

曹力玮, 谌昱含, 高玮峥, 等. 交汇区的交汇角和汇流比对微塑料运移的影响 [J]. 中国环境科学, 2025,45(1):265-277.

Cao L W, Shen Y H, Gao W Z, et al. Simulation of the impacts of varying junction angles and flow ratios on microplastic transport in confluences [J]. China Environmental Science, 2025,45(1):265-277.

交汇区的交汇角和汇流比对微塑料运移的影响

曹力玮¹, 谌昱含^{1,2*}, 高玮峥¹, 李德鸿¹, 李小龙¹, 李昇¹ (1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 本文建立了适用于交汇区的三维水动力-微塑料运动耦合模型, 基于 CFD-DEM 耦合方法模拟, 探究了不同交汇角、不同汇流比条件下微塑料的水动力运输机制与赋存特性. 结果表明: 干支流交汇区中的低流速区(分离区、停滞区、分离区下游)将发展为微塑料的富集区域; 微塑料主要受位于流动分离区中漩涡的影响, 从主流右岸进入漩涡区, 逐渐形成椭圆形富集带; 流动分离区中心微塑料丰度与交汇角呈线性正相关关系; 流动分离区中心微塑料丰度与干支流汇流比呈线性负相关关系, $R^2=0.9007$. 研究结果将丰富干支流交汇区微塑料运动的基础理论, 为精确化防治微塑料污染提供理论依据.

关键词: 微塑料; 交汇区; CFD-DEM; 交汇角; 汇流比; 富集区域

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2025)01-0265-13

Simulation of the impacts of varying junction angles and flow ratios on microplastic transport in confluences. CAO Li-wei¹, SHEN Yu-han^{1,2*}, GAO Wei-zheng¹, LI De-hong¹, LI Xiao-long¹, LI Sheng¹ (1.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Key Laboratory of Agricultural Water and Soil Engineering in Arid Regions, Ministry of Education, Northwest Agriculture & Forestry University, Yangling 712100, China). *China Environmental Science*, 2025,45(1): 265~277

Abstract: Microplastics exhibited unique properties and possessed a wide distribution across various environments. The confluence served as a key point for the contamination of microplastics. At present, there was a lack of effective methods to reveal the motion characteristics and accumulation areas of microplastics at the confluence. The motion and fate of microplastics should be accurately captured at the confluence. The three-dimensional hydrodynamic-microplastic transport model for microplastics was established at the confluence. The transport mechanism and fate of microplastics were investigated under varying junction angles and flow ratios through the coupled CFD-DEM method. The results showed that (1) The low velocity zones, including the flow separation, flow stagnation, and downstream of the flow separation, would evolve into regions of microplastic accumulation. (2) Microplastics were primarily influenced by the vortex located in the flow separation, entering the vortex zone from the right bank of the mainstream and gradually forming an elliptical enrichment region. (3) The concentrations of microplastics in the center of the flow separation were positively correlated with the junction angles. (4) There was a linear negative correlation between the concentrations of microplastics and the flow ratios in the center of the flow separation, $R^2=0.9007$. The number of microplastics in the flow separation exhibited a significant negative correlation with the flow ratio at the confluence. The findings of the study would advance the fundamental understanding of microplastic motion in confluences and establish a theoretical framework for precise prevention and control strategies against microplastic pollution.

Key words: microplastics; confluence; CFD-DEM; junction angles; flow ratios; enrichment region

微塑料, 通常被定义为小于等于 5mm 的塑料颗粒^[1], 吸附性强, 可作为细菌向河流下游运输的载体^[2], 其降解历时长^[3], 广泛分布于海洋环境^[4]、地表水^[5]、城市河流沉积物^[6]和排水系统^[7]中. 交汇区作为不同河流连接的重要节点^[8], 水动力特性表现出显著的三维特性^[9-10], 水质的混合可能会为鱼类提供栖息地^[11], 而微塑料在此生态关键区域中的输运规律和赋存特性尚不明晰, 因此研究微塑料受特殊水动力特性驱动下的运动机制将为微塑料污染治理提供理论支撑.

干支流交汇区水流流态差异较大, 相关研究^[12]将表现出不同水力特性的区域划分为: 流动停滞区、流动偏转区、流动分离区、最大流速区、流速恢复区和明显的剪切层. 停滞区流速较低; 流动偏转区流

收稿日期: 2024-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52109101); 中国博士后科学基金资助项目(2023T160532); 陕西省科技计划项目-重点研发计划项目(2022SF-443)

* 责任作者, 副教授, shenxia@nwfafu.edu.cn

线方向变化较大;流动分离区内存在垂直河底方向的漩涡与平行水流方向的漩涡^[10,13-14];最大流速区水流能量较大;流速恢复区水位梯度逐渐减小并趋于稳定^[15]。水流中的污染物和其他物质在这些水力分区影响下表现出不同分布滞留特征^[16-17]。微塑料在通过交汇区时,其运动与赋存特性同样发生变化,不同河流在交汇区汇合,将极大增加微塑料的通量^[18],受水动力分区影响,河道交汇区表现出较高的微塑料丰度^[19],可见,交汇区是微塑料富集和向下游输运的重要区域。然而,造成微塑料富集和通量增加现象的原因尚不明确,需要深入探究交汇区水动力条件影响下微塑料的细观运动机理。同时,汇流比和干支流交汇角显著影响交汇区的水流流态^[14,20],很可能进一步影响微塑料在交汇区的归宿,明晰交汇角和汇流比对微塑料迁移的影响就显得格外重要。此外,微塑料运动还受自身物理性质影响^[21],具体表现为密度小于水的微塑料会逐渐上浮于表层水体中,密度大于水的微塑料会逐渐下沉至底部水体中^[22];不同颗粒形状的微塑料具有不同的垂直运动速度^[23];微塑料粒径大小也是控制垂直运动的重要因素,较大粒径的微塑料较早的沉降^[24],较小的微塑料则表现出较低的上升速度^[25],综合考虑微塑料自身物理性质的影响将进一步提升模拟的准确性。微塑料在水中运动的因素较多,室内试验和原型观测缺乏有效手段追踪单个微塑料运动,此时就需要建立在动水条件下追踪微塑料运动的有效方法。计算流体力学(CFD)被认为是捕捉丁坝附近湍流的有效手段^[26],是精确捕捉微塑料行为的前提。离散元法(DEM)是一种考虑多种物理性质直接模拟微塑料或细小颗粒运动的方法。将这两种方法耦合会形成CFD-DEM方法,其中连续相流体运动由CFD计算,离散相颗粒运动由DEM模拟,流体和颗粒之间的相互作用力通过耦合接口交换。此方法由于可为微塑料或细小颗粒在复杂水动力条件下的运移特性提供细致的见解,现已得到较为广泛的应用。例如,基于CFD-DEM方法精细化模拟泥沙在水流中的输移行为^[27-29],同时获得泥沙颗粒的宏观运动轨迹和运动的细节信息^[30]。考虑浮力、拖曳力等的影响,即可模拟大体积滑坡与水库的相互作用,明确了水库水位和滑坡体下落高度是威胁坝体应力变化的因素^[31]。在难以通过实验手段测量的情况下,CFD-DEM方

法还可以较好地反映小颗粒在岩石裂缝中的微观运动。可见,CFD-DEM耦合模拟方法具有一定可靠性和科学性,可弥补室内试验的不足,精确捕捉微塑料在水中的行为,以便得出微塑料运移机理和赋存特性。

本研究旨在通过一种耦合水流与微塑料的方法揭示不同因素影响下微塑料在交汇区的迁移规律和赋存机制。研究结果将丰富淡水环境中微塑料输运理论,增强对交汇区中微塑料污染空间分布机制的理解,将进一步为交汇区微塑料污染富集区域识别、微塑料污染防控提供理论依据。

1 材料与方法

本文采用计算流体力学-离散元耦合(CFD-DEM)方法,CFD方法可用于描述计算域中流体的行为特性,DEM方法可考虑颗粒间碰撞,精确捕捉微塑料在流体影响下的运动,二者耦合可对实验室尺度下的交汇区微塑料进行高精度模拟。在计算流体力学中,本文使用商业软件ANSYS FLUENT作为流体力学的求解器,而离散元求解器使用商业软件Altair EDEM。

1.1 流体数值模型

FLUENT中流体计算采用RNG k-ε湍流模型、VOF两相流模型等,具体的控制方程如下:

质量守恒方程(连续方程)^[32]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程(动量方程)^[33]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_i \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; P 为压强; t 为时间; U 为速度矢量; u_i 、 u_j 分别为 U 在各方向的流速分量; x_i 、 x_j 为与流速对应的坐标分量; i 表示矢量方向,为 x 、 y 、 z 三个方向中的其中之一; j 同样表示矢量方向,为与 i 不相同的另一矢量方向; μ 为流体的动力黏度; μ_t 为流体的紊动粘度; S_i 是广义源项。

紊流广泛存在于水流流动中,具有复杂的瞬时特性,目前针对紊流的数值模拟方法按对瞬态的脉动量处理方式不同可分为直接数值模拟(DNS)、大

涡模拟(LES)和雷诺平均(RANS)三种方法^[34]。本文采用 Reynolds 平均法并以 RNG $k-\varepsilon$ 模型作为补充方程组进一步求解紊流的三维特性,RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型已被证明可以较好捕捉水流交汇区的水力特性^[35]。RNG $k-\varepsilon$ 模型^[36]方程具体如下:

湍动能方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon \quad (3)$$

耗散方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3} \quad (7)$$

$$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon} \quad (8)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (10)$$

式中: ρ 为水的密度; k 为湍动能; ε 为湍动能耗散率; α_k 和 α_ε 分别是 k 和 ε 的有效普朗特数的倒数; μ_{eff} 为有效粘度; P 为压强; t 为时间; U 为速度矢量; u_i 、 u_j 分别为 U 在各方向上的流速分量; x_i 、 x_j 为与流速对应的坐标分量; μ 为水的粘性系数; μ_t 为湍流粘性系数; G_k 是平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; E_{ij} 是时均应变率; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 C_μ 为模型常数; η 为湍流动能产生与耗散的比值; β 是经验常数; $C_\mu = 0.0845$, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$; $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$; $\eta_0 = 4.377$, $\beta = 0.012$ 。

对于明渠水流交汇区,本文使用 VOF 模型来捕捉自由液面,VOF 法求解明渠流动通过定义 $F_w(x,y,z,t)$ 和 $F_a(x,y,z,t)$ 分别代表计算区域内水和空气所占的体积分, F 的数值和梯度可分别用来确定水气交界面的位置和法线方向, F 的控制方程^[37]为:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla(Fu_i) = 0 \quad (11)$$

式中: u_i 为 i 节点的平均速度。

1.2 离散元数值模型

使用成熟的商业软件 EDEM 对微塑料的运动行为进行仿真,在 EDEM 内可精细化、逻辑化地设置微塑料的性质参数、接触模型,为模拟的准确性提供了保障。在 EDEM 中,求解器以牛顿第二定律描述微塑料的运动,包括平移运动和旋转运动,控制方程如下:

旋转运动:

$$I \frac{d\omega}{dt} = T \quad (12)$$

平移运动:

$$m \frac{dv}{dt} = mg + F_t + F_i \quad (13)$$

式中: I 是微塑料的转动惯量; ω 是微塑料的角速度; T 是微塑料受到的总扭矩; m 是微塑料的质量; v 是微塑料的平移速度; g 是当地的重力加速度; F_t 是水流对微塑料作用力的合力; F_i 是不同微塑料之间以及微塑料与水槽边壁之间的接触力。

本文中水流对微塑料作用的合力 F_t 包括水流对微塑料的浮力 F_b 及水流对微塑料的曳力 F_d ,浮力和曳力分别由式(14)^[38-39]式(15)^[40]计算:

$$F_b = \rho g V \quad (14)$$

$$F_d = 0.5 C_d \rho A |v_r| v_r \quad (15)$$

式中: V 是微塑料的体积; C_d 是曳力系数; A 是颗粒沿流向的投影面积; v_r 是微塑料与流体间的相对速度。

曳力系数 C_d 是计算曳力的重要参数,与微塑料的雷诺数 R_p 有关,在本文中,选用自由流曳力模型,具体公式^[41]为:

$$R_p = \partial \rho L |v_r| / \eta \quad (16)$$

$$C_d = \begin{cases} 24/R_p & (R_p \leq 0.5) \\ 24(1.0 + 0.25R_p^{0.687})/R_p & (0.5 < R_p \leq 1000) \\ 0.44 & (R_p > 1000) \end{cases} \quad (17)$$

式中: η 为流体的黏度; L 是微塑料的特征长度。

数值积分:

$$\begin{cases} x(t + \Delta t) = x(t) + v(t)\Delta t \\ v(t + \Delta t) = v(t) + a(t)\Delta t \end{cases} a \quad (18)$$

式中: $v(t)$ 是速度; $x(t)$ 是位置; $a(t)$ 是一个微塑料在给
定时间步的加速度; Δt 是时间步长;旋转速度和微塑
料方向以类似的方式更新.

微塑料与水槽边壁之间的接触力 F_i 使用接触
模型进行计算,作为对牛顿第二定律控制方程的补
充,本文中“弹簧-阻尼器-摩擦板”这种颗粒间
接触模型进行模拟,即 Hertz-Mindlin(no slip)接触模
型^[42-44],法向接触力包括接触弹力和法向阻尼力,具
体控制方程如下:

$$F_n = \sum_{j=1}^n \left(\frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^3 - 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^* v_n^{rel}} \right) \quad (19)$$

$$F_c = \sum_{j=1}^n \left(-S_c \delta_c - 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_c m^* v_c^{rel}} \right) \quad (20)$$

$$F_r = -\mu F_n \omega^{rel} \quad (21)$$

式中: E^* 是等效杨氏模量; R^* 是等效直径; δ_n 和 δ_c 分
别是法向和切向的微塑料重叠; β 是阻尼系数,与等
效杨氏模量 E^* 有关; S_n 为法向刚度; S_c 为切向刚度; m^*
是等效质量; v_n^{rel} 和 v_c^{rel} 是微塑料相对速度的法向和
切向分量.

Hertz-Mindlin(no slip)模型中,EDEM 使用
Rayleigh 时间准则,准则表示在多个颗粒接触时,一
个时间步长内两两颗粒间的能量不应该影响到其他
颗粒,故计算时间步长不应大于 Rayleigh 波传递
半个球面所需要的时间,其计算公式如下:

$$R_{Rayleigh} = \frac{\pi R}{0.1631\nu + 0.8766} \sqrt{\frac{\rho_p}{G}} \quad (22)$$

式中: R 为微塑料半径; ρ_p 是微塑料密度; ν 为泊松比;
 G 为剪切模量.

1.3 CFD-DEM 耦合计算流程

本文基于 CFD-DEM 方法,将 ANSYS FLUENT
软件和 Altair EDEM 软件通过耦合接口连接进行
联合仿真.为了提高微塑料运动计算精度,需单独对
流体进行先驱计算,计算中控制方程基于有限体积
法在空间上离散,其中对流项运用二阶迎风格式,瞬
态项与扩散项采用中心差分格式进行离散.求解器
类型为压力基求解器瞬态计算,设置 z 方向上的重
力加速度为 -9.81m/s^2 .在离散后的每个控制体积上
使用基于交错网格的求解压力耦合方程组的半隐
式方法(SIMPLE)计算代数方程组,使用 FLUENT 进
行仿真计算,得到流场相关参数.如图 1,在 FLUENT
流体达到稳定状态后,再使用耦合接口将 FLUENT

与 EDEM 连接,进行联合仿真.在进行联合仿真的过
程中,一个计算离散时间步内 FLUENT 的流场残差
被计算到 1×10^{-4} 收敛准则后,接着耦合接口调用
EDEM,在流体模拟时间步结束时开始 DEM 时间步,
通过耦合接口将流体网格单元中的数据传递到
EDEM,并计算微塑料的受力,随后 EDEM 通过接触
检索、接触模型计算等步骤更新微塑料位置,EDEM
计算结束后调用 FLUENT 并将微塑料位置输入流
场,进而计算出微塑料对流体的作用,完成一个时
间步内的计算.在完整计算时间尺度上,后续计算重
复上述步骤即可.

