

徐 述

DOI:10.13288/j.11-2166/r.2026.10.018

针刺穴位效应启动的物理生物学研究概况

李峻毅¹, 涂世伟², 刘阳阳¹, 窦报敏¹, 樊泽至¹,
付疆疆¹, 周江琦¹, 邓凯元¹, 李艳伟¹✉, 郭义¹

1. 天津中医药大学实验针灸学研究中心, 天津市静海区团泊新城西区鄱阳湖路10号, 301617; 2. 青海大学

[摘要] 通过梳理针刺穴位效应启动的物理生物学研究, 从针刺机械力学信息的产生、转导角度阐释针刺穴位效应启动机制, 揭示了穴区微环境中物理-化学耦合过程。提出未来研究应聚焦于局部机械力敏感性细胞, 深入探究针刺力学信号如何引发穴区细胞与分子的动态变化及其物理-化学信息转导机制, 为针刺穴位效应启动提供科学依据。相关研究将有助于深化针刺作用原理的科学内涵, 推动针灸的临床应用与发展。

[关键词] 针刺; 机械力; 针刺效应; 信息转导; 穴位启动

物理生物学是一门以物理学定量语言描述生命科学现象与内在机制的前沿交叉学科^[1-2], 强调运用物理概念重新解释并预测生物学现象^[3]。当前, 针灸学科的发展需多学科合作共同阐明相关科学问题, 很多议题可从物理生物学的角度切入^[4]。针刺作为一种机械性物理刺激, 刺入穴位以及行提插、捻转手法的过程中常伴随多种力学作用的产生, 这些力学信息可引起穴区产生一系列生物学信息变化, 导致穴区局部产生级联反应, 并经复杂途径传导至靶器官而发挥针刺效应^[5-7]。由此可见, 针刺刺激穴位所产生的机械力是针刺效应启动的关键性因素^[8]。本文从物理生物学视域梳理有关针刺穴位效应启动的研究概况, 以期探讨针刺的作用本质。

1 穴区组织对针刺机械力刺激的形态变化响应

腧穴是一个复杂的立体结构, 毫针针刺时由浅入深可刺激到穴位局部的皮肤、皮下组织、深筋膜、肌肉等结构层次。作为一种机械性物理刺激, 针刺可引起穴区不同层次组织结构产生形态变化, 如结缔组织是经络腧穴的主要物质基础, 80%的穴位位于结缔组织范围内, 而针刺机械力刺激会引起穴区结缔组织的改变^[9]。体内超声显像技术发现,

针刺捻转、提插均可对穴区结缔组织位移产生显著影响, 其中针刺捻转时穴区结缔组织的位移幅度可扩大至静止时的5倍^[10]。胶原纤维是结缔组织的重要组成部分, 在穴位处进行针刺提插、捻转, 出针后针体缠绕的残留物主要是胶原纤维^[11]。针刺可使穴区筋膜组织中胶原纤维排布随针刺捻转方向呈“漩涡状”走势^[12]。有研究^[13]显示, 针刺机械力的产生实际源于对以穴区结缔组织为物质基础所构成的片状网络支架的拉伸; 针刺捻转后, 穴区皮下组织增厚, 针体与结缔组织缠绕, 并连带组织发生断裂、形变位移及纤维缠绕等现象, 利用医学成像仪可观察到穴区组织以针体为中心形成螺旋状图案。此外, 多数腧穴分布与肌肉运动点几乎重合对应, 针刺腧穴深层得气后可引起肌肉收缩, 提插、捻转等针刺手法可引起穴区肌纤维断裂、肌电发放等变化^[14]。如有研究^[15]发现, 针刺可使健康人足三里、合谷穴区组织发生位移, 穴区局部血流量、肌电振幅及针体受力显著增加, 电阻显著降低。

针刺导致穴区组织形态发生改变后, 可通过组织牵拉将机械力信息传递于穴区机械力敏感性细胞, 引起细胞形态、功能状态等各方面改变。例如, 针刺捻转手法刺激穴位时, 穴区缠绕于针体的胶原纤维经机械牵拉可引起其周围成纤维细胞胞体发生可逆性收缩, 该种收缩又可进一步牵拉穴区胶原纤维进而导致细胞外基质变形, 最终将针体机械力信号“波浪”式传导至整个结缔组织^[16]。又如,

基金项目:国家自然科学基金(82030125);天津中医药大学新教师科研启动项目“雏鹰计划”项目(XS2024214);天津市教委科研计划项目(2024KJ017)

