

雷诺数对弯道水流点源污染物输运影响的大涡模拟研究

杨安邦¹, 朱海², 陈盛³, 方超¹, 徐激琚³, 陆晨雪², 王玲玲², 余真真⁴

(1. 中水淮河规划设计研究有限公司, 安徽 合肥 230091; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
3. 安徽省引江济淮集团有限公司, 安徽 合肥 230091; 4. 黄河水资源保护科学研究院, 河南 郑州 450004)

摘要:为预测水上污染事故发生时,连续弯道水流中点源污染物的输运过程和分布规律,采用 WALE 大涡模拟数值方法,构建了三维连续弯道水流污染物输运模型。针对 4 组不同雷诺数条件下的连续弯道水动力结构及点源污染物输运特征开展模拟研究,分析了雷诺数变化对水动力结构与紊动特性的影响,对比了不同雷诺数条件下点源污染物在弯曲河道下游的空间分布特征和混合速率,并揭示了污染物在二次环流和紊动输运共同作用下的输运机理。研究表明:雷诺数的增大使弯道内断面平均环流强度被削弱,水流结构更为均匀;污染物的沿程平均横向分散系数和垂向分散系数均与雷诺数呈指数型负相关关系;污染物的空间混合程度与雷诺数呈正相关关系;污染物的充分混合面积百分比与雷诺数呈负相关关系。

关键词:弯道水流;雷诺数;大涡模拟;点源污染;混合规律

中图分类号:TV143 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)03-0023-09

Large eddy simulation study on influence of Reynolds number on transport of point source pollutants in bend flow/YANG Anbang¹, ZHU Hai², CHEN Sheng³, FANG Chao¹, XU Weijun³, LU Chenxue², WANG Lingling², YU Zhenzhen⁴(1. China Water Huaihe Planning and Design Research Co., Ltd., Hefei 230091, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Anhui Provincial Group Limited for Yangtze-to-Huaihe Water Diversion, Hefei 230091, China; 4. Yellow River Water Resources Protection Institute, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: In order to predict the transport processes and distribution laws of point source pollutants in continuous bend flow when water pollution accidents occurs, a three-dimensional continuous bend flow pollutant transport model was constructed using the WALE-based large eddy simulation method. Numerical simulations were conducted under four different Reynolds number conditions to investigate the hydrodynamic structures and transport characteristics of point-source pollutants. The effects of Reynolds number variation on hydrodynamic structure and turbulence characteristics were analyzed. By comparing the spatial distribution characteristics and mixing rates of point-source pollutants in the lower reaches of curved channel under different Reynolds number conditions, the transport mechanisms of pollutants under the combined action of secondary circulation and turbulent transport were revealed. The results show that with the increase of the Reynolds number, the average circulation intensity on the cross-section is weakened, and the flow structure becomes more uniform. The average lateral and vertical dispersion coefficients of pollutants along the route are exponentially negatively correlated with the Reynolds number. The spatial mixing degree of pollutants is positively correlated with the Reynolds number. The percentage of fully mixed area of pollutants is negatively correlated with the Reynolds number.

Key words: bend flow; Reynolds number; large-eddy simulation; point-source pollution; mixing rule

弯曲河道作为常见的水流流动外部边界,其几何形态影响着水体的三维流动以及物质输运规律和能量交换过程。在弯曲河道中,水流在不均匀向心力、壁面切应力和水面坡降产生的压力梯度的共同作用下,发生流速重分布现象,形成了复杂的三维流动^[1]。三维流动伴随着强烈的二次流^[2]等弯曲流

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202605);国家自然科学基金项目(52479062);黄河水利委员会优秀青年人才科技项目(HQK-202320)

作者简介:杨安邦(1979—),男,高级工程师,主要从事水污染防治与水利规划研究。E-mail:anbangyang@126.com

通信作者:朱海(1986—),男,副教授,博士,主要从事水环境数值模拟研究。E-mail:h.zhu@hhu.edu.cn

动特征,并会随着河道曲率的增大而增强^[3]。

弯曲河道中的污染物、泥沙等物质受弯道水流的影响,输运及混合过程复杂。研究者针对弯曲河道内的物质输运和能量交换开展了实地测量、物理模型试验和数值模拟试验的多项研究,并尝试建立弯道曲率、水深、流速、河道坡降比等参数与污染物扩散之间的数学关系。例如:Boxall 等^[4]在自然形成的弯曲河道中加入荧光示踪剂,统计了激光多普勒测速仪测量的一系列数据,整理出污染物的混合程度与纵向平面曲率、截面形状和总流量的关系;曹玉芬等^[5]参考自然河道中的连续弯曲河道建立了正弦派生曲线弯道水槽,通过实测数据验证了横断面中存在主环流、反向环流等多种二次环流,这与 Mockmore^[6]研究发现的中心环流和凹岸环流的规律相似;涂洋等^[7]在此基础上研究了不同流量的水流流过弯顶后,在凹岸和凸岸之间发生的横向偏移运动。添加高锰酸钾、罗丹明等溶剂是物理试验中研究污染物在水体中输移的主要方法,Wilson 等^[8]、Baek 等^[9]、Chang^[10]利用物理模型进行了弯道水流示踪试验,定量分析了二次环流的分布和污染物的扩散,其中 Chang^[10]的示踪试验表明,下游污染物的分布形态与点源污染物的释放位置密切相关,Fukuoka^[11]对该试验结果进行了验证,并针对污染物的混合程度进行了定性分析。Demuren 等^[12]在 Leschziner 等^[13]的三维水动力数值模型的基础上,添加了针对物质输运的三维对流扩散方程,发现了弯曲河道中二次环流对污染物横向输运的显著影响。在数值模拟方面,受计算资源的局限性,早期关于弯道河流的研究还是以二维数值模型为主。例如:Ghani 等^[14-15]基于 $k-\varepsilon$ 湍流模型,使用 RANS 方程对弯曲河道的湍流进行了预测,发现尽管 RANS 方程在预测整体流态时具有可靠性,但在模拟二次环流时却很难处理边壁条件与二次环流结构的关系;Park 等^[16]基于有限单元法建立了水平二维数值模型,采用地表水模拟系统(SMS)和河流分析与建模系统(RAMS)分别进行了数值模拟试验,并与实验室数据进行了比较,发现二维数值模型和物理模型的结果仍存在显著差异。并行计算技术的发展和高性能计算设备的普及为利用三维紊流模型^[17-18]模拟弯道水流中的二次环流结构提供了条件,大涡模拟(large eddy simulation, LES)等高精度紊流模型能够捕捉复杂而细微的流场内部运动。例如:Van Balen 等^[19]通过试验比较,发现 LES 能更好地预测弯道主流和环流结构;Booij^[20]的试验结果也表明,LES 模拟的结果相较于 $k-\varepsilon$ 模型更为准确;徐彬^[21]采用 LES 技术对复式断面弯道紊流的流态进行了

