

流域环境变化的河流沉积物粒度响应 ——澜沧江案例

傅开道^{1,2}, 杨文辉^{1,2}, 苏斌^{1,2}, 李大兴^{1,2}, 李孟洋³, 张继来^{1,2}, 宋静宜^{1,2}

(1. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650091; 2. 云南大学云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 昆明 650091; 3. 华能澜沧江水电股份有限公司, 昆明 650214)

摘要:河流沉积物对流域环境变化具有敏感响应,其粒度参数能反映水动力环境。本文以澜沧江为研究案例,探究河流沉积物粒度对流域环境变化的响应。从澜沧江干流19个主要控制断面采集河床沉积物样品,用筛分法和吸管法对沉积物样品粒度参数进行测定,并分析了粒度参数的时空变化规律及其对流域水能开发为主的人为环境变化的响应。研究结论认为:①在空间尺度上,上游高原区,河谷宽坦,下蚀微弱,水流平缓,沉积物粒度较小,分选较好,呈负偏或近对称小峰度分布;中游高山峡谷河段,水流湍急,沉积物粒径变粗,分选相对上游较差,但整体分选良好,粒度出现较多正偏尖峰分布;下游中低山宽谷区受到梯级大坝的影响,河床沉积物中值粒径和平均粒径明显增大,且平均粒径增大更明显,分选变差,偏态趋向正偏,峰态尖锐化。②不同时间的样品粒度变化,反映梯级大坝致使坝下游沉积物中值粒径和平均粒径明显增大,且中值粒径增大更明显,分选变差,偏态趋向正偏,峰态尖锐化。研究结果既符合河流上下游沉积物粒度分布规律,也反映了河流环境变化对沉积物粒度组成的影响。

关键词:河流沉积物;粒度;环境变化;水电开发;澜沧江

1 引言

通过对河流沉积物的特征分析,可研究沉积物对气候变化和人类活动影响下的流域环境变化的响应;获取河流沉积物中所记录的各种环境变化和人类活动信息,不仅能反演近代沉积环境变化,还能对未来沉积环境变化作出预测(刘昌明等, 2006)。泥沙的粒度特征是沉积环境的一个重要判别标志,碎屑物质以机械搬运为主,其搬运和沉积作用受水动力条件(如介质、流量、流速)控制,碎屑物质埋藏后除部分石英有次生加大或溶解外,一般颗粒变化不大,因此粒度大小及分布特征,可用来直接反映沉积时的水动力条件(陈建强等, 2001),一般来说颗粒越大,反映的水动力也越大;反之,颗粒越小,水动力也越小。河流泥沙粒度特征是泥沙理化性质重要组成部分,也是解决泥沙问题的关键。

澜沧江—湄公河是流经中国及东南亚5个国家

的重要国际河流,流域沉积环境正发生极大的变化,其中分布在干支流上的不同规模梯级水电站即是其主导因素。梯级大坝建设扰乱了河流连续性,截断了河流泥沙输移通道,改变了河道水文情势和泥沙输送过程,使部分泥沙被拦截在库区(Kummu et al, 2007; Fu et al, 2008; Walling, 2008; Kummu et al, 2010)。澜沧江梯级大坝多个水库拦沙率超过60%(傅开道等, 2007),拦截了河段的大部分输沙,同时也对下游泥沙粒径组成产生影响(郭维东等, 2010; 黄江成等, 2010)。此前在澜沧江流域的研究多关注因水库拦沙引起的下游输沙量变化这一主题(尤联元, 1999; Lu et al, 2006; 傅开道等, 2006; 郭维东等, 2010; 黄江成等, 2010),而关于该流域梯级大坝对河床沉积物粒径的影响研究却鲜有报道。因此,本文通过采集澜沧江干流从源区至出境口19个断面的河床沉积物样品,开展粒度分析,研究以粒度为指示的澜沧江干流沉积环境。研究可为澜

收稿日期:2015-01;修订日期:2015-04。

基金项目:国家自然科学基金项目(41261100,41571032);云南省自然科学基金项目(2012FB116)。

作者简介:傅开道(1976-),男,海南陵水人,副研究员,主要从事河流泥沙与沉积环境学研究, E-mail: kdfu@ynu.edu.cn。

引用格式:傅开道, 杨文辉, 苏斌, 等. 2015. 流域环境变化的河流沉积物粒度响应: 澜沧江案例[J]. 地理科学进展, 34(9): 1148-1155. [Fu K D, Yang W H, Su B, et al. 2015. Response of river sediments to basin environmental changes: a case study of the Lancang River[J]. Progress in Geography, 34(9): 1148-1155.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2015.09.007

