

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.03.001

汇流比对U形弯曲交汇河道中污染物离散系数的影响

顾莉^{1,2},赵欣欣¹,戴波³,吴健伟⁴,褚克坚⁴

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,江苏南京 210098;

2. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心,江苏南京 210098;

3. 南京水利科学研究院,江苏南京 210029; 4. 河海大学环境学院,江苏南京 210098)

摘要: 针对弯曲河道交汇区污染物离散系数的分布特征进行研究,通过建立U形弯曲交汇河道水气两相流数学模型,进行交汇区水动力数值模拟。数学模型经试验数据验证后,模拟分析了不同汇流比对弯道交汇区水流结构和离散特性的影响,离散系数采用二维离散张量法进行计算。结果表明,支流入汇导致交汇断面附近纵向和横向离散系数达到峰值,该峰值随着汇流比的增大而增大;横向离散系数沿程分布呈现单峰结构,纵向离散系数沿程分布呈现双峰结构。

关键词: 离散系数;弯曲交汇河道;汇流比;二次环流;数值模拟;离散张量

中图分类号:TV121

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2018)03-0189-07

The influence of discharge ratio on the pollutant dispersion coefficient in the U-shaped confluent curved river

GU Li^{1,2}, ZHAO Xinxin¹, DAI Bo³, WU Jianyi⁴, CHU Kejian⁴

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering safety, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

4. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The distribution characteristics of pollutant dispersion coefficient in the confluence of a curved river with tributary are studied. The mathematical model of air-water two-phase flow in the U-shaped confluent channel is established and verified by the data of previous laboratory experiments. Based on the simulation results, the influence of different discharge ratio on the flow structure and dispersion characteristics of confluent curved river is analyzed, in which the dispersion coefficient is calculated by the two-dimensional tensor method. The results show that the dispersion coefficient reaches the peak value in the vicinity of convergence, and the peak value increases with the increase of discharge ratio. Moreover, the longitudinal dispersion coefficient shows a single peak distribution along the river, while the transversal dispersion coefficient presents a double-peak structure.

Key words: dispersion coefficient; confluent curved river; discharge ratio; secondary flow; numerical simulation; dispersion tensor

基金项目: 国家自然科学基金(51379058, 51479064);中央高校基本科研业务费专项资金(2016B06714)

作者简介: 顾莉(1981—),女,副教授,博士,从事环境与生态水力学研究。E-mail:gulicq@hhu.edu.cn

引用本文: 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.

河流的离散系数是反映污染物在水体中混合能力的重要参数,该系数的确定在研究污染物输移规律和计算水环境容量中有着重要作用。专家学者已经针对顺直和弯曲河道的离散系数进行了大量的研究。文献[1-5]研究了顺直河道的离散系数的分布范围,并分别提出了离散系数关于流速、河宽、水深等参量的经验公式,得到在室内试验顺直河道中无量纲横向离散系数的范围在0.1~0.26之间,而在天然河道中由于河道弯曲以及边壁的不规则性无量纲横向离散系数的范围在0.4~0.8之间。在弯曲河道方面,Rutherford^[6]归纳总结了天然弯曲河道离散系数值的分布特征,得出弯曲河道的无量纲横向离散系数在0.3~1.0,而强弯曲河道的无量纲横向离散系数达到了1.0~3.0。Baek等^[7-10]通过室内示踪试验探求连续弯曲河道的离散系数大小,此外还有不少学者从理论角度出发计算弯曲河道离散系数。李成光等^[11]对180°强弯曲河道进行了试验,结果表明:弯段前的纵向离散系数较大,横向离散系数较小;弯段中的横向离散系数较大,纵向离散系数较为平缓;弯段后离散系数基本趋于稳定。与顺直河道相比,弯曲河道存在两个显著的特点:第一是弯道会产生强烈的环流,增大横向混合系数,减小纵向离散系数;第二是弯曲河道断面流速的不均匀性比顺直河道更大,所以会产生更大的离散系数值^[12-13]。Andrea等^[14]认为环流会增强横向混合而减小纵向离散,但减小纵向离散的效应一般都小于断面流速分布不均匀而增大纵向离散的效应。