✉ 通讯作者:18394675118@163.com

针刺捻转可通过牵拉组织影响成纤维细胞周长和横截面积,使其细胞突起缩短,形态变为“片状”,体积增大^[17]。通过体外压力刺激装置模拟针刺机械力,发现压力刺激可使成纤维细胞胞体发生回缩、变形,使其由梭形变为三角形,细胞间隙加大^[18]。而成纤维细胞是穴区组织中重要的机械力敏感性细胞,不同参数的机械力刺激可导致成纤维细胞产生不同的形态变化。由此可见,针刺刺入穴位后,可引起穴区组织发生形态变化,并通过组织牵拉将机械力传递至其周围的机械力敏感性细胞。

2 穴区组织形态变化与针刺得气的相关性

针刺得气是指针刺刺入穴位后,医者手下产生“如鱼吞钩饵”的沉紧感,乃针刺取得临床疗效的关键因素。《灵枢·九针十二原》曰:“刺之要,气至而有效”,指出针刺得气的重要性。现代临床研究也证实得气与针刺效应密切相关^[19],针刺得气可使穴区组织位移、局部血流量、肌电振幅、针体受力等显著大于得气前^[19-20],表明针刺得气与穴区组织物理性变化相关。

在针刺得气过程中,医者手下会产生沉紧、涩滞感,这与针刺提插、捻转所引起的结缔组织形态变化以及穴区肌肉组织收缩、形态变化等具有相关性。有研究^[13, 15, 21]发现,针刺得气后穴区出现结缔组织纤维缠绕针体的现象,此可引起针体和穴位局部结缔组织间的机械耦合显著放大,结缔组织对针体的反作用力使得医者手下产生沉紧、涩滞感。结缔组织不仅参与针刺得气的即时效应,也与针刺的延续及累积效应相关,如针刺足三里穴在拔针后通常仍存在较为持久的酸、胀等得气感,这与组织未恢复的形态变化、位移相关^[21]。近年来,研究表明,针刺所引起的穴区结缔组织形态变化是针刺效应启动的前提,如穴区注射胶原酶破坏结缔组织胶原纤维,可明显降低针刺抗炎作用^[22];破坏穴区胶原结构可明显抑制肥大细胞脱颗粒,并降低针刺镇痛效应^[23]。此外,经络腧穴是以结缔组织为结构基础,周围富含大量的神经、血管、淋巴管等交织而成的复杂立体结构^[24]。针刺提插、捻转引起穴区结缔组织缠绕、肌肉收缩,可直接激活穴区神经末梢上感受器,启动神经调节^[25];亦可引起机械力敏感性细胞(如肥大细胞、成纤维细胞等)释放化学介质,启动体液调节^[26-28]。综上可见,穴区组织形态变化是针刺得气感产生与效应启动的关键环节。

3 物理生物学视阈下针刺穴位效应启动的作用机制

针刺机械力刺激作用于穴位后可引起穴区局部组织发生形态变化、位移、结缔组织缠绕、胶原纤维及肌纤维断裂等,这些力学变化伴随着能量转化,如针刺后可见穴区电阻降低、肌电升高等现象^[9, 15],即力学信号转导为电信号;同时,可能伴随着持久的细胞和分子事件,包括上调相关基因表达、对细胞表观遗传的修饰等^[29-30]。通过细胞的力学响应,可将力学信号转导为生物学效应,产生穴区局部神经兴奋、细胞功能激活、化学分子释放等多种生物学变化,而穴区神经、肥大细胞及多种化学物质相互作用和影响,使针刺信号得以启动并级联放大,最终产生针刺效应^[5-6, 8]。那么,针刺介导的力学刺激是如何激活穴区组织传递针刺信号?穴区细胞如何转导针刺所产生的力学信号?这可能是针刺穴位效应启动机制的关键问题。

3.1 穴区细胞外基质的力学传导

针刺机械力是一种能被穴区组织感知的重要物理刺激信息,而穴区组织细胞外基质的成分及状态对细胞周围的力学环境具有显著影响,如针刺机械力信号可通过纤维传导作用于穴区成纤维细胞、肥大细胞、血管内皮细胞、巨噬细胞、浆细胞等不同种类细胞。针刺入穴位行捻转手法后,胶原纤维的走向以针体为中心呈放射性分布,而附着胶原纤维上的成纤维细胞也随之受到机械性“牵拉力”^[13]。此外,成纤维细胞感受机械刺激后可通过细胞骨架和肌球蛋白产生收缩力,牵拉周围基质(如胶原纤维)发生变形,将针刺的机械力信号向穴区周围进行传递^[16],进而被穴区组织中的各类细胞所感知,使细胞形态、功能状态等多方面发生改变,完成穴区对针刺机械力信息的响应。

