DOI:10.16016/j.1000-5404.2003.07.011
第25卷第7期 第三军医大学学报 Vol. 25, No. 7
2003年4月 ACTA ACADEMIAE MEDICINAE MILITARIS TERTIAE Apr. 2003

文章编号:1000-5404(2003)07-0583-05

论著

原位牙的连续横断层解剖与可视化研究

宋 林[1],张绍祥[1],谭立文[1],刘正津[1],邱明国[1],李七渝[1],李 恺[1],崔高宇[1],郭燕丽[1],杨晓萍[1],陈现红[2],王欲更[3],唐泽圣[3],许忠信[3] [第三军医大学:[1]基础医学部解剖学教研室(计算医学实验室),重庆 400038;[2]附属大坪医院野战外科研究所影像诊断科,重庆 400042;[3]清华大学计算机科学与技术系,北京 100084]

提 要:目的 提供原位牙的断层解剖研究方法和形态学资料,并进行三维可视化研究,建立原位牙的立体形态。方法 从首例中国可视人数据集中提取全牙的断层图像,观察牙的形态结构,利用MedView1.0软件进行三维重建,观察牙及其周围结构的关系。结果 牙齿完整,能清晰显示牙及其周围解剖结构的形态及毗邻关系;重建结构清晰,能清楚显示牙在牙槽内位置和方向。结论 冰冻铣切技术能完整保留牙齿各断面,可作为牙断层解剖的研究手段;三维可视化可以建立标准的原位牙及牙冠的计算机三维模型。

关键词:牙;断层解剖;可视化人体;三维重建
中图法分类号:R319;R322;R322.41 文献标识码:A

Continuous thin cross-sectional anatomy and visualization of the teeth

SONG Lin, ZHANG Shao-xiang, TAN Li-wen, LIU Zheng-jin, QIU Ming-guo, LI Qi-yu, LI Kai, CUI Gao-yu, GUO Yan-li, YANG Xiao-ping, CHEN Xian-hong, WANG Yu-su, TANG Ze-sheng, XU Zhong-xin (Department of Anatomy, Third Military Medical University, Chongqing 400038, China)

Abstract: Objective To provide the method for sectional anatomy and morphological data of the teeth, and to build the 3-D visualization model of the teeth. Methods Cross-sectional images of the teeth were extracted from the first Chinese visible human dataset. The relationships of the teeth and the adjacent structures were observed on the 3-D model reconstructed by Medview 1.0 software. Results The complete image of the teeth could clearly display the anatomic structures of the teeth and the relationship with the adjacent structures. The clearly reconstructed structures could also display the position and direction of the teeth in the alveolar. Conclusion The milling technique can be applied in the studies of all cross-sectional images of the teeth. The standard computerized 3-D model of teeth and crowns *in situ* can be created by 3-D visualization.

Key words: teeth; sectional anatomy; visible human; 3-D reconstruction

牙是人体内最坚硬的器官,过去常用的研究方法,如解剖法、模型切片法、磨片法等很难同时观察清楚牙及其周围结构的形态及解剖关系,特别是断层解剖资料。近年来有部分作者利用CT等手段对牙及骨组织进行了断层研究和牙计算机三维模型的研究[1~5],但缺乏牙与周围软组织之间的关系。本研究采用首例中国数字化可视人体数据的图像[6],对牙及其周围组织进行解剖学观察和计算机三维重建,提供原位牙的断层解剖资料和牙的计算机三维模型,为原位牙列的几何仿真和力学仿真等研究建立可用的可视化模型。

1 材料与方法

标本来源为第三军医大学可视化研究组采集的首例中国数字化可视人体数据集,男性,35岁。提取硬腭至下颌骨下缘之间的薄层冰冻连续断层解剖图像,共计125层,层间距为0.5 mm。用Photoshop图像处理软件裁切咽以前的全牙区范围,裁切原位牙图像的有效分辨率为618×528 pixel,进行连续观察和测量。