模拟,发现复式断面中的水流结构与主槽和浅滩的相对位置有关;Zhu 等^[22]利用 LES 模拟了连续弯道水流中不同点源污染物释放位置对污染物混合的影响;吕岁菊等^[23]、曹引等^[24]、吴华莉等^[25]分别通过添加 SIMPLEC 算法、HLLC 网格、Reynolds 应力模型的方式对 LES 计算方法进行了修正和补充。

弯道水流的流态与雷诺数(Re)紧密相关。Dean^[26]在研究弯管内水流扰动时发现,雷诺数的大小决定了二次流的生成,其强度与雷诺数有关。刘荆辉等^[27]在研究城门洞型弯道河流时发现,随着雷诺数的增大,二次环流的强度减小,断面流速分布更加均匀。芮德繁^[28]在弯道床面剪切力的研究中发现,雷诺数、次生环流强度、切应力分布三者之间存在紧密联系,雷诺数越小、次生环流越强,切应力分布越不均匀。Moser 等^[29]在小曲率、低雷诺数的弯道水流模拟中,证明了二次流会显著影响雷诺切应力的分布,并增强凹凸岸之间的水流结构的不对称性。李民康等^[30-31]在研究冰封河流时发现,凸岸主流与凹岸次生环流之间存在相互作用,并在弯道前后存在明显差异。叶飞等^[32]在对局部恒定有压扩散流的研究中发现,不同雷诺数条件下,水流扩散时的摆动特征不同,而当雷诺数足够大时($Re>7\,000$),水流的摆动特征几乎不产生变化。综上,现有研究表明,不同雷诺数条件下弯道水流结构呈现不同的变化规律,因此也会影响污染物的输运。

虽然弯道水流中污染物的混合规律已有初步探索,但由于天然弯曲河道的雷诺数变幅范围大,通常在 $10^3\sim10^5$ 之间^[33-35],受限于高精度模拟对计算条件的要求,现有针对弯道水流中点源污染物三维输运规律的相关研究多局限于实验室尺度的低雷诺数流动,研究结论在高雷诺数条件下的普适性需进一步论证。此外,现有研究多从断面尺寸和水深流量方面考虑弯道水流中水动力和物质输运的变化,较少研究不同量级雷诺数变化对污染物输运带来的影响。总体来说,不同雷诺数条件下弯道水流中污染物扩散规律仍缺乏系统研究,污染物混合规律与雷诺数的量化关系尚未见报道。本文基于三维 LES 技术,利用开源代码 OpenFOAM 构建三维连续弯道壁面适应性涡黏性(wall-adapting local eddy-viscosity, WALE)亚格子数值模型,研究不同雷诺数条件下弯曲河道中的二次环流结构以及点源污染物的输运特征,以期揭示混合特征与雷诺数的相关关系,探讨水流结构与紊动特性对污染物输运过程的影响。

1 研究方法

1.1 控制方程与数值方法

本文采用三维 LES 模型开展弯道水流中污染

物输运研究。模型控制方程包括空间滤波后的连续性方程、动量方程和污染物输运方程,传统 Smagorinsky 应力方程模型需结合壁函数计算近壁处的亚格子黏度,难以适用复杂壁面形状;动态 Smagorinsky 模型无需使用壁面衰减函数,但需求解额外方程,另外在某些情况下亚格子黏度会变为负值^[36],本文采用的 WALE 亚格子模型可解决上述问题。根据前人研究^[37-38],采用三维数学模型模拟明渠中的污染物输运问题时,紊动施密特数取值范围为 0.5~1.0,本文根据前期模型率定^[38]将其取值为 0.7。

控制方程采用有限体积法离散,空间离散格式为中心差分格式;时间步进采用 Backward 格式;压力和速度解耦采用 PIMPLE 算法,可在提高库朗数的同时保证计算稳定性。

1.2 边界条件

连续弯道水流具有周期性,为了节省计算成本,本文选取单个周期的 S 形弯道作为计算区域。对水动力场的进出口采用周期性边界条件,可经过长时间的计算使水体紊动达到充分发展状态。通过设置沿坡降方向的附加体积力来等效替代明渠底坡的作用,驱动水体流动。本文研究重点为连续弯道的流场和污染物输运,不关注自由水面变化,故弯道顶部采用刚盖假定。在壁面处,流速采用无滑移条件,压力和标量采用第二类边界条件,亚格子黏度采用 OpenFOAM 中的壁面函数模型 nutUSpaldingWall-Function,可有效减少近壁网格数量^[39-40]。在上游进口区域,利用 scalarFixedValueConstraint 函数将此处的标量场强行设置为 0,从而避免下游出口的标量通过周期性边界回到上游,影响研究区域内的标量分布。

1.3 模型验证

本文参考 Chang^[10] 的连续弯道溶质示踪试验物理模型进行建模,用于检验 LES 研究相关问题的可靠性,该试验工况的几何边界和水动力参数也将作为后续算例设置的参照。物理试验水槽由 13 个完全相同的 90° 弯道组合而成,各弯道通过直道相连,相邻弯道交错反向弯曲,构成了连续型弯道水槽^[10]。该水槽的几何边界具有周期性质,为了节省计算成本,本文构建了单个周期的数值弯道水槽,对进出口采用周期性边界,经过足够时间的计算,模拟了连续弯道中紊流充分发展的水流流态。图 1 为数值模型计算区域,该 S 形弯道由两个反向弯曲的 90° 弯道和两段直道构成。其沿中心线总长度 L 为 3.823 m,水槽横截面为矩形,截面宽度 W 为 0.254 m,水深 H 为 0.057 m,水槽坡度为 0.001 2。

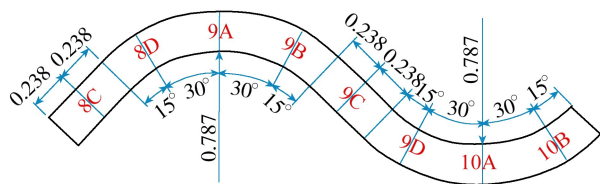


图 1 计算区域几何信息(尺寸单位:m)

计算区域的几何形状较为规则,故采用结构化网格剖分计算区域。将进口边界的左岸底部指定为坐标原点,定义渠道的横向、纵向、垂向分别为 x 、 y 、 z 轴方向。网格沿纵向均匀划分,由于近壁区域的流速梯度较大,对垂直壁面方向的网格加密,同时满足壁面模型对于无量纲壁面距离的要求,相邻网格膨胀率为 1.03。模型网格数量为 440(纵向)×120(横向)×40(垂向)=211.2 万。本模型水动力与污染物模块已在文献[22,38]中完成了验证。

