

文章编号: 0253-2239(2009)01-0102-06

# 海洋高光谱辐射实时观测系统的研制

杨跃忠<sup>1</sup> 曹文熙<sup>1</sup> 孙兆华<sup>1,2</sup> 王桂芬<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广东 广州 510301; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 研制了海洋水色高光谱辐射实时观测系统。该系统主要包括用于现场测量海面与海水近表层上行辐亮度 and 下行辐照度的高光谱光纤辐射计, 装载高光谱光纤辐射计及其它辅助设施的海上观测平台, 数据采集、实时通讯的控制系統。采用 6 通道光纤光谱仪解决了多参数测量同步性问题, 通过自动调整光谱仪 CCD 积分时间提高其测量的动态范围; 采用光纤光谱仪减小了光接收器的体积, 减小了自阴影效应的影响; 采用防污染装置解决了光学探头水下防污染问题。对系统的性能进行了室内测试及近海 36 d 试验。结果表明, 光学系统零漂误差小于  $\pm 5\%$ , 光学系统稳定可靠; 浮标性能可很好地满足水下光辐射测量对浮标体姿态和稳定性的要求; 控制系统的的天数据采集和通讯可靠有效。

**关键词** 海洋光学; 浮标; 水色遥感; 高光谱辐射计

**中图分类号** P733; O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092901.0102

## Development of Real-Time Hyperspectral Radiation Sea-Observation System

Yang Yuezhong<sup>1</sup> Cao Wenxi<sup>1</sup> Sun Zhaohua<sup>1,2</sup> Wang Guifen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510301, China  
<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10039, China

**Abstract** A hyperspectral system for real-time observation of ocean color is developed. The system includes three main units: an optical-fiber-based hyperspectroradiometer for in situ measurements of upwelling radiance and downwelling irradiance both at sea surface and at underwater depths, a moored buoy platform suitable for loading the hyperspectroradiometers and other auxiliary sensors, and an electronic system for data acquisition and real time data communication. A six-channel optical fiber spectroradiometer is designed, which can simultaneously measure parameters at different depths. The large dynamic range of the spectroradiometer is achieved by auto-adjusting the integration time of CCD array detector. The use of optical fiber makes it possible to minimize the collector of sensor, and thus the instrument self-shading effect is reduced. An auto-driving mechanical brush is designed for optical sensor, which prevents the sensors from bio-fouling and enables the sensors to work well underwater. The characteristics of the system were tested in laboratory, and the buoy was deployed in near-shore waters for 36 days in situ experimental testing. Experimental results show that, the errors for the optical parameters are within  $\pm 5\%$ , and the buoy has a good stability at high sea state conditions, and the data acquisition and electronic communication system is reliable and effective.

**Key words** ocean optics; buoy; ocean color remote sensing; hyperspectroradiometer

## 1 引言

浮标<sup>[1]</sup>具有全天候、全天时稳定可靠的收集海洋环境现场资料的能力,并能实现数据的自动采集、存储和发送,浮标技术已成为全球海洋立体观测网

的重要组成部分。海洋光学浮标<sup>[2]</sup>以测量水下太阳辐射分布为主,随着水色卫星海上辐射定标和数据真实性检验<sup>[3,4]</sup>、近海海洋环境<sup>[5]</sup>、赤潮现场实时观测<sup>[6]</sup>和预警<sup>[7]</sup>以及海洋过程多学科<sup>[8]</sup>联合诊断的

**收稿日期**: 2008-03-04; **收到修改稿日期**: 2008-08-19

**基金项目**: 国家 863 计划(2006AA09A310)、中科院装备项目(Y2005011)、中科院重要方向性项目(KZCX2-YW-215)、广东省科技计划项目(2006B36601001)和光机电装备北京市重点实验室项目(KF2007-01)资助课题。

**作者简介**: 杨跃忠(1965—),男,副研究员,主要从事海洋光学仪器方面的研究。E-mail: wuli@scsio.ac.cn

观测需要,海洋光学浮标技术在最近 10 年得到了较快的发展。1987 年美国在马尾藻海区应用深水锚定系统获取了时间系列的海水光学参数<sup>[9]</sup>。迄今为止,用于 SeaWiFS 和 MODIS 水色遥感器辐射定标的光学浮标为美国的 MOBY<sup>[4]</sup>,用于 MERIS 水色遥感器辐射定标的光学浮标为法国的 BOUSSOLE<sup>[10]</sup> 和英国的 PlyMBODY<sup>[11,12]</sup>;用于 OCTS 水色遥感器辐射定标的光学浮标为日本的 YBOM<sup>[13,14]</sup> 等,这些浮标能获取水色卫星过境期间的海面现场离水辐亮度<sup>[15]</sup> 真实值,以便对卫星数据和遥感产品进行检验和校正,已成为海洋水色遥感的重要组成部分。

