

水下高光谱衰减测量的不确定度分析

赵连成¹ 毛志华¹ 陶邦一¹ 陈鹏^{1,2} 朱乾坤¹

¹国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012

²武汉大学, 湖北 武汉 430072

摘要 研究了水下高光谱衰减测量仪(ACS)的不确定度。通过不同粒径的标准颗粒(2, 5, 10, 20 μm)的米氏散射理论计算值与紫外-可见分光光度计(PE35)的实测值对比, 得出: PE35的衰减测量误差最大不超过8%。针对我国高浑浊水体环境, 利用ACS与PE35对我国东海浑浊海水样品进行衰减同步测量, 结果表明: ACS在浑浊水体下的测量结果被低估, 其不确定度与波长呈负相关; 水体的浊度对ACS衰减测量的不确定度影响较大, 且呈正相关, 在低浊度水体下ACS(10 cm)的测量值被低估17.2%~19.04%, ACS(25 cm)的测量值被低估7.84%~15.36%, 在高浊度水体下ACS(10 cm)的低估则增至26.4%~28.24%。

关键词 海洋光学; 衰减系数; 米氏散射计算; 不确定度

中图分类号 P715.5 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0401004

Analysis of Uncertainties Associated to Underwater Hyperspectral Attenuation Measurements

Zhao Liancheng¹ Mao Zhihua¹ Tao Bangyi¹ Chen Peng^{1,2} Zhu Qiankun¹

¹State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou, Zhejiang 310012, China

²Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China

Abstract The uncertainty for the underwater hyperspectral measurement of attenuation (ACS) is studied. The attenuation measurements for standard particles of different diameters (2, 5, 10, 20 μm) by ultra violet-visible (UV-Vis) spectrophotometer (PE35) are compared with model values by Mie scattering theory, and the attenuation measurement error of PE35 is found less than 8%. Subsequently, simultaneous attenuation measurements by ACS and PE35 are carried out for samples from the high turbid water in the East China Sea. Comparative results show the attenuation measurements by ACS are underestimated in high turbid water, and the uncertainty of ACS measurements has a negative correlation with wavelength, conversely, with a strong positive correlation with turbidity of water. The attenuation measurements of ACS(10 cm) and ACS(25 cm) are underestimated within 17.2%~19.04% and 7.84%~15.36% in low turbid water, respectively, while ACS(10 cm) is within 26.4%~28.24% in high turbid water.

Key words oceanic optics; attenuation coefficient; Mie scattering calculation; uncertainty

OCIS codes 010.4450; 120.4640; 280.4788

1 引言

水体光谱衰减系数 $c(\lambda)$ 是指水体中各波段每单位距离光的衰减率。自然水体的光衰减主要由纯水、可溶性有机物、悬浮颗粒物的吸收、散射组成, 与吸收系数 $a(\lambda)$ 、散射系数 $b(\lambda)$ 存在着以下关系: $c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$ 。在实际水体固有光学量(IOP)测量中, 由于 $b(\lambda)$ 测量缺乏精确的实验测量方法, 直接测量精度较低, 通常用

收稿日期: 2014-09-09; 收到修改稿日期: 2014-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(40576080, 41206170)、国家重大科研仪器设备开发专项(2013YQ1034303)、海洋公益科学技术研究基金(2010050030)、海洋赤湖灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室开放研究基金(MATHAB201305)

作者简介: 赵连成(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事水色遥感方面的研究。E-mail: zhaolianchengg@163.com

导师简介: 毛志华(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事海洋遥感方面的研究。

E-mail: 1010827619@qq.com(通信联系人)

$c(\lambda)$ 和 $a(\lambda)$ 的差值来估算水体的总散射系数 $b(\lambda)$ 。因此,在实际研究过程中,衰减系数 $c(\lambda)$ 与吸收系数 $a(\lambda)$ 和散射系数 $b(\lambda)$ 共同成为决定水体离水辐亮度 $L_w(\lambda)$ 这一重要水色遥感物理参数的3个最基本的固有光学量^[1-2]。由于 $a(\lambda)$ 和 $b(\lambda)$ 都是自然水体自身性质与各组成成分浓度的可变函数,因此 $c(\lambda)$ 综合反映了光线在水中受到悬浮颗粒、可溶性有机质和浮游生物的影响程度,是水体的透明度、悬浮物浓度等因素的直接指标。很多学者对于自然水体的衰减系数与有机颗粒物、无机颗粒物、叶绿素等参数的相关关系进行了研究,发现在赤潮水体、高悬浮物浓度的近岸浑浊水体和内陆湖泊中存在较明显的相关关系^[3-6]。Phlips等^[7]对美国 Florida 近岸海域的水体光衰减系数与无机颗粒物、叶绿素 a 和水色的线性回归分析发现衰减系数与无机颗粒物相关性非常好。Pak等^[8]发现由水中悬浮粒子性质决定的粒子光束衰减系数 $c(660\text{ nm})$ 与总粒子体积浓度有很高的相关性。官文江等^[9]发现在东海近岸可以利用叶绿素浓度数据和纯海水光学特性较好地计算水体衰减系数。张运林等^[10]发现在太湖水体中悬浮物浓度的增加是引起水体透明度降低和光学衰减系数增大的主要原因,并建立光学衰减系数与悬浮物浓度的幂函数关系。

