



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Hydraulic Engineering—Article

## 平原河网区水动力重构理论与实践

唐洪武<sup>a,b,\*</sup>, 袁赛瑜<sup>a,b</sup>, 曹昊<sup>a</sup>

<sup>a</sup> National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China

<sup>b</sup> Yangtze Institute for Conservation and Green Development, Nanjing 210098, China

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 11 May 2021

Revised 17 December 2021

Accepted 5 January 2022

Available online 17 June 2022

#### 关键词

平原河网  
水安全问题  
水动力重构  
多目标  
统筹治理

### 摘要

我国平原河网地区地势低洼,河道比降平缓,水动力弱,加上密集的人类活动,水安全问题十分突出,比如洪涝频发、水体自净能力差、水生态系统脆弱等。本文研究发现这些问题都与水动力有关,水流能量时空分布失衡是产生这些水问题的共同本源。由此,创建了平原河网区水动力重构理论。该理论在水量调控的基础上,深挖水动力及有限能量在水生态环境改善中的作用,优化布局水闸、泵站等水利工程体系,充分挖潜工程的综合效益。通过重构水动力时空分布来满足平原河网区复杂水问题统筹治理的需求。在此基础上,建立了完整的弱动力平原河网区多尺度水动力重构、多目标水力调控的理论方法和技术体系,提出了平原河网区水问题统筹治理原则。最后以扬州主城区河网活水提质为例,介绍该理论的实际应用及效果。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

平原河网区人口集聚、经济发达,战略地位十分重要,但同时,河网区的水安全问题也十分突出。受台风、暴雨、梅雨、风暴潮等袭击,常出现上游客水压境、下游海潮或流域性洪水顶托,洪涝灾害频发。随着经济发展和城镇化进程的加快,人类活动的影响不断增大,平原河网逐渐暴露出水资源供需失衡、水环境恶化、水生态退化等问题。水灾害、水资源、水环境、水生态等水问题相互交织,治理难度较大,制约了区域社会经济的可持续发展。“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时期治水思路对水资源调配过程中的水生态环境保护、流域/

区域多目标系统治理提出了更高的要求。采用常规水资源调配理论方法对水量进行重新分配,难以实现平原地区水问题的统筹治理。

国际上的大河流域同样也遭受着不同程度的水安全问题。美国的密西西比河流域由于密集的河道整治工程,拦截了大量的泥沙,下游河道水-沙平衡遭到破坏,河口海岸湿地被大量侵蚀,洪水得到了控制,但河口生态遭到了破坏[1–3]。对于欧洲的莱茵河流域,荷兰等国提出了“还地于河”的防洪安全保障计划,洪涝得到缓解。自工业革命以来,流域河流污染日益严重。虽然已经开展了近70年的集中治理,但是河流底泥中仍然富集了大量污染物,流域洪水带来河道的冲刷、底泥的起悬,存在水污

\* Corresponding author.

E-mail address: [hwtang@hhu.edu.cn](mailto:hwtang@hhu.edu.cn) (H. Tang).

染暴发的隐患。如何实现洪水、水生态环境综合治理，相关国家仍在努力探索[1,3]。21世纪初，欧盟出台了“水框架指令”（Water Framework Directive）[4]，用于指导流域水问题的综合治理。我国也经历了初期的以防洪为主到如今的流域综合治理，2002年修订的《中华人民共和国水法》明确了流域作为水资源管理的基本单元。但目前，在水问题统筹治理方面仍然没有完备的理论和技術，“量”与“质”如何兼顾，亟待在理论、技术、制度等方面进行研究[5]。

平原河网区由于地势平缓、河道比降小的自然禀赋，加之工程密布、阻隔水系连通等人为影响，水流不畅，自然动力弱，是典型的弱动力区。研究发现，平原河网区水问题与其水动力特征息息相关。比如，水体流速低，复氧能力和自净能力差，水体易黑臭，引发水环境恶化问题。

研究表明，河道水体低溶氧环境直接影响微生物对有机污染物的降解速率[6]。当溶解氧浓度低于 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，还可能产生甲烷、硫化氢等有毒物质及刺激性气体，引发水体黑臭问题；当溶解氧浓度大于 $7.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，可认为水质良好。水体流动性是影响水体溶解氧浓度的重要因素，提升河网水动力能够促进复氧过程[7]。水流流速的增加可以在一定程度上提高含碳、氮、磷污染物的净化能力，特别是对降低生物需氧量（BOD）的作用明显[8]。提高水体的流动性能，提升水体紊动强度，促进了污染物的扩散，有助于污染物更快、更充分地被微生物降解，降低水体的污染浓度。

水流的流速、水深、紊动特征等也是影响水生态状况的重要参量。水流流速可以影响鱼类、底栖动物等水生生物的生理生态行为[9-12]。在一定范围内增加水体流速还可以抑制藻类生长[13]。如果忽略水动力在提升平原河网水生态环境中的重要作用，仅通过水量稀释、清水冲污、以量换质等传统水量调度思路，从水资源精准配置的角度看是不科学的，也不符合“节水优先”的新时期治水思路。本研究认为，水灾害、水资源、水环境、水生态等水问题其实都与水动力的时空失衡密切相关。利用水闸、泵站、大坝、丁坝等水利工程对水动力进行重构，可以得到适宜的水动力时空分布，变水害为水利。

目前，平原地区已经建成大量的水闸、泵站，形成了比较完备的水利工程体系，为区域水动力场重构提供了必要的工程手段。常规水资源调配理论方法利用闸、坝、泵等水工程调配水量，也蕴含水动力的调配，但在治理水灾害和提高水资源利用率等方面目标比较单一，有时还会产生次生灾害。然而，通过平原河网水动力过程重构，促使工程的单一功能向多功能转变，还存在以下理论和技術上

的瓶颈：首先，平原地区地势平坦，不具备修建大型水利工程的條件，高密度、小型化、分布式治理是必然选择；其次，边界比较复杂，常常通江达海，内外水动力相互干扰，不利组合会加重水问题的强度和风险；再次，河网纵横，水流无序，水动力过程牵一发动全身，水动力场重构面临极大挑战；最后，水问题相互交织，不同水问题对水动力的要求不完全一致，协调困难。作者基于多年的平原地区水问题治理理论研究與工程实践，提出了基于闸泵等水工程联调的平原河网区水动力重构理论。

