

# 全球河流入海沙量估算述评

刘 成<sup>1</sup>,何 耘<sup>2</sup>,陈建国<sup>1</sup>,史红玲<sup>1</sup>

(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:**全球河流入海沙量作为地球系统运行变化的重要而敏感的指标,在一定程度上会对全球社会、经济和环境问题产生重要影响,从而引起国内外研究者的高度关注。针对由于缺乏可靠、完整的河流输沙量数据,很难准确估算全球河流入海沙量的数值及其变化,且已有文献估算值差别很大,缺乏统一认识的问题,收集整理了 20 世纪 50 年代至今国内外 27 篇文献中全球河流入海沙量的估算值,并对近期相关典型研究成果进行述评。调查发现,早期估算的入海沙量数值差异很大,随着人们对这一问题的深入研究,近年来全球入海沙量估算值日趋合理,大多集中在 120 亿~200 亿 t/a。分析认为,人类活动影响前后的河流入海沙量宜分别按 190 亿 t/a 和 130 亿 t/a 考虑。

**关键词:**河流入海沙量;输沙量;流域;水库;人类活动;综述

**中图分类号:**TV148 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)05-0047-05

**Review of estimation of global fluvial sediment discharge to oceans//**LIU Cheng<sup>1</sup>, HE Yun<sup>2</sup>, CHEN Jianguo<sup>1</sup>, SHI Hongling<sup>1</sup>(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 amount of global fluvial sediment discharge to the oceans is an important and sensitive indicator, reflecting changes in the operation of the Earth, and has a significant influence on global socio-economic and environmental problems. Global river-to-ocean sediment flux has attracted the attention of many scholars around the world. Due to the lack of reliable and complete fluvial sediment load data, it is difficult to estimate the amount and variation of global fluvial sediment discharge to the oceans. There are large differences and inconsistencies between the values estimated by previous studies. In this paper, typical results obtained from 27 recently published papers in regards to the estimations of the global fluvial sediment discharge to the oceans are reviewed. The investigation shows that there have been large differences between estimates of the amount of global fluvial sediment discharge to the oceans in the early stages of such research, but, with increasingly in-depth examination, the estimated results in recent years have tended to be reasonable, with the amount mostly ranging from 12 to 20 billion tons per year. It is concluded that the amount of fluvial sediment discharge to the oceans before and after human activities can be considered 19 billion tons per year and 13 billion tons per year, respectively.

**Keywords:** fluvial sediment discharge to ocean; sediment load; river basin; reservoir; human activity; review

河流自高原和山区发育,最终挟带大量泥沙、溶解物和动植物碎屑奔流入海。据估计全球表层土壤年侵蚀量达 600 亿 t,其中约有 170 亿 t 泥沙流入海洋,相当于每年损失 500 万~700 万 hm<sup>2</sup> 农田<sup>[1]</sup>。河流输沙量对河流系统的功能发挥具有重要意义,对物质通量、地球化学循环、水质、河道演变、河口三角洲发展,以及依赖于河流的水生态系统和栖息地均起到重要作用。河流输沙量能够反映流域的地形地貌和水文因素的影响,也能反映流域侵蚀和产沙

的程度。流域侵蚀、产沙和输沙过程对人类可持续开发和利用地球自然资源具有重要意义,也能对社会经济发挥重要作用。例如,水土流失往往导致土地退化,从而影响粮食产量和粮食安全;而河流输沙量的变化也影响诸如供水、输水、航运等对河流的利用,大量泥沙输送入湖泊和近海,引发泥沙淤积问题,从而改变营养物循环<sup>[2]</sup>。由于流域侵蚀和输沙过程与土地覆盖、土地利用和流域的水文条件密切相关,因此河流输沙量对气候变化、土地覆被变化和