目前 $c(\lambda)$ 的测量可以通过实验室测量和现场测量获得。实验室常用的测量仪器是分光光度计,光束经过样品被分光光度计光接收器接收到衰减光包含了部分的前向散射光,故衰减系数的测量误差主要集中在前向散射的测量精度上^[11-12]。为减小测量误差,要求光束接收器的接收角度应比光源的发散角小。Bricaud等^[13-14]在利用分光光度计测量衰减系数时把样品放于离光源较近的位置,并增大样品与光束接收器的距离,同时在样品与光接收器之间放上特制的窄缝挡板以减少透射光中前向散射的干扰,提高测量精度。沈玉璋等^[15]借鉴 Bricaud 的方法在测量藻类的衰减系数时,利用标准颗粒物(中心粒径 $1.999\ \mu\text{m}$)来验证其测量方法的可靠性。相对于分光光度计,可应用于现场水下的高光谱衰减测量仪(ACS)则需具备密闭性良好的刚性的准直光路^[16],以适应高压的水下环境。美国 Wetlabs 公司生产的水下 9 波段和高光谱吸收衰减仪(AC-9 和 ACS)是海洋领域中目前使用最为广泛的水下衰减测量仪器。然而,前人对该仪器测量的不确定度的分析较少,已有研究认为 AC-9 的衰减测量误差主要源自光束接收器的视场角(0.9°)大于通过管壁的光子在前进方向分布的角度,从而导致对 $c(\lambda)$ 的低估^[17-19],Zaneveld 等^[20]针对这个问题提出“比值法”以校正误差。Leymarie 等^[21]认为光子传播过程中和管壁发生单次和多次散射导致光子的光程增加也是引起 $c(\lambda)$ 测量误差的来源,并利用 Monte Carlo 模型对 ACS 的测量精度模拟分析,结果显示,复杂水体下的 $c(\lambda)$ 通常被低估 $10\% \sim 40\%$ 。大多数学者对水下高光谱衰减仪测量的不确定度分析都是采用数值模拟的方法进行的,而以实测数据分析和验证的方法未见报道。近年来,我国高浑浊的近岸水体和内陆湖泊水体的衰减测量中已大量采用水下高光谱衰减仪,因此非常有必要对 ACS 在我国高浑浊水体的测量不确定度进行评价。

为模拟不同前向散射强度的颗粒对分光光度计衰减测量影响,本文利用4种不同粒径的标准颗粒物(2、5、10、20 μm)的米氏散射理论计算值和实测值对分光光度计测量的不确定度进行全面评价。利用基于 ACS 搭建的实验室流通测量系统和分光光度计对 2012 年 7 月长江口海域水体样品进行同步测量,给出 ACS 实测条件下较为准确的不确定度范围,对 ACS 在我国高浑浊水域衰减测量的精度评价具有重要的参考价值。

2 材料与方 法

2.1 实验样品选择

实验样品选择 4 种不同粒径的 Thermo 公司的 Duke Standards™ Microsphere Size Standards 4000 series,标准颗粒物主要由聚苯乙烯组成,中心粒径分别为 1.999、4.993、10.12、19.99 μm ,其中心粒径分布符合高斯分布,标准误差分别为 0.022、0.05、0.09、0.28 μm 。由于聚苯乙烯无吸收特性,故在计算时仅考虑其折射指数实部。由颗粒物的粒径大小及分布,悬浊液中颗粒的数量浓度,水和标准颗粒物的折射率(随波段变化)通过米氏散射理论计算即可计算得出其同一浓度下的衰减系数(其中米氏散射的计算代码采用了 Christian Mätzler 公开的代码^[22])。对比同浓度下标准颗粒物的计算值和分光光度计的测量值即可确定分光光度计的不确定度。

实测样品选用 2012 年 7 月份长江口水体样品,取回后使用磁力搅拌器搅拌均匀,选取不同浊度和总悬浮物浓度(TSM)的样品 8 组(编号: Sample_a~Sample_h),如表 1 所示。

表 1 2012 年 7 月份长江口海水样品

Table 1 Seawater samples of Changjiang River in July 2012

Sample	Sample_a	Sample_b	Sample_c	Sample_d	Sample_e	Sample_f	Sample_g	Sample_h
Turbidity /NTU	23	104.5	265.1	381.3	551.2	662.8	705.4	886.4
TSM /(mg/L)	9.81	53.18	325.65	190.72	424.24	544.35	616.3	660.88

2.2 分光光度计测量衰减系数

分光光度计使用 Perkin Elmer 公司生产的紫外-可见分光光度计 PE35, 波段范围为 190~1100 nm, 杂散光小于 0.01% T (T 为透射比), 分辨率为 0.1 nm, 波谱带宽为 1 nm。实验室衰减测量过程中有诸多因素可影响测量结果的准确度, 如光源的偏振性和不稳定性、杂散光、光度线性等^[23-32], 在测量时将样品放于贴近光源位置, 增大样品与光束探测器的距离, 并在探测器加特制黑色圆孔挡板以减少前向散射对测量结果的影响(接收角减小至 0.3°)。测量采用 1 cm 比色皿, Milli-Q 标准纯水作为参比, 衰减系数为

$$c(\lambda) = \frac{2.303}{l} \cdot [D_s(\lambda) - D_f(\lambda)] \tag{1}$$

式中 $l=1\text{cm}$ 为比色皿的光程, $D_s(\lambda)$ 为样品的吸光度, $D_f(\lambda)$ 为 Milli-Q 标准纯水和空白比色皿的吸光度。海水样品亦用此方法测量其衰减系数。

