

国内乡村景观数字化保护研究进展

Research Progress on Digital protection of Rural Landscape in China

刁智辉 童安琪 申亚梅* 严少君 陶一舟 李朝晖 单 翠
DIAO Zhihui TONG Anqi SHEN Yamei* YAN Shaojun TAO Yizhou LI Zhaohui SHAN Cui

(浙江农林大学风景园林与建筑学院, 杭州 311300)
(College of Landscape Architecture, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou, Zhejiang, China, 311300)

文章编号: 1000-0283(2023)05-0096-09
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2023. 05. 0096. 013
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2023-01-18
修回日期: 2023-03-15

摘 要
在梳理国内乡村景观数字化保护相关成果、系统分析乡村景观相关文献基础上, 比较乡村景观保护的理论与方法及数字化技术优势, 从路径、技术等方面综述国内乡村景观数字化保护的研究进展。结果表明:(1) 数字化技术在乡村景观保护中展现出显著技术优势。(2) 数字化技术在乡村景观保护中的应用分为4个时期, 即信息采集阶段(1990-2000年)、分析评估阶段(2000-2010年)、营建管控阶段(2010-2015年)、综合应用阶段(2015年至今)。(3) 乡村景观数字化技术的路径分为景观信息采集—分析评估—营建管控。(4) 乡村景观的信息采集包括景观空间信息采集和人类行为感知数据采集, 涉及遥感影像、无人机航拍影像、地理空间信息系统、大数据、生理检测与虚拟现实等; 分析评估主要涉及地理空间信息系统、人工智能、场景可视化等; 营建管控主要涉及参数化设计、景观信息模型、三维重建、虚拟现实等。基于上述分析, 指出乡村景观数字化保护在技术方法和实践应用等方面的研究趋势:(1) 技术方法创新应用, 辅助景观保护;(2) 应用场景日渐广泛, 全过程实践协同。研究旨在为乡村景观数字化保护的理论与实践应用提供参考。

关键词
乡村景观; 数字化保护; 数字化技术; 数字景观; 乡村振兴

Abstract
This study compares theoretical approaches to rural landscape protection and the benefits of digital technology. It reviews the research progress of digital protection of rural landscape in China, analyzing the path and technology involved by combing relevant literature. The findings indicate that digital technology offers significant technical advantages in rural landscape protection. Moreover, the application of digital technology can be divided into four stages, namely the information collection stage (1990-2000), the analysis and evaluation stage (2000-2010), the construction and control stage (2010-2015), and the comprehensive application stage (2015-present). The path of digital technology for rural landscape can be categorized into landscape information collection, analysis and evaluation, and construction and control. Information collection for rural landscapes includes landscape spatial information collection and human behaviour perception data collection using remote sensing images, UAV aerial images, geospatial information systems, big data, physiological detection, and virtual reality. Analysis and evaluation of rural landscapes primarily involves geospatial information systems, artificial intelligence, and scene visualization. Construction and control of rural landscapes mainly entail parameterized design, landscape information models, 3D reconstruction, and virtual reality. Based on the above analysis, the study identifies research trends of digital protection of rural landscape in terms of technical methods and practical applications, which include innovative application of technical methods to assist landscape protection and increasingly extensive application scenarios and whole process practice synergy. Overall, this study provides a valuable reference for both theoretical research and practical application of digital protection of rural landscapes.

Keywords
rural landscape; digital protection; digital technology; digital landscape; rural revitalization

刁智辉
1997年生/男/江苏东海人/在读硕士研究生/研究方向为乡村景观数字化保护

童安琪
1999年生/女/江西上饶人/在读硕士研究生/研究方向为乡村景观规划与设计

申亚梅
1977年生/女/江苏姜堰人/博士/教授/研究方向为乡村景观规划与设计

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: yameishen@zafu.edu.cn

基金项目:
浙江省重点研发项目“浙江省乡村生态景观营造技术研发与推广示范”(编号: 2019C02023)

乡村景观是地表自然与文化的综合体，在长期的自然演进过程中，形成了鲜明的地域文化特征，被赋予了多重的价值^[1]，是新时代乡村振兴的重要载体。但随着城市化水平的不断提升，乡村景观文化内涵日渐衰微以致乡村建设城市化，非物质乡村景观传承难以为继逐渐走向灭亡。乡村生态环境破坏严重，具有高文化价值、美学价值、生态价值的传统与地域性乡村景观正快速消失^[2]。而乡村的有序发展能够吸引人口、提升活力、促进景观系统运行与繁荣发展，因此，保护与利用乡村景观成为现代乡村社会发展的现实所需和未来关注重点。乡村景观既是乡村发展的结果，更是推动发展的资源，乡村景观保护的主要目的是实现乡村历史文化传统延续与社会经济发展的共赢。但乡村景观环境复杂、要素多样、类型丰富，科学地保护乡村景观，使其可持续发展尚有一定难度。在此背景下，数字化技术的快速发展和技术优势为乡村景观保护开辟了新的思路^[3]，其被应用于乡村景观的信息采集、分析与评估、营建管控三个阶段，统筹保护工作过程中的各要素和环节，促使乡村景观保护研究迈向科学化、高效化和精准化。

近年来，乡村景观数字化保护已成为热点问题，通过梳理总结乡村景观数字化保护的方法路径、技术方法、实践应用等内容，对数字化保护乡村景观的研究现状与发展前景进行分析，为后续理论研究和乡村建设提供参考。

1 乡村景观的概念

乡村景观的概念最早源于地理学科，地理学家索尔 (Carl O. Sauer) 早在 1925 年发表的《景观的形态》一文中将其定义为“附加在自然景观之上的人类活动形态”^[4]。学者们大多

