doi:10.11659/jjssx.12E025040

·骨科微创技术与围术期安全·

基于显微CT技术对枢椎基底部空腔区结构的多物种比较研究

许 瑶[1],秦宇伯[2],陈连香[3],马志豪[4],董腾昊[1],王奕婷[5],王 威[6] (1.内蒙古科技大学包头医学院,内蒙古 包头 014040;2.内蒙古自治区人民医院胃肠外科,内蒙古 呼和浩特 010017;3.内蒙古医科大学附属医院医学模拟中心,内蒙古 呼和浩特 010059;4.内蒙古自治区人民医院急诊外科,内蒙古 呼和浩特 010017;5.内蒙古医科大学内蒙古临床医学院,内蒙古 呼和浩特 010030;6.内蒙古自治区人民医院院外门诊部,内蒙古 呼和浩特 010017)

[摘 要] **目的** 通过显微计算机断层扫描(MicroCT)技术定量比较不同物种枢椎齿状突基底部的空腔区与正常区骨微结构,探讨空腔区的跨物种存在性及其作为力学薄弱区的潜在意义。**方法** 采用MicroCT扫描15份人类、35份白羽肉鸡及27份槐山羊枢椎标本的空腔区及同椎体正常区,观察其影像学特征,并测量骨微结构参数。采用*Spearman*相关性分析探讨空腔区骨微结构参数与正常区的内在联系。**结果** MicroCT图像显示,不同物种中齿状突基底部均存在骨小梁显著稀疏、紊乱的低密度区域;三维重建显示,不同物种标本中枢椎基底部均存在肉眼可见的低密度空腔区。在不同物种中空腔区的骨体积分数(BV/TV)、骨矿物密度(BMD)、骨小梁厚度(Tb.Th)和骨小梁数量(Tb.N)均显著低/少于正常区($P<0.05$),而Tb.Sp则显著大于正常区($P<0.05$)。结构模型指数(SMI)在白羽肉鸡的空腔区中显著高于正常区($P<0.001$),在人类和槐山羊空腔区和正常区中未见统计学差异($P>0.05$)。连通性密度(Conn.Dn)在人类和白羽肉鸡空腔区中显著低于正常区($P<0.05$),但在槐山羊空腔区与正常区中无显著差异($P>0.05$)。各物种间空腔区BV/TV、Tb.Sp、SMI、Tb.N的相对减少率存在显著差异($P<0.05$)。槐山羊空腔区Tb.Sp的相对减少率的绝对值显著高于白羽肉鸡和人类($P<0.05$)。槐山羊空腔区Tb.N的相对减少率的绝对值显著高于人类及白羽肉鸡($P<0.05$)。相关性分析显示,空腔区骨微结构参数间的内在关联模式发生紊乱。**结论** 齿状突基底部空腔区普遍存在于人类、槐山羊和白羽肉鸡中,表现为骨量流失、结构紊乱的先天性力学薄弱区域,易发生骨折和结构失稳。槐山羊模型在模拟人类退行性骨结构改变方面展现出巨大潜力,是研究齿状突生物力学及骨重塑机制的理想动物模型。

[关键词] 枢椎;齿状突;空腔区;显微计算机断层扫描;骨微结构;动物模型;槐山羊
[中图分类号] R681.1 [文献标志码] A [收稿日期] 2025-12-06

Comparative study on the cavitary structure at the base of the axis in multiple species using micro-computed tomography

XU Yao[1], QIN Yu-bo[2], CHEN Lian-xiang[3], MA Zhi-hao[4], DONG Teng-hao[1], WANG Yi-ting[5], WANG Wei[6] (1. Baotou Medical College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia 014040, China; 2. Department of Gastrointestinal Surgery, Inner Mongolia People's Hospital, Hohhot Inner Mongolia 010017, China; 3. Medical Simulation Center, Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia 010059, China; 4. Department of Emergency Surgery, Inner Mongolia People's Hospital, Hohhot Inner Mongolia 010017, China; 5. Inner Mongolia Clinical Medical College, Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia 010030, China; 6. Department of Off-site Outpatient, Inner Mongolia People's Hospital, Hohhot Inner Mongolia 010017, China)

