

文章编号: 1672-8785(2017)12-0006-07

高浊度水体光学测量仪器的比较与验证

杨孟毅 蒋雪中* 何 青

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘 要: 利用 2017 年冬季航次的现场光谱测量数据以及同步水文泥沙参数, 讨论了 ASD 地物光谱仪和 Hypersas 海面光谱仪两种光学测量仪器在长江口局地高浊度水域所测光谱数据的差异情况。结果表明, Hypersas 光谱仪所测的光谱值在整体上比 ASD 光谱仪的高; 当积分时间为 34 ms 时, 两者的差异最小, 其在 412 nm、443 nm、490 nm、510 nm、531 nm、555 nm、670 nm 和 750 nm 各个典型波段的平均相对差异值分别为 22.70%、18.73%、15.01%、14.07%、13.05%、11.93%、9.58% 和 9.85%。通过分析和对比两组数据与同步实测的悬沙浓度数据的相关性以及拟合精度可以发现, 在局地模式下, ASD 光谱仪所测的悬沙浓度建模精度 ($R^2=0.78$) 比 Hypersas 光谱仪的 ($R^2=0.67$) 高。

关键词: 光学测量; 光谱反射率; 高浊度水体; 长江口

中图分类号: N34 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.12.002

Comparison and Verification of Optical Measurement Instruments for High Turbidity Water

YANG Meng-yi, JIANG Xue-zhong *, HE Qing

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: In light of the in-situ spectral measurement data and the synchronous hydrological sediment parameters from the survey in 2017 winter, the difference of spectral data obtained by two kinds of optical instruments: an ASD spectrometer and a Hypersas sea surface spectrometer in the high turbidity water of the Yangtze Estuary is discussed. The results show that the spectral values measured by the Hypersas spectrometer are higher than those measured by the ASD spectrometer on the whole. For the integration time of 34 ms, the difference between the two instruments is lowest. The average relative difference values in the typical bands of 412 nm, 443 nm, 490 nm, 510 nm, 531 nm, 555 nm, 670 nm and 750 nm are 22.70%, 18.73%, 15.01%, 14.07%, 13.05%, 11.93%, 9.58% and 9.85% respectively. By analyzing the correlation and fitting accuracy of the two sets of data and the suspended sediment concentration data measured, it is found that in the local mode, the accuracy of suspended sediment concentration modeled by the ASD spectrometer is ($R^2=0.78$), which is higher than that modeled by the Hypersas spectrometer ($R^2=0.67$).

收稿日期: 2017-09-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016yfa0600904); 国家自然科学基金项目 (41376098); 上海市科委重大项目 (16DZ1205403)

作者简介: 杨孟毅 (1993-), 女, 河南温县人, 硕士研究生, 主要研究方向为河口变化分析和遥感应用。

*** 通讯作者:** E-mail: xzjiang@sklec.ecnu.edu.cn

Key words: optical measurement; spectral reflectance; high turbidity water; the Yangtze Estuary

0 引言

悬浮泥沙是高浊度水体中一种重要的水色参数,其浓度含量对水体的透明度、浑浊度和水色等光学性质有很大的影响,进而又会直接影响水色卫星遥感信号的强弱^[1-2]。目前,国内外在利用遥感影像反演高浊度水体的悬浮泥沙浓度方面已经做了很多工作。其中大量研究都是侧重于利用实测悬沙浓度与水体光谱信息建立某种定量关系,进而实现遥感反演算法^[3]。因此,现场水体光学测量的准确性会直接决定遥感反演算法建立的准确性。Doxaran D^[4]、Drerdre A^[5]和 Mobely C D^[6]等人对现场水体光谱测量中的影响因素进行了分析和研究,并给出了水体遥感反射率的计算参数。汪小勇和唐军武等人对光谱仪的测量方法和注意事项以及气水界面反射率的求取、太阳耀斑的剔除等光学测量中的关键问题进行了讨论,并对水面之上法的各种误差来源进行了分析^[7-8]。

