

风景园林信息模型与水文水动力模型的耦合及应用

Coupling and Application of Landscape Information Modeling and Hydrology and Hydrodynamic Modeling

郭 湧^{1*} 刘新栋² 王 庆³ 胡宏昌⁴
GUO Yong^{1*} LIU Xindong² WANG Qing³ HU Hongchang⁴

(1.清华大学建筑学院, 北京 100084; 2.潍坊市市政工程设计研究院, 潍坊 261061; 3.潍坊高新区规划编研中心, 潍坊 261111; 4.清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

(1. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing, China, 100084; 2. Weifang Municipal Engineering Design and Research Institute, Weifang, Shandong, China, 261061; 3. Weifang High-tech District Planning Research Center, Weifang, Shandong, China, 261111; 4. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, 100084)

文章编号: 1000-0283(2022)05-0037-07

DOI: 10. 12193 / j. laing. 2022. 05. 0037. 005

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2022-03-07

修回日期: 2022-04-06

摘 要

以山东省潍坊市高新区东部东瀑沙河、西瀑沙河和东浞河为研究对象, 利用风景园林信息模型 (Landscape Information Modeling, LIM) 对三个流域进行数字流域模型构建并开展水文水动力数值模拟, 探究流域水系空间特征和水文时空变化。模拟结果应用于该区域的景观规划, 以应对该流域常年无稳定径流, 河道汇水流域水体生态供水量时空动态变化导致水质影响等问题。研究采取工程项目实施、技术实验和科学探索在规划设计过程中统筹综合的研究路径, 整合数字模型构建和数值模拟, 针对研究对象构建数字地面模型 (Digital Terrain Model, DTM), 精确反映其空间特征; 构建数字水系, 研究流域和水系的分布特点; 进行数值模拟, 揭示和预演河流水文过程。研究成果通过 LIM 模型与水文水动力数值模拟联动的工作流作用于规划决策。研究取得以下结果: (1) 揭示了潍坊市高新区东三河自然汇水流域的形态和分布, 解释了东三河流域的地形汇水过程; (2) 通过水文水动力模拟, 揭示了东三河河道的水文特征; (3) 验证了数字水系在规划应用中的可信性与有效性, 提高了水系在规划中的整合程度。

关键词

风景园林; 风景园林信息模型; 水动力模拟; 规划应用; 数字水系

Abstract

The three rivers in the east of the High-tech district of Weifang City, Dongpusha River, Xipusha River, and Dongzhuo River, are the research objects. Based on landscape information modeling (LIM), the digital terrain model and hydrodynamic numerical simulation of the watersheds of these three adjacent rivers are conducted to explore the spatial characteristics of a drainage system and the temporal and spatial variation of hydrology. The simulation results are applied to the landscape planning in this region. Thus, the problems of discontinuous river flow and the impact on water quality caused by the weak hydrodynamic performance are studied and responded to. This research adopts the research approach that integrates engineering project implementation, technological experiments, and scientific exploration in the planning and design process. It integrates 3D digital model construction and numerical simulation, The digital terrain model (DTM) for the research object is conducted to represent its spatial characteristics accurately. The digital water systems and their watersheds distribution characteristics are analyzed. Numerical simulation is carried out to reveal and predict river hydrological processes. The outcome of the LIM model and numerical hydrodynamics simulation are applied for planning decision-making. The results are as follows: (1) The form and distribution of the natural catchment basins of the three rivers in the east of the Weifang High-tech district are revealed, and the flowing process in the three watercourses is explained. (2) The hydrodynamic characteristics of the three rivers are revealed through hydrodynamic numerical simulation. (3) It verifies the credibility and effectiveness of the application of digital water systems in planning and application and improves the ability of overall management of hydrological water systems in planning.

Keywords

landscape architecture; landscape information modeling (LIM); hydrodynamic simulation; planning applications; digital drainage

郭 湧

1983年生/男/山东烟台人/博士/助理教授/研究方向为风景园林技术科学、风景园林信息模型

刘新栋

1982年生/男/山东昌乐人/高级工程师、注册城乡规划师/风景园林所所长/研究方向为风景园林规划设计

王 庆

1981年生/男/山东潍坊人/中心副主任/研究方向为城乡规划

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

基金项目:
国家自然科学基金青年项目“基于风景园林信息模型的乡村景观绿色设计技术研究”(编号: 51808311)

在城市化及海绵城市建设的大背景下，城域水文水动力模拟是防洪排涝、建设海绵城市的核心技术之一^[1]。国内外研究学者关于水文水动力模型研究主要集中在海绵城市规划、城市排水规划设计、河道流域防洪规划、河道管网^[2-4]等方面，有效推动了城市规划精细化管控与建设^[5]。基于水文水动力学的城市洪涝模型主要模拟方法如表1所示。

