短指软珊瑚*Sinularia* sp.中的化学成分及其PPARs激动活性研究

张春琳[1#], 张莉亭[2#], 曾建昂[2], 李松威[3], 宫益霞[1], 郭跃伟[2], 王丽红[1*], 苏明智[2*]

(1. 佳木斯大学药学院, 黑龙江 佳木斯 154007; 2. 烟台新药创制山东省实验室/中科环渤海 (烟台) 药物高等研究院, 山东 烟台 264117; 3. 上海大学医学院, 上海 200444)

摘要: 对采自中国南海西瑁岛的短指软珊瑚*Sinularia* sp.中的化学成分及其过氧化物酶体增殖物激活受体 (peroxisome proliferator activated receptors, PPARs) 的激动活性和抗炎活性进行研究。采用硅胶柱色谱、Sephadex LH-20凝胶柱色谱和高效液相色谱 (HPLC) 等方法进行化学成分分离, 通过核磁共振波谱 (NMR)、质谱 (MS)、红外光谱 (IR) 等手段, 以及比对相关参考文献, 确定了化合物的结构。从短指软珊瑚中分离得到11个化合物, 包括2个降倍半萜、2个呋喃倍半萜、7个甾体类化合物。经波谱数据分析, 其结构分别鉴定为 (2*E*,6*E*)-3,7-dimethyl-nona-2,6,8-trienoic acid (**1**)、(3*S*,6*E*)-3,7-dimethyl-nona-6,8-dienoic acid (**2**)、(1′*E*,5′*E*)-5-(2′,6′-dimethylocta-1′,5′,7′-trienyl)-furan-3-carboxylic acid (**3**)、(5′*E*)-5-(2′,6′-dimethylocta-5′,7′-dienyl)-furan-3-carboxylic acid (**4**)、(24*S*)-24-甲基胆甾醇 (**5**)、24(*R*)-7*α*-羟基麦角甾-5-烯-3*β*-醇 (**6**)、brassicasterol (**7**)、孕甾-5,20-二烯-3*β*-醇 (**8**)、gorgosterol (**9**)、*β*-sitosterol (**10**)、24-methylenecholesterol (**11**)。化合物**1**为新化合物, 化合物**6**、**10**为首次从短指软珊瑚*Sinularia* sp.中分离得到。荧光素酶报告基因检测显示, 化合物**8**和**9**在5 μmol·L^{-1}浓度下具有选择性激活PPAR-*α*转录因子的活性, 化合物**5**是PPAR-*α*和PPAR-*β*的双激动剂。此外, 化合物**5**、**7**和**8**具有体外抗炎活性, 化合物**5**对脂多糖 (lipopolysaccharide, LPS) 诱导的小鼠巨噬细胞RAW264.7产生的炎症介质诱导型一氧化氮合酶 (inducible nitric oxide synthase, iNOS) 和环氧化酶-2 (cyclooxygenase-2, COX-2) 具有显著的抑制作用。

关键词: 软珊瑚; *Sinularia* sp.; 倍半萜; 甾体; PPARs激动剂; 抗炎活性

中图分类号: R284 **文献标识码**: A **文章编号**: 0513-4870(2026)06-2221-09

Study on the chemical constituents and their PPARs agonistic activities from the soft coral *Sinularia* sp.

ZHANG Chun-lin[1#], ZHANG Li-ting[2#], ZENG Jian-ang[2], LI Song-wei[3], GONG Yi-xia[1], GUO Yue-wei[2], WANG Li-hong[1*], SU Ming-zhi[2*]

(*1. College of Pharmacy, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China; 2. Shandong Laboratory of Yantai Drug Discovery, Bohai Rim Advanced Research Institute for Drug Discovery, Yantai 264117, China; 3. School of Medicine, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

Abstract: This study aims to investigate the chemical constituents of the soft coral *Sinularia* sp. collected from Ximao Island in the South China Sea, and to evaluate the peroxisome proliferator-activated receptor (PPARs) agonistic and anti-inflammatory activities of the isolated compounds. The chemical constituents were isolated using silica gel column chromatography, Sephadex LH-20 gel column chromatography, and high-performance liquid chromatography (HPLC). The structures of the compounds were elucidated by comprehensive analysis of NMR,

收稿日期: 2026-03-13; 修回日期: 2026-04-09.

基金项目: 山东省重点研发计划 (2025CXPT012, 2024CXPT029); 黑龙江省自然科学基金资助项目 (PL2025H049); 黑龙江省“优秀青年教师基础研究支持计划”项目 (YQJH2025240) 资助.

#共同第一作者.

*通讯作者 E-mail: wanglihong@jmsu.edu.cn; mzsu@baridd.ac.cn

DOI: 10.16438/j.0513-4870.2026-0278

MS, and IR data and comparing them with those reported in the literature. Eleven compounds were isolated from the soft coral *Sinularia* sp., including two norsesquiterpenes, two furanosesquiterpenes, and seven steroids. Their structures were elucidated by spectroscopic data analysis as (2*E*,6*E*)-3,7-dimethyl-nona-2,6,8-trienoic acid (**1**), (3*S*, 6*E*)-3,7-dimethyl-nona-6,8-dienoic acid (**2**), (1′*E*,5′*E*)-5-(2′,6′-dimethylocta-1′,5′,7′-trienyl)-furan-3-carboxylic acid (**3**), (5′*E*)-5-(2′,6′-dimethylocta-5′,7′-dienyl)-furan-3-carboxylic acid (**4**), (24*S*)-24-methylcholesterol (**5**), 24*R*-7*α*-hydroxyergosta-5-en-3*β*-ol (**6**), brassicasterol (**7**), pregn-5,20-dien-3*β*-ol (**8**), gorgosterol (**9**), *β*-sitosterol (**10**), 24-methylenecholesterol (**11**). Compound **1** was identified as a new compound. Compounds **6** and **10** were obtained from *Sinularia* sp. for the first time. Luciferase reporter gene assay revealed that compounds **8** and **9** selectively activated the PPAR-*α* transcription factor at a concentration of 5 μmol·L^{-1}, while compound **5** acted as a dual agonist of PPAR-*α* and PPAR-*β* isomers. In addition, compounds **5**, **7**, and **8** exhibited *in vitro* anti-inflammatory activities. Compound **5** significantly inhibited the production of the inflammatory mediators inducible nitric oxide synthase (iNOS) and cyclooxygenase-2 (COX-2) in lipopolysaccharide (LPS) stimulated mouse macrophages RAW264.7.

Key words: soft coral; *Sinularia* sp.; sesquiterpene; steroid; PPARs agonist; anti-inflammatory activity

短指软珊瑚 (*Sinularia* sp.) 属于刺胞动物门 (Cnidaria), 珊瑚虫纲 (Anthozoa), 八放珊瑚亚纲 (Octocorallia), 软珊瑚目 (Alcyonacea), 海鸡冠亚目 (Alcyoniina), 海鸡冠科。我国海洋资源丰富, 海洋生态环境良好, 短指软珊瑚在我国东海和南海等海域广泛分布。由于海洋特殊的高盐、高压、低氧等环境因素, 固着底栖的短指软珊瑚为了适应海底环境, 并抵御食物链上游生物的捕食或微生物的侵袭, 它们进化出了独特的化学防御体系以保障自身的生存与繁衍。因此它们的次级代谢产物丰富且结构新颖独特, 主要包括倍半萜、二萜、甾体和神经酰胺等[1,2]。这些次级代谢产物具有广泛的生物活性, 包括抗肿瘤、抗炎、抗菌以及调控糖脂代谢等[3-6]。

