

电站建设对澜沧江—湄公河 泥沙年内分配的影响

傅开道, 何大明, 陈 武, 叶长青, 李运刚

(云南大学亚洲国际河流中心, 昆明 650091)

摘要: 采用澜沧江漫湾电站上游旧州站和下游允景洪、清盛站 1987~2003 年逐月悬移质泥沙含量实测资料, 分析对比了三站年内泥沙分配不均匀系数、集中度和集中期、变化幅度等特性。将上述参数与澜沧江上游干流漫湾与大朝山电站建设的响应进行关联研究, 分析电站建设进程对河道输沙变化的驱动作用。结果表明: (1) 旧州水文站泥沙年内分配与区域气候变化(降水)趋势一致, 研究时段内不均匀性系数呈上升趋势, 维持天然河道输沙特性; 允景洪和清盛水文站的泥沙年内分配不均匀性系数对电站建设等人类活动的响应程度不一致, 允景洪站泥沙含量不均匀系数先减小后急剧增加, 而清盛站呈微弱减小态势。(2) 旧州水文站泥沙年内分配集中度及集中期基本无变化; 允景洪与清盛水文站的泥沙年内分配集中度变化较大, 泥沙集中期在在电站施工的高峰期(1987~1992 年、1997~2003 年)后延, 且不同步, 允景洪在漫湾施工期后延 5~6 天, 而清盛则后延将近半个月, 而在大朝山施工期, 允景洪的后延响应却明显于清盛。(3) 旧州站相对、绝对泥沙变幅逐时段递增, 允景洪站年内最大与最小月泥沙含量的相对、绝对变化幅度均减小, 清盛站泥沙含量的相对变化幅度却先增后减, 绝对变化幅度则一直减小。三站泥沙年内极值变幅以及电站建设前后的响应差异, 说明三站泥沙变化的驱动因子有明显不同。这些关于泥沙含量年内分配特征规律的发现, 为研究澜沧江干流电站建设对上下游泥沙变化以及跨境影响的科学评价提供了新的佐证。

关键词: 泥沙含量年内分配; 梯级水电开发; 澜沧江—湄公河; 纵向岭谷区

1 引言

河流泥沙时空分布变化与流域内自然因素与人类活动的交互作用密切相关^[1-5]。通常, 上游河道的泥沙变化会对下游河道演变、水生生态系统变化乃至洪泛平原农业发展带来一系列的影响^[6-11]。

澜沧江—湄公河是重要的国际河流, 流域范围涉及中国、老挝、缅甸、泰国、越南和柬埔寨 6 国。在中国境内的澜沧江, 即自河源至中国和缅甸边境的南腊河口河段, 集中了总干流落差的 91%, 水能资源蕴藏特别丰富^[1, 2]。近年来, 随着中国与东盟各国合作加强, 该流域逐渐成为沿岸国家和区域合作重点研究、开发和投资的地区。关于澜沧江梯级电站修建对河流泥沙的拦截效应及其跨境影响, 过去虽有了一些研究, 但受资料条件和研究范围的限制, 迄今还没有明确的结论, 尚存诸多争议。例如, 国际上一些观点指责澜沧江水电梯级开发导致流入下湄公河泥沙的大幅度减小, 将威胁下游的渔业生产, 增大河岸冲刷, 引发界河国界变化, 进而危害下游的生态安全和可持续发展^[12, 13]。然而根据另一些学者利用全流域的泥沙资料进行分析, 发现湄公河的泥沙主要不是来自澜沧江

收稿日期: 2006-06-03; 修订日期: 2006-11-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2003CB415105); 云南大学理(工)科校级科研重点项目 (2005Z003B)

[Foundation: National Key Project for Basic Research of China, No.2003CB415105; Key Project for Science and Technology of Yunnan University, No.2005Z003B]