为满足中国近海水色遥感定标检验的需求,设计了新型海洋高光谱实时观测系统(即海洋光学浮标)。该系统能同步测量海面和水下 0.7 m, 2.7 m 共三层高分辨率光谱的下行辐照度和上行辐亮度共 6 个光辐射量;同时可测量风速风向、浮标倾角、仓温等环境辅助参数;利用全球定位系统(GPS)实现浮标体的定位和跟踪;控制核心能够实现数据的自动采集,通过码分多址(CDMA)和通用分组无线网络(GPRS)实现数据和指令的实时传输。该系统经过 2 次海上试验,系统可靠性和数据质量都达到设计和应用要求。

## 2 光纤光谱仪及其探头

入射到海面的太阳光辐照度一般小于  $220 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm})$ ,为测到水下  $0.01 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm})$  的辐照度,要求仪器达到 5 个数量级的动态范围。目前先进的 CCD 阵列光电传感器具有光谱响应宽、测量光强范围大、较高灵敏度、操作容易等优点。使用 CCD 阵列光电转换器件,结合现场可编程门阵列(FPGA)及先入先出阵列(FIFO)技术设计数据采集电路模块构成的光谱仪,实现对 CCD 信号时间积分,以及信号存储、量化和缓存。此外,光谱仪还具备低功耗、体积小、机械牢固,适合于海上恶劣环境使用的优点。

以光谱仪、光纤和光学传感器探头组成光学系统<sup>[16,17]</sup>,实现海上高光谱测量,解决高灵敏度、宽动态范围高光谱、多路同步性测量问题。采用 6 个光谱仪模块构成一套六路光纤光谱仪。每路模块具有 2048 pixel 线阵 CCD 和标准光纤耦合口,测量波长在 350~1100 nm 范围,光谱分辨率 1.64 nm。当光辐射能量经光学探头导入沿着光纤耦合进入光谱仪,实现海上可见光谱辐射测量。不同光学量区别

于光学传感器探头设计,为了适应海洋环境,在测量不同水层光学辐射时,带光纤光学探头的密封性和镜头表面防污染成为长期现场测量主要问题,因此传感器探头设计尤其重要。图 1 为专门设计的水下辐照度和辐亮度传感器探头示意图,辐亮度入射角度为  $10^\circ$ 。由于使用光纤可以设计体积较小的光学探头,减小探头自阴影影响。光学系统在室内进行绝对定标<sup>[18]</sup>。

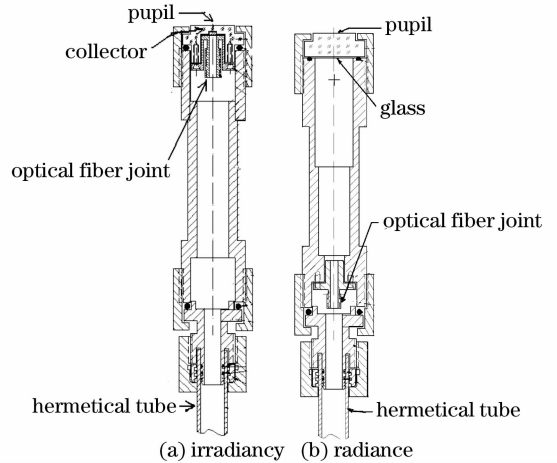


图 1 探头示意图

Fig. 1 Schematic figure of detectors

探头镜面防污染措施是在经过多次海上单独试验后,提出的解决方案。即每个探头配备一个电动刷,在每次测量前后,使用电动刷清洁探头表面,防止生物附着。

## 3 浮标体及搭载的主要仪器

把光学系统应用于海上测量,需要海上载体平台,浮标体就成为其中首选。海洋浮标的种类比较多,考虑海上投放回收方便,采用单系留浮标。浮标不仅要提供有效载货能力和高海况下良好的安全性能,同时要满足光辐射测量的要求,如尽量减小浮体阴影效应<sup>[19]</sup>,以及海流对单系留浮标造成倾斜等问题。为减小浮体海上姿态及其上层建筑的对光辐射测量的影响,保证在大海流条件下浮标体保持垂直的稳定性,光学浮体设计<sup>[20,21]</sup>采取的措施为:

第一,浮体的设计形状:上部分采用两个球状串接成葫芦状,如图 2 所示。大浮球直径为 1.3 m,在水下部的仓内安装控制系统和光谱仪;小浮球直径为 1.1 m 仓内安装电池。浮标体下部分连接一根龙柱,底端挂接一重块和平衡叶,降低浮标重心,增高整个浮标稳心高度,提高浮标的稳定性。

第二,浮标受力点位置:在靠近小浮球下方、平

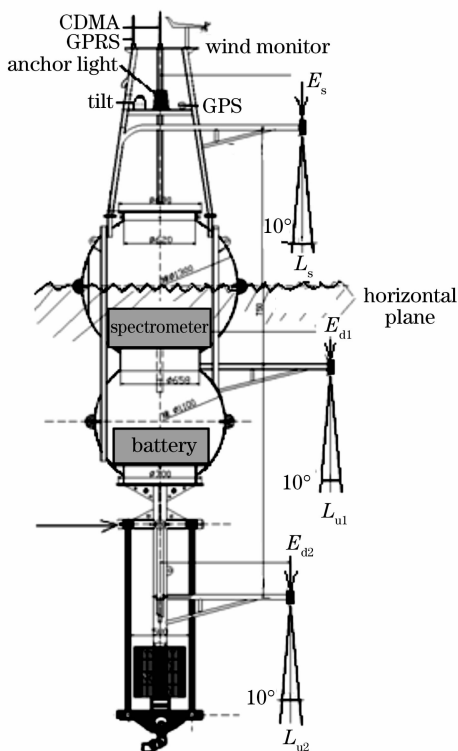


图2 浮标结构示意图

Fig. 2 Schematic configuration of the buoy

衡叶上方的龙柱上横杆,通过两条会转动刚性拉杆连接锚链即“马鞍链”结构,由于海流对浮标体产生一种曳力,使得单系留浮标产生一个转动力矩。当浮标受力点的上下部分受海流的曳力作用产生合力矩为零时,保证浮标垂直状态。浮标受力点位置的选定和平衡叶片的大小,与浮体的设计形状、球体大小、龙柱长短有关。

第三,浮标侧面安装三条横杆,每条横杆顶端都安装辐照度和辐亮度传感器探头(带有防污染装置),以减小浮体阴影的影响,分别测量下行光谱辐照度和上行光谱辐亮度。上层探头在水面上 1.5 m,中层在水面下 0.7 m,第三层在水面下 2.7 m。

浮标上层建筑安装辅助传感器,如 GPS 天线、倾角、方位角、风速、风向、气温、相机、锚灯以及 CDMA 和 GPRS 通讯天线等。

整个浮体长 6 m,重量 1 T。浮标通过锚链柔性结构,锚住海底。所有结构将进一步保证浮标体在受锚链的张力作用下不会产生大角度倾斜,保持光学探头垂直状态。同时整体结构简单、抗压强度大、使用方便、连接可靠、海上容易布放回收。

## 4 浮标控制系统

浮标控制系统是实现无人、长期、定时、实时全

天候观测的关键部分。图 3 为系统功能框图。系统分别实现功能为 1) 系统总电源自动定时开机; 2) 各测量单元电源独立控制与监测; 3) 系统收集各单元自检报告,并管理处理故障; 4) 指挥各测量仪器同步采集数据时序,接收数据; 5) 对原始数据进行初级处理与整理,保存数据; 6) 与岸机通信,发送数据和接收岸机指令; 7) 按预定顺序设置下一次开机时间; 8) 电源关闭,系统进入完成断电状态。