2 结果与分析

2.1 算例设置

天然弯曲河道的雷诺数通常在 $10^3 \sim 10^5$ 之间^[41-44];在部分缓坡及壅水河道中,雷诺数会随着坡降比和流速发生改变,变化范围为 $1\,900 \sim 12\,600$ ^[44]。为保证水流流态均为紊流,最低雷诺数设置为 $4\,000$,同时为确保各算例弯道水流水动力和污染物输运结果之间具有显著差异,设置了雷诺数为 $4\,000$ 、 $12\,650$ 、 $40\,000$ 、 $126\,500$ 共 4 组算例,量级均在天然弯曲河道雷诺数变幅范围内。通过改变运动黏度调整雷诺数的方式是数值试验中常用的方法,在明渠流、密度流等不同类型流动模拟中均有着广泛的应用和独特的优势^[45]。相较于改变流速调整雷诺数,本方法可以确保各算例的弗劳德数相同。算例参数设置见表 1,布置 $1 \sim 12$ 号共 12 个监测断面,见图 2。各算例的点源均于 1 号断面的中心位置($x = W/2, z = H/2$)持续释放,释放质量浓度为 1.0 mg/L 。定义流动周期 T 为渠道中心线总长度 L 与平均流速 $\bar{u}$ 的比值,即 $T = L/\bar{u}$ 。各算例计算约 $20T$ 达到紊流充分发展状态,此后释放点源污染物并经过约 $10T$ 的模拟使污染物分布趋于稳定,最后利用约 $20T$ 计算时均值与湍流统计特性。本文各算例的模拟计算均使用网格分块技术,利用信息传递接口(message passing interface, MPI)在服务器中可

表 1 算例参数设置

算例编号	雷诺数	黏性系数/(m ² /s)
1	4000(10 ³)	1.31×10 ⁻⁵
2	12 650(10 ^{3.5})	1.31×10 ^{-5.5}
3	40 000(10 ⁴)	1.31×10 ⁻⁶
4	126 500(10 ^{4.5})	1.31×10 ^{-6.5}

注:括号中数值表示量级范围。

实现并行运算,在河海大学高性能计算平台上使用 2 个节点,共计 96 核并行计算 (CPU: Intel Xeon 6240R)。单个算例的计算总时长约 1 000 核时。

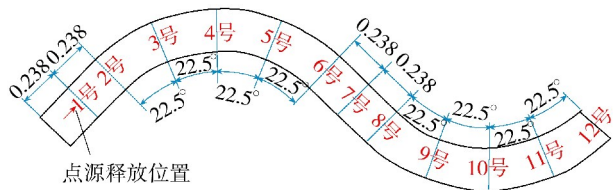


图 2 监测断面设置及点源释放位置示意图 (尺寸单位:m)

2.2 不同雷诺数条件下的水流结构特性

雷诺数的变化显著改变了纵向流速的分布。图 3 为 4 号断面 (弯道 45°位置, $\theta=45^\circ$) 时均纵向流速分布。由图 3 可知,在弯道 45°断面位置,随着雷诺数的增大,主流区的无量纲纵向流速峰值降低,断面的整体流速分布更为均匀,主流区也更偏向于右岸,左岸的低流速区 ($v/\bar{u} \leq 0.9$, 其中 v 为纵向流速) 面积增大,固壁的剪切层厚度减小,流速梯度更大。当 $Re=126\,500$ 时,位于右岸剪切层的速度梯度在垂向上分布更加均匀。

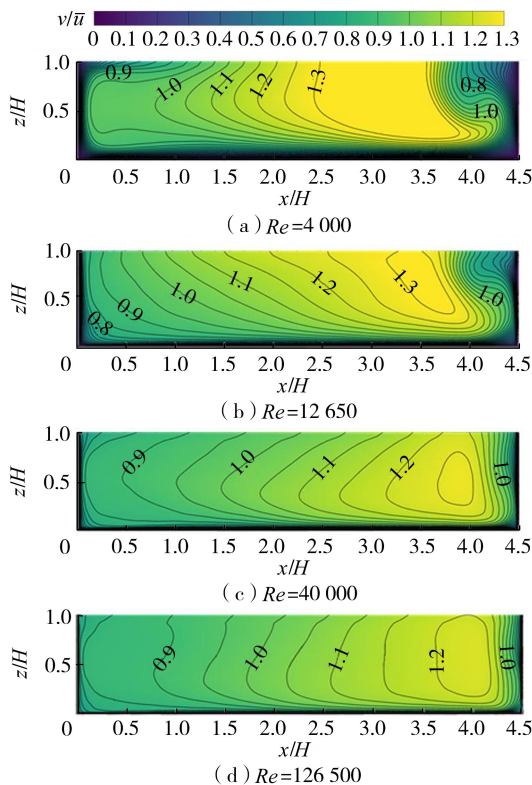


图 3 4 号断面时均纵向流速分布

弯道内的主流线位置也会随雷诺数改变。图 4 所示的 90°弯道内主流线横向位置沿程变化表明:不同雷诺数条件下,各算例的主流线在弯道进口处 ($\theta=0^\circ$) 均贴近凸岸,且横向位置几乎相同,距凸岸边壁 $0.05W$;进入弯道后,各算例主流线均向凹岸偏移,雷诺数越高,偏移程度越小。在弯道出口位置

($\theta=90^\circ$),较低雷诺数算例的主流线已经穿过断面中轴线,其主流线的横向位置转移主要在弯道内完成;而较高雷诺数算例的主流线尚未穿越断面中轴线,其主流线的横向位置转移主要在弯道间的直道内完成。

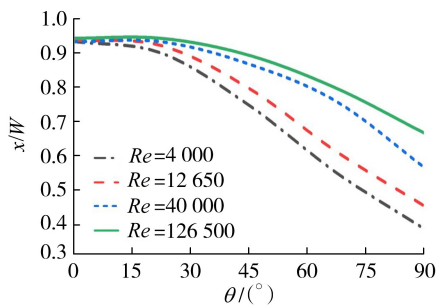


图 4 弯道内主流线的横向位置变化

雷诺数的变化改变了纵向流速分布,进而影响了弯道内的纵向水流与环流的平衡状态,导致环流结构的显著变化。图 5 的纵向涡量 ω_y (经 $\bar{u}/R$ 无量纲化,其中 R 为弯道水力半径) 分布表明,在弯道 45°断面位置,随着雷诺数的增大,断面纵向涡量的整体数值减小。但在不同雷诺数下,壁面处的纵向涡量分布几乎一致:底床处存在一层较薄的顺时针旋转涡量 (图中红色部分),上覆一层更厚的逆时针旋转涡量 (图中蓝色部分);在右岸剪切层处,存在较强的逆时针旋转涡量。但是对于非近壁区域,雷诺数的变化显著改变了涡量强度和二次环流结构。

