



## 西江四滩河段近 10 年河床变形与成因分析\*

童朝锋, 卢行长, 孟艳秋

(河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 基于 2004—2014 年西江四滩河段 10 年实测地形资料, 采用 Kring 插值方法及数理统计的方法, 分析该河段近 10 年的演变, 阐明其冲淤变化特征; 分析上游来水沙变化和航道整治工程对河道演变影响。研究表明: 2004—2014 年, 四滩河段河床整体处于冲刷下切态势, 2007—2013 年是冲刷剧烈期; 分析认为, 导致 2004—2014 年河床总体下切的主要原因是建库蓄水拦砂为主因的上游年平均含沙量和年输沙量持续大幅度的减少; 长洲枢纽 2007 年起拦砂泄清及航道整治工程是研究河段整治线范围内河槽 2007—2013 年冲刷剧烈的主要原因; 河床下切导致四滩河段最低通航保证流量下水位下降明显, 但航道水深有所增加。

**关键词:** 四滩河段; 河床下切; 航道整治; 河道采砂

**中图分类号:** U 617

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2016)02-0114-07

### Morphological evolution and causes of Sitan reach of Xijiang river in recent decade

TONG Chao-feng, LU Xing-chang, MENG Yan-qiu

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Based on topographies from 2004 to 2014 and using the Kring interpolation method and mathematical statistics method, we analyze the morphological evolution of Sitan reach and illustrate the scouring-erosion variation characteristics of channel. We also analyze the influence of the discharge and sediment variation and channel regulation upstream on the morphological evolution. The results show that the overall Sitan reach is in the state of erosion from 2004 to 2014, during which the scouring is several from 2007 to 2013. The analysis shows that the main reason for the undercutting of riverbed from 2004 to 2014 is the sharp decrease in sediment discharge from upstream due to the construction of more and more dams. The sand blocking effect by Changzhou Dam since 2007 and the channel regulation project from 2008 to 2010 are the main reasons for the sharp erosion during 2007 and 2013. The river bed undercutting leads to the lower water level but will not affect the navigation depth.

**Keywords:** Sitan reach; riverbed erosion; channel regulation; sand excavation

自 1980 年以来, 珠江中下游河段发生了不同程度的河床下切<sup>[1-3]</sup>, 为此有学者开展了其演变规律和成因分析研究。西江四滩河段自两广交

界的界首至都城, 上连广西西江梧州段, 下接广东西江德庆段, 因有界首滩、新滩、蟠龙滩和都乐滩等浅滩而称四滩。自 1986 年, 四滩段进行

收稿日期: 2015-06-22

\*基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51339005); 国家自然科学基金青年项目 (51409094)

作者简介: 童朝锋 (1973—), 男, 博士, 副教授, 从事河口海岸动力学研究。

了3次大的航道整治,其中2008—2010年为最近的一次Ⅱ级航道整治,实现了3.5 m水深航道全线贯通。随着西江航运的迅速发展,西江航道的进一步升级也正在论证实实施。近10年的西江中游河段河床演变及其水文特征影响研究主要集中在长洲枢纽坝下至界首河段<sup>[4-7]</sup>,对西江界首河段以下四滩河段开展的相应研究并不多。

本文通过2004—2014年界首—都城约37 km河段的9次河道地形图,分析四滩河段的冲淤情况,并根据四滩段上游梧州水文站多年来水来沙资料以及近10年航道工程情况,分析研究西江四滩河段河道变形的成因及对航道水位水深影响。