考虑到海上测量环境的复杂性,光谱仪器的选择在一定程度上也会影响测量的有效性。同时,在某项研究中,基于前后用不同光谱仪所测得的数据进行研究分析是否可行,目前针对这方面的研究较少。因此,本文对用两种常见的光谱仪在海上定点测量的条件下获取的光谱数据进行了分析和比较,以在此测量条件下实现较为有效的水面光谱测量,从而进一步提高卫星遥感泥沙水色反演的精度。

1 数据与方法

1.1 现场光谱数据采集

现场水体光谱采集工作使用两种常用的光谱仪同步进行。一种是应用较为广泛的美国 ASD

公司生产的 Field Spec Pro 4 地物光谱仪;另一种是由于操作方便而在近几年较为流行的 Hypersas 海面光谱仪(具体参数见表 1)。

在实际测量过程中,ASD 光谱仪使用 17 ms、34 ms、68 ms 和 136 ms 四种不同的积分时间。其中每档积分时间分别完成测量反射率为 20% 的标准板、水面和天空光^[12]。现场测量时,光纤探头的操作人员应尽量身着深色衣服,以免对白板周围的光环境产生影响。另外,电脑操作人员在每次观测之前都需要根据环境变化进行优化和暗电流消除以减小误差。图 1(左)为 ASD 光谱仪的现场测量照片。Hypersas 光谱仪可提供高精度高光谱测量方法来测定离水辐亮度和下行辐照度。具有 256 个通道的 HyperOCR 辐亮度和辐照度传感器可同时对海面和空中进行测量。它们主要包括 HyperOC (Radiance IN Air) SN250-Lt 水面总辐射亮度传感器、HyperOCR (Radiance IN Air) SN250-Lr 天空光辐射亮度传感器和 HyperOCR (Irradiance IN Air) SN187-Es 太阳辐照度传感器。这三部分的光谱测量结果在电脑输出端自动显示并保存。在用水表面以上观测法进行野外测量时,为了消除船体阴影和海水浪花的影响,一般将 Es 传感器垂直安装在船体的最高处,并将 Lr 和 Lt 传感器按照规定的测量角度安装,此时应尽量避免开船体阴影和海面白帽。图 1(右)为 Lt 和 Lr 传感器的现场测量照片。

野外测站位于长江口南槽(121.55°E, 31.10°N),时间为 2017 年 2 月 24 日至 3 月 4 日(农历正月二十八至农历二月初七),对大小潮均连续观测超过 26 h。光谱采集时间为白天 9:00 ~ 17:00,

表 1 ASD 地物光谱仪与 Hypersas 海面光谱仪的参数对比

仪器名称	波长范围	波长精度	光谱分辨率	积分时间
ASD 地物光谱仪	350 ~ 2500 nm	1 nm	3 nm@700 nm, 10 nm@1400 nm, 2100 nm	8.5 ms, 17 ms, 34 ms, 68 ms, 136 ms, 272 ms
Hypersas 海面光谱仪	350 ~ 858 nm	1 nm	10 nm	4 ~ 2048 ms (自动调整)



