



基于流凌演进数值模拟的可视化方法

牛新宇¹, 马世领²

(1. 中交天航环保工程有限公司, 天津 300461;
2. 浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310002)

摘要: 针对流凌演进三维可视化技术在冰冻河流可视化仿真方面不足的问题, 结合 MIKE21 与 ArcGIS 软件, 提出一种基于流凌演进数值模拟结果的可视化方法。通过模型构建、网格划分、边界条件确定, 开展流凌演进数值模拟与分析, 建立面向可视化的流凌演进数值模拟结果提取方法, 实现流凌演进三维可视化仿真场景与数值模拟的可视化数据融合。基于空间数据库与属性数据库, 建立的流凌演进仿真模拟系统, 可全方位展示流凌演进过程中地形、水流、堤防结构物等仿真模拟结果。

关键词: 流凌演进; 数值模拟; MIKE21; ArcGIS; 可视化

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)11-0180-07

Visualization method based on numerical simulation of ice flow evolution

NIU Xinyu¹, MA Shiling²

(1. CCCC-TDC Environmental Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Co., Ltd., Hangzhou 310002, China)

Abstract: Aiming at the shortage of 3D visualization technology of ice flow evolution in the visual simulation of frozen rivers, we propose a visualization method based on the numerical simulation results of ice flow evolution by combining with MIKE21 and ArcGIS software. Meanwhile, we conduct numerical simulation and analysis of the ice flow evolution by model building, grid division, and boundary condition determination. Then we propose an extraction method of numerical simulation results for the visualization of the ice flow evolution, which can realize the fusion of the 3D visualization simulation scene and numerical simulation results of the ice flow evolution. The built simulation system of the flow evolution based on the spatial database and the attribute database can comprehensively display the simulation results such as the terrain, water flow, and embankment structure during the ice flow evolution.

Keywords: ice flow evolution; numerical simulation; MIKE21; ArcGIS; visualization

流动的冰称为凌, 冰在水面或水体中随水流运动称为流凌。流凌可以分为结冰流凌和解冻流凌, 冬季结冰流凌以冰花和冰淤为主, 开春解冻的流凌以碎冰块为主^[1-2]。松花江干流地处我国高纬度地区, 冬夏气温差别较大, 属于季节性冰冻河流, 冰冻期较长, 一般为每年的 11 月中旬—翌年的 4 月初, 凌汛现象在封冻期和开江期均有可能发生。松花江干流沿程流速逐渐降低, 河流横断面形态变化较大, 日气温变化剧烈, 开、封江时间

有差异, 导致凌汛现象严峻和难以预测。松花江干流下游两岸平坦、城镇较多, 凌洪常造成更大灾害。松花江干流堤防工程极易受到冰凌、冻融、冻涨、腐蚀、冲刷等多因素耦合影响, 破坏该防护工程服役期间的性能^[3-5]。

随着计算机运算速度的提高, 数值模拟技术有了长足的发展, 开辟了许多研究冰塞的新方法^[6-8]。建立冰塞数学模型是一项非常艰难的工作, 由于冰塞现象本身的复杂性和人们对冰塞现

收稿日期: 2023-02-18

作者简介: 牛新宇 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为河海及水利工程建造技术及水利工程信息化。

象的认识不够深入, 其发展过程比较缓慢, 而且人们大多数将冰塞的数值模拟融合在整个河道冰情的模拟中, 很少有专门针对冰塞形成及其演进的动态数值模型进行研究^[9]。同时国内外对冰冻河流流凌演进堤防防护三维可视化方面的研究非常少, 流凌演进数值模拟结果多以图表数据形式展现, 缺乏直观性与生动性。

针对流凌演进三维可视化技术在冰冻河流可视化仿真方面的不足, 本文开展基于 MIKE21 的松花江干流流凌演进数值模拟, 建立面向可视化的流凌演进数据提取方法; 基于 GIS 和 3DS max 构建松花江干流流凌演进可视化场景, 融合流凌

