

PDRN在医学健康领域的研究与应用趋势

黄宇石*

成都岷山创芯生物芯片科技有限公司，四川 成都

收稿日期：2025年9月15日；录用日期：2025年10月30日；发布日期：2025年11月7日

摘要

多聚脱氧核糖核苷酸(PDRN)是低分子量短链DNA片段，多来源于鱼类生殖细胞，不具备有意义的遗传信息，是近期中国再生医学与高端护肤品的热点研发对象。本综述梳理其腺苷受体激动剂、核酸补救合成促进组织再生的两大核心机制、讨论其在皮肤、关节、神经再生等领域的应用现状，分析新产品开发的可能方向，探讨其转化应用仍面临的核心障碍，为PDRN更进一步的技术研发与产品开发提供参考。

关键词

多聚脱氧核糖核苷酸，再生医学，组织修复

PDRN: Research and Application Trends in Medical and Health Field

Yushi Huang*

Minshan Biochip Innovation Technology Ltd., Chengdu Sichuan

Received: September 15, 2025; accepted: October 30, 2025; published: November 7, 2025

Abstract

Polydeoxyribonucleotide (PDRN) is a short-chain DNA fragment with low molecular weight, mainly derived from fish sperms and without meaningful genetic information. It has recently become a research focus in regenerative medicine and high-end skincare products in China. This review combs through its two core mechanisms for promoting tissue regeneration-namely, acting as an adenosine receptor agonist and facilitating the salvage pathway of nucleic acids-discusses the current status of its research and application in fields such as skin, joint, and nerve regeneration, analyzes potential directions for the development of new products, and explores the core obstacles still faced in its

*通讯作者: yushihuang430@outlook.com。

文章引用: 黄宇石. PDRN 在医学健康领域的研究与应用趋势[J]. 生物医学, 2025, 15(6): 1095-1101.
DOI: 10.12677/hjbm.2025.156118

translational application. This review provides references for further technological research and product development of PDRN.

Keywords

Polydeoxyribonucleotide, Regenerative Medicine, Tissue Repairing

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

多聚脱氧核糖核苷酸(Polydeoxyribonucleotide 或 PDRN)属于脱氧核糖核苷酸(DNA)类物质,但与基因组 DNA 有显著区别。站在医学应用的角度,它特指一种天然来源的经过特殊加工处理的短链 DNA 片段。站在化学的角度,PDRN 特指分子量在 50 到 1500 KDa 的低分子量 DNA (以双链 DNA 分子量计算约 80 到 2500 个碱基对)[1]。站在分子结构的角度,PDRN 由脱氧核糖核苷酸(嘌呤核苷酸与嘧啶核苷酸)通过磷酸二酯键连接形成的含有双螺旋空间结构的线性聚合物构成。PDRN 与 DNA 最显著的区别在于前者不再储存有可用的、有意义的遗传信息。早期研究中,PDRN 多提取自人胎盘[2],但随后更广泛的研究与应用中,PDRN 多提取自虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*, Salmon trout)或驼背大麻哈鱼(*Oncorhynchus keta*, Chum Salmon)的生殖细胞。PDRN 主要通过促进组织修复、减轻炎症反应和增强再生能力发挥作用,是典型的内源性再生促进剂。在人口老龄化加剧的背景下,其多功能的特性使得 PDRN 成为近期再生医学和高端护肤领域最炙手可热的成分之一。其主要研究与应用领域涵盖了皮肤修复与年轻化、关节炎治疗、神经再生等场景。

本综述目的在于系统性梳理 PDRN 多途径发挥生理作用的分子机制,全面总结其在组织再生等领域的基础研究成果与临床应用进展。同时,结合中国医疗产品对安全性、实用性、产业化的开发导向,分析 PDRN 各类型制剂及联合给药系统等方面的可能产品形态,为中国 PDRN 相关产品研发与临床转化提供参考。

2. PDRN 的生物学基础与作用机制

在早期的研究中,Thellung 等人通过细胞实验,已初步证明 PDRN 和腺苷(adenosine)均可以提高原代培养的人皮肤成纤维细胞的生长速率,进一步地通过不同腺苷受体位点激动剂与拮抗剂的使用,他们发现 PDRN 的作用位点很可能是细胞膜表面的腺苷 A2A 受体[3]。

