

从频域分析波动输运过程的时均通量*

李 炎

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州)

收稿日期 1989年5月11日

关键词 悬沙输送, 共谱密度函数, 通量

提要 本文提出悬沙输运时均通量可在频域上用共谱密度函数表达。据此分析了长周期和12h, 6h等潮周期波动分量对河口、潮汐通道及浅滩区悬沙净输运的重要贡献。文章还讨论了它们的形成机制和从频域上分解扩散系数的可能。

低频流、潮流和波浪等具不同波动频率的环境因子, 究竟在非保守物质(例如悬浮泥沙)的净输运中有何作用, 从时域积分的常规计算显然无法解答这一问题。因此, Bowden, Fislicher 和 Dyer 等将含沙量、流速和水位的均值和脉动展开, 将输运方程分解为物理意义各异的若干次, 比较和分析其输送机制^[4]。本文在以往工作的基础上讨论进一步在频域上展开的方法。实例以及在分析环境因子与净输运相互关系上的意义。

本文引用1981年8月在长江口外设置的潜标阵中M₄站记录的底层流、浊度资料^[3]以及1983年在象山港进行的周日水文泥沙同步测验、1987年在钱塘水道进行的周日水文泥沙同步测验资料。

I. 时均通量 $\bar{F}(V, S)$ 的频域表达式

设现场某点实测悬浮泥沙含量和流速数据分别为随机过程 $S(t)$ 和 $V(t)$ 的测量, 同时也是平稳(各态历经)的, 可以用时间序列记录 $S(t)$ 和 $V(t)$ 分别表示, 则悬沙的时均通量由

$$\bar{F} = \frac{1}{T} \int_0^T S(t)V(t)dt \quad (1)$$

得出。比较 $S(t)$ 和 $V(t)$ 间的互相关函数^[2]

$$R_{SV}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T S(t)V(t+\tau)dt \quad (2)$$

当 T 足够大时, (1)式相当于时间滞后量 $\tau = 0$ 时的互相关函数。

$$R_{SV}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T S(t)V(t+0)dt \quad (3)$$

由于互相关函数可由谱域上的谱密度函数(包括共谱密度函数 $C_{SV}(f)$ 和重谱密度函数 $Q_{SV}(f)$)表达:

$$R_{SV}(\tau) = \int_0^\infty [C_{SV}(f)\cos 2\pi f\tau + Q_{SV}(f)\sin 2\pi f\tau]df \quad (4)$$

由(1), (3), (4)式得时均通量频域表达式:

$$\bar{F} = R_{SV}(0) = \int_0^\infty C_{SV}(f)df \quad (5)$$

(5)式表明, 时均通量 $\bar{F}$ 相当于共谱密度函数 $C_{SV}(f)$ 的频域积分。其中 $f = 0$ 处以 δ 函数出现的零频次是时均含沙量和时均流速的贡献, $f \neq 0$ 部分为各种含沙量和流速波动成份的贡献, 总的时均通量相当于各频段贡献的线性迭加。

由于量纲为 ML^{-2} 的共谱密度函数, 可由 $S(t)$ 和 $V(t)$ 两序列的富里哀变换

$$\left. \begin{aligned} S(f) &= a_s(f) - ib_s(f) \\ V(f) &= a_v(f) - ib_v(f) \end{aligned} \right\}$$

表示为:

$$C_{SV}(f) = a_s(f)a_v(f) + b_s(f)b_v(f) \quad (6)$$

* 国家海洋局第二海洋研究所苗青田、王康璿等提供数据, 谨此致谢。

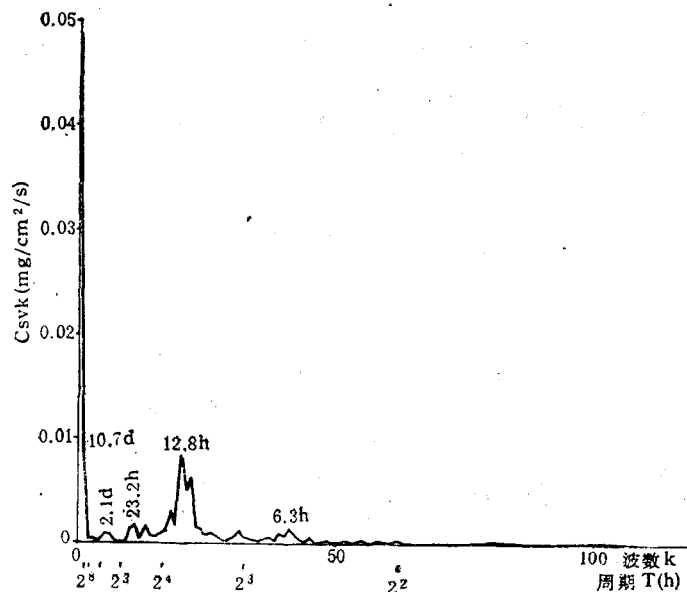


图 1 M₄ 站底层水流——悬沙共谱密度函数

Fig. 1 Cospectrum between water current and suspended sediment in lower layer at station M₄.

M₄, 31°16.25'N, 122°45.75'E; 水深47.3m; 起始: 1981年8月12日; 间隔: 15min; 历时: 256h; 测点高程: 离底100cm

或以流速、含沙量波幅谱和它们之间位相谱的形式表示为:

$$C_{sv}(f) = |V(f)| |S(f)| \cos \theta_{sv}(f) \quad (7)$$

(7)式确定了时均通量和流速、含沙量在频域上一个简单明了的数学关系——各频段所提供的时均通量,完全取决于该频段的流速、含沙量波幅以及它们之间的位相差。这一联系使分频段讨论各种特征频率的环境因素对时均通量的贡献成为可能。

对于实测的离散序列,(5),(7)式的离散化形式为:

$$\left. \begin{aligned} \bar{F} &= \sum_{k=0}^N C_{svk} \\ C_{svk} &= V_{ok} S_{ok} \cos \theta_{svk} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

当流速是平面二维矢量时,各频段对时均通量的贡献也为矢量,时均通量相当于它们的矢量和。

II. 不同尺度波成份对净输运的贡献

运用共谱密度函数从频域上表达时均通量

的最直接应用是比较不同尺度(频率)波动成份对净输运的贡献。

图1是长江水下三角洲外侧 M₄ 站底层测点的水流——悬沙共谱密度函数。该测点序列长 10.7d, 抽样间隔 15min, 波长覆盖范围从 0.5h 至 10.7d, 包括了潮频和部分低频波动。共谱密度函数的峰值出现在零频次、低频段的 10.7d, 2.1d 和潮频段的 24h, 12.8h, 6.2h 等项, 其间各项量级较低, 周期短于 4h 的高频部分量级普遍低。如果用峰值及附近项共谱密度函数之和表示峰值所代表频段形成的净输沙贡献, 其大小按“零频 > 12.8h 项 > 10.7d 项 > 24h 项 > 6.2h 项 > 2.1d 项”排列, 相对比例约为 50:25:9:3:2.5:1。

图2是若干周日水文泥沙测站(测点序列长 24h, 抽样间隔 1h)的共谱密度函数分布, 其中零频次, 12h 项和 6h 项量级较高, 但各成份的贡献因地而异。零频次在峡道型潮汐通道的输沙场中占绝对优势。以金塘水道为例, 零频次量级最大, 达到 $10^{-1} \text{kg/m}^2/\text{s}$, 量级为 10^{-2}kg/

