论 文

啄木鸟头颈部解剖结构分析

崔亚琳^{1,2}, 徐鹏^{1,2}, 倪义坤^{1,2}, 王丽珍^{1,2*}, 樊瑜波^{1,2,3*}

1. 北京航空航天大学生物与医学工程学院, 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 北京航空航天大学, 生物医学工程高精尖创新中心, 北京 102402;

3. 国家康复辅具研究中心, 北京 100176

* 联系人, E-mail: lizhenwang@buaa.edu.cn; yubofan@buaa.edu.cn

收稿日期: 2018-07-10; 接受日期: 2018-08-15; 网络版发表日期: 2018-10-09

摘要 啄木鸟(*Picidae*)能够高速有力地啄木而不发生颈部损伤, 相比之下, 人在汽车碰撞事故引起的头颈部后仰与前屈运动中易引发鞭样损伤。本文利用组织学解剖和椎骨逆向建模等方法对啄木鸟头颈部解剖结构进行分析, 绘制出啄木鸟头颈部主要肌肉解剖图谱, 从头颈部软组织解剖结构和椎骨形态角度将其与戴胜鸟以及人类进行对比, 分析其特殊解剖结构所发挥的抗震作用。通过对比发现, 啄木鸟的头腹直肌跨度较戴胜鸟更小, 头侧直肌为一整片肌肉不与头半棘肌分开, 颈前没有连接上节腹突与下节侧突的斜向肌肉, 这些均导致啄木鸟的头颈部旋转活动度小于戴胜鸟, 这表明啄木鸟颈部损失了一定的头颈部活动度以增强稳定性, 进而避免啄木过程中的颈部损伤。此外, 啄木鸟的头夹肌连接颅骨与上段颈椎起到增加颅颈连接稳定性的作用, 颈椎间没有椎间盘颈部旋转活动度相对较小, 这些可能是其较人类更不易发生颈部损伤的原因。

关键词 啄木鸟, 头颈部, 解剖结构, 软组织, 椎骨形态

挥鞭伤多发于汽车碰撞事故中^[1-4], 是由于后方或侧方撞击所导致的颈部突然地加速和减速而造成的颈部骨或软组织的损伤。有研究表明, 女性较男性更易发生挥鞭损伤^[5], 女性颈部长度比男性小2.7%, 而平均颈部周长却要小16.6%^[6], 这可以解释为在动态载荷下相对细长的颈部更易弯曲以及屈曲^[7]。啄木鸟(*Picidae*)每天的总啄木次数达到12000次之多^[8,9], 啄木时的颈部运动也类似于挥鞭样运动, 且其颈部细长, 直观上看啄木鸟应该更易发生挥鞭样损伤, 但实际上在如此频繁的啄木运动中啄木鸟并没有受到颈部损伤, 这其中的机制值得思考和探究。目前对于啄木鸟抗震机制的

研究多集中于头部^[9-14], 鲜有对其颈部的解剖结构及抗震研究。

本文旨在对啄木鸟的头颈部解剖结构进行分析, 从肌肉分布以及椎骨形态的角度探究啄木鸟的颈部抗震机制。

1 材料与方法

1.1 样本选取

本研究选取大斑啄木鸟(*Dendrocopos major*)与戴胜鸟(*Upupa epops*)作为研究对象。大斑啄木鸟广泛分

引用格式: 崔亚琳, 徐鹏, 倪义坤, 等. 啄木鸟头颈部解剖结构分析. 中国科学: 生命科学, 2018, 48: 1084–1092

Cui Y L, Xu P, Ni Y K, et al. Analysis of the anatomical structure of woodpecker head and neck (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2018, 48: 1084–1092, doi: 10.1360/N052017-00293

布于我国华北地区, 具有显著的啄木行为; 戴胜鸟在我国分布广泛, 栖息于山地、平原、草地、果园等开阔的地方, 其嘴形细长, 喜欢在开阔潮湿的地面用嘴翻动地面以寻找食物, 有轻微的啄物行为. 本文主要对啄木鸟进行研究, 戴胜鸟作为对照.