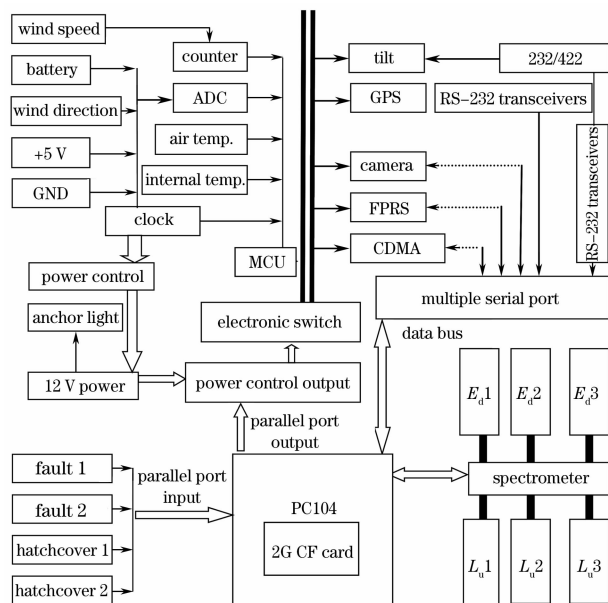


图3 浮标控制系统硬件原理图

Fig. 3 Schematic overview of the buoy control system

为实现浮标控制和数据采集所有功能,控制系统<sup>[22]</sup>由三种功能模块组成:CPU 主板、多串行通讯模块和复合功能板。

以低功耗、稳定要求为前提,系统核心模块选用嵌入式 PC 104 CPU 主板。带有 1.6 s 间隔看门狗定时器,此模块功耗很小(7 W),可用电子硬盘袖珍闪存(CF)卡(容量高达 GB 级),适用环境温度 0 ~ 70 ℃。

根据所有外围仪器或探头专门设计了复合功能板。复合功能板同时带有二级看门狗功能,防止程序“跑飞”,提高系统可靠性。

PC104 嵌入式主板与光纤光谱仪 OEM 模块通过 104 总线插接。CPU 通过 104 总线读取光谱数据,同时总线扩展 8 个 RS232C 通讯串口作为所搭载的仪器、传感器和无线通讯系统与浮标总控的硬件接口。利用主板的并行接口控制整个浮标系统的电源供给,接收浮标体的报警信号。

控制软件是在 DOS 系统平台下开发运行,缩短冷启动时间,增加系统的稳定性。

CDMA/GPRS 网络信号几乎覆盖中国近海沿岸。浮标在近海使用时,同时并用此两套网络无线通讯系统与岸站接收中心实时通讯;在 CDMA/GPRS 网络信号覆盖不到的海域(如大洋)时,应使用海事卫星或铱星与岸站接收中心通讯。

## 5 海洋光学浮标的试验结果

### 5.1 系统工作的可靠性

2006 年 9 月和 2007 年 8 月分别在珠江口担杆岛海域(经度  $114^{\circ} 17.37'$ , 纬度  $22^{\circ} 03.701'$ )投放,开展海上示范应用。试验期间,每天自动工作 12 次,每次开机 10 min。累计应该开机 432 次,从最后记录文件统计,实际开机 432 次,数据采集系统故障次数为零;因 CDMA/GPRS 网络不稳定,未接收到数据和接收数据不完整累计 20 次,由此可得数据收发平均无故障次数 21.6 次(数据收发平均无故障次数为开机测量总次数除以收发故障次数)。需要指出,由于数据采集系统在实时发送数据的同时也自动存储数据,因网络问题远程数据传输故障丢失的数据可以在浮标回收后从备份 CF 卡中读出,最终并不影响实测数据的完整性。

图 4 为在水下连续工作 28 d 后光学探头的污染情况。由图 4 可以看出,尽管探头外壳长满了附着生物,但光学窗口得到了有效的保护,防污染装置起到了很好的防污效果。



图 4 光学窗口的防污染效果

Fig. 4 An optical window is protected successfully by the auto-operated anti-biofouling device

### 5.2 光谱仪零漂

夜晚没有光照时,光谱仪测量得到的水下辐射量值认为是海上环境下光谱仪的零点值,因此专门设置凌晨 2 点为工作点,以便检验零漂和处理数据之用。图 5(a)、图 5(b)分别为 2006 年 9 月间每天 2 点钟测量平均值及平均相对误差,数据表明近一个月零点平均相对误差小于 5%。