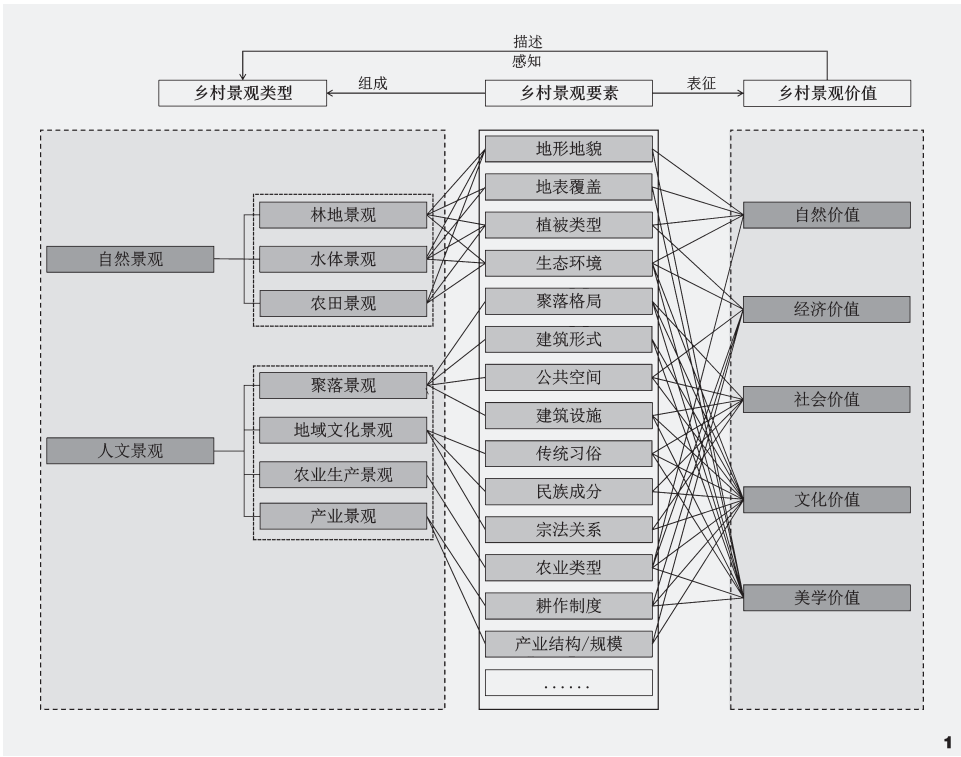


图1 乡村景观的多重价值
Fig. 1 Multi value of rural landscape

认为，乡村景观是人类改造、利用自然以满足生存、生产、生活的需求，形成的各种自然与文化景观综合体^[5-7]。

乡村景观可以分为乡村自然景观、人文景观，包含建筑、农田、植物、基础设施等物质景观要素及与之关联的传统习俗、宗教信仰、产业结构、宗族关系等非物质景观要素^[8]，同时涵盖了生态、美学、文化、经济、社会等多重价值 (图1)。需要指出的是，乡村景观的内涵宽泛，其丰富的遗产价值得到了联合国教科文组织 (UNESCO) 的认可，并将乡村景观归属为有机持续演进的文化景观^[9]，其具有的“突出普遍价值” (Outstanding Universal Value, OUV) 被认定为文化景观遗产的核心要件。乡村景观遗产即为具备特殊价值的乡村景观，主要包括传统建筑、传统村落、典型

的土地利用形式、独特的历史文化等，如哈尼梯田、皖南古村落等代表性乡村景观遗产^[10]。

乡村景观研究起源于二战后欧美国家的乡村建设，时至今日已形成了相对完整的理论体系。乡村作为中国传统文化、社会结构的发源地，乡村景观研究也得到了众多学者的重视。目前国内乡村景观研究主要集中在乡村景观内涵和分类的梳理、景观格局的分析优化、景观要素的演化变迁、人类感知的参与等方面^[11-12]，全面分析了乡村景观发展过程中出现的生态破坏、文化消逝、活力衰退等问题，从而实现有效挖掘乡村景观的多元价值，保护和利用乡村景观独特的地域特征，引导乡村可持续发展。保护乡村景观是当前亟待解决的现实问题，也是乡村景观研究的核心问题。

2 乡村景观数字化保护研究

自20世纪90年代起，乡村景观保护研究逐渐受到国内学者的关注，相关理论讨论激烈，但未形成研究定式。当前的主流理论有生态博物馆^[13]、景观基因^[14]、数字化保护等。

数字化保护是通过数字化技术为乡村景观的保护提供辅助分析、决策支持，贯穿了乡村景观保护中识别、分析、评价、规划、管理全过程^[15]，运用数字化技术手段，梳理总结乡村景观要素，客观、真实、全面地记录与保存乡村景观的基础信息与多元价值，进一步实施数字化重建、信息化管理、虚拟化游览等数字化保护工作。乡村景观的数字化强调乡村景观全要素、全类型的识别、模拟、重建，其中包含了价值突出的乡村景观遗产，这是乡村景观数字化保护的基础。贵州安顺鲍家屯的乡村景观空间信息数字化采集实验、湖北英山的缠花技艺数字化传承、广东潮州狮峰村的预防性保护数字化平台等乡村文化遗产数字化保护的探索为乡村景观的数字化保护提供了大量的经验^[16-18]。乡村景观数字化保护的时效性长、整体性与功能性强、管理优势明显，为乡村景观保护研究提供了新思路。

同时，人工智能、大数据等数字化技术不断迭代更新，使乡村景观保护的研究与实践更加直观、便利、精准。因此，数字化保

护因其显著的技术优势得到诸多学者的推崇，成为乡村景观永续传承与保护的不二选择。

2.1 数字化技术概述

数字化技术是指借助数字化设备将各种信息，包括文字、图片、声音等，转化为计算机能识别的二进制数字“0”和“1”的信号后进行运算、加工、存储、传送、传播、还原的技术。数字化技术可以为乡村景观包含的文字、图像、声音、视频及三维(3D)数据等信息提供数字化保存、精准采集、分析处理、存储传输与查询检索等功能^[15]，并进一步打造数字化重生、交互式体验，指导乡村景观的数字化营建管控，为乡村景观的保护、开发与利用服务(表1)。

以地理空间信息系统技术(Geographic Information System, GIS)、遥感(Remote Sensing, RS)、大数据、人工智能为代表的数字化技术为乡村景观保护研究与实践提供了强大的技术支持。数字化技术可以实现对乡村景观信息的采集、监测、分析、模拟、创造、再现^[22]。随着数字化技术的快速发展，其技术优势也愈加明显，与传统用纸质、图片、实物等方式记录景观信息相比，其提取、表达、分析结果更直观、便捷、精准，可辅助乡村景观研究实现从定性到定量、感觉到知觉的转变，为乡村景观的保护和利用提供一种崭新的途径。

