

黄河下游河道输沙功能的时间变化及其原因

许炯心

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 以输出某一河道的泥沙总量与进入这一河道的泥沙量之比来定义河道输沙功能, 以此为指标研究了黄河下游输沙功能的时间变化。研究表明, 近 50 年来黄河下游河道输沙功能表现出随时间而减小的明显趋势。在总的减小趋势中, 由于水库运用方式与下游水沙组合的不同, 河道输沙功能指标具有明显的差异, 可以划分为 6 个阶段。1986~1997 年, 由于降水偏少, 且人类大量引水, 黄河下游进入连续枯水的水文系列, 河道萎缩, 输沙功能迅速降低, 此时段中输沙功能指标的时段平均值为 0.62, 为有水沙记录以来最低的时期。对于黄河下游输沙功能指标与流域因子和河道特性因子的时间变化系列进行了比较, 以揭示输沙功能减小的原因。结果表明, 黄河下游河道输沙功能指标与流域平均年降水量、兰州站和三门峡站汛期径流占年径流百分比、游荡段典型断面平滩水位下断面面积、花园口站和高村站水面比降等因子有同步减小的关系, 并随流域水土保持面积、人类引水量及其占天然径流量比率的增大而增大, 说明这些因子的变化导致了黄河下游输沙功能的减弱。

关键词: 输沙功能; 流域因子; 人类活动; 时间变化; 黄河

文章编号: 1000-0585(2006)02-0276-09

1 引言

黄河下游河道输沙功能的衰退, 是黄河下游自 20 世纪 80 年代末成为以低流量运行为主并发生季节性断流的人为萎缩性河道以来的重要特征, 已引起各方面的广泛关注^[1~3]。尽管从 20 世纪 70 年代以后, 由于水土保持显著生效, 进入黄河下游的泥沙大幅度减小, 但黄河下游河道淤积, 特别是主槽淤积仍十分严重, 并没有随来沙量的减少而减轻, 因此查明黄河下游输沙功能衰退的原因, 是当前治黄中迫切需要解决的问题, 也是在多泥沙河流输沙功能研究中具有重要理论意义的问题。

国际上对自然和人为因素影响下河流特性的变化已经进行了大量的研究, 取得了一系列重要进展^[4~8]。国内在黄河水沙变化^[9,10]、河道萎缩^[11]、三角洲造陆变化^[12, 13]等方面也均取得了新的进展, 但对黄河河道输沙功能的衰退及其成因方面的研究尚少。本文将着重研究黄河下游河道输沙功能的时间变化及其原因。

2 理论和方法

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

收稿日期: 2005-06-12; 修订日期: 2005-09-20

基金项目: 国家自然科学基金委及水利部黄河水利委员会联合资助重点项目 (50239080); 国家重点基础研究规划项目 (G1999436)

作者简介: 许炯心 (1948-), 男, 四川绵阳人。研究员, 博士生导师。长期从事河流地貌研究工作。共发表学术论文 180 余篇。E-mail: xujx@igsrr.ac.cn

统^[4]。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^[4]。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。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^[6]，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 $Q_{s,t1}$ ， $Q_{s,t2}$ ，……，其和为 $\sum Q_{s,t}$ 。按沙量收支平衡概念，我们有：

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

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：

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

我们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，它表示输出某一河道的泥沙总量与进入这一河道的泥沙量之比。很显然， F_s 即为地貌学意义上的河道泥沙输移比，或泥沙工作者习用的河道排沙比。若只考虑淤积的情况，则上式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。

本文运用上述指标，通过对黄河下游河道输沙功能指标时间变化及影响因子时间变化的比较，试图查明 F_s 的时间变化与各影响因子时间变化的内在联系，借此揭示黄河下游河道输沙功能衰退的原因。

