

连续弯曲河道点源污染物输运特性三维数值模拟

陆圣杰¹, 朱海¹, 徐洁如¹, 王玲玲¹, 华祖林², 武显扬³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;
3. 南京林业大学风景园林学院, 江苏 南京 210037)

摘要:为研究连续弯道水流中污染物的输运过程,参考连续弯道水流标量示踪试验,构建了水动力-污染物耦合三维大涡模拟数值模型,分析了点源污染物不同横向和垂向释放位置对下游河道污染物浓度分布特性的影响。结果表明:连续弯道内的纵向流速、涡量与紊动能大小存在关联且二次环流对污染物的输运及混合起主导作用;点源在连续弯道进口的横向和垂向布设位置将显著影响污染物的混合速率和空间分布范围;当点源在横向上布置于弯道进口中心和中心偏凸岸处,或在垂向上布置于弯道进口底床或水深中间处,下游污染物的混合速率最大,且影响范围更广;近场的污染物混合速率和影响范围呈正相关关系;连续弯曲河道中,点源位置的差异对污染物混合的影响主要体现在单个周期的弯道内。

关键词:连续弯道水流;点源污染物;输运特性;混合规律;大涡模拟

中图分类号:TV133 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)02-0016-11

Three-dimensional numerical simulations of transport characteristics of point source pollutant in a sinuous open channel/LU Shengjie¹, ZHU Hai¹, XU Jieru¹, WANG Lingling¹, HUA Zulin², WU Xianyang³ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: To investigate the process of pollutant transport in sinuous open channel flow, a 3D hydrodynamic-pollutant coupled large-eddy simulation model was established according to the scalar tracer experiment. The influence of different release positions in transverse and vertical directions of point source on the concentration distribution in the downstream was analyzed. The results show that the streamwise velocity, vorticity and turbulent kinetic energy have clear relations and the secondary currents exert dominant impact on transport and mixing. Besides, the variance in transverse and vertical position of point source has significant influence on mixing efficiency and spatial distribution of pollutant. Specifically, the point source placed near the center of cross section in transverse direction or near the bottom of channel in vertical direction will result in a higher mixing efficiency and a wider influence range. There exists a positive correlation relationship between mixing rate and distribution range in the near field. The variance of point source position in a sinuous open channel mainly influences the pollutant's mixing within a single period.

Key words: sinuous open channel flow; point source pollutant; transport characteristics; mixing mechanism; large-eddy simulation

连续弯曲河道是自然河流较为常见的几何形态。在弯曲型边界的约束下,弯道水流同时受到不均匀向心力、壁面切应力和水面坡降所产生的压力梯度的共同作用,使得流场重分布,形成了复杂的三维螺旋流动^[1]。由于弯道水流存在二次环流现象,同时具有较强的紊动特性,其中的物质输运和能量

交换过程更为复杂^[2]。准确预测连续弯道水流中污染物的输运过程,是河流生态环境评估与水污染治理的基础^[3]。在河流污染分布形式中,点源污染作为一种典型的集中排污方式将长期存在,通常以河岸排污口和水上突发污染事故的形式而广泛出现。

目前,针对弯道水流污染物输运问题已开展了

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3200403);中央高校基本科研业务费专项(B200204044);中国长江三峡集团有限公司科研项目(202003251)

作者简介:陆圣杰(1997—),男,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:sj_lu@hhu.edu.cn

通信作者:朱海(1986—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:h.zhu@hhu.edu.cn

一些物理模型试验和数值模拟研究。在物理模型试验研究方面,Fischer^[4]根据理论推导和试验验证发现弯道环流显著影响物质输运过程,并探究了横向扩散系数与平均流速、摩阻流速、水深和弯道曲率的关系;Chang^[5]开展了连续弯道内的水动力和标量示踪系列试验,发现不同的点源释放位置会极大地影响示踪剂在下游的分布形态,二次环流的存在加速了物质的输运与混合过程;相比之下,Fukuoka^[6]做了宽深比更小的连续弯道试验,该试验也得到了类似的结果;Marion 等^[7]基于试验讨论了流速梯度和二次环流对弯道溶质纵向扩散系数的影响;Baek 等^[8]结合理论推导和试验率定提出了常曲率弯道内污染物横向扩散系数的经验公式。在数值模拟方面,Duan 等^[9-10]采用沿深度平均的二维数值模型,研究了瞬时释放的点源污染物在 S 形弯道内的输运过程,但无法评估二次环流的影响;Demuren 等^[11]采用标准 $k-\varepsilon$ 模型模拟了矩形截面弯道物质输运过程,认为弯道内的横向环流相比于紊动效应对污染物的混合作用更加强烈;申满斌等^[12]利用 $k-\varepsilon$ 模型研究对比点源污染物在凸岸与凹岸释放的差异;顾莉等^[13]模拟并比较了不同汇流比下 U 形弯曲交汇河道中污染物离散系数的分布;Huang 等^[14]利用标准 $k-\varepsilon$ 模型比较了不同密度污染物在蜿蜒河流的中心和边岸释放的差异,还进一步研究了河流弯曲度对不同密度污染物输运过程的影响^[15];丁敏^[16]借助 SMS 水质模型探讨了弯曲河段两岸排污口位置、河流流量和水深与污染混合区的几何参数的关系。在弯道水动力模拟上,大涡模拟相比于上述雷诺时均模型能更好地展现细部涡体结构和湍流脉动信息^[17-18],故采用更高阶的紊流模型是准确预测弯道水流结构和污染物混合过程的关键^[19]。van Balen 等^[20]比较了不同的大涡模拟亚格子应力模型模拟弯道水流的结果,所得流场几乎相同,说明小尺度涡对流场结构影响很小。Moncho-Esteve 等^[21]利用大涡模拟复演了 Chang^[5]的连续弯道污染物输运试验,模拟结果较为精确,还揭示了污染物混合过程与二次环流的关系;van Balen 等^[22]采用大涡模拟比较了不同宽深比急弯弯道内持续释放线源污染物的输运过程,并指出了线性梯度假设的局限性。

点源的释放位置将改变污染物在弯道下游的输运过程和分布形态^[5-6],但现有研究大多是针对混合现象的定性描述,利用高阶紊流模型开展三维定量研究和系统性分析的较少。本文利用开源代码 OpenFOAM,基于大涡模拟的 Smagorinsky 亚格子应力模型,构建连续弯道内单个周期的三维数值模型模拟水流结构和污染物输运混合过程,研究不同点

源释放位置与下游污染物混合程度和分布范围的定量关系,并探讨了水流结构与紊动特性对污染物输运过程的影响。

1 数学模型

1.1 控制方程与数值方法

本文采用的大涡模拟控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程及污染物输运方程:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \bar{f}_i \tag{2}$$

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(D + D_t) \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} \right] + \bar{S} \tag{3}$$

其中

$$D_t = \frac{\nu_t}{Sc_t}$$

式中: x 为笛卡尔坐标; u 为流速;下标 i, j 均表示 3 个空间方向; t 为时间; ρ 为流体密度; p 为压强; ν, ν_t 分别为运动黏度及亚格子黏度; f 为体积力; c 为被动标量; S 为源项;变量上加“-”代表大尺度可解变量; D, D_t 分别为分子和紊动扩散系数; Sc_t 为紊动施密特数,经率定取 0.7。

Smagorinsky 亚格子应力模型由于形式简单、模拟准确而得到广泛应用。该模型将 ν_t 表示为

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \tag{4}$$

其中

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

式中: C_s 为 Smagorinsky 常数; Δ 为截断尺度; S_{ij} 为可解尺度的应变率张量。本文参考了部分大涡模拟明渠研究^[20-21, 23],经验性常数 C_s 取 0.1。

