

河流断面特征因子对表面流速系数的影响规律研究

叶博翔¹, 陈梦², 明静³, 潘小东³, 黄贵平⁴, 郑建华⁴, 刘炳义⁵, 陈华^{1*}

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

²湖北安源安全环保科技有限公司, 湖北 武汉

³长江水利委员会汉江流域中心治理保护中心, 湖北 武汉

⁴福建省南平水文水资源勘测分中心, 福建 南平

⁵武汉大水云科技有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年3月23日; 录用日期: 2026年5月11日; 发布日期: 2026年6月29日

摘要

为明确河流断面特征因子对河流表面流速系数的影响机制, 提升视觉测流方法精度和水文监测智能化水平, 本研究基于福建省多个水文站的实测数据, 提出一种系统的断面特征因子提取与概化方法。研究采用多尺度因子分析方法, 构建流速剖面对数律分布理论模型, 分析水力半径、河宽、断面面积、边坡系数、二次流、河道宽深比、河床粗糙度及水生植被密度等断面特征因子与表面流速系数的响应关系, 并利用主成分分析法(PCA)进行降维处理。结果表明: ① 表面流速系数与水力半径、河宽等因子分别存在不同的显著响应关系; ② 通过主成分分析提取出三个核心公共因子: 水力特性因子、河道形态因子和河床糙度因子; ③ 理论模型定性揭示了不同断面形态与水文条件下表面流速系数的变化规律。研究成果为非接触式智能水文监测提供理论依据与技术支持。

关键词

水力学, 表面流速系数, 视觉流量监测, 河流流量测验, 因子分析

Study on the Influence of River Cross-Sectional Characteristics on Surface Flow Velocity Coefficient

Boxiang Ye¹, Meng Chen², Jing Ming³, Xiaodong Pan³, Guiping Huang⁴, Jianhua Zheng⁴, Bingyi Liu⁵, Hua Chen^{1*}

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

作者简介: 叶博翔(2003-), 男, 硕士研究生, 主要从事水文智能监测研究, Email: ybxiaog@whu.edu.cn

*通讯作者 Email: chua@whu.edu.cn

文章引用: 叶博翔, 陈梦, 明静, 潘小东, 黄贵平, 郑建华, 刘炳义, 陈华. 河流断面特征因子对表面流速系数的影响规律研究[J]. 水资源研究, 2026, 15(3): 243-254. DOI: 10.12677/jwrr.2026.153028

²Hubei Anyuan Safety & Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhan Hubei

³Han River Basin Management and Protection Center, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

⁴Nanping Branch Center of Hydrological and Water Resources Survey, Nanping Fujian

⁵Wuhan Dashuiyun Technology Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: March 23, 2026; accepted: May 11, 2026; published: June 29, 2026

Abstract

To clarify the influence mechanisms of river cross-section characteristic factors on the surface velocity coefficient and enhance the accuracy of visual flow measurement methods along with the intelligence level of hydrological monitoring, this study proposes a systematic method for extracting and generalizing cross-section characteristic factors based on field data from multiple hydrological stations in Fujian Province of China. A theoretical model of logarithmic velocity distribution was developed using multi-scale factor analysis to investigate the response relationships between surface velocity coefficient and cross-section characteristic factors—including hydraulic radius, channel width, cross-sectional area, bank slope coefficient, secondary flow, aspect ratio (B/H), bed roughness, and aquatic vegetation density. Dimensionality reduction was performed via principal component analysis (PCA). The results indicate that: 1) Distinct significant response relationships exist between the surface velocity coefficient and factors such as hydraulic radius and channel width; 2) Three core common factors were extracted through PCA: hydraulic characteristic factor, channel morphological factor, and bed roughness factor; 3) The theoretical model revealed variation patterns of surface velocity coefficient under different cross-section morphologies and hydrological conditions. This research provides theoretical foundations and technical tools for improving visual flow measurement accuracy and advancing intelligent hydrological monitoring.

Keywords

Hydraulics, Surface Flow Velocity Coefficient, Visual Discharge Monitoring, River Discharge Measurement, Factor Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

