

黄河下游河槽横断面调整规律 及治理方式探讨*

师长兴 许炯心

中国科学院
(国家计划委员会 地理研究所 北京 100101)

摘 要 通过对影响河槽挟沙能力诸因素的分析, 作者认为目前黄河下游只有河槽形态是一个人为可调节的控制河道淤积的要素。分析黄河下游河道横剖面形态的特征及其调整规律, 考虑来沙组成变化、河槽综合阻力变化, 计算得到黄河下游典型断面的实际挟沙能力及平均水沙条件下河槽平衡输沙横剖面, 经与实际断面形态对比, 得出必须以多级河槽方式缩窄 $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量以下即中、小水期的河槽, 方能显著减少黄河下游河槽中的淤积的结论。这样才能真正实现潘季驯的“束水攻沙”的治黄方略。

关键词 黄河下游 横断面调整 河道整治
分 类 中图法 TV882.1

1 前言

黄河下游洪水威胁一直是影响区域经济发展的重大问题。自古至今为解决这一问题耗费了多少代人的心血, 然而由于河道淤积不止, 洪水决溢的机率未能减少。近年, 基于潘季驯“束水攻沙”思想, 针对小水期淤槽问题, 牟玉玮、蔡为武提出大小水兼顾, 提高小水挟沙能力的三级河槽整治方式^[1,2]。蔡为武提出把下游整治成两岸大堤间过 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ ~ $15\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 以上的特大洪水河槽, 在嫩滩中过 $500\text{ m}^3/\text{s}$ ~ $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的中水河槽, 在中水河槽偏于凹岸侧的枯水河槽的三级复式河槽, 并提出中水河槽的宽度孟津至河口一律取 600 m ~ 800 m 。牟玉玮认为下游河道在河弯及有防护工程处均为三级河槽, 各级流量都有相适应的过水断面, 既能满足排洪要求, 又可提高小水的挟沙能力。并提出在统一规划下, 首先将河槽宽度缩窄到 1 km 以下, 稳定中水河槽, 使其中水不淤, 然后再修筑小水控导工程, 把直段改造成中水顺直、小水弯曲的三级河槽。这种敢于突破现状, 大胆缩窄河槽的设想是有意义的。但是, 首先应明确为什么通过河道整治可以显著减少下游淤积, 因为部分研究人员认为黄河的淤积主要是因为大量来沙通过河口淤积延伸间接产生的^[3]。照此观点, 只有减少来沙或将来沙排到河道两侧, 使入海泥沙减少, 河口不延伸才能明显减少下游淤积, 而“束水攻沙”是徒劳的。其次, 对于采用什么样的三级河槽形式才能防止河槽中的淤积, 又不至于过分缩窄河槽减少河槽过水能力而妨碍行洪, 应根据黄河下游的来水来沙条件以及已经形成的河道边界条件来确定。以下试作讨论。

