

河流输沙量变化的主要驱动因素

刘 成^{1,2}, 何 耘², 刘 桉²

(1. 国际泥沙研究培训中心, 北京 100048; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 鉴于河流输沙量的大小和变化对河流系统的功能发挥具有重要意义, 且河流输沙量的变化受多种因素驱动, 在总结近些年我国河流输沙量变化研究的基础上, 分析河流输沙量变化的主要驱动因素。认为我国主要河流除松花江多年水沙量无明显趋势性变化外, 其他河流的年输沙量均呈明显下降趋势, 主要河流总入海输沙量从 1955—1968 年的 20.3 亿 t/a 降至 1997—2010 年的 5.0 亿 t/a。研究表明: 大坝建设、水土保持措施、流域扰动、河道采砂和气候变化等是输沙量变化的主要驱动因素; 长江流域修建大量水库是长江入海沙量降低的主要驱动因素; 水土保持措施是黄河入海沙量大幅降低的主要驱动因素之一; 流域扰动为澜沧江清盛站输沙量的降低幅度远低于嘎旧站的原因; 农业增产减沙可能是淮河入海沙量降低的主要驱动因素; 珠江输沙量的降低受到河道采砂的影响; 海河流域气候变化是海河诸河输沙量大幅降低的主要驱动因素之一。

关键词: 输沙量; 大坝建设; 水土保持; 流域扰动; 河道采砂; 气候变化

中图分类号: TV152 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2017)01-0001-07

Key drivers of changes in sediment loads of rivers//LIU Cheng^{1,2}, HE Yun², LIU An² (1. *International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation, Beijing 100048, China*; 2. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

Abstract: The magnitude and variation of the sediment loads transported by rivers are of important significance to the functioning of river system, and changes in sediment loads of rivers are driven by numerous factors. In this paper, key drivers of changes in sediment loads of rivers in China are analyzed by reviewing recent publications of studies on changes in sediment loads. It can be concluded that nearly all of the major rivers in China exhibit an apparent decline in annual sediment loads except for the Songhua River, which presents no clear tendency of changes in runoff and sediment loads. The total annual sediment loads of major rivers transported to the coasts in China decreased from 2.03 billion t/a during the period of 1955 to 1968 to 0.50 billion t/a during the period of 1997 to 2010. The primary drivers of changes in the sediment loads of rivers are dam construction, soil and water conservation measure, catchment disturbance, sand mining and climate change. Case studies for rivers in China show the following: construction of a large number of reservoirs in the Yangtze River basin is the primary driver of the reduction of the sediment load of the Yangtze River; soil and water conservation measure is one of the key drivers of the sharp decline in the sediment load of the Yellow River; the catchment disturbance explains why the reduction of the sediment load of Chiangsaen Station was much lower than that of Gajiu Station on the Lancang-Mekong River; the decreasing sediment load resulting from the growth of agricultural production may be the main driver of the sediment reduction of the Huaihe River; the decrease in the sediment load of the Pearl River was influenced by sand mining activities; and climate change in the Haihe River Basin is one of the key drivers of the great reduction of the sediment load of the Haihe River.

Key words: sediment load; dam construction; soil and water conservation; catchment disturbance; sand mining; climate change

河流输沙量的大小和变化对河流系统的功能发挥具有重要意义, 河流输沙量对物质通量、地球化学循环、水质、河型、河口三角洲的发展起到重要作用, 影响着依赖于河流的水生生态系统和动物栖息地, 同时也会影响人类对河流的利用, 尤其是河流输沙量高会引起水库、取水口和灌溉系统的淤积, 增加河流引水的处理费用, 对水资源开发造成严重影响。

大量泥沙输入湖泊和近海, 引发泥沙淤积问题, 改变营养物循环^[1]。正因为这些原因, 近些年河流输沙量变化的研究吸引着全球科研工作者的关注, 研究成果较多。

受人类活动和全球气候变化的影响, 全球河流输沙量变化明显。据估计, 全球入海泥沙量约为 190 亿 t/a, 在人类活动和部分自然因素影响下, 近些

年全球入海泥沙量约减少 30%,降至 130 亿 t/a^[2]。河流输沙量的变化受多种因素驱动,如森林砍伐及毁林造田、农业扩张、土地利用、采矿采砂、城市化和基础设施建设、大坝和水库建设、水土保持和泥沙控制措施等人类活动,全球气候变化也是河流输沙量变化的驱动因素之一。本文基于我国近些年河流输沙量变化的研究文献,分析河流输沙量变化的主要驱动因素。