Galeano 等人的研究表明在糖尿病小鼠的创伤模型上的研究表明注射 PDRN 后实验动物血管内皮生长因子(VEGF)的 mRNA 表达水平出现了明显上升,同步伴随着 VEGF 蛋白含量在伤口中的提高、CD31 等促血管新生因子表达增加等效果[4]。此外,小鼠伤口的愈合得到了提升,断裂强度明显增大。更为重要的是,通过添加腺苷 A2A 受体的拮抗剂,PDRN 对伤口愈合的促进作用得到了完全抑制,很清晰地证明 PDRN 可以通过激活腺苷 A2A 受体来刺激血管新生和伤口愈合。

类似的,Irrera 等人也通过设置拮抗剂组的方式证明 PDRN 可以激活腺苷 A2A 受体,实现脊髓损伤模型小鼠脱髓鞘程度的减轻以及运动功能障碍的缓解[5]。在这项研究中,作者也观察到了 PDRN 减少促炎的肿瘤坏死因子 TNF- α 和白细胞介素-1 β (IL-1 β)的释放,下调了促凋亡蛋白 BAX 的表达,并维持了抗

凋亡蛋白 Bcl-2 的浓度水平。更进一步地, 作者证明 PDRN 通过激活腺苷受体从而激活了 Wnt/ β -连环蛋白(Wnt/ β -catenin)通路来减少凋亡活动。在此基础上, Irrera 等人进一步研究了 PDRN 具有生物活性的机制, 指出 PDRN 能通过腺苷 A_{2A} 受体的激活, 在增强 Wnt/ β -catenin 信号通路的同时抑制核因子- κ B (NF- κ B)通路, 以一种双重作用的模式, 实现对银屑病的治疗[6]。

由于血浆以及细胞膜表面均存在 DNA 核酸酶, 基于上述研究以及大量类似研究的结果, 我们可以很明确 PDRN 必定是在体内经过降解形成核苷和核苷酸后才发挥了其主要的生物学功能——与腺苷 A_{2A} 受体结合并对其进行激活。总结的 PDRN 作用机制图可以参见图 1, 其较为详细地表明了 PDRN 被降解及转化为腺苷后通过激活 A_{2A} 受体引导 cAMP 含量的上升进而调控下游关键信号通路的全过程。

