

人工示踪沙实验的原理与进展*

贾建军 高抒 汪亚平

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

摘要 人工示踪沙实验是进行沉积物搬运研究的一种独立方法, 已有近50年的发展历史。人工示踪沙实验有三种主要方法(即空间积分法、时间积分法和连续投放法), 可用以获得活动层厚度、垂向和水平扩散系数、输运率等定量参数, 并进行不同输沙公式进行对比验证, 在海底稳定性分析、港湾冲淤、工程措施影响评价等方面都有应用价值。通过加强实验的物理边界、沉积物活动层厚度、实验的时空尺度、充分混合状态、示踪沙回收率、沉积物搬运过程等方面的研究, 可望使人工示踪沙实验的理论更加完备, 更具应用价值。

关键词 人工示踪沙实验 沉积物搬运 活动层厚度

人工示踪沙实验(Artificial Tracer Experiment, ATE)已有近50年的研究历史。早在1945年第一颗原子弹爆炸后不久, 就有学者提出应用放射性物质追踪沉积物运动的思路。1954年, 在英国的泰晤士河进行了放射性示中沙研究^[5]。随之, Inman和Chamberlain^[17]提出了人工示踪沙研究沉积物搬运的计算方法, Crickmore和Jean^[9, 10]系统地提出空间积分法和时间积分法, 并给出了改进的计算公式。至此, ATE作为一种独立于常规力学方法的途径, 展示了完美的理论框架, 很快引起学者们的兴趣。从已发表的成果来看, ATE的应用领域包括河流底移质输沙^[11]、海岸带沿岸输沙^[1, 4, 13, 33]、河口水沙过程^[25, 26]、潮汐汊道输沙过程^[29]、海岸工程的冲淤效应^[16]、港口底质活动性^[12]、浅海表层沉积物运动^[7]、泥沙的活动层厚度^[8, 19, 21, 24]、各种输沙公式对比验证^[11, 15]、污染物的扩散和沉积过程^[6]等等。

我国学者也较早地开展了ATE的工作。60年代初, 张忍顺等^[2]在江苏淤泥质海岸、王颖等^[3]在秦皇岛沙质海滩, 用人工示踪沙研究了沉积物活动层厚度。上海航道局设计研究所与南京水利科学研究院也在长江口地区用放射性示踪沙进行过现场试验^[5]。但是, 从研究深度与广度来看, ATE在我国的研究和应用似乎是沉积动力学领域的一个薄弱环节。

1 人工示踪沙

1.1 人工示踪沙的概念

人工示踪沙是用人工方法标识的物质, 用以掺入天然母质沉积物中; 通过追踪示踪沙, 可获得沉积物的运动方向、搬运速度和搬运速率等信息^[28]。

对人工示踪沙的基本要求是:

收稿日期: 1999-07-30; 收修改稿日期: 1999-10-22

*国家杰出青年科学基金资助(编号: 49725612)

a) 可区别性。示踪沙物质必须具有独特的、易与母质沙相区别的物理特征, 以利于从样品中分离和进行统计分析。用以识别示踪沙的物理特征包括放射性、颜色等。

b) 形态相似与动力相似。示踪沙物质的形态特征和动力特征应与母质沉积物一致, 以保证示踪沙的行为能够代表自然沙的运动, 包括沉积物的密度、形态、粒度分布、表面电化学特性、沉降与起动速度, 等等^[31]。

1.2 人工示踪沙的制备方法

鉴于上述要求, 人工示踪沙的制备通常是从实验区采取原地沉积物, 特殊情况下, 也可用玻璃或金属材料制备人造沙, 再进行标识处理。常用的标识方法有:

a) 放射性标识。通过嵌入、电镀、照射等处理, 使示踪沙具有放射性, 可利用盖氏仪 (Geiger Counter) 检查沉积物的放射性强度, 从而获得示踪沙的信息;

b) 荧光标识。用荧光染料使示踪沙着色, 利用荧光物质在紫外线照射下发光的原理, 可区别示踪沙与自然沙;

c) 油漆颜色标识。将示踪沙用油柒染色, 用可见光下的颜色区别于自然沙;

d) 物质组成标识。可用金属制成示踪砾石, 利用金属探测仪检测;

e) 无线电标识。将无线电发射器嵌入示踪砾石, 利用无线电接收器检测。

2 人工示踪沙实验的原理与方法

2.1 基本原理

ATE所遵循的基本原理是质量守恒定律, 包括沉积物守恒和示踪沙守恒。以沉积物搬运率实验为例, 沉积物守恒可用下式表达:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