前人研究弯曲河道时都未考虑支流入汇的影响,其实支流与弯曲河道交汇的现象在自然界非常普遍,在干支流交汇区域水流结构与污染物混合过程十分复杂^[15-18],目前该区域污染物的横向和纵向离散系数分布特征尚不清楚。本文针对支流入汇U形弯曲河道进行研究,探求不同汇流比条件下水流运动特性和离散系数的分布规律。首先在前人的支流入汇U形弯曲河道物理模型试验的基础上,建立三维 RNGk-ε 紊流模型^[19],使用VOF方法追踪明渠的自由表面^[20];其次,利用验证后的数学模型模拟60°交汇角条件下汇流比由0.1变化至0.6的6个工况,探求U形弯曲交汇河道的三维流速结构和二次环流;最后,采用二维张量法计算交汇前、中、后不同区域的纵向和横向离散系数,解析不同汇流比对弯曲型交汇河道离散系数分布特征的影响。

1 交汇河道数学模型

计算模型基于高艳等^[21]的U形弯曲交汇河道模型,如图1所示,坐标原点位于U形弯道圆心处。整个物理模型系统由进口直段、出口直段、U形弯段和支流组成,支流入汇主流的位置在弯段的弯顶处,主、支流交汇角为60°,主、支流槽宽分别为1m和0.3m,上下游直段水槽长6m,支流水槽长3.5m。主流弯道转角为180°,内径为1.5m,外径为2.5m,弯道底部断面形状为偏U形,靠近凹岸处为深槽区。选取一个典型试验工况进行模拟和验证,主流进口流量为0.03m³/s,支流进口流量为0.009m³/s,下游水位高程保持为0.18m。

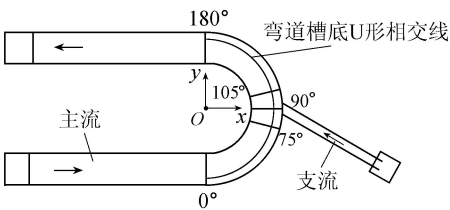


图1 试验水槽平面示意图
Fig.1 Sketch of the experimental flume

本文采用水气两相流三维数学模型,自由水面由VOF法追踪^[22]。

1.1 控制方程

连续方程、动量方程、紊动能方程和紊动能耗散率方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \rho G_k - \rho \varepsilon \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \rho \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

其中

$$G_k = \nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$C_\mu = 0.0845$$

$$\rho = f\rho_w + (1 - f)\rho_a$$

水气界面的跟踪通过求解连续性方程来完成:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u_i \frac{\partial f}{\partial x_i} = 0 \tag{5}$$

式中: i, j ——坐标方向, $i, j = 1, 2, 3$, 分别代表 x, y, z 坐标方向; x_i, x_j —— i, j 方向的笛卡尔坐标; u_i, u_j —— i, j 方向的时均流速; t ——时间; ρ ——混合流体密度; ρ_w ——水体密度; ρ_a ——空气密度; g ——重力加速度; p ——压强; μ ——动力黏性系数; μ_t ——动力紊动黏性系数; k ——紊动能; ε ——紊动能耗散率; ν ——分子运动黏性系数; ν_t ——分子紊动黏性系数; G_k ——紊动能生成项; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ —— k 方程和 ε 方程的紊流 Prandtl 数, 分别取值 1.44 和 1.92; $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_\mu$ ——经验系数, 分别取值 1.0、1.3 和 0.09。 $0 \leq f \leq 1, f = 1$ 代表控制体内充满水, $f = 0$ 代表控制体内充满空气。

1.2 计算方法及边界条件

采用有限体积法中迎风差分格式对计算区域进行离散, 压力校正采用 PISO 算法^[23]。水相进口采用试验实测流速, 空气进口采用压力进口, 出口均采用压力出口, 边壁采用无滑移固壁条件, 由标准壁面函数法给出。

