

·论著·

不同强度静磁场对人角质形成细胞、成纤维细胞及小鼠成纤维细胞生物学特性的影响

武娟, 张仁见智, 钟书颜, 都慧聪, 舒茂国

(西安交通大学第一附属医院整形美容·颌面外科 陕西 西安 710061)

[摘要]目的: 观察不同强度静磁场对人角质形成细胞 (Normal Human Epidermal Keratinocytes, NHEK)、人真皮成纤维细胞 (Normal Human Dermal Fibroblast, NHDF) 和小鼠胚胎成纤维细胞 (National Institutes of Health 3T3, NIH-3T3) 增殖和迁移能力以及细胞周期的影响。**方法:** NHEK、NHDF和NIH-3T3贴壁培养后, 确定四种静磁场干预模式; 空间磁场分布仪检测不同规格钕铁硼磁体相关指数; 观察四种静磁场干预72 h后三种细胞形态, 通过CCK-8检测其增殖能力的变化; 流式细胞术检测不同细胞静磁场干预72 h后细胞周期的变化; 划痕实验和检测不同细胞静磁场干预0 h、24 h和48 h细胞迁移能力的变化。**结果:** 四种规格磁体分别为: N-300 mT、S-150 mT、N-150 mT和N-S-100 mT。四种静磁场干预72 h后三种细胞形态均无明显变化。N-300 mT组NHEK和NHDF较对照组 (Blank) 增殖能力提升 ($P < 0.05$), S-150 mT组NHEK和NHDF较Blank组细胞增殖能力减弱 ($P < 0.05$)。N-300 mT组NIH-3T3较Blank组增殖能力提升 ($P < 0.05$)。S-150 mT组NHEK较对照组 (Blank) G0/G1期显著增长, S期显著减少 ($P < 0.05$)。NHDF在G0/G1期、S期和G2/M期各干预组较对照组 (Blank) 差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。N-150 mT组NIH-3T3较对照组 (Blank) S期显著减少, G2/M期显著增长 ($P < 0.05$)。S-150 mT组NHEK与Blank组细胞迁移能力差异无统计学意义 ($P > 0.05$), 其余各组NHEK较对照组 (Blank) 细胞迁移率均显著增高 ($P < 0.05$)。N-300 mT组NHDF较对照组 (Blank) 细胞迁移率显著增高 ($P < 0.05$)。N-300 mT组NIH-3T3较对照组 (Blank) 干预24 h细胞迁移率显著增高 ($P < 0.05$)。**结论:** N极磁场干预可刺激NHEK、NHDF和NIH-3T3增殖, S极的磁场干预可抑制三种细胞增殖, 静磁场干预强度对三种细胞周期以及增殖和迁移能力的影响有差异, 而不同方向的磁干预并未表现出明显差异。

[关键词] 静磁场; 成纤维细胞; 角质形成细胞; 增殖; 细胞周期; 生物学特性

[中图分类号]R321.5 **[文献标志码]**A **[文章编号]**1008-6455 (2026) 06-0013-05

The Impact of Different Intensities of Static Magnetic Fields on the Proliferation and Cell Cycle of Human Epidermal Keratinocytes, Human Dermal Fibroblasts, and NIH-3T3 Cells

WU Juan, ZHANG Renjianzhi, ZHONG Shuyan, DU Huicong, SHU Maoguo

(Department of Plastic, Cosmetic and Maxillofacial Surgery, the First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: Objective The study investigates the effects of varying intensities of static magnetic fields on the proliferation and migration capabilities, as well as the cell cycle dynamics, of Normal Human Epidermal Keratinocytes (NHEK), Normal Human Dermal Fibroblast (NHDF), and National Institutes of Health 3T3 (NIH-3T3). **Methods** After culturing human epidermal NHEK, NHDF, and NIH-3T3 adherently, four static magnetic field intervention modes were established. A spatial magnetic field distribution instrument was utilized to assess the relevant indices of various specifications of neodymium iron boron magnets. The morphological changes of the three cell types were observed 72 hours post-intervention with the four static magnetic fields, and their proliferation capabilities were evaluated using CCK8 assays. Flow cytometry was employed to analyze alterations in the cell cycle following 72 hours of static magnetic field intervention across different cell types. Additionally, a wound healing assay was conducted to examine variations in cellular migration abilities after 0, 24 and 48 hours of exposure to distinct static

