

引用:张鹏起,邹伟,王秋月,崔一之,张千石,王东岩.针灸与纳米技术的融合及应用[J].中医药导报,2025,31(9):152-156.

针灸与纳米技术的融合及应用^{*}

张鹏起¹,邹伟²,王秋月³,崔一之¹,张千石²,王东岩¹

(1.黑龙江中医药大学附属第二医院,黑龙江 哈尔滨 150001;

2.黑龙江中医药大学,黑龙江 哈尔滨 150006;

3.海南医科大学,海南 海口 570000)

[摘要] 针灸技术在现代医疗中的创新需求日益增长,纳米材料因其微小尺度的特殊性能与精准控制能力,为传统针灸的作用原理研究和器械升级打开了跨学科合作的新窗口。本文系统回顾了纳米技术与针灸学交叉领域的最新研究进展。在机制探索方面,纳米传感技术通过实时监测针刺过程中神经递质的动态变化,为经络腧穴的生物信息传导机制提供了分子层面的证据。在医疗应用方面,纳米载药微针系统和智能针灸设备的开发,显著提高了经皮给药效率和生物标志物检测的灵敏度,推动了针灸治疗从经验性操作向精准调控的转变。目前,研究已初步建立起“材料功能化修饰-靶向递送优化-能量精准调控”的技术体系,并在退行性疾病防治和慢性疼痛管理等领域展现出独特的优势。尽管针灸与纳米技术的融合仍处于研究阶段,但其潜在的应用前景令人期待,为传统医学的现代化提供可持续的技术支撑。

[关键词] 纳米技术;针灸学;医工结合;穴位注射;药物递送

[中图分类号] R2-03 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-951X(2025)09-0152-05

DOI:10.13862/j.cn43-1446/r.2025.09.026

Integration and Application of Acupuncture and Nanotechnology

ZHANG Pengqi¹, ZOU Wei², WANG Qiuyue³, CUI Yizhi¹, ZHANG Qianshi², WANG Dongyan¹

(1.The Second Affiliated Hospital of Heilongjiang University of Chinese Medicine, Harbin Heilongjiang 150001, China; 2.Heilongjiang University of Chinese Medicine, Harbin Heilongjiang 150006, China; 3.Hainan Medical University, Haikou Hainan 570000, China)

[Abstract] The demand for innovation in acupuncture technology within modern healthcare is increasing. Nanomaterials, owing to their unique properties at the nanoscale and precise controllability, open new avenues for interdisciplinary collaboration in researching the mechanisms of traditional acupuncture and upgrading its instruments. This article systematically reviews recent advancements at the intersection of nanotechnology and acupuncture research. In mechanistic exploration, nanosensing technologies enable real-time monitoring of dynamic neurotransmitter changes during acupuncture, providing molecular-level evidence for the biological information transmission mechanisms of meridians and acupoints. In medical applications, the development of nano-drug-loaded microneedle systems and intelligent acupuncture devices significantly enhances transdermal drug delivery efficiency and the sensitivity of biomarker detection, promoting the evolution of acupuncture therapy from empirical practice towards precise regulation. Current research has preliminarily established a technical framework encompassing "material functionalization modification - targeted delivery optimization-precise energy regulation", demonstrating unique advantages in areas such as prevention and treatment of degenerative diseases and chronic pain management. Although the integration of acupuncture and nanotechnology is still in the research stage, its potential application prospects are promising, offering sustainable technological support for the modernization of traditional medicine.

[Keywords] nanotechnology; acupuncture; integration of medicine and engineering; acupoint injection; drug delivery

*基金项目:国家自然科学基金面上项目(81774426);中国医药教育协会2020重大科学攻关问题和医药技术难题科研课题(2020KTE005)

通信作者:王东岩,女,主任医师,教授,研究方向为针灸防治神经系统疾病的临床与基础研究

纳米技术,即在1~100 nm尺度上对物质进行控制和操纵以实现特殊性能和功能的技术^[1]。随着纳米技术的广泛应用,纳米材料为针灸学提供了更加广阔的研究空间,其研究范围已从疾病防治深入到探索针灸的疗效机制、优化针灸器具、辅助药物输送和减毒增效等诸多方面。基于纳米技术的针灸器具能够通过检测生物信息的动态变化来提升针灸疗法的准确性和可靠性。此外,利用针灸作为载体负载纳米药物,可以有效改善药物的代谢和体内分布,增强其生物兼容性和靶向性,进而提高药物在组织中的渗透和滞留时间,发挥更大的疗效^[2]。

