

基于河道断面的三维水面构建方法研究

贾勇帅, 王正洋, 董斌

长江水利委员会水文局汉江水文水资源勘测局, 湖北 襄阳

收稿日期: 2025年11月10日; 录用日期: 2025年12月15日; 发布日期: 2025年12月26日

摘要

三维水面是数字孪生水利重要的可视化元素, 可以直观展示洪水演进、洪水淹没过程, 为管理提供决策支撑。本文提出了基于河道断面洪水位的三维水面构建方法, 首先是基于等值线粗略确定河道水面边界, 其次是对分布在河道上下游的断面水位数据进行不规则三角网构网与调整, 然后采用栅格模型计算、图像二值化等空间分析方法精确提取河道二维水面线, 最后通过高程映射实现河道三维水面构建。以湖北省某水电站下游河段为研究区域, 基于沿程断面50年一遇设计洪水位构建了三维水面, 并结合该区域实景三维模型构建了数字化场景, 验证了三维水面高程精度, 最大差值-0.33 m, 最小差值0.01 m, 结果表明该方法能精准有效表达河道水位的平面与高程变化。

关键词

三维水面, 断面, 栅格模型

Research on 3D Water Surface Construction Method Based on River Cross-Section

Yongshuai Jia, Zhengyang Wang, Bin Dong

Hanjiang River Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Xiangyang Hubei

Received: November 10, 2025; accepted: December 15, 2025; published: December 26, 2025

Abstract

The 3D water surface is an important visualization element in digital twin water conservancy, which can intuitively demonstrate flood routing and flood inundation processes, providing decision support for management. This paper proposes a method for constructing a 3D water surface based on flood levels in river cross-sections. Firstly, the boundary of the river water surface is roughly determined based on isoline,

作者简介: 贾勇帅, 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事河道测绘信息化工作, Email: 569548213@qq.com

文章引用: 贾勇帅, 王正洋, 董斌. 基于河道断面的三维水面构建方法研究[J]. 水资源研究, 2025, 14(6): 649-657.
DOI: 10.12677/jwrr.2025.146070

Secondly, irregular triangulation and adjustment of cross-sectional water level data are distributed upstream and downstream of the river channel. Then, spatial analysis methods such as raster model calculation and image binarization are used to accurately extract the 2D water surface line of the river. Finally, the 3D water surface is achieved through elevation mapping. Taking the downstream river section of a hydropower station in Hubei Province as the research area, the 3D water surface was constructed based on the 50-year design flood level of cross-sections along the river. A digital scene was also constructed by combining the real-world 3D model of the area. The accuracy of the 3D water surface elevation was validated, with a maximum difference of -0.33 m and a minimum of 0.01 m. The results show that the method can accurately and effectively represent the planar and elevation changes of river water levels.

Keywords

3D Water Surface, Cross-Section, Raster Model

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

智慧水利是新阶段水利高质量发展的显著标志，需要充分应用新一代信息技术，实现数字化场景、智慧化模拟、精准化决策，建成具有“四预”功能的智慧水利体系，数字孪生水利作为智慧水利建设的实施手段，是对水利全要素、水利治理管理全过程的数字化映射[1]-[4]。三维水面是数字孪生水利重要的可视化元素，可以直观展示洪水演进、洪水淹没过程，为管理提供决策支撑。查金星等提出面向三维 GIS 应用的动态水面绘制方法研究[5]，该方法能够得到保持原边界拓扑结构的动态水面场景，且具有较好的可视性效果。路强等提出了三维地形支撑的不规则动态水面模拟方法[6]，实现多种不规则水面且与三维地形结合程度高。徐志敏等提出了顾及水面比降的河道水面三维可视化方法[7]，能够有效表达河道的水位变化情况。张力等提出了构建多数据因子联合驱动的水体可视化模型，能够准确控制水体的流向、流速、水位、颜色、透明度等参数，从而实现数据驱动的三维仿真水面渲染[8]。总之，针对三维水面的构建从不同角度提出了研究方法，但是主要研究内容方向一是三维水面的动态展示、纹理效果模拟等，二是没有顾及上下游河道弯曲程度、精准的三维水面边界线缺失等；本文提出了基于河道断面的三维水面构建方法，通过河道粗略水面边界确定，河道上下游断面水位数据不规则三角网构建与调整、河道二维水面边界精确提取、三维水面的高程映射实现河道三维水面的构建。