Abstract: Objective To quantitatively compare the bone microstructure between the cavitary region and the normal region at the base of the odontoid process of the axis across different species using micro-computed tomography (MicroCT), and to explore the cross-species presence of the cavitary region and its potential significance as a mechanically weak region. **Methods** MicroCT was used to scan the cavitary region and the adjacent normal region of the same axis vertebra in specimens from 15 humans, 35 white-feathered broilers, and 27 Huai goat axis. The imaging characteristics were observed, and bone microstructural parameters were measured. *Spearman* correlation analysis was used to explore the intrinsic relationships between bone microstructural parameters in the cavitary region and normal region. **Results** MicroCT images revealed a low-density area with significantly sparse and disorganized trabecular bone at the base of the odontoid process in all three species, and three-dimensional reconstruction showed the presence of a grossly visible low-density cavitary region at the base of the axis in all three species. The cavitary region of all three species showed significantly lower bone volume fraction (BV/TV), bone mineral density (BMD) and trabecular thickness (Tb.Th), fewer trabecular number (Tb.N), and greater trabecular separation (Tb.Sp) than those in the normal region ($P<0.05$). The structure model index (SMI) in the cavitary region of white-feathered broilers was significantly greater than

[基金项目] 内蒙古自治区人民医院博士科研启动基金项目(2024BS02);内蒙古医科大学联合项目(YKD2021LH048)
[通信作者] 王 威,E-mail:185416759@qq.com

that in the normal region (P<0.001), while no significant difference was found in SMI between the cavitary region and normal region of humans or Huai goats (P>0.05). Connectivity density (Conn. Dn) in the cavitary region of humans and white-feathered broilers was significantly lower than that in the normal region (P<0.05), while no significant difference was observed in Conn. Dn between the cavitary region and normal region of Huai goats (P>0.05). The relative reduction ratios of BV/TV, Tb. Sp, SMI, and Tb. N in the cavitary region showed significant differences among three species (P<0.05). The absolute value of the relative reduction ratio of Tb. Sp in the cavitary region of Huai goats was significantly higher than that in white-feathered broilers and humans (P<0.05). The absolute value of the relative reduction ratio of Tb. N in the cavitary region of Huai goats was significantly higher than that in humans and white-feathered broilers (P<0.05). Correlation analysis showed that the intrinsic correlation patterns among bone microstructural parameters were disrupted in the cavitary region. **Conclusion** The cavitary region at the base of the odontoid process is commonly observed in humans, Huai goats, and white-feathered broilers, and manifests as an congenitally weak mechanics region characterized by bone loss, structural disorganization, making it prone to fracture and structural instability. The Huai goat model shows great potential for simulating human degenerative bone structural changes, and appears to be an ideal animal model for studying the biomechanics and bone remodeling mechanisms of the odontoid process.

Keywords: axis; odontoid process; cavitary region; micro-computed tomography; bone microstructure; animal model; Huai goat

人类枢椎齿状突基底部骨折的发生率约占颈椎损伤的70%[1],严重时会累及延髓,从而引起中枢性呼吸衰竭甚至死亡[2],目前其治疗仍是临床难点[3]。以往多从生物力学与退行性变方面解释人类枢椎齿状突基底部骨折发生的原因,然而齿状突基底部这一特定解剖学部位的骨折高发原因仍缺乏深入的生物学研究阐明。

从发育解剖学角度分析,齿状突通过基底软骨联合与枢椎相连并骨化融合[4-5]。但有学者提出,该软骨联合融合后可能遗留微结构的薄弱区域,即空腔区[6-7]。该空腔区是否为跨物种普遍存在的进化保守结构目前尚不明确,其微结构缺陷尚缺乏定量评估,同时也缺乏合适的动物模型支撑后续的机制与干预研究。为系统探究空腔区的跨物种保守性并筛选出理想的动物模型,本研究选取人类标本、脊柱解剖结构和生物力学特性等方面与人类高度相似的槐山羊[8-9],以及为论证该空腔区的跨物种保守性引入的白羽肉鸡作为研究对象[10-13]。显微计算机断层扫描(micro-computed tomography, MicroCT)技术的优势在于无损呈现微米级别的三维骨微结构,是量化骨微结构的理想工具[14]。因此,本研究采用MicroCT技术,定量比较人类、白羽肉鸡与槐山羊枢椎齿状突基底部的骨微结构,旨在明确空腔区的跨物种存在性及其力学薄弱性质,并为相关研究筛选理想的动物模型提供参考。

1 材料与方法

1.1 标本来源

45~60岁人类枢椎标本15份、6月龄白羽肉鸡枢椎标本35份及1岁槐山羊枢椎标本27份。人类枢椎标本由内蒙古医科大学基础医学院人体解剖教研室提供,动物标本由内蒙古医科大学动物学院解剖教研室提供。所有标本在数据采集前通过肉眼及X射线检查,排除骨折、肿瘤及明显退变标本,标本置于90%乙醇中固定脱水后室温保存,MicroCT扫描前保持湿润状态。本研究经内蒙古自治区人民医院伦理委员会批准(批准号:202400303k),所有标本使用均符合伦理规范。

