

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.02.006

长江-鄱阳湖交汇处三维水流结构研究

唐洪武¹,黄淑君¹,袁赛瑜¹,李 坤¹,肖 洋¹,肖仲凯²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 长江水利委员会水文局长江下游水文水资源勘测局,江苏 南京 210011)

摘要:为解决长江与鄱阳湖交汇处由于尺度大、流速快、结构复杂而导致的水流结构测量困难的问题,基于声学多普勒流速剖面仪(ADCP)对该交汇处 17 个横断面的流场进行测量,并采用动能校正系数(α)和动量校正系数(β)表征交汇水流的掺混特征。通过测量长江与鄱阳湖交汇前后的水体 pH、溶解氧和电导率,分析交汇前与交汇后水质的变化规律。结果表明:长江经官洲分流后的交汇由于流速相近和河床高差导致水流迅速掺混,而长江与鄱阳湖的交汇在交汇处下游约 2.6 km 才实现完全掺混,掺混完全时 α 、 β 分别约为 1.3 和 1.15。长江-鄱阳湖交汇处出现长约 300 m 的停滞区。停滞区下游形成成对反向螺旋流,环流强度可达 0.6 左右,并向下游衰减。受宽深比减小和码头等局部地形的影响,最下游 2 个断面出现单向逆时针螺旋流,环流强度低于 0.1。

关键词:长江下游;鄱阳湖;水流交汇;ADCP;水流结构;螺旋流

中图分类号:TV143 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2020)02-0128-08

Three-dimensional flow structure at the confluence zone of Yangtze River and Poyang Lake

TANG Hongwu¹, HUANG Shujun¹, YUAN Saiyu¹, LI Kun¹, XIAO Yang¹, XIAO Zhongkai²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Hydrology and Water Resources Survey Bureau for the Downstream of Yangtze River, Nanjing 210011, China)

Abstract: Due to the large scale, large flow velocity and complex flow structure, it is very difficult to measure the flow structure of the confluence of Yangtze River and Poyang Lake. In this study, Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) was used to measure the velocity and the water depth through 17 cross-sections. Kinetic energy correction coefficient (α) and momentum correction coefficient (β) were used to characterize the mixing of two flows. In addition, pH, dissolved oxygen, electrical conductivity, and suspended sand concentration were also measured. The results show that the two branches of the Yangtze River around the Guanzhou mixed quickly because of their similar flow velocity and bed discordance, while the Yangtze River and the Poyang Lake completely mix till 2.6 km downstream where α and β are about 1.3 and 1.15, respectively. A 300 m stagnation area and twin surface-convergent helical cells were observed. The circulation strength of secondary flows can reach about 0.6 and attenuates downstream. Due to decrease of width-depth ratio and effects of local wharfs, only one unidirectional counterclockwise helical cell occurred in the last two sections, and the circulation strength was lower than 0.1.

Key words: downstream of Yangtze River; Poyang Lake; confluence; acoustic doppler current profiler; flow structure; helical flow

作为中国最大的河流和最大的淡水湖,长江与鄱阳湖的水沙运动、河道演变、水环境生态一直是水科学和水工程领域研究的热点。长江和鄱阳湖交汇处是连接长江和鄱阳湖以及实现江湖物质输移交换的重要控

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51779080);国家自然科学基金青年科学基金(51509073)
作者简介: 唐洪武(1966—),男,教授,博士,主要从事河流动力学研究。E-mail:hwtang@hhu.edu.cn
引用本文: 唐洪武,黄淑君,袁赛瑜,等. 长江-鄱阳湖交汇处三维水流结构研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):128-135.
TANG Hongwu, HUANG Shujun, YUAN Saiyu, et al. Three-dimensional flow structure at the confluence zone of Yangtze River and Poyang Lake [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(2): 128-135.

制区域,认识其水流结构具有重要的实际意义与科学价值。前人对实验室尺度交汇水槽^[1-8]和中小尺度天然交汇河道^[9-12]的水流结构有较多研究报道。研究表明,水流交汇处会形成分离区、剪切层、螺旋流、停滞区等复杂水流形态。Best 等^[1-2]系统研究交汇水流流态与交汇角、汇流比、宽深比、河床高程等之间的关系。Yang 等^[3]深入研究分离区的水流特征。Yuan 等^[4-5]通过水槽试验研究交汇水流尤其是剪切层的三维紊流结构及其对床面变形的作用机理。Tang 等^[6]研究复杂床面形态下水流结构与物质输移掺混之间的响应关系。林青炜等^[7]开展基于 PIV 的交汇处涡旋结构的观测研究。Yuan 等^[8]进一步开展淮河支流交汇处底泥污染的长期现场观测。然而,像长江和鄱阳湖交汇处这样尺度大、流速快、结构复杂的交汇处研究相当有限。而且由于日常航运等影响,测量大江大湖交汇处的水流结构很困难。声学多普勒流速剖面仪(ADCP)作为一种新型的断面流速测量仪器,测量过程直观高效,而且精度可靠^[13],适用于大型交汇处的现场观测。本文基于 ADCP 测量技术,在 2018 年 8 月对长江和鄱阳湖交汇处的 17 个横断面流场进行了测量和分析。

