

夏阳,周苏芬,邹俊,等. 交汇区水流结构对底泥磷分布特征影响机制[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 595-604. XIA Y, ZHOU S F, ZOU J, et al. Influence mechanism of flow structure on distribution characteristics of phosphorus on bed sediments at river confluences[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 595-604. (in Chinese)

## 交汇区水流结构对底泥磷分布特征影响机制

夏阳<sup>1,2</sup>, 周苏芬<sup>1,2</sup>, 邹俊<sup>1,2</sup>, 胡健<sup>3</sup>

(1. 江西省水利科学院, 南昌 330029; 2. 江西省鄱阳湖流域生态水利技术创新中心, 南昌 330029;  
3. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 南京 210098)

**摘要:** 交汇区的水流结构极为复杂, 揭示交汇区底泥磷分布特征难度较大。设计交汇区底泥磷分布实验系统及其检测方法, 测量交汇区的三维流场和底泥中总磷含量, 分析交汇区水流分区与底泥中总磷空间分布的关系, 并基于交汇水槽实验中 204 组水动力参数与底泥中总磷含量数据, 建立人工神经网络模型, 定量分析流场中水动力参数对底泥中总磷含量的影响, 辨识其中的关键水动力参数。结果表明: 分离区内水流水平流速较小, 底泥磷含量较高; 位于分离区外侧的加速区水平流速较大, 底泥磷含量较低, 但加速区的局部区域(剪切层区)存在显著的底泥磷含量偏高现象; 通过人工神经网络模型的参数敏感性分析, 定量解释局部底泥磷含量高值现象与该区域较大的向下水流有关。

**关键词:** 河流交汇区; 底泥磷; 分布特征; 水流结构; 人工神经网络模型

**中图分类号:** TV68;TV9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0061

河流中磷的存在形态分为溶解态和颗粒态, 由于泥沙颗粒表面孔隙众多、富含各类矿物元素和微生物等, 对于磷的亲合力较强<sup>[1]</sup>, 吸附于泥沙的颗粒态磷是河流中磷输移和赋存的主要形态<sup>[2]</sup>。水沙运动携带颗粒态磷在河流中输移、沉积, 进而汇集于底泥, 成为水环境的内源磷负荷<sup>[3-4]</sup>。交汇区是河流系统物质输移和赋存的关键节点<sup>[5-6]</sup>, 研究该区域磷在底泥中的赋存和分布对于河流系统水环境、水生态保护具有重要意义。

河流中底泥对磷的吸附/解吸过程受到水动力的显著影响<sup>[7-8]</sup>, 前人对于流速对底泥吸附/解吸特性的影响开展了许多研究。钟小燕等<sup>[9]</sup>利用环形水槽研究了不同流速下底泥对磷的释放特性, 发现水体中总磷的平衡含量随流速的增加呈指数式增加。Liu 等<sup>[10]</sup>通过对水槽实验中多组数据进行统计分析发现, 底泥中污染物释放通量与流速之间呈现较好的正相关关系。Zhang 等<sup>[11]</sup>通过环形水槽实验和烧杯实验, 对比了动水条件和静水条件下底泥对磷的吸附过程, 也发现动水条件下底泥吸附速率更大, 平衡吸附量也更大。Smith<sup>[12]</sup>通过对比不同天然顺

直河流的流量和底泥磷含量发现, 流量、流速越大, 底泥磷含量越小, 认为: 流量较大的条件下上覆水中磷离子与底泥的接触时间较短, 不利于泥沙颗粒对磷的吸附; 大流量条件同时增强了水流对床面的冲刷, 导致富含磷的细颗粒泥沙起动再悬浮进入上覆水。

交汇区存在水流剪切、分离、螺旋等复杂的水流结构, 交汇区的水流一般分为以下几个区域<sup>[13]</sup>: 停滞区(位于交汇区上游交汇角)、剪切层(两汉水流界面)、水流偏折区、分离区(位于交汇区下游内岸侧)、加速区、水流恢复区。分离区由支汉水流在受到主汉阻滞后减速回流而形成, 内部存在复杂三维水流结构, 包括水平面存在的立轴涡和横断面存在的横轴涡, 分离区内部的流场呈现水平流速低、流速梯度大的特征<sup>[14-16]</sup>。由于流速梯度的存在, 交汇区两汉水流相互剪切形成剪切层, 该区域是两汉水流发生动量交换和物质掺混的主要区域, 因而也被称为掺混层<sup>[17-18]</sup>。剪切层内水流具有流速高、紊动强的特点; 由于水流剪切, 剪切层内部会发生涡旋的生成、演化, 紊流拟序结构十分复杂<sup>[19]</sup>。由于

收稿日期: 2023-12-25 修回日期: 2024-03-21 网络出版时间: 2024-05-21

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240520.0840.004>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3201804; 2022YFC3202603); 江西省水利厅科技项目(重大)(202124ZDKT18)

作者简介: 夏阳(1991—), 男, 江西南昌人, 博士, 主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail: 160402010001@hhu.edu.cn

交汇区不同水流分区之间水流结构差异较大, 目前对于交汇区水流分区与底泥磷分布特征之间的影响关系认识还存在不足, 且难以辨识其中影响底泥磷含量的关键水动力参数。

本文采用水槽实验, 通过设置不同的汇流比来改变交汇区的水流结构, 分析不同水流结构影响下交汇区的底泥磷分布特征, 并运用人工神经网络模型, 分析交汇区多个水动力参数与底泥磷含量之间的关系, 辨识影响交汇区底泥磷分布的关键水动力参数。

## 1 方法

### 1.1 循环水槽系统

研究使用的循环水槽系统(图 1)包括: 3 个水箱(主、支、上游水箱和下游水箱)、钢化玻璃平底水槽、PVC 抽水管、电磁流量计(测量精度 $\pm 0.01$  L/s)、调频水泵、平水格栅、尾门。在调频水泵作用下, 水流从下游水箱经过抽水管进入主、支、上游水箱, 随后通过水槽上游平水格栅漫入平底水槽, 在交汇区掺混后经过尾门回到下游水箱, 实现水槽系统水流自循环。水槽系统的流量由安装于抽水管道的电磁流量计和调频水泵控制, 水槽内水位通过调节下游尾门高度来控制。实验设置了 2 种汇流比工况: 工况 1 的汇流比  $[Q_1=Q_2/(Q_1+Q_2)]$  为 0.6, 工况 2 的汇流比为 0.4。

