引文格式：钟干明,刘晓明,曲英杰,等. 面向数字孪生流域的多级数据底板融合关键技术研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(11): 33-36. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2025.11.007

面向数字孪生流域的多级数据底板融合关键技术研究

钟干明[1]，刘晓明[1]，曲英杰[2]，王　莹[2*]
（1. 广东粤海飞来峡水力发电有限公司，广东 清远 518019；2. 长江科学院 空间信息技术应用研究所，湖北 武汉 430010）

摘　要：流域多级数据底板是数字孪生流域构建的基础，其核心是整合多源、多尺度、多层级的地理空间数据，以支撑流域预报、预警、预演、预案功能的准确有效应用。针对多级流域地理存在的数据量大、几何和色彩不一致、整合不充分等问题，以飞来峡水利枢纽数字底板建设为例，探讨了多级数据底板融合的关键技术。从数据存储管理、空间配准、拓扑融合、色彩统一处理和高效渲染等多个角度，实现了多级数据底板的有效融合与应用，提升了地理空间数据在流域规划、设计、建设和管理等水利全生命周期业务中的支撑作用，为其他流域的地理空间大数据平台建设提供了参考。

关键词：数字孪生流域；数据底板；多源数据融合；水利信息化
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）11-0033-04

Research on Key Technologies of Multi-level Data Baseboard Fusion for Digital Twin Watershed

ZHONG Ganming[1], LIU Xiaoming[1], QU Yingjie[2], WANG Ying[2]
(1. Guangdong Yuehai Feilaixia Hydropower Co., Ltd., Qingyuan 518019, China;
2. Research Institute of Space Information Technology Applications, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The multi-level data baseboard for watershed is fundamental for constructing digital twin watershed, integrating multi-source, multi-scale and multi-tier geospatial data to support the accurate application of forecasting, warning, simulation, and planning functions. Addressing issues such as large data volumes, inconsistencies in geometry and color, and insufficient integration in multi-level watershed geospatial data, taking the digital baseboard construction of Feilaixia Water Conservancy Hub for example, we explored key fusion technologies for multi-level data baseboards. We achieved the effective integration and application of multi-level data baseboards from data storage management, spatial registration, topological fusion, color unification, and efficient rendering, which could enhance the supporting role of geospatial data throughout the full lifecycle of water conservancy management, from planning and design to construction and maintenance, providing guidance for geospatial big data platform construction for other watersheds.

Key words: digital twin watershed, data baseboard, multi-source data fusion, water conservancy informatization

数字孪生流域是数字孪生技术与流域管理治理的结合，是水旱灾害防御、极端洪涝预防、水资源规划管理、水环境污染治理、维持区域良性发展的重要手段。数字孪生流域以物理流域为单元、时空数据为底座、数学模型为核心、水利知识为驱动，对物理流域全要素和水利治理管理活动全过程进行数字映射、智能模拟、前瞻预演，实现对物理流域的实时监控、优化调度[1-2]。数据底板是智慧水利的“算据”，因此形成基础数据统一、监测数据汇集、二三维一体化、跨层级和跨业务的智慧水利数据底板，是实现水利全要素数字化映射的关键。多级数据底板融合是实现流域数字化映射和高精度仿真模拟的核心。然而，多源数据底板融合面临着数据精度不同、空间参考多样、色彩差异、拓扑缺失、渲染效率低等挑战，可能导致数据在叠加和融合过程中出现偏差，影响水利“四预”（预报、预警、预演、预案）应用的准确性和有效性。

部分学者[3-5]通过研究实现了多级数据底板的叠加和联合渲染，但数据整合仍不充分，因此本文结合流域覆盖的地理空间数据特性和实际应用需求，探讨了流域内多尺度、多源异构空间数据的融合治理技术。在数据存储管理方面，采用数据湖[6]与数据仓库[7]的混合多态存储模式，以适应不同类型数据的存储和处理需求；通过数据配准技术，确保不同数据源的空间一

