

文章编号: 2097-096X(2023)-06-0519-07

基于植被粗糙度的生态渠道阻力系数研究

王伟杰¹, 赵进勇¹, 冯达骞^{1,2}, 彭文启¹, 刘晓波¹, 张晶¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056038)

摘要:天然渠道中遍布种类众多的水生植被,河道中的植被在改善水质、减少水土流失和生态修复中起到了重要作用,但同时也会产生阻力,影响河流流速的大小以及流量的分布。本文通过对植被化河道阻力系数进行理论分析,分析出相对粗糙度和阻力长度是影响植被阻力系数的两个关键因子。通过收集到的不同学者不同工况条件下刚性植被的实验数据,利用遗传算法获得植被阻力系数的计算公式。最后通过对比实验及验证组的实测数据与公式计算值,验证该公式对于计算植被阻力系数的精确性。结果表明:本文提出的植被化生态渠道的阻力系数公式相对简洁,模拟精度较高,为阻力系数公式在植被化渠道中的应用提供了参考,对植被化渠道的流量预测及生态修复提供了理论依据。

关键词:植被河道;明渠流动;阻力系数;遗传算法;植被粗糙度

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20230036

1 研究背景

河道中阻力的性质是至关重要的,以此可以确定它的洪水倾向^[1]。植被普遍存在于天然河道中,一方面,水生植被可以提高水质、减少水土流失、为水生动物提供营养物质和栖息场所,从而改善河流生态环境;而另一方面,植被的存在会增大河道的阻力,影响过流能力^[2-6]。因此,提高对水生植被如何影响河道水流的理解,更加精确的模拟植被阻力尤为重要。Wang等^[7]利用刚性圆柱体通过水槽实验测出局部均匀流中圆柱体的阻力系数(C_d)的曲线呈抛物线状,在树冠密度最大的情况下阻力系数达到最大,最后由 $C_d(x)$ 阻力系数的变化推导出体积阻力公式;贾凤聪等^[8]通过理论分析出影响阻力系数的因子,进一步通过水槽实验数据确定了淹没植被环境下阻力系数的计算公式;高学平等^[9]通过对实际植物分区控制流速的方法进行实验,植物密度按照实际河道情况进行布置沿横向和垂向对横断面进行分区,研究分区水体中的植物阻力;Wang等^[10]采用3种沉水植被来进行试验,在不同流速条件下对植被的高度进行了评估,建立起基于植物有效高度的归一化阻力与雷诺数的关系式,用于计算不同生长阶段沉水植物的阻力系数。在此基础上,本文基于理论分析和遗传算法确定了植被阻力系数公式,进一步优化和丰富了植被化河道阻力系数的计算方法,为河流生态修复及水环境治理提供理论依据。

2 研究方法

2.1 理论分析 植被化水力半径由 Cheng 和 Nguyen 提出^[11],可表示为:

$$R = \frac{V}{A} \quad (1)$$

收稿日期: 2023-03-01; 网络首发时间: 2023-10-27

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.tv.20231026.1516.001>

基金项目: 水体污染与治理科技重大专项(2018ZX07105-002); 水利部公益性行业科研专项(201501030); 中国水科院十四五创新团队专项(WE0145B042021); 中国水科院“五大人才计划”之基础研究型人才项目(WE0199A052021)

作者简介: 王伟杰(1988-), 博士, 高级工程师, 主要从事生态水力学模拟与调控等研究。E-mail: wjwang@whu.edu.cn

通信作者: 赵进勇(1976-), 博士, 正高级工程师, 主要从事河流生态修复、生态水工学等研究。E-mail: zhaojy@iwhr.com

式中 V 为单位河床面积的水体积，可表示为：

$$V = h_w - \varphi h_v \quad (2)$$

式中： $\varphi = \frac{m\pi D^2}{4}$ 为河道中植被所占面积； m 为植被密度； D 为植被直径； h_w 为水深； h_v 为植被高度； $A = mDh_v$ 为有效阻力面积，以植被阻力为主。

