

基于 ASD 光谱仪的悬浮泥沙光学衰减系数研究*

何颖清¹, 邓孺孺¹, 陈启东¹, 陈 蕾^{1,2}, 秦 雁¹

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;

2. 国家海洋局南海海洋工程勘察与环境研究院, 广东 广州 510300)

摘 要: 设计了基于 ASD 光谱仪的玻璃水槽实验, 测量人工光源穿透不同水深、不同质量浓度含沙水体的辐亮度, 以纯水为参照, 得出了某一粒径组成下不同质量浓度悬浮泥沙在 350 ~ 920 nm 波段范围内的光学衰减系数。实验泥沙样本的光学衰减系数光谱特征单一, 随着波长的增大逐渐减小, 表现为一条略倾的曲线, 且正比于泥沙质量浓度。在 0 ~ 0.15 m 深度范围内的, 相同质量浓度的泥沙光学衰减系数随水深的变化可以忽略不计。从 350 ~ 920 nm, 实验泥沙样本的单位质量浓度光学衰减系数从 0.084 缓慢减小至 0.069 m²/g。

关键词: 悬浮泥沙; 光学衰减系数; ASD 光谱仪; 水质遥感

中图分类号: P733.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2011) 03-0134-07

Diffuse Attenuation Coefficient of Suspended Sediment based on ASD Spectrometer

HE Yingqing¹, DENG Ruru¹, CHEN Qidong¹, CHEN Lei^{1,2}, QIN Yan¹

(1. School of Geographic Science and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. South China Sea Marine Engineering and Environment Institute, SOA, Guangzhou 510300, China)

Abstract: In this paper, a study was carried out to calculate the diffuse attenuation coefficient of suspended sediment by using the ASD F3. The experiment is based on measuring the radiance of an artificial light source penetrating through the water with different concentrations of suspended sediment in different water depths. Compared with pure water, the diffuse attenuation coefficients of suspended sediment with similar grain sizes were calculated for different concentrations with wavelength from 350 to 920 nm. The results show that the spectral characteristics of the diffuse attenuation coefficient of suspended sediment are simple, and it decreases as the wavelength increases. Furthermore, it shows a positive correlation between the diffuse attenuation coefficients and the concentrations of suspended sediment, with the exception of the water depth from 0 ~ 0.15 m, where the diffuse attenuation coefficients of suspended sediment are almost invariant. The diffuse attenuation coefficient of per unit concentration of suspended sediment used in the experiment gradually decreases from 0.084 to 0.069 m²/g with wavelength from 350 to 920 nm.

Key words: suspended sediment; diffuse attenuation coefficient; ASD Spectrometer; remote sensing of water quality

水体光学特性的研究是水质遥感的基础, 而现今的研究多以水体的表观光学性质为主, 缺乏对水

体固有光学参数的研究。目前获取水体固有光学参数的方法主要是通过仪器测量, 包括实验室测量和

* 收稿日期: 2010-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40671144); 水利部 948 资助项目 (200820); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2006AA06Z416); 广东省水利科技重点攻关资助项目 (ysk200602)

作者简介: 何颖清 (1985 年生), 女, 博士研究生; 通讯作者: 邓孺孺; E-mail: eesdr@mail.sysu.edu.cn

野外实地测量。实验室测量中最常用的仪器是分光光度计^[1], 这种方法使用定量滤膜技术将待测成分从水中过滤出来, 通过测量光量的衰减来计算物质的吸收系数, 该方法精度较高。而野外测量中常用的仪器有: 美国 Wetlabs 公司生产的水体吸收、衰减系数测量仪 AC9 (双光路、9 通道) 可测定水体的吸收、衰减系数^[2]; 光谱吸收仪 AC-S (测量波段为 400 ~ 750 nm) 可测量水体的吸收系数^[3]; 加拿大 Satlantic 公司生产的水下光谱仪 SPMR (9 通道) 可测量水体的漫衰减系数^[4]; 美国 Hobilabs 公司后向散射系数测量仪 HS6 (6 通道) 可测量水体的后向散射系数^[5-7]。野外测量的环境接近于遥感成像时水体的状态, 获取的水体固有参数对于水质模型的建立更有意义。然而这些仪器的工作波段大都在可见光范围内, 获取的数据也是离散的数个通道, 加之这些测量仪器价格不菲, 广泛应用具有一定的困难。美国 ASD 公司的 FieldSpec3 便携式地物波谱仪广泛应用于地表、水表光谱测量中, 很多研究机构都配备了该仪器用于研究。该仪器探测的波长范围为 350 ~ 2 500 nm, 可获取连续光谱。基于以上出发点, 本文设计了一套基于 ASD 光谱仪的实验装置, 可用于观测水体的光学衰减系数。

