

安徽医科大学学报
Acta Universitatis Medicinalis Anhui
ISSN 1000-1492, CN 34-1065/R

《安徽医科大学学报》网络首发论文

题目: BMP3 抑制大鼠佐剂诱导性关节炎的炎症反应
作者: 孙丹彤, 李小枫, 李俊, 宋标
网络首发日期: 2025-12-30
引用格式: 孙丹彤, 李小枫, 李俊, 宋标. BMP3 抑制大鼠佐剂诱导性关节炎的炎症反应 [J/OL]. 安徽医科大学学报.
<https://link.cnki.net/urlid/34.1065.R.20251229.1921.002>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字符、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

BMP3 抑制大鼠佐剂诱导性关节炎的炎症反应

孙丹彤^{1,2,3}, 李小枫^{2,3}, 李俊^{2,3}, 宋标^{1,2,3}

(¹安徽医科大学第一附属医院药剂科, 合肥 230022; 安徽医科大学²药学科学学院、³炎症免疫性疾病安徽省实验室, 合肥 230032)

摘要 目的 探讨骨形态发生蛋白 3 (BMP3) 对弗氏完全佐剂 (FCA) 诱导的大鼠关节炎 (AA) 炎症因子表达及关节损害的影响。方法 SD 大鼠通过左后肢足趾部皮内注射 FCA 建立 AIA 模型, 造模后第 8 天于膝关节腔原位注射 BMP3 过表达腺病毒 (Ad-BMP3) 或对照腺病毒 (Ad-NC)。采用 HE 染色观察滑膜组织病理变化; 免疫组化检测滑膜组织中 BMP3 表达; ELISA 分析血清中 IL-6、IL-1 β 和 TNF- α 的表达水平。提取 AIA 大鼠原代成纤维样滑膜细胞 (FLS), 敲低或过表达 FLS 细胞中 BMP3 的表达, Western blot 和 qRT-PCR 检测 FLS 细胞中 BMP3 和炎症因子的表达水平。结果 HE 染色证实 AIA 模型建立成功; 与正常大鼠相比, AIA 大鼠滑膜组织中 BMP3 表达降低; 敲低 BMP3 的表达促进了 FLS 细胞中炎症因子 (IL-6、IL-1 β 、IL-17A、TNF- α) 蛋白的表达以及趋化因子 [C-C 基序趋化因子配体 2 (CCL2)、C-C 基序趋化因子配体 3 (CCL3)、血管细胞黏附分子-1 (VCAM-1)] mRNA 的表达, 而过表达 BMP3 则抑制了相应炎症因子和趋化因子的表达; AIA 大鼠关节腔原位注射 BMP3 过表达腺病毒上调了滑膜组织中 BMP3 的表达, 抑制了关节滑膜的炎症反应和骨侵蚀。结论 BMP3 抑制了 FLS 细胞中炎症因子和趋化因子的产生, 减轻了关节炎的滑膜增生和骨侵蚀。

关键词 BMP3; 佐剂性关节炎; 成纤维样滑膜细胞; 炎症因子; AIA; 腺病毒

中图分类号 R 593.2

文献标志码 A

BMP3 inhibits the inflammatory response in rat adjuvant-induced arthritis

Sun Dantong^{1,2,3}, Li Xiaofeng^{2,3}, Li Jun^{2,3}, Song Biao^{1,2,3}

(¹Department of Pharmacy, the First Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei 230022, ²School of

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 82002269); 安徽医科大学校科研基金项目(编号: 2022xkj141); 安徽医科大学炎症免疫性疾病安徽省实验室开放课题项目(编号: IMMDL202102)

作者简介: 孙丹彤, 女, 硕士研究生;

宋 标, 男, 博士, 副主任药师, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: aysongbiao@ahmu.edu.cn

Pharmacy, ³Inflammation and Immune Mediated Disease Laboratory of Anhui Province, Anhui Medical University, Hefei 230032)

Abstract Objective To investigate the effect of bone morphogenetic protein 3 (BMP3) on the expression of inflammatory factors and joint damage in adjuvant arthritis (AA) induced by Freund's complete adjuvant (FCA) in rats. **Methods** The AIA model was established in SD rats by intradermal injection of FCA into the toes of the left hind limb, and BMP3 overexpressing adenovirus (Ad-BMP3) or control adenovirus (Ad-NC) was injected in situ into the knee joint cavity on the 8th day after modeling. Subsequently, HE staining was used to observe the histopathological changes in the synovium, immunohistochemistry was used to detect the expression of BMP3 in the synovium, and ELISA was used to analyze the expression levels of IL-6, IL-1 β and TNF- α in the serum. Primary fibroblast-like synoviocytes (FLS) were isolated from AIA rats, the expression of BMP3 in FLS was knocked down or overexpressed, and Western blot and qRT-PCR were used to detect the expression levels of BMP3 and inflammatory factors in FLS. **Results** HE staining confirmed the successful establishment of the AIA model. Compared with normal rats, AIA rats showed decreased BMP3 expression in synovial tissue. Knockdown of BMP3 promoted the protein expression of inflammatory factors (IL-6, IL-1 β , IL-17A, TNF- α) and the mRNA expression of chemokines [C-C motif chemokine ligand 2 (CCL2), C-C motif chemokine ligand 3 (CCL3), Vascular Cell Adhesion Molecule-1 (VCAM-1)] in FLS. In contrast, overexpression of BMP3 suppressed the expression of these inflammatory factors and chemokines. Intra-articular injection of BMP3-overexpressing adenovirus in AIA rats upregulated BMP3 expression in synovial tissue and inhibited synovial inflammation and bone erosion. **Conclusion** BMP3 suppresses the production of inflammatory factors and chemokines in FLS, thereby alleviating synovial hyperplasia and bone erosion in arthritis.