图 1 ASD 地物光谱仪与 Hyersas 海面光谱仪 (Lt 和 Lr 部分) 的工作现场

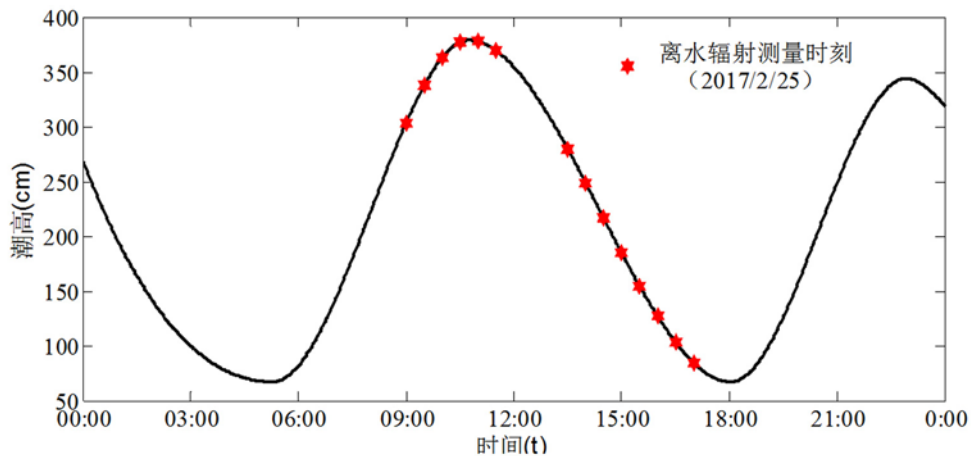


图 2 日内现场离水辐射测量时刻与潮汐周期

每半点采集一次, 其中避开中午 12:00 ~ 13:30 的太阳直射时段。图 2 所示为一日内的现场离水辐射测量时刻与当日的潮汐周期。可以看出, 日内光谱测量会经历涨落潮两个过程。其中, 在转流时刻, 船体会随之发生相应的转动, 即船头指向旋转 180° 左右。对于经过严格标定的 ASD 光谱仪及其标准板, 可以直接用式 (1) 计算遥感反射率^[6]:

$$R_{rs} = \frac{\rho_p (L_t - \rho_{sky} L_i)}{\pi E_p} \quad (1)$$

式中, E_p 为标准板上反射的辐射亮度, 通过计算可得到总的太阳辐照度; L_t 为水面总的向上辐射亮度信号; L_i 为不含水体信息的表层气-水反射辐射亮度; ρ_{sky} 为海表反射因子, 它与天空光条件、风速、太阳方位角以及观察角度有关。

根据测量过程中的天气状况, 将 ρ_{sky} 近似取为 0.024。

Hyersas 海面光谱仪的遥感反射率计算原理同 ASD 光谱仪一样, 但由于其太阳辐照度 E_s 是直接测得的, 故其遥感反射率计算公式为

$$R_{rs} = \frac{L_t - \rho_{sky} L_i}{E_s} \quad (2)$$

1.2 其他数据

在光谱测量期间, 每半点同步用横式采水器获取表层水样, 并将其装瓶运回实验室; 经滤膜过滤后, 采用质量称重法测量表层水体的悬浮泥沙含量 (Suspended Sediment Concentration, SSC)。在测量过程中, 还每半点同步测量并记录当时的天气情况, 包括光照、云量、风速和风向等。

