

文章编号:1001-5485(2009)02-0014-04

不同判别方法在长江水流挟沙力公式检验中的应用

高幼华¹, 范北林², 侯卫国¹, 胡石华¹

(1. 长江勘测规划设计研究院, 武汉 430010; 2. 长江科学院 河流研究所, 武汉 430010)

摘要:水流挟沙力是运用河流动力学原理进行河床冲淤计算的重要指标,对常见的水流挟沙力公式进行了检验,检验所采取的判别方法有:相关系数法、最小距离法、集中系数法、偏离系数法和聚类分析方法。结果表明:相关系数法、最小距离法、集中系数法、偏离系数法的检验结果在整体趋势上是一致的,但检验结果相互间存在一定的偏差;而聚类分析是根据聚类标准将不同的公式划分为不同类别,视同一类的计算效果相当,能将其他几种方法的结果较好地统一起来。

关键词:水流挟沙力;长江;公式检验;聚类分析

中图分类号:TV143.4 **文献标识码:**A

水流挟沙力是运用河流动力学原理进行河床冲淤计算的重要指标。国内外学者对水流挟沙力进行了大量研究,给出了一系列经验或半经验公式。例如,张瑞瑾^[1]、余文畴^[2]先后提出的长江水流挟沙力公式为解决长江实际工程问题做出了巨大贡献。水流挟沙力公式的选取直接影响到河床冲淤计算的精度^[3],故对现有常见挟沙力公式的检验并选取适合长江的水流挟沙力公式有重要的意义。水流挟沙力公式的检验除需要重视对冲淤平衡条件下水流挟沙力实测资料的选取之外,还取决于判别方法及其对计算结果的比较分析^[3,4]。

对水流挟沙力计算结果进行判别的方法有许多。最常见的方法是视计算挟沙力与实测资料的点群分布而定。这种经验判别法具有简单、直观等特点,同时也具有主观性较大的缺陷。另两种较为常见的判别方法为相关系数法和距离判别法,均为定量判别法,不过其侧重点存在差异:相关系数法主要是检验点群的线性程度,距离判别法主要是检验计算值与实测值的远近程度。此外,还有基于距离判别法而提出的集中系数法和偏离系数法。集中系数法是对计算值与实测值的比值进行加权平均,集中系数越接近1表明计算值越准确,这种方法能体现挟沙力计算值的综合情况;偏离系数是对计算值与实测值的差值加权平均,反映的是误差的大小,该系数越趋近于0则说明计算值越好。由于挟沙力公式检验时,选取的数据点较多,各组数据间的数值差异也较大,不同判别方法的检验结果会存在差异,给公式的选择带来较大的不确定性,因此,本文选取了不

同判别方法对长江水流挟沙力公式进行了检验,并以长江冲淤平衡条件下的水沙资料为基础,选取适合于长江中下游的挟沙力公式。

1 挟沙力检验判别方法简介

将多组挟沙力的计算值作为样本 A , 表示为 $x = (x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n)$, x_i 为样本的第 i 个指标,表示第 i 组挟沙力的计算值, n 为挟沙力的组数,也为样本总体指标个数;同样,将挟沙力实测值作为样本 B , 表示为 $y = y(y_1, y_2, y_3, \cdots, y_n)$, y_i 表示第 i 组挟沙力的实测值,样本总体指标个数为 n ,各检验方法如下。

1.1 相关系数法

相关系数反映 2 样本间的线性相关程度。本文采用夹角余弦相关系数

$$r_i = \frac{\sum_{k=1}^p x_{ik}y_k}{\sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ik})^2 \sum_{k=1}^p (y_k)^2}}, \tag{1}$$

相关系数 r_i 越大表明挟沙力的计算值与实测值相关性越好,反之,相关性越差。

1.2 最小距离法

距离也可作为判别随机变量相似程度的统计量。本文采用绝对值距离,可以表示为

$$d_i = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p |x_{ik} - y_k|, \tag{2}$$

d_i 越小则样本 A 和 B 越接近,反之,相差越大。

收稿日期:2008-09-29
作者简介:高幼华(1959-),女,湖北宜都人,高级工程师,主要从事水利规划和河流动力学方面的研究,(电话)027-82820320(电子信箱) yhg333000@yahoo.com.cn。

