

穿透密林的考古视野

——无人机LiDAR在闽北山地考古调查中的应用

刘 种 白欣瑶 付琳 李哲

在闽、浙、赣三省交界的山地丘陵区，南浦溪及其支流蜿蜒穿行，连接着东南沿海、长江下游与内陆地区，也见证了不同文化长期交流互动的历史。沿河山地分布着商周、秦汉时期的土墩墓葬，但茂密的植被、厚重的落叶和起伏的地形，使这些遗迹长期难以被系统发现和完整识别。

崎岖山地和茂密植被使考古调查受到通行条件和地表观察的双重限制。传统步行调查更容易发现体量较大的封土或明显的盗坑，而低矮墓丘、受侵蚀的封土边缘以及部分回填的浅坑，往往与自然起伏混淆。常规卫星影像和普通无人机影像主要呈现林冠表面，密集植被也会影响卫星定位信号的稳定性。因此，既往调查往往只能获得零散的遗迹点位，难以完整呈现墓地的范围、密度及其空间连续性。

厦门大学联合内蒙古大学民族与社会学学院、福建省考古研究院，以福建浦城麒麟畈八担亭止山为实验区，开展无人机载激光雷达考古调查，建立“参数设计—地面点分类—微地貌解译—田野验证”的完整工作链条，为南方亚热带常绿林环境下隐蔽遗存的发现、识别与验证提供了新的技术路径和方法支撑。

林下地形的数字重建

激光雷达（LiDAR）通过向地面发射大量激光脉冲，利用部分脉冲穿过林冠缝隙后形成的地面回波，获取三维点云。经过地面点分类，树木与灌丛可以被逐步剥离，山体真实的微地貌起伏得以在数字高程模型中呈现。

2024年1月9日，团队使用大疆M300RTK无人机搭载禅思L1传感器，在约0.2平方公里的八担亭止山完成7次清晰。采集完成后，对包含林冠、树干和地表信息的原始点云进行分类处理，提取能够反映真实地形的地面点。

为保证比较高的可靠性，所有航次在同一天、相近气象条件下进行，并保持飞行速度、三回波记录、采样频率和航线重叠度等条件一致，重点比较30米、50米、70米和120米相对航高，以及航向、传感器俯角和扫描模式的影响。各组数据均采用相同流程独立处理，最终生成0.3米网格的裸地数字高程模型。

试验表明，飞行高度是影响墓葬微地貌可见性的关键参数。在包含2022年步行调查所记录14座土墩墓的比较大区域内，30米和50米航高生成的模型均清晰显示其中13座；70米模型清晰显示7座，120米模型仅清晰显示4座。30米模型对低矮封土和浅小凹坑的表达最为锐利，但在陡坡密林中需要无人机更频繁地随地形升降，树冠上方安全余量较小，单块电池的覆盖范围也更有有限。

综合遗迹可见性、飞行安全与调查效率，研究将50米确定为八担亭止山常规覆盖的优选航高，将30米作为重点区域精细复扫的补充方案。相比之下，在本次试验条件下，改变扫描模式、航线方向或传感器俯角，并未产生与降低航高同样稳定而显著的改善。

调查还发现，激光穿透效果不仅受林冠密度影响，也与林下植被结构和地表覆盖状况密切相关。林下空间较为开阔时，激光脉冲能够形成较连续的地面回波；贴近地面生长的浓密植被或厚重落叶都可能遮蔽细微地形。

墓葬景观的整体识别

完成参数比较后，选用50米航高数据对整座山丘开展统一解译，并结合区域墓葬特征对微地貌进行综合识别。低矮的正地形被视为人工堆筑封土的可能迹象，邻近或位于其上的负地形被判断为盗掘或后期扰动形成的坑穴。“凸起与凹陷”相伴的形态被列为优先检查对象；同时，考虑到侵蚀、盗扰和落叶覆盖可能改变遗迹形态，孤立的低丘和坑状地貌也一并纳入后续核查范围。

