韩会玲,张剑,朱晓娟,等. 面向生态环境复苏的生态流量优化计算研究[J].环境科学与技术,2024,47(S1):235-247. Han Huiling, Zhang Jian, Zhu Xiaojuan, et al. Quantitative calculation & optimization of ecological flow for eco-environmental recovery[J]. Environmental Science & Technology, 2024,47(S1):235-247.

面向生态环境复苏的生态流量优化计算研究

韩会玲[1], 张剑[2], 朱晓娟[3], 付意成[2*], 李轩[1]

(1.河北农业大学,河北 保定 071001;
2.中国水利水电科学研究院,北京 100038;
3.廊坊市水利规划发展研究中心,河北 廊坊 065000)

摘 要:当前多数中小河流的水环境状况不容乐观,亟需开展河道的生态环境复苏工作,在河流生态流量确定过程中也存在计算方法不易推广和生态因子难以量化的问题。面向河道生境最大程度改善的河流生态复苏通常以水量保障和水环境改善为基础,并且也是对基于自然解决方案(NbS)中自然化修复理念的有效落实。为满足北方缺水河流的生态水量要求,该研究选取指示物种,借助二维水动力栖息地模拟模型和Penman-Monteith公式,开展恢复河流功能自然化、实现河流径流自然过程的研究。首先以恢复河流自然状态为目标,并以龙河作为典型河流在时空尺度开展指示物种-生态流量计算,得出相应生态流量及年最小生态需水量。然后以生态幅范围广且易于捕获的麦穗鱼为指示物种,开展产卵期(4-6月)、幼鱼期(7-11月)和成长期(12-3月)最适生态流量确定,3个时段对应的流量分别为3.22、4.30和10.81 m^3/s,典型河段芦苇的最小年生态需水量为1.51万m^3。计算结果均能满足陆域和水体指示物种的生理需水要求。以NbS为基础的生态流量计算方法适用范围广、结果代表性强,可用于流量小、流速低的北方中小河流的生态流量计算,利于实现河湖生态环境复苏。

关键词:生态环境复苏; NbS; 生态流量; 需水量; 龙河

中图分类号:X26 **文献标志码**:A **doi**:10.19672/j.cnki.1003-6504.1755.22.338 **文章编号**:1003-6504(2024)S1-0235-13

Quantitative Calculation & Optimization of Ecological Flow for Eco-environmental Recovery

HAN Huiling[1], ZHANG Jian[2], ZHU Xiaojuan[3], FU Yicheng[2*], LI Xuan[1]

(1. Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China;
2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
3. Langfang Development Research Center of Water Conservancy and Plan, Langfang 065000, China)

Abstract: At present, the health of the water ecosystems in most small and medium-sized river is worrying, and the protection and restoration of the natural ecology is prominent. The current difficulties in determining the ecological flow of rivers in northern China are the poor pertinence of methods and insufficient consideration of ecological factors. The ecological protection behavior based on Nature-based Solutions (NbS) is a key factor affecting the water ecological health, which is closely related to the regional water resources endowment and ecological protection goal. With help of physical habitat simulation and Penman-Monteith formula, the indicator species were selected to research the natural process of restoring river function and realizing river runoff. To restore the natural state of the river, taking Longhe as a typical river to carry out the ecological flow calculations at the time level. The corresponding ecological flow and annual minimum ecological water demand was obtained. The results showed that the ecological basic flow required for the oviposition period (4-6), the larval stage (7-11) and the developmental age (12-3) of pseudorasbora parva in the Long River (typical section) were 3.22, 4.30 and 10.81 m^3/s, respectively. The minimum annual ecological water requirement of reed is 15,100 m^3. The calculation results can meet the physiological water requirements of land and water indicator species. The ecological flow calculation method based on NbS can be used to calculate the ecological flow of small and medium-sized northern rivers.

Key words: eco-environmental recovery; NbS; ecological flow; water demand; Longhe river

《环境科学与技术》编辑部:(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期:2022-12-04;修回2023-03-08

基金项目:2020年廊坊市科技计划项目:基于自然理念的河流生态流量确定方法研究及应用(2020029024);水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07105-002);国家重点研发计划(2016YFC04014-08)

作者简介:韩会玲(1965-),女,教授,博士,主要从事节水灌溉、环境水利、水资源与水环境等方面的教学和科研工作,(电子信箱)13930256655@163.com;*通讯作者,男,教授级高级工程师,博士,主要从事流域生态保护修复研究,(电子信箱)swfyc@126.com。

目前，大多数河流生态系统受到人为干扰和自然变化的影响，其物种组成、群落结构和生态功能出现退化迹象[1,2]。生态流量的概念是为了遏制过度用水导致的河流生态系统退化而提出的，其定义没有统一的标准。基于自然的解决方案（NbS）利用生态系统及其提供的服务来应对社会发展过程中面临的挑战，如气候变化、粮食安全或自然灾害[3]。世界自然保护联盟（IUCN）认为NbS以恢复受扰动生境的自然化、生态化为目标，借助绿色、发展的理念对当前影响人类发展福祉的各种自然及人为干预进行有效协调，以实现区域生境的恢复及生态服务功能最大程度的改善[4-6]。除IUCN国际组织外，欧洲委员会（EC）及其他组织正在逐步的丰富和完善NbS的概念及内涵。NbS在我国以不同的形式被组织和个人以不同的主题开展研究，并被逐步推广应用。当前的研究通常将NbS与山水林田湖草系统治理的整体理念、系统设计、组织实施、绩效评价及监督管理等多环节相融合，使之逐渐发展成为指导我国河流生态复苏与流域生态保护修复工作开展的核心思想[7-9]。自20世纪70年代，生态系统服务功能的概念陆续被提出，随后，2005年的《千年生态系统评估》为执行生态系统保护政策提供了有力证据。为逐步提升生态系统的服务功能，基于NbS的河流生态复苏在强化生态修复规划举措实施功效的基础上，还应强化河道的生态空间划定的合理性，突出水体本身及空间的生态化治理方案的科学性和合理性，实现河流量质域的一体化管控。

生态流量计算方法的综合运用，极大丰富了中国河流生态流量保障水平[10]。但大多计算方法没有充分考虑河流地形地貌、水体物理化学特征、物质流-信息流-物种流等因素，因此，计算结果仅能满足指示物种的生态需求，但不一定能满足流域水生态系统的需求。从20世纪90年代开始，随着流域管理和河流水生态保护的需要，生态流量研究方法出现整合、扩张和融合阶段[11]。“现代”生态流量发展的时间流程见图1。为减弱人类活动对河流生态系统的影响，实现自然本身的价值，学者提出借助NbS的理念解决传统工程干预，以实现经济增长和可持续发展双重目标[12]。面向NbS的流域绿色发展机制应从流域生态系统本身的需求出发，反映水资源的时空变化对自然变化和生物生理变化的影响，为实现多样化的生态价值提供基础。就生物多样性而言，生态空间变化为其生理诉求及适应性的多元化提供了基础[13]。借助NbS在指导流域水生态系统恢复、灾害风险评估、系统运行完善方面的成功经验，从流域生态本体的诉求着手，分析生物生理变化引起的需水量和栖息地面积的变化，在综合分析和科学测算的基础上合理确定河流生态流量。基于NbS的生态流量研究已成为评估淡水物种、群落结构和河流生态系统动态需水量的一种定量技术，已从基于局部河段的分析扩展到面向流域/区域尺度的评估研究，为大型河流保护和生态恢复提供技术支持，利于水资源综合管理及气候变化适应性、可持续发展目标的实施[14,15]。论文基于北方缺水河流的生态需水现状，选取指示物种，借助栖息地模拟法和Penman-Monteith公式，提供生境适宜性曲线图，开展恢复河流功能自然化、实现河流径流有序下泄过程的研究，以满足生态服务功能提升的需要。论文开展基于NbS的河流生态流量/水量计算，旨在建立一种以水流自然化恢复为核心的生态流量计算方法并探求其适用范围，为野生和受保护的生物提供生态流量。