作者简介: 傅开道 (1976-), 男, 海南人, 博士, 从事水文地理学、河流泥沙与河床演变研究。E-mail: kdfu@ynu.edu.cn

联系作者: 何大明, E-mail: hedaming@public.km.yn.cn

而是老挝北部地区^[14-19]。

目前，澜沧江干流已建成电站有漫湾与大朝山电站，漫湾坝址位于大朝山电站上游约 84 km 处，其中漫湾电站于 1987 年截流，1993 年完工，大朝山电站 1996 年 12 月截流，2003 年竣工。究竟这两个电站在施工并投入使用的过程中，对流域河道泥沙产生怎样的影响？在过去相关研究的基础上^[5-7]，本文尝试借鉴河川径流年内分配规律的计算方法，通过研究澜沧江—湄公河干流旧州、允景洪、清盛三个重要控制站（图 1），1987~2003 年的月悬移质泥沙实测资料的分析，进一步判识泥沙含量年内分配的变化与水电站建设进程的关系。其中旧州水文站位于漫湾电站上游 269 km，代表未受水库回水影响的天然河道，允景洪、清盛则分别位于大朝山电站下游 314 km 与 662 km 处，两个距离不同的控制站的泥沙响应能反映电站建设对下游河道影响的程度。这些研究结论可为流域的梯级水电开发规划及水库联合调度运行提供理论依据。



2 泥沙年内分配特征的定量描述

泥沙年内分配特征变化包括“量”和“结构”的变化。“量”通常是指泥沙含量、输沙总量等数值上的变化。而后者则注重从泥沙过程线的“形状”上进行分析，它反映不同时段内来沙量的比例。本文泥沙年内分配特征的分析即属于后者。描述泥沙年内分配特征的方法有多种^[20-22]，通常使用较多的有各月（或季）占年输沙总量的百分比数、汛期—非汛期占年输沙量的百分比数等。除了上述方法之外，为了进一步定量分析澜沧江—湄公河主要河段河道泥沙年内分配特征的变

图 1 澜沧江—湄公河结合部研究河段示意图
Fig. 1 A sketch map for the conjoint reach of Lancang-Mekong River

表 1 澜沧江—湄公河旧州、允景洪和清盛水文站时段平均月含沙量 (kg/m³)

Tab. 1 Mean monthly sediment concentrations at Jiuzhou, Yunjinghong and Chiang Saen hydrological stations in Lancang-Mekong River

月份	1987-1992			1993-1996			1997-2003			1987-2003		
	旧州	允景洪	清盛	旧州	允景洪	清盛	旧州	允景洪	清盛	旧州	允景洪	清盛
1	0.04	0.18	0.15	0.02	0.14	0.09	0.04	0.17	0.09	0.03	0.16	0.11
2	0.04	0.14	0.11	0.06	0.16	0.06	0.04	0.11	0.05	0.05	0.14	0.07
3	0.35	0.29	0.08	0.23	0.52	0.03	0.07	0.12	0.07	0.22	0.31	0.06
4	0.19	0.41	0.13	0.17	0.47	0.22	0.13	0.17	0.08	0.16	0.35	0.14
5	0.29	0.87	0.31	0.34	0.99	0.24	0.30	0.73	0.27	0.31	0.86	0.27
6	0.89	2.38	0.51	0.56	1.78	0.48	0.92	1.13	0.30	0.79	1.76	0.43
7	1.46	3.02	1.03	1.52	2.47	0.67	1.64	1.97	0.63	1.54	2.48	0.78
8	1.45	2.79	1.32	1.50	2.38	0.59	1.46	1.92	0.57	1.47	2.37	0.83
9	0.76	2.55	0.91	0.77	1.85	0.59	1.03	1.96	0.54	0.85	2.12	0.68
10	0.38	1.96	0.86	0.15	1.27	0.39	0.16	1.00	0.30	0.23	1.41	0.52
11	0.03	0.80	0.38	0.02	0.77	0.19	0.04	0.88	0.24	0.03	0.82	0.27
12	0.03	0.31	0.22	0.01	0.39	0.12	0.02	0.25	0.13	0.02	0.32	0.15

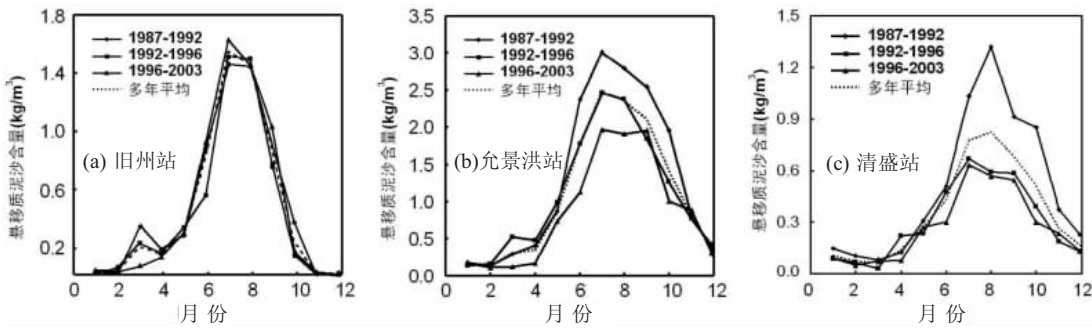


图 2 澜沧江—湄公河结合部年内泥沙年内分配特征

Fig. 2 Plots of annual distribution properties of suspended sediment concentrations from Yunjinghong and Chiang Saen hydrological stations, conjoint reach in Lancang-Mekong River