项目来源：中央级公益性科研院所基本科研业务资助项目（CKSF2023313）；粤海水务科研资助项目（CE472024000072）。
第一作者简介：钟干明（1982—），本科，工程师，从事水利信息化及防汛管理工作，E-mail：191469016@qq.com。
通信作者：王莹（1991—），硕士，工程师，研究方向为水利信息化，E-mail：523437244@qq.com。

致性。在拓扑融合方面，利用自动化拓扑融合算法实现了水下、水上地形模型之间的无缝连接；基于多级数据底板匀色算法消除了不同数据源之间的色彩差异，增强了数据的视觉连贯性；基于多级数据底板的动态高效渲染技术实现了地理空间数据的实时漫游和浏览。

1 多级数据底板融合关键技术

1.1 流域空间数据引擎构建

多源异构海量地理空间数据融合、数据标准化和一致性处理是流域数据底板建设的关键。本文从流域涵盖的地理空间数据和实际需求出发，研究了流域多尺度、多源异构时空数据的融合治理技术，构建了流域级多级地理空间数据分类体系（表1）。流域空间数据引擎是确保多级数据底板有效组织和管理的关键技术。针对海量异构的原始地理空间数据，采用数据湖[6]进行存储，以适应数据的多样性和可扩展性。流域空间数据引擎以数据湖为中央存储库，围绕数据湖建立一个多源异构时空数据成果仓库专用的“数据环”，包括矢量数据库、栅格数据库、三维模型数据库、激光点云库、地图瓦片库和属性数据库等，并采用关系型数据库和分布式文件系统组成的混合多态存储模式进行存储。基于“湖仓架构”的地理空间数据混合多态存储技术可实现多源多尺度数据的快速存取、有效管理和灵活分析，为水利决策提供了强有力的数据支撑。

表1 多级地理空间数据内容

尺度	范围	数据类型	精度
L1	流域全域	DEM	优于30 m
		DOM	优于2 m
		基础地理信息（水利、行政区划、路网、居民地等）	优于1∶100万
		专题信息（土地利用、植被等）	优于1∶100万
L2	主要江河流域重点区域	DEM	优于15 m
		DOM	优于1 m
		水下地形	优于2 m
		倾斜模型	优于0.08 m
L3	重点水利工程	DEM	优于5 m
		DOM	优于0.5 m
		水下地形	优于0.5 m
		倾斜模型	优于0.03 m
		BIM	LOD3.0

1.2 多级数据底板配准

多级数据底板配准的核心任务是将来自各传感器和平台、具有不同精度和获取时间的数据统一到一个坐标参考系统中。水上、水下地形数据是洪水淹没分析与模拟的基础。为实现水上、水下地形模型的高精度配准，本文提出了一种自动配准算法。首先将水下地形的数字表面模型（DSM）通过Delaunay三角化算法[8]转换为水下地形的Mesh模型；然后通过迭代最近点（ICP）配准算法[9-10]计算水下地形模型到倾斜模型的刚性变换参数。假设倾斜模型网格顶点集合为 P，水下地形网格顶点集合为 Q，采样一组点 $p_i \in P$，q_i 为 Q 中距离 p_i 最近的点，将 p_i 和 q_i 视为对应点，从而计算变换矩阵和配准代价：

$$f(\boldsymbol{R},\boldsymbol{T})=\frac{1}{K}\left\|q_i-(\boldsymbol{R}\times p_i+\boldsymbol{T})\right\|^2 \tag{1}$$