控制方程的空间离散采用有限体积法,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流动达到紊流充分发展状态。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。Demuren 等^[11]的研究表明,对于水面超高小于 10% 水深的弯道明渠模拟,可采用刚盖假定方法替代自由水面,该方法也在弯道水流的数值模拟中得到广泛应用^[20, 22-25]。本文工况满足

上述水深要求,且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,故采用刚盖假定方法。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,亚格子黏度采用了 OpenFOAM 中的壁面函数模型 $\text{nutUSpaldingWallFunction}$,可有效减少近壁网格数量。在上游进口区域,利用 $\text{scalarFixedValueConstraint}$ 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。

2 模型验证

本文选用 Chang^[5] 的连续弯道水槽试验数据验证数值模型,该试验的几何和水动力参数也将作为后续工况设置的基础。试验水槽由 26 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。图 1 为单个 S 形弯道的几何信息,其沿中心线总长度为 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。水槽整体向下游倾斜,坡度为 0.0012。该试验采用的标量示踪剂是盐和甲醇的混合溶液,其密度与水大致相同。示踪剂注射装置可调节释放流量,使溶液的注射速度和周围水流速度几乎相同,故可视为持续释放的点源污染物。

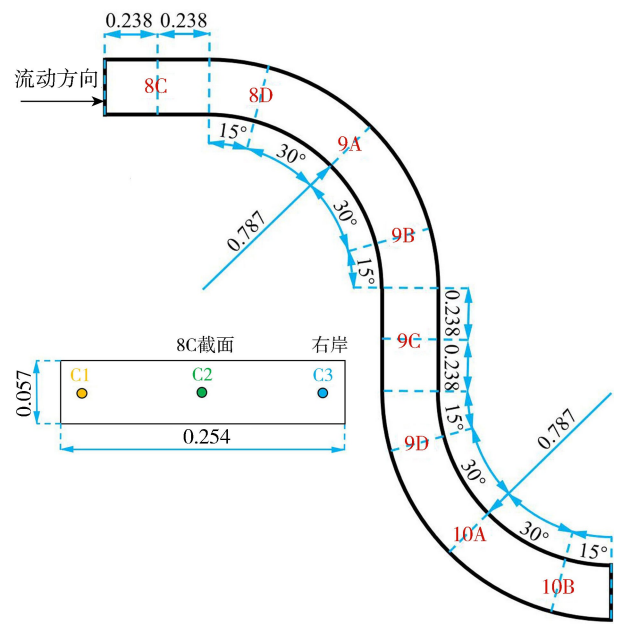


图 1 弯道几何信息及点源释放位置(单位:m)

通过调整水槽坡度和水泵流量,弯道内的水流流态将达到预设的水力参数,即宽深比为 4.47,水力半径 R 为 0.039,坡降 S 为 0.0012,摩阻流速 u^* 为 0.0214 m/s,平均流速 u_{av} 为 0.354,阻力系数 f 为 0.0293, Re 为 40000, Fr 为 0.473。试验中,示踪剂在 8C 截面(即第 8 段弯道起始处)的靠近左岸、水槽中心、靠近右岸的中间水深处释放,分别命名为

C1、C2 和 C3。其中 C1 和 C3 工况距离对应边壁 0.0254 m ($W/10$),具体释放位置见图 1。试验中测量了 8C 到 10B 共计 8 个截面(见图 1)的纵向流速和示踪剂浓度分布,各截面均位于流态充分发展的水槽后半段。

数值模型计算域见图 1,该 S 形弯道由两个反向弯曲的 90°弯道和两段直道构成。采用结构化网格剖分计算区域,进口边界的左岸底部为坐标原点,分别定义横向(展向)、纵向(流向)、垂向为 x 轴、 y 轴和 z 轴方向。模型网格沿纵向均匀划分,由于近壁处的流速梯度较大,对垂直壁面方向的网格加密并考虑壁面模型对于无量纲壁面距离 y^+ 和 z^+ 的要求。经过网格无关性检验,最终确定模型网格数量为 440(纵向)×120(横向)×40(垂向)=211.2 万。计算区域网格划分见图 2,由于网格线较为密集,为了清晰展示,图 2(a)给出了左半边截面的网格,图 2(b)每隔 3 个网格显示一次网格线。

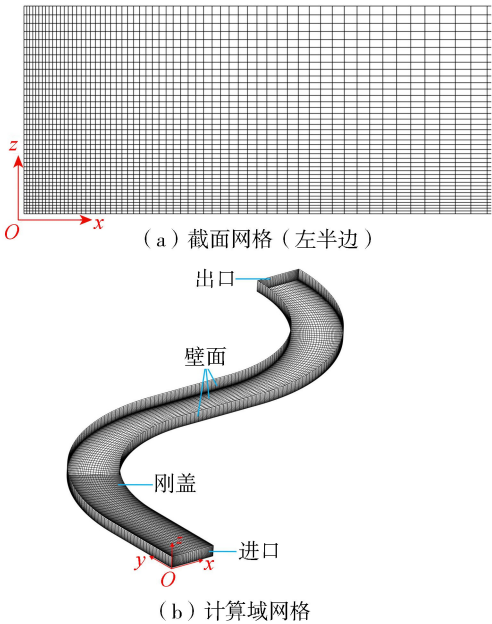


图 2 网格划分及边界位置

2.1 弯道水动力结果验证

图 3 是经过 u_{av} 无量纲化的水深平均纵向流速 u_h 的横向分布。水深平均纵向流速与试验值吻合较好,能准确反映速度分布情况。这表明本文建立的数值弯道水槽能反映流场的分布趋势,较好地预测连续弯道的水动力场。图 3 的数据呈轴对称分布,即弯道前、后半段对应位置的纵向流速分布几乎为对称形态,这是由连续弯道的几何性质导致的。

2.2 弯道污染物分布结果验证

图 4 为沿水深平均的污染物浓度 c_h 在各截面 上的横向分布。浓度 c_h 经截面平均浓度 c_s 无量纲化, c_s 的定义^[5]如下:

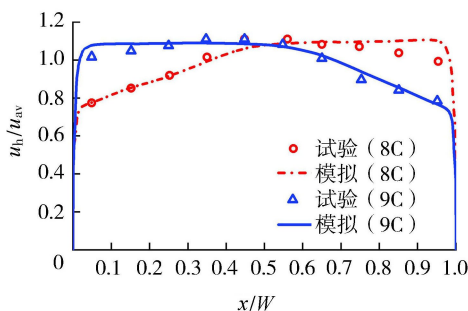
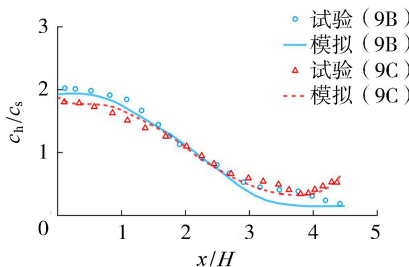
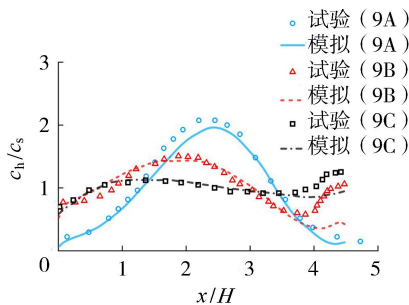


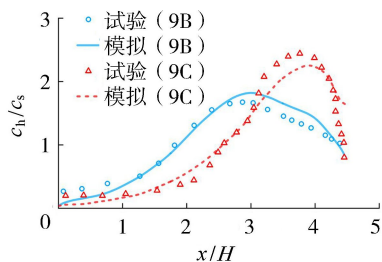
图3 部分截面沿水深平均纵向流速的横向分布



(a) C1工况 (9B和9C截面)



