

全球河流输沙量分布格局及其影响因素

景昭伟¹, 何洪鸣^{1,2}, Soksamnang Keo¹, 赵宏飞¹

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,
陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 研究河流输沙量具有重要的理论和实践意义。近 60 年在气候变化和人类活动日益增强的背景下, 全球众多河流输沙量都发生显著变化。基于全球河流输沙量数据库和区域河流输沙量研究成果, 从全球尺度对全球河流输沙量现状、输沙量空间分布格局及其影响因素、输沙量变化及其影响因素 3 方面进行分析研究。结果表明: (1) 全球河流年均总输沙量在 2×10^{10} t 左右, 对全球主要 36 条河流输沙量数据分析表明大多数河流输沙量显著减少; (2) 地质地貌条件是河流输沙量控制性因素, 气象水文条件和人类活动对河流间输沙量差异的贡献大致相当; (3) 对各气候带的代表性河流研究表明, 相比较气候变化, 全球河流输沙量变化主要受人类活动的影响。未来全球河流总输沙量会因人类活动尤其是大坝建设的影响而继续减少。

关键词: 输沙量; 影响因素; 气候变化; 人类活动; 全球河流

中图分类号: TV153/157

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0001-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.03.001

The Distributional Patterns of Sediment loads of Global Rivers and Influencing Factors

JING Zhaowei¹, HE Hongming^{1,2}, Soksamnang KEO¹, ZHAO Hongfei¹

(1. State Key Laboratory Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateaus, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shannxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shannxi 712100)

Abstract: Sediment load research is of important theoretical and practical significance. In the past 60 years, with the increasing climate change and human activities, the sediment loads in many world rivers have undergone significant changes. Based on global sediment database and regional river studies, status, distribution patterns, and influencing factors of suspended sediment loads (SSL) of global rivers were reviewed. The results showed that: (1) Before the proliferation of dam construction in the latter half of the 20th century, the annual SSL of global rivers was around 2×10^{10} t. New data of 36 rivers indicated that most global rivers had a decreasing trend in SSL. (2) Geology and geomorphology conditions were decisive factors controlling SSL on a global scale. Meteorological and hydrological conditions and human activities had comparable contributions in controlling the difference in SSL among rivers. (3) Representative river studies in various climatic zones showed that changes in global SSL were mainly affected by human activities. In the future, the total SSL of global rivers would continue to decrease due to the impact of human activities, especially dam construction.

Keywords: sediment load; influencing factor; climate change; human activity; global river

河流携带泥沙注入海洋是生物地球化学循环重要一环, 是全球剥蚀系统关键组成部分, 也是评估土地退化和全球土壤资源减少重要度量^[1]。Martin 等^[2]估计河流输送的元素(P、Ni、Mn、Cr、Pb、Fe、Al)超过 90% 与泥沙输送有关。Ludwig 等^[3]估计河流中的有机碳约 43% 以颗粒物形式注入海洋。从地质

地貌角度来看, 陆地—海洋通过河流转移泥沙也是全球剥蚀系统的关键组成部分, 可以作为度量陆地剥蚀率的一般方法^[4]。河流输沙量也是指示人类对生态系统影响的重要指标。土地管理不善导致河流输沙量显著增加, 这会对全球土地资源可持续利用产生负面影响; 而河流输沙量过低又会导致河道侵蚀加强,

河口三角洲萎缩以及输入河岸和水域生态系统中营养物质减少,进而影响人类生产生活^[5-6]。综上所述,研究河流输沙量具有重要理论和实践意义。

全球河流输沙量研究工作始于 20 世纪 50 年代。限于数据匮乏(观测年限短、资料覆盖不全面)和数据精确性较差(取样方法不统一),早期研究对全球河流年均总输沙量估计值差别较大^[7]。直到 20 世纪 60 年代末,一些重要国际大河(勒拿河,阿穆尔河,马更些河,赞比西河)依然无法包括在研究人员汇总工作中^[7]。联合国教科文组织自 20 世纪 70 年代开始进行河流输沙量汇总工作(1992 年停止相关工作,数据更新到 1984 年)。20 世纪 80 年代,可获得数据增加,Milliman 等^[8]研究认为,全球河流年均总输沙量为 1.55×10^{10} t,其中 70% 来自亚洲南部、太平洋大的岛屿。20 世纪 90 年代,研究人员对全球河流输沙数据进行更广泛的搜集工作,其中以 Ludwig 等^[9]和 Milliman 等^[10]研究工作最具代表性。他们估计在 20 世纪 50 年代大规模建坝之前,全球年均入海泥沙量为 2×10^{10} t,为人类大规模毁林开荒之前(距今 2 000~2 500 a)全球河流输沙量的 2 倍。1994 年在法国,GLORI 会议开始了进一步扩大全球河流数据库的工作。1995 年 4 月,LOICZ 发布了一份报告,内容概括了 1 000 多条河流基本流域特征、总悬移质和溶解质数据。同时,IGBP/LOICZ 和 GEMS/WATER 达成协议成立了 GEMS/GLORI,进一步扩充了 GLORI 数据库,其研究成果由 Meybeck 和 Ragun^[11]发表于 1996 年。随后超过 600 条河流数据陆续汇编到一起,为进一步汇编和更正工作提供了模板^[12]。同期,研究人员也因具体研究内容进行了全球河流输沙量的分析工作,如陆地碳循环^[3,13]。进入 21 世纪,新的搜集工作仍在继续^[12,14-15]。与此同时,研究人员对全球河流输沙量分布格局、变化趋势和变化原因进行了深入分析^[1,15-19]。

近 60 年,在气候变化和人类活动日益增强的背景下,全球众多河流输沙量都发生显著变化。研究人员以区域河流为研究对象,从气候变化(主要是降水)和人类活动(坝库建设、土地利用变化、水土保持措施等)2 方面进行研究,解释了河流输沙量在时间尺度上变化的原因^[20-25]。有研究人员从全球尺度对河流输沙量变化进行研究,揭示出地貌、流域面积等在影响输沙量空间分布方面的控制性作用,并从全球尺度探究区域河流输沙量变化原因^[9-10,18-19,26-28]。