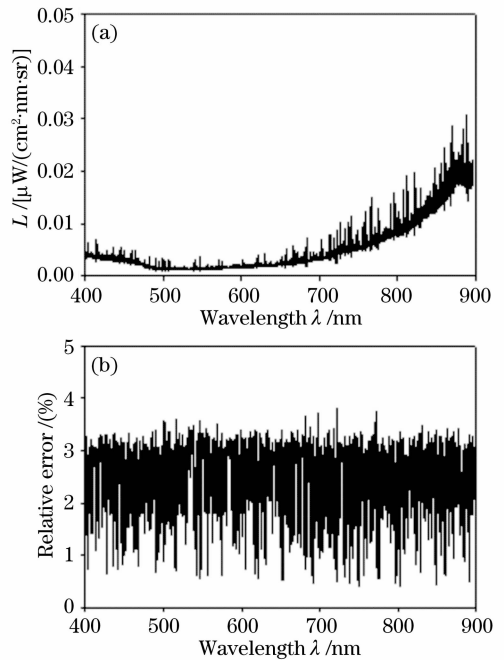


图 5 凌晨 2 点辐亮度值及其相对误差

Fig. 5 Radiance and its relative error at 02:00 am

### 5.3 实测数据分析

本系统白天定时工作 11 次(8 点到 18 点的正点)。图 6 为 2006 年 9 月 10 日 12:00 水下第一层向下辐照度  $E_{d1}$  的原始数据,图 6 为 8 min 内测量 22 frame 数据光谱曲线。除光强强度变化外,光谱形状基本保持一致。曲线幅度波动,由 4 个原因引起,1)浮标受波浪影响摇摆,导致光线入射角变化;2) 8 min 时间间隔内,大气、云层变动;3)海面波浪的聚焦、扩散周期性变换,即水表面波动造成水表层光强<sup>[23]</sup>在不停晃动。4)浮标上下沉浮,造成光学探头深度变化。

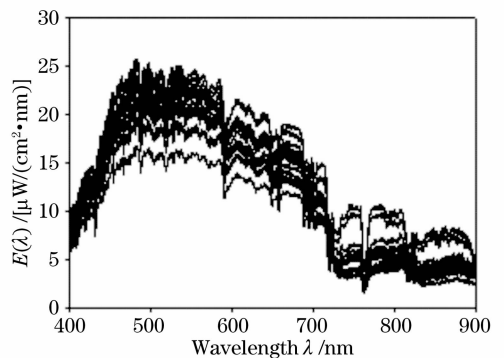


图 6 水下 0.7 m 下行辐照度  $E_{d1}$  光谱曲线

Fig. 6 Downwelling spectra for the 0.7 m-depth layer

图 7 为 2006 年 9 月 10 日 12 点同步测量的 6 个通道光谱实测值的平均值曲线。从图 7 中可以看出,1)表层辐照度光谱决定于入射到海面的太阳谱

分布。海面辐照度  $E_s$ 、水层 1 辐照度  $E_{d1}$ 、水层 2 辐照度  $E_{d2}$  的图形很相似；2) 海面辐亮度  $L_s$  谱线比水下的辐亮度  $L_u$  更像海面辐照度  $E_s$ ，海面辐亮度  $L_s$  为离水辐亮度和海面反射之和，说明  $L_s$  值中海面反射光比离水辐亮度贡献大；3) 虽然水层 1 辐亮度  $L_{u1}$ 、水层 2 辐亮度  $L_{u2}$  处在较浅水深 0.905 m 和 2.88 m，经水体后向散射后，峰谷已不明显，谱线变得平滑。特别在大于 600 nm 长波段被水吸收衰减很快。

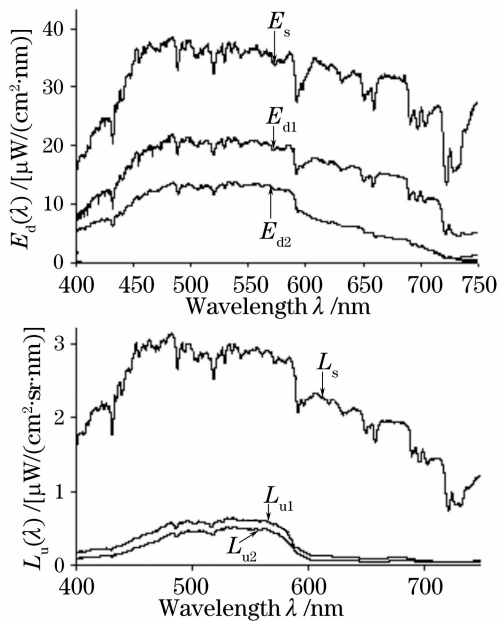


图 7 同一时间 6 路光谱曲线

Fig. 7 spectra from the six spectroradiometers at the same time

由于实现海上比测比较困难，采用实测可见光谱线与大气层外太阳光谱进行波长准确性的对比。图 8 中  $F_0$  曲线为由 Thuillier<sup>[24]</sup> 报道的大气层外太阳辐照度光谱(使用右边纵坐标)； $E_s$  曲线为本系统

