

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0066

贺莉. 流量过程对平滩流量的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 38-44. HE L. Effects of discharge hydrograph on bankfull discharge[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 38-44. (in Chinese)

流量过程对平滩流量的影响

贺莉

(中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 在分析年平滩流量与来水来沙关系的研究中多关注当年或多年水量、沙量、水沙系数等总量特征参数, 部分研究中增加考虑了洪峰峰值等特征参数, 而针对流量过程对年平滩流量影响的研究较少。通过花园口断面 1954-2000 年实测流量过程及大量实测断面资料, 采用流量历时曲线法来描述流量过程, 采用改进的 WOL 方法估算实时平滩水位, 进而估算年/实时平滩流量, 分析流量历时曲线特征参数与年/实时平滩特征之间的关系。分析认为, 在流量峰型扁平时, 断面的年/实时平滩水深基本不变, 断面形态变化不大; 当流量峰型尖瘦时, 断面的年/实时平滩水深变化较大, 断面形态变化较大。分析认为, 影响年平滩流量的水沙特征参数除水量、沙量、水沙系数等表征总量特性的参数外, 还应该适当考虑流量过程的影响, 即流量过程峰型相对尖瘦时年/实时平滩流量均变化较大。

关键词: 流量过程; 平滩流量; 断面形态; 花园口

中图分类号: TV 122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0038-07

Effects of discharge hydrograph on bankfull discharge

HE LI

(Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The analysis of the relationship between annual bankfull discharge and inflow mainly focuses on the quantity of runoff and sediment load at the annual scale (such as water amount, sediment load, and water sediment coefficient). Some researchers may also consider some specific characteristics such as peak discharge. However, few studies focus on the discharge hydrograph. We collected measured data of discharge and cross sections at Huayuankou Hydrology Station during 1954-2000, and adopted flow duration curve (FDC) to describe the discharge hydrograph. Then, we used improved MOL method to estimate the bankfull discharge at different temporal scales, both annual and real time. The relationship between the coefficients of FDCs and bankfull depth (annual and real time) was investigated. The analysis showed that when the discharge changed dramatically, the bankfull discharge was more likely to change, and so was the morphology of cross sections. In conclusion, in addition to the quantity of runoff and sediment load, discharge hydrograph may also influence the bankfull discharge (annual and real time).

Key words: discharge hydrograph; bankfull discharge; morphology of cross section; Huayuankou hydrological station

从真实的物理图景看, 平滩流量是指在滩槽分明的河道内, 主槽充满、与新生河漫滩表面平齐时的流量^[1]; 从几何意义上看, 平滩流量通常是断面宽深

比发生突然扩展的转折点; 从动力学意义上看, 平滩流量是来水来沙的动力作用从塑造主槽到塑造滩地的转折点。因此, 平滩流量其相应水流的流速大, 输

收稿日期: 2017-06-11 修回日期: 2017-12-12 网络出版时间: 2018-03-09
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180309.1633.016.html>
基金项目: 国家自然科学基金(51109198; 51579230)
Funds: National Natural Science Foundation of China (51109198; 51579230)
作者简介: 贺莉(1982-), 女, 江西萍乡人, 助理研究员, 博士, 从事水力学及河流动力学研究。E-mail: heli@ignrr.ac.cn

沙能力高,造床作用强,常作为造床流量^[2]反映水流的造床能力和河道的排洪输沙能力。在现有研究成果中,部分研究关注断面或河段的年平滩流量的估算方法^[2,5],部分研究则侧重分析年平滩流量与当年^[6,7]或多年来水来沙的关系^[8,12]。在分析年平滩流量与来水来沙关系的研究中,一般统计年内整个水沙过程的水量、沙量、水沙系数等^[5],部分研究增加考虑了汛期水沙量^[5,13]、最大洪峰流量^[14]、水流含沙量最大时的流量^[15,16]等的影响,而针对流量过程不同对年平滩特征影响的研究相对较少。本文收集整理花园口断面在1954–2000年的流量过程及大量实测断面资料,采用流量历时曲线法分析流量过程特征,采用改进的WOL方法估算年/实时平滩流量,并进一步分析流量过程特征参数与年/实时平滩流量之间的关系。

