

# 近60年黄河水沙变化过程及其对三角洲的影响

彭俊, 陈沈良

(华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 为了了解黄河水沙变化过程及其对三角洲的影响, 本文运用统计学方法对利津站1950-2007年的水沙数据以及流域人类活动引起的减水减沙数据进行了分析, 结果表明: 1950-2007年黄河入海水沙量明显减少, 且年际波动比较剧烈。人类活动的影响是入海水沙量减少的主要原因。1950-2005年, 水土保持年均减水减沙量分别为20.2亿 m<sup>3</sup>和3.41亿 t; 工农业年均引水引沙量分别为251.64亿 m<sup>3</sup>和2.42亿 t; 干流库区拦沙量, 三门峡水库1960-2007年年均淤积1.45亿 m<sup>3</sup>, 小浪底水库1997-2007年年均淤积2.398亿 m<sup>3</sup>。相比于花园口站的水沙量, 下游河道以淤积为主, 入海水沙量减少; 以冲刷为主, 入海水沙量增加。当不同时期入海总水沙量比为0.0257 t/m<sup>3</sup>左右时, 河口附近岸线延伸, 三角洲面积增加。但近年来入海水沙量的急剧减少, 特别是黄河口清8出汉以后, 整个黄河三角洲由淤积转变为侵蚀, 冲淤状态发生逆转的时间约在1997年。

**关键词:** 黄河; 水沙; 人类活动; 三角洲

河流入海水沙是河口地貌塑造、岸滩演变和近岸泥沙输移的主要影响因子, 也对海岸带环境和河口附近的沉积体系造成深远的影响, 河流入海泥沙变化已成为全球共同关注的问题<sup>[1-7]</sup>。近几十年来, 气候变化和人类活动对河流入海水沙的影响日趋严重, 流域内水库或大坝建设对径流的调节和对泥沙的拦蓄, 使入海水沙减少, 河口三角洲因此延伸减缓或遭受侵蚀, 给近岸工程和人类居住空间带来不利的影响<sup>[8-11]</sup>。黄河是世界上著名的多沙河流, 据1919-1960年资料, 黄河输送入海的泥沙量约 $1.2 \times 10^9$  t/a<sup>[12]</sup>, 而且黄河具有水少沙多、水沙异源的特点, 使黄河易遭水沙灾害。经过几十年的治理, 虽然取得了显著效果, 但是人类活动的干预及其对流域的开发, 使其自然演变规律受到破坏, 水沙过程发生了重大变化, 下游出现功能性断流、河槽萎缩、河床抬高和河口三角洲蚀退等问题。针对这些问题, 本文通过分析人类活动形成的各种减水减沙量(水土保持、引水引沙、水库建设)以及下游河道的演变过程, 力图说明黄河水沙的变化过程及对三角洲的影响, 为流域水沙的管理以及建立人与自然和谐的水沙利用模式提供参考。

## 1 流域概况与资料来源

黄河发源于青海省巴颜喀拉山北麓, 流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、

收稿日期: 2009-06-06; 修订日期: 2009-07-27

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目(200805063); 河口海岸学国家重点实验室科研业务课题(2008KYYW06); 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室开放基金(MASEG200608) [Foundation: Special Expenses Program of Scientific Research in Marine Commonweal Industry, No.200805063; Scientific Research Program of State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, No.2008KYYW06; Open-end Foundation of State Oceanic Administration Key laboratory of Marine Sedimentology & Environmental Geology, No.MASEG200608]

作者简介: 彭俊(1981-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事海洋地质和沉积动力学研究。

E-mail: ipengjun2010@sina.com

通讯作者: 陈沈良, 男, 博导, 教授, 主要从事河口海岸动力地貌和沉积动力学研究。E-mail: slchen@sklec.ecnu.edu.cn.

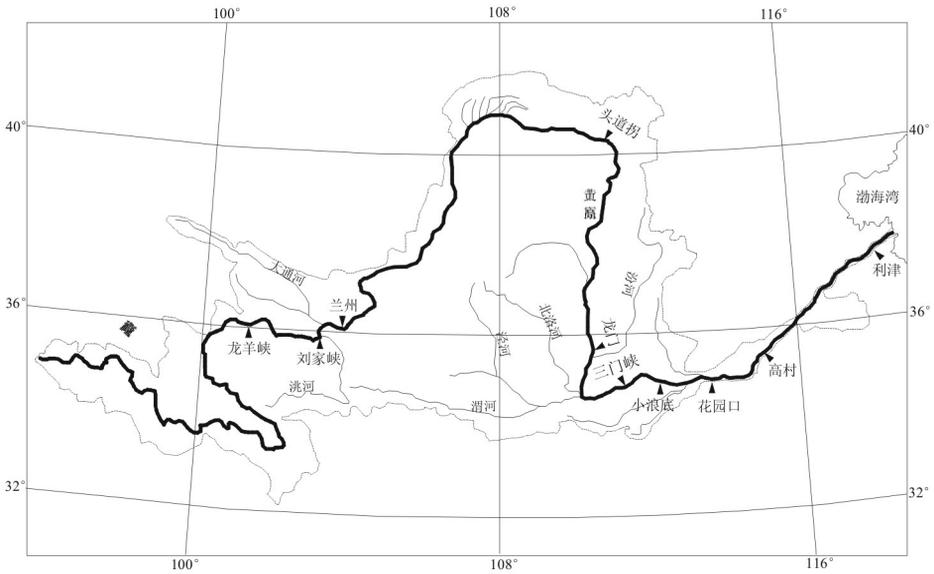


图1 黄河流域示意图

Fig. 1 Sketch map of Yellow River Basin

陕西、河南、山东9省(区),在山东垦利注入渤海(图1)。流域面积752,443 km<sup>2</sup>(不包括鄂尔多斯高原的内流区面积),干流全长5,464 km。源头—头道拐为上游,头道拐—花园口为中游,花园口以下为下游,利津站为河流入海水文控制站。流域主要支流有湟水、洮河、皇甫川、窟野河、渭河、泾河、汾河、北洛河、伊洛河和沁河等,主要水库有龙羊峡、刘家峡、三门峡和小浪底。