3 资料来源

本文的黄河下游河道是指黄河出山口进入宽谷平原和冲积平原以后的河道，即孟津以下至入海口的整个河段。以三门峡站为干流进口控制站（小浪底水库建成后则以小浪底水库出库控制站为下游干流进口控制站），利津站为入海控制站。区间支流为伊洛河和沁河，其入汇水沙量分别由黑石关站、小董站为代表。由于黄河下游灌溉引沙量较大，必须予以考虑。黄河下游河道输沙功能指标按下式计算：

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

式中， $Q_{s,s}$ ， $Q_{s,t}$ ， $Q_{s,h}$ ， $Q_{s,x}$ 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。

输沙功能指标也可以分河段计算，如花园口至高村间输沙功能指标按下式计算：

$$F_{s,hrg} = Q_{s,gao} / (Q_{s,hua} - Q_{s,div,hrg}) \quad (4)$$

式中 $Q_{s,hua}$ 和 $Q_{s,gao}$ 分别为花园口和高村站的输沙量， $Q_{s,div,hrg}$ 为花园口—高村区间的灌溉引沙量。其余河段依次类推。

本文所用的水文、泥沙和泥沙粒径组成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。

4 黄河下游输沙功能的时间变化

图 1a 中点绘了黄河下游河道输沙功能指标的历年变化, 可以看到, 尽管年际间有一定波动, 但随时间而减小的趋势是明显的, 图中给出了拟合直线与拟合方程。对相关系数灵敏的检验表明, 输沙功能指标与时间变量之间的负相关在 0.02 的水平上是显著的。

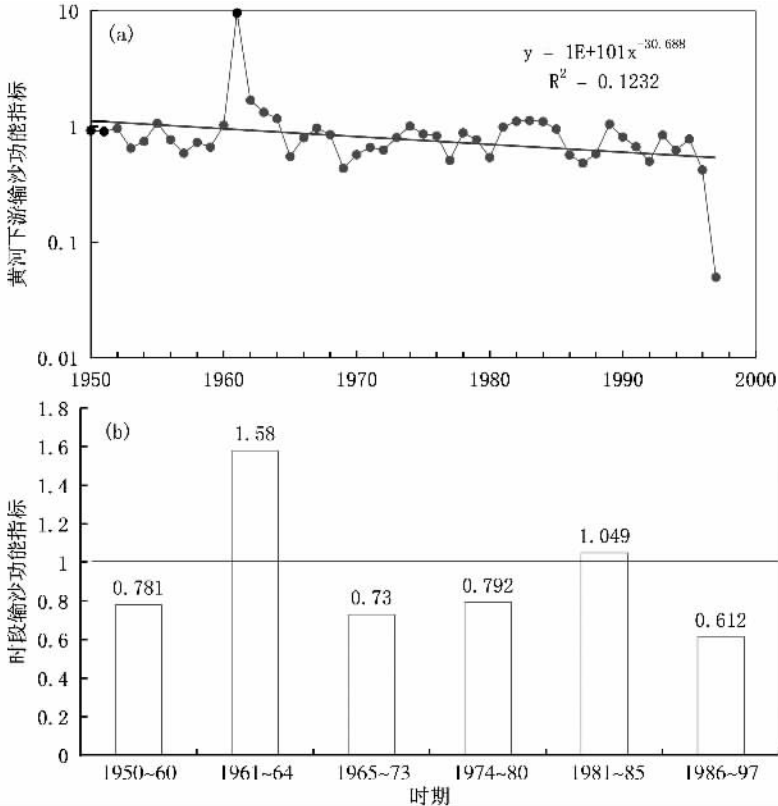


图 1 黄河下游河道输沙功能指标的历年变化 (a) 和分阶段变化 (b)

Fig. 1 Temporal variation in sediment transferring function

index of the lower Yellow River (a) and the different stages (b)

