

赛加羚羊头骨的三维重建研究 及其精确度评价

何鹏^① 周应杰^② 张瑞^③ 景丽百合^① 张燕^① 丁东方^① 王建林^{④*}

① 兰州大学生命科学学院 兰州 730000; ② 国家林业局甘肃濒危动物保护中心 武威 733000;

③ 兰州大学口腔医学院 兰州 730000; ④ 兰州大学草地农业科技学院 兰州 730020

摘要: 为建立赛加羚羊 (*Saiga tatarica*) 头骨三维可视化模型, 进一步研究赛加羚羊头骨的解剖特征, 建立赛加羚羊头骨的“数字化标本”, 以提高其疾病诊治的准确率和物种保护的有效性。本研究以国家林业局甘肃濒危动物保护中心的赛加羚羊为研究对象, 经锥形束 CT 扫描获得影像数据, 运用 MIMICS 20.0 软件对赛加羚羊头骨扫描数据进行处理和三维重建, 以建立赛加羚羊的“数字化头骨”用于形态研究。运用 MIMICS 20.0 软件对数字化头骨的 26 项形态学指标 ($n=8$) 进行三维测量, 且与头骨标本游标卡尺的测量值 ($n=8$) 进行配对样本 t 检验分析, 经与真实测量值比较后评价数字化模型及其三维测量的准确性。结果显示, 26 项形态测量指标均与真实头骨无显著性差异 ($P > 0.05$), 例如颅全长游标卡尺测量值为 (227.147 ± 10.646) mm, 三维测量值为 (227.130 ± 10.638) mm, $P = 0.635$, 表明三维重建后的数字化头骨和真实的头骨标本高度相似, 且“数字标本”能够实现任意角度的旋转、剖切和测量。本研究可为赛加羚羊头部疾病如骨折等的治疗及骨骼系统的三维可视化研究提供基础依据和技术支撑, 同时可为 CT 扫描和医学图像三维可视化技术在野生动物的临床应用和相关研究提供理论基础。

关键词: 赛加羚羊; 头骨; 锥形束 CT; 三维重建

中图分类号: Q954 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2022) 02-289-11

Three-dimensional Reconstruction and Precision Evaluation of the Skull of Saiga Antelope (*Saiga tatarica*)

HE Peng^① ZHOU Ying-Jie^② ZHANG Rui^③ JING Li-Bai-He^① ZHANG Yan^①
DING Dong-Fang^① WANG Jian-Lin^{④*}

① School of Life Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000; ② State Forest Administration Gansu Protection

Centre of Threatened Species, Wuwei 733000; ③ School of Stomatology, Lanzhou University, Lanzhou 730000;

④ College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

基金项目 甘肃省科技厅重点研发计划项目 (No. 17YF1NH084);

* 通讯作者, E-mail: jlwang@lzu.edu.cn;

第一作者介绍 何鹏, 男, 硕士研究生; 研究方向: 动物器官数字解剖学及三维重建; E-mail: hep2018@lzu.edu.cn.

收稿日期: 2021-04-01, 修回日期: 2022-01-03 DOI: 10.13859/j.cjz.202202014

Abstract: [Objectives] The establishment of three-dimensional (3D) visual model of the skull of Saiga Antelope (*Saiga tatarica*) could be helpful in studying its anatomical features and further enhancing the accuracy of disease diagnosis as well as the effectiveness of species protection through “digital specimen”. **[Methods]** This study took the *S. tatarica* which is identified as an endangered species by State Forest Administration Gansu Protection Centre of Threatened Species as the research object. Cone-beam CT scanning and 3D reconstruction techniques were utilized to scan and reconstruct the skull of *S. tatarica* for morphological study. A total of 26 morphological parameters of the skull model were measured digitally with the measuring tool of the Mimics20.0 (Fig. 2), where the data were presented in the form of Mean \pm SD. These results were compared with physical measurements obtained by vernier caliper and t-test between them was performed (Fig. 3). **[Results]** The high-precision 3D digital model of the skull of *S. tatarica* was successfully reconstructed. The reconstructed digital skull model could realize scaling and rotation, multi-angle cutting and measurement, and could better reflect the external characteristics, internal and three-dimensional structure of the head structure. The results showed that all the indexes ($n = 8$) had no significant difference from those obtained by physical measurements ($P > 0.05$). For example, for the full lengths of the skull obtained by vernier caliper and the digital model were 227.147 ± 10.646 mm and 227.130 ± 10.638 mm, respectively, similar between the “digital skull” and the dry skull (Table 1, $P = 0.635$). **[Conclusion]** This study has obtained the digital 3D model of the skull of *S. tatarica*, and compared the morphological characteristics of the skull using CT scanning and 3D reconstruction technology, which can provide the help for the diagnosis and treatment of head diseases as well as protection of this species. At the same time, it provides a theoretical basis for the clinical application and related research of CT scanning and 3D reconstruction in wild animals.

Key words: *Saiga tatarica*; Skull; Cone-beam CT; Three-dimensional reconstruction

赛加羚羊 (*Saiga tatarica*), 属哺乳纲偶蹄目牛科羊亚科高鼻羚羊属。因鼻部隆大而膨起, 向下弯曲, 形状特殊, 故又称其高鼻羚羊。作为原产国之一, 赛加羚羊种群曾广泛分布于我国西北地区, 最新相关研究表明, 在天山以南的伊犁河谷、吐鲁番和甘肃、内蒙古交界的北塔山、北山一带均有其踪迹, 其分布区比原来了解的广阔许多 (Cui et al. 2017)。但在 20 世纪中叶, 由于栖息地减少和人为过度偷猎捕杀等因素, 我国的赛加羚羊种群迅速减少, 至 1960 年代, 在野外已不见其踪迹。我国为恢复和保护这一珍贵的种群资源, 将赛加羚羊列为国家 I 级保护野生动物, 国家林业局自 1980 年代末从美国、德国等地引进了 11 只赛加羚羊, 在甘肃濒危动物保护中心进行半散养式饲养繁殖, 经过管理人员的科学研究与精心饲养, 其

