

陈春玉,黄映聪,王强,等.基于显微 CT 技术的恐龙蛋壳气孔结构. 吉林大学学报(地球科学版),2026,56(4): 1299 - 1314.
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240194.

Chen Chunyu, Huang Yingcong, Wang Qiang, et al. Pore Structure of Dinosaur Eggshells Based on Micro-CT Technology. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2026, 56(4): 1299 - 1314. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240194.

基于显微 CT 技术的恐龙蛋壳气孔结构

陈春玉¹, 黄映聪^{2,3,4,5,6}, 王 强⁷, 黎广荣², 何月顺^{3,5,8}

1. 四川省核工业地质局二八一大队, 四川 西昌 615000

2. 东华理工大学地球科学学院, 南昌 330013

3. 东华理工大学网络信息与现代教育技术中心, 南昌 330013

4. 江西省数字国土重点实验室(东华理工大学), 南昌 330013

5. 江西省放射性地质学大数据技术工程实验室, 南昌 330013

6. 核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013

7. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044

8. 东华理工大学人工智能与信息工程学院, 南昌 330013

摘要: 恐龙蛋壳是了解恐龙生活的古生物环境及演化与灭绝的重要证据, 蛋壳中的气孔与不同类型恐龙的繁殖习性相适应。本研究以广东河源发现的一种蜂窝蛋类恐龙蛋壳为研究对象, 对通过显微 CT 扫描获取的恐龙蛋壳 CT 影像气孔进行三维建模, 从定性与定量的角度分析气孔的大小、形态、排列、空间特征和发育程度等信息。首先通过 Python 将处理后的 CT 数据转换为点云数据, 依据滚球算法进行点云数据的三维重建; 其次对处理后的 CT 数据通过 Avizo 软件进行三维建模; 最后解剖其中一个气孔的点云数据进行典型气孔三维模型的研究, 并随机抽取切片进行定量研究。结果表明: 1) 部分气孔内外表面不连通, 孔道发育阻断, 且受阻断的气孔从内外表面到中间孔道逐渐缩小, 空间上交错镶嵌分布, 具有不对称性; 部分气孔连通, 贯穿内外表面, 发育较好, 使氧气流入胚胎内部, 供胚胎呼吸和发育。2) 蛋壳气孔发育广泛, 径切面气孔呈倒锥状、柱状, 弦切面单个呈圆形、椭圆形和多边形等, 周围基质似六边形、排列紧密, 多个六边形组成蜂窝状结构, 气孔间隔明显。3) 蛋壳气孔孔径与通道高度呈现出近外表面比近内表面大的趋势, 而贯穿内外表面的气孔无论是孔径还是高度都比近内、近外表面的大。4) 气孔发达且呈蜂窝状, 该类恐龙

收稿日期: 2025-06-25

作者简介: 陈春玉(1997—), 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事数字图像处理与三维地质建模方面的研究, E-mail: 1002075910@qq.com

通信作者: 黄映聪(1979—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事遥感图像语义识别方面的研究, E-mail: 5828516@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672012, 41688103, 41202160); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB26000000); 核资源与环境国家重点实验室开放基金项目(NRE1913); 江西省放射性地质学大数据技术工程实验室开放基金项目(JELRGBDT202002); 江西省数字国土重点实验室(东华理工大学)开放基金项目(DLLJ201916); 东华理工大学博士科研启动基金项目(DHBK2018021)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41672012, 41688103, 41202160), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Type B)(XDB26000000), the Open Foundation of State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment(NRE1913), the Open Foundation of Jiangxi Provincial Engineering Laboratory of Radiology Big Data Technology (JELRGBDT202002), the Open Foundation of Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province (East China University of Technology)(DLLJ201916) and the Doctoral Research Foundation of East China University of Technology (DHBK2018021)

蛋孵化地可能是一个被埋藏的环境;倒锥状气孔显示孔径从近外表面到中部逐渐变小,推测是为了防止化学侵蚀和水分散发。

关键词: 恐龙蛋壳;显微 CT;显微结构;气孔;点云;三维建模;广东河源

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240194

中图分类号: Q915.2;P52;TP391.41

文献标志码: A

Pore Structure of Dinosaur Eggshells Based on Micro-CT Technology

Chen Chunyu¹, Huang Yingcong^{2,3,4,5,6}, Wang Qiang⁷, Li Guangrong², He Yueshun^{3,5,8}

- 1. Sichuan Nuclear Industry Geological Bureau 281 Brigade, Xichang 615000, Sichuan, China
- 2. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China
- 3. Network Information and Modern Education Technology Center, East China University of Technology, Nanchang 330013, China
- 4. Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province (East China University of Technology), Nanchang 330013, China
- 5. Jiangxi Provincial Engineering Laboratory of Radiology Big Data Technology, Nanchang 330013, China
- 6. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, Nanchang 330013, China
- 7. Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China
- 8. School of Artificial Intelligence and Information Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: Dinosaur eggshell is an important evidence to understand the palaeontological environment of dinosaurs, as well as their evolution and extinction. The pore in the eggshell is more suitable for the reproductive habits of different types of dinosaurs. In this study, a honeycomb egg dinosaur eggshell found in Heyuan, Guangdong Province, was taken as the research object. The CT image pore of the dinosaur eggshell obtained by Micro-CT scanning was built into three-dimensional modeling, and the size, shape, arrangement, spatial characteristics, and development degree of the pore were analyzed ualitatively and quantitatively. Firstly, the processed CT data were converted into point cloud data by Python, and then reconstructed in three dimensions using the ball pivoting. Secondly, the processed CT data is modeled in three dimensions by Avizo. Finally, the point cloud data of one typical air hole is studied, and random slices are selected for quantitative research. The results showed that:1) Some of the pore was not connected, the pore was blocked, and the blocked pore gradually reduced from the inner and outer surfaces to the middle pore, staggered and distributed in space, with asymmetry; Some of the pore was connected, running through the inner and outer surfaces, and well developed, so that oxygen flowed into the embryo for respiration and development. 2) The pore was widely developed, the pore in the diameter section was conical and columnar, and the pore in the string section was single round, oval, polygonal, etc., the surrounding matrix was like hexagon, arranged closely, and multiple hexagons formed a honeycomb structure, with obvious poretal intervals. 3) The pore size and channel height of eggshell pores exhibit a trend of being larger near the outer surface than near the inner surface, while the pores that penetrate both surfaces have larger pore sizes and heights than the previous two.4) The well-developed honeycomb pore revealed that the hatching site of the egg of this dinosaur might be a buried environment; The cone pore showed that the pore size gradually decreased from the near outer surface to the middle, which was speculated to prevent chemical erosion and water dispersion.

Key words: dinosaur eggshell; Micro-CT; microstructure; pore; point cloud; 3D modeling; Heyuan, Guangdong

0 引言

CT(computed tomography)技术应用领域十分广泛,主要涉及医学诊断、工业无损检测、工程检测、安全检查,以及探测地球内部结构等方面^[1]。近年来,随着图像技术的发展和各种功能软件的开发,其应用范围不断拓展。对于CT技术在恐龙蛋显微结构研究上的应用,早在1995年,即有学者^[2]提出应用医疗CT扫描观察恐龙蛋化石,CT图像中可清晰地分辨出蛋形、卵蛋白、蛋壳、蛋黄和胚盘等结构,并能获取具体数据,为恐龙蛋化石和其他生物化石的研究开辟了新途径。但受限于当时CT技术不完善造成图像不清晰等问题,导致对恐龙蛋化石内部结构的研究结果不太明确。随着CT技术的持续进步,有学者^[3]以长安大学地质博物馆馆藏的18枚恐龙蛋化石作为实验测试对象,采用第二代双源CT,以1 mm的层厚与1 mm的间隔对这些蛋化石的内部结构进行扫描,测出其内部的密度分布数据。研究发现,仅有1枚蛋化石在卵壳与原生质之间存在规则空腔,推测该枚恐龙蛋化石可能保存了恐龙蛋胚胎的原始结构^[3]。关于恐龙蛋壳显微结构的建模,Hechenleitner等^[4]使用显微CT(micro-computed tomography),首次获得了蜥脚类恐龙蛋壳的三维微观特征,并对其进行三维重建,基于显微CT的分析提供了对恐龙蛋壳化石中复杂孔道气体电导性的稳健评估,认为该类蛋壳的孔道系统呈漏斗状,漏斗形孔隙对扩散的低阻力可以解除呼吸作用对蛋壳大小和强度的限制,能够很好地将化学侵蚀和孔隙阻塞的影响降至最低。基于此研究,寻找到一个研究恐龙蛋壳显微结构气孔的新途径,即将CT扫描后的恐龙蛋壳进行三维重建,从而获取气孔的形状、大小、排列、发育程度和空间特征等具体情况。本研究主要基于信息熵的CT图像目标与背景自动分离的方法处理蛋壳原始CT影像,再将处理后的CT数据转换为点云数据,最后通过点云数据建模的方法进行恐龙蛋壳气孔显微结构的研究^[5]。

点云数据建模应用在各行各业,如建筑业^[6-8]、农业^[9-11]、文物修复与保护^[12-15]和地铁隧道^[16-18]等方面。对建筑进行三维数字化建模不仅可以检测到建筑物内部结构,还可为古建筑文化遗产未来的开发、保护、维修、恢复重建与虚拟地理环境等提供高精度数据标准^[6];对果实、植物叶子等进行三维数字

