

基于蓝绿激光雷达的海洋赤潮探测方法研究

林宏 王新民 卢金军 李卫中

(孝感学院物理与电子信息工程学院, 湖北 孝感 432000)

摘要 对基于蓝绿激光的海水光学传输特性进行了分析,提出了利用蓝绿激光雷达探测海洋赤潮的新方法。利用蓝绿激光具有较强的海水透过性,可以获取较深海域的赤潮信息。通过检测海水中蓝绿激光的后向散射信号,可以实现对海洋赤潮密度信息的获取。在分析海洋赤潮粒子吸收和散射特性的基础上,建立了基于蓝绿激光雷达的海洋赤潮密度探测模型。通过仿真计算,证明该模型可以有效探测出海洋赤潮密度的大小,进而可以实现对海洋赤潮消长过程的监测和预报。

关键词 海洋光学;蓝绿激光雷达;散射系数;赤潮

中图分类号 TN958

OCIS 010.3640 010.4450

文献标识码 A

Ocean Red Tide Monitoring Method Based on Blue-Green Lidar

Lin Hong Wang Xinmin Lu Jinjun Li Weizhong

(College of Physics and Electronic-Information Engineering, Xiaogan University,
Xiaogan, Hubei 432000, China)

Abstract A method for red tide detecting and monitoring by the airborne blue-green lidar is proposed based on analyzing the blue-green optical properties of the seawater. The blue-green laser can enter the seawater deeply, and the information of red tide in the deep seawater can be detected by using the blue-green lidar. By detecting the blue-green light scattering signal under the seawater, the information of red tide density can be gained. A red tide density detecting model based on airborne blue-green lidar is established through analyzing the absorbing and scattering characteristics of the red tide. By emulating and computing, it is proved that the method can detect and monitor the density of the ocean red tide effectively, and therefore it can also predict the occurrence of red tide.

Key words oceanic optics; blue-green lidar; scattering coefficient; red tide

1 引言

近年来,中国海域赤潮发生规模呈现不断扩大的趋势,但是由于赤潮形成机理复杂,目前尚无十分有效的方法防治赤潮的发生,只能通过监测和预报的手段来减少赤潮造成的损失。常用的方法是基于船载的水质监测和浮标站定点连续自动监测等方法^[1,2]。船载光学仪器测量方法需要定点采样、化学分析和人工处理,存在测量速度慢、效率很低和成本高等问题,不能满足要求快速获得大面积水域水质参数的场合,同时也严重影响了对灾害预测的反应时间。近年来,监测赤潮的工作平台由传统的船载平台测量,转变为越来越多地利用航空、卫星来进行探测。特别是基于机载的航空海洋光学遥感等新技术在赤潮监测和预报领域的应用引起了越来越多国家的重视。有的利用红外监测计,实时探测海水温度及其变化,并根据赤潮海区的温度要高于正常海水温度的特点,来对赤潮进行监测和预报,但温度检测不能直接反映赤潮密度变化情况。有的利用红外激光检测赤潮密度信息,但是红外激光在海水中的透过性太差,回波信号微弱。有的利用蓝绿激光检测海水中叶绿素的含量来预测赤潮变化情况,由于不能直接反映赤潮密度信息,预报赤潮误差较大^[3,4]。