此外,针刺可诱导胶原纤维等细胞外基质成分的沉积与降解,动态影响细胞外基质的力学微环境,尤其是其粘弹性及刚度等关键物理特性^[31-33]。其中,刚度变化可直接影响局部细胞的黏附、铺展、迁移及分化等行为^[34-36];粘弹性尤其是应力松弛特征,可在不改变初始弹性模量的情况下进一步调控细胞铺展、增殖及分化过程^[37-38]。针刺还可促进穴区透明质酸的分泌^[39],透明质酸作为细胞外基质中重要的糖胺聚糖,不仅通过其含量及片段大小影响胶原基质的粘弹性^[40],还可直接与CD44等受体结合,介导免疫细胞的黏附与募集^[41-42],从而增加在针刺局部中的免疫调节效应^[43]。由此可见,

穴区细胞外基质既可作为力学传导的基础,将针刺信号往远端传递,又通过其成分的动态重塑调控局部细胞的功能状态,在针刺效应的启动及累积中可能发挥着重要作用。

3.2 细胞对机械力的感知与转导

细胞感知外界机械力刺激并将机械信息传递至细胞核产生生物学效应往往需要多个模块共同发挥作用^[44]。机体组织细胞感应、转导机械力信号主要通过细胞膜和/或细胞骨架系统两种途径完成^[45-47]。针刺穴区组织各细胞间信息的转导受细胞外基质微环境的影响,细胞表面黏附受体如整合素、钙黏素等力敏受体可响应细胞外基质的力学变化并将力学信号向胞内转导^[48-49]。其中,钙黏素主要介导细胞间的黏附来参与细胞群体中的力传递和机械力信号整合,整合素则可通过识别胶原蛋白、层粘连蛋白等细胞外基质蛋白来介导细胞与细胞外基质的黏附^[50]。整合素与钙黏素可协同将机械力信号转导入胞内并影响细胞骨架的重构^[51],同时整合素激活后可引起胞内相关力敏蛋白如黏着斑激酶、黏着斑蛋白、桩蛋白等的募集,将机械力信号转换为生物化学信号^[52]。研究发现,针刺机械力刺激可使穴区多种整合素受体表达发生变化,并可激活整合素-细胞骨架相关的信号通路^[53-55],表明整合素受体对细胞外基质的响应可能是针刺机械力信号转导的关键。

机械敏感性离子通道(MSCs)是一类膜张力敏感性高、通道开放概率与细胞膜张力变化密切相关的离子通道,在穴区组织可直接、快速地感受针刺机械力并将其转化为生物化学信号,进而传递针刺信息,引发针刺级联反应^[56]。MSCs主要包括瞬时感受器电位通道(TRP)^[57]、压电型机械敏感离子通道(Piezo)^[58]、酸敏感通道(ASICs)^[59]、上皮钠通道(ENaC)^[60]、双孔钾通道(K2P)^[61]等。MSCs镶嵌于多种细胞的细胞膜表面,可将生物力学信号直接转换为生物电信号、生物化学信号,当穴区组织细胞接收针刺机械力刺激时,机械力信号随即转化为生物信号,穴区细胞做出反应,此即针刺的机械转导过程。研究发现,穴位局部的Piezo家族、瞬时感受器电位家族等MSCs的激活是针刺发挥疗效的关键^[62-67]。如针刺穴位所产生的机械力可作用于肥大细胞,通过行针手法使针刺机械力刺激达到一定阈值时,可激活肥大细胞膜上瞬时受体电位香草素亚型2(TRPV2)通道,引起Ca²⁺内流,促使肥大细胞脱颗粒,释放组胺等化学活性物质,

并且该效应可被TRPV2基因敲除逆转^[62, 68];对穴区组织细胞瞬时受体电位香草素亚型1(TRPV1)通道基因敲除后可显著影响针刺镇痛效应^[63-64]。由此可见,针刺作为一种物理性刺激作用于穴区,可能通过多种MSCs感知机械力,并将机械力信号转化为生物信号,实现针刺的机械转导过程,在针刺穴位始动环节具有重要作用。

3.3 穴区化学信号的级联放大

针刺诱导的机械力刺激可引发穴区组织细胞释放损伤相关分子模式(DAMPs)及免疫相关因子,参与针刺信号局部的启动与放大^[69]。穴区细胞在针刺机械力刺激及微损伤作用下,可释放包括高迁移率族蛋白B1(HMGB1)、ATP、热休克蛋白、线粒体DNA等内源性DAMPs,此类分子可被免疫细胞表面模式识别受体如Toll样受体(TLRs)、晚期糖基化终产物受体(RAGE)、NOD样受体(NLRs)识别,并可通过激活核因子- κ B(NF- κ B)、丝裂原活化蛋白激酶(MAPK)及炎症小体等信号通路,进而诱导巨噬细胞、树突状细胞、中性粒细胞等向局部募集,并调节白细胞介素-1 β (IL-1 β)、肿瘤坏死因子- α (TNF- α)、白细胞介素-6(IL-6)等炎症介质与趋化因子的分泌,形成局部免疫微环境的激活和级联放大效应^[70-71]。

