

三峡库区草堂河库湾水动力特征

李昶¹, 邓兵¹, 汪福顺², 周子然¹

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

摘要:针对三峡库区蓄水后普遍存在的干流水体倒灌支流库湾的现象,为探究干支流水交换过程中的水动力特征,通过逐月(2012 年 9 月至 2013 年 7 月)实地观测获取三峡库区中部典型支流草堂河库湾水动力参数及水体温度、浊度等数据,分析了水库运行各期干流与库湾的水交换情况及其对库区水环境的影响。结果表明:由于温度差异、干流惯性作用以及支流特殊地形等因素的影响,草堂河河口存在明显的双向水流结构,水库运行各期干支流交界面进出水体分布差异显著;特殊的河流走向使得全年多数月份草堂河与干流有效交换量高于其他典型支流;干流水体全年均能倒灌至库湾尾部,水库高水位运行期进出水体在河口呈上下分层结构且连续性较好,低水位运行期则以左右环流为主且连续性较差。

关键词:干支流界面;水交换;异重流;草堂河库湾;三峡库区

中图分类号:TV131.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)02-0049-08

Study on hydrodynamic characteristics of Caotang Bay in Three Gorges Reservoir area//LI Chang¹, DENG bing¹, WANG Fushun², ZHOU Ziran¹(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: Water intrusion from the mainstream into tributaries frequently occurs since the Three Gorge Reservoir (TGR) impounded. To explore the hydrodynamic characteristics of the mainstream-tributary water exchange process, field observation was carried out to obtain the monthly data (from September 2012 to July 2013), including the hydrodynamic parameters, temperature and turbidity of the Caotang River, a typical tributary in the central area of TGR. Water exchange in different impoundment periods and its influences on water environment of the reservoir were analyzed. The results show that there is a clear bi-directional flow structure in the estuary of the Caotang River and the distribution patterns of the inward and outward flow varies in different periods at the mainstream-tributary interface. The effective flow exchange in most months of a year at the estuary of the Caotang River is higher than that in other tributaries due to the unique river orientation. The water in the mainstream can intrude into the end of Caotang Bay all year round. During the high water level operating periods, inflow and outflow in the estuary shows vertical stratification and good continuity while during the low water level operating periods, horizontal circulation occurs with poor continuity.

Key words: tributary interfaces; water exchange; density current; Caotang Bay; Three Gorges Reservoir area

三峡水库自 2003 年蓄水以来,在防洪、发电、航运以及水资源调配等方面产生了巨大的经济效益,所引起的环境效应也受到了很多学者的关注^[1-3]。三峡水库的运行带来了许多不确定性,如水位抬升一方面会改善库区航运条件,另一方面还会造成库区泥沙淤积格局的改变^[4-6],库区水质与水环境也会改变^[7-9]。三峡水库蓄水后,干流水体水质持续改善^[10],但同时干流水体的顶托作用使库区内众多山

区支流的深切河谷和丘陵间山谷形成库湾回水区,部分库湾回水区藻华频发^[11-14]。

已有研究表明,库区的生源要素循环与干支流的水交换情况及其动力特征密切相关^[15-16],库湾与干流水交换是认识库区水环境变化的关键。干流水体温度差和泥沙浓度差产生的分层异重流是支流库湾水交换的主要形式^[17-18],而在洪季低水位运行期以左右结构的水交换为主^[19],干支流界面水文结

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07104-001);国家重点研发计划(2016YFA0600904);国家自然科学基金(41271519)

作者简介:李昶(1993—),男,硕士研究生,主要从事沉积地球化学研究。E-mail:ecnulic@163.com

通信作者:邓兵(1975—),男,副研究员,主要从事沉积地球化学及古环境研究。E-mail:dengbing@sklec.ecnu.edu.cn

构复杂^[20-22]。此外,三峡库区支流众多,目前有关干支流水动力特性的研究多集中在香溪河^[23]、大宁河^[24]等支流,干支流水交换强度和通量是否受支流库湾回水区的规模及在库区的区位差异等影响,还需要对更多典型支流作进一步的研究。

本文利用声学多普勒流速剖面仪(ADCP)在三峡库区典型支流草堂河库湾进行多断面逐月走航观测,并对其水动力参数以及干流水温、浊度等数据进行分析,从水文角度探讨在水库不同水位运行期下的支流河口界面水流特征及产生原因,同时定量估算各时期的水交换通量,为进一步揭示支流库湾水环境演变规律提供水动力学基础。

1 研究区域与观测方法

草堂河是三峡库区长江北岸的一级支流,位于三峡库区中部重庆市奉节县境内,介于东经 108°14' ~ 109°25'、北纬 30°35' ~ 31°26' 之间,全长 33.3 km,流域面积约 394.8 km²,年径流总量 2.37 亿 m³,平均流量约 7.51 m³/s^[25]。库区蓄水后,在距河口 8 km 范围内形成常年回水区。本次研究在三峡库区干流设置 1 个监测断面(CJ),在草堂河下游(CT01)、中游(CT02)和上游(CT03)各设置 1 个监测断面(图 1),于 2012 年 9 月至 2013 年 7 月逐月监测,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。

