

日平均输沙率不同计算方法比较分析

赖厚桂, 周 波

水利部长江水利委员会水文局, 湖北 武汉
Email: zylhgui@126.com, cjwzhoubo@126.com

收稿日期: 2021年6月21日; 录用日期: 2021年8月9日; 发布日期: 2021年8月19日

摘 要

新的水文资料整编规范列出流量加权法的3种悬移质日平均输沙率的计算方法, 不同的计算方法对结果精度影响较大, 对河道冲刷变化、淤积分析等研究有着直接的影响。新的水文资料整编规范计算悬移质日平均输沙率要求采用流量加权第三法即积分法, 而目前的水文资料整编软件采用了老规范的流量加权第一法即四八法, 本文用四八法和积分法计算多年的资料进行对比分析, 阐述了采用两种方法计算日平均输沙率对输沙资料的影响。

关键词

日平均输沙率, 计算方法, 资料整编, 比较分析

Comparative Analysis of Daily Average Sediment Transport Rate Calculation Methods

Hougui Lai, Bo Zhou

Hydrology Bureau of Yangtze River Water Resources Commission, Ministry of Water Resources, Wuhan Hubei
Email: zylhgui@126.com, cjwzhoubo@126.com

Received: Jun. 21st, 2021; accepted: Aug. 9th, 2021; published: Aug. 19th, 2021

Abstract

Three types of suspended load daily average sediment transport rate calculation methods have a direct impact on the study of river erosion changes and sedimentation analysis. At present, the main hydrological data compilation software adopts the first method of flow weighting, namely the four-eight method, and the hydrological data compilation specification requires the use of the third method weighted by flow, namely the integral method. This study compares and analyzes the data calculated by the four-eight method and the integral method, and expounds the influence of using the integral method to calculate

作者简介: 赖厚桂(1963-), 男, 长江水利委员会水文局高级工程师, 主要从事水文水资源管理及整编软件开发。

the daily average sediment transport rate.

Keywords

Daily Average Sediment Transport Rate, Calculation Method, Data Compilation, Comparative Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

针对流量和含沙量变化情况的不同, 现行水文资料整编中给出了输沙率资料整编的三种不同方法, 分别为算术平均法、面积包围法和流量加权法; 而流量加权法适用于流量和含沙量变化均较大的情况, 相对于算术平均法、面积包围法而言, 更具普适性, 本文针对流量加权法进行研究。流量加权法根据算法不同, 又分为四八法、九六法及积分法三种。目前, 水文资料整编系统各个版本一直采用四八法, 新的水文资料整编规范[1]要求采用积分法, 以作为衡量其他各种方法计算误差的标准。本文就目前水文资料整编软件所采用的四八法和整编规范要求的积分法计算的结果进行比较、分析。

2. 基本原理

2.1. 流量加权输沙率计算方法

1) 流量加权第一种方法(四八法)

以瞬时流量乘以相应时间的断面含沙量, 得出瞬时输沙率, 再以时间加权求出日平均输沙率。

$$Q_s = \frac{1}{48} \sum_{i=1}^n [(q_i C_{si} + q_{i+1} C_{s(i+1)}) \Delta t_i] \quad (1)$$

2) 流量加权第二种方法(九六法)

以相邻瞬时流量的平均值乘以相应时间断面含沙量的平均值, 求得时段平均输沙率, 再乘以该时段的时距, 以积的代数和除以一日的时间即得日平均输沙率。

$$Q_s = \frac{1}{96} \sum_{i=1}^n [(q_i + q_{i+1})(C_{si} + C_{s(i+1)}) \Delta t_i] \quad (2)$$

3) 流量加权第三种方法(积分法)

相邻时段平均输沙率为流量、含沙量乘积的时间的积分与时段历时的比值, 再乘以该时段的时距, 其各时段的代数和除以一日的时间即得日平均输沙率。

$$Q_s = \frac{1}{72} \sum_{i=1}^n [(q_i C_{si} + q_{i+1} C_{s(i+1)}) \Delta t_i] + \frac{1}{144} \sum_{i=1}^n [(q_i C_{s(i+1)} + q_{i+1} C_{si}) \Delta t_i] \quad (3)$$

式中: Q_s 为日平均输沙率, kg/s 或 t/s; q_i 为瞬时流量, m³/s; C_{si} 为瞬时含沙量, kg/m³ 或 g/m³; Δt_i 为相邻要素时间的时距, h; i 为时间序列序号。