目前,纳米技术与传统针灸的结合主要体现在药物传递、诊断成像、生物传感器和优化治疗方案等领域。随着研究的不断深入,更多的创新应用将不断涌现,本文综述针灸与纳米技术结合的研究进展。(见图1)

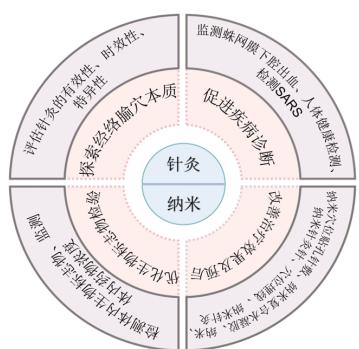


图1 针灸与纳米技术融合优势及应用

1 纳米技术探索经络腧穴本质

以纳米技术主导开发的生物传感器能够揭示经络的本质并追踪针灸负载药物的递送途径及分布,在推动针灸学现代化和科学化方面发挥着重要作用。唐丽娜等^[3]采用电化学方法制备功能性石墨烯修饰的针灸传感器,通过针刺腧穴过程中检测机体多巴胺(dopamine,DA)、一氧化氮(nitric oxide,NO)等生物活性分子水平的变化,为针灸治疗的科学性提供量化依据。LI P W等^[4]利用Au颗粒/石墨烯复合材料修饰的针灸针,实时监测大鼠穴位组胺的释放,证明不同穴位对组胺均有显著反应,展示其高效的电催化性能、高灵敏度和良好的选择性。

纳米分子影像技术是生物成像技术与纳米技术结合的产物,如光声成像,可用于研究经络腧穴,通过定量观察针灸后小鼠大脑血管血红蛋白浓度的变化,增强成像对比度,进而评估针灸的时效性^[5]。吴丹^[6]设计的金纳米颗粒-针灸复合光声造影剂,通过监测针刺阳陵泉穴后小鼠大脑皮层血红蛋白浓度的变化,进一步揭示了针灸穴位特异性与造影剂之间的相互作用机理,为针灸学的科学研究和临床应用开辟了新的视角。

2 纳米技术促进疾病诊断

针灸针具有微创性、痛感低、硬度高和穿透力强等优势。纳米技术进一步优化了其作为探针在动态定量分析和疾病诊断中的作用^[7]。表面增强拉曼光谱(surface-enhanced

raman spectroscopy,SERS)是一种高灵敏度和具有指纹信息的分析技术,在生物分析领域展现出巨大优势。利用针灸针、金纳米颗粒和聚苯乙烯构建的SERS活性针,能够在减少组织损伤的同时,收集体液并高灵敏度地提供目标分子的深度分布信息^[8]。在蛛网膜下腔出血的诊断和预后评估中,SUN J Y等^[9]开发的基于hairpin DNA共轭金纳米颗粒SERS探针,能够无创定量大鼠活细胞和脑脊液中的miRNA-21-5p,实现对该病进展的动态监测。

此外,摩擦纳米发电机技术通过将低频振动转换为可用电能,在针灸领域显示出应用潜力。CHEN X等^[10]通过在摩擦材料中掺杂核壳纳米颗粒Ag@SiO₂,进而开发出自供电针灸系统,用于人体健康检测和心血管功能调节。YANG X等^[11]则利用电沉积技术在针灸针尖端构建分子印迹微型电化学生物传感器,成功检测血清样本中的SARS-CoV-2-S蛋白,为临床诊断提供了新的工具。这些研究成果共同描绘了纳米技术与传统针灸结合的广阔前景,为早期疾病诊断和治疗提供了创新的方法和工具。

3 纳米技术优化生物标志物检验

针灸针以其经济实惠、制备简便和高导电性等优势,与纳米技术结合构建的生物传感器,能高灵敏度、快速响应和低成本地检测生物标志物,动态监测体内生理病理变化。

3.1 检测体内生物标志物 近年来,研究者们通过开发各类纳米修饰的针灸传感器,实现了对多种生物标志物的高灵敏度检测。VIEIRA D等^[12]开发一种具有高比表面积的微电极传感器,用于检测大脑中的氧气水平。JIA H L等^[13]通过电化学技术构建Ni₆MnO₈纳米片层修饰微针传感器,实现了对抗坏血酸的高灵敏度检测。ZHAN S S等^[14]制备金纳米颗粒配位聚多巴胺修饰针灸针,增强了对血清中肾上腺素的检测灵敏度。CHANG H E等^[15]研制一种可植入型微传感器,用于实时监测针刺过程中腺苷的释放,为分析腺苷信号提供检测途径。此外,还有研究通过纳米金功能化的针灸针结合SERS传感器,实现了对血清中三磷酸腺苷的灵敏检测^[16]。以上研究均表明,纳米技术在提升针灸针检测生物标志物能力方面具有巨大潜力,可为疾病的早期预警和精准治疗提供重要支持。

