

淹没柔性植被河道阻力系数特性及计算方法研究

赵汗青^{1,2}, 王伟杰³, 赵彦芳^{3,4}, 冯达骞^{3,4}, 李今今³, 徐宇轩^{3,5}

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 科学技术研究院, 北京 100038; 2. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210024; 3. 中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 4. 河北工程大学水利学院, 河北 邯郸 056000; 5. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450045)

摘 要: 植被是河流生态系统中重要的组成部分, 在河流生态修复、河道形态演变和水资源可持续利用中发挥重要的作用, 但水生植被的存在也会改变河道水流的运动形态, 降低水流流速。柔性植被在水流的作用下会产生形态变化, 使水流运动更加复杂。将柔性植被的形变因素加入到经典达西-魏斯巴赫阻力方程, 利用最大差异性算法对试验数据进行筛选分类, 通过遗传算法确定出淹没柔性植被阻力系数的表达式, 基于达西-魏斯巴赫阻力系数与曼宁系数的转换关系得出曼宁系数表达式。结果表明: 提出的达西-魏斯巴赫阻力系数公式和曼宁系数公式具有相对简明的表达形式, 能应用于不同水深、不同植被密度、不同植被高度等条件下的淹没柔性植被河道阻力系数计算, 研究成果可为植被化生态河道设计提供理论依据。

关键词: 柔性植被; 明渠流动; 阻力系数; 最大差异性算法; 遗传算法

中图分类号: TV131.2

文献标识码: A

DOI: 10.12396/znsd.221617

赵汗青, 王伟杰, 赵彦芳, 等. 淹没柔性植被河道阻力系数特性及计算方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(6): 128-132+137. DOI: 10.12396/znsd.221617.

ZHAO H Q, WANG W J, ZHAO Y F, et al. Research on the characteristics and calculation method of resistance coefficient of submerged flexible vegetated river channel[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(6): 128-132+137. DOI: 10.12396/znsd.221617.

Research on the Characteristics and Calculation Method of Resistance Coefficient of Submerged Flexible Vegetated River Channel

ZHAO Han-qing^{1,2}, WANG Wei-jie³, ZHAO Yan-fang^{3,4}, FENG Da-qian^{3,4}, LI Jin-jin³, XU Yu-xuan^{3,5}

(1. Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210024, Jiangsu Province, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. College of Water Resources, Hebei Engineering University, Handan 056000, Hebei Province, China; 5. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Hydropower, Zhengzhou 450045, Henan Province, China)

Abstract: Vegetation is an important part of the river ecosystem, which plays an important role in river ecological restoration, river morphology evolution and sustainable utilization of water resources. However, the existence of aquatic vegetation will also change the flow pattern and reduce the flow velocity. Flexible vegetation present certain oscillation and deformation under the action of water flow, which makes the water movement more complicated. In this paper, the deformation of the flexible vegetation is considered in the classical Darcy-Weisbach equation, and the vegetation properties that affect the resistance coefficient are analyzed. The maximum difference algorithm is used to screen and

收稿日期: 2022-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(52209083); 中国长江三峡集团有限公司科研项目(202103399); 国家自然科学基金项目(51809286); 中国水利水电科学研究院“五大人才”项目(WE0199A052021)。

作者简介: 赵汗青(1991-), 男, 博士, 研究方向为环境生态水力学与泥沙动力学。E-mail: zhao_hanqing@ctg.com.cn。

通讯作者: 王伟杰(1988-), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为流域水环境机理、模拟与调控。E-mail: wjwang@whu.edu.cn。

classify the experimental data, and then the genetic algorithm is used to determine the expression of the resistance coefficient of the submerged flexible vegetation. At the same time, the formula of Manning coefficient is derived by the relationship between the Darcy-Weisbach coefficient and the Manning coefficient. The results show that the friction formulae of Darcy-Weisbach and Manning have relatively concise expressions and can be applied to the calculation of the resistance coefficient of submerged flexible vegetation under different water depths, different vegetation densities and different vegetation heights. The research results can provide a theoretical basis for the design of vegetated ecological channel.

