 2 H), 1.26(s, 9 H)。

#### 2.1.4 1-叔丁基-3,3-二硝基氮杂环丁烷(4)的合成<sup>[12]</sup>

将化合物 **3**(7.0 g, 0.03 mol)和氢氧化钠水溶液(4.3 g, 90 ml  $H_2O$ )加入到 250 ml 两颈烧瓶中, 室温搅拌 2 h, 冰浴冷却到 10 °C 以下后, 滴加亚硝酸钠(8.6 g, 0.12 mol)、 $K_3Fe(CN)_6$ (1.0 g, 0.003 mol)和水(5 ml)配成的溶液。控制反应温度为 10~15 °C 下, 分批次加入过硫酸钠(10.3 g, 0.04 mol), 然后升温至室温, 反应过夜。反应液用 20 ml 二氯甲烷萃取 3 次, 有机相用无水硫酸钠干燥, 过滤, 滤液减压蒸去溶剂得 5.5 g 黄色液体 **4**, 收率 88.1%。<sup>1</sup>H NMR(400 MHz,  $CDCl_3$ ) $\delta$ : 4.12(s, 4 H), 1.05(s, 9 H)。

#### 2.1.5 N-乙酰基-3,3-二硝基氮杂环丁烷(5)的合成<sup>[12]</sup>

25 ml 两颈烧瓶中依次加入化合物 **4**(5.0 g, 0.03 mol)、醋酸酐(9.8 ml, 0.11 mol)和三氟硼酸乙醚溶液(0.5 ml, 3.88 mmol), 加热至 120 °C, 回流反应 12 h。减压蒸去溶剂, 柱层析纯化(二氯甲烷: 甲醇=100:1)得 2.8 g 淡黄色固体 **5**, 收率 60.0%, mp: 110.1~113.9 °C。<sup>1</sup>H NMR(600 MHz,  $CDCl_3$ ) $\delta$ : 4.98(s, 2 H), 4.82(s, 2 H), 2.02(s, 3 H)。

#### 2.1.6 3,3-二硝基氮杂环丁烷盐酸盐(6)的合成<sup>[13]</sup>

将化合物 **5**(1.0 g, 5.29 mmol)加入到 50 ml 单颈烧瓶, 然后加入 6.3 ml 的 5% 盐酸溶液, 回流反应 4 h。反应液冷却至室温, 过滤, 滤液减压蒸去溶剂得 0.6 g 黄色固体 **6**, 收率 58.2%, mp: 150.3~155.2 °C。<sup>1</sup>H NMR(600 MHz, DMSO- $d_6$ ) $\delta$ : 4.98(s, 4 H), 3.42(s, 2 H)。

#### 2.1.7 3,3-二硝基氮杂环丁烷(7)的合成<sup>[13]</sup>

将化合物 **6**(0.6 g, 3.16 mmol)和 15 ml 水加入到 50 ml 两颈烧瓶中, 升温至 40 °C, 再滴加 5% 碳酸氢钠溶液至 pH 为 8。反应液用 10 ml 二氯甲烷萃取 3 次, 有机相用无水硫酸钠干燥, 过滤, 减压蒸去溶剂得 0.4 g 黄色油状液体 **7**, 收率 84.7%。<sup>1</sup>H NMR(600 MHz,  $CDCl_3$ ) $\delta$ : 4.51(s, 4 H), 2.20(s, 1 H)。

## 2.2 RRx-001 衍生物 (ZM528-ZM531) 的合成

将关键中间体 3,3-二硝基氮杂环丁烷 **7**(74.0 mg, 0.50 mmol)加入到 25 ml 单颈烧瓶后, 分别加入干燥的二氯甲烷(4 ml)和碳酸氢钠(42.0 mg, 0.50 mmol), 冰浴冷却至 0 °C 后, 滴加各种酰氯或磺酰氯(0.55 mmol), 完全反应后减压蒸去溶剂, 柱层析纯化(二氯甲烷: 甲醇=100:1)得化合物 **ZM528~ZM531**。

**ZM528**, 白色固体, 83 mg, 收率 61.3%。<sup>1</sup>H NMR(300 MHz,  $CDCl_3$ ) $\delta$ : 6.46(dd,  $J$ =16.9, 1.2 Hz, 1 H), 6.16(dd,  $J$ =16.9, 10.4 Hz, 1 H), 5.88(dd,

$J=10.4, 1.2 \text{ Hz}, 1 \text{ H})$ ,  $4.96(\text{s}, 4 \text{ H})$ . HRMS(ESI, positive) $m/z$  calcd for  $\text{C}_5\text{H}_7\text{N}_3\text{O}_5$   $[\text{M} + \text{H}]^+$ : 202.0464; found 202.0458.