本文选取利津站1950-2007年的径流量和输沙量数据进行分析,数据来源于中国水利部发布的《中国河流泥沙公报》;降水量数据来源于国家气象局气象信息中心和《中国水资源公报》,时间序列为1956-2000年;水土保持减水减沙量和工农业引水引沙量数据引自参考文献<sup>[13]</sup>;时间序列为1950-2005年;干流库区拦沙量和下游河道冲淤量数据查阅于《黄河泥沙公报》,其中下游河道冲淤量数据的时间序列为1952-2007年。

## 2 入海水沙的变化

1950-2007年,黄河利津站入海水沙量呈明显减少的趋势(图2),多年平均径流量为316亿 m<sup>3</sup>,多年平均输沙量为7.68亿 t。由于水库建设拦蓄泥沙和调平流量,根据干流上龙羊峡、刘家峡、三门峡和小浪底4座主要水库的建设时间,把水沙变化过程分为5个阶段:1950-1959年、1960-1968年、1969-1985年、1986-1999年和2000-2007年。不同阶段年均入海水量分别为480.5亿 m<sup>3</sup>,524.9亿 m<sup>3</sup>,327.0亿 m<sup>3</sup>,156.9亿 m<sup>3</sup>和133.3亿 m<sup>3</sup>;年均入海沙量分别为13.19亿 t,11.44亿 t,8.40亿 t,4.14亿 t和1.56亿 t。1950-1959年可被视为流域水沙的“天然期”,以后不同阶段入海水沙的减少量明显,尤其是泥沙的减少量,1999-2007年年均入海水量为“天然期”的27.7%,

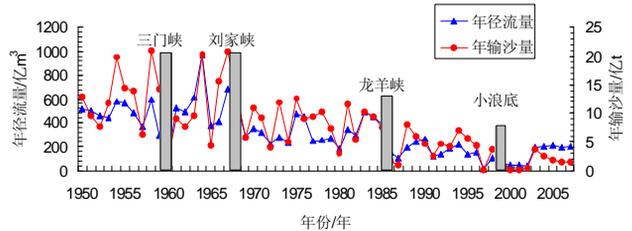


图2 利津站入海水沙量的变化过程

Fig. 2 The variation process of water and sediment discharge into sea at Lijin

而年均入海沙量仅为“天然期”的11.8%。

可以利用时间序列的变差系数 ( $C_v$ ) 和偏差系数 ( $C_s$ ) 评价黄河入海水沙的时间分布不均匀性。计算公式<sup>[14]</sup>:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i}{\bar{x}} - 1\right)^2}{N-1}}$$

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i}{\bar{x}} - 1\right)^3}{(N-3)C_v^3}$$

式中,  $x_i$ 、 $\bar{x}$  和  $N$  分别为年径流量 (年输沙量)、多年平均径流量 (输沙量) 和时间序列长度。 $C_v$  值越大, 水沙年际变化越剧烈, 不利于水沙资源的合理开发。 $C_s$  表示特征分布不对称情况,  $C_s = 0$  为密度曲线对称。

计算结果显示, 利津站径流量的变差系数  $C_v$  值为 0.6, 说明黄河径流量年际波动比较剧烈, 输沙量的变差系数  $C_v$  值为 0.71, 相对于径流量, 输沙量的年际变化更加剧烈, 说明流域人类活动对泥沙的影响更加深远。径流量和输沙量的  $C_s$  值分别为 0.81 和 0.74, 表明水沙的特征分布不对称, 与水沙量一直呈减少的趋势是等同的。

流域水沙量的减少, 也使利津站以上的下游河段出现功能性断流 (图 3), 尤其是上世纪 90 年代以后, 断流天数和断流长度都快速增加, 特别是 1997 年, 下游河段断流天数长达 226 天, 断流长度 706 km。黄河入海水沙的减少和下游河道的功能性断流, 都是由于人类活动对流域自然环境的影响而造成的。

### 3 黄河入海水沙量变化的影响因素

#### 3.1 气候变化

降水变化会导致流域下垫面的改变, 从而引起径流量的变化; 而流域的水量和沙量, 是流域降水和下垫面结合的产物, 它们之间具有函数关系。钱宁<sup>[15]</sup>计算流域产水量与产沙量之间的关系:  $G = K \cdot Q^m$  ( $G$  为输沙量,  $Q$  为径流量,  $m$  为大于 1 的指数,  $K$  为来沙系数)。

1956-2000 年, 黄河利津站降水量存在着由丰向枯的变化趋势, 天然径流量与降水量保持较好的同步性 (图 4)。说明降水量的减少引起天然径流量的减少, 是实测径流量减少的重要原因。20 世纪 70 年代以后, 实测径流量的减少更加显著, 这是工农业引水量增加的结果。由于径流是泥沙的搬载体, 实测径流量的减少必然会使输沙量减少。回归分析表明, 利津站径流量 ( $Q$ ) - 输沙量 ( $G$ ) 存在着明显的相关关系 ( $G = 0.0042 \times Q^{1.2886}$ ,  $R^2 = 0.8048$ )。因此本文认为气候变化是入海水沙量年际波动的重要影响因素, 而入海水沙量的减少应该主要是由人类活动造成的。

