

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222381

鱼巢砖渠道的水动力特性数值模拟

杨 吉^a, 龚轶青^b, 毛劲乔^a, 高 欢^a, 戴 杰^a

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

摘要: 为阐明典型生态护岸鱼巢砖对直线型引水渠道水动力特性的影响, 基于大涡模拟技术构建了含鱼巢砖渠道的三维水动力数值模型(LES), 在流向上使用周期性边界使计算域内水流重复发展, 通过水槽试验数据对该数值模型的可靠性进行了充分的验证, 并在此基础上利用 LES 模型模拟了含鱼巢砖渠道的水动力特性。结果表明, 鱼巢砖将渠道分为高速主流区和低速鱼巢腔, 主流区的时均流向流速约为断面平均流速 U_0 的 1.8 倍, 且在全水深范围内存在连续的涡旋分布; 而鱼巢腔内部的时均流速和紊动均处于较低水平, 适宜鱼类的栖息及粘性卵的孵化; 鱼巢腔口的混合层中存在相对强烈的涡旋结构, 不仅显著提高了湍流强度, 也是鱼巢腔内外动量交换的主要驱动力。

关键词: 鱼巢砖; 大涡模拟; 涡旋结构; 鱼类游泳

中图分类号: TV135

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)09-0112-04

1 引言

直线型人工渠道是引调水工程中输水的重要方式, 通过混凝土或浆砌块石结构进行护岸, 能够显著提升渠道的输水能力^[1], 但硬质护岸破坏了陆域与水域的连通性, 阻碍了生态系统的自然循环, 生态系统间无法进行正常的物质、能量、信息交换, 自然生态系统恢复能力下降; 同时, 直线型渠道的水流结构相对单一, 降低了渠道的生境多样性, 对水生生物的栖息造成不利影响^[2]。近年来, 生态型护岸型式应用广泛, 但大多采用以植物为主体的护岸方案, 用于营造河岸带景观、增加水体自净能力, 缺乏对水生生物栖息需求的设计。鱼类是水生态系统中的顶级群落, 也是调水渠道流水生境的重要组成部分^[3], 生态型鱼巢砖可营造多样化的水流环境, 为鱼类等水生动物提供适宜的栖息空间, 因而受到广泛关注。目前对人工鱼巢的研究集中于生态学指标, 而对水力特性的探讨相对匮乏^[4], 王兴勇等^[5]通过室内水槽试验和二维数值模拟的方法对比了不同结构鱼巢腔体内部的流速分布, 阐述了鱼巢砖的适用性; 苏国青

等^[6]通过三维数值模型模拟了贯通式鱼巢腔体内部的紊流结构, 表明鱼巢内部能够形成适宜鱼类栖息的条件。针对含鱼巢砖水流的数值模拟多采用雷诺平均模型(RANS), 能够再模拟和分析时均水动力指标上提供较高的精度, 但对涡旋结构特别是瞬时参数的刻画上存在不足。为此, 本文采用大涡模拟(LES)为主要研究手段, 精准还原了含鱼巢砖渠道的水流结构, 全面解析了鱼巢空腔内外的流场结构, 并结合鱼类的游泳偏好分析鱼巢砖对直线型河道鱼类栖息生境的改善效果。

2 材料与方法

为求解鱼巢砖影响下的三维流场结构, 采用开源大涡模拟计算代码 Hydro3D^[7] 求解空间滤波后的三维不可压缩纳维—斯托克斯(N-S)方程组, 包含如下的连续性方程和动量方程:

$$\partial u_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中, x_i ($i=1, 2, 3$) 为三维空间位置坐标; u_i 为 x 、 y 、 z 方向上的速度分量; p 为压强; ν 为流体运

收稿日期: 2022-11-11, **修回日期:** 2022-12-19

基金项目: 江西省科技厅重大科技研发专项(20213AAG01012); 国家自然科学基金项目(52109013); 中国博士后科学基金项目(2021M701049)