平原河网区水动力重构是利用河网地区有限的水流能量，辅以水闸、泵站、疏浚、蓄滞洪区等工程进行储能、增能，以再造与目标相协调的水动力时空分布。该理论在水量调控的基础上，注重水动力在水生态环境保护中的重要作用，优化布局水闸、泵站等水利工程体系，充分挖潜工程的综合效益。通过重构水动力来满足平原河网区多目标治理的需求。该理论由多尺度水动力重构理论方法、水动力重构工程技术体系以及多目标水力调控技术等部分组成，如图1所示。其中，平原河网区水动力重构工程技术体系是以“水流能量耗损控制、自然水动力高效利用”为核心，以解决河网交汇顶托、闸泵合建流动互扰、河床易冲易淤等问题为目标，而研发的成套水动力重构工程技术，包括河网交汇节点动力再造技术[14]、闸泵合建枢纽整流与消能技术、四面体透水框架群防冲技术[15]、临海挡潮闸节能防淤技术、分层取水排沙新闸型和调控技术[16]等。

## 2. 平原河网区多尺度水动力重构理论方法

平原河流因其特殊的水文地貌以及强人类活动影响，加上河网系统更是包含多个时空尺度的动力学过程，蕴含的动力学机理极为复杂。为了重塑平原弱动力河网区的水动力场，使其与多目标需求相协调，认清这些复杂的动力学过程是核心基础。平原河流泥沙颗粒较细，物化性质特殊，对于微观层面的动力过程和水生态环境响应都需要关注。同时，平原河流存在特质床面形态（如沙波、植被等）以及复杂河道形态（如复式断面、河流交汇等），平原河流水-沙运动和物质输移都呈现非常特殊的过程；而平原地区密集的水闸、泵站等工程调度运行让这一过程更为复杂。必须在微观上认清水、泥沙、污染物相互作用关系，宏观上厘清特质床面形态、复杂河道形态以及密集工程影响下水-沙-污染物耦合输移规律（图2）。进而，建立平原河网区的能量配置与目标需求间的定量关系，实现水安全保障。因此，弄清水动力与介质、边界、工程相互作用关系，