1.3 划分网格

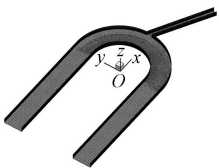
采用六面体结构化网格, 考虑到自由水面处存在波动和交汇处水流结构复杂等因素, 对水气交界面和弯段处网格进行加密处理。模型网格三维剖分见图 2。

1.4 模型验证

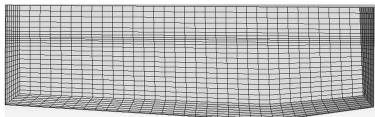
采用高艳交汇水槽的试验结果对水气两相流数学模型进行验证, 利用特征断面纵向流速和水面高程进行验证分析。本文断面图朝向均为面向下游。

1.4.1 纵向流速分布

90°圆心角特征断面纵向流速的实测值与模拟值的对比结果见图 3, 图 3 中 z^0 和 u^0 无量纲化水深和流速, r 为河道测点与圆心坐标原点的距离。由图 3 可知模拟值量值大小和实测值有较好的一致性, 计算所得流速误差在 10% 范围以内。



(a) 模型整体网格剖分



(b) 弯道断面网格剖分

图 2 支流入汇 U 形弯曲河道的三维网格布置

Fig.2 Three-dimensional grid of the U-shaped confluent curved river with tributary

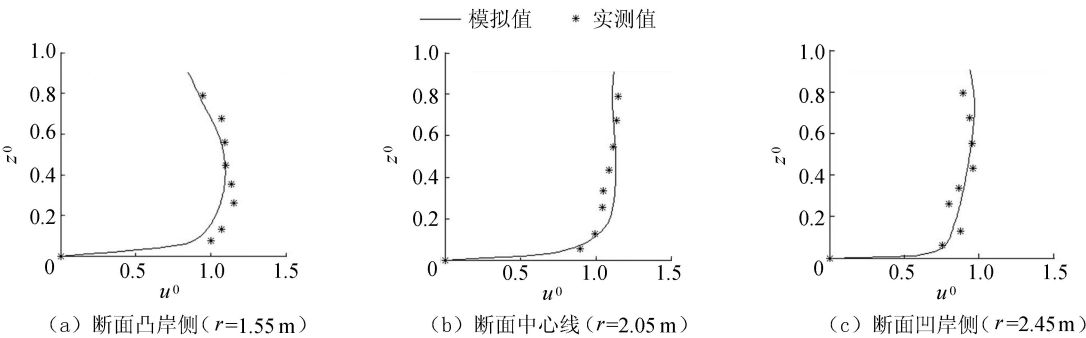


图 3 垂线的纵向流速实测值和计算值对比

Fig.3 Comparison of the measured and calculated values of longitudinal velocity

1.4.2 水面高程

水面线高程的实测值与模拟值对比结果见图 4, 其中 x^0 为河道测点与圆心坐标原点的无量纲距离。由图 4 可知, 模拟的水面线高程基本与实测值相似, 误差在 5% 的范围内, 支流入汇前凹岸侧水面明显高于凸岸侧, 交汇点附近都有明显的水面壅高现象, 交汇口下游不远处凹岸水面高程迅速下降之后缓慢上升, 凸岸附近水面高程相对凹岸偏低。