作者简介: 杨吉(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水利工程水生态安全, E-mail: yangji12@hhu.edu.cn

通讯作者: 毛劲乔(1978-), 男, 教授, 研究方向为水利工程水生态安全, E-mail: jingqm@163.com

动粘度; τ_{ij} 为亚格子尺度 (SGS) 的应力, 以 WALE 亚格子模型进行计算。

Hydro3D 为基于有限差分的并行计算程序, 采用四阶中心差分格式离散 N-S 方程组中的对流通量和扩散通量, 使用显式的三阶龙格-库塔显式格式进行时间步的推进, 时间步长通过库朗特数控制, 库朗特数取值为 0.3, 并采用空间强隐式迭代方法求解压力修正的泊松方程。

3 工况设定及验证

数值模拟参照典型的鱼巢单元水槽模型试验^[8]设定, 试验水槽的长度和宽度分别为 7.5、1.0 m; 一个鱼巢单元长 $L=0.75$ m, 宽 $W=0.2$ m, 由等长度 $l=0.25$ m 的三段组成, 首尾段为不透水的鱼巢砖, 中段为鱼巢空腔。试验中进口流量 Q 通过水泵控制, 流量大小为 4.8 L/s; 水深 h 通过尾门控制, 试验中水深恒定为 0.035 m, 断面平均流速 $U_0=0.137$ m/s, 相应的雷诺数 $Re=U_0 h/\nu=4\ 795$, 弗劳德数 $Fr=U_0/(gh)^{1/2}=0.23$, g 为重力加速度。试验中使用粒子图像测速系统 (PIV) 测量水槽下游水流充分发展区的鱼巢空腔内水流参数, 测量频率为 30 Hz。

为降低数值模拟的计算量, 仅对充分发展区的区域进行大涡模拟, 计算域见图 1, 包含了中段 1 个完整的鱼巢单元及进口段和出口段各半个鱼巢单元。计算域的进口和出口使用周期性边界使内部流动充分发展, 槽道的地面和侧面均使用无滑移固边界进行处理, 由于弗劳德数 Fr 不超过 0.3, 自由液面的变化对流场的影响可忽略, 因此使用自由滑移的刚盖假定对计算域液面进行概化。模拟使用均匀网格, 三向网格尺寸均为 1 mm, 总网格量约为 $5\ 200 \times 10^4$ 个, 使用混合 MPI/OpenMP 策略进行分区并行计算; 图 2 展示了鱼巢腔体局部网格及放大图, 网格的无量纲尺寸 $y^+=5.28$, 无需使用壁面函数预测近壁面流速。先计算约 50 个贯流时间 ($t_L=L/U_0$), 或充

