数据为媒：数字孪生技术在生态实践中的应用*

张晓彤[1] 刘 晖[1] 左 翔[1] 李佳欣[2]

1 西安建筑科技大学建筑学院 西安 710055
2 西安建筑科技大学交叉创新研究院 西安 710055

摘要：数字孪生技术的快速发展为解决生态科学与生态实践之间存在的不一致性和不平衡性提供了新的契机，因此，为推动数字孪生技术与生态实践的深入结合，文章首先探讨了生态数据连接生态科学与实践应用的核心媒介作用，并阐述了在该过程中数字孪生技术如何通过“监测—数据搜集与数据映射”“预测—数据分析与未来预判”“决策—数据驱动的决策优化”3 个方面推动从复杂生态变量到可操作工程参数的转化；其次，详细介绍了“生境营造数字景观平台”的搭建逻辑、系统架构及软硬件环境，展示了该平台在多源异构数据采集、数据分析及决策支持等方面的实际应用效果；最后，展望未来，基于平台建设经验并结合国内外相关案例，归纳了当前数字孪生技术应用于生态实践面临的 5 大挑战，包括逻辑融合与方法转译、定期检查并更新软硬件、问题建模及适宜分辨率、动态融合与灵活适应、协同合作与智慧融合。

关键词：数字孪生技术；生态实践；生态数据；智慧平台；生境营造
DOI：10.12169/zgcsly.2024.12.19.0001

Data as a Medium: Application of Digital Twin Technology in Ecological Practices

Zhang Xiaotong[1] Liu Hui[1] Zuo Xiang[1] Li Jiaxin[2]

(1. College of Architecture, Xi'an University of Architecture And Technology, Xi'an 710055, China; 2. Institute for interdisciplinary Innovation Research, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The rapid development of digital twin technology offers new opportunities to resolve the inconsistency and imbalance between ecological science and ecological practices. Firstly, this paper explores the core mediating role of ecological data in connecting ecological science with practical application in order to facilitate the deep integration between ecological twin technology and ecological practices. It also elucidates how digital twin technology facilitates the transformation from complex ecological variables to actionable engineering parameters through three aspects: "Monitoring: Data Collection and Mapping", "Prediction: Data Analysis and Future Forecasting" and "Decision: Data-Driven Decision Optimization." Secondly, the construction logic, system architecture, and soft- and hard-ware environment of "Digital Landscape Platform for Habitat-site Design" are introduced in detail, which demonstrates its practical application in multi-source heterogeneous data acquisition, data analysis, and decision support. Finally, based on the experience in platform construction and the relevant national and international cases, five major challenges facing the application of digital twin technology in ecological practices are summarized: logic fusion and method translation, regular inspection and updates of soft- and

收稿日期：2024-12-19
* 基金项目：国家自然科学基金（52578097）；渭南市海绵城市建设专题研究服务项目（20230759）
第一作者：张晓彤（1997- ），女，博士生，研究方向为风景园林规划与设计。E-mail：1426758722@qq.com
通信作者：刘晖（1968- ），女，博士，教授，研究方向为西北脆弱生态环境景观规划设计理论与方法、中国地景文化历史与理论。E-mail：249600425@qq.com

hard-ware, problem modeling and appropriate resolution, dynamic fusion and flexible adaptation, and coordinated cooperation with wise integration.

Keywords: digital twin technology; ecological practice; ecological data; intelligent platform; habitat-site design

随着数字技术的快速发展，数字孪生技术逐渐在多个领域中展现出独特的优势和广阔的应用前景，已成为许多科学领域的热门话题。数字孪生技术是指以数字化的方式建立物理实体多维、多时空尺度、多学科技术、面向全生命周期的动态虚拟模型，仿真和刻画物理实体在真实环境中的属性、行为、规则等[1-2]。

在数字中国和智慧城市建设的政策支持下，数字孪生技术为生态学研究及相关实践领域提供了新的工具和方法[3-5]。数字孪生技术可以对现实世界中肉眼难以观测的生态过程进行精确且实时的监控与模拟预测，以最小滞后甚至实时的方式呈现自然状态，使我们能够及时发现生态环境问题，并迅速采取有效的干预措施，为生态实践决策提供强有力的支持。

