

澜沧江-湄公河输沙量变化及其影响因素

刘成¹, 王建军², 何耘³

(1. 国际泥沙研究培训中心, 北京 100048; 2. 新布伦瑞克大学测绘工程系, 新布伦瑞克 弗雷德里克顿 E3B5A3, 加拿大;
3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 为了更准确评估澜沧江-湄公河输沙量的变化情况及上游水电开发对下游输沙量变化的影响, 从最近几年文献中选择可信的下湄公河各站的年输沙量数据, 并根据相关文献整理得出漫湾水电工程坝下第一个水文站点——嘎旧站 1965—2003 年的年径流和年输沙量系列数据, 分析比较澜沧江-湄公河沿程各站的年输沙量变化趋势。结果表明: 澜沧江上漫湾水电工程运行后, 嘎旧站年输沙量大幅降低, 降幅大于 60%, 但清盛站及其下游各站输沙量未出现与其一致的变化趋势。认为清盛站输沙量的降低量远低于嘎旧站的原因主要是两站间含沙量大的支流汇入、人工经济林取代原始森林等因素造成的流域水土流失和河流含沙量恢复。湄公河入海沙量约为 1.45 亿 t/a, 预计未来湄公河入海沙量可能会降低。

关键词: 澜沧江; 湄公河; 输沙量; 径流量

中图分类号: P333.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2013)01-0007-06

Change in sediment loads in the Lancang-Mekong River and its influencing factors//LIU Cheng¹, WANG Jianjun², HE Yun³ (1. International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation, Beijing 100048, China; 2. Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton E3B5A3, Canada; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: To accurately evaluate variations of sediment loads in the Lancang-Mekong River and influences of its upstream hydropower development on sediment loads in its downstream reaches, the credible data of annual sediment loads at various monitoring stations along the Lower Mekong River are chosen from the existing literatures, and the annual runoffs and sediment loads at Gajiu hydrological station (the first station downstream Manwan Hydropower Station dam on Lancang River) from 1965 to 2003 are yielded. The change trend of annual sediment loads of the Lancang-Mekong River at various stations is analyzed and compared. The results show that the annual sediment loads at Gajiu hydrological station has a dramatical decrease of over 60% after the operation of Manwan Hydropower Project. However, the sediment loads at Chiang Saen hydrological station and its downstream stations do not have the consistent change trend. The main causes for the less decrease of sediment loads at Chiang Saen hydrological station than that at Gajiu hydrological station are as follows: confluence of tributaries with high sediment concentration, soil and water losses caused by replacement of natural forest by artificial economic forest, and recovery of sediment content in the rivers. The amount of sediment loads of the Mekong River entering the sea is about 145 million t/a, and it is predicted to be reduced in the future.

Key words: Lancang River; Mekong River; sediment load; runoff

澜沧江-湄公河发源于青海省玉树藏族自治州的杂多县吉富山, 流域总面积约 81 万 km², 流域范围涉及中国、缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南 6 国。从河源至河口全长约 4 880 km, 平均比降为 0.103%。该河在我国境内称为澜沧江, 至南腊河口流出国境后称湄公河。国际上将中国和缅甸境内的河段称为上湄公河 (Upper Mekong), 把老挝、泰国、柬埔寨和越

南境内的河段称为下湄公河 (Lower Mekong) (图 1)。

河流泥沙量的变化对河道演变、河流生态、航运开发、水电站建设、河口三角洲冲淤等带来重大的影响, 因此研究澜沧江-湄公河河流泥沙的变化和发展趋势具有重要意义, 近年已有越来越多的研究涉及澜沧江-湄公河输沙量的变化及趋势预测。文献