因此，植被化水力半径可表示为：

$$R_v = \frac{h_w - \varphi h_v}{mDh_v} \quad (3)$$

Wang 等^[12] 提出包含整个水流深度(植被层和表层)的植被特征粗糙度高度 k_v ，可表示为：

$$k_v = \eta h_v \quad (4)$$

式中： $\eta = \frac{h_w L_{sp}}{h_w L_{sp} - h_v D}$ 为植被阵列对水流阻力的参数； L_{sp} 为相邻茎的空间平均距离。

根据先前研究^[13] 可知，建立植被阻力系数 f_v 与 $\frac{h_c}{h_w}$ 、 $\frac{h_c}{L_c}$ 、 $\frac{h_v}{h_c}$ 之间的函数关系，定义相对粗糙度 $\alpha = \frac{k_v}{R_v}$ ，

植被阻力长度 $\beta = \frac{h_v}{L_c}$ ，可得出 f_v 与 α 和 β 两个参数的相关关系：

$$f_v = F(\alpha, \beta) \quad (5)$$

2.2 遗传算法 遗传算法是一种根据达尔文进化论的产生的人工智能算法，该方法模拟了自然界物种遗传进化的机制。遗传算法通过选择、交配和突变这 3 个主要运算单元来推动运算机制。在这之中具有良好适应度的个体将被保留，并淘汰掉低适应度的个体，之后的个体会继承上一代良好的基因，不断进化出更高适合度的个体。具体运算步骤为：①设定评估条件来评估群体中的个体，达到评估条件时终止运算。②保留良好适应度的个体，通过交配及突变产生新个体。③重复上述步骤直到满足设定的条件^[14-15]。本文通过包含遗传算法的程序 Eureqa 来构建表达式，Eureqa 程序会将原始数据划分为训练组和验证组两组数据，利用搜索的符号回归算法解决迭代函数的问题。具体操作只需要输入数据，程序会自动搜索符号回归，直至求解到理想的表达式^[16]。

在利用 Eureqa 工具寻找理想表达式的过程中需要达到以下两个目标：①避免程序过度拟合表达式；②理想的表达式要同时兼顾表达式的复杂度以及求解的误差^[17]。

3 数据分析与公式构建

3.1 数据整理与分析 通过文献检索，收集到不同学者不同工况下的试验数据。对收集到的数据进行筛选处理，最终得到 200 组实验数据，实验数据的相关信息如表 1 所示。使用最大差异性算法将实验数据按照 4 : 4 : 2 的比例选择分类成训练组、测试组和验证组 3 组数据。三组实验数据统计见表 1。将训练组和验证组输入到 Eureqa 软件来寻找理想表达式。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 前人实验数据相关信息列表

Table 1 List of information related to previous experimental data

文献	$Q/(m^3/s)$	B/m	$S_0/\%$	h_w/m	h_v/m	L_{sp}/m	D/m	$m/(株/m^2)$
Shimizu et.al, 1991 ^[18]	0.00207~0.016	0.4~0.5	0.00066~0.007	0.05~0.106	0.041~0.046	0.00442~0.00785	0.001~0.0015	2501~9995
Dunn et.al, 1996 ^[19]	0.046~0.181	0.91	0.0036~0.0161	0.164~0.391	0.1175	0.0508~0.1525	0.00635	43~387
Meijer, 1998 ^[20]	0.866~8.98	3	0.00055~0.00205	0.99~2.5	0.45~1.5	0.0625~0.125	0.008	64~256
Stone and Shen, 2002 ^[21]	0.0024~0.065	0.45	0.00009~0.044	0.151~0.314	0.124	0.038~0.077	0.00318~0.013	166~692

注： Q 为流量； B 为水槽宽度； S_0 为能量坡度； h_w 为水深； h_v 为植被高度； L_{sp} 为相邻茎的空间平均距离； D 为植被直径； m 为植被密度。