最终，数字高程模型在山顶、山脊及邻近坡面共标绘出84处墓葬相关地貌线索，显著扩展了2022年步行调查所记录的14座土墩墓。它们在统一的地形框架中呈现出较为清晰的空间连续性，表明八担亭止山是一处整体性的墓葬景观，其分布范围、内部结构及不同区域之间的关系，可以在整座山丘的尺度上开展进一步研究。

这些墓葬相关地貌线索为田野核查提供了明确目标，其考古属性和年代还需结合地表遗物、土层探查及必要的考古发掘加以确认。

遥感解译的田野验证

2025年12月至2026年1月，考古人员依据带有精确坐标的地形模型进入林区，对可达到的墓葬相关地貌线索进行核查。通过地表形态观察、陶片采集和探铲探查，判断凸起内部是否存在人工堆筑土。核查结果总体支持LiDAR解译，也显示出坐标引导在密林环境中寻找细微遗迹的突出价值。

调查人员选择遗址西南部一处形态典型、盗扰严重的墓葬相关地貌线索进行试掘清理，确认其为一座带封土和单斜坡墓道的竖穴土坑墓，初步判断年代为战国晚期。LiDAR分类地面点提取的剖面，与发掘记录的地表轮廓具有良好对应关系，说明模型较为忠实地记录了墓丘遭盗扰后的微地貌状态。

尽管墓室受到严重盗扰，仍出土玉璧、玉剑饰、陶甗、陶盆、陶壶、陶罐、陶碗和纺轮等遗

交流

科技考古

物。墓葬规模以及礼仪性玉器、兵器附件的组合，表明墓主人具有较高社会地位。封土中还夹杂较早的商周时期陶片，提示这一山地墓葬景观可能经历了不同时期的利用。

这一发现为区域聚落研究提供了新的依据。墓葬的规模及随葬品组合，提示麒麟畈河谷附近存在与之相联系的战国晚期聚落，也为寻找同期居址及防御性遗存提供了重要线索。下一步可将林地墓葬调查与河谷、台地和低丘的系统勘察结合起来，进一步研究闽北战国晚期的聚落分布与社会组织。

调查方法的区域拓展

八担亭止山的实践，改变了南方林区考古调查的资料结构。传统踏查形成的是受道路、坡度和肉眼可见性制约的断续记录，LiDAR则在调查人员进入现场之前，先提供连续的山丘尺度地形和可导航的目标坐标，使考古人员能够通过遥感建立整体认识，再把有限的人力投入最需要核查的位置，并依据田野证据不断校正模型解译。

在八担亭止山样区试验的基础上，团队已将相关方法应用于闽北两百余平方公里的区域遥感调查，进一步检验其在更大范围考古调查中的适用性，并推动考古学、测绘遥感与文化遗产保护之间的深度协作。项目培养学生掌握点云处理、数字高程建模和田野验证等复合技能，相关成果进入高校课程和行业培训，也验证了国产无人机、激光雷达及点云处理软件在复杂文化遗产场景中的应用潜力。

与此同时，研究明确了技术边界：没有明显地表起伏的墓葬、严重侵蚀的小型遗迹，仍可能无法被发现；自然地貌和现代活动也会形成疑似的地貌形态；不同地区的植被、坡度、传感器与遗迹类型差异显著，必须依托已知遗迹进行局部试验和参数校准。只有坚持“参数设计—地面点分类—微地貌解译—田野验证”的反复测试与校正，LiDAR数据才能从清晰的地形影像转化为可靠的考古证据。

穿透密林的激光脉冲，使植被遮蔽的墓丘进入考古视野。连续的数字模型帮助考古学家从整座山丘的尺度系统性地认识墓地，使战国晚期墓葬成为寻找同期聚落的重要坐标，也为文化遗产保护提供了更加准确的风险定位和工作依据。从14座踏查记录到84处可能与墓葬有关的地貌线索，从模型中的一处地貌线索到经过试掘确认的中大型墓葬，八担亭止山的LiDAR调查实验展示了数字技术拓展了考古学可以观察、比较和验证的空间。

