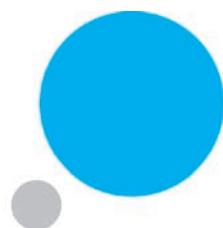




第1章 绪 论



1.1 水库建设与河流水沙环境变化概况

大河流域孕育了人类文明,为现代经济社会发展提供了丰富的物质资源和能源供给。河流是地球生物化学过程发生的关键区域,也是陆地水生态系统中的重要组成部分(Allen et al., 2018)。河流水系连接着陆地和海洋,是两者间物质交换的主要通道,全球的河流每年向海洋输送约 $36 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的淡水和约 200 亿 t 的泥沙(Syvitski, 2003; Milliman et al., 2011)。工农业发展中需要的水资源大部分来源于河流提供的淡水,大型城市也多数都坐落于河流沿岸。为了更好地利用河流的资源 and 能量,人们不断在流域内修建水库,截至 2022 年全球已建有超过 45 000 座的大型水库(坝高 15 m 以上或水库库容大于 300 万 m^3)。这些水库分布在世界上的主要大河或湖泊上,为全球农业提供了约 30%~40% 的灌溉水源,同时为城市提供了约 19% 的电力供应(WCD, 2000),为人类社会的持续发展提供了重要的支撑作用。

伴随着全球范围内大规模的水库建设,其调蓄作用和拦沙效应已经明显改变了原有河流系统的径流过程和泥沙输运格局,对于大型水库尤为显著。全球和亚洲的水库分别淤积了约 20% 和 31% 的河流泥沙,许多大河在水库修建后下游输沙量锐减(Syvitski et al., 2005; Walling, 2006),并在下游河道发生显著的沿程冲刷等现象(Williams et al., 1984; 谢鉴衡, 2002)。如非洲的尼罗河和奥兰治河、亚洲的印度河和长江,这些河流当前的输沙量相比建坝前减少了 1/2 以上(Vörösmarty et al., 2003; Yang et al., 2011)。同时,水库调蓄改变了陆地水资源在时间和空间上的分配,影响了河流径流量、水位和水文极值频率分布(Graf, 2006; Xu et al.,

2009)。河流上游修建水库产生的影响在经过复杂的沿程调整之后,最终会传递到河口(Hoitink et al., 2016)。入海输沙量的减少不仅会影响河口三角洲、海岸线和河口湿地的地貌(Bird, 2008; Kirwan et al., 2013; Syvitski et al., 2009),还会影响沿海区域的水生环境(Jickells, 1998)。从系统观点看,在流域大型水库或水库群的运行调蓄下,水库库区、下游河道直至感潮河段的水文、泥沙和动力地貌过程会产生相应的调整,从而对整个河流-河口水沙系统的环境条件和生态功能造成影响。

长江,就其巨大的水沙通量和受水库调控影响的显著程度而言,为研究大型水库运行对河流-河口系统水沙过程的影响规律提供了一个重要的研究对象。长江长约 6300 km,为全球第三,入海径流量约 9000 亿 m^3/a ,为全球第四,输沙量约 5 亿 t/a (按 20 世纪 70 年代数据统计结果),为全球第五(Milliman et al., 2011; Yang et al., 2015)。据国家统计局 2018 年数据,长江干流沿岸建有 16 个大型城市,合计人口约 1.34 亿,这些城市的发展和居民的生产生活都与长江息息相关。自 20 世纪 50 年代起,长江流域修建了 5 万余座水库,其中库容超过 1 亿 m^3 的大型水库约 270 座,流域总库容约 4000 亿 m^3 (周建军等, 2018)。三峡水库是长江干流上的最大水库,也是目前世界上装机容量最大的水利水电工程。水库从 2003 年 6 月开始蓄水运行,2010 年 10 月坝前水位蓄水至 175 m 的正常蓄水位,按设计水位运行至今已 10 余年。三峡水库上游金沙江大型梯级水库群中的向家坝和溪洛渡水库分别于 2012 年和 2013 年投入运行,乌东德和白鹤滩水库分别于 2020 年和 2021 年下闸蓄水。长江流域大型水库群对河流-河口系统水沙过程的影响已经或正在逐步显现(Chen et al., 2016; Zhou et al., 2017; Dai et al., 2018; Guo et al., 2018; Yang et al., 2018; Guo et al., 2019; Sun et al., 2021)。

