

考古领域空间分析技术的 AI 应用与展望

摘要：

随着空间分析技术的普及、AI 技术的发展和学科交叉的深入，人工智能技术和空间分析技术开始结合，并逐步应用在了考古领域之中。不断有国内外学者尝试将人工智能和算法应用于考古遗址的探测、发掘、分析和保护之中，并积累了一定数量的成果。基于近年来的工作，本文从空间分析技术在考古学中的几个应用领域讲起，按照不同的研究主题论述了空间分析技术和人工智能二者在国内外考古领域的应用现状。最后，通过总结国内外考古学者的研究，进一步探讨了人工智能在考古领域空间分析技术中的问题和应用前景展望，可为感兴趣的考古工作者提供借鉴与参考。

一、研究现状

随着现代计算机技术的发展，GIS 处理和管理复杂数据，支持空间分析的进步功能与考古学的新时代需求不相而谋，成为考古学分析越来越重要的手段。从上个世纪 90 年代中期到现在，GIS 被广泛地应用在世界各地的考古实践中。在实际应用中，GIS 运用为考古学研究提供了新的视角和思维方式。即使到了今天，GIS 考古也没有停下进步的步伐，它还在不断地革新，如 3D-GIS 电脑模拟的可视化技术引领的潮流，将在不同程度影响对考古学理论与实践的反思以及对考古学发展前景的畅想。近年来，人工智能飞速发展，大语言模型方兴未艾，在不同程度上改变了人类的生活方式。许多考古工作者积极运用人工智能、机器学习等新兴技术手段，丰富并拓展了考古学的研究方法，并取得了不俗的成就。通过对于国内外相关论文的检索，研究者在 GIS 考古中的应用主要体现在以下几个方面。

1.1 数据管理

数据处理是 GIS 考古中最为基础的功能，尤其是对于那些采集过电子数据的考古工地来说，把各类复杂数据输入一个成熟的储存管理系统是非常必要的，也是非常利于后期研究的。GIS 在大数据储存、关系数据库建立、属性数据输入、管理和处理、数据显示与地图编制、数据查询等方面具有巨大优势，这些功能的应用不仅对考古数据的存储、查询、分析和利用带来稳定性、便捷性和精确性，也能在文化遗产管理方面起到指导作用。

当前学界对于 GIS 的数据管理功能仅存在于表象，即将数据存储在里面以备查阅，或构建解释模型、促进文化传播等，实际上 GIS 不仅可以作为查询管理通道来使用-提供文物的二维、三维的完整信息描述、三维重建的数据、历史信息

和器物特征,还可以借用机器学习和人工智能寻找数据之间的联系,发现那些学者们过去不被重视的海量考古数据,并对之进行有目的、有项目性的管理、更新和再利用,从而促生出新的认识。

例如在印度塔尔沙漠下曾经有一条传说中的娑罗室伐底河,2011 年考古学家用 GIS 建立了这片流域超过一千个遗址的数据库,在此基础上进行的定量统计,对于认识古遗址的分布情况、古遗址与古河道的关系、哈拉帕文明的更多信息以及后期的考古调查有着重要指导作用^[1]。2013 年在智利复活节岛的案例表明,研究者基于放射性碳元素数据建立的 GIS 考古数据库分析结果可以为该区域前欧洲时期聚落发展史和土地利用历史的研究提供坚实的技术支撑^[2] 见下方。这些研究虽然并没有使用人工智能技术,但是因其具有建构良好的数据库、语料库和海量的数据,因而有着进行人工智能分析的潜质。

1.2 空间分析技术的应用

GIS 的空间分析功能主要有矢量数据分析(缓冲区建立、图层叠置、测量距离、模式分析、要素操作)、栅格数据分析(数据分析环境、局域运算、领域运算、分区运算、自然数据测量运算)、地形制图与分析(地形制图、坡度和坡向)、可视域与流域分析、空间分析建模等。这些功能是 GIS 应用于考古学研究的主流方向,在环境考古、景观考古、聚落考古、遗址模拟与预测、区域性考古调查等方面发挥了巨大的作用,展示出了 GIS 考古的技术优势。

