

不同来源水沙对黄河入海泥沙通量的影响*

许炯心

(中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

提要 文中研究了黄河入海泥沙通量与流域上、中游不同来源区的水沙量之间的关系,并以年系列和洪水系列水文泥沙资料,建立了表达这一关系的经验统计模型。所建立的模型表明,来自不同来源区的泥沙,对于入海泥沙通量的影响是不同的。来自多沙细沙区的每 1t 泥沙,输送入海的为 0.85t(年系列)和 0.72t(洪水系列);而来自多沙粗沙区的每 1t 泥沙,输送入海的仅为 0.34t(年系列)和 0.21t(洪水系列)。70 年代以来入海泥沙通量的减少,与多沙细沙区水土保持工作的开展有密切关系。将文中的模型与已建立的黄河流域水土保持减水、减沙模型相耦合,可以用来预测未来因人类活动和气候变化而使不同来源区的水沙进一步减少时,黄河入海泥沙通量的变化。

关键词 入海泥沙通量,流域来水来沙,流域系统,黄河

中图分类号 P343.5

入海泥沙通量是构成地球系统中泥沙循环的重要环节,也是陆海交互作用过程的主要影响因子。因此,包括入海泥沙、碳元素、磷元素和氮元素在内的入海物质通量的研究受到了国际科学界的高度重视。我国学者对长江、黄河等大江大河的入海泥沙通量均进行过研究(沈焕庭等,2000;曾庆华等,1998)。

黄河是世界上最著名的多沙河流。根据 1919—1960 年的资料,在受到大型水库影响之前,由上、中游流域进入黄河下游的悬移质泥沙量,平均每年为 16 亿 t,其中 4 亿 t 淤积在河道中,12 亿 t 输送入海(钱宁等,1965)。据计算,全世界河流每年输送入海的物质为 100 亿 t,其中悬移质泥沙量占 62%(Mebeck, 1976),黄河每年输送入海的悬移质泥沙即占总量的 19.4%。可见,黄河的入海泥沙通量在全球泥沙循环中占有十分重要的地位。

黄河流域面积为 77 万 km²,跨越不同的地貌单元和气候带,形成了不同的水沙来源区,表现出独特的水沙异源现象(叶青超,1994)。对于黄河这样一个位于半干旱地区的大流域而言,笼盖全流域的暴雨十分罕见。降落于流域不同部分的暴雨所产生的洪水,往往具有不同的水沙组合特征,进入下游之后的输移沉积过程也不相同,因而输送入海的泥沙量也有很大差异。目前对于黄河入海泥沙的总量已经比较清楚,对于进入河口区泥沙的输移、沉积和河口地貌的塑造均已进行了大量研究(张士奇,1990;孙效功等,2001;李泽刚,1993)。然而,对于不同来源区的泥沙对入海泥沙通量的贡献大小,尚未进行过研究。

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目, KZCX2-20705 号;国家自然科学基金委及水利部联合资助重大项目, 59890200 号。许炯心,出生于 1948 年 12 月,男,研究员,博士生导师。E-mail: xujx@igsnr.ac.cn

收稿日期: 2001-02-10, 收修稿日期: 2002-03-06

为了对入海泥沙进行科学的管理, 必须对其来源和影响因子进行深入研究; 在此基础上, 才能对未来的变化进行预测。作者将在文中在这方面进行尝试, 以阐明不同来源的水沙对黄河入海泥沙通量的影响, 并建立预报模型。

1 水沙来源区的划分

钱宁等(1980)在研究不同来源水沙对黄河下游泥沙游积和影响时, 曾将黄河流域划分为不同的水沙来源区。许炯心(1997)着眼于自然地理要素的组合, 对不同水沙来源区的形成进行了解释, 并对其基本特征进行了概括。作者在钱宁等(1980)研究基础上, 共划分了4个主要的水沙来源区, 即河口镇以上的清水区、河镇至龙门的多沙粗沙区、龙门至三门峡之间(包括渭河及汾河)的多沙细沙区, 以及三门峡以下由伊洛河和沁河流域构成的清水区。表1中列出了黄河干流的水沙特征值, 从中可以看到4个水沙来源区的差异。关于这4个水沙来源区的自然地理特征, 许炯心(1997)中已有详细介绍, 这里不再赘述。

