

基于原位激光粒度仪(LISST)的悬浮体平均粒径计算方法对比研究

李文建^{1,2,4}, 王珍岩^{1,2,3,4,5}, 黄海军^{1,2,3,4,5}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071)

摘要: 根据 2012 年夏季和 2016 年冬季在南黄海中部利用原位激光粒度仪(*laser in situ scattering and transmissometry*, LISST)进行调查获得的实测数据, 对两种平均粒径计算方法的结果进行比较研究, 并对产生差别的原因进行分析。结果表明: 无论在夏季和冬季, 在温度跃层以上粒度分布以粗颗粒为主, 两种计算方法差值较小, 可以相互替代。在温盐跃层以下层位, 细颗粒组分增加, 导致二者计算差值变大。端元分析表明较高的平均粒径值倾向于造成平均粒径差值增大。矩值法强调了粗颗粒组分的贡献, 而平均粒级法对细颗粒组分的贡献更加敏感, 后者是更适用于将 LISST 观测数据应用于陆架海区现代沉积环境研究的粒径参数计算方法。本文为使用 LISST 在陆架海区进行现代沉积过程研究提供了参考。

关键词: 平均粒径; 矩值法; 平均粒级法; 原位激光粒度仪(LISST); 粒径谱

中图分类号: P736.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)05-0024-10

DOI: 10.11759/hyxx20190909002

粒度分布特征是海洋沉积物的基本特征之一, 主要受到物源、搬运过程与海洋水动力条件的影响。沉积物的粒度分析是研究海底沉积物的物质来源、解释地质历史时期的沉积环境的重要方法之一^[1-3]。平均粒径是沉积学中进行粒度分析的基本参数, 表征了沉积物粒度分布的集中趋势, 而悬浮体的平均粒径是揭示颗粒输运机制和反映水动力过程的重要参数^[4-5], 也常被用于斯托克斯公式计算颗粒沉降速率^[6-7]。经典的粒度分析方法主要是筛析-沉降法, 利用不同孔径筛子的筛分以及颗粒的沉降规律, 测定粒度分布特征, 但是这种方法费时费力, 操作复杂。激光粒度分析仪的出现简化了粒度测量过程, 并可以实现对粒度的连续性测量。在现代沉积学研究中, 悬浮体的现场粒度测量对于研究现代沉积过程具有重要的意义, 而以上的测量方法主要是针对沉积物样品的实验室测量, 不能满足原位实时测量的需求。近年来, 随着观测技术的不断进步, 原位激光粒度仪(*Laser In-Situ Scattering and Transmissometry*, LISST)的出现解决了这一问题。LISST 可在现场完成不同粒级的悬浮体体积浓度的测量, 具有高效、垂向分辨率高、可以实现分粒级测量悬浮体浓度等优点。

在传统沉积学研究中, 平均粒径的计算方法主要有图解法和矩值法, 前人对这两种计算方法的应用结果进行了对比研究^[8-11], 指出这两种方法计算得到的平均粒径基本可以相互替代。但是图解法求解粒度参数是从频率累积曲线上取得关键分位对应的粒径值, 忽略了累积含量小于 5% 和大于 95% 部分的粒度特征, 而矩值法则考虑了粒度分布的总体特征, 更具有统计学意义, 并被引入“908 专项”《海洋底质调查技术规程》^[12]。在利用 LISST 进行现代沉积学研究中, 矩值法也得到了广泛应用^[13-14]。

基于光学散射原理, LISST 可以利用内置的环

收稿日期: 2019-09-09; 修回日期: 2019-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41476045); 中国科学院战略性先导科技专项(A类) (XDA19060401, XDA23050502); 科技部基础资源调查专项(2017FY100802)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41476045; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA19060401, No. XDA23050502; the Science and Technology Basic Resources Investigation Program of China, No. 2017FY100802]

作者简介: 李文建(1991-), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 研究方向为海洋沉积学, E-mail: liwenjian14@mails.ucas.ac.cn; 王珍岩(1972-), 通信作者, 男, 博士, 副研究员, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: zywang@qdio.ac.cn

形光学探测器测量 32 个不同粒级的悬浮体的体积浓度^[15]。与传统激光粒度仪相比, LISST 的每个粒级代表一定的粒级范围, 这些粒级范围的中值粒径之间具有对数关系^[15-16]。考虑到 LISST 特殊的粒级分布, Agrawal and Mikkelsen^[17]提出了优先计算平均粒级, 然后转换为平均粒径的计算方法(为讨论方便, 本文称之为平均粒级法)。本文的目的就是结合现场调查数据, 对比矩值法和平均粒级法的计算结果, 探讨造成其计算差异的原因以及各自的适用性, 为使用 LISST 观测数据进行现代海洋沉积环境研究提供参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源

“科学三号”和“东方红 2 号”科学考察船分别

于 2012 年 7 月 27 日(夏季)和 2016 年 12 月 30 日(冬季)在南黄海中部进行水体综合调查(图 1)。在调查站位利用 SBE9/11plus 型 CTD 采集水体剖面的温度、盐度和荧光叶绿素 *a* (Chl *a*)浓度数据(由于冬季传感器出现问题, 冬季 Chl *a* 数据缺失)。利用 SBE Data Processing 软件对采集数据进行处理, 得到垂向分辨率为 1 m 的剖面数据。根据《海洋调查规范》(GBT 12763.7-2007)^[18], 以 0.2 °C/m 为界定温度跃层范围, 确定跃层位置。同时, 将 LISST-100X(C 型)固定于 CTD 上部, 随采集系统一起下放, 同步获取各层位的粒度数据, 利用 LISST-SOP(Version 5.0.50, Sequoia Scientific, Inc.)软件下载并处理数据, 获取垂向分辨率为 1 m 的 32 个粒级的体积浓度数据, 其粒级分布范围(2.5~500 μm)及各粒级的中值粒径值如图 2 所示。