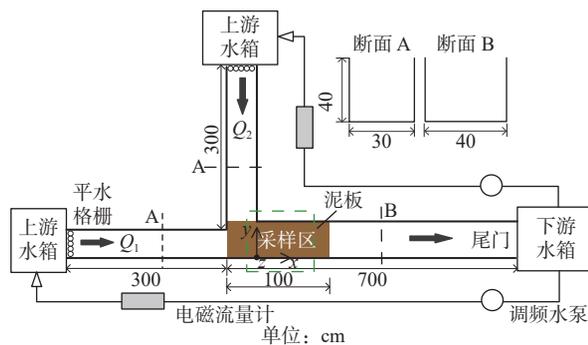


图 1 循环水槽系统

Fig. 1 The sketch of the channel confluence flume

### 1.2 流场测量

选用 Nortek 公司 Vectrino Plus 型号的声学多普勒流速仪(acoustic doppler velocimetry, ADV)作为流速测量设备, 将其与三维坐标架组合后能够精细地调整 ADV 探头的位置, 从而实现对流场中特定测点进行精确的三维流速测量。交汇区分布 6 个测量断面( $S_1 \sim S_6$ ), 相邻断面之间的间距为 10 cm。每个测量断面分布 17 条垂向测线, 相邻测线之间的间距为 2 cm, 见图 2(a)。为了使 ADV 探头完全浸没于水下, 将探头置于水面以下 2.5 cm 处, 探头下方存在高度为 5 cm 的测量盲区, 使得测线中最上方测点距离水面 7.5 cm。实验过程中, 水深控制为 16.5 cm, 流速测点分布于距离床面 1~9 cm 处, 测点垂向间距为 1 cm, 见图 2(b)。

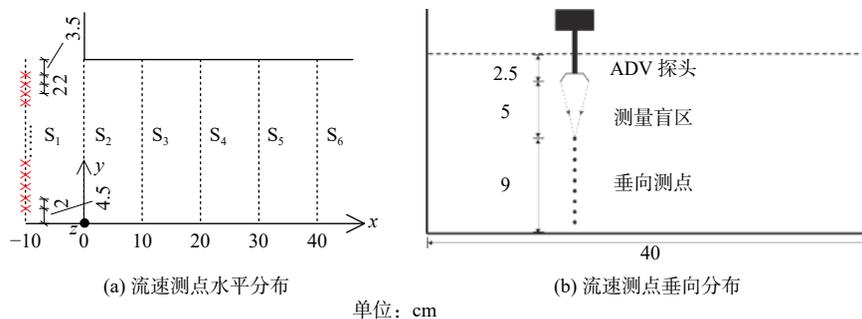


图 2 流速测点布置

Fig. 2 The arrangement of velocity measuring points

### 1.3 底泥对磷的吸附实验

采集河床原样底泥烘干、碾碎, 与清水混合、搅拌后, 均匀平铺于有机玻璃托盘, 底泥中值粒径约 11  $\mu\text{m}$ , 托盘尺寸为 100 cm(长) $\times$ 40 cm(宽) $\times$ 1 cm(厚)。实验所用污染物为磷酸二氢钾( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )<sup>[20]</sup>, 将 10.7 g 磷酸二氢钾粉末与清水在烧杯中搅拌混合, 将配置好的磷酸二氢钾溶液加入下游水箱。控制调频水泵使水槽流量达到实验设计流量, 控制下游

尾门调整水位, 使交汇区水位保持在 16.5 cm。水槽运行 2 h, 使水槽系统上下游水箱中的水体尽可能掺混, 并使污染物与水流边界充分接触, 以便水槽、水箱等设备在预运行中尽可能多的吸附污染物, 以免在正式实验过程中设备大量吸附污染物引起上覆水中污染物含量出现波动。

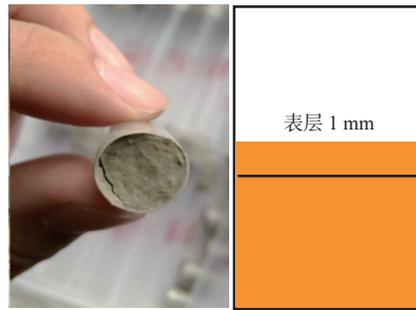
将覆盖有 1 cm 厚底泥的托盘放入交汇区, 泥板的具体位置见图 1。以泥板放入水槽交汇区的时刻

作为实验起始时刻,实验运行总时长为 48 h。在交汇区内床面密集布置大量底泥采样点,底泥采样点的平面布置与图 2(a)中流场测点的平面布置相对应:从交汇区上游( $x=-10$  cm)到下游( $x=40$  cm)共布置有 6 个测量断面( $S_1\sim S_6$ ),每个测量断面内从右岸( $y=4.5$  cm)到左岸( $y=36.5$  cm)共布置 17 个采样点,整个交汇区分布  $17\times 6=112$  个采样点。

