

黄河河口泥沙输移分布特性及其回归计算

王开荣¹, 李平², 郑春梅¹

(1. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 山东师范大学 山东 济南 250014)

摘要: 在分析黄河河口泥沙输移和分布影响因素的基础上, 分径流区域、径流潮汐区域和外海区域 3 个不同区域对黄河河口泥沙的输移和分布规律进行了系统探讨总结; 利用实测资料对河口清水沟流路的泥沙分布特征进行了分析, 并据此得出了河口泥沙沉积分配的回归计算式。

关键词: 泥沙; 输移; 分布; 回归计算; 黄河河口

中图分类号: P737.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2004)12-0022-04

黄河河口系典型的弱潮多沙堆积性河口, 1950~2002 年多年平均来沙量 8.23 亿 t, 约占整个下游来沙量的 73%, 其来沙量之大居世界各大江河海口之冠。由于巨量泥沙在河口的堆积和三角洲岸线的不断延伸, 直接导致了黄河河口尾闾流路周期性的出汉和摆动改道, 并影响到河口上游一定范围内河段的防洪安全。因此, 黄河河口治理的关键在于解决泥沙问题。换言之, 黄河河口任何一项治理措施的提出, 无一例外均与河口泥沙的输移和沉积分布状况存在密切关系, 这就要求必须充分了解和掌握河口泥沙的输移及分布规律, 并据此对各项治理措施进行科学评价和为治理措施的实施提供决策依据。

1 黄河河口泥沙输移和分布的影响因素

就影响河口泥沙沉积分配的因素而言, 主要有以下 3 个大的方面: (1) 流域来水来沙的特性, 主要包括来沙量的大小、来沙的粗细、含沙量的高低、洪峰的形式等。(2) 三角洲的地形地貌和尾闾河段的边界条件, 主要包括尾闾流路的自然形态、尾闾河段所处的演变阶段、尾闾河段的工程状况、尾闾入海的部位、河口沙嘴突出的程度等。(3) 滨海海洋动力状况, 主要包括潮流潮汐状况、风浪的状况、海水含盐度状况、余流状况、滨海的岸冰情况等。

粗略分析归纳表明, 影响河口入海泥沙沉积和输移的因素众多, 其中起主导作用的是流域来沙量的大小和粗细, 尾闾河段所处的演变阶段和河口入海部位的海域状况。

2 黄河河口泥沙输移和分布规律

按照影响和制约因素的不同, 黄河河口泥沙的输移和沉积规律在不同的区域和部位也明显不同, 具体可分为 3 个区域, 即径流区域、径流潮汐区域和外海区域 3 部分。概化后如图 1 所示。

2.1 径流区域泥沙输移沉积特性

实测资料表明, 径流区域泥沙的冲淤量占利津来沙的比例甚小, 据大断面统测资料计算, 1976 年 5 月~1993 年 5 月, 利津至西河口河段淤积 0.09 亿 t, 西河口至清 3 断面淤积 3.07 亿 t, 清 3 以下有断面观测资料范围内淤积 1.35 亿 t, 利津以下河道累计淤积 4.52 亿 t, 占利津来沙量的 4.1%。其中, 1976 年 6 月~1979 年 5 月是清水沟流路时期径流河段淤积最为严重的时期, 当时造成淤积的原因有两个方面, 首先是流路正处于改道初期, 西河口以下没有形成固定的河槽, 其次是来水来沙条件相对不利, 水少沙多, 洪水较小, 汛期平均含沙量达 50 kg/m³, 即使如此, 利津以

收稿日期: 2003-09-15; 修回日期: 2004-01-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50339050); 黄河水利科学研究院基金资助项目

作者简介: 王开荣 (1963-), 男, 山东泰安人, 高级工程师, 硕士, 电话: 0371-6024539, E-mail: kw@sina.com

必然发展结果。

2.2 径流潮汐区域泥沙输移和沉积特性

该区域的顺河长度基本上在 50~60 km 之间变化,其顺海岸宽度按测验区域考虑最宽可为 70 km。受径流、海洋潮汐和盐水絮凝以及边界条件急剧变化的影响,该河段是河口泥沙落淤沉积的主要区域,其泥沙的输移和沉积变化也最为激烈和复杂。

