

簇状分布的刚性双层植被明渠紊流特性分析

吕升奇¹, 陈俊舟¹, 陈红^{1,2}, 陈界仁¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水科学研究院, 江苏 南京 210098)

摘要:采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型, 对簇状分布的刚性双层植被明渠水流进行了模拟和分析; 根据时间及空间的双平均方法对植被明渠水流的流速及紊动参数进行了统计。结果表明: 簇状分布的植被明渠水流可以分为植物区、间隙区及主流区, 不同区域时均流速的大小和分布各异; 双层植被明渠水流中, 时均流速垂线分布在近床面、低植物顶部附近及高植物顶部附近均出现拐点, 脉动强度和紊动能的最大值出现在高植物顶部附近。

关键词: 双层植被; 簇状分布; 植被明渠水流; 紊流特性; 紊动能

中图分类号: TV133 文献标志码: A 文章编号: 1006-7647(2024)03-0008-05

Analysis of turbulent characteristics of open channel flow with patchy distributed double-layer rigid vegetation// LYU Shengqi¹, CHEN Junzhou¹, CHEN Hong^{1,2}, CHEN Jieren¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Institute of Water Science and Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The RNG $k-\varepsilon$ turbulence model was used to simulate and analyze the open channel flow with patchy distributed double-layer rigid vegetation. The flow velocity and turbulence parameters of the open channel flow with vegetation were statistically analyzed based on the double-average method of time and space. The results show that the open channel flow with patchy distributed vegetation can be divided into vegetation zone, gap zone, and mainstream zone, and the magnitude and distribution of time-averaged flow velocity vary in different zones. In the open channel flow with double-layer vegetation, the vertical distribution of time-averaged flow velocity exhibits inflection points near the bed surface, near the top of the low plants, and near the top of the high plants, and the maximum values of fluctuation intensity and turbulence kinetic energy occur near the top of the high plants.

Key words: double-layer vegetation; patchy distribution; open channel flow with vegetation; turbulent characteristics; turbulence kinetic energy

近年来,随着水环境和水生态问题越来越受到重视,针对植被明渠水流的研究已成为一个重要的研究课题。在自然界河流中,水生植物的存在会阻碍水流运动,降低其流速^[1],抬高河道水位,影响河道的行洪能力。同时,植物减弱了水流对河岸的冲刷,还能起到净化水体、美化水环境、平衡水生态的作用^[2-3]。在大部分研究中,植物被假定是呈单层均匀分布的。D' Ippolito 等^[4]使用刚性圆柱体研究了不同植物密度下含非淹没植被明渠水流的水流阻力,认为阻力系数取决于植物密度而与雷诺数无关。闫静等^[5]采用粒子图像测速技术对不同植物密度下的植被明渠水流进行试验,研究了植物密度对植物顶部猝发现象的影响。Zhao 等^[6]利用大涡模拟

模型对不连续分布植被明渠水流进行了研究,认为纵向流速与雷诺应力分布受植被密度和雷诺数影响较大。Huai 等^[7-8]结合水槽试验与数值模拟对悬浮植被明渠水流的水动力特性进行了研究,通过对动量方程进行解析求解,得到了适用于悬浮植被明渠水流流速的三层解析模型,流速和雷诺应力的数值结果与试验数据吻合良好。

河流中的植物通常呈非线性、不同高度、簇状分布,横向上水流与植物之间、纵向上不同植物层之间的流动存在着复杂的相互作用^[9-10]。簇状分布的植物存在于水流中的局部区域,水流流经植物区及非植物区会相互影响,簇状分布的植物在水动力作用下产生复杂摆动及应变,其对水流的作用更加复

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0407204)

作者简介:吕升奇(1976—),男,讲师,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:cnjlvsq@hhu.edu.cn

通信作者:陈红(1981—),男,正高级实验师,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:chh_hhu@hhu.edu.cn