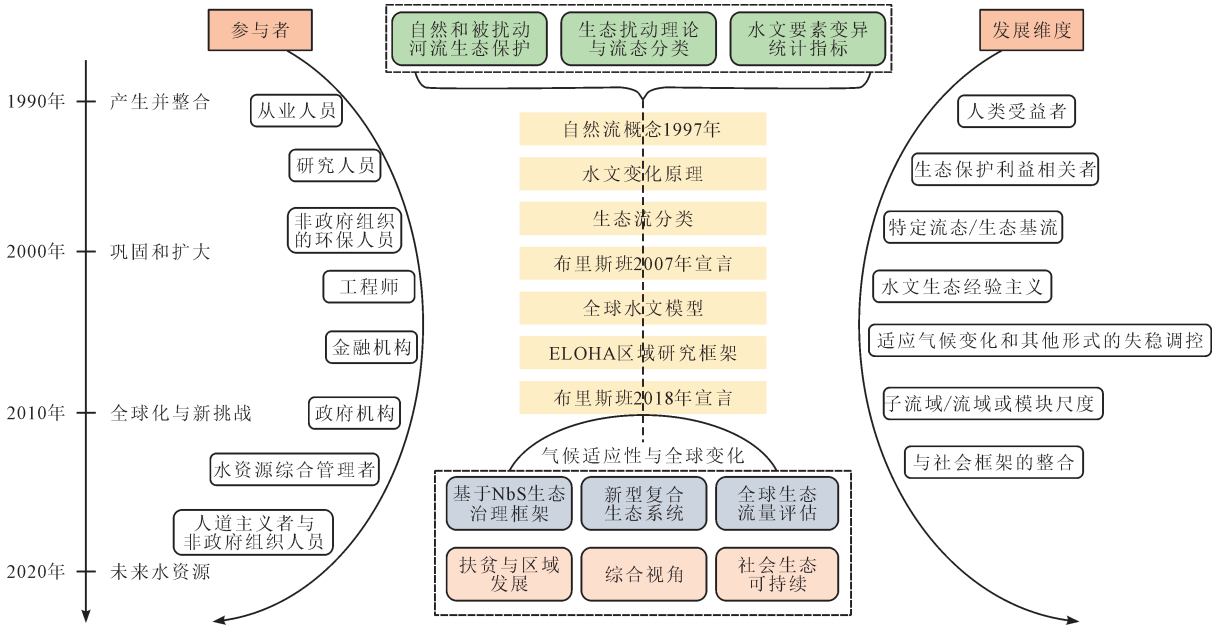


图1 “现代”生态流量发展框架

1　计算框架

北方中小河流最突出的特点是天然来水量少、自然水文节律消失，长时间的河道断流对河流生态系统造成严重影响。国外学者对生态流量进行了系统研究，经过几十年的发展，经历了理论萌芽、普及扩展、水文生态视角发展3个阶段。在量化计算与评估方面积累了大量的理论成果与科学测算经验[16-19]：在理论萌芽阶段，主要侧重于单个因素观测/监测数据的分析，缺乏系统的计算方法；在推广和扩展阶段，美国从生物多样性保护层面开展生态流量策略制定研究，欧洲、非洲、大洋洲等地区的研究则紧密结合区域的国情、水情和河流保护需求，对生态流量的内涵进行拓展和丰富，这一阶段最主要研究成果体现在各类数字化计算方法的研发和普及方面；在水文-生态结合阶段，一些国家和地区已经借助政策开展了两者之间耦合关系的探索，借助实践经验形成了基于水文变化与生态响应关系的多元化生态流量计算模式。学者基于对河流流态特征的概化，在对生态作用和流态变化的影响因素进行分析的基础上，借助“自然流动模式”对河流生态系统的结构和功能、水生生物的适应性进行研究。论文基于NbS，阐述了河流生态流量在维持水生生物多样性方面的重要性，并对负面生态影响的驱动机制进行了分析。河流生态流量的表现形式及调控过程见图2。

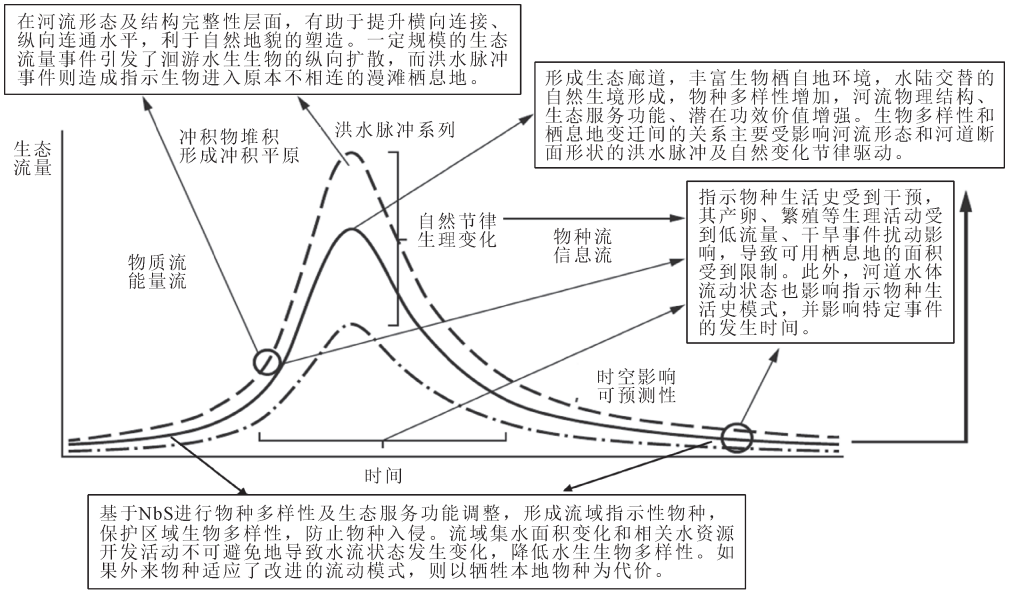


图2 河流生态流量的表现形式及调控过程

我国对生态流量理论的研究相对滞后，与当前流域生态保护的行动不相适应。最小生态流量的计算始于20世纪70年代的西北地区水资源开发利用规划。国内不仅有生态流量这一提法，还有诸如环境流量类似的提法，虽然名称类似，但内涵有所差别，对应的分析方法也不尽相同[15,20-23]。生态流量的研究工作主要将国际上已有的生态流量/生态需水的计算方法与国内的区域特点相结合，突出方法的可行性。随着国内生态保护理念的日益深入，学者根据我国的流域现状，改进和发展了生态流量的计算思路。在水资源短缺、水生态问题日益严峻的情况下，流域管理机构开始关注水资源配置中的生态环境用水需求问题，并结合功能分类和生态修复、生态健康的评价理论，对生态流量的一些方法进行深入探索、分析和总结。河流生态系统对变化的生态流量响应关系反映了一系列特定环境、历史流量变化和个别洪峰脉冲在河流管理中的作用[24]。河流流量-生态响应关系具有复杂性[25]。河流指示物种和生态系统间的适应性分析见表1。对河流流态改变程度与生态保护模式间关系进行多元分析，有助于揭示河流物种和生态系统间潜在的因果关系[26]。

生物栖息地的物理状况对种群的活动和健康状况具有重要影响。一般来说，生物栖息地的多样性与种群类型、生活习性和生物个体的分布及数量变化密切相关。河流适宜栖息地的面积受流速、水深、河床基质构成和水面大小、地形地貌特点、植被覆盖率等因素的影响。考虑到鱼类的生活习性，在对数据资料进行分析的基础上，从水文条件变异性、物种丰富度、生物生长周期及生理节律、生态空间变化等方面着手进行生物栖息地影响因素分析[27]。生物基本生理需水量的计算，通常以水流的天然变化节律和生物生理变化需求为基础，采用Tennant法或ELOHA框架法开展量化研究。在对流域水生态监测信息、水文系列数据进行分析的基础上，通常采用自然水流敏感期和水文变化范围法开展面向自然水流范式的生态流量优化

表1 河流生态流量与生态系统多样性关系研究

河流生态流量改变程度	生态响应机制	生态影响
生态基流减缓	河流流速减缓,河岸带栖息地(线性)和陆域栖息地面积减少,河道断面横向、纵向联系被切断	流域水生生物种群密度和丰度下降,甚至某些物种灭绝;陆生生物入侵河岸带和河床岸坡
洪水规模和发生频次减少	指示生物生活史受到干扰导致物种流、信息流改变减少洪水干扰频率和破坏程度;冲积平原养分输入阻断和生产力丧失	河道水文节律变化和破碎化景观影响鱼类生境;鸟类、水生植物和浮游生物的丰富度和功能多样性下降;大型水生植物生物量增加,多样性减少降低;生态系统生产能力,减少渔业产量
漫滩洪水发生频次减少	洪水脉冲优势丧失;用于开展人工养殖、生物自然繁育的湿地面积减少	依赖于河漫滩进行生理活动的生物种群密度降低;水鸟等涉禽、游禽等物种丰富度较低
增加生态基流(人工干预)	静水环境和低流速动水环境下的栖息地功能丧失干旱事件的损失降低	逐步改变的物种组成适应永久流动的动水栖息地环境;增加生物膜的代谢活性和叶绿素*a*的生产力,致使消费者密度和生物量(大型无脊椎动物)增加
增加生态流量可变性(洪水脉冲峰值)	河道频繁的干涸和泛滥对流域生态系统稳定起到扰动作用	由于指示生物的虫卵、幼虫和成虫的死亡率增加,种群数量下降;指示物种丰富度降低和物种组成改变
减少生态流量可变性	降低大规模洪水流速和发生频次干扰	造成非本土植被和鱼类入侵

计算[28]。本文以NbS为理论基础,在进行生态流量/生态需水综合测算的基础上,采用栖息地模拟方法对指示鱼的生态流量变化过程进行研究,以满足流域生态流量下泄及鱼类保护目标的需要。为实现河流生态流量恢复并保护河流生态服务功能多元化,应以水文分析为基础,根据选定的流量指标将河段进行细化,分析不同河流类型对流量的生态响应关系,建立基于NbS的生态流量计算框架(图3)。

