

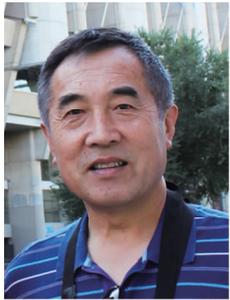
DOI:10.11798/j.issn.1007-1520.202130001

· 专家论坛 ·

涉及平衡感知调控中枢神经核团的解剖与功能

丁大连¹, 徐先荣², 李鹏³, 张建辉⁴, 孙虹⁵

(1. Center for Hearing and Deafness, State University of New York at Buffalo, NY 14214, USA; 2. 空军特色医学中心耳鼻咽喉头颈外科, 北京 100142; 3. 中山大学附属第三医院耳鼻咽喉头颈外科, 广东 广州 510230; 4. 成都市第三人民医院耳鼻咽喉头颈外科, 四川 成都 610014; 5. 中南大学湘雅医院耳鼻咽喉头颈外科, 湖南 长沙 410008)



专家简介 丁大连, 生命科学博士。现任美国纽约州立大学布法罗大学听力耳聋研究中心教授, 兼任上海交通大学耳鼻咽喉科研究所副所长;《中华耳科学杂志》编委、《中国耳鼻咽喉颅底外科杂志》副主编、《中国中西医结合耳鼻咽喉科杂志》编委、《听力学与言语疾病杂志》编委, 中山大学附属第三医院耳鼻咽喉头颈外科客座教授, 广西中医药大学客座教授, 成都市第三人民医院耳鼻咽喉头颈外科客座教授等。主要致力于内耳病理生理学, 内耳感觉器官及神经元离体培养, 内耳药物性损害的机理及防治, 内耳微循环障碍, 内耳缺氧, 内耳重金属损害, 老年性耳聋以及特殊基因缺陷性耳聋等方面的研究。曾经作为课题负责人或主要成员完成多项国家自然科学基金课题, 美国

全国卫生研究所(National Institutes of Health, NIH)研究课题, 中国卫生部和上海市教育局以及美国其他经费来源资助的多项研究项目。迄今为止在国内外杂志总共发表405篇论文和200余篇国际会议摘要。曾经出版3本有关内耳研究科学的专著, 并为国内外耳科基础科学研究教科书编写过20余篇章节。获一项有关Minocycline内耳保护的美国科学专利。多次在美国、欧洲以及中国举行的国际听力学研讨会做为演讲人发言。曾经在国内外举办过30多次内耳实验技术学习班, 在美国作为导师接受并培训了50余名中国博士后访问学者, 并在国内发动和参与主办了5次国际听力学研讨会, 为中国听力学研究领域培养出大批专业人才, 为在内耳研究领域架设中美两国之间的国际合作桥梁做出一定贡献。

摘要: 本文回顾与平衡功能相关的中枢各个神经核团的解剖与功能。以前庭神经核为中心, 阐述前庭-小脑通路、前庭-眼反射通路、前庭-脑干网状结构反射通路、前庭-丘脑通路、前庭-脊髓通路, 以及前庭中枢通路等, 并综述参与平衡感知和调控的各个中枢神经核团之间的联系通路, 为进一步深刻理解中枢各个神经核团在平衡感知和调控及代偿过程中的相互影响及作用提供有用的信息。

关键词: 平衡感知; 平衡调控; 解剖; 功能; 中枢神经核团

中图分类号: R764.3

Anatomy and function of the central nerve nucleus involving the balance perception and regulation

DING Dalian¹, XU Xianrong², LI Peng³, ZHANG Jianhui⁴, SUN Hong⁵

(1. Center for Hearing and Deafness, State University of New York at Buffalo, NY 14214, USA; 2. Department of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery, Air Force Special Medical Center, Beijing 100142, China; 3. Department of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery, the Third Affiliated Hospital of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510230, China; 4. Department of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery, Chengdu Third People's Hospital, Chengdu 610014, China; 5. Department of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery, Xiangya Hospital, Central South University, Changsha