表1 黄河干流的水沙特征值(引自叶青超, 1994, 略有精简)

Tab. 1 Water and sediment characteristics of the Yellow River, based on data for the period 1919—1989 (after Ye, 1994, Table 2-1)

站名或区间名	控制面积		天然年水量		年沙量	
	流域面积 (km ²)	占流域面积 (%)	径流量 (×10 ⁸ m ³)	占全河 (%)	泥沙量 (×10 ⁸ t)	三门峡石+黑 石关+小董(%)
河口镇(上游)	385966	51.3	31.26	55.9	1.42	8.7
河口镇至龙门	111586	14.8	7.25	13.0	9.08	55.7
龙门至三门峡	190869	25.4	11.33	20.3	5.54	34.0
三门峡至花园口	41615	5.5	6.08	10.9	0.32	2.0
全流域	730036		580.2		16.3	

2 方法与资料来源

黄河水利委员会在黄河流域建有完善的水文站网, 进行了长期的监测, 积累了丰富的径流、悬移质泥沙输沙量和悬移质泥沙粒度组成的资料。根据有关的控制水文站的资料, 可以计算出由不同来源区进入黄河的水量和悬移质泥沙量。这种计算, 既可以以年系列资料为基础来进行, 也可以以洪水系列资料为基础来进行。具体的计算方法已列入表2

表2 4个水沙来源区来沙量的计算方法

Tab. 2 Method to calculate water and sediment from different source areas

水沙来源区	计算方法
河口镇以上清水区	以河口镇站的年均输沙量表示
河镇至龙门间的多沙粗沙区	龙门站年输沙量-河口镇年输沙量-泾河支流马连河雨落坪站年输沙量+北洛河状头站年输沙量
龙门至三门峡之间的多沙细沙	渭河华县站年输沙量+汾河河津站年输沙量-马连河雨落坪站年输沙量
伊洛河和沁河流域构成的清区	伊洛河黑石关站年输沙量+沁河小董站年输沙量

中。文中所用的资料主要来自黄河水利委员会刊印的水文资料以及黄河水利委员会水利科学研究所整编和刊印的《黄河下游河床演变基本资料汇编》(1987)。受资料来源的限制,年系列资料时段为 1950—1989 年,洪水系列资料时段为 1950—1984 年,但受三门峡水库强烈影响的 1961—1968 年除外。

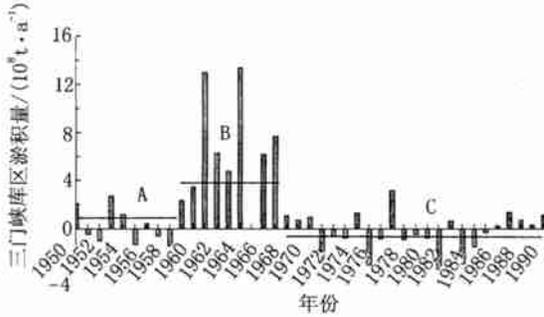


图 1 历年沉积在三门峡水库库区的泥沙量随时间的变化

Fig. 1 The annual sedimentation in the Yellow River channel between Longmen and Sanmenxia (basically the Sanmenxia Reservoir area)

A. 三门峡水库修建前; B. 三门峡水库蓄水和高水头滞洪排沙; C. 三门峡水库低水头滞洪排沙和蓄清排浑运用

应该指出,由于三门峡水库的修建,来自上、中游水沙来源区的径流和泥沙,要经过水库的调节之后才能进入孟津以下的下游河道。依水库建成和改建后运用方式的不同,三门峡水库对入库径流泥沙的调节方式和程度也不同。1960—1964 年为蓄水期,水库拦截了来自库上游的全部泥沙,进入下游的泥沙与各来源区的来沙量不存在依存关系。为了解决三门峡水库严重的泥沙淤积问题,不得不对大坝进行了改建。此后,1965—1973 年水库按滞洪排沙方式运用;1973 年以后则按蓄清排浑方式运用。在滞洪运用前期,即 1965—1968 年,汛期水库控制水位很高,大部分泥沙淤积在库内;1969—1973 年,汛期水库按低水头方式运行,淤在库中的

