

剖面法与水面之上法测量水面下遥感反射率的比较

隋晓飞^{1,2}, 商少平^{1,2}, 马晓鑫³, 商少凌^{1*}

(1. 近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学), 2. 厦门大学海洋与环境学院, 福建 厦门 361005; 3. YSI 公司, 福建 厦门 361005)

摘要: 台湾海峡、福建沿岸及两个淡水湖的表面和剖面光谱测量结果表明, 分别由水面之上法和剖面法得到的恰于水面下的遥感反射率($r_{rs}(s)$ 和 $r_{rs}(p)$)之间存在一定差异. 在量值上, 波段平均的无偏百分比误差参数在 1.7%~68.3%之间, 但 50%以上站次 20%; 在光谱形状上两者有很好的相似性, 各站次的 R^2 都在 0.93 以上; 490 nm 和 555 nm 波段比无偏百分比误差参数 $\frac{\Delta}{B}(490/555)$ 在 0.5%~11.0%之间, 且近 70%的站次 $\frac{\Delta}{B}(490/555) < 5\%$. 在平静湖泊 $r_{rs}(s)$ 与 $r_{rs}(p)$ 量值的统计差与美国 NASA 水色遥感工作组对离水辐射率所做的类似统计相当, 但在海洋水体的结果远大于此, 分析测量环境条件变化造成的光学参数测量误差是主要原因.

关键词: 水面之上法; 剖面法; 遥感反射率

中图分类号: TP 722.4

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2007)S1-0006-06

恰于水面下的遥感反射率(remote sensing reflectance just below the surface, r_{rs})是主要的水体表面光学参数之一, 也是众多海洋水色遥感算法中的一个基础物理量, 表达如下:

$$r_{rs} = L_u(0^-) / E_d(0^-) \quad (1)$$

其中 L_u 和 E_d 分别为恰于水面下的向上辐亮度和向下辐照度. r_{rs} 与离水辐亮度(L_w)相比, 由于能够部分消除不同入射光照条件对光谱数据的影响, 因此更能反映水体不同成分的吸收和散射信息, 从而在反演水体成分浓度的算法中得到更广泛的应用^[1].

然而现场光谱测量很难直接测量到恰于水面下的光学量, 只能通过其它手段间接得到. 目前, 主要有两种方法可以获得 r_{rs} : 一是通过海表遥感反射率(R_{rs})推算得到, 称之为水面之上法; 二是利用剖面光谱仪测量水下不同水层的 L_u 和 E_d , 以此反推得到恰于水面下的 L_u 和 E_d , 从而得到 r_{rs} , 称之为剖面法.

水面之上法利用下式计算^[2]:

$$r_{rs} = \frac{R_{rs}}{T + QR_{rs}} \quad (2)$$

其中 $T = t_{-} / n^2$, t_{-} 是从水表面下到水表面上的辐射透过率, t_{+} 是从水表面上到水表面下的辐射透过率, n 为水体折射系数; R_{rs} 是水-气界面反射率; Q 是光场分布参数, 为上行辐亮度与上行辐照度的比值.

1995年, Mobley通过HYDROLIGHT对 R_{rs} 和 r_{rs} 进行计算, 认为对于光学深水位于天底方位观测的传感器而言 $T = 0.52$, $Q = 1.7$ ^[3].

剖面法利用剖面仪测量得到的水下不同水层的 L_u 和 E_d , 通过局部线性回归法进行线性拟合, 反推得到恰于水面下的 $L_u(0^-)$ 和 $E_d(0^-)$, 通过式(1)计算得到 r_{rs} ^[4].

水面之上法具有现场操作简单、现场实验成本低等优点, 但受海面、天气条件等的影响大, 会给数据结果带来很多不确定的因素. 相对而言, 剖面法则受现场环境因素影响较小, 但也有其局限性, 如受仪器自身的自阴影, 水下仪器的姿态等因素影响而对数据结果带来一定的误差. 关于两种方法所获得的 L_w 的一致性, 已见数例报道, 而对于遥感半分析反演算法的关键参数 r_{rs} , 两种来源数据的一致性究竟如何, 迄今未见报道.