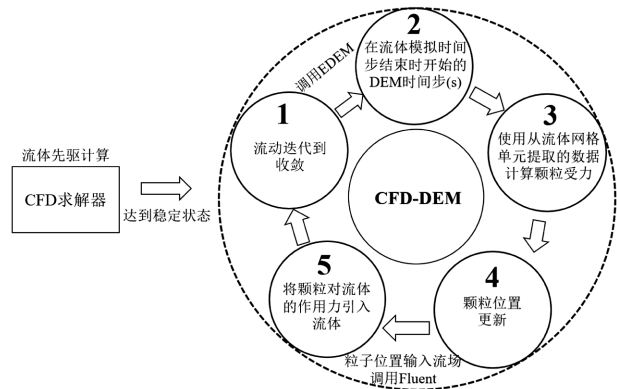


图 1 CFD-DEM 耦合计算流程

Fig.1 CFD-DEM coupling calculation process

1.4 计算域网格生成及工况设计

本文聚焦实验室尺度下干支流交汇区中微塑
料的汇聚、扩散、输运及分布过程,以交汇水槽为
基础,进行不同工况的设计.如图 2(a),支流水槽以
斜接的形式汇入干流水槽,干、支流水槽宽度均为
0.5m,处于交汇区上游的干流水槽长 3m,位于交汇
区上游的支流水槽长 2m,位于交汇区下游的干流
水槽长 11m,水槽总高 0.3m,水槽整体被分为水
和空气两部分,位于水槽底部水流的平均水深为
0.2m,空气部分的 z 方向平均高度为 0.1m.如图
2(b),将建立的物理模型划分为结构化网格,如图
2(c-f),控制最小网格尺寸为 0.007m,对流场剧烈
变化的区域进行适当加密.所建立的网格中最大
网格尺寸为 0.03m,各工况网格单元数量均在 67
万左右.

在 FLUENT 基于网格进行边界条件设置时,如
图 2(a),将干、支流水槽空气和水流进口(对应图
中 air inlet1、air inlet2、water inlet1 和 water inlet2)边

界类型设置为 velocity inlet,可设置不同的进口流量.将干、支流水槽汇合后的水槽出口(对应图中 zeroGradient)边界类型设置为 pressure outlet,在明渠的条件下固定水槽出口(对应图中 zeroGradient)的水位为 0.2m.水槽顶部(对应图中 atmosphere)边界类型设置为 pressure inlet,设置绝对压强为一个大气压.其他水槽边壁(对应图中 wall)边界类型均设置为 wall,粗糙高度设置为 0.0001m.在 EDEM 进行初始条件设置时,采用广泛存在于天然水体且丰度较高的微塑料材料:PE、PS 和 PA,具体材料性质见表 1.同时,本文将不同形状的微塑料简化为球形,主要模拟的微塑料粒径包括 0.5,1.5,2.5,3.5,5.0mm 五类.此外,water inlet 1 与 water inlet 2 同时也是微塑料的注入口,微塑料在注入口的初始速度与水流流速保持一致.本文主要探究不同交汇角和不同汇流比对交汇区水流特性和微塑料运动的影响,具体计算工况见表 2.

表 1 微塑料材料性质

Table 1 Material properties of microplastics

材料	密度 (kg/m ³)	泊松比	弹性模量	恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
PE	962	0.44	640000000	1.24	0.131	0.097
PS	1050	0.32	910000000	0.87	0.5	0.4
PA	1200	0.39	2400000000	1.46	0.6	0.53

表 2 具体工况

Table 2 Specific cases

工况	交汇角度 $\alpha(^{\circ})$	颗粒材料	颗粒粒径(mm)	干支流汇流比 η
1	45	PE/PS/PA	0.5/1.5/2.5/3.5/5.0	1.5
1a	67.5	PE/PS/PA	0.5/1.5/2.5/3.5/5.0	1.5
2	90	PE/PS/PA	0.5/1.5/2.5/3.5/5.0	1.5
2a	112.5	PE/PS/PA	0.5/1.5/2.5/3.5/5.0	1.5
3	135	PE/PS/PA	0.5/1.5/2.5/3.5/5.0	1.5
4	90	PE/PS/PA	0.5/1.5/2.5/3.5/5.0	1.5
4a	90	PE/PS/PA	0.5/1.5/2.5/3.5/5.0	1.25
5	90	PE/PS/PA	0.5/1.5/2.5/3.5/5.0	1
5a	90	PE/PS/PA	0.5/1.5/2.5/3.5/5.0	0.75
6	90	PE/PS/PA	0.5/1.5/2.5/3.5/5.0	0.5

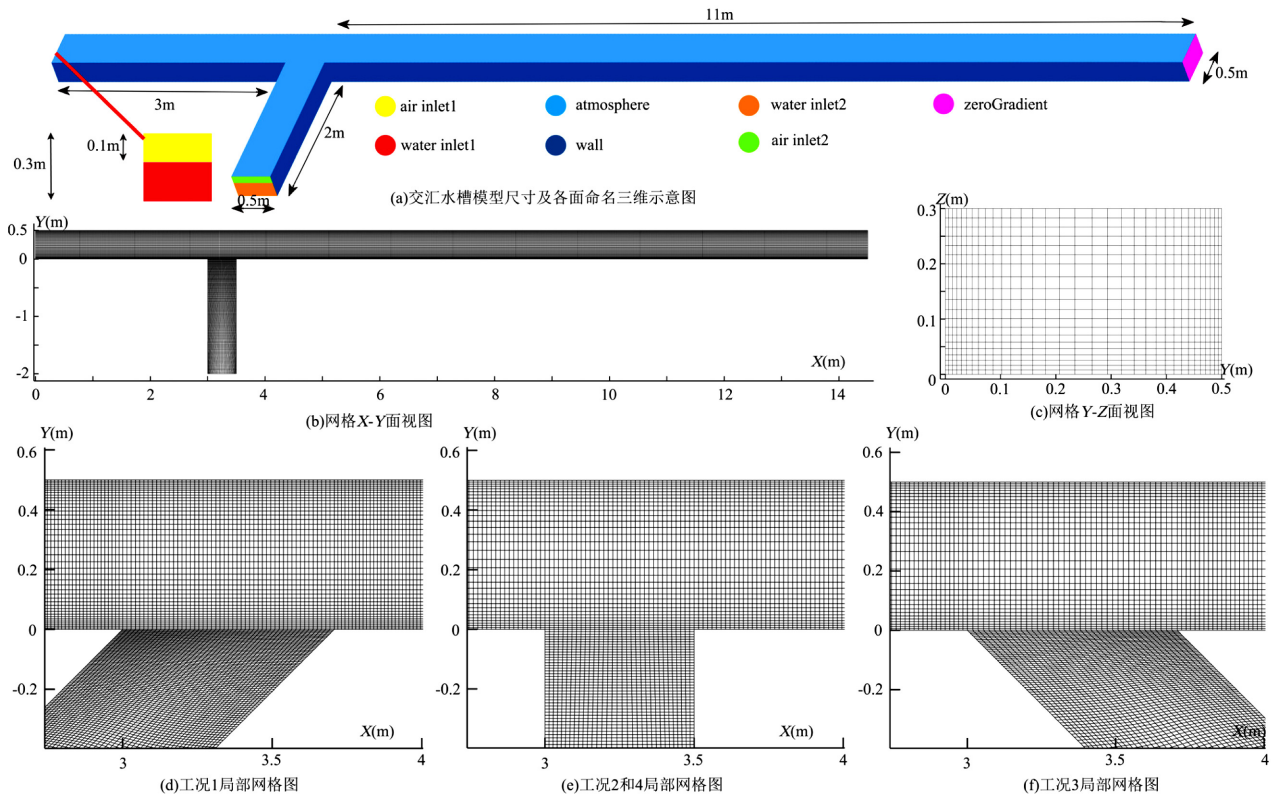


图 2 水槽尺寸及网格示意

Fig.2 The flume size and mesh diagram

2 结果与讨论

2.1 模型验证

由于 Shen 等^[45]已经通过实验表明:采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流闭合模型可以较好地描述交汇区的流速和水位变化.因此,本文通过微塑料在静水中的上浮实

验并以终端上浮速度作为指标来验证 CFD-DEM 耦合模型的准确性.参考 Waldschläger 等^[46]的沉降试验装置,建立如图 3 所示的沉降水槽,并使用他们已发表的数据进行验证.为了保证微塑料充分加速到终端上浮速度,分别在距水槽底部和顶部 15cm 处设置过渡区域,在此区域不对微塑料速度进行记录.剩余的 70cm 水槽为测量区域,其被平均分为两段,分别提取这两段水槽中微塑料上浮速度的平均值作为微塑料的终端上浮速度.在进行数值模拟时,选择粒径为 0.84583 和 1.06099mm 的 EPS(密度为 22kg/m³)微塑料分别由位于水槽底部的中心红色区域释放进入水中.每种微塑料模拟 3 次,以保证较高的精度.每种微塑料的终端上浮速度的实测值(V_M)和模拟值(V_S)分别列于表 3,两者之间的最大相对误差(E)仅为 10.541%,可见,本文使用的 CFD-DEM 耦合模型可以较好模拟微塑料在水中的行为.

