张惠心,邵延秀,邹小波,等.无人机载LiDAR在文化遗产保护中的应用研究——以乐山大佛景区为例[J].地震工程学报,2027,49(1):215-226.DOI:10.20000/j.1000-0844.20251012001

Zhang Huixin, Shao Yanxiu, Zou Xiaobo, et al. UAV-borne light detection and ranging for cultural heritage conservation: a case study of the Leshan Giant Buddha Scenic Area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2027, 49(1): 215-226. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20251012001

无人机载LiDAR在文化遗产保护中的应用研究——以乐山大佛景区为例

张惠心[1], 邵延秀[1], 邹小波[2], 李泊铭[1], 董 玉[1], 张师豪[1]

(1. 天津大学地球系统科学学院 表层地球系统科学研究院, 天津 300072;
2. 甘肃省地震局,甘肃 兰州 730000)

摘要: 随着文化遗产保护意识的增强,传统测绘手段在复杂地形与文物表面精细重建方面面临局限。以乐山大佛景区为例,系统探索无人机载激光雷达测量(LiDAR)技术在文化遗产保护中的应用潜力;通过获取高密度点云数据,实现对景区全域微地形特征的高分辨率解析。结果表明,大佛核心区坡度(>35°)与河道陡峭指数显著升高,地形不稳定性突出。利用泊松重建方法完成对大佛及附属文物的厘米级三维建模,实现大佛精确结构参数的提取。结合冠层高度模型与森林参数提取,识别出根系侵蚀与地质条件共同作用对文物保存的不利影响。研究可为文化遗产数字保护与风险评估提供技术路径和数据支撑。

关键词: 乐山大佛;无人机载LiDAR;文化遗产保护;三维建模;地形分析

中图分类号: P237; K878.2 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0844(2027)01-0215-12

DOI:10.20000/j.1000-0844.20251012001

UAV-borne light detection and ranging for cultural heritage conservation: a case study of the Leshan Giant Buddha Scenic Area

Zhang Huixin[1], Shao Yanxiu[1], Zou Xiaobo[2], Li Boming[1], Dong Yu[1], Zhang Shihao[1]

(*1.Institute of Surface-Earth System Science, School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*
2.Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: With increasing emphasis on cultural heritage conservation, traditional surveying methods face limitations in the high-precision reconstruction of complex terrain and cultural relic surfaces. Taking the Leshan Giant Buddha Scenic Area as an example, this study systematically explores the potential application of drone-mounted light detection and ranging (LiDAR) technology in cultural heritage conservation. High-density point cloud data were acquired to enable a high-resolution analysis of the micro-topographic features across the entire scenic area. The results show that slope gradients in the

收稿日期:2025-10-12

基金项目:国家重大科技专项计划(2024ZD1001004-3);国家自然科学基金项目(42272242,W2411033);中国地震局监测、预报、科研三结合课题(CEA-SJH-202502010)

第一作者简介:张惠心(2002-),女,硕士研究生,主要研究方向为微地形地貌。E-mail:zhanghuixin23@163.com。

通信作者:邹小波(1987-),男,高级工程师,主要从事地震学、活动构造研究。E-mail:ynuzou@163.com。

core area of the Giant Buddha exceed 35° and the channel steepness index is notably elevated, indicating prominent terrain instability. Poisson surface reconstruction was then applied to generate millimeter-accurate 3D models of the Giant Buddha and its affiliated cultural relics, enabling the extraction of its precise structural parameters. Canopy height model results combined with forest parameter extraction further revealed the adverse effects of root erosion and geological conditions on heritage preservation. This work can provide a technical pathway and data support for the digital preservation and risk assessment of cultural heritage.

Keywords: Leshan Giant Buddha; UAV-borne LiDAR; cultural heritage conservation; 3D modeling; topographic analysis

0 引言

自然与文化遗产镌刻了人类智慧与文明的辉煌篇章[1-2],其保护工作具有重大的历史、艺术和科学价值。作为世界文化与自然双遗产,峨眉山—乐山大佛是中国古代石刻艺术的杰出代表[3],其保护工作面临诸多挑战。乐山大佛所处的丹霞地貌岩性疏松、抗风化能力较弱,在长期雨水冲刷、温度变化及生物作用影响下,极易发生表层剥落与形态损毁[4-6]。旅游活动带来的持续扰动进一步加剧了大佛本体及周边岩体的劣化。此外,周边茂密的植被不仅改变了大佛本体的光照、通风与透水条件[7-9],其根系还可能穿透并扩大岩体裂隙,加速文物本体破损进程。灵宝塔作为峨眉山—乐山大佛风景区的组成部分之一,现今普遍认同其建于唐宋时期,历史超过千年[10],是佛教重地,也是丝绸之路的导航塔,具有重要历史意义。宝塔位于灵宝峰上,受植被侵害严重,已有灌木生长其中。因此,亟需引入创新技术手段,实现精准监测与保护。

鉴于文化遗产的不可再生性,建立文化遗产档案至关重要。在古文物保护领域,三维(3D)点云重建技术正在发挥越来越重要的作用。随着技术进步,点云数据的获取方式不断演进[11]。与传统人工测量相比,无人机贴近摄影测量具有成本低、灵活性高、非接触等优势[12-13],可精细采集大型古建筑复杂表面,避免二次破坏[14-16]。搭载激光雷达测量(Light Detection and Ranging,LiDAR)技术的无人机平台进一步提升了数据采集能力。LiDAR通过主动发射激光脉冲,可在夜间或低光照条件下作业,不受阴影和表面反光干扰[17-20],并具备一定植被与浅层水体的穿透能力,显著提高了三维空间数据的获取效率与覆盖完整性[21-22]。通过直接获取目标物的三维坐标信息,可实现厘米级高精度建模[23],同时满足复杂几何结构与不规则表面的重建需求[24-25]。作为一种主动遥感手段,LiDAR具备全天候工作能力,能够快速、高精度地采集海量三维信息,在数据准确性、作业安全性及处理自动化方面实现了全面提升。

点云数据在地表微小形态识别方面同样表现卓越。高密度点云可生成亚米级分辨率的地形模型[26],实现研究区域的无死角覆盖,支持在三维空间中计算任意方向的坡度与曲率,精确捕捉因风化、侵蚀或人为活动引起的微地貌变化,为文物表面劣化过程的定量评估提供关键依据。

在植被监测方面,机载LiDAR技术相较于传统摄影测量方法具有独特优势:传统摄影测量主要依赖可见光波段,所获取信息多为地表二维影像,在刻画植被垂直结构方面存在局限;而LiDAR系统通过主动发射激光脉冲并接收多回波信号,可直接获取林下地形信息和植被不同层次的三维结构数据,精确提取单木或林分尺度上的树高、冠层体积、冠幅轮廓及林下微地形等参数,为定量分析植被生长对岩体稳定性、水分渗透及风化过程的影响,提供了传统手段难以实现的立体数据支撑[27-30]。此外,结合多期LiDAR数据,还可进一步监测植被动态变化及其对文物本体潜在影响的长期趋势。

本研究利用无人机载LiDAR对乐山大佛景区进行测量,获取高精度密集点云数据,重点对大佛主体及灵宝塔进行精细扫描,通过地形分析、文物表面重建及区域植被分析等工作,为文物侵蚀程度研究、数据古今对比及景区文物保护提供重要参考依据。

