

海洋表层叶绿素浓度的激光雷达 测量方法和海上实验*

陈卫标 吴东 张亭禄 刘智深

(青岛海洋大学国家教委海洋遥感开放研究实验室 青岛 266003)

摘要 依据激光感生荧光的原理和叶绿素分子的荧光谱特性,研制一套激发波长为 532nm 的海洋激光雷达系统,用于海洋表层叶绿素分子浓度的快速测量。应用该系统于 1994 年 10—11 月进行一次长距离的海上现场实验,对东海(27—32°N, 122—129°E)21 个站位的表层叶绿素浓度进行了测量,得到 0.15 $\mu\text{g} / \text{L}$ —1.10 $\mu\text{g} / \text{L}$ 范围的表层叶绿素分子的浓度分布。测量结果与水样的分光光度计测量结果相吻合。

关键词 海洋激光雷达 激光荧光 喇曼散射 叶绿素浓度

学科分类号 P733.3

叶绿素浓度是反映海洋浮游植物密度的一个重要指标。长期以来,一直利用定点采样和化学分析的方法对其进行确定。但由于分析速度慢,不能满足大面积海域调查的需要。利用激光雷达系统测量海洋叶绿素浓度分布是海洋初级生产力调查的一项新技术(Kim, 1973),它可以快速、高精度、大面积测量海洋表层叶绿素浓度。本文报道国内第一台车载海洋激光荧光雷达系统,并利用该系统首次在东海进行了表层叶绿素浓度的现场测量,拟在实现中国近海海洋初级生产力的大面积和快速调查进行技术探讨。

1 原理和方法

波长为 532nm 的激光脉冲入射到海水中,返回光的典型光谱如图 1 所示。除粒子散射信号(532nm)外,还有激光激发的水分子喇曼(Raman)散射信号(650nm)和叶绿素分子荧光信号(685nm),中间可能还有其它藻类或可溶有机物激发的荧光信号。

假设车载的海洋激光雷达的激光发射器和接收器与海面的距离可忽略,在激光脉冲发射的同时接收回波信号,由

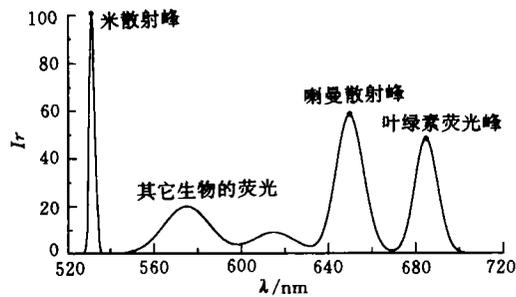


图 1 532 nm 激光激发的海水回波光谱特性示意图 (I_r 为相对强度)

Fig.1 The diagram of return spectral characteristics from seawater excited by 532 nm laser.

* 国家自然科学基金资助项目,49486007号。陈卫标,男,出生于1969年11月,博士,讲师, E-mail: orsi @ mail.ouqd.edu.cn

收稿日期:1996-08-07,收修改稿日期:1996-11-07

望远镜收集后通过中心频率为 685nm、带宽为 $\Delta\lambda$ 的光谱滤光器,则感生的叶绿素分子荧光从海面到 z_m 深度的积分信号功率可写为 (Measure, 1984):

$$P_F \approx \frac{K_1}{n^2 z^2} \frac{n_F \sigma_F}{k_L + k_F} \tag{1}$$

式中, K_1 为系统常数, $K_1 = \frac{P_0 \xi A \Delta \lambda_F (1 - \rho_L) (1 - \rho_F)}{4\pi}$, 其中, P_0 为激光发射功率, A 为接收望远镜的有效面积, ξ 为系统接收效率, 则 ρ_L, ρ_F 分别为激光、荧光波长的海表反射率, $\Delta \lambda_F$ 为接收荧光带宽; n_F, σ_F 是叶绿素分子的数密度和截面因子; k_L, k_F 分别为激光和荧光波长的海水漫衰减系数; n 为海水的折射率。

(1) 式中激光雷达系统常数和海水漫衰减系数的不确定性会对 n_F 测量产生影响, 而定量测量海水的漫衰减系数是比较困难的。利用激光激发的海水喇曼散射信号归一化技术可消除海水光学衰减系数对测量结果的影响 (Bristow *et al*, 1981)。喇曼散射是水的固有特性, 其信号强弱主要决定于激光和喇曼波长的海水衰减系数。喇曼散射光与叶绿素荧光在水中的辐射传输机制是相同的, 因此接收到的积分喇曼散射信号功率为:

$$P_R \approx \frac{K_2}{n^2 z^2} \frac{n_R \sigma_R}{k_L + k_R} \tag{2}$$

K_2 与 K_1 相似, $K_2 = \frac{P_0 \xi A \Delta \lambda_R (1 - \rho_L) (1 - \rho_R)}{4\pi}$, 其中, $\rho_R, \Delta \lambda_R$ 分别为喇曼波长的海表发射率和接收带宽; n_R, σ_R 是水分子的数密度和截面因子; k_R 为喇曼波长的海水漫衰减系数。公式 (1)、(2) 之比可得到:

$$\frac{P_F}{P_R} = C \cdot \frac{n_F \sigma_F}{n_R \sigma_R} \frac{k_L + k_R}{k_L + k_F} \approx C \cdot n_F \tag{3}$$

