

# 无锡市排涝对外部承泄河道洪涝情势的影响及机制研究

李曦亭<sup>1,2</sup>, 王磊之<sup>1,3</sup>, 高玉琴<sup>2</sup>, 梁志红<sup>2</sup>, 苏鑫<sup>3</sup>, 揭仕青<sup>4</sup>

(1. 水利部水旱灾害防御重点实验室; 2. 河海大学水科学研究院;  
3. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室; 4. 抚河水文水资源监测中心)

**摘要:**针对城市排涝能力提升可能引发洪涝风险的空间转移,对外部承泄河道防洪安全产生不利影响的问题,以无锡市中心城区及毗邻江南运河为研究区,构建精细化水文水动力模型,采用情景分析法对比了自然重力排水、现状泵站排水、加大泵站能力排水3种排涝模式对城内外洪涝风险的差异化影响。结果表明:泵站启用可显著降低城区洪峰水位并缩短超警戒水位历时,但在现有调度规则下,进一步提升泵站能力带来的水位改善效果不再显著;无锡市集中强排在承泄河道口门处产生的动量交换效应构成沿程向上的水力屏障,导致上游河段出现流向逆转和水位壅高,而下游河段受影响较小;当承泄河道基流流量较低时,强制性侧向入流更易改变河道原有流态,呈现明显的低流量敏感性特征。

**关键词:**城市排涝;洪涝风险;承泄河道;水文水动力模型;无锡市

**Research on impact and mechanism of drainage from Wuxi City on flood situation of external drainage channels//** Li Xiting<sup>1,2</sup>, Wang Leizhi<sup>1,3</sup>, Gao Yuqin<sup>2</sup>, Liang Zhihong<sup>2</sup>, Su Xin<sup>3</sup>, Jie Shiqing<sup>4</sup>(1. Key Laboratory of Flood & Drought Disaster Defense, Ministry of Water Resources; 2. Institute of Water Science and Technology, Hohai University; 3. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute; 4. Fuhe Hydrology and Water Resources Monitoring Center)

**Abstract:** In response to the potential spatial transfer of flood risks caused by the improvement of urban drainage capacity and the adverse impact on flood control safety of external drainage channels, a refined hydrological and hydrodynamic model was constructed in the central urban area of Wuxi City and adjacent Jiangnan Canal as the study area. The scenario analysis method was used to compare the differential effects of three drainage modes, namely natural gravity drainage, current pump station drainage, and increased pump station capacity drainage, on flood risks inside and outside the city. The results show that the use of pumping stations can significantly reduce the peak water level in urban areas and shorten the duration of exceeding the warning water level. However, under the existing scheduling rules, the water level improvement effect brought by further improving the pumping station capacity is no longer significant. The momentum exchange effect generated by the concentrated strong discharge at the mouth of the discharge channel in Wuxi City forms a hydraulic barrier along the way, leading to flow reversal and water level rise in the upstream section, while the downstream section is less affected. When the base flow rate of the discharge channel is low, forced lateral inflow is more likely to change the original flow state of the channel, showing obvious low flow sensitivity characteristics.

**Key words:** urban drainage; flood risk; drainage channel; hydrological and hydrodynamic model; Wuxi City

在全球气候变化与城市化快速发展双重背景下,极端降雨呈现高强度、高频率、长历时的特征,叠加城市下垫面改变引起的产汇流过程重塑,城市洪涝灾害的突发性、复杂性和破坏性不断增强,城市内

涝已成为各国共同面临的重大挑战<sup>[1-2]</sup>。我国作为世界上受洪涝灾害影响最严重的国家之一,特别是在平原河网地区,由于地势低洼、河网稠密、人口密集等特点,内涝造成的经济损失和社会影响尤为严

**基金项目:**水利部水旱灾害防御重点实验室开放研究基金项目(WX20241100510);国家自然科学基金项目(52239008,52509014);江苏省自然科学基金项目(BK20251476);江苏省卓越博士后计划项目(2025ZB322)

**作者简介:**李曦亭(1990—),女,助理研究员,博士,主要从事防洪减灾与水文预报研究。E-mail:xiting1016@hhu.edu.cn

**通信作者:**王磊之(1991—),男,高级工程师,博士,主要从事防洪除涝与水资源规划管理研究。E-mail:leizhi668@foxmail.com

重<sup>[3]</sup>。据统计,2016 年梅雨期,江苏苏南及浙江杭嘉湖地区受灾人口达 71.5 万人,直接经济损失约 73.92 亿元,间接损失更是难以估量<sup>[4]</sup>。

为积极应对日益严峻的城市内涝威胁,各大城市普遍构建了以大型泵站强排为核心的主动排涝体系<sup>[5]</sup>,该体系通过排涝泵站群统一调度运行,能够有效突破自然地形约束和复杂河网阻力限制,实现城市内涝的快速外排<sup>[6-7]</sup>。Ma 等<sup>[8]</sup>的研究表明,科学合理调度泵站排涝系统可使城市整体排涝效率提升 30%~50%,显著降低城市内涝风险水平。然而,城市排涝能力的快速增强在有效缓解城市内涝压力的同时,必然将大量涝水在短时间内集中转移至承泄河道,进而引发洪涝风险的空间转移。钟桂辉等<sup>[9]</sup>的研究发现,大型城市集中强排作业可使邻近主要河道水位在 2~4 h 内快速上涨 0.5~1.5 m,显著改变河道原有的洪水演进规律。特别是在地势平坦、水力坡降小的平原河网区域,城市大规模强排产生的强烈局部水力扰动极易沿着密集河网体系快速传播扩散,对区域整体防洪安全格局和水文循环过程产生复杂影响<sup>[10]</sup>。

目前,城市洪涝研究总体仍以城市内部过程为核心,主要围绕致灾机理解析、积水过程模拟、排水系统优化等方面开展。在致灾机理方面,刘明潇等<sup>[11-12]</sup>系统分析了城市化对雨洪过程的影响机制,揭示了不透水面增加、天然调蓄能力减弱等关键因素。在积水过程模拟方面,SWMM、MIKE URBAN 等城市雨洪模型日趋完善,能够精确刻画城市内部产汇流过程<sup>[13-14]</sup>。在排水系统优化方面,低影响开发(LID)、海绵城市等理念得到广泛应用,为城市雨洪管理提供了新思路<sup>[15-17]</sup>。然而,这些研究多根据城市行政边界划分研究范围,以提高本地排水效率为优化目标,忽视了城市强排对外部承泄河道的水力冲击效应。随着城市与周边地区洪涝矛盾日益凸显,学界开始关注城市排涝对外部水系的影响。例