1 研究方法数据来源

1.1 研究方法

采用流量历时曲线(FDC, flow duration curve)法来描述年流量过程,该方法能简单描述长序列流量或输沙量过程的特征^[17]。采用FDC方法描述流量序列过程时,将年流量序列 $q_i (q_1, q_2, \dots, q_n)$ 重新排列,形成新的流量序列 $q_{(i)} (q_{(1)}, q_{(2)}, \dots, q_{(n)})$,计算序列中等于或大于某一特定流量的累积分布函数 p_i ,然后绘制实测流量 $q_{(i)}$ 和概率 p_i 的相关关系图。其中, n 为样本大小, $q_{(1)}$ 和 $q_{(n)}$ 分别是实测流量序列中的最大值和最小值, p_i 的计算方法如下所示:

$$p_i = P(Q > q_{(i)}) = \frac{i}{n+1} \quad (1)$$

进一步以对数函数来拟合各年流量的FDC曲线,获得拟合关系式 $Q = a \ln(p) + b$,其中,参数 a 值越大或 b 值越小,流量过程的年内变化越小。

在基于断面几何标准的平滩水位估算方法中,Wolman^[18]认为平滩高程处的河宽与平均水深比值最小(简称为WOL方法)。本文采用改进的WOL方法估算各断面对应的平滩水位,即在WOL方法基础上增加一定的修正,以适应黄河下游河道的多流路断面^[18,20]。改进的WOL方法估算平滩水位的步骤如下:首先根据断面的滩槽判断出最大河宽,并增加最大河宽的缩小系数(0.1, 0.9),然后计算该范围内河宽与平均水深的比值,最小比值对应的高程即为实时平滩水位。在断面实时平滩水位确定后,根据断面处日均水位–流量关系计算相应的实时平滩流量,并获得相应的实时平滩水深等特征参

数。如果某年存在多组实测大断面资料,将全年内各实测大断面实时平滩特征的均值作为年平滩特征值,即

$$A_{Yi} = \frac{\sum_i A_{Yi}}{N} \quad (2)$$

式中: A_{Yi} 为大断面对应的实时平滩特征; i 为实测大断面组次; N 为该年内实测大断面组数; A_{Yi} 为年平滩特征。

1.2 数据来源

本文的主要数据为花园口断面在1954–2000年的流量过程,以及各年在年内不同时期施测的大断面资料,包括在1954–1964年施测的126组次大断面资料以及在1965–2000年期间施测的88组次大断面资料,最多的一年有26组次实测大断面资料(1959年)。在1972年至2000年期间,每年基本有2组次实测大断面资料,测量时间基本为汛前和汛后;在1954年至1971年期间,每年平均有8组次实测大断面资料,汛前、汛后及汛期均有实测大断面资料。

2 结果分析

2.1 年平滩特征

在估算年平滩流量时,一般是先从河床横断面图上确定河漫滩前缘高程,即各个断面的实时平滩水位,并将该实时平滩水位视为断面年平滩水位,然后根据水位–流量关系曲线估算相应于年平滩水位的年平滩流量。其中,大断面资料一般选取汛后测量的地形资料。然而,各家在估算断面实时平滩水位时采用的判别方法不同,采用的水位流量关系(日均或汛期或多年平均)也存在不同,导致不同学者估算的年平滩水位和年平滩流量的数值存在很大不同,见图1。各家估算的年平滩水位中以1965年的差异最大,最大年平滩水位为94.27 m,而最小年平滩水位为92.08 m,最大值和最小值相差2.19 m;各家估算的年平滩流量中以1958年的差异最大,最大年平滩流量为10 420 m³/s,最小年平滩流量为5 620 m³/s,最大值和最小值相差4 800 m³/s。在50年内(1954–2000年),各家估算的年平滩水位的变化幅度为0.76 m,约为年平滩水位多年平均值的0.8%;各家估算的年平滩流量的变化幅度为2 642 m³/s,约为年平滩流量多年平均值的43%。由此可见,各家估算的年平滩流量相差较大。因此,下文分析年平滩流量/水位时忽略各家估算值的不同,而采用各家估值的平均数作为年平滩流量/水位。

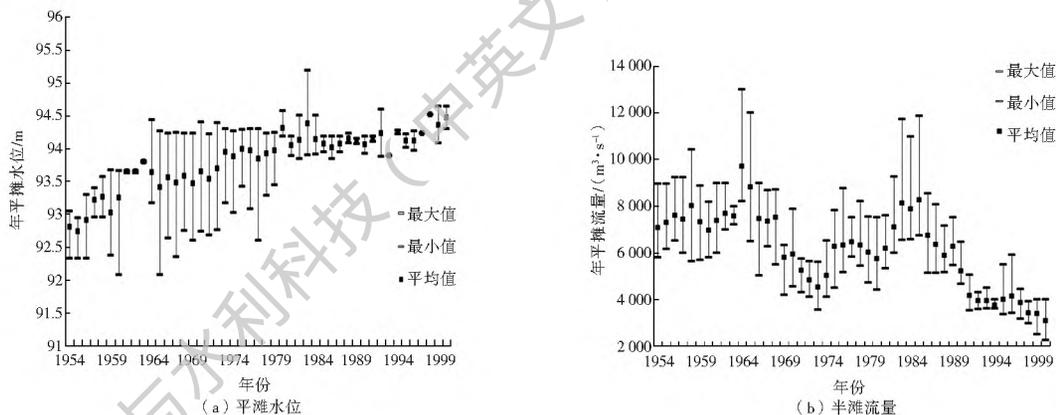


图 1 花园口断面年平滩水位 (a) 及年平滩流量 (b) 的逐年变化

Fig. 1 Variation of annual bankfull elevation (a) and annual bankfull discharge (b) at Huayankou hydrological station