水库修建对河流系统具有多方面的影响,其中最直接的是对水流的影响。水库运行会引起库区、大坝下游直至河口地区水体输运的变化。对于河流、湖泊或水库等水体而言,水体输运时间尺度与流量、水温等生境要素的季节性协调变化有关,这些生境要素是体现和维持河流生态系统正常节律的基础条件,对生态环境有着至关重要的作用(Koiv et al., 2011; Tornés et al., 2014; Javaheri et al., 2018; Maavara et al., 2020)。而水库调蓄将显著改变水体输运原有时间尺度的大小和节律变化,进而影响水环境与生态系统。例如,水库蓄水的增加可能导致全球范围内水体老化、水体的流动状态变化、地表水的再氧化等(Humborg et al., 1997a)。在长江流域内,上游大型梯级水库群运行后,河流水体沿程输运时间发生了显著的改变(Sun et al., 2021)。提高对长江水体输运时间尺度的认识不仅有助于研究已建水库运行可能导致的生态环境问题,如水质恶化、局部水华和鱼类种群数量减少等(Gao et al., 2014; Zhou et al., 2015; Long et al., 2016; Huang et al., 2018),也

能够为拟建或在建大坝的综合规划和管理策略的制定提供参考。

悬沙运动特征显著改变是水库对河流的另一个显著影响。随着三峡等大型水库的持续修建和运行,长江中下游的悬沙输移量大幅降低,相比于流域水库运行前(1956—1968年),2013—2015年的悬沙输移量降低了77%~97%(Yang et al., 2018)。悬移质泥沙的减少引起长江中下游河道的冲刷,以及干流与湖泊或支流悬沙交换关系的调整。此外,河流悬沙浓度的改变会影响到河流营养物质分布及相关生境条件,如磷元素的吸附与解吸附过程(Froelich, 1988; Zhou et al., 2015),悬沙的减少还将通过影响水体的透明度进一步对河流系统的初级生产力和生态环境产生作用(Stefan et al., 1983; Bilotta et al., 2008)。

水库运行引起的泥沙通量变化会对长江下游感潮河段的地形演变产生重要影响,这种影响不仅在短时间尺度上有所反映,还可能延续更长的时间(Williams et al., 1984; Ganju et al., 2010; Luan et al., 2017)。近几十年来,在自然变化、上游减沙和局部工程背景下,感潮河段的泥沙收支平衡和地形演变特征正在发生系统性的调整(Wang et al., 2018)。此外,从中长时间尺度(10~100年)上看,上游水沙通量和海平面的变化是长江河口区域长期地形演变的重要控制性因素(Bolla et al., 2015)。20世纪全球海平面的平均上升速度接近2 mm/a,且上升的速度预期在整个21世纪会一直增加(Ablain et al., 2017; Church et al., 2013)。在持续的来沙减少和海平面上升作用下,感潮河段径潮动力与河床地形的调整和再平衡过程将是长江河口区域长期地形演变趋势预测的关键问题之一。

综上所述,大型水库影响下的长江水沙环境的变化是一个综合性问题,其中包括了河流水体输运时间的改变、泥沙输运的变化以及感潮河段在径流-潮汐相互作用下的水沙动力与地形调整等重要过程。截至2022年三峡工程已按正常蓄水位运行了10余年,上游金沙江梯级水库也陆续投入运行,针对水沙环境等基础问题的深入研究是未来科学管理长江和优化水库运用的重要前提。因此本书基于长序列实测水沙数据、结合数学模型计算与理论分析等手段研究和预测长江中下游水沙动力过程及其变化趋势,研究成果可以揭示人类活动作用下河流-水库-河口系统水沙演变规律,同时为长江大保护、长江经济带、长三角一体化等国家战略的实施提供重要的科技支撑。