沧江梯级电站开发提供科学依据。

2 澜沧江流域水文泥沙及水电开发概况

作为湄公河上游的澜沧江,其干流总长 2129 km,流域面积 16.48 km²,多年平均流量 2140 m³/s,年出境水量 765 亿 m³(陈茜等, 2000; 何大明, 冯彦, 2006)。澜沧江河段以昌都、功果桥为界划分为上中下游,其中上游河段河川径流以地下水补给为主,约占年径流量的 50%以上,其次是雨水和冰雪融水补给。中下游河段两岸高山,支流短小,山峰终年积雪,但冰雪融水占年径流量比重较小。中游区随着降水量的增加,融雪补给减少,河川径流补给为降水和地下水混合补给。下游河段处于亚热带和热带气候区,受季风影响,降水丰沛,河川径流降水补给为主,降水占年径流量的 60%以上,其次是地下水补给。流域平均年径流深为 450.2 mm,其中:青海区年径流深为 304.4 mm,西藏区 283.3 mm,云南区 583.8 mm,出境口断面多年平均流量 2180 m³/s。

澜沧江上游广大地区均属青藏高原,人口密度小,耕地面积稀少,垦殖率低,人类活动影响小,原生植被保存较完整。河流泥沙含量小,以悬移质为主,在出西藏处的多年平均输沙量约 18.50×10⁶ t(何大明, 1995)。昌都以下,澜沧江云南省境内河段,流域多年平均侵蚀模数 691 t/km²,平均侵蚀速率约为 0.55 mm/a,年均输沙量 61.25×10⁶ t(何大明等, 2000)。其中,昌都—功果桥河段的中游流域,高山峡谷众多,地形陡峻,降雨量大,但耕地少。地表主要外营力有冰冻风化作用、重力作用和流水作用,

加之人类活动(水电站、沿江公路修建及陡坡开垦),导致河流泥沙组成以大颗粒推移质为主,悬移质少,年平均含沙量仅 0.73 kg/m³。功果桥至糯扎渡电站坝址,地形破碎,河谷深切且狭窄,相对高差 1000~2000 m,多干热坝区、温干河谷少雨区和暴雨中心,土地人口承载力大,劣质地多,地表松散层厚,植被差,流水侵蚀作用强,为澜沧江流域(云南境内)水土流失最严重的地区。糯扎渡电站以下流域,河谷相对开阔,水热充足,复生条件好,地表森林覆盖率高,水土流失弱于中上游地区。据云南省水利部门对流域内 13 个测站资料分析,云南境内河川径流含沙量介于 0.057~1.45 kg/m³,最大与最小值相差近 25 倍。普洱河、威远江较大,介于 1.35~1.45 kg/m³;西洱河、流沙河较小,分别为 0.054 kg/m³和 0.14 kg/m³。干流各测站的泥沙含量见表 1(何大明, 1995; Lu et al, 2006),河道特征见表 2(何大明等, 2000),其中南阿河口至南腊河口段缺少河宽数据,其平均比降为 0.42‰。

澜沧江—湄公河水能丰富,澜沧江水能蕴藏量 3.656×10³万 kW,湄公河(不含缅甸)为 3.7×10³万 kW(何大明, 1995; 何大明, 冯彦, 甘淑, 2006; 钟华平等, 2010)。澜沧江上游按“一库七级”(古水、乌弄龙、里底、托巴、黄登、大华桥、苗尾)开发水电;干流中下游规划开发 8 个梯级水电站(何大明等, 2000, 2007),从上至下分别为功果桥、小湾、漫湾、大朝山、糯扎渡、景洪、橄榄坝和勐松水电站,其中以小湾和糯扎渡两大水电站为核心。截至所有样品采集完成时已建成和基本建成的水电站有 6 座(表 3)。

3 材料与方 法

表 1 澜沧江—湄公河干流主要水文泥沙特征
Tab.1 Characteristics of river hydrology and sediment along the mainstream of the Lancang-Mekong River

站名	含沙量/(kg·m ⁻³)	最大断面平均含沙量/(kg·m ⁻³)	输沙率/(kg·s ⁻¹)	年输沙量		侵蚀模数/(t·km ⁻²)
				输沙率/10 ⁶ t	6-9月占比/%	
溜桐江	0.800	15.0	642	20.3	95	296
旧州	0.730	30.3	682	24.8	95	247
戛旧	1.060	33.9	1341	45.6	95	393
允景洪	1.230	19.0	2298	90.8	96	514
清盛	0.645	/	1719	54.2	/	287
琅勃拉邦	0.483	/	1906	60.1	/	224
廊开	0.521	/	2388	75.3	/	251
穆达汉	0.461	/	3561	112.3	/	287
巴色	0.431	/	4198	132.4	/	243

注:溜桐江:1956–1985 年,据何大明(1995);戛旧:1965–1992 年;旧州、允景洪:1965–2005 年;下湄公河站点据 Lu 等(2006)。