每1.0 mm抽取一个层面图像,将层间距为1.0 mm的连续断层图像输入SGI图形工作站,把上颌骨、上颌牙龈、上颌牙、下颌牙、下颌牙龈、下颌骨等结构标示为不同的类别,用MedView1.0软件进行三维重建。三维重建采用contours + marching cubes算法,获取需重建结构的外形轮廓,经选取一定的采样频率和平滑值后生成三维数据场,利用剖分立方体算法提取等值面,进行三维重建,将三维数据场的数据经数据格式的转换可生成供快速成型技术所需的STL文件和可供AutoCAD识别的DXF文件。

基金项目:国家杰出青年基金资助项目(39925022);国家自然科学基金资助项目(30270698)
作者简介:宋 林(1972-),女,山东省济南市人,助理实验师,主要从事组织切片技术及计算机三维重建方面的研究。电话:(023)68752225
通信作者:张绍祥,电话:(023)68752201
收稿日期:2003-02-17;修回日期:2003-03-04

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 结果

2.1 连续断层观察

2.1.1 硬腭鼻腔粘膜层面 在上颌骨硬腭鼻腔粘膜层面可见上颌右侧尖牙底根尖,此层面是牙显示的最上层层面。在两侧上颌骨后部可见上颌窦下部,外侧可见面动脉,上颌骨后方的腔隙为鼻腔,在下鼻甲和鼻中隔后方经鼻后孔与鼻咽部相通。

2.1.2 硬腭口腔粘膜层面 该层面切及上颌骨硬腭口腔粘膜的顶、咽鼓管咽口等结构。该层面是上颌牙根出现的层面,除右侧上颌第2磨牙的一个颊根在下一层面出现外,其余牙的牙根均可见,前牙的牙根很清晰,两侧第3磨牙的牙根特别粗大。其上一层面除上颌第2磨牙的牙根未见外,其余牙根已清晰可见。鼻腔的下鼻甲已完全消失,鼻中隔也仅见后下部一小片区域,至向下第4个层面则完全消失。在上颌骨前方可见一窄的裂隙,为口腔前庭,该裂隙始见于本层面上方第6个层面。

2.1.3 上颌切牙根管层面 该层面切及软腭的起始部、切牙的根管等结构。切牙的髓腔在上5个层面已清晰可辨,该层面位于前牙的根中1/3处,根管显示较清楚,其下第12个层面以后则完全消失。而前磨牙、磨牙的髓腔在该层面不易辨认。左侧上颌尖牙牙根位于牙列左外侧,牙根内可见牙髓腔。尖牙后内侧两颗牙的牙根形态相似,为左侧上颌的前磨牙。口腔前庭的裂隙后缘扩展到第2前磨牙的外侧。

2.1.4 上颌前磨牙髓室层面 该层面切及尖牙和切牙牙冠、第2磨牙的髓室底等结构,见图1。除第3磨牙外,其余牙的髓腔均可见,腔较大,为髓室(牙冠腔)的部位,是显示上颌牙髓腔的最佳层面。在切牙和尖牙的近中面和远中面有少许牙龈附着,显示牙冠突入口腔内。前磨牙、磨牙均被牙龈包裹,为切及牙颈部位。口腔前庭后缘已突入到第3磨牙的外侧。在固有口腔与鼻咽部之间可见腭垂,腭垂部可见前方的腭帆张肌和后方的腭帆提肌。

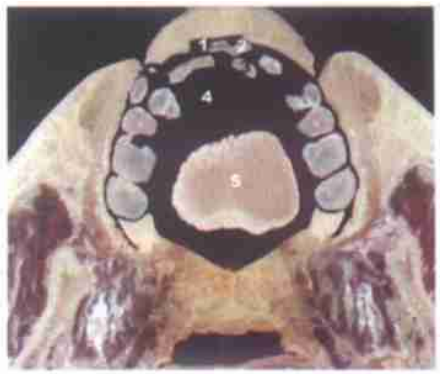


1: Incisor; 2: Oral cavity proper; 3: Gingiva; 4: Maxillary third molar; 5: Maxillary canine