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(82071050)。

第一作者简介: 丁大连, 男, 博士, 教授。Email: dding@buffalo.edu

410008, China)

Abstract: In this article, we reviewed the anatomical structure and function of the central nerve nucleus related to balance function. Focusing on the vestibular nucleus, we not only described the vestibular-cerebellar pathway, the vestibular-ocular reflex pathway, the vestibular-autonomic reflex pathway, the vestibular-thalamic pathway, the vestibular-spinal cord pathway, and the vestibular central pathway, we also reviewed the neural pathways within the various central nerve nuclei involved in balance perception and regulation. This review article may provide helpful information to further understand the mutual influence of each central nerve nucleus in the process of balance perception, regulation and compensation.

Keywords: Balance perception; Balance regulation; Anatomy; Function; Central nerve nucleus

平衡功能障碍使机体迅速启动对平衡的重新调节。参与平衡感觉和调控的器官除了前庭系统之外,还包含视觉和眼球肌肉控制系统、小脑神经系统、下橄榄核、脑干网状结构、脊髓神经、丘脑神经、纹状体、大脑皮层等。除了“平衡三联”中的前庭之外,视觉及本体感觉在感知和维持平衡的同时还担负着其他功能。前庭性损害引起的平衡功能代偿不仅关系到双侧前庭核之间的代偿性调节,而且与机体其他所有参与平衡感知与调控的神经核团的活动密切相关^[1-9];同样,中枢神经核团损害引起的平衡障碍在代偿过程中也离不开前庭系统的参与^[10-14]。为了更好地理解与平衡感知和调控相关的所有中枢神经核团对平衡代偿的联合调节作用,现将参与平衡感知和调控神经核团的解剖关系及其相关功能综述如下。

1 前庭神经通路及与其他中枢神经系统的相互联系

接受椭圆囊斑、外半规管壶腹嵴、上半规管壶腹嵴以及球囊斑沟端毛细胞刺激信号的前庭上神经经上筛斑穿越骨壁抵达前庭上神经元集结区,其中枢端神经纤维在此汇集成前庭上神经束进入颅内。接受球囊斑大部和后壶腹嵴毛细胞相联系的前庭下神经分别经中筛斑和下筛斑穿越骨壁汇集到蜗神经底部的前庭下神经元集结区,其中枢端神经纤维在此汇集成前庭下神经束进入颅内^[15-17]。前庭上神经束和前庭下神经束进入颅内后汇合并上行进入脑桥和延髓,大部分前庭神经终止于前庭神经核区,小部分前庭神经纤维进入小脑^[18]。

进入前庭核区的前庭传入神经纤维分别分布到同侧前庭上核、下核、内侧核和外侧核,其中来自壶腹嵴的传入神经分布到前庭上核和前庭内侧核,来自椭圆囊斑的传入神经分布在前庭外侧核,来自球囊斑的传入神经分布在前庭外侧核和前庭下核。单侧前庭核接收的同侧前庭刺激信号可经抑制性连合

系统传递到对侧前庭核^[19]。作为感觉和运动控制的第一级整合中心,前庭核除了接受来自内耳前庭的刺激信号之外,还接受视觉和颈部本体感觉及小脑的输入,这些神经联系对丧失前庭之后的前庭核自发电代偿性恢复起到重要作用^[8]。直接进入同侧小脑的前庭神经终止在小脑的小结、蚓部和绒球区,另有一部分前庭神经终止于副绒球的腹部和外侧的齿状核腹部^[19-20]。

前庭核与中枢其他神经核团主要建立了如下联系:①投射到双侧小脑的前庭核传入神经构成前庭小脑束,这是产生前庭小脑反射的主要解剖学基础^[19-21];②投射到外展核、动眼核和滑车核的前庭核传入神经构成前庭眼束,这是产生前庭-眼反射的主要解剖学基础^[21-22];③投射到双侧网状结构的前庭核传入神经与迷走神经核群建立联系,这是刺激前庭产生植物神经反射的解剖学基础^[23];④投射到脊髓的前庭核传入神经纤维构成前庭-脊髓束,这是产生前庭脊髓反射的解剖学基础^[21, 24-25];⑤投射到丘脑的前庭核传入神经在丘脑被整合成平衡丘觉,使丘脑成为平衡感觉通路上重要的信号加工站^[26-28];⑥经丘脑和小脑投射至大脑皮层前庭中枢的前庭核刺激信号最终在大脑实现平衡感觉的空间定向及平衡调控^[28-31]。