泥沙显著减少。在 1973 年以后的滞洪运用阶段,汛期开闸畅泄,汛后则抬高水位,拦蓄清水,故洪水过程中来自上游的泥沙基本上可以全部进入下游河道。图 1 中点绘了历年沉积在三门峡水库库区的泥沙量随时间的变化。可以看到,自 1969 年后,淤在库中的泥沙可以忽略不计。因此,作者在研究中、上游不同来源区水沙对入海泥沙通量的影响时,采用了 1950—1960 年及 1969 年以后的资料,受三门峡水库蓄水及滞洪影响的 1961—1968 年的资料未被采用。

3 影响入海泥沙通量的因素

3.1 不同来源区来水来沙对入海泥沙通量的影响

前已指出,黄河流域在水文上具有十分典型的水沙异源特征。这种特征对于入海泥沙通量有十分深远的影响。

河口镇以上清水区,是黄河径流的主要来源,来沙量则较少。对于下游河道而言,来自河口镇以上的、含沙量较低的洪水为其提供了输沙入海的动力条件。在其他地区来沙量相同的情况下,将会增加送到河口的泥沙数量。河口镇至龙门之间的多沙粗沙区,来沙量大而径流相对较少,高含沙水流频繁发生。如果洪水来自多沙粗沙区而河口镇以上来水较少,则洪水进入下游河道后,由于缺乏足够的搬运动力,将会在河道中特别是在高村以上的宽浅游荡段中大量淤积,因而输送到河口的泥沙将会减少。图 2 中以 1950—1960 年及 1969—1984 年间 145 次洪水的资料为基础,点绘了输送到河口区的泥沙量与进入下游河道的泥沙量之间的关系。可以看到,所有的点据可以被一条直线分成两部分,洪峰含

沙量 C_{max} 大于 $200\text{kg}/\text{m}^3$ 的点据位于直线下方, 而 C_{max} 小于 $200\text{kg}/\text{m}^3$ 的点据位于直线上方。由于在黄河下游, 含沙量大于 $200\text{kg}/\text{m}^3$ 的水流可以认为已属于含沙水流(赵文林, 1996), 故图 2a 表明, 在同样来沙量的情况下, 高含沙洪水沿程淤积量要比非高含沙洪水大, 因而到达利津的泥沙量要比非高含沙洪水少得多。为了进一步揭示高含沙水流对入海泥沙通量的影响, 作者在图 2b 中点绘了 145 次洪水过程中输送到利津站以下的泥沙量与进入下游的泥沙量之比与场次洪水中的最大含沙量 C_{max} 的关系, 二者表现出很强的负相关, 说明高含沙水流越发育, 能够输送入海的泥沙量占下游河道来沙量的比例越小。

3.2 泥沙粒度特征的影响

黄河上中游不同水沙来源区产沙量的差异, 不仅表现在量的方面, 而且也表现在质的即粒度组成方面。河口镇至龙门区间来自多沙粗沙区的泥沙, 粒度组成较粗, 按 1962—1984 年累计沙量计, $> 0.05\text{mm}$ 的百分比为 34.7%; 而来自渭河、汾河所构成的多沙细沙区的泥沙, $> 0.05\text{mm}$ 的百分比仅为 12.0%。具有一定水利条件的水流, 输送粗泥沙和细泥沙的能力是不同的。以输送到河口的泥沙与进入黄河下游的泥沙之比来表示河道的输沙能力, 称为排沙比。将排沙比与来沙中大于 0.05mm 的百分比与小于 0.025mm 的百分比分别建立关系(图 3), 前者表现出负相关, 而后者表现为正相关。这是因为, 挟沙能力关系可以用下式表示:

$$\rho = k(v^3/gh\omega)^m \quad (1)$$

式中 ρ 为挟沙能力, v 为流速, h 为水深, ω 为泥沙沉速, g 为重力加速度, k 、 m 为经验系数与指数。由此式知, 在一定的水力条件下, 挟沙力与沉速成反变, 泥沙越粗, 沉速越大, 因而挟沙能力越小, 故水流能输送到海的比率亦越小。

4 基于年系列资料的统计关系

为了建立入海泥沙量与不同来源区水沙的关系, 首先以年系列资料为基础进行了分析。表 3 中列出了代表入海悬移质泥沙量的利津站年输沙量与 4 个水沙来源区的年径流量与泥沙量之间的相关系数矩阵。可以看到, 入海泥沙量与 4 个来源区的水、沙都有一定的相关关系。