尽管数字孪生技术在生态实践中展现了巨大潜力，但实现生态文明的理论研究和生态实践之间即生态科学与生态实践应用之间仍存在不一致和不平衡，因此弥合理论与实践的差距对于更好地推动城市生态转型势在必行[6]。生态科学强调理解与解构自然现象，而生态实践应用侧重于集成与解决现实生态问题。弥合这一理论与实践之间的差距，关键在于将生态学变量及变量关系转化为可操作的设计指标及工程参数，而生态数据就是这一过程的核心媒介。生态问题的复杂性要求明智的决策方案依赖于长期有效数据的积累[7-8]，而大数据技术结合云计算和人工智能等手段，通过对多源异构数据的无缝融合和高效管理，实现对生态系统的全面、动态监测，促进对生态过程的深刻理解，有效推动复杂生态问题的解决[9-10]。

本文探讨了生态数据作为连接生态科学与生态实践应用的核心媒介作用及数字孪生技术在该过程中的推动作用，并介绍了生境营造数字景观平台的搭建。最后，进一步归纳总结了数字孪生技术应用于生态实践的挑战，为数字技术与生态实践的深入结合提供有益的参考。

1 数字孪生技术与数据驱动的生态实践

1.1 数据的媒介角色及数字孪生技术的推动作用

生态科学为生态实践提供理论指导，而生态实践向生态科学反馈现实问题，实现两者之间的有效转化一直是个难题。这种转化的挑战主要源于两者在思维方式和侧重点上的差异。生态科学主要通过研究自然现象和规律，揭示生态系统中各类互动机制，其核心特点在于解构生态系统，逐步细化各变量之间的关系，从而深入理解生态过程；而生态实践应用主要关注如何通过设计和工程实践，满足人类的行为心理需求及社会、经济和文化的可持续发展，它强调集成与聚焦，为未来的生态建设提供切实可行的解决方案[11]。

弥合生态科学与生态实践之间差距的关键在于将生态学中的变量及其相互关系转化为可操作的设计指标和工程参数，而在这一转化过程中，生态数据充当了核心媒介。采集关键生态指标，量化生态系统的实时特征和运行机制，简化复杂的生态变量关系，从而提取能够指导实践设计与工程实施的核心参数（如提取土壤湿度、氮磷钾等核心参数），指导植物选种及养护灌溉频率，最后通过监测和反馈在设计和实施过程中动态调整方案，以适应环境变化和不确定性。这种“数据为媒”的转化过程能够推动生态理论向实践转化，并实现可持续生态建设与管理。

上述这种以“数据为媒”的转化过程，也是数字孪生技术介入生态实践的基础，在这一过程中，数字孪生技术的核心功能可以归纳为“监测-数据搜集与数据映射”“预测-数据分析与未来预判”及“决策-数据驱动的决策优化”3 个方面（图 1）。

1.2 数字孪生技术与生态实践的结合

1.2.1 监测-数据搜集与数据映射

数字孪生技术凭借其先进的传感器网络、云端同步能力与数据处理技术，确保生态数据的实

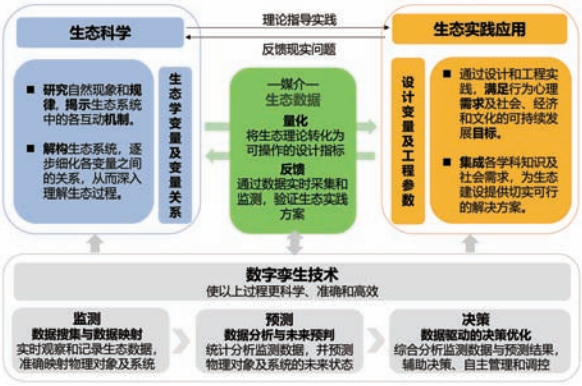


图 1　数据的媒介角色及数字孪生技术的推动作用

时性、可靠性和完整性，克服传统方法因数据滞后、不完整引发的多方面问题，为精准映射和动态管理奠定基础，涉及传感器、遥感、无人机、图像、文本等多源异构数据的无缝融合、高效管理和分析计算[12-13]。目前整合来自不同数据源的数据仍是一个难题，这些数据格式多样，且通常分布在不同的所有者手中，限制了数据的访问和使用[14-15]。

实现对生态数据的高精度映射，需要依托先进的建模方法与可靠的生态理论知识，以高度还原现实场景。数据映射通常包括 4 个主要步骤：要素体系构建、三维模型重建、空间位置计算以及场景渲染[16]。借助航空摄影、激光雷达等技术，基于 3D Max、Grasshopper、ArcGIS 等平台，研究人员精细化建模各类要素，如植物、地形、水体、建筑等[17-18]。