根据年平滩流量的逐年变化可以看出(图 1 中的平均值), 1964 年的年平滩流量最大(9 713 m³/s), 相应的年平滩水位为 93.64 m; 1998 年和 2000 年的年平滩流量均很小, 分别为 3 418 m³/s 和 3 092 m³/s, 相应的年平滩水位分别为 94.52 m 和 94.47 m。由年平滩流量的估算方法可知, 计算年平滩流量需要根据年平滩水位和水位-流量关系共同决定的, 年平滩水位一般由汛后大断面地形决定, 水位-流量关系同样受到大断面形态的影响。因此, 图 2 绘制了最大、最小年平滩流量对应的汛后断面及 FDC 曲线。由图 2 可知, 1964 年

的汛后地形相比 1998 年和 2000 年的汛后地形, 主槽更为窄深, 且 1964 年断面在 [1197 5356 m] 范围内的平均高程为 90.73 m, 1998 年和 2000 年断面在同样宽度范围内的平均高程分别为 93.5 m 和 93.3 m。1998 年和 2000 年的主槽断面形态差别不大, 年平滩水深(分别为 1.02 m 和 1.17 m) 和年平滩流量差别也不大; 1964 年的主槽断面窄深, 年平滩水深(约为 2.91 m) 和年平滩流量均较大。为了进一步分析流量过程对年平滩特征值和断面地形的影响, 接下来分析年平滩水深与流量过程参数之间的关系。

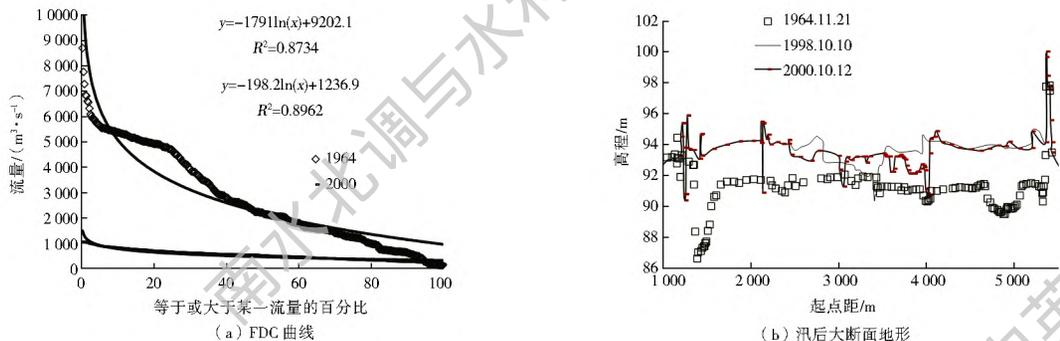


图 2 1964、1998 和 2000 年的 FDC 曲线及汛后大断面形态

Fig. 2 Flow duration curves and morphology of cross sections after flood in 1964, 1998, and 2000

根据公式(1)获得各年流量过程的 FDC 曲线, 然后拟合获得对数参数 a 和 b ; 根据公式(2) 计算各年的年平滩水深, 并点画年平滩水深与对数参数之间的关系, 如图 3 所示。根据 a 值的大小, 将所有数据点大致分为 $a < -1 500$ 、 $-1 500 < a < -1 000$ 、 $-1 000 < a < -500$ 和 $a > -500$ 四组。由图 3 可知, 除第四组($a > -500$)外, 其余三组中的年平滩水深随着 a 值或 b 值呈现同样的趋势: 年平滩水深随 a 值增大呈现减小的趋势, 随 b 值增大呈现增大的趋势; 在第四组($a > -500$)中, 年平滩水深与 a 值或 b 值的关系不大, 基本维持不变。

图 4 绘制了两组 a 值对应的代表性流量过程及花园口断面的典型年内变化。可以看出, 在 $a > -500$ 时, 流量在全年内的变幅不大, 汛前汛后地形变化不大, 虽会出现主槽横向摆动(如 1991、1997 和 1999), 但主槽形态变化不大; 当 $a < -1 500$ 时, 流量的年内变幅较大, 断面地形改变明显, 汛前主槽和汛后主槽存在横向移动, 如 1954 年。以上分析表明, 年内流量变幅较大时(如 $a < -1 000$), 断面地形在流量作用下变化剧烈, 同时, 年平滩水位随 a 值增大而减小; 而年内流量基本保持平稳的话(如 $a > -500$), 断面主槽形态在流量作用下变化不大, 年平滩水位基本维持不变。