图1 上颌前磨牙髓室层面

Fig 1 Section at pulp chamber of maxillary premolars

2.1.5 口角层面 该层面切及上颌第1前磨牙牙合面、口角等结构,见图2。两侧口角之间的切牙和尖牙为下颌牙,口角后方显示的牙仍为上颌牙。其中尖牙和第1前磨牙已近𬌗面,其余的前磨牙和磨牙为牙冠处。所有牙齿表面均未见牙龈附着,为牙冠部位。

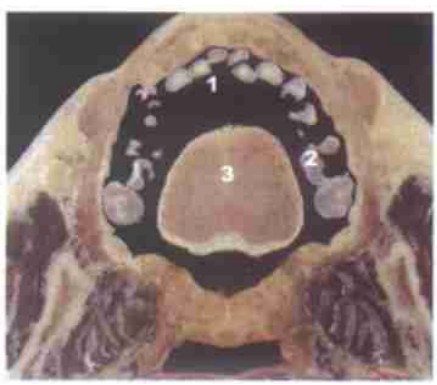


1: Oral vestibule; 2: Mandibular central incisor; 3: Lateral incisor; 4: Oral cavity proper; 5: Tongue

图2 口角层面

Fig 2 Section at the angles of mouth

2.1.6 下颌第1磨牙𬌗面层面 该层面切及下颌第1、2磨牙牙𬌗面处,见图3。层面上所显示的为各牙的牙冠,均游离于口腔内,是观察下颌牙牙冠的最佳显示层面。右侧下颌第1、2磨牙和左侧下颌第2磨牙牙𬌗面上的近中颊尖、远中颊尖和近中舌尖清晰可辨。在两侧第2磨牙的后方可见口腔前庭与固有口腔相通的间隙,左侧的间隙宽度为7.2 mm,右侧的间隙宽度为5.7 mm。



1: Oral cavity proper; 2: Occlusal surface; 3: Tongue

图3 下颌第1磨牙牙𬌗面层面

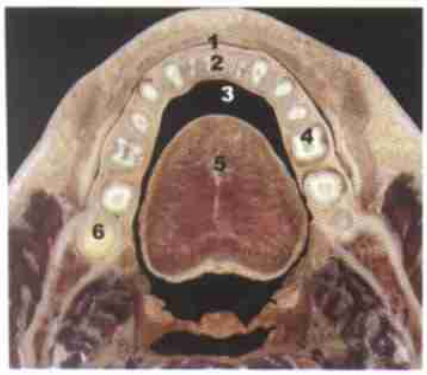
Fig 3 Section at occlusal surface of mandibular first molar

2.1.7 下颌第2磨牙牙𬌗面层面 该层面切及下颌磨牙的颊颈嵴、髓室等结构。右侧第3磨牙牙𬌗面刚出现,而左侧第3磨牙牙𬌗面深层的牙本质清晰可见。前牙及其周围的牙槽骨和牙龈也清楚可辨,而前磨牙和磨牙周围则仅见牙龈,牙槽骨未切到。除第3磨牙外,其余各牙的髓腔可辨,磨牙和前磨牙的髓腔为髓室,前牙的髓腔为根管。口腔前庭的裂隙移至第2磨牙的外侧。

2.1.8 下颌牙根层面 该层面切及下颌切牙的根尖、腭垂等结构,下颌磨牙切及牙根的分叉处稍上方,见图4。故各牙均位于下颌骨的牙槽内,牙龈已不可见。第1、2前磨牙的外侧可

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

见口腔前庭的少许裂隙, 再向下 1 mm 则完全消失。该层面向下 2 mm 处切牙的牙根消失, 3 mm 处腭垂消失, 5 mm 处第 1、2 磨牙和尖牙的牙根消失, 7 mm 处第 3 磨牙牙根消失, 9 mm 处所有牙根均消失。



1: Oral vestibule; 2: Root of tooth; 3: Oral cavity proper; 4: Pulp chamber; 5: Tongue; 6: Mandibular third molar

