

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.04.016

澜沧江-湄公河流域产输沙和水库拦沙研究 存在问题分析

侯时雨, 田富强, 倪广恒

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 澜沧江-湄公河是中国与东南亚地区重要的跨境河流, 其泥沙问题涉及流域内各国的生态、农业、渔业、航运、海岸侵蚀等诸多领域, 近年来下游输沙量持续减少, 受到广泛关注。综述了澜沧江-湄公河泥沙研究的争论焦点, 包括全流域主产沙区的位置, 湄公河干流水文站点间实测输沙量异常变化关系以及人类活动对泥沙过程的影响。系统梳理了现有研究中存在的主要问题, 包括下湄公河泥沙观测数据质量不高、全流域总输沙量 1.60 亿 t/a 的数据基础存疑、水文模拟的时空分辨率不足、未考虑土地利用变化的影响和悬移质之外的泥沙研究不充分等, 在此基础上提出了进一步研究建议。

关键词: 流域产沙; 输沙; 水库拦沙; 澜沧江-湄公河

中图分类号: TV153/157; G353.11

文献标志码: A

文章编号: 1001-6791(2020)04-0619-10

澜沧江-湄公河发源于中国青藏高原唐古拉山北麓, 流经中国、缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南等 6 个国家, 于越南胡志明市汇入南中国海, 其干流全长 4 880 km, 汇流面积约 81 万 km², 下游的湄公河三角洲是世界第三大三角洲平原。研究表明, 在过去的 3 000 年中, 湄公河三角洲来沙量保持相对不变^[1], 平均每年向海中延伸 10~20 m^[2]。据估计, 澜沧江-湄公河流域年均产沙量为 1.50 亿~1.70 亿 t^[3-5], 然而近些年来来沙量减少, 在强烈的冬季海浪影响下, 三角洲东北区域的部分海岸线以每年 50 m 的速度被侵蚀^[6]。2018 年湄公河委员会(Mekong River Commission, MRC, 简称湄委会)的报告指出^[7], 2007 年进入三角洲的泥沙量为 1.43 亿 t, 由于受到干支流水利工程的影响, 到 2020 年将减少至 0.47 亿 t(也有研究认为 2020 年将减少 50% 左右^[8]), 2040 年将不足 0.05 亿 t。由于泥沙为下游带来丰富的营养物质, 如果按此趋势发展, 三角洲无疑将受到非常严重的损失, “鱼仓”洞里萨湖和“粮仓”湄公河三角洲都会因此面临大幅减产的风险。除此之外, 泥沙量变化还对发电、航运、沿海红树林、河岸冲刷以及由此引发的国界变化、流域生态安全和可持续发展等带来影响。

在澜沧江-湄公河流域泥沙相关研究中, 流域产沙时空分布是其他研究的基础, 最为关键。不清楚各区域产沙量随时间变化特征及受到不同因素的影响程度, 就不可能正确分析三角洲来沙量减少的原因, 也就不可能从根本上改变这一趋势。目前该领域研究众多, 但结论相差较大, 目前主要分为两类观点: 一类观点认为湄公河下游的泥沙主要产自澜沧江流域, 澜沧江流域产沙量约占全流域产沙量的一半左右^[7,9-10]; 另一类观点认为湄公河下游的泥沙并非主要来自澜沧江, 老挝北部地区也是重要的产沙区^[11-12]。关于澜沧江-湄公河流域输沙过程, 主要问题是上下游水文站输沙量存在异常的变化关系, 实测数据显示断面输沙量在清汗—空坚区间大量增加, 在空坚—巴色区间大量减少, 目前对该现象尚无合理解释^[12]。水库拦沙研究的焦点在于水库建设对下游来沙量的影响评价, 有研究将湄公河下游来沙大幅减小归因于澜沧江梯级电站的建设, 认

收稿日期: 2019-10-28; **网络出版日期:** 2020-04-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20200410.1854.010.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFA0601603); 国家自然科学基金资助项目(51961125204)

作者简介: 侯时雨(1994—), 女, 陕西西原人, 博士研究生, 主要从事水文学水资源研究。

E-mail: housy16@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者: 田富强, E-mail: tianfq@tsinghua.edu.cn

为上游的泥沙大量淤积于水库^[13-14]，澜沧江流域梯级电站拦截泥沙的影响波及下游河段直至巴色^[15]，也有研究认为澜沧江泥沙的变化只影响到万象以上区域，下湄公河的水沙主要受到下游的影响而非上游的澜沧江^[16-17]。

本文致力于梳理澜沧江-湄公河流域产沙、河道输沙和水库拦沙研究中存在的主要问题，为后续研究提供参考。需要说明的是，河道中的泥沙一般分为两类：悬移质和推移质。由于分析河床底部推移质需要考虑更多影响因素，相关研究有限，因此，目前大部分澜沧江-湄公河流域的泥沙研究都不考虑推移质，本文中的“泥沙”在大多数情况下也是指悬移质。

1 下湄公河泥沙观测

1960 年以来，由美国国际开发总署资助设立了下湄公河泥沙取样计划，在包括清盛、琅勃拉邦、穆达汉、廊开和巴色的若干站点中观测断面悬移质浓度，逐年取样数量如图 1，水文站点分布如图 2 所示。可以看到，其取样频率较低，缺测年份较多，站点之间观测时间不统一。清盛 1976—1985 年、琅勃拉邦 1963—1984 年、廊开 1960—1971 年、巴色 1963—1985 年都没有泥沙观测记录。