本文通过分析海水信道的蓝绿光传输特性,提出了利用蓝绿激光雷达探测海洋赤潮密度的新方法。在

收稿日期: 2010-06-07; 收到修改稿日期: 2010-07-05

基金项目: 湖北省教育厅科技项目(Q20092601)资助课题。

作者简介: 林宏(1980—),男,博士,讲师,主要从事海洋光学和光学遥感等方面的研究。

E-mail: linwind@smail.hust.edu.cn

分析海洋赤潮粒子吸收和散射特性的基础上,建立了基于蓝绿激光雷达的海洋赤潮密度探测模型。通过检测海水中蓝绿激光的后向散射信号,可以实现对海洋赤潮藻密度信息的获取。

2 海水光学吸收特性

海水介质具有的两个重要光学特性:一个是海水及海水中无机盐、溶解的有机物、浮游植物、碎屑及细菌对光的吸收作用;另一个则是海水及海水中的无机盐、溶解的有机物、浮游植物、碎屑及细菌对光的散射作用。海洋水体中有4种主要物质影响其光学特性^[5,6]:水分子、浮游植物、非色素悬浮粒子和黄色物质。水分子对光具有吸收和散射的特性,浮游植物即海洋赤潮的主体,其同时具有吸收和散射双重光学特性,非色素悬浮粒子对光也具有吸收和散射的双重作用,而黄色物质对光只具有单一的吸收作用。

水分子是极化的,水分子在紫外和红外光谱带上发生强烈的共振,造成水对光谱中的这部分光表现出强烈的吸收。水分子在可见光谱产生的共振较弱,纯水在可见光范围的吸收要较紫外光和红外光小得多,在450~580 nm范围吸收最小,吸收系数在 $0.02\sim 0.05\text{ m}^{-1}$ 之间,在蓝绿光波段吸收系数为 0.04 m^{-1} 左右,即 $a_w(532)\approx 0.04\text{ m}^{-1}$ 。由于蓝绿光在海水中的穿透性最好,在实际监测海洋赤潮时,可选择输出波长为532 nm的倍频Nd:YAG半导体激光器。

黄色物质即海水中的可溶有色有机物,黄色物质光吸收系数与波长成指数函数关系^[7]

$$a_y(\lambda) = a_y(\lambda_0) \exp[S(\lambda_0 - \lambda)], \quad (1)$$

式中 $a_y(\lambda_0)$ 为参考波长下黄色物质的光吸收系数,一般取 $\lambda_0 = 440\text{ nm}$ 。 S 为光吸收谱的斜率,其值基本稳定,随波长及黄色物质的浓度的变化不大,与所用仪器、选取的波段范围及地区的不同存在一些差异,一般在 $0.0110\sim 0.0172$ 之间。研究中,取 $a_y(440) = 0.243\text{ m}^{-1}$, S 取平均值 0.014 ,即

$$a_y(\lambda) = 0.243 \exp[0.014(440 - \lambda)]. \quad (2)$$

非色素悬浮粒子的吸收系数与波长也成指数关系^[8],和黄色物质具有非常相似的吸收光谱,表示为

$$a_d(\lambda) = a_d(\lambda_0) \exp[S'(\lambda_0 - \lambda)], \quad (3)$$

式中 $a_d(\lambda_0)$ 为参考波长下非色素悬浮粒子的光吸收系数,一般取 $\lambda_0 = 440\text{ nm}$ 。 S' 为光吸收谱的斜率,平均值为 0.010 ± 0.002 。研究中,取 $a_d(440) = 0.198\text{ m}^{-1}$, S' 取平均值 0.01 ,即

$$a_d(\lambda) = 0.198 \exp[0.01(440 - \lambda)]. \quad (4)$$

叶绿素a存在于一切海洋浮游植物中,它能反映浮游植物的现存量,与海洋浮游植物的密度存在一定比例关系,当海洋浮游植物的种类、大小一定的情况下,可以近似认为海洋浮游植物所含叶绿素a的浓度与其粒子密度成正比。通常用叶绿素a的吸收来表征浮游植物的吸收,浮游植物对光的吸收系数可以计算为^[9]

$$a_{ph}(\lambda) = 0.06A(\lambda)[C_{hl}]^{0.65}, \quad (5)$$

式中 $[C_{hl}]$ 为叶绿素的浓度, $A(\lambda)$ 为在 $\lambda = 440\text{ nm}$ 处进行归一化处理以后的单位浓度叶绿素a的比吸收系数,即: $A(\lambda) = a_{ph}(\lambda)/[a_{ph}(440)]$ 。