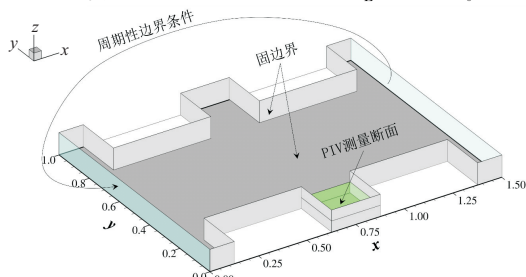


图 1 数值模拟计算域示意图

Fig. 1 Geometric configuration of the computational domain

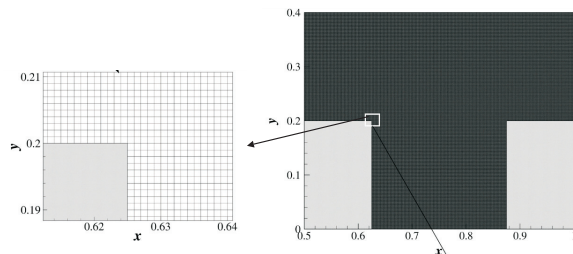


图 2 局部网格分布图

Fig. 2 Grid distribution of a local region

分发展的紊流, 再继续运行 250 个 t_L 后统计水动力参数。

图 3 选取了大涡模拟结果中水体表面 ($z=h$) 两条测线 $x=0.687\ 5$ m 和 $x=0.75$ m 在鱼巢腔体内 ($0 \leq y \leq 0.2$ m) 测线上的时均流向流速 \bar{u} 和横向流速 \bar{v} 作为验证数据, 通过 U_0 无量纲化后与水槽试验中的实测数据进行定量对比。图 3 (a)、(b) 中的时均流向流速均与试验实测值吻合良好, 仅在近壁面 $y/W \leq 0.2$ 范围内的模拟值存在较小的误差, LES 对近壁面的回流强度相对 PIV 的实测值略有高估, 两条测线在该处的平均误差均不超过 10%, 造成误差的可能原因是由于 2D-PIV 在近壁面处水体中的追踪粒子浓度较低, 通常会造成本处的流速测量值存在偏差。这种偏差更加显著地体现在横向流速的比较中, 在 $y/W \leq 0.6$ 的范围内, 实测的横向流速呈线性增加趋势, 而模拟的流速分布变化则较为复杂, 图 3 (c) 中的模拟值呈现先增后减的趋势, 并显著大于实测值, 平均误差约为 47%, 直到在 $y/W \approx 0.6$ 处于实测值重合; 而图 3 (d) 中 LES 预测的横向流速存在反复增减的现象, 最大误差出现在鱼巢腔体中段 $0.4 \leq y/W \leq 0.6$ 范围内, 该段的平均

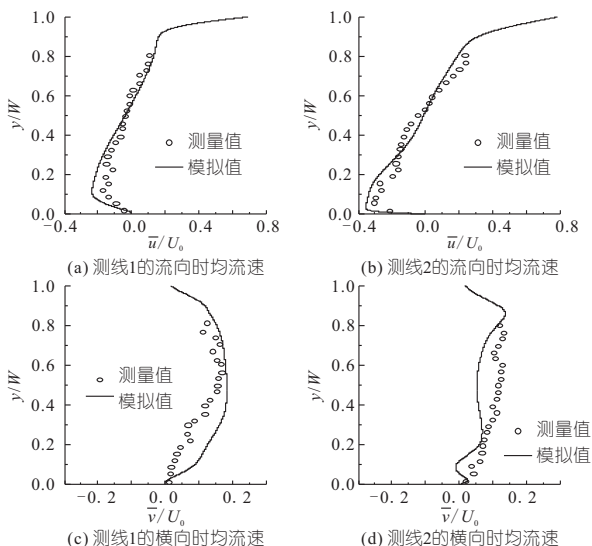


图 3 LES 模拟值与试验测量值的对比

Fig. 3 Comparisons of numerical results and experimental measurements

误差约为 62%，这种偏差可能是由于模拟中对自由表面进行的刚盖假定不能完全反映变化自由表面的横向动量输移。但横向流速的量级相对流向流速较小，模拟结果的平均绝对误差低于 0.01 m/s，同时流向流速在鱼类游泳行为中起决定性作用，且模拟吻合程度较好，因此本文使用的 LES 模型可用于评估含鱼巢砖结构渠道的水流结构。

4 数值模拟结果分析

4.1 时均流场特征

图 4 为鱼巢砖影响下充分发展的直线型渠道中层 ($z/h=0.5$) 的时均流向流速分布，并通过断面平均流速 U_0 进行无量纲化，平面流场总体呈现沿中轴线 ($y=0.5$ m) 对称分布的特征，根据流速分布特点，平面流场可分为渠道中间 (0.2 m $\leq y \leq 0.8$ m) 连续分布的主流区和两侧 (1 m $\leq y/W \leq 0.2$ m、 4 m $\leq y/W \leq 5$ m) 间断分布的鱼巢腔。主流区的流速与等宽明渠流速分布较为相似，在两侧存在厚度约为 $0.5W$ 的边界层，流速值在边界层内迅速从 0 增加至约 $1.8U_0$ ，呈层状分布，在鱼巢腔体外缘的边界层流速层状结构存在较为微弱的波动形态；高流速带 ($\bar{u} \geq 1.8U_0$) 占据了宽度约为 $2W$ 的中央主流区，主流区的高速水流将有利于漂流性卵 (如四大家鱼鱼卵) 的顺利孵化。鱼巢腔内的流速方向存在差异，靠近腔口的流速为正，而靠近壁面的流速为负，但整体流速值均低于 $0.6U_0$ ，鱼巢内部的低速水流环境不仅能为多种水生生物提供栖息场所，还能为产粘沉性卵鱼类提供适宜的产卵场孵化条件。