表2 澜沧江河道特征
Tab.2 Channel characteristics of the Lancang River

河段	河长/km	河床高程/m	落差/m	河道比降/‰		河谷宽/m		河谷深/m	谷型
				平均	最大	一般	最大		
河源—昌都	556	5167~3210	1850	3.3	15.0	50~200	300~500	300~1000	槽型、V型
昌都—功果桥	821	3210~1230	1980	2.4	3.7	100~200	200~500	800~1500	V型
功果桥—景云桥	213	1230~914	316	1.5	1.9	100~250	300~500	600~800	V型
景云桥—南阿河口	495	914~465	449	0.9	27.0	150~300	800~1200	400~800	V型、槽型

表3 澜沧江下游水电站开发情况
Tab.3 Hydropower development on the mainstream of the Lower Lancang River

水电站	总装机容量/万 kW	总库容/亿 m ³	开工时间	截流时间	开始蓄水时间	首次发电时间	完工时间
漫湾	155	9.20	1986年5月	1987年12月	1993年	1993年6月	2007年5月
大朝山	135	9.40	1993年1月	1997年11月	2001年11月	2001年12月	2003年10月
景洪	175	11.40	2003年7月	2005年1月	2008年3月	2008年6月	2009年5月
小湾	420	150.00	2002年1月	2004年10月	2008年12月	2009年9月	2010年8月
功果桥	90	3.16	2007年5月	2008年12月	2011年9月	2011年11月	2012年3月
糯扎渡	585	237.03	2006年1月	2007年11月	2011年11月	2012年9月	2014年6月

3.1 样品采集

本次实验在澜沧江干流选择 19 个主要控制断面采集河床沉积物。采样点及采样时间如表 4 所示,采样点的分布如图 1 所示。样品采集时间均在汛期,采样点位置一般要求河段平直、断面上下 100 m 范围内无明显弯道及人为干扰,以消除某些河段特殊水力特征及其人为扰动对泥沙的分选干扰。采集边滩表面泥沙,采样深度不超过 10 cm。每个采样点在不同位置取 3 袋样品,封好,每袋重约 1 kg,自然风干,测量前将样品置于 42 ℃ 的恒温箱内干燥 24 h,各样点的干样品混合后获得待测样品(宋静宜等, 2013)。

3.2 实验测试分析

在对样品经加 H₂O₂ 溶液去除有机质、滚筒碾压

分散处理后,对粒径大于 0.062 mm 的采用筛分法,小于 0.062 mm 的采用吸管法进行样品粒径测定。同时选用中值粒径(D_{50})、平均粒径(D_{mean})、分选系数(δ)、偏态(SK)、峰度(K_G)等参数对泥沙粒径特征进行

表4 采样点及采样时间
Tab.4 Sampling sections and time schedule

采样点	采样时间
扎曲河嘎玛、昂曲河—昌都北、昌都镇、吉塘、如美、曲孜卡	2011年9月
白济汛、维登、中排、营盘、旧州、功果桥库区	2009年8月
昌宁潞水、小湾坝下、夏旧、大朝山坝下、允景洪	2011年8月
关累、界碑	2006年7月
旧州	2006、2009、2011年
大朝山	2006、2011年
允景洪	2006、2009、2011年

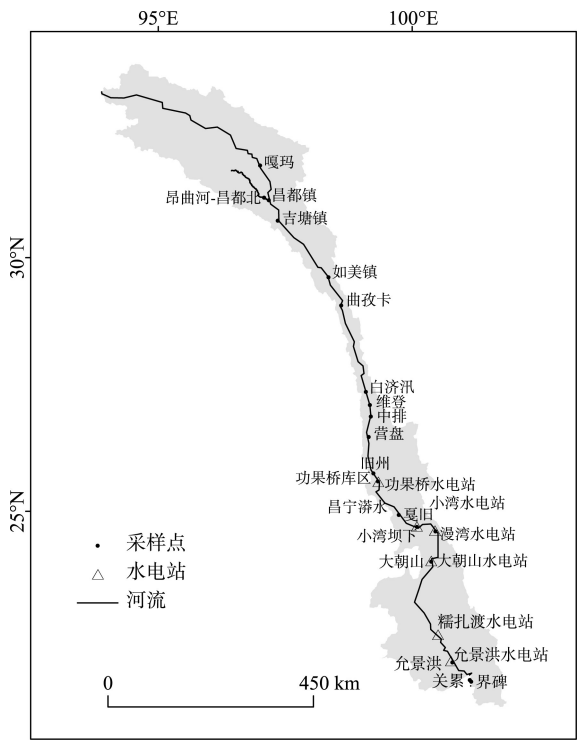


图1 采样点分布图
Fig.1 Distribution of the sampling sites

分析计算。本文粒度参数计算与分析采用Folk等(1957)提出的粒度参数计算方法与粒度参数分级标准(表5)。粒径值与 ϕ 值通过公式 $\phi=-\log_2 D$ (D 为粒径,单位mm)转换。

4 结果与分析

用筛分法和吸管法相结合的方法对河床沉积物样品进行粒径测定后,根据Folk等(1957)粒度分析方法,对澜沧江干流19个河段沉积物粒径计算得出中值粒径、平均粒径、分选系数、偏态、峰度等粒径参数,如表6所示。