风景园林信息模型 (Landscape Information Modeling, LIM) 是指创建并利用数字化模型对风景园林工程项目的设计、建造和运营全过程进行管理和优化的过程、方法和技术^[14]。LIM模型已经在城市规划、景观设计、基础设施建设等项目展开应用，不仅具有跨尺度的数据融合功能，为国土空间规划、生态空间规划、乡村景观规划等提供专业化数据分析，而且能够进行数据交付，用于雨洪、水文水动力、风环境、植被和土方等关键影响要素的动态仿真模拟^[15]。

LIM模型与水文水动力数学模型结合，能模拟水文水动力时空特征，实现从降雨到淹没的动态数值模拟。本研究以山东省潍坊市

高新区东部东瀑沙河、西瀑沙河、东浞河三条河流（简称东三河）所在流域为研究对象，聚焦于东三河流域景观规划中河道上下游水源补给所面临的问题，应用LIM技术，构建数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)，精准描述河道流域的自然空间特征，在此基础上开展水文水动力数值模拟，揭示东三河流域的自然水文现象，为流域抗洪排涝和雨洪管理等相关规划决策提供依据和支持。

1 研究区域概况

东三河位于山东省潍坊市高新区，地势平坦，自然流域的季节性河流发育较浅且连通性差，常年无稳定径流。潍坊市年均降水量650 mm左右，年均径流深177 mm，三条河流的流域面积为36.5 km²。降水量年际变化很大，其中2/3集中于夏季并易形成局部的积涝。东三河自东向西依次并列，流向均为自南向北（图1）。以青银高速公路为界，高速公路以北河道属于河流下游，高速公路以南河道为上游区域。随着行政区划调整，东三河上游部分与下游部分统一归于潍坊高新区

的行政管理，具备了以自然流域为空间单元，对河流生态和景观进行统筹治理的条件。尤其是在河道补水方面，治理迎来了从河道源头展开的机遇。

2 研究方法

2.1 设计研究

本研究应用“贯穿设计的研究”（Research through Design, RtD）方法，将项目过程作为研究“介质”，采取工程项目实施、技术实验和科学探索在规划设计过程中统筹综合的研究路径，整合三维数字模型构建和数值模拟，针对研究对象构建数字地面模型 (Digital Terrain Model, DTM)，精确反映其空间特征；构建数字水系，研究流域和水系的分布特点；进行数值模拟，揭示和预演河流水文过程。研究成果通过LIM模型与水文水动力数值模拟联动的工作流作用于规划决策。

2.2 LIM模型构建

LIM模型构建具有技术实验和项目实践两方面意义：（1）基于LIM平台整合地理信息和规划信息，形成特定精度下覆盖三条河道自然汇水流域的数字地面模型。在此过程中实验基于LIM的多源数据融合技术，收集和处理地理信息数据并提高数据的精度，弥补测绘数据的不足，并作用于规划设计方案的表现、评价与优化。（2）基于LIM平台整合三维空间模型构建与数值模拟运算相联动的工作流。基于“数据总线”的构架逻辑，LIM模型中的空间模型信息以特定格式形成数据交付，作为数值模拟的输入条件，数值模拟的结果则反馈为三维空间条件，作用于规划决策。

2.3 水文水动力数值模拟

（1）收集与处理研究对象的地理信息数

表1 基于水动力学的城市洪涝模型主要模拟方法
Tab. 1 Main simulation methods of urban flood model based on hydrodynamics

模型或开发者 The model or developer	一维模拟 One-dimensional simulation	二维模拟 Two-dimensional simulation
MIKE FLOOD ^[6]	MIKE11水力模块	二维浅水方程，二维模型MIKE21，基于规则网络，采用有限差分法离散方程求解
XPSWMM ^[7]	SWMM一维水力模块	二维浅水方程，基于规则网络，采用有限体积法离散方程求解
IFMS Urban ^[8]	SWMM模型一维流模块	二维浅水方程，基于有限体积法的Godunov格式离散方程求解
LISFLOOD ^[9-10]	一维圣维南方程、运动波和扩散波	基于DEM的运用连续性和动量简化的浅水方程，采用显示有限差分法离散方程求解
刘家宏 ^[11]	SWMM-GEXTRAN模块	二维非守恒浅水动力方程，TELEMAC-2D模块，采用有限元法求解
喻海军 ^[12]	采用Preissmann狭缝假设将两种流态的方程统一成明满流控制方程	二维守恒浅水方程，基于非结构网格的Godunov型有限体积法，用隐式的双时间步方法求解
李帅杰 ^[13]	一维非恒定流方程	二维非恒定流方程，有限体积法离散求解