1 我国河流输沙量变化趋势

目前我国河流水沙量及其变化的研究成果较多^[3-6],总体上看,以入海(或出境)前最后一个水文站的数据作为评价依据,除松花江的多年水沙量无明显趋势性变化外,其他主要河流的年输沙量均呈明显下降趋势,淮河及其以北河流的年径流量下降趋势明显,淮河以南河流的年径流量无趋势性变化。

文献[7]选择我国 10 条河流(松花江、辽河、海河、黄河、淮河、长江、钱塘江、闽江、珠江和澜沧江) 17 个代表性站点数据,分析 1955—2010 年的水沙量变化趋势。分析认为淮河及其以北的河流年径流量变化趋势呈略降或下降趋势,长江及其以南河流的年径流量基本无趋势性变化;从年输沙量变化看,除了松花江和澜沧江年输沙量变化呈略增加趋势外,其他河流均呈明显下降趋势(表 1)。将 10 条河流的水沙数据汇总,得出我国主要河流 1955—2010 年排入太平洋的总水沙量及其变化趋势,即多年平均年径流总量为 14250 亿/a,无趋势性变化;多年平均年输沙量为 12.9 亿 t/a,呈明显的 4 级梯级下降趋势,年输沙量从 1955—1968 年的 20.3 亿 t/a 逐步降至 1969—1985 年的 14.9 亿 t/a,1986—1996 年的 10.5 亿 t/a,1997—2010 年的 5.0 亿 t/a。

表 1 中国主要河流入海水沙量及其变化趋势

河流	站点	平均 年径流量/ (亿 m ³ · a ⁻¹)	年径流 量变化 趋势	平均 年输沙量/ (亿 t · a ⁻¹)	年输沙 量变化 趋势
松花江	佳木斯	629	略降	1 250	略增
辽河	铁岭、新民	26	略降	896	下降
海河	海河闸	8	下降	8	下降
黄河	利津	301	下降	72 220	下降
淮河	蚌埠、临沂	297	略降	1 050	下降
长江	大通	8 964	不变	38 980	下降
钱塘江	兰溪、诸暨、花山	198	略增	250	下降
闽江	竹岐、永泰	573	不变	640	下降
珠江	博罗、石角、高要	2 839	不变	7 160	下降
澜沧江	允景洪	569	不变	9 010	略增

2 河流输沙量变化的主要驱动因素

2.1 大坝建设

大量文献表明,全球许多河流输沙量大幅降低是由于大坝拦沙所致。Walling^[1]粗略估算全球水

库拦沙量约为 600 亿 t/a,因建坝而减少的全球河流入海沙量约为 240 亿 t/a。尼罗河在建坝前排入地中海的泥沙量约为 1000 万 t/a,阿斯旺大坝建成后,入海沙量几乎降低至零。我国长江、黄河、珠江、海河等河流的输沙量降低也与水库建设有关。以长江为例,分析表明大型电站水库的修建是 20 世纪 80 年代以来乌江,20 世纪 90 年代以来金沙江、嘉陵江输沙量减少和 20 世纪 70 年代以来岷江输沙量波动的重要驱动因素。宜昌站 1992—2002 年的输沙量比 1956—1992 年减少 28.2%,主要归因于嘉陵江来沙量减少和 1998 年以后金沙江来沙量减少;2003—2007 年的输沙量比 1992—2002 年期间减少 82.2%,主要归因于三峡水库的蓄水拦沙^[8]。自 1950 年以来,长江流域共修建水库近 5 万座,其中大型水库(库容大于 1 亿 m³) 143 座,总库容约为 2000 亿 m³。图 1 为长江流域大型水库累积库容变化与长江大通站历年输沙量变化情况^[9],从输沙量变化与累积库容变化的对比可见,以丹江口、葛洲坝和三峡水利枢纽的建成为主要转折点,大型水库累计库容呈梯级增长趋势,而长江入海沙量相应地呈梯级下降趋势,从建坝前的约 5 亿 t/a 降至 2011—2014 年的约 1.5 亿 t/a,表现出良好的负相关关系。因此,虽然长江流域的水土保持和采砂等人类活动也对长江输沙量的降低有一定的贡献,但流域修建大量水库才是长江入海沙量降低的主要驱动因素。

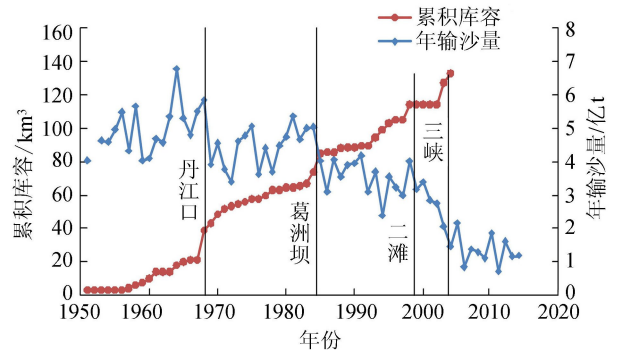


图 1 长江流域大型水库累积库容变化与大通站历年输沙量变化

2.2 水土保持和退耕还林(草)