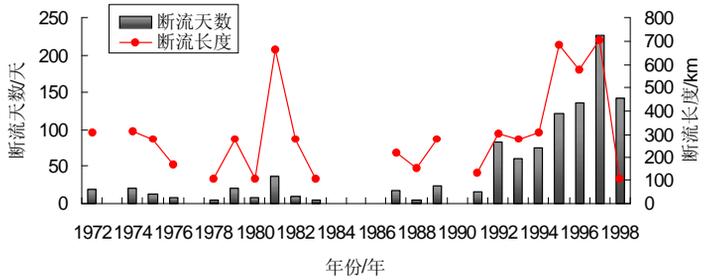


图3 黄河下游河段断流情况

Fig. 3 Flows turnout in the lower reaches of the Yellow River

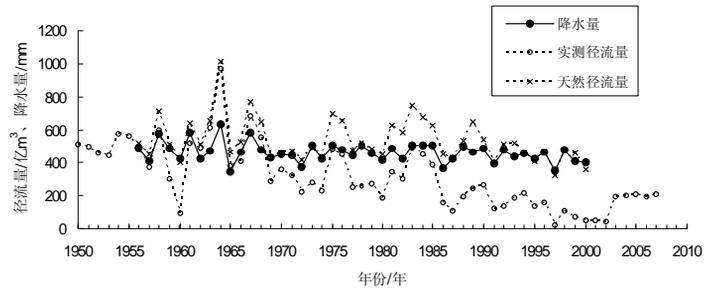


图4 利津站降水量与径流量的变化过程

Fig. 4 The variation process of precipitation and runoff at Lijin

表1 工农业引水引沙量

Tab. 1 Usage of water and sediment for industry and agriculture

时间	1950-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2005	1950-2005
工农业引水量/亿 m <sup>3</sup>	153.95	166.12	230.92	305.42	316.46	422.3	251.64
工农业引沙量/亿 t	2.13	1.78	3.28	2.81	2.29	2.04	2.42

表2 水土保持减水减沙量

Tab. 2 Reduction of water and sediment by means of water and soil conservation

时间	1950-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2005	1950-2005
水土保持减水量/亿 m <sup>3</sup>	7.28	9.82	21.93	29.35	29.04	27.36	20.20
水土保持减沙量/亿 t	0.32	1.51	2.87	4.01	4.57	4.35	2.81

### 3.2 工农业引水引沙量

随着沿黄生产水平的提高和经济的快速发展,工农业引水引沙量也急剧上升(表1)。1950-1959年黄河流域年均引水量仅153.95亿 m<sup>3</sup>,往后引水量逐渐增加,20世纪70年代开始增速明显,同期利津站实测径流量迅速减小(图4)。到1980-1989年,年均引水量增加到305.42亿 m<sup>3</sup>,比1950-1959年增加了151.47亿 m<sup>3</sup>;到2000-2005年,年均引水量增至422.3亿 m<sup>3</sup>,已占到同期黄河年均总水量的74%。由此可见,黄河入海水量的减少很大程度是由于工农业引水量的增加。在引水的同时必然会引走泥沙,年均引沙量1950-1959年为2.13亿 t,1970-1979年为3.28亿 t,2000-2005年为2.04亿 t。虽然从20世纪70年代开始,引水量快速增加,但引沙量并未随引水量的增加而增加。也就是说更多的泥沙在引水的过程中没有被引走,这相对增加了河流中泥沙的含量,含沙量的增加更容易产生淤积,从而抬高河床,使河道的行洪能力减弱。

### 3.3 水土保持减水减沙量

水土保持措施是通过改变地表微地形或覆盖条件等下垫面状况,从而影响流域的产流过程与侵蚀过程。20世纪60年代末在黄土高原地区,尤其是头道拐-龙门区间的粗沙多沙区开展大规模的水土保持工作,主要为梯田、林地、草地和淤地坝四大水土保持措施。截止2000年底,黄河中游黄土高原地区累计治理水土流失面积18万 km<sup>2</sup>。

1950-1959年,水土保持年均减水减沙量分别为7.28亿 m<sup>3</sup>和0.32亿 t(表2),1960-1969年,水土保持年均减水减沙量分别为9.82亿 m<sup>3</sup>和1.51亿 t。20世纪60年代末大规模实施水土保持措施后,年均减水减沙量明显增加。1970-1979年,年均减水量为21.93亿 m<sup>3</sup>,年均减沙量为2.87亿 t,比1960-1969年分别增加了12.11亿 m<sup>3</sup>和1.36亿 t。20世纪90年代,年均减水量增加到29.04亿 m<sup>3</sup>,年均减沙量增加到4.57亿 t,比1960-1969年分别增加了19.22亿 m<sup>3</sup>和3.06亿 t。1950-2005年,水土保持年均减水量20.2亿 m<sup>3</sup>,年均减沙量2.81亿 t。这些水土保持措施的全面实施,使流域侵蚀强度降低,入黄水沙减少,同时有助于改善下游河道的水沙分布状况。

### 3.4 干流库区拦沙量

黄河干流上的主要水库有刘家峡、龙羊峡、三门峡和小浪底。刘家峡和龙羊峡水库位于兰州上游,汛期拦蓄洪水,削平洪峰,非汛期泄水,调平水量分布,其影响主要是改变水量年内分配。当然,水库在调节水量的同时也使泥沙淤积在库内。1968-1997年刘家峡水库淤积15.47亿 m<sup>3</sup>,年均淤积为0.53亿 m<sup>3</sup>;1986-1997年龙羊峡水库淤积1.796亿 m<sup>3</sup>,年均淤积0.16亿 m<sup>3</sup>。两库的淤积强度都不大,对入海沙量的影响有限。而三门峡和小浪底水库位于黄河中游下段,不仅对上游来水来沙起着主要的调节作用,而且对下游河道的演变和行洪输沙能力以及入海水沙的变化产生影响。

**3.4.1 三门峡水库** 三门峡水库控制流域面积68.8万 km<sup>2</sup>,1960年9月开始蓄水运用,先后经历了1960-1964年“蓄水拦沙期”、1965-1973年“滞洪排沙期”和1974年以来“蓄清排浑期”三种运用方式(表3)。

表3 三门峡水库不同时期冲淤量(单位:亿 m<sup>3</sup>)Tab. 3 Siltation and erosion in different periods in Sanmenxia Reservoir (unit: 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)

时间	大坝—黄淤 41	黄淤 41-黄淤 68	渭拦 1(4)-渭淤 37	洛淤 1-洛淤 21	总冲淤量
1960-1964	35.750	6.342	1.845	0.481	44.418
1965-1973	-9.225	12.030	8.477	0.800	12.082
1974-1986	0.554	0.689	-0.235	0.142	1.151
1987-1995	1.452	5.043	2.979	1.240	10.714
1996-2000	0.899	0.386	0.269	0.238	1.792
2001	-0.095	0.309	0.088	0.161	0.463
2002	0.032	0.291	0.217	0.009	0.548
2003	-1.380	-0.270	-0.170	-0.120	-1.940
2004	0.490	-0.127	0.059	-0.004	0.417
2005	-0.688	-0.343	-0.187	0.021	-1.197
2006	0.155	-0.623	0.140	0.002	-0.326
2007	0.196	-0.008	-0.148	0.008	0.048
1960-2007	28.139	23.719	13.333	2.979	68.170