(b) C2工况 (9A、9B和9C截面)



(c) C3工况 (9B和9C截面)

图4 部分截面沿水深平均的污染物浓度横向分布

$$c_s = \frac{H}{Q} \sum_{i=1}^n (c_{hi} u_{hi} \Delta x) \quad (5)$$

式中: H 为水深; Q 为流量; Δx 为横向间隔长度。各截面的污染物浓度横向分布与实测值总体趋势一致, 除个别近壁区域存在偏差, 绝大部分点位吻合较好, 可认为该数值模型较为准确地模拟了污染物的浓度分布。

3 不同点源释放位置的污染物混合特性

3.1 工况设置

工况设置见图5, S1~S5点源均位于1号截面的0.9H水深处, 分别距左岸0.1W、0.3W、0.5W、

0.7W和0.9W, 用于研究点源横向位置的影响; H1~H3点源均位于1号截面的中轴线处, 分别距离底床0.05H、0.5H和0.95H, 用于研究点源垂向位置的影响。各工况的水动力条件与前述试验相同; 计算约20T (T 为流动周期, 定义为弯道中心线长度与截面平均流速的比值) 后达到紊流充分发展状态, 再计算约20T用于统计流场与标量场的时均值, 各工况计算时长约500核时 (CPU: Intel Xeon 6240R, 2节点, 每个节点48核)。共设置12个典型监测截面, 位置分布见图5。

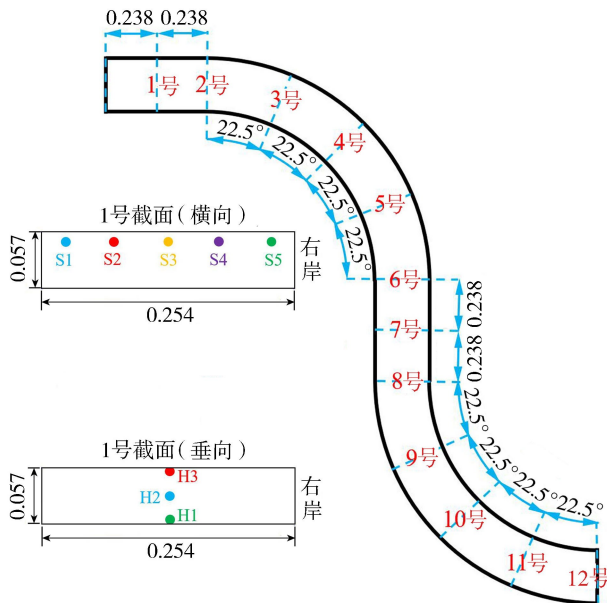
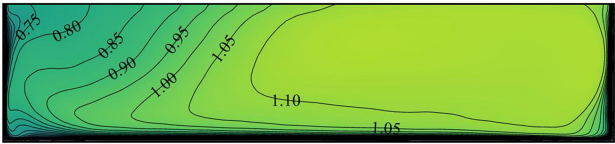


图5 不同工况的点源释放位置 (单位:m)

3.2 时均水流结构与紊动特性

图6为典型截面的无量纲纵向流速分布云图 (视角为顺水流方向, 后续云图均采用相同视角)。模拟结果显示: 主流区 ($u/u_{av} \geq 1.1$ 的区域) 在弯道进口前逐步偏向凸岸, 并在弯道进口后完全分布于凸岸一侧; 而在4号截面 (图6(d)) 后, 主流区又转向凹岸方向; 直到6号截面 (图6(f)) 附近, 主流区回归截面中心, 并在下一个弯道重复上述过程。在2~4号截面 (图6(b)~(d)), 主流区范围较小, 流速峰值较大, 与近壁的低流速区之间存在较大的流速梯度。图7的水动力轴线反映了主流区的横向位置变化过程, 水动力轴线在弯道内偏向凸岸分布, 并在2号截面后逐步转移到另一侧, 具有沿最短路径行进的特征。

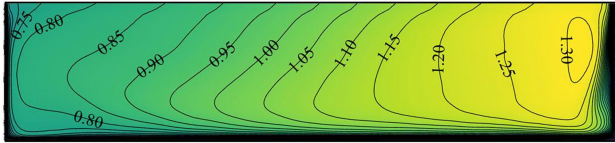
弯道的二次环流将主流区由凸岸转向凹岸, 实现动量传输^[26], 是弯道水流最显著的特征。典型截面时均纵向涡量 ω_θ (经 u_{av}/R 无量纲化) 与环流矢量 (经 u_{av} 无量纲化) 分布 (图8) 表明各截面均存在多个环流, 且在4个顶点处形成了强度不一的小尺度环流结构, 在近底处出现横跨大半个截面的扁平



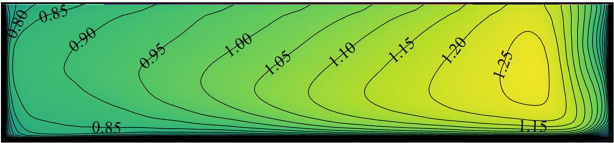
(a) 直道截面 (1号)



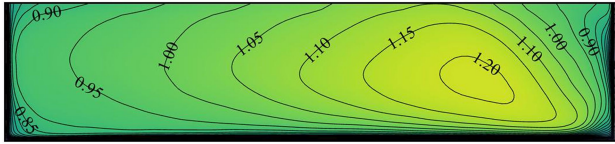
(b) 0° 截面 (2号)



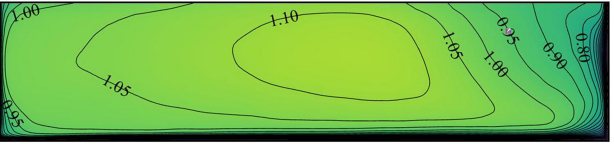
(c) 22.5° 截面 (3号)



(d) 45° 截面 (4号)



(e) 67.5° 截面 (5号)



(f) 90° 截面 (6号)

图6 典型截面的时均纵向流速分布

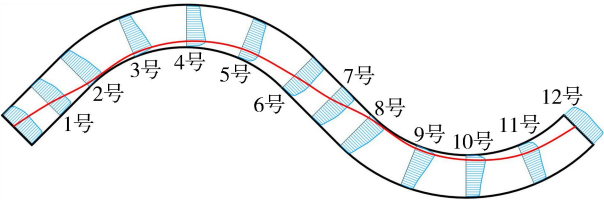


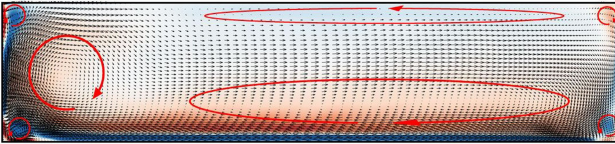
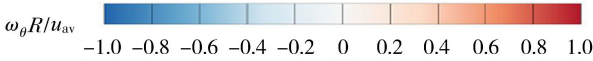
图7 沿水深平均的纵向流速分布和水动力轴线

中心环流,其旋转方向与截面中上部的环流方向相反。与图6的纵向流速相比可发现;主流区的涡量较小,而涡量较大的区域则位于边壁的低流速区;在3~6号截面(图8(c)~(f))的右岸近底部,涡量数值较大,存在强烈的环流运动,此处的纵向流速梯度也较大。

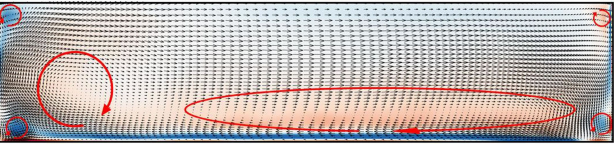
紊动能是表征紊动强弱程度的指标。数值模拟结果(图9)表明,各截面的主流区紊动能较小,紊动