**ZM529**, 白色固体, 77 mg, 收率 60.2%。 $^1\text{H}$  NMR(300 MHz,  $\text{DMSO}-d_6$ ) $\delta$ : 7.47(s, 2 H), 4.77(s, 4 H). HRMS(ESI, positive) $m/z$  calcd for  $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_4\text{O}_6\text{S}$   $[\text{M} + \text{H}]^+$ : 226.0008; found 226.0013.

**ZM530**, 白色固体, 54 mg, 收率 50.1%。 $^1\text{H}$  NMR(600 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ) $\delta$ : 5.63–5.61(m, 1 H), 5.45(s, 1 H), 4.93(s, 4 H), 1.97(dd,  $J=1.6, 1.1 \text{ Hz}, 3 \text{ H})$ 。HRMS(ESI, positive) $m/z$  calcd for  $\text{C}_7\text{H}_9\text{N}_3\text{O}_5$   $[\text{M} + \text{H}]^+$ : 216.0620; found 216.0615.

**ZM531**, 淡黄色固体, 81 mg, 收率 69.6%。 $^1\text{H}$  NMR(600 MHz,  $\text{CDCl}_3$ ) $\delta$ : 6.58(dd,  $J=16.5, 9.8 \text{ Hz}, 1 \text{ H})$ , 6.46(d,  $J=16.6 \text{ Hz}, 1 \text{ H})$ , 6.27(d,  $J=9.8 \text{ Hz}, 1 \text{ H})$ , 4.75(s, 4 H)。

### 2.3 体外抗肿瘤活性测试

选用人结肠癌细胞 HCT-116 和人非小细胞肺癌细胞 A549, 于海军军医大学药物化学教研室冻存和传代。96 孔板边缘每孔加入 100  $\mu\text{l}$  的 PBS 溶液防止边缘效应, 内部每孔加入浓度为  $7 \times 10^4$  个/ml 的细胞悬液 100  $\mu\text{l}$ , 置于 37  $^\circ\text{C}$ 、5% 二氧化碳培养箱内。24 h 后, 弃去 96 孔板内培养液, 每孔分别加入 100  $\mu\text{l}$  受试化合物样品液和对照品液, 设三复

孔。将 96 孔板置于 37  $^\circ\text{C}$ 、5% 二氧化碳培养箱中培养 72 h。实验采用 CCK-8 法<sup>[14-16]</sup>。在基础培养基中加入 10 % CCK-8 试剂制成混合液, 弃去 96 孔板内旧培养基, 加入混合液, 100  $\mu\text{l}$ /孔, 将 96 孔板置于 37  $^\circ\text{C}$ 、5 % 二氧化碳培养箱中孵育 2 ~ 4 h。使用酶标仪于 450 nm 波长处测定荧光 OD 值。细胞生长抑制率  $\text{IC}\% = (\text{空白对照孔 OD 值} - \text{给药孔 OD 值}) / \text{空白对照孔 OD 值} \times 100\%$ 。根据各个浓度的  $\text{IC}\%$  值, 用 GraphPad 软件进行线性回归, 算出各受试化合物抑制细胞生长 50% 的药物浓度, 即  $\text{IC}_{50}$ 。

## 3 结果与讨论

### 3.1 化学合成

参考文献<sup>[12-13]</sup>设计了关键中间体 3, 3-二硝基氮杂环丁烷的合成路线, 合成路线见图 2。以多聚甲醛和硝基甲烷为起始原料, 通过环合、开环、Mistunobu、反向 Henry、脱叔丁基/乙酰化、脱乙酰基、碱化等 7 步反应合成出关键中间体 7, 总收率为 14.9 %。其中, 反向 Henry 反应对催化剂的用量和反应温度较为敏感, 经过反应条件优化, 反应温度为 10 ~ 15  $^\circ\text{C}$  时, 亚硝酸钠和  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$  的用量分别为化合物 3 的 4 倍和 10% 时, 该步反应收率达 88.1%, 相比原有路线提升了 6.3%。

