

Doi :10.11840/j.issn.1001-6392.2018.02.009

# 海岸破波带内水底悬沙浓度形成机理实验研究

张洋, 邹志利, 薛武山, 孙大鹏

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘 要:**通过大尺度水槽波浪引起泥沙悬移的动床模型实验,研究了沙坝海岸破波带内水底悬沙浓度形成机理,通过比较时间平均水底悬沙浓度与时间平均水底波浪水质点动能或时间平均水底湍动能之间的相关性,论证了利用时间平均湍动能比利用时间平均波浪水质点动能计算时间平均水底悬沙浓度更为适用,并提出了以上时间平均水底悬沙浓度与水底湍动能之间的关系也可以用来近似表达时间变化的水底悬沙浓度与时间变化的水底湍动能之间的关系。研究针对规则波、波群和不规则波 3 种波浪形态进行,并分别对破波带内的爬坡区、内破波区和沙坝区 3 个区域实验结果进行讨论。

**关键词:**破波带;波浪形态;悬沙浓度;湍动能;沙坝

中图分类号:TV149.2

文献标识码:A

文章编号:1001-6932(2018)02-0181-11

## Experimental study on the formation mechanism of bottom suspended sediment concentration in surf zone

ZHANG Yang, ZOU Zhi-li, XUE Wu-shan, SUN Da-peng

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** To study the formation mechanism of bottom suspended sediment concentration in surf zone, a series of experiments were conducted in a large scale wave flume for the wave conditions of regular wave, wave group and irregular wave. The correlation of bottom suspended sediment concentration with the wave kinetic energy or the turbulent kinetic energy near bottom are examined. The results show that the bottom suspended sand concentration which can be calculated in terms of the pick-up function correlates better to the turbulent kinetic energy at bottom, which contain both the wave breaking effect and bottom boundary turbulent flow effect, than to the kinetic energy of wave flow, which is a representation of the bottom shear stress. Based on this result, the superiority of the formula for the bottom concentration in terms of wave energy dissipation to that in terms of bottom shear stress is verified.

**Keywords:** surf zone; wave type; suspended sediment concentration; turbulent kinetic energy; sand bar

海岸泥沙运动的突出特征是受破碎波浪影响。海岸破碎波浪使水底泥沙悬移或层移而形成高浓度含沙量,悬移的泥沙在破波带内水流(水底回流或沿岸流、裂流等海岸环流)作用下,在垂直海岸方向和沿岸方向输移,从而形成沙坝、沙嘴和连岛沙洲等复杂海岸地貌形态(邹志利,2009;Dronkers,2009)。研究海岸破碎波作用下泥沙悬移的机理是研究上述海岸泥沙运动和地貌形态的关键问题。但

由于波浪破碎和泥沙运动的复杂性,目前对于破波带泥沙悬移机理的研究还存在较多不清楚之处。有关研究中表达水底悬沙浓度一般的方法还是基于水底剪应力(其正比于波浪水质点速度或水流速度的平方)(Nielsen,1986;Van Rijn,1993,2007),但也有研究结果表明,若采用波浪破碎生成的湍流来表达水底处悬沙浓度则更能反映破波带内泥沙悬移的特征(Steetzel,1990;Mocke et al,1993)。

收稿日期:2017-08-12;修订日期:2017-11-02

基金项目:国家自然科学基金(51079024)

作者简介:张洋(1989-),博士研究生,主要从事海岸泥沙研究。电子邮箱:1002307687@qq.com。

通讯作者:邹志利,博士,教授。电子邮箱:zizou@dlut.edu.cn。

此外, 研究也发现破波带内悬沙的水平对流作用也可能使得悬沙浓度不只与当地流态有关 (Yoon et al, 2012), 但关于此贡献的定量结果还没有得到。

本研究通过物理模型实验研究破波带内水底悬沙浓度形成机理, 即对于水底泥沙冲淤强度有关因素 (波浪水质点速度、湍流能量) 的影响进行了定量研究, 给出了时间平均水底悬沙浓度与波浪水质点动能相关或者与湍流能量相关的条件。分析针对规则波、波群和不规则波 3 种波浪形态, 并对破波带内爬坡区、内破波区和沙坝区的 3 个分区进行了讨论。根据分析结果讨论了适合于时间平均水底悬沙浓度计算公式的适用性, 包括将其扩展到时间变化水底悬沙浓度的可行性。

## 1 实验内容

实验在大连理工大学海岸及近海工程国家重点实验室的大尺度波浪水槽进行。水槽长 60 m、宽 4.0 m、高 2.5 m, 实验平底处水深为 2.0 m。水槽一端配置推板式造波机, 另一端为天然沙构成的海岸模型, 见图 1 (a), 水槽中间加入两水泥隔离墙将海岸模型限制在宽度为 1.0 m 的范围, 以保证实验的垂向二维特征。海岸模型由中值粒径  $D_{50}=0.25$  mm

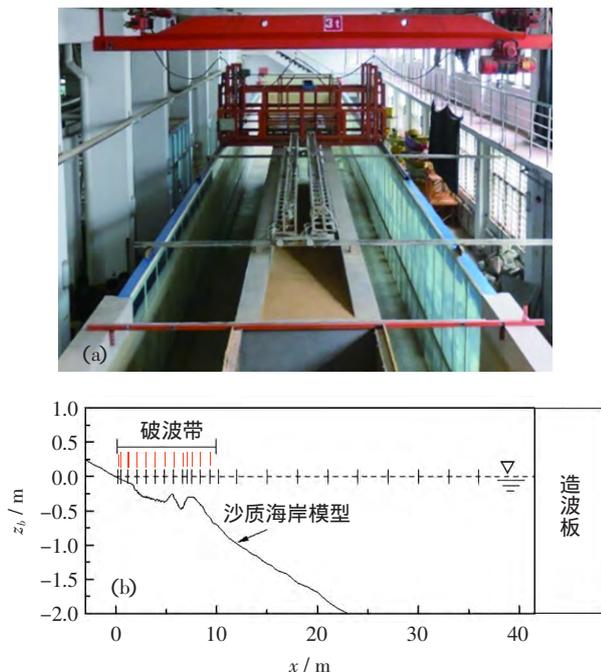


图 1 实验水槽及实验布置(a)、实验海岸剖面及测点位置(b) 黑色竖线为浪高仪, 红色竖线为流速和悬沙浓度测量断面。造波板位于  $x=41.5$  m

的天然沙组成, 模型坡脚距离造波板 18.5 m, 总长 26 m, 沙层厚度 0.4 m, 初始剖面为 1:10 的平面斜坡。实际剖面取决于实验过程的塑造。取坐标原点为海岸剖面与静水线的交点 (不同波况原点位置不同),  $x$  坐标轴离岸方向为正,  $z$  坐标轴垂直向上为正。

为了考虑波浪形态的影响, 实验波浪包括规则波、波群和不规则波 (规则波可以看作调制系数为零的波群)。波群调制系数  $\delta$  取为 0.5, 其波面升高由下式确定

$$\eta(t) = A(t) \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (1a)$$

$$A(t) = a[1 + \delta \sin\left(\frac{2\pi}{T_c}t\right)] \quad (1b)$$

式中  $a$  和  $T$  分别为波群中短波波幅和周期;  $T_c$  为波群周期,  $T_c = nT$ ,  $n$  为波群中短波的个数, 实验中取  $n = 10$ 。不规则波生成谱采用 JONSWAP 谱, 谱峰因子  $\gamma = 3.30$ 。表 1 给出了实验的波浪要素。

表 1 实验波浪要素

波浪类型	$H_{ms}$ / m	$T$ / s	$T_c$ / s	$\delta$
规则波	0.34	3.3		
波群	0.34	3.3	33	0.5
不规则波	0.2	2.2		