基金项目: 国家自然科学基金指南引导类原创探索计划项目 (编号: 82151317); 陕西省重点研发计划社会发展领域一般项目 (编号: 2020SF-155)

通信作者: 舒茂国, 主任医师; 研究方向为创面修复。E-mail: shumaoguo@163.com

共同通信作者: 都慧聪, 助理研究员; 研究方向为创面修复。E-mail: dhc0309@126.com

第一作者: 武娟, 实验技术员; 研究方向为创面修复。E-mail: 012437@xjtu.edu.cn

magnetic field interventions. **Results** The four types of magnets used in the study were as follows: N-300 mT pole at 300 mT, S-150 mT pole and N-150 mT pole ranging from 100 to 150 mT, and N-S-100 mT group at 50-100 mT. After a 72-hour intervention with these static magnetic fields, no significant changes were observed in the morphology of three cell types. In NHEK and NHDF, the proliferation ability in the N-300 mT pole group was significantly enhanced compared to the Blank group ($P < 0.05$). Conversely, the S-150 mT pole group exhibited reduced cell proliferation compared to the Blank group ($P < 0.05$). In NIH-3T3, an increase in proliferation ability was also noted for the N-300 mT pole group relative to the Blank group ($P < 0.05$). **Conclusion** N-pole magnetic field intervention can stimulate the proliferation of NHEK, NHDF and NIH-3T3. S-pole magnetic field intervention can inhibit the proliferation of the three types of cells. The effects of static magnetic field intervention intensity on the cell cycle, proliferation and migration abilities of the three types of cells are different, while magnetic intervention in different directions does not show significant differences.

Keywords: quiet magnetic field; fibroblast; keratinocyte; proliferation; cell cycle; biological characteristics

静磁场是一种不随时间变化的磁场, 作为常规疗法在临床上应用较为普遍^[1-2], 研究表明静磁场能够影响某些类型细胞的细胞周期, 静磁场干预后癌细胞在G2/M期细胞周期进程停滞、坏死和晚期细胞凋亡显著增加, 有助于减少正常细胞中抗癌药物的副作用和降低癌细胞对该药物的耐药性^[3-4]。也有研究表明, 6 mT静磁场可通过p53非依赖性通路诱导T淋巴瘤母细胞凋亡并改变细胞周期^[5]。另一方面, 有研究发现不是所有细胞的细胞周期都受静磁场的影响, 静磁场对细胞周期的影响与细胞类型有关。将15种不同细胞, 其中包括2种人源正常细胞(人类视网膜上皮细胞和人胚肾细胞)、6种人源癌细胞(鼻咽癌、结肠癌、表皮癌、肺癌、前列腺癌和膀胱癌细胞)和2种啮齿动物细胞(小鼠胚胎成纤维细胞和中国仓鼠卵巢细胞), 暴露在1 T的静磁场中, 2 d后观察到静磁场处理没有显著影响细胞周期^[6]; 将人的鼻咽癌细胞和人类视网膜上皮细胞暴露于超强静磁场中4 h, 没有观察到明显的细胞周期变化, 说明不同强度和类型的磁场对细胞的增殖和分化会产生截然不同的效果^[7-8]。有研究报导静磁场干预其对组织创面的修复有促进效果, 在创伤愈合修复的过程中, 角质形成细胞和成纤维细胞发挥了重要的作用^[9], 角质形成细胞在创伤后数分钟内形态发生变化, 成纤维细胞创伤后被活化, 并在增殖后改变其分化表型, 从而发挥作用^[10-12]。

已有研究报道静磁场对人皮肤成纤维细胞、小鼠成纤维细胞和小鼠巨噬细胞生物学行为的影响^[13-15], 但实验之间缺乏一定的一致性, 主要与干预的磁场参数、干预模式和细胞类别等有关。因此, 本实验通过设置不同强度静磁场以及干预模式, 探究不同磁场强度和干预模式对NHEK、NHDF和NIH-3T3生物学行为的影响。

