

三峡库区梅溪河河口干支流界面水流特征

王洪波¹, 邓兵¹, 汪福顺², 罗光富¹

(1. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062; 2. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444)

摘要:通过对三峡库区中部典型支流梅溪河库湾水动力参数及水体温度、浊度数据进行分析, 研究水库运行各时期梅溪河河口干支流界面水流特性, 探讨其影响因素以及水交换对库湾的影响。结果表明: 梅溪河河口双向水流特征明显, 在温差异重流、干流惯性作用以及库区水位变动等因素影响下, 干支流界面水流强度、进出水体间界面结构及形态在不同运行期有显著差异; 由于双向水流结构的存在, 尽管梅溪河河口干支流界面净流量较小(多小于 $100\text{ m}^3/\text{s}$), 但是干流水体的交换量相对显著, 介于 $314.17\sim 535.26\text{ m}^3/\text{s}$ 之间, 可达净流量的 $4\sim 40$ 倍; 在净流量最小的低水位运行期, 干流倒灌水体基本能到达支流库湾常年回水区的末端。

关键词: 支流河口; 库湾; 水交换; 异重流; 环境影响; 梅溪河; 三峡库区

中图分类号: TV697

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2017)03-0042-07

Characteristics of flow at interface between Yangtze River and Meixi River in Three Gorges Reservoir area// WANG Hongbo¹, DENG Bing¹, WANG Fushun², LUO Guangfu¹ (1. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China*; 2. *School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

Abstract: Based on analyses of the hydrodynamic parameters, turbidity, and temperature of water in the bay of the Meixi River, a typical tributary in the middle area of the Three Gorges Reservoir area, the characteristics of flow at the interface between the mainstream and the tributary during different operation stages of the Three Gorges Reservoir were investigated, and the factors influencing the flow characteristics and the influence of water exchange on the bay are discussed. The results show that the flow is bidirectional in the Meixi Estuary. Driven by the thermal density flow, the inertia of mainstream flow, and changes in the reservoir water level, the flow intensity at the interface and the structure and pattern of the interface between the inflow and outflow differed in different operation stages. The net flux is low (mostly below $100\text{ m}^3/\text{s}$), while the water exchange volume (from 314.17 to $535.26\text{ m}^3/\text{s}$, about 4 to 40 times the net flux) is relatively large at the interface in the Meixi River Estuary because of the bidirectional flow. The mainstream inflow could reach the end of the perennial backwater zone even during the low-water level stage with minimum net flux.

Key words: tributary estuary; bay; water exchange; density current; environmental impact; Meixi River; Three Gorges Reservoir

江河筑坝在水电、航运、防汛、灌溉等多方面为社会经济带来效益^[1], 但同时大坝拦截破坏了河流的连续性, 使河流原有的水文、水动力特征发生改变^[2-3], 从而影响河流生源要素的循环及其输送^[4-6], 甚至引起河流水生生态系统的结构、功能调整^[7-8]。三峡大坝是位于长江上游的世界级水利工程, 它的建成及运行使三峡库区成为人工调蓄的河道型水库。自蓄水以来, 库区干流的自然河流特征明显^[9], 紊流作用仍较强, 水质持续改善^[1]; 而在干流顶托影响下, 库区大小支流形成库湾回水区, 近年

来出现富营养化趋势, 藻类优势种由河流型向湖泊型演变^[10]。库区干流水环境的异化表明, 三峡库区以表层生产力为代表的生源要素循环可能主要发生在众多的支流库湾里, 究其主因在于水动力条件的改变^[11-12]。故干流与支流库湾水交换的研究是认识库区水环境变化的关键。已有支流库湾水动力特征的研究发现, 干流水体间密度差异导致异重流的产生, 而干流水体以倒灌异重流的形式进入库湾与支流水体进行水交换, 使得库湾水动力在垂向上具有分层异向流动特征^[13-15]。本文基于2012年

基金项目: 国家自然科学基金(41271519); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07104-001)

作者简介: 王洪波(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事沉积地球化学研究。E-mail: wanghongbocq@sina.cn

通信作者: 邓兵(1975—), 男, 副教授, 博士, 主要从事沉积地球化学研究。E-mail: dengbing@sklec.ecnu.edu.cn

8月至2013年7月采用声学多普勒流速剖面仪对库区典型支流梅溪河库湾重点断面(河口区和常年回水区)上的水动力参数以及干流水温、浊度进行的逐月测量的数据分析,从水文角度揭示水库不同运行水位条件下的梅溪河河口界面水流特征,并定量估算出各时期的水交换通量,探讨界面水交换的影响因素,以期对干流水体物质交换的进一步研究提供参考。