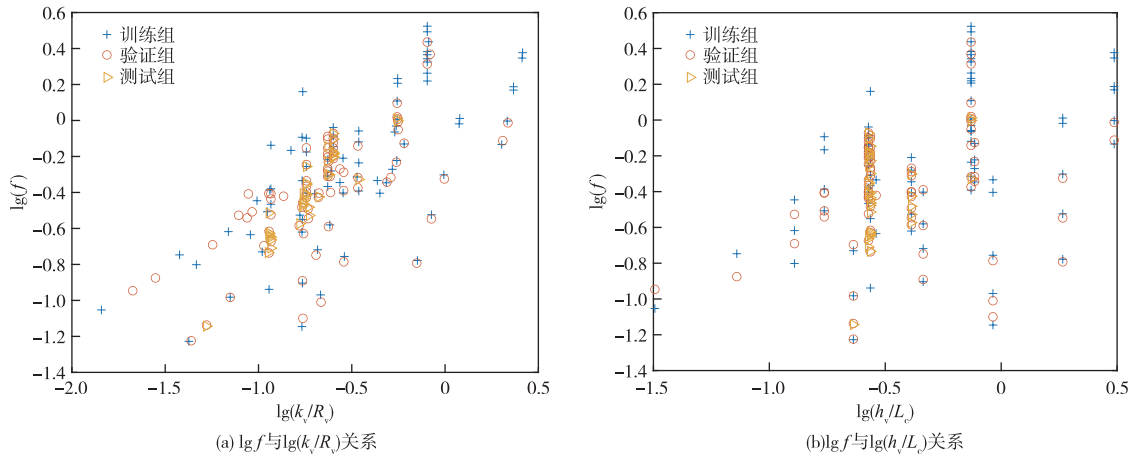


图1 不同数据组分布图

Fig.1 Distribution of different data groups

3.2 植被阻力系数公式构建 将最大差异法选择分类后的数据输入到 Eureka 程序中来寻找表达式。Eureka 程序能够获得实验数据中参数的关联性，并利用若干个表达式表示出来。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。在本次寻找理想表达式的过程中，有 10 组公式被保留，其中复杂度最小为 1，最大为 20。求解结果如表 2 所示。

图 2 描述了 Pareto 前沿，误差与复杂度之间总体呈现负相关关系，当公式复杂度增加时，误差会随之变小。当表达式较为简单时，会导致计算值与实测值拟合程度不够，表达式没有应用价值；但当复杂度提升到一定程度时，会导致表达式过度拟合，并且误差减小的并不明显。

当表达式的复杂度分别为 14、18、20 时，复杂度由 14 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，且表达式复杂度为 18 时，复杂度适中，拟合程度良好。综上所述，选择复杂度为 18 的表达式作为最终公式，即：

$$f_v = \frac{4.19\alpha^3}{\alpha^2 + \beta^3} \quad (6)$$

4 实验与公式验证

4.1 实验 本次实验在长 10 m，宽 1 m，高

表 2 公式求解

Table 2 Formula solution

复杂度	适应度	方程
1	1	$f_v = 0.455$
3	0.828	$f_v = 0.189 + \alpha$
5	0.792	$f_v = 0.243 + 0.762\alpha$
6	0.632	$f_v = \frac{\alpha}{0.119 + \beta}$
8	0.562	$f_v = \frac{2.02\alpha}{0.522 + \beta}$
10	0.536	$f_v = \frac{0.471\alpha + \alpha^2}{\beta}$
12	0.404	$f_v = \frac{2.21\alpha^2}{0.108 + \beta^2}$
14	0.385	$f_v = 0.063 + \frac{2.21\alpha^2}{0.142 + \beta^2}$
18	0.383	$f_v = \frac{4.19\alpha^3}{\alpha^2 + \beta^3}$
20	0.337	$f_v = \frac{\alpha + 3.94\alpha^3}{0.177 + \beta + \beta^3}$

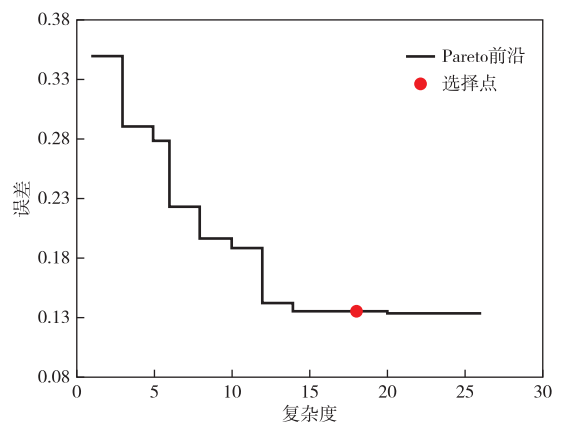


图 2 Pareto 前沿

Fig.2 Pareto frontier

1 m 的矩形循环玻璃水槽中进行。流量的测量采用内置电磁流量计。采用刚性圆柱体来模拟真实植被，两种模拟植被均采用相同的直径 ($d=8$ mm) 和两种不同的植被高度 ($h_v=20$ mm 和 30 mm)，植被密度的变化范围从 34 株/m² 到 134 株/m²。6 个实验工况的实验数据如表 3 所示。