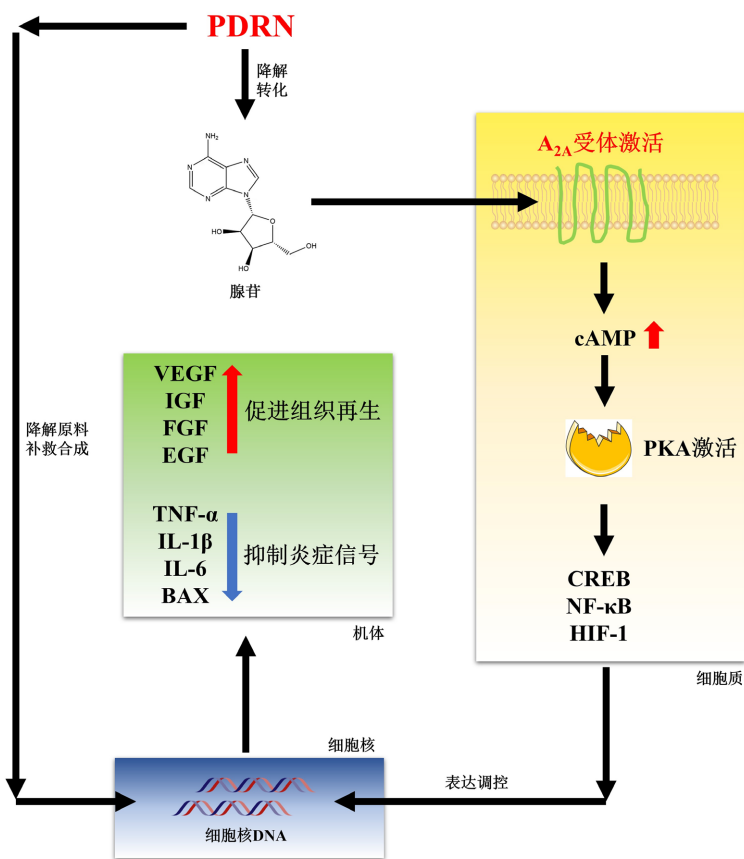


Figure 1. PDRN mechanism of action in Vivo

图 1. PDRN 体内作用机制图

另一方面, 同样是在细胞试验中, Belletti 等人研究了 PDRN 对人真皮成纤维细胞免受 UVB 诱导 DNA 损伤的保护作用及相关机制[7]。通过对细胞施加 600 mJ/cm² 的 UVB 照射, 作者发现照射后立即向细胞培养体系中添加 100 μg/mL 的 PDRN 可在最初 24 小时强烈激活 DNA 损伤应答的核心调控蛋白 p53 的表达并降低 UVB 诱导 DNA 损伤的标志性产物环丁烷嘧啶二聚体(CPDs)的水平。作者认为 PDRN 能通过为 UVB 损伤细胞提供脱氧核苷三磷酸前体的形式以促进补救合成途径加速 DNA 修复。事实上, 核酸补救合成途径有助于回收 DNA 和 RNA 降解产生的碱基与核苷, 进而将它们合成回核苷酸并最终重新整合到 DNA 中。PDRN 通过核酸酶酶解作用生成核苷酸与核苷, 除了激活了腺苷 A_{2A} 受体外, 也为受损或新生细胞 DNA 的合成提供了丰富且及时的原料支持, 从而促进组织更快再生及伤口愈合。但值得注意的

是, 现有报道缺乏对 PDRN 通过核酸补救合成途径参与机体再生修复过程的系统性研究, 研发人员在评估和评价 PDRN 生物学效果的时候因谨慎对待该机制所能带来的实际效果。

3. PDRN 应用与产品研发趋势

3.1. PDRN 的临床潜在应用

基于 PDRN (降解产物)腺苷激动剂以及核酸补救合成原料提供剂的特性, PDRN 以组织修复为核心概念, 在皮肤、肌肉、神经、关节、骨、内脏器官等多组织或器官层面得到了大量的应用和临床研究[8]。从剂型的角度涵盖了注射剂、凝胶剂、敷料、纳米制剂等多个类型。本章节将综述有代表意义的 PDRN 转化研究工作, 为更新产品的开发提供参考。

3.1.1. 骨关节炎

Back 等人的研究表明在骨性关节炎的细胞模型中 PDRN 能显著下调 IL-1 β 、IL-6、IL-8 等促炎性细胞因子的基因表达, 因此能在骨性关节炎的疾病进展中发挥抗炎作用[9]。Kim 等人通过荟萃分析, 评估了膝关节腔内 PDRN 注射与透明质酸(hyaluronic acid, HA)注射的有效性与安全性[10]。他们的研究纳入了 5 项随机对照研究。结果显示, 注射后 1 个月和 2 个月 PDRN 组患者的疼痛改善程度显著优于 HA 组, 但 4 个月后两组患者的疼痛改善无显著差异。而且在所有时间点 PDRN 组与 HA 组的功能评分也都没有显著差异。该荟萃分析表明, 从患者获益的角度, PDRN 表现出的优势相对已有治疗手段比较有限, 可能原因在于 PDRN 作为腺苷受体激动剂, 一旦降解耗尽后将无法再发挥相应作用。但 Yoon 等人报道了其开展的 PDRN 联合 HA 进行关节腔注射来评估其效果的前瞻性临床试验[11]。在该研究中, 患者经历了连续三周每周一次的注射, 在持续六个月的评估中联合治疗组患者相比 HA 组在各量表的评估下均有显著性提高, 且未发生任何不良事件。对比两个临床试验结果, PDRN 联合 HA 注射有效的可能原因是 HA 作为一个高分子, 与 PDRN 共同注射后在一定程度上避免了 PDRN 被核酸酶的快速降解, 延长了 PDRN 的存在时间。基于上述研究 PDRN 在膝骨关节炎中或类似应用中可以更多地考虑联合用药或者复方制剂的形式尽量减缓 PDRN 的降解, 延长其持续作用时间。