1 基础数据观测

1.1 研究区概况

梅溪河位于三峡库区常年回水区中部,是长江北岸的一级库区支流,发源于重庆市巫溪县,在奉节县永安镇由北向南注入长江,三峡蓄水后在距河口21 km范围内形成常年回水区^[16]。梅溪河干流全长约161 km(奉节县境内长103 km),流域面积2001 km²,多年平均流量39.60 m³/s,枯水期平均流量15.03 m³/s^[17-18]。梅溪河上游落差大,河谷狭窄,植被覆盖率高;中下游河谷较宽,两岸有河谷带阶地分布;河口两岸峭壁林立。

1.2 观测方式

自梅溪河河口向上,共设置河口、下游(库湾常年回水区中部)、中游(库湾常年回水区末端)3个采样断面,编号依次为MX01、MX02、MX03;在长江干流梅溪河河口上、下游适当位置分别设置CJ01、CJ02断面,断面分布见图1。

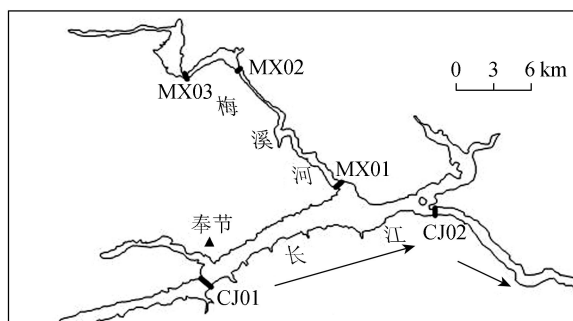


图1 研究区域及站位分布

于2012年8月至2013年7月对梅溪河库湾回水区及长江干流各断面进行逐月现场观测,主要监测指标包括水动力参数(流速和流向)、水深、水温、浊度等。

采用美国Campbell光学后向散射浊度计(浊度测量精度±0.1 NTU;测温范围0~35℃,精度±0.01℃)在支流各断面中泓线处由表至底每隔5 m测量水温、浊度;由于干流水体垂向混合均匀,物理化学参数的垂向差异小^[9],故干流只进行表层水温、浊度观测。梅溪河汇入处的干流水温、浊度由CJ01与CJ02断面的测量数据通过插值计算得出。干流水位、流量等水情信息从中国长江三峡集团公

司获取。

采用美国Teledyne RDI“骏马”系列300 kHz声学多普勒流速剖面仪(ADCP,其最大测流水深180 m,流速测量范围±5 m/s,精度±0.005 m/s)对于支流各断面进行走航测流,得到各断面流速、水深与断面宽度。由于梅溪河河口流速小、断面面积大,在计算断面流量时忽略ADCP测流中两岸浅水区域以及断面表底层盲区的流量值,认为实测流量即为断面总流量:

$$Q_{\text{总}} = Q_{\text{实测}} = \sum_{i=1}^m Q_i = \sum_{i=1}^m V_i S_i \quad (1)$$

式中: m 为河口断面的积分断面数; V_i 为第 i 个积分断面的法向流速; S_i 为第 i 个积分断面的面积。根据GB 50179—1993《河流流量测验规范》, V_i 可由以下公式求得:

$$V_i = V_{\text{实测}} \cos \theta \quad (2)$$

式中: $V_{\text{实测}}$ 为实测流速大小; θ 为流向与积分断面法线方向(指向干流)的夹角。根据 V_i 的符号,将积分断面分为流出($V_i \geq 0$)和倒灌($V_i < 0$)两类。