化 (表 1, 图 2), 本文采用泥沙含量年内不均匀系数、集中度 (期) 以及变化幅度等不同指标, 从不同角度分析泥沙年内分配的变化规律。

2.1 泥沙年内分配不均匀性

由于气候的季节性波动, 降水和气温等因素的季节性变化, 对河流泥沙年内分配的不均匀性影响明显。反映河流泥沙年内分配不均匀性的特征值有许多不同的计算方法。本文借鉴径流年内分配的计算方法^[23], 采用泥沙年内分配不均匀系数 S_v 和泥沙年内分配完全调节系数 S_r 来衡量泥沙年内分配的不均匀性。泥沙年内分配不均匀系数 S_v 计算公式如下:

$$S_v = \sigma / \bar{S} \tag{1}$$

式中: S_v 为年内各月泥沙含量, \bar{S} 为年含沙量。由式 (1) 中可以看出, S_v 值越大说明年内各月泥沙含量相差越大, 泥沙年内分配越不均匀。

年内分配完全调节系数可定义为:

$$S_r = \sum_{i=1}^{12} \psi(t)[S_i - \bar{S}] / \sum_{i=1}^{12} S_i \quad \text{其中, } \psi(t) = \begin{cases} 0, & \rightarrow S_i < \bar{S} \\ 1, & \rightarrow S_i \geq \bar{S} \end{cases} \tag{2}$$

从三站不同时段内泥沙年内分配不均匀性的变化特征可以看出 (表 2), 1987~1992 年时段 (漫湾电站建设期)、1993~1996 年时段 (漫湾电站蓄水发电) 和 1997~2003 年时段 (大朝山电站建设期), 旧州水文站的 S_v 与 S_r 值均逐段增加; 允景洪水文站的 S_v 与 S_r 值先减少后急剧增加; 清盛站却逐段呈平稳减小趋势。

2.2 泥沙年内分配集中程度

集中度和集中期的计算是将一年内各月的泥沙含量作为向量看待, 月泥沙含量的大小为向量的长度, 所处的月份为向量的方向^[21, 22]。从 1 月到 12 月每月的方位角 θ_i 分别为 0, 30, 60, …, 360 度, 并把每个月的泥沙含量分解为 x 和 y 两个方向上的分量 S_x 和 S_y :

$$\begin{aligned} S_x &= \sum_{i=1}^{12} S_i \cos \theta_i \\ S_y &= \sum_{i=1}^{12} S_i \sin \theta_i \end{aligned} \tag{3}$$

于是泥沙含量的合成计算式为:

表 2 澜沧江—湄公河旧州、允景洪和清盛水文站泥沙年内分配不均匀性
Tab. 2 Unevenness of annual distribution of sediment concentrations at Jiuzhou, Yunjinghong and Chiang Saen stations on Lancang-Mekong River

时段	S_v			S_r		
	旧州站	允景洪站	清盛站	旧州站	允景洪站	清盛站
1987~1992	3.575	2.875	2.817	0.439	0.3259	0.3562
1993~1996	4.076	2.528	2.450	0.479	0.3222	0.3208
1997~2003	4.106	3.902	2.521	0.530	0.3516	0.2991
1987~2003	3.875	2.722	2.581	0.486	0.3576	0.3313

$$S=\sqrt{S_x^2+S_y^2}\tag{4}$$

其相应的集中度 S_d 和集中期 D 定义如下式:

$$S_d=S\bigg/\sum_{i=1}^{12}S_i$$
$$D=\arctg(S_y/S_x)\tag{5}$$

由式 (5) 可以看出, 合成向量的方位, 即集中期 D 指示了月泥沙含量合成后的总效应, 也就是向量合成后重心所指示的角度, 即表示一年中最大月泥沙含量出现的月份。而集中度则反映了集中期泥沙值占年总泥沙的比例 (表 3, 表 4)。从这个角度看, 集中度与通常采用的汛期泥沙占全年泥沙比有明显的相关关系。

