

空间信息技术应用于文化遗产研究的新进展

李铁乔^{1,2}, 刘传胜¹, 习晓环¹, 王心源¹

1. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 通过回顾空间信息技术应用于文化遗产研究的发展历程, 分析了各项技术方法的优势与不足, 论述了空间信息技术应用于文化遗产研究的最新进展和未来发展趋势。最新的应用进展主要表现在: 探测手段的多样化、数据存储管理的集成化、遗产信息虚拟可视化表达、遗址地空间信息智能分析和多种空间信息技术的综合应用。研究结果认为, 空间信息技术应用于文化遗产研究正逐步向网络化、集成化、智能化的新阶段迈进。

关键词 空间信息技术; 文化遗产; 集成化; 智能化

中图分类号 K854

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.06.013

New Progress of Spatial Information Technology in the Research of Cultural Heritage

LI Tieqiao^{1,2}, LIU Chuansheng¹, XI Xiaohuan¹, WANG Xinyuan¹

1. Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China
2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The study of the cultural heritage, related with the human history in general, is a long-term and multi-disciplinary complex task with important significance. New methods and techniques such as the spatial information technology will remarkably help clarify the time and spatial characteristics of the cultural heritage. As is known, the spatial information technology has been widely used in many aspects of cultural heritage researches due to its powerful capabilities to acquire, store, represent and analyze the spatial data. This paper discusses the current status and the latest progress of the spatial information technology application in the cultural heritage from several key aspects, i.e., various detection techniques, data integration, representative visualization, spatial information intelligent analysis of heritage sites and the comprehensive application of the multiple spatial information technology. The results show that the research in this field is more and more concerned with network, integration and intelligent level.

Keywords spatial information technology; cultural heritage; integration; intellectualization

0 引言

文化遗产是人类历史的信息载体, 对其研究与保护是一项长期的多学科综合的复杂工作, 具有明显的时间与空间特征^[1]。遥感(RS)、地理信息系统(GIS)、全球导航卫星系统(GNSS)和虚拟现实(VR)等空间信息技术凭借自身强大的空

间数据获取、存储管理、可视化表达与分析处理能力为文化遗产研究提供了全新的技术手段, 极大地促进了文化遗产研究的技术革新与信息化快速发展。

空间信息技术引入文化遗产的研究是一个跨学科交叉融合的过程。早在1906年, 遥感技术便开始应用于对古遗址

收稿日期: 2011-09-22; 修回日期: 2011-11-24

基金项目: 国家重点基础发展研究计划(973计划)项目(2009CB723900)

作者简介: 李铁乔, 研究方向为空间技术应用于数字遗产, 电子邮箱: tqli@ceode.ac.cn; 习晓环(通信作者), 副研究员, 研究方向为地图学与地理信息系统, 电子邮箱: xhxi@ceode.ac.cn

的探测。随后,在第一次世界大战期间科学家们进一步验证了黑白航空像片识别古遗址特征的能力,并于20世纪30年代,初步建立了航空摄影考古学的理论基础^[2]。随着航天遥感技术的兴起以及遥感技术的商业化发展与民用化普及,以高分辨率光学遥感为主、微波和高光谱等多种遥感技术综合应用的遗址探测体系逐渐发展起来,为考古探测和文化遗址的监测与保护提供了丰富的数据源。20世纪80年代,出现了基于GIS的遗址制图与数据管理技术,GIS分析在遗址预测与景观考古中的应用也逐渐盛行,并通过结合GPS的古文物空间位置标定技术和虚拟考古技术,解决了考古学空间性和多变量性问题,为现代区域考古学提供了一整套全新的方法和手段。近年来,随着WEB GIS和精细测绘技术的迅猛发展,空间信息技术不仅为“数字遗产”研究提供了方便快捷的手段,而且还在文物及遗址信息的可视化表达,尤其是大遗址规划管理与文化遗产信息共享等方面发挥了重要作用。