1985 年以后 MRC 在下湄公河建立了水质监测网，检测内容包含悬浮固体物总量(TSS)，然而其观测方法却备受争议。大多数站点按水质测试方法得到单点悬移质浓度，也有少数站点按美国泥沙测试技术测量总悬移质浓度^[18-19]。其单点悬移质浓度观测采用 USD-49、P-46 和 P-61 标准，从水下 30 cm 处得到数据，而缺少悬移质浓度的垂向分布。一般来说，断面不同深度设置的取样点越多，得到的泥沙垂向浓度分布就越细致，推算的断面平均悬移质浓度的误差就越小。如果只有一个取样点，设置在哪里最合理呢？根据中国河流悬移质泥沙测验规范^[20]，采用一点法测悬移质浓度时，应在距水面 0.6 个相对水深位置处取样。湄公河的水深可达数米至数十米，不同月份之间相差 10 倍以上，距离水面 30 cm 的单个采样点显然会导致推算出的断面平均悬移质浓度存在较大误差。Walling^[21]对比清盛站水质监测网计划和湄公河下游泥沙取样计划 1994—2001 年的两套泥沙观测数据，发现水质监测网计划(使用瓶子取样

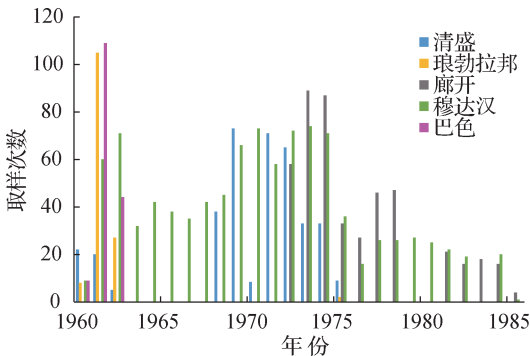


图 1 下湄公河干流主要水文站点 1960—1985 年取样次数
Fig.1 Number of samples collected at five main sites of Lower Mekong River in 1960—1985

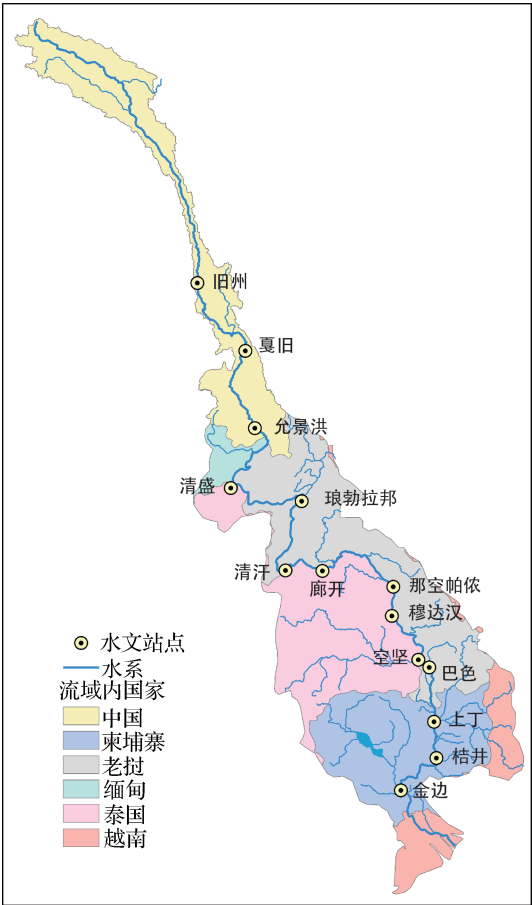


图 2 澜沧江-湄公河流域
Fig.2 The Lancang-Mekong River basin

而非取样器)公布的 TSS 浓度大约是同一地点悬移质取样计划公布悬移质浓度的一半,并指出其取样的月频率不足以运用输沙率关系曲线来进行可靠的年输沙量估计。

2009 年湄委会信息知识管理计划 IKMP(Information Knowledge Management Programme)发起流量与泥沙监测项目 DSMP(Discharge and Sediment Monitoring Project)。DSMP 共 17 个监测站点,湿季(6—10 月)每月监测 4 次,其余月份每月监测 2 次。DSMP 为成员国建立了分析实验室,便于控制数据质量,然而即便是这样经过严格质量控制的泥沙观测数据,也因为站点间输沙量的异常变化而被学者质疑。MRC 报告^[22]展示了 DSMP 项目 2009—2013 年下湄公河水文站点监测的流量和泥沙含量,估算出 2011 年下湄公河干流沿程各重要控制站点流量观测值和输沙量估算值的年内变化,发现上下游站点间的输沙量存在异常的变化关系^[12]。具体来说,偏上游的清盛、琅勃拉邦和清汗的年输沙量为 0.13 亿~0.26 亿 t,靠近中游的穆达汉和空坚的年输沙量突然增加至 1.07 亿 t 和 1.66 亿 t(2010 年这两处的输沙量分别为 1.19 亿 t 和 2.06 亿 t),而偏下游的巴色、上丁和桔井站点的输沙量又突然减少为 0.73 亿 t、1.06 亿 t 和 1.16 亿 t。泥沙在清汗—空坚区间大量增加,在空坚—巴色区间大量减少,空坚和巴色距离非常近,而泥沙量却悬崖式下降超过 50%。若观测数据准确,该段河道冲淤将是一个非常严重的问题;若观测数据有误,就要重新校核观测数据,而目前这一方面的研究还非常少。

与下湄公河相比,澜沧江水文站采用更加规范的中国标准^[20],澜沧江和下湄公河水文站点悬移质观测标准不一致也增加了基于上下游实测泥沙数据开展研究的难度。有研究对比允景洪和清盛站的月泥沙数据,发现二者并无显著相关关系^[17,23]。