2.3 ACS 测量水体衰减系数

美国 Wetlab 公司生产的水下高光谱吸收衰减测量仪根据测量通道的长度不同分为两种型号: 光程 10 cm 的 ACS(10 cm) 和光程 25 cm 的 ACS(25 cm)。在可见光波段共有 85 个光谱通道, 光谱分辨率为 4 nm, 测量精度为 0.01 m^{-1} 。仪器在测量样品前, 依次进行纯水校正、温盐校正, 最后得到除纯水之外水体成分的衰减系数为^[33]

$$c_m(\lambda) = c_{mraw}(\lambda) - c_{off}(\lambda) \tag{2}$$

$$c_{mTS} = c_m - [\psi_T(T - T_r) + \psi_S(S - S_r)] \tag{3}$$

式中 c 为衰减系数, λ 为波长, 下标 mraw 表示原始测量数据, m 表示测量数据, off 表示纯水校正的偏移量, r 表示参考量, 下标 mTS 表示经温盐校正的数据, T 为温度, S 为盐度, ψ_T 和 ψ_S 分别为温度和盐度校正系数。由于纯水衰减系数为常量, 本文仅对除纯水之外水体成分的衰减系数进行比较分析。

然而, 对 ACS 的传统使用方法为现场水下测量, 实验室内按照水下测量方法需要大量海水样品, 这无疑增加了测量实验的难度和成本, 为解决这一难题, 搭建了一种可用于实验室内测量的 ACS 流通池测量系统, 如图 1 所示。用清洗过的 Teflon 水管分别连接 ACS(25 cm) 和 ACS(10 cm) 的衰减测量管(以下简称 c 管, 为避光接口处使用黑色橡胶管), ACS 仪器左侧水管连接三通阀门, 一接口连接定标筒, 定标筒高于仪器整体水平面, 作定标使用, 另一接口连接蠕动泵, 用作循环系统流动动力使用, 第三个接口连接缓冲池, 最后连通 ACS(10 cm) 和 ACS(25 cm) 的 c 管, 组成一个密闭的循环测量系统。为解决循环系统中内部因气泡存在而影响

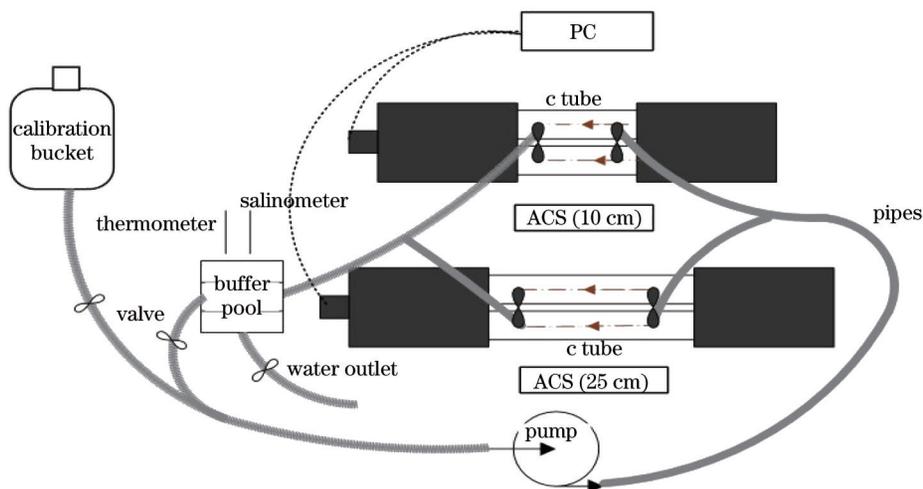


图 1 ACS 实验室流通测量系统

Fig.1 ACS laboratory cycle measurement system

测量结果的问题,在所有接口做密闭处理。在正式测量之前调节蠕动泵以合适的压力使水管内水体缓慢流动将水中气泡冲至缓冲池内,若ACS所测曲线波动稳定在 0.005 m^{-1} 内,则认为系统内部气泡已排除。定标时,使用前需用定标筒内静置一天去气泡的 Milli-Q 水缓慢充满整个测量系统,气泡排除后定标,并记录缓冲池内水的温度。定标完成后,关闭定标筒水流开关,使 Milli-Q 水在系统内缓慢流通。在测量样品时,在缓冲池内缓慢加入海水样品一边打开缓冲池一侧开关使纯水缓慢流出,直至海水样品完全取代纯水充满整个循环系统(以曲线数值稳定在 0.005 m^{-1} 内为准),此时关闭缓冲池开关并停止向缓冲池注入海水样品,记录 ACS 测量曲线以及此时的温盐数值用于数据处理,然后取缓冲池中部混合均匀海水样品加入 1 cm 比色皿用 PE35 进行测量。待一组样品测量完成后,打开定标筒开关,使用 Milli-Q 水冲洗系统后开始测量下一组海水样品。为保证 ACS 测量稳定性,每测 5 组数据取下 ACS 的 c 管进行清洗,纯水定标后继续测量海水样品。

3 结果与分析

3.1 分光光度计衰减测量精度评估

本文利用不同粒径的标准颗粒物对 PE35 测量的不确定度进行分析,定义不确定度为

$$E(\lambda) = \left[\frac{c_m(\lambda) - c_t(\lambda)}{c_t(\lambda)} \right] \times 100\%, \quad (4)$$

式中 $c_m(\lambda)$ 为 PE35 实测衰减系数值, $c_t(\lambda)$ 为样品米氏散射理论计算值。 $E(\lambda)$ 为正值表示 PE35 的测量值被高估,负值表示被低估。