1 材料和方法

1.1 细胞、试剂和主要仪器: 人角质形成细胞、人真皮成纤维细胞和小鼠胚胎成纤维细胞(武汉普诺赛生命科技有限公司); DMEM培养基、MEM培养基(武汉普诺赛生命科技有限公司); 胎牛血清(南京诺唯赞生物科技股份有限公司); CCK-8(碧云天生物技术有限公司); 细胞凋亡

检测试剂盒(江苏凯基生物技术股份有限公司); CO₂培养箱(深圳市瑞沃德生命科技股份有限公司); 倒置显微镜(Leica, 德国); 流式细胞仪(安捷伦科技有限公司)。

1.2 细胞培养及干预模式: 将NHEK、NHDF和NIH-3T3常规复苏后, NHEK细胞使用MEM基础培养基(含1%青/链霉素和10%胎牛血清), NHDF和NIH-3T3细胞使用DMEM基础培养基(含1%青/链霉素和10%胎牛血清), 置于37°C, 5% CO₂培养箱中进行培养和静磁场干预。课题组现有钕铁硼磁片规格为: 盘状, 直径100 mm, 厚20 mm; 盘状, 直径35 mm, 厚2 mm; 正方体, 磁片表面35 mm×10 mm, 长30 mm。将上述三种细胞接种于35 mm培养皿, 四种干预模式具体如下。N-300 mT干预组: 细胞贴壁后置于直径100 mm盘状磁片N极上进行干预; S-150 mT干预组: 细胞贴壁后置于直径35 mm盘状磁片S极上进行干预; N-150 mT干预组: 细胞贴壁后置于直径35 mm盘状磁片N极上进行干预; N-S-100 mT干预组: 细胞贴壁后置于正方体磁片N极与S极之间进行干预; Blank组: 细胞在35 mm培养皿中正常培养。

1.3 静磁场检测: 空间磁场分布仪分别安装水平方向和垂直方向的两种探头, 设置相关参数, 主扫描轴X, 沿X方向扫描50 mm后, 沿Y方向平移探头, 将铁片置于拟扫描区域的中心位置并设置好测试点, 分别测试N-300 mT、S-150 mT、N-150 mT和N-S-100 mT四种干预模式下静磁场大小。

1.4 CCK-8实验检测细胞增殖: 收集NHEK、NHDF和NIH-3T3后, 接种于96孔内, 分别使用N-300 mT、S-150 mT和N-150 mT持续干预, 并设置对照组(Blank), 于37°C, 5% CO₂培养箱中培养。干预72 h后弃去培养基, 每孔加入90 μl培养基和10 μl CCK-8溶液, 避光37°C孵育2 h后, 酶标仪检测。

1.5 流式细胞术检测细胞周期: 收集四种干预模式的NHEK、NHDF和NIH-3T3后, 调整细胞量为 1×10^6 个, 干预72 h后, 分别加入1 ml 75%冷乙醇, 4°C过夜固定细胞, 1×PBS洗涤后加入PI/RNase A染色工作液(PI:RNase A为9:1), 室温避光孵育45 min, 上机检测。

1.6 划痕实验检测细胞迁移水平: 将NHEK、NHDF和NIH-3T3接种于六孔板内, 细胞融合度达到90%后, 用无菌枪头垂直划线, 形成划痕。分别使用N-300 mT、S-150 mT和N-150 mT

持续干预并设置对照组 (Blank)，于37℃，5% CO₂培养箱中培养。0 h、24 h和48 h时观察细胞迁移情况并采图，使用Image J软件计算三种细胞干预后的迁移率。

1.7 统计学分析：使用SPSS 22.0和GraphPad Prism 8进行统计学分析。以均数±标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示，单因素方差分析比较组间差异，*t* 检验比较两组间差异，*P* < 0.05表示具有统计学意义。