4.1 沉积物粒度特征时空分布规律

4.1.1 沉积物粒度参数沿程变化

据表6可知,旧州上游河段,中值粒径和平均粒径从嘎玛到旧州基本趋于水平,数值变化不大;在功果桥库区和关累处突然下降,功果桥库区的中值粒径和平均粒径均为0.05 mm,数值偏小,其中中值粒径为所有样点中的最小值,平均粒径位列倒数第二,关累的中值粒径和平均粒径分别为0.05 mm和0.04 mm,均为所有样点中的最小值;在小湾坝下、戛旧、大朝山、界碑处中值粒径和平均粒径突然增大,中值粒径在大朝山处达到最大值0.38 mm,平均粒径在戛旧处达到最大值0.92 mm。总体来看,上游和中游沿程缓慢细化,波动不大;下游粒径波动激烈,且平均粒径较中值粒径更明显。从分选系数来看,上中下游的变化范围分别是0.05~0.07、0.03~0.16和0.02~2.86,其中上游分选系数小,变化范围

表5 粒度参数分级标准
Tab.5 Grain size grades parameters

分选程度	δ	偏态等级	SK	峰度等级	K_G
分选很好	<0.35	极负偏	-1.00~-0.30	很平坦	<0.67
分选好	0.35~0.50	负偏	-0.30~-0.10	平坦	0.67~0.90
分选中等	0.50~1.00	近对称	-0.10~0.10	中等尖锐	0.90~1.11
分选差	1.00~2.00	正偏	0.10~0.30	尖锐	1.11~1.56
分选很差	2.00~4.00	极正偏	0.30~1.00	很尖锐	1.56~3.00
分选极差	>4.00			非常尖锐	>3.00

表6 澜沧江干流河床沉积物粒径特征参数
Tab.6 Characteristic sediment grain size parameters in the Lancang bed sediments

采样点	D_{10}/mm	D_{25}/mm	D_{50}/mm	D_{75}/mm	D_{90}/mm	D_{mean}/mm	δ	SK	K_G
嘎玛	0.05	0.06	0.10	0.13	0.15	0.08	0.05	-0.11	0.85
昂曲河—昌都北	0.05	0.06	0.11	0.15	0.16	0.10	0.05	0.01	0.74
昌都镇	0.05	0.09	0.13	0.16	0.17	0.14	0.07	-0.04	1.56
吉塘镇	0.11	0.12	0.14	0.16	0.16	0.11	0.03	-0.26	1.17
如美镇	0.05	0.07	0.11	0.13	0.14	0.08	0.04	-0.09	0.79
曲孜卡	0.05	0.06	0.13	0.19	0.23	0.17	0.16	0.42	2.47
白济汛	0.03	0.04	0.05	0.06	0.09	0.05	0.03	0.37	1.84
维登	0.04	0.05	0.06	0.11	0.12	0.06	0.04	0.48	0.92
中排	0.05	0.06	0.10	0.12	0.13	0.08	0.04	-0.04	0.78
营盘	0.05	0.05	0.11	0.13	0.15	0.08	0.05	-0.06	0.72
旧州	0.06	0.09	0.13	0.15	0.17	0.10	0.05	-0.20	0.98
功果桥库区	0.02	0.03	0.05	0.08	0.10	0.05	0.04	0.34	1.05
昌宁潞水	0.04	0.06	0.14	0.34	0.55	0.22	0.27	0.68	1.43
小湾坝下	0.07	0.11	0.15	0.20	0.70	0.53	1.37	0.86	36.39
戛旧	0.09	0.13	0.33	1.53	4.16	0.92	2.86	0.91	3.56
大朝山	0.16	0.20	0.38	0.62	0.74	0.33	0.28	0.31	0.85
允景洪	0.10	0.11	0.14	0.17	0.18	0.17	0.06	0.18	2.08
关累	0.02	0.03	0.05	0.05	0.06	0.04	0.02	0.01	1.48
界碑	0.14	0.16	0.24	0.43	0.55	0.24	0.21	0.55	1.09

小,分选很好;中游分选系数较上游大,变化范围也较上游大,分选相对上游更差;下游分选系数大,变化范围最大,增大非常明显,分选最差;最大值2.86出现在戛旧,最小值0.02出现在关累,所有采样点样品分选等级除小湾坝下分选差、戛旧属分选很差外,其余都分选很好。从偏态系数来看,上中下游变化范围分别是 $-0.11\sim 0.01$ 、 $-0.26\sim 0.48$ 和 $-0.31\sim 0.91$;上游偏态等级属负偏或近对称;中游偏态等级以极正偏为主,兼有近对称和负偏;下游偏态等级绝大部分属极正偏,少有正偏、近对称和极负偏。从峰度系数来看,上中下游变化范围分别是 $0.74\sim 1.56$ 、 $0.72\sim 2.47$ 和 $0.85\sim 36.39$;上游峰度系数范围小,峰度系数较小,峰度等级以平坦为主,兼有尖锐;中游峰度范围相对上游较宽,整体峰度系数也较上游大,峰度等级以中等尖锐为主,兼有很尖锐、尖锐、平坦;下游峰度系数范围在3个河段中最宽,整体峰度系数最大,峰度等级除大朝山属平坦外,其余都在中等尖锐以上,且在小湾坝下和戛旧分别出现3.56和36.39这样的极大值,峰度等级为非常尖锐。