目前,在对地观测技术与“数字地球”理念的推动下,空间信息技术在文化遗产领域的应用已进入一个新的发展时期,主要表现为:(1)探测手段的改进与探测精度的提升方面^[3];(2)从单一数据源发展到多源信息的综合分析处理^[4];(3)逐渐向多时相、多维度趋势发展^[5];(4)不断走向网络化、共享化、智能化^[6];(5)从传统的定性分析向定量模型化转变^[7]。本文试图通过探讨目前的发展现状及最新研究进展,梳理和总结各种技术方法的优势与不足,进而展望未来的发展趋势。

1 研究进展

空间信息技术正日益成为文化遗产研究不可或缺的技术支撑,并已取得了诸多进展,主要表现在以下5个方面。

1.1 探测手段多样化

古遗址探测手段多种多样,主要可分为航空与航天遥感技术和地球物理探测技术2大类。

(1) 航空与航天遥感技术

航空与航天遥感技术探测尺度大、信息获取速度快,为大区域考古勘察提供多种经济便捷的探测手段,并取得了一系列的进展。首先,在光学遥感方面,高分辨率影像的精度与数据处理能力得到了极大的提升,由原来的30m提升到目前的0.5m,航空影像的分辨率更是高达厘米级^[8-10]。光学图像的考古解译技术不仅在原有的阴影、土壤和植被特征的基础上发展了积水、霜雪等新解译标志,数据处理流程与信息提取方法也得到逐步加强^[10],如基于图像分割技术的考古特征自动提取和基于空间自相关统计方法的遗址地变化监测^[11-12]。其次,高光谱遥感方面,通过改进图像处理方法与传统航空像片结合,极大地增强了对细小历史遗存的识别能力^[13-14],如在植被覆盖多的地区选择可见光近红外波段,而在植被稀少的地区选择短波红外波段更有利于突出考古目标^[14]。再次,近年来迅猛发展的激光雷达遥感技术不仅能穿透植被冠层对密林区夯土等遗迹进行考古调查,还能在古老航片的辅助下反映较

长历史时期的地表特征^[15-16]。此外,微波遥感、热红外遥感等技术在考古探测中的应用也在不断拓宽,新提出的基于Google earth的考古探测虽然因为缺乏系统化的处理流程,对遗址点的识别具有较大的随机性而颇具争议,但也取得了一定的成果^[17-19]。

(2) 地球物理探测技术

常用的地球物理探测方法主要是磁力探测法、电阻率探测法和微波脉冲“探地雷达”(Ground Penetrating Radar,GPR)3种。最新研究表明,磁力探测法特别适合对古代冶炼熔炉、窑等烘烤过的岩石等地物位置的探测^[20],但易受到金属、管道等埋藏物的干扰。电阻率探测法能够很好地揭示地下大尺度遗存(如古城墙、护城河)的结构特征,常结合新发展的激光极化法和自然电位法等电学考古探测法来辅助GPR以增强和验证探测结果^[21]。GPR技术对细小的地下埋藏探测能力强,对地下目标的介电常数、电导率和磁导率非常敏感,且不易受到城市中电磁效应的影响^[22-23]。此外,地球物理探测技术还包括地震法、微重力法、甚低频电磁法等多种方法,由于易受土壤信号的干扰,这些方法又各有局限性,因而在实际应用中常常结合多种方法进行综合使用^[24-25]。

1.2 数据存储管理的集成化

目前文化遗产数据的存储管理主要以空间数据库和各种信息系统为主,发展了诸如考古数据服务、文物信息系统、考古信息框架等一系列应用产品^[9,26]。其中,文化遗产数据的标准化集成管理与网络共享发布是该领域的2大研究热点。