2005 年,考古学者运用 GIS 与航拍结合,对阿拉斯加高纬度地区冰雪环境下的考古遗址进行全景式调查,在对兰格尔·圣埃利亚斯国家公园和保护区的调查中,MAPIS 软件对于定位和记录因冰雪融化而暴露的脆弱文物起到重要作用^[3],这可能是最早将航拍图像与图像识别技术结合起来应用的案例。此外研究者还借助算法构建模型,应用在了墨西哥马尔帕索峡谷古典时期晚期战争和环境因素对聚落范式的重要影响的研究中^[4],它通过计算机技术对各种模式的可能性进行了评估。

2007 年,在北爱尔兰海岸线沉船遗址的调查中,GIS 被赋予了在水下考古领域提供空间分布和空间分析技术的使命,有利于对过去航海时代各种行为的再认识^[5];在美国马里兰州,通过 GIS 进行建模,设定预测因子可以构建出遗址预测模式,对寻找和定位那些历史上的造船遗址提供了方向^[6],但是这种模型较为局限,不能广泛使用在世界各地的其他造船遗址上面;在土耳其萨迦拉索斯的考古研究中,研究者从 Ikonos-2 卫星图像中自动提取考古特征,然后将其与古代结构的视觉解释进行比较,表现出 GIS 与高精度遥感技术相结合的强烈趋势^[7]。

2008 年,在希腊克里特岛的景观考古和青铜时期交流通道的研究中,在过去的基础上形成了一套整合调查、航拍、数字高程模型分析、最佳路径分析、随机遗址抽检和预测模型等手段于一体的 GIS 考古方法,解释了古代人为何在此定居等系列问题^[8]。

2010 年在秘鲁蒂华纳科最佳路径分析下的贸易模式的研究中,研究者构建模型分析表明 Tiwanaku 和 Moquegua 之间成本最低的过境路线的区域。根据有关大篷车路线历史位置的线人数据对调查区域进行了实地调整^[9]。

2011 年,在苏格兰新石器时期聚落形态、农业定居生产活动遗址预测研究中,研究者通过基于 GIS 的据信与定居或占领活动相关的地点模型来识别对定居和占领活动有吸引力的区域,包括带室的石冢、木屋大厅和包含挖坑事件的地点^[10]。

2012 年,在俄罗斯基斯洛沃茨克地区公元 5-8 世纪的一项考古调查中,基于 GIS 技术,学者对当地农牧经济区域环境进行模拟、预测,并以其规模来估算区域内人口、牲畜数量^[11];在墨西哥瓦哈卡前哥伦布时期交通网络^[12]、中美洲奥尔梅克巨石文化的运输通道^[13]以及葡萄牙科阿峡谷地区史前物品交换路线^[14]的各项研究中,GIS 的空间模型分布、最佳路径分析、遗址模拟预测等手段持续深入应用。

2013 年在希腊北部,GIS 预测模式用于古典时期马其顿墓葬的预测。这不仅对考古研究,也对文化遗产管理保护和土地利用有着积极意义^[14]。

2014 年运用 GIS 空间分析技术的考古项目主要有美国怀俄明州温德河岭旧石器晚期聚落遗址预测^[15]、澳大利亚昆士兰史前石器制作原料地的预测^[16]、伊比利亚半岛西北部罗马时期道路的最佳路径分析^[17]、阿根廷南部地区史前遗址与环境关系的呈现以遗址预测^[18]。

2016 年研究者在加拿大巴芬岛的研究中,展示了一种具有多层类别成本分析的手段对内陆遗址和海岸线定居点不同季节条件下最佳路径的分析,对该区域内社会活动模式与资源关系研究提供了新视角^[19];在塞浦路斯古希腊和古罗马时期大墓葬的景观还原和预测中,GIS 空间分析技术再一次证明了它宏观视野下对考古学研究的优势^[20]。

2021 年,研究者在丹麦大贝尔特海峡的中石器时代遗址 Tude Hage 构建了能够在 GIS 中输出无缝形态图的考古地层模型,这是通过遥感数据库和收集海床上方和下方的海洋地理数据实现的。基于这些数据,确定了具有冰前海侵面沉积物序列代表性的关键区域。岩石标本被用于古环境分析和定年,从而重建了相对海平面变化。利用这些信息,绘制了图德斯哈格地区孔门早期、孔门晚期、二特博勒期和新石器时代的古地理海岸线图,并提出了水下考古遗址的潜在