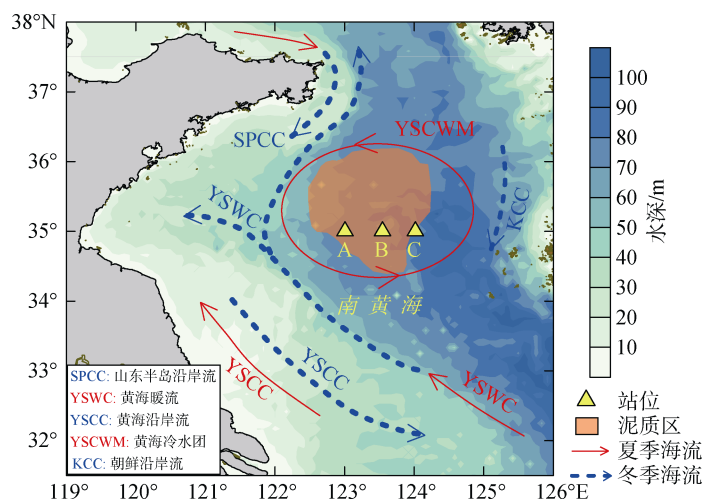


图 1 研究区地形、环流特征及站位分布图(环流特征改自文献[19])

Fig. 1 Topography, circulation and sample stations in the study area (the circulation is modified from reference [19])

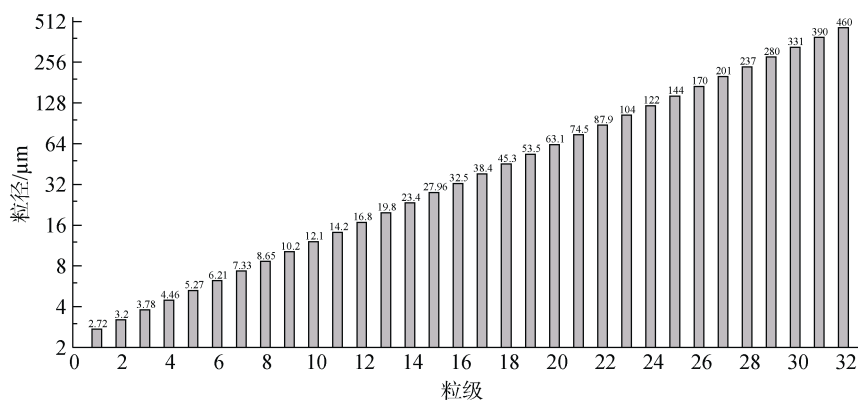


图 2 LISST-100X32 个观测粒级的粒径范围* (改自文献[16])

Fig. 2 32 size ranges of LISST-100X (modified from reference [16])

注: *参考 LISST-100X Particle Size Analyzer: User's Manual (Version5.0)

1.2 平均粒径计算方法

1.2.1 矩值法

在矩值法计算中, 平均粒径(\bar{X})计算公式为^[14, 20]:

$$\bar{X} = \left(\sum_{i=1}^n f_i X_i \right) / 100, \quad (1)$$

f_i 为各粒级颗粒的百分含量, X_i 为粒级组中值, i 表示粒级数(1~32)。考虑到 LISST 的粒级分布特征, 该公式可以改写为:

$$M_{Z1} = \sum_{i=1}^{32} \frac{V_i}{C_{TV}} D_i, \quad (2)$$

$$C_{TV} = \sum_{i=1}^{32} V_i, \quad (3)$$

M_{Z1} 表示利用矩值法计算得到的平均粒径; V_i 表示各粒级范围的体积浓度, C_{TV} 为 32 个粒级的总体积浓度, D_i 表示各粒级对应的实际粒度值。

1.2.2 平均粒级法

由于 LISST 的 32 个粒级呈对数分布, 不同粒级之间的关系可以用如下公式表示:

$$D_i = D_1 \rho^{i-1}, \quad (4)$$

i 表示 LISST 的粒级数(1~32), D_i 表示第 i 个粒级对应的中值粒径值(图 1), D_1 表示第 1 个粒级对应的中值粒径值(这里是 2.72 μm , 图 1), ρ 表示相邻粒级之间的系数关系(对于 LISST-100X, 这里 ρ 为 1.18)。

根据平均粒级法^[17], 可以考虑优先计算平均粒级, 然后根据粒级之间的指数关系计算平均粒径(M_{Z2})。因此, 平均粒径的计算问题转化为平均粒级(U)的计算问题。首先根据不同粒级的体积浓度值与总体积浓度的关系计算平均粒级:

$$U = \left(\sum_{i=1}^{32} V_i^i \right) / \left(\sum_{i=1}^{32} V_i \right), \quad (5)$$

然后根据平均粒级以及粒级之间的指数关系计算平均粒径(M_{Z2}):

$$M_{Z2} = D_1 \rho^{U-1}. \quad (6)$$

2 结果

2.1 平均粒径差值

根据前述两种计算方法得到的平均粒径计算结果如图 3 所示。3 个站位的平均粒径计算结果具有相似的特征。因此, 我们以两种计算方法计算的差值增大的地方为界, 将 3 个站点的水层划分为浅水层和深水层。对 A 站位, 夏季分界深度为 35 m 左右, 对 B 和 C 站位, 分界深度为 50 m 左右。在 3 个站位的

浅水层, M_{Z1} 与 M_{Z2} 差异较小, 差值在 10 μm 以内。而在深水层, 差值向近底层逐渐增大, A 站位差值及相对误差分别可达 70 μm 以及 20% 左右; 而 C 站位差值可达 90 μm 以上, 相对误差在 30% 左右。在冬季, A 站位分界深度为 65 m 左右, 对 B 和 C 站位, 分界深度分别为 55 和 60 m 左右。从表层到底层, M_{Z1} 均大于 M_{Z2} 。3 个站位浅水层差值均在 25 μm 以内, 而底层差值在 50 μm 以上, 相对误差在 40% 左右。对比公式(2)和公式(6)可知平均粒径的计算与粒度分布特征密切相关, 造成计算差值的原因也需要从粒度分布特征入手进行分析。

