论文

基于 Micro-CT 断层扫描图像的啄木鸟颅骨不同部位显微结构参数研究

倪义坤^{①②}, 徐鹏^{①②}, 牛旭锋^{①②}, 王丽珍^{①②*}, 樊瑜波^{①②*}

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 100191;

② 科技部空天生物技术与医学工程国际联合研究中心, 北京 100191

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

收稿日期: 2013-11-27; 接受日期: 2013-12-02; 网络版发表日期: 2014-06-04

国家自然科学基金(批准号: 11202017, 11272038, 11322223)、教育部博士点基金(批准号: 20121102120039, 20131102130004)和北京市自然科学基金(批准号: 7133245)资助项目

doi: 10.1360/052013-344

摘要 选取大斑啄木鸟、灰头绿啄木鸟、百灵鸟、山雀和戴胜鸟作为样本, 其中百灵鸟、山雀和戴胜鸟作为对照, 研究啄木鸟颅骨颞部、额部和枕部的显微结构参数. 样本经 Micro-CT 扫描后, 在断层扫描图像的基础上, 可以得到的显微结构参数包括体积分数、结构模型指数、骨小梁数量、骨小梁厚度、骨小梁分离度和骨质密度. 通过与其他鸟类的对比分析发现, 啄木鸟具有更加独特的颅骨结构, 其骨小梁厚度、体积分数和骨小梁数量显著高于其他鸟类, 结构模型指数小于其他鸟类, 其颅骨所具有的这种特点是啄木鸟长期进化过程中为适应啄木行为所形成的, 也是其抗冲击的重要原因.

关键词啄木鸟颅骨
不同部位
显微结构参数

啄木鸟(*Piculus*)出色的抗冲击能力受到了学者们的广泛关注. 达尔文在《物种的起源》中即将啄木鸟作为例子来说明生物体对于自然环境的适应能力, 他认为, 啄木鸟通过啄木行为进行的捕食、建筑巢穴、互相通讯或者示威, 是自然选择进化的结果^[1]. 此后, May 等人^[2]通过解剖学观察认为, 啄木鸟头部特殊的解剖学结构包括特殊的舌骨结构、狭窄的蛛网膜下空间及强有力的翼状牵引肌和颈部肌肉、丰富的海绵状颅骨结构对其脑组织免受冲击伤具有重要作用. 麻省理工大学材料系的 Gibson^[3]认为, 啄木鸟脑组织尺寸较小, 且在颅骨中的分布方向使得脑组织与颅骨之间的接触面积相对于人类来说更大, 这个

特点使其对加速度的耐受性大幅提高, 从而没有发生脑损伤. 实际上, 自然界中的生物材料在进化过程中会进行自我调节和适应, 使其达到良好的力学性能; 而力学因素的刺激又会引起骨显微结构、骨矿含量变化, 导致其力学特性变化, 进而适应外界环境. 啄木鸟抗冲击性的功能必然与其颅骨的微观结构具有联系. 本实验室此前研究发现, 啄木鸟颅骨部位的松质骨分布具有特殊性, 且较其他鸟相比松质骨含量更少^[4].

骨作为一种生物材料, 其显微结构形态和力学性能均与其功能有密切关系, 并随着环境等因素改变而逐渐演化, 以适应不同的生存环境^[5-7]. 近年来

引用格式: 倪义坤, 徐鹏, 牛旭锋, 等. 基于 Micro-CT 断层扫描图像的啄木鸟颅骨不同部位显微结构参数研究. 中国科学: 生命科学, 2014, 44: 578-583
Ni Y K, Xu P, Niu X F, et al. Microstructure of woodpecker's cranial bone based on micro-computed tomography. SCIENTIA SINICA Vitae, 2014, 44: 578-583, doi: 10.1360/052013-344

的大量研究表明, 骨的力学强度不仅与骨量相关, 还与其内部的松质骨显微结构及其分布、骨矿化程度等相关^[8-11]. 人体的椎体、胫骨、股骨、跟骨等部位的骨组织三维显微结构形态特征和力学特性方面的研究已有很多报道^[12-21]. 对胫骨松质骨结构形态研究表明, 结构模型指数(structural model index, SMI)是预测弹性模量、极限应力和疲劳能量的最佳参数^[14,15]. Cui 等人^[17]采用 Micro-CT 扫描获得股骨近端的显微结构形态, 利用显微有限元法计算松质骨区域沿高度方向的表现弹性模量, 结果表明, 多个显微结构参数结合在一起, 可以更好地解释表现弹性模量的变化. Mittra 等人^[18]利用微观 CT、力学测试和骨密度仪评估了跟骨部位松质骨显微结构形态和力学特性, 结果表明, 骨量的丢失首先影响了连通性和骨小梁的数目, 而且极限强度与骨小梁数目具有更好的相关性. 马信龙等人^[19]研究了不同载荷和偏轴角对股骨头松质骨空间分布和力学性能的影响, 应用有限元分析方法模拟单轴压缩试验, 考察了松质骨区域的应变分布, 结果表明, 股骨头内部的松质骨骨小梁空间分布与力学适应性密切相关, 结构与功能不相适应会降低其力学性能.