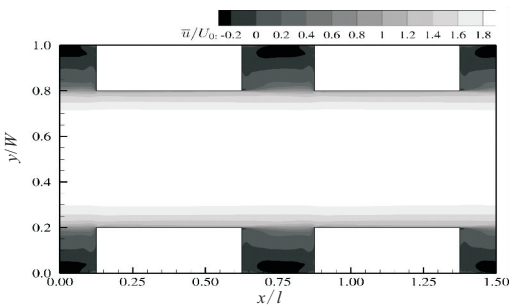


图 4 时均流向流速分布图 ($z/h=0.5$)

Fig. 4 Distribution of time-averaged streamwise velocity ($z/h=0.5$)

为更加充分地展示鱼巢腔体内的水动力特征，图 5 为鱼巢腔体内部无量纲化的时均流向流速和时均横向流速及流线分布。流线分布显示鱼巢腔内的绝大部分空间被单个顺时针的主涡旋占据，仅在拐角位置存在较小的逆时针次涡。外部

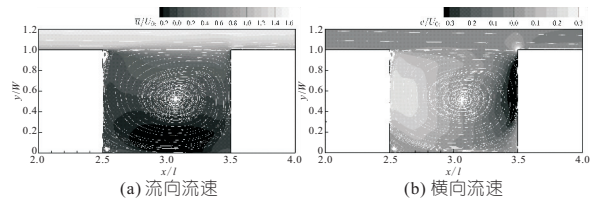


图 5 鱼巢腔体的时均流场及流线分布 ($z/H=0.5$)

Fig. 5 Distribution of time-averaged flow field with streamlines in the cavity of the fish nest ($z/H=0.5$)

的高速流动将主涡封闭在鱼巢腔体内部，同时主涡携带的时均和紊动能也相对较低，引起的横向流速仅在壁面两侧能达到约 $0.25U_0$ ，并在腔口附近迅速降低，因此主涡在腔体内物质和能量交换的作用较为微弱，但可为内部的鱼类和其他水生生物提供相对稳定的栖息空间。

4.2 紊流及涡旋结构

基于渠道流动的对称性，图 6 中上下两部分分别展示了含鱼巢渠道中层剖面的瞬时流向流速和垂向涡量分布，相对于图 4 的时均流速，瞬时流速的上下限均向两侧拓展，主流区的瞬时流速可高达约 $2.4U_0$ ，鱼巢腔的近壁面逆向流速值也增加至 $0.4U_0$ 。主流区的瞬时流速呈现条带状分布，并分布有连续的顺时针 (黑色涡量) 和逆时针 (白色涡量)，这是由于主流区的紊流中存在不同类型的拟序结构，伴随着涡旋的生成、传输和耗散等过程，同时主流区两侧鱼巢砖表面边界层中的猝发现象持续生成成粘附涡、流向涡和发夹涡，以及鱼巢腔口 ($y/W=1$) 混合层中由于 K-H 不稳定性 (Kelvin-Helmholtz instability) 形成的不稳定涡均促进了主流区高低速条带结构的形成。