研究表明,针刺可显著改变穴区DAMPs表达水平并介导针刺效应,如针刺正常大鼠可显著上调穴区热休克蛋白表达^[72];针刺可提高足三里穴区腺苷水平并参与镇痛调节^[73];针刺正常及关节炎模型大鼠可上调穴区HMGB1表达,并通过NF- κ B通路调节穴区局部炎症进程,进而介导针刺镇痛作用^[74-76]。DAMPs释放后可诱导免疫相关因子分泌及细胞间相互作用,将针刺信号进一步放大,如肥大细胞、巨噬细胞等在受到刺激后可通过释放组胺、细胞因子及趋化因子等免疫介质或通过细胞间的通信进一步调控免疫细胞的募集与功能^[77-79]。

综上,针刺可能通过激活穴区MSCs,促进DAMPs释放,与免疫细胞相互作用,形成级联反应,不断放大针刺信号,从而完成针刺穴位效应的启动。

4 小结

针刺作为一种机械性物理刺激,会引起穴区组织形态变化,并通过胶原纤维细胞外基质形变,向成纤维细胞等传递力学信号,进一步激活整合素、MSCs,释放化学性损伤相关分子,启动穴位微环

境时序性物理化学耦合互动,从而启动针刺效应。但针刺的物理力学信息如何转化为生物化学信息仍未阐明。一方面,针刺从刺入穴区到行提插捻转手法的过程中包含多种力学因素,如压力、剪切力、牵张力等^[80-81],但现阶段对针刺的体外模拟多从单一力学特征出发,并不能完全反映针刺过程中力学信号变化。另一方面,针刺穴位效应启动的初始调控过程涉及多个环节和众多物质,但目前对针刺穴位效应启动机制的研究主要是从穴区化学离子入手,由点及线,从神经、免疫、内分泌、能量代谢等不同角度开展研究,尚缺乏各个调控因素之间相互联系、相互影响的复杂网络研究。因此,本文认为未来研究可将研究方向从穴区局部化学物质变化,进一步转向针刺力学本质,聚焦于针刺的力学信息如何影响穴区细胞及分子的变化。可从局部机械力敏感性细胞入手,探究穴区响应针刺机械力刺激的物理-化学信息的转导机制,并探讨其与针刺效应之间的联系,为针刺穴位效应的启动机制提供科学依据。