2.2 悬浮体粒度分布特征

3 个站位夏季和冬季悬浮体的粒径谱如图 4 所示。夏季, 各站位悬浮体的粒度分布在浅水层和深水层有两种不同的分布特征。在浅水层(图 4), 悬浮颗粒主要集中在 64 μm 以上的大颗粒, 在 256 和 391 μm 左右存在两个浓度峰, 小于 64 μm 的颗粒较少, 8~64 μm 的颗粒基本缺失, 只在个别层位出现且不连续, 体积浓度值基本低于 0.1 $\mu\text{L/L}$; 在深水层位(图 4), 悬浮体体积浓度随粒径增大而增大, 无明显峰值, 但最大粒级体积浓度可达 10 $\mu\text{L/L}$ 及以上, 比最小粒级高出两个量级。冬季, 悬浮体的粒度分布也分为两种。在浅水层位(图 4), 悬浮体呈近似两端元分布, 细颗粒端集中于 2.5~64 μm 颗粒, 体积浓度低于 0.05 $\mu\text{L/L}$, 无明显峰值。另一端元集中于大于 128 μm 的粗颗粒, 且在 391 μm 处存在一个明显峰值。而在深水层位(图 4), 悬浮体体积浓度随粒径增大而增大, 与夏季相似。

对比图 3 与图 4 结果, 无论在夏季或冬季, 悬浮体粒径谱均存在一个明显界面, 界面上下层位粒度分布特征明显不同。界面上部层位, 细颗粒(<64 μm) 体积浓度较小, 部分粒级甚至缺失, 粒度分布主要以粗颗粒为主, 此时两种方法计算的平均粒径差值较小(图 3)。而在界面下部层位, 细颗粒的比重增大, 无明显峰值粒级, 平均粒径差值增大。对比夏季和冬季浅水层位, 冬季小于 64 μm 的细颗粒较夏季明显增多, 平均粒径差值也大于夏季。因此, 悬浮体的粒度分布, 尤其是细颗粒组分的比重, 对平均粒径的差值具有重要影响。

3 讨论

3.1 水文环境特征对粒度分布的影响

海水中的悬浮体是由无机组分和有机组分共同

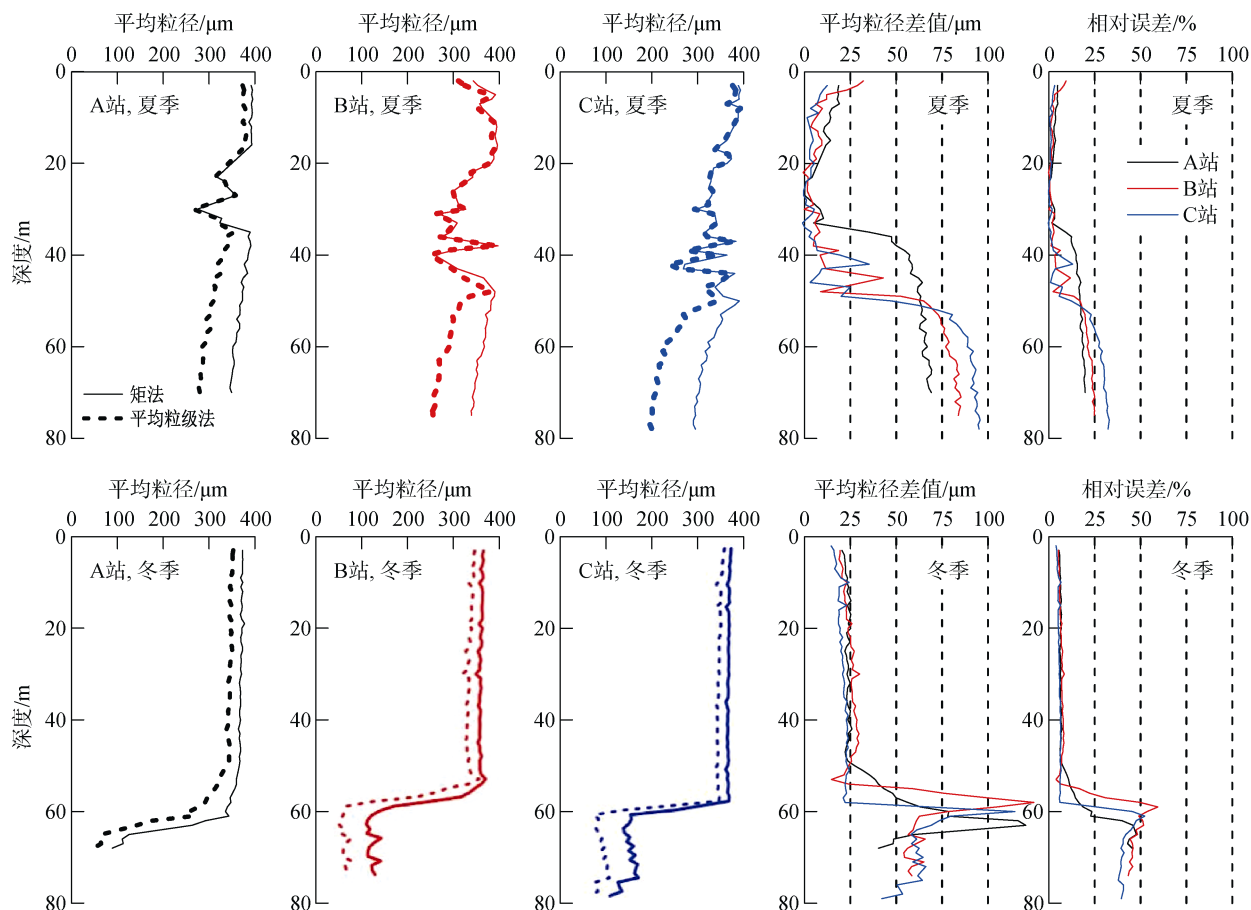


图3 夏季和冬季两种方法计算的各站位平均粒径, 平均粒径差值及其相对误差垂向分布特征

Fig. 3 Vertical distribution of mean size based on the two methods and their differences and relative errors in station A in summer and winter