1.2 长江流域及水库修建概况

1.2.1 长江流域概况

长江发源于青海省的格拉丹东雪山,干流向东流经11个省(区、市)进入东

海,全程约 6300 km。作为我国和亚洲的第一大河,其流域面积约 180 万 km^2 ,流域内人口约 4.5 亿,占我国人口的 1/3,长江经济带是我国经济社会发展的重点区域。

长江流域的整体地势为西北部高而东部低,流域内支流水系众多,根据地理条件的不同长江干流可以分成上游、中游和下游 3 个河段。上游河段从长江源头延伸到宜昌,流域面积约 100 万 km^2 。四川宜宾以上的干流河段称为金沙江,全长 3500 km,宜宾以下始称长江。上游北岸依次有雅砻江、岷江、沱江和嘉陵江等重要支流汇入,南岸有乌江汇入。自然状态下长江上游河段为山区河流,河道坡度陡、水流比降大。长江中游河段从宜昌到鄱阳湖口,长度约 950 km,流域面积约 68 万 km^2 。中游河流的比降较上游缓,在荆江河段干流通过三口(松滋口、太平口和藕池口)分流进入洞庭湖,洞庭湖出流在城陵矶出口处汇入长江。汉江水系在汉口龙王庙附近汇入长江,鄱阳湖水系在九江湖口处汇入长江。湖口以下为长江下游,长度约 930 km,流域面积约 12 万 km^2 (王兆印等,2009;夏云峰等,2015),江苏以下江段又称扬子江。长江本意指宜宾—湖口的江段,在现代文献中,长江也常用于指包括金沙江在内的长江干流或整个流域,在英文语境下常将 Yangtze 与 Changjiang 等同,都可以用来表示长江干流或流域。长江流域降水受季风气候影响,径流存在明显的洪季和枯季变化,全年大约 70% 的径流集中在 5—10 月的洪季,而枯季只有 30% 的径流量。

长江流域及水库概况如图 1-1 所示。

1.2.2 流域大型水库群运行概况

长江流域内至今已修建水库超过 50 000 座,总库容约 4000 亿 m^3 ,其中库容在 100 万 m^3 以上的水库就超过 200 座,总库容超过 1000 亿 m^3 ,并且在干支流上还修建有一系列的世界级超大型水库。表 1-1 列出了长江干流和主要支流部分大型水库的关键信息。长江干流上修建的第一个大型水库是葛洲坝水库,总库容为 15.8 亿 m^3 ,于 1981 年开始运行;第二个大型水库是三峡水库,总库容 393 亿 m^3 ,于 2003 年开始蓄水。近年来,金沙江下游梯级水库群中 4 个大型水库也陆续开始蓄水运行,其中的向家坝和溪洛渡水库的库容分别为 51.6 亿 m^3 和 126.7 亿 m^3 ,已于 2012 年和 2013 年陆续投入运行,乌东德和白鹤滩的库容分别为 76 亿 m^3 和 206 亿 m^3 ,分别于 2020 年和 2021 年下闸蓄水。关于长江流域内大型水库的修建和运行情况可参考相关专著或数据库,本节主要介绍长江干流最关键的水利枢纽三峡工程的运行情况。

