

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2012.03021

黄河中游主要支流输沙量变化对黄河 入海泥沙通量的影响

张佳¹, 王厚杰^{1,2}, 张勇^{3,4}, 毕世普^{3,4}

(1 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;
3 国土资源部 海洋油气资源和环境地质重点实验室, 青岛 266071; 4 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要:以60年来(1950—2009年)黄河中游7条主要支流(皇甫川、窟野河、无定河、延河、北洛河、泾河、渭河)及支流最终汇入黄河的控制水文站——潼关站逐年的水沙资料为依据,分析各支流年均径流量、输沙量的变化趋势,同时,对7支流、潼关、利津输沙量的年际变化过程研究,进一步探讨了中游泥沙减少对黄河入海泥沙通量变化的决定性作用。结果表明:黄河主要支流的年径流量和年输沙量均呈显著的减少,与20世纪50—60年代相比,7条支流总的输沙量由13.5亿t/a剧减至最近10年的3.4亿t/a,减幅达75%。黄河中游输沙量的急剧减少是降水减少,特别是黄土高原地区水土保持措施的实施(梯田、林地、草地、淤地坝等),以及退耕还林后植被覆盖度大幅度提高等因素共同作用的结果;黄河中游主要支流输沙量的急剧减少是黄河入海泥沙通量锐减的决定性因素,而20世纪80年代以来,下游引水、耗水的急剧增加以及水库调蓄(淤积)加剧了黄河入海泥沙通量的快速减少。

关键词:主要支流;输沙量;入海泥沙通量;黄河中游

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2012)03-0021-10

河流是连接陆地和海洋的重要通道^[1],经由河流输送的泥沙及颗粒态物质占到整个陆源物质(包括P、Ni、Mn、Cr、Pb、Fe和Al)输移总量的90%以上^[2],从河流入海的有机碳的45%是以颗粒态输移的^[3],与细颗粒泥沙的输运行为有密切的关系。河流入海物质通量对近海生物地球化学循环有重要意义,其变化与流域内气候变化与人类活动又密切相关。因此,全球变化背景下,河流泥沙通量变化及其生物地球化学效应是目前地球科学领域的热点问题,是IGBP的两个核心计划JGOFS和LOICZ的中心议题。

黄河是我国第二大河,以高输沙量闻名,多年平均入海泥沙通量达10.8亿t。然而,自20世纪60年代以来,黄河入海水沙不断减少,主要受自然因素(如降雨量减少)和人类活动(如人类建坝、水土保持)共同影响,其中人类活动正日益成为影响黄河水沙变化的根本因素^[4-10]。很多研究者基于黄河干流主要水文站的长期连续观测资料,研究了人类活动

影响下黄河径流量和输沙量的变化过程^[7-8, 11-12]。同时,对入海泥沙量减少引发黄河三角洲地貌响应开展了大量的研究^[13-17]。近年来,也有学者对部分支流流域人类活动产生的影响进行了研究^[18-21],尤其是20世纪70年代以来,黄河河口镇-龙门区间的大规模、高强度水土流失治理使黄河河-龙区间径流和泥沙量显著减少^[22-23]。但迄今为止,黄河中游主要的支流产沙量的变化对于黄河入海泥沙通量的影响,尚未进行过系统的研究。

黄河三角洲蕴藏着丰富的油气、淡水、地热以及海洋生物、土地资源,其开发与治理的重要前提是维持黄河三角洲的稳定,而黄河泥沙是塑造三角洲的基础。三角洲的冲淤演变极易受河流入海泥沙量的影响^[24]。作为黄河主要产沙区的黄河中游地区(黄土高原区),其产沙量变化将直接影响黄河三角洲的发育演变过程。因此,研究黄河中游主要支流的输沙变化,对于理解黄河入海水沙变异、黄河三角洲演化以及人类活动强烈影响背景下的海岸带陆海相互作用有重要的科学意义和现实意义。

1 方法与资料

本文根据黄河中游7条主要支流(皇甫川、窟野河、无定河、延河、北洛河、泾河、渭河)及支流最终汇入黄河的控制水文站——潼关站60年来(1950—

基金项目:全球变化重大研究计划项目(2010CB951202);山东省杰出青年基金项目(2009JQ12);沿海经济带多目标区域地球化学系列图件编制(1210820508)

作者简介:张佳(1986—),女,硕士生,主要从事海岸带陆海相互作用研究。

收稿日期:2011-05-13;改回日期:2012-02-17。 张光威编辑

2009 年)的水沙资料,以潼关站水沙代表中游支流进入下游的水沙,利津站作为黄河流域入海控制站,利津站径流量、输沙量即为入海的径流量、泥沙通量,并根据黄河大型水库的修建年份以及前人研究结果^[4],将 1956—2009 年 54 年的水沙变化划分成 4 个阶段:1956—1968 年(13 年)、1969—1985 年(17 年)、1986—1999 年(14 年)和 2000—2009 年(10 年),据此系统分析了黄河中游主要支流水沙变化对下游河道冲淤及黄河入海泥沙通量的影响。

通过流域径流和泥沙浓度的数据,分析悬浮泥沙浓度与河流径流量的率定曲线(Rating Curve)关系^[25]。通常将这种幂次函数的关系表示为:

$$C_s = aQ^b \quad (1)$$

式中, C_s 是泥沙浓度(M/L^3 , kg/m^3), Q 是径流量(L^3/T , m^3/s), a 和 b 是率定曲线的系数和指数。系数 a 包含了把径流 Q 转化为泥沙浓度 C_s 的信息,同时也包含了在双对数曲线上的线性偏移量的信息。类似地,河流的含沙量 Q_s (M/T , kg/s)也与径流量有关系,并且有着相同的曲线系数:

$$Q_s = aQ^{b+1} \quad (2)$$

本文利用率定曲线,对各支流逐年水沙变化(径流量-输沙量)的特征进行分析。

本文采用的黄河干流水文泥沙数据来自黄河水利委员会 1950 年以来的连续观测资料,包括月和年均的水沙变化数据。中游主要的支流水沙资料(50 年代初至 80 年代末)来自地球系统科学数据共享平台——黄土高原数据共享运行服务中心(<http://loess.geodata.cn/prec/>)。90 年代以后的数据来自黄河泥沙公报 2000—2008 年。

