

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.01.011

不同沿岸输沙率计算公式对比分析

王宁舸, 唐磊, 孙波, 辛文杰

(南京水利科学研究院, 江苏南京 210029)

摘要: 经历近 100 a 的发展, 沿岸输沙率计算公式研究领域已形成许多代表性成果, 系统研判各计算公式的预测精度对于快速准确判断研究区域沿岸输沙能力具有重要意义。依据使用率高、公式结构简洁、考虑参数相对全面等标准, 选择了国内外 7 个沿岸输沙率计算公式, 采用现场原型沙、室内原型沙和室内轻质沙等多种实测资料, 对各公式的计算准确程度和适用范围进行了定量检验。结果表明, CERC 公式和 Kamphuis 公式适用于现场原型沙预测, 但对室内轻质沙预测的偏离程度较大; MH-Kamphuis 公式和 van Rijn 公式对各种实测资料的预测均总体偏小; 赵今声公式和 Bayram 公式的预测精度最低, 预测偏小程度较大。经比较, 孙林云公式对各项实测资料的符合程度总体较高, 预测精度提高了 36% ~ 73%, 具有更广泛的适用范围, 推荐用于推导沙质海岸沿岸输沙模型相似律比尺关系。

关键词: 沿岸输沙率; 计算公式; 原型沙; 轻质沙

中图分类号: P753 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2024)01-0123-09

沿岸输沙基本规律是沙质海岸研究领域的基本问题之一, 探索出能够快速准确判断研究区域沿岸输沙能力的计算方法是沿岸输沙问题研究的重要方向, 对深化泥沙运动规律认识和解决实际工程问题具有重要意义。

自 20 世纪 30 年代以来, 沿岸输沙率计算公式研究涌现出许多代表性成果, 为快速预测沙质海岸沿岸输沙能力创造了基本条件^[1], 但这些公式的适用性和预测精度有待考量。国内外多位学者对一些代表性公式开展过检验。如 Sanil Kumar 等^[2]采用印度西海岸约 60 组现场实测数据对 CERC 公式、Walton-Bruno 公式和 van Rijn 公式(1989)作了评估; Bayram 等^[3]基于 5 套现场和 1 套室内原型沙实测资料建立了输沙率公式, 并与 CERC 公式、Kamphuis 公式和 Inman-Bagnold 公式的预测精度作了比较; Mil-Homens 等^[4]采用了与 Bayram 等^[3]相同的资料, 对 CERC 公式、Kamphuis 公式和 Bayram 公式进行了再检验, 并提出了改进形式; 陈超等^[5]收集了 2 套现场和 1 套室内原型沙实测资料共 17 组数据对 CERC 公式及其他学者改进形式、Kamphuis 公式及其他学者改进形式、van Rijn 公式(2014)和赵今声公式进行了比较研究。总体而言, 以往检验评估工作大多存在检验资料数据量和种类偏少的问题, 尤其是缺乏室内轻质沙实测资料, 无法判断各公式对轻质沙的适用性。因此, 当前沿岸输沙率计算公式的预测精度与适用范围仍未有系统检验, 导致在应用上具有明显的局限性, 这是目前沿岸输沙率计算公式研究领域核心的问题之一。

本文在前人成果的基础上, 进一步收集不同的现场原型沙、室内原型沙和室内轻质沙实测数据, 研判国内外代表性沿岸输沙率公式的预测精度和适用范围, 以期推荐出适用范围广、符合现场和室内沿岸输沙统一规律的沿岸输沙率计算方法。研究成果以期沙质海岸沿岸输沙模型相似律比尺关系的推导和物理模型相似理论发展提供支撑。

收稿日期: 2023-04-24; 网络出版日期: 2023-11-03

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20231103.1337.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52101310)

作者简介: 王宁舸(1990—), 男, 浙江宁波人, 工程师, 主要从事河口海岸水动力与泥沙运动研究。

E-mail: ngwang@nhri.cn

1 实测资料简介

通过广泛查阅沿岸输沙现场观测、试验研究、输沙率计算公式建立及检验评估等相关文献,并综合考虑数据采集方式是否主流、数据是否被广泛使用、数据是否存在明显问题等方面,对各数据源进行了筛选,汇总得到本次评估检验工作的数据库,共11处来源、238个点据,包括现场原型沙、室内原型沙和室内轻质沙实测资料。总体上,收集的资料可靠性较强,可作为本次评估检验工作的基础,数据基本情况见表1。其中,轻质沙作为室内模拟河流海岸泥沙运动的一种模型沙,对实现泥沙输移和岸滩冲淤变形相似发挥了重要作用,采用轻质沙开展波浪沿岸输沙模型试验写入了《水运工程模拟试验技术规范:JTS/T 231—2021》^[6]。目前,国内外对于室内轻质沙沿岸输沙与岸滩演变试验的研究成果仍然较少,通过引入轻质沙试验检验资料,可进一步分析不同沿岸输沙率公式的适用范围,有助于推导沙质海岸物理模型的沿岸输沙相似律,发展模型相似理论。