2 小脑的解剖和功能及与其他中枢神经系统的相互联系

小脑位于大脑半球后下方并覆盖颅后窝脑桥与延髓,其外形是中部窄缩的小脑蚓和两侧膨大的小脑半球。小脑以原裂为界被分为前叶和后叶,以后外侧裂为界被分为小脑后叶和小脑绒球叶。小脑的内部结构可分为皮质和髓质及小脑核,小脑皮质位于平行小脑沟的小脑小叶表面,小脑髓质位于小脑皮质深层的神经元树突聚集部,小脑核是位于小脑

髓质中心的灰质神经核团。根据小脑种系发生和器官进化及功能差异,小脑被分为 3 个功能区,其中小脑绒球叶因在发生学上最早出现而被称之为古小脑或原小脑,因古小脑与前庭核保持密切联系又被称之为前庭小脑;小脑原裂和小脑蚓部的蚓锤和蚓锥体被称之为旧小脑,因旧小脑与脊髓保持密切联系又被称之为脊髓小脑;因小脑半球外侧部是随着大脑运动皮质的发展而进化的新结构,因而被称之为新小脑或大脑小脑^[32]。

前庭小脑接受到同侧前庭核发出的神经信号经小脑下脚传递到小脑绒球叶皮质。前庭小脑的传出神经系统则经绒球叶皮质投射到同侧前庭核再经前庭脊髓束和内侧纵束传输到脊髓前脚细胞和脑神经运动核。前庭小脑还接受外侧膝状体和上丘及视觉皮层传来的视觉信息并参与调节眼外肌运动和运动凝视。前庭小脑的主要功能是感受来自前庭的重力感应和头位改变信息,并经传出神经系统参与调控躯干肌以维持体位平衡,还通过眼外肌运动神经元调控眼球的运动。脊髓小脑的前束、后束和楔小脑束分别将体位信息传递到小脑上脚、下脚及脊髓小脑皮质,其传出神经系统经小脑蚓部皮质传到小脑顶核、小脑下脚及脑干网状结构,最后抵达前庭脊髓束和网状脊髓束以调控躯干肌和肢体肌张力的协调运动。新小脑接受经对侧脑桥核神经发放的信息,经小脑中脚和新小脑皮质抵达小脑外侧皮质的齿状核,从齿状核发出的传出神经经小脑上脚和对侧红核小细胞及丘脑腹外侧核抵达大脑皮质运动区,新小脑通过皮质脊髓束调控机体共济运动的方向和范围及力度。作为控制感觉和运动的第 2 级整合中心,小脑蚓部和顶核还发出神经纤维至前庭核共同参与平衡的感觉和调控。前庭神经系统与小脑神经核团之间的相互联系成为实现前庭小脑反射的主要解剖基础^[19, 33]。

3 下橄榄体的解剖和功能及与其他神经系统的相互联系

位于延髓橄榄深部的橄榄体由上橄榄核和下橄榄核共同组成,上橄榄核接受来自耳蜗腹侧核的听觉神经信号并投射到双侧外侧丘系,成为处理脑干听觉信号实现声音空间定位的初级听觉中枢。由下橄榄主核和背侧及内侧副核组成的下橄榄核,发出神经纤维穿越中线在延髓背外侧聚集上行并与脊髓小脑后束共同组成小脑下脚,再经第四脑室外侧折

向背侧进入小脑。作为延髓内的负责整合感觉和运动信号的神经核团,下橄榄核的主要功能是编码运动信息并通过橄榄小脑束把信息传送到小脑,由于下橄榄核不仅接受脊髓上行投射纤维和脑干感觉中继核团的传入信息,还与大脑皮层、基底核、中脑红核和中脑导水管周围灰质的下行投射纤维相联系,因此下橄榄核的主要功能是参与延髓、小脑及大脑皮层之间的运动感觉和运动控制及运动学习^[34]。