演进数值模拟结果, 建立基于流凌演进数值模拟结果的可视化方法, 实现流凌运动轨迹、沉积密度、流凌速度等信息可视化。

1 流凌演进数值模拟

1.1 模型建立

根据航道局实测的水深图和地形图资料, 利用 ArcGIS 软件进行图纸矢量化, 得到试验江段的江底高程散点 .xyz 文件。在原型试验^[10]中, 实测了该段江面的实际水面边界。以实测的两岸边界为准, 利用江底高程散点文件, 在 MIKE21 中通过插值创建模拟江段三维地形, 如图 1 所示。



图 1 模型地形范围

1.2 网格划分

为保证计算的精准度, 同时考虑计算的时间, 对网格划分尽量细密, 通过网格无关性验证, 确定网格划分方法和大小。把模拟江段分为若干段, 每一段均采用四边形网格对模拟江段三维模型进

行网格划分; 沿水流方向网格长度为 10.0 m, 垂直于水流方向网格长度为 8.0 m, 网格总数为 22.1 万个, 最小网格面积为 20.0 m²。最小角度为 37.5°。网格划分结果如图 2 所示。

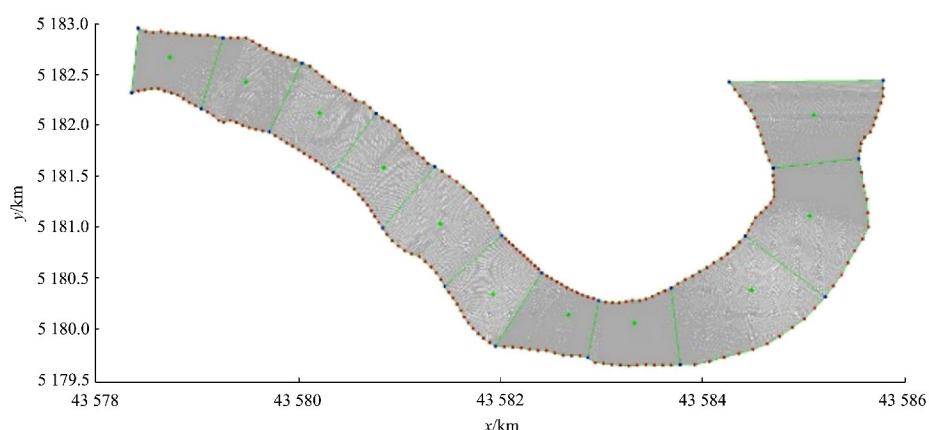


图 2 网格划分

1.3 边界条件和计算条件确定

通过结合 MIKE21 的水动力模块和粒子追踪模块对冰块粒子运动规律的数值模拟, 2 个模块互相耦合, 计算控制条件是统一的, 但边界条件应分别进行设置。

1.3.1 计算控制条件的估算和设置

计算时间步长取 30 s, 模拟总时间取 2 000 步, 模拟计算的实际时间为 1 000 min。

1.3.2 水动力模块的边界条件

不考虑冰盖、科氏力、潮汐、降雨和波浪等

条件, 同时模拟计算中无法考虑冰块粒子热力消融、冰块粒子互相撞击破裂、冰块粒子形状等的影响。具体设定边界要素如下。

1) 河底糙率。糙率是衡量河道粗糙程度对水流影响的一个重要系数^[11]。利用曼宁系数经验值计算的水面线和实测水面线对比, 可知计算水面线和实测水面线差别较大。因此, 需要对曼宁系数(即江底糙率)进行率定, 结果如图 3 所示。河底糙率按照实测水面线进行模型率定后获得的结果设定。