Key words: flexible vegetation; open channel flow; resistance factor; maximum variability algorithm; genetic algorithm

0 引言

植被是河道生态系统中不可或缺的组成部分,它具有许多生态功能。例如通过根系固定来保持河床稳定性,通过表皮的吸收能力来改善水质,并通过为生物提供附着基质和栖息地来丰富生物多样性特征,因此植被被广泛应用于河道生态系统的修复和重建。但植被的存在会阻碍水流运动,降低水流流速,抬升河道水位,影响河道的行洪能力。柔性植被的阻水机理更为复杂,在水流影响下表现出一定的运动和弯曲,从而导致植被顶部的水流更加紊乱,影响了河道局部水流的变化。因此,开展柔性植被的阻力特性研究对改善河道生态环境,计算河道防洪能力具有重要意义^[1]。已有研究更多侧重物理过程描述和基于基理的分析,如Wang^[2]利用水槽实验推断出局部均匀流中孤立圆柱体的阻力系数(C_d)呈现出接近抛物线的形状,在最密集的树冠情况下达到峰值,并将这种 $C_d(x)$ 变化的结果总结为体积阻力公式;Okamoto和Nezu^[3]使用粒子图像测速仪(PIV)在有淹没植被明渠水流中进行湍流测量;Yang和Choi^[4]提出了一种速度关系,用于预测植被中两层流的速度分布;Wang^[5]建立了描述沉水植物归一化阻力与基于植物有效高度的雷诺数之间关系的方程,并用于计算不同生长阶段沉水植物的植被阻力参数。但是大部分研究者没有考虑植被本身形态的影响,尚未形成含植被形态变化的阻力系数计算公式,因此,将柔性植被的变形加入其中,提出了淹没柔性植被河道阻力系数的计算方法。该方法可应用于不同水深、不同植被密度、不同植被高度等条件下的淹没柔性植被河道阻力系数计算,其结果可对河流生态保护及防洪措施提供理论依据。

1 研究方法

1.1 理论分析

经典Darcy-Weisbach公式由Darcy和Weisbach提出,现在被广泛应用于明渠中摩擦损失的计算^[6]。其中的达西-魏斯巴赫阻力系数 f 可表示为:

$$f = \frac{8\tau_0}{\rho \cdot U_b^2} \quad (1)$$

式中: $\tau_0 = \rho u_*^2$ 为水流和固体边界之间的湍流剪应力; ρ 为水的密度; u_* 为摩阻流速; U_b 为断面平均流速。

在有植被存在的情况下,水流与边界产生的湍流剪应力远小于由植被形状所产生的剪应力,因此可忽略不计,故有:

$$\tau_0 = \tau_v = \frac{\rho C_d m D h_v U_v^2}{2} \quad (2)$$

式中: C_d 为植被阻力系数; m 为植被密度; D 为植被杆径; h_v 为植

被高度; U_v 为植被层水流运动速度。

联立公式(1)、(2)可得:

$$f = 4 \frac{h_v}{L_c} \left(\frac{U_v}{U_b} \right)^2 \quad (3)$$

其中: $L_c = (C_d m D)^{-1}$ 为调整长度尺度;

对于淹没植被的情况,计算植被阻力系数的核心是确定植被层中的水流速度与整体断面平均流速的比值。定义 U_s 为淹没植被上方的自由水层的断面平均流速,定义 $\Delta U = U_s - U_v$ 为自由水层流速与植被层流速的差。则有:

$$U_b = \frac{U_v h_v + U_s (h_w - h_v)}{h_w} \quad (4)$$

式中: h_w 为水深。

结合式(4)及 ΔU 的定义,有:

$$\frac{U_v}{U_b} = \left[\frac{h_v}{h_w} + \left(1 - \frac{h_v}{h_w} \right) \left(1 + \frac{\Delta U}{U_v} \right) \right]^{-1} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3),得:

$$f = 4 \frac{h_v}{L_c} \left[\frac{h_v}{h_w} + \left(1 - \frac{h_v}{h_w} \right) \left(1 + \frac{\Delta U}{U_v} \right) \right]^{-2} \quad (6)$$

考虑到淹没柔性植被会在水流作用下发生弯曲,故将柔性植被弯曲前的高度引入公式(6)。

$$f = 4 \frac{h_c}{L_c} \frac{h_v}{h_c} \left[\frac{h_c}{h_w} \frac{h_v}{h_c} + \left(1 - \frac{h_c}{h_w} \frac{h_v}{h_c} \right) \left(1 + \frac{\Delta U}{U_v} \right) \right]^{-2} \quad (7)$$

式中: h_c 为柔性植被弯曲前的高度。

由式(7)可以看出, h_c/L_c 、 h_v/h_c 及 h_c/h_w 反映了植被阻力系数、植被分布密度、植被杆径、植被高度、水深、弯曲前后形态变化的综合作用;而且 $\Delta U/U_v$ 也随着 h_c/L_c 、 h_v/h_c 及 h_c/h_w 变化而变化。

