

黄河下游河型转换及弯曲变化机理

陈绪坚¹ 陈清扬²

(1. 中国水利水电科学研究院 泥沙研究所, 北京 100048; 2. 首都师范大学附属中学, 北京 100048)

摘要: 冲积河流河型转换及弯曲变化机理是一个有争议的自然科学难题。根据河道卫星图片量测结果, 分析了黄河下游各河段的主河槽弯曲系数变化, 各河段的主河槽弯曲系数对比表明, 小浪底水库运用后, 黄河下游各河段的主河槽弯曲系数有所增大, 其中游荡型河段主河槽弯曲系数由 1.12 增大到 1.29, 游荡型有向弯曲型转化的趋势; 过渡性河段的主河槽弯曲系数由 1.23 增大到 1.35, 过渡性河段基本转变为弯曲型; 弯曲型河段的主河槽弯曲系数由 1.19 增大到 1.25。探讨了河道形态弯曲变化的机理, 从理论上解释了水库的滞洪沉沙作用使下泄水流含沙量减小、泥沙粒径变细、洪峰调平, 使下游游荡型有向弯曲型转化的趋势, 主河槽弯曲系数增大。

关键词: 黄河下游; 河床演变; 河道形态; 弯曲系数; 均衡理论

中图分类号: TV143.4 文献标识码: A 文章编号: 0468-155X(2013)01-0001-06

1 前言

冲积河流河型转换及弯曲变化机理是一个有争议的自然科学难题。山区河流形态受地质和地貌条件控制呈无规则弯曲, 但平原河流的形态弯曲有一定规律。水往低处流是常识, 但为何平原冲积河流通常不是顺直往低处流, 而是有规律的弯曲流动, 目前国内外关于冲积河流形态弯曲变化机理有多种有争议的假说和理论, 如最小能耗率^[1]、最小河流功^[2]、最小比降^[2]、最大输沙率^[3]和河床演变均衡理论^[4]等, 河床演变不仅仅是调整比降, 挟沙水流有努力达到平衡输沙的趋势, 目前的假说和理论尚不能完全解释天然河道河床演变的各种现象, 特别是小浪底水库投入运用后, 黄河下游河道的弯曲形态有何变化尚不明确。了解河道弯曲形态的变化是河道治理的基础, 揭示河流形态弯曲变化的机理对防治洪水灾害有重要意义。

2 黄河下游河道形态变化

黄河在河南省孟津县白鹤(铁谢)由山区进入平原, 于山东省垦利县注入渤海, 铁谢至利津为黄河下游, 利津以下为河口段。由于泥沙淤积, 黄河下游河床普遍高出两岸地面 4~6m, 部分河段达 10m 以上, 成为淮河与海河流域的天然分水岭。河道上宽下窄, 比降上陡下缓, 由 2.65‰ 减小到 1‰, 黄河下游各河段河道形态如图 1 所示。按照河道自然形态, 黄河下游河道形态可分为: 铁谢至高村为游荡型河段, 高村至陶城埠为过渡性河段, 陶城埠至利津为弯曲型河段。

黄河下游河道形态与来水流量、含沙量及泥沙级配有关, 小浪底水库建库前黄河下游各河段河道特征值及建库前后平均流量和含沙量见表 1, 小浪底水库建库前, 上段游荡型河段主河槽宽浅, 床

收稿日期: 2012-10-15

基金项目: 十二五国家科技支撑计划项目(2012BAB02B01-03); 水利部公益性行业科研专项(200901003); 首都师范大学附中研究性学习课题

作者简介: 陈绪坚(1967-), 男, 湖北通山人, 博士, 教授级高工, 主要从事泥沙研究。E-mail: chenxj1@iwhr.com

沙粒径粗 ,弯曲系数小 ,流量和含沙量大 ,下段弯曲型河段主河槽窄深 ,床沙粒径细 ,弯曲系数大 ,流量和含沙量小。上段宽浅游荡型河段的滞洪沉沙作用 ,使洪水流量过程调平、泥沙沿程沉积分选变细 ,对下段窄深弯曲型河段的形成起了重要作用^[5]。1999 年 10 月小浪底水库投入运用后 ,黄河下游的洪水流量过程调平 ,流量和含沙量显著减小 ,小浪底水库蓄水拦沙对黄河下游河道形态的弯曲变化产生了较大影响。