过氧化物酶体增殖物激活受体 (peroxisome proliferator activated receptors, PPARs) 作为核受体超家族成员, 是一类配体依赖型转录因子, 包含PPAR-*α*、PPAR-*β*和PPAR-*γ*三种亚型。它们通过调控靶基因转录, 广泛参与调节脂质代谢、葡萄糖稳态和炎症反应等生理病理过程的[7-10]。PPAR-*α*激动剂 (GW7647) 可以降低可溶性淀粉样前体蛋白*β* (soluble amyloid precursor protein beta, sAPP*β*) 的表达和抑制*β*分泌酶1 (beta-site amyloid precursor protein cleaving enzyme 1, BACE-1) 的活性, 并减少了*β*-淀粉样蛋白1-42 (amyloid beta peptide 1-42, A*β*1-42) 的释放, 在神经炎症性疾病的治疗中具有保护作用[11,12]。PPAR-*β*具有促进脂肪酸氧化、增强胰岛素敏感性及调节炎症反应的作用, 其激活后可下调抗凋亡蛋白Bcl-2的表达, 并显著降低促炎细胞因子白细胞介素-1*β* (interleukin-1 beta, IL-1*β*)、肿瘤坏死因子-*α* (tumor necrosis factor-alpha, TNF-*α*) 以及促凋亡蛋白Bax的表达水平[13]; PPAR-*γ*主要分布于脂肪组织中, 提高胰岛素敏感性、参与脂肪生成和抗炎过程。临床用于治疗2型糖尿病的PPAR-*γ*激动剂罗格列酮 (rosiglitazone, ROSI), 近期被证实可通过抑制神经元NLRP3炎性小体活化以发挥抗炎效应[14]。由此可见, PPARs靶点在炎症性疾病中的潜在治疗价值。

为了从海洋天然产物中挖掘具有PPARs激动活性的先导化合物, 本文对采自中国南海西瑁岛的短指软珊瑚*Sinularia* sp.进行了系统的化学成分分析。从该属软珊瑚中共分离得到11个化合物, 包括4个倍半萜类化合物和7个甾体类化合物 (图1)。并对它们进行了针对PPAR-*α*、PPAR-*β*和PPAR-*γ*三个亚型的激动活性以及抗炎活性进行了评估。

结果与讨论

1 化合物1的结构鉴定

化合物**1**为无色油状物, 易溶于氯仿。HR-ESI-MS显示**1**的准分子离子峰 $[M-H]^-$为*m*/*z* 179.107 5 (计算值为$C_{11}H_{15}O_2$ 179.107 8), 提示化合物的分子式为$C_{11}H_{16}O_2$, 不饱和度为4。^{1}H NMR波谱数据显示化合物**1**有两个甲基信号, 分别为δ_H 1.75 (3H, s, H_3-11)和2.18 (3H, s, H_3-10)。^{13}C NMR和DEPT波谱数据显示, 化合物**1**有11个碳信号, 分别为两个甲基 (δ_C 11.9和19.2), 两个sp^{3}亚甲基 (δ_C 40.8和26.3)、1个sp^{2}亚甲基 (δ_C 111.4)、3个sp^{2}次甲基 (δ_C 115.1、131.0、141.3) 和3个sp^{2}季碳, 其中包括一个羰基碳信号 (δ_C 170.2), 其信号归属如表1所示。通过^{1}H-^{1}H COSY可识别出H_2-4 (δ_H 2.25) 至H-6 (δ_H 5.43) 以及H-8 (δ_H 6.35) 和H_2-9 (δ_H 4.96/5.11) 之间的相关信号。结合关键HMBC相关信号: H_3-10与C-2 (δ_C 115.1)/C-3 (δ_C 162.0)/C-4 (δ_C 40.8); H_3-11与C-6 (δ_C 131.0)/C-7 (δ_C 135.2)/C-8 (δ_C

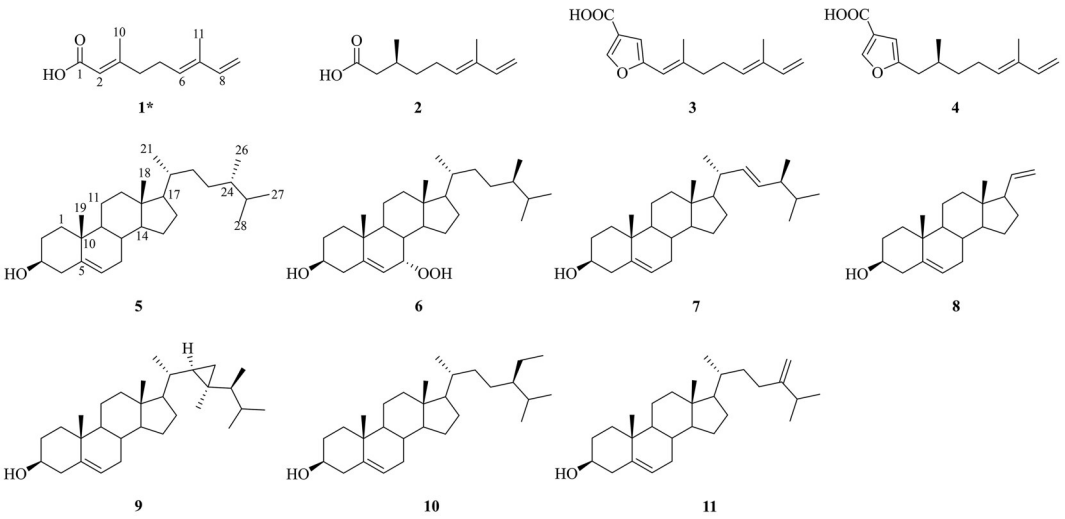


Figure 1 Chemical structures of compounds **1**−**11**

141.3); 以及 H-2 与 C-1 (δ_C 170.2) (图 2), 确立了化合物 **1** 的平面结构。进一步综合分析表明, 化合物 **1** 与 **2** 的结构高度相似, 二者主要差异在于化合物 **1** 中存在 $\Delta^{2(3)}$ 双键, 导致其在低场区出现两个 sp^2 碳信号 (δ_C 115.1 和 δ_C 162.0), 这与二者分子质量相差 2 个质量单位的质谱数据相吻合。

Table 1 ^{1}H (600 MHz) and ^{13}C (150 MHz) NMR data for compound **1** in $CDCl_3$

No.	δ_H mult. (*J* in Hz)	δ_C
1	–	170.2 C
2	5.71 s	115.1 CH
3	–	162.0 C
4	2.25 m, 2.25 m	40.8 CH_2
5	2.33 m, 2.33 m	26.3 CH_2
6	5.43 t (6.9)	131.0 CH
7	–	135.2 C
8	6.35 dd (17.4, 10.6)	141.3 CH
9	4.96 d (10.6), 5.11 d (17.4)	111.4 CH_2
10	2.18 s	19.2 CH_3
11	1.75 s	11.9 CH_3

化合物 **1** 的相对构型主要通过 NOESY 数据解析确定 (图 2)。NOESY 谱中 H-2/H_2-4 的相关信号, 以及 H-6/H-8 和 H_2-5/H_3-11 的相关信号, 分别证实了 $\Delta^{2(3)}$和 $\Delta^{6(7)}$双键均为 *E* 构型。综上所述, 化合物 **1** 的结构如图 2 所示, 命名(2*E*,6*E*)-3,7-dimethyl-nona-2,6,8-trienoic acid。