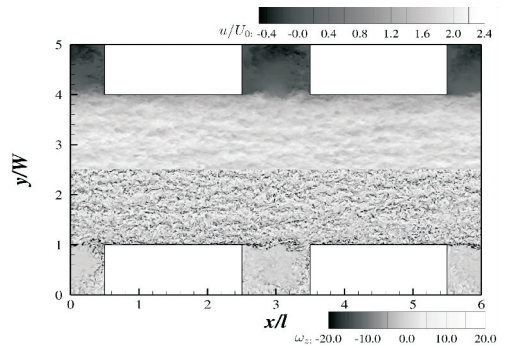


图 6 瞬时流向流速和垂向涡量分布图 ($z/h=0.5$)

Fig. 6 Distribution of instantaneous streamwise velocity and vertical vorticity ($z/h=0.5$)

研究表明紊流和涡旋对鱼类的游泳行为存在不可忽视的影响，特别是处于繁殖期的鱼类对水动力参数表现出显著的偏好，因此图 7 分别给出了鱼巢腔内的无量纲化流向紊流强度、横向紊流强度、紊动能及垂向涡量分布。4 种不同的参数均从不同角度表明腔内的紊动强度处于较低的状态。

态;腔内的流向和横向紊流强度均低于 0.15,绝大部分区域紊动能低于 0.02,仅在壁面和边角维持存在较为明显的涡量分布,因此腔内的低流速低紊动状态适宜游泳能力较弱的鱼类,如幼鱼进行生长发育。图 7 中紊流主要来源于鱼巢腔口 ($y/W=1$) 强烈的剪切运动,及右侧鱼巢砖拐角附近的流速波动,对比图 7(a)、(b)、(c) 不难发现, u'/U_0 相对 v'/U_0 与 κ/U_0^2 (κ 为紊动能) 的分布更为接近,这表明腔口流向湍动是紊动能的主要成分,二者的极值范围均处在腔口的前半段 ($2.5 \leq x/l \leq 3.0$),同时在右侧鱼巢砖表面也存在长度约 $0.2l$ 的极值区,而横向紊动则在腔口区分布的较为均匀,极值区终止于右侧鱼巢砖拐角处。图 7(d) 更加清晰地显示了腔口处的流速紊动主要源于左侧鱼巢砖表面脱落的边界层,在腔口强烈的水流掺混环境下,这些分离涡的强度和尺寸持续增长,直至在鱼巢腔右边壁和鱼巢砖顶角周围进行耗散,导致鱼巢腔内右侧的紊流强度和紊动能显著高于左侧,同时卷入外层高动量水流进入腔体内部,是鱼巢内外动量交换的驱动因素。

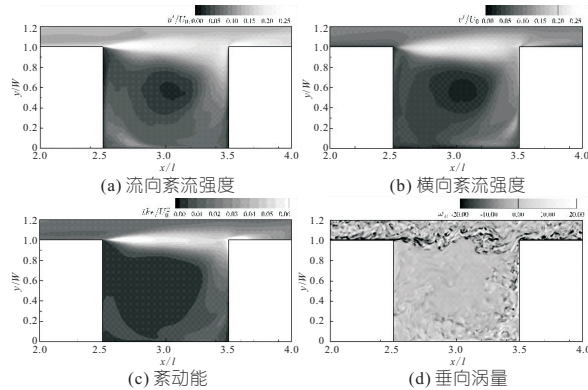


图 7 鱼巢腔体的紊流参数分布 ($z/H=0.5$)

Fig. 7 Distribution of turbulence parameters in the cavity of the fish nest ($z/H=0.5$)

为进一步展示含鱼巢渠道的拟序结构的分布,图 8 使用了 Q 准则等值面表征了一侧渠道的涡旋分布,并使用无量纲化的瞬时流向流速量化涡旋携带的动能。主流区中全水深范围内均存在细密的

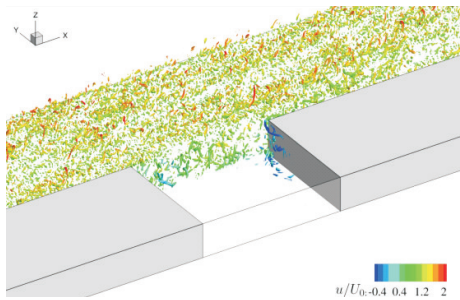


图 8 Q 准则等值面表征的拟序结构分布

Fig. 8 Distribution of coherent structures represented with iso-surfaces of the Q criterion