2 自然地理背景

黄河中游是指内蒙古托克托县河口镇至河南郑州桃花峪间的黄河河段,河段内汇入较大支流 30 条,区间增加的水量占黄河水量的 42.5%,增加沙量占全黄河沙量的 92%,为黄河泥沙的主要来源地。黄河中游位于世界著名的黄土高原,黄土厚度大,分布广。自西北向东南,地表物质依次为风成沙、沙黄土、黄土和黏黄土。河段内支流绝大部分流经黄土丘陵沟壑区,水土流失严重,是黄河粗泥沙的主要来源,全河多年年均输沙量 16 亿 t 中有 9 亿 t 来源于此区间。从自然地理上看,黄河中游位于干旱气候向半湿润气候的过渡带,从西北向东南,年平均降水量由 250 mm 逐渐增大至 600 mm,而每年沙尘暴日数则逐渐由 25 天减少到 1 天^[26]。

黄河中游多沙粗沙区是由河口镇至龙门间支流如皇甫川、窟野河、无定河,以及北洛河、泾河及渭河(图 1)等流域构成,绝大部分位于河口镇至龙门之间。年降水量为 350~450 mm,多以暴雨形式集中发生,降雨侵蚀力较强。地表物质主要为沙黄土,黄土中 >0.05 mm 的粗颗粒含量为 31%~57%,抗蚀力很弱。因此,本区侵蚀强烈,粗泥沙的产沙量高,是黄河泥沙特别是粗泥沙的主要来源区。由于黄土层深厚,渗透性强,故径流深度较小,对黄河径流量的贡献相对较小。该区面积仅占全流域的 14.8%,1950—1989 年的实测年沙量为 9.08 亿 t/a,占同期花园口站输沙量的 80%。表 1 中所示为本文中研究的黄河中游主要的 7 条支流的基本情

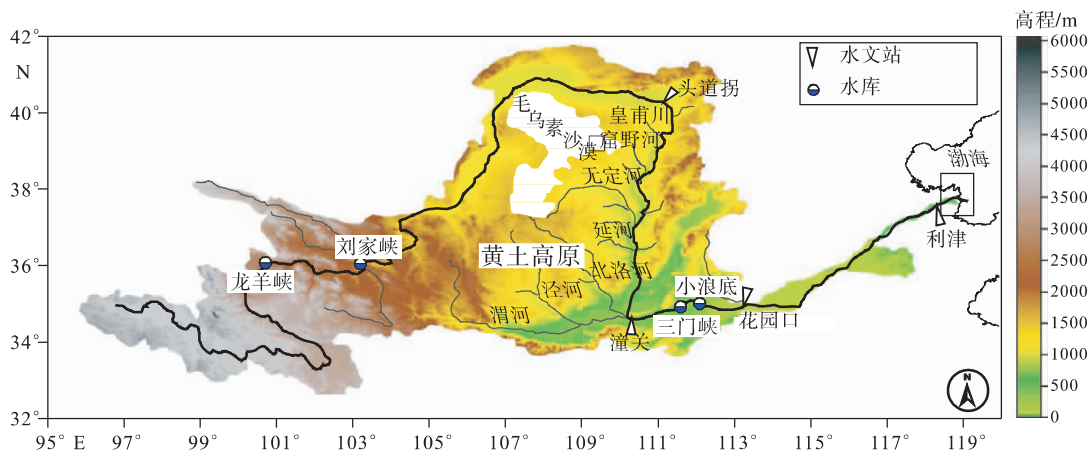


图 1 黄河中游主要 7 条支流分布

Fig. 1 Distributions of 7 tributaries in the middle reaches of the Huanghe basin

表 1 黄河中游主要支流概况

Table 1 Distributions of main tributaries in the middle reaches of the Huanghe basin

	流域面积/km ²	径流量/km ³	输沙量/10 ⁶ t
皇甫川	3 199	0.14(1.2%)	43.2(4.7%)
窟野河	8 645	0.56(4.9%)	86.7(9.5%)
无定河	29 662	1.13(10%)	111.9(12.2%)
延河	5 891	0.21(1.8%)	42.8(4.7%)
北洛河	25 154	0.81(7.2%)	76.5(8.4%)
泾河	43 216	1.62(14.3%)	225.6(24.7%)
渭河	106 498	6.86(60.6%)	327.7(35.8%)
总数	222 265	11.33	914.4
潼关站	/	34.4	1 065.0

况,包括流域面积、径流量和输沙量的多年平均值,以及其在 7 条支流中所占的比重。

3 主要支流输沙量的年际变化

将黄河中游主要的 7 条支流逐年的径流量和输沙量点绘于图 2 中。可以看到,7 条支流径流量和输沙量自 1970 年水土保持实施以来表现出明显的减小趋势,特别是 90 年代以来减幅更加突出,整体呈下降趋势。

根据公式(2): $Q_s = aQ^{b+1}$,以年径流量 Q 为横坐标,年输沙量 Q_s 为纵坐标,做 7 条支流及支流汇入黄河的控制站——潼关站的率定曲线(图 3)。非线性幂函数关系具有这样的特点:流量的较小变化可以引起输沙量的较大变化。从整体上看,北面 4 条支流相关性显著(皇甫川、窟野河、无定河、延河分别为 0.89、0.80、0.71、0.76),南面的 3 条支流相关性不显著(北洛河、泾河、渭河分别为 0.34、0.60、0.31)。天然状态下,流域来水来沙有着高阶非线性响应关系,即水沙之间符合幂函数的规律,一定量的水流携带一定量的泥沙。而实际情况是河流受到很多外部因素的干扰,如人类活动(建堤建坝,沿途引水引沙等)使得水沙关系发生变化^[27]。黄土高原南北支流率定曲线的整体差异表明,相比北方而言,南方支流受到的人类活动的干扰更为严重,导致了水沙关系偏离了原来的曲线关系。

近 10 年黄河中游,特别是河龙区间产流量、产沙量呈下降趋势,降水减少是其重要驱动因素,同时,人类大规模的水土保持措施(梯田、林地、草地和淤地坝)的实施,使得流域侵蚀强度降低,入黄水沙减少是造成黄河中游产沙量显著减少的重要原因。