为精确控制每次采样的位置和质量,设计了表



(a) 底泥采样点布置



(b) 柱状底泥样品

图 3 底泥采样方法

Fig. 3 Sediment sampling method

#### 1.4 人工神经网络模型的建立

人工神经网络结构见图 4。该模型主要由输入层、隐含层和输出层 3 部分组成,各层之间通过激活函数、权值和阈值来建立内部网络结构。将床面上方的水动力参数测点分为下(距床面 1~3 cm)、中(距床面 4~6 cm)、上(距床面 7~9 cm)3 层。 $V_{h1}$ 、 $V_{h2}$ 、 $V_{h3}$  表示下、中、上层水平方向流速, $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  表示下、中、上层垂向流速, $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  表示下、中、上层紊动能,这 9 个水动力参数为输入项;底泥中总磷含量  $C$  为输出项; $[IW_1]$  和  $[IW_2]$  代表权值矩阵, $[b_1]$  和  $[b_2]$  代表阈值矩阵。该模型共包括 204 组数据,其中:水槽实验中  $Q_r=0.6$  条件下的测点编号为 test 1~test 102;  $Q_r=0.4$  条件下的测点编号为 test 103~test 204。将所有数据分为训练集、验证集和测试集,其中:训练集数据的数量为 164 个,包含的数据为 test 1~test 38, test 21, test 41~test 68, test 72~test 102, test 137~test 204; 验证集数据的数量为 20 个,包含的数据为 test 69~test 71, test 120~test 136; 测试集数据的数量为 20 个,包含的数据为 test 39, test 40, test 103~test 119, test 185。

选用的训练算法为 Levenberg-Marquardt, 激活函数为 Tan-Sigmoid 型,该函数的计算公式为

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (1)$$

式中: $x$  为人工神经网络信号传递过程中神经元的

层底泥精确定位定量采样分析方法,采用钢尺配合圆柱形塑料软管进行底泥采样工作,具体步骤如下:利用钢尺将软管精确定位于各采样点[图 3(a)],确定采样点的平面位置;将得到的圆柱形底泥样品用冷冻干燥机烘干,截取柱状底泥表层厚度为 1 mm 底泥[图 3(b)]。采用标准测量和测试方法(standards measurement and testing, SMT)<sup>[21]</sup>检测底泥中总磷含量(质量分数,下同)。

输出值,激活函数将该输出值映射至(-1, 1)之间,以实现输出值的非线性变换。

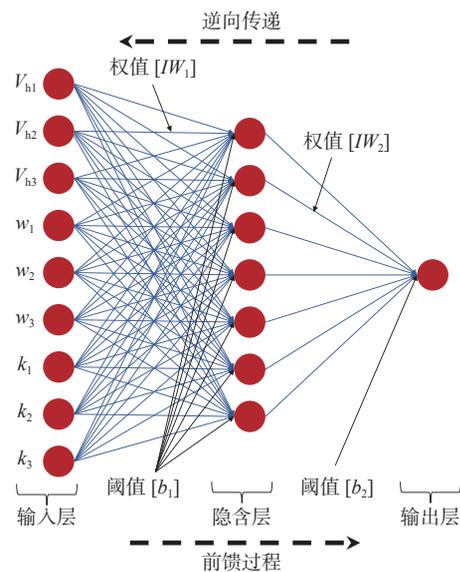


图 4 人工神经网络结构

Fig. 4 The architecture of an artificial neural network

目前大多数用于工程问题的人工神经网络普遍采用 3 层网络结构<sup>[22]</sup>,即 1 个输入层、1 个隐含层和 1 个输出层,这种只有 1 个隐含层的人工神经网络能够用来拟合任何从一个有限空间到另一个有限空间的连续映射。采用更大的隐含层数量虽然能够有限地提高模型预测的精度,但这会使得模型更容易陷入局部最优解,因此,不能盲目增加隐含

层数量。通过分析本研究数据的复杂程度和数量, 决定采用 1 个隐含层的人工神经网络。

隐含层神经元的数目对于模型的性能十分重要: 数量过少会导致预测精度过低; 数量过多会导致模型计算量过大, 且对于模型精度提升不明显。对于隐含层神经元数量, Yan 等<sup>[23]</sup> 给出了以下公式进行计算:

$$m = \sqrt{n+l+a} \quad (2)$$

式中:  $m$  代表隐含层神经元数量;  $n$  代表输入层神经

元数量;  $l$  代表输出层神经元数量;  $a$  表示经验常数, 取值范围为 1~10。

设置输入神经元数目为 9, 输出神经元数目为 1, 采用公式(2)可以计算得到隐含层神经元的数目为 4~13。开展试凑实验来选择合适的隐含层神经元数量。不同隐含层神经元数的人工神经网络模型性能对比结果见表 1。对比不同隐含层神经元数工况的均方误差, 确定隐含神经元数量为 7。最终确定的人工神经网络模型参数见表 2。

表 1 不同隐含层神经元数的人工神经网络模型性能对比

Tab. 1 The performance of artificial neural network (ANN) model with different hidden neuron numbers

隐含层神经元数	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
均方误差	0.007 7	0.007 7	0.002 1	0.001 5	0.003 5	0.002 0	0.002 0	0.002 8	0.007 7	0.004 2

表 2 人工神经网络模型参数设置

Tab. 2 The parameter setting of ANN

输入神经元数目	9
隐含神经元数目	7
输出神经元数目	1
数据划分	随机划分(80%训练集, 10%验证集, 10%测试集)
激活函数	Tan-Sigmoid
训练函数	Levenberg-Marquardt

## 2 结果与分析讨论

### 2.1 交汇区水平流速对底泥磷空间分布的影响

在工况 1 中, 左岸( $y=36.5$  cm)附近区域内平均底泥磷含量为 0.7 mg/g, 是底泥磷高赋存区, 其宽度约为主槽宽度的 1/2 [图 5(a)]。在该区域外侧, 有长条形的底泥磷低赋存区, 平均底泥磷含量约为 0.55 mg/g。该低赋存区与右岸( $y=4.5$  cm)之间存在一处底泥磷高赋存区, 平均底泥磷含量约为 0.73 mg/g, 该区域范围较小, 长度约为 20 cm, 宽约为 5 cm。