如,李伶俐等<sup>[18]</sup>以太湖流域为对象,评估了城市化对区域水循环的整体影响,指出城市扩张显著增强了流域产汇流能力;Zhang 等<sup>[19]</sup>构建了城市-河道耦合二维水动力模型,定量评估了城市强排对邻近河道洪水风险的影响,发现强排可显著增加河道洪峰流量;胡向阳等<sup>[20]</sup>利用集总水文模型分析了典型年份沿江泵站排涝流量对长江干流洪水位的影响,揭示了强排引起的水位壅高具有明显的时空分异特征。尽管这些研究在效应识别和风险定量方面取得了积极进展,但仍存在以下局限性:一是对承泄河道不同河段的差异化响应规律及其水力学驱动机制认识不足;二是缺乏对基流条件、排涝强度等关键因素影响规律的系统分析。这些不足限制了对城市-河道耦合系统互馈机制的深入理解,难以支撑精细化的区域防洪调度决策。

鉴于此,本文以位于平原河网地区的无锡市中心城区及其毗邻的江南运河为研究区,构建精细化水文水动力耦合模型,采用情景分析法定量评估不同排涝方案对城市内外洪涝风险的影响,揭示城市强排对承泄河道水动力特征的时空影响规律及其驱动机制,以期为平原河网地区城市防洪排涝系统优化和区域洪涝风险协同管控提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本文以太湖流域无锡市中心城区及其毗邻的江南运河为研究区,如图 1 所示,研究区地处 31°20'N~31°45'N、120°00'E~120°30'E,总面积约 1 200 km<sup>2</sup>。研究区属亚热带季风气候,多年平均气温 15.6℃,多年平均降水量 1 112 mm,降水年内分布不均,梅雨期(6—7 月)降水量占全年的 40%,暴雨多发生在夏季。无锡市中心城区河网与江南运河水系联系紧密,城区排涝主要通过江南运河向下游输送,部分通过其他河道北排长江、东排望虞河。2000 年以来,无锡市城市化进程加速,城市化率由 58.25% 提升

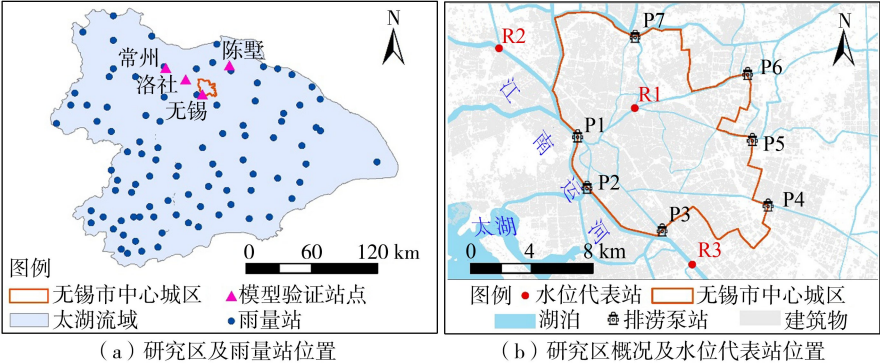


图 1 研究区概况  
Fig. 1 Overview of study area

至 83.51%,下垫面性质改变显著,径流系数增大,暴雨期间城市内涝风险加剧。为应对日益严峻的排涝压力,城区排涝能力不断提升,至 2010 年,中心城区设计排涝流量达 415 m<sup>3</sup>/s。然而,城市排涝标准提升与江南运河防洪能力建设存在时序不匹配问题,运河防洪标准相对滞后,河道行洪能力未能同步提升,导致城市强排与河道承泄能力矛盾突出,研究区洪涝问题日趋严重。

### 1.2 数据来源

本文采用的基础数据包括:30 m 精度的土地利用数据(2024 年)来源于武汉大学杨杰和黄昕教授发布的土地利用数据集( <https://zenodo.org/records/12779975> );30 m 精度的 DEM 数据来源于资源环境科学数据平台( <http://www.resdc.cn> );太湖流域 1991 年和 1999 年逐日气象水文观测资料来源于《水文年鉴》,包括 138 个雨量站、4 个水文站的观测数据(图 1(a));设计暴雨资料和河流、湖泊防洪工程规格及调度运行规则等由水利部太湖流域管理局提供。

## 2 研究方法

### 2.1 水文水动力模型

本文采用产流模型和一维河网水动力模型耦合的水文水动力模型进行研究。产流模型中将土地利用分为水域、湿地、田地、建筑用地 4 种类型,在考虑蒸散、洼地蓄水和渗透损失后,根据不同类型的生成机制计算其径流深。总径流深为所有土地利用类型的面积加权平均值。

采用一维圣维南方程组描述河道中的水流运动,其连续方程及动力方程为:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{n^2 |Q| Q}{R^{1.333}} = q_L v_x \tag{2}$$

式中: $x$ 、 $t$  为距离、时间自变量; $A$  为过水面积; $Q$  为断面流量; $Z$  为水位; $\alpha$  为动量修正系数; $g$  为重力加速度; $R$  为水力半径; $n$  为曼宁糙率系数; $q_L$  为旁侧入流,入流为正,出流为负; $v_x$  为入流沿水流方向的速度,若旁侧入流垂直于主流,则  $v_x = 0$ 。

图 2 为河道断面示意图。由图 2 可见,对于横截面  $L_1$  和  $L_k(k=2,3,\cdots,K)$  之间的河段,使用四点线性隐式有限差分法对连续方程及动力方程进行离散化。因此,第  $K$  个横截面  $L_K$  处的流量可表示为相应节点处水位的线性函数,进而得到流量-水位关系。

由图 2 可见,水闸和泵站等水力控制结构在河

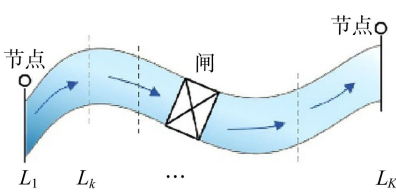


图 2 河道断面示意图

Fig. 2 Sketch map of river reach computation

流上游和下游节点之间建模,节点之间水位差与流量之间的关系由堰流方程和运行方式决定。自由出流条件和淹没出流条件下的计算公式分别为:

$$Q = mB\sqrt{2g}H_0^{1.5} \tag{3}$$

$$Q = \varphi_m B H_s \sqrt{2g(Z_U - Z_D)} \tag{4}$$

其中  $H_0 = Z_U - Z_d$   $H_s = Z_D - Z_d$   
 式中: $B$  为闸门开启宽度; $m$  为自由出流系数; $Z_d$  为堰顶高程; $Z_U$  为闸上游水位; $Z_D$  为闸下游水位; $\varphi_m$  为淹没出流系数。