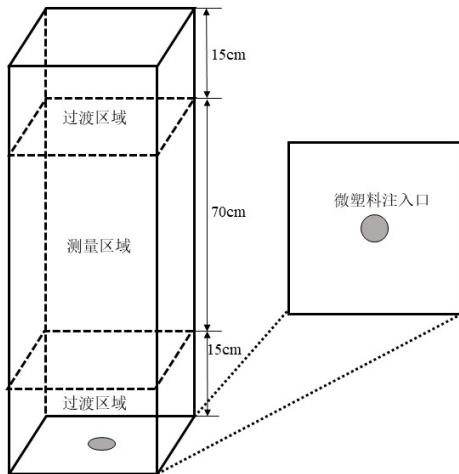


图 3 沉降水槽尺寸及边界条件示意

Fig.3 Model dimensions and boundary conditions for validation case

表 3 验证工况中微塑料终端上浮速度的实测值和模拟值比较

Table 3 Comparison of simulation terminal velocity and measured terminal velocity and relative error E

$D(\text{mm})$	Type	$V_S(\text{cm/s})$	$V_M(\text{cm/s})$	$E(\%)$
0.0008	Max	9.725	8.860	9.762
	Min	8.567	7.796	9.890
	Mean	9.333	8.443	10.541
0.0011	Max	13.183	12.052	9.381
	Min	11.158	11.196	0.344
	Mean	12.263	11.751	4.353

2.2 交汇区微塑料运动特性

以工况 4 为例,探究微塑料在交汇区复杂水动力条件影响下的运动特征.为了量化微塑料在计算域中的停留历时,现定义微塑料自进入计算域开始在计算域中停留的总时间为驻留时间(R_T).如图 4(a),在支流汇入干流后,交汇区流量骤增,交汇口上游水位升高形成壅水^[47],如图 4(b)受支流的顶托作用,在交汇区下游形成流速较大的区域,本文沿用 Best^[48]对交汇区水流的分区命名,将此区域称为最大流速区.同时,在交汇口下游干流右岸一侧形成流速较低的流动分离区.由图 4(c)可见,随干流和支流运输的微塑料路径在交汇口均发生了不同程度的偏转,这主要是由于干流和支流相互顶托水流流线被压缩,微塑料被裹挟发生偏转.此外,共发现二个微塑料驻留时间异常区域,第一个区域为流动停滞区,第二个区域为流动分离区及其下游区域.流动分离区及其下游区域的微塑料数量大于流动停滞区,这表明流动分离区中的微塑料保留是一个不可忽略的问题,因此在本文后续研究中着重对流动分离区中的微塑料运动和分布进行深入探究.

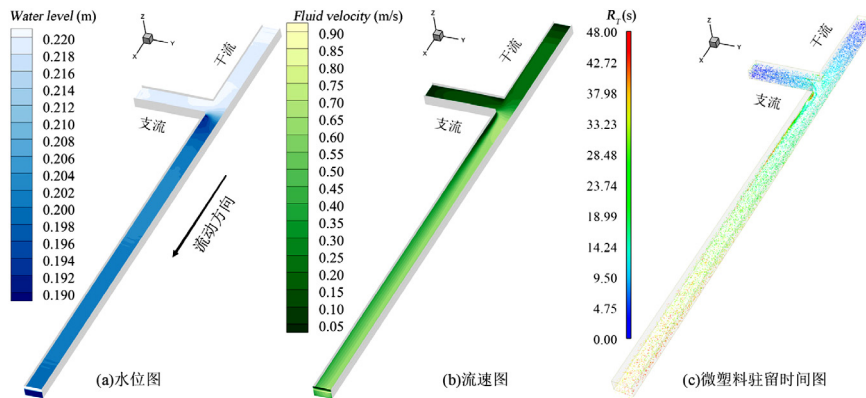


图 4 工况 4 微塑料与水流参数分布

Fig.4 Distribution of microplastics and flow parameters for Case 4

与交汇区微塑料运动相似的是,高含沙支流在汇入干流后,部分泥沙也会进入分离区并逐渐落淤^[49].但微塑料材质可由多种密度的聚合物组成^[50],进入流动分离区的微塑料在低流速环境中可能受密度驱动^[51]发生上浮或下沉,且微塑料丰度相较于高含沙水流中泥沙浓度更小,因此在流动分离区微塑料富集的水平分布和垂直分布可能与泥沙淤积的空间分布格局不同,这表明交汇区泥沙冲淤的相关理论应用于微塑料的适用性还有待考证.

2.3 交汇区不同交汇角对微塑料运移特性的影响

为了探究不同交汇角影响下的水动力特性及水流-微塑料相互耦合过程,如表 2 所示,本节通过工况 1、工况 2 及工况 3 设置水槽交汇角为 45° 、 90° 和 135° 进行研究.在以上 3 个工况中,干流水槽进口流速为 0.3m/s ,支流水槽进口流速为 0.2m/s ,干、支流的汇流比保持 1.5 不变.

如图 5,3 种工况微塑料运动与归趋具有共性,微塑料沿流动分离区外围形成富集带,流动分离区内存在微塑料且微塑料的粒径分布呈现出中心小,外围大的趋势.结合图 6 中 3 种工况下的水流流线分布可见,水流流线在流动分离区靠近水槽中心一侧被剧烈压缩,随水流运动的微塑料很可能会在水流的裹挟下改变运动方向,在流动分离区外围形成富集带,同时,3 种工况在流动分离区均存在顺时针漩涡,且该区域的水位自漩涡中心向外围递减(图 7),由此可认为水位梯度可能是造成顺时针漩涡水压力梯度分布的原因,而水压力梯度可能会成为微塑料由漩涡外围向中心运动的主要驱动力.此外,小粒径的微塑料由于体积更小,更易受压力的影响,因此小粒径微塑料更易向流动分离区漩涡中心移动,逐渐形成中心粒径小,外围粒径大的空间分布格局.

在流动分离区外围存在剪切层,剪切层中存在剪切涡旋,可促进水流的掺混^[15],有研究表明^[12],溶解氧在流动分离区外围表现出增强混合,观察微塑料在流动分离区外围的分布,尚未观察到明显的混合现象,这表明剪切层中的剪切涡旋对微塑料的混合影响较小.

然而,3 种工况间微塑料运动的差异性也显而易见.如图 5,在工况 1 中,流动分离区中存在的微塑料丰度较低且分布分散,这是由于当交汇角为 45° 时,流动分离区尺度很小,水流中的微塑料不易进入回

流区而被输送至下游.在工况 2 中,流动分离区内存在显著的长 R_T 聚集带,分布形状与图 6(b)中的漩涡形状保持一致,相较于工况 1,工况 2 流动分离区中的微塑料富集量明显更大,流动分离区中依然存在较大的微塑料稀疏区,主要原因是:工况 2 流动分离区中的漩涡下缘接近 $X=4.4\text{m}$,漩涡尺寸显然大于工况 1 中的漩涡尺寸,这将提高工况 2 中流动分离区漩涡对微塑料的滞留能力;此外,由于流动分离区外围的微塑料富集带中的颗粒速度较大,漩涡对这部分微塑料的影响效果弱,有相当一部分微塑料输送至下游,从而在流动分离区中存在颗粒分布稀疏的区域.在工况 3 中,流动分离区长 R_T 微塑料数量进一步增加,微塑料稀疏区范围减小,流动分离区富集颗粒的椭圆状分布尺寸增长至 $x=4.8\text{m}$ 附近,这是由于当交汇角增大到 135° 时,支流汇入时的水流流向与干流流向相反,沿干流右岸和支流右岸运动的微塑料速度被抑制,这些微塑料更容易受到更大流动分离区(图 6c)漩涡的影响逐渐富集于漩涡中心.综上,交汇角显著影响微塑料在流动分离区中的分布规律,随着交汇角的增加,流动分离区中存在的顺时针漩涡更容易保留干流右岸及支流右岸的微塑料,并最终在流动分离区中滞留,造成局部区域的污染.