参考文献

- [1]WEICHSELBERGER V, MOORE G, TLILI S, et al. Biophysics of organoids[J]. *Developmental Cell*, 2026, 61(1):24-41.
- [2]NELSON C M, XIAO B, WICKSTR M S A, et al. Mechanobiology: shaping the future of cellular form and function[J]. *Cell*, 2024, 187(11):2652-2656.
- [3]GARCIA H G, BREWSTER R C, PHILLIPS R. Using synthetic biology to make cells tomorrow's test tubes[J]. *Integr Biol(Camb)*, 2016, 8(4):431-450.
- [4]杨馥铭,徐枝芳,周丹.物理生物学:大科学观下针灸学的突破[J].*中华中医药杂志*, 2019, 34(3):896-900.
- [5]LI N C, LI M Y, CHEN B, et al. A new perspective of acupuncture: the interaction among three networks leads to neutralization[J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2019, 2019:2326867. doi: 10.1155/2019/2326867.
- [6]GONG Y, LI N, LV Z, et al. The neuro-immune microenvironment of acupoints-initiation of acupuncture effectiveness[J]. *J Leukoc Biol*, 2020, 108(1):189-198.
- [7]LI N, GUO Y, GONG Y, et al. The anti-inflammatory actions and mechanisms of acupuncture from acupoint to target organs via neuro-immune regulation[J]. *J Inflamm Res*, 2021, 14:7191-7224. doi: 10.2147/JIR.S341581.
- [8]薛玺情,曾以德.从穴区细胞对针刺时的响应浅谈手针针刺启动[J].*中华中医药杂志*, 2022, 37(9):5248-5252.
- [9]LANGEVIN H M, YANDOW J A. Relationship of acupuncture points and meridians to connective tissue planes[J]. *Anat Rec*, 2002, 269(6):257-265.
- [10]LANGEVIN H M, KONOFAGOU E E, BADGER G J, et al. Tissue displacements during acupuncture using ultrasound elastography techniques[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2004, 30(9):1173-1183.
- [11]KIMURA M, TOHYA K, KUROIWA K, et al. Electron microscopical and immunohistochemical studies on the induction of "Qi" employing needling manipulation[J]. *Am J Chin Med*, 1992, 20(1):25-35.
- [12]李程,陈波,胡铁汉,等.不同规格毫针针刺对大鼠穴区筋膜组织、细胞和胶原纤维的影响[J].*中国针灸*, 2015, 35(8):801-805.
- [13]LANGEVIN H M, CHURCHILL D L, WU J, et al. Evidence of connective tissue involvement in acupuncture[J]. *FASEB J*, 2002, 16(8):872-874.
- [14]李孝光,房台生,党汝霖.穴位与运动点是否存在对应关系[J].*西安交通大学学报(医学版)*, 1981(2):204-209.
- [15]TIAN D S, XIONG J, PAN Q, et al. De qi, a threshold of the stimulus intensity, elicits the specific response of acupoints and intrinsic change of human brain to acupuncture[J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2014, 2014:914878. doi:10.1155/2014/914878.
- [16]LANGEVIN H M, CHURCHILL D L, CIPOLLA M J. Mechanical signaling through connective tissue: a mechanism for the therapeutic effect of acupuncture[J]. *FASEB J*, 2001, 15(12):2275-2282.
- [17]LANGEVIN H M, BOUFFARD N A, BADGER G J, et al. Dynamic fibroblast cytoskeletal response to subcutaneous tissue stretch ex vivo and in vivo[J]. *Am J Physiol Cell Physiol*, 2005, 288(3):C747-C756.
- [18]陈波,王兴桂,李小玉,等.体外压力刺激对大鼠筋膜组织成纤维细胞形态和MMP-1、MMP-3合成释放影响的研究[J].*辽宁中医杂志*, 2011, 38(4):770-772.
- [19]XU S B, HUANG B, ZHANG C Y, et al. Effectiveness of strengthened stimulation during acupuncture for the treatment of Bell palsy: a randomized controlled trial[J]. *CMAJ*, 2013, 185(6):473-479.
- [20]李姝,宋思敏,李玲,等.得气的量化评价及客观表征研究现状概述[J].*上海针灸杂志*, 2023, 42(12):1331-1336.
- [21]张迪,丁光宏,沈雪勇,等.针刺引起结缔组织效应的研究进展[J].*针刺研究*, 2004, 29(1):77-81.
- [22]WANG F, CUI G W, KUAI L, et al. Role of acupoint area collagen fibers in anti-inflammation of acupuncture lifting