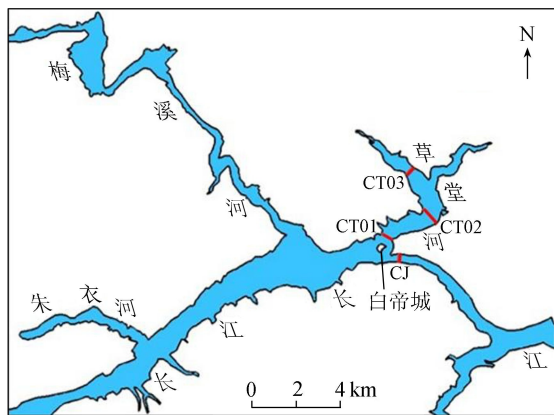


图 1 研究区域与监测断面

利用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 ℃)在支流各监测断面中泓线沿垂向由表层至底层每隔 5 m 进行测量,得到相应层次的水温、浊度,由于水库干流水体垂向混合均匀,水体基本物理化学参数的垂向差异小^[26],故干流水温、浊度值由表层数据代替。库区干流水位、流量等水情信息从中国长江三峡集团公司网站(<http://www.ctgpc.com.cn>)获取。

用声学多普勒流速剖面仪(流速测量范围 ± 5 m/s,精度 ± 0.005 m/s;最大测流水深 180 m)在干

支流各监测断面进行走航测流(船速控制在 0.5 m/s 左右),得到断面宽度、水深、流速等数据,测流期间采用 GPS 导航。流量的计算公式为

$$Q = \sum_{i=1}^n A_i v_i \quad (1)$$

其中

$$v_i = v_{\text{实}} \cos \theta$$

式中: v_i 为第 i 个积分断面处垂直断面方向的流速; A_i 为第 i 个积分断面的面积; n 为测量断面的积分断面数; $v_{\text{实}}$ 为实测流速; θ 为流向与积分断面法线方向(指向干流)的夹角, $\theta < 90^\circ$ 时为正值(水体由库湾流入干流), $\theta > 90^\circ$ 时为负值(水体由干流倒灌入库湾)。

2 草堂河库湾回水区水动力特征

综合 2012 年 9 月至 2013 年 7 月草堂河口断面(CT01)的水体流速分布来看,全年流速较小,主要集中在 0.2 m/s 以内(图 2)。现场监测表明,支流河口界面上存在明显的双向水流结构,进出水体出现的位置及流速大小在水库蓄水期、高水位运行期、消落期以及低水位运行期存在显著差异。

2.1 干支流界面特征

图 2 给出了观测期内 CT01 断面水体流场结构,图 3 ~ 8 为干流水位、流量变化以及支流河口界面进出流速、流量等变化情况。

a. 蓄水期(9—10 月),干流水位上升,最大水位日变幅为 2.20 m(图 4),支流河口断面(CT01)最大水深约 55 m(图 2(a)(b))。库湾流出水体分布在河口左岸,平均流速为 0.083 ~ 0.088 m/s,流量为 707.08 ~ 1 072.29 m³/s;干流倒灌水体分布在右岸,平均流速为 0.073 ~ 0.102 m/s(图 8),流量为 901.74 ~ 1 367.10 m³/s(图 5),形成右进左出的结构(图 2(a))。10 月下旬进入蓄水末期,随着干流水位的抬升,干流水体相互顶托作用增强,流速减小,水体左右进出结构没有 9 月明显(图 2(b))。

b. 高水位运行期(11 月至翌年 1 月),坝前水位在 11 月 14 日达到观测期最高水位 174.91 m(图 3),水位日变幅小于 0.45 m(图 4),CT01 断面水深最大,约 60 m(图 2(e))。这一时期河口进出水体呈现典型的上下分层结构,大约以 25 m 水深处为界(图 2(c)(d)),上层为长江干流倒灌进入草堂河的水体,平均流速为 0.066 ~ 0.067 m/s,其上部(0 ~ 10 m 水深)流速大(0.10 ~ 0.22 m/s),下部(10 ~ 25 m 水深)流速小(<0.05 m/s);下层为库湾流入长江的水体,平均流速为 0.082 ~ 0.086 m/s,其上部(25 ~ 40 m 水深)流速小(<0.05 m/s),下部(水深 40 m 以下)流速大(0.11 ~ 0.28 m/s)。整个断面流速分布为中间小,表层和底层大。

