

基于时间序列分析的水位-流量关系单值化处理研究

杨栋

新疆维吾尔自治区昌吉水文勘测中心

DOI:10.32629/hwr.v10i2.6820

[摘要] 水位-流量关系(H-Q关系)是水文监测、预报及工程设计的核心依据。受洪水涨落、断面冲淤、变动回水等多重动力因素影响,天然河道的水位与流量常呈非单一对应的“绳套曲线”,给水文资料整理与实时应用带来显著困难。单值化处理旨在通过数学方法消除这种多值性,建立稳定、可用的单值函数关系。本文以天山北麓的开垦河为研究对象,在系统梳理单值化理论的基础上,结合该流域“冰雪融水与降水混合补给”、“洪枯季分明”、“河床冲淤变化显著”等具体水文特性,探讨适用于内陆干旱区河流的水位-流量关系单值化方法。

[关键词] 水位-流量关系; 单值化; 时间序列分析; 落差指数法; 水文资料整理

中图分类号: P336 文献标识码: A

Research on Single-Valued Processing of Stage-Discharge Relationship Based on Time Series Analysis

Dong Yang

Xinjiang Uygur Autonomous Region Changji Hydrological Survey Center

[Abstract] The stage-discharge relationship (H-Q relationship) serves as a core basis for hydrological monitoring, forecasting, and engineering design. Influenced by multiple dynamic factors such as flood rise and fall, cross-section scour and siltation, and variable backwater, the stage and discharge in natural rivers often exhibit a non-unique correspondence, forming a "loop curve," which poses significant difficulties for the compilation of hydrological data and real-time application. Single-valued processing aims to eliminate this multi-valued nature through mathematical methods, establishing a stable and usable single-valued functional relationship. This paper takes the Kaiken River at the northern foot of the Tianshan Mountains in Xinjiang as the research object. Based on a systematic review of single-valued theory and combined with the specific hydrological characteristics of the basin, such as "mixed supply of snowmelt and precipitation," "distinct wet and dry seasons," and "significant riverbed scour and siltation changes," it explores single-valued methods for the stage-discharge relationship applicable to inland arid region rivers.

[Key words] Stage-discharge relationship; Single-valued processing; Time series analysis; Fall index method; Hydrological data compilation

引言

在水文科学与工程实践中,精确建立水位(H)与流量(Q)之间的关系具有基础性意义。理想状态下,一个水文断面的H-Q关系应是稳定、单值的函数。然而,天然河流的水力条件极其复杂。洪水波的传播导致涨水段与落水段在同水位下流量不同,形成逆时针绳套;河道断面的冲刷或淤积会使H-Q曲线发生系统性偏移;下游湖泊、水库或支流的顶托作用(变动回水)则会改变断面的水面比降,进一步扭曲H-Q关系。这种多值化、非稳定的关系,若采用传统的连时序法定线,不仅过程繁琐,而且对实时测流频次要求极高,极大增加了水文监测的工作量与不确定性。为

解决这一难题,水文单值化技术应运而生。其核心思想是通过引入辅助水力参数(如落差、比降),或对水文序列进行合理分期,构建一个综合校正参数,从而将复杂的多值绳套曲线转化为单一、稳定的关系曲线。开垦河发源于东天山博格达山脉北坡,其水文站是控制该河流域水量变化的关键站点。该河流域的洪水过程集中、河床物质组成易动,其H-Q关系必然受到洪枯季水量剧变与断面调整的双重影响。

1 水位-流量关系复杂性及单值化原理

1.1 水位-流量关系的多值化成因

天然河道的水流可近似视为非恒定渐变流,其流量计算的

基本公式(如曼宁公式)表明,流量 Q 与水力学参数的关系为:

$$Q = A \cdot v = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$$

式中, A 为过水断面面积, R 为水力半径, n 为曼宁糙率系数, S 为能面比降或水面比降。在稳定流条件下, 断面形态固定, 比降与水位存在确定关系, 从而 H 与 Q 一一对应。然而, 实际中多个因素导致这种单值关系被破坏:

1.1.1 洪水涨落影响。洪水波在传播过程中, 波前部分水面比降大于稳定流时的比降, 而波后部分则小于稳定流比降。这使得在同水位下, 涨水段的流量大于稳定流值, 落水段则小于稳定流值, 形成绳套曲线。

1.1.2 断面冲淤变化。河流携带的泥沙会在断面处发生沉积或冲刷, 导致过水面积 A 、水力半径 R 等几何参数随时间变化。即使水位相同, 由于断面扩大或缩小, 流量也会不同。

1.1.3 变动回水影响。当下游水位因潮汐、支流汇入或水库调度而发生顶托时, 会抬高研究断面的水位, 同时减小其水面比降 S 。这导致在同一泄流量下, 受顶托的水位更高, 破坏了原有的 H - Q 关系。

开垦河作为天山北麓的河流, 其水文情势同时受到上述多种因素的复合作用。其径流以冰雪融水和夏季降水补给为主, 汛期(5-8月)流量集中且洪峰尖瘦, 陡涨陡落, 非汛期流量小。剧烈的流量变化必然伴随强烈的河床冲刷与淤积过程。因此, 其 H - Q 关系呈现出典型的、受多重因素干扰的非单值特征, 是开展单值化研究的理想对象。

1.2 单值化处理的核心方法

单值化处理的本质, 是寻找一个或一组能够综合反映上述干扰因素变化的校正参数, 对原始水位或流量进行变换, 从而在变换后的新参数与流量(或水位)之间建立稳定的函数关系。主要方法包括:

1.2.1 落差指数法。这是我国应用最广的单值化方法之一, 由水文专家葛维亚等系统发展并推广。其基本公式为:

$$Q_s = K(Z - Z_0)^\alpha (\Delta Z)^\beta$$

式中, Q_s 为校正后的单值化流量, Z 为测站水位, Z_0 为基准水位(常取断流水位), ΔZ 为测站与下游辅助站的水位落差(反映比降), K , α , β 为经验参数。通过优选参数, 可将绳套曲线转换为单值曲线 $Q_s \sim Z$ 或 $Q_s \sim (Z - Z_0)$ 。

1.2.2 枯汛分期处理法。对于水文情势在年内有显著阶段性差异的河流, 可考虑分期建立单值关系。例如, 针对梯级水库间的水文站, 有研究提出分别利用枯水期和汛期资料建立两套独立的 H - Q 单值关系, 以适应不同时期主导影响因素的变化。这种方法的关键在于科学划分水文时期。

1.2.3 时序分析与建模法。随着时间序列分析技术的发展, 利用历史 H 、 Q 序列数据, 通过滤波、分解(如将序列分解为趋势项、周期项和随机项)、突变检测等手段, 先识别和量化 H - Q 关系漂移或变动的规律, 再在模型中引入时间变量或状态变量进行

动态校正。例如, 对多瑙河和蒂萨河的长序列分析表明, 通过样条插值等技术可以重构可靠且均匀的时间序列, 为关系分析奠定基础。

对于开垦河而言, 需要综合考量其水文特性。其年最大洪峰流量序列已被检测出具有显著的上升趋势, 这表明长期的水文情势在变化。同时, 年内洪枯两季的水力条件截然不同。因此, 单一固定的参数模型可能难以适应。合理的思路是: 首先基于长时间序列进行趋势和突变分析, 界定水文阶段; 然后, 考虑在落差指数法的框架内, 使关键参数(如 β)能根据水文分期或实时水力条件(如流量级、涨落状态)动态调整, 从而实现更高精度的单值化。

2 研究区概况与水文特征分析

2.1 开垦河流域概况

开垦河位于新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州奇台县境内, 是发源于东天山博格达山脉北坡的一条内陆河流。流域地势南高北低, 最高点为海拔5445米的博格达峰, 山顶终年积雪, 并发育有冰川, 是河流重要的永久性补给源。河流最终消失在北部的古尔班通古特沙漠南缘, 属于典型的内流河。设立于该河上的开垦河水文站, 是掌控该河流域水情变化的关键测站。

