

渭河干流下游造床流量与有效流量的时空变化特征

代双亮¹, 韩剑桥², 曹绮欣³, 李聪⁴

(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
3.中国电建西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065; 4.中建三局第一建设工程有限责任公司, 武汉 430064)

摘要:为研究渭河下游河流演变关键特征流量的变化特性,采用改进的马卡维也夫法与水沙频率组合法,计算并分析了咸阳、临潼与华县水文站的造床流量与有效流量的时空变化特征,探讨了造床流量、有效流量与平滩流量之间的关系。结果表明:年均流量在 1934—2014 年呈波动性下降趋势,含沙量在 1980 年前呈增加趋势,此后至 2014 年急剧下降;造床流量由 1980—1989 年之前的 561~1 586 m³/s 减小到之后的 254~885 m³/s;有效流量除了华县站在 1930—1959 年时段内急剧减小外,其他年份波动变化。在空间上,造床流量除了临潼站在 1990—1999 年大于下游华县站之外均呈现下游大于上游的特点;有效流量除了临潼站在 1970—1979 年小于上游咸阳站和在 2000—2009 年略大于下游华县站之外也呈现下游大于上游的特点,这与径流量的沿程增大密切相关。年均径流量、含沙量与输沙率对造床流量影响较大,而含沙量与输沙率对有效流量影响较小。在渭河下游,平滩流量最大,造床流量次之,有效流量最小,三者并不一致,采用平滩流量法计算渭河下游的造床流量是不合适的。

关键词:渭河下游;有效流量;造床流量;河流演变;河流治理

中图分类号:TV147

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0094-06

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2020.06.014

Spatial and Temporal Distribution of Dominant Discharge and Effective Discharge in the Lower Reaches of Weihe River

DAI Shuangliang¹, HAN Jianqiao², CAO Qixin³, LI Cong⁴

(1.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 4.The First Construction Engineering Ltd. Co. of Third Engineering Bureau of China Construction, Wuhan 430064, China)

Abstract: To understand the key discharges of river evolution in the lower reaches of Weihe River, the Makovieve method and frequency combination of water and sediment method were used to calculate the dominant discharge and effective discharge in Xianyang, Lintong and Huaxian stations. In addition, we discussed the relationship between the key discharges and bank-full discharge. Conclusions are as follows. In terms of time, from 1934 to 2014, the average annual runoff showed a wave decline, and the sediment concentration showed an increasing trend before 1980, and then dropped sharply in the period from 1980 to 2014. The dominant discharge decreased from 561~1 586 m³/s before the period 1980—1989 to 254~885 m³/s after that period. The effective discharge fluctuated in other years except for the sharp decrease in Huaxian station during the period from 1930 to 1959. In terms of space, the dominant discharge showed the phenomenon that discharge of the downstream was larger than that of the upstream except that the discharge in Lintong station was larger than that of downstream in Huaxian station in 1990—1999. The effective discharge showed the phenomenon that the discharge of the downstream was larger than that of the upstream except that the discharge in Lintong station was smaller than that of the upstream of Xianyang station in 1990—1999 and was little larger than that of downstream of Huaxian station in 2000—2009, which was closely related with the increasing

收稿日期:2019-05-16

修回日期:2020-07-01

资助项目:国家自然科学基金(41807067);陕西省水利水保科技项目(2017sbkj-01);水资源与水电工程科学国家重点实验室(武汉大学)开放研究基金项目(2018HLG03)

第一作者:代双亮(1997—),男,四川自贡人,本科,研究方向为水文与水资源。E-mail:shuangliang622@163.com

通信作者:韩剑桥(1987—),男,河南禹州人,博士,副研究员,主要从事泥沙运动力学研究。E-mail:hjq13@163.com

runoff along the river. The average annual runoff, sediment concentration and sediment transport rate had great influence on the dominant discharge, however, the sediment concentration and sediment transport rate had less influence on the effective discharge. In the lower reaches of Weihe River, the bank-full discharge was the largest, followed by the dominant discharge, and the effective discharge was the smallest, which was not consistent. Therefore, it is not appropriate to use the bank-full discharge method to calculate the dominant discharge in the lower reaches of Weihe River.