当森林不再意味着信息空白，南方丘陵中那些细微的地形起伏，便重新成为认识历史、理解文明的重要证据。以本地化校准为基础、以田野验证为保障的无人机LiDAR调查，正在为闽北墓葬景观与聚落研究打开新的视野，也为全球高植被覆盖区文化遗产的发现、研究与保护提供一条来自中国的实践路径。

（作者单位：厦门大学 内蒙古大学民族与社会学学院 福建省考古研究院）

2023年至2025年，洛阳市考古研究院与乌兹别克斯坦费尔干纳国立大学组成联合考古队，在费尔干纳盆地东南部的库瓦古城遗址开展了多轮田野考古工作。回顾库瓦古城近百年考古历程，以往各阶段工作因技术条件所限，始终未能建立起系统的数字化记录体系。2025年夏季，联合考古队将数字化技术系统性融入田野考古全流程，探索出一条适应中亚遗址特点、可供数字化技术薄弱地区借鉴的工作路径。这一实践不仅有效弥补了当地考古数字化记录的长期缺口，也为跨国联合考古的协同研究提供了可共享、可追溯的数字基础。

历史遗赠与现实挑战：数字化何以成为必然选择

库瓦古城遗址位于费尔干纳盆地南部，现存面积约11万平方米，平面大致呈方形，边长300米左右。

库瓦古城的考古工作有着较长历史。最早可以追溯到20世纪30年代配合费尔干纳运河建设工程考古调查。20世纪50至70年代，在库瓦古城开展了大规模考古工作，发现了一系列重要遗迹遗物。但受限于当时的技术条件，也因历史原因，大量考古资料未能系统发表，部分原始记录与实物资料已散佚遗失。世纪之交的考古工作虽有新发现，但同样未能建立系统的数字化资料归档体系。以往的遗憾使库瓦古城的整体文化面貌长期模糊，也让联合考古队深刻认识到——数字化不仅是一种技术手段，更是对历史负责的必然选择。

自2023年起，联合考古队将数字化技术系统性嵌入考古工作全流程。在合作过程中，双方共同面对跨国考古的一系列难题：技术与记录标准的差异导致资料整合困难；田野工作周期短、地理距离远，现场信息不易及时完整地在国际团队间共享；土遗址本体脆弱，一经揭露便面临环境侵蚀，需要为每一个发掘阶段建立高保真、可回溯的数字记录。基于上述问题，联合考古队探索出一条“标准化采集—云端协同处理—多终端活化应用”的实践路径。

技术平移与标准共建：中国数字化方法在中亚落地

数字化工作的第一步是建立标准。项目确立了以遗址总基点为原点的统一空间坐标系，采用象限法布设探方，确保每一次发掘、每一件遗物的空间位置均精准可追溯，为中乌双方在同一套坐标系统下开展后续工作提供了共同的技术基础。所有探孔逐一编号并记录，使用RTK记录精确坐标，从源头避免了因标准不一致导致的资料整合困境。

在田野端，联合考古队以RTK高精度测绘，以无人机和数码相机为主要设备，配合精细解剖发掘法，对遗址地层、遗迹单位、出土遗物进行多维度、可量测的数据采集。这套设备组合便捷、稳定、成本可控，在境外复杂环境中仍能高效运转。对北城门、护城壕沟等关键遗迹，考古队进行了高精度影像采集，为后续制作正射影像和三维模型提供了基础数据。

田野工作期间，考古队定期将影像资料通过摄影测量软件处理，制作成带地理坐标的发掘区正射影像图。这些高精度数字底图替代了当地机构传统手工绘图，成为中乌双方进行遗迹判读、地层划分、分期讨论的共同基础。北城东门侧墙体的解剖发掘是典型案例。考古队对墙体所在探方采用1/2解剖法，同步对剖面进行精细的数字影像记录，通过分析不同砌筑单元的纹理、颜色、包物差异，结合传统地层学方法，清晰划分出四期城墙建造过程——从帕提亚时期至萨曼尼时期（公元前3世纪—公元10世纪）。这些传统肉眼观察中容易被忽略，而数字影像使其变得清晰可辨、可量测、可回溯。本次发掘共采集文物标本5类35件套，包括陶器、玻璃、铁器、铜器、石器和骨骼等，所有出土物均为残损状态，未见完整器。陶器以夹砂红陶为主，器表多为素面，少数残片见有弦纹、划纹及波浪纹。各层位还采集了