3.2 监测体内药物浓度 体内药物浓度检测是评估治疗效果和安全性的重要指标,有助于避免药物浓度过高导致的毒副作用。通过监测血药浓度,临幊上能够个性化调整治疗方案,确保药物疗效的同时,降低不良反应的风险。在这一领域,纳米技术同样发挥着重要作用。CHEN J D等^[17]制备Au/Cu纳米双金属的氯丙嗪传感器,为人血清中氯丙嗪的浓度实时检测提供新的思路。LIU H Y等^[18]采用双金属纳米团簇功能化针灸针微电极,可提高异丙嗪生物传感器的灵敏度和选择性。纳米传感器是一种基于纳米技术制造的微型化传感装置,利用纳米材料的独特物理和化学性质,实现对目标物质或物理量的高灵敏度、高选择性检测。NIU X L等^[19]结合AuNPs和石墨烯修饰针灸针,构建纳米传感器,用于药剂和人尿液中芦丁的灵敏测定。以上研究成果均表明,纳米技术结合针灸针

可实现对体内药物浓度的精准监测,为临床合理用药提供有力保障。

4 纳米技术改善治疗效果及预后

纳米药物递送系统通过纳米级别的药物载体,优化药物的溶解度、生物利用度和靶向性,提高治疗效率,减少不良反应。而结合针刺和纳米材料的药物载体,利用其导电、导热和机械性能,能够对药物用量、递送位置和释放过程的精准控制。这种技术不仅解决了传统给药体系中血药浓度不稳定的问题,还提高了药物利用效率,增强了患者的依从性。通过纳米技术改造的针灸针,能够在针刺的同时递送药物。这种创新的方法有望减轻患者的就医负担,并提高治疗效果^[20]。

4.1 纳米穴位贴敷 纳米穴位贴敷是中医经皮给药的特色疗法,即将纳米材料或纳米技术处理的中、西药涂抹于局部穴位或经络,经皮肤外部角质层渗透吸收,将药物最大范围穿透皮肤屏障,通过调控释放速度及作用靶点,做到精准给药^[21]。杨秋红等^[22]采用Fe₃O₄/N-异丙基丙烯酰胺新型穴位敷贴控制药物释放,改善哮喘大鼠一般状态,支气管肺泡灌洗液中IgE、IL-4、IL-13的表达水平明显降低,哮喘症状得以有效缓解。该研究表明,纳米穴位贴敷在调节机体免疫反应及改善疾病症状方面具有显著优势,为呼吸系统疾病的治疗提供了新思路。

4.2 纳米复合水凝胶 纳米复合水凝胶是一种由聚合物基质和纳米填料组成的高性能软材料,能够响应外界刺激如酸碱度、温度和磁场^[23],广泛应用于药物递送、组织工程等领域。纳米水凝胶穴位注射是一种创新应用,能够缓释平稳释放治疗药物,具有模拟针灸的效果。WEI W等^[24]开发了一种地塞米松载药的可注射原位热交联磁响应水凝胶,将地塞米松和磁性Fe₃O₄纳米颗粒结合,通过改善嵌入材料的性能来增强治疗效果,从而显著提高心肌缺血再灌注损伤和慢性疼痛等疾病的治疗效果。有实验显示,穴位纳米复合水凝胶有助于恢复类风湿关节炎模型中Th17/Treg的免疫平衡^[25]。LIN F等^[26]进一步设计负载水凝胶的螺纹结构针灸针,这种针具能够微创地穿透物理屏障,在病灶处精准释放水凝胶药物,有效改善骨关节炎大鼠的软骨下骨重构和软骨退化。这些研究结果揭示了纳米复合水凝胶在缓释药物、模拟针灸效果及精准治疗方面展现出巨大潜力,为相关疾病的治疗提供了新的策略。