1 研究河段与现场观测设置

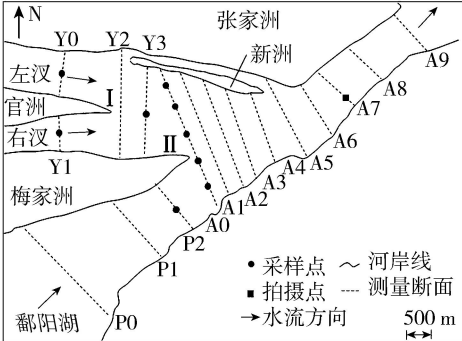
长江在江西九江流经张家洲时,右汊被官洲分流后汇合,再与鄱阳湖的出湖水在湖口县附近交汇。研究区域为长江与鄱阳湖的交汇河段,距离上游三峡大坝超过 900 km,下至长江入海口有 800 km。2018 年 8 月 11—14 日展开现场观测,此时为长江汛期,由表 1 可知,测量时期内现场水文条件基本不变。图 1 中 Y、P 分别表示长江和鄱阳湖河道的断面,A 表示交汇后的断面。测量断面共 17 个,江湖交汇前长江设置 4 个、鄱阳湖 3 个,交汇后设置 10 个。在图 1 中圆点位置进行水质测量和水样采样,方点位置为交汇物质掺混图(图 2)的拍摄点。交汇 I 表示因官洲分隔的长江左、右汊的交汇处,交汇 II 表示长江与鄱阳湖的交汇处。

表 1 观测时期的九江和湖口站水文数据
Table 1 Hydrologic data of Jiujiang station and Hukou station during the survey

观测日期	流量/(10 ³ m ³ · s ⁻¹)		水位/m	
	九江站	湖口站	九江站	湖口站
2018-08-11	33.3	3.40	16.32	15.66
2018-08-12	32.8	3.28	16.18	15.49
2018-08-13	32.9	3.19	16.16	15.53
2018-08-14	34.3	3.08	16.17	15.52



(a) 研究区域



(b) 测量断面设置

图 1 研究区域和测量断面设置

Fig. 1 Study area and measurement profile setup

使用 ADCP(Sontek M9)测量断面三维流速、断面水深、断面流量和表层水温等。ADCP 配置有 2 组不同频率的波束(每组 4 个,倾角 25°)测量断面流速,正中间配置垂直波束测量水深。ADCP 可以根据不同水深自动调整发射频率和采样单元的大小,满足不同水深的测量要求,从而保证测量精度(±0.002 m/s)。ADCP 安装在配套的单体船上,传感器入水深度为 0.1 m,ADCP 正上方安装差分全球定位系统(DGPS),DGPS 精度为 1.0 m,不仅可以用于测量船速,同时可以定位单体船使其沿着测量断面直线前行。鄱阳湖流速小,控制船速约 1.5 m/s,其他断面的船速则控制约 2.0 m/s。为了获得较好的平均流场,并减小航道来往的船只干扰,每个断面重复测量 4 次。ADCP 采集的数据用后处理软件 velocity mapping toolbox(VMT)计算重复测量下的断

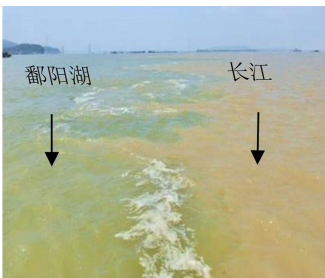


图 2 交汇 II 掺混层位置照片
Fig. 2 Photo of the mixing layer of confluence II

面三维流速^[14],使用内置的 Rozovskii 方法计算二次流。使用美国多参数水质监测仪(YSI EXO2)测量 pH、溶解氧和电导率等水质参数。水样采样点位于水面以下 4 m(约为 0.4 倍水深)^[15],每个采样点采集 2 份 1 L 的水样带回实验室,过滤烘干等处理后确定样品的悬沙浓度。

