

# 基于多源数据融合的遗址古地层重建与应用研究

沈姜威<sup>1,2</sup>, 杨 林<sup>1,3</sup>, 郑方子豪<sup>1</sup>, 吴卫红<sup>4</sup>

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

(2. 苏州工业园区测绘地理信息有限公司, 江苏 苏州 215027)

(3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023)

(4. 安徽大学历史系, 安徽 合肥 230039)

[摘要] 面向考古遗址三维重建, 以安徽凌家滩遗址为例, 提出了多源数据融合方法和基于融合结果的古地层三维建模方法。根据无人机航拍数据、大范围钻探数据、基础地理数据、田野考古图及文本资料, 着重研究解决这些多源异构时空数据在空间基准、时空尺度和数据结构等方面的差异问题, 进而构建了该遗址古地表三维模型。并在此模型基础上, 初步探讨了面向考古遗址时空分析的地理空间统计、空间关系和最优路径分析等应用研究方法。实践证明, 本文提出的方法为考古研究提供了直观科学的可视化平台, 有助于进一步分析大范围遗址中各类遗迹的时空关系, 为推演古人类的生存环境和历史发展规律提供依据。本研究深化了地理学与考古学的交叉应用, 为数字考古提供新的思路, 也拓展了历史地理研究新方向。

[关键词] 多源数据, 古地层重建, 数据融合, 应用分析, 凌家滩遗址

[中图分类号] P234.1; K854.3 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2020)02-0049-07

## Reconstruction and Application of Paleo-Stratigraphy of Archaeological Site Based on Multi-Source Data Fusion

Shen Jiangwei<sup>1,2</sup>, Yang Lin<sup>1,3</sup>, Zheng Fangzihao<sup>1</sup>, Wu Weihong<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Suzhou Industrial Park Surveying, Mapping and Geoinformation Company, Suzhou 215027, China)

(3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

(4. Department of History, Anhui University, Hefei 230039, China)

**Abstract:** A multi-source data fusion method and a 3D modeling method for paleostratigraphy (by focusing on solving the difference of the multi-source data in the space criterion, scale, data structure and so on.) based on fusion results were proposed in this paper. By taking Lingjiatan Site as a study case, the 3D model of the ancient surface was constructed based on UAV aerial data, extensive drilling data, basic geographic data, field archaeological maps, text data and so on. What's more, the application research method of spatial statistics, spatial relationship and optimal path analysis based on the constructed model were also discussed preliminarily in the paper, and the experimental results were in line with the expectations of archaeologists. It had proved that the method proposed in this paper provided an intuitive and scientific visualization platform for archaeological research, and was helpful for further analysis of spatio-temporal relationship of various relics in large-scale sites. Besides, it could help archaeologists understand the living environment, customs and productivity development level of the ancients, and provide a basis for the study of historical development and environmental change. More importantly, this study deepens the cross-application of geography and archaeology, not only solves the practical problems in digital archaeology and promotes the process of archaeological digitization and standardization, but also brings new vitality into the geography subject, and expands the new direction of historical and geographical research.

**Key words:** multi-source data, paleo-stratigraphic reconstruction, data fusion, application analysis, Lingjiatan Site

收稿日期: 2019-05-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471102、41631175、41101377)、国家社会科学基金重大项目(15ZDB054)、国家社会科学基金项目(15CKG014)、江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX17\_0338).

通讯作者: 杨 林, 博士, 教授, 研究方向: 测绘与 GIS 应用. E-mail: yangcius@126.com

恢复历史地理场景是地理信息学关注的重要内容,古地层是历史地理场景的重要组成部分,是进行各项考古研究的地理平台。可视化的三维原始地表模型,是其他地物模型定位的载体,是空间分析和交互操作的基础<sup>[1]</sup>,能有效辅助考古学家完成后续的定量决策分析<sup>[2-3]</sup>。考古地层学最初来源于地质地层学,考古地层三维建模方法主要借鉴三维地质建模技术。

