

DOI:10.11798/j.issn.1007-1520.202120295

· 论著 ·

颞骨 HRCT 三维重建测量乳突气房 表面积与容积的临床意义

于锋^{1,2}, 黄佳丽^{1,2,3}, 林颖⁴, 邹子柔^{1,2,3}

(1. 广州市红十字会医院耳鼻咽喉头颈外科, 广东 广州 510220; 2. 暨南大学耳鼻咽喉头颈外科研究所, 广东 广州 510220; 3. 广州医科大学耳鼻咽喉头颈外科研究所, 广东 广州 510620; 4. 广州市第十二人民医院耳鼻咽喉头颈外科, 广东 广州 510620)

摘要: **目的** 通过颞骨 HRCT 三维重建测量乳突气房表面积(SA)、容积(V),以揭示健康气化型乳突气房 SA、V、表面积容积比(SA/V)的参考值范围及特征,为进一步乳突气房功能研究、生理建模及功能重建提供依据。**方法** 回顾性分析 2016 年 1 月—2017 年 6 月广州市红十字会医院 108 例(216 耳)乳突气化型成年患者的颞骨 HRCT 资料。使用 Mimics 21.0 三维重建颞骨 HRCT 乳突气房并测量其 SA、V、SA/V,采用 SPSS 25.0 软件确定参考值范围, Mann-Whitney U 检验比较上述测量值在性别间的差异,配对 Wilcoxon 检验比较 SA、V 在左右耳间的差异,配对 *t* 检验比较 SA/V 在左右耳间的差异。**结果** 108 例(216 耳)气化型乳突气房 SA 呈偏态分布,中位数为 9 220.20(6 837.42 ~ 12 472.07) mm², 95% 参考值范围为 3 105.70 ~ 21 218.66 mm²; V 呈偏态分布,中位数为 7 255.86(5 178.03 ~ 9 796.77) mm³, 95% 参考值范围为 2 185.78 ~ 19 297.57 mm³; SA/V 呈正态分布,平均为 (1.309 8 ± 0.244 4) mm⁻¹, 95% 参考值范围为 0.830 8 ~ 1.788 8 mm⁻¹; 男性乳突气房 SA、V 均大于女性,差异具有统计学意义(*P* 均 < 0.05), 男性乳突气房 SA/V 小于女性,差异具有统计学意义(*P* < 0.05); 左耳与右耳乳突气房 SA、SA/V 均无明显区别,差异无统计学意义(*P* > 0.05), 左耳乳突气房 V 大于右耳,差异具有统计学意义(*P* < 0.05)。**结论** 健康乳突气化型成年人中, SA、V、SA/V 的 95% 参考值范围分别为 3 105.70 ~ 21 218.66 mm²、2 185.78 ~ 19 297.57 mm³、0.830 8 ~ 1.788 8 mm⁻¹; SA、V 在个体间存在较大差异, SA/V 在个体间差异较小。这些数据可为临床乳突功能重建提供参考。

关键词: 中耳, 乳突气房; 颞骨 HRCT; 三维重建; 表面积容积比; 气体交换
中图分类号: R764.2

Surface area and volume measurement of mastoid air cells by 3D reconstruction based on HRCT

YU Feng^{1,2}, HUANG Jiali^{1,2,3}, LIN Ying⁴, ZOU Zirou^{1,2,3}

(1. Department of Otolaryngology Head and Neck Surgery, Guangzhou Red Cross Hospital, Guangzhou 510220, China; 2. Institute of Otolaryngology Head and Neck Surgery Affiliated to Jinan University, Guangzhou 510220, China; 3. Institute of Otolaryngology Head and Neck Surgery, Guangzhou Medical University, Guangzhou 510620, China; 4. Department of Otolaryngology, Guangzhou 12th People's Hospital, Guangzhou 510620, China)

Abstract: **Objective** The aim of this study was to reveal the range and characteristics of surface area(SA), volume(V) and surface area volume ratio(SA/V) of mastoid air cells based on healthy pneumatic mastoid adult temporal bone HRCT(High Resolution CT), 3D reconstruct mastoid air cells by medical image control system. It provides the basis for further study of mastoid gas cells function, physiological modeling and reconstruction. **Methods** It was retrospectively analyzed for the temporal bone HRCT data of 108 (216 ears) adult patients with mastoid of pneumatic type in Guangzhou Red Cross Hospital from January 2016 to June 2017. All patients were excluded from middle ear disease. Mimics 21.0 medical imaging control system was used to reconstruct the temporal bone HRCT mastoid air cells, and measure its SA, V,