图 4　下颌牙根层面

Fig 4　Section at mandibular root of tooth

2.2　计算机三维重建

在 SGI 工作站上成功建立了原位牙列的三维可视化模型, 重建了上颌骨、上颌牙龈、上颌牙、下颌牙、下颌牙龈及下颌骨等相关结构。重建结构可以多彩色、任意组合及半透明显示。经不同角度观察, 整个牙列显示清晰、实体感强, 各器官、结构及其相互的毗邻关系也一目了然, 即便是位于牙槽内牙根的形态、方位、大小也清晰可辨。重建后生成的三维数据场经数据转换后在 Auto CAD 和 3-D MAX 中均能清晰显示和修改。

三维重建的图像中可清楚观察牙及其周围组织的形态和位置关系, 牙列在前面观察最清楚, 牙𬌗面在上颌牙的下面和下颌牙的上面观察最清楚。从三维图像的前面可观察到右侧下颌中切牙呈斜向生长, 见图 5、图 6, 左侧上颌尖牙并列于牙列的外侧; 从透明图像上可观察到第 3 磨牙位于牙龈内, 其中左侧上颌第 3 磨牙斜向生长, 见图 6~8。



1: Maxilla; 2: Maxillary gingivae; 3: Maxillary central incisor; 4: Mandibular central incisor; 5: Mandibular gingivae; 6: Mandible

图 5　牙前面观

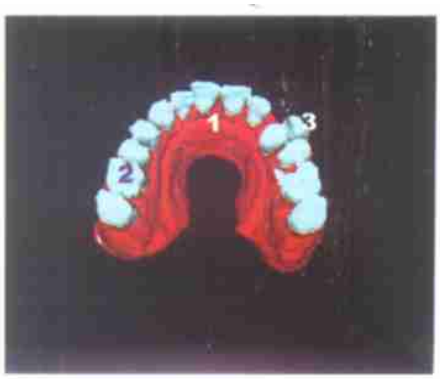
Fig 5　Anterior view of teeth



1: Maxilla; 2: Maxillary teeth; 3: Mandibular teeth; 4: Mandible

图 6　前面半透明显示

Fig 6　Anterior semitransparent view



1: Maxilla; 2: Occlusal surface of maxillary molar; 3: Left maxillary canine

图 7　上颌牙下面观

Fig 7　Inferior view of maxillary teeth



1: Maxilla; 2: Maxillary third molar; 3: Mandibular third molar; 4: Root of teeth; 5: Mandible

图 8　左侧半透明显示

Fig 8　Left lateral semitransparent view

3　讨论

3.1　牙的断层解剖研究方法

牙是人体内最坚硬的器官, 采用传统的断层切割

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

方法,如冰冻锯切、磨片等方法,难以获取完整牙的断层资料,特别是原位牙齿的断层资料。美国"可视化人项目"采用铣床磨铣的方法获取了可视化人体的数据[5,7],其中包含了整个牙齿的断层数据,但由于在冰点以上的温度环境下铣切,且牙冠部位包埋不充分,牙冠区域的数据有缺损现象,原位牙齿的断层数据不完整。韩科等[5]也曾采用数控铣床对圆筒状包埋卡具包埋单颗游离的牙齿进行铣切,但该包埋方法难以对带有软组织的原位牙进行断层铣切和可视化研究,并认为不适合采用冰冻铣切的方法来获取牙齿的断层数据。本研究将全口牙于原位用5%的明胶体包埋,采用高速旋转的铣刀在-25 ℃的环境下铣切,牙齿表面平整,无缺损现象,牙齿𬌗面上尖、嵴均能完整保留,采集的图像说明该方法是制作牙齿断层,特别是原位牙断层的理想方法之一。

