

黄河内蒙古河段平滩流量与有效输沙流量关系

申红彬, 吴保生, 郑 珊, 李文文

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 从水沙组合的角度出发, 建立了基于水沙二维向量组合的频率统计方法, 并在此基础上提出了有效输沙流量的计算方法。根据黄河内蒙古河段巴彦高勒站 1954—2006 年日水沙资料及汛后平滩流量资料, 采用上述有效输沙流量计算方法计算得到了各年有效输沙流量及相应含沙量组合, 进而分析了平滩流量与有效输沙流量及有效来沙系数之间的关系。结果表明, 巴彦高勒站平滩流量调整分别受到包括当年在内的前期 12 年来水来沙条件的影响。

关键词: 平滩流量; 有效输沙流量; 水沙二维向量; 内蒙古河段

中图分类号: TV147 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2013)04-0477-06

平滩流量、有效输沙流量、造床流量是河床演变学中 3 个重要的物理量。其中, 平滩流量是指在具有滩槽结构的复式河槽中, 水位到达河漫滩(或边滩的滩边)高度时所对应的流量; 有效输沙流量是指天然河流某一时段内水沙过程中输送泥沙最多的某级流量; 造床流量是指造床作用与多年流量过程的综合作用相当而对塑造河床形态起控制作用的某一流速。三者之间存在一定的区别与联系: ① 平滩流量是一真实存在的实测值, 而有效输沙流量是一个虚拟的统计量; ② 平滩流量反映的是某一具体时刻河道主槽过流能力, 而有效输沙流量是某一个时段内流量过程的最大输沙流量; ③ 当河段在统计时间段内处于均衡状态时, 平滩流量、有效输沙流量与造床流量有可能是等价的, 而对于处于冲淤调整过程中的非平衡、不稳定河流, 平滩流量、有效输沙流量与造床流量并不等价。

在天然河流中, 由于主流摆动频繁、河槽冲淤变化幅度大, 河道滩唇高程不易确定, 水位~流量关系不稳定, 难以通过实测水位~流量关系找到滩唇高程所对应的平滩流量。因此, 在实际工作中, 很多学者通过建立河道平滩流量与不同影响因子之间的关系来进行计算。这些影响因子包括年平均洪水流量^[1]、流域面积与比降^[2]、多年汛期平均流量^[3]、年水量和汛期水量^[4]等。

对于有效输沙流量, 众多学者对其进行了研究, 并提出了多种计算方法。包括: Lenzi 等^[5]、张红武等^[6]、吉祖稳等^[7]、韩其为等^[8]。同时, 一些学者还对平滩流量与有效输沙流量、造床流量之间的关系进行了研究^[9-10]。

上述平滩流量与有效输沙流量的研究存在一些合理性与不足之处: ① 由于不同地区河流的气候条件、下垫面条件、河床边界组成、来沙量大小及颗粒级配等因素不尽相同, 因而造成平滩流量与流域面积之间的函数指数变化范围较大, 位于 0.50~0.95 之间, 另外, 对于来水来沙条件受人工干扰较大的河流, 仅仅单纯地考虑流域面积对平滩流量的影响存在明显不足; ② 将平滩流量与前期若干年的水沙条件联系起来, 反映出了河槽形态是多年水沙条件累积作用结果的理念, 但其计算过程多以年平均流量、含沙量或汛期平均流量、含沙量序列为基础, 再进行多年平均或滑动平均, 难以反映出河道水沙过程中不同量级流量造床作用大小、历时频率的差异以及水沙搭配的影响; ③ 在上述有效输沙流量的计算方法中, 多考虑了流量过程的影响, 较少考虑多沙河流中来沙量的影响; 频率计算多以流量过程为统计基础或分别单独将流量与含沙量过程进行统计, 将两者看作是互不相关的独立变量, 未能反映出水沙组合的特征。

收稿日期: 2012-07-06; **网络出版时间:** 2013-04-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/KCMS/detail/32.1309.P.20130412.1641.001.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2011CB403300); 国家自然科学基金资助项目(51109116)

作者简介: 申红彬(1981-), 男, 河南安阳人, 博士后, 主要从事水力学及河流动力学研究。

E-mail: hongbinshen@yahoo.com.cn

计表。

(3) 分别计算不同量级流量与含沙量区间组合所对应的地貌功, 即输沙率 $Q_i S_j$ 与历时频率 P_{ij} 的乘积 $Q_i S_j P_{ij}$, 其中, Q_i 、 S_j 分别为相应流量与含沙量区间中值。