图 2 为不同粒径的标准颗粒实测值与米氏散射理论计算值对比曲线和 PE35 的不确定度分析结果,图中曲线是标准颗粒物的理论计算值归一化到实测时的颗粒数量浓度所得。在 $400\sim 800\text{ nm}$ 波段,PE35 测量结果与米氏散射理论值在谱形上较为一致,但由于前向散射的影响无法完全消除,PE35 的测量结果总体上偏低。由图中的蓝色误差线可以看出,测量误差在随波长的波动的谱形与标准颗粒物的计算值的谱形较为一致。4 种标准颗粒物的实测值与计算值的误差值在波峰范围远大于波谷的范围的值(粒径 $D=2\ \mu\text{m}$ 时,波峰波谷的不确定度约为 -2% ;粒径 $D=5\ \mu\text{m}$ 时,波峰波谷的不确定度约为 -3% ;粒径 $D=10\ \mu\text{m}$ 时,波峰波谷的不确定度约为 -4% ;粒径 $D=20\ \mu\text{m}$ 时,波峰波谷的不确定度约为 -6%)。由米氏散射理论可知,随所测的球形颗粒粒径的增

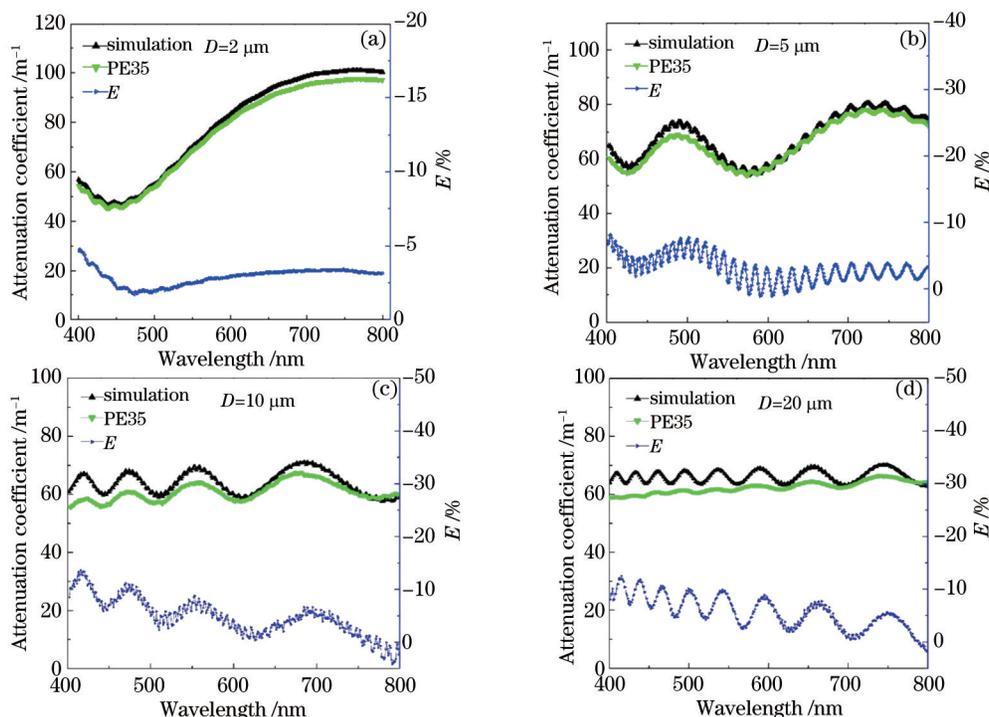


图 2 不同粒径标准颗粒的衰减系数测量值与理论计算值的比较(以标准颗粒的数量浓度归一化,单位为 g/m^3)

Fig.2 Comparison of the attenuation coefficient measurements and theoretical calculations of the standard particles with different sizes (normalized by particle concentration with unit of g/m^3)

加,悬浊液的前向散射所占总体散射的比例增大,强的前向散射导致PE35的光束接收器接收的能量增大,测量的衰减系数减小,随着颗粒的粒径的增加,分光光度计的测量不确定度随之增加,分别约为-5%,-6%,-8%,-10%。

取特征波段412,420,443,490,531,550,555,660,670,678 nm对4种标准颗粒物的计算值和实测值对比分析。结果如图3(a)所示,斜线为1:1线,PE35测量值相对于计算值(近似真值)整体偏低,PE35的测量值的误差大小和波段并无明显关系。从衰减系数量值上来看,在衰减系数实测值较低值处波段拟合效果要优于衰减系数实测的高值处。

图3(b)显示测量的不确定度分布,大部分在-1%~-10%以内,部分波段位于-10%~-15%(412、670、678 nm处)。由于球形标准颗粒的粒径分布和折射指数参数存在平均为±1.1%的变动,由计算可知其对结果的影响平均为±0.2%,假设仪器测量过程中由于人为引入的系统误差对结果的影响为±2%,说明PE35的不确定度约为-8%(所测标准颗粒物粒径为20 μm时),当所测粒径较小如2 μm时,约为-3%。