我们还对不同时期的黄河下游河道输沙功能指标进行了研究 (图 1b)。按三门峡水库运用方式与进入黄河下游水沙组合的不同, 可以分为 6 个阶段, 即: (1) 1950~1960 年, 为三门峡水库建库前, 水文条件的组合为丰水丰沙, 输沙功能指标的时段平均值为 0.781; (2) 1961~1964 年, 三门峡水库建成并按蓄水拦沙方式运行, 大量泥沙淤积在库中, 水库下泄清水, 发生强烈冲刷, 河道下游输沙功能指标急剧增大, 时段平均值高达 1.58; (3) 三门峡水库改建后, 1965~1973 年为滞洪排沙运用, 洪水时洪峰受到削减, 泥沙淤在库中; 洪水过后则排出库外, 进入下游河道, 因而下游河道出现“小水带大沙”的水沙组合, 极不利于输沙, 故河道发生较强烈淤积, 河道输沙功能指标的时段平均值为 0.73, 低于建库前的 0.781; (4) 1973 年以后, 三门峡水库按蓄清排浑方式运用, 汛期开闸畅泄, 来自库上游的泥沙可以基本上全部排入下游河道, 汛后则关闸排蓄清水, 用于灌溉。在这种运用方式之下, 汛期“大水带大沙”, 有利于输沙入海, 使得 1974~1980 年间

黄河下游河道的输沙功能指标的时段平均值增大为 0.792，大大高于滞洪排沙运用期的 0.73，与建库前的 0.781 持平，且略高一点。这说明，在蓄清排浑运用方式之下，三门峡水库对下游河道输沙功能的影响不大；(5) 1981~1985 年，黄河下游来水偏丰而来沙偏少，挟沙水流处于次饱和状态，因而下游河道冲刷，输沙功能指标为 1.049，略大于 1；(6) 1986~1997 年，由于降水偏少，且人类大量引水，黄河下游进入连续枯水的水文系列，断流频繁发生，河道发生萎缩，输沙功能迅速降低，输沙功能指标的时段平均值降为 0.612，为有水沙记录以来最低的时期。

5 降水变化的影响

为了揭示黄河上中游流域降水变化对黄河下游输沙功能的影响，我们将输沙功能指标与花园口以上流域的面平均年雨量的时间变化点绘在同一坐标中（图 2），二者均随时间而减小。由此可见，上中游流域中降水的减少是黄河下游河道输沙功能减少的原因之一。这是由于降水减少使得天然径流量减少，因而河道输沙动力减弱。

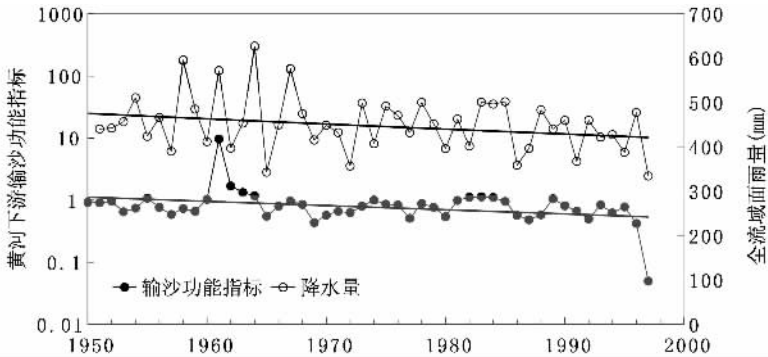


图 2 黄河下游输沙功能指标与花园口以上流域的面平均年雨量的时间变化

Fig. 2 Temporal variations in sediment transferring function index of the lower Yellow River and the area-averaged annual precipitation in the drainage basin