(1) 文化遗产数据的标准化

为了解决多源异构文化遗产数据的集成化存储和管理的问题,人们引入了基于元数据与本体的数据整合技术,并制定了相应的数据标准。常用的元数据标准(如MIDAS XML)完全遵循Schema规范,能够支持跨国家、跨区域的数据整合以及考古数据服务的快速在线检索,通过发展Archeo ML等通用性数据模型促进了遗产数据元数据整合技术的快速标准化发展^[27]。与元数据不同,本体是定义元数据及其相关关系的规范,具有良好的概念层次结构,支持知识的推理,能够解决数据标准规范的定义与数据描述语言规范化的问题。目前国际上文化遗产的本体模型主要包括CIDOC CRM,ABC ONTOLOGY以及CDWA等模型^[28]。其中,CIDOC CRM模型定义的实体与属性涵盖的信息量最多,应用最广,不仅能借助地理本体弥补自身在地理信息表达方面的不足,而且还可以通过建立语义参照系统附加语义数据来解决时空信息模糊、缺失甚至出现冲突时的数据整合问题^[29-30]。

(2) 数据共享与网络发布

文化遗产数据不同于传统数据的网络应用,其最新的共享与发布主要采用语义网技术。针对文化遗产应用的语义网借助于本体与元数据之间的相互映射实现对异构元数据的快速整合,支持对历史背景信息的快速导入、更新和网络查询,是数据集成化共享发布的重要平台^[6,31]。最新的语义网不仅可

用于遗址点的旅游管理,还发展了针对文物的语义搜索引擎与语义维基百科等新应用,并将逐步解决文化遗产领域一些敏感数据的保护和管理问题^[9,32]。

1.3 基于精细测绘的考古制图与虚拟可视化表达

可视化表达指对考古遗存的直接显示与古遗址的重建,主要包括考古制图、文物数字化与古环境重建3个方面^[9]。

(1) 考古制图

考古制图是遗址可视化表达的一项重要技术,以往通常采用已有的制图标准,结合模板来绘制地图^[9]。然而近几年的应用研究发现,对于一些不完整、不精确或不确定的时空信息,常常需要进行某些特殊处理,如 Runz 等^[33]采用模糊 Hough 变换,实现了对古遗迹数据的可视化表达及信息挖掘;高分辨率卫星遥感立体影像表现力更强,IKONOS 和 ASTER 等卫星的立体影像在经过正射校正后能够通过提取数字表面模型绘制考古研究的底图,因而被广泛用于古遗址的 3D 可视研究、立体分析与距离量测^[34-36]。

(2) 文物数字化

主要用于文物的数字化复原和展示,对文物的保护、研究和展示意义重大。在计算机技术与近景摄影测量技术的推动下,新兴的第三代工业计算机断层照相法(Computed Tomography, CT)技术能对文物内部(如青铜器)进行任意视角的测量,制作文物三维演示动画;三维激光扫描仪不仅可以对文物的现状进行三维数字化,还能对文物局部的变形进行准确地测量,因而广泛应用于古佛像与古建筑(如敦煌莫高窟、故宫、乐山大佛等)的数字化,是目前文物表面 3D 建模的最理想选择^[37]。此外,结构光技术革新了激光探测技术,可避免图像之间的匹配麻烦,也取得了较好的应用^[38]。

(3) 古环境重建

与文物数字化不同,古环境重建主要通过模拟与恢复古遗址区域的地形、地貌及遗址点分布特征,探讨人类活动与自然环境之间的相互影响。虚拟现实技术与精细测绘、三维建模技术的综合应用是该领域的研究热点,如希腊北部遗址点的重建很好地支持了三维数据分析和地层数据解译;非洲南部一个古遗址洞穴的三维重建不仅能用于遗址点的旅游管理、保护和恢复,还能为后代提供数据参照和记录^[39-40]。

1.4 遗产地空间信息智能分析

针对遗产地空间分析的特殊需求,GIS 的空间分析不仅包括传统的缓冲区分析、叠加分析、点线分析、地形分析、拓扑分析和空间统计分析,而且产生了相应的智能化分析方法及应用。