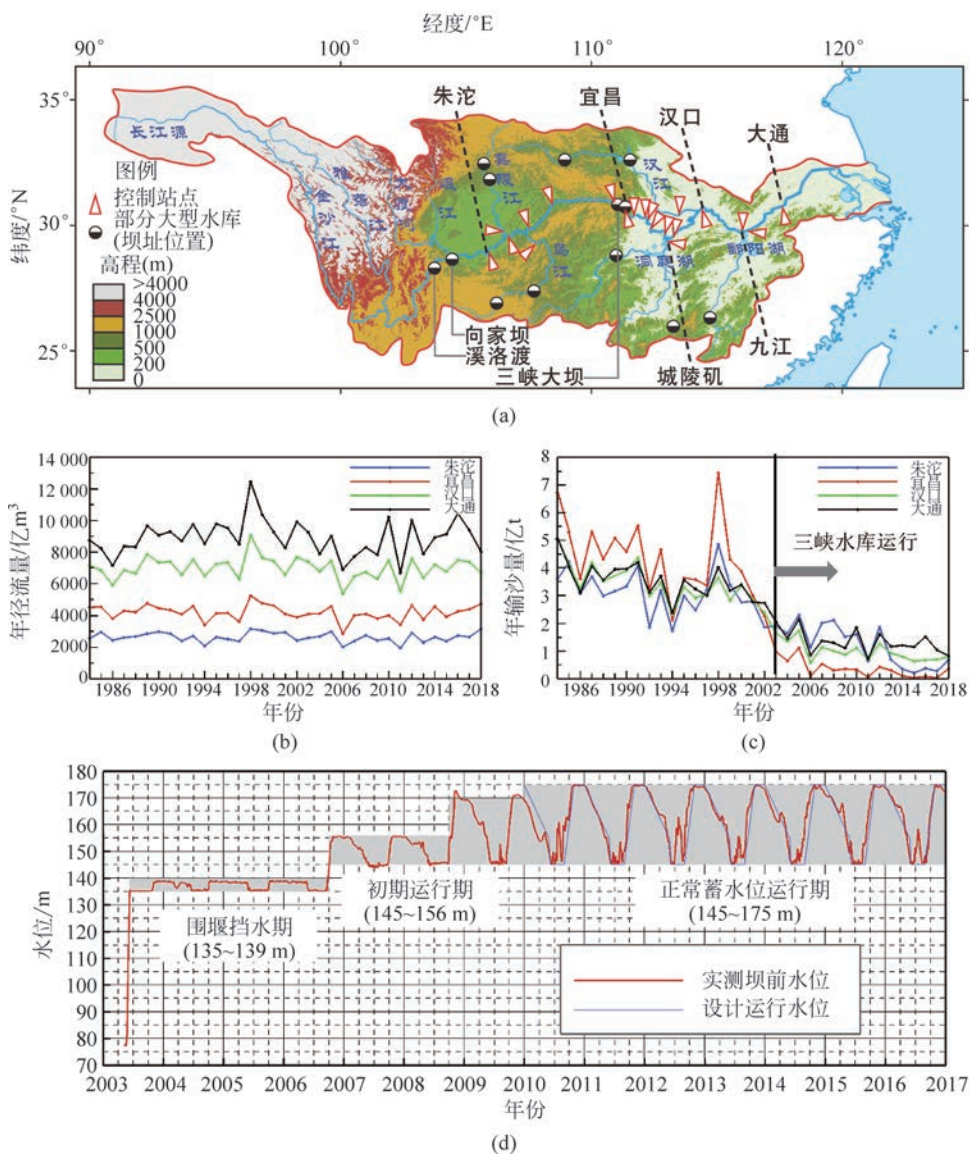


图 1-1 长江流域及水库概况(审图号：GS 京(2023)0586 号)

(a) 长江流域地形和重要水文站点位置；(b) 长江干流重要控制站的年径流量；(c) 长江干流重要控制站的年输沙量；(d) 长江三峡坝前水位的变化

注：图(a)中标注了本研究中收集的长江流域实测水沙数据的控制站点位置，从上游到下游的控制站依次为：朱沱、北碚、寸滩、武隆、清溪场、万县、庙河、宜昌、松滋口(新江口和沙道观)、太平口(弥陀寺)、沙市、藕池口(康家岗和管家铺)、监利、城陵矶、螺山、仙桃、汉口、九江、湖口和大通；图(a)中同时标注了本书中分析提及的流域内干流和支流上的重要水库，水库详细信息见表 1-1。

