

毛发再生机制的研究进展

张雨晴

曲阜市人民医院皮肤科 山东曲阜

【摘要】 毛发作为人体重要的附属结构，在保护、保温和感觉等方面发挥着关键作用。近年来，毛发再生机制的研究取得了显著进展。本文综述了近五年关于毛发再生机制的研究成果，包括毛发生长周期的调控、干细胞在毛发再生中的关键作用、信号通路对毛发再生的调节、内分泌因素的影响以及环境因素对毛发再生的作用等方面。同时，探讨了当前毛发再生治疗的方法及未来的研究方向。

【关键词】 毛发再生；毛发生长周期；干细胞；信号通路；内分泌因素

【收稿日期】 2025 年 6 月 18 日

【出刊日期】 2025 年 7 月 24 日

【DOI】 10.12208/j.ijcr.20250324

Advance on hair regeneration mechanism

Yuqing Zhang

Dermatology Department of Qufu People's Hospital, Qufu, Shandong

【Abstract】 As an important accessory structure of the human body, hair plays a key role in protection, insulation, and sensation. In recent years, significant progress has been made in the research on the mechanism of hair regeneration. This article reviews the research results on the mechanism of hair regeneration in the past five years, including the regulation of the hair growth cycle, the key role of stem cells in hair regeneration, the regulation of signal pathways on hair regeneration, the influence of endocrine factors, and the role of environmental factors on hair regeneration. At the same time, it discusses the current methods of hair regeneration treatment and future research directions.

【Keywords】 Hair regeneration; Hair growth cycle; Stem cells; Signal pathways; Endocrine factors

毛发的生长和再生是一个复杂的生物学过程，受到多种内在和外在因素的调控。随着人们对健康和美观的关注度不断提高，毛发再生成为了医学和美容领域的研究热点。近年来，随着技术的不断进步和研究的深入，对毛发再生机制的认识有了很大的提升。

1 毛发生长周期

毛发生长周期分为生长期（anagen）、退行期（catagen）和休止期（telogen）三个阶段^[1,2]。不同部位的毛发具有不同的生长周期特点^[3]。例如，头发的生长周期相对较长，而眉毛和睫毛的生长周期则较短。

1.1 生长期

在生长期，毛囊细胞积极增殖和分化，毛发持续生长。此阶段，毛囊底部的毛乳头细胞（dermal papilla cells, DPCs）与毛囊干细胞（hair follicle stem cells, HFSCs）相互作用，对毛发的生长起着关键推动作用。

1.2 退行期

退行期是生长周期的过渡阶段，毛囊细胞增殖逐渐停止，毛发停止生长。此时，毛囊逐渐萎缩，毛乳头

细胞与毛囊干细胞分离。

1.3 休止期

休止期的毛囊处于休眠状态，毛发最终脱落。在此阶段，毛囊干细胞也处于相对静止状态，等待下一个生长周期的启动信号。

2 干细胞在毛发再生中的作用

2.1 毛囊干细胞

毛囊是皮肤的外胚层附属器官，在毛发周期中反复再生新毛发^[4]。毛囊干细胞位于毛囊隆突区（bulge region），具有自我更新和多向分化的能力。在毛发生长周期中，它们可以分化为毛囊的各种细胞类型^[5]，如毛母质细胞（matrix cells）、内根鞘细胞（inner root sheath cells）和外根鞘细胞（outer root sheath cells）等，对毛发的生长和再生至关重要。

2.2 间充质干细胞

间充质干细胞（mesenchymal stem cells, MSCs）是一种多能干细胞，能够分化为多种细胞类型^[6]。研究表明，间充质干细胞可以通过分泌多种生长因子和细

胞因子, 如血管内皮生长因子 (vascular endothelial growth factor, VEGF)、胰岛素样生长因子 -1 (insulin-like growth factor-1, IGF-1)、肝细胞生长因子 (hepatocyte growth factor, HGF) 等^[7], 促进毛囊细胞的增殖和分化, 从而助力毛发再生。

2.3 诱导多能干细胞

诱导多能干细胞 (induced pluripotent stem cells, iPSCs) 是通过将体细胞重编程获得的干细胞。近年来的研究发现, 诱导多能干细胞也具有分化为毛囊干细胞和其他毛囊细胞类型的潜力, 为毛发再生提供了新的途径^[8]。

3 信号通路对毛发再生的调节

3.1 Wnt/ β -catenin 信号通路

Wnt/ β -catenin 信号通路在毛发再生中起着核心作用^[9]。在生长期, 该信号通路被激活, 促进毛囊干细胞的增殖和分化, 推动毛发的生长。而在退行期和休止期, 该信号通路受到抑制, 毛囊干细胞进入静止状态^[10]。