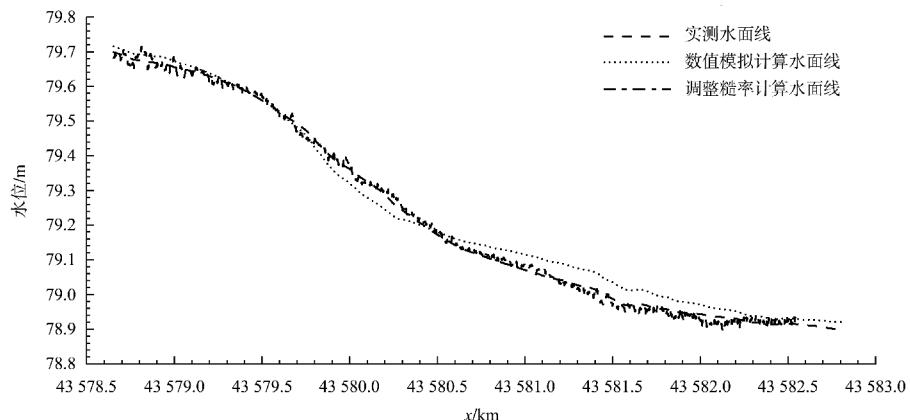


图 3 率定前后水面线对比情况

2) 风力条件。按照现场调研、访问村民和历年春季同期气象资料, 取风速为 5 m/s, 取风向为北偏东 235°。

3) 进出口水位条件。入口水位边界条件和出口水位边界条件均以实际水位资料为准进行设置, 共 4 个数值模拟工况, 见表 1。

表 1 数值模拟工况水位设置表

| 工况 | 入口水位/m | 出口水位/m | 流量/(m ³ ·s ⁻¹) |
|----|--------|--------|---------------------------------------|
| 1 | 79.57 | 78.40 | 1 311 |
| 2 | 79.56 | 78.45 | 1 113 |
| 3 | 79.50 | 78.20 | 1 250 |
| 4 | 79.64 | 78.30 | 1 570 |

1.3.3 粒子模块的边界条件

数值模拟中采用冰块粒子的正方形表面边长为 5 m、厚度 0.8 m, 每秒通过的数量按照 750 个粒子为标准进行模拟计算。单个冰块粒子的质量

为 18 t。

1.4 数值模拟结果分析

数值模拟结果提取冰块粒子运动轨迹绘制成曲线如图 4 所示。可以看出: 1) 由冰块粒子轨迹对比可知, 在进口断面不同位置释放粒子, 粒子的运动轨迹不同; 2) 在 43 580 km 附近, 粒子分为南北两股进行运动, 其中靠近南岸(上北下南)释放的粒子, 在该位置贴近南岸运动; 在靠近北岸释放的粒子, 在该位置贴近北岸运动; 3) 在 43 581 km 位置开始, 两股分开运动的粒子重新靠近江心运动, 通过各个模拟项目的冰块粒子速度对比可知, 该处粒子运动速度较大; 4) 在 43 583 km 附近即转弯段, 粒子有明显向南岸靠近的趋势。随后粒子一直贴近南岸运动; 5) 在计算出口断面处, 江水分为两股, 所有粒子轨迹均从北股流出。

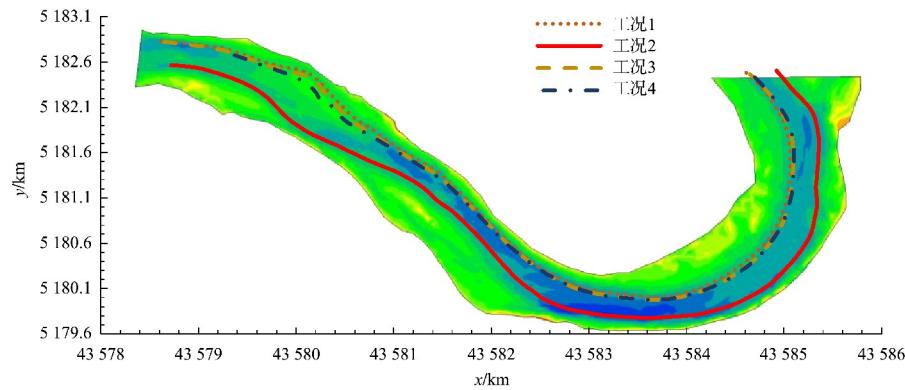


图 4 流凌演进数值模拟结果

2 面向可视化的流凌演进数据提取方法

MIKE21 计算获得的数值模拟结果可以在 MIKE view 中进行三维展示, 根据不同类型计算结果展示需要调用不同的模块, 其中包括二维信息、表格、视频等, 但是其对流凌演进的三维模拟场景的搭建及可视化表达能力有限。因此 MIKE21 软件自带显示模块在结果可视化方面具有一定的局限, 也造成了结果数据查询的不便。为了将流凌演进数值模拟结果、三维全视景场景等信息同时在地理信息系统 (geographic information system, GIS) 下集成显示, 需要将计算得到的数据格式转换成面向可视化平台上展示的数据类型^[12]。