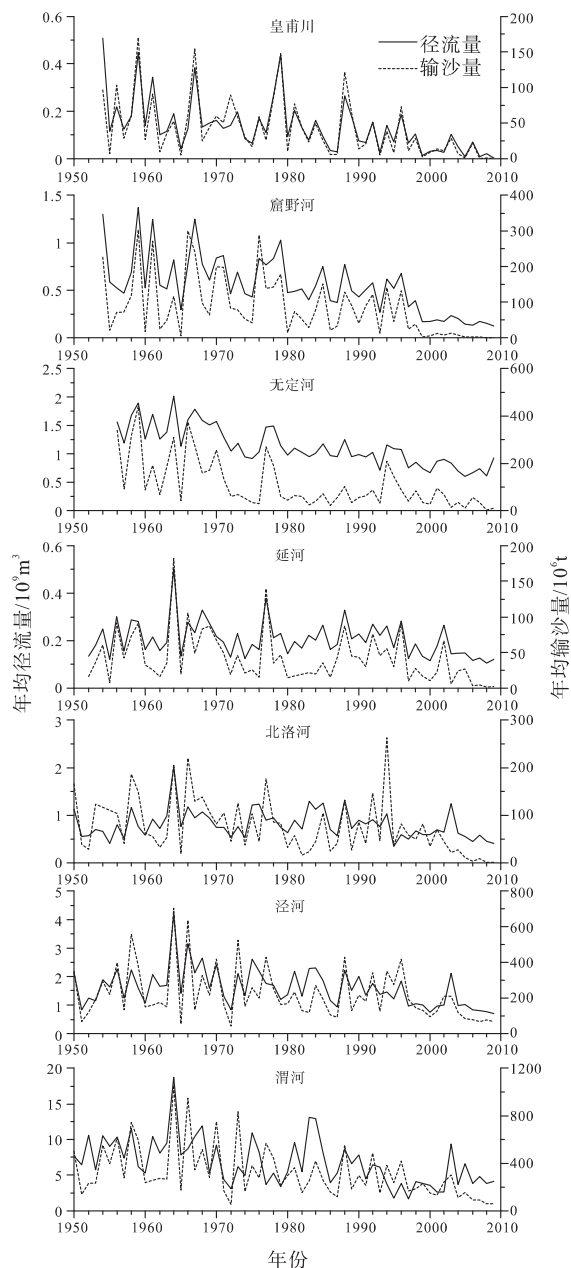


图 2 黄河中游主要 7 条支流年径流量和年输沙量的变化

Fig. 2 Changes in annual water discharge and sediment load of the seven main tributaries in the Huanghe middle reaches

除此之外,随着植被覆盖度的上升,区域蒸发将随之加剧,因此会造成地表径流的减少。研究发现,水土保持措施的实施增加了黄河中游河龙区间蒸发和蒸腾作用,降低了径流的可再生性^[28]。王浩等基于分布式水文模型对河龙区间水土保持对径流量的影响进行了模拟,结果表明水土保持减少径流量 $9.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,减幅 14.4 %^[28]。近 10 年来,在退耕还林工程的大规模建设下,河龙区植被覆盖恢复显著,这势

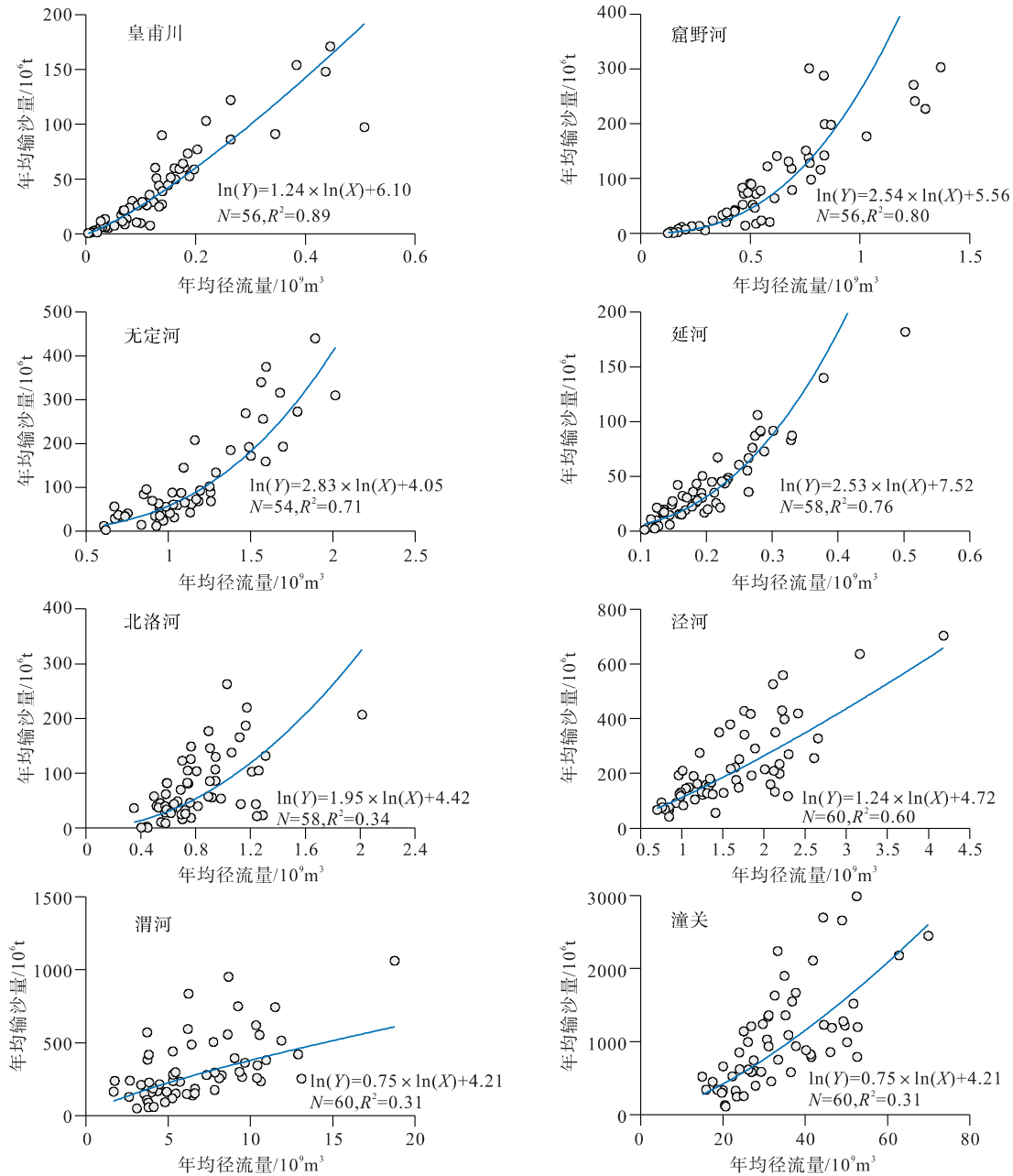


图3 黄河中游7条支流及潼关站率定曲线

Fig. 3 Rating curves derived from water discharge and sediment load data at the gauge stations of the seven tributaries and the Tongguan station