Key words BMP3; adjuvant-induced arthritis; fibroblast-like synoviocytes; inflammatory factors; AIA; adenovirus

Fund programs National Natural Science Foundation of China (No. 82002269); Scientific Research Project of Anhui Medical University (No. 2022xkj141); Open Project of Anhui Provincial Laboratory of Inflammatory and Immune Diseases, Anhui Medical University (No. IMMDL202102)

Corresponding author Song Biao, E-mail: aysongbiao@ahmu.edu.cn

类风湿关节炎（rheumatoid arthritis, RA）是一种慢性自身免疫性疾病，其病理特征为滑膜增生、炎性细胞浸润、相邻关节骨和软骨的侵蚀以及血管翳的形成，最终导致关节功能障碍甚至丧失^[1-2]。在RA

中，成纤维样滑膜细胞（fibroblast-like synoviocytes, FLS）在其中发挥了重要的作用，活化的FLS细胞侵入细胞外基质，分泌炎症因子（IL-6、IL-1 β ）^[3]、趋化因子^[4]、转化生长因子- β （transforming growth factor- β , TGF- β ）^[5]、基质金属蛋白酶（matrix metalloproteases, MMPs）^[6]和细胞黏附分子^[7]等，破坏关节软骨和骨骼，加重关节功能障碍。因此，抑制FLS细胞的增殖和炎症反应可能是RA治疗的重要靶点。骨形态发生蛋白（bone morphogenetic proteins, BMPs）是TGF- β 超家族成员之一，是一种分泌型信号蛋白^[8]，能够促进骨和软骨^[9]的发育。研究^[10]表明，骨形态发生蛋白3（bone morphogenetic protein 3, BMP3）通过抑制成骨细胞分化和功能来抑制RA关节骨的修复，但其在FLS细胞炎症反应中的具体调控机制尚不明确。因此，本研究通过体内外实验，系统分析BMP3对FLS细胞炎症因子（如IL-6、TNF- α ）及趋化因子如〔C-C基序趋化因子配体2（C-C motif chemokine ligand 2, CCL2）、血管细胞黏附分子-1（vascular cell adhesion molecule-1, VCAM-1〕的调控作用，以揭示其在RA中的潜在治疗价值。

为进一步探讨BMP3在RA中的作用，本研究通过弗氏完全佐剂（Freund's complete adjuvant, FCA）诱导大鼠AIA模型，结合体外FLS细胞对基因进行沉默和过表达实验，系统分析BMP3对炎症反应的调控作用。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 实验动物 40 只斯普拉格-道利大鼠（sprague-dawley, SD）大鼠（雌性，体质量 120~160 g）购自安徽医科大学实验动物中心，常规饲养于药学科学学院动物实验中心的大鼠笼位中，饲养环境温度恒定在（22±2）℃，湿度 40%~70%，独立通风，饮食供应充足。本研究获得安徽医科大学实验动物伦理委员会的批准（批号：LLSC20210150）。

1.1.2 主要试剂与仪器 FCA 购自美国 Chondrex 公司（货号：7027）；BMP3 和 TNF- α 抗体购自英国 Abcam 公司（货号：ab134724、ab307164）；IL-6、IL-1 β 和 IL-17A 抗体购自美国 Bioworld 公司（货号：BS6419、BS6067、BS60297）； β -actin 抗体购自美国 Cell Signaling Technology 公司（货号：4967S）；Vimentin 抗体购自武汉三鹰生物技术有限公司（货号：CL594-60330）；Alexa Fluor 488 偶联的山羊抗兔 IgG（H+L）抗体购自北京中杉金桥生物技术有限公司（货号：ZF0511）；4,6-二氨基-2-苯基吲哚（4',6-diamidino-2-phenylindole, DAPI）购自上海碧云天生物技术有限公司（货号：P0131）；TRIzol 试剂购自日本 Takara 公司（货号：525-0058）；BMP3、TNF- α 、IL-6、IL-1 β 、IL-17A、CCL2、CCL3、VCAM-1 和 β -actin 引物由上海生工生物科技有限公司合成。Evo M-MLV 逆转录预混试剂盒购自

湖南艾科瑞生物工程有限公司（货号：11701）；BMP3-RNAi 购自上海吉玛制药技术有限公司。鼠源 BMP3（Ad-BMP3）和对照（Ad-NC）的腺病毒购自上海汉恒生物科技有限公司，鼠源 BMP3 腺病毒基因编码序列参考自美国国家生物技术信息中心（National Center for Biotechnology Information, NCBI）数据库（转录本 ID 为 NM_017105.1）。荧光倒置式显微镜购自日本 Olympus Corporation 公司（型号：IX83）；数字化 PCR 仪购自美国 Thermo Scientific 公司（型号：QX200）。

1.2 方法

1.2.1 AIA 大鼠模型建立 将购于安徽医科大学实验动物中心体质量为 120 g±20 g 的成年雌性 SD 大鼠随机分为每 5 只一笼，适应性饲养 1 周后造模。在大鼠左后肢足趾部皮内注射 FCA，诱导建立佐剂性关节炎（adjuvant-induced arthritis, AIA）模型，FCA 剂量为 0.1 mL/100 g。对照组大鼠在左后肢足趾部皮内注射相同剂量的医用生理盐水。FCA 注射当天为第 0 天，在第 8 天于 AIA 大鼠膝关节腔内注射 0.1 mL 携带鼠源 BMP3（Ad-BMP3）或 Ad-NC 的腺病毒，AIA 模型建立的第 24 天将大鼠进行安乐死并收集样本。以上实验方案和操作步骤均符合安徽医科大学动物伦理委员会实验要求。

1.2.2 滑膜组织病理学观察 造模后处死大鼠，迅速分离大鼠膝关节滑膜组织，用 4% 多聚甲醛固定 48 h 后换 EDTA 脱钙液脱钙，随后进行石蜡包埋、切片。组织切片用 HE 染色，显微镜观察滑膜组织病理变化。

1.2.3 免疫组化 大鼠滑膜组织切片进行常规处理后 4 °C 过夜孵育 BMP3 抗体，次日取出后于室温下复温 0.5 h，室温孵育二抗 2 h，3,3'-二氨基联苯胺（3,3'-diaminobenzidine, DAB）显色剂显色至产生棕色颗粒，随后进行苏木精复染细胞核，梯度乙醇脱水，二甲苯透明，封片后在显微镜下观察 BMP3 表达情况。

1.2.4 细胞培养 收集大鼠膝关节滑膜组织，采用贴片法进行分离和培养原代 FLS 细胞。细胞于 37°C、5% CO₂ 条件下，使用含 20% FBS 的 DMEM 培养基培养。经过 3 次传代后即可得到均一且形态稳定的 FLS 细胞。

1.2.5 免疫荧光 培养的 FLS 细胞密度达到 1~2×10⁵ 个/mL 时，使用 BMP3 抗体和 Vimentin 抗体（1:200）进行免疫荧光双染。以 Alexa Fluor 488 偶联的山羊抗兔 IgG（H+L）作为二抗，用 DAPI 对细胞核进行复染，用荧光倒置显微镜检测染色的 FLS 细胞。

1.2.6 基因沉默 构建小干扰RNA（siRNA）转染敲低FLS细胞中BMP3的表达。BMP3-RNAi正义链为 5'-CCAAGUCUUUGAAGCCAUTT-3'，反义链为 5'-AUGGCUUCAAAAGACUUUGGTT-3'。阴性对照 siRNA（NC-RNAi）正义链是 5'-UUCUCCGAACGUGUCACGUU-3'，反义链是 5'-ACGUGACACGUUCGGAGAATT-3'。使用 GP-transfect-Mate 转染试剂将 BMP3-RNAi 转染到 FLS 细胞中，