Keywords: lower reaches of Weihe River; dominant discharge; effective discharge; river evolution; river regulation

天然河道内水沙变化是导致河床形态调整的主要因素,为研究河床演变特征,目前多采用造床流量、有效流量和平滩流量作为水沙条件的表征指标^[1-2]。造床流量是指其造床作用与多年流量过程的综合造床作用相当的某一种流量^[3]。有效流量是一个虚拟的统计量,指的是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^[4]。平滩流量是指某一断面水位与滩唇齐平时该断面所通过的流量^[5]。研究这些特征流量的变化及原因,对于河流演变及其规划治理具有重要意义^[6-8]。

渭河是黄河最大支流,也是黄河中下游的三大洪水来源之一^[9]。近 60 a 来,受人类活动与气候变化的共同影响,河流水沙及河床边界条件不断变化,促使渭河下游河床形态频繁调整^[10]。为满足渭河下游河道规划治理的需求,已有研究目前多采用平滩流量代替造床流量。如张冰洁等^[11]采用平滩水位法计算了咸阳、临潼和华县水文站的造床流量,分别为 3 710, 3 560, 3 140 m³/s,呈沿程减小特点。但是,已有研究表明,在河床冲淤平衡情况下,平滩流量与造床流量才基本一致^[12-13]。因此,在冲淤变化较大的渭河下游,能否使用平滩流量代替造床流量还需考证。此外,作为天然河流某一时段内水沙过程中输送泥沙最多的有效流量,在渭河下游还未有研究,有效流量、造床流量与平滩流量之间的关系也较少涉及。

为此,本文采用改进的马卡维也夫法和分组频率法分别计算造床流量与有效流量,分析渭河下游造床流量和有效流量的时空变化特征及其影响因素,并探讨造床流量、有效流量和平滩流量 3 种特征流量之间的关系,以期对渭河下游规划与管理提供依据。

1 研究区域

渭河发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,主要流经陇东黄土高原、天水盆地和宝鸡峡谷进入关中平原,于渭南市潼关县汇入黄河。渭河全长 818 km,平均径流量为 78.89 亿 m³/s^[14],多年平均含沙量 50 kg/m³,年平均输沙量 4.43 亿 t,占黄河实测来沙量的 35%^[15]。

渭河下游自咸阳市至河口全长约 208 km,流域面积

8.8 万 km²,设有咸阳水文站(108°41′50″E,34°19′28″N)、临潼水文站(109°12′6″E,34°25′51″N)和华县水文站(109°45′40″E,34°34′58″N)。渭河下游属于冲积性河流,自三门峡水库建成后,泥沙淤积严重,河道主槽宽度束窄明显、主槽摆动加剧且过水断面逐渐萎缩。渭河下游入汇的支流众多,其中北岸主要有泾河、石川河和北洛河 3 条较大支流;南岸汇入支流源自秦岭北麓,坡陡流急,含沙量小,对含沙量较高的渭河干流有“稀释”作用^[16]。

2 资料与方法

2.1 资料来源

为计算造床流量与有效流量,收集渭河下游咸阳水文站(1956—2015 年)、临潼水文站(1956—2015 年)和华县水文站(1934—2015 年)的逐日平均流量、逐日平均含沙量和逐日平均输沙率数据。其中 1990 年及其之前的数据由西北农林科技大学水文气象资料数据库提供,1990 年之后的数据来自于中华人民共和国水文年鉴黄河流域水文资料。

为比较造床流量、有效流量与平滩流量之间的关系,本文引用戴清^[16]、马雪妍^[17]等计算的渭河下游的平滩流量。

2.2 计算方法

2.2.1 造床流量计算方法 造床流量与来水和来沙两个条件有关,本文选取长系列流量数据以 10 a 为一个年代区间计算造床流量,其中 2010—2015 年按照一个年代来计算。计算方法采用改进的马卡维也夫法^[18],步骤如下:

(1) 确定参数 m 值。用幂函数 $Q_s = aQ^m$ 对水文站的日均输沙率和日均流量数据进行拟合,并通过线性回归的指标 R^2 检验拟合效果,从而确定计算时段内的 m 值。

(2) 确定皮尔逊曲线函数中的参数 α 、 β 和 a_0 值。依据计算时段内的日均流量资料,采用皮尔逊 III 型流量频率曲线进行拟合,得到均值 \bar{X} 、变差系数 C_v 和偏态系数 C_s 值,再将 3 个数值带入公式(1)—(3),从而确定 α 、 β 、 a_0 的值。

$$\alpha = \frac{4}{C_s^2} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{2}{\bar{X} C_v C_s} \quad (2)$$

$$a_0 = \bar{X} \left(1 - \frac{2C_v}{C_s}\right) \quad (3)$$

(3) 确定造床流量。将上述步骤求得的 m 值和 α, β, a_0 值代入公式(4)求解 x 得到两个值,取二者的最大值即为造床流量。

$$x^2 - \frac{1}{\beta}(m + \alpha - 1 + \beta a_0)x + \frac{a_0}{\beta}m = 0 \quad (4)$$