自然水体的光学衰减系数主要由纯水、可溶性有机物、悬浮颗粒物的吸收、散射组成。很多学者^[8-14]对于自然水体的衰减系数与有机颗粒物、无机颗粒物、叶绿素的关系进行了研究, 他们得出的结论是: 光线在水体中传输的衰减主要由悬浮物的吸收和散射所致, 且无机悬浮物的影响占主导地位。内陆水体中悬浮物的一个主要成分就是悬浮泥沙。悬浮泥沙大量存在于内陆以及近岸水体中, 主要因为内陆、水体大都水深较浅, 受风浪的搅动作用水底的泥沙上浮, 造成水中悬浮泥沙含量增大; 近年来很多河流、水库采沙现象日益严重, 更使得水中的悬浮泥沙含量增大。因此, 悬浮泥沙衰减系数的研究对水质遥感的应用意义重大。有些学者针对于含沙水体的表观反射率、吸收系数、后向散射系数进行过实验^[6,15-17], 但尚无专门针对于悬浮泥沙光学衰减系数的研究。

综上, 本文设计了基于人工光源的实验, 使用 ASD 光谱仪测量光源穿透不同质量浓度含沙水体的辐照度, 计算泥沙对光源的衰减量, 最终获取泥沙的光学衰减系数。

1 实验

1.1 实验设置

实验在暗室中进行, 采用人工光源, 用美国 ASD 公司的 FieldSpec3 便携式地物波谱仪进行观测, 探头视场角为 5°, 可探测的波长范围为 350 ~ 2 500 nm。准备一个透明的玻璃缸 (长宽高 0.4 m × 0.4 m × 0.2 m) 以及一个木质的暗箱 (长宽高 0.4 m × 0.8 m × 0.3 m), 将玻璃缸侧壁、暗箱内外壁都包裹上黑色无光塑料布。暗箱的顶部设置一个直径为 d 的圆形开口, 将玻璃缸置于暗箱上方, 玻璃缸底面中心与暗箱顶部圆心重合。在暗箱的底部水平放置标准板, 在暗箱顶部一侧设置另一个较小的开口用于放置光谱仪的探头。实验时在玻璃缸中加入待测的悬浮泥沙水体, 将光源固定于三角架上使得光线垂直入射穿透水体, 穿过暗箱开口到达标准板, 光谱仪探头倾斜测量, 使用红外瞄准仪使其对准光斑的中心。待测的悬浮泥沙水体为纯净水加入泥沙。试验采用的泥沙样本为广东省飞来峡水库库底泥沙。将采集到的泥沙经烘干、筛处理、称量后分别包装。采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 激光粒度仪进行粒度分析。泥沙以细粒子为主, 其体积平均粒径为 14 μm 。其中, 细粉砂 (泥沙粒度 16 ~ 4 μm) 含量最多, 占 38.02%, 其次为粗粉砂 (63 ~ 16 μm) 以及粘土 (< 4 μm), 分别占 30.27%、29.61%, 还包含有少量的细沙 (250 ~ 125 μm) 以及极细沙 (125 ~ 63 μm)。实验时将泥沙逐一放入盛有纯水的玻璃缸中, 使用电动搅拌器搅拌均匀, 呈悬浮状态下进行光谱辐亮度测量。

1.2 实验原理

实验中所使用的光源为方向性良好的大功率探照灯, 其可视为平行光。如图 1 所示入射光源在穿透待测水体后, 穿过暗箱顶部的开口在标准板上形成一个圆形的光斑。图 1 中 d 为暗箱开口直径, α 为光谱仪探头的半视场角, H 为暗箱顶部到标准板的距离, φ 为探头的倾角, r 为探头椭圆视场长轴。光谱仪在进行辐亮度定标时, 探头的视场范围须覆盖整个被测目标, 所以实际测量中探头的视场范围需小于光斑。如图 2 所示, 实验时可调节 H 、 φ 、 d 使得探头对准光斑的中心, 且 $r \leq d/2$ 。根据几何关系容易求出

$$r = H \sqrt{\left(\frac{\tan\alpha}{\cos\varphi}\right)^2 + \left(\frac{1}{\cos(\alpha + \varphi)} - \frac{1}{\cos\alpha\cos\varphi}\right)^2} - 2 \frac{\tan\alpha}{\cos\varphi} \left(\frac{1}{\cos(\alpha + \varphi)} - \frac{1}{\cos\alpha\cos\varphi}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \quad (1)$$