细胞用 Opti-MEM 培养 4-6 h，然后换成含 20% FBS 的 DMEM，在 37℃ 培养 48 h。

1.2.7 基因过表达 BMP3 的过表达质粒由上海吉玛制药技术有限公司构建。根据制造商的说明要求，用 BMP3 过表达质粒（BMP3-PEX）转染 FLS 细胞，诱导 BMP3 过表达，并以空的 PEX-3 载体（NC-PEX）作为对照，转染实验使用 LipoFiter 3.0，转染步骤同 1.2.6 项。

1.2.8 qRT-PCR 根据制造商手册/协议，使用 TRIzol 试剂从 FLS 细胞中提取总 RNA，反应根据制造商的方案进行，使用 Evo M-MLV 逆转录预混试剂盒将 RNA 逆转录为 cDNA。此外，使用数字化 PCR 仪检测相关基因的 mRNA 表达水平。用 $2^{-\Delta C_T}$ 法分析目标基因 mRNA 的相对表达量。实验中使用的所有引物序列参照表 1 所示。

表 1 相关基因引物序列

Tab.1 Primer sequences of related genes

Gene	Primer sequence (5'-3')
<i>BMP3</i>	F: CTACCCCTACCTAGCTACGTAT R: GCTGGTGACATTGTTACTCATG
<i>IL-1β</i>	F: TGACCCATGTGAGCTGAAAG R: AGGGATTTGTCGTTGCTTG
<i>IL-6</i>	F: GAGCCCACCAGGAACGAAAGTC R: TGTTGTGGGTGGTATCCTCTGTGAA
<i>IL-17A</i>	F: TGCCTGATGCTGTTGCTGCTAC R: GGTGAAGTGGAACGGTTGAGGTAG
<i>TNF-α</i>	F: ACTCCCAGAAAAGCAAGCAA R: CAGTTCCACATCTCGGATCA
β -actin	F: TTCGCCATGGATGACGATATC R: TAGGAGTCCTTCTGACCCATAC
<i>VCAM-1</i>	F: GTCAGCGAAGGAAACTGGAG R: ACCGTGCAGTTGACAGTGAC
<i>CCL2</i>	F: TAGCATCCACGTGCTGTCTC R: TGCTGCTGGTGATTCTCTTG
<i>CCL3</i>	F: ACTGCCTGCTGCTTCTCCA R: CGGTTCTCTGGTCAGGAA

1.2.9 Western blot 体外培养的 FLS 细胞和滑膜组织使用含 1% 蛋白酶抑制剂的 RIPA 裂解液裂解，冰上裂解细胞沉淀 30 min，在 4 ℃、12 000 r/min 条件下离心 20 min，取上清液进行 BCA 定量。后续取总蛋白加入每孔泳道中，进行十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳（sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE），用湿转法将蛋白转移至聚偏二氟乙烯（polyvinylidene fluoride membrane，

PVDF) 膜上。室温封闭后加入相应的一抗, 4 °C 孵育过夜。使用抗 BMP3 (1:500)、IL-1 β (1:500)、IL-6 (1:500)、IL-17A (1:500)、TNF- α (1:500) 和 β -actin (1:1 000) 的一级抗体。次日洗涤 3 次后使用山羊抗兔或小鼠二抗孵育 2 h。洗涤 3 次后, 用 ECL 化学发光检测试剂盒发光、显影和定影。利用 Image J 软件计算蛋白质条带的灰度值。

1.2.10 大鼠关节炎评分和足肿胀测量 通过测量足爪厚度和体积, 评价关节炎足肿胀的严重程度。取大鼠踝关节在 4% 多聚甲醛中固定 48 h 后, 对踝关节进行 Micro-CT 扫描, 然后进行图像重建和数据分析。由杭州越波生物技术有限公司利用 SCANCO MEDICAL μ CT100 仪器执行扫描方案。

1.3 统计学处理 数据使用 SPSS 27.0 软件进行评估和统计分析, 结果以均数 \pm 标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示。采用单因素方差分析评估组间差异。此外, 还使用 GraphPad Prism 10.4 软件对数据进行分析, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 建立大鼠 AIA 模型 SD 大鼠适应性饲养 1 周后, 于大鼠左后足爪皮内注射 FCA 建立 AIA 大鼠模型。造模后收集血液, 离心取上清液, 通过 ELISA 试剂盒检测血清中 IL-6、IL-1 β 和 TNF- α 表达水平。ELISA 结果显示, AIA 模型大鼠血清中 IL-6、IL-1 β 和 TNF- α 水平较正常组表达升高 ($P < 0.01$, 图 1A), 此外, HE 染色显示 AIA 组滑膜组织出现典型病理特征: 滑膜层明显增厚、炎性细胞浸润及血管翳形成 (图 1B、1C), 上述结果共同验证了 AIA 模型成功建立。

2.2 AIA 大鼠中滑膜组织 BMP3 的表达情况 为了明确 BMP3 在关节炎发病过程中的表达变化, 首先检测了 AIA 大鼠滑膜组织中 BMP3 的表达水平, 免疫组织化学结果显示, BMP3 在 AIA 滑膜组织中表达下调 (图 1D、1E)。为进一步验证 BMP3 在 FLS 细胞中的表达情况, 通过免疫荧光双染检测 BMP3 (绿色) 与 FLS 细胞标志物 Vimentin (红色) 的共定位情况, 结果显示, AIA 组 FLS 细胞中 BMP3 荧光信号强度较正常组减弱 (图 1F), 且 Vimentin 在两组细胞中均广泛表达且细胞形态呈典型梭形, 证实 FLS 细胞分离培养成功。上述结果提示, AIA 模型中 BMP3 的表达下调可能参与 RA 滑膜炎症的病理进程, 为后续探究 BMP3 对 FLS 细胞功能的调控作用奠定基础。