按照上述 3 个步骤即可求得各个水文站每个计算时段内的造床流量。

2.2.2 有效流量计算方法 有效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,是一个虚拟的统计量。对于有效流量的计算,我们根据渭河下游流量变差系数较大的特征,采用了 Wolman 等^[19]提出的地貌功的概念计算有效流量,计算时段选取与造床流量保持一致,其具体步骤如下:

(1) 计算统计时段内流量的标准差,采用标准差的 3/4 作为标准将流量划分为若干量级,保证分组数目为 10~25 组^[20]。

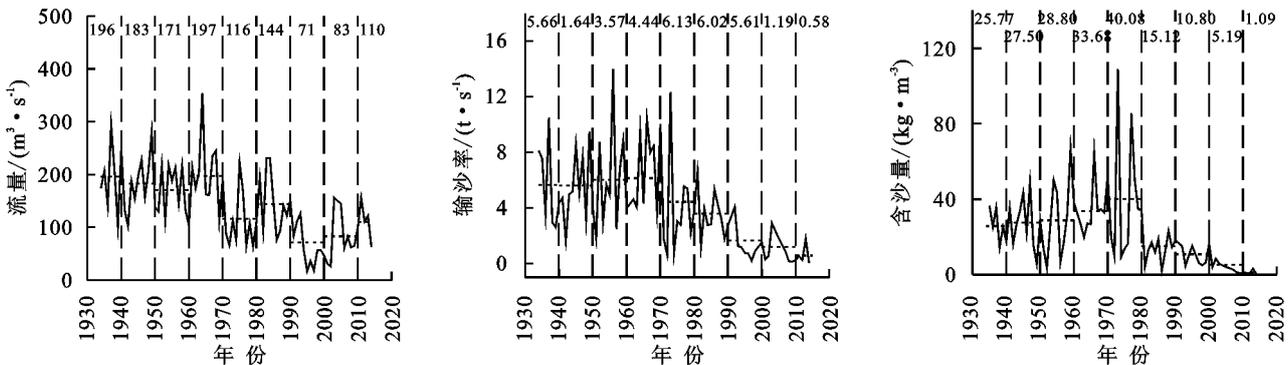


图 1 咸阳水文站年际水沙变化

3.2 造床流量的时空变化特征

通过线性回归方法中的 R^2 指标检验幂函数拟合成果,咸阳站 R^2 为 0.587 4~0.788 5,临潼站 R^2 为 0.557 8~0.730 4,华县站 R^2 为 0.627 1~0.805,均大于 0.55,拟合结果较好,数据具有一定可靠性。在此基础上,绘制 1930—2015 年咸阳、临潼与华县水文站的造床流量变化(图 2)。在时间上,3 个水文站的造床流量均随时间发展逐渐减小。其变化范围由 1980—1989 年之前的 561~1 586 m^3/s 减小到之后的 254~885 m^3/s 。在空间上,除了 1990—1999 年临潼站的造床流量大于同时段的华县站之外,其余同时段的造床流量均呈现下游大于上游的特点,如 2000—2009 年时间段内,咸阳、临潼与华县水文站的造床流量分别为 281,723,885 m^3/s 。

(2) 统计不同流量区间的流量在该时段内出现的频率 P_i 。

(3) 计算不同流量区间的输沙率和频率的乘积 $Q_i S_i P_i$,其中 Q_i 为各流量区间的平均值, S_i 为该流量区间对应含沙量的平均值, P_i 为该流量区间对应的频率。 $Q_i S_i P_i$ 最大时的流量区间中值即为有效流量^[21]。