* 中国科学院地理研究所所长基金资助
收稿日期: 1996-10-08, 收到修改稿日期: 1996-11-29

2 调整河槽横断面形态，控制河道淤积

黄河下游滩地与河槽面积之比是 4.9 : 1，漫滩淤积构成下游淤积的主体。漫滩淤积在大水水流漫滩时产生，而其持续淤积是由于河槽不断淤积抬高所致。黄河下游河槽淤积的一般规律是河槽在汛期大水时冲，枯水、小水期淤，平均来说，年内有净淤积。对黄河下游不断淤积的原因与上述河口延伸起主要作用观点不同的是认为黄河下游的淤积由于二种基本原因^[1, 4]：即河槽本身不能适应来水来沙而产生的淤积和河口延伸中造成的溯源淤积。作者对此作过定量分析，结论是现代黄河下游淤积虽然也受到河口延伸引起的溯源淤积的影响，但主要是已经形成的下游河槽不能适应来水来沙条件所致^[5]。基于此种认识，改变河槽输沙能力显然是减少下游淤积的一种有效方法。所谓河槽不能适应来水来沙条件是指河槽形态及边界组成不能使来水恰好带走来沙。河槽形态指其纵向形态或比降和横断面形态。就比降而言，从输沙平衡来说，比降越大，河流输沙能力应该越大，但除非河型发生了明显变化，例如从弯曲变成了游荡型，比降会明显增大，而曲率不大的河流只能通过河流上下不等量的淤积调整比降，这种调整是很缓慢的。据分析，如果单纯依靠抬高比降使来沙通过下游河道，在其它条件不变的条件下，需要下游河道上端抬高约 36 m，以现在的淤积速度，河口不再延长的条件下，要几百年才能达到^[5]。显然要想在几十年内调整比降不是治河的重要方向。一般说来，其它条件相同，来沙中以较粗的床沙质为主的河流易形成宽浅的河槽，以较细的悬移质为主的河流易形成窄深的河槽^[6]。河床的边界组成影响河流挟沙能力的一个主要要素是河床质的粒度大小。河流在冲淤中，河床质的粒度可能发生明显变化。但是，水力条件及来沙组成决定了河床在淤积中不可能无限制的细化。而且河床组成受水力条件和来沙组成的影响，调整快，是不易控制的要素。从黄河几十年的发育历史来看，虽然黄河在不断强烈淤积，但在适应性调整中，并没有河床质变细、比降变大的长期趋势性变化，见图 1a、1b。这样，进行河道整治，可考虑的影响水流挟沙力的因素只能是调整河槽横断面形态。换言之，调整河槽横断面形态以控制河道淤积是必然的选择。

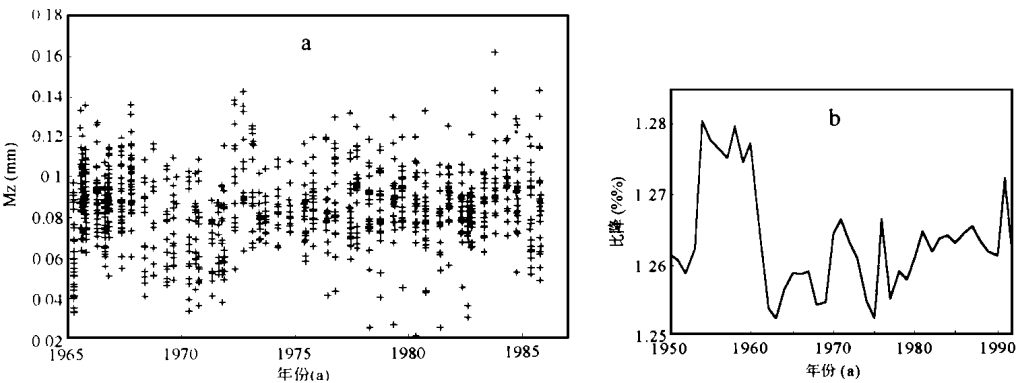


图 1 黄河下游河床质平均粒径 (a) 花园口至利津比降; (b) 变化图

Fig. 1 Changes of mean grain size of bed material (a) and slope (Huayuankou to Lijin) (b) of the lower Yellow River

3 黄河下游河道横断面形态的特征及其调整规律

黄河下游从游荡性河道到弯曲性河道河槽由宽浅向窄深变化,断面形态也有很大变化。如以断面宽度与水深关系曲线对角分割一矩形,则曲线所分割矩形的上半部分与下半部分面积之比可表示断面呈上凸或是下凹,定义为断面凹度值。上凸则凹度值小于1,下凹则大于1。为了统一标准,选各断面2 000 m²过水面积下的宽度与水深关系曲线。图2是黄河下游45个典型断面凹度值的计算结果。可见,黄河下游游荡段断面形态呈上凸形;过渡及弯曲段绝大部分断面呈下凹形。横断面的宽深比 \overline{B}/H 与凹度值呈反比关系,如图3。对于2 000 m²过水断面来说,凹度值大于1的断面的宽深比 \overline{B}/H 都小于10。