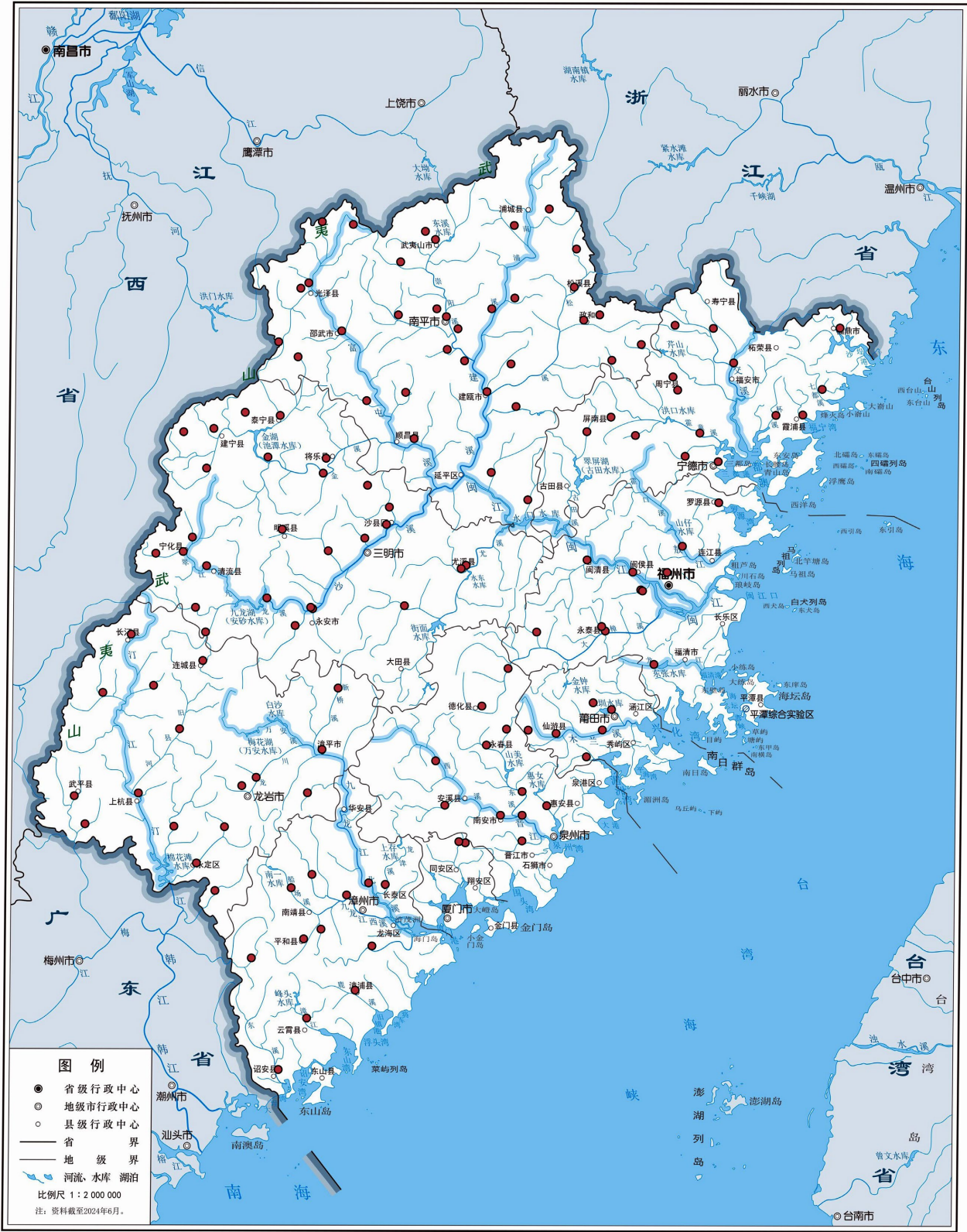
1. 引言

近年来,随着水文水资源精细化管理和生态保护需求的提升,对河流流量监测精度与效率提出了更高要求。基于图像识别与人工智能的视觉测流技术,作为一种非接触式测流方法,可实现河流断面流速与流量的全时段连续监测,显著提升水情预报与调度决策的准确性,尤其适用于极端洪水、无水文站河段及山区小型河流的实时在线监测[1]-[3]。该方法需通过表面流速系数将非接触式测流测得的横向河流表面流速转换为近似水深平均流速,再结合流速面积法及断面资料进行推算。该系数受多种河流断面因素影响而非常量,其取值精度直接决定了视觉测流结果的可靠性。然而,现有相关研究仍显不足,制约了视觉测流技术的推广应用[4]。

表面流速系数与河道断面要素的关联机制复杂。Hauet等[5]基于176条河流的3611个测站数据,证实其与水深呈正相关。此外,该系数还受宽深比、植被条件、潮汐波动及次级水流影响[6]-[8]。影响因素的复杂性导致其真实值难以精确获取。若研究河段具备历史水文资料,可通过算术平均法、回归方程或经验公式计算该系数[9]-[11];但在缺乏历史数据的多数场景中,仅能依赖经验估值。此类估算难以适应于不同河流,尤其在复杂断

福建省地图

水系要素版



审图号：闽S（2024）141号

福建省制图院 编制 福建省自然资源厅 监制

图 1. 福建省流域水文站的空间分布图

面条件下易导致显著误差[12]。

当前各国基于区域特性提出了系数参考范围：中国《河流流量测验规范》(GB 50179-2015) [13]和《水文测验手册》[14]限定取值区间；德国 ISO748:2021 标准[15]建议采用指数分布流速模型；美国地质调查局(USGS)推荐取值为 0.80~0.85。多数研究基于对数流速分布和典型河床粗糙度假设，常取固定值 0.85 [16]-[18]。现有方法精度不足，亟需开发新方案以提升视觉测流适用性。

针对以上问题，本文明确了河流断面特征因子对河流表面流速系数的影响机制，并结合因子分析法提出了一种系统的断面特征因子提取与概化方法，对突破视觉测流技术瓶颈、提升水文监测精度与效率、促进水文现代化进程具有重要理论和实践价值。

2. 研究区域与数据

研究基于福建省水文水资源勘测中心下辖的 135 个水文测站，覆盖三明、南平、漳州、宁德、福州、泉州、厦门、莆田及龙岩共 9 个分中心，135 个水文站在省内的位置分布见图 1，水文站用红色圆点标出。2022 年枯水期(9~11 月)开展现场调研，通过实地查勘、数据采集与资料整合，获取各测站河段的断面形态、水情特征及河床组成等参数。由于测站分布较广，涵盖了小型河流到大型河流、平原河流到山区河流等各类特征河流，样本具有一定代表性，河段特征如表 1 所示。其中，流量统计指标 Q_{10} 与 Q_{90} 分别表示第 10 与第 90 百分位数。