### 2.2 计算情景设置

1991 年太湖流域遭遇了 20 世纪 90 年代以来最严重的流域性特大洪水,造成直接经济损失超过 200 亿元,具有极强的代表性和典型性。6 月 7 日至 7 月 6 日的暴雨中心恰好位于无锡市人口稠密、经济发达的中心城区,整个降雨过程中,最大日降水量超过 200 mm,达到特大暴雨量级,30 d 累计降水量达到 700 mm。《太湖流域防洪规划》中的典型设计暴雨“91 北部”50 年一遇最大 30 d 暴雨基于该场暴雨在太湖流域北部地区的实测数据,采用同频率放大法进行缩放得到,本文选取其作为模拟情景,暴雨过程如图 3 所示。设计暴雨的雨型是太湖流域最具代表性的致灾暴雨类型,雨峰集中、历时长、降水量大,能够充分考验城市排涝系统的响应能力和承泄河道的承载压力。

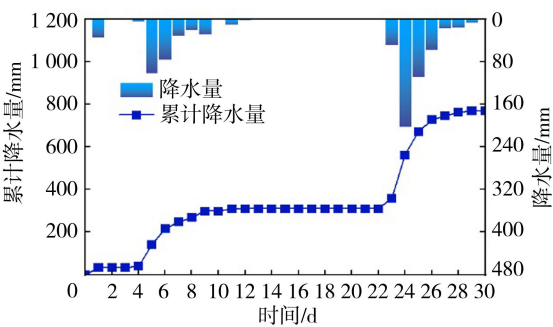


图 3 设计暴雨过程

Fig. 3 Design storm hyetograph

基于上述设计暴雨,设置 3 种城市排涝方案进行对比分析:方案 1 为自然重力排水模式,即城市涝水仅通过闸门依托重力沿地形坡降通过天然排水通道向邻近河道排泄,最大排涝流量为 126 m<sup>3</sup>/s;方

案 2 为现状泵站排涝模式,即无锡市中心城区大包围启用 7 座排涝泵站(分布位置以及设计参数分别见图 1 和表 1)强排城市内部涝水至城市外部河道,总设计排涝流量为 405 m<sup>3</sup>/s,其中 P1、P2、P3 泵站抽排涝水直接排入江南运河,最大排涝流量可达 195 m<sup>3</sup>/s;方案 3 为加大泵站能力排水模式,即在方案 2 基础上提升总排涝能力至 510 m<sup>3</sup>/s,其中 P1、P2、P3 泵站最大排涝流量提升至 230 m<sup>3</sup>/s。城市外部防洪工程规模及调度规则均依据《太湖流域洪水与水量调度方案》和《苏南运河区域洪涝联合调度方案(试行)》设置,保持现状不变,避免因工程及调度规则的变化对模拟结果造成的其他影响。

表 1 排涝泵站参数及设计排涝流量

| Table 1 Parameters and design drainage flow of pump stations |        |        |                            |      |
|--------------------------------------------------------------|--------|--------|----------------------------|------|
| 闸泵编号                                                         | 闸门宽度/m | 闸底高程/m | 设计排涝流量/(m <sup>3</sup> /s) |      |
|                                                              |        |        | 方案 2                       | 方案 3 |
| P1                                                           | 64     | 0      | 60                         | 75   |
| P2                                                           | 20     | 0      | 75                         | 90   |
| P3                                                           | 33     | 0      | 60                         | 75   |
| P4                                                           | 40     | 0      | 70                         | 85   |
| P5                                                           | 24     | 1.3    | 60                         | 75   |
| P6                                                           | 8      | 0      | 40                         | 55   |
| P7                                                           | 8      | -0.5   | 40                         | 55   |

为了量化分析不同城市排涝方案对城市内外河道洪涝风险的影响,从 3 个水位代表站(分布位置和特征水位见图 1 和表 2)提取洪水过程模拟数据,R1 站位于无锡中心城区内部,代表城市内部水位,R2、R3 站分别位于城市附近的江南运河上游和下游,站点警戒水位和防洪设计水位根据《无锡市城市防洪规划修编报告(2013—2030)》确定。

表 2 水位代表站特征水位

| Table 2 Characteristic water level of water level represent stations |        |          |
|----------------------------------------------------------------------|--------|----------|
| 站点                                                                   | 警戒水位/m | 防洪设计水位/m |
| R1                                                                   | 3.50   | 4.94     |
| R2                                                                   | 4.00   | 5.12     |
| R3                                                                   | 3.80   | 4.70     |

2.3 模型构建与验证

研究区所处的太湖流域水力联系复杂,为了更准确地表征研究区城市内外水动力相互作用,本文在整个太湖流域构建了水文水动力模型,而水位分析时则重点关注无锡市中心城区及其毗邻河道。在一维水动力模拟中,湖泊和水库被建模为与河流横截面相连的零维蓄水节点。闸门和泵被表示为根据预定义的调度规则运行的联动元件。利用 2024 年遥感影像的土地覆盖分类确定 4 种土地利用类型(水域、湿地、田地、建筑用地),覆盖在 500 m 网格单元

上,用于空间分布的降雨径流计算。模型边界条件包括丘陵地区的水上游流量边界和河段的横向流量边界,分别来自平原地区的降雨径流模块和径流演算。模型构建、参数设置及率定过程详见文献[21]。

本文采用 Chen 等<sup>[21]</sup> 基于太湖流域 1998 年、2002 年、2003 年实测降雨数据和河道水位数据率定得到的模型参数,进一步基于 1999 年实测降雨数据,利用纳什效率系数(NSE)和决定系数(R<sup>2</sup>)评价模拟水位与观测水位的拟合程度以及水位过程线的匹配程度。模型验证结果显示,研究区内陈墅、常州、洛社和无锡 4 个水位代表站的 NSE 为 0.87~0.91,R<sup>2</sup> 为 0.86~0.93,因篇幅有限,图 4 只展示常州、陈墅站模型验证结果。需要说明的是,模型验证采用 1999 年实测资料,而产流计算基于 2024 年土地利用数据,存在下垫面时间尺度不一致问题。理论上,2024 年城市化水平显著高于 1999 年,不透水面积增加导致的产流系数增大应使模拟水位高于实测值。然而,近年来太湖流域实施了两轮治太工程,通过新建、扩建排涝泵站和拓浚骨干河道等措施显著提升了区域排水能力,该工程效应对产流增加产生了部分补偿作用。上述两种相反作用叠加的综合结果使得模型验证精度保持在合理范围内,表明模

