

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 04. 008

太湖流域平原河网分流比影响因素

王子悦¹,李一平¹,董志强²,庄巍³,翁晟琳¹,张靖林¹

(1. 河海大学环境学院,江苏 南京 210098; 2. 宁阳县环境保护局,山东 泰安 271400;
3. 生态环境部南京环境科学研究所,江苏 南京 210042)

摘要:以太湖流域典型分汊河道为例,构建河道二维水动力模型,研究平原河网分流比主要影响因素及其作用机理,并运用岭回归建立了平原河网分流比预测方程。结果表明:平原河网分流比与糙率、支汊过水宽度比、水位差呈正相关关系,与干流流量呈负相关关系,与分汊角度关系复杂;干流流量和支汊过水宽度比是影响分流比的主要因素;构建的多因素平原河网分流比综合预测方程可用于预测平原河网分汊河道分流比。

关键词:分流比;平原河网;影响因素;岭回归;太湖流域

中图分类号:TV213.4; X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2019)04 - 0049 - 06

Influencing factors of flow diversion ratio in plain river networks of Taihu Lake Basin//WANG Ziyue¹, LI Yiping¹, DONG Zhiqiang², ZHUANG Wei³, WENG Shenglin¹, ZHANG Jinglin¹ (1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Environmental Protection Bureau of Ningyang, Tai'an 271400, China; 3. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China)

Abstract: Taking the typical branching channel in Taihu basin as an example, a 2-D hydrodynamic model of river channel was constructed to study the main influencing factors and mechanism of flow diversion ratio in plain river networks, and a prediction equation of diversion ratio for plain river networks is established by ridge regression. The results show that the flow diversion ratio of plain river networks has a positive correlation with roughness, ratio of the width of the tributary to that of the main Channel and water level difference, while a negative correlation with the main stream discharge, and a complicated relationship with the branching angle. The discharge of the main stream and the ratio of the width of the tributary to that of the are two dominant factors of the flow diversion ratio. The multi-factor comprehensive prediction equation for the flow diversion ratio of plain river network can be used to predict the flow diversion ratio of braided rivers in plain river networks.

Key words: flow diversion ratio; plain rivers network; influencing factor; ridge regression; Taihu Lake Basin

分汊河道是天然河流中一种常见的河型^[1],大致可以分为单汊、群汊、分汊再汇合3种形式。作为单汊型分汊河道的基础形式和典型代表的Y型分汊河道,是分汊河道中最为普遍的一种分汊形式。分汊河道的分流特性习惯上用分流比表示,其大小和变化会影响分汊河道各支汊的兴衰,并改变航道、决定防洪布局^[3]。平原河网地区受城市化影响,逐渐暴露出水系结构破坏、河流连通受阻、河网水系自然调蓄能力明显下降等问题,而分汊河道作为平原河网的咽喉要道^[4],其分流比对平原河网的

基本格局和河流主干规模有着直接影响^[5]。一般来说,水深、流量、过水面积、水面宽度、流速、分流角、流向、汊道糙率、汊道比降等因素均与分流比有关^[6-7]。目前国内外对分流比的研究主要从室内试验、野外观测、公式推导3个方面展开^[8-10]。在室内试验方面,顾莉等^[11]通过等宽直角分汊水槽试验,发现分流比的大小取决于分汊口水动力条件和支汊的回流特性;Ramamurthy等^[12]指出直角明渠分流比与干流弗劳德数以及上下游纵向水深比有关,并推导出三者之间的理论关系式。在野外观测方面,

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0405203);水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07204003);中央高校基本科研业务费专项(2018B48214);国家自然科学基金(51539003);宁夏回族自治区重点研发计划(20175046802)
作者简介:王子悦(1998—),男,研究方向为水环境数学模型。E-mail:943033756@qq.com
通信作者:李一平,教授。E-mail:liyiping@hhu.edu.cn

唐立模等^[7]分析了多次实测的赣江东西河分流比资料,认为东西河分流比主要受到流量、水位、两汉道过水条件、汉道比降 4 个因素的影响;胡春宏等^[13]运用多元回归分析法建立了分流比的多因素综合关系式,依据滩槽过水宽度比、过水深度比、过水面积比、糙率比、流速比和主槽宽深比 6 个因素对黄河下游复式河道滩槽分流比进行预测。已有研究侧重于理想条件下室内平底水槽实验,难以模拟现实复杂情形。也有研究针对黄河、赣江等地形起伏较大的流域,其分流比很大程度上受到水力冲刷引起的河道演变的影响。但对于地势低平、水流滞缓、以人工河道为主的平原河网地区,如太湖地区,以上研究结论并不适用。