人类活动中,土地利用通常导致河流输沙量增加,然而,人类为控制水土流失、保护生态环境而实施的流域水土保持、退耕还林(草)等措施会使河流输沙量降低。由于美国在 20 世纪实施水土保持措施,引入经济激励手段,其耕地的侵蚀量从 20 世纪 80 年代初的 34 亿 t/a 降至 90 年代末期的 20 亿 t/a^[10]。我国江河流域水土保持工作大多从 20 世纪 80 年代起走向正轨,水土保持范围迅速扩大,效益逐步明显。图 2 为黄河利津站历年输沙量的变化情况,可见黄

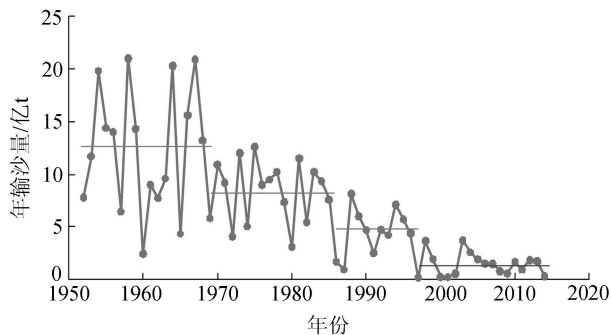


图2 黄河利津站的历年输沙量变化

河入海输沙量呈阶梯状大幅下降趋势,平均年输沙量从1952—1968年的约12.5亿t/a降至1997年以后的1.4亿t/a。黄河输沙量大幅降低的主要驱动因素包括干支流上水利枢纽的建设、工农业用水引起的年径流量下降和引水间接引沙等,不容忽视的重要驱动因素是黄河流域的水土保持措施。图3为黄河中游潼关以上地区不同时段水土保持措施所致入黄年均减沙量^[11],认为1980—1989年、1990—1996年和1997—2006年3个时段的水土保持措施(即图中的流域治理措施)年均减沙量分别为3.5亿t、4.1亿t和4.4亿t,水土保持措施的减沙量约为水库减沙量的4倍。文献[12]和[13]也分析了引起黄河沙量降低的各种因素,虽然各研究所得出的水土保持措施减沙量有较大差异,但均认为水土保持措施是黄河输沙量降低的主要驱动因素。

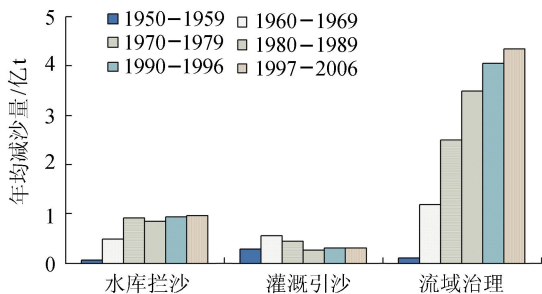


图3 黄河中游水土保持措施每年减少的入黄沙量

始于1999年的退耕还林(草)工程是我国一项重大生态工程,从保护生态环境的目的出发,将水土流失严重的耕地,沙化、盐碱化、石漠化严重的耕地以及粮食产量低而不稳的耕地有计划、有步骤地停止耕种,因地制宜地造林种草,恢复植被。退耕还林工程的实施,加快了水土流失和土地沙化治理的步伐,使当地生态状况得到明显改善。文献[14]分析了黄河支流北洛河上游在实施退耕还林工程前后的水沙变化,认为林草重建是北洛河水沙大幅减少的主导因素,植被的减沙效应为81%。

2.3 流域扰动

森林砍伐、毁林造田、集约化农业生产、采矿、基

础设施建设等人类活动造成的流域扰动一般会增加流域侵蚀,增大河流输沙量。Walling^[1]以世界十大主要产沙河流之一哥伦比亚的马格达莱纳河(Rio Magdalena)为例,说明过去一二十年间的森林砍伐、土地利用和金矿开采等流域扰动引起流域大范围的土壤侵蚀量增大,1975—1995年期间流域出口处的输沙量增大40%~45%。图4为澜沧江(湄公河)嘎旧站与下游境外第1个水文站清盛站的输沙量变化^[15],可见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,说明这一时期受人类活动干扰小。1985—1992年期间,两站的输沙量均大幅提高。嘎旧站和清盛站平均年输沙量的增幅为40%~50%,这种沙量的大幅度增加恰与20世纪80年代中期澜沧江流域最严重的水土流失相对应,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。1993—2003年期间,嘎旧站平均年输沙量大幅降低,主要归因于漫湾水电站1993年开始蓄水发电的拦沙效应^[16]。而清盛站此期间的平均年输沙量虽较1985—1992年有所降低,但这一时期的年输沙量值仍高于1965—1984年的10%左右。清盛站输沙量的降低幅度远低于嘎旧站,其原因可能如下:①嘎旧至清盛站有多条含沙量大的支流汇入,仅景洪至中国、老挝和缅甸三国交界点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%^[17]。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。澜沧江流域云南段也有大片原始森林被橡胶林、茶园和热带果园等人工经济林所取代的现象。