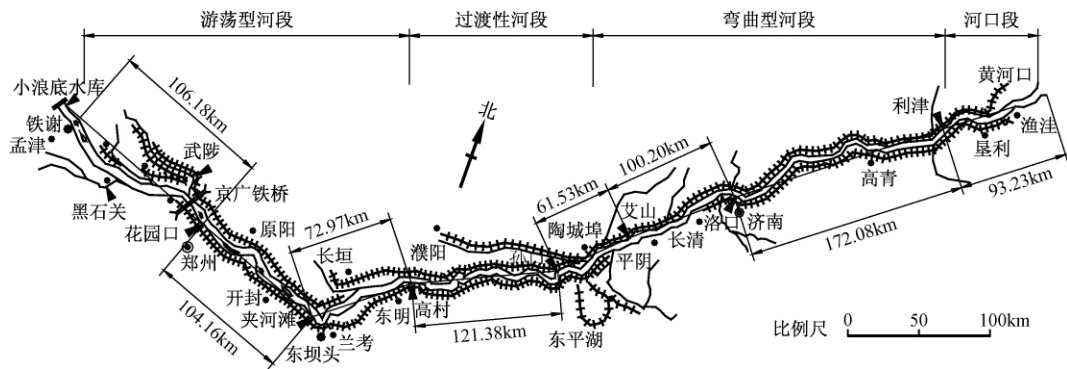


图 1 黄河下游各河段河道形态示意图
Fig. 1 Sketch of Lower Yellow River

表 1 黄河下游各河段河道特征值及建库前后平均流量和含沙量

Table 1 Discharge , sediment concentration and channel features in Lower Yellow River

河段		铁谢 – 高村游荡河段	高村 – 陶城埠过渡河段	陶城埠 – 利津弯曲河段
建库前	主河槽长度/km	283. 31	155. 29	299. 90
	主河槽平均宽度/m	4 475	1 848	664
	床沙平均粒径/mm	0. 121	0. 100	0. 080
	平均弯曲系数	1. 12	1. 23	1. 19
建库前 1950 – 1999 年	平均流量/(m ³ /s)	1 286(花园口站)	1 217(高村站)	1 187(艾山站)
	平均含沙量/(kg/m ³)	26. 20(花园口站)	24. 85(高村站)	24. 45(艾山站)
建库后 2000 – 2010 年	平均流量/(m ³ /s)	747(花园口站)	683(高村站)	622(艾山站)
	平均含沙量/(kg/m ³)	4. 46(花园口站)	6. 71(高村站)	7. 92(艾山站)

3 黄河下游主河槽弯曲变化

铁谢至高村为游荡型河段 ,本河段滩地宽广 ,河宽水散 ,冲淤变化大 ,历史上主流摆动频繁 ,两岸大堤距一般为 5 ~ 10km ,最宽处达 20 多千米 ,河道比降 1. 71‰ ~ 2. 65‰。铁谢至高村游荡型河段主河槽弯曲系数计算成果见表 2 ,根据小浪底水库运用前的资料^[6] ,铁谢至高村的主河槽长度为 283. 31km (主河槽断面间距累计 ,黄河生产堤之间的河道为主河槽 ,下同) ,主河槽平均弯曲系数为 1. 12(主河槽曲线长度与河段直线长度比值 ,下同) 。根据小浪底水库运用后的最新河道形态卫星图片量测结果 ,铁谢至高村的主河槽长度为 324. 98km ,主河槽平均弯曲系数为 1. 29。本河段的主河槽平均弯曲系数明显增大 ,游荡型河段有向弯曲型转化的趋势 ,高村附近局部河段河势如图 2 所示。



图 2 高村附近局部河段河势图(2010 年)
Fig. 2 Satellite channel image around Gaocun (2010)

表2 铁谢至高村游荡型河段主河槽弯曲系数计算成果

Table 2 Sinuosity ratio of main channel from Tiexie to Gaocun

河段	铁谢至花园口	花园口至夹河滩	夹河滩至高村	铁谢至高村合计
直线长度/km	97.42	93.63	61.60	252.65
建库前	主河槽长度/km	106.18	104.6	283.31
	平均弯曲系数	1.09	1.11	1.12
建库后	主河槽长度/km	124.93	112.59	324.98
	平均弯曲系数	1.28	1.20	1.42

高村至陶城埠属于由游荡向弯曲转化的过渡性河段,本河段主河槽比游荡型稳定,仍有一定的摆动,但摆动幅度较小,两岸大堤堤距一般为1.4~8.5km,主河槽宽0.5~1.6km,河道平均比降1.48‰。高村至陶城埠过渡性河段主河槽弯曲系数计算成果见表3,根据小浪底水库运用前的资料^[6],高村至陶城埠的主河槽长度为155.29km,主河槽平均弯曲系数为1.23。根据小浪底水库运用后的最新河道形态卫星图片量测结果,高村至陶城埠的主河槽长度为169.58km,主河槽平均弯曲系数为1.35。本河段的主河槽平均弯曲系数增大,主河槽弯曲系数除了随来水来沙条件变化,还受堤防整治和两岸地形控制,根据实测卫星图片的主河槽平面形态判断,目前该河段基本转化为弯曲型河段,孙口附近局部河段河势如图3所示。