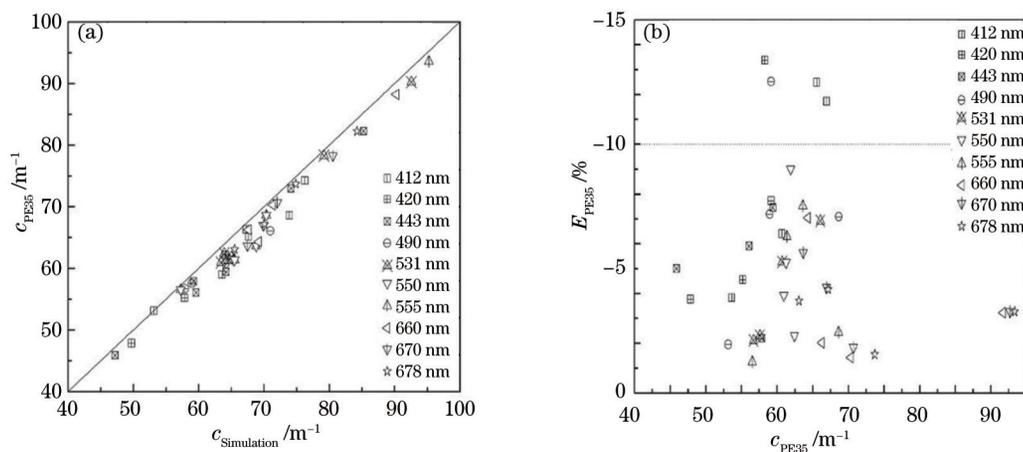


图3 标准颗粒物在不同特征波段的分析。(a)PE35测量值和计算值的分布;(b)PE35测量值的不确定度分布

Fig.3 Analysis of the standard particles with different characteristic bands. (a) Distribution of measurement from PE35 and simulation; (b) uncertainty distribution of measurement from PE35

3.2 ACS衰减测量不确定度分析

由于ACS实验室循环测量系统所需样品量较大,不适合使用标准颗粒物悬浊液分析其不确定度。由3.1节中PE35的精度已知,故采用海水样品作为实测样品进行ACS和分光光度计同步对比测量。

图4给出对比结果。ACS(25 cm)衰减系数量程为0~32 m^{-1} ,ACS(10 cm)量程为0~80 m^{-1} ,超过量程的部分不在图中显示。由图4可看出,ACS在400~800 nm波段的测量值低于PE35的测量值。分析可能的原因有:测量过程中人为操作带来的误差;ACS的c管管壁虽是由黑色吸光材料组成,管壁不能完全吸收所测样品所散射的光子;ACS的光路接收器的视场角为0.9°,导致部分前向散射光被光接收器接收等都会导致对c值的低估。

在低浊度的水体中,ACS(25 cm)和ACS(10 cm)的测量值有略有差异,ACS(25 cm)的测量值比ACS(10 cm)略高,更接近PE35的测量值(近似真值),这是由于在光源发散角一定的情况下,增加光程不仅可以使光子在样品传播过程中被散射的部分被黑色管壁充分吸收,同时使光子接收器接收到更少的前向散射的光子,从而提高了c值的测量精度。

从波段上分析,ACS测量不确定度在短波波段要普遍高于长波段,与波长呈正相关,这不同与PE35的不确定度与波长无明显关系。水体的浊度对ACS的测量精度影响较大,低浊度水体下,ACS测量值比PE35测量值低10%(±2%),高浊度水体下低至20%(±2%)。

取420,443,531,550,660,678 nm特征波段对ACS和PE35的测量值进行分析,由图5可以看出,低浊度的水体下,ACS的测量值更接近于PE35的测量值,但随着c值的增加,ACS与PE35的测量值之间的差别逐渐增大。水体越浑浊,ACS测量精度下降越剧烈,这主要是由于高浑浊水体中颗粒强烈的前向散射,光子接收