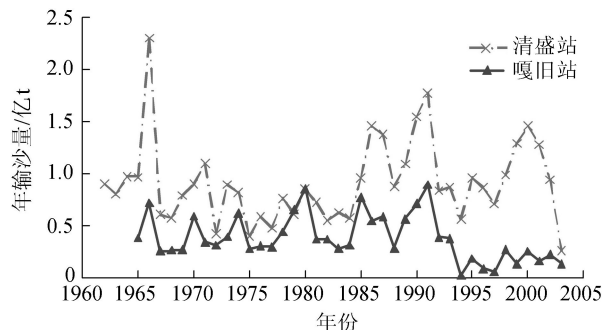


图4 澜沧江嘎旧站与清盛站年输沙量比较

农业生产也是一种流域扰动,一般认为传统农业的过度耕作加剧了流域的水土流失。为了控制农田水土流失和生态环境的恶化,免耕、少耕等保护性耕作技术在全球得到推广。据估计,在全球范围内,以减少水土流失为目的的免耕农业目前已在约5%的世界耕地上实施,巴西免耕农田的比例可能高达

50%^[18]。但也有研究认为农业增产具有减少平原地区水土流失的效应^[19]。图5为淮河蚌埠站历年径流量和输沙量的变化情况,可见淮河干流年径流量变化趋势不明显,略有下降,但年输沙量从1970年以后呈现持续减小趋势。文献[19]提出淮河水系输沙量持续下降的主要成因不是水库拦沙作用,而是农作物持续增产导致下垫面水土保持条件发生变化。淮河流域的淮北地区是我国重要的粮食生产基地,1978年实施改革开放后,农业产量得以持续增长。随着耕作方式和种植结构的改变,种植密度及冠层覆盖面积增大,地面裸土面积减小,可有效拦截降雨,避免雨点直接打击地面,消除或减弱了雨点溅蚀的作用;作物的枯叶和发达的根系具有改善土壤结构的作用,使土壤有效孔隙增多,透水性加大,也起到了减少地面径流及土壤流失的效果。通过农业产量逐年增加与泥沙量逐年减少的对比,得出“淮河淮北地区农业持续增产与含沙量持续趋减有统计学的相关和物理机制的联系,可能是导致淮河含沙量持续减少的成因”的推论。

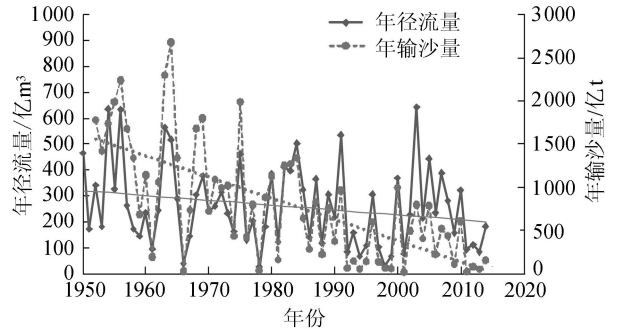


图5 淮河蚌埠站的年径流量和年输沙量变化

2.4 河道采砂

河道采砂也是河流输沙量减少的主要驱动因素之一,但因为非法采砂猖獗,采砂造成河流输沙量的降低量较难准确评估。莱茵河在1950—1970年间因建筑业的需求大量采砂,数据表明1936—1990年莱茵河上游段采砂总量达2900万m³,1950—1974年期间瑞士河段在Ellhorn等处河床冲蚀深度达5m,造成1972年Buchs-Schaan桥的垮塌事故^[20]。我国的长江、淮河、珠江等河流的输沙量变化都受到河道采砂不同程度的影响。图6为珠江流域东江博罗站的历年输沙量变化,可见年输沙量呈明显下降趋势。总体来看,1974年以前输沙量相对较大,1974—1994年输沙量中等,1994年以后输沙量较低(1983年、2005年和2006年输沙量高是径流量高造成的)^[21]。输沙量的下降应与1959年、1973年和1985年新丰江水库、枫树坝水库和西枝江上游的白盆珠水库的建成蓄水拦沙相关,同时,东江近些年大量的采砂活动应该也是输沙量降低的主要驱动因素