6 人类活动变化的影响

黄河流域人类活动可分为修建水库调节水沙，实施水土保持措施减少侵蚀以及开发利用水资源等方面，兹分别讨论如下。

6.1 修建水库调节水沙

三门峡水库是黄河流域重要的水库。除了三门峡水库以外，在黄河上游还建有一系列水库，如刘家峡水库，龙羊峡水库，青铜峡水库等。上游水库的主要功能是蓄水发电。为保证发电需要，部分汛期径流被拦蓄用于枯水期发电，故修建水库之后，黄河上游汛期径流占全年的百分比显著减小（图 3）。由于黄河流域在水文上具有水沙异源的特点，径流主要来自河套以上的上游地区，而泥沙则主要来自河口镇至龙门之间的多沙粗沙区和由渭河、汾河流域构成的多沙细沙区^[15]。汛期中河口镇以上，特别是兰州以上的清水径流，对多沙粗沙区的高含沙洪水有稀释作用，可以缓和下游河道的淤积。当兰州以上汛期清水基流减少之后，下游河道输沙功能也会降低。同时，三门峡水库对汛期径流的调节虽然不如上游水库显著，但也有一定的作用，如以中游水土保持措施具有增加入渗、削减洪水、增大枯水径流的作用，也使得三门峡水库下游汛期径流量占全年的百分比有所减小（图

3)。由于水流挟沙力与流量的高次方成正比^[14],当水库削减洪峰使汛期流量减少之后,必然会导致汛期河道输沙能力的减弱。虽然非汛期流量的增加会增大非汛期水流的输沙能力,但由于黄河下游的泥沙绝大部分是在汛期中输移的,故全年的输沙能力会大幅度减小。

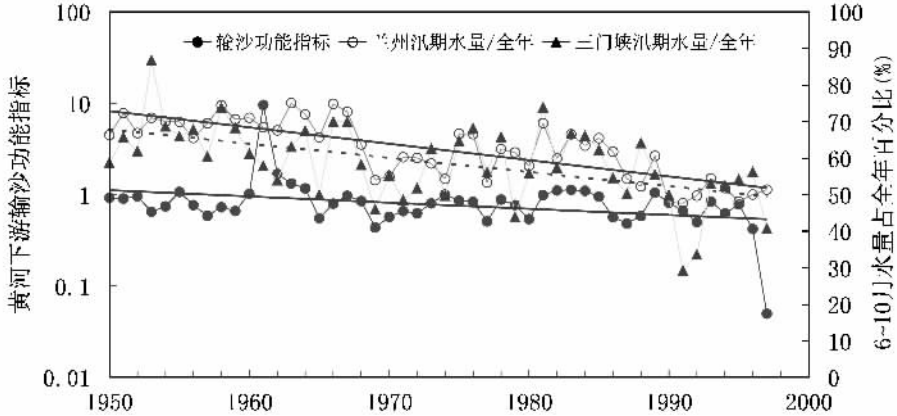


图3 兰州站和三门峡站汛期径流占年径流百分比与黄河下游河道输沙功能的历年变化

Fig. 3 Temporal variations in sediment transferring function index of the lower Yellow River and in the percentages of high-flow season runoff of annual runoff at Lanzhou and Sanmenxia stations

6.2 水土保持

水土保持措施包括修建梯田、种树造林、修筑淤地坝拦沙等。水土保持措施可以减弱坡面侵蚀,减少入黄泥沙量,因而可以降低河道水流的负载,从而增强河道输沙功能。但另一方面,如前所述,水土保持又会削减洪水流量,使河道输沙动力减弱。上述两种作用产生的效应是相反的,最终结果取决于二者的对比关系。图4中点绘了黄河下游输沙功能指标与水土保持措施面积随时间的变化,二者的趋势是相反的(图4a)。

为了进一步揭示水土保持措施对黄河下游输沙功能的影响,我们运用水土保持开始大规模实施以后即20世纪60年代中期1965年以来的资料,点绘黄河下游河道输沙功能与水土保持面积的关系,见图4b。这里,水土保持面积是指梯田、造林、种草和坝地的总面积。值得注意的是,图上点子的分布尽管比较分散,但却可以用一条抛物线来拟合(见图4b),相关系数为0.54,显著性程度为0.01。这意味着,水土保持措施对黄河下游河道输沙功能的影响是非线性的,当水保面积到达750万 hm^2 之后,随着水保面积的进一步增大,下游河道输沙功能减小。