4.1.2 不同年份沉积物粒度参数变异

结合表5、表7和图2,旧州2006、2009、2011年样品粒度参数对比,分选系数分别为0.04、0.05、0.05,都分选很好,但2009年和2011年分选系数较

2006年稍高;偏态系数分别为0.31、 -0.09 、 -0.20 ,偏态等级分别为极正偏、近对称和负偏;峰度系数分别为1.92、1.05、0.98,峰度等级分别为很尖锐、中等尖锐、中等尖锐;中值粒径分别为0.05、0.12、0.13 mm,平均粒径均分别0.05、0.10、0.10 mm,均有增大趋势,且中值粒径增大更明显,2009年和2011年大小很接近。大朝山2006、2009年分选系数均为0.28,都分选很好;偏态系数分别为0.55、0.31,均属极正偏;峰度系数分别为1.01、0.85,偏态等级分别为中等尖锐和平坦;中值粒径分别为0.21、0.38 mm,平均粒径分别为0.29、0.33 mm,均有增大趋势,且中值粒径增大更明显。允景洪2006、2009、2011年样品分选系数分别为0.05、0.05、0.06,都分选很好,但2011年分选系数较2006和2009年大,分选有变差趋势;偏态系数分别为0.42、 -0.28 、0.18,偏态等级分别为极正偏、负偏和正偏;峰度系数分别为0.83、1.01、2.08,峰度等级分别为平坦、中等尖锐和很尖锐,有尖锐化趋势;中值粒径分别为0.06、0.12、0.14 mm,平均粒径分别为0.07、0.10、0.17 mm,均有增大趋势,且平均粒径增大更明显。

4.2 沉积物粒度参数对水电开发的响应

根据对澜沧江干流河床沉积物粒度参数沿程变化的分析,从中值粒径和平均粒径看(图3),在功果桥库区出现低值,反映原来河段变为库区后沉积

表7 旧州、大朝山、允景洪不同年份河床沉积物粒径特征参数

Tab.7 Characteristic bed sediment grain size parameters at Jiuzhou, Dachaoshan, and Yunjinghong in different years

采样点	年份	D_{16}	D_{25}	D_{50}	D_{75}	D_{84}	D_{mean}	δ	SK	K_G
旧州	2006	0.02	0.04	0.05	0.06	0.11	0.05	0.04	0.31	1.92
	2009	0.06	0.09	0.12	0.15	0.17	0.10	0.05	-0.09	1.05
	2011	0.06	0.09	0.13	0.15	0.17	0.10	0.05	-0.20	0.98
大朝山	2006	0.06	0.12	0.21	0.49	0.65	0.29	0.28	0.55	1.01
	2011	0.16	0.20	0.38	0.62	0.74	0.33	0.28	0.31	0.85
允景洪	2006	0.03	0.05	0.06	0.12	0.14	0.07	0.05	0.42	0.83
	2009	0.06	0.10	0.12	0.15	0.16	0.10	0.05	-0.28	1.01
	2011	0.10	0.11	0.14	0.17	0.18	0.17	0.06	0.18	2.08

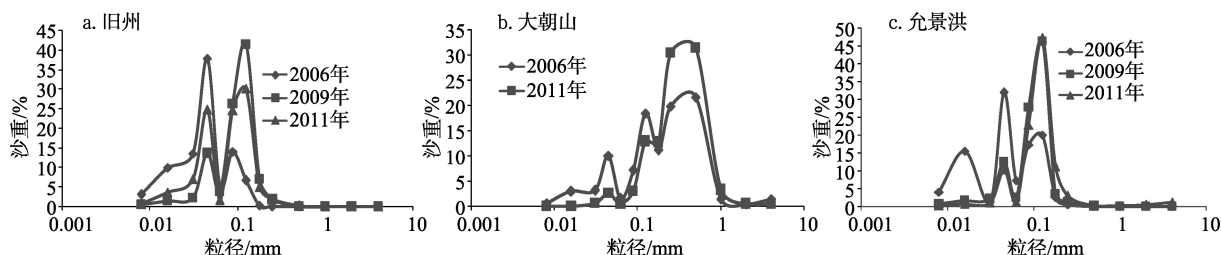


图2 旧州、大朝山、允景洪不同年份河床沉积物粒径频率分布曲线

Fig.2 Frequency distribution curves of riverbed sediment gran size in different years at Jiuzhou, Dachaoshan, and Yunjinghong

