

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221309

黄河下游造床流量计算方法分析

段海浪^{1a,1b}, 陆 琴², 王志国^{1a,1b}, 杨焘铭^{1a,1b}, 李鑫垚^{1a,1b}

(1. 河北工程大学 a. 水利水电学院; b. 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038;
2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 针对利用马卡维耶夫法计算造床流量繁琐的问题, 采用地貌功图解法简化计算造床流量, 并基于黄河下游花园口、高村、艾山、利津4个水文站1960~2014年实测水沙数据, 通过马卡维耶夫法与地貌功图解法分别计算4站历年造床流量。结果表明, 两种方法所计算的黄河下游4站历年造床流量差异较小且下降趋势相近, 地貌功图解法相比马卡维耶夫法计算造床流量更简便、准确。

关键词: 黄河下游; 造床流量; 马卡维耶夫法; 地貌功图解法

中图分类号: TV143

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)04-0049-03

1 引言

天然河道水沙条件的改变影响着河道冲淤演变, 但水沙过程时刻发生变化。因此, 在进行河床演变分析和河道整治时, 可选定某一特定流量级作为“代表性流量”^[1,2], 视为长时间序列流量的替代流量, 即造床流量。近年来对计算造床流量的研究有很多, 如来志强等^[3]采用滑动分析法修正经典马卡维耶夫法造床能力表达式, 计算黄河下游花园口造床流量, 提出黄河下游造床能力已由第一造床流量主导转变为第二造床流量主导; 孙东坡等^[4]通过分析评价已有的造床流量, 对比了平滩流量法、输沙率法、输沙能力法、水沙综合频率法4种方法的不同; 陈建国等^[5]根据黄河下游各水文站多年水沙数据, 分析平滩流量与造床流量变化过程, 提出造床流量的增加是治理河道萎缩的方式之一。马卡维耶夫法^[6]在计算过程中将影响造床流量的因素, 如流量与输沙率的关系、河道断面因素、流量频率等考虑在内, 计算结果较准确, 但计算过程较繁琐且考虑的参数较多。因此, 本文根据黄河下游花园口、高村、艾山、利津4个水文站实测水沙数据, 采用马卡维耶夫法与地貌功图解法^[7]分别计算4站1960~2014年历年

造床流量, 对比两种方法的计算结果, 探究了两种方法在计算造床流量方面的准确性。

2 研究方法

马卡维耶夫法计算过程^[6]为: 将1960~2014年历年日均流量数据按一定流量级分级, 确定每个流量级所出现的频率 p ; 根据实测的断面数据计算出历年的比降值 j ; m 值为指数, 即拟合流量与输沙率函数关系的指数, 可由实测数据确定; 流量值 Q 用每一流量级的中值代替; 计算出相应于每一流量的 $Q^m j p$ (j 为比降; p 为各流量级所出现的频率)的数值, 绘制出 $Q-Q^m j p$ 关系曲线图像, 找到 $Q^m j p$ 的最大值所对应的流量值 Q , 即马卡维耶夫法所求的造床流量。

地貌功图解法是将水沙数据按流量等对数划分区间, 分别计算每一区间内的输沙量, 寻找输沙量最大值所对应的流量值, 即地貌功图解法所求的造床流量。地貌功图解法计算过程^[7]如下。

(1) 将1960~2014年的流量最值取对数, 并将其对数等间隔分成 k 个区间:

$$L_{\text{总}} = k^{-1} \log_{10} (Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}) \quad (1)$$

式中, $L_{\text{总}}$ 为区间长度; Q_{max} 、 Q_{min} 分别为1960~2014年流量最值。

收稿日期: 2022-06-24, **修回日期:** 2022-07-27

基金项目: 中国水利水电科学研究院水利部泥沙科学与北方河流治理重点实验室开放研究基金(IWHR-SEDI-202102)

作者简介: 段海浪(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为防洪及河道治理, E-mail: 461444598@qq.com

通讯作者: 王志国(1977-), 男, 博士、副教授、硕导, 研究方向为河道治理及生态河道、水工及河工模拟, E-mail: zg-

每个区间为 $[Q_{\max} - xL_{\text{总}}, Q_{\max} - (x+1)L_{\text{总}}]$, 其中 $x=[0, k-1]$ 。