表 1-1 长江流域干流及主要支流大型水库信息

河流	水库名称	坝高/m	水库长度/ km	总库容/ 亿 m ³	控制流域面 积/万 km ²	修建年份
长江 干流	葛洲坝	53.8	38	15.8	100.0	1981
	三峡	181.0	663	393.0	100.0	2003
金沙江	向家坝	162.0	200	51.6	45.9	2012
	溪洛渡	285.5	150	126.7	45.4	2013
	乌东德	270.0	200	76.0	40.6	2020
	白鹤滩	289.0	145	206.0	43.0	2021
雅砻江	二滩	240.0	145	57.9	11.6	1998
嘉陵江	宝珠寺	132.0	67	25.5	2.8	1996
	亭子口	116.0	150	41.2	6.1	2013
乌江	洪家渡	179.5	85	45.0	1.0	2004
	构皮滩	232.5	137	64.5	4.3	2009
汉江	安康	128.0	128	32.0	3.6	1989
	丹江口加高	176.6	287	290.5	290.5	2012
洞庭湖	东江	157.0	160	92.7	0.5	1988
	五强溪	87.5	150	42.0	8.4	1994
鄱阳湖	万安	58.0	90	22.1	3.7	1990

注：本研究中相关的长江流域内干流和支流重要水库的信息主要来源于国家能源局大坝安全监察中心网站和文献(张信宝 等, 2011; Zhao et al., 2017)。

长江三峡水利枢纽位于长江三峡之一的西陵峡,距离长江口门处约 1800 km,是世界上装机容量最大的水电工程。三峡水库正常蓄水位和防洪限制水位分别为 175 m 和 145 m,对应的水库回水区末端分别在江津和长寿附近,距三峡大坝约 680 km 和 540 km。库区上游干流的入库水文控制站是朱沱站,距离坝址约 756 km;大坝下游的水文控制站为宜昌站,距离坝址约 40 km,如图 1-1(a)所示。从 2003 年开始,三峡水库以分期蓄水的方式逐步蓄水至正常蓄水位。2003 年 6 月,水库合龙蓄水,坝前水位蓄至 135 m,当年汛末蓄至 139 m;2006 年 9 月,水库实行第 2 次蓄水,至 156 m;2008 年 9 月,三峡水库开始首次 175 m 试验性蓄水,当年坝前水位达到 172.8 m;次年汛末,第二次启动试验性蓄水,坝前水位达到 171.43 m;2010 年,第三次启动试验性蓄水,三峡水库首次达到 175 m 正常蓄水位;此后,水库正式进入正常蓄水位运行阶段,即每年汛末蓄水至坝前 175 m 水位,如图 1-1(d)所示。在正常蓄水位运行阶段,三峡水库按照 175—155—145 m 的调度模式进行年内调蓄:汛期(6—9 月),水库按照防洪限制水位 145 m 运行;汛末

蓄水期(9—10月),水位蓄至175 m的正常蓄水位;次年1—5月,坝前水位从175 m的高水位逐步下降至155 m左右的汛前水位;在汛期来临之前,水位进一步下降至145 m的防洪限制水位。在实际运行过程中,根据上游来水来沙情况,并综合考虑防洪、发电、灌溉、航运等各种需求,水库调蓄方式会进行相应调整。

值得注意的是,虽然长江流域内水库数量众多,总库容量也很大,但是三峡等大型水库陆续投入运行后,干流主要控制站的年径流总量并没有发生明显变化,如图1-1(b)所示。这主要是因为长江径流量巨大,其多年平均径流量约9000亿 m^3/a (以大通入海流量计),流域内水库均为季节性调蓄水库。更重要的是,流域内由于修建水库等原因导致的用水调水增加量与河流径流总量相比较小,因此长江径流量的年际变化并不显著。

与径流量不同,长江泥沙输运状况受水库运行影响非常显著。三峡库区修建后(2003—2017年)多年平均的泥沙淤积量为1.15亿 t/a ,约占总来沙量的80%(郑守仁,2019)。长江的主产沙区之一是三峡水库上游的金沙江流域,随着金沙江下游梯级水库的建设完成,水库群对泥沙的拦截效应也在逐步显现。基于2013—2016年实测资料分析,向家坝和溪洛渡两座水库年平均拦沙量占来沙量的98%,几乎拦截了所有的来沙(秦蕾蕾等,2019),三峡水库的入库水沙条件也因此发生了重大改变。受长江上游大型水库整体拦沙效应影响,长江中下游的悬沙输移量大幅降低(图1-1(c)),宜昌的年平均悬沙通量已经由1950—2002年的4.92亿 t/a 降至2003—2018年的0.36亿 t/a (李一冰等,2015)。