表 1. 135 个测站河段特征

	最小值	最大值	平均值	Q_{10}	Q_{90}
流量(m^3/s)	1	7125	277.76	5	650
河宽 B (m)	5	600	76.4	24	156.8
水力半径 Rh (m)	0.15	16.89	2.32	0.33	5.41

3. 研究思路与方法

本研究基于福建省 135 个水文测站河段断面特征参数，应用对数律流速分布模型估算表面流速系数；随后分析不同断面条件下系数的变化规律；最后采用主成分分析法提取关键公共因子，并通过单因子与多因子分析揭示特征因子的影响规律。

3.1. 河流断面特征因子计算

对 135 个研究测站所对应的河流测量断面的主要特征因子进行标准化处理与计算，包含调研期间的断面形态、水情信息、河床特征及是否存在二次流等特殊情况，确保全面涵盖可能影响表面流速系数的因子。

3.2. 流速剖面对数律分布理论模型

河道水流速度剖面通常采用两种理论模型描述：

1) 对数律模型(适用于主流区)：

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (1)$$

式中： $u(z)$ 为局部平均流向速度，m/s； u_* 为剪切速度，m/s； $\kappa \approx 0.41$ 为冯·卡门常数； z 为水深位置，m； z_0 为床面粗糙度，m。Dancey 等[19]研究表明，该模型在 z/z_0 范围 $3 \sim 10^3$ 时有效。Le Coz 等[20]利用天然河流计算的表面流速系数 α 取值为 0.79~0.89，当 $z/z_0 = 10^3$ 时，中心值接近 0.85。

2) 幂律模型(简化计算)：

$$u(z) = \beta \cdot (z - z_0)^{1/m} \quad (2)$$

式中： β 和 m 是反映流动条件、河道几何形状和粗糙度的校准参数。研究表明，对于大多数天然河流 $1/m$ 通常取值为 0.14~0.17 [21]。结合曼宁公式可推导 $\alpha \approx 0.857$ [22]。天然河流流速剖面存在以下偏离理想模型的情况：对数律在 $z/h < 0.7$ (h 为水深) 时较为适用，而在 $z/h > 0.7$ 的近水面区流速趋稳[23]；河道形态变异、植被覆盖及风力效应可导致 α 偏离 0.85 的经验值[24]。

3.3. 对数律条件表面流速系数计算

为探究河流断面特征因子对表面流速系数(α)的影响，本研究基于 135 个测站数据，采用对数律模拟垂直流速分布，推导 α 作为真实系数的替代值。核心推导如下：

表面流速系数定义为表面流速与垂线平均流速之比：

$$\alpha_{log} = \frac{u_{avg}}{u_{surface}} = \frac{\frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{h}{z_0} \right) - 1 \right]}{\frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{h}{z_0} \right)} = 1 - \left[\ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

式中： u_{avg} 为垂线平均流速，m/s； $u_{surface}$ 为表面流速，m/s。

引入无量纲剪切速度 u_*^+ (剪切速度 u_* 与表面流速 $u_{surface}$ 的比值)，则表面流速系数 α_{log} 可以表示为：

$$\alpha_{log} = 1 - \left[\ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \right]^{-1} = 1 - \frac{u_*^+}{\kappa} \quad (4)$$

无量纲剪切速度的取值通常依赖于水深和流速分布的特征，典型范围为 0.05~0.1 [25]。水深较浅时，河床的摩擦增强， u_*^+ 增大；水深较深时，表面流速和剪切流速的差距减少， u_*^+ 减小。结合流速，通过 u_*^+/κ 与水深的指数衰减模型校准，计算得 α 取值为 0.79~0.94。

3.4. 因子分析法

因子分析法通过识别变量间的共性因子降维，在保留关键信息的同时提升数据可解释性。其核心假设是观测变量的变动由少数公共因子和特有因子共同决定。在河流断面特征分析中，相关变量可能受相似水动力学机制驱动。此类机制虽无法直接测量，但可通过因子分析提取并量化：构建变量相关性矩阵，识别潜在因子，使多变量关系由少数代表性公共因子解释，从而简化数据结构并突出主要影响因素。

假设从 p 个观测变量 X_p 中提取 q 个因子 f_q ($q \leq p$)，得到因子分析理论模型[26]：

$$\mathbf{X} = \boldsymbol{\mu} + \mathbf{A}\mathbf{f} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5)$$

式中： $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_p)^T$ 是 p 维随机向量； $\mathbf{f} = (f_1, f_2, \dots, f_q)^T$ 是 q 维随机变量，满足 $E\mathbf{f} = 0$ ， $E\mathbf{f}\mathbf{f}^T = \mathbf{I}_q$ ，其分量 f_i 称为公共因子，对 $\mathbf{X}$ 的每个分量都起作用； $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_p)^T$ 是 p 维不可观测的随机向量，特有因子与公共因子之间相互独立，其内部分量之间互不相关， $\boldsymbol{\varepsilon}$ 的分量 ε_i 仅对 $\mathbf{X}$ 的分量 X_i 起作用； $\boldsymbol{\mu}$ 和 $\mathbf{A}$ 为参数矩阵， $\boldsymbol{\mu}$ 代表观测变量的均值向量， $\mathbf{A}$ 称为因子载荷系数，即 a_{ij} 是 X_i 在 f_j 上的载荷，反映二者的相关系数。