1 区域背景

1.1 环境背景

乐山大佛雕刻于凌云山栖鸾峰的峭壁之上,面朝岷江、大渡河、青衣江三江汇流处,是中国现存最

大的摩崖石刻造像[31]。其开凿于唐代开元元年（公元713年），完成于贞元十九年（公元803年），历时约90年[32]。乐山大佛景区涵盖大佛本体、灵宝塔、凌云山及麻浩岩墓等核心景点，总面积约8 km²。

乐山大佛风景区位于四川省乐山市城区东南方向，属亚热带季风性湿润气候区。夏季炎热湿润，年降水量超过1 000 mm，加之大气污染和酸雨等影响，乐山大佛表面遭受了严重的淋滤溶蚀破坏与生物根系作用破坏（图1）。



图1　乐山大佛表面病害状况

Fig. 1　Surface deterioration of the Leshan Giant Buddha

1.2　地质构造背景

历史记载表明，自公元26年至今，乐山大佛周边多发生小震，最大地震为1936年马边—美姑6.7级地震，地震类型以主余震型与震群型为主。尽管景区自身无强震记录，但仍会受到周边地震带的影响。

区域构造上，乐山大佛西北侧属龙门山逆冲推覆构造带，东临川中古隆起，南接二者交汇区，整体处于盆地与造山带过渡带[33-34]（图2）。该区域地层层序完整清晰，无明显褶皱与断裂发育[35]，稳定的地质环境为大佛的长期保存提供了有利条件。

大佛主体雕凿于下白垩统夹关组（K_1j）岩层上。夹关组（K_1j）是以砂岩为主的岩层[34]，夹有少量棕红色泥岩与泥质粉砂岩，底部为紫红色砾岩及含砾砂岩[35]，产状稳定，岩层倾向以NW30°～50°为主，倾角2°～5°。此类岩性组合在降水、植被等外营力作用下易发生风化，直接影响大佛的保存状态。

在当前稳定的区域构造背景下，大佛所遭受的病害主要表现为表层风化。该类风化过程受岩性组合、植被发育与地形条件等因素共同影响，亟需系统分析其主要致病因素，并开展针对性的综合治理研究，以提升保护措施的针对性与有效性。

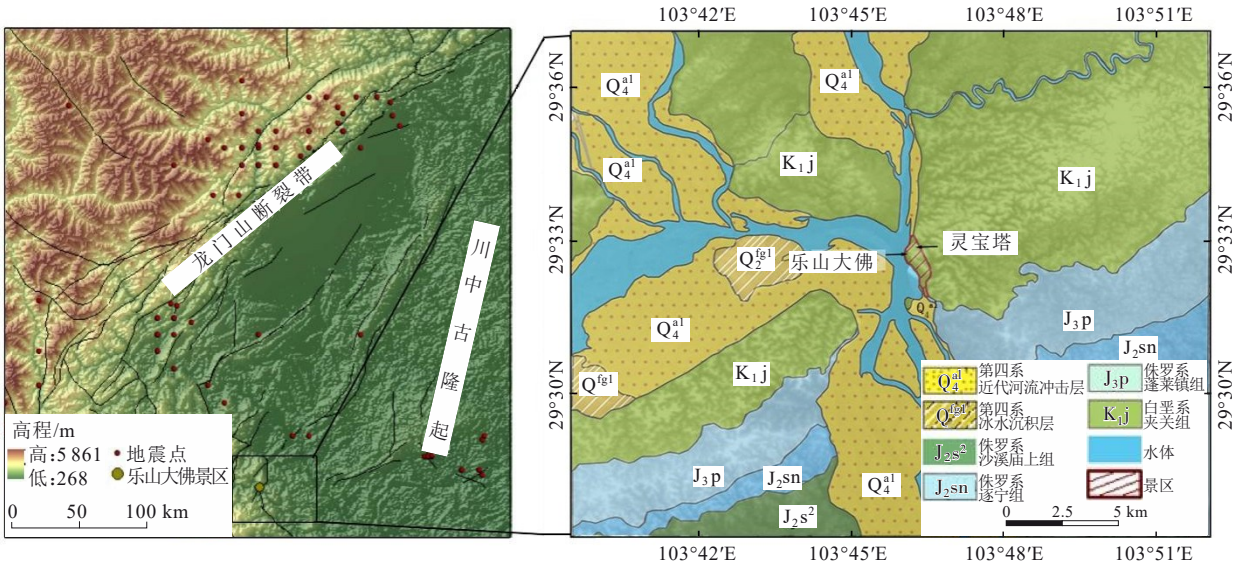


图2　研究区地质图

Fig. 2　Geological map of the study area

2　研究数据和方法

研究工作主要基于机载LiDAR点云数据展开，具体包括点云数据采集与处理、三维表面重建、地形特征分析及植被参数提取四个核心环节。

2.1　点云数据采集与处理

传统测量需攀爬到大佛本体进行，不仅耗时较长，也存在损伤文物表面的风险。相比之下，无人机载LiDAR技术能够以非接触方式快速获取海量三维空间数据，在保障文物安全的同时，显著提升

了测绘效率[36-37]。

点云数据采集采用大疆禅思L1机载LiDAR系统，综合运用自动航线扫描与手动扫描两种方式。在自动扫描模式下，根据乐山大佛景区的地形特征，规划正射飞行航线。飞行过程中保持稳定姿态，航线重叠率不低于80%，飞行速度控制在5 m/s以内，以确保建筑区域可用点云密度超过5 000 points/m^2，满足高精度表面重建需求。扫描策略因地制宜，对于乐山大佛这类高大垂直结构，采用分层环绕的飞行方式，确保佛体从上至下各立面均能被激光束有效覆盖，避免出现数据空洞。在环境适应性调整方面，根据现场植被覆盖情况及文物表面材质，动态调整激光发射功率与回波强度设置，以优化点云的信噪比。扫描所得数据列于表1。

针对大佛与灵宝塔等重点目标开展了精细扫描，以获取其高精度三维结构，其中大佛完成8次、灵宝塔完成9次手动扫描作业。

点云预处理作为数据处理流程的初始关键步骤，主要包括点云滤波、抽稀和配准等操作[38-40]。本研究首先使用大疆智图(DJI Terra)软件处理航测数据，生成数字正射影像，并完成初步点云预处理与航带数据拼接；随后，在CloudCompare软件中进行点云去噪、离群点剔除及滤波处理，以提升数据质量；最后，为生成数字高程模型(Digital Elevation Model，DEM)与冠层高度模型(Canopy Height Model，CHM)，进一步实施了点云归一化处理与地面点提取[41]。