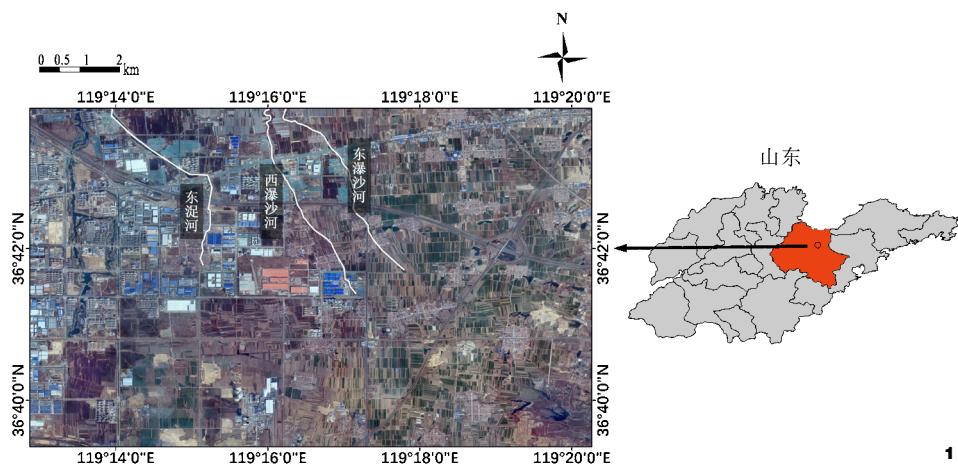
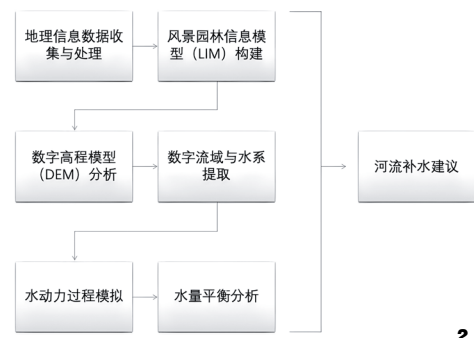


图1 潍坊市高新区东三河地理位置
Fig. 1 Location of the 3 rivers in the east of Weifang High-tech district

图2 技术路径
Fig. 2 Technical approach



据, 为数字模型构建和数值模拟运算提供充分的数据基础条件; (2) 构建风景园林信息模型 (LIM), 融合多源数据, 匹配地理坐标和测绘投影信息, 形成描述研究对象空间特征的数字载体; (3) 从LIM模型中提取河道区域的数字地面模型 (DTM), 为下一步运算提供基础并限定条件; (4) 通过数值运算提取数字流域与水系, 精准描述河道及其所在流域的自然空间特征, 划分下一步运算的空间网格和计算节点; (5) 进行水文水力过程模拟, 揭示水文现象, 从中分析其规律和原因; (6) 从水文过程中提取水量平衡的相关因子进行专题研究, 对其中的水源补水条件和补水效果进行专门分析。以上过程和结果为河流补水方案及相关规划决策提供依据和支持, 技术路径如图2。

3 研究过程

3.1 数字流域与水系

数字流域与水系研究的目的是解释河道的空间特征, 定量揭示河道的自然汇水区域和流域的构成, 并在数字模型中定义河道的空间分布。研究的基础是LIM模型, 以及从中

提取和构建的DTM模型。本研究采取30 mDEM与1:10 000测绘图数据融合形成的DTM数据, 同时需要基于实际的测绘水系对DTM进行修正, 使其能更为准确地反映实际情况 (图3)。

在此基础上, 通过分析DTM实现对数字水系的提取, 东瀑沙河、西瀑沙河、东泥河三条河流的流域面积和为36.50 km², 子流域数38个; 其中东泥河流域面积为17.18 km², 子流域17个; 西瀑沙河流域面积为7.75 km², 子流域7个; 东瀑沙河流域面积为11.57 km², 子流域14个 (图4)。

3.2 水力模拟

水文水力过程通过对东三河水文过程的动态模拟, 提取不同时间节点上水文现象发生时, 河道内的径流深度、流速等关键指标, 进而对东三河的水文过程进行定量描述, 研究结果可以支撑水量平衡的分析。

3.3 建模与应用

基于LIM模型, 对大范围研究区域的30 m精度数字高程模型和重点区域三角网格进行数字高程值提取: 对数字河流周边

范围基于三角网格进行剖分, 剖分的面积为14.94 km², 其中节点7 981个, 边22 482条, 单元14 503个。对流域的所有支流设置入流节点, 对25 h (1 500 min) 过程的汇流过程进行模拟, 获取区域淹没过程数据, 得到流域的水流路径和淹没范围, 每隔1 h淹没深度及河道流速如下图 (图5-6)。

最后将建模结果应用于东泥河、西瀑沙河、东瀑沙河河道水动力中, 验证东三河水系汇流结果 (图7)。东泥河水系在水动力模拟运行至420 min时, 河道上下两处入流形成合流, 东泥河河道汇流也接收了来自其东侧数字水系所示区域的汇水, 汇水于第660 min与东泥河河道汇流汇合。西瀑沙河河道水动力特征将河道分为两段, 青银高速以北的下游河道水动力较强, 入流流速均匀, 在水动力模拟运行至420 min时, 该段河道已经充分过流, 青银高速以南的上游地区水动力较弱, 该段河道在第1 080 min只有78%的部分完成过流。东瀑沙河河道水动力高于西瀑沙河, 青银高速以南的上游河道, 在水动力模拟中到420 min时, 已经有接近一半的河道过流。东瀑沙河河道流速不均匀, 在源头附近