采用ADCP对河流横断面进行走航测量的方法近年来已在水文系统中推广普及,该方法与以往的点式流速仪测量相比,能够提供更精细的断面水流特征。

2 梅溪河河口干支流界面水流特征

从2012年8月到2013年7月的梅溪河河口断面流速分布图(图2)可看出,双向水流结构明显,进出水流的相对位置、进出水体间界面结构和形态在

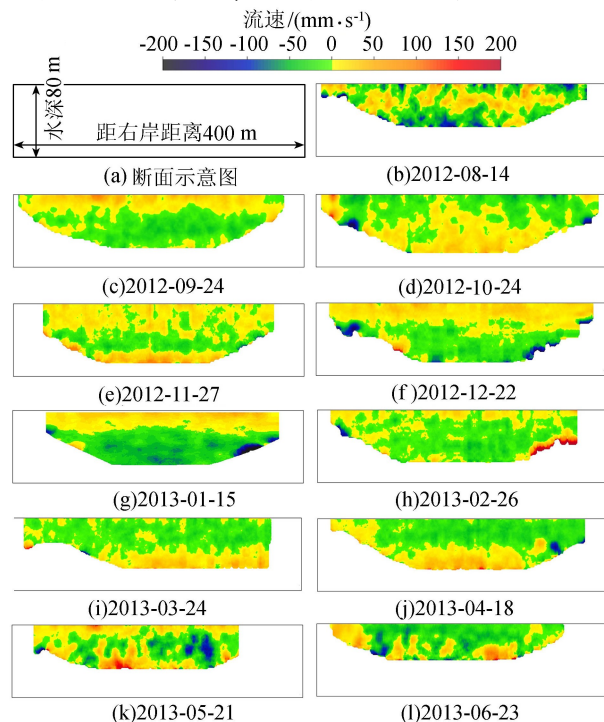


图2 梅溪河河口断面(MX01断面)水体流速分布

不同运行期各有差异。

总体上看(图3(e)),梅溪河河口断面进出水流平均流速大多集中在0.1 m/s以内,消落后期、低水位运行期流速明显大于其他时期,倒灌水流平均流速最大为0.112 m/s(2013年6月23日),最小为0.064 m/s(2012年11月27日);流出水流平均流速最大为0.106 m/s(2013年5月21日),最小为0.062 m/s(2013年3月24日)。此外梅溪河河口断面的净流量大多低于100 m³/s(图3(d)),而其有效交换量相对显著,介于314.17~535.26 m³/s之间,为净流量的4~40倍。

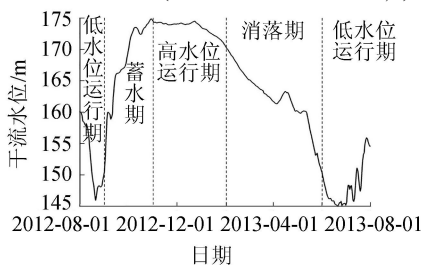
高水位运行期(11月至次年1月),三峡水库以175 m左右高水位运行(图3(a)),水位日变化小(图3(b))。这一时期河口断面(MX01)水深最大,约65 m,断面两侧水体双向交换特征明显,进出水体间界限清晰(图2(f)(g)),呈上下分层结构,干流水体主要从下层倒灌进入支流库湾,平均流速在-0.064~-0.074 m/s之间,流量为-385.56~-459.26 m³/s;库湾水体从上层流出,平均流速在0.067~0.071 m/s之间,流量为410.51~535.26 m³/s。断面净流量变化大,在-48.75~149.7 m³/s间,为水体交换量的10%~25%。

消落期(2—5月),干流水位降低(图3(a)),水位日变化的时间差异显著,2—4月日均降幅为0.11 m,5月的日均降幅达0.33 m(图3(b))。消落前期,干流水位由170 m降至160 m的同时,MX01最大水深降至55 m左右(图2(h)(i)(j)),河口水流特征与高水位运行期相似,进出水体上下分层结构明显(图2(i)(j)),平均流速值较小(0.062~0.073 m/s),

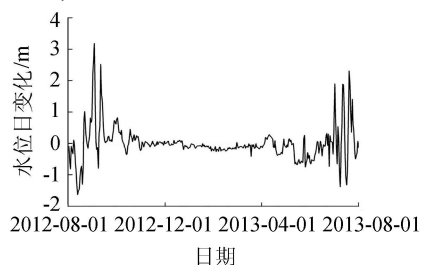
净流量变化不大,且水体交换量减小。缓慢的流速与减弱的水交换可能提供了该时期支流库湾“水华”产生的水动力条件^[19]。消落后期,MX01断面最大水深陡降至45 m左右(图2(k)),双向水流稳定的分层结构破坏,进出水流交错分布;水位下降使顶托作用减弱^[20],进出水流流速显著增大,平均流速分别达到-0.111 m/s和0.106 m/s,高速倒灌水体大部分集中在中层,倒灌流量达到全年最大值498.62 m³/s(图3(d)),高速流出水团基本占据着底层,流出量为456.42 m³/s(图3(d))。

低水位运行期(6—8月)水位在145~155 m之间(图3(a)),水位日变化大(图3(b))。这一时期MX01断面最大水深在40~50 m频繁变动,双向水流结构与消落后期类似,进出水体相对位置变化频繁(图2(b)(1));流速变化较大,平均流速值在0.082~0.112 m/s之间(图3(e));由于水位急剧变动导致河口过水断面面积改变,水体双向交换量变化大,介于333.66~485.2 m³/s之间(图3(d))。

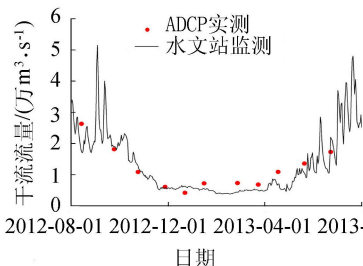
蓄水期(9—10月)水位上升(图3(a)),水位日变化仅次于低水位运行期。MX01断面最大水深从45 m增至约60 m,双向水流整体呈现上下分层结构,进出水流的时空差异显著,前期倒灌水流主要集中在断面中下层,后期则主要分布于断面上层,进出水流交错(图2(c)(d))。随着水位的抬升,顶托作用增强,进出水流流速减小,流出平均流速为0.068~0.069 m/s,倒灌平均流速为-0.066~-0.071 m/s(图3(e));水体有效交换量增大,倒灌量在-386.29~-477.26 m³/s,流出量在394.08~462.74 m³/s;净流量变化小,在-14.52~7.79 m³/s间变动,双向交换