1.2 MicroCT扫描

采用Hiscan XM MicroCT机[15]扫描标本,参数设置:电压60 kV(白羽肉鸡、人类)、80 kV(槐山羊),电流133 μA(白羽肉鸡)、100 μA(槐山羊)和134 μA(人类),单次曝光时间50 ms,扫描分辨率25 μm,扫描角度间隔0.5°,扫描前后均使用羟基磷灰石体模进行密度校准。

1.3 图像分析与参数测量

使用MicroCT设备配套的Hiscan Analyzer软件[16],在齿状突基底部空腔区及同椎体正常区分别手动勾画一致性的感兴趣区(region of interest, ROI)。空腔区ROI严格定位于齿状突基底部,在冠状位及矢状位MicroCT图像上均表现为骨小梁稀疏、紊乱的低密度区域。正常区ROI选取同椎体上远离空腔区且骨小梁分布均匀致密的枢椎松质骨区域。所有ROI体积统一为直径2 mm的圆柱体。上述操作由两名不知晓分组的研究人员独立完成,两名研究人员ROI定位的一致性良好(*Kappa*值为0.85)。经软件自动计算各ROI内的骨矿物密度(bone mineral density, BMD)、骨体积分数(bone volume fraction, BV/TV)、骨小梁厚度(trabecular thickness, Tb. Th)、骨小梁间隙(trabecular separation, Tb. Sp)、骨小梁数量(trabecular number, Tb. N)、结构

模型指数(structure model index, SMI)及连通性密度(connectivity density, Conn. Dn)。计算各物种间空腔区骨微结构参数相对于正常区骨微结构参数的相对减少率,相对减少率=(正常区值-空腔区值)/正常区值×100%。

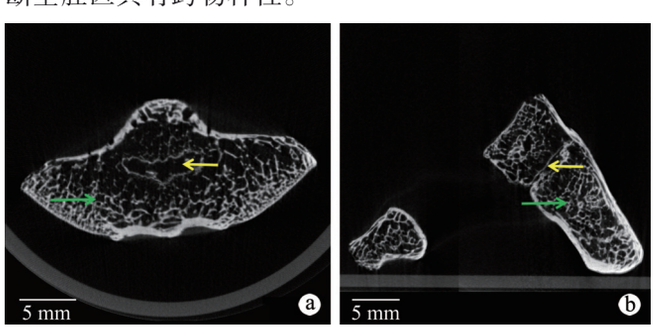
1.4 统计学分析

采用SPSS 27.0软件进行统计学分析。计量资料经*Shapiro-Wilk*检验不符合正态分布,以中位数(四分位间距)[$M(Q_1,Q_3)$]表示,采用*Wilcoxon*符号秩检验分析各物种空腔区与正常区参数差异,并计算效应量(r)以评估差异度,基于Rosenthal公式计算:$r = Z/\sqrt{N}$。0.10≤|r|<0.30为小效应,0.30≤|r|<0.50为中等效应,|r|≥0.50为大效应。采用*Kruskal-Wallis H*检验比较不同物种间各参数相对减少率的差异,若存在显著性则进一步进行*Dunn's*事后检验,并使用*Bonferroni*法多重比较校正P值。采用*Spearman*相关性分析探讨空腔区骨微结构参数与正常区的内在联系。α=0.05,P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 影像学结果

所有标本经MicroCT扫描显示,人类、白羽肉鸡和槐山羊的齿状突基底部均存在骨小梁显著稀疏、紊乱的低密度区域,即空腔区,而同椎体正常区的骨小梁呈现出更厚、更多、连续性更强的分布特点,二者形成鲜明对比(图1)。三维重建显示,不同物种标本中枢椎基底部均存在肉眼可见的低密度空腔区(图2),推断空腔区具有跨物种性。