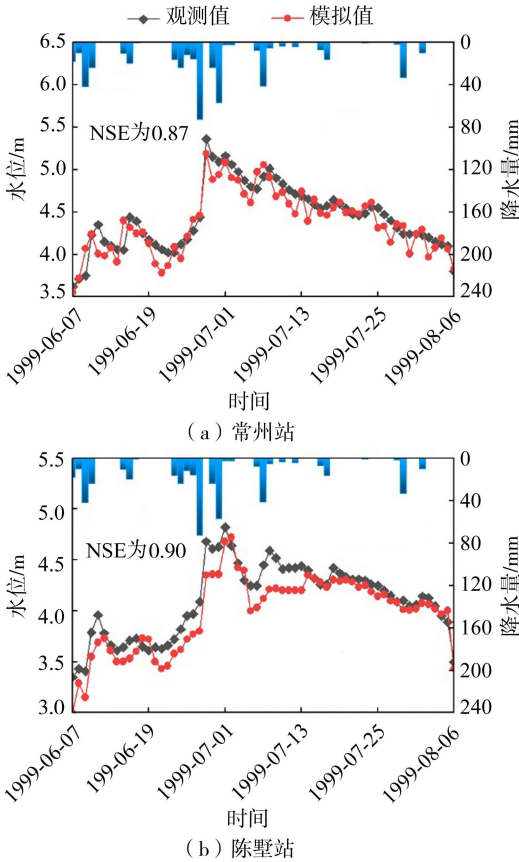


图 4 常州站和陈墅站模型验证结果  
Fig. 4 Model validation results of Changzhou Station and Chenshu Station

型能够较好地反映研究区水文水动力过程,在研究区有较好的适用性。

### 3 结果与分析

#### 3.1 城市排涝对城内水位的控制效果

图 5 为不同城市排涝方案下 R1 站的水位过程。长时强降雨导致城区河道水位急剧上升,是研究区的主要致洪因子。设计暴雨呈现双峰型降雨特征,包含两个主要降雨时段(06-11T12:00 至 06-18T12:00、06-30T12:00 至 07-07T12:00)。由图 5 可见,各方案下城区水位过程均呈现相应的双峰特征,且与降雨强度呈正相关关系。城区通过泵站抽排方式将积水快速输送至外围受纳水体,有效降低内涝风险,而重力排涝方式受水动力条件制约,短期减灾效果有限。R1 站在方案 1 中第一次洪峰水位达 4.91 m,分别较方案 2、3 高 1.21、1.25 m,方案 1 第二次洪峰水位达 5.10 m (超防洪设计水位 0.16 m),分别较方案 2、3 高 0.54、0.52 m;同时,城内水位在方案 1 中高水位持续时间较方案 2、3 更久。以第一次降雨过程为例,方案 1 中 R1 站水位

于 06-12T01:00 突破警戒水位(3.59 m),超警戒水位持续时间超过 300 h;方案 2、3 中情况较为相似,R1 站水位均于 06-12T01:00 突破警戒水位,至 06-12T11:00 迅速降至警戒水位以下,超警戒水位持续时间不超过 12 h。受边际效益递减规律影响,泵站排涝能力的进一步提升未产生显著增益,方案 3 和方案 2 中 R1 站的洪峰水位差异很小,仅 0.15~0.25 m。

为深入分析不同城市排涝方案在短历时强降雨过程中的内涝控制效果,模拟了无锡市中心城区在两个 48 h 典型降雨时段((06-12T08:00 至 06-14T08:00、07-01T08:00 至 07-03T08:00))内各方案向江南运河的排涝流量及累计排涝量,分别表征第一轮、第二轮强降雨过程的排涝水力特征,结果如图 6 所示。泵站枢纽通过强制抽排能够快速疏散城区涝水,有效规避复杂河网路线和地形制约。由图 6 可见,方案 2、3 排涝枢纽的最大排涝能力为方案 1 的 3~4 倍;方案 2、3 的 48 h 累计排涝量比方案 1 多 1.5~2 倍。以第二轮降雨过程为例,方案 2、3 的 48 h 累计排涝量分别为 3335.44 万、3826.42 万  $m^3$ ,分别较方案 1 增排 1352.47 万、1843.45 万  $m^3$ 。

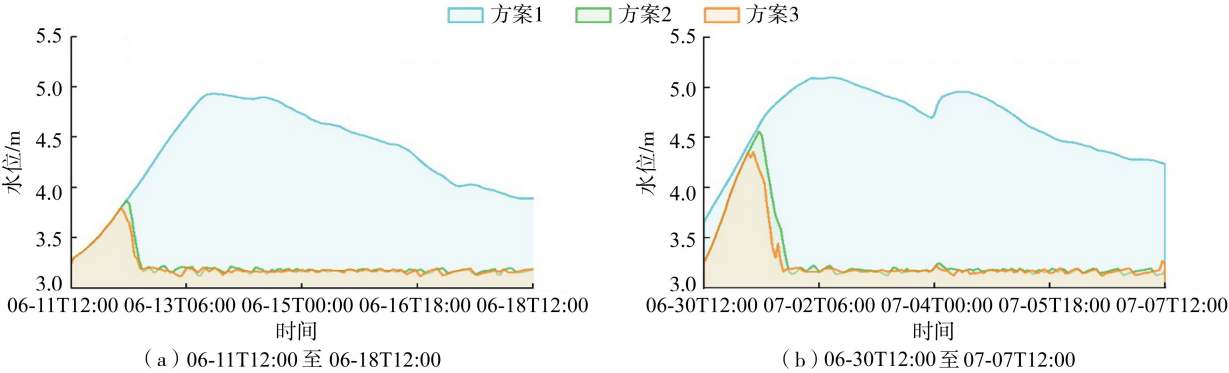


图 5 不同城市排涝方案下 R1 站的水位过程  
Fig. 5 Water level process of R1 Station under different urban drainage schemes