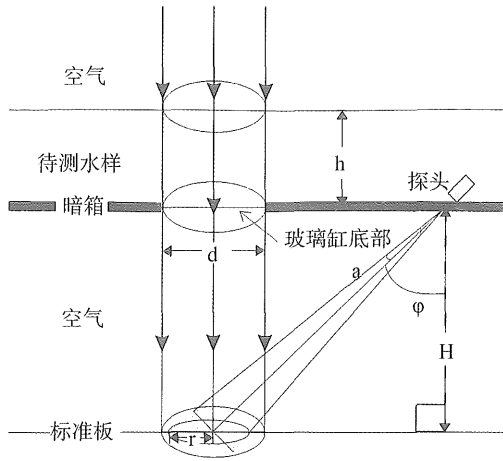


图 1 实验光路图

Fig. 1 Light path of the experiment

其中, $H = 26.5 \text{ cm}$, $\varphi = 37^\circ$, $\alpha = 2.5^\circ$, 求得 $r = 3.75 \text{ cm}$ 。即 $d \geq 2r = 7.5 \text{ cm}$, 本实验中取 $d = 9.5 \text{ cm}$ 。光源垂直穿透水深为 h 待测水体、玻璃缸后到达标准板, 被标准板反射进入光谱仪探头, 由于标准板为朗伯体, 则光谱仪接收到的辐射亮度 $L(\lambda)$ 可表示为

$$L(\lambda) = \frac{E_d(\lambda, h)}{\pi} T_g(\lambda) R_p(\lambda) \quad (2)$$

式中, $E_d(\lambda, h)$ 为水深 h 处波长为 λ 时的下行辐照度, T_g 为玻璃缸的透过率, R_p 为标准板反射率。

在光学性质均匀的水体中, 若假设水表面 $h = 0$ 处波长为 λ 时的辐射照度为 $E_d(\lambda, 0)$, $k(\lambda, h)$ 为待测水体的光学衰减系数, 则有:

$$E_d(\lambda, h) = E_d(\lambda, 0) e^{-k(\lambda, h)h} \quad (3)$$

若光源、玻璃缸、标准板、光谱仪、探头以及水深皆保持不变, 改变待测水体样本可得 2 组数据 $L_1(\lambda)$ 、 $L_2(\lambda)$ 。2 组数据之比可得:

$$\frac{L_1(\lambda)}{L_2(\lambda)} = \frac{E_{d1}(\lambda, h) T_g(\lambda) R_p(\lambda) / \pi}{E_{d2}(\lambda, h) T_g(\lambda) R_p(\lambda) / \pi} = \frac{E_d(\lambda, 0) e^{-k_1(\lambda, h)h}}{E_d(\lambda, 0) e^{-k_2(\lambda, h)h}} = e^{h(k_2(\lambda, h) - k_1(\lambda, h))} \quad (4)$$

$$k_2(\lambda, h) - k_1(\lambda, h) = \frac{\ln L_1(\lambda) - \ln L_2(\lambda)}{h} \quad (5)$$

水体的衰减系数等于水分子以及水中杂质的衰减系数的代数和, 待测水体样本为纯净水加上泥沙, 即 $k = k_w + k_s$, k_s 为泥沙的光学衰减系数。若使用纯水作为参照与含沙水体做比, 即待测样本 1 为水深 h 的纯水获取数据 $L_w(\lambda, h)$, 样本 2 为水深 h 的含沙水体获取数据 $L_s(\lambda, h)$, 由 (5) 式可得:

$$k_s(\lambda, h) = \frac{\ln L_w(\lambda, h) - \ln L_s(\lambda, h)}{h} \quad (6)$$

$k_s(\lambda, h)$ 即为水深 h 处悬浮泥沙的衰减系数。

1.3 实验步骤

实验时若水过少, 泥沙较难均匀悬浮, 因此实验的最小水深为 5 cm, 如表 1 共选取 6 个水深进行实验。加入纯水后依次加入泥沙进行实验, 每个深度共测得 5 组数据, 每组数据包括 1 个纯水参照, 4 个泥沙质量浓度。由于实验在室内进行, 水面基本无晃动, 光谱曲线稳定, 每次保存 5 条光谱曲线取平均即可。光谱积分时间为 136 ms, 故每组数据可在 1 s 内采集完毕, 每个深度实验可在 5 min 内完成。

表 1 实验中泥沙质量浓度以及水深

组别	水深/cm	悬浮泥沙质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
a	5	0, 10, 20, 30, 40
b	7	0, 10, 20, 30, 40
c	9	0, 10, 20, 30, 40
d	11	0, 10, 20, 30, 40
e	13	0, 10, 20, 30, 40
f	15	0, 10, 20, 30, 40