本研究利用GER1500型地物高光谱仪以及基于GER1500型地物高光谱仪研发的光纤式剖面光谱测量系统^[8], 在台湾海峡南部海域、福建沿岸水域和两个陆地平静湖泊同步测量了表面光谱数据和剖面光谱数据, 对分别由水面之上法和剖面法得到的 r_{rs} 结果进行比较, 并分析其影响因素.

1 方 法

1.1 仪器与测量方法

在水面之上法中, 光谱测量采用的仪器为GER1500型便携式高光谱仪, 其参数如表1所示.

收稿日期: 2007-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(40376031, 40331004, 40521003), 863计划(2002AA639540, 2006AA09A302), 教育部创新群体计划, 厦门大学新世纪人才计划联合资助

*通讯作者: slshang@xmu.edu.cn

表 1 GER1500 参数表
Tab. 1 The parameters of GER1500

仪器型号	探测器	光谱分辨率 / nm	光谱范围	波段数	视场角	扫描时间 / ms	尺寸 / cm
GER1500	512Si	1.5	350 ~ 1050	512	4 °(无光纤) 23 °(带光纤)	5(可设定)	15 × 8 × 26

由于目标水域基本上都属于二类水体,所以表面光谱测量按照唐军武等(2004年1月)提出的二类水体水面以上光谱的测量方法^[5]. 仪器观测平面与太阳入射平面的夹角为 40° (135°背向太阳方向), 仪器与海面法线方向的夹角 30° (45°这种观测几何也是目前国际水色 SIMBIOS 计划中推荐的方法,其优点是:与剖面观测的固有差异较小,能更好地避免太阳直射反射和船体自身对水体光场的破坏,缺点是天空光的均匀性较差,船舶的晃动会产生一定的影响.而后通过下式获得 $R_{rs}(\lambda)$:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_d(0_+, \lambda)} = \frac{L_u(\lambda) - R_{sky}(\lambda)}{L_{plaque}(\lambda)} \quad (3)$$

其中, L_w 为离水辐射率, $E_d(0_+, \lambda)$ 为海面入射辐照度, L_u 为水面向上总辐亮度, L_{sky} 为天空辐亮度, L_{plaque} 为漫反射板辐亮度, $R_{sky} = 50\%$ (漫反射板反射率), r 为气-水界面对天空光的反射率,取值 0.028^[6,7].

剖面光谱测量采用针对近海高污水体光谱测量开发的光纤式剖面高光谱测量系统,该系统的设计思路是以光纤为媒介,通过光纤将水下光信号引出至水面上的表面光谱仪内,使原本用于测量表面光谱的 GER1500 型表面光谱仪扩展为可以进行水下剖面光谱测量的剖面光谱仪,其概念图如图 1 所示,详细说明参见文献[8]. 其中,在两个海上航次的剖面光谱测量中,使用的是完全版的剖面光谱测量系统,其光纤总长 15 m,浮子系统靠长 3 m 的硬质连杆推离船体,水下探头依靠浮子系统维持海面 0 基准的控制,用液位计测量水下探头的水深;而在两个浅水平静湖泊进行测量时,使用的是简易版的剖面光谱测量系统,其光纤总长 5 m,利用光纤上标志深度的标签观测探头的水深^[8].

1.2 数据采集与处理

采用上述仪器与方法进行了 4 个批次的测量,分别是 2006 年 5 月到 7 月厦门大学校园内的两个平静淡水湖——芙蓉湖和情人湖(图 2a)、2004 年 7 月 25 日至 8 月 6 日台湾海峡南部(图 2b)、2004 年 9 月 10 ~ 18 日福建沿岸(图 2c),总测量站次为 77 次,得到表面与剖面光谱匹配、且通过质量控制的数据,共 21 组. 按上述两种不同方法计算恰于水面下的遥感反射率 r_{rs} , 其中由水面之上法得到的标志为 $r_{rs}(s)$, 由剖面法得到的标志为 $r_{rs}(p)$.