注:大坝—黄淤 41 断面:三门峡—潼关河段;黄淤 41-68 断面:小北干流河段;洛淤 1-洛淤 21:北洛河自上而下断面;渭拦 1-渭淤 37:渭河断面从上而下分渭拦 11、12、渭拦 1-10 和渭淤 1-37 布设,2004 年开始,渭河冲淤计算从渭拦 4 开始 - 表示冲刷

1960-1964 年“蓄水拦沙期”淤积严重,库内淤积泥沙 44.42 亿 m<sup>3</sup>, 年均淤积量 11.1 亿 m<sup>3</sup>, 其中 42.09 亿 m<sup>3</sup> 淤积在干流库段(大坝—黄淤 68)。1965-1973 年改为“滞洪排沙”, 库内淤积泥沙 12.08 亿 m<sup>3</sup>, 年均淤积量 1.34 亿 m<sup>3</sup>, 比“蓄水拦沙期”的淤积程度大大减轻; 1974 年改为“蓄清排浑”后, 1974-1986 年库

表4 小浪底水库不同时期淤积量(单位:亿 m<sup>3</sup>)

Tab. 4 Siltation in different periods in Xiaolangdi Reservoir

时间	大坝~黄河 20	黄河 20~黄河 38	黄河 38~黄河 56	总淤积量
1997.10 - 2000.05	0.588	0.039	0.006	0.633
2000.05 - 2000.11	1.890	0.870	0.799	3.559
2001	2.678	0.655	-0.362	2.971
2002	0.707	1.520	-0.116	2.111
2003	0.152	2.028	2.704	4.884
2004	1.279	1.834	-1.939	1.174
2005	0.920	1.042	0.948	2.910
2006	2.162	1.845	-0.562	3.445
2007	1.852	0.201	0.239	2.292
1997.10 - 2007.10	12.228	10.034	1.717	23.979

注:黄河 20: 距离大坝 34.2 km; 黄河 38: 距离大坝 66.2 km; 黄河 56: 距离大坝 126.7 km - 表示冲刷

内仅淤积泥沙 1.15 亿 m<sup>3</sup>, 基本达到年内冲淤平衡。由于 1986 年龙羊峡水库下闸蓄水, 使汛期来水量减少, 而径流对泥沙输运又主要集中在洪水期, 加之 90 年代以来天然水量减少, 径流搬运力减弱使泥沙淤积增加。1987-1995 年库内淤积泥沙 10.71 亿 m<sup>3</sup>, 比“蓄清排浑”前期大大增加。1996-2000 年, 库内淤积泥沙 1.79 亿 m<sup>3</sup>, 淤积程度呈现减弱趋势。1960-2000 年的 40 年间, 库内共淤积泥沙 70.16 亿 m<sup>3</sup>, 年均淤积量 1.75 亿 m<sup>3</sup>, 其中 53.92 亿 m<sup>3</sup> 淤积在干流库段。2001-2007 年, 库内泥沙有冲有淤, 整体表现为冲刷, 年均冲刷量 0.28 亿 m<sup>3</sup>。1960-2007 年, 三门峡库内共淤积泥沙 68.17 亿 m<sup>3</sup>, 年均淤积量 1.45 亿 m<sup>3</sup>。

**3.4.2 小浪底水库** 小浪底水库控制流域面积 69.4 万 km<sup>2</sup>, 1997 年 10 月截流, 1999 年 10 月下闸蓄水, 2000 年 5 月正式投入运用。1997 年 10 月截流时, 水库 275 m 高程库容为 127.5 亿 m<sup>3</sup>, 直到 1999 年 6 月都基本保持不变, 1999 年 10 月下闸蓄水后, 水库库容开始减少, 到 2001 年底为 120.4 亿 m<sup>3</sup>, 此后逐年减少, 到 2007 年 10 月为 103.5 亿 m<sup>3</sup>, 比水库截流时减少了 24 亿 m<sup>3</sup>。与库容减少相对应的就是库内的泥沙淤积, 1997 年 10 月-2007 年 10 月, 库内共淤积 23.98 亿 m<sup>3</sup>, 淤积量与库容减少量 (24 亿 m<sup>3</sup>) 基本一致。1997 年 10 月-2000 年 5 月仅淤积 0.633 亿 m<sup>3</sup>, 淤积程度较轻, 2000 年 5 月-11 月淤积 3.559 亿 m<sup>3</sup>, 淤积程度显著增加, 2001-2007 年都保持不同程度的淤积 (表 4)。

## 4 黄河下游河道的冲淤演变

黄河下游河道的冲淤演变见图5,把花园口站作为进入下游河道水沙量的控制站,利津站作为入海水沙量的控制站。

1952-1959年,水沙分布基本上是天然状态,主河道和滩地之间没有明显的分

界,河道的游荡摆动和洪水漫滩的扰动,使滩槽水沙频繁交换,泥沙空间分布比较均匀,河道和滩地同步淤积抬升。此时期相对于花园口站水沙量,入海水沙量减少。

1960-1964年,三门峡采用“蓄水拦沙”的运用方式,大部分泥沙被淤积在库内,下游河道受到清水冲刷,侵蚀严重。此时期相对于花园口站水沙量,入海水沙量增加。

1965-1973年,三门峡采用“滞洪排沙”的运用方式,加上1968年10月刘家峡水库蓄水运用,下游汛期来水量减少,河道输沙功能减弱,泥沙大量淤积。由于水库滞洪削峰,下游洪水期洪峰流量减小,不容易漫滩,淤积主要集中在河道里,使河床抬高,“二级悬河”得以发展。此时期相对于花园口站水沙量,入海水沙量减少。