热点^[21]在另一个案例中,研究者将 Tobler Offpath Hiking 算法应用到 GIS 中,估计了安第斯地层学中局部、非局部和区域外岩屑资源开发过程中的移动成本,并将其作为等时线或移动次数的函数,对高原环境下的人类活动和岩屑采购成本进行建模,利用 GIS 分析了南安第斯早期占领时期可以岩屑采购运输费用^[22]。

2022 年在意大利西西里市米勒纳镇境内长时间的考古发掘记录了无数的史前遗址。研究者利用多光谱遥感数据找到可以被重新编码到人类居住的地区有陶瓷元素,在 GIS 环境下进行了预测和事后分析^[23]。

2023 年葡萄牙上米尼奥地区的一项案例研究就是一个很好的例子。研究人员利用一种名为数据扩增的技术,开发了一个人工智能模型,通过创建新的类似训练示例来扩展数据集,该模型是在有注释的坟丘上训练出来的。该人工智能系统可以为潜在的新墓冢地点提供建议。尽管由于激光雷达数据的鸟瞰视角存在误报的问题,但经过专家验证后,这种方法的成功率达到了 72.53%^[24]。阿布扎比哈利法大学探索利用人工智能技术在阿拉伯半岛探寻考古遗址的方法。虽然近年来谷歌地球等光学卫星遥感图像在这一领域的尝试方兴未艾,但沙漠对发现地下遗存的干扰仍是一个挑战。对此,该研究利用机器学习算法分析合成孔径雷达 SAR 收集的卫片,探寻地下遗存^[25]。在沙特阿拉伯,研究者们使用几何特征工具,将可解释的人工智能 算法与点云的三维几何分析相结合,获得自动映射结果。使用 UAV-DP 技术获得三维数据。能够准确预测考古遗址中的海绵状风化区域^[26]。在秘鲁,研究者使用随机森林算法和 Landsat 卫星数据,量化了 1985 年至 2020 年间秘鲁 LowerMoche 山谷造成的考古遗址破坏^[27]。在构建数据库方面,研究者们使用机器学习自动提取历史地图的数据以进行景观分析,加快了 GIS 平台的数据收集速度^[28]。

2024 年日本科学家使用人工智能研究秘鲁纳斯卡沙漠,在 6 个月的调查期间发现 303 幅新的地画,让前印加文明于 2000 年前刻画的已知地画数量增加一倍。科学家使用 AI 分析飞机产出的大量地理空间数据,识别出大量较小的浮雕型地画,而这种地画较难用肉眼发现^[29]。此外有研究人员开发了 EAMENA 机器学习自动变化检测工具。这个新开发的在线工具使用定制的机器学习算法来处理连续的卫星图像并创建土地分类地图,以检测和识别已知考古遗址附近的干扰和威胁,以用于遗产监测和保护^[30]。在利比亚巴尼瓦利德的案例研究中对 EAMENA MLACD 的结果进行初步测试和验证^[31]。在北欧,研究者使用国家机载激光数据和深度学习自动绘制狩猎坑。最佳模型正确映射了测试数据中 70% 的狩猎坑^[32]。在美洲,研究者们构建了一个大规模、基于多区域的卷积神经网络对象检测模型,使用机载激光扫描数据或激光雷达在玛雅地区内进行考古特征检测^[33]。在意大利

南部, 研究者们基于 UHR 数字测深模型, 以及使用机器学习和统计技术从海底基质的其他组成部分中自动提取和区分具有考古意义的特征。结果达到了大约 90% 的准确率, 并创建了一个地理参考矢量地图。

1.3 3D-GIS

基于真实数据的 3D-GIS 技术为意大利庞贝考古区建立起了一套包括对应各类电子数据, 支持数据分类分析和考古遗址可视化展示的三维文物信息系统, 三维建模复原了真实的情况, 满足了研究者在 2D-GIS 条件下达不到的研究需求^[34]同样是庞贝的案例, 研究者可以依靠 3D-GIS 在全三维环境下对遗址保护的各类问题进行高效处理, 还可使用 GIS 对古建筑结构进行三维测绘和后期研究^[35]在埃及马萨·巴古什遗址水下考古研究项目中, 该遗址文献资料成果被数字化, 并利用 GIS 数据库的集成, 准确记录了地形和考古要素以及获取遗址及其内容的三维数字模型^[36]。