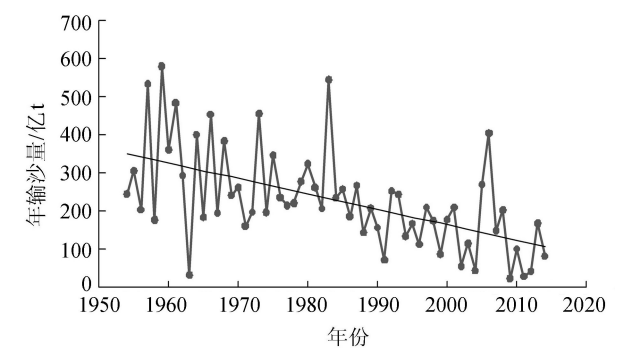


图6 珠江流域东江博罗站的历年输沙量变化

之一。文献[22]提出1988—1997年东江下游平均年采砂量约为1500万m³,1997年以后年采砂量约为650万m³。文献[23]提出东江下游及东江三角洲1980—2002年22年间采沙总量达到了3.32亿m³。文献[24]提出东江博罗以下河段1988—1994年人为采走河床泥沙5723万t,远大于博罗水文站同期的总输沙量1212万t。

2.5 气候变化

气候变化会引起降水量和雨强的变化,从而引起土壤侵蚀量及河流输沙量的变化。Inman等^[25]分析了美国沿加利福尼亚州排入太平洋的20条河流的水沙特征,认为数十年时间尺度的厄尔尼诺和南方涛动引起的气候变化与太平洋和北美气候模式基本符合:1944—1968年为干旱气候,1969年至今为湿润气候。湿润气候时期的河流平均年输沙量约是干旱气候时期的5倍,3大洪水年期间这些河流的平均输沙量高于干旱气候期间年输沙量的27倍。气候变化对我国河流输沙量变化的影响在一些研究和论文中也有提及,但大多数难以将气候变化的影响与人类活动的影响区分开来。文献[26]和文献[27]分别对黄河上游33个雨量站2002年前近50年数据和全流域77个雨量站2001年前约50年的数据进行分析,均认为黄河流域的降水量近年来有所下降。文献[28]提出黄河中游20世纪70年代、80年代、90年代年均降水量较基准期1969年前分别减少了7%、11%和13%,因降雨减少致使70年代、80年代和90年代的输沙量分别减少2.03亿t、3.55亿t和2.71亿t。然而,文献[29]对黄河气象数据分析认为,黄河源区的降水量长期变化趋势不明显,2003年前10年的降水量下降;文献[30]收集了黄河流域上游至下游17个雨量站2006年以前的年降水数据,认为黄河源区年降水量无趋势性变化,中游区年降水量呈略降低趋势。黄河水量主要来源于兰州以上,约占全河径流量的58%^[31],因此推断气候变化对黄河水量的影响不是主要的,对黄河输沙量的影响也不是主要的。文献[32]分析了河口

镇—龙门区间降水量与水沙变化,认为2000—2010年多年平均降水量与1956—1999年均值基本持平,但主汛期降水量较1956—1999年同期平均值小13%,特别是7月较1956—1999年同期平均值小24%,而9月较1956—1999年同期平均值大36%。较大降水量发生天数减少,小降水量发生天数增多,降水强度明显减弱,使得同等条件下产沙量大为减少。与1969年以前相比,2000年以后降水量增大,径流量变化不大,而实测径流量相同的条件下输沙量明显减小。虽然不同的研究得出气候变化对黄河输沙量变化影响的观点不一,但在所研究的时间尺度内,可以认为影响黄河输沙量变化的驱动因素中,人类活动的影响更为重要。年内降水分配、降水强度的变化会对黄河输沙量变化起到一定的作用。

比较而言,海河流域的气候变化影响更加明显。海河流域多年(1961—2007年)平均降水量为548 mm,多年平均气温为11.1℃。文献[33]认为在全球气候变暖的背景下,海河流域年降水量呈明显减少趋势,平均每10年减少21 mm;年气温呈明显升高趋势,平均每10年升高0.3℃,海河流域气候暖干化趋势造成地表水资源平均每10年减少18%。文献[34]发现1961—2010年降水量呈显著降低趋势,每10年约降低18 mm。以海河水系永定河的输沙量变化为例,永定河上游为水土流失严重地区,永定河为多沙河流,雁翅站1952—1954年的年径流量为17亿~29亿m³,1952年和1954年的输沙量高达8010万t和7730万t,流域产沙量极高。1954年官厅水库竣工后,拦截了永定河上游大量泥沙。由于连续干旱,2001—2005年永定河雁翅、三家店、卢沟桥站的年均降雨量较多年平均值分别减少21.6%、20.3%、18.7%,造成各站年输沙量在此数年内均出现接近于零的现象^[35]。海河输沙量的大幅降低,其主要驱动因素是水库拦沙、上游引水造成径流量减小、水土保持措施等,从降水量减少引起径流量降低从而造成输沙量下降的角度来看,气候变化也是海河流域河流输沙量大幅降低的驱动因素之一。