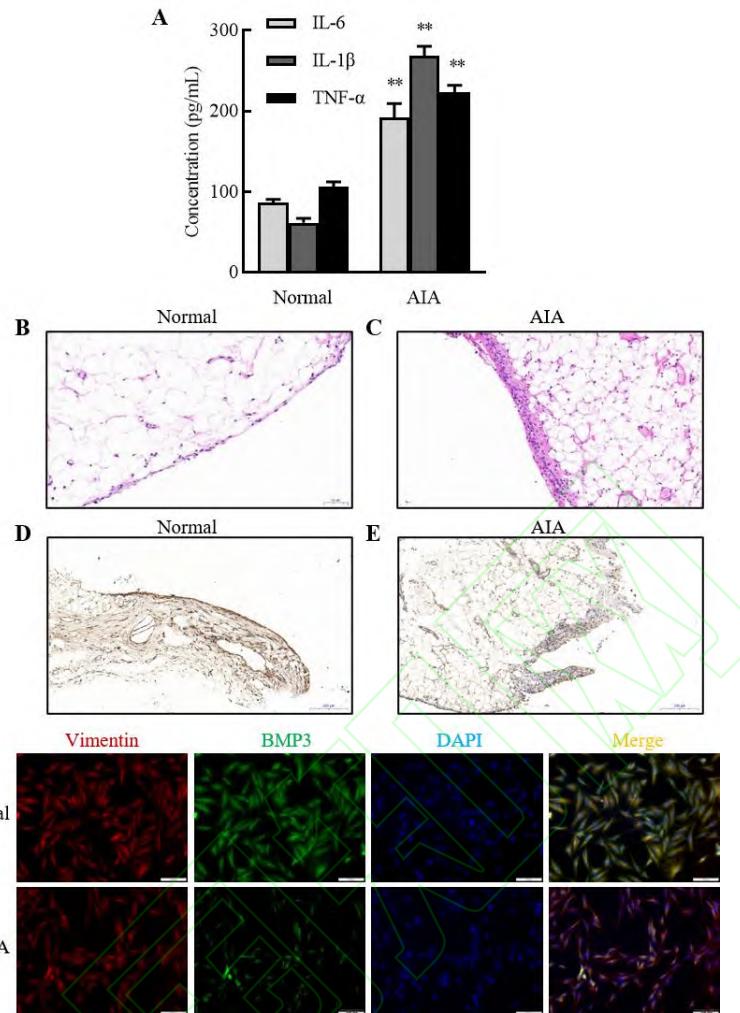


图 1 BMP3 在 AIA 大鼠 FLS 细胞中的表达情况 $\times 20$

Fig. 1 Expression of BMP3 in FLS of AIA rats $\times 20$

A: Detection of the expression of IL-6, IL-1 β and TNF- α in serum of AIA rats by ELISA; B, C: Representative pictures of HE staining; D, E: Representative pictures of IHC-BMP3 staining; F: Immunofluorescence detection of Vimentin (red) and BMP3 (green) expression in rat synovial tissue; ** $P < 0.01$ vs Normal group.

2.3 AIA 大鼠中炎症因子、趋化因子和黏附因子的表达情况 基于前期研究表明, AIA 大鼠滑膜组织中 BMP3 表达降低(图 2A), 进一步检测了 FLS 细胞中炎症相关因子的表达变化。Western blot 和 qRT-PCR 结果显示, 与正常组相比, AIA 组 FLS 细胞中促炎因子(IL-6、IL-1 β 、IL-17A 和 TNF- α)的蛋白及 mRNA 水平均升高 [例如 IL-6 mRNA: 正常组 1.00 ± 0.49 , AIA 组 5.78 ± 1.09 , $F(1, 4) = 48.014$, $P < 0.01$, 图 2B、2C]。同时, 单因素方差分析也表明, 参与免疫细胞招募的趋化因子(CCL2、CCL3)和黏附分子(VCAM-1)的表达也明显上调 [例如 CCL2 mRNA: 正常组 1.11 ± 0.59 , AIA 组 3.97 ± 0.51 , F

$(1, 4) = 40.10, P < 0.01$, 图 2C]。这些结果提示, BMP3 表达降低可能通过激活 FLS 细胞的炎症因子促进关节炎的病理进展, 这为后续探讨 BMP3 的功能机制提供了实验依据。

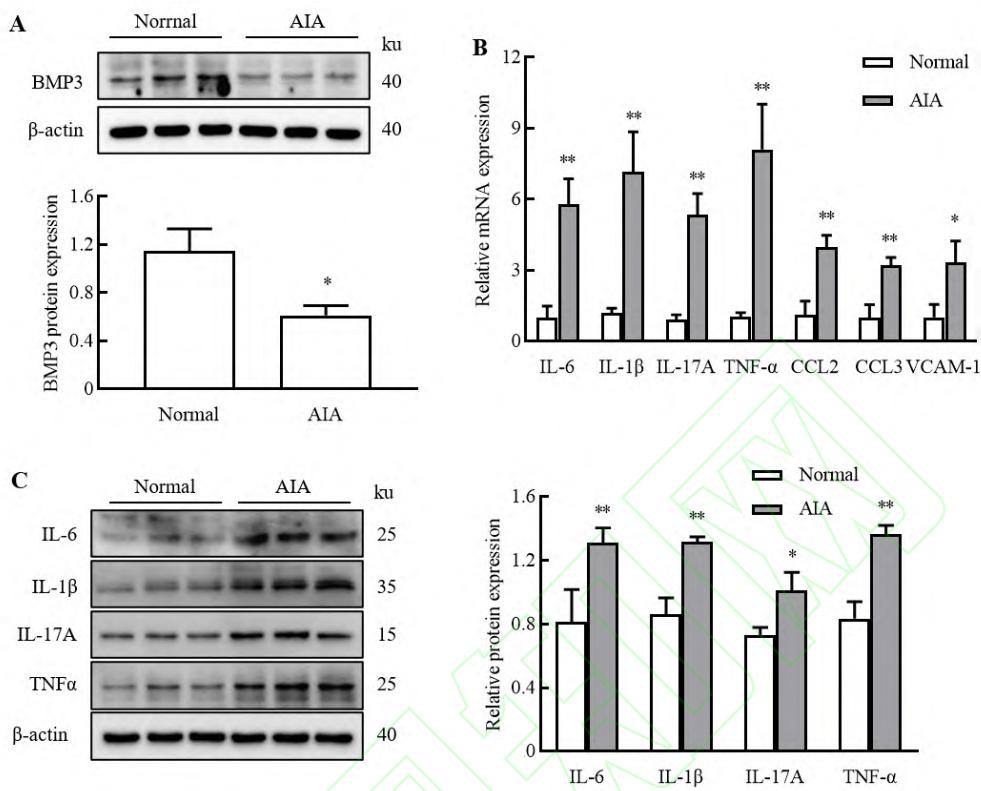


图 2 AIA 大鼠 FLS 细胞中炎症因子、趋化因子和黏附因子的表达情况

Fig. 2 Expression of inflammatory factors, chemokines and adhesion factors in FLS of AIA rats

A: Western blot detection of protein expression of BMP3 in FLS of AIA rats; B: Changes in mRNA expression of inflammatory factors, chemokines and adhesion factors in FLS of AIA rats detected by qRT-PCR; C: Western blot detection of protein expression of inflammatory factors in FLS of AIA Rats; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ vs Normal group.