按边界条件和水流动力条件的不同,该区域又可分为径流潮波区、径流潮流区和滨海区共 3 个部位(如图 1);尽管受观测资料限制,目前尚难以划分和确定各部位泥沙的沉积比例和数量,但各部位泥沙输移和沉积的机理显然有所不同。

在径流潮波区,径流潮波区的上界是潮区界的上界,下界为潮流界的上界,在该区内,动力仍以河流水流动力为主,但其水流受海洋潮汐的影响,水流流速具有潮波的特征,在某一时段,流速沿程增大,而另一时段,流速却可能沿程减小,含沙量及河床边界条件都与径流区域河道有所区别,含沙量随潮汐变化时大时小,推移质随潮汐时动时停。但该区基本没有盐水的入侵,有关盐水的絮凝作用在该区内不存在。

在径流潮流区,径流潮流区上界为潮流区的上界,下界为浅海 12 m 等深线处。在径流潮流区内,水流受径流及潮流的共同作用,是一种往复流,无论是海洋动力还是径流动力,在此消耗均很大,泥沙落淤也最为剧烈,因此,该区与拦门沙区是基本对应的。

测验结果表明:清水沟流路改道初期的 1976 年至 1980 年间,河口流路游荡散乱,并且河口附近海域水深较浅,陆地部分的淤积量比较大,可占同期利津来沙量的 31.0%,河口滨海区的淤积量占到同期利津来沙量的 44.0%,在河口流路形成比较稳定的河道后的 1980 年至 1992 年,陆地部分的淤积量占同期利津来沙量的比例逐渐减小,只占到同期利津来沙量的 16.1%,而滨海区淤积量占同期来沙量的比例则增大到 65.3%。1997~1999 年,滨海区淤积量则达到了利津来沙量的 68.4%。

位于径流潮流区的拦门沙作为河口区域的主要地貌系统,是上游来沙大量沉淤的必然结果。黄河河口拦门沙的形态与国内外其他河口相比,具有 3 个突出特点,即长度短,顶部水深浅以及前缘坡度陡,并且具有汛期淤进、非汛期蚀退的演变特征。拦门沙的发育扩展,其扩展宽度主要与水沙及口门摆幅大小有关,摆幅在 4~10 km 之间。在垂向上,就整个河口而言,拦门沙是有升有降,以升为主的交替状态,在近几年小水小沙的情况下,上升的幅度受到一定的抑制。由于各个口门行水持续时间不同、射流方向变幅不