2.2 基于时间序列的水文特征诊断

根据已有的研究, 利用开垦河水文站的长序列观测资料(见表1), 可以对其水文特征, 特别是与 H - Q 关系密切相关的流量特征进行深入的时序分析。

2.2.1 趋势性分析。采用线性趋势法、Mann-Kendall趋势检验和Spearman秩相关法对年最大洪峰流量序列进行分析, 结果表明该序列呈现显著的上升趋势。这意味着从长期来看, 开垦河的洪水造峰能力在增强, 河道的水力条件可能因此发生持续性改变, 对 H - Q 关系的稳定性构成长期影响。

2.2.2 突变性分析。Mann-Kendall突变检验进一步揭示, 开垦河的年最大洪峰流量序列在多个年份(如1964、1983、1986、2008、2018年)存在突变点。这些突变点可能对应着流域下垫面(如冰川退缩、土地利用变化)或气候特征的阶段性转变, 提示 H - Q 关系模型可能需要在这些时间节点前后进行分段或参数调整。

2.2.3 年内周期性。开垦河的径流年内分配极不均匀。研究指出, 其6-8月的平均流量是水文预报和分析的重点。最大洪峰主要集中在6-7月。这种强烈的季节性意味着, 汛期受洪水涨落和强烈冲刷影响为主的 H - Q 关系, 与枯水期受相对稳定基流和可能淤积影响为主的 H - Q 关系, 很可能具有不同的形态和参数。这为实施“枯汛分期”单值化处理提供了直接依据。

综合以上分析, 开垦河的水文序列呈现出“长期趋势上升、年内分配极端、阶段突变明显”的复杂特征。这决定了对其 H - Q 关系进行单值化处理时, 不能简单地套用静态模型, 而必须采用能够适应其动态变化特征的方法。

3 适用于开垦河的水位-流量关系单值化处理方法

结合开垦河的水文特性与单值化理论, 本文提出一个“分期-动态校正”的综合单值化处理框架。

表1 开垦河水文站年最大洪峰流量序列基本统计特征

统计项目	数值/特征	水文意义
序列长度	59年(1960-2019)	具备进行长期趋势分析的数据基础
多年平均值	86.8m ³ /s	反映河流的平均造峰能力
历史最大值	357m ³ /s(1987年)	防洪设计的关键参考值
历史最小值	24.5m ³ /s(1968年)	反映极端枯水情况
主汛期	以7月为中心的约60天(6-7月)	年最大洪峰出现概率高达68%
警戒流量	130m ³ /s	超过此流量的洪峰在65年中出现7次
保证流量	250m ³ /s	超过此流量的特大洪峰出现3次

3.1 基于时序分析的水文分期

首先,利用开垦河历史流量、水位时间序列,进行多尺度分析。除了年度最大序列,还应分析日均、月均序列。通过滑动平均、小波分析或傅里叶变换等方法,精准识别年内水文周期的起止时间。结合博格达山北麓地区的气候特点(春旱夏洪),可将全年划分为至少两个水文期:枯水期(大致为9月至次年4月)和汛期(5月至8月)。进一步的,根据突变检测结果,若某些年份前后水文状态发生显著跳跃,则可在长序列建模时考虑以突变点为界进行分段处理。

3.2 分期动态落差指数法模型构建

在每一水文期内,采用落差指数法作为基础模型。但对于开垦河这样比降可能随流量剧烈变化的山区河流,固定的落差指数 β 可能不足以在全流量级范围内实现良好单值化。因此,引入动态校正思想:

3.2.1 模型形式:对于第*i*个水文期(如汛期),基本模型为:

$$Q_{s,i} = K_i (Z - Z_{0,i})^{\alpha_i} (\Delta Z)^{\beta_i(F)}$$

式中, K_i , $Z_{0,i}$, α_i 为该水文期的固定参数,通过该期内的实测数据率定。 $\beta_i(F)$ 则定义为与水文状态因子*F*相关的动态参数。