杂^[11-13]。在实际河流中,植物总是多种多样的,不同高度的植物共生共存,针对双层植被明渠水流的研究已有不少。例如:Liu等^[14]利用激光多普勒测速仪测量了双层植被明渠水流中的脉动流速,指出在低植物顶部存在速度突增现象,在高植物顶部存在不稳定的高紊流区;Huai等^[15-16]基于三区划分观点,利用混合长度理论求解动量方程,提出了一种预测双层植被明渠水流中不同区域纵向流速分布的解析模型,并利用试验数据验证了模型的有效性;Anjum等^[17]利用雷诺应力模型对双层植被明渠水流中的流速分布进行了计算,发现低植物顶部附近的混合层平均流速存在拐点;Rahimi等^[18]利用 $k-\varepsilon$ 紊流模型对不同布置方式的双层植被明渠水流进行了数值模拟,发现低植物和高植物之间的水流相互作用,产生了混合速度层;罗晶等^[19]对不同直径下植物对流场的影响进行了数值模拟,发现水流中不同横纵剖面的水位、平均流速与植物直径有着密切关系;Asif等^[20]对不同淹没条件下的双层植被明渠水流进行了数值模拟,发现在水流的中心区域,纵向流速呈波峰和波谷交替分布,而在植物两侧区域,纵向流速呈锯齿状分布。上述双层植被明渠水流研究大都假定植物是均匀分布的,由于植物分布、杆径、密度、水深等影响因素较多,簇状分布的双层植物对明渠水流的影响更为复杂,目前这方面的专门研究还较少,本文尝试探讨簇状分布刚性双层植物对明渠紊流特性的影响。

1 数值模型及其验证

基于 RNG $k-\varepsilon$ 方程建立刚性双层植物明渠水流数值模型,研究簇状双层植被对明渠紊流特性的影响。水流运动满足质量守恒及动量守恒方程。RNG $k-\varepsilon$ 方程对于复杂紊流问题具有较高预测精度,在植被明渠水流数值模拟方面被较为广泛地应用。该方程通过修正紊流动力黏滞系数考虑平均流动中的旋转情况,体现小尺度运动的影响。参照现有研究成果^[21-22],模型中参数的取值为: $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_{\mu} = 0.09$ 。

1.1 试验工况

Liu等^[14]在长4.3 m、宽0.3 m、坡度为0.003的水槽中进行试验,利用激光多普勒测速仪测量了双层植被明渠水流的流速场,水流平均流速为0.342 m/s,植物直径 $d = 0.635$ cm,双层植物高度分别为高植物 $h_1 = 7.6$ cm、低植物 $h_2 = 5.1$ cm,植物布置方式为交错布置,高植物和低植物的间距分别为 $10d$ 和 $5d$,总水深 $H = 10.93$ cm,弗劳德数为0.33,基于水深的雷诺数为37300。

本文采用Liu等^[14]的试验数据对紊流模型进行验证,模型计算区域长0.762 m、宽0.3 m、高0.1093 m,植物的布置方式及水流特性参数与试验相同。进行模型验证的点有3个,点1位于高植物下游 $2.5d$ 处,点2位于低植物上游 $2.5d$ 处,点3位于低植物下游 $2.5d$ 处,具体植物布置方式与验证点位置见图1。

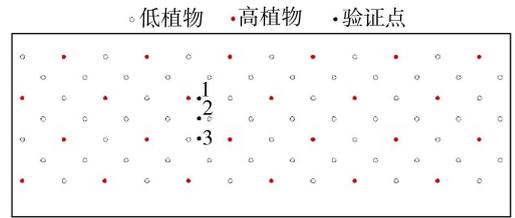


图1 植物布置方式及紊流模型验证点位置

1.2 数值模拟边界条件

紊流模型上下游边界采用周期性循环边界,周期性条件设置为质量流量边界条件,可以消除模型长度及进出口设置可能引起的计算误差。计算域顶面采用刚盖假定法进行处理,计算域底面、侧面及植物表面均设置为无滑移壁面,在近壁区域使用标准壁面函数法修正。为了使流动成为完全发展的紊流,在计算10个流动周期后取20个流动周期进行时间平均统计。采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型进行计算,模型压力与速度的耦合采用 SIMPLE 算法。梯度离散采用基于单元的最小二乘法,压力项离散格式采用二阶格式,动量、紊动能、紊动耗散率采用二阶迎风格式进行离散。

1.3 模型验证

试验数据及模型计算结果均进行无量纲化处理,利用低植物高度 h_2 对水深进行无量纲化处理,利用摩阻流速 $u_* = \sqrt{gHS}$ 对时均流速进行处理,其中 g 为重力加速度, S 为坡度。图2为3个验证点的时均流速计算值与试验值对比。由图2可见,验证点1位于高植物尾涡区,受到植物绕流的影响最大,在低植物顶部及高植物顶部附近流速分布均有较大变化,增加幅度突然变大;验证点3位于低植物尾涡区,在低植物顶部附近流速突然增大;验证点2位于低植物迎流面区域,受植物绕流影响相对小一些,因而植物顶部附近流速增大幅度较为平缓。总体上看,计算值与试验值吻合良好,表明紊流模型及计算参数合理可行。