本文进一步量化研究了华北地区较为常见的大斑啄木鸟(*Dendrocopos major*)和灰头绿啄木鸟(*Picus canus*)及 3 种非啄木鸟种属的戴胜鸟(*Upupa epops*)、百灵鸟(*Melanocorypha monolica*)、山雀(*Parus venustulus*)的颅骨不同部位处的显微结构参数, 量化的研究了啄木鸟颅骨不同部位处骨分布情况.

1 材料与方法

1.1 样本选取

本文选取 2 种啄木鸟: 大斑啄木鸟、灰头绿啄木鸟; 3 种非啄木鸟鸟类: 山雀、戴胜鸟、百灵鸟作为研究对象. 大斑啄木鸟与灰头绿啄木鸟属于鴉形目, 啄木鸟科, 在中国华北地区分布广泛且都具有显著啄物行为; 山雀是雀形目, 山雀科, 山雀属鸟类, 形小, 活跃, 栖于林地或庭园, 无啄物行为; 戴胜鸟属佛法僧目, 戴胜属, 戴胜科鸟类, 栖息在开阔的田园、园林、郊野的树干上, 是有名的食虫鸟, 大量捕食金针虫等害虫, 常啄食松软土地中的害虫, 具有轻微啄物行为; 百灵鸟属雀形目, 百灵科, 百灵属, 善鸣啾和

模仿声音, 以其“婉转的歌喉”著称, 无啄物行为. 本文选取 2 种啄木鸟进行种间对比, 3 种非啄木鸟类作为啄木鸟的对照研究样本.

1.2 Micro-CT 断层扫描和显微结构参数提取

利用 Micro-CT 系统(Skyscan1076, Skyscan, 比利时)对 5 种鸟类的头部进行扫描, 扫描层厚为 37.9 μm , 扫描后沿鸟喙尖到枕部的中轴线方向进行图片重建. 将所得的重建图像利用 CTAn 重建之后观察颅骨冠状面剖面的骨质分布, 由于啄木鸟的额部、颞部与枕部富含松质骨, 而其他部位几乎不含松质骨, 因此选取额部、颞部与枕部作为研究部位, 每个部位选取 3 个样本, 每个样本的区域大小为 1.0 mm $\times$ 1.0 mm(图 1).

利用 CTAn 软件分析颅骨冠状面剖面上颅骨 3 个不同区域处显微结构参数及其分布. 主要分析的显微结构参数(表 1)包括骨体积分数(BV/TV), 结构模型指数(SMI), 骨小梁数量(Tb.N), 骨小梁厚度(Tb.Th), 骨小梁分离度(Tb.Sp), 骨质密度(BMD). 得到的数据利用统计学软件 SPSS(版本 19.0, IBM, 美国)分析显著性差异水平($\bar{x} \pm \text{SD}$).

2 结果

由于每个部位选择 3 个样本, 对所得的数据取平均值后, 得到 5 种鸟的 3 个部位显微结构参数数据. 表 2 为计算得到的额部的显微结构参数. 山雀、戴胜鸟和百灵鸟的体积分数(BV/TV)、骨小梁数量(Tb.N)、骨小梁厚度(Tb.Th)以及骨小梁分离度(Tb.Sp)与大斑啄木鸟具有显著差异($P < 0.05$). 大斑啄木鸟与灰头绿啄木鸟的体积分数、骨小梁数量与骨小梁厚度均高于其他几种鸟类, 而骨小梁分离度和结构模型指数(SMI)小于山雀、戴胜鸟和百灵鸟.

表 3 列出了几种鸟颞部的显微结构参数, 其中大斑啄木鸟的体积分数、骨小梁数量、骨小梁厚度以及骨小梁分离度的情况与表 2 中类似, 与山雀、戴胜鸟和百灵鸟具有显著差异. 在结构模型指数方面, 百灵鸟的数值最高, 达到了 2.02, 大斑啄木鸟最低, 仅为 0.93. 大斑啄木鸟的骨小梁数量显著高于其他几种鸟类, 达到了 0.0039($1/\mu\text{m}$). 在骨质密度方面, 几种鸟类的差别并不明显.