表 3 本次实验数据相关信息列表

Table 3 List of the information related to the experimental data

工况	$Q/(m^3/s)$	B/m	$S_0/\%$	h_w/m	h_v/m	L_{sp}/m	D/m	$m/(株/m^2)$
1	0.08	1	0.1	0.4	0.3	0.0864	0.008	134
2	0.046	1	0.1	0.25	0.2	0.0864	0.008	134
3	0.078	1	0.1	0.35	0.3	0.1222	0.008	67
4	0.063	1	0.1	0.25	0.2	0.1222	0.008	67
5	0.084	1	0.1	0.32	0.3	0.1222	0.008	34
6	0.076	1	0.1	0.25	0.2	0.1715	0.008	34

4.2 公式计算值与实测值的对比分析 为了评价本文表达式的拟合程度，将验证组和本文的实验数据代入本文表达式中计算出植被阻力系数。

再结合经典 Darcy-Weisbach 公式: $f_v = \frac{8gS_0h_w}{U_b^2}$ ，得出水深 h_w 的计算值:

$$h_w = \frac{0.52\alpha^3 U_b^2}{gS_0(\alpha^2 + \beta^3)} \quad (7)$$

式中 U_b 为断面平均流速。

采用相关系数 (r) 及均方根误差 ($RMSE$) 评价植被阻力系数 f_v 和水深 h_w 实测值与计算值的拟合程度。

相关系数 (r) 表示如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (8)$$

式中: X_i 、 Y_i 分别为表达式计算值和实验测量值; \bar{X} 、 \bar{Y} 分别为变量 X_i 、 Y_i 的均值; N 为数据长度。

r 值的绝对值的范围在 0~1 之间。当 r 值距离 1 越近，表示 X 、 Y 两个变量之间的相关程度就越强，反之，当 r 值距离 0 越近， 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:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}} \quad (9)$$

式中: X_i 、 Y_i 分别为计算值和实测值; N 为数据长度。

将植被阻力系数 f_v 和水深 h_w 的公式计算值与实验测量值进行统计分析，结果见图 3。

由图 3 可看出，植被阻力系数 f_v 的表达式计算值和实验测量值的相关系数为 0.946，均方根误差为 0.086；水深 h_w 的表达式计算值和实验测量值的相关系数为 0.929，均方根误差为 0.059；可以看出本文提出的植被阻力系数 f_v 计算公式拟合程度良好，即该公式可以很好的用来计算植被化河道阻力系数。