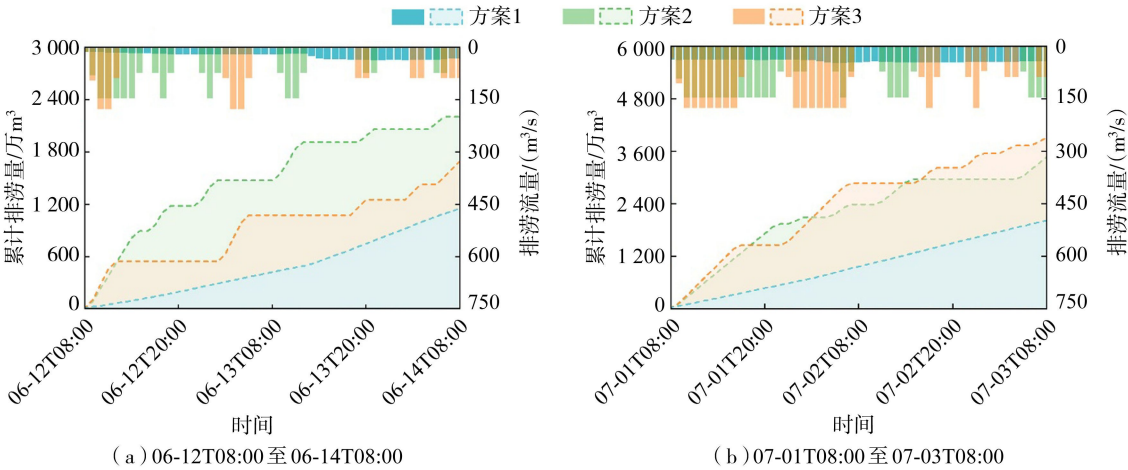


图 6 不同城市排涝方案下无锡市中心城区向江南运河的排涝流量及累计排涝量  
Fig. 6 Drainage discharge and cumulative drainage volume from central urban area of Wuxi to Jiangnan Canal under different urban drainage schemes

值得注意的是,在方案2、3的调度运行过程中,城市排涝泵站枢纽均经历了4~5个完整的启闭运行周期,呈现出明显的周期性调度特征。通过对运行过程的详细分析发现,两方案中泵站枢纽在暴雨初期均能够以最大排涝能力进行抽排作业,有效应对城市内涝积水。尽管降雨过程呈双峰特征,R1站水位在两轮强降雨间隔期快速回落,且每轮降雨过程的水位响应呈现单峰特征,能够在较短时间内快速回落至警戒水位以下,表现出良好的水位调控效果。究其原因,泵站在远低于预警水位的阈值下提前启动,通过“预降预排”调度策略显著提升了排涝效率。此外,尽管方案3中城泵站枢纽较方案2的排水效率高0.13~0.17 m/h,但其运行时间反而减少了4~6 h,累计排涝量降低了599.43万 m<sup>3</sup>。方案3的高排涝能力使城区水位快速下降至启泵阈值以下,触发泵站提前关闭,而方案2由于排涝能力相对较低,城区水位下降速度较慢,泵站维持较长时间运行,从而产生了更大的累计排涝量。这一现象反映出有基于固定水位阈值的泵站启停规则存在局限性,未能充分发挥高排涝能力泵站的效能。

上述分析也进一步揭示了泵站排涝能力提升的边际效益递减规律,因此,在城市排涝系统的设计应用过程中,建议:①根据降雨预报和城区水位变化趋势,动态调整泵站启停阈值,使高能力泵站在保证安全的前提下延长运行时间;②将泵站分组,根据降雨强度和城区水位分级启动,避免全部泵站同时启停造成的能力浪费;③结合数值天气预报,在强降雨来临前适度预降城区水位,为后续强降雨创造调蓄空间,同时避免泵站在降雨过程中频繁启停。在实际工程应用中,结合智能调度系统和实时监测数据,可实现泵站群的精细化、智能化调度,充分发挥工程效益。

### 3.2 城市排涝对毗邻河道洪水情势的影响

图7为不同城市排涝方案下江南运河上游(R2站)和下游(R3站)的水位过程。由图7可见,城市

集中排涝对承泄河道水位抬升效应显著,且上游河段的水位响应敏感性明显高于下游河段,呈现出明显的空间差异性特征。对于上游河段R2站,城市泵站集中排涝对其水位过程产生显著影响。方案1、2、3的洪峰水位分别为5.24、5.54、5.62 m,较防洪设计水位分别超高0.12、0.42、0.50 m,表明随着城市排涝能力的提升,上游河段超标洪水风险呈递增趋势。不同方案间R2站的水位过程差异显著,其中方案1与方案3的洪峰水位差值达0.30 m,反映出泵站排涝能力增强对上游水位的显著影响。值得注意的是,这种水位差异在退水阶段进一步放大,呈现出明显的“滞涨效应”。方案2、3与方案1的最大水位差分别达0.57 m和0.71 m,且高水位持续时间明显延长,反映出城市泵站排涝能力提升对承泄河道上游河段水位过程的显著影响。退水阶段水位差异的放大机制在于泵站持续排水导致上游河段形成“蓄水效应”,当天然入流减小而泵站仍维持排水时,上游河段水位下降速率明显滞后于天然条件。对于下游河段R3站,不同排涝方案的洪水过程线形态基本一致,水位差异相对较小,且差异主要体现在退水阶段。方案1、2、3中下游河段两次峰现时间一致且洪峰差异微乎其微,R3站在3种方案下均于06-13T08:00和07-01T10:00达到洪峰水位,不同方案间的洪峰水位差值均小于0.03 m,远低于上游河段的水位差异幅度。从退水特征分析,方案2、3相对于方案1在退水阶段水位抬升0.01~0.13 m,而方案2与方案3之间的退水阶段水位差异不超过0.02 m。这种相对微弱的水位响应表明,下游河段具有较强的水流输送能力,能够有效消化上游泵站排水的影响,洪水风险水平相应较低。

为揭示江南运河洪水风险空间差异分布的水力学机制,对06-10T00:00至07-09T03:00的江南运河上下游流量进行模拟。图8为不同城市排涝方案下R2站和R3站的流量过程(图中正值表示正流