式中 q_x 、 q_y ——分别是x和y方向的沉积物体积输运率; h ——底床高程。示踪沙守恒满足下式:

$$D_L \frac{\partial c}{\partial t} + q_x \frac{\partial c}{\partial x} + q_y \frac{\partial c}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

式中 D_L ——参与运动的沉积物的平均活动层厚度; c ——示踪沙浓度。将式(1)、式(2)联

立, 通过观测可以了解 $\frac{\partial h}{\partial t}$ 、 $\frac{\partial c}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial c}{\partial y}$, 即底床高程和示踪沙浓度随时间或空间的变化,

从而解出沉积物体积输运率 q_x 、 q_y 。

沉积物的平均活动层厚度, 可以通过以下三种方法获得^[8]:

a) 取柱状样, 根据示踪沙随深度的分布特征计算平均活动层厚度;

b) 挖方填入深度已知的示踪沙, 与底床相平; 测量一定时间后被自然沙替代的厚度;

c) 观察涂有特殊涂料的标尺记录。这种涂料很易被运动的沉积物擦去, 进行观测时, 将涂料刷在床面以下, 经过一段时间, 活动层内的涂料被泥沙抹去, 可以从标尺上涂料的保存状态观察到沉积物的扰动深度。

2.2 人工示踪沙实验的基本方法

根据采样、观测与统计计算的原理,研究示踪沙的变化有两种方法,即拉格朗日法和欧拉法。拉格朗日法,也称为空间积分法,通过研究不同时刻示踪沙的空间分布格局,导出示踪沙重心的运移轨迹,从而了解沉积物的运动特征。欧拉法,也称为时间积分法,通过研究固定断面上示踪沙浓度随时间的变化来导出沉积物的运动规律。在时间积分法的基础上,人们进一步提出了连续投放法。

2.2.1 空间积分法(Spatial Integration Method, SIM)

当示踪沙投放后,经过一定时间示踪沙与自然沙充分混合,可以认为,示踪沙的重心移动速度等于自然沙的运动速度,于是沉积物质量输运率 q_s 可简单地表示为:

$$q_s = \rho_s(1 - \lambda) D_L u_t \quad (3)$$

式中 ρ_s 、 λ ——分别是沉积物的密度和孔隙度; u_t ——示踪沙重心的迁移速度(centroid velocity); D_L ——参与运动的沉积物的平均活动层厚度(mean depth of activation)。沉积物质量输运率 q_s 定义为单位时间内单位断面宽度上通过的沉积物质量,其量纲为 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ 。 u_t 可通过测量不同时刻示踪沙浓度分布的变化来求得:

$$\begin{cases} U_t = \left[\left(\frac{\int_0^\infty c_t dx X}{\int_0^\infty c_t dx} \right)_{t_2} - \left(\frac{\int_0^\infty c_t dx X}{\int_0^\infty c_t dx} \right)_{t_1} \right] \frac{1}{t_2 - t_1} \\ V_t = \left[\left(\frac{\int_0^\infty c_t dy Y}{\int_0^\infty c_t dy} \right)_{t_2} - \left(\frac{\int_0^\infty c_t dy Y}{\int_0^\infty c_t dy} \right)_{t_1} \right] \frac{1}{t_2 - t_1} \end{cases} \quad (4)$$

式中 t_1 、 t_2 ——两次测量的时刻; c_t ——采样点的示踪沙浓度; U_t 、 V_t ——分别是横向和纵向的示踪沙运动速度; X 、 Y ——分别是采样点与投放点在横向和纵向的距离。

SIM实验的具体做法是:

- a) 在 t_0 时刻投放已知量的示踪沙;
- b) 经过一定时间 T 后,示踪沙与母质沙已充分混合;
- c) 分别在 t_1 、 t_2 时刻采样,得到不同空间位置(X , Y)上示踪沙的浓度分布 $c(x, y)$,要求采样范围要覆盖全部示踪沙的扩散区间,且 $t_2 - t_0 > t_1 - t_0 > T$;
- d) 在 t_1 、 t_2 时刻,与采样同时进行活动层厚度观测;
- e) 运用式(3)、式(4)两式,计算沉积物输运率。