近 20 年,区域河流研究取得了丰富的输沙量数据,已有研究表明,各河流输沙量发生了显著变化。本文从这些研究中搜集了全球 40 条代表性河流的多年

平均输沙量数据,并从全球尺度对河流输沙量研究工作进行整理,具体包括全球河流输沙量现状、全球河流输沙量分布格局及其影响因素、全球河流输沙量变化及其影响因素 3 个方面。

1 研究数据与方法

研究涉及的输沙量为悬移质输沙量。主要原因是:(1)从全球尺度来说,悬移质输沙量占河流总输沙量的 90%^[12];(2)悬移质易于观测,数据精度可靠;(3)多数研究以悬移质为研究对象。全球现有悬移质输沙量数据库也存在一些潜在问题和错误:(1)数据空间分布不均,长历时高精度数据仅集中在欧洲、北美洲和亚洲的中国;(2)先前估计的年平均输沙量数据因为各种原因存在错误^[8,29]。本研究第 3 部分 653 条河流输沙量数据来源于 Milliman 等^[12]专著,其他输沙量数据来源于历史文献,且均在文中标明来源。全球大坝库容数据来源于联合国粮农组织(FAO)网站统计数据。

本研究首先对全球河流总输沙量现状进行整体概括,然后从时空尺度对控制河流输沙量的因素进行分析。空间尺度控制因素包括流域面积、流域地形和流域气象水文 3 个方面。时间尺度从气候变化和人类活动 2 个方面来分析,气候变化主要指降水变化,人类活动包括水库大坝建设和土地利用变化。本文所涉及的流域面积为河流入海前最后一个观测站所控制的流域面积,与实际流域面积有一定差别。

2 全球河流输沙量空间分布格局

2.1 全球河流总输沙量估计

对全球河流总输沙量估计值,不同时期甚至同一时期是不同的(表 1)。这主要是由于各研究使用的数据和程序方法不同^[17]。早期各研究的估计值差别较大,近年全球河流总输沙量估计值在 $(1.5 \sim 2) \times 10^{10}$ t 左右。需要注意的是这些估计值并不能代表实际入海泥沙量,原因除了数据本身精确性存在问题,更重要的是河流输沙量本身的非平稳特性和空间差异性。Syvitski 等^[30]研究表明是否考虑大坝因素对估计入海总输沙量有显著影响。河流输沙量的非平稳特性还表现在其易受气候变化的影响^[21]。河流输沙量空间差异性的典型例子是 Milliman^[31]对新几内亚岛的研究发现面积仅 8×10^5 km² 的新几内亚岛年均输沙量却达 1.7×10^9 t,相当于北美洲河流年均总输沙量。各研究利用现有的输沙量数据进行外推估计总输沙量时,要求外推河流所在流域的地质和环境条件与已知输沙量流域的基本相同,这在一定程度上忽略了各河流之间的差异性。综上所述,对于各研究所得出的全球河流总输沙量估计值需要谨慎参考。

表 1 全球河流年均总输沙量估计值

作者(机构), 年份(年)	总输沙量/ (10 ⁹ t)	作者, 年份(年)	总输沙量/ (10 ⁹ t)
P. H. Kuenen, 1950	32. 5	E. D. Goldberg, 1976	18. 6
G. C. Lopatin, 1952	12. 7	D. E. Walling, 1983	15. 0
J. Gilluly, 1955	31. 7	J. H. Milliman, 1983	13. 5
D. Pechinov, 1959	24. 2	J. H. Milliman, 1992	20. 0
F. Fournier, 1960	51. 1	W. Ludwig, 1996	14. 8
S. A. Schumm, 1963	20. 5	W. Ludwig, 1996	14. 7
F. T. MacKenzie, 1966	8. 3	R. Stallard, 1998	14. 0
J. N. Holeman, 1968	18. 3	J. P. M. Syvitski, 2003	24. 0
A. Sunbborg, 1973	15. 0	J. P. M. Syvitski, 2005	14. 0
J. H. L. Jansen, 1974	26. 7	J. P. M. Syvitski, 2005	12. 6
USSR, 1974	15. 7	J. H. Milliman, 2011	19. 1

注:数据来源 Milliman 和 Farnsworth^[32], Walling^[17], Syvitski 等^[30]。

2.2 各大洲河流总输沙量估计

如表 2 所示,尽管研究人员对各大洲河流输沙量的估计值有差异,但整体而言,亚洲河流年均输沙量最大,约 6×10⁹ t 左右,然后依次是大洋洲、南美洲、北美洲、非洲和欧洲。亚洲河流输沙量主要来自中国和印度以及众多的山地小河流。Milliman 等^[32] 近年的研究表明大洋洲的输沙量超过亚洲。

这主要是由于岛屿输沙量(尤其是大洋洲的巴布亚新几内亚)在全球河流输沙量中占有重要比重,其输沙量状况在近 20 年才被研究人员系统研究^[32-34]。南美洲西部的安第斯山脉在地质上属于年轻褶皱山系,该地区降水丰富且时空分布不均,为南美河流泥沙的主要来源^[35]。南美洲哥伦比亚的马格达莱纳河在 1975—1995 年期间输沙量显著增加,主要原因是毁林开荒和工矿活动^[18]。FAO 研究表明,在 1995—2005 年期间,南美洲的森林净损失量为全球第一,达 3.3×10⁷ km²/a^[36]。如果这一趋势继续下去,预计在未来南美洲河流输沙量会增加。北/中美洲河流输沙量在众多研究中基本相同,为(1.5~2)×10⁹ t 左右,其中输沙量 1/2 以上来自西部的山地,其次是密西西比河流域,加拿大北部地区河流输沙量较低^[32]。相比较而言,非洲河流输沙量较低。早期研究由于数据缺乏,对其估值较低^[7-8]。近年的估值约为 1.5×10⁹ t 左右。非洲大陆的平均海拔要高于其他大陆,其众多河流都属于世界大河,包括尼罗河,刚果河和尼日尔河等。非洲大河建坝前平均输沙模数仅为 25 t/(km²·a),远低于全球平均值 190 t/(km²·a)^[37]。这可能是由非洲大陆很多流域岩石地质年代较老,气候干旱,地势平缓等综合原因造成的^[32]。欧洲河流输沙量不到 1×10⁹ t,是各大洲中输沙量最低的。欧洲北部广大地区地势平缓,且河流上修建有众多水坝、河道广泛渠道化,因此输沙量较低。欧洲河流泥沙主要来自阿尔卑斯山南部注入地中海的河流。