环境改变,水流变缓,水动力变弱,泥沙容易分层淤积,上层泥沙较细;最低值出现在关累,反映了下游河谷变宽、水流变缓的沉积环境,细沙容易沉积;小湾坝下、戛旧、大朝山出现高值,这是因为小湾坝下样点位于小湾电站大坝下游,戛旧样点位于漫湾电站大坝下游,大朝山样点位于大朝山大坝下游,说明大坝泻下的清水增加了河水的携沙和冲刷能力,水动力较强,河流河床沉积物粗化,但位于景洪电站大坝下游的允景洪数值却不大,这是因为该样点的样品采集于2011年8月,而允景洪电站于2008年6月首台机组投产发电,于2009年9月5台机组全部投入运行,采样时间和水电站开始运行时间相隔相对较短,所以造成的影响不明显;界碑处于澜沧江下游,理论上下游河谷宽阔,水流平缓,河床沉积物应该较细,但其中值粒径和平均粒径却高于其上游的关累,出现高值,主要是由于出境处界碑采样点河段河谷狭窄,且界碑与关累间有支流南腊河汇入,流量流速加大,泥沙较粗。从分选系数来看,小湾坝下和戛旧数值偏大,分选性分别为差和很差,其余样点都分选良好,说明小湾大坝和漫湾大坝使下游泥沙粒径范围变宽,组分复杂,且有部分粒径较大颗粒。从偏态和峰态来看,一般来说,河流上中游比降、流速、水动力均较下游大,河流沉积物颗粒较大,偏态应以正偏为主,峰态也应以尖锐为主。但澜沧江上中游从嘎玛至功果桥库区,却是偏态以近对称为主,峰态以平坦为主,说明上中游沉积物受人类活动影响小,变化不大,分选好。下游从功果桥至界碑,偏态以极正偏为主,峰态以尖锐为主且小湾坝下和戛旧非常尖锐,说明下游梯级大

坝使沉积物粒径变粗,且粗组分百分比很高。总体来看,上中游主要受自然环境控制,上游高原区河谷宽坦,下蚀微弱,水流平缓,沉积物粒度较小,分选较好,呈负偏或近对称小峰度分布;中游高山峡谷河段,水流湍急,沉积物粒径变粗,分选相对上游较差,但整体分选良好,粒度出现较多正偏尖峰分布;下游中低山宽谷区受到梯级大坝的影响,河床沉积物中值粒径和平均粒径明显增大,且平均粒径增大更明显,分选变差,偏态趋向正偏,峰态尖锐化。

从时间尺度上看,旧州中值粒径和平均粒径在2006年均小于2009和2011年,偏态由极正偏到近对称和负偏,峰态也有所缓和,这可能是因为旧州位于功果桥电站的上方,而功果桥电站于2008年大江截流,采样时旧州镇已经开始大面积拆迁移居等,且由于采沙等人为活动的干扰使后面两个时间的样品整体粒径变粗,但细组分百分比有所增大。大朝山2006年和2009年对比,主要变化是中值粒径和平均粒径有增大趋势,这可能是因为2006年距离大朝山水电站完工时间(2003年10月)较短,大坝影响不明显。允景洪2006年河床沉积物样品呈多峰态分布,2009年和2011年的河床沉积物样品分布曲线比较相似呈双峰态分布,可能是因为允景洪采样点位于允景洪电站前,该电站建于2003年7月,于2008年3月开始蓄水发电,2006年的样品受水电的干扰较小,比较接近河床沉积物自然特征,而2009年和2011年的样品受到了电站的影响,粒径也受电站影响而变粗且粗组分比例增加。总体来看,不同时间的样品粒度变化,反映梯级大坝致使坝下游沉积物中值粒径和平均粒径明显增大,且