2.2.2 时间积分法(Temporal Integration Method, TIM)

对于某一固定观测断面,当它与投放点的距离足够远时,可以认为示踪沙运动至此地时已经与母质沙充分混合。可用下式计算沉积物搬运率:

$$q_s = \frac{v}{W} \frac{1}{\int_0^T c dt} \quad (5)$$

式中 v ——投放的示踪沙体积; c ——示踪沙浓度; W ——采样断面宽度(W 应大于沉积物的运动断面宽度); T ——从投放开始直至全部示踪沙通过观测断面所需的时间。

TIM实验的具体做法是:

- a) 在 t_0 时刻投放已知量的示踪沙;
- b) 在沉积物运动的下游布设采样断面, 要求断面宽度大于沉积物运动范围, 且断面与投放点距离足够远, 保证示踪沙运动至此时已经与母质沙充分混合;
- c) 从 t_0 时刻开始采样, 直至所有的示踪沙都通过采样断面;
- d) 应用式(4)计算沉积物输运率。

2.2.3 连续投放法(Continuous Inject Method, CIM)

CIM是TIM的一种变形。这种方法要求在投放点以一定时间间隔投放等量的示踪沙, 同时在下流一定距离的观测断面上采样。经过一段时间后, 采样断面上的示踪沙浓度达到一个稳定值, 即投放速率与采样点的示踪沙输运率达到平衡, 此时可计算出沉积物输运率:

$$q_s = \frac{q'}{W} \frac{1}{C_{eq}} \quad (6)$$

式中 q' ——投放点示踪沙投放速率; C_{eq} ——采样点示踪沙达到稳定时的浓度; W ——采样断面宽度(W 应大于沉积物的运动断面宽度)。

可以看出, CIM与TIM有两点区别:

- a) TIM在实验开始时一次性投放示踪沙, 而CIM以一定的速率连续投放示踪沙;
- b) TIM观测到的示踪沙浓度值全部用于计算, 而CIM的计算只需要示踪沙浓度达到稳定时的观测值。

3 问题与研究进展

实际应用情况显示, ATE存在着理论上的完美与实际操作上的困难及不确定性之间的矛盾, 主要表现在确定实验的空间范围、活动层厚度、对“充分混合”状态的理解、示踪沙的回收率及其代表性, 以及研究对象的时空尺度的影响等。从整体上看, ATE的三种方法工作效率都不高, 一次实验只能获得一个测点或一条测线的沉积物输运率。ATE正是伴随着这些问题的发现与解决对策的研究而进步的。

3.1 实验的物理边界

沉积物的运动是一个三维的过程, 包括平面的扩散^[27]和垂向的混合。因此, 不论采取何种方法进行研究, 都应将沉积物运动的整个物理范围包含在内, 以不失其代表性。垂向物理范围即活动层厚度将在下节详细讨论, 本节探讨平面的研究范围。

人工示踪沙早期的应用及其理论框架的建立是基于河流输沙过程的研究^[9~11]。由于河流属于单向水流, 其水沙运移过程相对较为稳定, 运动范围受河岸堤坝的限制, 因此将实验范围界定于河道之内, 能够较好地反映河流输沙过程。但是, 将ATE推广到河口、海岸与海洋环境中, 确定沉积物运动的平面范围就显得非常困难。

从已有的研究来看, 对于沿岸输沙过程的定量研究, 很少应用SIM^[13], 原因之一是泥沙向海运动的边界(从某种意义上)是无限的, 其次是SIM计算输沙率需要活动层厚度的空间分布, 而一般的SIM仅用平均活动层厚度乘以平均输运断面宽度, 误差很大。这样, 应用TIM/CIM研究沿岸输沙率就很有优势, 可选择激浪带作为沿岸输沙的横向范围^[13, 20], 而采样断面