在实际应用中，因子分析的输入通常为两个及以上的定量变量，需要从多个方面收集观测指标数据，并确保所选变量合理有效、数量充足且具有代表性且变量间具有相关性。输出则最低可降维成一维，即通过单一综合因子代表所有变量，输出因子得分用于衡量每个样本数据在不同因子上的表现，常用于综合评价研究；最多可保持原变量数量不变，仅进行变量重组，通过对各因子得分赋权求和计算综合因子得分，权重可取因子方差贡献率占累积方差的比例，一般用于数据脱敏。同时可以得到降维后各变量的组成权重，以表征原变量的信息

保留情况。因子分析主要包括公共因子提取、因子命名及因子得分计算等步骤，如图 2 所示。提取因子的方法包括：主成分分析法(PCA)、最大似然法(ML)、主轴因子法(PA)、普通最小二乘法(OLS)、加权最小二乘法(WLS)、广义最小二乘法(GLS)、Alpha 因子法(AF)等，其中前三种方法较为常用。本研究采用主成分分析法(PCA)，该方法通过特征值分解，将原始变量线性变换为若干个互不相关的主成分，并按方差贡献大小排序。

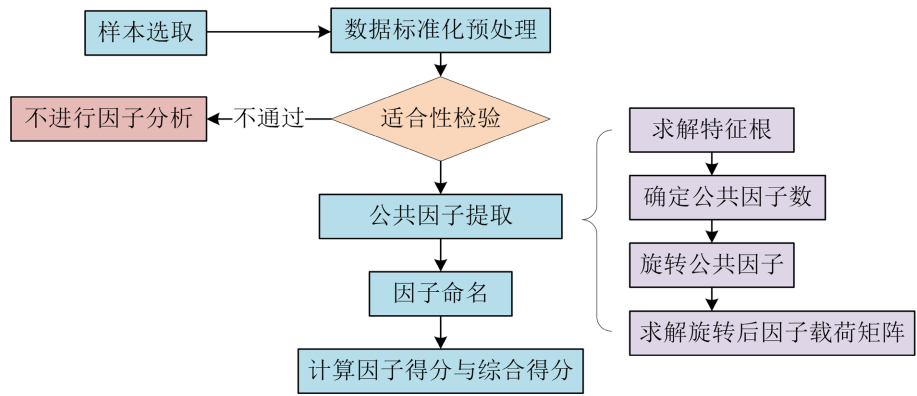


图 2. 因子分析步骤流程图

4. 河流断面特征因子对表面流速系数的影响规律研究

4.1. 基于单因子分析选取影响因子

基于水力学系统能量分配理论[27]，影响垂向流速分布的关键因子须满足：直接参与水流能量耗散(如河床粗糙度、植被密度)；控制断面几何边界条件(如河宽、断面面积、边坡系数、宽深比)；反映动量传递效率(如水力半径、二次流强度)。

以线性拟合方法将表面流速系数 α 随各因子的变化趋势表示如图 3 所示，整体拟合优度较好。观察结果表明： α 随水力半径的增加而增加，趋势接近线性；整体上 α 随河宽的变化趋势较为平滑，呈现为正相关关系并近似线性增长； α 随断面面积的变化趋势整体呈现为正相关关系； α 随边坡系数变化较小，整体上仍为正相关关系； α 随河道宽深比变化趋势整体呈现为负相关关系；根据边界层理论当相对粗糙度 $(Rh/D_{50}) < 10$ 时，水流处于水力光滑区，对数律适用性高，观察到 α 值分布集中且呈正相关趋势， $Rh/D_{50} > 10$ 时进入水力粗糙区， α 值相对稀少且波动性增大，总体上相对粗糙度增大时， α 值呈缓升趋势。

根据测站资料及现场照片，采用自定义归一化等级划分规则进行赋值。稀疏：覆盖率在 0%~10%，0.25；中等：覆盖率在 10%~50%，0；茂盛：覆盖率在 50%~90%，0.75；非常茂盛：覆盖率在 90%~100%，1。对于每种茂盛度下的河流，计算平均表面流速系数并拟合分析发现，表面流速系数 α 与植被密度整体呈负相关关系，在赋值 0.25~0.5 时，表面流速系数相对较高，约达 0.88，而当赋值达到 0.75~1 时， α 均值降至 0.80。以水动力学角度看密集水生植被显著增大近底层流体阻力，加剧底部剪切作用，导致流速垂向分布不均，此时垂线平均流速的下降幅度大于表层流速，致使 α 减小。潮汐作用引发的二次流是影响流速剖面的虽不常见但效应显著的因素，潮汐水位波动与盐度入侵等多重动力作用可以显著改变河流表面坡度或正压压力梯度，迫使水流周期性地向上游或下游发生反向运动。Bechle 等[6]在潮汐河口测验中发现：涨潮阶段表面流速系数 α 高达 0.997，远高于落潮阶段的 0.911，且显著超越常规河流经验值 0.85。所研究测站中唯一受潮汐显著影响而存在二次流的竹岐站呈现类似特征，其 α 值达 0.94 (全数据集最高)，进一步证实潮汐二次流对流速剖面结构的强化作用。

综上，表面流速系数受多种因素的复合影响，其中与水力半径、河宽、断面面积、边坡系数、二次流情况呈正相关，与河道宽深比、河床粗糙度、水生植被密度呈负相关，体现了多因子耦合作用下表面流速系数的动态响应特征。