1.4 国内研究

曹兵武首先阐释了 GIS 应用于考古学表现在, 一为提供了适用于文化遗产规划管理方面的遗址寻找预测和定位方法; 二是讨论 GIS 考古的具体应用方法, 尤其是如何具体处理考古资料的问题; 三用于探讨相关考古文化理论构架的区域性聚落模式问题^[37]。

齐乌云等更细致地归纳了 GIS 考古的操作方向: 包括数据库与信息系统平台建设、计算机制作考古专题地图和图形、聚落考古研究、景观考古研究、基于 GIS 的考古遗址预测模型建设以及基于 GIS 的考古遗址模拟^[38]。

目前国内的相关研究主要体现在寻找遗迹遗址之间的规律和联系, 而忽视建模与预测的作用, 其中杨阳基于 GIS 和遥感技术分析视角, 采用集成资源域和遗址域等分析方法, 分析了青藏高原东北部河湟谷地马家窑文化至辛店文化事情的史前聚落形态的特征和演变^[39]。黄鑫以唐山地区商代至战国时期遗址的考古调查数据为基础, 运用 GIS 技术在进行遗址与周边自然环境相关性分析的基础上, 探究唐山地区商代至战国遗址点的分布特征^[40]。这些研究具有 AI 应用的潜质。

在可视化与遗址保护中, 王一帆等在北宋东京城的城市结构复原研究中, 在综合相关文献研究和考古发现成果的基础上, 利用 GIS 技术复原了开封的古代城市空间, 为古代城市遗址相关空间复原研究提供了很好的借鉴^[41]; 相类似的研究还有在南京的历史空间格局数字复原工作, 研究者提出了传统手段与新兴技术相结合, 成功应用 GIS 数字复原技术复原南京的历史空间复原, 并得到了现状普查的验证^[42]; 赵晓林结合虚拟地理信息系统技术应用在古遗址保护研究的经验, 对遗址考古数据的采集、处理和三维虚拟技术进行了说明, 通过三

维建模的可视化成果为进一步的研究和展示提供了技术上的支持^[43]；张慧在数字虚拟复原展示西安小雁塔和西汉张安世古墓群等遗址的工作中，使用三维激光扫描和 GIS 虚拟技术实现了 3D 古遗址虚拟漫游系统的建立，为 GIS 虚拟技术应用到数字文化遗产保护中积累了经验^[44]。冯铁宏等通过 GIS 技术构建与现实环境对应的虚拟地理信息空间，实现规划区景观的三维可视化，为实现内蒙古鄂尔多斯萨拉乌苏考古遗址公园的科学规划提供辅助^[45]。

2023 年，武汉大学的研究者设计了一种森林下古墓的自动识别算法，利用遥感影像的时序特征和高度详细的 DSM 数据，该方法已在中国荆州巴陵山得到验证^[46]。

2024 年，兰州大学的相关学者引入了机器学习和人工智能方法，在研究中通过使用 GIS 和随机森林来考虑多种因素，以构建分类模型来识别不同文化时期的环境差异，从而探索了一种新的建模案例。该模型表现出较强的性能和较高的考古预测价值。为每个文化阶段生成了潜在的活地图，揭示了从新石器时代到青铜时代的不同环境选择策略^[47]。

二、展望与总结

对于通过 GIS 构建的数据库，AI 可以在其中起到数据整理、分类、识别的重要作用 AI 可以自动化处理和记录功能，对考古数据进行快速、准确地分析、整理和储存。例如，通过机器学习算法，AI 可以从大量的考古数据中挖掘出隐藏的规律和模式，例如人口迁徙、文化交流、社会发展等，为历史研究提供新的视角和见解。利用深度学习和计算机视觉技术，AI 可以自动识别和分类文物。基于大量样本数据，AI 可以学习到文物的特征，并利用这些特征对未知文物进行分类。这不仅提高了文物研究的效率和准确性，也降低了因人为疲劳或专业知识不足导致的错误。