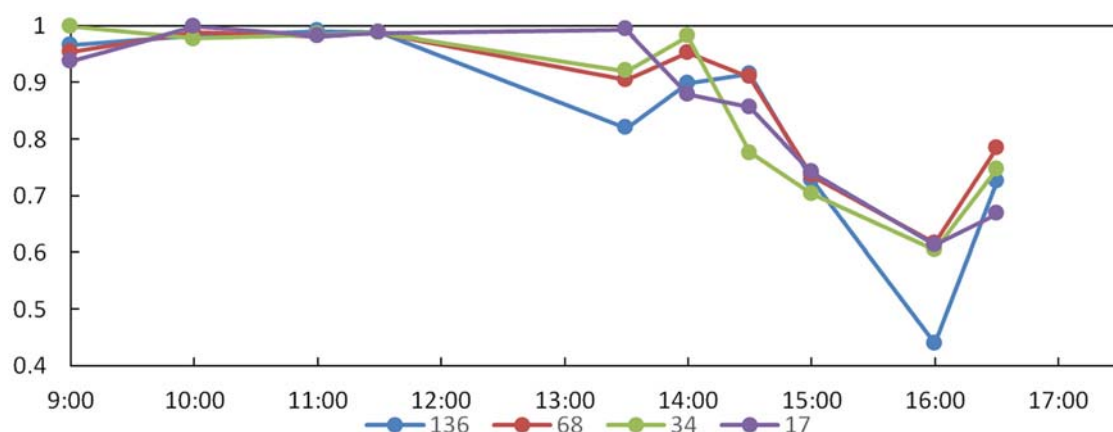


图 3 2017 年 2 月 25 日两种光谱仪光谱测量结果的相关图

2 两种光谱仪光谱测量的比较与验证

2.1 两种光谱仪所测水体光谱数据的差异分析

选取 2017 年 2 月 25 日当天内两种光谱仪在各测量点获取的数据作为代表进行相关性分析(结果见图 3)。可以看出,在早上 11:30 之前,两者的相关性均很高,相关系数最高可达 0.99,说明其光谱曲线的形状接近相同;但从下午 13:30 开始,ASD 光谱仪的各个积分时间与 Hypersas 光谱仪的相关性出现了不同程度的变化,但变化趋势均为下降。结合当天光谱测量时刻点的潮情(见图 2)以及现场照片分析发现, Hypersas 光谱仪的测量过程在上午不受阴影的影响,测量角度以及测量环境较好;在 13:30 左右,船体随潮水转流转动 180° 左右后, Hypersas 光谱仪开始慢慢处于船体阴影中;最后到 15:30 时,已经完全处在阴影中。在以上过程中, Hypersas 光谱仪与 ASD 光谱仪的四种积分时间的相关性均呈下降趋势。当 Hypersas 光谱仪完全处在船体阴影下时,相关系数最小达到 0.44。而之后相关性稍有回升,这是由于接近黄昏,光线较弱,有无阴影对数据测量的影响较小。

结合现场测量记录表,并剔除受阴影影响的光谱数据,选取环境较好、质量较高的光谱数据对两种光谱仪的测量数据进行匹配和对比。图 4 为 Hypersas 和 ASD 四档积分时间的测量光谱结果值在海洋卫星 412 nm、443 nm、490 nm、510 nm、531 nm、555 nm、670 nm 和 750 nm 遥感波段的散点对比图。可以看出, Hypersas 光谱仪

所测光谱值在整体上偏高于 ASD 光谱仪,这在积分时间为 17 ms 和 136 ms 时表现较为明显;当积分时间为 34 ms 时,两者的差异最小,其在 412 nm、443 nm、490 nm、510 nm、531 nm、555 nm、670 nm 和 750 nm 各个典型波段的平均相对差异值分别为 22.70%、18.73%、15.01%、14.07%、13.05%、11.93%、9.58% 和 9.85%。该结果与戴乾等人^[10]的研究结果(10.67% ~ 8.48%)接近。另外还发现两者在较短波长处的差异相对较大,而在长波长处的差异则逐渐减小。两种光谱仪测量数据的结果差异可能缘于以下几点:一是因为两种光谱仪的视场角大小不一样。ASD 光谱仪光纤探头的视场角为 25°, Hypersas 光谱仪的 Lt 水面总辐射亮度传感器的视场角为 3°。其次, Hypersas 光谱仪直接测得总辐照度,而 ASD 光谱仪则是通过测量标准板来间接计算得到总辐照度的。再次,虽然两种光谱仪所参考的测量角度一致,但是在角度控制方面,两者均有一定的误差范围。最后, ASD 光谱仪依次测量标准板、水体和天空光,而 Hypersas 光谱仪则同时对三者进行测量。总体说来,影响两者间差异的因素较多,故在同一研究中不建议使用两种光谱仪的混合数据。