图1 澜沧江-湄公河示意图

[1]将中国境内澜沧江划分成上、中、下3段,根据实测水文泥沙资料,分析了20世纪50年代到1987年3段各自的水沙变化过程,发现水量变化比较平稳,泥沙则有增加趋势。关于中国境内水电站工程对下湄公河输沙量的影响,近年来发表的文献有多种不同看法。文献[2]认为漫湾水电工程使湄公河下游各站沙量均下降,比较1962—1992年和1993—2002年两个时段的年输沙量,清盛站从7100万t降至3100万t,巴色站从1.33亿t降至1.06亿t。文献[3]提出受漫湾水电工程的影响,清盛站的年输沙量从1993年前的7411万t下降到1993—2000年的3451万t,但大坝的减沙效应只影响至万象,相应时期穆达汉站的年输沙量却增高约34%。文献[4]通过分析漫湾水电站建成前后数站的悬沙浓度变化,认为漫湾水电工程对河流悬沙浓度的影响仅局限至允景洪站。文献[5-6]分析了澜沧江允景洪站1965—1987年以及湄公河清盛、琅勃拉邦、廊开、穆达汉和巴色5个站1960—2002年的泥沙数据,显示清盛及下游各站的输沙量没有响应大坝的减沙作用,清盛站年输沙量从1960—1992年的7230万t增加到1993—2003年的9480万t,下湄公河各站的输沙量变化在过去40a里相对平稳;同时指出一些水质测试得到的泥沙数据低估了实际的输沙量,这也是一些研究^[2,3,7]得出漫湾水电工程造成清盛站输沙量突然降低的原因之一。文献[8]结合不同来源的水沙数据,重建了清盛、琅勃拉邦、廊开、穆达汉和孔尖5个站的年输沙量的系列变化,在上游水电工程对河流输沙量的影响上,也认为仅局限至清盛站。

澜沧江-湄公河境外的现有泥沙数据很难直接使用,因为数据采集方法不一致,测试方法也有多

种,有按水质测试方法测量的单点悬浮物浓度;有按美国河流泥沙测试技术测量的总悬移质浓度,但按此法测试的站点少,采样频率低^[6-8]。正是由于数据量有限,数据的一致性、可信性不高,不同的研究者得出不同的结果也是可以理解的,但随着研究的深入,研究成果越来越具有说服力。文献[6]详细分析了各站泥沙数据的可靠性,得出的年输沙量数据令人信服;文献[8]等在前人研究的基础上,重建了多站连续的年输沙量系列数据,在此方面做出了有益的贡献。但文献[6]提出由于分析中缺乏1990年以后澜沧江段的泥沙数据,难以评估中国水电工程对下游河段输沙量的影响。

本文以文献[6,8]得到的湄公河上各站的年输沙量数据为基础,从公开发表的文献整理得出漫湾水电站坝下的第一个水文站点——嘎旧站的年径流量和输沙量数据,对澜沧江-湄公河输沙量的变化情况进行比较,分析输沙量变化的影响因素和漫湾水电工程对沿程输沙量变化的影响。

1 嘎旧站水沙变化情况

嘎旧站是漫湾水电站坝下的第一个水文站点,距坝址约15 km,漫湾水电工程对其水沙变化影响明显。嘎旧站有长系列的水沙数据,本文主要数据源自文献[1]所列出的1965—1987年嘎旧站的年径流、年输沙数据,并根据文献[9]补至2003年,据此得出嘎旧站的年径流量和年输沙量逐年变化如图2所示,得出年径流量和年输沙量双累计曲线如图3所示。