人类活动敏感,其中,人类活动包括毁林造田、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等。

全球河流入海沙量为地球系统的运行变化提供了重要而敏感的指标,在一定程度上能够反映流域侵蚀、产沙和输沙过程对全球社会、经济和环境问题产生的影响。从全球范围来看,河流入海沙量的变化反映了全球土地资源的可持续利用情况,陆-海泥沙转移量的变化将导致地球化学循环中的变化,尤其是碳通量的变化。同样,河流输沙量的变化也会引发许多问题,例如,河流输沙量增加会导致水库、河道和输水系统的淤积加速,并对水生生物的栖息地和生态系统产生不利影响。相反,输沙量减少可能会导致河道冲刷和三角洲海岸线的侵蚀,减少营养物输入至水生态系统和滨河生态系统,特别是湖泊、三角洲和沿海海域。正是由于这些原因,国内外研究者对河流输沙量及全球入海沙量的研究非常重视,已有研究成果丰富<sup>[3-8]</sup>。但由于全球河流实测输沙量数据难以收集齐全,没有实测数据的河流较多,估算方法各异,全球河流入海沙量的估算值差别很大,没有统一的认识。笔者收集了从 20 世纪 50 年代至今文献所提出的全球河流入海沙量的估值,对近期相关典型研究成果进行综述,提出目前在估算人类影响前后全球河流入海沙量上的最新认识。

### 1 全球河流入海沙量估算统计

由于全球河流输沙量数据缺少或不完整,难以推算全球入海沙量的数值及其变化。一方面很多地区没有开展过河流输沙参数的测量工作;另一方面,收集和获取各个国家已有的河流泥沙数据较为困难;而且有很多河流虽然有输沙量数据,但并非长系列数据,因此数据代表性不强,难以直接应用于河流输沙量的变化趋势分析。

虽然推算全球河流入海沙量较难,从 20 世纪下半叶至今,还是有很多学者进行了有益的尝试,用不同的方法进行估算。表 1 列出了 27 篇文献中提出的 30 个全球河流入海沙量数据(按数值从小到大排序)。从表 1 可见,各文献提出的全球河流入海沙量数值分布范围很大,最低 83 亿 t/a,最高 511 亿 t/a。近些年,随着对这一问题的深入研究,以及更多河流开展了河流输沙量的实测,互联网时代更多河流输沙量数据的获取,并且随着计算机技术及数值模拟技术的不断进步,可以利用先进的数值模拟技术进行输沙量的推算,因此全球河流入海沙量的估算值日趋合理,近些年估算值大多集中在 120 亿~200 亿 t/a。

表 1 不同文献全球河流入海沙量估值

| 文献来源   | 发表年份 | 作者/研究者      | 入海沙量估算值/<br>(亿 t·a <sup>-1</sup> ) |
|--------|------|-------------|------------------------------------|
| 文献[9]  | 1966 | MacKenzie 等 | 83                                 |
| 文献[10] | 2006 | Walling     | 126                                |
| 文献[11] | 2005 | Syvitski 等  | 126<br>(扣除水库淤积量)                   |
| 文献[12] | 1952 | Lopatin     | 127                                |
| 文献[13] | 2011 | Syvitski 等  | 128<br>(人类活动影响后)                   |
| 文献[14] | 1993 | Gleick      | 135                                |
| 文献[15] | 1983 | Milliman 等  | 135                                |
| 文献[11] | 2005 | Syvitski 等  | 140<br>(人类活动影响前)                   |
| 文献[16] | 1998 | Stallard    | 140                                |
| 文献[17] | 1996 | Ludwig 等    | 148                                |
| 文献[18] | 1973 | Sundborg    | 150                                |
| 文献[13] | 2011 | Syvitski 等  | 151<br>(史前)                        |
| 文献[12] | 2000 | Dedkov 等    | 155                                |
| 文献[12] | 1974 | Alekseev 等  | 157                                |
| 文献[11] | 2005 | Syvitski 等  | 162<br>(包括水库淤积量)                   |
| 文献[12] | 1981 | Makkaveev   | 170                                |
| 文献[19] | 1968 | Holeman     | 183                                |
| 文献[12] | 1974 | Lisitsyn    | 185                                |
| 文献[20] | 1976 | Goldberg    | 186                                |
| 文献[21] | 2011 | Milliman 等  | 191<br>(建坝前)                       |
| 文献[22] | 1992 | Milliman 等  | 200                                |
| 文献[23] | 1963 | Schumm      | 205                                |
| 文献[12] | 1978 | Safyanov    | 213                                |
| 文献[12] | 1974 | Lvovich     | 217                                |
| 文献[3]  | 2003 | Syvitski 等  | 240                                |
| 文献[12] | 1959 | Pechinov    | 242                                |
| 文献[24] | 1974 | Jansen 等    | 267                                |
| 文献[25] | 1955 | Gilluly     | 317                                |
| 文献[26] | 1950 | Kuenen      | 325                                |
| 文献[27] | 1960 | Fournier    | 511                                |