近年来随着城市化进程的推进,平原河网地区城市水文特性发生巨大变化,在防洪、航运、调水引流等方面受到严峻挑战^[14]。分汊河道作为平原河网的咽喉要道,其分流比直接关系到这些问题的解决。本研究以典型太湖流域平原河网分汊河道——位于张家港市谷渚港的 Y 型分汊口为例,采用 EFDC 软件建立二维水动力模型,运用单因素 Logistic 回归和多元回归探究分流比与糙率、分汊角度、过水宽度比、干流流量、水位差的相关关系,在此基础上运用岭回归 (ridge regression) 建立平原河网分流比预测方程,旨在为平原河网水资源调度^[15]、生态引流等提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区域概况

张家港市位于太湖流域,全境地势平坦,河港纵横,河网密布,河道比降平缓,水流方向往复不定,有大小河道 6 033 条,总长 4 477.3 km,是典型的平原河网地区。本文研究对象谷渚港入口为 Y 型分汊河道,研究它对研究平原河网分汊河道分流特性具有较好的参考价值。

1.2 模型介绍

EFDC (environmental fluid dynamics code) 是当前广泛使用的水环境生态模型,适用范围十分广泛,可用于河流、湖库、近岸海域、河口等地表水域,从一维到三维流场模拟、物质运输 (包括温度、盐度和泥沙的运输)、污染物迁移转化等过程的模拟^[16]。EFDC 采用 σ 坐标下的水动力方程,其动量方程见文献^[17]。

1.3 模拟情景设计

影响分流比的影响因素有干流流量 Q 、糙率 n 、分汊角度 θ 、支汊过水宽度与主汊过水宽度比 B 和主汊水位与支汊水位差 Δz 。本研究采取控制变量

法,分别控制其他参数不变,探究单一参数对分流比 ξ 的影响。分流比的计算公式见文献^[18]。重复参数初始值为: $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$, $n = 0.05$, $\theta = 70^\circ$, $B = 0.63$, $\Delta z = 0.1 \text{ m}$ 。各参数工况设置见表 1。

表 1 参数工况

$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	n	$\theta/(^\circ)$	B	$\Delta z/\text{m}$
0.01, 0.02、 3, 5, 8、 10, 12.5, 15、 17.5, 20, 23、 25, 26, 22, 30	0.01, 0.02、 0.025, 0.03、 0.035, 0.04、 0.05, 0.06、 0.07, 0.08、 0.09, 0.10	10, 20, 30、 40, 45, 50、 60, 70, 80、 90	0.35, 0.49、 0.63, 0.80、 0.91, 1.00	0, 0.05, 0.10、 0.15, 0.20、 0.25, 0.30、 0.35, 0.40、 0.45

1.4 数据分析方法

采用单因素 logistic 回归和多元回归进行相关性分析,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$,并运用岭回归方法来克服多重共线性。为统一量纲,将各参数进行标准化处理。数据处理及分析采用的软件为 IBM SPSS Statistics 23 和 Excel 2016,作图软件为 MATLAB 和 AutoCAD 2017。

2 结果与讨论

2.1 模型构建及率定

2.1.1 野外观测结果

河道共设 3 个监测点位:滋生桥、松坟桥和慕墩桥^[19]。野外采样在 2018 年 10 月 26—27 日进行,监测频率为每 30 min 一次,监测时间共 8 h。各断面流量数据来源于 3 个监测点的手持式 ADV 实测数据。使用 ADCP (acoustic doppler current profilers) 多普勒流速剖面仪测量河道各监测点断面形态。河道分汊角度从水系图上测得为 70° 。部分野外观测数据见图 1。

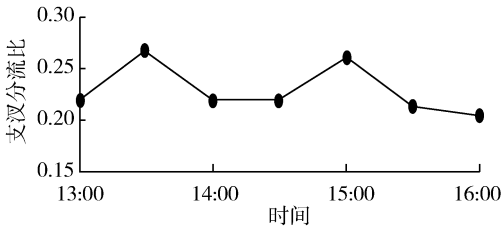


图 1 部分野外观测数据

2.1.2 模型构建

截取东横河长度 2 442.00 m、支汊谷渚港长度 917.00 m 作为模型的水域边界。采用笛卡尔直角坐标划分网格,共划分 22 143 个网格,每个网格边长为 2 m。大多数模型的断面使用梯形概化^[20],本研究根据实际监测断面点位的监测数据,建立模型底部高程文件,将实测地形资料导入后插值获得模型底高程,以求对河道断面进行最近似的模拟。将分汊河道上游入流口、支流出流口以及主汊下游出

流口设置为计算边界。入口口采用流量为边界条件,两个出口口采用水位为边界条件。流量数据、水位数据由野外观测获得。模拟时间设置为 10 d,时间步长 0.4 s。

2.1.3 模型率定

模型率定是建立水动力模型的重要步骤。利用纳什效率系数公式对流量拟合效果进行评估^[21]:

$$E_{NSE} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{0t} - Q_{m})^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{0t} - \bar{Q}_0)^2} \quad (1)$$