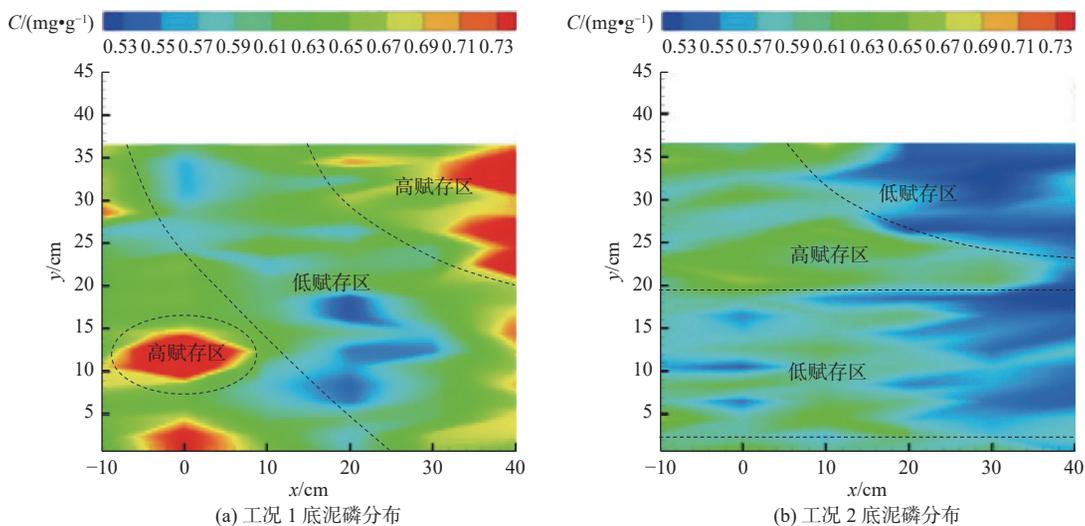


图 5 交汇区底泥磷空间分布

Fig. 5 The distribution of phosphorus on bed sediments at the channel confluence

在工况 2 中, 左岸( $y=36.5$  cm)附近区域内平均底泥磷含量仅为 0.53 mg/g, 是底泥磷低赋存区, 其宽度约为水槽宽度的 1/3 [图 5(b)]。在该区域外侧,  $y = 20\sim 25$  cm 范围的区域内平均底泥磷含量为

0.65 mg/g, 是底泥磷高赋存区。该高赋存区与右岸( $y=4.5$  cm)之间区域内平均底泥磷含量为 0.54 mg/g, 是底泥磷低赋存区, 该区域呈长条形, 范围较大, 其宽度约为主槽宽度的 1/2。该工况中交汇区的平均

底泥磷含量比工况 1 低约 10%, 床面不同区域之间底泥磷含量的差异不大。

水平流速是影响底泥中污染物含量的重要水力要素, 受到学者的广泛关注<sup>[24]</sup>。图 6 给出了 2 种工况下交汇区与底泥磷空间分布较为相关的断面  $S_3 \sim S_6$  水平面内顺水流方向流速  $u$  的空间分布。在工况 1 中, 分离区 [图 6(a) 中蓝色区域] 范围从断

面  $S_3$  到断面  $S_5$  逐渐增大, 在断面  $S_5$  其范围达到最大, 随后减小。沿垂向, 分离区的宽度逐渐减小。由于分离区束窄主槽过流断面, 水流加速, 在分离区外侧形成加速区 [图 6(a) 中红色区域]。在工况 2 中 [图 6(b)], 分离区范围约为工况 1 的一半, 分离区外侧加速区范围大幅增大。

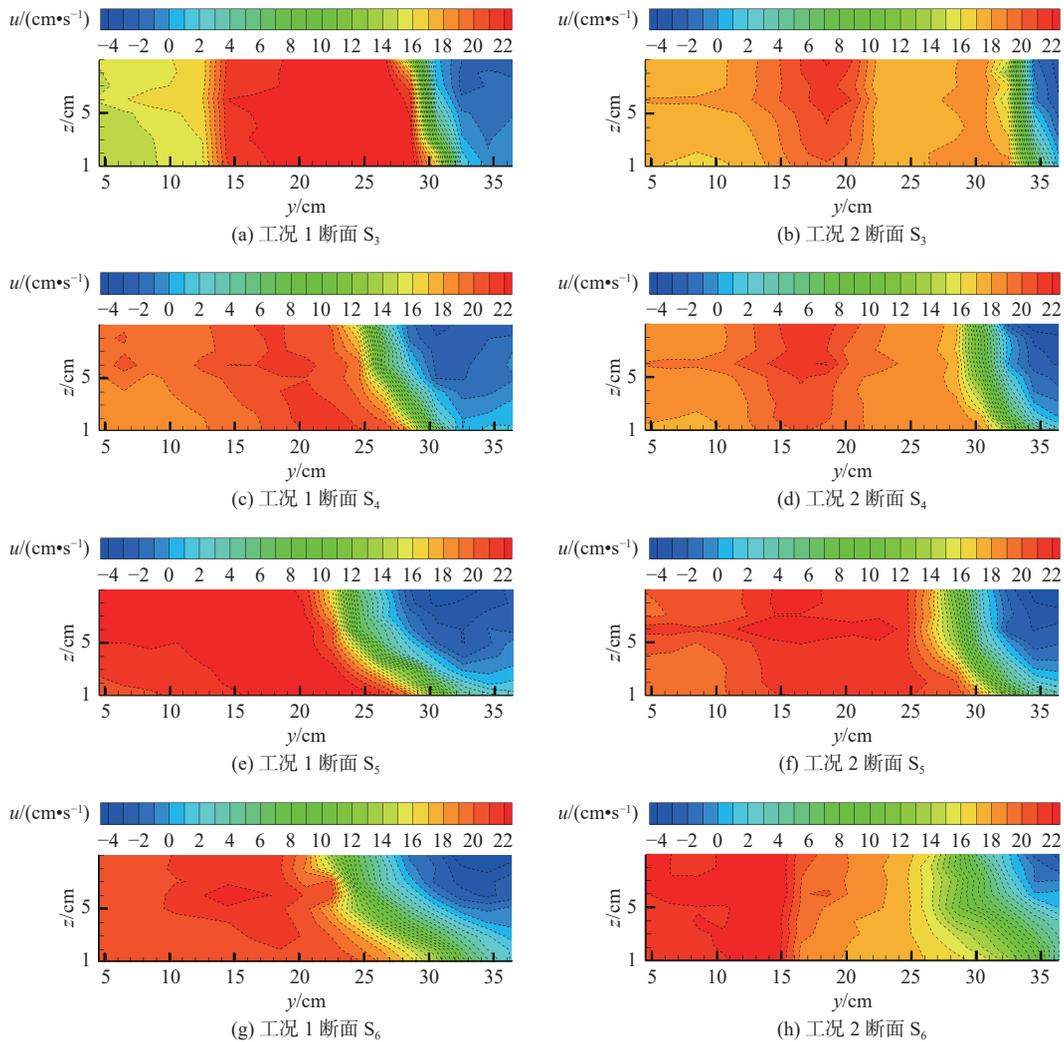


图 6 2 种工况下断面  $S_3 \sim S_6$  流速  $u$  空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of velocity in section  $S_3 \sim S_6$  under two working conditions