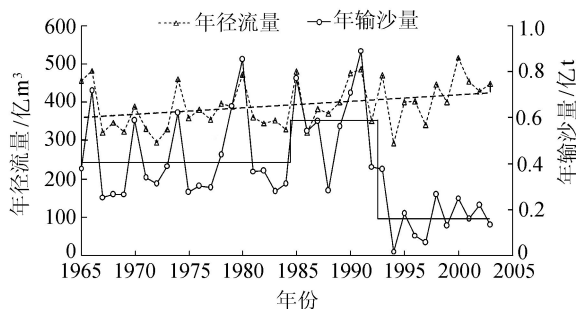


图2 嘎旧站的年径流量和年输沙量逐年变化

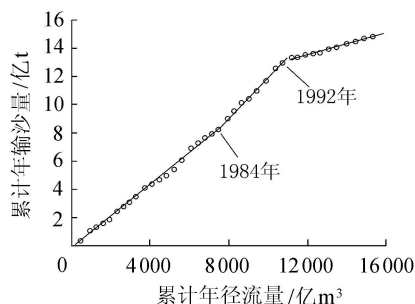


图3 嘎旧站的年径流量和年输沙量双累计曲线

由图 2 可见,嘎旧站年径流量呈略增长趋势,多年平均值约为 390 亿 m^3 ,1993—2003 年平均径流量增加至约 418 亿 m^3 。从年输沙量变化情况看,嘎旧站多年平均值约为 3 800 万 t,总体上各年输沙量随年径流量的升降而同步增大和减少。采用径流量和输沙量双累积曲线是判定输沙量变化出现拐点的有效方法,能够消除径流量的变化对输沙量趋势分析的影响。由图 3 可见,累积年径流量和输沙量在 1984 年前均基本呈线性增长关系,说明 1965—1984 年期间两站的输沙量无明显趋势性变化。1985 年双累积曲线开始略上翘,直至 1992 年后出现第 2 个拐点,双累积曲线斜率明显变缓,反映出 1985—1992 年输沙量有一定增高,1993—2003 年输沙量大幅下降。因此,输沙量变化可分成 1965—1984 年、1985—1992 年和 1993—2003 年 3 个明显的不同时段,呈稳定、升高、降低的变化。3 个时段平均值分别为 4 130 万 t、5 890 万 t 和 1 690 万 t。

2 下湄公河段输沙量变化情况

Walling^[6]经过现场调研,收集了各类泥沙量数据,整理、分析得出有足够实测数据支持的清盛、琅勃拉邦、廊开、穆达汉和巴色 5 个站 1960—2003 年的年输沙量数据;Wang 等^[8]充分吸收、借鉴前人的研究成果,重建了清盛、琅勃拉邦、廊开、穆达汉和孔尖 5 个站 1962—2003 年的逐年输沙量的系列变化,对湄公河输沙量研究作出了有益的贡献。

图 4 为文献[6,8]所提出的各站的年输沙量变化情况。文献[6]最下游站采用了巴色站数据,但仅有 6 年可信的数据;文献[8]选用了距巴色站上游 41 km 的孔尖站数据。总体看,除孔尖、巴色站外,文献[8]重建的各站年输沙量变化值与文献[6]提出的输沙量基本一致,说明重建的数据基本可信。

文献[10]对澜沧江段年径流量 1960—2005 年的变化趋势进行了分析,显示清盛、琅勃拉邦、万象和巴色站年径流量呈减少趋势,而穆达汉站呈增加趋势。从图 4 可见,各站的年输沙量变化趋势与年径流量变化趋势不尽相同。清盛站年输沙量的多年变化与嘎旧站表现出相似的形态,即 20 世纪 80 年代中期至 90 年代初输沙量增高,随后输沙量降低,但与嘎旧站输沙量呈下降趋势不同,清盛站输沙量的总体变化趋势略增高。琅勃拉邦和廊开站年输沙量变化相似,总体明显下降,其中 20 世纪 70 年代初之前输沙量较高,其后基本无明显变化趋势;廊开站的年输沙量下降幅度低于琅勃拉邦站。穆达汉和孔尖站输沙量则呈上升趋势,2000 年前后年输沙量明显增加。