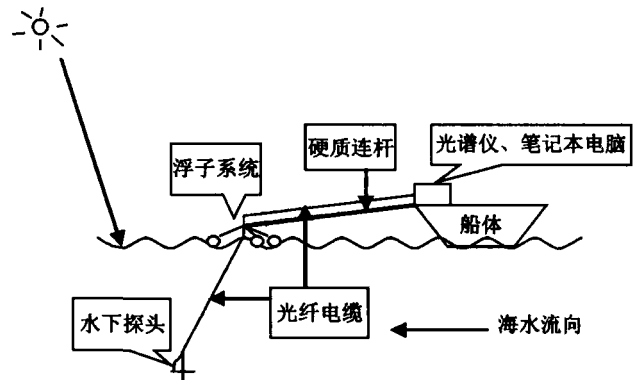


图 1 剖面测量系统概念图
Fig. 1 The conceptual chart of profiling spectroradiometer

1.3 比较方法

为了进一步分析比较 $r_{rs}(p)$ 和 $r_{rs}(s)$ 之间的差异,参照 Stanford B. Hooker 等人在评价水面之上法和剖面法得到的离水辐射率时采用的方法^[9],从量值和光谱形状变化的角度去分析比较两者之间的异同. 用 400 ~ 700 nm 波长范围内共 188 个波段的平均无偏百分比误差参数 (Unbiased percent difference, 简称 UPD) 表征量值上的差异,用 $r_{rs}(p)$ 和 $r_{rs}(s)$ 的 R^2 以及 490、555 nm 波段比的无偏百分比误差参数来说明在光谱形状上的差异. 计算公式如下:

$$\frac{A}{B}(\lambda, t) = 200 \frac{|X^A(\lambda, t) - X^B(\lambda, t)|}{X^A(\lambda, t) + X^B(\lambda, t)} \quad (4)$$

式中 X^A 和 X^B 分别表示由两种不同途径得到的 r_{rs} . 光谱平均的 UPD 由下式计算:

$$\frac{A}{B}(\text{all}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{A}{B}(\lambda, t) \quad (5)$$

490、555 nm 波段比的 UPD 由下式计算:

$$\frac{A}{B}(490/555) = 200 \times \frac{|\frac{X^A(490)}{X^A(555)} - \frac{X^B(490)}{X^B(555)}|}{\frac{X^A(490)}{X^A(555)} + \frac{X^B(490)}{X^B(555)}} \quad (6)$$

2 结果与讨论

各站次 $r_{rs}(s)$ 和 $r_{rs}(p)$ 随波长变化的光谱曲线图如图 3 所示,二者比较的误差统计结果如表 2 所示. 从光谱曲线图(图 3)粗略分析, $r_{rs}(s)$ 和 $r_{rs}(p)$ 存在一定差异,有的站次 $r_{rs}(s)$ 高于 $r_{rs}(p)$, 而有的站次相反.