4 动眼神经核、滑车神经核和外展神经核的解剖和功能及与前庭核之间的联系

动眼和滑车及外展核同属运动神经,共同管理和支配眼球的运动。动眼核位于中脑上丘和大脑导水管腹侧灰质,其神经纤维经大脑脚动眼神经沟出脑,在大脑后动脉与小脑上动脉之间抵达海绵窦再从颅中凹之眶上裂出颅,分出的上支负责支配上直肌和提上睑肌,下支则支配内直肌、下直肌、下斜肌和瞳孔括约肌及睫状肌。滑车核位于动眼核下方的中脑中央灰质腹侧部平齐下丘的位置,其神经纤维走向背侧顶盖再绕大脑脚的外侧前行,抵达海绵窦外侧壁后经眶上裂进入眼眶,越过受动眼神经支配的上直肌和上睑提肌之后分布到上斜肌以控制眼球向外下方的运动。外展核位于桥脑第四脑室底部,其神经纤维斜向腹外侧投射从锥体束的外侧并在桥延沟中线两侧出脑,继续前行经眶上裂进入眼眶分布到外直肌以控制眼球向外侧的运动^[35]。

由前庭核发出的交叉和非交叉神经纤维经同侧和对侧内侧纵束分别投射到同侧和对侧外展核和动眼核及滑车核,由于前庭三对半规管所处的弧形旋转平面分别与三对眼外肌所在平面一致,因此,刺激壶腹嵴可引起与该半规管平行眼外肌产生相应的反射性运动而诱发对应的眼球震颤。近年来的研究发现,刺激球囊斑或椭圆囊斑也可以诱发到垂直或水平眼球震颤。因此,前庭核与 3 对控制眼球运动的神经核之间的联系成为实现前庭-眼反射的解剖学基础^[36-37]。

5 脑干网状结构的解剖与功能

脑干内白质与灰质相互交织构成了网状结构。脑干网状结构上行系统接受来自内耳的听觉和平衡信号,经丘脑再把信号分别传送到对应的大脑皮层感应区;脑干网状结构下行纤维抵达脊髓参与调控

机体运动。脑干网状结构与其他中枢神经核团的联系包括小脑网状束、网状小脑束、脊髓网状束、网状脊髓束、网状丘脑纤维、网状丘脑下部纤维、纹状体网状纤维、网状纹状体纤维、皮质网状纤维、网状皮质纤维等,可见脑干网状结构可凭借其多方联系接受和传递各方信息并行使其多种复杂功能^[38]。例如,脑桥上段的上行网状激活系统和桥脑下段的上行网状抑制系统分别具备调节睡眠觉醒周期的功能;桥脑蓝斑核投射到大脑、丘脑、海马、小脑、延髓等不同区域的神经纤维参与选择性注意机制;从中脑、桥脑和延髓网状结构发出的易化性网状脊髓束接受来自脊髓和小脑前庭的刺激,并使脊髓产生相应的牵强反射增强和肌张力增高;延髓网状结构腹侧部发出的抑制性网状脊髓束则使脊髓牵强反射减弱和肌张力降低;在延髓背侧外部的呕吐中枢与迷走神经和前庭神经纤维直接联系并通过壳核、桥脑泌涎核、延髓呼吸中枢及脊髓运动神经元等共同完成呕吐反射的一系列动作^[23]。