必会通过加强植被蒸发强度,进而减少了河龙区间近年来的径流量^[29]。植被 NDVI 上升最显著区域位于黄土丘陵沟壑区,即窟野河、无定河中下游以及延河中下游地区,这里也是黄河中游主要的侵蚀产沙区。从前后两个时期对比看,后期 NDVI 较前期提高 10% 以上和 20% 以上的区域分别占总面积的 72.5% 和 36.4%^[30]。这势必会降低区域侵蚀产沙强度,减少区间产沙量。因此,退耕还林工程所带来的植被覆盖显著提高也是近年黄河中游河龙区间产沙量显著减少的一个重要原因。

4 中游支流与下游水文站输沙量的逐年变化

黄河干流大型水库(三门峡、刘家峡、龙羊峡、小浪底)的作用下,黄河下游水沙变化在时间上呈明显的阶段性。其中,三门峡建成于 1960 年 9 月,刘家峡建成于 1968 年 10 月,龙羊峡建成于 1986 年 10 月,小浪底建成于 1999 年 10 月。参考前人的研究,

并利用收集的支流水文泥沙数据,将 1956—2009 年(54 年)划分为以下 4 个阶段(表 2):

对 4 个阶段的北 4 支流、南 3 支流、7 支流、潼关站、花园口和利津 6 个项目年均径流量和输沙量进行对比(表 2)。以第一阶段的年均径流量和输沙量为背景值(100%),将其后各阶段与其比较。从表 2 和图 4 中可以清楚地看出,北 4 支流、南 3 支流、7 支流、潼关站、花园口和利津站年均径流量和年均输沙量逐阶段同步减少;而在大型水库修建的年份(1960、1968、1986、1999 年),受其控制的各站年均径流量和输沙量均急剧减少,反映了大型水库下闸蓄水对黄河水沙输运有显著的影响;小浪底水库建成后的 10 年间,黄河年均入海水沙量仅为 1956—1968 年的 28%和 11%。

第一阶段内 7 支流的年均径流量(15.51 km³/a)占到潼关站(45.33 km³/a)的 34%,利津站(49.81)的 31%。年均输沙量(13.78×10⁸ t/a)占潼关站(16.47×10⁸ t/a)的 84%,是利津站(12.22)的 113%。到第四阶段,7 支流的年均径流量(6.93 km³/a)占到潼关站(21.04 km³/a)的 33%,利津站(14.09 km³/a)的 49%。年均输沙量(3.41×10⁸ t/a)占潼关站(3.12×10⁸ t/a)的 109%,是利津站

(1.36×10⁸ t/a)的 251%。尽管随着时间的推移,6 个项目的径流量和输沙量都在显著减少,但 7 条支流的产流产沙量对下游利津站的贡献程度呈现大幅度增加(图 5),这说明黄河中游支流的水沙变化趋势对黄河下游乃至入海水沙通量起到决定性作用。

5 下游河道冲淤变化与中游支流来沙量的关系

花园口、利津站 1950—2009 年逐月经流量和输沙量变化过程如图 6 所示。以干流主要水库修建年份为界限,对比两站 1950—1968、1969—1985、1986—1999 年的月均径流量、输沙量,以及 2000—2009 年逐年的月均径流量、输沙量。

将花园口、利津站 1950—2009 年逐月经流量和输沙量相减,由两站间的输沙增减粗略反映下游河道的冲淤,1950—2009 年黄河下游冲淤情况如图 7(蓝色)。将两站对应逐年的月均径流量、输沙量相减(HYK-LJ,蓝色:正值表明沿程淤积;负值表明沿程冲刷。红色:正值表明流量沿程减少;负值表明流量沿程增加)。

表 2 黄河中游主要支流及下游水文站各阶段年均径流量和输沙量

Table 2 Annual average discharge and sediment load of main tributaries in the middle reaches and at the stations in the lower reaches of the Huanghe

阶段	第一阶段:1956—1968		第二阶段:1969—1985		第三阶段:1986—1999		第四阶段:2000—2009	
站名	年均径流量 /(km ³ /a)	比值 /%	年均径流量 /(km ³ /a)	比值 /%	年均径流量 /(km ³ /a)	比值 /%	年均径流量 /(km ³ /a)	比值 /%
北 4	2.74	100	2.18	80	1.74	63	1.11	40
南 3	12.77	100	9.70	76	7.04	55	5.82	46
7 支流	15.51	100	11.88	77	8.78	57	6.93	45
潼关站	45.33	100	37.30	82	26.28	58	21.04	46
花园口	50.83	100	40.79	80	27.65	54	23.16	46
利津	49.81	100	32.70	66	15.06	30	14.09	28
站名	年均输沙量 /(10 ⁸ t/a)	比值 /%	年均输沙量 /(10 ⁸ t/a)	比值 /%	年均输沙量 /(10 ⁸ t/a)	比值 /%	年均输沙量 /(10 ⁸ t/a)	比值 /%
北 4	4.80	100	2.99	62	2.18	45	0.68	14
南 3	8.98	100	6.50	72	5.73	64	2.73	30
7 支流	13.78	100	9.50	69	7.91	57	3.41	25
潼关站	16.47	100	11.30	69	7.77	47	3.12	19
花园口	13.49	100	10.82	80	6.84	51	1.03	8
利津	12.22	100	8.40	69	3.98	33	1.36	11