2.4 沉默 BMP3 的表达对 AIA FLS 细胞炎症反应的影响 为明确 BMP3 对 FLS 细胞炎症反应的调控作用, 通过 BMP3-RNAi 小干扰敲低 FLS 细胞中 BMP3 的表达。Western blot 和 qRT-PCR 表明, BMP3-RNAi 转染组中 BMP3 的表达水平较 NC-RNAi 对照组表达降低 (图 3A、3B)。Western blot 和 qRT-PCR 的分析表明, 沉默 BMP3 后, FLS 细胞中促炎细胞因子 (IL-6、IL-1β、IL-17A、TNF-α) 的蛋白及 mRNA 表达均上调 [例如 IL-6 mRNA: NC-RNAi 组 4.15 ± 0.94 , BMP3-RNAi 组 7.97 ± 0.87 , $F(1, 4) = 17.76, P < 0.05$, 图 3A-3C], 同时趋化因子 CCL2、CCL3 和 VCAM-1 的 mRNA 水平也明显增加 [例如 CCL2 mRNA: NC-RNAi 组 4.67 ± 0.66 , BMP3-RNAi 组 9.12 ± 0.68 , $F(1, 4) = 66.13, P$

<0.01 , 图 4A]。ELISA 结果显示, 与对照组相比, IL-6、IL-1 β 以及 TNF- α 在细胞培养上清液中的含量增加 ($P < 0.01$), 如图 4B 所示。这些结果不仅证明 BMP3 对 AIA FLS 细胞炎症反应的负调控作用, 还揭示了 BMP3 可能通过同时抑制多类炎症介质的产生来维持滑膜稳态。这一结果为理解 BMP3 在 RA 中的保护机制提供了新的实验证据。

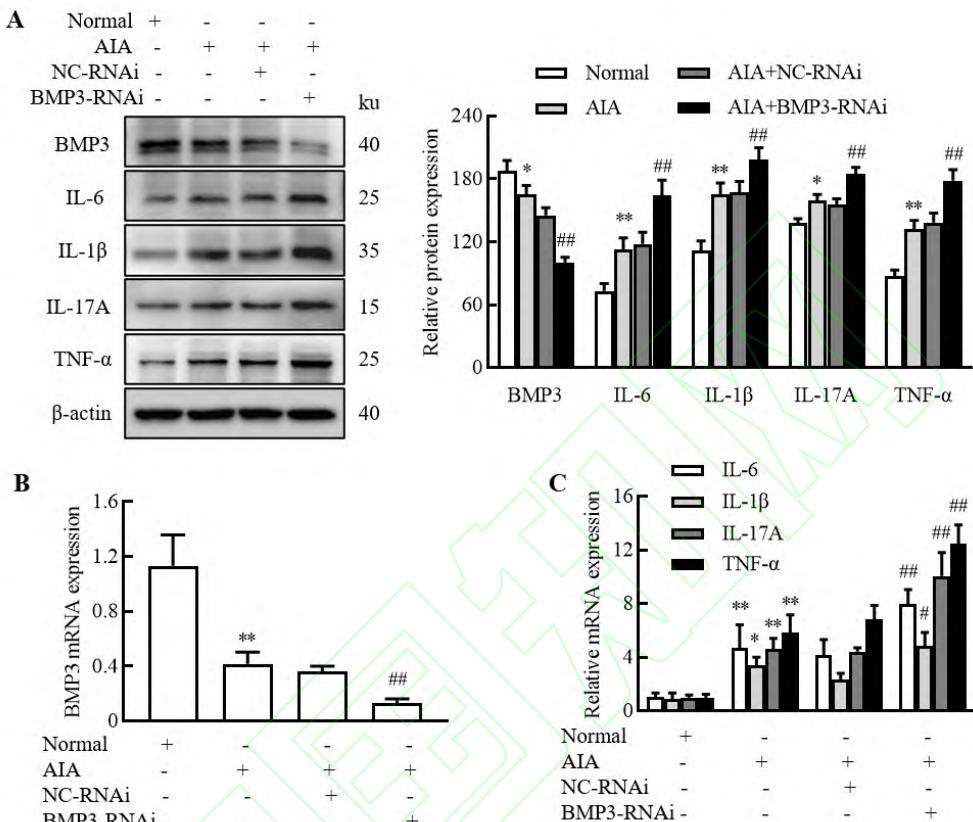


图 3 BMP3-RNAi 对 AIA 大鼠 FLS 细胞中炎症因子分泌的影响

Fig. 3 The effects of BMP3-RNAi on inflammatory cytokine secretion in FLS of AIA rats

A: Protein expression map of BMP3 and inflammatory factors in AIA FLS after silencing BMP3 detected by Western blot; B, C: mRNA expression map of BMP3 and inflammatory factors in AIA FLS after silencing BMP3 detected by qRT-PCR; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ vs Normal group; # $P < 0.05$, ## $P < 0.01$ vs NC-RNAi group.

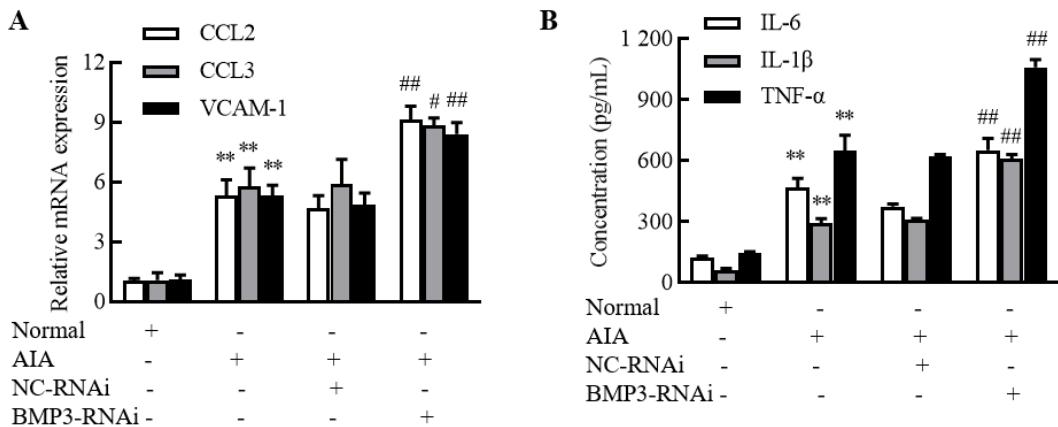


图 4 BMP3-RNAi 对 AIA 大鼠 FLS 细胞中炎症因子、趋化因子分泌的影响

Fig. 4 The effects of BMP3-RNAi on inflammatory factors and chemokines in FLS of AIA Rat

A: mRNA expression map of BMP3 and chemokines in AIA FLS after silencing BMP3 detected by qRT-PCR; B: Detection of secretion of inflammatory factors in AIA FLS after silencing of BMP3 detected by ELISA;
 $**P < 0.01$ vs Normal group; $^{\#}P < 0.05$, $^{##}P < 0.01$ vs NC-RNAi group.