6 脊髓神经束的解剖与功能

位于椎管内脊髓呈前后略扁圆柱形,其上端连接延脑,下端在成人至第一腰椎下缘。脊髓的末端变细呈锥状的脊髓圆锥,由脊髓圆锥发出的无神经组织终丝末端止于尾骨背侧。在脊髓前后表面正中各有一条纵沟将脊髓分为左右对称两部分,在脊髓两侧各有两对外侧沟又将脊髓的侧面分为前外侧沟和后外侧沟。前外侧沟有脊神经前根运动神经纤维穿出,后外侧沟有脊神经后根感觉神经纤维的中枢突进入。脊髓内部中央贯穿脊髓全长的纵行中央管被呈蝶形的灰质围绕,灰质的外围则是白质。蝶形灰质前角有运动神经元,后角有联络神经元。脊髓白质由上行感觉神经纤维束和下行运动神经纤维束共同组成,感觉神经束将感觉冲动信号上传入脑,运动神经束则将脑发出的神经冲动信号下传到机体各个终端^[39]。脊髓小脑束亦经半球中部皮质传递信息到小脑球状核及小脑上脚,经对侧红核大细胞和丘脑腹外侧核传出到大脑皮质运动区以调控肢体远端的肌张力和协调运动。

作为中枢神经系统与周围神经系统的联系通道,脊髓的主要功能是传导和反射,传导功能是指把来自躯干、四肢及内脏的各种刺激上传到脑,同时再把脑发出的活动指令传送到周边以支配机体运动;反射功能则是指由脊髓调节的一些简单活动反射。

除了上述功能之外,脊髓神经还通过脊髓顶盖束参与调节眼球及头部运动,通过前庭脊髓内束束参与控制颈部肌肉运动,并根据前庭脊髓束和小脑脊髓束及脑干网状结构下行投射信号调控体位平衡^[25]。

7 丘脑的解剖与功能

间脑呈楔形位于脑干和大脑之间的间隙,其下部与中脑相连。间脑可分为丘脑、上丘脑、下丘脑、后丘脑和底丘脑,其内腔是第三脑室。丘脑是间脑中最大的卵圆形灰色核团。丘脑内由Y形纤维组织将其内部分隔为前核和内侧核以及外侧核,其中外侧核又被分为背侧核和腹侧核上下两层,腹侧核从前向后再被分隔为腹前核、腹中核和腹后核,腹后核则又被分隔为腹后内侧核和腹后外侧核。上述分布在不同核区的各种神经核团分别具有投射到周围其他神经核团或与邻近其他神经核团相联系的功能,其中背侧核接受丘脑其他核团传送的信息并发出神经纤维到顶叶皮层,而腹侧核则与脊髓、脑干和小脑有直接的神经联系^[18]。

除了嗅觉之外,丘脑是所有其他感觉信号的重要神经枢纽,并对所有传入感觉信息进行觉知、加工、合成及再发放。经过丘脑觉知整合的信息被称之为丘觉,丘觉信号被发送到相应的大脑皮层才使大脑觉知到精准的意识。因此,损害丘脑意味着丧失丘觉,丧失丘觉意味着丧失了大脑皮层的精准意识。做为机体感觉的首要整合机构,丘脑在感知平衡中同样起到重要作用,被认为是控制感觉和运动的第3级整合中心之一。由前庭核直接投射到丘脑腹后核的平衡觉信号经丘脑觉知整合后所产生出的位置丘觉被直接投射到位于顶叶中央后沟与顶内沟交界处的大脑前庭皮层及腹侧的脑干、小脑和脊髓^[26-28, 40]。

8 纹状体的解剖与功能

作为锥体外系组成部分和大脑基底神经节之一的纹状体是由前端腹侧相连的豆状核和尾状核共同组成,其中豆状核可分为壳核和苍白球。纹状体接受来自丘脑和大脑皮质的神经信号并向丘脑发出神经纤维,纹状体因此被视为同时接受丘脑和大脑皮质的信号而成为大脑皮质下行传导的中继核团。纹状体的主要功能是参与维持正常肌肉张力和参与协调肌肉群运动以及参与控制精准的运动。虽然纹状体并没有与前庭核发生直接的神经联系,但是却可