表 2 各大洲河流总输沙量对比

洲名称	单位:×10 ⁹ t			
	J. N. Holeman	J. H. Milliman and R. H. Meade	J. M. P. Syvitski et al.	J. H. Milliman and K. L. Farnsworth
北、中美洲	1. 8	1. 5	2. 35	1. 9
非洲	0. 49	0. 53	1. 31	1. 5
亚洲	14. 5	6. 3	6. 35	5. 3
欧亚北极圈	—	0. 084	—	0. 15
欧洲	0. 29	0. 23	0. 92	0. 85
南美洲	1. 1	1. 8	2. 68	2. 3
大洋洲	—	3. 1	0. 42	7. 1
总计	18. 3	13. 5	14. 03	19. 1

注:“—”表示无数据;数据来源 Holeman^[7], Milliman 和 Meade^[8], Syvitski 等^[30], Milliman 和 Farnsworth^[32]。

3 全球河流输沙量空间分布格局影响因素

从全球尺度研究河流间输沙量差异的结果表明地貌条件(流域面积、地形)、地质条件(基岩性质)、气象水文条件(温度、降水、径流)和人类活动均对输沙量有影响^[9,15,30,33]。其中地质地貌条件(流域地形、流域面积、岩性、冰川侵蚀)是河流输沙量控制性因素,气象水文条件和人类活动对河流间输沙量差异的贡献大致相当^[15]。

3.1 流域气象水文

早期研究认为河流输沙量受降水控制,研究发现半干旱地区输沙量最大^[38]。但这些研究建立的降水与输沙量函数关系差别很大,其结果只能应用于与研究流域相似的气候区,无法应用于全球尺度。因此有研究人员认为河流输沙量是关于区域气候的函数,而不是降水量的函数^[39]。Ludwig 等^[9]和 Ludwig 等^[26]利用模型来研究河流输沙量的影响因素。他们通过设计不同的参数组合来分析全球主要 60 条河流的环境参数和输沙量的关系,发现不同气候区和输沙量相关性最好的参数组合是不同的。但由于该研究限于河流数量较少,温带干旱气候区仅包括 2 条河流,其结果需要谨慎参考^[40]。Syvitski^[27]把流域按气温不同进行气候分区,发现了流域平均温度对输沙量有重要影响,并提出了 ART 模型。将全球 653 条河流按多年平均气温分为寒带、亚寒带、温带、亚热带和热带 5 个区,具体原则参见 Milliman 等^[12]的研究。整体来说,亚热带、热带的河流输沙模数要大于温带(图 1)。

3.2 流域面积

20 世纪 50 年代末定量地貌学开始发展,研究人员开始对流域地貌参数和河流输沙量关系进行定量研究^[41]。众多研究发现河流输沙量随着流域面积的增大而增加^[4,40]。由图 1 可知,5 个气候区的河流输沙量均随流域面积的增加而增加。20 世纪 90 年代,

Milliman 等^[10]以全球 280 条河流输沙量、径流量、最高海拔高度等数据为基础分析了流域面积和流域最高海拔与输沙量的关系,发现河流输沙量与流域面积较好地呈对数线性关系(尤其是当把河流按地形进行分类后)。Mulder 等^[42]在此研究工作研究的基础上发现,当去除受人类活动影响较大的河流后,相关性显著增加。有研究人员从流域尺度研究发现流域面积与河流输沙模数无明显线性关系^[43-44],与通常认为的输沙模数与流域面积呈反比关系不相符合^[45]。但近年从全球尺度的研究却符合通常认为的反比关系^[46]。这说明全球尺度的河流输沙量研究结果是否适合于局部尺度仍是值得商榷的^[47]。从图 1 中可以看出,温带地区流域面积为 $1\ 000\text{ km}^2$ 的河流输沙量差别可达 3 个数量级。这说明从流域尺度来说,还有其他重要因素影响着河流输沙量。

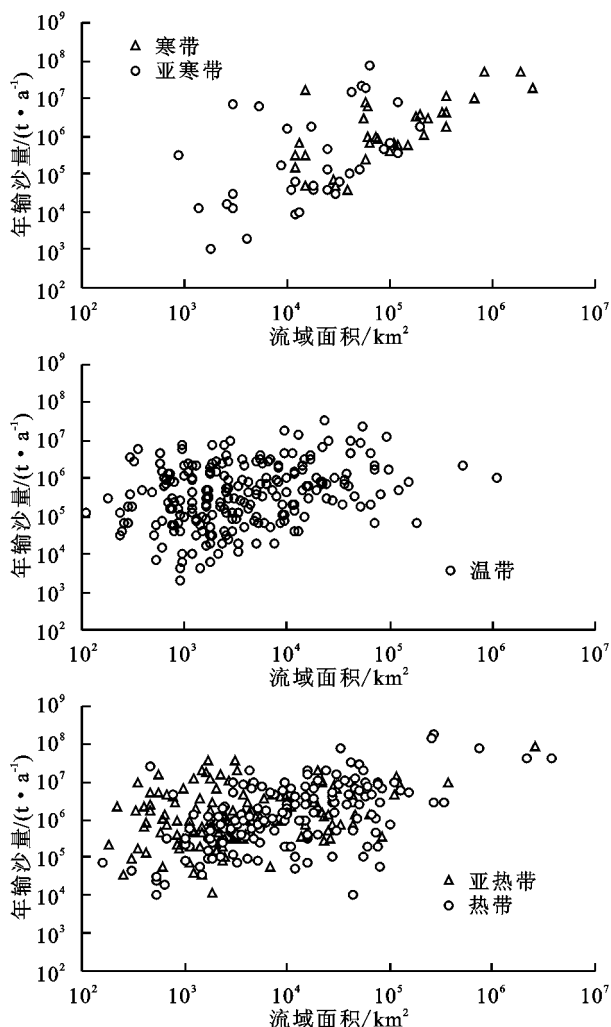


图 1 各气候区流域面积一年输沙量关系

3.3 流域地形地质

研究人员早期对地形也给予一定重视,但当时这些数据难以获取。20 世纪 80 年代,Pinet 等^[4]研究表明,机械剥蚀速率与流域平均海拔高度呈线性关系(这一法则适用于晚于 250 Ma B. P. 受造山运动影响