## 1 研究区域概况

四滩河段自界首至都城(图1),全长约37 km,河宽多在500~1 100 m,平均比降0.014‰。据四滩上游约7 km的梧州水文站1954—2013年流量统计,西江四滩段入流年平均流量为6 384 m<sup>3</sup>/s,年际变化较小,年平均流量最大值、最小值分别为9 390 m<sup>3</sup>/s(1994年)、3 250 m<sup>3</sup>/s(1963年);径流年内分布不均,汛期流量约占全年流量的72%,洪水具有峰高、量大、历时长的特点;枯水期为10月至翌年4月,以1月份最枯。贺江为四滩河段主要支流,年平均流量约不到梧州水文站的10%。四滩河床沙质为主。据近60年梧州水文站的泥沙资料统计,四滩河段悬沙含沙量多年平均为0.28 kg/m<sup>3</sup>,年平均含沙量最大值、最小值分别为0.57 kg/m<sup>3</sup>(1983年)、0.033 kg/m<sup>3</sup>(2011年);悬沙输沙量多年平均为4 382万t/a,主要集中在汛期,汛期5—10月的来沙量占全年来沙量的96.2%;河床床砂以中粗砂为主,中值粒径为0.25~0.49 mm。珠江河口潮汐类型主要为不规则半日潮,受河床下切等因素影响,西江潮区界范围已经上至梧州(鸡笼洲),枯季受河口潮汐影响,在流量3 000 m<sup>3</sup>/s以下时,四滩河段已经可以观测到水位随潮汐变化。

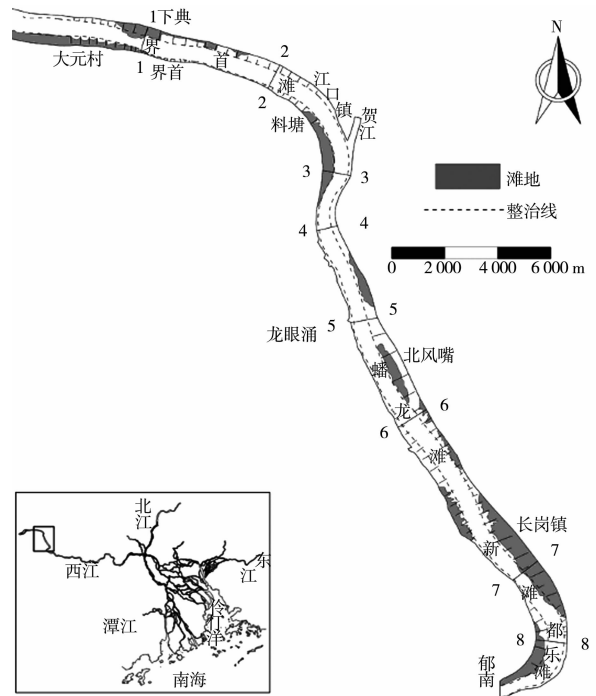


图1 四滩河段(界首—都城)

## 2 数据来源及分析方法

利用近10年四滩河段9套河道地形图,采用Kriging插值方法,统计四滩河段冲淤变化,分析其河床演变。各测图测量时间为2004年6月、2005年3月、2005年7月、2006年11月、2009年12月、2013年6月、2013年9月、2014年3月、2014年6月。结合梧州站水文泥沙数据以及近期航道工程等资料,通过相关性分析,探讨上游来水来沙变化、航道工程、采砂等对四滩段河床冲淤影响。梧州水文站的径流量和泥沙1954—2013年数据则来自水文年鉴,具体数据包括平均流量、含沙量、输沙量及水位等。

## 3 结果分析

### 3.1 冲淤量变化

考虑到四滩河段坝田区的边滩和整治线内的主槽具有不同水动力和河床演变特征,因此将两者河床冲淤量分别统计,四滩段河槽总面积 $4\,425 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,整治线范围内主槽面积为 $2\,125 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,边滩面积 $2\,300 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。各年间平均冲淤厚度如图2所示,冲淤量如图3所示。