下湄公河泥沙观测数据质量不高可能会导致研究结果出现矛盾。Hecht 等^[24]收集 MRC 不同站点的泥沙观测数据,展示小湾水电建设对下游断面输沙量的影响:清盛从 0.60 亿 t/a 减少至 0.10 亿 t/a,巴色从 1.20 亿 t/a 减少至 0.60 亿 t/a,桔井从 1.60 亿 t/a 减少至 0.90 亿 t/a。从理论上分析,由于河道自身的恢复作用,上游来沙减少对下游的影响应当沿程递减,而 Hecht 等^[24]的分析结果却显示小湾建设导致清盛、巴色、桔井 3 处输沙量分别减少 0.50 亿 t/a、0.60 亿 t/a、0.70 亿 t/a,从上游到下游依次递增。理论和观测值出现矛盾,有可能是因为泥沙观测数据不准确,也有可能是忽略了其他可能导致输沙量减少的因素。

下湄公河泥沙观测数据质量不高还可能会导致主产沙区的误判。刘成等^[25]认为戛旧站和清盛站之间有含沙量大的支流汇入,仅允景洪至中国、老挝、缅甸交界处就有流沙河、南阿河、补远江、南腊河等多条支流,年径流量占澜沧江的 15.4%,其输沙量不可小觑。加之这一区域受到人类活动干扰,原始森林被砍伐,人工经济林取而代之,水土流失严重。而由于下湄公河水文站低估了河道悬移质浓度,清盛站输沙量接近甚至低于允景洪站,导致这一区域的产沙一直都没有受到重视。

2 澜沧江-湄公河全流域总输沙量

在澜沧江-湄公河的泥沙研究中,几乎所有文献都将全流域总产沙量 1.60 亿 t/a 左右作为前提条件。那么 1.60 亿 t/a 这一数值源自哪里,是否得到了充分论证呢?沿着时间线向前追寻,笔者发现几乎所有使用 1.60 亿 t/a 的研究都直接或间接地引用了两篇文章:① Milliman 和 Meade^[26]于 1983 年在《The Journal of Geology》期刊上发表“World-wide delivery of river sediment to the oceans”。该文指出红河、湄公河和伊洛瓦底江总共向海中输送 5.00 亿 t/a 的泥沙,其中湄公河输沙量为 1.60 亿 t/a,数据来源是 Gordon 在 1885 年的报告中引用 19 世纪 70 年代的观测数据(并未记载观测和计算的方法),在 Gordon 之后最新可信的观测数据来自 Borland^[27]。Liu 等^[28]指出 Borland^[27]的数据是基于 1968 年清汗和万象的泥沙观测数据,很遗憾笔者只找到了 Borland^[27]的简要信息而未能获得全文。② Milliman 和 Syvitski^[3]于 1992 年在《The Journal of Geology》期刊上发表文章“Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers”。该文梳理了全球 280 条入海河流,湄公河作为其中一条出现在表格中,列有流域面积、输沙量和径流量,但无观测和计算的方法,无参考文献。这两篇文章受到大量引用,截至 2019 年 9 月 28 日,Web of

Science 检索两篇文章被引频次分别为 2 148 和 2 272。自此,澜沧江-湄公河输沙量为 1.60 亿 t/a 的说法作为事实被广泛引用,而并未得到更多论证。

其他研究对湄公河年输沙量的估值大多位于 0.50 亿 ~ 1.70 亿 t/a 区间。包括:第六届亚洲水资源研究发展区域会议论文集^[29]认为湄公河输沙量为 1.70 亿 t/a; Roberts^[4]将 1.60 亿 t/a 这一固定值扩展为区间 1.50 亿 ~ 1.70 亿 t/a,但并未说明计算过程,也无参考文献,只是将其作为事实进行陈述; Liu 等^[28]通过分析 1965—2003 年的泥沙观测数据,认为目前湄公河河口的输沙量为 1.45 亿 t/a; Milliman 和 Farnsworth^[30]从全球视角讨论河流将水、沙、化学物质带入海中,其中提到水库建设导致当前湄公河下游年均输沙量为 1.1 亿 t/a; Darby 等^[31]通过分析 1981—2005 年的泥沙数据,估计桔井断面的年均输沙量为 0.59 亿 ~ 1.16 亿 t/a; Lu 等^[32]通过分析湄公河下游站点泥沙观测数据,认为湄公河输沙量为 0.50 亿 ~ 0.91 亿 t/a。

认为湄公河输沙量低于 1.60 亿 t/a 的研究大多基于下湄公河水文站点的泥沙观测数据,其数据质量还有待校核,另一方面这是人类活动影响(包括水库建设、河道采砂、砍伐森林等)之后的湄公河输沙量分析,已与天然情况有异。目前学界常用的自然状态下澜沧江-湄公河年均产沙量依然是 1.60 亿 t/a,例如 2018 年 MRC 的报告^[7]就采用了 1.60 亿 t/a 的说法。

笔者认为,澜沧江-湄公河全流域输沙量 1.60 亿 t/a 的说法值得商榷,原因如下:

(1) 150 年前得到的、没有计算方法说明的数据是否准确,经过时代变迁后是否还适应今天的情况,尚需论证。

(2) 湄公河流域不同年份来水来沙量不同,平均值无法反映年际差异。Liu 等^[28]综合 Walling^[18]和 Wang 等^[19]的研究成果,对比 1960—2003 年清盛、琅勃拉邦、廊开、穆达汉、巴色、空坚的年输沙量,发现 Walling^[18]和 Wang 等^[19]对清盛、琅勃拉邦、廊开、穆达汉 4 个断面的泥沙重构序列基本一致,而巴色和空坚则有较大差距。空坚位于巴色上游 41 km 处,其输沙量却远远超过巴色,甚至在一些年份超过巴色年输沙量的 2 倍。Liu 等^[28]认为 Walling^[18]提供的巴色泥沙数据准确,于是将这一差异归因于 Wang 等^[19]提供的空坚泥沙数据误差较大。同样, Lu 等^[32]也指出从穆达汉到金边输沙量观测值锐减 45%,但并未给出解释,而是直接以金边的输沙量观测值作为判断全流域输沙量的基础。研究者们之所以通常认为巴色和金边的泥沙观测数据较为准确,主要是基于对 1.60 亿 t/a 的认可。现在既已证明这个基础不牢靠,不妨大胆设想,如果不是空坚和穆达汉数据高估,而是下游的巴色和金边泥沙观测数据低估了输沙量的真实值,或者存在其他导致穆达汉—巴色区间输沙量减小的因素。Walling^[18]仅展示了 6 年的巴色泥沙数据,而 Wang 等^[19]则展示了 1960—2003 年连续的空坚泥沙数据。空坚这 40 多年连续的年输沙量数据显示,该处最大年输沙量约 5.00 亿 t/a(1990 年),最小年输沙量约 0.50 亿 t/a(1975 年),这样大的年际变化是否准确尚待研究,但是至少为湄公河泥沙研究提供了一种新的可能性,那就是湄公河年输沙量不是 1.60 亿 t/a 的定值,也不是 1.50 亿 ~ 1.70 亿 t/a 这样的小幅波动,其年际变化有可能极大。如果确是如此,那么在分析气候变化、人类活动对澜沧江-湄公河输沙量影响的研究中,就不能以 1.60 亿 t/a 作为全流域总产沙量,而是应该综合考虑当年的来水来沙情势后再做判断。

(3) Nowacki 等^[33]通过分析湄公河最下游 30 km 河道的泥沙含量,认为湄公河河口的年输沙量约为 0.40 亿 t/a,虽然也提到由于时空代表性的问题,0.40 亿 t/a 的结论可能有较大误差,但是该研究的可贵之处在于其思路和方法没有受到 1.60 亿 t/a 的限制,保持了相对的独立性。Holeman^[34]于 20 世纪 60 年代在河口上游 1 000 km 处观测该处输沙量为 1.90 亿 t/a; Harden 和 Sundborg^[35]在河口上游 850 km 处观测输沙量为 1.78 亿 t/a,同时指出只有 1.00 亿 ~ 1.50 亿 t/a 的泥沙入海,26% ~ 44% 的泥沙都沉积在了下游冲积平原和三角洲。不仅下游平原有沉积, Walling^[21]使用泥沙观测数据发现,1972—1990 年这 19 年间,有一半时间允景洪输沙量小于廊开,即有大量泥沙沉积在允景洪—廊开段的干流河床上,现场照片也证实琅勃拉邦—清盛段(位于允景洪—廊开区间内)有大量泥沙沉积^[36]。如果确实如此,那么研究中常用的以下游输沙量作为全流域总产沙量就不合适,由于大部分研究都以上游泥沙观测值作为其产沙量,而以下游断面观测到的输沙量减去上游产沙量得到区间产沙量,故而会高估上游产沙占比、低估下游产沙占比。

此外,也有文献在千年尺度上研究湄公河三角洲的形成过程,计算全流域输沙量。例如,Ta等^[1]通过分析湄公河三角洲和海洋结合部的地理条件,认为在过去的3 000年间,三角洲平均每年向海内延伸15~20 m,厚度为 (20 ± 5) m,面积为 18×10^3 km²,故而由此计算得到三角洲年均输沙 (360 ± 90) km³,密度 (1.2 ± 0.1) g/cm³,得到总输沙量为 (1.44 ± 0.36) 亿 t/a。这与1.60 亿 t/a的说法相互印证,使双方的结论都更具说服力。然而根据相关研究^[37],由于目前湄公河三角洲来沙量减少,一部分海岸线以每年50 m的速度被侵蚀。可见进入湄公河三角洲的泥沙首先被用来抵消海岸线侵蚀,其次才体现为向海中延伸。另据Darby等^[31]估计,1981—2005年间热带气旋移动导致湄公河三角洲悬移质减少 (0.33 ± 0.07) 亿 t,可见海岸侵蚀对泥沙的影响较大,不能忽略。因此只计算向海中延伸的部分必然会低估湄公河为三角洲带来的泥沙量,Ta等^[1]将三角洲向海中延伸的部分作为总输沙量,便得到了 (1.44 ± 0.36) 亿 t/a的结论,若加上用于抵消海岸侵蚀的部分,输沙量会增加多少,具体数值有待进一步研究,但可以肯定计算结果一定会超过1.60 亿 t/a。

3 分布式水文模拟的时空分辨率

澜沧江-湄公河流域南北狭长,涵盖青藏高原、横断山脉、万象平原、北部山地、呵叻高原、东部山地、南部山地、湄公河低地等若干生物-地理区,经过高原气候、亚热带季风气候、热带季风气候等不同气候区,拥有冰雪融水、地下水、雨水等多样化的径流补给类型。地区间气候、地形条件差异较大,仅干流上若干泥沙观测点很难准确反映全流域的情况。在观测数据不足以支撑精细研究的情况下,模型模拟就显得十分重要,然而目前澜沧江-湄公河流域模型模拟的时空分辨率还不够高。

(1) 时间分辨率。模型率定和评价的标准是实测值,受限于下湄公河水文站点实测泥沙数据质量和取样频次,目前的产输沙模型只能局限于月尺度。学术界普遍认为降雨强度是影响侵蚀产沙的主要因素,降水量越大、雨强越大,产沙量就会越大,发生侵蚀和不发生侵蚀的临界降雨被称为侵蚀性降雨指标^[38]。而下湄公河汛期每月2~4次的采样频率几乎捕捉不到短时间强降雨侵蚀土壤造成的泥沙浓度峰值。加之澜沧江-湄公河在年尺度上呈现出明显的干湿季变化,年内70%的水量集中在夏季,越靠近下游年径流分布越集中。在月尺度上流域内又往往有多个降雨中心,水流挟带泥沙倾泻而下,从上游到下游需要大约半个月的时间。因此,月尺度的泥沙模拟可能会因为时间分辨率较低而无法充分刻画流域各区域的产沙情况,这是导致不同模型模拟全流域产沙分布结论差别大的重要原因。SWAT模型模拟结果整体比IWRM小^[7],IWRM模拟的最大土壤侵蚀模数超过50 t/hm²,而SWAT得到的侵蚀模数最大值仅为18 t/hm²。IWRM模拟结果显示澜沧江-湄公河流域较高产沙模数面状分布在澜沧江上游青海西藏段和缅甸境内,点状分布在澜沧江云南段和老挝全境。而SWAT模拟结果显示较高产沙模数主要分布在澜沧江青海段、云南段的一部分、泰国北部和东北部、老挝境内。