的流域)。同时期的研究也发现地貌和流域高程是决定河流输沙量的决定性因素^[47]。研究人员进一步认为构造运动和构造抬升速度才是影响河流输沙量的根本原因^[48]。按河流源头最高高程将流域分为平原($<100\text{ m}$)、低地($100\sim500\text{ m}$)、高地($500\sim1\ 000\text{ m}$)、山($1\ 000\sim3\ 000\text{ m}$)和高山($>3\ 000\text{ m}$)。如图 2 所示,整体来说,高山比低地河流年输沙量高出 1~3 个数量级。岩石可蚀性决定于其岩性及组成颗粒物的大小,反映了岩石成分、形成方式和年龄。年轻岩石比古老岩石易受到侵蚀^[4,15]。从全球尺度对流域岩性进行标准化处理存在诸多困难。将河流源区岩石按年龄将地层分为前中生界、中生界和新生界 3 种。整体来说,新生界地层占主导的流域年输沙量要高于前中生界(图 2)。Syvitski 等^[15]研究认为岩性作为控制全球河流输沙量重要因素,其比重占 13%。全球河流输沙量分布格局研究所采用的数据来源于人类大规模坝库建设之前的河流输沙数据。新的输沙数据虽在不断更新,但这些数据均不能代表“自然状态”下的河流输沙量状况,因此无法应用于全球河流输沙量分布格局的研究中。Syvitski 等^[15]的研究代表了最新研究成果,其对于全球河流输沙量分布格局差异的分析结果较为可靠。

4 全球河流输沙量变化趋势及其影响因素

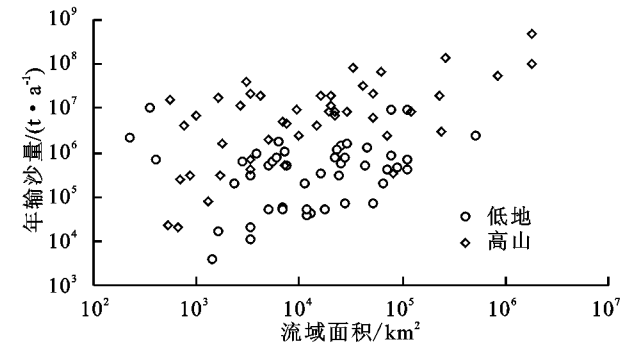
4.1 全球主要河流输沙量变化

全球河流输沙量在过去的几十年发生了显著变化(表 3)。列举河流的旧输沙量数据(1970 年前)来源于 Pinet 等^[4]的研究。这些数据为 20 世纪 70 年代之前河流多年年均输沙量数据,属于大规模建坝前的数据。新数据来源于近年的研究文献,除 Syvitski 和 Milliman^[15]数据库的数据之外,基本为 20 世纪 90 年代之后的河流多年平均输沙量数据,属于大规模建坝后的数据。表 3 中的 36 条河流,输沙量减少的河流有 30 条,所占比重大达 83.3%。其中北美洲的科罗拉多河输沙量减少最为显著,从年均 $1.35\times10^8\text{ t}$ 减少到年均 $1\times10^5\text{ t}$ (表 3)。其他的如亚洲、黄河,大洋洲的墨累河,南美洲的圣弗朗西斯科河,北美洲的密西西比河,非洲的奥兰治河、林波波河,欧洲的多瑙河输沙量减幅也较大。输沙量增加的河流出现在亚洲(湄公河和伊洛瓦底江)、南美洲(巴拉那河)和北美洲(马更些河和圣劳伦斯河)。非洲和欧洲河流输沙量无增加。

4.2 气候变化对全球河流输沙量变化的影响

河流输沙量变化影响因素包括气候变化和人类活动^[18]。气候变化主要通过降水来影响土壤侵蚀和泥

沙输移。降水是土壤侵蚀发生的主要驱动力,全球土壤侵蚀以水力侵蚀为主^[49]。从全球尺度来看,气候变化对全球河流输沙量的影响研究不多,可能是由于河流数据的缺乏。对于探究河流径流量的趋势性变化,



需要 50~100 a 的河流数据记录^[19]。GRDC 数据库满足这一条件的河流只有 179 条,且 135 条在欧洲和北美洲^[29]。因此很多研究集中在由气候变化导致的极端降水事件对河流输沙量的影响。