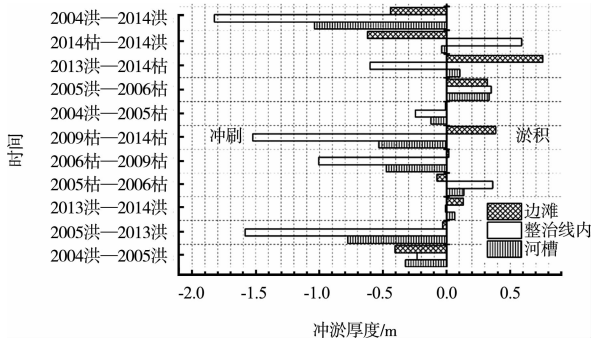


图2 2004—2014年四滩河段河床平均冲淤厚度变化

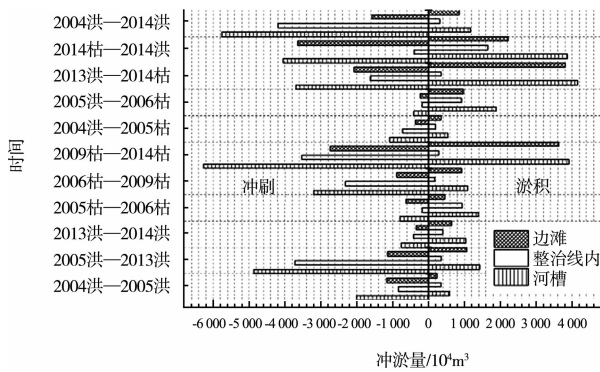


图3 2004—2014四滩河段河床冲淤量变化

2004年6月—2014年6月四滩河段冲淤统计结果显示：各年份之间，四滩河段河床有冲有淤，但是年际总体为冲刷，且较为剧烈。近10年河槽累积平均冲刷厚度为1.04 m，累积冲刷量为 $5\ 760 \times 10^4\ m^3$ ，冲刷主要集中在河道主槽，10年间平均冲刷厚度累积达1.83 m，冲刷量为 $4\ 194 \times 10^4\ m^3$ ，边滩冲淤变化较小，10年间平均冲刷厚度累积为0.31 m。其中，冲淤变化较大的是2007—2013年，在此期间河槽主槽冲刷严重，边滩冲淤基本平衡，河槽整体下切明显，河槽平均冲刷厚度为1.11 m，冲刷量为 $5\ 601 \times 10^4\ m^3$ ，其中整治线范围内主槽河床冲刷1.93 m，冲刷量为 $4\ 212 \times 10^4\ m^3$ ；2013洪至2014年洪，主槽轻微冲刷，冲刷量为 $19 \times 10^4\ m^3$ ，边滩稍有淤积，河槽整体轻微淤积，平均淤积厚度为0.06 m。

洪、枯季年内变化冲淤量统计显示，河道主槽呈现出洪淤枯冲的特点明显，如2004年6月洪季至2005年3月枯季，主槽冲刷明显，平均冲刷厚度为0.25 m，边滩几乎不变；2014年3月枯季至2014年6月洪季，整治线范围内河道平均淤积

厚度为0.59 m，边滩则表现为冲刷，平均冲刷厚度为0.62 m，这也反映了洪季和枯季流量变化和丁坝群相互影响，导致对河床冲淤作用效果的差异。

### 3.2 冲淤分布

西江四滩河段2004—2014年冲淤分布如图4所示。四滩河段河床在此10年期间，冲刷明显，特别是两岸丁坝之间的河槽主槽。冲刷严重的区段分布在界首—江口镇以上的界首河段，以及四村—郁南的三滩河段。从图4可见，河槽主槽河床冲刷变化较大的河段，边滩均建有丁坝群，说明丁坝群建设对四滩河段河床影响变化明显，而没有丁坝群的江口镇—四村河段，河道冲淤变化较小。