目前国内外相关研究包括国外研究者开发的 STRAT 工具实现了考古地层的交互式可视化功能;Day 等人通过整合层位关系图(Harris Matrix)和 STRAT 工具来获取考古地层二维和三维视图的方法<sup>[4]</sup>;阚媛珂利用剖面采样数据插值拟合出考古地层面,以三棱柱为基本体元构建了成都金沙江遗址考古地层三维模型<sup>[5]</sup>;林冰仙等以探方为基本建模单元,利用手绘图件构建了湖南澧县八十垱东区遗址的完整三维模型<sup>[6]</sup>;张立莹基于探孔数据选用体素模型构模方式建立了秦始皇帝陵地区的考古地层模型等<sup>[7]</sup>。

上述方法虽能有效地实现考古地层的三维重建,但生成的遗址地层模型范围都比较小,停留在一个或多个探方的建模尺度上;数据来源比较单一,主要包括手绘平剖面图和小范围探孔;地层模型主要是深度模型,并未考量建模地层实际海拔高度,不利于构建真实的遗址三维场景。随着各项新技术(激光雷达<sup>[8]</sup>、倾斜摄影测量<sup>[9]</sup>、探地雷达<sup>[10]</sup>、GPS<sup>[11]</sup>、声纳等)的引入,考古数据的采集与获取更加便捷、高效和全面,田野考古数据源更加多样和复杂<sup>[12-13]</sup>。因此,本文试图通过无人机航拍数据和大范围的钻探点等数据重建遗址原始地层三维模型,研究多源数据的处理和融合方法,具体体现为多源异构数据在数据格式、数据结构、空间基准、时空尺度及数据内容等方面的融合统一,为还原古人生活场景,推断古地貌、古水文、古气候等环境要素的演变提供科学的平台<sup>[14]</sup>,并在此基础上展开初步的应用研究。

## 1 数据准备和预处理

数据的准备和预处理是后续建模的基础,是地层模型的精度保证,只有确保了原始数据的准确性、完整性,才能构建出科学、精确、可靠的原始地层三维模型,才能正确地辅助后续的考古研究决策。

为了重建大范围遗址的原始地表三维模型,以无人机航拍影像作为现势数据获取的主要来源,融合大面积的钻探数据,并以地形图、遗迹手绘平剖面图和发掘报告等资料作为辅助数据完善模型的构建。无人机倾斜摄影测量是当前大面积空间数据采集的主要方法,也是研究热点,可以高效快速、精细准确地获取遗址区域高分辨率正射影像和数字高程模型(DEM),为原始地层构建提供现势地表的海拔高度。钻探数据主要由探铲获取,考古人员根据遗址分布范围确定布孔规则。探孔提供的信息主要包括每个探孔的地理位置、地层分层情况、每一层的土质土色及距离地表的深度。

无人机航拍数据的预处理主要分为两步,一是使用主流无人机后处理软件 Pix4D mapper 从航拍图片中利用摄影测量和多目重建的原理快速获取点云数据,通过给予的控制点生成真实坐标及数字高程模型<sup>[15]</sup>;二是对点云数据进行采样,提高后续融合建模效率。预处理后的无人机航拍数据从航拍图片转变成了离散点云。钻探数据则需要进行数据挖掘,根据编号规则和布孔规律,提取出每一个探孔点的平面坐标( $x, y$ )及其距离地表的深度值 $z$ ,对于极少部分缺失深度信息或编号记录有误的噪音点则直接删除,通过可信的相邻点插值获取。

## 2 古地层三维重建方法

### 2.1 面向古地层重建的多源数据融合方法

无人机航拍数据和考古钻探数据经过预处理之后具有了相同的数据格式和大致相当的数据规模,但是它们所处坐标系不同,并不能直接用于后续建模。基础地理数据和调查数据可以作为桥梁将这两类数据连接起来,以实现各类数据的坐标统一,从而完成包括遗址基础地理数据、无人机航拍数据和考古钻探数据在内的多源数据的初步融合。

