

文章编号: 1007-6301 (2000) 02-0142-08

小浪底工程修建对黄河河口淤积影响

尤联元

(中国科学院地理研究所 北京, 100101)

摘要: 本文在整理、分析黄河小浪底工程建成后, 坝下游来水来沙条件变化的基础上, 利用若干经验关系式, 就小浪底工程修建后对黄河河口区清水沟流路的淤积特征和变化趋势进行了研究, 得到了: 在小浪底水库初期蓄水拦沙运用阶段, 淤积减少、河口砂嘴发展速度变缓; 在后期正常调水调沙运用阶段, 淤积又有所恢复, 河口砂嘴发展加快的认识。

关 键 词: 黄河河口; 小浪底工程; 淤积; 河口砂嘴

中图分类号: P931 文献标识码: A

1 概述

黄河河口是黄河带来泥沙的淤积区, 泥沙的持续淤积, 一方面使得黄河河道不断延伸、河口三角洲面积不断扩大, 另一方面, 又使得河道流路十分不稳定, 具有淤积—延伸—摆动—改道的周期性演变规律, 100 余年来, 平均每 10 年就要改道一次。黄河河口地区具有重要的国民经济地位, 流路频繁地改道对国民经济发展十分不利, 同时, 通过由比降变化引起的溯源淤积和溯源侵蚀, 又对黄河下游河道演变带来重大影响, 从而密切关系到黄河下游的治理。因此, 研究黄河河口泥沙淤积问题有着重要的意义。

影响河口区泥沙淤积的因素, 归纳而言, 可以分为两方面: 一方面是上游的来水来沙条件。黄河河口段河道明显地具有大水冲刷、小水淤积规律^[1]。当来沙多来水少时, 河道淤积和砂嘴前伸加快, 反之则减慢, 甚至砂嘴和海岸线蚀退; 另一方面是海域条件、河口外海不同部分的海域水深、海洋动力(潮汐、波浪、余流等)状况各不相同, 容沙和输沙能力也彼此有异, 因而在不同海域入海的流路其淤积、延伸状况也不一样。已知神仙沟河口海洋动力状况最好, 钓口河口次之, 清水沟口最弱^[4]。当然, 上游来水来沙和海域条件是同时起作用的, 河口淤积、延伸和河道摆动、变迁是两者相互作用的综合结果。

关于黄河河口淤积及其与河道变迁、三角洲发育等问题, 前人已有大量研究, 研究途径也多种多样。如地质地貌和沉积物特征的分析^[2, 3], 历史资料、图件的分析^[5], 实测水文泥沙资料和河床演变过程分析^[1, 4], 利用数学模型进行计算和预测^[1], 采用地理信息系统进行动态模拟等。尤其是在关于清水沟流路(图 1, 1976 年 6 月开始至今)演变趋势和稳定性的研究方面取得了很大进展。业已确定, 在现有的来水来沙和海域条件下, 清水沟流路

收稿日期: 1999-12; 修订日期: 2000-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49871014)

作者简介: 尤联元 (1938-), 男, 研究员。1962 年毕业于华东师范大学地理系, 主要从事河流地貌、区域地貌等方面的研究, 已发表论文数十篇。

表 1 水库不同运用方式| 不同运用期减淤效果比较

Tab. 1 Deposition reduction result of Xiaolongdi Reservoir in different operation types and different periods

运用方式	泄空水位 / m	50 年平均淤积量/ 10 ⁸ t		运用初期年平均淤积/ 10 ⁸ t		正常调水调沙运用期 年均冲淤/ 10 ⁸ t		
		全河	艾山以下	全河	艾山以下	全河	艾山以下	相应时段无小浪底水库 全河年均淤积量/10 ⁸ t
招标设计	230	2. 10	0. 252	- 1. 26	0. 051	3. 41	0. 33	3. 92
逐步抬高	230	2. 11	0. 243	- 1. 41	- 0. 07	3. 48	0. 365	3. 92
	220	2. 05	0. 240	- 1. 41	- 0. 07	3. 40	0. 360	3. 92
	205	1. 95	0. 23	- 1. 41	- 0. 07	3. 25	0. 319	3. 92
控蓄速冲	220	1. 62	0. 277	- 1. 71	- 0. 15	2. 92	0. 44	3. 88
	205	1. 50	0. 167	- 1. 71	- 0. 15	2. 75	0. 29	3. 88
高蓄速冲	225	2. 39	0. 376	- 0. 68	0. 36	2. 98	0. 46	3. 57
	200	1. 65	0. 203	- 0. 68	0. 36	2. 18	0. 26	3. 57