2 簇状分布的双层植被明渠水流模拟

2.1 模拟工况

设置双层植物的分布形式如图3,植物呈簇状分布在水流断面两侧,计算区域面积与验证工况相

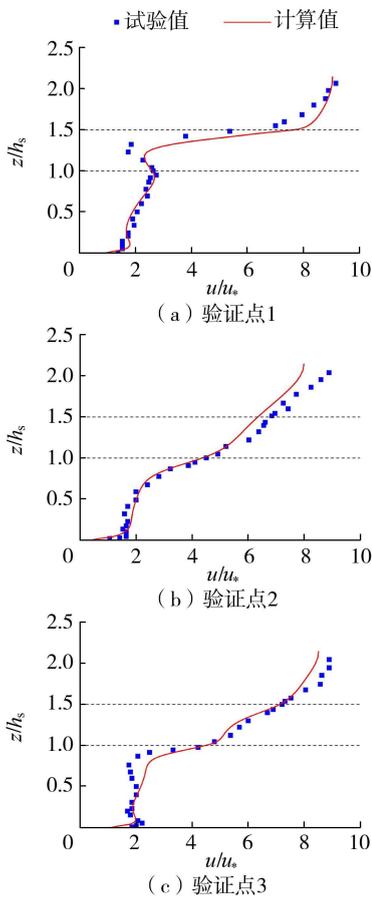


图2 计算流速与试验流速对比

同。沿水流方向的中间区域没有植物,是主流区。在水流两侧,簇状植物区和间隙区间隔分布,长度均为 12.192 cm。在簇状分布的植物区域,高植物和低植物呈交错排列,相邻高植物间距为 4.064 cm,相邻低植物间距为 2.032 cm。

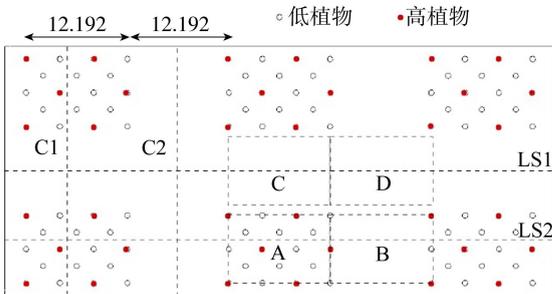


图3 模拟工况植物分布形式及分析断面布置(单位:cm)

2.2 时均流速

2.2.1 流速垂向分布

水流在流经植物群时,在每株植物周围形成绕流,许多绕流相互叠加,持续向下游运动。在簇状分布的植被明渠水流中,根据受植物影响程度的不同,可以划分出不同的区域,如图3将植物周围分为A、B、C、D 4个区域,A区域为植物区域,B区域为植物间隙区域,C区域为主流区域,D区域为主流间隙区域。利用时间及空间的双平均方法,可以更好地了

解各个区域紊流的典型特征。图4为利用双平均方法对各区域的时均流速分布进行统计的结果。由图4可见,在A区域,由于双层植物的影响,纵向流速在垂线上呈现多个拐点,拐点位置由虚线给出。在 $z/h_s < 0.08$ 的近床面附近,流速从零迅速增大;在 $z/h_s = 0.08 \sim 0.9$ 的低植物区,流速缓慢增加,流速梯度较小;在 $z/h_s = 0.9 \sim 1.1$ 的低植物顶部附近,流速再次迅速增大,这显然是由于从低植物区过渡到高植物区时植物密度突然减小造成的;在 $z/h_s = 1.1 \sim 1.5$ 的高植物区,流速继续稳定增加,流速梯度明显大于低植物区;在 $z/h_s > 1.5$ 的无植物水流区,流速继续增加,但流速梯度逐渐减小,与光滑明渠的流速规律类似。与A区域相比,另外3个区域的流速分布相对简单,流速曲线仅在近床面附近有明显拐点,其他部分都较为光滑。虽然B区域没有植物,但在 $z/h_s < 1.5$ 区域,流速仍然相对较小。在C、D两个区域,水流没有受到植物的直接阻滞,流速垂线分布规律非常接近,流速明显比A、B两个区域大。对比 $z/h_s = 1.5$ 时A、B、C、D 4个区域的流速平均值,其比值为1 : 1.15 : 2.07 : 2.03。与整个水深范围的流速平均值进行对比,比值为1 : 1.10 : 1.74 : 1.71。