式中: Q_{0t} 为 t 时刻流量实测值; Q_{m} 为 t 时刻流量模拟值; $\bar{Q}_0$ 为监测流量的平均值; T 为总观测时间。计算得纳什效率系数等于 0.86,表明模拟结果良好^[22]。将分汊河道分流比 ξ 的实测值与模拟值以及 3 种经验公式法得出的数值进行比较^[3,13,23] (图 2),模拟时间内模拟值与实测数据最为接近,说明模型模拟相比于经验公式法更能准确预测分汊河道分流情况。

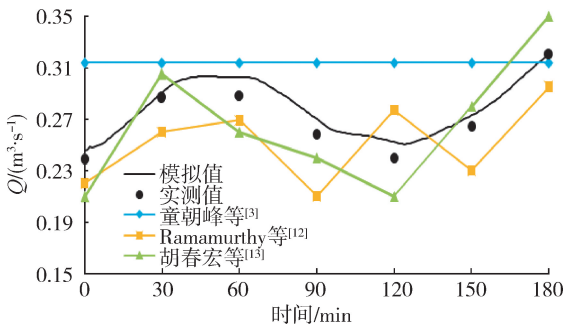


图 2 分汊河道模型率定结果

2.2 河道的水体结构性连通参数对分流比的影响

2.2.1 糙率的影响

图 3 为谷渎港入口分流比 ξ 与河道糙率 n 关系图。运用回归分析的方法建立了 ξ 与 n 的相关关系式:

$$\xi = 0.019 \ln n + 0.31 \quad (R^2 = 0.991, P < 0.001) \quad (2)$$

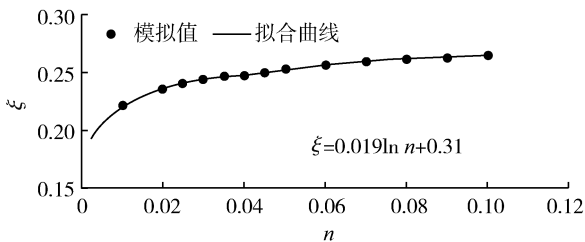


图 3 支汊分流比与河道糙率关系

模拟时糙率取值范围为 0.01 ~ 0.10,分流比变化范围为 0.224 ~ 0.265。糙率在 0.010 ~ 0.025 期间时,分流比增长速率最快,从 0.224 增长到 0.238,涨幅为 1.4%;糙率在 0.07 ~ 0.10 期间时,分

流比增长速率最慢,从 0.261 增长到 0.265,涨幅为 0.4%。糙率在 0.025 ~ 0.070 期间时,即平原河网糙率实际取值区间,分流比范围为 0.238 ~ 0.261。总体而言,分流比随着糙率的增大而增大,增长速度逐渐变缓,但是总体变化范围不大,仅为 4.1%。

平原河网糙率范围约为 0.025 ~ 0.070^[24]。在天然河道,河槽清洁、顺直、平滑、无沙滩、无滩的情形下,糙率取到最小值 0.025。随着河槽植物、滩坑、石头的增多,糙率逐渐增大,在多滞流间段、多丛、有滩坑的情形下,平原河网糙率取到最大值 0.070。在平原河网糙率取值范围内,分流比仅变化 2.3%,可见糙率对分流比的影响很小。糙率对分流比的影响,主要是通过对水流不同程度的阻碍作用使过流流量发生变化来实现的。在河道断面形态及面积一定的条件下,糙率增大时水流流速明显降低,水流克服自身惯性转向所需离心力将相应减小,水流更易进入支汊,从而使分流比增大。陈界仁等^[25]对赣江尾闾进行研究,发现植被较多、糙率较大的区域,支汊分流比有微弱增大的现象。但水中植物对糙率的影响程度小于 0.05^[26],对分流比的影响小于 1%,可以忽略不计。在平原河网整治工程中,常采用生态工程来净化水质^[27]。由于糙率对分流比影响较小,在预测平原河网分流比或建立平原河网模型时,建议对分流量较大的主要支流糙率进行测量,而对一些分流量较小的支流糙率可根据经验公式法推求或参考往年数据即可。

2.2.2 分汊角度的影响

图 4 为谷渎港入口分流比 ξ 与分汊角度 θ 关系图。运用回归分析法建立了 ξ 与 θ 的相关关系式:
$$\xi = -0.09057 |\sin(4\theta)| + 0.2986 \quad (R^2 = 0.787) \quad (3)$$