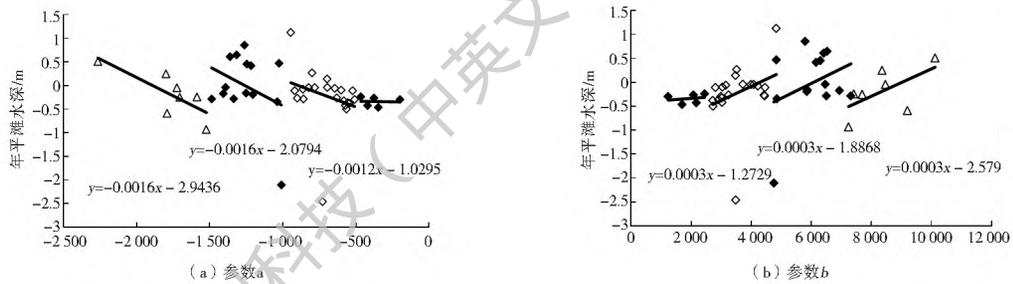


图3 年平滩水深与对数参数 a 和 b 的关系

Fig. 3 Relationship between parameters a and b of flow duration curve and annual bankfull depth

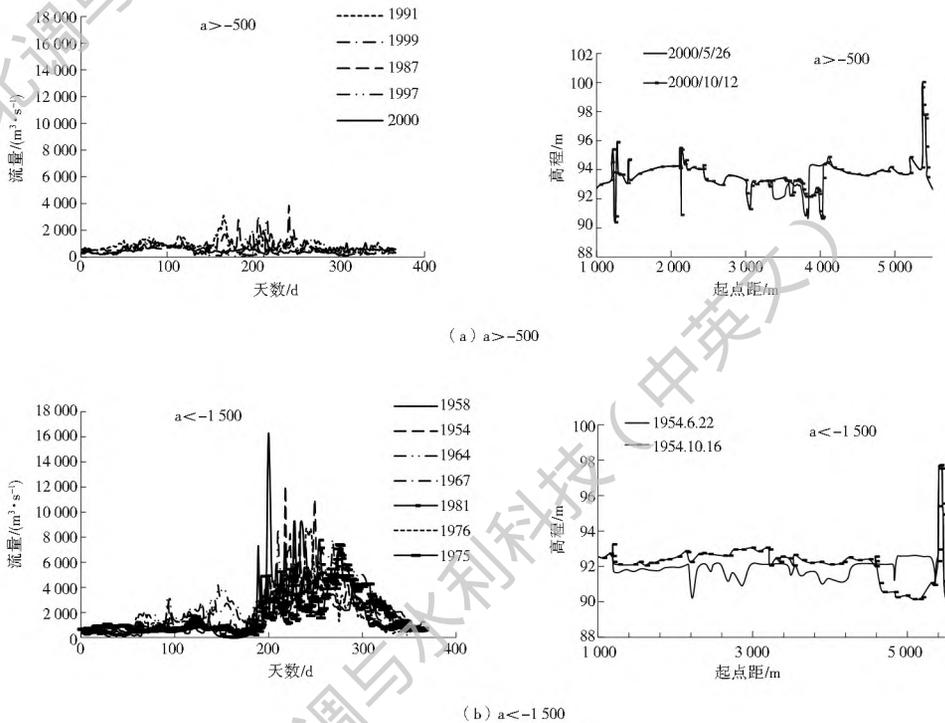


图4 对数参数 $a > -550$ 和 $a < -1500$ 的典型流量过程, 及断面的典型年内变化

Fig. 4 Discharge hydrograph with different α values, and typical cross sections before and after floods

2.2 实时平滩特征

为了分析实时平滩特征与年内流量过程以及断面地形年内变化之间的关系, 搜集整理 1958、1959、1961 和 1962 年四年的所有实测大断面数据及实测的水位-流量关系数据。1958 年的实测洪水资料范围为 7 月 4 日至 8 月 6 日, 实测大断面资料的施测时间为 1 月 4 日至 12 月 30 日, 共完成有效大断面测量 20 次, 其中, 花园口断面的最大流量为 $22\,300\text{ m}^3/\text{s}$ (自 1919 年黄河有实测水文资料以来的最大的一场洪水), 最大含沙量为 $187\text{ kg}/\text{m}^3$, 水位范围为 $91.81\sim 94.42\text{ m}$ 。1959 年实测洪水资料范围为 7 月 17 日至 9 月 6 日, 实测大断面资料的施测时间为 3 月 21 日至 12 月 22 日, 共完成有效大断面测量 26 次, 其中, 花园口断面的最大流量为 $9\,480\text{ m}^3/\text{s}$, 最大含沙量为 $269\text{ kg}/\text{m}^3$, 水位范围为 $92.02\sim 93.42\text{ m}$ 。1961 年的实测洪水资料范围为 7 月 9 日