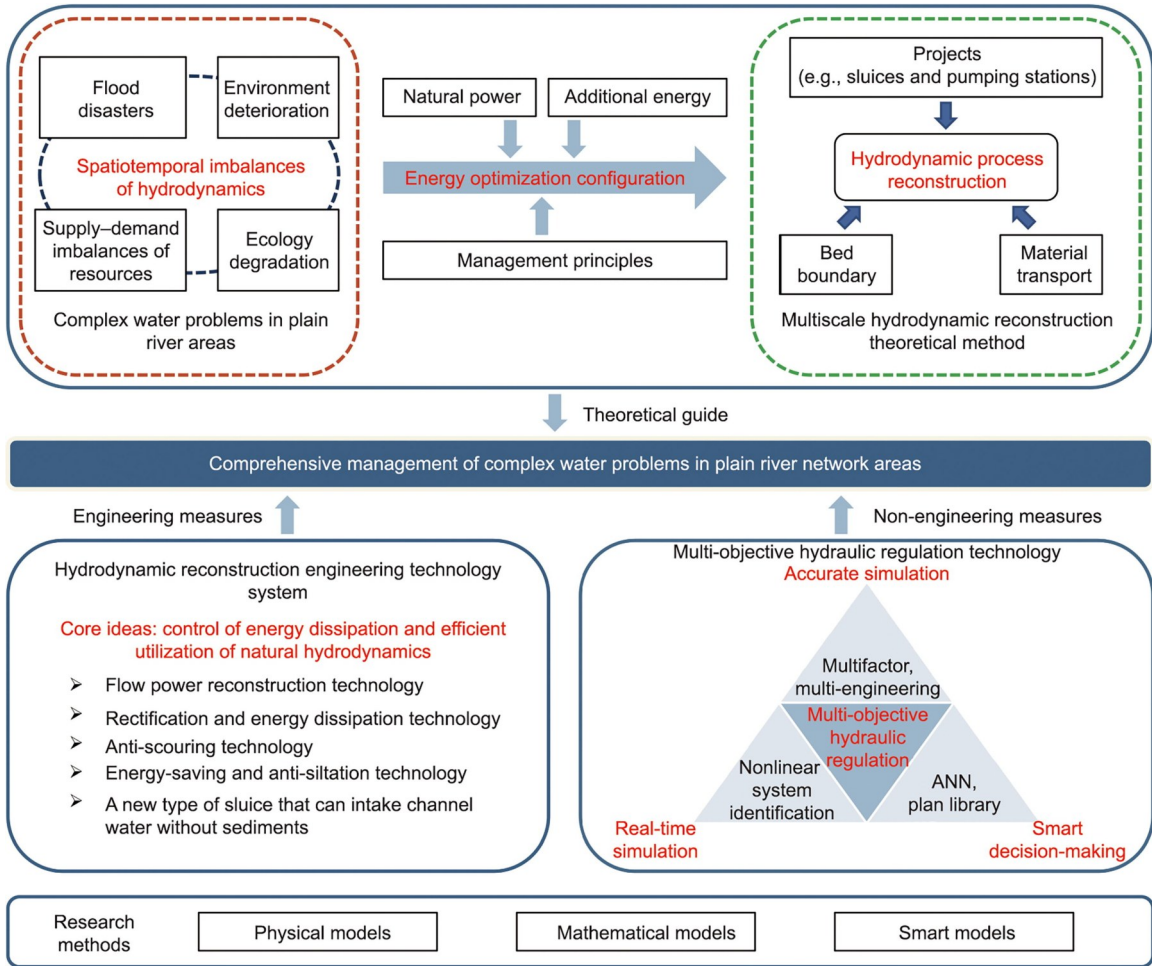


图1. 平原河网区水动力重构理论和技术体系架构。ANN：人工神经网络。

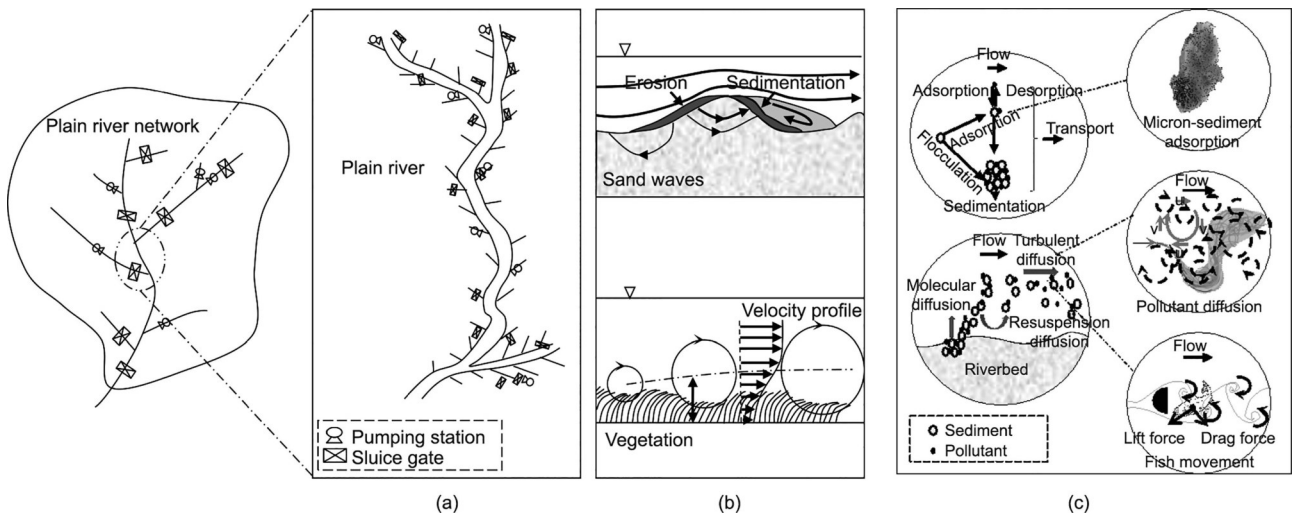


图2. 平原河网区多尺度水动力和物质耦合输移过程。(a) 河道尺度；(b) 河床界面尺度；(c) 微尺度。

是平原河网区多尺度水动力重构理论方法的核心内容。

### 2.1. 水动力与介质的关系

平原河流泥沙颗粒细，对污染物吸附/解吸附作用较

强，水-沙-污染物耦合作用过程在平原河网水环境变化中扮演着举足轻重的作用。水动力较弱时，悬沙容易吸附水中的污染物沉降，降低水体中污染物浓度；当水动力较强时，底泥中污染物容易解吸附[图2 (c)]，甚至带有污染

物的底泥发生悬浮，这些都容易造成下游水体的二次污染。因此进行水动力调控时必须选择适宜的水动力场，使得泥沙充分发挥其环境作用，在一定程度上节约水资源和水流能量。

在颗粒尺度，泥沙对磷等平原河网主要污染物的吸附或解吸附，受水流运动、溶解态磷浓度、泥沙粒径、有机质和铁铝氧化物含量、阳离子交换量等影响[17-18]。水流运动可以引起泥沙颗粒悬浮和沉降，同时伴随着泥沙对污染物的吸附与解吸附作用[19]。水流紊动强度提高，河床起悬的泥沙增加，泥沙中污染物释放量也会增大[20]。在界面尺度，河流的潜流带（即河流地表水和地下水相互作用的区域）中存在相对较强的流动，是地表水和地下水物质交换频繁的场合[21-23]。由于潜流带交换过程引起的污染物迁移影响持久，密度流会加快污染物进入潜流带，但会减缓污染物的释放，因此潜流带交换过程与河流二次污染也有密切关系[24]。在河道尺度，弯曲、分汇、复式明渠等各种河型的物质输移过程和环境生态响应差异很大[25]。比如弯曲河道存在横向环流和纵向螺旋流，会加剧泥沙横向输移和污染物对流扩散[26]。而交汇水流存在螺旋流、剪切立轴涡和回流等水流结构，直接影响物质掺混、河床冲刷等过程[27]。复式明渠中主槽和滩地河床的压差同样可以产生潜流交换，较陡的岸坡可以产生更大的潜流交换量，降低了溶质在河床中向下迁移的速率和净交换总量[28]。

可见，为了更有效、精准地确定与目标需求相适宜的水动力场，必须明确各个尺度下水、泥沙、污染物之间的相互作用和耦合输移过程。考虑不同泥沙浓度和流速条件下泥沙对污染物吸附能力的变化，提出反映泥沙和污染物相互作用关系的项：

$$\begin{cases} F_c = k_a \cdot C \cdot (A_m - N) - k_d \cdot N \\ k_a = f\left(\frac{C}{C_0}, \frac{U}{u_*}, \frac{D_{50}}{H}\right) \\ \frac{k_a}{k_d} = g\left(\frac{C}{C_0}, \frac{U}{u_*}, \frac{S}{S_0}, \frac{D_{50}}{H}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中， $F_c$ 是水中溶解态磷吸附到泥沙表面的源项； $N$ 是单位泥沙吸附污染物的质量； $A_m$ 是泥沙的最大吸附量； $k_a$ 、 $k_d$ 是吸附/解吸附系数，取值与溶解态污染物浓度 $C$ 、水流流速 $U$ 、泥沙中值粒径 $D_{50}$ 和悬沙浓度 $S$ 有关； $C_0$ 是溶解态污染物初始浓度； $u_*$ 是摩阻流速； $S_0$ 是挟沙力； $H$ 是河道水深； $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 是函数关系。从而，为河网适宜的水动力阈值的确定提供了重要的理论支撑。

## 2.2. 水动力与河床边界的关系

平原地区河道比降平缓，水动力弱，对水流能量需要精打细算，因此必须明确水流能量在河网中的消耗过程。植物、沙波是平原河流非常常见的河床形态[图2(b)]，它们的存在扰动水流、加强紊动，消耗水流能量。传统的阻力确定方法以经验为主，无法准确确定植物、沙波边界条件下水流能量的消耗。

植被的存在会扰动水体，产生植物层内尾涡、植物顶部附近的猝发结构、植物层上部和自由水面之间的 Kelvin-Helmholtz (KH) 涡等大量涡结构[29-32]。植被剪切层会将上部自由水流动量大量转移到植物层内部，加速水流的动能消耗。植被对水流的影响程度与植被淹没度、密度、分布形式、刚度以及水流雷诺数等众多因素有关[30, 33-34]。同样，沙波会促使水流分离，使得迎水坡面和背水坡面形成压力差，即形状阻力[35-36]，引起水流能量的消耗。沙波形态（包括形状、长度、高度等）在确定形状阻力方面至关重要[36]，主要与沙粒雷诺数、水流强度参数和佛罗德数等参数有关[37-39]。建立了沙波的几何特征值（波长和波高）与沙粒雷诺数的关系[40-41]，确定了沙波附近紊流拟序结构及其对不同床面形态的响应机制[40-41]。综上，提出了糙元等效理论，将植被、沙波等河床形态等效成“附加颗粒”组成的糙元。假定等效前后河道的能坡不变，通过受力平衡，得到等效后的综合糙率计算公式为：

$$n_c = \frac{1}{U} \left( \frac{B\alpha^{5/2}}{2\alpha + B/H} \right)^{2/3} i_{hg}^{1/2} \quad (2)$$