依据上述资料, 建立了入海泥沙量与各来源区的水量、沙量的线性回归方程:

$$S_{Lijin} = -7.55 + 0.0273W_H - 0.290S_H + 0.011W_{FSA} + 0.900S_{FSA} + 0.0575W_{CSA} +$$

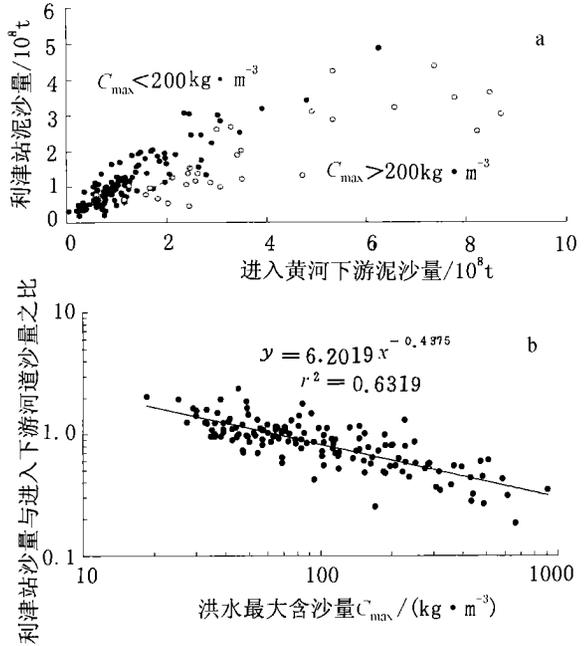


图 2 高含沙水流对入海泥沙通量的影响

Fig. 2 Effect of hyperconcentrated flows on sediment discharge into the sea

a. 输送到黄河河口区的泥沙量与进入下游河道的泥沙量之间的关系; b. 输送到利津站以下的泥沙量与进入下游的泥沙量之比与场次洪水中的最大含沙量 C_{max} 的关系

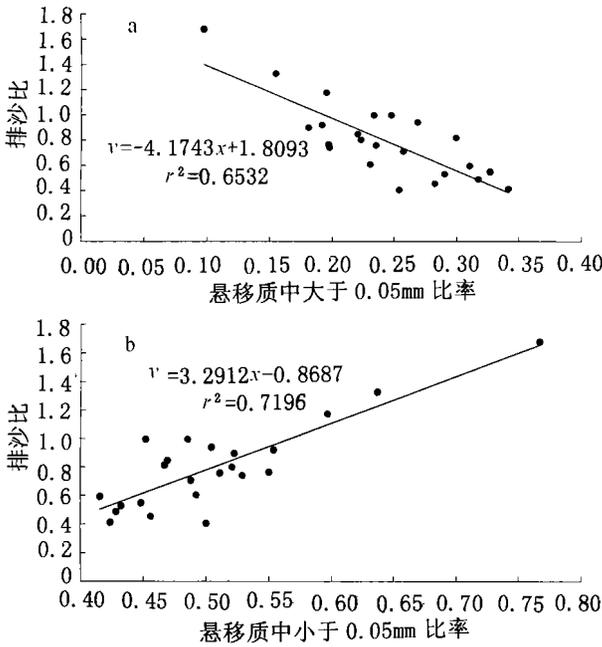


图 3 排沙比与来沙中大于 0.05mm 的比率 (a) 与小于 0.025mm 的比率 (b) 的关系

Fig. 3 Relationship between the channel sediment delivery ratio and the proportions of > 0.05mm (a) and < 0.025mm (b) in the suspended sediment load

$$0.132S_{CSA} + 0.044W_{YLQ} - 0.500S_{YLQ} \quad (2)$$

$(r^2 = 0.953, S = 1.107, F = 92.02, n = 32)$

式中水量以亿 m³ 计, 沙量以亿 t 计。由于各来源区的水、沙之间均存在着较好的相关关系, 彼此间并不独立, 故将 8 个自变量均选入回归方程并不十分合理。由于泥沙主要来自多沙粗沙区与多沙细沙区, 径流主要来自河口镇以上的清水区, 而来自伊洛沁河清水区的径流对黄河下游的洪水可以起到稀释作用, 因而有利于输沙入海, 因此作者以多沙粗沙区与多沙细沙区来沙、河口镇以上清水区与伊洛沁河清水区来水作为自变量, 建立回归方程如下:

$$S_{Lijm} = -4.94 + 0.857S_{FSA} + 0.337S_{CSA} + 0.0284W_H + 0.0628W_{YLQ} \quad (3)$$