通过丘脑和大脑皮质的神经联系间接参与平衡调控的姿势纠正过程^[7]。

9 大脑皮层的解剖与功能

大脑皮层主要由锥体形态或篮状形态的神经细胞和星形胶质细胞和其他支持细胞及大脑基质所组成。根据细胞和神经分布,从大脑皮层表面到大脑的髓质可将大脑皮层大致分为分子层、外颗粒细胞层、外锥体细胞层、内颗粒细胞层、内锥体细胞层以及多形细胞层。按照空间位置,大脑皮层被分为额叶、顶叶、颞叶、枕叶以及边缘系统。按照功能又可将大脑皮层分为若干个不同的功能区,其中感觉区主要位于大脑的中央后回,而运动区则主要位于大脑的中央前回。大脑皮层除了某些已知专职特定功能的中枢区域之外,例如可能位于颞上回前方的前庭中枢、位于大脑半球内梨状叶、嗅区、钩回和海马回前部的嗅觉中枢、位于枕极和矩状裂的视觉中枢以及位于颞横回中部的听觉中枢等之外,顶叶和枕叶及颞叶的大部分大脑皮层都被统一划分为联合区,联合区的大脑皮层被认为具备接受各种传入感觉信息的潜在能力。在正常情况下,联合区大脑皮层并没有对某种特殊的传入刺激表现出明显的反应,但是当某一特定中枢发生不可逆性损害之后,联合区的神经元就可能通过可塑性改变以行使被损害皮层的功能,使该功能得到部分甚至完全恢复。大脑皮层区内和区间神经元之间的联系均以突触形式连接。连接两个大脑半球之间的神经突触构成特殊的胼胝体结构,胼胝体因此成为两个大脑半球信息交流的桥梁。一旦将胼胝体从中线切断,两个大脑半球则因失去统合作用而无法做出相应的合作。大脑半球在功能上的大体划分是右半球管理左半身而左半球管理右半身。除了左右管理模式之外,大脑皮层的分层管理也呈上下倒置管理模式,一般来说,大脑皮层的上层管理下肢,中层管理躯干,而下层管理头部。大脑皮层接收到周边传入的刺激信号之后会通过运动中枢向各个相应的周边神经系统发出行动的指令,运动中枢发出的神经冲动信号也是以左右交叉上下倒置的模式发送到各个指定的周边感受器。在大脑皮层下有一组包括纹状体、杏仁核及带状核神经核团的特殊神经核团被称之为基底神经节,大脑皮层的传出神经通路是通过基底神经节、内囊、由胼胝体和前连合及海马共同组成的连合系、间脑、脑干、脊髓等一系列结构之间的神经联系,才把

大脑皮层发出的行动指令下达并付诸实施。脑激活研究发现前庭皮层存在于大脑多个不同的网络区域,这些区域包括岛叶后部和顶岛的后岛皮质以及颞上回、下顶叶、前楔、前扣带回、前岛叶及海马等,上述各个前庭皮层区域的具体功能作用目前尚不十分清楚。大脑前庭皮层是控制平衡感觉和运动的第3级整合中心,也是平衡感知和调控的最高指挥部。当大脑前庭中枢接收到体位平衡障碍的刺激信号之后,立刻经运动中枢发出行动指令指挥脊髓神经通过改变相应肌肉群的肌张力来维持体位的平衡和运动的协调。

10 结论

无论是内耳损害、小脑损害、视觉系统损害、还是中枢其他核团损害引起的眩晕,受影响和起反应的神经核团都不仅仅局限在发生病变的某单个系统,眩晕信号将通过各个神经中枢之间的网络联系使所有参与平衡感知的神经核团接收到平衡障碍的信息,并通过平衡调控的神经核团做出相应反应,从而出现眼球震颤、身体倾倒、植物神经反射等一系列眩晕症状^[28]。中枢各个神经核团随后将立刻启动集体纠错行动以实现机体的平衡代偿。

参考文献:

- [1] Helmchen C, Klinkenstein J, Machner B, et al. Structural changes in the human brain following vestibular neuritis indicate central vestibular compensation [J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2009, 1164: 104-115.
- [2] Shinder ME, Perachio AA, Kaufman GD. VOR and Fos response during acute vestibular compensation in the Mongolian gerbil in darkness and in light [J]. *Brain Res*, 2005, 1038(2): 183-197.
- [3] Dutia MB. Mechanisms of vestibular compensation: recent advances [J]. *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg*, 2010, 18(5): 420-424.
- [4] D'Ascanio P, Arrighi P, Fascetti F, et al. Effects of unilateral labyrinthectomy on the norepinephrine content in forebrain and cerebellar structures of albino rats [J]. *Arch Ital Biol*, 2000, 138(3): 241-270.
- [5] Yates BJ, Miller DM. Integration of nonlabyrinthine inputs by the vestibular system: role in compensation following bilateral damage to the inner ear [J]. *J Vestib Res*, 2009, 19(5-6): 183-189.
- [6] Kaga K, Shinjo Y, Jin Y, et al. Vestibular failure in children with congenital deafness [J]. *Int J Audiol*, 2008, 47(9): 590-599.
- [7] Sakka L, Vitte E. Anatomy and physiology of the vestibular sys-