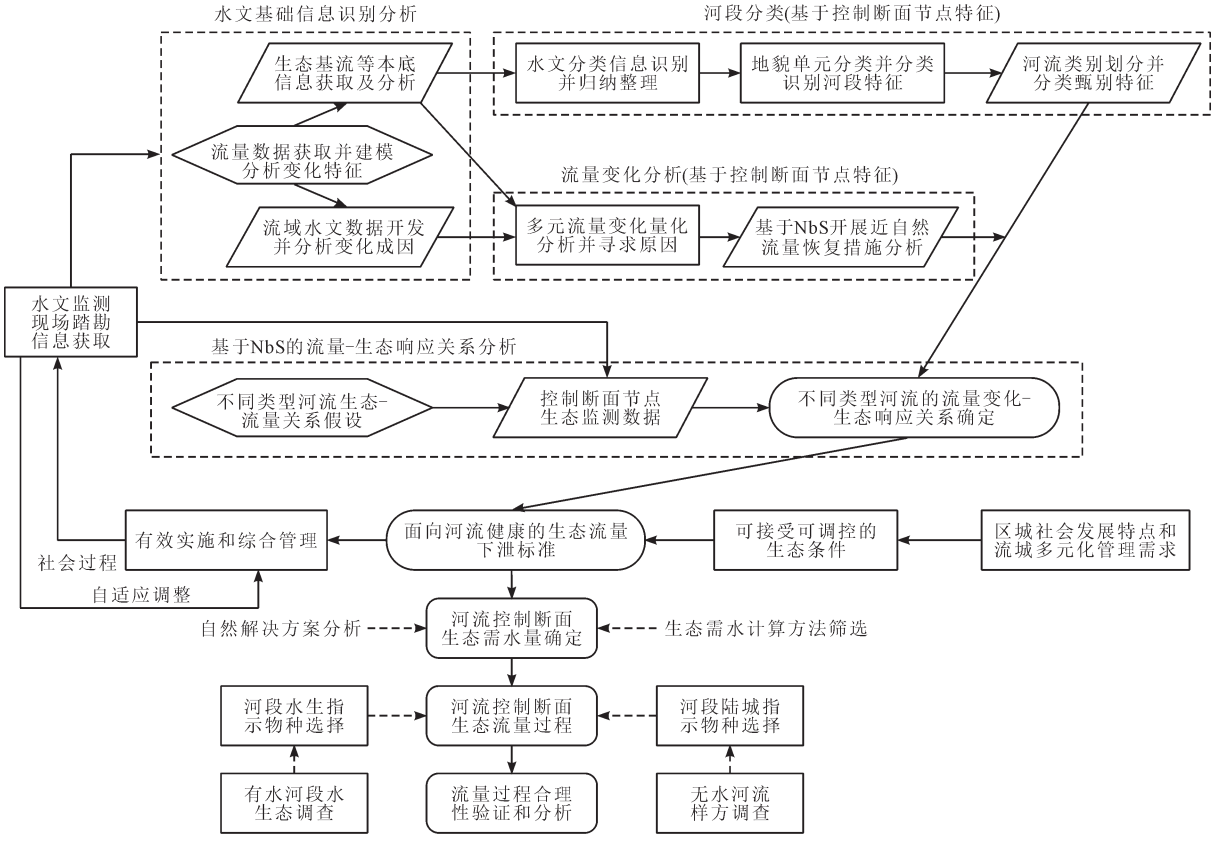


图3 基于NbS的生态流量计算框架

2 方法优化

2.1 指示物种

在确定典型河段生态流量的过程中,如何选择合适的指示物种并构建该物种对流量过程的适宜性曲线至关重要。论文根据研究区生物多样性及生态现状,结合河道径流变化及地形地貌特点选择具有代表性的指示物种。国际上通常将鲑鱼和鲟鱼作为生态

流量的指示物种，但这在中国北方的河流中一般不适用。在中国被广泛用于确定生态流量变化阈值的4种典型鱼类为青鱼、草鱼、鲢鱼和鳙鱼，但上述鱼类因在华北地区河流中的种群数量不大且分布不均匀，对评价华北地区河流生态恢复的意义不大[29]。因此，选择典型的本地优势鱼类作为指示水生生物，可以最大程度地保护区域河流生态多样性，利于指导区域生态补水工作的开展。

水生植物的分布和数量与生境的变化密切相关。水分的多少在一定程度上影响了植物群落的结构变化和群落演替方向。水生植被会适应由水体条件变化引起的变化。不同植被群落对水分变化的响应强度和敏感性不同，可能会产生不同的演变过程或结果[30]。在确定河流生态流量的过程中，选择河岸植被作为指示物种，能充分表征河流的水平连通性。河岸植被主要受漫滩流量影响，对确定典型生物的敏感生态流量具有一定的参考价值，但一些人工扰动较大的河流河岸带植被覆盖率较低[31]。因此，选择生命力强、需水特征明显的优势种群作为指示物种是指导生态流量制定的有效手段。

2.2　生态流量

多数生态流量的确定以地表水的水文特征为基础，是指示生物栖息地水深、流速和地形地貌的综合函数。IFIM的物理栖息地模拟模块（PHABSIM）计算过程简单、数据便于获取，计算结果可对河流受损状况进行直接反映，利于恢复受人为干扰河流的临界流量（图4）。生境适宜性（S_i）用来表示生物对不同生境条件（流速、水深和河床基质）的耐受性。依据适宜性值开展面积（A_j）的河流分段，以确定指示鱼类可用的栖息地面积（WUA）。指示鱼类WUA的关系通常被认为是线性的（图4(a)），也可以不同的形式出现，即不存在相关性（图4(b)）、非线性（图4(c)）、复杂多变关系（图4(d)）。

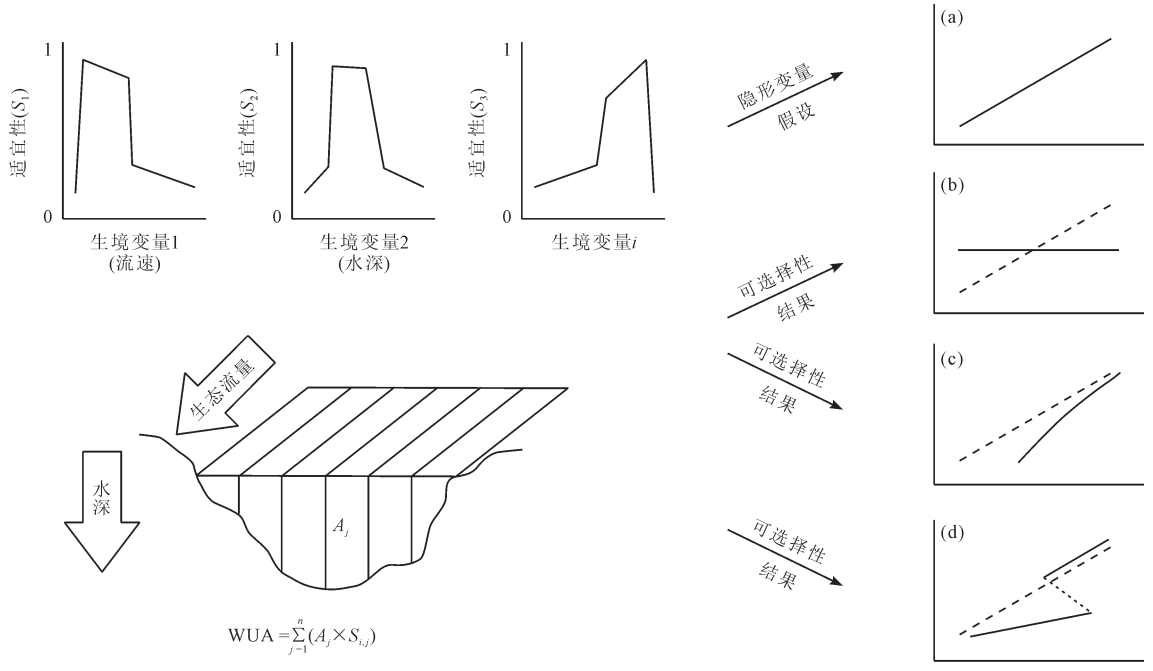


图4 PHABSIM模块主要特点

当前多数河流受人为开发活动影响，自然环境条件发生变化。河流生态流量的确定过程即为采用水动力鱼类生境模拟方法，寻求最小流量阈值，以模拟指示鱼类生境，评估河流生态健康。利用一维水动力模型模拟鱼类栖息地环境，是以往研究中计算生态流量和环境流量的常用方法。由于河流结构及水力条件的复杂性，二维水动力模型已被应用于开展鱼类适宜栖息地环境的模拟[32,33]。论文采用二维水动力模型River2D模型在考虑指示鱼类栖息地环境的情况下开展生态流量计算。物理栖息地模型以河流生态水动力分析为基础，用于分析流量变化对物理栖息地的影响。River2D的水动力模块基于St. Venant方程开展计算，该方程以保守形式表示平均水深。计算过程中，首先在研究河段中选取代表性控制断面，通过现场测量获得各断面的河底高程数据；在控制水文站至少测算3次流量变化过程，联合确定最适生态流量，并根据修正流量对应的水深和流速开展水文要素分析。论文将河流地形信息、流量、水深和适宜性指数作为River2D模型的输入数据，采用x、y方向的质量守恒方程和动量守恒方程进行计算。