4.3 纳米孔针 纳米孔针通过在针灸针尖表面构建多层纳米锥形孔,显著增加了界面面积,并在成瘾和结直肠癌模型^[27]中显示出卓越的治疗效果。此外,纳米孔针能够通过针刺足三里延长治疗炎性疼痛的镇痛效果^[28]。在临床应用中,纳米孔针能有效缩短单肺通气开胸患者的认知功能恢复时间,降低认知障碍风险,并提升治疗效果^[29]。以上研究均证实,纳米孔针在提高针刺疗效和改善患者预后方面优势显著,具有重要的临床应用价值。

4.4 纳米针灸针 针灸针能够强力穿透组织器官的物理屏障,是包封负载纳米级药物的理想材料。纳米针灸针结合了针灸的穿透力和纳米技术的药物递送能力,成为一种能够提

升治疗效果、延长作用时间、减少副作用的创新疗法。研究显示,应用纳米药物递送技术,在针灸针表面负载利多卡因治疗小鼠关节炎疼痛,能够在生物化学和组织学角度延缓膝骨关节炎的病情进展,缓解关节疼痛^[30]。此外,纳米颗粒包封的蜂毒针灸针对疼痛大鼠的治疗效果显著,能够减轻致敏性水肿并延长疗效^[31]。以上研究结果表明,纳米针灸针在提升治疗效果、延长作用时间及减少副作用方面具有独特优势,这为针灸疗法的现代化发展提供了有力支持。

4.5 穴位埋线 穴位埋线法是一种新型针灸技术,可通过植入不同材质的缝合线到穴位,调节气血以治疗多种疾病。尽管传统材料如羊肠线和可吸收外科缝合线在临幊上广泛使用,但可能会出现不同程度的局部炎症、疼痛等不良反应。银纳米线因其抗菌性、穴位刺激效果、减少排斥反应和药物释放能力,显示出改善临床埋线不良反应和提升治疗效果的潜力^[32]。另一方面,可溶性微针作为一种创新的穴位埋线设备,能够无痛无创地进行自主刺激和给药,避免了首过效应^[33]。ZHANG Q等^[34]研究的胸腺肽负载可溶性微针,贴敷足三里穴能有效调节免疫功能。

4.6 纳米针灸 纳米针灸是一种在纳米尺度上精确施加力学刺激于活细胞的技术。LI B等^[35]通过研究单细胞在纳米力作用下的自噬反应,揭示了自噬体的形成、降解和传导过程,并发现细胞自噬水平与施加的力大小和作用面积紧密相关。研究还表明,机械力刺激下的细胞自噬反应可能在细胞间远程传递。这一发现不仅为生物力学疗法提供了重要的模型研究平台,也为纳米针灸在细胞水平上的治疗机制研究奠定了基础,为针灸疗法的微观研究和临床应用拓展提供了新的思路。

5 结语

多学科交叉是推动传统医学发展的动力之一,纳米技术与针灸医学的交叉融合,标志着传统疗法向精准化诊疗模式转型的重要突破^[36]。当前研究将宏观中医理论与微观纳米技术有机地结合起来,发现纳米技术与针灸医学的协同创新,正通过生物传感、靶向递送与智能调控等技术路径,推动传统疗法向精准化诊疗转型。在生物传感领域,纳米传感器可实时捕捉针刺过程中神经递质、炎症因子等生物标志物的动态变化,为针灸治疗神经系统疾病、免疫系统疾病提供分子层面的疗效证据;在药物递送方面,纳米载药系统结合穴位注射可精准调控药物释放,显著降低化疗药物全身毒性并延长镇痛效果,为慢性疼痛管理提供新策略。

智能针灸设备是指利用纳米技术与传感器技术等技术相结合,能够实时监测针灸过程中的生理信号、自动调整针刺参数,并提供精准治疗的新型针灸器具。同时,磁性纳米颗粒等智能器械通过热疗、磁疗等能量调控方式,进一步增强了针灸的抗炎与组织修复功能,进而初步构建起“生物传感-靶向递送-能量调控”三位一体的技术框架,利用纳米材料的特殊性质和经络腧穴的独特优势,既丰富针灸诊疗疾病功能,也推动针灸的现代化。这一融合不仅以客观数据验证

了经络理论的科学内涵,还通过减毒增效优化临床治疗方案。

在纳米技术与针灸结合的临床前研究中,张国军团队采用电化学方法在针灸针尖表面修饰纳米材料,构建纳米针灸传感针,实现对针刺前后穴位信号分子的实时监测,相关成果获国家发明专利^[37]。顾臻教授团队开发血糖响应性“智能胰岛素微针贴片”贴片通过模拟胰腺细胞功能,实现血糖响应性胰岛素释放,实时监测体内血糖水平。该研究已进入注册临床试验阶段^[38]。这些研究展示了纳米技术在针灸领域的巨大潜力,然而,未来仍需突破纳米材料生物相容性验证、多模态诊疗平台开发及国际标准化体系建立等关键瓶颈,加速跨学科成果向临床转化。