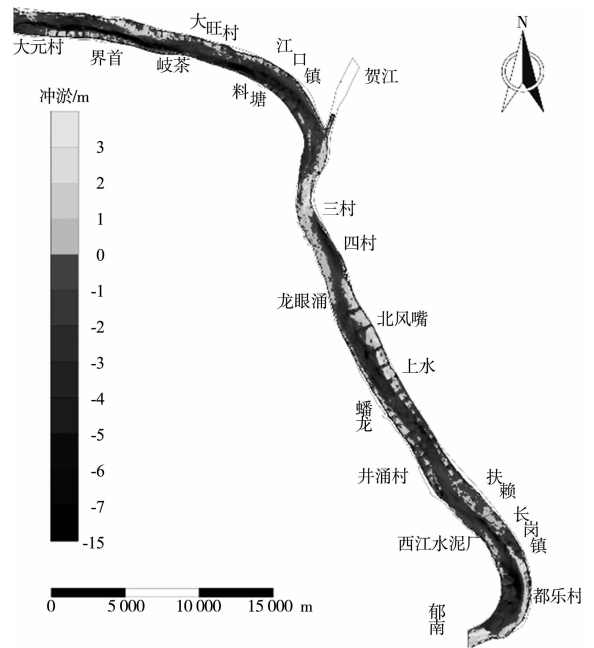
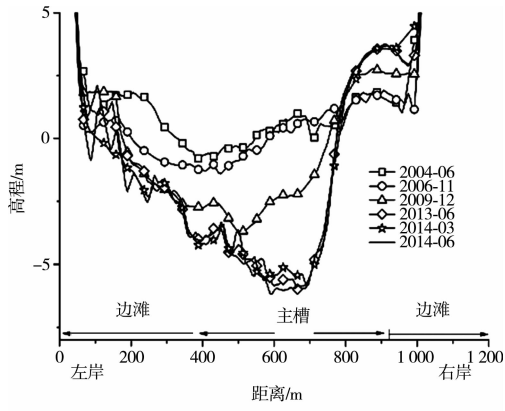
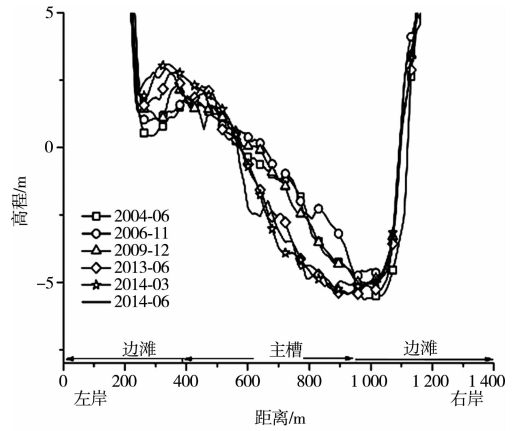


图4 2004—2014四滩河段河床冲淤分布

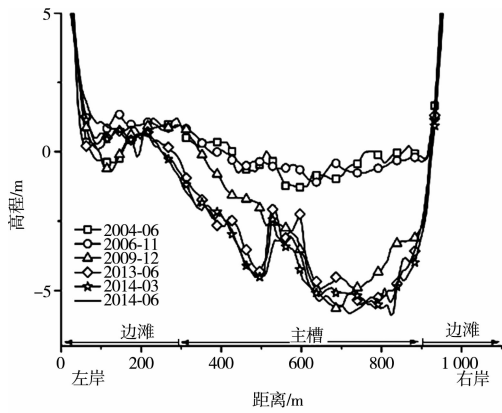
图5为在此期间各断面变化。各河段从2004—2006年，各断面河床变化并不剧烈，说明2006年前河床相对稳定；2006年11月—2013年，各断面主槽河床下切剧烈，其中断面1和2显示界首段河床下切从2006年11月始，断面5~8的变化显示三滩河段河床下切主要从2009年始；边滩河床变化较小，部分淤积明显，如界首段的断面，反映丁坝群对河道河床冲淤分布影响明显；2013年后，河床变化较小，处于相对稳定状态。