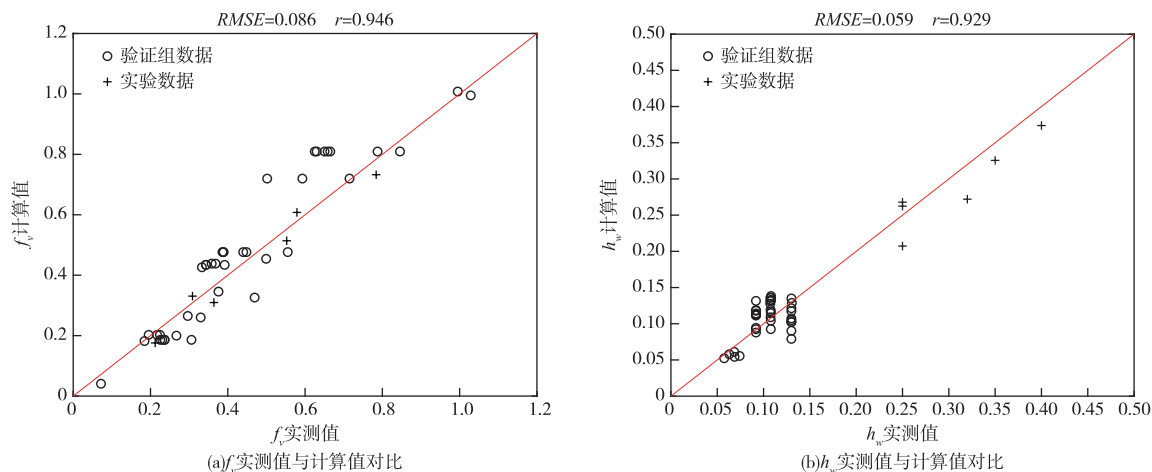


图3 f_v 、 h_w 实测值与计算值对比

Fig 3 Comparison of measured and calculated values of f_v and h_w

5 结论

本文对植被的空间结构进行理论分析，将植被特征粗糙度高度和植被化水力半径与植被阻力系数联系在一起，分析出植被阻力系数与相对粗糙度和植被阻力长度之间的相关关系，结论如下：

(1) 运用遗传算法找出了植被阻力系数与相对粗糙度、植被阻力长度之间的表达式为 $f_v = \frac{4.19\alpha^3}{\alpha^2 + \beta^3}$ ，水面线的表达式为 $h_w = \frac{0.52\alpha^3 U_b^2}{gS_0(\alpha^2 + \beta^3)}$ 。表达式中输入参数较少，形式简洁。

(2) 通过对提出的植被阻力系数表达式及水面线结果进行精度验证，得到植被阻力系数 f_v 的表达式计算值和实验测量值的相关系数为 0.946，均方根误差为 0.086；水深 h_w 的表达式计算值和实验测量值的相关系数为 0.929，均方根误差为 0.059；植被阻力系数与水深表达式计算值和实验测量值拟合结果良好，具有一定的工程实用价值，且可为河道生态修复提供理论依据。

参 考 文 献：

- [1] 何星. 刚性植被河道的圣维南方程修正研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2021. (HE Xing. Study on modification of Saint-Venant equation for rigid vegetation channels [D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2021. (in Chinese))
- [2] 蒋北寒, 杨克君, 曹叔尤, 等. 基于等效阻力的植被化复式河道流速分布研究[J]. 水利学报, 2012, 43(S2): 20-26. (JIANG Beihan, YANG Kejun, CAO Shuyou, et al. Study on velocity distribution of vegetated multi-channel based on equivalent resistance [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(S2): 20-26. (in Chinese))
- [3] GREEN J C. Modelling flow resistance in vegetated streams: review and development of new theory[J]. Hydrological Processes: An International Journal, 2005, 19(6): 1245-1259.
- [4] 王若男, 刘晓波, 韩祯, 等. 鄱阳湖湿地典型植被对关键水文要素的响应规律研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(5): 482-489. (WANG Ruonan, LIU Xiaobo, HAN Zhen, et al. Responses of typical vegetation to key hydrological factors in Poyang Lake wetland [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(5): 482-489. (in Chinese))
- [5] 闫静, 陈扬, 唐洪武, 等. 含植物明渠流动分区和特征尺度研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(6): 428-434, 441. (YAN Jing, CHEN Yang, TANG Hongwu, et al. Research progress on flow zoning and characteristic scale in open channels containing plants [J]. Journal of China Institute of Water