$$\text{质量守恒方程：}\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}=0 \qquad (1)$$

$$x方向动量守恒方程:\frac{\partial q_x}{\partial t}+\frac{\partial(U\cdot q_x)}{\partial x}+\frac{\partial(V\cdot q_x)}{\partial y}+\frac{g}{2}\cdot\frac{\partial H^2}{\partial x}=g\cdot H(S_{0x}-S_{fx})+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial H\tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial H\tau_{xy}}{\partial y}\right) \quad (2)$$

$$y方向动量守恒方程:\frac{\partial q_y}{\partial t}+\frac{\partial(U\cdot q_y)}{\partial x}+\frac{\partial(V\cdot q_y)}{\partial y}+\frac{g}{2}\cdot\frac{\partial H^2}{\partial y}=g\cdot H(S_{0y}-S_{fy})+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial H\tau_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial H\tau_{yy}}{\partial y}\right) \quad (3)$$

式中,H为河段平均水深;U、V分别为x、y方向的平均流速;q_x、q_y分别为x、y方向的流量;g是重力加速度,ρ为水的密度;S_{0x}和S_{0y}分别为x和y方向上的底部斜率;S_{fx}和S_{fy}分别为x、y方向摩阻坡度斜率;τ_{xx}、τ_{xy}、τ_{yx}、τ_{yy}为所示方向上的剪应力值。

以PHABSIM模块鱼类栖息地模型加权可用面积(WUA)计算过程为基础,确定指示鱼类栖息地面积计算方法:

$$\mathrm{WUA}=\sum_{i=1}^{n}A_i\times C_i \quad (4)$$

式中,A_i为控制单元的截面积,C_i为控制单元的适宜性指数HIS(水深、流速、河床基质综合函数)。

论文利用研究区实测数据确定模型计算的初始条件和边界条件,计算不同流量下的自然栖息地总面积WUA。生态临界流量Q_B为在考虑物种多样性的情况下,种群不同比例的WUA之和最大时的流量。

$$Q_B=\max\left[Q_j\times\sum_{k}^{N}(\omega_k\times \mathrm{WUA}_k)\right] \quad (5)$$

式中,k为流域鱼种类数,ω_k为鱼群总数N中第k种鱼群数量n,j为流量变化的次数。

Q_B可通过生活在其中的整个物种或选择具有代表性的物种来估计。论文选择指示鱼类作为目标种,评价其生态响应状况,计算相应的WUA值。

2.3 生态需水

影响植被生态需水量确定的因素主要包括气候因素、土壤水分和植被种类差异。论文将植被的实际需水量视为植被的生态需水量。植被蒸散发主要由研究区植被类型和气象条件决定。植被蒸散发系数能反映植被本身的生物学特性,主要受植被群落生长周期长短、叶面指数等因素的影响。对于河流湿地植被来说,植被需水量的满足程度可以通过实际蒸散发量与对应植被生长条件下的植被需水量的差值进行计算。

论文采用改进的Penman-Monteith公式计算植物蒸散发量[34]。计算公式为:

$$\begin{cases}\mathrm{ET}_c=K_c\times K_s\times \mathrm{ET}_0\\ W_p=\dfrac{\mathrm{ET}_c\times A_p}{1\,000}\end{cases} \quad (6)$$

式中,ET_c为植被蒸腾量,mm;ET_0为指示植被蒸散量,mm;K_c为植被蒸散发系数;K_s为土壤水分极限系数;W_p为植被生态需水量,m^3;A_p为植被分布面积,m^2。

论文采用改进的Penman公式,通过计算植被的潜在蒸散发量以确定其实际需水量。植被潜在蒸散发量计算公式为:

$$\mathrm{ET}_0=[0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\times\frac{900\times(\mathrm{e}_s-\mathrm{e}_a)}{T+273}]/[\Delta+\gamma(\mathrm{I}+0.34u_2)] \quad (7)$$

式中,R_n为植被冠层表面净辐射,MJ/(m^2·d);G为土壤热通量,MJ/(m^2·d);T为平均温度,℃;e_s为饱和蒸气压,kPa;e_a为实际水汽压,kPa;Δ为T时饱和水汽压与空气温度的切线斜率,kPa/℃;γ为湿度计常数,kPa/℃;U_2是高度为2 m时的风速,m/s。

论文借助统计回归模型的组合评估K_c,使用Penman-Monteith模型,利用K_c值乘以ET_0转换为ET_c值。在模型$f(x)$中,变量与计算Penman-Monteith方程的变量相同[35]。线性回归模型描述如下:

$$\begin{cases}a.\mathrm{ET}_c=K_c\times \mathrm{ET}_0 \quad K_c=f(\mathrm{day})+\xi\\ b.\mathrm{ET}_c=K_c\times \mathrm{ET}_0 \quad K_c=f(\mathrm{LAI},\mathrm{day})+\xi\\ c.\mathrm{ET}_c=f(\mathrm{LAI},\mathrm{day})+\xi\\ d.\mathrm{ET}_c=f(T_{\mathrm{mean}},\mathrm{RH}_{\mathrm{mean}},U_{10,\mathrm{mean}},R_n,\mathrm{day})+\xi\\ e.\mathrm{ET}_c=f(T_{\mathrm{mean}},\mathrm{RH}_{\mathrm{mean}},U_{10,\mathrm{mean}},R_n,\mathrm{LAI},\mathrm{day})+\xi\\ f.\mathrm{ET}_c=f(T_{\mathrm{min}},T_{\mathrm{max}},\mathrm{RH}_{\mathrm{min}},\mathrm{RH}_{\mathrm{max}},U_2,R_n,\mathrm{LAI},\mathrm{day})+\xi\end{cases} \quad (8)$$

单作物蒸发系数受蒸腾作用和土壤蒸发作用综合影响。为了区分蒸腾和蒸发效应,本文引入双作物系数(K_{cb})的概念:

$$K_{c-\mathrm{dual}}=K_{cb}+K_e \quad (9)$$

式中,K_{cb}为作物蒸腾作用,K_e为土壤水分蒸发作用。

K_{cb}和K_e的计算公式如下:

$$K_{cb}=\frac{T}{\mathrm{ET}_0}\qquad K_e=\frac{E}{\mathrm{ET}_0} \quad (10)$$

FAO-56给出了平稳风速(U_2为2 m/s)和最小相对湿度($\mathrm{RH}_{\mathrm{min}}$)为45%的半湿润地区的$K_c$值。论文计算出

的单作物和双作物系数与FAO-56推荐值进行了比较[36]。由于研究区属于半干旱气候区，为便于论文研究得到的作物系数与FAO-56的作物系数进行比较，将研究时段中、时段末的K_c、K_{cb}值按下列公式进行调整：

$$\begin{cases} K_{c-\mathrm{mid,end}} = K_{c-\mathrm{FAO}} + [0.04(U_2-2) - 0.004(\mathrm{RH_{min}}-45)](\dfrac{h}{3})^{0.3} \\ K_{cb-\mathrm{mid,end}} = K_{cb-\mathrm{FAO}} + [0.04(U_2-2) - 0.004(\mathrm{RH_{min}}-45)](\dfrac{h}{3})^{0.3} \end{cases} \tag{11}$$

在统计分析中，采用Tukey检验来确定处理计算结果是否具有统计学显著性。

此外，在考虑植被本身生态学特性的基础上，K_c的测定受植被生长期长短、叶面指数等因素的影响。论文采用联合国粮农组织提出的作物系数分段法确定K_c[37]。在确定K_c的过程中，需要对植被生长发育和生长后期的植被蒸散系数上下限阈值取平均值。生长初期的植被蒸散发系数$K_{c,\mathrm{ini}}$与研究区土壤湿度的时空变化有关。

根据叶面积指数确定生长中期的植被系数$K_{c,\mathrm{mid}}$。计算公式为：

$$\begin{cases} K_{c,\mathrm{mid}} = K_{cp} + (0.05\sim0.10) \\ K_{cp} = K_{c,\min} + (K_{\mathrm{cfull}} - K_{c,\min}) \times (1 - \mathrm{e}^{-0.7\mathrm{LAI}}) \\ K_{\mathrm{cfull}} = K_{c,h} + 0.04[(u_2-2) - (\mathrm{RH_{min}}-45)(\dfrac{h}{a})^{0.3}] \\ \mathrm{LAI} = \mathrm{LAI_{den}}(\dfrac{P}{P_{\mathrm{den}}})^{\beta} \end{cases} \tag{12}$$