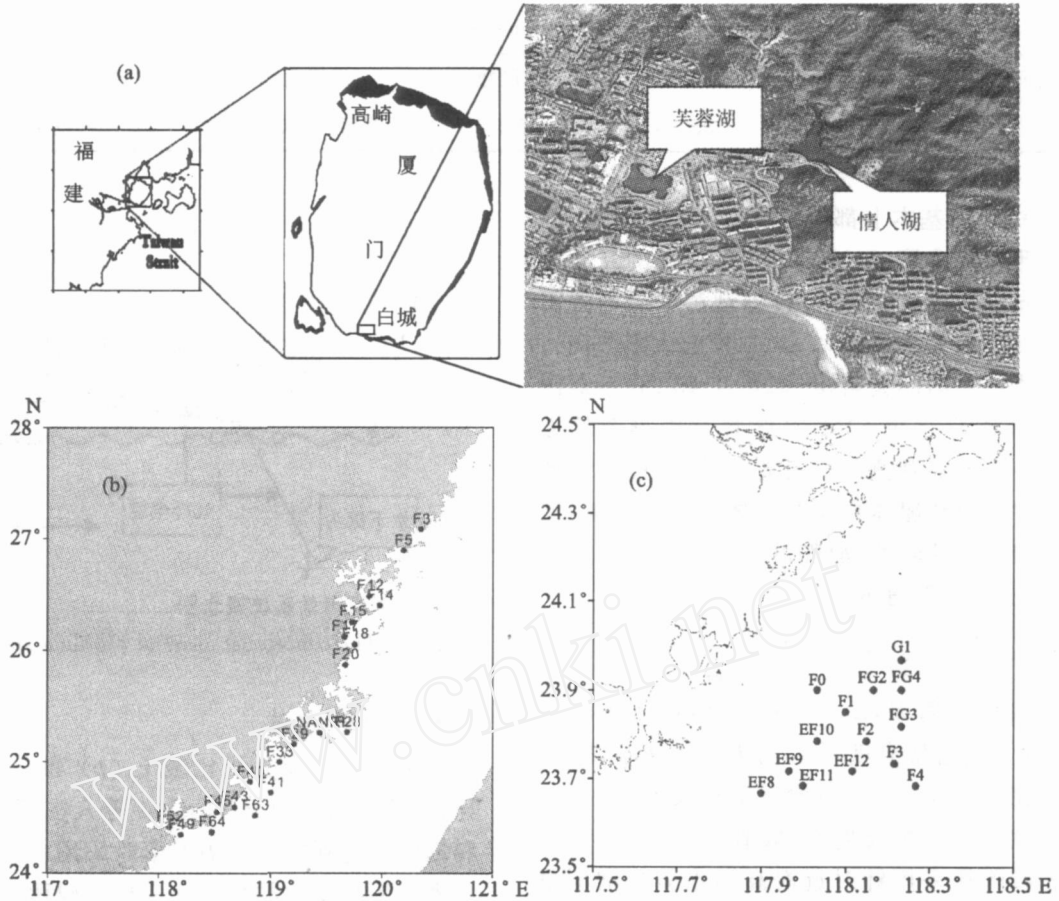


图2 各航次站位图
 a. 情人湖、芙蓉湖位置图; b. 福建沿岸航次站位图; c. 台湾海峡航次站位图

Fig. 2 Sampling stations

就 $r_s(s)$ 与 $r_s(p)$ 波段平均的量值差异而言,波段平均无偏百分比误差 $\bar{\epsilon}_B^A(\text{all})$ 变化显著,范围在 1.7% ~ 68.3% 之间,平均值为 25.6%,但 50% 以上站次 $\bar{\epsilon}_B^A(\text{all}) > 20\%$. 其中两个平静淡水湖的在 1.7% ~ 13.2% 之间,平均值为 7.3%,与 Stanford B. Hooker 等人对离水辐射率进行比较的结果(3.2% ~ 17%)相似. 而在台湾海峡水域和福建沿岸 $\bar{\epsilon}_B^A(\text{all})$ 在 5.9% ~ 68.3% 之间,变化范围很大且平均值为 38.37%,远大于 Hooker 等人的离水辐射率比较结果. 这与现场测量条件、光场环境以及目标水体随站位和测量时间不同而引起的太阳高度角的差异等实验背景的不同而呈现的各异性有很大的关系. 这些实验背景的差异不仅影响到直接测量参数的准确性,同时对随后的遥感反射率推算产生影响. 具体而言,在计算 r_s 时使用的一些参数,如公式(2)中的光场分布参数 Q 以及公式(3)中的气-水界面反射率 r 等,是随着现场测量条件(如太阳角度,海面风速等)的不同而变化的,但这种变化,目前很难度量,本文仿通常的做法[文献 2 等]采用固定值,因此我们所观察到的差异在一定

程度上可能是由 Q 和 r 的变化带来的.