为了测量波面升高, 由距造波板 5.5 m 到波浪破碎点布置 10 个浪高仪, 从破碎点到岸线布置 12~13 个 (依赖于测量波况) 与流速和悬沙浓度测量剖面同位置的浪高仪。前者位置见图 1 (b) 中破波带外测点标记, 后者位置见图 1 (b) 中破波带内测点标记。波面升高采用天津水运工程科学研究院生产的电容式浪高仪测量。

流速、悬沙浓度和波面升高采取同点同步测量 (图 2) 以便进行同步时域分析。为了测量流速和悬沙浓度的垂向分布, 从岸线到沙坝区布置了 12~13 个垂向测量断面 (见图 1 (b) 红色竖线)。每个断面布置垂向间隔为 0.5~10 cm 的 3~8 个测点 (根据当地静水水深确定, 水深小则布点密度大, 见图 3, 流速和悬沙浓度测点具体位置见附录附表 1-3)。每个测点同时布置流速仪 (ADV) 和浊度仪 (OTS) 同点同步测量流速和悬沙浓度。流速仪为 Nortek 生产的 Vectrino 三维多普勒流速仪 (探头为侧向和竖向型), 测量精度为测量值的  $\pm 0.5\% \sim \pm 1$  mm/s。浊度仪为日本东京测量株式会社生产的

PCT-2503 光学浊度仪，测量精度为±0.02 g/L。

海岸地形采用武汉大学研制的 URT-III 三维动态底床地形测量仪测量，测量方式为超声式。地形测量仪测量范围为从静水岸线到破波点的地形，测量间距为 0.01 m。对于静水线以上以及破波点外地形，利用直尺进行人工测量，测量间距为 0.1 m。



图 2 多普勒流速仪 (ADV) 和光学浊度仪 (OTS)

每一波况的实验过程是，首先将波浪作用于海岸模型 4 小时形成平衡沙坝剖面并测量平衡剖面地形，然后测量平衡剖面的波浪以及各测点流速和悬沙浓度。测量分组进行，每一波况共作用 17-19 组波浪 (波浪作用组次数目依赖于各波况流速和悬沙浓度测点数量，见附表 1-3)。每组波浪作用 40 min，共包括 730 个 (规则波和波群) 或 1 090 个 (不规则波) 短波。各组的测量在波浪作用海岸 10 min 之后开始，以使得泥沙起动并达到平衡状态。各测点测量时间为 11min，并将其作为分析结果的样本长度。

图 3 给出规则波、波群和不规则波 3 种波况各测量断面上的悬沙浓度时均值  $\bar{C}(z)$  的测量结果。为了分析  $\bar{C}(z)$  沿空间分布规律，根据水底地形特征将破波带分为 3 个不同形态的区域，即爬坡区、内

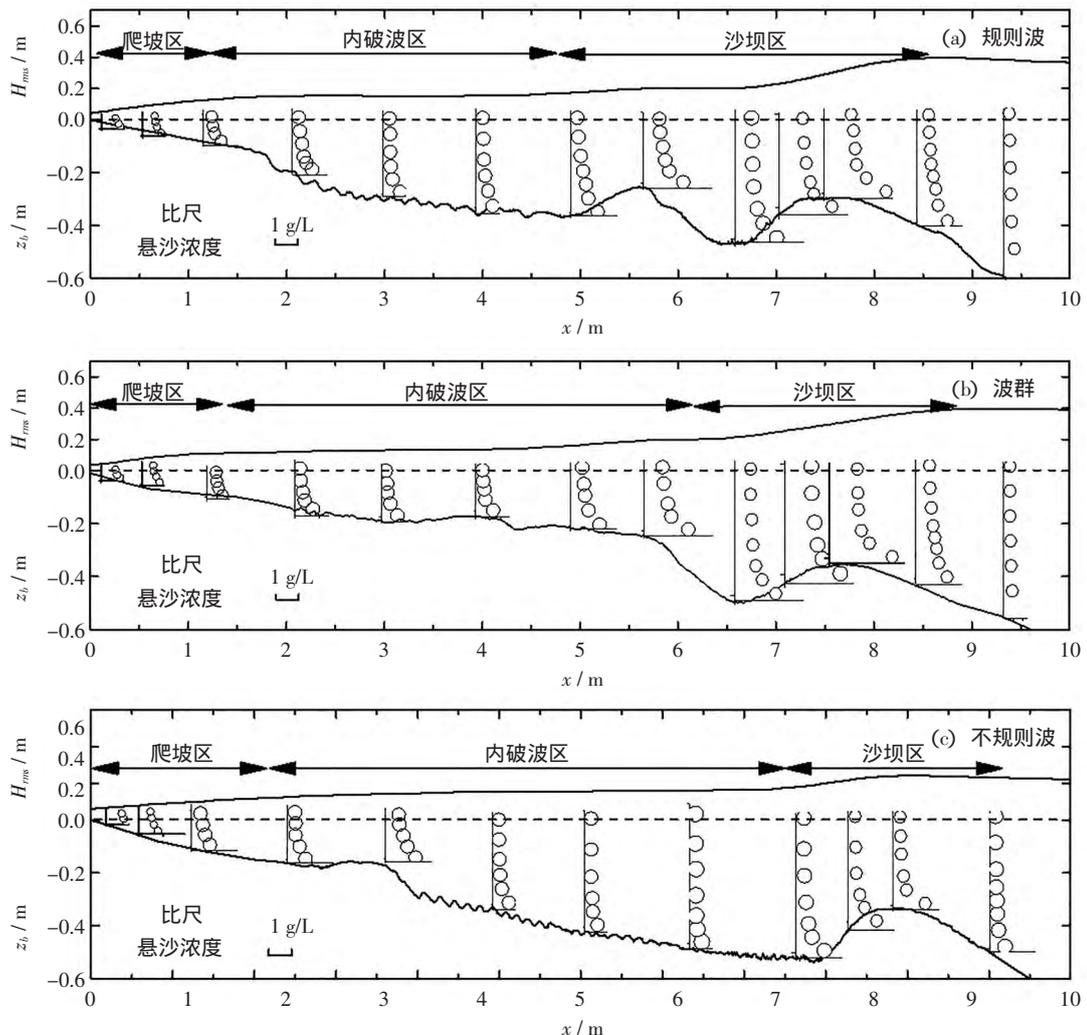


图 3 时间平均悬沙浓度空间分布

破波区和沙坝区。爬坡区的特征是受波浪上爬和下落运动的影响,存在波浪爬坡回落所形成的靠近岸线的泥沙淤积地形,悬沙沿水深分布呈现幂函数型;沙坝区是波浪开始破碎所产生的沙坝和凹槽所在区域,该区域存在波浪以卷破波形式破碎产生的较大湍流,其对水底冲击作用强烈,因而对泥沙悬移和运动影响较大,悬沙沿水深分布也呈现幂函数型;内破波区则是位于爬坡区和沙坝区之间的区域,该区域波浪破碎处于饱和状态(破碎波波高受水深控制),悬沙沿水深分布较爬坡区和沙坝区更为不均匀,呈现出指数型分布。由于上述3个区域波浪运动状态不同,因此悬沙的分布和产生机理也存在差异,所以在下面的讨论中将分别考虑这3个区域的情况。

## 2 时均水底悬沙浓度生成机理

影响图3中水体含沙量的关键因素之一是水底悬沙浓度 $C_a$ (悬沙参考浓度)。波浪垂向速度以及湍流引起的垂向扩散作用使水底泥沙可以向上扩散,这样水底悬沙浓度的大小将决定整个水深含沙量的大小。本研究的目的是通过实验中得到的水底悬沙浓度 $C_a$ 、波浪水质点速度和湍流速度(其形成湍动能 $k_e$ 的影响)的测量结果,来研究 $C_a$ 与后两者之间的依赖关系,从而得到 $C_a$ 的产生机理。分析中,将 $C_a$ 取为最靠近水底测点的悬沙浓度,该距离为0.5 cm,对应的波浪水质点速度和湍流速度也取为同一位置处的ADV的测量结果。