1.3 集中系数法和偏离系数法

文献[5]提出了集中系数和偏离系数法,表达式如下:

集中系数法
$$b_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{y_i}; \tag{3}$$

偏离系数法
$$b_x = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - y_i}{(x_i + y_i)/2} \right|}{n}。 \tag{4}$$

1.4 聚类分析法

文献[4]给出了聚类分析方法,其具体计算步骤如下:

(1) 首先将构造的每个样本(即对应的每一挟沙力公式)作为一类,选择样欧氏距离计算公式计算样本间的距离 D_{ij} ,距离矩阵可写为

$$\begin{bmatrix} 0 & D_{12} & D_{13} & \cdots & D_{1n} \\ & 0 & D_{23} & \cdots & D_{2n} \\ & & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & & 0 & D_{n-1,n} \\ & & & & 0 \end{bmatrix},$$

矩阵中 D_{ij} 为第 i 个样本和第 j 个样本间的距离,该矩阵为对称阵。

(2) 在矩阵的各元素中找出最小者,即找到了距离最近的两类,将其合并为 $n + 1$ 类,并取消刚合并的那两类,这样得到 $n - 1$ 类。

(3) 计算新类与其余各类的距离,原剩余类的距离不变,重复(2)的工作,直到剩余类的个数为 1。

(4) 画出聚类谱图,确定水流挟沙力公式的分类。

2 挟沙力公式及检验资料

2.1 挟沙力公式

本文选取的 8 个水流挟沙力公式中,除主要或曾用长江资料率定过的 6 个公式外,还有 2 个公式主要是用黄河资料率定的。限于篇幅,结构或系数、指数相近的公式不再加入比较。最终选来进行检验的公式包括:(a)维利坎诺夫公式^[1];(b)张瑞瑾公式^[1];(c)李昌华公式^[6];(d)窦国仁公式^[7];(e)张红武公式^[8];(f)曹如轩公式^[9];(g)舒安平公式^[10];(h)刘兴年公式^[11]。公式形式如表 1 所示,式中 S_{*i} 为公式计算的挟沙力, S_i 为实测的挟沙力,公式中参数选取可参考文献[1~12]。这些公式中在近几年多被选来加以检验比较。

其中,维里坎诺夫公式是从重力理论出发,认为浑水在单位时间内的能量损失除用于克服阻力做功

外,还用于悬浮泥沙做功;张瑞瑾公式则从“制紊假说”出发,认为水流挟带的泥沙有“制紊”作用,相同的水流条件下浑水比清水的能量损失要少,并由长江、黄河等资料确定相关的参数;麦乔威公式是采用量纲分析得到公式的基本形式,再根据黄河及引黄渠系实测资料确定公式中的参数;窦国仁公式在推导过程中考虑了浑水的宾汉极限剪切力和边壁切应力;张红武公式认为挟沙力不仅与水流条件等常见的因子有关,而且还同本河段含沙浓度等因素有密切关系,挟沙水流为维持悬移质的悬浮而将一部分紊动能转化为热能,并从二度流能耗图形出发,考虑某空间点上的能量平衡;舒安平公式是通过紊动能量的耗散途径,兼顾能耗效率得到的;刘兴年公式也是从“制紊假说”出发,建立水流挟沙力公式的能量平衡方程,即清水和浑水的能量损失等于悬移质制紊作用的能耗;李昌华公式、曹如轩公式和余文畴公式的结构形式与维里坎诺夫公式或张瑞瑾公式较为相近,但由于各自考虑水流挟沙力影响因素的侧重点不同,所确定的参数数值也有一定的差异。