在两电站建设的不同时段, 旧州水文站年内泥沙分配集中度基本稳定, 集中期变化不大, 分布在 7 月中旬; 允景洪与清盛水文站的泥沙年内分配集中度变化较大, 泥沙集中期在电站施工的高峰期 (1987~1992 年、1997~2003 年) 后延, 且不同步, 允景洪在漫湾施工期后延 5~6 天, 而清盛则后延将近半个月, 而在大朝山施工期, 允景洪的后延响应却明显于清盛。

2.3 泥沙年内分配变化幅度

泥沙变化幅度的大小对于河床演变和河道生态环境有重要的影响。泥沙含量的过于平稳或者过于激烈的变化, 都可能对水生生态系统的平衡产生影响。本文用两个指标来衡量河流泥沙的变化幅度, 一个是相对变化幅度, 以河流最大月泥沙含量 (S_{\max}) 和最小月泥沙含量 (S_{\min}) 之比表示, 如式 (6); 另一个是绝对变化幅度, 以最大与最小月泥沙含量之差表示, 定义如式 (7), 表 5 为该两式的计算结果。

$$S_r=S_{\max}/S_{\min}\tag{6}$$

$$S_a=S_{\max}-S_{\min}\tag{7}$$

1987 年以来, 旧州站相对、绝对泥沙变幅逐时段递增, 允景洪站年内最大与最小月泥沙含量的相对、绝对变化幅度均减小, 清盛站泥沙含量的相对变化幅度却先增后减, 绝对变化幅度则一直减小 (表 5)。三站泥沙年内极值变幅以及电站建设前后的响应差异, 说明三站泥沙变化的驱动因子有明显不同。

3 泥沙年内分配特征对电站建设的时空响应

流域上游的人类活动能敏感地为下游泥沙所记录, 其中电站建设的下游泥沙响应表现为, 建设期的增沙效应以及建成后的拦沙效应^[23, 24]。

表 3 澜沧江—湄公河旧州、允景洪和清盛水文站泥沙年内分配的集中度

Tab. 3 Concentration rate of annual distribution of sediment charge at Jiuzhou, Yunjinghong and Chiang Saen stations on Lancang-Mekong River

时段	旧州站	允景洪站	清盛站
1987~1992	0.220	0.463	0.764
1993~1996	0.170	0.349	0.426
1997~2003	0.212	0.606	0.555
1987~2003	0.186	0.463	0.613

表 4 澜沧江—湄公河旧州、允景洪和清盛水文站泥沙年内分配的集中期

Tab. 4 Concentration period of annual distribution of sediment charge at Jiuzhou, Yunjinghong and Chiang Saen stations on Lancang-Mekong River

时段	旧州站		允景洪站		清盛站	
	集中期	集中天数	集中期	集中天数	集中期	集中天数
1987~1992	192.4	7 月 12-13 日	204.8	7 月 24-25 日	217.4	8 月 7-8 日
1993~1996	189.6	7 月 9-10 日	199.2	7 月 19-20 日	203.1	7 月 23-24 日
1997~2003	192.0	7 月 11-12 日	211.2	8 月 2-3 日	209.0	7 月 29-30 日
1987~2003	190.5	7 月 10-11 日	204.8	7 月 24-25 日	211.5	8 月 2-3 日

表 5 澜沧江—湄公河结合部泥沙年内变化幅度

Tab. 5 Variation range of annual distribution of sediment charge at Jiuzhou, Yunjinghong and Chiang Saen stations on Lancang-Mekong River

时段	Sr			Sa (kg/m ³)		
	旧州站	允景洪站	清盛站	旧州站	允景洪站	清盛站
1987~1992	73.2	21.90	16.12	1.44	2.87	1.23
1993~1996	75.8	17.79	19.87	1.50	2.32	0.63
1997~2003	81.8	17.54	12.96	1.60	1.85	0.58
1987~2003	71.8	18.15	13.18	1.50	2.34	0.76