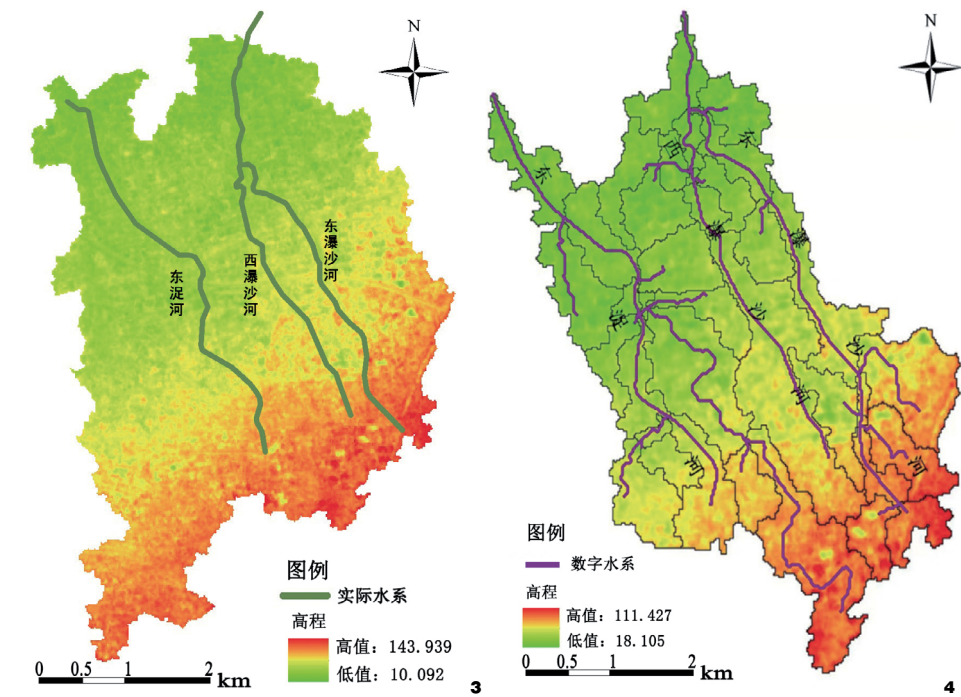


图3 研究区域内的实际水系与数字高程
Fig. 3 Real watersheds and digital elevation model in the study area

图4 数字高程模型 (DEM) 与数字水系
Fig. 4 Digital elevation model (DEM) and digital watersheds

出现局部流速激增的现象。造成该现象的原因一方面来自于地面高程模型精度不足，导致局部出现与现状不符的高差；另一方面说明该区域地形复杂，不利于雨水汇集和贮留，不利于涵养水源。

4 分析与结果

4.1 水动力模拟分析

4.1.1 东三河流域的水文水资源分析

(1) 东三河入渗蒸发情况分析。潍坊市

高新区东三河城镇化比例较高，水系的入渗和蒸发在未进行现场勘探和土壤取样化验的情况下，根据河道长度取约值做综合量化计算。其具体数值如表2所示。上游电厂达标排放的退水是区域补水的重要水源，为此基于其设定的8 000 m³/d的水量，开展水动力过程模拟，具体分析水量平衡情况。

(2) 东三河补水条件分析。从区域未来发展潜力和开发价值考虑，东三河补水应优先选择西瀑沙河。着眼潍坊市发展趋势，

表2 东三河水系蒸发情况
Tab. 2 Evaporation of Dongsan rivers system

河流 River	河长/km River length	防渗施工入渗蒸发量范围/(m ³ /d) Infiltration and evaporation range of permeable construction	未防渗施工入渗蒸发量范围/(m ³ /d) Infiltration and evaporation range of impermeable construction
东泥河	10	16 000	4 000
西瀑沙河	7	11 200	2 800
东瀑沙河	8	12 800	3 200

城市格局向东对接青岛，形成区域城市群的发展格局明显。同时在国土空间规划体系下，对三区三线的划定和管控趋于严格。基于这两个趋势，潍坊高新区东三河所在区域既具有城市东向门户的属性，又具有城市开发边界东部边缘的属性。因此该区域的土地利用价值和开发潜力非常可观，其中以西瀑沙河所在位置的价值和潜力最高。根据现场地形和已经形成的河道条件，河道上游电厂退水距离西瀑沙河上游也更为接近，西瀑沙河接收电厂退水补充河道水量最为便利。

4.1.2 西瀑沙河水文水动力模拟分析

(1) 基于水文水动力模拟的西瀑沙河分析。首先对西瀑沙河水系进行模拟，设西瀑沙河河道比降为千分之五，设定河宽为0.5 m，设定上游补水为电厂水源，开展相关模拟并分析其河道洪水演进过程(图8)。按水源来水为8 000 m³/d计算，来水水量实为0.093 m³/s。根据实际情况推断，电厂退水一般取固定流速均匀排放。则可根据排水水量和时间的关系模拟河道洪水演进过程。