能最大值集中于边壁附近。与图6对比,最小紊动能的位置位于纵向流速较大的区域,而纵向流速较小的区域伴随着较大的紊动能,这与低流速区存在复杂旋涡以及环流结构有关。与图8对比,最大紊动能与最大涡量的位置几乎重合,这说明紊动能的大小与弯道环流的强弱呈正相关(图10)。

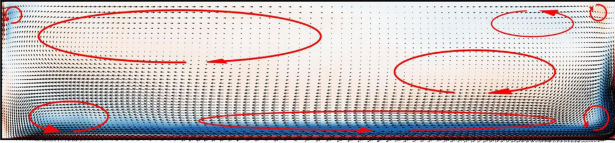
综上所述,纵向流速、环流结构和紊动强度之间存在关联。纵向流速较大的主流区环流强度较弱,其涡量和紊动能数值较低;对于22.5°至90°之间的弯段,纵向流速在靠近凸岸侧存在明显的低流速区,与邻近的高流速区之间形成了大流速梯度的剪切层,在剪切作用下形成了纵向旋涡^[27],大大增强紊动强度,使水流结构更为复杂。图11为 $Z=H/2$ 截面的 z 方向涡量云图,可以发现两个凸岸的顶部及



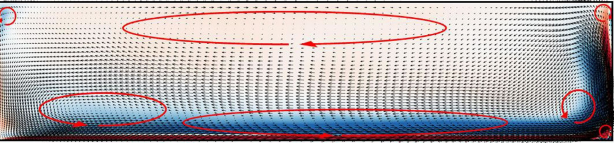
(a) 直道截面 (1号)



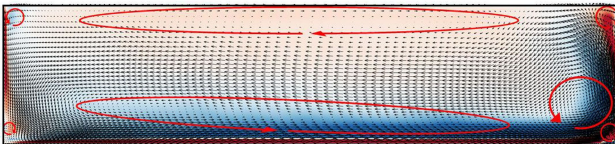
(b) 0° 截面 (2号)



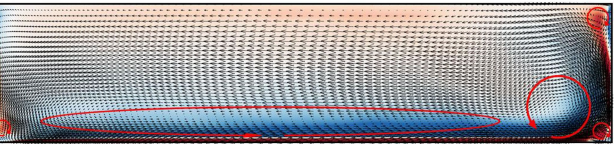
(c) 22.5° 截面 (3号)



(d) 45° 截面 (4号)



(e) 67.5° 截面 (5号)



(f) 90° 截面 (6号)

图8 典型截面的时均涡量云图和流速矢量云图

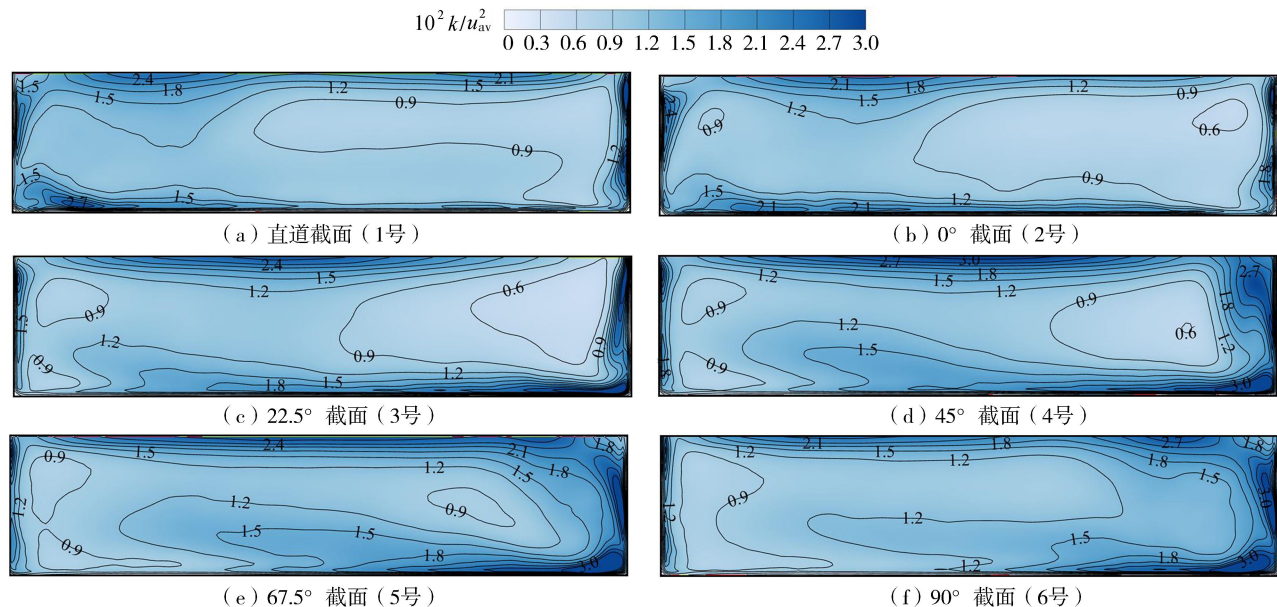


图9 典型截面的时均紊动能分布

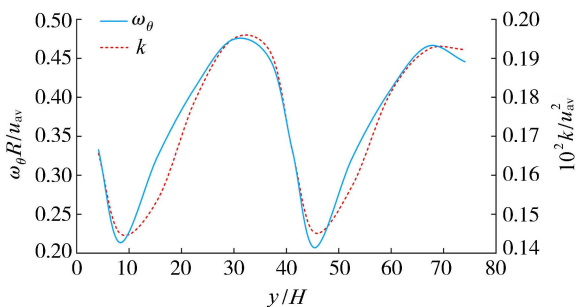


图10 截面平均涡量与平均紊动能的沿程分布

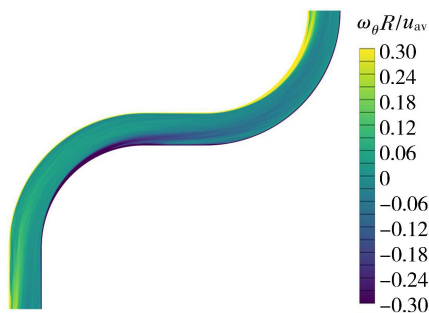


图11 $Z=H/2$ 截面的 z 方向涡量分布

其下游形成了强度相当但方向相反的一对涡旋,这是由剪切层的 Kelvin-Helmholtz 不稳定效应产生的,此处的纵向流速梯度、涡量和紊动能均较大。

3.3 污染物时均浓度场

点源横向布设位置的差异将显著影响污染物浓度分布。图12为S1和S5工况的下游截面污染物浓度分布。左岸S1点源释放后,污染物迅速到达底部,底部污染物持续向右岸输移,在4号截面处,底部污染物到达右岸并向上移动。右岸S5点源释放后,污染团也很快到达底部,顶部的污染物持续向左岸输移,污染团中心逐步向截面中心移动。在8号截面处,S1污染团集中于右岸底部,而S5偏向左岸水面处。

点源污染物垂向释放位置的差异也将显著影响近场的污染物浓度分布。H1和H3具有不同的污染物输运过程,下游浓度分布仍存在很大差异,底层释放工况的高浓度污染物易聚集在右岸,而表层释放工况高浓度污染物易聚集在左岸(图13中4号截面)。这表明在较小宽深比的弯曲河道中,污染物经点源释放后在近场的三维特征较为明显,因此沿水深平均的二维数值模型将难以准确预测小宽深比弯道明渠内污染物浓度的近场分布。