2.2 两种光学仪器与局地悬沙浓度的回归建模

长江口南槽地区的测站位于最大浑浊带水域^[11],其水体的光谱反射率主要以悬浮泥沙为主导。结合同步实测的悬浮泥沙浓度,分析两种

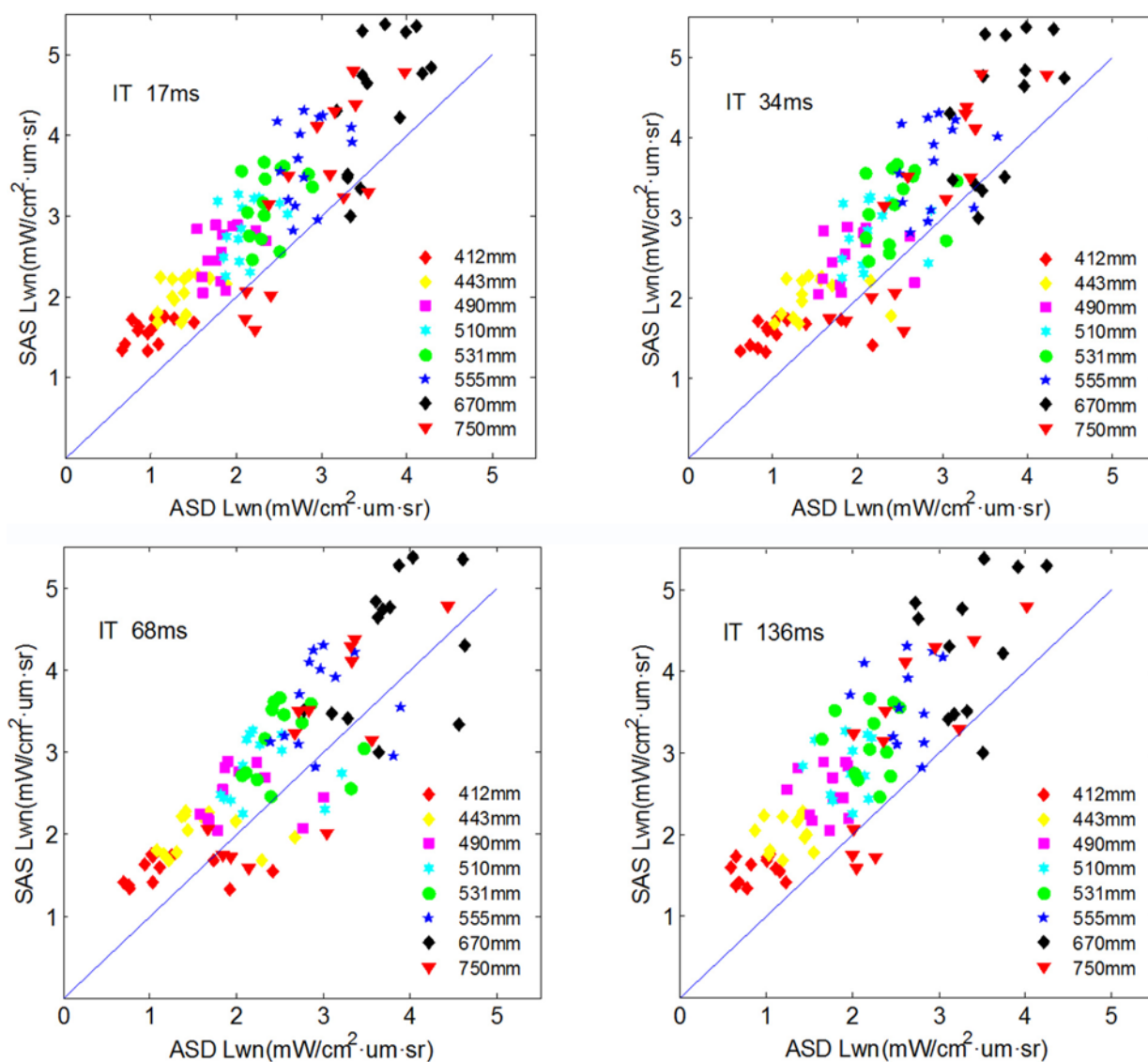


图 4 ASD 光谱仪四档积分时间和 Hypersas 光谱仪在典型波段的光谱反射率值对比

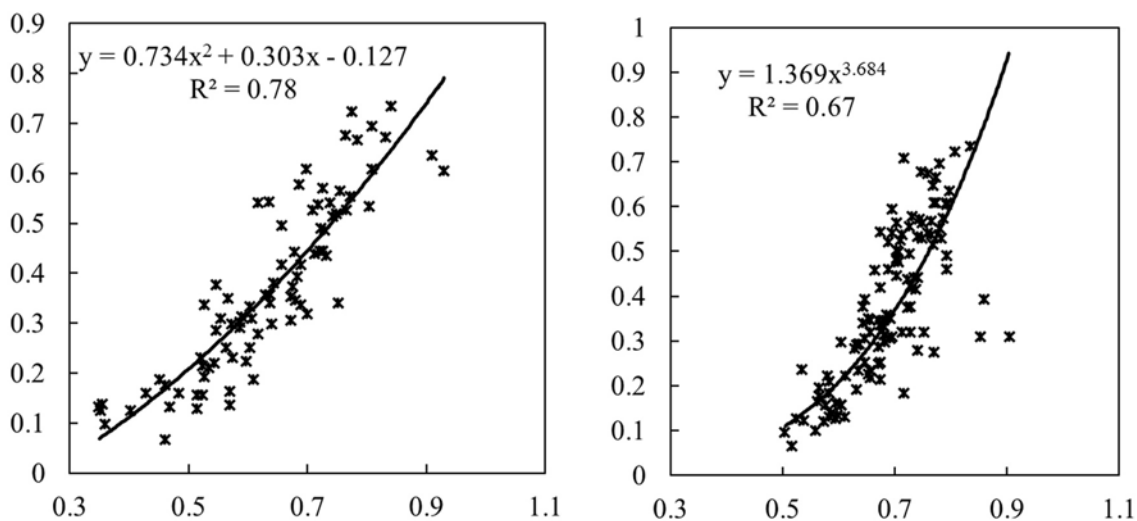


图 5 光谱反射率与悬沙浓度的回归建模

光谱仪所测的光谱反射率及其相关性并对其进行建模。选取两种光谱仪所测光谱数据与悬沙浓度相关性最高的 858 nm 波段作为悬沙浓度的一个反演波段。一般进行悬浮泥沙反演的最佳波段在 600 ~ 858 nm 左右^[1], 而波段比值又能很好地提高反演精度^[12], 故通过计算 600 nm 之后的每一个波段比值所建立回归方程反演的悬沙浓度与实测浓度的均方根误差, 选取均方根最小的两个波段组合。根据计算结果, 分别选取 Hypersas 光谱仪和 ASD 光谱仪在 34 ms 积分时间下的 858 nm/813 nm 和 858 nm/709 nm 波段组合作为新的光谱反射率参数进行遥感反演建模。结果表明, ASD 光谱仪以多项式建模的精度最高, 其 R^2 值为 0.78; Hypersas 光谱仪数据以指数建模的精度最高, 其 R^2 值为 0.67。

从两种光谱仪所测光谱数据与同步实测悬沙浓度数据的相关性以及建模研究过程来看, 两者的最佳建模波段参数和建模方式都不相同。这进一步说明不适合在同一研究中使用两者的混合数据。同时, 由建模结果可知, ASD 光谱仪所测的光谱数据比 Hypersas 光谱仪的更为准确。经分析认为, 这是由于在海上固定点测量, 且 Hypersas 光谱仪的各个部分在船上固定好的。若观测水域出现白帽, 这些也是无法避免的。而且, Hypersas 光谱仪所测的光谱数据在船体定点测量过程中易受潮流影响; 随潮流转动, 进而容易受到船体阴影的影响。此外, 一天当中太阳角度一直在不断变化, 因此 Hypersas 光谱仪的角度调整不及时也会导致测量结果出现异常。而在固定点船只测量中, ASD 光谱仪则表现出了优越的灵活性。测量前, 可选择最佳角度和最佳水域(白帽少、不受船体阴影的影响等)。根据外界环境可随时对测量位置进行调整。而且 ASD 光谱仪使用的是 25° 裸视场角, 其观测水域比 Hypersas 光谱仪的大, 因此可以综合水体表层的泥沙状况。