3.2 原位牙的计算机三维模型及其应用

许多作者对单个牙或整个牙列利用CT或磨片的方法进行计算机三维建模[1,3,4,8],但对原位牙的三维建模未见报道。由于CT图像是灰度图,且层间距一般在1.0 mm以上,图像上所表达的解剖信息不够完整,在三维建模过程中常需插层或加层,以提高数据的完整性[3]。本研究仅抽取了1.0 mm间距的图像进行三维重建,牙、牙龈、牙槽骨等结构清晰可见,即便是牙根在牙槽骨内的位置、方向也能清楚观察到,部分牙𬌗面的结构也能观察。通过旋转观察方位和调整显示的结构,能清楚显示牙及其相邻结构的形态、位置和毗邻关系。如果降低原位牙齿断层的厚度,用于重建的原始断层图像间距更小,重建的结构就更精细、形态就更逼真。本研究采用的铣床为Tk6350,其铣切精度为0.001 mm,完全能满足标准牙建模数据的要求。本研究方法提示采用冰冻铣切和计算机三维重建的方法是研究原位牙齿形态、位置关系,建立标准牙及牙列的理想方法之一。

将重建的三维数据场转换成.STL格式后,通过快速成型机生成三维模型[9]。通过数据转换生成.DXF文件可在Auto CAD中进行修改,并可在3DS MAX中渲染、显示。这些数据格式均可为临床种植义齿时提供制取印模和灌注模型的参考依据。郑元俐等[3]采用CT技术进行了牙齿的三维有限元模型分析,认为牙颌组织及其修复体的形态多样、不规则、受力复杂,准确获取牙颌组织形态的有限元模型是牙有限元分析的关键。本研究采用的重建算法为轮廓线+Maching cubes,是选取断层上各重建结构的外形轮廓,按一定的频率采样,所生成三维数据场的结构为网状结构,该网状结构的结点经数据转换后可在Auto CAD中进行编辑。因此,本研究方法可为牙齿的有限元分析提供几何模型,可以通过对支持组织的应力分析研究,了解修复体及基牙牙周组织的应力分布情况,为口腔生物力学和修复体优化设计提供详实的几何模型。

3.3 牙列不整齐

从断层图像和三维重建的图像上可显示牙及其牙周组织的形态、位置和相互关系。除左上颌尖牙错位、下颌前牙拥挤和下颌第3磨牙未萌出外,本例标本的牙及其周围结构未见其它异常。发生牙列拥挤的主要机制是牙量与骨量不协调,牙量大于骨量[10]。从断层和重建图像上可观察到右侧下颌中切牙牙根向左侧中切牙牙根靠近,而在根尖处2颗中切牙牙根紧靠在一起。右侧中切牙牙冠舌面贴附在侧切牙的唇面,相互间约成60°的夹角。从下颌前牙的牙冠处观察,牙量明显大于骨量,在牙根尖处观察,右侧下颌中切牙的根尖与左侧中切牙根尖的距离远远小于与右侧侧切牙根尖的距离,牙根处的骨量是足够牙根排列的,不致引起拥挤。因此,可以考虑此处牙列拥挤可能是由于牙胚的位置和发育不良所引起的。临床上,牙列拥挤多为尖牙唇向和侧切牙舌向错位,并伴有其它牙𬌗畸形,多采用减数拔牙矫治或扩大牙弓的方法来治疗[11]。

本例标本在左侧上颌前牙与前磨牙之间出现了双层牙,在牙冠处可见尖牙位于第1前磨牙的外侧,在牙根尖处可见尖牙牙根位于第1、2前磨牙牙根之间的外侧,使上颌尖牙出现唇向错位现象。在三维图像上显示两颗牙并行于牙列,左上颌尖牙和第1前磨牙与左下颌第1前磨牙咬合,左上颌尖牙向唇面突起,致使该处的口腔粘膜向外凹陷,不仅影响牙齿的美观,亦可降低牙齿的咬𬌗力度。尖牙位于口角区,在牙列中牙根最粗壮,对维持牙弓形态及面部丰满有重要作用,因此尽量保留尖牙[10],常采用矫治的方法以恢复其正常位置具有重要的临床意义。

3.4 第3磨牙的萌出

第3磨牙位于牙列的最后端,其萌出时间很晚,在20岁左右,也可终身不出,常易出现先天缺失或形态位置异常,且常因阻生而引起冠周炎或第2磨牙龋坏[12]。本例标本所见,上、下颌的第3磨牙均未萌出,所以该例标本的牙冠部分仅见28颗恒牙,虽然属正常范围,但第3磨牙未萌出的原因是阻生还是未发育,则需要确定。从经半透明处理的三维图像观察到左侧上颌第3磨牙𬌗面指向第2磨牙的牙颈部,是由于位置异常而出现阻生智齿,应尽早拔除[10,13],以免给第2磨牙造成不良影响。

