

流域因素与人类活动对黄河下游河道输沙功能的影响*

许炯心**

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 从泥沙收支平衡的概念出发定义了河道的输沙功能, 提出了河道输沙功能的定量指标, 研究了流域自然因子和人类活动对黄河下游河道输沙功能的影响. 这种影响可以用不同水沙来源区的降水量、进入黄河下游的大于 0.05 mm 粗泥沙占来沙量百分比、黄河上游水库对汛期清水基流的调节程度(以兰州站汛期径流量占全年百分比表示)、高含沙水流频率、流域内水土保持措施实施面积等来定量表达. 运用多元回归分析方法, 建立了黄河下游河道输沙功能指标与上述 7 个因子之间的多元回归方程. 表明不同水沙来源区降水量的减少对下游河道输沙功能的影响是不同的. 河口镇以上清水区和龙门至三门峡之间年降水量减少, 将导致下游河道输沙功能指标降低; 河口镇至龙门间降水减少, 将导致下游河道输沙功能指标增高. 来沙的组成强烈地影响下游河道输沙功能指标, 进入黄河下游的大于 0.05 mm 粗泥沙占来沙量百分比越大, 则河道输沙功能指标越低. 因此, 小浪底水库拦截粗泥沙、排出细泥沙, 将有利于提高下游河道输沙功能指标. 兰州站汛期径流量占全年百分比越低, 下游河道输沙功能指标越低, 说明黄河上游水库大量拦截汛期清水基流, 是下游河道输沙功能降低的原因之一.

关键词 河流泥沙 河道淤积 流域因素 人类活动 黄河

自从 1986 年以来, 黄河下游流量急剧减少, 进入了以低流量为主导, 并伴有季节性断流的状态^[1,2]. 尽管从 1999 年起, 通过实施严格的引水管理措施, 断流大为缓解并基本上得到控制, 但低流量状态仍未改变, 黄河下游已成为人为的萎缩性河道. 经过近

40 年的努力, 上中游水土保持显著生效, 加上气候变化的影响, 20 世纪 90 年代进入下游河道泥沙量(以花园口站为代表)仅为 7.27×10^7 t/a, 相当于 1950~1960 年间平均值 15.6×10^8 t/a 的 46.6%. 然而, 由于下游河道萎缩, 作为输沙动力的径流量大幅度减少, 黄河

2003-10-26 收稿, 2004-02-02 收修稿稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(编号: G1999043604)和国家自然科学基金及水利部联合资助重点项目(批准号: 50239080)共同资助

** E-mail: xujx@igsrr.ac.cn

下游河道淤积仍较严重,尤其是主槽内的淤积,致使同流量下水位的抬升速率仍然很大,由此对下游河道防洪产生了很大的压力.

为了深入理解黄河下游河道在新的水沙条件下所发生的变化及其形成机理,从而为下游河道治理提供决策依据,必须研究黄河下游河道输沙能力下降的原因.一些学者已提出了黄河下游输沙功能衰竭的问题¹⁾.本文将从地貌学的原理出发,提出河道输沙功能的概念,并对流域因素与人类活动对黄河下游河道输沙功能的影响进行研究.

1 河道输沙功能的内涵及其定量指标

河流系统是一个开放系统,具有多种功能,包括生态功能、水资源功能、行洪功能、输沙功能、航运功能和环境美学功能等.对于黄河这样的多泥沙河流而言,输沙功能的研究具有重要意义.按流域系统理论,一个完整的河流系统可分为产流产沙带、输沙带和沉积带 3 个子系统^[3].泥沙输移是输沙带最主要的功能.我们将河道输沙功能定义为某一河道在宏观意义上输送泥沙的能力.对于黄河下游而言,则是指河道将进入下游的泥沙输送入海的能力.河道输沙功能的水力学基础是河道水流挟沙能力,两者之间既有联系又有区别.水流挟沙能力是针对某一断面而言的,是指当满足输沙平衡条件即挟沙水流达到饱和时,挟沙水流的床沙质含沙量.挟沙能力与表达水流强度的变量(如水流切力、流速、能量消耗率等)和表达泥沙特性的变量(如泥沙粒径及其组成、泥沙沉速)之间具有函数关系,这一函数关系主要反映水流的微观水力学和泥沙动力学行为.我们认为,河道输沙功能是宏观意义上的,它不是指一个断面,而是针对一个河段甚至整个下游河道;它也不要求满足输沙平衡条件,因为在天然情况下,河道可以是平衡的或非平衡的(包括淤积的和冲刷的),在不同情形下的河道都具有输沙功能.