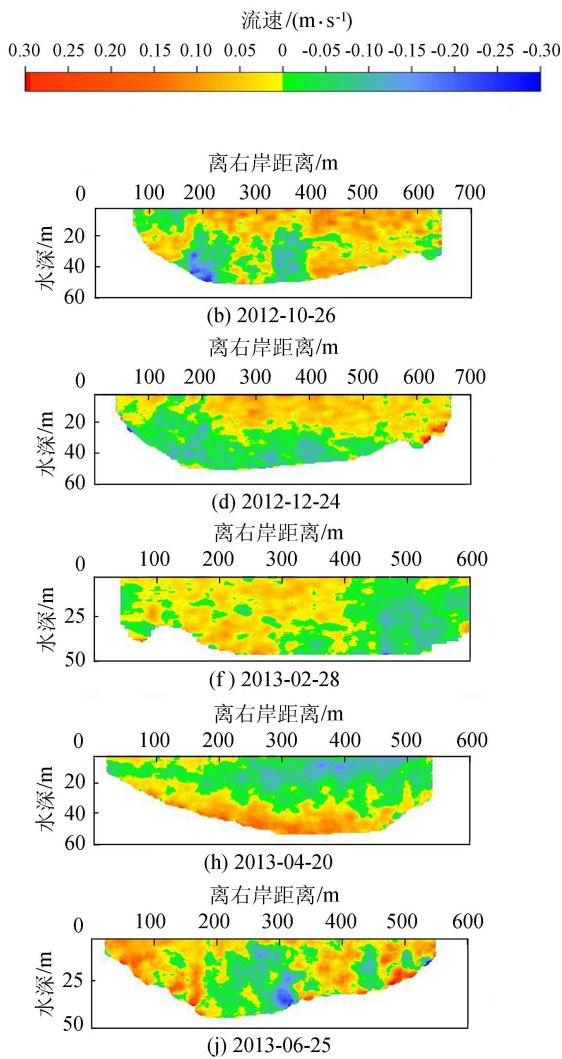


图2 草堂河河口断面(CT01)流速分布

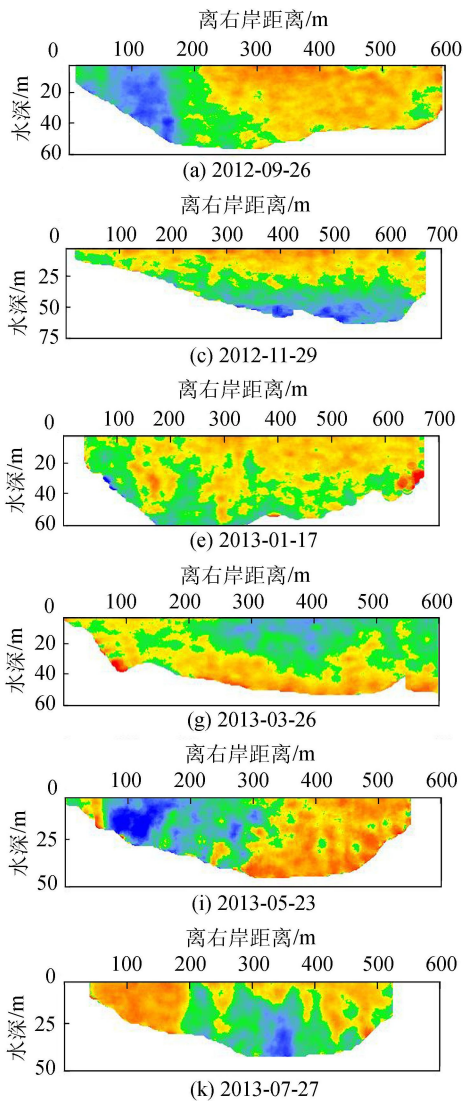


图3 干流水位变化

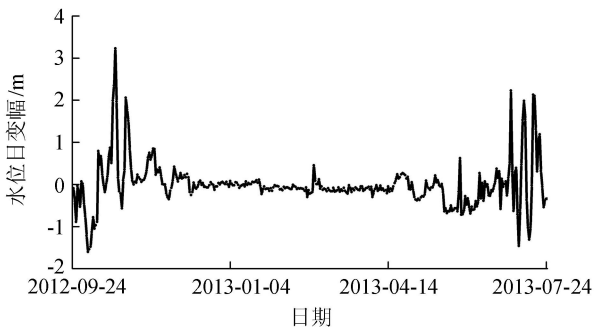


图4 干流水位日变幅

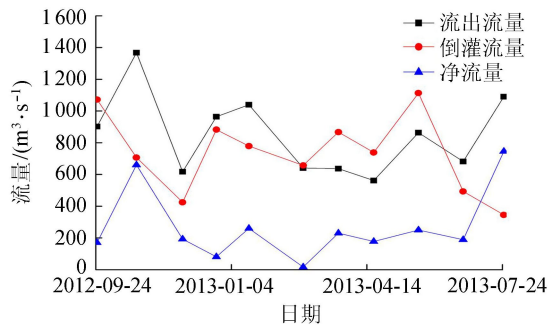


图5 草堂河河口断面进出水体流量与净流量

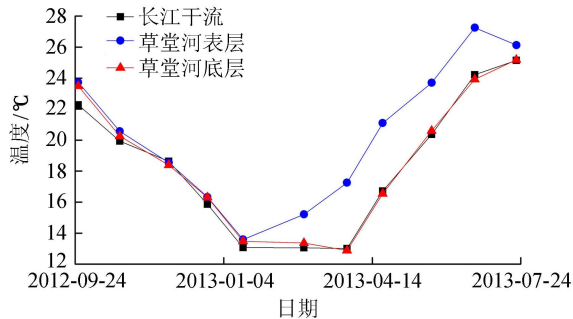


图6 干流与草堂河河口表底层温度

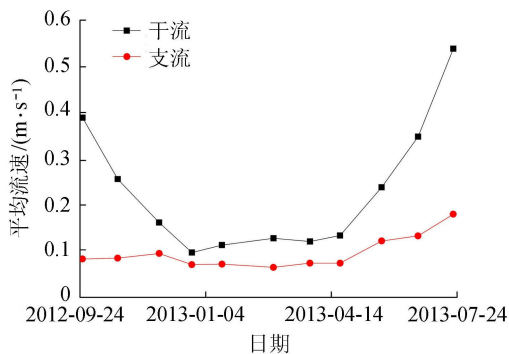


图7 干流与草堂河河口平均流速

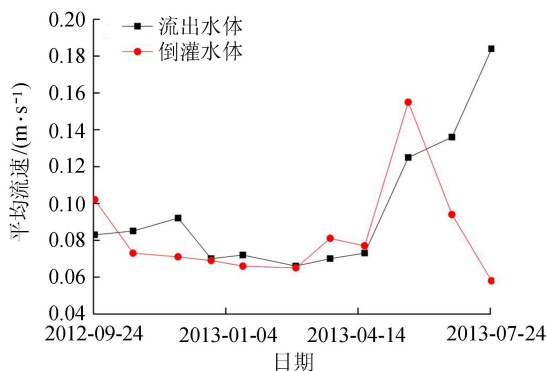


图8 草堂河河口断面进出水体平均流速

c. 消落期(2—5月),干流水位持续降低,从170.41 m(2月1日)降至150.93 m(5月31日)(图3),平均日降幅为0.163 m(图4),这一时期库湾水位也在降低,CT01断面最大水深降至48 m左右(图2(i))。消落前期(2—4月),CT01断面水体流场结构从左右分布逐渐过渡到上下分层结构(图2(f)(g)(h)),相比于上一时期,消落前期进出水体