遗址基础地理数据主要包括各比例尺航空影像图和遗址地形图。田野调查工作中通常会选取遗址地形图中某一控制点作为基准点,其坐标主要由全站仪测取,精度较高。因此以该控制点所在坐标系(遗址地形图所属坐标系)为基准,航拍数据坐标系和钻孔数据坐标系均向其转换,以实现坐标基准的统一。在钻探数据的原始独立坐标系中,钻探点的平面坐标有其自定义规则(通常是与地形图同轴向,基于相同采样间隔的均匀钻探),通过计算钻探基准点与遗址地形图基准点的平移量,对所有钻孔点进行相同的平移

操作,即可将钻探数据坐标系转变成基准坐标系. 无人机航拍数据坐标转换的关键在于对航摄影像进行像控测量和空中三角测量后,通过与若干地面控制点的联测实现坐标配准.

在遗址地形图中基准点的控制下,航拍数据坐标系、钻探数据坐标系和遗址地形图坐标系得到了统一,多源数据实现了初步融合,为后续的建模提供基础数据.

## 2.2 古地层三维重建方法

确定空间构模方法是建立古地层三维模型的第一步. 本文选取曲面建模方式<sup>[16]</sup>,一是由于遗址范围广,其他构模方法建立的模型过于复杂,存储空间太大<sup>[17]</sup>;二是进行后续分析时目前仅仅需要遗址所在地层的三维界面模型,并不关注与其他地层的关系,曲面建模即可满足要求.

基于面的空间构模实际上是对样点进行内插来建立地层面的数字高程模型. 因为地层是既有随机性又有结构性的“区域化变量”,而 Kriging 法正是采用这一概念<sup>[18]</sup>,所以选择 Kriging 插值方法来构建地层面.

确定好构模方式和插值方法后,再进行古地层的三维重建. 使用 Kriging 插值方法分别对无人机航测数据和钻探数据进行插值计算,得到无人机航测数据插值曲面(即现势地表栅格曲面)和钻探数据插值曲面(即钻孔深度栅格曲面). 由于航拍范围和钻探范围可能并不完全一致,因此要对两个曲面进行掩膜提取,使其大小一致. 最后进行栅格计算,保持  $x$ 、 $y$  值不变,只对  $z$  值进行差运算,用现势地表栅格曲面的高程值减去钻孔数据插值所得曲面的深度值(每一个钻孔点钻至遗迹所在地层时距离地表的深度),即可得到原始地层模型的高程值,从而获得具有真实海拔高度的原始地层栅格曲面. 得到地层分界面处的高程栅格数据集后,创建 TIN<sup>[19]</sup>. 最后在 ArcScene 中实现地层模型的三维可视化并在此基础上进行后续的空间分析. 考古发掘数据与地层的整合是为了细化地层局部建模层次和精度,方法过程与钻探数据类似. 具体技术路线见图 1.