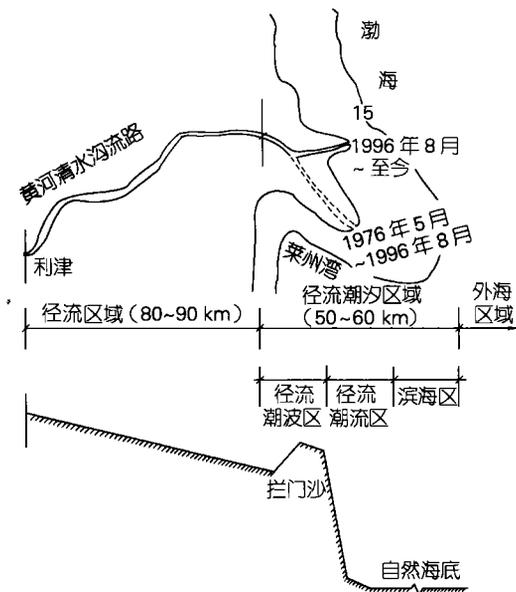


图 1 黄河河口区域划分示意

Fig. 1 Division of the Huanghe River estuary

下河段观测范围内(至清 4 断面,全长约 73 km)的淤积量也仅为 2.88 亿 t, 只占利津来沙量的 10%。

利津以下径流区域的冲淤变化特征规律同黄河下游河道基本类似,一般受制于来水来沙条件和河床边界条件,遵循“大水多排沙”、“大水淤滩刷槽”、“大水河走中泓、水流集中、河身变窄深”、“汛期冲刷,非汛期淤积”等自然演变特性。同时,随着来水来沙条件变化,输沙能力调整非常迅速,呈现出“多来、多淤、多排”、“少来、少淤(或冲刷)、少排”的输沙特点。而且主槽输沙能力大,滩地输沙能力小,水流平滩满槽时输沙能力最大。与下游河道不同的是,河口河段的冲淤变化与河口入海流路的演变阶段密切相关,变化相对激烈;同时,在流路长度发生大距离缩短时,如果相应的来水来沙条件和边界条件比较适应,河口河段会发生强烈的冲刷。另外,实测资料表明:在流路演变处于中期阶段,河槽处于窄深状态时,河段同样会发生相对较大幅度的冲刷。

需要说明的是,尽管该河段泥沙冲淤的数量较小,但它是构成河道水位上升的直接因素,同时,径流性河段的冲刷与淤积是一个相互依存、相互制约的统一体,有淤积必然就有冲刷,而冲刷到一定程度则必然有向淤积发展的趋势,这也是河床趋向冲淤平衡的

同、来水来沙条件不同,所堆积的拦门沙形状各异,大小不一,面积较大的近 50 km^2 ,较小的不足 10 km^2 ;另外,根据 1984~1992 年的实测资料,拦门沙的高度为 $0.25\sim 1.75 \text{ m}$,平均为 1.07 m 。

2.3 外海区域泥沙输移特性

除陆上和径流潮汐区域淤积外,尚有约 $1/4$ 的相对较细颗粒的入海沙量随着径流和潮流输往河口观测范围以外。如果将前述径流潮汐区域理解为入海泥沙的直接淤积扩散范围的话,那么,外海区域则可理解为入海泥沙的间接扩散范围。

相关的研究成果表明,入海泥沙一般是通过底部异重流或表层异重流的形式输往外海的。黄河口泥沙异重流广泛多发,其成因有 3 种情形:一是由河口向海排放的高泥沙量水体形成的浊流;二是由黄河河口两侧烂泥区及沿岸未固结软泥在风暴海潮情况下受波浪作用发生的再次悬浮所形成的高含沙水体顺水沿斜坡向下流动形成的泥沙异重流;三是由于沉积物块体运动而引起的阵发性泥沙异重流。上述 3 种泥沙异重流中,由河流直接排放高含沙水体到海域而引发的异重流最为直接,最为重要^[1]。

入海泥沙通过异重流的形式进入外海区域以后,在海洋动力作用下,伴随着水流含沙量的减少,泥沙或沉积、或悬浮,其扩散和运移要受到潮流、风海流、波浪、海洋激流、余流和环流等诸多因素的综合影响^[1],需要指出的是,向深海或远离河口的海区扩散的泥沙主要受海洋动力作用,而海洋动力中对泥沙扩散起作用的是余流,因此,余流的分布状况决定着泥沙扩散的趋向^[2]。

关于入海泥沙的扩散方向:实测和数学模拟潮流和余流系统,均可得出,河口区明显地分为南北两个不同的区。当河口南北均为落潮时,河口以北 SE 向流和南部 NEE 向流在河口附近汇合后向东或东北,此时黄河水沙自河口沿河道偏南向入海后,向东和东北扩散运移。当河口以北处于落潮,以南为涨潮时,潮流在河口前转向 SW 和 W,使泥沙聚集于河口南侧湾内,河口北侧,泥沙沿近岸北上。当河口南北均为涨潮时,潮流在河口前分为 NW 和 SW 两支,并在河口附近形成顺时针环流,此时黄河泥沙聚集于河口附近且明显偏南。当河口以北仍为涨潮时,河口南侧开始落潮,此时黄河水沙主要沿海岸向 NW 运移。总之,河口滨海区向外输送的悬沙主要随落潮流向 NE 运移,其次是向 E 和沿岸北上。据此,有关文献认为^[1],进入滨海区泥沙的扩散最终向东北方向进入渤海中部地区,莱州湾只是一个向外的输沙通道。