参考文献

- [1] CHEHELGERDI M, CHEHELGERDI M, ALLELA O Q B, et al. Progressing nanotechnology to improve targeted cancer treatment: Overcoming hurdles in its clinical implementation[J]. Mol Cancer, 2023, 22(1):169.
- [2] OLIVEIRA I M, GONÇALVES C, REIS R L, et al. Engineering nanoparticles for targeting rheumatoid arthritis: Past, present, and future trends[J]. Nano Res, 2018, 11(9): 4489–4506.
- [3] 唐丽娜,李玉桃,梁凤霞,等.纳米针灸传感针的研制及其在生物活性分子检测中的应用[J].中华中医药杂志,2016, 31(5):1612–1616.
- [4] LI P W, YU A T, HAN L, et al. Highly sensitive biosensors for real-time monitoring of histamine at acupoint PC6 in rats based on graphene-modified acupuncture needles[J]. Nanoscale, 2024, 16(37):17393–17403.
- [5] WU D, ZHANG X X, RONG J, et al. Photoacoustic molecular imaging using combined acupuncture and gold nanorods as a composite contrast agent[J]. J Innov Opt Health Sci, 2019, 12(3):1941004.
- [6] 吴丹.脑功能和针灸脑图谱光声成像技术[D].成都:电子科技大学,2019.
- [7] 刘立安,孙永章,曹颖,等.经典针灸身体构建思想探微与理论表达[J].中医药导报,2024,30(2):174–177,197.
- [8] LI L H, JIANG R T, SHAN B B, et al. Near-infrared II plasmonic porous cubic nanoshells for in vivo noninvasive SERS visualization of sub-millimeter microtumors[J]. Nat Commun, 2022, 13(1):5249.
- [9] SUN J Y, SONG Y N, WANG M Y, et al. Quantitative and noninvasive detection of SAH-related MiRNA in cerebrospinal fluids in vivo using SERS sensors based on acupuncture-based technology[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2022, 14(32):37088–37100.
- [10] CHEN X, WANG F Y, ZHAO Y J, et al. Surface plasmon effect dominated high-performance triboelectric nanogenerator for traditional Chinese medicine acupuncture[J]. Research (Wash D C), 2022, 2022:9765634.
- [11] YANG X, YIN Z Z, ZHENG G J, et al. Molecularly imprinted miniature electrochemical biosensor for SARS-CoV-2 spike protein based on Au nanoparticles and reduced graphene oxide modified acupuncture needle[J]. Bioelectrochemistry, 2023, 151:108375.
- [12] VIEIRA D, MCEACHERN F, FILIPPELLI R, et al. Microelectrochemical smart needle for real time minimally invasive oximetry[J]. Biosensors (Basel), 2020, 10(11):157.
- [13] JIA H L, ZHAO J W, QIN L R, et al. The fabrication of an Ni₆Mn₈O nanoflake-modified acupuncture needle electrode for highly sensitive ascorbic acid detection[J]. RSC Adv, 2019, 9(46):26843–26849.
- [14] ZHAN S S, XU C H, CHEN J D, et al. A novel epinephrine biosensor based on gold nanoparticles coordinated polydopamine-functionalized acupuncture needle microelectrode[J]. Electrochim Acta, 2023, 437:141468.
- [15] CHANG H E, HUO M Z, ZHANG Q X, et al. Flexible needle-type Microbiosensor for real-time monitoring traditional acupuncture-mediated adenosine release in vivo[J]. Biosens Bioelectron, 2023, 235:115383.
- [16] LI P, GE M H, LIN D Y, et al. Functionalized acupuncture needle as a SERS-active platform for rapid and sensitive determination of adenosine triphosphate[J]. Anal Bioanal Chem, 2019, 411(22):5669–5679.
- [17] CHEN J D, LIU H Y, WANG C W, et al. An electrochemical chlorpromazine sensor based on a gold-copper bimetallic synergetic molecularly imprinted interface on an acupuncture needle electrode[J]. Analyst, 2023, 148(10):2214–2224.
- [18] LIU H Y, ZHANG C R, WANG C W, et al. A highly selective and sensitive sensor for promethazine based on molecularly imprinted interface coated Au/Sn bimetal nanoclusters functionalized acupuncture needle microelectrode[J]. Anal Chim Acta, 2023, 1269:341395.
- [19] NIU X L, WEN Z R, LI X B, et al. Fabrication of graphene and gold nanoparticle modified acupuncture needle electrode and its application in rutin analysis[J]. Sens Actuat B Chem, 2018, 255:471–477.
- [20] LI M J, CUI H, CAO Y B, et al. Deep eutectic solvents: Hydrogels for the topical management of rheumatoid arthritis[J]. J Control Release, 2023, 354:664–679.
- [21] 唐亚平,陈邦第,朱文雄,等.桃红四物汤联合六香散穴位贴敷治疗气滞血瘀型带状疱疹后遗神经痛的临床观察[J].中医药导报,2024,30(10):111–115.