至 11 月 15 日, 实测大断面资料的施测时间为 4 月 30 日至 12 月 1 日, 共完成 8 次大断面测量, 其中, 花园口断面的最大流量为 $6\,300\text{ m}^3/\text{s}$, 最大含沙量为 $33.1\text{ kg}/\text{m}^3$, 水位范围为 $91.43\sim 92.92\text{ m}$ 。1962 年的实测洪水资料范围为 3 月 10 日至 10 月 22 日, 实测大断面资料的施测时间为 5 月 21 日至 11 月 20 日, 共完成 8 次大断面测量, 其中, 花园口断面的最大流量为 $6\,080\text{ m}^3/\text{s}$, 最大含沙量为 $64.2\text{ kg}/\text{m}^3$, 水位范围为 $90.71\sim 92.40\text{ m}$ 。

图 5 所示为各年 (1958、1959、1961 和 1962 年) 实时平滩流量 (Q_{br}) 在一年内的变化。图 5 中同时也绘制出了该年的年平滩流量, 包括各家估算的最大值、最小值和均值。此外, 研究表明年平滩流量与 4 年滑动平均的综合水沙系数存在很好的相关性^[21], 这里进一步分析 4 天滑动平均的综合水沙系数与实时平滩流量的相关性。因此, 图 5 中同样绘

制了对应的水沙综合参数, $k(\bar{Q}_{4f})^c(Q_{4f})^d$, 其中, 滑动平均来沙系数的计算方法为 $\bar{Q}_{4f} = C_{4f}/Q_{4f}$, Q_{4f} 是日均流量, C_{4f} 为日均含沙量, 下标 4 表明取 4 天的滑动平均值。从图 5 可知, 实时平滩流量与水沙综合参数的相关性良好, 因此, 综合水沙参数也同样能用于描述实时平滩流量的变化。

由图 5 可知, 实时平滩流量有时会大于或小于

该年的年平滩流量, 但是基本在各家估算的年平滩流量范围内。除 1959 年外, 实时平滩流量均在汛后变大, 其中, 1958 年和 1959 年的实时平滩流量变化较大, 变幅分别为 $3\ 495\ \text{m}^3/\text{s}$ 和 $3\ 585\ \text{m}^3/\text{s}$, 分别为年平滩流量的 44% 和 49%; 1961 年和 1962 年的实时平滩流量变化较小, 变幅分别为 $1\ 539\ \text{m}^3/\text{s}$ 和 $2\ 029\ \text{m}^3/\text{s}$, 约占年平滩流量的 21% 和 26%。

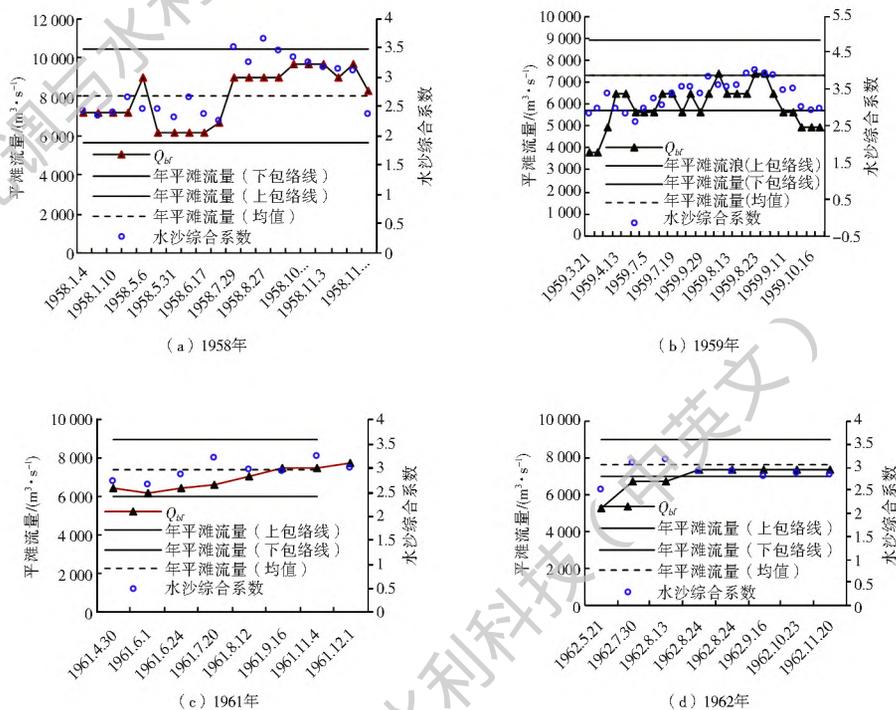


图 5 断面实时平滩流量与水沙综合参数的对比

Fig. 5 Variation of real time bankfull discharge and water sediment parameter in (a) 1958, (b) 1959, (c) 1961 and (d) 1962