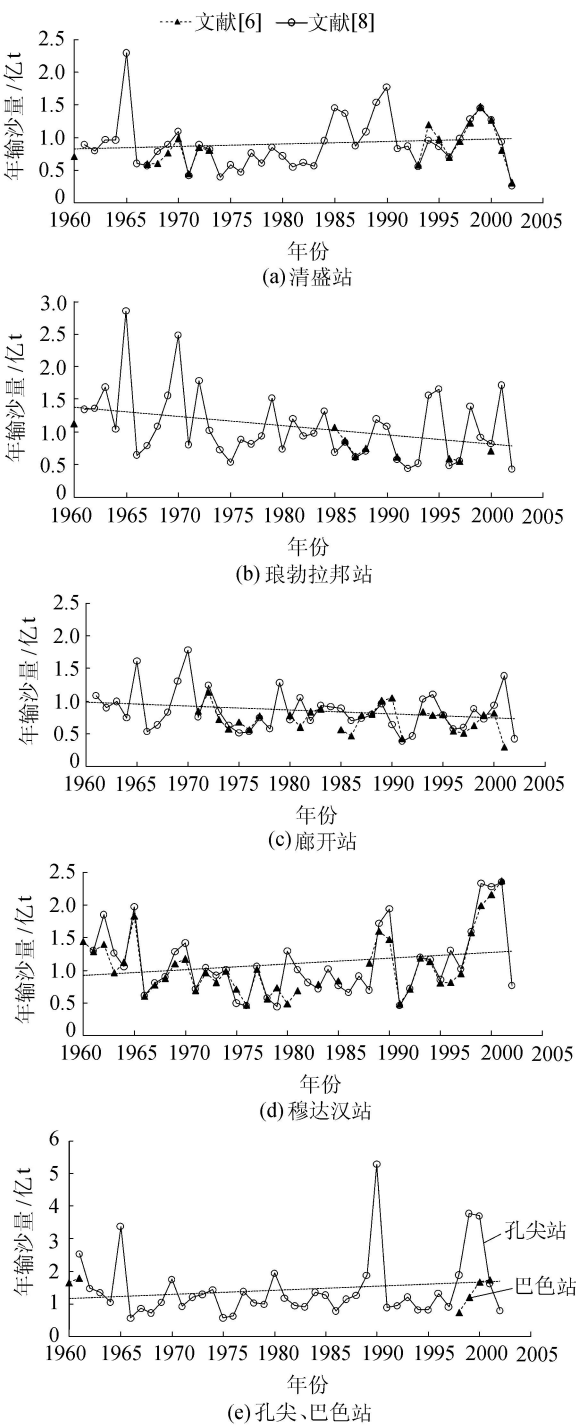


图 4 下湄公河各站年输沙量变化曲线

3 澜沧江-湄公河输沙量沿程变化

表 1 列出了澜沧江-湄公河自上而下 6 个站 1965—2003 年、1965—1992 年、1993—2001 年不同时间段的多年平均输沙量的沿程分布,其中嘎旧站年输沙量采用图 2 数据,湄公河境外段各站输沙量采用文献[8]数据。

如表 1 所示,嘎旧、清盛、琅勃拉邦、廊开、穆达汉和孔尖站 1965—2003 年的多年平均输沙量分别为 3 802 万 t、9 096 万 t、10 471 万 t、8 437 万 t、10 866 万 t 和

表1 澜沧江-湄公河各站不同时段多年平均输沙量 万 t

时 段	嘎旧	清盛	琅勃拉邦	廊开	穆达汉	孔尖
1965—2003 年	3 802	9 096	10 471	8 437	10 866	14 215
1965—1992 年	4 630	9 048	10 839	8 569	9 568	13 447
1993—2003 年	1 694	9 219	9 536	8 102	14 170	16 168

14 215 万 t,说明嘎旧—清盛、清盛—琅勃拉邦、廊开以下河段有明显的泥沙输入,而琅勃拉邦—廊开区间可能存在泥沙沉积区段。

1965—1992 年多年平均输沙量沿程分布与 1965—2003 年的分布大致一样,从嘎旧站至琅勃拉邦站输沙量逐渐升高,廊开站明显降低,下游 2 站沿程增加。从 1993 年后多年平均输沙量的沿程分布看,嘎旧站最低,至清盛站迅速升高,并高于清盛站 1992 年前的多年平均值;琅勃拉邦站输沙量与清盛站变化不大,廊开站明显下降;随后穆达汉站和孔尖站输沙量大幅增加。

从沿程各站 1993 年前后两个时段的输沙量变化看,虽然嘎旧站年输沙量降幅大于 60%,但下游各站年输沙量的变化不相同。清盛站年输沙量略升 2%;琅勃拉邦和廊开站降低约 12% 和 5%;而穆达汉站和孔尖站大幅增加了 48% 和 20%。