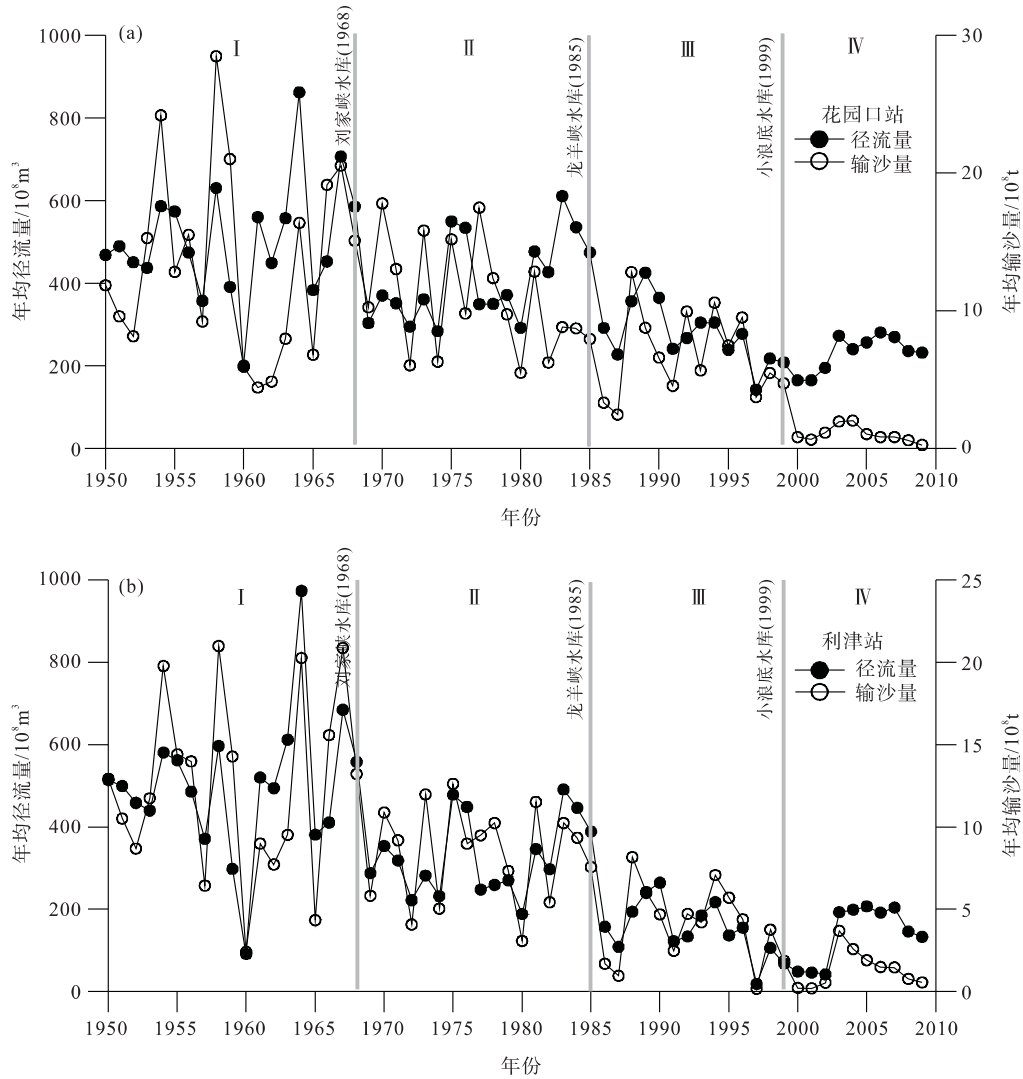


图 4 黄河中游花园口和利津 1950—2009 年均径流量和输沙量变化

Fig. 4 Variation of the annual average water discharge and sediment load at Huayuankou and Lijin between 1950—2009

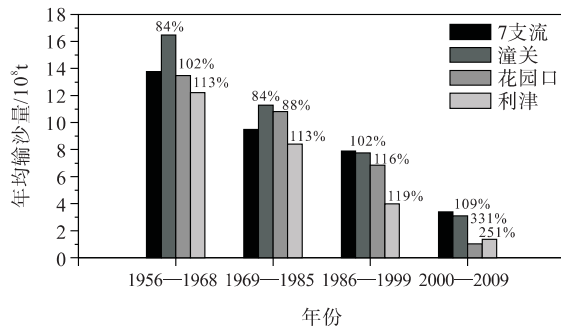


图 5 黄河中游 7 支流各阶段输沙量占潼关、花园口、利津的比例

Fig. 5 Proportion of 7 tributaries account for Tongguan, Huayuankou, Lijin at different stages

由年际阶段性变化来看,1950—1968 和 1969—1985 年花园口、利津之间以高淤积为主,同时也出现了少量的冲刷。这是由于三门峡水库最初运作的

1961—1964 年,下游河道普遍冲刷的缘故。1986—1999 年流量沿程显著减少,而沉积物表现为淤积。1999 年小浪底修建以后,下游沿程耗水量持续减少,而下游沉积物基本冲淤平衡,但从 2003 年 9 月以后出现了长时间的冲刷。从 2000—2009 年逐月的冲淤情况可以看出,自 2002 年以来,每年的七八月份出现了不同程度的冲刷现象,且每年的冲刷强度呈递减趋势。这是由于自 2002 年开始的黄河调水调沙试验期间排沙集中所导致的。分析表明,人类活动对黄河下游耗水量和沉积物的冲淤产生很大影响。

潼关是黄河中游支流最终汇入黄河的重要水文站,利津是黄河水沙入海的最后一个水文站,因而,通常用利津站的输沙量来估算黄河入海的泥沙通量。将黄河中游主要 7 条支流、潼关站、利津站 1950—2009 年的年均输沙量绘于图 8 中。