1974-1986年,三门峡采用“蓄清排浑”的运用方式,下游汛期流量增大,而洪水又多发于汛期,下游河道泄洪、排沙能力有所增强,部分年份河道发生不同程度的冲刷,河床抬升不明显,河道仍以淤积为主。此时期相对于花园口站水沙量,入海水沙量减少。

1987-1999年,由于1986年龙羊峡水库的下闸蓄水和刘家峡水库的联合调度,以及工农业用水量的增加,黄河下游汛期流量显著减小,非汛期流量增加,洪水发生频率和洪峰流量降低,洪水扰动强度下降,下游漫滩机会减少,滩槽之间的泥沙交换减弱,泥沙主要淤积在河道里,表现出河道萎缩,河床明显抬高,“二级悬河”迅速发展。此时期相对于花园口站水沙量,入海水沙量减少。

2000年5月小浪底水库正式投入使用。但由于工农业用水量的增加,径流量大幅度减少,下游河道的输沙功能减弱,2000年和2001年小浪底水库对下游河道的调节作用并不明显,虽然小浪底-利津河段整体表现出侵蚀,但高村以下仍以淤积为主(表5),河床淤高,河道持续萎缩,“二级悬河”现象加剧。2002年小浪底调水调沙以后,下游河道的行洪能力增强,全河段呈现侵蚀,“二级悬河”现象得以缓解,到2007年年内第二次调水调沙后,下游河道平滩流量增大到3700 m<sup>3</sup>/s。

表5 2000-2007年黄河下游不同区段冲淤变化(单位:亿 m<sup>3</sup>)

Tab. 5 Variation of different channels in the lower reaches of the Yellow River from 2000 to 2007 (unit: 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)

时间	小浪底-花园口	花园口-夹河滩	夹河滩-高村	高村-孙口	孙口-艾山	艾山-淤口	淤口-利津	小浪底-利津
2000	-0.672	-0.263	-0.107	0.067	0.036	0.059	0.051	-0.829
2001	-0.552	-0.278	-0.080	0.062	-0.028	0.055	0.042	-0.779
2002	-0.218	-0.297	-0.056	-0.391	-0.021	-0.046	-0.184	-1.213
2003	-1.344	-0.474	-0.411	-0.259	-0.145	-0.398	-0.581	-3.612
2004	-0.280	-0.426	-0.281	-0.050	-0.053	-0.112	-0.135	-1.337
2005	-0.239	-0.266	-0.289	-0.194	-0.115	-0.190	-0.135	-1.428
2006	-0.395	-0.634	-0.077	-0.214	-0.001	0.074	-0.038	-1.285
2007	-0.438	-0.443	-0.159	-0.252	-0.065	-0.131	-0.161	-1.649

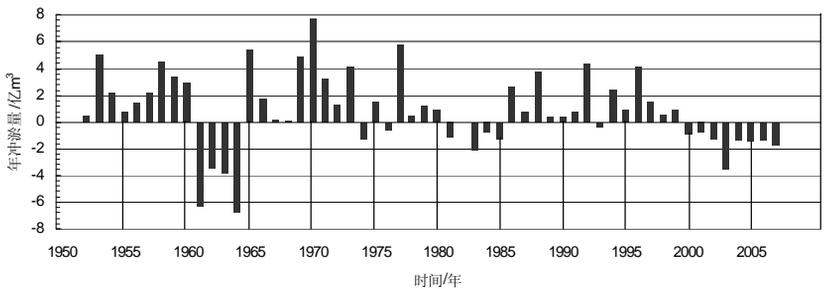


图5 黄河下游河道的冲淤演变

Fig. 5 Evolution in the lower reaches of the Yellow River

## 5 黄河入海水沙量变化对三角洲的影响

### 5.1 黄河入海流路演变

现代黄河三角洲是 1855 年黄河于铜瓦厢决口夺大清河改道注入渤海湾以后发育而成的, 距今仅 150 余年历史。黄河每年挟带大量泥沙在入海口地区落淤, 致使河口长期处于自然淤积、延伸和频繁摆动改道的变化状态。1855 年以来, 黄河入海尾间流路共发生了 9 次大的变迁, 其中 1855-1953 年自然改道 6 次, 顶点为宁海附近, 北起套尔河口, 南至支脉沟, 面积约 6000 多 km<sup>2</sup> 的扇形区域, 这一时期宁海以下河口尾间河道基本处于自然演变状态。1953 年以后, 为保护河口地区的工农业生产, 实施有计划人工改道 3 次, 尾间河段改道顶点渔洼附近, 摆动改道范围北起车子沟, 南至宋春荣沟, 面积 2400 多 km<sup>2</sup> 的扇形地区。其中 1953 年 7 月人工裁弯并汊形成神仙沟流路, 1964 年 1 月凌汛人工破堤形成刁口河流路, 1976 年 5 月人工截流改道清水沟流路, 1996 年汛前实施了清 8 断面人工出汊 (图 6)。目前清水沟流路是黄河入海行水年限最长的流路, 现已 33 年, 并仍有较大的行水潜力。

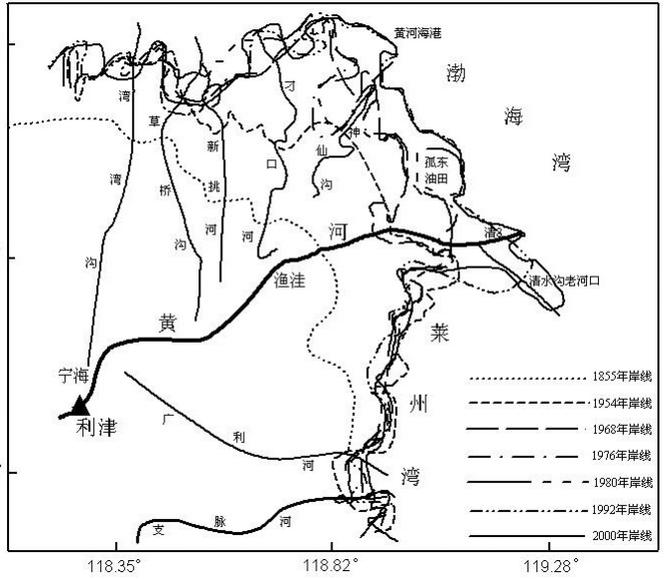


图 6 黄河入海流路及三角洲岸线演变图

Fig. 6 Channel changes of the Yellow River to the sea and coastal evolutions of the Yellow River Delta