2 化合物的活性筛选

2.1 化合物对 PPARs 转录激活的影响 如图 3A 所示, 经 5 μmol·L^{-1}浓度处理 24 h 后, 化合物 **5**、**7**～**9** 及 **11** 对大鼠肝细胞 (Ac2F) 细胞活力均保持在 90% 以上, 表明其在该浓度下无显著细胞毒性。采用 PPAR 荧光素酶报告基因系统评估化合物对 PPAR 亚型 (*α*、*β*、*γ*) 的激动活性 (图 3B～D)。结果表明, 阳性药匹立尼酸 (pirinixic acid, WY14643)、GW501516 及 ROSI 在 5 μmol·L^{-1}浓度下分别显著激活了 PPAR-*α*、PPAR-*β* 及 PPAR-*γ*。化合物 **5** 在 5 μmol·L^{-1}浓度下显著激活了 PPAR-*α* 和 PPAR-*β*; 化合物 **8** 和 **9** 则特异性激活 PPAR-*α*。基于上述结果, 化合物 **5** 为 PPAR-*α*/*β* 双重激动剂, 化合物 **8** 和 **9** 是 PPAR-*α* 的选择性激动剂。

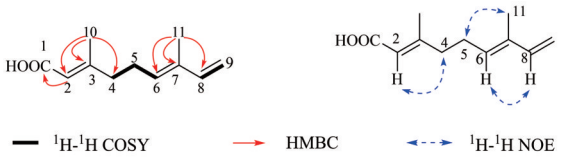


Figure 2 Key ^{1}H-^{1}H COSY, HMBC and NOESY correlations of compound **1**

2.2 分子对接 基于荧光素酶报告基因检测结果, 通过分子对接模拟分析了化合物 **5**、**8** 和 **9** 与 PPAR-*α* 的结合模式, 以及化合物 **5** 与 PPAR-*β* 的结合模式。如图 4A 所示, PPAR-*α* 激动剂 WY 14643 结合于配体结合域[15], 与 CYS276、SER280、TYR314、HIS440 和 TYR464 形成氢键, 并与 THR279、ILE317 和 LEU321 产生疏水相互作用。化合物 **5** 与关键残基 SER280 形成氢键, 并与 MET220、THR279、THR283、PHE318、LEU321 及 VAL324 产生疏水作用 (图 4B)。化合物 **8** 与 HIS440 和 TYR464 形成氢键, 同时与 TYR314、ILE317、PHE318、LEU321、VAL332 和 ILE354 发生疏水相互作用 (图 4C)。化合物 **9** 与 SER280 形成氢键, 并与 THR279、ILE317、PHE318、LEU321、VAL324 及 TYR334 产生疏水作用, 从而稳定其与 PPAR-*α* 的结合 (图 4D)。值得注意的是, 化合物 **8** 与活性口袋形成了更为广泛的氢键网络和疏

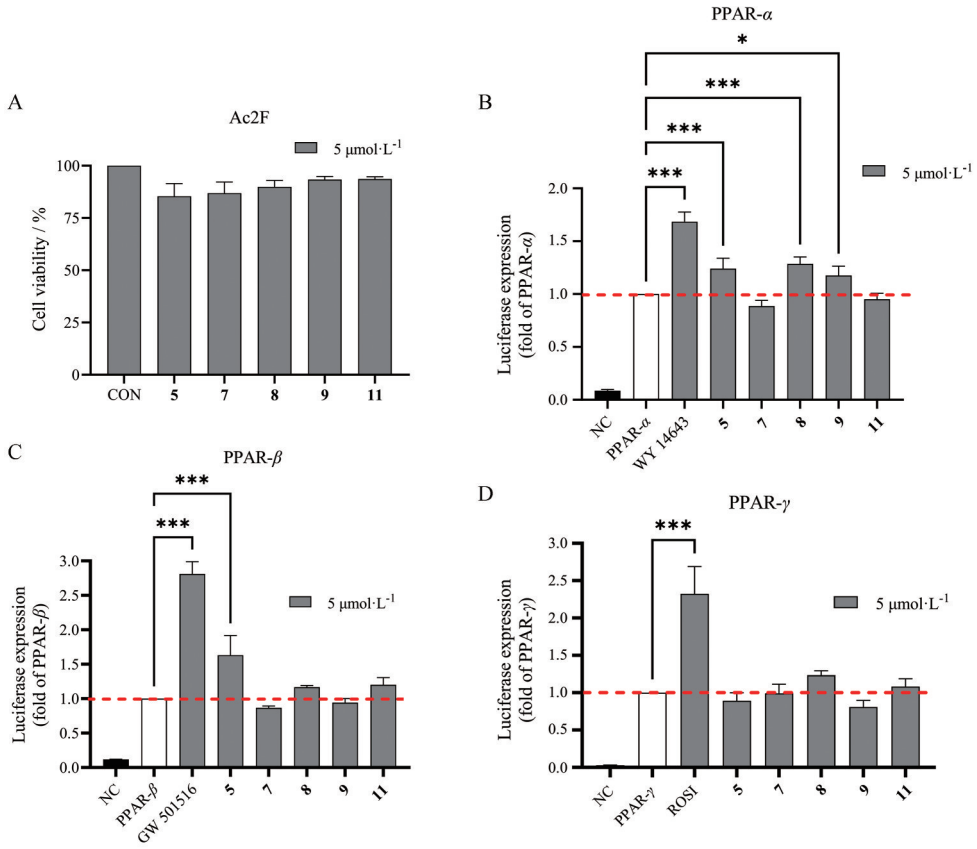


Figure 3 Evaluation of compound effects on Ac2F cell viability and PPAR-*α*, PPAR-*β*, and PPAR-*γ* transcriptional activity. A: Viability of Ac2F cells after treatment with the indicated compounds; B−D: Agonistic activities toward PPAR-*α*, PPAR-*β*, and PPAR-*γ*, respectively, determined by luciferase reporter assays. $n = 3$, $\bar{x} \pm s$. $^{*}P < 0.05$, $^{***}P < 0.001$ *vs* transfection control group. PPAR-*α*: Peroxisome proliferator-activated receptor-*α*; PPAR-*β*: Peroxisome proliferator-activated receptor-*β*; PPAR-*γ*: Peroxisome proliferator-activated receptor-*γ*; WY14643: Pirinixic acid; ROSI: Rosiglitazone

水相互作用, 这可能与其相对较好的PPAR-*α*激动活性密切相关。

对于PPAR-*β*受体[16], GW 501516与其活性口袋结合时与THR289形成氢键, 与THR288、THR292、ILE326、MET329、ILE333和LEU339存在疏水相互作用, 同时与PHE327形成*π*-*π*堆积, 并与HIS323产生盐桥作用(图4E)。化合物**5**与PPAR-*β*结合时, 可与HIS323形成氢键, 并与PHE282、TYR283、GLN286和PHE360发生疏水作用 (图4F)。综上结果表明, 化合物**5**与PPAR-*α*和PPAR-*β*均具有良好的结合能力。

2.3 抗炎活性测试 化合物**5**、**7**和**8**在50 μmol·L^{-1}浓度显著抑制了LPS诱导的RAW264.7细胞产生NO, 表明它们具有体外的抗炎活性 (图5A)。Western blot结果进一步显示, 化合物**5**能有效降低LPS诱导的iNOS和COX-2蛋白表达水平 (图5B～D)。

3 讨论

短指软珊瑚 (*Sinularia* sp.) 作为中国南海重要的海洋生物资源, 因其独特的化学防御机制, 已成为结构新颖、活性显著化合物的重要来源。本课题对中国南海西瑁岛海域采集的短指软珊瑚进行了系统的化学成分研究, 共分离鉴定得到2个降倍半萜、2个呋喃倍半萜及7个甾体类化合物。其中, 化合物**1**为新化合物, 化合物**6**和**10**为首次从短指属软珊瑚中报道。上述发现进一步丰富了短指软珊瑚的化学成分多样性。