表 1 选来检验的水流挟沙力公式列举表

Table 1 List of the sediment carrying capacity formulae		
序号	作者	公式结构
(a)	维利坎诺夫	$S_* = 0.345 \frac{V^2}{gh\omega}$
(b)	张瑞瑾	$S_* = 0.07 \left(\frac{V^3}{gR\omega} \right)^{1.14}$
(c)	李昌华	$S_* = 0.056 \left(\frac{f\gamma}{\gamma_s - \gamma} \frac{V^3}{gR\omega} \right)^{1.25}$
(d)	窦国仁	$S_* = \frac{K_s \gamma_s}{C_0^2} \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_0} \right) \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \cdot \frac{V^3}{R\omega}$
(e)	张红武	$S_* = 2.5 \left[\frac{(0.0022 + S_v) V^3}{\kappa \frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma_m} gh\omega} \ln \left(\frac{h}{6D_{50}} \right) \right]^{0.62}$
(f)	曹如轩	$S_* = 0.385 \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \cdot \frac{V^3}{gR\omega}$
(g)	舒安平	$S_{V*} = K \sum p_i \cdot \left[\frac{\lg(\mu_r + 0.1)}{\kappa^2} \cdot \left(\frac{f_m}{8} \right)^{3/2} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \cdot \frac{V^3}{gR\omega} \right]^m$
(h)	刘兴年	$S_* = 0.211 \cdot \left[\left(\frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \cdot \frac{V^3}{gR\omega} \right) \left(1 + \frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma_m} S_v \right) \mu_r \right]^{0.69}$

2.2 检验资料

本文检验所依据的资料除主要采用文献[13]外,少量还采用了文献[2]的资料。最终选取长江宜昌站、陈家湾站、沙市河段、监利站、新厂站、螺山、汉口、青山近似冲淤平衡的水沙资料 109 组,作为水流挟沙力公式检验的原始资料,检验资料特征参数如表 2 所示。该表给出了所选资料的断面平均含沙量、平均水深、河宽、流量以及悬沙中径的变化范围,

从水沙资料的特征可以看出该资料具有一定的代表性,可用于长江水流挟沙力的研究。

表 2 验证资料特征表

Table 2 Characteristics of the verification data						
站名	组数	含沙量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水深/ m	河宽/ m	流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	悬沙中值 粒径/mm
宜昌	15	0.40~ 2.1	9.0~ 13.3	634~ 864	4 780~ 31 100	0.016~ 0.065
陈家湾	3	0.31~ 0.61	8.5~ 10.1	1 040~ 1 100	10 100~ 19 700	0.05~ 0.06
沙市	5	0.17~ 0.23	6.3~ 8.4	786~ 1 420	7 470~ 8 300	0.045~ 0.066
监利	17	0.30~ 2.48	3.09~ 13.1	844~ 1 090	4 160~ 20 700	0.019~ 0.066
新厂	34	0.26~ 3.8	3.56~ 11.9	1 210~ 1 500	4 290~ 41 200	0.025~ 0.10
螺山	5	0.30~ 0.68	5.6~ 11.2	1 430~ 1 660	7 000~ 37 900	0.031~ 0.065
汉口	12	0.13~ 0.90	5.6~ 13.3	1 610~ 1 890	7 240~ 70 500	0.017~ 0.039
青山	15	0.13~ 1.23	8.7~ 12.9	478~ 1 110	3 280~ 21 100	0.013~ 0.07
大通	3	0.11~ 0.52	10.2~ 12.1	1 690~ 1 790	11 600~ 42 500	0.03~ 0.04

3 检验结果和分析

表 3 给出了不同判别方法的检验结果和公式优劣的排序(序号越小表示与实测值越接近)。可以看出不同方法对挟沙力公式检验的结果存在一定差异,但是这种差异一般只是在上下 2~3 个位置波动。检验结果可以说明相关系数法、最小距离法、集中系数法、偏离系数法的检验结果在整体优劣的趋势上是可信的,但是对于较为接近的数值则难以分辨,故而存在一定的波动。由于水文泥沙测验精度所限,在检验中存在波动是正常的。

表 3 不同判别方法检验结果

Table 3 Results of different verification methods								
检验方法	相关系数法		最小距离法		集中系数法		偏离系数法	
	相关系数	公式排序	距离	公式排序	集中系数	公式排序	偏离系数	公式排序
1	0.95	张红武	0.24	张红武	1.12	张红武	0.33	张红武
2	0.93	舒安平	0.41	张瑞瑾	1.15	张瑞瑾	0.47	刘兴年
3	0.89	刘兴年	0.42	窦国仁	1.32	窦国仁	0.50	窦国仁
4	0.88	张瑞瑾	0.44	曹如轩	1.50	刘兴年	0.51	张瑞瑾
5	0.86	窦国仁	0.48	舒安平	0.60	曹如轩	0.52	舒安平
6	0.85	维利坎诺夫	0.58	刘兴年	1.76	舒安平	0.77	曹如轩
7	0.84	曹如轩	0.73	李昌华	0.18	李昌华	0.96	维利坎诺夫
8	0.82	李昌华	1.75	维利坎诺夫	3.90	维利坎诺夫	1.43	李昌华