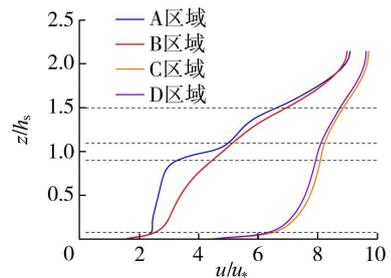


图4 不同区域的流速垂向分布

2.2.2 流速纵向分布

在图3的植物排列情况下,水流在两侧的植物区和中间的主流区所受到的阻力相差很大,纵向断面LS1、LS2分别代表主流区、植物区,统计两条断面的垂线平均流速如图5所示,图中虚线框代表植被区域。可见在断面LS2上,植物区的平均流速大于间隙区的平均流速,这与Anjum等^[22]的研究结果一致。平均流速在簇状植物区呈波浪状分布,这显然是由于植物的影响造成的,水流经过植物区后,逐渐稳定下来,随后进入下一个植物区,流速再次呈波浪状分布。在断面LS1上,由于水流沿程没有受到植物的直接阻滞,平均流速明显较大,断面LS1的平均流速是断面LS2的1.61倍。在沿水流方向上,断面LS1的平均流速也呈现有规律的波动,在两侧有植物的区域,流速偏大,水流流经两侧没有植物的区域时,流速略有降低。

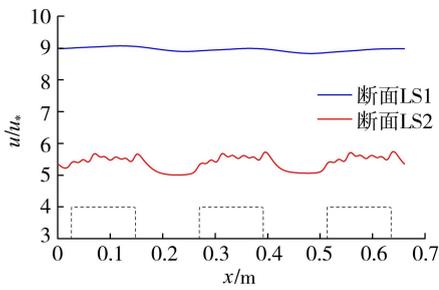


图5 不同区域的流速纵向分布

由于刚性双层植被在不同水深区域内的植被密度不同,水流所受阻力有很大差异,图6为水深分别为0.03 m和0.06 m时的流速分布。在单株植物后侧均可以观察到流速较低的尾迹区,经过一段距离后流态恢复稳定。在高植物区中,靠近壁面的植物前侧流速相较于其他植物略大。在两侧植物区内,低植物区的植物密度大于高植物区,水流受植物的直接阻滞更明显,因此低植物区的平均流速明显小于高植物区。

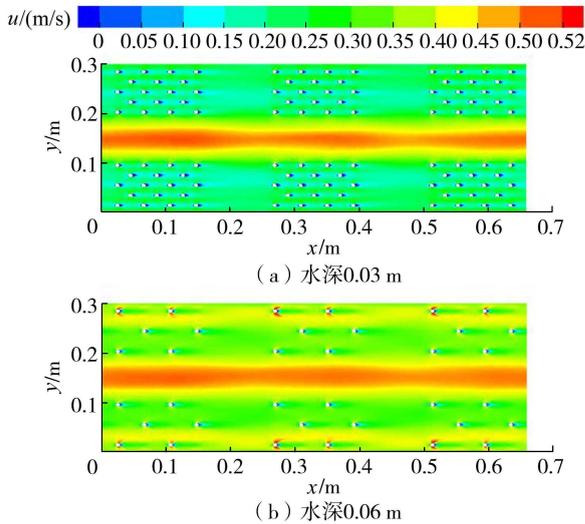


图6 不同水深的流速纵向分布

2.2.3 流速横向分布

图3中的横向断面C1、C2分别代表植物区、间隙区,图7为这两个断面的流速分布。可见植物对水流流速的断面分布产生剧烈影响,在断面C1上,可以看到每一株植物的尾流区流速显著降低,与周围流速形成较大的梯度。在断面两侧植物群的影响下,断面C1、C2的流速较高的水流都明显集中于主流区,在主流区与断面两侧交界区形成较大的流速梯度。而且可以发现,断面C2的高流速水流比断面C1更加集中于主流区。