针对不同项目模拟结果, 面向 GIS 平台可视

化的数据提取主要包括 3 大部分, 即三维场景中虚拟流凌演进水位等值线图、流场速度矢量图、沉积密度图、运动轨迹图等二维平面结果图片的提取, 堤防维护等位置断面的水位、流量、流速等数值数据表格的提取, 在 MIKE21 软件中有直接调用的模块进行图片与表格数据的提取。但对于三维虚拟场景中流凌演进水面数据及粒子分布的提取方法与数据结构转换及处理方法较为困难。

根据流凌演进可视化要求, 将 MIKE21 计算结果的 dfsu 格式文件通过 data extraction 模块, 按照时间轴驱动机制进行提取, 并通过 grid series 模块转化为 dfs2 数据, 如图 5 所示。

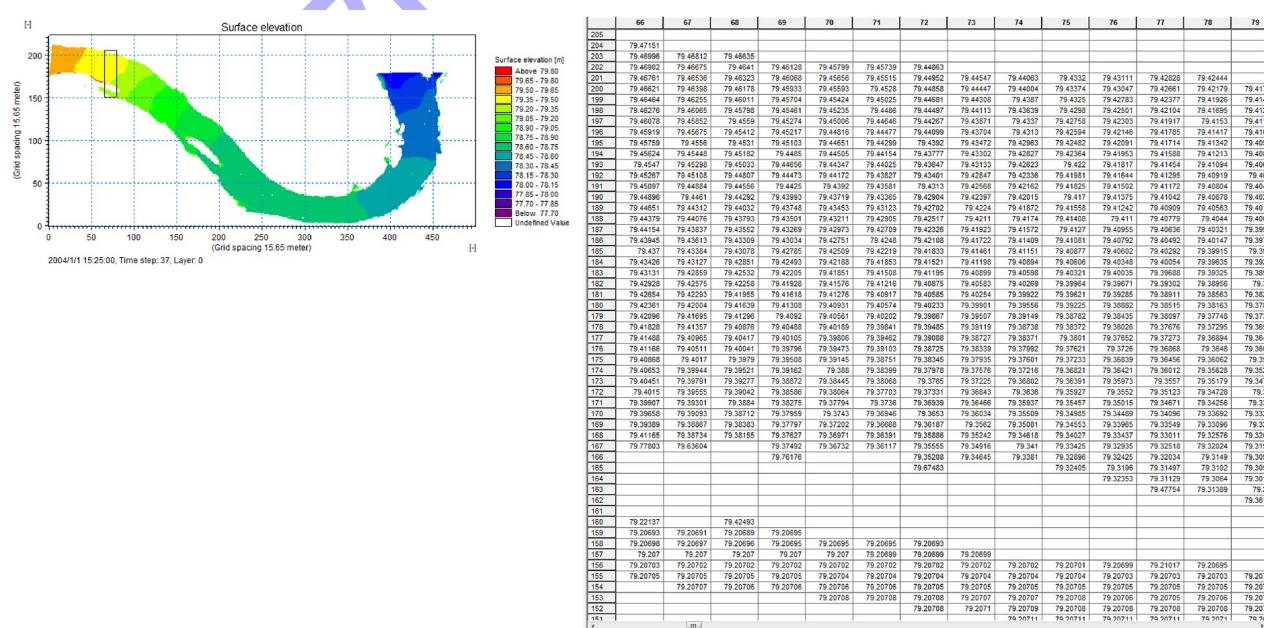


图 5 dfs2 数据结构界面

调用 MIKE zero 中 GIS 工具的 MIKE2GRD 模块将处理获得的 dfs2 文件结果转换为 ASCII 格式。通过 ArcGIS 中的 ASCII to raster 转换功能, 使用 ArcGIS 平台提供的 ArcToolbox 工具箱, 添加 ASCII 源文件、修改生成的 raster 文件名、修改输出数据类型, 手动进行文件转换。ASCII 格式数据转化为 Raster 格式数据转化如图 6 所示。