由此,可得到三个无量纲因子 h_c/L_c 、 h_v/h_c 及 h_c/h_w 。

定义:

$$\alpha = \frac{h_c}{h_w} \beta = \frac{h_c}{L_c} \gamma = \frac{h_v}{h_c} \quad (8)$$

Wang^[7]等根据一维闭合数值模型建立 ΔU 和 U_v 的相关关系:

$$\frac{\Delta U}{U_v} = c_1 \left(\frac{1}{\alpha \gamma} \right)^{c_2} (\beta \gamma)^{c_3} \quad (9)$$

式中: c_1 、 c_2 、 c_3 均为参数。

由式(7)、(8)、(9)可建立 f 与 α 、 β 、 γ 之间的函数关系,其中, α 、 β 、 γ 为自变量, f 为因变量,得到 f 的一般公式为:

$$f = 4\beta\gamma \left\{ \alpha\gamma + (1 - \alpha\gamma) \left[1 + c_1 \left(\frac{1}{\alpha\gamma} \right)^{c_2} (\beta\gamma)^{c_3} \right] \right\}^{-2} \quad (10)$$

由式(10)可得 f 与 α, β, γ 三个参数相关关系为:

$$f = F(\alpha, \beta, \gamma)$$

(11)

1.2 最大差异性算法

利用最大差异性算法(MDA)将原始数据进行选择分类。MDA的目标是从大小为 N 的数据库中选择大小为 M 的代表性子集。将 N 维向量组成的数据样本 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,通过该算法得到代表数据多样性的向量子集 $\{v_1, \dots, v_m\}$,通过从数据样本 $\{v_1\}$ 传输一个向量来初始化子集,迭代选择剩余的 $M-1$ 个元素,计算数据库中每个剩余数据与子集元素之间的不相似性,并将最不相似的元素转移到子集。当算法达到 M 次迭代时,该过程结束^[8]。在该方法中,子集的初始数据作为数据样本中相对于其他数据样本的差异和最大的向量。在选择数据的过程中,计算数据库中每个剩余向量与子集中每个向量的相异度,并建立数据库中每个向量与子集中每个向量的唯一相异度来定义最相异的一个。本文即从实验数据中选择出训练组、测试组组和验证组。

1.3 遗传算法

遗传算法是将达尔文遗传规律和自然淘汰的生物进化过程作为理论依据,将原始数据作为初代种群,通过对交叉和变异过程的模拟,筛选并储存适应度较好的个体,并对筛选过程重复进行,最终得到个体的最优解。遗传算法的主要步骤为生成原始种群、选择、交叉和变异^[7]。利用集成遗传算法的程序Eureqa来寻找公式,具体步骤为^[9]:①输入数据。将由最大差异

性算法分类得到的训练组和测试组数据依次输入到程序中。②初始化。程序内部的符号函数生成器会随机的将算子和算符结合起来。本文用到的算符有加、减、乘、除和幂。初始解不用于进化,当子表达式的变化不会导致解的精度超出程序给定的范围时,该子表达式将会被废除。③交叉及变异。运用选定的精度标准对表达式的预测值和验证组的实测值进行比较,舍弃掉不符合标准的表达式,剩下的表达式利用程序内置的概率函数进行杂交,并生成新的表达式。④程序会生成一系列不同精度和复杂度的表达式,需要根据表达式表现的物理意义、精度和复杂度来选择合适的表达式,随即终止程序运行。

在寻找目标表达式的过程中需要遵循两个原则:①为防止公式的过度拟合,需及时终止程序;②选择表达式同时兼顾解的误差和公式的复杂度^[10]。

2 数据分析与公式构建

2.1 实验数据整理与分析

利用文献检索,收集到不同条件下的试验数据。试验数据的相关信息如表1所示。对收集到的数据进行筛选处理,最终得到89组实验数据。使用最大差异性算法对数据进行选择,将训练组、测试组和验证组的数据按照4:4:2的比例进行分配。3组实验数据统计见表2。将训练组和验证组数据导入到Eureqa软件中,进行公式拟合。利用Matlab程序将实验数据进行分类,分类结果如图1所示。