各数据源的基本要素包括资料获取场景(原型或室内试验)、泥沙类型(原型沙或轻质沙)、破波波高、波浪周期、泥沙粒径、破波角和输沙率等。关于水位变化影响,主要是通过改变近岸水深及相应的波浪传播和破波要素间接地影响沿岸输沙,即水位变化影响最终隐含在水深和破波要素变化对沿岸输沙的影响。各数据源基本都对破波水深进行了测量,未直接获取水深数据的可根据经验公式还原,表1不再单列说明。

表1 检验资料基本情况
Table 1 Basic information of inspection data

数据来源	年份	资料类型	H_{rms}/m	T_m/s	D_{50}/mm	$\theta_b/(\circ)$	实测输沙率/ (N/s)
Kamphuis 等 ^[7]	1953—1981年	现场原型沙	0.20~1.41	2.7~13.4	0.18~0.60	0.3~16.8	6.0~2 528.0
友谊港 1977 ^[8]	1977年	现场原型沙	0.27~1.34	3.3~12.7	0.20	8.5~20.0	487.3~1 462.0
友谊港 1983—1984 ^[9]	1983—1984年	现场原型沙	0.41~1.59	4.6~17.8	0.25	2.7~16.5	19.5~4 077.5
印度西海岸 ^[2]	1990年	现场原型沙	0.36~0.82	3.5~7.9	0.19	0.6~18.0	11.8~190.6
美国东海岸 SandyDuck ^[10]	1995—1996年	现场原型沙	1.10~2.82	5.5~9.9	0.17	7.8~22.0	1 195.6~4 729.2
LSTF ^[11]	2002年	室内原型沙	0.13~0.19	1.24~2.48	0.15	6.4~6.7	0.4~2.2
美国墨西哥湾 Galveston 岛 ^[12]	2003—2004年	现场原型沙	0.40~0.49	3.2~4.2	0.13	10.1~34.8	26.1~70.1
van Rijn ^[13]	1952—1999年	现场原型沙	0.20~2.26	2.5~9.8	0.17~0.42	3.0~25.0	3.2~9 025.2
NHRI 2009 ^[14]	2009年	室内轻质沙	0.02~0.09*	0.8~1.1	0.16~0.24	7.6~30.1	0.002~1.3
NHRI 2010 ^[15]	2010年	室内轻质沙	0.02~0.04*	0.6~1.1	0.13~0.24	13.0~25.0	0.002~0.451
NHRI 2022—2023 ^[16]	2022—2023年	室内轻质沙	0.02~0.12* 0.02~0.09	0.41~2.0	0.04	6.9~13.4	0.007~0.4

注: H_{rms} 为破波均方根波高; T_m 为波浪平均周期; D_{50} 为泥沙中值粒径; θ_b 为破波波向与岸线的夹角(以下简称“破波角”); *表示规则波波高; 资料“友谊港 1977”和“友谊港 1983—1984”收集于典型强输沙海岸毛里塔尼亚西海岸,“美国东海岸 SandyDuck”收集于风暴潮大浪期间,三者充实了输沙率检验数据的上限; 资料“NHRI 2009”、“NHRI 2010”和“NHRI 2022—2023”为室内轻质沙试验资料,采用精制煤粉模拟沿岸泥沙运动,泥沙颗粒重度为1 250~1 400 kg/m³,填补了以往检验工作欠缺轻质沙资料的不足,并充实了本次输沙率检验数据的下限。

2 沿岸输沙率公式简介

选择了国内外7个沿岸输沙率计算公式进行检验和比较,以下对各公式作简要介绍。

2.1 CERC 公式

CERC 公式^[17]是能量法公式中经验与理论相结合的首个成果,凭借着结构简洁、便于使用等特点,该

公式成为当前使用率最高、受检验最多的沿岸输沙率公式。CERC 公式^[17]的形式见式(1)和式(2)。

$$I_1 = KP_1 \quad (1)$$

$$P_1 = EC_g \sin \theta_b \cos \theta_b \quad (2)$$

式中: I_1 为浮重度输沙率, N/s; P_1 为单位岸线长度上破波波能流的沿岸分量, N/s; E 为单位波峰线长度的破波波能, kg/s²; C_g 为破波波能传播速度, m/s; K 为经验系数, 当波能流采用均方根波高计算时取 0.77, 当波能流采用有效波高计算时取 0.39。