式中，K_{cp}为不完全覆盖条件下的植被系数；$K_{c,\min}$为无植被覆盖时裸地植被系数的最小值，通常取0.15~0.20；K_{cfull}为植被全覆盖条件下的植被系数；$K_{c,h}$为标准风速，即为湿度条件下的全覆盖植被系数，当$h\geqslant2$时，$K_{c,h}\leqslant1.2$，当$h<2$时，$K_{c,h}=1+0.1h$；$\mathrm{RH_{min}}$为计算期内的日平均最小相对湿度，%；h为计算期内的平均株高，m；P为实际生长条件下单位地被面积的植物数；LAI为实际叶面积指数；P_{den}为正常生长密度或原始生长条件下的单位地表覆盖度，当植被旺盛生长时，β=0.5；当植被生长不旺盛时，β=1。

生长后期的植被系数$K_{c,\mathrm{end}}$可以根据植被的生长状况和叶面积指数按一定比例确定。根据研究区植被实测数据反演$K_{c,\mathrm{end}}$。

3　研究区概况

廊坊市位于华北平原东北部，属海河流域中下游，多年平均降雨量539.7 mm、蒸发量1 033.6 mm。雨量年内分配不均，降水集中在汛期6-9月，约占全年的80%。廊坊市河网密布，流域面积大于50 km²的河流112条。

龙河发源于北京市的大兴区，全长68 km，流域总面积为578 km²。龙河控制断面的水位、流量变化受人工控制严重，自调控能力差。河道流量变化多受人工调控，自然变化节律基本消失，河流生态需水过程得不到满足。流域水体及岸边的植被单一、生物多样性差。水力学模型以龙河北昌站~东张务河段为模拟对象。在研究河段上选取了北昌站、永丰闸、岳庄站和东张务站4个断面作为龙河代表性断面，每个断面的平均距离约为4.6 km。龙河流域概况见图5。

4　结果分析与讨论

4.1　适宜流量确定

龙河是永定河一级支流，受流域水系特征及区域发展的影响，龙河与永定河的连通性较好，流域内的水生生物群落分布特性与永定河流域相似度高。永定河水系已有鱼类的分布参考学者对河北省淡水鱼类分类学资料的总结及采样调查数据，永定河鱼类种群共计36种[38,39]。论文通过查阅资料、专家咨询和现场调查，选用永定河水系指示性鱼类的物种名录作为龙河流域的指示生物的识别基础。本文根据对永定河水系鱼类群落组成和空间分布状况开展分析，麦穗鱼是永定河水系常见的鱼类。在综合统计数据、现场捕获鱼类的种类及数量信息的基础上，从流域指示鱼类的特征上分析，选取麦穗鱼为龙河指示物种进行生态流量确定研究。

结合现场调查及统计数据，每年大致4-6月为麦穗鱼的产卵期，幼鱼期和成年期的划分主要基于麦穗鱼体重的日均增量变化数据划分，在划分过程中也参考了不同时期麦穗鱼的平均体长、总长度和特定生长率等数据[40,41]。依托2010-2020年每年4-11月现场对龙河北昌站、永丰闸站、岳庄站、东张务站的日流量、水位变化数据进行分析，流速在0.05~2.0 m/s之间变动，水位差则在0.8~2.4 m之间。在2010-2020年期间，每年选择4月20日、9月20日对固定断面的河床基

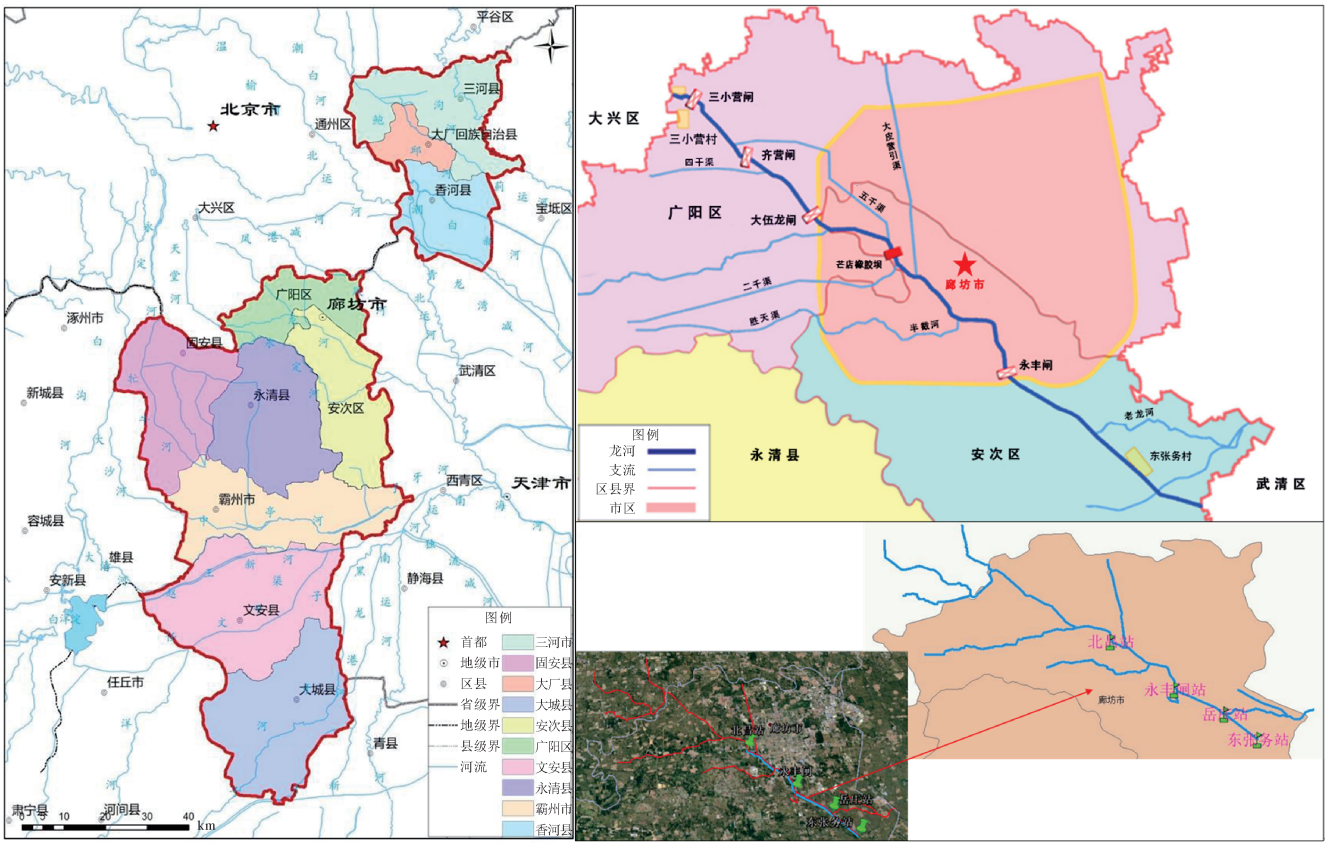


图5 龙河流域图

质进行取样分析。结合水深、平均流速和河床基质中值，建立功能回归模型(FRM)预测水位-流量关系曲线的变异点，绘制麦穗鱼在不同生长期的生境适宜性指数变化过程线，见表2、图6。

表2 不同生理周期下的麦穗鱼水位-流量关系曲线

生理周期	水位变化/m	适应性系数	流速/(m·s^{-1})	拟合系数	时间
	0	0	0	0	
产卵期	0.3~1.0	1	0.2~1.0	1	4-6月
	1.5	0	1.5	0	
	0	0	0	0.2	
幼鱼期	0.5~1.5	1	0.5~1.2	1	7-11月
	1.8	0	1.5	0	
	0	0	0	0.3	
成长期	0.3~2.0	1	0.5~1.5	1	12-3月
	2.5	0	2.0	0	

本文利用多元线性回归-模糊赋权法对龙河廊坊段所在流域的最佳栖息地面积(流速和深度的加权系数分别为0.5)进行确定，在此基础上，借助算术平均法获取研究河段的WUA曲线。各模拟流量下WUA适宜栖息地面积值及其变化趋势见表3、图7。考虑到麦穗鱼生存范围广、适应空间变化范围大等特点，同时龙河在枯水期、丰水期进行多次闸坝调度，水位及流量变化频繁，并且受人为调控影响较大，导致在麦穗鱼的不同生理期内不同曲线的拟合度普遍在0.5~0.75间，在天然河道中拟合度提升空间较大。

从图7可以看出，在典型河段，WUA在麦穗鱼的各个生长阶段随着流量的增加呈现出增大的趋势，在某一流量的综合影响下达到峰值。然后，受外界因素的干扰，WUA有所减少，且减少的幅度逐渐降低。

龙河河道水面开阔，宽深比小，非汛期流速变化不明显。处于WUA-流量曲线转折点处的值，即为满足指示鱼类的最佳需求流量(表3、图7)。综合计算出龙河不同时期的生态流量设定目标值，可最大限度地满足麦穗鱼不同生理阶段的生长及空间要求，有效改善河道多元生物的栖息地环境。龙河各时期的适宜生态流量见表4。