的距离则依据研究对象的时空尺度从 $10^0 \sim 10^4$ m不等。

3.2 活动层厚度

活动层厚度,即参与运动的表层沉积物垂向尺度,是ATE所需的基本参数;同时,它对于用常规力学手段研究沉积物输运率、分析海底表层沉积物活动性、了解短时间尺度的冲淤过程,等等,都具有基础性的意义。影响活动层厚度的因素主要是动力作用强度、沉积物特性、沉积物运动的环境,包括破碎波高^[14, 21, 24, 32]、沉积物粒径^[21]、Shields参数^[30]、海滩坡度^[32]、沙波移动^[11, 12]、潮流作用^[12]、极端天气过程^[12],以及研究所涉及的空间和时间尺度^[12]。实测活动层厚度表现出很大的差异,从0.01~0.24 m不等^[22],即使在同一个海滩,纵横剖面的不同位置,活动层厚也有相当的差异。因此,怎样观测活动层厚度(确定观测地点、时间、历时、密度等),怎样合理确定平均活动层厚度,成为ATE的关键问题。

3.2.1 研究方法进展

在观测活动层厚度的三种方法(见2.1节)当中,取柱状样测量示踪沙的分布深度是应用最广泛的一种。早期,King^[21]将示踪沙出现的最大深度作为活动层厚度。Crickmore和Jean^[9, 10]认为,表层的沉积物参与运动的机会最多,向下活动性逐渐减弱,King的做法可能夸大了沉积物的实际活动范围,理由是:(1)将采样管向下插入时,可能会把表层的示踪沙挟裹到并无示踪沙存在的深度;(2)示踪沙出现的(即自然的垂直扩散产生的)最大深度主要是极端事件作用的结果,而不是参与运动泥沙的平均厚度;(3)仅凭肉眼观察柱状样各层位示踪沙的有无,有很大的主观性和不确定性。Crickmore和Jean分层统计柱状样中示踪沙的浓度,提出了4种垂向浓度变化模式,将平均活动层厚度设计为各层的深度及其浓度的加权函数。这种方法以其较强的合理性得到了许多学者的首肯。Inman等^[18]对加权法进行了一些改进。80年代中期,Kraus^[24]指出,示踪沙在柱状样垂向分布上可能会出现10种情况(而不仅仅只有4种),其中两种情况无法用加权法计算出唯一的平均活动层厚度,会产生歧义;因此,他提出了用示踪沙的累积出现深度代表有效活动层厚度的思想,即分层统计示踪沙浓度,然后绘出整个柱状样的示踪沙浓度随深度变化的累积分布曲线;他发现,累积浓度80%~90%的示踪沙出现深度是一个明显的界线,因此将80%的示踪沙累积深度定为有效活动层深度。这个方法是目前实测活动层厚度的最佳方案。

3.2.2 波浪作用下的活动层厚度

在小于潮周期的时间尺度上,研究了波浪作用下的活动层厚度。King^[21]根据在英国高能海滩的研究,认为激浪带的活动层厚度是破碎波高和沉积物粒径的函数,量级大约在3 cm。Kraus等^[23, 24]对日本沿岸4个地点的高能海滩研究显示,激浪带的平均活动层厚度 D_L 与破碎波高 H_b 呈现很好的线性正相关,即 $D_L = 0.027H_b$; D_L 在横向上的分布呈现双峰,在越流带和破波带出现最大值;他们还发现,混合深度与波浪近床底作用的Shields参数相关,但与沉积物粒径只有微弱的正相关。在Kraus等人的研究中,当 H_b 为0.75~1.5 m时, D_L 为0.4~1.6 cm,与Inman等人^[18]的结果(H_b : 1~2 m, D_L : 1~2 cm)相近。

Ciavola等人^[8]研究了葡萄牙一处低能海滩的活动层厚度,在波高0.34~0.80 m、海滩沙粒径0.26~0.38 mm、海滩坡度0.10~0.14的条件下, D_L 与 H_b 也表现了良好的线性正相关, $D_L = 0.27H_b$,但横向分布未表现出双峰的特点。这与Kraus等人的结果有较大差异。Ciavola等认为研究区的波浪破碎类型和海滩坡度可能是造成这种差异的原因。Ciavola等还发现, D_L 与

波浪周期有关, 但与沉积物粒径似无明显联系。

对波浪作用下活动层厚度的研究表明, 时间尺度短于一个潮周期, D_L 的量级与小波痕(Ripples)的波高相仿, 它的物理意义是瞬时参与运动的泥沙厚度, 也是常规力学方法研究沉积物搬运的基本参数。因此, 这方面的研究具有基础性的理论意义。