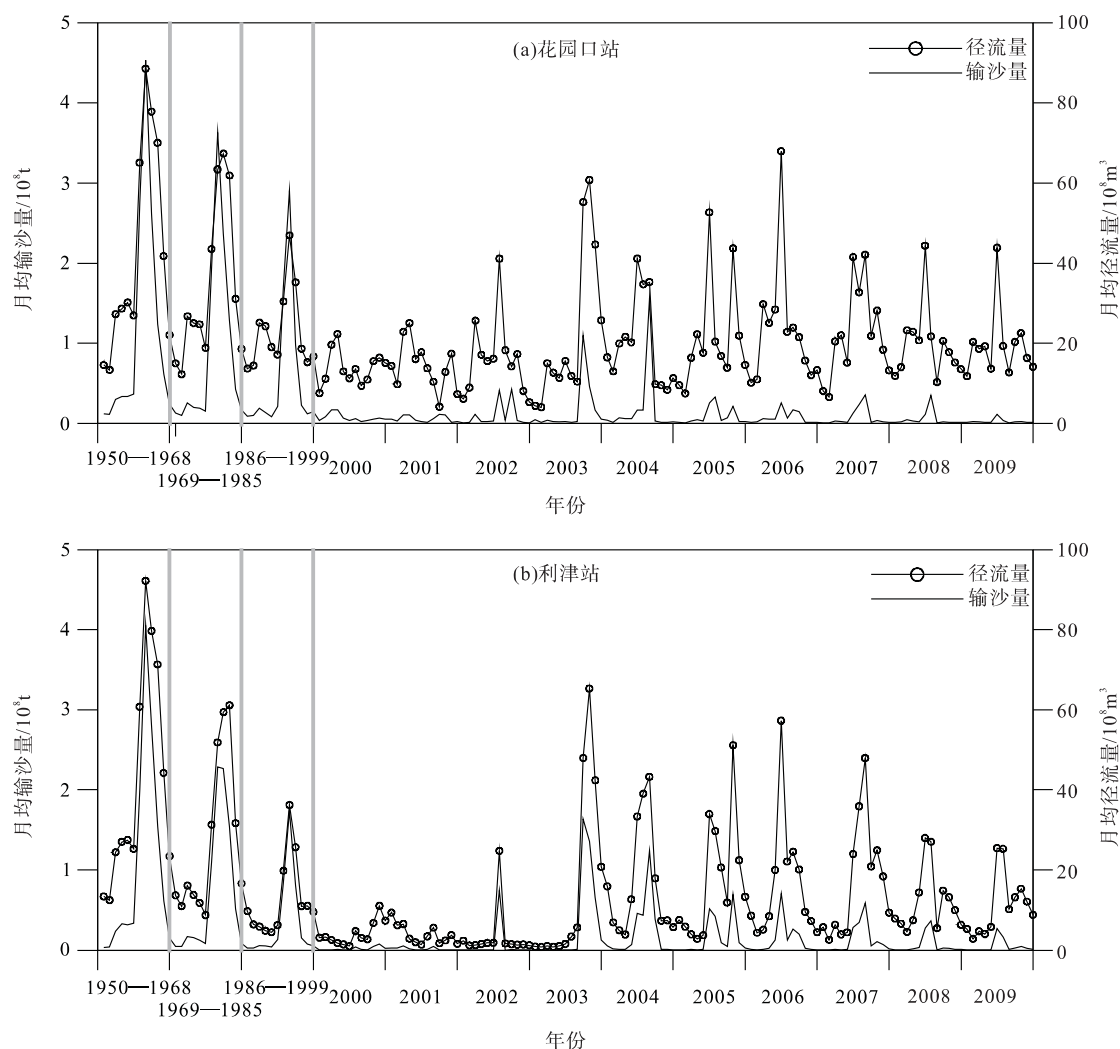


图 6 花园口、利津站 1950—2009 年逐月输沙量和径流量对比

Fig. 6 Monthly water discharge and sediment load at Huayuankou and Lijin stations between 1950—2009

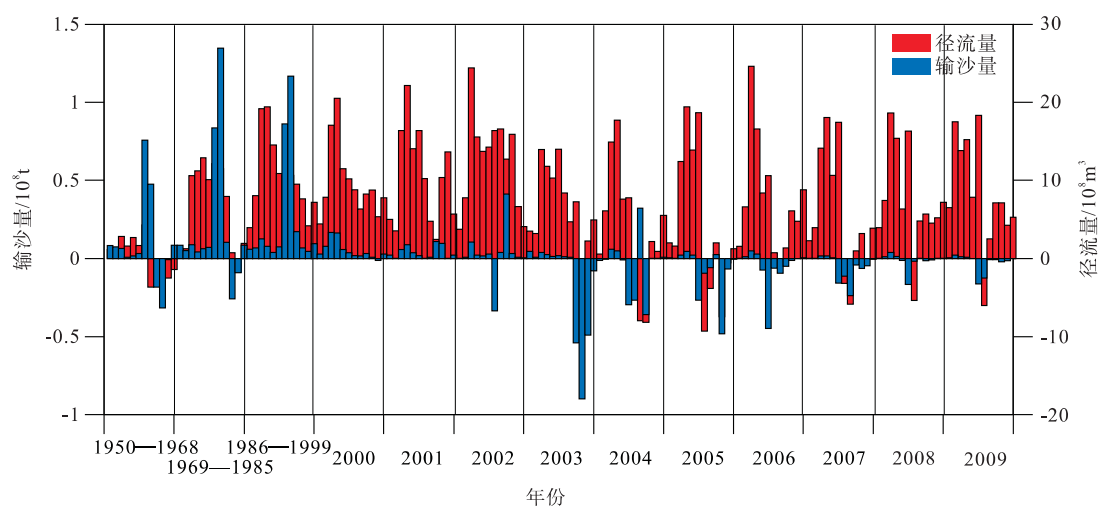


图 7 1950—2009 年黄河花园口站、利津站月均径流量和输沙量差(HYK-LJ)变化

红色(径流量),蓝色(输沙量),正值表示沿程淤积,负值表示沿程冲刷

Fig. 7 The difference of monthly water discharge and sediment load between Huayuankou and Lijin stations during 1950 to 2009

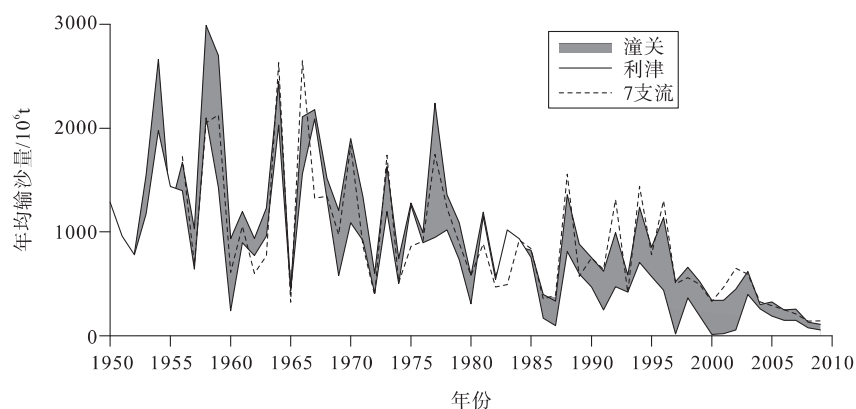


图 8 1950 年以来黄河中游主要支流、潼关站和利津站输沙量年际变化

Fig. 8 Annual variation of sediment load at 7 tributaries, Tongguan and Lijin since 1950