如今, 业界已形成一定的共识, 对 CERC 公式^[17]的系数 K 取常数存在质疑, 认为系数 K 可能与泥沙粒径、岸滩坡度、波浪周期、波陡、破波类型等多种因素相关。当然, 不排除当时率定资料美国加利福尼亚银滩和墨西哥埃尔莫雷诺海滩的波浪动力、岸滩坡度和泥沙粒径之间相互作用结果恰巧符合同一规律, 即系数 K 率定为常数。因此, 通过汇总不同动力环境和泥沙类型的实测资料, 可进一步分析 CERC 公式^[17]系数取值的合理性、预测准确性和适用范围。

2.2 赵今声公式

赵今声公式^[18]借鉴了 Larras^[19]对泥沙粒径影响的表达形式, 可以视为对 CERC 公式^[17]的改进, 相当于在系数 K 中进一步考虑了泥沙粒径和波陡的影响, 公式形式见式(3)。该公式已被收录在《港口与航道水文规范: JTS145—2015》^[20]中。

$$Q = K \left(3 \ 500 \frac{D_{50}}{D_{50}^4 + 2} \right)^{\frac{11-100H_0/L_0}{10}} \frac{H_0}{L_0} P_1 \quad (3)$$

式中: Q 为体积输沙率, m³/s; H_0 为深水波高, m; L_0 为深水波长, m。

赵今声公式^[18]最大的特点是沿岸输沙计算值随波陡和粒径发生非单调变化。具体而言, 当波陡在 0.15 ~ 0.25 以及粒径在 0.9 mm 时, 输沙率达到最大; 随着波陡和粒径增大或减小, 输沙率均会减小。在众多沿岸输沙率公式中, 赵今声公式^[18]所反映的这种变化规律是独特的, 规律是否合理有待进一步检验。

2.3 Kamphuis 公式

Kamphuis 公式^[21]是量纲分析法公式的主要代表之一, 公式中考虑了波高、周期、破波角、泥沙粒径、岸滩坡度等各种影响因子, 考虑因素较全面, 见式(4)。

$$Q_1 = 2.27 H_{sb}^2 T_p^{1.5} m^{0.75} D_{50}^{-0.25} [\sin(2\theta_b)]^{0.6} \quad (4)$$

式中: Q_1 为浮重量输沙率, kg/s; H_{sb} 为破碎波有效波高, m; T_p 为谱峰周期, s; m 为岸滩坡度。

Kamphuis^[21]率定公式所采用的实测资料是室内原型沙, 波浪条件包括不规则波和规则波。同时, Kamphuis 还收集了前人现场资料对公式作了进一步检验, 显示出公式也适用于现场尺度。不过, 该公式对泥沙的考虑形式是以粒径的方式, 因此对于具有相同粒径、不同颗粒重度或不同沉速的轻质沙而言, 公式可能并不适用。因此, 需要结合更丰富的实测资料, 尤其是室内轻质沙资料, 对 Kamphuis 公式^[21]作进一步检验。

2.4 孙林云公式

孙林云公式^[9]也是能量公式的主要代表之一, 公式表达形式见式(5)和式(6)。该公式最终可表达为对 CERC 公式^[17]的改进形式, 相当于在系数 K 中进一步考虑了破波类型和泥沙悬浮因子的影响, 涵盖了波高、波浪周期和岸滩坡度的影响与三者之间的相关关系, 以及波浪掀沙与泥沙沉降之间的强弱关系。孙林云公式^[9]对于泥沙的考虑形式是以沉速的方式, 因此在定性上可适用于轻质沙, 相比于 Kamphuis 公式^[21]考虑的更加全面。

$$Q = \frac{2.154 \times 10^{-2}}{(\rho_s - \rho)(1-a)g} (EC_g)_b I_r^{3/8} \frac{u_{mb}}{\omega_s} \sin \theta_b \cos \theta_b \quad (5)$$

$$I_r = \frac{m}{(H_b/L_0)^{1/2}} \quad (6)$$

式中： ρ_s 为泥沙颗粒密度， kg/m^3 ； ρ 为水密度， kg/m^3 ； g 为重力加速度， m/s^2 ； a 为泥沙孔隙率； I_r 为破波类型判数； u_{mb} 为破碎波的近底波浪水质点最大轨迹速度， m/s ； ω_s 为泥沙沉速， m/s ； H_b 为破碎波高， m 。

孙林云^[9]采用了友谊港现场资料对公式进行了率定，之后郭天润^[14]和吴炳良^[15]采用室内轻质沙资料对孙林云公式^[9]作了进一步检验，表明该公式也可适用于室内轻质沙输沙场景。根据上述成果，孙林云公式^[9]似乎具有较广泛的适用范围，但以往率定和检验资料的数据量相对有限，需要结合更丰富的实测资料作进一步评判。