对比图8的环流结构可发现,各工况的污染物输运过程和二次环流结构存在关联。2号截面中上部存在大范围自左岸向右岸的流动,该流动范围在后续截面持续缩减,直至在6号截面消失;而2号截面近底部存在自右岸向左岸的小区域流动,该区域在后续截面持续扩大,直至在6号截面几乎占据全截面;从3号截面开始,底部持续存在自左岸向右岸的流动。上述横向流速的存在导致污染物在表层和底层输移过程的差异。截面顶角处的小尺度环流结构是导致垂向迅速输运的重要原因。此外,4~6号截面的右岸底部存在强烈的紊动,但此处的污染物混合并不明显,相比之下二次环流的对流作用占据了主导。

3.4 瞬时流场和污染物浓度场

瞬时流场与浓度场反映某一时刻的实际流场结构与污染物分布状态,图14~16为4号截面(弯道顶部)和7号截面(直道中部)的瞬时场。相较于时均场,瞬时场的纵向流速分布更不均匀,仅在大体趋势上较为相似。涡量分布方面,时均场中4号截面(图8(d))右下角集中存在较强的涡流结构,而瞬时场的涡量分布较为分散。此外,瞬时浓度场的污染团在截面中的位置和形态与时均场存在明显差异。

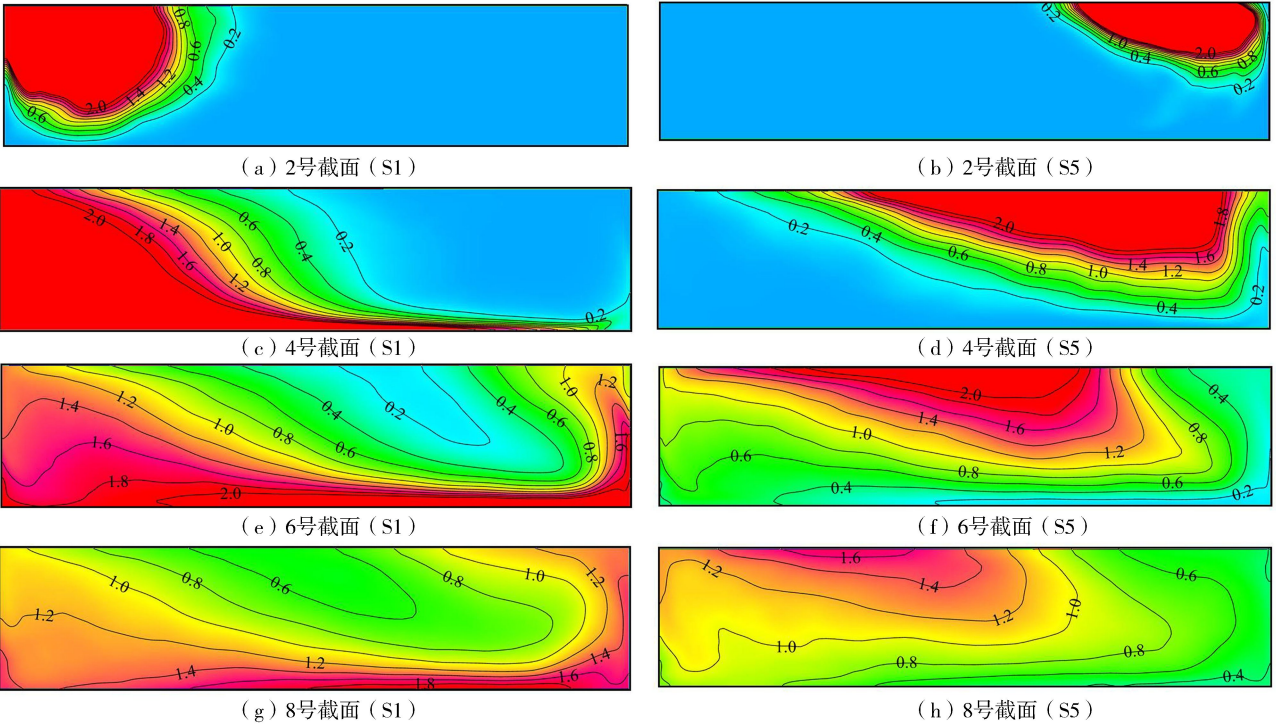
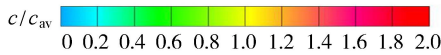


图 12 S1 和 S5 工况的污染物时均浓度分布云图

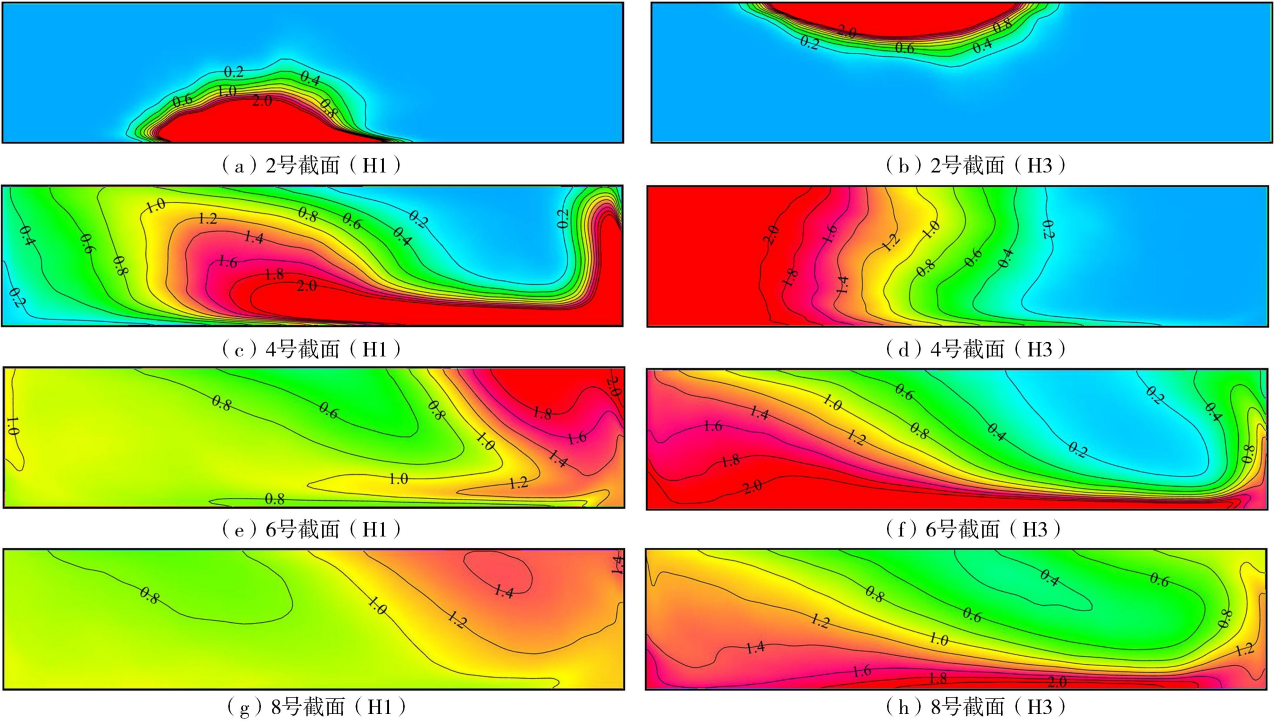
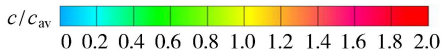


图 13 H1 和 H3 工况的污染物时均浓度分布云图

3.5 污染物混合速率

为衡量各工况的污染物混合速率,本文选取空间混合程度 c_m ^[28]用于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:

$$c_m = \frac{1}{c_{av}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_i - c_{av})^2} \tag{6}$$