1.2.3 长江口与感潮河段概况

从广义上讲,河口包括从潮区界到口门外滨海的地带。长江口一般是指从潮区界的大通站到口门外的水下三角洲的前缘(30~50 m等深线)之间的水域(沈焕庭等,2003),如图1-2(a)(b)所示。从地貌特征上来看,长江口可分为3段:近口段指从大通到江阴,受河道控制作用显著,该河段内多出现江心洲河型;河口段指江阴一口门处,河槽分汊多变,徐六泾以下江面逐渐展宽,呈现出三级分汊、四口入海的基本格局,口门处最大宽度约90 km;口门外海滨段发育有水下三角洲(沈焕庭等,2001)。长江感潮河段是指潮区界大通一口门之间的长江干流部分,也是本书重点研究对象之一。

长江口属于中等潮汐强度河口,受长江径流与外海潮波相互作用显著。大通站的年平均径流量约29000 m^3/s ,在枯季12月份和洪季7月份,平均径流分别为15000 m^3/s 和49000 m^3/s 左右。口门外的拦门沙地区平均潮差超过2 m,其中 M_2 分潮起主导作用,潮汐属于正规半日潮。潮波进入口门后,因水深变浅和径流作用发生变形。潮流场在口门外主要运动形式为旋转流。口门内感潮河段水流受