2.5 Bayram 公式

Bayram 公式^[3]建立的基本理论和总体思路与孙林云公式^[9]相似，只是在关键参数的选择上有所不同，公式形式见式(7)一式(10)。该公式通过在沿岸流流速(V_1)和经验系数(ε)中引入 Dean^[22]提出的平衡剖面及判数，最终考虑了波高、周期、岸滩形态和泥沙沉速等多项影响因素。

$$Q = \frac{\varepsilon}{(\rho_s - \rho)(1 - a)g\omega_s} F \bar{V}_1 \quad (7)$$

$$F = EC_g \quad (8)$$

$$\bar{V}_1 = \frac{5}{32} \frac{\pi \gamma_b \sqrt{g}}{c_f} A^{3/2} \sin \theta_b \quad (9)$$

$$\varepsilon = 10^{-5} \left(9.0 + 4.0 \frac{H_{sb}}{\omega_s T_p} \right) \quad (10)$$

式中： \bar{V}_1 为破波带平均沿岸流流速， m/s ； γ_b 为波浪破碎指标； c_f 为摩阻系数； A 为与 Dean 剖面相关的形态参数。

Bayram 公式^[3]主要有 2 点质疑。其一是公式显示出沿岸输沙强度与周期呈负相关，定性上与通常认知相悖^[1]；其二是对公式系数 ε 建立经验关系时，数据点基本集中在小输沙量级，大输沙量级的离散程度较大，实际拟合效果不佳。与此同时，率定资料中的 Wang 等^[23]实测资料的输沙率很可能显著偏小，公式的预测准确性会受较大影响。Bayram 公式^[3]需结合更丰富的实测资料作进一步检验。

2.6 MH-Kamphuis 公式

2013 年，Mil-Homens 等^[4]改进了 Kamphuis 公式^[21]，以下将该公式简称为 MH-Kamphuis 公式，表达式见式(11)。MH-Kamphuis 公式对各参数的指数均作了调整，其中增大了波高和岸滩坡度的指数，减小了周期、泥沙粒径和破波角的指数，即改变了各参数的敏感程度。

$$Q_l = 17.5 H_{sb}^{2.75} T_p^{0.89} m^{0.86} D_{50}^{-0.69} [\sin(2\theta_b)]^{0.5} \quad (11)$$

Mil-Homens 等^[4]改进 Kamphuis 公式^[21]所采用的资料是 Bayram 等^[3]收集的实测资料，相比于 Kamphuis 公式^[21]的率定和检验资料，Mil-Homens 等^[4]采用数据量更大。不过，由于数据源包含 Wang 等^[23]的实测资料，该公式的预测准确性也需要进一步检验。

2.7 van Rijn 公式

van Rijn^[13]采用量纲分析法建立了沿岸输沙率公式，其最大的特点是将适用范围界定为 0.1 ~ 100 mm，泥沙类型从细沙到卵砾石，公式形式见式(12)和式(13)。相比于 Kamphuis 公式^[21]，该公式进一步考虑了泥沙颗粒重度的影响，定性上可计算轻质沙输沙率，考虑因素更全面。

$$Q_m = 0.00018 K_{swell} \rho_s g^{0.5} m^{0.4} D_{50}^{-0.6} H_{sb}^{3.1} \sin(2\theta_b) \quad (12)$$

$$K_{swell} = 0.015 p_{swell} + (1 - 0.01 p_{swell}) \quad (13)$$

式中： Q_m 为质量输沙率， kg/s ； K_{swell} 为涌浪系数； p_{swell} 为涌浪出现频率。

van Rijn 公式^[13]主要问题在于率定资料。该公式采用了经率定和验证后的向-离岸输沙和沿岸输沙数学模型预测值作为率定资料, 而该模型采用 van Rijn 早期公式(TRANSPOR2004)计算输沙率, 对于泥沙粒径、岸滩坡度、波浪周期等因素的关系描述已自成逻辑体系, 模型计算点据不能等同于实测资料。尽管 van Rijn 公式^[13]的率定数据量较大, 但资料的可靠性和说服力不足, 需要结合实测资料作进一步检验。

3 沿岸输沙率公式检验结果

3.1 各公式对收集资料的运用情况

本文收集的实测资料包含了各沿岸输沙率公式率定或检验的资料, 既是尊重各公式对其运用资料符合性的客观事实, 也是出于资料可供其他公式相互检验的考虑。在此基础上, 还补充了新的现场和室内实测数据。

各公式对收集资料的运用情况见表 2。对于表中任一沿岸输沙率公式, 除去其原本已运用的实测资料, 还有其他丰富的资料可用于公式检验。

表 2 各公式对收集资料的运用情况

Table 2 Application of each formula to the collected data

数据来源	CERC	赵今声	Kamphuis	孙林云	Bayram	MH-Kamphuis	van Rijn
Kamphuis ^[21]	√		√				
友谊港 1977 ^[8]							
友谊港 1983—1984 ^[1]				√			
印度西海岸 ^[2]					√	√	
美国东海岸 SandyDuck ^[10]					√	√	√
LSTF ^[11]					√	√	
美国墨西哥湾 Galveston 岛 ^[12]							
van Rijn ^[13]							√
NHRI 2009 ^[14]				√			
NHRI 2010 ^[15]				√			
NHRI 2022—2023 ^[16]							