3.1.2. 缺血性疾病

Ko 等人的研究表明, 在沙鼠脑缺血模型中, PDRN 腹腔注射后可通过抑制脑缺血状态下促炎细胞因子的产生, 使得丝裂原活化蛋白激酶(mitogen-activated protein kinase, MAPK)信号通路相关因子失活从而改善短期记忆障碍[12]。Kim 等人通过选择性去血管化构建了大鼠缺血性结肠炎模型, 评估了 PDRN 用于治疗缺血性结肠炎的可行性[13]。他们发现, 大鼠造模后出现了缺血区域皮温升高、结肠黏膜损伤、胶原明显沉积等典型缺血性结肠炎的特征, 同时伴有各类炎症因子(TNF- α 、IL-1 β 、IL-6)及 COX-2 表达上调、Bcl-2/Bax 比值下降、磷酸化 ERK1/2 表达受抑等指标变化。此外, 结肠细胞凋亡也明显增加。但通过腹腔连续 21 天注射 PDRN 注射液, 治疗组结肠黏膜损伤显著减轻, 炎症因子及 COX-2 表达降低, 细胞凋亡也受到了抑制。这类研究报道指出了 PDRN 治疗针对内脏器官疾病的可能效果与方式, 有强烈的指导意义。但是这两项动物实验中, PDRN 均需要连续注射数天才能发挥治疗效果(前述膝骨关节炎中, 给药频率仅一周一次), 其过长的治疗过程对于临床患者的依从性将会是巨大的考验, 短期大剂量密集给药的安全性也存疑。PDRN 的相关临床试验适应症中并未能检索到缺血性疾病的存在, 背后的可能原因不容忽视。

3.1.3. 皮肤修复

根据 PDRN 在糖尿病小鼠模型上良好的促进伤口愈合的效果, Squadrito 团队对 PDRN 治疗中轻度糖

尿病足溃疡的效果开展了临床试验。通过肌内注射联合病灶周围注射给药,在8周的治疗周期后,和安慰剂组相比 PDRN 治疗组无论是在足溃疡完全愈合率还是伤口完全闭合所需时间以及伤口表面上皮化程度上均表现出了具有统计学意义上的显著效果[14]。

Caridi 等人则通过临床实验表明 PDRN 复合 HA 的凝胶在治疗下肢静脉溃疡上有着比单纯使用 HA 更好的效果[15]。通过连续6周每周2次在患处涂抹相应凝胶,复合凝胶组实现了复合组比对照组 60% vs 22%的患肢溃疡完全愈合效果以及溃疡平均面积减少 67% vs 34%的提高。但比较遗憾的是该研究并未对比 PDRN 单独使用与 HA 凝胶的效果优劣,或 PDRN 凝胶与 HA 凝胶的效果差异。类似前述观点,在市场已有成熟促进皮肤修复的医疗器械的存在下,研究人员应谨慎评估 PDRN 单独使用的效果。Kim 等人将海星作为 PDRN 来源,将提取纯化的 PDRN 和聚己内酯、明胶共混经由经典纺丝技术制备了纳米纤维构成的伤口敷料[16]。他们研究了敷料对于人真皮成纤维细胞和人角质形成细胞的细胞毒性并利用全层皮肤缺损的小鼠进行了体内实验。结果表明,含有 PDRN 的敷料能增强胶原的产生,加速伤口的再上皮化,实现伤口更快地愈合。他们的报道无疑为 PDRN 在皮肤疾病的治疗与产品开发提供了有极强补充意义的思路。当然除了可以与各类生物材料相互配合外,PDRN 还可能与诸如富血小板血浆[17]、间充质基质细胞[18]等新兴生物制品配合,进而开发出有价值与差异化的产品。

3.1.4. 皮肤抗衰

PDRN 在化妆品领域的应用已经有丰富的产品推向市场,但 PDRN 作为一种水溶性生物活性分子,其穿透皮肤角质层的能力不是很理想。因此,增强其透皮能力将更有利于其发挥治疗效果。He 等人报道了将 PDRN 包封到纳米脂质体内的研究,其制备的 PDRN 纳米脂质体平均粒径 $125 \pm 1 \text{ nm}$ 、多分散指数 (PDI) 0.12 ± 0.02 、PDRN 包封率高达 81.3% [19]。通过体外试验,他们报道 PDRN 纳米脂质体的透皮渗透量和皮肤滞留量是游离 PDRN 的两倍以上。更贴近实际应用的是其制备的纳米脂质体 zeta 电位值很利于脂质体间相互排斥,多重光散射仪实验数据预估货架期可高达三年。Liu 等人则更系统地报道了利用静电吸附原理将亚精胺与 PDRN 凝聚并构建出核酸递送载体纳米粒用于 PDRN 的透皮递送[20]。经过工艺优化,他们制备出了平均粒径 $201.9 \pm 5.3 \text{ nm}$ 的 PDRN 纳米粒。体外试验中该纳米粒可在成纤维细胞周围富集并更易被巨噬细胞吞噬、诱导细胞线粒体 ATP 表达量提升、抑制多个炎症因子的表达。此外,其在体外和活体实验中相比 PDRN 溶液能达到翻倍的透皮递送效果。更进一步地,该组研究人员还通过临床试验,证明 PDRN 纳米粒从多层面改善皮肤结构与功能,为 PDRN 药物递送及化妆品应用提供了理论与实验依据。