综上所述, 从特征断面垂线流速和水面线高程的对比结果来看, 模拟值与实测值具有较好的一致性, 可见此数学模型计算结果合理可靠。

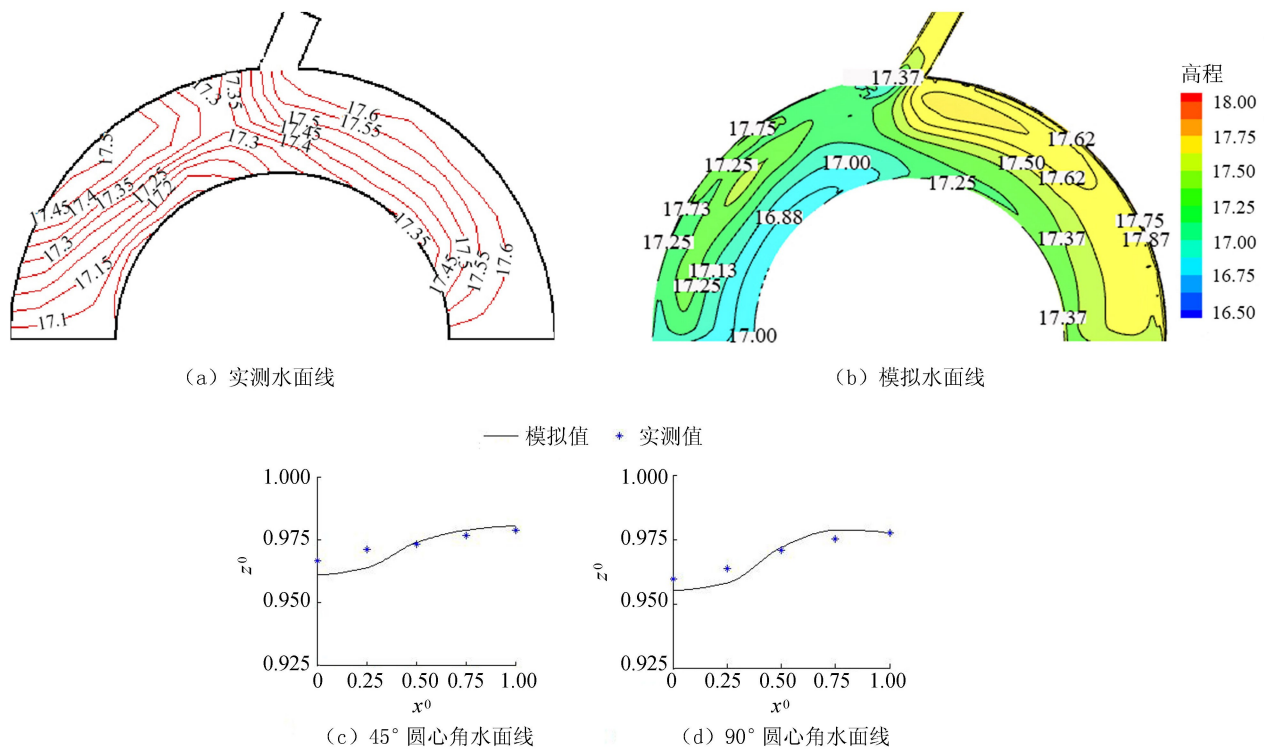


图 4 实测水面线和模拟水面线对比 (单位:cm)

Fig.4 Comparison of the measured and simulated water surface profile (units: cm)

2 流速场数值模拟

2.1 数值模拟工况

利用经过验证的数学模型,对不同汇流比工况进行数值模拟,计算工况见表 1。

表 1 模拟工况

Table 1 Simulated conditions							
汇流比 Q_r	$Q_t/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$Q_m/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流速比 U_r	汇流比 Q_r	$Q_t/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$Q_m/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流速比 U_r
0.1	0.003	0.03	0.34	0.4	0.012	0.03	1.33
0.2	0.006	0.03	0.66	0.5	0.015	0.03	1.66
0.3	0.009	0.03	1.00	0.6	0.018	0.03	1.99

注: $Q_r=Q_t/Q_m$, Q_t 为支流流量, Q_m 为主流流量; $U_r=U_t/U_m$, U_t 为支流断面平均流速, U_m 为主流断面平均流速;水深保持恒定, $h=0.18$; 交汇角 $\theta=60^\circ$ 。