表 4 为聚类分析检验方法第一步的样本距离,样本的编号分别为:①含沙量;②张瑞瑾公式;③李昌华公式;④窦国仁公式;⑤曹如轩公式;⑥张红武公式;⑦刘兴年公式;⑧舒安平公式;⑨维利坎诺夫公式。按照文献[2]的确定方法,可以得到样本聚类框架图,

如图 1 所示。检验结果为:张红武公式计算值与实测值较为接近;张瑞瑾公式与窦国仁公式较为接近;刘兴年公式计算值与舒安平公式计算值较为接近;可以认为较为接近的两组公式间的差异不大,效果等

图 1 聚类分析图
Fig.1 Chart of clustering analysis

同。再根据各样本与实测值距离的远近和生成新类间的相互关系,可以将其分为 3 类:第一类为张红武公式、张瑞瑾公式和窦国仁公式;第二类为曹如轩公式、舒安平公式、刘兴年公式;李昌华公式和维利坎诺夫公式为第三类,其划分结果将其他几种方法的结果较好地统一起来。

图 2 为不同挟沙力公式的验证图。由图可知,张红武公式计算值与实测值颇为接近,其点群分布

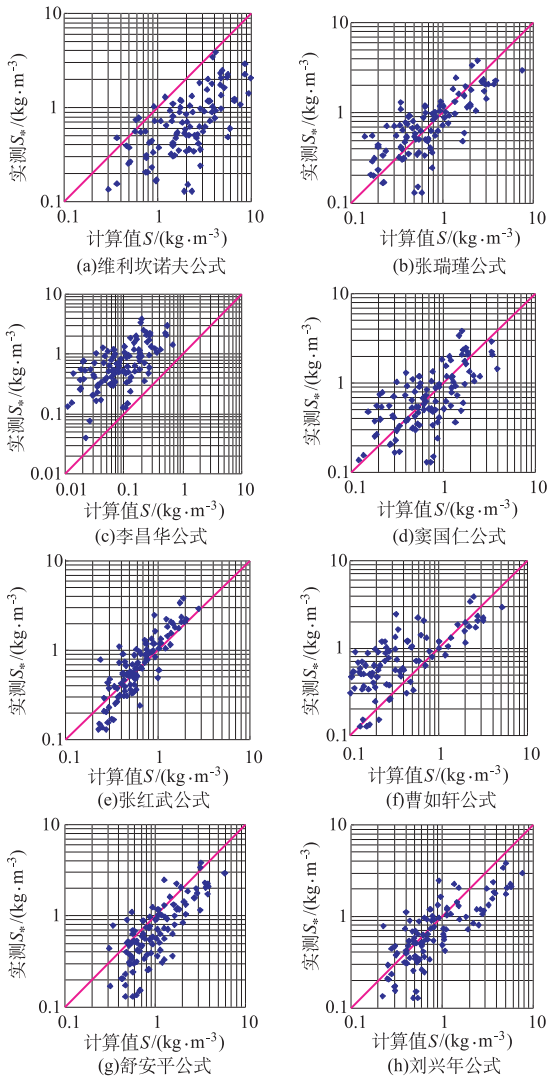


图 2 不同挟沙力公式检验图
Fig.2 Verification of variable formulae

表 4 聚类分析的样本距离

Table 4 Sample distances of cluster analysis

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.000	0.407	0.732	0.414	0.442	0.244	0.578	0.479	1.747
2		0.000	0.815	0.292	0.502	0.354	0.583	0.480	1.647
3			0.000	0.767	0.456	0.606	1.122	1.100	2.462
4				0.000	0.674	0.334	0.818	0.603	1.695
5					0.000	0.378	0.668	0.646	2.008
6						0.000	1.274	0.551	6.342
7							0.000	0.371	1.554
8								0.000	1.469
9									0.000