1987~2003 年期间, 澜沧江干流漫湾电站于 1987 年 11 月截流、1993 年开始蓄水发电、1996 年全部竣工; 大朝山电站于 1997 年 12 月截流、2003 年完工。数据来源的三个干流水文站中, 旧州位于远离电站上游, 基本反映天然河流泥沙输移状况; 而允景洪、清盛站则处于两电站下游, 受电站建设施工造成的泥沙扰动影响, 以及蓄水的拦沙效应, 均为大坝下游的允景洪和清盛水文站泥沙年内分配记录所响应。三站泥沙含量年内分配曲线能清楚反映电站对下游断面泥沙的影响 (图 2)。自 1987 年以来, 上游旧州站各时段年平均泥沙含量年内分配差异微小, 基本维持天然河道输沙特性; 而允景洪与清盛站泥沙年内分配趋势在变“矮”, 即在漫湾电站施工高峰期, 由于受施工扰动, 河道输沙较多年平均明显增加, 随后的漫湾蓄水拦沙导致下游泥沙季节分配的重新调整, 来沙高峰削减 (图 2)。根据表 1 所得的结果可以看出, 1987~1992 年时段 (漫湾电站建设高峰期) 和 1997~2003 年时段 (大朝山电站建设高峰期), 旧州水文站泥沙年内分配不均匀系数 S_r 和泥沙年内分配完全调节系数 S_r 逐时段增加, 这与区域降水趋势一致, 据旧州与允景洪逐日实测降水资料表明, 该区 1987 年以来, 两站时段平均年降水量呈平稳增加态势, 这可能是全球变暖气候的区域响应^[25], 而其时段平均年含沙量却表现出不同的变化程度, 允景洪站年含沙量波动更加急剧 (图 3); 与此同时, 尽管允景洪水文站降水呈上升趋势, 但其泥沙 S_v 和 S_r 值却先减小后再急剧增加 (表 2), 表现出与降水不协调的步调, 这归因于上游电站的调节作用; 距离电站更远的清盛水文站泥沙 S_v 和 S_r 值逐时段微小下降 (表 2), 表明其泥沙年内分配由于受上游电站调节流量的影响, 输沙趋向平稳; 允景洪与清盛泥沙 S_v 和 S_r 值对电站建设及气候变化的响应趋势及程度的不一致, 可能是受两控制断面距电站远近不同与区间来水输沙状况差异造成的。允景洪水文站离大朝山电站较近, 区间较少有大支流汇入, 人为活动作用表现强烈, 清盛站离电站很远, 区间有诸如补远江、南腊河、南阿河等多条含沙量大的支流汇入。除此之外, 1998 年长江大洪水后, 国家和云南省加大了在流域内的水土保持工作力度, 如天然林保护和退耕还林等项目的实施, 也是使得下游泥沙减少的一个重要原因。

泥沙年内分配集中度及集中期也进一步验证了上述的论证 (表 3, 4), 上游旧州站基本维持天然来水输沙特性, 泥沙年内集中在 7 月中旬。而受漫湾、大朝山电站建设施工影响, 允景洪与清盛水文站的泥沙年内分配集中度变化较大, 泥沙集中期在电站施工的高峰期 (1987~1992 年、1997~2003 年) 后延, 且不同步, 允景洪在漫湾施工期后延 5~6 天, 而清盛则后延将近半个月, 而在大朝山施工期, 允景洪的后延响应却明显于清盛。值得注意的是, 下游两水文站集中期不同步现象比较明显, 说明三站集水区地理特征、水文情势以及区内的人类活动均存在较大的差别, 这些差别因素叠加在电站建设的响应

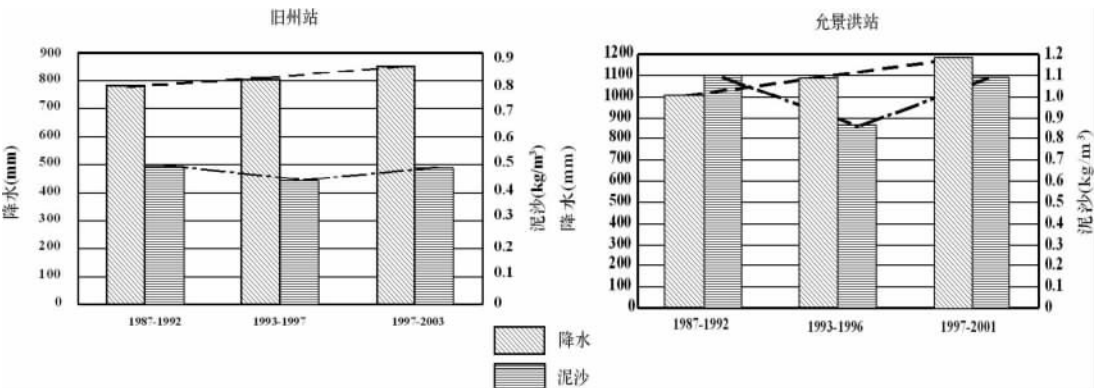


图 3 澜沧江旧州、允景洪水文站多年平均降水和悬移质泥沙含量变化趋势对照图

Fig. 3 Comparing trends of average annual precipitations and suspended loads at Jiuzhou and Yunjinghong hydrological stations, Lancang River