- [22] 杨秋红,卫弯,田健材,等.姜汁水凝胶穴位贴敷对哮喘大鼠辅助性T细胞2细胞因子的调节作用[J].中华中医药杂志,2024,39(6):3068-3072.
- [23] QIAN K Y, SONG Y H, YAN X, et al. Injectable ferrimagnetic silk fibroin hydrogel for magnetic hyperthermia ablation of deep tumor[J]. Biomaterials,2020,259:120299.
- [24] WEI W, YANG Q H, HU J, et al. Dexamethasone-loaded injectable In-situ thermal crosslinking magnetic responsive hydrogel for the physiochemical stimulation of acupoint to suppress pain in sciatica rats[J]. Cell Transplant, 2022,31:9636897221126088.
- [25] REN S J, LIU H, WANG X T, et al. Acupoint nanocomposite hydrogel for simulation of acupuncture and targeted delivery of triptolide against rheumatoid arthritis[J]. J Nanobiotechnology,2021,19(1):409.
- [26] LIN F, WANG Z, XIANG L, et al. Transporting hydrogel via Chinese acupuncture needles for lesion positioning therapy[J]. Adv Sci (Weinh),2022,9(17):e2200079.
- [27] IN S L, GWAK Y S, KIM H R, et al. Hierarchical micro/nano-porous acupuncture needles offering enhanced therapeutic properties[J]. Sci Rep,2016,6:34061.
- [28] BAE S J, LIM J, LEE S M, et al. Augmented mechanical forces of the surface-modified nanoporous acupuncture needles elicit enhanced analgesic effects[J]. Front Neurosci,2019,13:652.
- [29] LI M J, PENG H W, WEI B X, et al. Effect of acupuncture anesthesia based on nanomaterial sensor on cognitive function after one-lung ventilation thoracotomy[J]. Mat Express,2021,11(7):1051-1056.
- [30] XU W J, XIAO Y, ZHAO M Z, et al. Effective treatment of knee osteoarthritis using a nano-enabled drug acupuncture technology in mice[J]. Adv Sci (Weinh), 2023,10(28):e2302586.
- [31] JEONG I, KIM B S, LEE H, et al. Prolonged analgesic effect of PLGA-encapsulated bee venom on formalin-induced pain in rats[J]. Int J Pharm,2009,380(1-2):62-66.
- [32] 任晓艳,刘钧天,张洲.针灸埋线疗法的创新性研究[J].北京中医药,2023,42(7):776-778.
- [33] 周逸轩,金银秀,蒋曼昀,等.微针与新型经皮给药载体结合的研究进展[J].中国现代应用药学,2020,37(17):2170-2176.
- [34] ZHANG Q, XU C C, LIN S Q, et al. Synergistic immunoreaction of acupuncture-like dissolving microneedles containing thymopenitin at acupoints in immune-suppressed rats[J]. Acta Pharm Sin B,2018,8(3):449-457.
- [35] LI B, WEI Y H, LI Q, et al. Nanomechanical induction of autophagy-related fluorescence in single cells with atomic force microscopy[J]. Adv Sci (Weinh),2021,8(24):e2102989.
- [36] 王少白.糖针:舒适化针灸[J].中医药导报,2017,23(5):7-8,11.
- [37] LIU B Z, YU S S, ZHOU Y, et al. Dual-needle field-effect transistor biosensor for in vivo pH monitoring[J]. ACS Sens,2023,8(7):2609-2617.
- [38] YANG C W, SHENG T, HOU W H, et al. Glucose-responsive microneedle patch for closed-loop dual-hormone delivery in mice and pigs[J]. Sci Adv,2022,8(48):eadd3197.

(收稿日期:2024-01-09 编辑:时格格)