参考文献:

[1] 陈松龄,林尔坚,冉 炜,等. 螺旋CT牙体表面成像对骨内埋伏牙底定位及临床应用[J]. 华西口腔医学杂志,2000,18(4):247-249.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[2] 邹　波, 王　勇, 吕培军, 等. 标准牙冠三维模型底建立及其可操作平台底研究[J]. 现代口腔医学杂志, 2002, 16(1): 34－37.
[3] 郑元俐, 张富强, 陈　笠, 等. 采用牙 CT 技术建立完整下颌骨三维有限元模型[J]. 实用口腔医学杂志, 2000, 16(2): 134－136.
[4] 李　玲, 张　睿, 于力牛, 等. 基于 CT 断层影像底下颌骨及下牙列三维几何学仿真[J]. 上海口腔医学, 2000, 9(4): 235－236.
[5] 韩　科, 陆汝铃, 吕培军, 等. 人类恒牙的计算机三维建模[J]. 中华口腔医学杂志, 1998, 33(2): 94－96.
[6] 张绍祥, 刘正津, 谭立文, 等. 首例中国数字化可视人体完成[J]. 第三军医大学学报. 2002, 24(10): 1231－1232.
[7] Ackerman M J. The visible human project: a resource for education[J]. Acad Med, 1999, 74(6): 667.
[8] 黄隆庆, 朱智敏, 张　萌, 等. 计算机图形图象处理技术在牙颌及修复体三维形态数字模型建立中底应用[J]. 华西口腔医学杂志, 1997, 15(1): 76－78.
[9] 邱明国, 张绍祥, 刘正津, 等. 应用激光快速成型方法复制颞骨[J]. 第三军医大学学报, 2002, 24(8): 816－818.
[10] 范朝云. 减数拔牙在牙列拥挤矫治中的临床应用[J]. 山西医科大学学报, 1998, 29(4): 376－377.
[11] 张金香, 刘丰春. 前牙错 畸的早期正畸[J]. 康复与疗养杂志, 1994, 9(3): 125－126.
[12] 王翰章. 中华口腔科学(上卷)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2001. 141－180, 786－815, 1496－1516.
[13] 何成君. 下颌阻生智齿的对称性及与牙牙合畸形的关系[J]. 哈尔滨医科大学学报, 1994, 28(2): 136.

(编辑　汪勤俭)

(上接 582 页)

能。分别以考马斯亮蓝染色[1]和台盼蓝-姬母萨染色[2]检查 AR 率。

1.3　顶体反应评定标准及顶体反应发生率计算

考马斯亮蓝染色后, 精子头部顶端顶体区着蓝色者为无顶体反应, 不着色者为有顶体反应。台盼蓝-姬母萨染色的精子, 顶体部未着色或部分着色, 为有顶体反应; 顶体部着色深, 为无顶体反应。每份样品做 3 张平行涂片, 每涂片在 1 000 倍显微镜下记数 200 个精子, 计算 AR 发生率(%, $\bar{x}\pm s$)。

1.4　统计学处理

采用 χ^2 检验。

2　结果

2.1　考马斯亮蓝与台盼蓝-姬母萨染色后的精子顶体效果观察

考马斯亮蓝染色后, 4 种哺乳动物未获能的精子头部顶端顶体区呈深蓝色, 获能后的精子顶体区不着色, 反差明显, 容易辨别。台盼蓝-姬母萨染色, 除顶体区呈深染(为获能)或不着色(已获能)外, 另有部分精子着色介于二者之间, 难于判定, 这种现象在猪尤为多见。