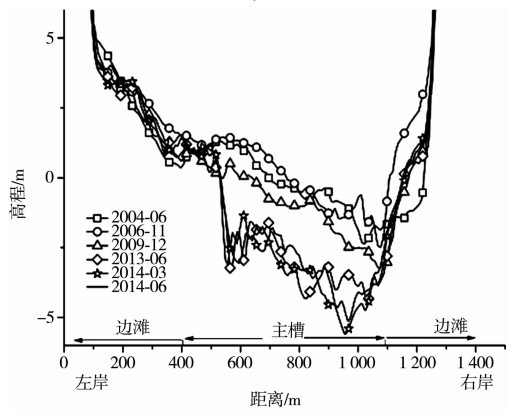
a) 断面1



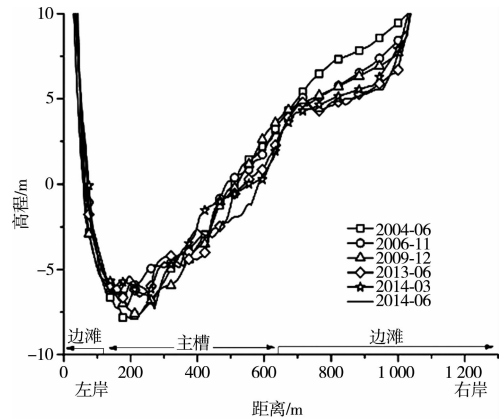
e) 断面5



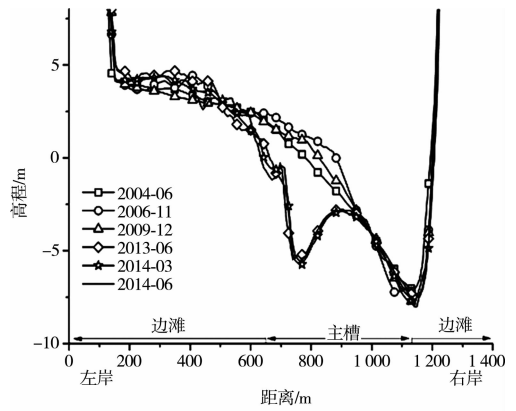
b) 断面2



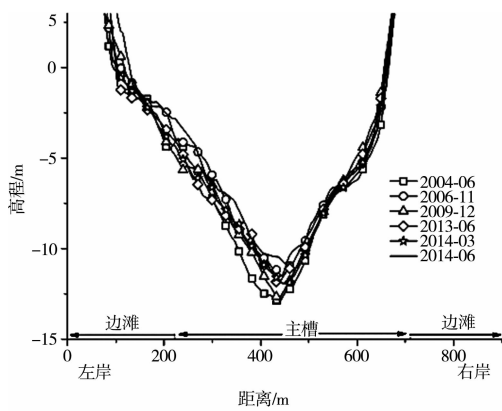
f) 断面6



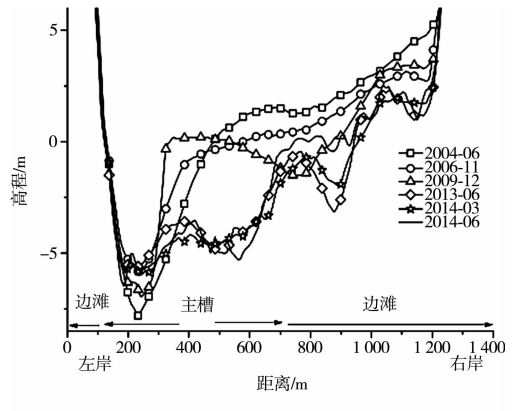
c) 断面3



g) 断面7



d) 断面4



h) 断面8

图5 2004—2014年四滩河段断面1~8变化

### 4 成因及影响

#### 4.1 成因

四滩河段河床冲淤统计结果显示，2004—2014年河床冲刷明显，平均冲刷下切达1.04 m，冲刷剧烈期为2006年11月—2013年，冲刷主要集中在界首段和三滩段的主槽范围内。一般而言，影响河道河床冲淤的主要因素有来水来沙变化、航道工程影响、采砂等因素影响，为此四滩河段河床冲淤成因也将从上述几个方面分析。

##### 1) 来水来沙变化。

图6为四滩上游梧州水文站1954—2013年年平均流量、悬沙年平均含沙量和年输沙量过程曲线。60年间，梧州水文站年径流量呈丰水年、枯水年交替波动，从长周期的年径流量趋势线而言，年径流量相对稳定，近10年略有下降，但幅度很小。60年时间内年平均流量为6384 m<sup>3</sup>/s，与河床演变分析时段相对应的2004—2013年，平均流量为5619 m<sup>3</sup>/s，四滩冲刷剧烈期2007—2013年平均流量5571 m<sup>3</sup>/s。因此四滩河段水动力强度近期(2007—2013年)虽略有减小，但总体没有大的改变。