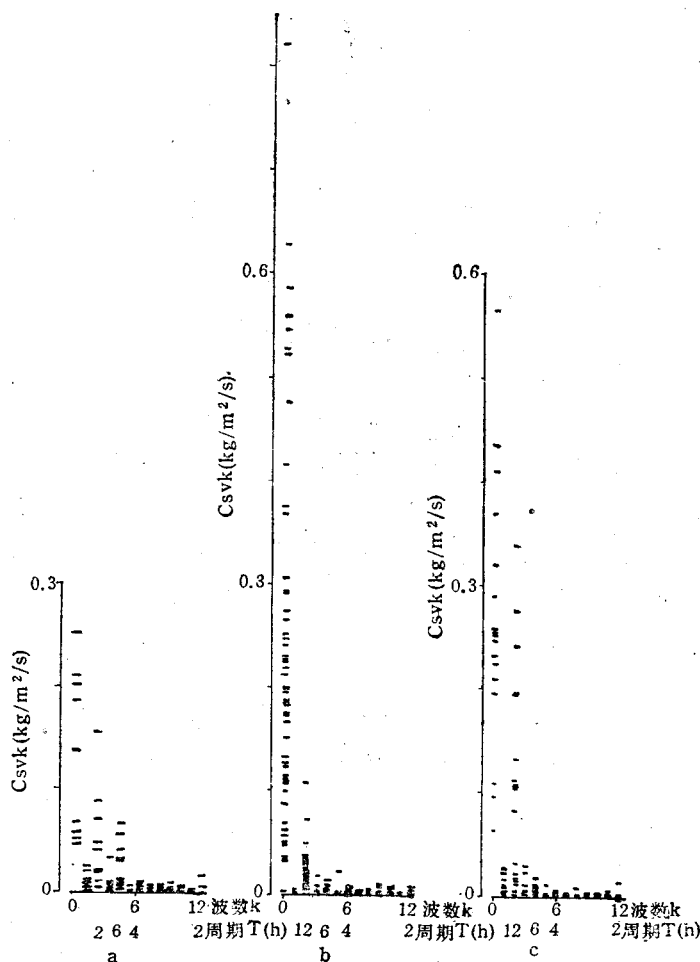


图 2 金塘水道,甬江口及象山港口各周日连续站水流——悬沙共谱密度函数

Fig. 2 Cospectrum between water current and suspended sediment estuary and Xiangshan Bay

- a. 象山港口 8311—8313, 1983 年 12 月 6—7 日; 测点数: 9; b. 金塘水道 J_1 — J_{10} , 1987 年 4 月 30 日—5 月 1 日, 测点数: 57; c. 甬江口外, J_{11} — J_{13} , 1987 年 4 月 29—30 日, 测点数: 18

m^2/s 的 12h 项次之, 其余各次均在 $10^{-3}\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ 或更低的量级。河口及浅水区中波动项量级明显提高。如甬江口外水深 5—8m 的 J_{11} , J_{12} , J_{13} 站, 12h 项量级也达 $10^{-1}\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$, 与零频次相当, 另外 6h 和 24h 项也有 $10^{-2}\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ 的量级。波动项提高的迹象也见于象山港口的潮汐汊道中。平均项与 12h, 6h 及 24h 等波动项的相对比例也接近 50:25:15:5。

由于海洋要素的波动与各种相应尺度的海洋环境现象密切相关。上述比较中出现的泥沙

净输送主要贡献项, 反映了海洋环境中存在着该尺度的主要输沙因子, 为概括和简化泥沙输运模型提供了实测依据。例如在峡道型潮汐通道, 仅考虑平均项(包括长序列时的低频次), 即仅考虑平均流场和泥沙含量分布的“平均流模型”已有一定可信度。加上 12h 项后, 模型已与实际情况较好拟合。但是在河口区, 浅水区和半封闭潮汐汊道口门, 必须充分注意 12h 和 6h 等波动的影响。此外, 周期数天的低频波动现象在净输沙中的贡献也有重要的影响。

III. 波动成份的输运机制

根据式(7),构成波动成份净输沙的第一个必要条件是流速和含沙量时序过程中具有相同频率(或周期)的波动分量。第二个必要条件,是该频率的流速——含沙量波动位相差满足其余弦不为零的条件。净输沙量的大小,随其流速波动振幅,含沙量波动振幅及两者位相差余弦的乘积变动。

在实测的潮流、悬浮泥沙序列中,上述第一个必要条件在潮频范围内成立。一般流速谱具有显著的12h周期分量,24h分量,6h分量为次。此外,低频流也占有一定地位。含沙量谱的潮频段各分量差异较小,一般以低频段为高,12h周期分量和6h周期分量也有较大的振幅。

然而,由于位相谱分布比较离散,第二个必要条件受到一定的限制。图3a表现了 M_4 站东分量自1波至119波等波动分量位相差的分布,尽管多数分量的位相差集中于 $30^\circ-60^\circ$ 和 $-30^\circ-60^\circ$ 之间,仍有相当一部分集中于 $\pm 90^\circ$,即位相差余弦接近零的区间内。图3b则