由表 1 可以看出, 不同运用方式情况下, 小浪底工程的兴建都可使下游河道淤积减少, 但减淤的发生主要在蓄水拦沙的运用初期, 这时水库下游河道发生冲刷, 到正常调水调沙运用期后, 河道又转为淤积。

2. 2 库下游冲刷限于一定范围, 入海沙量不同运用阶段有所差异

小浪底水库蓄水运用初期, 库下游河道发生冲刷, 但冲刷发生主要在艾山以上河段, 特别是在高村以上河段, 对利津以下的河口段基本无其影响。表 2 列出了库下游 50 年全过程河道不同河段的冲淤情况^[5]。

表 2 小浪底水库泥沙多年调节减淤效果

Tab. 2 Deposition reduction result of Xiaolongdi Reservoir by multiple year adjustment sediment							
方案	最低冲刷水位/m	200	225	180	200	225	
初期蓄水拦沙运用 8 年	下游河道冲淤量/ × 10 ⁸ t	总量		年平均			
	高村以上	- 0. 94		- 1. 13			
	高村至艾山	0. 73		0. 09			
	艾山至利津	2. 86		0. 36			
正常调水调沙运用 42 年	全河	1. 88	2. 45	1. 55	1. 85	2. 45	
	年均下游	高村以上	0. 84	1. 09	0. 64	0. 98	1. 09
	冲淤量	高村至艾山	0. 74	0. 99	0. 66	0. 71	0. 99
	/ × 10 ⁸ t	艾山至利津	0. 31	0. 38	0. 26	0. 31	0. 38
	减淤量	1. 62	1. 05	1. 95	1. 66	1. 05	

与 60 年代初三门峡水库下游河道的冲刷情况相比较, 计算所得小浪底水库下游河道的冲刷情况与之基本相似^[5], 均未能达到利津以下的河口段。

黄河下游河道冲淤变化十分剧烈, 在天然情况下, 河道冲淤过程以累计性淤积为主, 淤

积主要发生在高村以上的游荡型河段，占全下游河道淤积量的 48.3%，高村至艾山的过渡河段占 33.1%。艾山至利津的窄深型河段仅占 18.6%^[5]，由于上段大量淤积，所以下段的淤积减少，从而泥沙可以充分地输送入海。修建小浪底工程以后，库下游的冲刷虽然剧烈，但恢复饱和的过程也很快，上段内被冲起的泥沙加入到下段的输沙中去，并最终被输送入海。正是由于小浪底水库导致的下游河道冲刷限制在一定范围，所以以利津站输沙量作为黄河口的来沙量是合理的。表 3 列出了计算所得各不同方案，不同时段黄河口入海沙量。

表 3 各方案入海沙量比较 (10⁸t)^{*}

Tab. 3 Comparison of sediment volume coming into the sea in different schemes

方 案	时段总 来沙量	小浪底水库 淤积量	下游河道 淤积量	引沙量	利津入海沙量	
					总量	年平均
无小浪底水库	808. 5	0	208. 3	78. 57	521. 63	10. 43
225 m	初期蓄水拦沙	128. 8	98	- 43. 6	6. 97	67. 43
	正常调水调沙	679. 14	113. 9	125. 16	36. 6	403. 48
200 m	初期蓄水拦沙	128. 8	98	- 43. 6	6. 85	67. 55
	正常调水调沙	679. 14	108. 8	78. 96	34. 9	456. 48
180 m	初期蓄水拦沙	128. 8	98	- 43. 6	3. 81	70. 59
	正常调水调沙	679. 14	105. 5	66. 78	20	486. 86