对比底泥磷空间分布与流速  $u$  空间分布可见, 流速较小的分离区内, 底泥磷含量较高, 而流速较大的加速区, 底泥磷含量较低。水平方向流速的扰动能够提高底泥磷的释放速率<sup>[25]</sup>, 这一方面是由于较大的水平流速会增大床面切应力, 泥沙颗粒表面附着的磷在机械力的作用下释放进入水体; 此外, 更大的水平流速能够减小水沙界面边界层厚度, 促进地表水-底泥界面紊动扩散, 加快孔隙水与地表水之间溶质交换, 使得溶质更难被底泥吸附<sup>[8]</sup>。

## 2.2 交汇区垂向流速分布对底泥磷空间分布的影响

由上一节可知, 除了水平流速较小的分离区, 在水平流速较大的加速区局部区域也存在底泥磷高赋存区, 这主要与垂向流速有关。图 7 给出了断面  $S_2 \sim S_4$  垂向流速  $w$  的分布。在工况 1 中, 加速区内的底泥磷高赋存区 ( $y=10$  cm) 与图 7(a) 中断面  $S_2$  的向下水流相对应。在工况 2 中, 加速区内的底泥磷高赋存区 ( $y=25$  cm) 与图 7(b) 中断面  $S_2 \sim S_4$  的向下水流相对应。Vervier 等<sup>[26]</sup> 通过现场监测发现, 向下

水流能够促进地表水与孔隙水之间的交换,使得向下水流区底泥磷含量高于河床其他区域。Martone 等<sup>[27]</sup>通过测量交汇区床面各处的潜流交换通量发现,床面压强越大的区域,潜流交换通量越大。因此,向

下水流通过增大床面压强,能够促进地表水中的溶解态磷向孔隙水迁移,提升该区域孔隙水磷的含量,增加磷与泥沙颗粒的接触概率,从而增大吸附效率和吸附量<sup>[28]</sup>。

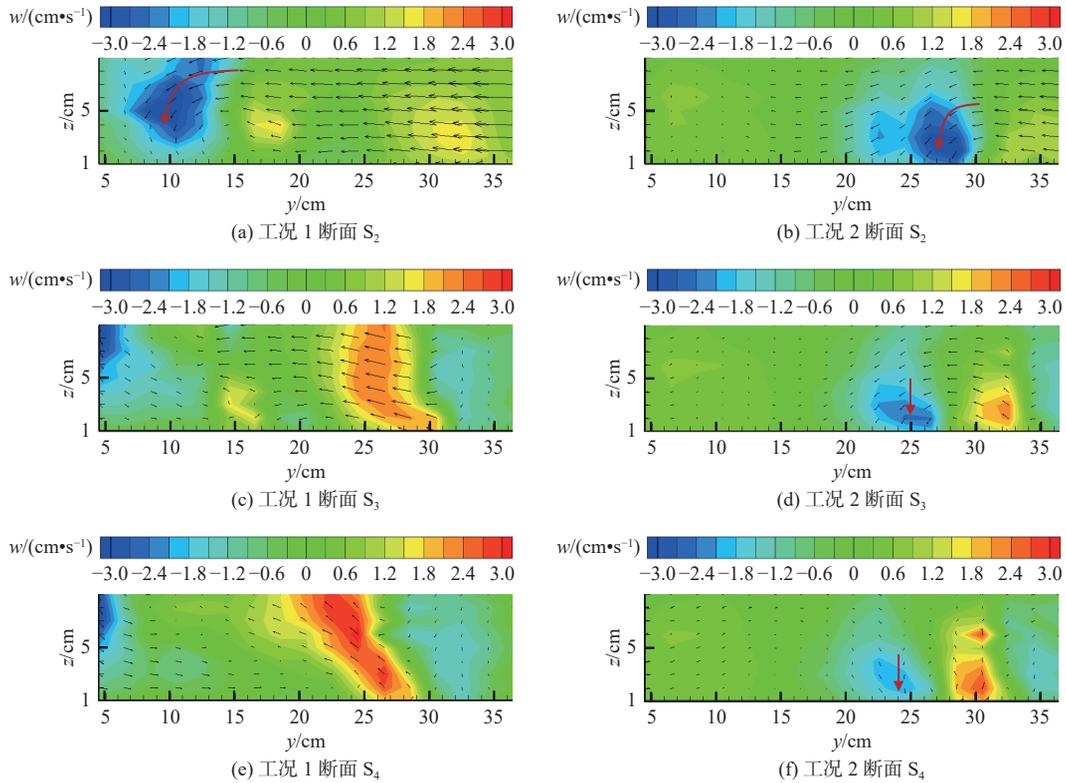


图 7 2 种工况下断面  $S_2 \sim S_4$  流速  $w$  分布

Fig. 7 Distribution of velocity in section  $S_2 \sim S_4$  under two working conditions