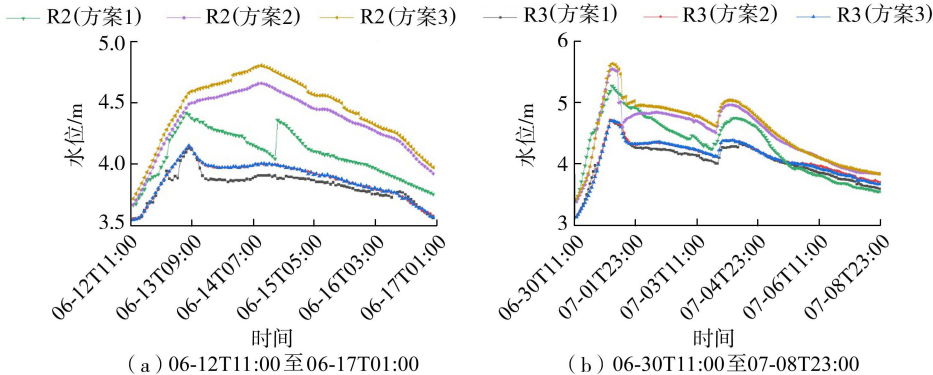


图7 不同城市排涝方案下R2站和R3站的水位过程

Fig. 7 Water level process of R2 and R3 stations under different urban drainage schemes

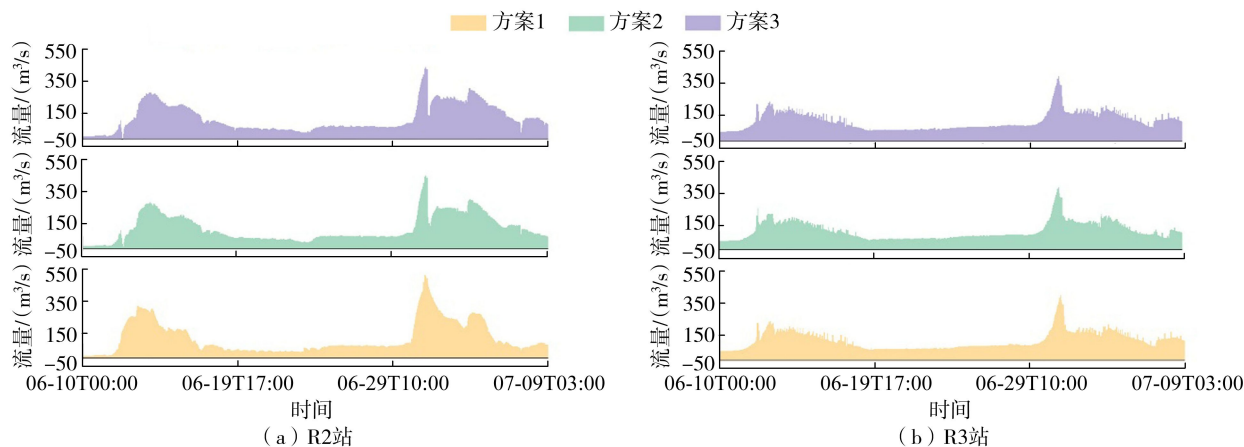


图 8 不同城市排涝方案下 R2 站和 R3 站的流量过程

Fig. 8 Discharge process of R2 and R3 stations under different urban drainage schemes

向,负值表示逆流向)。方案 2、3 中无锡市中心城区泵站枢纽分别于 6 月 12 日和 7 月 1 日启动集中强排,由图 8 可见,江南运河上游 R2 站相应地出现明显的流速骤降和流向逆转现象,形成典型的回水顶托效应。城市泵站枢纽短时集中排涝在河道中形成局部水力屏障,其作用机理表现为:强制性侧向入流扰动了河道原有的水力平衡状态,大流量排水在主河道内产生明显的动量交换效应,导致上游河段水位壅高并产生逆流。江南运河下游河段则因有利的水力坡降条件和较大的过流断面,受城市集中排涝影响相对较小。具体而言,6 月 12 日 R2 站记录到显著负流量值,方案 2、3 分别达到  $-3.9$ 、 $-11.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,表明河道出现明显的逆向流动。逆流现象的出现标志着局部水力平衡破坏,上游河段的输水功能受到影响。与此形成鲜明对比的是,下游 R3 站在整个排涝期间始终维持正向流量,流向未发生逆转,表明其水力连续性得到较好维持。

进一步分析发现,泵站集中排涝对河道流量的影响程度与基流大小密切相关,呈现明显的低流量敏感性特征。当江南运河流量较小时,城市泵排对上游河段的水力影响呈非线性放大效应,形成更为显著的壅水现象。在 6 月 12 日泵站启动时,R2 站天然流量仅约  $14 \text{ m}^3/\text{s}$ ,此时泵站排涝流量(方案 3 约为  $176 \text{ m}^3/\text{s}$ )是天然流量的 10 倍以上。泵排入流首先在承泄河道局部汇流区形成高能扰动区,其动量作用通过压力波向上游传播,而非直接的流量叠加。江南运河作为区域骨干河道,河道宽度  $40 \sim 60 \text{ m}$ ,过流能力较大,泵站排涝流量在主河道中被稀释,仅导致局部流速场重构而非整体流量逆转。在 7 月 1 日江南运河洪峰期间,R2 站天然流量约  $70 \text{ m}^3/\text{s}$ ,泵站排涝流量与天然流量的比值降至 2,水力冲击效应相对减弱,但仍导致流量显著下降。这种机制解释了流向逆转主要发生在泵站启用初期而

非江南运河洪峰流量时段的现象,表明城市集中排涝的冲击动量在低流量条件下更易改变河道天然水流流态。当侧向排水流量与主河道天然流量比值过大时,必然引起主流流态的剧烈改变,甚至导致流向完全逆转。

综上,建议城市排涝能力提升应遵循适度性原则,避免因过度建设导致边际效益递减和外部洪涝风险转移。洪水风险管理需突破城市边界限制,构建区域协同的防洪排涝体系,统筹受城市排水影响的承泄河道及上游敏感区,评估并控制回水顶托效应,优化泵站启停与功率分配,实施分散化出口与分区错峰排放,同时在承泄受限河段增设沿河滞洪区、地下调蓄池与海绵设施并与闸泵联动,形成“源头减排-中途滞蓄-末端有序入河”的系统路径。上述路径将城市排涝与区域防洪有机耦合,有效缓解集中排涝对河网系统的冲击,提升城市水系统韧性。