式中，K 为采样点数量；$\boldsymbol{R}$ 为旋转矩阵；$\boldsymbol{T}$ 为平移矩阵。

迭代上述过程，求得配准代价最小变换矩阵 $(\boldsymbol{R},\boldsymbol{T})$。

1.3 多级数据底板拓扑融合

多级数据底板拓扑融合是确保“四预”仿真准确性的关键。目前的水利数据底板通常源自多样化的传感器，数据形式和结构各异，未实现拓扑连接，导致水动力分析、洪水淹没模拟、污染扩散模拟等关键应用中出现错误的边界条件，影响仿真模拟的精度和效果。为实现多级数据底板之间的有效连接，本文提出了一种拓扑融合算法。假设水下地形模型与水上倾斜摄影模型已完成配准，则通过二维格网运算实现两种数据的拓扑连接，首先对水上倾斜摄影模型进行采样，生成DSM模型；然后将倾斜DSM与水下地形DSM进行融合计算；最后利用Delaunay三角化方法将融合后的DSM转换为网格模型，实现了水上、水下地形模型拓扑结构的无缝连接。假设倾斜DSM、水下地形DSM每个格网点的高程分别为 H_o、H_w，河道矢量面为 W，则融合后的DSM高程为：

$$H=\begin{cases}\min\left(H_o,H_w\right), & H\in W\\ \max\left(H_o,H_w\right), & H\notin W\end{cases} \tag{2}$$

1.4 多级数据底板匀色

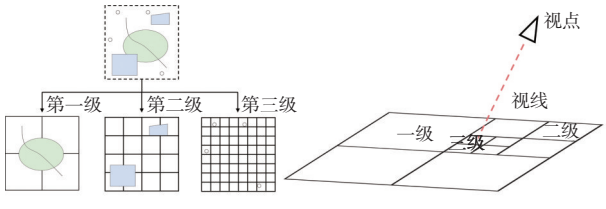
在数字孪生流域的多级数据底板结构中，对于用户关注的核心区域，一般采用L3级高精度倾斜摄影数据构建三维模型，以获取丰富的地表实景信息；而在非关键区域，则采用L1级DEM结合DOM的地形数据进行表示，这种表达方式能在保证成本效益的同时，实现大范围的地理空间可视化。然而，由于地形数据

和倾斜摄影数据采集和构建的时间和设备不同，在色调、明暗度和饱和度等方面存在显著差异，影响了数字场景的真实感和沉浸感。为解决该问题，本文提出了多源数据底板匀色方法。首先将两个地理空间数据导入渲染引擎，并分别渲染为两张影像；然后基于Wallis滤波算法[11-12]计算色彩变换参数；最后将色彩变换参数应用于倾斜模型的纹理图像，实现模型的匀色，从而保证多源地理数据的色彩一致性。假设待处理的倾斜影像像素值为 $g(x,y)$，色彩变换后的像素值为 $f(x,y)$，将影像进行分块处理，倾斜影像的均值与方差为 m_g、s_g，地形影像的均值和方差为 m_f、s_f，则色彩变换的计算公式为：

$$f(x,y)=\left[g(x,y)-m_g\right]\left(\frac{s_f}{s_g}\right)+m_f \tag{3}$$

1.5　多级数据底板的动态高效渲染

针对数字孪生流域中多级数据底板数据量大、渲染效率低的问题，本文采用空间索引技术与LOD[13]相结合的方法进行处理。基于R树[14]与四叉树[15]的动态索引技术，将复杂的地理空间数据集划分为若干个规则或不规则的网格，每个网格作为索引单元，记录其中包含的地理对象，为每个地理对象提供明确的空间位置标识。在渲染阶段，系统根据用户的视点位置和朝向，动态确定视图中必要的地理空间数据，并通过空间索引快速检索这些数据（图1a）；同时根据用户视点与对象的距离，动态调整地理数据的细节层次，近处对象采用高细节模型，以展现精确的地理特征（图1b），远处对象则采用低细节模型，以降低渲染复杂度。这种渲染方式能确保用户视点附近的地理空间数据被加载和渲染，实现了“近实远虚”的视觉效果，提升了多级数据底板的渲染效率。