表1 实验数据的相关信息列表

Tab.1 List of relevant information of experimental data

文献	$Q/(m^3 \cdot s)$	B/m	$S_0/\%$	h_w/m	h_v/m	h_c/m	D/m	$m/(株 \cdot m^{-2})$
Dunn et.al, 1996 ^[11]	0.078~0.180	0.91	0.360~1.01	0.230~0.367	0.097~0.161	0.169	0.006 0	43~388
Yang, 2009 ^[12]	0.080~0.011	0.45	0.070~0.361	0.055~0.110	0.023~0.034	0.035	0.002 0	1 400
Kubrak et al, 2008 ^[13]	0.027~0.075	0.58	0.009~0.017	0.180~0.266	0.131~0.164	0.165	0.000 8	2 500~10 000
Okamoto and Nezu, 2010 ^[14]	0.006~0.032	0.40	0.019~0.241	0.150~0.315	0.030~0.096	0.050~0.105	0.008 0	951
Jarvelak, 2005 ^[15]	0.040~0.143	1.10	0.306~0.707	0.155~0.260	0.155~0.260	0.280	0.003 0	12 000
Carollol et al, 2002 ^[16]	0.027~0.189	0.60	0.200~1.000	0.119~0.277	0.031~0.082	0.035~0.200	0.001 0	28 000~44 000

表2 实验数据统计

Tab.2 Experimental data statistics

组别	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	B/m	$S_0/\%$	h_w/m	h_v/m	h_c/m	D/m	$m/(株 \cdot m^{-2})$
训练组	0.006 0~0.189 2	0.40~1.10	0.000 200~0.017 400	0.055 0~0.706 5	0.022 6~0.260 0	0.035~0.280	0.000 825~0.008 000	43~44 000
测试组	0.007 5~0.180 0	0.40~0.91	0.000 190~0.017 400	0.075 0~0.315 0	0.025 3~0.164 0	0.035~0.200	0.000 825~0.008 000	172~44 000
验证组	0.007 2~0.135 0	0.40~0.60	0.000 249~0.017 400	0.150 0~0.315 0	0.030 0~0.154 0	0.050~0.165	0.000 825~0.008 000	951~28 000

2.2 柔性植被阻力系数公式构建

根据最大差异性算法选择的数据,再利用Eureqa程序寻找计算公式。Eureqa程序可以寻找原始数据里变量的关联性,然后提出一系列公式来描述出来。在公式搜索过程中,利用适应度函数评估每个候选解,并且还考虑了求解公式的复杂度。当公式中变量的个数、系数和公式中包含的运算符和类型增加时,公式的复杂度也会随之增加。软件会在复杂度相同的情况下保存误差较小的预测公式。本此公式的搜寻,有14组公式被保留,其中复杂度最小为1,最大为40。求解结果如表3所示。

图2描述了Pareto前沿,总体看来,误差与复杂度之间大致呈负相关关系,当公式复杂度增加时,误差会随之变小。当公式较为简单时,会导致计算值与实测值过度拟合,公式的物理意义不大;但当复杂度提升到一定程度时,模拟的精度提高的并不明显。

当公式的复杂度分别为16、18、20时,复杂度由16变到18时误差的变化较大,但当复杂度由18变为20时误差变化不明显,且公式复杂度为18时,复杂度适中,拟合程度良好。综上所述,选择复杂度为18的公式作为最终公式,即:

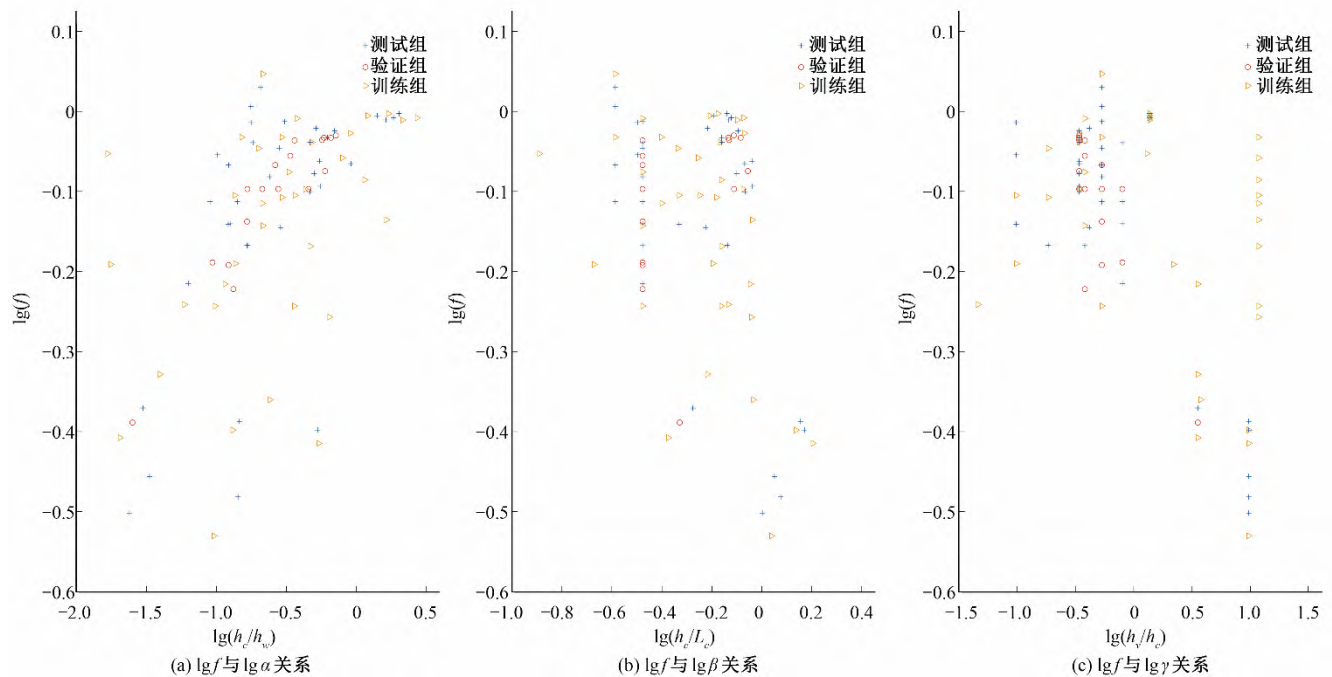


图1 不同数据组分布图

Fig.1 Distribution of different data groups

表3 公式求解

Tab.3 Formula solution

复杂度	适应度	方程
1	1.000	$f_v = 0.239$
3	0.799	$f_v = \alpha\gamma$
5	0.642	$f_v = \alpha\gamma^2$
7	0.622	$f_v = \alpha\gamma^2 - 0.0456$
8	0.570	$f_v = \frac{\alpha}{8.41 - 8.07\gamma}$
12	0.417	$f_v = 0.0602 + \frac{\alpha^2}{8.09 - 7.87\gamma}$
16	0.398	$f_v = 0.0859\gamma + \frac{\alpha^2\gamma}{7.95 - 7.73\gamma}$
18	0.324	$f_v = \frac{4.71\alpha^2\beta\gamma^3}{\beta + \gamma}$
20	0.276	$f_v = \frac{5.39\alpha^2\beta\gamma^4}{\alpha + \beta}$
22	0.229	$f_v = \frac{0.075 + 5.8\alpha^2\beta\gamma^4}{0.974 + \beta}$

$$f_v = \frac{4.71\alpha^2\beta\gamma^3}{\alpha + \beta} \quad (12)$$

式(12)公式拟合程度较好,表达形式相对简单,可以准确、清晰的表达出淹没柔性植被形态特征与阻力系数之间的关系。

在实际工程应用中,曼宁系数的使用相对较多,其与Darcy-Weisbach系数 f 存在定量关系:

$$n = \frac{f^{\frac{1}{2}} R^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{8g}} \quad (13)$$

式中: R 为水力半径; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。

联立式(12)、(13)得到曼宁系数 n 与各个无量纲因子之间的定量关系。

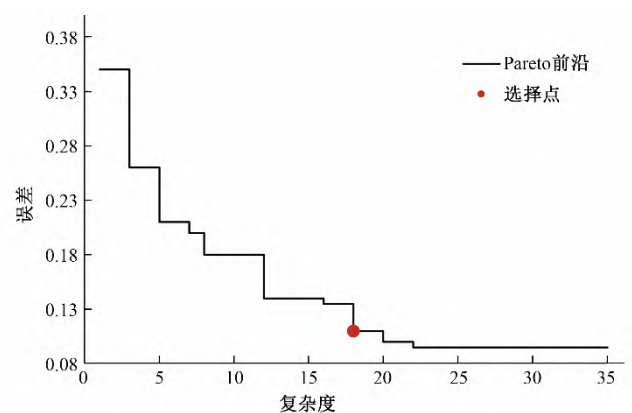


图2 Pareto前沿

Fig.2 Pareto frontier

$$n = \frac{0.245\alpha\beta^{\frac{1}{2}}\gamma^{\frac{3}{2}}R^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{\alpha + \beta}} \quad (14)$$