按照上述 3 个步骤便可求得各个水文站每个计算时段内的有效流量。

3 结果与分析

3.1 渭河下游年际水沙变化过程

渭河下游河段的年际水沙变化过程如图 1 所示。1934—2014 年,年均流量呈波动性下降的趋势。年均流量由 1970 年前的 171~197 m^3/s 下降至 1970 年后的 71~144 m^3/s 。年均含沙量尽管在 1980 年前呈增加趋势,但 1980 年后急剧下降,从 40.08 kg/m^3 逐渐减小到 1.09 kg/m^3 。1934—1970 年年均输沙率从 5.66 t/s 增加到 6.13 t/s ,变化不大,但在 1970—2014 年,输沙率急剧下降,从 6.13 t/s 逐渐减小到 0.58 t/s 。因此,自 20 世纪 70 年代之前渭河年均水沙数量呈增大态势,之后急剧减小。

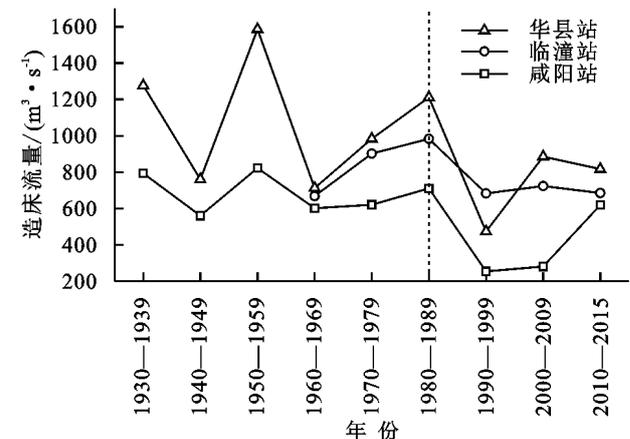


图 2 渭河下游干流河段各水文站造床流量变化

3.3 有效流量的时空变化特征

咸阳、临潼与华县水文站的有效流量变化如图 3 所

示。在时间上,除华县站有效流量在 1930—1939 时段至 1950—1959 时段大幅下降外,其他年份波动变化,3 个水文站的变化趋势也基本一致,均在 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 以下。在空间上,除临潼站 1970—1979 年的有效流量小于上游咸阳站,2000—2009 年的有效流量略大于下游华县站外,其他时段下游水文站的有效流量均大于上游,与造床流量的下游流量始终大于上游流量的结论基本一致。如 1990—1999 年时段,咸阳、临潼与华县水文站的有效流量分别为 217,496,531 m^3/s 。

4 讨论

4.1 造床流量与有效流量的影响因素

径流量与含沙量是影响造床流量的主要因素,张为等^[22]认为长江中下游的径流量与造床流量呈正相关关系,陈栋等^[23]认为输沙量对造床流量有重要影响。点绘渭河下游各站的年径流量、含沙量、输沙率与特征流量的关系见图 4。可以看出,造床流量随着

年均流量、含沙量和输沙率的增大而增大,呈正相关关系,与已有研究结论一致。径流量由于汇水而沿程增加,也导致了造床流量的沿程增大,有效流量随径流量增大也呈增加趋势,与马元旭等^[4]针对无定河流域研究有效流量和径流量关系的结论一致。但是有效流量对含沙量和输沙率变化的响应相对不明显。