SA/V. SPSS 25.0 software was used to determine the reference value range. The Mann-Whitney U test was used to compare the gender differences of the above measured values. The paired Wilcoxon test was used to compare the differences of SA and V between the left and right ears, and a paired t-test measures for the differences of SA/V between the left and right ears. **Results** In 108 cases (216 ears), the pneumatic mastoid air cells SA showed a skewed distribution with the median value of 9 220.20 (6 837.42 ~ 12 472.07) mm²; the 95% reference value range was 3 105.70 ~ 21 218.66 mm². V was skewed, with the median of 7 255.86 (5 178.03 ~ 9 796.77) mm³, and the 95% reference value range was 2 185.78 ~ 19 297.57 mm³. SA/V is normally distributed, with an average (1.309 8 ± 0.244 4) mm⁻¹, and the 95% reference value range was 0.830 8 ~ 1.788 8 mm⁻¹. The SA and V of mastoid air cells in male were all larger than that in female, and the difference was statistically significant ($P < 0.05$), while the SA/V in male was less than that in female, and the difference was statistically significant ($P < 0.05$). There was no significant difference between left ear and right ear in SA and SA/V of mastoid air cells ($P > 0.05$). The V of the left ear and the mastoid was greater than that of the right ear, and the difference was statistically significant ($P < 0.05$). **Conclusions** The 95% reference values of SA, V and SA/V were 3 105.70 ~ 21 218.66 mm², 2 185.78 ~ 19 297.57 mm³ and 0.830 8 ~ 1.788 8 mm⁻¹ respectively in healthy adults with mastoid of pneumatic type. There were significant differences in SA and V, but small differences in SA/V among individuals. The data can provide a reference for clinical reconstruction of mastoid function.

Keywords: Middle ear, mastoid air cells; Temporal HRCT; Three-dimensional reconstruction; surface-to-volume ratio; Gas exchange function

中耳负压不仅是分泌性中耳炎、中耳胆脂瘤等中耳疾患形成的重要原因,也是中耳胆脂瘤等疾病术后复发的重要因素。中耳负压的形成源于中耳压力调节的失败。乳突气房和咽鼓管在中耳压力的调节中都占据着重要的地位^[1]。近年,大量研究者致力于探讨改善咽鼓管功能的有效治疗方法以改善中耳负压,并取得了不错的进展,但少有关于乳突气房功能重建改善中耳负压的研究被报道。乳突气房(mastoid air cells, MAC)维持中耳压力平衡,主要通过两种功能,即储备气体的压力缓冲功能和表面黏膜的气体交换功能^[2-5]。乳突气房的容积(volume, V)越大,其储备气体的压力缓冲功能就越强,乳突气房的表面积(surface area, SA)和表面积容积比(surface-to-volume ratio, SA/V)越大,其气体交换功能就越强。本研究拟通过三维重建颞骨 HRCT 乳突气房测量乳突气房 SA、V、SA/V,探讨乳突气化型成年人中 SA、V、SA/V 的正常参考值范围及特征,为进一步乳突气房功能研究、生理建模及功能重建提供依据。

1 资料与方法

1.1 研究对象

回顾性分析 2016 年 1 月—2017 年 6 月在广州市红十字会医院行颞骨 HRCT 平扫患者的临床资料。入选研究对象均满足以下纳入标准:①成年患者;②双侧乳突气房扫描完整;③气化型乳突;④无中、内耳解剖结构变异及畸形;⑤耳内镜、纯音听阈

测试、声导抗检查排除中耳疾患。

符合纳入标准的乳突气化型成年患者共 108 例(216 耳),其中男 51 例(47.22%, 51/108),女 57 例(52.78%, 57/108);年龄 18 ~ 79 岁,平均年龄(48.8 ± 14.6)岁。

1.2 研究方法

1.2.1 CT 检查方法 采用日本东芝公司 AQUILION 64 排螺旋 CT 行颞骨薄层扫描,患者取仰卧位,以听眶上线为基线,头颅摆位须左右对称,扫描范围自岩尖上缘至乳突尖部。扫描参数:层厚 0.5 mm,像素点阵 0.331 mm,高分辨率骨算法重建,重建间隔 0.3 mm,窗宽 4 500 Hu,窗位 450 Hu。