表1 无人机架次数据

Table 1 Unmanned aerial vehicle mission data

架次		平均对地高度/m	采样距离/m	采样面积/m^2	平均点云密度/(points/m^2)
一		46.6	20	301 596	920
二		144.57	20	240 120	739
三		163.34	20	312 244	833
四		92.44	20	186 412	637
五		55.35	20	329 476	732
六(手动扫描大佛，分8次进行)	第1次	2.11	5		6 548
	第2次	3.66	5		6 548
	第3次	5.35	5		6 548
	第4次	12.36	5		6 548
	第5次	13.36	5		6 548
	第6次	19.41	5		6 548
	第7次	20.86	5		6 548
	第8次	25.99	5		6 548
					总计：22 612
七(手动扫描灵宝塔，分9次进行)	第1次	105.22	5		5 002
	第2次	109.11	5		5 002
	第3次	111.47	5		5 002
	第4次	111.69	5		5 002
	第5次	116.57	5		5 002
	第6次	116.99	5		5 002
	第7次	121.63	5		5 002
	第8次	123.05	5		5 002
	第9次	123.58	5		5 002
					总计：33 672
八(加密点云)		135.93	20	323 004	665
九(加密点云)		57.52	20	349 464	726
十(加密点云)		71.78	20	129 100	703
十一(加密点云)		128.7	20	178 784	930

2.2 三维表面重建

三维表面重建是构建文物精细数字档案、支持后续监测与分析的重要基础。本研究采用泊松重建方法对三维表面进行重建。作为一种基于点云数据生成平滑连续三维表面的关键技术，泊松重建方法以描述标量场梯度与源项之间数学关系的泊松方程作为理论核心。该方法通过将点云视为梯度场的采样，并求解相应方程，生成光滑的三维模型[42-43]。泊松方程可表示为：

$$\Delta\chi=\nabla\cdot\boldsymbol{V} \tag{1}$$

式中：χ为待求解的标量场(隐式指示函数)；$\boldsymbol{V}$为基于点云法向量构造的矢量场；Δ为拉普拉斯算子；$\nabla\cdot$为散度算子。

通过向量场近似，将离散的点云数据转化为连续的向量场：

$$\boldsymbol{V}\approx\sum_{s\in S}\boldsymbol{n}_s\cdot F(\boldsymbol{p}-\boldsymbol{p}_s) \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{S}$为点云样本集合；s为样本索引；$\boldsymbol{n}_s$是第s个样本点的单位法向量；F为平滑基函数；$\boldsymbol{p}$为三维坐标点(x, y, z)。

通过离散化泊松方程，将连续偏微分方程问题转化为离散线性代数问题：

$$L\chi=\boldsymbol{v} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{L}$为拉普拉斯矩阵；$\boldsymbol{v}$为离散化后的右端向量。

最后进行等值面提取，将隐式函数转化为显式三角网格：

$$\{\boldsymbol{p}|\chi(\boldsymbol{p})=0.5\} \tag{4}$$

由于内部为1，外部为0，取其中间值0.5作为表面的分界点。

该方法具有良好再现性与较高可靠性[44]。基于真彩点云的表面重建，能够高质量复原文物的几

何形态与纹理特征，对建立精细文物数字档案具有关键意义，并为后续多维度量化分析与可视化展示提供可靠的数据基础。

2.3　河流陡峭指数

区域河流陡峭指数（K_{sn}）通过量化河道坡度，反映其对构造抬升与岩性抗侵蚀能力的响应关系[45-46]。在乐山大佛保护中，K_{sn}分析有助于识别区域侵蚀趋势与岩性差异，为评估大佛所在崖体在自然营力作用下的稳定性及风化敏感性提供地貌依据，从而深化对表层风化机制的系统认知。其基本理论框架是将河道高程变化用基岩抬升速率（U）和河流侵蚀速率（E）之差来表示：

$$\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}=U(l,t)-E \tag{5}$$

式中：z为河道高程；l为距河口距离；t为时间。

进一步地，将基岩河流侵蚀速率E表示为流域汇水面积A与河道梯度S的幂次函数关系：

$$E=K\cdot A^{m}\cdot S^{n} \tag{6}$$

式中：K为流域侵蚀系数；m和n分别为流域汇水面积指数与河道梯度指数。

本研究基于高分辨率地形数据提取河流参数，利用开源MATLAB工具箱TopoToolbox进行K_{sn}值计算[47]，并编写配套代码，对研究区全域进行系统分析。

2.4　植被森林参数提取

茂密植被通过改变局部微气候、根系渗透及水分运移等方式，直接或间接加速石刻表面的风化进程。在乐山大佛保护研究中，这些参数对于分析植被与岩体风化间的相互作用具有重要意义。森林参数是用于定量描述和评估森林资源状况的一系列可测量特征与指标，包括树高、冠幅、树种组成、郁闭度及叶面积指数等。

冠层高度模型（CHM）通过数字表面模型（Digital Surface Model，DSM）与数字高程模型（DEM）的高程差值计算获得，能够精确反映林冠顶部相对于地面的高度分布特征[48-49]，为后续单木分割与冠层参数提取提供基础高程数据支持

基于CHM数据，采用分水岭算法识别单木树冠顶点，并通过模拟地形汇流实现单木分割[50-51]。该方法可有效识别每棵树木的空间位置，并提取树高、冠幅直径和冠幅面积等关键参数。单木树高（x）与冠幅直径（Y）之间的关系采用以下经验模型表示：

$$Y=1.230\,1\mathrm{e}^{0.035\,9x} \tag{7}$$

该模型有助于评估单木生长状态及其空间结构特征[52]，为进一步分析植被对岩体稳定性的影响提供依据。

叶面积指数（Leaf Area Index，LAI）定义为植物群落叶面积与地面面积之比，是表征冠层结构与植被茂密程度的关键生态参数[53]。其计算公式如下：

$$\mathrm{LAI}=\frac{-\ln(\mathrm{GF})}{k\cdot ang} \tag{8}$$

式中：ang为平均扫描角；GF为间隙率；k为消光系数，与树冠的叶倾角分布紧密相关。

冠层覆盖率（Canopy Cover）是指植物枝干和叶片对地面的覆盖程度。本研究采用点网格法进行估算，将每个采样点的观测结果记录为1（视野被遮挡）或0（视野未被遮挡），最终冠层覆盖率为这二项观测值变量的平均值[54]。

间隙率（Gap Fraction，GF）指森林冠层的光线传输概率，即光线在特定方向上穿过森林冠层而不被植被遮挡的比例[55]，可由以下公式计算：

$$P(\theta)=\mathrm{e}^{-\frac{G(\theta)L}{\cos(\theta)}} \tag{9}$$

式中：$P(\theta)$为特定方向θ上的冠层间隙率；$G(\theta)$为单位叶面积在方向θ上的投影，与叶角分布密切相关；L为叶面积指数。

通过系统提取上述森林参数，可量化评估植被对石刻岩体风化过程的潜在影响，为乐山大佛保护中植被管理措施的制定提供科学依据。

3　结果和讨论

3.1　文物建筑三维重建

本研究基于获取的高精度点云数据，采用泊松重建方法对乐山大佛主体及灵宝塔进行了三维重建。大佛的三维模型重建与测量结果显示：大佛头部宽度为9.69 m［图3(a)］，高度为11.96 m［图3(b)］，肩宽为20.13 m［图3(c)］，不含莲花基座的总高度为59.87 m［图3(d)］。历史记录表明，大佛曾历经多次测量，其中广为引用的整体高度为71 m（包含现已淹没于江水之下的莲花基座）[56]，而不含基座的测量结果与本研究数据基本一致[57]，验证了本次三维重建与测量的准确性。