2.2 二次环流

二次环流是弯曲河道的重要特征,它对污染物的扩散有很大的影响。鉴于篇幅有限,以交汇角 $\theta=60^\circ$, 汇流比 $Q_r=0.3$ 工况下弯道不同断面环流结构进行分析,图 5 为弯道沿程各断面流速 (U) 分布。弯道前半段,在弯道入口圆心角 0° 断面(图 5(a)),最大流速位置靠近凸岸侧,未形成环流;圆心角 45° 断面形成了完整的顺时针环流(图 5(b)),这与单一弯道形成的环流结构相似,表流指向凹岸,底流指向凸岸,该环流是弯道离心力和水面横比降共同作用下的结果,最大流速位置开始偏离凸岸,有朝向凹岸移动的趋势。在支流入汇的弯顶断面(图 5(c)),断面凹岸侧存在着量值较大的横向流速,压缩上游弯段形成的顺时针环流,只在凸岸侧形成较小的顺时针环流。在弯道后半段,圆心角 105° 断面的凹岸侧形成了水流分离区(图 5(d)),最大流速区紧挨着分离区,形成了凸岸顺时针环流和凹岸逆时针环流的双环流结构,水流紊动强烈;在圆心角 145° 断面(图 5(e)),由于分离区的消失,凹岸侧的逆时针环流强度有所减小,形成凸岸侧较大的顺时针环流,凹岸较小的逆时针环流的双环流结构,主流最大流速区由于逆时针环流的存在不贴近凹岸。图 5(f) 为 180° 圆心角断面,此时环流结构不明显,流速横向分布较均匀。

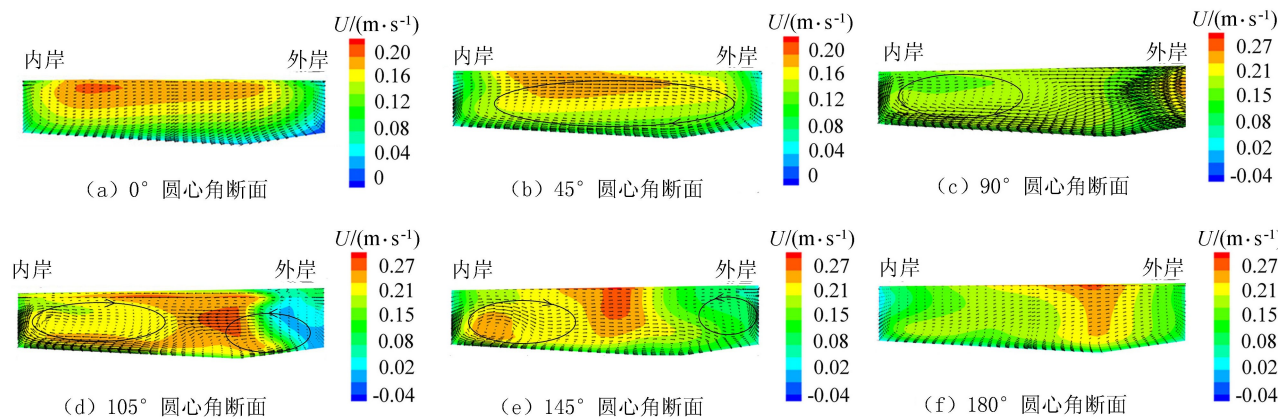


图 5 $\theta=60^\circ, Q_r=0.3$ 工况下弯道各断面流速分布

Fig.5 Velocity distribution of different sections for the runs with $\theta=60^\circ$ and $Q_r=0.3$

3 离散系数的计算

3.1 计算离散系数方法

采用 Fischer^[24] 的二维张量法计算离散系数,计算公式如下:

$$\begin{cases} D_{xx} = -\frac{1}{h} \int_0^h u' \int_0^z \frac{1}{\varepsilon_t} \int_0^z u' dz dz dz \\ D_{xy} = -\frac{1}{h} \int_0^h u' \int_0^z \frac{1}{\varepsilon_t} \int_0^z v' dz dz dz \\ D_{yx} = -\frac{1}{h} \int_0^h v' \int_0^z \frac{1}{\varepsilon_t} \int_0^z u' dz dz dz \\ D_{yy} = -\frac{1}{h} \int_0^h v' \int_0^z \frac{1}{\varepsilon_t} \int_0^z v' dz dz dz \end{cases} \tag{6}$$