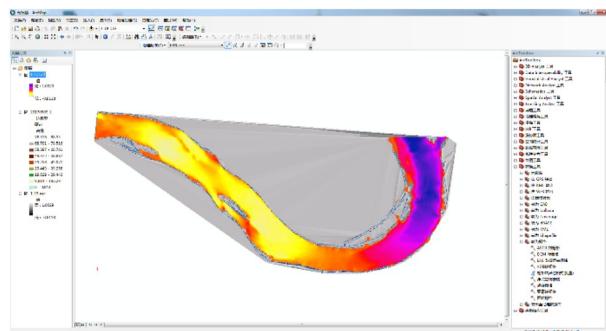


图 6 ASCII 格式数据转化为 Raster 格式数据的界面

对于地理配准的 ASCII 格式数据, 利用 ASCII to raster 转换功能, 保持默认设置, 修改文件类型等相关设置, 将 ASCII 数据转化为栅格数据(.tif)。为了更好地体现流凌演进机理, 使全视景仿真场景更逼真、形象, 可以通过改变栅格文件颜色配比, 多层次、多角度、多方向模拟流凌演进数值模拟可视化结果。

3 基于流凌演进数值模拟数据的可视化方法

3.1 流凌演进三维可视化场景

3.1.1 数字地形

数字地形系统的构建是实现流凌演进仿真模拟的基础, 根据可视化特点与要求, 考虑数据来源复杂且格式迥异, 分为河道数字地形与河岸两侧数字地形系统^[13-14]。通过利用 GIS 工具提取 google earth 数据源与纸质地形图资料中的等高线与点高程数据, 将其转化为一系列不相交的三角形, 按照一定规则构成数字高程模型(digital elevation model, DEM)矢量数据, 即不规则三角网(triangulated irregular network, TIN)模型。对生成的 TIN 进行重新配色、渲染与光照调整等操作, 完成数字地形系统生成, 该地形河道数字地形精度 0.50 像元内, 岸上数字

地形精度也在 0.82 像元。最后将获取的遥感影像修复美化、地理配准, 利用 TIN 模型显示数字地形凹凸情况, 完成数字地形系统的构建。如图 7 所示。

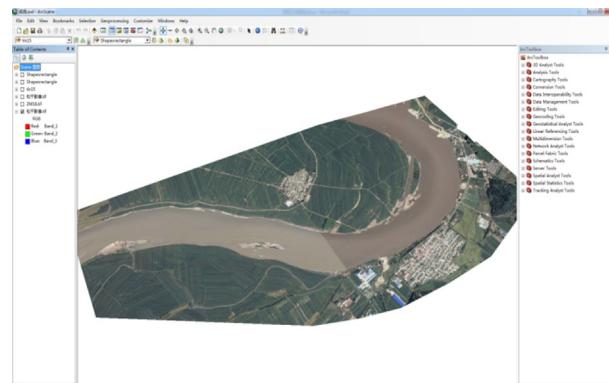


图 7 研究区段三维数字地形界面

3.1.2 堤防工程建筑物

考虑堤防水工建筑物相对于松花江干流河道数字地形, 模型长度显著大于其他方面维度, 且无地基、底面高程变化, 如果以原尺寸模型融合数字地形中, 在流凌演进模拟场景中难以展示中的水工建筑物模型, 因此选择在布局放缩建模, 加大模型纵向尺寸。基于堤防工程的布置图与施工图等电子图纸, 采用 CAD 实体特征建模技术和参数化实体建模方法, 选用 3DS Max 建模软件作为三维建模工具, 参数化人机交互式建立堤防水工建筑物模型, 将沿松花江岸边堤防工程分段建模, 完成堤防工程三维模型真实性的优化处理, 如图 8 所示。