平均流速稍有增加,介于0.065~0.081 m/s之间(图7),流出流量为561.31~640.73 m³/s,倒灌流量为657.04~867.16 m³/s(图5);消落后期(5月)进出水体流速明显增大,库湾流出水体平均流速约为0.131 m/s,倒灌水体平均流速约为0.160 m/s(图8),净流量达到249.64 m³/s(图5)。5月CT01断面进出的流速较大,在水深20 m处,距离右岸90~110 m范围内有一较高流速水团(>0.30 m/s),断面中部流速较高(>0.25 m/s)。总体来讲,该时期河口断面的水体流速较大。

d. 低水位运行期(6—8月),干流水位为145.05~155.92 m(图3),CT01断面最大水深维持在45 m左右(图2(j)(k))。与5月相比,6、7月进出水体界面交错,干流水体在距离河口断面右岸200~400 m范围内倒灌进入库湾,库湾水体多在靠近两岸200 m的范围内流出到干流,倒灌流量为345.05~492.87 m³/s(图5),平均流速为0.058~0.094 m/s(图8)。这一时期由于水位较低,流速有所增加,说明干流水体以较高流速倒灌进入库湾进行水交换。

2.2 水交换影响范围

a. 水库高水位运行期,进出水体在河口界面呈现典型的上下分层结构(图9(a)),尤其在2012年12月,库湾中部(图9(b))及尾部(图9(c))也存在同样结构,说明该结构沿河道方向具有良好的连续性,干流水体能够到达库湾末端,水交换较为彻底。库湾自河口向库尾3个断面(CT01、CT02、CT03)倒灌平均流速依次缓慢减小,分别为0.069 m/s、