由于河道水流的水力学特性是变化不定的,不仅有显著的季节性变化,而且在同一次洪水过程中,从涨水到落水会经历十分剧烈的变化.因此,要以水

流的水力学特性来定义河道的输沙功能,存在一定困难.在地貌学上,常常用某一过程所产生的效应,来对这一过程进行度量.因此,我们以一个河道为单元,从泥沙收支平衡的概念(Sediment budget)出发,来定义河道的输沙功能.

设某一河道除干流外,还包括若干支流,干流进口控制站的全沙年输沙量为 $Q_{s,i}$,干流出口站的全沙年输沙量为 $Q_{s,o}$,各支流汇入的年沙量为 $Q_{s,t1}, Q_{s,t2}, \dots$,其和为 $\sum Q_{s,t}$.按沙量收支平衡概念:

$$Q_{s,i} + \sum Q_{s,t} = Q_{s,o} + Q_{d,s}, \quad (1)$$

式中, $Q_{d,s}$ 为该河段的年沉积量(以正值表示)或年冲刷量(以负值表示).由上式得:

$$\frac{Q_{s,o}}{Q_{s,i} + \sum Q_{s,t}} = 1 - \frac{Q_{d,s}}{Q_{s,i} + \sum Q_{s,t}}, \quad (2)$$

以上式左端来定义河道输沙功能,称为输沙功能指标,以 F_s 来代表,表示某河道的输出泥沙量与进入该河道的泥沙总量之比.很显然, F_s 即为地貌学意义上的河道泥沙输移比,或河道排沙比.若只考虑淤积的情况,则公式(2)右端第二项即为河道泥沙的淤积比,它反映河道泥沙沉积汇(Sink)中的沉积量占来沙量的比例.

引入上述定量指标,可以反映河道的平衡或非平衡状况.若 $F_s > 1$,则河道处于冲刷; $F_s = 1$,河道处于平衡; $F_s < 1$,河道处于淤积.同时,河道输沙功能指标还反映了河道输送泥沙的效率,此值越大,则输沙效率越高.若不考虑冲刷的情形,则越接近于 1.0,说明河道输送泥沙的效率越高.

进入河道的泥沙量反映了河流负载的大小,输出河道的泥沙量则反映了河道输沙能力的大小,故 F_s 也是一个衡量河道负载与输沙能力的对比关系的指标.河道的负载取决于流域的侵蚀产沙.河道的输沙能力取决于来自流域的径流量及其时间过程,同时还与河道自身的形态特性有关.对于冲积性河道而言,其自身的形态特性也是河道针对来水量和来沙量进行长期的自动调整之后形成的,因而归根到底也取决于流域的特性.因此,在本文中,将黄河下游的河道输沙功能指标与来自流域的水沙特性和人

1) 赵业安. 21 世纪黄河下游形势与对策研究. 黄河水利科学研究院, 1999

类活动相联系, 探讨黄河下游输沙功能衰退的原因.

黄河下游输沙功能取决于水沙条件和河道几何形态. 对黄河这样的多泥沙河流而言, 由于来沙量极大, 加以河道不稳定, 游荡强度大、变形速率快^[4], 因而河床自动调整的速率很快, 当水沙条件改变之后, 河床便会适应于变化之后的水沙条件, 在较短的时间塑造出新的河床形态, 尤其是横断面和平面形态. 由此可以认为, 河床形态是水沙条件的函数. 另一方面, 黄河流域的气候条件以半干旱占主导, 地表覆盖着疏松易蚀的黄土层, 当气候条件如降雨发生改变之后, 或者当土地利用土地覆被条件因人类活动而改变之后, 径流泥沙条件会迅速发生变化. 同时, 人类通过水库的调节作用, 也会使河流水沙条件发生显著的变化. 可以认为, 黄河下游的水沙条件又是流域自然地理因子与人类活动的函数.

由此可知, 流域自然地理因子和人类活动的变化将导致水沙条件的变化, 而水沙条件的变化又会进而导致河道几何形态的变化, 这些变化将共同对河道的输沙功能产生影响. 换言之, 可以将流域因素与人类活动同河道输沙功能相联系, 以阐明河道输沙功能变化的原因.