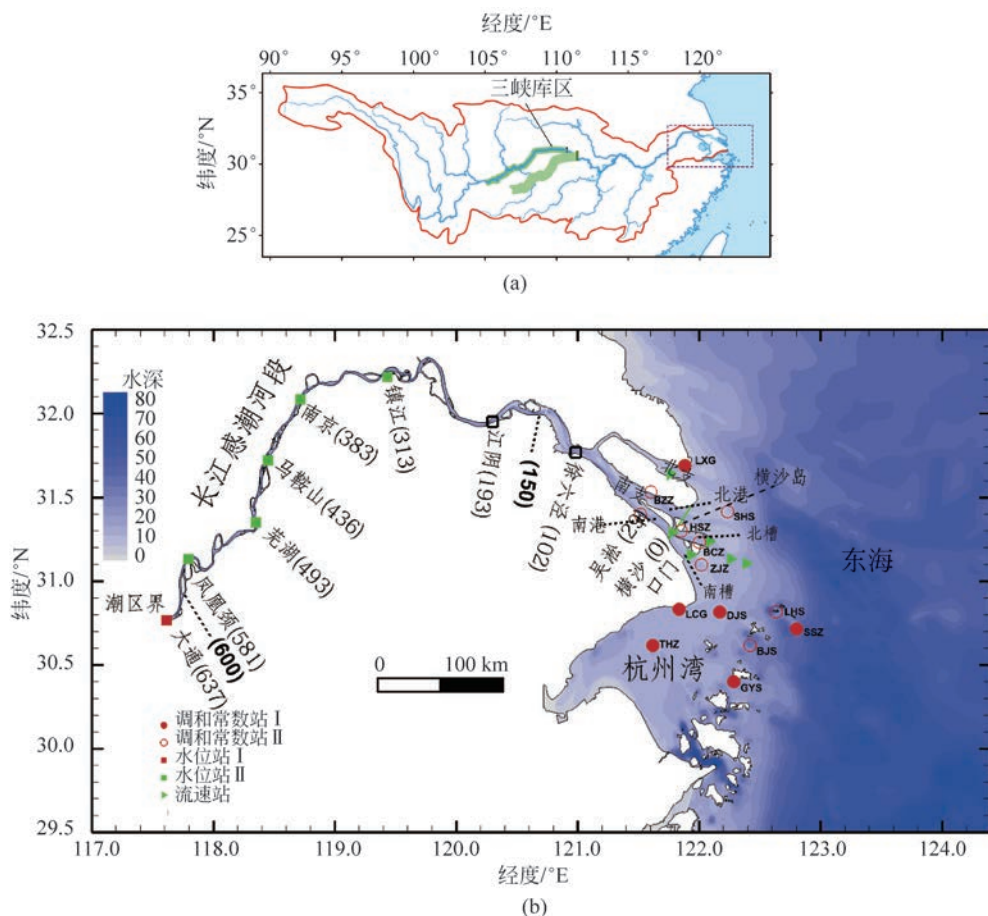


图 1-2 长江流域水系示意图和感潮河段近岸海域地形示意图(审图号: GS 京(2023)0586 号)

(a) 长江流域水系示意图; (b) 长江感潮河段近岸海域地形示意图

注: 图(b)中调和常数站 I 代表对实测水位序列进行调和与分析以得到各分潮调和常数的站点; 调和常数站 II 代表从文献中获得各分潮调和常数值值的站点; 水位站 I 和 II 分别代表用于模型率定和模型验证的水位站点; 流速站从上游往下游依次为站点 Z9, CS1D, Z5, CSWD, CS4D 和 CS5D。

河槽约束作用, 潮流界以下主要运动形式为双向往复流, 潮流界以上为单向流但存在日内波动现象(沈焕庭 等, 2001)。

大通站的年平均悬沙浓度为 0.486 kg/m^3 , 主要为细颗粒泥沙, 悬沙的中值粒径为 0.017 mm 。50% 的流域来沙在南支口门附近沉积, 水下三角洲是主要的泥沙淤积区域。在口门外主要由涨落潮流往复运动消能, 盐水楔异重流对水流结构的改变, 以及含沙量分布等多种因素形成了最大浑浊带(陈吉余, 2009)。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 水库修建对河流水体输运时间的影响

河流通过输运大量淡水、泥沙、营养物质等将陆地和海洋连接起来,在全球物质能量循环中发挥着重要作用,同时为自然界和人类社会提供了重要的资源、能量和环境条件。在河流系统中,水流及其携带的物质从汇入河道到河口入海的输运时间尺度是其物质输运过程的基本度量,也是河流生态系统节律的重要依靠。在自然条件下,流量、水温等基本要素呈现有规律的季节性波动,河流生态系统在漫长的进化过程中演化出与之相适应的自然节律。但是,自20世纪50年代以来,世界范围内大坝数量显著增加,例如密西西比河、亚马孙河、尼罗河、黄河和长江等大型河流都在密集地进行水库建设(Nilsson et al., 2005)。水库的大规模修建和运行对河流、河口及近岸海域的物质输运过程都有着深远的影响(Milliman et al., 2011)。这些影响不仅改变了生物及非生物物质通量,而且还导致它们的输运过程和时间尺度偏离自然节律。

作为基本时间尺度,滞留时间和水龄是量化水体输运过程的重要指标,两者在概念上具有互补的性质(Takeoka, 1984)。水龄,即水体微团的年龄,通常是指该水体微团通过指定边界进入研究区域所经过的时间长度,而滞留时间指研究区域内的水体微团离开该区域所需的时间长度。滞留时间和水龄通常被用来描述湖泊、河口或沿海地区水体输运时间的分布特征(Deleersnijder et al., 2001)。国内外学者通常采用水文数据估算滞留时间,即通过某一水体的体积与流量之比求得,也可称作水力滞留时间(hydraulic residence time, HRT),在一定条件下可用于反映水体的更新速度(Maavara et al., 2020)。不同水库或者湖泊,水力滞留时间的变化范围从日到年不等(Köiv et al., 2011; Tornés et al., 2014; Javaheri et al., 2018; Maavara et al., 2020)。需要指出的是,水力滞留时间估算的一个隐含假设是体积和流量两个物理量必须是稳定的,至少需要在水力滞留时间尺度范围内是稳定的。但是,实际情况下水库、湖泊等水体的水位和流量都是不断变化的,不仅存在显著的洪、枯变化,还有不同幅度的短周期波动。因此,如果所研究水体的水力滞留时间尺度较大,其体积或流量发生了较大变化,该水力滞留时间估算值将不能有效描述水体的滞留过程和更新过程。