关于泥沙的扩散范围问题,因涉及因素众多和缺

乏系统的实测资料,多数研究成果并没有考虑到其时间的跨度问题,这不能不说是一个重大缺陷。显然,不同的时间跨度,入海泥沙的最终扩散范围也会有所不同。就清水沟流路而言,目前的研究成果大都认为:在涨潮流期间,黄河口外的泥沙向南运移,但最远也只能抵达小清河河口;在落潮流期间,黄河泥沙向北和东北方向运移,但最远不超过 38°N 或者向北达不到位于湾口的 5 号桩海区。

关于整个滨海区域泥沙沉积地分布特征问题,众多的研究成果基本一致,认为河口沙嘴附近入海泥沙的分选作用十分明显,淤沙由里向外由粗逐渐变细,即沙嘴前沿为粗粉沙,其外为细粉沙,再外为粉沙质粘土软泥,而远离海岸的海湾中部则为极细颗粒的粘土质软泥。

3 清水沟流路泥沙总体淤积分配特征

黄河河口现行入海流路是 1976 年 5 月人工有计划改道形成的清水沟流路,行河年限迄今已近 27 a,其河口泥沙的分配可划分为陆上、滨海和外海 3 个部位。其中,陆地部分是指利津以下至河口黄海基面 2 m 等深线之间的区域,河口海域是指河口两侧各 12 km、滨海 12 m 等深线以内的海域。

计算结果表明,1976 年 5 月~2000 年 10 月,河口利津站累计来沙量为 138.455 亿 t,其中陆地部分、滨海和输往测区外界的沙量分别为 25.61 亿 t、35.17 亿 t 和 77.675 亿 t,所占比例为 19%、25% 和 56%,从总体来看,输往外海的比例较以往流路偏大,这主要是由于清水沟流路来沙量相对偏少,而泥沙输往外海的能力可基本维持在一个相对稳定状态的缘故。

从河口泥沙沉积分配的过程来看(如图 2 所示),可得出如下两点基本认识,第一:陆上与滨海区泥沙

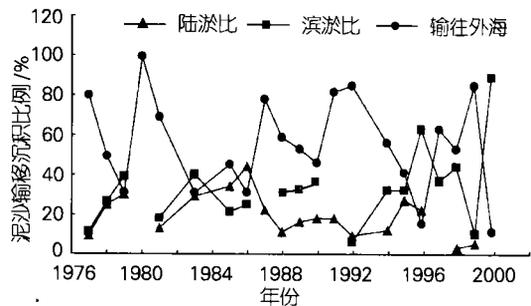


图 2 河口泥沙输移沉积分配变化过程

Fig. 2 Variations in transportation—deposition in Huanghe River estuary

的沉积变化趋势是基本一致的;第二,各部位的泥沙沉积比例变化基本呈波动状态,且陆上与滨海区泥沙的沉积比例与来沙量密切相关,基本成正比关系,当河口来沙量小到一定程度时,在适宜的边界条件下,陆上与滨海区则有可能处于冲刷状态。

4 流路泥沙沉积分配影响因素回归分析

影响河口泥沙沉积分配的因素众多复杂,包括利津来沙量(W_{sl})大小、来沙系数(ϵ)、泥沙粒径(Φ)、河相关系(ξ)、比降(J)、沙嘴岸线的凸出程度(λ)等。其中, ϵ 用时段内平均含沙量与平均流量的比值来表示, Φ 用悬沙中小于0.01 mm和小于0.007 mm的泥沙所占总量的百分比表示, ξ 用清水沟流路清

2~清4断面的 $\sqrt{B/H}$ 平均值表示, J 用西河口以下至岸线3000 m³/s流量时的水面比降表示, λ 则用西河口以下河长与改道初始河长的比值表示。

据此,对陆上淤积量(W_{ss})、滨海区淤积量(W_{sb})和输往外海的沙量(W_{sw})进行单因素回归分析计算,可以发现, W_{ss} 、 W_{sb} 、 W_{sw} 除与 W_{sl} 关系相对密切外,与其它因素关系则相对散乱。