2.2. 技术路线

本研究根据水文特性选择典型测站, 在水文资料代表性分析和样本检验的基础上, 采用统计检验的方法,

对积分法与四八法两个系列数据进行统计检验，并开展年输沙量和最大日平均输沙率的误差统计分析，进而得出研究结论，其基本技术路线见图 1。

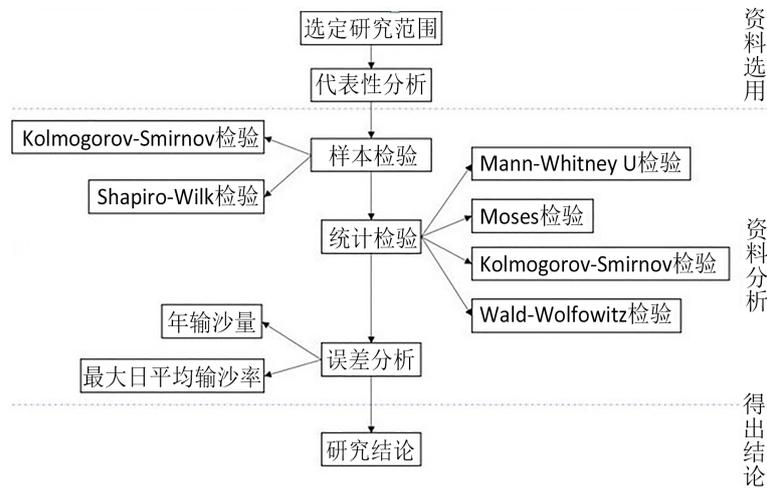


Figure 1. Sketch block diagram of technical route
图 1. 技术路线框图

3. 研究范围

3.1. 分析站点

以含沙量为标准，含沙量变化很大，拟选择暴涨暴落、水沙变化的很大的北方河流站点；含沙量变化适中，拟选择水沙变化较大的长江上游河流站点；含沙量变化较小，拟选择水沙变化较平缓的长江中下游河流站点。分析站点分布图见图 2。



Figure 2. Distribution map of analysis stations
图 2. 分析站点分布图

3.2. 水沙特性范围

分析资料样本，谭家沟站收集了 2015~2019 年共 5 年资料，三堆子、北碚、汉口收集了 2010~2019 年共 10 年资料，其水沙特性见表 1。

Table 1. The characteristics of water and sediment for analysis data series**表 1.** 分析资料水沙特性表

水文要素		站点			
		谭家沟	北碚	三堆子	汉口
水位(m)	最高	1259.05	199.31	988.82	28.37
	最低	1253.57	172.18	975.17	13.50
流量(m ³ /s)	最大	816	35,700	15,900	60,400
	最小	0.027	110	652	9130
含沙量(kg/m ³)	最大	968	14.6	24.0	0.898
	最小	0	0.001	0.006	0.027
输沙率(kg/s)	最大	144,000	233,000	102,000	27,000
	最小	6200	1070	4660	5800

3.3. 代表性分析

3.3.1. 含沙量量值

谭家沟站最大含沙量 968 kg/m³，含沙量大但流量较小，代表了北方暴涨暴落、水沙变化大的河流，北碚站和三堆子站最大含沙量分别为 14.6 kg/m³、24.0 kg/m³，含沙量较大但流量更大，汉口站最大含沙量 0.898 kg/m³，含沙量小但流量很大，代表了南方河流的水沙特性。

3.3.2. 单沙测次

在含沙量很大期间，大沙河流每日单样含沙量测次达到 19 次，与水位测次组合以后达 30 次；中沙河流每日单样含沙量测次 12 次，与水位测次直线内插组合以后达 23 次；小沙河流一般取样 4~5 次，与水位测次直线内插组合以后为 7~9 次；单日测次基本满足积分法与四八法日平均输沙率计算的要求，消除因测次不足而导致的计算误差。

3.3.3. 资料样本

对于两种方法计算的日平均输沙率，剔除了相同的数据，谭家沟站有 806 组数据，北碚站有 602 组数据，三堆子站有 405 组数据，汉口站有 29 组数据，能满足分析要求。

4. 误差分析

4.1. 样本检验

利用 SPSS 统计软件对四站资料样本数据进行样本检验，以确定资料演变数据的性质、分布特点，探索分析统计出一般的描述性统计指标，有助于进一步对数据的研究分析。

Table 2. Result analysis of normality test (Significance level: 0.05)**表 2.** 正态性检验(显著性水平 = 0.05)结果分析

计算方法		Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		统计量	df	Sig.	统计量	df	Sig.
谭家沟	积分法	0.440	806	0.000	0.132	806	0.000
	四八法	0.440	806	0.000	0.132	806	0.000