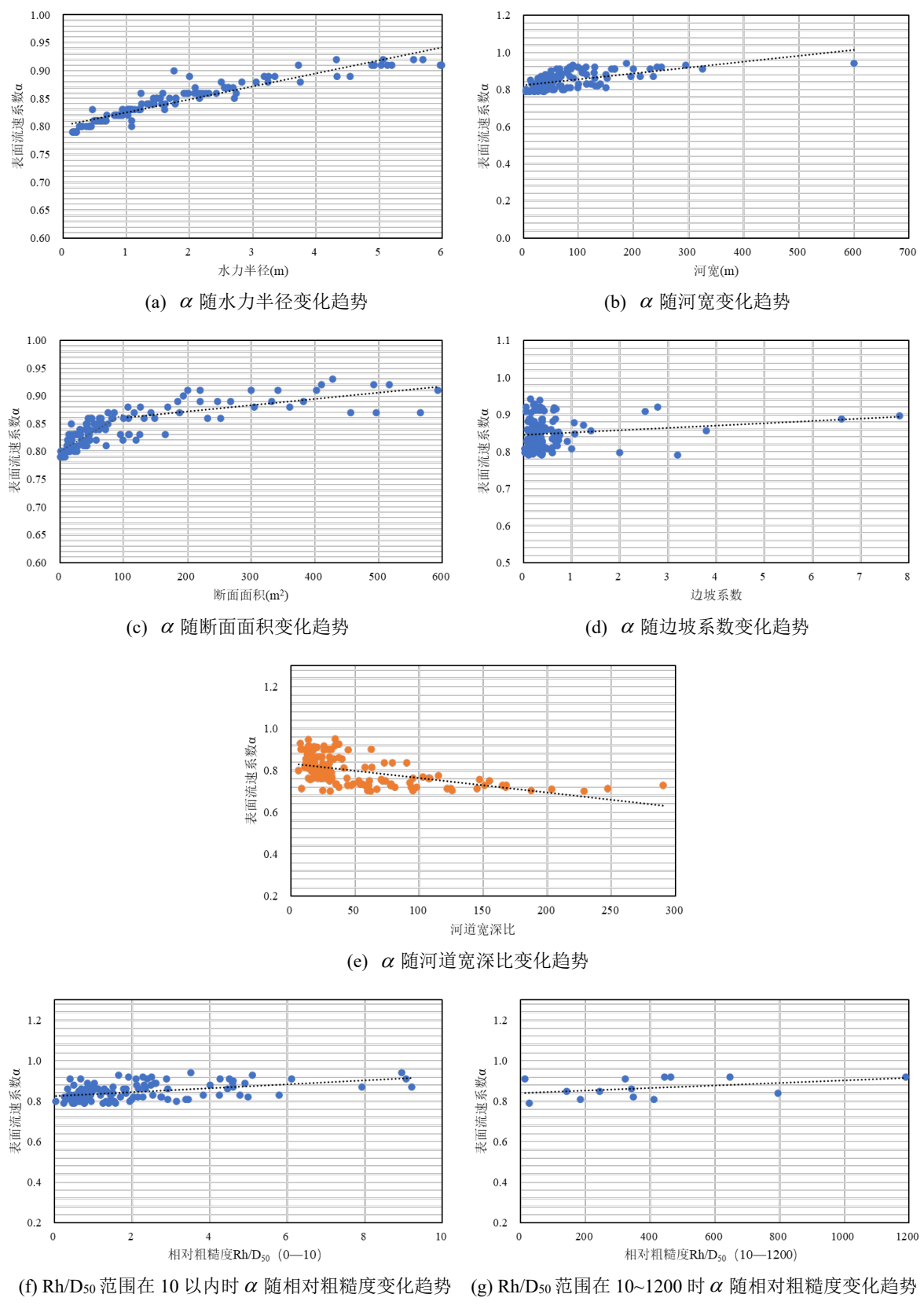


图 3. 不同因子变化趋势图

4.2. 基于多因子分析计算公共因子

4.2.1. 数据标准化与适合性检验

综合各影响因子的拟合结果，研究优选了福建省河流样本集中具备明确水动力作用机制、变化趋势清晰的水力半径、河宽、断面面积、边坡系数、河道宽深比、河床中值粒径、水生植被密度和二次流情况共八个可能影响因子作为因子分析的输入变量。经 KMO 和 Bartlett 检验，本研究所选八个变量间存在一定程度的共线性与结构关联性，具备开展探索性因子分析的条件。进一步对数据集开展样本适度性检验(MSA)，测量每个变量与其余项的相关关系情况。计算结果值均处于[0.2, 0.8]之间，表示可将全部变量纳入因子分析。

为全面评估影响因子之间的相关性，对预处理后的数据集进行 Pearson 相关性分析，结果如图 4。图中下三角区域为相关系数，数值越大、颜色越深说明相关性越强；上三角区域的“**”标记表示相关系数在 $p < 0.01$ 水平上显著，即变量间存在显著线性关系。