由表 1 中的 a 值和 b 值可知, 三门峡水库在 1960 年蓄水运用后, 1962 年流量过程的 a 很大(值为 -945), 峰型相对更为扁平(图 6(f)), 呈现双峰型, 且峰值流量较小, 流量变化不大(最大、最小日均流量分别为 $5\ 180\ \text{m}^3/\text{s}$ 和 $63\ \text{m}^3/\text{s}$); 1958 年流量过程的 a 很小(值为 -2 266), 峰型明显尖瘦(图 6(e)), 洪峰流量大, 流量陡涨陡落(最大、最小日均流量分别为 $16\ 300\ \text{m}^3/\text{s}$ 和 $70\ \text{m}^3/\text{s}$)。对比四年的实时平滩流量(图 5) 可发现, 在流量过程峰型尖瘦的年份(1958 年), 实时平滩流量随洪水涨落的变化较

大(1958 年实时平滩流量的变化幅度约占平均值的 44%); 而在流量过程峰型相对扁平的年份(1962 年), 实时平滩流量随洪水涨落的变化不大(1962 年实时平滩流量的变化幅度约占平均值的 26%), 基本保持不变。需要指出的是, 1959 年和 1961 年的 a 值比较接近, 但两年日均流量的变化幅度不同(最大日均流量与最小日均流量的差分别为 $7\ 429\ \text{m}^3/\text{s}$ 和 $5\ 994\ \text{m}^3/\text{s}$), 同样的, 两年实时平滩流量的变化幅度也不同(变幅约占平均数的比值分别为 49% 和 21%)。

表 1 各年流量过程特征参数及年平滩特征

Tab. 1 Discharge hydrograph parameters and annual bankfull parameters

年份	a	b	年平滩高程 / m	平均河底高程 / m	年平滩水深 / m	备注
1958	- 2265.5	10 121.0	93.14	92.63	0.51	$a < - 1500$
1959	- 1262.5	5 801.3	93.43	92.58	0.85	$- 1500 < a < - 1000$
1961	- 1315.6	6 529.5	93.34	92.69	0.65	$- 1500 < a < - 1000$
1962	- 945.13	4 837.1	93.53	92.40	1.12	$- 1000 < a < - 500$

图 6 对比了最大实时平滩流量和最小实时平滩

流量对应的大断面形态, 如 1958 年 5 月 20 日大断

面对应的实时平滩流量最小, 而 1958 年 11 月 3 日大断面对应的实时平滩流量最大, 11 月的地形相对 5 月份地形更为窄深, 即相对窄深的断面地形对应的实时平滩流量较大; 1959 年的地形同样表明, 大实时平滩流量对应的断面形态更为窄深(1959 年 8 月 27 日), 小实时平滩流量对应的断面形态更为宽

浅(1959 年 3 月 21 日)。1962 年断面地形中的对比不是很明显, 实时平滩流量的变化也不显著(图 5(d))。需要特别注意的是 1961 年的地形, 汛后地形的主槽冲刷严重, 但是断面形态相比汛前没有很大变化, 基本属于主槽内均匀刷深, 因此, 实时平滩流量的变化也不大(图 5(c))。