- and thrusting manipulation [J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2017, 2017: 2813437. doi: 10.1155/2017/2813437.
- [23] 余晓佳, 丁光宏, 姚伟, 等. 穴位处胶原纤维在针刺大鼠“足三里”镇痛过程中的作用[J]. *中国针灸*, 2008, 28(3): 207-213.
- [24] 何伟, 吴美玲, 景向红, 等. 穴位的本态: 穴位组织细胞化学的动态变化[J]. *中国针灸*, 2015, 35(11): 1181-1186.
- [25] CHEN Y, GUO Y, WANG J, et al. Fractal characterization of acupuncture-induced spike trains of rat WDR neurons[J]. *Chaos Soliton Fract*, 2015, 77: 205-214. doi: 10.1016/j.chaos.2015.05.026.
- [26] 熊江艳, 陈波, 刘峰, 等. 张力刺激对经筋膜成纤维细胞整合素 $\beta 1$ 亚基影响的体外研究[J]. *江西中医药*, 2015, 46(10): 31-33.
- [27] 潘萍, 郭义. 肥大细胞是针刺效应信号放大的关键因素之一[J]. *辽宁中医杂志*, 2009, 36(12): 2066-2068.
- [28] 康婧青, 张赛, 郭义, 等. 穴位局部 P 物质与肥大细胞在针刺效应启动中作用的研究[J]. *上海针灸杂志*, 2014, 33(11): 1054-1058.
- [29] COSGROVE B D, BOUNDS L R, TAYLOR C K, et al. Mechanosensitive genomic enhancers potentiate the cellular response to matrix stiffness [J]. *Science*, 2025, 390(6778): ead11988.
- [30] MAKKAR H, TRAN N, CHEN Y C, et al. Matrix stiffness governs fibroblasts' regulation of gingival immune homeostasis[J]. *Adv Mater*, 2026, 38(15): e20717.
- [31] 张志英, 党瑞山, 张传森, 等. 大鼠后三里针刺前后细胞外基质的差异性基因表达[J]. *解剖学杂志*, 2007, 30(2): 143-145.
- [32] 王学新, 李永春, 马晓芃, 等. 针刺颈夹脊穴对大鼠退变颈椎间盘细胞外基质金属蛋白酶 1、3 和金属蛋白酶抑制因子 1 的影响[J]. *针刺研究*, 2009, 34(4): 248-251.
- [33] 孙卫强, 张光志. 针刺对颈椎间盘退变大鼠椎间盘 VEGF、PLA2 和 PGE2 和细胞外基质胶原、代谢酶表达的影响[J]. *海南医学院学报*, 2019, 25(17): 1308-1313.
- [34] CONWAY J R W, ISOMURSU A, FOLLAIN G, et al. Defined extracellular matrix compositions support stiffness-insensitive cell spreading and adhesion signaling [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2023, 120(43): e2304288120.
- [35] KERSEY A L, CHENG D Y, DEO K A, et al. Stiffness assisted cell-matrix remodeling trigger 3D mechanotransduction regulatory programs[J]. *Biomaterials*, 2024, 306: 122473. doi: 10.1016/j.biomaterials.2024.122473.
- [36] JIANG C, CENTONZE A, SONG Y, et al. Collagen signaling and matrix stiffness regulate multipotency in glandular epithelial stem cells in mice [J]. *Nat Commun*, 2024, 15(1): 10482.
- [37] ADEBOWALE K, ALLAN C, HA B, et al. Monocytes use protrusive forces to generate migration paths in viscoelastic collagen-based extracellular matrices [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2025, 122(25): e2309772122.
- [38] CHAUDHURI O, COOPER-WHITE J, JANMEY P A, et al. Effects of extracellular matrix viscoelasticity on cellular behaviour [J]. *Nature*, 2020, 584(7822): 535-546.
- [39] TU S W, KAWANOKUCHI J, TAKAGI K, et al. Fibroblasts as key effectors of acupuncture in treatment of rheumatoid arthritis [J]. *Front Immunol*, 2026, 17: 1715313. doi: 10.3389/fimmu.2026.1715313.
- [40] KREGER S T, VOYTIK-HARBIN S L. Hyaluronan concentration within a 3D collagen matrix modulates matrix viscoelasticity, but not fibroblast response [J]. *Matrix Biol*, 2009, 28(6): 336-346.
- [41] VAN STEEN A C I, GRONLOH M L B, JOOSTEN S, et al. Endothelial ICAM-1 adhesome recruits CD44 for optimal transcellular migration of human CTLs [J]. *J Immunol*, 2023, 211(3): 377-388.
- [42] ALBTOUSH N, QUEISSER K A, ZAWERTON A, et al. TSG6 hyaluronan matrix remodeling dampens the inflammatory response during colitis [J]. *Matrix Biol*, 2023, 121: 149-166. doi: 10.1016/j.matbio.2023.06.007.
- [43] LIU L, DENG D, LI C, et al. The combination of modified acupuncture needle and melittin hydrogel as a novel therapeutic approach for rheumatoid arthritis treatment [J]. *J Nanobiotechnology*, 2024, 22(1): 432.
- [44] SARASWATHIBHATLA A, INDANA D, CHAUDHURI O. Cell-extracellular matrix mechanotransduction in 3D [J]. *Nat Rev Mol Cell Biol*, 2023, 24(7): 495-516.
- [45] 张欢, 赵国清, 冯锦腾, 等. 力敏感受体介导细胞功能调控的力学生物学研究[J]. *力学进展*, 2023, 53(1): 48-153.
- [46] 齐颖新. 细胞核与应力信号转导[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(3): 385-388.
- [47] 韦堂墙, 牛超, 伍季, 等. 细胞对机械应力的感知及其信号转导机制[J]. *华西医学*, 2022, 37(3): 449-452.
- [48] BISWAS K H. Molecular mobility-mediated regulation of E-cadherin adhesion [J]. *Trends Biochem Sci*, 2020, 45(2): 163-173.
- [49] BOCK F, LI S, POZZI A, et al. Integrins in the kidney-beyond the matrix [J]. *Nat Rev Nephrol*, 2025, 21(3):