2 结果与讨论

2.1 基本水动力水质参数分析

汇流比 Q_R (支流流量/主流流量)、流速比 U_R (支流流速/主流流速)和动量通量比 M_R (支流动量通量/主流动量通量)是影响交汇处水流结构的主要特征参量。交汇 I(长江右汉/左汉)左汉为主流,主流流量是支流的 3 倍, M_R 为 0.257, Q_R 为 0.336,交汇角为 20° (交汇角用两汉深泓线夹角确定),交汇后的流向基本与主流流向一致(由深泓线判断)。交汇 II(鄱阳湖/长江)长江干流为主流, M_R 仅为 0.089, Q_R 为 0.222,交汇角 58° ,交汇后的流向基本与支流流向一致,长江水流发生了大角度的偏折。虽然 2 处交汇都是 Y 形不对称交汇,但交汇 I 支流发生偏折,而交汇 II 则是主流发生偏折。交汇 I 是同一条河分汉后交汇,水动力相近。交汇 II 为江湖不同来源水流的交汇,水流条件差异大,水动力结构复杂。交汇 I 的 U_R (0.791)约为交汇 II(0.352)的 2 倍, M_R 约为交汇 II 的 3 倍。

交汇 I 左右汉属于长江水流,交汇后与交汇前的水质特性基本一致(表 2),长江左右汉断面(Y0 和 Y1)除悬沙浓度外,温度、pH、电导率等水质参数都接近,由于左汉流量大、流速大,悬沙浓度比右汉高约 18%。交汇 II 长江和鄱阳湖两股水流的 pH 相差不大,但长江的电导率是鄱阳湖的 2 倍,溶解氧低于鄱阳湖,悬沙浓度约为鄱阳湖的 5 倍。在交汇 II 现场可直接观察到两汉水体颜色的差异(图 2),照片从断面 A7 拍摄点向上游拍摄得到,右侧长江来水悬沙浓度高、呈黄色浑浊,左侧鄱阳湖出流相比之下清澈、显绿色,两股水流交界分明,反映了两汉水流不同的悬沙浓度,而且通过现场观察发现分界线往下游延伸约 4 km。

表 2 长江、鄱阳湖主要水流特性参数

Table 2 Main characteristic parameters of Yangtze River and Poyang Lake												
断面	$Q/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$A/$ m^2	$v_{\text{ave}}/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$D_{\text{ir}}/$ ($^\circ$)	$W/$ m	$H_{\text{M}}/$ m	$T/$ $^\circ\text{C}$	$\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	pH	$\sigma/$ ($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)	$\rho(\text{DO})/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SC/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
Y0	14 280	13 020	1.097	99.0	900	15.53	29.2	995.89	8	337.8	6.72	79.1
Y1	4 800	5 548	0.868	80.0	647	6.86	29.1	995.92	7.99	338.3	6.49	67.1
Y3	17 180	18 502	0.929	100.0	1 770	11.48	29.2	995.89	7.98	338.2	6.56	74.4
P2	3 820	11 692	0.327	42.0	1 098	7.84	33.8	994.44	7.99	167.6	7.34	15.4
A0	19 888	30 322	0.656	93.7	2 816	10.87	31.7	995.13	7.94	280.4	6.71	65.1

注: Q 为断面流量, A 为断面面积, v_{ave} 为断面平均流速, D_{ir} 为自正北方向顺时针偏转的水流方向, W 为河宽, H_{M} 为断面垂线水深的中值, T 为表层水流温度, ρ 为由水温查得的相应密度, σ 为电导率,DO 为溶解氧,SC 为悬沙浓度;水质水样在采样点水深 4 m 处采集,A0 断面数据以左起第 3 点数据为例。

以交汇 II 第一个交汇断面 A0 为例分析参数沿横向的变化情况。由图 3 可知,A0 断面上两股水流在距左岸 1 900 m 的位置发生流速突变,此处为掺混剧烈的剪切层(也称掺混层),表层水温也发生突变。观测期间正值夏天,当天最高气温为 37°C ,鄱阳湖湖区面积大、受热多,出湖水流表层水温达 33.8°C ,远高于长江表层水温(29.2°C)。温度差异带来的密度差异会影响剪切层处涡旋的形成和发展以及两汉水流的物质掺混^[16]。由图 4 可见,从左岸到右岸 pH 减小、DO 增大,而悬沙浓度、电导率大幅度减小,所以后两者更能反

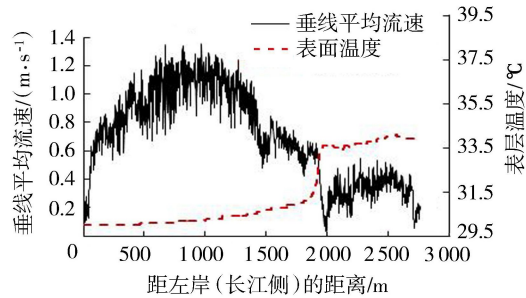


图 3 A0 断面流速与表层温度横向分布
Fig.3 Lateral distributions of velocity and surface water temperature at cross-section A0