式中: z ——垂向坐标; u' 、 v' ——实际速度与沿深平均速度 u 和 v 的垂向速度偏差; ε_t ——垂向扩散系数; h ——水深。当给出垂向流速分布资料时,就可以通过上式得出准确的离散系数。

在天然河道里,河道通常是蜿蜒曲折的,所以使用顺水流方向的坐标 ξ 和垂直于水流方向的坐标 η 作为随体坐标系,二维物质输运方程表示为

$$\frac{\partial(hC)}{\partial t} + \frac{\partial(u_\xi hC)}{\partial \xi} + \frac{\partial(u_\eta hC)}{\partial \eta} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(hD_L \frac{\partial C}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(hD_T \frac{\partial C}{\partial \eta} \right) \tag{7}$$

式中: u_ξ 、 u_η —— ξ 、 η 方向流速; D_L 、 D_T ——纵向和横向离散系数。Alavian^[25] 给出离散张量的笛卡尔分量和 D_L 、 D_T 的关系:

$$\begin{cases} D_{xx} = D_L \frac{u^2}{U^2} + D_T \frac{v^2}{U^2} \\ D_{xy} = D_{yx} = (D_L - D_T) \frac{uv}{U^2} \\ D_{yy} = D_T \frac{u^2}{U^2} + D_L \frac{v^2}{U^2} \end{cases} \tag{8}$$

其中 $U = \sqrt{u^2 + v^2}$

关联式(6)和式(8),利用最小二乘法得出 D_L 、 D_T 。

因此可以由计算出的离散张量的笛卡尔分量估算出纵向离散系数和横向离散系数值。

3.2 汇流比对离散系数的影响

利用二维张量模型计算断面离散系数点值,然后用断面平均值研究离散系数沿程变化规律。 $D_T/(hu^*)$ 、 $D_L/(hu^*)$ 分别为无量纲的横向和纵向离散系数, u^* 为剪切流速,由 $u^* = (gRS_f)^{1/2}$ 给出,其中 g 为重力加速度, R 为水力半径, S_f 为比降。

3.2.1 横向离散系数

不同汇流比条件下无量纲横向离散系数沿程分布见图6(a)。从图6(a)中可以看出, $D_T/(hu^*)$ 沿程呈现先增大后减小的趋势, $D_T/(hu^*)$ 的峰值出现在圆心角 90° 弯顶断面附近; 随着汇流比的增大, 峰值量值也相应变大, 并且位置也由弯顶前向弯顶后断面偏移。分析其原因, 弯道进口段, 水流横向流速较小, 横向掺混并不剧烈, 所以 $D_T/(hu^*)$ 相应较小; 随着水流进入弯道后不断地发展, 断面形成顺时针二次环流, 加剧了水流横向掺混作用, 所以 $D_T/(hu^*)$ 不断增大; 到达支流入汇的弯顶断面, 支流入汇带来的较大的水流横向剪切流速在一定程度上约束了上游弯道形成的二次环流, 支流流量较小时, $D_T/(hu^*)$ 会出现变小状况, 当汇流比增大到一定程度, 支流带来的横向剪切流速很大, $D_T/(hu^*)$ 沿程会持续变大, 所以 $D_T/(hu^*)$ 的峰值随着汇流比增大而增大, 位置也偏向交汇断面下游; 交汇区下游凹岸侧形成了水流分离区, 断面二次环流也由单一的顺时针环流变成凸岸顺时针凹岸逆时针的双环流系统, 水流横向剪切作用较大, $D_T/(hu^*)$ 也会持续增大, 到弯道下游段, 由于二次流强度逐渐减小, 横向剪切流速减小, $D_T/(hu^*)$ 也逐渐减小。