过程中, 最后表现出不一致的响应程度。这一推论也明显的被三站泥沙变化幅度数值所证实, 从表 5 看出, 1987 年以来, 旧州站相对、绝对泥沙变幅逐时段递增, 允景洪站年内最大与最小月泥沙含量的相对、绝对变化幅度均减小, 清盛站泥沙含量的相对变化幅度却先增后减, 绝对变化幅度则一直在减小。三站泥沙年内极值变幅以及电站建设前后的响应差异, 说明三站泥沙变化的驱动因子有明显不同。

总而言之, 本次研究参照维持天然河道水文、泥沙特性的上游旧州水文站, 结合反映气候变化的降水资料, 对比分析允景洪与清盛水文站年内泥沙分配特征对上游电站建设的响应程度的结果, 与前期利用两水文站实测年月泥沙含量资料的关联及因果分析得到的结论^[26]一致, 从而更加充分的证明, 目前上游水能开发对下游河段, 尤其是境外河道泥沙影响甚微, 研究水文站断面集水区来水输沙条件的差异是导致相关河段泥沙变化的主要根源。

4 结论

通过借鉴研究径流年内分配规律的方法, 利用澜沧江—湄公河干流三个代表水文站 1987~2003 年的历年逐月泥沙资料, 通过对从泥沙年内分配不均匀性、集中性和变化幅度等泥沙年内分配的变化规律进行具体分析, 得出以下结论:

(1) 旧州水文站泥沙年内分配与区域气候变化(降水)趋势一致, 研究时段内不均匀性系数呈上升趋势, 维持天然河道输沙特性; 允景洪和清盛水文站的泥沙年内分配不均匀性系数对电站建设等人类活动的响应程度不一致, 允景洪站泥沙含量不均匀系数先减小后急剧增加, 而清盛站呈微弱减小态势。

(2) 旧州水文站泥沙年内分配集中度及集中期基本无变化; 允景洪与清盛水文站的泥沙年内分配集中度变化较大, 泥沙集中期在电站施工的高峰期(1987~1992 年、1997~2003 年)后延, 且不同步, 允景洪在漫湾施工期后延 5~6 天, 而清盛则后延将近半个月, 而在大朝山施工期, 允景洪的后延响应却明显于清盛。

(3) 1987 年以来, 旧州站相对、绝对泥沙变幅逐时段递增, 允景洪站年内最大与最小月泥沙含量的相对、绝对变化幅度均减小, 清盛站泥沙含量的相对变化幅度却先增后减, 绝对变化幅度则一直减小。三站泥沙年内极值变幅以及电站建设前后的响应差异, 说明三站泥沙变化的驱动因子有明显不同。

致谢: 湄公河委员会提供了清盛站水文数据支持, 以此深表感谢。

参考文献 (References)

- [1] Qian Ning, Zhang Ren, Zhou Zhide. Fluvial Process. Beijing: Science Press, 1987. 453-496. [钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1987. 453-496.]
- [2] Lu X X, Higgitt D L. Sediment delivery to the Three Gorges (2): local response. Geomorphology, 2001, 41: 157-169.
- [3] Li Yitian, Sun Zhaohua, Deng Jinyun et al. Variation of sediment transport and flood disaster in the middle reach of Yangtze River. Journal of Sediment Research, 2004, (2): 33-39. [李义天, 孙昭华, 邓金运 等. 泥沙输移变化与长江中游水患. 泥沙研究, 2004, (2): 33-39.]
- [4] Liu Shaoquan, Chen Zhijian, Chen Guojie et al. Surface erosion and fluvial silt in the Jinsha River watershed. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1999, 8(4): 423-428. [刘邵权, 陈治谦, 陈国阶 等. 金沙江流域水土流失现状与河道泥沙分析. 长江流域资源与环境, 1999, 8(4): 423-428.]
- [5] Chen Zhongyuan, Li Jiufa, Shen Huanting et al. Yangtze River of China: historical analysis of discharge variability and sediment flux. Geomorphology, 2001, 41: 77-91.
- [6] Xu Jiongxin. Watershed factors and anthropological activities affect sediment transporting function in lower reaches of Yellow River. Science in China (Series D), 2004, 34(8): 775-781. [许炯心. 流域因素与人类活动对黄河下游河道输沙功能的影响. 中国科学(D 辑), 2004, 34(8): 775-781.]