注:文献[12]中列出了多篇俄罗斯/前苏联文献数据。

### 2 近年典型研究成果

#### 2.1 Syvitski 等<sup>[11]</sup>的研究成果

Syvitski 等利用能反映全球地形、地貌和气象水文特征的全球数据库,采用流域通量模型(DBFM),考虑了地形、流域面积(或平均流量)和流域气温分布等因素,推算出全球河流入海年输沙量及其季节变化,成果发表在美国科学促进会的权威期刊《Science》上,影响很大。该研究基于流域面积合计为 9 100 km<sup>2</sup> 的 4 462 条河流的分析,尝试计算人类活动影响前和受人类活动影响的现代全球河流入海沙量。

在计算人类活动影响前的全球河流输沙量时,采用了美国北极与高山研究所的流域通量模型(INSTAAR-DBFM)中的面积-地形-温度输沙模型(ART)。计算中,采用全球数据库中 340 条河流的

数据对模型进行训练,这些河流覆盖全球 70% 的水文地块。为了反映人类活动影响前的状况,选择的这些河流大部分处于原始状态,或者河流在受到水库拦沙或土地扰动影响前有输沙量实测数据。模型计算得出人类活动影响前全球河流入海沙量约为 140 亿 t/a,各区域的沙量如表 2 所示。由表 2 可见,入海沙量最高的区域为亚洲,为 54.50 亿 t/a,占全球入海总沙量的 39%;南美和北美入海沙量数据相近,分别为 26.80 亿 t/a 和 23.50 亿 t/a,两者总和占全球入海总沙量的 36%。

| 表 2 Syvitski 等 <sup>[11]</sup> 估算的全球河流入海沙量区域分布 |                                           |                          |                                            |                                       |                                       |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 区域                                             | 面积/<br>(10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> ) | 年径流量/<br>km <sup>3</sup> | 人类活动影<br>响前入海沙量/<br>(亿 t·a <sup>-1</sup> ) | 现代<br>入海沙量/<br>(亿 t·a <sup>-1</sup> ) | 入海沙量<br>变化/<br>(亿 t·a <sup>-1</sup> ) |
| 非洲                                             | 20                                        | 3 800                    | 13.10                                      | 8.00                                  | -5.10                                 |
| 亚洲                                             | 31                                        | 9 810                    | 54.50                                      | 47.40                                 | -7.10                                 |
| 南太平洋                                           | 4                                         | 610                      | 4.20                                       | 3.90                                  | -0.30                                 |
| 欧洲                                             | 10                                        | 2 680                    | 9.20                                       | 6.80                                  | -2.40                                 |
| 印度尼西亚                                          | 3                                         | 4 260                    | 9.00                                       | 16.30                                 | 7.30                                  |
| 北美                                             | 21                                        | 5 820                    | 23.50                                      | 19.10                                 | -4.40                                 |
| 海洋岛屿                                           | 0.01                                      | 20                       | 0.04                                       | 0.08                                  | 0.04                                  |
| 南美                                             | 17                                        | 11 540                   | 26.80                                      | 24.50                                 | -2.30                                 |
| 全球                                             | 106                                       | 38 540                   | 140.34                                     | 126.08                                | -14.26                                |