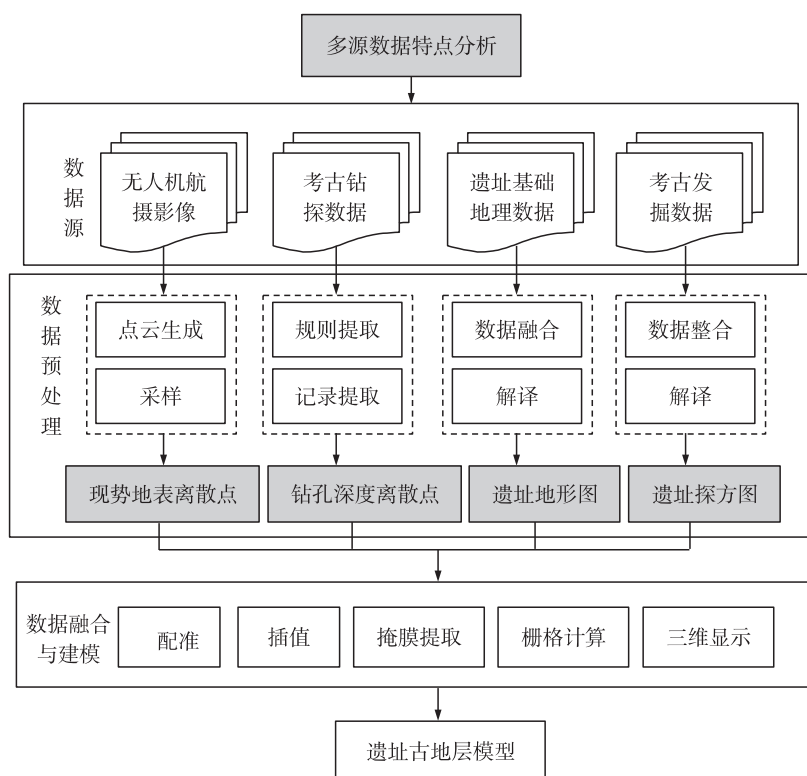


图 1 多源数据融合与建模方法

Fig. 1 Multi-source data fusion and modelling methods

## 2.3 实验结果

本文以凌家滩遗址为实验区,该遗址距今已有约 6 000 年历史,是长江下游巢湖流域发现的面积最大(约 160 万  $\text{m}^2$ )、保存最完整的新石器时代聚落遗址. 凌家滩遗址所表现出的文化证明它具有深厚的城市内涵,是中国第一个以地势分层次建筑的聚落遗址<sup>[20]</sup>.

凌家滩遗址钻探数据是以该遗址的某一基准点为原点,东西方向为  $x$  轴,南北方向为  $y$  轴布设起来

的. 共分为 SE、SW、NE、NW 4 个区域. 遗址本体按 5 m×5 m 加中孔钻探,并且记录了所有钻孔点的总钻探深度及钻探到每一层不同土质时距离地表的深度,完整的地层分 8 层. 共记录数据 10 501 个.

根据钻孔规则和记录规则,对钻探数据进行处理,提取出每一个钻孔点的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  值,其中  $z$  表示钻孔点钻至生土层时距离地表的深度. 统一单位与格式后,进行 Kriging 插值,拟合得到钻孔深度栅格曲面. 此外,基于无人机航拍技术获取了凌家滩遗址的航拍影像,使用 Pix4D mapper 软件生成遗址点云. 采样后同样进行 Kriging 插值,得到现势地表栅格曲面. 叠加显示现势地表插值曲面和钻孔深度插值曲面,可以发现由于航拍范围更广,现势地表数据比钻探数据覆盖范围更大,因此需要做掩膜提取使两者范围一致. 最后使用栅格计算器,保持  $x$ 、 $y$  值不变,只对  $z$  值进行差运算,用凌家滩现势地表的高程值减去钻孔数据插值所得曲面的深度值,即可得到原始地层模型的高程值,从而获得原始地表的栅格曲面(如图 2). 图 3 对比展示了凌家滩现势地表模型和原始地表三维模型.

需要说明的是,本文选取的插值方法在一定程度上能够内插生成可信的高程点,提高建模精度,但是在大规模的遗址地层构建中,钻探数据偏少这一事实普遍存在. 改进的方法,除了在钻探时统筹规划,排除困难,钻取更多的特征点,同时需要因地制宜改进建模方法,提高其普适性和建模精度.