2.5 过表达 BMP3 对 AIA FLS 细胞中促炎细胞因子和趋化因子的影响 为验证 BMP3 对 FLS 细胞炎症反应的直接调控作用，构建了 BMP3 过表达质粒。Western blot 和 qRT-PCR 结果显示，与 NC-PEX 组相比，BMP3-PEX 组 FLS 细胞中 BMP3 的表达更高，如图 5A、5 B 所示。此外，与 NC-PEX 组相比，BMP3-PEX 下调了促炎细胞因子 (IL-6、IL-1 β 、IL-17A 和 TNF- α) 的 mRNA 水平 [例如 IL-6 mRNA: NC-PEX 组 7.91 ± 0.99 , BMP3-PEX 组 3.37 ± 0.64 , $F(1, 4) = 46.68$, $P < 0.01$]，如图 5 A、5 C 所示。除此之外，在 AIA FLS 细胞中，过表达 BMP3 后，趋化因子 (CCL2、CCL3 和 VCAM-1) 的 mRNA 表达显著降低 [例如 CCL2 mRNA: NC-PEX 组 3.57 ± 0.47 , BMP3-PEX 组 1.67 ± 0.19 , $F(1, 4) = 42.664$, $P < 0.01$]，如图 5D 所示。

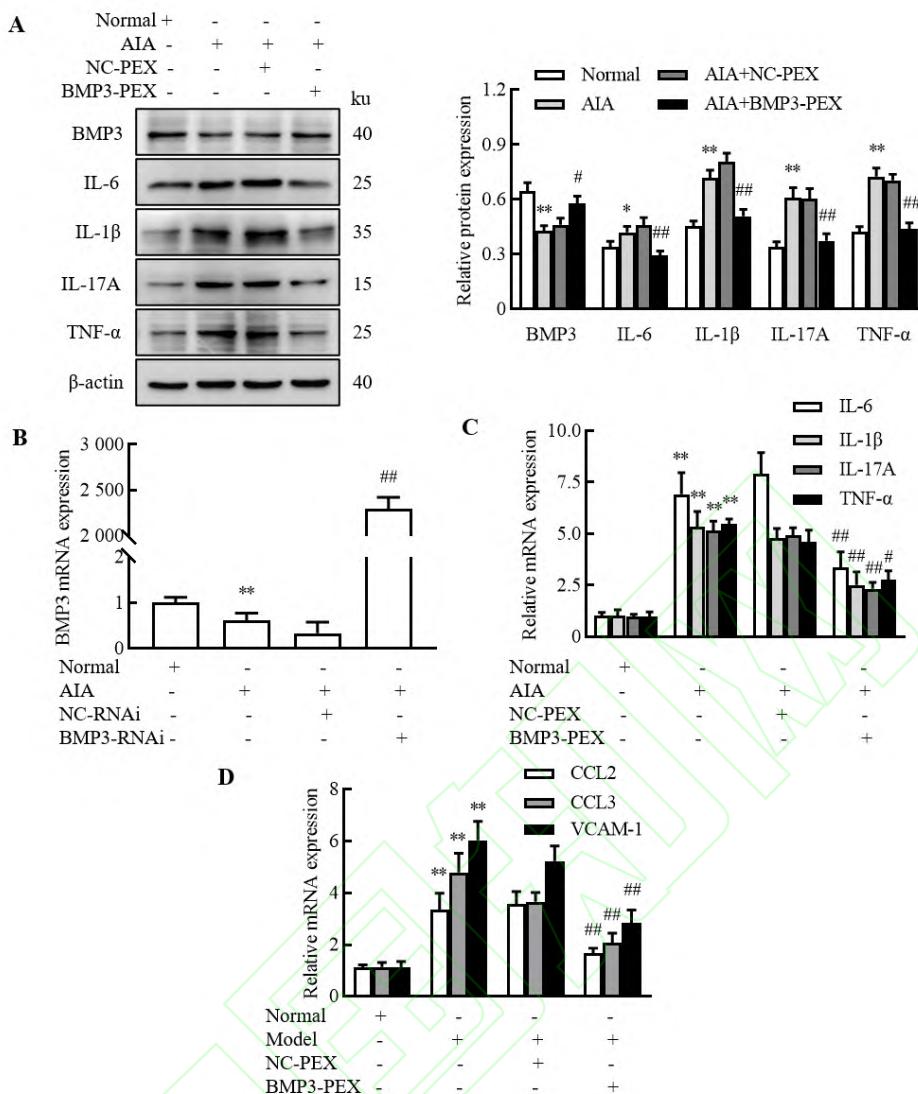


图 5 过表达 BMP3 对 AIA FLS 细胞中炎症因子、趋化因子的表达情况

Fig. 5 The effects of the overexpression of BMP3 on the expression of inflammatory factors and chemokines in AIA FLS

A: Protein expression of BMP3 and inflammatory factors in FLS after overexpression of BMP3 detected by Western blot; B, C: mRNA expression of BMP3 and inflammatory factors in FLS after overexpression of BMP3 detected by qRT-PCR; D: mRNA expression of chemokines in FLS after overexpression of BMP3 detected by qRT-PCR; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ vs Normal group; # $P < 0.05$, ## $P < 0.01$ vs NC-PEX group.