3.2 Notch 信号通路

Notch 信号通路对毛囊干细胞的增殖、分化以及毛囊细胞的命运决定起着重要调节作用^[11]。在生长期, Notch 信号通路激活, 有助于毛囊干细胞的活性维持和毛囊细胞的正常发育。在退行期和休止期, Notch 信号通路活性降低, 毛囊干细胞进入休眠状态^[12]。

3.3 BMP 信号通路

BMP 信号通路对毛发再生具有双重调节作用^[13]。在生长期, 该信号通路被抑制, 以促进毛囊干细胞的增殖和分化。而在退行期和休止期, BMP 信号通路被激活, 抑制毛囊干细胞的活性并促进毛囊细胞的凋亡^[14]。

4 内分泌因素对毛发再生的影响

4.1 雄激素

雄激素是影响毛发生长和再生的重要内分泌因素之一^[15]。在男性中, 雄激素可以促进胡须、胸毛、阴毛等毛发的生长, 但另一方面, 雄激素二氢睾酮 (DHT) 通过作用于毛乳头细胞, 可缩短头发生长期, 诱发雄激素性脱发。在女性中, 雄激素水平过高也可能引起多毛症^[16]。

4.2 甲状腺激素

甲状腺激素对毛发的生长和再生也有重要影响。甲状腺功能减退症患者常伴有脱发^[17], 而甲状腺功能亢进症患者则可能出现多毛症。但甲状腺功能亢进患者也可出现严重脱发^[18]。甲状腺激素可以通过调节毛囊细胞的增殖和分化来影响毛发的生长。

4.3 生长激素

生长激素同样在毛发再生中发挥作用。生长激素缺乏症患者往往伴有脱发, 而生长激素过多症患者则可能出现多毛症^[19,20]。生长激素可以通过促进毛囊细胞的增殖和分化, 以及调节毛囊干细胞的活性^[21]。

5 环境因素对毛发再生的作用

5.1 紫外线辐射

紫外线辐射是一种重要的环境因素, 对毛发的生长和再生具有负面影响。紫外线辐射可以损伤毛囊细胞, 导致毛发脱落^[22]。同时, 紫外线辐射还可能影响毛囊干细胞的功能, 从而影响毛发的再生能力^[23]。因此, 窄谱中波紫外线常作为一种辅助疗法治疗脱发疾病。

5.2 营养不良

营养不良也是影响毛发再生的重要环境因素之一。缺乏必要的营养物质, 如蛋白质、维生素和矿物质等, 会导致毛囊细胞的增殖和分化受到抑制, 从而影响毛发的生长和再生^[24]。

5.3 压力

压力对毛发再生也有不良影响。长期的压力可能导致毛囊细胞的增殖和分化受到抑制, 同时影响毛囊干细胞的功能, 进而影响毛发的生长和再生^[25]。身心放松才能够促进毛发的生长^[26]。

6 毛发再生治疗的方法

6.1 药物治疗

6.1.1 米诺地尔

米诺地尔是一种常用的毛发再生药物, 其作用机制是通过扩张血管, 增加毛囊的血液供应, 从而促进毛发的生长。米诺地尔可用于治疗男性型脱发和女性型脱发^[27]。

6.1.2 非那雄胺

非那雄胺主要用于治疗男性型脱发^[28], 其作用机制是通过抑制 5α -还原酶, 减少雄激素的生成, 从而抑制脱发。

6.2 手术治疗

6.2.1 毛发移植

毛发移植是一种常见的毛发再生手术方法, 通过将自体健康的毛囊移植到脱发部位, 促进毛发的生长^[29]。毛发移植可用于治疗男性型脱发和女性型脱发。

6.2.2 毛囊干细胞移植

毛囊干细胞移植是一种新兴的治疗方法, 尽管干细胞移植显示出促进毛发再生的潜力, 但目前仍处于动物实验和临床前验证阶段, 尚未广泛应用于临床^[30]。其原理是将自体或异体的毛囊干细胞移植到脱发部位, 以促进毛发的再生。

6.3 物理治疗

6.3.1 低能量激光治疗

低能量激光治疗是一种常用的毛发再生物理治疗方法^[31],通过低能量激光照射头皮,促进毛囊细胞的增殖和分化,同时光调节局部免疫环境,减少炎症反应对毛囊的抑制作用,从而促进毛发的生长^[32]。可用于治疗男性型脱发和女性型脱发。