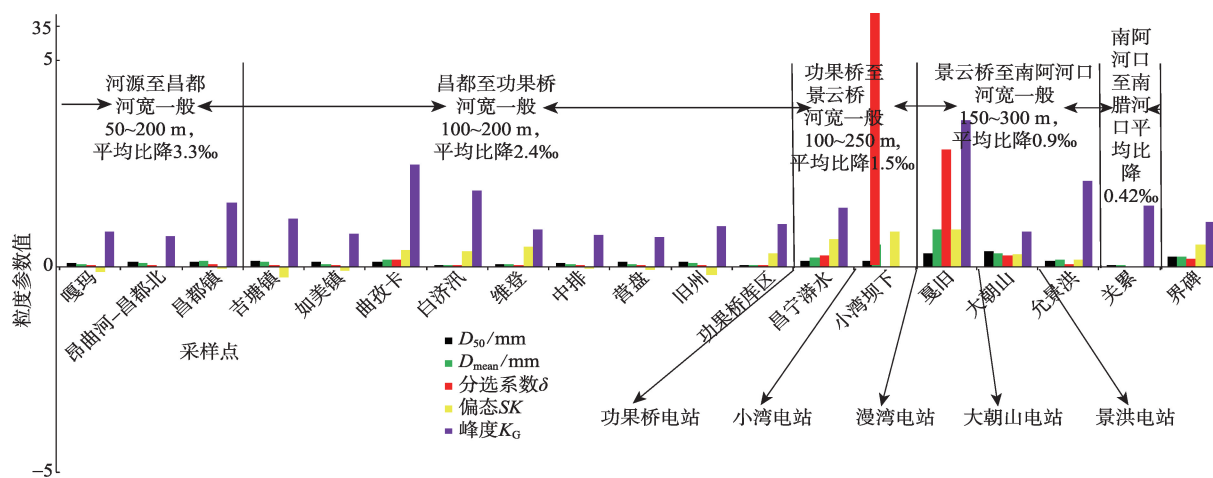


图3 澜沧江干流河床沉积物粒度参数沿程变化

Fig.3 Change of grain size parameters of bed sediments in the mainstem of the Lancang River

中值粒径增大更明显,分选变差,偏态趋向正偏,峰态尖锐化。

5 结论

本文对澜沧江沉积物粒度参数的时空变化进行了分析,探究了沉积物对该流域环境变化的响应,得到以下主要结论:

(1) 在空间尺度上,上游高原区河谷宽坦,下蚀微弱,水流平缓,沉积物粒度较小,分选较好,呈负偏或近对称小峰度分布;中游高山峡谷河段,水流湍急,沉积物粒径变粗,分选相对上游较差,但整体分选良好,粒度出现较多正偏尖峰分布;下游中低山宽谷区受到梯级大坝的影响,河床沉积物中值粒径和平均粒径明显增大,且平均粒径增大更明显,分选变差,偏态趋向正偏,峰态尖锐化。

(2) 不同时间的样品粒度变化,反映梯级大坝致使坝下游沉积物中值粒径和平均粒径明显增大,且中值粒径增大更明显,分选变差,偏态趋向正偏,峰态尖锐化。研究结果既符合河流上下游沉积物粒度分布规律,也反映了河流环境变化对沉积物粒度组成的影响。

参考文献(References)

- 陈建强,周洪瑞,王训练. 2001. 沉积学及古地理学教程[M]. 北京:地质出版社. [Chen J Q, Zhou H R, Wang X L. 2001. Sedimentology and sedimentary palaeogeography [M]. Beijing, China: Geological Press.]
- 陈茜,孔晓莎. 2000. 澜沧江—湄公河流域基础资料汇编[M]. 昆明:云南科技出版社. [Chen Q, Kong X S. 2000. Lancang-Mekong River Basin basic data collections[M]. Kunming, China: Yunnan Science and Technical Press.]
- 傅开道,何大明. 2007. 澜沧江干流水库拦沙效应分析与预测[J]. 科学通报, 52(S2): 117-122. [Fu K D, He D M. 2007. Analysis and prediction of sediment trapping efficiencies of the reservoirs in the mainstream of the Lancang River [J]. Chinese Science Bulletin, 52(S2): 134-140.]
- 傅开道,何大明,李少娟. 2006. 澜沧江干流水电开发的下游泥沙响应[J]. 科学通报, 51(S2): 100-105. [Fu K D, He D M, Li S J. 2006. Variation of downstream sediment in Lancang-Mekong River and its transboundary effects[J]. Chinese Science Bulletin, 51(S2): 119-126.]
- 郭维东,李颖卓,杨白,等. 2010. 闹德海水库泥沙特性分析[J]. 水电能源科学, 28(2): 119-121, 84. [Guo W D, Li Y Z, Yang B, et al. 2010. Characteristics analysis of Naode-