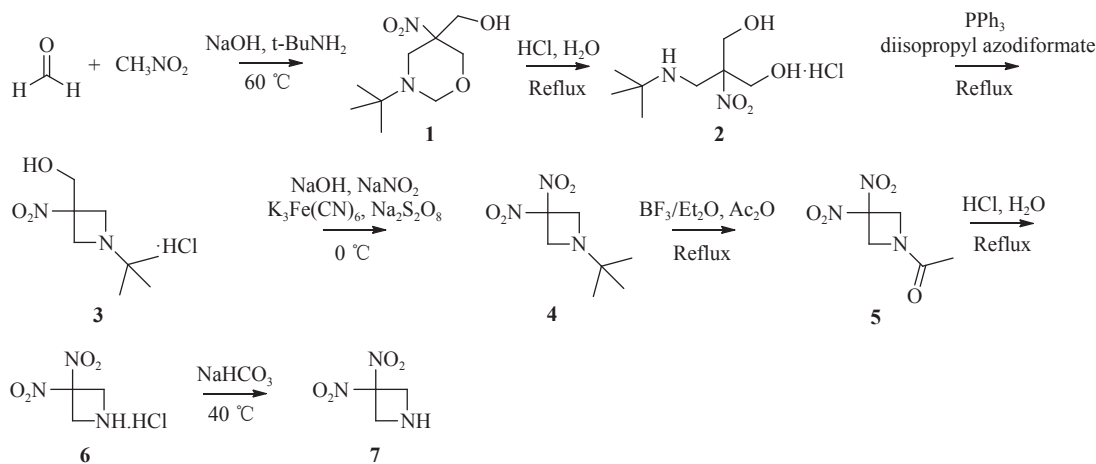


图 2 关键中间体 3, 3-二硝基氮杂环丁烷的合成路线

将关键中间体 7 与各种酰氯或磺酰氯在三乙胺和碳酸氢钠催化下发生酰胺化反应, 以较高收率合成得到目标化合物 **ZM528 ~ ZM531**(图 3)。

### 3.2 体外抗肿瘤活性研究

采用 CCK-8 法测定目标化合物对肿瘤细胞株 HCT-116 和 A549 的体外抗肿瘤活性, 以多柔比星(DOX)和 RRx-001 为阳性对照药, 结果见表 1。从

表中可以看出, 4 个化合物均能保持一定的抗肿瘤活性, 但相比 RRx-001, 均出现明显下降, 其中丙烯酰基类化合物 **ZM528** 活性最高, 对 HCT-116 和 A549 的  $\text{IC}_{50}$  分别为  $(6.0 \pm 2.7)$  和  $(5.1 \pm 4.8) \mu\text{mol/L}$ 。当丙烯酰基的 2 位引入甲基后活性明显下降, 以磺酰基代替酰基后, 活性也呈现下降趋势。以磺酰胺基代替丙烯酰基后, 对 HCT-116 和 A549 肿瘤细胞



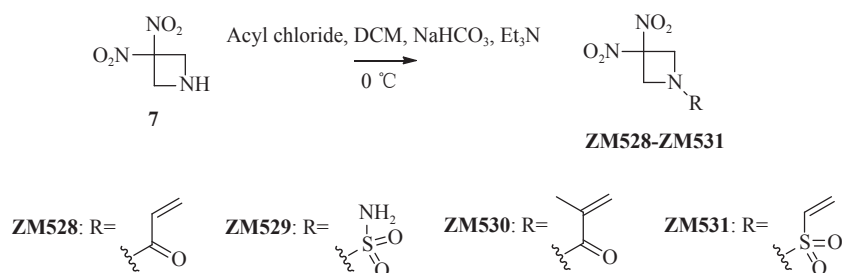


图 3 RRx-001 类似物的合成路线

株的活性分别下降了 6.4 和 5.4 倍,但当以磺酰基代替磺酰胺基后活性基本保持。以上研究结果初步表明,RRx-001 的溴代乙酰基对抗肿瘤活性影响较大,以其他共价结合片段代替后活性出现明显下降。

表 1 RRx-001 衍生物体外抗肿瘤活性

| 化合物     | IC <sub>50</sub> (μmol/L) |           |
|---------|---------------------------|-----------|
|         | HCT-116细胞株                | A549细胞株   |
| RRx-001 | 0.94±0.7                  | <0.2      |
| ZM528   | 6.0±2.7                   | 5.1±4.8   |
| ZM529   | 38.1±19.7                 | 27.3±10.4 |
| ZM530   | >50                       | 14.4±3.0  |
| ZM531   | 34.5±13.5                 | 36.3±5.3  |
| DOX     | <0.2                      | <0.2      |

## 4 结论

采用骨架跃迁药物设计策略,设计合成出 4 个 RRx-001 衍生物。体外抗肿瘤活性研究发现,所有新化合物对 HCT-116 和 A549 细胞株的抑制活性均显示出明显的下降,但能保持一定的抗肿瘤活性,其中丙烯酰基类化合物 ZM528 活性最高,对两种肿瘤细胞株的 IC<sub>50</sub> 分别为(6.0±2.7)和(5.1±4.8) μmol/L,其原因可能是 RRx-001 的共价结合片段为溴代乙酰基,结合活性高于其他共价结合片段。初步构效关系显示,氮杂环丁烷的氨基上溴代乙酰基取代后活性最高,丙烯酰基取代活性次之。研究结果和初步构效关系为以 RRx-001 为骨架的新型靶向 CD47 药物的进一步优化设计研究提供了理论指导。