注: 表中“√”表示以往研究中该实测资料用于了对应沿岸输沙率公式的率定或检验。

3.2 检验结果比较

各沿岸输沙率公式的实测资料检验散点图见图 1。为了定量分析各公式的预测准确程度, 选择均方根偏差(S_{rms})计算各公式预测值与实测值的偏差程度, 同时统计预测值与实测值的倍数关系。国内外通常选择倍数关系在 0.5 ~ 2 倍和 0.25 ~ 4 倍关系内的占比, 为了进一步严格评判标准, 增加了 0.7 ~ 1.4 倍关系的统计。图 1 各散点图中由内向外依次成对出现的虚线即分别表示预测值与实测值在 0.7 ~ 1.4 倍、0.5 ~ 2 倍和 0.25 ~ 4 倍关系的包络范围。 S_{rms} 的计算公式见式(14), 其意义是计算值越小, 则公式预测的偏离程度越小、准确性越高。为了分析讨论各公式的适用范围, 分别对现场原型实测资料、室内模型试验资料和全部实测资料的检验结果进行上述参数统计, 见表 3。

$$S_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\lg Q_{cal} - \lg Q_{mea})^2}{N}} \tag{14}$$

式中: Q_{cal} 为浮重量输沙率计算值, N/s; Q_{mea} 为浮重量输沙率实测值, N/s; N 为样本数量。

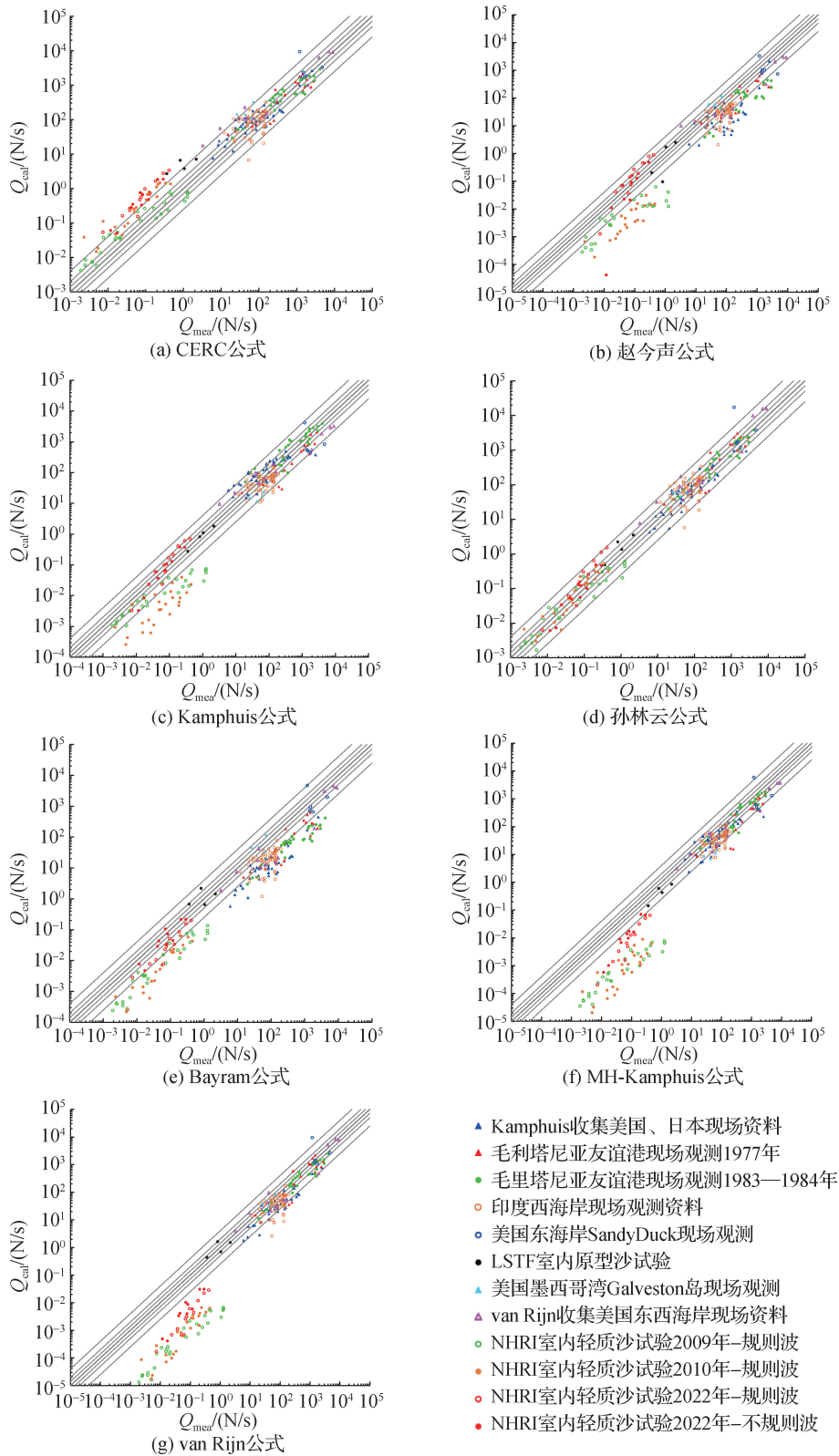


图 1 各家公式检验散点图

Fig. 1 Scatter plots of different formulas

表3 各沿岸输沙率公式对不同检验资料的预测结果准确性统计参数

Table 3 Statistical parameters of the prediction accuracy of the field prototype sand data by longshore sediment

公式	现场原型检验资料				室内检验资料				全部检验资料			
	S_{rms}	R1/%	R2/%	R3/%	S_{rms}	R1/%	R2/%	R3/%	S_{rms}	R1/%	R2/%	R3/%
CERC	0.73	39	66	94	1.50	6	21	49	1.04	29	51	79
赵今声	1.47	14	29	61	2.29	6	24	40	1.77	11	27	54
Kamphuis	0.79	32	58	92	1.91	17	38	55	1.27	27	51	80
孙林云	0.68	45	70	96	0.65	38	71	99	0.67	42	71	97
Bayram	1.80	4	13	37	1.84	6	16	42	1.81	5	14	39
MH-Kamphuis	0.97	24	48	88	3.82	1	1	6	2.31	17	33	61