不同时期黄河三角洲的演变见表 6 和图 6。1855 年-1953 年 6 月, 黄河入海实际行水只有 64 年, 三角洲造陆面积 1510 km<sup>2</sup>, 平均每年 23.6 km<sup>2</sup>。岸线延伸 128 km, 延伸速率 2 km/yr<sup>[16]</sup>。1953 年 7 月-1963 年 12 月, 神仙沟流路时期, 三角洲造陆面积 412 km<sup>2</sup>, 平均每年造陆面积 39.2 km<sup>2</sup>。岸线延伸 27 km, 延伸速率 2.57 km/yr<sup>[16]</sup>。同期利津站的来水总量 5050.37 亿 m<sup>3</sup>, 来沙总量 130.31 亿 t, 水沙比为 0.0258 t/m<sup>3</sup>。利津每来沙 1 亿 t, 三角洲岸线延伸 0.21 km。1964 年 1 月-1976 年 5 月, 刁口河流路时期, 三角洲造陆面积 506.9 km<sup>2</sup>, 平均每年 40.8 km<sup>2</sup>。岸线延伸 33 km, 延伸速率 2.66 km/yr<sup>[16]</sup>。同期利津站来水总量 5629.8 亿 m<sup>3</sup>, 来

### 5.2 黄河三角洲演变过程

不同时期黄河三角洲的演变见表 6 和图 6。

1855 年-1953 年 6 月, 黄河入海实际行水只有 64 年, 三角洲造陆面积 1510 km<sup>2</sup>, 平均每年 23.6 km<sup>2</sup>。岸线延伸 128 km, 延伸速率 2 km/yr<sup>[16]</sup>。

1953 年 7 月-1963 年 12 月, 神仙沟流路时期, 三角洲造陆面积 412 km<sup>2</sup>, 平均每年造陆面积 39.2 km<sup>2</sup>。岸线延伸 27 km, 延伸速率 2.57 km/yr<sup>[16]</sup>。同期利津站的来水总量 5050.37 亿 m<sup>3</sup>, 来沙总量 130.31 亿 t, 水沙比为 0.0258 t/m<sup>3</sup>。利津每来沙 1 亿 t, 三角洲岸线延伸 0.21 km。

1964 年 1 月-1976 年 5 月, 刁口河流路时期, 三角洲造陆面积 506.9 km<sup>2</sup>, 平均每年 40.8 km<sup>2</sup>。岸线延伸 33 km, 延伸速率 2.66 km/yr<sup>[16]</sup>。同期利津站来水总量 5629.8 亿 m<sup>3</sup>, 来

表 6 不同时期利津站入海水沙量与三角洲演变过程

Tab. 6 Water and sediment discharge into sea and evolution process of delta in different periods

时段 (年)	行水时间 (年)	流路	入海水沙量			三角洲年均 造陆面积 (km <sup>2</sup> /yr)	三角洲岸线 年均延伸速率 (km/yr)
			总水量 (亿 m <sup>3</sup> )	总沙量 (亿 t)	水沙比 (t/m <sup>3</sup> )		
1855-1953.6	64.0				23.6	2.00	
1953.7-1963.12	10.5	神仙沟	5050.37	130.31	0.0258	39.2	2.57
1964.1-1976.5	12.4	刁口河	5629.80	142.80	0.0254	40.8	2.66
1976.6-1996.6	20.0	清水沟	4851.10	124.17	0.0256	22.1	1.90
1996.7-2000	4.5	清 8 断面	396.90	10.34	0.0260	9.6	2.82
2001-2007	7.0		1082.32	11.88	0.0109	-9.4	

沙总量 142.8 亿 t, 水沙比为 0.0254 t/m<sup>3</sup>。利津每来沙 1 亿 t, 三角洲岸线延伸 0.23 km。

1976 年 6 月-1996 年 6 月, 清水沟流路时期, 三角洲造陆面积 442 km<sup>2</sup>, 平均每年造陆面积 22.1 km<sup>2</sup>。岸线延伸 38 km, 延伸速率 1.9 km/yr。同期利津站来水总量 4851.1 亿 m<sup>3</sup>, 来沙总量 124.17 亿 t, 水沙比 0.0256 t/m<sup>3</sup>。利津每来沙 1 亿 t, 三角洲岸线延伸 0.31 km。在比神仙沟和钓口河流路来沙总量少的情况下, 岸线延伸距离最大, 每亿吨入海泥沙形成的海岸延伸也最大。这是因为河口位于三角洲的东部, 海域较浅, 海洋动力较弱。

1996 年 7 月-2000 年, 清 8 断面出汉时期, 汉河小沙嘴造陆面积 19.2 km<sup>2</sup>, 出汉前的原大沙嘴南侧继续淤积, 造陆面积 25 km<sup>2</sup>, 而顶端则被缓慢侵蚀。河口三角洲岸线延伸了 12 km, 延伸速率 2.82 km/yr。同期利津站来水总量 396.9 亿 m<sup>3</sup>, 来沙总量为 10.34 亿 t, 水沙比为 0.0260 t/m<sup>3</sup>。利津每来沙 1 亿 t, 三角洲岸线延伸 1.16 km。

### 5.3 入海水沙量变化对黄河三角洲的影响

河口三角洲的发展与演化受入海水沙条件和海洋动力作用的双重制约, 前者使三角洲岸线向海延伸, 后者使三角洲岸线向陆蚀退。在行水河口, 河流水沙直接补给, 三角洲堆积速率远大于海洋动力的侵蚀速率, 岸线不断向海延伸。而且在行水流路初期延伸较快, 以后随着入海口门向滨海深水区突出逐渐减缓。而在废弃河口, 河流来沙断绝, 海洋动力成为岸线演化的主导因素, 在波浪和潮流作用下岸线不断侵蚀后退。而且在行水停止流路初期蚀退较快, 以后逐渐减缓, 直至基本稳定。