在计算受人类活动影响的现代全球河流入海沙量时,有输沙量实测值的河流面积占全球流域面积的 70%,对于缺乏输沙量实测值的河流利用流量-地形-气温输沙模型(QRT)进行估算。河流泥沙数据库中的数据包括建坝前后的输沙量观测值,针对无泥沙测量数据的河流,按水库规模(大型水库、小型水库)分别估算其拦沙量。计算得出现代全球河流入海沙量约为 126 亿 t/a,较人类活动影响前的入海沙量降低约 10%。按全球大型和小型水库拦沙量分别占全球入海总沙量的 20% 和 6% 估算,推算出无大坝拦沙影响的现代全球河流入海沙量约为 162 亿 t/a。由表 2 还可发现,非洲和亚洲的入海沙量降低幅度最大,分别达 5.1 亿 t/a 和 7.1 亿 t/a。其中,入海沙量大幅降低的包括非洲的尼罗河、奥兰治河、尼日尔河、赞比西河,以及亚洲的长江、黄河和印度河。欧洲、北美和南美区域的河流入海沙量也大幅减少,分别降低 2.4 亿 t/a、4.4 亿 t/a 和 2.3 亿 t/a。印度尼西亚区域的河流入海沙量增加 7.3 亿 t/a,主要由森林砍伐造成。

2.2 Milliman 等<sup>[21]</sup> 的研究成果

Milliman 等在其 2011 年出版的专著《River discharge to the coastal ocean: a global synthesis》<sup>[2]</sup> 中,利用全球 1 534 条直接排放入海的河流干流数据库,分析了全球河流入海的水量、悬移质输沙量和可溶性固体颗粒量。数据库中河流总的流域面积为 8 660 万 km<sup>2</sup>,其中流域面积大于 50 万 km<sup>2</sup> 的河流

有 34 条,这些河流的流域面积为 5 290 万 km<sup>2</sup>,占全球入海河流总流域面积(约 10 500 万 km<sup>2</sup>) 的 1/2。Milliman 等估算全球河流入海沙量时,将全球按地理和环境条件(特别是降水量)大致划分为 11 个区域,分别为南美东北部、南美西部、南美东南部、北美西部、北美东部、美洲极地、欧亚极地、欧洲、南亚及大洋洲、非洲西部和非洲东部,利用与各区域河流实测输沙量和流域面积相关的计算方法,估算各区域的入海沙量。计算中尽可能采用建坝前的数据。计算出各区域建坝前入海沙量见表 3,将各区域数值相加,得出建坝前全球入海沙量约为 191 亿 t/a。

| 表 3 不同文献估算的分区域全球河流入海沙量比较 |                            |                         |                            | 亿 t/a |
|--------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|-------|
| 区域                       | Milliman 等 <sup>[21]</sup> | Holeman <sup>[19]</sup> | Milliman 等 <sup>[15]</sup> |       |
| 北美                       | 19                         | 18                      |                            | 15    |
| 南美                       | 23                         | 11                      |                            | 18    |
| 欧洲                       | 8.5                        | 2.90                    |                            | 2.3   |
| 非洲                       | 15                         | 4.9                     |                            | 5.3   |
| 欧亚极地                     | 1.5                        |                         |                            | 0.84  |
| 亚洲                       | 53                         | 145                     |                            | 63    |
| 大洋洲                      | 71                         |                         |                            | 31    |
| 全球                       | 191                        | 183                     |                            | 135   |

Milliman 等<sup>[21]</sup> 将计算的各区域入海沙量与过去的成果进行了比较(表 3)。结果表明,其估算的全球入海沙量与 Holeman<sup>[19]</sup> 估算的结果基本一致,高于 Milliman 等<sup>[15]</sup> 估算的 135 亿 t/a<sup>[15]</sup>。在具体分析各区域数值后,Milliman 等<sup>[21]</sup> 指出,由于数据库资料有限,Holeman 利用南亚河流计算了亚洲河流的平均产沙率,然后将这些产沙率值应用至整个亚洲大陆,没有考虑北冰洋河流产沙率非常低这一因素。因此,Holeman 计算的亚洲大陆的输沙量约为 Milliman 等估算值的 3 倍。因为 Holeman 缺少大洋洲岛屿河流的数据,估算中缺少此区域输沙量。另外,因为缺乏北美西部和南美数据,以及流经阿尔卑斯山南部河流的数据,导致文献[19]和文献[15]均低估了这些地区的输沙量。

2.3 Syvitski 等<sup>[13]</sup> 的研究成果

Syvitski 等<sup>[13]</sup> 利用数学模型分析人类活动影响前后全球河流入海沙量的变化。分析中采用了 BQART 经验模型计算长期的悬移质输沙量(B、Q、A、R、T 分别代表流域、流量、流域面积、地形和流域气温),主要考虑因素包括:①流域面上的地貌/地质、岩性和地势的影响;②流域气温、径流和冰范围的地理影响;③可能会加速或减缓土壤侵蚀和/或拦沙的人类活动。