影响 $C_a$ 的有关因素可从以下水深平均和湍流周期平均的悬沙输移方程(可由沿水深积分的泥沙浓度输移方程得到)看出

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = -\frac{1}{h}(D_b - E_b) \quad (2)$$

式中 $C$ 和 $U$ 分别为水深平均悬沙浓度和水平流速, $h$ 为静水水深; $E_b = (\overline{w'C'})_{z=0}$ 为泥沙扬动函数(也称为冲刷函数), $w'$ 和 $C'$ 分别为湍流周期波动垂向速度和悬沙浓度。该表达式中仅是将湍流脉动部分通过时间平均光滑掉(雷诺平均),波浪的波动部分还包含在其中。 $D_b$ 为泥沙沉降函数,由于沉降是由于泥沙在水底落淤引起,所以有表达式 $D_b = \omega C_a$ ( $\omega$ 为沉速)。将 $D_b$ 表达式代入方程(2)可得 $C_a$ 表达式:

$$C_a = \frac{E_b}{\omega} - \frac{h}{\omega} \left( U \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial t} \right) \quad (3)$$

上式的左端中,第一项表示泥沙扬动函数 $E_b$ 对 $C_a$ 的贡献,即水底处的水流扰动会导致水底悬沙浓度 $C_a$ 的形成;第二项(括弧内两项)表示泥沙沿水平方向输移(相邻的两沿水深垂直断面输沙通量存在差别 $U \partial C / \partial x \neq 0$ ),加上水体含沙能力的改变(水深平均含沙量随时间变化 $\partial C / \partial t \neq 0$ )对水底悬沙浓度 $C_a$ 的贡献,即二者的不平衡会导致泥沙向水底的沉降或水底泥沙的悬移。式中 $C_a$ 分成两部分: $C_a = \bar{C}_a + \tilde{C}_a$ ,其中 $\bar{C}_a$ 为时间平均部分, $\tilde{C}_a$ 为随时间波动部分。时间平均部分 $\bar{C}_a$ 是通常人们在一般的波浪平均模型所研究的对象,而时间波动部分 $\tilde{C}_a$ 在目前研究中关心的还不多,但其对于研究水底泥沙悬移机理是重要的,是需要考虑的对象。本节给出 $\bar{C}_a$ 产生机理的分析,而 $\tilde{C}_a$ 产生机理的分析将在下一节给出。

为了分析时均水底悬沙浓度 $\bar{C}_a$ ,对方程(3)做时间平均,有 $\overline{\partial C / \partial t} = 0$ ,对波浪垂直入射海岸情况又有时间平均流速 $\bar{U} = 0$ (因为沿水深断面流量为零),在忽略水平扩散项(由波浪部分的乘积项 $\overline{\tilde{U} \partial \tilde{C} / \partial x}$ 产生,由于 $\tilde{U}$ 与 $\tilde{C}$ 相关性不大,所以该项的值相对较小)后可得方程:

$$\bar{C}_a = \frac{\bar{E}_b}{\omega} \quad (4)$$

上式表明,时间平均悬沙浓度 $\bar{C}_a$ 仅依赖于时间平均扬动函数 $\bar{E}_b$ ,即水底悬沙浓度 $\bar{C}_a$ 是由泥沙扬动函数 $\bar{E}_b$ 所产生。在目前的研究结果中, $\bar{E}_b$ 一般是由水底剪应力 $\tau_b$ 来表达的(Partheniades, 1965):

$$\bar{E}_b = M \left( \frac{\tau_{bw}}{\tau_c} - 1 \right) \quad (5)$$

式中 $M$ 为常数(单位:kg/(m<sup>2</sup>·s)); $\tau_c$ 为临界冲刷剪应力; $\tau_{bw}$ 为 $\tau_b$ 的幅值,其大小正比于水底边界层上方波浪水质点速度 $\tilde{u}$ 幅值 $u_m$ 的平方:

$$\tau_{bw} = \frac{1}{2} f_w \rho u_m^2 \quad (6)$$

式中, $f_w$ 为波浪摩阻系数, $\rho$ 为流体密度。由于式(6)可表达为 $\tau_{bw} = \rho f_w \bar{u}^2$ ,所以 $\bar{E}_b$ 依赖于单位质量波浪水质点动能 $\bar{u}^2/2$ 。这样,根据式(4), $\bar{C}_a$ 也是

依赖于波浪水质点动能。又由于水底剪应力所表征的是水底边界层湍流引起的作用力，所以以上结果的物理意义是：水底边界层产生的湍动能引起了对水底泥沙的扬动作用。这一作用也可从以下的表达式看出：

$$\bar{C}_a = \frac{q_b}{au_m} \quad (7)$$

上式中， $q_b$  是推移质输沙率， $a$  是推移质厚度。若将  $q_b$  用 Meyer-Peter 公式 (Meyer-Peter, 1948) 表达，

$$\phi = 8(\psi - \psi_c)^{3/2} \quad (8)$$

( $\phi = q_b / \sqrt{(s-1)gD^3}$ ， $\psi = \tau_{bw} / [\rho(s-1)gD]$  为希尔兹数， $s = \rho_s / \rho$ ， $\rho_s$  为泥沙颗粒密度， $g$  是重力加速度， $D$  为泥沙粒径， $\psi_c$  为临界希尔兹数)，且考虑  $\psi \gg \psi_c$  的情况，可知有  $q_b$  正比于  $\tau_{bw}^{3/2}$ ，代入式 (7)

可知  $\bar{C}_a$  正比于  $\tau_{bw}$ ，即  $\bar{C}_a$  依赖于水底剪应力或者波浪水质点动能。

以上  $\bar{C}_a$  依赖于水底剪应力这一结果的不足之处是其仅考虑了水底边界层湍动能对水底泥沙的扬动作用，事实上，在破波带内，波浪破碎产生的湍动能也可能作用到水底而引起泥沙扬动，若将这一作用考虑到  $\bar{E}_b$  的表达式中，则  $\bar{E}_b$  可采用下式表达 (Kobayashi et al, 2001)：

$$\bar{E}_b = \frac{W_B}{\rho g(s-1)h} \quad (9)$$

式中， $W_B = e_B D_B + e_f D_f$ ， $e_B$  和  $e_f$  为效率系数， $D_B$  为波浪破碎产生的波能耗散， $D_f$  是水底边界层产生的波能耗散，二者分别可采用下式计算 (Battjes et al, 1978)：

$$D_B = 2\alpha \frac{1}{T} EQ_b \quad (10a)$$

$$D_f = \frac{2\pi^2}{3} \rho f_w \left(\frac{H}{T}\right)^3 \frac{1}{\sinh^3 kh} \approx \frac{8\pi}{3} f_w \gamma_b \sqrt{\frac{h}{g}} \frac{E}{T^2} \quad (10b)$$

式中  $\alpha$  为大小接近 1 的常数， $T$  为波浪周期， $E = \rho g H^2 / 8$  为波能， $Q_b$  为波浪破碎概率， $H$  为波高， $k$  为波数， $\gamma_b = H/h$  为波浪破碎指标。式 (9) 不仅考虑了水底边界层湍流产生的泥沙扬动作用 (由  $D_f$  表达)，而且也考虑了波浪破碎产生的湍流对水底泥沙扬动作用 (由  $D_B$  表达)，所以其比式 (5) 更能体现破波带内水流对泥沙扬动作用的特征。该