2 结果

2.1 四种模式静磁场检测结果：NHEK、NHDF和NIH-3T3贴壁后，四种干预模式见图1。空间磁场分布仪检测四种干预模式下磁场强度，N-300 mT组表面磁场强度为300 mT；S-150 mT和N-150 mT组表面磁场强度均为150 mT，磁场方向相反；N-S-100 mT组两个磁体间磁场强度为50~100 mT。见图1。

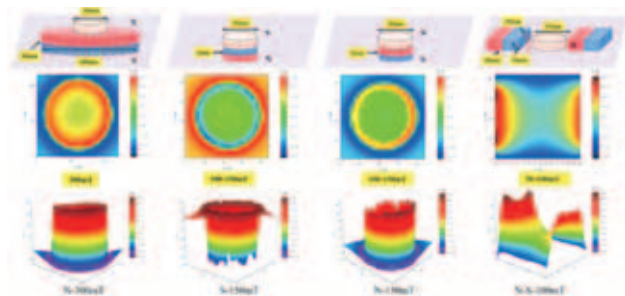
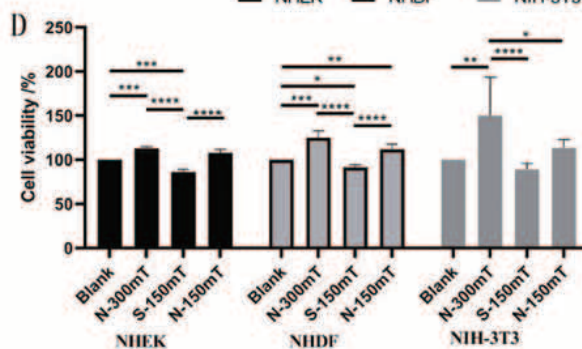
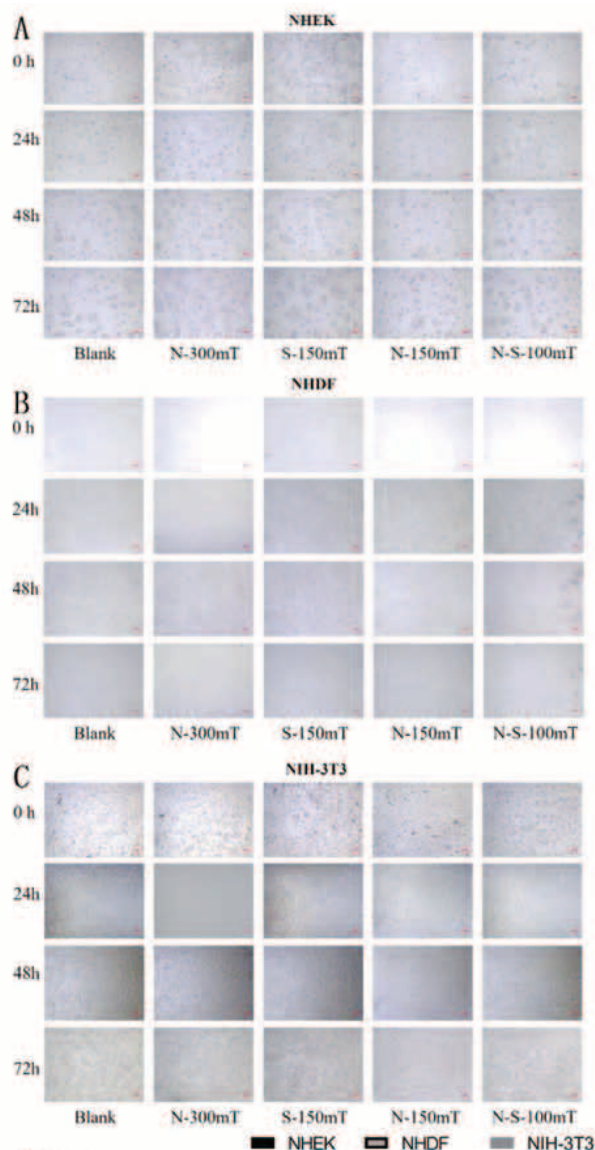