1.2.2　预测–数据分析与未来预判

数字孪生技术通过精细化建模和全面监控，使生态环境的评估更加精准，它不仅能映射生态系统的当前状态，还能借助机器学习和模型分析对各类数据进行深入解读，预测未来的变化趋势并及时预警潜在生态风险。例如，矿山生态环境的生态演变模型可评估生态风险并优化修复策略[19]；河流修复中的数字水文模型能够优化水系设计，促进生态系统的良性循环[20]；多源遥感技术与优化算法结合可用于城市绿地碳汇效益评估和格局优化[21]。

此外，数字孪生技术通过创建物理环境的精确数字副本，使虚拟实验和情景分析成为可能。通过虚拟实验和情景分析，数字孪生模型使研究者在虚拟环境中模拟与评估不同的生态管理方案，减少实际操作中的风险和不确定性。

1.2.3　决策–数据驱动的决策优化

在生态实践设计与管理过程中，数字孪生技术通过生成动态报告，为实践提供科学清晰的优化路径。利用数字技术生成不同方案的三维虚拟效果[22]，并模拟其生态效应[23-24]，从而提升方案比选的准确性。例如，通过图像视觉优化模型，分析传统村落的空间格局和地理特征[25]；对城市进行多维度数字体检评估，并从空间形态、设施布局、景观风貌等方面提出针对性的优化策略[26]。

综上，数字孪生技术通过对多源数据的整合和精确映射，有效评估生态环境现状并预测未来变化趋势，为决策者提供针对性强、可操作的优化方案，实现从数据采集到优化方案制定的全面支持。

2　生境营造数字景观平台：数据驱动的生态实践应用

2.1　数据驱动的生境营造实验性研究

生境营造实验性研究提出场地生态设计思路并进行实证分析，在充满复杂不确定性的生态实践中寻找确定性[27]，使生态学理论得以有效应用于生态实践。生境营造实验性研究主要通过变量控制、数据的采集与分析解读要素及其相互关系，以求解生态实践中的各类现实问题[28]，而数字技术的介入使该过程更加高效、理性与科学。

生态数据是用于描述和理解生态系统状态、过程及其变化的各种数据，其中一手数据即实地观测数据（field data）是指研究者通过实地调查、采样或传感器设备直接获取的数据，这类数据未经过任何加工处理，直接反映生态系统的实际状态，为生态研究提供最可靠的基础。然而，获取一手数据的过程也面临诸多难点：首先，实地调研需要投入大量的人力物力资源；此外，数据的可识别性和标准化处理也是一大难题。因此，提高一手生态数据采集的有效性、长期性、可识别性是推动生态学理论在实践中的有效转化和应用的必经之路。此外，随着生境营造实验性研究的不断深入，相关子课题遇到时间粒度的提升、空间尺度和维度的提升、数据分析的复杂化等挑战，对分析和操作工具提出了更高的要求。

2.2 生境营造数字景观平台的搭建

2.2.1 搭建逻辑

生境营造数字景观平台以“数据为媒”，搭建的核心逻辑在于收集多源异构数据，通过实现数据的实时映射、动态感知和状态预测，最终支持智能决策（图 2）。核心愿景是通过数字化映射场地生境及其动态变化，探索场地、生境、植物、动物之间的相互作用关系及变化机制，从而更好地掌握生态学变量与设计变量之间的规律，进一步提升生境营造的科学性和准确性。