(4) 分别以流量 Q 及含沙量 S 为坐标轴, 绘制出相应的地貌功 $Q_i S_j P_{ij}$ 曲面或采用表格表示, 其地貌功最大值所对应的流量与含沙量组合分别为有效输沙流量与含沙量组合。

2 黄河内蒙古河道有效输沙流量计算

黄河内蒙古河段位于黄河上游下段, 自内蒙古巴音陶亥入境至准格尔旗马栅乡出境, 总长度约 830 km, 沿程分布有巴彦高勒、三湖河口、昭君坟、头道拐等水文站, 如图 2 所示。

根据黄河内蒙古河段巴彦高勒站 1954—2006 年实测日流量、含沙量资料, 以各年为统计时段, 采用上述有效输沙流量计算方法, 可以计算得到各年的有效输沙流量与相应含沙量。以 1969 年为例, 其不同流量 Q 、含沙量 S 区间组合的统计频率 P_{ij} 如表 2 所示。

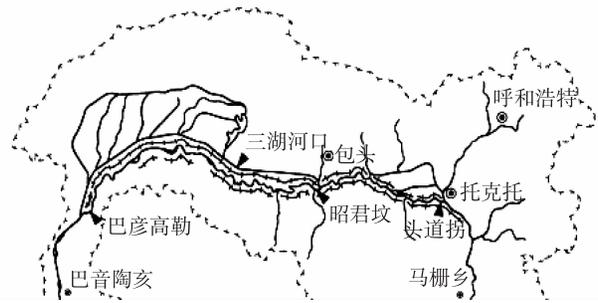


图 2 黄河内蒙古河段示意

Fig. 2 Sketch map of Yellow River at the Inner Mongolia reach

表 2 黄河内蒙古河段巴彦高勒站流量、含沙量二维向量组合频率统计

kg/s

Table 2 Frequency of discharge and sediment concentration at Bayangaole station in Inner Mongolia reach of Yellow River

$S / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$Q / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$									Σ
	[0, 150)	[150, 300)	[300, 450)	[450, 600)	[600, 750)	[750, 900)	[900, 1 050)	[1 050, 1 200)	[1 200, 1 350)	
[0, 0.5)	0.082	0.058	0.184	0.066	0.036					0.425
[0.5, 1.0)	0.049	0.074	0.104	0.079	0.003					0.310
[1.0, 1.5)		0.005	0.049	0.063	0.027	0.005	0.003			0.153
[1.5, 2.0)			0.008	0.033	0.016	0.005				0.063
[2.0, 2.5)				0.005	0.008	0.005				0.019
[2.5, 3.0)				0.003		0.003			0.003	0.008
[3.0, 3.5)						0.005		0.005	0.003	0.014
[3.5, 4.0)								0.003		0.003
[4.0, 4.5)						0.003	0.003			0.005
Σ	0.132	0.137	0.345	0.249	0.090	0.027	0.005	0.008	0.005	1.000

不同量级流量与含沙量区间组合所对应的地貌功值如表 3 所示。从表 3 可以看出, 地貌功最大值为 41.35 kg/s, 其对应的流量与含沙量分别为 $525 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.25 \text{ kg}/\text{m}^3$, 即为黄河内蒙古河段巴彦高勒站 1969 年的有效输沙流量与相应含沙量组合。

与 1969 年有效输沙流量与相应含沙量计算方法相同, 可以分别计算得到黄河内蒙古河段巴彦高勒站 1954—2006 年各年有效输沙流量与相应含沙量组合。图 3 为各年有效输沙流量的变化情况, 同时给出了各年的平均流量与最大流量变化过程。图 4 为黄河内蒙古河段巴彦高勒站 1954—2006 年各年有效来沙系数 S/Q (有效输沙流量相应含沙量与有效输沙流量的比值) 的变化情况。

从图 3、图 4 可以看出: ① 黄河内蒙古河段巴彦高勒站各年的有效输沙流量计算值基本上位于年平均流量与最大流量之间, 且总体上呈现出不断减小的趋势; ② 巴彦高勒站年有效来沙系数在 20 世纪 80 年代以前总体上呈现出减小的趋势, 而在 80 年代以后, 总体上呈现出不断增大的趋势, 其中, 1996 年有效来沙系数甚至出现了异常增大的情况。

表 3 黄河内蒙古河段巴彦高勒站流量、含沙量二维向量组合地貌功计算

kg/s

Table 3 Geology power of Bayangaole station in Inner Mongolia reach of Yellow River