3.2.2 动态参数 $\beta_i(F)$ 的确定。状态因子*F*可以选取:流量级(将当期流量划分为低、中、高几个等级,不同等级采用不同的 β 值。);涨落状态(区分涨水过程和落水过程,设置不同的 β 值以部分抵消绳套效应。);时序变量(在长期模型中, β 也可以是与时间相关的函数,用以吸收因长期趋势或缓慢淤积带来的影响)。最优的 $\beta_i(F)$ 函数形式或取值可通过“试错法”结合优化算法(如最小二乘法)确定,目标函数是使校正后的单值化流量 Q_s 与实测流量 Q_m 的误差平方和最小。

3.3 模型率定与验证

从长序列资料中,按分期原则选取足够数量的、覆盖不同水位和流量级的实测H-Q点据,用于率定各期的模型参数。使用剩余的另一部分数据作为验证集,评估模型的稳定性与外推精度。评价指标可包括:确定性系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、相对误差在允许范围(如±5%或±10%)内的点据合格率。通过验证,不断调整分期方案和动态参数规则,直至满足《水文资料整编规范》的要求。

4 讨论与结论

4.1 方法优势与适用性讨论

本文提出的“分期-动态校正”单值化框架,是针对开垦河这类具有显著非平稳水文序列的内陆河所设计的。其优势在于:(1)物理概念清晰。分期处理承认了洪、枯季水力主导机制的差异,动态参数则细化了同一期内不同水力条件下的比降影响,均具有明确的水力学解释。(2)对数据驱动的适应性。方法核心建立在时间序列分析的基础上,能够吸收和反映水文系统长期演变与短期波动的信息,使模型具备一定的“自适应”能力。(3)业务应用价值:一旦模型建立,在实际工作中,只需观测水位(Z)和落差(ΔZ),根据当前时间(判断所属水文期)和水情(判断状态*F*),即可快速查算或计算出流量,大大减少了频繁实测流量的需要,提高了水文监测和报讯的效率。该方法不仅适用于开垦河,对于天山北麓乃至整个西北内陆地区,具有类似“融雪与降雨混合补给、径流集中、河床易变”特征的中小河流,均具有重要的参考和推广价值。

4.2 结论

水位-流量关系的单值化处理是提升水文资料使用效率与自动化水平的关键技术。本研究结合新疆开垦河的具体案例,得出以下主要结论:(1)开垦河的水位-流量关系受其独特的水文情势(强烈的季节性、长期的上升趋势、频繁的阶段性突变)控制,呈现出复杂的非单值特征,是单值化技术应用的典型场景。(2)单纯的时间序列分析或静态的单值化模型均难以妥善处理开垦河的H-Q关系。必须将时序分析作为诊断工具,识别其变化规律,进而指导单值化模型的构建。(3)提出的“分期-动态校正”落差指数法框架,有机融合了枯汛分期处理和动态参数优化思想,理论上能够更好地贴合开垦河水力条件的时空变异,是实现其H-Q关系稳健单值化的可行路径。未来研究需基于开垦河水文站更详尽的长序列分钟级或小时级数据,完成具体模型的参数率定与实证检验。并进一步探索将气温、前期降水等气候因子作为状态因子*F*的可能性,发展更具预测能力的水位-流量关系模型,服务于该流域的水资源精细化管理与洪水风险防控。

[参考文献]

[1]葛维亚.水位流量关系单值化方法的创立和发展[J].水文,2025,45(5):1-8.

[2]王艳君,姜彤,许崇育.水文时间序列分析方法研究进展[J].地球信息科学学报,2024,26(10):1890-1905.

[3]李疆,张捷斌,王水献.新疆开垦河流域径流变化特征分析[J].干旱区研究,2008,25(4):224-228.

作者简介:

杨栋(1989-),男,汉族,新疆昌吉人,大学本科,工程师,研究方向为水文勘测与资料整编。