2.2 数字化技术发展历程

数字化技术的运用是乡村景观数字化保护领域最根本的特征，数字化技术的进步成为解决乡村景观保护与发展问题的新契机，其发展呈现出指数增长的特征。在近30年的发展历程中，乡村景观数字化保护的探索与技术的发展密切相关。该领域的学者们根据不同研究需要选取适宜的技术手段，大致分为4个发展阶段(图2)。

(1) 信息采集阶段(1990-1999年)。数字化技术最初应用于乡村景观中价值突出、濒临消失的乡村文化遗产。3D扫描、3D建模、数字化摄影测量等景观信息采集技术得到大力推广，极大提高了乡村景观信息采集的数据精度、工作效率和复原效果^[23]。此时，处于起步阶段的GIS、RS、计算机辅助设计、人工智能(Artificial Intelligence, AI)等技术丰富了乡村景观信息采集手段，但由于数据和资源的缺乏，这些技术的应用相对单一、局限^[24]。

(2) 分析评估阶段(2000-2009年)。GIS、RS、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)等地理空间信息系统技术，具备出色的乡村景观地表时空数据处理能力，促使乡村景观保护迈向精准化分析评估阶段。乡村景观的土地利用变化、景观空间形态等研究领域数字化技术的应用更加深入而广泛。国内最早见于李首成等^[25]在乡村景观格局分析中应用GIS技术。此外，互联网的普及和移动设

表1 数字化技术概览
Tab. 1 Overview of digital landscape technology

技术类别 Technical category	具体技术 Specific technology	优点 Advantage	缺点 Disadvantage
信息采集	3D激光扫描、无人机倾斜摄影、多光谱遥感、遥感影像等 ^[19]	节省人力、物力，提升采集效率和精准性，数据资料更全面、客观	存在技术门槛，主要由专业人员掌握；高精度采集，成本较高
分析评估	地理空间信息系统技术、人工智能、虚拟现实等 ^[20]	可视化表达景观信息，量化比较与分析以及存储管理数据	具体算法依赖人工选择，复杂的景观系统无法完全仿真模拟
营建管控	景观信息模型、3D重建、虚拟现实、增强现实技术等 ^[21]	优化设计、建造效率，降低成本；数字化重建呈现3D立体效果，更具有沉浸感、交互性	技术与景观信息的实时反馈、动态适应性有待考证；制作、维护成本较高，真实还原效果欠佳

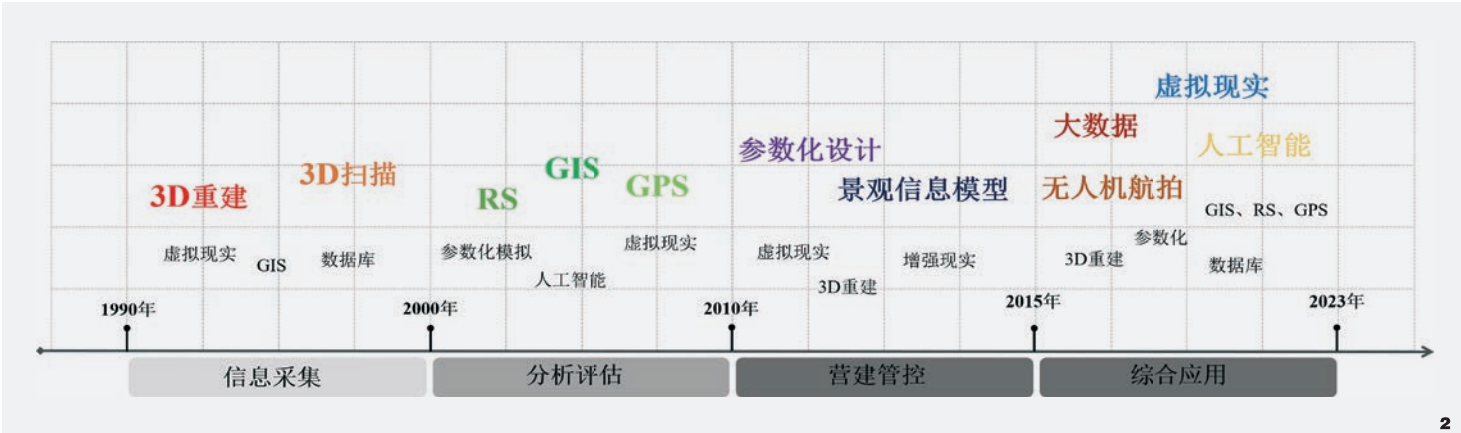


图2 乡村景观数字化技术的发展历程
Fig. 2 The development history of rural landscape digital technology

图3 乡村景观数字化保护的途径
Fig. 3 Path of digital protection of rural landscape

备的发展使得实时收集和共享数据变得更加容易，大数据、AI等技术逐渐崭露头角。

(3) 营建管控阶段(2010-2014年)。通过利用参数化、景观信息模型(Landscape Information Model, LIM)、虚拟现实(Virtual Reality, VR)等技术对景观环境、空间形态模拟仿真,推动乡村景观建设全周期的综合管控,探索乡村新型发展模式^[26]。

(4) 综合应用阶段(2015年至今)。近年来, AI、深度学习、云计算、无人机倾斜摄影等高新技术取得重大突破,乡村景观数字化技术应用和实践探索继续深化,更加强调多种技术的综合运用^[27-28]。