S/(kg·m ⁻³)	Q/(m ³ ·s ⁻¹)									max
	75	225	375	525	675	825	975	1 125	1 275	
0.25	1.54	3.24	17.21	8.63	6.01					17.21
0.75	2.77	12.48	29.28	31.28	1.39					31.28
1.25		1.54	23.12	41.35	23.12	5.65	3.34			41.35
1.75			5.39	30.21	19.42	7.91				30.21
2.25				6.47	12.48	10.17				12.48
2.75				3.96		6.22			9.61	9.61
3.25						14.69		20.03	11.35	20.03
3.75								11.56		11.56
4.25						9.61	11.35			11.35
max	2.77	12.48	29.28	41.35	23.12	14.69	11.35	20.03	11.35	

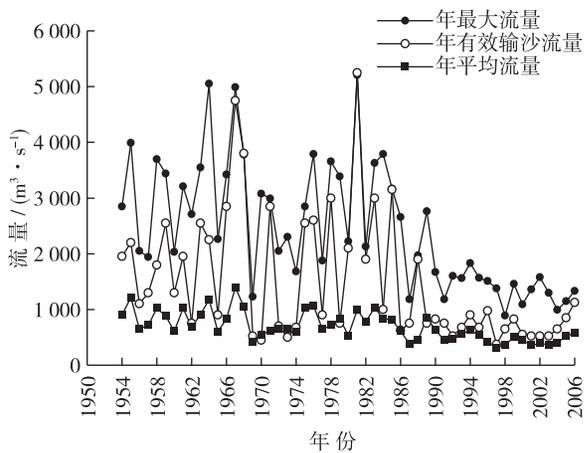


图 3 黄河内蒙古河段巴彦高勒站历年平均流量、最大流量及有效输沙流量变化过程

Fig. 3 Variation of average, maximum and effective discharge at Bayangaole station in Inner Mongolia reach of Yellow River

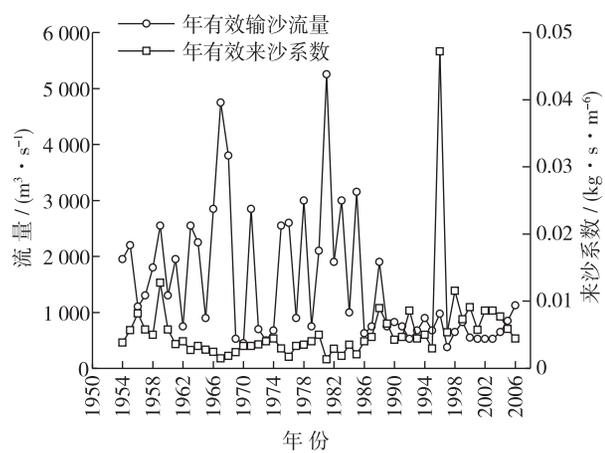


图 4 黄河内蒙古河段巴彦高勒站历年有效来沙系数变化过程

Fig. 4 Variation of effective incoming sediment coefficient at Bayangaole station in Inner Mongolia reach of Yellow River

3 黄河内蒙古河段平滩流量与有效输沙流量关系

3.1 内蒙古河段平滩流量变化情况

一般而言，对于具有滩槽结构的复式河槽，由于滩地糙率较大、主槽糙率较小，洪水漫滩后，主槽过流能力明显大于滩地，可以达到全断面过流量的 80% 以上。因此，平滩流量是反映河道排洪输沙能力的重要指标。

图 5 为黄河内蒙古河段巴彦高勒站 1958—2006 年汛后平滩流量变化情况，同时还给出了 1954—2006 年各年有效输沙流量及有效来沙系数的变化情况。

从图 5 可以看出：① 黄河内蒙古河段巴彦高勒站 1958—2006 年平滩流量与有效输沙流量并不相等；② 黄河内蒙古河段巴彦高勒站历年平滩流量变化情况总体上与有效输沙流量成正相关关系，而与有效来沙系数成负相关关系。

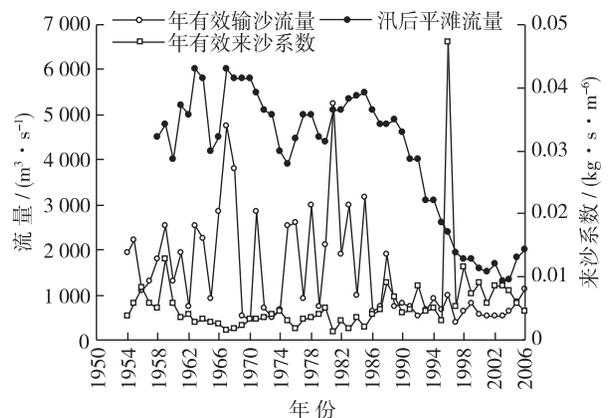


图 5 黄河内蒙古河段巴彦高勒站各年平滩流量、有效输沙流量及有效来沙系数变化过程

Fig. 5 Variation of bank-full discharge and effective discharge and incoming sediment coefficient at Bayangaole station