- [7] Higgitt D L, Lu X X. Challenges in relating land use to sediment yield in the Upper Yangtze. *Hydrobiologia*, 1999, 410: 269-277.
- [8] Guo Qingchao, Hu Chunhong, Lu Qin et al. Effect of different operation of Sanmenxia Reservoir on water level at Tongguan. *Journal of Sediment Research*, 2003, (1): 1-9. [郭庆超, 胡春宏, 陆琴 等. 三门峡水库不同运行方式对降低潼关高程作用的研究. *泥沙研究*, 2003, (1): 1-9.]
- [9] Li Congxian, Yang Shouye, Fan Daidu et al. The change in Changjiang suspended load and its impact on the delta after completion of Three-Gorge Dam. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(5): 495-500. [李从先, 杨守业, 范代读 等. 三峡大坝建成后长江输沙量的减少及其对长江三角洲的影响. *第四纪研究*, 2004, 24(5): 495-500.]
- [10] Anders Brandt S. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 2000, 40: 375-401.
- [11] Jim Bogen, Truls E Bønsnes. The impact of hydroelectric power plant on the sediment load in downstream water bodies, Svartisen northern Norway. *The Science of the Total Environment*, 2001, 266: 273-280.
- [12] Gupta A, Hock L, He X J et al. Evaluation of part of the Mekong River using satellite imagery. *Geomorphology*, 2002, 44(3-4): 221-239.
- [13] Kumm M, Koponen J, Sarkkula J. Upstream effects on lower Mekong floodplains: Tonle Sap case study. In: *Proceedings international conference on "Advances in Integrated Mekong River Management"*. Vientiane, the Lao PDR, 2004, 347-352.
- [14] He Daming, Wu Shaohong, Peng Hua et al. A study of ecosystem changes in longitudinal range-gorge and transboundary eco-security in Southwest China. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(3): 338-344. [何大明, 吴绍洪, 彭华 等. 纵向岭谷区生态系统变化及西南跨境生态安全研究. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 338-344.]
- [15] Liu Heng, Liu Jiufu, Tang Haixing. Present and future of water resources development in Lancang River Basin in Yunnan Province. *Advances in Water Science*, 1998, 9(1): 70-76. [刘恒, 刘九夫, 唐海行. 澜沧江流域(云南段)水资源开发利用现状及趋势分析. *水科学进展*, 1998, 9(1): 70-76.]
- [16] Zou Gaolu, Luo Huailiang. Analysis of the Granger causality between the scouring and silting and the coefficient of incoming sediments of the Lancang River. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(6): 698-703. [邹高禄, 罗怀良. 澜沧江河道冲淤变化与来沙系数的格兰吉尔因果分析. *地理科学*, 2004, 24(6): 698-703.]
- [17] Huang Ying. Study on sediment concentration and its variation of Lancang River in Yunnan Province. *Yangtze River*, 1996, 27(1): 33-35. [黄英. 澜沧江云南段河流输沙量及其变化规律探讨. *人民长江*, 1996, 27(1): 33-35.]
- [18] You Lianyun. Scouring and silting changes of Lancang River (Mekong River) and its development tendency. *Geographical Research*, 20(2): 178-183. [尤联云. 澜沧江河道冲淤变化特征及发展趋势. *地理研究*, 2001, 20(2): 178-183.]
- [19] You Lianyun. A study on temporal changes of river sedimentation in Lancang River Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 54(suppl.): 93-100. [尤联云. 澜沧江流域河流泥沙发展趋势初步研究. *地理学报*, 1999, 54(增刊): 93-100.]
- [20] Tang Qicheng, Cheng Tianxiu, Li Xiuyun. Primary study on concentrated rates and periods of river monthly runoff in China. *Scientia Geographica Sinica*, 1982, 37(4): 383-393. [汤奇成, 程天文, 李秀云. 中国河川月径流的集中度和集中期的初步研究. *地理学报*, 1982, 37(4): 383-393.]
- [21] Yang Yuandong. Computing methods for annual distribution of river runoff. *Scientia Geographica Sinica*, 1984, 39(2): 218-227. [杨远东. 河川径流年内分配的计算方法. *地理学报*, 1984, 39(2): 218-227.]
- [22] Zheng Hongxing, Liu Changming. Changes of annual runoff distribution in the headwater of the Yellow River Basin. *Progress in Geography*, 2003, 22(6): 585-590. [郑红星, 刘昌明. 黄河源区径流年内分配变化规律分析. *地理科学进展*, 2003, 22(6): 585-590.]
- [23] Zhang Xinbao, Wen Anbang. Variation of sediment in upper stream of Yangtze River and its tributary. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, (4): 56-59. [张信宝, 文安邦. 长江上游干流和支流河流泥沙近期变化及其原因. *水利学报*, 2002, (4): 56-59.]
- [24] Han Qiwei (ed.). *Reservoir Deposit*. Beijing: Science Press, 2003. 533-606. [韩其为 编. 水库淤积. 北京: 科学出版社, 2003. 533-606.]
- [25] Cao Tingjian, Qin Dahe, Kang Ersi et al. Runoff variation of main rivers in outflowing zone on Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(21): 2403-2408. [曹廷建, 秦大河, 康尔泗 等. 青藏高原外流区主要河流地表径流变化. *科学通报*, 2005, 50(21): 2403-2408.]
- [26] Fu Kaidao, He Daming, Li Shaojuan. Response of downstream sediment to water resource development in mainstream of the Lancang River. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(suppl.): 100-105. [傅开道, 何大明, 李少娟. 澜沧江干流水电开发的下游泥沙响应. *科学通报*, 2006, 51(suppl.): 100-105.]