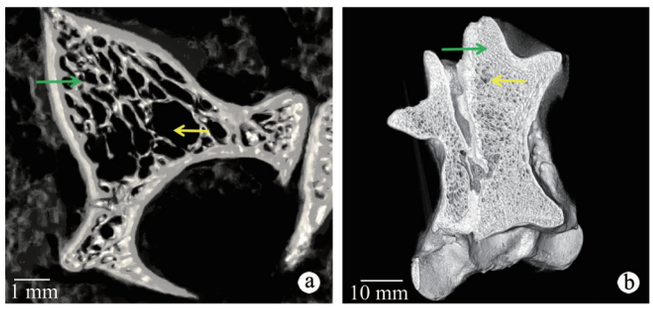


a:冠状位;b:矢状位 黄色箭头:枢椎齿状突基底部空腔区;绿色箭头:同椎体正常区

图1 人类枢椎MicroCT图像

2.2 各物种骨微结构参数分析

在不同物种中空腔区的BV/TV、BMD、Tb. Th和Tb. N均显著低/少于正常区(P<0.05),而Tb. Sp则显著大于正常区(P<0.05),见表1。这些差异在统计上表现多为大效应(|r|>0.50),表明空腔区是一个骨量严重流失、结构稀疏的力学薄弱区域。



a:白羽肉鸡枢椎冠状位;b:槐山羊枢椎矢状位 黄色箭头:枢椎齿状突基底部空腔区;绿色箭头:同椎体正常区

图2 白羽肉鸡、槐山羊MicroCT扫描三维重建

SMI与Conn. Dn的结果呈现出物种特异性。SMI在白羽肉鸡的空腔区中显著大于正常区(P<0.001),提示白羽肉鸡的空腔区骨小梁形态更倾向于力学性能较差的杆状结构;SMI在人类和槐山羊空腔区与正常区中未见统计学差异(P>0.05)。Conn. Dn在人类和白羽肉鸡空腔区中显著低于正常区(P<0.05),但在槐山羊空腔区与正常区中无显著差异(P>0.05)。其中Conn. Dn在槐山羊正常区出现负值,可能是在骨小梁极其致密、连通性极高的区域,ROI算法将单一结构误判为多个孤立结构,敏感性分析显示,排除异常值后组内比较的统计学结果保持不变。

2.3 不同物种间枢椎齿状突基底部骨微结构参数相对减少率

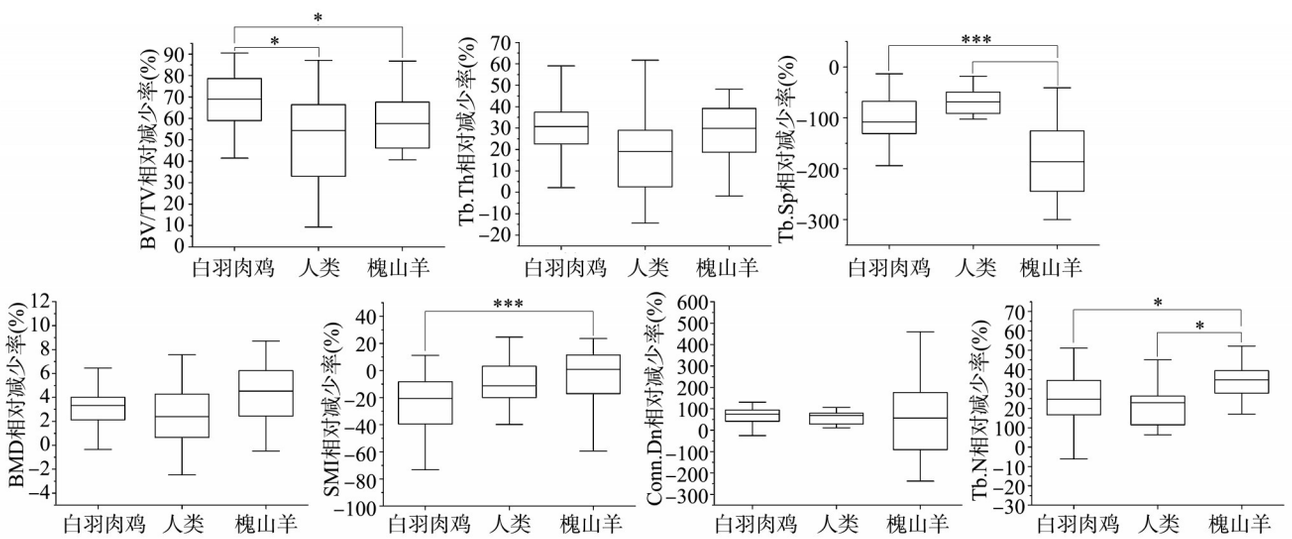
各物种间空腔区Tb. Th、BMD、Conn. Dn相对减少率无显著差异(P>0.05);各物种间空腔区BV/TV、Tb. Sp、SMI、Tb. N的相对减少率有显著差异(P<0.05)。进一步分析显示,槐山羊空腔区Tb. Sp相对减少率的绝对值显著高于白羽肉鸡和人类(P<0.05)。槐山羊空腔区Tb. N相对减少率的绝对值显著高于人类及白羽肉鸡(P<0.05),见图3。