2 实验数据处理及分析

2.1 数据校正

数据校正包括数据跳跃点校正和光源衰减校正。

光线穿透水体, 通过暗箱开口到达标准板, 经标准板反射进入 ASD 光谱仪探头, 测得其辐亮度 (此后称作 $L_{\text{光源}}$) 如图 2 所示。由于 ASD 光谱仪的光纤输入端口是由 57 条光纤构成的, 在测量距离比较小的时候, 不同的光纤采集到不同位置的样品光谱, 导致图 3 中纠正前的曲线在 1 000、1 830 nm 处出现了光谱连接点跳跃。这个问题不会影响所采集到的数据质量, 我们可将其纠正过来。ASD 公司的 FieldSpec 3 便携式地物波谱仪由三组探测器组成, 其光谱范围分别为: 350 ~ 1 000 nm, 1 000 ~ 1 900 nm, 1 700 ~ 2 500 nm。地物光谱曲线由这三组探测器获得的数据接合而成。ASD 公司经过大量实验发现, 仪器所使用的三个探测器在不同的环境功能温度以及预热时间下具有变化的响应度, 但是在 SWIR1 (1 000 ~ 1 900 nm) 波段传感器的响应度不受影响。因此我们以 1 000 ~ 1 900 nm 之间的数据为准, 根据以下等式对数据进行纠正。光源纠正前后的曲线如图 2 所示。

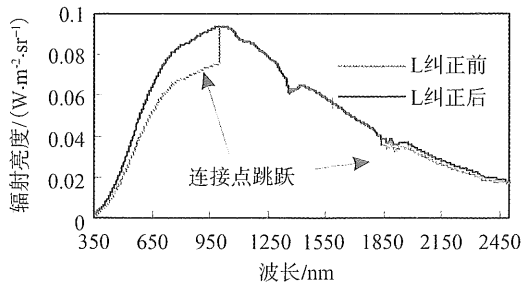


图 2 纠正前后的光源辐射亮度

Fig. 2 Radiance of the light source before and after correction

$$L_{cor}(\lambda) = \begin{cases} \frac{L(1001 \text{ nm})}{L(1000 \text{ nm})} \cdot L(\lambda) & 350 \leq \lambda \leq 1000 \text{ nm} \\ L(\lambda) & 1001 \leq \lambda \leq 1830 \text{ nm} \\ \frac{L(1830 \text{ nm})}{L(1831 \text{ nm})} \cdot L(\lambda) & 1831 \leq \lambda \leq 2500 \text{ nm} \end{cases} \quad (7)$$

由于所用光源为蓄电池供电，所以光源存在一定程度的衰减。经过多次专门针对光源辐亮度的测量，发现光源随时间呈现标准的线性衰减。若以开灯时刻为初始时刻，即 $t = 0$ ，光源的辐射亮度可用下式表示：

$$L_{光源}(t) = at + b \quad (8)$$

保存光谱数据时形成的原始 *.asd 文件属性中可查看测量时间，可以针对实验前后的 $L_{光源}$ 进行测

量，计算其衰减斜率 a 、截距 b ，用于实验中数据的纠正。任意时刻的测量数据可用下式进行纠正：

$$L_{cor}(t) = L_{光源}(0) \cdot L(t) / (at + b) \quad (9)$$

实际测量时间很短，灯光衰减非常小，5 min 内的衰减约 0.5% 左右。为了提高实验精度，应尽量提高实验的效率，缩短实验时间。

2.2 泥沙衰减系数计算

图 3 是 6 个水深测量得到的 6 组数据，每组数据包括了测量同一水深下的纯净水、4 个不同质量浓度含沙水体经校正后的辐亮度光谱曲线。由于水在红外波段强吸收，曲线在红外波段之后的值基本为 0。因此图中只截取了 1 250 nm 之前的数据显示。容易看出随着悬浮泥沙质量浓度的增加，测量所得辐亮度越来越小，即泥沙质量浓度越高，水体的消光作用越大。对比图 2 光源的光谱曲线可知：加入水体之后的光谱曲线在 750、980 nm 出现 2 个明显的谷值，这正好对应于纯水的吸收峰；对应这 2 个谷值处，随着水深的增加，水的消光作用增大，因此不同质量浓度含沙水体的辐亮度在此处的间隔也越来越大；为避开纯水的两个强吸收带，实验中截取 920 nm 之前的数据进行计算。