在计算无人类活动影响的史前全球河流入海沙量时,采用流域平均气温和流量等数据和无人类活

动扰动的其他参数应用 BQART 模型,估算出史前全球河流入海沙量约为 151 亿 t/a。计算人类活动影响下的现代全球河流入海沙量分两部分进行,一部分采用 1960—1990 年全球 160 条河流实测输沙量数据进行计算,这些河流流域面积涵盖全球陆地表面面积的 60%;另一部分为全球其他无实测输沙量数据的河流,利用现代气象条件、人口密度、国民生产总值和水库特征值进行计算。两者相加得出 20 世纪全球入海沙量约为 129 亿 t/a,各区域史前和现代河流入海沙量见表 4。

表 4 Syvitski 等<sup>[13]</sup>估算的史前和现代河流入海沙量

| 区域                 | 年径流量/km <sup>3</sup> | 入海沙量/(亿 t·a <sup>-1</sup> ) |         |
|--------------------|----------------------|-----------------------------|---------|
|                    |                      | 现代                          | 史前      |
| 北美                 | 5 819                | 15                          | 17      |
| 南美                 | 11 529               | 24                          | 33      |
| 欧洲                 | 2 680                | 4                           | 6       |
| 非洲                 | 3 797                | 11                          | 16      |
| 亚洲                 | 9 806                | 48                          | 53      |
| 澳大拉西亚 <sup>①</sup> | 608                  | 2. 8                        | 2. 4    |
| 印度尼西亚              | 4 251                | 24                          | 24      |
| 海洋岛屿               | 20                   | 0. 04                       | 0. 03   |
| 全球                 | 38 510               | 128. 84                     | 151. 43 |

注:①指澳大利亚、新西兰及附近太平洋诸岛。

2.4 其他近期研究成果

Walling<sup>[2]</sup>根据全球主要水库总库容估算年库容损失,进而估算水库拦沙量。目前,全球水库总库容约为 6000 km<sup>3</sup>,估测年库容损失约为 48 km<sup>3</sup>,水库库容损失主要由泥沙淤积造成,粗略折算相当于水库拦沙量 600 亿 t/a。这一水库拦沙量数值远高于其他文献数值,是大多数全球入海沙量估算值的 4 倍。考虑水库拦沙量中的泥沙有相当部分在建坝前会淤积于河道和下游河道滩地、洪泛平原等,粗略估算假设水库年拦沙量中的 40% 在建坝前可以输送入海,则因建坝而减少的入海沙量约为 240 亿 t/a。据此,Walling 认可 Syvitski 等<sup>[11]</sup>提出的人类影响前和现代全球河流入海沙量分别约为 140 亿 t/a 和 126 亿 t/a,但认为水库拦沙造成的入海沙量减少值为 240 亿 t/a,无水库拦沙的现代入海沙量达 366 亿 t/a,大幅度高于 Syvitski 等<sup>[11]</sup>及其他研究者的估算值,如表 5 所示。笔者认为 Walling 是基于全球水库拦沙量数据基础上进行估算的,其结论有其合理性。

表 5 Walling<sup>[2]</sup>与 Syvitski 等<sup>[11]</sup>估算的入海沙量及水库拦沙量

| 河流入海沙量类型      | Walling <sup>[2]</sup> | Syvitski 等 <sup>[11]</sup> |
|---------------|------------------------|----------------------------|
| 人类活动影响前的入海沙量  | 140                    | 140                        |
| 现代入海沙量        | 126                    | 126                        |
| 水库拦沙造成的入海沙量减少 | 240                    | 36                         |
| 无水库拦沙的现代入海沙量  | 366                    | 162                        |

Liu 等<sup>[28]</sup>以 Milliman 等<sup>[21]</sup>所提出的建坝前全

球河流入海沙量 190 亿 t/a 为基准,利用中国 10 条主要河流入海的 17 个测站多年系列数据,全球其他国家 78 条河流入海的建坝前后数据,分析各区域受人类活动影响的输沙量变化率,估算各区域河流的入海沙量如表 6 所示,得出当前全球河流入海沙量约为 132 亿 t/a。