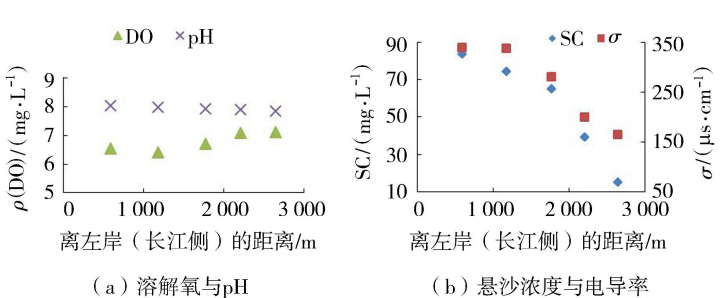


图 4 A0 断面水质特性横向分布
Fig.4 Lateral distribution of water quality characteristics at cross-section A0

映两汉水流水质参数差别和掺混过程。

2.2 交汇水流断面流速场

图 5 给出了 17 个测量断面沿水深平均的水平流速分布。长江主流在左汉河道,流速主槽大、两侧小。主流与右汉水流交汇后,在断面 Y2 距离左岸 1 200 m(交汇点 I 附近)处出现停滞区(设定顺水流方向流速小于 0.5 m/s 为停滞区),停滞区长约 200 m,交汇后主流方向仍与左汉主槽一致。断面 A0 的左侧长江部分的速度场趋于均匀,可认为交汇 I 的两汉水流在断面 A0 处掺混基本完成,所以交汇 I 的掺混完全长度约为 1.2 km。鄱阳湖出湖水流速小(0.3 m/s),在断面 A0 处,主流长江与鄱阳湖水流发生掺混,并受鄱阳湖出流影响开始发生偏折进入下游。在 A0 断面距左岸 1 900 m 处出现停滞区,停滞区长约 300 m。交汇断面右侧鄱阳湖低流速水流在交汇过程中流速逐渐增大,断面 A3 至 A5 中间段出现最大流速区,直至断面水流 A6 流速在整个断面上分布基本均匀,所以交汇 II 的掺混完全长度约为 2.6 km。在断面 A6、A7 左岸出现分离区,水流存在回流。由于断面宽度束窄,最后 2 个断面 A8、A9 的流速增大,最大流速达 2 m/s。

表 3 给出了交汇 II 交汇后各断面水流特征参数,可见长江与鄱阳湖交汇后,除了断面 A5 有新洲左侧的水流汇入、流量增加约 1 600 m³/s、宽深比较上一个断面有所增大以外,断面 A0 到 A8 呈现河道逐渐变窄、宽深比逐渐减小、流速逐渐变大的趋势。断面 A8 的河宽最小,断面平均流速最大为 1.26 m/s。鄱阳湖水湖水的汇入导致交汇后水流表层水温升高,随着与长江水掺混程度的增加,表层温度逐渐趋于与交汇前长江表层水温一致。

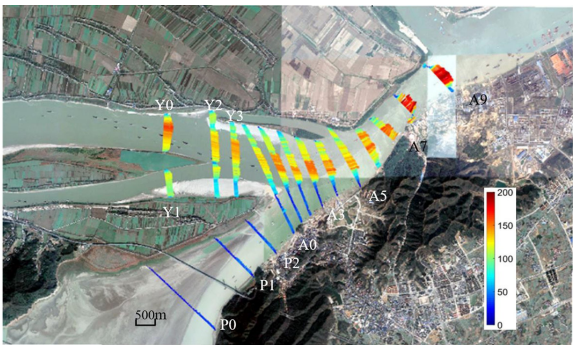


图 5 沿水深平均的水平流速分布(单位:cm/s)
Fig. 5 Depth-averaged horizontal velocity vectors (units: cm/s)

表 3 交汇 II 交汇后水流特性

Table 3 Flow characteristics after confluence at confluence II

断面	距离 交汇点/m	流量/ (m ³ ·s ⁻²)	河宽/ m	平均 水深/m	宽深比	平均流速/ (m·s ⁻¹)	面积/ m ²	表层 水温/℃
A0	200	19 888	2 816	11.24	250.53	0.656	30 322	31.7
A1	560	20 500	2 515	11.85	212.24	0.658	31 232	31.3
A2	820	19 859	2 179	14.33	152.06	0.690	28 853	31.1
A3	1 160	19 917	1 844	13.21	139.59	0.733	27 168	31.3
A4	1 560	19 682	1 438	16.51	87.10	0.849	23 189	31.0
A5	2 050	21 322	1 620	15.40	105.19	0.892	23 909	30.7
A6	2 610	21 277	1 067	16.99	62.80	1.046	20 332	30.4
A7	3 130	20 353	909	14.62	62.18	1.094	18 608	30.5
A8	3 920	20 262	776	21.12	36.74	1.259	16 095	29.9
A9	4 860	22 297	930	22.35	41.61	1.025	21 752	29.9