2.3 紊动特性

2.3.1 脉动强度

脉动强度 σ 是反映水流紊动情况的一个重要参数。为了分析簇状分布的植物对水流脉动强度的

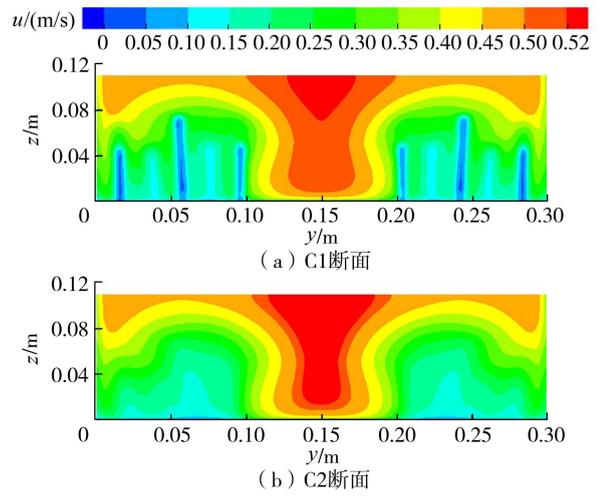


图7 不同断面的流速分布

影响,选择5条特征垂线如图8所示,其中垂线1、2、3位于植物区,垂线4、5位于间隙区。

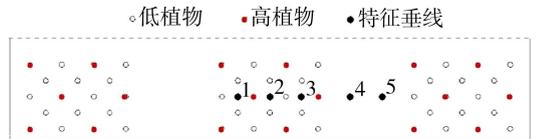


图8 脉动强度特征垂线位置

5条特征垂线的脉动强度分布如图9所示。可见5条特征垂线的脉动强度垂线分布规律相差很大。垂线1位于低植物尾流区,在低植物顶部以下附近出现极大值,在低植物顶部以上的脉动强度迅速减小;垂线2位于高植物尾流区,在高植物顶部以下位置出现极大值;垂线3明显受到低植物和高植物的共同影响,在低植物顶部以下及高植物顶部以下附近出现两个极大值;可以看出在植物区,高植物对脉动强度的影响明显更大,整体看来,脉动强度的最大值出现在高植物顶部以下附近;垂线4、5均位于间隙区,脉动强度垂线分布曲线有相似的特征,极大值出现在低植物顶部与高植物顶部之间,随着水流流出植物区进入间隙区,脉动强度逐渐减小,因而垂线5的脉动强度明显小于垂线4,显示出了脉动强度从植物区到间隙区过渡的特征,没有了植物的扰动,脉动强度显著降低。

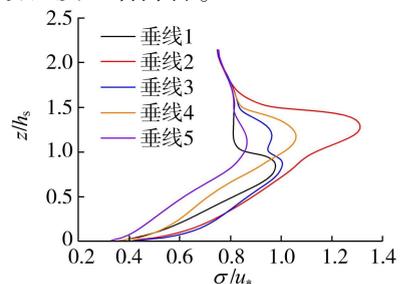


图9 不同特征垂线的脉动强度分布

图 10 为主流区中间纵断面及植物区中间纵断面的脉动强度分布。由植物区中间断面可见,脉动强度起伏较大,高植物顶部出现极大值,间隙区的脉动强度明显小于植物区。断面 LS1 的脉动强度分布显得比较稳定,最大值出现在高植物顶部高度附近。

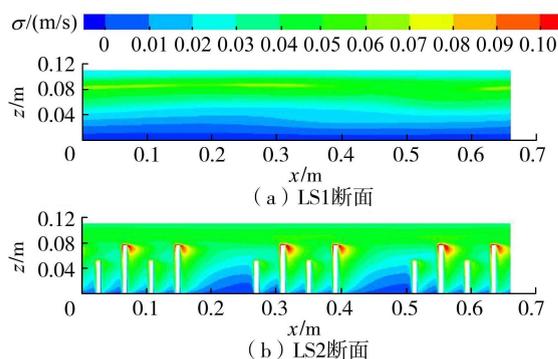


图 10 不同区域的脉动强度纵向分布

2.3.2 紊动能

紊动能也是描述紊流强度的重要参数。图 11 为纵向断面 LS1、LS2 的紊动能分布情况,分别对应主流区、植物区的紊动能。由图 11 可见,在断面 LS2 上,植物区的紊动能大于间隙区,紊动能在植物区呈波浪状分布,水流经过植物区后,紊动能稳定下来,但明显降低。在断面 LS1 上,由于水流沿程没有受到植物的直接扰动,紊动能明显较小,断面 LS2 的平均紊动能是断面 LS1 的 4.77 倍。