式中, C 为校正常数。(1)、(2) 式之比消除了激光能量起伏、系统电子学和光学效率的不确定以及海水的漫衰减系数对荧光和喇曼接收功率的影响。荧光和喇曼信号分别与叶绿素分子和水分子的数密度和截面有关 (Marshall *et al*, 1990), 而喇曼散射截面和数密度可假设成常数。另假设: (1) 背景噪声已从测量信号中剔除; (2) 在测量时间内, 水体中 $k_L, k_F,$

k_R, σ_F 随深度保持不变; (3) 685 nm 的回波信号中只有感生的叶绿素分子荧光。这样可以认为公式 (3) 叶绿素浓度与荧光喇曼功率比成正比。通过实验室样品和海上实验确定叶绿素浓度和荧光喇曼功率比的关系和校正参数, 最后由校正参数得到叶绿素浓度。

2 激光雷达系统

在原理实验的基础上, 建立一套船载海洋激光雷达系统, 其原理框图见图 2。系统是在原蓝绿海洋激光雷达系统——BLOL (Liu

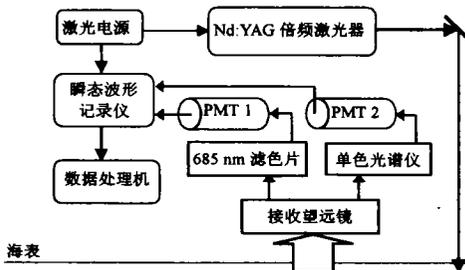


图 2 海洋激光雷达系统原理示意图

Fig.2 Block diagram of the ocean lidar system

et al, 1993)的基础上改造的,系统根据青岛海洋大学“东方红”调查船设计的。系统安置在船舱内,有一个伸出船窗的机械“前臂”,激光脉冲由“前臂”上的棱镜垂直反射到海中;激发荧光和喇曼散射光通过“前臂”上的一个大反射镜反射后被望远镜接收,系统的发射和接收在机械上保证了其共轴性。系统的部件设计和选择充分考虑了海上的恶劣环境,保证了系统在海上实验时的长时间稳定工作。

系统发射器是倍频 Nd: YAG脉冲激光器,输出波长为 532nm,脉冲宽度为 10ns,单脉冲能量为 70mJ,重复频率为 40Hz。光学接收采用直径 120mm、焦距 668mm 的卡塞格林结构的望远系统;望远镜的输出光准直后分成两束,一束通过中心波长 683.7nm、带宽 20nm、孔径 30mm 的干涉滤光片,用于接收感生的叶绿素荧光信号;另一束用 101W 型野外光谱辐射计来接收喇曼散射信号中心波长调在 650 nm。两路光信号由 GDB54 光电倍增管 (PMT 1 和 PMT 2) 收集转换,输出电信号被高频前置放大器放大后由 100MHz 采样率、8 bits 的瞬态波形记录仪记录,记录数据通过 DMA 方式输入给 PC 机进行实时处理和显示。激光器的触发信号经过延时处理后(延时时间相当于激光入射到水面的距离)作为波形记录仪的触发信号,保证数据记录和激光发射同步。

3 实验结果与讨论

对建立的海洋激光雷达系统在实验室进行了综合测试,并在青岛海域附近进行了多次现场实验,对系统相关因子,如激光能量的起伏,光电转换效率以及电子学误差等参数进行了测量,同时也对叶绿素浓度与荧光喇曼功率比的关系进行了校正。在此基础上,海洋激光雷达系统安装在青岛海洋大学的“东方红”调查船上,于 1994 年 10—11 月在东海进行了一次海上现场实验,实验海域和站位分布见图 3。