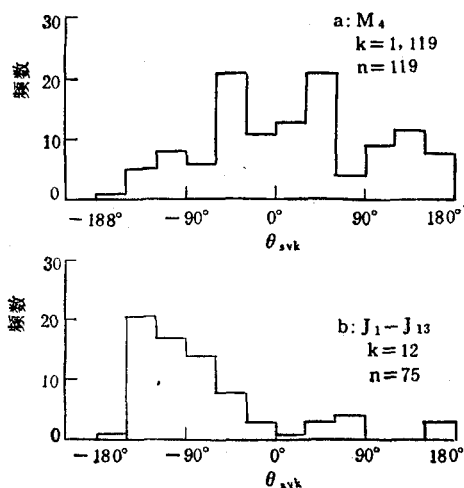


图3 位相差 θ_{sv} 分布直方

Fig. 3 Distribution of phase difference θ_{sv}

a. 长江水下三角洲外侧 M_4 站底层测点,各波动分量($k=1-119$)的统计(东分量); b. 浙江钱塘水道及甬江口 J_1-J_{13} 站各层12h周期波动分量的统计(平行水道分量)

表现了钱塘水道及甬江口13个站位中12h周期分量位相差分布,其中 $-120^\circ-150^\circ$ 为主要分布中心, $\pm 90^\circ$ 附近仍有一定的分布。上述谱域和空间的两个例子说明,浅海悬沙输运过程中存在着一部分流速——悬沙位相差的余弦接近零的波动分量,其净输沙效果远远小于往复搬运的数量,属“功率因素”很低的“无功波动”(这里简单借用了电工学的名词)。但大部分集中分布在“功率因素” $\cos \theta_{svk}$ 为0.5—0.87的范围内。

简单地从一维问题考虑,流速——悬沙位相差的象限决定了相应波动分量的输沙方向。表1列出了两者的对应关系,其中第一类分向相对流速的正方向(如东分量中的东向,平行岸线分量中的偏东向)而言,同向为“+”,反向为“-”;第二类方向则以悬沙空间梯度为参照,由高含量向低含量为正方向(+),反之为逆向(-)。根据该原则判断,钱塘水道各站的12h周期项净输沙以向内(涨潮流方向)和向高含沙带的输送为主(图3b)。而长江水下三角洲外侧 M_4 站各波动项的净输沙以向外海方向为主,并含有由高含量带向低含量带正向输送的趋势(图3a)。显然,在潮频和低频范围内,悬浮泥沙的净输送方向并不完全遵照扩散定律、沿着悬沙梯度方向。特别是在港汊和浅滩区,将出现占优势的逆向输送。这里必然存在着另外的机制。

表1 流速——悬沙波动分量的位相差及其净输沙方向

Tab. 1 The relation between v-s phase difference and net sediment transport direction

位相差 θ_{sv}	$\cos \theta_{sv}$	净输沙方向	
		相对流速方向	相对悬沙梯度
$-90^\circ \rightarrow -180^\circ$	$0 \rightarrow -1$	-	-
-90°	0	0	0
$0 \rightarrow -90^\circ$	$1 \rightarrow 0$	+	+
0	1	+	0
$0 \rightarrow 90^\circ$	$1 \rightarrow 0$	+	-
90°	0	0	0
$90^\circ \rightarrow 180^\circ$	$0 \rightarrow -1$	-	+
180°	-1	-	0

“陷捕效应”^[4]有利于逆向输送的形成。当高含沙带和低含沙带水体仅随潮流来回移动而与沉积物的泥沙交换处于平衡态时,过渡带各测点悬沙含量波动超前流速波动 90° (12h 周期中的 3h), 不产生净输沙。但当水体移至支汊、浅滩、弯道和回流、静水区等缓冲区域, 悬沙含量波动位相延迟, 对流速超前角落入 $0^\circ \rightarrow 90^\circ$ 范围, 逆向输送出现。