1.2 组织学解剖

解剖之前, 首先将存放于-80℃冰箱(Thermo Scientific TSE, Thermo Scientific, 美国)中的样本取出, 在室温下解冻后将样本放入70%的乙醇溶液浸泡8 h进行固定^[15,16].

解剖在体视显微镜(Motic SMZ 168, Motic, 厦门)下进行, 放大倍数为10倍, 所用工具包括眼科剪、镊子、手术刀等. 将气管与食道移除后对头颈部肌肉韧带等软组织进行组织学解剖, 在解剖过程中不断用生理盐水对样本进行淋洒以防样本干燥而影响解剖的进行. 记录下头颈部肌肉韧带等软组织的形态及起止点, 根据解剖观察绘制主要肌肉韧带的解剖图谱. 解剖图谱使用Adobe Illustrator软件(Adobe Illustrator CC 2017)进行绘制, 其中骨性结构对照三维重建的颅骨与颈椎椎骨三视图进行绘制, 以绿色示意; 软组织结构如头颈肌肉以及韧带根据解剖观察的起止点及形态加于骨性结构上进行示意, 肌肉以红色示意, 韧带以黄色示意.

1.3 椎骨数值模型建立

利用Micro-CT系统(Skyscan1076, Skyscan, 比利时)对啄木鸟和戴胜进行整体扫描, 扫描层厚为

37.9 μm, 扫描结束后利用NRecon软件对扫描得到的图片进行断层重建, 将啄木鸟和戴胜的头颈部断层图片分别导入Mimics软件(Mimics Medical 17.0)中进行3D模型的重建, 得到头部与颈椎的骨性3D模型后导入Geomagic软件(Geomagic Studio 2012)中进行光顺处理.

2 结果

2.1 软组织解剖结构

啄木鸟头颈部主要肌肉的附着点位置及主要功能的简单汇总见表1所示. 其中颈椎用大写字母C (cervical首字母)表示、胸椎用大写字母T (thoracic首字母)表示, 字母后的数字表示由头部向尾部的节段数, 如C3表示第三节颈椎, 后文中椎体的表示统一用此格式. 啄木鸟颈部主要肌肉的解剖图谱如图1所示.

2.2 椎骨结构

对啄木鸟头颈部骨性结构进行逆向建模, 各节颈椎的形态如图2所示. 其中第一行为上面观, 第二行为前面观, 第三行为后面观, 第四行为右侧面观, 所对应椎骨节段于最上方一行标出. 啄木鸟的寰椎(C1)与枢椎(C2)形态结构与人类相似, C3与C4具有极其相似的形态结构, 椎体下部后面(如图2中C3, C4后面观箭头所指向外所示)基本处在同一水平线, 后部两关节面间没有凹陷, 这在很大程度上限制了后仰运动而允许相对较大幅度的腹侧弯曲. C5-C9形态结构较为相似, 后部两关节面间有较大凹陷(如图2中C5-C9后面观箭头

表 1 啄木鸟颈部主要肌肉分布

肌群	名称	起点	终点	主要作用
颅颈肌肉	头腹直肌	C2腹突	基枕骨	使头部向腹侧弯曲
	头侧直肌	C2腹突, C3, C4侧突	枕骨(上)	连接颅骨与颈椎、头部转动
	头夹肌	C2后突	枕骨(中)	连接颅骨与颈椎
	头棘肌	C14后突	枕骨(下)	后仰
颈腹肌肉	颈前韧带	C13-T1腹突	C2-C5腹突	回弹前屈
	棘间肌	下节椎体腹突	上节椎体腹突	维持椎体稳定
颈背肌肉	颈背长肌	C14后突	C2侧突	后仰
	颈升肌	C6-C11侧突	C4-C9后突	颈部转动
	棘间肌	下节椎体后突	上节椎体后突	维持椎体稳定
颈侧肌肉	棘间肌	下节椎体侧突	上节椎体侧突	维持椎体稳定

图 1 啄木鸟颈部主要肌肉解剖图谱(网络版彩图)

A: 前面观; B: 侧面观; C: 后面观

图 2 啄木鸟颈椎椎骨形态(网络版彩图)

图3 椎骨连接(网络版彩图)

A: C1-C2连接; B: C6-C7连接

所指向处所示), 这能够实现颈部中段较大幅度的后仰运动. C10-C14以及T1与上部和中段颈椎的不同之处在于腹突变为斜向上方向的薄片状突出, 同时后部关节面间的凹陷仍然存在但比中段颈椎小(如图2中C10-C14后面观箭头所指向处所示), 这说明下部颈椎的后仰活动度较中段颈椎要小, 而突出的腹突薄片是为了给与肋骨和锁骨相连的肌肉提供附着.