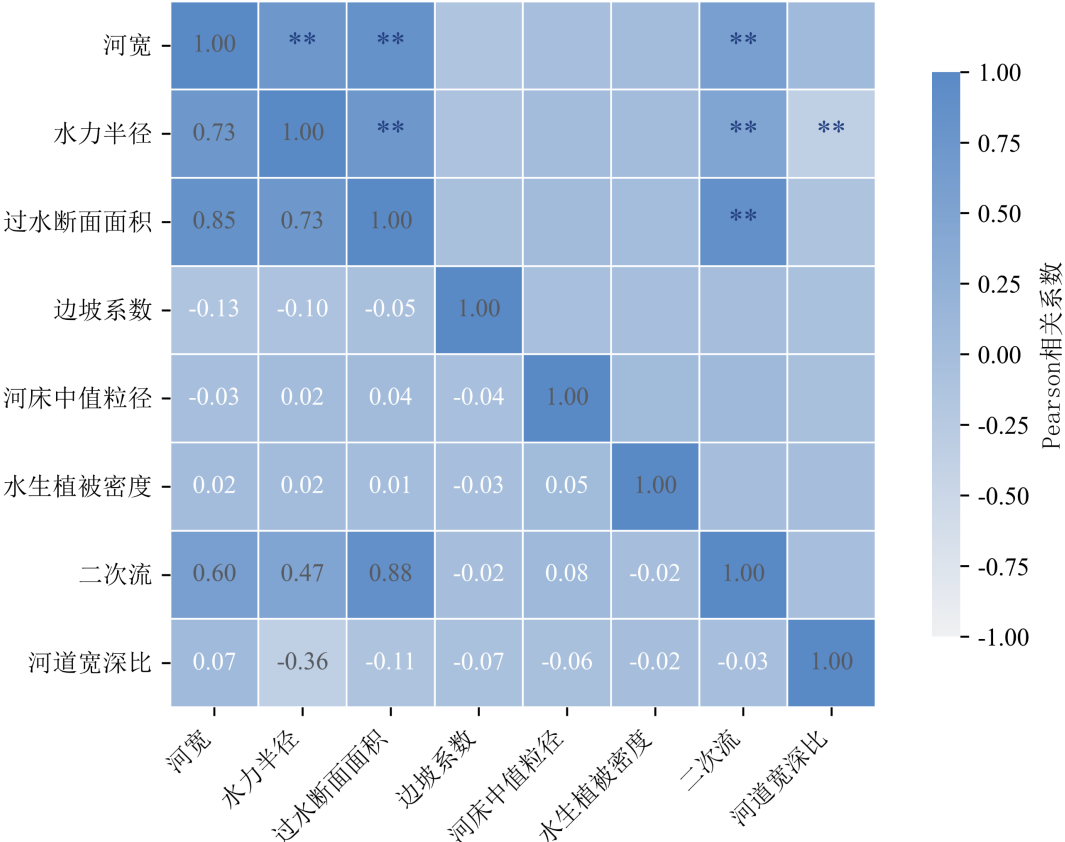


图 4. Pearson 相关性分析结果

4.2.2. 公共因子提取与命名

公共因子的提取采用主成分分析法，使用最大方差法 Varimax 旋转，计算变量旋转前和旋转后的特征根、方差解释率和方差累计解释率，结果如表 2 所示。针对因子提取情况，以及因子提取信息量情况对计算结果进行综合分析，研究从 8 个影响因素变量中提取出 3 个特征根明显大于其他因子的主因子。通过 3.4 节中载荷计算方法得到旋转后因子载荷系数矩阵如表 3 所示，其中负值以红色、正值以蓝色标示。共同度反映变量被因子解释的程度，其值越高解释度越好。由表可得，所有研究变量的共同度值均高于 0.4，表明变量与公因子关联性 强，公共因子能有效提取信息。

表 2. 特征根及方差解释率计算表

因子	旋转前			旋转后		
	特征根	方差解释率%	累积解释率%	特征根	方差解释率%	累积解释率%
1	3.175	39.691	39.691	3.158	39.47	39.47
2	1.16	14.506	54.198	1.164	14.553	54.023
3	1.078	13.473	67.671	1.092	13.648	67.671
4	0.968	12.094	79.765	-	-	-
5	0.945	11.808	91.573	-	-	-
6	0.497	6.209	97.782	-	-	-
7	0.152	1.903	99.686	-	-	-
8	0.025	0.314	100	-	-	-

表 3. 旋转后因子载荷系数表

变量名称	因子载荷系数			共同度(公共因子方差)
	因子 1	因子 2	因子 3	
河宽	0.904	0.161	-0.008	0.843
水力半径	0.815	-0.311	0.094	0.769
过水断面面积	0.978	-0.031	0.011	0.958
边坡系数	-0.124	-0.47	-0.457	0.444
河床中值粒径	0.007	-0.121	0.645	0.43
水生植被密度	-0.026	0.018	0.657	0.433
二次流	0.833	0.035	-0.014	0.696
河道宽深比	-0.097	0.897	-0.164	0.84

基于载荷系数与变量物理意义综合分析，因子 1 体现“河道水动力”类特征，河宽(0.904)、过水断面面积(0.978)、水力半径(0.815)和二次流(0.833)在该因子上载荷显著且相关方向一致，表明其与河道整体空间结构、流量能力与流态复杂性密切相关，故命名为水力特性因子；因子 2 在边坡系数(-0.47)与河道宽深比(0.897)上载荷较大，二者都能反映“形状约束”类特征，强调断面几何形状对流速剖面结构的调控作用，故命名为河道形状因子；因子 3 与河床中值粒径(0.645)和水生植被密度(0.657)正相关，可解释为“底界面扰动”类特征，反映底床特性与植被扰动对流速结构的影响，往往通过增加底部阻力、改变速度梯度、降低垂线平均流速来间接影响表面流速系数，故命名为河床糙度因子。