化重建,则对推动数字植物几何建模及可视化具有重要意义^[9];文物三维建模可在不损伤文物的前提下,为文物的修复、管理和保护提供科学依据^[14];地铁隧道三维建模在地铁安全监测方面发挥了重大优势,也为三维数字城市建设提供一定的技术参考^[16]。

本研究将点云数据三维建模应用于古生物化石数字化恢复领域,聚焦于恐龙蛋壳的显微结构研究。通过点云数据获取蛋壳气孔的形态、分布、排列和空间特征等具体情况,综合定性与定量分析探讨广东河源发现的蜂窝蛋类恐龙蛋壳的气孔显微结构特征,进而揭示气孔结构与恐龙蛋的发育及其生存的气候、环境之间的内在联系。

1 研究区概况

1.1 地理位置

河源市地处广东省东北部,东江中上游,南接惠州市,北连江西省赣州市,东邻梅州市,西靠韶关市,是广东省沿海和内地的一个结合部。河源市总面积1.58万km²,地理位置为23°10'N—24°50'N,114°13'E—115°35'E,属于热带季风气候^[19](图1)。河源市早在1971年就发现了恐龙化石,1996年出土了大量的恐龙蛋化石,此后又陆续发现恐龙骨骼化石和恐龙足迹化石,成为世界上仅有的蛋化石、恐龙化石、脚印化石“三位一体”的埋藏地,河源市也

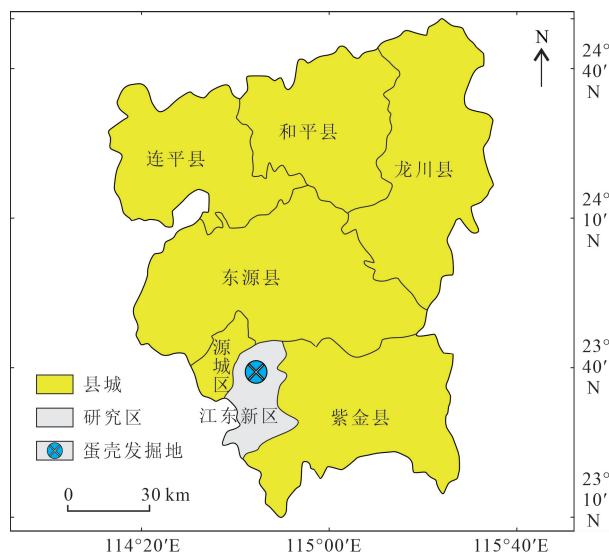


图1 河源市行政区及蛋壳发掘地

Fig.1 Administrative area and eggshell excavation site of Heyuan

因此被称为“南国古生物宝库”和“南国恐龙之乡”^[20]。

1.2 区域地质背景

近几十年来,广东省河源盆地不仅发现了恐龙骨骼、恐龙牙齿、恐龙脚印和龟鳖类化石,还出土了大量形态各异的恐龙蛋化石。此外,该盆地内存在一条呈北东向展布的恐龙蛋化石分布带,使河源盆地也成为世界上少有的恐龙蛋化石较丰富的地区之一^[21-24]。河源盆地位于广东省中东部,面积约为725 km²,红层沉积物较粗,上部丹霞地貌突出,是广东十大红层盆地之一。该盆地受新华夏系河源(东江)大断裂主干构造控制,是一个形状不规则,与东江水系及构造带大体平行、呈北东—南西向线型展布的断陷盆地^[21,25-28]。由于基底断裂长期活动,使得沉积中心向盆地西侧倾斜,地层向北西方向倾斜,形成了向西北倾的单斜盆地;沉积物多以砾石类粗碎屑为主,主要沉积于河流和湖泊沉积环境,于热带—亚热带干旱—半干旱性气候条件下发育;岩层内多处发现恐龙化石及其蛋化石,同时还含有丰富的腹足类化石、瓣鳃类化石、龟鳖类化石及其蛋化石等^[21,28-29]。根据岩性特征及化石分布,将河源盆地的白垩系—古近系由下至上划分为仙塘组、东源组和格岭组3个岩石地层单位。其中,东源组位于盆地中部,红层沉积物较粗,为恐龙蛋化石提供了埋藏与赋存条件,并产有河源恐龙化石、龟鳖类化石、恐龙脚印和恐龙蛋化石。蛋化石分布地点集中,绝大

部分都产自东源组。本次研究的蛋壳化石样品即来自河源市江东新区上白垩统东源组^[25](图2)。

仙塘组(K_2x)分布于河源盆地的东部和南部边缘,下部为粗碎屑岩,上部与棕黄色砾岩、紫红色高泥质砂岩不整合接触,下伏地质体为花岗岩,顶部为熔结火山角砾岩或凝灰质泥岩,未发现化石,该组厚约500 m,时代为晚白垩世^[24-25]。

东源组(K_2d)分布在盆地中部,岩性相对较细,细砾岩及含砾砂岩特别发育,地层以暗紫色、紫红色砾岩、砂砾岩沉积为主,厚约1 700 m;顶部为厚约2 m的灰绿色泥岩,与下伏的仙塘组整合接触,产有恐龙脚印、窃蛋龙类化石、龟鳖类化石和大量蛋化石,时代属于晚白垩世^[24-25]。

格岭组($E?$)是以紫红色、灰紫色、暗褐色为主要特征的砂岩和细砾岩,中间夹带着粗砾岩—巨砾岩层,与下伏东源组整合接触,其上为花岗岩断层,该组厚约1 500 m,未发现蛋化石,时代推断可能为古近纪(?)^[24-25]。

2 数据与方法

2.1 样品采集与预处理

本次研究的化石样本出土于广东省河源市江东新区的一处建筑工地,在松散的砂土层中仅见多块破损的恐龙蛋壳,未发现完整蛋化石。对采集的样品进行筛选,选取其中1片采用传统方法制作蛋壳的径切面和弦切面的显微结构切片;另选一片内外