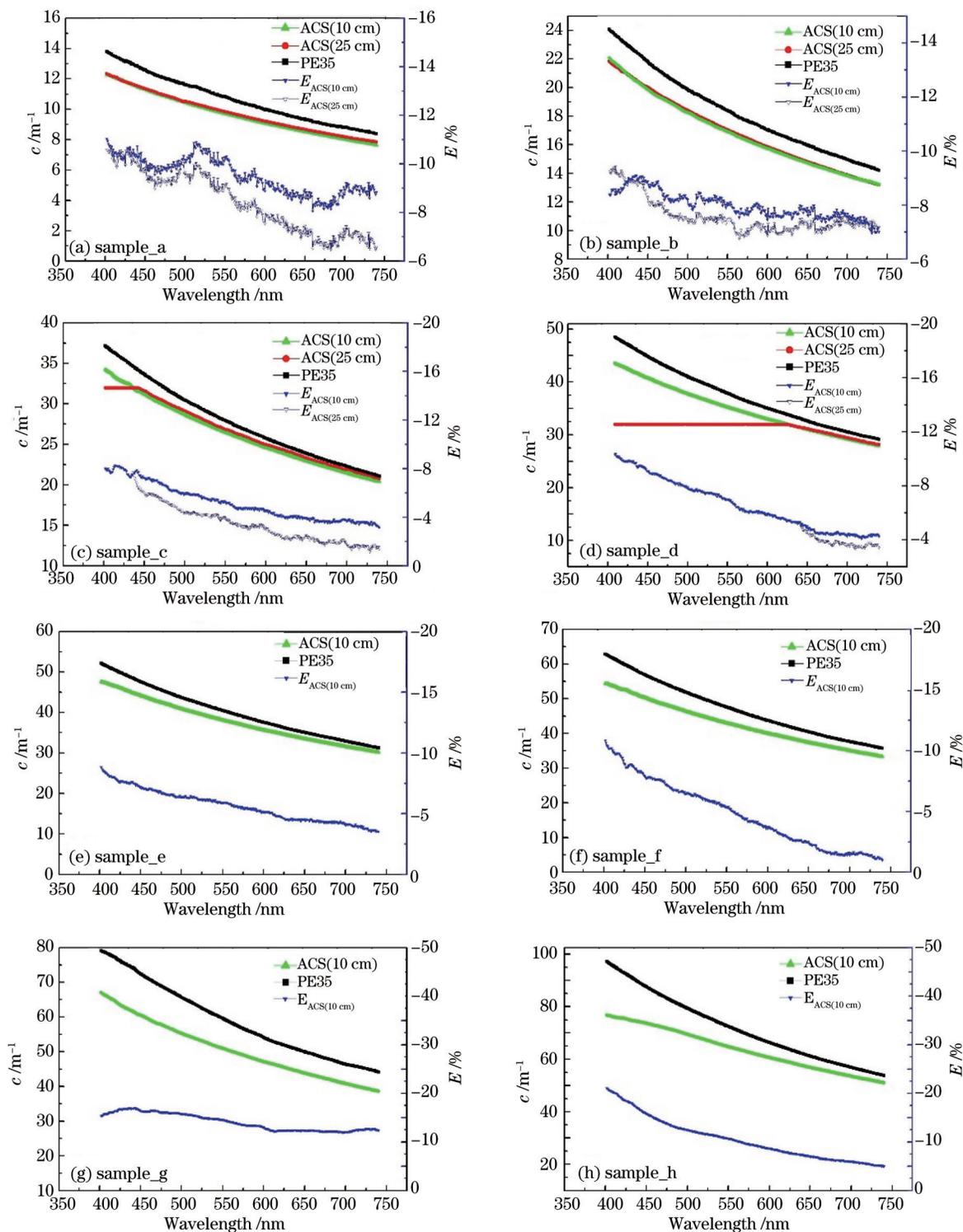


图4 ACS和PE35测量结果对比

Fig.4 Comparison of measurements between ACS and PE35

器接收能量过大, c 值被严重低估。其中, ACS(25 cm) 在测量高浊度呈现饱和状态, 故出现如图 5(a) 在 c (40~50 m^{-1}) 4 个点出现误差突然增大现象。

从 ACS 不确定度分布上, ACS(10 cm)、ACS(25 cm) 和 PE35 对比结果如图 5(b) 所示, ACS 测量误差随浊度的增加呈现明显增大趋势, 其不确定度主要集中在 $-1\% \sim -15\%$, 少部分位于 $-15\% \sim -20\%$ (420 nm 和 678 nm 处)。

表 2、3 给出 ACS(光程 25 cm) 和 ACS(光程 10 cm) 的各个波段平均相对误差, l 表示 ACS(25 cm) 超出量程, ACS(25 cm) 平均相对误差为 4.145%, ACS(10 cm) 平均相对误差为 9.046%。表明 ACS 与分光光度计的测量的

精度在可接受的范围内。

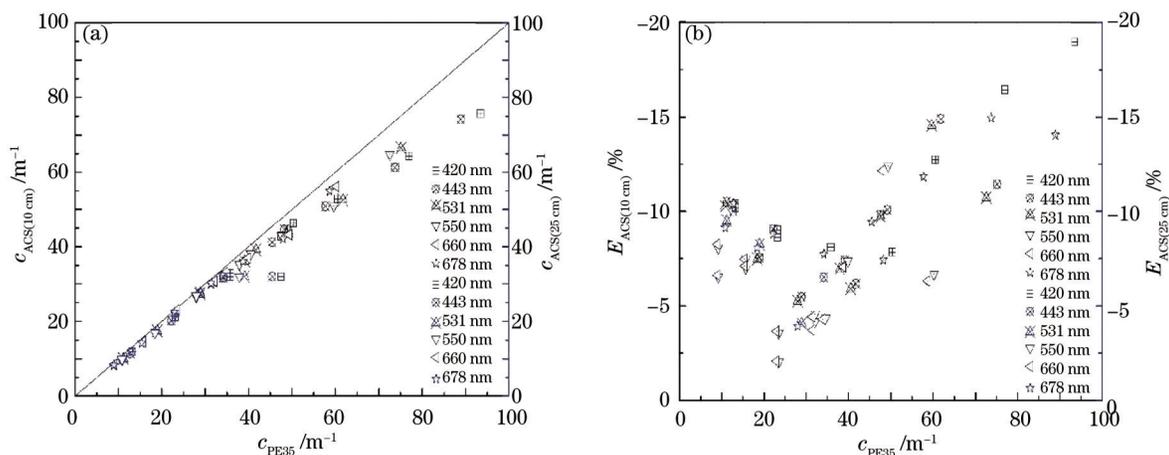


图5 (a) ACS和PE35测量值在不同特征波段下的分布图; (b) ACS不确定度与PE35测量值对比

Fig.5 (a) Distribution of measurements from ACS and PE35 with different characteristic bands; (b) comparison between ACS uncertainty and measurements from PE35

表 2 ACS(25 cm)测量值在特征波段下的相对偏差

Table 2 Relative deviation of the measurements from ACS(25 cm) on the characteristic bands

Wavelength / nm	Sample_a / %	Sample_b / %	Sample_c / %	Sample_d / %	Sample_e / %	Sample_f / %	Sample_g / %	Sample_h / %
420	10.404	8.637	8.101	/	/	/	/	/
443	10.011	9.073	6.509	/	/	/	/	/
531	9.514	8.251	4.094	/	/	/	/	/
550	9.147	8.074	3.929	/	/	/	/	/
660	6.526	7.489	2.015	4.184	/	/	/	/
678	6.630	7.479	2.018	3.729	/	/	/	/
Mean	8.705	8.167	4.455	3.957				
Total mean / %	4.145							

表 3 ACS(10 cm)测量值在特征波段下的相对偏差

Table 3 Relative deviation of the measurements from ACS(10 cm) on the characteristic bands