Continued

北碚	积分法	0.432	602	0.000	0.152	602	0.000
	四八法	0.432	602	0.000	0.153	602	0.000
三堆子	积分法	0.301	405	0.000	0.560	405	0.000
	四八法	0.302	405	0.000	0.560	405	0.000
汉口	积分法	0.120	29	0.200	0.917	29	0.025
	四八法	0.120	29	0.200	0.917	29	0.025

从表 2 可见, 四个站的两种计算方法的结果数据, 除汉口站以外, 正态分布均不明显, 因此, 两种方法计算的结果数据视为独立样本, 采用 SPSS 非参数检验的两个独立样本检验(Two-Independent Samples Test), 对日平均输沙率两种计算方法的样本数据进行差异性分析。

4.2. 两个独立样本检验

为了进一步检验积分法与四八法两个序列总体是否一致, 本研究分别采用了 Mann-Whitney U 检验、Moses 检验、独立样本 Kolmogorov-Smirnov 检验和 Wald-Wolfowitz 检验等四种不同方法进行两种计算方法的总体均值检验。

Table 3. Result analysis of Mann-Whitney U test

表 3. Mann-Whitney U 检验分析结果

站名	总计 N	平均秩		Mann-Whitney U	Wilcoxon W	标准化检验统计量	Sig.
		积分法	四八法				
谭家沟	1612	805.29	807.71	325,759.000	651,016.000	0.105	0.917
北碚	1204	602.22	602.78	181,369.500	362,872.500	0.028	0.978
三堆子	810	405.48	405.52	82,022.000	164,237.000	0.003	0.998
汉口	58	29.16	29.84	430.500	865.500	0.156	0.876

从表 3 中 Mann-Whitney U 检验分析结果, 四个站的秩均值积分法都比四八法偏小, 含沙量越大的站秩均值偏小越多, 渐近显著性(sig)最小值为 0.876, 都远大于 0.05, 说明两个样本的总体具有相同的分布。

Table 4. Result analysis of Moses test

表 4. Moses 检验分析结果

站点	总计 N	观测控制组		修整的控制组		从每个末端裁剪的离群值
		检验统计量	精准显著性(单侧)	检验统计量	精准显著性(单侧)	
谭家沟	1612	1610.000	0.500	1453.000	0.599	40.000
北碚	1204	1203.000	0.750	1084.000	0.576	30.000
三堆子	810	808.000	0.500	730.000	0.593	20.000
汉口	58	58.000	1.000	53.000	0.665	1.000

从表 4 Moses 检验结果, 控制组显著性水平最小 0.500, 修整的控制组显著性水平最小 0.576, 大于 0.05。

Table 5. Kolmogorov-Smirnov test for independent samples
表 5. 独立样本 Kolmogorov-Smirnov 检验

站点	总计 N	最大极差			检验统计量 ^a	渐近显著性(双侧)
		绝对值	正	负		
谭家沟	1612	0.007	0.007	-0.002	0.149	1.000
北碚	1204	0.005	0.005	-0.005	0.086	1.000
三堆子	810	0.007	0.005	-0.007	0.105	1.000
汉口	58	0.034	0.034	-0.034	0.131	1.000