van Rijn	0.95	29	52	84	4.14	1	5	5	2.48	20	37	59

注: R1、R2 和 R3 分别表示预测值与实测值的倍数关系在 0.7~1.4、0.5~2.0 和 0.25~4.0 的点数据数量占全部点据的百分比。

由各家公式检验散点图(图1)可见:

(1) 对于现场原型沙, CERC 公式^[17]、Kamphuis 公式^[21]和孙林云公式^[9]的预测表现总体接近, 预测精度最高, 预测散点大致均匀分布在 1:1 关系线两侧。其中, 孙林云公式^[9]的预测偏差最小, 统计得到 S_{rms} 为 0.68, 0.7~1.4 倍、0.5~2 倍和 0.25~4 倍关系占比可分别达到 45%、70% 和 96%。CERC 公式^[17]和 Kamphuis 公式^[21]的预测精度也总体较高, 相比于孙林云公式^[9]略低一些。MH-Kamphuis 公式^[4]和 van Rijn 公式^[13]的预测水平大致相当, 2 个公式预测值总体偏小一些, 在工程实际应用中偏于不安全。赵今声公式^[18]和 Bayram 公式^[3]的预测精度最低, 公式预测值偏小程度较大。尤其是 Bayram 公式^[3], 即使是 0.25~4 倍关系占比也只有 37%。

(2) 对于包括原型沙和轻质沙在内的室内试验实测资料, 检验散点图直观地表明, 仅孙林云公式^[9]具有较高的预测精度, 预测散点大致均匀分布在 1:1 关系线两侧, 统计得到 S_{rms} 为 0.65, 0.7~1.4 倍、0.5~2 倍和 0.25~4 倍关系占比可分别达到 38%、71% 和 99%, 符合性较好。相比之下, 其他公式对室内资料的预测结果均偏离较大, 尤其是对于轻质沙的预测。CERC 公式^[17]的检验结果与 Komar 等^[24]给出的结果是定性一致的, 主要由于公式中系数 K 为单一常数, 无法反映模型尺度沿岸输沙规律。Kamphuis 公式^[21]对大尺度沿岸输沙试验(LSTF)室内原型沙的吻合程度很高, 这得益于该公式建立在室内原型沙输沙试验资料的基础上, 但该公式未考虑泥沙颗粒重度或沉速的影响, 因而对轻质沙预测偏小。结合现场原型沙检验结果, 赵今声公式^[18]、Bayram 公式^[3]、MH-Kamphuis 公式^[4]和 van Rijn 公式^[13]对所有资料的预测均偏小。其中, 如前文所述, 采用 Wang 等^[23]实测资料作为率定资料可能是导致 Bayram 公式^[3]和 MH-Kamphuis 公式^[4]预测偏小的主要原因。赵今声公式^[18]预测显著偏小则表明, 公式中输沙率随波陡和粒径呈非单调变化规律的可信度进一步降低。van Rijn 公式^[13]预测显著偏小则表明, 采用数学模型预测点作为公式率定资料并不合理。

