

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221375

基于 Fluent 的刚性非淹没植被排列方式对地表水流影响分析

王雯军, 张升堂, 张景洲, 王传涛, 马丽君, 张丽丽

(山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 为研究刚性非淹没植被排列方式对地表水流的影响, 结合实际建立水力学模型, 以植被间距均匀排列为对照组, 植被条带式排列且条带间距以 1.333、1.667、2.000、2.333、2.667 倍数增大、条带内距离以 0.833、0.667、0.500、0.333、0.167 倍数减小为试验组, 基于 Fluent 数值模拟 5% 植被盖度(210 株) 植被排列方式变化对水流流态和水力特性的影响。结果表明, 植被相同盖度, 排列趋于均匀; 水深影响下, 流速减小, 水深下段雷诺应力增大; 非淹没植被上表面流速减小, 紊流动能增大。消耗了水体能量达到阻水作用并减少了水流表面的冲刷。该研究为防洪减灾提供了参考。

关键词: 植被盖度; 排列方式; 数值模拟; 水流流态; 水力特性; 防洪减灾

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)05-0034-04

1 引言

随着社会的发展, 自然地表面受人类活动影响而发生改变, 如树木种植、农田耕作等产生植被不同排列方式^[1], 极大影响水流推进时的水力特性, 从而影响洪涝灾害发生率^[2]。目前, 关于植被排列对水力特性影响的研究多集中于植被在相同盖度下布置不同排列类型及植被在不同盖度下布置同一排列类型方面, 但实际情况为在指定面积区域, 人为布置不同宽度的条带区域形成不同排列方式。因此, 研究相同盖度下布置条带宽度有规律变化的植被排列在推进水流时的水力特性有重要实际意义。对此, 本文拟采用物理模型试验与数值模拟相结合的方法, 分析了刚性非淹没植被排列方式对地表水流影响规律, 以期为防洪减灾提供参考。

2 研究方法

2.1 物理模型试验

在坡度为 0° 的长 5.00 m (Y 向)、宽 0.40 m (X 向)、高 0.30 m (Z 向) 矩形水槽推进非淹没水

流进行放水冲刷试验, 水槽分为上游稳水段(1.00 m)、铺设段(3.00 m)、下游尾门段(1.00 m) 三个部分, 在长 3.00 m (Y 向), 宽 0.40 m (X 向) 的铺设段放置 210 个直径为 0.02 m 刚性棒, 模拟植被盖度为 5%, 将其分为 30 行, 每行 7 个, 每 3 行为 1 个条带, 条带中心行即 $Y=0.15、0.45、0.75、1.05、1.35、1.65、1.95、2.25、2.55、2.85$ m 布置的植被保持不变, 条带宽度由植被均匀排列逐渐趋于条带间距离越来越大、条带内距离越来越小的规律变化, 选 $Y=0.75$ m \rightarrow $Y=2.25$ m 为试验区, 植被排列方式分别命名为 A、B、C、D、E、F, 其条带间距离和条带内距离变化规律见表 1、图 1。利用声学多普勒流速仪 (ADV) 在铺设段中心垂线测出水深 Z 与流速 v 的关系。

表 1 植被排列方式变化规律

Tab. 1 The pattern of vegetation arrangement changes

排列方式	间距/m		占比/%		排列方式	间距/m		占比/%	
	条带内	条带间	条带内	条带间		条带内	条带间	条带内	条带间
A	1.000	0.100	0.100	1.000	D	0.050	0.200	0.500	2.000
B	0.083	0.133	0.833	1.333	E	0.033	0.223	0.333	2.333
C	0.067	0.167	0.667	1.667	F	0.017	0.267	0.167	2.667

2.2 数值模拟

2.2.1 网格选取

由于矩形水槽几何形状较简单, 因此选取

收稿日期: 2022-07-06, 修回日期: 2022-08-01

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2020ME248)

作者简介: 王雯军(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源, E-mail: wangwenjun2020l@163.com