涡旋分布,涡旋表面的瞬时流速覆盖了全部的流速范围,高动量涡旋(白色)约占全部涡旋的 10%,根据相关鱼类游泳行为研究结论,主流区尺寸较小且动量较低的涡旋结构并不会严重干扰鱼类游泳稳定性。鱼巢腔内几乎无显著的涡旋分布,腔口由 K-H 不稳定性形成的涡旋也未能深入腔内,因此在腔内栖息的鱼类可免于涡旋的扰动。

5 结论

a. 本文通过大涡模拟技术解析了含鱼巢渠道的三维水流结构,不仅通过时均模拟结果表明鱼巢结构能够减缓外部高速水流的冲击,还通过紊流指标和涡旋结构分析论证了鱼巢内部的水体紊动显著降低。

b. 鱼巢砖将渠道分为高速主流区和低速鱼巢腔,增加了水流的多样性,主流区时均流速可高达 $1.8U_0$,鱼巢腔内时均流速低于 $0.6U_0$ 。

c. 主流区的瞬时流速呈现出高低速条带结构,并分布有连续细密的涡旋体,而鱼巢内部的流动状态更加稳定,仅在下流侧边壁附近存在低能量涡旋分布。

d. 鱼巢腔内的水流紊动对外部渠道受到明显抑制,形成了适宜鱼类栖息的水流环境。

参考文献:

- [1] 沈凤生. 南水北调中线一期总干渠渠系渠道工程设计有关问题的探讨[J]. 水利水电技术, 2009, 40(8): 95-98,107.
- [2] 唐剑锋,肖新宗,王英才,等. 南水北调中线干渠生态系统结构与功能分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(12): 5391-5402.
- [3] 周梦,唐涛,杨明哲,等. 南水北调中线干线鱼类资源调查研究[J]. 中国水利,2019(14): 33-36.
- [4] MAEDA S, YOSHIDA K, KURODA H. Turbulence and energetics of fish nest and pool structures in agricultural canal[J]. Paddy and water environment, 2018, 16(3): 493-505.
- [5] 王兴勇,郭军,刘树坤,等. 生态型鱼巢砖水力特性研究[J]. 水利学报, 2007,38(11): 1290-1295.
- [6] 苏国青,王正君,韩雷,等. 基于 FLUENT 的贯通型鱼巢砌块水力特性研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(6): 150-153.
- [7] KARA M C, STOESSER T, MCSHERRY R. Calculation of fluid - structure interaction: methods, refinements, applications [C]//Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering and Computational Mechanics, 2015, 168(2): 59-78.
- [8] JUEZ C, BÜHLMANN I, MAECHLER G, et al. Transport of suspended sediments under the influence of bank macro-roughness [J]. Earth surface processes and landforms, 2018, 43(1): 271-284.

Analysis of Influence of Different Spillway Bends on Spiral Flow of Spillway Side Troughs

GUO Jin-nan¹, QIU Yong¹, HE Pei-shan², WU Si-heng¹, JI Lun-yong¹

(1. College of Water Resources and Hydraulic Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Kunming Hongzhao Water Conservancy and Hydropower Engineering Design Consulting Co., Ltd., Kunming 650020, China)