虽然滞留时间和水龄的概念已经应用于湖泊、水库和河口等水体,但是对大跨度的河流系统,尤其是对大型河流,相关水体输运时间尺度的研究仍然非常缺乏。作为一个连续体,河流的上游和下游即使相隔数千千米,也会通过水体的输运作用连接在一起,因此河流系统上下游之间有着密切的联系,这也充分地反映在水龄和

滞留时间等水体输运时间尺度上。当在河流上修建大坝后,在一定程度上会隔断水流,而且将会影响上下游较长的距离,从上游的回水区到大坝下游河段,以及河口与邻近海岸都可能受到不同程度的影响。这些影响包括但不限于水体流动状态的变化(Nilsson et al., 2005)、生物地球化学结构的扰动(Humborg et al., 1997)、下游沉积物减少和三角洲侵蚀(Yang et al., 2011; Alexander et al., 2012; Kondolf et al., 2014)。因此,有必要对大型河流的水体输运时间进行系统研究,分析其沿程分布特征和季节变化规律,尤其是要厘清水库修建等人为干扰对水龄和滞留时间等特征参数的影响。

长江流域修建了大量水库,仅干流与上游的金沙江就有三峡、向家坝、溪洛渡、白鹤滩和乌东德 5 个世界级大型水库,河流水动力过程受水库调节作用明显,生境条件发生了显著变化。目前关于大坝对河流系统影响的研究中,关注的重点主要是与泥沙相关的主题,如水库淤积泥沙、下游河道侵蚀和三角洲缺沙(Yang et al., 2011; Dai et al., 2013; Dai et al., 2014; Yang et al., 2014; Luo et al., 2017; Guo et al., 2018)。近年来,水库运行导致的生态环境问题也逐渐被重视,如局部水华和鱼类物种减少等(Zhou et al., 2015)。长江受水库调蓄等人类活动影响的规模大、范围广且条件复杂,需要进行综合研究,尤其是针对河流水体长距离输运规律和时间尺度等基本规律进行系统研究。

1.3.2 水库影响河流悬沙输运特征的研究

水库的调蓄改变了河流水量在时空上的分配,其对下游河道的径流节律、水位过程和水文极值频率的改变作用已被广泛认知和研究(Riggs et al., 1990; Avijit, 2007)。同时,水库的拦沙效应改变了河流输沙量的分布格局,大型水库下游河流悬沙输移量和悬沙浓度普遍降低。研究表明,一些多沙河流上水库运行后,对于泥沙的拦截率可以高达 90%,水库下游的悬沙输运量下降至了极低水平(Vörösmarty et al., 2003)。Avijit(2007)指出,科罗拉多河的输沙量从水库建设开始前的每年 1.2 亿 t 减小至水库运行后接近零。在尼罗河上的阿斯旺大坝运行前,坝下 41 km 处河流洪季悬沙浓度接近 5 kg/m^3 ,水库运行后大坝下游处洪季的悬沙浓度迅速降低至近 0.06 kg/m^3 (Gasser et al., 1994)。欧应钧等(2014)统计得出汉江丹江口水库修建之后,坝下黄家港站年平均悬沙浓度从 1950—1958 年的 2.18 kg/m^3 下降至 1974—1979 年的 0.03 kg/m^3 。水库下游悬沙输移量和悬沙浓度的降低引起了坝下河道冲刷,同时河流的悬沙浓度存在着沿程恢复这一现象(钱宁等, 1987)。随着水库持续运行,下游河道冲刷放缓(Williams et al., 1984),悬沙浓度沿程恢复的过程也随之调整,这种调整与坝下的水量沙量以及河床河岸的泥沙地质条件有关(Brandt, 2000)。从现有的研究看,水库下游河道的悬沙恢复过程的模拟和预测仍