通讯作者: 张升堂(1970-), 男, 教授、博导, 研究方向为水文水资源, E-mail: zst0077@163.com

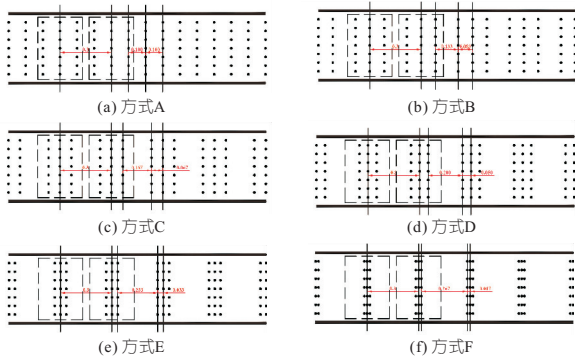


图 1 试验区

Fig. 1 The test area

0.15 m 网格大小且质量高的结构化网格, A~F 网络划分结果见图 2。

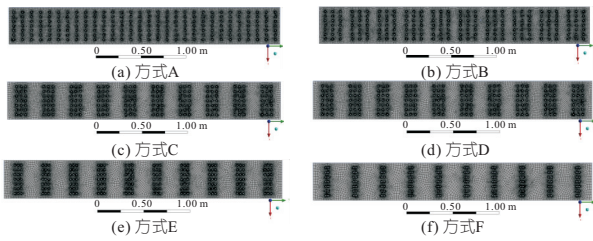


图 2 划分网格结果

Fig. 2 Partition grid result

2.2.2 雷诺应力模型(RSM)

雷诺应力模型(RSM)求解六个雷诺应力项(加上耗散率方程)的偏微分输运方程组,克服涡粘模型缺点,通过平均速度脉动的乘积,导出六个独立的雷诺应力分量输运方程。其中雷诺方程为:

$$\frac{\partial(\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{u_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} + u \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right) - \rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) - C_{1\rho} \frac{\epsilon}{k} \left(\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - C_{2\rho} \left(P_{ij} - \frac{1}{3} P_{kk} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho \epsilon \delta_{ij} \quad (1)$$

紊动能 κ 方程:

$$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} P_{ii} - \rho \epsilon \quad (2)$$

紊动能耗散率 ϵ 方程:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} P_{ii} / 2 - C_{2\epsilon} \rho \epsilon^2 / \kappa \quad (3)$$

式中, ρ 为密度; u_i, u_j, u_k 均为速度分量; μ_t 为 t 时刻动力粘滞系数; $\overline{u'_i u'_j}, \overline{u'_i u'_k}, \overline{u'_j u'_k}$ 均为雷诺应力值分量; t 为时间; x_i, x_j, x_k 均为位置分量坐标; μ 为动力粘滞系数; δ_{ij} 为 Kronecker 符号; $C_{1\rho}, C_{2\rho}, \sigma_\kappa, \sigma_\epsilon, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$ 均为常数项, 分别取为 1.8、0.60、0.82、10、1.44、1.92; P_{ij}, P_{ii} 均为剪应

力产生项分量。

2.2.3 数值模拟方法

基于计算流体力学工具 Fluent 数值模拟, 采用雷诺应力模型(RSM), 对长 3.00 m(Y 向)、宽 0.40 m(X 向)、高 0.07 m(Z 向)坡度为 0° 的计算域进行刚性非淹没植被建模, 选择模型对应位置进行水力特性测量。模型采用速度进口, 压力出口的边界条件。采用基于压力法的 Pressure-Based 求解器, 进行压力修正算法, 近壁处理采用标准壁函数, 空间离散采用标量二阶迎风格式控制方程, 采用 SIMPLEC 算法实现压力—速度耦合。选择 1 000 步迭代步数, 当所有残差均低于 1×10^{-6} 且残差不再发生改变, 认为模拟已经收敛。

3 基于 Fluent 的刚性非淹没植被排列方式对地表水流影响分析

3.1 模型验证

数值模拟计算出的模型中心垂线(0.2, 1.5, 0)→(0.2, 1.5, 0.07)处水深 Z 与流速 v 的关系与数值模拟吻合较好, 验证了数值模拟的有效性。

3.2 水深影响下的水流流态和雷诺应力结果分析

3.2.1 水流流态

流速 v 随水深 Z 的数值模拟结果见图 3。由图 3 可知, Z 向流速符合“J”形分布^[3], 在同一水深, 随着植被排列方式趋于均匀, 流速减小, 且有急流向缓流延伸的趋势, 水流阻力增大, 达到阻水的目的。六种植被排列方式, 所有数据点均位于缓过渡流和缓紊流两个流区^[4], 随着水深的增加, 在推进水流水深下半段由缓过渡流转换为缓紊流。