表 6 近年不同文献估算的分区域全球河流

| 区域    | 入海沙量                       |         | 亿 t/a                      |         |                            |         |
|-------|----------------------------|---------|----------------------------|---------|----------------------------|---------|
|       | Syvitski 等 <sup>[11]</sup> |         | Milliman 等 <sup>[21]</sup> |         | Syvitski 等 <sup>[13]</sup> |         |
|       | 人类活动影响前                    | 现代      | (建坝前)                      | 现代      | 史前                         | (建坝后)   |
| 非洲    | 13. 10                     | 8. 00   | 15. 00                     | 11. 00  | 16. 00                     | 6. 00   |
| 亚洲    | 54. 50                     | 47. 40  | 53. 00                     | 48. 00  | 53. 00                     | 21. 80  |
| 南太平洋  | 4. 20                      | 3. 90   |                            | 2. 80   | 2. 40                      |         |
| 欧洲    | 9. 20                      | 6. 80   | 8. 50                      | 4. 00   | 6. 00                      | 2. 55   |
| 印度尼西亚 | 9. 00                      | 16. 30  |                            | 24. 00  | 24. 00                     |         |
| 北美    | 23. 50                     | 19. 10  | 19. 00                     | 15. 00  | 17. 00                     | 5. 70   |
| 南美    | 26. 80                     | 24. 50  | 23. 00                     | 24. 00  | 33. 00                     | 28. 64  |
| 大洋洲   |                            |         | 71. 00                     |         |                            | 67. 45  |
| 海洋岛屿  | 0. 04                      | 0. 08   |                            | 0. 04   | 0. 03                      |         |
| 欧亚极地  |                            |         | 1. 50                      |         |                            |         |
| 全球    | 140. 34                    | 126. 08 | 191. 00                    | 128. 84 | 151. 43                    | 132. 14 |

3 近年研究成果的比较分析

为便于讨论,将上述近年关于全球分区域河流入海沙量的估算结果列于表 6。

从人类活动影响前(建坝前、史前)入海沙量看,Milliman 等<sup>[21]</sup>估算的 191. 00 亿 t/a 远大于另外两个估算值(140. 34 亿 t/a 和 151. 43 亿 t/a)。具体到分区域数值比较,输沙量较大的区域中,非洲、亚洲、欧洲、北美和南美的输沙量值基本相近,差别不大;全球入海沙量数值的差别主要是由大洋洲区域输沙量的差别造成的。Milliman 等认为其他研究成果没有包括或低估了大洋洲岛屿河流的数据,提出大洋洲岛屿流域面积虽然不足全球入海河流域面积的 2. 5%,但其排入海洋的年输沙量达 71 亿/a,约占全球总量的 40%。考虑此因素,人类活动影响前的河流入海沙量宜按 190 亿 t/a 考虑。

从建坝后全球河流入海沙量看,表 6 所列 3 篇文献数值基本一致,都在 130 亿 t/a 上下,但具体到分区域数值看,文献[28]在非洲、亚洲、欧洲和北美区域的数值远低于其他 2 篇文献的数值,但由于其数值建立在 Milliman 等<sup>[21]</sup>估算的建坝前全球数值的基础上,大洋洲入海沙量大大高于另 2 篇文献数值,两相抵消因此 3 篇文献估算的全球入海沙量基本一致。文献[28]中 88 条河流入海沙量的变化多有长期系列实测数据的支撑,这 88 条河流基本上包括了全球大型河流和输沙量较大的河流,因而分析结果有一定数据基础,特别是亚洲河流数据较其他

研究更为全面、可靠。以亚洲河流入海沙量来看,分析中采用中国 10 条主要河流 17 个测站长系列数据和其他国家 26 条河流建坝前后的数据,这些河流的入海沙量从过去的约 46 亿 t/a 降至当前的 19 亿 t/a,其中中国 10 条主要河流入海沙量从 20 亿 t/a 降至 5 亿 t/a。分析河流的输沙量占亚洲河流总输沙量的约 90%,因此其提出的亚洲建坝后入海沙量比过去入海沙量值减少约 60% 较为合理。仅中国 10 条主要河流的入海沙量就已降低了 15 t/a,大于另 2 篇文献提出的亚洲入海沙量减少值(7 t/a)的 2 倍,这也说明了另 2 篇文献至少在亚洲区域入海沙量估算是有较大偏差的。