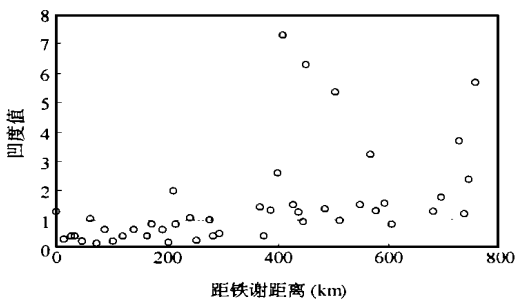


图2 黄河下游横断面凹度值变化

Fig.2 Changes of the concavity value of channel cross-sections along the lower Yellow River

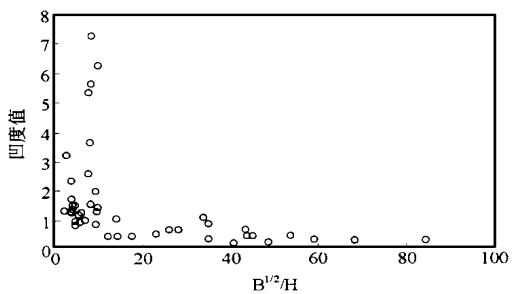


图3 黄河下游横断面凹度值与宽深比关系

Fig.3 Relation of the concavity value with \overline{B}/H of channel cross-sections of the lower Yellow River

在下游过渡及限制性弯曲河段往往浅滩段深泓点比其上游弯顶段的深泓点还高,弯顶段与浅滩段河道形态明显不同,弯顶段河槽窄深,浅滩段宽浅,黄河下游过渡及限制性弯曲段断面深泓点相对高度与宽深比 \overline{B}/H 的明显对应关系说明了这一点,如图4。

黄河来水来沙的剧烈变化,造成河道年内的洪冲枯淤和年际间的冲淤交替。从河床演变理论上讲,这是不同来水来沙量平衡通过河道时要求不同的过水断面形态,河槽形态随来水来沙条件变化做出的自动调整。那么,在黄河下游冲淤中河槽形态是如何调整的呢?

依据1983年至1985年典型断面6个测次的断面观测结果分析得出,对于小断面来说(因为黄河小水期的淤积较多,这里选用的500 m²过水面积相当于1 000 m³/s流量以下的过水面积),汛期中河道冲刷的机会多,但断面调整的方向不定;枯水期河道淤积的时间多,河槽既有向宽浅的调整也有向窄深的调整,而向宽浅的调整机会相对较多,如图5。可见,河床淤积并非都是使河槽向窄深调整以减少淤积。因为除河槽形态外,在短期调整中,河床质组成及床面形态调整也是响应来水来沙条件变化的较为活跃的因素。从长时段来说,以1934年与1985年下游45个断面相比,下游高村以上河段,即游荡段3 000 m²过水面积(相当于流量约6 000 m³/s以上漫滩流量下的过水面积)的平均 \overline{B}/H 从25.1增加到48.7,2 000 m²过水面积(相当于3 000 m³/s~4 500 m³/s接近漫滩流量的过水面积)的平

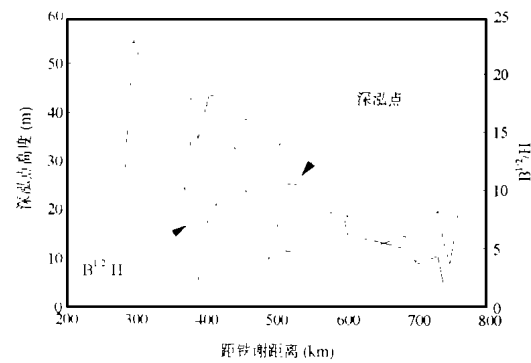


图4 黄河下游过渡与限制性弯曲河段
横断面深泓点与宽深比沿程变化

Fig.4 Changes of the height of thalweg and $\overline{B/H}$ of channel cross-sections along the transitional and confined meandering reaches of the lower Yellow River