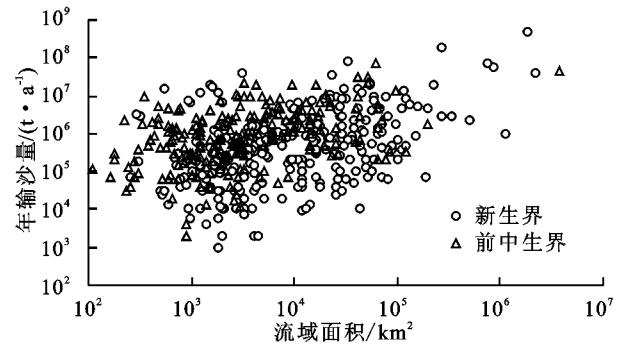


图 2 流域面积—输沙量关系

表 3 建坝前后全球主要 36 条河流输沙量对比

各洲名称	河流名称	观测站控制流域面积/ 10^6 km^2	1970 年前输沙量/ $(10^6\text{ t}\cdot\text{a}^{-1})$	1990 年后输沙量/ $(10^6\text{ t}\cdot\text{a}^{-1})$	1990 年后数据来源
亚洲	叶尼塞河	2.58	13.0 ^a	5.6	B. Hasholt 等,2006
	勒拿河	2.44	12.0 ^a	9.0	N. I. Tananaeve 等,2015
	鄂毕河	2.43	16.0 ^a	15.2	B. Hasholt 等,2006
	阿穆尔河	1.86	52.0 ^a	24.0	A. Marc 等,2005
	湄公河	0.85	160.0 ^a	187.9	H. Wang 等,2011
	黄河	0.74	1080.0 ^a	143.0	Y. Yu 等,2013
	珠江	0.45	69.0 ^a	24.6	中国河流泥沙公报
	伊洛瓦底江	0.43	265.0 ^a	325.0	T. Furuichi 等,2009
	辽河	0.22	41.0 ^a	2.7	H. Gupta 等,2012
大洋洲	墨累河	1.03	30.0 ^a	3.0	J. P. M. Syvitski 和 J. H. Milliman,2007
南美洲	亚马逊河	4.68	900.0 ^a	570.0	J. E. F. W. Lima 等,2005
	巴拉那河	3.10	92.0 ^a	120.0	M. L. Amsler 和 E. C. Drago, 2009
	奥里诺科河	0.94	210.0 ^a	173.2	J. P. M. Syvitski 和 J. H. Milliman, 2007
	圣弗朗西斯科河	0.59	6.0 ^a	1.8	J. E. F. W. Lima 等,2005
北美洲	玛格达莱纳河	0.26	220.0 ^a	145.0	A. Higgins 等,2015
	密西西比河	3.24	500.0 ^a	173.8	Y. J. Xu,2014
	马更些河	1.68	100.0 ^a	124.0	B. Hasholt 等,2006
	圣劳伦斯河	1.11	4.0 ^a	6.5	B. Rondeau 等,2000
	育空河	0.83	60.0 ^a	38.0	B. Hasholt 等,2006
	哥伦比亚河	0.67	29.0 ^a	15.0	J. P. M. Syvitski 和 J. H. Milliman,2007
	科罗拉多河	0.64	135.0 ^a	0.1	J. H. Milliman 和 J. P. M. Syvitski, 2011
	弗雷泽河	0.25	20.0 ^a	17.0	M. E. Attard 等,2014
	刚果河	3.50	43.0 ^a	31.7	A. Coynel 等,2005
非洲	尼罗河	2.87	111.0 ^a	119.8	J. P. M. Syvitski 和 J. H. Milliman,2007
	尼日尔河	2.09	67.0 ^a	40.0	J. P. M. Syvitski 和 J. H. Milliman,2007
	赞比西河	1.36	100.0 ^a	15.0	J. P. M. Syvitski 和 J. H. Milliman,2007
	奥兰治河	0.94	153.0 ^a	17.0	J. M. Bremner 等,1988
	塞内加尔河	0.27	2.9 ^a	2.1	J. P. M. Syvitski 和 J. H. Milliman,2007
	林波波河	0.38	33.0 ^a	6.0	J. H. Milliman 和 J. P. M. Syvitski, 2011
	伏尔加河	1.36	26.3 ^a	9.1	K. A. Maltsev 等,2015
	多瑙河	0.80	67.0 ^a	19.0	I. Liska,2014
	顿河	0.42	7.4 ^b	6.3	J. P. M. Syvitski 和 J. H. Milliman,2007
欧洲	北德维纳河	0.36	5.0 ^a	4.1	V. V. Gordeev,2006
	戈达瓦里河	0.31	96.0 ^a	51.3	U. K. Pradhan 等,2014
	因迪吉尔卡河	0.31	14.0 ^a	12.0	B. Hasholt 等,2006
	亚纳河	0.23	3.4 ^b	3.0	B. Hasholt 等,2006

注:a 数据来源于 Pinet 和 Souriau^[4];b 数据来源于 Ludwig 等^[3]。

4.2.1 极端降水事件对河流输沙量的影响 东南亚诸多河流输沙量易受极端事件的影响。以中国台湾地区为例,在 1979—1997 年间,台湾 11 条河流经历了 100 次异重流事件,多数与台风等极端气候事件有关^[50]。Kao 等^[34]的研究表明在过去 20 a,台湾 16 条河流年总输沙量变化在 $(1.6 \sim 40) \times 10^7$ t/a 之间。在 2004 年 6 月初台风“蒲公英”期间,浊水溪注入台湾海峡的泥沙达 7.2×10^7 t,而其多年平均输沙量仅为 3.8×10^7 t/a^[21,33]。极端降水事件在过去 60 年也呈增加趋势。近 60 年来,北美洲、欧洲和南美洲的极端降水事件的频率和强度呈增加趋势^[51]。亚洲北部强降雨呈增加趋势,中部无空间连续性趋势变化,东亚南亚极端降水事件频率有所增加^[52-53]。为应对气候变化对土壤侵蚀和河流输沙产生的影响,研究人员仍需对气候变化预测及其环境效应进行深入研究。

4.2.2 降水趋势性变化对河流输沙量的影响 如 4.1 部分所述,全球河流输沙量在过去的几十年发生了显著变化。Walling 以全球 145 条主要河流为研究对象,分析了这些河流输沙量的变化趋势^[18]。简单的趋势性分析表明近几十年约 50% 河流输沙量呈明显的上升或下降

趋势,其中大多数(47%)为下降趋势。对各气候区的 8 条代表性流域内降水、径流和输沙的变化趋势分析表明各流域的降水虽有变化,但均未达到显著水平($p < 0.05$) (表 4)。有研究表明近 60 年来黄河输沙量减少的部分原因是由于降水减少导致的^[18,54]。但本研究表明,黄河降水量虽略有减少,但减少趋势不显著。相比较而言,黄河径流量减少却十分明显,但其与降水量减少关系不大,可能主要与人类取水活动有关。寒带河流输沙量数据较少。相比黄河,寒带的科雷马河降水量减少较为明显,但其输沙量却呈显著增加趋势。温带半干旱河流密西西比河降水量和径流量均增加,且径流的增加量达到显著水平($p < 0.05$),但其输沙量却显著降低($p < 0.01$)。温带湿润区的多瑙河和长江以及亚热带的珠江流域的降水和径流量均无显著趋势性变化,但这些河流的输沙量却显著降低,且达到显著水平 $p < 0.01$ 。热带的湄公河和玛格达莱纳河的降水、径流和输沙量均无显著变化。通过对这些代表性河流的分析表明自 20 世纪 50 年代以来,这些河流输沙量变化与降水变化关系并不显著,这说明河流输沙量受人类活动影响更大。

表 4 全球各气候带代表性河流降水、径流和输沙变化趋势 M-K 检验表

气候带	河流名称	数据年份 (年)	降水		径流		输沙	
			Z_c	β	Z_c	β	Z_c	β
寒带	科雷马河	1942—1989	-1.16	-0.40	0.27	0.00	2.68**	0.05
温带干旱	黄河	1950—2014	-0.03	0.02	-6.09**	-0.67	-7.05**	-22.08
温带半干旱	密西西比河	1951—2007	1.91	1.24	2.00*	2.02	-4.67**	-2.15
温带湿润	长江	1951—2014	-0.21	-0.11	-0.33	-0.24	-6.89**	-5.85
温带湿润	多瑙河	1950—2004	-0.25	-0.11	0.06	0.03	-6.17**	-1.00
亚热带	珠江	1960—2014	-0.10	-0.18	-1.20	-0.47	-4.07**	-1.15
亚热带	湄公河	1962—2000	0.07	0.22	-0.70	-12.92	0.53	0.27
热带	玛格达莱纳河	1972—2010	0.99	3.83	-0.02	-0.01	0.94	0.83