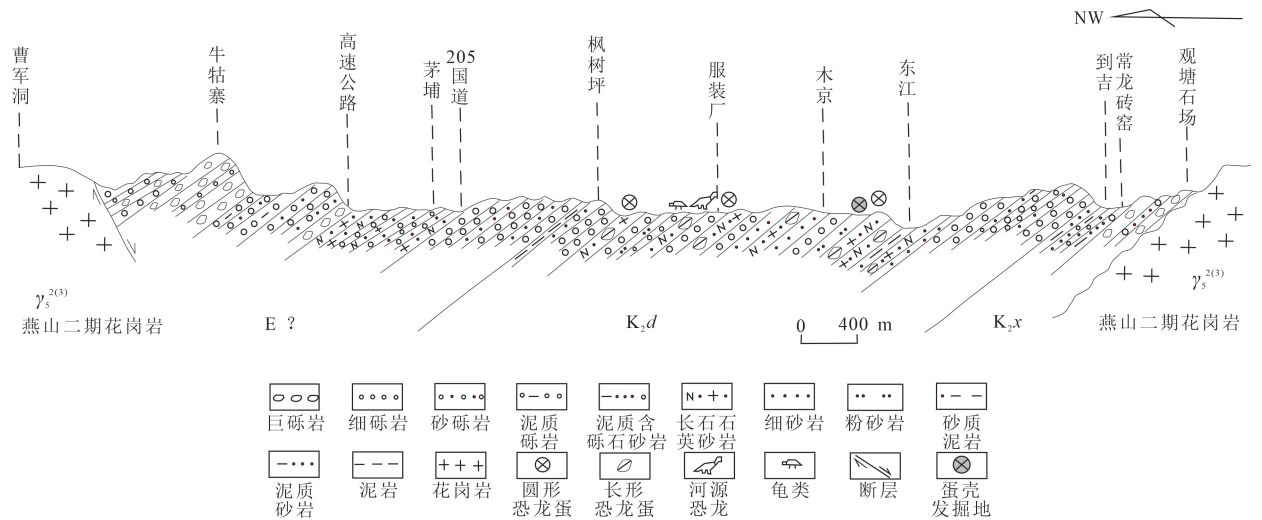


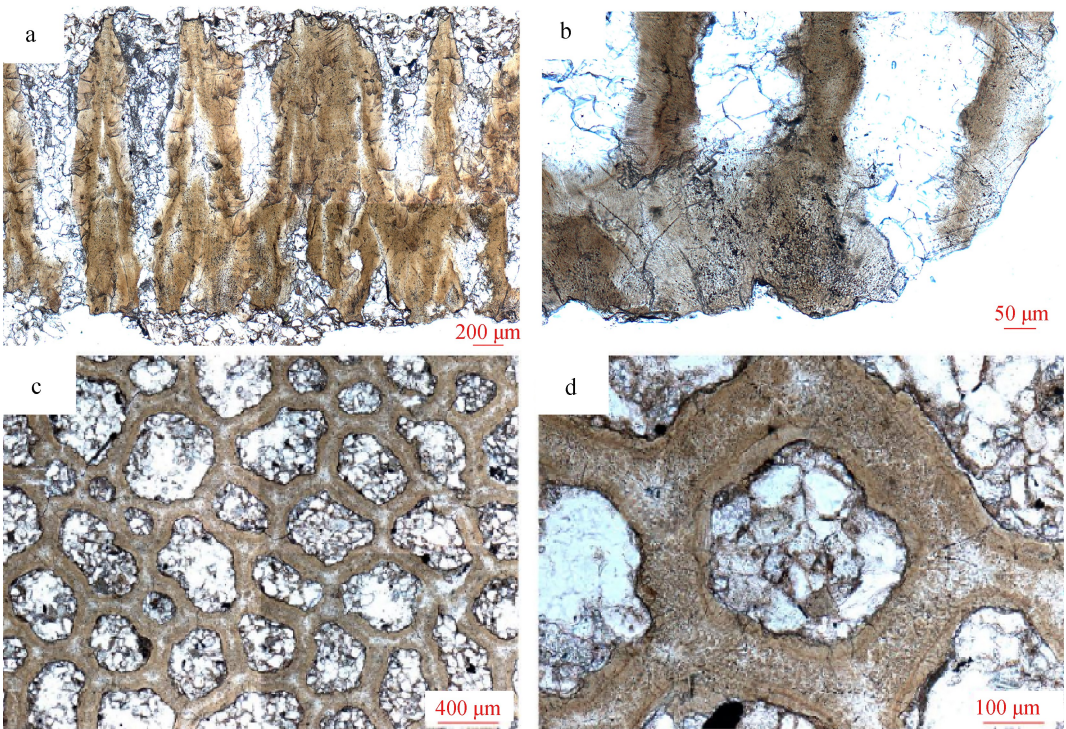
图2 广东东源县到吉—牛牯寨上白垩统—古近系剖面
Fig.2 Upper Cretaceous-Paleogene Daoji-Niuguzhai cross-section, Dongyuan Country, Guangdong

表面保存较为完整、围岩覆盖较少的蛋壳,先采用超声波对蛋壳进行清洗,然后再进行蛋壳结构的显微 CT 扫描。采用的设备为 GEphoenix vtomex m 180 kV/300 kV,测试电压为 70 kV,测试电流为 130 μ A,时间间隔为 2 000 ms,扫描距离间隔 3.799 9 μ m,得到了 3 329 张(样号 0000—3328) 16 位的恐龙蛋壳原始切片 CT 图像样品数据(表 1)。其垂直最大距离为 11.380 8 mm,水平最大距离为 11.345 2 mm,空间分辨率为 3.896 0 μ m/像素,图像保存为 tif 格式,其中获得含有目标信号的图片有2 995张(表 1)。使用显微 CT 扫描仪将蛋壳自上而下进行弦切面的 CT 扫描,从蛋壳 CT 影像弦切面可观察到明显的气孔分布。挑选几个不同观测位置,包括距外表面 0.422 7、0.804 5、1.291 5及1.809 7 mm处,可观察到一些气孔的分布情况。

通过传统方法制作的显微结构切片显示,径切面壳单元呈柱状,气孔呈锥状、柱状,相互间隔明显(图 3a、b);弦切面气孔呈蜂窝状,气孔呈圆形、椭圆形和多边形等(图 3c、d)。CT 影像显示,蛋壳弦切

表 1 CT 扫描测试参数统计		
Table 1 CT scan testing statistical parameters		
参数	样号区间	结果
全部扫描切片	0000—3328	3 329 张
垂直最大距离		11.380 8 mm
水平最大距离		11.345 2 mm
空间分辨率		3.896 0 μ m
扫描距离间隔		3.799 9 μ m
含扫描信号 起止切片	0001—3328	3 328 张
含观测目标 起止切片	0206—3200	2 995 张
所用样本 数据集切片	0483—2599	2 117 张

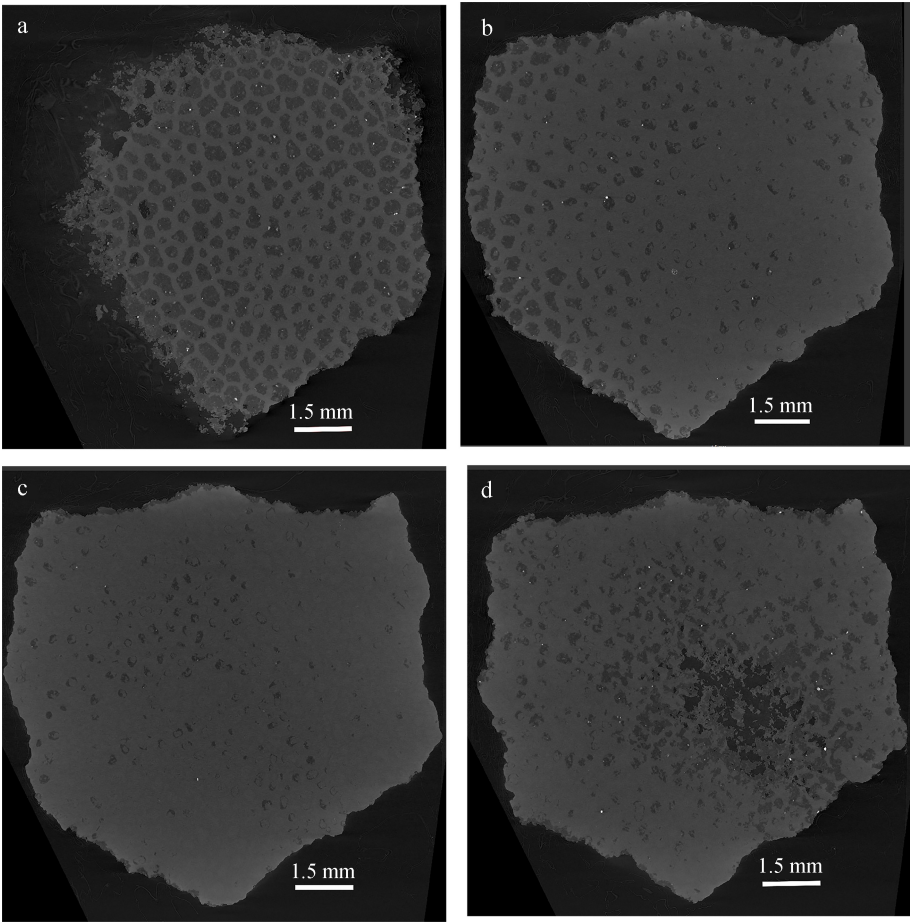
面具有蜂窝状的气孔,距离外表面更近处气孔形态更明显,自上而下气孔孔径逐渐变小,并且气孔形状多样,多呈圆形、椭圆形和多边形等(图 4)。因此,鉴定该蛋壳属于蜂窝蛋类型。由于样品数据头部和尾部CT图像的目标区域太小(目标区域像元比率



a. 径切面;b. 径切面局部放大图;c. 近外表面处弦切面;d. 弦切面气孔局部放大图。

图 3 蛋壳显微结构的径切面和弦切面

Fig.3 Radial and chord section of eggshell microstructure



a. 距离外表面 0.422 7 mm 处;b. 距离外表面 0.804 5 mm 处;c. 距离外表面 1.291 5 mm 处;d. 距离外表面 1.809 7 mm 处。

图 4 蛋壳弦切面 CT 影像

Fig.4 CT image of eggshell chord section

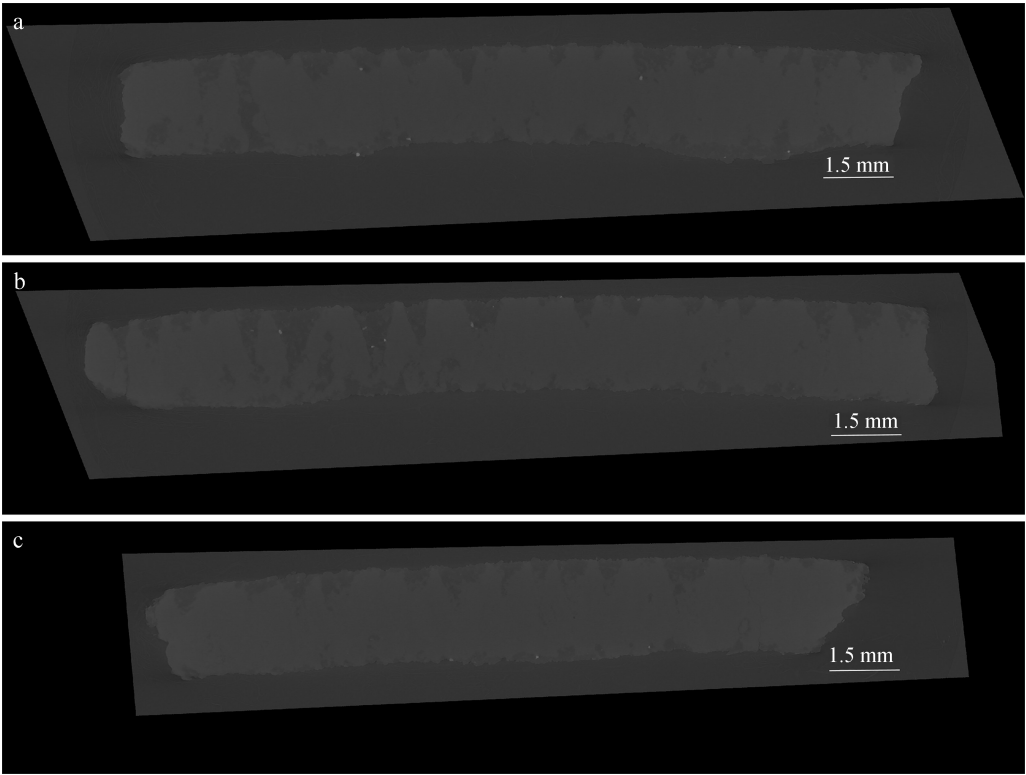
小于 3%), 为提高处理速度, 仅选取切片样号 0483—2599 作为样本数据集。图 5 为从样本数据集里随机选取的前、中、后三段的原始 CT 影像径切面, 分别为切片样号 0687、1549、2365, 每个切片目标范围大小不一, 其中亮度值高且呈现较明亮的区域为目标区域, 其余为背景区域。