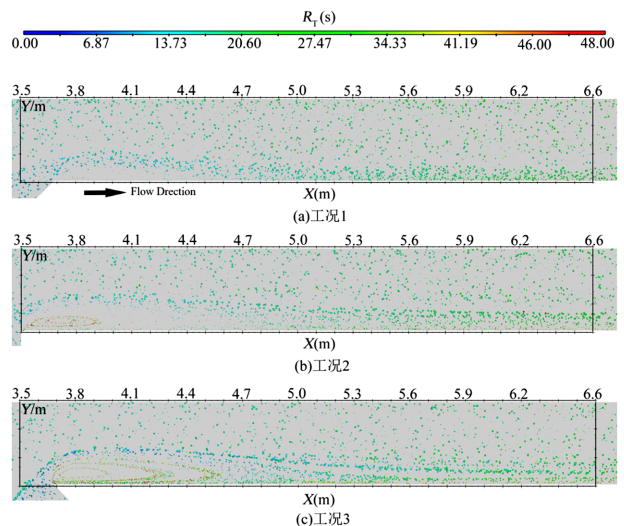


图 5 3 种工况的微塑料的空间分布及驻留时间
Fig.5 The spatial distribution and residence time plots of microplastics in three cases

流动分离区是鲢鱼最喜欢的栖息地和觅食地^[52],由以上分析可得,当交汇角为 45° 时,流动分离区内微塑料丰度较小且分布稀疏,鲢鱼的微塑料暴

露风险最低,当交汇角为 135° 时,流动分离区内微塑料丰度最大,鲢鱼的微塑料暴露风险最高,可以预见的是,随着交汇角的增大,与鲢鱼具有相似栖息习惯的鱼类微塑料摄入风险随交汇角的增大而增大.此外,鱼类可摄入水体中的微塑料并在其肠胃中存在^[53-54],随着交汇角增大,微塑料在生态系统中累积的风险也随之增大.

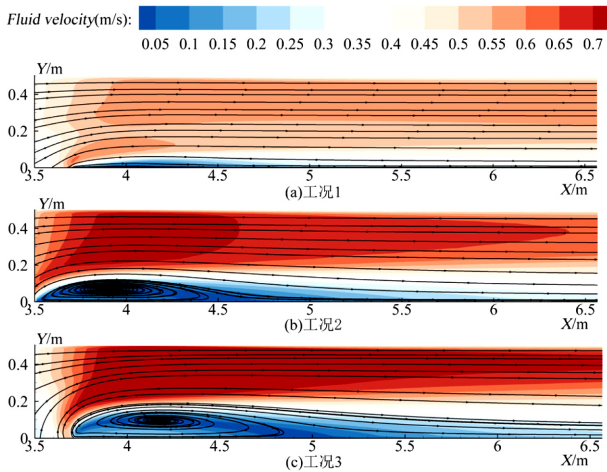


图 6 3 种工况的 $Z=0.1$ 截面的流速等值线和流线
Fig.6 The flow velocity contours and streamlines of $Z=0.1$ cross section for three cases

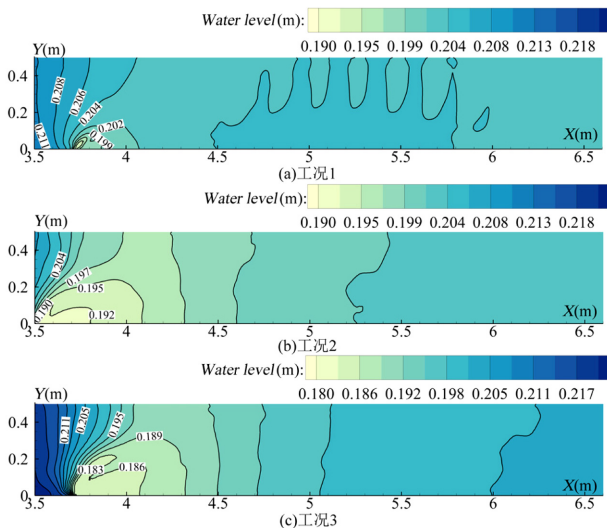


图 7 3 种工况的水位等值线图
Fig.7 The water level contours for three cases

微塑料在水深方向的运动和分布规律同样重要,在本节中,聚焦流动分离区及最大流速区,通过微塑料的三维坐标,分别绘制 $X=4\text{m}$ 、 $X=4.5\text{m}$ 、 $X=5\text{m}$ 、 $X=5.5\text{m}$ 横断面上的微塑料位置分布(图 8).

由图 8 可知,微塑料在向下游运输的过程中,在水槽沿水深方向表现出明显的分层现象,工况 1~3 各断面的微塑料表现为:密度小于水的 PE 微塑料大量分布于表层水体中,密度大于水的 PS、PA 微塑料大量分布于底层水体中,中层水体中微塑料分布稀疏,材料为 PE、PS 和 PA 的微塑料均存在.显然,微塑料的材料密度主导了微塑料在水体中的垂直分布,这与 Andradý 等^[55]的研究结论相同,密度较轻的微塑料更易漂浮于水体表面并向下游运输,密度较重的微塑料更易沉降于下层水体之中,在下层水体中作推移运动^[56-57].此外,各横断面的中层水体中存在一些特例,表现为中层水体中同时存在 PE、PS、PA 材料的微塑料,这可能是受微塑料注入位置影响,即微塑料在水体中下沉或上浮需要一定历时才能加速到终端速度^[46],当低密度微塑料注入点靠近水槽底部和高密度微塑料靠近水面时,微塑料需要相当长的时间才能逐渐上浮或下沉,呈现出中层水体特殊的分布格局.表层水体中的低密度微塑料在流动分离区分布较少,底层水体中的高密度微塑料在分离区和分离区对岸分布较多,而水槽底部的中心分布较少;在流动分离区内,PS 微塑料丰度较高,而 PA 微塑料丰度较低,这可能是由于材料密度的影响,PS 微塑料密度更接近水,流动分离区中的漩涡携带 PS 微塑料的能力可能更强,最终导致了这种分布.

工况 1~3 之间也存在显著差异;在 $X=4\text{m}$ 横断面时,工况 1~3 均在流动分离区一侧的表层水体中存在未分布 PE 微塑料的区域,但随着交汇角的增加,这一区域的长度从 0.08m 增长至 0.18m ,增长趋势与流动分离区尺寸变化趋势一致.工况 1 中,在横断面 $X=5\text{m}$ 和 $X=5.5\text{m}$ 表层水体中低密度微塑料分布已经趋于均匀,而工况 2 和工况 3 均存在未分布 PE 微塑料的区域.随着交汇角的增大,各断面低密度微塑料距水槽底部的高度极小值逐渐减小,各断面水位的极小值也逐渐减小,可见低密度微塑料的垂直位置受断面水位极小值的影响.

综上,不同材料的微塑料在水流中表现出不同的命运,低密度微塑料漂浮于表层水体,高密度微塑料逐渐沉积于下层水体,Aljaibachi 等^[58]发现低密度 PE 微塑料是河流上层水体中最常检出的材料之一,这与本结论一致;流动分离区对 PE 微塑料的保留效果强于 PA 微塑料,而 PE 微塑料吸附阿莫西林这种

抗生素的能力更强^[59],这预示着 PE 微塑料可能造成更大的潜在风险;低密度微塑料进入流动分离区比

较困难,这表明更多的低密度微塑料在通过交汇区后向下游输送,具有较高的流动性^[60].

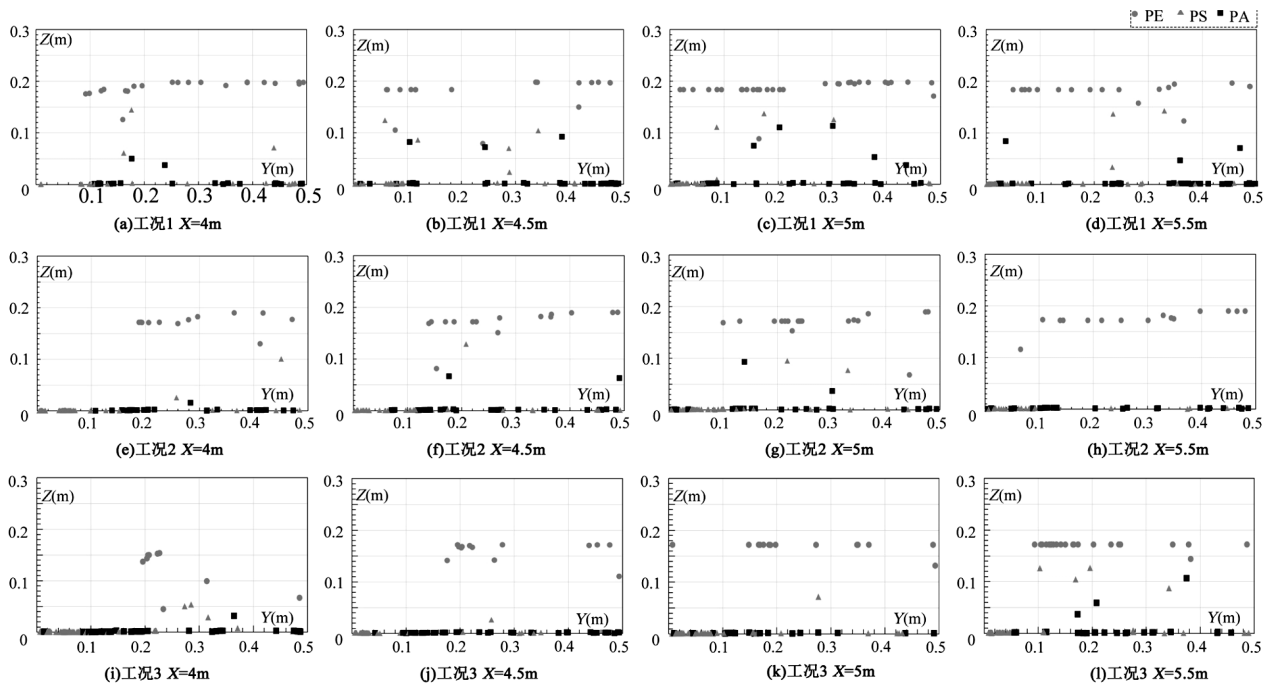


图 8 工况 1~3 不同横断面上微塑料垂向分布图

Fig.8 Vertical distribution of microplastic particles in different cross-sections of Case 1~3