(2) 空间分辨率。有研究尝试根据地质条件将澜沧江-湄公河流域分区,估算不同区域的产沙情况,但空间分辨率较低。Kondolf等^[10]将澜沧江-湄公河流域分为9个区域,每个区域分别估算其产沙模数。然而缺少详细的泥沙观测数据使得估计值较为粗略,将一个地理分区作为整体而只赋予一个产沙模数估计值会忽略地区变异性。实际上,被忽略的差异有可能是巨大的。在澜沧江流域,1985年云南省水电厅、水利电力部、天津勘测设计院曾经通过分析航片和实地考察,绘制出云南省大理、临沧、思茅、景洪地区的土壤侵蚀图,量化不同区域的产沙强度。何大明^[39]在1995年详细描述过这种空间差异:在昌都站以上的广大区域,年降水量只有400 mm左右,地表冻结期长,河流含沙量小,出西藏处的多年平均输沙量只有1 850 万 t,以悬移质为主;昌都到功果桥河段,山高坡陡,分水岭最窄处仅20~25 km,以推移质为主,悬移质少,年均含沙量(悬移质)仅0.73 kg/m³;功果桥至糯扎渡段,地形破碎,地表松散层厚,植被较差,流水侵蚀作用强,是澜沧江流域水土流失最严重的区域;糯扎渡以下至南阿河口,山势渐低,河谷渐宽,森林覆盖率高,水土流失弱于中上游。黄英^[40]给出了澜沧江流域各站点多年平均输沙模数:旧州 265 t/(km²·a),戛旧 416 t/(km²·a),允景洪 635 t/(km²·a),塘上 381 t/(km²·a),羊庄坪 430 t/(km²·a),景谷 1 030

$t/(km^2 \cdot a)$ ，勐海 $91.9 t/(km^2 \cdot a)$ ，孟连 $701 t/(km^2 \cdot a)$ ，最大值超过 $1\,000 t/(km^2 \cdot a)$ ，最小值不到 $100 t/(km^2 \cdot a)$ ，可见差别之大。

4 土地利用变化的影响

20 世纪下半叶以来，澜沧江-湄公河流域的土地覆盖和土地利用类型已经从森林大面积转变为商业、农业以及城市发展用地^[41]。土地利用方式变化极大地影响了泥沙过程，这在泥沙研究中是一个不可忽视的因素。虽然有学者提出该问题，但在全流域范围内，尚缺乏综合性的定量研究。

20 世纪七八十年代，毁林开荒和陡坡垦耕破坏了植被和山体，导致澜沧江流域水土流失。五六十年代，澜沧江流域的森林覆盖率超过 50%，到了 1985 年降至 33%，1991 年前后达到 28.4%。同期河水最大含沙量从 $5 \sim 6 kg/m^3$ 增至 $10 \sim 19 kg/m^3$ ，河道年输沙量从 0.6 亿 t 增至 1.2 亿 t，几乎翻了一倍^[42-43]。在下湄公河区域，1970—1985 年间，森林覆盖率从 50% 减小至 27%^[39]。姜昀等^[44]对比 1986 年和 2000 年的遥感影像，分析澜沧江流域在云南段 $87\,612 km^2$ 面积上的土地利用变化，结果显示这 14 年间草地面积减少了 $8\,189 km^2$ ，耕地面积增加了 $5\,399 km^2$ ，裸土地面积增加 $20.46 km^2$ 且主要发生在坡度较大、生态系统脆弱的上游地区。90 年代以来，澜沧江大片的原始森林被改造为橡胶林、果园和茶园^[44]，澜沧江-湄公河结合部区域大量种植橡胶、甘蔗和热带水果^[42]，这些经济活动都加剧了水土流失。

土地利用变化引起泥沙量变化。根据尤联元^[45]的研究，20 世纪 60 年代至 20 世纪末，澜沧江来沙量有逐年增加的趋势。旧州至戛旧段，70 年代比 60 年代悬移质泥沙增加了 22.3%，80 年代比 70 年代又增加了 18.8%，来沙系数(平均含沙量与平均流量的比值)分别为 $0.39 \times 10^3 (kg \cdot s)/m^6$ (60 年代)、 $0.46 \times 10^3 (kg \cdot s)/m^6$ (70 年代)、 $0.53 \times 10^3 (kg \cdot s)/m^6$ (80 年代)。戛旧至允景洪段，80 年代比 70 年代来沙量增加 79%。

21 世纪以来澜沧江上游大力开展保护天然林、退牧还林、退耕还林等研究，这对输沙量的影响尚有待量化评估。假设水土保持工作使得澜沧江中部产沙率最高区域的来沙系数恢复至 20 世纪 60 年代的水平，即减少一半，按照澜沧江产沙量占全流域总产沙量一半的说法，仅澜沧江的水土保持工作就将减少全流域输沙量的四分之一。如果忽略土地利用变化这一因素，很容易就会将减少的泥沙量归于水库建设，这既不利于正确认识当前湄公河输沙量减少的现象，也不利于水库的调度管理。