6.3 水资源开发利用

黄河流域的可供应水资源量与耕地面积之间的关系严重失衡,区内耕地面积为1800万 hm^2 ,年均水资源量为580亿 m^3 ,以占全国河川径流2%的有限水量,承担着占全国15%的耕地和12%的人口的供水任务^[16]。因此,水资源的供需关系十分紧张。20世纪80年代以来,随着工农业生产的迅速发展,人类从黄河的引水量急剧增加,20世纪90年代已占全流域天然径流量的50~70%。人类引水量的增加,使得进入下游河道的年径流量减小,因而减小了河道的输沙动力。虽然泥沙的输移主要是在汛期,而人类引水主要是在非汛期,但进入90年代以后,汛期引水也大幅度增加,会对输沙功能产生直接的影响。非汛期进入下游河道的径流含沙量低,对河道有冲刷作用,非汛期入海泥沙主要是河道冲

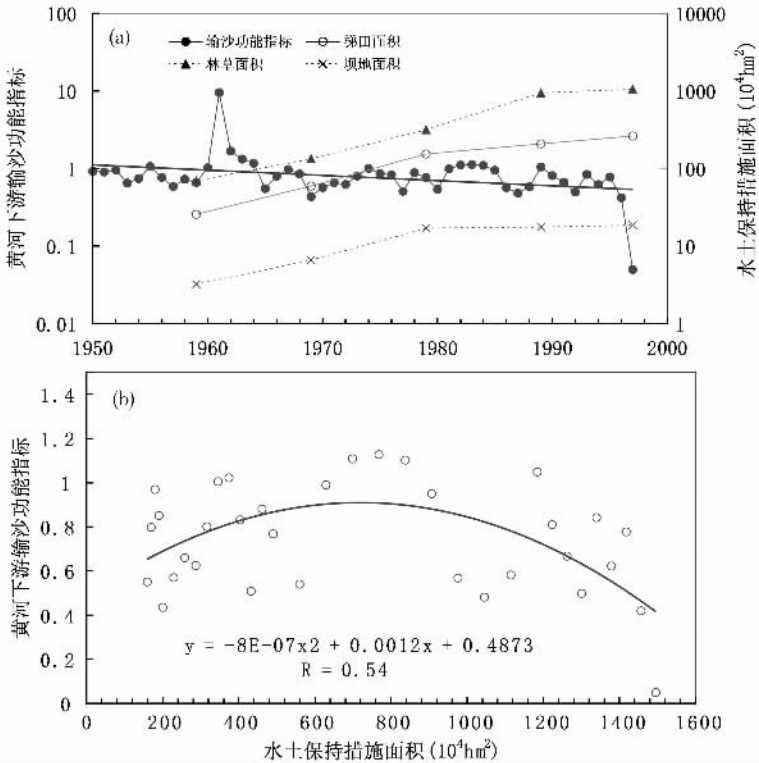


图 4 黄河流域水土保持面积及下游河道输沙功能的历年变化 (a) 及二者关系 (b)

Fig. 4 Temporal variations in sediment transferring function index of the lower Yellow River and in the area of soil-water conservation measures (a) and the relationship between them (b)

刷产生的。非汛期水量大幅度减小以后，这部分沙量不可能入海，故全年的入海沙量减少，也会使输沙功能指标降低。图 5 中点绘了输沙功能指标和人类引水量及其占天然径流量比率的年际变化，二者的趋势相反。