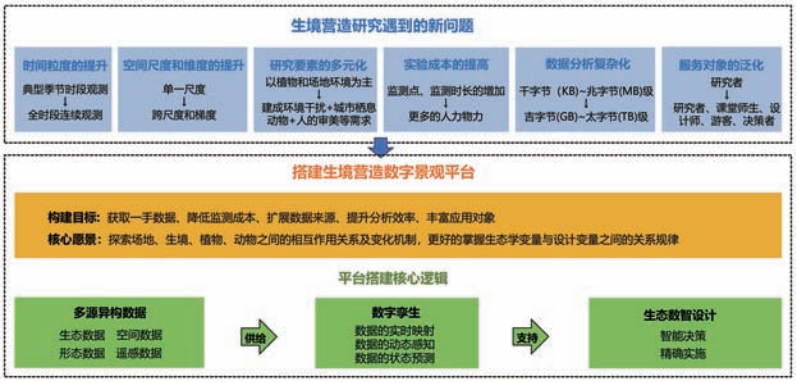


图 2 生境营造数字景观平台的搭建逻辑

2.2.2 系统架构

平台遵循四层物联网架构，自下而上依次包括感知层、数据资源层、数据支持层和应用服务层。感知层由气象站、土壤站、摄像头等采集设备组成，负责生态数据的收集；数据资源层整合 SQL Server 数据库和云存储服务，将多源异构数据进行适配和管理，为上层分析提供支持；数据支撑层通过数据相关性分析服务、AI 告警服务、视频分析服务等，支持数据处理与智能分析；应用服务层则面向用户提供直观的功能模块。

2.2.3 网络及云计算架构

平台监测基地分布分散，且部分不具备互联网连接条件，通过 4G 联网会造成高额的流量费用，因此平台采用 SD-WAN 云虚拟局域网组网方案替代传统 VPN，具备多路径传输、低延迟、高灵活性以及成本低等诸多优势。

软件平台采用云计算架构实现。云计算是一种通过位于网络服务器群，将计算能力、存储空间和数据等资源作为服务提供给用户，以完成信息处理任务的方法和过程。

2.2.4 软硬件环境

平台运行的硬件环境包括腾讯云服务器、蒲公英路由器、TP-LINK 交换机、TP-LINK 无线网桥、摄像头、气象站、土壤站、客户端电脑和手机等。

平台的软件系统采用 Windows Server 2012 R2 和 Windows 10 操作系统，使用 SQL Server 2008 R2 作为核心数据库。云服务部分依托华为好望云平台及视频分析服务，并结合第三方珍稀动物智能分析算法，为动态监测和智能分析提供支持。同时，腾讯小程序管理平台和平台专用软件进一步提升了移动端的应用便捷性。

2.3 生境营造数字景观平台的应用

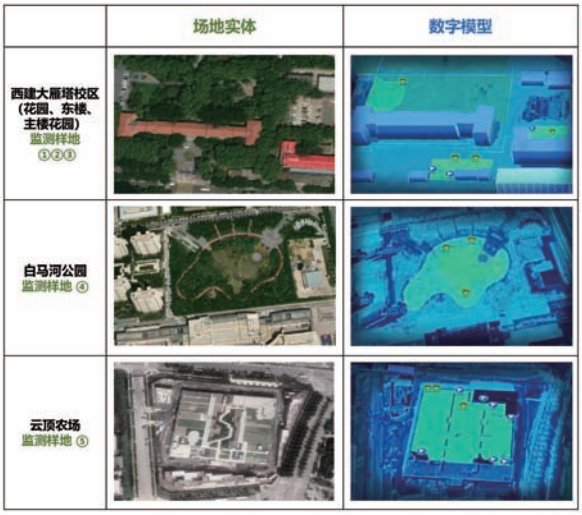
2.3.1 监测样地部署及数据采集

平台初步在西安市 5 处典型样地部署环境监测基站和智能监控设备（图 3）。监测样地包括建筑物附属绿地生境、大型绿地生境和屋顶特殊生境。监测基站包括小气候监测系统和土壤墒情监测系统，实时采集、转发和储存大气温湿度、风速、土壤氮磷钾等 14 项生态数据，并通过 GPRS 与腾讯云服务器通信。智能监控设备对场地进行持续拍摄并实时响应，通过 SD-WAN 虚拟局域网络与云服务器进行通讯。在云平台上，Microsoft SQL SERVER 数据库用于大规模数据的存储和处理。

2.3.2 数据分析与状态评估

平台主页面可以实时通过仪表盘、图表等直观显示多个监测站点的 14 个关键指标，并自动整理数据，生成“数据总览”“月度统计”“年度统计”等多种报表，同时支持离线数据的录入和整编。此外，还支持任意 2~4 个指标间的相关性分析，自动生成图表，方便观察数据之间的关系，发现科学问题和规律。