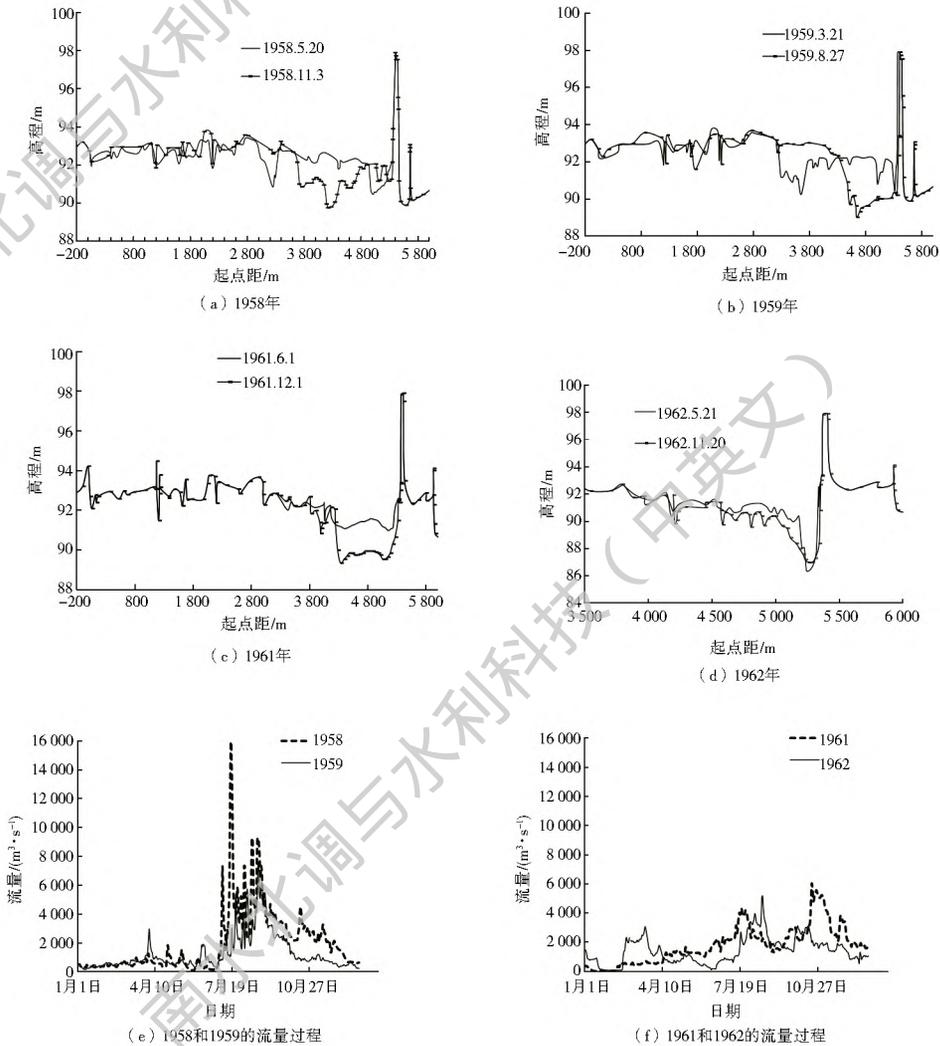


图 6 最大实时平滩流量和最小实时平滩流量对应的断面形态及流量过程(1958、1959、1961 和 1962 年)

Fig. 6 Morphology of cross sections and discharge hydrography at maximum and minimum real-time bankfull discharge(in 1958, 1959, 1961, and 1962)

3 结论

本文根据花园口断面 1954–2000 年的实测流量过程及大断面资料, 分别分析流量过程特征与年/实时平滩流量之间的关系, 得出如下结论。

(1) 在流量过程特征参数 $a > -500$ 时, 洪峰过程相对扁平, 汛前汛后断面形态变化不大, 而断面的年平均滩水深基本不变; 当流量过程特征参数 $a < -1500$ 、 $-1500 < a < -1000$ 、 $-1000 < a < -500$ 时, 洪峰过程相对尖瘦, 汛前汛后断面形态变化较大, 断面的年平均滩水深随 a 值增大而减小。

(2) 流量峰型相对扁平时, 实时平滩流量随洪水涨落的变化不大, 地形在洪水前后变化不大; 流量峰型相对尖瘦时, 实时平滩流量随洪水涨落的变化较大, 地形在洪水前后变化较大。实时平滩流量一般在汛后相对较大, 因此, 用汛后地形估算年平均滩流量能获得相对较大的数值。需要指出的是, 主槽整体刷深或淤高基本不影响实时平滩流量。

(3) 分析认为, 影响年平均滩流量的水沙特征参数除水量、沙量、水沙系数等表征总量特性的参数外, 还应该适当考虑流量过程的影响。

参考文献(References):