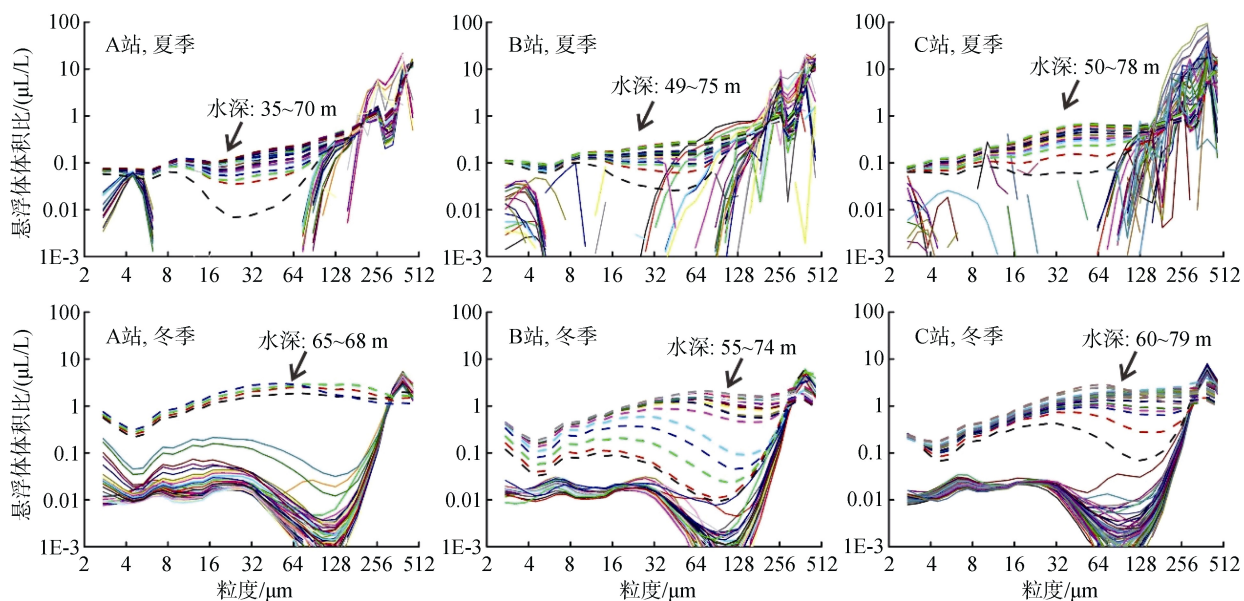


图4 各站位夏季和冬季粒径谱

Fig. 4 Particle size distribution in the station A-C during summer and winter

构成的。一方面, 碎屑物质可以在水文动力条件下运移和沉降, 这是影响陆架海区悬浮沉积物分布特征的主要过程; 另一方面, 水文环境对浮游植物的生长具有重要作用(如温度, 盐度, 光照条件等), 进一步影响了悬浮体中的有机组分。因此, 悬浮体的粒度分布特征与水文环境特征密切相关。黄海冷水团是夏季南黄海海区的典型水文特征^[21-23], 我们以更靠近南黄海中部的 C 站位为例, 探讨水文特征对悬浮体粒度分布特征的影响。

夏季, C 站位的温度垂向分布具有明显的三层结构(图 5)。10 m 以浅为混合层, 温度在 28℃ 左右; 在 10~50 m 左右深度, 温度快速降低至 10℃ 以下, 以 0.2 °C/m 为界, 形成明显的温度跃层; 50 m 以深存在着垂向均匀分布的低温水体。与温度相似, 夏季盐度垂向分布也具有明显的三层结构, 但分布趋势完全相反。10 m 以浅是低盐混合层, 10~50 m 是盐度跃层, 盐度快速增大至 33.5 以上, 底层为高盐水体, 此低温高盐的底层水体即为黄海冷水团水体^[21-23]。跃层底部边界与粒径谱的分界深度基本一致, 约在 50 m 左右深度。前人研究表明, 黄海冷水团是夏半年黄海浮游植物生长的营养盐储库^[24-26], 而温盐跃层的存在阻挡了营养盐的垂向扩散, 造成了表层的寡营养条件^[27]。因此, 在温盐跃层所在层位形成了适宜的温度,

光照以及营养盐条件, 这些条件促进了次表层叶绿素最大值层的形成(图 5), 生源颗粒的存在又进一步改变了悬浮体的物质组成和粒度特征。浮游植物可以分泌大量的具有粘性的透明胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)。这些聚合物具有正浮力性质, 可以自动向上扩散至表层^[28-30], 而粘性特征使得它们可以与碎屑矿物颗粒相结合形成大尺寸絮凝体, 增大了粒径谱中的粗颗粒组分含量。同时, 无机颗粒的加入增大了絮凝体的密度, 当增大到一定程度时, 这些高密度的絮凝体具有负浮力特征并向下沉降。温盐跃层的存在延长了生源颗粒和絮凝体的滞留时间^[31-32], 提供了絮凝的物质和空间条件, 因此跃层及其以上层位具有更多的粗颗粒物, 在跃层位置形成了体积浓度的次表层最大值(图 5)。从粒级百分比中也可以看到, 50 m 以上层位, 小于 256 μm 的细颗粒比重不足 0.1, 小于 64 μm 的细颗粒基本可以忽略不计(图 5)。现场, 分散颗粒和无机颗粒的粒度对比试验也表明, 夏季在冷水团海区, 大于 256 μm 的粗颗粒主要是絮凝体和浮游植物单体^[13]。而在跃层以下, 细颗粒比重逐渐升高。这是由于 C 站位于南黄海中部泥质区(图 1), 在潮流作用下, 底层泥质沉积物发生再悬浮, 增大了细颗粒的含量^[33-34]。