按本文提出的定义, 黄河下游输沙功能指标可以定义为在一定的时间内, 输送入海的泥沙(以利津站为代表)与进入河道中的泥沙(按干流三门峡站、伊洛河黑石关站、沁河小董站输沙量之和减去全下游灌溉引沙量来计算)之比, 用 F_s 表示:

$$F_s = \frac{Q_{s,l}}{Q_{s,s} + Q_{s,h} + Q_{s,x} - Q_{s,div}}, \quad (3)$$

式中, $Q_{s,s}$, $Q_{s,l}$, $Q_{s,h}$, $Q_{s,x}$ 分别为三门峡站、利津站、黑石关站、小董站的沙量, $Q_{s,div}$ 为全下游的灌溉引沙量. 本文所涉及到的流量、输沙量、悬移质泥沙粒径组成以及降水量的资料均来自黄河流域有关水文站, 灌溉引水、引沙资料则来自黄河水利委员会有关部门的统计资料.

2 影响因子分析及其定量表达

2.1 自然因子

由于本文研究的是近 50 年来即有水文观测资料

以来的变化, 故以降水的变化来反映自然因子的变化, 其他因子的影响暂时从略. 黄河流域有水沙异源的特征^[5]. 径流主要来自河口镇以上的流域, 该区域来沙较少, 形成一个相对清水区; 泥沙主要来自河口镇至三门峡之间的流域, 其中又以河口镇至龙门之间产沙强度和来沙量最高, 且来沙较粗, 称为多沙粗沙区; 而龙门至三门峡间来沙较细, 称为多沙细沙区^[6]. 故可以将这 3 个区域的降水量加以区分, 引进河口镇以上流域的面平均年降水量 $P_H(\text{mm})$, 河口镇至龙门区间的面平均年降水量 P_{H-L} 和龙门至三门峡之间的面平均年降水量 P_{L-S} , 按相应区域内各雨量站的资料和各雨量站的控制面积, 以加权平均方法求得.

降雨与产流有密切的关系, 降雨减少时, 年径流量会减小, 这将导致输沙动力的减弱, 因而使输沙功能减弱. 然而, 在降雨减少的情况下, 侵蚀强度和产沙量也会降低, 这将使河流的负载减轻, 因而增强输沙功能. 故河道输沙功能的变化方向最终取决于二者的对比关系.

2.2 人为因子

(i) 水库调节. 按水库功能的不同, 可以分为黄河上游刘家峡、龙羊峡等以发电为主的水库和目前按蓄清排浑方式运用的三门峡水库. 黄河上游为主要径流来源区, 河口镇以上的来水量占全流域的 55.9%^[5], 且含沙量低, 加以上游河道比降大, 多峡谷, 是黄河流域水能资源集中分布的地区. 从 20 世纪 60 年代起, 这里先后建成了一系列以发电为主的水库, 使径流过程受到强烈的调节. 为了保证均衡发电, 汛期的清水大量被拦截, 因而使汛期径流减少, 非汛期径流增加. 汛期中来自河口镇以上的清水基流被拦截之后, 来自河龙区间的含沙量很高的洪水得不到稀释, 使进入下游的洪水出现水少沙多的组合特点, 因而高含沙流发生的频率增加. 这些都将导致黄河下游泥沙淤积的增加. 所以, 兰州以上的汛期清水基流被拦截以后, 下游河道的输沙功能可能会减弱. 为了表征上游水库对径流的调节作用, 以兰州站汛期(6~10 月)径流量占全年总径流量的比率作为指标, 用 R_L 来表示. 很显然, 当兰州以上汛期径流所占比率减小时, 黄河下游输沙动力会减弱, 因而使下游河道

输沙功能降低. 相关系数的计算证明了这一点 (表 1).