将每组数据中不同质量浓度的含沙水体与纯水的测量值做比，根据 (6) 式对不同水深的 6 组数

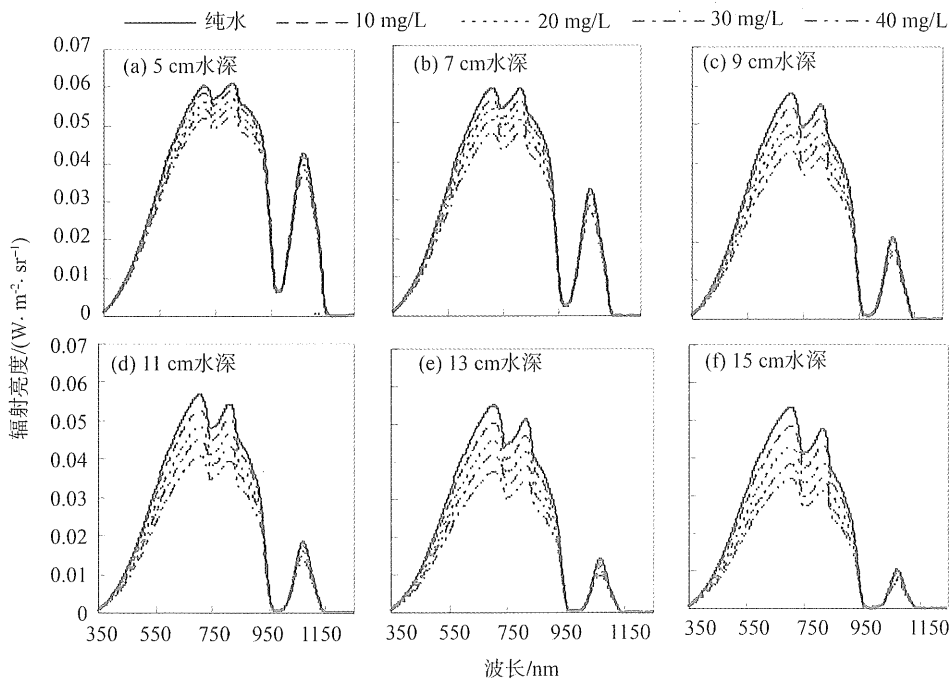


图 3 光源穿透不同质量浓度含沙水体后的辐亮度曲线

Fig. 3 Radiance of the light penetrating the water with different concentrations of suspended sediment

据进行计算获取泥沙的光学衰减系数,共获取 6 组数据如图 4 所示。相比 SPMR 水下剖面仪测得的衰减系数而言,实验获取的是衰减系数的连续光谱,数据波长间隔是 1 nm,而 SPMR 得到的只是 9 个波段的衰减系数。所有的 24 条曲线形状基本一致,在 350~400 nm 处都存在微小的数据波动,这是由于光源在此处的辐亮度较小,加之水的吸收造成这部分信号较弱但仍在光谱仪的灵敏度范围内,所以使这部分数据出现微小的震荡。

由实验结果可以看到,实验泥沙样本的光学衰减系数光谱特征比较单一,近似为一条倾斜的直线,随着波长的增加,衰减系数略有减小。根据 Dekker 的研究^[18],光学衰减系数是由吸收系数以及后向散射系数决定的。吸收系数由泥沙的物质组成结构决定,悬浮泥沙的吸收系数光谱通常随着波长的增大而逐渐降低,近似符合负指数衰减规

律^[17,19];散射主要由泥沙的粒径尺度决定,根据泥沙的粒径尺度,散射的类型包括有瑞利散射、米散射、无选择散射。前两种散射强度都随波长增大而逐渐降低,而无选择散射则与波长无关。因此不管发生何种散射,综合考虑吸收和散射两者,泥沙的光学衰减系数都应当存在随着波长而减小的趋势,这和实验的结果是相符的。

由实验结果还可以看出,悬浮泥沙的光学衰减系数随着泥沙质量浓度的增加而增加,因为泥沙质量浓度是等量增加的,图 4 中各条曲线的间距也十分有规律。由于实验泥沙样本的衰减系数没有特征波段,我们抽取几个波段进行相关性分析。图 5 表示了泥沙衰减系数在 490、670、900 nm 处随泥沙质量浓度的变化。参照水下光谱仪 SPMR 的波段设置以及本实验的测量波段,选取 412、443、490、510、520、555、565、670、780、900 nm 10 个波