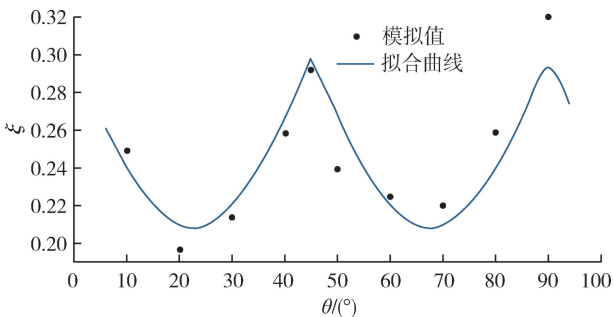


图 4 支汊分流比与分汊角度关系

分汊角度取值范围为 10° ~ 90°,分流比与分汊角度是复杂的三角函数关系。总体而言, θ 在 22.5° 和 67.5° 时,分流比取极小值 0.2; θ 在 45° 时,分流比取极大值 0.3。

目前对支汊分流比和分汊角度的关系尚无定论,如 Grace 等^[28]在室内水槽试验中发现分汊角度

在 70°左右时,支汊分流比取最小值;童朝峰^[4]计算了 30°、60°、90°时的分汊流运动结构,得出分流比先减小后增大,在 60°时分流比最小的结论。但是大多数研究者认为分汊角度增大时,河道水流系统为达到平衡状态会不断调整河道分流形势使支汊分流比减小^[3,29-31]。本文采用小角度间隔 10°进行研究,以更加全面地模拟分汊角度变化对分流比的影响,结果发现分流比和分汊角度的关系十分复杂:①分汊角度与分流比的关系不呈明显的正相关或负相关,而是复杂的三角函数关系;②分汊角度每变化 10°,对分流比的影响在 0.005 ~ 0.07 之间,河道分汊角度测量误差约 ±3°,对分流比影响小于 2%,可以忽略不计。就平原河网而言,不同角度所导致的变化可以归纳为:分汊角度在 22.5°和 67.5°时,支汊分流比最小;45°时,支汊分流比最大。因此,洪水期平原河网分汊河道行洪的过程中,要想提高主汊过洪能力,使相同洪水流量下,增大主汊承担的过洪量,降低支汊分流比,可在平原河网整治工程中设计分汊角度为 60°~70°,使支汊分流比取最小值。在现实情况中,分流比和分汊角度的响应关系更为复杂,分汊角度变化会造成泥沙堆积并对地形等方面产生影响。分流比与分汊角度复杂的相关关系,可能是受到上层水体流向和底层流向不一致的影响^[4],即底层流流向的偏转比表层流大,这在二维模型中被忽略了。

2.2.3 支汊过水宽度比的影响

图 5 为谷渎港入口分流比 ξ 与支汊过水宽度比 B 关系图。运用回归分析法建立了 ξ 与 B 的相关关系式:

$$\xi=0.372B-0.017 \quad (R^2=0.998,P<0.001) \quad (4)$$

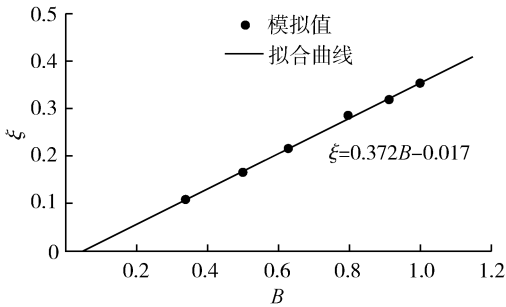


图 5 支汊分流比与支汊过水宽度比关系

图 5 表明,在主汊宽度不变的情况下,支汊分流比与支汊过水宽度比呈良好的线性关系。支汊过水宽度比在 0.34 ~ 0.63 时,分流比由 0.122 增长至 0.219。支汊过水宽度比在 0.63 ~ 0.91 时,分流比由 0.219 增长至 0.321 支汊过水宽度比在 0.19 ~ 1 时,分流比由 0.321 增长至 0.35。总体而言,支汊

过水宽度比对分流比影响较大,在支汊过水宽度比从 0.34 增长至 1 时,分流比由 0.122 增长至 0.35。

随着支汊过水宽度比的增大,支汊过水宽度增大,支汊过水面积增大,从而过水能力提高,其分流比显著增大。在平原河网地区,地形冲淤引起的深度变化较小,过水断面的变化主要来自宽度的改变。相关研究^[32-33]与本文的结论一致。Ramamurthy 等^[34]在室内直角明渠水槽试验中,保持其他条件不变,设置 0.22、0.77、1 这 3 种不同的过水宽度比,发现支汊过水宽度比为 1 时支汊分流比最大。可见,支汊过水宽度比越大,过水能力越强,支汊分流比越大。实际工程中,拓宽、填埋河道导致河道宽度的变化而直接影响了分流比。在对平原河网进行治理时,可考虑拓宽支汊河道,从而增大分流量,加快水体流动速度,起到改善内河水动力条件的效果。