“周期性再悬浮作用”^[3]对波动项净输沙方向的影响, 常见的为两方面, 一是随周期为 T 的流速波动产生的, 主要波动分量为 $\frac{T}{2}$ 周期的悬沙含量波动, 由于主要的流速波动周期和悬沙波动周期不一致, 产生的净输沙效果很小。第二是随周期为 T 的潮位波动、因高低潮位掀沙能力差别形成的 T 周期悬沙含量波动。当潮位滞后潮流 2—3h, 最大含沙量出现在低平潮后涨初时, 最小含沙量出现在高平潮, 含沙量对流速 1—2h (相对 12h 周期而言) 超前, 出现逆向输送。而当潮位——流速位相接近时, 含沙量对流速波动位相滞后, 则形成正向输送。显然, 驻波发育, 潮差较大, 水深较小的浅滩较易建立向近岸高含沙带的逆向输运格局。

IV. 扩散系数的频域分解

悬浮物质输送的时均通量是各周期项的迭加, 如式(5)所示。由于周期在 10^{-1} — 10^1 d 的潮频段, 10^0 — 10^1 s 的波浪频段和仅 10^{-1} s 的紊动频段为海洋环境中三个优势频段, 近似地可将时均通量视为平均项与这三个优势频段的贡献之和:

$$\begin{aligned}\bar{F} &= \bar{V} \cdot \bar{S} + \int_{f_T} C_{SV}(f) df + \int_{f_w} C_{SV}(f) df \\ &\quad + \int_{f_t} C_{SV}(f) df \\ &= \bar{V} \cdot \bar{S} + (\overline{S'_T V'_T}) + (\overline{S'_w V'_w})\end{aligned}$$

$$+ (\overline{S'_t V'_t}) \quad (9)$$

在扩散过程中, 当悬沙含量梯度为 $\frac{\partial s}{\partial y}$ 时,

$$\text{扩散系数定义为 } \varepsilon = -\frac{(\overline{V'S'})}{\frac{\partial s}{\partial y}}, \quad (9) \text{ 式可改}$$

写为

$$\bar{F} = \bar{V} \cdot \bar{S} - (\varepsilon_T + \varepsilon_w + \varepsilon_t) \frac{\partial s}{\partial y} \quad (10)$$

其中 $\varepsilon_T, \varepsilon_w$ 和 ε_t 分别为潮频段, 波浪频段和紊动频段的分扩散系数。扩散系数为各频段分扩散系数之和。该结论为各种测量方法推算的扩散系数的代表性评价提供了数学基础。例如在金塘水道的测量中, 数据抽样间隔为 1h, 高频项影响已滤除, 据 $\overline{S'V'} = 0.1 \text{ kg/m}^2/\text{s}$; $\frac{\partial s}{\partial y} = 0.1 \text{ kg/m}^3/\text{km}$ 的众数估计出的 $10^4 \text{ m}^2/\text{s}$

扩散系数, 只相当于潮扩散系数 ε_T 。

当然, 式(10)是广义的扩散方程, 其低频部分已不完全遵循紊动扩散的性质, 这部分扩散系数既有正负值变化又非各项同性。

参 考 文 献

- [1] 钱宁、万兆惠, 1983. 泥沙运动力学. 科学出版社, 303—306 页。
- [2] Julius S. Bendat 等著, 凌福根译, 1980. 相关分析和谱分析的工程应用, 国防工业出版社, 45—47 页。
- [3] R.W. Sternberg et al., 1983. Near bottom flow conditions and associated sediment transport on the East China Sea continental shelf, in Proceedings of International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf, China Ocean Press, 1(2):552—535.
- [4] Su Jilan and Wang Kangshan, 1986. The suspended sediment balance in Changjiang Estuary, Estuarine, Coastal and Shelf Science 1(23):81—98.

NOTES ON NET FLUX IN FLUCTUATED PROCESS IN VIEW OF FREQUENCY WITH SPECIAL REFERENCE TO THE SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT

Li Yan

(Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou)

Received: May 11, 1989

Key Words: Suspended sediment transport, Cospectrum, Flux

Abstract

It was deducted that S (concentration of suspended sediment) - V (water current velocity) cospectrum expresses the contributions to net flux from domain of frequency. Main contributions from long-term fluctuation and some tidal fluctuations ($T = 12h$ or $T = 6h$) were gained by comparison among cospectrums of some stations in tidal inlets and estuaries. Discussed also was the causes and the desoluted form of dispersion (diffusion) coefficient.