本文主要列举澜沧江区域的例子，并非是下湄公河不存在土地利用变化影响产沙的情况，而是由于澜沧江区域有较多可获取的信息。要详细了解湄公河区域土地利用变化如何影响产沙问题，还需要更加深入的研究。

5 悬移质之外的泥沙研究

(1) 推移质相关研究。河道中的泥沙一般分为两类：悬移质和推移质，目前大部分澜沧江-湄公河流域的泥沙研究都将推移质排除在外。从理论上分析，泥沙颗粒的运动方式与流速、颗粒大小、形状及其在所处位置有关。流速增加，一部分泥沙颗粒跃离床面，进入主流区成为悬移质。湄公河流出山区后河道变宽，是否有悬移质转变为推移质，从而被只观测悬移质的水文站漏掉呢？Bravard 等^[6]研究下湄公河采砂情况，从侧面反映出干流沿程推移质的粒径变化，结果显示，老挝的采砂总量中粒径较大的鹅卵石占比 33.2%，而在泰国、柬埔寨、越南则均为 0，粒径较小砂的比例从上游到下游逐渐增加，从老挝的 66.1% 增加到越南的 100%。鹅卵石沿程减少而沙粒增加，说明上游水流携沙能力较强，到了中下游逐渐减弱，必然会出现悬移质到推移质的转变。那么多大比例的悬移质会转变为推移质，这一转变又会如何影响上下游悬移质浓度的分析结果，还需要深入研究。

(2) 河道采砂研究。至少从 20 世纪中期开始，下湄公河就开始采挖砂卵石以满足基础建设和垃圾填埋的需要^[12]。Kondolf 等^[46]指出砂石是国际贸易的商品，河道采砂已经对下湄公河的环境产生严重危害，在柬

埔寨河沙出口已经被禁止,但是这项法规并未被严格执行。Brunier等^[47]以湄公河在三角洲的两条分支河道为研究对象,发现这两条河道的深度在1998—2008年10年间均增加超过1.3 m,认为主要原因是河道采砂。据Bravard等^[6]保守估计,目前下湄公河年均采砂量为0.50亿t/a,占全流域年均输沙量1.60亿t/a的31.25%,这导致1998—2008年三角洲主河道的水位降低超过1 m,引发海水倒灌进入稻田。从其提供的采砂量分布图可以看出,采砂行为主要集中在湄公河干流的万象—穆达汉段以及桔井以下河段。河道采砂、土地利用变化、水库建设、气候变化和水文周期等因素如何耦合影响澜沧江-湄公河流域泥沙过程,有待进一步研究^[19,48]。

(3) 泥沙特征研究。MRC报告^[22]通过分析湄公河17个断面的泥沙样本,根据粒径将其分为7类。Piman和Shrestham^[12]对其结果进行整理,进一步整合成5类(>2.0 mm、0.5~2.0 mm、0.25~0.5 mm、0.063~0.25 mm、0.002~0.063 mm),并绘出下湄公河干流沿程各断面粒径组成比例图。结果显示,琅勃拉邦断面细砂约占该处输沙量的93.7%,而穆达汉断面细砂约占该处输沙量的21.5%。琅勃拉邦位于穆达汉上游,若忽略河道冲淤变化,应有琅勃拉邦断面细砂量小于穆达汉断面,由此可以计算出琅勃拉邦断面总输沙量占穆达汉断面总输沙量比例的上限为 $21.5\% \div 93.7\% \approx 22.9\%$ 。澜沧江流域位于琅勃拉邦上游,考虑到澜沧江出口—琅勃拉邦区间还会有泥沙补充进河道,因此澜沧江出口处的输沙量应小于琅勃拉邦断面,即澜沧江输沙量占穆达汉断面输沙量的比值应小于22.9%。上述结论成立的前提是琅勃拉邦—穆达汉河段没有大规模泥沙沉积,另外取样的时间也会对泥沙粒径级配产生影响,这些因素会如何影响结论有待进一步研究。虽然尚存在诸多不确定性,基于湄公河十分有限的数据分析得到的结论依然具有一定的参考意义,来自允景洪以上区域的泥沙占下游断面输沙量的比例是多少,仍需更加深入的研究。

6 结论与建议

(1) 进一步校准泥沙观测数据。由于受到上下游悬移质观测标准和时段不一致、监测站点数量不足、跨境信息保密等多因素制约,澜沧江-湄公河流域的泥沙观测数据需要经过更加严谨的评估和校核后方可使用。

(2) 深入研究全流域年均产输沙量及其年际变化规律。既可以从上到下,通过模拟全流域泥沙过程来计算流域产输沙量,也可以从下到上,以湄公河三角洲的形成过程为切入点,通过泥沙在海洋中留下的印记,结合海岸侵蚀速率,倒推出湄公河三角洲的来沙量。

(3) 构建具有较高时空分辨率的分布式物理性水文模型。在观测站点稀少、数据质量不佳的现状下,有效利用地面观测数据和快速发展的卫星遥感产品,基于通用土壤侵蚀方程,使用模型细致分析全流域产输沙问题。

(4) 区分不同因素对输沙量变化的影响。澜沧江-湄公河流域水库建设、河道采砂、土地利用变化、气候变化和水文周期等因素耦合影响泥沙过程,如何定量区分各因素对输沙量及其变化的影响程度,还有待进一步研究。

(5) 从悬移质之外的角度切入泥沙问题。分析在流速沿程变化较大的河段中悬移质和推移质的转化关系,研究大量采砂行为如何影响输沙量及其观测值,从泥沙粒径分布的角度研究流域泥沙过程,从而全面认识澜沧江-湄公河流域的泥沙问题。

参考文献:

- [1] TA T K O, NGUYEN V L, TATEISHI, et al. Holocene delta evolution and sediment discharge of the Mekong River, Southern Vietnam[J]. Quaternary Science Reviews, 2002, 21(16): 1807-1819.
- [2] SOKSAMNANG K. Effect of big dams on sediment in large Asian rivers: Yellow River, Yangtze River, Pearl River and Mekong River[D]. Xi'an: Northwest A & F University, 2017.
- [3] MILLIMAN J D, SYVITSKI J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small moun-

- tainous rivers[J]. *Journal of Geology*, 1992, 100(5): 525-544.
- [4] ROBERTS T R. Downstream ecological implications of China's Lancang Hydropower and Mekong Navigation project[R/OL]. (2001-06-01)[2019-09-28]. <http://www.irmn.org/programs/lanang/>.
- [5] ADB. Cumulative impact analysis and Nam Theun 2 contributions[R]. Mandaluyong: ADB, 2004.
- [6] BRAVARD J P, GOICHOT M, GAILLOT S. Geography of sand and gravel mining in the Lower Mekong River[J]. *EchoGéo*, 2013, 26: 1499-1501.
- [7] MRC. The study on the sustainable management and development of the Mekong River basin, including impacts of mainstream hydropower projects[R]. Vientiane: MRC, 2018.
- [8] KUMMU M, LU X, WANG J, et al. Basin-wide sediment trapping efficiency of emerging reservoirs along the Mekong[J]. *Geomorphology*, 2010, 119(3/4): 181-197.
- [9] GRUMBINE R E, DORE J, XU J. Mekong hydropower: drivers of change and governance challenges[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(2): 91-98.
- [10] KONDOLF G M, RUBIN Z K, MINEAR J T. Dams on the Mekong: cumulative sediment starvation[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(6): 5158-5169.
- [11] 陈丽晖, 何大明. 澜沧江-湄公河水电梯级开发的生态影响[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 577-586. (CHEN L H, HE D M. The ecological impacts of hydropower cascade development in Lancang-Mekong River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 577-586. (in Chinese))
- [12] PIMAN T, SHRESTHAM. Case study on sediment in the Mekong River basin: current state and future trends[R]. Bangkok: SEI, 2017.
- [13] GUPTA A, HOCK L, XIAOJING H, et al. Evaluation of part of the Mekong River using satellite imagery[J]. *Geomorphology*, 2002, 44(3/4): 221-239.
- [14] FU K D, HE D M. Analysis and prediction of sediment trapping efficiencies of the reservoirs in the mainstream of the Lancang River[J]. *Chinese Science Bulletin*. 2007, 52(A02): 134-140.
- [15] KUMMU M, VARIS O. Sediment-related impacts due to upstream reservoir trapping, the Lower Mekong River[J]. *Geomorphology*, 2007, 85(3): 275-293.
- [16] LU X X, SIEW R Y. 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*, 2006, 10: 181-195.
- [17] 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[J]. *科学通报*, 2006, 51(增刊2): 100-105. (FU K D, HE D M, LI S J. Variation of downstream sediment in Lancang-Mekong River and its transboundary effects[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(Suppl 2): 100-105. (in Chinese))
- [18] WALLING D E. The sediment load of the Mekong River: chapter 6[M]. New York: Academic Press, 2009.
- [19] WANG J J, LU X X, KUMMU M. Sediment load estimates and variation in the Lower Mekong River[J]. *River Research & Applications*, 2011, 27(1): 33-46.
- [20] 河流悬移质泥沙测验规范: GB/T 50159—2015 [S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2015. (Code for measurement of suspended load in open channels: GB/T 50159—2015 [S]. Beijing: Ministry of Water Resources of the PRC, 2015. (in Chinese))
- [21] WALLING D E. The changing sediment load of the Mekong River[J]. *AMBIO*, 2008, 37(3): 150-158.
- [22] MRC. Discharge Sediment Monitoring Project (DSMP) 2009—2013 summary & analysis of results[R]. Vientiane: MRC, 2014.
- [23] FU K, HE D, LU X. Sedimentation in the Manwan reservoir in the Upper Mekong and its downstream impacts[J]. *Quaternary International*, 2008, 186(1): 91-99.
- [24] HECHT J S, LACOMBE G, ARIAS M E, et al. Hydropower dams of the Mekong River basin: a review of their hydrological impacts[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 568: 285-300.
- [25] 刘成, 王建军, 何耘, 等. 澜沧江-湄公河输沙量变化及其影响因素[J]. *水利水电科技进展*, 2013, 33(1): 7-12. (LIU C, WANG J J, HE Y, et al. Change in sediment loads in the Lancang-Mekong River and its influencing factors[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2013, 33(1): 7-12. (in Chinese))
- [26] MILLIMAN J D, MEADE R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. *Journal of Geology*, 1983, 91(1): 1-21.