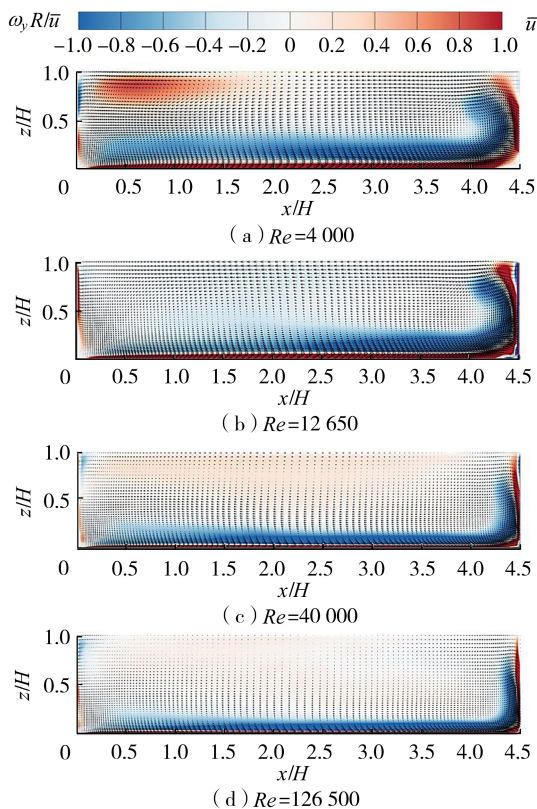


图 5 4 号断面时均纵向涡量和环流矢量

对比图3发现,纵向涡量数值较大区域与纵向流速梯度较大区域几乎重合,两者数值呈正相关关系。对于二次环流矢量,雷诺数的增大使环流矢量相对于纵向流速的数值减小,这表明随着雷诺数的增大,纵向流速的主导作用加强,而弯道环流的影响被削弱。此外,断面上的大尺度涡流结构也发生了明显改变,这种环流空间结构的变化将影响污染物的输运过程。

弯道内的二次环流沿程变化复杂,各断面的环流强度也各不相同。本文选用 Shukry^[40] 提出的断面平均环流强度 $\bar{I}_s$ 作为量化环流结构强弱的指标,该指标能综合评价断面上二次环流强度。图6为 $\bar{I}_s$ 的沿程变化,图中灰色阴影表示弯道区域。较高雷诺数算例的 $\bar{I}_s$ 在弯道内持续上升,而在直道内持续下降, $\bar{I}_s$ 曲线的起伏较小,最大值在 0.011~0.012 之间;较低雷诺数算例的 $\bar{I}_s$ 在弯道偏后位置即开始下降,同时在直道偏后位置即开始上升,最大值接近 0.032, $\bar{I}_s$ 曲线起伏较大;在直道内,各算例的 $\bar{I}_s$ 数值较为接近。上述现象说明:在较高雷诺数条件下,弯道内的总体二次环流强度相对偏小,最大环流强度仅为低雷诺数条件下的 26.5%,此时的横向与垂向流速相对纵向流速数值较小,这与图5的现象一致;直道内的 $\bar{I}_s$ 数值几乎不受雷诺数的影响,在各算例中均为沿程最低值;较高雷诺数算例的沿程 $\bar{I}_s$ 峰值位于弯道出口,而较低雷诺数算例的沿程 $\bar{I}_s$ 峰值位于弯道中后段。

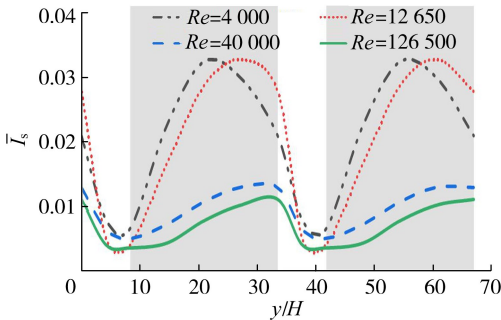


图6 断面平均环流强度沿程变化

2.3 不同雷诺数条件下的污染物浓度场

不同雷诺数条件下三维水流结构与紊动特性的差异导致了不同的污染物输运过程。图7为 $Re = 4000$ 和 $Re = 126500$ 算例在第一段弯道内的时均浓度 c 的分布云图,图中 $\bar{c}$ 为断面平均浓度。低雷诺数算例的污染团核心持续向左岸底部输运,从3号断面(弯道 22.5°)开始,底部污染物沿着边壁逆时针移动,在7号断面(直道)位置,污染物分布于断面四周,而中心位置浓度较低。高雷诺数算例的污染团核心几乎保持在断面中心位置,从6号断面

(弯道 90°)开始向左岸顶部移动,底部污染物也沿着边壁逆时针移动,但速率低于高雷诺数算例,污染物整体分布呈同心环形向四周发散。从横向比较,低雷诺数算例的污染物横向输运更为明显,混合效果优于高雷诺数算例。在弯道出口处的浓度分布也截然不同,高雷诺数算例的污染物主要集中于断面中心偏左岸位置,污染团形态与初始释放状态近似,而低雷诺数算例的污染物分布于边壁附近,断面中心反而形成了低浓度区。

上述现象的差异与水动力条件的变化有紧密关联。随着雷诺数增大,壁面边界层的厚度减小,纵向流速在三维水流结构中占据主导地位,横向和垂向流速在合速度中的比重降低,断面环流强度被削弱(图6),从而减缓了污染团横向和垂向输运过程,污染物受纵向水流的对流作用快速向下游输运,横向及垂向输运速率相对减缓,故污染物在断面上的混合效果较差。此外,环流结构形态的变化,也导致了污染团在断面不同位置的输运方向和速率的差异,进而改变了污染团的最终分布形态。

2.4 不同雷诺数条件下的污染团浓度中心位置

污染物经点源释放后,逐步形成团状污染物,此后形态愈发不规则。污染团的位置经水流的对流扩散作用而发生沿程变化。为了定量描述污染团中心的垂向高度和横向位置,便于分析污染物分布的空间特征,本文选用污染团平均高度 $\bar{z}$ 和平均横向位置 $\bar{x}$ 表征污染团的中心位置^[46]。由污染团平均高度沿程变化(图8(a))可知:各算例的 $\bar{z}$ 在垂向上偏移中轴线($z = H/2$)的程度较小,最大偏移量不超过 0.08H。其中,雷诺数较大算例($Re = 40000$ 、 126500)的 $\bar{z}$ 在沿程范围内均位于中轴线以上,浓度分布偏向断面上部位置,并在第二段弯道进口位置收敛于中轴线。而低雷诺数算例($Re = 4000$)的 $\bar{z}$ 在第二段弯道进口前持续位于中轴线以下,浓度分布偏向断面下部位置,偏离程度较大。 $Re = 12650$ 时的 $\bar{z}$ 在中轴线附近上下波动,直到第二段弯道末尾才稳定于中轴线附近,其收敛速度慢于其他算例。总体来说,当 $Re \geq 40000$ 时,污染团中心高度稳定在断面中轴偏上部位置,偏离程度很小。