注: Z_c 为分位数; β 为 Kendall 倾斜度,表示趋势变化的大小; * 表示差异显著($p < 0.05$); ** 表示差异极显著($p < 0.01$)。

4.3 人类活动对全球河流输沙量变化的影响

相比气候变化,人类活动对河流输沙量的影响更大。人类通过土地利用变化和水利工程建设影响河流输沙量,其中水利工程以坝库建设为典型代表;土地利用变化的驱动力包括毁林开荒、采矿、城市化建设、水土保持措施等。

自 20 世纪 50 年代左右,全球众多河流开始大规模地建设坝库,到 20 世纪 80 年代达到顶峰,随后逐渐减少(图 3)。除南美洲、非洲北部和北极圈大坝分布较少外,全球主要入海河流均有大规模大坝建设(图 4)。大坝的建设主要用于防洪、供水、灌溉、水力发电、改善航运等。但与此同时,泥沙由于大坝的阻挡淤积在坝库内。尼罗河在 1960 年之前的输沙量在 1.6×10^8 t 左右,由于大坝建设(尤其是 1964 年的阿斯旺大坝),大量泥沙淤积在纳赛尔湖,目前几乎已无

入海泥沙^[55]。有研究表明多瑙河下游输沙量在铁门二号建设后显著降低,虽然其径流量并未发生显著变化^[56]。中国三条最大河流输沙量在过去近 60 年均显著降低,其中长江和珠江河流输沙量减少主要是由于大坝建设^[57]。大坝建设对黄河输沙量减少贡献率,各研究结果虽不一致,但均在 20% 以上^[21,58-59]。从全球尺度来看,坝库年拦沙量达 $(4 \sim 5) \times 10^9$ t,占全球总输沙量的 25%~30%^[60]。有研究表明,为解决人类对能源的需求,未来 20 年(2010—2030 年)全球大坝建设将再次迎来快速发展阶段^[61-62]。目前至少有 3 700 座水电站大坝在计划或建设当中,这些大坝主要集中在新兴经济体国家^[62]。可以预计未来全球河流输沙量仍将继续减少。

人类活动(毁林开荒、采矿、城市化建设、水土保持措施等)导致的土地利用变化对河流输沙量有显著

影响。有研究表明南美洲哥伦比亚的马格达莱纳河在 1975—1995 年期间输沙量也显著增加,这主要是由于毁林开荒造成的^[30]。俄罗斯东北部的科雷马河在 1942—1989 年间径流量并无显著变化,但其输沙模数却增加了 1.5 倍,主要原因是流域内的采矿活动^[18]。相比自然景观,城市景观并不会引起当地严重的土壤侵蚀,但城市化过程中开发建设项目会引起短暂却严重的土壤侵蚀。对东南亚地区的研究表明开发建设项目引起 10 000 t/(km²·a)侵蚀输沙模数十分普遍^[63]。相反,在中国的黄河流域,自 20 世纪 70 年代大规模的水土保持措施建设以及 1999 年开始的退耕还林(还草)工程建设以来,黄河 12 个亚流域的植被覆盖率已由 1978 年的 25% 提高到 2010 年

的 46%^[58]。有研究表明,2000—2010 年植被覆盖增加对黄河输沙量减少的贡献率为 57%^[58]。

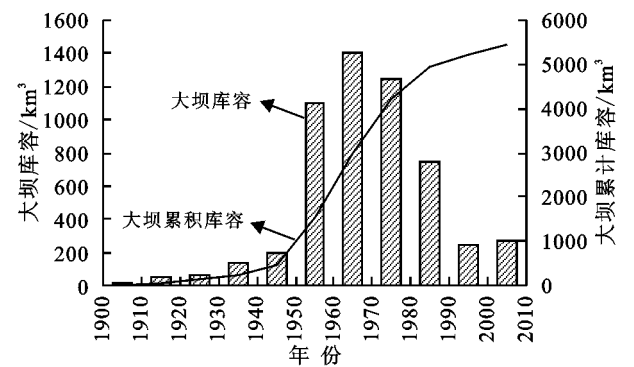


图 3 1900—2010 年全球大坝(库容 $\geq 1\times 10^6\text{ m}^3$, 高度 $\geq 15\text{ m}$)库容和累积库容