6.3.2 微针治疗

微针治疗是一种新兴的物理治疗方法,通过微针刺刺激头皮,造成机械损伤诱导毛囊干细胞激活,同时促进毛囊细胞的增殖和分化以及毛囊干细胞的活化,从而促进毛发的生长^[33,34]。目前仍处于研究阶段。

7 总结与展望

尽管目前对毛发再生的机制有了一定的了解,但仍有许多问题有待进一步探索。例如,毛囊干细胞的自我更新和分化的详细机制、信号通路之间的相互作用对毛发再生的调节机制、内分泌因素和环境因素对毛发再生的具体影响机制等。深入研究这些问题将为开发更有效的毛发再生治疗方法提供理论基础。

当前的毛发再生治疗方法存在一定的局限性,因此需要开发新的治疗方法。例如,基因治疗、干细胞治疗、组织工程等新兴技术有望为毛发再生治疗带来新的突破。此外,不同患者对毛发再生治疗的反应可能存在差异,因此需要根据患者的具体情况进行个性化治疗。例如,根据患者的年龄、性别、脱发类型、病情严重程度等因素,选择合适的治疗方法和药物剂量,以提高治疗效果和安全性。总之,毛发再生是一个复杂的生物学过程,受到多种因素的调控。近年来,随着研究的不断深入,对毛发再生机制的认识有了很大的提高,毛发再生治疗也取得了一定的进展。然而,仍有许多问题需要进一步研究和解决。未来,需要深入研究毛发再生的机制,开发新的治疗方法,并进行个性化治疗,以提高毛发再生治疗的效果和安全性。

参考文献

- [1] Hsu YC, Pasolli HA, and Fuchs E. Dynamics between stem cells, niche, and progeny in the hair follicle[J]. *Cell*. 2011;144(1):92-105.
- [2] Greco V, Chen T, Rendl M, et al. A two-step mechanism for stem cell activation during hair regeneration[J]. *Cell Stem Cell*. 2009;4(2):155-169.
- [3] Horesh EJ, Chéret J, and Paus R. Growth Hormone and the Human Hair Follicle[J]. *Int J Mol Sci*. 2021;22(24):13205.
- [4] Lin X, Zhu L, He J. Morphogenesis, Growth Cycle and Molecular Regulation of Hair Follicles[J]. *Front Cell Dev Biol*. 2022;10:899095.
- [5] Villeneuve C, Hashmi A, Ylivinkka I, et al. Mechanical forces across compartments coordinate cell shape and fate transitions to generate tissue architecture[J]. *Nat Cell Biol*. 2024;26(2):207-218.
- [6] D'Alessandris QG, Della Pepa GM, Noya C, et al. Mesenchymal stem cells[J]. *Neuro Oncol*. 2021;23(7):1203-1204.
- [7] Lee S, Kim S, Hwang ST, et al. Cold shock therapy promotes hair growth in association with upregulation of cold-inducible RNA-binding protein and vascular endothelial growth factor[J]. *J Dermatol Sci*. 2024;115(3):141-144.
- [8] Shafiee A, Sun J, Ahmed IA, et al. Development of Physiologically Relevant Skin Organoids from Human Induced Pluripotent Stem Cells[J]. *Small*. 2024;20(16):e2304879.
- [9] Lefebvre S, Fliniaux I, Schneider P, et al. Identification of ectodysplasin target genes reveals the involvement of chemokines in hair development[J]. *J Invest Dermatol*. 2012;132(4):1094-1102.
- [10] Tripurani SK, Wang Y, Fan YX, et al. Suppression of Wnt/ β -catenin signaling by EGF receptor is required for hair follicle development[J]. *Mol Biol Cell*. 2018;29(22):2784-2799.
- [11] Wollina U. Gray hair, dark brows, and diabetes--possibly a NOTCH story[J]. *Int J Dermatol*. 2010;49(1):109-110.
- [12] Christopoulos PF, Gjølberg TT, Krüger S, et al. Targeting the Notch Signaling Pathway in Chronic Inflammatory Diseases[J]. *Front Immunol*. 2021;12:668207.
- [13] Lewis RM, Keller JJ, Wan L, et al. Bone morphogenetic protein 4 antagonizes hair cell regeneration in the avian auditory epithelium[J]. *Hear Res*. 2018;364:1-11.
- [14] Rendl M, Polak L, and Fuchs E. BMP signaling in dermal papilla cells is required for their hair follicle-inductive properties[J]. *Genes Dev*. 2008;22(4):543-557.
- [15] Kiconco S, Teede HJ, and Azziz R. Letter to the Editor[J]. *J Clin Endocrinol Metab*. 2020;105(8):dgaa312.