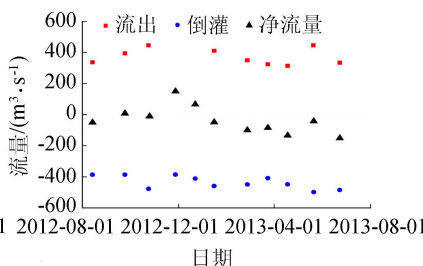
(a) 干流水位变化



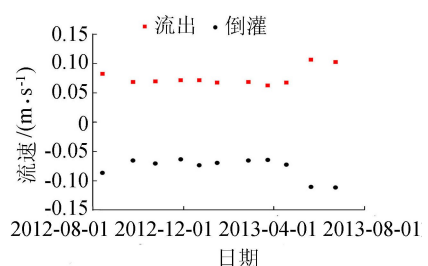
(b) 干流水位日变化



(c) 水文站监测与ADCP实测干流流量对比



(d) 梅溪河河口断面进出水体流量与净流量



(e) 梅溪河河口断面进出水体平均流速

图3 干流水位、流量变化以及梅溪河河口断面进出流速流量统计结果

流量是净流量的 30 ~ 40 倍。

3 梅溪河河口断面水交换的影响因素

梅溪河河口断面进出水流强度、进出水流间界面结构及形态的季节差异显著,影响因素复杂。结合野外实测数据及研究区域的基本特征分析得知,温差异重流、干流水体惯性作用和库区水位变化是梅溪河河口断面水交换特征的主要影响因素。

2013 年 4 月,梅溪河河口上下分层的双向水流结构特征明显,库湾水体由底部流出,而干流水体从表层倒灌,进出水体间界限清晰(图 2(j)),同时库湾水体温度分层显著,表底水温分别为 19.62℃ 和 16.28℃,长江干流水温介于两者之间,为 17.18℃(图 4),以上界面水流特征为典型的温差异重流影响特征。同样的现象在 2013 年 3 月也存在(图 2(i)),说明这一时期梅溪河河口水流特征形成的驱动因素以温差为主。温度低密度大的库湾底层水体,形成顺坡流从梅溪河河口底层流出,同时干流水体形成反方向的补偿流从表层倒灌。由于库湾水温分层产生的密度梯度使水体的垂向交换受到限制,干支流温差形成的异重流^[21]侵入库湾后受阻,其垂向扩散减弱^[22],梅溪河河口干支流界面呈现稳定的上下分层结构,进出水体间界面近水平分布且界限清晰(图 2(i)(j)),进出水流强度小,流速分别为 -0.073 m/s 和 0.067 m/s(2013 年 4 月,图 3(e))。这种由干支流水温差异驱动引起的温差异重流在三峡库区香溪河、朱衣河以及大宁河等支流库湾也有发现^[15,23-24],消落前期,干流水体表层倒灌进入库湾,平均流速分别为:香溪河 -0.05 m/s^[15]、朱衣河 -0.061 m/s^[23]、大宁河 -0.055 m/s^[24],干支流界面水流强度及结构特征与梅溪河河口相似。

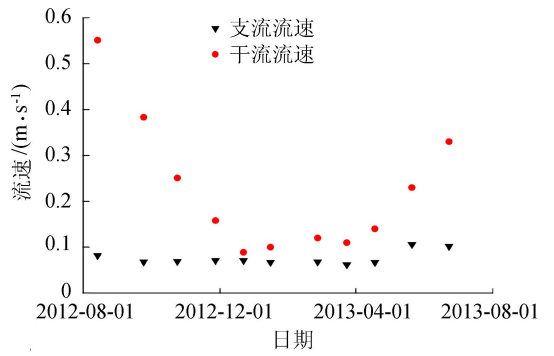


图 5 梅溪河河口干支流流速变化

达 3 ~ 6 倍,以低水位运行期为例,2013 年 6 月平均流速达到 0.33 m/s 的干流水体在惯性驱动下,向支流回水阻力较小的区域倒灌进入库湾,库湾水体在来水挤压下流向干流,进出水流强度较其他时期显著增强,平均流速分别达到 -0.112 m/s 和 0.102 m/s(图 3(e));高速水体惯性倒灌引起梅溪河河口强烈的紊动掺混,其力度远远超过了水体的垂向扩散阻力,因此在其影响下河口上下分层结构被破坏,进出水体水流交错且向倒灌一侧发生倾斜(图 2(b)(k)(1)),可见干流高速水体的惯性倒灌也是影响梅溪河河口水交换的重要因素。这种由干流惯性倒灌引起的河口水交换的现象在库区朱衣河河口也有发现^[23]。低水位运行期,朱衣河河口进出水体呈左右分布,干流水体主要沿河口左岸倒灌,平均流速为 -0.09 m/s^[23];不同规模的梅溪河河口,在干流水体惯性倒灌影响下,水流强度有所增强,水流形态呈现差异。