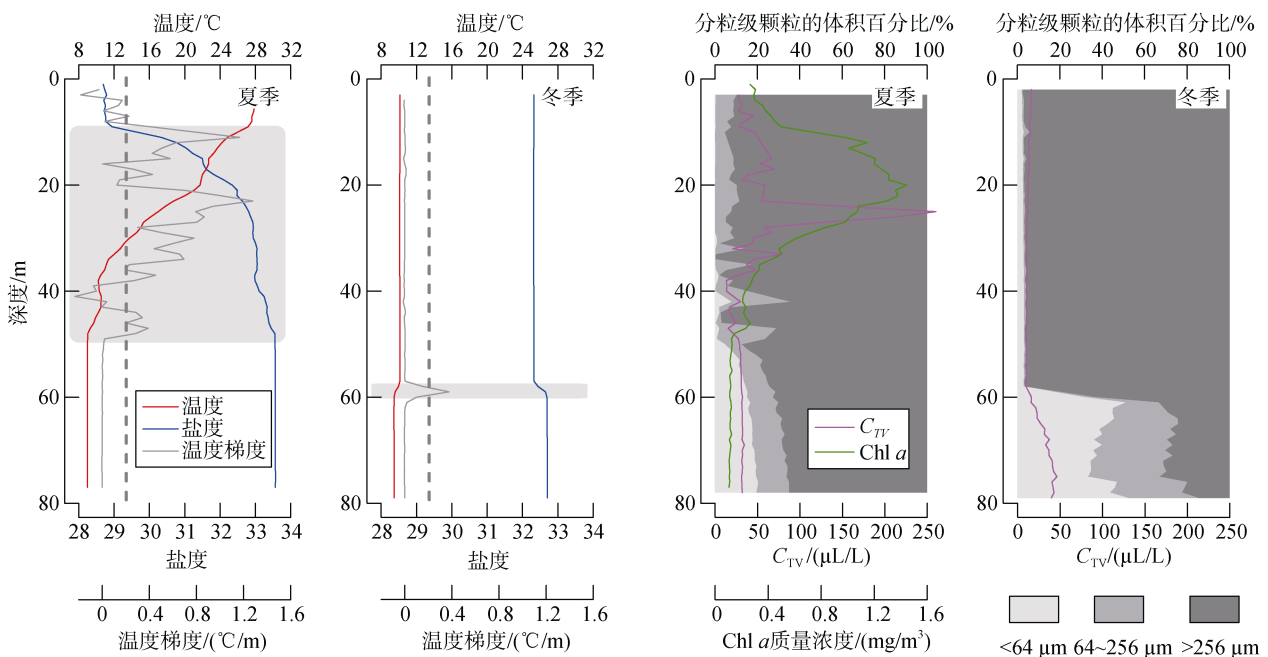


图 5 夏季和冬季 C 站位温度, 盐度, 温度梯度, 总体积浓度和叶绿素浓度的垂向分布以及分粒级颗粒的体积百分比
Fig. 5 Vertical distribution of temperature, salinity, temperature gradient, C_{TV} , Chl a and the percentage of particles of different grain sizes in station C in summer and winter

冬季, 由于受到冬季风的影响, 上层水体混合均匀且混合层深度可达 60 m 左右(图 5)。下层为相对低温高盐水体, 但跃层强度与厚度与夏季相比均较小。上下水层温度差异约 0.6 °C, 盐度差异约为 0.4, 跃层厚度约 3 m。相关研究表明冬季黄海暖流由南向北侵入南黄海, 在经过长江口附近海域时, 得益于强烈的混合作用, 水团营养程度得到加强^[35]。一方面, 在山东半岛沿岸流和黄海暖流的输运作用下, 山东半岛沿岸泥楔以及南黄海西南部的细颗粒可以被输运至南黄海中部^[36-39]; 另一方面, 黄海暖流将营养盐携带至南黄海中部促进了浮游植物生长^[40-42]。冬季粒径谱特征也显示了上层暖水体中大颗粒的存在(图 4), 这些大颗粒即是浮游植物或絮凝体颗粒存在的体现^[13, 33]。而底层同样受到再悬浮作用的影响, 细颗粒组分增加, 粗颗粒组分含量降低(图 5)。

3.2 粒度分布对平均粒径计算结果的影响

对比夏季和冬季平均粒径计算结果及粒径谱特征, 矩值法计算结果总是大于平均粒径法的结果, 而不同的粒径分布特征造成了平均粒径差值的表现不同。为了进一步分析原因, 我们分别选取夏、冬两季 C 站位表层, 跃层(夏季 25 m 层, 冬季 58 m 层)和近底层的粒径谱进行进一步分析。如图 6 所示, 我们

可以将粒径谱划分为两大类: 类型 I, 表层和跃层(图 6a、图 6b、图 6d 和图 6e); 类型 II, 近底层(图 6c 和图 6f)。其中类型 I 又可以划分为夏季(类型 I 夏季: 图 6a 和图 6b)和冬季(类型 I 冬季: 图 6d 和图 6e)两类。对于类型 I, 其特征为粗颗粒占据粒径谱的绝对组分, 累积频率曲线在细颗粒端保持极低值, 在 128 μm 处迅速上升。而类型 II 中各粒级体积浓度均大于 0.1 μL/L, 累积频率曲线从细颗粒端至粗颗粒段平稳上升。两种类型对比, 可以认为类型 I 颗粒集中度更好, 如果忽略细颗粒的贡献, 可以近似认为颗粒只集中于粗颗粒一端, 表明颗粒的分选性更好。根据两种算法公式, 粒度和各粒级的体积浓度是影响计算结果的变量, 类型 I 更好的集中度使得造成差异的粒级范围和差异大大缩小。而类型 II 各个粒级的颗粒的贡献均不可忽略, 意味着每个粒级都对平均粒径法的计算结果有所贡献, 因此类型 II 的计算差异大于类型 I 的颗粒。对于类型 I, 夏季的细颗粒基本缺失, 而冬季中小于 64 μm 的细颗粒体积浓度约为 0.01 μL/L。可以认为夏季是单一端元类型, 而冬季是两端元类型, 尽管细颗粒端元的贡献较小, 但是这种细微的贡献同样造成了冬季平均粒径的差值大于夏季(图 3), 这一结果也进一步验证了前述对类型 I 和类型 II 计算差异的解释。