模拟结果显示，按恒定流量供水10 min时，随着水量的入渗和蒸发，进入河道的水无法形成稳定的径流，在其起始位置进入河道形成的水深约为5 mm，沿河道流至6.5 km处，水量完全消耗，形成断流。如图8中蓝色曲线所示。

当按恒定流量持续供水20 min到12 h时，河道内的水量不再出现断流，河道源头水深5 mm，下游水深随着时间积累，逐渐从0.5 mm增至3.5 mm，形成持续径流。如图表中橙红色、灰色、橙黄色、浅蓝色和绿色曲线所示。当按恒定流量持续供水12 h以上时，河道内的水量趋于稳定，形成稳定径流，下游水深保持在3.5 mm左右。如图8中深蓝

色和咖啡色曲线所示。

根据以上模拟数据可知, 电厂退水可以有效补充西瀑沙河上游河道。其有效的补水作用长度约6.5 km, 所形成的补水效果为一道宽度0.5 m, 深度3.5 ~ 5.0 mm的持续的河道中泓径流。形成此效果的同时发生河流径流下渗和蒸发过程, 具有一定的生态补偿效应。

(2) 基于数字水系模拟的西瀑沙河上游河道分析。基于自然地形汇水条件分析, 东泥河和西瀑沙河之间源头流域存在汇水条件, 进一步分析西瀑沙河上游河道地形高程、坡向、局部汇水范围, 以及河道洪水淹没范围, 依托现状地形确定西瀑沙河河道布局, 为未来的河道治理和景观体系营造限定空间范围(图9)。

根据河道水动力模拟的结果, 西瀑沙河上游5 km河道应作为补水的重点河道。同时, 应重点对西瀑沙河上游河道的比降、断面进行空间塑造, 增强河道的水动力。

4.2 规划应用

4.2.1 城市区域数字水系分析

通过数值模拟运算所构建的数字水系可应用于水系景观的规划决策。根据数字地面高程的分析结果可判断高新区地势南高北低, 规划范围横跨4条自然水系汇水流域。通过数值模拟所构建数字水系详细反映了自然水系流域内的子流域空间分布情况。根据这一模拟结果, 高新区拟根据东三河汇水区上游水文条件, 规划新建“汶泉河”水系景观(图10红色箭头所示位置)。将数字水系与测绘数据描述的实际水系进行叠加分析, 可见数字水系与实际水系高度吻合。说明数字水系用以支持水系景观规划决策具有可信性。