将海洋浮游植物所含叶绿素a的浓度转化为海洋浮游植物粒子密度,则浮游植物对光的吸收系数可以用近似公式计算为

$$a_{ph}(\lambda) = 0.06A(\lambda)B(\lambda)N_i^{0.65}, \quad (6)$$

式中 N_i 为海洋浮游植物粒子密度, $B(\lambda)$ 为海洋浮游植物所含叶绿素a的浓度转化为海洋浮游植物粒子密度的比例系数。

3 海水光学散射特性

光和粒子的相互作用,按粒子尺度(r)与入射波波长(λ)相对大小的不同,可采用不同的处理方法。通常将粒子考虑为均匀球状体,常采用无量纲尺度参数 r/λ 作为判别标准。当 $r/\lambda \ll 1$ 时,属于瑞利散射;当 $r/\lambda \approx 1$ 时,属于米氏散射;当 $r/\lambda \gg 1$ 时,属于漫反射,可用几何光学处理。

由于水分子粒子尺寸远远小于探测光波长,所以海水中水分子的散射可以用瑞利散射理论来进行处理。水分子散射取决于三种类型的变化:密度起伏,各向异性水分子运动方向的起伏,溶解物质的浓度起伏。其

体积散射函数的形式为^[10]

$$\beta_w(\theta) = \beta(90^\circ)(1 + \cos^2\theta), \quad (7)$$

式中 θ 为散射角。总的散射系数 b 和体积散射函数 $\beta(\theta)$ 的关系为

$$b = \int_{4\pi} \beta(\theta) d\omega = 2\pi \int_0^\pi \beta(\theta) \sin\theta d\theta. \quad (8)$$

由(7)及(8)式可得

$$b_w = 16\pi\beta(90^\circ)/3, \quad (9)$$

由(9)式可知,海水本身引起的光散射损耗占总损耗的比例很小。同时由于其体积散射函数不具有明显的方向选择性,从对光场衰减的作用效果来看,可将它看作是一种类似于吸收的衰减性质。假定相同海域中,水分子的密度起伏和各向异性水分子运动方向的起伏不大,可近似认为在同一水域,水分子光散射是一个常数,即 b_w 为一常数。通常有: $\lambda=500$ nm 时, $b_w=2.2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$; $\lambda=520$ nm 时, $b_w=1.9 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$; $\lambda=530$ nm 时, $b_w=1.7 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$; $\lambda=540$ nm 时, $b_w=1.6 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 。

海水中的非色素悬浮粒子和浮游植物都属于海水中的悬浮粒子,它们的密度、大小、分布极其复杂,其严格描述理论还不存在,但是这些海水中的悬浮粒子尺寸与探测光波波长可相比拟,可以近似采用等效球的米氏理论来描述它们的散射特性。其散射系数可表示为^[11]

$$b = \sum_{i=1}^n (\pi r_i^2) N_i K_0, \quad (10)$$

式中 r_i 为非色素悬浮粒子或者浮游植物粒子的半径,对于特定海域非色素悬浮粒子和浮游植物粒子半径都可以认为是一定值; N_i 为非色素悬浮粒子或者浮游植物粒子的密度,对于特定海域非色素悬浮粒子密度可以认为是一定值,而浮游植物粒子密度为一变量; K_0 为无量纲有效因子(有效面积系数),它与粒子直径、粒子对周围介质折射率及光波长有关。

4 赤潮密度探测模型

日本安达六郎对共计 140 多起赤潮进行了观测,总结出不同大小的赤潮藻在赤潮开始阶段的密度范围,如表 1 所述^[12]。研究认为若达到该范围就可以断定赤潮的发生;若接近该范围则趋于赤潮发生状态;若小于并恢复海域原有生物量即可谓赤潮消失。