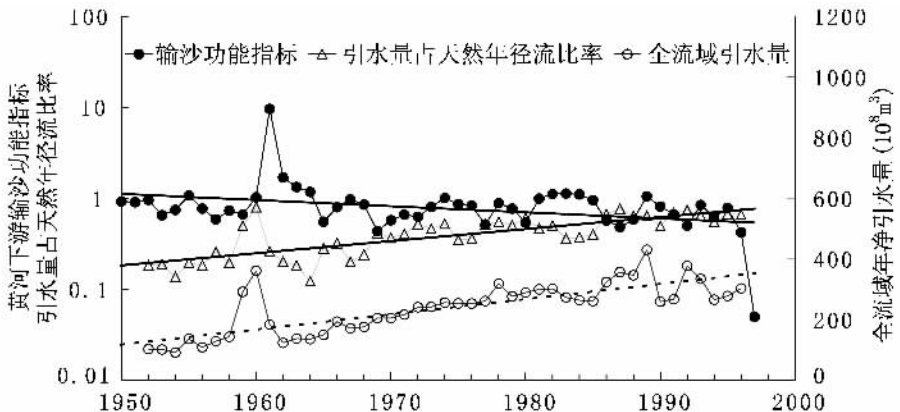


图 5 黄河下游河道输沙功能指标和人类引水量及其占天然径流量比率的年际变化

Fig. 5 Temporal variations in sediment transferring function index of the lower Yellow River and in the quantity of water diversion by man and its proportion of the annual natural runoff

7 河床特性变化的影响

河道的输沙功能除了与来水来沙条件有关以外，还直接受到河床几何形态的影响。因为在流量及其过程给定的情形下，水流的水力学特性（流速、水流切力、能耗）取决于河床形态（横断面特性与河床比降）。对于黄河下游这样的来沙量十分丰富的冲积河流来说，河床形态塑造于其自身携带并堆积下来的泥沙中，当来水来沙发生改变时，河床形态将发生响应，塑造出与变化了的水沙条件相适应的河道几何形态。这种响应十分灵敏，因而历年的平滩水位下的断面面积与年径流量之间存在着较为密切的正相关关系，但与年沙量之间则不相关，可见平滩水位下的断面面积主要受径流量而不是受来沙量的控制。图 6a 中点绘了游荡段典型断面马寨断面的平滩水位下断面面积与三黑小年径流量、年沙量的关系，证明了这一点。