基于同一三维重建流程，对灵宝塔的关键结构参数也进行了精确量测。结果表明，该塔为13级密檐式方塔，总高29.25 m［图4(a)］，与景区公布数据基本吻合［图4(g)］。自下到上各层高度依次为

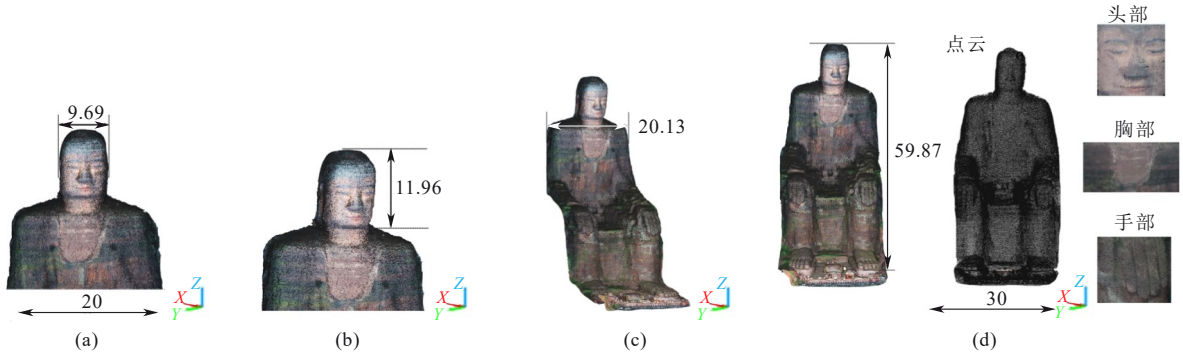


图 3 乐山大佛三维结构重建(单位：m)

Fig. 3 Three-dimensional structural reconstruction of the Leshan Giant Buddha (unit: m)

5.1、2.0、2.0、1.9、1.7、1.5、1.5、1.2、1.2、1.0、1.0、1.0及0.9 m。塔体坐落于边长为19.98 m的正方形平台之上[图4(c)]，塔基底面边长为11.79 m[图4(f)]，自下而上收至塔顶，顶面边长为3.09 m[图4(e)]，塔刹高为1.04 m[图4(d)]。重建模型清晰呈现了塔基、入口及台阶等细部结构[图4(b)]。

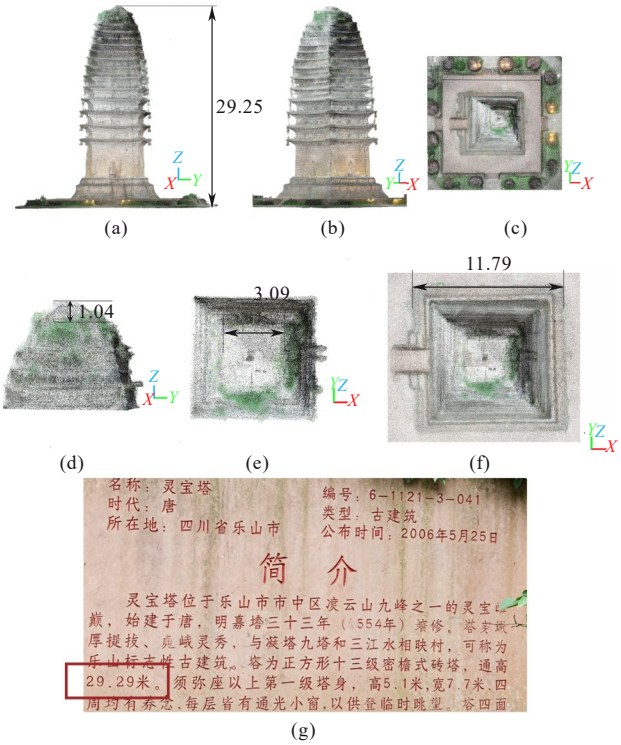


图 4 灵宝塔三维结构重建(单位：m)

Fig. 4 Three-dimensional structural reconstruction of the Lingbao Pagoda (unit: m)

无人机LiDAR技术的核心优势在于其非接触、高精度与高效率的测绘能力。相较于采样范围有限且易受遮挡的传统地面LiDAR，无人机平台可提升作业效率7～10倍[58]，支持对大范围文物群实施快速、周期性的长时序监测[59]。结合多视角摄影测量，该技术可实现亚毫米级的表面重构精度，为永久性数字档案建设、数字文物库开发及虚拟现实展示等深度应用提供关键技术支撑，从而为后续保护工作奠定可靠的数字化基准。

3.2 地形特征

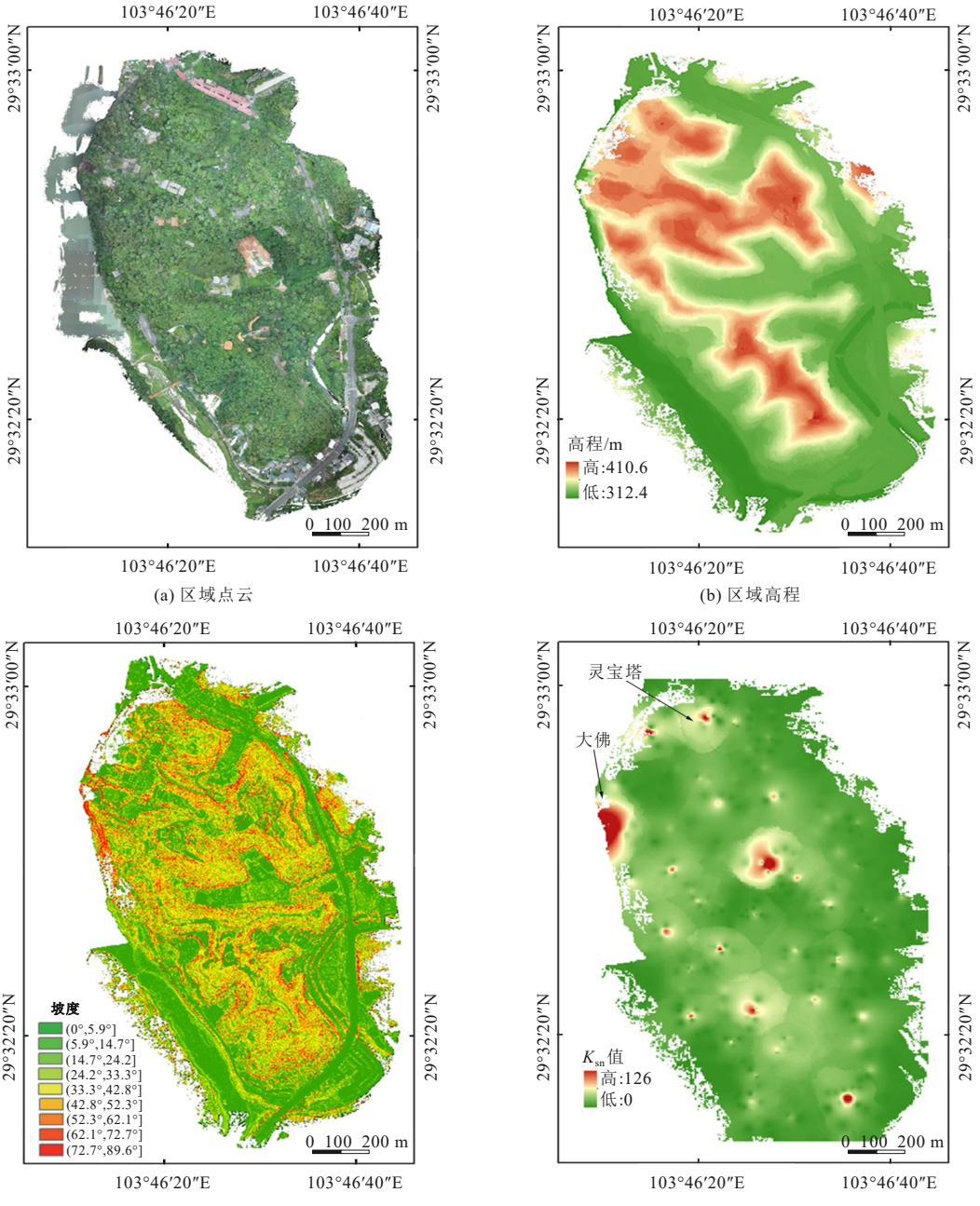
基于乐山大佛景区小尺度高分辨率地形数据，开展了坡度分析与河道陡峭指数(K_{sn})提取。传统遥感技术难以获取此类高分辨率地形数据，而通过对初始点云数据的后期处理，可实现对区域风化状况的精细定量评估。