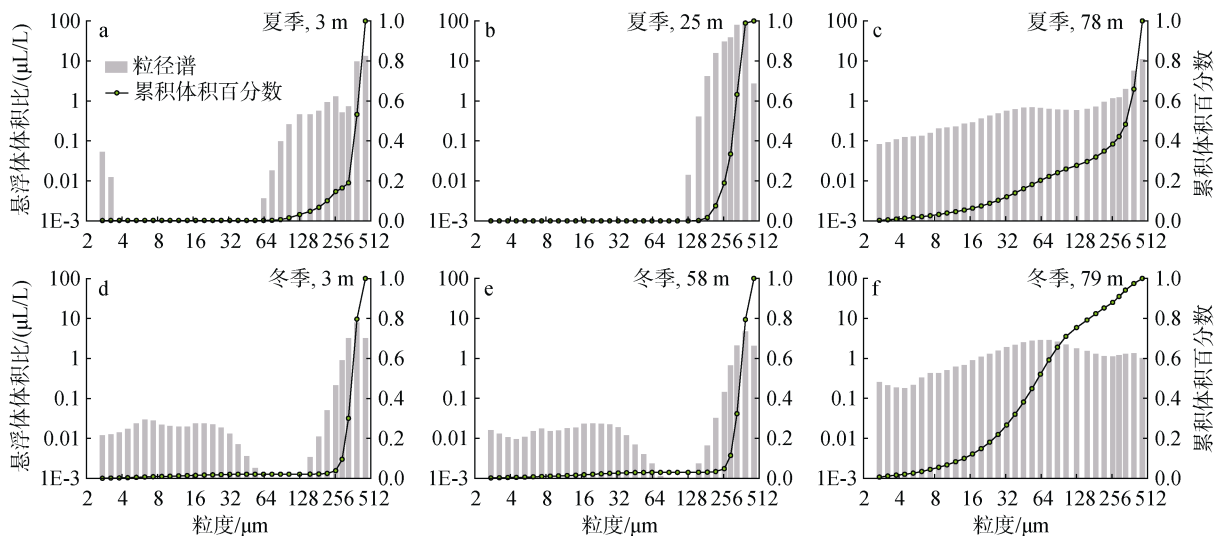


图 6 C 站位表层, 跃层和近底层粒径谱和累积频率分布曲线

Fig. 6 Particle size distribution and cumulative frequency distribution in the surface, thermocline, and bottom layers of station C
注: a—c 分别代表夏季表层、跃层和近底层的数据; d—f 分别代表冬季表层、跃层和近底层的数据

3.3 两种算法的适用性

类型 I 和类型 II 的粒度分布差异可以解释平均粒径的差值在跃层上下层位的差异问题, 但是对于

类型 II, 夏季和冬季的粒径谱均表现为多端元特征, 夏季的平均粒径差值却显著高于冬季, 而相对误差则低于冬季(图 3)。粒度分布显示冬季底层细颗粒组分

明显增多(图 5), 累积频率分布曲线显示夏季呈下凹型, 冬季呈上凸型(图 6 c 和图 6f)。夏季 128 μm 处的累积频率曲线只有 0.3 左右, 而冬季可达 0.7 左右。细颗粒组分的增加造成的直接结果是冬季平均粒径整体小于夏季, 季节差异可达 100 μm 以上。因此, 可以推测平均粒径绝对值(本质上是细颗粒组分的比重)的变化造成了两季节差值的不同, 而其相对误差只有 10%左右。

为了验证该结论, 我们设计了一组两端元粒度模型(表 1), 分别利用两种算法计算其平均粒径及其差值, 探讨平均粒径值变化对计算差值的影响。根据计算结果, 在总体积浓度不变情况下, 当细颗粒端元(2.72 μm)或者粗颗粒端元(462 μm)组分为 0 时, 即只存在单一端元时, 两种计算方法结果基本一致, 类似于 I 的计算结果。随着细颗粒组分的增大, 平均粒径值逐渐减小, 其差值在细颗粒为 25%时达到最大, 随后逐渐减小, 而相对误差则逐渐增大。这表明, 平均粒径绝对值的大小会影响计算差值的大小。尽管该模型只涉及两个端元, 但是充分说明了细颗粒组分增加导致了平均粒径绝对值的减小, 并进一步造成了平均粒径差值的减小。

对比两种计算方法[公式(2)和公式(6)], 矩值法计算中将所有粒径值与其百分比相乘进行计算, 由于 LISST32 个粒级呈对数分布, 粗颗粒的粒径值与细颗粒相差可达两个数量级, 在一定程度上放大了粗颗粒的作用。而对于平均粒级法, 考虑了每个粒级的贡献, 求得平均粒级后再利用指数关系求解实际对应的粒径值, 充分考虑了细颗粒的贡献。如夏季, 在以浮游生物主导的跃层以上层位(层化环境), 两种方法的计算结果差异较小, 可以互相替代; 而跃层以下层位(黄海冷水团)再悬浮作用导致的细颗粒组分明显增大(图 4), 但矩值法计算得到的平均粒径仍然在 300 μm 以上, 对两种不同粒度特征的指示性较差; 而平均粒级法的结果在 250 μm 以下(图 3), 对两种分布特征的区分度相对较好。因此, 在以大颗粒占绝对贡献时, 两种算法可相互替代, 计算差值较小; 当细颗粒的组分增加时, 平均粒级法对细颗粒的变化更加敏感。而在陆架海区, 细颗粒悬浮体是源汇沉积过程的重要载体, 其分布和输运机制是现代沉积过程的重要内容。从现代海洋沉积学角度看, 平均粒级法是更合理的平均粒径计算方法。

表 1 两端元粒度模型及其计算结果

Tab. 1 Two-end element granularity model and its mean size calculation results

各粒级颗粒体积百分比 / %		M_{Z1}	M_{Z2}	$M_{Z1}-M_{Z2}$	$(M_{Z1}-M_{Z2})/M_{Z1}$
2.72 μm	462 μm				
0	100	462	460.16	1.84	0.004
10	90	416.07	275.47	140.60	0.338
25	75	347.18	127.59	219.59	0.632
50	50	232.36	35.38	195.98	0.843
75	25	117.54	9.81	107.73	0.917
90	10	48.65	4.54	44.11	0.907
100	0	2.72	2.72	0	0

4 结论

基于 LISST32 个粒级的对数分布特征, 根据南黄海海区的实测数据, 对两种算法计算的平均粒径结果进行了比较研究。

1) 矩值法计算得到的平均粒径结果总是大于平均粒级法的结果。无论夏季还是冬季, 温度跃层及其以上层位差值较小, 而跃层以下层位差值较大。两种方法计算的平均粒径差值与悬浮体的粒度分布特征密切相关。

2) 根据南黄海现场调查资料, 可以将粒度分布

特征划分为两种类型。类型 I 位于温盐跃层及其以上层位, 以粗颗粒为主, 细颗粒组分比重极小。此时, 悬浮体粒径谱可以认为是近似单一端元分布, 颗粒分选较好, 粒度集中度高, 两种方法计算的平均粒径差值较小, 两者可以相互替代。类型 II 位于跃层以下层位, 细颗粒组分高于类型 I, 颗粒分选较差, 粒度集中度低, 导致两种方法计算的平均粒径差值较大, 夏季差值可达 90 μm , 冬季差值小于 70 μm 。