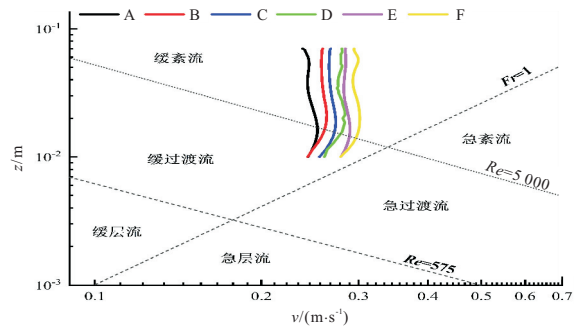


图 3 水流流态

Fig. 3 The flow regime

3.2.2 雷诺应力

由于植被条带内产生的堵塞效应和遮蔽作用^[5], 选取植被排列条带间中心垂线(同为试验区中心垂线)(0.2, 1.5, 0)→(0.2, 1.5, 0.07)位置处, 研究雷诺应力随水深 Z 的变化规律(图 4), 得出雷诺应力随水深的增加呈先增大后减小的变化

趋势^[6],大约在 1/2 水深以下的水流所受影响最大^[7],且在 1/2 水深以下的同一水深,随着植被排列方式趋于均匀,雷诺应力逐渐减小。经计算六种不同植被排列方式的雷诺应力最大值分别为 $(3.22 \times 10^{-4}, 5.71 \times 10^{-3})$ 、 $(2.81 \times 10^{-4}, 5.71 \times 10^{-3})$ 、 $(2.52 \times 10^{-4}, 4.29 \times 10^{-3})$ 、 $(2.33 \times 10^{-4}, 4.29 \times 10^{-3})$ 、 $(2.05 \times 10^{-4}, 5.71 \times 10^{-3})$ 、 $(1.93 \times 10^{-4}, 4.29 \times 10^{-3})$,均出现在水深 $Z = 0.005 \text{ m}$ 处附近即水流底部产生最大雷诺应力且 B~F 最大雷诺应力相对于 A 减少占比分别为 12.3%、25.4%、27.7%、36.4%、42.7%。植被排列方式趋于均匀,雷诺应力越大,形成强剪切层,有助于紊流,产生质量和动量交换,增强动量的垂直运输^[8]。

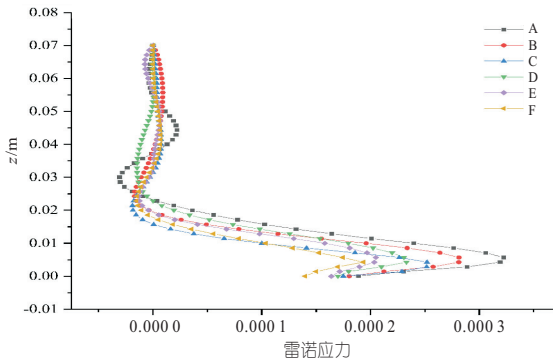


图 4 植被排列条带间雷诺应力关系图

Fig. 4 Reynolds stress relation diagram between strips of vegetation arrangement

3.3 非淹没植被上表面水力特性结果分析

3.3.1 水流速度

基于 Fluent 数值模拟,计算出试验区非淹没植被水流上表面即 $(0, 0.75, 0.07)$, $(0.4, 0.75, 0.07) \rightarrow (0, 2.25, 0.07)$, $(0.4, 2.25, 0.07)$ 速度,可明显得出植被排列条带内速度比条带间速度小。选取试验区非淹没植被水流上表面中心线段 $(0.2, 0.75, 0.07) \rightarrow (0.2, 2.25, 0.07)$ 做出 $Y-v(Y)$ 关系曲线(图 5)可知,在条带内中心 $Y = 1.05, 1.35, 1.65, 1.95 \text{ m}$ 附近流速有最小值,随着植被排列由条带内向条带间延伸,其值逐渐增大,这是由于条带内存在堵塞效应和遮蔽作用,故以植被条带间中线处即 $Y = 0.9, 1.2, 1.5, 1.8, 2.1 \text{ m}$ 处作为研究对象,随着植被排列方式逐渐趋于均匀,流速 $v(Y)$ 减小,故以 A 为对照,计算植被排列条带间中线处 $v(Y)$ 均值, B~F 的 $v(Y)$ 增加占比分别为 9.04%、14.73%、17.97%、20.86%、23.78%(表 2)。说明植被排列趋于均匀,植被固体边界对水流的制约增加,水体惯性力减小,有利于防止水流表面被过度冲刷^[9]。