式也说明  $\bar{E}_b$  事实上正比于波能耗散，因为  $D_B$  和  $D_f$  分别代表了波能耗散的两个方面，即波浪破碎产生的波能耗散和水底摩擦产生的波能耗散。而这两个波能耗散都可通过靠近水底边界层的湍动能来代表，因这一湍动能既来自于水底边界层耗散的波能 (相当于式 (5) 所代表的波能耗散)，又来自于波浪破碎耗散的波能 (而不是如式 (5) 所示的仅来自于水底波浪动能耗散)。已有的研究表明，波浪水底边界层的上边界可取为泥沙层移运动的上边界，该边界一般距离水底有几个毫米的距离。Zanden 等 (2017) 根据大水槽实验流速和浓度断面扫描仪测量结果分辨出该边界在距水底约 0.005 m (5 毫米) 位置处。本文实验也在该位置进行悬沙浓度和流速的测量，所以该位置悬沙浓度结果可以作为水底处悬沙浓度  $\bar{C}_a$ 。而该位置流速测量结果给出的湍动能则可以作为反映产生  $\bar{C}_a$  的湍动能，或者波能耗散量。该湍动能  $\bar{k}_e$  可以通过下式计算

$$\bar{k}_e = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (11)$$

式中  $u'$ 、 $v'$  和  $w'$  分别为水平、沿岸方向和垂向湍流流速。应用以上  $\bar{C}_a$  和  $\bar{k}_e$  的测量结果可以研究  $\bar{C}_a$  与  $\bar{k}_e$  的相关性，这样可以验证公式 (9) 的适用性，同理也可研究  $\bar{C}_a$  与时间平均波浪水质点动能的相关性来验证公式 (5) 的适用性。这两个结果分别由图 4 和图 5 给出。

图 4 为规则波、波群和不规则波情况的  $\bar{C}_a$  (纵轴) 与时间平均单位质量波浪水质点动能  $\bar{W}$  ( $\bar{W} = \overline{u^2}/2$ ，横轴) 的相关性结果。从图中实验测点分布可以看出二者相关性：若实验点集中在一条斜线附近，则表明二者线性相关。图中实验点分别针对爬坡区、内破波区和沙坝区给出。由图可见，对 3 个波况  $\bar{C}_a$  与  $\bar{W}$  的相关性整体上是存在的，但规则波情况的沙坝区的实验点离散性很大，几乎不存在图中斜线所表达的变化趋势。为了表达图中实验点与图中斜线的接近程度，图中给出了 3 个波况拟合结果的决定系数  $r^2$ 。结果表明，不规则波最好 ( $r^2 = 0.83$ )，波群与其接近 ( $r^2 = 0.8$ )，规则波最差 ( $r^2 = 0.62$ )。后者结果最差的原因是由规则波情况沙坝区实验点的离散性较大所致，这是因为规则波情况波浪破碎更加集中，沙坝区卷破波产生的湍动能更

为强烈，其可以由水面直达水底，所以对水底泥沙悬移 ( $\bar{C}_a$  的产生) 具有不可忽略的影响，而横轴中的波浪水质点动能  $\bar{W}$  没有包含该部分能量，所以造成其与  $\bar{C}_a$  相关性结果变差，因此实验点表现为具有很大离散性。与此相对比，不规则波情况沙坝区实验点离散性变得比规则波情况的小，这是因为不规则波情况仅是大波在沙坝区破碎，而较小波在内破波区破碎，波浪破碎并不集中在沙坝区，所以在沙坝区  $\bar{C}_a$  与  $\bar{W}$  仍然具有较好相关性，但由于含有高强度的大波破碎，该相关性没有内破波区和爬坡区的好。

图 5 给出规则波、波群和不规则波情况的  $\bar{C}_a$  (纵轴) 与时间平均水底湍动能  $\bar{k}_e$  (横轴) 的相关性结果。由图可见，3 种波浪情况的爬坡区、内破波区和沙坝区的实验点都可以分布在一条斜线附近，并且比图 4 中实验点对斜线的接近程度要高得多，这可由拟合结果的决定系数  $r^2$  值看出：三个波况  $r^2$  的值都在 0.9 以上，图 4 中规则波情况沙坝区实验点的较大离散在这里是不存在的。

以上两图的结果表明， $\bar{C}_a$  与  $\bar{k}_e$  的相关性要明显高于  $\bar{C}_a$  与  $\bar{W}$  的相关性，所以由此可以推断采用式 (9) 计算  $\bar{E}_b$  比由式 (5) 计算  $\bar{E}_b$  精度更高，更适合整个破波带内 (包括爬坡区、内破波区和沙坝区)  $\bar{C}_a$  的计算，因为式 (9) 中计算  $\bar{E}_b$  的量  $W_b$  是直接与水底湍动能  $\bar{k}_e$  成正比的，即  $W_b$  既包含了水底边界层产生的能量耗散 ( $D_f$ ，其产生了边界层的湍动能)，又包含了波浪破碎产生的能量耗散 ( $D_B$ ，其产生了由水面向水底扩散的湍动能)，而式 (5) 仅包含了水底边界层产生的湍动能的贡献，即仅与水底剪应力有关 (水底剪应力是边界层湍流流动对泥沙作用力的度量，也是水底边界层消耗水流能量的度量，即与  $D_f$  有关)，而不包含波浪破碎产生湍流的贡献。但是式 (5) 的不适用性主要体现在沙坝区，而在爬坡区和内破波区还能给出具有一定精度的结果，这表明仅考虑水底边界层湍动能对  $\bar{C}_a$  的贡献也有一定的适用性。其原因是爬坡区和内破波区，波浪破碎强度减弱，特别是破碎波湍动能直达水底的穿透能力较弱 (波浪破碎不存在卷破)，波