表 3 列举了有代表性的 5 个站次实验时的现场条件,其中 060514-情人湖站次符合准确测量光学参数的标准条件,现场光学参数测量准确,无偏百分比误差很小(1.7%);而其它几个站次因为太阳角度过大,云移动导致光场变化,水流过急或水面有白沫等不同原因而使现场光学测量和后期 r_s 的计算结果误差增大,导致 $\bar{\epsilon}_B^A(\text{all})$ 均在 40% 以上.

就光谱形状的相似度而言,所有的 21 个站次数据, R^2 均在 0.93 以上,其中有 15 个站次在 0.99 以上. 各站次 490、555 nm 波段比值的无偏百分比误差 $\bar{\epsilon}_B^A(490/555)$ 范围在 0.5% ~ 11.0% 之间,且近 70% 的站次 $\bar{\epsilon}_B^A(490/555) < 5\%$,远小于上述量值上的差异,与 Hooker 等人 1.4% ~ 7.2% 的结果在可比范围之内. 这表明每个站次的 $r_s(p)$ 和 $r_s(s)$ 之间虽然在量值上存在着差异,但其差异在 400 ~ 700 nm 波段范围内几乎不存在波长依从特征.

综合衡量分析各站次谱型图、线性相关系数、 $\bar{\epsilon}_B^A(\text{all})$ 以及 $\bar{\epsilon}_B^A(490/555)$,一方面表明恰于水面下

表 2 各站次误差统计结果
Tab.2 Statistics of $r_s(p)$ and $r_s(s)$

站次	R^2	$\frac{A_B(\text{all})}{\%}$	$\frac{A_B(490/555)}{\%}$
060512-芙蓉湖	0.9989	12.5	2.8
060514-情人湖	0.9997	1.7	1.0
060611-芙蓉湖	0.9989	2.3	0.4
060611-情人湖	0.9953	13.2	9.6
060706-芙蓉湖	0.9951	7.0	10.7
040801-F3	0.9458	61.1	6.4
040802-F3	0.9983	17.6	4.5
040804-F2	0.9995	20.8	3.2
040804-F3	0.9942	49.0	4.8
040804-F4	0.9785	29.6	11.0
040805-G1	0.9690	17.5	3.9
040805-F0	0.9942	17.6	7.6
040805-F1	0.9987	47.8	5.4
040805-F2	0.9998	25.6	0.87
040805-F3	0.9889	14.0	0.8
040805-F4	0.9776	68.3	4.6
040806-G1	0.9917	39.9	7.8
040806-F1	0.9954	27.5	1.1
040914-F3	0.9393	5.9	0.5
040914-F12	0.9861	27.1	1.4
040917-F63	0.9936	32.5	8.1

的遥感反射率 r_s 的光谱曲线形态,光谱波段比值的测量可以达到较高的质量水平,但 r_s 的量值测量还存在较大的误差.另一方面,两个陆地淡水湖的实验结果优于台湾海峡南部水域和福建沿岸海域的实验结果,分析其原因主要有两方面,一是相对于海上测量而言在平静的陆地淡水湖测量时,可以比较精确的把握现场测量几何,而且对于测量结果影响很大的船的晃动、自阴影和海面波浪起伏等客观因素的影响会彻底消除或大大减弱;二是由于两个湖都是高污浑浊水体,其 490 nm 的水体漫衰减系数 $K_d(490)$ 基本都在 2 m^{-1} 以上,光学深度在 $0.3 \sim 0.5 \text{ m}$ 内变动,因此

可以忽略底部和水边界的影响.虽然光学深度很浅,但是通过提高深度分辨率(湖里测量为 0.05 m ,海上测量为 1 m),依然可以推导出相对可靠的 L_u 和 E_d 的垂直变化,从而得到更为准确的 $r_s(p)$.