数字丝路：库瓦古城联合考古的数字化探索与实践

刘斌 郝君涛

动物骨骼（牙齿）、土样和碳粒样品，已送交国内实验室进行碳十四测年与动物考古学检测。

在宫阙区东部的勘探中，考古队将探孔的位置、深度、地层岩性等信息全部数字化，精准推断出被晚期建筑破坏、地表已无任何迹象的约690平方米地下夯土建筑基址，为古城布局复原提供了关键线索。

能力共建与在地转化：平台建设与人才培养

这些数字化技术手段在当前业界虽非最前沿，亦非原创性突破，但将其引入中亚考古现场，无偿分享给乌兹别克斯坦同行，却具有超越技术本身的意义。中亚地区考古工作长期面临技术手段相对滞后、数字化记录能力不足的现实困境，本次联合考古所应用的RTK测绘、无人机航测、摄影测量建模等技术，成本可控、操作简便、易于推广，恰好契合了当地田野考古的实际需求。中国考古人将经过国内实践反复检验的数字化工作方法完整平移至中亚考古现场，以“轻量化、标准化、可复制”的技术方案，帮助乌方同仁建立起完整的数字化工作链条。技术的价值，不仅在于其先进水平，更在于其能否切中现实需求、能否为使用者所掌握并持续发挥作用。这正是共建“一带一路”倡议在国际考古合作中的生动注脚。

数字化工作的价值更延伸至平台建设与人才培养领域。2025年5月，双方共同揭牌成立了“费尔干纳—洛阳库瓦古城遗址联合考古研究基地”和“考古遗址保护与文物修复实验室”。联合考古研究基地选址于库瓦古城遗址西南处，乌方州政府为联合考古队无偿提供遗址管理处办公用房；考古遗址保护与文物修复实验室设于费尔干纳国立大学主校区，旨在搭建跨学科研究平台，培养文物保护修复综合型人才。这是继共建“乌兹别克斯坦—中国联合考古系”和“费尔干纳—洛阳考古研究中心”之后的又一重要成果。依托这些平台，中方团队系统培训乌方师生数字化记录方法与文

物保护修复技术，回国后又成功举办了两届费尔干纳国立大学洛阳田野考古技术实训班，实现了技术的在地化转移。费尔干纳国立大学内设立的考古成果展示长廊，通过数字打印的影像图板向师生和公众直观展示遗址最新发现。



库瓦古城北城门东墙发掘区域剖面数字化模型

永久建档与活态传承：数字化成果的双重价值

目前，库瓦古城联合考古项目已完成北城门发掘区、宫阙区东部勘探区的全面数字化建档，生成了发掘探方及关键遗迹的高精度正射影像图和三维模型数据。依托项目积累的一手资料，联合考古队与郑州大学合作的《丝路循香》数字化文创项目，在教育部、中国科协有关局指导的“文化中国”两创大赛中，荣获全国一等奖。联合考古队还通过网络云端首次动员全国三百余名青少年绘制“文化中国”主题美术作品礼赠乌方友人，实现了从考古“一线”到文化“两创”的无缝衔接。

实践表明，将数字化技术系统性地嵌入跨国联合考古全流程，不仅有效提升了田野工作的精度与效率，更开辟了一条从标准化采集到云端协同再到多终端活化的完整路径。在高质量共建“一带一路”与中国—中亚合作不断深化的背景下，库瓦古城的数字化实践，不仅为土遗址留下了永久、精确的数字档案，更探索出一条中国数字化考古方法在境外落地推广的可行路径。（作者单位：洛阳市考古研究院）