(3) 综合全部实测资料, 由于孙林云公式^[9]对原型和模型 2 种尺度、原型沙和轻质沙 2 种泥沙类型的沿岸输沙资料吻合程度均较高, 统计得到 S_{rms} 为 0.67, 0.7~1.4 倍、0.5~2 倍和 0.25~4 倍关系占比可分别达到 42%、71% 和 97%。其他公式对室内轻质沙的吻合性均不理想, 因此整体预测水平也相对较低。CERC 公式^[17]和 Kamphuis 公式^[21]的整体表现水平相近, 但 Kamphuis 公式^[21]对室内原型沙的吻合性较好。赵今声公式^[18]、Bayram 公式^[3]、MH-Kamphuis 公式^[4]和 van Rijn 公式^[13]的整体表现属于同等水平, 预测偏差均较大。

基于偏差系数对比分析, 与其他公式相比, 孙林云公式^[9]将沿岸输沙率预测精度提高了 36%~73%。

3.3 分析与讨论

单就现场尺度而言, CERC 公式^[17]、Kamphuis 公式^[21]和孙林云公式^[9]的预测表现总体接近, 三者均适用于现场尺度的沿岸输沙率预测; MH-Kamphuis 公式^[4]和 van Rijn 公式^[13]的预测水平大致相当, 2 个公式预测值总体偏小一些, 在工程实际应用中偏于不安全; 赵今声公式^[18]和 Bayram 公式^[3]的预测精度最低, 公式

预测值偏小程度较大。

对于室内模型尺度实测资料, 仅孙林云公式^[9]预测吻合程度较高, 并且预测精度与现场资料预测结果相当, 反映出孙林云公式可靠性较高、适用范围广, 可同时反映原型和模型 2 种尺度沿岸输沙规律。

综上所述, 孙林云公式^[9]实现了对原型和模型 2 种尺度泥沙运动规律的统一, 与其他代表性沿岸输沙率公式相比具有更高的预测精度和更广的适用范围, 推荐用于推导沙质海岸沿岸输沙模型相似律比尺关系。

4 结 论

选择了 CERC 公式、赵今声公式、Kamphuis 公式、孙林云公式、Bayram 公式、MH-Kamphuis 公式和 van Rijn 公式共 7 个国内外代表性沿岸输沙率计算公式, 通过收集现场原型沙、室内原型沙和室内轻质沙等多种实测资料, 定量检验了各公式的计算精度, 讨论了各公式的适用范围。结论如下:

(1) CERC 公式和 Kamphuis 公式适用于现场原型沙预测, 但对室内轻质沙预测的偏离程度较大。

(2) MH-Kamphuis 公式和 van Rijn 公式预测水平大致相当, 对各种实测资料的预测均总体偏小。

(3) 赵今声公式和 Bayram 公式的预测精度最低, 预测偏小程度较大。

(4) 孙林云公式对各项实测资料的吻合性均较好, 总体具有更广的适用范围和更高的预测精度, 实现了原型和模型 2 种尺度、原型沙和轻质沙 2 种类型泥沙运动规律的统一, 推荐用于推导沙质海岸沿岸输沙模型相似律比尺关系。

参考文献:

- [1] 王宁舸, 韩信, 孙波等. 沙质海岸沿岸输沙率计算方法研究进展[J]. 海洋工程, 2023, 41(6): 171-185. (WANG N G, HAN X, SUN B, et al. A review on longshore sediment transport rate formulas in sandy coast[J]. The Ocean Engineering, 2023, 41(6): 171-185. (in Chinese))
- [2] SANIL KUMAR V, ANAND N M, CHANDRAMOHAN P, et al. Longshore sediment transport rate: measurement and estimation, central west coast of India[J]. Coastal Engineering, 2003, 48(2): 95-109.
- [3] BAYRAM A, LARSON M, HANSON H. A new formula for the total longshore sediment transport rate[J]. Coastal Engineering, 2007, 54(9): 700-710.
- [4] MIL-HOMENS J, RANASINGHE R, van THIEL de VRIES J S M, et al. Re-evaluation and improvement of three commonly used bulk longshore sediment transport formulas[J]. Coastal Engineering, 2013, 75: 29-39.
- [5] 陈超, 张庆河. 总沿岸输沙率公式比较研究[J]. 泥沙研究, 2016(3): 9-16. (CHEN C, ZHANG Q H. Comparison of bulk longshore sediment transport formulae[J]. Journal of Sediment Research, 2016(3): 9-16. (in Chinese))
- [6] 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京: 人民交通出版社, 2021. (Code of water transport engineering simulation test: JTS/T 231—2021[S]. Beijing: China Communications Press, 2021. (in Chinese))
- [7] KAMPHUIS J W, DAVIES M H, NAIRN R B, et al. Calculation of littoral sand transport rate[J]. Coastal Engineering, 1986, 10(1): 1-21.
- [8] 谢世楞, 牛广军. 沿岸输沙量的年变化[J]. 海洋学报, 1986, 8(1): 101-106. (XIE S L, NIU G J. Annual variation of sediment transport along the coast[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1986, 8(1): 101-106. (in Chinese))
- [9] 孙林云. 沙质海岸破波带沿岸输沙率问题的研究[M]. 南京: 南京水利科学研究所, 1992. (SUN L Y. Study on longshore sediment transport rate in breaking wave zone of sandy coast[M]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1992. (in Chinese))
- [10] MILLER H C. Field measurements of longshore sediment transport during storms[J]. Coastal Engineering, 1999, 36(4): 301-321.
- [11] WANG P, SMITH E R, EBERSOLE B A. Large-scale laboratory measurements of longshore sediment transport under spilling and plunging breakers[J]. Journal of Coastal Research, 2002, 18: 118-135.
- [12] ROGERS A L, RAVENS T M. Measurement of longshore sediment transport rates in the surf zone on Galveston Island, Texas[J]. Journal of Coastal Research, 2008, 2: 62-73.