2. 研究方法与技术路线

2.1. 粗略水面边界确定

河道水面的边界范围是指河道内水面与陆地的交界线，可以有效控制河道断面不规则三角网构建时数据处理的范围与精度；由于天然河道的上游水位高于下游水位，水面边界范围采用河道最上游水位对应的高程等值线的范围才能完全覆盖河道的淹没范围，如有特殊情况，例如该河道区域存在滚水坝等水工建筑时，水面边界的确定需以水工建筑为界进行上下游分段处理，粗略水面边界的确定主要是通过三角网算法提取河道范围内河道最上游水位数据的等值线，该算法主要是利用河道范围内的高程数据建立不规则三角网，根据初始三角形顶点的高程值，判断等值线是否经过该三角形，获取等值线与三角形两边的交点(X_j, Y_j)，反复计算获取交点的连线即为粗略水面边界线，如图 1 所示。

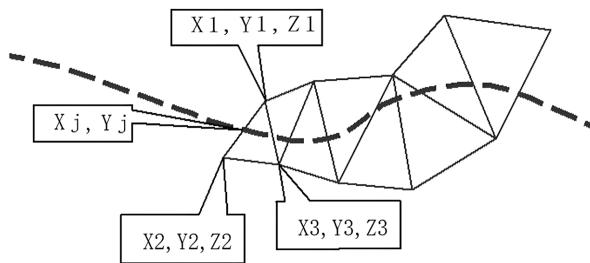


图 1. 三角网法确定粗略水面边界

2.2. 不规则三角网构建与调整

数字高程模型通常用来表达地形特征，通过分布在河道上下游的每个断面对应的水位连接成不连续的不规则三角网，进行内插或模拟计算获得[9]，由于点集的高程信息是有限的，无法满足三角网构网的需求，需对点集处理，可以经点集作垂直于河道中心线的断面，以断面的形式构建初始不规则三角网；由于部分河道较为复杂，断面不能完全真实地反映出河道的走势变化，还需对断面进行加密、延长处理，然后调整不规则三角网，使三角网能充分反映出上下游水位落差且覆盖整个水面边界。

2.3. 二维水面边界精确提取

二维水面边界的精确提取主要是通过对河道断面水位数据构建的数字高程模型与测区的数字高程模型进行栅格计算[10]，参与计算的数字高程模型应具有相同的像元行数和列数以及相同的像元大小，以确保计算精度。

计算后的栅格模型根据栅格计算前后顺序，栅格值大于0的区域为填方区域(挖方区域)，小于0的区域是挖方区域(填方区域)，等于0的区域为平衡区域，通过图像二值化处理，使大于(小于)0的栅格值统一变更为255或者其他值，以便于凸显出填方区域(挖方区域)的轮廓，方便对栅格边缘像素的提取，然后再对边缘像素矢量化