虽然黄河入海水沙量由于各种因素的影响而减少, 但各个时期的入海总水沙比却相对比较稳定(表 6), 在 0.0254~0.0260 t/m<sup>3</sup> 之间, 平均为 0.0257 t/m<sup>3</sup>, 此时河口附近岸线延伸, 三角洲造陆面积增加。在河口沙量充足的情况下, 利津每 1 亿 t 来沙, 可使河口岸线延伸 0.2~0.3 km。但入海水沙小于一定程度, 河口岸线就不会延伸, 甚至出现蚀退。据许炯心研究<sup>[17]</sup>, 当入海年水量为 176.7 亿 m<sup>3</sup>, 入海年沙量为 2.78 亿 t 时, 黄河三角洲造陆过程处于临界平衡状态。而 2001-2007 年, 入海年沙量仅 1.51 亿 t, 入海总水沙比只有 0.0109 t/m<sup>3</sup>, 河口三角洲表现出侵蚀, 年均侵蚀面积约 9.4 km<sup>2</sup>。

对于废弃河口的岸段, 据陈沈良等研究<sup>[18]</sup>, 1976-1988 年的 12 年间, 神仙沟岸段总侵蚀量为 8.22 亿 t, 年均侵蚀量为 0.685 亿 t; 刁口河岸段总侵蚀量为 17.12 亿 t, 年均侵蚀量 1.427 亿 t。整个侵蚀型岸段年均侵蚀量为 2.11 亿 t, 是同期利津站年均入海沙量 7.22 亿 t 的 29.2%, 接近于行水河口入海泥沙输向外海的比例<sup>[19]</sup>。考虑到岸段侵蚀后期的侵蚀程度会降低, 以及现行河口附近海域海洋动力条件相对于侵蚀岸段的为弱, 清 8 出汉后的泥沙被侵蚀输向外海的量要小于 2.11 亿 t/yr。而清 8 出汉后, 黄河多年 (1997-2007) 平均入海沙量仅为 1.62 亿 t, 即便满足海洋动力侵蚀输向外海的泥沙量, 也远小于 1976-1996 年清水沟流路的入海泥沙量 (6.34 亿 t/yr)。河口三角洲整体已经表现为侵蚀 (约 22.6 km<sup>2</sup>), 加上废弃河口的岸段侵蚀, 整个黄河三角洲已由淤积转变为侵蚀, 冲淤状态发生逆转的时间约在 1997 年 (图 7、8), 与 1996 年以后黄河利津站入海水沙量迅速减少基本一致 (图 2)。而且 1999 年小浪底水库的下闸蓄水, 使利津站入海水沙量进一步减少, 直到 2002 年小浪底水库第一次开始调水调沙后, 利津站入海水沙量才有所增加 (图 8), 但黄河三角洲自 1997 年以来整体上已成侵蚀状态 (图 7)。

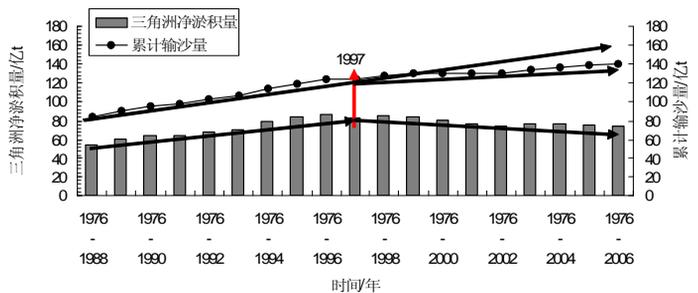


图 7 利津站累计输沙量与黄河三角洲净淤积量

Fig. 7 Accumulative sediment discharge at Lijin and net accumulation of delta since 1976

## 6 结论

(1) 1950-2007年,黄河入海水沙量呈明显减少的趋势,且年际波动比较剧烈,多年平均径流量316亿 $\text{m}^3$ ,多年平均输沙量7.68亿t。水沙变化过程可分为1950-1959年、1960-1968年、1969-1985年、1985-1998年和1999-2007年5个阶段。

(2) 气候变化是入海水沙量年际波动的重要影响因素,但人类活动的影响也是入海水沙量减少的主要原因。1950-2005年,水土保持年均减水减沙量分别为20.2亿 $\text{m}^3$ 和3.41亿t;工农业年均引水引沙量分别为251.64亿 $\text{m}^3$ 和2.42亿t;干流库区拦沙量,三门峡水库1960-2007年年均淤积1.45亿 $\text{m}^3$ ,小浪底水库1997-2007年年均淤积2.398亿 $\text{m}^3$ 。

(3) 由于人类活动的影响,下游河道的水沙分布趋于不合理,表现为河道萎缩、河床抬高,“二级悬河”加剧以及河口蚀退,而小浪底水库的调水调沙有助于缓解下游河道的不利局面。相比于花园口站的水沙量,当下游河道以淤积为主,入海水沙量减少;以冲刷为主,入海水沙量增加。

(4) 黄河入海流路变迁的各个时期,当入海总水沙量比在 $0.0257\text{ t/m}^3$ 左右时,河口附近岸线延伸,三角洲造陆面积增加。但近年来入海水沙量的急剧减少,特别是黄河口清8出汊以后,黄河入海年沙量仅为1.62亿t,总水沙量比只有 $0.0135\text{ t/m}^3$ ,河口三角洲整体已表现为侵蚀;整个黄河三角洲由淤积转变为侵蚀的时间约在1997年。