在代谢性疾病中, PPARs靶点与脂质代谢紊乱、胰岛素抵抗和炎症反应等密切相关。由于受到化合物量的限制, 本研究仅对化合物**5**、**7**～**9**和**11**进行了生物活性测试。本研究首次发现化合物**8**和**9**为选择性PPAR-*α*激动剂, 而化合物**5**为PPAR-*α*/*β*双激动剂。此外, 化合物**5**、**7**和**8**均表现出体外抗炎活性。其中, 化合物**5**可通过抑制LPS诱导的RAW264.7细胞中炎症相关蛋白iNOS和COX-2的表达, 进而减少NO的生成, 发挥抗炎作用。化合物**5**、**7**和**8**表现出显著的抗炎效果可能与其激动PPARs受体密切相关。上述结果揭示了软珊瑚来源的甾体化合物作为新型PPARs激动剂的开发潜力。

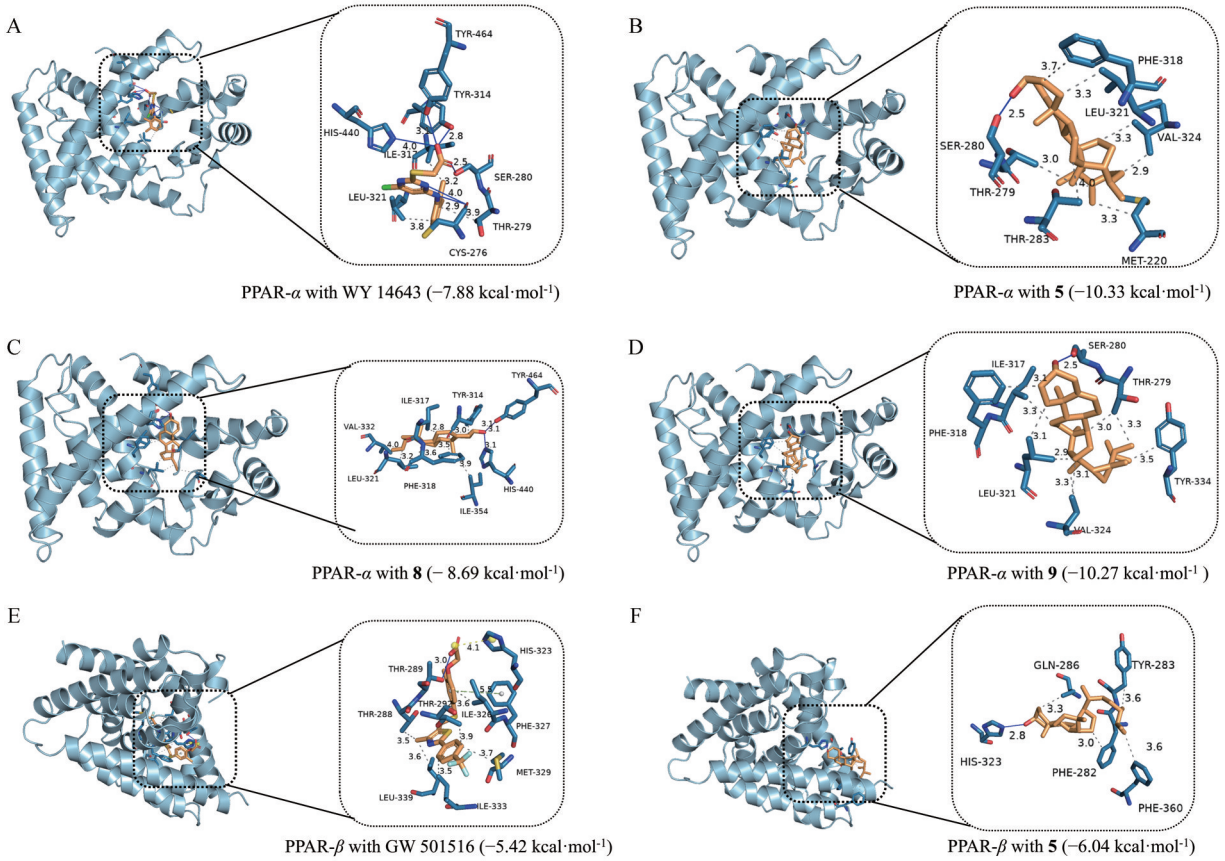


Figure 4 Molecular interactions between the bioactive compounds and PPAR-α/PPAR-β. A: Molecular docking diagram of PPAR-α with the positive control WY 14643; B: Molecular docking diagram of PPAR-α with compound **5**; C: Molecular docking diagram of PPAR-α with compound **8**; D: Molecular docking diagram of PPAR-α with compound **9**; E: Molecular docking diagram of PPAR-β with the positive control GW 501516; F: Molecular docking diagram of PPAR-β with compound **5**

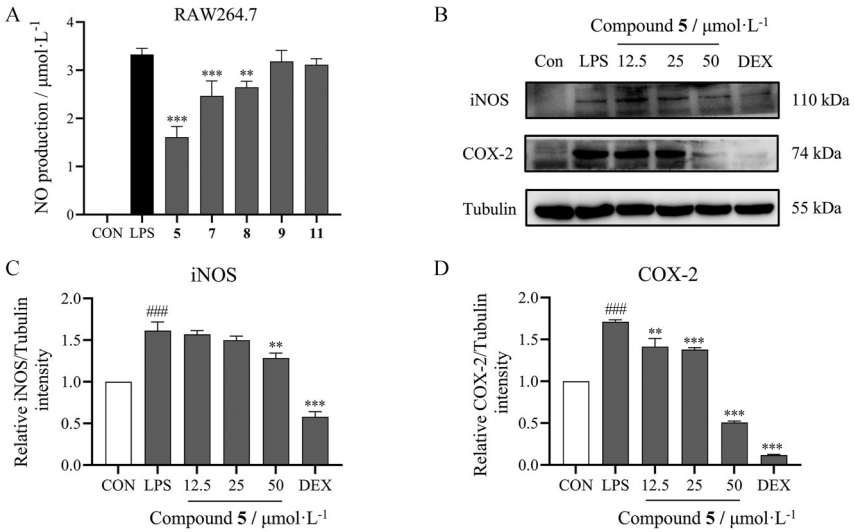


Figure 5 *In vitro* anti-inflammatory activity of compound **5**. A: Inhibitory effect of compound **5** on nitric oxide (NO) production in LPS-stimulated RAW264.7 macrophages. $n = 3$, $\bar{x} \pm s$. $^{**}P < 0.01$, $^{***}P < 0.001$ *vs* LPS group; B: Western blot analysis of iNOS and COX-2 protein expression in RAW264.7 cells treated with compound **5** or dexamethasone (DEX, 10 μmol·L^{-1}) in the presence of LPS; C, D: Protein levels were quantified by densitometry analysis using ImageJ and normalized to tubulin expression. $n = 2$, $\bar{x} \pm s$. $^{\#\#\#}P < 0.001$ *vs* control group; $^{**}P < 0.01$, $^{***}P < 0.001$ *vs* LPS group. LPS: Lipopolysaccharide; DEX: Dexamethasone; iNOS: Inducible nitric oxide synthase; COX-2: Cyclooxygenase-2

实验部分

Agilent 1260高效液相色谱仪, ZenoTOF7600高分辨电喷雾质谱 (美国Agilent公司); Bruker DRX-600型核磁共振波谱仪 (德国Bruker公司); SephadexLH-20凝胶 (美国Pharmacia公司); R-210/215旋转蒸发仪 (瑞士Buchi公司); Thermo 371二氧化碳恒温培养箱 (美国Thermo Fisher公司); EnVision多功能酶标仪 (美国PerkinElemer公司); ChemiDoc MP凝胶成像仪 (美国Bio-Rad公司)。