### 2.3 交汇区水流分区与底泥磷空间分布的关系

基于前两节的研究,提出交汇区水流分区与底泥磷空间分布的关系。支汊水流进入主槽后,一部分水流在交汇口下游左岸与主槽岸壁分离,产生回流,形成分离区。当汇流比较大 [图 8(a)] 时,分离区范围较大,床面附近水平流速较小,底泥磷含量较高,形成底泥磷高赋存区;当汇流比较小 [图 8(b)] 时,分离区范围较小,二次环流侵入分离区底部,床面附近水平流速较大,底泥磷含量较低,形成底泥磷低赋存区。在分离区外侧,支汊水流与主汊水流相互剪切,形成剪切层,水流在剪切层处下降,并在其内侧上升,即主槽横断面出现二次环流。受向下水流影响,剪切层区底泥磷含量较高,形成底泥磷的高赋存区。由于分离区束窄主槽过流断面,两汊水流掺混后在分离区外侧加速,在剪切层两侧形成加速区,其内部流速较高,底泥磷含量较低,形成底泥磷低赋存区。可见,水平流速和垂向流速均能够影响交汇区底泥磷的空间分布特征。

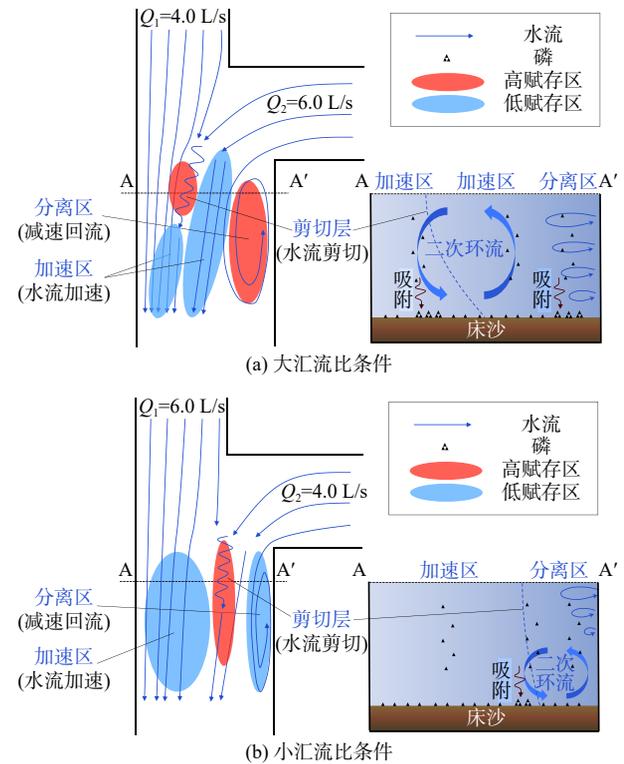


图 8 交汇区水流分区与底泥磷空间分布关系

Fig. 8 The relationship between the flow structure and the distribution of phosphorus on bed sediments at the confluence

## 2.4 交汇区水动力参数对底泥磷空间分布的影响

图9给出了人工神经网络模型计算得到的各测点底泥磷含量预测值与实测值。误差分析结果表明,该模型能够较好地预测交汇水槽中底泥磷含量,模型的相对误差为 $\pm 10\%$ 。预测结果的偏差主要源于试验数据本身,由于试验数据采集过程中难免会有人为误差(比如底泥质量的称量误差、磷酸盐标准曲线绘制精度的高低引起的误差等),这会使得数据集内含有噪声,神经网络模型在训练时会受到这些噪声的干扰,从而导致预测结果出现偏差。此外,训练集数据量也是引发预测结果偏差的原因之一,神经网络模型的预测精度会随训练数据量的增加而增加。需要注意的是,当训练集的规模变大时,模型的参数也需要重新调整。总的来说,本文模型的相对误差基本控制在 $\pm 10\%$ 以内。说明预测结果具有较高的可靠性。

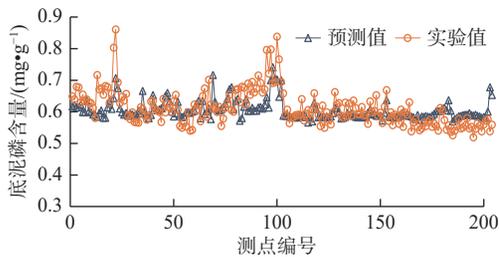


图9 预测值与实验值对比

Fig. 9 The comparison of predicted and experimental results

表3给出了人工神经网络模型预测的底泥磷含量与实验实际测量的底泥磷含量的比值( $C_{ANN}/C_{Experiment}$ )的统计分析结果以及相对误差( $\delta$ )绝对值的平均值。通过分析表3中 $C_{ANN}/C_{Experiment}$ 的平均值、标准差、变异系数和平均相对误差的绝对值可见,人工神经网络模型对 $Q_r = 0.4$ (test 103~test 204)的模拟效果优于 $Q_r = 0.6$ (test 1~test 102)。除了少数测点的误差较大以外,模型预测的相对误差约为 $\pm 10\%$ 。整体上来看, $C_{ANN}/C_{Experiment}$ 的平均值较大(为0.99),且变异系数较小(为0.07),平均相对误差的绝对值较小(5.71%),说明本文建立的人工神经网络模型能够快速、准确地基于交汇区的水动力参数预测底泥磷含量。

为分析各输入变量对于模型预测结果的影响,辨识出影响底泥磷含量最重要的水动力参数,设置了10个工况进行计算,并对比分析各工况得到的平均相对误差的绝对值,各工况的具体输入变量和平均相对误差绝对值见表4。其中,各工况间除了输

入变量存在差异以外,模型的其他参数均保持一致。

表3 人工神经网络模型计算结果的统计分析

Tab. 3 The descriptive statistic of the result predicted by the ANN

工况	$C_{ANN}/C_{Experiment}$			平均相对误差/%
	平均值	标准差	变异系数	
$Q_r = 0.6$ (test 1~test 102)	0.97	0.08	0.08	6.70
$Q_r = 0.4$ (test 103~test 204)	1.02	0.06	0.06	4.71
整体 (test 1~test 204)	0.99	0.07	0.07	5.71