- hai reservoir sediment[J]. Water Resources and Power, 28 (2): 119-121, 84.]
- 何大明. 1995. 澜沧江—湄公河水文特征分析[J]. 云南地理环境研究, 7(1): 58-74. [He D M. 1995. Analysis of hydrological characteristics in Lancang-Mekong River[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 7(1): 58-74.]
- 何大明,汤奇成. 2000. 中国国际河流[M]. 北京:科学出版社. [He D M, Tang Q C. 2000. Chinese international rivers[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 何大明,冯彦. 2006. 国际河流跨境水资源合理利用与协调管理[M]. 北京:科学出版社. [He D M, Feng Y. 2006. Rational utilization and coordination management of transboundary water resources in the international river[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 何大明,冯彦,甘淑,等. 2006. 澜沧江干流水电开发的跨境水文效应[J]. 科学通报, 51(S1): 14-20. [He D M, Feng Y, Gan S, et al. 2006. The cross-border hydrological effect of hydropower development along main stream of the Lancang River[J]. Chinese Science Bulletin, 51(S1): 14-20.]
- 何大明,冯彦,胡金明,等. 2007. 中国西南国际河流水资源利用与生态保护[M]. 北京:科学出版社. [He D M, Feng Y, Hu J M, et al. 2007. Utilization of water resources and environmental conservation in the international rivers, Southwest China[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 黄江成,傅开道,何大明. 2010. 澜沧江中下游河流泥沙特性分析[J]. 四川大学学报:工程科学版, 42(3): 112-120. [Huang J C, Fu K D, He D M. 2010. Analysis on the characteristics of sediment in the middle and lower parts of the Lancang river[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 42(3): 112-120.]
- 刘昌明. 2006. "黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理"研究进展[J]. 地球科学进展, 21(10): 991-998. [Liu C M. 2006. A study of evolutionary laws and maintaining mechanism of renewable capacity of the Yellow River's water resources[J]. Advances in Earth Science, 21(10): 991-998.]
- 宋静宜,傅开道,苏斌,等. 2013. 澜沧江水系底沙重金属含量空间分布及其污染评价[J]. 地理学报, 68(3): 389-397. [Song J Y, Fu K D, Su B, et al. 2013. Spatial distribution of heavy metal concentrations and pollution assessment in the bed loads of the Lancang River System[J]. Acta Geographica Sinica, 68(3): 389-397.]
- 尤联元. 1999. 澜沧江流域河流泥沙发展趋势初步研究[J]. 地理学报, 54(S1): 93-100. [You L Y. 1999. A study on temporal changes of river sedimentation in Lancang River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 54(S1): 93-100.]
- 钟华平,王建生. 2010. 澜沧江干流水电开发对径流的影响分析[J]. 水利水电技术, 41(12): 72-74. [Zhong H P,

- Wang J S. 2010. Impacts from hydropower development of main stream on runoff of Lancangjiang River[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 41(12): 72-74.]
- Folk R L, Ward W C. 1957. Brazos river bar: a study in the signification of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27: 3-27.
- Fu K D, He D M, Lu X X. 2008. Sedimentation in the Manwan Reservoir in the Upper Mekong and its downstream impacts[J]. *Quaternary International*, 186(1): 91-99.
- Kummu M, Lu X X, Wang J J, et al. 2010. Basin-wide sediment trapping efficiency of emerging reservoirs along the Mekong[J]. *Geomorphology*, 119(3-4): 181-197.
- Kummu M, Varis O. 2007. Sediment-related impacts due to upstream reservoir trapping, the Lower Mekong River[J]. *Geomorphology*, 85(3-4): 275-293.
- Lu X X, Siew R Y. 2006. Water discharge and sediment flux changes over the past decades in the Lower Mekong River: possible impacts of the Chinese dams[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(2): 181-195.
- Walling D E. 2008. The changing sediment load of the Mekong River[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 37(3): 150-157.

Response of river sediments to basin environmental changes: a case study of the Lancang River

FU Kaidao^{1,2}, YANG Wenhui^{1,2}, SU Bin^{1,2}, LI Daxing^{1,2}, LI Mengyang³,
ZHANG Jilai^{1,2}, SONG Jingyi^{1,2}

(1. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. Yunnan Key Laboratory of International Rivers and Transboundary Eco-security, Yunnan University, Kunming 650091, China; 3. Huaneng Lancang River Hydropower CO.,LTD., Kunming 650214, China)

Abstract: River sediments respond sensitively to the basin environmental changes and particle size parameters can reflect the hydrodynamic environment. This article takes the Lancang River as a case to explore the response of river sediment grain size to the basin environmental changes. River sediment samples were collected from 19 sections along the mainstream of the Lancang River, and sieving and pipette methods were applied to measure the particle size. Spatial and temporal variations of grain size parameters and their responses to the anthropogenic environmental changes of the basin through hydropower development were analyzed. Our results indicate that: (1) Spatially, the upstream of the Lancang River flows through the Tibet plateau region where the river valley is wide and flat, downward erosion is weak, and the sediments are characterized by small grain size and well sorted, with small kurtosis and negative skew or nearly symmetrical distributions; the middle part of the river flows through the alpine valleys, where the river flows fast, the grain size of bed sediments is coarse and poorly sorted, and the grain size distributions are more positively skewed with sharp kurtosis; in the lower reach of the river among the low and middle mountains and wide valleys sediment grain sizes are affected by the cascade dams, riverbed sediments' median and average grain sizes increased abruptly, especially the average grain sizes, with poorly sorted sediments, positively skewed grain size distribution and acute kurtosis. (2) On the temporal scale, grain sizes of sediments from different time periods indicate that the cascade dams increased the median and average grain sizes of the downstream sediments, especially the median increased dramatically. The sediments are poorly sorted, with positively skewed grain size distribution and acute kurtosis. The results accord with the normal pattern of distribution of sediment grain sizes in rivers, also reflect the impact of environmental changes on river sediment grain size composition.

Key words: river sediments; grain size; environmental change; hydropower development; the Lancang River