人工半散养模式已取得较大成功 (Liu et al. 2019) (图 1)。21 世纪以来, 随着分布国和国际保护机构的大力保护和投资, 该物种种群开始缓慢增长。然而, 2015 年春季, 哈萨克斯坦的赛加羚羊种群发生了大规模死亡, 在短短数周之内, 超过 20 万只赛加羚羊死于疑似巴氏杆菌引起的疾病, 致其数量在全世界范围内骤减, 因此, 采取有效的措施保护现有赛加羚羊种群已迫在眉睫 (Nicholls 2015, Robinson et al. 2019)。由于我国的赛加羚羊野外灭绝较早, 种群数量少、警惕性高难以接近等原因, 很多研究还处于空白阶段。对其进行科学研究与保护, 不仅具有潜在的经济价值, 而且具有重要的学术研究意义。因赛加羚羊性情胆怯, 对外界刺激及人为惊扰极为敏感, 在半散养条件下的轻微惊扰会使它们惊跳狂奔, 甚至头部碰壁导致



图 1 甘肃濒危动物保护中心半散养的赛加羚羊

Fig. 1 Semi-free ranging *Saiga tatarica* in Gansu Endangered Animal Protection Center

死亡，故研究其头骨结构的形态特征对现有种群的保护具有重要意义，能够为其头部疾病的诊断治疗提供参考，同时能够为评价我国现存赛加羚羊种群对生存环境及人工半散养模式的适应性提供基础。

CT 扫描技术及三维重建技术在能够保持样本完整性的情况下，得到研究对象高分辨率的断层图像，结合图像处理技术，获得高精度的表面以及内部结构三维图像。随着医学成像设备的完善和计算机三维可视化技术的高速发展，医学影像技术和三维重建技术已不局限应用于人体医学领域，国内外已将其广泛应用于动物体成像及形态学研究。为进一步了解赛加羚羊头部的解剖学特征，本研究尝试运用 CT 技术和三维重建技术以获得赛加羚羊头骨的“数字化标本”，以为赛加羚羊头部结构研究、疾病诊疗及物种保护提供依据。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

自然死亡埋于地下经虫蚀半年以上的 2 ~ 4 龄成年赛加羚羊头骨标本 8 例，所有标本均

无较大面积破损、无畸形、无明显发育不良（收集自甘肃濒危动物保护中心）。

1.2 实验方法

1.2.1 头骨扫描及数据保存 扫描机器：德国 Kavo 公司生产的 KaVo 3D eXam 高品质 CBCT 体层摄影系统。扫描参数：扫描范围 160 mm × 160 mm × 130 mm，图像采集单次 360° 旋转，扫描时间 8.9 s，球管电流 5 mA，球管电压 120 kV，层厚 0.3 mm，层间距 0.3 mm。扫描完成后运用计算机系统对结果进行重建，在标准窗下检查扫描效果，合格后，导出横断位、矢状位、冠状位三个序列的图片。影像数据资料以 DICOM 3.0 格式在 eXam Vision 软件中刻录保存至光盘。

1.2.2 赛加羚羊头骨的三维重建 数据处理与重建：将扫描得到的 DICOM 格式的赛加羚羊头骨 CT 数据导入到 Mimics 20.0（比利时 Materialise 公司）软件中，进行三维重建。操作流程如下：① 将头骨 CBCT 扫描得到的 DICOM 格式数据导入 Mimics 20.0 软件中，利用阈值分割工具（Thresholding）生成头骨模型的蒙版（Mask）；② 使用蒙版编辑（Edit Masks）

和区域生长 (Region Growing) 工具对头骨区域进行分割和精准提取, 再使用三维计算 (Calculate Part) 命令重建出头骨三维模型; ③ 使用模型光滑 (Smooth) 命令对模型进行适当光滑处理, 得到头骨三维模型。可将三维模型以 STL 格式导出保存。

1.2.3 头骨形态研究 运用大体解剖学描述方法, 对三维重建后的数字化头骨模型进行描述, 对头骨背面、侧面、腹面及枕面特征进行形态观察和描述, 同时对每块头骨的解剖特征进行研究。

1.2.4 头骨形态指标测量 利用 Mimics 20.0 软件测量 Measure 工具中的 Distance 命令对数字化头骨的颅全长等 26 项头骨形态指标进行三维测量, 每个指标测量 6 次, 取平均值, 同时运用数显游标卡尺 (精确度为 0.005 mm, 桂林广陆数字测控有限公司, 110N-203) 测量头骨标本上述相同形态指标, 测量过程由同一人完成。所测得的所有头骨的标志点及测量方法均按照文献 (夏霖等 2005, 杨奇森等 2005) 测量标准进行测量统计。头骨测量指标为颅全长、颅基长、鼻吻长、额骨长、面颅长、脑颅长、上齿列长、前颌骨侧长、眼窝长、眼窝高、

乳突间距、枕髁宽、颈静脉突宽、枕大孔宽、枕大孔高、脑颅宽、面颅宽、眶上孔距、枕高、颧宽、听泡长、下颌长、下齿列长、下颌至关节长、下颌全高和最大眶间距。三维测量方法见图 2。

1.3 数据统计分析

运用统计分析软件 SPSS 22.0 对测量获得的 26 项形态指标数据进行统计学分析, 计算测量所得头骨形态指标的平均值和标准差。对两组数据进行方差齐性检验, 并用配对样本 *t* 检验对游标卡尺测量结果和三维测量值进行指标均值差异比较, 以期评价三维重建后数字化头骨的精确度。 $P > 0.05$ 为差异不显著, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 赛加羚羊头骨的三维重建