4 结 语

全球河流入海沙量变化受到两个主要驱动力的影响,一是流域扰动导致输沙量的增加,这种扰动包括森林砍伐、毁林开荒、采矿、道路及基础设施建设等人类活动;另一是大坝建设、水土保持措施、河道采砂以及河流引水等人类活动,导致输沙量的降低。随着人类活动的影响越来越大,一方面流域扰动引起流域产沙量和河流输沙量增加,另一方面水库拦沙等措施导致河流最终入海沙量降低。本文通过对全球河流入海沙量的研究进行综述,有如下认识:①早期文献估算的全球河流入海沙量差异很大,近些年随着获取的河流输沙数据越来越全面,数值模拟技术的不断进步,估算出的入海沙量的数值日趋合理,大多集中在 120 亿~200 亿 t/a。②综合近年文献研究,人类活动影响前后的河流入海沙量宜分别按 190 亿 t/a 和 130 亿 t/a 考虑。③水库拦沙造成的入海沙量大幅减少,Walling<sup>[10]</sup>得出因水库拦沙造成的入海沙量减少值约为 240 亿 t/a,无水库拦沙的现代入海沙量约 366 亿 t/a,认为该数值是合理的,可以参考。

参考文献:

[ 1 ] 王兆印,刘成,余国安,等. 河流水沙生态综合管理 [M]. 北京:科学出版社,2014.

[ 2 ] WALLING D E. The impact of global change on erosion and sediment transport by rivers: current progress and future challenges[R]. Paris: UNESCO,2009.

[ 3 ] 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: 5-24.

[ 4 ] 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.

[ 5 ] 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 [J]. Journal of Sediment Research,2011(1): 70-75. (in Chinese))

[ 6 ] 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))

[ 7 ] 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 Zhaoying, 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))

[ 8 ] 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 Zhaoying, 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))

[ 9 ] MACKENZIE F T, GARRELS R M. Chemical mass balance between rivers and oceans[J]. American Journal of Science,1966,264: 507-524.

[ 10 ] WALLING D E. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers[J]. Geomorphology,2006, 79: 192-216.

[ 11 ] 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: 376-380.

[ 12 ] JAOSHVILI S. The rivers of the Black Sea[R]. Denmark: European Environment Agency,2002: 5-8.

[ 13 ] SYVITSKI J P M, KETTNER A. Sediment flux and anthropocene[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society,2011,369: 957-975.

[ 14 ] GLEICK P H. Water in Crisis: a guide to the world's freshwater resources [M]. New York: New York Oxford University Press,1993: 50-89.

[ 15 ] MILLIMAN J D, MEAD G L. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. Journal of Geology,1983,91: 1-21.

[ 16 ] STALLARD R. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: coupling weathering and erosion to carbon burial [J]. Global Biogeochemical Cycles,1998,12: 231-257.

[ 17 ] LUDWIG W, PROBST J L. A global modeling of the climatic, morphological and lithological sediment yield: global and regional perspectives [C]//Proceedings of the Exeter Symposium. Wallingford: IAHS Press,1996:21-28.

(下转第 190 页)