3.2.3 时间尺度、沙波迁移及极端天气过程对活动层的影响

如果将研究的时间尺度扩大到日、周、月、年, 在大波痕(Megaripples)或沙波(Sandwaves)存在并运动的情况下, 实际活动层的厚度就相当于底形的波高, D_L 将达到 10^2 mm 的量级^[11]。在较大的时空尺度下, 活动层的物理意义也包含着沉积物垂向扩散的范围, 则风暴潮等极端天气过程对海滩沙的扰动混合, 也会扩大 D_L 的数值^[12]。

Dolphin 等^[12] 在新西兰的一个封闭海湾中, 系统地研究了不同动力作用、不同时间尺度下沙坪(Sand Flat)沉积物的活动层厚度。他们发现, 研究区的混合过程表现为三种时空尺度组合: (1)整个沙坪表面发育着波高 1~1.5 cm 的小沙波, 在较小波浪作用下, 仅扰动表层泥沙, D_L 的量级是 1~1.5 cm, 发生的时间尺度是天/周; (2)大浪作用可达沙坪的中上部, 使表层 3 cm 的泥沙起动, 沿潮流及长周期海流的方向运动, 扰动深度与有效波高存在以下关系: $D_L = -7.5 + 0.45H_b$, $H_b > 0.18$ m, 发生的时间尺度是周/月; (3)风暴潮的作用可使表层沉积物的混合深达 20 cm, 导致沙坪表面微地形的沟槽位置发生迁移, 发生的时间尺度是季/年。

3.3 “充分混合”状态

“充分混合”状态是 ATE 在理论上的前提条件。在实际操作中, 有两个因素会影响“充分混合”状态的判断^[13]。

a) 在同一个沉积物搬运系统中, 不同粒径的泥沙具有不同的运动特征, 最直接的表现是它们在净搬运方向上的运动速度有明显的差异。自然沙总是有一定的粒度分布范围, 可能细颗粒物很快就混合均匀, 而粗砂达到充分混合状态的时间会超过实验所涉及的尺度。另外, 在样品所含的示踪沙中, 运动慢的粗颗粒所占比例会大于运动快的细颗粒, 使得计算出来的示踪沙浓度(重量比)偏大。这样, 实验的结果就不具有整体的代表性。

b) 应用示踪沙理论取得较理想结果的实验都有一个假设, 即沉积物搬运系统在实验期间保持恒定状态。如果搬运率或系统边界范围在实验期间发生了变化, 那么, 对于取样得到的示踪沙信息, 实验者将很难区分哪些是由混合过程引起的, 哪些是由于系统状态的变化造成的。但是, 在野外实验区, 这一假设难以得到充分满足; 一旦系统状态发生变化, 原先已经充分混合的示踪沙又要继续向“充分混合状态”变化。因此, 示踪沙是否能达到充分混合状态, 实验结果的可靠性如何, 在很大程度上取决于实验期间系统的稳定性。

由于上述两个原因, ATE 要想取得有真实意义的成果, 在满足充分混合条件时, 不仅要考虑所需要的时间尺度(对 SIM 而言, 即投放后多长时间开始取样)和空间距离(对 TIM 而言, 即在投放点下游多远的断面进行取样), 还应解决不同粒径的泥沙在扩散—混合过程上的差异, 并力争在较小范围、较短时间内完成实验, 以避免系统稳定性的变化给试验结果带来影响。

Duane 和 James^[13] 在进行沿岸输沙实验时, 考虑了上述问题, 在实验设计上进行了预处理, 如人为增加粗颗粒在示踪沙中的含量, 改点源投放为线源投放, 选择了 CIM 实验并以破