(2) 依据流量大小进行排列, 取日均流量对数, 并计算 $[Q_{\max} - xL_{\text{总}}, Q_{\max} - (x+1)L_{\text{总}}]$ 中上下边界的均值流量 Q_i :

$$Q_i = 10^{(\log_{10} Q_{\text{上}} - \log_{10} Q_{\text{下}}) / 2} \quad (2)$$

式中, $\log_{10} Q_{\text{上}}$ 、 $\log_{10} Q_{\text{下}}$ 分别为对数区间上下界。

根据划分的区间, 计算每个区间内的累计输沙量 Φ_i :

$$\Phi_i = 86\,400 \left(\sum Q_s \right)_i \quad (3)$$

式中, Q_s 为同一流量区间下不同流量所对应的输沙率; $(\sum Q_s)_i$ 为每个区间输沙率之和。

(3) 绘制出 $Q-\Phi$ 的图像找到输沙量 Φ 的最大值 Φ_{\max} 所对应的流量 Q , 即地貌功图解法所求的造床流量。

3 黄河下游造床流量计算方法分析

采用马卡维耶夫法和地貌功图解法计算黄河下游 4 站(花园口、高村、艾山、利津)历年造床流量, 为减少流量级的划分不一致而造成的两种方法所计算结果的误差, 两种方法流量级的划分均选取 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3.1 各站造床流量变化过程及对比

黄河下游 1960~2014 年 4 站历年造床流量变化过程见图 1。

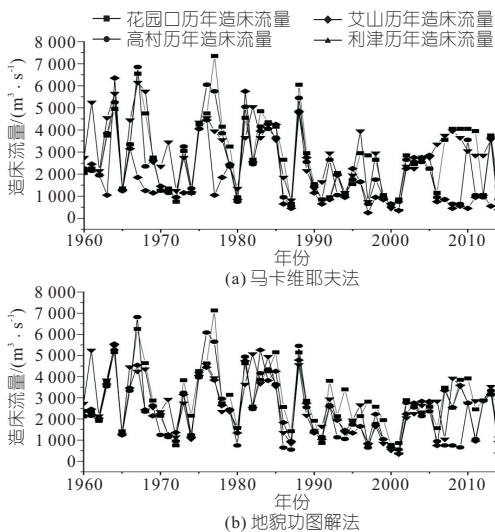


图 1 历年造床流量变化过程

Fig. 1 Change process of bed-forming flow calculated by Markaviev method and geomorphic work diagram method

由图 1 可知: ①4 个水文站的历年造床流量变化趋势相近, 1960~2014 年黄河下游 4 站历年造床流量变化过程大致可分为两部分。其中,

1960~1999 年 4 站历年造床流量变化范围较大, 呈下降趋势; 2000 年左右 4 站造床流量达到最小值, 随着小浪底水库建成, 黄河下游 4 站造床流量变化范围减小, 造床流量呈上升趋势。②对比每个水文站两种方法所计算的造床流量变化, 其中花园口马卡维耶夫法、地貌功图解法计算的造床流量变化范围分别为 $550 \sim 7\,350$ 、 $779 \sim 7\,131 \text{ m}^3/\text{s}$; 高村马卡维耶夫法、地貌功图解法计算的造床流量变化范围分别为 $650 \sim 6\,850$ 、 $653 \sim 6\,815 \text{ m}^3/\text{s}$; 艾山马卡维耶夫法、地貌功图解法计算的造床流量变化范围分别为 $350 \sim 6\,350$ 、 $354 \sim 5\,542 \text{ m}^3/\text{s}$; 利津马卡维耶夫法、地貌功图解法计算的造床流量变化范围分别为 $350 \sim 6\,150$ 、 $341 \sim 5\,447 \text{ m}^3/\text{s}$ 。可见两种方法所计算的结果存在较小差异。

黄河下游 4 个水文站 1960~2014 年历年造床流量整体呈下降趋势, 各站下降趋势线函数方程见表 1。由表 1 可知, 花园口与利津两站的马卡维耶夫法与地貌功图解法所计算的造床流量变化趋势线斜率近似, 造床流量下降趋势相近; 高村水文站的马卡维耶夫法与地貌功图解法所计算的造床流量变化趋势线斜率存在较小差距, 造床流量下降趋势较为相近; 艾山水文站的两种方法所计算的造床流量变化趋势线斜率存在差距, 但两种方法所计算历年造床流量值大体相近。

表 1 各站趋势线函数方程

Tab. 1 Trend line function equation of each station

水文站	趋势线函数方程	
	马卡维耶夫法	地貌功图解法
花园口	$y = -15.8x + 34\,260$	$y = -15.5x + 33\,729$
高村	$y = -38.1x + 77\,999$	$y = -35.0x + 71\,997$
艾山	$y = -30.1x + 61\,564$	$y = -20.3x + 42\,836$
利津	$y = -29.6x + 61\,668$	$y = -29.1x + 60\,567$

3.2 结果分析

地貌功图解法直接基于实测水沙数据, 计算过程较为简便, 无需考虑流量与输沙率的函数关系, 只需考虑不同流量区间内的输沙量问题, 即使实测流量的经验概率分布不符合常见概率密度函数, 也可得到造床流量, 解决了马卡维耶夫法计算过程中考虑参数较多的问题, 使造床流量的计算更简便、准确。