## 参考文献 (References)

- [1] Bobrovitskaya N N, Kokorev A V, Lemeshko N A. Regional patterns in recent trends in sediment yields of Eurasian and Siberian rivers. *Global and Planetary Change*, 2003, 39: 127-146.
- [2] Vorosmarty C J, Meybeck M, Feketea B et al. Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, 2003, 39: 169-190.
- [3] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world rivers. *Global and Planetary Change*, 2003, 39: 111-126.
- [4] Siakeu J, Oguchi T, Aoki T et al. Change in riverine suspended sediment concentration in central Japan in response to late 20th century human activities. *Catena*, 2004, 55(2): 231-254.
- [5] Chen Zhongyuan. Discussion on flux of silt discharge of the Yangtze River into the sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(1): 1-5. [陈中原. 长江河流入海泥沙通量的探讨. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(1): 1-5.]
- [6] Xu Jiongxin. Sediment fluxes to the sea as influenced by sediment delivery of the lower Yellow River. *Oecologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(6): 663-670. [许炯心. 黄河下游泥沙输移特征对入海泥沙通量的影响. *海洋与湖沼*, 2003, 34(6): 663-670.]
- [7] Dai Shibao, Yang Shilun, Cai Aimin. Variation of sediment discharge of the Pearl River Basin from 1955 to 2005. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(5): 545-554. [戴仕宝, 杨世伦, 蔡爱民. 51年来珠江流域输沙量的变化. *地理学报*, 2007, 62(5): 545-554.]
- [8] Syvitski J P M, Vorosmarty C J, Ketmer A J et al. Impact of human on the flux of terrestrial sediment to the global ocean. *Science*, 2005, 308: 376-380.
- [9] Fanos A M. The impact of human activities on the erosion and accretion of the Nile Delta coast. *Journal of Coastal Research*, 1995, 11(3): 821-833.
- [10] Mikhailova M V. Transformation of the Ebro River Delta under the impact of intense human-induced reduction of sediment runoff. *Water Resources*, 2003, 30(4): 370-378.
- [11] Carriquiry J D, Sanchez A. Sedimentation in the Colorado River Delta and upper gulf of California after nearly a

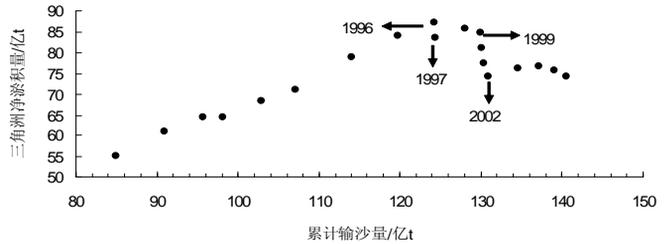


图8 利津站累计输沙量与黄河三角洲净淤积量之间的相关关系

Fig. 8 Correlation of accumulative sediment discharge at Lijin and net accumulation of delta

- century of discharge loss. *Marine Geology*, 1999, 158: 125-145.
- [12] Qian Ning, Zhou Wenhao. Evolution of Riverbed in Lower Reaches of Yellow River. Beijing: Science Press, 1965. [钱宁, 周文浩. 黄河下游河床演变. 北京: 科学出版社, 1965.]
- [13] Hu Chunhong. Spatial distribution and its variation process of sedimentation in Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(5): 518-527. [胡春宏. 黄河水沙空间分布及其变化过程研究. 水利学报, 2008, 39(5): 518-527.]
- [14] Si Maochong, Gao Guoping, Bao Xianwen. Investigation Means in Oceans. Qiangdao: Ocean University of Qingdao Press, 1999: 305-309. [侍茂崇, 高郭平, 鲍献文. 海洋调查方法. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1999: 305-309.]
- [15] Qian Ning. Evolution of Riverbed. Beijing: Science Press, 1989. [钱宁. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1989.]
- [16] Wang Kaizhen. Evolution Law of Yellow River Estuary and Its Influence to the Lower Reaches in Thesis Collection (II): Sediment & Water and Soil Conservation. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1990. [王恺忱. 黄河口演变规律及其对下游河道的影响科学研究论文集(第二集): 泥沙·水土保持. 郑州: 河南科学技术出版社, 1990.]
- [17] Xu Jiongxin. A study of thresholds of runoff and sediment for the land accretion of the Yellow River delta. *Geographical Research*, 2002, 21(2): 163-170. [许炯心. 黄河三角洲造陆过程中的陆域水沙临界条件研究. 地理研究, 2002, 21(2): 163-170.]
- [18] Chen Shenliang, Zhang Guoan, Gu Guochuan. Mechanism of heavy coastal erosion on Yellow River Delta and its countermeasures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, (7): 1-7. [陈沈良, 张国安, 谷国传. 黄河三角洲海岸强侵蚀机理及治理对策. 水利学报, 2004, (7): 1-7.]
- [19] Zang Qiyun. Coastal Sediment in Yellow River Delta. Beijing: China Ocean Press, 1998. [臧启运. 黄河三角洲近岸泥沙. 北京: 海洋出版社, 1998.]

## The Variation Process of Water and Sediment and Its Effect on the Yellow River Delta over the Six Decades

PENG Jun, CHEN Shenliang

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** In order to find out the variation process of water and sediment and its effect on the Yellow River Delta, this paper, by means of statistics, analyzed the water and sediment discharge from 1950 to 2007 at Lijin and the reduction of water and sediment in Yellow River Basin caused by human activities. Results show that the water and sediment discharge into sea decreased from 1950 to 2007 with serious fluctuation. The human activities were the main cause for the reduction of water and sediments into sea. From 1950 to 2005, the multiyear average reduction of water and sediment by means of water and soil conservation were  $2.02 \times 10^9 \text{ m}^3$  and  $3.41 \times 10^8 \text{ t}$ , respectively, while the multiyear average usage of water and sediment for industry and agriculture were  $2.52 \times 10^{10} \text{ m}^3$  and  $2.42 \times 10^8 \text{ t}$ , respectively. From 1960 to 2007, the multiyear average sediment silted in the Sanmenxia Reservoir was  $1.45 \times 10^8 \text{ t}$  and that silted in the Xiaolangdi Reservoir was  $2.398 \times 10^8 \text{ t}$ . Compared to the data of Huayuankou, in the lower reaches, the water and sediment discharge into sea decreased with siltation and increased with erosion. The coastline near the estuary extended and the delta increased when the ratio of total water and sediment into sea was about  $0.0257 \text{ t/m}^3$  in different periods.

**Key words:** Yellow River; water and sediment; human activities; delta