$(r^2 = 0.940, S = 1.343, F = 44.85, n = 32)$

值得注意的是, 在上述两个回归方程中, 多沙粗沙区来沙 S_{CSA} 和多沙细沙区来沙 S_{FSA} 的系数有较大差异, 说明来自这两个来源区泥沙对入海泥沙通量的贡献是不同的。假定式(2)中的 S_{FSA} , W_H 和 W_{YLQ} 保持为常数, 令 S_{CSA} 变化, 对两端取偏导数, 可得:

$$\frac{\partial S_{Lijm}}{\partial S_{CSA}} = 0.337 \quad (4)$$

再假定式(2)中 S_{CSA} , W_H , W_{YLQ} 保持为常数, 令 S_{FSA} 变化, 取偏导数后得到:

$$\frac{\partial S_{Lijm}}{\partial S_{FSA}} = 0.857 \quad (5)$$

由上列二式可知, 在其他因素相同时, 来自多沙粗沙区的每 1t 泥沙中, 只有 0.337t 被输送到河口; 而来自多沙细沙区的每 1t 泥沙中, 仅有 0.857t 被输送到河口。这说明, 不同

来源区的泥沙, 对黄河入海泥沙通量的贡献是迥然不同的。

表 3 利津站年输沙量与 4 个水沙来源区的年径流量与泥沙量之间的相关系数矩阵

Tab. 3 Correlation matrix between the sediment into the sea, represented by the annual suspended sediment load at Lijin station, and the annual water and sediment quantities from the four major sediment source areas

	S_{LJJN}	W_H	S_H	W_{FSA}	S_{FSA}	W_{CSA}	S_{CSA}	W_{YLQ}	S_{YLQ}
W_H	0.435								
S_H	0.650	0.816							
W_{FSA}	0.698	0.569	0.562						
S_{FSA}	0.767	0.029	0.260	0.468					
W_{CSA}	0.621	-0.143	0.304	0.150	0.466				
S_{CSA}	0.645	-0.153	0.129	0.112	0.671	0.754			
W_{YLQ}	0.681	0.363	0.465	0.813	0.406	0.301	0.244		
S_{YLQ}	0.615	0.200	0.368	0.526	0.424	0.379	0.409	0.816	

注: S_{LJJN} 为利津站的年输沙量, W_H 为来自河口镇以上清水区的年水量, S_H 为来自河口镇以上清水区的年输沙量, W_{FSA} 为来自多沙细沙区的年水量, S_{FSA} 为来自多沙细沙区的年输沙量, W_{CSA} 为来自多沙粗沙区的年水量, S_{CSA} 为来自多沙粗沙区的年输沙量, W_{YLQ} 为来自伊洛沁河清水区的年水量, S_{YLQ} 为来自伊洛沁河清水区的年输沙量

上述差异是粗泥沙和细泥沙具有不同输沙行为的结果, 可以用上文中已经讨论过的水流挟沙能力与泥沙粒径之间的反变关系来解释。由于水流挟运粗颗粒泥沙的能力要远远小于细颗粒, 而黄河下游又是一条强烈淤积的河道, 故淤积在河道中的粗泥沙要比细泥沙多得多, 因而在给定沙量的情形下, 输送入海的粗泥沙则会远远少于细泥沙。这就是上述结果的形成机理。

另外, 作者还建立了入海沙量与 4 个来源区的沙量之间的关系:

$$S_{LJJN} = -1.02 + 3.54S_H + 0.927S_{FSA} + 0.213S_{CSA} + 2.90S_{YLQ} \quad (6)$$

$$(r^2 = 0.899, S = 1.603, F = 60.31, n = 32)$$

可以看到, 式中两个清水区沙量即 S_H 和 S_{YLQ} 的系数均大于 1。这意味着, 若假定其他条件相同, 则来自清区的每 1t 泥沙所导致的入海泥沙将分别为 3.54t (河口镇以上清水区) 和 2.90t (伊洛沁河清水区)。从表面上看, 这似乎不合理; 但实际上, 这是由于来自这两个区的清水远离饱和状态, 可以使来自两个多沙区的泥沙更有效地得到搬运, 或者是冲刷河床, 使更多的泥沙进入径流并最终被输送入海。因而来自清水区每挟带 1t 泥沙的径流, 可以输送超过 1t 的泥沙入海。