2.6 腺病毒体内诱导 BMP3 过表达对 AIA 大鼠关节炎的影响 基于体外实验证实 BMP3 具有抗炎作用，为了研究 BMP3 在 AIA 大鼠体内滑膜组织中的作用，将携带 BMP3 的腺病毒（Ad-BMP3）注射到 AIA 大鼠的膝关节内以诱导 BMP3 的过表达。结果显示，Ad-BMP3 组大鼠足爪肿胀程度较 Ad-NC 对照组减

轻，如图 6A 所示。组织病理学分析表明，Ad-BMP3 组减少了 AIA 大鼠滑膜组织中的炎性细胞浸润和滑膜增生情况，如图 6B 所示。免疫组化结果表明，与注射 Ad-NC 一侧的滑膜组织相比，注射 Ad-BMP3 的滑膜组织中的 BMP3 表达更高，如图 6C 所示。Micro-CT 对大鼠右后爪骨破坏情况进行分析结果表明，右后爪 CT 片显示典型的 AIA 改变（正常组除外），包括关节破坏、关节移位和覆盖整个踝关节区域的不规则骨增生，如图 6D 所示。因此，实验结果证实了关节腔内注射 Ad-BMP3 诱导的 BMP3 过表达能够缓解 AIA 大鼠的滑膜炎症，BMP3 通过调控 FLS 细胞功能在关节炎治疗中发挥核心作用。

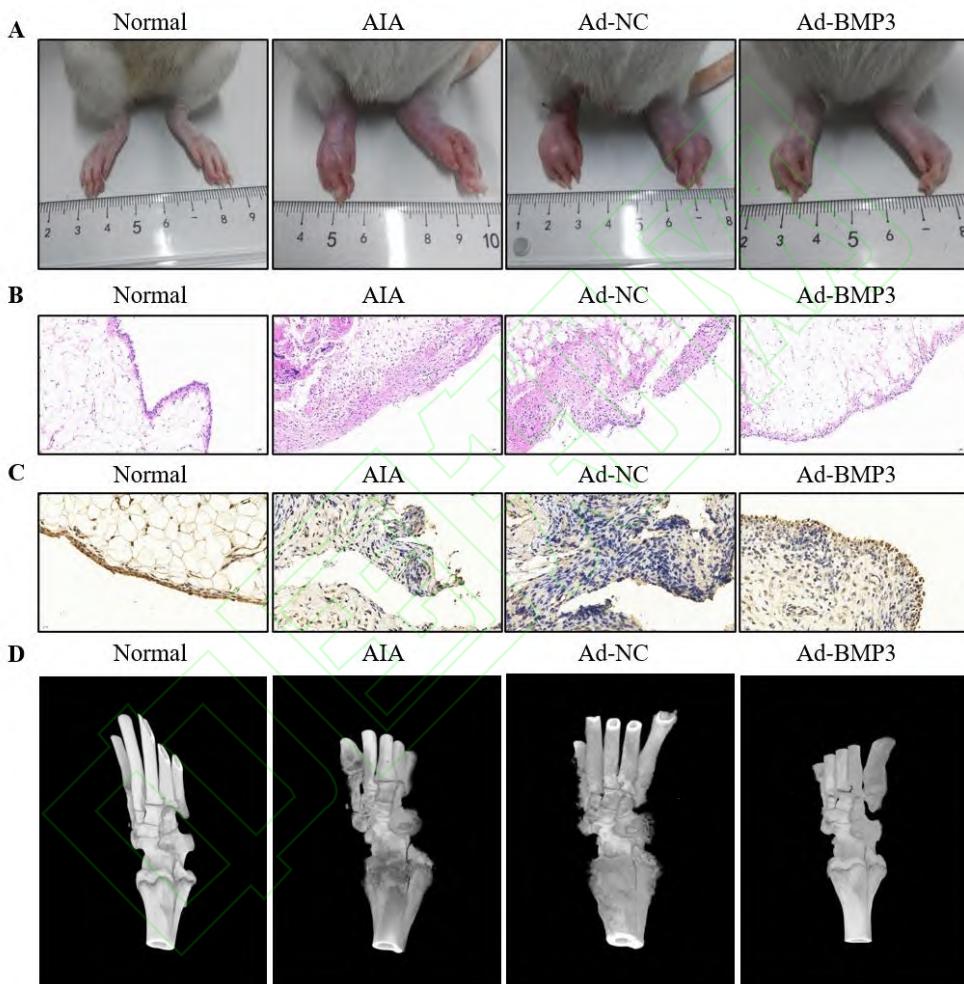


图 6 腺病毒体内诱导 BMP3 过表达对 AIA 大鼠关节炎严重程度的影响 $\times 20$

Fig. 6 The effects of *in vivo* induction of BMP3 overexpression by adenovirus on the severity in AIA rats

$\times 20$

A: Changes in foot and claw morphology after administration of Ad-BMP3; B: Representative pictures of HE staining showing the effects of Ad-BMP3 on inflammatory cell infiltration in AIA synovial tissue; C: Representative pictures of IHC-BMP3 staining in synovium after administration of Ad-BMP3; D: Representative

pictures showing bone destruction in the right hind paw of rats, imaged by Micro-CT.

3 讨论

RA 是一种以慢性滑膜炎症、进行性关节破坏为特征的全身性自身免疫性疾病。其病理特征主要表现为滑膜组织异常增生、炎性细胞浸润以及血管翳形成，最终导致不可逆的关节损伤和功能障碍^[1-2]。在 RA 复杂的发病机制中，多种免疫细胞共同参与了疾病的发生发展过程，如 T 细胞、B 细胞^[11]、FLS 细胞^[7]。其中，活化的 FLS 细胞通过分泌大量促炎细胞因子（如 IL-6、TNF- α ）、趋化因子（如 CCL2、CXCL8）、MMPs 以及细胞黏附分子（如 VCAM-1），不仅促进了局部炎症反应的持续放大，还直接参与了关节软骨和骨的侵蚀破坏^[6, 12-14]。尽管 FLS 细胞在 RA 发病中的关键作用已得到广泛认可，但目前对其异常活化的调控机制仍缺乏系统认识。因此，深入解析 FLS 细胞功能异常的分子机制，寻找特异性干预靶点，对 RA 的治疗具有重要意义。

BMP3 作为成骨 BMP 家族的拮抗剂，在骨骼发育^[15]和肿瘤^[16]发生中发挥多重调控作用，既往研究^[17]报道其可抑制结直肠癌细胞增殖。本研究表明，AIA 大鼠滑膜组织中 BMP3 表达低于正常组，提示 BMP3 可能参与关节炎的病理进程。BMP3 的表达缺失程度与关节炎的严重程度呈负相关，提示 BMP3 可能作为重要的内源性保护因子参与关节炎的病理进程，这为理解 BMP3 在关节炎中的保护作用提供了新的临床证据。