AI 与遥感图像的结合在考古学中也展现出巨大潜力。基于地理信息系统（GIS）和机器学习算法，AI 可以分析地形、地质、历史文献等数据，预测埋藏的遗迹位置，为考古发掘提供指导。人工智能和计算机视觉算法正在被用来分析卫星图像数据，并自动执行检测其中可能的考古遗址的过程。这种方法可以大大加快考古研究的步伐，并且减少了手动分析数千张图像的工作量。

AI 技术可以模拟在特定条件下的变化，这对于考古学和文化遗产保护尤为重要。例如，通过模拟过去 300 万年中气候和生态系统的变化，研究者可以更好地理解人类进化的生态驱动因素。这些模型利用当前对环境和气候的理解，从不完整的记录中进行推断，并为进化变化提供生态背景。

AI 结合 GIS 技术在文化遗产的数字复原中也发挥着重要作用。利用 3D 扫描、无人机航拍、激光雷达等技术，AI 系统能够对古建筑、遗址、艺术品等进行

精确三维建模，实现毫米级别的还原，为文化遗产的长期监测、修复与复原提供精准数据基础。基于深度学习的图像识别技术，AI 可以自动识别并分类大量的历史照片、文献资料、艺术品图像等，协助研究人员快速定位相关信息。同时，AI 还能够对褪色、破损的文物图像进行智能修复，重现其原始风貌。

综上所述，AI 技术与 GIS 的结合在考古学和文化遗产保护领域展现出革命性的潜力。它在 GIS 数据库、预测遗迹位置、模拟环境变化、数字复原方面都有着重要的作用。展望未来，AI 将继续拓展考古学的研究边界，但同时也面临数据准确性和数据伦理的挑战。

三、参考文献

- [1] Rajani, M. B and Rajawat, A. S. , Potential of satellite based sensors for studying distribution of archaeological sites along palaeo channels: Harappan sites a case study. *Journal of Archaeological Science*, Vol.38, 2011:9, pp.2010-2016.
- [2] Mulrooney, Mara A. , An island-wide assessment of the chronology of settlement and land use on Rapa Nui(Easter Island) base on radiocarbon data. *Journal of Archaeological Science*, Vol.40, 2013:12, pp.4377-4399
- [3] Dixon, EJ. Manley, WF and Lee, CM. , The emerging archaeology of glaciers and ice patches: examples from Alaska's Wrangell-St.Elias National and preserve. *American Antiquity*, Vol.70, 2005:1, pp.129-143.
- [4] Elliott, M. , Evaluating evidence for warfare and environmental stress in settlement pattern data from the Malpaso valley, Zacatecas, Mexico. *Journal of Anthropological Archaeology*, Vol.24, 2005:4, pp.297-315.
- [5] Breen, Colin. Quinn, Rory and Forsythe, Wes. , A preliminary analysis of historic shipwrecks in Northern Ireland. *Historical Archaeology*, Vol.41, 2007:3, pp.4-8.
- [6] Ford, Ben. , Down by the water's edge: Modeling shipyard locations in Maryland, USA. *International Journal of Nautical Archaeology*, Vol.36, 2007:1, pp.125-137.
- [7] De laet, V. Paulissen, E and Waelkens, M. , Methods for the extraction of archaeological features from very high-resolution Ikonos-2 remote sensing imagery, Hisar(southwest Turkey). *Journal of Archaeological Science*, Vol.34, 2007:5, pp.830-841.
- [8] Siart, Christoph. Eitel, Bernhard. and Panagiotopoulos, Diamantis. , Investigation of past archaeological landscape using remote sensing and GIS: a multi-method case study from Mount Ida, Crete. *Journal of Archaeological Science*, Vol.35, 2008:11, pp.2918-2926.
- [9] Stanish, Charles. de la Vega, Edmundo and Moseley, Michael. , Tiwanaku trade patterns in southern Peru. *Journal of Anthropological Archaeology*, Vol. 29, 2010:4, pp.524-532.