利用 CBCT 断层图像数据结合 Mimics 20.0 软件成功重建了赛加羚羊头骨, 获得了赛加羚羊整体头骨和各骨块的数字化三维模型。三维模型与真实头骨形态高度相似, 三维模型能够直观再现赛加羚羊头骨三维解剖形态, 可进行全方位立体观察 (图 3)。

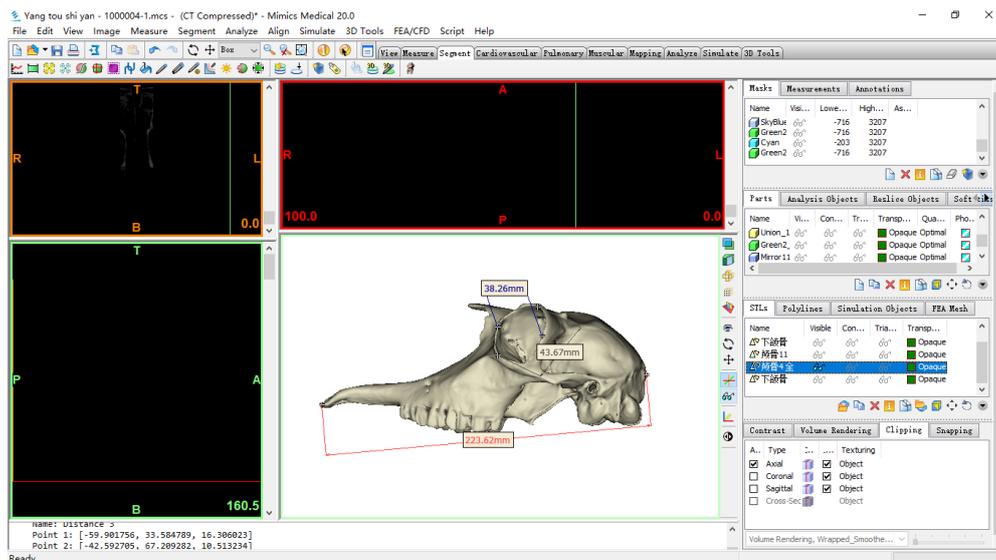


图 2 头骨三维测量

Fig. 2 3D Measurement of the skull model

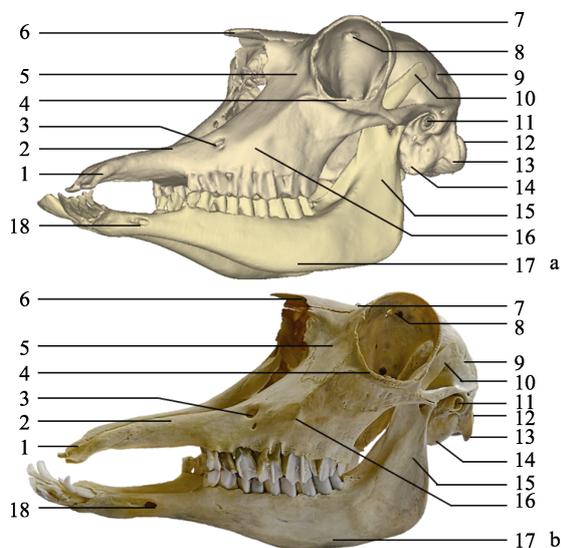


图3 三维重建后的头骨模型与头骨标本形态特征比较

Fig. 3 Morphological feature of the skull of *Saiga tatarica*

a. 数字化头骨; b. 头骨标本。a. Virtual skull; b. Dry skull.

1. 切齿骨; 2. 上颌骨; 3. 眶下孔; 4. 颧骨; 5. 泪骨; 6. 额骨; 7. 角突; 8. 眶上孔; 9. 顶骨颞面; 10. 冠状突; 11. 外耳道; 12. 枕髁; 13. 颈静脉突; 14. 鼓泡; 15. 下颌支; 16. 面结节; 17. 下颌骨体; 18. 颞孔

1. Premaxillary; 2. Maxilla; 3. Infra-orbital foramen; 4. Zogomatic bone; 5. Lacrimal bone; 6. Frontal bone; 7. Angular process; 8. Supraorbital foramen; 9. Temporal surface of parietal bone; 10. Condylar process; 11. External acoustic meatus; 12. Occipital condyle; 13. Processus jugularis; 14. Tympanic bulla; 15. Mandibular ramus; 16. Tuber faciale; 17. Mandibular body; 18. Mental foramen

2.2 赛加羚羊头骨整体的形态特征

赛加羚羊头骨整体呈狭长的四面棱锥形，头骨长宽比例约为2:1，由扁骨和不规则骨构成。赛加羚羊头骨壁薄，分为颅骨和面骨两部分，除下颌骨通过关节与颞骨相连之外，其他颅骨之间均通过骨缝形成连接。颅骨由7种骨构成，包括不成对的枕骨、顶间骨、蝶骨和筛骨以及成对的顶骨、额骨和颞骨，形成了颅腔的骨质基础，具有容纳脑、脑膜和血管等作用。面骨由10种骨构成，包括上颌骨、切齿骨、泪骨、颧骨、腭骨、翼骨、犁骨、鼻甲骨、下颌

骨和舌骨，形成鼻腔侧壁、底壁和口腔顶壁的骨质基础，下颌骨形成口腔的底和两侧壁。赛加羚羊鼻骨退化，额骨发达，向前伸出，覆盖于鼻甲骨背侧，形成鼻腔顶壁的骨质基础。雌、雄性赛加羚羊额骨上均有明显的角突，但只有雄性长直立的角，成年雄性赛加羚羊角呈琥珀色。赛加羚羊头骨可分为背面、侧面、枕面和腹面（图4）。