式中， $n_c$ 是等效糙率； $i_{hg}$ 是水力坡度； $\alpha$ 是孔隙率； $B$ 是河道宽度。从而，精确确定含植物、沙波河道能量损耗大小。

## 2.3. 水动力与工程的关系

平原区兴建了大量的水闸、泵站、行蓄洪区、分洪河道等水利工程[图2(a)]，这些工程为河网水流能量的配置提供了工程手段。但是平原河网的水流能量是有限的，利用工程体系对能量进行配置的前提是明晰单个工程与水动力之间的作用关系、减小工程对水流的能量损失。比如，对于平原区常见的闸泵合建布置形式，闸泵出流相互干扰严重、流态不佳，导致水闸泄流能力和泵站效率的降低。为了减少能量的损失，应尽量减小局部回旋、强紊动的不良水流出现，可以采用整流方法平顺水流，改善工程局部水流条件。

另外，平原河道比降平缓，水利工程对水动力的影响会向上下游同时传递[42]，小、多、密的水利工程群联合

调控时水动力相互干扰。也就是说，多工程与水动力的作用关系或者多工程作用下能量的损失是非常复杂的，并不是单一工程影响的叠加。多工程与水动力之间存在非常复杂的非线性关系。必须首先明确这些工程扰动下水动力的响应关系。根据其能量耗损程度以及工程显效程度来辨识多工程中的显效工程，利用水流非线性系统辨识方法（详见3.2节），辨识水动力对显性工程（群）调控的响应机理，并优先采用显效工程（群）对能量场进行配置，辅以水泵进行增能，表达式如下：

$$\begin{cases} W = \sum_{i,j} (P_{si} + \tilde{P}_{si}) \Delta t_{ij} + \sum_{i,j} (P_{pi} + \tilde{P}_{pi}) \Delta t_{ij} - E(\varphi) \\ W > W_{\min}(\varphi) \\ \sum_{i,j} P_{pi} \Delta t_{ij} \rightarrow \min \end{cases} \quad (3)$$

式中， $W$ 是河网水流动能； $P_s$ 是水闸调度转化势能为动能的功率； $P_p$ 是泵站运行补充水流动能的功率；下标“ $i$ ”是水利程序号，上标“ $\sim$ ”是其他工程扰动的影响； $\Delta t_{ij}$ 是各个工程的作用时间，下标“ $ij$ ”是第 $i$ 个工程的第 $j$ 次调度运行； $\varphi$ 是水流特征量，如流速、水深等； $E(\varphi)$ 是在构造的水动力场 $\varphi$ 下的河网水流能量耗损； $W_{\min}(\varphi)$ 是构造水动力场 $\varphi$ 所需的最小河网动能。从而，为平原区小、多、密的水利工程群优化布局和联合调控奠定了理论基础。

### 3. 平原河网区多目标水力调控技术

基于平原河网现有水利工程体系进行水动力时空再造的治理思路，是解决复杂水问题的重要措施，但多目标水动力重构在实际应用时还面临着两大挑战。第一，不同目标对水动力的需求不一致甚至是矛盾的，各目标之间的关系是动态非线性变化的，而且河网区水动力弱、水能有限，因此多目标之间的优化也至关重要；第二，平原河网水问题时常伴有突发性和不可预见性，比如突发污染事件、台风等，因此要求模拟和调控方案的生成具有实时性。

物理模型和数学模型是河流模拟与工程治理最常用的研究手段，但平原河网区大范围、多尺度、多工程、多要素、实测资料缺失等特点对这些传统的研究方法提出了巨大的挑战，对模拟技术的精度提出了更高的要求，催生了智能模型、混合模型等新兴模拟方法的发展。在解决平原河网实际问题时，三种研究方法可以按需要择优选用或配合使用。这里以数学模型和智能模型相结合的方法为例介绍平原河网区多目标水力调控技术。

#### 3.1. 平原河网多要素多工程精准模拟

数学模型是研究河流水、泥沙物质输移和工程治理的重要手段。平原河网通江达海，内连湖泊，巨大的时空尺度差异使得数学模型较物理模型有很多优势，但也正因为时空尺度的差异以及众多工程的扰动，增加了数学模型耦合模拟的难度。Wang和Li[43]将平原河网不同尺度的水流运动进行不同维度的概化：湖泊（或蓄洪区）的零维、河道水流的一维、行洪区水流的二维，能够更好地模拟水流在不同区域的运动情况。采用疏密网格嵌套和二、三维计算区域嵌套，可以实现二维湖区与三维工程局部的大范围、全耦合、高精度河-湖-工程流场模拟[44]。在此基础上，结合前文提到的床面阻力的确定、水-沙-污染物的相互作用等方法，建立水-沙-污染物耦合输移数学模型，为流域/区域工程规划及单一工程多目标功能发挥提供有效的技术支撑。其中，泥沙-污染物耦合输移数学模型的方程如下：

$$\begin{cases} \frac{\partial N}{\partial t} + u \frac{\partial N}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} + w \frac{\partial N}{\partial z} = \varepsilon_x \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \varepsilon_y \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} + \varepsilon_z \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} + F_c \\ \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \varepsilon_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \varepsilon_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \varepsilon_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - F_c \cdot S \end{cases} \quad (4)$$

式中， $t$ 是时间； $x$ 、 $y$ 、 $z$ 是坐标系； $u$ 、 $v$ 、 $w$ 是三维流速； $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_z$ 是紊流扩散系数； $-F_c \cdot S$ 是从泥沙表面解吸附的污染物源项。

以上三维模型可以模拟水闸、泵站等工程局部污染物输移过程。针对具体河网情况，可以简化成一维、二维等数学模型进行计算。若考虑氨氮、化学需氧量、BOD等可降解物质的输运模拟，还需要考虑水体溶解氧的变化与水动力的关系以及物质的降解过程。

#### 3.2. 平原河网水动力的参数智能反演及实时模拟

大型河网河道多达几百、上千条，水流流动复杂，河网数学模型需要求解大型稀疏矩阵方程组，计算耗时长，难以满足多目标水力调控过程中快速生成方案的需求。智能模型使用人工智能技术模拟河流水动力过程，能够实现实时模拟，甚至可以解决部分资料缺乏的问题。例如，Ghalkhani等[45]将人工神经网络（ANN）和自适应神经模糊推理系统结合，应用于流域上游洪水演进实时模拟，训练所用的数据集预先用降雨-径流模型和洪水演进模型生成。Chen等[46]建立了将连续方程、模糊模式识别概念与ANN相结合的混合模型，应用于水库调度影响下河流