- [10] Graves, Dorothy. , The use of predictive modelling to target Neolithic settlement and occupation activity in mainland Scotland. *Journal of Archaeological Science*, Vol.38, 2011:3, pp.633-656.
- [11] Korobov, D, S. , GIS-modelling of the early Medieval agricultural landscape in the Kislovodsk depression. *Kratkie soobshcheniya Instituta arkheologii*, 2012:226, pp.17-27.
- [12] White, Devin A and Barber, Sarah B. , Geospatial modeling of pedestrian transportation networks: a case study from precolumbian Oaxaca, Mexico. *Journal of Archaeological Science*, Vol.:39, 2012:8, pp.2684-2696.
- [13] Hazell, Leslie C and Brodie, Graham. , Applying GIS tools to define prehistoric megalith transport route corridors: Olmec megalith transport routes: a case study. *Journal of Archaeological Science*, Vol.39, 2012:11, pp.3475-3479.
- [14] Balla, Aikaterini. Pavlogeorgatos, Gerasimos and Tsiafakis, Despoina. , Locating Macedonian tombs using predictive modelling. *Journal of Cultural Heritage*, Vol.14, 2013:5, pp 403-410.
- [15] Stirn, Matthew. , Modeling site location patterns amongst late-prehistorical villages in the Wind River Range, Wyoming. *Journal of Archaeological Science*, Vol.41, 2014, pp.523-532.
- [16] Clarkon, Chris and Bellas, Angelo. , Mapping stone: using GIS spatial modelling to predict lithic source zone. *Journal of Archaeological Science*, Vol.46, 2014, pp.324-333.
- [17] Gueimi-Farina, Alejandro and Parcerio-Oubina, Cesar. , “Dotting the joins”: a non-reconstrutive use of least cost paths to approach ancient roads. The case of the Roman roads in the NW Iberian Peninsula. *Journal of Archaeological Science*, Vol.54, 2015, pp.31-44.
- [18] Lamenza, Guillermo M. , GIS and remote sensing in the Archaeological research of the Argentine Chaco. *Arqueologia Iberoamericana*, Vol.27, 2015, pp. 40-54.
- [19] Ten, Bruggencate. Rachel, E. Stup, Jeffrey P and Milne, S. Brook. , A human-centered GIS approach to modeling mobility on southern Baffin Island, Nunavut, Canada. *Journal of Field Archaeology*, Vol.41, 2016:4, pp.684-698.
- [20] Lysandrou, Vasiliki and Agapiou, Athos. , Cities of the Dead: approaching the lost landscape of Hellenistic and Roman necropoleis of Cyprus. *Archaeological and Anthropological Sciences*, Vol. 8, 2016:4, pp.867-877.
- [21] Gregory David John; Bennike Ole; Jensen Jørn Bo; Rasmussen Peter; AlHamdani Ziad. Development of Predictive Geoarchaeological Models to Locate and Assess the Preservation Potential of Submerged Prehistoric Sites Using Remote Sensing, Palaeoenvironmental Analysis, and GIS.Heritage. Volume 4, Issue 4. 2021. PP.4678-4699.
- [22] Lucero Gustavo F.; Castro Silvina C.; Cortegoso Valeria. , GIS modeling of Lithic Procurement in Highlands: Archaeological and Actualistic Approach in the Andes. *Journal of*

Archaeological Science: Reports. Volume 38, 2021.