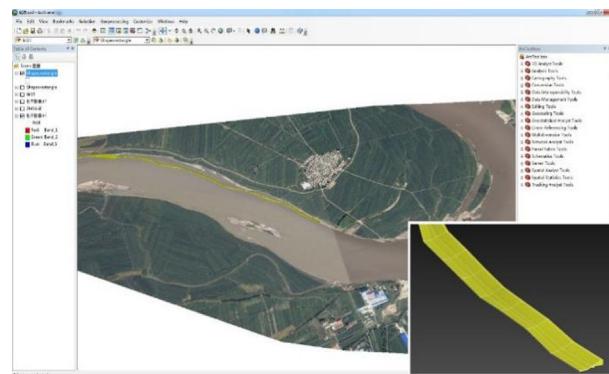


图 8 三维地形与堤防建筑物融合界面

3.2 空间数据库与属性数据库的构建

为了保证系统无缝耦合各部分数据, 需要对各类型松花江干流流凌演进模拟数据进行收集整

理, 通过 ArcSDE+SQL Server 数据库系统存储和管理属性数据与空间数据。在松花江干流流凌演进可视化数据库中, 按照数据类型与仿真模拟要求不同, 利用 ArcGIS 下 personal geodatabase 建立空间数据库, 并利用 SQL 建立属性数据库, 分别储

存属性数据和空间数据。空间数据库包括流凌运动轨迹模型、流凌分布密度模型、流凌流速模型、基础地形数据、堤防建筑物模型。属性数据包括实时监测数据、冰凌粒子速度曲线、冰凌演进状态图库, 数据库框架如图 9 所示。

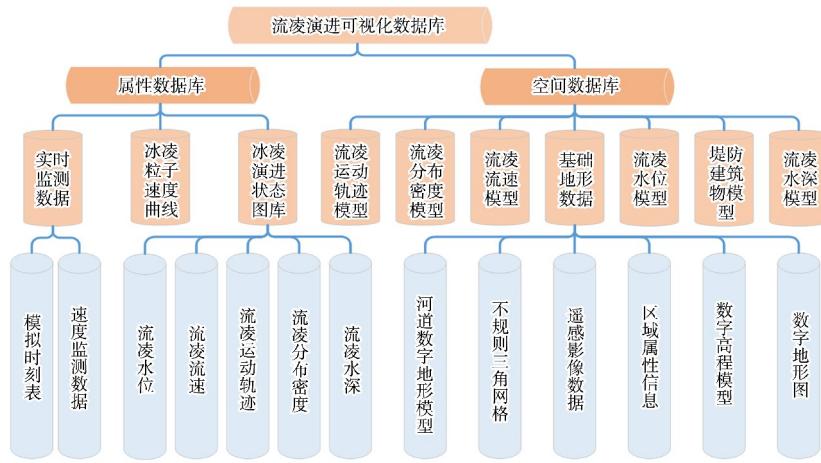


图 9 数据库框架

3.3 流凌演进仿真模拟系统功能实现

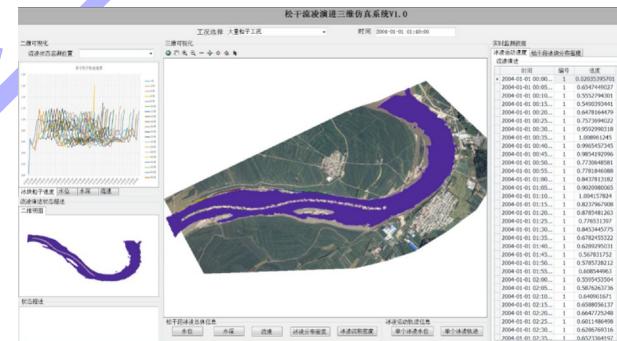
3.3.1 可视化与漫游

利用 AE 二次开发工具, 呈现冰冻地区流凌演进区域复杂场景下三维数字地形模型与遥感影像的融合, 同时展现数字地形与三维水工建筑物模型的时空逻辑关系, 实现场景下的放缩、平移、漫游、鹰眼、浏览查询等功能, 可利用鼠标操作控制点位置与视角高度, 完成场景下堤防建筑物的拉近和远离。通过视角的任意调整, 实现不同角度、不同层面、不同视角的观察。

3.3.2 流凌运动轨迹模拟

通过加载不同时刻的流凌运动轨迹模型动态仿真信息, 包括流凌运动轨迹模型和对应不同时刻的流凌运动轨迹要素属性信息等, 基于时间轴驱动机制, 读取模型库中对应的模型数据及属性信息, 以图层的形式将各个阶段模型显示在松花江干流流凌三维全视景场景中, 实现任意模拟时刻下不同粒子编号的三维场景及流凌运动轨迹模型要素耦合状态再现, 同时针对不同时刻显示当前的流凌运动轨迹二维图, 从而在流凌运动轨迹全过程中揭示流凌运动总体规律以及运动特性,