5 基于洪水系列资料的统计关系

以 1950—1960 年及 1969—1984 年间的 145 次洪水的资料为基础, 研究了历次洪水中不同来源的水沙与入海泥沙之间的关系。各变量之间的相关系数矩阵见表 4。

依据上述资料, 建立了基于洪水序列资料的入海泥沙量与各来源区的水量、沙量之间的线性回归方程:

表 4 利津站 145 次洪水的输沙量与 4 个水沙来源区的来水量与来沙量之间的相关系数矩阵

Tab. 4 Correlation matrix between the sediment into the sea, represented by the event suspended sediment load at Lijin station, and the event water and sediment quantities from the four major sediment source areas, based on 145 flood events in the periods of 1950—1960 and 1969—1984

	SF_{Lijin}	WF_H	WF_{CSA}	WF_{FSA}	WF_{YLQ}	SF_H	SF_{CSA}	SF_{FSA}
WF_H	0.310							
WF_{CSA}	0.648	-0.008						
WF_{FSA}	0.507	0.228	0.166					
WF_{YLQ}	0.445	0.099	0.271	0.482				
SF_H	0.399	0.847	-0.004	0.227	0.094			
SF_{CSA}	0.573	-0.162	0.874	-0.014	0.062	-0.091		
SF_{FSA}	0.702	-0.093	0.501	0.425	0.317	-0.046	0.491	
SF_{YLQ}	0.428	0.000	0.338	0.255	0.878	0.006	0.172	0.385

注: SF_{Lijin} 为利津站的年沙量, WF_H 为来自河口镇以上清水区的年水量, SF_H 为来自河口镇以上清水区的年沙量, WF_{FSA} 为来自多沙细沙区的年水量, SF_{FSA} 为来自多沙细沙区的年沙量, WF_{CSA} 为来自多沙粗沙区的年水量, SF_{CSA} 为来自多沙粗沙区的年沙量, WF_{YLQ} 为来自伊洛沁河清水区的年水量, SF_{YLQ} 为来自伊洛沁河清水区的年沙量

$$SF_{Lijin} = 549 + 55.7WF_H + 2.84SF_H + 270WF_{FSA} + 0.589SF_{FSA} + 255WF_{CSA} + 0.172SF_{CSA} + 210WF_{YLQ} + 0.401SF_{YLQ} \quad (7)$$

($r^2 = 0.837, S = 3801, F = 85.72, n = 145$)

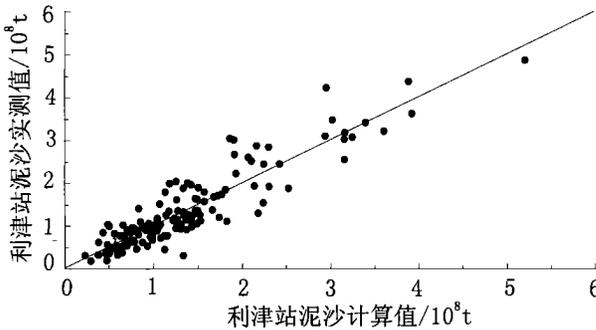


图 4 按(7)求得的利津站沙量计算值与实测值的比较
Fig. 4 Comparison between the calculated and the measured sediment load at Lijin station

式中水量以亿 m^3 计, 沙量以万 t 计。将历次洪水中各来源区的水量、沙量代入上式, 可以计算出利津站的沙量。计算值与实测值的比较见图 4。限于篇幅, 文中其他各式的计算值与实测值的比较图从略。

以多沙粗沙区与多沙细沙区来沙、河口镇以上清水区与伊洛沁河清水区来水作为自变量, 可以建立回归方程:

$$SF_{Lijin} = 1624 + 0.716SF_{FSA} + 0.213SF_{CSA} + 296WF_H + 421WF_{YLQ} \quad (8)$$

($r^2 = 0.782, S = 4339, F = 125.42, n = 145$)