a 动态索引　　b 基于视点的细节层次渲染

图1　基于动态索引的多级地理空间数据渲染示意图

2　应用案例

2.1　飞来峡水利枢纽多级数据地板构建

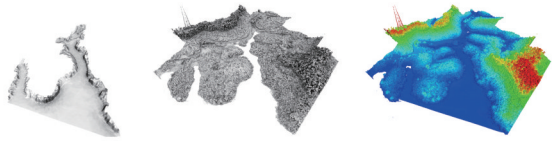
飞来峡水利枢纽作为广东省最大的综合性水利工程，承担着防洪、发电、航运、供水以及改善生态环境等多重功能，是北江流域综合治理的关键性工程。该枢纽的数字化孪生构建，有利于提升水利决策与管理的科学化、精准化和智能化水平。本文收集了流域地形、遥感影像和基础地理信息数据，并通过现场测绘和无人机航拍技术获取了高清影像、倾斜模型、堤防高程、河道断面、水下地形等多级空间数据。为确保数据的规范性、一致性和可用性，对多级数据底板进行统一清洗和管理，通过数据模型管理、数据血缘关系建立、数据清洗融合、数据质量管理、数据开发管理、元数据管理等手段实现了数据治理，避免了数据冗余和冲突。飞来峡水利枢纽的数字孪生系统（图2）集成了多级数据底板，有效支撑了流域规划、工程建设与管理等关键水利业务，提升了决策的科学性和精准性。



图2　飞来峡水利枢纽数字孪生系统界面

2.2　水下地形和倾斜模型配准

采用多波束探测技术获取的飞来峡库区水下地形与倾斜模型存在位置偏差，而利用多级数据底板配准技术能实现水下地形和倾斜模型的配准。配准结果见图3。在数据采集阶段，水下地形测绘设备不仅捕获了水下几何特征，而且获取了岸边地区的点云数据，其中岸边点云与倾斜模型存在重叠，为两套数据提供了配准依据。倾斜模型能构建真实地表的三维模型，但无法重建动态水面，导致倾斜模型在水面区域存在数据缺失。将倾斜模型与水下地形数据进行精确配准，可实现多源数据的无缝融合，得到完整的地表三维数据。



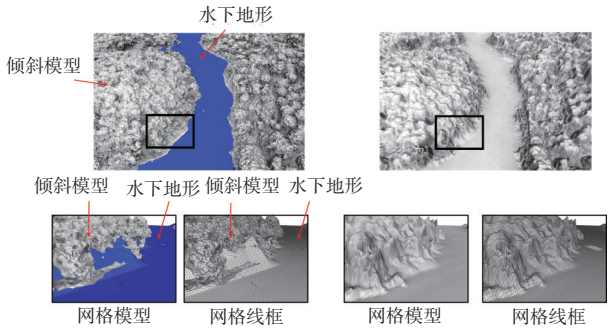
a 水下地形　　b 倾斜模型　　c 配准后的结果

图3　水下地形和倾斜模型配准结果

2.3　水下地形和倾斜模型拓扑融合

为确保数据的连续性，位置配准后利用多级数据底板拓扑融合方法实现水下地形和倾斜模型的拓扑融合。拓扑融合结果见图4，可以看出，拓扑融合前倾

斜模型和水下地形虽已实现配准，但二者没有拓扑连接，仅放置在一起，视觉上存在明显的接边，也无法实现准确的淹没和污染扩散等分析；拓扑融合后模型交界处无明显接边，线框模型中水上、水下部分已实现准确的拓扑连接。拓扑融合模型的定量结果根据融合前各模型的精度，遵循向低精度兼容的原则分区评定，即融合后的模型在不同区域的精度不同：非重叠的地面和河道精度分别等于倾斜模型和水下地形精度；重叠的河岸精度以二者中较低的精度为准，以此确保融合模型定量结果的可靠性。