乐山大佛景区地形起伏显著，呈现典型的山地地貌特征。山体坡度普遍较大，整体等高线密集，高程介于312～410 m之间[图5(b)]。区域平均坡度约为27°，其中大佛所在临江区域地形变化尤为剧烈，坡度普遍超过50°，为全区坡度高值区，主要分布于研究区西侧边界[图5(c)]。过于陡峭的江岸在重力和河流侵蚀作用下稳定性较差，更易发生塌方等地质灾害，对大佛安全构成潜在威胁。灵宝塔位于景区内海拔较高处，周边局部坡度变化显著。为保障建筑稳定性，塔体选址于山体中上部一处相对平整的剥蚀面。

地形是决定植被分布的关键因子，而河道陡峭指数(K_{sn})作为一项重要指标，能够有效反映河道坡度如何受构造抬升速率与岩性抗侵蚀能力的共同影响[60-62]。结果显示，研究区西北部临近乐山大佛区域整体K_{sn}值偏高[图5(d)]，表明该区域下切侵蚀作用较强，滑坡等自然灾害风险较高，需在保护工作中予以重点关注。

3.3 植被分布情况

基于激光雷达点云数据，对乐山大佛景区植被进行系统提取与分析。利用植被与建筑物回波特性



(a) 区域点云　(b) 区域高程

(c) 区域坡度　(d) 区域河流陡峭指数

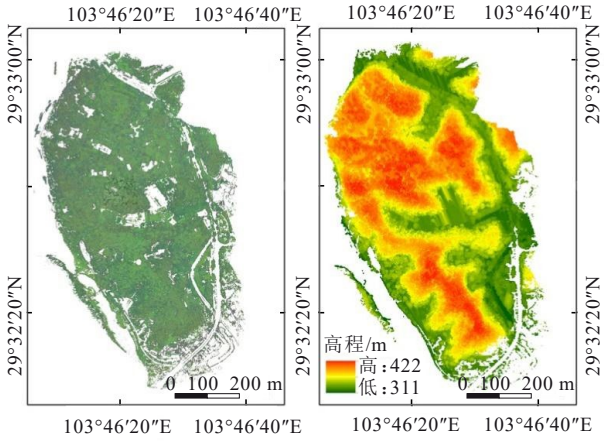
图 5　基于LiDAR点云的研究区地形图

Fig. 5　Topographic map of the study area derived from LiDAR point cloud

的差异进行初步分类，结合HSV（色相、饱和度、明度）色彩空间提取绿色植被点云，并采用形态学滤波优化分类结果，最终获得高精度冠层植被数据［图6(a)］。由图6(a)可知，乐山大佛景区植被覆盖度极高，冠层高度介于312～411 m之间［图6(b)］。

在单木尺度上，基于单木分割方法分析植被空间分布，并耦合冠幅与树高数据识别植被种类，进而推测根系生长状况，为评估植被对岩体稳定性的影响及高风险区域预测提供依据。通过对研究区进行单木分割，共提取超过18 000株植被个体［图7(a)］。统计分析表明，树高主要集中于15～20 m区间，冠层直径普遍小于10 m，平均树高为17.05 m，平均冠幅直径为5.92 m。结合形态参数判断，研究区内植被以常绿阔叶林为主，本研究计算所得参数符合该类树种的典型特征。

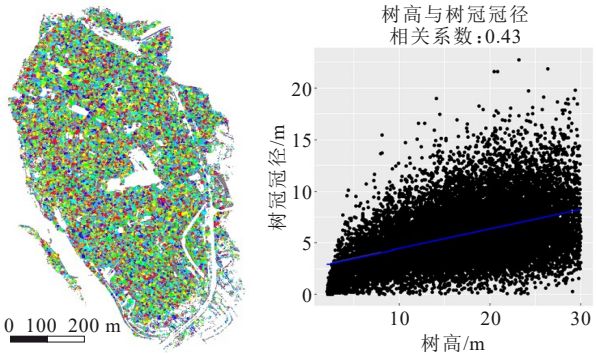
进一步分析显示，乐山大佛周边区域树高与冠幅直径的相关系数为0.43［图7(b)］，表明二者存在一定正相关关系，但相关性较弱。这可能受到多种