图1 四种磁体的干预模式及磁场分布情况

2.2 不同磁场干预对细胞形态及增殖的影响：四种磁场干预72 h后，NHEK无明显形态学改变，其中N-300 mT组较Blank组和S-150 mT组细胞增殖快 (*P* < 0.05)，S-150 mT组较Blank组、N-300 mT组和N-150 mT组细胞增殖慢 (*P* < 0.05)，N-S-100 mT较Blank组无明显变化 (见图2A)；NHDF无明显形态学改变，N-300 mT组较Blank组和S-150 mT组干预72 h后细胞增殖快 (*P* < 0.05)，S-150 mT组较Blank组、N-300 mT和N-150 mT组细胞增殖慢 (*P* < 0.05)，N-S-100 mT组无明显变化 (见图2B)；NIH-3T3也无明显形态学改变，N-300 mT组较Blank组、S-150 mT和N-150 mT干预72 h后细胞增殖快 (*P* < 0.05)，N-S-100 mT较Blank组无明显变化 (见图2C)。

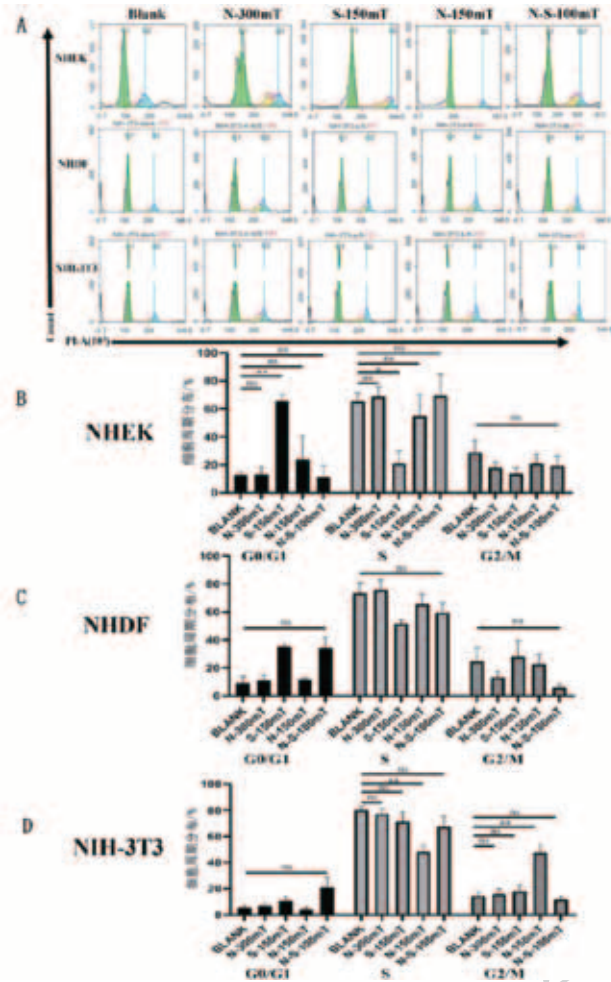
2.3 不同磁场干预对NHEK、NHDF和NIH-3T3细胞周期的影响：四种磁场干预72 h后，收集细胞通过流式细胞术检测细胞周期。对于NHEK，S-150 mT较Blank组G₀/G₁期显著增长 (*P* < 0.05)，S期显著减少 (*P* < 0.05)，G₂/M期无明显变化 (*P* > 0.05)，其余各组差异均无统计学意义 (*P* > 0.05) (见图3A)。对于NHDF，G₀/G₁期、S期和G₂/M期各干预组较Blank组差异均无统计学意义 (*P* > 0.05) (见图3B)。对于NIH-3T3，N-150 mT较Blank组S期显著减少 (*P* < 0.05)，G₂/M期显著增长 (*P* < 0.05)，G₂/M期无明显变化 (*P* > 0.05)，