在 RA 的发病机制中，多种促炎因子网络共同参与了疾病的发生发展。本研究表明，通过 RNAi 小干扰敲低 BMP3 表达后，AIA 大鼠来源的 FLS 细胞表现出促炎表型：IL-6、IL-1 β 、IL-17A 等关键炎症因子的 mRNA 表达水平上调，同时 CCL2、CCL3 等趋化因子及 VCAM-1 黏附分子的表达也增加。相反，BMP3 过表达实验证实，过表达 BMP3 的表达水平可使这些炎症介质降低，能够缓解滑膜炎症。BMP3 过表达不仅逆转了 AIA FLS 细胞的炎症反应，其抑制效果甚至使部分指标恢复至接近正常组水平，这些结果与沉默 BMP3 实验相互印证，共同证实 BMP3 通过调控 FLS 细胞的炎症反应参与关节炎的病理过程。关节腔注射 Ad-BMP3 不仅改善了 AIA 大鼠的关节肿胀和滑膜炎症，还使血清中 IL-6、IL-1 β 等细胞因子水平下降。这些结果系统性地表明了 BMP3 通过调控 FLS 细胞的炎症反应参与 RA 的病理过程，其作用机制可能涉及对多个炎症相关信号通路的共同调控，为其临床应用提供了实验基础。

本研究表明，在 RA 病理微环境中 BMP3 低表达。通过 Western blot 和 qRT-PCR 分析显示，AIA 大鼠滑膜组织中 BMP3 蛋白和 mRNA 表达水平低于正常组。免疫荧光染色进一步证实，BMP3 的表达缺失主要定位于滑膜衬里层的活化 FLS 细胞区域。体外实验揭示这一现象可能与炎症因子网络的负反馈调节有关。这种双向调控关系提示，炎症微环境抑制 BMP3 表达，而 BMP3 的缺失又进一步促进炎症因子分

泌，最终导致疾病持续进展。这一结果为理解 RA 慢性化的分子机制提供了新的理论依据。

本研究也存在一定的局限性。尽管通过体内外实验系统揭示了 BMP3 在 AIA 大鼠模型中抑制 FLS 细胞炎症反应的作用，但其具体作用机制有待进一步研究。此外，本研究使用的 AIA 模型虽能模拟 RA 的炎症和骨侵蚀特征，但其免疫机制与人类 RA 存在差异，因此，BMP3 在人类 RA 中的具体作用仍需进一步验证，这将是未来进一步研究的方向。

参考文献

- [1] Mueller A L, Payandeh Z, Mohammadkhani N, et al. Recent advances in understanding the pathogenesis of rheumatoid arthritis: new treatment strategies[J]. Cells, 2021, 10(11):3017. doi:10.3390/cells10113017.
- [2] van Delft M A M, Huizinga T W J. An overview of autoantibodies in rheumatoid arthritis[J]. J Autoimmun, 2020, 110: 102392. doi:10.1016/j.jaut.2019.102392.
- [3] Lee H R, Yoo S J, Kim J, et al. LKB1 regulates inflammation of fibroblast-like synoviocytes from patients with rheumatoid arthritis via AMPK-dependent SLC7A11-NOX4-ROS signaling[J]. Cells, 2023, 12(9): 1263. doi:10.3390/cells12091263.
- [4] Miyabe Y, Lian J, Miyabe C, et al. Chemokines in rheumatic diseases: pathogenic role and therapeutic implications[J]. Nat Rev Rheumatol, 2019, 15(12): 731-46. doi:10.1038/s41584-019-0323-6.
- [5] Bottini A, Wu D J, Ai R, et al. PTPN14 phosphatase and YAP promote TGF β signalling in rheumatoid synoviocytes[J]. Ann Rheum Dis, 2019, 78(5): 600-9. doi:10.1136/annrheumdis-2018-213799.
- [6] Qin Y, Cai M L, Jin H Z, et al. Age-associated B cells contribute to the pathogenesis of rheumatoid arthritis by inducing activation of fibroblast-like synoviocytes via TNF- α -mediated ERK1/2 and JAK-STAT1 pathways[J]. Ann Rheum Dis, 2022, 81(11): 1504-14. doi:10.1136/ard-2022-222605.
- [7] Nygaard G, Firestein G S. Restoring synovial homeostasis in rheumatoid arthritis by targeting fibroblast-like synoviocytes[J]. Nat Rev Rheumatol, 2020, 16(6): 316-33. doi:10.1038/s41584-020-0413-5.
- [8] Ganjoo S, Puebla-Osorio N, Nanez S, et al. Bone morphogenetic proteins, activins, and growth and differentiation factors in tumor immunology and immunotherapy resistance[J]. Front Immunol, 2022, 13: 1033642. doi:10.3389/fimmu.2022.1033642.
- [9] Wu M, Wu S, Chen W, et al. The roles and regulatory mechanisms of TGF- β and BMP signaling in bone and cartilage development, homeostasis and disease[J]. Cell Res, 2024, 34(2): 101-23. doi:10.1038/s41422-023-00918-9.
- [10] Matzelle M M, Shaw A T, Baum R, et al. Inflammation in arthritis induces expression of BMP3, an inhibitor of bone formation[J]. Scand J Rheumatol, 2016, 45(5): 379-83. doi:10.3109/03009742.2015.1126347.
- [11] Wu F, Gao J, Kang J, et al. B cells in rheumatoid arthritis: pathogenic mechanisms and treatment prospects[J]. Front Immunol, 2021, 12: 750753. doi:10.3389/fimmu.2021.750753.
- [12] Jia Y, Feng B, Ji X, et al. Complement factor H attenuates TNF- α -induced inflammation by upregulating EIF3C in rheumatoid arthritis[J]. J Transl Med, 2023, 21(1): 846.

doi:10.1186/s12967-023-04730-2.

- [13] Fan W, Xu Z, Liang S, et al. MLL3 inhibits apoptosis of rheumatoid arthritis fibroblast-like synoviocytes and promotes secretion of inflammatory factors by activating CCL2 and the NF- κ B pathway[J]. Inflammation, 2021, 44(5): 1803-14. doi:10.1007/s10753-021-01459-2.
- [14] Park J K, Shon S, Yoo H J, et al. Inhibition of histone deacetylase 6 suppresses inflammatory responses and invasiveness of fibroblast-like-synoviocytes in inflammatory arthritis[J]. Arthritis Res Ther, 2021, 23(1): 177. doi:10.1186/s13075-021-02561-4.
- [15] Banovac I, Grgurevic L, Rumenovic V, et al. BMP3 affects cortical and trabecular long bone development in mice[J]. Int J Mol Sci, 2022, 23(2): 785. doi:10.3390/ijms23020785.
- [16] Chen X R, Wang J W, Li X, et al. Role of BMP3 in progression of gastric carcinoma in Chinese people[J]. World J Gastroenterol, 2010, 16(11): 1409-13. doi:10.3748/wjg.v16.i11.1409.
- [17] Wen J, Liu X, Qi Y, et al. BMP3 suppresses colon tumorigenesis via ActRIIB/SMAD2-dependent and TAK1/JNK signaling pathways[J]. J Exp Clin Cancer Res, 2019, 38(1): 428. doi:10.1186/s13046-019-1435-1.