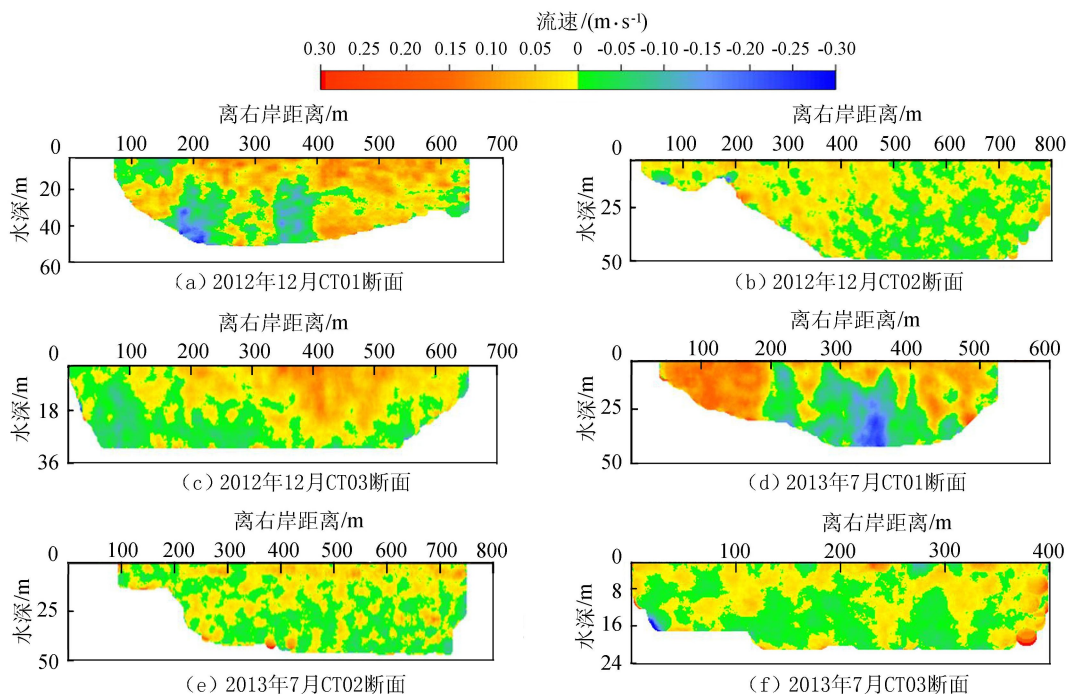


图9 2012年12月与2013年7月不同断面流速分布

0.062 m/s和0.061 m/s。

b. 水库低水位运行期,库湾河口进出水体流场主要呈左右结构,以2013年7月为例,CT01断面水体流向左右结构明显(图9(d)),而在库湾中部(图9(e))及尾部(图9(f))断面呈较弱的上下分层结构,此结构沿河道方向连续性较差,水交换形态复杂。这一时期干流水体浊度差异显著,干流高浊度水体向库湾倒灌可有效指示干支流水体交换。以低水位运行期的2013年7月为例,干流水体浊度高于700 NTU,而库湾内水体平均浊度仅为198 NTU,库湾尾部更是低于20 NTU,携带着大量泥沙的高浊度干流水体在惯性作用下从河口进入库湾,倒灌过程中由于受到库湾水体的顶托及河道的阻滞作用,流速明显减小,同时颗粒物沉降,浊度自河口向库湾内部递减,呈明显的“舌状”分布(图10),在距河口3.5 km的库湾回水区仍有浊度大于50 NTU的水体,说明干流水体能到达库湾常年回水区末端。

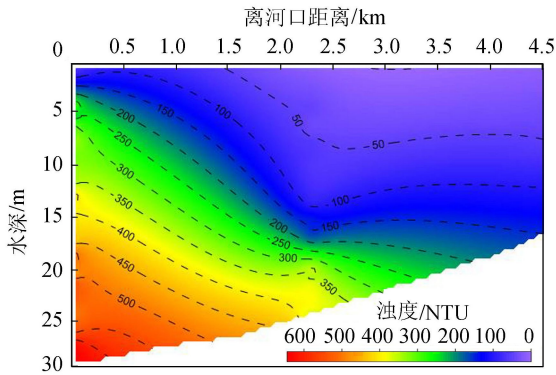


图10 草堂河库湾浊度分布纵剖面(2013年7月)

从以上分析来看,无论水库高、低水位期,干流水体交换都比较彻底。虽然在洪季用浊度来指示水交换情况效果较好,但在其他时期干支流浊度差异不明显。已有研究表明,草堂河库湾顶部全年营养盐浓度与干流相近,与草堂河上游差异显著,其月变化趋势也与干流一致,并无明显滞后^[25],干流水体对草堂河库湾的影响可达库湾末端,库湾与干流连通性很好,干流水体交换迅速且充分。胡念三等^[27-28]对三峡库区其他4条支流(香溪河、大宁河、磨刀溪和小江)库湾水动力的观测也证实了干流倒灌水体携带营养盐能到达库湾中上游,在纵向上表现为靠近库湾河口处的营养盐浓度高而库湾尾部营养盐浓度低的分布趋势,说明干流水体对支流库湾的影响较为普遍。

3 干支流界面水交换影响因素探讨

草堂河干支流进出水体的交换强度、界面形态结构在库区不同运行期存在差异,并对库湾中部水

体的交换存在季节上的影响,所以驱动干支流水体交换的影响因素较复杂。

3.1 干流水体温度差

水库消落期,草堂河河口界面上下分层的双向水流结构特征明显,河口进出水体间界限较清晰(图2(g)(h))。由图11可知,这一时期库湾表底层水体温度差异显著,尤其在2013年4月,库湾表层(水深0~3 m)水温大于17.50℃,底层(水深3 m以下)小于16.50℃,而长江干流表底层水温均在17.10~17.40℃范围内。库湾水温分层产生的密度梯度使水体在垂直方向上的交换受阻,温度低密度大的库湾水体沿底坡从河口界面底部流出,干流水体以表层补偿流的形式倒灌进入库湾(图2(h)),这是典型的温差异重流驱动下的水流特征。河口水流强度较小,进出水体流速大小分别为0.077 m/s和0.073 m/s(图8)。相似的结构在2012年11月也有出现(图2(c)),说明虽然冬季干支流温度差异较小(图6),但其所驱动的密度差异仍然存在。

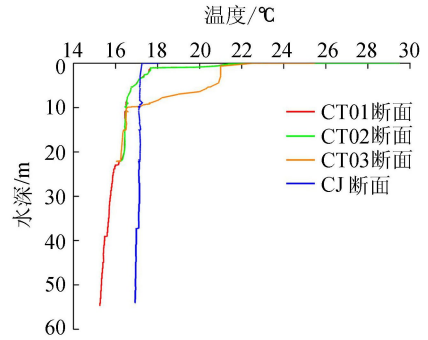


图11 2013年4月长江干流及草堂河库湾温度分布

长江三峡库区段多数支流呈东西走向,大部分支流处于同一纬度带(北纬30°00'~31°00')和气候带之间。在以温差异重流为主导的时期,各支流库湾与干流水体温度差异相似,因而水交换结构、强度在不同支流具有相似性^[17,19,24]。梅溪河、朱衣河在消落前期也是上下分层结构,其平均流速大小约分别为0.073 m/s^[29]和0.059 m/s^[19]。香溪河、大宁河也有类似情况,如香溪河在3—5月平均流速约为0.051 m/s、表层平均密度约998.21 kg/m³的干流水体从河口水深40 m以上范围倒灌潜入库湾,且绝大多数时间均影响到库湾中上游^[29];库湾内密度约为997.78 kg/m³的水体从底层流出到干流,形成上下分层的水流结构。