3 各种驱动因素的影响力比较

河流输沙量变化的各种驱动因素的贡献难以定量评价,我国科研工作者对黄河、长江输沙量下降的驱动因素有些定量评价,但各研究得出的结论相差较大。如文献[11]提出水库拦沙、灌溉引沙和流域治理3种驱动因素导致的黄河减沙量及几个时段的变化(图3)。文献[12]估算出黄河中游1982—2008年年均减沙量约为5.7亿t,其中,引水间接引沙

量约为0.6亿t,水土保持措施减沙量约为2.7亿t,河道库坝淤积沙量约为1.8亿t。文献[13]提出在黄河入海沙量降低的各因素中,1950—2005年水土保持年均减沙量为3.41亿t,工农业用水引沙量为2.42亿t,三门峡水库1960—2007年年均淤积1.45亿m³,小浪底水库1997—2007年年均淤积2.398亿m³。各个研究给出了不同的数据,总体来看,水土保持措施减沙、库坝拦沙、工农业用水减沙和引水间接引沙是主要的驱动因素。

长江水利委员会指出1991—2005年三峡入库泥沙量与1990年前相比减少1.585亿t/a。人类活动影响引起的减沙量为1.187亿t/a,占总减沙量的75%,是导致近期三峡入库平均沙量大幅度减小的主要因素(其中,水库拦沙新增减沙量0.809亿t/a,水土保持措施年均减沙量0.378亿t/a)。气候(降雨)变化导致减沙量0.189亿t/a,占三峡入库总减沙量的12%。河道采砂等其他因素引起减沙0.209亿t/a,占总减沙量的13%^[36]。

文献[4]分析了我国长江、黄河、珠江、松花江、辽河、海河、淮河、钱塘江和闽江等9条河流的输沙量变化,指出1959—2007年人类活动引起的总输沙量降低量为500亿t,其中,库坝拦沙减沙量为280亿t,占56%;水土保持措施减沙量为115亿t,占23%;工农业用水减沙量为75亿t,占15%;河道采砂减沙量为30亿t,占6%。

定性地看,各河流输沙量下降的驱动因素按贡献从大到小可大致排列如下。黄河:水土保持措施减沙,库坝拦沙,工农业用水减沙,引水间接引沙;长江、珠江:库坝拦沙,水土保持措施减沙,河道采砂减沙;淮河:农业增产减沙,库坝拦沙,水土保持措施减沙;澜沧江:库坝拦沙,水土保持措施减沙,人工经济林增沙;海河诸河:库坝拦沙,工农业用水减沙,水土保持措施减沙,气候变化减沙。

4 结 语

河流输沙量变化会对河道演变、河流生态、下游营养物、航道、水利建筑物以及河口三角洲的冲淤平衡产生明显影响。这种影响既有正面作用,也有负面作用。仅从河流输沙量的降低对河道功能的影响来看,一方面,减轻了水库库区的淤积,延长了水库的使用寿命,还减轻了防洪压力。另一方面,河流含沙量降低,沙量补给不足,造成河床冲刷加剧、岸滩坍塌。河流输沙量变化受到多种驱动因素的综合影响,本文以我国多条河流为例,分析河流输沙量变化的主要驱动因素,包括大坝建设、水土保持措施、流域扰动、河道采砂和气候变化等。

我国大多数河流入海输沙量呈下降趋势,主要河流总的入海年输沙量从 1955—1968 年的 20.3 亿 t/a 降至 1997—2010 年的 5.0 亿 t/a。大坝建设、水土保持措施、流域扰动、河道采砂和气候变化等因素是输沙量变化的主要驱动因素。不同河流各方面条件不同,输沙量降低的主要驱动因素也有所差别。

参考文献:

- [1] WALLING D E. The impact of global change on erosion and sediment transport by rivers: current progress and future challenges[R]. Paris: UNESCO, 2009.
- [2] 刘成,何耘,陈建国,等. 全球河流入海沙量估算述评[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 47-51. (LIU Cheng, HE Yun, CHEN Jianguo, et al. Review of estimation of global fluvial sediment discharge to oceans [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 47-51. (in Chinese))
- [3] LU X X, RAN L S, LIU S, et al. Sediment loads response to climate change: a preliminary study of large Chinese rivers [J]. International Journal of Sediment Research, 2013, 28(1): 1-14.
- [4] CHU Z X, ZHAI S K, LU X X, et al. A quantitative assessment of human impacts on decrease in sediment flux from major Chinese rivers entering the western Pacific Ocean[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(19): 446-449.
- [5] DAI S B, YANG S L, LI M. The sharp decrease in suspended sediment supply from China's rivers to the sea: anthropogenic and natural causes [J]. Hydrological Sciences Journal, 2009, 54(1): 135-146.
- [6] 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))
- [7] LIU Cheng, SUI Jueyi, WANG Zhaoyin. Sediment load reduction in Chinese rivers [J]. International Journal of Sediment Research, 2008, 23(1): 44-55.
- [8] 张信宝,文安邦, WALLING D E, 等. 大型水库对长江上游主要干支流河流输沙量的影响[J]. 泥沙研究, 2011(4): 59-66. (ZHANG Xinbao, WEN Anbang, WALLING D E, et al. Effects of large-scale hydropower reservoirs on sediment loads in upper Yangtze River and its major tributaries [J]. Journal of Sediment Research, 2011(4): 59-66. (in Chinese))
- [9] 李保,付桂,杜亚南. 长江口近期来沙量变化及其对河势的影响分析[J]. 水运工程, 2012(7): 129-134. (LI Bao, FU Gui, DU Ya'nan. Recent variation of sediment transport and its impact on morphological evolution in the Yangtze Estuary [J]. Port & Waterway Engineering, 2012(7): 129-134. (in Chinese))

- [10] URI N D, LEWIS J A. Agriculture and the dynamics of soil erosion in the United States [J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2010, 14(2): 63-82.
- [11] 史红玲,胡春宏,王延贵,等. 黄河流域水沙变化趋势分析及原因探讨[J]. 人民黄河, 2014, 36(4): 1-5. (SHI Hongling, HU Chunhong, WANG Yangui, et al. Analysis on variation trends of runoff and sediment of the Yellow River Basin and reasons discussion [J]. Yellow River, 2014, 36(4): 1-5. (in Chinese))
- [12] 高鹏,穆兴民,王飞,等. 黄河中游河口镇—花园口区间水沙变化及其对人类活动的响应[J]. 泥沙研究, 2013(5): 75-80. (GAO Peng, MU Xingmin, WANG Fei, et al. Analysis of impact of human activities on stream flow and sediment discharge from Hekouzhen to Huayuankou in middle reaches of Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2013(5): 75-80. (in Chinese))
- [13] 彭俊,陈沈良. 近 60 年黄河水沙变化过程及其对三角洲的影响 [J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1353-1362. (PENG Jun, CHEN Shenliang. The variation process of water and sediment and its effect on the Yellow River Delta over the six decades [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(11): 1353-1362. (in Chinese))
- [14] 刘二佳,张晓萍,谢名礼,等. 退耕背景下北洛河上游水沙变化分析[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(1): 39-45. (LIU Erjia, ZHANG Xiaoping, XIE Mingli, et al. Change in runoff and sediment in the upper catchment of Beiluo River under the vegetation restoration [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(1): 39-45. (in Chinese))
- [15] LIU Cheng, HE Yun, WALLING D E, 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.
- [16] 刘成,王建军,何耘. 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 Cheng, WANG Jianjun, HE Yun. 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))
- [17] 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. (in Chinese))
- [18] LAL R, GRIFFIN M, APT J, et al. Managing soil carbon [J]. Science, 2004, 304: 393.
- [19] 毛世民,许浒. 对“淮河流域水沙变化趋势及其成因分析”一文的商榷 [J]. 水利学报, 2013, 44(7): 880-882. (MAO Shimin, XU Hu. Discussion on the paper of “Variation trend and cause of runoff and sediment load variations in Huaihe River” [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 880-882. (in Chinese))