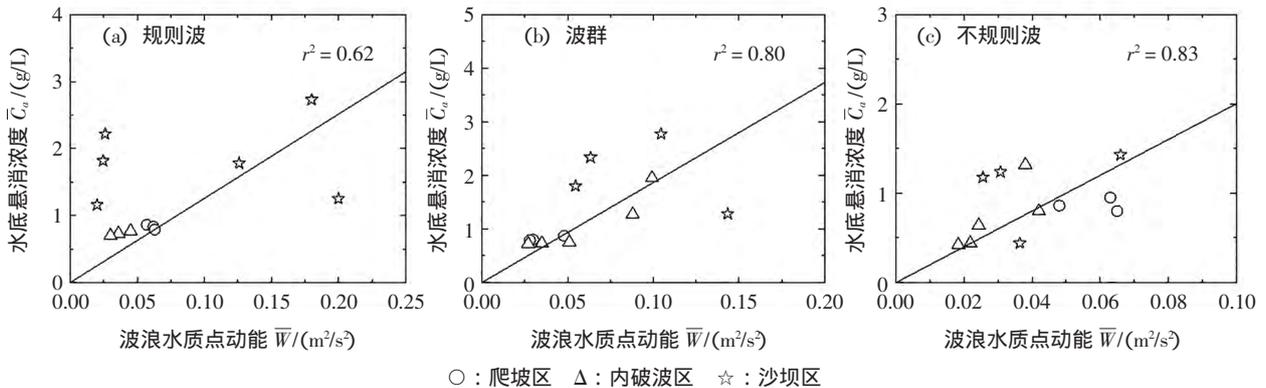


图 4 时间平均水底悬沙浓度  $\bar{C}_a$  和水底波浪水质点动能  $\bar{W}$  拟合直线

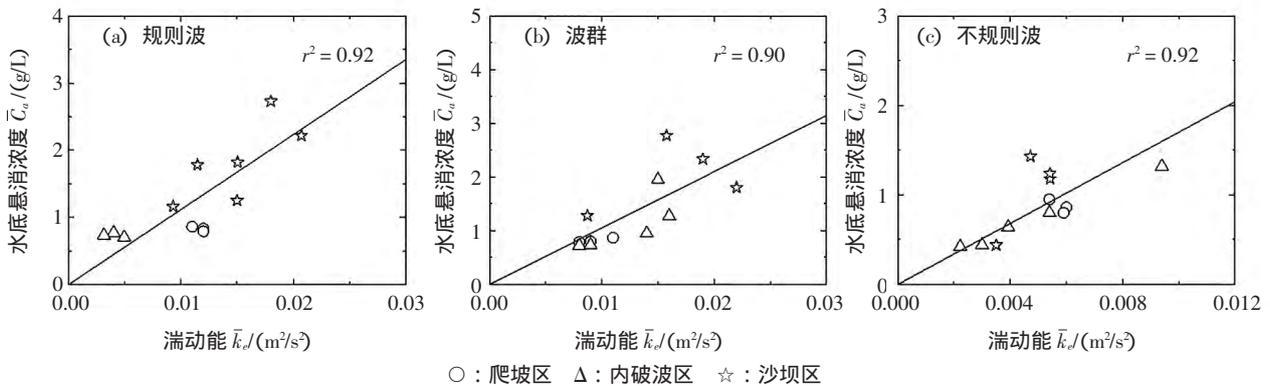


图 5 时间平均水底悬沙浓度  $\bar{C}_a$  和水底湍动能  $\bar{k}_e$  拟合直线

浪破碎产生湍动能对 $\bar{C}_a$ 贡献所占比例减小，所以式(5)仅考虑水底边界层湍流的贡献也是具有一定近似程度的。

Zanden 等(2017)仅针对规则波情况实验结果研究了 $\bar{C}_a$ 与 $\bar{W}$ 、 $\bar{k}_e$ 相关性。他们的结果表明在内破波区水底悬沙浓度 $\bar{C}_a$ 与 $\bar{W}$ (或者 $\bar{k}_e$ )具有很好相关性(实验点离散性较小，他们也给出了破波带外的实验结果，离散性也较小)。但在沙坝区的实验点远远偏离内破波区的实验点，沙坝区不能用内破波区的 $\bar{C}_a$ 对 $\bar{W}$ (或者 $\bar{k}_e$ )的拟合直线来表达 $\bar{C}_a$ 对 $\bar{W}$ (或者 $\bar{k}_e$ )的相关性。本文的沙坝区结果虽然也表现出较大离散性，但没有 Zanden 等(2017)的结果离散性大(无论是 $\bar{C}_a$ 与 $\bar{W}$ 还是 $\bar{k}_e$ )。但从趋势上来说，本文结果与该研究结果是一致的，只是不同的实验条件使所得结果有所差别。

### 3 时变水底悬沙浓度生成机理

水底悬沙浓度 $C_a$ 时变部分 $\tilde{C}_a$ 可由式(3)来分析，但与上节时均水底悬沙浓度 $\bar{C}_a$ 仅由 $\bar{E}_b$ 决定(式(4))不同，因为 $\partial C/\partial t \neq 0$ 和 $U \neq 0$ ， $\tilde{C}_a$ 还与式(3)右端的 $U\partial C/\partial x + \partial C/\partial t$ 项有关，即不仅与当地水流作用 $\tilde{E}_b$ 有关，而且还与临近区域向本地的泥沙输移 $U\partial C/\partial x$ 有关，也与本地泥沙对该输移的响应 $\partial C/\partial x$ 有关。但后两者有抵消作用，二者之和的贡献可能并不占主要部分，若是这样，则 $\tilde{C}_a$ 主要取决于扬动函数 $\tilde{E}_b$ ，即 $\tilde{C}_a$ 仍然可以像 $\bar{C}_a$ 一样采用式(4)计算，即有

$$C_a = \frac{E_b}{\omega} \quad (12)$$

该公式中 $C_a$ 和 $E_b$ 是包含时间平均值和波动值的总的水底悬沙浓度和总的扬动函数。本节将通过论证 $\tilde{C}_a$ 与时变湍动能 $\tilde{k}_e$ 之间相关性来说明上式成立的条件( $\tilde{k}_e$ 于 $\tilde{E}_b$ 相关，即式(9)对时间变化 $\tilde{E}_b$ 也成立)，即式(3)中 $U\partial C/\partial x + \partial C/\partial t$ 项的贡献可以忽略的条件。

这里研究 $\tilde{C}_a$ 对 $\tilde{k}_e$ 依赖性的方法是：分析 $C_a$ 时间历程的峰值出现时刻与湍动能 $k_e$ 时间历程峰值

出现时刻的对应性，若二者出现时刻一一对应，则说明 $\tilde{C}_a$ 是由 $\tilde{k}_e$ (或 $\tilde{E}_b$ )直接激发产生，而与 $U\partial C/\partial x + \partial C/\partial t$ 项关系不大。与上节分析 $\bar{C}_a$ 产生机理方法不同的是，这里不再给出 $\tilde{C}_a$ 和 $\tilde{k}_e$ 如图4和图5的相关性曲线，而仅讨论二者时间历程峰值出现时刻的相关性。

图6-图8分别给出了规则波、波群和不规则波情况波面升高 $\eta$ 、水底湍动能 $k_e$ 和水底悬沙浓度 $C_a$ 的时间历程。为了讨论这些结果在破波带内不同位置的差别，图中结果分别针对爬坡区、内破波区和沙坝区(凹槽和坝峰)给出。因为波群和不规则波情况 $\tilde{C}_a$ 和 $\tilde{k}_e$ 不明显随短波周期波动，所以图中利用短波平均水底悬沙浓度 $\langle C_a \rangle$ 和短波平均湍动能 $\langle k_e \rangle$ 时间历程来研究波群和不规则波情况 $\tilde{C}_a$ 和 $\tilde{k}_e$ 特征。由图中结果可以看出，对规则波情况， $\tilde{k}_e$ 峰值的出现是由 $\eta$ 波峰破碎所引起， $\tilde{k}_e$ 与 $\eta$ 波峰出现时刻对应性在爬坡区和沙坝坝峰最好，在内破波区和沙坝凹槽较差； $\tilde{C}_a$ 峰值与 $\tilde{k}_e$ 峰值出现时刻对应关系与此类似。对波群情况，短波平均湍动能 $\langle k_e \rangle$ 峰值在内破波区与长波波峰对应，在爬坡区和沙坝区与长波波谷对应；悬沙浓度 $\langle C_a \rangle$ 较大峰值与湍动能 $\langle k_e \rangle$ 较大峰值出现时刻基本具有一一对应关系。对不规则波情况， $\langle k_e \rangle$ 峰值出现时刻与波面、悬沙浓度 $\langle C_a \rangle$ 峰值没有以上简单对应关系，但悬沙浓度 $C_a$ 与湍动能 $k_e$ 能量谱谱峰位置基本是对应的，后一结果在图9给出，所以在统计意义上(总能量分布上)也可以看作是 $\tilde{C}_a$ 和 $\tilde{k}_e$ 具有对应关系。

为了定量说明上述 $\tilde{C}_a$ 峰值与 $\tilde{k}_e$ 峰值对应关系，表2给出 $C_a$ 与 $k_e$ 的相关系数 $r_{kc}$ 。表中规则波情况相关系数是将各物理量时间历程滤掉湍流周期波动项然后做相关性分析得到的，波群和不规则波情况相关系数为将各物理量时间历程短波平均然后做相关性分析得到的。从表中可以看出，对规则波情况，内破波区和沙坝凹槽处 $C_a$ 和 $k_e$ 相关性较弱，对应的 $r_{kc}$ 值均较小( $r_{kc} = 0.104, 0.392$ )，而爬坡区和沙坝坝峰处 $C_a$ 和 $k_e$ 相关性较强，对应的 $r_{kc}$ 量值均较大( $r_{kc} = 0.451, 0.599$ )。这与上面所述图6中时间历程二者的峰值对应关系相符。对波群情