背面：分颅顶部和颌前部。颅顶部呈穹隆状，颅腔的顶壁主要由额骨和顶骨构成，额骨形成头骨的最高点，向前水平延伸至泪骨垂直前缘。顶骨位于颅顶部尾侧。在两眼眶的正上方有角突，在角突的前方有眶上沟和眶上孔，赛加羚羊无鼻骨，额骨发达，额鳞水平向前延伸形成了鼻腔的顶壁。颌前部由泪骨、切齿骨和上颌骨构成，长度大约占整个头骨的一半。前颌骨和上颌骨构成了鼻腔底部的骨质基础。

侧面：分颅侧部、眶部、上颌部和下颌部。颅侧部由颞窝、颧弓、颞骨鼓部及岩部构成，形成颅腔的侧壁。颞窝发达，大部分由颞骨鳞部和顶骨颞面构成，其外侧面为颧弓，在颧弓的后下方为外耳道及鼓泡。眶部发达，由额骨、泪骨和颧骨构成，泪骨的眶面形成大而壁薄的泪泡。上颌部呈前小后大的三角形状，由泪骨、颧骨、上颌骨和切齿骨构成，面嵴明显，其前端有发达的面结节，面结节的前方有眶下孔。下颌部由下颌骨构成，上颌骨和下颌骨臼齿部的齿槽缘上各有6个齿槽，切齿骨的骨体上无切齿齿槽，而下颌骨体的切齿部上有4个切齿齿槽。

枕面：形成颅腔的后壁，由枕骨鳞部和侧部构成，下部的中央有枕骨大孔。枕骨大孔两侧有椭圆形的枕髁，枕髁的两侧为颈静脉突。

腹面：结构复杂，由枕骨体、蝶骨、翼骨、腭骨、犁骨、上颌骨、下颌骨、颧骨、颞骨鼓部组成。去除下颌骨，可分为颅底部、鼻后孔部、腭部三部分。颅底部由枕骨体、蝶骨和部分颞骨构成，枕骨体两侧与鼓泡形成岩枕裂；鼻后孔部狭长，犁骨的后部不与鼻腔底壁接触，

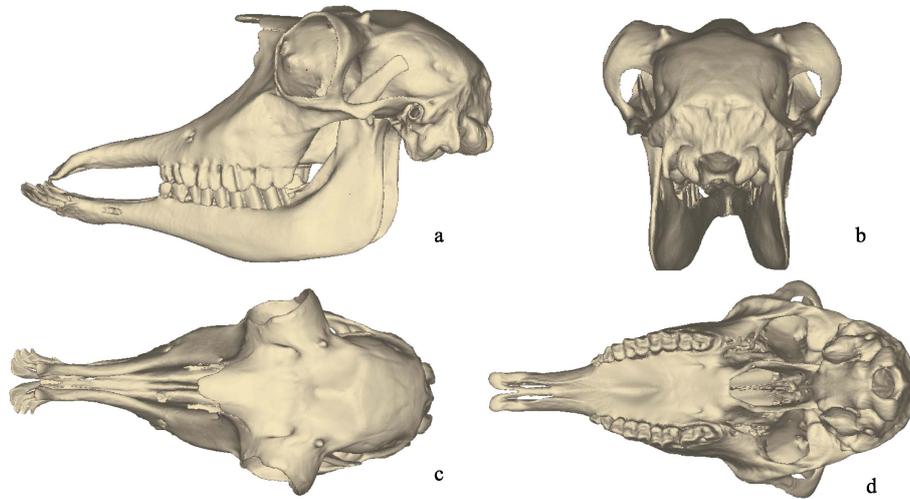


图4 成年赛加羚羊头骨三维数字化模型

Fig. 4 3D Reconstruction of skull digital model of adult *Saiga tatarica*.

a. 侧面观; b. 枕面观; c. 背面观; d. 腹面观。

A. Lateral view; B. Caudal view; C. Dorsal view; D. Ventral view.

因此鼻后孔为整个腔体; 腭部呈三角形, 由腭骨的水平部、上颌骨的腭突和切齿骨组成, 共同构成了骨质硬腭。

2.3 赛加羚羊头骨各骨的形态特征

枕骨 枕骨为单骨, 构成颅腔的后壁及部分底壁, 且有小部分向顶壁延伸。分为三部分: 底部、鳞部和侧部, 幼年时各部间骨缝较明显, 成年后骨缝愈合, 中央有枕骨大孔。底部也称枕骨体, 近似梯形, 腹正中嵴较明显。自枕骨大孔向前延伸至蝶骨, 成年赛加羚羊的底部与蝶骨融合, 骨缝不明显。侧缘与鼓泡之间有狭长的缝, 为岩枕裂。岩枕裂的后部具颈静脉孔, 无破裂孔。侧部, 位于枕骨大孔两侧及背侧部, 两侧各有一枕骨髁, 呈卵圆形的关节面, 枕骨髁的两侧各有一颈静脉突, 其基部与枕骨髁之间有凹陷的髁腹侧窝, 窝内侧有一孔通向颅腔, 为舌下神经孔。鳞部也称上枕骨, 位于枕骨大孔背侧, 呈五边形。外面有明显的枕嵴与枕正中嵴, 两嵴交点处具有明显的枕外隆凸。内表面有一凹陷, 容纳小脑蚓部, 其上方有一明显的枕内隆凸, 两侧小脑幕清晰可见。