表 1 相关系数矩阵

	$\ln r_{>0.05}$	$\ln R_L$	$\ln A_{\text{ifgd}}$	f_h	$\ln P_L$	$\ln P_{H-L}$	$\ln P_{L-S}$	$\ln F_s$
$\ln r_{>0.05}$	1.00	-0.30	0.30	0.21	-0.20	-0.27	-0.28	-0.82
$\ln R_L$	-0.30	1.00	-0.72	-0.35	0.23	0.21	0.46	0.43
$\ln A_{\text{ifgd}}$	0.30	-0.72	1.00	0.02	-0.04	-0.21	-0.34	-0.28
f_h	0.21	-0.35	0.02	1.00	0.09	0.17	0.01	-0.33
$\ln P_L$	-0.20	0.23	-0.04	0.09	1.00	0.74	0.55	0.39
$\ln P_{H-L}$	-0.27	0.21	-0.21	0.17	0.74	1.00	0.64	0.25
$\ln P_{L-S}$	-0.28	0.46	-0.34	0.01	0.55	0.64	1.00	0.35
$\ln F_s$	-0.82	0.43	-0.28	-0.33	0.39	0.25	0.35	1.00

三门峡水库自 1960 年建成蓄水之后, 曾发生过强烈的淤积, 水库分别于 1962 年和 1969 年进行过两次改建. 自 1960 年以来, 水库运用方式经历过数次变化^[7]. 1960~1964 年为蓄水运用, 此期间内下泄清水, 下游河道发生冲刷, 河道输沙功能指标达到 1.58. 1965~1973 年为滞洪排沙运用, 洪水发生时滞洪, 洪水过后排沙, 河道输沙功能指标下降至 0.73. 1973 年以后水库按蓄清排浑方式运用, 洪水时开闸畅泄, 洪水过程不受调节, 汛后则关闸蓄水用于灌溉, 1974~1980 年间下游河道输沙功能指标增大至 0.79, 高于滞洪排沙时期.

(ii) 水土保持. 自 20 世纪 60 年代以来, 大规模的水土保持工作在黄河上中游流域中展开, 以控制土壤侵蚀和拦截沟道中的泥沙, 从而达到减少入黄泥沙, 缓解黄河下游河道淤积的目的. 水土保持措施可以分为修造梯田、造林、种草和修筑淤地坝拦沙等类型. 水土保持措施改变了地表植被条件, 从而改变侵蚀产沙过程^[8,9].

水土保持措施减少入黄泥沙的效益十分显著, 在图 1 中点绘了上中游各年代以来不同措施的实施面积与龙门、华县、河津、淤头 4 站各年代的年平均输沙量之和的关系, 可以清楚地看到, 二者之间表现为很强的负相关. 但与此同时, 由于植被自身的耗水, 年径流也有所减少, 这可能降低河道输沙功能. 最终结果取决于二者的对比关系.

用各种措施(梯田、造林、种草和淤地坝造地面积)之和来表示水土保持措施的影响程度, 以 A_{ifgd} 来表示(10^4hm^2). 为了与年系列资料相匹配, 依据各年

代末的统计资料, 用线性内插的方法得到历年的数据.

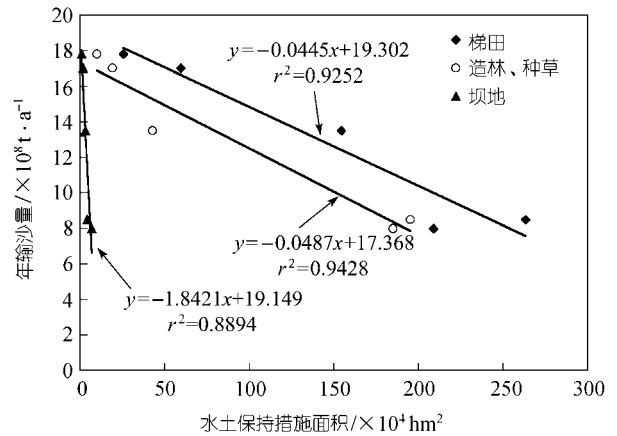


图 1 龙门、华县、河津、淤头 4 站各年代的年平均输沙量之和与黄河上中游各年代末不同措施实施面积的关系

(iii) 人类引水. 黄河流域大部分地区处于半干旱地区, 全流域灌溉引水量很大, 并呈增大趋势. 与此同时, 随着工业、采矿业的开发与城镇居民需水量的增加, 全流域引水量也会增大. 由于径流是输沙的动力, 径流的减少将减低河流的输沙功能. 但是, 黄河流域 85% 以上的引水是由于灌溉, 多发生于非汛期, 而非汛期入黄泥沙是很少的. 从这一意义上说, 人类引水对河道输沙功能的影响可能不是很大. 因此, 本文在进行多元回归分析时, 未将人类引水因子包括在内.