以多沙粗沙区、多沙细沙区、河口镇以上清水区与伊洛沁河清水区来沙作为自变量, 可以建立如下回归方程:

$$SF_{Lijin} = 2594 + 0.730SF_{FSA} + 0.189SF_{CSA} + 3.84SF_H + 1.74SF_{YLQ} \quad (9)$$

($r^2 = 0.795, S = 4201, F = 136.12, n = 145$)

对于式(7), 假定自变量依次为 S_{CSA} 或 S_{FSA} , 其余 3 个变量为常量, 对两端分别求偏导

数后可以得到:

$$\delta SF_{Lijm} / \delta SF_{CSA} = 0.213 \quad (10)$$

$$\delta SF_{Lijm} / \delta SF_{FSA} = 0.716 \quad (11)$$

即洪水事件中来自多沙粗沙区的每 1t 泥沙, 只有 0.213t 输送入海; 来自多沙细沙区的每 1t 泥沙, 只有 0.716t 输送入海, 差异十分明显。

可以看到, 与年系列资料的计算结果相比, 洪水事件中来自粗沙区和细沙区的泥沙输送入海的比例都要小一些。这是由于, 汛期洪水事件中, 有一部泥沙沉积在河道的主槽中和滩地上; 非汛期, 进入下游的径流含沙量很低, 处于不饱和状态, 可以冲刷河床, 使洪水事件中淤在河床中的泥沙得以输送入海。由于这一原因, 对于年系列而言, 来自各泥沙来源区的每 1t 泥沙, 能被送入海的比率要高于洪水事件系列。

在同一次洪水事件中, 进入下游河道的水沙来自不同的来源区, 在下游河道中形成了一定的水沙组合关系。这种组合关系可以用来沙系数 R_c 来反映, 来沙系数定义为洪水事件平均含沙量与平均流量之比, 表示相对于水量而言来沙量的多寡。洪峰中最大含沙量可以用来表征高沙沙水流影响的程度。依据 145 次洪水的资料, 建立了利津站的输沙量与进入黄河下游的水量、沙量、来沙系数、洪水事件的最大含沙量之间的经验关系:

$$SF_{Lijm} = 306Q_w + 138Q_s + 0.514 Q_s - 19129R_c - 18.0C_{max} \quad (12)$$

($SE = 340, r^2 = 86.5\%, F = 224.73$)

式中 Q_w 为次洪水的总水量, Q_s 为总沙量, R_c 为来沙系数, 系以三门峡、黑石关、小董 3 站的水沙之和为基础计算得到; C_{max} 为场次洪水中最大含沙量。上式表明, 洪水事件来沙系数越大, 洪水最大含沙量越大, 则输送入海的泥沙越少, 因为此时淤在河道中的泥沙将增多, 使得入海泥沙减少。

6 应用意义

文中建立了一系列的黄河入海泥沙通量与不同来源区来沙量的经验关系, 这些关系可以用来预测各来源区水、沙发生变化以后, 入海泥沙通量的变化。

从 20 世纪 70 年代以来, 黄河入海泥沙通量持续减少, 对此将另文讨论。这种减少一方面与降雨特别是暴雨偏少有关, 但更主要的是由于流域中水土保持措施使进入黄河干流中的泥沙大幅度减少。关于黄河流域水土保持措施的减水量和减沙量, 10 余年来已进行了大量工作, 取得了很大的进展, 提出了估算黄河流域水土保持措施减水量和减沙量的水文法和水保法两种比较成熟的计算方法(叶清超, 1994; 张胜利等, 1994)。通过这两种方法, 可以对不同来源区因水土保持措施的实施而导致的入黄径流和泥沙的减少量进行估算, 将所获得结果代入本研究所得到的经验公式, 即可计算出入海泥沙通量的变化。换言之, 如果将已有的估算黄河上、中游减水减沙的模型与本文中的经验模型相耦合, 则对于未来水土保持对入海泥沙通量变化的影响进行定量预测是可以实现的。

运用本文中的公式, 还可以对不同来源区的泥沙对入海泥沙通量的贡献进行估算。20 世纪 70 年代以来入海泥沙通量的减少, 已经带来了一系列的环境后果, 必须查明减少的原因, 才能采取必要的对策进行调控。运用本文中的经验公式计算的成果表明, 就全年而论, 来自多沙细沙区的每 1t 泥沙, 有 0.85t 输送入海; 来自多沙粗沙区的每 1t 泥沙, 只