- tem: review of the literature[J]. *Morphologie*, 2004,88(282): 117-126.
- [8] de Waele C, Vidal PP, Tran Ba Huy P, et al. Vestibular compensation. Review of the literature and clinical applications[J]. *Ann Otolaryngol Chir Cervicofac*, 1990, 107(5): 285-298.
- [9] Tighilet B, Rastoldo G, Chabbert C. The adult brain produces new neurons to restore balance after vestibular loss[J]. *Med Sci (Paris)*, 2020,36(6-7): 581-591.
- [10] Badalyan SA. Plastic reorganization in the cerebellothalamic system after partial deafferentation of the ventrolateral nucleus of the thalamus[J]. *Neurosci Behav Physiol*, 2005,35(1): 43-47.
- [11] Badalian SA. Plastic reorganisation in the cerebellothalamic system after partial deafferentation of the thalamic ventrolateral nucleus [J]. *Morfologiia*, 2003,124(6): 26-29.
- [12] Conrad J, Habs M, Boegle R, et al. Global multisensory reorganization after vestibular brain stem stroke[J]. *Ann Clin Transl Neurol*, 2020,7(10):1788-1801.
- [13] Clegg TJ, Perachio AA. Effect of spinal cord transection on spontaneous activity recorded from type I neurons of the medial vestibular nucleus in compensated hemilabyrinthectomized gerbils [J]. *Otolaryngol Head Neck Surg*, 1985,93(3): 414-418.
- [14] 姜斌,黎振航,陈应城. 大鼠下橄榄核毁损对前庭核神经元自发性放电活动的影响[J]. *中国临床康复*, 2004,8(22): 4480-4482.
- [15] Ding D, Yu J, Li P, et al. Standardization of experimental animals temporal bone sections[J]. *J Otol*, 2015,10(2): 66-71.
- [16] 丁大连, 亓卫东, Salvi R. 前庭毛细胞的反相激活模式[J]. *中华耳科学杂志*, 2017,15(6): 667-672.
- [17] 丁大连, 亓卫东, 曲雁, 等. 内耳解剖[A]//丁大连. 内耳科学[M]. 北京:中国科学技术出版社,2010: 1-8.
- [18] Kirsch V, Keeser D, Hergenroeder T, et al. Structural and functional connectivity mapping of the vestibular circuitry from human brainstem to cortex[J]. *Brain Struct Funct*, 2016,221(3): 1291-1308.
- [19] Barmack NH. Central vestibular system: vestibular nuclei and posterior cerebellum[J]. *Brain Res Bull*, 2003, 60(5-6):511-541.
- [20] 曲雁, 丁大连, 亓卫东, 等. 前庭生理[A]//丁大连. 内耳科学[M]. 北京:中国科学技术出版社,2010: 26-33.
- [21] Lui F, Foris LA, Willner K, et al. Central Vertigo[M]. *Treasure Island(FL)*:StatPearls Publishing,2021: 28722891.
- [22] Bronstein AM, Patel M, Arshad Q. A brief review of the clinical anatomy of the vestibular-ocular connections-how much do we know [J]. *Eye(Lond)*, 2015,29(2): 163-170.
- [23] Augustine JA. *Human Neuroanatomy*[M]. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons, 2016: 141-153.
- [24] Dichgans J, Diener HC. The contribution of vestibulo-spinal mechanisms to the maintenance of human upright posture [J]. *Acta Otolaryngol*, 1989,107(5-6): 338-345.
- [25] McCall AA, Miller DM, Yates BJ. Descending influences on vestibulospinal and vestibul sympathetic reflexes[J]. *Front Neurol*, 2017, 8:112.
- [26] Conrad J, Baier B, Dieterich M. The role of the thalamus in the human subcortical vestibular system[J]. *J Vestib Res*, 2014,24(5-6): 375-385.
- [27] Brandt T, Dieterich M. Thalamocortical network: a core structure for integrative multimodal vestibular functions[J]. *Curr Opin Neurol*, 2019,32(1): 154-164.
- [28] Meng H, May PJ, Dickman JD, et al. Vestibular signals in primate thalamus: properties and origins[J]. *J Neurosci*, 2007, 27(50): 13590-13602.
- [29] Reuss S, Siebrecht E, Stier U, et al. Modeling vestibular compensation: neural plasticity upon thalamic lesion[J]. *Front Neurol*, 2020, 11: 441.
- [30] Dieterich M, Brandt T. The parietal lobe and the vestibular system [J]. *Handb Clin Neurol*, 2018,151: 119-140.
- [31] Zamergrad MV, Levin OS. Metavestibular disorders and disorders of higher vestibular function[J]. *Zh Nevrol Psikhiatr Im S S Korsakova*, 2017,117(6. Vyp. 2): 11-15.
- [32] Voogd J, Glickstein M. The anatomy of the cerebellum [J]. *Trends Neurosci*, 1998,21(9): 370-375.
- [33] Narayanan S, Thirumalai V. Contributions of the cerebellum for predictive and instructional control of movement [J]. *Curr Opin Physiol*, 2019, 8: 146-151.
- [34] De Gruijl JR, Hoogland TM, De Zeeuw CI. Behavioral correlates of complex spike synchrony in cerebellar microzones[J]. *J Neurosci*, 2014,34(27): 8937-8947.
- [35] Park HS, Chung MS, Shin DS, et al. Whole courses of the oculomotor, trochlear, and abducens nerves, identified in sectioned images and surface models [J]. *Anat Rec (Hoboken)*, 2015,298(2): 436-443.
- [36] 庄建华, 从前庭病理生理学角度指导良性阵发性位置性眩晕的诊断与治疗[J]. *中国现代神经疾病杂志*, 2019,19(2): 75-80.
- [37] Hain TC, Squires TM, Stone HA. Clinical implications of a mathematical model of benign paroxysmal positional vertigo[J]. *Ann NY Acad Sci*, 2005, 1039: 384-394.
- [38] 金莅颖, 赵树安, 王耀山. 脑干网状结构的生理机能与其相关病变[J]. *现代康复*, 2000, 4(5): 729-730.
- [39] McCormick PC, Stein BM. Functional anatomy of the spinal cord and related structures[J]. *Neurosurg Clin N Am*, 1990,1(3): 469-489.
- [40] Peyrache A, Duzskiewicz AJ, Viejo G, et al. Thalamocortical processing of the head-direction sense [J]. *Prog Neurobiol*, 2019, 183: 101693.

(收稿日期:2021-03-01;网络首发:2021-05-12)

本文引用格式:丁大连,徐先荣,李鹏,等. 涉及平衡感知调控中枢神经核团的解剖与功能[J]. *中国耳鼻咽喉颅底外科杂志*, 2021, 27(3): 250-255. DOI:10.11798/j.issn.1007-1520.202130001
Cite this article as: DING Dalian, XU Xianrong, LI Peng, et al. Anatomy and function of the central nerve nucleus involving the balance perception and regulation [J]. *Chin J Otorhinolaryngol Skull Base Surg*, 2021, 27(3): 250-255. DOI:10.11798/j.issn.1007-1520.202130001