总体而言,数字化技术应用于中国乡村景观保护呈现出硬件、软件和数据处理方法不断进步的特点。随着技术的不断发展,研究人员可能会拥有更强大的工具来了解和管理乡村景观。

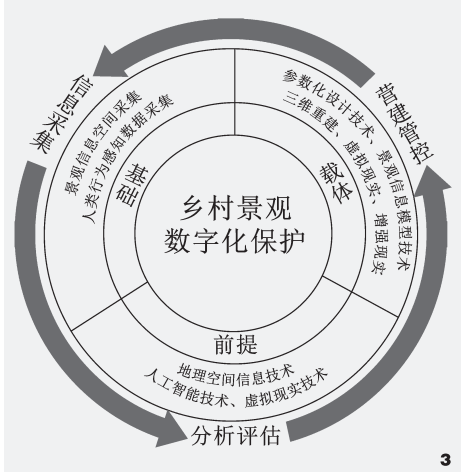
2.3 乡村景观数字化保护路径

乡村景观要素复杂,其中包含的自然与人文景观类别丰富。但相关研究大多将数

字化技术应用于乡村景观保护过程中的某一环节、某种景观类型。整合数字化技术在乡村景观保护全过程、多要素、多类型中的应用,形成完整的乡村景观数字化保护路径。现有的技术路径多围绕数字化技术的功能展开^[29-30],且侧重于文化遗产框架下构造数字化保护的技术路径。结合数字化技术的功能、发展历程以及乡村景观的要素、特征、类型,依据乡村景观保护需求和数字化技术功能之间的关联性,从乡村景观的视角出发,构建信息采集、分析评估、营建管控的数字化保护路径(图3)。

2.3.1 乡村景观的信息采集

乡村景观正遭受着日益严重的环境问题,对乡村景观空间信息和景观环境中人的行为感知进行科学、准确的认知显得愈发重要。传统的数据采集工作主要依靠实地调研、勘测及人工感性判断来完成,完整度低、效率低、精准性差,难以避免主观性、模糊性,尤其大中尺度的风景环境情况复杂、工作量大、局限性更为突出,数字化技



术成为乡村景观信息精准化采集重要辅助手段。此阶段主要分为景观空间信息采集、人类行为感知数据采集^[21],主要涉及卫星遥感影像、无人机航拍影像、地理信息模型、大数据、生理检测与VR等数字化技术。

2.3.1.1 景观空间信息采集

乡村自然环境、人类活动等因素的特定结合形成了乡村地表空间内独特的景观特征。乡村景观空间信息主要包括土地覆盖、地形地貌、植被绿化、气候、水文、土壤、建筑等环境要素,以及人类个体的时空行为数据等。

目前, 卫星遥感、航拍影像、地理信息模型等技术手段在乡村景观研究中已十分成熟。卫星遥感影像识别与3D空间数据提取已经成为乡村景观信息采集的重要内容。同时, 随机森林、向量机、决策树等机器学习算法为精确解译遥感卫星图中的植被覆盖、土地利用类型等信息提供了更多可能。同济大学王云才团队^[31]运用人工智能深度学习技术中的U-Net与BDCN模型智能解译高精度遥感影像, 实现了南京市牌坊社区村域范围内的景观要素与景观单元边界的图像识别, 完成了乡村社区尺度下的基本空间单元划分。但是以卫星遥感影像作为主要的数据来源, 易受限于影像的分辨率, 对于场所尺度的乡村景观数据获取难度较大, 数据精度更难以保证。同时, 对于跨越时间尺度的数据, 遥感影像无法完全覆盖, 卫星遥感影像最早只追溯到20世纪70年代, 且那时的影像分辨率较低。

近年来, 航拍无人机逐渐普及, 场所尺度的乡村景观地表空间信息采集的成本与难度大大降低。通过小型无人机航拍技术, 能够有效获取乡村景观高精度的遥感影像^[32], 搭载多光谱镜头、激光雷达等硬件后, 地表的植被覆盖、土地利用、地形起伏等空间信息的精细程度不亚于高精度卫星遥感影像。无人机与激光雷达扫描技术不仅能便捷快速地获取高精度地理空间信息数据和多光谱影像, 其采集的点云数据还可以结合Context Capture、ArcGIS进行乡村景观中重要建筑遗产的3D重建。何源荣等^[33]利用激光扫描技术、无人机倾斜摄影获取乡村建筑的3D点云数据, 重建中国传统村落渐山村李氏家庙。但目前无人机航拍影像在技术发展、使用场景、飞行环境等方面受限, 如当前民用级无人机的续航能力有限, 单次飞行平均维持在30 min左右, 频繁充电和更换电

池极大地影响了拍摄效率; 天气状况、空域许可、飞行安全等因素的限制也导致一些处于特殊环境的乡村景观信息较难获取; 而高性能无人机的成本较高, 需要专业人员维护和操作。

与此同时, 随着大数据的获取、挖掘、处理技术逐渐成熟, 乡村景观分析的精度与准度得到显著提高。以卫星遥感数据、地理信息数据、人口数据、历史文化数据等信息来源为乡村景观保护研究提供了丰富的信息和视角, 如余苏超等^[34]收集POI、路网、卫星遥感等多源数据评价乡村景观游憩吸引力, 探索乡村景观建设发展路径。地理空间多源数据的获取与应用为分析评估乡村景观提供了客观、有效的途径。但在一些较为落后的乡村地区人口分布稀疏、基础设施不完善, 可能缺乏相关的数字化信息数据, 并且数据质量不高, 可能会影响大数据分析的精度和可靠性。

2.3.1.2 人类行为感知数据采集

乡村景观是人与自然长期相互作用、相互影响的结果, 人是乡村景观环境中的主体, 人类的行为偏好、情感感知对乡村景观影响很大, 故人类行为感知数据的采集对于了解人类生产发展需求、反映景观环境感知差异等方面意义重大。在乡村景观环境中人群行为活动的采集与分析主要涉及大数据技术、生理检测与VR技术^[21]。

伴随着互联网、移动互联网、云计算技术的兴起, 社交网络、微信、微博、手机信令等各种网络服务更加便捷, 用户在设备上的交互操作更加频繁^[22], 记录下人类无意识的时空行为, 无形中产生出大量人类行为感知数据。这些大数据具有信息体量大、及时、微观等特点, 便于进行量化统计分析乡村景

观环境中的人类行为活动规律。将用户生成内容(User-Generated Content, UGC)作为数据源, 结合云计算、GIS技术、人工智能算法处理和表达数据信息, 进一步分析乡村景观人类时空特征和影响因素, 以便更清晰地解读乡村景观意象^[35-36]。但受地域文化、场地记忆、景观偏好等非物质要素影响, 单纯依靠大数据算法的分析解读结果可解释性较差, 因此UGC数据的筛选需要人工干预和判断。