2.3 公式计算值与实测值的对比分析

为了评价本文公式的拟合程度,将测试组的数据代入本文公式中来对阻力系数进行计算。采用相关系数(r)及均方根误差($RMSE$)评价 f 、 n 与各个无量纲因子之间的拟合程度。

相关系数(r)表示如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (15)$$

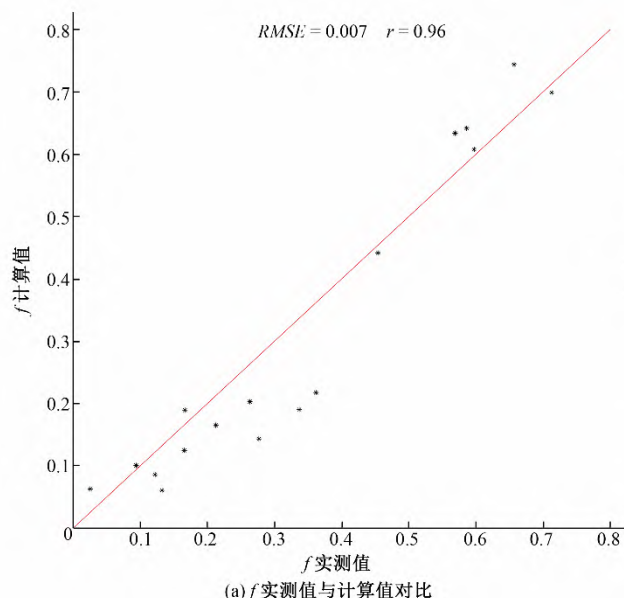
式中: X_i 、 Y_i 为两个不同的变量(在本发明中分别表示为计算值和实测值); $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 分别为变量 X_i 、 Y_i 的均值; N 为数据长度。

r 值的绝对值介于0~1之间。通常来说, r 越接近1,表示 X 、 Y 两个量之间的相关程度就越强,反之, r 越接近于0, X 、 Y 两个变量之间的相关程度就越弱。

均方根误差($RMSE$)是用于表征计算值与实测值曲线的拟

合程度,均方根误差越小,拟合程度越高。公式表示为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}} \quad (16)$$



式中: X_i 、 Y_i 分别为计算值和实测值; N 为数据长度。

将河道阻力系数 f 和曼宁系数 n 的公式计算值与试验测量值进行统计分析,结果见图3。

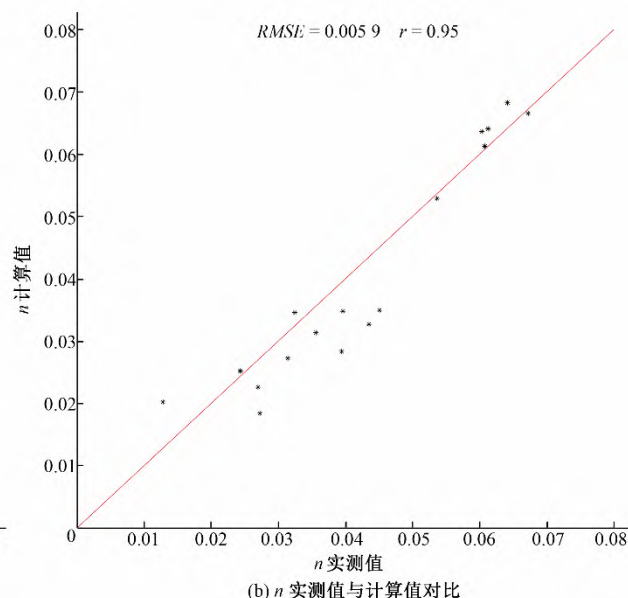


图3 f 、 n 实测值与计算值对比

Fig3 Comparison of measured and calculated values of f and n

由图3可看出,达西-魏斯巴赫阻力系数 f 的公式计算值和实验测量值的相关系数为0.96,均方根误差为0.07;曼宁系数 n 的公式计算值和实验测量值的相关系数为0.95,均方根误差为0.0059。由此可看出本文提出的淹没柔性植被河道阻力系数 f 与曼宁系数 n 计算值与实测值拟合较好,即该公式可以很好的用来计算淹没柔性植被的河道阻力系数。