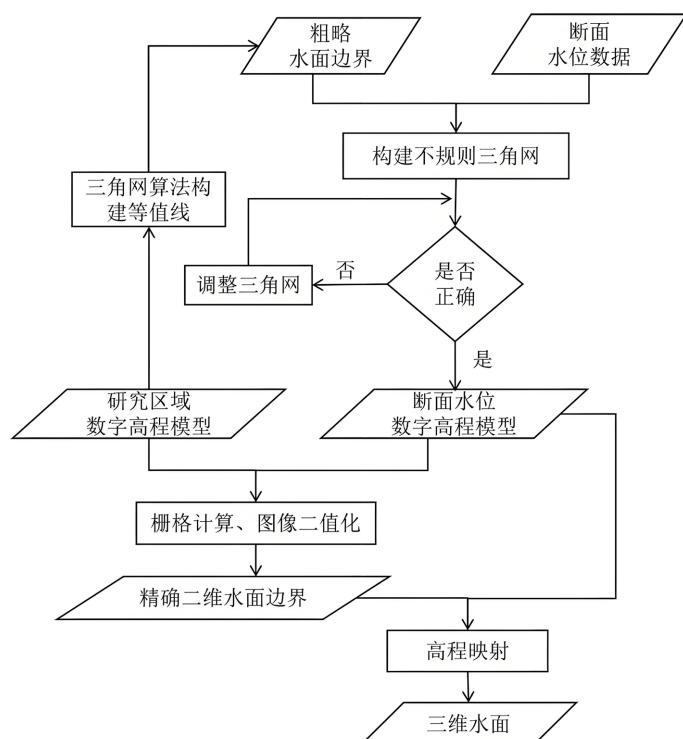


图 2. 三维水面构建技术路线

处理、建立拓扑关系实现二维水面边界的精确提取。

2.4. 三维水面高程映射

二维水面边界是不含有高程信息的，无法满足三维场景的可视化展示需求，以每个河道断面对应的水位值构建的不规则三角网插值所得的数字高程模型(DEM)为高程基础，通过高程映射获取二维水面节点在数字高程模型处的高程信息，使二维水面升维成三维水面。

2.5. 技术路线

本文以布设在河道上下游的断面水位数据为基础，进行了河道三维水面的构建研究，主要包含河道粗略水面边界确定，不规则三角网构网与调整、河道二维水面边界精确提取、三维水面的高程映射等内容，技术路线见图2。

3. 实例分析

本次选取湖北省某水电站河道下游作为研究区域，采用 DJI M300RTK 无人机搭载 ZenmuseP1 相机采用 GNSS 实时差分定位进行航测，该测区河道长度约为 9 km，布设了 28 个河道断面，断面布设间距约 0.3 km，测区正射影像及断面布设见图3。

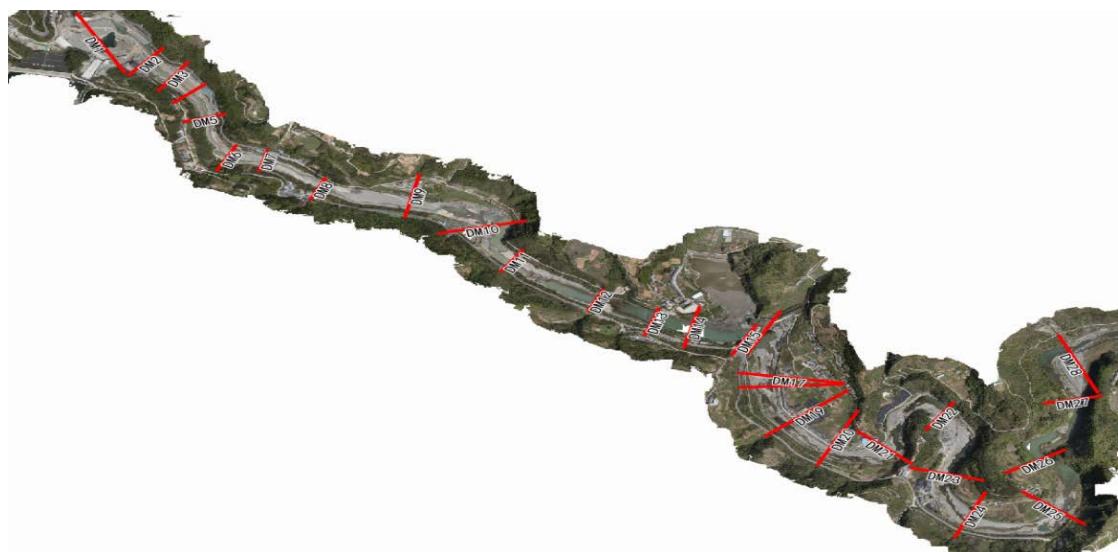


图 3. 测区正射影像及断面布设图

基于实测资料，构建了该研究区域河段内一维水动力模型，根据历史洪水调查情况对河段沿程糙率进行率定，本次模型率定试算时，河道综合糙率参考《水工建筑物与堰槽测流规范》(SL537-2011)中表 K.0.4 中的内容确定，初始值取 0.040。根据 2021 年实际来水情况及本次实测河道断面与洪水迹调查成果，试糙推算出 2021 年沿程水面线。在试算过程中，根据该河段沟道形态、河床组成情况、两岸植被生长状况、河道弯曲度以及涉水建筑物等因素选择较为恰当的断面间综合糙率值，同时，考虑到河道沿程有弯曲及宽窄相间情况，适当调整分段扩散或收缩系数。从而使得推算 2021 年水面线尽量与调查到可靠程度较高的洪痕接近。综上，经反复调整参数试算，最终确定了本河段沿程分段综合糙率，取值为 0.040~0.055。模型推算 2021 年水面线与调查洪痕比较情况见下图4，从下图中可以看出，本次水面线试算河段，模型推算值与调查洪痕成果总体拟合程度较好，根据模型率定情况，对该河段 50 年一遇设计洪水水面线进行推算，如表 1 所示。