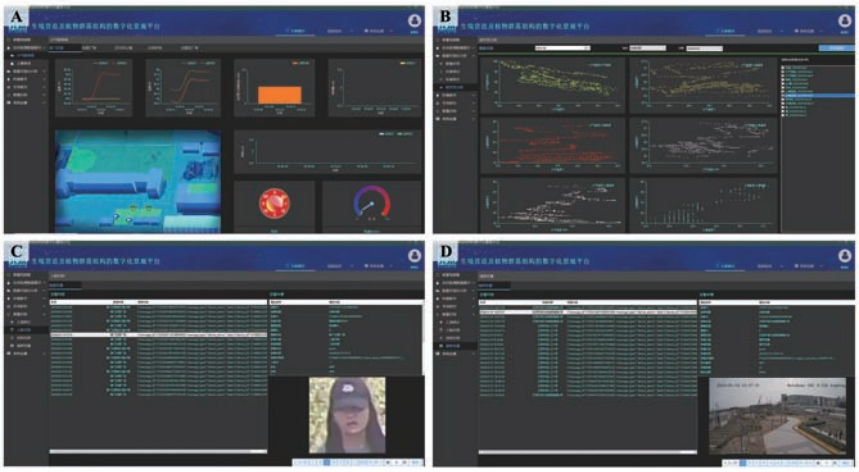
平台在生态监测区域应用了智慧识别功能，实时监控场地的人流量和游客特征，观察游客和环境的互动行为；还具备对动物的抓拍和分析功能，有助于追踪生物多样性，促进物种保护和管理，并配置实时监测告警和周界告警系统，增强安全监督（图 4）。



各传感器的测量指标及主要技术参数

测量参数	测量范围	精度
大气温度	-50～100℃	±0.5℃
大气湿度	0～100%	±5%
光照强度	0～200000 Lux	±7%
风速	0～45 $m \cdot s^{-1}$	±(0.3+0.03V) $m \cdot s^{-1}$
风向	0～360°	±3°
降雨量	0～999.9 mm	±4%
土壤温度	-40～80℃	±0.5℃
土壤湿度	0-100%	±5%
土壤电导率	0-10000 $us \cdot cm^{-1}$	±5%
土壤氮磷钾	1~1999 $mg \cdot kg^{-1}$	±2%FS
土壤pH值	0～14	0.01

图 3　生境营造数字景观平台各监测样地部署及测量指标



注：A 数据显示页面；B 数据分析界面；C 智慧识别界面；D 周界告警界面。

图 4　生境营造数字景观平台的操作界面

2.3.3　决策支持及移动端开发

平台通过监测整理各类数据及分析评估，支持用户进行科学决策。例如，通过对小气候监测系统及土壤墒情监测系统获取的数据进行分析，生成直观的分析报告，支持用户对特定环境展开资源的优化配置；结合对游客及动物行为的监控信息，支持用户提出生物多样性保护及场地管理维护方案等。除 PC 端外，平台还开发了微信小程序，方便教学、游客参观和场地管理。小程序具有用户友好的界面和交互设计，信息获取更加直观便捷。

3　数字孪生技术应用于生态实践的挑战

基于课题组生境营造数字景观平台搭建与应用的经验，结合国内外有关数字孪生技术应用于生态实践的案例，本文归纳总结了数字孪生技术应用于生态实践的挑战（图 5）。

3.1　逻辑融合与方法转译

数智化生态设计并不能等同于数智化设计技术，数智化生态设计是将生态理念与数字智能技术相结合的设计实践，它不仅是设计技术的数字化升级，还包括对生态系统的理解及系统性策略。设计逻辑与数智技术逻辑有着本质区别，设计逻

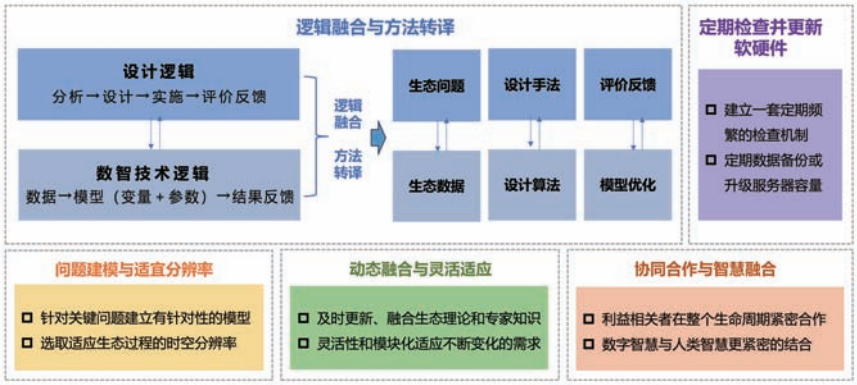


图 5 数字孪生技术应用于生态实践的挑战

辑一般包括分析、设计、实施、评价反馈等流程，而数智技术逻辑一般包括数据、模型、结果反馈等流程，需要将两者进行逻辑融合和方法转译以指导数智化生态设计。因此，数智化生态设计的关键在于将生态问题反映为生态数据、将设计手法编制为设计算法及根据评价反馈优化计算模型。