至此我们知道 $r_s(s)$ 与 $r_s(p)$ 之间主要存在量值上的差异,且此差异基本不随波长而变.我们认为产生差异的主要原因,一方面是与波段无关的测量几何波动和环境条件变化导致表面法测量的 R_s 和剖面法直接测量的 $L_u(\cdot, z)$ 和 $E_d(\cdot, z)$ 的测量误差引起,另一方面由测量环境条件不同导致的 R_s 到 r_s 转换参数的变化也可能产生一定影响.为此我们尝试做一个估算,公式(2)中, T 和 Q 相对来说较为固定,我们仍取定值, Q 则随不同水体、太阳角度以及仪器观测角度在 $1.7 \sim 7$ 之间变动^[4],以 R_s 值较大的 040914-F12 站次为例, Q 分别取 $1.7, 3.75(Q=1.7), 7$ 计算 $r_s(s)$, 并与该站次的 $r_s(p)$ 做比较,如图 4 所示.可见 Q 取 $3.75, 7$ 时,计算得到的 $r_s(s)$ 差异较大,两者的 $\frac{A_B(\text{all})}{\%}$ 为 4.2% , 而 $\frac{A_B(490/555)}{\%}$ 为 0.3% .表 2 所示 $r_s(s)$ 与 $r_s(p)$ 之间差异的统计结果, Q 的取值是 3.75 , 对于该站位 $r_s(s)$ 与 $r_s(p)$ 的为 27.1% , $\frac{A_B(490/555)}{\%}$ 为 1.4 , 可见由 Q 的变化引起的误差对 040914-F12 站次的 $r_s(s)$ 与 $r_s(p)$ 之间的总体差异的贡献相对较小.

3 结 论

本文利用 GER1500 型便携式高光谱仪和一套主机为 GER1500 型便携式高光谱仪的光纤式剖面光谱测量系统,分别在台湾海峡南部,福建沿岸海域以及两个陆地淡水湖中进行了表面和剖面的光谱测量,积累了 21 个站次的同步数据,分别计算出了 $r_s(p)$ 和 $r_s(s)$, 并利用 R^2 , 波段平均的无偏百分比误差 $\frac{A_B(\text{all})}{\%}$ 和波段比值的无偏百分比误差 $(\frac{A_B(490/555)}{\%})$ 等统计分析方法,初步分析比较了两者之间的异同.与美国 NASA 水色遥感工作组对离水辐射率所做的类似统计相比,海上的 $\frac{A_B(490/555)}{\%}$ 远

表 3 几个站次现场实验记录

Tab.3 Record of the sampling conditions for a couple of representative stations

站位	测量时间	海况	云量	风速
060514-情人湖	13:45	水面平静,水流速很小	晴,无云,光照很强	近于无风
040801-F3	16:10	有波纹无波顶	晴,无云光照较强	微风
040805-F4	16:30	有波纹无波顶	晴,少量薄云光照很强	微风
040805-F1	11:25	细小波纹,流速较急,仪器有倾角	晴,大量厚云,测量时光场有变化光照很强	微风
040806-G1	10:06	水面平静无波,拍剖面时,水面有少许白沫	晴,无云光照强烈	微风