a 拓扑融合前　　b 拓扑融合后

图4 水下地形和倾斜模型拓扑融合结果

2.4 地形与倾斜模型匀色

为确保多源地理数据的色彩一致性，利用多级数据底板拓扑融合方法实现地形与倾斜模型的匀色。匀色结果见图5，可以看出，色彩调整前由于地形数据与倾斜摄影数据的纹理分别来自卫星影像和无人机影像，二者的接边区域出现了明显色差；色彩调整后则有效消除了接边区域的色差，使得整体风格更加一致，确保了多源数据在色彩表现上的一致性。



a 色彩调整前　　b 色彩调整后

图5 倾斜模型与地形数据匀色结果

3 结 论

针对多源多级数据底板存在的混合多态存储、数据配准、拓扑重构、色彩迁移、混合场景渲染等难题，探索了多级多源地理空间数据底板融合方法。首先基于数据湖技术实现了多源异构数据的管理，并利用ICP等算法实现了水下地形和倾斜模型的配准与拓扑融合；然后通过Wallis滤波算法提升了多源多级数据的色彩的一致性；最后基于LOD模型实现了多级数据底板的高效渲染。研究实践表明，本文方法实现了多级数据底板的深入融合，为水利“四预”应用提供了准确可靠的数据基础，对于流域级地理空间数据底板建设具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 谢文君,李家欢,李鑫雨,等.《数字孪生流域建设技术大纲(试行)》解析[J]. 水利信息化,2022(4):6-12

[2] 郝一峰,李政鹏,陈晖. 南水北调中线工程交叉河流防洪“四预”应用[J]. 水利信息化,2024(5):28-32

[3] 朱光华,林榕杰,申友汀. 基于多源空间融合的流域数据底板构建及应用:以金溪将乐城区段为例[C]//2022(第十届)中国水利信息化技术论坛论文集,莆田,2022

[4] 高永红,田帅帅,陈乐旻,等. 面向数字孪生流域的多尺度三维数据底板建设[J]. 河南科技,2024,51(10):10-15

[5] 洪德法,赵世军,阮宝民,等. 流域级地理空间大数据平台建设研究与应用[J/OL]. (2024-08-26)[2024-10-12]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=7qDgw1F_0HW3BmZhQnFmz9IrTWF3Efcpw2gWWVqUuxpQlL4zRywkw-XQ9OkBPu2W8as0tJviddtb3eez_Fru0FA9vyFFSlpmIWYbpf7GJIhh4HcIpuVpayfJJLM1bx7j4-a0gIzwgXy2K-KP1-FBsPtzQh0VV7ToOCuVVPQy-AyjMh2sbYxTOw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS

[6] 高俊,柳春生,淦立琴,等. 面向城市更新的实景三维平台设计与实现[J]. 地理空间信息,2023,21(9):120-123

[7] 吴丹,夏润亮,李涛,等. 黄河水沙变化数据仓库构建关键技术研究[J]. 人民黄河,2022,44(10):159-162

[8] 钟美,杜清运,徐德军. 以等高线为特征约束的Delaunay TIN的构建[J]. 地理空间信息,2009,7(6):73-76

[9] 黄山,吴学群. 一种改进ICP算法在建筑物配准中的应用[J]. 城市勘测,2024(4):78-82

[10] 刘清,朱宁宁,余万东,等. 一种林区无人机和地基点云的自动化配准方法[J]. 地理空间信息,2022,20(5):96-101

[11] 任中杰,刘小生. 一种基于Wallis滤波的瓦片影像匀色算法[J]. 江西理工大学学报,2019,40(3):95-102

[12] 赖云,厉彦皓,尹峰. 颜色迁移在遥感影像匀色中的应用[J]. 地理空间信息,2015,13(5):118-120

[13] 林晓佳. 基于自适应细节层次模型的三维场景生成[J]. 赤峰学院学报(自然科学版),2023,39(5):40-44

[14] 代欣位,郭甲腾,刘善军,等. 基于动态四叉树索引的三维地质模型组合剖切算法[J]. 地理与地理信息科学,2020,36(4):8-13

[15] 秦安娜. 高分遥感影像三维重建立体匹配技术研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2021