注：A. NHEK细胞静磁场干预后形态观察；B. NHDF细胞静磁场干预后形态观察；C. NIH-3T3细胞静磁场干预后形态观察；D. 通过CCK-8测定静磁场干预后三种细胞的增殖能力。**P* < 0.05，***P* < 0.01，****P* < 0.001，*****P* < 0.0001；每组*n* = 3。比例尺 = 200 μm

图2 四种磁体干预72 h三种细胞形态及细胞增殖能力变化情况 (5×)

其余各组较Blank组差异均无统计学意义 (*P* > 0.05) (见图3C)。



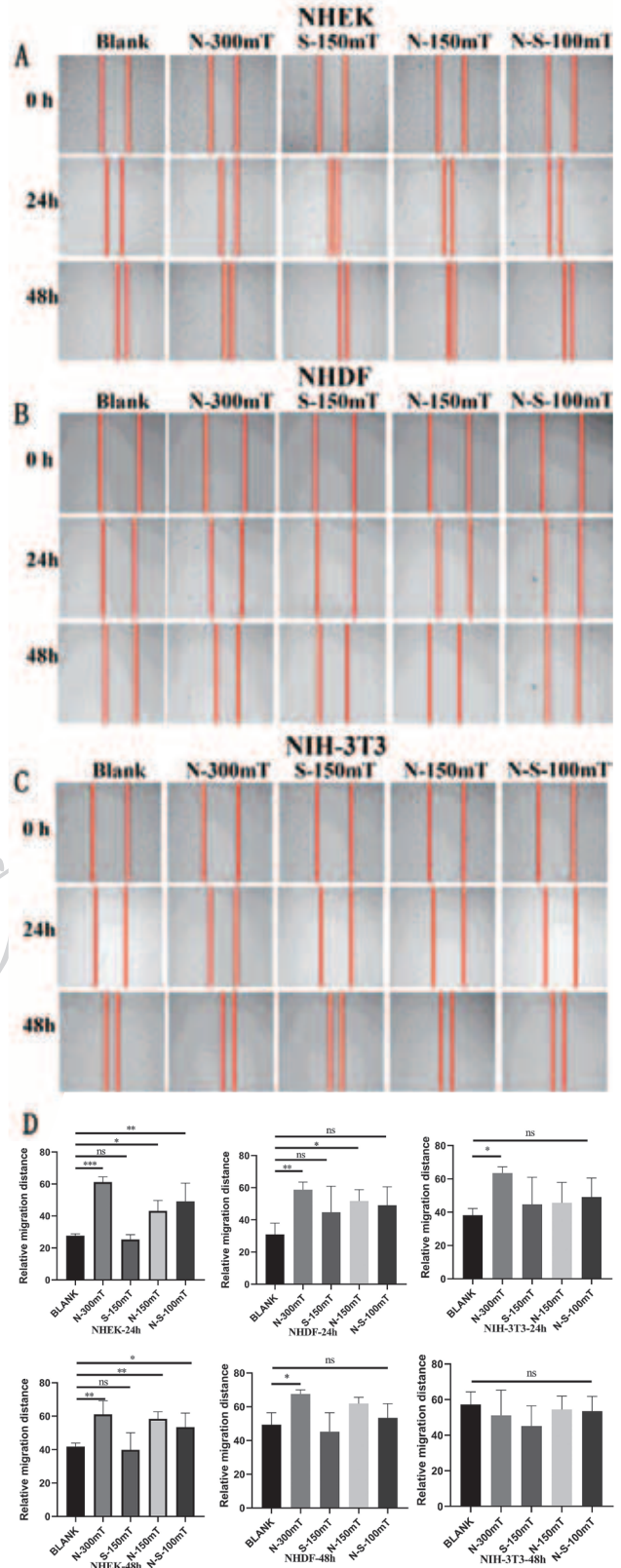
注: A. NHEK、NHDF和NIH-3T3细胞静磁场干预后细胞周期变化示意图; B. NHEK细胞静磁场干预后细胞周期变化情况; C. NHDF细胞静磁场干预后细胞周期变化情况; D. NIH-3T3细胞静磁场干预后细胞周期变化情况。 $^*P < 0.05$, $^{**}P < 0.01$, $^{***}P < 0.001$, $^{****}P < 0.0001$; 每组 $n=3$