蓄水期的干流流速较大,但梅溪河河口上下分层结构却较稳定(图 2(c)(d)),河口水流流速较小(介于 0.066 ~ 0.071 m/s 之间),说明这一时期干流惯性倒灌可能并非是梅溪河河口水交换的主要影响因素。该时期库区水位变动较大,日均变幅达 0.45 m(图 3(b)),干流水位的急剧上涨引起干支流水面相对高度差的形成,高度差产生压强梯度力驱使表层水体从干流一侧向库湾一侧流动,同时温差异重流的存在,使底层低温水体沿支流河道流出库湾,进出水体平均流速分别为 -0.071 m/s 和 0.069 m/s(图 3(e));库区水位变动引起表层水体紊流掺混,在温差异重流的叠加影响下,梅溪河河口上下分层明显,进出水体水流交错(图 2(d))。水位变动影响下的干支流界面水交换在朱衣河河口同样存在^[23],测得蓄水期河口进出水体平均流速为 -0.063 m/s 和 0.064 m/s,上下分层异向流动特征明显^[23]。

除了上述影响因素以外,梅溪河河口水交换还会受到其他因素的影响。比如高水位运行期,梅溪河河口水流强度、进出水体水流分布形态与消落前期类似,但相对位置却完全相反,并非温差异重流影

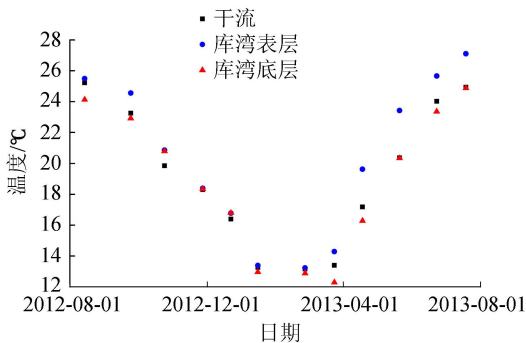


图 4 梅溪河库湾与长江干流水温对比

消落后期和低水位运行期的干支流温差同样显著,但梅溪河河口上下分层结构破坏,进出水体间水流交错(图 2(b)(k)(1)),说明水交换进程可能并非只受温差异重流影响。这一阶段干流流速大(平均流速超过 0.3 m/s,图 5),干支流之间流速差异可

响特征,同样的现象在高水位运行期时的大宁河、朱衣河河口也有发现^[23-24],究其原因可能与冬季持续北风的影响有关。这一时期,干流流速小、水位变动小、干支流水温差异小,在冬季持续的顺河谷北风的影响下,表层水体顺风向从库湾一侧流向干流一侧,而干流水体则为补偿流从底层倒灌(图2(f)(g))。可见库区梅溪河河口界面水交换影响因素复杂,仍有待更深入的研究和探讨。

4 干流倒灌对梅溪河库湾水环境的影响

在温差异重流、干流惯性倒灌、水位变动等因素驱动下,梅溪河河口界面上的干支流水交换在不同水位运行期下持续进行。由于双向水流结构的存在,河口干支流界面水体的交换量可达 314.17 ~ 535.26 m³/s,远远高于净流量。在如此高的水交换强度下,干流倒灌所能影响的库湾范围及其深度对于认识干支流水交换对库湾水环境的影响有重要意义。

在洪季,干流水体的浊度差异显著,干流浊度高达 145.0 NTU,而梅溪河上游浊度只有 12.5 NTU,随着流速的减慢,水体中泥沙沉降引起浊度值降低。以低水位运行期的 2012 年 8 月为例,干流水体浊度为 123.5 NTU(图 6),在干流惯性倒灌作用下,携带着大量泥沙的高浊度干流水体从河口进入库湾,倒灌过程中由于受到库湾水体的顶托,流速明显放缓,同时颗粒物沉降,浊度由河口向库湾内部递减,呈现明显的“舌状”分布(图 7),在库湾常年回水区末端