2.4 骨微结构参数的相关性分析

空腔区与正常区相比骨微结构参数间的相关性模式发生了明显改变。正常区BV/TV与Tb. Th呈强正相关(r=0.74),Tb. Th与Tb. N呈极强负相关(r=-0.88)。Tb. Sp与Tb. N在正常区呈极强负相关(r=-0.85),其负相关性在空腔区进一步增加(r=-0.98)。BV/TV与Tb. N在正常区呈负相关(r=-0.40),其负相关性在空腔区降至-0.28。Tb. Th与Conn. Dn在正常区呈强负相关(r=-0.87),但在空腔区(r=-0.41)明显减弱。SMI与BV/TV由正常区的弱正相关(r=0.25)转为空腔区的接近零相关(r=-0.02),见图4。

表1 各物种空腔区与正常区骨微结构参数比较[$M(Q_1,Q_3)$]

参数	物种	空腔区	正常区	r	P
BV/TV	白羽肉鸡	0.172(0.106,0.242)	0.527(0.431,0.715)	0.87	<0.001
	槐山羊	0.340(0.243,0.387)	0.780(0.675,0.825)	0.87	<0.001
	人类	0.228(0.157,0.295)	0.497(0.398,0.579)	0.88	<0.001
Tb.Th(mm)	白羽肉鸡	0.118(0.104,0.148)	0.167(0.151,0.220)	0.85	<0.001
	槐山羊	0.404(0.346,0.453)	0.585(0.513,0.642)	0.86	<0.001
	人类	0.262(0.218,0.310)	0.320(0.282,0.372)	0.73	0.005
Tb.Sp(mm)	白羽肉鸡	0.346(0.310,0.437)	0.189(0.133,0.206)	0.87	<0.001
	槐山羊	1.083(0.884,1.182)	0.371(0.349,0.416)	0.87	<0.001
	人类	0.637(0.538,0.822)	0.428(0.332,0.460)	0.88	<0.001
BMD(g/cm^3)	白羽肉鸡	1.481(1.467,1.500)	1.533(1.514,1.552)	0.86	<0.001
	槐山羊	1.256(1.236,1.290)	1.315(1.257,1.364)	0.85	<0.001
	人类	1.462(1.428,1.506)	1.492(1.462,1.552)	0.70	0.006
SMI	白羽肉鸡	98.134(92.052,101.700)	81.849(72.468,87.265)	0.81	<0.001
	槐山羊	96.222(90.245,102.000)	97.425(80.429,105.414)	0.05	0.981
	人类	95.528(87.455,99.984)	86.394(75.239,99.879)	0.48	0.061
Tb.N(1/mm)	白羽肉鸡	2.109(1.763,2.289)	2.691(2.522,2.871)	0.85	<0.001
	槐山羊	0.667(0.606,0.744)	1.036(0.980,1.085)	0.87	<0.001
	人类	1.032(0.895,1.264)	1.363(1.272,1.593)	0.82	0.001
Conn.Dn($1/mm^3$)	白羽肉鸡	5.647(1.338,8.399)	14.608(10.225,22.304)	0.68	<0.001
	槐山羊	0.468(0.301,0.630)	0.210(−0.044,0.933)	0.19	0.313
	人类	1.332(0.807,2.323)	3.967(2.773,5.501)	0.81	0.002



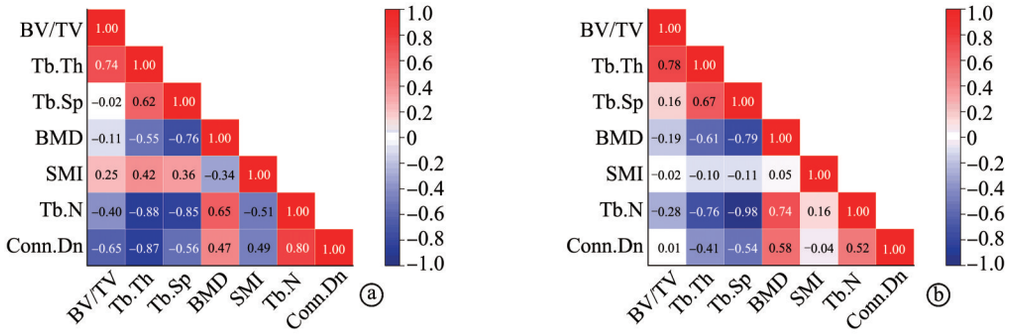
正值表示空腔区参数较正常区下降;负值表示空腔区参数较正常区上升 *:P<0.05;***:P<0.001