1960 年以前(即三门峡水库运作以前),潼关站的输沙量明显高于 7 条主要支流和利津,这是因为对潼关而言,除了 7 条支流的泥沙贡献外,黄河其他的支流也有不同程度的输沙贡献。潼关和利津之间输沙量的差距表明该时间段,下游河道以淤积为主。这与图 7 中 1960 年以前下游河道以淤积为主一致。

三门峡运作后的几年,7 支流、潼关、利津的输沙量急剧减少,且以利津减少幅度最大。1968 年刘家峡水库运作开始到 80 年代,7 条主要支流和潼关站的输沙量基本一致,这表明该时段内黄河的来沙量几乎全部来自于中游的主要 7 条支流。而与利津站之间的输沙量差表明该时段下游河道仍以淤积为主。

1986—1999 年,是水土保持逐见成效的时期,因而 7 支流、潼关、利津的输沙量整体呈下降趋势。7 条支流总的输沙量几乎与潼关站持平,潼关站与利津站之间输沙量差距拉大,这与该时间段内下游大规模的工农业引水密切相关。水库蓄水作用以及沿途用水量的增加使得下游出现了严重的断流(最为严重的是 1997 年),同时泥沙沿程淤积,该时段下游表现为明显的淤积(图 7)。

1999 年小浪底实施调水调沙以后,利津站的输沙量急剧减少,而由于水土保持的作用,黄河中游主要支流来沙量也继续减少。

如果将黄河潼关—利津河段作为系统整体来看,作为系统输入的中游黄土区主要支流输沙量在发生快速的减少,直接导致黄河入海泥沙通量剧减;而黄河下游的大型水库的运作、沿途的引水引沙加剧了黄河入海泥沙通量的减少。

6 结论

(1)黄河中游 7 条主要支流年际输沙量呈现急

剧减少的趋势。与 20 世纪 50—60 年代相比,最近 10 年的减幅高达 75%,仅为 3.4 亿 t/a。支流泥沙减少的原因分为自然因素和人类因素,在自然因素中,流域降雨量的变化对支流产水产沙起到决定性作用,在人类因素中,黄河中游支流流域内水土保持措施(梯田+淤地坝)的实施为主要原因。此外,流域沿途引水引沙灌溉农田,退耕还林政策的实施,以及通过植树造林使植被覆盖率提高等也在一定程度上起到了减少支流产水产沙的作用。

(2)7 条支流南北差异显著,北面 4 条支流率定曲线的拟合程度要高于南面 3 条支流。这是因为相比较而言,南面 3 条支流受到的人类活动(包括水土保持,植被覆盖等)影响更大。

(3)7 条支流的来沙量对黄河下游河道冲淤变化的影响作用在增强,并对黄河入海泥沙通量的变化起到了决定性作用,而 20 世纪 80 年代以来,下游引水、耗水的急剧增加,水库调蓄加剧了入海泥沙通量的快速减少。

参考文献 (References)