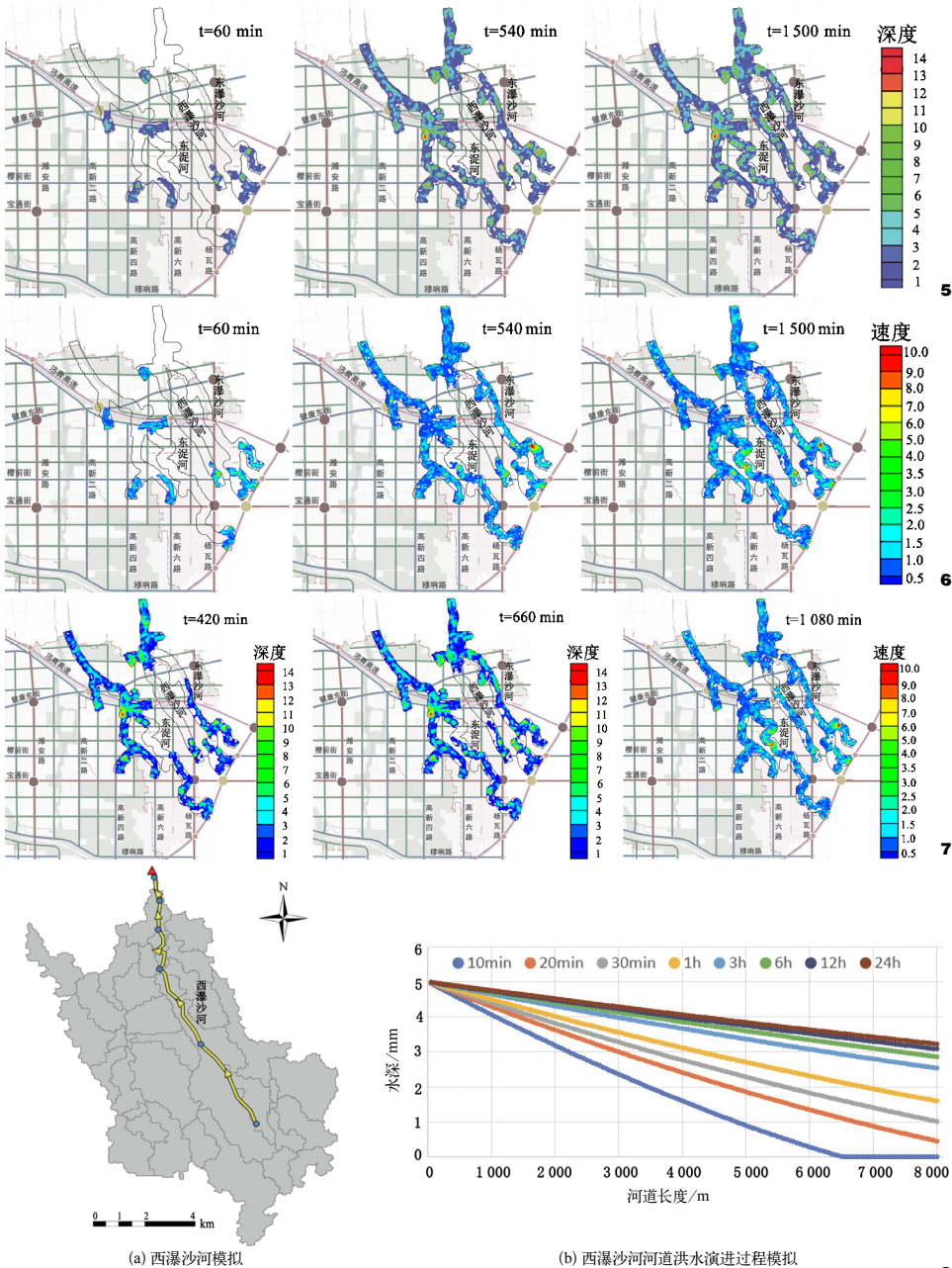


图5 水深分布图
Fig. 5 Water depth distribution

图6 流速分布图
Fig. 6 Flow velocity distribution diagram

图7 东瀑沙河、西瀑沙河、东泥河河道汇流情况
Fig. 7 The river confluence of Dongpusha River, Xipusha River and Dongzhuo River

图8 西瀑沙河水力模拟
Fig. 8 Hydrodynamic simulation of Xipusha River

4.2.2 水系整治规划

基于LIM模型与水文水动力数值模拟相结合的工作流, 水系整治规划工作的科学合理性明显提升。基于水文水动力模拟结

果, 规划部门提出了整体治理的方案, 将汶泉河和西瀑沙河作为一体, 统一规划、整体治理和提升。依托新汶泉河水系, 构建长度8.9 km, 面积约89 hm²的绿色基础设施