3.2 定期检查并更新软硬件

平台搭建至今已采集近 2 年的生态数据，但由于部分传感器埋于地下，容易受到自然因素或人为活动的影响而损坏，导致数据采集过程中频繁出现故障和异常值，这对数据的连续性构成严重挑战，并直接影响后续数据分析的价值与可靠性，因此建立一套定期频繁的检查机制并及时采取补救措施尤为重要。此外，24 h 不间断的高频高精数据采集会产生海量的信息，为避免因储存空间不足导致数据丢失，需定期将累积的数据备份到外部存储设备上或考虑升级服务器容量。

3.3 问题建模及适宜分辨率

有些生态数据可以通过传感器轻松获取，但由于许多生态过程相对缓慢，这类数据需要繁重的实地采集和数字化处理，且生态系统本质上比工程系统更加复杂，其具有高度的随机性和不可预测性。数字孪生技术虽然为生态保护和实践提供了科学依据，但完全复刻整个自然生态系统是难以实现的[9]，因此，应该基于关键的问题或感兴趣的区域，选择适宜的时空分辨率并建立有针对性的模型，而不是追求包含生态系统的所有细节。对于生态实践来说，数字孪生技术的“动态实时”实际上是“以适应目标、适应生态过程的时空分辨率同步”，因此制定目标和时空分辨率的选取尤为关键。

3.4 动态融合与灵活适应

数字孪生平台的优势不仅在于高科技传感器和多源数据的整合，更来自于生态理论和专家知识的融合，因此，合理融合生态理论和专家知识同样关键。特别是在预测和决策层面的应用中，可靠的生态学理论知识至关重要，这意味着应基于最新的科学证据，及时更新平台所依赖的基础理论，以避免科学见解与生态实践之间的脱节。此外，平台搭建需要高度的灵活性和模块化，以适应不断变化的需求，实现基础设施的最大程度重复利用。

3.5 协同合作与智慧融合

尽管数字模型可以基于数据提供理性分析和数据判断，但在道德、伦理、感性和综合决策等层面，人类智慧具有不可替代的价值。因此，数字孪生平台的搭建者、生态领域研究者、生态实践者、政策制定者等利益相关者需在平台的整个生命周期中紧密合作，共同参与目标制定，及时获取相关场景的最新见解，以在生态数字孪生领域建立最佳实践。

4 结论与展望

本文探讨了生态数据在连接生态科学与生态实践应用中的核心媒介作用及数字孪生技术在该过程中的推动作用，并介绍了在此背景下搭建的生境营造数字景观平台。此外，结合国内外相关研究，进一步分析了数字孪生技术应用于生态实践的挑战。

弥合生态科学与生态实践之间差距的关键在于将生态学中的变量及其相互关系转化为可操作的设计指标和工程参数。“数据为媒”的转化方

式通过数据的采集与分析，简化复杂的生态变量关系，提取能够指导实践的核心参数，并通过实时监测和动态反馈适应环境变化和不确定性。这一转化方式也构成了数字孪生技术介入生态实践的基础。凭借强大的“监测-数据搜集与数据映射”“预测-数据分析与未来预判”及“决策-数据驱动的决策优化”功能，数字孪生技术为生态实践提供强有力的科学依据和技术支撑。

展望未来，数字孪生技术在生态实践中的应用应注重设计逻辑与数智技术逻辑的融合与方法转译，选取适应目标、适应生态过程的时空分辨率，及时更新并合理结合生态理论和专家知识，建立一套定期频繁的检查机制。平台搭建需要具备高度的灵活性和模块化，以适应不断变化的需求。同时，还需加强数字孪生技术与人类智慧的结合，确保各利益相关者在平台生命周期内的紧密合作。通过持续的创新和优化，数字孪生技术将在生态实践中展现出更广阔的前景。

参考文献

[1]陶飞,刘蔚然,刘检华,等.数字孪生及其应用探索[J].计算机集成制造系统,2018,24(1):1-18.