- [1] 钱宁,周文浩. 黄河下游河床演变 [M]. 北京:科学出版社, 1965. [QIAN Ning, ZHOU Wenhao. The Evolution of Low Yellow River[M]. Beijing: Science Press, 1965.]
- [2] 崔树强. 黄河断流对黄河三角洲生态环境的影响 [J]. 海洋学报, 2002, 26(7): 42-46. [CUI Shuqiang. Influence of water discharge cut-off of Huanghe on environment of its delta[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 26(7): 42-46.]
- [3] 许炯心. 流域降水和人类活动对黄河入海泥沙通量的影响 [J]. 海洋学报, 2003, 25(5): 125-135. [XU Jiongxin. Sediment flux into the sea as influenced by the changing human activities and precipitation: example of the Huanghe River, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(5): 125-135.]
- [4] Wang H, Yang Z, 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(3-4): 331-354.
- [5] Yang Z S, Milliman J D, Galler J, et al. Yellow River's water and sediment discharge decreasing steadily [J]. *EosTransactions*, 1998, 79(48): 589-592.
- [6] Xu J. Implication of relationships among suspended sediment size, water discharge and suspended sediment concentration: the Yellow River basin, China [J]. *Catena*, 2002, 49(4): 289-307.
- [7] Xu J. The water fluxes of the Yellow River to the sea in the past 50 years, in response to climate change and human activities [J]. *Environmental Management*, 2005, 35(5): 620-631.
- [8] Wang H, Yang Z, Saito Y, et al. Interannual and seasonal variation of the Huanghe (Yellow River) water discharge over the past 50 years: Connections to impacts from ENSO events and dams [J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 50(3-4): 212-225.
- [9] Syvitski J P M, Smarty V R C J, Kettiner A J, et al. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean [J]. *Science*, 2005, 308(5720): 376.
- [10] 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]. *Journal of Geology*, 2007, 115(1): 1-19.
- [11] 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区 1997—2007 年的水沙变化趋势及其成因 [J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 2-7. [XU Jiongxin. Trend of sediment yield in the coarser sediment-producing Area in the middle Yellow River basin in the period 1997—2007 and the formative cause[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 2-7.]
- [12] Wang Z, Wu B, Wang G. Fluvial processes and morphological response in the Yellow and Weihe Rivers to closure and operation of Sanmenxia Dam [J]. *Geomorphology*, 2007, 91(1-2): 65-79.
- [13] 赵光磊. 黄河水沙变化和三角洲岸滩侵蚀态势 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004. [ZHAO Guanglei. The change of water and sand in Yellow River, and the coast corrosion trend in delta[D]. Qingdao: The Ocean University of China, 2004.]
- [14] 吴世迎, 石学法, 刘焱光. 黄河断流对三角洲油气开发环境的影响 [J]. *海岸工程*, 2000, 19(4): 33-40. [WU Shiying, SHI Xuefa, LIU Yanguang. Influence of the Yellow River zero flow on delta petroleum and gas exploitation environment [J]. *Coastal Engineering*, 2000, 19(4): 33-40.]
- [15] 王兆印, 程东升, 刘成. 人类活动对典型三角洲演变的影响——黄河和海河三角洲[J]. *中国三峡建设*, 2007, 64-71. [WANG Zhaoyin, CHEN Dongsheng, LIU Cheng. The influence of human activities on the evolution of typical delta-Huanghe and Haihe delta[J]. *China Three Gorges*, 2007, 64-71.]
- [16] 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.]
- [17] 刘勇胜. 黄河入海水沙通量变化规律与三角洲演变关系 [D]. 上海: 华东师范大学, 2006. [LIU Yongsheng. Variations in the water and sediment fluxes entering the sea and their relation to the evolution of the Yellow River delta[D]. Shanghai: East China Normal University, 2006.]
- [18] 高航, 姚文艺, 张晓华. 黄河上中游近期水沙变化分析 [J]. *华北水利水电学院学报*, 2009, 30(5): 8-12. [GAO Hang, YAO Wenyi, ZHANG Xiaohua. Analysis on short-term variation of runoff and sediment load in the upper and middle reaches of Yellow River[J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2009, 30(5): 8-12.]
- [19] 杨新, 延军平, 刘宝元. 无定河年径流量变化特征及人为驱动力分析 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(6): 637-642. [YANG Xin, YAN Junping, LIU Baoyuan. The analysis on the change characteristics and driving forces of wudinghe river runoff[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(6): 637-642.]
- [20] 张守红, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 降雨和水保措施对无定河流域径流和产沙量影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(4): 161-168. [ZHANG Shouhong, LIU Shuxia, MO Xingguo, et al. Impacts of precipitation variation and soil and water conservation measures on runoff and sediment yield in the Wuding River Basin, middle reaches of the Yellow River[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(4): 161-168.]
- [21] 王宏, 秦百顺, 马勇, 等. 渭河流域水土保持措施减水减沙作用分析 [J]. *人民黄河*, 2001, 23(2): 18-20. [WANG Hong, QIN Baishun, MA Yong, et al. The analysis of soil and water conservation at Wuding River[J]. *Yellow River*, 2001, 23(2): 18-20.]
- [22] 饶素秋, 霍世青, 薛建国, 等. 黄河上中游水沙变化特点分析及未来趋势展望 [J]. *泥沙研究*, 2001, (2): 74-77. [RAO Suqiu, HUO Shiqing, XUE Jianguo. Analysis on the characteristics of runoff and sediment and the outlook of their tendency in the future in the upper and middle Yellow River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2001, (2): 74-77.]
- [23] 穆兴民. 黄土高原水土保持对河川径流及土壤水文的影响 [D]. 西北农林科技大学, 2002. [MU Xingmin. Impacts of soil water conservation on river flow and soil-hydrology on the Loess Plateau[D]. Northwest A&F University, 2002.]
- [24] CHEN X, ZONG Y. Coastal erosion along the Changjiang deltaic shoreline, China: history and prospective [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 46(5): 733-742.
- [25] Syvitski J P M, Burrell D C, Skei J M. Fjords: Processes and Products[M]. Spring-Verlag, New York, NY, 1987.
- [26] 许炯心. 黄河中游支流悬移质粒度与含沙量、流量间的复杂关系 [J]. *地理研究*, 2003, 22(1): 39-48. [XU Jiongxin. Complicated relationships between suspended sediment grain-size, water discharge and sediment concentration in tributaries

- of middle Yellow River[J]. Geographical Research, 2003, 22(1): 39-48.]
- [27] Hu B, Wang H, Yang Z, et al. Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang (Yangtze River) basin and their implications [J]. Quaternary International, 2009, 1-10.
- [28] 许炯心. 黄河流域河口镇至龙门区间的径流可再生性变化及其影响因素 [J]. 自然科学进展, 2004, 14(7): 787-791. [XU Jiongxin. The renewable capability changes of water discharge and its impacts between Hekouzheng and Longmen in Huanghe basin[J]. Natural Science Process, 2004, 14(7): 787-791.]
- [29] 王浩, 杨爱民, 周祖昊, 等. 基于分布式水文模型的水土保持水文水资源效应研究 [J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(4): 6-10. [WANG Hao, YANG Aimin, ZHOU Zuhao, et al. Studies on effect of soil and water conservation on hydrology and water resources based on distributed hydrological model [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(4): 6-10.]
- [30] 信忠保, 余新晓, 甘敬, 等. 黄河中游河龙区间植被覆盖变化与径流输沙关系研究 [J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 1-7. [XIN Zhongbao, YU Xinxiao, GAN Jin. Vegetation restoration and its effects on runoff and sediment yield in hekouzheng-Longmen Section of the middle reaches of Yellow River[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(5): 1-7.]

VARIATION OF SEDIMENT LOAD AT THE MAJOR TRIBUTARIES IN THE MIDDLE REACHES OF YELLOW RIVER AND ITS IMPACTS ON THE SEDIMENT FLUX TO THE SEA

ZHANG Jia¹, WANG Houjie^{1,2}, ZHANG Yong^{3,4}, BI Shipu^{3,4}

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100;

2 Key Lab of Submarine Geoscience and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100;

3 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071;

4 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071)

Abstract: The loess plateau plays a critical role in the sediment budget of Huanghe River and its flux to the sea. Here in this paper, we studied the variations in annual water discharge and sediment load in seven main tributaries in the middle reach of the Huanghe River. Annual water and sediment data have been acquired from seven major hydrographic stations for 7 tributaries (Huangfuchuan River, Kuyehe River, Wudinghe River, Yanhe River, Beiluohu River, Jinghe River and Weihe River) and the Tongguan Station in the middle reach of the Huanghe River in 1950-2009. Besides, we studied the annual sediment load of the seven major tributaries and several hydrological stations in the mainstream (Tongguan and Lijin). The results indicate that the annual water discharge and sediment load decreased sharply over the past 60 years, the total sediment loads have dropped from 13.5×10^8 t/a in 1950s-1960s to only 3.4×10^8 t/a in 2000-2009, with a reduction of about 75%. Time series data of sediment loads from the major tributaries and Lijin station indicate that tributaries in the loess plateau played a dominant role in the decrease in Huanghe sediment flux to the sea, while the rapid increases in water consumption and redistribution in the low reaches since the 1980s accelerated the reduction of sediment flux to the sea.

Key words: major tributaries; sediment yield; sediment flux to the sea; middle reach of Huanghe