- [20] SPREAFICO M, LEHMANN C. Erosion, transport and deposition of sediment-case study rhine[R]. Netherlands: International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin,2009.
- [21] 刘成,何耘,张红亚. 水沙动态图法分析中国主要江河水沙变化[J]. 水科学进展,2008,19(3): 317-324. (LIU Cheng, HE Yun, ZHANG Hongya. Trends analysis of the water and sediment loads of the main rivers in China using water-sediment diagram [J]. Advances in Water Science,2008,19(3): 317-324. (in Chinese))
- [22] 陈海全,黄恒熙,周作付. 人工采沙对东江博罗河段水文特性的影响分析[J]. 广东水利水电,2004(6): 56-58. (CHEN Haiquan, HUANG Hengxi, ZHOU Zuofu. Analysis on the impact of sand excavation on hydrological variation of Boluo Reach, Dongjiang River [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower,2004(6): 56-58. (in Chinese))
- [23] 贾良文,罗章仁,杨清书,等. 大量采沙对东江下游及东江三角洲河床地形和潮汐动力的影响[J]. 地理学报,2006,61(9): 985-994. (JIA Liangwen, LUO Zhangren, YANG Qingshu, et al. Impacts of huge amount of sand dredging on riverbed morphology and tidal dynamics of the lower reaches of the Dongjiang River and the Dongjiang River Delta [J]. Acta Geographica Sinica,2006,61(9): 985-994. (in Chinese))
- [24] 李道生,陈斯俊. 东江中、下游地区河道群众性过量取沙造成水环境的影响及对策[J]. 广东水利水电,1997(4): 3-7. (LI Daosheng, CHEN Sijun. Impacts of excess sand excavation on water environment in the middle and lower reaches of Dongjiang River and its countermeasures [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower,1997(4): 3-7. (in Chinese))
- [25] INMAN D L, JENKINS S A. Climate change and the episodicity of sediment flux of small california rivers[J]. The Journal of Geology,1999,107: 251-270.
- [26] 王云璋,康玲玲,王国庆. 近50年黄河上游降水变化及其对径流的影响[J]. 人民黄河,2004,26(5): 5-7. (WANG Yunzhang, KANG Lingling, WANG Guoqing. Changes in precipitation and its influence on runoff of the Lower Yellow River in recent 50 years [J]. Yellow River,2004,26(5): 5-7. (in Chinese))
- [27] 许炯心,孙季. 近50年来降水变化和人类活动对黄河入海径流量通量的影响[J]. 水科学进展,2003,14(6): 690-695. (XU Jiongxin, SUN Ji. Influence of precipitation and human activities on water fluxes from the Yellow River into the sea in the past 50 years [J]. Advances in Water Science,2003,14(6): 690-695. (in Chinese))
- [28] 胡春宏,王延贵,张燕菁,等. 中国江河水沙变化趋势与主要影响因素[J]. 水科学进展,2010,21(4): 524-532. (HU Chunhong, WANG Yangui, ZHANG Yanjing, et al. Variation tendency of runoff and sediment load in China major rivers and its causes [J]. Advances in Water Science,2010,21(4): 524-532. (in Chinese))
- [29] 王可丽,程国栋,丁永建,等. 黄河、长江源区降水变化的水汽输送和环流特征[J]. 冰川冻土,2006,28(1): 8-14. (WANG Keli, CHENG Guodong, DING Yongjian, et al. Characteristics of water vapor transport and atmospheric circulation for precipitation over the source regions of the Yellow and Yangtze Rivers [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2006,28(1): 8-14. (in Chinese))
- [30] 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))
- [31] 刘成,王兆印,隋觉义. 我国主要入海河流水沙变化分析[J]. 水利学报,2007,38(12): 1444-1452. (LIU Cheng, WANG Zhaoyin, SUI Jueyi. Analysis on variation of seagoing water and sediment load in main rivers of China [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(12): 1444-1452. (in Chinese))
- [32] 尚红霞,彭红,田世民,等. 黄河河口镇—龙门区间近期内水沙变化特点分析[J]. 人民黄河,2014,36(2): 1-8. (SHANG Hongxia, PENG Hong, TIAN Shimin, et al. Variation features of runoff and sediment in Hekouzheng-Longmen reach of the Yellow River during 2000—2010 [J]. Yellow River,2014,36(2): 1-8. (in Chinese))
- [33] 郝立生,姚学祥,只德国. 气候变化与海河流域地表水资源量的关系[J]. 海河水利,2009(5): 1-4. (HAO Lisheng, YAO Xuexiang, ZHI Deguo. Relationship between climate change and surface water resources of Haihe River Basin [J]. Haihe Water Resources,2009(5): 1-4. (in Chinese))
- [34] 王刚,严登华,张冬冬,等. 海河流域1961年—2010年极端气温与降水变化趋势分析[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(1): 1-6. (WANG Gang, YAN Denghua, ZHANG Dongdong, et al. Trend analysis of variations in extreme precipitation and temperature in the Hai River Basin from 1961 to 2010 [J]. South-to-North Transfers and Water Science & Technology,2014,12(1): 1-6. (in Chinese))
- [35] 吴海山,王亚娟,赵洪岩. 永定河下游水沙变化趋势及其影响分析[C]//陈五一,何根寿,朱鉴远. 全国水文泥沙文选:中国水力发电工程学会水文泥沙专业委员会学术讨论会论文集. 成都:四川科学技术出版社,2007.
- [36] LIU Cheng, HU Chunhong. Recent changes of runoff and sediment loads of the Yangtze River [C]//Conference abstract book of the International Conference on the Status and Future of the World's Large Rivers. Vienna, Austria: [s. n.],2011:127.

(收稿日期:2016-06-09 编辑:骆超)