2.3 泥沙粒径

由于自 20 世纪 60 年代末开始, 国家在黄河中游多沙粗沙区进行重点治理, 使这一地区入黄泥沙减少, 粒径也有变细的趋势(图 2). 由于水库对粗颗粒与细颗粒泥沙拦截的程度不同, 会使泥沙的粒径组成发生变化. 此外, 暴雨发生于多沙粗沙区还是发生于多沙细沙区, 也会造成年际之间泥沙粒径的差异. 为了表达粒径的变化, 以三门峡站全年悬沙中 $>0.05 \text{mm}$ 所占百分比作为定量指标, 用 $r_{>0.05}$ 来表示.

在同样的水力条件下, 水流输送细泥沙的能力要比输送粗泥沙的能力强. 张瑞瑾^[10]将挟沙能力 ρ 与流速 v 、水深 h 和泥沙沉速 ω 相联系, 得到如下的挟沙

能力公式:

$$\rho = k \left(\frac{v^3}{gh\omega} \right)^m, \quad (4)$$

式中, g 为重力加速度, ω 为泥沙沉速. 由于粒径越粗, 沉速 ω 越大, 而 ρ 越小, 故 $r_{>0.05}$ 的减小将导致水流挟沙能力的增大和河道输沙功能的增强, 反之亦然. 以历年资料为基础, 计算了黄河下游河道输沙功能指标与 $r_{>0.05}$ 的关系, 二者之间存在着显著的负相关(表 1).

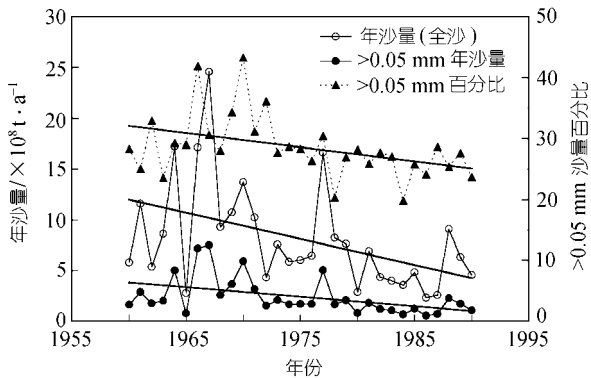


图 2 黄河中游河口镇-龙门区间入黄泥沙量、>0.05 mm 粗泥沙量与入黄泥沙中大于 0.05 mm 百分比的变化

2.4 高含沙水流的影响

高含沙水流虽然发生在黄河下游, 但其产生根源却在上中游流域之中. 许炯心^[11,12]曾对黄土高原高含沙水流发生的自然地理因素进行过系统的研究, 并对人类活动对黄河中游高含沙水流的影响进行过分析^[13]. 高含沙水流在流经黄河下游宽浅游荡河段时, 则会发生强烈的淤积^[7]. 因此, 如果流域因素和人类活动使黄河下游高含沙水流发生频率增加, 会使下游河道的输沙功能减弱. 本文以花园口站每年中发生 $>200 \text{ kg/m}^3$ 的日数作为黄河下游高含沙水流发生频率指标, 用 f_H 表示.

2.5 河道特性的影响

河道特性是决定河道输沙能力的重要因素. 黄河下游河道按河型的差异可以分为不同的河段, 铁谢至高村为游荡河段, 高村至陶城铺为过渡性弯曲

河段, 陶城铺以下为限制性弯曲河段. 上述 3 个河段的宽深比逐渐减小. 在流量给定的条件下, 窄深河道的输沙能力要大于宽浅河道, 因此, 可以预期, 其输沙功能指标也要高于宽浅河道. 按 1985 年的断面资料, 计算出了铁谢-花园口、花园口-高村、高村-艾山、艾山-利津 4 个河段的平均宽深比, 依次为 884, 736, 230 和 78, 沿流程逐渐减小. 同时, 还计算出了上述 4 个河段 1950~1985 年间的平均输沙功能指标值, 按上述顺序分别为 0.833, 0.932, 0.979 和 0.979, 表现出沿流程增大的趋势. 可见, 黄河下游河道河型的沿程变化, 使得输沙功能指标沿程增大.