图3 不同物种间枢椎齿状突基底部骨微结构参数相对减少率比较

不同物种间骨微结构参数的关联模式各异。白羽肉鸡参数高度协同,BV/TV与Tb.Th呈极强正相关(r=0.84),与Tb.Sp极强负相关(r=−0.92);SMI与BV/TV呈中度负相关(r=−0.67)。槐山羊呈现独特的“SMI独立”模式,SMI与其他参数相关性极弱(|r|≤0.22),而BV/TV与Tb.Th(r=0.90)、Tb.Sp(r=−0.95)仍保持极强关联。人类呈现多参数联动模式,SMI与Tb.Sp呈正相关(r=0.51),与Tb.N(r=−0.44)及Conn.Dn(r=−0.39)呈负相关,Tb.N与Conn.Dn呈强正相关(r=0.81),见图5。这些物种间骨微结构参数的差异提示骨内部调控机制可能存在物种特异性。

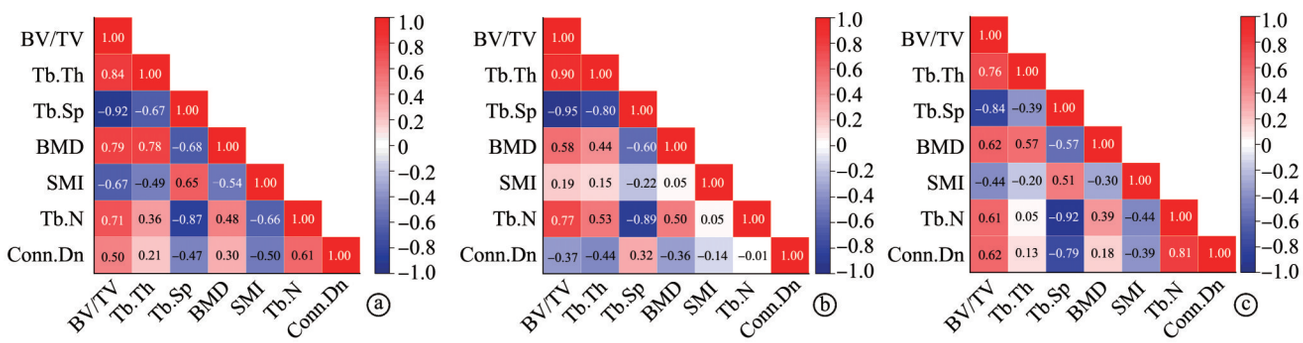
3 讨论

枢椎齿状突骨折是颈椎的严重损伤,既往研究研究多集中于宏观力学与临床治疗[17-21],而对齿状突内部固有的微结构薄弱区缺乏深入认识。随着MicroCT的应用,目前的研究逐渐深入至骨微结构层面[22-23]。有学者发现,齿状突基底部存在未完全愈合的骨化中心或结构空腔,其内骨小梁结构较正常区紊乱、薄弱,被认为是引起齿状突基底部骨折的风险因素[6,24-25]。在



a:正常区;b:空腔区 颜色深浅表示相关系数*r*的大小(红色为正相关,蓝色为负相关)

图4 空腔区与正常区骨微结构参数的相关性分析



a:白羽肉鸡骨微结构参数相关性矩阵图;b:槐山羊骨微结构参数相关性矩阵图;c:人类骨微结构参数相关性矩阵图 颜色深浅表示相关系数*r*的大小(红色为正相关,蓝色为负相关)

图5 各物种骨微结构参数的相关性分析

动物模型方面,山羊等大型哺乳类动物因其颈椎尺寸与人类相近常被用于脊柱生物力学和内固定器械测试[26],而禽类因其独特的骨代谢特性也被用于骨生物学研究[10]。然而现有研究多局限于单一物种,缺乏多物种的解剖学比较以证实空腔区的普遍性及其潜在的发育生物学成因。