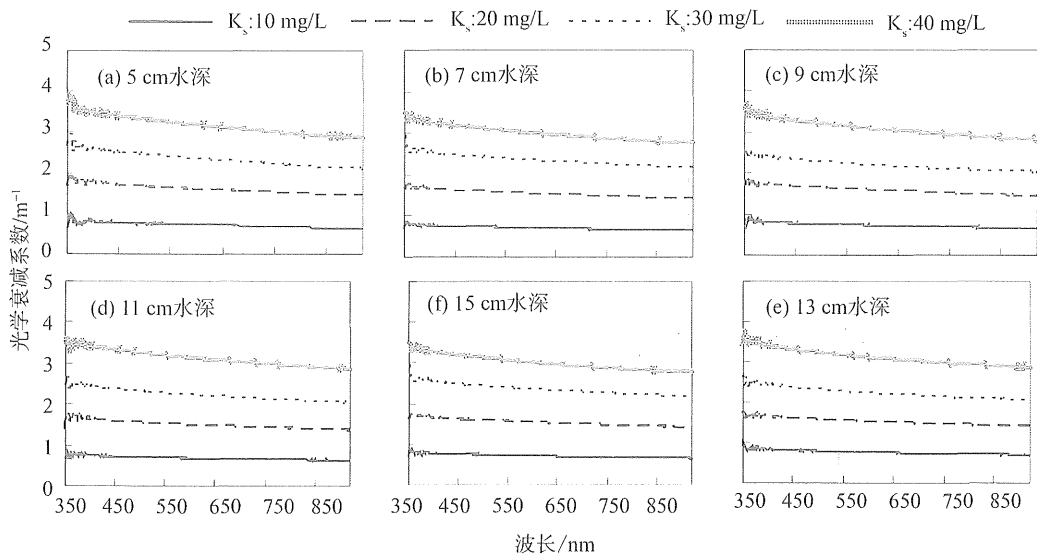


图 4 不同质量浓度不同水深悬浮泥沙光学衰减系数曲线

Fig. 4 Diffuse attenuation coefficients of sediment with different suspended sediment concentrations in different water depths

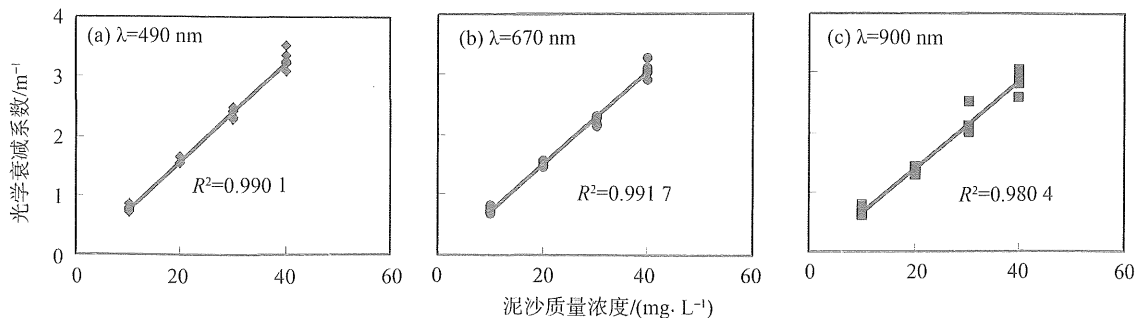


图 5 悬浮泥沙光学衰减系数随泥沙质量浓度变化图

Fig. 5 Relationship between diffuse attenuation coefficients of suspended sediment and sediment concentrations

段针对衰减系数与泥沙质量浓度计算其相关系数，对应的相关系数分别为 0.988 8, 0.988 2, 0.990 1, 0.990 0, 0.990 1, 0.990 4, 0.990 6, 0.991 7。可见，泥沙的衰减系数在 0 ~ 40 mg/L 质量浓度范围内与泥沙质量浓度相关性极高，接近于 1；两者的关系近似可表示为一条过原点的直线，表明泥沙的光学衰减系数正比于泥沙质量浓度。实验泥沙样本光学衰减系数的光谱特征比较单一，该关系同样适用于 350 ~ 920 nm 波段范围内。若定义单位质量浓度的衰减系数用符号 k_s^* (m^2/g) 表示，则泥沙的衰减系数 $k_s(\lambda, h)$ 可用下式表示

$$k_s(\lambda, h) = k_s^*(\lambda, h) \cdot D_s \quad (10)$$

D_s 为泥沙的质量浓度 (mg/L)。据 10 式对实验中所获得的 6 组数据进行计算，每组数据取平均，得到 6 条 $k_s^*(\lambda, h)$ 曲线如图 6 所示。