表 1 由赤潮生物的密度来判断赤潮的标准

Table 1 Standard of red tide based on its density

Sort	Size of red tide / μm	Density of red tide / (cell/L)
1	<10	> 10^7
2	10~29	> 10^5
3	30~99	> 3×10^5
4	100~299	> 10^5
5	300~1000	> 3×10^4

由前面介绍的赤潮消长特性可知:赤潮生物粒子密度的大小直接预示着赤潮的消长过程。所以,根据监测海洋赤潮粒子的生物密度的变化可以准确进行赤潮的预报和监测。理论上,机载海洋激光雷达方程的一般表达式为^[13]

$$P_r(R) = P_1 \gamma_b \eta \frac{A}{(H + R/n)^2} \exp\left[-2 \int_0^R \sigma(r) dr\right], \quad (11)$$

式中 $P_r(R)$ 为激光雷达探测器探测到的激光功率; P_1 为激光雷达发射的激光功率; γ_b 为海水总的后向散射率, n 为海水折射率; η 为激光雷达的效率; A 为探测器的有效接收面积,即 $A = 1/4(\pi D^2)$, D 为光学探测器的有效孔径; H 为飞机的飞行高度; R 为空气海水界面下的探测距离; $\sigma(r)$ 为发射激光束经过大气、海水界面和水中总的衰减系数, r 为激光束传输到某一点的距离。如果 $H \gg R$, 可以认为 $(H + R/n)^2 \approx H^2$, 这样(11)式就可以简化为

$$P_r(R) = P_1 \gamma_b \eta T^2 \frac{A}{H^2} \exp(-2c \cdot R), \quad (12)$$

式中 $c = a + b$ 为海水总的衰减系数; R 为激光束在水下的传输距离。

$$P_r(R) = P_1 \gamma_b \eta T^2 \frac{A}{H^2} \exp\{-2[a_w + a_y + a_d + 0.06A(\lambda)B(\lambda)N_i^{0.65} + b_w + b_d + \pi r_i^2 K_0 N_i]R\}, \quad (13)$$

(13)式可以看成是在不同海洋赤潮密度下,接收激光雷达回波信号随探测距离变化的关系式。这样,就可以通过检测 532 nm 波长的蓝绿脉冲激光在海水中传输的后向回波信号,来直接获取海水中赤潮密度的信息,然后根据海水中赤潮密度的变化来预测赤潮的发生和消长。

5 仿真结果及其分析

在仿真过程中,采用的参数为:激光的波长为 $\lambda = 532$ nm;激光的脉宽为 $\tau = 10$ ns;激光的发射功率为 $P_1 = 100 \times 10^6$ W;激光在海水中的传输距离为 $R = 0 \sim 10$ m;接收天线口径为 $D = 50$ cm;激光雷达的光学系统的传输效率为 $\eta = 0.45$;光束发散角为 $a = 0.01$ mrad;水面的透射率为 $T = 0.98$;飞机飞行高度为 $H = 500$ m;海水中水分子后向散射率为 $\gamma_{bw} = 0.5^{[14]}$;海水中叶绿素后向散射率为 $\gamma_{bph} = 0.001 \sim 0.005^{[14]}$;海水中非色素悬浮粒子后向散射率为 $\gamma_{bd} = 0.01 \sim 0.02^{[14]}$;纯水吸收系数为 $a_w(532) = 0.04$ m⁻¹;黄色物质吸收系数为 $a_y(532) = 0.067$ m⁻¹;非色素悬浮粒子吸收系数为 $a_d(532) = 0.079$ m⁻¹;纯水散射系数为 $b_w = 1.7 \times 10^{-3}$ m⁻¹;非色素悬浮粒子质量浓度取为 $D' = 1$ mg/L。