本研究通过MicroCT扫描及三维重建首次证实了枢椎齿状突基底部的空腔区存在于人类、槐山羊和白羽肉鸡中,且该区域呈现出BV/TV、Tb. Th、Tb. N及BMD显著低/少于同椎体正常区,Tb. Sp显著高于正常区的骨微结构退化特征,证明了空腔区是一个骨量严重流失、结构稀疏的区域。这种综合性的微观结构退化必然导致宏观力学强度的下降,为临床常见的齿状突基底部骨折提供了潜在的微观解释。空腔区即使在亲缘关系较远、颈椎力学功能迥异的白羽肉鸡中依然存在,证实空腔区可能是一种先天性的发育遗迹而非力学适应性结果。从发育解剖学来看,空腔区的位置与胚胎期齿状突基底部软骨联合的解剖位置高度吻合。已有胚胎学研究证实,在人类中该软骨联合是枢椎生长板的一部分,通常在3~7岁完全骨化闭合[27]。因此,本研究观察到的空腔区很可能是该软骨联合在微观水平上的永久性痕迹,即骨化遗迹。这一发现为宏观解剖、微观结构以及发育生物学提供了参考。

为了解空腔区内部骨微结构参数的调控关系是否不同于正常区,本研究进行了*Spearman*相关性分析,结果显示,空腔区的骨微结构退化机制不同于正常区的骨量维持调控:正常区BV/TV与Tb. Th呈强正相关,而与Tb. N呈负相关,表明生理状态下骨量的维持主要依赖于骨小梁增厚;Tb. Th与Tb. N呈极强负相关,Tb. Sp与Tb. N呈极强负相关,符合骨小梁数量越少,间隙越大的基本结构原理。而空腔区以Tb. N减少和Conn. Dn降低为主要特征,Tb. N与Tb. Sp呈现出极强的负相关,证实空腔区的骨丢失主要表现为骨小梁的断裂与消失。本研究中空腔区BV/TV与Tb. N的负相关减弱,表明以厚度换数量的协调机制被破坏。SMI与BV/TV由正常区的弱正相关转为空腔区的接近零相关,符合骨退变时形态恶化与骨量丢失同步的病理过程。这种改变使得空腔区在承受负荷时更易发生结构失稳和骨折。

为消除不同物种间骨微结构的差异,本研究首次系统性量化并比较了不同物种间空腔区骨微结构参数的相对减少率,发现槐山羊的Tb. Sp、Tb. N等骨小梁结构参数的相对减少率绝对值大于人类和白羽肉鸡,提示槐山羊的空腔区结构对力学环境的变化更敏

感。槐山羊空腔区中BV/TV与Tb. Th的相关性强于人类和白羽肉鸡;槐山羊空腔区中Conn. Dn与Tb. N几乎无相关性,而在人类中两者呈强正相关,在白羽肉鸡中为中等正相关。这提示槐山羊空腔区的骨小梁连接性调控机制可能与其他物种不同,其骨结构对力学刺激的适应性反应更为显著。四足动物脊柱呈水平位,但其受肌肉韧带调控,主要承受轴向压缩载荷,其椎体骨小梁结构也呈现典型的轴向承重特征[9]。结合槐山羊颈椎在尺寸、力学特性上与人类的高度相似性[8,28],本研究认为:槐山羊是研究齿状突生物力学、骨重塑机制及后续干预措施的极具潜力的大型动物。

本研究的局限性:人类标本数量相对有限且年龄局限,无法探讨不同年龄段及不同骨骼状态下骨微结构的变化规律;未控制性别对骨代谢的混杂影响;仅局限于3个物种,结论的普适性有待在更多物种中验证;为离体研究,未能模拟在体动态力学负荷的变化;未纳入供体的生活习惯、营养状态、基础疾病等可能影响空腔区的因素。未来研究可扩大样本量、涵盖更广年龄段,并按照性别进行研究,结合在体力学测试、有限元分析[28-29]及利用槐山羊模型建立齿状突骨折愈合模型,动态观察空腔区在骨折愈合过程中的变化,为临床新型内置物的优化设计提供生物力学依据;同时可借助白羽肉鸡的基因组背景从进化发育生物学角度揭示空腔区的遗传基础。

综上,本研究首次提供了齿状突基底部空腔区普遍存在的定量证据。空腔区在人类、白羽肉鸡和槐山羊中均表现为骨量减少、结构疏松的先天性力学薄弱区,为齿状突基底部骨折提供了直接的微观形态学解释。此外,槐山羊的空腔区对骨微结构的削弱效应最为显著,结合其与人类在脊柱生物力学上的相似性,可作为研究齿状突骨折机制、骨重塑过程及干预措施的理想动物模型。本研究结果深化了对枢椎齿状突基底部结构与功能的认识,为未来针对性骨折风险评估与治疗提供了理论依据。

[参考文献]

[1] Eseonu K, Oduoza U, Fakouri B, et al. Fractures of the odontoid peg of the cervical spine[J]. Injury, 2020, 51(11): 2429-2436. doi: 10.1016/j.injury.2020.07.052.