(a) 区域植被点云 (b) 植被表面高程

图 6 研究区植被分布图

Fig. 6 Vegetation distribution map of the study area



(a) 单木分割结果 (b) 树高与树冠回归分析

图 7 单木分割结果

Fig. 7 Results of individual tree segmentation

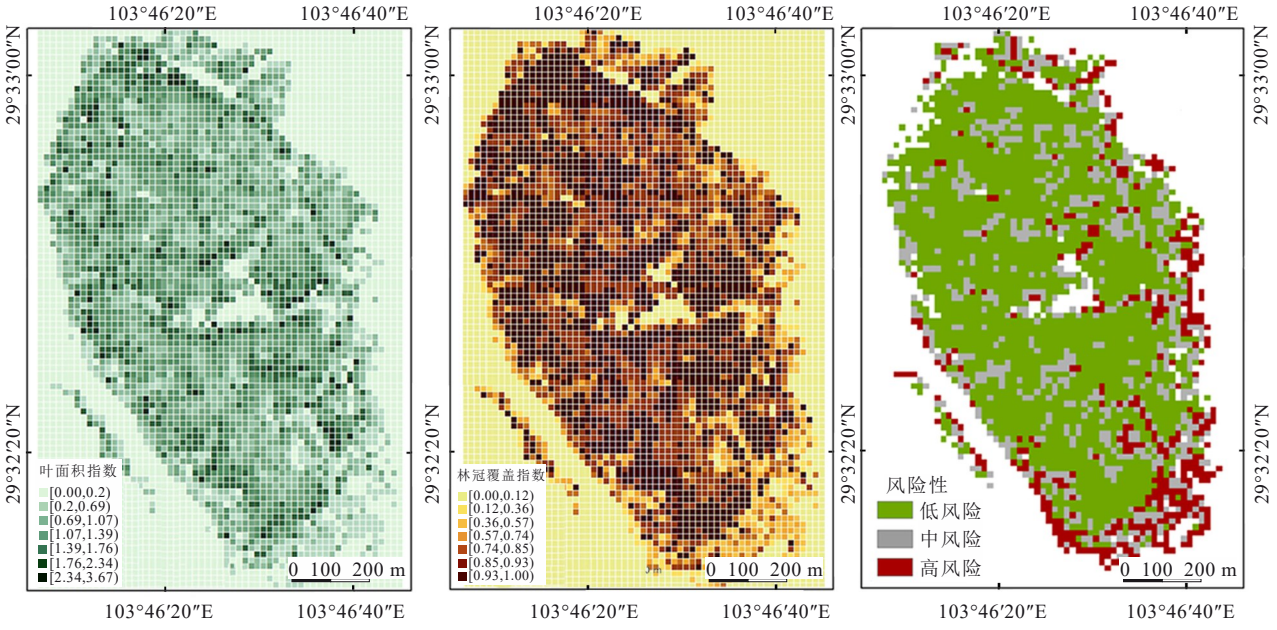
因素的影响,如冠高比在同一树种内变异较小,而在不同树种间差异显著。

需要指出的是,尽管LiDAR点云数据可基于冠层的单木分割,但在植被郁闭度较高区域,受冠层遮蔽及点云穿透能力限制,难以对树干形态进行有效提取与聚类分析。为提升植被茂密区的数据完整性,可采用多次重复扫描并增设林下基站扫描的方式来补充林下点云[63],从而增强点云数据的覆盖度和细节层次。此外,多回波信号在植被与建筑区域存在显著穿透损耗,通过增加扫描次数并结合地基LiDAR数据,可有效提高点云密度与植被结构参数的提取精度。

3.4 森林参数特征

对研究区植被进行栅格化处理,栅格单元大小设为15 m。叶面积指数(LAI)值分布于0~3.7之间[图8(a)]。冠层覆盖率通常反映森林郁闭状况及光照条件[图8(b)]:图中颜色越浅,表示林冠空隙越大,指示冠层较为稀疏或草本、灌木占比较高;颜色越深,则表示林冠越郁闭。区域内林冠空隙值介于0~1.0之间,其空间分布对乐山大佛的保护具有重要影响——较高的空隙率意味着更多阳光可直射地面。

根据中华人民共和国环境保护部相关标准[64],坡度大于15°时,土壤侵蚀显著加剧,需优先实施保护;坡度超过30°的区域则属滑坡和崩塌高风险区。



(a) 植被叶面积指数 (b) 植被林冠覆盖指数 (c) 坡度-植被叶面积指数风险性

图 8 森林参数风险性计算结果

Fig. 8 Calculation results of forest parameter risk assessment

LAI值小于1，通常对应草地、灌木或退化森林，表征较弱的光合作用能力；LAI值小于0.5，多见于裸地、严重退化区或高寒荒漠带，指示生态功能极为有限[65-66]。基于植被指数与坡度之间的关系，本研究将风险等级划分为三类（表2）。对植被指数与坡度数据进行重投影后计算得到的风险分布如图8（c）所示。可见，景区边缘多为高风险区域，这些区域植被覆盖较低而坡度较大，需适当控制人流量并加强防护。

表2　风险等级分类

Table 2　Risk level classification

风险等级	坡度值	LAI值	依据
低风险	＞15°	＞1	文献[64-66]
中风险	15°～30°	0.5～1	文献[64, 66]
高风险	＞30°	＜0.5	文献[64, 66]

由图8可知，乐山大佛景区内植被茂密程度存在明显的空间异质性。林冠空隙分布较为复杂，深绿色区域（指示林冠空隙较小）主要集中于山体中上部。灵宝塔周边植被较为茂盛，较高的LAI值与较低的林冠空隙表明该区域以高大乔木为主。大佛附近植被密度中等，在图中呈浅绿色，林冠空隙较大。这一特征与其临江的地理位置及景区为保持观赏视野而控制人工栽植有关：人工栽植较少使得该区域光照条件较好，进而影响植物根系的生长方向与强度。植物根系过度生长可能侵入大佛本体岩隙，对其结构稳定性构成威胁[67]。然而，植被同时具备干扰气流、减缓雨水直接冲刷的作用，从而间接影响风化进程[68]。不同岩性风化所形成的土壤在养分、pH值和结构方面存在差异，根系分泌的有机酸与腐殖质还会促进岩石化学风化[69]。因此，实施科学的植被管理策略是达成大佛长期保护目标的关键环节。

植被与地形对岩体结构的稳定性存在显著影响，根系侵入可能进一步加剧岩石裂隙的扩展与风化进程。高坡度（＞50°）与高河道陡峭指数（K_{sn}）共同表明，大佛所在崖体正经历强烈下切侵蚀，处于动态不稳定状态，从而加剧了崖体卸荷裂隙发育与表层剥落风险。与此同时，茂密植被通过根劈作用与有机酸分泌，从物理和化学两个层面加速了夹关组疏松砂岩的风化。因此，乐山大佛与灵宝塔正面临着由地形不稳定性与植被生物侵蚀共同构成的协同破坏作用。

4　结论

本研究以乐山市凌云山区域的乐山大佛及周边环境为研究对象，开展高精度地形与植被参数定量分析，并采用无人机载LiDAR技术，结合泊松曲面重建方法，构建了大佛与灵宝塔厘米级精度的三维模型，验证了该技术在文物非接触测绘、数字孪生构建及长期监测方面的高效性与可靠性。主要结论如下：

（1）研究区属构造活跃的山地地貌，地形起伏显著，平均坡度达27°。大佛所在区域坡度与河道陡峭指数（K_{sn}）值较高，地形稳定性较差，物理风化作用强烈。

（2）基于高精度测量，乐山大佛通高为59.87 m，头部高9.69 m，肩宽20.13 m；灵宝塔总高为29.25 m，塔基边长11.79 m，塔刹高1.04 m，含平台外部边长19.98 m。

（3）植被分析结果表明，景区植被以乔木为主，植被覆盖度高，根系发达；基于叶面积指数与坡度数据划分植被生态风险等级后发现，乐山大佛景区边缘植被稀疏且坡度陡峭的区域风险较高，需通过科学植被管理以平衡生态保护与石窟安全。

研究结果为乐山大佛及类似文化遗产的风化机理研究、动态监测与数字存档提供了可靠数据基础与方法支撑，为大尺度、复杂环境下的文化遗产监测提供了可复制的解决方案，提升了文物风险识别的精准性与防控措施的预测能力，对推动我国石质文物从被动修复向主动预防、从经验判断向数据驱动的现代保护模式转型具有实践意义

参考文献（References）

[1] Glendinning M. The conservation movement: a history of architectural preservation: antiquity to modernity [M]. London: Routledge, 2013.

[2] Labadi S. UNESCO, cultural heritage, and outstanding universal value: value-based analyses of the world heritage and intangible cultural heritage conventions [M]. Lanham: AltaMira Press, 2012.