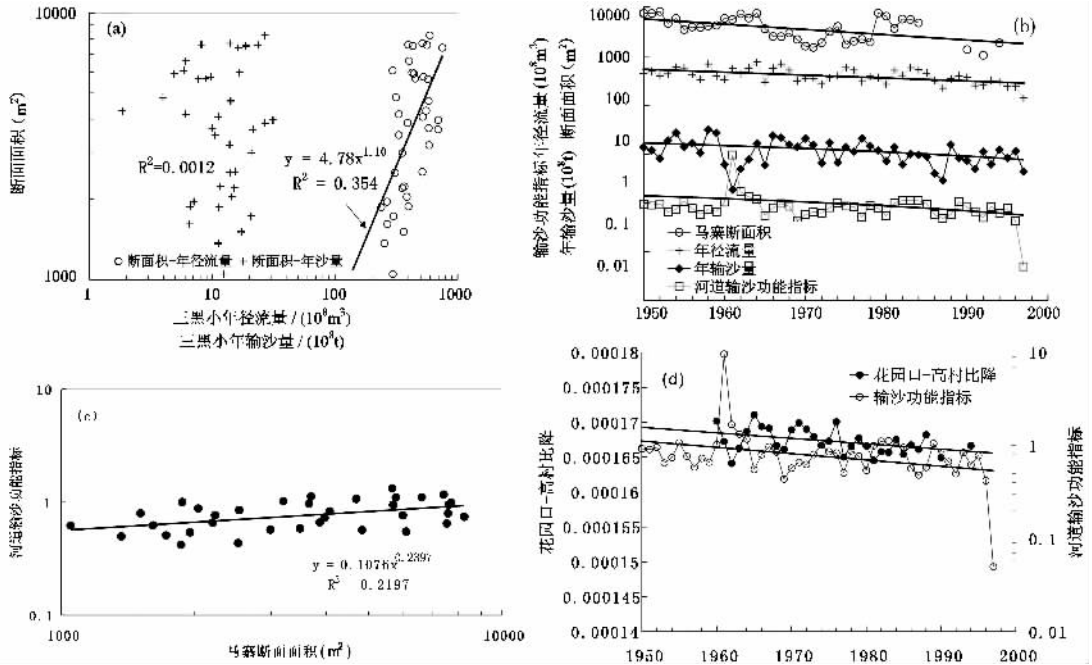


图 6 河床特性变化对黄河下游河道输沙功能的影响

Fig. 6 Variation in channel geometry and its influence on sediment transferring function of the lower Yellow River

由于 20 世纪 70 年代以来降水偏少，加以强烈的人类活动影响，使得来水来沙呈减少趋势，导致了河床的萎缩（图 6b），使平滩水位下河床过水断面面积减小。河道萎缩后，一旦发生较大洪水，则易发生漫滩现象，使大量泥沙淤积在滩地上，因而从主槽中下泄的泥沙量减小。同时，在河道萎缩的过程中，大量泥沙沿主槽河岸边缘发生侧向淤积，也使得向下输移的泥沙减少。因而河道的萎缩导致了河道输沙功能指标的减小。图 6c 中点绘了河道输沙功能与马寨断面面积的关系，虽然点子较分散，但相关系数可达 0.47，

二者的相关关系在 0.01 水平上是显著的。正因为如此，当来水量减小，平滩水位下的河床断面面积减小之后，河道输沙功能也随之减小，二者具有一定的同步变化关系。

除过水断面萎缩导致河道输沙功能的下降以外，河道比降的变化也有一定的影响，特别是在游荡河段是如此。我们依据历年 $3000\text{m}^3/\text{s}$ 流量下花园口站和高村站的水位数据，计算出了两站间 $3000\text{m}^3/\text{s}$ 流量下水面比降的数值，并将 1960 年以来比降的变化点绘于图 6d 中。尽管比降的变幅很小，年际间有较大的波动，但仍可以看到随时间而减小的趋势。这一因素对河道输沙功能的下降也有一定的影响。

8 结论

近 50 年来黄河下游河道输沙功能指标表现出随时间而减小的明显趋势。按三门峡水库运用方式与进入黄河下游水沙组合的不同，可以分为 6 个阶段，即：(1) 1950~1960 年，三门峡水库建库前，输沙功能指标的时段平均值为 0.781；(2) 1961~1964 年，三门峡水库建成并按蓄水拦沙方式运行，下游河道清水冲刷，输沙功能指标的时段平均值高达 1.58；(3) 1965~1973，三门峡水库为滞洪排沙运用，下游河道小水带大沙，河道输沙功能指标为 0.73，低于建库前；(4) 1973~1980，三门峡水库按蓄清排浑方式运用，输沙功能指标的时段平均值为 0.792，大大高于滞洪排沙运用期的 0.73，与建库前的 0.78 持平，且略高一点。这说明，在蓄清排浑方式之下，三门峡水库对下游河道输沙功能的影响不大；(5) 1981~1985 年，黄河下游来水偏丰而来沙偏少，下游河道冲刷，输沙功能指标为 1.049；(6) 1986~1997 年，由于降水偏少，且人类大量引水，黄河下游进入连续枯水的水文系列，河道发生萎缩，输沙功能迅速降低，此时段中输沙功能指标的时段平均值为 0.612，为有水沙记录以来最低的时期。

黄河下游河道输沙功能指标与流域平均年降水量、兰州站和三门峡站汛期径流占年径流百分比、游荡段典型断面马寨断面的平滩水位下断面面积、花园口站和高村站水面比降等因子有同步减小的关系，并随流域水土保持面积、人类引水量及其占天然径流量比率的增大而增大，说明这些因子的变化导致了黄河下游输沙功能的减弱。