文献[7]以清盛、琅勃拉邦、穆达汉和巴色 4 站 1961 年的输沙量为基础数据,与近年同一站具有相近年径流量年份的输沙量值相比较,判定输沙量的变化情况。本文补上嘎旧站 1965 年的年输沙量及其近年相近径流量年份的输沙量,如表 2 所示。由表 2 可见嘎旧站年输沙量约降低了 60%,清盛和穆达汉站年输沙量分别增大 14% 和 38%,而琅勃拉邦和巴色站年输沙量在两个年代基本持平。从 1961 年的沿程数据看,清盛站以下各站输沙量沿程增加,也表明了清盛—琅勃拉邦区段以及更下游河段存在明显的泥沙输入。可见,利用这种比较方法与利用多年输沙量数据进行比较得出了相似的判断。

表2 澜沧江-湄公河各站 1961 年输沙量和近年来与之相近年径流量年份的输沙量比较

站 点	1961 年 输沙量/ 万 t	1961 年 径流量/ 亿 m ³	近期年 输沙量/ 万 t	近期年 径流量/ 亿 m ³	输沙量 变化/ %
嘎 旧	3 790	455	1 583 (2001 年)	454 (2001 年)	-58
清 盛	7 130	920	8 110 (2002 年)	892 (2002 年)	14
琅勃拉邦	11 240	1 266	11 840 (1997 年)	1 184 (1997 年)	5
穆达汉	14 450	2 833	19 910 (2000 年)	2 966 (2000 年)	38
巴 色	16 580	3 843	16 800 (2001 年)	3 880 (2001 年)	1

注:嘎旧站为 1965 年的数据。

4 输沙量变化影响因素

4.1 嘎旧与清盛站输沙量变化的原因

为了便于比较嘎旧与清盛站输沙量变化的差异,分析原因,将两站的逐年输沙量变化绘制在同一图中(图 5)。由图 5 可见,嘎旧和清盛站的年输沙量呈现相似的变化形态,即可按 1965—1984 年、1985—1992 年和 1993—2003 年清晰分出输沙量稳定、升高、降低 3 个变化时段。在 3 个时间段内,除了 2002 年和 2003 年清盛站的输沙量呈现明显降低(主要受大朝山水电站建成拦沙的影响)外,输沙量变化相对稳定。

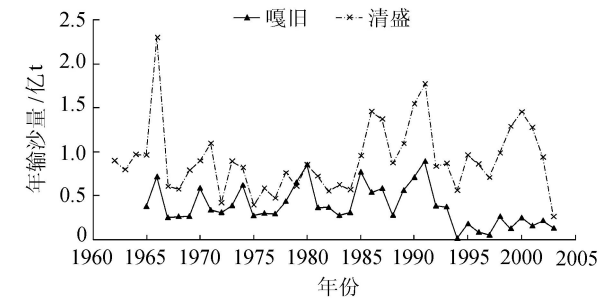


图5 嘎旧与清盛站年输沙量比较

1965—1984 年期间,两站的年输沙量基本随年径流量变化而升降,无趋势性变化。说明这一时期河流和上游流域受人类活动干扰小,流域水土流失的影响尚不明显。

1985—1992 年期间,两站的输沙量均大幅增加。嘎旧站多年平均输沙量从 1984 年前的 4 130 万 t 增至 1985—1992 年的 5 890 万 t,增幅超过 40%,增加量达 1 760 万 t;而清盛站从 1984 年前的 7 730 t 增至 1985—1992 年的 11 940 万 t,增幅 54%,增加量达 4 210 万 t,远高于嘎旧站。这种输沙量的大幅度增加恰与澜沧江流域水土流失最严重的 20 世纪 80 年代中期相对应,主要是流域内不合理的土地利用、毁林开荒、陡坡耕垦等,使植被、山体破坏严重。据不完全统计,澜沧江流域 20 世纪 50—60 年代的森林覆盖率达 50% 以上,到 1985 年降至 33%,70—80 年代澜沧江流域的森林覆盖面积急剧减少^[11]。同时,漫湾水电站施工造成输沙量的增加可能也是原因之一。漫湾水电站 1985 年开工建设,1993 年开始蓄水发电,总库容 9.20 亿 m³,调节库容 2.51 亿 m³^[12]。