(MX03 断面)观察到有少量较高浊度的倒灌水体分布(图 7 和图 8(b)),即使干支流水交换量处于最小的低水位运行期时,倒灌的高浊度干流水体也能到达库湾常年回水区末端。在其他水位运行期下,干流水体对库湾的影响范围不亚于低水位运行期。已有研究发现,草堂河支流回水区营养盐浓度随时间的变化趋势与干流高度一致,而与支流源头变化相差很大^[25-26],表明干流水体对支流库湾的影响相当显著。通过梅溪河河口界面的干支流水交换,干流水体倒灌进入支流库湾回水区,同时将大量生源要素带入库湾^[14],这些生源要素参与到库湾的生物地球化学循环过程,对库湾水环境产生影响。而在库区众多支流库湾回水区中,干支流水交换广泛存在,这对于库湾水环境的影响值得更深入的探讨。

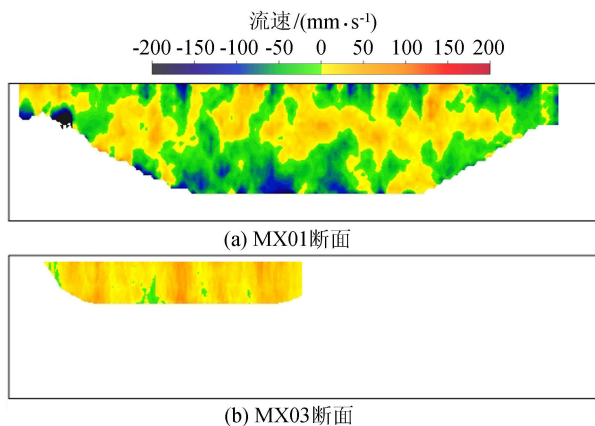


图 8 低水位运行期梅溪河河口界面、回水区末端流速分布

5 结论

a. 作为三峡库区中部典型支流的梅溪河,其河口界面双向水流特征明显,在温差异重流、干流惯性作用以及库区水位变动等因素影响下,水流强度、进出水体间界面结构及形态在不同运行期差异显著。受典型温差异重流影响的时期,梅溪河河口水流强度小,进出水体间界限清晰;低水位运行期,干流惯性倒灌引起水体紊乱掺混,水流强度大,梅溪河河口水流结构被破坏,进出水流交错;蓄水期,受水位变动和温差异重流叠加影响,梅溪河河口界面水流强度小,进出水流交错分布。此外梅溪河河口界面水交换还会受到其他多重因素的影响(比如冬季北风),具体机理仍有待探究。

b. 在水库不同水位运行期,由于梅溪河河口双向水流结构的存在,尽管其净流量大小普遍偏小(大多低于 100 m³/s),但水体交换量相对显著(介于 314.17 ~ 535.26 m³/s 之间),可达净流量的 4 ~ 40 倍。

c. 即使水库处于梅溪河河口界面净流量最小

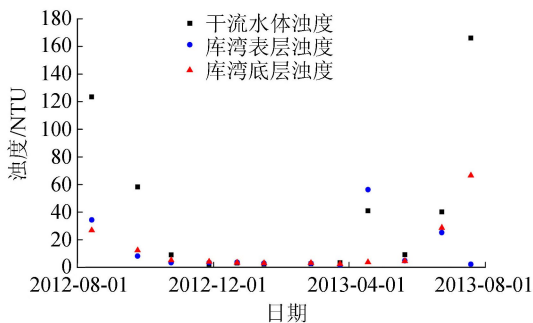


图 6 干支流浊度变化

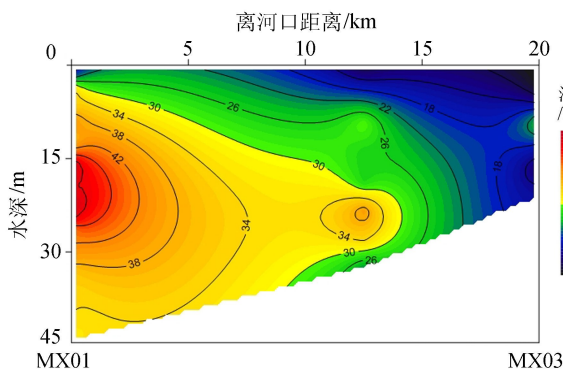


图 7 低水位运行期梅溪河库湾浊度分布(纵剖面)

的低水位运行期,倒灌的干流水体也能到达库湾常年回水区末端。

参考文献:

- [1] 国家环境保护总局. 长江三峡工程生态与环境监测公报[R]. 北京:国家环境保护总局,2013.
- [2] 吴挺峰,高光,晁建颖,等. 基于流域富营养化模型的水库水华主要诱发因素及防治对策[J]. 水利学报,2009,40(4):391-397 (WU Tingfeng, GAO Guang, CHAO Jianying, et al. Analysis on factors inducing algal bloom in reservoir based on basin eutrophication model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(4): 391-397. (in Chinese)).
- [3] KAWARA O, YURA E, FUJII S, et al. A study on the role of hydraulic retention time in eutrophication of the Asahi River Dam Reservoir[J]. Water Science and Technology, 1998,37(2): 245-252.
- [4] FRIEDL G, WÜEST A. Disrupting biogeochemical cycles-Consequences of damming[J]. Aquatic Sciences,2002,64(1): 55-65.
- [5] WANG F, YU Y, LIU C, et al. Dissolved silicate retention and transport in cascade reservoirs in karst area, Southwest China[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(7):1667-1675.
- [6] 冉祥滨,姚庆祯,巩瑶,等. 蓄水前后三峡水库营养盐收支计算[J]. 水生态学杂志,2009,2(2):1-8. (RAN Xiangbin, YAO Qingzhen, GONG Yao, et al. Nutrient budget of Three Gorges Reservoir pre-and-post impoundment[J]. Journal of Hydroecology,2009,2(2):1-8. (in Chinese))
- [7] 刘丛强,汪福顺,王雨春,等. 河流筑坝拦截的水环境影响:来自地球化学的视角[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(4):384-396. (LIU Congqiang, WANG Fushun, WANG Yuchun, et al. Responses of aquatic environment to river damming:from the geochemical view[J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 2009, 18(4): 384-396. (in Chinese))
- [8] RAYMOND M, DONG C Z. Diversity of microbial plankton across the Three Gorges Dam of the Yangtze River, China [J]. Geoscience Frontiers,2012,3(3):335-349.
- [9] 吴起鑫,韩贵琳,唐杨. 三峡水库坝前水体水化学及溶解无机碳时空分布特征[J]. 环境科学学报,2012,32(3): 654-661. (WU Qixin, Han Guilin, TANG Yang. Temporal and spatial variation of water chemistry and dissolved inorganic carbon isotope characterization in Three Gorges Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2012,32(3): 654-661. (in Chinese))
- [10] 张远,郑丙辉,刘鸿亮. 三峡水库蓄水后的浮游植物特征变化及影响因素[J]. 长江流域资源与环境,2006,15(2): 254-258. (ZHANG Yuan, ZHENG Binghui, LIU
- Hongliang. Characteristics of phytoplankton composition with analysis of its impact factors after impounding of the Three Gorges Reservoir [J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 2006, 15(2): 254-258. (in Chinese))
- [11] 杨正健,刘德富,纪道斌,等. 三峡水库 172.5 m 蓄水过程对香溪河库湾水体富营养化的影响[J]. 中国科学:技术科学,2010,40(4):358-369. (YANG Zhengjian, LIU Defu, JI Daobin, et al. Influence of the impounding process of the Three Gorges Reservoir up to water level 172.5 m on water eutrophication in the Xiangxi Bay [J]. Science China: Technological Sciences, 2010, 40(4): 358-369. (in Chinese))
- [12] 曾辉,宋立荣,于志刚,等. 三峡水库“水华”成因初探[J]. 长江流域资源与环境,2007,16(3): 336-339. (ZHENG Hui, SONG Lirong, YU Zhigang, et al. Preliminary study on algal blooms within the Three Gorges Reservoir [J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 2007, 16(3): 336-339. (in Chinese))
- [13] 吉小盼,刘德富,黄钰铃,等. 三峡水库泄水期香溪河库湾营养盐动态及干流逆向影响[J]. 环境工程学报,2010,4(12):2687-2693. (JI Xiaopan, LIU Defu, HUANG Yuling, et al. Dynamic characteristics of nutrients in Xiangxi Bay and converse impact from mainstream in drainage period of the Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(12):2687-2693. (in Chinese))
- [14] 纪道斌,刘德富,杨正健,等. 汛末蓄水期香溪河库湾倒灌异重流现象及其对水华的影响[J]. 水利学报,2010,41(6): 691-696. (JI Daobin, LIU Defu, YANG Zhengjian, et al. Adverse slope density flow and its ecological effect on the algae bloom in Xiangxi Bay of TGR during the reservoir impounding at the end of flood season [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(6):691-696. (in Chinese))
- [15] 纪道斌,刘德富,杨正健,等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2010,40(1): 101-112. (JI Daobin, LIU Defu, YANG Zhengjian, et al. Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir [J]. Science in China: Physica, Mechanica & Astronomica, 2010, 40(1): 101-112. (in Chinese))
- [16] 王军,杨斌,陈明栋,等. 重庆梅溪河特大桥梁通航净空尺度和技术要求论证[J]. 中国水运(学术版),2006,6(4):36-38. (WANG Jun, YANG Bin, CHEN Mingdong, et al. The navigation clearance and technique requirements of the Meixi Bridge in Chongqing [J]. China Water Transport (Academic Version), 2006, 6(4): 36-38. (in Chinese))
- [17] 郭平,龚宇,李永建,等. 三峡水库 135 m 水位蓄水典型次级河流回水段富营养化监测评价[J]. 中国环境监测,2005,21(2): 88-89. (GUO Ping, GONG Yu, LI