蝶骨 蝶骨为单骨, 构成颅腔底壁的前三分之二, 由相似的两部分构成, 前蝶骨的蝶骨体前部与筛板愈合, 底蝶骨的蝶骨体后部与枕骨基底部相连。成年后有的头骨两部分会愈合, 都由蝶骨体、两对翼和一对翼突组成。前蝶骨, 前蝶骨的蝶骨体接筛骨, 具中空结构的蝶窦, 大脑面具有内凹结构为视交叉沟, 沟内两边各向前外侧通入一孔, 为视神经孔。视交叉沟前方有明显的蝶轭与嵴状的蝶嘴, 蝶嘴与前方筛骨的鸡冠相连, 骨缝不可见。幼年前蝶骨与底蝶骨之间的骨缝明显, 共同围成一孔, 为眶圆孔。底蝶骨的蝶骨体由三部分构成, 包括蝶鞍, 垂体窝及鞍背。呈梯形柱状, 位于颅腔底壁正中, 后接枕骨基地部, 成年赛加羚羊蝶骨体与枕骨之间的骨缝愈合。眶翼由骨体前部两侧向外伸延。颞翼较眶翼不发达, 颞翼上各有一较大的卵圆形孔, 为卵圆孔。翼突向前下方突出, 发达, 连接腭骨垂直部, 形成鼻后孔的侧壁。

筛骨 筛骨为单骨, 将颅腔与鼻腔分开, 由筛板、垂直板、筛骨迷路组成, 形成颅腔的前壁。筛板位于颅腔和鼻腔之间, 有许多小孔, 较大的两个为筛孔。脑面正中具有一突起的嵴,

为鸡冠，是垂直板向颅腔的延续，两侧各具有一卵圆形的凹陷，内有许多小孔，为筛骨窝。鼻腔面隆凸，附着有薄壁的筛骨迷路，为薄而脆的骨板，呈卷曲的锥状，伸向鼻腔。垂直板，位于筛板鼻腔面中央的半椭圆形骨板，前缘不齐，形成鼻中隔后部的骨质基础。

颞骨 颞骨为不规则形状的对骨，构成颅腔的部分底壁和后侧壁基础，可分为鳞部、岩部及鼓部三部分。各部骨缝较明显，界线清晰。鳞部，向前伸出一突起为颞突，较发达，与颞骨颞突相接形成颞弓，颞突基部向下凹陷，腹面形成横向长方形的关节结节，与下颌骨髁状突形成颞下颌关节，下颌窝不明显，后方有一明显的关节后突，其后上方有一孔通入颅腔，为关节后孔。颞骨后上方靠近岩部有一较大的孔，为颞管外口。岩部位于枕骨侧部两侧，颞骨鳞部后方，较粗糙，略呈不规则梯形。腹侧突出形成乳突，背侧与枕骨连接处有乳突孔。岩部内含内耳结构，包括耳蜗、前庭及半规管。鼓部，位于岩部腹内侧，枕骨基地部两侧，包括鼓泡和外耳道两部分。外耳道开口较大。鼓泡发达，构成中耳腔的外壁，内有 3 块听小骨（锤骨、砧骨和镫骨），鼓泡前方有 2 或 3 个小而尖的肌突。在外耳道基部、鼓泡背部及乳突部间有一孔，为茎乳突孔。

顶间骨 顶间骨在幼年赛加羚羊即不可见，与顶骨及枕骨鳞部相愈合。脑面有清晰可见的枕内隆凸。

顶骨 顶骨为对骨，较发达，顶骨构成颅腔顶壁及部分侧壁，可分为顶面及颞面两部分。顶面外表面较光滑，左右顶骨在出生时已经愈合，无顶间缝。顶面略呈四边形，中间有微隆起的中央线，前缘接额骨，额顶缝清晰可见，顶骨内表面有容纳脑回和脑沟的凹陷和嵴，矢状沟明显。颞面被颞线与顶面分开，位于额骨颞突基部，上接额骨后侧面，前接底蝶骨颞翼，构成颞窝的上部，下接颞骨鳞部，骨缝清晰，颞面上有 2 或 3 个顶孔，内表面构成颅腔的部分侧壁，容纳脑回和脑沟的指状压迹和脑轳。

额骨 额骨为对骨，较发达，略呈五边形，左右额骨间的额中缝在正中矢状面清晰可见。构成了颅腔顶壁和鼻腔的顶壁。赛加羚羊鼻骨退化，额骨向前延伸形成了鼻腔顶部的骨质基础。额骨由额鳞、鼻部和眶部组成，界限不明显。额鳞部分占据额骨的大部分，水平向前延伸，两侧各有一较大的孔，通向眼窝，为眶上孔，有的具一副孔；背侧有锥形的角突，成年雄性角非常发达；侧面由额骨颞突与颞骨颞突相连；脑面构成颅腔前半部，内有明显的凹陷和嵴。额骨内外骨板间具有额窦。眶部形成眼窝的大部分内壁，眶面凹陷较光滑，有眶上孔内口及筛孔。鼻部与额鳞被筛骨筛板分隔开，正中两侧各有一突出的小骨板，与筛板相连。鼻部略呈三角形，中部具有额窦，不发达。

上颌骨 上颌骨为对骨，略呈三角形。分为左右两侧，较发达，约占整个头骨长度的一半，与大部分面骨相连接，构成鼻腔、口腔的骨质基础。上颌骨由上颌骨体、齿槽突、腭突、颧突四部分组成。上颌骨体前部较小，后部膨大，内有较大的鼻旁窦，为上颌窦。第三臼齿正上方有眶下孔，常有一副孔，为眶下管外口。后方约 1 cm 处有较明显的面结节，面嵴向外突出。鼻面呈不规则的凹陷，构成鼻腔侧壁，内有鼻甲嵴，供下鼻甲附着。齿槽突，各臼齿位于各齿槽内，齿槽之间被横向的齿槽间隔分开。腭突位于上颌骨体腹侧，两侧腭突以腭中缝相连，与后侧颧骨构成硬腭。腭突前端有一长方形空隙，接切齿骨。两侧腭突在鼻面形成鼻嵴，与犁骨相连。额骨颞突位于上颌骨后部，与颞骨相连。

切齿骨 切齿骨为对骨，较其他反刍动物的较小，与上颌骨相连。切齿骨分为骨体、腭突。骨体前端无切齿槽，形成扁平状小骨板，腭突水平伸出，向后接上颌骨腭突，与其共同构成口腔顶壁。