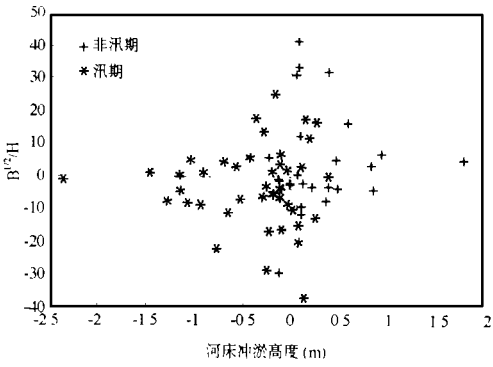


图5 黄河下游部分断面河槽冲淤
与断面宽深比变化关系

Fig.5 Relation between sedimentation and the changes of $\overline{B/H}$ of the lower Yellow River channel

均 $\overline{B/H}$ 从 30.1 增加到 38.4, 这种变化的主要原因是由于东坝头以上河道淤积, 高滩变得不高的结果; 过渡及限制弯曲段在 1949 年后大量河防工程作用下, $3\ 000\ \text{m}^2$ 及 $2\ 000\ \text{m}^2$ 过水面积下的平均 $\overline{B/H}$ 分别从 9.8 和 13.0 降低到 6.8 和 7.8; $1\ 000\ \text{m}^2$ 过水面积下 (相当于 $500\ \text{m}^3/\text{s} \sim 2\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ 中等流量的过水面积) 的平均 $\overline{B/H}$ 不论是游荡段还是过渡及限制性弯曲段都变的窄深了些, 分别从 32.9 和 13.6 降低到 29.7 和 10.8; 在 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 流量以下的过水断面的平均 $\overline{B/H}$, 以 $500\ \text{m}^2$ 和 $250\ \text{m}^2$ 过水面积为例, 游荡段分别从 32.0 和 30.8 变到 30.6 和 31.9, 变化不大, 过渡及限制性弯曲段分别从 13.6 和 17.1 增加到 15.0 和 22.0, 明显变得宽浅了。由此可见, 无论是在长期还是短期时间尺度上, 黄河基本上没有向形成窄深的输沙平衡横剖面调整的趋势。

4 输沙平衡河槽形态及与实际断面的对比

河流有自动调整以适应来水来沙条件, 达到平衡输送上游来沙的趋向。现代黄河下游河槽形态是否在长期调整中已达到了平衡输沙所要求的形态? 什么样的河槽形态才能在黄河的来水来沙条件下平衡输沙? 为此, 我们以日平均流量和日均输沙量为基础, 统计得到了靠近黄河下游上端的花园口站 1962 年至 1985 年的分级流量下的平均含沙量, 并利用悬沙组成月统计资料, 得到不同含沙量下的来沙组成。以所得到的来水来沙资料, 利用吴保生的挟沙能力公式, 在现有河床比降和河床组成条件下, 计算了黄河下游几个典型断面 1985 年汛后实测断面不同流量的挟沙力, 计算中利用了费祥俊含沙水流泥沙沉速计算方法^[7], 还考虑了动床阻力变化的影响。计算综合阻力的方法是作者基于秦荣昱利用黄河资料对卡门常数变化规律的研究成果^[8]推导出的计算方法。与黄河长期平均分级流量的含沙量相比, 即使对于比较窄深的高村、利津断面, 主要输沙流量级的挟沙力也小于实际来水含沙量, 见图 6。也就是说, 下游河槽横断面相对平均来水来沙条件都显得宽浅了。利津站小