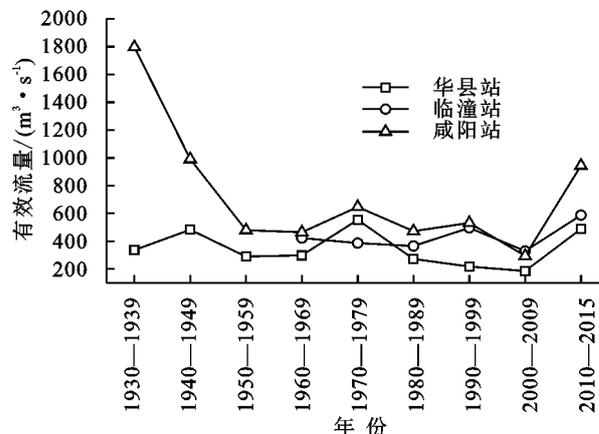


图 3 渭河干流下游河段各水文站有效流量变化

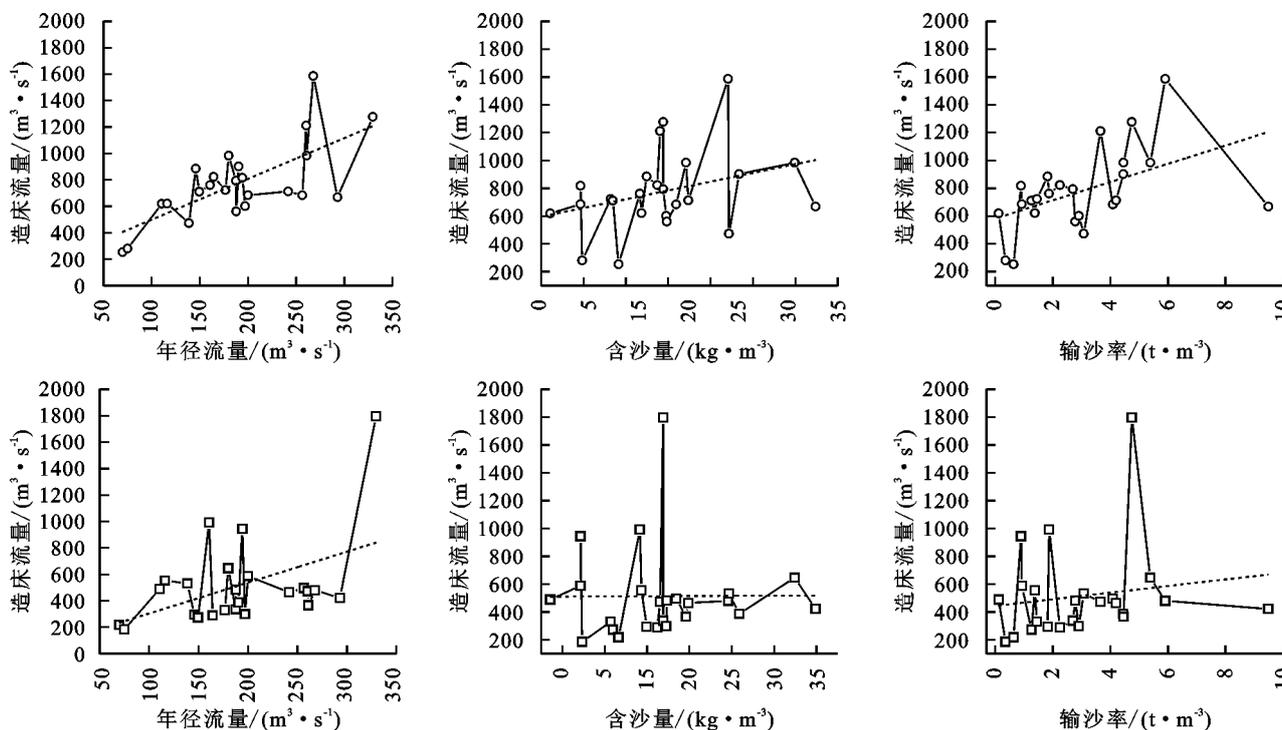


图 4 造床流量和有效流量与年径流量、含沙量和输沙率关系

4.2 造床流量、有效流量与平滩流量的关系

1930—2015 年渭河下游河段各水文站的造床流量与有效流量比较见图 5。可以发现,各水文站内有效流量基本都小于造床流量,如咸阳站 2000—2009 年时段内的造床流量与有效流量分别为 281,185 m^3/s 。从各站造床流量与有效流量的变化过程来看,除了咸阳站 1980 年以后造床流量与有效流量变化趋势接近一致,造床流量和有效流量在其余站点随时间的变化趋势并不一致。因此,在计算时段内,渭

河下游的造床流量并不等价于有效流量。

平滩流量是指水位与河漫滩相平时的流量,流速大,输沙能力高,造床作用强。在河床冲淤相对平衡的长时段内,平滩流量可作为造床流量。根据文献^[16—17]统计了 1960—2009 年渭河干流下游河段临潼站和华县站的平滩流量,并将这两个站点的平滩流量与本文计算的造床流量进行比较(表 1)。可以看出,造床流量远小于平滩流量,该结论与 Benson 等^[24]的研究结果一致。如华县站在 1970—1979 年时段