1.2.2 测量方法 乳突气房 SA、V 测量:颞骨 HRCT 数据以 DICOM 文件格式导入至 Mimics Medical 21.0 软件中,界定乳突气房平均 CT 值阈值 -1 024 ~ -200 Hu,将含气部分从原始扫描资料中分离出,分离出的含气部分在各扫描层界面上以指定的绿色显示(图 1A)。逐层检查各扫描层乳突气房是否与其他含气腔室相通,使用编辑功能将与之相通的其他含气腔室显色部分在连接处涂抹掉,确保每一层面乳突气房与其他含气腔室不通过后,使用区域增长功能将目标相连像素进行局域集合,使乳突气房在各扫描层被完整分离并以指定的蓝色显示(图 1B)。对分离的乳突气房进行三维重建,所有蓝色标记的像素相互连接立体成像形成重建的气房(图 2A)。重建的气房表面由大量带有向量的三角平面覆盖拼凑形成(图 2B)。所有三角平面面积的总和即为乳突气房 SA,所有组成像素体积的总和即

为乳突气房 V 。

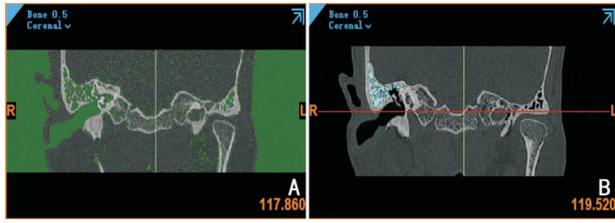


图 1 乳突气房三维重建方法 A:Hu 阈值设置 $-1\ 024 \sim -200$ Hu 后的 CT 冠位窗口,见含气部分均被分离并以指定的绿色显示(存在噪点);B:使用编辑及区域增长功能将乳突气房自含气部分进一步分离后的 CT 冠位窗口,见乳突气房以指定的蓝色显示(噪点已消除)

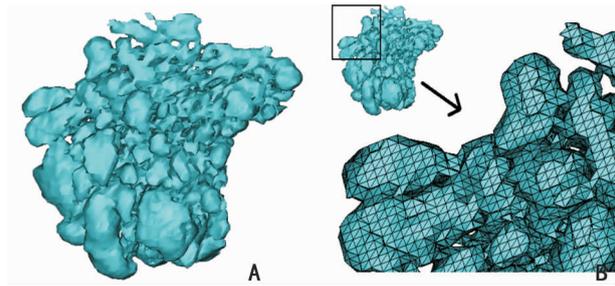


图 2 三维重建的乳突气房 A:三维重建的乳突气房;B:三维重建的乳突气房表面由大量带有向量的三角平面覆盖拼凑形成

所有患者的颞骨 HRCT 资料均由经验丰富的影像科医生判读,通过 Mimics Medical 三维重建软件对图像进行三维重建并测量乳突气房 SA、 V 。SA 测量结果精确到 $0.01\ \text{mm}^2$, V 测量结果精确到 $0.01\ \text{mm}^3$,SA/ V 计算结果精确到 $0.000\ 1\ \text{mm}^{-1}$ 。所有数据均经 2 次测量,取 2 次测量结果的平均值。

1.3 统计学处理

使用 SPSS 25.0 软件进行统计分析,百分位数法确定 SA、 V 的双侧 95% 参考值范围数据以 $[M(Q_1 \sim Q_3)]$ 表示,正态分布法确定 SA/ V 的双侧 95% 参考值范围;采用 Mann-Whitney U 检验比较上述测量值在性别间的差异,以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义;采用配对 Wilcoxon 检验比较 SA、 V 在左右耳间的差异,配对 t 检验比较 SA/ V 在左右耳间的差异,数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示,以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 SA、 V 、SA/ V 参考值范围