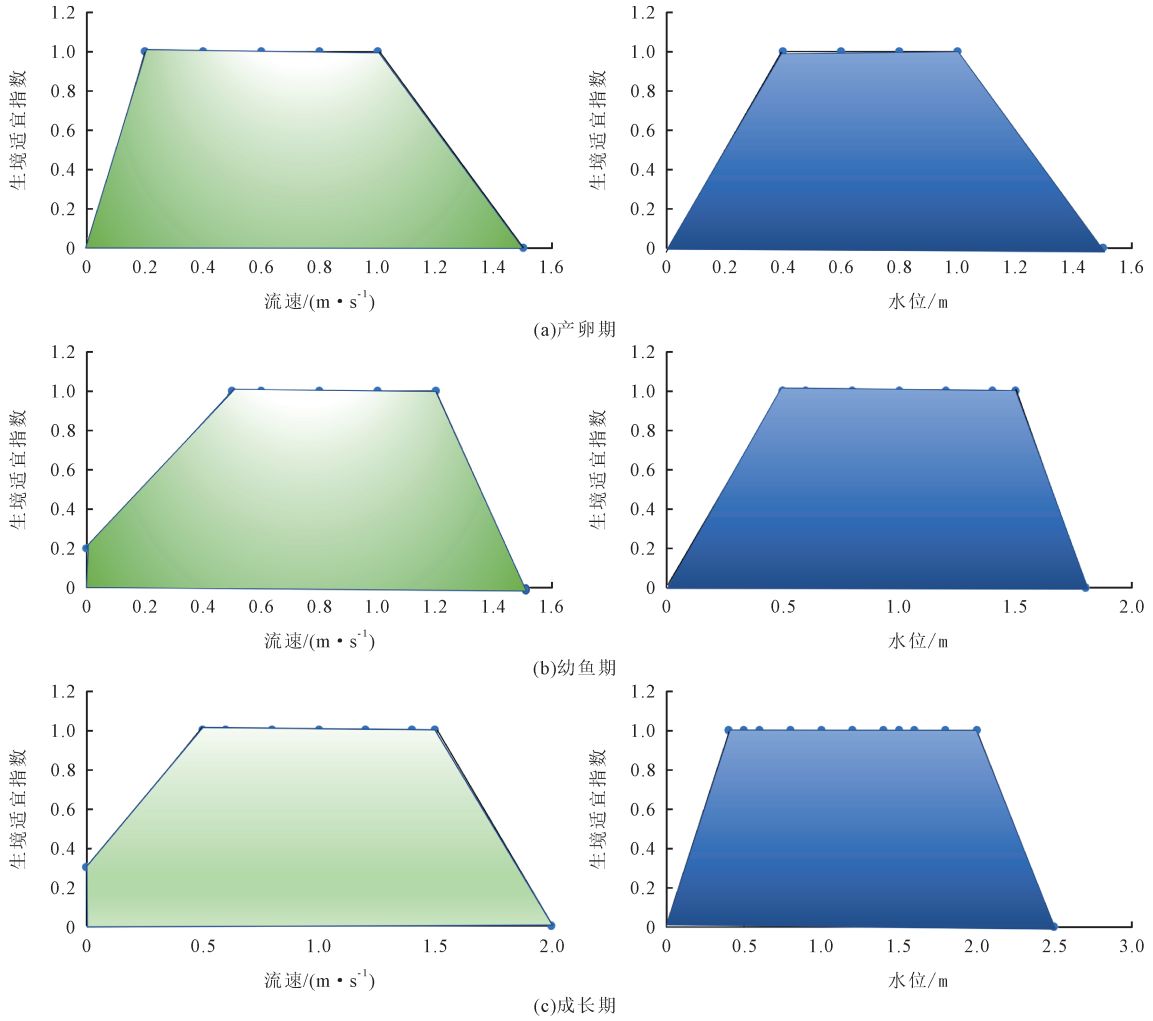


图6 麦穗鱼不同生理期适宜性曲线

表3　典型河段麦穗鱼WUA曲线拟合率定结果

流量/(m³·s⁻¹)	WUA/m²		
	产卵期(4–6月)	幼鱼期(7–11月)	成长期(12–3月)
0.22	3 447	6 251	3 363
0.86	5 030	8 134	5 136
1.51	6 446	9 652	6 638
1.94	7 623	10 873	7 817
2.16	9 129	12 338	9 459
3.22	9 764	12 894	10 607
4.30	10 268	13 259	11 776
10.81	10 820	13 925	14 575
21.61	11 315	14 357	16 302
32.41	11 001	14 444	17 197
43.20	10 592	14 136	17 898
64.80	9 859	13 495	18 843
108.00	8 730	12 460	19 965
172.80	6 798	10 435	20 819
216.00	5 505	8 418	20 390
259.20	4 300	6 359	17 981
280.80	3 811	5 574	16 352
324.00	2 976	4 627	12 420
388.80	2 201	3 967	7 656
432.00	1 952	3 757	7 151

4.2　生态需水量计算

芦苇是一种广泛分布于水陆交错带中的大型无性繁殖水生植物,在湿地生态系统的结构完整和功能多样性的调控中发挥着重要作用。芦苇是喜水性植物,

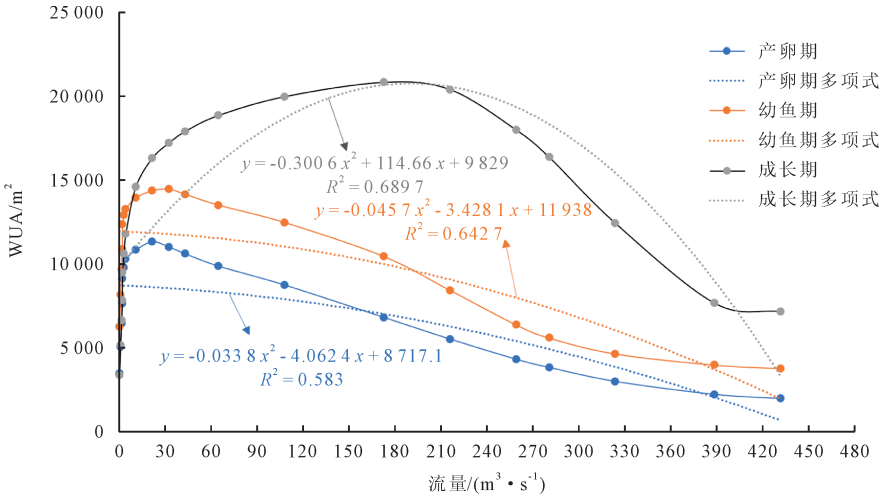


图7 龙河研究河段麦穗鱼各生长阶段流量~WUA图

表4 龙河麦穗鱼生理水量确定

河流	典型鱼类	生理阶段	时段	典型流量/(m³·s⁻¹)
龙河廊坊段	麦穗鱼	产卵期	4–6月	3.22
		幼鱼期	7–11月	4.30
		成长期	12–3月	10.81

喜生沼泽地、河漫滩和浅水河边，生境宽泛。龙河主河道分布有大量的控制性闸坝，受水位周期变化的影响，河流沿岸形成了大面积的河滩湿地。本文结合河岸生境的演替变化过程，从多种植物的耐受机理上分析，以芦苇作为典型植被进行植被生态水量的确定。以不同生长阶段用水量、根系长度、土壤特征的统计数据为基础，建立了芦苇生理用水–生长阶段的变化曲线，并利用改进的Penman公式法模拟给出了芦苇生长阶段的需水变化过程。本文选择廊坊站2005–2016年的气象数据作为参数计算的依据。根据计算结果，指示植被芦苇蒸散量ET_0变化见图8。

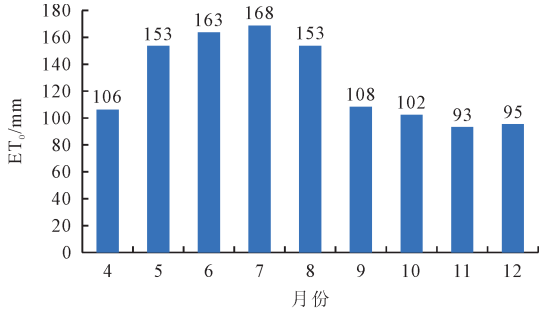


图8 芦苇多年平均ET_0各月变化趋势

从图8可以看出，在芦苇的初始生长阶段，不同月份的ET_0值有所差异，5–8月的生理用水量占56%。随着芦苇生长的需要，蒸散发量逐渐增大，最大生理用水量在7月，达到168 mm。随着时间的延续，当芦苇都达到最大生长量后，生理用水量有所减少，11月达到最小值93 mm。在芦苇生长期(4–11月)，根据上述方法计算相关参数和植被生态需水量，见图9。