波带和越流带为横向边界。

3.4 示踪沙的回收率

由于ATE是一个从部分认识整体的过程,因此,投放的示踪沙回收率越高,实验的代表性就越可靠。从这个意义上说,示踪沙实验的回收率是评价实验结果的成败与优劣的重要标准。早期的ATE应用放射性物质标识示踪沙,用放射强度探测仪检查示踪沙的运移和浓度,有较高的回收率和工作效率。但是,由于放射性物质对生态环境和人类健康的危害,这种方法已被许多国家禁用。其它方法,如荧光/油漆着色,需要对样品进行统计,工作强度大,效率低,回收少,代表性较差。Wright等^[33]认为,用荧光/油漆着色法进行砾石示踪实验,回收率很少超过30%,一般在15%左右。砂级的示踪实验回收率也不过60%。这极大地影响了ATE的结果的意义。

不少学者为提高示踪沙的回收率,进行了有益的尝试,用金属制成示踪砾,或用无线电发射器标识示踪砾。Wright等^[33]用铝制砾石研究英国南部砾质海滩的沿岸运动,用金属探测仪进行检查,提高了工作效率,实验的总回收率达65%;对每个铝砾都编上号,不仅可计算搬运率,还可追踪铝砾的运动轨迹。

3.5 时空尺度的影响

由于ATE要求实验过程中系统保持稳定状态,因此它的适用范围不可能有较大的时空尺度。一般来说,研究一个相对独立、完整的沉积物输运体系,如一段河道的底移质输沙、岸线相对平直的海滩上的沿岸过程,在较短的时间内,如果系统的动力作用相对稳定,用ATE能得到较满意的、定量的结果。对于较长时间尺度的输运—堆积过程,或者复杂的系统,ATE的结果所涵有的意义就不甚明确。例如,对于潮汐汉道口门内外的净输沙过程,由于涉及沿岸输沙、周期性的潮流作用、涨落潮三角洲的动力地貌过程等因素,时间跨越了波浪周期、潮周期,存在日、月、季的变化,示踪沙实验所得的净搬运方向和净输沙率就不一定可靠。

从已有的ATE实验来看,尤其是SIM法,所得的沉积物输运率有随观测时间增加而非线性递减的现象^[29],它的出现不是偶然的。由于ATE法在理论上的缺陷,即用时间平均的 D_L 与 u 之积代表沉积物搬运率,而忽略了脉动项,造成它的结果前后不一致。因此,应重点研究沉积物运动的平均状态与脉动状态的关系,使ATE的理论更加完备,应用更为广泛。

4 讨论与结论

人工示踪沙实验是进行沉积物搬运研究的一种独立方法。研究沉积物运动的方法在ATE出现之前,主要是动力学和地质地貌学方法,与ATE同期出现的有遥感手段。动力学研究是从力学手段入手,运用经验半经验公式进行计算,这需要大量的、甚至是长期的现场水动力与泥沙观测资料;但是,现场观测要耗费大量人力、财力和物力,所获资料的数量与精度不一定能满足要求;而且,目前的科学认识对于沉积物搬运的物理机制和过程还不能做到完全了解,使得动力学的结果存在很大的差异和误差。地质地貌方法和遥感方法在沉积物搬运问题上尚未达到定量的要求。在这种情况下,ATE以其黑箱/灰箱操作、理论完备、简便易行的特点,与动力学、地貌形态、遥感等方法相并立,在理论与实际操作上显示了特有的优

势。

4.1 人工示踪沙实验的发展阶段

纵观ATE50年的发展过程,可分为三个阶段。

- a) 40年代末提出实验原理,到60年代初完成定量化研究的理论框架;
- b) 整个60、70年代是大量应用于沉积物搬运与活动性研究的时期;
- c) 80年代以来,研究的重点转向活动层厚度等基础性、细节性问题,或者是对不同时空尺度、不同动力作用下的搬运系统进行综合性研究。

4.2 人工示踪沙实验的理论与实践意义

a) 从理论研究的角度来看,ATE可获得某些输移参数的定量估算值,如沉积物的活动层厚度、垂向和表面横向扩散系数;可以对不同输沙公式进行对比验证;可以加深对沉积物输移规律的认识。

b) 从应用研究的角度来看,ATE可以获得沉积物的输运率和总的输移方向,确定平均位移和最大位移的相对数量级,判断所得结论与水动力及天气过程的关系等。在海底稳定性分析、港湾冲淤、工程措施影响评价等方面都有应用价值。