## 【参考文献】

- [1] ORONSKY B, GUO X N, WANG X H, et al. Discovery of RRx-001, a myc and CD47 downregulating small molecule with tumor targeted cytotoxicity and healthy tissue cytoprotective properties in clinical development[J]. *J Med Chem*, 2021, 64(11): 7261-7271.
- [2] ORONSKY B, REID T R, LARSON C, et al. REPLATINUM

Phase III randomized study: RRx-001 + platinum doublet versus platinum doublet in third-line small cell lung cancer[J]. *Future Oncol*, 2019, 15(30): 3427-3433.

- [3] JURGENSEN K J, SKINNER W K J, ORONSKY B, et al. RRx-001 radioprotection: enhancement of survival and hematopoietic recovery in gamma-irradiated mice[J]. *Front Pharmacol*, 2021, 12: 676396.
- [4] MORGENSEN D, ROSE M, WAQAR S N, et al. RRx-001 followed by platinum plus etoposide in patients with previously treated small-cell lung cancer[J]. *Br J Cancer*, 2019, 121(3): 211-217.
- [5] REID T R, ABROUK N, CAROEN S, et al. ROCKET: phase II randomized, active-controlled, multicenter trial to assess the safety and efficacy of RRx-001 + irinotecan vs. single-agent regorafenib in third/fourth line colorectal cancer[J]. *Clin Colorectal Cancer*, 2023, 22(1): 92-99.
- [6] REID T, ORONSKY B, CAROEN S, et al. Phase 1 pilot study of RRx-001 + nivolumab in patients with advanced metastatic cancer(PRIMETIME)[J]. *Front Immunol*, 2023, 14: 1104753.
- [7] FINE H, REID T, CAROEN S, et al. A multicenter, phase 1, dose escalation clinical trial(G-FORCE-1)of XRT, RRx-001 and temozolomide followed by temozolomide +/- RRx-001 in newly diagnosed glioblastoma[J]. *Front Oncol*, 2023, 13: 1176448.
- [8] ORONSKY B, PAULMURUGAN R, FOYGE K, et al. RRx-001: a systemically non-toxic M2-to-M1 macrophage stimulating and prosensitizing agent in Phase II clinical trials[J]. *Expert Opin Investig Drugs*, 2017, 26(1): 109-119.
- [9] JANI V P, ASARO R, ORONSKY B, et al. RRx-001 increases erythrocyte preferential adhesion to the tumor vasculature[J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(9): 4713.
- [10] ZHAO H J, NING S C, SCICINSKI J, et al. Epigenetic effects of RRx-001: a possible unifying mechanism of anticancer activity[J]. *Oncotarget*, 2015, 6(41): 43172-43181.
- [11] ORONSKY B, CABRALES P, CAROEN S, et al. RRx-001, a downregulator of the CD47- SIRPα checkpoint pathway, does not cause anemia or thrombocytopenia[J]. *Expert Opin Drug Metab Toxicol*, 2021, 17(4): 355-357.
- [12] 李洪珍, 舒远杰, 刘世俊, 等. N-乙酰基-3, 3-二硝基氮杂环丁烷的合成 [J]. *化学研究与应用*, 2004, 16(3): 393-395.
- [13] 李洪珍, 舒远杰, 黄奕刚, 等. 3, 3-二硝基氮杂环丁烷和 1, 1'-亚甲基-双(3, 3-二硝基-1-氮杂环丁烷)的合成研究 [J]. *有机化学*, 2004, 24(7): 775-777.

- [14] TANG W M, ZHANG Y M, YANG K L, et al. Discovery of novel 3, 11-bispeptide ester arenobufagin derivatives with potential *in vivo* antitumor activity and reduced cardiotoxicity[J]. [Chem Biodivers](#), 2023, 20(2): e202200911.
- [15] ZHANG Y M, YANG K L, YE S, et al. Application of a fluorine strategy in the lead optimization of betulinic acid to the discovery of potent CD73 inhibitors[J]. [Steroids](#), 2022, 188: 109112.
- [16] 罗川, 马建江, 缪震元, 等. 沙蟾毒精酯类衍生物的合成和抗肿瘤活性研究 [J]. 药与实践杂志, 2021, 39(1): 35-37,57.
- [收稿日期] 2024-08-30 [修回日期] 2025-03-06  
[本文编辑] 崔俐俊