3 结束语

在正常情况下, Hypersas 光谱仪和 ASD 光谱仪所测遥感反射率曲线的变化特征具有高度一致性, 其相关性在 0.9 以上, 最高可达 0.99。在野外海上定点测量法中, Hypersas 光谱仪所测光谱易受船体阴影的影响, 因此 ASD 光谱仪更适用于野外海上定点测量。

Hypersas 光谱仪所测的光谱值在整体上高于 ASD 光谱仪, 这在积分时间为 17 ms 和 136 ms 时表现得较为明显。当积分时间为 34 ms 时, 两者的差异最小, 其在 412 nm、443 nm、490 nm、510 nm、531 nm、555 nm、670 nm 和 750 nm 各个典型波段的平均相对差异值分别为 22.70%、18.73%、15.01%、14.07%、13.05%、11.93%、9.58% 和 9.85%。总体说来, 影响两者间差异的因素较多, 故在同一研究中不建议使用两种光谱仪的混合数据。

由于受到船体阴影和海上白帽等一系列因素的影响, Hypersas 光谱仪所测光谱反射率与悬沙浓度的相关性以及建模精度均低于 ASD 光谱仪。因此, 建议在定点泥沙反演研究中使用 ASD 光谱仪进行野外测量工作。

参考文献

- [1] 付东洋, 栾虹, 刘大召, 等. 珠江口冬春季悬浮泥沙浓度遥感反演模式分析[J]. *海洋环境科学*, 2016, **35**(4): 600-604.
- [2] 王繁, 周斌, 徐建明, 等. 基于实测光谱的杭州湾悬浮物浓度遥感反演模式[J]. *环境科学*, 2008, **33**(11): 3022-3026.
- [3] Fang S, Verhoef W, Zhou Y X, et al. Satellite Estimates of Wide-range Suspended Sediment Concentrations in Changjiang (Yangtze) Estuary Using MERIS Data [J]. *Estuaries & Coasts*, 2010, **33**(6): 1420-1429.
- [4] Doxaran D, Froidefond J M, Castaing P. A Reflectance Band Ratio Used to Estimate Suspended Matter Concentrations in Sediment-dominated Coastal Waters [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, **23**(23): 5079-5085.
- [5] Drerdre A T, David A S, David W. Remote-sensing Reflectance Determinations in the Coastal Ocean