^a 分组变量: 计算方法。

Table 6. Independent sample Wald-Wolfowitz test
表 6. 独立样本 Wald-Wolfowitz 检验

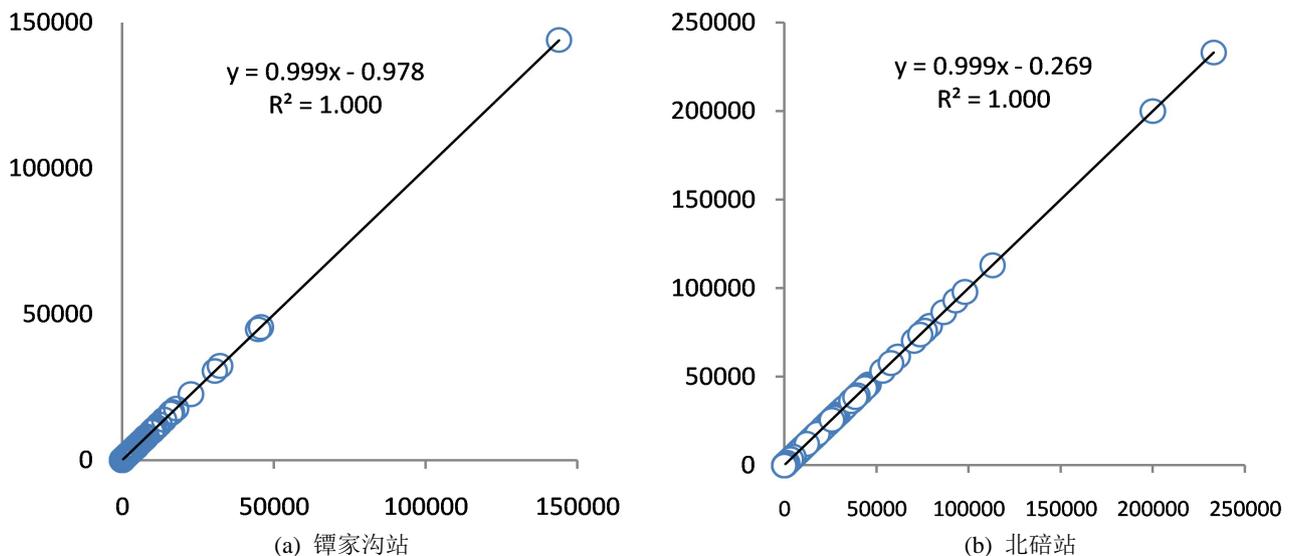
站点	总计 N	最小可能值				最大可能值			
		检验统计量	标准误	标准化检验统计量	渐近显著性(双侧)	检验统计量	标准误	标准化检验统计量	渐近显著性(双侧)
谭家沟	1612	883.000	20.069	3.787	1.000	1121.000	20.069	15.646	1.000
北碚	1204	714.000	17.342	6.401	1.000	898.000	17.342	17.011	1.000
三堆子	810	497.000	14.221	6.399	1.000	597.000	14.221	13.430	1.000
汉口	58	49.000	3.774	5.034	1.000	51.000	3.774	5.564	1.000

从表 5 和表 6 检验结果, 渐近显著性均大于 0.05, 说明积分法与四八法两个序列总体没有差异。

从以上四种检验方法得出的结果分析, 从样本均值来看, 四个站的积分法计算值要比四八法的计算值均偏小[2], 但 P 值均远大于 0.05, 说明四站的两种计算方法的数据样本, 来自于具有相同分布的总体。从统计数据看, 四站的日平均输沙率采用积分法和四八法计算的结果不存在显著差异。

4.3. 日平均输沙率相关分析

从各站两种方法计算的日平均输沙率相关关系来看(图 3), 四八法与积分法的决定系数 R^2 均为 1, 说明两种方法计算结果具有很强的相关性。



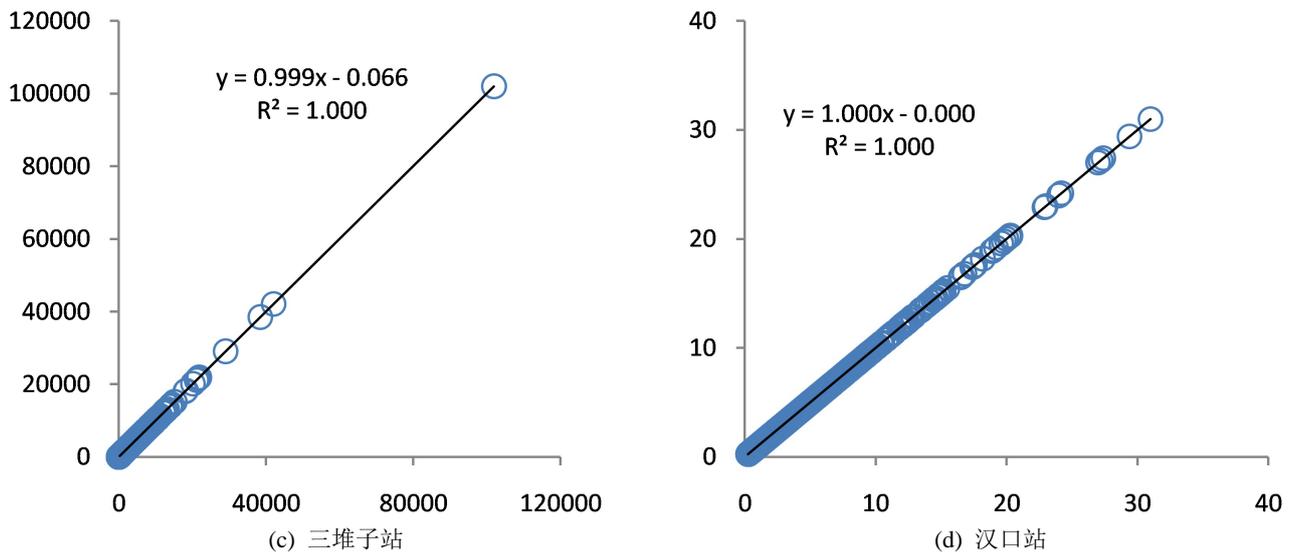


Figure 3. Correlation diagram of daily average sediment transport rate (The abscissa in the figure is the four eight method, and the ordinate is the integral method)