梧州水文站1954—2013年含沙量和输沙量过程表明：1993年前，悬沙年平均含沙量和年输沙量相对稳定，略有增加；1993年以后，流经四滩河段的悬沙平均含沙量和年输沙量逐渐急剧减少，下降趋势明显，而年径流量依然在平均值上下波动，水沙关系发生变化。图7为累积径流量和输沙量关系，1993年前呈线性直线增长，1993年后逐渐变成抛物增长线。1954—1992年平均含沙量为0.349 kg/m<sup>3</sup>，年输沙量为7141万t/a，1993—2013年平均含沙量为0.125 kg/m<sup>3</sup>，年输沙量为2756万t/a，含沙量和输沙量均约为1993年的前约1/2.5。与河床演变分析时段相对应的2004—2013年，平均含沙量为0.079 kg/m<sup>3</sup>，年输沙量为1443万t/a；四滩冲刷剧烈期2007—2013年，平均含沙量为0.066 kg/m<sup>3</sup>，年输沙量为1221万t/a，年输沙量接近1992年前年输沙量的1/6，特别是2008年，年平均流量为7805 m<sup>3</sup>/s，年平均含沙量和年输沙量为0.106 kg/m<sup>3</sup>和818万t/a，历史上同等径流量的年份(1954、1983、2001年)输沙量远大于该值，最大可以达到5倍以上。