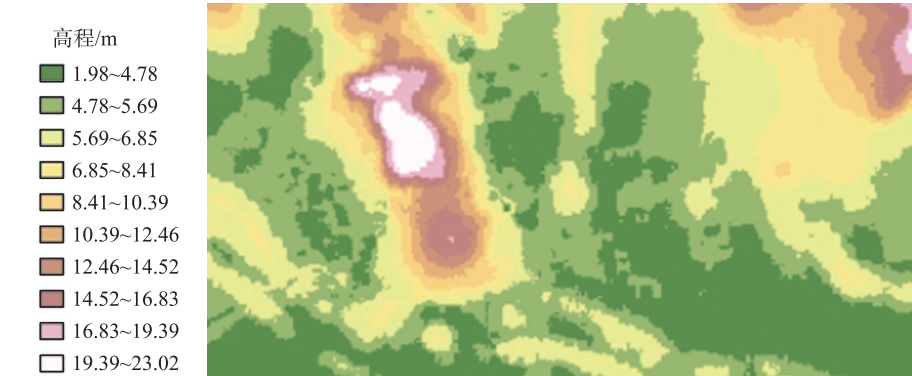


图 2 凌家滩原始地表栅格曲面  
Fig. 2 Raster surface of Lingjitan paleo stratigraphy

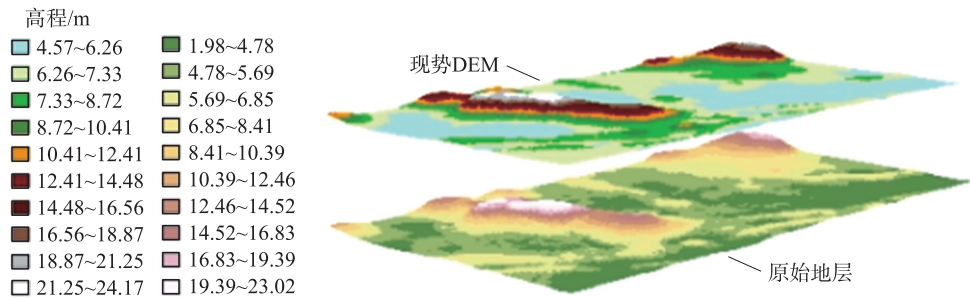


图 3 现势地表三维模型和原始地表三维模型对比图  
Fig. 3 Comparison of present DEM and paleo stratigraphic model

3 基于古地层的考古应用分析

凌家滩遗址北枕太湖山,南邻裕溪河,东、西、南三面环水<sup>[21]</sup>,地理位置优越,主要功能区由生活区(大型红烧土区)、祭祀区、环壕三部分组成. 各类功能区数据以及水系在经过数字化、配准和三维处理后可以叠加显示到古地层上(如图 1 所示,考古发掘数据与地层三维模型的融合过程),从而还原出古凌家滩人的生活环境,在此基础上能够更加直观地分析古凌家滩各功能区之间的空间关系及它的分布范围、形态(如图 4,其中 J1~J6 分别代表 6 个主要居住区). 由于涉及到其他类型的数据源,古地层和各功能区之间的详细融合方法另撰文论述.

基于以上构建的遗址三维地理场景图,可以对各类遗迹进行初步的空间分析. 本文拟从壕沟规模统计、重要遗迹空间关系、最优路径预测等几个方面展开初步应用分析.