4.2.3. 因子得分与综合评价

因子得分用于衡量每个样本数据在不同因子上的表现，有利于在后续分析中将公共因子而非原始变量作为分析变量。原理上忽略特有因子后，变量是因子的线性组合，因此通常采用回归法获取因子得分。基于标准化后数据由回归计算构建因子得分计算模型，得到因子得分系数矩阵。原理上忽略特有因子后，变量是因子的线性组合，因此通常采用回归法获取因子得分，计算公式为：

$$F_j = A^T S^{-1} X_j \tag{6}$$

式中： F_j 为因子得分， S^{-1} 为相关矩阵的逆矩阵。

可进一步计算综合因子得分，即对各因子得分赋权求和，权重可取因子方差贡献率占累积方差的比例：

$$F_{\text{综}} = \omega_1 F_1 + \omega_2 F_2 + \cdots + \omega_p F_p \tag{7}$$

式中： $\omega_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^p \lambda_j}$ 代表因子 F_i 的权重，取因子方差贡献率占累积方差的比例。

为将多个公共因子得分转化为对原始变量的加权评价，首先计算变量在每个因子得分中的线性组合系数，其次计算对原始变量的线性组合得到的综合得分系数，最后对综合得分系数进行归一化处理，得到变量最终的权重。计算结果如表 4 所示。结果表明，在研究测站中，流速剖面结构的核心变量主要集中在反映断面尺度与流态特征的维度上，而河床粗糙度与生态因子的影响则相对次要。

表 4. 线性组合系数及权重结果

名称	因子 1	因子 2	因子 3	综合得分系数	权重
特征根(旋转后)	3.158	1.164	1.092		
方差解释率	39.47%	14.55%	13.65%		
河宽	0.5087	0.1494	0.0076	0.3304	16.16%
水力半径	0.4584	0.2883	0.0903	0.3476	17.00%
过水断面面积	0.5505	0.0287	0.0105	0.3294	16.11%
边坡系数	0.07	0.4352	0.437	0.2226	10.89%
河床中值粒径	0.0037	0.1119	0.6169	0.1507	7.37%
水生植被密度	0.0144	0.0169	0.6287	0.1388	6.79%
二次流	0.469	0.0327	0.0133	0.2833	13.85%
河道宽深比	0.0544	0.831	0.157	0.2421	11.84%

4.3. 对比分析

对于在流量计算中起到关键作用的表面流速系数，本身并非稳定的常数值，受河流断面有关的多种因素影响，相关研究并不十分丰富。时钟和李艳红[28]利用室内水槽实验探讨了不同海岸盐沼植被类型对河流平均流速分布及流速剖面的影响。赵连权等[29]通过物理实验发现，水生植被密度越大，水流紊动性越强，但植被密度对水流紊动的影响程度受植被材质影响较大。关于断面构成对垂线流速分布的影响，梁越等[30]基于 N-S 方程推导出适用于光滑床面的流速分布公式。董曾南等[31]研究了不同低淹没度条件下粗糙床面的尺度划分。当前此类研究通常采用不考虑测速断面条件变化的单一的表面流速系数取值方法，不能够满足所有时段在复杂断面的实际使用。因此，研究提出基于实测数据驱动的，适合不同场景、断面河床形态的表面流速系数影响规律，能够适用于多样化的实际河流表面流速推求，而不仅仅局限于单一、特定的河流断面条件，对于解决复杂断面或无比测数据场景下的视觉测流应用问题，提升中国水文测验能力和水平、促进水文现代化建设具有重要意义。

5. 结论

研究揭示了断面特征因子对河流表面流速系数的影响规律，并提出对影响表面流速系数的不同因子的抽取方法体系。基于福建省 135 个水文测站数据，明确了主要河流断面因子对表面流速系数的影响规律：

1) 较大水力半径的断面有利于表面流速系数的提升；表面流速系数与河宽的关系呈现为正相关并近似线性增长；表面流速系数随断面面积与边坡系数变化趋势整体呈现为正相关关系；是河段在潮汐影响下产生的二次流现象改变了传统的流速剖面分布特征，增强了垂向剪切的非对称性，对流速结构起到强化作用；

2) 宽深比较小(<50)时, 流速系数值波动相对较大, 可能由于断面形态各异、水深起伏显著, 造成表面流速系数的不确定性增强, 当宽深比增大到一定程度后, 流速结构更趋稳定, 表面流速系数的取值随之缓慢下降; 当河床粗糙程度升高时, 断面内流速分布趋于平缓, 剖面顶部流速优势减弱, 从而导致表面流速系数降低; 水生植被密度对表面流速系数存在一定负向调节作用;

3) 通过因子分析提取出水力特性、河道形状和河床糙度三个公共影响因子, 其中水力特性因子对系数的影响最为显著(解释率达 39.47%), 其次是河道形状因子(14.55%)和河床糙度因子(13.65%)。

现有的表面流速系数计算方法在极端水文条件和极端复杂断面条件下的适应性尚需进一步验证, 未来可通过扩充极端水文事件和复杂断面条件的观测样本、优化现有模型的算法结构和建立考虑极端条件的修正系数体系等方式进一步提升模型的鲁棒性。同时可进一步推进新型监测技术与传统水文观测的深度融合, 通过整合无人机遥感、卫星影像等先进技术手段构建多源数据监测体系, 并运用深度学习算法实现断面特征的自动提取及动态更新, 实现智能化的系数计算与流量反演。