3.2 内蒙古河段平滩流量对水沙变化的响应

天然河流的河床演变过程不仅取决于河道当年的来水来沙条件还取决于初始的河床边界条件, 而初始河床边界条件又是前期水沙条件作用的结果^[4]。对巴彦高勒站各年有效输沙流量与有效来沙系数进行多年滑动平均, 并分析平滩流量与多年滑动平均有效输沙流量、有效来沙系数之间的关系, 如图 6 所示。

图 6 结果表明, 随着巴彦高勒站有效输沙流量、有效来沙系数滑动平均年数的增大, 平滩流量与有效输沙流量及有效来沙系数之间的相关系数逐步增大; 当滑动平均年数为 12 年时, 相关关系最好; 之后, 相关系数增长缓慢, 甚至降低。也就是说内蒙古河段巴彦高勒站平滩流量调整分别受到包括当年在内的前期 12 年来水来沙条件的累计影响, 而更早年份的来水来沙条件对平滩流量调整的影响基本消失。

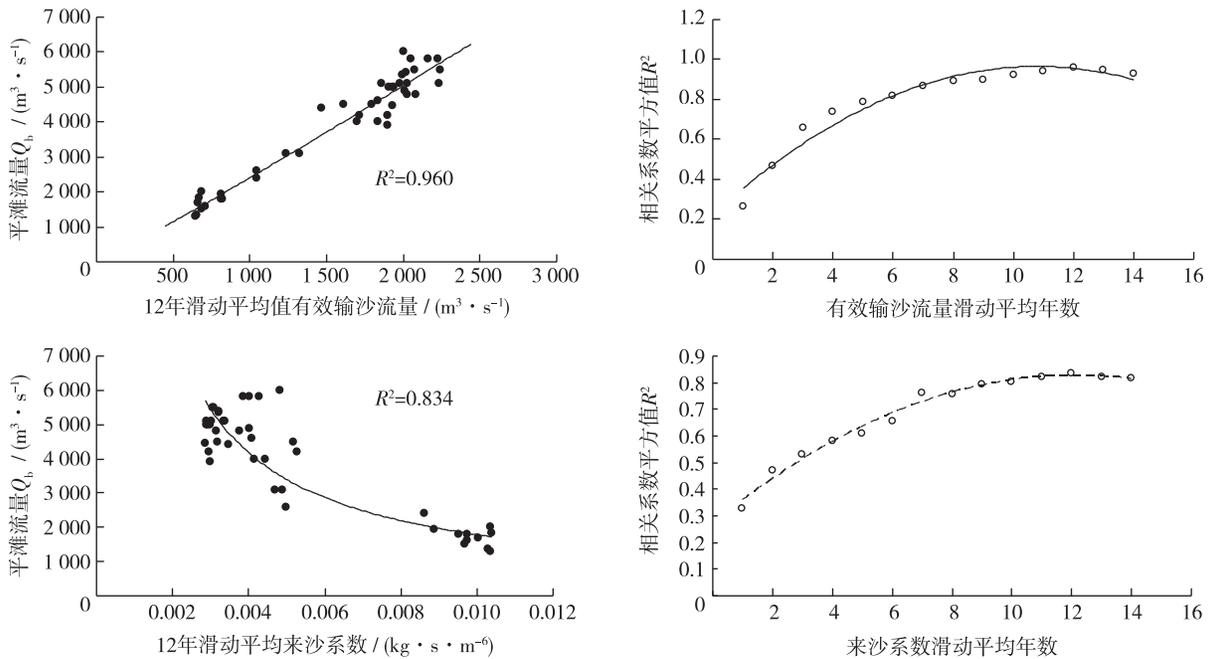


图 6 黄河内蒙古河段巴彦高勒站平滩流量与多年滑动平均有效输沙流量、有效来沙系数的关系

Fig. 6 Relation between bank-full discharge and effective discharge, incoming sediment coefficient at Bayangaole station in Inner Mongolia reach of Yellow River