由于径切面原始 CT 影像目标与背景难以区分, 无法有效识别目标区域(图 5), 且缺乏处理大量恐龙蛋壳化石 CT 影像可借鉴的经验, 传统分离提取方法繁琐, 精度不高, 需要较多人工参与, 难以实现完全自动化, 处理难度较大, 效率低下。为此, 采用陈春玉等^[5]提出的一种基于信息熵的 CT 影像目标与背景自动分离提取方法, 将样本数据集中 2 117 张 CT 影像进行自动化分离。该方法不仅能准确提取目标, 还保留完整的目标轮廓, 边缘也十分清晰, 并且可有效识别气孔, 为本研究构建恐龙蛋壳气孔的三维立体结构提供了数据基础(图 6)。

2.2 研究方法

2.2.1 点云

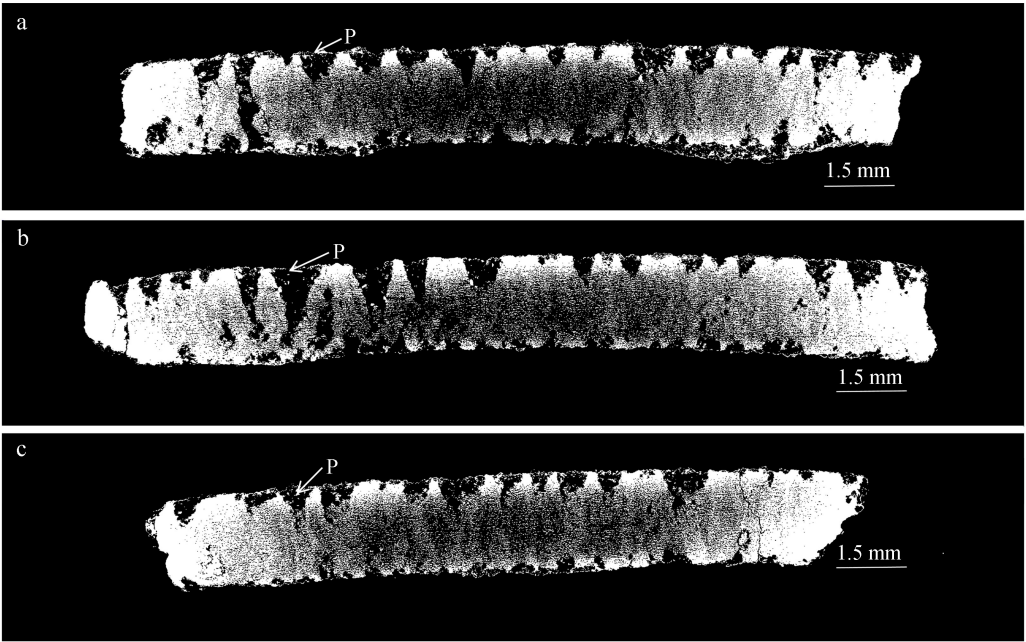
点云(point cloud)是一个数据集, 集合中的每个点都有各自的含义, 它被认为是一个几何坐标(X、Y、Z)加上一个强度值的组合; 把这些点集合在一起就形成了一个点云, 就是我们常说的空间中表示 3D 形状或实体对象的数据点集合。点云数据通过利用三维扫描设备来采集实体表面的空间采样点的数据集合, 采集到的三维模型数据信息除点云数据之外, 还包括纹理图像, 其中通过纹理图像可以了解到物体表面的颜色、深度、光照等信息; 依据排列方式和有无次序, 可以将点云数据划分为扫描线点云、阵列式点云、三角网格式点云及散乱点云^[30]; 依据数据点的数量及疏密程度(即各数据之间的密度大小)可分为稠密点云与稀疏点云^[13]。点云模型是利用离散点来描述实际物体的几何坐标和表面信息的 CAD 模型, 具有三维可视化效果好、存储空间



a. 切片 0687;b. 切片 1549;c. 切片 2365。

图 5 蛋壳径切面原始 CT 影像

Fig.5 CT image of eggshell radial section



a. 切片 0687;b. 切片 1549;c. 切片 2365。P. 气孔。

图 6 蛋壳径切面分离后的图像

Fig.6 Images after separating the radial section of eggshell

占用少、模型处理作业量小的优势,适用于表示大规模的数据,是表示三维物体的常用模型之一^[31-32]。

CT 数据通常以二维断层图像的形式存在,这些图像虽然能够提供物体内部的详细信息,但缺乏三维空间中的直观表达。通过将 CT 数据转换成点云数据,可以有效地将二维图像信息整合到三维空间中,从而更直观地展示物体的几何形状和结构特征。本研究进行恐龙蛋壳显微结构三维构建的方法主要是点云数据建模方法,再辅以 CT 影像数据的三维重建做补充。研究所用到的点云数据是通过 Python 将经过信息熵自动分离处理后的 CT 影像数据转换成格式为 txt 的点云数据。具体操作过程如下:使用 Python 对样本数据集(0483—2599)中每张 CT 影像进行逐行读取,从读取到的第一个有目标的像素开始记录其(x, y)坐标,以扫描间隔 $3.799\ 9\ \mu\text{m}$ 逐层累加的距离作为高程 z 坐标(其中一张图像的高程为同一数值),最后将(x, y, z)形式的点云数据保存为 txt 格式,在此算法中已进行图像的去噪处理。由于本研究的建模要求和数据量过大等原因,因此在利用 Python 转换时设置转换目标边缘的数据作为预备建模的点云数据,在此过程中也将点云数据进行了压缩处理,所以形成的形状可能会与原始图像有一定差距。

2.2.2 滚球算法

由于本研究所用的点云是散乱了点云数据,因此选择 Delaunay 三角剖分重建算法中的滚球算法进行点云数据的三维重建。滚球算法(ball pivoting, BPA)具有鲁棒性好、三角化速度快的优点,广泛应用于 CT 切片方面,常在 MeshLab 等三维建模软件中用来进行点云数据的三维建模^[33]。但是滚球算法不适用于稀疏点云或非均匀点云,因其需要提前定义滚球半径,可能导致滚球无法与点接触,从而产生孔洞。滚球算法的原理是:首先从一个种子三角形开始,用户先定义一个半径为 r 的滚球;然后将滚球沿着种子三角形的一条边不停旋转直到接触这条边的两个端点;最后,通过判断这个滚球里面有无其他点来确定这条边是否与这个点构成一个新的三角形。以此类推,不断重复上述操作过程,直到所有点都被遍历完而包含在三角形网格中,即认为完成重建工作^[33-35]。