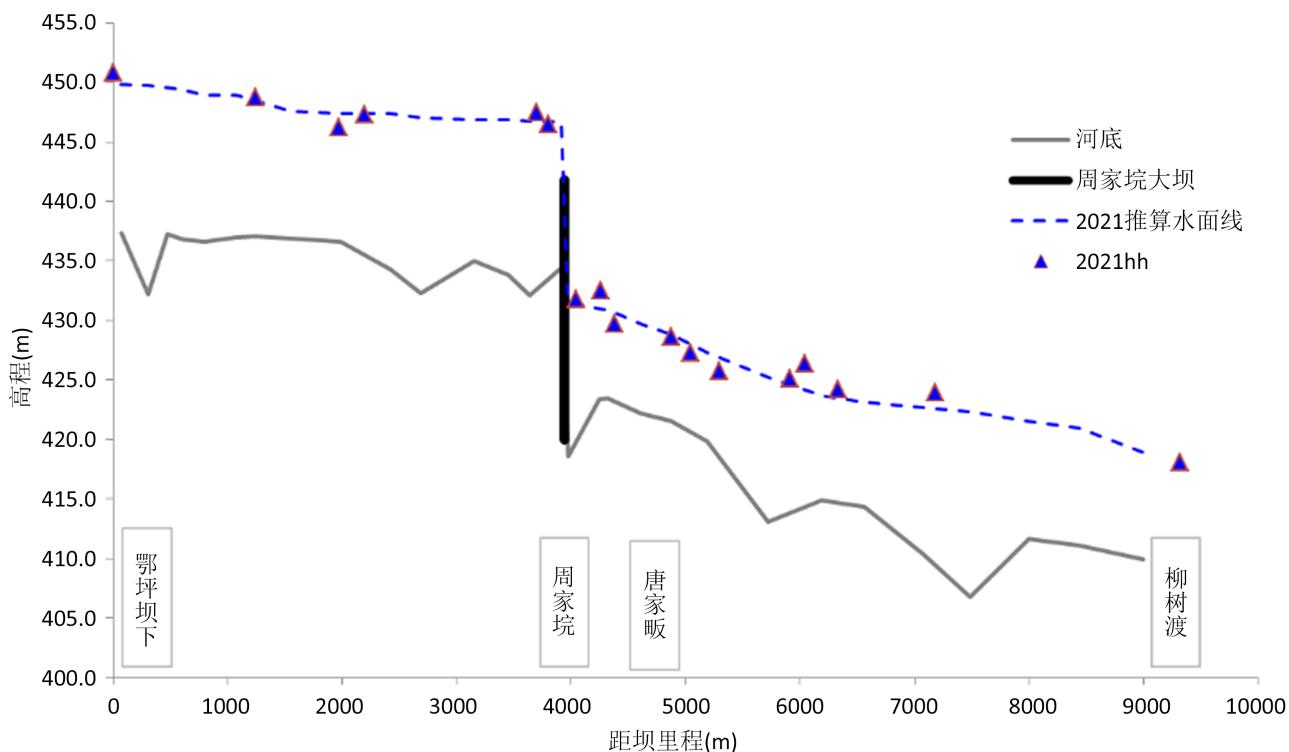


图 4. 模型推算 2021 年水面线与调查洪痕比较情况

表 1. 河道各断面 $P = 2\%$ 洪水位

断面名	$P = 2\%$ 水位	断面名	$P = 2\%$ 水位	断面名	$P = 2\%$ 水位	断面名	$P = 2\%$ 水位
DM1	*52.69	DM8	*49.88	DM15	*48.79	DM22	*27.53
DM2	*52.46	DM9	*49.76	DM16	*33.5	DM23	*25.93
DM3	*52.31	DM10	*49.82	DM17	*32.56	DM24	*25.26
DM4	*52.13	DM11	*49.2	DM18	*32.57	DM25	*24.89
DM5	*51.53	DM12	*49.08	DM19	*31.06	DM26	*24.34
DM6	*51.58	DM13	*48.99	DM20	*30.41	DM27	*23.21
DM7	*51.08	DM14	*48.96	DM21	*29.57	DM28	*22.85