下游流量的预测。

在平原河网区，调控对象和调控目标大幅增多，物质输移过程更加复杂。而智能模型能够借助水流非线性系统辨识方法实现实时模拟，其关键就是对“调控-工程-水动力”之间存在的复杂非线性作用机理进行快速辨识。水流非线性系统辨识方法，就是指由实测信息的变化规律辨识出与实际水流规律最接近的最佳模型（模型结构式和模型结构参数）。水流系统辨识的数学形式可统一写成：

$$\min J = J \left( \left\| \text{mod}(T, O, Q) - \text{pho}(T, Q) \right\|_{\text{sys}} \right) \quad (5)$$

式中， $J$ 是评价水流系统（sys）模型的准则函数；pho、mod分别是水流系统的原型和模型； $Q$ 是水流系统的状态集； $T$ 是水流系统的条件集； $O$ 是水流系统模型的参数集； $\|\cdot\|_{\text{sys}}$ 是在水流系统sys上的某一范数。

利用ANN的一系列特性与能力（如非线性表达、自学习和泛化能力），辅以大量资料，建立基于ANN的水流系统模型辨识方法，快速确定与实际水流特征最接近的模型。网络训练的学习资料取自观测资料、物理模型试验资料，或成熟的数值模拟结果。利用训练好的模型即可辨识出水流数据间蕴藏的非线性关系。建立了基于遗传算法的平原河网流场参数通用智能反演模型，对参数集合进行选择算子、交叉算子和变异算子操作，实现河网水动力模拟多参数全局优化的智能快速反演[47]。

### 3.3. 平原河网多目标水力调控智能决策方法

#### 3.3.1. 目标函数

平原河网区由于地势平缓、比降较小，水流势能和动能都不大，除了高效利用潮汐能、水文节律等自然能量，水流能量还需要靠外源能量补充（泵站的作用），植被、沙波等床面形态还存在较大的能量损耗，这些都是其动力弱的重要原因。从水能的角度认识水闸、泵站、疏浚等河流治理工程的作用机理，对有限水能的优化至关重要。平原河流能量方程如下：

$$\frac{\partial E_e}{\partial x} = \rho \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E_p}{\partial x} - \frac{\partial E_f}{\partial x} \quad (6)$$

式中， $E_e$ 是单位体积水流能量，包括势能（ $\rho gh$ ）和动能（ $\rho U^2/2$ ）， $\rho$ 是水体密度， $h$ 是水位；第二项是非恒定过程引起的附加动能项； $E_p$ 是沿程输入的单位体积水流外源能量，比如水泵提供的水能； $E_f$ 是调控过程中的局部（比如水流流经水闸的局部水头损失）和沿程（比如植被、沙波等床面增加的水流阻力）的单位体积水流能量损失。

动能与势能之间的转化很多时候也能产生很好的经济、社会和生态环境效益。比如，利用水闸制造水位差，

将动能转化为势能，合理调配动力的时空变化过程，使其满足日常生态流量等需要。实现复杂水问题综合治理的最优化模型函数形式表示为：

$$\max \{M(\varphi), I(\varphi), L(\varphi), t\}, \quad \varphi \in \Omega$$

$$\text{st. } G(\varphi) \leq 0 \quad (7)$$

式中， $M$ 、 $I$ 、 $L$ 分别是经济效益函数（如灌溉效益）、社会效益函数（如区域防洪效益）和生态效益函数（如生物适应性）； $\Omega$ 是可行域； $G$ 是约束条件集。

#### 3.3.2. 智能决策方法

为了满足河流水流系统精细多目标管理的要求，可以尝试将智能模型集成到模拟-优化模型中。例如，Shokri等[48]集成了多目标非支配排序遗传算法、自适应学习人工神经网络（NSGAI-ALANN）算法和水质模型，用于水库突发水污染事件中的水量-水质优化调度；Skardi等[49]将多目标非支配归档蚁群优化（NA-ACO）算法与水文模型结合，优化了流域污染排放的管理。

平原河网闸泵等工程多，闸泵群优化调控满足多目标需求难度很大。传统的闸泵群调控方案采用枚举比选、逐步递推的方法得到，方案主观成分多、人工参与量大、优化程度低、时效性差，不能实现自动决策。为此，结合高精度数学模型与人工智能理论，构建了面向多目标的具有先验知识概念和智能化特征的平原河网水力调控智能决策方法（图3）。主要思路如下：①利用数学模型事先对假设的若干调控方案进行模拟，生成预案库；②使用预案库训练基于ANN的水力调控决策模型；③根据调控目标以及实时监测的水情水质数据等，经水力调控决策模型形成初步的河网水力调控方案；④通过数学模型对调控方案进行预判，如达到目标，即为最终的调控方案，如达不到，则需人工或自动干预对调控方案进行修正、再预判，直至达到最终的调控方案；⑤此时调控方案可作为新预案加入预案库，供水力调控决策模型学习。