式中: c_{av} 为截面平均浓度; c_i 为经插值后均布于截面上不同位置的浓度值。 c_m 数值越小,表明混合程度越高。

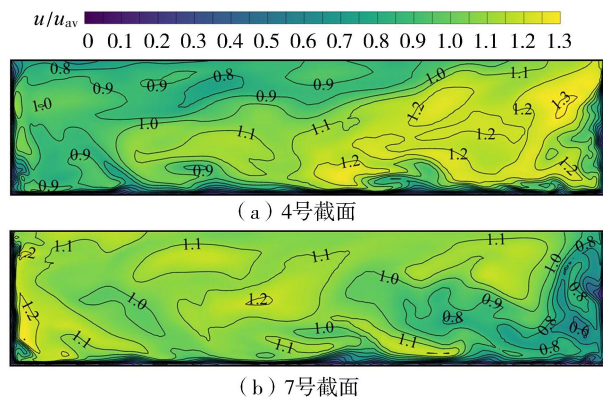


图 14 4 号和 7 号截面瞬时纵向流速

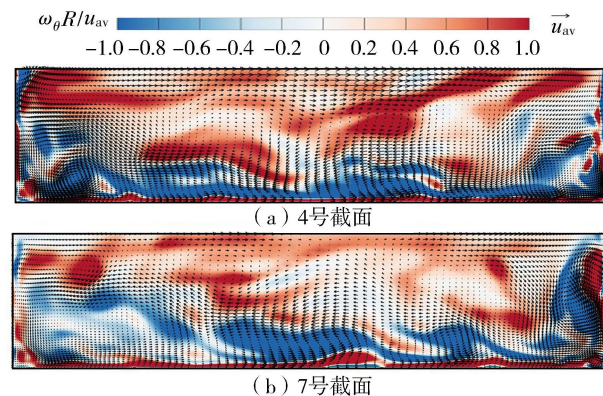


图 15 4 号和 7 号截面瞬时涡量及环流矢量

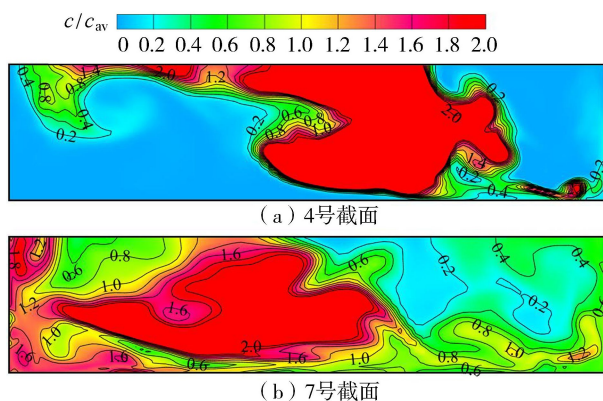
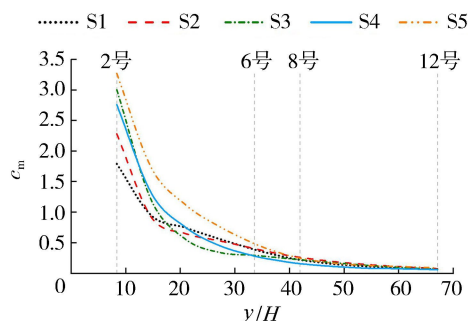


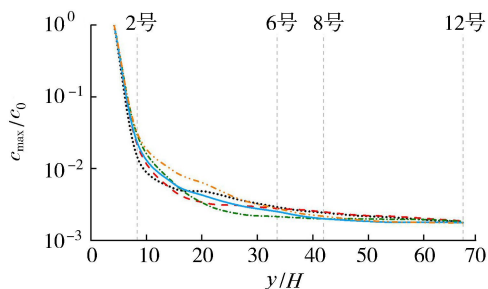
图 16 4 号和 7 号截面污染物瞬时浓度分布

S1 ~ S5 的 c_m 沿程变化曲线见图 17(a), 鉴于 1 号截面污染物聚集, 浓度均方根很大, 故从 2 号截面开始统计。图中显示各工况 c_m 在上游截面(2 号截面, $y/H=8.4$)存在明显差异; 其中 S1 在弯道进口处对应 c_m 最小, 混合程度最好。进入弯道后, S1 ~ S5 的 c_m 迅速下降; 在中游截面(6 号截面, $y/H=33.5$)处, 各工况的 c_m 值差距逐渐减小; 下游截面(12 号截面, $y/H=67.1$)处的 c_m 曲线近乎重合, 可认为各工况的混合程度近乎相同, 点源横向释放位置的影响基本可以忽略。总体上, S1 ~ S5 的 c_m 均沿程持续下降, 说明各工况污染物混合程度沿程变大。虽然 S3 和 S4 在第一段弯道前半段的 c_m 较大, 但在后半段中, S3 的 c_m 反超其他工况; 而 S4 在离

开弯道后, 其 c_m 一直较小, 说明 S3 和 S4 混合更快, 经过弯道水流作用的混合效率最高。而 S5 的 c_m 全程保持最高, 其混合效果最差。S1 ~ S5 的沿程 c_m 平均值分别为 0.358、0.361、0.334、0.351 和 0.519, 也充分说明 S3 与 S4 的混合效果最好。



(a) 截面空间混合程度



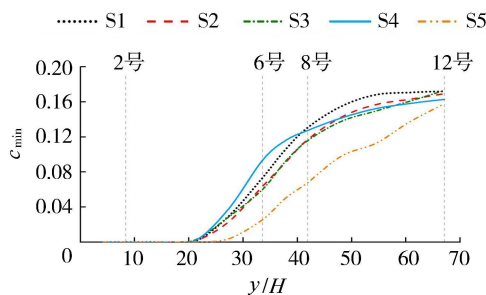
(b) 截面最大浓度

图 17 截面空间混合程度和截面最大浓度沿程变化(S1 ~ S5)

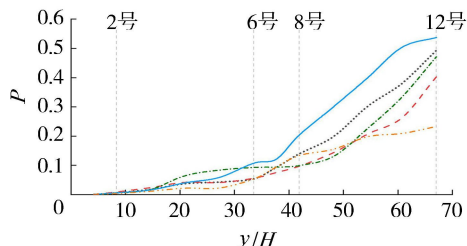
截面最大浓度 $c_{\max}$ 也可间接反映污染物的混合情况^[21]。 $c_{\max}$ 的沿程变化(图 17(b))显示: S1 ~ S5 在进入弯道前, $c_{\max}$ 的绝对数值急剧下降, 且下降过程近乎一致, 说明各工况的点源污染物在释放后的浓度峰值衰减迅速, 且衰减速率和横向布设位置无关。在第二段弯道内, 各工况 $c_{\max}$ 持续下降, 直到 6 号截面($y/H=33.5$), $c_{\max}$ 下降速率趋于平缓。在 12 号截面($y/H=67.1$), 各工况 $c_{\max}$ 近乎相同。横向比较 S1 ~ S5 可发现: S3 在第二段弯道中部到第二段弯道进口之间, $c_{\max}$ 持续保持最低, 后陆续被 S4 和 S5 反超。考虑到 S5 的 $c_{\max}$ 在第二段弯道内数值较高, 故可认为 S3 和 S4 是混合最好的工况。