参考文献：

- [1] 黄河下游断流成因及对策研究组. 黄河下游断流成因及对策研究. 人民黄河, 1997, 19(10): 1~9.
- [2] 王玲, 林银平, 王建中, 姚建闯. 黄河下游断流成因分析. 人民黄河, 1997, 19(10): 13~17.
- [3] 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.
- [4] Schumm S A. The Fluvial System. New York: John Wiley & Sons, 1977. 1~338.
- [5] Goudie A. The Human Impact on the Natural Environment. Oxford, UK: Blackwell, 2000.
- [6] Knighton D. Fluvial Forms and Processes; A new Perspective. London, UK: Arnold, 1998.
- [7] Maheshwari B L, Walker K F, McMahon T A. Effects of regulation on the flow regime of the River Murray, Australia. Regulated River, 1995, 10: 15~38.
- [8] Graf W L. Dam nation: a geographic census of American dams and their large-scale hydrologic impacts. Water Resources Research, 1999, 35(4): 1305~1311.
- [9] 汪岗, 范昭 主编. 黄河水沙变化研究. 第 1 卷. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [10] 汪岗, 范昭 主编. 黄河水沙变化研究. 第 2 卷. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [11] 姚文艺. 黄河下游萎缩模式研究. 泥沙研究, 2004, (5): 8~14.
- [12] 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.
- [13] 师长兴, 等. 黄河口泥沙淤积估算问题和方法——以钓口河三角洲为例. 地理研究, 2003, 22(1): 49~59.

- [14] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学. 北京:科学出版社,1983.
- [15] 叶青超 主编. 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,1994.
- [16] 刘昌明,陈效国 主编. 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理. 郑州:黄河水利出版社,2002. 178~185.

Temporal variation in sediment transferring function of the Lower Yellow River and the formative causes

XU Jiong-xin

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The decline in sediment transferring function of the lower Yellow River has drawn attention from the scientific community, the government and the public. Hence, finding out the cause for it is an important and urgent issue in harnessing the Yellow River, both in theory and in engineering practice. An index of sediment transferring function (F_s), which is defined as the ratio of sediment output from a given river reach to the sediment input to this river reach, is applied in this study to reveal the temporal variation in sediment transferring function of the lower Yellow River. It is found that in the past 50 years, sediment transferring function index (F_s) of the lower Yellow River showed a decreasing trend. Due to the changing operation mode of the Sanmenxia Reservoir and the varying combinations of runoff and sediment load, the temporal variation of F_s can be divided into 6 stages. During the period from 1986 to 1997, due to the decrease in annual precipitation and increase in water diversion, the incoming flow of the lower Yellow River was significantly less than the average. As a result, channel shrinking occurred, and the index of sediment transferring function decreased to 0.62, the minimum in the hydro-metrical history. To elucidate the formative cause for the decrease in sediment for the sediment transferring function, the temporal variation in F_s has been compared with the temporal variations in a number of drainage basin factors, including drainage basin factors and river channel characteristics. The results show that the decreasing trend of F_s is basically synchronic with the decreasing trends in the area-averaged annual precipitation in the upper and middle drainage basin, the index of reservoir regulation (defined as the percentage of high-water season flow of the annual total) at Lanzhou and Sanmenxia stations, the bankfull cross sectional area of the typical braided reach and the water surface gradient of the Huanyuankou-Gaocun reach at a given discharge. The F_s index increased with the total area of all soil-water conservation measures, the quantity of water diversion and its proportion of the annual flow. Thus, it is demonstrated that the changing drainage basin factors and channel characteristics resulted in the decrease in the sediment transferring function of the lower Yellow River.

Key words: sediment transferring function; drainage basin factors; human activities; temporal variation; Yellow River