不同雷诺数算例的平均横向位置 $\bar{x}$ 沿程变化(图8(b))表明:各算例的 $\bar{x}$ 偏离中轴线($x = W/2$)的程度较小,最大偏移量不超过 0.09W。其中,低雷诺数算例($Re = 4000$)的 $\bar{x}$ 在第二段弯道内偏向凹岸,偏离程度较大, $\bar{x}$ 在直道中部收敛于中轴线;另外3组算例的 $\bar{x}$ 沿程变化趋势相同,均在初始释放后向凹岸偏移,在进入第二段弯道后转向凸岸方向,又在3号断面处转向凹岸方向,最终在离开第一段

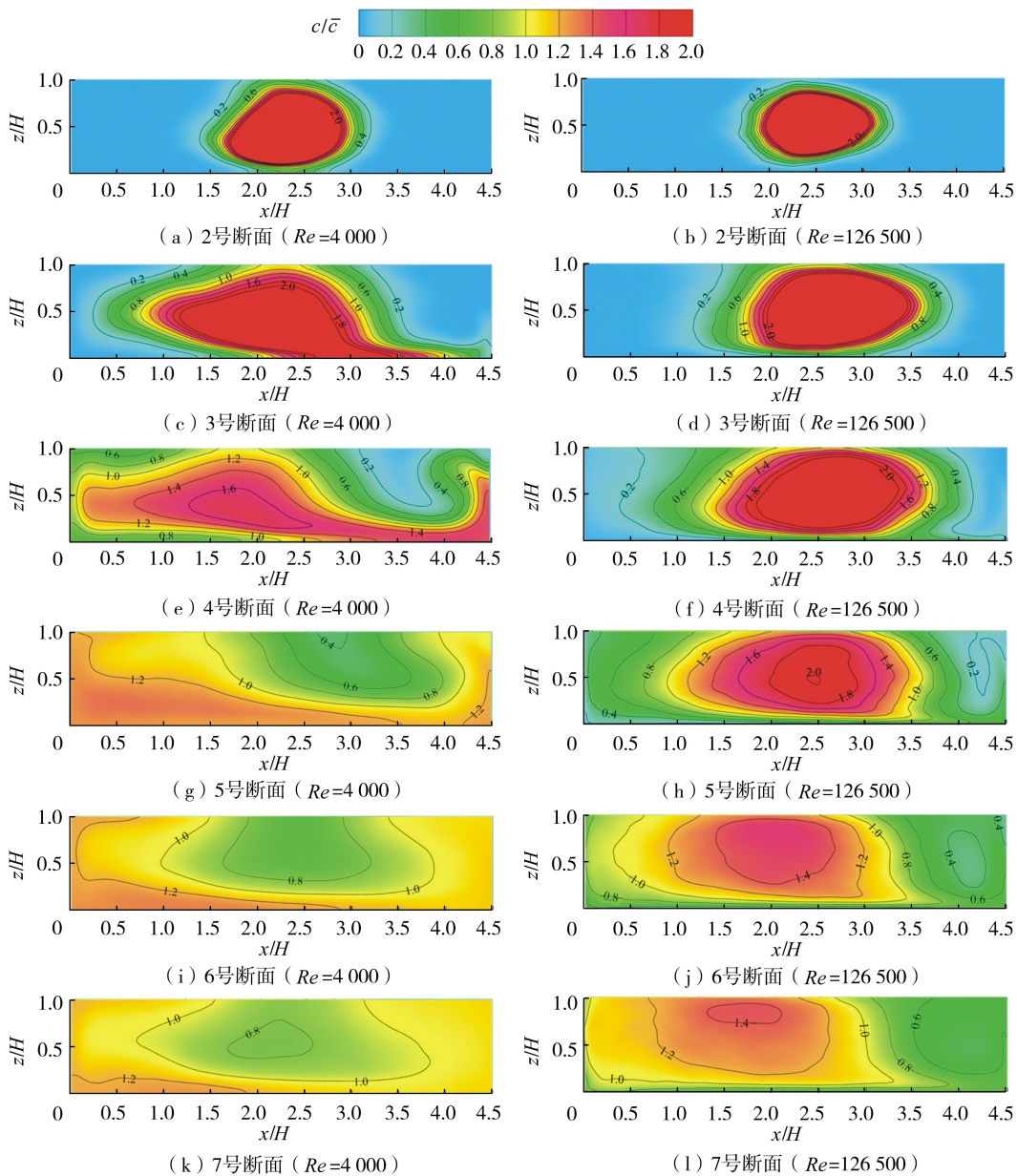


图7 污染物时均浓度分布

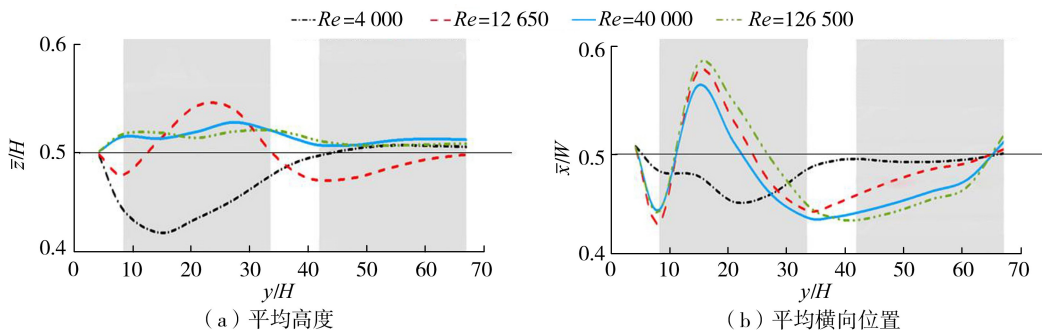


图8 污染团平均位置沿程变化

弯道后缓慢向中轴线收敛。总体来看,当 $Re \geq 12650$ 时, $\bar{x}$ 受横向环流影响显著,且不同雷诺数条件下 $\bar{x}$ 的沿程变化规律一致:在第二段弯道进口位置,受到断面中心由凹岸向凸岸的大尺度横向环流影响,污染团整体向凸岸输运, $\bar{x}$ 数值增大,而从

3号断面起,断面中心横向环流转为由凸岸向凹岸流动,污染团反方向输运, $\bar{x}$ 减小。

污染物平均高度 $\bar{z}$ 和平均横向位置 $\bar{x}$ 在断面上的标准差 σ_z 和 σ_x 可用来衡量污染物的混合程度,分别称作垂向分散系数和横向分散系数^[47]。