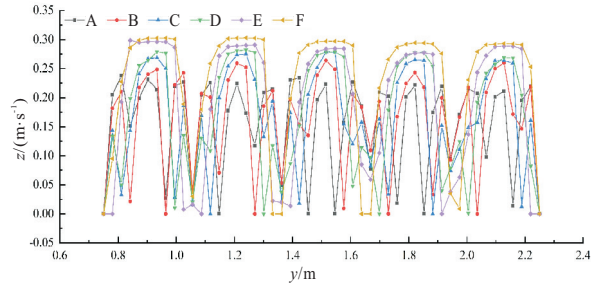


图 5 试验段 Y-v(Y) 关系曲线

Fig. 5 Y-v(Y) relation curve of test section

表 2 植被不同排列方式的 v(Y) 对比

Tab. 2 v(Y) comparison of different vegetation arrangements

Y/m	v(Y)/(m · s ⁻¹)					
	A	B	C	D	E	F
0.9	0.234	0.260	0.275	0.275	0.286	0.293
1.2	0.241	0.254	0.272	0.286	0.283	0.299
1.5	0.237	0.268	0.267	0.283	0.284	0.294
1.8	0.227	0.255	0.270	0.265	0.289	0.291
2.1	0.239	0.248	0.268	0.282	0.282	0.282
v(Y) 均值	0.236	0.257	0.270	0.278	0.285	0.292
增加占比/%	0	9.04	14.73	17.97	20.86	23.78

3.3.2 紊流动能

基于 Fluent 数值模拟,研究试验区非淹没植被水流上表面 $(0, 0.75, 0.07)$, $(0.4, 0.75, 0.07) \rightarrow (0, 2.25, 0.07)$, $(0.4, 2.25, 0.07)$ 紊流动能 $T(Y)$ 分布,可明显得出植被排列条带内紊流动能比条带间的紊流动能大^[10]。选取试验区非淹没植被水流上表面中心线段 $(0.2, 0.75, 0.07) \rightarrow (0.2, 2.25, 0.07)$ 做出 $Y-T(Y)$ 关系曲线,在条带内中心 $Y = 1.05, 1.35, 1.65, 1.95 \text{ m}$ 附近紊流动能有最大值,随着植被排列由条带内向条带间延伸,其值逐渐减小,这是由于条带内产生堵塞效应和遮蔽作用,故以植被条带间中心处 $Y = 0.9, 1.2, 1.5, 1.8, 2.1 \text{ m}$ 处做 $Y-T(Y)$ 关系曲线(图 6),随着植被排列方式趋于均匀,紊流动能 T 整体增大。故以 A 为对照,计算植被排列条带间中线处 T 均值, B~F 的 T 减少占比分别为 9.18%、36.51%、39.03%、63.25%、88.53%(表 3)。说明植被排列趋于均匀,促进了非淹没植被上表面横向动能的交换^[11]。

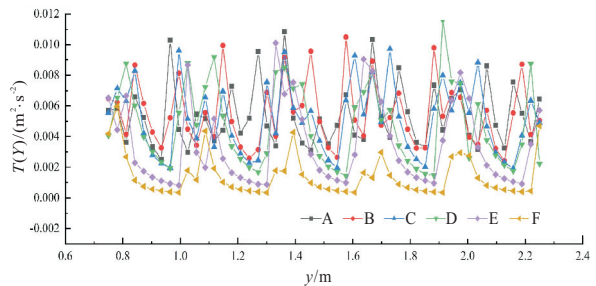


图 6 Y-T(Y) 关系曲线

Fig. 6 The relation curve of Y-T(Y)

表 3 植被不同排列方式的 T 对比Tab. 3 T comparison of different vegetation arrangements

Y/m	$T(Y)/(m^2 \cdot s^{-2})$					
	A	B	C	D	E	F
0.9	1.84×10^{-3}	1.76×10^{-3}	1.47×10^{-3}	1.45×10^{-3}	7.51×10^{-4}	2.78×10^{-4}
1.2	2.01×10^{-3}	1.70×10^{-3}	1.44×10^{-3}	1.29×10^{-3}	8.33×10^{-4}	2.03×10^{-4}
1.5	1.76×10^{-3}	2.10×10^{-3}	1.28×10^{-3}	1.11×10^{-3}	7.08×10^{-4}	2.30×10^{-4}
1.8	2.65×10^{-3}	1.83×10^{-3}	1.06×10^{-3}	1.22×10^{-3}	6.25×10^{-4}	2.15×10^{-4}
2.1	1.84×10^{-3}	1.80×10^{-3}	1.18×10^{-3}	1.10×10^{-3}	7.98×10^{-4}	2.34×10^{-4}
T 均值	2.02×10^{-3}	1.84×10^{-3}	1.28×10^{-3}	1.23×10^{-3}	7.43×10^{-4}	2.32×10^{-4}
减少占 比/%	0	9.18	36.51	39.03	63.25	88.53