2.3 河道的水体功能性连通参数对分流比的影响

2.3.1 干流流量的影响

图 6 为谷渎港入口分汊河道分流比 ξ 与干流流量 Q 关系图。运用回归分析方法建立了 ξ 与 Q 的相关关系式:

$$\xi=0.452Q^{-0.252} \quad (R^2=0.916,P<0.001) \quad (5)$$

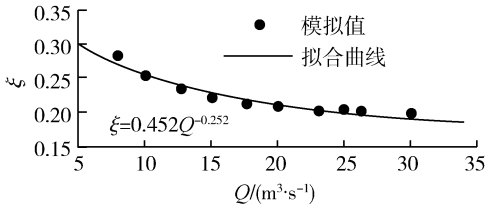


图 6 支汊分流比与干流流量关系

图 6 表明,随着干流流量的不断增加,支汊分流比逐渐减小,干流流量在 8 ~ 20 m³/s 时,分流比由 0.28 减小到 0.2。在干流流量达到临界流量 20 m³/s 之后(20 ~ 30 m³/s 时),流量的增加对分流比几乎没有影响。

本文依据 2018 年 10 月 26—27 日实测流量,将研究的 Y 型河道流量变量参数值确定为 8 ~ 30 m³/s。流量变化会引起分流段水深、流速、分水断面宽度以及过水断面面积等多个水力条件的改变,进而对支汊分流特性产生影响。在其他条件不变的情况下,干流流量增加,流速增大,水流克服自身惯性转向所需离心力相应增大,水流进入支汊变得困难,从而使分流比减小。不同区域河道乃至不同河段的分流比对流量变化敏感性都不同,甚至有不止一个临界流量产生^[35-37]。总体来说,干流流量小于临界流量时,支汊分流比随着流量增大而减小;在干流流量达到临界流量后,流量增加对分流比几乎没有影响。在调水引流工程中,常常通过增大引水量提升整个

河网的水动力条件。但需要指出的是,增大干流引水量会导致支汊分流比减小,可能对支汊水动力起到相反的效果。

2.3.2 水位差的影响

图 7 为谷渎港入口分流比 ξ 与水位差(支汊与主汊水位之差) Δz 关系图。运用回归分析法建立了分汊口分流比与水位差关系式:

$$\xi=0.718\Delta z+0.146 \quad (R^2=0.997,P<0.001) \tag{6}$$

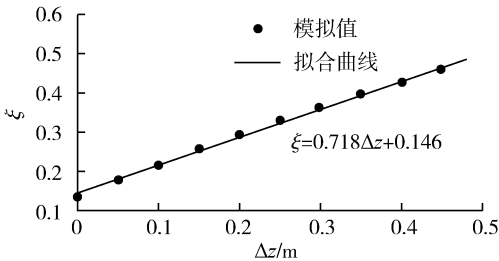


图 7 支汊分流比与水位差关系

图 7 表明,分流比与水位差呈良好的线性关系。水位差由 0 增大到 0.45 m 时,分流比由 0.136 增长到 0.46。随着支汊水位降低,水位差增大,分流比也相应增大。

在主汊水位不变的情况下,水位差增大,支汊水位降低。受重力作用,水流有向水位较低的方向即支汊方向流动的趋势,导致分流比增大。分流比与水位差的线性关系在其他平原河网地区如长江江都段^[38]、鄱阳湖^[39]也得到了验证。在调水引流工程中,主支汊水位差是影响水量分配的重要因素。水位差越大,支汊流量越大,流速越快,支汊水体流动性越强。但是过大的水位差可能会导致开闸时支汊分流量突然增大,水位快速上涨而影响河道生态。因此,应充分考虑水位差对于分汊河道分流比的影响,采取闸坝联合调度、生态补水等措施,合理安排闸坝下泄水量。

2.4 多因素平原河网分流比综合预测方程

2.4.1 预测方程

运用单因素 logistic 回归和多元回归并结合岭回归,得到多参数的平原河网分流比预测方程。过程如下:①选择 ξ 作为因变量, Q 、 n 、 θ 、 B 、 Δz 作为自变量,在单因素回归的基础上,对各自变量进行如下变换,得到: $x_1=Q^{-0.252}$, $x_2=\ln n$, $x_3=|\sin(4\theta)|$, $x_4=B$, $x_5=\Delta z$ 。以使得 ξ 对 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 均为线性关系,这样可以使 ξ 对 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 作多元回归。②随机选取 80% 的模拟后的数据进行多元回归。进行多元回归后,变换后的 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 之间可能具有多重共线性,这样造成糙率 n 的 P 值为 0.501,无法通过检验。③其余自变量均为 P 值极