生理监测技术与VR技术可以有效将客观的生理心理感知与景观空间特征进行关联。眼动仪、皮电仪及脑电仪等生理数据监测仪器能够量化人在景观环境中的生理心理感知^[37]。景观颜色、复杂性与人类观景偏好行为联系密切, 如眼动仪通过监测眼动频率、注视次数、注视热点等信息获取人类视觉偏好类型、要素, 从而客观地解释被试者对于乡村景观的“刺激—反应”过程^[38]。生理监测技术可以精确地识别、分析出影响人群身心健康的景观环境要素特征, 但在乡村景观研究中应用较少, 尚无发现除眼动仪实验之外的技术应用。

VR技术打破了时间、空间的束缚, 以逼真的虚拟还原手段为体验者打造出沉浸感极强的场景。但受限于成本较高、技术壁垒较强、真实还原度不高等问题, VR技术的应用难度较大, 尚处于起步阶段, 在相关研究和实践的应用较为少见。如北京林业大学李雄团队^[39]利用VR全景图技术获取乡村景观视觉偏好初始数据, 以此得到个体对乡村景观要素的偏好, 并根据评价分析结果指导乡村景观保护。

2.3.2 乡村景观的分析评估

乡村景观的分析评估一直是其保护过程中的重点, 相关研究更加强调借鉴相关学

科, 结合数学分析模型, 量化分析乡村景观现象与发展规律, 评估其特有价值。借助计算机技术强大的管理、模拟、运算功能, 依托各软件操作平台, 为分析和处理乡村景观信息创造了有利条件。其中主要涉及GIS、AI、VR、3D建模渲染等。

2.3.2.1 GIS技术

GIS因其强大的空间数据处理功能, 应用最为广泛而成熟。GIS作为乡村景观空间分析中量化评估的重要手段, 可以帮助描述乡村景观时空分布、展示各要素间的空间关系^[40], 在乡村景观保护中有广泛的适用范围, 可以为乡村景观保护提供数据支持和决策参考。GIS常应用于乡村景观地形地貌分析、土地利用分析、生态环境监测评估、历史文化遗产调查、旅游资源评估等。在乡村景观数字化保护的应用步骤为: 利用GIS地理数据库对采集、处理的数据进行存储后, 结合其空间分析功能对乡村景观资源进行量化的分析与研究^[41], 辅助乡村景观更合理、科学的保护。

GIS具备的数据管理功能, 能够便捷管理乡村景观信息, 分级分类整理基础数据, 构建乡村景观数字化平台, 实现海量、大范围连续空间数据和多尺度的集成化管理。综合运用ArcGIS、WebGIS、Access等数据库平台, 可以有效整合乡村景观的空间信息和各类景观资源信息, 搭建乡村景观数字化管理平台。利用航拍无人机、GPS接收器等工具获取地理空间属性数据, 并将乡村景观的原始数据以及分析评估的结果录入数据库, 实时更新、展示乡村景观信息^[42], 实现乡村景观的动态管理与保护。20世纪90年代起, 英国乡村景观特征的调查评估工作已经将建设乡村景观信息数据库作为标准环节和评估成果。

目前GIS数据库技术已经熟练应用于国内乡村景观保护实践, 为乡村景观动态监测、遗产保护、历史演变等相关研究提供数据管理、存储、展示等功能。

GIS具备的空间分析功能, 在土地覆盖分析、乡村景观价值评估、乡村景观格局分析、生态敏感性分析、景观感知空间特征等方面发挥着重要的作用^[43]。乡村环境中地形起伏、水系、土地类型、历史文化遗产、动植物栖息地、植物覆盖、旅游资源等要素具备的时空分布特征可以通过GIS可视化地展现, 并且通过不同的功能模块进行时空分布变化、景观价值、适宜性、可达性等景观要素特征的分析。如刘澜等^[44]利用GIS支持的复合分析、缓冲区分析、数据加权叠加分析等方法, 对苏南乡村自然景观生态敏感性进行了分析。

GIS分析需要大量具有空间属性的数据支持, 然而乡村景观中的一些要素往往空间位置模糊, 如民间传说、宗教仪式、传统习俗等非物质文化景观要素。虽然可以运用GIS缓冲区分析其辐射范围、影响区域, 或使用叠置分析其分布情况、交互关系, 但是其空间属性的缺失很大程度上影响着分析结果的精确性。

同时, 3D地理信息系统、地信智能化处理、机器学习等技术的综合应用实现了信息采集与分析评估、营建管控环节的衔接。在同济大学韩锋团队^[16]的贵州安顺屯堡聚落文化景观研究中也无人机倾斜摄影、3D重建、GIS数据库、人工智能等数字化技术进行综合应用, 创新发展了乡村景观信息的数字化收集分析、存储管理的技术应用方式, 大力提升了乡村景观分析评估的能力和精度。

2.3.2.2 AI技术

乡村景观的仿真模拟是基于对乡村景观

现象与发展规律的认识, 借助计算机软件、数学模型模拟不同时间点(过去、现状、未来)的乡村景观以及乡村景观变化过程(景观格局、土地利用等), 可以帮助规划者、决策者和公众更好地理解 and 评估规划方案。在景观仿真模拟、场景可视化的基础上进行分析评估乡村景观更加科学、精确。AI技术作为乡村景观仿真模拟的核心技术, 在乡村景观数字化保护领域最为常见。

其中应用最为广泛的是人工神经网络算法。早在2000年, 周再知等^[45]运用具有S型特征函数的B-P人工神经网络技术, 建立了面向乡村景观规划的神经网络模型, 并利用该模型生成优化、可行的景观规划方案。通过神经网络模型技术的仿真模拟功能, 可以有效地预测乡村景观的特征、量化分析乡村景观设计效果和景观建设效益^[27]。此外人工神经网络、卷积神经网络、支持向量机和随机森林等深度学习算法在乡村景观遥感影像智能解译应用更为广泛, 通过对无人机航拍影像、卫星遥感影像的图像识别完成土地利用类型、建筑特征、地质环境等要素分类, 从而促进对乡村景观特征更深入的认识。如王艳军等^[46]运用无人机高分辨率图像获取准确的建筑物屋顶信息, 结合AI中的Mask R-CNN模型准确识别农村建筑的村建筑屋顶类型特征。