图 1 选取部位示意图

A: 大斑啄木鸟; B: 灰头绿啄木鸟; C: 山雀; D: 戴胜鸟; E: 百灵鸟. I: 额部; II: 颞部; III: 枕部

表 1 显微结构参数定义^[19]

参数缩写形式		参数定义(单位)
骨体积分数	BV/TV	3-D ROI 中骨体积所占的百分比(%)
结构模型指数	SMI	该指数用以表示杆状或板状, 大小为 0~3, 越接近 0, 表示形状接近板状, 接近 3 则表示形状接近杆状
骨小梁厚度	Tb.Th	3-D ROI 中骨小梁的平均厚度(μm)
骨小梁数量	Tb.N	3-D ROI 中骨小梁的平均数量($1/\mu\text{m}$)
骨小梁分离度	Tb.Sp	3-D ROI 中骨小梁之间的间隔大小(μm)
骨质密度	BMD	以 3-D ROI 为基础所得到的骨骼矿物质密度(g/cm^3)

表 2 5 种鸟类额部显微结构参数^{a)}

	大斑啄木鸟	灰头绿啄木鸟	山雀	戴胜鸟	百灵鸟
BV/TV(%)	55.82±1.26	35.76±2.45*	12.67±1.44**	8.14±2.62*	14.79±3.45*
SMI	0.93±0.35	1.34±0.45	1.64±0.12*	1.52±0.08	1.57±0.29
Tb.N($1/\mu\text{m}$)	0.0037±0.0002	0.0024±0.0003*	0.0014±0.0002*	0.0009±0.0003**	0.0019±0.0004*
Tb.Th(μm)	150.74±9.87	140.57±7.48	91.27±15.78*	91.51±4.55*	78.16±1.44*
Tb.Sp(μm)	137.62±5.16	218.97±23.05*	325.18±17.80*	321.70±51.82*	262.7±13.76*
BMD(g/cm^3)	0.318±0.004	0.317±0.005	0.284±0.0006*	0.285±0.019	0.293±0.006*

a) *: $P<0.05$; **: $P<0.001$

在表 4 中, 同样发现了与表 2 和 3 相似的规律, 但是从枕部的数据来看, 戴胜鸟的骨小梁厚度与灰头绿啄木鸟相近, 其体积分数也相对较高, 达到了 26.28%, 但是戴胜鸟的骨小梁分离度明显高于大斑啄木鸟与灰头绿啄木鸟。

3 讨论

本文基于 Micro-CT 扫描图像得到了大斑啄木鸟、灰头绿啄木鸟、山雀、戴胜鸟和百灵鸟的颅骨显微结构参数。结果表明, 大斑啄木鸟与灰头绿啄木鸟

表 3 5 种鸟类颞部显微结构参数^{a)}

	大斑啄木鸟	灰头绿啄木鸟	山雀	戴胜鸟	百灵鸟
BV/TV(%)	47.89±11.29	22.66±1.40	8.91±0.72*	16.13±1.03*	10.85±1.44*
SMI	0.93±0.09	1.59±0.02*	1.75±0.21*	1.35±0.001*	2.02±0.13*
Tb.N(1/μm)	0.0039±0.0004	0.0017±0.00004*	0.00088±0.0001*	0.0014±0.0004**	0.0012±0.0001*
Tb.Th(μm)	120.68±15.38	135.85±11.02	95.10±8.94*	94.71±15.51	91.77±6.62*
Tb.Sp(μm)	141.93±19.36	262.17±2.17*	387.37±59.80*	255.33±61.10*	325.43±25.97*
BMD(g/cm ³)	0.303±0.01	0.297±0.003	0.272±0.0008*	0.308±0.009	0.278±0.002

a) *: $P<0.05$; **: $P<0.001$ 表 4 5 种鸟类枕部显微结构参数^{a)}

	大斑啄木鸟	灰头绿啄木鸟	山雀	戴胜鸟	百灵鸟
BV/TV(%)	59.57±11.12	35.90±6.22*	11.31±1.22*	26.28±4.80	8.83±3.63*
SMI	0.92±0.31	1.10±0.04	1.36±0.14*	1.33±0.09	2.09±0.10*
Tb.N(1/μm)	0.0041±0.0008	0.0028±0.0002	0.0015±0.0003*	0.00213±0.0004	0.0010±0.0003*
Tb.Th(μm)	144.50±2.83	127.33±9.04	81.91±1.34**	122.31±9.32*	83.39±9.01*
Tb.Sp(μm)	119.71±5.16	208.63±32.75	358.15±17.80*	303.50±11.71*	288.61±23.71*
BMD(g/cm ³)	0.322±0.02	0.302±0.001	0.294±0.003	0.344±0.02	0.276±0.001