小、 R^2 较大的情况下,选择岭回归并结合岭迹图,取岭参数 $k=0.6$,进行岭回归,由此得到岭回归方程(式(7))。④将剩余 20% 数据代入式(7)进行验证,得到计算值与模拟值的比较结果。如图 8 所示。图 8 中计算值与模拟值接近,表明式(7)回归效果良好。该方程既克服了多重共线性,同时拟合效果良好,可用来预测平原河网分汊河道分流比。

$$\begin{aligned} \xi= & 0.26Q^{-0.252}+0.12\ln n-0.036|\sin(4\theta)|+ \\ & 0.219B0.425\Delta z-0.006 \quad (0.25<n<0.75, \\ & 0<\theta<\frac{\pi}{2},R^2=0.793) \end{aligned} \tag{7}$$

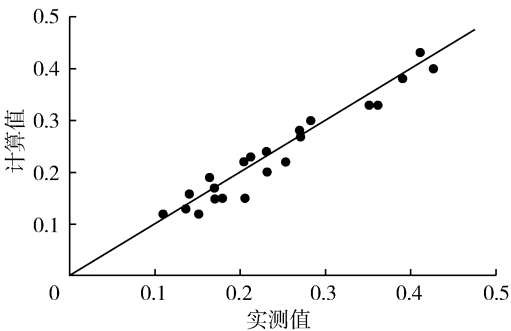


图 8 分流比实测值与计算值比较

2.4.2 贡献模型

为进一步探究干流流量 Q 、糙率 n 、分汊角度 θ 、支汊过水宽度比 B 、水位差 Δz 对分流比 ξ 的贡献,首先以均值对各自变量进行标准化处理,然后按照上述过程进行岭回归,得到回归方程:

$$\begin{aligned} \xi= & 0.133Q^{-0.252}-0.035\ln n-0.0316|\sin(4\theta)|+ \\ & 0.14B+0.054\Delta z+0.255 \end{aligned} \tag{8}$$

变量标准化后,其自变量系数反映了它们对于分流比的贡献大小,与上文中定性讨论结果一致。式(8)中流量与支汊过水宽度比的系数分别为 0.133 和 0.14,显著大于糙率、分汊角度、水位差的系数,表明支汊过水宽度比和干流流量是影响分流比的主要因素,各因素对于分流比的影响程度从大到小排序如下:支汊过水宽度比、干流流量、水位差、糙率、分汊角度。分析其原因,河道流量的大小很大程度上取决于河道过水面积和水流流速,而过水面积和水流流速与过水宽度比和干流流量直接相关。因此,在生态引流、改善内河水动力条件和防洪布局时,应主要注意支汊过水宽度比和干流流量的影响。

3 结 论

a. 基于野外观测数据建立谷渎港入口分汊河道二维水动力模型,模拟结果良好,可用于研究平原河网分汊河道的分流特性。

- b. 分流比随干流流量增大而减小,随糙率、支汊过水宽度比、水位差增大而增大。分流比与分汊角度关系呈复杂的三角函数关系,在 22.5° 、 67.5° 取极小值,在 45° 取极大值。
- c. 用贡献值来评价各因素对于分流比的影响,贡献值从大到小排序为:支汊过水宽度比、干流流量、水位差、糙率、分汊角度。
- d. 运用岭回归得到多因素平原河网分流比综合预测方程,经验证,拟合效果良好,可用于平原河网分汊河道分流比预测。

参考文献:

[1] 韩剑桥,张为,袁晶,等. 三峡水库下游分汊河道滩槽调整及其对水文过程的响应[J]. 水科学进展,2018,29(2):186-195. (HAN Jianqiao,ZHANG Wei,YUAN Jing, et al. Responses of riverbed morphology to the hydrological regime in anabranching reaches of the downstream Three Gorges Reservoir[J]. Advances in Water Science,2018,29(2):186-195. (in Chinese))

[2] 吴迪,郭维东,刘卓也. 复式断面河道“Y”型交汇河口水流水力特性[J]. 水利水电科技进展,2007,27(3):21-23. (WU Di, GUO Weidong, LIU Zhuoye. Hydraulic characteristics of water flow at “ Y ”-shaped junction of river channel with compound cross-section[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2007,27(3):21-23. (in Chinese))

[3] 童朝锋,严以新,孟艳秋,等. 分汊河道分流比估算方法[J]. 水利水电科技进展,2011,31(6):7-9. (TONG Chaofeng,YAN Yixin,MENG Yanqiu, et al. Methods for evaluating flow diversion ratio of bifurcated rivers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(6):7-9. (in Chinese))

[4] 童朝锋. 分汊口水沙运动特征及三维水流数学模型应用研究[D]. 南京:河海大学,2005.

[5] 道付海. 长江河口南北槽分流口工程及瑞丰沙地形变化对落潮分流比的影响研究[D]. 上海:华东师范大学,2017.

[6] 谢鉴衡. 河床演变及整治[M]. 北京:水利水电出版社,1997.