- Environment: Impact of Instrumental Characteristics and Environmental Variability [J]. *Appl Opt*, 2000, **39**(3): 456–469.
- [6] Mobley C D. Estimation of the Remote-sensing Reflectance from Above Surface Measurements [J]. *Appl Opt*, 1999, **38**(36): 7442–7255.
- [7] 唐军武, 田国良, 汪小勇. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法 [J]. *遥感学报*, 2004, **8**(1): 37–44.
- [8] 汪小勇, 唐军武, 李铜基, 等. 水面之上法测量水体光谱的关键技术 [J]. *海洋技术学报*, 2012, **31**(1): 72–76.
- [9] 洪官林, 沈芳, 沈宏. 长江口及邻近海域水体反射率的模拟 [J]. *华东师范大学学报 (自然科学版)*, 2012, **71**(1): 37–46.
- [10] 戴乾, 潘德炉, 何贤强, 等. 杭州湾水体光谱高频观测及在悬浮物动态变化监测中的应用 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, **35**(11): 3247–3254.
- [11] 沈健, 沈焕庭. 长江河口最大浑浊带水沙输运机制分析 [J]. *地理学报*, 1995, **50**(5): 411–420.
- [12] 陈晓东, 蒋雪中. 用波段比值参数提升水体悬浮颗粒物浓度反演模型稳健性的分析 [J]. *红外*, 2016, **37**(4): 38–43.
- (上接第 5 页)
- [10] 于燕波, 臧鹏, 付元华. 近红外光谱法快速测定植物油中脂肪酸含量 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(7): 1554–1558.
- [11] Marina Cocchi, Caterina Durante. Durum Wheat Adulteration Detection by NIR Spectroscopy Multivariate Calibration [J]. *Talanta*, 2006, **68**(5): 1505–1511.
- [12] 陈全胜. 基于支持向量机的近红外光谱鉴别茶叶的真伪 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 933–937.
- [13] 李华北, 陈斌, 赵杰文, 等. 用小波变换技术提高食醋近红外光谱分析的精度 [J]. *农业工程学报*, 2000, **16**(6): 114–117.
- [14] 林涛, 于海燕, 徐惠荣. 光程变化对基于近红外光谱的黄酒品质检测的影响 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(4): 950–955.
- [15] 芮玉奎. 近红外光谱在转基因玉米检测识别中的应用 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, **25**(10): 1581–1583.
- [16] Cooper P J, Reynolds R J. Tobacco Co Published Results [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1992.
- [17] 王家俊. FT-NIR 光谱分析技术测定烟草中总氮总糖和烟碱 [J]. *光谱实验室*, 2003, **20**(2): 181–185.
- [18] 邱军, 王允白, 张怀宝. FT-NIR 法测定烟草中的镁 [J]. *光谱实验室*, 2005, **22**(5): 976–978.
- [19] Wang Y, Mei M H, Ni Y N, et al. Combined NIR/MIR Analysis: A Novel Method for the Classification of Complex Substances Such as Illicium Verum Hook F and Its Adulterants [J]. *Spectrochimica Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2014, **130**(17): 539–545.
- [20] 任玉林, 李伟, 沈今明, 等. 多变量统计分类技术—磺胺磺胺甲基异唑质量评价的研究 [J]. *分析实验室*, 1997, **16**(5): 4–9.
- [21] Laasonen M, Harmia-Pulkkinen T, Simard C L, et al. Fast Identification of Echinacea Purpurea Dried Roots Using Near-Infrared Spectroscopy [J]. *Anal Chem*, 2002, **74**(11): 2493.
- [22] Ufret C, Morris K. Modeling of Powder Blending Using on-line Near-Infrared Measurements [J]. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 2001, **27**(7): 719–729.
- [23] 柯博克, 刘雪松, 陈勇, 等. 近红外光谱快速测定复方丹参滴丸的包衣厚度 [J]. *中草药*, 2006, **37**(5): 685–687.
- [24] 王旭峰. 近红外光谱分析技术在饲料品质快速检测中的应用研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
- [25] 撤淙武, 王春光. 基于近红外光谱技术的饲料混合均匀度检测 [J]. *农机化研究*, 2015, **31**(3): 191–194.
- [26] Tena N, Pierna J A F, Boix A, et al. Differentiation of Meat and Bone Meal from Fishmeal by Near-Infrared Spectroscopy: Extension of Scope to Defatted Samples [J]. *Food Control*, 2014, **43**(8): 155–162.
- [27] 孟丽丽, 姚春丽. 近红外光谱法评估欧美杨纸张性能 [J]. *分析检验*, 2011, **30**(3): 61–65.
- [28] 张大勇, 沈志学, 骆永全. 高光谱成像技术在纸质档案数字图像去污方面的应用 [J]. *数字与缩微影像*, 2015, **26**(4): 29–31.
- [29] 苏鹏飞, 张喈, 温晓燕. 近红外漫反射光谱法快速测定混合炸药组分含量 [J]. *火炸药学报*, 2008, **31**(5): 62–65.