3 结 论

本文将柔性植被的变形考虑其中,首先分析了达西-魏斯巴赫阻力系数与淹没度及植被属性之间的相关关系,然后将数据进行筛选处理,利用最大差异性算法将实验数据进行选择分类,运用遗传算法寻找因变量和自变量之间的关系,再通过对表达式复杂度、误差的分析,以及不同阻力系数之间的转换关系,提出并验证了淹没柔性植被河道的达西-魏斯巴赫阻力系数公式及曼宁系数公式,为植被化生态河道设计提供理论基础。

参考文献:

- [1] WANG W J, HUAI W X, LI S, et al. Analytical solutions of velocity profile in flow through submerged vegetation with variable frontal width[J]. Journal of Hydrology, 2019, 578: 124-138.
- [2] WANG W J, HUAI W X, THOMPSON S, et al. Steady nonuniform shallow flow within emergent vegetation [J]. Water Resources Research, 2015, 51(12): 10 047-10 064.
- [3] OKAMOTO T, NEZU I. Spatial evolution of coherent motions in finite-length vegetation patch flow [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2013, 13(5): 417-434.
- [4] YANG W, CHOI S U. A two-layer approach for depth-limited open-channel flows with submerged vegetation[J]. Journal of Hydraulic Research, 2010, 48(4): 466-475.
- [5] WANG P, WANG C, ZHU D Z. Hydraulic resistance of submerged vegetation related to effective height [J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(2): 265-273.
- [6] WANG W J, PENG W Q, HUAI W X, et al. Friction factor for turbulent open channel flow covered by vegetation [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-16.
- [7] WANG W J, PENG W Q, HUAI W X, et al. Derivation of canopy resistance in turbulent flow from first-order closure models [J]. Water, 2018, 10(12): 1782.
- [8] CAMUS P, MENDEZ F J, MEDINA R, et al. Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate [J]. Coastal Engineering, 2011, 58(6): 453-462.
- [9] 王宇飞. 天然河道纵向离散系数研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [10] 贾凤聪, 王伟杰, 张 晶, 等. 明渠水流淹没植被阻力系数计算公式研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(3): 132-135.
- [11] JIA F C, WANG W J, ZHANG J, et al. Research on formula for calculating resistance coefficient of submerged vegetation in open channel flow [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(3): 132-135.
- [12] DUNN C, LOPEZ F, GARCIA M H. Mean flow and turbulence in a laboratory channel with simulated vegetation (hes 51) [R]. 1996.
- [13] YANG W, CHOI S U. Mean and turbulence structures of open-channel flows with submerged vegetation [M]// Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009: 429-434.

(下转第137页)