Agilent Eclipse XDB-C18半制备色谱柱 (250 mm × 9.4 mm, 5 μm, 美国Agilent公司); 薄层层析硅胶板GF254 (烟台江友硅胶开发有限公司); 柱色谱硅胶 (200～300和300～400目, 青岛海湾精细化工有限公司); 柱色谱与高效液相色谱所用溶剂分别为分析纯 (上海化学试剂有限公司) 和色谱纯 (北京迪科马科技); 二甲基亚砜 (DMSO, 3230820001) 购自北京索莱宝科技有限公司; 噻唑兰 (MTT, P3244322) 购自上海阿达玛斯试剂有限公司; DMEM培养基 (6125388) 购自美国Gibco公司; 脂多糖 (LPS, 0000189842) 购自德国Sigma-Aldrich公司; 罗格列酮 (ROSI, P3244322) 和地塞米松 (DEX, P194330) 均购自中国Damas-Beta公司。匹立尼酸 (WY 14643, 101345) 和GW 501516 (19891) 均购自美仑生物科技有限公司; iNOS (5) 购自美国Cell Signaling Technology公司; COX-2 (00100441) 购自中国武汉三鹰生物技术有限公司; HRP山羊抗兔IgG (3873A26) 购自美国ImmunoWay公司; ECL化学发光液 (FGRGP) 购自中国山东思科捷生物技术有限公司; 荧光素酶报告基因检测试剂盒 (A416251021) 购自中国上海碧云天生物技术股份有限公司; 小鼠巨噬细胞 (RAW264.7) 购自中国武汉普诺赛生命科技有限公司; 大鼠肝细胞 (Ac2F) 获赠于韩国釜山大学。

实验样品于2023年采自中国南海西瑁岛, 经海南大学李秀保教授鉴定为短指软珊瑚*Sinularia* sp., 标本 (编号: 23-SH-65) 保存于烟台新药创制山东省实验室/中科环渤海 (烟台) 药物高等研究院。

1 提取分离

将冷冻的短指软珊瑚*Sinularia* sp. (湿重14.1 kg) 切碎后于室温下用丙酮超声提取6次, 每次15 min。将提取液减压浓缩去除溶剂, 将丙酮提取物用水充分溶解, 再加入等体积的乙醚于常温下萃取6次, 萃取液减压浓缩, 得到乙醚粗浸膏23.0 g。

取乙醚粗浸膏 (13.0 g) 经硅胶柱色谱分离, 石油醚−乙酸乙酯体系 (100∶1→80∶1→40∶1→20∶1→10∶1→1∶1→1∶5) 和二氯甲烷−甲醇体系 (4∶1→2∶1) 进行梯度洗脱, 每个梯度洗脱2个柱体积, 得到A～H共8个组分。组分C经Sephadex LH-20柱层析 (石油醚−二氯甲烷−甲醇, 2∶1∶1) 分离, 得到4个亚组分CA～CE。CE通过硅胶柱层析 (300～400目, 石油醚−乙酸乙酯, 4∶1) 分离, 得到亚组分CEA。该亚组分再经硅胶柱层析 (300～400目, 石油醚−乙酸乙酯, 9∶1) 纯化, 得到化合物**1** (1.5 mg) 和**2** (1.7 mg)。

组分D经过纯二氯甲烷 (DCM) 等度洗脱得到组分DB, DB再经硅胶柱层析石油醚−乙酸乙酯以20∶1→4∶1梯度洗脱组分DBA～DBD, DBB通过半制备型高效液相色谱, 以甲醇−水体系 (85∶15) 洗脱得到化合物**5** (1.7 mg, t_R = 17.2 min) 和化合物**6** (0.8 mg, t_R = 23.5 min), DBD经甲醇−水体系 (82∶18) 得到化合物**7** (1.9 mg, t_R = 19.4 min)。

组分E先后经过Sephadex LH-20柱色谱 (石油醚−二氯甲烷−甲醇, 2∶1∶1) 得到5个亚组分EA～EE, EC进一步通过硅胶柱色谱 (石油醚−乙酸乙酯, 9∶1) 纯化, 得到化合物**3** (7 mg) 和**4** (12.5 mg)、ED通过Sephadex LH-20柱色谱 (二氯甲烷等度洗脱)、通过HPLC分离, 流速为3 mL·min^{-1}的条件下得到化合物**8** (1.5 mg, 甲醇−水, 72∶28, t_R = 26 min)、化合物**9** (1.6 mg, 甲醇−水, 70∶30, t_R = 28.6 min)、化合物**10** (0.7 mg, 甲醇−水, 64∶36, t_R = 27.3 min)、化合物**11** (1.7 mg, 乙腈−水, 55∶45, t_R = 37.5 min)。

2 结构鉴定

化合物**1**: 无色油状物, IR (KBr): max 3 436, 2 955, 2 923, 2 851, 1 692, 1 641, 1 251 cm^{-1}; ^{1}H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) 和^{13}C NMR (150 MHz, $CDCl_3$) 数据见表1, HRESIMS *m*/*z*: 179.107 5, $[M-H]^-$ (计算值$C_{11}H_{15}O_2$, 179.107 8)。

化合物**2**: 无色油状物, 分子式为$C_{11}H_{18}O_2$, ESI-MS *m*/*z* 183 $[M+H]^+$。^{1}H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ_H: 6.36 (1H, dd, *J* = 17.4, 10.7 Hz, H-8), 5.47 (1H, t, *J* = 7.2 Hz, H-6), 5.09 (1H, dd, *J* = 17.4 Hz, H-9b), 4.93 (1H, d, *J* = 10.7 Hz, H-9a), 2.38 (1H, dd, *J* = 15.0, 5.9 Hz, H-2b), 2.19 (1H, dd, *J* = 15.0, 7.9 Hz, H-2a), 2.17 (2H, m, H_2-5), 2.0 (1H, m, H-3), 1.74 (3H, s, H_3-11), 1.45 (1H, m, H-4b), 1.30 (1H, m, H-4a), 1.00 (3H, d, *J* = 6.6 Hz, H_3-10); ^{13}C NMR (150 MHz, $CDCl_3$) δ_C: 177.5 (C-1), 41.2 (C-2), 29.9 (C-3), 36.2 (C-4), 25.6 (C-5), 132.6 (C-6), 134.2 (C-7), 141.5 (C-8), 110.6 (C-9), 19.5 (C-10), 11.6 (C-11)。以上数据与文献[17]报道一致, 故鉴定化合物**2**为 (3*S*, 6*E*)-3,7-dimethyl-nona-6,8-dienoic acid。

化合物**3**: 无色油状物, 分子式为$C_{15}H_{18}O_3$, ESI-MS *m*/*z* 247 $[M+H]^+$。^{1}H NMR (600 MHz, DMSO-d_6) δ_H: 8.05 (1H, s, H-1), 6.53 (1H, s, H-3), 6.36 (1H, dd,