3.2. PDRN 产品研发关注点

需要注意的是,中国国家药品监督管理局医疗器械标准管理中心对外发布的《2023 年第一次医疗器械分类界定结果汇总》中将两款含 PDRN 的注射用透明质酸钠复合溶液作为以医疗器械为主的药械组合产品监管。鉴于通常的注射用透明质酸钠溶液多为三类医疗器械,上述两款产品被界定为以械为主的药械组合产品的主要原因是其添加了 PDRN。这一结果很明确地表明监管机构是将 PDRN 作为药品在对待。事实上,这两款产品均申明了其添加的 PDRN 具有促进缓解炎症、促进细胞增殖生长、为细胞生长提供营养物质等作用,也是其作为药品而非器械在发挥治疗功能的证据。此外,参考国外已获批上市的药品去纤苷(Defibrotide)注射液,其本质也是基于单链脱氧寡核苷酸混合物的腺苷受体激动剂,与 PDRN 的作用机制及位点存在高度相似性。因此,PDRN 的产品研发人员因谨慎对待 PDRN 类产品的研发周期与所需投入。

PDRN 通常会在提取过程中经历高温灭菌、分子量酸解降低、沉淀分离等操作的处理[21],因此可以得到 DNA 含量 > 95%的活性原料。同时因上述工艺中对蛋白质具有破坏性的操作步骤,成品 PDRN 几

乎不再含有具有药理活性的蛋白质和多肽[1]。产品的安全性在逻辑层面上具有比较明确和清晰的基础。但要注意的是 PDRN 因其三文鱼来源的特殊性,其产量与质量受动物供体影响较大。从原料研发的角度,近期有大量的研究在关注如植物[22]、藻类[23]、乃至生物合成来源的 PDRN [24],其对应的提取工艺以及种属来源对 PDRN 安全性与生物学效果的影响仍需要保持关注。

4. 结论与展望

PDRN 以“内源性再生调节剂”为核心定位,凭借双重作用机制(腺苷 A2A 受体激活搭配 DNA 补救代谢途径)构建了区别于传统外源性疗法的修复逻辑——既通过信号通路精准调控炎症/修复状态,又为损伤细胞补充代谢底物,实现顺应机体规律的主动修复。

尽管 PDRN 的研究已取得阶段性突破,但其转化应用仍面临三重核心障碍:其一,临床证据体系尚不健全,现有研究多为小样本单中心实验,缺乏多中心、大样本长期随访数据,且针对很多疾病的适应症验证仍停留在动物实验阶段。其二,产业化与标准化衔接不足,虽已形成三文鱼生殖细胞 DNA 提取的标准化工艺,但面向不同临床场景的剂型开发(如神经损伤所需的靶向给药系统)、剂量个体化方案(如基于患者 A2A 受体表达水平的精准给药)尚未成熟。且部分地区存在的原料供应波动与成本控制问题,制约了其规模化临床应用。其三,作用机制细节仍需深化,腺苷 A2A 受体激活后下游信号通路、个体差异(如年龄、基础疾病对 PDRN 疗效的影响)的分子机制尚未完全阐明,这些研究的缺乏限制了对其疗效与安全性的精准把控。在产业发展层面,其高安全性、相对可控的制备成本特性,契合中国医疗产品安全性优先、实用性导向的开发原则。若能突破剂型与剂量标准化瓶颈,有望成为中国再生医学领域兼具学术价值与产业潜力的代表性产品,为全球内源性再生调节剂的研发与转化提供中国实践参考。综上,PDRN 虽面临转化挑战,未来随着研究的深入与转化的推进,有望成为连接基础医学与临床治疗的关键纽带。