## 4. 平原河网区水问题统筹治理原则

河网区水问题非常复杂、且相互交织，多目标治理需求也会随时空变化而变化。对此，提出了若干平原河网区复杂水问题统筹治理原则。

### 4.1. 构造比降、定期活水畅流

地势低洼、比降平缓、水流往复，是导致涝灾易发、水体恶化的重要原因。汛期使用水闸、泵站、溢流堰等工程人为构造比降，形成快速行洪的通道，减少涝水在洼

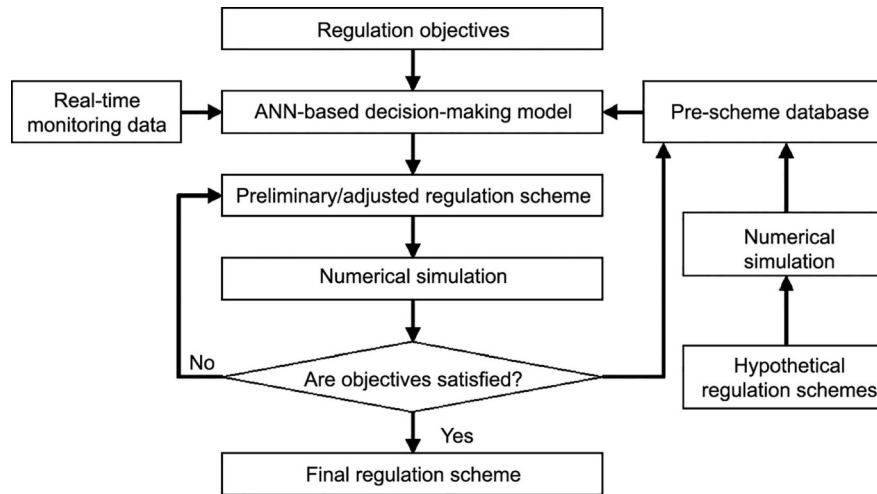


图3. 河网多目标水力调控智能决策框架图。

地、行蓄洪区等的滞留时间。在日常调度中，定期构造定向流动，活水畅流，减少振荡污染水体的滞留时间，保证水体环境承载力，同时也要防止底泥冲刷和污染物释放。

#### 4.2. 调整汛限水位、汛末洪水的资源化

各种水问题虽然不一定同时发生，但却相互关联、相互影响。比如径流年内分配极不平衡导致汛期水量大，易发洪涝灾害，而枯期水量小，导致水资源供需不平衡、河道生态流量不足。通过精准预报洪水过程，合理调整汛限水位，储蓄汛末洪水进行资源化利用。

#### 4.3. 注重日常调控、防止洪污同现

枯水期，水闸常呈关闭状态以储存水量。但由于各种点源、面源污染的汇入，停滞的水体自净能力差，水体恶化。等到汛期，开闸泄洪时，常出现洪峰与污峰同现的问题，造成下游水生生物的大量死亡。应重视日常水闸群的环境调控，构造可以保障水体自净的动力场。

#### 4.4. 潮汐能等自然动力的高效利用

平原河网区往往滨江临海，受潮汐干扰，江海的水位变动大。潮汐能作为一种清洁环保的自然动力，应该在平原河网区水动力重构中得到充分利用。可以通过联合调控水闸群，潮涨上游开闸引水、潮落下游开闸退水。利用潮差构造比降，增强水体动能，满足水体日常自净需求。

#### 4.5. 河网内部水流能量的优化配置

河网内部水流的能量也需要整体优化，需要遵循“耗损抑制、阈值控制、目标决策”的重构原则。尽量减小河槽糙率，抑制能量损耗，保障弱动力区水流的总体能量。水流动能必须在合理阈值范围内，过高或者过低都不利于防洪以及生态环境的保护。最后需要根据多目标需求优化

决策，构造最适宜的水动力场。

## 5. 工程应用

### 5.1. 研究区域

扬州市地处江淮交汇区域，境内河湖交错，水网纵横，是典型的平原河网地区。城区西部为丘陵山区、地势较高，东部沿江沿淮及里下河地区地势低洼，70%以上的地面高程低于江淮历史洪水位，洪涝易发。20世纪70年代以来，为了抵御淮水，城区相继建成瓜洲闸、扬州闸等69座水闸和64座泵站，逐渐形成各片“封闭分治”的防洪格局和排涝体系。

### 5.2. 问题分析

近年来，随着扬州市社会经济的高速发展，生产、生活废污水排放量增加，总磷、总氮等有机物污染超标，主城区和瘦西湖核心景区水质多为V类到劣V类，水体透明度低，局部河段水体黑臭。该地区面临着严峻的防洪安全保障、片区供水、景区水环境提升、水生态保障等水问题综合治理难题。为保障瘦西湖水系和西部水系供水，扬州市相继建成管道、河道两条入湖补水路线，城区内水系可与外围的京杭大运河、古运河、仪扬河等形成引排水线路。河道补水路线实现了中部水系与西部水系的互联互通，瘦西湖成为连接城区中部水系和西部水系的过流通道。每日引入瘦西湖-保障湖水系的水量约为700 000 m<sup>3</sup>，但景区水质提升效果却十分有限。主要原因有以下三点。

首先，由于扬州主城区地势以平原、圩区为主，加之闸站控制，片区内水系相对独立，水位变化不大。例如，瘦西湖水系片区河道长期水位为4.8~5.0 m。整个河网的

水位差小, 水流流动性很差。区域内水流流速缓慢, 甚至出现滞流, 局部河道往往死水一潭, 引发黑臭现象。因此, 需要泵站增加能量进行引排, 或利用水闸拦蓄水源, 存蓄势能形成水头差, 再由引水工程进行引排。但是, 区域内河道自然禀赋比较差, 例如, 当瘦西湖水系源水从邗沟流入保障湖时, 河道断面突增, 局部水头损失明显; 瘦西湖景区内河道蜿蜒曲折, 沿程水头损失加剧。外加动能和存蓄势能若得不到合理运用, 既消耗了大量能量, 又不能有效地改善河道流动性。

其次, 没有厘清河网中泥沙、污染物等介质与水动力之间的作用关系, 难以准确界定水动力调控标准。比如, 引水规模过大, 导致水体长期处于流动紊乱状态, 缺乏必要的净化沉淀机会。同时由于频繁换水, 湖泊内部难以形成稳定的生境, 在水动力作用下, 底泥中富集集聚的污染物还会不断释放到河道中。据2018年7月底监测结果显示, 底泥有机质中总磷浓度为 $2000\sim 500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 并以 $3000\sim 8000\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 的速度释放至水体中。2020年3月关闭平山堂泵站后, 湖区水体透明度反而平均提升了 $15\%\sim 80\%$ , 个别点提升 $150\%$ 。

最后, 闸泵工程体系的布局和调度方式也存在一定问题。在原有工程布局和调度规则下, 瘦西湖内部水流方向总体自北向南, 平山堂站引水方向自东向西, 两股水流交叉影响, 仅约 $25\%$ 的水量进入瘦西湖核心景区。当上游引水流量较大, 达到 $10\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下, 瘦西湖核心景区流速也只有 $0.01\sim 0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 局部还存在往复流。尤其在夜间, 平山堂泵站引水比例提升, 湖区由南向北的回流现象更明显, 进入河道的污水在河网中积存回荡, 使河道水质进一步恶化。此外, 分别控制漕河、北城河、小秦淮河等河道水流的高桥闸、便益门闸、钞关闸日常关闭, 导致这些河道水体基本处于静止状态, 加之沿线生活污水入河影响, 河道水质较差。而黄金坝闸站引水携带漕河、北城河部分污水西入瘦西湖, 进一步影响瘦西湖水质。

从以上分析发现, 以往的水利工程调控比较单一, 无法满足防洪以及日常水环境维持的要求。究其原因, 是强调水量对水环境提升的作用, 忽视了水动力的影响, 既浪费了水资源, 又没有达到良好的治理效果。基于水动力重构的理论, 利用河网中已建的水闸、泵站等水利工程体系联合调控水动力是该河网水问题综合治理的重要措施。