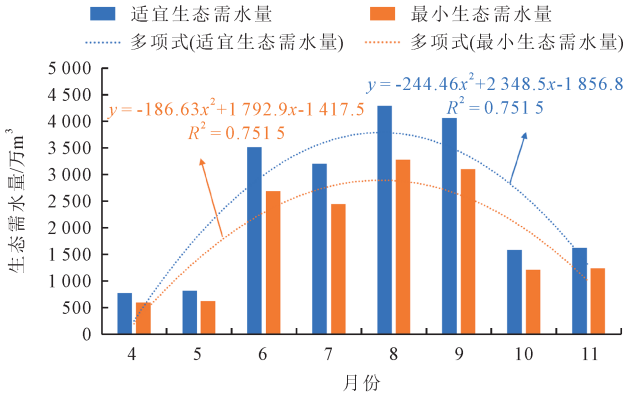


图9 芦苇不同时间阶段的需水过程

因此，龙河廊坊段芦苇生长的年需水量为19 800 m³，最小值为15 100 m³。根据植被生态需水量的计算结果，当年蒸散量小于1 000 mm时，芦苇生长状态受到胁迫，此外，芦苇生长过程将受到缺水威胁。当年蒸散量超过1 900 mm时，因河道外取量水量且日益增多的影响，芦苇的正常生长受到影响。龙河流域年均蒸散量为1 035 mm，基本维持芦苇生长所需的最小生态需水量的要求。综合分析，龙河廊坊段芦苇生长的最小生态需水量为15 100 m³，可满足不同阶段适宜生长所需的最用水需求。

4.3 结果讨论分析

当前，生态流量的计算通常以河段地貌形态的物理参数、生物生长阶段的基本需求为基础，但多数方法仅以河道水文数据估算栖息地面积，以湿周长作为河道水生生物的栖息地质量指数来估算河道流量，并未考虑指示生物本身的生理诉求和发展变化趋势[42,43]。以麦穗鱼生理需水量的确定为目标，根据麦穗鱼在各个生长阶段适宜生态空间的数据变化分析为基础，从流域生态系统本身的需求出发，全面反映生物生理变化引起的需水量变化，并将基于自然水流范式理论的生态流量确定方法开展了实例应用。

龙河属于北方缺水小河流,河流宽深指数较低。流量-WUA曲线转折点处的WUA值是指示鱼类生长的最佳值。产卵期流量-WUA曲线出现明显拐点时,对应的流量为3.22 m^3/s,麦穗鱼的WUA为9 764 m^2。幼鱼生长期间流量-WUA曲线出现明显拐点时,对应的流量为4.30 m^3/s,麦穗鱼的生境适宜区WUA为13 259 m^2。成长期流量-WUA曲线出现明显拐点时,对应的流量为10.81 m^3/s,目标鱼的生境适宜区WUA为14 575 m^2。将该流量作为龙河不同时期生态流量的目标值,可以最大程度地保证麦穗鱼的生存环境,满足各生长阶段的生态流量需求。

在芦苇生长期间,芦苇的生长状况与水深的变化密切相关。邓春暖等根据水深梯度分析芦苇生长规律,结果表明,水深0.15 m是芦苇的最小生态水位,水深0.35~0.45 m为芦苇的最佳生长区间,是芦苇生长的最适宜生态水位[44]。Poorter等认为芦苇种群对水深梯度变化的生态适应性不是线性的。过高的水深(50~150 cm)或过低的水深(0~5 cm)对芦苇的生长均有一定的抑制作用[45]。适宜水深区间(5~50 cm)芦苇株高与生物量耦合度较高,生长良好。水深20~30 cm时,单生芦苇生长良好。随着水深的增加,单生芦苇的叶片数、茎粗、株高和密度均呈现先增加后降低的趋势。因此,芦苇生长期的适宜水深为0.2~0.5 m。

生态流量是河流保护与修复的重要指标之一。目前,已有许多研究估算了中国北方河流的生态流量[46,47]。建议河流的生态流量应设为自然流量的30%或以上。河流生态系统恢复的最小生态流量阈值标准为年平均流量的31%[48]。选取河流生态系统经济功能总量与经济服务功能间的比值最大值为判定依据,渭河宝鸡段河流生态基流量占自然径流的35%[49]。额尔齐斯河鱼类繁殖期推荐的生态流量为年平均流量的79%,处于最佳生态流量范围[50]。繁殖期内的生态流量约为年平均流量的50%。论文的计算结果与前人[49,50]的计算结果非常接近,利于防止龙河生态退化,实现河流健康。

论文计算结果均能满足陆域和水体指示物种的生理需水要求。生态流量计算以多年积累的实测数据为基础,突出河流和湿地生态系统的完整性。计算过程基于生态-水文响应关系并以河流健康目标为导向,寻求以区域水资源均衡为基础的生态需水量合理配置研究,计算结果易将生态需水成果与龙河水量生态调度有效结合起来,在水量调控过程中实现龙河廊坊段水生态健康。基于此,本文给出的生态需水计算方法具有较好的实际应用价值,助于将河流生态系统生态需水的内涵、目标及需水过程进行有机融合。

5　结论

(1)通过数据成果的比对分析,用于反映河道流量变化和指示鱼类适宜生存空间的对应关系,基于麦穗鱼WUA变化曲线、生长适宜性关系曲线,结合龙河水文情势变化序列,综合分析得到龙河麦穗鱼产卵期(4-6月)、幼鱼期(7-11月)和成长期(12-3月)的最适生态流量值分别为3.22 m^3/s、4.30 m^3/s和10.81 m^3/s。

(2)为确保麦穗鱼生长期河岸带植被生态服务功能发挥及岸坡生态修复的基本需求,实现龙河廊坊段的生态复苏,开展面向植被生理变化及功能保障的芦苇生态需水过程研究,综合分析表明芦苇合理生态用水值为1.51万 m^3。

(3)水域、陆域指示物种的生态需水过程在时间上表现出相似的特征,需水变化特征与降雨的变化表相出同步性,因此,论文计算结果均能满足陆域和水体指示物种的生理需水要求。基于NbS的生态环境复苏方案是可行的,开展龙河廊坊段河道陆域-水域一体化生态修复可为实现流域河流健康提供数据支撑。论文给出的研究方法能够将生物不同生理阶段的生态诉求与生态需水过程耦合为系统化的调控体系,对于解决季节性河流所在流域的生态需水计算提供方法支撑,利于实现河湖生态环境复苏。

[参考文献]

[1] 何萍,史培军,刘树坤,等. 河流分类体系研究综述[J]. 水科学进展, 2008,19(3):434-442.
He Ping, Shi Peijun, Liu Shukun, et al. A summary of the research on river classification system[J]. Advances in Water Science, 2008,19(3):434-442.

[2] 陈凯麒,陶洁. 河流生物栖息地的生态水文学研究[J]. 水资源保护, 2015,31(6):52-56.
Chen Kaiqi, Tao Jie. Research on eco-hydrology of river habitat[J]. Water Resources Protection, 2015,31(6):52-56.

[3] Fu Y C, Leng J W, Zhao J Y, et al. Quantitative calculation and optimized applications of ecological flow based on nature-based solutions[J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126216.

[4] Cohen-Shacham E, Janzen C, Maginnis S, et al. Nature-based solutions to address global societal challenges[R]. IUCN, Gland, Switzerland, 2016.

[5] IUCN. Panorama, www.iucn.org/theme/protected-areas/our-work/planetinspiring-protected-area-solutions/panorama[R]. 2016.

[6] Millennium Ecosystem Assessment. Guide to the Millennium Assessment Reports[EB/OL]. http://www.millenniumassessment.org/zh/Index-2.html.

[7] CBD (Convention on Biological Diversity). Ecosystem Approach Sourcebook[EB/OL]. www.cbd.int/ecosystem/sourcebook/. 2004.

[8] Kabisch N, Frantzeskaki N, Pauleit S, et al. Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action[J]. Ecology and Society, 2016, 21(2):art39.

[9] Maes J, Jacobs S. Nature-based solutions for Europe's sustainable development[J]. Conservation Letters, 2017, 10(1): 121-124.

[10] Ma L J, Zhang X N, Wang H, et al. Characteristics and practices of ecological flow in rivers with flow reductions due to water storage and hydropower projects in China[J]. Water, 2018,10(8):1091.

[11] Poff N L, Tharme R E, Arthington A H. Evolution of environmental flows assessment science, principles, and methodologies[M]//Water for the Environment. Amsterdam: Elsevier, 2017:203-236.

[12] Fu Y C, Zhao J Y, Peng W Q, et al. Spatial modelling of the regulating function of the Huangqihai Lake wetland ecosystem[J]. Journal of Hydrology, 2018,564:283-293.

[13] 冷吉卫,付意成,赵进勇. 基于NBS的流域绿色发展机制研究[J]. 水电能源科学, 2020,38(9):159-162.

[14] Horne A C, Webb J, Stewardson M J, et al. Water for the Environment: From Policy and Science to Implementation and Management[D]. Cambridge, MA: Elsevier. 2017.

[15] Poff N L, Matthews J H. Environmental flows in the Anthropocence: past progress and future prospects[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013,5(6):667-675.