- Resources and Hydropower Research, 2015, 13(6): 428-434, 441. (in Chinese))
- [6] 马井泉, 周怀东, 董哲仁. 水生植物对氮和磷去除效果的试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(2): 130-134, 154. (MA Jingquan, ZHOU Huaidong, DONG Zheren. Experimental study on nitrogen and phosphorus removal effect of aquatic plants [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005, 3(2): 130-134, 154. (in Chinese))
- [7] WANG W J, HUAI W X, THOMPSON S, et al. Steady nonuniform shallow flow within emergent vegetation[J]. Water Resources Research, 2015, 51(12): 10047-10064.
- [8] 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. (JIA Fengcong, WANG Weijie, ZHANG Jing, et al. Research on the calculation formula of resistance coefficient of submerged vegetation by open channel flow [J]. Journal of Hydropower Energy Science, 2022, 40(3): 132-135. (in Chinese))
- [9] 高学平, 吕建璋, 孙博闻, 等. 含植物河道等效床面阻力试验研究[J]. 水利学报, 2021, 52(9): 1024-1035, 1046. (GAO Xueping, LÜ Jianzhang, SUN Bowen, et al. Experimental study on equivalent bed resistance of watercourse containing plants [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(9): 1024-1035, 1046. (in Chinese))
- [10] 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.
- [11] CHENG N S, NGUYEN H T. Hydraulic radius for evaluating resistance induced by simulated emergent vegetation in open-channel flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2010, 137(9): 995-1004.
- [12] WANG W, PENG W, HUAI W, et al. Roughness height of submerged vegetation in flow based on spatial structure[J]. Journal of Hydrodynamics, 2018, 30(4): 754-757.
- [13] 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. (ZHAO Hanqing, WANG Weijie, ZHAO Yanfang, et al. Study on characteristics and calculation method of resistance coefficient of submerged flexible vegetation channels [J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2023(6): 128-132, 137. (in Chinese))
- [14] 贾磊, 郭鑫宇. 考虑生态流量分级约束的跨流域引水与供水优化调度研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(4): 24-30, 36. (JIA Lei, GUO Xinyu. Study on interbasin water diversion and optimal water supply scheduling considering ecological flow classification constraints [J]. Journal of Yangtze River Research Institute, 2018, 35(4): 24-30, 36. (in Chinese))
- [15] 刘兴龙. 黄河源区多个水文站点径流量的分析与预测[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. (LIU Xinglong. Analysis and Prediction of Runoff from Multiple Hydrological Stations in the Source Region of the Yellow River [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019. (in Chinese))
- [16] 吴建峰. 基于 TRMM 和 MODIS 卫星数据的重庆市干旱监测模型构建[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2015. (WU Jianfeng. Construction of Drought Monitoring Model in Chongqing Based on TRMM and MODIS Satellite Data [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2015. (in Chinese))
- [17] 王宇飞. 天然河道纵向离散系数研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017. (WANG Yufei. Study on Longitudinal Dispersion Coefficient of Natural River Channel [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese))
- [18] SHIMIZU Y, TSUJIMOTO T, NAKAGAWA H, et al. Experimental study on flow over rigid vegetation simulated by cylinders with equi-spacing[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1991, 438: 31-40.
- [19] DUNN C, LOPEZ F, GARCIA M H. Mean flow and turbulence in a laboratory channel with simulated vegetation (hes 51)[R]. 1996.
- [20] MEIJER D G, VAN VELZEN E H. Prototype-scale flume experiments on hydraulic roughness of submerged vegetation[C]//28th International IAHR Conference. Graz: 1999.
- [21] STONE B M, SHEN H T. Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(5): 500-506.

Study on resistance coefficient of ecological channel based on vegetation roughness

WANG Weijie¹, ZHAO Jinyong¹, FENG Daqian^{1,2}, PENG Wenqi¹, LIU Xiaobo¹, ZHANG Jing¹

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;*

2. *School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)*

Abstract: The natural channels are full of various aquatic vegetation, which plays an important role in improving water quality, reducing soil and water loss and ecological restoration, but at the same time, it will also produce resistance, affecting the velocity of the river and the distribution of the discharge. Based on the theoretical analysis of the resistance coefficient of the vegetated channel, it is found that the relative roughness and the resistance length are the two key factors affecting the resistance coefficient of vegetation. Through the collected experimental data of rigid vegetation under different working conditions, the formula of vegetation resistance coefficient is obtained by using genetic algorithm. Finally, the accuracy of the formula for calculating the vegetation resistance coefficient was verified by comparing the measured data and the calculated values of the formula. The results show that the resistance coefficient formula of the vegetated ecological channel proposed in this paper is relatively simple and has high simulation accuracy, which provides both a reference for the application of the resistance coefficient formula in the vegetated ecological channel and a theoretical basis for the flow prediction and ecological restoration of the vegetated ecological channel.

Keywords: vegetated channel; open channel flow; resistance factor; genetic algorithm; vegetation roughness

(责任编辑: 王学风)