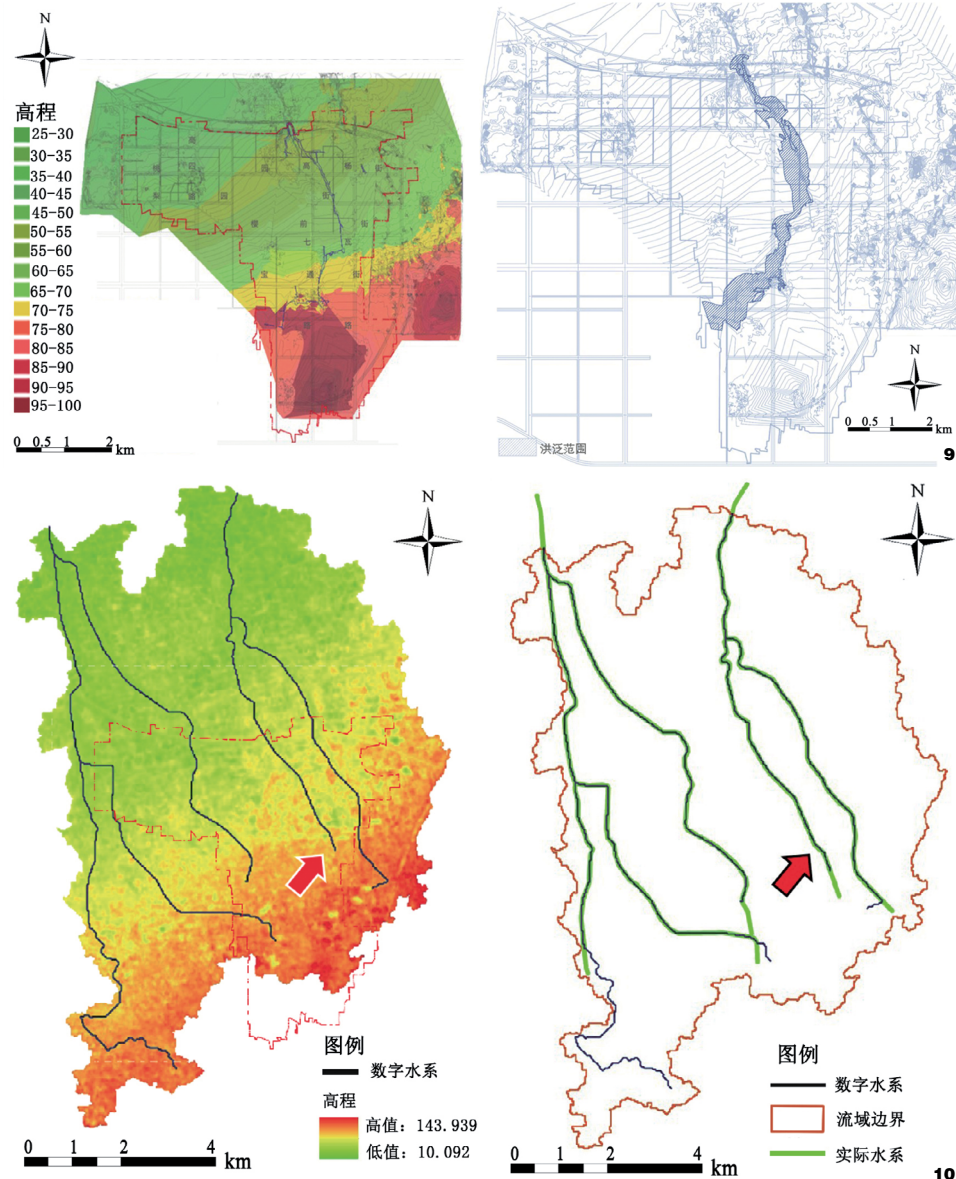


图9 西瀑沙河上游详细地形高程和汇水分析
Fig. 9 Detailed topography and catchment analysis of the upper reaches of Xipusha River

图10 数字水系模拟与验证
Fig. 10 Digital drainage system simulation and verification

(图11)。整体治理方案包含了水环境优化治理、用地规划优化调整、水质净化提升等方面，并确定了相关的工程措施。

在水环境优化方面，依托现状条件合理改造河道，结合现状水系条件，构建4处水面节点，加强水安全，优化水环境，提升水

景观。

在用地规划方面，依托水系景观提升的综合价值，调整沿汶泉水系的土地利用方式，充分发挥水系提升的综合作用，创造水绿融城的活力城区(图12)。

在水体净化方面，发电厂退水属劣V类

水，水质较浑浊，有较多悬浮物，需进行人工湿地净化处理。为解决此问题，在入流处设置沉淀池和净化区，对水体进行过滤净化；扩大主河道水面，形成湿地景观，净化水质；采用当地乡土耐水湿的乔、灌、地被及水生植物，形成自然湿地群落，改善水体环境并带动整个区域生态效益的提升。

在工程措施方面，根据电厂补水水量及河道比降，通过梯形布置拦蓄水坝，尽量形成河道连续水面，并根据整体景观效果适当调整拦河坝布置间距，打造主槽中泓小溪与连续整体水面交替布置的水体景观。并进行纵断面设计，疏浚拓挖河槽，使河道设计比降尽量接近现状自然比降，尽量保持挖填平衡。

5 结论与讨论

(1) 研究揭示了潍坊市高新区东三河自然汇水流域的形态和分布，对东三河流域的地形汇水过程进行了解释。根据流域的空间形态和自然地形条件，可以对河流补水的适宜机制做出判断。其中，东泥河应重点进行雨洪的资源化利用，考虑以雨水的收集利用作为河流的主要补水来源；西瀑沙河应重点考虑依靠河道上游的水源向河道补水和应用工程措施对入流径流进行降速和滞流，并加强河道两侧雨洪管理和防洪；东瀑沙河应加强源头的水土保持和水源涵养，同时加强河道的防洪措施。

(2) 研究通过水文水动力模拟，揭示了东三河河道的水动力特征。东泥河河道的水动力最强，东瀑沙河次之，而西瀑沙河分为两段，青银高速以北的下游河道，水动力较强，青银高速以南的上游河道，水动力较弱，尤其是自汇流水域源头向下5 km的河道范围，水动力很弱。基于上述结论，对西瀑