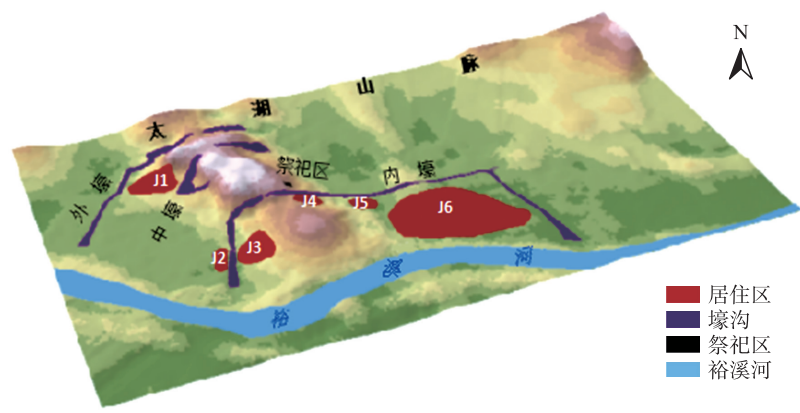


图 4 凌家滩遗址三维场景图

Fig. 4 3D scene of Lingjiatan Site

3.1 壕沟规模统计

在考古学界,凌家滩遗址被认为具备了最初的城市雏形,素有“中华远古文明曙光”之称<sup>[22]</sup>. 其中最重要的一个指标来自于遗址由南至北类似壕沟遗迹三处,暂且命名为内壕、中壕和外壕. 以往的考古研究由于缺乏直观且准确的分析平台,只能根据发掘钻探数据大致推断壕沟规模,精度较低,而基于遗址三维场景模型,则可以对壕沟规模进行定量评价. 结合钻探与发掘资料及已有考古成果,可以确定壕沟平均宽约 30 m,局部深浅不同,岗地最深可达 10 m,两侧圩区深约 2.5 m<sup>[23]</sup>. 因此,对土方量的计算主要分为两个部分:一是两侧圩区,取其高为 2.5 m;二是中间岗地,取其平均高度为 6.25 m. 壕沟长度可以在古地表三维模型上量测获取. 用微分的思想将壕沟看成数个长方体连接而成,计算每一个长方体的体积,累加后即可大致估算得到壕沟的规模. 表 1 是对壕沟的基本地学统计,可以发现挖壕土方量极大,如果当时没有掌握神权、军权的聚落首领及巫师在背后把控壕沟的发掘<sup>[23]</sup>,如此大规模的防御设施几乎不可能有条不紊地修建完成. 从侧面也体现了凌家滩的繁盛及对防御设施、对领地的重视,说明凌家滩先民的社会财富十分可观,并且可能经常受到外族或是野兽的侵扰. 基于遗址地层三维模型,考古学家可以更加科学高效地统计遗址内重要遗迹规模,为后续的决策分析提供可靠的数据支撑.

表 1 壕沟规模统计表

Table 1 Trench scale statistics

遗迹名称	周长/m	表面积/m <sup>2</sup>	体积(土方量)/m <sup>3</sup>
内壕	4 320.001	45 262.486	203 250
中壕	1 167.336	17 898.384	63 900
外壕	2 221.771	29 173.789	126 600

3.2 重要遗迹空间关系分析

基于遗址三维场景图,可以看到凌家滩遗址最重要的遗迹祭祀区位于遗址的高处,海拔在 12~16 m 之间,南可俯视生活区和裕溪河,视野开阔. 生活区主要集中在裕溪河北岸,内壕南侧,呈东西条带状分布. 此区域地势平坦,海拔在 4~5 m 之间,与祭祀区高差约 10 m. 环壕呈不规则形,其中内壕规模最大,中段穿过高岗,两端对接裕溪河,将生活区包围在内,同时也分割开了生活区和祭祀区. 外壕规模较小,将祭祀区保护在内,两壕沟中间居住遗迹比较零散且规模不大. 根据各功能区之间的空间关系,可以推断凌家滩人首先在裕溪河北岸定居,随着社会生产力的发展,聚落规模不断加大、人口增多,为了保护财富并且抵御外族和野兽袭扰,凌家滩人首先修建了内壕. 之后聚落继续向北扩张,内壕反而限制了聚落的发展,因此凌家滩人开始在内壕北侧建立居住区,并且在内壕外专门修建了祭祀区来祭拜先祖,最后为了保护祭祀区和内壕北侧居民的财产又修建了外壕加强防御,两条壕沟将整个凌家滩保护在内,佐证了考古学家“双重壕沟”的推论<sup>[23]</sup>. 此外,壕沟的修建有规律可循,都穿过了岗地两高坡间的低洼处,并在其中设立了出入口(由考古发掘资料确定),因地制宜,符合实际. 表 2 是壕沟出入口与南北两侧分别距壕沟 10 m 的岗地高程对比,可以明显地看到壕沟出入口的高程最低,南北两侧地势较高. 遗址地层三维模型的建立不仅使得考古学家可以更为直观准确地分析遗迹内重要遗存的空间关系,还能在此基础上辅助学者推断遗址

的发展演变.