Wavelength / nm	Sample_a / %	Sample_b / %	Sample_c / %	Sample_d / %	Sample_e / %	Sample_f / %	Sample_g / %	Sample_h / %
420	10.204	9.018	8.102	9.843	7.842	12.738	16.427	18.991
443	10.420	8.823	7.742	9.451	7.442	11.844	16.956	16.550
531	10.506	7.555	5.482	7.411	6.172	10.086	14.894	11.445
550	10.271	7.507	5.260	6.979	5.917	9.735	14.554	10.736
660	8.061	6.986	3.567	4.567	4.360	7.374	12.413	6.6840
678	8.261	7.122	3.663	4.428	4.302	7.075	12.170	6.3180
Mean	9.620	7.835	5.636	7.113	6.005	9.808	14.569	11.787
Total mean / %	9.046							

4 结 论

为了分析水下高光谱衰减测量的不确定度,以PE35测量值为参考,通过PE35和ACS流通池测量系统同步测量结果的对比分析得到ACS的不确定度。通过4种不同粒径的标准颗粒物(中心粒径D=2、5、10、20 μm)对PE35测量精度进行验证,结果显示PE35测量结果与米氏散射计算得到的理论值在谱形上具有较好的一致性,但在幅值上PE35的测量值总体上偏低。随着颗粒的粒径的增大,PE35相对于其理论值的低估随之

增大,分别约为-5%,-6%,-8%,-10%,平均不确定度约为-7%。然后通过 ACS 实验室流通测量系统与分光光度计对 2012 年 7 月东海航次所获取海水样品进行同步对比测量,以 PE35 测量值为基准对 ACS 的测量不确定度进行分析,结果显示低浊度下的 ACS 的测量值比分光光度计测量值低 10%(±2%),高浊度水体下低至 20%(±2%)。发现在低浊度的水体中,ACS(25 cm)的测量值比 ACS(10 cm)更接近 PE35 的测量值(近似真值),说明 ACS(25 cm)比 ACS(10 cm)更适合低浊度水体中测量,而 ACS(10 cm)则适合中国近海浑浊水体如长江口中测量。

ACS 的不确定度可大致估算:PE35 的测量不确定度约为-8%,低浊度水体下,ACS(25 cm)相对于 PE35 的测量相对不确定度约为-6%(±2%),故 ACS(25 cm)测量不确定度约为-7.84%~-15.36%,ACS(10 cm)相对于 PE35 的测量相对不确定度约为-10%(±2%),故 ACS(10 cm)测量不确定度约为-17.2%~-19.04%;在高浊度水体下 ACS(10 cm)相对于 PE35 的测量不确定度约为-20%(±2%),则 ACS(10 cm)的不确定度约为-26.4%~-28.24%。

参 考 文 献

- 1 Bricaud A, Morel A. Light attenuation and scattering by phytoplanktonic cells: a theoretical modeling [J]. *Applied Optics*, 1986, 25(4): 571-580.
- 2 Dana D R, Maffione R A. Determining the backward scattering coefficient with fixed-angle backscattering sensors-revisited [J]. *Ocean Optics XVI*, Santa Fe, New Mexico, 2002, 22(6): 18-22.
- 3 Hao Yanling, Cao Wenxi, Ma Yi, *et al.*. Analysis of inherent optical properties in the occurrence and decline of a red tide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1101004.
郝艳玲,曹文熙,马毅,等.赤潮生消过程中的水体固有光学性质分析[J].*光学学报*, 2011, 31(11): 1101004.
- 4 Hao Yanling, Cao Wenxi, Cui Tingwei, *et al.*. The retrieval of oceanic inherent optical properties based on semianalytical algorithm during the red tide [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, 33(1): 52-65.
郝艳玲,曹文熙,崔廷伟,等.基于半分析算法的赤潮水体固有光学性质反演[J].*海洋学报*, 2011, 33(1): 52-65.
- 5 Mu Bing, Cui Tingwei, Cao Wenxi, *et al.*. A semi-analytical monitoring method during the process of red tide based on optical buoy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0201001.
牟冰,崔廷伟,曹文熙,等.基于光学浮标的赤潮生消过程半分析监测方法[J].*光学学报*, 2012, 32(2): 0201001.
- 6 Wu Tingting, Qiu Zhongfeng, He Yijun, *et al.*. Retrieval algorithms of diffuse attenuation coefficient in the yellow sea, the east China sea and the pearl river estuary [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0701001.
吴婷婷,丘仲锋,何宜军,等.黄东海及珠江口附近海域水体漫衰减系数反演[J].*光学学报*, 2013, 33(7): 0701001.
- 7 Phlips E J. Chlorophyll a tripton, color, and light availability in Florida Bay, USA [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1995, 12(7): 223-234.
- 8 Pak H, Kiefer D A, Kitchen J C. Meridional variations in the concentration of chlorophyll and microparticles in the North Pacific Ocean [J]. *Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers*, 1988, 35(7): 1151-1171.
- 9 Guan Wenjiang, Qian Weiguo, Chen Xinjun. Computing underwater downward irradiance of fish aggregation lamps in class I ocean water based on Monte Carlo method [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, (10): 1595-1604.
官文江,钱卫国,陈新军.应用 Monte Carlo 方法计算水上集鱼灯向下辐照度在一类海水中的分布[J].*水产学报*, 2010, (10): 1595-1604.
- 10 Zhang Yunlin, Qin Boqiang, Chen Weimin, *et al.*. Experimental study on underwater light intensity and primary productivity caused by variation of total suspended matter [J]. *Advances In Water Science*, 2004, 15(5): 615-620.
张运林,秦伯强,陈伟民,等.悬浮物浓度对水下光照和初级生产力的影响[J].*水科学进展*, 2004, 15(5): 615-620.
- 11 Ronald J, Zaneveld V, Bartz R. Beam attenuation and absorption meters [C]. *Ocean Optics VII*. International Society for Optics and Photonics, 1984: 318-324.
- 12 Voss K J, Austin R W. Beam-attenuation measurement error due to small-angle scattering acceptance [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1993, 10(1): 113-121.
- 13 Bricaud A, Morel A. Light attenuation and scattering by phytoplanktonic cells: a theoretical modeling [J]. *Applied Optics*, 1986, 25(4): 571-580.
- 14 Bradner H. Attenuation of light in clear deep ocean water [C]. *Proceedings of the 2nd NESTOR International Workshop*, 1992: 247.
- 15 Shen Yuzhang, Mao Zhihua, Tao Bangyi. Scattering properties of two blooming algae: *Skeletonema costatum* and *Prorocentrum donghaiense* [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2013, 31(1): 45-52.