椎骨连接形式如图3所示, 选取具有代表性的C1-C2连接以及C6-C7连接进行展示. C2的关节突与C1凹陷的孔相配合形成寰枢间球窝关节连接, C1与C2可以相对转动, 具有较大的旋转活动度. 除C1与C2的关节连接外, 其他相邻椎骨间的连接均为3个关节面, 前部有马鞍形的滑动关节面, 后部为两个关节平面相接触, 这3处关节面允许相邻两椎体存在矢状面内的相对滑移以完成颈部的俯仰运动, 但三面接触的连接同时又很大程度上限制了相邻椎体间的旋转运动, 使得椎骨间连接更加稳定从而防止颈椎运动过程中椎骨的错位.

对戴胜鸟头颈部骨性结构进行逆向建模, 各节颈椎的形态如图4所示. 其中第一行为上面观, 第二行为前面观, 第三行为后面观, 第四行为右侧面观, 所对应的椎骨节段于最上方一行标出. 戴胜鸟颈椎椎骨形态与啄木鸟颈椎椎骨形态非常相似, 具有多数鸟类的共同特征, 其差别主要存在于以下两点: (i) 戴胜鸟的颈动脉沟(如图4中C6-C9上面观箭头所示位置)并未如啄木鸟一般封闭而形成颈动脉孔(如图3中C6-C9上面观箭头所示位置); (ii) 戴胜鸟的肋棘突(如图4中C3,

C4侧面观圆圈所示位置)相较啄木鸟的肋棘突更加细长与突出.

3 讨论

3.1 啄木鸟与戴胜颈部解剖结构差异

与其他鸟类相似, 啄木鸟的头颈肌肉可以根据相对位置和起止点的位置分为4个区域: 颅颈肌肉、颈背肌肉、颈侧肌肉以及颈腹肌肉^[17]. 颈部肌肉组织是鸟类最复杂^[18]也是相关研究最少^[16]的部分, 单侧就有超过200条肌肉^[19]. 本研究对啄木鸟和戴胜的典型头颈肌肉进行了解剖对比, 探究了啄木鸟头颈部软组织的抗震机制.

头腹直肌是颈前连接颞下基枕骨与上部椎骨腹突的短肌肉, 作用是使头部向腹侧进行弯曲. 两种鸟类的颈腹直肌均为左右各有一条, 如图5所示, 不同点是啄木鸟的头腹直肌从C2腹突发出而戴胜的头腹直肌从C3的腹突发出, 啄木鸟较戴胜的头腹直肌跨度更小, 这会使得啄木鸟在头颈段活动度较戴胜鸟小.

头侧直肌是颈侧连接枕骨与椎骨侧突的肌肉, 左右两侧对称分布. 如图6所示, 啄木鸟的头侧直肌左右各为一片完整的扇形肌肉, 上部与上枕骨相连, 连接处为一月牙形区域, 下部前侧与C2腹突相连后侧与C3, C4侧突相连, 头侧直肌紧紧包裹住枕部与上段颈椎, 能够在很大程度上提高颅颈连接处的稳定性, 但同时也使得活动度受到限制; 戴胜鸟的头侧直肌面积相比啄木鸟更小, 头侧直肌与头半棘肌可以分开是独立的两束肌肉, 其中头侧直肌连接侧方偏后处的上枕骨与C3, C4侧突, 头半棘肌连接侧方偏前处的上枕骨与C2腹突. 独立的头侧直肌与头半棘肌使得肌肉间协调能够完成头部的旋转、俯仰、侧弯等运动, 因此头侧直肌结构上的差异也使啄木鸟的头颈部旋转活动度小于戴胜鸟.