图3 四种磁体干预72h三种细胞的细胞周期变化情况

2.4 不同磁场干预对NHEK、NHDF和NIH-3T3细胞迁移能力的影响: 在不同磁场干预24 h和48 h后, NHEK在N-300 mT、N-150 mT和N-S-100 mT组均较Blank组迁移率显著增高 ($P < 0.05$); S-150 mT组无明显差异 ($P > 0.05$) (见图4A)。对于NHDF, N-300 mT干预相比Blank组, 24 h和48 h细胞迁移率均显著增高 ($P < 0.05$); N-150 mT干预组较Blank组, 24 h细胞迁移显著增高 ($P < 0.05$); 其余各组较Blank组均无明显差异 ($P > 0.05$) (见图4B)。对于NIH-3T3, 在24 h时, 仅N-300 mT干预促进细胞迁移率显著增高 ($P < 0.05$); 其余各组较Blank组均无明显差异 ($P > 0.05$) (见图4C)。

3 讨论

本研究使用课题组现有三种规格的钕铁硼磁体, 通过空间磁场分布仪测定静磁场大小, 并设置不同的干预模式, 确定静磁场干预后对角质形成细胞和成纤维细胞增殖



注: A. NHEK细胞静磁场干预后细胞迁移情况; B. NHDF细胞静磁场干预后细胞迁移情况; C. NIH-3T3细胞静磁场干预后细胞迁移情况; D. 通过伤口愈合实验测定静磁场干预后三种细胞的迁移能力。 $^*P < 0.05$, $^{**}P < 0.01$, $^{***}P < 0.001$, $^{****}P < 0.0001$; 每组 $n=3$ 。比例尺=200 μm

图4 四种磁体干预72h三种细胞的细胞迁移能力变化情况 (5 \times)

能力以及细胞周期的影响。在不同磁场干预下,角质形成细胞和成纤维细胞形态均无明显变化,也未见对磁场响应的分布变化,但对细胞增殖、周期和迁移能力表现出不同的影响。其中N-300 mT干预对NHEK的增殖能力显著提升,S-150 mT则出现抑制现象;S-150 mT干预后NHEK表现出G0/G1期显著增长,S期显著减少;N-300 mT、N-150 mT和N-S-100 mT干预则促进NHEK迁移能力显著提升。对于NHDF细胞,N-300 mT和N-150 mT干预后细胞增殖能力和迁移能力均显著提升,S-150 mT干预则出现抑制现象,但不同磁场干预后细胞周期均无明显差异。此外,本研究也对小鼠来源的成纤维细胞进行了对应的检测,NIH-3T3细胞磁干预72 h无明显形态改变,N-300 mT和N-150 mT干预后细胞的增殖能力显著提升;N-150 mT干预后导致细胞S期显著减少,G2/M期显著增长;N-300 mT干预促进细胞迁移能力显著提升。综上所述表明,人源成纤维细胞和角质形成细胞以及小鼠来源的成纤维细胞在本研究设置的不同磁场强度和干预模式下,细胞形态及分布无明显变化,但细胞增殖和迁移能力受到不同程度影响。

本研究考虑不同磁场大小以及同一磁场不同方向设计4种磁场干预组,实验结果表明,N-300 mT干预后三种细胞的增殖能力和迁移能力均显著增加,但细胞周期无明显变化;S-150 mT干预后NHEK细胞和NHDF细胞的增殖率减少,且细胞周期检测NHEK细胞显示G0/G1期显著增长,S期显著减少,提示对其增殖能力产生一定的抑制作用;N-150 mT干预后NHEK细胞和NHDF细胞的增殖率提升,细胞周期检测NIH-3T3细胞显示S期显著减少G2/M期显著增长,提示其增殖能力增强;N-S-100 mT干预组,仅NHEK细胞的增殖率提升,细胞周期和迁移率无明显变化。结果表明,相同磁场强度但磁场方向不同对细胞增殖、周期、迁移能力影响存在差异。