4.3 进一步研究的方向

a) 理论基础的改进。重点进行沉积物搬运过程的研究,包括它的影响因素、对泥沙运动的贡献、对平均状态的影响,等等,进一步完备ATE的理论。

b) 实验方法的研究。针对ATE回收率低、统计计算工作量大的问题,研究更为便捷有效的示踪沙标识方法,使采样与统计在野外同步完成。对于萤光示踪沙的统计,也可进行光学扫描—自动计数仪器的研制,提高工作效率。

c) 沉积动力学的基础性研究。应用示踪沙研究沉积物的垂向活动层厚度与平面搬运速度和搬运率,有助于认识自然输沙的垂向与平面扩散系数。另外,作为测量输沙率的一种手段,ATE的精度和准确性的提高,有利于已有输沙公式的修正和改进。

d) 应用范围的拓展。由于理论基础的限制,ATE适用的研究是较小时空尺度的输沙系统。事实上,中尺度与大尺度的输沙过程和动力—地貌演化与生产实际有更密切的联系。从已有的方法看,天然示踪物研究和动力地貌方法更适用于较大尺度的输沙—沉积体系,但目前定量化的程度较低。如何将不同研究方法相结合,以加深对自然界泥沙运动过程和地貌演化的理解,是ATE及其它方法应努力的方向。例如,天然示踪物方法与ATE最主要的优缺点恰好是互补的:ATE的系统输入已知,可以定量研究,但适用尺度较小,而天然示踪物方法适用于研究大范围、长时间的系统,但经常无法得到定量结果;但是,这两种方法在很多方面可通过式(2)相联系,如何将二者统一起来,是一个很有意义的研究方向。

参考文献

- 1 王文海. 蓬莱西庄海滩示踪沙试验研究. 黄渤海海洋, 1994, 12(1): 19~27
- 2 王颖, 朱大奎. 海岸地貌学. 北京: 高等教育出版社, 1995, 66~86
- 3 王颖等. 秦皇岛海岸研究. 南京: 南京大学出版社, 1988
- 4 刘新安, 崔金瑞, 王文海等. 热带风暴过程中珊瑚礁坪示踪砂运移的现场实验研究. 海洋与湖沼, 1999, 30(3): 315~320
- 5 陈进兴. 放射性示踪沙在研究泥沙运动中的应用. 海洋湖沼通报, 1985, (2): 72~78