### 5.3. 系统构建与实施成效

首先, 基于多尺度水动力重构理论方法, 确定满足防洪除涝、活水提质等多目标的水动力时空格局。利用前文提到的植被、沙波阻力计算方法, 可以确定河网各河道的

糙率大小。利用水文资料以及调水试验, 可以检验糙率参数的准确性。考虑底泥对磷、氨氮等的吸附作用, 确定了西部城区和瘦西湖景区的生态流量阈值分别为 $5\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $3\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。从优化河网活水格局的角度, 为使工程联合调控能达到利于水体复氧、长效维持河道的水质状态的效果, 要保证调水时水流呈自北向南的单向流动, 同时保证水流流速大于 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

其次, 系统识别水动力场对扬州河网69座水闸和64座泵站的响应关系。建立水动力水质数学模型, 计算各调控方案下的河网水动力及水质时空分布, 结合调水实验, 建立闸泵工程调控方案库。通过对这些方案的学习, 建立水动力智能调控模型。该智能调控模型可以很好地模拟汛期洪水过程以及日常的水质变化过程, 极大提升了最优方案生成的速度, 为该地区防洪除涝和水质预测提供重要的技术支撑。

最后, 基于水力调控智能决策模型, 通过对瘦西湖景区和西部城区的水质提升的上百个工程布局和调度方案进行优化智能比选, 迅速给出满足引水规模合适、流量分配合理需求的扬州市活水提质工程设计和调度方案。在河网中、西部实施水系水源分离工程, 使得瘦西湖活水水源单独供给; 在中部水系采用闸泵调度优化和河道清淤等措施, 提升瘦西湖核心景区水流流动性和水环境容量, 改善景区外围河道水动力状况, 实现扬州市主城区水系水环境的综合治理。

在瘦西湖水系, 水质提升规划方案包括工程布局和调度的优化。实施前输水流量高达 $9\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , 但局部流速不足 $0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 方案执行后, 输水流量控制在 $3\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , 同时整体流速提升至 $0.02\sim 0.10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 河道水体由静到动, 达到生态流量阈值要求。景区内部核心河段由往复流动变为单向流动。活水格局得到明显改善, 进入西部城区和东部湖区的水量分配合理, 河道的生态需水量得到有效保障, 核心景区氨氮浓度从 $2.0\sim 8.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。水质均能够得到有效改善和维持, 城区水环境明显改善。

## 6. 结论

新时期背景下, 平原河网的治理从单一的水灾害治理向水灾害、水资源、水环境、水生态复杂水问题统筹治理转变。国家正在实施的长三角一体化、京津冀协同发展、淮河生态经济带和粤港澳大湾区建设等重大战略都位于平原区, 平原区水安全保障尤为重要。水动力是平原河网水问题综合治理的基本控制要素。针对水动力不适应的问题, 本文提出了平原河网水动力重构理论与技术体系, 包



括平原河网弱动力区多尺度水动力重构理论方法、水动力重构工程技术体系以及多目标水力调控技术。利用现有工程体系实现水动力时空分布重构,促使工程的单一功能向多功能转变以及平原河网区有限能量的均衡配置。统筹治理复杂水问题,同时节省水闸、泵站频繁启用的能量消耗,为实现“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”十六字治水方略,以及“双碳”目标做出贡献。未来还可以考虑土地和生态环境保护等需求,进一步扩展和完善该理论。

## 致谢

本研究由国家重点研发计划(2022YFC3202602)、国家自然科学基金(51779080;U2040205)资助。感谢河海大学肖洋、王玲玲、金光球、周健教授,李志鹏博士和印度理工学院、河海学者 Bidya Sagar Pani 教授对本文修改提供的帮助。