腭骨 腭骨为对骨，位于鼻后孔的腹侧，由互相垂直的水平部和垂直部两部分构成，水平部在上颌骨腭突的尾侧，以半圆形骨缝与上

颌骨腭突相连, 形成鼻后孔的底壁。垂直部与额骨眶部、上颌骨骨体后部及后蝶骨翼突相连, 垂直部前缘腹侧有一孔为腭管的后口, 为腭后孔。背缘与前蝶骨眶翼相连后缘与底蝶骨翼突及翼骨连接, 共同构成鼻后孔的侧壁, 其背侧具有一卵圆形孔, 为蝶腭孔。在第三臼齿平面的腭面上, 两侧各有一对称的孔, 为腭前孔, 内有腭管通过。

翼骨 翼骨为对骨, 略呈长四边形的不规则薄质骨板。附于腭骨垂直部及底蝶骨翼突之上, 腹侧的游离面具有突出向后外侧弯曲的钩状突, 为翼骨钩, 较发达。

犁骨 犁骨为单骨, 将鼻腔分成左右两部分, 后缘以犁骨翼与前蝶骨体腹面相连, 从腭骨水平部鼻嵴向前延续, 延伸至颌骨腭突。背缘有犁骨沟, 与筛骨垂直板相连, 腹侧为薄的犁骨嵴, 后部游离, 使鼻后孔相通。

泪骨 泪骨为对骨, 位于额骨前外侧下方, 下接上颌骨, 背侧与额鳞相连, 分为眶面、鼻面及颜面三部分。眶缘将外侧面分为眶面和颜面。眶面背内侧有一凹陷, 为泪囊窝, 内有一泪孔, 是泪管的入口。泪囊窝腹侧有一明显的凹陷, 为下斜肌窝。下斜肌窝腹前侧有薄骨质的泪泡, 较发达。颜面前部接上颌骨及颧骨, 背侧接额骨, 形成面部的外侧壁。鼻面不规则, 前部伸至上颌骨体中部, 侧缘有一开口为鼻泪管外口。颜面背侧与鼻面之间含泪窦, 与上颌窦相通。

颧骨 颧骨为对骨, 位于眶腹侧, 形成眼眶底部和颧弓的一部分。颧骨颧突与颧骨颧骨相接, 构成颧弓; 颧骨额突与额骨颧突相连, 形成眼眶壁, 眶缘下方的面嵴明显, 向后延伸至颧弓。

下颌骨 下颌骨为对骨, 为面骨中最大的骨, 由下颌骨体与下颌支两部分组成。下颌骨体由切齿部和臼齿部组成, 切齿部较宽厚, 每侧有四个切齿齿槽, 内含四个切齿。臼齿部侧扁, 与切齿部之间有齿槽间缘, 齿槽间缘侧面有一颧孔, 为下颌管外口。臼齿部上缘有六个

臼齿齿槽, 腹缘圆钝而光滑, 有较明显的面切迹。下颌支与下颌骨体略呈垂直, 下颌角扁圆, 内外两侧具凹陷, 外部为咬肌窝, 供咬肌附着。内侧面为翼肌窝, 供翼内肌附着。内侧面稍上侧有一较大的下颌孔, 为下颌管的后口。下颌骨切迹将冠状突与髁状突分开, 冠状突为向后弯曲的长方形骨板, 髁状突与颞骨鳞部的关节结节形成颞下颌关节。

2.4 头骨形态学指标的三维测量及其精确度评价

对三维重建后的成年赛加羚羊头骨模型的颅全长等 26 项形态学指标运用 Mimics 20.0 软件进行三维测量, 结果以平均值 \pm 标准差 (Mean \pm SD) 表示, $n = 8$ 。以游标卡尺对形态学指标测量结果为基准值, 将重建后三维测量 26 项头骨指标的测量值分别与游标卡尺的测量值进行配对样本 t 检验, 结果显示, Mimics 20.0 重建获得三维模型经三维测量的结果与游标卡尺测量数据差异不显著 ($P > 0.05$) (表 1)。

3 讨论

3.1 赛加羚羊头骨的形态特征

赛加羚羊头骨整体骨质较轻而壁薄; 切齿骨不发达, 无鼻突, 与上颌骨相连游离于头骨前端; 额骨和上颌骨发达, 共同构成了鼻腔顶壁和底壁骨质基础的大部。赛加羚羊具有发达的眶突, 额骨眶面以眶上缘与额鳞分开, 向外侧突出; 眼窝深, 眼眶面积较大, 方向朝头骨外前侧, 这一特征可能有助于增加视角, 以提高警惕性和躲避天敌。与 Clifford 等 (2004) 对赛加羚羊鼻部的解剖结构研究报道不同的是, 本研究中对头骨进行大体解剖和三维重建结果发现, 赛加羚羊的鼻骨完全退化, 发达的额鳞水平向前延伸, 以行使鼻骨的部分功能。与其他反刍动物相比, 以上头骨结构的特殊性可能使其鼻腔显著增大以适应其生活环境, 是赛加羚羊适应荒漠半荒漠环境的结构基础 (Dalga et al. 2018, Park et al. 2016, Gündemir et al. 2020)。

不同物种间的头骨形态存在显著差异, 头

表 1 两种方法对成年赛加羚羊头骨指标测量结果 (平均值 \pm 标准差)Table 1 Craniometric measurements of *Saiga tatarica* in different ways (Mean \pm SD)