J = 17.6, 10.9 Hz, H-11), 6.11 (1H, s, H-5), 5.52 (1H, t, *J* = 6.7 Hz, H-9), 5.07 (1H, d, *J* = 17.6 Hz, H-12a), 4.89 (1H, d, *J* = 10.9 Hz, H-12b), 2.36 (1H, m, H-8), 2.27 (1H, t, *J* = 8.1 Hz, H-7), 1.99 (3H, s, H_3-14), 1.74 (3H, s, H_3-15); ^{13}C NMR (150 MHz, DMSO-d_6) δ_C: 146.8 (C-1), 126.8 (C-2), 107.9 (C-3), 155.5 (C-4), 114.5 (C-5), 141.1 (C-6), 40.8 (C-7), 27.3 (C-8), 132.7 (C-9), 135.2 (C-10), 142.3 (C-11), 110.98 (C-12), 164.51 (C-13), 18.70 (C-14), 11.7 (C-15)。以上数据与文献[18]报道一致, 故鉴定化合物**3**为 (1*E*′,5′*E*)-5-(2′,6′-dimethylocta-1′,5′,7′-trienyl)-furan-3-carboxylic acid。

化合物**4**: 无色油状物, 分子式 $C_{15}H_{20}O_3$, ESI-MS *m*/*z* 271 [M+Na]$^+$。^{1}H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ_H: 7.96 (1H, s, H-2), 6.37 (1H, s, H-4), 6.36 (1H, dd, *J* = 17.2, 10.8 Hz, H-7′), 5.46 (1H, t, *J* = 7.2 Hz, H-5′), 5.08 (1H, d, *J* = 17.2 Hz, H-8a′), 4.93 (1H, d, *J* = 10.8 Hz, H-8b′), 2.64 (1H, dd, *J* = 14.8, 6.0 Hz, H-1a′), 2.48 (1H, dd, *J* = 15.2, 8.0 Hz, H-1b′), 2.18 (2H, m, H_2-4′), 1.86 (1H, m, H-2′), 1.74 (3H, s, H_3-10′), 1.44 (1H, m, H-3a′), 1.27 (1H, m, H-3b′), 0.93 (3H, d, *J* = 6.8 Hz, H_3-9′); ^{13}C NMR (150 MHz, $CDCl_3$) δ_C: 147.5 (C-2), 118.8 (C-3), 106.0 (C-4), 157.2 (C-5), 167.2 (C-6), 35.1 (C-1′), 32.1 (C-2′), 36.1 (C-3′), 25.7 (C-4′), 132.8 (C-5′), 134.1 (C-6′), 141.5 (C-7′), 110.6 (C-8′), 19.4 (C-9′), 11.6 (C-10′) 以上数据与文献[19]报道一致, 故鉴定化合物**4**为 (5′*E*)-5-(2′,6′-dimethylocta-5′,7′-dienyl)-furan-3-carboxylic acid。

化合物**5**: 无色油状物, 分子式 $C_{28}H_{48}O$, ESI-MS *m*/*z* 401 [M+H]$^+$。^{1}H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ_H: 5.35 (1H, m, H-6), 3.53 (1H, m, H-3), 1.01 (3H, s, H_3-19), 0.92 (3H, d, *J* = 6.5 Hz, H_3-21), 0.85 (3H, d, *J* = 6.8 Hz, H_3-26), 0.78 (3H, d, *J* = 4.4 Hz, H_3-27), 0.77 (3H, d, *J* = 4.3 Hz, H_3-24), 0.68 (3H, s, H_3-18); ^{13}C NMR (150 MHz, $CDCl_3$) δ_C: 37.4 (C-1), 31.6 (C-2), 72.0 (C-3), 42.5 (C-4), 140.9 (C-5), 121.9 (C-6), 32.1 (C-7), 31.8 (C-8), 50.3 (C-9), 36.7 (C-10), 21.2 (C-11), 39.9 (C-12), 42.5 (C-13), 56.9 (C-14), 24.5 (C-15), 28.3 (C-16), 56.1 (C-17), 12.0 (C-18), 19.6 (C-19), 36.3 (C-20), 19.0 (C-21), 33.9 (C-22), 30.7 (C-23), 39.2 (C-24), 31.5 (C-25), 17.7 (C-26), 20.7 (C-27), 15.6 (C-28)。以上数据与文献[20]报道一致, 故鉴定化合物**5**为 (24*S*)-24-甲基胆甾醇。

化合物**6**: 无色油状物, 分子式 $C_{28}H_{48}O_3$, ESI-MS *m*/*z* 433 [M+H]$^+$。^{1}H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ_H: 5.72 (1H, dd, *J* = 5.0, 1.9 Hz, H-6), 4.17 (1H, s, H-7), 3.49 (3H, m, H_3-3), 1.01 (3H, s, H_3-19), 0.92 (3H, d, *J* = 6.6 Hz, H_3-21), 0.85 (3H, d, *J* = 6.8 Hz, H_3-26), 0.78 (3H, d, *J* = 5.6 Hz, H_3-27), 0.77 (3H, d, *J* = 5.5 Hz, H_3-28), 0.64 (3H, s, H_3-18); ^{13}C NMR (150 MHz, $CDCl_3$) δ_C: 36.9 (C-1), 31.5 (C-2), 71.5 (C-3), 42.3 (C-4), 149.0 (C-5), 120.1 (C-6), 78.6 (C-7), 37.2 (C-8), 43.7 (C-9), 37.6 (C-10), 21.0 (C-11), 39.2 (C-12), 42.5 (C-13), 49.2 (C-14), 24.6 (C-15), 28.3 (C-16), 55.6 (C-17), 11.5 (C-18), 18.4 (C-19), 36.3 (C-20), 19.1 (C-21), 33.8 (C-22), 30.5 (C-23), 39.2 (C-24), 31.6 (C-25), 20.6 (C-26), 17.8 (C-27), 15.6 (C-28)。以上数据与文献[21]报道一致, 故鉴定化合物**6**为 24(*R*)-7*α*-羟基麦角甾-5-烯-3*β*-醇。

化合物**7**: 白色油状物, 分子式 $C_{28}H_{46}O$, ESI-MS *m*/*z* 399 [M+H]$^+$。^{1}H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ_H: 5.35 (1H, m, H-6), 5.16-5.22 (2H, m, H-22, 23), 1.01 (3H, d, *J* = 4.2 Hz, H_3-28), 1.00 (3H, d, *J* = 6.1 Hz, H_3-21), 0.91 (3H, d, *J* = 6.9 Hz, H_3-27), 0.83 (3H, d, *J* = 6.7 Hz, H_3-26), 0.81 (3H, s, H_3-19), 0.69 (3H, s, H_3-18); ^{13}C NMR (150 MHz, $CDCl_3$) δ_C: 37.4 (C-1), 30.3 (C-2), 72.0 (C-3), 42.4 (C-4), 140.9 (C-5), 121.9 (C-6), 31.6 (C-7), 32.1 (C-8), 50.3 (C-9), 36.7 (C-10), 21.2 (C-11), 39.8 (C-12), 42.5 (C-13), 57.0 (C-14), 24.4 (C-15), 28.7 (C-16), 56.2 (C-17), 12.2 (C-18), 19.6 (C-19), 40.3 (C-20), 21.1 (C-21), 136.0 (C-22), 131.9 (C-23), 43.0 (C-24), 33.3 (C-25), 20.1 (C-26), 19.8 (C-27), 17.8 (C-28)。以上数据与文献[22]报道一致, 故鉴定化合物**7**为brassicasterol。