(1) 可视域分析

可视域分析指采用 DEM/TIN、智能体和元胞自动机等技术提取一定区域的地表面可被探测到的地域范围,是古遗址点空间分析中的重要内容之一^[41]。在传统基于 DEM 的可视域算法的基础上, Juan 等^[42]提出一种从 DEM 中提取立体角的可视域计算方法,比已有的处理方法精度更高,且对于距离没

有明显限制。Llobera^[43]引入共视性概念,强调遗址点之间的可视性而且可以相互共享。Paliout 等提出的新方法通过完全重建三维古环境,支持对各种形状、样式的 3D 模型对象的可视域分析^[44]。

(2) 遗址预测

遗址预测指利用已知遗址点在空间位置上表现出的趋势性(例如接近水源、临近交通路线、较好的可视性位置等)对可能的未知遗址点位置进行模型模拟与预测。基于统计概率的逻辑斯蒂回归模型是近期应用最多的一个模型,在使用过程中尽可能全面地考虑各种环境因素的影响,确保输入数据的准确性,并针对不同时期分别建立独立的预测模型^[45]。Vaughn 等^[46]在对伯利兹城的研究中选择绿度、坡向与地面平坦度3个因子建立了逻辑斯蒂回归最佳预测模型。此外,有部分学者采用斯米尔诺夫统计检验方法、权重计算方法和回归树等方法进行遗址预测,取得了很好的应用效果^[47-48]。

1.5 综合应用

空间信息的综合应用能够充分利用“3S”等技术在功能上的互补性,为文化遗产研究提供更加全面的研究方法与技术手段。如基于数据字典的 GPS 与 GIS 的集成应用允许用户通过自定义的字段类型来连接矢量数据,有效地解决了 GPS 在考古探测中标定的文物出土位置的数字化存储管理问题^[9]。Kan 等基于“3S”技术提出的考古信息综合研究体系较好地满足了考古应用的高层次需求^[49]。此外,空间信息集成化在地质遗产资源保护、历史文化资源普查、遗址地的环境监测保护与影响因子分析等方面也有广泛的应用^[50-52]。

2 发展趋势及展望

空间信息技术经过长期的发展,在文化遗产领域的应用已初具规模,但现阶段的空间信息技术自身发展还不够完善,在文化遗产研究中尚存更广阔的发展空间。

2.1 存在的不足与发展趋势

在遥感考古探测方面,当前对遗址信息(尤其是细小遗存)的识别还存在较大的不确定性,以高光谱遥感、GPR 为主的小尺度遗址探测技术正逐步成为遗产研究的热点^[8,22]。尽可能多地利用多种探测数据,建立有效可靠的自动或半自动考古信息提取流程,整合传统考古数据资源(如田野考古、试验、挖掘和历史文档)及其他多种科学性检验手段是未来遥感考古探测的主要发展方向。

在数据存储方面,如何更好实现多源海量异构文化遗产信息的集成化存储与管理将是一个长期的研究课题。未来的研究重点将不再局限于建立统一的数据存储标准和实现多源海量、异构数据的网络化共享发布,还会发展对文化遗产空间数据与属性数据结合体的数据挖掘,从而达到 GIS 应用的更高层次。

由于受到源数据精度、处理流程与网络传输效率等因素的影响,目前的文化遗产可视化效果还不够理想,未来将朝

着信息获取的高精度化、可视化处理的高性能并行化与虚拟表达的网络化等方向发展,从而满足动态、实时和三维可视化的需求,获得更好的交互性与沉浸感效果^[9]。

随着研究的深入,传统的 GIS 分析功能无法满足文化遗产领域的发展需求,基于智能体和元胞自动机的可视域分析技术在计算效率、影响因素分析等方面仍需进一步加强^[41-42]。另外,遗址预测模型与古代人地关系研究中对探测尺度、环境因子的考虑尚不够全面,引入传统建筑学、美学以及风水学说的思想对遗址的预测将会有较大帮助。