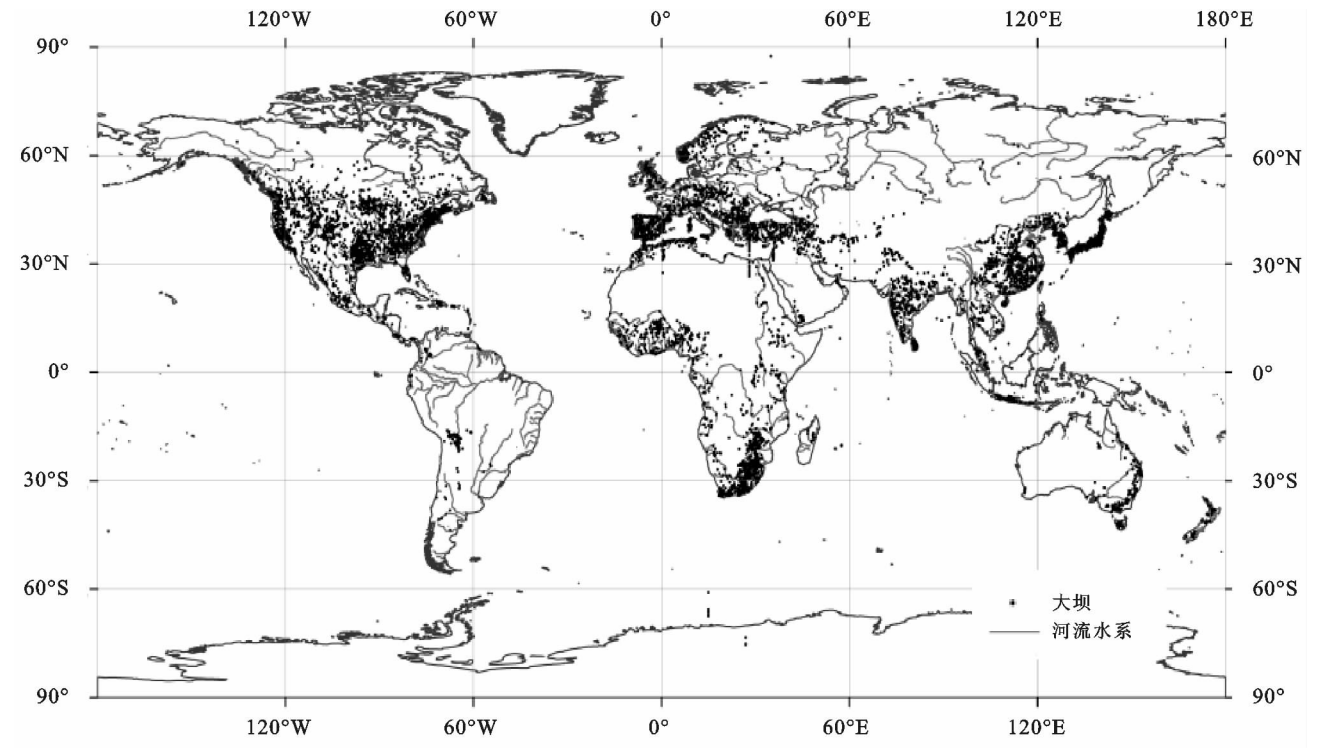


图 4 全球主要河流水系及大坝分布

5 结论

早期各研究对全球河流年均总输沙量的估计值差别较大,近年的研究估计值在 2×10^{10} t 左右。各大洲河流输沙量差异明显。亚洲年均入海泥沙最多,约 6×10^9 t 左右,然后依次是大洋洲、南美洲、北美洲、非洲、欧洲。通过全球主要 36 条河流近 20 年输沙量与大规模建坝前输沙量的对比发现有 30 条河流呈减小趋势,占河流总数的 83.3%。

地貌条件(流域面积、地形)、地质条件(基岩性质)、气象水文条件(温度、降水、径流)和人类活动均对全球河流输沙空间分布格局有影响。近年的综合研究表明,地质地貌条件是全局河流输沙量分布格局差异的控制性因素,所占比重达 65%;气象水文条件和人类活动对河流间输沙量差异的贡献大致相当,总

共占比重达 35%^[15]。

气候变化和人类活动是单条河流输沙量变化的驱动力因素。极端降水事件会显著增加河流输沙量,甚至单次极端降水事件期间的河流输沙量可超过河流多年平均输沙量。对各气候区代表性河流的研究表明,河流输沙量变化与降水变化关系并不显著,河流输沙量受人类活动影响更大。人类自 20 世纪 50 年代以来大规模坝库建设是河流输沙量减少的主要因素。为解决人类对能源的需求,目前至少有 3 700 座水电站大坝在计划或建设当中,这些大坝主要集中在新兴经济体国家。可以预计未来全球河流总输沙量仍将继续减少。

参考文献:

[1] 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): 111-126.

- [2] Martin J M, Meybeck M. Elemental massbalance of material carried by major world rivers [J]. *Marine Chemistry*, 1979, 7(3): 173-206.
- [3] Ludwig W, Probst J L, Kempe S. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(1): 23-41.
- [4] Pinet P, Souriau M. Continental erosion and large scale relief [J]. *Tectonics*, 1988, 7(3): 563-582.
- [5] Walling D E. The impact of global change on erosion and sediment transport by rivers: current progress and future challenges [M]. Paris, France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2009: 1-26.
- [6] Montgomery D R. Soil erosion and agricultural sustainability [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(33): 13268-13272.
- [7] Holeman J N. The sediment yield of major rivers of the world [J]. *Water Resources Research*, 1968, 4(4): 737-747.
- [8] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans [J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(1): 1-21.
- [9] Ludwig W, Probst J L. River sediment discharge to the oceans; present-day controls and global budgets [J]. *American Journal of Science*, 1998, 298(4): 265-295.
- [10] 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(5): 525-544.
- [11] Meybeck M, Ragu A. River discharges to the oceans: An assessment of suspended solids, major ions and nutrients [M]. Paris, France: United Nations Environment Programme, 1995.
- [12] Milliman J D, Farnsworth K L. River discharge to the coastal ocean: a global synthesis [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 2011.
- [13] Stallard R F. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: coupling weathering and erosion to carbon burial [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12(2): 231-257.
- [14] Hasholt B, Bobrovitskaya N, Bogen J, et al. Sediment transport to the Arctic Ocean and adjoining cold oceans [J]. *Nordic Hydrology*, 2006, 37(4/5): 413-432.
- [15] Syvitski J P M, Milliman J D. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean [J]. *The Journal of Geology*, 2007, 115(1): 1-19.
- [16] Syvitski J P M, Peckham S D, Hilberman R, et al. Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective [J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 162(1): 5-24.
- [17] Walling D. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers [J]. *Geomorphology*, 2006, 79(3): 192-216.
- [18] Walling D E, Schmidt J, Cochrane T, et al. The changing sediment loads of the world's rivers [J]. *Land Reclamation*, 2008, 39(325): 3-20.
- [19] Milliman J D, Farnsworth K L, Jones P D, et al. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951—2000 [J]. *Global and planetary change*, 2008, 62(3): 187-194.
- [20] Wang H J, Yang Z S, Saito Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950—2005): Impacts of climate change and human activities [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(3): 331-354.
- [21] Milliman J D, Lin S W, Kao S J, et al. Short-term changes in seafloor character due to flood-derived hyperpycnal discharge: Typhoon Mindulle, Taiwan, July 2004 [J]. *Geology*, 2007, 35(9): 779-782.
- [22] 楚纯洁, 李亚丽. 近 60 年黄河干流水沙变化及其驱动因素 [J]. *水土保持学报*, 2013, 27(5): 41-47, 132.
- [23] 戴仕宝, 杨世伦, 蔡爱民. 51 年来珠江流域输沙量的变化 [J]. *地理学报*, 2007, 62(5): 545-554.
- [24] Wang H J, Saito Y, Zhang Y, et al. Recent changes of sediment flux to the western Pacific Ocean from major rivers in East and Southeast Asia [J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 108(1): 80-100.
- [25] 王延贵, 刘茜, 史红玲. 长江中下游水沙态势变异及主要影响因素 [J]. *泥沙研究*, 2014, 2014(5): 38-47.
- [26] Ludwig W, Probst J L. A global modelling of the climatic, morphological, and lithological control of river sediment discharges to the oceans [C]// *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*. UK: IAHS, 1996.
- [27] Syvitski J P M. The influence of climate on the flux of sediment to the coastal ocean [C]// *Oceans, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2003.
- [28] Vörösmarty C J, Meybeck M, Fekete B, et al. Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments [J]. *Global & Planetary Change*, 2003, 39(1/2): 169-190.
- [29] Milliman J D, Farnsworth K L. River discharge to the coastal ocean: A global synthesis [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 2011: 7-12.
- [30] Syvitski J P M, Vörösmarty C J, Kettner A J, et al. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean [J]. *Science*, 2005, 308(5720): 376-380.
- [31] Milliman J D. Sediment discharge to the ocean from small mountainous rivers: the New Guinea example [J]. *Geo-Marine Letters*, 1995, 15(3/4): 127-133.
- [32] Milliman J D, Farnsworth K L. River discharge to the