图 6 给出了 16 个测量断面的断面内流速场。交汇 I 的断面 Y2 没有出现明显的螺旋流,可能由于交汇 I 的左右两汉流速比为 0.791(表 2),两股水流动速差异不大,而且支流偏折角度较小(20°),没有产生螺旋流。加上交汇 I 右汉河床明显高于左汉,河床高程不一致也会加快两汉水流掺混^[12]。对于交汇 II,断面 A0 处两汉水流刚交汇,尚未出现螺旋流,而随着两流的剧烈剪切,断面 A1 可以看到在距离左岸 1 700 m 的位置水流会在近水面汇聚、在近床面分散,形成一对反向的螺旋流。类似的成对反向螺旋流在前人的现场观测中也被观测到^[17]。螺旋流向下水流的位置与河道主槽深泓线基本一致。

从断面 A1 到 A7 观察交汇 II 螺旋流的变化,可以发现螺旋流在垂向范围逐渐扩大加深直至断面 A4,从 A5 断面开始螺旋流垂向流速减小,而侧向扩展较为明显,主要与河道断面形态由 V 形向 U 形转变有关。在 A6 和 A7 断面,成对螺旋流的尺寸不再扩大。断面 A8 和 A9 仅出现了单向的逆时针方向螺旋流,可能是由于交汇下游断面宽深比减小以及流场受断面 A7 右岸码头等工程影响所致。螺旋流加快两股水流的掺混^[18],在下游约 2.6 km 处掺混完全。