形态学指标 Morphometric Parameters	游标卡尺测量值 Vernier caliper measurement value ($n = 8$)	三维测量值 3D measurement value ($n = 8$)	配对 t 检验 P 值 t -test P -value
颅全长 Total length (mm)	227.147 \pm 10.646	227.130 \pm 10.638	0.635
颅基长 Basal length (mm)	207.343 \pm 11.475	207.517 \pm 11.299	0.746
鼻吻长 Viscerocranium length (mm)	122.346 \pm 5.572	122.074 \pm 5.687	0.892
额骨长 Greatest frontal length (mm)	90.197 \pm 6.662	90.598 \pm 6.467	0.673
面颅长 Facial length (mm)	162.929 \pm 7.549	163.005 \pm 7.455	0.798
脑颅长 Length of braincase (mm)	105.650 \pm 8.362	105.730 \pm 8.157	0.694
上齿列长 Length of tooth row (mm)	126.705 \pm 7.631	126.626 \pm 8.060	0.731
前颌骨长 Lateral length of the premaxilla (mm)	38.791 \pm 5.359	38.773 \pm 5.297	0.886
眼窝长 Greatest inner length of the orbit (mm)	41.946 \pm 2.022	41.979 \pm 2.097	0.894
眼窝高 Greatest inner height of the orbit (mm)	39.860 \pm 1.255	39.866 \pm 1.141	0.932
乳突间距 Greatest mastoid breadth (mm)	73.292 \pm 5.295	73.309 \pm 5.125	0.849
枕髁宽 Greatest breadth of the occipital condyles (mm)	41.753 \pm 1.804	41.805 \pm 1.721	0.756
颈静脉突宽 Greatest breadth of the bases of the paraoccipital processes (mm)	57.123 \pm 3.867	56.984 \pm 3.841	0.593
枕大孔宽 Greatest breadth of the foramen magnum (mm)	20.210 \pm 1.007	20.179 \pm 1.107	0.757
枕大孔高 Height of the foramen magnum (mm)	17.563 \pm 1.713	17.411 \pm 1.562	0.951
脑颅宽 Greatest neurocranium breadth (mm)	62.993 \pm 10.267	63.551 \pm 10.287	0.659
面颅宽 Facial breadth (mm)	62.855 \pm 5.886	62.831 \pm 5.852	0.865
眶上孔距 Least breadth between the supraorbitale (mm)	47.284 \pm 6.960	47.047 \pm 6.969	0.637
枕颅高 Basion heigh (mm)	66.467 \pm 9.134	66.174 \pm 9.247	0.862
颧宽 Zygomatic breadth (mm)	92.137 \pm 4.747	92.163 \pm 4.614	0.764
听泡长 Length of tympanic bulla (mm)	24.913 \pm 1.836	24.846 \pm 1.785	0.915
下颌长 Total length of Mandible (mm)	170.441 \pm 8.352	170.570 \pm 8.326	0.846
下齿列长 Length of the tooth row (mm)	123.491 \pm 4.479	124.442 \pm 4.135	0.743
下颌至关节长 Length from the condyle (mm)	176.901 \pm 8.500	177.147 \pm 8.406	0.638
下颌全高 Oral height of the vertical ramus (mm)	116.015 \pm 5.763	116.078 \pm 5.766	0.879
最大眶间距 Greatest breadth of the skull (mm)	114.586 \pm 6.485	114.254 \pm 6.823	0.636

骨的形态结构和测量特征常用于动物分类学研究，国内外已有许多学者对多种反刍动物的头骨进行了大量的比较解剖学研究 (Olopade et al. 2009, Onuk et al. 2013, Tohidifar et al. 2020)。Onuk 等 (2013) 对成年狍 (*Capreolus capreolus*)、绵羊 (*Ovis aries*) 及山羊 (*Capra hircus*) 的头骨进行了形态研究，三个物种头骨全长分别为 (196.19 \pm 2.56) mm、(215.89 \pm 6.06) mm 和 (216.67 \pm 17.21) mm；宽度分别为 (85.37 \pm 0.39) mm、(105.37 \pm 4.29) mm 和 (97.2 \pm

8.1) mm。本研究测得赛加羚羊头骨长和宽分别为 (227.147 \pm 10.646) mm 和 (114.586 \pm 6.485) mm，与上述三个物种相比，其头骨整体形态更大。

综上，构成赛加羚羊头骨的各骨解剖结构特征与其他反刍动物尤其是牛科动物相似，但同时又具有与牛科动物头骨结构不同的特征。赛加羚羊头骨整体呈狭长的四面棱锥形，其最显著特征为鼻骨完全退化，鼻前庭宽阔，上颌骨骨体和额骨鳞部向前延伸，额骨和上颌骨分

别构成鼻腔顶壁、底壁和侧壁的骨质基础。鼻骨的退化为赛加羚羊扩大鼻腔体积、增加鼻部的表面积以附着鼻黏膜从而更好地适应高速奔跑和过滤沙尘提供了可能。

3.2 赛加羚羊头骨的三维重建及其精确度评价

目前, 三维重建及数字化骨科技术越来越广泛地应用于人体解剖学、疾病诊断及临床辅助医疗(曲德伟等 2008, Teishima et al. 2018, 薛丹枫 2020), 但应用于动物尤其是濒危动物的疾病诊断及相关研究尚处于初始阶段(刘双云等 2010)。国内对于动物头骨结构的解剖学研究主要利用尸体的大体解剖及少部分影像解剖研究(Zhu 2012), 较难直观而准确地展现其复杂的解剖结构及毗邻组织器官。