对 W_{ss} 、 W_{sb} 、 W_{sw} 进行多因素回归计算,经分析比较, W_{ss} 、 W_{sb} 、 W_{sw} 与 W_{sl} 、 ξ 和 λ 3个因素关系密切,相关数据如表1所示。其关系式见公式(1)、(2)、(3)。至于与其它因素的关系,受资料缺乏和资料精度所限,其相关关系式的可信度较低,不再列出。

表1 黄河口泥沙分配及其影响因素计算成果

Tab. 1 Sediment distribution and its influence factors in Huanghe River estuary

起止时间(年-月)	$W_{sl}(\times 10^8 \text{ t})$	$W_{ss}(\times 10^8 \text{ t})$	$W_{sb}(\times 10^8 \text{ t})$	$W_{sw}(\times 10^8 \text{ t})$	ξ	λ
1976-05~1977-10	17.63	1.63	1.87	14.13	39.1	1.000
1977-11~1978-10	10.12	2.5	2.64	4.98	28.9	1.350
1978-11~1979-10	7.46	2.25	2.93	2.28	13.6	1.383
1979-11~1980-10	3.11	-0.46	-0.61	4.18	13.4	1.517
1980-11~1981-10	11.51	1.47	2.05	7.99	13.25	1.517
1981-11~1983-10	14.37	4.21	5.81	4.35	12.6	1.653
1983-11~1985-10	17.97	6.19	3.83	7.95	18.4	1.747
1985-11~1986-10	2.1	0.92	0.53	0.65	13.05	1.790
1986-11~1987-10	0.9	0.2	-0.4	1.10	14.3	1.840
1987-11~1988-10	8.14	0.89	2.47	4.78	13.4	1.907
1988-11~1989-10	5.76	0.9	1.78	3.08	10.3	1.982
1989-11~1990-10	4.78	0.86	1.7	2.22	10.7	2.000
1990-11~1991-10	2.66	0.49	-0.33	2.50	12.5	2.017
1991-11~1992-10	4.5	0.41	0.27	3.82	8.6	2.062
1992-11~1994-10	11.11	1.31	3.6	6.20	9.5	2.107
1994-11~1995-10	6.05	1.63	1.95	2.47		2.173
1995-11~1996-10	4.28	0.94	2.71	0.63		1.903

通过回归计算得出的陆上淤积量、滨海区淤积量、输往外海沙量的计算式分别为:

$$W_{sw} = 0.298 W_{sl} + 0.0591 \xi + 0.258 \lambda - 1.195 \quad (1)$$

$$W_{sb} = 0.316 W_{sl} - 0.0534 \xi - 0.558 \lambda + 0.557 \quad (2)$$

$$W_{ss} = 0.386 W_{sl} - 0.0057 \xi + 0.30 \lambda + 0.638 \quad (3)$$

需要说明的是,表中的公式只是简单的现行回归计算,由于影响因素众多复杂以及受资料限制,符合客观实际的较精确的关系,有待以后在充实实测资料的基础上进行更深入的分析。

参考文献:

- [1] 李殿魁,杨玉珍,程义吉,等. 延长黄河口清水沟流路行水年限的研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2002. 3.
- [2] 王恺忱,董年虎,王开荣. 黄河入海泥沙对大口河海区影响分析[A]. 黄河水利科学研究院论文集编辑委员会. 黄河水利科学研究院科学研究所论文集(第三集)[C]. 北京:中国环境科学出版社,1992. 4.

(下转第30页)

(上接第 25 页)

Regression analysis on sediment transportation – deposition pattern in Huanghe River estuary

WANG Kai-rong¹, LI Ping², ZHENG Chun-mei¹

(1. Institute of Hydraulic Research, Huanghe River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China;

2. Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Received: Sep, 15, 2003

Key words: sediment; transportation; distribution; regression analysis; Huanghe River estuary

Abstract: Based on the analysis of impact factors on sediment transportation and deposition in Huanghe River estuary, their patterns were studied systematically in 3 sections: river channel with runoff, river channel with runoff and tidal current, and offshore area. The sediment distribution patterns were analyzed with data surveyed from Lijin Hydraulic Station during Qingshuigou River channel period (since 1976-), and the regression formula of the pattern in river estuary was obtained.

(本文编辑: 刘珊珊)