^{*} 本表数据系根据文献 [5] 中表 4- 14, 4- 29 综合编制、计算获得。

2. 3 考虑全球增暖和人类活动后的来沙状况

全球增暖导致气候条件的变化，因而流域水产产沙状况也发生变化，同样，人类活动方式和程度的不同，也使流域产沙量不一样。根据已有的研究成果，黄河流域在未来 50 年内，由于全球增暖和不同人类活动方式而引起的下游河道来沙量、冲淤量可能变化如表 4 所示^[6]。

表 4 中方案 、 分别表示按过去 40 年平均速度发展水利水保工程和按水保大规划速度发展水利水保工程的状况。不同规模的水利水保工程将带来不同的养护效益，从而又导致下游河道来沙量的不同。花园口来沙量则表示将全球增暖与不同的水利水保方案的影响综合考虑后估算所得到的可能来沙量。从表 4 可以看出，在 2014 年以前的小浪底水库蓄水拦沙运用期，下游河道发生冲刷，2014 年以后河道恢复淤积。花园口来沙量与下游河道冲淤量之差即为进入河口的来沙量。可以看出，其值与表 3 中所列河口来沙量大体处同一数量级。

表 4 不同方案下不同时段黄河口来沙量

Tab. 4 Oncoming sediment volume of the Yellow River Estuary in different schemes and periods

方案	时段/ 年	花园口来沙量/ 10 ⁸ t	下游河道冲淤量/ 10 ⁸ t	河口来沙量/ 10 ⁸ t
	2014	5. 49	- 2. 785	8. 275
	2050	10. 80	0. 69	10. 11
	2014	4. 79	- 3. 055	7. 845
	2050	7. 45	- 0. 675	8. 125

注：2014 年前为初期蓄水拦沙阶段，2014 年以后为正常调水调沙阶段。

综合分析可以看出,小浪底工程的修建,在初期蓄水拦沙运用阶段,黄河口利津入海沙量有所减少,减幅约为 15.4% ~ 19.1%。在后期正常调水调沙运用阶段,则大致与无小浪底工程情况下相同,增减幅仅在- 8% ~ + 11.1% 之间。

3 小浪底工程对黄河河口泥沙堆积的影响

3.1 河口区淤积量

现有的研究表明,在 1976 年以来黄河河口走清水沟流路期间,河口区淤积量 (Y) 与来沙量 (X) 之间存在相关关系^[4]:

$$Y = - 1.24 + 0.97X \tag{1}$$

目前清水沟流路形势属于后者,故可利用式 (2) 就小浪底工程修建后,不同阶段的来沙状况对河口泥沙淤积量的状况进行预估,估算所得各种情况下的数值见表 5。

表 5 不同方案河口淤积量估算 (10⁸t)

Tab. 5 Deposition volume of the Huanghe River Estuary in different schemes

方 案			利津年均 入海沙量	年均淤积量	较无小浪底水库 增减/ %	50 年总计 增减/ %
无小浪底水库			10.43	8.877	0	0
225 m	初期蓄水拦沙		8.43	6.937	- 21.85	- 11.0
	正常调水调沙		9.61	8.082	- 8.96	
200 m	初期蓄水拦沙		8.44	6.947	- 21.74	+ 0.5
	正常调水调沙		10.87	9.303	+ 4.80	
180 m	初期蓄水拦沙		8.82	7.315	- 17.60	+ 7.8
	正常调水调沙		11.59	10.00	+ 12.65	
考虑全球 增暖和 人类活动	方案	2014 年	8.275	6.787	- 23.5	- 9.1
		2050 年	10.11	8.567	- 3.49	
	方案	2014 年	7.845	6.370	- 28.24	- 26.04
		2050 年	8.125	6.641	- 26.31	

从表 5 中可以看出:

(1) 各种方案在小浪底水库初期蓄水拦沙运用阶段,河口区淤积量均较小,与无小浪底水库时相比,最大可减淤 28%。到正常调水运用期后,淤积量又开始回升。

(2) 不同方案的淤积量和减淤量有所不同,高方案由于利津入海沙量少,河口区淤积量也较少,从而减淤率也较大,低方案则相反。50 年总量相比较,225 m 高方案仍是减淤,而 200 m 和 180 m 方案已较无小浪水库时反而有所增加。

(3) 水土保持工程对河口淤积也有较大影响。如果水保工程能按正常速度继续发展,与小浪底工程相配合,能达到比仅有小浪底工程为大的减淤效果。如能做到按大规划发展的目标,则效果更好。

3.2 河口沙嘴的发展

河口泥沙的淤积,必然造成河口海岸外延,而黄河三角洲海岸淤积外延的基本形式就是河口沙嘴的延伸。由于河口砂嘴的延伸,导致河口区河道比降变缓和溯源淤积,并由此

带来整个黄河下游河道的一系列演变。

现有的研究表明，黄河口清水沟流路河口砂嘴的变幅与来水沙比（来沙量/来水量， t/m^3 ），存在较好的相关关系（图2）。当水沙比较大时，砂嘴变幅增长较快，反之则慢，甚至蚀退^[1]。

$$F = -1.46 + 188R$$
$$S = 1.246 \quad R = 0.863 \quad n = 14$$

(2)

式中 F ——河口砂嘴变幅，km
 R ——水沙比（来沙量/来水量， t/m^3 ）
 S ——标准差
 R ——相关系数
 n ——样本数

随着国民经济的发展，对黄河水资源的需求在将来一段时间内还将不断增加，因而下泄水量还将进一步减少。据国家八五攻关课题“黄河治理与水资源开发利用”的研究，今后20年内黄河口多年平均下泄水量分别为： $224.8 \times 10^8 m^3$ （2000年）； $191.9 \times 10^8 m^3$ （2010年）和 $158.9 \times 10^8 m^3$ （2020年）^[7]，而现状则为 $272.1 \times 10^8 m^3$ 。与表3中所列入海沙量一起，计算得各不同时段和方案的水沙比如下（表6）。

表 6 清水沟流路河口砂嘴变幅估算值

Tab.6 Calculated values of the river mouth spit of Qingshuigou course

方 案			水沙比	计算砂嘴演变幅 / km	与无小浪底水库增减 %
无小浪底水库			0.038	5.67	0
225 m	初期蓄水拦沙		0.044	6.80	+ 19.9
	正常调水调沙		0.060	7.93	+ 39.86
200 m	初期蓄水拦沙		0.044	6.84	+ 19.9
	正常调水调沙		0.068	11.30	+ 99.3
180 m	初期蓄水拦沙		0.046	7.17	+ 26.5
	正常调水调沙		0.073	12.24	+ 116.4
考虑全球增暖 和人类活动	方案	2014 年	0.043	6.61	+ 16.6
		2050 年	0.064	10.55	+ 86.10
	方案	2014 年	0.041	6.24	+ 10.0
		2050 年	0.051	8.11	+ 43.0

将已知的水沙比值代入式（3），即可估算得到今后不同时段、不同运用方式情况下河口砂嘴的变幅，以及与小浪底水库情况下的增减比较值，它们同时列入于表6中。由表6可见，由于来水量的急剧减少，河口砂嘴的正向变幅均较目前状况为快，其中后期正常调水调沙运用阶段更快，最大可较现状增大一倍以上。这意味着，在修建小浪底工程以后，尽

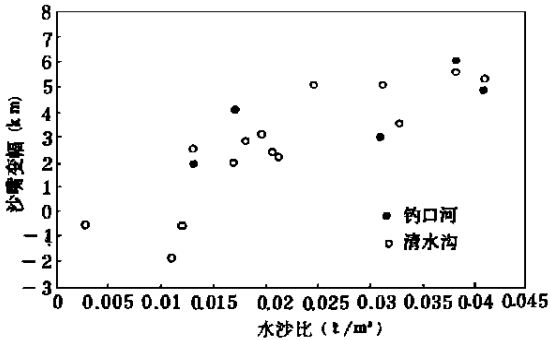


图 2 清水沟流路沙咀淤进蚀退与
来水来沙关系，文献 [1]