[7] 唐立模,肖洋,周洪都,等. 赣江东西河分流比影响因素研究[J]. 水利水运工程学报,2011,33(4):64-68. (TANG Limo,XIAO Yang,ZHOU Hongdu,et al. Research on the effect factors of flow diversion ratio in Ganjiang River[J]. Hydro-Science and Engineering,2011,33(4):64-68. (in Chinese))

[8] LI Lu,ZHU Jianrong,WU Hui,et al. A numerical study on water diversion ratio of the Changjiang (Yangtze) estuary in dry season [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology,2010,28(3):700-712.

[9] HUA Zulin,GU Li. Experiments of three-dimensional flow structure in braided rivers[J]. Journal of Hydrodynamics,2009,21(2):228-237.

[10] 吴门伍,严黎,陈莹,等. 珠江河口磨刀门门口外东西两汊实测分流比分析[J]. 人民长江,2019,50(1):13-17. (WU Menwu, YAN Li,CHEN Ying, et al. Analysis on measured discharge ratio of east and west branches outside Modaomen entrance of Pearl River estuary [J]. Yangtze River,2019,50(1):13-17. (in Chinese))

[11] 顾莉,华祖林,褚克坚,等. 分汊型河道水流运动特性和污染物输移规律研究进展[J]. 水利水电科技进展,2011,31(5):88-94. (GU Li,HUA Zulin,CHU Kejian,et al. Advances in flow characteristics and pollutant transport laws in braided rivers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(5):88-94. (in Chinese))

[12] RAMAMURTHY A S,SATISH M G. Division of flow in short open channel branches [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1988,114(4):428-438.

[13] 胡春宏,张治昊. 黄河下游复式河道滩槽分流特征研究[J]. 水利学报,2013,44(1):1-9. (HU Chunhong,ZHANG Zhihao. Research on separated discharge characteristics of flood plain and main channel of the Lower Yellow River compound channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(1):1-9. (in Chinese))

[14] 岳晓红,陶娟,吴昊. 太湖流域水环境存在问题的研究[J]. 中国水运(下半月),2017,17(3):117-118. (YUE Xiaohong,TAO Juan,WU Hao. Research on problems of water environment of Lake Taihu Basin [J]. China Water Transport,2017,17(3):117-118. (in Chinese))

[15] 陆志华,李勇涛,钱旭,等. 考虑太湖水质指标的流域骨干工程调度方案[J]. 水资源保护,2018,34(6):44-48. (LU Zhihua, LI Yongtao, QIAN Xu, et al. Scheduling scheme of Taihu Basin key projects considering water qualityindex of Taihu Lake [J]. Water Resources Protection,2018,34(6):44-48. (in Chinese))

[16] HAMRICKJ M. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code : theoretical and computational aspects [R]. Gloucester, Massachusetts: Virginia Institute of Marine, the College of William and Mary,1992.

[17] 邢贞相,张丽慧,纪毅,等. 基于 EFDC 模型五大连池水质模拟和富营养化评价研究[J]. 东北农业大学学报,2018,49(5):88-98. (XING Zhenxiang,ZHANG Lihui,JI Yi, et al. Study on water quality simulation and eutrophication assessment in Wudalianchi based on EFDC model [J]. Journal of Northeast Agricultural University,2018,49(5):88-98. (in Chinese))

[18] THEWODROS K G. Numerical analysis of stormwater flow conditions and separation zone at open-channel junctions [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2017,143(1):1-9.

[19] 王晓,逢勇,沈春其,等. 太湖流域跨界水环境动态监测点位优化布局[J]. 水资源保护,2017,33(5):130-137. (WANG Xiao,PANG Yong,SHEN Chunqi, et al. Layout optimization of water environmental monitoring site of trans-boundary of Taihu Basin [J]. Water Resources Protection,2017,33(5):130-137. (in Chinese))

(下转第75页)