有 0.34t 入海。对于洪水事件而言,来自多沙细沙区和多沙粗沙区的每 1t 泥沙其入海的部分分别为 0.72t 和 0.21t。这就启示我们,多沙细沙区的水土保持工作,导致了入海泥沙通量的大幅度减少。

7 结论

7.1 黄河入海泥沙通量与流域上、中游不同来源区的水沙量有密切的关系。本文以年系列和洪水系列的来水来沙和入海泥沙通量的资料,建立了表达这一关系的经验统计模型。

7.2 本文中所建立的经验模型表明,来自不同来源区的泥沙,对于入海泥沙通量的影响是不同的。来自多沙细沙区的每 1t 泥沙,输送入海的为 0.85t(年系列)和 0.72t(洪水系列);而来自多沙粗沙区的每 1t 泥沙,输送入海的仅为 0.21t(年系列)和 0.34t(洪水系列)。70 年代以来入海泥沙通量的减少,与多沙细沙区水土保持工作的开展有密切关系。

7.3 将本文中的模型与已建立的黄河流域水土保持减水、减沙模型相耦合,可以用来预测未来因人类活动和气候变化而使不同来源区的水沙进一步减少时,黄河入海泥沙通量的变化。

参 考 文 献

- 叶青超(主编),1994.黄河流域环境变迁与水沙运行规律研究.济南:山东科学技术出版社,1—250
- 孙效功,赵海虹,崔承琦,2001.黄河三角洲潮滩潮沟体系的分维特征.海洋与湖沼,32(1):74—81
- 许炯心,1997.黄河上中游产水产沙系统与下游河道沉积系统的耦合关系.地理学报,52(5):421—429
- 张士奇,1990.黄河口输沙及冲淤变形计算研究.水利学报,1:23—33
- 张胜利,于一鸣,1994.水土保持减水减沙效益计算方法.北京:中国环境科学出版社,1—160
- 李泽刚,1993.黄河口拦门沙的形成机制.海洋学报,15(1):84—91
- 沈焕庭,张超,毛志昌,2000.长江入河口区水沙通量变化规律.海洋与湖沼,31(3):288—295
- 赵文林主编,1996.黄河泥沙.郑州:黄河水利出版社,1—350
- 钱宁,王可钦等,1980.黄河中游粗泥沙来源区对黄河下游冲淤的影响.第一次河流泥沙国际学术讨论会论文集.北京:光华出版社,53—62
- 钱宁,周文浩,1965.黄河下游河床演变.北京:科学出版社,1—160
- 曾庆华,胡春洪,1998.黄河口演变规律及整治.济南:黄河水利出版社,1—98
- Mebeck M., 1976. Total mineral dissolved transport by major world rivers. Hydrological Sciences Bulletin, 20: 265—284

SEDIMENT FLUX INTO THE SEA AS INFLUENCED BY DIFFERENT WATER AND SEDIMENT SOURCES IN THE DRAINAGE BASIN: AN EXAMPLE FROM THE YELLOW RIVER, CHINA

XU Jiong-Xin

(*Institute of Geographical Sciences and Natural Resources, The Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101*)

Abstract The runoff and sediment of large rivers usually come from different source areas, which make different contributions to the sediment flux into the sea. This has been studied with an example from the Yellow River in China, whose suspended sediment flux into the sea accounts for a large percentage of the total of the world. The drainage basin of this river can be divided into 4 major water and sediment source areas. The sediment flux into the sea is closely related to the water and sediment from the different source areas in the drainage basin and, accordingly, an empirical regression model has been established to express this relationship. According to this model, for each unit amount of sediment from the fine sediment producing area (FSA), 85% (for annual series) or 72% (for event series) can be transported into the sea; however, for the sediment from the coarse sediment producing area (CSA), only 21% (for annual series) or 34% (for event series) can be delivered to the sea. Since the 1970s, the Yellow River's sediment flux into the sea has declined markedly and this reduction can be attributed to a great degree to the soil control measures in the fine sediment producing area.

Combining the model of this study and the previously established models for estimating the water and sediment reduction caused by soil control measures in the Yellow River basin, quantitative prediction may be made for the change of sediment flux caused by climate change and human activities in the future.

Key words Sediment flux into the sea, Runoff and Sediment sources, Fluvial system, Yellow River