由于研究区域中间有滚水坝，该河段需分段进行粗略水面边界的确定，滚水坝上游粗略水面边界以 DM1 设计 50 年一遇洪水位确定，滚水坝下游粗略水面边界以 DM16 设计 50 年一遇洪水位确定，通过该研究区域的数字高程模型的栅格值提取 DM1、DM16 设计 50 年一遇洪水位的等值线，测区上下游粗略水面边界如图 5 所示。

本次沿程河道断面水位经一维水动力模型计算，默认左右岸水位一致，为了验证三维水面的高程精度，选择 DM3、DM7、DM9、DM11、DM13、DM18 水位与三维水面左右岸水边高程进行对比分析，其余 22 个断面参与不规则三角网构网，由于部分河道断面长度无法满足覆盖整个河道范围内的不规则三角网(TIN)的构建，为了满足河道各断面水位插值后的数字高程模型能覆盖整个水面边界区域且反应真实的水位落差，还需对原始断面进行加密、延长处理，生成初始不规则三角网，如图 6 左侧图所示，部分区域由于断面高程信息互相干扰，以及插值数据源较少的原因造成插值错误，对不规则三角网进行调整，调整后的不规则三角网如图 6 右侧图所

示，插值错误区域的高程与周边高程较为吻合。

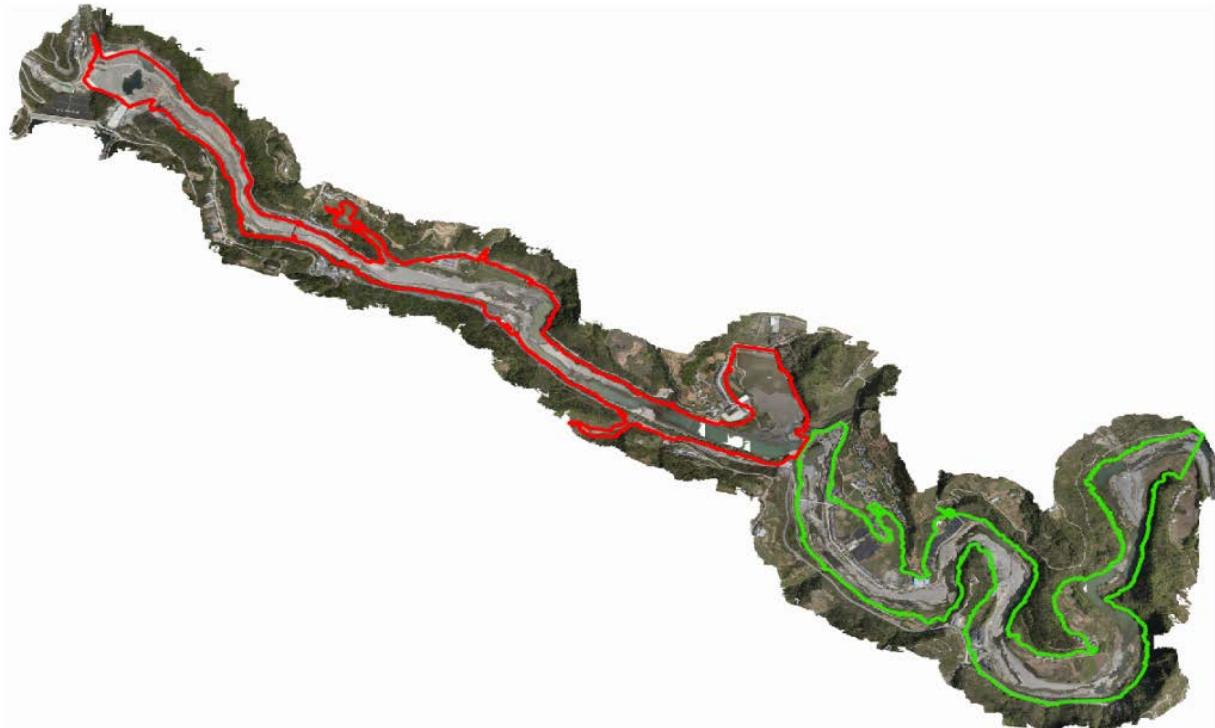


图 5. 测区上下游粗略水面边界

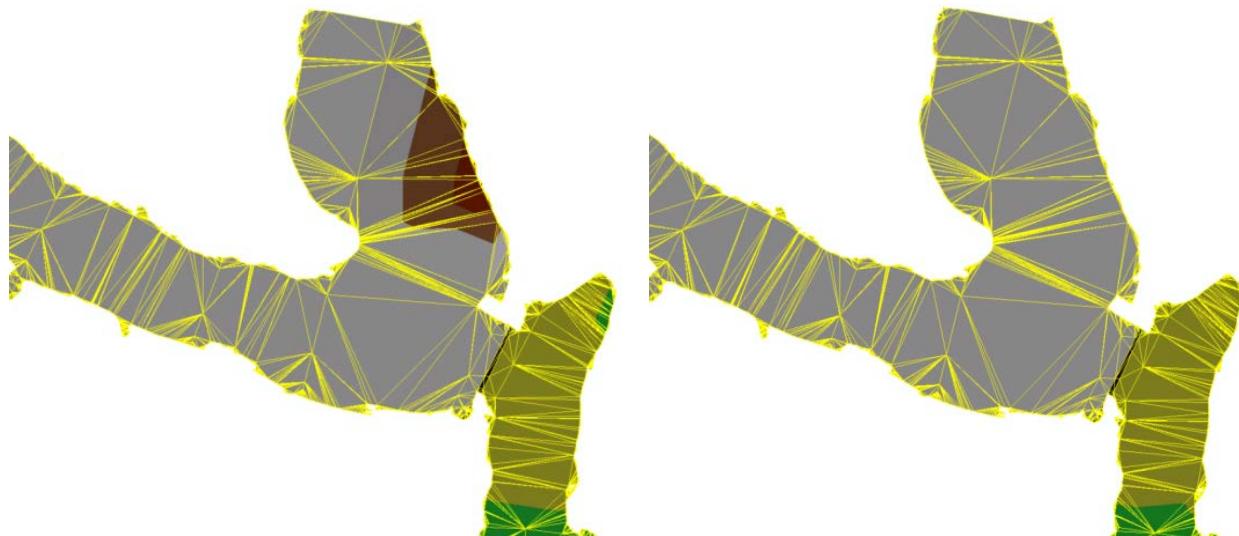


图 6. 初始不规则三角网与调整后不规则三角网

对调整后的不规则三角网进行插值生成格网尺寸为 1 m 的数字高程模型，通过与整个研究区域的格网尺寸为 1 m 的数字高程模型联合进行栅格计算，得到差值栅格模型；当调整后的河道上下游水位构建的数字高程模型为减数栅格模型时，差值栅格模型中栅格值大于 0 的区域为填方区域，小于 0 的区域是挖方区域，等于 0 的区域为平衡区域，然后通过图像二值化处理，使大于 0 的栅格值统一变更为 255 或者其他值，以便于凸显出填方区域的轮廓，方便二维水面的提取，如图 7 所示，青色区域即为二维水面边界。