[2] 中国医师协会急诊医师分会,解放军急救医学专业委员会,中国急诊专科医联体,等. 成人颈椎损伤急诊诊治专家共识[J]. 中国急救医学, 2022, 42(3): 189-196. doi: 10.3969/j.issn.1002-1949.2022.03.002.

[3] Gonschorek O, Vordemvenne T, Blattert T, et al. Treatment of odontoid fractures: recommendations of the spine section of the German Society for Orthopaedics and Trauma (DGOU)[J]. Global Spine J, 2018, 8(2_suppl): 12S-17S. doi: 10.1177/21925682231157316.

[4] Ogden JA. Radiology of postnatal skeletal development: XI. The first cervical vertebra[J]. Skeletal Radiol, 1984, 12(1): 12-20. doi: 10.1007/BF00373169.

[5] Akobo S, Rizk E, Loukas M, et al. The odontoid process: a comprehensive review of its anatomy, embryology, and variations[J]. Childs Nerv Syst, 2015, 31(11): 2025-2034. doi: 10.1007/s00381-015-2866-4.

[6] 王 威. 人体寰枢椎复合体显微CT的数字化研究及其中医发育学意义的初探[D]. 北京:北京中医药大学, 2018. doi: 10.26973/d.cnki.gbjzu.2018.000123.

[7] 袁 文. 齿状突骨折及其生物力学研究进展[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 1998, 8(1): 51-53. doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.1998.01.018.

[8] Dong J, Liang B, Sun Y, et al. Biomechanics of a novel artificial cervical vertebra from an in vivo caprine cervical spine non-fusion model[J]. J Orthop Translat, 2022, 37: 61-68. doi: 10.1016/j.jot.2022.07.005.

[9] Smit TH. The use of a quadruped as an in vivo model for the study of the spine-biomechanical considerations[J]. Eur Spine J, 2002, 11(2): 137-144. doi: 10.1007/s005860100346.

[10] Johnsson M, Jonsson KB, Andersson L, et al. Genetic regulation of bone metabolism in the chicken: similarities and differences to mammalian systems[J]. PLoS Genet, 2015, 11(5): e1005250. doi: 10.1371/journal.pgen.1005250.

[11] Kerschnitzki M, Zander T, Zaslansky P, et al. Rapid alterations of avian medullary bone material during the daily egg-laying cycle[J]. Bone, 2014, 69: 109-117. doi: 10.1016/j.bone.2014.08.019.

[12] Rubin CJ, Brändström H, Wright D, et al. Quantitative trait loci for BMD and bone strength in an intercross between domestic and wild-type chickens[J]. J Bone Miner Res, 2007, 22(3): 375-384. doi: 10.1359/jbmr.061203.

[13] Lyu Z, Yuan G, Zhang Y, et al. Anaerostipes caccae CML199 enhances bone development and counteracts aging-induced bone loss through the butyrate-driven gut-bone axis: the chicken model[J]. Microbiome, 2024, 12(1): 215. doi: 10.1186/s40168-024-01920-y.

[14] Bouxsein ML, Boyd SK, Christiansen BA, et al. Guidelines for assessment of bone microstructure in rodents using micro-computed tomography[J]. J Bone Miner Res, 2010, 25(7): 1468-1486. doi: 10.1002/jbmr.141.

[15] Fu L, Li L, Bian Q, et al. Cartilage-like protein hydrogels engineered via entanglement[J]. Nature, 2023, 618(7966): 740-747. doi: 10.1038/s41586-023-06037-0.

[16] 张凤珍,孙瑞芬,李梓瑜,等. Micro-CT分析跟骨内骨小梁分布及结构特征[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(24): 3885-3889. doi: 10.12307/2024.617.

[17] 朱晓龙,黄婧潇,邹殿俊,等. 上颈椎损伤诊断及治疗中应用多层螺旋CT结合人工智能模式的效果分析[J]. 中国临床医生杂志, 2022, 50(3): 348-350. doi: 10.3969/j.issn.2095-8552.2022.03.028.

[18] Grauer JN, Shafi B, Hilibrand AS, et al. Proposal of a modified, treatment-oriented classification of odontoid fractures[J]. Spine J, 2005, 5(2): 123-129. doi: 10.1016/j.spinee.2004.09.014.

[19] Hsu WK, Anderson PA. Odontoid fractures: update on management[J]. J Am Acad Orthop Surg, 2010, 18(7): 383-394. doi: 10.5435/00124635-201007000-00001.