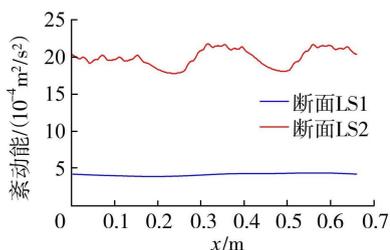


图 11 不同区域的紊动能纵向分布

3 结论

a. 双层植物区的时均流速垂线分布在近床面、低植物顶部附近、高植物顶部附近均出现拐点,可以将时均流速划分为 4 个不同的区域。

b. 在簇状分布的刚性植物作用下,水流在过流断面上形成植物区、间隙区及主流区,不同区域的时均流速有不同的大小和分布形态,植被区域相较于其他区域具有更复杂的流速垂向分布,在近床面、低植物顶部附近及高植物顶部附近均出现拐点。

c. 在双层植被明渠水流中,脉动强度和紊动能的峰值出现在高植物的顶部附近,植被区水流的紊动相较于主流区回流明显更剧烈。

参考文献:

- [1] 闫静,鲁经宇,赵汗青,等. 含植物明渠紊流流速分布无量纲化方法及流动分区[J]. 水利水电科技进展,2023,43(3):101-106. (YAN Jing, LU Jingyu, ZHAO Hanqing, et al. Dimensionless method for velocity distribution in vegetated open channel turbulent flows and flow subdivision [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3):101-106. (in Chinese))
- [2] BAUER M, HARZER R, STROBL K, et al. Resilience of riparian vegetation after restoration measures on River Inn [J]. River research and applications, 2018, 34(5):451-460.
- [3] ALI A, PASHA G A, GHANI U, et al. Investigating role of vegetation in protection of houses during floods [J]. Civil Engineering Journal, 2019, 5(12):2598-2613.
- [4] D'IPPOLITO A, LAURIA A, ALFONSI G, et al. Investigation of flow resistance exerted by rigid emergent vegetation in open channel [J]. Acta Geophysica, 2019, 67(3):971-986.
- [5] 闫静,余洋,唐立模,等. 植物密度对明渠紊流拟序结构的影响研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(12):133-145. (YAN Jing, YU Yang, TANG Limo, et al. Study on effect of vegetation density on coherent structure in vegetated open channel flows [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(12):133-145. (in Chinese))
- [6] 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.
- [7] HUAI Wenxin, HU Yang, ZENG Yuhong, et al. Velocity distribution for open channel flows with suspended vegetation [J]. Advances in Water Resources, 2012, 49:56-61.
- [8] ZHAO Fang, HUAI Wenxin, LI Dan. Numerical modeling of open channel flow with suspended canopy [J]. Advances in Water Resources, 2017, 105:132-143.
- [9] GHISALBERTI M, NEPF H. The structure of the shear layer in flows over rigid and flexible canopies [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2006, 6(3):277-301.
- [10] 陈橙,李梓萱. 我国沿海生态植被消波研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5):1-7. (CHEN Cheng, LI Zixuan. Research progress on wave dissipation of ecological vegetation in coastal area of China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5):1-7. (in Chinese))
- [11] RIGHETTI M, ARMANINI A. Flow resistance in open channel flows with sparsely distributed bushes [J]. Journal of Hydrology, 2002, 269(1/2):55-64.

(下转第 33 页)