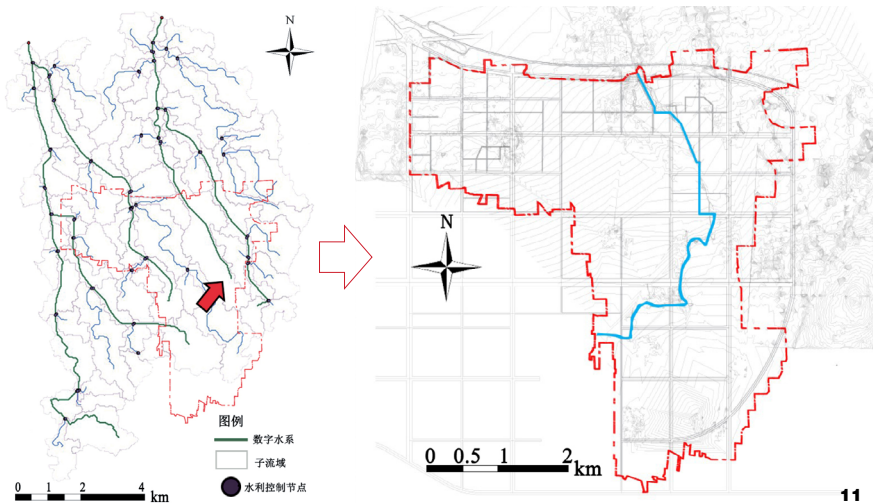


图11 汶泉水系整体治理
Fig. 11 Wenquan River system overall governance

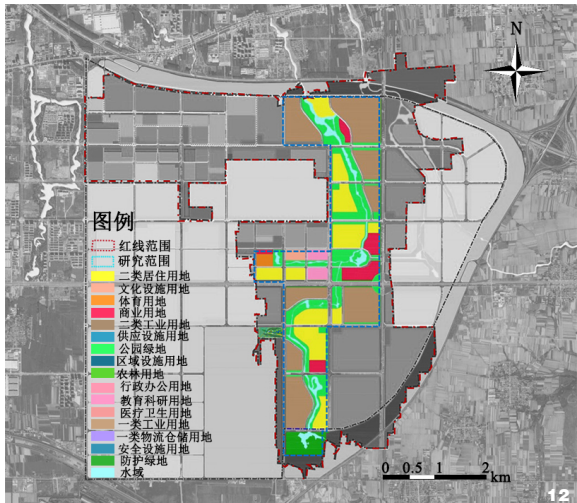


图12 汶泉河沿线区域用地规划
Fig. 12 Land use along Wenquan River

沙河的河道洪水演进过程进行了模拟。模拟结果论证了利用电厂退水为河道补水的效果。模拟结果显示，利用电厂退水对西瀑沙河河道进行补水，可以有效影响西瀑沙河上游河道6.5 km长度范围，在该范围内形成相对稳定的0.5 m宽、3.5 ~ 5.0 mm深的河道中泓径流，同时发生径流入渗和蒸发的生态补偿过程。

(3) 验证了数字水系在规划应用中的可信性与有效性，提高了通过规划对水系实施整体治理的能力。根据数字地面模型的分析结果得到数字水系与实际测绘数据描述水系高度吻合，验证了数字水系在规划应用中的可信性与有效性。将新建汶泉水系与西瀑沙河统筹进行整体治理，分别从新汶泉水系、现状条件、水系景观及专项排水规划4方面展开，有效改善后期水环境。LIM模型与水文数值模拟相结合的工作流在城乡建设绿色发展过程中，可以结合生态空间专项规划、排水专项规划、景观系统专项规划等规划工作发挥有益作用，并应用于国土空间规划相关工作。

致谢：

感谢东盛生态科技股份有限公司为项目开展所提供的支持；感谢清华大学地景营建技术创新实验室欧阳翠玉女士为本文所进行的资料汇总和整理工作。

注：文中图表均由作者绘制。其中，项目资料来源为2019年度潍坊市优秀城乡规划设计一等奖获奖项目“潍坊高新区东三河补水研究”。项目组成员：郭湧、胡宏昌、张能、全龙、宋志生、包春雷、杨浩、李加忠、刘新栋、韩雷、王庆、陈芊蓉、方慧、吕俊、马翠翠。

参考文献

[1] 徐宗学, 叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟: 原理、模型与展望[J]. 水利学报, 2021, 52(04): 381-392.
[2] SANGHOON S, YADU P, ROCKY T, et al. Spatio-temporal Dynamics of Hydrologic Changes in the Himalayan River Basins of Nepal Using High-resolution Hydrological-hydrodynamic Modeling[J]. Journal of Hydrology, 2021, 598.
[3] 黄志龙. MIKE11水动力模型在河道防洪规划中的应用[J]. 陕西水利, 2021(04): 21-23.
[4] TENG J, JAKEMAN A J, VAZE J, et al. Flood Inundation Modelling: A Review of Methods, Recent Advances and Uncertainty Analysis[J].

Environmental Modelling and Software, 2017, 90: 201-216.

[5] 梅超. 城市水文水力耦合模型及其应用研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
[6] 初祁, 彭定志, 徐宗学, 等. 基于MIKE11和MIKE21的城市暴雨洪涝灾害风险分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2014, 50(05): 446-451.
[7] 管凛, 教静. 基于XPSWMM模型的平原水网城镇防洪规划研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(21): 151-154.
[8] 马建明, 喻海军, 张大伟, 等. 洪水分析软件在洪水风险图编制中的应用[J]. 中国水利, 2017(05): 17-20.
[9] BATESA P D, ROO A P J D. A Simple Raster-based Model for Flood Inundation Simulation[J]. Journal of Hydrology, 2000, 236(1): 54-77.
[10] 曾照洋, 王兆礼, 吴旭树, 等. 基于SWMM和LISFLOOD模型的暴雨内涝模拟研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(05): 68-77.
[11] 邵薇薇, 刘家宏, 王开博, 等. 基于情景模拟的城市洪涝交通影响评估[J/OL]. 清华大学学报(自然科学版): 1-15[2022-03-17].
[12] 喻海军. 城市洪涝数值模拟技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
[13] 李帅杰. 城市洪水风险管理及应用技术研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
[14] 郭湧, 武廷海, 王学荣. LIM模型辅助“规画”研究——秦始皇陵数字地面模型构建实验[J]. 风景园林, 2017(11): 29-34.
[15] 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.