颈腹肌肉中, 如图7所示, 啄木鸟只存在连接相邻两椎体的棘间肌肉, 而戴胜鸟除棘间肌肉外还有连接上节椎体腹突与下节椎体侧突的肌肉, 这一差异同样造成啄木鸟颈部旋转活动度小于戴胜鸟.

颈背长肌的头侧部分啄木鸟与戴胜鸟结构相似, 都是由C3-C6的后突发出, 斜向上与由C2侧突发出的韧带相融合, 中部均为韧带的延伸. 如图8所示, 两者的差别在于尾部颈背长肌, 啄木鸟的尾部颈背长肌是

图 4 戴胜颈椎椎骨形态(网络版彩图)

啄木鸟颈背肌肉中最为粗壮的一束肌肉, 由C14的后突发出向上与韧带相连, 除肌肉两端外中部没有椎骨上的附着点. 戴胜鸟的尾部颈背长肌较啄木鸟更细小, 并且有斜向上连接到C7-C10后突上的分支. 这表明啄木鸟的尾部颈背长肌只与发力相关而戴胜鸟的该肌肉同时参与颈部旋转, 再次表明啄木鸟颈部旋转活动度

要小于戴胜. 本课题组认为, 啄木鸟发达的尾部颈背长肌为其啄木过程中的后仰运动提供动力, 是其能够快速有力啄木的关键.

除头颈部肌肉的解剖差异外, 啄木鸟与戴胜鸟在颈椎椎骨形态上也存在一定差异. 不同于戴胜鸟和其他大多数鸟类^[17], 啄木鸟C6-C9椎体中颈动脉沟两侧

图 5 头腹直肌(网络版彩图)
A: 啄木鸟前面观; B: 戴胜鸟前面观

图 6 头侧直肌(网络版彩图)
A: 啄木鸟侧面观; B: 戴胜鸟侧面观

的颈动脉突延伸相连而形成颈动脉孔(如图3中C6-C9上面观箭头所示位置), 此形态结构能够在啄木鸟啄木时更有效地保护颈动脉免受冲击过程中的伤害。此外, 啄木鸟的颈椎肋棘突较戴胜鸟和其他多数鸟类更加短小^[17,20], 肋棘突的不同部位为多条颈部肌肉提供附着点, 如中间部位附着有中部颈屈肌, 侧嵴附着有横突间肌和外侧颈屈肌^[21], 啄木鸟颈屈肌较戴胜鸟颈屈肌更为简单, 推测更少的颈部肌肉附着造成了啄木鸟颈椎肋棘突的退化。

3.2 啄木鸟与人类颈部解剖结构差别

啄木鸟与人类头颈部肌肉的差别主要在于颅颈连接肌肉。如图9所示, 啄木鸟的头夹肌是一片完整的的扇形肌肉, 以肌腱的形式从C2后突发出, 附着在上枕骨; 人体的头夹肌从项韧带下部和C7-T4的后突以及棘上韧带发出, 附着在颞骨乳突后缘枕骨上, 分为左右对称的两部分^[22], 肌肉跨度较啄木鸟大且在枕骨上的附着区域也相对啄木鸟较小。

如图10所示, 啄木鸟与人体头颈肌肉的另一处显

图 7 颈腹肌肉(网络版彩图)
A: 啄木鸟前面观; B: 戴胜鸟前面观

图 8 尾部颈背长肌(网络版彩图)
A: 啄木鸟后面观; B: 戴胜鸟后面观

著区别在于啄木鸟的头侧直肌是左右各一片完整的扇形肌肉, 牢牢包裹住上部颈椎与颅骨, 而人体连接枕骨的主要颈侧肌肉为胸锁乳突肌, 它从胸骨柄前端的锁骨和胸骨端发出, 附着在颞骨乳突。胸锁乳突肌在汽车追尾事故中易受损伤^[23,24], 推测这也与胸锁乳突肌跨度大且中间缺少附着于椎体上的分支有关, 此外也与人类缺少发达的连接枕骨与上段颈椎的颅颈肌肉有关。

图9 头夹肌(网络版彩图)

A: 啄木鸟后面观; B: 人体后面观

图10 头颈肌肉(网络版彩图)