表4 输入变量数量对人工神经网络预测效果的影响

Tab. 4 The effect of input variable on the prediction by ANN models

工况	输入变量数目	输入变量	平均相对误差/%
1	9	$V_{h1}, V_{h2}, V_{h3}, w_1, w_2, w_3,$ $k_1, k_2, k_3,$	5.71
2		$V_{h2}, V_{h3}, w_1, w_2, w_3,$ $k_1, k_2, k_3,$	7.27
3		$V_{h1}, V_{h3}, w_1, w_2, w_3,$ $k_1, k_2, k_3,$	6.24
4		$V_{h1}, V_{h2}, w_1, w_2, w_3,$ $k_1, k_2, k_3,$	9.56
5		$V_{h1}, V_{h2}, V_{h3}, w_2, w_3,$ $k_1, k_2, k_3,$	13.26
6	8	$V_{h1}, V_{h2}, V_{h3}, w_1, w_3,$ $k_1, k_2, k_3,$	14.35
7		$V_{h1}, V_{h2}, V_{h3}, w_1, w_2,$ $k_1, k_2, k_3,$	8.08
8		$V_{h1}, V_{h2}, V_{h3}, w_1, w_2,$ $w_3, k_2, k_3,$	7.00
9		$V_{h1}, V_{h2}, V_{h3}, w_1, w_2,$ $w_3, k_1, k_3,$	7.84
10		$V_{h1}, V_{h2}, V_{h3}, w_1, w_2,$ $w_3, k_1, k_2,$	7.19

由表4可见,相比于9个输入变量的情况,8个输入变量会导致模型预测效果更差,其中,工况5和工况6的预测效果最差,说明 $w_1$ 和 $w_2$ 是模型中不能够忽略的两个最重要的输入变量。由此可见,交汇区近床面的垂向流速是决定底泥磷含量的最重要的水动力要素,这也就解释了为何水平流速较大的剪切层区在较强的向下水流作用下会出现较高的底泥磷含量。

## 3 结论

本文通过开展交汇水槽实验,测量了交汇区三

维流场和底泥中总磷空间分布,揭示了交汇区水流分区与底泥磷空间分布之间的关系。基于交汇水槽实验的测量数据,建立了预测交汇区底泥中总磷含量的人工神经网络模型,并分析了交汇区各水力参数对底泥磷含量的影响,结论如下:

在大汇流比( $Q_r = 0.6$ )工况中,分离区和剪切层区内底泥中总磷含量较高,为底泥磷高赋存区;加速区内底泥中总磷含量较低,比分离区低约 21.4%,为底泥磷低赋存区。在小汇流比( $Q_r = 0.4$ )工况中,除了剪切层区底泥有较高的磷含量,其他区域均较低。

分离区内水流水平流速较小,有助于水体中的磷向底泥迁移,使得底泥磷含量较高;位于分离区外侧的加速区水平流速较高,底泥磷含量较低;但加速区的局部区域(剪切层区)存在显著的底泥磷含量偏高现象,这与该区存在向下水流(主要由螺旋流产生)促进地表水与孔隙水交换、加大磷与底泥的接触概率有关。

建立人工神经网络模型,基于水动力参数数据,准确预测了交汇区底泥磷含量,模型预测结果与实验结果之间的平均相对误差仅为 5.71%。通过对模型的参数敏感性分析,发现  $w_1$  和  $w_2$  对于模型预测效果的影响最大,说明下层和中层垂向流速是影响交汇区底泥中总磷含量的关键水动力参数。

#### 参考文献:

- [1] 万杰,袁旭音,叶宏萌,等. 洪泽湖不同入湖河流沉积物磷形态特征及生物有效性[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(10): 4568-4579. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0507.
- [2] 赵汗青,唐洪武,李志伟,等. 河湖水沙对磷迁移转化的作用研究进展[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(24): 643-649. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.04.009.
- [3] 张晗,王芝麟,邹彬,等. 黄土高原北洛河沉积物生态风险解析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(2): 332-341. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0034.
- [4] 龚艳伟,李晓秀,王晓燕,等. 北运河(北京段)底泥磷含量及其对上覆水质的影响[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(6): 39-44. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.06039.
- [5] YUAN S Y, TANG H W, XIAO Y, et al. Phosphorus contamination of the surface sediment at a river confluence[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 568-580. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.02.036.
- [6] YU Q C, YUAN S Y, RENNIE C D. Experiment on the morphodynamics of open channel confluences: Implications for the accumulation of contaminated sediments[J]. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 2020, 125(9): e2019JF005438. DOI: 10.1029/2019JF005438.
- [7] 范成新,刘敏,王圣瑞,等. 近20年来我国沉积物环境与污染控制研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(04): 346-374. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2021.038.
- [8] 余景芝,王烜,蔡剑英,等. 水动力条件对浅水湖泊沉积物氮磷释放的影响[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(8): 4219-4228. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230506.005.
- [9] 钟小燕,王船海,庾从蓉,等. 流速对太湖河道底泥泥沙、营养盐释放规律影响实验研究[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(8): 2862-2869. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2017.0068.
- [10] LIU X D, LI L Q, GU L, et al. Distribution and release of perfluorinated compounds (PFCs) in water-sediment systems: The effect of confluence channels [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 775(25): 145720. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145720.
- [11] ZHANG Z J, WANG Z D, WANG Y W, et al. Properties of phosphorus retention in sediments under different hydrological regimes: A laboratory-scale simulation study[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 404(3-4): 109-116. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.06.018.
- [12] SMITH D. R. Assessment of in-stream phosphorus dynamics in agricultural drainage ditches[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407: 3883-3889. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.02.038.
- [13] 肖洋,姚晨欣,张涛涛,等. 交汇区水流结构对水温分布特征影响机理研究[J/OL]. *河海大学学报(自然科学版)*: 1-15[2024-01-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20231213.1108.002.html>.
- [14] 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. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.2022.2608.
- [15] 戴文鸿,胡涛,丁梦娇,等. 感潮河段交汇区水流特性数值模拟:以宁波三江口为例[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(6): 171-177. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0168.
- [16] 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. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2019.04.010.
- [17] KWON S, SEO I, LYU S, et al. Investigating mixing patterns of suspended sediment in a river confluence