- [16] Martínez-Pascual MA, Sacristán S, Toledano-Macías E, et al. Effects of RF Electric Currents on Hair Follicle Growth and Differentiation: A Possible Treatment for Alopecia[J]. *Int J Mol Sci.* 2024;25(14):7865.
- [17] Kusano C, Hori N, Hasegawa T, et al. Recovery from Atrophic Autoimmune Thyroiditis in a Child: Thyroid Stimulation-Blocking Antibody as a Prognostic Marker[J]. *Horm Res Paediatr.* 2025:1-5.
- [18] Paudel V, Chudal D, Pradhan MB, et al. Alopecia Universalis Associated with Hyperthyroidism Treated with Azathioprine and Hydroxychloroquine: A Case Report[J]. *JNMA J Nepal Med Assoc.* 2021;59(241):935-937.
- [19] Han SH, Jo KW, Kim Y, et al. Piperonylic Acid Promotes Hair Growth by Activation of EGFR and Wnt/ β -Catenin Pathway[J]. *Int J Mol Sci.* 2024;25(19):10774.
- [20] Mizukami Y, Sugawara K, and Tsuruta D. Female pattern hair loss with acromegaly[J]. *Clin Exp Dermatol.* 2021;46(3):607-609.
- [21] Alam M, Below DA, Chéret J, et al. Growth Hormone Operates as a Neuroendocrine Regulator of Human Hair Growth Ex Vivo[J]. *J Invest Dermatol.* 2019;139(7):1593-1596.
- [22] Hu SH, Jiang S, Miao F, et al. sPmel17 Secreted by Ultraviolet B-Exposed Melanocytes Alters the Intercellular Adhesion of Keratinocytes[J]. *Oxid Med Cell Longev.* 2022;2022:1856830.
- [23] Ahuja R, and Gupta S. Deciphering differential response to NB-UVB[J]. *J Eur Acad Dermatol Venereol.* 2024;38(4):e337-e338.
- [24] Carey MN, Cameron LH, Rider NL, et al. What Came First[J]. *Pediatrics.* 2023;152(3):e2022060983.
- [25] Choi S, Zhang B, Ma S, et al. Corticosterone inhibits GAS6 to govern hair follicle stem-cell quiescence[J]. *Nature.* 2021;592(7854):428-432.
- [26] Yi R. Relax to grow more hair[J]. *Nature.* 2021;592(7854):356-357.
- [27] Ramos PM, Sinclair RD, Kasprzak M, et al. Minoxidil 1 mg oral versus minoxidil 5% topical solution for the treatment of female-pattern hair loss[J]. *J Am Acad Dermatol.* 2020;82(1):252-253.
- [28] Nguyen DD, Cone EB, Trinh QD. Association of Hair Loss With Suicidality and Psychological Adverse Events vs Finasteride Use-Reply[J]. *JAMA Dermatol.* 2021;157(6):738.
- [29] Martinez DAES, Sodré JL, Regis JR, et al Hair transplantation in uncommon secondary cicatricial alopecias[J]. *Dermatol Ther.* 2022;35(8):e15592.
- [30] Call M, Meyer EA, Kao WW, et al. Murine Hair Follicle Derived Stem Cell Transplantation onto the Cornea Using a Fibrin Carrier[J]. *Bio Protoc.* 2018;8(10):e2849.
- [31] Kianfar N, Dasdar S, Mahmoudi H, et al. Comparison of the efficacy and safety of 308-nm excimer laser with intralesional corticosteroids for the treatment of alopecia areata[J]. *Lasers Surg Med.* 2022;54(4):502-510.
- [32] Chen SZ, Mao MQ, Miao YJ, et al. Ablative 2940-nm Er[J]. *Eur J Dermatol.* 2024;34(2):216-217.
- [33] Sánchez-Meza E, Ocampo-Candiani J, Gómez-Flores M, et al. Microneedling plus topical dutasteride solution for androgenetic alopecia: a randomized placebo-controlled study[J]. *J Eur Acad Dermatol Venereol.* 2022 ;36(10):e806-e808.
- [34] Pensato R, and La Padula S. A Comprehensive Review of Microneedling as a Potential Treatment Option for Androgenetic Alopecia[J]. *Aesthetic Plast Surg.* 2023;47 (Suppl 1):237-238.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心（OAJRC）所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS