

## · 临床研究 ·

## 冷却对振动引起的人手指感觉神经动作电位波幅的影响

刘芳<sup>1</sup> 朱冬青<sup>2</sup> 曾明<sup>1</sup> 时美芳<sup>1</sup> 朱愈<sup>3</sup> 顾旭东<sup>1</sup>

<sup>1</sup>嘉兴学院附属第二医院康复医学科, 嘉兴 314000; <sup>2</sup>复旦大学附属华山医院神经内科, 上海 200040; <sup>3</sup>美国纽约州立大学上州医科大学医院物理医学与康复科, 纽约州锡拉丘兹, 13206  
通信作者: 顾旭东, Email: tougao\_jxey@163.com

**【摘要】 目的** 观察冷却对振动引起的人手指感觉神经动作电位(SNAP)波幅的影响。**方法** 采用自身配对设计, 随机选取 15 名健康成年人, 利用冰袋将中指皮肤温度冷却至 22℃ 左右, 或保持常温(中指皮肤温度 32℃ 左右), 将振动器置于受试者中指掌指关节处, 施加振动, 振动幅度 2 mm, 频率 60 Hz。分别于振动前、振动时、振动停止后, 采用电生理感觉神经传导检查记录受试者中指 SNAP 的波幅。**结果** 相同温度条件下, 振动时的中指 SNAP 波幅均较振动前低( $P<0.05$ ), 在振动停止后即刻恢复至振动前水平, 振动前与振动停止后中指 SNAP 波幅比较, 差异无统计学意义( $P>0.05$ )。与 32℃ 条件下同振动时间点比较, 受试者在 22℃ 条件下的中指 SNAP 波幅较高( $P<0.05$ )。受试者 32℃ 条件下的中指 SNAP 波幅差为( $61.7\pm 15.1$ )%, 22℃ 条件下的波幅差为( $24.1\pm 7.0$ )%, 与 32℃ 条件下相比, 受试者 22℃ 条件下的中指 SNAP 波幅差值较小( $P<0.05$ )。**结论** 冷却能显著减少振动对人手指 SNAP 波幅降低的影响, 这可能是冷却疗法治疗手-臂振动综合征的潜在机制之一。

**【关键词】** 振动; 冷却; 感觉神经动作电位; 皮肤机械感受器

**基金项目:** 嘉兴市科技计划项目(2020AD30096)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2024.02.009

**Effects of cooling on the amplitude of vibration-induced sensory nerve action potentials**

Liu Fang<sup>1</sup>, Zhu Dongqing<sup>2</sup>, Zeng Ming<sup>1</sup>, Shi Meifang<sup>1</sup>, Zhu Yu<sup>3</sup>, Gu Xudong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Rehabilitation Medicine, Second Affiliated Hospital of Jiaxing University, Jiaxing 314000, China;

<sup>2</sup>Department of Neurology, Huashan Hospital Affiliated to Fudan University, Shanghai 200040, China; <sup>3</sup>Department of Physical Medicine and Rehabilitation, State University of New York Upstate Medical University Hospital, Syracuse, NY 13206, USA.

Corresponding author: Gu Xudong, Email: tougao\_jxey@163.com

**【Abstract】 Objective** To observe any effect of cooling on the amplitude of vibration-induced sensory nerve action potentials (SNAPs) in human digits. **Methods** The middle fingers of 15 healthy adults were either cooled to about 22℃ using an ice pack or kept at about 32℃. A vibrator was applied to the joint connecting the middle finger and the palm vibrating with an amplitude of 2mm at a frequency of 60Hz. The amplitudes of middle finger SNAPs before, during and right after the vibration were recorded. **Results** The SNAP amplitude at a given temperature was lower during vibration than before it, but it immediately returned to the pre-vibration level after the vibration ceased. The middle finger SNAP amplitudes at 22℃ were significantly higher than those at 32℃ throughout. The decrease in amplitude at 32℃ ( $61.7\pm 15.1\%$ ) was significantly greater than that at 22℃ ( $24.1\pm 7.0\%$ ). **Conclusions** Cooling significantly reduces the effect of vibration on the amplitude of digital SNAPs. That suggests a way to protect the sensory nerves in hand-arm vibration syndrome.

**【Key words】** Vibration; Cooling; Sensory nerves; Action potentials; Mechanoreceptors

**Funding:** A Jiaxing Science and Technology Plan project (2020AD30096)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2024.02.009

手臂振动综合征是因手、臂过度重复暴露于手持振动工具(如气动工具、链锯、磨床)而导致的疾病,其所带来的振动效应可能会对神经肌肉和血管系统产生

不利影响<sup>[1-3]</sup>,如麻木、感觉异常、灵活性降低等。有研究报道,振动影响神经功能的机制可能是有髓纤维损伤和神经轴突丢失,或继发于病理性血管变化<sup>[4-5]</sup>。

Nilsson 等<sup>[3]</sup>研究报道,振动所引发的感觉症状发生于血管症状出现之前,其潜伏期比雷诺现象短 3 倍,提示手臂振动综合征的感觉神经损伤可能由振动直接引发,但目前尚缺乏实质性的电生理学证据。感觉神经动作电位(sensory nerve action potential, SNAP)代表 A $\beta$  有髓神经纤维动作电位的总和,其波幅大小与去极化的感觉神经轴突数量成正比。前期研究发现,将振动作用于人手掌时,手指正中神经 SNAP 波幅即刻降低,停止振动时,SNAP 波幅立即回到振动前水平,提示振动刺激会影响 A $\beta$  纤维,即刻降低 A $\beta$  纤维对电刺激的反应性,即振动可以降低人手指 SNAP 波幅,且该效应具有即时性<sup>[6]</sup>。

皮肤的机械感受器在本体感觉<sup>[7-8]</sup>、肌肉激活的调节<sup>[9]</sup>和运动控制<sup>[10]</sup>中发挥重要作用。皮肤感觉功能障碍可能会导致本体感觉障碍<sup>[11]</sup>和/或运动功能障碍<sup>[12]</sup>。有研究报道,局部振动可影响本体感觉系统,进而调节运动控制能力,目前已应用于神经疾病患者的康复<sup>[13]</sup>。振动可以激活多种皮肤机械感受器,包括骨膜和深层的 Pacinian 小体(频率 60~400 Hz)、表层的 Meissner 小体(20~50 Hz)、Merkel 盘(频率 5~15 Hz)<sup>[14-16]</sup>。机械感受器由传入神经纤维支配,这些传入纤维向近端汇聚成 A $\beta$  有髓纤维。

有较多研究使用冷却方法来减少皮肤感觉传入,其中有研究发现冷却脚底皮肤可降低皮肤机械感受器的敏感性<sup>[17]</sup>。还有研究证实,冷却可以有效减少振动对无毛皮肤中支配机械感受器的传入纤维的发放<sup>[17]</sup>。本研究采用电生理感觉神经传导检查,观察冷却对短暂暴露于局部振动条件下手指 SNAP 波幅的影响,即对有髓 A $\beta$  感觉神经纤维的影响。

## 对象与方法

### 一、研究对象

纳入标准:所有受试者均为健康成年人,无神经肌肉功能障碍,电生理检测正中神经 SNAP 均正常,年龄 20~48 岁,平均年龄(28.7 $\pm$ 8.0)岁,均签署了知情同意书。排除标准:不能配合完成试验者,手部局部皮肤破损者。

采用自身配对设计,在嘉兴市随机选取 15 名健康受试者,其中男性 6 例,女性 9 例。本研究获得中国嘉兴学院附属第二医院伦理委员会审核批准(JXEY-2021SW102)。

### 二、研究方法

分别在 32℃ 和 22℃ 的条件下,于振动前、振动时、振动停止后对每名受试者各进行 1 次中指正中神经 SNAP 的记录。受试者坐在椅子上,手和前臂旋后位,

自然摆放于面前的木桌上,手指放松。将中国产红外温度计探头(HABOTEST 型、DT8380BH 型)置于受试者中指表面,监测中指皮肤温度。

1. 振动刺激:采用中国产 9908 型手持式振动器进行振动刺激,波幅为 2 mm,频率为 60 Hz。振动器位于掌面中指的掌指关节处,与手掌皮肤接触,接触区域为直径 3.0 cm 的圆形。

2. 感觉神经传导电刺激:采用日本产 MEB-9400 型电刺激器进行感觉神经传导电刺激。将表面环状电极贴于中指近端指间关节作为作用电极,其远端 3.5 cm 处为参考电极,接地电极位于电刺激点和记录电极之间。在受试者手腕中部、距离记录电极 13 cm 处刺激正中神经。逐渐增加电流刺激强度,直至达到 SNAP 最大波幅,然后再增加 20% 电流刺激强度,以确保达到最大 SNAP 波幅并保持稳定。电刺激为频率 2 Hz、时限 0.2 ms 的方波。

3. 记录 32℃ 条件下中指正中神经的 SNAP:①常温下,用红外线温度计测量受试者中指皮肤温度,约 32℃;②振动前,电刺激频率为 2 Hz,SNAP 连续叠加 20 次,将持续 10 s 后得到的电位作为基线;③连续振动期间,记录正中神经 20 次 SNAP 波形叠加的电位,持续 10 s;④停止振动,立即记录 20 次 SNAP 波形叠加的电位,持续 10 s;⑤测量振动前、振动时、振动停止后 SNAP 负相位的波幅,记录波幅差,波幅差=[(振动前的波幅-振动时的波幅)/振动前的波幅] $\times$ 100%。详见图 1A。

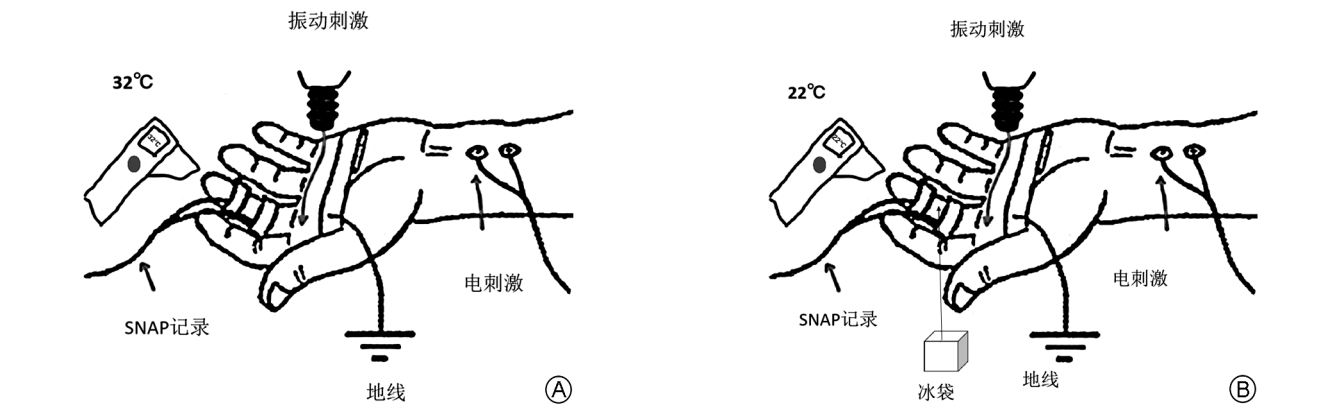
4. 记录 22℃ 条件下中指正中神经的 SNAP:利用冰袋冷却受试者中指,用红外温度计测量中指皮肤温度,至 22℃ 左右时重复上述②~⑤步骤。详见图 1B。试验过程中,随时监测受试者中指温度,维持在 22℃ 左右。

### 三、统计学方法

采用 SPSS 25.0 版统计学软件进行数据分析,本研究所得计量资料以( $\bar{x} \pm s$ )形式表示,均符合正态分布,不同温度条件下的结果比较采用配对  $t$  检验。同一温度下,振动前与振动时的比较、振动前与振动停止后的比较采用配对  $t$  检验。 $P < 0.05$  表示差异有统计学意义。

## 结 果

冷却及振动期间,本研究受试者中指均未出现明显的发绀、发白现象。相同温度条件下,振动时的中指 SNAP 波幅均较振动前低( $P < 0.05$ ),在振动停止后恢复至振动前水平,振动前与振动停止后中指 SNAP 波幅比较,差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。与 32℃ 条件下同振动时间点比较,受试者在 22℃ 条件下的中指



注:图 1A 为 32℃ 条件下记录中指正中神经 SNAP 的示意图;图 1B 为 22℃ 条件下记录中指正中神经 SNAP 的示意图;将电刺激作用于受试者腕部正中神经,振动刺激作用于受试者中指掌指关节掌侧;采用中指环形表面电极记录

图 1 32℃ 和 22℃ 条件下记录中指正中神经 SNAP 的示意图

SNAP 波幅较高 ( $P<0.05$ )。受试者 32℃ 条件下的中指 SNAP 波幅差为  $(61.7\pm15.1)\%$ , 22℃ 条件下的波幅差为  $(24.1\pm7.0)\%$ , 与 32℃ 条件下相比, 受试者 22℃ 条件下的中指 SNAP 波幅差值较小 ( $P<0.05$ )。详见表 1、表 2。

表 1 受试者振动前、振动时和振动停止后中指不同温度下的 SNAP 波幅 ( $\mu\text{V}$ ,  $\bar{x}\pm s$ )

| 时间点   | 例数 | 32℃ 条件下的 SNAP 波幅      | 22℃ 条件下的 SNAP 波幅        |
|-------|----|-----------------------|-------------------------|
| 振动前   | 15 | 49.4±14.6             | 66.5±13.7 <sup>b</sup>  |
| 振动时   | 15 | 17.9±8.3 <sup>a</sup> | 51.0±13.7 <sup>ab</sup> |
| 振动停止后 | 15 | 48.7±14.3             | 66.8±13.6 <sup>b</sup>  |

注:与同温度条件下振动前比较, <sup>a</sup> $P<0.05$ ;与 32℃ 条件下同振动时间点比较, <sup>b</sup> $P<0.05$

讨 论

前期研究表明, 常温时, 振动会立即引起手指 SNAP 波幅降低<sup>[6]</sup>。本研究发现, 冷却条件下, 振动也能立即引起手指 SNAP 波幅降低, 但冷却对振动引起 SNAP 波幅降低的幅度较常温时显著减小。

有研究报道, 手部的机械感受器可被低频 (20 Hz) 振动激活, 且每次激活均会产生多个峰电位发放<sup>[18]</sup>。在人类手部无毛的皮肤中, 支配 4 种皮肤机械感受器的传入纤维占比分别为: Pacinian 小体 10%~15%, Meissner 小体约 40%, Ruffini 的末梢约 20%, Merkel 细胞约 25%<sup>[19]</sup>。从经典神经生理学观点来看, 这 4 类支配手部皮肤传入纤维的功能有着明显

| 受试者<br>编号 |    |   | 32℃ 条件下的 SNAP 波幅         |                          |                            |            | 22℃ 条件下的 SNAP 波幅         |                          |                            |            |
|-----------|----|---|--------------------------|--------------------------|----------------------------|------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|------------|
|           |    |   | 振动前<br>( $\mu\text{V}$ ) | 振动时<br>( $\mu\text{V}$ ) | 振动停止后<br>( $\mu\text{V}$ ) | 波幅差<br>(%) | 振动前<br>( $\mu\text{V}$ ) | 振动时<br>( $\mu\text{V}$ ) | 振动停止后<br>( $\mu\text{V}$ ) | 波幅差<br>(%) |
| 1         | 32 | 女 | 56                       | 35                       | 56                         | 38         | 73                       | 56                       | 73                         | 23         |
| 2         | 41 | 男 | 46                       | 24                       | 46                         | 48         | 65                       | 56                       | 64                         | 14         |
| 3         | 22 | 女 | 56                       | 32                       | 56                         | 43         | 81                       | 71                       | 81                         | 13         |
| 4         | 48 | 男 | 26                       | 15                       | 25                         | 42         | 45                       | 30                       | 45                         | 33         |
| 5         | 20 | 女 | 73                       | 21                       | 72                         | 71         | 94                       | 77                       | 94                         | 18         |
| 6         | 21 | 女 | 57                       | 17                       | 55                         | 70         | 81                       | 64                       | 81                         | 21         |
| 7         | 23 | 女 | 71                       | 27                       | 70                         | 62         | 78                       | 58                       | 73                         | 26         |
| 8         | 28 | 男 | 38                       | 11                       | 40                         | 71         | 59                       | 37                       | 61                         | 37         |
| 9         | 27 | 女 | 35                       | 18                       | 35                         | 49         | 64                       | 54                       | 65                         | 16         |
| 10        | 25 | 女 | 56                       | 7                        | 50                         | 87         | 67                       | 50                       | 71                         | 25         |
| 11        | 20 | 男 | 64                       | 10                       | 65                         | 84         | 74                       | 54                       | 77                         | 27         |
| 12        | 28 | 女 | 37                       | 14                       | 37                         | 62         | 54                       | 41                       | 54                         | 24         |
| 13        | 30 | 男 | 40                       | 10                       | 40                         | 75         | 62                       | 45                       | 63                         | 27         |
| 14        | 35 | 女 | 38                       | 15                       | 39                         | 61         | 53                       | 40                       | 51                         | 25         |
| 15        | 31 | 男 | 35                       | 13                       | 31                         | 63         | 48                       | 32                       | 49                         | 33         |