a) *: $P<0.05$; **: $P<0.001$

在 3 个部位的体积分数、骨小梁厚度、骨小梁数量和骨小梁分离度均大于 3 种对照鸟类, 而结构模型指数小于 3 种对照鸟类, 骨质密度并无显著差异。

根据结构模型指数的定义, 其数值越小代表骨小梁的结构越趋于板状, 啄木鸟相比其他 3 种不啄木的鸟类具有更小的结构模型指数, 表明啄木鸟的骨小梁形状更加接近板状, 对表 2~4 中的数据进行纵向对比, 大斑啄木鸟 3 个部位的 SMI 数值十分接近, 表明大斑啄木鸟在颞部、额部和枕部的松质骨具有相似的形状。

在体积分数方面, 如图 2A 所示, 2 种啄木鸟的骨体积分数显著高于其他 3 种鸟类, 表明在 3 个部位所选取的样本中, 啄木鸟的样本骨含量更高; 而从图 2A 中可以看出, 大斑啄木鸟的骨含量是几种鸟类中最高的。在 3 个部位间进行纵向对比发现, 啄木鸟枕部的骨量最高, 达到 59.57%, 但是可以看到, 2 种啄木鸟枕部和额部的体积分数差异较小, 却均高于颞部, 所以在啄木鸟枕部和额部具有更多的松质骨。

本实验室之前的研究结果表明^[22], 大斑啄木鸟头部的松质骨分布不均匀, 骨小梁厚度更大且密度更高, 小梁骨之间空隙度更小。由于枕部和额部均为啄木鸟舌骨经过的部位, 因此, 枕部和额部丰富的松质骨含量与啄木鸟头部的抗冲击性能具有联系。图

2B 反映了骨小梁厚度的对比, 可以看到, 啄木鸟的骨小梁厚度要明显高于其他 3 种对照鸟类。另外, 大斑啄木鸟的枕部和额部的骨小梁厚度高于颞部, 与骨体积分数的情况类似。图 2C 和 D 分别表示了骨小梁数量和骨小梁分离度的对比。可见, 啄木鸟 3 个部位的松质骨排列更加紧密, 与此对应的是相同部位的骨小梁数量更多。

本文在每个部位选取了 3 个样本, 研究了 5 种鸟类的显微结构参数。今后的研究目标包括 2 个方面: (i) 可以在本研究样本的基础上, 进行扫描电子显微镜实验, 观察各个部位的显微结构, 与本文中的数据进行对比验证, 从而全面分析啄木鸟颅骨的显微结构特性; (ii) 可在 Micro-CT 断层扫描的基础上进行三维重建, 通过有限元模拟计算分析啄木鸟颅骨的受力情况。相信通过这些研究可以全面地了解啄木鸟颅骨的显微结构与其力学性能, 有助于进一步认识这种结构的作用。

4 结论

自然界中的生物材料在进化过程中会进行自我调节和适应, 使其达到良好的力学性能。啄木鸟在不断地进化过程中, 头部的显微结构与没有啄木行为的其他鸟具有显著性差异。这种特殊的结构使

图 2 显微结构参数对比示意图

A: 骨体积分数(BV/TV); B: 骨小梁厚度(Tb.Th); C: 骨小梁数量(Tb.N; D: 骨小梁分离度(Tb.Sp). *: $P<0.05$; **: $P<0.001$