于 $7\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 流量级的含沙量都小于来水平均含沙量，这与尹学良等分析得到的艾山以下河道大于 $1\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 流量后河道一般发生冲刷的结论似相矛盾^[9]。原因是这里用的是花园口的来沙组成，是下游输沙平衡条件下利津段的来沙情况。如果考虑到实际上黄河下游不断淤积，泥沙沿程因淤积而分选，泥沙沉速沿程逐渐减小，那么按实际利津来沙的沉速计算，则大约在 $1\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 流量级以上的挟沙力大于实际来水相应流量级的平均含沙量。

将从实测断面计算水流挟沙力的方法反过来，我们可以计算得到与黄河分级流量对应的长期平均来沙要求的平衡输沙横断面，如图 7。可见与 1985 年实测断面相比较要相对窄深得多。因为花园口站小于 $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量的出现频率达 99.7%，其输沙量占该站总输沙量的 97%，因此这里只探讨 $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量以下的平衡断面。由图 7 可见，平衡断面的显著特点是都呈上凸形。上节论及黄河下游过渡及限制性弯曲段断面呈下凹形，即凹度值大于 1。可见，就总体形态来说，黄河下游过渡及限制性弯曲段的断面是不合适的，包括一些弯曲段的弯顶段。游荡段虽然总体形态呈上凸形，但显得过于宽浅。

值得提出的是曾庆华等由黄河水沙测验资料统计分析认为黄河下游横断面的 \overline{B}/H 值接近于 8 时输沙能力最大^[10]。而我们发现下游限制性弯曲段比降较小的断面的 \overline{B}/H 值已小于 8，且计算得到的平衡输沙横断面比实际断面更窄深。进一步计算分析发现 \overline{B}/H 值比 8 小的断面，在一定范围内，河底阻力仍构成河道阻力的主要部分，随着 \overline{B}/H 值的减小，水流挟沙力逐渐增大，直到河岸阻力的增加超过河底阻力的减小。事实上，文献^[10]得到 \overline{B}/H 值等于 8 挟沙力最大结论的根据是黄河下游水文站实测断面形态和实测洪峰含沙量的相互关系。其中，关系图中曲线的下半部分，即洪峰含沙量随断面趋向宽浅而增大的数据分布规律不明显，如图 8，而且 $\overline{B}/H < 8$ 的点据绝大部分是利津、艾山的数据，该河段断面形态窄深，在黄河来沙经过游荡段淤积后，含沙量减少，因此出现小的 \overline{B}/H 值对应较小的含沙量。其次，在河相关系相同时，由于流量、来沙组成、河床比降或河床边界组成等条件不同，水流饱和含沙量也会有明显的变化，因此在利用实测水文数据，包括利用一个水文站的数据，揭示河相关系与水流挟沙能力的关系时应避免这种情况发生。由此可见，将下游河道比降相差极大以及来水来沙条件又不同的几个水文站的资料放在一起，借此揭示河道横断面形态与挟沙力的关系的方法的合理性尚需讨论。

5 结语

通过上述分析，作者认为，明代潘季驯“束水攻沙”治黄方略仍可作为黄河治理的一种有效方法。当年，潘季驯“束水攻沙”的具体措施是建筑近河缕堤和远河遥堤。建缕堤

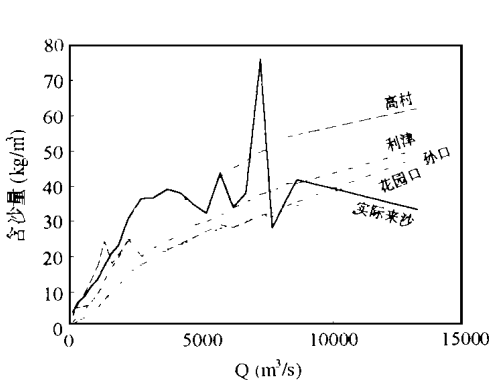


图 6 黄河下游实测典型断面不同流量挟沙力
Fig. 6 Sediment transport capacity of some typical cross-sections surveyed in 1985