图3 孙口附近局部河段河势图(2010年)

Fig. 3 Satellite channel image around Sunkou (2010)

表3 高村至陶城埠过渡性河段主河槽弯曲系数计算成果

Table 3 Sinuosity ratio of main channel from Gaocun to Taochengbu

河段	高村至孙口	孙口至陶城埠	高村至陶城埠合计
直线长度/km	98.77	26.98	125.75
建库前	主河槽长度/km	121.38	155.29
	平均弯曲系数	1.23	1.23
建库后	主河槽长度/km	133.87	169.58
	平均弯曲系数	1.36	1.32

陶城埠至利津为弯曲型河段,本河段河道弯曲,两岸整治工程较多,河势稳定,两岸大堤堤距一般为0.4~5km,主河槽宽0.3~0.8km,河道平均比降1‰左右。陶城埠至利津弯曲型河段主河槽弯曲系数计算成果见表4,根据小浪底水库运用前的资料^[6],陶城埠至利津的主河槽长度为299.90km,主河槽平均弯曲系数为1.19。根据小浪底水库运用后的最新河道形态卫星图片量测结果,陶城埠至利津的主河槽长度为314.18km,主河槽平均弯曲系数为1.25。该河段维持弯曲型不变,主河槽平均弯曲系数有所增大,陶城埠至艾山河段河势如图4所示。



图4 陶城埠至艾山河段河势图(2010年)

Fig. 4 Sinuosity ratio image from Taochengbu to Aishan (2010)

表4 陶城埠至利津弯曲型河段不同时期主河槽弯曲系数计算成果

Table 4 Sinuosity ratio of main channel from Taochengbu to Lijin

河段	陶城埠至艾山	艾山至洛口	洛口至利津	陶城埠至利津合计
直线长度/km	25.34	79.59	146.83	251.76
建库前	主河槽长度/km	27.62	100.20	299.90
	平均弯曲系数	1.09	1.26	1.19
建库后	主河槽长度/km	30.00	106.02	314.18
	平均弯曲系数	1.18	1.33	1.25

4 河床演变基本原理

进一步通过河床演变基本原理来解释黄河下游河型转换和弯曲变化的机理。挟沙水流的水力机械能是由水和泥沙所组成的浑水体的势能和动能,其机械能的转换和损耗过程为:一部分推动推移质运动作有用功,转化为推移质的平均动能,维持推移质运动;其余都转化为紊动能和热能,其中紊动能又有一部分悬浮悬移质作有用功,转化为悬移质的平均势能,维持悬移质悬浮和浑水平均比重,其余紊动能都转化为热能耗散。河流是一个具有能量紊动粘性热耗散结构的开放系统,遵循耗散结构基本理论,利用开放系统耗散结构理论的普适发展判据判定河流的均衡稳定性,提出了河床演变均衡理论的河流最小可用能耗率原理^[4]。

河流最小可用能耗率原理可阐述为:在一定来水来沙条件下,河流总是在一定约束条件下努力调整所有可以调整的变量,使挟沙水流的可用机械能损耗率减小,且当河道稳定时为最小,最小值的大小取决于来水来沙和河床边界条件,其表达式为

$$P = \gamma_m Q U J_e - \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} Q S \omega - \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} g_b B_d U_g (\tan \varphi - J_0) = \text{最小值} \quad (1)$$

式中 P 为可用机械能损耗率; γ_m 为浑水平均比重; Q 为流量; U 为流速; J_e 为能坡; γ_s 为泥沙比重; γ 为水的比重; S 为悬移质含沙量; ω 为悬移质平均沉速; g_b 为单宽推移质输沙率; B_d 为推移质输沙带宽; U_g 为推移质运动速度; φ 为推移质水下休止角; J_0 为河床坡降。

方程式(1)的物理意义是体积为流量 Q 的含沙浑水体在向下游流动过程中的可用机械能损耗率(即紊动粘性热耗散率),第一项为挟沙河流的总能耗率;第二项为总能耗率中用于维持悬移质悬浮作有用功的功率,转化为悬移质的平均势能,维持悬移质悬浮和浑水平均比重;第三项为总能耗率中用于维持推移质运动作有用功的功率,转化为推移质的平均动能,维持推移质运动。