Abstract: For side channel spillways, although the adjustment section can be arranged on the downstream side to smooth the water flow, it is difficult to completely avoid the interference of the transverse axis spiral flow on the water flow pattern of the chute. Through numerical simulation, the impacts of the curved circulation in the turning section of the chute on the spiral flow on the lateral axis of the side trough were studied. The results show that when the direction of the circulation and the spiral flow are the same (the turning angle is 14.505°), the streamline in the bend rolls obliquely from the concave bank to the convex bank, the superposition of the flow velocity is obvious, and the circulation intensity intensifies. The lateral flow velocity of the outlet section of the curve reaches 3.29 m/s, and the height difference of the outlet water surface has reached 1.140 m (low left and high right); When the circulation flow of channel bend and spiral flow are in opposite directions (the turning angle is -5°); The water flow in the bend turns from both sides to the axis and then flows downstream, and the circulation phenomenon almost disappears; The lateral flow velocity at the outlet section of the bend decreases to -0.19 m/s, and the height difference of the outlet water surface decreases to -0.467 m (high left and low right). That is, the turbulence of the spiral flow in the upstream groove can be improved by providing a curved path in the chute.

Key words: transverse velocity; vertical velocity; chute circulation flow of channel bend; side groove spiral flow; water flow regime

(上接第 14 页)

Runoff Simulation of Qingshui River Basin Under Future Climate Change and Land Use Scenarios

ZHOU Fan^{a,b}, LI Han^{a,b}, LIU Rui-fen^{a,b}

(a. Hubei Key Laboratory of River and Lake Ecological Restoration and Algae Utilization;

b. School of Civil Engineering, Architecture & Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Simulation and prediction of runoff under climate change and land use scenarios are of great significance for the study of water balance and water resources planning and management. Taking the Qingshui River Basin in Zhangjiakou City as the research area, the global climate model GFDL-ESM2M and CA-Markov model were used to analyze and predict the meteorological data and land use in the Qingshui River basin, and the SWAT hydrological model was constructed to quantify the changes of water balance factors in the basin in 2025 under the joint influence of climate change and land use. The results show that under the three GHG emission scenarios, the rainfall in Qingshui River Basin increased significantly in 2025, the maximum temperature and average temperature under the RCP2.6 emission scenario decreased compared with 2015; The maximum temperature and average temperature under the RCP4.5 and RCP8.5 emission scenario increased, and the minimum temperature under the three scenarios decreased. From 2015 to 2025, arable land, woodland, grassland, water area and construction land changed by -6.24% , -0.86% , 6.32% , 0.20% and 0.59% , respectively. Compared with 2014-2015, the water balance distribution of the watershed changed in 2025, and the peak monthly runoff occurred from July to September. The average annual runoff under the three discharge scenarios were 4.40 m³/s, 5.84 m³/s and 9.94 m³/s, respectively.

Key words: Qingshui River Basin; climate change; landuse; SWAT model; runoff

(上接第 115 页)

Numerical Simulation of Hydrodynamic Characteristics in a Channel with Fish-nest Brisk

YANG Ji^a, GONG Yi-qing^b, MAO Jing-qiao^a, GAO Huan^a, DAI Jie^a

(a. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering;

b. Institute of Water Science, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to investigate the impact of typical ecological revetment fish-nest brick on the hydrodynamic characteristics of straight water conveyance channels, a 3-D numerical model (LES) incorporating fish-nest brick was developed using large-eddy simulation technology. Periodic boundaries were employed in the longitudinal direction to allow for the repeated development of water flow within the computational domain. The reliability of the numerical model was extensively validated through experimental data from flume tests. Subsequently, the LES model was used to simulate the hydrodynamic characteristics of channels containing fish-nest brick. The results indicate that the fish-nest brick divide the channel into a high-speed main flow region and a low-speed fish-nest cavity. The time-averaged flow velocity in the main flow region is approximately 1.8 times the cross-sectional average flow velocity (U_0), and a continuous distribution of vortices exists throughout the entire water depth range. Conversely, the time-averaged flow velocity and turbulence within the fish-nest cavity are at relatively low levels, making it suitable for fish habitat and the hatching of adhesive eggs. The mixing layer at the mouth of the fish-nest cavity exhibits relatively strong vortex structures, which significantly enhances turbulence intensity and services as the primary driving force for momentum exchange between the interior and exterior of the fish-nest cavity.

Key words: fish-nest brisk; large-eddy simulation; vortex structures; fish swimming