3 实验结果与分析

本章实验环境为 Windows10 系统下安装的

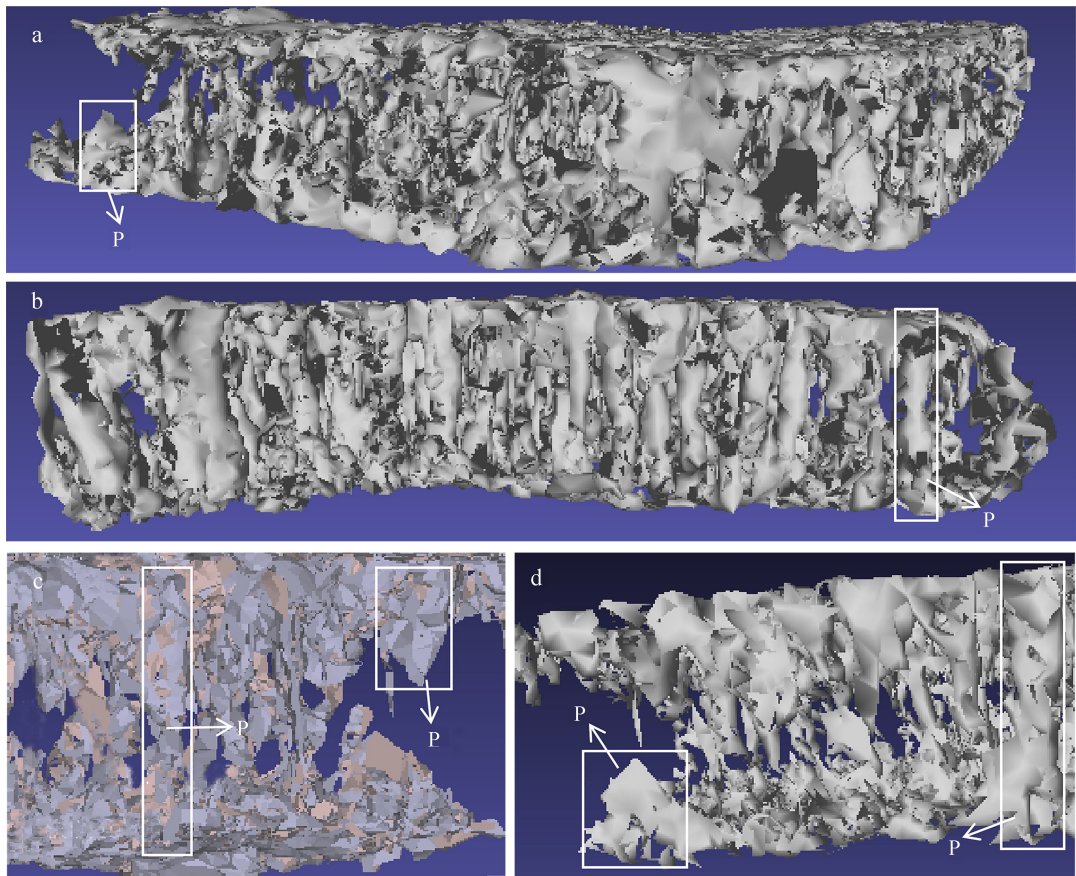
CloudCompare 软件、MeshLab 软件、Avizo 软件和 Adobe Photoshop 软件,主要从两方面进行气孔的三维建模分析与处理,根据建成的三维可视化图像研究蛋壳气孔的大小、形状、发育程度、排列状况和空间特征等具体情况。首先,使用 CloudCompare 软件、MeshLab 软件对转换处理后的点云数据进行配准、去噪与精简;再使用 MeshLab 软件中的滚球算法进行点云数据的三维重建,获取蛋壳气孔的三维可视化图像,并解剖其中一个气孔的点云数据以进行典型气孔三维模型的详细研究。其次,将处理后的 CT 数据通过 Avizo 软件进行弦切面方向上的切片三维重建;由于蛋壳径切面 CT 切片并不规则,因此将其从外表面与内表面处裁剪为规则的矩形切片,观察所有切片组合在一起的三维模型。最后,使用 Adobe Photoshop 软件选取若干张处理后的 CT 影像切片,对径切面近外表面与近内表面的气孔孔径和高度进行测量。

本研究将现有的点云边缘轮廓提取物技术应用与古生物化石数字化恢复领域,在点云三维建模的基础上提取恐龙蛋壳气孔,从气孔径切面与弦切面的三维模型中分析蛋壳气孔形态、分布、排列情况和空间特征等。通过综合定性分析与定量分析探讨广东河源发现的这类蜂窝蛋类恐龙蛋壳气孔结构变化与生存气候、环境之间的联系,并推测恐龙蛋的发育程度、形成机制及演化规律,从而为研究河源盆地在晚白垩世时期的古气候演变提供一定的参考依据。

3.1 定性分析

3.1.1 径切面气孔三维模型

通过 CloudCompare 软件进行点云数据的配准、去噪、精简预处理,然后利用 MeshLab 软件进行点云数据的曲面生成,再进一步使用软件里的滚球重建算法进行三维构建工作。从气孔三维可视化图像中可以看出气孔的大小、形状、发育程度及排列状况(图 7)。蛋壳径切面气孔的三维可视化显示气孔主要呈锥状或柱状。从气孔孔道发育程度来看,气孔大部分发育良好,部分贯穿整个径切面(图 7b、d),部分从表面到中部截断,即气孔发育阻断,且受阻断的气孔从内外表面到中间孔道逐渐缩小(图 7a、c)。从排列情况来看,气孔排列紧密有序。从空间分布特征来看,气孔之间间隔明显,部分气孔内外表面不连通,交错镶嵌分布,具有不对称性;部分气孔连通,贯穿内外表面,但显示出气孔孔径从内外表面到中部逐渐缩小的趋势(7c)。贯穿内外表面的气



a、b. 径切面三维可视化；c、d. 径切面局部放大图。P. 气孔。

图 7 蛋壳径切面气孔三维可视化

Fig.7 3D visualization of radial section of eggshell pores

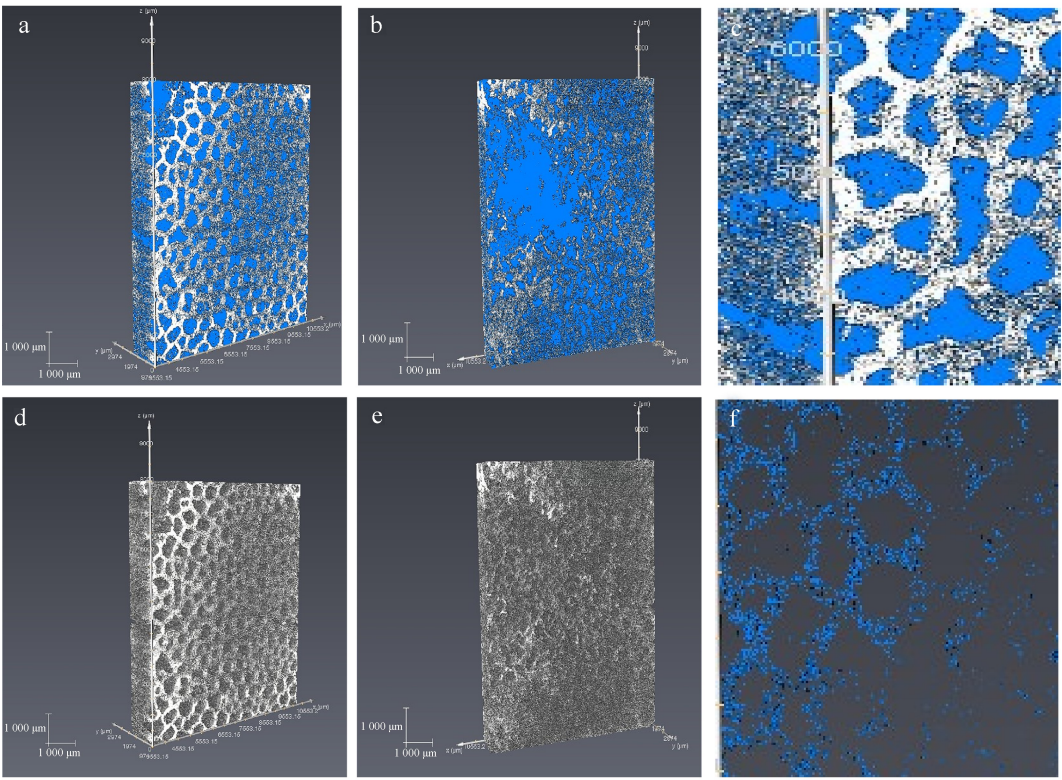
孔可以使氧气、水分及营养物质流入胚胎内部,供胚胎呼吸和发育,但缩小气孔的孔径也可认为是恐龙蛋对自身个体发育的保护,可降低外界环境化学侵蚀,也可被认为是防止水分散发、减少营养物质流失的一种功能适应。

3.1.1.2 弦切面气孔三维模型

将处理后的 CT 数据导入 Avizo 软件,经图像降噪、阈值分割处理后,对切片进行三维建模,获取蛋壳弦切面切片的气孔空间分布情况(图 8)。蛋壳气孔大小不一,其数量在不同弦切面位置(外表面、中部、内表面等)都有变化。蛋壳气孔广泛发育。外表面(图 8a、c、d)气孔形态清晰可见,蛋壳气孔整体结构呈蜂窝状,单个气孔也呈多种形态,有圆形、椭圆形、不规则多边形,气孔孔径较大,气孔空间上呈锥状、柱状,基质相互连接,气孔被周围基质隔开;而内表面(图 8b、e)气孔形态不明显,未形成圈闭的气孔,气孔分布较散乱;外表面气孔排列比内表面紧密

有序,孔径也大于内表面。其中,孤立孔隙(图 8f)即本研究所要探讨的气孔,其直接影响流体的流动性和储层的渗透性。蛋壳气孔发达,表明此次在广东河源发现的这类恐龙蛋过去可能是在相对封闭被埋藏的环境中进行孵化;若处于开放的环境,发达的气孔会造成蛋内的水分短时间迅速蒸发,从而导致蛋内胚胎缺水而死。