以我国 1999 年发生的浮动弯角藻赤潮具体消长过程^[15]为例。本文将对赤潮尚未发生(浮动弯角藻密度为 22.5×10^3 cell/L)、赤潮刚刚发生(浮动弯角藻密度为 300×10^3 cell/L)以及赤潮爆发高峰期(浮动弯角藻密度为 1324×10^3 cell/L)3 个阶段进行仿真。图 1 所示是不同赤潮密度下激光雷达系统接收到的整个海水回波信号,图 2 所示是接收到的激光雷达回波信号在极坐标下的波形,其斜率表示回波信号能量的衰减速度。

从图 1,2 可以明显看出,探测系统接收到的激光回波信号随着赤潮体密度的增大而衰减,且衰减速率逐渐增大。这是由于在赤潮的消长过程中,随着藻体密度的不断增加,赤潮藻体所引起的吸收和散射也就越强,使得总的衰减系数不断增强,所以能量衰减的速率也就越来越快。仿真结果表明:系统接收到的激光雷达回波信号随着赤潮藻体密度的增加呈现出相应的变化。二者之间的这种对应关系,从理论上证明了本文提出的探测模型和实现方法的可行性。因此,可以通过检测激光雷达回波信号在海水中的衰减情况来监测海洋赤潮的消长过程,进一步实现对赤潮的监测和预报。

6 结 论

通过分析海水信道的蓝绿光传输特性,提出了通过检测蓝绿激光海水后向散射信号,得到海水中赤潮粒子密度的大小,进而实现对赤潮消长过程监测的新方法。通过选择 532 nm 的蓝绿激光来进行海洋赤潮监测,建立了海水中各种介质的光学吸收和散射模型,实现了对海洋中赤潮粒子密度的实时监测。仿真计算证明,该探测模型可以有效探测出海洋赤潮粒子密度的大小,实现对赤潮的消长过程的判断。仿真结果从理论上证明了本文所提出的探测模型和实现方法的可行性。

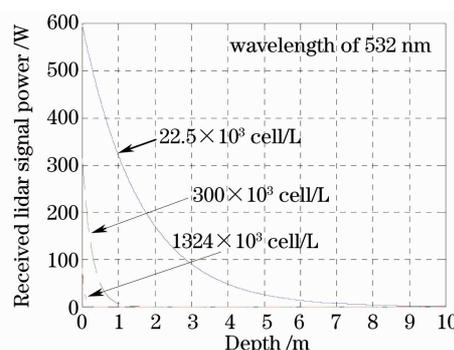


图 1 不同赤潮密度下接收到的回波信号
Fig. 1 Lidar return signal at different densities of red tide

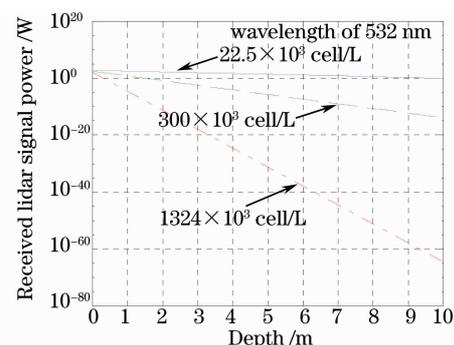


图 2 不同赤潮密度下接收到的回波信号(对数坐标)
Fig. 2 Lidar return signal at different densities of red tide(polar coordinates)