污染物的沿程扩散速率受到水动力条件的显著影响,整体的横向和垂向分散系数随雷诺数的变化而改变。图 9 为无量纲横向和垂向分散系数随雷诺数的变化规律,横向分散系数和垂向分散系数均随雷诺数的增大而减小,在横坐标为对数坐标的情况下,散点呈近似线性排布,经过非线性曲线拟合,曲线的决定系数 R^2 分别为 0.985 和 0.979,拟合值与计算值差异较小。从图 9 中的曲线变化规律可知:雷诺数的增大将降低污染物在横向和垂向的分散程度。结合流场特性分析可知,雷诺数的增大导致纵向流速在合速度中的比重提高,环流流速比重降低,污染团的纵向输运速率大于横向和垂向,故污染物的横向和垂向分散系数变小。

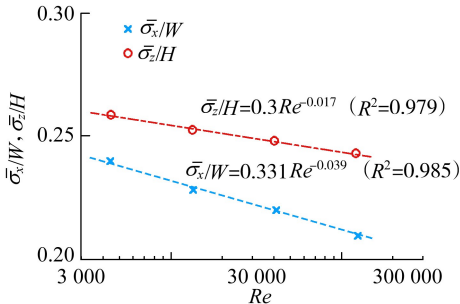


图 9 无量纲横向和垂向分散系数与雷诺数的关系

2.5 不同雷诺数条件下的污染物混合速率

为衡量各算例的污染物混合速率,选取空间混合程度 c_m [48] 表征污染物浓度空间分布的均匀程度,该参数本质上是无量纲化的浓度均方根。图 10(a) 的 c_m 曲线表明:不同雷诺数算例的 c_m 沿程变化趋势一致,在第二段弯道内迅速下降,然后缓慢下降,曲线趋于水平。横向比较各算例的差异可知,在相同位置处,雷诺数越大, c_m 数值越高,混合程度越低;其中, $Re = 12\,650$ 和 $40\,000$ 两组算例在 $y/H = 15 \sim 30$ 范围内的差异较小。总体而言,雷诺数几乎不影响 c_m 的沿程变化趋势,但是影响同一位置的 c_m 数值,雷诺数越大,污染物到达下游相同断面的时间越短,在横向与垂向的混合尚不充分,混合效果相对较差。

图 10(b) 是 c_m 的时域变化曲线。在相同输运时间 t 内(各算例点源污染物释放时刻记为 $t = 0\text{ s}$),雷诺数越大, c_m 越小,混合程度越高,即混合速率越高。结合图 10(a),说明从空间的角度,雷诺数的增大使同一断面位置的混合程度降低,但从时间的角度,雷诺数的增大使混合速率提高。

污染物在水体中输运时,断面最大浓度将持续下降,最小浓度将持续上升,直至污染物在全断面混合均匀,浓度保持不变,此时的浓度可称作完全混合浓度 $\bar{c}$ 。在环境水力学实践中,若全断面浓度均在

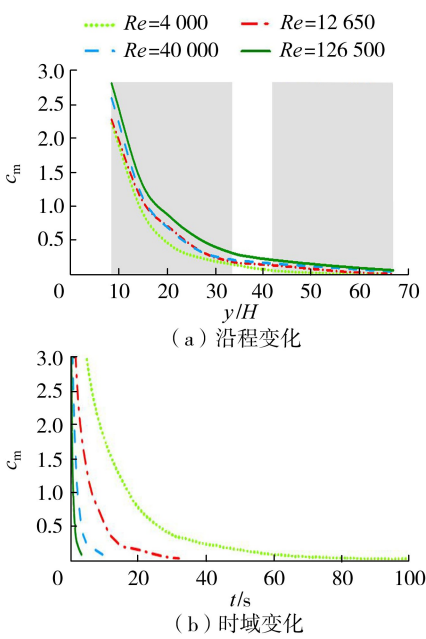


图 10 空间混合程度变化曲线

$\pm 5\% \bar{c}$ 范围内,可认为污染物充分混合。本文统计了 $\pm 5\% \bar{c}$ 浓度范围面积占断面总面积的百分比 P , P 值越大,表明混合程度越高。采用充分混合面积百分比 P 定量分析不同雷诺数算例的污染物混合速率,不同雷诺数条件下的 P 沿程变化曲线差异较为明显。根据图 11(a),各算例的 P 曲线沿程均保持增长,但在第一段弯道内增长较为缓慢,且各算例间差异较小。而当进入直道后,不同算例的曲线增长速率出现差别。其中较高雷诺数算例($Re = 40\,000$ 和 $126\,500$)的曲线增长速率仍然较低,但在靠近第二段弯道出口位置, P 增长速率略有增大。对于 $Re = 4\,000$ 算例, P 曲线从第一段弯道出口位置起迅速上升,在 $y/H = 50$ 位置起增速减缓,而 $Re = 12\,650$ 算例的 P 曲线起始上升位置相对滞后。在第二段弯道末尾处,较高雷诺数算例的 P 曲线较为接近,数值偏小;而另外两组算例($Re = 4\,000$ 和 $12\,650$)的 P 曲线更为接近,数值更大。整体上看,雷诺数越高,相同位置处的 P 值越小,混合程度越低。此外,在较高雷诺数条件下, P 值的差异较小。

图 11(b) 的 P 时域变化表明:在相同时刻,当雷诺数越高时,对应的 P 值越大,混合程度越高,即混合速率越高。这与指标 c_m 在时域上的规律一致,故高雷诺数算例对应单位纵向长度内较低的混合程度和单位时间内更高的混合速率。

对比 c_m 和 P 的沿程变化曲线发现:不同雷诺数算例的 c_m 曲线差异主要体现在第一段弯道内,而 P 的曲线差异主要体现在第一段弯道出口后的下游。该现象说明 c_m 在近场的衰减速率较高,在远场几乎没有变化;而 P 在近场的变化很小,在远场才出现

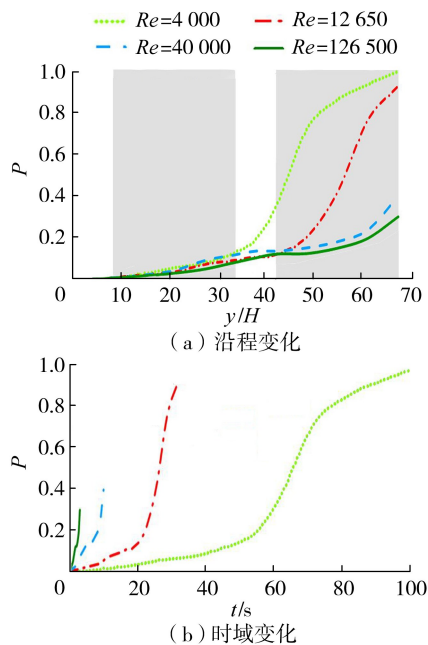


图 11 充分混合面积百分比变化曲线

显著增加,且雷诺数对 P 曲线的上升过程影响较大,能体现各算例间混合程度的差异。故 c_m 适用于描述近场的混合过程,而 P 更适用于远场的混合程度对比。

对各算例的 c_m 和 P 作沿程平均得到 c_m^* 和 P^* ,可以定量描述各算例在计算域内的整体混合程度。图 12 为 c_m^* 和 P^* 随雷诺数的变化规律,在横坐标为对数坐标的情况下,散点分布呈现近似线性规律,通过非线性函数拟合,曲线的决定系数 R^2 分别为 0.993 和 0.992,拟合值与计算值差异较小。 c_m^* 和 P^* 均与雷诺数呈幂函数关系, c_m^* 随雷诺数增大而增大,高雷诺数情景下 c_m^* 可达 0.75,比低雷诺数情景下 ($c_m^* = 0.4$) 提高了近 1 倍; P^* 随雷诺数增大而减小,由 0.35 降低至 0.1,因此雷诺数的增大导致污染物在计算域内的整体混合程度降低。