与GIS技术相比, AI技术的数据包容度更高, 可处理的数据类型更多, 包括文本、图像、音频等。但是在运用过程中具体算法依赖人工选择, 需要大量样本数据的训练, 对算法和数据质量的要求较高, 复杂的景观系统尚无法完全仿真模拟。随着AI技术中随机森林、决策树、遗传算法、元胞自动机等深度学习算法的出现和完善, 乡村景观模拟仿真和识别分类的计算精度逐渐提高, 应用前

景十分广阔。

2.3.2.3 场景可视化

乡村景观的场景可视化主要采用3D建模渲染及VR等数字化技术，利用图形图像、动画场景等形式，再现乡村景观真实场景。GIS、AI技术将感官感知转化为可识别、捕捉的计算机信息数据，帮助人们直观地理解和评估乡村景观。

3D建模技术能够非常逼真地模拟真实物体、场景或人物，常应用于乡村景观文化遗产的数字测绘和3D重建。其分析评估能力体现在与3S (GIS、RS、GPS)、AI等技术的结合使用，建立乡村景观的可视化数字模型，可以还原乡村的地形、水系、道路与建筑等乡村景观要素的空间分布和结构关系，运用尺寸量测、空间关系查询、可视化分析等功能，实现各类空间数据的精确分析计算^[16]。

VR技术是以3D建模成果为基础进行的应用拓展，通过头戴式显示器、运动跟踪设备和手柄控制器等设备，可以实现效果逼真的场景游览和交互体验。VR技术实现的新型游览方式可以帮助人们跨越时空界限接触乡村景观，虚拟空间内游客游览数据分析成为乡村景观分析评估的重要内容。如宛思楠等^[47]对VR技术进行了深度开发应用，详细介绍VR实验平台的搭建流程，并通过VR实验平台采集虚拟游览传统村落空间过程中实时站点坐标、视点坐标以及时间线等数据，对虚拟游览数据进行了分析与可视化，结合SD法对实测者对于传统村落主观认知评价进行了分析。

在乡村景观分析中，场景可视化技术主要用于展示和交互式探索，如VR漫游乡村景观、增强现实 (Augment Reality, AR) 导游等方面。与GIS和AI技术相比，场景可视化技术注重对乡村景观的可视化和交互式探索的体验

和效果，但在数据处理和分析方面相对较弱。

2.3.3 乡村景观的营建管控

在乡村景观营建管控中，主要涉及参数化设计、景观信息模型 (Landscape Information Model, LIM)、3D重建、VR、AR、混合现实 (Mixed Reality, MR) 等数字化技术。

2.3.3.1 参数化设计

参数化设计是利用计算机软件和脚本编写规则度量、关联设计与景观要素，并通过计算机算法内实现景观空间形态与自然演进过程分析、模拟的一种设计方法^[48]。它可以在短时间内进行多方案的生成与比较，大大提高了乡村景观规划设计方案决策的效率。如葛丹东等^[49]通过城市引擎 (City Engine, CE) 系统的道路生成模块，进行乡村路网模拟生成，结合空间句法、路径结构分析理论、几何图形相似理论对乡村道路方案的生成进行研究。同时，可以将光照、风向等自然规律转化为计算机模拟运算程序，动态模拟乡村景观环境因子变化过程，保证乡村建筑设计遵循自然规律^[50]。参数化设计适用于快速生成多样化的设计方案，可以提高设计效率和质量，但是参数化设计要求掌握相应的软件和编程技能，存在一定的技术门槛。

2.3.3.2 LIM技术

LIM由建筑信息模型 (Building Information Model, BIM) 发展而来，基于GIS技术，整合管理乡村景观空间信息和属性信息，创建利用数字3D模型对景观营建的设计、建造和运营全过程进行管理和优化的过程、方法和技术，实现设计、建造及运营管理一体化，全面统筹把控设计的生命周期^[51]。LIM侧重于优化乡村景观数据和信息管理，适用于乡村景观的场

地环境数字化表达、规划设计方案表现与模拟、景观工程综合管控等。重庆大学与香港大学的公益团队首次尝试构建LIM以推进乡村景观营造项目^[52]。

LIM在中国处于起步阶段，但景观信息化、智能化的营造是大势所趋，测绘、大数据、AI、物联网等技术的创新将推动LIM的应用场景多元化，在乡村景观营建管控中潜力无限。

2.3.3.3 3D重建 &VR技术

3D重建、VR、AR等数字化技术能够还原乡村景观环境真实的空间分布情况，助推乡村景观现实环境的虚拟化、数字化，是建造乡村景观“元宇宙”的基础技术。3D重建技术通过激光雷达扫描、全息拍摄、无人机倾斜投影等技术获取乡村景观的3D结构及纹理信息。结合Smart3D、3DMAX、Maya、Lumion、City Engine等计算机软件，重建乡村景观3D场景，是VR、AR技术等虚拟仿真技术的数据基础，为乡村景观数字化体验中的数字模型^[53]，实现了乡村景观的“数字重生”。

VR技术以乡村景观3D重建成果为基础，进行自由漫游和交互体验创新，能提供多角度、多模式模拟，使用户的体验更具真实性、沉浸感，强化了人机交互设计、人景交互体验。AR技术从VR发展而来，在同一画面、空间内实时叠加虚拟场景和真实环境，用户的体验更加真实。林峰^[54]在研究中介绍了乡村景观VR全景漫游的技术实现操作步骤，即以无人机和全景相机相结合的方式拍摄全景图像，通过PTGui拼接无人机影像合成全景图，上传至720°云平台，构建VR全景漫游系统。通过VR技术对乡村景观中农业场景、建筑遗址进行快速构建，展示出全新的乡村旅游发展模式。VR技术实现了人类在乡村景观虚拟

环境中的“数字孪生”，营造出乡村景观保护传承的“新空间”。

随着VR技术的发展，AR、MR技术被相继提出：AR是将虚拟信息叠加在现实世界之上；而MR则是将虚拟信息与现实世界进行融合。可以理解为，VR是对现实世界的完全虚拟沉浸体验；AR是将虚拟信息叠加到现实世界中；MR介于两者之间，是将虚拟世界与现实世界相融合。目前，AR、MR技术在国内还处于起步阶段，在乡村景观保护中的应用较少^[65]。