基金项目

国家重点研发计划项目(2023YFC3209101)。

参考文献

- [1] MUSTE, M., FUJITA, I. and HAUET, A. Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research*, 2008, 44(4): W00D19. <https://doi.org/10.1029/2008wr006950>
- [2] HUANG, K. L., CHEN, H., XIANG, T. Y., et al. A photogrammetry-based variational optimization method for river surface velocity measurement. *Journal of Hydrology*, 2022, 605: 127240. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127240>
- [3] 陈梦, 郑建华, 徐小友, 等. 山区性河流流量视频智能监测方法应用研究[C]//第十四届防汛抗旱信息化论坛论文集. 北京: 中国防汛抗旱, 2024: 690-699.
- [4] CHEN, M., CHEN, H., WU, Z. H., et al. A review on the video-based river discharge measurement technique. *Sensors-Basel*, 2024, 24(14): 4655. <https://doi.org/10.3390/s24144655>
- [5] HAUET, A., MORLOT, T. and DAUBAGNAN, L. Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: A review over a large sample of rivers. *E3S Web of Conferences*, 2018, 40(6): 06015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184006015>
- [6] BECHLE, A. J., WU, C. H., LIU, W. C., et al. Development and application of an automated river-estuary discharge imaging system. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138(4): 327-339. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000521](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000521)
- [7] JOHNSON, E. D., COWEN, E. A. Remote determination of the velocity index and mean streamwise velocity profiles. *Water Resources Research*, 2017, 53(9): 7521-7535. <https://doi.org/10.1002/2017wr020504>
- [8] SMART, G. M., BIGGS, H. J. Remote gauging of open channel flow: Estimation of depth averaged velocity from surface velocity and turbulence. In *Proceedings of river flow 2020*. Boca Raton: CRC Press, 2020: 1035-1044. <https://doi.org/10.1201/b22619-145>
- [9] 杨文瑞. 茧场水文站水面流速系数的试验与确定[J]. *东北水利水电*, 2015, 33(4): 27-28+40.
- [10] 崔科超, 李云武, 武千森, 等. 基于山溪性河流水面流速系数分析[J]. *陕西水利*, 2024(10): 40-43.
- [11] 孔霞. 梨园河肃南水文站水面流速系数分析[J]. *甘肃科技*, 2014, 30(23): 65-67.
- [12] AL-MAMARI, M. M., KANTOUSH, S. A., KOBAYASHI, S., et al. Real-time measurement of flash-flood in a wadi area by LSPIV and STIV. *Hydrology-Basel*, 2019, 6(1): 27. <https://doi.org/10.3390/hydrology6010027>
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 河流流量测验规范: GB 50179-2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [14] 水利电力部水利司. 水文测验手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1976.
- [15] Technical Committee ISO/TC 113/SC 1. ISO 748-2021 Hydrometry—Measurement of liquid flow in open channels—Velocity area methods using point velocity measurements. Geneva: ISO, 2021.
- [16] COSTA, J. E., SPICER, K. R., CHENG, R. T., et al. Measuring stream discharge by non-contact methods: A proof-of-concept experiment. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(4): 553-556. <https://doi.org/10.1029/1999gl006087>
- [17] COSTA, J. E., CHENG, R. T., HAENI, F. P., et al. Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods. *Water*

- Resources Research, 2006, 42(7): W07422. <https://doi.org/10.1029/2005wr004430>
- [18] ISLAM, M. T., YOSHIDA, K., NISHIYAMA, S., et al. Mutual validation of remote hydraulic estimates and flow model simulations using UAV-borne LiDAR and deep learning-based imaging techniques. Results in Engineering, 2023, 20: 101415. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101415>
- [19] DANCEY, C. L., DIPLAS, P., GRIFFITHS, G. A., et al. Turbulent velocity profiles and boundary shear in gravel bed rivers. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(126): 476-476. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2000\)126:6\(476\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2000)126:6(476))
- [20] LE COZ, J., HAUET, A., PIERREFEU, G., et al. Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. Journal of Hydrology, 2010, 394(1-2): 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.049>
- [21] BIGGS, H., SMART, G., DOYLE, M., et al. Surface velocity to depth-averaged velocity—A review of methods to estimate alpha and remaining challenges. Water, 2023, 15(21): 3711. <https://doi.org/10.3390/w15213711>
- [22] PUMO, D., ALONGI, F., NASELLO, C., et al. A simplified method for estimating the alpha coefficient in surface velocity based river discharge measurements. Journal of Hydrology, 2025, 648: 132468.
- [23] CARDOSO, A. H., GRAF, W. H. and GUST, G. Uniform flow in a smooth open channel. Journal of Hydraulic Research, 1991, 27(5): 603-616. <https://doi.org/10.1080/00221688909499113>
- [24] BIGGS, H., SMART, G., HOLWERDA, N., et al. River discharge from surface velocity measurements: A field guide for selecting alpha. National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd., 2021: 2021196CH.
- [25] POPE, S. B. Turbulent flows. New York: Cambridge University Press, 2000. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511840531>
- [26] 王元, 文兰, 陈木法. 数学大辞典[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2017.
- [27] YANG, X., LIU, Q. and WANG, R. A unified energy allocation theory for velocity distribution in open channels. Journal of Hydraulic Research, 2020, 58(3): 350-367.
- [28] 时钟, 李艳红. 含植物河流平均流速分布的实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2003(8): 1254-1260.
- [29] 赵连权, 白晓华, 李丰超, 等. 含天然沉水植物明渠紊流特性研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(11): 113-116.
- [30] 梁越, 曹叔尤, 杨奉广, 等. 光滑宽浅明渠流动垂线流速分布公式研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(5): 147-152.
- [31] 董曾南, 王晋军, 陈长植, 等. 粗糙床面明渠均匀紊流水力特性[J]. 中国科学, 1992(5): 541-547.