的区别<sup>[20-21]</sup>。然而,部分研究通过直接记录单个感受器传入的实验证实,上述 4 类机械感受器在功能上存在大量重叠<sup>[8]</sup>,且参与了人的运动控制<sup>[17]</sup>。在自然条件的刺激下,较少出现仅激活某种单一类型机械感受器的情况<sup>[22]</sup>。提示皮质整合是多模态的,其输入刺激来自于多种类型的机械感受器<sup>[23]</sup>。

一项采用成对关联刺激技术的研究表明,人手指神经 SNAP 的绝对不应期是 0.7 ms<sup>[24]</sup>。通过显微神经图记录到人远端正中神经感觉神经纤维轴突的绝对不应期范围是 0.7~4.5 ms,平均 $(2.1 \pm 0.9)$  ms<sup>[14,25]</sup>。支配 4 种机械感受器的传入纤维,无论是快纤维还是慢纤维,绝对不应期的范围均无明显差别,如想维持绝对不应期在这个范围,所有传入纤维的 A $\beta$  纤维放电频率至少需维持在 222~1428 Hz 或以上<sup>[6]</sup>。而本实验采用的振动频率为 60 Hz,所以引起的神经纤维的放电频率远高于振动频率。本课题组前期的研究表明,振动可以兴奋多种类型的机械感受器,进一步促使传入神经纤维兴奋,而该兴奋可与来自电刺激兴奋神经纤维诱发的电位相互对撞抵消<sup>[6]</sup>,这可能是振动引起 SNAP 波幅降低的原因。这一结果与 Hagbarth 等<sup>[26]</sup>提出的“忙线”(line busy)假说相一致,即振动引起传入神经纤维强烈兴奋后的绝对不应期阻碍了神经短时间内的再次兴奋。

对于有髓纤维,冷却可以延迟钠通道的关闭失活,并延长神经纤维去极化的时间,导致神经传导速度减慢,更长的钠通道开放时间会导致大量钠流入,因此冷却会导致更高的波幅和更长的时限,这种现象在感觉神经纤维中更明显<sup>[27-28]</sup>。这与目前的研究一致,即受试者中指冷却至 22℃ 时,振动前、中、后的 SNAP 波幅均比 32℃ 时更高。冷却对周围神经的作用使传入纤维的绝对不应期延长<sup>[17,28]</sup>。推测认为,冷却时 SNAP 波幅应降低的较多,但我们的研究表明,冷却减少了振动引起的 SNAP 波幅降低的幅度,原因在于人体皮肤冷却期间,支配 4 种机械感受器的单个感觉神经纤维的激活水平也是降低的<sup>[11]</sup>。此外,冷却时,皮肤机械感受器的阈值增高<sup>[12]</sup>,即机械感受器冲动不能以高频率发放<sup>[20]</sup>,这与动物研究报告中冷却可以使机械感受器的放电频率普遍降低相一致<sup>[29-30]</sup>。本实验表明,皮肤中的机械感受器和 A $\beta$  传入神经纤维都受冷却的影响,且皮肤机械感受器受冷却的影响大于 A $\beta$  传入纤维所受的影响。

综上所述,冷却时,振动引起的感觉神经纤维兴奋的发放频率可能比常温时更难达到“占线效应”(line busy effects)或“掩蔽效应”(masking effects)的频率范围。振动可以强有力地兴奋皮肤机械感受器,从而引起 A $\beta$  传入纤维的高频发放<sup>[6]</sup>。而振动的这种效应在