Figure 6 is a line graph showing the sediment transport capacity (含沙量 in kg/m³) versus discharge (Q in m³/s) for some typical cross-sections surveyed in 1985. The x-axis ranges from 0 to 15,000 m³/s, and the y-axis ranges from 0 to 80 kg/m³. Four curves are plotted: '高村' (Gaocun), '利津' (Lijin), '花园口' (Huayuankou), and '实际来沙' (Actual incoming sand). The '高村' curve shows a sharp peak around 7,000 m³/s. The '利津' curve shows a peak around 10,000 m³/s. The '花园口' curve shows a peak around 12,000 m³/s. The '实际来沙' curve shows a peak around 14,000 m³/s.

Figure 6 is a line graph showing the sediment transport capacity (含沙量 in kg/m³) versus discharge (Q in m³/s) for some typical cross-sections surveyed in 1985. The x-axis ranges from 0 to 15,000 m³/s, and the y-axis ranges from 0 to 80 kg/m³. Four curves are plotted: '高村' (Gaocun), '利津' (Lijin), '花园口' (Huayuankou), and '实际来沙' (Actual incoming sand). The '高村' curve shows a sharp peak around 7,000 m³/s. The '利津' curve shows a peak around 10,000 m³/s. The '花园口' curve shows a peak around 12,000 m³/s. The '实际来沙' curve shows a peak around 14,000 m³/s.

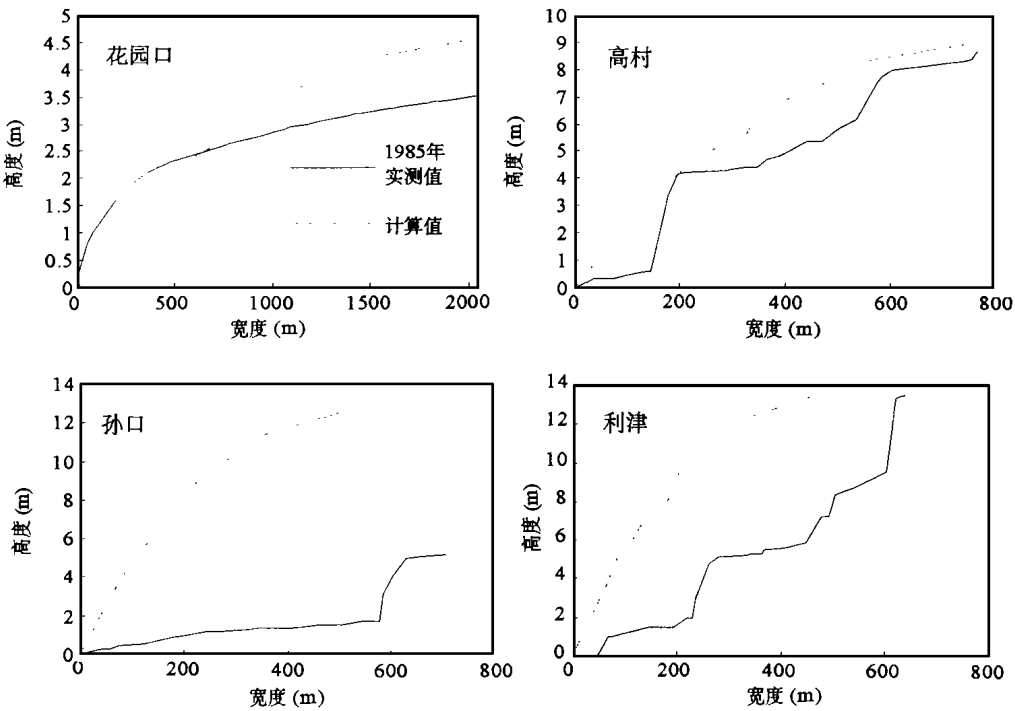


图 7 黄河下游典型断面平均来水来沙条件下的输沙平衡断面形态

Fig. 7 Width via height curves of the cross-sections with sediment transport capacity equal to imposed long-term mean sediment load and coupled with those surveyed in 1985