利用 $\gamma_m = \gamma + \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} S$ 和 $J_e \approx J$ 可将(1)式转换为

$$P = \gamma Q U J + \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} Q S (U J - \omega) - \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} g_b B_d U_g (\tan \varphi - J_0) = \text{最小值} \quad (2)$$

根据(2)式计算,由于篇幅限制,计算方法和过程详见参考文献[5],黄河下游河道断面宽深比及平衡比降计算成果如图5所示,河道断面形态计算结果表明,游荡性河段的宽浅主要是由 $50 \sim 120 \text{ kg/m}^3$ 的来水含沙量所引起,来水含沙量小于 50 kg/m^3 或大于 120 kg/m^3 形成的河道断面窄深,但高含沙水流平衡输沙比降大于 3‰ ,而黄河下游河道比降小于 3‰ ,高含沙水流易于沿程淤积。来水含沙量大,河道断面宽浅;来水含沙量小,河道断面窄深。泥沙粒径粗,河道断面宽浅;泥沙粒径细,河道断面窄深。高含沙水流,河道断面窄深,平衡输沙比降大。

小浪底建库前,黄河下游自上而下,洪水含沙量沿程减小,泥沙粒径沿程细化,主河槽断面逐渐窄深,弯曲系数增大。小浪底建库后,黄河下游洪水含沙量显著减小,主河槽断面向窄深发展,虽然河道冲刷,含沙量沿程增加,泥沙粒径增大,河道断面有展宽的因素,但与建库前比较,洪水含沙量减小是主要的,因此,黄河下游各河段都表现出主河槽断面向窄深发展,弯曲系数增大。

不同河型的形成机理是,在宽浅河段,粗颗粒泥沙易于沉积为洲,洪峰涨落快,沙洲不稳,主流不定,

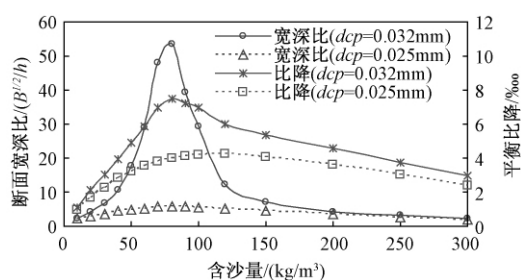


图5 黄河下游河道断面宽深比及平衡比降计算成果图

Fig. 5 Calculated results of channel section and slope in regime of Lower Yellow River

河道游荡;在窄深河段,表层水流惯性大,弯道环流强,河道弯曲。

河型沿程变化机理是,黄河下游宽浅游荡河段的滞洪沉沙作用使泥沙粒径沿程分选变细、水流含沙量减小、洪峰调平,促使下段窄深弯曲性河段的形成。同理,小浪底水库的滞洪沉沙作用,下泄水流的含沙量减小、泥沙粒径变细、洪峰调平,使下游游荡型河段有向弯曲型转化的趋势,主河槽弯曲系数增大。

5 河道弯曲变化机理

在一定水沙条件下,河流能耗率由边界条件决定,由于河道边界条件沿程不相同,河流能耗率沿程变化,河流通过改变河宽、水深、比降和含沙量等来减小可用能耗率。河流能耗率变化的表现方式之一是河道比降变化,河道平均比降与河谷地貌平均坡降成正比,与河道平均弯曲系数成反比。

$$J = \frac{J_d}{\eta} \quad (3)$$

式中 J 为河道平均比降; J_d 为河谷地貌平均坡降; η 为河道平均弯曲系数。

由于河谷地貌坡降变化很慢,河床演变研究可认为其不变,因此,河道比降变化直接表现为河道弯曲系数变化,河道弯曲系数增大,河道比降减小,河流能耗率减小,反之,河道弯曲系数减小,河道比降增大,河流能耗率增大。

河流最小可用能耗率原理的公式反映了河床演变是多个变量之间的综合关系,从河流最小可用能耗率原理出发,可以得到多种广义的河相关系,但这些河相关系只能反映河床演变的某两个变量之间的关系^[4],其中水流平均含沙量与河道平均比降及河道平均弯曲系数的关系为

$$S = k_1 J^{3/2} \quad (4)$$

$$S = k_2 \eta^{-3/2} \quad (5)$$

(4) 和 (5) 式表现了含沙量大的河流河道比降大,而河道弯曲系数小,反之,含沙量小的河流河道比降小,而河道弯曲系数大,例如,长江的含沙量比黄河小,长江中下游的河道弯曲系数比黄河下游大,而长江中下游的河道比降比黄河下游小。同理,建库后下泄水流含沙量减小,下游主河槽弯曲系数增大,主河槽平均比降减小。从而理论上解释了修建水库后下泄水流含沙量减小,导致下游主河槽弯曲系数增大,下游河道冲刷易于出现塌滩和畸形弯道,说明建库后下游河道整治工程的弯曲半径应减小,整治河道的弯曲系数应增大。