- 沈玉璋, 毛志华, 陶邦一. 中肋骨条藻和东海原甲藻的散射特性[J]. 海洋学研究, 2013, 31(1): 45-52.
- 16 Bartz R, Ronald J, Zaneveld V, *et al.*. A transmissometer for profiling and moored observations in water [C]. 22nd Annual Technical Symposium. International Society for Optics and Photonics, 1978: 102-109.
- 17 Otremba Z, Piskozub J. Modelling the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of seawater polluted by an oil film [J]. Optics Express, 2004, 12(8): 1671-1676.
- 18 Jeyendran R S, Vander Ven H H, Perez-Pelaez M, *et al.*. Development of an assay to assess the functional integrity of the human sperm membrane and its relationship to other semen characteristics [J]. Journal of Reproduction and Fertility, 1984, 70(1): 219-228.
- 19 Voss K J, Austin R W. Beam-attenuation measurement error due to small-angle scattering acceptance [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1993, 10(1): 113-121.
- 20 Zaneveld J R V, Kitchen J C, Moore C C. Scattering error correction of reflecting-tube absorption meters [C]. Ocean Optics XII. International Society for Optics and Photonics, 1994: 44-55.
- 21 Leymarie E, Doxaran D, Babin M. Uncertainties associated to measurements of inherent optical properties in natural waters [J]. Applied optics, 2010, 49(28): 5415-5436.
- 22 Mätzler C. MATLAB Functions for Mie Scattering and Absorption, version 2[R]. Bern: IAP, 2002.
- 23 Wegmüller U, Matzler C, Huppi R, *et al.*. Active and passive microwave signature catalog on bare soil (2~12 GHz)[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(3): 698-702.
- 24 Ni Yi, Huang Meizhen, Yuan Bo, *et al.*. Development and current status of UV-VIS spectrophotometer [J]. Modern Scientific Instruments, 2004, 3: 1-11.
- 25 Zhu Ying, He Huipeng, Wu Xiaobo, *et al.*. UV-vis spectrophotometer and its application [J]. Chemical Intermediates, 2012, (11): 34-37.
朱 英, 和惠朋, 武晓博, 等. 紫外可见分光光度计及其应用[J]. 化工中间体, 2012, (11): 34-37.
- 26 Wang Haijun, Ning Xinxia. Recent progress of application of UV-Vis spectrophotometric technique [J]. Physical Testing and Chemical Analysis(Part B:Chemical Analysis), 2012, 48(6): 740-745.
王海军, 宁新霞. 紫外可见分光光度技术的应用进展[J]. 理化检验-化学分册, 2012, 48(6): 740-745
- 27 Zhang Zhihong. Error analysis and adjustment of the wavelength of spectrophotometer [J]. Industrial Measurement, 2003, 13(2): 39-40.
张志红. 分光光度计波长误差分析及波长的调整[J]. 工业计量, 2003, 13(2): 39-40.
- 28 Zhong Lexuan. Analysis of the reasons for the error caused by spectrophotometer [J]. Shanghai Coustruction Science and Technology, 2006, (5): 41-42.
钟乐璇. 引起分光光度计误差原因之分析[J]. 上海建设科技, 2006, (5): 41-42.
- 29 Chen Yunfang. Analysis of spectrophotometer measurement accuracy of zero error affected by atomic absorption [J]. Hydrology, 2004, 24(3): 56-57.
陈运芳. 原子吸收分光光度计的调零误差对测量精度的影响分析[J]. 水文, 2004, 24(3): 56-57.
- 30 Hong Yinxia. Spectrophotometer [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1982.
洪吟霞. 分光光度计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- 31 Tang Bin, Wei Biao, Mao Benjiang, *et al.*. Noise analysis and denoising research on the UV-visible absorption spectroscopy water quality detection system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 043002.
汤 斌, 魏 彪, 毛本将, 等. 紫外-可见吸收光谱法水质检测系统的噪声分析与处理研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 043002.
- 32 Liu Jia, Huang Haiqing, Bai Yan, *et al.*. Influences of liner polarization light on the measurement of water absorption coefficient [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0601003.
刘 佳, 黄海清, 白 雁, 等. 不同线偏振光对水体吸收系数测量的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0601003.
- 33 Moore C, Bruce E J, Pegau W S, *et al.*. WET labs ac-9: field calibration protocol, deployment techniques, data processing, and design improvements [C]. SPIE, 1997, 2963: 725-730.

栏目编辑: 史 敏