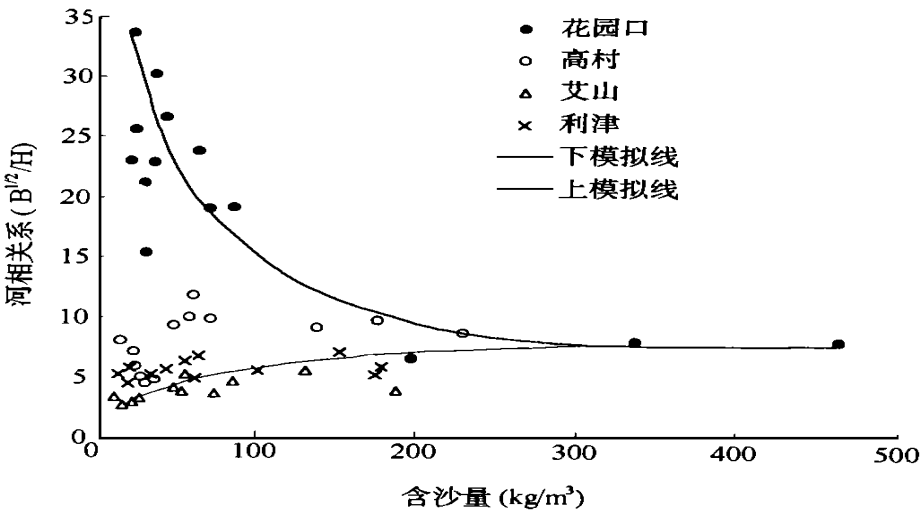


图 8 洪峰含沙量与河相关系 (平滩流量以下) (据曾庆华等)

Fig. 8 Relation between sediment concentration during flood and river channel morphology (for bank full discharge) (after Zeng et al.)

以束河流，筑遥堤以防溃决。但在实际应用中，缕堤难于修守，屡被冲决，结果实行的是以遥堤束水归槽，配以护滩工程等，并认为遥堤仍旧可以实现“束水攻沙”^[11]。现代黄河下游已实施的治河工程比潘季驯时还要多而坚固，尚且为河槽横向冲淤留有許多余地，可想潘季驯治河时的“束水攻沙”思想并未真正实现。新中国治黄实行的“控导主溜、护滩保堤”方针，以防洪为主要目的，对中小水的减淤作用不大，因此河槽越淤越高，洪水的威胁没有减小。随着下游区域经济的发展，洪水决溢可能造成的损失变得越来越大。当前，随着国家经济实力的增大，为了实现有效治河防洪，实行多级河槽治理，可以说是目前治黄的一个可供选择的较好方法。其整治措施可通过在 $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量以下设二或三级河槽的方式，使其总体形态呈上凸形。这样既能约束输送黄河绝大部分泥沙的流量，又不致显著减少河槽的过洪能力，达到止淤和长期防洪的目的。在下游河道比降和流量沿程递减的条件下，整治宽度也应逐渐减小。具体整治宽度及方法还需在充分考虑未来水沙变化的基础上，由理论分析结合试验及实践来决定。

因为河口延伸将在长时期中成为下游淤积的一个重要影响因素^[5]，为了更长远的稳定河道，我们不提倡将泥沙大量输送到河口。在黄河来沙不能充分减少的情况下，为实现几百年以上长期稳定河道的目的，不仅要进行正在实行的背河淤堤，而且要实行更大范围的引水引沙，将黄河通过周期摆动让泥沙堆积在黄淮海平原和浅海的历史现象变成人为控制的现实，这样也能充分利用黄河宝贵的水资源。