- Area of the Yellow River, Tibetan Plateau [J]. *Geoderma*, 2020, 376:114531.
- [19] WU Yanfeng, ZHANG Guangxin. A review of hydrological regulation functions of watershed wetlands [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3):458-469.
- [20] 王国庆, 张建云. 环境变化的径流效应研究进展及黄河水源涵养区研究展望 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(2):1-8. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun. Research progress on runoff effects of environmental changes and prospects for research on the Yellow River water source conservation area [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(2):1-8. (in Chinese))
- [21] 左其亭, 王娇阳, 杨峰, 等. 水源涵养相关概念辨析及水源涵养能力计算方法 [J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(2):13-19. (ZUO Qiting, WANG Jiaoyang, YANG Feng, et al. Concept analysis of water conservation and calculation methods of water conservation capacity [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(2):13-19. (in Chinese))
- [22] 周冰玉, 李志威, 游宇驰, 等. 2015 年黄河源区泥炭地分布及其空间差异性 [J]. *湿地科学*, 2021, 19(5):543-550. (ZHOU Bingyu, LI Zhiwei, YOU Yuchi, et al. Distribution and spatial differences of peatlands in the Source Region of the Yellow River in 2015 [J]. *Wetland Science*, 2021, 19(5):543-550. (in Chinese))
- [23] 鲁瀚友, 李志威, 胡旭跃, 等. 若尔盖高原径流量变化与
- 储量计算 [J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(6):12-18. (LU Hanyou, LI Zhiwei, HU Xuyue, et al. Estimation of runoff change and water storage in Zoige Plateau [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(6):12-18. (in Chinese))
- [24] LI Binquan, YU Zhongbo, LIANG Zhongming, et al. Effects of climate variations and human activities on runoff in the Zoige alpine wetland in the Eastern Edge of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(5):1026-1035.
- [25] WANG Taihua, YANG Hanbo, YANG Dawen, et al. Quantifying the streamflow response to frozen ground degradation in the Source Region of the Yellow River within the Budyko framework [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558:301-313.
- [26] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements (Irrigation and Drainage Paper 56) [R]. Rome:FAO, 1998.
- [27] 李志威, 孙萌, 游宇驰, 等. 若尔盖高原实际蒸散量变化规律研究 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(8):1317-1324. (LI Zhiwei, SUN Meng, YOU Yuchi, et al. Change of actual evapotranspiration in the Zoige Plateau [J]. *Journal of Eco-Environment*, 2017, 26(8):1317-1324. (in Chinese))

(收稿日期:2023-06-01 编辑:熊水斌)

(上接第 12 页)

- [12] WUNDER S, TREVISSON M, HECKELE C, et al. Near wake of emergent vegetation patches in shallow flow [J]. *E3S Web of Conferences*, 2018, 40:438-444.
- [13] OKAMOTO T A, NEZU I. Spatial evolution of coherent motions in finite-length vegetation patch flow [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2013, 13(5):417-434.
- [14] LIU D, DIPLAS P, HODGES C C, et al. Hydrodynamics of flow through double layer rigid vegetation [J]. *Geomorphology*, 2010, 116(3/4):286-296.
- [15] HUAI Wenxin, ZENG Yuhong, XU Z G, et al. Three-layer model for vertical velocity distribution in open channel flow with submerged rigid vegetation [J]. *Advances in Water Resources*, 2009, 32(4):487-492.
- [16] HUAI Wenxin, WANG Weijie, HU Yang, et al. Analytical model of the mean velocity distribution in an open channel with double-layered rigid vegetation [J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 69:106-113.
- [17] ANJUM N, TANAKA N. Numerical investigation of velocity distribution of turbulent flow through vertically double-layered vegetation [J]. *Water Science and Engineering*, 2019, 12(4):319-329.
- [18] RAHIMI H R, TANG X, SINGH P. Experimental and numerical study on impact of double layer vegetation in open channel flows [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2020, 25(2):04019064.
- [19] 罗晶, 杨具瑞, 谭毅源, 等. 湿地刚性植物对水流结构影响的三维数值模拟 [J]. *水电能源科学*, 2010, 28(1):86-88. (LUO Jing, YANG Jurui, TAN Yiyuan, et al. Three dimensional numerical simulation of flow structure effect of wetland rigid plant growth [J]. *Water Resources and Power*, 2010, 28(1):86-88. (in Chinese))
- [20] ASIF M, GHANI U, PASHA G A, et al. 3D numerical investigation of flow behavior in an open channel with uniform and layered vegetation patches under varying submergence conditions [J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2024, 15(1):102288.
- [21] 王雯, 槐文信. 刚性淹没双层植被明渠水流紊流特性研究 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2014, 46(1):61-67. (WANG Wen, HUAI Wenxin. Turbulence structure of open channel flow through double layer rigid submerged vegetation [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2014, 46(1):61-67. (in Chinese))
- [22] ANJUM N, TANAKA N. Study on the flow structure around discontinued vertically layered vegetation in an open channel [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2020, 32(3):454-467.

(收稿日期:2023-11-09 编辑:俞云利)