## 4 结 论

a. 以太湖流域无锡市中心城区及毗邻的江南运河为研究区,构建了精细化水文水动力模型,模型验证结果表明 NSE 为  $0.87 \sim 0.91$ ,  $R^2$  为  $0.86 \sim 0.93$ ,模型能够较好地反映研究区水文水动力过程。

b. 设计了自然重力排水、现状泵站排水、加大泵站能力排水 3 种城市排涝方案,发现城市泵排枢纽能够显著提升内涝控制效果,但进一步提升泵站能力带来的水位改善效果有限。与自然重力排水相比,泵排可使城区暴雨洪峰水位降低  $0.54 \sim 1.75 \text{ m}$ ,超警戒水位持续时间缩短至  $24 \text{ h}$  以内。然而,与现状泵站排水相比,加大泵站能力排水的洪峰水位降幅仅增加  $0.02 \sim 0.04 \text{ m}$ ,呈现明显的边际效益递减特征。

c. 研究区的城市集中强排在承泄河道口门处与外来河流汇集,泵排涝水与天然径流发生剧烈动量交换和能量重分配,诱发水面线突变并形成沿程向上的

水力屏障效应。该机制导致江南运河上游河段出现流向逆转和水位壅高,洪峰水位在强化排涝方案下较自然排涝抬升 0.30 m 以上;而下游河段仅受轻微影响,不同方案间洪峰差异小于 0.03 m。

d. 当承泄河道基流流量较低时,排涝流量与基流动量差显著,城市排涝动量占主导,易改写承泄河道原有流态;洪峰期基流增大,排涝与基流动量比降低,水力扰动被稀释,承泄河道流态受扰程度显著减弱。

参考文献:

[ 1 ] 王强,许有鹏,杨龙,等.太湖平原地区洪水特征变化及驱动机理[J].地理学报,2023,78(5):1088-1103. (Wang Qiang,Xu Youpeng,Yang Long,et al.Changes in flood characteristics and their driving mechanisms in the Taihu Plain region[J].Acta Geographica Sinica,2023,78(5):1088-1103.(in Chinese))

[ 2 ] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等.中国城市洪涝问题及成因分析[J].水科学进展,2016,27(4):485-491. (Zhang Jianyun,Wang Yintang,He Ruimin,et al.Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J].Advances in Water Science,2016,27(4):485-491.(in Chinese))

[ 3 ] 程晓陶,刘昌军,李昌志,等.变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J].水利学报,2022,53(7):757-768. (Cheng Xiaotao,Liu Changjun,Li Changzhi,et al.Evolution characteristics of flood risk under changing environment and strategy of urban resilience improvement[J].Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(7):757-768.(in Chinese))

[ 4 ] 王静,王艳艳,李娜,等.2016年太湖流域洪灾损失及骨干工程防洪减灾效益评估研究[J].水利水电技术,2019,50(9):176-183. (Wang Jing,Wang Yanyan,Li Na,et al.Study on flood losses and disaster reduction benefits assessment of key flood control projects in Taihu Basin in 2016[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2019,50(9):176-183.(in Chinese))

[ 5 ] Ben Xuechen,Yang Fan,Fan Ziwu,et al.Methodology for inflow and infiltration management utilizing PySWMM:a case study of the BX pumping station in Suzhou's central city area, China [J]. Journal of Water Process Engineering,2025,72:107597.

[ 6 ] 李曦亭,王磊之,商守卫,等.流域、区域和城镇防洪工程工况与调度变化的洪涝互馈效应研究[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):12-18. (Li Xiting,Wang Leizhi,Shang Shouwei,et al.Research on mute feed effect of flood and waterlogging under change of working condition and dispatching of flood control project in basin, sub-basin and urban[J].Journal of Hohai University

(Natural Sciences),2024,52(2):12-18.(in Chinese))

[ 7 ] 田培楠,刘舒,杨娜娜,等.联圩并圩措施对平原河网城市防洪排涝影响评估:以芜湖市新城南圩为例[J].水利水电技术(中英文),2025,56(10):135-151. (Tian Peinan,Liu Shu,Yang Nana,et al.Evaluation of effect of dike merging measures on flood control and drainage in plain river network cities:a case study of Xinchengnanwei in Wuhu City[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2025,56(10):135-151.(in Chinese))

[ 8 ] Ma Tianfang,Kim J S,Jun C,et al.Optimizing urban flood management:enhancing urban drainage system efficiency under extreme rainfall events [J]. Journal of Hydroinformatics,2024,26(11):2704-2719.

[ 9 ] 钟桂辉,刘曙光,娄厦,等.苏锡常排涝对江南运河产生的洪涝转移特征[J].水利水电科技进展,2020,40(5):40-47. (Zhong Guihui,Liu Shuguang,Lou Sha,et al.Flood dispatching characteristics of Jiangnan Canal caused by drainage from Suzhou,Wuxi and Changzhou[J].Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(5):40-47.(in Chinese))

[10] Gao Xiaoqing,Liu Yunzhu,Gao Cheng,et al.Coupling and comparison of physical mechanism and machine learning models for water level simulation in plain river network area[J].Applied Sciences,2024,14(24):12008.

[11] 刘明潇,朱勇杰,胡昊,等.城市新区极端雨洪汇流淹没特性与致灾机理调查研究:以郑州“7·20”特大暴雨(郑东新区)为例[J].水利学报,2024,55(3):288-300. (Liu Mingxiao,Zhu Yongjie,Hu Hao,et al.Survey research on characteristics of extreme rainstorm flood and disaster-causing mechanism in urban new district:taking Zhengdong New District in Zhengzhou's "7·20" heavy rainstorm as an example [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2024,55(3):288-300.(in Chinese))

[12] 刘成帅,许营营,孙悦,等.产流模式空间分布对城市雨洪过程模拟的影响[J].水资源保护,2024,40(2):28-34. (Liu Chengshuai,Xu Yingying,Sun Yue,et al.Effect of spatial distribution of runoff generation patterns on urban storm flood process simulation[J].Water Resources Protection,2024,40(2):28-34.(in Chinese))

[13] 邱靖宇,程磊,周楚天,等.基于SWMM和SIMWE模型水文水动力耦合的岳阳市主城区内涝模拟[J].水资源保护,2026,42(1):121-128. (Qiu Jingyu,Cheng Lei,Zhou Chutian,et al.Simulation of waterlogging in main urban area of Yueyang City based on hydrological-hydrodynamic coupling of SWMM and SIMWE model[J].Water Resources Protection,2026,42(1):121-128.(in Chinese))

[14] 侯俊,陈诚,郑玉磊,等.基于MIKE FLOOD模型的平原水网地区内涝治理效果模拟研究[J].水利水电科技进展,2024,44(6):41-47. (Hou Jun,Chen Cheng,Zheng Yulei,et al.Simulation study on effectiveness of

waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 ( 6 ) : 41-47. ( in Chinese )

[ 15 ] Van Oorschot V, Slootweg M, Remme R P, et al. Optimizing green and gray infrastructure planning for sustainable urban development [ J ]. NPJ Urban Sustainability, 2024, 4 ( 1 ) : 41.