冷却时显著降低。对于手臂振动综合征患者或存在潜在风险的人群,手部局部冷却对振动引起的手指感觉神经的强烈兴奋具有预防和保护作用。本研究也存在一些不足,如仅观察了短暂振动作业 10 s 时的 SNAP,在今后的研究中将考虑观察长时间振动作业对 SNAP 的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Griffin MJ.Measurement, evaluation, and assessment of peripheral neurological disorders caused by hand-transmitted vibration[J].Int Arch Occup Environ Health, 2008, 81 ( 5 ): 559-573. DOI: 10.1007/s00420-007-0253-5.
- [2] Pyykkö I.Clinical aspects of the hand-arm vibration syndrome;a review [J].Scand J Work Environ Health, 1986, 12 ( 5 ): 439-447. DOI: 10.5271/sjweh.2114.
- [3] Nilsson T, Wahlström J, Burström L.Hand-arm vibration and the risk of vascular and neurological diseases-a systematic review and meta-analysis[J].PLoS One, 2017, 12 ( 7 ): e0180795. DOI: 10.1371/journal.pone.0180795.
- [4] Pilgian G, Herbert R, Hearn M, et al.Evaluation and management of chronic work-related musculoskeletal disorders of the distal upper extremity[J].Am J Ind Med, 2000, 37 ( 1 ): 75-93. DOI:10.1002/(sici)1097-0274(200001)37:1<75::aid-ajim7>3.0.co;2-4.
- [5] Takeuchi T, Futatsuka M, Imanishi H, et al.Pathological changes observed in the finger biopsy of patients with vibration-induced white finger[J].Scand J Work Environ Health, 1986, 12 ( 4 Spec ): 280-283. DOI:10.5271/sjweh.2140.
- [6] Zhu DQ, Liu F, Zhu Y, et al.Focal vibration alters human digital sensory nerve action potentials: a pilot study [J].Neural Plast, 2021, 2021:8819169.DOI:10.1155/2021/8819169.
- [7] Collins DF, Refshauge KM, Todd G, et al.Cutaneous receptors contribute to kinesthesia at the index finger, elbow, and knee[J].J Neurophysiol, 2005, 94 ( 3 ): 1699-1706. DOI:10.1152/jn.00191.2005.
- [8] Lowrey CR, Strzalkowski ND, Bent LR.Skin sensory information from the dorsum of the foot and ankle is necessary for kinesthesia at the ankle joint[J].Neurosci Lett, 2010, 485 ( 1 ): 6-10. DOI:10.1016/j.neulet.2010.08.033.
- [9] Fallon JB, Bent LR, McNulty PA, et al.Evidence for strong synaptic coupling between single tactile afferents from the sole of the foot and motoneurons supplying leg muscles[J].J Neurophysiol, 2005, 94 ( 6 ): 3795-3804. DOI:10.1152/jn.00359.2005.
- [10] Eils E, Nolte S, Tewes M, et al. Modified pressure distribution patterns in walking following reduction of plantar sensation [J].J Biomech, 2002, 35 ( 10 ): 1307-1313. DOI: 10.1016/s0021-9290 ( 02 ) 00168-9.
- [11] Kim JS, Choi-Kwon S.Discriminative sensory dysfunction after unilateral stroke[J].Stroke, 1996, 27 ( 4 ): 677-682. DOI:10.1161/01.str.27.4.677.
- [12] Fisher CM. Pure sensory stroke involving face, arm, and leg[J].Neurology, 1965, 15:76-80. DOI:0.1212/WNL.15.1.76.7.
- [13] Zackowski KM, Dromerick AW, Sahrman SA, et al.How do strength, sensation, spasticity and joint individuation relate to the reaching deficits of people with chronic hemiparesis [J].Brain, 2004, 127 ( 5 ): 1035-1046. DOI:10.1093/brain/awh116.