- using high-resolution hyperspectral imagery[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620(B): 129505. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129505.
- [18] XU L, YUAN S Y, TANG H W, et al. Mixing dynamics at the large confluence between the Yangtze River and Poyang Lake[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(11): e2022WR032195. DOI: 10.1029/2022WR032195.
- [19] SUKHODOLOV A N, SHUMILOVA O O, CONSTANTINESCU G S, et al. Mixing dynamics at river confluences governed by intermodal behaviour[J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16(1): 89-93. DOI: 10.1038/s41561-022-01091-1.
- [20] ZHU X, CHEN Y P, XU C Y, et al. The influence of turbulence on sediment phosphorus sorption[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 258: 114955. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2023.114955.
- [21] WATERLOT C. Alternative approach to the standard, measurements and testing programme used to establish phosphorus fractionation in soils[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2018, 1003: 26-33. DOI: 10.1016/j.aca.2017.11.059.
- [22] JIANG S, SHARAFISAF A M, SHEN L. Using artificial neural networks to predict influences of heterogeneity on rock strength at different strain rates[J]. *Materials*, 2021, 14: 3042. DOI: 10.3390/ma14113042.
- [23] YAN Y, REN Q, XIA N, et al. Artificial neural network approach to predict the fracture parameters of the size effect model for concrete[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2015, 38: 1347-1358. DOI: 10.1111/ffe.12309.
- [24] SHARMA A, HUANG L, FANG H W, et al. Effects of hydrodynamic on the mobility of phosphorous induced by sediment resuspension in a seepage affected alluvial channel[J]. *Chemosphere*, 2020, 260: 127550. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127550.
- [25] 李乾岗, 田颖, 刘玲, 等. 水体中沉积物氮和磷的释放机制及其影响因素研究进展[J]. *湿地科学*, 2022, 20(1): 94-103. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2022.01.010.
- [26] VERVIER P, BONVALLET-GARAY S, SAUVAGE S, et al. Influence of the hyporheic zone on the phosphorus dynamics of a large gravel-bed river, Garonne River, France[J]. *Hydrological Process*, 2009, 23(12): 1801-1812. DOI: 10.1002/hyp.7319.
- [27] MARTONE I, GUALTIERI C, ENDRENY T. Characterization of hyporheic exchange drivers and patterns within a low-gradient, first-order, river confluence during low and high flow[J]. *Water*, 2020, 12(3): 649. DOI: 10.3390/w12030649.
- [28] 李旺, 祖波, 李振亮, 等. 泥沙对磷的吸附及解吸研究进展[J]. *环境保护科学*, 2018, 44(4): 49-53. DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2018.04.008.

## Influence mechanism of flow structure on distribution characteristics of phosphorus on bed sediments at river confluences

XIA Yang<sup>1,2</sup>, ZHOU Sufen<sup>1,2</sup>, ZOU Jun<sup>1,2</sup>, HU Jian<sup>3</sup>

(1. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China; 2. Jiangxi Provincial Technology Innovation Center for Ecological Water Engineering in Poyang Lake Basin, Nanchang 330029, China; 3. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** River systems, particularly plain river systems, are rich in fine-grained sediments, which exhibit a significant adsorption capacity for phosphorus. The fine-grained sediments play a significant role in river water pollution, serving as both sources and sinks for pollutants. The confluence zone is a crucial node for phosphorus transport and deposition in river systems. Due to the complex flow structure in this area, it is difficult to reveal the distribution characteristics of phosphorus on bed sediments at river confluences.

An experimental system and detection method were designed to investigate the distribution of phosphorus on bed sediments within the confluence zone. The three-dimensional flow field of the confluence and the total phosphorus content of the bed sediments were measured. Subsequently, the relationship between the flow zone and the spatial distribution of total phosphorus on the bed sediments was analyzed. Based on 204 sets of hydrodynamic parameters and total phosphorus content data obtained from the confluence experiment, an artificial neural network model was established to quantitatively analyze the influence of hydrodynamic parameters within the confluence zone on the total phosphorus content of bed sediments, thereby identifying the key hydrodynamic parameters.

The results show that: (1) Under the condition of large confluence ratio ( $Q_r = 0.6$ ), the total phosphorus content

of bed sediments in the separation zone and the shear layer zone was high, indicating zones with high occurrences of phosphorus. The total phosphorus content of bed sediments in the acceleration zone was 21.4% lower than that in the separation zone, indicating a zone with low phosphorus occurrence. Under the condition of small confluence ratio ( $Q_r = 0.4$ ), except for sediments in the shear layer zone, which exhibited a high phosphorus content, the other areas exhibited a comparatively low phosphorus content. (2) The low horizontal flow velocity in the separation zone facilitated the migration of phosphorus from the water body to the bed sediments, resulting in a high phosphorus content of the bed sediments. Conversely, the high horizontal flow velocity in the acceleration zone outside the separation zone resulted in a low phosphorus content of the bed sediments. However, there was a significantly high phosphorus content in the local area (shear layer zone) within the acceleration zone, which was attributed to the downward flow (primarily generated by spiral flow) in this area. The downward flow promoted the exchange of surface water and pore water, increasing the contact probability between phosphorus and the bed sediments. (3) An artificial neural network model, formulated using hydrodynamic parameters, has accurately predicted the phosphorus content of the bed sediments at the confluence. Remarkably, the average relative error between the model predictions and the experimental results was only 5.71%. Through parameter sensitivity analysis of the model, it was found that  $w_1$  and  $w_2$  exerted the most significant influence on the model prediction accuracy, indicating that the vertical velocities in the lower and middle layers were crucial hydrodynamic parameters impacting the total phosphorus content of the bed sediments at the confluence.

The horizontal flow velocity is low in the separation zone, resulting in high phosphorus content of the bed sediments. Conversely, in the acceleration zone outside the separation zone, the horizontal flow velocity is higher, leading to lower phosphorus content of the bed sediments. However, there is a notable exception in a specific region of the acceleration zone known as the shear layer zone, where a large amount of phosphorus is present. This phenomenon is related to the downward flow caused by spiral flow in this area, which promotes the exchange of surface water and pore water, increasing the contact probability between phosphorus and bed sediments.

**Key words:** river confluence; phosphorus on bed sediments; distribution characteristics; flow structure; artificial neural network model