108 例(216 耳)乳突气化型成年患者乳突气房 SA 经 K-S 正态性检验呈偏态分布,中位数为 $9\ 220.20$ ($6\ 837.42 \sim 12\ 472.07$) mm^2 ,按照百分位数法,双侧 95% 参考值范围为 $3\ 105.70 \sim 21\ 218.66\ \text{mm}^2$; V 呈偏态分布,中位数为 $7\ 255.86$ ($5\ 178.03 \sim 9\ 796.77$) mm^3 ,按照百分位数法,双侧 95% 参考值范围为 $2\ 185.78 \sim 19\ 297.57\ \text{mm}^3$;SA/ V 呈正态分布,平均为 $(1.309\ 8 \pm 0.244\ 4)\ \text{mm}^{-1}$,按照正态分布法,双侧 95% 参考值范围为 $0.830\ 8 \sim 1.788\ 8\ \text{mm}^{-1}$ 。

2.2 各测量值性别间比较

108 例(216 耳)乳突气化型成年患者中 51 例(47.22%, 51/108)为男性患者,57 例(52.78%, 57/108)女性患者。男性左耳乳突气房 SA、右耳乳突气房 SA、左耳乳突气房 V 和右耳乳突气房 V 等测量值均大于女性,差异具有统计学意义(P 均 < 0.05);男性左耳乳突气房 SA/ V 、右耳乳突气房 SA/ V 均小于女性,差异具有统计学意义(P 均 < 0.05)。详见表 1。

表 1 各测量值性别间比较 (男 = 51 例,女 = 57 例)

项目	S-W 正态性			Mann-Whitney U
	P	均数 (中位数)	标准差 (四分位间距)	P
左侧 SA(mm^2)				
男	0.000	(10 335.84)	(5 775.68)	0.000
女	0.041	(7 913.86)	(5 290.62)	
左侧 V(mm^3)				
男	0.000	(8 358.51)	(5 290.36)	0.000
女	0.007	(6 032.26)	(4 353.13)	
左侧 SA/ V (mm^{-1})				
男	0.331	1.234 6	0.227 9	0.000
女	0.010	(1.340 4)	(0.393 7)	
右侧 SA(mm^2)				
男	0.265	11 251.26	4 150.45	0.000
女	0.001	(8 254.80)	(4 353.85)	
右侧 V(mm^3)				
男	0.103	9 303.76	4 060.62	0.012
女	0.000	(5 985.28)	(4 147.16)	
右侧 SA/ V (mm^{-1})				
男	0.391	1.261 8	0.231 7	0.015
女	0.022	(1.391 6)	(0.351 9)	

2.3 各测量值左右耳间比较

108 例乳突气化型成年患者中,左耳与右耳乳突气房 SA、SA/V 等测量值数值接近,差异无统计学意义($P > 0.05$);左耳乳突气房 V 大于右耳,差异具有统计学意义($P < 0.05$)。详见表 2。

表 2 各测量值左右耳间比较

项目	例数	K-S 正态性			Wilcoxon
		<i>P</i>	均数 (中位数)	标准差(四分 位间距)	(<i>t</i>) <i>P</i>
SA(mm ²)					
左	108	0.000	(9 273.59)	(4 967.48)	0.065
右	108	0.041	(9 153.31)	(6 055.18)	
V(mm ³)					
左	108	0.000	(7 315.85)	(4 468.00)	0.017
右	108	0.007	(7 173.74)	(4 845.56)	
SA/V(mm ⁻¹)					
左	108	0.331	1.299 1	0.245 6	(0.097)
右	108	0.010	1.320 5	0.243 9	

3 讨论

乳突气房在中耳压力调节中起一定作用,主要通过两种机制实现:乳突气房的压力缓冲和乳突黏膜的气体交换^[1]。气化型乳突气房增加了中耳的含气空间,使得中耳更易耐受压力的变化,起到了压力缓冲的作用^[3,4]。其内大小不一的气房被较薄的骨壁分隔但又相互连通,大大增加了其表面积,气房的内表面被覆一层无纤毛的薄层黏膜,依靠黏膜中丰富毛细血管的浓度/压力梯度进行气体交换,在维持中耳压力平衡中发挥一定的作用^[6-7]。化脓性中耳炎和中耳胆脂瘤等病变累及乳突气房或是乳突本身气化不良,导致乳突气房此功能不全甚至完全丧失,影响中耳压力平衡,产生中耳负压,不仅与中耳疾病的发生相关,还是术后复发的原因之一^[8-10]。因此,中耳乳突术后重建乳突气房功能有望减少中耳乳突术后负压产生,减少化脓性中耳炎、中耳胆脂瘤等病变术后复发。乳突气房功能的发挥与其解剖特征密切相关,探讨乳突气房功能并重建其功能,首先应明确健康气化型乳突气房 SA、V、SA/V 等与其功能密切相关的重要解剖参数的正常参考值范围及特征。本研究采用了基于颞骨 HRCT 三维重建乳突气房的测量方法,揭示了健康气化型乳突气房 SA、V、SA/V 的参考值范围及特征。