6 结论

冲积河流河型转换及弯曲变化机理是一个有争议的自然科学难题,根据河道形态卫星图片量测结果,分析了黄河下游各河段的主河槽弯曲系数变化,根据河床演变基本原理,探讨了平原冲积河流河道形态弯曲变化的机理,得到如下主要结论。

(1) 黄河下游各河段的主河槽弯曲系数对比表明,小浪底水库运用后,黄河下游各河段的主河槽弯曲系数有所增大,其中游荡型河段的主河槽弯曲系数由 1.12 增大到 1.29,游荡型有向弯曲型转化的趋势;过渡性河段的主河槽弯曲系数由 1.23 增大到 1.35,过渡性河段基本转变为弯曲型;弯曲型河段的

主河槽弯曲系数由 1.19 增大到 1.25。

(2) 河道断面形态计算结果表明,来水含沙量大,河道断面宽浅,来水含沙量小,河道断面窄深;泥沙粒径粗,河道断面宽浅,泥沙粒径细,河道断面窄深;高含沙水流,河道断面窄深,平衡输沙比降大。不同河型的形成机理是,在宽浅河段,粗颗粒泥沙易于沉积为洲,洪峰涨落快,沙洲不稳,主流不定,河道游荡;在窄深河段,表层水流惯性大,弯道环流强,河道弯曲。

(3) 河型沿程变化机理分析表明,黄河下游宽浅游荡河段的滞洪沉沙作用使泥沙粒径沿程分选变细、水流含沙量减小、洪峰调平,促使下段窄深弯曲河段的形成。同理,小浪底水库的滞洪沉沙作用,下泄水流的含沙量减小、泥沙粒径变细、洪峰调平,使下游游荡型河段有向弯曲型转化的趋势,主河槽弯曲系数增大。

(4) 河道弯曲变化机理分析表明,含沙量大的河流河道比降大,而河道弯曲系数小,反之,含沙量小的河流河道比降小,而河道弯曲系数大,从理论上解释了修建水库后下泄水流含沙量减小,导致下游主河槽弯曲系数增大。本文是黄河下游现状工程控制条件的测量数据分析结果,可以作为将来的比较参考。

参考文献:

- [1] Yang C. T., C. C. S. Song. Theory of minimum rate of energy dissipation [J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1979, 105(HY7): 769 - 784.
- [2] Chang H. H.. Minimum stream power and river channel patterns [J]. Journal of Hydrology, 1979, 41: 303 - 327.
- [3] White W. R., Bettis R., Paris E.. Analytical approach to river regime [J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1982, 108(HY10): 1179 - 1193.
- [4] 陈绪坚 胡春宏. 河流最小可用能耗率原理和统计熵理论研究 [J]. 泥沙研究, 2004(6): 10 - 15.
- [5] 陈绪坚 胡春宏. 河床演变的均衡稳定理论及其在黄河下游的应用 [J]. 泥沙研究, 2006(3): 14 - 22.
- [6] 黄河下游断面法冲淤量分析与评价 [R]. 郑州: 黄河水利委员会水利科学研究院, 2002: 18 - 30.

Theory of river pattern transformation and change of channel sinuosity ratio in Lower Yellow River

CHEN Xu-jian¹, CHEN Qing-yang²

(1. Sedimentation Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. High School Attached to Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: The theory of river pattern transformation and change of sinuosity ratio of alluvial channels is a difficult problem disputed in physical science. Based on the results of satellite images, the change of sinuosity ratio of the main channel of each reach in the Lower Yellow River is analysed. The results indicate that the sinuosity ratio is increasing after the Xiaolangdi reservoir was operated. The braided pattern tends to be transformed to meandering pattern for its sinuosity ratio increased from 1.12 to 1.29, the transitional pattern has been transformed to meandering pattern for its sinuosity ratio increased from 1.23 to 1.35, and the sinuosity ratio of meandering reach is increased from 1.19 to 1.25. The theory explains theoretically pattern transformation and change in sinuosity ratio of river channel for sediment concentration decreased, grain size attenuated, and flood peak reduced due to the flood detention and sediment siltation in the reservoir.

Key words: Lower Yellow River; river bed evolution; channel patterns; sinuosity ratio; regime theory