- (Part II)[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2003(4): 1-13.
- [4] 王开荣,黄海军,张永平. 黄河清水沟流路河口尾闾段河床形态萎缩特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(2):15-22.
WANG K R, HUANG H J, ZHANG Y P. Shrinkage on riverbed form of the tail of Yellow River Mouth in Qingshuigou course[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008,28(2):15-22.
- [5] 余 欣,吉祖稳,王开荣,等. 黄河河口演变与流路稳定关键技术研究[J]. 人民黄河, 2020,42(9):66-70.
YU X, JI Z W, WANG K R, et al. Morphological changes of the Yellow River Estuary and key technology for its course stabilization[J]. Yellow River, 2020,42(9):66-70.
- [6] ASLAN A, AUTIN W J, BLUM M D. Causes of river avulsion: insights from the late Holocene avulsion history of the Mississippi River, USA [J]. Journal of Sedimentary Research, 2005, 75 (4) : 650-664.
- [7] PHILLIPS J D. Universal and local controls of avulsions in southeast Texas Rivers[J]. Geomorphology, 2011,130(1-2):17-28.
- [8] LAMB M P, NITTROUER J A, MOHRIGD, et al. Backwater and river plume controls on scour upstream of river mouths: Implications for fluvio-deltaic morphodynamics [J]. Journal of Geophysical Research, 2012,117, F01002.
- [9] CHADWICK A J, LAMB M P. Origin of a preferential avulsion node on lowland river deltas[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46: 4 267-4 277.
- [10] BROOKE S, GANTI V, CHADWICK A J, et al. Flood variability determines the location of lobe scale avulsions on deltas: Madagascar[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47, e2020GL088797.
- [11] 吉祖稳,胡春宏. 黄河口口门地区沟汉形成机制初探[J]. 泥沙研究,1996(4):96-102.
JI Z W, HU C H. A preliminary study on the formation mechanism of the gulch in the mouth area of the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, ,1996(4):96-102.
- [12] JONES L S, SCHUMM S A. Causes of avulsion: an overview. In: Smith, N. D. & Rogers [J]. (eds) : Fluvial Sedimentology VI. Special Publication of the International Association of Sedimentologists, 1999,28:171-178.
- [13] SCHUMM S A. The fluvial system[R]. John Wiley & Sons, New York, 1977.
- [14] BRIDGE J, LEEDER R. A simulation model of alluvial stratigraphy [J]. Sedimentology, 1979,26(5):617-644
- [15] MOHRIG D, HELLER P L, PAOLA C, et al. Interpreting avulsion process from ancient alluvial sequences: Guadalupe-Matarranya system (northern Spain) and Wasatch Formation (western Colorado)[J]. GSA Bulletin, 2000,112:1 787-1 803.
- [16] 杨卓媛,夏军强,周美蓉,等. 黄河口尾闾段河床形态调整及过流能力变化[J]. 水科学进展, 2019,30(3):305-315.
YANG Z Y, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Adjustments in reach-scale bankfull channel geometry and bankfull discharge in the Yellow River Estuary over the past 30 years[J]. Advances in Water Science, 2019,30(3):305-315.
- [17] 张晓华. 黄河干流大型水库修建后上下游再造床过程[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2008.
- [18] 陈彰榕. 黄河现行河口的潮区界[J]. 海洋湖沼通报, 1988(4): 85-88.
CHEN Z R. The tidal range of the modern Yellow River Estuary[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1988(4) : 85-88.
- [19] 侯志军, 由宝宏, 李士国. 近年来黄河尾闾河道冲淤特性分析[J]. 泥沙研究, 2009(1):48-53.
HOU Z J, YOU B H, LI S G. Erosion and deposition characteristic analysis of tail reaches in the Yellow River Estuary in recent years [J]. Journal of Sediment Research, 2009(1):48-53.
- [20] 赵 翔,吉祖稳,王党伟,等. 基于逻辑回归法预测黄河口尾闾河道出汉概率[J]. 泥沙研究, 2021,46(3):36-42.
ZHAO X, JI Z W, WANG D W, et al., The branch probability prediction based on logistic regression method of the Yellow River estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2021,46(3):36-42.
- [21] 杨卓媛,夏军强,周美蓉,等. 黄河口尾闾河道近期自然出汉过程及其机理探讨[J]. 泥沙研究,2022,47(1):65-72.
YANG Z Y, XIA J Q, ZHOU M R, et al., Study on channel avulsion in the recent tail reach of the Yellow River Estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2022,47(1):65-72.
- [22] 于 帅,毕乃双,王厚杰,等. 黄河调水调沙影响下河口入海泥沙扩散及沉积效应[J]. 海洋湖沼通报, 2015(2):155-163.
YU S, BI N S, WANG H J., et al. Suspended sediment dispersal off the huanghe (Yellow River) river mouth and its sedimentary effects under impact of the water-sediment regulation scheme[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1988(4):85-88.
- [23] 谢鉴衡. 河床演变及整治 [M]. 北京:中国水利电力出版社, 1997.
- [24] 明宗富. 冲积河流的河相关系[J]. 泥沙研究,1983(4):77-86.
MING Z F. Alluvial river relationship [J]. Journal of Sediment Research,1983(4):77-86.
- [25] 李 洁,夏军强,邓珊珊,等. 近30年黄河下游河道深泓线摆动特点[J]. 水科学进展, 2017,28(5):652-661.
LI J, XIA J Q, DENG S S., et al. Characteristics of channel thalweg migration in the lower Yellow River over the past 30 years [J]. Advances in Water Science, 2007,28(5):652-661.
- (上接第132页)
- [13] KUBRAK E, KUBRAK J, ROWIŃSKI P M. Vertical velocity distributions through and above submerged, flexible vegetation [J]. Hydrological Sciences Journal, 2008,53(4):905-920.
- [14] OKAMOTO T, NEZU I. Flow resistance law in open-channel flows with rigid and flexible vegetation[J]. River Flow 2010:261-268.
- [15] JÄRVELÄ J. Effect of submerged flexible vegetation on flow structure and resistance [J]. Journal of Hydrology, 2005, 307 (1-4) : 233-241.
- [16] CAROLLO F G, FERRO V, TERMINI D. Flow velocity measurements in vegetated channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002,128(7):664-673.