参考文献

- [1] Squadrito, F., Bitto, A., Irrera, N., Pizzino, G., Pallio, G., Minutoli, L., *et al.* (2017) Pharmacological Activity and Clinical Use of PDRN. *Frontiers in Pharmacology*, **8**, Article 224. <https://doi.org/10.3389/fphar.2017.00224>
- [2] Tonello, G., Daglio, M., Zaccarelli, N., Sottofattori, E., Mazzei, M. and Balbi, A. (1996) Characterization and Quantitation of the Active Polynucleotide Fraction (PDRN) from Human Placenta, a Tissue Repair Stimulating Agent. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, **14**, 1555-1560. [https://doi.org/10.1016/0731-7085\(96\)01788-8](https://doi.org/10.1016/0731-7085(96)01788-8)
- [3] Thellung, S., Florio, T., Maragliano, A., Cattarini, G. and Schettini, G. (1999) Polydeoxyribonucleotides Enhance the Proliferation of Human Skin Fibroblasts: Involvement of A2 Purinergic Receptor Subtypes. *Life Sciences*, **64**, 1661-1674. [https://doi.org/10.1016/s0024-3205\(99\)00104-6](https://doi.org/10.1016/s0024-3205(99)00104-6)
- [4] Galeano, M., Bitto, A., Altavilla, D., Minutoli, L., Polito, F., Calò, M., *et al.* (2008) Polydeoxyribonucleotide Stimulates Angiogenesis and Wound Healing in the Genetically Diabetic Mouse. *Wound Repair and Regeneration*, **16**, 208-217. <https://doi.org/10.1111/j.1524-475x.2008.00361.x>
- [5] Irrera, N., Arcoraci, V., Mannino, F., Vermiglio, G., Pallio, G., Minutoli, L., *et al.* (2018) Activation of A2A Receptor by PDRN Reduces Neuronal Damage and Stimulates Wnt/ β -Catenin Driven Neurogenesis in Spinal Cord Injury. *Frontiers in Pharmacology*, **9**, Article 506. <https://doi.org/10.3389/fphar.2018.00506>
- [6] Irrera, N., Bitto, A., Vaccaro, M., Mannino, F., Squadrito, V., Pallio, G., *et al.* (2020) PDRN, a Bioactive Natural Compound, Ameliorates Imiquimod-Induced Psoriasis through NF- κ B Pathway Inhibition and Wnt/ β -Catenin Signaling Modulation. *International Journal of Molecular Sciences*, **21**, Article 1215. <https://doi.org/10.3390/ijms21041215>
- [7] Belletti, S., Uggeri, J., Gatti, R., Govoni, P. and Guizzardi, S. (2007) Polydeoxyribonucleotide Promotes Cyclobutane Pyrimidine Dimer Repair in UVB-Exposed Dermal Fibroblasts. *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine*, **23**, 242-249. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0781.2007.00320.x>
- [8] Oh, N., Hwang, J., Kang, M.S., Yoo, C., Kwak, M. and Han, D. (2025) Versatile and Marvelous Potentials of Polydeoxyribonucleotide for Tissue Engineering and Regeneration. *Biomaterials Research*, **29**, Article 183. <https://doi.org/10.34133/bmr.0183>
- [9] Baek, A., Kim, M., Kim, S.H., Cho, S. and Kim, H.J. (2018) Anti-Inflammatory Effect of DNA Polymeric Molecules in a Cell Model of Osteoarthritis. *Inflammation*, **41**, 677-688. <https://doi.org/10.1007/s10753-017-0722-2>