分析两种方法误差可知, 马卡维耶夫法计算过程中考虑流量频率问题, 当出现短暂较大流量时, 对计算结果存在影响, 但大流量作用时间较短, 无法说明此流量对河道有持续性作用。而地貌功图解法将流量分级, 计算每一流量级下总的

输沙量,短暂较大流量级的输沙量要小于代表性流量的输沙量,计算过程中就避免了大流量的影响。

综上所述,两种方法所计算出的造床流量较接近且整体数值差距较小,说明两种方法计算的造床流量可相互印证,此外,马卡维耶夫法在计算造床流量时将影响流量的因素考虑在内,所计算的造床流量可视为河道冲淤演变的“代表性流量”。因此,地貌功图解法相比马卡维耶夫法计算造床流量更简便、准确。

4 结论

a. 地貌功图解法计算的结果与马卡维耶夫法的结果相近,且地貌功图解法参数较少。证明在黄河下游河段计算造床流量,地貌功图解法相比于马卡维耶夫法更简便。

b. 本文计算造床流量级划分方式较单一,且仅选取黄河下游为研究河段,计算结果不够全面。因此,未来可采用多流量级多河道方法进一步验证地貌功图解法的简便性。

参考文献:

- [1] GOODWIN P. Analytical solutions for estimating effective discharge[J]. Journal of hydraulic engineering, 2004, 130(8): 729-738.
- [2] WOLMAN M G, MILLER J P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes[J]. Journal of geology, 1960, 68(2): 54-74.
- [3] 来志强, 赵连军, 江恩慧, 等. 基于滑动分析法的黄河下游造床流量变化研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(9): 2396-2404.
- [4] 孙东坡, 王勤香, 王鹏涛, 等. 基于水沙关系系数法确定黄河下游造床流量[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 150-155.
- [5] 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.
- [6] Н И 马卡维耶夫, 麦乔威. 造床流量[J]. 泥沙研究, 1957(2): 40-43.
- [7] 孙昭华, 周炜兴, 周坤, 等. 江湖水沙输移与长江中下游造床流量的关系[J]. 水利学报, 2021, 52(5): 521-534.

Analysis of Calculation Method of Bed-forming Flow in the Lower Reaches of the Yellow River

DUAN Hai-lang^{1a,1b}, LU Qin², WANG Zhi-guo^{1a,1b}, YANG Dao-ming^{1a,1b}, LI Xin-yao^{1a,1b}
(1a. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power; 1b. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Aiming at the cumbersome problem of applying the Markaviev method to calculate the bed-forming flow rate, the geomorphic work diagram method was proposed to simplify the calculation of the bed-forming flow. Based on the measured water and sediment data from 1960 to 2014 at the four hydrological stations of Huayuankou, Gaocun, Aishan and Lijin in the lower reaches of the Yellow River, the Markaviev method and the geomorphological method were used to calculate the bed-forming flow of the four stations over the years. The results show that the differences in the bed-forming flow over the years at the four stations in the lower reaches of the Yellow River calculated by the two methods are small and the downward trend is similar. Compared with the Markaviev method, the geomorphic work diagram method is more convenient and accurate to calculate the bed-forming flow.

Key words: the lower reaches of the Yellow River; bed-forming flow; Markaviev method; graphic method of geomorphology

(上接第 84 页)

Spatio-temporal Dynamics and Coupling Coordination Relationship Between Ecosystem Services and Matching of Water and Land Resources in China

HUANG Shi-tao¹, WU Kai², ZHAO Wen-fei³

(1. Changjiang Institute of Technology, Wuhan 430212, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Changjiang River Scientific Research Institute, Changjiang, Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: It is of great significance to discuss the relationship between ecosystem services and matching status of water and land resources for the sustainable utilization of ecological resources. Therefore, the equivalence factor method, matching coefficient of water and land resources, and coupling coordination degree model were used to reveal the spatio-temporal evolution characteristics of the ecosystem service value, matching status of water and land resources, as well as the coupled coordination relationship between them in China. The results show that the total value of ecosystem services in China increased 2144.45 billion yuan. The overall spatial pattern of the ecosystem service value per unit area was high in the south China and low in the north China, and the ecosystem service value per unit area in all provinces except Shanghai was improved during the study period. The matching coefficient of water and land resources in China continued to decrease, showing a clockwise spatial variation characteristic of first decreasing and then increasing roughly with Qinghai province as the endpoint in space. The coupling coordination degree between ecosystem services and matching of water and land resources in China from 2010 to 2018 first increased and then decreased, and the overall belonged to the basic coordination type, which was in transition. The coupling coordination degree shows the spatial distribution characteristics of high in the south China and low in the north China. The results can provide decision-making basis for the policy formulation of coordinating ecological protection and water and land resources utilization.

Key words: ecosystem service; water and land resources; coupling coordination; spatio-temporal evolution; China