- Yongjian, et al. Eutrophic investigation and assessment on backwater reaches of several typical branches of Three Gorges Reservoir at 135 m water level [J]. Environmental Monitoring in China, 2005, 21(2): 88-89. (in Chinese))
- [18] 童思陈, 许光祥, 文传平. 三峡库区支流航道技术等级定级及其应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(6): 1112-1117. (TONG Sichen, XU Guangxiang, WEN Chuanping. Preliminary study and its application of navigation grading standard planning of the tributary channel in TGP Reservoir area [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2009, 28(6): 1112-1117. (in Chinese))
- [19] 刘玉洁, 尹真真. 三峡水库支流回水区富营养化时空分布特征[J]. 环境保护科学, 2014, 40(2): 30-34. (LIU Yujie, YIN Zhenzhen. Space-time distribution of eutrophication in backwater zones of branch rivers in Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Protection Science, 2014, 40(2): 30-34. (in Chinese))
- [20] 闫涛, 陈立, 徐敏, 等. 库区交汇河段水动力特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 60-65. (YAN Tao, CHEN Li, XU Min, et al. Experimental study of hydrodynamic characteristics at confluence reach in reservoir area [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(1): 60-65. (in Chinese))
- [21] 解云海, 张金良, 郝振纯, 等. 水库异重流研究综述[J]. 人民黄河, 2008, 30(5): 28-31. (XIE Hehai, ZHANG Jinliang, HAO Zhengchun, et al. Summary of research on density current in reservoir [J]. Yellow River, 2008, 30(5): 28-31. (in Chinese))
- [22] 姚志坚, 张小峰, 陆俊卿. 温度分层环境下的水库异重流试验研究[J]. 人民长江, 2011, 42(13): 51-55. (YAO Zhijian, ZHANG Xiaofeng, LU Junqing. Laboratory investigation on density currents in temperature stratified reservoirs [J]. Yangtze River, 2011, 42(13): 51-55. (in Chinese))
- [23] 周子然, 邓兵, 王雨春, 等. 三峡库区干支流水体交换特征初步研究: 以朱衣河为例[J]. 人民长江, 2015, 46(22): 1-6. (ZHOU Ziran, DENG Bing, WANG Yuchun, et al. Preliminary study on characteristics of water exchange between mainstream and tributaries in Three Gorges Reservoir area: case of Zhuyi River [J]. Yangtze River, 2015, 46(22): 1-6. (in Chinese))
- [24] 熊超军. 三峡水库大宁河库湾分层异重流及其水环境效应研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2013.
- [25] 操满, 傅家楠, 周子然, 等. 三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换: 以梅溪河为例[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1293-1300. (CAO Man, FU Jianan, ZHOU Ziran, et al. Nutrient exchange between Meixi River and Yangtze River due to the typical interaction process of the Three Gorges Reservoir and its tributary [J]. Environmental Science, 2015, 36(4): 1293-1300. (in Chinese))
- [26] 罗光富. 梅溪河河口水动力作用对三峡库区干支流营养盐交换的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
(收稿日期: 2016-02-22 编辑: 郑孝宇)

(上接第 34 页)

- [27] 史培军. 四论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 1-7. (SHI Peijun. Theory and practice on disaster system research in a fourth time [J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(6): 1-7. (in Chinese))
- [28] 王兆礼, 赖成光, 陈晓宏. 基于熵权的洪灾风险空间模糊综合评价模型[J]. 水力发电学报, 2012, 21(5): 35-40. (WANG Zhaoli, LAI Chengguang, Chen Xiaohong. Spatially fuzzy comprehensive assessment model for flood hazard risk based on entropy weight [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 21(5): 35-40. (in Chinese))
- [29] 龚艳冰, 张继国. 基于正态云模型和熵权的人口发展现代化程度综合评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(1): 138-143. (GONG Yanbing, ZHANG Jiguo. Comprehensive assessment on population development degree of modernization based on normal cloud model and entropy weight [J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(1): 138-143. (in Chinese))
- [30] 孙鸿鹄, 程先富, 倪玲, 等. 基于云模型和熵权法的巢湖流域防洪减灾能力评估[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 222-227. (SUN Honghu, CHENG Xianfu, NI Ling, et al. Capacity evaluation of flood disaster prevention and reduction in Chaohu Basin based on cloud model and entropy weight method [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 222-227. (in Chinese))
- [31] 安康市地方志编纂委员会. 安康县志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1989.
- [32] 汉阴县志编纂委员会. 汉阴县志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1989.
- [33] 石泉县志编纂委员会. 石泉县志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1990.
- [34] 白河县地方志编纂委员会. 白河县志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1996.
- [35] 旬阳县地方志编纂委员会. 旬阳县志[M]. 北京: 中国和平出版社, 1996.
(收稿日期: 2016-07-06 编辑: 郑孝宇)