3.2 水体惯性

消落后期及低水位运行期的干支流温差同样显著,但其支流河口进出水体界面交错(图2(i)(j)),说明其水交换进程可能并非只受温差异重流影响。该阶段干流平均流速超过0.250 m/s,干支流流速差

异达 3~5 倍(图 7),由于草堂河河口偏向长江上游来水方向(图 1),干流水体极易由于惯性从河口右岸倒灌进入库湾。以消落后期(2013 年 5 月)为例,平均流速约为 0.252 m/s 的干流水体在惯性作用下,长驱直入库湾回水区,库湾内水体由于倒灌水体的挤压,从河口断面其他位置流出,高速惯性倒灌水体引起的支流河口界面强烈紊动掺混远超过水体的垂向扩散阻力,形成左右流场结构(图 2(a)(i)(k))。

不同规模库湾回水区,在干流水体惯性倒灌影响下,其河口界面水流强度、流场形态存在差异,如在低水位运行期的 8 月,最大流速约分别为 0.059 m/s^[23]和 0.077 m/s^[23]的朱衣河、梅溪河干流倒灌水体,主要以底部倒灌的形式进入其库湾回水区,倒灌范围接近库湾尾部。这与草堂河的水交换强度差异显著,可能与河流规模、支流与干流的朝向等因素有关。草堂河的规模虽不及三峡库区其他支流,但该时期由于干流水体较强的惯性作用,倒灌量较大。

3.3 地形的影响

库区朱衣河、梅溪河、草堂河 3 条支流走向与干流所成角度约分别为 60°、90°和 150°(图 1),草堂河河口基本面向干流上游。水库各运行期,干流水体更易直接进入草堂河库湾内部,草堂河河口断面(CT01)各月进出水体流速要大于其他支流(图 12);倒灌流量所占干流流量比例也要大于其他支流,水交换强度更大,尤其在低水位运行期较为显著,如 2013 年 3—5 月,倒灌流量占干流流量比例均高于 7%(图 5)。这说明支流走向的差异会对水体交换产生影响^[29]。

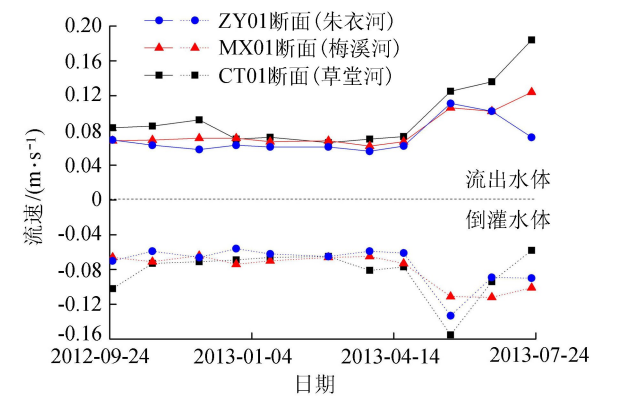


图 12 3 条支流进出水体平均流速

草堂河河口区别于库区其他支流的特殊性除河流走向之外,还在于有一座岛屿(白帝城)位于河口干支流交界处(图 1),水位会由于其阻挡作用在河口区域抬升,干流水体的流速减小,势必会造成干流水体在河口交界处流场分布的季节性差异,如 2012 年 10 月净流量约为 660.02 m³/s(库湾流向干流),而 2013 年 5 月净流量约为 249.64 m³/s(干流

倒灌库湾)(图 5)。当库区水位较低时,河口平均水深较浅(约为 33.95 m),白帝城与河道右岸之间部分水体的流速由于水下原有道路(三峡水库建成前,白帝城与草堂河河口右岸有道路联通,三峡水库建成后,道路淹没,在水面上修建风雨廊桥)的阻挡迅速减小,干流水体以漫灌的形式在河口进行交换,而大部分水体主要从白帝城与左岸之间进出河口,形成河口环流,如 2013 年 5—7 月(图 2(i)(j)(k));库区水位较高时,干流水体可以直接从白帝城两侧进出库湾,不易形成河口环流。

4 干流水体交换对库区水环境的影响

在温差异重流、干流惯性倒灌、地理特性等因素驱动下,支流河口界面上的干流水体交换在不同水位运行期持续进行。三峡库区内主要支流约 40 条^[27],且普遍存在与干流的水体交换,本文选取库区香溪河、小江、梅溪河及朱衣河这 4 条典型支流作为参考,其中香溪河河口干流水体有效交换量为 170.9~677.5 m³/s^[17],朱衣河为 209.2~493.0 m³/s^[19]。

三峡水库全年各运行期,草堂河与干流水体的有效交换量均高于梅溪河及朱衣河。如图 13(a)所示,蓄水期 10 月草堂河干流水体交换量为全年最高,达到 1113.07 m³/s;在其他时期经历连续的波动过程,干流水体交换量在 12 月降至全年最低(约为 345.05 m³/s)后持续上升,到 2 月达到极值(约为