化合物**8**: 白色油状物, 分子式 $C_{21}H_{32}O$, ESI-MS *m*/*z* 301 [M+H]$^+$。^{1}H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ_H: 5.75 (1H, m, H-20), 5.35 (1H, m, H-6), 5.0 (2H, m, H_2-21), 3.55 (1H, m, H-3), 1.01 (1H, s, H-18), 0.61 (1H, s, H-19); ^{13}C NMR (150 MHz, $CDCl_3$) δ_C: 36.9 (C-1), 31.5 (C-2), 71.5 (C-3), 42.3 (C-4), 141.0 (C-5), 121.8 (C-6), 78.6 (C-7), 37.2 (C-8), 43.7 (C-9), 37.6 (C-10), 21.0 (C-11), 39.2 (C-12), 42.5 (C-13), 49.2 (C-14), 24.6 (C-15), 28.3 (C-16), 55.7 (C-17), 11.5 (C-18), 18.4 (C-19), 139.8 (C-20), 114.7 (C-21)。以上数据与文献[23]报道一致, 故鉴定化合物**8**为孕甾-5,20-二烯-3*β*-醇。

化合物**9**: 白色油状物, 分子式 $C_{30}H_{50}O$, ESI-MS *m*/*z* 427 [M+H]$^+$。^{1}H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ_H: 5.35 (1H, dd, *J* = 5.1, 2.7 Hz, H-6), 3.53 (1H, m, H-3), 1.01 (3H, s, H_3-19), 0.95 (3H, d, *J* = 7.0 Hz, H_3-26), 0.94 (3H, s, H_3-28), 0.91 (3H, s, H_3-30), 0.86 (3H, d, *J* = 6.6 Hz, H_3-27), 0.66 (3H, s, H_3-18), 0.45 (1H, dd, *J* = 9.1, 4.3 Hz, H-29a), −0.13 (1H, dd, *J* = 5.9, 4.3 Hz, H-29b); ^{13}C NMR (150 MHz, $CDCl_3$) δ_C: 36.9 (C-1), 31.5 (C-2), 71.6 (C-3), 42.4 (C-4), 149.1 (C-5), 120.0 (C-6), 78.7 (C-7), 37.3 (C-8), 43.7 (C-9), 37.6 (C-10), 21.1 (C-11), 39.2 (C-12),

42.9 (C-13), 49.1 (C-14), 24.8 (C-15), 28.4 (C-16), 57.7 (C-17), 11.5 (C-18), 18.4 (C-19), 35.6 (C-20), 21.3 (C-21), 32.2 (C-22), 26.0 (C-23), 51.0 (C-24), 32.4 (C-25), 22.3 (C-26), 21.7 (C-27), 15.6 (C-28), 21.5 (C-29), 14.5 (C-30)。以上数据与文献[24]报道一致, 故鉴定化合物**9**为gorgosterol。

化合物**10**: 无色粉末, 分子式$C_{29}H_{50}O$, ESI-MS *m*/*z* 415 $[M+H]^+$。^{1}H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ_H: 5.35 (1H, m, H-6), 3.51 (1H, m, H-3), 1.25 (3H, s, H_3-19), 1.00 (3H, s, H_3-21), 0.91 (3H, d, J = 3.8 Hz, H_3-29), 0.89 (3H, d, J = 6.9 Hz, H_3-27), 0.86 (3H, d, J = 6.8 Hz, H_3-26), 0.64 (3H, s, H_3-18); ^{13}C NMR (150 MHz, $CDCl_3$) δ_C: 37.4 (C-1), 28.7 (C-2), 72.0 (C-3), 42.8 (C-4), 140.9 (C-5), 121.9 (C-6), 31.8 (C-7), 31.8 (C-8), 50.3 (C-9), 36.7 (C-10), 20.9 (C-11), 40.3 (C-12), 42.5 (C-13), 57.7 (C-14), 24.2 (C-15), 25.5 (C-16), 56.6 (C-17), 11.9 (C-18), 18.7 (C-19), 33.0 (C-20), 19.4 (C-21), 32.1 (C-22), 39.9 (C-23), 45.1 (C-24), 24.7 (C-25), 15.9 (C-26), 19.6 (C-27), 21.3 (C-28), 10.6 (C-29)。以上数据与文献[25]报道一致, 故鉴定化合物**10**为*β*-sitosterol。

化合物**11**: 白色粉末, 分子式$C_{28}H_{46}O$, ESI-MS *m*/*z* 399 $[M+H]^+$。^{1}H NMR (600 MHz, $CDCl_3$) δ_H: 5.35 (1H, m, H-6), 4.67 (2H, m, H_2-28), 3.52 (1H, m, H-3), 1.03 (3H, d, J = 3.2 Hz, H_3-26), 1.02 (3H, s, H_3-27), 1.01 (3H, s, J = 4.1 Hz, H_3-19), 0.95 (3H, d, J = 6.6 Hz, H_3-21), 0.68 (3H, s, H_3-18); ^{13}C NMR (150 MHz, $CDCl_3$) δ_C: 37.4 (C-1), 31.8 (C-2), 72.0 (C-3), 42.4 (C-4), 140.9 (C-5), 121.9 (C-6), 32.1 (C-7), 32.1 (C-8), 50.3 (C-9), 36.7 (C-10), 21.23 (C-11), 39.9 (C-12), 42.5 (C-13), 56.9 (C-14), 24.4 (C-15), 28.4 (C-16), 56.1 (C-17), 12.0 (C-18), 19.5 (C-19), 35.9 (C-20), 18.9 (C-21), 34.8 (C-22), 31.1 (C-23), 157.0 (C-24), 33.6 (C-25), 22.0 (C-26), 22.6 (C-27), 106.1 (C-28)。以上数据与文献[26]报道一致, 故鉴定化合物**11**为24-methylenecholesterol。

3 生物活性测试

3.1 细胞活力检测 将Ac2F细胞以每孔2×10^4个接种于96孔板, 培养12 h后加入待测化合物或等体积DMSO (空白对照), 继续培养24 h。每孔加入20 μL MTT (5 mg·mL^{-1}), 37 ℃避光孵育4 h后弃上清, 加入150 μL DMSO振荡溶解, 于560 nm测定吸光度。选取无显著细胞毒性的浓度进行后续生物学实验检测。

3.2 荧光素酶报告基因法 将Ac2F细胞以每孔1×10^5个密度接种于48孔板, 贴壁后更换无血清培养基。使用Lipofectamine™ 2000转染试剂进行转染。空白组转染3×AOX-TK-荧光素酶报告质粒与pcDNA3空载体; 转染组转染该报告质粒及pFlag-PPAR-*α*、PPAR-*β*或PPAR-*γ*质粒。转染6 h后, 更换为含10%胎牛血清的完全培养基, 继续培养过夜。次日, 向转染组分别加入待测化合物; 同时设置WY14643、GW501516及ROSI分别作为PPAR-*α*、PPAR-*β*及PPAR-*γ*的阳性对照, 并以等体积DMSO作为阴性对照。继续培养7 h后, PBS洗涤细胞, 裂解并收集上清液。使用荧光素酶报告基因检测试剂盒, 通过多功能酶标仪测定化学发光信号。

3.3 分子对接 从RCSB Protein Data Bank获取PPAR-*α* (PDB ID: 4BCR) 与PPAR-*β* (PDB ID: 2Q5G) 的晶体结构, 并采用PyMOL 3.9软件对其进行了加氢和去除水分子的预处理。随后, 将化合物**5**、**8**、**9**的分子结构转换为PDB格式, 利用AutoDock1.5.7软件进行分子对接分析。最终的对接结果通过PyMOL 3.9进行可视化与图像生成。

3.4 抗炎活性测试 Griess法检测NO生成量: 取对数生长期RAW264.7细胞, 以每孔1×10^4个接种于96孔板 (每孔100 μL), 37 ℃培养12 h。药物组加入待测化合物, 空白组与模型组加入等体积DMSO, 孵育1 h后, 除空白组外各孔加入LPS (终浓度500 ng·mL^{-1}), 继续培养24 h。吸取70 μL细胞培养上清至新96孔板, 加入70 μL Griess试剂, 37 ℃避光孵育1 h, 于540 nm测定OD值。

