

文章编号: 0253-2239(2007)05-0760-6

# 太湖梅梁湾水下光场扰动的特征分析\*

赵巧华<sup>1,2</sup> 秦伯强<sup>1</sup> 张运林<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)  
(<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 在水体表面波的扰动作用下, 水下光场随深度呈现较为明显的波动现象, 且水中光合作用会对水下光场波动作出响应, 因而此现象引起了广泛的关注。基于太湖梅梁湾观测的水下光场数据, 计算了水下光场随深度的变化, 并分析了其波动特征。结果表明: 表面波引起了水下光场较为明显的波动现象, 波动振幅最大的深度基本小于 20 cm, 远小于海洋中对应的深度; 水下光场波动的振幅随深度呈 e 的负指数衰减, 漫射消光系数越大, 水下光场的波动衰减得也越快; 当深度大于 30 cm 时, 水下光场的扰动现象基本消失。还计算了船舶对水下光场观测的影响, 发现直射光未被遮挡的情况下, 漫射比例越高, 其相对误差越大。

**关键词:** 海洋光学; 表面波; 水下光场; 波动

中图分类号: P733.3 文献标识码: A

## Characteristic Analysis of the Fluctuation of Light Field under Water in Meiliang Bay of Taihu Lake

Zhao Qiaohua<sup>1,2</sup> Qin Boqiang<sup>1</sup> Zhang Yunlin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Nanjing Institute of Geography and Limnology, the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)  
(<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** There is a significant fluctuation in the light field under water caused by surface wave of water, to which the photosynthesis of phytoplankton in water responses. As a result, the phenomenon is attracting more and more attentions. Based on the data of light field under water in Meiliang Bay of Taihu Lake, the variation of light field under water with depth was calculated and the fluctuant characteristics of light field under water were analyzed. The results show that significant fluctuation in light field under water is resulted from surface wave of water. The maximal fluctuation depth in aptitude is approximately smaller than 20 cm, which is much smaller than that in ocean. The decrease of the fluctuation varies with depth is exponential. The larger is the diffuse attenuation coefficient, the faster is the attenuation of magnitude of the light field under water. The fluctuation will almost disappear when the depth is larger than 30 cm. In addition, the effect of boat on the measured light field under water was investigated. If the direct sunlight isn't blocked by the boat the larger proportion of the skylight in the incident light, the more relative errors just beneath the surface of water caused by the shelter of boat will be.

**Key words:** ocean optics; surface wave; light field under water; fluctuation

## 1 引言

风诱使水表起伏而形成水体表面波, 从而引起水入射光的反射、折射的波动, 以及水下光场波动的现象。而水下光场的波动与水中藻类关系密切,

它不仅影响水体的初级生产力, 而且影响藻类的迁移<sup>[1]</sup>; 水中波动的光场还会促进光合作用效率, 从而对水中生态环境变化有着重要意义<sup>[2]</sup>。

造成水下光场波动的主要贡献者并非低频的重

\* 中国科学院知识创新战略行动项目(KZCX1-SW-12)、国家 863 计划(2002AA601011)和中国科学院方向性项目(KZCX3-SW-350)资助课题。

作者简介: 赵巧华(1972—), 男, 江西南昌人, 讲师, 博士研究生, 主要从事水光学及大气光学方面的研究。

E-mail: qhzhao@niglas.ac.cn

导师简介: 秦伯强(1963—), 男, 江苏吴县人, 研究员, 博士, 主要从事水资源与水环境方面的研究。

E-mail: qinbq@niglas.ac.cn

收稿日期: 2006-02-20; 收到修改稿日期: 2006-07-10

力波,而是高频的重力-毛细波<sup>[3~5]</sup>。然而由于有关重力-毛细波结构特征的研究还处于半经验的基础上,使得水下光场波动的研究目前仍停留在特征分析和简化模式的基础上。

尽管如此,水下光场的波动依然受到诸多学者的关注。早在 20 世纪 50 年代,对水下光场的波动就进行了理论探讨,并在忽略散射、吸收的条件下,用射线模式模拟了表面波对铅直入射光线聚光作用<sup>[6]</sup>。Tessendorf<sup>[7]</sup>通过水体散射相函数的小角度近似,模拟了表面波与水中介质散射联合对铅直入射光的扰动作用。Stramski 等<sup>[8,9]</sup>分析讨论了表面波对铅直的直射光的聚光机制,并讨论了漫射光对水下辐照度波动的强度和频率的影响。水中下行光照度( $E_d$ )变化较大的深度范围与表面波的波陡存在密切的关系<sup>[5]</sup>。然而上述研究基本上都是在假定水体表面波参量、太阳位于天顶、水体消光作用较小的海洋中进行的。但风浪对太阳光的聚光作用所依赖的大气、水体表面波、水体本身的光学特性以及太阳天顶角等却相对较为复杂。因而在求解辐射传输方程时,通过近表层光学特性水平均匀的假设可能会造成较大的误差,甚至会造成漫射消光系数为负值的现象;水体表面波还会提高入射光方向的后向散射,从而影响遥感过程中传感器所接收到的离水辐射信号<sup>[10]</sup>。

我国大部分大型浅水湖泊处于富营养化阶段,水体消光作用强烈,夏季水华频发,水下光场的扰动特征对光在这类水体中的传输规律及水华爆发的影响就显得更有意义。但国内对上述现象的研究甚少。本文试图通过在太湖梅梁湾观测的  $E_d$ ,分析其变化特征,为进一步研究表面波引起的光场波动对藻类光合作用的影响提供依据,同时也为二类水体的遥感机理研究奠定基础。