表 2 壕沟出入口与南北两侧岗地高程对比表

Table 2 Elevation comparison between the north-south downland and the entrance of the trench

遗迹名称	出入口高程/m	南侧 10 m 处高程/m	北侧 10 m 处高程/m
内壕	13.15	14.06	14.46
中壕	18.93	19.41	19.58
外壕	12.97	13.30	13.42

3.3 最优路径分析

路径分析是推演古人行为模式的重要方法之一. 融合古地表及遗迹(各功能区)数据,为最优路径解算提供了可能. 本文选取几个重要的起止点进行分析,包括核心生活区 J6 中心点到内壕沟的出入口、裕溪河及内壕沟出入口到祭祀区、外壕沟出入口. 使用常规的成本计算公式,基于坡度和地形起伏因子,最后计算得到各功能区之间的理论最优路径<sup>[24]</sup>(如图 5). 该研究一方面可以模拟古人日常生活的主要活动路线,推演他们的行为模式;另一方面也为遗址考古调查、发掘提供线索和判断的依据,验证考古学家的猜想与推测.

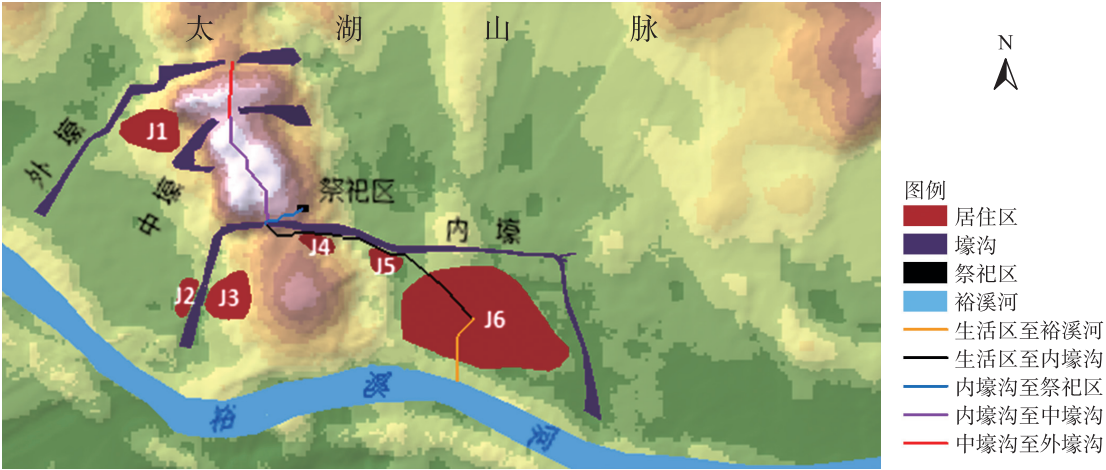


图 5 凌家滩功能区最优路径图

Fig. 5 Optimal path map of Lingjiatan functional area

以上融合遗址古地层三维模型和考古发掘数据进行的基础空间分析,由于数据有限并且缺乏与考古研究人员的深入沟通,应用研究还处于比较浅显的层次. 但是可以预见随着地理信息技术与考古学的不断碰撞交融,遗址场景三维模型的应用会更加广泛深入.

4 结论

本文提出的建模方法,融合了无人机航拍数据、大范围钻探数据、遗址基础地理数据和发掘数据等多源数据,最终构建得到了古遗址三维场景模型. 并在此基础上进行了初步的空间统计、空间关系和最优路径分析,满足考古人员对三维模拟效果和空间分析复杂度的要求,验证了研究成果的有效性与实用性. 有助于人类从更高的视角直观地了解古人生活的自然场景和古人行为模式的发展过程,对深化空间信息技术、地理学与考古学间的交叉应用研究具有重要意义.

[ 参考文献 ]

[ 1 ] 杨林,裴安平. 田野考古地层空间数据模型构建[J]. 应用基础与工程科学学报,2011,19(1):85-94.  
[ 2 ] KONNIE L,BRANDON R. Practical application of GIS for archaeologists:a predictive modeling toolkit[M]. London;New York:Taylor & Francis,2005:144-159.  
[ 3 ] FORD M,GRIFFITHS R,WATSON L. The sandford inventory of earth buildings constructed using a GIS[J]. Building and environment,2005,40(7):964-972.