3) 对于类型 II 分布特征, 细颗粒组分的比重导致了平均粒径值的降低, 进一步造成了差值的减小, 并通过两端元粒度模型进行了验证。针对 LISST 的

测量结果和粒度分布特征, 矩值法强调了粗颗粒组分的贡献, 而平均粒度法对细颗粒组分的变化更加敏感, 后者是更适用于将 LISST 观测数据应用于陆架海区现代沉积环境研究的粒径参数计算方法。

致谢: 感谢“科学三号”和“东方红2号”考察船全体船员和航次科考队员对相关悬浮体采样和观测工作提供的帮助。美国 Sequoia 科学公司 Agrawal 博士和青岛海洋研究设备服务有限公司(ORE)李明波高级工程师对本文的写作提供了指导和建议, 谨致谢忱。

参考文献:

- [1] Gao Shu, Collins M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of “transport vectors” [J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 81(1-2): 47-60.
- [2] 万世明, 李安春, Jan-berend W S, 等. 南海北部 ODP1146 站粒度揭示的近 20Ma 以来东亚季风演化[J]. *中国科学: D 辑: 地球科学*, 2007, 37(6): 761-770.
Wan Shiming, Li Anchun, Jan-Berend W S, et al. The evolution of east Asian monsoon revealed by the particle size of ODP1146 in the north of South China Sea since nearly 20 Ma[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2007, 37(6): 761-770.
- [3] Hu Bangqi, Yang Zuosheng, Zhao Meixun, et al. Grain size records reveal variability of the East Asian Winter Monsoon since the Middle Holocene in the Central Yellow Sea mud area, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(10): 1656-1668.
- [4] 李军, 高抒, 曾志刚, 等. 长江口悬浮体粒度特征及其季节性差异[J]. *海洋与湖沼*, 2003, 34(5): 499-510.
Li Jun, Gao Shu, Zeng Zhigang, et al. Particle-size characteristics and seasonal variability of suspended particulate matter in the Changjiang River estuary[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(5): 499-510.
- [5] 许冬, 初凤友, 李家彪, 等. 粤西—琼东北近海沉积物的运移和沉积[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2014, 44(3): 905-917.
Xu Dong, Chu Fengyou, Li Jiabiao, et al. Transport and deposition of sediment on the shelf off Western Guangdong to Northeastern Hainan[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(3): 905-917.
- [6] Fettweis M, Baeye M. Seasonal variation in concentration, size, and settling velocity of muddy marine flocs in the benthic boundary layer[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(8): 5648-5667.
- [7] Many G, de Madron X D, Verney R, et al. Geometry, fractal dimension and settling velocity of flocs during flooding conditions in the Rhône ROFI[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 219: 1-13.
- [8] 贾建军, 高抒, 薛允传. 图解法与矩法沉积物粒度参数的对比[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(6): 577-582.
Jia Jianjun, Gao Shu, Xue Yunchuan. Grain-size parameters and derived from graphic and moment methods: A comparative study[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(6): 577-582.
- [9] 刘志杰, 公衍芬, 周松望, 等. 海洋沉积物粒度参数 3 种计算方法的对比研究[J]. *海洋学报*, 2013, 35(3): 179-188.
Liu Zhijie, Gong Yanfen, Zhou Songwang, et al. A comparative study on the grain-size parameter of marine sediments derived from three different computing methods[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(3): 179-188.
- [10] 蔡国富, 范代读, 尚帅, 等. 图解法与矩值法计算的潮汐沉积物粒度参数之差异及其原因解析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(1): 195-204.
Cai Guofu, Fan Daidu, Shang Shuai, et al. The difference between graphic and moment method in calculating the size parameters of tidal deposition and their reasons[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(1): 195-204.
- [11] 徐兴永, 易亮, 于洪军, 等. 图解法和矩值法估计海岸带沉积物粒度参数的差异[J]. *海洋学报*, 2010, 32(2): 80-86.
Xu Xingyong, Yi Liang, Yu Hongjun, et al. The difference of grain-size parameters estimated with graphic and moment methods in coastal sediments[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(2): 80-86.
- [12] 国家海洋局 908 专项办公室. 海洋底质调查技术规范[M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
908 Office in State Oceanic Administration. Technical Regulation for Marine Bottom Sediments Survey[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006.
- [13] Zhang K N, Wang Z Y, Li W J, et al. Properties of coarse particles in suspended particulate matter of the North Yellow Sea during summer[J]. *Journal of Oceanology & Limnology*, 2019, 37(1): 79-92.
- [14] Wang Aijun, Ye Xiang, Chen Jian. Observations and analyses of floc size and floc settling velocity in coastal salt marsh of Luoyuan Bay, Fujian Province, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29(3): 116-126.
- [15] Agrawal Y C, Pottsmith H C. 2000. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport[J]. *Marine Geology*, 2000, 168(1): 89-114.
- [16] 王珍岩, 张洪格, 高微, 等. 冬季西太平洋雅浦海山(Y3) 区次表层叶绿素最大值层分布及其对悬浮体粒度的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(6): 1404-1414.
Wang Zhenyan, Zhang Hongge, Gao Wei, et al. Sub-surface chlorophyll maximum layer in YAP (Y3) sea-