2.2 未来展望

(1) 多种空间信息技术高度集成化应用

随着“数字地球”、“智慧地球”等概念的提出,在未来的文化遗产研究中空间信息技术的集成化趋势会越来越明显。目前在文化遗产领域的“3S”集成化应用中各项技术还处于分散、独立运行状态,软硬件平台不统一,需要进一步整合。建立一种高效管理各类文化遗产信息资源和提供各种应用与服务的“数字遗产”信息基础平台,在信息高度集成化的基础上开展多学科综合的文化遗产研究将是未来发展的一个显著特征。

(2) 空间信息技术的网络化、智能化趋势

受到物联网、移动导航定位及人工智能等新技术的影响,空间信息技术的网络化和智能化的发展趋势也毋庸置疑。空间信息技术将能够通过利用物联网技术实现对文化遗产信息的网络化、智能化管理,解决分布式异构网络环境下多元、多维、多尺度、多时态遗产空间数据的管理问题,基于网络服务实现文化遗产信息的共享与数据互操作。未来的文化遗产研究还将发展基于云计算和智能 Agent 的空间信息服务,向着数据共享化、平台网络化、系统智能化和应用社会化的方向发展。

3 结束语

空间信息技术在文化遗产研究中的应用遍及信息的获取、分析处理、存储管理与可视化表达等多个方面,并已经取得了诸多成果。在当前空间信息技术快速发展的趋向下,文化遗产研究正逐步进入信息化、网络化阶段,并逐步向空间信息的集成化、智能化方向迈进。

然而,空间信息技术在文化遗产中的应用是一项长期复杂的工作,由于技术上的限制,其应用效果还不尽如人意,仍需要各相关行业专家学者的积极参与和共同努力。在未来的发展过程中,空间信息技术将作为文化遗产研究的技术基础与核心而受到更加广泛的关注,空间信息技术在文化遗产研究领域将发挥更大的作用。

参考文献 (References)

[1] 赵生才. 人类文化遗产信息的空间认识[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 687-691.

Zhao Shengcai. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(4): 687-691.

[2] 聂跃平, 杨林. 中国遥感技术在考古中的应用与发展[J]. 遥感学报, 2009, 13(5): 940-962.

Nie Yueping, Yang Lin. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13 (5): 940-962.

[3] Giardino M J. A history of NASA remote sensing contributions to archaeology[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2011, 38(9): 1-7.

[4] Lasaponara R, Masini N, Rizzo E, et al. New discoveries in the Piramide Naranjada in Cahuachi (Peru) using satellite, Ground Probing Radar and magnetic investigations [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2011, 38 (9): 2031-2039.

[5] Deroin J P, Téreygeol F, Heckes J. Evaluation of very high to medium resolution multispectral satellite imagery for geoarchaeology in arid regions -case study from Jabali, Yemen [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2011, 38(1): 101-114.

[6] Witte R, Gitzinger T, Kappler T, et al. A semantic Wiki approach to cultural heritage data management [J]. *Language Technology for Cultural Heritage Data (LaTeCH 2008)*, Marrakech, Morocco June, 2008, 1(6): 61-71.

[7] Gouma M, Wijngaarden G J V, Soetens S. Assessing the effects of geomorphological processes on archaeological densities: A GIS case study on Zakynthos Island, Greece[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2011, 38(10): 1-12.

[8] Gron O, Palmér S, Stylegar F A, et al. Interpretation of archaeological small-scale features in spectral images[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2011, 38(9): 2024-2030.

[9] McCoy M D, Ladefoged T N. New developments in the use of spatial technology in archaeology [J]. *Journal of Archaeological Research*, 2009, 17(3): 263-295.

[10] Lasaponara R, Masini N. Satellite remote sensing in archaeology: Past, present and future perspectives [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2011, 2(2): 1-7.

[11] Jahjah M, Ulivieri C. Automatic archaeological feature extraction from satellite VHR images [J]. *Acta Astronautica*, 2010, 66 (9-10): 1302-1310.