人工智能与遥感技术驱动的吐鲁番坎儿井普查创新实践

奥斯曼·艾力尼亚孜

作为古丝绸之路的重要枢纽，吐鲁番拥有极为丰富的文物资源，而其中最为特殊的，无疑是坎儿井。坎儿井是古代劳动人民根据当地干旱少雨的气候特点和地理条件，创造的一种独特的地下水水利工程。通过巧妙地利用地形坡度，它将地下潜流引出地面，用于农业灌溉和居民生活用水，被誉为“地下万里长城”。2006年，坎儿井被公布为全国重点文物保护单位；2024年，成功入选世界灌溉工程遗产名录。吐鲁番的坎儿井数量占全国的71.95%，承载着重要的科技、历史与文化价值。

然而，受全球气候变暖、地下水位持续下降及人为活动等多重因素影响，大量坎儿井面临干涸、坍塌甚至消失的风险。与此同时，传统普查方法在坎儿井调查中的局限性日益凸显：竖井数量庞大，单个坎儿井可达数十至数百个竖井，人工识别效率极低；盆地地形复杂、分布范围极广，偏远区域难以全面覆盖；普查制图依赖AutoCAD等专业软件，操作门槛高、格式不统一，严重影响数据汇总效率。如何运用新技术手段高效、精准地完成坎儿井普查，成为第四次全国文物普查吐鲁番专项调查必须破解的关键命题。

技术路径创新：深度学习与遥感影像的融合应用

针对传统人工踏查效率低、精度差的痛点，研究团队选取0.5米空间分辨率的卫星遥感影像覆盖整个吐鲁番盆地，构建了一套基于卷积神经网络的坎儿井竖井自动识别技术体系。影像处理主要包括预处理、样本标注与数据增强三个步骤：首先进行投影、重采样和区域裁剪，随后对竖井目标进行人工标注，最后通过图像切片与数据增强技术构建适用于深度学习模型的训练数据集。数据增强手段包括改变亮度与对比度、图像缩放、随机拼接等，以提升模型的泛化能力。

在模型构建环节，团队分别采用SSD、Faster R-CNN、YOLO及MMDetection等多种目标检测框架进行训练与比较。结果表明，以ResNet50为骨干网络的MMDetection模型表现最优，在测试数据集上达到了0.833的平均精度（mAP50-95）。该模型能够自动提取遥感影像中竖井的视觉特征——环形暗色斑块（形如甜甜圈，而内部均一纹理及其与戈壁背景的灰度反差，从而对新影像中的分类目标实现智能判别。与传统人工目视解译相比，该方法大幅提升了竖井识别的效率与精度，能够捕捉人眼难以察觉的细微特征。

工作流程创新：基于空间拓扑约束的误检筛选机制

深度学习模型在高效识别的同时，也面临误检的问题——圆形蓄水池、取土坑等容易被误判为竖井。针对这一难题，研究团队创新性地设计了基于空间邻域拓扑的误检剔除策略——“定向扇形缓冲区”筛选方法。该方法的原理基于坎儿井竖井的核心空间分布规律：同一坎儿井的竖井沿暗渠走向呈线性排列，且相邻竖井在坡向方向上存在一定的连续性。

具体操作上，首先基于数字高程模型计算每个候选竖井所在位置的地形坡向角度，以此为基准方向为每个点生成一定角度范围的扇形缓冲区。真实竖井的扇形缓冲区会与其相邻竖井的缓冲区在坡向方向上产生交叠，而孤立存在的误检点（如圆形蓄水池、取土坑等）则不具备这一特征。通过判断缓冲区之间的相交关系，即可有效区分真实竖井与误检目标。在此基础上，结合层次聚类分析与人工复核，团队成功消除了90.20%的误检目标，最终识别出88288个坎儿井竖井，生成2527公里坎儿井线段。经2024年10月底至2025年4月初的野外实地验证，识别准确率达99%以上。这一创新方法将坎儿井竖井的空间分布规律转化为可计算的地理空间规则，实现了领域知识与人工智能技术的深度融合，为同类线性文化遗产的辅助判读提供了可借鉴的方法论。