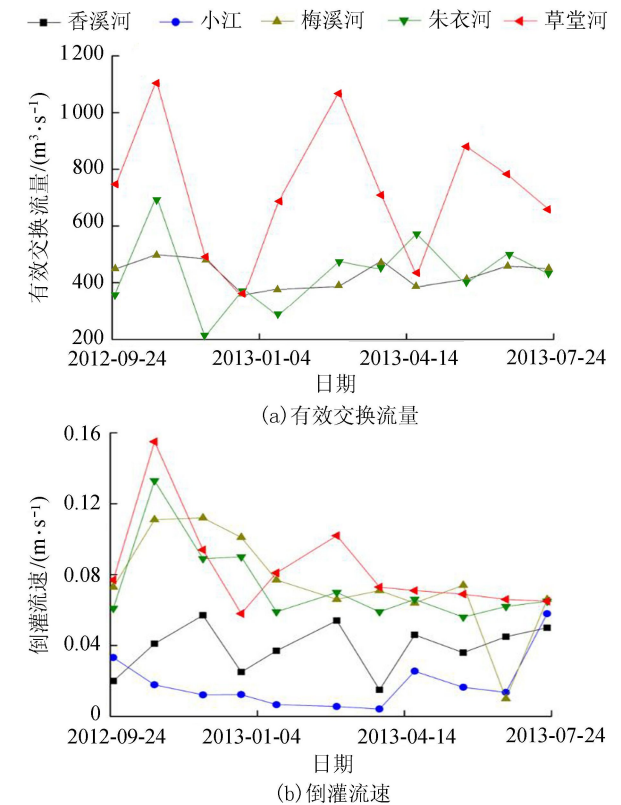


图 13 三峡库区典型支流与干流有效交换流量及倒灌流速

1072.29 m³/s),之后又继续下降,至4月达到低值424.53 m³/s。总体而言,库区干流水体交换量较大,全年平均值为730.55 m³/s,高于其他典型支流,其中2012年12月相差最小,约为19.18 m³/s,2012年10月差值最大,约为738.26 m³/s(图13(a)),这可能与草堂河特殊走向有关。水库各运行期,草堂河河口干流倒灌支流库湾的强度普遍高于其他支流,尤其在消落前期(2月),干流倒灌水体平均流速高于0.100 m/s,其他支流河口低于0.070 m/s(图13(b))。支流河口界面的干流水体交换会将大量生源要素从干流带入库湾^[13,15,25],这些生源要素进入库湾,参与其生物地球化学循环过程,对库湾水环境产生影响。在库区众多支流库湾回水区中,干流水体交换广泛存在^[17,19,29],这对于库湾水环境的影响值得更深入的探讨。

5 结 论

a. 草堂河河口存在明显的双向水流特征,受温差差异重流、干流惯性作用以及特殊的地形等因素影响,在水库各个运行期干支流界面上进出水体的结构以及水流强度差异显著。在蓄水期,受水位变动和温差差异重流叠加影响,支流河口界面水流强度小,进出水体以分层异重流形式进行交换;在低水位运行期,河口水流特征主要受地形和水体惯性影响,干流水体直接沿河口右岸倒灌进库湾,水流强度大,支流河口界面水流结构破坏,进出水体间界面交错并向倒灌一侧倾斜,形成左右分布的双向水流结构。此外,支流河口界面水交换还会受到其他诸多因素的影响,仍有待研究。

b. 干流水体全年均能倒灌至库湾尾部,水库高水位运行期进出水体上下分层结构沿库湾且纵向连续性较好,在低水位运行期河口进出水体以左右环流为主且沿河道方向连续性较差。

c. 草堂河相比库区其他支流的特殊走向使干流水体在水库各运行期均能大量倒灌进入库湾,其干流水体的有效交换量高于其他典型支流,其中2012年12月相差最小,约为19.18 m³/s,2012年10月差值最大,约为738.26 m³/s。

参考文献:

[1] RICHARD S. Three Gorges Dams; into the unknown[J]. Science, 2008, 321(1): 628-632.
[2] ZHANG Q F, LOU Z P. The environmental changes and mitigation actions in the Three Gorges Reservoir region, China[J]. Environmental Science & Policy, 2011, 14(8), 1132-1138.
[3] 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))
[4] XU K H, MILLIMAN J D. Seasonal variations of sediment discharge from the Yangtze River before and after impoundment of the Three Gorges Dam [J]. Geomorphology, 2009, 104(3), 276-283.
[5] SHIELDS J F D, SIMON A, STEFFEN L J. Reservoir effects on downstream river channel migration [J]. Environmental Conservation, 2000, 27(1): 54-66.
[6] YANG S L, MILLIMAN J D, XU K H, et al. Downstream sedimentary and geomorphic impacts of the Three Gorges Dam on the Yangtze River [J]. Earth-Science Reviews, 2014 138(6): 439-486.
[7] 李永建, 李斗果, 王德蕊. 三峡工程Ⅱ期蓄水对支流富营养化的影响[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2005, 27(4): 474-478. (LI Yongjian, LI Douguo, WANG Derui. Influence of second phase sluice of the Three Gorges Reservoir on the extrication of the reservoir-feeding tributaries [J]. Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science), 2005, 27(4): 474-478. (in Chinese))
[8] 张晨, 刘景红, 黎莉莉, 等. 三峡水库成库初期营养盐与浮游植物分布特征[J]. 环境科学, 2006, 27(6): 1056-1061. (ZHANG Sheng, LIU Jinghong, LI Lili, et al. Distribution features of nutrient and phytoplankton in incipient Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2006, 27(6): 1056-1061. (in Chinese))
[9] 王健康, 周怀东, 陆瑾, 等. 三峡库区水环境中重金属污染研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(1): 49-53. (WANG Jiankang, ZHOU Huaidong, LU Jin, et al. Reviews of heavy metals pollution in water environment of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(1): 49-53. (in Chinese))
[10] 蔡庆华, 孙志禹. 三峡水库水环境与水生态研究的进展与展望[J]. 湖泊科学, 2012, 24(2): 169-177. (CAI Qinghua, SUN Zhiyu. Water environment and aquatic ecosystem of Three Gorges Reservoir, China: progress and prospects [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(2): 169-177. (in Chinese))
[11] 周广杰, 况琪军, 胡征宇, 等. 三峡库区四条支流藻类多样性评价及“水华”防治[J]. 中国环境科学, 2006, 26(3): 337-341. (ZHOU Guangjie, KUANG Qijun, HU Zhengyu, et al. Assessment of algal diversity and water blooms prevention in four tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. China Environmental Science, 2006, 26(3): 337-341. (in Chinese))