- [10] Kim, M.S., Cho, R.K. and In, Y. (2019) The Efficacy and Safety of Polydeoxyribonucleotide for the Treatment of Knee Osteoarthritis. *Medicine*, **98**, e17386. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000017386>
- [11] Yoon, S., Kang, J.J., Kim, J., Park, S. and Kim, J.M. (2019) Efficacy and Safety of Intra-Articular Injections of Hyaluronic Acid Combined with Polydeoxyribonucleotide in the Treatment of Knee Osteoarthritis. *Annals of Rehabilitation Medicine*, **43**, 204-214. <https://doi.org/10.5535/arm.2019.43.2.204>
- [12] Ko, I., Jin, J., Hwang, L., Kim, S., Kim, C., Jeon, J.W., *et al.* (2021) Adenosine A2A Receptor Agonist Polydeoxyribonucleotide Ameliorates Short-Term Memory Impairment by Suppressing Cerebral Ischemia-Induced Inflammation via MAPK Pathway. *PLOS ONE*, **16**, e0248689. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248689>
- [13] Kim, S., Ko, I., Jin, J., Hwang, L., Kim, C., Kim, S., *et al.* (2020) Polydeoxyribonucleotide Exerts Therapeutic Effect by Increasing VEGF and Inhibiting Inflammatory Cytokines in Ischemic Colitis Rats. *BioMed Research International*, **2020**, Article 2169083. <https://doi.org/10.1155/2020/2169083>
- [14] Squadrito, F., Bitto, A., Altavilla, D., Arcoraci, V., *et al.* (2014) The Effect of PDRN, an Adenosine Receptor A2A Agonist, on the Healing of Chronic Diabetic Foot Ulcers: Results of a Clinical Trial. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, **99**, E746-E753.
- [15] De Caridi, G., Massara, M., Acri, I., Zavettieri, S., Grande, R., Butrico, L., *et al.* (2016) Trophic Effects of Polynucleotides and Hyaluronic Acid in the Healing of Venous Ulcers of the Lower Limbs: A Clinical Study. *International Wound Journal*, **13**, 754-758. <https://doi.org/10.1111/iwj.12368>
- [16] Kim, T.H., Kim, S.C., Park, W.S., Choi, I.W., *et al.* (2023) PCL/Gelatin Nanofibers Incorporated with Starfish Polydeoxyribonucleotides for Potential Wound Healing Applications. *Materials & Design*, **229**, Article 111912. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111912>
- [17] Lee, S., Zheng, Z., Kang, J., Kim, D., Oh, S.H. and Cho, S.B. (2015) Therapeutic Efficacy of Autologous Platelet-Rich Plasma and Polydeoxyribonucleotide on Female Pattern Hair Loss. *Wound Repair and Regeneration*, **23**, 30-36. <https://doi.org/10.1111/wrr.12250>
- [18] Yun, Y.G., Yeo, D., Shin, S., Shin, J., Lee, J.H. and Kim, H. (2024) Polydeoxyribonucleotide Enhances the Bioactivities of Stem Cells from Human Exfoliated Deciduous Teeth through Akt Activation. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, **739**, Article 150947. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2024.150947>
- [19] He, Y., Xu, L., Pei, X., Dong, Y. and Yang, X. (2025) Preparation of Polydeoxyribonucleotide Nanoliposomes and Their Applicability to Cosmetic Formulations. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, **26**. <https://doi.org/10.2174/0113892010353418250218064202>
- [20] Liu, Y., Hu, W., Pei, X., Zhu, J., Meng, H., Lyu, Y., *et al.* (2025) Polydeoxyribonucleotide-Spermidine Nanoparticles: Preparation, Characterization, and Verification of Skin Anti-Aging Efficacy. *International Journal of Biological Macromolecules*, **322**, Article 146984. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146984>
- [21] Nguyen, T.H., Wang, S. and Nguyen, V.B. (2024) Recent Advances on Polydeoxyribonucleotide Extraction and Its Novel Application in Cosmeceuticals. *International Journal of Biological Macromolecules*, **282**, Article 137051. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137051>
- [22] Lee, K., Lee, S., Wang, H., Lee, G., Kim, S., Ryu, Y., *et al.* (2023) Analysis of Skin Regeneration and Barrier-Improvement Efficacy of Polydeoxyribonucleotide Isolated from Panax Ginseng (C.A. Mey.) Adventitious Root. *Molecules*, **28**, Article 7240. <https://doi.org/10.3390/molecules28217240>
- [23] Kim, T.H., Heo, S.Y., Han, J.S. and Jung, W.K. (2023) Anti-Inflammatory Effect of Polydeoxyribonucleotides (PDRN) Extracted from Red Alga (*porphyra sp.*) (Ps-PDRN) in RAW 264.7 Macrophages Stimulated with *Escherichia coli* Lipopolysaccharides: A Comparative Study with Commercial PDRN. *Cell Biochemistry and Function*, **41**, 889-897. <https://doi.org/10.1002/cbf.3840>
- [24] Chae, D., Oh, S.W., Choi, Y.S., Kang, D.J., Park, C.W., Lee, J. and Seo, W.S. (2025) First Report on Microbial-Derived Polydeoxyribonucleotide: A Sustainable and Enhanced Alternative to Salmon-Based Polydeoxyribonucleotide. *Current Issues in Molecular Biology*, **47**, Article 41. <https://doi.org/10.3390/cimb47010041>