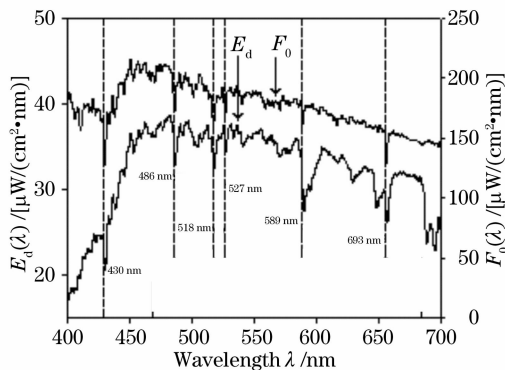


图 8 海面光谱  $E_s$  与大气层外光谱  $F_0$

Fig. 8 Comparison of the solar spectra at the sea surface and outer space

海面现场辐照度实测值。分析图 8 可以看出，在可见光范围，实测海面光谱与太阳光谱夫琅和费谱线一致，如 430 nm、486 nm、518 nm、588 nm、656 nm 等重合在一起，说明该系统光谱仪波长位置准确可信。

## 6 结 论

针对海洋光学浮标的特殊性，对其关键技术问题如自阴影问题、标体稳定性问题、探头防污等，提出具体的解决方案，进而完成海洋高光谱辐射实时观测系统集成及海上现场观测试验。结果表明，光谱仪波长位置稳定，光学系统零漂误差小于  $\pm 5\%$ 。系统经过 36 d 的海上试验测试，共完成了 432 次测量，结果表明，数据采集系统无故障，证实了系统设计的可靠性；采用 GPRS 和 CDMA 实时通讯实时传送，36 天共 432 次测试结果表明，CDMA/GPRS 网络远程数据收发平均无故障次数为 21.6 次。

海洋高光谱辐射实时观测系统将为中国水色遥感<sup>[25]</sup>、海洋科学观测、近海海洋环境监测等方面应用提供长期的多层水体高光谱数据。

## 参 考 文 献

- 1 Chu Tongjin, Cao Hanyong, Wang Juncheng *et al.*. *Chinese Marine Data Buoy* [M]. Beijing: Ocean Press, 2001. 1~319  
褚同金, 曹恒永, 王军成等. 中国海洋资料浮标[M]. 北京: 海洋出版社, 2001. 1~319
- 2 Cao W X, Yang Y Z, Ke T C *et al.*. Optical systems for applications in ocean color remote sensing and interdisciplinary study[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4892**: 222~232
- 3 Chen Qinglian, Li Tongji, Ren Hongqi. The radiometric calibration and validation of HY-1/COCTS [J]. *Ocean Technology*, 2003, **22**(1): 2~9  
陈清莲, 李铜基, 任洪启. HY-1 卫星水色扫描仪的辐射定标与真实性检验[J]. 海洋技术, 2003, **22**(1): 2~9
- 4 Mueller J L, Fargion G S, McClain C R. Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation [R]. NASA/TM-2003-211621, 2003
- 5 Dickey T D, Jones B H. A decade of interdisciplinary process studies[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **2963**: 254~259
- 6 Ma Yong, Lin Hong, Ai Qing *et al.*. Red tide monitoring based on bio-optical algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 7~11  
马泳, 林宏, 艾青等. 基于生物光学算法的海洋赤潮监测[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 7~11
- 7 Zhao Dongzi. *The Study of Monitoring and Evaluation of the Disaster of Red Tide in Bohai Sea* [M]. Beijing: Ocean Press, 2000. 144~150  
赵冬至. 渤海赤潮灾害监测与评估研究文集[M]. 北京: 海洋出版社, 2000. 144~150
- 8 Dickey T D, Siegel D A. U. S. JGOFS Planning Report: Bio-optics in U. S. JGOFS [R]. U. S. JGOFS Planning and Coordination Office, Woods Hole Oceanographic Institution, 1993, 180
- 9 Dickey T D, Marra J, Granata T *et al.*. Concurrent high