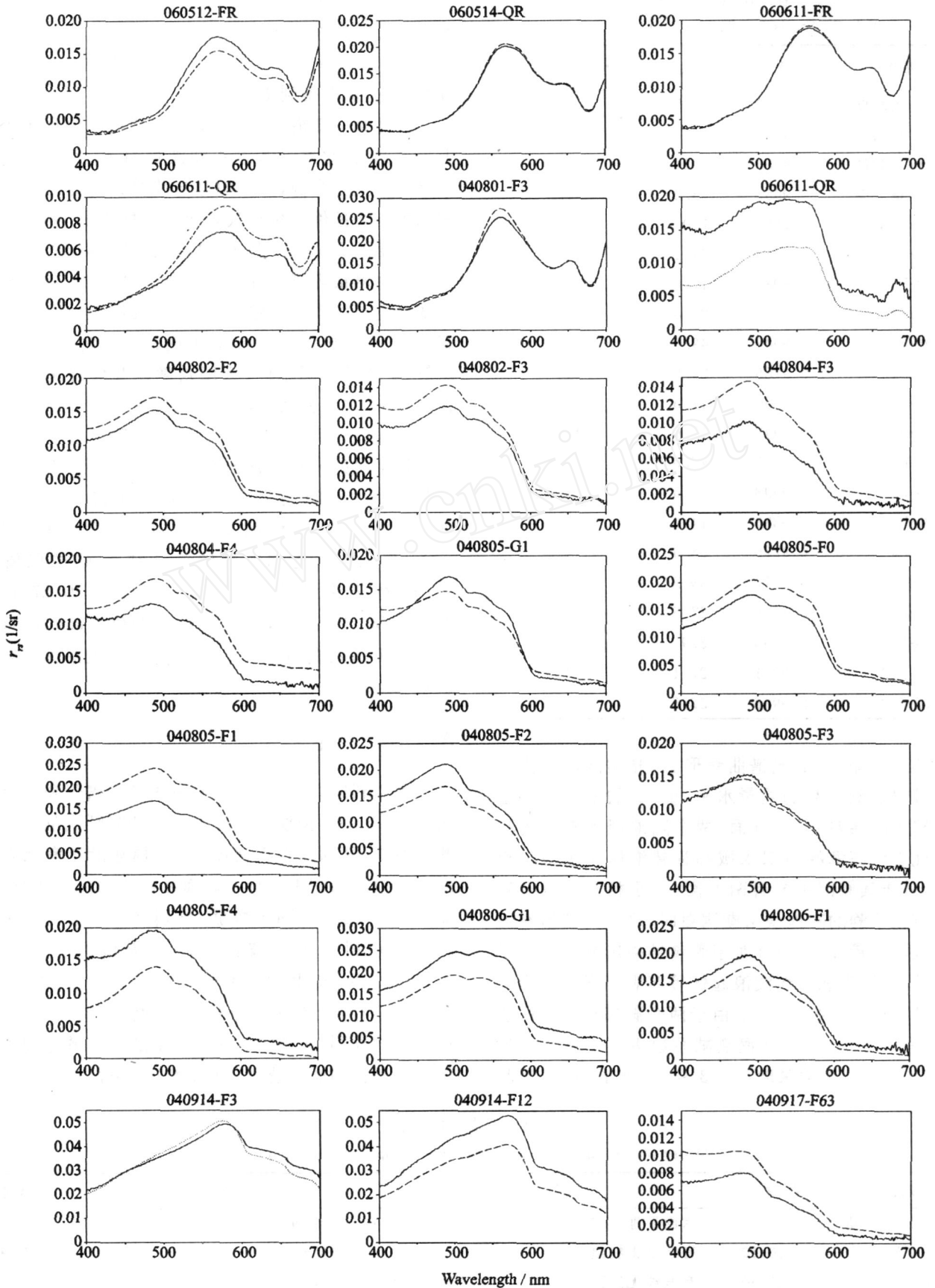


图3 各站次 $r_n(p)$ 和 $r_n(s)$ 谱形图

— $r_n(p)$; - - $r_n(s)$

Fig. 3 The $r_n(p)$ and $r_n(s)$ of each station

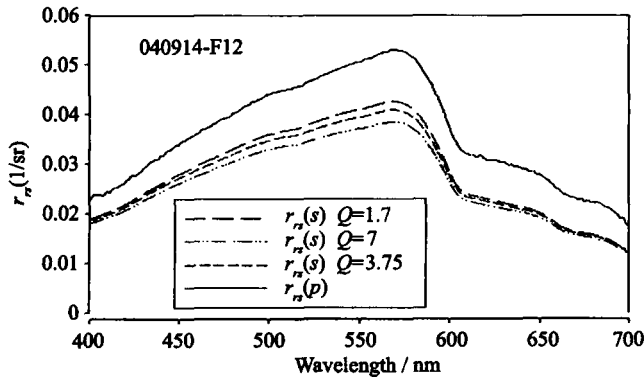


图 4 040914-F12 站 $r_{rs}(p)$ 和不同 Q 值下的 $r_{rs}(s)$

Fig. 4 The $r_{rs}(p)$ and $r_{rs}(s)$ for different Q of 040914-F12

大与其统计结果,但海上的 R^2 、 $\frac{A}{B}(490/555)$ 以及平静湖泊的 3 个误差统计都与之相当.说明恰于水面下的遥感反射率光谱 r_{rs} 的曲线形态、光谱波段比值的测量质量可以达到较高的水平,而量值的测量质量不容易控制,其原因主要是由与波段无关的测量几何、环境条件变动等原因而造成的光学量测量误差和 r_{rs} 计算公式中光学参数的变化引起的.进一步根据可能的光学参数变化范围估算的结果表明,光学参数变化对总体误差的贡献相对较小,所以尽管卫星遥感类似于采用水面之上法,但对于主流的多波段比值水色遥感算法而言,其与剖面法的差异对反演结果造成的影响是可以忽略的.

致谢:现场数据采集中得到董强和朱钰等同学的大力协助与支持,谨此一并致谢.

参考文献:

- [1] 周良明,刘玉光,郭佩芳.渤海和北黄海水色光谱的特征分析[J].海洋通报,2005,24(2):13-19.
- [2] Gordon H R, Brown O B, Evans R H, et al. A semi-analytic radiance model of ocean color[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93:10909-10924.
- [3] Lee Z P, Carder K L, Arnone R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. Applied Optics, 2002, 41(27):5755-5772.
- [4] 杨安安,李铜基,陈清莲,等.二类水体表面光学特性的测量与分析——剖面法方法研究[J].海洋技术,2005,26(3):111-115.
- [5] 唐军武,田国良,汪小勇,等.水体光谱测量与分析:水面以上测量法[J].遥感学报,2004,8(1):37-44.
- [6] 李铜基,陈清莲,韩冰.海面之上法中海面反射率和观测几何模拟研究[J].海洋技术,2005,24(4):112-117.
- [7] 汪小勇,李铜基,唐军武,等.二类水体表面光学特性的测量与分析——水面之上法方法研究[J].海洋技术,2004,23(2):1-6.
- [8] 马晓鑫.光纤式高光谱剖面测量系统[D].厦门:厦门大学,2006.
- [9] Hooker S B, Lazin G, Zibordi G, et al. An evaluation of above and in-water methods for determining water-leaving radiances [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19: 486-513.

The Comparison Between Above- and In-Water Methods for Determining Remote Sensing Reflectance Just Below Surface