综上所述,不同磁场方向对细胞增殖、周期以及迁移能力表现出不同的影响,且与静磁场的大小有一定的相关性^[14-15],后续将其内在调控机制进行深入研究,明确磁场对创面修复相关细胞生物学行为影响的内在机制,探索磁场促创面修复的可行性,期待以磁为代表的物理疗法早日在创面临床治疗中得到应用。

[参考文献]

- [1]Wei Z L, Sheng W F, Sheng Y L, et al. The review of bioeffects of static magnetic fields on the oral tissue-derived cells and its application in regenerative medicine[J]. Cells, 2021,10(10):2662.
- [2]Yang J C, Feng Y, Li Q M, et al. Evidence of the static magnetic field

effects on bone-related diseases and bone cells[J]. Prog Biophys Mol Biol, 2022,177168-177180.

- [3]Samaneh K, Sabet A, Jouni F J, et al. Effect of co-treatment with static magnetic field and cis-diamminedichloroplatinum(II) on apoptosis and cell cycle progression in HeLa cell line and Hu0₂[J]. Cytol Genet, 2021,55(2):162-170.
- [4]Mohammad S, Fatemeh J J, Parviz A, et al. Influence of static magnetic field on HeLa and Huo2 cells in the presence of aloe vera extract[J]. Asian Pac J Cancer Prev, 2021,22(S1):19-15.
- [5]Reza M A, Parviz A, Javad S M, et al. Static magnetic field of 6 mT induces apoptosis and alters cell cycle in p53 mutant Jurkat cells[J]. Electromagnetic Biol Med, 2013,32(1):9-19.
- [6]Zhang L, Hou Y, Li Z, et al. 27T ultra-high static magnetic field changes orientation and morphology of mitotic spindles in human cells[J]. Elife, 2017,6:e28212.
- [7]Zhang L, Ji X, Yang X, et al. Cell type- and density-dependent effect of 1T static magnetic field on cell proliferation[J]. Oncotarget, 2017,8(8):13126-13141.
- [8]Ueno S. Studies on magnetism and bioelectromagnetics for 45 years: from magnetic analog memory to human brain stimulation and imaging[J]. Bioelectromagnetics, 2012,33(1):3-22.
- [9]Baron J M, Glatz M, Proksch E. Optimal support of wound healing: new insights[J]. Dermatology, 2020,236(6):593-600.
- [10]Dhulipalla S, Duarte A G, Wu L, et al. Keratinocyte integrin $\alpha 3 \beta 1$ promotes efficient healing of wound epidermis[J]. JID Innov, 2025,5(1):100310.
- [11]Silva N, Marques J, Cruz D B M, et al. Cold atmospheric plasma activation of human gingival fibroblasts for improved wound healing[J]. J Phys D Appl Phys, 2025,58(2):025207.
- [12]宋佳妹,刘挺挺,姚斌. 神经系统在调控皮肤创伤修复和瘢痕愈合中的重要作用[J].中国组织工程研究, 2025,29(18):3877-3884.
- [13]蒋沐岐,孙宇轩,孙亚生,等. 静磁场对纯钛表面成骨细胞和巨噬细胞的影响[J].口腔医学研究,2024,40(6):512-518.
- [14]Tang X, Wang D, Zhang M, et al. Magnetic field direction differentially impacts the growth of different cell types[J]. Electromagnetic Biol Med, 2018,37(2):114-125.
- [15]朱一鸣,方彦雯,杨建成,等. 磁场与血管生成研究进展[J].科学通报, 2020,65(13):1224-1237.

[收稿日期]2025-02-18

本文引用格式: 武娟,张仁见智,钟书颜,等. 不同强度静磁场对人角质形成细胞、成纤维细胞及小鼠成纤维细胞生物学特性的影响[J]. 中国美容医学,2026,35(6):13-17.

· 告作者和读者 ·

来稿请自留底稿,勿一稿多投,投稿邮箱: zgmryx@163.com。作者如欲投他刊,请务必在投稿后2个月内告知本刊,若因未及时告知,导致稿件的版权问题,责任作者自负。