3.1 测量方法

乳突气房 SA、V 等几何参数无法直接测量,主

要通过颞骨 CT 资料进行影像后处理的方法间接测量,本文使用的 CT 阈值三维重建测量法被认为是目前测量乳突气房 SA、V 最为精准的测量方法。Luntz 等^[11]为了验证此方法的准确性,设计了一种密度与骨密度相近的聚乙烯管状系统模型,各管中空且相互连接,其内容积已知。使用 CT 阈值三维重建测量法测量管状系统模型的体积,发现其体积与已知的体积相同,证实了 CT 阈值三维重建测量法的准确性。采用此方法测量乳突气房 SA、V,其结果精准度受 CT 数据分辨率、分割阈值设置以及三维重建优化表面算法等因素的影响。CT 扫描的分辨率是影响测量结果的一个重要因素,分辨率越高测量到更微小的气房就越多,测量结果就越精准。Cros 等^[12]通过使用 CT 阈值三维重建测量法测量同一样本不同分辨率 CT 扫描资料的乳突气房几何参数,证实分辨率越高测量结果越精准;测量过程中阈值的设置亦是一个影响测量结果精准度的重要因素^[13]。CT 图像上各个体素的 CT 值代表相应空间内所有组织的平均 CT 值,单一体素内是无法区分不同组织的,这被称之为部分容积效应。如果阈值设置过低,与黏膜表面交界的部分含气空间将有可能不被提取出重建测量,如果阈值设置过高,提取出重建的部分将可能包含软组织甚至骨质。Byun 等^[13]针对同一样本高分辨 CT 扫描数据使用不同 CT 值阈值进行乳突气房 SA、V 的测量,发现阈值设置为 -200 Hu 时,测量出的结果最准确;不同的医学影像后处理软件在重建过程中是否采用优化处理或采用的优化处理具体算法都不一致,使用不同的软件对 CT 数据进行重建和测量,自然可能会得到有差异的结果。Byun 通过对像素平方算法(square pixel based algorithm, SP)和行进平方算法(marching square algorithm, MP)两种算法进行比较研究,发现 MP 作为优化算法,其结果更加准确^[13]。直接用于 TDP 技术的医学影像控制系统软件对医学影像资料进行三维重建后以 STL 格式储存,STL 格式储存的三维重建物体其表面由许多带有向量的微小三角形平面相互连接构成,可以使重建表面更加接近于真实的物体表面,重建乳突气房表面所有三角形平面的面积总和便是乳突气房的表面积。为求精准的乳突气房 SA、V 测量结果,本研究采用 Mimics 医学影像控制系统三维重建颞骨 HRCT 乳突气房,分割阈值范围设置 -1 024 ~ -200 Hu。本研究中 108 例(216 耳)乳突气化型成年人乳突气房呈偏态分布,中位数为 9 220.20(6 837.42 ~ 12 472.07)mm²;V 呈偏态分布,

中位数为 $7\ 255.86(5\ 178.03 \sim 9\ 796.77)\text{ mm}^3$; SA/V 呈正态分布,平均为 $(1.309\ 8 \pm 0.244\ 4)\text{ mm}^{-1}$ 。其中乳突气房 V 与国内同样使用三维重建方法的金和娟等^[14]报道的数值相似,比未使用三维重建方法的张国来等^[15-16]报道的数值更大。