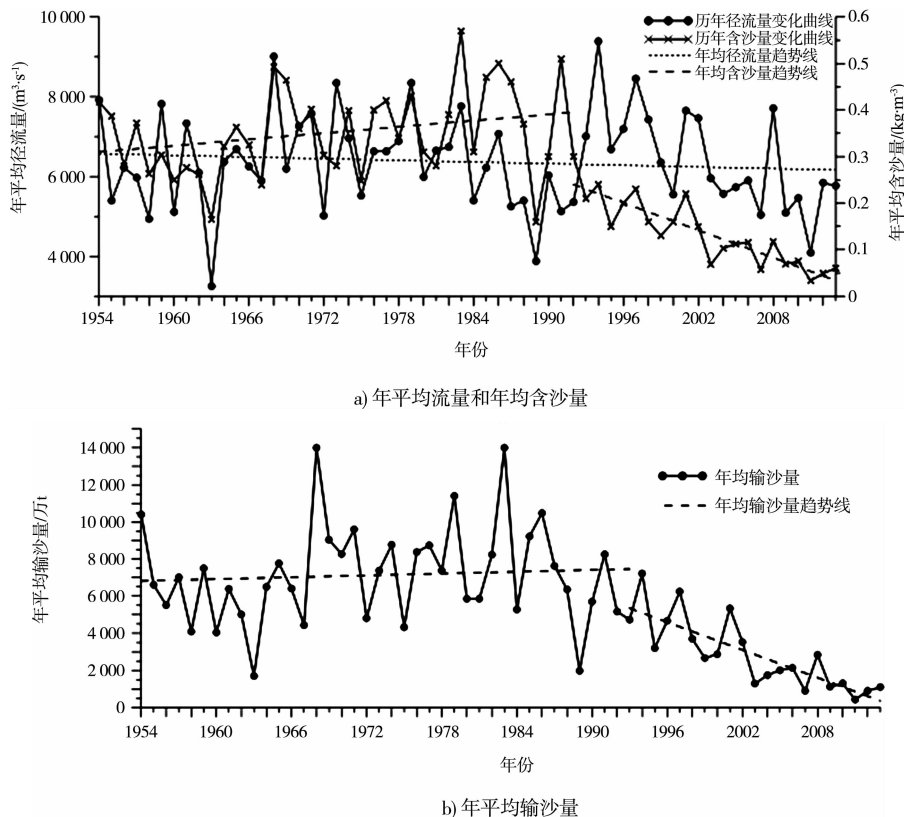


图6 1954—2013年年平均流量、悬沙含沙量、年平均悬沙输沙量变化曲线

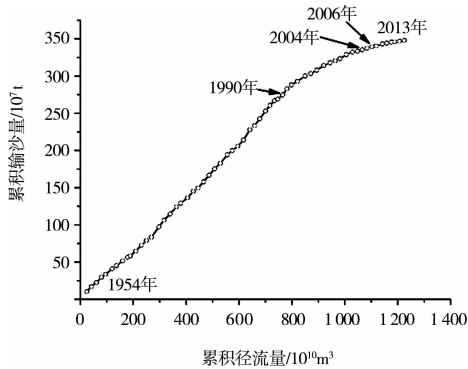


图7 1954—2013年累积径流量和输沙量关系

导致流域来沙减少的原因很多,包括流域植被的改变、气候变化、河道采砂、水库拦砂等因素。在梧州径流量多年变化不大,输沙量在短期发生如此大变化的情况下,综合各成因认为,西江梧州断面上游不断建成的水库拦砂作用是导致输沙减少的主要成因。统计四滩河段上游流域1990—2015年水库总库容变化(图8),库容显著递增,尤其在2007—2009年,每一次库容的增长,均导致输沙量的减少,这与四滩冲刷剧烈期一致。上游各水库中,长洲枢纽位于界首上游仅22 km,其蓄水运行的时间正好为2007年,因此势必导致下泄水体含沙量较大幅度下降。

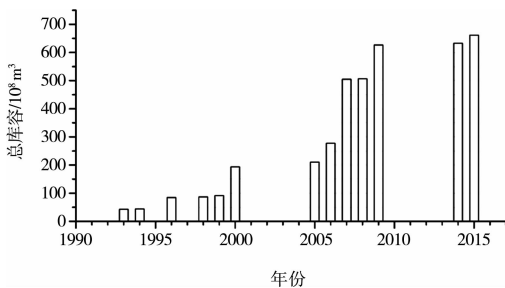


图8 梧州上游水库总库容变化

水库建设同时也拦截了大部分下泄的推移质泥沙。西江流域推移质实测资料较少,据1983年在黔江和郁江交汇口下游约2 km的铜鼓滩坝址和1986、1987年在武宣水文站上游15.1 km的陇村推移质泥沙观测,按照面积比估算,长洲枢纽坝址处推移质输沙量为30.23万~54.28万t/a,长洲枢纽建成后,近2/3的推移质泥沙将被拦截在库区<sup>[8]</sup>。

因此,上游径流量稳定,来沙量大幅度减少,形成“清水”下泄,势必造成河床冲刷,可以判断来沙量减少,特别是上游长洲枢纽的拦沙作用是导致2007年以后四滩河段河床下切的重要原因。当然坝下游四滩河段河床冲刷也并非一致冲刷下切,随着上游来水来沙的稳定,河床床面的粗化保护,河床下切减缓,趋于新的平衡。2012、2013年来水来沙基本相近,2013—2014年地形比较,该时段冲淤变化已经相对较少,这也说明河床在趋于新的平衡。

## 2) 航道工程影响。

1986—2014年,西江四滩河段进行过3次大的航道整治,2008—2010年的最后一次航道整治时间正好是四滩河段整治线范围内河床剧烈下切时期。此次航道整治工程界首滩共布置61座丁坝,新建丁坝27座加高加长34座,清礁14处,三滩河段布置55座丁坝,其中新建丁坝21座,加高加长旧丁坝34座,清礁10处,筑坝清礁工程于2009年12月完工<sup>[7]</sup>。

根据航道整治工程前后的2006年11月、2009年12月、2013年实测河床各断面地形图5对比,四滩河段主槽在航道整治工程后发生很大下切,而边滩基本稳定甚至有少量淤积。断面1和2界首段主槽在筑坝清礁工程完成前就已经较大幅度下切,2010年的疏浚工程中,界首段仅料塘处少量疏浚,共计疏浚土方 $0.65 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;三滩河段发生主槽冲刷时间则是在筑坝清礁工程后,其后续的疏浚工程位于断面6的开南大桥附近和断面8的长岗弯曲段,疏浚土方共 $62 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,疏浚土方量相对于四滩河段2007—2013年的冲刷土方量,不到10%。因此西江航道整治工程改变了四滩河段的河床边界条件,束水效应促使河槽主槽冲刷,这也是四滩河段2007—2013年河床整治线范围内的河槽主槽严重冲刷下切的重要原因。