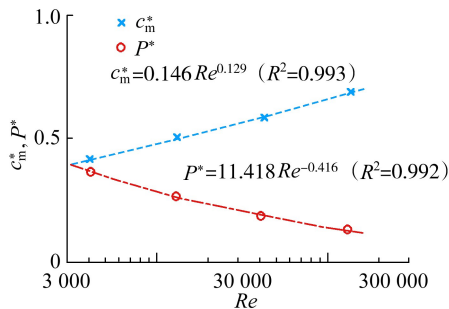


图 12 c_m^* 和 P^* 的沿程平均值与雷诺数的关系

3 结 论

a. 随着雷诺数的增大,断面纵向流速分布更为均匀;断面上的大尺度环流结构被削弱,弯道内断面平均环流强度的极值由低雷诺数条件下的 0.032 降

低至高雷诺数情景下的 0.011~0.012;直道内各工况的断面平均环流强度均会逐渐降低,并稳定在 0.005 左右。

b. 衡量污染物混合程度的平均横向分散系数和垂向分散系数均随雷诺数的增大而减小,与雷诺数呈指数型变化关系。

c. 雷诺数越大,下游相同沿程断面位置的混合程度越低,但单位时间内的混合速率越高。流线方向沿程平均空间混合程度和充分混合面积百分比均与雷诺数呈幂函数线性关系,空间混合程度随雷诺数的增大而增加,充分混合面积百分比随雷诺数的增大而降低。

参考文献:

- [1] WEI Miao, BLANCKAERT K, HEYMAN J, et al. A parametrical study on secondary flow in sharp open-channel bends: experiments and theoretical modelling[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2016, 13: 1-13.
- [2] BLANCKAERT K, DE VRIEND H J. Nonlinear modeling of mean flow redistribution in curved open channels[J]. Water Resources Research, 2003, 39(12): 1375-1388.
- [3] YANG Xiaoting, SHANG Qianqian, XU Hui, et al. Effect of Froude similitude deviation on curved channel simulations: a case study in the Middle Yangtze River[J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(3): 289-294.
- [4] BOXALL J B, GUYMER I. Analysis and prediction of transverse mixing coefficients in natural channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(2): 129-139.
- [5] 曹玉芬,高术仙,白玉川. 正弦派生曲线弯道水流结构特征实验研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(4): 21-32. (CAO Yufen, GAO Shuxian, BAI Yuchuan. Experimental study on flow structures in sine-generated meandering channel[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(4): 21-32. (in Chinese))
- [6] MOCKMORE C A. Flow around bends in stable channels[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1944, 109(1): 593-618.
- [7] 涂洋,刘春晶. 180°弯道水槽表面流速分布研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(4): 1543-1547. (TU Yang, LIU Chunjing. On the distribution of surface flow velocity in 180° curved open channel[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(4): 1543-1547. (in Chinese))
- [8] WILSON C A M E, BOXALL J B, GUYMER I, et al. Validation of a three-dimensional numerical code in the simulation of pseudo-natural meandering flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(10): 758-768.
- [9] BAEK K O, SEO I W, JEONG S J. Evaluation of dispersion coefficients in meandering channels from

- transient tracer tests [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(10): 1021-1032.
- [10] CHANG Y C. Lateral mixing in meandering channels[D]. Iowa: The University of Iowa, 1971.
- [11] FUKUOKA S. Longitudinal dispersion in sinuous channels [D]. Iowa: University of Iowa, 1971.
- [12] DEMUREN A O, RODI W. Calculation of flow and pollutant dispersion in meandering channels[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986, 172: 63-92.
- [13] LESCHZINER M A, RODI W. Calculation of strongly curved open channel flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1979, 105(10): 1297-1314.
- [14] GHANI U, MARRIOTT M, WORMLEATON P. The performance of RANS models for prediction of flows in meandering channels[J]. Life Science Journal, 2013, 10(10): 121-132.
- [15] ZHOU Jianyin, SHAO Xuejun, WANG Hong, et al. Assessment of the predictive capability of RANS models in simulating meandering open channel flows[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2017, 29(1): 40-51.
- [16] PARK S W, AHN J. Experimental and numerical investigations of primary flow patterns and mixing in laboratory meandering channel[J]. Smart Water, 2019, 4(1): 4.
- [17] BOXALL J B. Dispersion of solutes in sinuous open channel flows [D]. Sheffield: University of Sheffield, 2000.
- [18] HUANG Heqing, CHEN Guang, ZHANG Qianfeng. The distribution characteristics of pollutants released at different cross-sectional positions of a river [J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1327-1333.
- [19] VAN BALEN W, UIJTTEWAAL W S J, BLANCKAERT K. Large-eddy simulation of a mildly curved open-channel flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 630: 413-442.
- [20] BOOIJ R. Measurements and large eddy simulations of the flows in some curved flumes[J]. Journal of Turbulence, 2003, 4(4): 1-17.
- [21] 徐彬. 复式断面弯道湍流结构大涡数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [22] ZHU Hai, LU Shengjie, WANG Lingling, et al. Numerical study of mixing process by point source pollution with different release positions in a sinuous open channel[J]. Water, 2022, 14(12): 1903.
- [23] 吕岁菊, 冯民权, 李春光. 天然连续弯道中水流运动的三维数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2013(5): 10-16. (LYU Suiju, FENG Minquan, LI Chunguang. 3-D numerical simulation of flow in natural meandering channel[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(5): 10-16. (in Chinese))
- [24] 曹引, 冶运涛, 梁犁丽, 等. 基于自适应网格的急流条件下污染物输运高效高精度模拟[J]. 水利学报, 2019, 50(3): 388-398. (CAO Yin, YE Yuntao, LIANG Lili, et al. High efficient and accurate simulation of pollutant transport in torrential flow based on adaptive grid method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(3): 388-398. (in Chinese))
- [25] 吴华莉, 陈翠霞, 金中武, 等. 基于 Fluent 的连续弯道水流三维数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(5): 599-603. (WU Huali, CHEN Cuixia, JIN Zhongwu, et al. Three-dimensional numerical simulation of flow in successive bends based on Fluent[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(5): 599-603. (in Chinese))
- [26] DEAN W R. Fluid motion in a curved channel [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1928, 121(787): 402-420.
- [27] 刘荆辉, 胡明. 不同雷诺数下 90° 城门洞形弯道内二次流及动能修正系数的研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34(5): 102-106. (LIU Jinghui, HU Ming. Study on secondary flow and kinetic energy correction factor of 90° city gate-shaped bend tunnel under different Reynolds number[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(5): 102-106. (in Chinese))
- [28] 芮德繁. 连续弯道环流运动与泥沙冲淤特性的数值模拟及实验[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [29] MOSER R D, MOIN P. The effects of curvature in wall-bounded turbulent flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1987, 175: 479-510
- [30] 李民康, 冀鸿兰, 罗红春, 等. 流凌条件下弯道水力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 41-49. (LI Minkang, JI Honglan, LUO Hongchun, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of curved channels under ice flow conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 41-49. (in Chinese))
- [31] 王骁, 罗红春, 冀鸿兰, 等. 黄河什四份子弯道冰下环流特性研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(4): 31-36. (WANG Xiao, LUO Hongchun, JI Honglan, et al. Experimental study on characteristics of subglacial circulation for Shisifenzi bend flow in Yellow River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(4): 31-36. (in Chinese))
- [32] 叶飞, 周振民, 高学平, 等. 恒定有压扩散流局部非稳态现象数值模拟研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(4): 178-185. (YE Fei, ZHOU Zhenmin, GAO Xueping, et al. Investigation of local unsteady phenomena in pressurized steady diffusion flows by numerical simulation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(4): 178-185. (in Chinese))