2.4 不同汇流比对微塑料运输特性的影响

以上结果与分析对不同交汇角条件下微塑料在交汇区的运动特性进行了全面分析与讨论,而汇流比是另一影响交汇区水动力特征的重要因素^[61],在本节中,定义干流流量/支流流量为干支流汇流比,以交汇角为 90° 的交汇水槽为基础,探究不同汇流比条件下微塑料的运输机理.在运行相同时间后,微塑料在 $X=3.5\text{m}\sim X=7\text{m}$ 内的空间分布及驻留时间如图 10 所示.不同汇流比工况下,微塑料分布区域与 2.3 节中微塑料分布相似,即均在流动分离区附近存在椭圆形微塑料富集区,靠近椭圆富集区域中心的微塑料的驻留时间更长,最长驻留时间为 48s,微塑料驻留时间从椭圆富集区域外围向中心表现出逐渐递增的趋势,这表明微塑料是由椭圆富集区外围逐渐输运至中心区域.3 种汇流工况中微塑料分布存在差异,具体表现为:当干支流汇流比为 1.5 时,在流动分离区内由长驻留时间微塑料组成的椭圆形区域呈扁长分布,当干支流汇流比为 1 时,在流动分离区内由长驻留时间微塑料组成的椭圆形区域的高度明显增大,而干支流汇流比为 0.5 时,在流动分离区

内由长驻留时间微塑料组成的椭圆形区域的高度变化不大,但该区域内微塑料分布密集,并未出现中心区域较大空旷的情况.

同时,由本文前节分析可知,水流流场是造成这种空间分布格局的主要驱动力,因此,本文对工况 4、工况 5、工况 6 中的流动分离区通过流线法^[62]定义并量化其尺寸,提取最大流速区中微塑料丰度,具体结果见表 4.

如表 4 所示,分析不同工况下流动分离区中微塑料富集数量的变化,随着干支流汇流比的减小,流动分离区中富集的微塑料数量逐渐增多,该区域中微塑料污染也随之加重,这主要是由于流动分离区长度和宽度都有不同程度的增大,流动分离区中存在的漩涡也更大,这使得更多微塑料受漩涡影响进入流动分离区并在此区域低流速富集.流动分离区长度和宽度随汇流比的变化趋势与吴菲等^[20]所得结论一致.流动分离区长宽比工况 6 最大,工况 5 最小,3 种工况的流动分离区长宽比均在 9 左右,呈现出扁长分布.流动分离区这种水动力学现象可能是驱动图 9 中长驻留时间微塑料组成的椭圆形区域呈扁

长分布的主要原因.如图 9,3 种工况在最大流速区的微塑料分布均比较稀疏,但结合表 4 可得不同工况下微塑料丰度却存在差异,即在最大流速区中,工况 5 微塑料丰度最大,工况 6 微塑料丰度最小.微塑料呈现这种空间分布的主要原因可能是最大流速的变化,即最大流速区流速越大对微塑料的携带能力越

强,这将有可能使更多微塑料向下游输送,最大流速区的微塑料丰度随之减少.泥沙在最大流速区速度快,很难淤积^[32],这表现出与微塑料相似的运动规律.可见在高含沙水流的条件下微塑料和泥沙均会在最大流速区以较大的通量向下游输送,可能会促进微塑料与泥沙间的异质聚集现象^[63].

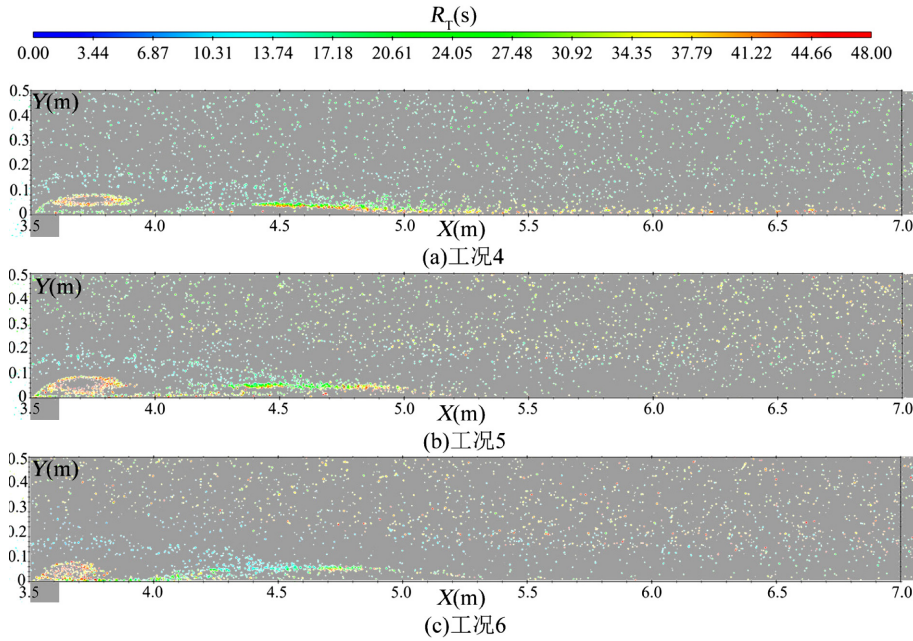


图 9 工况 4~6 的微塑料的空间分布及驻留时间

Fig.9 Spatial distribution and residence time of microplastics in Case 4~6

表 4 流动分离区尺寸及各区域微塑料丰度

Table 4 The flow separation size and microplastic abundance in each region

工况	流动分离区长度 $l(m)$	流动分离区宽度 $w(m)$	流动分离区长宽比 λ	流动分离区微塑料数量 $N(items)$	交汇区最大流速 $V(m/s)$	最大流速区微塑料丰度 $C(items/L)$
工况 4	1.08	0.11	9.82	1038	0.74	3.70
工况 5	1.33	0.14	9.50	1522	0.63	4.77
工况 6	1.48	0.14	10.57	1538	0.77	3.67

2.5 交汇角和干支流汇流比对流动分离区中心微塑料丰度的影响

通过以上分析不难发现,不同工况间流动分离区中心的微塑料疏密程度存在显著差异,这可能与交汇角(α)和干支流汇流比(η)的变化有关.为了更好地量化这种关系,本文引入流动分离区中心微塑料丰度(C_c)来量化流动分离区中心的微塑料疏密程度,并建立 C_c 与 α 、 C_c 与 η 间的数学关系.如图 10(a),交汇角(α)与流动分离区中心微塑料丰度(C_c)间存在较好

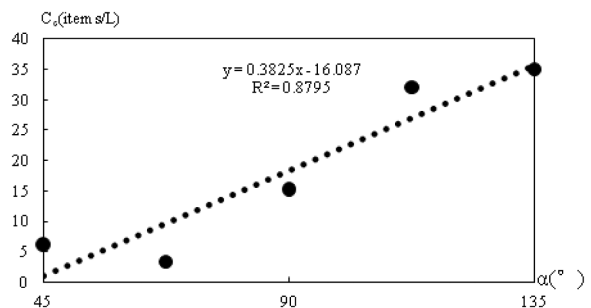
的线性拟合关系,关系式为:

$$C_c = 0.3825\alpha - 16.087 \quad (23)$$

由式(23)可知,随着交汇角的增加,流动分离区中心微塑料丰度也随之增大,在此区域栖息的生物将会面临较大的暴露风险.