于 45°线左右,且较为集中,不存在跳跃性较大的点;张瑞瑾公式、窦国仁公式的点群能较好地分布于 45°线左右,但点群较为发散;刘兴年公式、舒安平公式点群也较为集中,但和 45°线有所偏离;其他公式的点群分布相对较散。此外,由图中含沙量小于0.3 kg/m³的点据来看,点群分布都较乱,显然同测验精度有关。

前文检验与直接由图得到的结果一致,由此也可以说明,检验方法能较好反映公式检验图的信息。但相对而言,聚类分析方法在检验过程中各种信息都是定量给出的,可给出各公式综合的评价值,减少了仅从图形判断的人为性,增强了检验结果的理论依据和可信度。

4 结 论

水流挟沙力是河床演变计算的重要指标,但受河流动力学学科发展水平所限,通过不同理论和经验处理得到的挟沙力公式,在形式和精度方面都相差较大。由于问题的复杂性,文中的相关系数法、最小距离法、集中系数法、偏离系数法的检验结果在整体优劣的趋势上是可信的,但是对于较为接近的数值则难以分辨,相应的检验结果也存在一定的偏差。相对而言,聚类分析法并不着眼于比较每个公式的优劣,而

根据聚类标准将不同的公式划分为不同类别,视同一类的计算效果相当,可将其他几种方法的结果较好地统一起来。检验结果表明,张红武公式、张瑞瑾公式和窦国仁公式与实际情况最为接近,可用于长江水流挟沙力计算,其结论同文献[3]基本是一致的。

参考文献:

[1] 张瑞瑾,谢鉴衡,王明甫,等. 河流泥沙动力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998.

[2] 余文畴. 长江下游水流挟沙力经验公式[J]. 长江水利水电科学研究院院报, 1986,(1):45-53.

[3] 陈雪峰,陈立,李义天. 高、中、低浓度挟沙水流挟沙力公式的对比分析[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999,(5):1-5.

[4] 吴腾,李远发,洪建,等. 聚类统计方法在高含沙水流挟沙力公式验证中的应用[J]. 水利学报, 2007, 38(7):852-857.

[5] 黄仁勇,韦直林,赵连军,等. 河床冲淤幅度判别指标与水流挟沙力公式验证[J]. 人民黄河, 2004, (5):22-24.

[6] 李昌华. 明渠水流挟沙能力初步研究[J]. 水利水运科学研究, 1957,(10):76-83.

[7] 窦国仁,王国兵. 黄河小浪底枢纽泥沙研究(报告汇编)[R]. 南京:南京水利科学研究院, 1993.

[8] 张红武,张清. 黄河水流挟沙力的计算公式[J]. 人民黄河,1992,(11):7-9.

[9] 曹如轩,程文,钱善琪,等. 高含沙洪水揭河底冲刷初探[J]. 人民黄河, 1997,(2):1-5.

[10] 舒安平. 高含沙水流挟沙能力及输沙机理研究[D]. 北京:清华大学, 1994.

[11] 刘兴年,曹淑尤,黄尔,等. 粗细泥沙挟沙能力研究[J]. 泥沙研究,2000, (4):35-39.

[12] 张红武,江恩惠,白咏梅,等. 黄河高含沙洪水模型的相似律[M]. 郑州:河南科学技术出版社, 1994.

[13] 武汉水利电力学院水流挟沙力研究组. 长江中下游水流挟沙力研究[J]. 泥沙研究, 1959, 4(3):59-72.

(编辑:周晓雁)

Application of Different Verification Methods for Sediment Carrying Capacity Formulae in Middle and Lower Yangtze River

GAO You-hua¹, FAN Bei-lin², HOU Wei-guo¹, HU Shi-hua¹

(1.Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China;
2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010,China)

Abstract: Sediment carrying capacity is an important parameter in the analysis of river process. This paper verifies a great deal of sediment carrying capacity formulae and adopts some verification methods. The verification methods include correlation coefficient method, least distance method, convergence coefficient method, error coefficient method and clustering analysis method. The results obtained from the correlation coefficient method, least distance method, convergence coefficient method and error coefficient method disagree with each other in some differences, but cluster analysis method can unify the other four methods' result.

Key words:sediment-carried capacity; Changjiang(Yangtze)River; verification of formulae; cluster analysis