1993—2003 年期间,嘎旧站多年平均输沙量大幅降低至 1 690 万 t,较上一时段(1985—1992 年)减沙 4 200 万 t,应主要归因于漫湾水电站 1993 年开始蓄水发电的拦沙效应,流域内水土保持措施的减沙作用也不容忽视。1998 年长江大洪水后,国家和云

南省加大了澜沧江流域内的水土保持工作力度,如实施天然林保护等项目。2000 年以后,随着退牧还林、退耕还林项目的开展,面上水土流失受到有效控制^[13]。清盛站此期间的多年平均输沙量较 1985—1992 年降低 2720 万 t,但仍高于 1984 年以前 10% 左右,反映了漫湾水电站大坝的拦沙效应和澜沧江上游水土保持措施的综合作用。清盛站输沙量的降低量远低于嘎旧站,其原因可能有:①嘎旧至清盛站有多条含沙量大的支流汇入,不受上游水电站影响,仅景洪至中国、老挝和缅甸三国交界处南腊河口出境处就有流沙河、南阿河、补远江和南腊河等多条支流,年均径流量占澜沧江出境多年平均径流量的 15.4%^[9]。②近年来澜沧江-湄公河结合部区域经济快速发展,以橡胶、甘蔗和热带水果为主体的土地开发大力发展,导致水土流失加剧^[11]。在澜沧江流域云南段也有大片的原始森林被橡胶林、茶园和热带果园等人工经济林所取代的现象^[14]。③坝下清水对河道的冲刷,使得河流含沙量沿程恢复。文献[15]讨论水库下游清水冲刷过程中的含沙量沿程恢复问题时,计算了比降为 0.000 1、水深 2.4 m、平均流速 1.9 m/s 条件下,粒径为 0.1 mm 的泥沙在清水冲刷作用下的含沙量恢复过程,得出经过 800 m 的距离后含沙量已恢复 89%,认为含沙量恢复饱和的距离一般不长。

4.2 中国境内水电工程对下湄公河输沙量的影响

Roberts^[16]认为中国出境水量约占全流域入海水量的 18%,输沙量占 50%。仅按这种输沙量的比例简单推算,中国境内因水电工程拦沙引起的出境沙量的降低,将会引起下游各站乃至湄公河入海沙量的降低。但这种简单推断可能失之偏颇,未考虑各区间河段的产沙、河道冲刷和淤积效应。

从前文分析可见,由于上游漫湾水电站等工程的拦沙效应,1993 年后嘎旧站年输沙量大幅降低,降幅超过 60%,但进入下湄公河的第一个站清盛站的输沙量却变化不明显,更下游的各站输沙量有升有降,反映出 1993 年前后各站区间河段的来沙、淤积等变化情况。根据这些站输沙量的变化情况,可以认为上游大坝的拦沙效应虽然造成嘎旧站输沙量的大幅降低,但清盛站及其下游各站的输沙量未出现与其一致的变化趋势。

4.3 湄公河入海沙量

湄公河入海沙量主要有两个数据,一个是联合国提出的 1.7 亿 t/a^[17],另一个是 Borland^[18]提出的 1.6 亿 t/a。联合国数据主要依据穆达汉站的数据,文献[18]的数据源自 1968 年清盛和万象站的现场实测数据。多数文献认为入海沙量为 1.5 亿 ~

1.7 亿 t/a^[16,19-20],但这些数据均没有可靠的基础数据支持。根据文献[8]重建的距河口最近的孔尖站 1962—2003 年逐年输沙量数据,可得到多年平均输沙量为 1.45 亿 t。入海沙量呈略增长趋势,1962—1992 年多年平均输沙量为 1.39 亿 t,1993—2003 年为 1.62 亿 t。按此数据,湄公河入海沙量低于过去的估计值,入海沙量未受到上游建坝的明显影响。