[3] 贺云翱. 文化遗产学初论[J]. 南京大学学报(哲学·人文科学·社会科学), 2007, 44(3): 127-139.
He Yun'ao. On the studies of cultural heritage [J]. Journal of Nanjing University (Philosophy, Humanities and Social Sciences), 2007, 44(3): 127-139.

[4] Favero-Longo S E, Viles H A. A review of the nature, role and control of lithobionts on stone cultural heritage: weighing-up and managing biodeterioration and bioprotection [J]. World

Journal of Microbiology and Biotechnology, 2020, 36(7): 100.

[5] Winkler E. Stone in architecture: properties, durability[M]. 3rd ed. Berlin: Springer, 1994.

[6] Charola A E, Ware R. Acid deposition and the deterioration of stone: a brief review of a broad topic[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2002, 205(1): 393-406.

[7] 陈旭黎, 吴福佳, 孙博, 等. 氮添加对乐山大佛裸露岩石与地衣覆盖岩石表面细菌群落结构的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8762-8772.
Chen Xuli, Wu Fujia, Sun Bo, et al. Effects of nitrogen addition on bacterial community structure on bare rock and lichen covered rock surface of Leshan Giant Buddha[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(21): 8762-8772.

[8] Warscheid T, Braams J. Biodeterioration of stone: a review[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2000, 46(4): 343-368.

[9] Macedo M F, Miller A Z, Dionísio A, et al. Biodiversity of cyanobacteria and green algae on monuments in the Mediterranean Basin: an overview[J]. Microbiology, 2009, 155(11): 3476-3490.

[10] 彭学艺. 乐山灵宝塔始建年代之我见[J]. 四川文物, 1995(1): 66-68.
Peng Xueyi. My opinion on the founding age of Leshan Lingbao Tower[J]. Sichuan Cultural Relics, 1995(1): 66-68.

[11] Pieraccini M, Guidi G, Atzeni C. 3D digitizing of cultural heritage[J]. Journal of Cultural Heritage, 2001, 2(1): 63-70.

[12] Rinaudo F, Chiabrando F, Lingua A, et al. Archaeological site monitoring: UAV photogrammetry can be an answer[C]//ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2012, 39(B1): 583-588.

[13] Colomina I, Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 92: 79-97.

[14] Remondino F. Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning[J]. Remote Sensing, 2011, 3(6): 1104-1138.

[15] 蒲天鹏, 王海波. 无人机贴近摄影测量技术在城市建筑三维精细建模中的应用研究[J]. 测绘科学技术, 2024, 12(3): 176-183.
Pu Tianpeng, Wang Haibo. Research on the application of UAV proximity photogrammetry technology in 3D fine modeling of urban buildings[J]. Geomatics Science and Technology, 2024, 12(3): 176-183.

[16] Yang Su, Xu Shishuo, Huang Wei. 3D point cloud for cultural heritage: a scientometric survey[J]. Remote Sensing, 2022, 14(21): 5542.

[17] Baltsavias E P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(2-3): 199-214.

[18] Remondino F, Rizzi A, Barazzetti L, et al. Review of geometric and radiometric analyses of paintings[J]. The Photogrammetric Record, 2011, 26(136): 439-461.

[19] Doneus M, Briese C, Fera M, et al. Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning[J]. Journal of Archaeological Science, 2008, 35(4): 882-893.

[20] Chase A F, Chase D Z, Weishampel J F, et al. Airborne LiDAR, archaeology, and the ancient Maya landscape at Caracol, Belize[J]. Journal of Archaeological Science, 2011, 38(2): 387-398.

[21] 李增元, 刘清旺, 庞勇. 激光雷达森林参数反演研究进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1138-1150.
Li Zengyuan, Liu Qingwang, Pang Yong. Review on forest parameters inversion using LiDAR[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 1138-1150.

[22] Moon D, Chung S, Kwon S, et al. Comparison and utilization of point cloud generated from photogrammetry and laser scanning: 3D world model for smart heavy equipment planning[J]. Automation in Construction, 2019, 98: 322-331.

[23] Leberl F, Irschara A, Pock T, et al. Point clouds[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2010, 76(10): 1123-1134.

[24] El-Hakim S, Beraldin J A, Remondino F, et al. Using terrestrial laser scanning and digital images for the 3D modelling of the Erechteion, Acropolis of Athens[C]// Conference on Digital Media and its Applications in Cultural Heritage (DMACH). 2008: 3-16.

[25] Guidi G, Beraldin J A, Atzeni C. High-accuracy 3D modeling of cultural heritage: the digitizing of Donatello's "Maddalena"[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(3): 370-380.

[26] 刘峰, 武金辉, 张孝荣, 等. 机载激光点云构建黄土高原复杂地貌区精细DEM实验研究[J]. 测绘工程, 2023, 32(3): 44-53.
Liu Feng, Wu Jinhui, Zhang Xiaorong, et al. Experimental study on constructing fine DEM in complex geomorphic gegion of Loess Plateau by airborne laser point cloud[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2023, 32(3): 44-53.

[27] Wang R S, Peethambaran J, Chen D. LiDAR point clouds to 3-D urban models: a review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(2): 606-627.

[28] Mohan M, Silva C A, Klauberg C, et al. Individual tree detection from unmanned aerial vehicle (UAV) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest[J]. Forests, 2017, 8(9): 340.

[29] Lefsky M A, Cohen W B, Harding D J, et al. Lidar remote sensing of above-ground biomass in three biomes[J]. Global Ecology and Biogeography, 2002, 11(5): 393-399.

[30] Hyde P, Dubayah R, Peterson B, et al. Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using waveform Lidar: validation of montane ecosystems[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 96(3-4): 427-437.

[31] 陈沙沙, 孙克勤. 中国世界文化—自然遗产可持续发展研

究：以峨眉山—乐山大佛为例[J]. 资源开发与市场，2010，26(12)：1141-1143.
Chen Shasha，Sun Keqin. Study on sustainable development of world cultural and natural heritage：a case of Mountain Emei scenic area，including Leshan Giant Buddha scenic area [J]. Resource Development & Market，2010，26(12)：1141-1143.

[32] 干树德. 乐山大佛建造始末考略[J]. 四川文物，1997(1)：15-20.
Gan Shude. Textual research on the construction of Leshan Giant Buddha[J]. Sichuan Cultural Relics，1997(1)：15-20.

[33] 乔秀夫，郭宪璞，李海兵，等. 龙门山晚三叠世软沉积物变形与印支期构造运动[J]. 地质学报，2012，86(1)：132-156.
Qiao Xiufu，Guo Xianpu，Li Haibing，et al. Soft-sediment deformation in the Late Triassic and the indosinian tectonic movement in Longmenshan[J]. Acta Geologica Sinica，2012，86(1)：132-156.

[34] 四川省地质矿产局.峨眉幅(H-48-20) 1∶20万地质图[CM]. 成都：四川省地质矿产局，1971.
Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources. Geologic map of Emei sheet (H-48-20)，1∶200 000[CM]. Chengdu：Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources，1971.