内,造床流量与平滩流量分别为 984,2 370 m³/s。其原因可能在于渭河水沙在近期持续减少,河床不断调整,

河流处于非平衡的状态。因此,在计算时段内,在渭河下游采用平滩流量计算造床流量是不合适的。

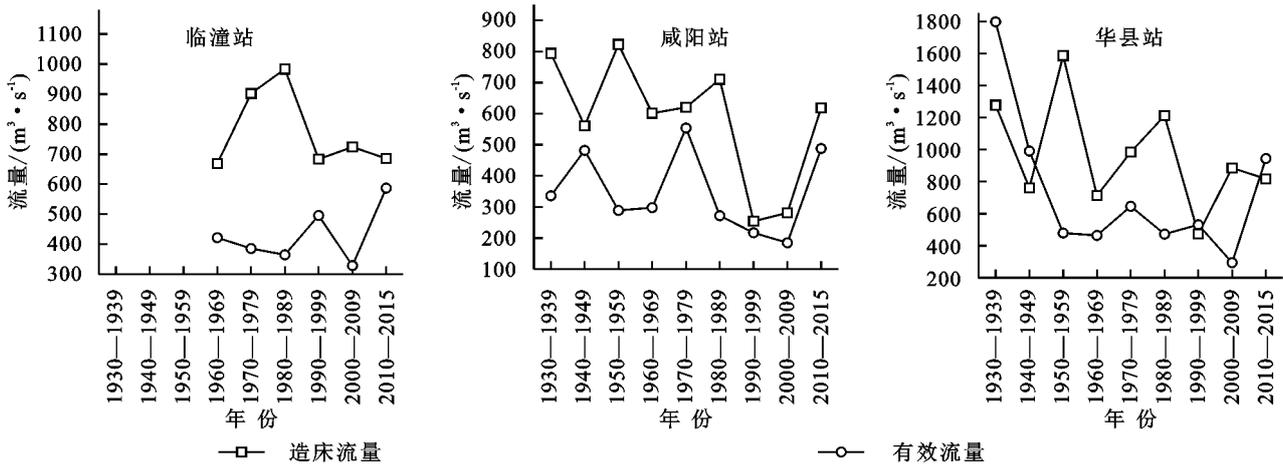


图 5 渭河干流下游河段各站造床流量与有效流量变化

表 1 临潼站和华县站 1960—2009 年造床流量和平滩流量 m³/s

| 时间段 | 临潼站 | | 华县站 | |
|-----------|------|------|------|------|
| | 造床流量 | 平滩流量 | 造床流量 | 平滩流量 |
| 1960—1969 | 669 | 4850 | 713 | 1040 |
| 1970—1979 | 902 | 4300 | 984 | 2370 |
| 1980—1989 | 983 | 4670 | 1211 | 4500 |
| 1990—1999 | 683 | 3600 | 473 | 4050 |
| 2000—2009 | 724 | 3949 | 885 | 1600 |

5 结论

(1) 通过计算 1934—2015 年渭河下游咸阳站、临潼站和华县站的造床流量与有效流量,发现在时间上,从 1934 年至今,渭河下游的造床流量大致呈随时间减小特点,而有效流量波动变化。在空间上,造床流量与有效流量均呈现出下游大于上游的特点。

(2) 通过分析年均径流量、含沙量和输沙率 3 个水文要素的变化特征,并与特征流量比较后发现年均径流量、含沙量与输沙率对造床流量影响较大,而含沙量与输沙率对有效流量影响较小。

(3) 在通过上文计算得到的造床流量和有效流量的基础上,结合现有的渭河下游的 1960—2009 年的平滩流量,发现在渭河下游的特征流量中,平滩流量最大,在 1 040~4 850 m³/s 变化;造床流量次之,在 473~1 211 m³/s 变化;而有效流量最小,在 185~646 m³/s 变化。三者并不一致。所以在本文的计算时段内,采用平滩流量法计算渭河下游的造床流量是不合适的。

致谢:西北农林科技大学图书馆提供了本文的部分数据,中国科学院地理科学与资源研究所马元旭老

师对本文研究方法提供了大力支持,在此特别致谢。

参考文献:

- [1] Simon A, Dickerson W, Heins A. Suspended-sediment transport rates at the 1.5-year recurrence interval for ecoregions of the United States; transport conditions at the bankfull and effective discharge[J]. *Geomorphology*, 2004,58(1):243-262.
- [2] 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(1):257-276.
- [3] 李子文.造床流量为参数的冲积河流输沙量模型研究及应用[D].西安:西安理工大学,2018.
- [4] 马元旭,许炯心,黄河清.无定河流域悬移质有效输沙流量分析[J].*泥沙研究*,2010(3):73-80.
- [5] Andrews E D. Effective and bankfull discharges of streams in the Yampa River basin, Colorado and Wyoming[J]. *Journal of Hydrology*, 1980,46(3):311-330.
- [6] 李文文,吴保生.渭河下游平滩流量影响因子相关分析[J].*应用基础与工程科学学报*,2011,19(S1):28-36.
- [7] Andrews E D, Nankervis J M. Effective discharge and the design of channel maintenance flows for gravel-bed rivers[J]. *Natural & Anthropogenic Influences in Fluvial Geomorphology*, 1995,89:151-164.
- [8] Jianqiao H, Zhaohua S, Yitian L. Distribution of erosion intensity in the Jingjiang reach influenced by the Three Gorges Dam[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018,43(12):2654-2665.
- [9] 袁敏洁,徐梓曜,江恩慧.有效流量研究及应用现状[J].*人民黄河*,2015,37(6):32-35.
- [10] 陈建国,胡春宏,董占地.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.