(下转第 39 页)

[23] 刘有亮,胡斌超.超高昂程及长距离泵站水锤分析及防护设置[J].中国农村水利水电,2020(11):112-117. (LIU Youliang,HU Binchao. An analysis of water hammer in super high lift and long distance pump stations [J]. China Rural Water and Hydropower,2020(11):112-117. (in Chinese))

[24] 蔡付林,樊子凯,周建旭,等.长距离多支线有压输水系统启动水锤防护[J].水利水电科技进展,2024,44(4):1-6. (CAI Fulin,FAN Zikai,ZHOU Jianxu, et al. Start-up water hammer protection for long-distance multi-branch pressurized water conveyance systems [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(4):1-6. (in Chinese))

[25] 毛艳艳,闫观清,毛艳民,等.空气阀在长距离供水工程水锤防护中的作用[J].人民黄河,2011,33(12):123-125. (MAO Yanyan,YAN Guanqing,MAO Yanmin, et al. Water hammer prevention by air valve in long distance water transportation projects [J]. Yellow River, 2011, 33 (12):123-125. (in Chinese))

[26] 梁圣辰,张健,贺蔚,等.长距离输水系统串联多阻抗调压室的水锤防护效果[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):170-175. (LIANG Shengchen,ZHANG Jian,HE Wei, et al. Water hammer protection effect of series throttled surge chambers in long-distance water conveyance system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021,49(2):170-175. (in Chinese))

[27] 徐放,李志鹏,王东福,等.水锤防护空气阀研究综述[J].流体机械,2018,46(6):33-38. (XU Fang, LI Zhipeng, WANG Dongfu, et al. A review on air valve performance and water hammer protection [J]. Fluid Machinery, 2018,46(6):33-38. (in Chinese))

(收稿日期:2024-05-23 编辑:俞云利)

(上接第 31 页)

[33] 张炳昌,许栋,及春宁,等.大宽深比变曲率弯道水动力结构大涡模拟研究[J].水力发电学报,2019,38(6):77-91. (ZHANG Bingchang,XU Dong,JI Chunning, et al. Large eddy simulations of hydrodynamic structure in channel bends with large width-depth ratios and variable curvatures [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019,38(6):77-91. (in Chinese))

[34] 曹玉芬.弯曲河道水动力不稳定性及床面短期演变特性[D].天津:天津大学,2020.

[35] 韩汝婷.模拟植被对明渠流动力学特性的影响研究[D].北京:北京林业大学,2022.

[36] FUREBY C, TABOR G, WELLER H G, et al. A comparative study of subgrid scale models in homogeneous isotropic turbulence[J]. Physics of Fluids, 1997, 9(5): 1416-1429.

[37] SEO I W, PARK S W, CHOI H J. A study of pollutant mixing and evaluating of dispersion coefficients in laboratory meandering channel [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009:485-490.

[38] 陆圣杰,朱海,徐洁如,等.连续弯曲河道点源污染物输运特性三维数值模拟[J].水利水电科技进展,2023,43(2):16-26. (LU Shengjie, ZHU Hai, XU Jieru, et al. Three-dimensional numerical simulations of transport characteristics of point source pollutant in a sinuous open channel [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023,43(2):16-26. (in Chinese))

[39] LIU Fangqing. A thorough description of how wall functions are implemented in OpenFOAM [C]// Proceedings of the CFD with OpenSource Software. Gothenburg, Sweden, 2016.

[40] SHUKRY A. Flow around bends in an open flume[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1950, 115(1): 751-778.

[41] WEBER L J, SCHUMATE E D, MAWER N. Experiments on flow at a 90° open-channel junction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(5): 340-350.

[42] BRADBROOK K F, BIRON P M, LANE S N, et al. Investigation of controls on secondary circulation in a simple confluence geometry using a three-dimensional numerical model [J]. Hydrological Processes, 1998, 12(8): 1371-1396.

[43] BIRON P M, RAMAMURTHY A S, HAN S. Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluences[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(3): 243-253.

[44] LI Gang, ABRAHAMS A D, ATKINSON J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21(6): 509-515.

[45] ZHU Hai, LIN Chang, WANG Lingling, et al. Numerical investigation of internal solitary waves of elevation type propagating on a uniform slope [J]. Physics of Fluids, 2018, 30(11): 116602.

[46] YAN Chao, NEPF H M, HUANG Weixi, et al. Large eddy simulation of flow and scalar transport in a vegetated channel [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2017, 17(3): 497-519.

[47] FISCHER H B, LIST E J, KOH R C Y, et al. Mixing in inland and coastal waters [M]. San Diego: Academic Press, 1979.

[48] DENEV J A, FRÖHLICH J, BOCKHORN H. Large eddy simulation of a swirling transverse jet into a crossflow with investigation of scalar transport [J]. Physics of Fluids, 2009, 21(1): 015101.

(收稿日期:2024-05-10 编辑:俞云利)