- 157-174.
- [50] CONWAY J R W, JOSHI O, KAIVOLA J, et al. Dynamic regulation of integrin $\beta 1$ phosphorylation supports invasion of breast cancer cells[J]. *Nat Cell Biol*, 2025, 27(6):1021-1034.
- [51] BARCELONA-ESTAJE E, OLIVA M A G, CUNNIFFE F, et al. N-cadherin crosstalk with integrin weakens the molecular clutch in response to surface viscosity[J]. *Nat Commun*, 2024, 15(1):8824.
- [52] KANCHANAWONG P, CALDERWOOD D A. Organization, dynamics and mechanoregulation of integrin-mediated cell-ECM adhesions[J]. *Nat Rev Mol Cell Biol*, 2023, 24(2):142-161.
- [53] 陈波. 模拟毫针机械刺激诱导成纤维细胞压力信号生物转化作用与针刺效应的研究[D]. 成都:成都中医药大学, 2005.
- [54] 刘峰. 体外不同力学刺激对经脉相关筋膜成纤维细胞整合素-细胞骨架信号传导通路影响的研究[D]. 贵阳:贵阳中医学院, 2013.
- [55] 刘峰, 胡铁汉, 罗明鸿, 等. 体外不同压力刺激对筋膜成纤维细胞整合素 $\beta 1$ 亚基和微丝表达的影响[J]. *贵阳中医学院学报*, 2016, 38(1):6-10.
- [56] GUO Y, LI Y, XU T, et al. An inspiration to the studies on mechanisms of acupuncture and moxibustion action derived from 2021 Nobel Prize in Physiology or Medicine [J]. *Acupunct Herb Med*, 2022, 2(1):1-8.
- [57] ZHANG M, MA Y, YE X, et al. TRP (transient receptor potential) ion channel family: structures, biological functions and therapeutic interventions for diseases [J]. *Signal Transduct Target Ther*, 2023, 8(1):261.
- [58] XIAO B. Mechanisms of mechanotransduction and physiological roles of PIEZO channels[J]. *Nat Rev Mol Cell Biol*, 2024, 25(11):886-903.
- [59] RASH L D, KELLENBERGER S. Acid-sensing ion channels: structure, function, pharmacology, and clinical significance[J]. *Physiol Rev*, 2026, 106(1):281-362.
- [60] LIU Y, JIANG B J, ZHAO R Z, et al. Epithelial sodium channels in pulmonary epithelial progenitor and stem cells[J]. *Int J Biol Sci*, 2016, 12(9):1150-1154.
- [61] ANDRINI O, SOUSSIA IBEN, TARDY P, et al. Constitutive sodium permeability in a *C. elegans* two-pore domain potassium channel[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2024, 121(43):e2400650121.
- [62] HUANG M, WANG X, XING B, et al. Critical roles of TRPV2 channels, histamine H1 and adenosine A1 receptors in the initiation of acupoint signals for acupuncture analgesia[J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1):6523.
- [63] CHEN Z, YAO K, WANG X, et al. Acupuncture promotes muscle cells ATP metabolism in ST36 acupoint local exerting effect by activating TRPV1/CaMKII/AMPK/PGC1 α signaling pathway [J]. *Chin Med*, 2025, 20(1):112.
- [64] YAO K, CHEN Z, LI Y, et al. TRPA1 ion channel mediates the analgesic effects of acupuncture at the ST36 acupoint in mice suffering from arthritis [J]. *J Inflamm Res*, 2024, 17:1823-1837. doi:10.2147/JIR.S455699.
- [65] 郑雅文. 穴区机械敏感性 TRPA1 与 TRPV4 蛋白在针刺镇痛外周机制中的作用[D]. 上海:上海中医药大学, 2020.
- [66] 王江山. 基于单细胞测序的穴区成纤维细胞机械敏感离子通道 Piezo1 介导针刺镇痛效应机制研究[D]. 天津:天津中医药大学, 2025.
- [67] 翟永晓. 基于 Piezo2 激活牵张反射介导针刺得气客观反应的机制研究[D]. 天津:天津中医药大学, 2024.
- [68] 朱海宁, 张迪, 黄猛, 等. 肥大细胞对针灸治疗过程中的物理刺激的敏感性机制研究[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2013, 52(5):681-687.
- [69] 李亚男, 徐枝芳, 吕中茜, 等. 损伤相关分子:针刺起效过程中的“前哨兵”[J]. *针灸临床杂志*, 2022, 38(5):1-5.
- [70] ZINDEL J, KUBES P. DAMPs, PAMPs, and LAMPs in immunity and sterile inflammation[J]. *Annu Rev Pathol*, 2020, 15:493-518. doi: 10.1146/annurev-pathmechdis-012419-032847.
- [71] MA M, JIANG W, ZHOU R. DAMPs and DAMP-sensing receptors in inflammation and diseases[J]. *Immunity*, 2024, 57(4):752-771.
- [72] XU Y, WANG Y, PARK G, et al. Non-specific physiological background effects of acupuncture revealed by proteomic analysis in normal rats[J]. *BMC Complement Altern Med*, 2014, 14: 375. doi: 10.1186/1472-6882-14-375.
- [73] GOLDMAN N, CHEN M, FUJITA T, et al. Adenosine A1 receptors mediate local anti-nociceptive effects of acupuncture[J]. *Nat Neurosci*, 2010, 13(7):883-888.
- [74] 窦报敏. 脊髓 CXCL1-CXCR2 介导针刺足三里抗炎性痛的作用及机制研究[D]. 天津:天津中医药大学, 2020.
- [75] 李艳伟, 窦报敏, 王慎军, 等. S1 脑区 CXCL1/CXCR2 参与针刺改善佐剂性关节炎大鼠炎性痛的作用机制[J]. *针刺研究*, 2024, 49(4):331-340.
- [76] 康晓春. 针刺足三里诱导的 C1q 对穴区 HMGB1-RAGE-NF κ B 信号轴的调控作用及机制研究[D]. 天津:天津中医药大学, 2025.