4 结论

a. 以刚性非淹没植被建立水力学模型,基于 Fluent 数值模拟控制植被条带宽度规律变化为单一变量,进行 5% 植被盖度不同排列方式对地表水流影响的数值模拟,定性和定量分析水流流态和水力特性的研究结果,符合水力学基本规律。

b. 相同植被盖度,植被排列趋于均匀;水深影响下,流速减小,水深下半段雷诺应力增大,达到阻水的目的;非淹没植被上表面流速减少,紊流动能增大,减少了水流表面冲刷。进一步为精确模拟相同盖度的人工种植植被不同排列方式对地表水流影响提供基理论支持,为区域灾害性洪水预测防治提供依据。

参考文献:

- [1] 雷宏俦. 作物在田间的排列与分布问题[J]. 植物生理学通讯,1963(1):22-33.
 [2] 朱玉鑫,姚顺波. 基于生态系统服务价值变化的环

境与经济协调发展研究——以陕西省为例[J]. 生态学报, 2021, 41(9):3331-3342.

- [3] 惠遇甲,胡春宏. 矩形明槽宽深比和边壁糙率对于流速分布和阻力影响的实验研究[J]. 水科学进展, 1991, 2(1):22-31.
 [4] 陈椿庭. 关于明渠水流的六区流态[J]. 人民长江, 1995, 3(3):43-46.
 [5] ANJUM N, TANAKA N. Investigating the turbulent flow behaviour through partially distributed discontinuous rigid vegetation in an open channel [J]. River research and applications, 2020, 36(8): 1701-1716.
 [6] 王文娥,廖伟,漆力健. 宽窄相间河道水流紊动特性试验研究[J]. 水科学进展, 2020, 31(3):394-403.
 [7] 吕毅. 仿生水草防护条件下明渠水流紊动特性试验研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2020.
 [8] 槐文信,梁雪融. 基于随机位移方法的植被水流纵向离散研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(3): 138-143.
 [9] ZHAO FANG, HUAI WENXIN. Hydrodynamics of discontinuous rigid submerged vegetation patches in open-channel flow[J]. Journal of hydro-environment research, 2016,12:148-160.
 [10] LI Q, ZENG Y H, BAI Y. Mean flow and turbulence structure of open channel flow with suspended vegetation[J]. 水动力学研究与进展(英文版), 2020, 32(2):314-325.
 [11] ANJUM N, TANAKA N. Hydrodynamics of longitudinally discontinuous, vertically double layered and partially covered rigid vegetation patches in open channel flow[J]. River research and applications, 2020, 36(1):115-127.

Fluent-based Impact Analysis of Rigid Non-submerged Vegetation Arrangement on Surface Water Flow

WANG Wen-jun, ZHANG Sheng-tang, ZHANG Jing-zhou, WANG Chuan-tao, MA Li-jun, ZHANG Li-li (College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In order to study the effect of arrangement of non-submerged rigid vegetation on surface flow hydraulic characteristics, this paper established a hydraulic model based on the actual situation. The average vegetation was evenly arranged as the control group, the vegetation was arranged in a strip pattern and the distance between the strips increased in multiples of 1.333, 1.667, 2.000, 2.333, 2.667, while the distance within the strips decreased by 0.833, 0.667, 0.500, 0.333, 0.167 as the experimental group. The numerical simulation based on Fluent verified the effects of changes in the arrangement of vegetation with the 5% coverage (210 plants) on the water flow and hydraulic characteristics. The results show that the vegetation coverage was the same and the vegetation arrangement tended to be uniform. Under the influence of water depth, the flow rate decreased, and the Reynolds stress in the lower half of the water depth increased. The surface flow rate on the non-submerged vegetation decreased, and the turbulent flow increased. The water energy is consumed to prevent water and reduce the erosion of water surface. This study provides reference for flood control and disaster reduction.

Key words: vegetation coverage; distribution pattern; numerical modeling; flow regime; hydraulic characteristics; flood control and disaster mitigation