研究表明,受人类活动影响,全球河流输沙量大多呈下降趋势^[21];中国主要河流入海沙量近些年都有不同程度的降低^[22-23]。中国南方河流如长江、钱塘江、珠江流域的东江和西江的水沙数据显示,虽然这些河流的入海年径流量基本无趋势性变化,但近年入海年输沙量约为多年平均值的 60%~80%^[24]。虽然从本文所述数据看,近年来湄公河入海沙量呈增长趋势,但考虑到澜沧江河段小湾、漫湾、大朝山、糯扎渡、景洪等系列水电工程的兴建,下湄公河干支流上已建和将建的大坝,结合全球气候变化、水土保持工程、下湄公河流域取水灌溉等人类活动干扰的影响,长期看,估计湄公河入海沙量会有一定幅度的降低。

5 结 论

a. 以漫湾水电工程运行的 1993 年前后分成两个时段,受大坝拦沙效应等影响,嘎旧站多年平均输沙量的降幅大于 60%,但清盛至廊开站的输沙量变化不大,而最下游穆达汉和孔尖站两站却大幅增加了 48% 和 20%,说明上游大坝虽然造成嘎旧站输沙量的大幅降低,但清盛站及其下游各站的输沙量未出现与其一致的变化趋势。

b. 嘎旧和清盛站的年输沙量呈现相似的变化形态,即可按 1965—1984 年、1985—1992 年和 1993—2003 年清晰分出输沙量稳定、升高、降低 3 个变化时段。1985—1992 年输沙量大幅度增高的原因主要是流域内不合理的土地利用和人工经济林取代原始森林等造成的严重水土流失,水电站施工也引起河流输沙量增大。1993—2003 年两站输沙量降低,反映了漫湾水电站大坝的拦沙效应和水土保持效应的综合作用;清盛站输沙量的降低量远低于嘎旧站,其原因主要应是两站间含沙量大的支流汇入、人工经济林取代原始森林等因素造成的水土流失和河流含沙量恢复。

c. 从澜沧江-湄公河多年平均输沙量的沿程变化来看,嘎旧—清盛、清盛—琅勃拉邦、廊开以下河段有明显的泥沙输入,而琅勃拉邦—廊开区间可能存在泥沙沉积区段。

d. 湄公河入海沙量约为 1.45 亿 t/a,低于过去的估计值,近年入海沙量呈上升趋势,考虑受人类活

动影响等多种因素,预计未来湄公河入海沙量会有一定幅度的降低。

参考文献:

- [1] 尤联元. 澜沧江流域河流泥沙发展趋势初步研究[J]. 地理学报, 1999, 54(增刊1): 93-100. (YOU Lianyuan. A study on temporal changes of river sedimentation in Lancang River Basin[J]. ACTA Geographica Sinica, 1999, 54(Sup1): 93-100. (in Chinese))
- [2] KUMMU M, VARIS O. Sediment-related impacts due to upstream reservoir trapping, the Lower Mekong River[J]. Geomorphology, 2007, 85: 275-293.
- [3] LU X X, SIEW R Y. Water discharge and sediment flux changes over the past decades in the Lower Mekong River; possible impact of the Chinese dams[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2006, 10: 181-195.
- [4] FU K D, HE D M, LU X X. Sedimentation in the Manwan reservoir in the Upper Mekong and its downstream impacts [J]. Quaternary International, 2008, 186(1): 91-99.
- [5] WALLING D E. The changing sediment load of the Mekong River [J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2008, 37(3): 150-157.
- [6] WALLING D E. The sediment load of the Mekong River; Chapter 6 [C]//CAMPBELL I C. The Mekong: Biophysical Environment of an International River Basin. New York: Academic Press, 2009: 113-142.
- [7] FU Kaidao, HE Dammg, LI Shaojuan. Response of downstream sediment to water resource development in mainstream of the Lancang River[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(Sup1): 119-126.
- [8] WANG J J, LU X X, KUMMU M. Sediment load estimates and variations in the Lower Mekong River[J]. River Research and Applications, 2011, 27(1): 33-46.
- [9] 傅开道, 黄江成, 何大明. 澜沧江漫湾电站拦沙能力评估[J]. 泥沙研究, 2008(4): 36-40. (FU Kaidao, HUANG Jiangcheng, HE Daming. Assessment of sediment trapped by the Manwan Dam on Lancang River [J]. Sediment Research, 2008(4): 36-40.
- [10] 周婷, 于福亮, 李传哲, 等. 1960—2005年湄公河流域径流量演变趋势[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(6): 608-613. (ZHOU Ting, YU Fuliang, LI Chuanzhe, et al. Evolution trend of runoff in Mekong River Basin during 1960-2005[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(6): 608-613. (in Chinese))
- [11] 疏玉清, 许光祥, 王云祥. 澜沧江流域的水土流失与森林覆盖率[J]. 重庆交通学院学报, 1997, 16(2): 97-100. (SHU Yuqing, XU Guangxiang, WANG Yunxiang. Soil-erosion with decreasing forest cover rate about Lancang River Basin [J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1997, 16(2): 97-100. (in Chinese))
- [12] 刘新有, 何大明. 水电开发对河流水沙特性影响的综合评价方法[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 953-960. (LIU Xinyou, HE Daming. A comprehensive assessment method