3.2.2 纵向离散系数

图6(b)为不同汇流比工况无量纲纵向离散系数沿程分布。从图6(b)中可以看出, $D_L/(hu^*)$ 沿程先减小, 在弯顶断面开始变大, 峰值随着汇流比的增大而增大, 随后沿程再逐渐减小。分析其原因, 弯道进口段, 由于流速的重新分配, 凸岸侧流速远大于凹岸侧(图5(a)), 纵向流速剪切作用较大, 所以 $D_L/(hu^*)$ 在进口断面较大; 进入弯道后, 水流不断发展, 最大流速由凸岸向凹岸转移, 水流流速分布较为平缓, 纵向流速梯度逐渐减小, 所以 $D_L/(hu^*)$ 在弯道上游段逐渐减小; 在圆心角 90° 断面, 由于支流的汇入, 压缩主流过水断面, 在凹岸侧形成分离区, 靠近分离区侧形成最大流速区(图5(d)), 纵向流速梯度变大, 且随着汇流比的增大, 流速梯度越大, $D_L/(hu^*)$ 值变得越大; 弯道下游, 随着分离区的消失, 水流重新分配, 纵向流速在断面横向的分布逐渐平缓, 流速剪切作用也逐渐变小, $D_L/(hu^*)$ 逐渐减小。

4 结 论

- a. 弯道交汇河道的水流结构复杂, 在弯道进口断面, 最大流速出现在凸岸侧, 随着水流在弯道内的不断发展, 二次环流形成, 最大流速也向凹岸转移, 弯顶断面, 由于支流汇入, 使得交汇区下游流速分布异常复杂, 凹岸侧形成分离区, 最大流速偏离凹岸, 二次环流也呈现双环流结构, 远离交汇区, 环流逐渐减弱。
- b. 弯道进口断面, 横向流速较小, $D_T/(hu^*)$ 较小, 但纵向剪切流速较大, 所以 $D_L/(hu^*)$ 较大; 随着水流入弯后不断发展, 二次环流形成, 水流横向剪切剧烈, $D_T/(hu^*)$ 变大, 最大流速向凹岸转移, 纵向剪切流速变小, $D_L/(hu^*)$ 变小; 支流入汇后, 带来的较大的水流横向剪切流速, 支流流量较小时, 一定程度上削弱了上游产生的二次环流, $D_T/(hu^*)$ 会出现变小状况, 随着汇流比增大, 支流带来的横向剪切流速变大, 断面 $D_T/(hu^*)$ 会持续变大, 支流的汇入也使最大流速显著增大, 使得纵向剪切流速显著变大, $D_L/(hu^*)$ 突然变大; 交汇区下游断面, 由于水流在横向和纵向上的重新分配, $D_T/(hu^*)$ 和 $D_L/(hu^*)$ 逐渐减小。

参考文献:

[1] ELDER, J W. The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1959, 5(4) : 544-560.
[2] FISCHER H B, LIST E J, KOH R C Y, et al. Mixing in inland and coastal waters[M]. London: Academic Press, 1979.
[3] STEFAN H, GULLIVER J S. Effluent mixing zone in a shallow river[J]. Journal of the Environmental Engineering Division, 1978, 104(2) : 199-213.

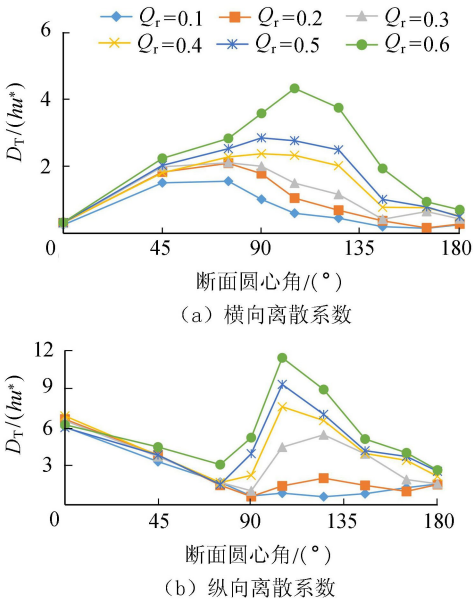


图6 不同汇流比工况离散系数沿程分布
Fig. 6 Distribution of the dispersion coefficient along the channel under different discharge ratios