得啄木鸟能够在高速度、高加速度冲击下免遭头部冲击伤。针对啄木鸟头部骨显微结构及力学性能方面

的进一步探索,有助于抗震材料的优化设计等领域的研究。

参考文献

- 1 Darwin C. The Origin of Species by Means of Natural Selection. Champaign: NetLibrary, 1866
- 2 May P R, Fuster J M, Newman P, et al. Woodpeckers and head injury. Lancet, 1976, 1: 454-455
- 3 Gibson L J. Woodpecker pecking: how woodpeckers avoid brain injury. J Zool, 2006, 270: 462-465.
- 4 Carter D R, Fyhrie D P, Whalen R T. Trabecular bone density and loading history: regulation of connective tissue biology by mechanical energy. J Biomech, 1987, 20: 785-794
- 5 王丽珍, 张宏泉, 樊瑜波. 啄木鸟颅骨及颌骨的材料学特征在头部抗冲击中的作用. 中国科学: 生命科学, 2012, 42: 234-239
- 6 Rayner J M V, Wootton R J. Biomechanics in Evolution. Cambridge: Cambridge University Press, 1991
- 7 朱乐, 赵红平, 宋延龄, 等. 羚牛股骨密质骨力学性能的实验研究. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 42: 301-304
- 8 Gong H, Zhang M, Qin L, et al. Regional variations in microstructural properties of vertebral trabeculae with structural groups. Spine, 2006, 31: 24-32
- 9 Lanyon L E. Using functional loading to influence bone mass and architecture: objectives, mechanisms, and relationship with estrogen of the mechanically adaptive process in bone. Bone, 1996, 18: S37-S43
- 10 Ruimerman R, Huiskes R, Van Lenthe G H, et al. A Computer-simulation model relating bone-cell metabolism to mechanical adaptation of trabecular architecture. Comput Methods Biomech Biomed Eng, 2001, 4: 433-448

- 11 Liu X S, Huang A H, Zhang X H, et al. Dynamic simulation of three dimensional architectural and mechanical alterations in human trabecular bone during menopause. *Bone*, 2008, 43: 292–301
- 12 Rubner M. Materials science: synthetic sea shell. *Nature*, 2003, 423: 925–926
- 13 Gong H, Zhang M, Yeung H Y, et al. Regional variations in microstructural properties of vertebral trabeculae with aging. *J Bone Miner Metab*, 2005, 23: 174–180
- 14 Ding M, Odgaard A, Linde F, et al. Age-related variations in the microstructure of human tibial cancellous bone. *J Orthop Res*, 2002, 20: 615–621
- 15 Ding M, Hvid I. Quantification of age-related changes in the structure model type and trabecular thickness of human tibial cancellous bone. *Bone*, 2000, 26: 291–295
- 16 Cui W Q, Won Y Y, Baek M H, et al. Age-and region-dependent changes in three-dimensional microstructural properties of proximal femoral trabeculae. *Osteoporosis Int*, 2008, 19: 1579–1587
- 17 Cui W Q, Won Y Y, Baek M H, et al. Contributions of three-dimensional trabecular bone microstructure of the proximal femur to its mechanical properties as assessed by micro-finite element analysis. *Key Eng Mater*, 2006, 321: 278–281
- 18 Mittra E, Rubin C, Gruber B, et al. Evaluation of trabecular mechanical and microstructural properties in human calcaneal bone of advanced age using mechanical testing, μ CT, and DXA. *J Biomech*, 2008, 41: 368–375
- 19 马信龙, 付鑫, 马剑雄, 等. 股骨头内松质骨空间分布和力学性能变化有限元分析. *医用生物力学*, 2010, 25: 465–470
- 20 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: 924564
- 21 Gong H, Lv L, Hong L, et al. Regional variations in the anisotropic elastic properties of femoral trabecular bone. *Bone*, 2010, 47: S399
- 22 Wang L, Cheung J T M, Pu F, et al. Why do woodpeckers resist head impact injury: a biomechanical investigation. *PLoS One*, 2011, 10: 6–10

Microstructure of Woodpecker's Cranial Bone Based on Micro-computed Tomography

NI YiKun^{1,2}, XU Peng^{1,2}, NIU XuFeng^{1,2}, WANG LiZhen^{1,2} & FAN YuBo^{1,2}

1 Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2 International Research Center of Aerospace Biotechnology and Medical Engineering of Ministry of Science and Technology, Beijing 100191, China

The main purpose of this article is to research the microstructure of woodpecker's cranial bone on tempus, occiput and forehead. The great spotted woodpecker, the grey-headed woodpecker, the eurasian hoopoe, the titmouse and the lark bird were selected as research samples and the Eurasian hoopoe, the titmouse and the lark bird were chosen as control groups. Microstructure parameters including BV/TV, SMI, Tb.N, Tb.Th, Tb.Sp and BMD were measured based on the micro-computed tomography. After comparison with the control groups, it was found that the Tb.Th, BV/TV and Tb.N were significantly higher and the SMI was lower than that of control groups. These characteristics of woodpecker's cranial bone were developed during the evolutionary process in order to adapt to the pecking behaviours and it is an important reason why woodpeckers can resist head impact.

cranial bone of woodpecker, different parts, microstructure parameters

doi: 10.1360/052013-344