截面最小浓度 $c_{\min}$ 可间接表征污染物对水体的影响程度, 也可衡量污染物在水体内的混合速率。图 18(a)为 S1 ~ S5 的 $c_{\min}$ 沿程变化, 各工况 $c_{\min}$ 呈现先快后慢的持续上升趋势。其中 S1 ~ S4 的 $c_{\min}$ 几乎在同一位置上升, 说明污染物在此处开始占据整个截面。在 12 号截面($y/H=67.1$)处, S1 和 S3 的 $c_{\min}$ 达到最大, 但与其他工况差异不大。S5 的 $c_{\min}$ 全程小于其他工况, 说明其在弯道内的混合效果较差。

污染物在水体中输运时, 截面最大浓度将持续下降(图 17(b)), 最小浓度将从 0 持续上升



(a) 截面最小浓度



(b) $\pm 5\%$ 浓度范围占截面面积百分比

图 18 截面最小浓度和截面 $\pm 5\%$ 浓度范围占截面面积百分比沿程变化 (S1 ~ S5)

(图 18(a)), 直至污染物在全截面混合均匀, 浓度保持不变, 此时的浓度可称作完全混合浓度 c'_m 。若全截面浓度均在 $\pm 5\% c'_m$ 范围内, 可认为污染物充分混合^[29]。图 18(b) 统计了 $\pm 5\% c'_m$ 浓度范围包围面积 A' 占总截面面积 A_{cs} 的百分比 P (即 $P=A'/A_{cs}$), S1 ~ S5 的 P 值沿程增大, 但曲线的上升速率有所不同。在 12 号截面 ($y/H=67.1$) 处, 各工况 P 值差异较为明显, 其中 S4 的 P 值最大, 截面上充分混合的区域占比较大, 混合速率最高; S5 工况的情况相反, 混合不明显。

H1 ~ H3 的 c_m 沿程变化曲线 (图 19(a)) 表明 H2 在第二段弯道的混合速率最高, 后被 H1 反超; 在第二段弯道的出口处, 各工况的 c_m 近乎相同。

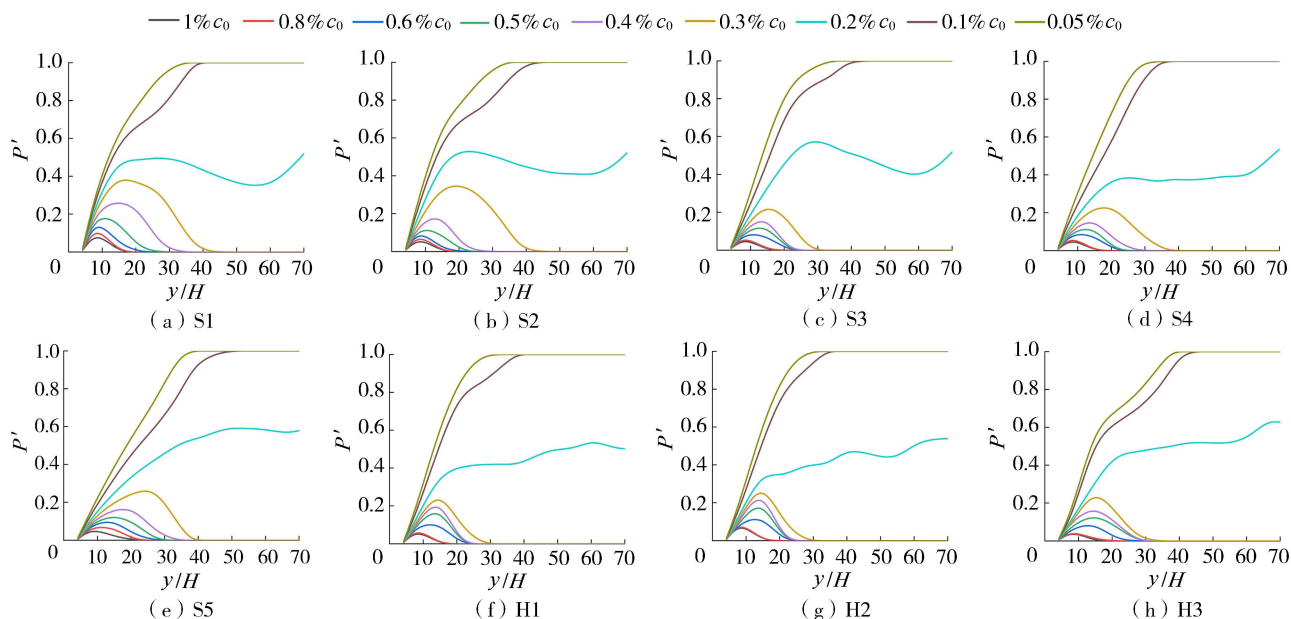
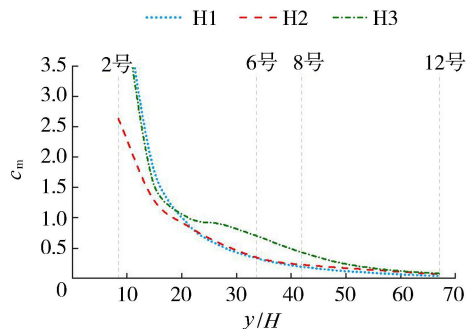
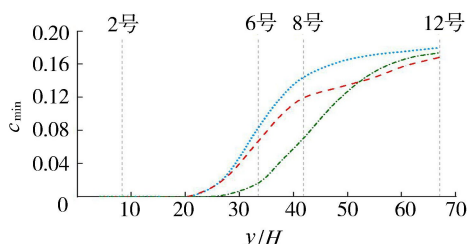


图 20 各浓度区间占截面百分比沿程变化

H1 ~ H3 的沿程 c_m 平均值分别为 0.443、0.413 和 0.588。 c_{min} 沿程变化曲线 (图 19(b)) 表明 H1 的混合效果最好; 而在第二段弯道的出口处, 各工况 c_{min} 较为接近。总体来说, 点源在垂向上布置位置的差异将影响近场处的混合效率, 当点源靠近底床将获得更高的混合速率, 当点源靠近水面将使混合减慢; 在第二段弯道的出口处, 各工况的指标趋于相同, 不再体现垂向释放位置差异对混合的影响。



(a) 截面空间混合程度



(b) 截面最小浓度

图 19 截面空间混合程度和截面最小浓度沿程变化 (H1 ~ H3)

3.6 污染物影响范围

污染物空间分布及影响范围的确定也是河流生境评估的基础。图 20 统计了截面上大于某浓度等

值线的区域占总截面面积百分比 P' 的沿程变化, 浓度等值线的划分依据初始浓度 c_0 , 图上相邻曲线之差即为两相邻浓度等值线包围的面积占截面的比率。可以直观地发现, S1 ~ S5 的 P' 曲线总体趋势一致: 在第二段弯道进口前, $0.3\% c_0$ 曲线都降至 0, $0.2\% c_0$ 在 0.4 至 0.6 区间内波动, 而 $0.1\% c_0$ 几乎都升至 1, 说明此处 S1 ~ S5 的全截面浓度均在 $0.1\% c_0$ 至 $0.3\% c_0$ 之间。横向比较可发现, S5 的曲线整体偏向右侧, 说明 S5 混合效率低, 导致污染物在释放后的一段距离内影响范围更小。H1 ~ H3 的 P' 沿程变化曲线趋势一致, 而 H3 的 $0.1\% c_0$ 和 $0.05\% c_0$ 曲线在偏后的位置到达 1。说明 H1 ~ H3 的污染物分布范围基本相同, 但 H3 的污染团在近场的影响范围较小。