[ 16 ] Iqbal A, Soni L, Qazi A W, et al. Utilizing remote sensing for sponge city development: enhancing flood management and urban resilience in Karachi [ J ]. Remote Sensing, 2025, 17 ( 11 ) : 1818.

[ 17 ] 程涛, 黄本胜, 邱静, 等. 基于 UAV 精细化地表数据的城市洪涝模拟与分析: 以济南市海绵城市示范区为例 [ J ]. 水力发电学报, 2021, 40 ( 5 ) : 110-124. ( Cheng Tao, Huang Bensheng, Qiu Jing, et al. Urban flood simulation and analysis using UAV-based refined surface data: case study for sponge city pilot area of Jinan City [ J ]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40 ( 5 ) : 110-124. ( in Chinese ) )

[ 18 ] 李伶杰, 胡庆芳, 王银堂, 等. 快速城镇化进程中太湖流域产水量变化的时空分布特征 [ J ]. 湖泊科学, 2019, 31 ( 5 ) : 1289-1298. ( Li Lingjie, Hu Qingfang, Wang Yintang, et al. Spatiotemporal pattern of water yield changes over the Taihu Basin during the rapid urbanization process [ J ]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31 ( 5 ) : 1289-1298. ( in Chinese ) )

[ 19 ] Zhang Haijia, Liu Jiahong, Zhou Jinjun, et al. Quantitative assessment of exacerbating effect on urban inundation when river flood encounters heavy rainfall in an urbanized watershed [ J ]. Science China Technological Sciences, 2025, 68 ( 9 ) : 1920703.

[ 20 ] 胡向阳, 刘佳明, 吴家阳, 等. 长江中下游沿江泵站排涝对干流防洪的影响分析 [ J ]. 人民长江, 2020, 51 ( 12 ) : 172-178. ( Hu Xiangyang, Liu Jiaming, Wu Jiayang, et al. Influence of drainage of pumping stations along middle and lower reaches of Yangtze River on flood control of main stream [ J ]. Yangtze River, 2020, 51 ( 12 ) : 172-178. ( in Chinese ) )

[ 21 ] Chen Gang, Wang Chuanhai, Fang Xing, et al. Distributed-framework basin modeling system: IV. application in Taihu Basin [ J ]. Water, 2021, 13 ( 5 ) : 611. ( 收稿日期: 2025 - 09 - 29 编辑: 王芳 )

.....

( 上接第 39 页 )

[ 27 ] 张玉, 李灵, 俞建安, 等. 武夷山风景名胜区水资源变化特征及可持续规划 [ J ]. 云南师范大学学报 ( 自然科学版 ), 2010, 30 ( 5 ) : 62-67. ( Zhang Yu, Li Ling, Yu Jian'an, et al. Changing characteristics and Sustainable planning of water resources from Wuyishan Scenic Area [ J ]. Journal of Yunnan Normal University, 2010, 30 ( 5 ) : 62-67. ( in Chinese ) )

[ 28 ] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究 [ J ]. 应用生态学报, 2002 ( 1 ) : 121-125 ( Chen Wenbo, Xiao Duning, Li Xiuzhen. Classification, application, and creation of landscape indices [ J ]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002 ( 1 ) : 121-125. ( in Chinese ) )

[ 29 ] 陈启慧, 纪璐, 李琼芳, 等. 伊犁河三角洲水资源条件变化对景观格局演变的影响 [ J ]. 水资源保护, 2024, 40 ( 2 ) : 90-99. ( Chen Qihui, Ji Lu, Li Qiongfang, et al. Influence of water resources condition changes on landscape pattern evolution in the Ili River Delta [ J ]. Water Resources Protection, 2024, 40 ( 2 ) : 90-99. ( in Chinese ) )

[ 30 ] 吕乐婷, 乔皓, 郑德凤, 等. 太子河流域景观格局时空演变及其对水源涵养的影响 [ J ]. 水资源保护, 2023, 39 ( 6 ) : 111-120. ( Lyu Leting, Qiao Hao, Zheng Defeng, et al. Spatial-temporal evolution of landscape pattern in the Taizi River Basin and its impact on water conservation [ J ]. Water Resources Protection, 2023, 39 ( 6 ) : 111-120. ( in Chinese ) )

[ 31 ] 关伯仁. 水污染指数的综合问题 [ J ]. 环境污染与防治, 1980, 2 ( 5 ) : 11-14. ( Guan Boren. The comprehensive issues of water pollution index [ J ]. Environmental Pollution & Control, 1980, 2 ( 5 ) : 11-14. ( in Chinese ) )

[ 32 ] 尹海龙, 徐祖信. 河流综合水质评价方法比较研究 [ J ]. 长江流域资源与环境, 2008, 17 ( 5 ) : 729-733. ( Yin Hailong, Xu Zuxin. Comparative study on typical river comprehensive water quality assessment methods [ J ]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17 ( 5 ) : 729-733. ( in Chinese ) )

[ 33 ] 刘洋, 李江, 陈诚, 等. 基于模糊隶属度分布函数的博斯腾湖景观适宜水位确定 [ J ]. 水资源保护, 2024, 40 ( 3 ) : 116-124. ( Liu Yang, Li Jiang, Chen Cheng, et al. Identification of landscape suitable water levels in Bosten Lake based on fuzzy membership degree distribution function [ J ]. Water Resources Protection, 2024, 40 ( 3 ) : 116-124. ( in Chinese ) )

[ 34 ] 衣鹏, 纪源, 钱睿智, 等. 2012—2023 年南水北调东线水源区水质演变趋势 [ J ]. 河海大学学报 ( 自然科学版 ), 2025, 53 ( 3 ) : 40-49. ( Yi Peng, Ji Yuan, Qian Ruizhi, et al. Evolution trend of water quality in water source area along eastern route of South-to-North Water Diversion Project from 2012 to 2023 [ J ]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2025, 53 ( 3 ) : 40-49. ( in Chinese ) ) ( 收稿日期: 2025 - 07 - 24 编辑: 王芳 )