[12] Lasaponara R, Masini N. Facing the Archaeological looting in Peru by using very high resolution satellite imagery and local spatial autocorrelation statistics [C]/Computational Science and Its Applications-CICCSA 2010. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 254-261.

[13] Bassani C, Cavalli R M, Goffredo R, et al. Specific spectral bands for different land cover contexts to improve the efficiency of remote sensing archaeological prospection: The Arpi case study [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2009, 10 (S1): e41-e48.

[14] Cavalli R M, Colosi F, Palombo A, et al. Remote hyperspectral imagery as a support to archaeological prospection [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2007, 8(3): 272-283.

[15] Lasaponara R, Masini N. On the processing of aerial LiDAR data for supporting enhancement, interpretation and mapping of archaeological features [J]. *Computational Science and Its Applications-ICCSA 2011*, 2011, 392-406.

[16] Coluzzi R, Masini N, Lasaponara R. Flights into the past: full-waveform airborne laser scanning data for archaeological investigation [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2010, 38(9): 1-10.

[17] Pieraccini M, Fratini M, Dei D, et al. Structural testing of historical heritage site towers by microwave remote sensing [J]. *Journal of*

- Cultural Heritage*, 10(2): 174–182.
- [18] 王勇. 卫星红外探测技术新发现埃及 17 座金字塔 [EB/OL]. [2011-07-29]. <http://news.sina.com.cn/w/2011-05-26/021122530398.shtml>.
Wang Yong. The new finding of 17 pyramids with the thermal-infrared remote sensing technology [EB/OL]. [2011-07-29]. <http://news.sina.com.cn/w/2011-05-26/021122530398.shtml>.
- [19] Myers A. Field work in the age of digital reproduction: A review of the potentials and limitations of Google earth for archaeologists [J]. *SAA Archaeological Record*, 2010, 10(4): 7–11.
- [20] Batayneh A T. Archaeogeophysics-archaeological prospection – A mini review [J]. *Journal of King Saud University-Science*, 2011, 23 (1): 83–89.
- [21] Drahor M G. A review of integrated geophysical investigations from archaeological and cultural sites under encroaching urbanisation in Izmir, Turkey [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2011, 3(10): 1–16.
- [22] Conyers L B. Ground-penetrating radar for anthropological research [J]. *Antiquity*, 2010, 1(84): 175–184.
- [23] Conyers L B, Leckebusch J. Geophysical archaeology research agendas for the future: Some ground penetrating radar examples [J]. *Archaeological Prospection*, 2010, 17(2): 117–123.
- [24] Muller C, Woelz S, Ersoy Y, et al. Ultra-high-resolution marine 2D–3D seismic investigation of the Liman Tepe/Karantina Island archaeological site (Urfa/Turkey) [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 68 (1): 124–134.
- [25] Panisova J, Pasteka R. The use of microgravity technique in archaeology: A case study from the St. Nicolas Church in Pukanec, Slovakia [C]// Contributions to Geophysics and Geodesy. Heidelberg. Springer Science, 2009: 254–261.
- [26] Liu Z, Mao F, Zhou W, et al. Conservation of large-scale cultural heritage sites based on spatial databases [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2010, 50(3): 338–341.
- [27] Kansa E. A community approach to data integration: Authorship and building meaningful links across diverse archaeological data sets [J]. *Geosphere*, 2005, 1(2): 96–109.
- [28] Staab S. Handbook on ontologies [M]. Berlin: Springer Verlag, 2009: 463–486.
- [29] Phumisathan U, Tantasanawong P. GEO-ontology for cultural knowledge [C]//The 8th International Conference on e-Business (iNCEB2009). Thailand: IEEE, 2010: 62–65.
- [30] 吴琼, 鲍泓. 基于地理本体的不可移动文物信息参考模型研究及应用 [J]. *计算机科学*, 2008, 35(3): 113–116.
Wu Qiong, Bao Hong. *Computer Science*, 2008, 35(3): 113–116.
- [31] Liao S H, Huang H C, Chen Y N. A semantic web approach to heterogeneous metadata integration [J]. *Computational Collective Intelligence. Technologies and Applications*, 2010, 6421(11): 205–214.