图 3. 日平均输沙率相关关系图(图中横坐标为四八法, 纵坐标为积分法)

4.4. 年输沙量影响分析

年输沙量计算方法, 以年内各日日平均输沙率的总数乘以一日秒数(86,400)求得, 根据水文资料整编规范对年输沙量的取用精度, 为取三位有效数字, 小数不过三位[1]。根据两种方法计算的年输沙量和最大日平均输沙率, 列表计算出各年的相对误差, 见表 7 和表 8。

Table 7. Error statistics of annual sediment discharge (Unit: 10⁴ t)

表 7. 年输沙量误差统计(单位: 10⁴ t)

站名	计算方法	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
谭家沟	积分法						840	1760	1250	1530	187
	四八法						845	1770	1250	1540	188
相对误差%							0.6	0.6	0	0.7	0.5
北碚	积分法	6220	3540	2880	5760	1450	953	107	557	7210	2170
	四八法	6220	3550	2880	5760	1450	954	107	558	7220	2170
相对误差%		0	0.3	0	0	0	0.1	0	0.2	0.1	0
三堆子	积分法	5290	1660	5570	1620	2000	1290	1700	969	1050	589
	四八法	5290	1660	5570	1620	2000	1290	1700	969	1050	589
相对误差%		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
汉口	积分法	11,100	6860	12,600	9280	8050	6300	6790	6980	7960	5730
	四八法	11,100	6860	12,600	9280	8050	6300	6790	6980	7960	5730
相对误差%		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 8. Error statistics of maximum daily average sediment transport rate (Unit: kg/s, t/s for Hankou station)
表 8. 最大日平均输沙率误差统计(单位: kg/s, 汉口站为 t/s)

站名	计算方法	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
谭家沟	积分法						45,600	144,000	30,600	44,800	6190
	四八法						45,800	144,000	30,600	44,900	6200
	相对误差%						0.4	0	0	0.2	0.2
北碚	积分法	86,500	73,800	31,800	113,000	36,600	29,600	1070	9120	233,000	38,500
	四八法	86,500	73,800	31,800	113,000	36,600	29,600	1070	9120	233,000	38,500
	相对误差%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
三堆子	积分法	21,200	14,300	102,000	12,800	29,100	13,100	12,500	14,000	10,900	4660
	四八法	21,200	14,300	102,000	12,800	29,100	13,100	12,500	14,000	10,900	4660
	相对误差%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
汉口	积分法	27	13.9	19.8	31	8.6	7.18	8.99	11.4	24.2	5.8
	四八法	27	13.9	19.8	31	8.6	7.18	8.99	11.4	24.2	5.8
	相对误差%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

年输沙量和最大日平均输沙率误差统计结果, 北方暴涨暴落、水沙变化大的河流其年输沙量积分法偏小 0.7% 以下, 中沙河流偏小 0.3% 以下, 含沙量小的河流两种计算方法结果一致; 最大日平均输沙率大沙河流积分法偏小 0.4% 以下, 其他河流两种计算方法结果一致, 各站统计误差均在误差允许范围内。

5. 结语

根据四站的积分法和四八法对比分析、误差统计结果, 日平均输沙率计算结果积分法要比四八法系统偏小, 但不存在显著差异; 以目前的手段取得的单样含沙量, 在不改变数据加工方法的前提下, 采用积分法计算日平均输沙率, 能提高计算精度[3], 更能反映日平均输沙率数据的真实性; 水文资料整编软件采用积分法计算日平均输沙率, 不会引起显著变化, 对测站的输沙资料连续性影响很小, 同时也符合整编规范规定的要求。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水利行业标准. 水文资料整编规范[S]. SL/T247-2020. Water Conservancy Industry Standard of the People's Republic of China. Code for hydrologic data processing. SL/T247-2020. (in Chinese)
- [2] 牛占, 马庆云. 时段平均输沙率计算方法探讨[J]. 水文, 1995(6): 14-19, 65. NIU Zhan, MA Qingyun. A study on computation method of time-average sediment discharge. Journal of Hydrology, 1995(6): 14-19, 65. (in Chinese)
- [3] 王卫东, 赵志贡, 荣晓明. 洪水期悬移质日平均输沙率计算方法的分析研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(2): 77-80. WANG Weidong, ZHAO Zhigong and RONG Xiaoming. Analysis and research on calculation method of daily average suspended load transport rate in flood period. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(2): 77-80. (in Chinese)