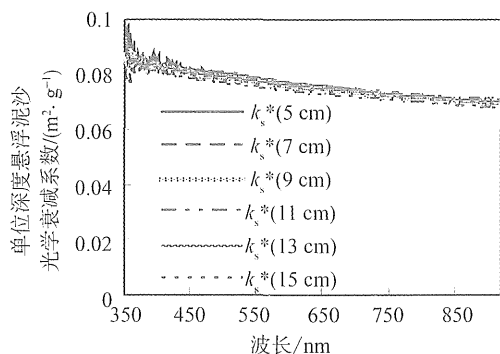


图 6 不同水深单位质量浓度悬浮泥沙光学衰减系数

Fig. 6 Diffuse attenuation coefficient of per unit suspended sediment concentration with different water depths

2.3 光学衰减系数的垂直变化

据相关学者的研究，自然界水体的光学衰减系数的垂直变化比较复杂，有递增的、递减的、均匀的，还有不规则型的，种类繁多^[12]。这种变化往往是由于不同研究区域各个水层的物质种类、含量的差异造成的。因此，对于研究单一成分是如何影响光学衰减系数的垂直变化是很有意义的。

大部分学者在研究自然水体的光学衰减系数时采用一种简化的模式，即认为 $k(\lambda)$ 在观测深度范围内不随波长而变化，可近似地看为常数^[20-21]。

由 2.2 可知，泥沙的光学衰减系数波长依赖性不大，因此在研究泥沙光学衰减系数的垂直变化时，我们忽略其随波长的变化，得到泥沙光学衰减

系数的简化计算式：

$$k_s(h) = \frac{\ln E_w(h) - \ln E_s(h)}{h} \quad (11)$$

图 7 给出了泥沙 4 个质量浓度光学衰减系数在随水深的变化。由图可知，泥沙光学衰减系数在 0.05 ~ 0.15 m 深度范围内的变化非常小。从图 6 也可以看出，6 个水深的单位质量浓度泥沙光学衰减系数是基本重叠。可以认为，在 0.05 ~ 0.15 m 深度范围，等质量浓度泥沙的光学衰减系数在深度上的垂直变化是可以忽略的。据此，取这 6 条曲线的均值作为该粒径组成下的 $k_s^*(\lambda)$ 。表 2 给出了实验泥沙样本在 350 ~ 920 nm 之间单位质量浓度的光学衰减系数，原始数据光谱分辨率为 1 nm，但 $k_s^*(\lambda)$ 保留精度至小数点后 3 位，因此在一些波段的 k_s^* 相等。从 350 至 920 nm，单位质量浓度泥沙光学衰减系数从 0.084 缓慢减小至 0.069 m^2/g 。

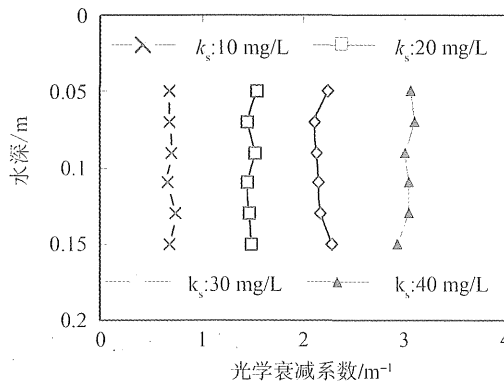


图 7 悬浮泥沙光学衰减系数随水深变化图

Fig. 7 Relationship between diffuse attenuation coefficients of suspended sediment and water depth

表 2 实验所用泥沙单位质量浓度光学衰减系数

Table 2 Diffuse attenuation coefficient of per unit suspended sediment concentration used in the experiment

波长/nm	$k_s^*/(m^2 \cdot g^{-1})$	波长/nm	$k_s^*/(m^2 \cdot g^{-1})$
350 ~ 383	0.084	574 ~ 613	0.076
384 ~ 404	0.083	614 ~ 653	0.075
405 ~ 424	0.082	654 ~ 702	0.074
425 ~ 443	0.081	703 ~ 739	0.073
444 ~ 473	0.080	740 ~ 790	0.072
474 ~ 506	0.079	791 ~ 840	0.071
507 ~ 542	0.078	841 ~ 912	0.070
542 ~ 573	0.077	913 ~ 920	0.069

3 结 论

本文设计了利用 ASD 光谱仪测量悬浮泥沙光学衰减系数的实验,以纯水为参照,对不同水深处不同质量浓度的含沙水体光学衰减系数进行了测量,揭示了某一粒径组成下的悬浮泥沙在 5~40 mg/L 质量浓度范围、350~920 nm 波段内光谱衰减的变化规律,并计算出了单位质量浓度悬浮泥沙在 350~920 nm 波段内,光谱间隔为 1 nm 的光学衰减系数,为水质遥感物理分析模型提供了必要参数。实验结果表明:

1) 实验所用泥沙粒子的光学衰减系数表现为一条略倾的曲线,其光谱特征较为单一,波长依赖性不大。随着波长的增大,衰减系数略有减小;

2) 悬浮泥沙光学衰减系数在 0~40 mg/L 质量浓度范围内与泥沙的质量浓度成正比;

3) 悬浮泥沙光学衰减系数在 0~0.15 m 深度范围内的垂直变化可以忽略。

从微观角度来看,泥沙光学衰减系数的光谱特征与泥沙的物质结构以及粒度组成有很大关系。因此,以上结论皆针对于本实验所用悬浮泥沙。不同粒径组成下泥沙的光学衰减系数的光谱特征还有待研究。

此外,本文设计的基于 ASD 光谱的实验方案,简单易操作,能获取连续的光学衰减系数光谱曲线,光谱分辨率高,波段范围宽,能测量其他水质成分的光学衰减系数,也是下一步研究的内容。

参考文献:

- [1] 朱建华. 分光光度计测量 2 类水体光谱吸收系数的关键技术[J]. 海洋技术, 2003, 22(1): 34-39.
- [2] 李刚. 水体吸收衰减系数测量仪定标技术[J]. 海洋技术, 2005, 24(4): 120-123.
- [3] MOORE C, BARNARD A, HANKINS D, et al. Spectral Absorption and Attenuation Meter (Ac-S) User's Guide, Revision A [M]. America: WET Labs Inc, 2004: 5-20.
- [4] 彭海龙, 孙从容, 张正, 等. 黄、东海区光谱漫衰减系数特性研究[J]. 海洋通报, 2004, 23(4): 15-18
- [5] MAFFIONE R A, DANA D R. Instruments and methods for measuring the backward scattering coefficient of ocean waters [J]. Applied Optics, 1997, 36 (24): 6057-6067.
- [6] 宋庆君, 唐军武, 马荣华. 水体后向散射系数校正方法研究[J]. 海洋技术, 2008, 27(1): 48-52.
- [7] 韩震, 恽才兴, 蒋雪中. 悬浮泥沙反射光谱特性实验研究[J]. 水利学报, 2003, 12: 118-122.
- [8] BLOM G, Van DUIN E H S, LIJKLEMA L. Sediment resuspension and light conditions in some shallow Dutch lakes[J]. Wat Sci Technol, 1994, 30: 243-252.
- [9] BUI TEVELD H. A model for calculation of diffuse light attenuation (PAR) and secchi depth. Neth J Aquat Ecol, 1995, 29: 55-65.
- [10] Van DUIN E H S, BLOM G, LOS F J, et al. Modelling under water light climate in relation to sedimentation, resuspension, water quality and autotrophic growth[J]. Hydrobiologia, 2001, 444: 25-42.
- [11] 孙德勇, 李云梅, 乐成峰, 等. 太湖水体散射特性及其与悬浮物质量浓度关系模型[J]. 环境科学, 2007 (12): 688-2693.
- [12] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体光学衰减系数的分布及其变化特征[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 447-453.
- [13] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体光学衰减系数的特征及参数化[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(3): 209-213.
- [14] 乐成峰, 李云梅, 查勇, 等. 太湖水体漫射衰减系数的光学特性及其遥感反演模型[J]. 应用生态学报, 2009, 2(2): 337-343.
- [15] 王艳姣, 张培群, 董文杰. 悬浮泥沙反射光谱特性和泥沙量估算试验研究[J]. 泥沙研究, 2007, 10: 36-41.
- [16] 沈芳, 周云轩, 李九发, 等. 河口悬沙粒径对遥感反射率影响的理论分析与实验观测[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28: 168-172.
- [17] 孙德勇, 李云梅, 王桥, 等. 不同质量浓度悬浮泥沙水体的光谱吸收特性模拟[J]. 地理与地理信息科学, 2008(24): 16-20.
- [18] DEKKER A G, HOOGENBOOM H J, GODDIJN L M, et al. the relationship between spectral reflectance absorption and backscattering for four inland water types[C] // Proceedings of 6th int symp on physical measurements and signatures in remote sensing, CNES, France, 1994: 245-252.
- [19] BOWERS D G, BINDING C E. The optical properties of mineral suspended particles: A review and synthesis [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 67: 219-230.
- [20] KIRK J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystem [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1983: 113-114, 115-117.
- [21] 李武, 张士魁, 吴曙初, 等. 北黄海水体中辐照度的分布变化特征[J]. 黄渤海海洋, 1997, 15(2): 16-20.