如图 10(b),干支流汇流比(η)与流动分离区中心微塑料丰度(C_c)间同样存在线性拟合关系,关系式为:

$$C_c = -55.381\eta + 97.651 \quad (24)$$



(a)微塑料丰度(C_c)与交汇角(α)拟合直线

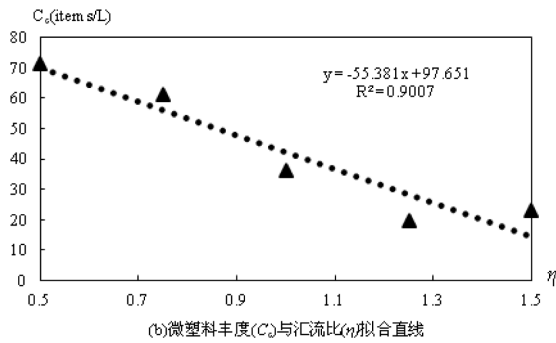


图 10 变量拟合关系

Fig.10 Variable fitting relationship

可见,交汇角越小、干支流汇流比越大,在流动分离区中心微塑料的密集程度就越低,这将减小流动分离区局部的微塑料污染,有助于提升交汇区生态环境的质量。

2.6 不足与展望

本研究也存在一些不足,例如,天然河流中微塑料形态各异,主要形状包括纤维状,球状,薄膜状,发泡状,本研究尚未全面考虑非球形颗粒在水流中的特殊运动行为,下一步将构建多形状颗粒模型,调整形状参数,优化颗粒运动方程,进行更精细化的模拟。此外,交汇区干支流宽度差异的影响和交汇区产生的二次环流对微塑料运动的影响程度还需探索和论证,这也将是本研究下一阶段的重要内容。

3 结论

3.1 干支流交汇后形成的低流速区域(分离区、停滞区、分离区下游)对微塑料有较强的滞留作用,逐渐发展成微塑料长驻留时间的富集区域;

3.2 微塑料主要受流动分离区中漩涡的影响,从干流右岸进入漩涡区,逐渐形成椭圆形富集带;

3.3 不同的交汇角和汇流比显著影响流动分离区中微塑料的空间分布格局,相同条件下,流动分离区中心微塑料丰度 C_c 与交汇角 α 呈线性正相关关系, $R^2=0.8795$,流动分离区中心微塑料丰度 C_c 与干支流汇流比 η 呈线性负相关关系, $R^2=0.9007$ 。

参考文献:

[1] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea: Where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004,304(5672):838.
[2] McCormick A, Hoellein T J, Mason S A, et al. Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river [J].

Environmental science & technology, 2014,48(20):11863-11871.
[3] 黄志琴,徐颂军,秦俊豪.微塑料降解的主要方法、影响因素及环境风险 [J]. *环境科学与技术*, 2022,45(2):134-141.
Huang Z Q, Xu S J, Qin J H. Main methods, influencing factors and environmental risks of degradation of microplastics [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022,45(2):134-141.
[4] 李道季,蒋春华.海洋中的塑料垃圾和微塑料:从污染到治理 [J]. *世界科学*, 2023,(12):33-35.
Li D J, Jiang C H. Plastic waste and microplastics in the ocean: from pollution to treatment [J]. *World Science*, 2023,(12):33-35.
[5] 陈钦威,王 鹏,丁明军,等.中国地表水环境微塑料赋存特征及驱动因素 [J]. *中国环境科学*, 2024,44(8):4599-4609.
Chen Q W, Wang P, Ding M J, et al. Characteristics and driving factors of microplastics in surface water environment of China [J]. *China Environmental Science*, 2024,44(8):4599-4609.
[6] 吴鹏豹,凌宇豪,陈锦嫦,等.城市化下东江水体沉积物微塑料分布特征研究——以惠州段为例 [J]. *环境保护科学*, 2023,49(6):120-127.
Wu P B, Ling Y H, Chen J C, et al. Distribution features of microplastics in sediments of Dongjiang River under urbanization—Taking Huizhou section as an example [J]. *Environmental Protection Science*, 2023,49(6):120-127.
[7] 刘佳奇,张 勇,胡定成,等.微塑料在城市排水系统中的迁移和扩散 [J/OL]. *中国给水排水*, 2024,<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1073.tu.20240510.1938.002.html>, 2024-05-28.
Liu J Q, Zhang Y, Hu D C, et al. Migration and diffusion of microplastics in urban drainage systems [J/OL]. *China Water & Wastewater*, 2024,<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1073.tu.20240510.1938.002.html>, 2024-05-28.
[8] 李 典,彭振阳,刘国强,等.河流交汇区水力学特性与水安全研究进展 [J/OL]. *长江科学院院报*, 2024,<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20240508.1721.002.html>, 2024-05-28.
Li D, Peng Z Y, Liu G Q, et al. Research progress on flow characteristics and water safety at river confluences [J/OL]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024,<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20240508.1721.002.html>, 2024-05-28.
[9] Shen X, Gao W Z, Cao L W, et al. Characteristics of water free-surface with different momentum ratio at 45° confluence [J]. *Journal of Hydrology*, 2023,623:129787.
[10] Shen X, Li R, Cai H J, et al. Characteristics of secondary flow and separation zone with different junction angle and flow ratio at river confluences [J]. *Journal of Hydrology*, 2022,614:128537.
[11] Yuan S Y, Qiu J J, Tang H W, et al. Fish community traits near a large confluence: Implications for its nodal effects in the river ecosystem [J]. *Journal of Hydrology*, 2023,626:130335.
[12] Best, J L. *Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology* [M]. New York: Wiley Press Room, 1987,27-35.
[13] 吴 菲,白凤朋,陈雪妮,等.明槽支流交汇区水动力特性 PIV 试验研究 [J]. *水电能源科学*, 2023,41(11):111-115.
Wu F, Bai F P, Chen X N, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of open channel tributary intersection area based on PIV technology [J]. *Water Resources and Power*, 2023,41(11):111-115.
[14] 林青炜,唐洪武,袁赛瑜,等.河道交汇区涡旋结构研究 [J]. *河海大学*