- [11] 张冰洁,王玲玲,薛亚莉.渭河下游河道造床流量及过洪能力变化分析[J].陕西水利,2018(1):8-9,11.
- [12] 李福田,高澜.造床流量计算方法初探[J].河海大学学报,1990,18(4):113-116.
- [13] Carling P. The concept of dominant discharge applied to two gravel-bed streams in relation to channel stability thresholds[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1988,13(4):355-367.
- [14] 柴雪柯.渭河流域水沙变化及其影响因素[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [15] 陈星星.近代渭河下游河道演变趋势研究[D].西安:西安理工大学,2017.
- [16] 戴清,胡健,袁玉萍.渭河下游河道输水能力与断面形态响应关系研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2007,5(3):227-232.
- [17] 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.
- [18] 宝婉宁,郭维东,李翔.辽河干流中下游河段造床流量和平滩流量及有效流量分析[J].泥沙研究,2018,43(2):55-60.
- [19] Wolman M G, Miller J P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes[J]. the Journal of Geology, 1960,68(1):54-74.
- [20] Ma Y, Huang H Q, Xu J, et al. Variability of effective discharge for suspended sediment transport in a large semi-arid river basin[J]. Journal of Hydrology, 2010,388(3):357-369.
- [21] Roy N G, Sinha R. Effective discharge for suspended sediment transport of the Ganga River and its geomorphic implication[J]. Geomorphology, 2014,227:18-30.
- [22] 张为,高宇,许全喜.三峡水库运用后长江中下游造床流量变化及其影响因素[J].水科学进展,2018,29(3):331-338.
- [23] 陈栋,余明辉,朱勇辉.三峡建库前后下荆江有效流量研究[J].水利水电快报,2018,29(6):788-798.
- [24] Benson M A, Thomas D M. A definition of dominant discharge[J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 1966,11(2):76-80.

(上接第93页)

- [15] Cui G, Zhu J. Prediction of unsaturated flow and water backfill during infiltration in layered soils[J]. Journal of Hydrology, 2018,557:509-521.
- [16] Chu X, Marino M A. Determination of ponding condition and infiltration into layered soils under unsteady rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2005,313(3):195-207.
- [17] Corradini C, Melone F, Smith R E. Modeling local infiltration for a two layered soil under complex rainfall patterns[J]. Journal of Hydrology, 2000,237:58-73.
- [18] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [19] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society America Journal, 1980,44(5):892-898.
- [20] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic Properties of Porous Media[R]. Fort Collins, USA: Colorado State University, 1964.
- [21] Kosugi K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties [J]. Water Resources Research, 1996,32(9):2697-2703.
- [22] Durner W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure [J]. Water Resources Research, 1994,30(2):211-223.
- [23] Li J H, Zhang L M, Li X. Soil-water characteristic curve and permeability function for unsaturated cracked soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011,48:1010-1031.
- [24] 摄晓燕,张兴昌,魏孝荣.适量砒砂岩改良风沙土的吸水和保水特性[J].农业工程学报,2014,30(14):115-123.
- [25] Jia J C, Zhang P P, Yang X F, et al. Feldspathic sandstone addition and its impact on hydraulic properties [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2018,98(3):399-406.
- [26] 文曼.黄土高原地区生物炭的土壤水动力学效应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [27] van Genuchten M T, Leij F J, Yates S R. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils[D]. California, USA: Salinity Laboratory, 1992.
- [28] 贾俊超.砒砂岩添加对风沙土水分运动和苜蓿生长的影响[D].北京:中国科学院大学,2019.
- [29] 胡振琪,张学礼.基于 ANN 的复垦土壤水分特征曲线的预测研究[J].农业工程学报,2008,24(10):15-19.