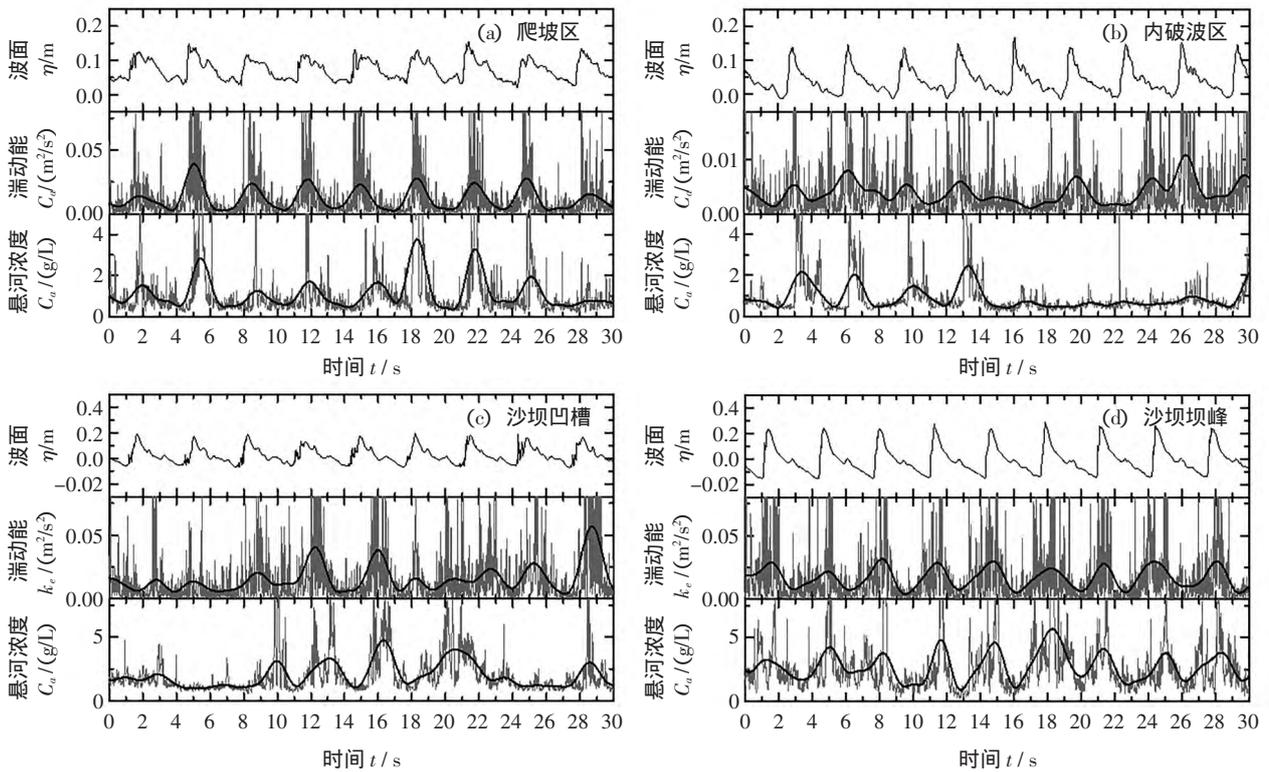


图6 规则波情况波面升高  $\eta$ 、湍动能  $k_e$  和水底悬沙浓度  $C_s$  时间历程 (黑色实线为滤波后值)

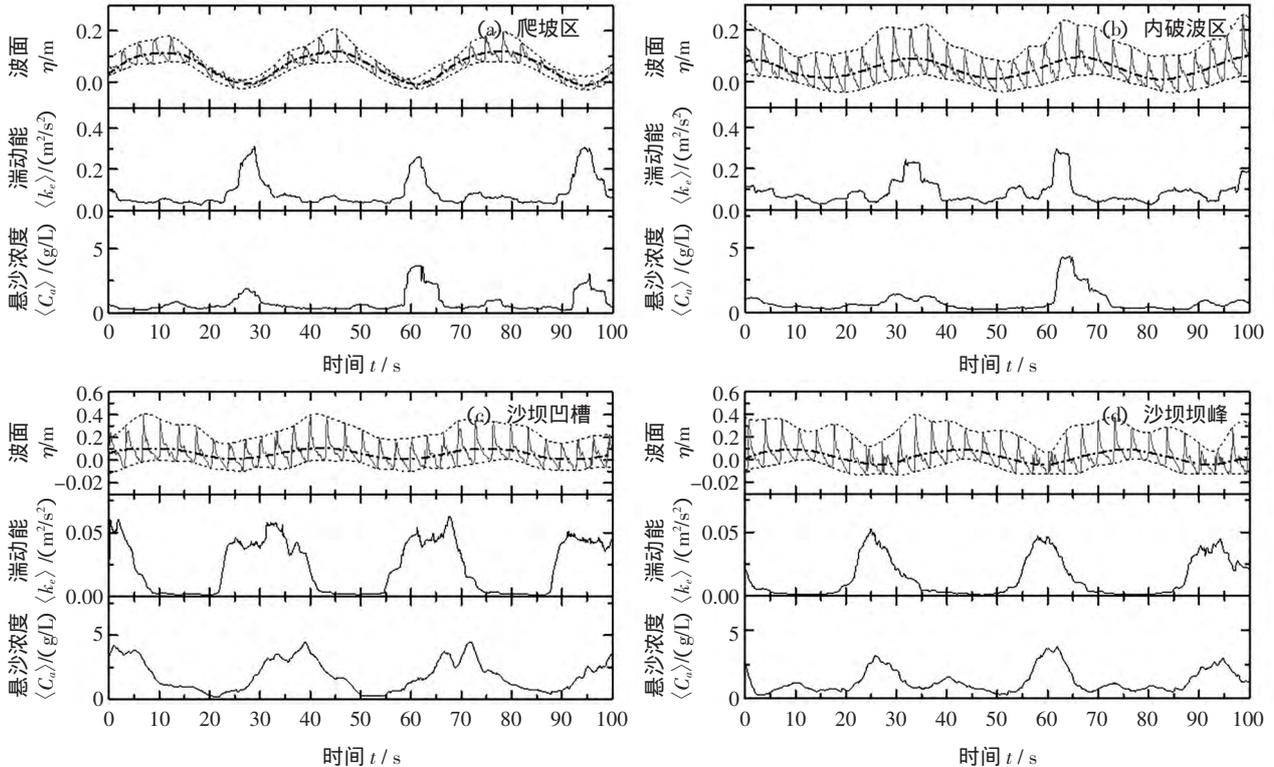


图7 波群情况波面  $\eta$  (虚点线为长波, 虚线为包络线)、平均湍动能  $\langle k_e \rangle$  和平均悬沙浓度  $\langle C_s \rangle$  时间历程

况, 在破波带内各区域  $r_{kC}$  均量值较大 ( $r_{kC} = 0.739, 0.429, 0.483, 0.808$ ), 表明波群情况  $\langle C_s \rangle$  对  $\langle k_e \rangle$

相关性在整个破波带内都很好, 这与上面图7中  $\langle C_s \rangle$  与  $\langle k_e \rangle$  峰值出现时刻相同是一致的。对不