[16] 南军虎,刘一安,陈垚,等. 裁弯河道内生物栖息地改造及生态流量估算[J]. 水资源保护, 2022,38(3):189-197.
Nan Junhu, Liu Yian, Chen Yao, et al. Reconstruction of biological habitat and ecological flow estimation in curving cut-off river channel[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3):189-197.

[17] 李泽君,黄本胜,邱静,等. 变化环境下韩江生态流量演变特征分析[J]. 水资源保护, 2021,37(5):22-29.
Li Zejun, Huang Bensheng, Qiu Jing, et al. Analysis on evolution characteristics of ecological flow in Hanjiang River under changing environment[J]. Water Resources Protection, 2021,37(5):22-29.

[18] 董哲仁,张晶,赵进勇. 环境流理论进展述评[J]. 水利学报, 2017,48(6):670-677.
Dong Zheren, Zhang Jing, Zhao Jinyong. Review on the progress of environmental flow theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017,48(6):670-677.

[19] 侯俊,裴佳琦,黄喻威,等. 基于鱼类需求的息县枢纽工程闸下河段环境流量研究[J]. 水资源保护, 2020,36(2):8-12.
Hou Jun, Pei Jiaqi, Huang Yuwei, et al. Study on environmental flow of lower reach of Xi County hub project based on fish demand[J]. Water Resources Protection, 2020,36(2): 8-12.

[20] Peake P, Fitzsimons J, Frood D, et al. A new approach to determining environmental flow requirements: sustaining the natural values of floodplains of the southern Murray-Darling Basin[J]. Ecological Management & Restoration, 2011, 12(2):128-137.

[21] 陈昂,隋欣,廖文根,等. 我国河流生态基流理论研究回顾[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016,14(6):401-411.
Chen Ang, Sui Xin, Liao Wengen, et al. Review of theoretical research on river ecological basic flow in China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016,14(6):401-411.

[22] 王强,夏瑞,邹磊,等. 水文变异条件下潦河生态流量计算研究[J]. 环境科学研究, 2021,34(3):607-617.
Wang Qiang, Xia Rui, Zou Lei, et al. Study on calculation of ecological flow of Liaohe River under hydrological variation[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(3): 607-617.

[23] Sedighkia M, Abdoli A. Optimizing environmental flow regime by integrating river and reservoir ecosystems[J]. Water Resources Management, 2022,36(6):2079-2094.

[24] Stewart-Koster B, Olden J D, Gido K B. Quantifying flow-ecology relationships with functional linear models[J]. Hydrological Sciences Journal, 2014,59(3/4):629-644.

[25] Arthington A H. Environmental flows: ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA) [M]// The Wetland Book. Dordrecht: Springer, 2018:1843-1847.

[26] McManamay R A, Orth D J, Dolloff C A, et al. Application of the ELOHA framework to regulated rivers in the Upper Tennessee River Basin: a case study[J]. Environmental Management, 2013,51(6):1210-1235.

[27] 徐宗学,武玮,于松延. 生态基流研究: 进展与挑战[J]. 水力发电学报, 2016,35(4):1-11.
Xu Zongxue, Wu Wei, Yu Songyan. Research on ecological base flow: progress and challenges[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016,35(4):1-11.

[28] 程俊翔,徐力刚,姜加虎. 水文改变指标体系在生态水文研究中的应用综述[J]. 水资源保护, 2018,34(6):24-32.
Cheng Junxiang, Xu Ligang, Jiang Jiahu. Summary of application of hydrological change index system in eco-hydrological research[J]. Water Resources Protection, 2018,34(6): 24-32.

[29] Wang H, Wang H, Hao Z C, et al. Multi-objective assessment of the ecological flow requirement in the Upper Yangtze national nature reserve in China using PHABSIM[J]. Water, 2018,10(3):326.

[30] Zhang C, Wan Z Y, Jing Z, et al. Calculation of ecological water requirements of urban rivers using a hydrological

model:a case study of Beiyun River[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,262:121368.

[31] Yue D X, Chen G G, Zhu M X, et al. Biocapacity and ecological water demand in Shule River Basin over the past 20 Years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(14): 5178−5187.

[32] Im D, Kang H. Two−dimensional physical habitat modeling of effects of habitat structures on urban stream restoration [J]. Water Science and Engineering, 2011,4:386−395.

[33] Lee J, Jeong S M, Lee M, et al. Estimation of instream flow for fish habitat using Instream Flow Incremental Methodology(IFIM) for Major Tributaries in Han River Basin[J]. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 2006, 26: 153−160.

[34] Paredes P, Pereira L S, Almorox J, et al. Reference grass evapotranspiration with reduced data sets:parameterization of the FAO Penman−Monteith temperature approach and the Hargeaves−Samani equation using local climatic variables[J]. Agricultural Water Management, 2020,240:106210.

[35] Ohana−Levi N, Ben−Gal A, Munitz S, et al. Grapevine crop evapotranspiration and crop coefficient forecasting using linear and non−linear multiple regression models[J]. Agricultural Water Management, 2022,262:107317.

[36] Jafari M, Kamali H, Keshavarz A, et al. Estimation of evapotranspiration and crop coefficient of drip−irrigated orange trees under a semi−arid climate[J]. Agricultural Water Management, 2021,248:106769.

[37] Allen R, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements−FAO Irrigation and Drainage Paper. FAO 56[R]. FAO, 1998.

[38] Abbott J F. List of fishes collected in the River Pei−Ho, at Tien−Tsin, China, by Noah Fields Drake, with descriptions of seven new species[J]. Proceedings of the United States National Museum, 1901,23(1221):483−491.

[39] 杜龙飞. 基于鱼类栖息地模型的洋河流域生态需水研究[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2019.
Du Longfei. Study on Ecological Water Demand in the Yang River Valley Based on Fish Habitat Model[D]. Zhengzhou:North China University of Water Resources and Electric Power, 2019.

[40] 侯昕玥,徐宗学,任梅芳,等. 基于麦穗鱼生境模拟的渭河宝鸡段生态基流估算[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2019,55(3):362−368.
Hou Xinyue, Xu Zongxue, Ren Meifang, et al. Estimation of ecological base flow in Baoji section of Wei River by habitat simulation of *Pseudorasbora parva*[J]. Journal of Beijing Normal University:Natural Science, 2019,55(3):362−368.

[41] 姜虎成,夏爱军,张明生,等. 人工养殖条件下麦穗鱼的生长特性[J]. 中国农学通报, 2017,33(35):137−140.
Jiang Hucheng, Xia Aijun, Zhang Mingsheng, et al. Growth characteristics of cultured Pseudorasbora parva[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017,33(35):137−140.

[42] 易雨君,张尚弘. 水生生物栖息地模拟方法及模型综述[J]. 中国科学:技术科学, 2019,49(4):363−377.
Yi Yujun, Zhang Shanghong. Review of aquatic species habitat simulation method and modelling[J]. Scientia Sinica:Technologica, 2019,49(4):363−377.

[43] 南军虎,张书峰,袁福民,等. 基于砾石群布置的河道生物栖息地自然化改造[J]. 水科学进展, 2021,32(4):608−617.
Nan Junhu, Zhang Shufeng, Yuan Fumin, et al. Naturalization of biological habitat in river based on arrangement of gravel groups[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 608−617.

[44] 邓春暖,章光新,潘响亮. 莫莫格湿地芦苇生理生态特征对水深梯度的响应[J]. 生态科学, 2012,31(4):352−356.
Deng Chunnuan, Zhang Guangxin, Pan Xiangliang. Eco−physiological responses of *Phragmites australis* to different water depth in Momoge Wetland[J]. Ecological Science, 2012,31(4):352−356.

[45] Poorter H, Niklas K J, Reich P B, et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots:meta−analyses of interspecific variation and environmental control[J]. The New Phytologist, 2012,193(1):30−50.

[46] Bao Z X, Zhang J Y, Wang G Q, et al. Attribution for decreasing streamflow of the Haihe River Basin, Northern China: climate variability or human activities?[J]. Journal of Hydrology, 2012,460/461:117−129.

[47] Huang S Z, Chang J X, Huang Q, et al. Calculation of the instream ecological flow of the Wei River based on hydrological variation[J]. Journal of Applied Mathematics, 2014,2014: 127067.

[48] Wu M, Chen A. Practice on ecological flow and adaptive management of hydropower engineering projects in China from 2001 to 2015[J]. Water Policy, 2018,20(2):336−354.

[49] Cheng B, Li H E, Yue S Y, et al. A conceptual decision−making for the ecological base flow of rivers considering the economic value of ecosystem services of rivers in water shortage area of Northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2019,578:124126.

[50] 张召,张伟,廖卫红,等. 基于生态流量区间的多目标水库生态调度模型及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2016,14(5): 96−101.
Zhang Zhao, Zhang Wei, Liao Weihong, et al. Multi−objective reservoir ecological operation model based on ecological flow interval and its application[J]. South−to−North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016,14(5): 96−101.