A: 啄木鸟侧面观; B: 人体侧面观

与人类相比,啄木鸟的颈椎椎骨结构主要有以下3点不同: (i) 啄木鸟的相邻椎骨依靠关节平面或球窝关节相连, 关节面存在关节软骨结构但不存在椎间盘; (ii) 除C1-C2关节外, 其他关节存在较小的旋转活动度, 但较人类具有更大的俯仰活动度; (iii) 啄木鸟的椎骨为中空结构, 只存在外层的坚硬骨质结构而没有松质骨填充。

4 结论

啄木鸟与戴胜鸟在头颈部肌肉结构上的差别反映出啄木鸟的头颈部活动度尤其是旋转活动度要小于戴胜, 由此可以推断啄木鸟损失了一定的头颈部活动度来换取更大的稳定性, 大而完整的颈部肌肉是啄木鸟能够高速啄木而不引起头颈部损伤的重要原因。

与人类相比, 啄木鸟的头夹肌和头侧直肌等颅颈连接肌肉包裹上段颈椎与颅骨下部, 增加颅颈连接的稳定性, 可能是其不易受颈部损伤的原因之一。从椎骨形态角度比较, 啄木鸟没有椎间盘并且除寰枢关节外相邻两椎体有3个关节面使得啄木鸟的颈部较人类具有更小的旋转活动度, 通过限制旋转的方式来增强颈部的稳定性; 同时相邻两椎体可以沿关节面进行矢状面内的滑动, 活动范围较人类更大, 这保证了啄木鸟啄木时的颈部俯仰运动。

参考文献

- 1 Naumann R B, Dellinger A M, Zaloshnja E, et al. Incidence and total lifetime costs of motor vehicle-related fatal and nonfatal injury by road user type, United States, 2005. *Traffic Injury Prevent*, 2005, 11: 353-360
- 2 Skipper C S. Seat Structural Design Choices and the Effect on Occupant Injury Potential in Rear End Collisions. Doctoral Dissertation. Columbia: the University of British Columbia, 2005
- 3 Carroll L J, Hogg-Johnson S, Côté P, et al. Course and prognostic factors for neck pain in workers: results of the bone and joint decade 2000-2010 task force on neck pain and its associated disorders. *Eur Spine J*, 2000, 17: 93-100
- 4 Quinlan K P, Annett J L, Myers B, et al. Neck strains and sprains among motor vehicle occupants—United States, 2000. *Accid Anal Prev*, 2004, 36: 21-27
- 5 Ettlin T M, Kischka U, Reichmann S, et al. Cerebral symptoms after whiplash injury of the neck: a prospective clinical and neuropsychological study of whiplash injury. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 1992, 55: 943-948
- 6 Gordon C C, Blackwell C L, Bradtmiller B, et al. 2010 Anthropometric Survey of U.S. Marine Corps Personnel: Methods and Summary Statistics. NATICK/TR-13/018. Massachusetts: U.S. Army Natick Soldier Research, Development and Engineering Center, 2013. 170-173
- 7 Stemper B D, Corner B D. Whiplash-associated disorders: occupant kinematics and neck morphology. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2016, 46: 834-844
- 8 Sielmann H. My Year with the Woodpeckers. London: Barrier and Rockliff, 1959. 139