[2]成玉宁,樊柏青.数字景观进程[J].中国园林,2023,39(6):6-12.

[3]成玉宁,王雪原.城市蓝绿空间融合规划的生态逻辑[J].中国园林,2023,39(10):39-43.

[4]巫细波,杨再高.智慧城市理念与未来城市发展[J].城市发展研究,2010,17(11):56-60,40.

[5]李德仁,姚远,邵振峰.智慧城市中的大数据[J].武汉大学学报(信息科学版),2014,39(6):631-640.

[6]WANG N,GUO J L,ZHANG J,et al.Comparing eco-civilization theory and practice:big-data evidence from China[J].Journal of Cleaner Production,2022,380:134754.

[7]STAPANIAN M A,RODRIGUEZ K,LEWIS T E,et al.Announcement:guidance document for acquiring reliable data in ecological restoration projects[J].Restoration Ecology,2016,24(5):570-572.

[8]MICHENER W K.Ecological data sharing[J].Ecological Informatics,2015,29:33-44.

[9]TRANTAS A,PLUG R,PILEGGI P,et al.Digital twin challenges in biodiversity modelling[J].Ecological Informatics,2023,78:102357.

[10]赵苗苗,赵师成,张丽云,等.大数据在生态环境领域的应用进展与展望[J].应用生态学报,2017,28(5):1727-1734.

[11]王志芳,白竹惠.确保设计研究有用的核心之一:设计参数与研究调参路径[J].风景园林,2024(8):22-27.

[12]袁旸洋,谈方琪,樊柏青,等.乡村景观全要素数字化模型构建研究:以福建省将乐县常口村为例[J].中国园林,2023,39(2):50-56.

[13]RANTANEN T,JULIN A,VIRTANEN J P,et al.Open geospatial data integration in game engine for urban digital twin applications[J].ISPRS International Journal of Geo-Information,2023,12(8):310.

[14]REICHSTEIN M,CAMPS-VALLS G,STEVENS B,et al.Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science[J].Nature,2019,566(7743):195-204.

[15]JEFFERY K,WITTENBURG P,LANNOM L,et al.Not ready for convergence in data infrastructures[J].Data Intelligence,2021,3(1):116-135.

[16]贺彪,郭仁忠,张琛,等.面向数字孪生城市的自然场景构造方法[J].测绘通报,2022(7):87-92.

[17]WU X K.The digital landscape design and layout of wetlands based on green ecology[J].Energy Reports,2023,9:982-987.

[18]董则奉,汪正,张朱虹.公园智慧管理中的数字孪生模型技术研究[J].园林,2023,40(7):43-49.

[19]李全生,刘举庆,李军,等.矿山生态环境数字孪生:内涵、架构与关键技术[J].煤炭学报,2023,48(10):3859-3873.

[20]李雱,彼得·派切克.基于数字水文地形模型的景观水系优化设计:德国埃尔廷根-宾茨旺根段多瑙河河流修复[J].中国园林,2013,29(8):30-34.

[21]孙载瑞,尹露曦,杨智.喀斯特地区碳储量与景观格局时空演变与预测[J].中国城市林业,2025,23(3):108-116.

[22]刘童,兰翔.数字孪生技术在生态水景观设计中的应用[C]//2022(第十届)中国水生态大会论文集.2022.

[23]侯庆贺,成玉宁.建成环境景观水文研究框架构建:基于数字景观技术的景观水文分析、评价与优化[J].中国园林,2023,39(7):77-82.

[24]成玉宁,侯庆贺,谢明坤.低影响开发下的城市绿地规划方法:基于数字景观技术的规划机制研究[J].中国园林,2019,35(10):5-12.

[25]ZHU Y,HAN G Q,WANG L,et al.Analysis of spatial pattern and geographical divergence characteristics of traditional villages oriented to digital landscape technology[J].Applied Mathematics and Nonlinear Sciences,2024,9:20230577.

[26]史宜,张钟虎,娄莺,等.问诊天堑:基于多源数据的城市跨江城区数字体检与优化策略研究:以南京浦口中心城区为例[J].建筑师,2024(2):22-30.

[27]刘晖,李仓拴,王晶懋.低影响开发引导下的生境与植物群落景观建构[J].中国园林,2019,35(10):13-18.

[28]许博文,刘晖,曹朔.低碳视角下西北地区城市绿地的适水种植设计途径[J].中国城市林业,2023,21(04):51-58.