- [1] WILLIAMS G P. Bank-full discharge of rivers[J]. *Water Resources Research*, 1978, 14(6): 1141-1154. DOI: 10.1029/WR014i006p01141.
- [2] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987, 43-345. (QIAN N, ZHANG R, ZHOU Z D. *Fluvial processes* [M]. Beijing: Science Press, 1987, 43-345. (in Chinese))
- [3] NAVRATIL Q, ALBERT M B, HEROUIN, et al. Determination of bankfull discharge magnitude and frequency: comparison of methods on 16 gravel bed river reaches[J]. *Earth Surf. Process. Landforms*, 2006, 31: 1345-1363. DOI: 10.1002/esp.1337.
- [4] 夏军强, 吴保生, 王艳平, 等. 黄河下游河段平滩流量计算及变化过程分析[J]. 泥沙研究, 2010(2): 7-14. (XIA J Q, WU B S, WANG Y P, et al. Estimating the bankfull discharge in the Lower Yellow River and analysis of its variation processes[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(2): 7-14. (in Chinese)) DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2010.02.003.
- [5] LEOPOLD L B, Wolman G M, Miller J P. *Fluvial Processes in Geomorphology* [M]. W. H. Freeman and Co.: San Francisco, New York, 1964, 522.
- [6] 张国罡. 三门峡水库出库水沙过程变化及下游河道的响应[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2008. (ZHANG G Z. *The change of water and sediment process and response of the Lower Yellow River* [D]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [7] JAN H. Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers. *Geomorphology* [J], 1995, 12: 259-279. DOI: 10.1016/0169-555X(95)00014-V.
- [8] 林秀芝, 田勇, 伊晓燕, 等. 渭河下游平滩流量变化对来水来沙的响应[J]. 泥沙研究, 2005(5): 1-4. (LIN X Z, TIAN Y, YIN X Y, et al. Response of the bank full discharge to runoff and sediment load in the Lower Weihe River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2005(5): 1-4. (in Chinese)) DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2005.05.001.
- [9] 马雪妍. 渭河下游平滩流量与水沙条件响应关系研究[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(3): 79-82. (MA X Y. *Research on the relationship between bank full discharge and runoff sediment condition in the downstream of Weihe River* [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2006, 17(3): 79-82. (in Chinese))
- [10] WU B S, WANG G Q, XIA J Q. Case Study: Delayed sedimentation response to inflow and operations at Sanmenxia dam [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133(5): 482-494. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:5(482).
- [11] 王莉, 陈雄波, 程冀. 宁蒙河段冲淤量和平滩流量影响因素的BP分析[J]. 人民黄河, 2009, 31(11): 38-41. (WANG L, CHEN X B, CHEN J. Scour and influencing factors on bank full discharge by BP analysis in Ningmeng reach[J]. *Yellow River*, 2009, 31(11): 38-41. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2009.11.017.
- [12] 胡春宏, 陈建国, 刘大滨, 等. 水沙变异条件下黄河下游河道横断面形态特征研究[J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1283-1289. (HU C H, CHEN J G, LIU D B, et al. *Studies on the features of cross section's profile in lower Yellow River under the conditions of variable incoming water and sediment* [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(11): 1283-1289. (in Chinese)) DOI: 0559-9350(2006)11-1283-07.
- [13] 陈建国, 胡春宏, 董占地, 等. 黄河下游河道平滩流量与造床流量的变化过程研究[J]. 泥沙研究, 2006(5): 10-16. (CHEN J G, HU C H, DONG Z D, et al. *Change of bankfull and bed forming discharges in the Lower Yellow River* [J]. *Journal of Sediment Research*, 2006(5): 10-16. (in Chinese)) DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2006.05.002.
- [14] 胡春宏, 郭庆超, 陈建国, 等. 塑造和维持黄河下游中水河槽措施研究[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 381-388. (HU C H, GUO Q C, CHEN J G, et al. *Measures of reforming and maintaining the river channel for medium flood in lower Yellow River* [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(4): 381-388. (in Chinese)) DOI: 0559-9350(2006)04-0381-08.
- [15] Andrews E D. Effective and bankfull discharges of streams in the Yampa River basin, Colorado and Wyoming [J]. *Journal of Hydrology*, 1980, 46(3-4): 311-330. DOI: 10.1016/0022-1694(80)90084-0.
- [16] 石伟, 王光谦. 基于非线性动力系统观点估算平滩流量[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(11): 1563-1566. (SHI W, WANG G Q. *Estimate of bankfull discharge rate based on nonlinear dynamics system theory* [J]. *J. Tsinghua Univ. (Sci & Tech)*, 2003, 43(11): 1563-1566. (in Chinese)) DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2003.11.032.
- [17] BROWN A E, WESTERN A W, MCM AHON T A, et al. Impact of forest cover changes on annual streamflow and flow duration curves [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 483: 39-50. DOI: 10.1016/j.jhydro.2012.12.031.
- [18] WOLMAN M G, LEOPOLD L B. *River flood plains: some observations on their formation* [R]. US Geological Survey, US Government Printing Office Washington, 1957.
- [19] WANG Y J, FU X D, ZHANG Y F, et al. Temporal change in bankfull characteristics of the Yellow River, single thread versus multiple thread reach [A]. *Proceedings of 2013 IAHR World Congress*, 2013.
- [20] 贺莉, 闫云霞, 颜明. 基于断面几何标准的平滩水位估算方法对比[J]. 水力发电学报, 2015, 34(5): 6-11. (HE L, YAN Y X, YAN M. *Analysis on the definition of bankfull stage by geometric criterion* [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(5): 6-11. (in Chinese))
- [21] WU B S, WANG G Q, XIA J Q, et al. Response of bankfull discharge to discharge and sediment load in the Lower Yellow River [J]. *Geomorphology*, 2008, 100: 366-376. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.01.007.