工具开发创新：自主制图小程序赋能标准化汇交

普查工作的最终环节是将调查成果转化为符合规范的标准图件并汇交至“四普”系统。传统方法依赖AutoCAD等专业制图软件，操作周期长，对使用人员技能要求高，且不同普查人员的制图习惯差异导致格式不统一、要素不全，需反复修改才能满足汇交要求。

针对这一瓶颈，研究团队自主开发了面向第四次全国文物普查系统的位置图与平面图生成小程序。该工具的操作流程简洁高效：普查人员基于野外调查结果，使用奥维互动地图软件按统一规范绘制每条坎儿井的各个组成部分（暗渠、出水口、明渠、涝坝等）并导出为Shapefile格式文件，随后将文件导入小程序，系统自动识别图像内容并添加所有必要的标准化地图要素——图例、标题、指北针、图框、比例尺等——快速生成符合“四普”系统导入规范的平面图。该小程序的推广应用显著简化了制图流程，大幅降低了制图时间，从源头保障了数据的规范性与一致

性，有效解决了格式不统一这一长期困扰普查工作的难题。目前，已累计形成2000余张标准化普查地图，为普查数据与“四普”系统的顺畅对接提供了坚实的技术保障。

实践成效：从普查效率提升到数据资产构建

本技术体系在吐鲁番坎儿井专项普查中取得了显著的实践成效。

在普查效率与精度层面，深度学习模型可在数日内完成对全吐鲁番盆地遥感影像的自动识别，而传统方法完成同样工作量需要数月时间，竖井识别效率提升数十倍。在精度方面，实地验证准确率远高于传统目视解译，定位精度达亚米级，满足技术要求。

在数据资产构建层面，本研究首次建立了吐鲁番坎儿井高精度空间数据库。这是目前吐鲁番盆地最为完整的坎儿井空间数据集。该数据库不仅直接服务于第四次全国文物普查的数据汇交，更为坎儿井保护规划、病害监测、学术研究以及文旅开发提供了科学、可量化的数据底座。

未来前景：从普查到监测与活化利用的全链条延伸

基于积累的丰富数据与技术经验，研究团队将持续推进三项重点工作。一是技术推广与应用拓展。本案例所形成的“遥感+深度学习+GIS”技术框架具有高度的可迁移性。该技术框架同样可迁移至古墓葬、烽燧等其他类型文化遗产的识别与普查。二是坎儿井动态监测与预警系统建设。结合多时相遥感影像与实地传感器数据，实现对坎儿井保存状况的持续跟踪、变化检测与风险预警，推动坎儿井保护从“抢救性保护”向“预防性保护”转变。三是文化遗产活化利用。依托普查成果，开发坎儿井数字展示平台、虚拟导览系统等数字化产品，推动坎儿井文化价值的公众传播与活态传承。

从戈壁墙上的实地踏查，到数字空间中的智能识别，本案例构建的“智能识别—实地验证—系统汇交”全链条普查模式，有效解决了坎儿井普查中“找不到、测不准、汇不齐”的实际困难。这不仅是一次技术手段的升级，更是一场文化遗产普查范式的深刻变革——让古老的水利工程在数字时代获得“新生”，为“AI+文化遗产普查”提供了可复制、可推广的方案。

（作者单位：吐鲁番市博物院）

■ 广告

MicroWise
— system —
元智赋新生

数智护文脉
元智赋新生

文化遗产全链数智
解决方案提供商

科技保护

环境调控、环境监测、本体监测、馆藏监测、文物运输监测、文物展柜、文保修复实验室装备...

智慧管理

藏品管理、资产管理、人员管理、客流监测、数字资源管理...

智慧服务

数字化采集、数字化展陈、智慧导览、咨询服务、非遗展示服务、展柜微气候评测服务...

西安元智系统技术有限公司
电话：13572270596（张总） 座机：029-88246388
邮箱：info@microwise-system.com
网址：www.microwise-system.com
地址：西安市高新区锦业路69号创业研发园E座4F