- mount area in the Western Pacific during winter: Distribution and influence on particle size distribution of suspended particulate matter[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(6): 1404-1414.
- [17] Agrawal Y C, Mikkelsen O A. Shaped focal plane detectors for particle concentration and mean size observations[J]. *Optics Express*, 2009, 17(25): 23066-23077.
- [18] 国家海洋局. 海洋调查规范. 第七分册—海洋调查资料交换[M]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 106-107. State Ocean Administration. Specifications for Oceanographic Survey Part 7: Exchange of Oceanographic Survey Data[M]. Beijing: China Standards Press, 2007: 106-107.
- [19] Yuan Dongliang, Zhu Jianrong, Li Chunyan, et al. Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations[J]. *Journal of Marine System*, 2008, 70(1): 134-149.
- [20] McManus J. Grain size determination and interpretation[J]. *Techniques in Sedimentology*, 1988, 408: 63-85.
- [21] 赫崇本, 汪园祥, 雷宗友, 等. 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨[J]. *海洋与湖沼*, 1959, 2(1): 11-15. He Chongben, Wang Yuanxiang, Lei Zongyou, et al. A preliminary study of the formation of Yellow Sea Cold Water Mass and its properties[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1959, 2(1): 11-15.
- [22] Zhang S W, Wang Q Y, Lü Y, et al. Observation of the seasonal evolution of the Yellow Sea Cold Water Mass in 1996–1998[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(3): 442-457.
- [23] Park S, Chu P C, Lee J H. Interannual-to-interdecadal variability of the Yellow Sea Cold Water Mass in 1967–2008: characteristics and seasonal forcings[J]. *Journal of Marine System*, 2011, 87(3-4): 177-193.
- [24] 王保栋. 黄海冷水域生源要素的变化特征及相互关系[J]. *海洋学报*, 2000, 22(6): 47-54. Wang Baodong. Characteristics of variations and interrelations of biogenic elements in the Huanghai Sea Cold Water Mass[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(6): 47-54.
- [25] 韦钦胜, 傅明珠, 李艳, 等. 南黄海冷水团海域溶解氧和叶绿素最大值现象及营养盐累积的季节演变[J]. *海洋学报*, 2013, 35(4): 142-154. Wei Qinsheng, Fu Mingzhu, Li Yan, et al. Observation of the seasonal evolution of DO, chlorophyll a maximum phenomena and nutrient accumulating in the southern Huanghai (Yellow) Sea Cold Water Mass area[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(4): 142-154.
- [26] Su Ni, Du Jinzhou, Liu Sumei, et al. Nutrient fluxes via radium isotopes from the coast to offshore and from the seafloor to upper waters after the 2009 spring bloom in the Yellow Sea[J]. *Deep Sea Research, Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, 97: 33-42.
- [27] Jin Jie, Liu Sumei, Ren Jingling, et al. Nutrient dynamics and coupling with phytoplankton species composition during the spring blooms in the Yellow Sea[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, 97(12): 16-32.
- [28] Alldredge A L, Passow U, Logan B E. The abundance and significance of a class of large, transparent organic particles in the ocean[J]. *Deep-sea Research Part I. Oceanographic Research Papers*, 1993, 40(6): 1131-1140.
- [29] Passow U. Transparent exopolymer particles (TEP) in aquatic environments[J]. *Progress in Oceanography*, 2002, 55: 287-333.
- [30] Mari X, Passow U, Migon C, et al. Transparent exopolymer particles: Effects on carbon cycling in the ocean[J]. *Progress in Oceanography*, 2017, 151: 13-37.
- [31] Azetsu-Scott K, Passow U. Ascending marine particles: Significance of transparent exopolymer particles (TEP) in the upper ocean[J]. *Limnology Oceanography*, 2004, 49(3): 741-748.
- [32] Wurl O, Miller L, Vagle S. Production and fate of transparent exopolymer particles in the ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116: 1-16.
- [33] 凡仁福, 魏皓, 赵亮. 高生产力区 LISST-100 和 OBS 对悬浮颗粒物测量的比较研究[J]. *海洋科学进展*, 2015, 33(4): 492-500. Fan Renfu, Wei Hao, Zhao Liang. The comparison between LISST-100 and OBS observation on the suspended particulate material in the high-production area[J]. *Advance in Marine Science*, 2015, 33(4): 492-500.
- [34] Li Guangxue, Qiao Lulu, Dong Ping, et al. Hydrodynamic condition and suspended sediment diffusion in the Yellow Sea and East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2016, 121: 6204-6222.
- [35] Liu Xin, Chiang K P, Liu Sumei, et al. Influence of the Yellow Sea Warm Current on phytoplankton community in the central Yellow Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, 106: 17-29.
- [36] Alexander C R, DeMaster D J, Nittrouer C A. Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: The Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 1991, 98(1): 51-72.
- [37] Yang Zuosheng, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2007, 240: 169-176.
- [38] Bian Changwei, Jiang Wensheng, Quan Qi, et al. Distributions of suspended sediment concentration in the Yellow Sea and the East China Sea based on field surveys during the four seasons of 2011[J]. *Journal of Marine Systems*, 2013, 121-122: 24-35.
- [39] Lu Jian, Li Anchun, Zhang Jin, et al. Yangtze River-

- derived sediments in the southwestern South Yellow Sea: Provenance discrimination and seasonal transport mechanisms[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 176: 353-367.
- [40] Fu Mingzhu, Wang Zongling, Li Yan, et al. Phytoplankton biomass size structure and its regulation in the Southern Yellow Sea (China): Seasonal variability[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(18): 2178-2194.
- [41] Liu Xin, Huang Bangqin, Huang Qiu, et al. Seasonal phytoplankton response to physical processes in the southern Yellow Sea[J]. *Journal of Sea Research*, 2015, 95: 45-55.
- [42] Lin Lei, Wang Yueqi, Liu Dongyan. Vertical average irradiance shapes the spatial pattern of winter chlorophyll-a in the Yellow Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 224: 11-19.

Comparative study on calculation of mean size of suspended particulate matter based on the LISST

LI Wen-jian^{1, 2, 4}, WANG Zhen-yan^{1, 2, 3, 4, 5}, HUANG Hai-jun^{1, 2, 3, 4, 5}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. CAS Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology Qingdao, Qingdao 266071, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Sep. 9, 2019

Key words: mean size; moments method; mean size class method; laser *in situ* scattering and transmissometry (LISST); particle size distribution

Abstract: The mean size of suspended particulate matter is an important parameter for modern deposition process research. It is also of great significance to reveal the sedimentary environment and hydrodynamic background. The *in situ* grain size of suspended particulate matter can be measured rapidly by laser *in situ* scattering and transmissometry (LISST), which is non-destructive and efficient. The 32 size classes of the LISST are exponential, and the mean size can be calculated based on the moments method and mean size class method. We conducted the comparative study of the mean size calculation by the two methods based on the *in situ* data measured by the LISST-100X in the central South Yellow Sea in the summer of 2012 and the winter of 2016. The results showed that the difference in mean size was negligible above the thermocline both in summer or winter. The difference increased with depth under the thermocline due to the increase in fine particle composition. The end-member experiment showed that a higher mean size tended to cause the higher difference. The moments method highlights the contribution of coarse particles, while the mean size class method is sensitive to the fine particles. The latter is more suitable for the study of modern deposition environment in continental shelf sea areas. This work can guide the study of modern sedimentary processes with LISST in continental shelf sea areas.

(本文编辑: 刘珊珊)