4 结 论

a. 由于连续弯道的几何特性, 弯道前、后半段的水动力结构呈轴对称分布。弯道内主流区靠近凸岸, 水动力轴线沿最短路径分布。连续弯道水流的时均纵向流速、环流结构、紊动能之间存在密切关联。在纵向流速较大的主流区, 涡量与紊动能数值较小; 而纵向流速梯度较大的区域形成剪切层, 该区域的涡量与紊动能更大。横截面顶角处形成了涡量与紊动能均较大的小型环流结构。

b. 相比于紊动扩散, 大尺度环流对污染物的输运及混合起主导作用。弯道内污染物的分布均随大尺度环流的方向与强度而变化, 截面顶部与底部的横向流动显著加剧了污染物的横向输运。横截面顶角处的小型环流加速了污染物的垂向输运, 而弯顶凸岸的剪切层对污染物的混合作用不明显。

c. 点源的横向布设位置对下游污染物的混合速率与分布范围存在较大影响。当点源布置于弯道进口中部及偏右岸位置时, 污染物在下游的混合速率更快, 影响范围更广; 当点源布置在弯道进口右岸位置时, 混合速率偏低, 在近场的影响范围更小; 当点源布置于弯道进口偏左岸位置时, 污染物在下游的混合速率及影响范围居中。混合效果最好的工况对应空间混合程度的沿程平均值为 0.334。

d. 点源的垂向布设位置能显著改变污染物的近场输运过程, 使污染物的近场分布表现出明显的三维特征。当点源释放位置位于水深中部或靠近底床, 污染物的混合效率较高; 当点源释放位置靠近水面, 污染物混合效率较低, 影响范围偏小。混合效果最好的工况对应空间混合程度的沿程平均值为 0.413。

参考文献:

[1] BLANCKAERT K, DE VRIEND H J. Secondary flow in

sharp open-channel bends [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 498 : 353-380.

[2] 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))

[3] 李志伟, 丁凌峰, 唐洪武, 等. 淮河干流污染物分布及变化规律 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2020, 48 (1) : 29-38. (LI Zhiwei, DING Lingfeng, TANG Hongwu, et al. Distribution and variation of pollutants in main stream of Huaihe River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (1) : 29-38. (in Chinese))

[4] FISCHER H B. The effect of bends on dispersion in streams [J]. Water Resources Research, 1969, 5 (2) : 496-506.

[5] CHANG Y C. Lateral mixing in meandering channels [D]. Iowa : University of Iowa, 1971.

[6] FUKUOKA S. Longitudinal dispersion in sinuous channels [D]. Iowa : University of Iowa, 1971.

[7] MARION A, ZARAMELLA M. Effects of velocity gradients and secondary flow on the dispersion of solutes in a meandering channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132 (12) : 1295-1302.

[8] BAEK K O, SEO I W. Transverse dispersion caused by secondary flow in curved channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137 (10) : 1126-1134.

[9] DUAN J G. Simulation of flow and mass dispersion in meandering channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130 (10) : 964-976.

[10] 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.

[11] DEMUREN A O, RODI W. Calculation of flow and pollutant dispersion in meandering channels [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986, 172 : 63-92.

[12] 申满斌, 陈永灿. 明渠弯道水流及污染物输移特性研究 [C] // 第六届全国环境水力学学术会议. 北京 : 中国水利学会, 2004 : 10-16.

[13] 顾莉, 赵欣欣, 戴波, 等. 汇流比对 U 形弯曲交汇河道中污染物离散系数的影响 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2018, 46 (3) : 189-195. (GU Li, ZHAO Xinxin, DAI Bo, et al. The influence of discharge ratio on the pollutant dispersion coefficient in the U-shaped confluent curved river [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46 (3) : 189-195. (in Chinese))

[14] 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.
- [15] HUANG Heqing, CHEN Guang, ZHANG Qianfeng. Influence of river sinuosity on the distribution of conservative pollutants [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2012,17(12):1296-1301.
- [16] 丁敏. 弯曲河段污染混合区特性变化规律研究[D]. 青岛: 青岛理工大学,2016.
- [17] BOOIJ R. Measurements and large eddy simulations of the flows in some curved flumes[J]. Journal of Turbulence, 2003,4(4):N8.
- [18] STOESSER T, RUETHER N, OLSEN N R B. Calculation of primary and secondary flow and boundary shear stresses in a meandering channel [J]. Advances in Water Resources,2010,33(2):158-170.
- [19] KHOSRONEJAD A, RENNIE C D, NEYSHABOURI S A A S, et al. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in laboratory channel bends [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,133(10):1123-1134.
- [20] VAN BALEN W, BLANCKAERT K, UIJTTEWAAL W S J. Analysis of the role of turbulence in curved open-channel flow at different water depths by means of experiments, LES and RANS[J]. Journal of Turbulence, 2010,11(12):N12.
- [21] MONCHO-ESTEVE I J, FOLKE F, GARCÍA-VILLALBA M, et al. Influence of the secondary motions on pollutant mixing in a meandering open channel flow [J]. Environmental Fluid Mechanics,2017,17(4):695-714.
- [22] VAN BALEN B, UIJTTEWALL W S J, BLANCKAERT K. Scalar dispersion in strongly curved open-channel flows [C]//River Flow. Braunschweig: Bundesanstalt für Wasserbau,2010:169-177.
- [23] HINTERBERGER C, FRÖHLICH J, RODI W. Three-dimensional and depth-averaged large-eddy simulations of some shallow water flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,133(8):857-872.
- [24] XU Dong, BAI Yucuan, MUNJIZA A, et al. Investigation on the characteristics of turbulent flow in a meandering open channel bend using large eddy simulation[C]//35th IAHR World Congress. Beijing: IAHR,2013.
- [25] 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.
- [26] 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))
- [27] KOKEN M, CONSTANTINESCU G, BLANCKAERT K. Hydrodynamic processes, sediment erosion mechanisms, and Reynolds-number-induced scale effects in an open channel bend of strong curvature with flat bathymetry[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface,2013,118(4):2308-2324.
- [28] 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.
- [29] POUCHOULIN S, MIGNOT E, RIVIÈRE N, et al. Numerical simulations on mixing of passive scalars in river confluences [J]. E3S Web of Conferences, 2018, 40: 05019.
- (收稿日期:2022-03-24 编辑:俞云利)
- +++++
- (上接第 8 页)
- [28] 潘志刚, 林祥峰, 张继生. 基于支持向量机的桥墩局部冲刷深度预测模型[J]. 水利水电科技进展,2021,41(6):78-81. (PAN Zhigang, LIN Xiangfeng, ZHANG Jisheng. Prediction model for bridge pier local scour depth based on support vector machine[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(6):78-81. (in Chinese))
- [29] 王飞, 姚磊华, 张彬, 等. 桥墩局部冲刷动态模拟及不同截面的冲刷特性[J]. 水利水电科技进展,2018,38(3):81-87. (WANG Fei, YAO Leihua, ZHANG Bin, et al. Dynamic simulation of local scour around bridge piers and scouring characteristics of piers with different cross sections [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(3):81-87. (in Chinese))
- [30] KHOSRAVINIA P, MALEKPOUR A, HOSSEINZADEHDALIR A, et al. Effect of trapezoidal collars as a scour countermeasure around wing-wall abutments [J]. Water Science and Engineering,2018,11(1):53-60.
- [31] TANG T C C, DAVAR K S. Resistance to flow in partially-covered channels [R]. Fredericton: University of New Brunswick,1985.
- [32] CAREY K L. Observed configuration and computed roughness of the underside of river ice, St. Croix River, Wisconsin [R]. Reston: U. S. Geological Survey Professional Paper,1966:192-198.
- [33] FU Hui, GUO Xinlei, KASHANI A H, et al. Experimental study of real ice accumulation on channel hydraulics upstream of inverted siphons[J]. Cold Regions Science and Technology,2020,176:103087.
- (收稿日期:2022-05-22 编辑:俞云利)