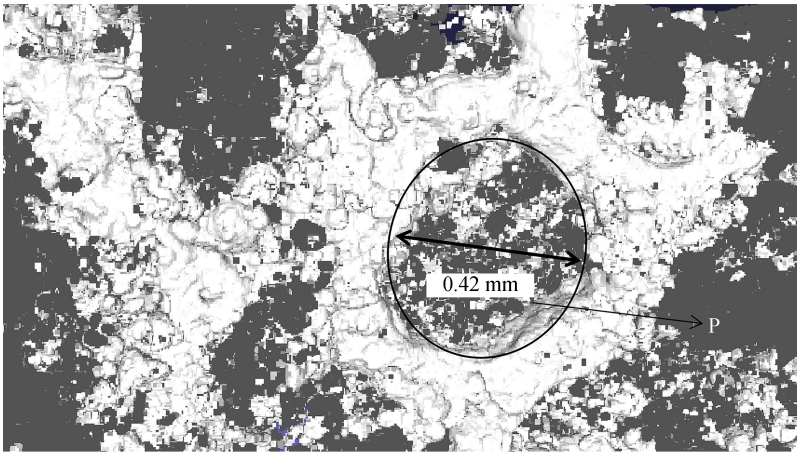
此外,在对整个蛋壳 CT 图像数据转换为点云数据时,选取弦切面上其中一个气孔的点云数据进行三维构建。将选取数据导入到 MeshLab 软件,通过处理获取蛋壳近外表面弦切面气孔三维模型(图 9)。三维可视化图像显示,气孔呈不规则多边形、近圆形等,气孔孔径较大,周围基质似六边形、排列紧密,多个六边形组成蜂窝状结构,基质相互连接,气孔被周围基质隔开,间隔明显。与 Avizo 软件进行 CT 数据的三维重建模型(图 8)结果大致相同。



a. 外表面三维模型与基质;b. 内表面三维模型与基质;c. 外表面局部放大图;d. 外表面基质;e. 内表面基质;f. 孤立孔隙。

图 8 蛋壳内外表面弦切面三维模型

Fig.8 3D model of the eggshell surface chord section



P.气孔。

图 9 蛋壳近外表面弦切面气孔三维模型

Fig.9 3D model of pores on chord section near outer surface of eggshell

3.2 定量分析

由于蛋壳分布有很多气孔,每个气孔形态都不一样,其孔径大小也不一致,每个气孔都具有代表性。使用 Adobe Photoshop 软件选取若干张处理

后的 CT 影像切片,对径切面近外表面的气孔孔径与高度进行测量。图 10 显示的是其中一张切片(样号 1207)两个气孔的孔径和高度测量数据,测得的气孔孔径分别为0.43、0.56mm,孔道高度分别为

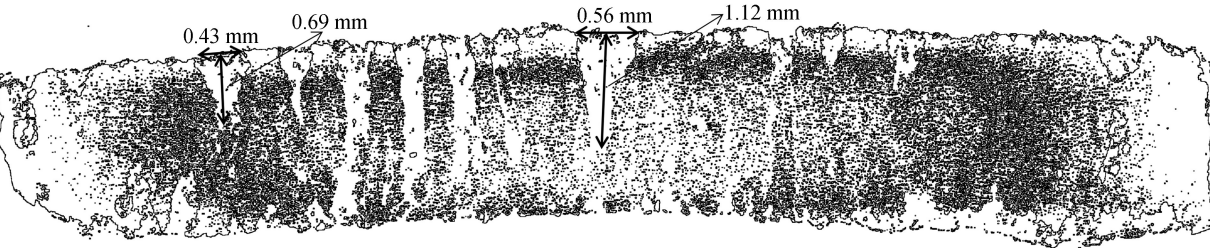


图 10 蛋壳气孔孔径与高度
Fig.10 Eggshell pore size and height

0.69、1.12 mm,这两个气孔孔径偏大,孔径宽度向
内表面逐渐变小。此外,对蛋壳近外表面(10 个)、
近内表面(10 个)和贯穿内外表面(5 个)的锥/柱状
气孔定量参数进行统计,发现近外表面锥/柱状底直径
(孔径)在 0.23~0.73 mm 之间,平均直径为 0.395 mm,
锥/柱状高度在 0.38~1.38 mm 之间,平均高度为
0.801 mm;贯穿内外表面的气孔直径在 0.25~
0.80 mm之间,平均直径为 0.414 mm,锥/柱状高度
在 1.63~1.71 mm之间,平均高度为 1.658 mm;近
内表面锥/柱状底直径(孔径)在0.16~0.41 mm 之
间,平均直径为 0.286 mm,锥/柱状高度在 0.13~
0.65 mm之间,平均高度为0.386 mm(表 2)。可见
蛋壳近外表面气孔孔径比近内表面气孔孔径大,孔
道高度也同样如此,而贯穿内外表面的气孔无论是
平均孔径还是平均高度都比前两者大。这和上文通
过定性分析所进行的三维重建可视化得出的结果一
致。

4 讨论

4.1 三维重建技术

CT 数据通常以二维断层图像的形式存在,这
些图像能够提供物体内部的详细信息,可基于面绘
制或者体绘制的方法进行图像的三维重建。但 CT
数据的三维重建依赖于原始的 CT 图像数据,如果
原始数据质量不佳,重建后的三维图像也可能受到
影响^[36]。点云数据三维建模过程具有孔洞修复功
能,可对散乱点云数据中的孔洞进行识别,通过建立
点云数据空间索引遍历数据点,并根据孔洞边界点
特征在空间中找到满足条件的特征点;还可基于三
角网格化对孔洞进行识别,该功能对于排除由于显
微 CT 仪器造成的细小孔隙具有明显优势^[37-38]。本
研究将CT数据转换成点云数据,可直接将二维图

表 2 蛋壳气孔定量参数						
Table 2 Quantitative parameter of eggshell pores						
类型	气孔 编号	锥/柱底 直径/mm	平均直 径/mm	锥/柱 高/mm	平均高 度/mm	是否 贯穿
近外 表面	1	0.43	0.395	0.69	0.801	否
	2	0.30		0.70		否
	3	0.34		0.68		否
	4	0.73		0.78		否
	5	0.23		1.38		否
	6	0.23		1.21		否
	7	0.56		1.12		否
	8	0.25		0.54		否
	9	0.33		0.53		否
	10	0.55		0.38		否
贯穿内 外表面	A	0.37	0.414	1.65	1.658	是
	B	0.34		1.66		是
	C	0.31		1.63		是
	D	0.80		1.71		是
	E	0.25		1.64		是
近内 表面	11	0.21	0.286	0.58	0.386	否
	12	0.25		0.65		否
	13	0.35		0.18		否
	14	0.37		0.26		否
	15	0.33		0.28		否
	16	0.37		0.34		否
	17	0.41		0.13		否
	18	0.16		0.41		否
	19	0.17		0.64		否
	20	0.24		0.39		否

像信息整合到三维空间中,更直观地展示物体的几
何形状和结构特征。点云数据包含每个点的三维坐

标,能够更精确地描述物体的表面特性,对细小孔隙进行修复,不仅可以减少原始 CT 图像数据质量不佳造成的影响,还能够处理复杂的曲面结构重建,提供更高精度的三维信息,因此将 CT 数据转换为点云数据是有必要的。此外,使用 Avizo 软件处理 CT 数据,主要是为了从弦切面上提取三维信息。由于该软件会提取细小的孔隙,因此仅用它做一般三维重建模型的定性讨论,未做定量研究,该过程是对点云数据三维重建可视化的补充。

本研究将点云数据、CT 数据的三维重建应用于恐龙蛋壳的显微结构研究,获取蛋壳气孔的形态、大小、排列和空间特征等情况,探讨本研究提到的蜂窝蛋类恐龙蛋壳气孔显微结构、个体发育及其生存的气候、环境之间的关系,还能给其他类型恐龙蛋壳气孔的显微结构研究提供技术参考,具有重要科学意义。

4.2 气孔显微结构变化的指示意义

气孔具有保障胚胎发育过程中气体和水分交换的功能,蜂窝蛋类、网形蛋类、树枝蛋类都具有非常发育的气孔系统^[39-40]。但在演化过程中为了减缓水分的过度散失,树枝蛋类、网形蛋类在近蛋壳近外表面形成融合层,而蜂窝蛋类中仅有少部分类型具有融合层。通过传统方法制作显微结构切片显示径切面壳单元呈柱状,气孔呈锥状、柱状,相互间隔明显,弦切面气孔呈蜂窝状,气孔呈圆形、椭圆形、多边形等^[41];通过三维可视化重建观察,除以上特征外,气孔形状显示出更立体的锥体、柱体,还显示出其空间分布特征,气孔之间间隔明显,部分气孔内外表面不连通,交错镶嵌分布,具有不对称性,部分气孔贯穿内外表面,显示出气孔孔径从外表面到内表面、从内外表面到中部逐渐缩小的趋势。这将为探讨恐龙蛋个体发育及蛋壳形成演化机制提供非常重要的信息,也将为探讨河源盆地晚白垩世时期古环境、古气候的变化提供一些参考。根据我国主要的恐龙蛋化石类型建立初步的晚白垩世地层框架,其中蜂窝蛋类主要发现于晚白垩世早期的浙江天台盆地^[42-43]和晚白垩世早—中期的河南西峡盆地^[43-45]等,由此可以认定河源盆地发现的这类蜂窝蛋所处的地层时代也应该属于晚白垩世早—中期。

白垩纪发生了很多重大的环境突变事件,如大洋缺氧事件、晚白垩世大洋红层与富氧作用、全球范围内的大规模火山活动和生物集群绝灭事件等,其中极端环境的突变直接影响恐龙蛋胚胎的发育^[44]。