Fig.2 Correlation of advance and retreat of
the spit to oncoming water and sediment

管整个河口三角洲区总体淤积量减少, 但河口砂嘴却比原来的变幅为大。换言之, 可能是河口淤积量中淤积在陆上部分有所增加, 而淤积在海域的部分却有所减少。

4 结语

(1) 小浪底工程的修建对黄河河口区清水沟流路的淤积发展有一定影响。在初期蓄水拦沙运用阶段, 与无小浪底工程相比较, 相应淤积量减少, 减幅可达 17.6% ~ 21.85%, 增减幅度与地空水位的高低有关。在正常调水调沙运用阶段, 高方案仍有一定程度减淤, 低方案则淤积反而有所增加。50 年总冲淤量, 高方案仍减淤 11%, 低方案则增淤 0.5% ~ 7.8%。

(2) 全球增暖和人类活动对河口淤积也有较大影响。在继续增暖情况下, 如果各种水土保持工程能按正常速度继续发展, 与小浪底工程配合, 能达到比仅有小浪底工程为大的减淤效果。

(3) 河口砂嘴的发展与来水来沙比密切相关, 因而与小浪底工程也有一定关系。由于来水量大大减少, 河口砂嘴的正向变幅今后将进一步增大, 其中在小浪底工程正常调水调沙运用期更快于蓄水拦沙期。

参考文献:

- [1] 曾庆华, 张世奇, 胡春宏 等. 黄河口演变规律及整治[M]. 黄河水利出版社, 1997. 28 ~ 29, 134 ~ 162.
- [2] 叶青超, 陆中臣, 杨毅芬 等. 黄河下游河流地貌[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 115 ~ 176.
- [3] 高善明, 李元芳, 安凤桐 等. 黄河三角洲形成和沉积环境[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [4] 钱意颖, 叶青超, 周文浩. 黄河干流水沙变化与河床演变[M]. 中国建材工业出版社, 1993. 160 ~ 229.
- [5] 齐璞, 李世滢, 刘月兰 等. 黄河水沙变化与下游河道减淤措施[M]. 黄河水利出版社, 1997. 73 ~ 101.
- [6] 叶青超, 尤联元, 许炯心 等. 黄河下游地上河发展趋势与环境后效[M]. 黄河水利出版社, 1997. 96 ~ 155.
- [7] 陈霁巍, 徐明权, 姚传江. 黄河治理与水资源开发利用[M]. 黄河水利出版社, 1998. 308 ~ 331.

Impact of Xiaolangdi Water Conservation Project on Deposition Reduction of the Huanghe River Estuary

YOU Liang-yuan

(Institute of Geography, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Xiaolangdi Water conservation project is the largest one in the Huanghe River. It changes the oncoming water and sediment process of the Lower Huanghe River and consequently, the deposition of the Huanghe River Estuary. Using obtained experimental formulas, this paper gets the following results:

1. Comparing with the situation without Xiaolangdi project, deposition volume decreases at the first utilization stage, and then deposition volume is restored at the second utilization stage. Besides, the deposition volume is also depended on different discharge

level of the Xiaolangdi reservoir.

2. Global warming and human activities impact on deposition volume of the Huanghe River Estuary. If the water and soil conservation works are continuously increased with the normal speed, in addition to Xiaolangdi project, it is possible to make a good deposition volume reduction, which is better than that under only Xiaolangdi project.

3. The river mouth spit is also related to oncoming water and sediment, consequently, to Xiaolangdi project. The Changing amplitude of the river mouth spit at the second utilization stage of Xiaolangdi project is faster than that of the first utilization stage.

Key words: Huanghe River Estuary; Xiaolangdi project; deposition; the river mouth spit