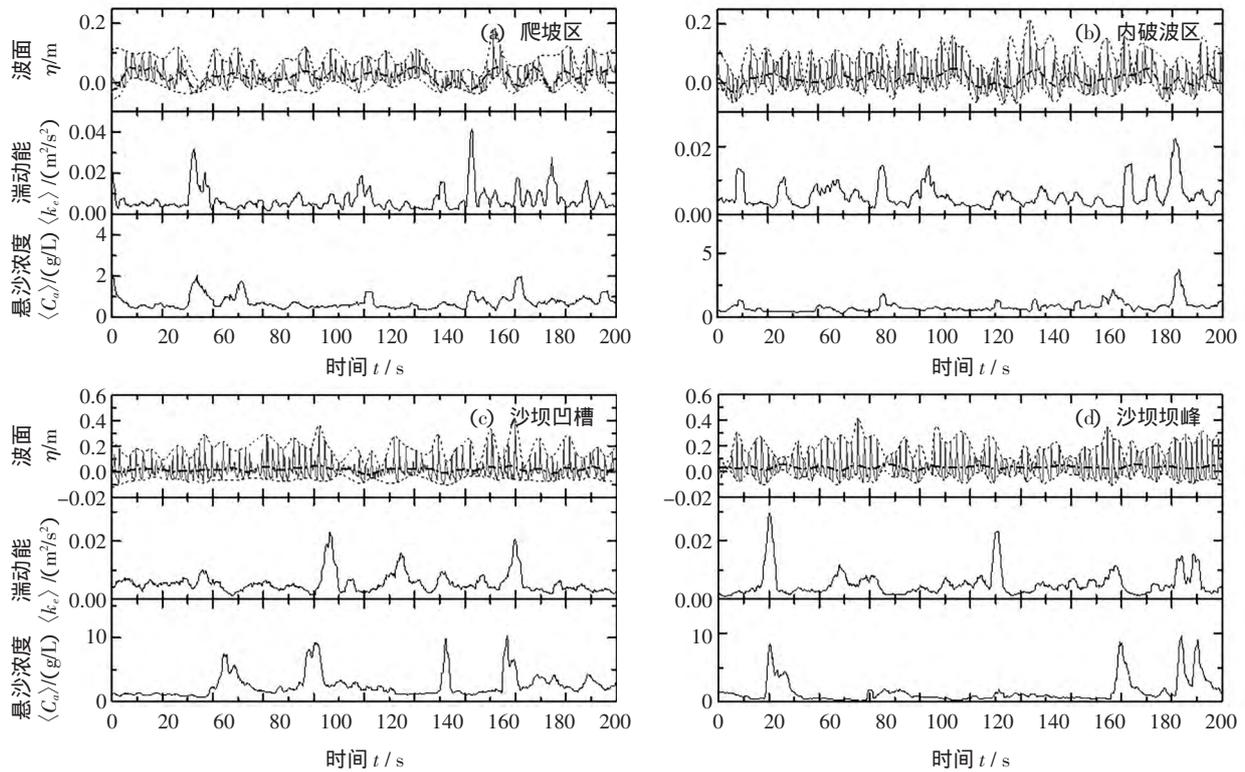


图 8 不规则波情况波面  $\eta$  (虚点线为长波, 虚线为包络线)、平均湍动能  $\langle k_e \rangle$  和平均悬沙浓度  $\langle C_a \rangle$  时间历程

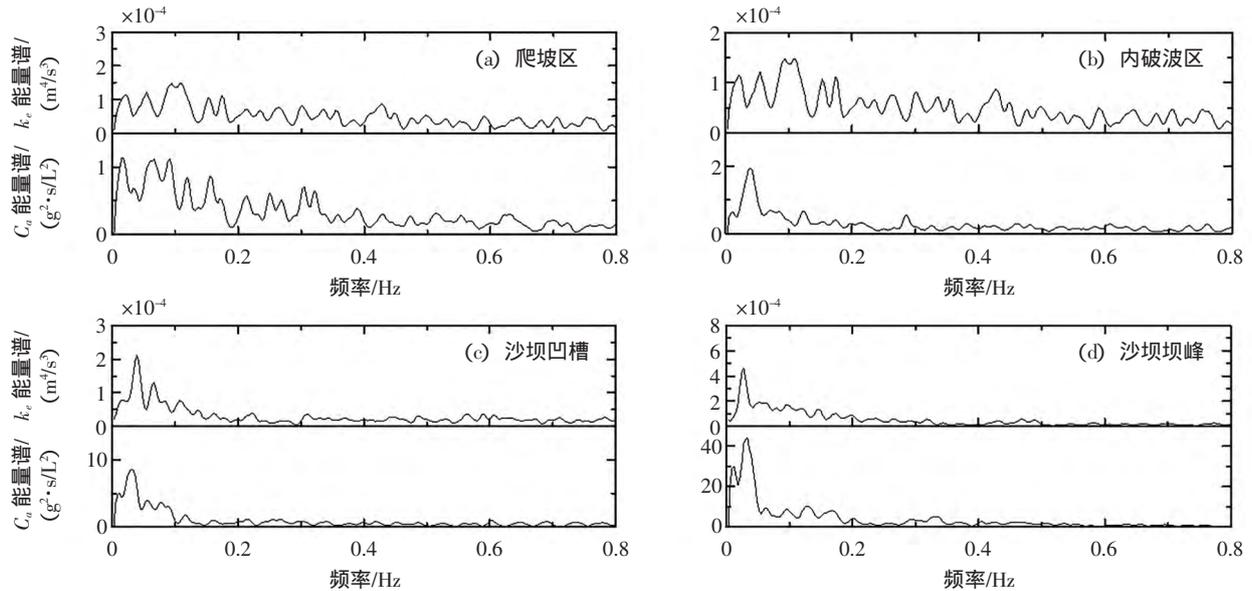


图 9 不规则波情况湍动能  $k_e$  和水底悬沙浓度  $C_a$  能量谱

规则波情况, 爬坡区和内破波区的  $r_{kC}$  也都有类似于规则波情况的较大值 ( $r_{kC} = 0.501, 0.428$ ), 沙坝坝峰处  $r_{kC}$  量值有所降低 ( $r_{kC} = 0.356$ ), 但沙坝凹槽处  $r_{kC}$  接近零。所以, 不规则波情况  $\langle C_a \rangle$  对  $\langle k_e \rangle$  相关性总体来看要比图 8 中时间历程所表达的要好, 且表现出  $r_{kC}$  随水深减小而增加的趋势。

表 2 水底悬沙浓度  $C_a$  和湍动能  $k_e$  相关系数  $r_{kC}$

波浪类型	爬坡区	内破波区	沙坝凹槽	沙坝坝峰
规则波	0.451	0.104	0.392	0.599
波群	0.739	0.429	0.483	0.808
不规则波	0.501	0.428	-0.087	0.356

注: 规则波情况  $r_{kC}$  为  $k_e$  与  $C_a$  相关系数; 波群和不规则波情况  $r_{kC}$  为  $\langle k_e \rangle$  与  $\langle C_a \rangle$  相关系数。

以上结果总的来看仍然可以认为 $\tilde{C}_a$ 与 $\tilde{k}_e$ 有近似对应关系,在工程计算中可以采用式(12)来近似计算规则波、波群和不规则波情况的水底悬沙浓度 $C_a$ (包括时间平均值和时间变化部分)。

## 4 结论

由于悬沙垂向扩散作用,水底悬沙浓度 $C_a$ 是决定水体含沙量的关键因素。本文通过大尺度水槽模型实验测量了水底悬沙浓度 $C_a$ 和流速的空间和时间分布,以此为基础研究了 $C_a$ 的产生机理。分析针对时间平均和时间变化水底悬沙浓度分别进行,对前者给出了其与波浪水质点动能(表征水底剪应力大小)、湍动能(表征破碎波能量耗散和边界层能量耗散)的相关性曲线,对后者分析了其峰值与湍动能峰值出现时刻对应性。以这两个结果为基础,讨论了合适计算 $C_a$ 的有关公式。主要结论如下:

(1) 给出了时间平均水底悬沙浓度 $\bar{C}_a$ 与时间平均波浪水质点动能 $\bar{W}$ 、时间平均湍动能 $\bar{k}_e$ 的相关性结果。结果表明, $\bar{C}_a$ 与 $\bar{k}_e$ 的相关性要大于 $\bar{C}_a$ 与 $\bar{W}$ 相关性,特别在沙坝区。这说明采用波浪耗散计算 $\bar{C}_a$ (式(9))比采用水底剪应力计算 $\bar{C}_a$ (式(5))更加合理。这一结果的原因是沙坝区内波浪卷破产生的湍流可以作用于水底,其对水底悬沙浓度 $\bar{C}_a$ 的贡献是主要的。