本文研究的蜂窝蛋类位于河源盆地红层中,推测受当时极端环境影响,导致后期河流与海平面的快速上涨将恐龙蛋掩埋,可能是处于一个被埋藏的环境中,从而恐龙蛋还未孵化就以化石的形式保留下来^[46]。另外,恐龙蛋类蛋壳气孔孔道十分发育,气孔呈柱状和倒立的锥状,锥状气孔显示孔径从近外表面到中部逐渐变小,缩小气孔的孔径也可以被认为是防止化学侵蚀、水分散发的一种功能适应。推测广东河源盆地晚白垩世时期除了地层中存在微量元素异常以外,气候也发生了异常的变化。大陆上空的空气变冷使空气中的水蒸气含量迅速减少,可能长时间、大范围地出现过严重缺水的干旱性气候。为了适应长时间的干旱气候,避免水分蒸发过快,恐龙蛋壳上的气孔才变小的。气孔变小不能让足够的氧气通过气孔进入蛋内,恐龙蛋里胚胎的正常呼吸受到了严重的影响,无法供给小恐龙呼吸,从而导致恐龙无法繁殖出正常后代而逐渐走向最终的灭绝。

5 结论与展望

本研究将进行自动分离目标与背景处理后的 CT 影像数据转换为点云数据,并将转换后的点云数据进行蛋壳气孔显微结构的三维建模,再将处理后的 CT 数据进行蛋壳气孔弦切面的三维重建。通过定性与定量分析获取蛋壳气孔的形状、大小、排列、空间特征和发育程度等情况。通过上述实验及分析,获得以下几个结论:

1)从气孔孔道发育程度来看,气孔大部分发育良好,部分贯穿整个径切面,部分从表面到中部被截断,即气孔发育阻断,且受阻断的气孔孔径从内外表面到中部孔道逐渐缩小。从排列情况来看,气孔排列紧密。从空间分布特征来看,气孔之间间隔明显,部分气孔内外表面不连通,交错镶嵌分布,具有不对称性;部分气孔连通,贯穿内外表面,可以使氧气、水分、营养物质流入胚胎内部,供胚胎呼吸和发育。

2)蛋壳气孔广泛发育,弦切面近外表面气孔表面整体呈蜂窝状,推测本次研究发现的恐龙蛋过去可能处在一个相对封闭被埋藏的环境中进行孵化。单个气孔形态多样,有圆形、椭圆形、不规则多边形等,气孔孔径较大。内表面气孔形状不明显,未形成圈闭的气孔;外表面气孔排列紧密有规律,孔径比内表面大。

3)蛋壳近外表面、近内表面和贯穿内外表面的锥/柱状气孔直径、高度等定量参数显示,近外表面

锥/柱状底直径平均直径与平均高度均大于近内表面,而贯穿内外表面的气孔直径和气孔通道高度都大于前两者。

4)蛋壳径切面显示气孔呈柱状和倒立的锥状。倒锥状气孔显示孔径从近内外表面到中部逐渐变小,缩小气孔的孔径可认为是降低外界化学侵蚀和气孔阻塞影响的一种机能适应,也可被认为是防止水分散发的一种功能适应,对恐龙蛋自身的发育有利。推测广东河源盆地晚白垩世时期地层环境中存在微量元素异常情况,气候也发生了异常的变化,可能长时间、大范围地出现过严重缺水的干旱性气候。

受 CT 仪器等因素限制,扫描所得的 CT 影像噪声过多,导致转换的点云数据量庞大,影响建模结果的准确度与精度。因此,本研究进行的恐龙蛋壳显微结构三维建模的研究方法还需进一步优化。同时,本研究中的定量数据还只是最基础的,后续拟增加模拟空气的通过率、计算气孔的比例等定量研究数据,以更准确地讨论蛋壳气孔结构与呼吸能力的关系。此外,本研究仅对采集的一片蛋壳进行了 CT 扫描分析建模,未采集到完整的蛋体,后续研究会对建模方法进行改进,逐步从一片蛋壳的研究拓展到整个蛋体的研究。

参考文献 (References):

[1] 高丽娜,陈文革.CT 技术的应用发展及前景[J].CT 理论与应用研究,2009,18(1): 99 - 109.
Gao Lina, Chen Wenge. The Application and Prospect of CT[J]. CT Theory and Applications, 2009, 18(1): 99 - 109.

[2] 左权,靖伟德.应用医疗 CT 扫描法观察恐龙蛋化石的内部结构[J].古生物学报,1995,34(6): 777 - 779.
Zuo Quan, Jing Weide. First Report on Studying Dinosaur Egg Fossils with Method of Medical CT Scanning[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1995, 34(6): 777 - 779.

[3] 汪晓伟,姚肖永.新 CT 技术在恐龙蛋化石扫描中的应用与发现[J].西北地质,2015,48(2): 224 - 230.
Wang Xiaowei, Yao Xiaoyong. Application and Discovery of the New Computed Tomography Technology in the Internal Structure of Dinosaur Egg Fossils[J]. Northwestern Geology, 2015, 48(2): 224 - 230.

[4] Hechenleitner E M, Grellet-Tinner G, Foley M, et al. Micro-CT Scan Reveals an Unexpected High-Volume and Interconnected Pore Network in a Cretaceous

Sanagasta Dinosaur Eggshell[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2016, 13: 20160008.

[5] 陈春玉,黄映聪,王强,等.基于信息熵的 CT 图像目标自动提取实验研究:以恐龙蛋壳化石切片 CT 图像为例[J].液晶与显示,2022,37(7):891 - 899.
Chen Chunyu, Huang Yingcong, Wang Qiang, et al. Experimental Research on Automatic Object Extraction from CT Image Based on Information Entropy: Taking CT Image of Dinosaur Eggshell Slices as an Example[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2022, 37(7): 891 - 899.

[6] 索俊峰,刘勇,蒋志勇,等.基于三维激光扫描点云数据的古建筑建模[J].测绘科学,2017,42(3): 179 - 185.
Suo Junfeng, Liu Yong, Jiang Zhiyong, et al. Modeling of Ancient Building Based on 3D Laser Scanning Point Cloud Data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(3): 179 - 185.

[7] 刘瑶,张城芳.基于三维激光点云数据的建筑景观可视化建模[J].激光杂志,2022,43(3): 138 - 142.
Liu Yao, Zhang Chengfang. Visual Modeling of Architectural Landscape Based on 3D Laser Point Cloud Data[J]. Laser Journal, 2022, 43(3): 138 - 142.

[8] Cheng G Z, Liu J P, Cui N, et al. Virtual Trial Assembly of Large Steel Members with Bolted Connections Based on Point Cloud Data[J]. Automation in Construction, 2023(7):151.

[9] 王勇健,温维亮,郭新宇,等.基于点云数据的植物叶片三维重建[J].中国农业科技导报,2014,16(5): 83 - 89.
Wang Yongjian, Wen Weiliang, Guo Xinyu, et al. Three-Dimensional Reconstruction of Plant Leaf Blade Based on Point Cloud Data[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(5): 83 - 89.

[10] 郎彦城.基于点云的刺梨果实三维建模及其生物力学特性研究[D].贵阳:贵州师范大学,2022.
Lang Yancheng. Three-Dimensional Modeling and Biomechanical Properties of Roxburgh Pear Fruit Based on Point Cloud[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2022.

[11] Comba L, Biglia A, Aimonino D R, et al. Unsupervised Detection of Vineyards by 3D Point-Cloud UAV Photogrammetry for Precision Agriculture[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 155:84 - 95.