Impacts of Dam Constructions on the Annual Distribution of Sediment in Lancang-Mekong River Basin

FU Kaidao, HE Daming, CHEN Wu, YE Changqing, LI Yungang

(Asian International Rivers Center, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: Annual distribution characteristic of river sediment concentration is closely related to climate change and anthropogenic activities and directly affected by the process of hydraulic resource development in the Lancang-Mekong River basin. Using monthly suspended sediment concentrations in 1987-2003 at the three hydrological stations, Jiuzhou, Yunjinghong and Chiang Saen stations, on the mainstream of Lancang-Mekong River, the uneven distributions coefficient, the concentrated rate and period, and the range of variation of annual distribution characteristics of sediment concentrations at the three stations were studied and then the responses of these characteristics to the progress of upstream dam constructions were analyzed. The research results show that: (1) Annual distribution of sediment concentration at Jiuzhou hydrological station agrees with the variation trend of local climate changes, its uneven distribution coefficients (AUDC) increased at the studied period and maintained the characteristics of natural river; AUDCs at Yunjinghong and Chiang Saen stations seemed to be affected by anthropological activities such as dam constructions rather than climate changes, however, sediments of two downstream stations responded differently to the dam constructions. AUDC at Yunjinghong station decreased from the periods of 1987-1992 to 1993-1996, then abruptly increased during 1997-2003; while AUDC at Chiang Saen took on a trend of moderate decreasing in the whole period. (2) Rates and distribution periods of sediment concentrations at Jiuzhou station almost kept stable during the studied period; but those at Yunjinghong and Chiang Saen changed evidently, their distribution periods delayed asynchronously during the dam construction processes (1987-1992, 1997-2003), in the period of Manwan dam construction, distribution periods at Yunjinghong station delayed 5-6 days, while Chiang Saen delayed almost half a month, and in the Dachaoshan dam construction, delayed period at Yunjinghong station was longer than that at Chiang Saen. (3) Relative and absolute ranges of sediment variations at Jiuzhou station both increased against the time phases; those at Yunjinghong decreased, while relative ranges of sediment variation at Chiang Saen decreased in the earlier years then increased later, but absolute range was decreasing all the time. Different responses of annual distributions of sediment concentration at three hydrological stations to dam constructions indicate that their driving factors of sediment variation are absolutely different. These discoveries of annual distribution characteristics of sediment concentrations present new scientific evidences for assessing the impacts of dam constructions on upstream and downstream sediment change as well as its transboundary effects.

Key words: distribution of suspended sediment concentrations; hydropower cascade development; Lancang-Mekong River; the longitudinal range-gorge region (LRGR)