3 多元回归分析

3.1 资料来源

计算上述 7 项定量指标所依据的水文泥沙和粒径资料来自黄河流域的各有关水文站. 计算各分区面平均雨量的资料, 来自全流域 848 个雨量站. 水土保持措施面积来自黄河水利委员会有关部门的统计资料. 具有完整数据的时间系列为 1956~1996 年, 共有 41 年资料.

依据上述资料, 我们将黄河下游河道输沙功能指标 F_s 与 7 个影响因子变量联系起来, 进行了多元回归分析.

3.2 相关系数矩阵

为了判明 F_s 与各影响因子之间的相关程度以及各影响因子相互间的相关程度, 计算出了相关矩阵(表 1). 从表 1 中可以看到, 输沙功能指标 F_s 与来沙中大于 0.05 mm 百分比 $r_{>0.05}$ 的相关系数为 -0.82, 与兰州以上汛期径流占全年比率 R_L 的相关系数为 0.43, 与河下游高含沙水流频率 f_H 的相关系数为 -0.33, 与河口镇以上年降水量的相关系数为 0.39, 与龙门至三门峡之间年降水量的相关系数为 0.35, 均在 0.05 的水平上是显著的.

3.3 多元回归方程

运用 1956~1996 年间共 41 年资料, 建立了 F_s 与 7 个影响因子之间的多元回归方程:

$$\ln F_s = -7.367 - 0.7761 r_{>0.05} + 0.4159 \ln R_L + 0.001983$$

$$\begin{aligned} & \cdot \ln A_{\text{tfgd}} - 0.0282f_h + 1.3295 \ln P_H \\ & - 0.7589 \ln P_{H-L} + 0.1652 \ln P_{L-S}, \end{aligned} \quad (5)$$

复相关系数 $R=0.900$, $F=19.817$, $P=0.000000000393$, $SE=0.2442$, 回归效果是较好的. F_s 计算值与实测值的比较见图 3.

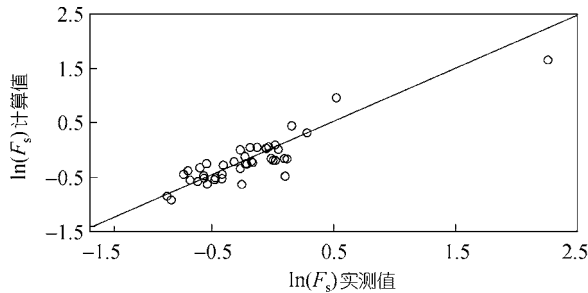


图 3 $\ln F_s$ 计算值与实测值的比较

从公式(5)可以看到, 进入下游河道的泥沙中 $>0.05 \text{ mm}$ 的比例越大, 则河道输沙功能 F_s 越低; 高含沙水流频率越高, F_s 越低; 兰州以上汛期径流占全年径流的比率越低, 则 F_s 越低; 河口镇以上清水区和龙门至三门峡之间年降水量越少, 则 F_s 越低; 河口镇至龙门间降水越少, 则 F_s 越高; 水土保持措施面积越大, 则 F_s 越高.

年降水与 F_s 的关系, 取决于年降水减小导致的产沙量减少与产水量减少的对比关系, 若减水带来的减小 F_s 的效应超过减沙带来的增加 F_s 的效应, 则 F_s 将增大, 反之将减小. 从 F_s 与 3 个不同来源区降水量的关系来看, 对河口镇以上清水区和龙门至三门峡间的多沙细沙区而言, 降水减少产生的减水作用占主导, 故 F_s 减小; 而对河口镇至龙门区间而言, 情形是相反的. 来自河口镇至龙门区间的径流占进入下游河道径流量的比例很小, 仅为 14.8%, 但来自这一区间的泥沙量 $9.08 \times 10^8 \text{ t/a}$ 却占进入下游河道泥沙量的 55.7%^[5], 其中 $>0.05 \text{ mm}$ 的粗泥沙为 $2.0 \times 10^8 \text{ t/a}$ ^[14], 占进入下游河道粗泥沙量的 81.9%. 当这一区间的降水量减少时, 来自这一区间的径流量的减少不会显著降低黄河下游的输沙动力, 但降水减少所导致的泥沙量特别是粗泥沙量的减少, 则会显著降低黄河下游的“负载”. 因此, 最终结果表现为使 F_s 增高.