2.3 环流旋度

环流旋度(v/u , v 为横向流速,左岸指向右岸为正; u 为垂直断面流速,向下游为正)可以表征断面内环流

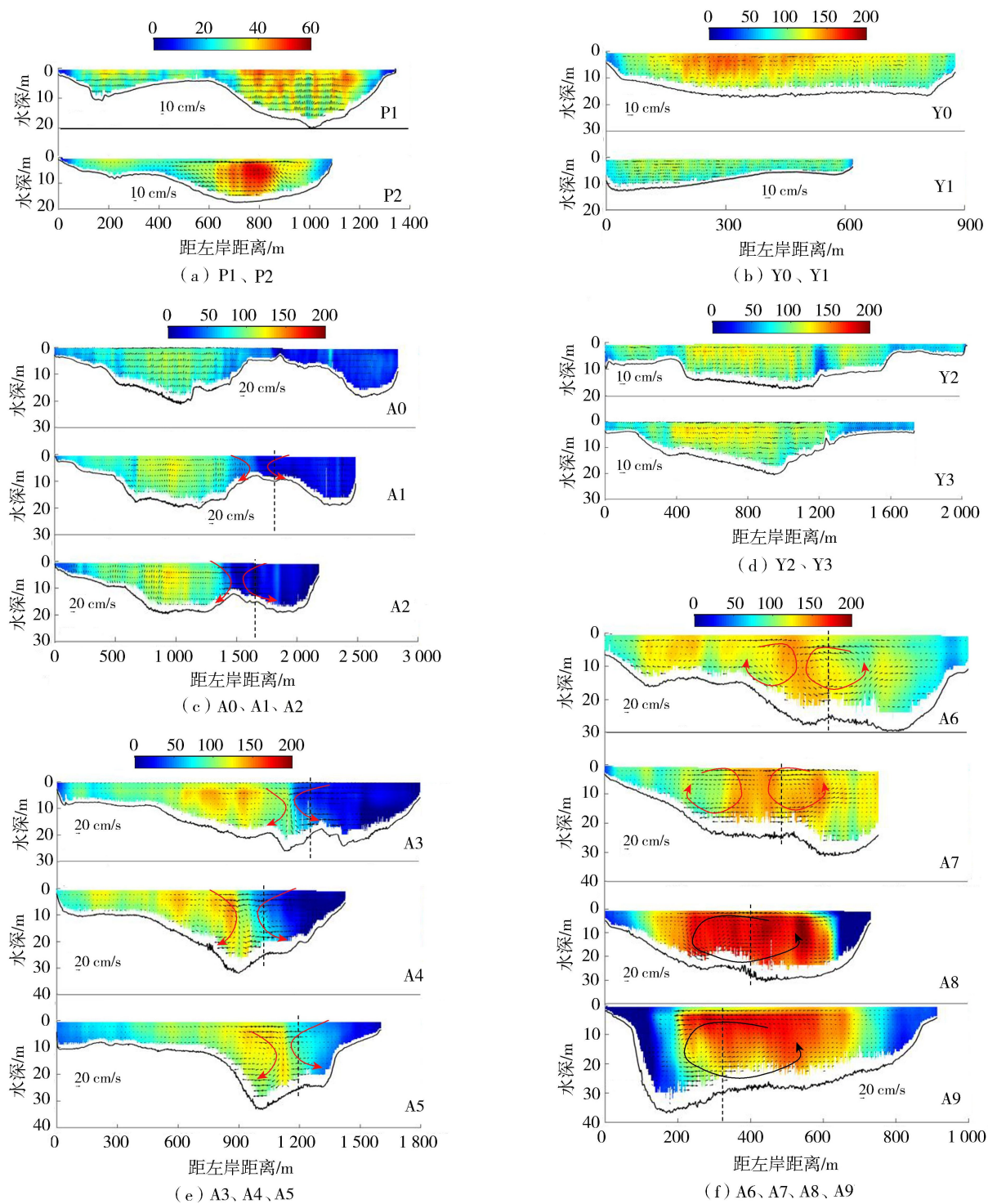


图6 测量断面的断面内流速场(单位:cm/s)

Fig. 6 Measured flow velocity fields in all cross sections (units: cm/s)

的强度,可以定量反映螺旋流的强度。图7中可以明显看出2个螺旋流:环流旋度正值分布在左岸近水面和右岸近底面,环流旋度负值分布在左岸近底面和右岸近水面。环流旋度绝对值最大值分布在右岸螺旋流的近底面和近水面的中部。选取各断面上环流强度绝对值最大值处的垂线($z=0.3H$ 、 $0.5H$ 、 $0.7H$ 、 $0.9H$,图6中是竖直虚线; H 为水深, z 为选取点到水面垂直距离),来对比螺旋流强度在沿水深和沿水流方向的变化过程。由表4可见,沿水深方向,环流旋度在近水面和近河床的值较中部大,这与弯道二次流的环流旋度沿水深的分布规律一致^[19]。断面A1、A2、A3的环流强度可达0.6,向下游发展过程中环流强度逐渐减小,至断面A7环流强度降到0.1左右。可见,两汊水流刚交汇时产生的螺旋流强度大,但随着两汊水流动量的交换,螺

旋流的强度逐渐减小。最后 2 个断面的单向螺旋流环流强度基本低于 0.1,这主要与河道断面束窄、流速 u 增大有关。

2.4 交汇的掺混系数变化

为了描述交汇处水流掺混特征,引入 2 个参数:动能校正系数(科里奥利系数) α 和动量校正系数(布西涅斯克系数) β :

$$\alpha = \frac{\int_A V^3 dA}{v_{ave}^3 A}$$
$$\beta = \frac{\int_A V^2 dA}{v_{ave}^2 A}$$

(1)

式中: V ——水深平均流速。

α 、 β 均为大于 1 的数,且过水断面上流速分布越不均匀,其值越大^[20]。天然河道的动能校正系数大于 1.1,受断面形状的影响较大^[21]。而且, α 、 β 在窄深河道变化范围小,在宽浅河道变化范围大^[21]。

表 4 交汇 II 交汇后各断面环流旋度的垂线分布

Table 4 Vertical distribution of secondary flow strength after confluence at the confluence II

z	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
0.3H	-0.47	-0.59	-0.64	-0.31	-0.16	-0.25	-0.11	-0.10	-0.05
0.5H	-0.32	-0.18	-0.26	-0.13	-0.02	-0.04	0.01	-0.01	-0.01
0.7H	0.21	0.35	0.34	0.20	0.14	0.10	0.08	0.04	0.10
0.9H	0.57	0.59	0.60	0.30	0.10	0.15	0.09	0.03	0.18

图 8 给出了交汇前后各个测量断面的 α 、 β 值。交汇 I 交汇前长江左汊和右汊都属于宽浅河道,流速分布较均匀, α 约为 1.1。交汇后掺混流速不均匀, α 增大到 1.4。交汇 II 交汇前,鄱阳湖出口的断面形态变化大,断面左侧大半是浅滩,右侧为深航道,因此断面流速分布不均匀, α 最大达到 3.0。长江和鄱阳湖交汇后在 A0 断面开始发生掺混,此处由于两股水流的流速相差大, α 值约为 2.7。往下游两股水流逐渐掺混,流速不均匀程度降低, α 减小,到 A6 断面, α 已经减小至 1.3。由于码头等地形影响,最后 2 个断面水流结构的不均匀性增加,使得 α 增大。动量校正系数 β 的变化趋势与 α 大体一致,交汇 I 掺混后 Y2 断面 β 为 1.2。交汇 II 鄱阳湖断面 P0 的 β 接近 1.8,长江断面流速分布均匀, β 小,交汇后 β 高达 1.7,再随着掺混程度增加, β 减小至 A6 断面为 1.15。