- 学报(自然科学版), 2019,47(4):352-358.
- Lin Q W, Tang H W, Yuan S Y, et al. Study on vortex structure at river confluence [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47(4):352-358.
- [15] Werber L J, Schumate E D, Mawer N. Experiments on flow at a 90° open-channel junction [J]. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*, 2001,127(5):340-350.
- [16] Tang H W, Zhang H M, Yuan S Y. Hydrodynamics and contaminant transport on a degraded bed at a 90-degree channel confluence [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2018,18(2):443-463.
- [17] 刘雪兰.重庆两江汇流流场及水质的数值模拟 [D]. 重庆:重庆大学, 2005:25-31.
- Liu X L. Numerical simulation of the hydrodynamics and water quality of confluence of the two rivers in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005:25-31.
- [18] Zhao W L, Huang W, Yin M C, et al. Tributary inflows enhance the microplastic load in the estuary: A case from the Qiantang River [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020,156:111152.
- [19] Klein S, Worch E, Knepper T P. Occurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the Rhine-Main Area in Germany [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015,49(10):6070-6076.
- [20] 吴菲,刘瑞芬,白凤朋,等.交汇角和流量比对干支流交汇区水流结构影响模拟研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2024,(4):15-23.
- Wu F, Liu R F, Bai F P, et al. Study on the influence of intersection angles and confluence ratios on the flow structure in the intersection area of main and branch rivers [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024,(4):15-23.
- [21] 李宵慧,徐红霞,孙媛媛,等.多孔介质中微塑料的环境行为研究进展 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(6):2798-2811.
- Li X H, Xu H X, Sun Y Y, et al. Review on the environmental behaviors of microplastics in porous media [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(6):2798-2811.
- [22] 刘禹,史小红,张生,等.乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律 [J]. *环境科学*, 2022,43(3):1463-1471.
- Liu Y, Shi X H, Zhang S, et al. Deposition law of low-density microplastics aggregation in Wuliangsu Lake [J]. *Environmental Science*, 2022,43(3):1463-1471.
- [23] Filella M. Questions of size and numbers in environmental research on microplastics: methodological and conceptual aspects [J]. *Environmental Chemistry*, 2015,12(5):527-538.
- [24] 程昕煜,杨丽虎,宋献方.白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征 [J]. *环境科学*, 2023,44(8):4344-4352.
- Cheng X Y, Yang L H, Song X F. Occurrence characteristics of microplastics in Baiyangdian Lake water and sediments [J]. *Environmental Science*, 2023,44(8):4344-4352.
- [25] Reisser J, Slat B, Noble K, et al. The vertical distribution of buoyant plastics at sea: an observational study in the North Atlantic Gyre [J]. *Biogeosciences*, 2015,12(4):1249-1256.
- [26] Acharya Anu. Experimental study and numerical simulation of flow and sediment transport around a series of spur dikes [D]. Univ Arizona USA: The University of Arizona, Civil Engineering, 2011:39-44.
- [27] Alihosseini M, Thamsen P U. Analysis of sediment transport in sewer pipes using a coupled CFD-DEM model and experimental work [J]. *Urban Water Journal*, 2019,16(4):259-268.
- [28] Zheng H C, Shi Z M, Peng M, et al. Coupled CFD-DEM model for the direct numerical simulation of sediment bed erosion by viscous shear flow [J]. *Engineering Geology*, 2018,245:309-321.
- [29] Yazdanfar Z, Lester D, Robert D, et al. A novel CFD-DEM upscaling method for prediction of scour under live-bed conditions [J]. *Ocean Engineering*, 2021,220:108442.
- [30] 雷明,叶晨,王协康.边滩漂石河流水沙输移及河床响应数值分析 [J]. *工程科学与技术*, 2023,55(4):110-118.
- Lei M, Ye C, Wang X K. Simulation study on the influence of boulders on flow-sediment transport and riverbed adjustment in a mountainous River [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2023,55(4):110-118.
- [31] Shan T, Zhao J D. A coupled CFD-DEM analysis of granular flow impacting on a water reservoir [J]. *Acta Mechanica*, 2014,225(8):2449-2470.
- [32] 孙帮成,李明高,李明,等.ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计 [M]. 北京:机械工业出版社, 2014:65-74.
- Sun B C, Li M G, Li M, et al. ANSYS FLUENT 14.0 Simulation analysis and optimization design [M]. Beijing: China Machine Press, 2014:65-74.
- [33] Batchelor G K. An Introduction to Fluid Dynamics [M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1967:116-120.
- [34] Cataño-Lopera Y A, Spelman D, Yee T, et al. Best practices for computational fluid dynamic applications in water infrastructure [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2023,149(10):03123003.
- [35] Shen X, Li R, Cai H J, et al. Characteristics of secondary flow and separation zone with different junction angle and flow ratio at river confluences [J]. *Journal of Hydrology*, 2022,614:128537.
- [36] Yakhot V, Orszag S A. Renormalization-group analysis of turbulence [J]. *Physical review letters*, 1986,57(14):1722-1724.
- [37] 唐渊,马文波,温红艳,等.基于VOF-DPM模型的明渠含沙数值模拟及量水方案比选 [J]. *人民黄河*, 2024,46(11):126-132,148.
- Tang Y, Ma W B, Wen H Y, et al. Numerical simulation of sediment concentration in open channels and comparison of water measurement schemes based on VOF-DPM Model [J]. *Yellow River*, 2024,46(11):126-132,148.
- [38] Kafui K D, Thornton C, Adams M J. Discrete particle-continuum fluid modelling of gas-solid fluidised beds [J]. *Chemical engineering Science*, 2002,57(13):2395-2410.
- [39] O'Sullivan C. Particulate discrete element modelling: a geomechanics perspective [M]. Florida: CRC Press, 2011:23-31.
- [40] 杨保.气流中颗粒阻力系数和升力系数讨论 [J]. *中国沙漠*, 1998,(1):72-78.
- Yang B. Discussion of particle drag coefficient and lift coefficient in airflow [J]. *Journal of Desert Research*, 1998,(1):72-78.
- [41] Morsi S A, Alexander A J. An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems [J]. *J Fluid Mech*, 1972,55(2):193-208.
- [42] Hertz H. On the contact of elastic solids [J]. *reine und angewandte Mathematik*, 1882,92:156-171.
- [43] Mindlin R D. Compliance of elastic bodies in contact [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1949,16:259-268.
- [44] Mindlin R D, Deresiewicz H. Elastic spheres in contact under varying

- oblique forces [J]. ASME, 1953:327-344.
- [45] Shen X, Li R, Cai H J, et al. Characteristics of secondary flow and separation zone with different junction angle and flow ratio at river confluences [J]. Journal Hydrology, 2022,614:128537.
- [46] Waldschläger K, Schütttrumpf H. Effects of particle properties on the settling and rise velocities of microplastics in freshwater under laboratory conditions [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(4):1958-1966.
- [47] 陈凯霖. 明槽交汇区水动力特性与污染物浓度场试验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019:19-26.
- Chen K L. Experimental study on hydrodynamic characteristics and contaminant concentration field in open channel intersection [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019:19-26.
- [48] Best J L. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences [J]. Sedimentology, 1988,35(3):481-498.
- [49] 张原锋, 王平. 黄河上游高含沙水流交汇区河床形态及冲淤变化规律 [J]. 水力发电学报, 2017,36(12):39-48.
- Zhang Y F, Wang P. Deposition pattern and morphological process at hyperconcentrated flow confluences in upper Yellow River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017,36(12):39-48.
- [50] 门聪, 李頔, 左剑恶, 等. 北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析 [J]. 环境科学, 2022,43(7):3656-3663.
- Men C, Li D, Zuo J E, et al. Spatial variation and potential sources of microplastics in rivers in Tongzhou District, Beijing [J]. Environmental Science, 2022,43(7):3656-3663.
- [51] Sun Y C, Cao L, Wang Y T, et al. Sources and distribution of microplastics in the east China sea under a three-dimensional numerical modelling [J]. Environmental pollution, 2022,311:119910.
- [52] Yuan S Y, Xu L, Tang H W, et al. Swimming behavior of juvenile silver carp near the separation zone of a channel confluence [J]. International Journal of Sediment Research, 2022,37(1):122-127.
- [53] 赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 等. 微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累 [J]. 环境科学, 2021,42(1):485-491.
- Zhao J, Rao B Q, Guo X M, et al. Effects of microplastics on embryo hatching and intestinal accumulation in larval zebrafish *Danio rerio* [J]. Environmental Science, 2021,42(1):485-491.
- [54] 李文华, 简敏菲, 余厚平, 等. 鄱阳湖流域饶河河口入湖段优势淡水鱼类对微塑料及重金属污染物的生物累积 [J]. 湖泊科学, 2020,32(2):357-369.
- Li W H, Jian M F, Yu H P, et al. Bioaccumulation effects of microplastics and heavy metals pollutants in the dominant freshwater fish species in the Longkou entry of Raohe River, Lake Poyang Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2020,32(2):357-369.
- [55] Andrady A L. The plastic in microplastics: A review [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017,119(1):12-22.
- [56] Watkins L, McGrattan S, Sullivan P J, et al. The effect of dams on river transport of microplastic pollution [J]. Science of the Total Environment, 2019,664:834-840.
- [57] Tibbetts J, Krause S, Lynch I, et al. Abundance, distribution, and drivers of microplastic contamination in urban river environments [J]. Water, 2018,10(11):1597.
- [58] Aljaibachi R, Callaghan A. Impact of polystyrene microplastics on *Daphnia magna* mortality and reproduction in relation to food availability [J]. PeerJ, 2018,6:e4601.
- [59] Godoy V, Martín-Lara M A, Calero M, et al. The relevance of interaction of chemicals/pollutants and microplastic samples as route for transporting contaminants [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020,138:312-323.
- [60] He B B, Smith M, Egodawatta P, et al. Dispersal and transport of microplastics in river sediments [J]. Environmental Pollution, 2021, 279:116884.
- [61] 杨志山, 米潭, 姚建, 等. 河流交汇区污染物扩散数值模拟研究 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021,42(6):86-92.
- Yang Z S, Mi T, Yao J, et al. Numerical Simulation Research on Pollutant Diffusion in the Confluence Area of Rivers [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021,42(6):86-92.
- [62] 翟亚彤. 堤线优化对斜接型交汇口水力特性的影响研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2018:21-22.
- Zhai Y T. Research on influence of embankment line optimization on hydraulic characteristics of confluence Zone [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018:21-22.
- [63] 秦民, 邱静, 陈志和, 等. 河口细颗粒泥沙与微塑料异质聚集的环境效应理论研究进展 [J]. 水利学报, 2024,55(1):104-114.
- Qin M, Qiu J, Chen Z H, et al. Environmental effect theory of heterogeneous aggregation of fine sediment and microplastics in estuarine: a review [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024,55(1):104-114.

作者简介: 曹力玮(2000-),男,甘肃定西人,西北农林科技大学硕士研究生,研究方向为生态与环境水力学.发表论文 1 篇.caolw666@nwafu.edu.cn.