- [77] YANG J, WANG Z, JIANG J, et al. Effects of acupuncture on serotonin, histamine, substance P, and tryptase levels at sensitized points in model rats with knee osteoarthritis[J]. J Tradit Chin Med Sci, 2024, 11(4): 500-512.
- [78] 杜思敏, 林小伟, 陈志翰, 等. 成纤维细胞与巨噬细胞的胞间通讯在针刺穴区启动机制中的作用探讨[J]. 上海针灸杂志, 2025, 44(5): 631-638.
- [79] 薛玺情, 曾以德. 基于肥大细胞与成纤维细胞的相互作用探讨手针针刺启动机制[J]. 中华中医药杂志, 2024, 39(4): 1666-1670.
- [80] 魏斐. 剪切力作用下的肥大细胞内钙信号和脱颗粒研究[D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [81] TU S, LI Y, LI J, et al. Mechanical stretch-mediated fibroblast activation: the pivotal role of Piezo1 channels[J]. Biochim Biophys Acta Mol Cell Res, 2025, 1872(7): 120008.

Overview of Physical Biological Research on the Activation of Acupoint Effects by Acupuncture

LI Junyi¹, TU Shiwei², LIU Yangyang¹, DOU Baomin¹, FAN Zezhi¹, FU Jiangjiang¹, ZHOU Jiangqi¹, DENG Kaiyuan¹, LI Yanwei¹, GUO Yi¹

1. Research Center of Experimental Acupuncture and Moxibustion Sciences, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin, 301617; 2. Qinghai University

ABSTRACT By reviewing the physical biological research on the activation of acupoint effects by acupuncture, this paper explains the activation mechanism from the perspective of the generation and transmission of mechanical signals caused by acupuncture, and reveals the physical-chemical coupling processes in the acupoint microenvironment. Future research should focus on locally mechanosensitive cells, further exploring how acupuncture mechanical signals trigger dynamic changes in cells and molecules in the acupoints, and the physical-chemical information transduction mechanism, which will provide scientific evidence for the acupoint activation during acupuncture. Related studies will contribute to a deeper understanding of the scientific principles behind acupuncture and promote its clinical application and development.

Keywords acupuncture; mechanical force; acupuncture effect; information translation; acupoint activation

(收稿日期: 2025-09-23; 录用日期: 2026-04-02; 修回日期: 2026-04-28)

[编辑: 姜 冰]

读者·作者·编者

中医药学术论文中药名称及名词术语的使用

中医药学术论文中正确使用中药名称及术语对于提高论文的科学性具有重要意义。中药学名词术语应使用全国科学技术名词审定委员会公布的《中医药学名词》和相关学科的名词。中药名称应以最新版《中华人民共和国药典》为主要依据。暂未公布者及《中华人民共和国药典》未收录的品种可参考团体标准 ZGZYXH/T 1-2015《中药学基本术语》《中药大辞典》以及新版全国高等中医院校统编教材《中药学》。地方及少数民族药物可遵照地方相关标准或药物的习称。

中药名称的使用应根据其概念范畴使用相应的名称。中药材使用药材名称, 必要时需注明拉丁学名; 临床处方应使用饮片名称, 若其无法定名称, 论述时可使用药材名称。由特定种质、产区, 以及特定的生产加工技术生产的道地药材加工炮制而成的饮片, 可在药材名前加产地名称作为特殊的饮片名称, 如“岷当归”“川厚朴”等。处方中饮片为生品者, 有法定名称的遵法定名称, 无法定名称且毒性较强的, 用生品时, 应在其药材名称前加注“生”字, 以免误用, 如生大黄。无法定名称的炮制品, 可在其药材名称之前或之后加炮制术语炒、焦、煨、炙、盐、炭、曲等作为饮片名称, 如姜炭、半夏曲等。无法定饮片名称的鲜品入药时, 应在药材名前加“鲜”字, 如鲜薄荷。使用特定药用部位入药的饮片, 如无法定饮片名称, 表述时可在其药材名称前或后加药用部位名称, 如当归尾。有特殊煎煮要求的中药, 应在饮片名称后加圆括号注明煎服法, 如薄荷(后下)、生石膏(先煎)、三七粉(冲服)等。中成药名称以国家药典委员会《中成药通用名称》为准, 暂未公布者可依次参照国家食品药品监督管理总局批准的中成药通用名、新版全国高等中医院校统编教材《方剂学》。

(本刊编辑部)