3.2 乳突气房容积

乳突气房 V 是反映乳突气房压力缓冲功能的重要解剖参数,Cinamon 等^[34,17]通过各自的实验设计证实了乳突气房容积越大,其储备气体的压力缓冲功能越强。本研究中,男性乳突气房 V 中位数为 $8\ 298.63(6\ 559.75 \sim 11\ 794.65)\text{ mm}^3$,最小值为 $1\ 880.64\text{ mm}^3$,最大值为 $21\ 863.24\text{ mm}^3$;女性乳突气房 V 中位数为 $6\ 009.84(4\ 053.97 \sim 8\ 129.57)\text{ mm}^3$,最小值为 $1\ 431.21\text{ mm}^3$,最大值为 $17\ 849.79\text{ mm}^3$ 。可见,乳突气化型成年人中,乳突气房 V 在个体间存在较大差异,说明乳突气化型成年人的乳突气房压力缓冲功能在个体间存在较大差异。性别间 Mann-Whitney U 检验发现,男性的乳突气房 V 比女性大。乳突气房 V 在性别间的差异与国内金和娟等^[14-15]报道的 39 例(男 20,女 19)、43 例(男 32,女 11)结果相违背,可能与既往研究样本量较少有关。左右耳间 Wilcoxon 检验发现,左耳与右耳乳突气房 V 存在差异。左耳中位数为 $7\ 315.85(5\ 502.88 \sim 9\ 970.88)\text{ mm}^3$,右耳中位数为 $7\ 173.74(4\ 744.79 \sim 9\ 590.35)\text{ mm}^3$,可见二者差值较小,临床可认为左右耳间乳突气房 V 无明显差异。

3.3 乳突气房表面积、表面积容积比

乳突气房的气体交换功能取决于黏膜的面积、毛细血管的丰富程度以及用于单位容积气体进行交换的黏膜范围。Takahashi 等^[18]通过对保留部分乳突气房黏膜和未保留乳突气房黏膜的乳突根治术后患耳的比较,发现保留了部分黏膜的术后患耳,其气体交换功能得到了部分恢复,而未保留黏膜的术后患耳,其气体交换功能未得到恢复。Magnuson 等^[19]发现在乳突气房黏膜通过气体交换功能维持中耳压力平衡的过程中,更大的黏膜表面积容积比使其能更有效地发挥这一作用。因此,乳突气房 SA 和 SA/V 是反映乳突气房气体交换功能的重要解剖参数,其中,SA/V 最具代表性,SA/V 比值越大,在单位气体容积内,用于进行气体交换的黏膜面积越大,气体交换功能也越强。在本研究中,男性乳突气房 SA/V 平均为 $(1.248\ 2 \pm 0.229\ 1)\text{ mm}^{-1}$,最小值为 $0.805\ 0\text{ mm}^{-1}$,最大值为 $1.863\ 9\text{ mm}^{-1}$;女性乳突气房 SA/V 平均为 $(1.365\ 0 \pm 0.245\ 5)\text{ mm}^{-1}$,最

小值为 $0.913\ 5\text{ mm}^{-1}$,最大值为 $2.286\ 6\text{ mm}^{-1}$ 。相比较乳突气房 V 在乳突气化型成年人中的明显差异,乳突气房 SA/V 在乳突气化型成年人中的差异较小。乳突气房的这一结构特征,提示在乳突气房维持中耳压力平衡的过程中,反映乳突气房气体交换功能的 SA/V 变化相比较反映其压力缓冲功能的 V 变化可能对中耳压力的平衡产生更大的影响。目前并无报道证实在乳突气房维持中耳压力平衡的过程中,二者究竟哪一功能占主导地位,尚值得进一步探讨。

综上所述,本研究使用 Mimics 医学影像控制系统三维重建颞骨 HRCT 测量乳突气房 SA、V、SA/V,获得健康乳突气化型成年人乳突气房 SA、V、SA/V 的 95% 参考值范围分别为 $3\ 105.70 \sim 21\ 218.66\text{ mm}^2$ 、 $2\ 185.78 \sim 19\ 297.57\text{ mm}^3$ 、 $0.830\ 8 \sim 1.788\ 8\text{ mm}^{-1}$;并发现乳突气化型成年人中,反映压力缓冲功能的乳突气房 V 在个体间存在较大差异,反映气体交换功能的乳突气房 SA/V 在个体间差异较小。为进一步乳突气房功能研究、生理建模及功能重建提供了一定的基础。

参考文献:

- [1] 卢永德. 中耳不张[J]. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志,2008, 22(19): 908-909.
- [2] Alper CM, Kitsko DJ, Swarts JD, et al. Role of the mastoid in middle ear pressure regulation[J]. Laryngoscope,2011, 121(2): 404-408.
- [3] Cinamon U, Sade J. Mastoid and tympanic membrane as pressure buffers: a quantitative study in a middle ear cleft model[J]. Otol Neurotol,2003, 24(6): 839-842.
- [4] Doyle WJ. The mastoid as a functional rate-limiter of middle ear pressure change[J]. Int J Pediatr Otorhinolaryngol,2007, 71(3): 393-402.
- [5] Ikarashi F, Tsuchiya A. Middle ear gas exchange via the mucosa: estimation by hyperventilation[J]. Acta Otolaryngol,2008, 128(1): 9-12.
- [6] Chung DH, Jung H, Ryu EW, et al. Changes of mastoid gas physiology in virtual mastoidectomy model[J]. Korean J Otorhinolaryngol Head Neck Surg,2010, 53(5): 284-289.
- [7] Yamamoto Y. Gas exchange function through the middle ear mucosa in piglets: comparative study of normal and inflamed ears[J]. Acta Otolaryngol, 1999, 119(1): 72-77.
- [8] Akiyama N, Yamamoto-Fukuda T, Takahashi H. Influence of continuous negative pressure in the rat middle ear[J]. Laryngoscope, 2014, 124(10): 2404-2410.
- [9] Akiyama N, Yamamoto-Fukuda T, Yoshikawa M, et al. Evaluation of YAP signaling in a rat tympanic membrane under a continuous negative pressure load and in human middle ear cholesteatoma

- [J]. *Acta Otolaryngol*, 2017, 137(11): 1158 – 1165.
- [10] Yang Q, Zhao Y, Wang ZY, et al. Progress in middle ear dysventilation research[J]. *Zhonghua Er Bi Yan Hou Tou Jing Wai Ke Za Zhi*, 2019, 54(4): 303 – 306.
- [11] Luntz M, Malatskey S, Tan M, et al. Volume of mastoid pneumatization: three-dimensional reconstruction with ultrahigh-resolution computed tomography[J]. *Ann Otol Rhinol Laryngol*, 2001, 110(5 Pt 1): 486 – 490.
- [12] Cros O, Knutsson H, Andersson M, et al. Determination of the mastoid surface area and volume based on micro-CT scanning of human temporal bones. Geometrical parameters depend on scanning resolutions[J]. *Hear Res*, 2016, 340: 127 – 134.
- [13] Byun SW, Lee SS, Park JY, et al. Normal mastoid air cell system geometry: has surface area been overestimated[J]. *Clin Exp Otorhinolaryngol*, 2016, 9(1): 27 – 32.
- [14] 金和娟, 赵守琴, 韩德民, 等. CT 三维容积重建测量正常人乳突中耳气房系统内气体容积[J]. *中华耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2006, 41(1): 65 – 66.
- [15] 张国来, 包强, 陈光辉, 等. CT 阈值法测量乳突气房体积与面神经管垂直段位置的相关性[J]. *中国医学影像学杂志*, 2016, 24(3): 175 – 178.
- [16] 戴培东, 张天宇, 王克强, 等. 乳突气房体积的新测量方法[J]. *中国眼耳鼻喉科杂志*, 2002, 2(3): 142 – 144.
- [17] Elam M, Harell M, Luntz M, et al. Middle ear pressure variations during 50% N₂O anesthesia as a function of mastoid pneumatization[J]. *Am J Otol*, 1998, 19(6): 709 – 711.
- [18] Takahashi H, Honjo I, Naito Y, et al. Gas exchange function through the mastoid mucosa in ears after surgery [J]. *Laryngoscope*, 1997, 107(8): 1117 – 1121.
- [19] Magnuson B. Functions of the mastoid cell system: auto-regulation of temperature and gas pressure [J]. *J Laryngol Otol*, 2003, 117(2): 99 – 103.

(收稿日期: 2020 – 05 – 27)

本文引用格式: 于锋, 黄佳丽, 林颖, 等. 颞骨 HRCT 三维重建测量乳突气房表面积与容积的临床意义[J]. *中国耳鼻咽喉颅底外科杂志*, 2021, 27(1): 65 – 70. DOI: 10. 11798/j. issn. 1007 – 1520. 202120295

Cite this article as: YU Feng, HUANG Jiali, LIN Ying, et al. Surface area and volume measurement of mastoid air cells by 3D reconstruction based on HRCT[J]. *Chin J Otorhinolaryngol Skull Base Surg*, 2021, 27(1): 65 – 70. DOI: 10. 11798/j. issn. 1007 – 1520. 202120295