- coastal ocean: a global synthesis [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 2011: 40-47.
- [33] Kao S, Lee T, Milliman J D. Calculating highly fluctuated suspended sediment fluxes from mountainous rivers in Taiwan[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2005, 16(3): 653-675.
- [34] Kao S, Milliman J. Water and sediment discharge from small mountainous rivers, Taiwan: The roles of lithology, episodic events, and human activities[J]. *The Journal of Geology*, 2008, 116(5): 431-448.
- [35] Armijos E, Crave A, Vauchel P, et al. Suspended sediment dynamics in the Amazon River of Peru[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2013, 44(2013): 75-84.
- [36] Lindquist E J, Annunzio R, Gerrand A, et al. Global forest land-use change 1990-2005 [M]. Rome, Italy: FAO, 2012.
- [37] Tamooch F, Meysman F J R, Borges A V, et al. Sediment and carbon fluxes along a longitudinal gradient in the lower Tana River (Kenya) [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119 (7): 1340-1353.
- [38] Langbein W B, Schumm S A. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1958, 39(6): 1076-1084.
- [39] Wilson L. Variations in mean annual sediment yield as a function of mean annual precipitation[J]. *American Journal of Science*, 1973, 273(4): 335-349.
- [40] Jansen I, Painter R. Predicting sediment yield from climate and topography [J]. *Journal of Hydrology*, 1974, 21(4): 371-380.
- [41] Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology[J]. *Transactions American Geophysical Union*, 1957, 38(6): 913-920.
- [42] Mulder T, Syvitski J P M. Climatic and morphologic relationships of rivers: implications of sea-level fluctuations on river loads [J]. *The Journal of Geology*, 1996, 104(5): 509-523.
- [43] 景可, 师长兴. 流域输沙模数与流域面积关系研究[J]. *泥沙研究*, 2007, 2007(1): 17-23.
- [44] 景可, 焦菊英, 李林育, 等. 输沙量、侵蚀量与泥沙输移比的流域尺度关系: 以赣江流域为例[J]. *地理研究*, 2010, 29(7): 1163-1170.
- [45] Walling D E. The sediment delivery problem[J]. *Journal of Hydrology*, 1983, 65(1): 209-237.
- [46] Milliman J D, Farnsworth K L. River discharge to the coastal ocean: a global synthesis [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 2011: 29-33.
- [47] Phillips J D. Relative importance of factors influencing fluvial soil loss at the global scale[J]. *American Journal of Science*, 1990, 290(5): 547-568.
- [48] Montgomery D R, Brandon M T. Topographic controls on erosion rates in tectonically active mountain ranges[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 201(3): 481-489.
- [49] Oldeman L R. The global extent of soil degradation [R]. *ISRIC Bi-Annual Report 1991-1992*, 1994.
- [50] Milliman J D, Kao S J. Hyperpycnal discharge of fluvial sediment to the ocean: Impact of super-Typhoon Herb (1996) on Taiwanese rivers[J]. *Journal of Geology*, 2005, 113(5): 503-516.
- [51] Milliman J D, Farnsworth K L. River discharge to the coastal ocean: a global synthesis [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 2011: 162-163.
- [52] Pattanaik D, Rajeevan M. Variability of extreme rainfall events over India during southwest monsoon season[J]. *Meteorological Applications*, 2010, 17(1): 88-104.
- [53] 高涛, 谢立安. 近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(5): 577-589.
- [54] 王随继, 李玲, 颜明. 气候和人类活动对黄河中游区间产流量变化的贡献率[J]. *地理研究*, 2013, 32(3): 395-402.
- [55] Gu J, Chen Z, Salem A. Post-Aswan dam sedimentation rate of lagoons of the Nile Delta, Egypt[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(7): 1807-1813.
- [56] Panin N, Jipa D. Danube River sediment input and its interaction with the north-western Black Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 54(3): 551-562.
- [57] Liu C, Sui J Y, He Y, et al. Changes in runoff and sediment load from major Chinese rivers to the Pacific Ocean over the period 1955—2010 [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2013, 28(4): 486-495.
- [58] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 9(1): 1-4.
- [59] Ran L S, Lu X X, Xin Z B, et al. Cumulative sediment trapping by reservoirs in large river basins: A case study of the Yellow River basin[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 2013(100): 308-319.
- [60] Vörösmarty C J, Meybeck Michel, Fekete Balazs, et al. Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments [J]. *Global and planetary change*, 2003, 39(1): 169-190.
- [61] Lehner B, Liermann C R, Revenga C, et al. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(9): 494-502.
- [62] Zarfl C, Lumsdon A E, Berlekamp J, et al. A global boom in hydropower dam construction [J]. *Aquatic Sciences*, 2015, 77(1): 161-170.
- [63] Douglas I. The impact of land-use changes, especially logging, shifting cultivation, mining and urbanization on sediment yields in humid tropical Southeast Asia: a review with special reference to Borneo [R]. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 1996, 236: 463-472.