- [12] SHA Y K, WEI Y P, LI W P, et al. Artificial tide generation and its effects on the water environment in the backwater of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Hydrology, 2015, 528: 230-237.
- [13] 黄钰铃. 三峡水库香溪河库湾水华生消机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [14] 许涛, 王雨春, 刘德富, 等. 三峡水库香溪河库湾夏季水华调查[J]. 生态学杂志, 2014, 33(3): 646-652. (XU Tao, WANG Yuchun, LIU Defu, et al. An investigation on summer algal blooms in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(3): 646-652. (in Chinese))
- [15] 冉祥滨, 陈洪涛, 姚庆祯, 等. 三峡水库小江库湾水体混合过程中营养盐的行为研究[J]. 水生态学杂志, 2009, 2(2): 21-27. (RAN Xiangbin, CHEN Hongtao, YAO Qingzhen, et al. Characteristics of nutrients in the Xiangjiang Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Hydrology, 2009, 2(2): 21-27. (in Chinese))
- [16] 黄程, 钟成华, 邓春光, 等. 三峡水库蓄水初期大宁河回水区流速与藻类生长关系的初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 453-457. (HUANG Cheng, ZHONG Chenghua, DENG Chunguang, et al. Preliminary study on correlation between flow velocity and algae along Daning River's backwater region at sluice initial stages in the Tree Gorges Reservoir [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(2): 453-457. (in Chinese))
- [17] 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]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2010, 40(1): 101-112. (in Chinese))
- [18] 刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 443-454. (LIU Defu, YANG Zhengjian, JI Daobin, et al. A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 443-454. (in Chinese))
- [19] 周子然, 邓兵, 王雨春, 等. 三峡库区干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: a case of Zhuyi River [J]. Yangtze River, 2015, 46(22): 1-6. (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. Experimental study of hydrodynamic characteristics at confluence reach in reservoir area [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2015, 43(1): 60-65. (in Chinese))
- [21] 王冠, 韩龙喜, 常文婷. 基于立面二维水动力-水温耦合模型的水库水温分布[J]. 水资源保护, 2009, 25(2): 59-63. (WANG Guan, HAN Longxi, GHANG Wenting. Modeling water temperature distribution in reservoirs with 2D laterally averaged flow-temperature coupled model [J]. Water Resources Protection, 2009, 25(2): 59-63. (in Chinese))
- [22] 王洪波, 邓兵, 汪福顺, 等. 三峡库区梅溪河河口干支流界面水流特征[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 42-48. (WANG Hongbo, DENG Bing, WANG Fushun, et al. Characteristics of flow at interface between Yangtze River and Meixi River in Three Gorges Reservoir area [J]. Advances in Science and Technology of Water Reasources, 2017, 37(3): 42-48. (in Chinese))
- [23] YANG Z, LIU D, JI D, 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]. Since China Technological Sciences, 2010, 53(4): 1114-1125.
- [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] 王晓彤, 罗光富, 操满, 等. 库湾营养盐循环对三峡库区营养盐输运的影响: 以草堂河为例[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 2957-2963. (WANG Xiaotong, LUO Guangfu, CAO Man, et al. Effect of nutrient cycles in tributaries on the transport of nutrient in the Three Gorges Reservoir: a case study of Caotang River [J]. Environmental Science, 2016, 37(8): 2957-2953. (in Chinese))
- [26] 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 Science Circumstantial, 2012, 32(3): 654-661. (in Chinese))
- [27] 胡念三, 刘德富, 纪道斌, 等. 三峡水库干流倒灌对支流库湾营养盐分布的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(10): 6-11. (HU Niansan, LIU Defu, JI Daobin, et al. Effect of backward flow from mainstream on nutrients distribution of tributaries in Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(10): 6-11. (in Chinese))
- [28] 罗光富. 支流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.
- [29] 曹巧丽. 三峡水库香溪河库湾倒灌异重流运动特性研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2010.

(收稿日期: 2017-03-30 编辑: 熊水斌)