2.2　考马斯亮蓝与台盼蓝-姬母萨染色检查的顶体反应发生率结果比较

小鼠、猪、牛、羊 4 种哺乳动物精子顶体反应发生率的 3 次重复实验结果见表 1。牛、羊精子获能处理后, 两种染色方法获得的顶体反应发生率高度一致, 小鼠精子在台盼蓝-姬母萨染色中的获能率较考马斯亮蓝高 10%, 但统计学差异尚未达到显著; 猪精子以考马斯亮蓝染色的顶体反应发生率显著低于台盼蓝-姬母萨的 78.8%($P<0.01$)。此外, 考马斯亮蓝检查结果的稳定性重复性好, 而台盼蓝-姬母萨在平行组内以及重复实验中变异度大。

表 1　两种染色方法检查四种动物精子顶体发生率比较(%, $\bar{x}\pm s$)

检查方法	小鼠	猪	牛	羊
考马斯亮蓝	80.15±1.95	58.65±2.92**	85.50±1.68	81.00±1.15
台盼蓝-姬母萨	90.35±9.10	78.85±16.50	83.85±8.50	78.50±6.75

**: $P<0.01$ 与台盼蓝-姬母萨法比较

3　讨论

实验结果表明, 考马斯亮蓝染色技术可用于哺乳动物精子顶体状态的准确评价。未获能的小鼠、猪、牛、羊精子, 头部顶体区呈深蓝色着染, 而获能的精子, 顶体区不着色, 二者反差明显, 易于辨别, 3 次实验结果重复性稳定性好。此外, 考马斯亮蓝染色适用范围广泛, 猪获能精子的评价, 一直是普通简单染色技术的盲区, 苯胺黑-伊红-姬母萨三染色以及台盼蓝-姬母萨染色都存在较大比例的中间型染色个体(获能精子顶体区不着色, 未获能精子顶体区深蓝色或黑色), 获能率在不同研究者的报道中差异较大[1~3]; 小鼠精子因其特别的形态结构, 普通简单染色技术也存在难于辨认等缺点。本实验以小鼠、猪、牛、羊为研究对象, 都取得较为理想的染色效果。两种染色技术的获能率统计分析表明, 牛、羊、小鼠 3 种哺乳动物精子的获能率差异不显著($P>0.05$), 但猪的获能率差异较大($P<0.01$)。Tamuli 和冯怀亮发现, 姬母萨方法获得的猪精子顶体反应发生率较微分干涉(DIC)高 15%左右[2,3], 与本实验结果相似, 同时考马斯亮蓝平行组内变异程度以及重复实验的稳定性均优于台盼蓝-姬母萨组(数据没有列出)。因此, 作者认为: 考马斯亮蓝的检查结果更为客观。

精子获能效率不仅影响体外受精的穿透率、受精率和胚胎发育率, 而且还是评价雄性不育的可靠指标[4,5]。考马斯亮蓝染色方法的建立, 可为哺乳动物受精, 特别是体外受精以及雄性不育的研究提供重要技术手段。

关键词: 顶体反应; 考马斯亮蓝染色技术; 精子; 哺乳动物
中图法分类号: Q95-33　　文献标识码: B

参考文献:

[1] Moller C C, Bleil J D, Kinloch R A, *et al*. Structural and functional relationships between mouse and hamster zonapellucida glycoproteins[J]. Dev Biol, 1990, 137(1): 276－286.
[2] Tamuli M K, Watson P F. Use of a simple staining technique to distinguish acrosomal changes in live sperm sub-population[J]. Anim Reprod Sci, 1994, 35(2): 247－254.
[3] 陈大元. 精子顶体反应及穿过透明带[A]. 见: 陈大元 主编. 受精生物学[M]. 北京: 科学技术出版社, 2000. 105－145.
[4] Cummins J M, Pember S M, Jequier A M, *et al*. A test of the human sperm acrosome reaction following ionophore challenge: relationship to fertility and other seminal parameters[J]. J Androl, 1991, 12(1): 98－103.
[5] Christensen P, Parkinson T, Whitfield C. *In vitro* induction of acrosome reactions in stallion spermatozoa by heparin and A23187[J]. Theriogenology, 1996, 45(6): 1201－1210.

(编辑　陈聪连)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net