[12] 周强,张敏,李巍,等.基于点云数据的古陶瓷碎片

- 边缘轮廓提取技术[J].陕西科技大学学报, 2021, 39(6): 174-181.
- Zhou Qiang, Zhang Min, Li Wei, et al. Edge Contour Extraction of Ancient Ceramic Fragments Based on Point Cloud Data[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2021, 39(6): 174-181.
- [13] 陶思佳.面向文物稠密点云的真实感三维建模研究[D].西安:西北大学, 2022.
- Tao Sijia. Realistic 3D Modeling for Dense Point Clouds of Cultural Relics [D]. Xi'an: Northwest University, 2022.
- [14] 张向葵.文物三维点云模型与 CT 切片模型的配准研究[D].西安:西北大学, 2022.
- Zhang Xiangkui. Study on the Registration of 3D Point Cloud Model and CT Slice Model of Cultural Relics[D]. Xi'an: Northwest University, 2022.
- [15] Yang S, Hou M L, Shaker A, et al. Modeling and Processing of Smart Point Clouds of Cultural Relics with Complex Geometries [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(9): 617.
- [16] 熊长喜, 侯岳, 时亚东, 等.基于点云数据的地下空间模型构建技术研究[J].河南科技, 2017(7): 29-30.
- Xiong Changxi, Hou Yue, Shi Yadong, et al. Research on the Construction of Underground Space Model Based on Point Cloud Data[J]. Henan Science and Technology, 2017(7): 29-30.
- [17] 李元达.地铁隧道点云数据采集与预处理[J].北京测绘, 2019, 33(9): 1047-1050.
- Li Yuanda. Point Cloud Data Acquisition and Preprocessing in Subway Tunnel[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2019, 33(9): 1047-1050.
- [18] Cao Z, Chen D, Peethambaran J, et al. Tunnel Reconstruction with Block Level Precision by Combining Data-Driven Segmentation and Model-Driven Assembly[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 99:1-20.
- [19] 姜喜东, 林媚珍, 陈志云, 等.广东省河源市森林资源动态变化分析[J].安徽农业科学, 2009, 37(20): 9729-9731.
- Jiang Xidong, Lin Meizhen, Chen Zhiyun, et al. Dynamic Changes Analysis of Forest Resource in Heyuan[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(20): 9729-9731.
- [20] 方远平, 毕斗斗, 甘巧林.河源市文化旅游资源开发模式研究[J].热带地理, 2008(5): 483-487.
- Fang Yuanping, Bi Doudou, Gan Qiaolin. Development Modes of Cultural Tourism Resources in Heyuan City[J]. Tropical Geography, 2008(5): 483-487.
- [21] 凌秋贤, 张显球.广东河源盆地红层的初步研究[J].地层学杂志, 2002, 26(4): 264-271.
- Ling Qiuxian, Zhang Xianqiu. Preliminary Study of the Red Beds in the Heyuan Basin of Guangdong[J]. Journal of Stratigraphy, 2002, 26(4): 264-271.
- [22] 吕君昌, 刘艺, 黄志青, 等.广东河源盆地晚白垩世霸王龙类牙齿化石的发现及其意义[J].地质通报, 2009, 28(6): 701-704.
- Lü Junchang, Liu Yi, Huang Zhiqing, et al. New Discovery of Late Cretaceous Tyrannosaurid Tooth from the Heyuan Basin, Guangdong Province, Southern China [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(6): 701-704.
- [23] 凌秋贤, 张显球, 林建南.南雄盆地白垩纪—古近纪地层研究进展[J].地层学杂志, 2005, 29(增刊 1): 596-601.
- Ling Qiuxian, Zhang Xianqiu, Lin Jiannan. New Advance in the Study of the Cretaceous and Paleogene Strata of the Nanxiong Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 2005, 29(Sup.1): 596-601.
- [24] 张显球, 凌秋贤, 林建南.广东河源盆地红层研究现状[J].地层学杂志, 2005, 29(增刊 1): 602-607.
- Zhang Xianqiu, Ling Qiuxian, Lin Jiannan. Research Status Quo About the Red Beds of the Heyuan Basin, Guangdong [J]. Journal of Stratigraphy, 2005, 29(Sup.1): 602-607.
- [25] 方晓思, 张志军, 张显球, 等.广东河源盆地蛋化石[J].地质通报, 2005, 24(7): 682-686.
- Fang Xiaosi, Zhang Zhijun, Zhang Xianqiu, et al. Fossil Eggs from the Heyuan Basin, East-Central Guangdong, China[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(7): 682-686.
- [26] 邓勇, 罗鑫, 邱瑞山.广东白垩纪—新近纪断陷盆地形成演化及其含矿性[J].资源调查与环境, 2007(3): 165-170.
- Deng Yong, Luo Xin, Qiu Ruishan. Evolution and Ore-Bearing Property of Cretaceous-Neogene Fault Basin in Guangdong[J]. Resource Survey and Environment, 2007(3): 165-170.
- [27] Tannock L, 王亚, 李景富, 等.广东河源断裂带地热成因及与构造关系初探[J].地质力学学报, 2019, 25(3): 400-411.
- Tannock L, Wang Ya, Li Jingfu, et al. A Preliminary Study on the Mechanics and Tectonic Relationship to

- the Geothermal Field of the Heyuan Fault Zone in Guangdong Province[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(3): 400 - 411.
- [28] Wang Q M, Li H L, Li T D, et al. Two-Episode Tectono-Thermal Events of the Heyuan Fault in Late Cretaceous and Oligocene and Their Tectonic Implications, Southernmost South China Block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(2): 447 - 459.
- [29] Zhang X Q, Lu J C, Bai G G, et al. A Preliminary Study on the Red Beds in Northern Heyuan Basin, Guangdong Province, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(5): 598 - 604.
- [30] 孙正林. 三维激光扫描点云数据滤波方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
Sun Zhenglin. Research on Filtering Method of 3D Laser Scanning Point Cloud Data [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [31] 孙金虎. 点云模型分割与融合关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
Sun Jinhu. Research on Key Technologies of Point Cloud Model Segmentation and Fusion[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [32] 盛仲飙, 韩慧妍. 散乱点云分割技术研究 with 实现[J]. *计算技术与自动化*, 2016, 35(1): 104 - 106.
Sheng Zhongbiao, Han Huiyan. Research and Implementation of Scattered Point Cloud Segmentation Technology[J]. *Computing Technology and Automation*, 2016, 35(1): 104 - 106.
- [33] 付永健, 李宗春, 何华. 点云内在属性因子驱动的自适应滚球算法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(3): 353 - 361.
Fu Yongjian, Li Zongchun, He Hua. A New Self-Adaptive Ball Pivoting Algorithm Driven by an Intrinsic Property Factor of Point Cloud[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 353 - 361.
- [34] 胡丝兰, 周明全, 税午阳, 等. 一种改进 Ball Pivoting 的散乱点云数据重建算法[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(10): 2446 - 2452.
Hu Silan, Zhou Mingquan, Shui Wuyang, et al. Improved Pivoting Ball Algorithm for Nonuniform Point Cloud Data[J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(10): 2446 - 2452.
- [35] Bernardini F, Mittleman J, Rushmeier H, et al. The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction [J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 1999, 5(4): 349 - 359.
- [36] 张顺康, 陈月明, 侯健, 等. 岩石孔隙中微观流动规律的 CT 层析图像三维可视化研究[J]. *石油天然气学报*, 2006, 28(4): 102 - 106.
Zhang Shunkang, Chen Yueming, Hou Jian, et al. Three Dimensional Visualization for CT Tomographic Image of Microscopic Flow Rock Pore[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2006, 28(4): 102 - 106.
- [37] 晏海平. 散乱点云边界提取及孔洞修复算法研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
Yan Haiping. Research of Boundary Extraction and Hole Repairing Algorithm Based on Scattered Point Cloud[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.
- [38] 王春香, 孟宏, 张勇. 散乱点云的孔洞识别和边界提取算法研究[J]. *机械设计与制造*, 2019(3): 74 - 76, 81.
Wang Chunxiang, Meng Hong, Zhang Yong. Research on the Hole Detection and Hole Boundary Extraction Algorithm for the Scattered Point Cloud[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2019(3): 74 - 76, 81.
- [39] 赵资奎. 河南内乡新的恐龙蛋类型和恐龙脚印化石的发现及其意义[J]. *古脊椎动物与古人类*, 1979(4): 304 - 309, 353 - 354.
Zhao Zikui. Discovery of the Dinosaurian Eggs and Footprint from Neixiang County, Henan Province [J]. *Vertebrata Palasiatica*, 1979(4): 304 - 309, 353 - 354.
- [40] 郑鸾, 王邦骐, 刘念. 一些恐龙蛋与现生鸟类蛋的对比研究[C]//第十三届中国古脊椎动物学学术年会论文集. 北京: 海洋出版社, 2012: 69 - 82.
Zheng Luan, Wang Bangqi, Liu Nian. Comparative Study on Some Dinosaur Eggs and Modern Bird Eggs [C]// Proceedings of the Thirteenth Annual Meeting of the Chinese Society of Vertebrate Paleontology. Beijing: China Ocean Press, 2012: 69 - 82.
- [41] 邹松林, 王强, 汪筱林. 江西萍乡地区晚白垩世副蜂窝蛋类一新蛋种[J]. *古脊椎动物学报*, 2013, 51(2): 102 - 106.
Zou Songlin, Wang Qiang, Wang Xiaolin. A New Oospecies of Parafaveololithids from the Pingxiang Basin, Jiangxi Province of China[J]. *Vertebrata Palasiatica*, 2013, 51(2): 102 - 106.
- [42] Wang Q, Wang X L, Zhao Z K, et al. A New Oofamily of Dinosaur Egg from the Upper Cretaceous of Tiantai Basin, Zhejiang Province, and Its Mechanism of Eggshell Formation[J]. *Chinese*

Science Bulletin, 2012, 57(Z2): 3740 - 3747.

[43] Wang X L, Wang Q, Jiang S X, et al. Dinosaur Egg Faunas of the Upper Cretaceous Terrestrial Red Beds of China and Its Stratigraphical Significance[J]. Journal of Stratigraphy, 2012, 36(2):400 - 416.

[44] 贾松海, 徐莉, 常华丽, 等. 南阳盆地西峡赵营村上白垩统高沟组恐龙蛋化石埋藏特征及古环境意义[J]. 地球学报, 2020, 41(3): 431 - 442.

Jia Songhai, Xu Li, Chang Huali, et al. The Dinosaur Egg Embedding Characteristics and Palaeoenvironmental Significance for the Upper Cretaceous Gaogou Formation in Zhaoying Village, Xixia County, Nanyang Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(3): 431 - 442.

[45] 王强, 汪筱林. 山东莱阳恐龙蛋研究新进展[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1):38 - 45.

Wang Qiang, Wang Xiaolin. New Progress on the Study of Dinosaur Eggs in Laiyang, Shandong [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1):38 - 45.

[46] 黎敬, 时国, 楼法生, 等. 江西省赣州市章贡区晚白垩世莲荷组恐龙蛋化石显微结构及古环境意义[J]. 现代地质, 2025, 39(2): 350 - 360.

Li Jing, Shi Guo, Lou Fasheng, et al. Microstructure and Palaeoenvironmental Significance of Dinosaur Egg Fossils from the Late Cretaceous Lianhe Formation in Zhanggong District, Ganzhou City, Jiangxi Province [J]. Geoscience, 2025, 39(2): 350 - 360.