SUI Xiao-fei^{1,2}, SHANG Shao-ping^{1,2}, MA Xiao-xin³, SHANG Shao-ling^{1*}

(1. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University,

2. College of Oceanography and Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

3. The YSI China Inc, Xiamen 361005, China)

Abstract: We used GER1500 spectrometer and a home-made profiler to measure remote sensing reflectance in two pools, the Taiwan Strait and the water alongshore Fujian, China. The differences between $r_{rs}(s)$ and $r_{rs}(p)$ (remote sensing reflectance determined by above- and in-water methods, respectively) were found changing significantly in values for the sea rather than the pools. Following Hooker et al. (2002), $\frac{A}{B}(\text{all})$ and $\frac{A}{B}(490/555)$ were calculated, ranged between 1.7% ~ 68.3%, yet it was < 20% for half of the sampling stations. However, R^2 were > 0.9 for all the stations. $\frac{A}{B}(490/555)$ ranged between 0.5% ~ 11.0%, and it was < 5% for 70% stations. It meant that no great deviation of spectral shapes occurred while comparing $r_{rs}(s)$ with $r_{rs}(p)$. The statistics results for the pool water were comparable to what Hooker et al. (2002) reported. However, those for the observations on the sea showed much higher $\frac{A}{B}(\text{all})$ and $\frac{A}{B}(490/555)$. It was suggested that relatively calm surface for the pools would ensure convincing and constant spectral measurements, while it was not the case for the sea observation.

Key words: above-water method; in-water method; remote sensing reflectance