- [4] DAY W, COSMAS J, RYAN N, et al. Linking 2D harris matrix with 3D stratigraphic visualizations: an integrated approach to archaeological visualizations[EB/OL]. [2019-05-12]. <https://publikationen.uni-tuebingen.de/xmlui/handle/10900/60970>.
- [5] 阚媛珂. 考古地层的三维可视化及应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- [6] 林冰仙, 周良辰, 盛业华, 等. 基于手绘图件的考古遗址三维建模方法[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(3): 349-357.
- [7] 张立莹. 考古地层的三维建模方法在秦始皇帝陵考古勘探中应用尝试[J]. 文物保护与考古科学, 2017, 29(2): 63-66.
- [8] ARIF R, ESSA K. Evolving techniques of documentation of a world heritage site in Lahore[J]. The international archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2017, 42(2): 33-40.
- [9] BENJAMIN D, DAVID S, JOSEPH R. Multiview 3D reconstruction of the archaeological site at Weymouth from image series[J]. Computers & graphics, 2011, 35(2): 375-382.
- [10] JEFFREY L, CHRISTOPHER C, NICHOLAS P, et al. Employing airborne lidar and archaeological testing to determine the role of small depressions in water management at the ancient Maya site of Yaxnohcah, Campeche, Mexico[J]. Journal of archaeological science: reports, 2017, 13: 291-302.
- [11] JAMES M, NORMAN S, ANGELINA D, et al. A geoinformatic approach to the collection of archaeological survey data[J]. Cartography and geographic information science, 2013, 40(1): 3-17.
- [12] ROSA L, ROSA C, FABRIZIO T, et al. On the LiDAR contribution for the archaeological and geomorphological study of a deserted medieval village in Southern Italy[J]. Journal of geophysics and engineering, 2010, 7(2): 155-163.
- [13] DEODATO T, VANESSA B, LEE J, et al. Contextualising archaeological models with geological, airborne and terrestrial LiDAR data: the ice age landscape in farndon fields, Nottinghamshire, UK[J]. Journal of archaeological science, 2017, 81: 31-48.
- [14] ROVERATO M, CAPRA L, SULPIZIO R, et al. Stratigraphic reconstruction of two debris avalanche deposits at Colima Volcano(Mexico): insights into pre-failure conditions and climate influence[J]. Journal of volcanology and geothermal research, 2011, 207(1): 33-46.
- [15] 赵明. Pix4D mapper 软件在无人机航空摄影与工程地质调查中的数据处理[J]. 水电站设计, 2017, 33(2): 47-48, 62.
- [16] 吴立新, 史文中. 地理信息系统原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [17] 党海燕. 考古探方三维数据组织与可视化研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2018.
- [18] 张渭军, 王文科. 基于钻孔数据的地层三维建模与可视化研究[J]. 大地构造与成矿学, 2006(1): 108-113.
- [19] 刘林贵, 刘高扬. 基于 ArcGIS 的三维地层建模方法[J]. 山西建筑, 2015, 41(12): 55-56.
- [20] 胡杨. 面向田野考古发掘场景 3D 重建的点云数据处理方法[D]. 南京: 南京师范大学, 2016.
- [21] 王心源, 吴立, 吴学泽, 等. 巢湖凌家滩遗址古人类活动的地理环境特征[J]. 地理研究, 2009, 28(5): 1208-1216.
- [22] 邵英, 张敬国. 凌家滩上的远古文明[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2018, 127(4): 80-82.
- [23] 刘松林. 凌家滩遗址防御体系及其社会意义之蠡测[J]. 巢湖学院学报, 2014, 16(5): 5-8.
- [24] 高伟, 张剑波. 基于栅格数据模型的最优路径分析算法及实现[J]. 黑龙江工程学院学报, 2004, 18(1): 22-24.

[ 责任编辑: 丁 蓉 ]