- 6 Adams E E, Stolzenbach K D, Lee J-J et al. Deposition of contaminated sediments in Boston harbor studied using fluorescent dye and particle tracers. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 1998, 46: 371~382
- 7 Bratteland E, Bruun P. Tracer tests in the Middle North Sea. *Proc. 14th Coastal Eng. Conf. New York: ASCE*, 1976, 1513~1530
- 8 Ciavola P, Taborda R, Ferreira O et al. Field observations of sand-mixing depth on steep beaches. *Marine Geology*, 1997, 141: 147~156
- 9 Crickmore M J, Lean G H. The measurement of sand transport by means of radioactive tracer. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, 1962a, 266: 402~421
- 10 Crickmore M J, Lean G H. The measurement of sand transport by the temporal integration method with radioactive tracers. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, 1962b, 270: 27~47
- 11 Crickmore M J. Measurement of sand transport in rivers with special reference to tracer methods. *Sedimentology*, 1967, 8: 175~228
- 12 Dolphin T J, Hume T M, Parnell K E. Oceanographic processes and sediment mixing on a sand flat in an enclosed sea, Manukau Harbour, New Zealand. *Mar. Geol.*, 1995, 128: 169~181
- 13 Duane D B, James W R. Littoral transport in the surf zone elucidated by an elucidated sediment eulerian sediment tracer experiment. *J. Sedi. Petr.*, 1980, 50: 929~942
- 14 Gaughan M K. Depth of disturbance of sand in surf zones. *Proc. 16th Coastal Eng. Conf., New York: ASCE*, 1978, 1513~1530
- 15 Heathershaw. Comparisons of measured and predicted sediment transport rates in tidal currents. *Mar. Geol.*, 1981, 42: 75~104
- 16 Ingram L F, Cummins R S, Simmons H B. Radioactive sediment tracer test near the North and South Jetties, Galveston Harbor Entrance. MP 2-472, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss. Nov. 1965
- 17 Inman D L and Chamberlain T K. Tracing beach sand movement with irradiated quartz. *Journal of Geophysical Research*, 1959, 64: 41~47
- 18 Inman D L, Zampol J A, White T E et al. Field measurements of sand motion in the surf zone. *ASCE, Civil Eng., Proc. 17th Coastal Engineering Conf., New York: ASCE*, 1980, 1215~1234
- 19 Jackson N L, Nordstrom K F. Depth of activation of sediment by plunging breakers on a steep sand beach. *Mar. Geol.*, 1993, 115: 143~151
- 20 Kadib A-L A. Rate of sediment motion using fluorescent tracer. *Proc. 10th Coastal Eng. Conf., New York: ASCE*, 1972, 985~1003
- 21 King C A M. Depth of disturbance of sand on sea beaches by waves. *J. Sediment. Petrol.*, 1951, 21: 131~140
- 22 Komar P D, Inman D L. Longshore sand transport on beaches. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75: 5917~5927
- 23 Kraus N C, Isobe I, Igarashi H et al. Field experiments on longshore sand transport in the surf zone. *Proc. 18th Coastal Eng. Conf., New York: ASCE*, 1982, 776~794.
- 24 Kraus. Field experiments on vertical mixing of sand in the surf zone. *J. Sedi. Petr.*, 1985, 55: 3~14
- 25 Luedtke N A, Bender M L. Tracer study of sediment-water interactions in Estuaries. *Estuarine and Coastal Marine Sciences*, 1979, 9: 643~651
- 26 Martin J-M, Meybeck M, Heuzel M. A study of the dynamics of suspended matter by means of natural radioactive tracers: an application to the Gironde estuary. *Sedimentology*, 1970, 14: 27~78
- 27 Price W A. Variable dispersion and its effects on the movements of tracers on beaches. *Proc. 6th Coastal Eng. Conf., New York: ASCE*, 1968, 329~334
- 28 Sauzay G. Principles of tracer methods. In: *International Atomic Energy Agency. Technical Reports Series No.145: Tracer Techniques in Sediment Transport*, Vienna, 1973, 9~12.
- 29 Stuiver M, Purpura J. A Application of fluorescent coated sand in littoral drift and inlet studies. *Proc. 6th Coastal Eng. Conf. New York: ASCE*, 1968, 307~321

- 30 Sunamura T, Kraus N C. Prediction of average mixing depth of sediment in the surf zone. *Mar. Geol.*, 1985, 62: 1~12
- 31 US Army, Coastal Engineering Research Center. *Shore Protection Manual*, Second Edition, 1975, 1(4):150~152
- 32 Williams A T. An analysis of some factors involved in the depth of disturbance of beach sand by waves. *Mar. Geol.*, 1971, 11: 145~158
- 33 Wright P, Cross J S, Webber N B. Shingle tracing: by a new technique. *Proc. 16th Coastal Eng. Conf.*, New York: ASCE, 1978, 1705~1704

作者简介: 贾建军, 男, 1973年9月19日生, 博士研究生。1990~1996在南京大学学习, 获理学学士和理学硕士学位, 1996~1998在河海大学任教, 1998年9月起在中国科学院海洋研究所攻读海洋沉积动力学博士学位。从事沉积动力学与地貌学、遥感与地理信息系统应用、海岸带管理与可持续发展等方面的科研工作, 已发表论文数篇。

Artificial Tracer Techniques for Sediment Transport Studies: A Review

Jia Jianjun, Gao Shu and Wang Yaping

Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071

Abstract Artificial tracer techniques represent an approach to sediment transport, independent of mechanics-based semi-empirical methods. They have a history of development of around 50 years. There have been three methods for artificial tracer experiments i.e. the spatial integration method, the temporal integration method, and the continuous inject method. Through such experiments, parameters such as the moving layer thickness, vertical and lateral mixing coefficients for sediment and transport rate can be estimated quantitatively. Further, the result obtained can be used to verify the calculations using the various transport formulae. Hence, this technique is of high practical value for seabed stability assessment, accretion/erosion evaluation and environmental impact assessment for coastal engineering. The method can be improved further if more studies on the sediment sampling range, depth of disturbance, spatial/temporal scales, sufficient mixing conditions, recovery rate and transport processes are undertaken in the future.

Keywords Artificial tracer experiment; Sediment transport; Moving layer thickness