- [23] Calderone D.; Mangiameli Michele; Mussumeci Giuseppe; Palio O. , Multispectral Satellite Imagery Processing to Recognize and Analyze Archaeological Sites in the Central Area of Sicily (Italy). Journal of Archaeological Science: Reports. Volume 44, 2022.
- [24] Canedo, Daniel; Fonte, Joao; Seco, Luis Goncalves; Uncovering Archaeological Sites in Airborne LiDAR Data With Data-Centric Artificial Intelligence. IEEE ACCESS:Volume 11, 2023. Page 65608-65619
- [25] Ben-Romdhane, H; Francis, D; Cherif, C; Pavlopoulos, K; Ghedira, H; Griffiths, S .Detecting and Predicting Archaeological Sites Using Remote Sensing and Machine Learning—Application to the Saruq Al-Hadid Site, Dubai, UAE.GEOSCIENCES: Volume 13, Issue 6,2023.
- [26] BENI T, NAVA L, GIGLI G, et al. Classification of rock slope cavernous weathering on UAV photogrammetric point clouds: The example of Hegra (UNESCO World Heritage Site, Kingdom of Saudi Arabia)[J]. Engineering Geology, 2023, 325
- [27] PAYNTAR N D. A Multi-Temporal Analysis of Archaeological Site Destruction using Landsat Satellite Data and Machine Learning, Moche Valley, Peru[J]. Journal on Computing and Cultural Heritage, 2023, 16(3): 1-20.
- [28] SOBOTKOVA A, ROSS S A, NASSIF-HAYNES C, et al. Creating large, high-quality geospatial datasets from historical maps using novice volunteers[J]. Applied Geography, 2023, 155
- [29] Masato Sakai, et al. AI-accelerated Nazca survey nearly doubles the number of known figurative geoglyphs and sheds light on their purpose. NATL ACAD SCIENCES,2023
- [30] MAHMOUD A M A, SHELDRIK N, AHMED M. A novel machine learning automated change detection tool for monitoring disturbances and threats to archaeological sites[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2025, 37
- [31] LIDBERG W, WESTPHAL F, BRAX C, et al. Detection of Hunting Pits using Airborne Laser Scanning and Deep Learning[J]. Journal of Field Archaeology, 2024, 49(6): 395-405.
- [32] CHARACTER L, BEACH T, INOMATA T, et al. Broadscale deep learning model for archaeological feature detection across the Maya area[J]. Journal of Archaeological Science, 2024, 169
- [33] ABATE N, VIOLANTE C, MASINI N. A Semi-Automatic-Based Approach to the Extraction of Underwater Archaeological Features from Ultra-High-Resolution Bathymetric Data: The Case of the Submerged Baia Archaeological Park[J]. Remote Sensing, 2024, 16(11).
- [34] Apollonio, Fabrizio I. Gaini, Marco and Benedetti, Benedetto. , 3D reality-based artefact

models for the management of archaeological sites using 3D GIS: a framework starting from the case study of the Pompeii archaeological area. *Journal of Archaeological Science*, Vol.39, 2012:5, pp.1271-1287.

- [35] Campanaro, Danilo Marco. Landeschi, Giacomo and Dell'Unto, Nicolo. , 3D GIS for cultural heritage restoration: a “white box” workflow. *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 18, 2016, pp. 321-332.
- [36] Salama M.; Khalil E. , Intergrating GIS and Photogrammetric Recording for Extended Seabed Archaeological Research, Marsa Bagoush, Egypt. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volume XLIII-B2-2022 , Issue . 2022. PP.953-958.
- [37] 曹兵武：《GIS 与考古学》，《考古与文物》1997 年第 4 期。
- [38] 齐乌云、周成虎、王榕勋：《地理信息系统在考古研究中的应用》，《华夏考古》2005 年第 2 期
- [39] 杨阳：《基于 GIS 的青藏高原东北部河谷地带史前聚落演变研究》，青海师范大学硕士学位论文，2018 年。
- [40] 黄鑫：《GIS 支持下唐山商至战国遗址点人地关系研究》，辽宁大学硕士学位论文，2019 年。
- [41] 王一帆、孔云峰、马海涛：《古代城市结构复原的 GIS 分析与应用——以北宋东京城为例》，《地球信息科学》，2007 年第 5 期。
- [42] 周岚等：《基于 GIS 的城市历史空间格局数字复原研究——以南京为例》，《规划师》，2011 年第 4 期。
- [43] 赵晓林：《基于 VRGIS 的三维古遗址重建与网络发布》，首都师范大学硕士学位论文，2007 年。
- [44] 张慧：《真实感受遗址三维重建及虚拟展示技术研究与应用》，西北大学硕士学位论文，2010 年。
- [45] 冯铁宏、刘新宇、李晓蕾：《GIS 技术在萨拉乌苏考古遗址公园规划设计中的应用》，《文物保护与考古科学》，2014 年第 4 期。
- [46] LIU Y, HU Q, WANG S, et al. Discovering the Ancient Tomb under the Forest Using Machine Learning with Timing-Series Features of Sentinel Images: Taking Baling Mountain in Jingzhou as an Example[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(3)
- [47] LI G, DONG J, CHE M, et al. GIS and Machine Learning Models Target Dynamic Settlement Patterns and Their Driving Mechanisms from the Neolithic to Bronze Age in the Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(8).