- resolution bio-optical and physical time series observations in the Sargasso Sea during the spring of 1987 [J]. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**: 8643~8663
- 10 Antoine D, Chami M, Claustre H *et al.*. BOUSSOLE: a Joint CNRS-INSU, ESA, CNES and NASA Ocean Color Calibration and Validation Activity[R]. NASA/TM-2006-214147, 2006
- 11 Pinkerton M H, Lavender S J, Aiken J. Validation of SeaWiFS ocean color satellite data using a moored databuoy [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(C5): 3133, 1~9
- 12 Pinkerton M H, Aiken J. Calibration and validation of remotely sensed observations of ocean color from a moored data buoy[J]. *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999, **16**: 915~923
- 13 Ishizaka J, Asanuma I, Ebuchi N *et al.*. Time series of physical and optical parameters off Shimane, Japan, during fall of 1993; First observation by moored optical buoy system for ADEOS data verification[J]. *J. Oceanogr.*, 1997, **53**: 245~258
- 14 Kishino M, Ishizaka J, Saitoh S *et al.*. Verification plan of ocean color and temperature scanner atmospheric correction and phytoplankton pigment by moored optical buoy system[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(D14): 17197~17207
- 15 Hooker S B, Lazin G, Zibordi G *et al.*. An evaluation of above and in-water methods for determining water-leaving radiances[J]. *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, **19**: 486~513
- 16 Cao Wenxi, Guo Yongfei, Yang Yuezhong *et al.*. A multichannel underwater spectroradiometer [J]. *High Technology Letters*, 2002, **1**: 96~101  
曹文熙, 郭永飞, 杨跃忠 等. 多波段水下光谱辐射计[J]. *高技术通讯*, 2002, **1**: 96~101
- 17 Li Cai, Ke Tiancheng, Cao Wenxi *et al.*. Design of a moored underwater multi-channel radiometer [J]. *Optical Technique*, 2004, **6**: 665~668  
李 彩, 柯天存, 曹文熙 等. 锚链式水下多光谱辐射计的设计[J]. *光学技术*, 2004, **6**: 665~668
- 18 Jia Hui, Li Futian. Analysis of factors affecting spectral radiance calibration by applying a diffuse plane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 383~387  
贾 辉, 李福田. 影响光谱辐亮度标定因素的分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 383~387
- 19 Cao Wenxi, Wu Tingfang, Yang Yuezhong *et al.*. Monte Carlo simulations of the optical buoy's shading effects [J]. *High Technology Letter*, 2003, **13**(3): 80~84  
曹文熙, 吴廷芳, 杨跃忠 等. 光学浮标阴影效应的蒙特卡洛模拟[J]. *高技术通讯*, 2003, **13**(3): 80~84
- 20 Wang Xiangnan. The technique of the underwater spectrum radiation measurement [J]. *Ocean Technology*, 2003, **22**(2): 12~18  
王项南. 水下光谱辐射测量技术[J]. *海洋技术*, 2003, **22**(2): 12~18
- 21 Li Tongji, Tang Junwu, Chen Qinglian *et al.*. A method for measuring water-leaving radiance using photometer [J]. *J. Tropical Oceanography*, 2001, **20**(4): 56~60  
李铜基, 唐军武, 陈清莲 等. 光谱仪测量离水辐亮度的方法[J]. *热带海洋学报*, 2001, **20**(4): 56~60
- 22 Xu Zongming, Yu Binxi, Jin Xifeng *et al.*. Radiometric system for measuring spectrum below ocean surface and the design of its controlling program[J]. *J. Test and Measurement Technology*, 2004, **18**(4): 283~287  
徐中民, 禹秉熙, 金锡峰 等. 海水近表层光谱辐射计系统及其控制软件设计[J]. *测试技术学报*, 2004, **18**(4): 283~287
- 23 Xia Ming, Yang Kecheng, Zheng Yi *et al.*. Influence of wavy sea surface on airborne lidar underwater beam quality with Monte Carlo method[J]. *Chin. J. Lasers*, 2008, **35**(2): 178~182  
夏 珉, 杨克成, 郑 毅 等. 用蒙特卡罗法研究波动水表面对机载海洋激光雷达水下光束质量的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 178~182
- 24 Thuillier G, Herse M, Labs D *et al.*. The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the ATLAS and EURECA missions[J]. *Solar Phys.*, 2003, **214**: 1~22
- 25 Zhu Hai, Jiang Lu, Liang Bo *et al.*. Retrieving optical concealment depth of underwater target by remote sensing [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(5): 699~702  
朱 海, 姜 璐, 梁 波 等. 水下目标光学隐蔽深度遥感获取方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 699~702