还应指出, 上中游水土保持措施对下游河道输沙功能的影响是双重的. 水土保持措施可以减少入

黄泥沙, 因而使河道负载减轻, 输沙功能提高; 但也会减少汛期入黄径流量从而减弱输沙动力, 因而使河道输沙功能降低. 在公式(5)中, 水土保持措施面积项的系数为正, 这似乎表明, 前一方面的作用居于主导地位, 因而水土保持措施实施以后, 黄河下游河道输沙功能有可能提高.

4 结论

本文从泥沙收支平衡的概念出发定义了河道的输沙功能, 并提出了河道输沙功能的定量指标, 研究了流域自然因子和人类活动对黄河下游河道输沙功能的影响. 流域自然因子和人类活动的影响可以用不同水沙来源区的降水量、进入黄河下游的大于 0.05 mm 粗泥沙占来沙量百分比、黄河上游水库对汛期清水基流的调节程度(以兰州站汛期径流量占全年百分比表示)、高含沙水流频率、流域内水土保持措施实施面积等指标来定量表达. 运用多元回归分析方法, 建立了黄河下游河道输沙功能指标与上述 7 个因子之间的多元回归方程, 复相关系数达 0.90.

不同水沙来源区降水量的减少对下游河道输沙功能的影响是不同的. 河口镇以上清水区和龙门至三门峡之间年降水量减少, 将导致下游河道输沙功能指标降低; 河口镇至龙门间降水减少, 将导致下游河道输沙功能指标增高. 来沙的组成强烈地影响下游河道输沙功能指标, 进入黄河下游的大于 0.05 mm 粗泥沙占来沙量百分比越大, 则河道输沙功能指标越低. 因此, 小浪底水库拦截粗泥沙、排出细泥沙, 将有利于提高下游河道输沙功能指标. 兰州站汛期径流量占全年百分比越低, 则下游河道输沙功能指标越低, 说明黄河上游水库大量拦截汛期清水基流, 是下游河道输沙功能降低的原因之一. 应该指出, 小浪底水库建成之后, 将会对下游河道的输沙功能产生深远的影响.

参 考 文 献

- 1 许炯心. 论黄河下游河道两次历史性大转折及其意义. 水利学报, 2001, (7): 1~7
- 2 许炯心. 低流量及间歇性断流条件下黄河下游的河床沉积过程与形态调整. 泥沙研究, 2002, (1): 10~17
- 3 Schumm S A. The Fluvial System. New York: John Wiley & Sons,

1977. 1~338
- 4 钱 宁, 周文浩, 主编. 黄河下游河床演变. 北京: 科学出版社, 1965. 1~233
- 5 叶清超. 黄河流域环境演变与水沙运行规律. 济南: 山东科技出版社, 1994. 1~233
- 6 钱 宁, 王可钦, 府仁寿, 等. 黄河中游粗泥沙来源区对黄河下游冲淤的影响. 见: 中国水利学会主编. 第一次河流泥沙国际学术讨论会论文集. 北京: 光华出版社, 1980. 53~62.
- 7 赵业安, 周文浩, 费祥俊, 等. 黄河下游河床演变基本规律. 郑州: 黄河水利出版社, 1997. 1~195
- 8 陈 浩, 陆中臣, 李忠艳, 等. 流域产沙中的地理环境要素临界. 中国科学, D辑, 2003, 33(10): 1005~1012[摘要] [PDF]
- 9 王兆印, 王光谦, 李昌志, 等. 植被-侵蚀动力学的初步探索与应用. 中国科学, D辑, 2003, 33(10): 1013~1023[摘要] [PDF]
- 10 张瑞瑾, 主编. 河流动力学. 北京: 中国工业出版社, 1961. 58~60
- 11 许炯心. 黄土高原高含沙水流形成的自然地理因素. 地理学报, 1999, 54(4): 319~326
- 12 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区的风水两相侵蚀产沙过程. 中国科学, D辑, 2000, 30(5): 540~548[摘要] [PDF]
- 13 许炯心. 人类活动对黄河中游高含沙水流的影响. 地理科学, 2002, 22(3): 294~299
- 14 徐建华, 牛玉国. 水利水电工程对黄河中游多沙粗沙区径流泥沙影响研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2000. 1~296