系统运行界面如图 10 所示。



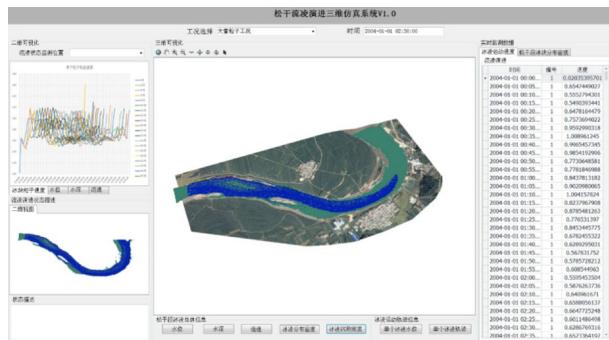


图 11 流凌演进沉积密度模拟界面

3.3.4 流凌演进数据信息管理

流凌轨迹信息管理一方面是对流凌轨迹信息的统计、分析、排列，另一方面是对流凌轨迹信息的计算结果可视化的过程，通过对单个粒子的一次排列组合，实现不同时间阶段的粒子速度曲线的绘制与分析。

4 结论

1) 以松花江干流区段为例，建立了基于 MIKE21 的流凌演进三维数学模型，预报流凌演进规律和分布情况，包括冰坝或冰塞的位置和规模。

2) 借助 ArcGIS 空间性和动态性的可视化功能，通过分层、设色等方式，实现流凌演进模拟结果的可视化。

3) 通过将 MIKE21 数值模拟结果与 GIS 下数字地形模型进行耦合，开发了流凌演进三维仿真系统，可为流凌管控提供决策依据，为建设绿色和环境友好型堤防提供技术支持。

4) 本文研究过程中未考虑流凌之间的相互作用。因此，考虑流凌间的相互作用的流凌演进问题值得进一步研究。

参考文献：

- [1] 高彦丽. 松花江哈尔滨段流凌分析[J]. 黑龙江水利科技, 2002(4): 102-104.
- [2] 滕翔, 何秉顺. 黄河凌汛及防凌措施[J]. 中国防汛抗旱, 2010, 20(6): 72.
- [3] 杨广云, 刘晓凤, 肖迪芳. 松花江冰坝凌汛分析[J]. 黑龙江水专学报, 2007(2): 18-22.
- [4] 张玉国, 肖兴涛, 肖迪芳. 黑龙江上游冰坝典型年凌汛分析[J]. 黑龙江水利科技, 2007(1): 136-137.
- [5] 徐海强, 周玉. 黑龙江上游冰凌灾害成因及防凌措施[J]. 黑龙江水专学报, 2000(3): 86-88.
- [6] 李清刚. 冰盖形成及厚度变化的数值模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [7] MARKO J R, JASEK M. Sonar detection and measurements of ice in a freezing river I: methods and data characteristics [J]. Cold regions science and technology, 2010, 63(3): 121-134.
- [8] MARKO J R, JASEK M. Sonar detection and measurements of ice in a freezing river II: observations and results on frazil ice [J]. Cold regions science and technology, 2010, 63(3): 135-153.
- [9] 茅泽育, 吴剑疆, 张磊, 等. 天然河道冰塞演变发展的数值模拟[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 700-705.
- [10] 牛新宇, 赵冲久, 马世领, 等. 流凌演进原型试验方法[J]. 水运工程, 2018(1): 23-28.
- [11] 王宏伟, 高斌, 徐健民. 松花江佳木斯站糙率规律性的探讨[J]. 黑龙江水利科技, 2008(1): 65-66.
- [12] 耿敬, 张洋, 李明伟, 等. 洪水数值模拟的三维动态可视化方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(7): 1179-1185.
- [13] 牛新宇, 耿贺松, 耿敬, 等. 基于 Google Earth 数据的水运工程数字地形快速构建方法[J]. 水运工程, 2018(5): 67-71.
- [14] 耿敬, 张洋, 李明伟, 等. 航电枢纽施工三维动态可视化系统设计与实现[J]. 水运工程, 2017(2): 115-122.

(本文编辑 王璁)