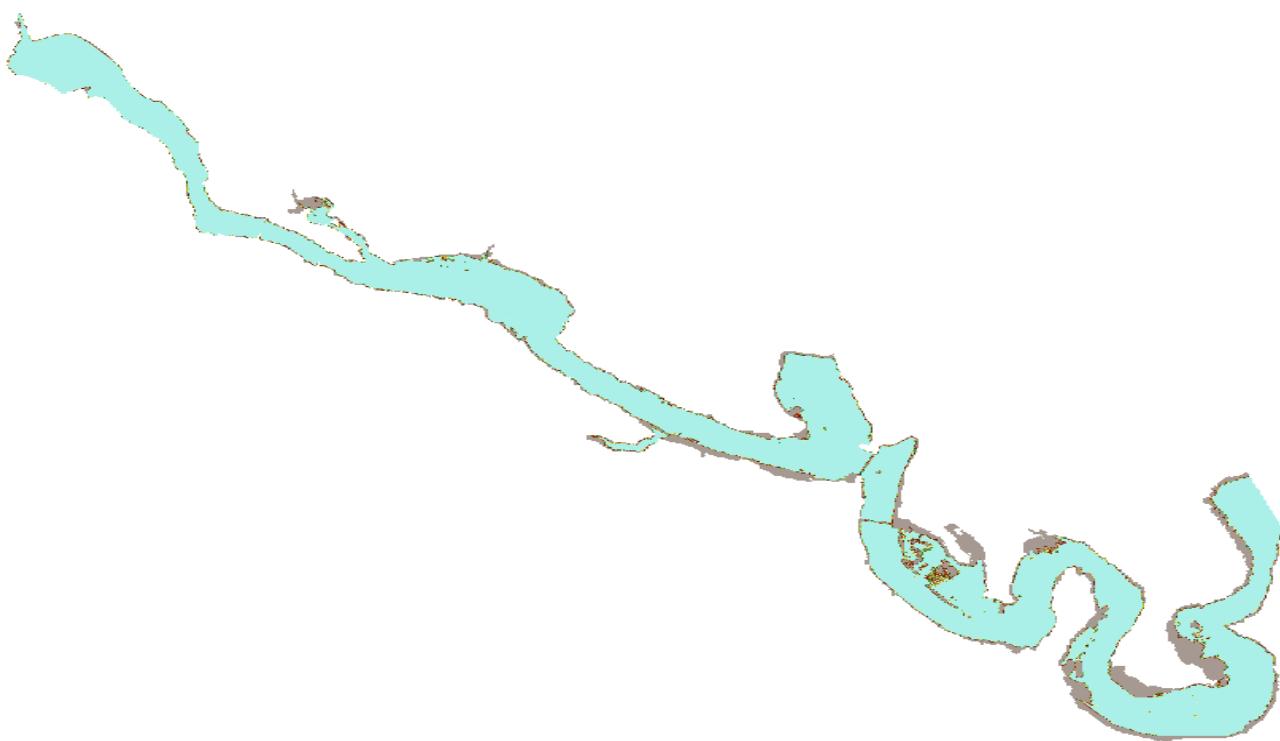


图 7. 图像二值化处理后差值栅格区域

为了实现二维水面在三维场景中的可视化，通过河道断面水位数据构建的数字高程模型实现二维水面各节点的高程的映射，完成二维到三维的升维，如图 8 所示，下方黄色区域为二维水面边界，上方蓝色区域为三维水面。