这次海上实验是海洋通量研究计划的一部分,有很多研究单位和调查仪器参与本次

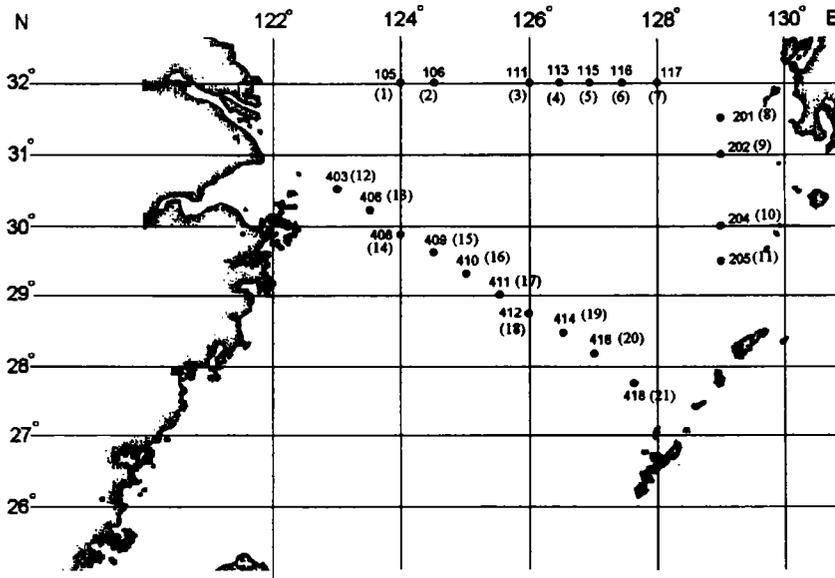


图 3 海洋激光雷达系统东海实验站位分布图

Fig.3 Location of stations in the East China Sea for ocean lidar system measurement

实验,历时 20 多天。调查船在每一个站位抛锚后,海洋激光雷达开始工作,工作时的激光重复频率为 10Hz。瞬态波形记录仪每半分钟记录一组实时平均的荧光和喇曼信号,这相当于 300 个激光脉冲的平均结果。连续测量 50 组数据,因此每个站位需要的测量时间为 25 min。在激光实验的同时,用海水透明度仪测量了海水的漫衰减系数,作为确定叶绿素浓度的校正参数。通过激光测量结果和校正参数的处理,得到了每一站位的叶绿素浓度。在每个站位采集了水样,海上实验结束后,利用分光光度计对水样进行了叶绿素浓度分析。这次实验共得到了 21 个站位的海洋表层叶绿素浓度,图 4 为各站位现场测量的结果,图 5 是海洋激光雷达和分光光度计测量结果的相关比较。

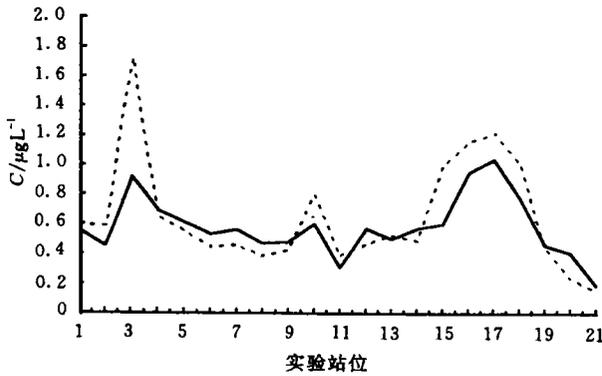


图 4 东海海洋表层叶绿素浓度(C)分布的测量结果
Fig.4 Measured chlorophyll concentration (C) distribution in the East China Sea

——海洋激光雷达测量结果;
---- 水样的分光光度计测量的结果

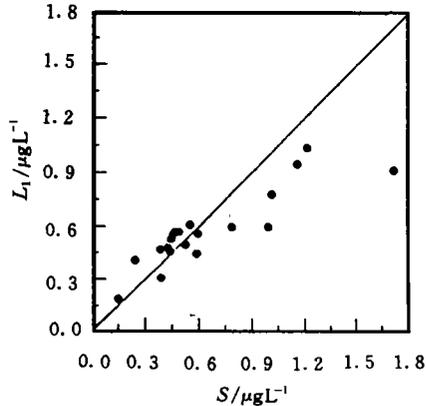


图 5 海洋激光雷达测量(L₁)与分光光度计(S)测量结果

Fig.5 Measured results by Ocean lidar (L₁) and spectrophotometer (S)
●各站位的测量数据;——线性拟合结果

从实验结果来看,东海海洋表层叶绿素分子浓度在 0.15—1.10µg / L 左右的范围内起伏。可以看出海洋激光雷达与分光光度计的测量结果还是较吻合的,由图 5 数据计算得到的相关系数为 84%。另外在 20 多天的海上实验中,海洋激光雷达系统一直保持稳定工作。这说明海洋激光雷达测量叶绿素浓度是一项可行的新技术,是实现快速实时测量海洋表层叶绿素浓度的一个有效途径。但也应该看到海洋激光雷达测量存在着一定的误差,在高浓度时的误差较大,如图 4 中的 3 站位数据,此现象正待研究。分别用 50 组的荧光和喇曼信号的标准偏差,得到测量的叶绿素浓度的标准偏差为 10% 左右。误差可能来自以下几方面:

(1) 由于海水粒子米散射信号大大强于荧光和喇曼散射信号(见图 1),虽然采取了一定的抑止手段,但强烈的回向米散射光经常造成光电倍增管的疲劳,影响了荧光和喇曼信号的测量,因此提高抑止米散射光的手段是十分必要的。另外海面白帽和海浪也会影响激光束的传播,通过多脉冲平均可消除这些随机误差。

(2) 在白天工作时,太阳光背景的影响不可忽略。在本海洋激光雷达系统中采用了窄带干涉滤光片(2 nm)剔除背景太阳光,但仍然对测量结果带来影响。

(3) 在原理部分假设了 σ_f 在测量期间内保持不变,根据有的测量结果, σ_f 会随着不

同藻类而变化(Kiefer *et al.*, 1974),因此在叶绿素浓度的反演模型中考虑这一因素。

(1)和(2)可以通过技术改进来减少误差。同时应该发展更好的反演叶绿素浓度的模型,考虑其它浮游生物的发光机制以及 k_L, k_p, k_R, σ_F 对荧光和喇曼信号测量的干扰。因此通过进一步研究可提高激光雷达测量表层叶绿素浓度的测量精度。

4 结语

本文报道一种测量海洋表层叶绿素浓度的海洋激光雷达系统。利用该系统于1994年10—11月,在东海进行了海上现场实验,得到了21个站位的表层叶绿素浓度的分布,结果与传统测量相吻合。这说明海洋激光雷达系统可以快速实时测量海洋表层叶绿素浓度分布,也可作为卫星海色遥感的同步观测设备。

致谢 在海洋激光雷达系统的研制过程中得到黄晓圣先生的帮助,中国科学院海洋研究所提供了水样分析数据,谨志谢忱。

参 考 文 献

Bristow M, Nielsen D, Bundy D, 1981. Use of water Raman emission to correct airborne laser fluorescence data effects of water optical attenuation. *Appl Opt*, 20(17):2 889

Kim H H, 1973. New Algae Mapping technique by the Use of an Airborne Laser Fluorosensor. *Appl Opt*, 12(7):1 454

Kiefer D A, Austin R W, 1974. The effect of varying phytoplankton concentration on submarine light transmission in th Gulf of Galifomia. *Limnol Oceanogr*, 21:447—452

Liu Zhi-Shen, Zhang Jinglong, Ma Jun, 1993. A Raman lidar for measuring backscattering in the China Sea. *SPIE*, 1 558:379

Marshall B, Smith R C, 1990. Raman scattering and in-water ocean optical properties. *Appl Opt*, 29(1):71

Measures R M,1984. *Laser Remote Sensing Fundamentals and Applications*. New York: A Wiley-Interscience publication. 442

METHOD AND EXPERIMENT FOR MEASURING SEA SURFACE CHLOROPHYLL CONCENTRATION USING LIDAR

CHEN Wei-biao, WU Dong, ZHANG Ting-lu, LIU Zhi-shen

(*Ocean Remote Sensing Laboratory of State Education Commission, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003*)

Abstract By measuring the laser induced chlorophyll molecule fluorescence and water molecule Raman scattering, the sea surface concentration of chlorophyll can be deduced from the fluorescence normalized by the Raman scattering. An ocean lidar system with transmitter of frequency doubled Nd:YAG 532 nm laser was developed to measure the concentration of chlorophyll based on the above principle. An interference filter with center wavelength of 683.7 nm and bandwidth of 20 nm is used to detect the chlorophyll fluorescence. The Raman scattering is measured by a monochromator with center wavelength of 650 nm and bandwidth of 10 nm. The ocean lidar system was installed on DONGFANGHONG research ship, and was deployed for long track observation in the East China Sea (27°—32°N, 122°—129°E) during October and November, 1994. The experiment is one parts of JGOFS plan of China. The distribution of sea surface chlorophyll concentration of 21 stations was obtained by the ocean lidar. The measured concentration ranged from 0.15—1.10 $\mu\text{g} / \text{L}$. The ocean lidar system's result is close to the spectrophotometer's result, and the correlation coefficient of the two results is 84%. The error sources of the lidar system are analyzed in the paper, and the big bias is found in the high concentration. This study showed that the ocean lidar system is superior to the concentration measurement method in such features as real-time and easy-operation. It can be used to detect the sea surface chlorophyll concentration *in situ* and as a simultaneous observation instrument of the ocean color satellite.

Key words Ocean lidar Laser fluorescence Raman scattering Concentration of chlorophyll

Subject classification number P733.3