(2) 讨论了时间变化水底悬沙浓度 $\tilde{C}_a$ 峰值与湍动能 $\tilde{k}_e$ 峰值出现时刻的对应性,发现规则波情况 $\tilde{k}_e$ 峰值的出现是由波峰破碎所引起,二者对应性在爬坡区、内破波区和沙坝区有所差别, $\tilde{C}_a$ 峰值与 $\tilde{k}_e$ 峰值出现时刻对应关系与此类似。短波平均的波群的湍动能 $\langle k_e \rangle$ 峰值或与长波波峰对应(内破波区),或与长波波谷对应(爬坡区和沙坝区),悬沙浓度 $\langle C_a \rangle$ 较大峰值与湍动能 $\langle k_e \rangle$ 较大峰值出现时刻基本具有一一对应关系。不规则波的湍动能 $\langle k_e \rangle$ 峰值出现时刻与波面、悬沙浓度 $\langle C_a \rangle$ 峰值没有以上简单对应关系,但湍动能 $k_e$ 和悬沙浓度 $C_a$ 能量谱谱峰位置基本是对应的。鉴于以上结果,可以将 $\bar{C}_a$ 与 $\bar{k}_e$ 正比关系推广到 $\tilde{C}_a$ 与 $\tilde{k}_e$ 之间的关

系:即以下关系既可以用于 $\bar{C}_a$ 与 $\bar{k}_e$ 之间,也可以用于 $\tilde{C}_a$ 与 $\tilde{k}_e$ 之间

$$C_a = \frac{E_b}{\omega}$$

式中 $E_b$ 可通过 $W_B = e_B D_B + e_f D_f$ 来计算,见式(9)。

(3) 应用以上公式时要注意到该公式不同情况下的精度是不同的。对时间平均水底悬沙浓度 $\bar{C}_a$ 和时间平均水底扬动函数 $\bar{E}_b$ 该公式具有较高精度,但对时变部分 $\tilde{C}_a$ 对不同波浪形态具有不同精度:规则波和不规则波情况下精度不如波群情况下精度高。因为波群情况整个破波带内 $\langle C_a \rangle$ 与 $\langle k_e \rangle$ 有明显对应关系。而规则波情况仅在爬坡区和沙坝坝峰 $\tilde{C}_a$ 与 $\tilde{k}_e$ 有明显对应关系(二者相关系数 $r_{kc}$ 分别为0.451和0.599),但内破波区和沙坝凹槽情况对应关系较弱( $r_{kc}$ 分别为0.104和0.392);不规则波情况仅在爬坡区和内破波区 $\langle C_a \rangle$ 与 $\langle k_e \rangle$ 有明显对应关系( $r_{kc}$ 分别为0.501和0.428),在沙坝区 $\langle C_a \rangle$ 与 $\langle k_e \rangle$ 没有明显对应关系(凹槽和坝峰 $r_{kc}$ 分别为-0.087和0.356)。虽然不规则波情况 $\langle C_a \rangle$ 与 $\langle k_e \rangle$ 峰值没有明显对应关系,但 $C_a$ 和 $k_e$ 能量谱谱峰几乎一一对应。所以,利用上述公式计算 $\langle C_a \rangle$ 也可以达到一定精度。

## 附录:

附表1 规则波情况流速和悬沙浓度测点位置

测量断面位置 $x/m$	当地静水水深 $h/cm$	各测点距当地水底距离 $z'/cm$
0.2	2	0.5, 1, 2
0.5	5	0.5, 2, 3.5, 5
1.2	10	0.5, 3.5, 6.5, 10
2.1	20	0.5, 3.5, 6.5, 10, 15, 20
3	28	0.5, 5.5, 10.5, 16, 22, 28
3.9	30	0.5, 5.5, 10.5, 17, 23, 30
4.8	35	0.5, 5.5, 10.5, 16, 22, 28, 35
5.7	26	0.5, 5.5, 10.5, 15.5, 20.5, 26
6.6	42	0.5, 5.5, 10.5, 18, 26, 34, 42
7.05	34	0.5, 5.5, 10.5, 18, 26, 34
7.5	30	0.5, 5.5, 10.5, 16, 23, 30
8.4	35	0.5, 5.5, 10.5, 15, 20, 25, 30, 35
9.3	60	10, 20, 30, 40, 50, 60

附表 2 波群情况流速和悬沙浓度测点位置

测量断面 位置 $x/m$	当地静水 水深 $h/cm$	各测点距当地 水底距离 $z'/cm$
0.2	2	0.5, 1, 2
0.5	5	0.5, 2, 3.5, 5
1.2	10	0.5, 3.5, 6.5, 10
2.1	18	0.5, 3.5, 6.5, 12, 18
3	21	0.5, 5.5, 10.5, 15.5, 21
3.9	21	0.5, 5.5, 10.5, 15.5, 21
4.8	22	0.5, 5.5, 10.5, 16, 22
5.7	26	0.5, 5.5, 10.5, 15.5, 20.5, 26
6.6	45	0.5, 5.5, 10.5, 18, 27, 36, 45
7.05	40	0.5, 5.5, 10.5, 20, 30, 40
7.5	34	0.5, 5.5, 10.5, 18, 26, 34
8.4	40	0.5, 5.5, 10.5, 16, 22, 28, 34, 40
9.3	60	10, 20, 30, 40, 50, 60

附表 3 不规则波情况流速和悬沙浓度测点位置

测量断面 位置 $x/m$	当地静水 水深 $h/cm$	各测点距当地 水底距离 $z'/cm$
0.2	2	0.5, 1, 2
0.5	5	0.5, 2, 3.5, 5
1.2	10	0.5, 3.5, 6.5, 10
2.4	18	0.5, 3.5, 6.5, 12, 18
3.7	18	0.5, 3.5, 6.5, 12, 18
4.9	35	0.5, 5.5, 10.5, 18, 26, 35
6.1	43	0.5, 5.5, 10.5, 21, 32, 43
7.4	50	0.5, 5.5, 10.5, 20, 30, 40, 50
8.6	52	0.5, 5.5, 10.5, 20, 30, 41, 52
9.2	40	0.5, 5.5, 10.5, 20, 30, 40
9.8	32	0.5, 5.5, 10.5, 17, 24, 32
11	50	0.5, 5.5, 10.5, 18, 26, 34, 42, 50

## 参 考 文 献

- Battjes J A, Janssen J, 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Coastal Engineering*, 569–587.
- Dronkers J, 2009. *Dynamics of coastal systems*. World Scientific.
- Kobayashi N, Johnson B D, 2001. Sand suspension, storage, advection, and settling in surf and swash zones. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C5): 9363–9376.
- Meyer-Peter E, 1948. Formulas for bed-load transport. *Proc of Congress Iahr*.
- Mocke G P, Smith G G, 1993. Wave breaker turbulence as a mechanism for sediment suspension. *Coastal Engineering*, 2279–2292.
- Nielsen P, 1986. Suspended sediment concentrations under waves. *Coastal Engineering*, 10(1): 23–31.
- Partheniades E A, 1965. Erosion and Deposition of Cohesive Soils. *World Journal of Biological Psychiatry the Official Journal of the World Federation of Societies of Biological Psychiatry*, 2(4):190–192.
- Steezel H J, 1990. Cross-shore transport during storm surges. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(22).
- Zanden J V D, Hurther D, C aceres I, et al, 2017. Suspended sediment transport around a large-scale laboratory breaker bar. *Coastal Engineering*, 125: 51–69.
- Van Rijn L C, 1993. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Amsterdam: Aqua publications.
- Van Rijn L C, 2007. Unified view of sediment transport by currents and waves, II: Suspended transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6):668–689.
- Yoon H D, Cox D T, 2012. Cross-shore variation of intermittent sediment suspension and turbulence induced by depth-limited wave breaking. *Continental Shelf Research*, 47(10): 93–106.
- 邹志利, 2009. *海岸动力学*. 北京: 人民交通出版社.

(本文编辑 崔尚公)