国内外已有许多研究学者对于三维重建后的组织器官模型进行测量及其精确度的评价(Sholts et al. 2011, 黄柱飞等 2019, 惠家明等 2019)。张玄等(2020)对云南墓葬考古遗址出土的现代人头骨进行了基于 CT 扫描的 Mimics 三维重建及相关形态学指标测量, 对重建过程中软件选择不同重建精度的差异性进行了评价, 结果显示 Mimics 软件的不同重建精度之间头骨模型测量数值的准确性有较大差异, 最佳精度的重建模型最接近真实的头骨形态结构及形态学指标, 同时指出不同重建软件及不同分辨率的 CT 机及组织差异等均可能会影响重建模型的精确度。基于以上结论, 本研究中运用 Mimics 重建赛加羚羊头骨的过程中均选择最佳精度的模型重建, 对赛加羚羊头骨指标分别运用游标卡尺和三维模型测量两种方法进行了测量, 同时将两种测量方法得到的结果进行了配对样本 *t* 检验, 结果显示两种测量结果间无显著性差异。由此可知, Mimics 最佳精度三维重建后的数字化模型能够真实反映组织器官的形态特征及其测量数据, 具有较高的精确度, 其优点在于不破坏珍贵标本的前提下获得重建结构准确的数据信息, 同时克服了大体解剖学及断层解剖学等方法可能损坏原始标本的缺点, 为动物形态学研究和动物标本数字化保存

提供了新的方法和思路, 可与传统的手工测量方法互补使用。

本研究运用 CT 扫描结合医学图像三维重建技术对赛加羚羊头骨进行了可视化研究, 获得了赛加羚羊头骨的三维数字化模型, 三维模型能够真实反映头骨的解剖结构及各骨间的位置关系, 能够为赛加羚羊头颈部疾病尤其是头骨骨折等的诊断及治疗, 提高诊疗水平、种群保护等提供基础依据, 同时可为动物体各组织器官尤其是骨骼的三维可视化及三维形态测量学研究提供理论基础。

参 考 文 献

- Clifford A B, Witmer L M. 2004. Case studies in novel narial anatomy: 3. Structure and function of the nasal cavity of saiga (Artiodactyla: Bovidae: *Saiga tatarica*). *Journal of Zoology*, 264(3): 217–230.
- Cui S, Ilner-Gulland E J, Singh N J, et al. 2017. Historical range, extirpation and prospects for reintroduction of saigas in China. *Scientific Reports*, 9(7): 44200.
- Dalga S, Aslan K. 2018. A morphometric study on the skull of the adult Hemshin Sheep. *Van Veterinary Journal*, 29(3): 125–129.
- Gündemir O, Duro S, Jashari T, et al. 2020. A study on morphology and morphometric parameters on skull of the Bardhoka autochthonous sheep breed in Kosovo. *Anatomia, Histologia, Embryologia*, 49(3): 365–371.
- Liu X, Mawolo J B, Du X, et al. 2019. Investigation of biochemical and physiological parameters of the newborn Saiga antelope (*Saiga tatarica*) in Gansu Province, China. *PLoS One*, 14(11): e0224822.
- Nicholls H. 2015. Mysterious die-off sparks race to save saiga antelope. *Nature, New: Explainer*: 17675. doi:10.1038/nature.2015.17675.
- Olopade J O, Onwuka S K. 2009. Morphometric analysis of the skull of the Sahel goat breed: basic and clinical anatomy. *Italian Journal of Anatomy and Embryology*, 114(4): 167–178.
- Onuk B, Kabak M, Atalar K. 2013. Anatomic and craniometric factors in differentiating roe deer (*Capreolus capreolus*) from sheep (*Ovis aries*) and goat (*Capra hircus*) skulls. *Archives of*

- Biological Sciences, 65(1): 133–141.
- Park Y S, Cha J Y, Kim N S. 2016. Taxonomic revision of variation in skull morphology of Siberian Roe Deer (*Capreolus pygargus*, Pallas, 1771) in South Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology*, 30(1): 39–47.
- Robinson S, Milner-Gulland E J, Grachev Y, et al. 2019. Opportunistic bacteria and mass mortality in ungulates: lessons from an extreme event. *Ecosphere*, 10(6): e02671.
- Sholts S B, Flores L, Walker P L, et al. 2011. Comparison of coordinate measurement precision of different landmark types on human crania using a 3D laser scanner and a 3D digitiser: Implications for applications of digital morphometrics. *International Journal of Osteoarchaeology*, 21(5): 535–543.
- Teishima J, Takayama Y, Iwaguro S, et al. 2018. Usefulness of personalized three-dimensional printed model on the satisfaction of preoperative education for patients undergoing robot-assisted partial nephrectomy and their families. *International Urology and Nephrology*, 50(6): 1061–1066.
- Tohidifar M, Goodarzi N, Masoudifard M. 2020. Anatomy of the head in the Saanen goat: a computed tomographic and cross-sectional approach. *Anatomical Science International*, 95(3): 408–419.
- Zhu L. 2012. Craniometrical studies on the skull of Tibetan Gazelle (*Procapra Picticaudata*). *International Journal of Morphology*, 30(1): 196–198.
- 黄柱飞, 王坚, 李大创, 等. 2019. Mimics 软件测量肝胆结石体积的精确度研究. *西南国防医药*, 29(9): 926–928.
- 惠家明, 贺乐天, 王明辉. 2019. 基于三维激光扫描的颅骨测量与手工测量的比较. *人类学学报*, 38(2): 254–264.
- 刘双云, 陈永进, 董岩, 等. 2010. 野生大熊猫左上颌第一磨牙三维模型的重建. *国际口腔医学杂志*, 37(4): 379–381.
- 曲德伟, 李幼琼, 徐亮, 等. 2008. 中国人颅骨三维重建. *解剖科学进展*, 14(2): 199–200.
- 夏霖, 杨奇森, 冯祚建. 2005. 兽类头骨测量标准 II: 奇蹄目、偶蹄目、食肉目. *动物学杂志*, 40(6): 67–73.
- 薛丹枫. 2020. 数字化技术在人体解剖学教学中的运用探究. *东西南北*, 550(2): 154–154.
- 杨奇森, 夏霖, 马勇, 等. 2005. 兽类头骨测量标准 I: 基本量度. *动物学杂志*, 11(3): 50–56.
- 张玄, 张亚盟, 吴秀杰. 2020. 3D 虚拟复原精度的差异对头骨测量数值的影响——以 Mimics 软件为例. *人类学学报*, 39(2): 270–281.