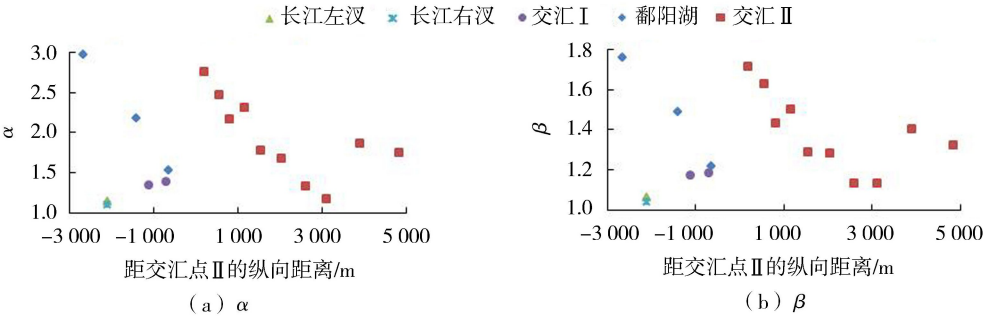


图 8 α 、 β 的沿程变化
Fig. 8 Streamwise variations of α and β

α 、 β 沿程变化可反映两股水流的掺混过程。水流交汇后 α 、 β 值突然增大(图 8),反映了两股水流在交汇处水流流速的差异,但随着两流掺混,断面流速逐渐趋于均匀, α 、 β 值恢复到某一低值。此时,两流掺混完全,该值只与河道和断面形态有关。在长江与鄱阳湖交汇处,由 α 、 β 得到的完全掺混距离为 2.6 km,与 2.2 节流速场的结果是一致的。

2.5 床面切应力分布

河道床面切应力是反映河床冲淤变形的重要参数。Wilcock^[22] 提出基于垂线平均流速和泥沙粒径参数的床面切应力公式如下:

$$\tau_0 = \rho \left(\frac{U}{C_{zs}} \right)^2 \tag{2}$$

其中

$$C_{zs} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(11 \frac{H}{k_s} \right)$$

式中： τ_0 ——床面切应力； U ——垂线平均流速； C_{zs} ——谢才系数^[23]； κ ——卡门系数，取值0.41； H ——水深； k_s ——与床沙颗粒相关的粗糙高度， $k_s=2.5D_{50}$ ； D_{50} ——床沙的中值粒径。

由式(2)计算得到所有测量断面的床面切应力后，由Surfer Demo 11 软件进行克里金插值，得到整个交汇处的床面切应力分布(图9)。床面切应力的分布与流速分布(图5)是基本一致的。鄱阳湖出口段床面切应力约为0.5 Pa，主槽航道床面切应力较浅滩略大。长江左汉的床面切应力可达2.0 Pa，大于右汉的床面切应力。交汇后长江侧的床面切应力大于鄱阳湖侧，直至断面A6(图9中黑色虚线)床面切应力在断面上分布趋于均匀。之后因为河宽减小，流速增大，相应床面切应力增大至3.0 Pa。

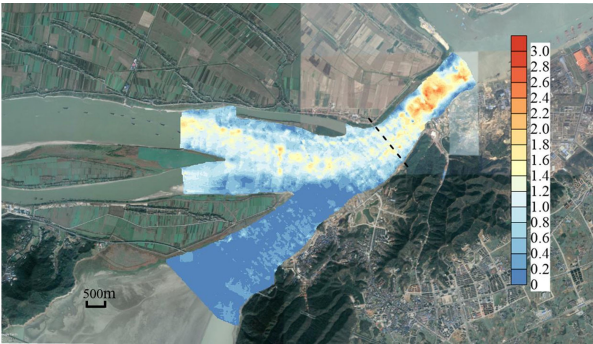


图9 测量区域床面切应力分布(单位:Pa)
Fig.9 Contour of bed shear stress in the measure site (units: Pa)

3 结 语

长江经官洲分流后的交汇由于流速相近、河床高差不同等原因掺混迅速，而长江与鄱阳湖的交汇在交汇处下游2.6 km 才能实现完全掺混。长江-鄱阳湖交汇后出现一对反向的螺旋流，水流在近水面相汇、在近河床分开。螺旋流沿程向垂向和横向扩展，环流强度由0.6 降低至0.1，而最后2 个测量断面由于宽深比减小以及码头等地形影响下出现单向螺旋流，环流强度低于0.1。通过动能校正系数 α 和动量校正系数 β 的计算，发现2 个参数可以定量反映两汉水流的掺混程度，掺混越完全，断面流速分布越均匀，参数值越趋近于1。长江-鄱阳湖掺混完全时， α 、 β 分别约为1.3 和1.15。两流交汇不仅发生能量和动量掺混，同时也伴随着水质的掺混，显示水质掺混过程以及完全掺混距离因参数而异。结合水质参数分布，发现水温、电导率和悬沙浓度较其他水质参数更能反映两汉的掺混程度。经过计算获得河道床面切应力的分布与流速分布基本一致，交汇下游段出现最大床面切应力为3.0 Pa。研究结果为认识长江、鄱阳湖物质输移、水质变化、河床冲淤演变等提供数据支撑。

参考文献:

[1] BEST J L, REID I. Separation zone at open-channel junctions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110(11): 1588-1594.