- [14] Mackel R. Conduction of neural impulses in human mechanoreceptive cutaneous afferents[J]. J Physiol, 1988, 401: 597-615. DOI: 10.1113/jphysiol.1988.sp017182.
- [15] Gilman S. Joint position sense and vibration sense: anatomical organisation and assessment[J]. J Neurol Neurosurg Psychiatry, 2002, 73(5): 473-477. DOI: 10.1136/jnnp.73.5.473.
- [16] Gardner EP, Martin JH, Jessell TM. The bodily senses, principles of neural science[M]. New York: McGraw-Hill, 2000: 430-450.
- [17] Lowrey CR, Strzalkowski ND, Bent LR. Cooling reduces the cutaneous afferent firing response to vibratory in stimuli glabrous skin of the human foot sole[J]. J Neurophysiol, 2013, 109(3): 839-850. DOI: 10.1152/jn.00381.2012.
- [18] Muniak MA, Ray S, Hsiao SS, et al. The neural coding of stimulus intensity: linking the population response of mechanoreceptive afferents with psychophysical behavior[J]. J Neurosci, 2007, 27(43): 11687-11699. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1486-07.2007.
- [19] Purves D, Aaugustine GJ, Fitzpatrick D, et al. Neuroscience[M]. Massachusetts, USA, Sunderland: Sinauer Associates, 2004: 192-193.
- [20] Nelson RJ. The somatosensory system deciphering the brain's own body image, neural mechanisms of tactile form and texture perception[M]. Boca Raton: CRC Press, 2002: 95.
- [21] Park SB, Davare M, Falla M, et al. Fast-adapting mechanoreceptors are important for force control in precision grip but not for sensorimotor memory[J]. J Neurophysiol, 2016, 115(6): 3156-3161. DOI: 10.1152/jn.00195.2016.
- [22] Gardner E, Martin J. Coding of sensory information, principles of neural science[M]. USA: McGraw-Hill, 2000: 411-429.
- [23] Saal HP, Bensmaia SJ. Touch is a team effort: interplay of submodalities in cutaneous sensibility[J]. Trends Neurosci, 2014, 37(12): 689-697. DOI: 10.1016/j.tins.2014.08.012.
- [24] Tackmann W, Lehmann HJ. Refractory period in human sensory nerve fibers[J]. Eur Neurol, 2004, 12(5-6): 277-292. DOI: 10.1159/000114626.
- [25] Brink EE, Mackel RG. Time course of action potentials recorded from single human afferents[J]. Brain, 1993, 116(2): 415-432. DOI: 10.1093/brain/116.2.415.
- [26] Hagbarth KE. The effect of muscle vibration in normal man and in patients with motor disorders, new development in electromyography and clinical neurophysiology[M]. Basel: Karger, 1973: 428-443.
- [27] Preston DC, Shapiro BE. Electromyography and neuromuscular disorders clinical-electrophysiologic correlations[M]. New York: Elsevier, 2013: 71-73.
- [28] Franz DN, Iggo A. Conduction failure in myelinated and non-myelinated axons at low temperatures[J]. J Physiol, 1968, 199(2): 319-345. DOI: 10.1113/jphysiol.1968.sp008656.
- [29] Phillips JR, Matthews PB. Texture perception and afferent coding distorted by cooling the human ulnar nerve[J]. J Neurosci, 1993, 13(6): 2332-2341. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.13-06-02332.1993.
- [30] Duclaux R, Kenshalo DR. The temperature sensitivity of the type I slowly adapting mechanoreceptors in cats and monkeys[J]. J Physiol, 1972, 224(3): 647-664. DOI: 10.1113/jphysiol.1972.sp009917.

(修回日期: 2023-12-29)

(本文编辑: 凌琛)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

## 本刊对参考文献的有关要求

执行 GB/T 7714-2005《文后参考文献著录规则》。采用顺序编码制著录, 依照其在文中出现的先后顺序用阿拉伯数字标出, 并将序号置于方括号中, 排列于文后。内部刊物、未发表资料(不包括已被接受的待发表资料)、个人通信等请勿作为文献引用。日文字符请按日文规定书写, 勿与我国汉字及简化字混淆。同一文献作者不超过 3 人全部著录; 超过 3 人只著录前 3 人, 后依文种加表示“等”。作者姓名一律姓氏在前、名字在后, 外国人的名字采用首字母缩写形式, 缩写名后不加缩写点; 不同作者姓名之间用“,” 隔开, 不用“和”、“and”等连词。题名后请标注文献类型标志。文献类型标志代码参照 GB 3469-1983《文献类型与文献载体代码》, 如参考文献类型为杂志, 请于参考文献末尾标注 DOI 号。中文期刊用全名。示例如下。

- [1] 陈登原. 国史旧闻[M]. 北京: 中华书局, 2000: 29.
- [2] 胡永善. 运动功能评定//王茂斌. 康复医学[M]. 2 版. 北京: 人民卫生出版社, 2002: 67-78.
- [3] 刘欣, 申阳, 洪葵, 等. 心脏性猝死风险的遗传检测管理[J]. 中华心血管病杂志, 2015, 43(9): 760-764. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-3758.2015.09.003.
- [4] Mahowald ML, Krug HE, Singh JA, et al. Intra-articular Botulinum Toxin Type A: a new approach to treat arthritis joint pain[J]. Toxicon, 2009, 54(5): 658-667. DOI: 10.1016/j.toxicon.2009.03.028.
- [5] 余建斌. 我们的科技一直在追赶: 访中国工程院院长周济[N/OL]. 人民日报, 2013-01-12(2). [2013-03-20]. [http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2013-01/12/nw.D110000renmrb\\_20130112\\_5-02.htm](http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2013-01/12/nw.D110000renmrb_20130112_5-02.htm).