根据丁坝工程实施前后地形对比,即2006年与2009年地形对比,在丁坝工程完成后的2009年,主槽下切非常明显,说明丁坝束水冲沙效果能在

短期内快速显现,而2013—2014年,因西江四滩河段航道整治工程,河道冲淤相对较少。

### 3) 采砂影响。

河道采砂对挖砂河段的河床演变影响很大:一方面,直接降低了河道输沙量;另一方面,加剧了河床变形,进而导致河道水动力变化。近30年来,珠江三角洲地区经济飞速发展,大规模的基础建设使得河沙需求量急剧增加,河道采砂泛滥,至20世纪90年代初达到高潮。据统计,广东省河道在1985—2005年短短20年间的挖砂总量达 $16.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,而1990—2012年,年平均输沙量仅有3386万t,约相当于河道116a泥沙沉积量<sup>[9]</sup>。目前没有详细资料记录四滩河段具体产砂量情况。

考虑到四滩河段处于长洲枢纽下游,又是渔业保护区,产砂监管相对严格,同时四滩河段河床有不少礁石,影响采砂产出,根据相关调查,西江采砂主要集中在都城以下<sup>[9]</sup>。对比2006—2013年、2013—2014年两段期间的河床变化及各影响因素,得知四滩河段的采砂并非河段剧烈下切的主要原因,否则四滩河段在2013—2014年间河床就不会相对稳定。

### 4.2 河床下切对通航水位水深的影响

2006年前,四滩上游梧州站设计最低通航水位为2.95m,四滩河段河床下切势必导致其水位下降,直接影响四滩航道水位。图9为通航保证率98%的设计流量 $1128 \text{ m}^3/\text{s}$ 下梧州水文站1954—2012年相应最低通航水位变化曲线。由图9可见,1993年以前,特征流量下,梧州站水位虽然略有下降,但下降趋势并不明显,1954—1992年下降了0.08m,平均每年下降0.002m。1993—2003年水位下降较为明显,下降了0.62m,平均每年下降0.062m。2004—2012年,最低通航水位仍呈明显下降趋势,平均每年下降0.123m,下降约0.98m,降至1.83m。低于梧州设计最低通航水位1.2m(国家85高程基准面)。

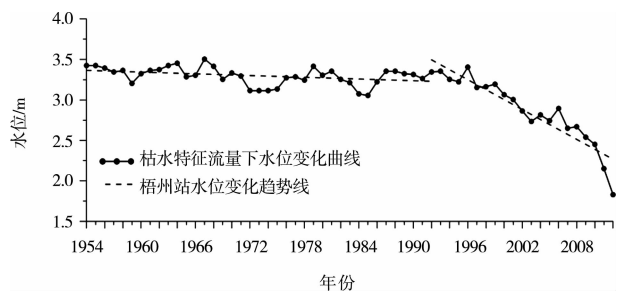


图9 梧州站最小通航设计流量下水位变化曲线

根据河床冲淤分析,2004—2014年近10年河槽累积平均冲刷厚度为1.04m,整治线范围内河道主槽10年间平均冲刷厚度累积达1.83m,其中2007—2013年,河槽平均冲刷厚度为1.11m,整治线内范围内主槽河床冲深1.93m;对于四滩段航道水深而言,航道内的水深总体增加,有利于航道水深稳定,当然枯水期对于河床未下切的礁石区域,通航水深无疑影响是明显的,需要进行一定的疏浚清礁等措施。

## 5 结论

1) 西江四滩河段2004—2014年河床演变分析表明,研究河段河床下切明显,近10年累积冲刷厚度达1.03m,冲刷主要集中在主槽,累积平均冲刷厚度达1.83m,边滩冲淤平衡;河床冲刷剧烈期为2007—2013年,约占2004—2014年总冲刷量的95%。

2) 导致2004—2014年河床总体下切的主要原因是上游含沙量和输沙量持续减少,上游长洲枢纽蓄水拦砂泄清、四滩河段航道整治工程的实施是导致四滩河段整治线范围内河槽主槽于2007—2013年间冲刷剧烈的主要原因,河段内采砂非近10年河床下切的主要原因。

3) 四滩河段的河床下切导致最低通航水位下降1.0m有余,但最低通航水位下航道水深并未整体性减少,除未下切的礁石区域,通航水深略有增加。

(下转第126页)