4 结 论

(1) 从水沙组合的角度出发, 建立了基于水沙二维向量组合的频率统计方法, 并在此基础上提出了有效输沙流量计算方法。

(2) 采用上述计算方法对内蒙古河段巴彦高勒站历年有效输沙流量及相应含沙量组合进行了计算。结果表明, 巴彦高勒站有效输沙流量总体上呈现不断减小的趋势, 有效来沙系数在 20 世纪 80 年代以前总体上呈现减小趋势, 而在 80 年代以后, 总体上呈现不断增大的趋势。

(3) 随着巴彦高勒站有效输沙流量、有效来沙系数滑动平均年数的增大, 平滩流量与有效输沙流量及有效来沙系数之间的相关系数逐步增大; 当滑动平均年数为 12 年时, 相关关系最好; 之后, 相关系数增长缓慢, 甚至降低。这表明巴彦高勒站平滩流量调整分别受到包括当年在内的前期 12 年来水来沙条件的累计影响, 而更早年份的来水来沙条件对平滩流量调整的影响基本消失。

参考文献:

[1] BERG J H. Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers [J]. Geomorphology, 1995, 12: 259-279.

- [2] PETIT F, PAUQUET A. Bank-full discharge recurrence interval in gravel-bed rivers [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22: 685-693.
- [3] 吴保生, 夏军强, 张原锋. 黄河下游平滩流量对来水来沙的响应[J]. *水利学报*, 2007, 38(7): 886-892. (WU Baosheng, XIA Junqiang, ZHANG Yuanfeng. Response of bankfull discharge to variation of flow discharge and sediment load in lower reaches of Yellow River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(7): 886-892. (in Chinese))
- [4] 胡春宏, 陈建国, 郭庆超, 等. 黄河水沙调控与下游河道中水河槽塑造[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (HU Chunhong, CHEN Jianguo, GUO Qingchao, et al. Regulation of flow and sediment processes and reform of medium-size channel in the lower Yellow River [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [5] LENZI M A, MAO L, COMITI F. Effective discharge for sediment transport in a mountain river: Computational approaches and geomorphic effectiveness [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 326: 257-276.
- [6] 张红武, 张清, 江恩惠. 黄河下游河道造床流量的计算方法[J]. *泥沙研究*, 1994(4): 50-55. (ZHANG Hongwu, ZHANG Qing, JIANG Enhui. Calculation of dominated discharge in the lower Yellow River [J]. *Journal of Sediment Research*, 1994(4): 50-55. (in Chinese))
- [7] 吉祖稳, 胡春宏, 阎颐, 等. 多沙河流造床流量研究[J]. *水科学进展*, 1994, 5(3): 229-234. (JI Zuwen, HU Chunhong, YAN Yi, et al. Dominant discharge on heavy sediment-laden river [J]. *Advances in Water Science*, 1994, 5(3): 229-234. (in Chinese))
- [8] 韩其为, 江恩惠, 陈绪坚. 黄河下游第二造床流量研究[J]. *人民黄河*, 2009, 31(2): 1-4. (HAN Qiwei, JIANG Enhui, CHEN Xujian. Study on second bed-forming discharge of the lower Yellow River [J]. *Yellow River*, 2009, 31(2): 1-4. (in Chinese))
- [9] EMMETT W W, WOLMAN M G. Effective discharge and gravel-bed rivers [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26: 1369-1380.
- [10] PHILLIPS J D. Geomorphic impacts of flash flooding in a forested headwater basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 269: 236-250.

Relation of bank-full discharge to effective discharge in the Inner Mongolia reach of Yellow River*

SHEN Hongbin, WU Baosheng, ZHENG Shan, LI Wenwen

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: A statistical method is proposed for calculating the frequency of a two-dimensional vector combining of discharge and sediment concentration. The method can be applied to compute the effective sediment-transporting discharge a channel reach. Using the observed discharge and sediment data from the Bayangaole station located in the Inner Mongolia reach of Yellow River during the period 1954—2006, the effective sediment-transporting discharge is calculated annually. The corresponding effective incoming sediment coefficient is also obtained. The relationships between the bank-full discharge and the effective discharge, as well as the effective incoming sediment coefficient are analyzed. The result shows that the current value of bank-full discharge at the Bayangaole station in the Inner Mongolia reach of Yellow River is affected by the antecedent discharge and sediment conditions in the previous 12 years.

Key words: bank-full discharge; effective discharge; statistical method for calculate vector of discharge and sediment concentration frequency; Inner Mongolia reach of Yellow River

* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2011CB403300) and the National Natural Science Foundation of China (No. 51109116).