- [32] Hernandez F, Rodrigo L, Contreras J, et al. Building a cultural heritage ontology for Cantabria [C]//2008 Annual Conference of CIDOC. Athens: International Documentation Committee of the International Council of Museums, 2008: 15–18.
- [33] Runz C D, Desjardin E. Imperfect spatiotemporal information analysis in a GIS: Application to archaeological information completion hypothesis [J]. *Methods for Handling Imperfect Spatial Information*, 2010, 256 (15): 341–356.
- [34] Bitelli G, Girelli V A. Metrical use of declassified satellite imagery for an area of archaeological interest in Turkey [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2009, 10 (Supplement 1): e35–e40.
- [35] Giacomo G D, Ditaranto I, Scardozzi G. Cartography of archaeological surveys taken from an Ikonos stereo-pair: A case study of the territory of Hierapolis in Phrygia (Turkey) [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2011, 38(9): 2051–2060.
- [36] Harrower M J. Geographic Information Systems (GIS) hydrological modeling in archaeology: An example from the origins of irrigation in Southwest Arabia (Yemen) [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2010, 37(7): 1447–1452.
- [37] Qiu Z, Zhang T. Key techniques on cultural relic 3D reconstruction [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(12): 5.
- [38] Li R J, Luo T B, Zha H. 3D digitization and its applications in cultural heritage [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2010, 6436 (10): 381–388.
- [39] Katsianis M, Tsipidis S, Kotsakis K, et al. A 3D digital workflow for archaeological intra-site research using GIS [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2008, 35(3): 655–667.
- [40] Ruther H, Chazan M, Schroeder R, et al. Laser scanning for conservation and research of African cultural heritage sites: The case study of Wonderwerk Cave, South Africa [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2009, 36(9): 1847–1856.
- [41] Sevenant M, Antrop M. Settlement models, land use and visibility in rural landscapes: Two case studies in Greece [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(4): 362–374.
- [42] Juan M D S, Ruben F D V, Igor R A, et al. The visual exposure in forest and rural landscapes: An algorithm and a GIS tool [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 101(1): 1–7.
- [43] Llobera M. Reconstructing visual landscapes [J]. *World Archaeology*, 2007, 39(1): 51–69.
- [44] Paliou E, Wheatley D, Earl G. Three-dimensional visibility analysis of architectural spaces: Iconography and visibility of the wall paintings of Xeste 3 (Late Bronze Age Akrotiri) [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2010, 38(2): 375–386.
- [45] Gardner R L. Modeling archaeological site distribution in the black bottom of illinois using geographic information systems and logistic regression [D]. Murray, Kentucky: Murray State University, 2009: 97.
- [46] Vaughn S, Crawford T. A predictive model of archaeological potential: An example from northwestern Belize [J]. *Applied Geography*, 2009, 29 (4): 542–555.
- [47] Espa G, Benedetti R, De Meo A, et al. GIS based models an estimation methods for the probability of archaeological site location [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2006, 7(3): 147–155.
- [48] Rua H. Geographic information systems in archaeological analysis: A predictive model in the detection of rural Roman villae [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2009, 36(2): 224–235.
- [49] Kan A K, Wang X B. The archaeological detection methods supported by 3S technology: A review [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2008, 1(3): 4–8.
- [50] Geng Y H. Application of "3S" technology in development and protection of geological heritage resources [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(25): 32–34.
- [51] Zhou L, Ye B, Wang F, et al. Applying "3S" technology to historic resource surveys: Nanjing example [J]. *Planners*, 2010, 26(4): 73–77.
- [52] Zheng C Y. Application and analysis of "3S" in research on historical geography and cultural geography [J]. *Journal of Jiaying University*, 2009, 27(6): 84–87.

(责任编辑 张军, 岳臣)