需要注意的是，3D重建技术、VR技术、AR技术依赖于准确的数据和模型构建，需要大量高分辨图像的采集，同时3D重建技术和VR技术对设备的要求较高，大规模、高精度的乡村景观3D重建需要高性能计算机集群计算数日才能完成，VR技术所需的头戴式显示器、运动跟踪设备、手柄控制器等设备性能有待提升、成本居高不下。此外受限于当前技术发展水平，虚拟场景的效果难以匹敌真实场景，交互式体验中多感官的体验缺失，人类情感、非物质景观要素数字化、虚拟化的探索机遇与挑战并存。

3 结语

在乡村振兴等国家战略的大力推动下，乡村景观的重要性日益突出，作为乡村生态环境、历史文化等要素的综合表征，乡村景观应成为乡村规划的主体，将管理乡村景观作为解决乡村发展问题的重要形式。因此，科学地保护与利用乡村景观是当今乡村可持续发展的重要课题。数字化技术因其特有的技术优势能够直观、便捷、精准地提取、分析、表达、建设乡村景观，已经成为乡村景观保护的重要辅助手段。近年来，AI、VR、大数据、移动通讯等数字化技术突飞猛进，

为解决乡村景观发展过程中出现的景观地域性丧失、生态环境恶化、乡村活力衰退等问题提供了新的契机。传统的调查、观察和问卷调查难以实现乡村景观全面、深入地分析，通过数字化技术的辅助手段，可以更加便捷、精准地提取、分析乡村景观的空间发展规律和人类行为感知，有效衔接乡村景观全过程的信息采集、分析评估、营建管控，系统地把握乡村景观的整体性、综合性。

综合整理分析乡村景观数字化保护的技术路径以及技术方法研究发现，数字化技术在乡村景观的信息采集、分析评估、营建管控全过程中均得到充分运用，展现出显著的技术优势，具体表现以下两个层面。

(1) 技术方法层面：技术方法创新应用，辅助景观保护。目前在乡村景观保护的实践过程中，数字化技术的应用方法研究讨论十分激烈，GIS、RS、AI等数字化技术已经在实践中逐渐成熟。但相关研究大多局限于单一技术或某一环节的技术应用。虽然有学者借鉴相关学科技术应用经验进行多技术的综合运用，但尚未形成系统的研究方法。因此，应以“保护与利用乡村景观”为目的，以数字化技术为辅助手段，综合考量数字化技术的技术门槛、操作难度、展现效果、适用范围等问题，跨学科、跨领域协同合作，并参与到自主研发技术方法的过程中，更加关注数字化技术的综合应用和创新探索。

(2) 实践应用层面：应用场景日渐广泛，全过程实践协同。在未来乡村景观数字化保护的实践过程中，数字化技术手段将更加丰富，应用场景将更加多元化，数字化技术应用场景的适用性将进一步提升。乡村景观保护研究存在的基础数据精度和可靠性不足、复杂系统难以仿真模拟等问题也将迎刃而解。结合场景适用的数字化技术，在

乡村景观的信息采集、分析评估、营建管控的全过程中，通过系统化、信息化的分析评估，智慧化的设计表达，开展多尺度、多要素、全过程的实践协同研究，使乡村景观数字化保护逐步走向精准化、集约化和规范化。

注：文中图表均由作者自绘。

参考文献

- [1] 王南希, 陆琦. 乡村景观价值评价要素及可持续发展方法研究[J]. 风景园林, 2015, 125(12): 74-79.
- [2] ZHANG M, CHEN Q, ZHANG K. Influence of the Variation in Rural Population on Farmland Preservation in the Rapid Urbanization Area of China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(9): 1365-1380.
- [3] 高凯, 龚政, 龙雨丹, 等. 风景园林视野下的乡村景观研究进展[J]. 园林, 2022, 39(10): 72-78.
- [4] CHARLES R D, CARL O S. The Morphology of Landscape[J]. Geographical Review, 1926, 16(02): 348.
- [5] 王云才, 刘滨谊. 论中国乡村景观及乡村景观规划[J]. 中国园林, 2003(01): 56-59.
- [6] 刘黎明, 李振鹏, 张虹波. 试论我国乡村景观的特点及乡村景观规划的目标和内容[J]. 生态环境, 2004, 13(03): 445-448.
- [7] 范建红, 魏成, 李松志. 乡村景观的概念内涵与发展研究[J]. 热带地理, 2009, 29(03): 285-289.
- [8] 欧阳勇锋, 黄汉荪. 试论乡村文化景观的意义及其分类、评价与保护设计[J]. 中国园林, 2012, 28(12): 105-108.
- [9] UNESCO WHC. Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention[M]. Paris: Unesco, 1999.
- [10] 周政旭, 严妮. 乡村景观遗产视角的黔东南苗族聚落特征与价值分析[J]. 原生态民族文化学刊, 2020, 12(02): 72-78.
- [11] 杨惠雅. 中国乡村景观实践发展历程梳理(1949-2022年)[J]. 园林, 2022, 39(06): 10-17.
- [12] MU Q, AIMAR F. How are Historical Villages Changed? A Systematic Literature Review on European and Chinese Cultural Heritage Preservation Practices in Rural Areas[J]. Land, 2022, 11(07): 982.
- [13] 杜韵红. 何以可能: 乡村博物馆文化遗产保护真实性研究——以云南章朗生态博物馆为例[J]. 中国博物馆, 2022, 148(01): 45-49.

[14] 李晓颖,黄欢,王世超.乡土文化景观风貌提升构建中景观基因的识别与运用研究[J].中国园林,2022,38(06):29-34.

[15] 刘颂,张桐恺,李春晖.数字景观技术研究应用进展[J].西部人居环境学刊,2016,31(04):1-7.

[16] 杨晨,韩锋,刘春.基于点云技术的乡村景观遗产空间信息记录与可视化方法研究[J].风景园林,2018,25(05):37-42.