参 考 文 献

1 牟玉玮. 搞好河道整治造成三级河槽利用河口地区处理黄河泥沙. 当代治黄论坛. 科学出版社, 1990. 218 ~ 230

2 蔡为武. 治黄的根本措施是下游河道整治. 人民黄河, 1995(1): 48 ~ 51

3 钱意颖, 叶青超, 周文浩主编. 黄河干流水沙变化与河床演变. 中国建材工业出版社, 1993. 213 ~ 218

4 谢鉴衡. 黄河下游纵剖面变化规律及河道治理. 当代治黄论坛. 科学出版社, 1990. 166 ~ 182

5 师长兴, 叶青超. 黄河河口延伸对下游淤积影响的定量研究. 科学通报, 1996, 41(15): 1399 ~ 1401

6 Richard J. Chorley, Stanley A. Schumm, David E. Sugden. Geomorphology. Methuen, London and New York, 1984

7 费祥俊. 黄河中下游含沙水流粘度的计算模型. 齐璞等编黄河高含沙水流运动规律及其应用前景. 科学出版社, 1993. 1 ~ 19

8 秦荣昱. 动床水流卡门常数变化规律的研究. 泥沙研究, 1991(3): 38 ~ 52

9 尹学良, 陈金荣. 黄河下游的河性. 地理学报, 1992, 47(3): 193 ~ 207

10 曾庆华, 周文浩, 阎颐, 赵华侠. 黄河下游河道各级粒径输沙特性的初步分析. 左大康主编黄河流域环境演变与水沙运行规律研究文集, 第一集. 地质出版社, 1991. 172 ~ 183

11 周魁一. 潘季驯“束水攻沙”治河思想历史地位辨析. 水利学报, 1996(8): 1 ~ 7

作 者 简 介

师长兴, 男, 1963 年 8 月生, 副研究员。主要从事河流地貌与环境整治研究, 曾发表“红山水库上游河床及支流调整分析”等多篇文章。

A STUDY ON THE REGULARITY OF ADJUSTMENT OF CHANNEL CROSS-SECTIONS AND DIRECTION OF CHANNEL TRAINING OF THE LOWER YELLOW RIVER

Shi Changxing Xu Jiongxin

(*Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences Beijing 100101*)

Abstract

This paper deals with one way of controlling sedimentation in the channel of the lower Yellow River. Generally, for adapting to imposed water and sediment load, a river channel has three main factors to adjust, that is, bed material composition, slope and channel geometry. However, revealed by gauged hydrological and channel geometry surveying data over 20 years, the three factors of the lower Yellow River did not display detectable long-term changing tendencies in the process of channel silting up. Limited by concrete conditions in the lower Yellow River, the slope and bed material composition are not easy to change for alleviating markedly sedimentation, while channel geometry can be adjusted by channel training for this purpose.

By analyzing 45 cross-sections of the river, it was found that the overall geometry, in the relation of width with relative height, of the cross-sections in the braided reaches took the shape of convex curve, and most of the cross-sections in the transitional and confined meandering reaches in the shape of concave curve. Based on analyzing the characteristic of the oncoming water and sediment of the river in the period from 1965 to 1985, and considering the effects of variations in the synthetic channel's hydraulic roughness and of grain size composition changes of different sediment concentration, the sediment transport capacity of some typical cross-sections is calculated, and the shape of the cross-sections with the slope and bed material composition of the typical ones demanded by sediment transport in equilibrium for all the discharge classes below $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ is figured out also. The results reveal that the present channel is too shallow and wide. The equilibrium shape of the channel follows a convex curve; therefore, the concave shape of cross-sections in the transitional and confined meandering reaches is not suitable for sediment transport keeping in equilibrium.

Based on the results of analysis in the paper, we suggest that one of the best ways of harnessing the lower Yellow River is to reform its channel containing the discharges lower than $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ to compound one with over two steps of berm, to narrow the channel downward and downstream according to the future imposed water and sediment load. By this way, the strategy, 'gathering water to erode sediment', advanced by a famous expert, Pan Jixun, in the Yellow River management over 400 years ago, may be realized fully.

Key words the lower Yellow River, channel cross-section adjustment, river channel training