- 9 May P R A, Fuster J M, Haber J, et al. Woodpecker drilling behavior. An endorsement of the rotational theory of impact brain injury. *Arch Neurol*, 1979, 36: 370–373
- 10 Wang L, Cheung J T M, Pu F, et al. Why do woodpeckers resist head impact injury: a biomechanical investigation. *PLoS ONE*, 2011, 6: e26490
- 11 Wang L, Niu X, Ni Y, et al. Effect of microstructure of spongy bone in different parts of woodpecker's skull on resistance to impact injury. *J Nanomater*, 2013, 2013: 1–6
- 12 May P R A, Newman P, Fuster J M, et al. Woodpeckers and head injury. *Lancet*, 1976, 307: 454–455
- 13 Liu Y, Qiu X, Zhang X, et al. Response of woodpecker's head during pecking process simulated by material point method. *PLoS ONE*, 2015, 10: e0122677
- 14 Liu Y Z, Qiu X M, Ma H L, et al. A study of woodpecker's pecking process and the impact response of its brain. *Int J Impact Eng*, 2017, 108: 263–271
- 15 Boumans M L L M, Krings M, Wagner H. Muscular arrangement and muscle attachment sites in the cervical region of the American barn owl (*Tyto furcata pratincola*). *PLoS ONE*, 2015, 10: e0134272
- 16 Brause C, Gasse H, Mayr G. New observations on the splenius capitis and rectus capitis ventralis muscles of the Common Swift *Apus apus* (Apodidae). *Ibis*, 2009, 151: 633–639
- 17 Baumel J J. Handbook of Avian Anatomy: Nomina Anatomica Avium. 2nd ed. Cambridge: Publications of Nuttall Ornithological Club, 1993
- 18 Kuroda N. On the cervical muscles of birds. *J Yamashina Inst Ornithol*, 1962, 3: 189–211
- 19 Zweers G, Bout R, Heidweiller J. Motor Organization of the Avian Head-Neck System. Berlin: Springer Heidelberg, 1994. 201–221
- 20 Zweers G A, Vanden Berge J C, Koppendraier R. Avian cranio-cervical systems. Part I: Anatomy of the cervical column in the chicken (*Gallus gallus* L.). *Acta Morphol Neerlando-Scandinavica*, 1987, 25: 131–155
- 21 Wedel M W J, Sanders R K T. Osteological correlates of cervical musculature in Aves and Sauropoda (Dinosauria: Saurishia), with comments on the cervical ribs of *Apatosaurus*. *PaleoBios*, 2002, 22: 1–6
- 22 赵定麟. 脊柱外科学. 上海: 科学技术文献出版社, 1996
- 23 Brault J R, Siegmund G P, Wheeler J B. Cervical muscle response during whiplash: evidence of a lengthening muscle contraction. *Clin Biomech*, 2000, 15: 426–435
- 24 McCully K K, Faulkner J A. Injury to skeletal muscle fibers of mice following lengthening contractions. *J Appl Physiol*, 1985, 59: 119–126

Analysis of the anatomical structure of woodpecker head and neck

CUI YaLin^{1,2}, XU Peng^{1,2}, NI YiKun^{1,2}, WANG LiZhen^{1,2} & FAN YuBo^{1,2,3}

1 Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;

2 Beijing Advanced Innovation Centre for Biomechanical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;

3 National Research Center for Rehabilitation Technical Aids, Beijing 100176, China

Woodpeckers are able to peck wood at great force and high speed without sustaining neck injury. Unlike woodpeckers, humans are prone to whiplash injury during vehicle collisions as a result of hypsokinesis and anteflexion of the head and neck. In this study, the anatomical structure of woodpecker head and neck was analyzed based on histological evaluation of anatomy and reverse modeling of vertebrae, and an atlas of the anatomy of the primary muscles of woodpecker head and neck was constructed. The anatomical structure of the head and neck soft tissue and morphology of the cervical vertebrae were compared among woodpeckers, humans, and hoopoes to assess the shock resistance of the woodpecker head and neck special structure. We found that the span of the woodpecker rectus capitis ventralis is smaller than that of the hoopoe, the woodpecker rectus capitis lateralis is a single muscle tissue and is not separated from the complexus, and the oblique muscles that connect the ventral process of the upper vertebra and the lateral process of the lower vertebra do not exist in woodpeckers. These differences result in woodpeckers having more restricted head and neck rotation compared with hoopoes. Thus, woodpeckers sacrifice some range of motion to ensure greater stability, thereby avoiding neck injury during pecking. In addition, the woodpecker splenius capitis, which connects the os supraoccipitale and the upper cervical vertebra, increases the stability of the cranial-cervical connection, and the absence of the cervical intervertebral disc leads to a reduced range of cervical rotation. These anatomical differences may explain why woodpeckers are less prone to neck injury than humans.

woodpecker, head and neck, anatomical structure, soft tissue, cervical vertebrae

doi: [10.1360/N052017-00293](https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N052017-00293)