- of hydropower development impact on runoff and sediment change[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(7): 953-960. (in Chinese))
- [13] 傅开道, 何大明, 陈武, 等. 电站建设对澜沧江-湄公河泥沙年内分配的影响[J]. 地理学报. 2007, 62(1): 14-21. (FU Kaidao, HE Daming, CHEN Wu, et al. Impacts of dam constructions on the annual distribution of sediment in Lancang-Mekong River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(1): 14-21. (in Chinese))
- [14] 姜昀, 高吉喜, 欧晓昆. 澜沧江流域云南段土地利用格局变化及环境影响分析[J]. 环境科学研究. 2006, 19(3): 46-51. (JIANG Yun, GAO Jixi, OU Xiaokun. Change of land use pattern and analysis of environment impact of Lancang watershed in Yunnan [J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(3): 46-51. (in Chinese))
- [15] CHIEN N, WAN Z H. Mechanics of sediment transport [M]. New York: ASCE Press, 1999: 913.
- [16] ROBERTS T. Downstream ecological implications of China's Lancang Hydropower and Mekong Navigational Project [R/OL]. [2012-04-28]. <http://www.irm.org/programs/lancang/>.
- [17] United Nations. Compendium of international rivers in the ECAFE region [C]//ECAFE. Proceedings of the 6th Regional Conference on Water Researches Development in Asia. New York: United Nations, 1965.
- [18] BORLAND W M. Pa Mong phase II, supplement to main report: hydraulics and sediment studies (Vol. 1) [R]. Washington, D. C.: Bureau of Reclamation, 1973.
- [19] MILLIMAN J D, MEADE R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans [J]. Journal of Geology, 1983, 91: 1-21.
- [20] MILLIMAN J D, SYVITSKI J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean; the importance of small mountainous rivers [J]. Journal of Geology, 1992, 100: 525-544.
- [21] WALLING D E, FANG D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers [J]. Global and Planetary Change, 2003, 39(1/2): 111-126.
- [22] 刘成, 王兆印, 隋觉义. 黄河干流沿程水沙变化及其影响因素分析[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(3): 1-7. (LIU Cheng, WANG Zhaoyin, SUI Jueyi. Variation of flow and sediment of the Yellow River and their influential factors [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(3): 1-7. (in Chinese))
- [23] 刘成, 胡春宏, 史红玲. 中国大陆太平洋流域河流下泄水沙通量的变化[J]. 泥沙研究, 2011(1): 70-75. (LIU Cheng, HU Chunhong, SHI Hongling. Changes of runoff and sediment fluxes of rivers in mainland of China discharged into Pacific Ocean [J]. Sediment Research, 2011(1): 70-75. (in Chinese))
- [24] LIU Cheng, SUI Jueji, WANG Zhaoyin. Sediment load reduction in Chinese rivers [J]. International Journal of Sediment Research, 2008, 23(1): 44-55.

(收稿日期: 2012-05-08 编辑: 熊水斌)