[17] 郭丽,陶辉.“有法”的非遗保护与“无法”的可持续性发展——以湖北英山缠花技艺为例[J].中南民族大学学报(人文社会科学版),2020,40(05):70-75.

[18] 何韶颖,杨钰琪,汤众,等.传统村落预防性保护研究——以潮州市狮峰村为例[J].城市发展研究,2021,28(11):16-21.

[19] 成玉宁,袁旻洋.当代科学技术背景下的风景园林学[J].风景园林,2015,120(07):15-19.

[20] 成玉宁.数字景观[M].南京:东南大学出版社,2019.

[21] 成实,张潇涵,成玉宁.数字景观技术在中国风景园林领域的运用前瞻[J].风景园林,2021,28(01):46-52.

[22] 刘颂.数字景观的缘起、发展与应对[J].园林,2015(10):12-15.

[23] 胡伟熾,潘志庚,刘喜作,等.虚拟世界自然文化遗产保护关键技术概述[J].系统仿真学报,2003,15(03):315-318.

[24] 李安波,毕硕本,裴安平,等.田野考古地理信息系统研究与建设[J].地理与地理信息科学,2004,20(01):39-42.

[25] 李首成,刘文全,程序,等.基于高分辨率卫星图的川中丘陵区村级景观格局特征研究[J].应用生态学报,2005,16(10):1830-1837.

[26] 彼得·派切克,郭湧.智慧造景[J].风景园林,2013,102(01):33-37.

[27] 曾丽娟.基于层次分析法和人工智能技术的乡村景观设计效果评估[J].现代电子技术,2020,43(11):128-131.

[28] LIU C, CAO Y J, YANG C, et al. Pattern Identification and Analysis for the Traditional Village Using Low Altitude UAV-Borne Remote Sensing: Multifeatured Geospatial Data to Support Rural Landscape Investigation, Documentation and Management[J]. Journal of Cultural Heritage, 2020, 44: 185-195.

[29] 郭晓彤,杨晨,韩锋.文化景观遗产数字化记录及保护创新[J].中国园林,2020,36(11):84-89.

[30] 胡最,闵庆文.构建农业文化遗产数字化保护的概念框架探讨[J].地球信息科学学报,2021,23(09):1632-1645.

[31] 陈照方,王云才.乡村景观单元识别与认知的空间生态智慧——以南京市牌坊社区为例[J].风景园林,2022,29(07):30-36.

[32] 徐丽华,黄炜铤,许铁光,等.基于无人机航拍遥感影像的新农村规划研究[J].上海农业学报,2010,

26(03):101-105.

[33] 何原荣,陈平,苏铮,等.基于三维激光扫描与无人机倾斜摄影技术的古建筑重建[J].遥感技术与应用,2019,34(06):1343-1352.

[34] 余苏超,苏同向.基于多源数据的景中村游憩吸引力研究——以常州长荡湖旅游度假区乡村为例[J].园林,2022,39(06):18-25.

[35] 郑文俊,李桂芳,骆姚瑶.基于UGC图片数据的民族村寨景观意象特征解析——以广西程阳八寨为例[J].园林,2022,39(07):13-19.

[36] 宋启,李侃侃,刘建军.基于UGC数据的乡村游客行为时空特征研究[J].中国园林,2021,37(08):80-85.

[37] 张洋,葛梦婷,董孟斌,等.数字化背景下人机交互对景观感知的影响[J].风景园林,2022,29(09):48-54.

[38] 罗映舜,沈宇云,詹文.基于SD与眼动分析的张谷英村文化景观体验评价研究[J].中国园林,2022,38(05):98-103.

[39] 孙漪南,赵芯,王宇泓,等.基于VR全景图技术的乡村景观视觉评价偏好研究[J].北京林业大学学报,2016,38(12):104-112.

[40] 李晓颖,雷奥林. GIS在乡村文化景观规划中的应用及展望[J].中国名城,2021,35(09):67-72.

[41] 马毅,赵天宇.严寒地区绿色镇村体系数据库系统设计[J].建筑科学,2016,32(06):61-65.

[42] 熊星,唐晓岚,刘澜,等.风景名胜区乡村文化景观管理数据库平台建构策略[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(05):99-106.

[43] YANG W, FAN B, TAN J, et al. The Spatial Perception and Spatial Feature of Rural Cultural Landscape in the Context of Rural Tourism[J]. Sustainability, 2022, 14(07): 4370.

[44] 刘澜,唐晓岚,熊星,等.基于GIS的苏南乡村自然景观的生态敏感性分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(04):159-164.

[45] 周再知,蔡满堂.乡村景观规划研究[J].林业科学研究,2000(02):160-166.

[46] WANG Y, LI S, TENG F, et al. Improved Mask R-CNN for Rural Building Roof Type Recognition from UAV-High-Resolution Images: A Case Study in Hunan Province, China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(02): 265.

[47] 苑思楠,张寒,张翌.VR认知实验在传统村落空间形态研究中的应用[J].世界建筑导报,2018,33(01):49-51.

[48] 袁旻洋,成玉宁.过程、逻辑与模型:参数化风景园林规划设计解析[J].中国园林,2018,34(10):77-83.

[49] 葛丹东,童磊,吴宁,等.乡村道路形态参数化解析与重构方法[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(02):279-286.

[50] PITTS A, GAO Y, TIEN LE V. Opportunities to Improve Sustainable Environmental Design of

Dwellings in Rural Southwest China[J]. Sustainability, 2019, 11(19): 5515.

[51] 郭湧.论风景园林信息模型的概念内涵和技术应用体系[J].中国园林,2020,36(09):17-22.

[52] 唐振雄.乡村景观营造中的景观信息模型(LIM)构建初探——以“无止桥”乡村公益实践为例[J].包装世界,2016,165(02):74-78.

[53] 李彦雪,李复,朱舒,等.多视图影像三维重建技术在乡村景观设计中的应用[J].东北林业大学学报,2019,47(12):84-89.

[54] 林峰.虚拟现实技术在农业可视化场景快速构建中的应用[J].江苏农业科学,2020,48(14):268-273.

[55] ZHAO X, LI M, SUN Z, et al. Intelligent Construction and Management of Landscapes through Building Information Modeling and Mixed Reality[J]. Applied Sciences, 2022, 12(14): 7118.