- (20): 54-58. (CHEN Qingfeng, YANG Hongyan, MA Junjian, et al. Application of artificial plants to ecological restoration of heavily polluted river [J]. China Water & Waste Water, 2014, 30(20): 54-58. (in Chinese))
- [15] 贺磊. 微生物强化修复技术在锦州市河道治理中的应用[J]. 中国水能及电气化, 2017(3): 18-21. (HE Lei. The application of enhanced bioremediation technique in river regulation of Jinzhou City [J]. China Water Power & Electrification, 2017(3): 18-21. (in Chinese))
- [16] 严少红, 李涛. 利用水质综合污染指数评价珠江口近岸海域环境质量[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(7): 173-175. (YAN Shaohong, LI Tao. Assessment of the Pearl River estuary pollution by water comprehensive pollution index [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(7): 173-175. (in Chinese))
- (收稿日期: 2018-08-31 编辑: 王 芳)
-
- (上接第 54 页)
- [20] 胡鹏, 崔小红, 周祖昊, 等. 流域水文模型中河道断面概化的原理和方法[J]. 水文, 2010, 30(5): 38-41. (HU Peng, CUI Xiaohong, ZHOU Zuhao, et al. Principle and method of river cross section regularization in watershed hydrological model [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(5): 38-41. (in Chinese))
- [21] 张如强, 高红凯, 刘俊国, 等. 不同目标函数对水文模型模拟效果影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2017, 59(4): 106-111. (ZHANG Ruqiang, GAO Hongkai, LIU Junguo, et al. The influence of different objective functions on hydrological model performance [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017, 59(4): 106-111. (in Chinese))
- [22] MORIASI D N. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
- [23] RAMAMURTHY A S. Dividing flow in open channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(3): 449-455.
- [24] 李炜. 水力计算手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [25] 陈界仁, 余雯. 码头桩群对八卦洲汊道分流比的影响研究[J]. 水运工程, 2012, 19(3): 104-107. (CHEN Jieren, YU Wen. Influence of pile group on division ratio of Baguazhou branch [J]. Port and Waterway Engineering, 2012, 19(3): 104-107. (in Chinese))
- [26] 张秉文. 天然河道糙率计算及取值方法[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(A01): 25-28. (ZHANG Bingwen. Calculation and value selection method of the roughness of natural river channel [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(A01): 25-28. (in Chinese))
- [27] 王鹤霏. 生物-生态技术对水体修复效果的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [28] GRACE J, PRIEST M. Diversion of flow in open channels [R]. Alabama: Alabama Polytechnic Institute, 1958.
- [29] 葛亮. 分汊河道分流特性的研究与应用[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [30] 何伟, 陈静, 谈永锋. 分汊河道的水流运动特性研究进展[J]. 水电站设计, 2008, 24(2): 83-85. (HE Wei, CHEN Jing, TAN Yongfeng. Research progress on flow movement characteristics of bifurcated rivers [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2008, 24(2): 83-85. (in Chinese))
- [31] 严以新, 葛亮, 高进. 最小能耗率理论在分汊河段的应用[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2003, 18(6): 692-697. (YAN Yixin, GE Liang, GAO Jin. Application of the minimum energy dissipation rate theory in the braided river [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(6): 692-697. (in Chinese))
- [32] 何伟. 点源排放下分汊河道污染物分配规律试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [33] 郑鸣芳. 闽江下游分流口河段分流比及河道演变分析[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [34] RAMAMURTHY A S, ZHU W. Dividing rectangular closed conduit flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(12): 687-691.
- [35] 陈界仁, 张婧, 罗春, 等. 赣江下游东西河分流比变化分析[J]. 人民长江, 2010, 41(6): 40-42. (CHEN Jieren, ZHANG Jing, LUO Chun, et al. Analysis on diversion ratio for downstream of Ganjiang River [J]. Yangtze River, 2010, 41(6): 40-42. (in Chinese))
- [36] 黄志文, 许新发, 唐立模, 等. 赣江入鄱阳湖尾间东西河分流比变化规律分析[J]. 人民长江, 2017, 48(24): 26-30. (HUANG Zhiwen, XU Xinfu, TANG Limu, et al. Analysis on variation of flow diversion ratio at tail-streams of Ganjiang River [J]. Yangtze River, 2017, 48(24): 26-30. (in Chinese))
- [37] 姜宁林, 张长宽, 陈永平. 上游径流变化对长江澄通河段汊道分流比的影响[J]. 人民长江, 2012, 43(23): 33-36. (JIANG Ninglin, ZHANG Changkuan, CHEN Yongping. Impacts of upstream discharge on branch discharge ratio of Chengtong reach of Yangtze River [J]. Yangtze River, 2012, 43(23): 33-36. (in Chinese))
- [38] 钱睿智, 王永东, 杨咏梅, 等. 江都东闸引水期宜陵节点分流比模型研究[J]. 江苏水利, 2017, 23(8): 5-10. (QIAN Ruizhi, WANG Yongdong, YANG Yongmei, et al. Study on the split ratio model of Yiling node at diversion stage of Jiangdu East Gate [J]. Jiangsu Water Resources, 2017, 23(8): 5-10. (in Chinese))
- [39] 陈斌, 邹年华, 许新发, 等. 鄱阳湖水位变化对赣江尾间河段分流比影响研究[J]. 人民长江, 2018, 49(8): 8-12. (CHEN Bin, ZU Nianhua, XU Xinfu, et al. Test study on effects of water level fluctuation of Poyang Lake on diversion ratio of estuaries of Ganjiang River. [J] Yangtze River, 2018, 49(8): 8-12. (in Chinese))
- (收稿日期: 2019-03-11 编辑: 彭桃英)