## Compliance with ethics guidelines

Hongwu Tang, Saiyu Yuan, and Hao Cao declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Liu C, Walling DE, He Y. Review: The International Sediment Initiative case studies of sediment problems in river basins and their management. *Int J Sediment Res* 2018;33(2):216–9.
- [2] Blum MD, Roberts HH. Drowning of the Mississippi Delta due to insufficient sediment supply and global sea-level rise. *Nat Geosci* 2009;2(7):488–91.
- [3] Baptist MJ, Penning WE, Duell H, Smits AJM, Geerling GW, Van der Lee GEM, et al. Assessment of the effects of cyclic floodplain rejuvenation on flood levels and biodiversity along the Rhine River. *River Res Appl* 2004; 20(3): 285–97.
- [4] Giakoumis T, Voulvoulis N. The transition of EU water policy towards the Water Framework Directive’s integrated river basin management paradigm. *Environ Manage* 2018;62(5):819–31.
- [5] Song X, Ravesteijn W, Frostell B, Wennersten R. Managing water resources for sustainable development: the case of integrated river basin management in China. *Water Sci Technol* 2010;61(2):499–506.
- [6] Ruan R. Theory and practice of improving water quality by water resources diversion in plain river-net areas. Beijing: China Water & Power Press; 2006. Chinese.
- [7] Tan P. The study on real-time optimization of water diversion project scheme on lowland river based on the variation of dissolved oxygen [dissertation]. Hangzhou: Zhejiang University; 2020. Chinese.
- [8] Wang Y. Study on the impact factors of the urban river water quality [dissertation]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology; 2013. Chinese.
- [9] Yi Y, Wang Z, Lu Y. Habitat suitability index model for Chinese Sturgeon in the Yangtze River. *Adv Water Sci* 2007;18(4):538–43. Chinese.
- [10] Zhong J, Zhang Q, Li X, Kang B. Effects of water velocity on the swimming behavior of *Anabarrilius grahami*. *Chin J Ecol* 2013;32(3):655–60. Chinese.
- [11] Shi X, Xu J, Huang Z, Katopodis C, Ban X, Kynard B, et al. A computer-based vision method to automatically determine the 2-dimensional flow-field preference of fish. *J Hydraul Res* 2019;57(4):598–602.
- [12] Chen Y, Liao W, Peng Q, Chen D, Gao Y. A summary of hydrology and hydrodynamics conditions of four Chinese carp’s spawning. *J Hydroecol* 2009; 2(2):130–3. Chinese.
- [13] Liao P, Hu X. Experimental study on the effect of flow velocity on algal growth. *Beijing Water Res* 2005;2:12–4. Chinese.
- [14] Arega F, Lee JHW, Tang H. Hydraulic jet control for river junction design of Yuen Long Bypass Floodway, Hong Kong. *J Hydraul Eng* 2008;134(1):23–33.
- [15] Tang H, Li F, Xiao Y, Xu X, Wang Z, Zhou C. Experimental study on effect of scour prevention and sedimentation promotion of bank protection of tetrahedron penetrating frame groups. *Port Waterw Eng* 2002; 34(9):25–8. Chinese.
- [16] Tang H, Lv S, Zhou Y, Xu X, Xiao Y. Water environment improvements in Zhenjiang City, China. *P I Civil Eng Munic* 2008;161(1):11–6.
- [17] Wang Y, Shen Z, Niu J, Liu R. Adsorption of phosphorus on sediments from the Three-Gorges Reservoir (China) and the relation with sediment compositions. *J Hazard Mater* 2009;162(1):92–8.
- [18] Dieter D, Herzog C, Hupfer M. Effects of drying on phosphorus uptake in re-flooded lake sediments. *Environ Sci Pollut Res Int* 2015;22(21):17065–81.
- [19] Zhu H, Zhang K, Zhong B, Wang D. Effects of particles and pore water in release of pollutants due to sediment resuspension. *Chin J Hydrodynam* 2011; 26(5):631–41. Chinese.
- [20] Zhou X, Huang T, Tang Y. Effect of flow turbulence on release of heavy metals in rivers. *J Hydraul Eng* 1994;11:22–5. Chinese.
- [21] Marion A, Zaramella M. Diffusive behavior of bedform-induced hyporheic exchange in rivers. *J Environ Eng* 2005;131(9):1260–6.
- [22] Marion A, Bellinello M, Guymer I, Packman A. Effect of bed form geometry on the penetration of nonreactive solutes into a streambed. *Water Resour Res* 2002;38(10):27–1–27–12.
- [23] Lee A, Aubeneau AF, Cardenas MB. The sensitivity of hyporheic exchange to fractal properties of riverbeds. *Water Resour Res* 2020;56(5): e2019WR026560.
- [24] Jin G, Tang H, Li L, Barry DA. Prolonged river water pollution due to variable-density flow and solute transport in the riverbed. *Water Resour Res* 2015;51(4): 1898–915.
- [25] Yi Q, Chen Q, Hu L, Shi W. Tracking nitrogen sources, transformation, and transport at a basin scale with complex plain river networks. *Environ Sci Technol* 2017;51(10):5396–403.
- [26] Chien N, Zhang R, Zhou Z. River fluvial mechanics. Beijing: Science Press; 1987. Chinese.
- [27] Yuan S, Tang H, Li K, Xu L, Xiao Y, Gualtieri C, et al. Hydrodynamics, sediment transport and morphological features at the confluence between the Yangtze River and the Poyang Lake. *Water Resour Res* 2021; 57(3): e2020WR028284.
- [28] Wang N, Zhang C, Xiao Y, Jin G, Li L. Transverse hyporheic flow in the cross-section of a compound river system. *Adv Water Resour* 2018; 122:263–77.
- [29] Nepf HM. Hydrodynamics of vegetated channels. *J Hydraul Res* 2012; 50(3): 262–79.
- [30] Poggi D, Porporato A, Ridolfi L, Albertson JD, Katul GG. The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence. *Bound-Lay Meteorol* 2004; 111(3):565–87.
- [31] Ghisalberti M, Nepf HM. Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows. *J Geophys Res-Oceans* 2002;107(C2):3-1-3-11.
- [32] Nepf HM, Ghisalberti M. Flow and transport in channels with submerged vegetation. *Acta Geophys* 2008;56(3):753–77.
- [33] Devi TB, Kumar B. Turbulent flow statistics of vegetative channel with seepage. *J Appl Geophys* 2015;123:267–76.
- [34] Caroppi G, Västilä K, Gualtieri P, Järvelä J, Giugni M, Rowin’ ski PM. Comparison of flexible and rigid vegetation induced shear layers in partly vegetated channels. *Water Resour Res* 2021;57(3):e2020WR028243.
- [35] Einstein HA, Barbarossa NL. River channel roughness. *Trans Am Soc Civ Eng* 1952;117(1):1121–32.
- [36] Maddux TB, Nelson JM, McLean SR. Turbulent flow over three-dimensional dunes: 1. free surface and flow response. *J Geophys Res Earth Surf* 2003; 108(F1):6009.
- [37] Colombini M, Stocchino A. Ripple and dune formation in rivers. *J Fluid Mech* 2011;673:121–31.
- [38] Raudkivi AJ. Transition from ripples to dunes. *J Hydraul Eng* 2006; 132(12): 1316–20.
- [39] Chien N, Wan Z. Mechanics of sediment transport. Reston: American Society of Civil Engineers; 1999.

- [40] Tang L, Wang X. Experimental study on three dimensional movements of particles I effects of particle diameter on velocity and concentration distributions. *Int J Sediment Res* 2009;24(2):159–68.
- [41] Tang L, Wang X. Experimental study on three dimensional movements of particles II effects of particle diameter on turbulence characteristics. *Int J Sediment Res* 2009;24(2):169–76.
- [42] Tsai CW. Flood routing in mild-sloped rivers—wave characteristics and downstream backwater effect. *J Hydrol* 2005;308(1–4):151–67.
- [43] Wang C, Li G. The modelling of basin flood. *J Hydraul Eng* 1996;27(3):44–50. Chinese.
- [44] Huang Z, Ma X, Wang L, Zhang Y, Cheng G, Hu Z. Application of a nested grid hydrodynamic model to discharge pattern simulation overhaul conditions of Sanhe sluice. *J Hohai Uni Nat Sci* 2012;6:653–8. Chinese.
- [45] Ghalkhani H, Golian S, Saghafian B, Farokhnia A, Shamseldin A. Application of surrogate artificial intelligent models for real-time flood routing. *Water Environ J* 2013;27(4):535–48.
- [46] Chen X, Chau K, Wang W. A novel hybrid neural network based on continuity equation and fuzzy pattern-recognition for downstream daily river discharge forecasting. *J Hydroinform* 2015;17(5):733–44.
- [47] Tang H, Xin X, Dai W, Xiao Y. Parameter identification for modeling river network using a genetic algorithm. *J Hydrodynam* 2010;22(2): 246–53.
- [48] Shokri A, Haddad OB, Mariño MA. Multi-objective quantity–quality reservoir operation in sudden pollution. *Water Resour Manage* 2014;28(2): 567–86.
- [49] Skardi MJE, Afshar A, Saadatpour M, Solis SS. Hybrid ACO–ANN-based multi-objective simulation–optimization model for pollutant load control at basin scale. *Environ Model Assess* 2015;20(1):29–39.