- [27] BORLAND W M. Pa Mong Phase II, supplement to main report: hydraulics and sediment studies[M]. Washington D C: US Bureau of Reclamation, 1973.
- [28] LIU C, HE Y, WALLING E D, et al. Changes in the sediment load of the Lancang-Mekong River over the period 1965—2003[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(4): 843-852.
- [29] United Nations Economic Commission for Asia, the Far East. A compendium of major international rivers in the ECAFE region[R]. New York: United Nations, 1966.
- [30] MILLIMAN J D, FARNSWORTH K L. River discharge to the coastal ocean: a global synthesis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [31] DARBY S E, HACKNEY C R, LEYLAND J, et al. Fluvial sediment supply to a mega-delta reduced by shifting tropical-cyclone activity[J]. Nature, 2016, 539(7628): 276.
- [32] LU X X, KUMMU M, OEURNG C. Reappraisal of sediment dynamics in the Lower Mekong River, Cambodia[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2014, 39(14): 1855-1865.
- [33] NOWACKI D J, OGSTON A S, NITTROUER C A, et al. Sediment dynamics in the lower Mekong River: transition from tidal river to estuary[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2015, 120(9): 6363-6383.
- [34] HOLEMAN J N. The sediment yield of major rivers of the world[J]. Water Resources Research, 1968, 4(4): 737-747.
- [35] HARDEN P O, SUNDBORG A. The lower Mekong basin suspended sediment transport and sedimentation problems[M]. Uppsala: AB Hydroconsult, 1992.
- [36] BRAVARD J P, GOICHOT M, TRONCHERE H. An assessment of sediment-transport processes in the Lower Mekong River based on deposit grain sizes, the CM technique and flow-energy data[J]. Geomorphology, 2014, 207: 174-189.
- [37] MARCHESIELLO P, NGUYEN N M, GRATIOT N. Erosion of the coastal Mekong delta: assessing natural against man induced processes[J]. Continental Shelf Research, 2019, 181: 72-89.
- [38] XIE Y, LIU B, NEARING M A. Practical thresholds for separating erosive and non-erosive storms[J]. Transaction of the ASAE, 2002, 45(6): 1843-1847.
- [39] 何大明. 澜沧江-湄公河水文特征分析[J]. 云南地理环境研究, 1995(1): 58-74. (HE D M. Analysis of hydrological characteristics in Lancang-Mekong River[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 1995(1): 58-74. (in Chinese))
- [40] 黄英. 澜沧江云南段河流输沙量及其变化规律探讨[J]. 人民长江, 1996, 27(1): 33-35. (HUANG Y. Study on sediment concentration and its variation of Lancang River in Yunnan Province[J]. Yangtze River, 1996, 27(1): 33-35. (in Chinese))
- [41] LYON S W, KING K, POLPANICH O U, et al. Assessing hydrologic changes across the Lower Mekong basin[J]. Journal of Hydrology Regional Studies, 2017, 12: 303-314.
- [42] 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]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 1997, 16(2): 97-100. (SHU Y Q, XU G X, WANG Y X. Soil-erosion with decreasing forest cover rate about Lancang River valley[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 1997, 16(2): 97-100. (in Chinese))
- [43] 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 X Y, HE D M. A comprehensive assessment method of hydropower development impact on runoff and sediment change[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(7): 953-960. (in Chinese))
- [44] 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, 193(3): 46-51. (JIANG Y, GAO J X, OU X K. 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))
- [45] 尤联元. 澜沧江河道冲淤变化特征及发展趋势[J]. 地理研究, 2001, 20(2): 178-183. (YOU L Y. Scouring and silting changes of Lancang River (Mekong River) and its development tendency[J]. Geographical Research, 2001, 20(2): 178-183. (in Chinese))
- [46] KONDOLF G M, RJP S, CARLING P, et al. Changing sediment budget of the Mekong: cumulative threats and management strategies for a large river basin[J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 114-134.
- [47] BRUNIER G, ANTHONY E J, GOICHOT M, et al. Recent morphological changes in the Mekong and Bassac River channels, Mekong delta: the marked impact of river-bed mining and implications for delta destabilisation[J]. Geomorphology, 2014, 224: 177-191.

- [48] FAN H, HE D, WANG H. Environmental consequences of damming the mainstream Lancang-Mekong River: a review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 146: 77-91.

Review of sediment yield, transportation, and trap in reservoirs in Lancang-Mekong River basin*

HOU Shiyu, TIAN Fuqiang, NI Guangheng

(*State Key Laboratory of Hydro-Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: The Lancang-Mekong River is one of the largest transboundary river shared by China and Southeast Asian countries. In recent years, the sediment issue in this large river has received extensive attention due to nutrient-rich sediment decreasing which is critical to ecological health, aquatic habitats, shipping, coastal erosion and agricultural and fisheries production. A wide range of studies on sediment yield, transportation and trapped by reservoirs are summarized. The main controversial topics include where the most sediment comes from, how to explain the abnormal relationship among suspended sediment loads observed along the mainstream, and the quantification of effect of human activities on sediment load change. There are five main issues unsolved, including unreliable observed sediment data in Lower Mekong River, weak basis of total sediment load of 160×10^6 t/a, low spatiotemporal resolution in model simulation, insufficient study of the land use change impacts in recent decades and inadequate research on sediment except for suspended sediment. Several possible ways to overcome these difficulties are also discussed.

Key words: sediment yield; sediment transportation; sediment trap in reservoirs; Lancang-Mekong River

出版伦理与学术不端声明

《水科学进展》作为一本严格执行同行评议的学术性期刊，一直致力于抵制学术不端行为，营造学术期刊良好的学术氛围。为加强科技道德规范，促进科研诚信，提高我国科技工作者和科技期刊编辑出版队伍的职业道德水平，保障我国科技事业的健康发展，期刊编委会声明如下：

(1) 进一步完善同行专家评议机制，从源头上严把论文评审关口，确保学术评价的科学性、权威性和公信力。

(2) 作者所投稿件必须是原创性研究成果，无任何学术不端行为（剽窃、伪造、篡改、不当署名、一稿多投、重复发表和拆分发表等），符合有关法规和政策的要求，不存在涉密内容；作者在文章中引述他人观点和成果等应注明出处，应对非涉密研究项目获得的经费支持及来源予以标明；所有的作者都应该在工作中有所贡献，作者署名及排序无争议。

(3) 审稿人应严格执行稿件学术质量审查规范，客观、公正、公平对待每篇稿件，严禁审稿人利用审稿谋取私利乃至剽窃所审稿件内容。

(4) 编辑工作应参照出版伦理委员会（COPE）制定的期刊编辑行为准则和实践指南，稿件的送审、录用与拒稿应坚持公平公正原则；编辑有义务保护作者的知识产权，论文发表前不向稿件处理无关人员泄露论文信息。

《水科学进展》编委会

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2016YFA0601603) and the National Natural Science Foundation of China (No. 51961125204).