- [4] 蒋忠锦,王继徽. 天然河流和湖泊岸流污染带横向混合系数计算[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 1997, 24(1):29-32. (JIANG Zhongjin, WANG Jihui. Calculation of transverse mixed coefficient in the polluted zone of natural rivers and lakes bank flow[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 1997, 24(1):29-32. (in Chinese))
- [5] 郑旭荣,邓志强,申继红. 顺直河流横向紊动扩散系数[J]. 水科学进展, 2002, 13(6):670-674. (ZHENG Xurong, DENG Zhiqiang, SHEN Jihong. Transverse turbulent dispersion coefficient in straight channel[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(6):670-674. (in Chinese))
- [6] RUTHERFORD J. River mixing[M]. New York: John Wiley and Sons, 1994.
- [7] 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.
- [8] SEO I W, LEE M E, BAEK K O. 2D modeling of heterogeneous dispersion in meandering channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(2): 196-204.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 李成光,槐文信,曾玉红,等. 强弯河道水流结构及离散特性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014(2):64-67. (LI Chengguang, HUAN Wenxin, ZENG Yuhong, et al. Flow structures and dispersion characteristics in strongly curved open channels[J]. Journal of Huazhong University(Natural Sciences), 2014(2):64-67. (in Chinese))
- [12] 高伟,杨中华. 弯道纵向离散系数研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2009(2):5-8. (GAO Wei, YANG Zhonghua. Advance in longitudinal dispersion coefficient of river bends[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(2):5-8. (in Chinese))
- [13] LANCKAERT K, de VRIEND H J. Secondary flow in sharp open-channel bends[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 498(1): 353-380.
- [14] ANDREA M, MATTIA Z. Effects of velocity gradients and secondary flow on the dispersion of solutes in a meandering channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(12): 295-302.
- [15] 孙远敬,徐建新. 基于CFD的河流弯道二次流的三维数值模拟[J]. 应用力学学报, 2015(3):502-507. (SUN Yuanjin, XU Jianxin. Three-dimensional numerical simulation of secondary flow in river bends based on CFD[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015(3):502-507. (in Chinese))
- [16] 江帆,陈维平,陈敏,等. 弯曲性分叉河道中污染物扩散性的初步研究[J]. 水资源保护, 2006, 22(4):30-32. (JIANG Fan, CHEN Weipin, CHEN Min, et al. Primary study on diffusion of contaminants in meandering furcated rivers[J]. Water Resources Protection, 2006, 22(4):30-32. (in Chinese))
- [17] CHEN Liping, CHENG Jingtao, DENG Guangfa. Anisotropic diffusion of volatile pollutants at air-water interface[J]. Water Science and Engineering, 2013, 6(1):153-163.
- [18] 路川藤,黄华聪,钱明霞. 长江口北槽丁坝田区潮流及污染物迁移扩散特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(3): 265-271. (LU Chuanteng, HUANG Huacong, QIAN Mingxia. Tidal current and pollutant diffusion characteristics in spur dike field of north passage in yangtze estuary[J]. Journal Of Hohai University(Natural Sciences), 2016, 44(3):265-271. (in Chinese))
- [19] 冯丽华. 明渠弯道三维水流数值模拟研究[D]. 扬州:扬州大学, 2007.
- [20] HIRT C W, NICHOLS B D. A computational method for free surface hydrodynamics[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1981, 103(2): 136-141.
- [21] 高艳,黄社华,李琼. 弯道干流与支流交汇口垂线流速分布的试验研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(7): 90-93. (GAO Yan, HUANG Shehua, LI Qiong. Experimental research on velocity distribution along depth at junction of bend stream with branch afflux[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(7): 90-93. (in Chinese))
- [22] CIFANI P, MICHALEK W R, PRIEMS G J M, et al. A comparison between the surface compression method and an interface reconstruction method for the VOF approach[J]. Computers & Fluids, 2016, 136: 421-435.
- [23] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [24] FISCHER H B. On the tensor form of the bulk dispersion coefficient in a bounded skewed shear flow[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1978, 83(C5): 2373-2375.
- [25] ALAVIAN V. Dispersion tensor in rotating flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986, 112(8):771-777.