参 考 文 献

- 1 Wang Xiulin, Sun Peiyan, Gao Zhenhui *et al.*. Advances in red tide prediction method in China[J]. *Advances in Marine Science*, 2003, **21**(1): 93~98
王修林, 孙培艳, 高振会 等. 中国有害赤潮预测方法研究现状和进展[J]. 海洋科学进展, 2003, **21**(1): 93~98
- 2 Liu Peiran, Huang Xianyu, Ke Dong. The general report of red tide mechanisms and prediction[J]. *Marine Forecasts*, 1999, **16**(4): 46~51
刘沛然, 黄先玉, 柯 栋. 赤潮成因及预报方法[J]. 海洋预报, 1999, **16**(4): 46~51
- 3 He Yan, Wu Dong. Performance evaluation of airborne ocean lidar for measuring chlorophyll-a, suspended matter and coastal water depth in the east china sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, **34**(4): 649~654
贺 岩, 吴 东. 机载海洋激光雷达测量叶绿素 a 浓度、悬移质浓度和浅海深度的性能估计[J]. 中国海洋大学学报, 2004, **34**(4): 649~654
- 4 Chen Wenge, Huang Tiexia, Lu Yimin. Survey of airborne oceanic lidar[J]. *Laser Technology*, 1998, **22**(3): 147~152
陈文革, 黄铁侠, 卢益民. 机载海洋激光雷达发展综述[J]. 激光技术, 1998, **22**(3): 147~152
- 5 Song Qinjun, Tang Junwu. The study on the scattering properties in the Huanghai and East China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, **28**(4): 56~63
宋庆君, 唐军武. 黄海、东海海区水体散射特性研究[J]. 海洋学报, 2006, **28**(4): 56~63
- 6 Lin Hong, Dong Tianlin, Ma Yong. The study on infrared scattering of red tide[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **28**(4): 305~314
- 7 Wang Guifen, Cao Wenxi, Zhang Jianlin *et al.*. Variations in specific absorption coefficients of phytoplankton in northern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, **24**(5): 1~10
王桂芬, 曹文熙, 张建林 等. 南海北部水体浮游植物比吸收系数的变化[J]. 热带海洋学报, 2005, **24**(5): 1~10
- 8 Xu Xiaoqiang, Cao Wenxi, Yang Yuezhong. Relationships between spectral absorption coefficient of particulates and salinity and chlorophyll-a concentration in Zhujiang River Mouth[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2004, **23**(5): 64~71
许晓强, 曹文熙, 杨跃忠. 珠江口颗粒物吸收系数与盐度及叶绿素 a 浓度的关系[J]. 热带海洋学报, 2004, **23**(5): 64~71
- 9 Roderick E. Warnock, Winfried W. C. Gieskes, Sandor van Laar. Regional and seasonal differences in light absorption by yellow substance in the Southern Bight of the North Sea[J]. *Journal of Sea Research*, 1999, **42**: 169~178
- 10 Chen Feng, Chen Liangyi, Xue Minqiu. Analysis of absorption and scatter characteristics of the sea on airborne laser sounding[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(6): 561~565
陈 烽, 陈良益, 薛鸣球. 机载激光测深海洋传输通道的吸收和散射特性分析[J]. 光子学报, 1997, **26**(6): 561~565
- 11 Lin Hong, Dong Tianlin, Ma Yong *et al.*. The study on backward scattering ratio characteristics of oceanic suspended particles[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(1): 65~71
林 宏, 董天临, 马 泳 等. 海洋悬浮粒子的光学后向散射率特性研究[J]. 大气与环境光学学报, 2008, **3**(1): 65~71
- 12 Ma Yong, Lin Hong, Ji Hang. A scattering coefficient model for airborne lidar detection of red tide[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 344~349
马 泳, 林 宏, 冀 航. 基于机载激光雷达监测海洋赤潮模型研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(2): 344~349
- 13 Zhu Xiao, Wang Hua, Qi Lijun. Airborne laser bathymetry backscattering lidar equation[J]. *Laser & Infrared*, 2002, **32**(6): 386~388
朱 晓, 王 华, 齐丽君. 机载激光测深后向散射光雷达方程[J]. 激光与红外, 2002, **32**(6): 386~388
- 14 Ma Yong, Lin Hong, Ai Qing *et al.*. Red tide monitoring study 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
- 15 Zhang Yongshan, Wu Yulin, Zou Jingzhong *et al.*. A red tide caused by diatom eucampia zoopiacus in the Jiaozhou Bay[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2002, **33**(1): 55~61
张永山, 吴玉霖, 邹景忠 等. 胶州湾浮动弯角藻赤潮生消过程[J]. 海洋与湖沼, 2002, **33**(1): 55~61