- [13] van Rijn L C. A simple general expression for longshore transport of sand, gravel and shingle[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 90: 23-39.
- [14] 郭天润. 波浪作用下砂纸海岸的沿岸输沙研究[D]. 南京: 河海大学, 2009. (GUO T R. Investigation on longshore transport rate under waves[D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese))
- [15] 吴炳良. 波浪共同作用下沿岸输沙率研究[D]. 南京: 河海大学, 2010. (WU B L. Investigation on longshore transport rate under waves and currents[D]. Nanjing: Hohai University, 2010. (in Chinese))
- [16] 王宁舸, 杨长义, 张弛, 等. “一带一路”强输沙海岸建港关键技术研究[M]. 南京: 南京水利科学研究所, 2023. (WANG N G, YANG C Y, ZHANG C, et al. Research on key technology of harbor construction in “Belt and Road” strong longshore sediment transport coast[M]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2023. (in Chinese))
- [17] U S Army Corps of Engineers. Shore protection manual[M]. Vicksburg: Coastal Engineering Research Center, 1984.
- [18] 赵今声. 沙质海岸的泥沙运动, 港址选择和防冲防淤措施[J]. *港工技术通讯*, 1975, 12(6): 1-36. (ZHAO J S. Sediment movement, port site selection and erosion and siltation prevention measures in sandy coast[J]. *Port Engineering Technology*, 1975, 12(6): 1-36. (in Chinese))
- [19] LARRAS J. Cubes desable charries parla houle parallilment alacote[J]. *Annales des Ponts et Chaussées*, 1966, 11: 71-76.
- [20] 港口与航道水文规范: JTS145—2015(2022版)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2022. (Code of hydrology for harbour and waterway. JTS145—2015(2022 version)[S]. Beijing: China Communications Press, 2022. (in Chinese))
- [21] KAMPHUIS J W. Alongshore sediment transport rate[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1991, 117(6): 624-640.
- [22] DEAN R G. Heuristic models of sand transport in the surf zone[C]//*Dynamics in the Surf Zone*. Proc. Conf. Eng. Sydney: ASCE, 1973: 208-214.
- [23] WANG P, KRAUS N C, DAVIS R A. Total longshore sediment transport rate in the surf zone: field measurements and empirical predictions[J]. *Journal of Coastal Research*, 1998, 14(1): 269-282.
- [24] KOMAR P D, INMAN D L. Longshore sand transport on beaches[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(30): 5914-5927.

Comparison and analysis of different longshore sediment transport formulas*

WANG Ningge, TANG Lei, SUN Bo, XIN Wenjie

(*Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: The longshore sediment transport has been intensively investigated in the past nearly one hundred years and numerous formulas have been proposed to predict the longshore sediment transport rate. However, the accuracy and applicability of those formulas remain unknown. In this study, seven formulas that have been widely used are compared to find a formula with high accuracy and wide applicability. The observations of the prototype coast and the indoor wave pool testing data using both natural sand and light sand are collected, screened, and filtered. The seven formulas are applied to all the collected data, and the root mean square deviations (S_{rms}) are computed. The results show that the CERC formula and Kamphuis formula are more suitable for on-site use. The S_{rms} between the two formulas and the indoor testing data of the light sand is relatively high. The MH-Kamphuis formula and van Rijn formula generally underestimate the measured data. The Zhao Jinsheng formula and Bayram formula have relatively high S_{rms} . The Sun Linyun formula turns out to have relatively high prediction accuracy. The S_{rms} for the Sun Linyun formula is 36%—73% lower than other formulas. The Sun Linyun formula shows a higher overall agreement with the measurements of both natural and light sand, demonstrating its potential use in model similarity laws.

Key words: longshore sediment transport rate; calculation formula; natural sand; light sand

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52101310).