- regional analysis [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 9306.
- [60] YANG Zhifeng, MAO Xufeng, ZHAO Xu, et al. Ecological network analysis on global virtual water trade [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46 (3): 1796-1803.
- [61] MAO Xufeng, YANG Zhifeng. Ecological network analysis for virtual water trade system: a case study for the Baiyangdian Basin in Northern China [J]. Ecological Informatics, 2012, 10: 17-24.
- [62] MAO Xufeng, YUAN Donghai, Wei Xiaoyan, et al. Network analysis for a better water use configuration in the Baiyangdian Basin, China [J]. Sustainability, 2015, 7 (2): 1730-1741.
- [63] FRACASSO A. A gravity model of virtual water trade [J]. Ecological Economics, 2014, 108: 215-228.
- [64] ZHAO Xu, LIU Junguo, LIU Qingying, et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China [J]. Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America, 2015, 112(4): 1031-1035.
- [65] 马静, 汪党献, 来海亮, 等. 中国区域水足迹的估算[J]. 资源科学, 2005, 27(5): 96-100. (MA Jing, WANG Dangxian, LAI Hailiang, et al. Water footprint-an application in water resources research [J]. Resources Science, 2005, 27(5): 96-100. (in Chinese))
- [66] SEEKELL D A, D'ODORICO P, PACE M L. Virtual water transfers unlikely to redress inequality in global water use [J]. Environmental Research Letters, 2011, 6(2): 024017.
- [67] WEISS E B, SLOBODIAN L. Virtual water, water scarcity, and international trade law [J]. Journal of International Economic Law, 2014, 17(4): 717-737.
- [68] RIDOUTT B G, PFISTER S. A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity [J]. Global Environmental Change, 2010, 20: 113-120.
- [69] FENG Kuishuang, HUBACEK K, PFISTER S, et al. Virtual scarce water in China [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(14): 7704-7713.
- [70] KONDO K. Economic analysis of water resources in Japan: using factor decomposition analysis based on input-output tables [J]. Environmental Economics and Policy Studies, 2005, 7: 109-129.
- [71] 李晓惠, 张玲玲, 王宗志, 等. 江苏省用水演变驱动因素研究[J]. 水资源研究, 2014, 3(1): 50-56. (LI Xiaohui, ZHANG Lingling, WANG Zongzhi, et al. Study on driving factors of water utilization structure evolution in Jiangsu Province [J]. Journal of Water Resources Research, 2014, 3(1): 50-56. (in Chinese))
- [72] ZHAO Chunfu, CHEN Bin. Driving force analysis of the agricultural water footprint in China based on the LMDI method [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(21): 12723-12731.
- [73] 韩雪, 刘玉玉. 虚拟水研究进展[J]. 水利经济, 2012, 30(2): 17-21. (HAN Xue, LIU Yuyu. Research advances in virtual water [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2012, 30(2): 17-21. (in Chinese))
- [74] ZHI Yuan, YANG Zhifeng, YIN Xin'an, et al. Using grey water footprint to verify economic sectors' consumption of assimilative capacity in a river basin: model and a case study in the Haihe River Basin, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 92: 267-273.

(收稿日期: 2015-06-19 编辑: 刘晓艳)

(上接第 51 页)

- [18] SUNDBORG A. Significance of fluvial processes and sedimentation [C]//Proc Hydrology Symposium: Fluvial Processes and Sedimentation. Ottawa: Canada National Research Council, 1973: 1-10.
- [19] HOLEMAN J N. The sediment yield of major rivers of the world [J]. Water Resources Research, 1968, 4: 737-747.
- [20] GOLDBERG E D. The health of the oceans [M]. Paris: UNESCO, 1976.
- [21] MILLIMAN J D, FARNSWORTH K L. River discharge to the coastal ocean: a global synthesis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 23-46.
- [22] MILLIMAN J H, 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: 325-344.
- [23] SCHUMM S A. The disparity between present rates of denudation and orogeny [R]. Washington, D. C.: USGS, 1963: 1-13.
- [24] JANSEN J H L, Painter R. B. Predicting sediment yield from climate and topography [J]. Journal of Hydrology, 1974, 21: 371-380.
- [25] GILLULY J. Geologic contrasts between continents and ocean basins [J]. Geological Society of America Special Papers, 1955, 62: 7-18.
- [26] KUENEN P H. Marine geology [M]. Chichester: John Wiley and Sons, 1950.
- [27] FOURNIER F. Climat et erosion [M]. Paris: Presses Universitaires de France, 1960.
- [28] LIU C, HU C H, HE Y. Total sediment flux entering the sea from major Chinese rivers and rough estimation for global land-ocean sediment flux [C]//FUKUOKA S, NAKAGAWA H, SUMI T, et al. Advances in River Sediment Research. Florida: CRC Press, 2011: 201-202.

(收稿日期: 2015-06-30 编辑: 骆超)