[35] 何黎松，向芳，丁力，等. 乐山大佛砂岩微观风化特征和风化机理[J]. 四川地质学报，2024，44(1)：113-118.
He Lisong，Xiang Fang，Ding Li，et al. Micro weathering characteristics and mechanism of Leshan Giant Buddha sandstone[J]. Acta Geologica Sichuan，2024，44(1)：113-118.

[36] 杨必胜，梁福逊，黄荣刚. 三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势[J]. 测绘学报，2017，46(10)：1509-1516.
Yang Bisheng，Liang Fuxun，Huang Ronggang. Progress，challenges and perspectives of 3D LiDAR point cloud processing[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica，2017，46(10)：1509-1516.

[37] 索俊锋，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.

[38] Besl P J，Mckay N D. Method for registration of 3-D shapes [J]. Sensor Fusion IV：Control Paradigms and Data Structures，1992，1611：586-606.

[39] Curless B，Levoy M. A volumetric method for building complex models from range images[C]//Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York：ACM，1996：303-312.

[40] Rusu R B，Cousins S. 3D is here：point cloud library (PCL) [C]//Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai：IEEE，2011：1-4.

[41] Liu Xiaoye. Airborne LiDAR for DEM generation：some critical issues [J]. Progress in Physical Geography：Earth and Environment，2008，32(1)：31-49.

[42] Kazhdan M，Bolitho M，Hoppe H. Poisson surface reconstruction[C]// The Fourth Eurographics Symposium On Geometry Processing，2006：61-70.

[43] Kazhdan M，Hoppe H. Screened Poisson surface reconstruction[J]. ACM Transactions on Graphics，2013，32(3)：1-13.

[44] Berger M，Tagliasacchi A，Seversky L M，et al. A survey of surface reconstruction from point clouds[J]. Computer Graphics Forum，2017，36(1)：301-329.

[45] Howard A D，Dietrich W E，Seidl M A. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales[J]. Journal of Geophysical Research：Solid Earth，1994，99(B7)：13971-13986.

[46] Duvall A，Kirby E，Burbank D. Tectonic and lithologic controls on bedrock channel profiles and processes in coastal California[J]. Journal of Geophysical Research：Earth Surface，2004，109(F3)：2003JF000086.

[47] Schwanghart W，Scherler D. Short communication：TopoToolbox 2—MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences [J]. Earth Surface Dynamics，2014，2(1)：1-7.

[48] Lang N，Jetz W，Schindler K，et al. A high-resolution canopy height model of the Earth[J]. Nature Ecology & Evolution，2023，7(11)：1778-1789.

[49] Khosravipour A，Skidmore A K，WANG T J，et al. Effect of slope on treetop detection using a LiDAR Canopy Height Model [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing，2015，104：44-52.

[50] Pouliot D A，King D J，Bell F W，et al. Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration[J]. Remote Sensing of Environment，2002，82(2-3)：322-334.

[51] 郭昱杉，刘庆生，刘高焕，等. 基于标记控制分水岭分割方法的高分辨率遥感影像单木树冠提取[J]. 地球信息科学学报，2016，18(9)：1259-1266.
Guo Yushan，Liu Qingsheng，Liu Gaohuan，et al. Individual tree crown extraction of high resolution image based on marker-controlled watershed segmentation method [J]. Journal of Geo-Information Science，2016，18(9)：1259-1266.

[52] 刘会玲，张晓丽，张莹，等. 机载激光雷达单木识别研究进展[J]. 激光与光电子学进展，2018，55(8)：82805.
Liu Huiling，Zhang Xiaoli，Zhang Ying，et al. Review on individual tree detection based on airborne LiDAR [J]. Laser & Optoelectronics Progress，2018，55(8)：82805.

[53] Campbell G S，Norman J M. The description and measurement of plant canopy structure [M]//Plant Canopies. Cambridge，UK：Cambridge University Press，1989：1-20.

[54] Korhonen L，Korhonen K，Rautiainen M，et al. Estimation of forest canopy cover：a comparison of field measurement techniques[J]. Silva Fennica，2006，40(4)：577-588.

[55] Geng J，Roujean J L，Kuusk A，et al. A universal canopy gap fraction model for forests with various tree distributions based on Nilson's models considering directional overlaps among crowns [J]. Agricultural and Forest Meteorology，2024，352：110026.

[56] 罗孟汀. 乐山大佛高度研究[J]. 四川文物，1989(2)：38-43.

Luo Mengting. Study on the height of Leshan Giant Buddha [J]. Sichuan Cultural Relics, 1989(2): 38-43.

[57] 中铁西北科学研究院. 乐山大佛勘测维护项目阶段性成果白皮书[R]. 乐山: 中铁西北科学研究院, 2019:2-6.
China Railway Northwest Scientific Research Institute Co., Ltd. Phased achievement white paper on the survey and maintenance project of the Leshan Giant Buddha [R]. Leshan: China Railway Northwest Scientific Research Institute Co., Ltd, 2019: 2-6.

[58] Liang Xinlian, Wang Yunsheng, Jaakkola A, et al. Forest data collection using terrestrial image-based point clouds from a handheld camera compared to terrestrial and personal laser scanning[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(9): 5117-5132.

[59] Scherer S, Singh S, Chamberlain L, et al. Flying fast and low among obstacles: methodology and experiments[J]. The International Journal of Robotics Research, 2008, 27(5): 549-574.

[60] Howard A D, Dietrich W E, Seidl M A. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1994, 99(B7): 13971-13986.

[61] Duvall A, Kirby E, Burbank D. Tectonic and lithologic controls on bedrock channel profiles and processes in coastal California[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2004, 109(F3): 2003JF000086.

[62] Kazhdan M, Hoppe H. Screened Poisson surface reconstruction[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(3): 1-13.

[63] Fritz A, Kattenborn T, Koch B. UAV-based photogrammetric point clouds-tree stem mapping in open stands in comparison to terrestrial laser scanner point clouds[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2013, 40: 141-146.

[64] 生态保护红线划定指南: 环办生态[2017]48号[S].
Guidelines for the delineation of ecological protection red lines: No. 48 [2017] of the Office of Ecological and Environmental Protection[S].

[65] 中华人民共和国科学技术部. 全球生态环境遥感监测2013年度报告[R]. 北京:中华人民共和国科学技术部,2014: 5-8.
Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. 2013 annual report on global ecological environment remote sensing monitoring[R]. Beijing: Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, 2014: 5-8.

[66] Lin Jinhuang, Chen Wenhui, Qi Xinhua, et al. Risk assessment and its influencing factors analysis of geological hazards in typical mountain environment[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 309: 127077.

[67] Kelly E F, Chadwick O A, Hilinski T E. The effect of plants on mineral weathering[J]. Biogeochemistry, 1998, 42(1): 21-53.

[68] 江海英, 贾坤, 赵祥, 等. 山地叶面积指数反演理论、方法与研究进展[J]. 遥感学报, 2020, 24(12): 1433-1449.
Jiang Haiying, Jia Kun, Zhao Xiang, et al. Review on the theory, method, and research progress of leaf area index estimation in mountainous areas[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(12): 1433-1449.

[69] Pawlik Ł, Phillips J D, Šamonil P. Roots, rock, and regolith: biomechanical and biochemical weathering by trees and its impact on hillslopes: a critical literature review[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 159: 142-159.

(本文编辑:赵乘程)