[2] BEST J L. Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology[J]. Special Publications, 1987, 39: 27-35.

[3] YANG Qingyuan, WANG Xianye, LU Weizhen, et al. Experimental study on characteristics of separation zone in confluence zones in rivers[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(2): 166-171.

[4] YUAN Saiyu, TANG Hongwu, XIAO Yang, et al. Turbulent flow structure at a 90-degree open channel confluence: accounting for the distortion of the shear layer[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2016, 12: 130-147.

[5] YUAN Saiyu, TANG Hongwu, XIAO Yang, et al. Water flow and sediment transport at open-channel confluences: an experimental study[J]. Journal of Hydraulic Research, 2018, 56(3): 333-350.

[6] TANG Hongwu, ZHANG Huiming, YUAN Saiyu. Hydrodynamics and contaminant transport on a degraded bed at a 90-degree channel confluence[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2018, 18(2): 443-463.

[7] 林青伟, 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 Qingwei, TANG Hongwu, YUAN Saiyu, et al. Study on vortex structure at river confluence[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4): 352-358. (in Chinese))

[8] YUAN Saiyu, TANG Hongwu, XIAO Yang, et al. Phosphorus contamination of the surface sediment at a river confluence[J]. Journal of Hydrology, 2019, 573: 568-580.

[9] RHOADS B L, SUKHODOLOV A N. Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences: 1. thermal mixing and time-averaged velocities[J]. Water Resources Research, 2001, 37(9): 2393-2410.

[10] RHOADS B L, SUKHODOLOV A N. Lateral momentum flux and the spatial evolution of flow within a confluence mixing interface[J]. Water Resources Research, 2008, 44(8): 134-143.

[11] RHOADS B L, RILEY J D, MAYER D R. Response of bed morphology and bed material texture to hydrological conditions at an asymmetrical stream confluence[J]. Geomorphology, 2009, 109(3/4): 161-173.

[12] DE SERRES B, ROY A G, BIRON P M, et al. Three-dimensional structure of flow at a confluence of river channels with discordant beds[J]. Geomorphology, 1999, 26(4): 313-335.

[13] 饶西平. ADCP 测流与传统测流的对比及应用[J]. 科技资讯, 2012, 9(6): 96. (RAO Xiping. Comparison and application of ADCP flow measurement and traditional flow measurement[J]. Science & Technology Information, 2012, 9(6): 96. (in Chinese))

[14] ROZOVSKII I L. Flow of water in bends of open channels[M]. Kyiv:Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1957.

[15] 杨国禄, 王运辉. 实测悬移质级配及分组含沙量修正问题[J]. 武汉水利电力学院学报, 1984 (4): 115-129. (YANG Guolu, WANG Yunhui. On the error modification in measurement of the grain composition and the graded concentration of suspended-sediment[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 1984(4): 115-129. (in Chinese))

[16] CHENG Zhengyang, CONSTANTINESCU G. Stratification effects on flow hydrodynamics and mixing at a confluence with a highly discordant bed and a relatively low velocity ratio[J]. Water Resources Research, 2018, 54(7): 4537-4562.

[17] RHOADS B L, KENWORTHY S T. Time-averaged flow structure in the central region of a stream confluence[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(2): 171-191.

[18] LANE S N, PARSONS D R, BEST J L, et al. Causes of rapid mixing at a junction of two large rivers: Rio Parana and Rio Paraguay, Argentina[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(F2): F02019.

[19] 张红武, 吕昕. 弯道水力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993: 70-71.

[20] 罗光兰, 章应耕. 非恒定流动能与加速比降对流量计算的影响分析[J]. 水文, 1994, 14(3): 33-37. (LUO Guanglan, ZHANG Yinggeng. Analysis of the influence of unsteady flow energy and acceleration ratio on flow calculation[J]. Journal of China Hydrology, 1994, 14(3): 33-37. (in Chinese))

[21] 杨玉阁, 陈祖辉, 赵庆生. 天然河道水流动能校正系数的分析与应用[J]. 东北水利水电, 2010, 28(9): 39-40. (YANG Yuge, CHEN Zuhui, ZHAO Qingsheng. Analysis and application of kinetic energy correction coefficient for water flow of natural rive[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2010, 28(9): 39-40. (in Chinese))

[22] WILCOCK P R. Estimating local bed shear stress from velocity observations[J]. Water Resources Research, 1996, 32(11): 3361-3336.

[23] VAN RIJN L C. Sediment transport, part I: bed load transport[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110(10): 1431-1456.

(收稿日期:2019 - 07 - 24 编辑:刘晓艳)