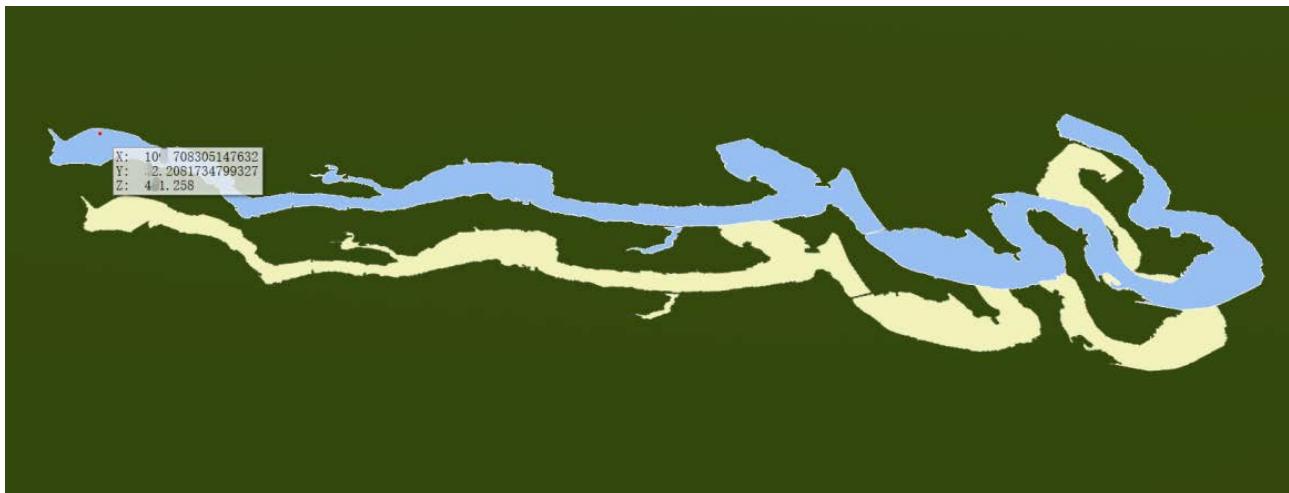


图 8. 二维水面高程映射

结合研究区域内实景三维模型与基于洪水位构建的三维水面构建研究区域三维可视化数字场景，如图 9 所示，能直观地看到洪水淹没的区域，并且能获取洪水淹没区域任意位置的空间信息，经过与现场洪痕调查，淹没效果与实际调查基本一致，同时选择 DM3、DM7、DM9、DM11、DM13、DM18 水位与三维水面左右岸水边高程进行对比分析，如表 2 所示，DM11 与 DM18 断面左右岸差值较大，结合正射影像可知，两处均为弯道，

由于进行断面高程验证导致该断面没有参与计算，误差较大。



图9. 三维水面的可视化展示

表2. 三维水面高程精度对比分析表

断面名	P = 2% 水位(m)	左岸水位(m)	右岸水位(m)	左岸差值(m)	右岸差值(m)
DM3	*52.31	*52.29	*52.27	-0.02	-0.04
DM7	*51.08	*51.04	*50.96	-0.04	-0.12
DM9	*49.76	*49.85	*49.84	0.09	0.08
DM11	*49.20	*49.52	*49.49	0.32	0.29
DM13	*48.99	*49.00	*49.00	0.01	0.01
DM18	*32.57	*32.37	*32.24	-0.20	-0.33

4. 结论

本文提出了基于河道断面洪水位的三维水面构建方法，并以湖北省某水电站下游河段为研究区域，基于该河段沿程断面 50 年一遇设计洪水位构建了三维水面，同时结合该区域实景三维模型构建了数字化场景，清晰展示了该水位下的淹没范围效果。通过选取未参与计算的沿程断面水位进行三维水面高程验证，验证了三维水面高程精度，最大差值-0.33 m，最小差值 0.01 m，结果表明该方法能精准有效表达河道水位的平面与高程变化。

参考文献

- [1] 密玲, 罗文统. 数字孪生技术与智慧黄河水利系统的融合及应用[C]//河海大学, 江苏省水利学会, 浙江省水利学会, 上海市水利学会. 2024(第十二届)中国水利信息化技术论坛论文集. 黄河水利委员会上游水文水资源局, 2024: 773-780.
- [2] 张雄, 管林杰, 邱鑫, 等. 数字孪生岳城水库建设研究[J]. 水利水电快报, 2024, 45(12): 130-135.
- [3] 蔡阳. 以数字孪生流域建设为核心 构建具有“四预”功能智慧水利体系[J]. 中国水利, 2022(20): 2-6+60.

- [4] 蔡阳. 数字孪生水利建设中应把握的重点和难点[J]. 水利信息化, 2023(3): 1-7.
- [5] 查金星. 面向三维 GIS 应用的动态水面绘制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [6] 路强, 查金星. 三维地形支撑的不规则动态水面模拟方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(3): 403-408.
- [7] 徐志敏, 张力, 马瑞, 等. 顾及水面比降的河道水面三维可视化方法[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(10): 19-22.
- [8] 张力, 张航, 刘成堃, 等. 水利数字孪生平台三维模拟仿真技术研究与应用[J]. 人民长江, 2023, 54(8): 9-18.
- [9] 薄杨, 黄存东. 基于 TIN 的三维面模型构造研究[J]. 贵阳学院学报(自然科学版), 2018, 13(1): 10-12+16.
- [10] 冯琼瑛, 肖敏, 杨锋, 等. 基于 ArcGIS10 空间插值法的填挖方计算精度分析比较[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(2): 94-96+99.