Western blot法检测炎症蛋白表达: 将RAW264.7细胞按每孔4×10^5个接种于6孔板, 培养12 h后, 分别加入待测化合物或DMSO预处理1 h。除空白组外, 其余各组加入LPS (1 μg·mL^{-1}) 诱导12 h。细胞经预冷裂解液 (含PMSF及磷酸酶抑制剂) 裂解30 min后, 离心取上清, BCA法定量蛋白。取35 μg蛋白进行SDS-PAGE电泳, 转膜至PVDF膜, 5% BSA封闭2 h, 依次孵育一抗 (iNOS或COX-2, 1∶1 000, 4 ℃过夜) 及HRP标记二抗 (1∶7 000, 室温2 h), ECL显影后用凝胶成像系统采集图像, ImageJ软件分析条带灰度值。

3.5 统计学分析 所有数据均以均值 ± 标准差表示, 并通过单因素方差分析进行统计分析 (ANOVA)。以$P < 0.05$为差异具有统计学意义。

作者贡献: 张春琳与张莉亭为本文共同第一作者。张春琳负责化合物的分离、鉴定及文章撰写; 张莉亭负责药理活性的筛选及初稿撰写; 曾建昂负责PPARs活性的筛选工作; 李松威、王丽红及宫益霞在实验过程中提供指导, 并参与稿件修订; 郭跃伟与苏明智负责实验设计、基金支持与论文的最终修订。

利益冲突: 所有作者均声明不存在利益冲突。

References

[1] Hanaa BE, Eman ZA, Khedr AIM, et al. Recent updates on *Sinularia* soft coral [J]. Mini Rev Med Chem, 2022, 22: 1152-1196.

[2] Yan X, Liu J, Leng X, et al. Chemical diversity and biological activity of secondary metabolites from soft coral genus *Sinularia* since 2013 [J]. Mar Drugs, 2021, 19: 335.

[3] Huang CY, Tseng YJ, Chokkalingam U, et al. Bioactive isoprenoid-derived natural products from a Dongsha atoll soft coral *Sinularia erecta* [J]. J Nat Prod, 2016, 79: 1339-1346.

[4] Jiang CS, Ru T, Yao LG, et al. Four new cembranoids from the Chinese soft coral *Sinularia* sp. and their anti-Aβ aggregation activities [J]. Fitoterapia, 2019, 136: 104176.

[5] Yuan WP, Cheng SM, Fu WT, et al. Structurally diverse metabolites from the soft coral *Sinularia verruca* collected in the South China Sea [J]. J Nat Prod, 2016, 79: 1124-1131.

[6] Sun M, Li SW, Zeng JA, et al. Two new diterpenoids formed by transannular Diels-Alder cycloaddition from the soft coral *Sarcophyton tortuosum*, and their antibacterial and PPAR-β agonist activities [J]. Mar Drugs, 2024, 22: 553.

[7] He L, Wang YT, Bi J, et al. Terpinen-4-ol ameliorates high glucose-induced cardiomyocyte injury by modulating SIRT1/PPARγ signaling [J]. Acta Pharm Sin (药学学报), 2025, 60: 3457-3466.

[8] Mirza AZ, Althagafi II, Shamshad H. Role of PPAR receptor in different diseases and their ligands: Physiological importance and clinical implications [J]. Eur J Med Chem, 2019, 166: 502-513.

[9] Zeng JA, Sun M, Qi Y, et al. Novel PPAR-γ agonist from the soft coral *Sarcophyton crassocaule*: Modulating glucose uptake and lipid droplet formation [J]. Mar Drugs, 2025, 23: 450.

[10] Ke XM, Zhang RY, Li P, et al. Hydrochloride berberine ameliorates alcohol-induced liver injury by regulating inflammation and lipid metabolism [J]. Biochem Biophys Res Commun, 2022, 610: 49-55.

[11] Guan SJ, Zhang Q, Zhu XX, et al. The role of peroxisome proliferator-activated receptor α in metabolic cardiovascular diseases [J]. Acta Pharm Sin (药学学报), 2025, 60: 3595-3604.

[12] Zhang H, Gao Y, Qiao PF, et al. PPAR-α agonist regulates amyloid-β generation *via* inhibiting BACE-1 activity in human neuroblastoma SH-SY5Y cells transfected with APPswe gene [J]. Mol Cell Biochem, 2015, 408: 37-46.

[13] Rostami A, Palomer X, Pizarro-Delgado J, et al. PPARβ/δ prevents inflammation and fibrosis during diabetic cardiomyopathy [J]. Pharmacol Res, 2024, 210: 107515.

[14] Meng QQ, Feng ZC, Zhang XL, et al. PPAR-γ activation exerts an anti-inflammatory effect by suppressing the NLRP3 inflammasome in spinal cord-derived neurons [J]. Mediators Inflamm, 2019, 2019: 6386729.

[15] Bernardes A, Souza PC, Muniz JR, et al. Molecular mechanism of peroxisome proliferator-activated receptor α activation by WY14643: A new mode of ligand recognition and receptor stabilization [J]. J Mol Biol, 2013, 425: 2878-2893.

[16] Pettersson I, Ebdrup S, Havranek M, et al. Design of a partial PPARδ agonist [J]. Bioorg Med Chem Lett, 2007, 17: 4625-4629.

[17] Su J, Hsien C, Lo C. Sesquiterpenoids-related metabolites from the soft coral *Sinularia* sp. [J]. J Chin Chem Soc, 2008, 55: 1286-1289.

[18] Park SK, Scheuer PJ. Isolation and structure determination of two furanosesquiterpenes from the soft coral *Sinularia lochmodes* [J]. J Korean Chem Soc, 1994, 38: 749-752.

[19] Su JH, Huang CY, Li PJ, et al. Bioactive cadinane-type compounds from the soft coral *Sinularia scabra* [J]. Arch Pharm Res, 2012, 35: 779-784.

[20] Tanaka A, Shimizu K, Kondo R. Antibacterial compounds from shoot skins of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) [J]. J Wood Sci, 2013, 59: 155-159.

[21] Pinto F, Almeida JG, Silveira E, et al. Steroids from the Brazilian zoanthids *Palythoa caribaeorum* and *Palythoa variabilis* [J]. J Braz Chem Soc, 2016, 28: 485-491.

[22] Hassan WHB, El Sayed ZI, Al-Wahaibi LH, et al. Metabolites profiling and *in vitro* biological characterization of different fractions of *Cliona* sp. marine sponge from the Red Sea Egypt [J]. Molecules, 2023, 28: 1643.

[23] Dawe RD, Wright JLC. An improved route to pregna-5,20-dien-3β-ol (muricin aglycone): Carbon and proton nuclear magnetic resonance assignments for the aglycone and a number of related pregnene derivatives [J]. Can J Chem, 1987, 65: 666-669.

[24] Lan WJ, Su JY, Zeng LM. Studies on the secondary metabolites of the soft coral, *Sinularia* sp. collected from the South China Sea [J]. Acta Sci Nat Univ Sunyatseni (Nat Sci Ed) (中山大学学报·自然科学版), 2003, 42: 105-107.

[25] Li XJ, Song XH, Tang SQ, et al. Phytochemical constituents from rhizomes of *Dryopteris crassirhizoma* and their anti-inflammatory activity [J]. Nat Prod Res, 2024, 38: 3574-3580.

[26] Iguchi K, Saitoh S, Yamada Y. Novel 19-oxygenated sterols from the Okinawan soft coral *Litophyton viridis* [J]. Chem Pharm Bull, 1989, 37: 2553-2554.