## 2 数据采集

针对 2005 年 10 月 10 日在太湖梅梁湾 13 个点观测的水中下行辐照度,采样点分布见图 1,在船上观测了水气交界面上方的下行辐照度  $E_d(\lambda, 0^+)$ ,使用遮挡物遮住太阳直射光后的漫射光的下行辐照度  $E_{sky}(\lambda, 0^+)$ ,水中下行辐照度  $E_d(\lambda, z)$ ,其中  $E_d(\lambda, z)$  测量的水下深度分别为 0.0 m、0.05 m、0.1 m、0.15 m、0.2 m、0.25 m、0.3 m、0.4 m、0.5 m、0.6 m、0.8 m、1.0 m。在进行观测时,选择在船体向阳的一面进行,以避免船体遮挡直射辐射,且使仪器离开船体一定的距离;在深度测量时,通过一金属

标尺垂直插入水中并多次测定对应采样点的深度,其平均值即为该采样点的水深;同时通过一与直金属杆垂直的金属横杆将水下光谱仪固定,以保证仪器探头始终与金属标尺平行,且探头向上。使用仪器为德国 Trios 公司生产的 SAM-8099 光谱辐射仪,其校正时间为 2005 年 7 月 18 日。该仪器采样波长的有效范围为 415~722 nm,但考虑到太湖中黄质、非藻类颗粒物对短波的强烈衰减作用,因而本文只分析波长大于 415 nm 的下行辐照度。各点风速  $v$  的测定仪器为上海华风公司生产的手持式风速风向仪。

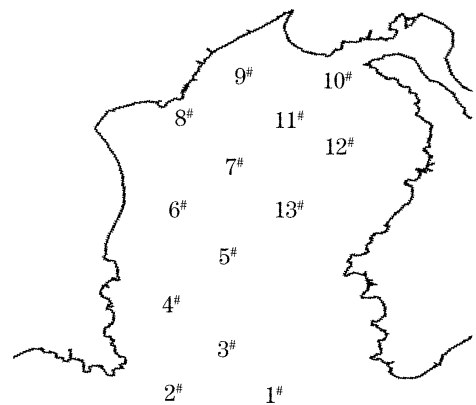


图 1 梅梁湾采样点位置图

Fig. 1 Location of sampling stations in Meiliang Bay

## 3 理论和方法

### 3.1 紧邻水气交界面下方的订正过的平均下行辐照度计算

$E_d(\lambda, z)$  是一个表征水下光能谱随深度分布的一个物理量。它关联到水中的生物化学过程,其变化也反映出水体的光学特性,同时也是确定离水辐射信号的关键参量。但水体表层(紧邻水气交界面下方)  $E_d(\lambda, 0^-)$  受到水表起伏、船舶等外界条件的干扰,尤其受到船舶遮光的影响<sup>[11]</sup>,根据 Raymond 等<sup>[12]</sup>和 Zheng 等<sup>[13]</sup>的研究,由于  $E_d(\lambda, 0^+)$ 、 $E_{sky}(\lambda, 0^-)$  的观测是在船甲板上进行的,避免了船舶及水体表面波对其的干扰,因而其观测值是准确的,可以用来对计算紧邻水气交界面下方的订正过的下行辐照度  $E_d^*(\lambda, 0^-)$ 。

$E_d(\lambda, 0^+)$  包括两部分的内容,紧邻水气交界面上方的太阳光下行辐照度  $E_{sun}(\lambda, 0^+)$  和  $E_{sky}(\lambda, 0^+)$ 。

$$E_d(\lambda, 0^+) = E_{sun}(\lambda, 0^+) + E_{sky}(\lambda, 0^+), \quad (1)$$

并定义  $y(\lambda)$  为  $E_{sky}(\lambda, 0^+)$  在  $E_d(\lambda, 0^+)$  中所占的比例:

$$y(\lambda) = E_{sky}(\lambda, 0^+)/E_d(\lambda, 0^+), \quad (2)$$

$\rho$  为水表反射率。其表示的是反射辐照度与入射辐照度之比。

$$\rho = \frac{\rho_{\text{sun}} E_{\text{sun}}(\lambda, 0^+) + \rho_{\text{sky}} E_{\text{sky}}(\lambda, 0^+)}{E_{\text{sun}}(\lambda, 0^+) + E_{\text{sky}}(\lambda, 0^+)} = \frac{\rho_{\text{sun}}(1-y) + \rho_{\text{sky}}y}{\rho_{\text{sun}}(1-y) + \rho_{\text{sky}}y}, \quad (3)$$

其中  $\rho_{\text{sun}}$  为直射辐射在水气交界面上方处的反射率。 $\rho_{\text{sky}}$  为漫射辐射在水气交界面上方处的反射率, 假定天空漫射是均匀分布, 则它近似为一常量<sup>[12]</sup>, 即  $\rho_{\text{sky}} = 0.066$ ;  $\rho_w$  水中上行光在水气交界面下方处的反射率同样近似为一常量<sup>[12]</sup>, 其值为  $\rho_w = 0.47$ 。

引入一物理量  $E_u(\lambda, 0^-)$ , 表示在水气交界面下方上行辐照度。于是可得

$$E_d^c(\lambda, 0^-) = (1-\rho)E_d(0^+) + \rho_w E_u(\lambda, 0^-) = \frac{1}{1-\rho_w R}(1-\rho)E_d(0^+), \quad (4)$$

其中  $R = \frac{E_u(0^-)}{E_d(0^-)}$ , 称为辐照度反射率 (Irradiance reflectance)。

由于  $1/(1-\rho_w R)$  的变化范围为  $1.01 \sim 1.05$ , 可得

$$E_d^c(\lambda, 0^-) \approx 1.03[1 - \rho_{\text{sun}}(1-y) - \rho_{\text{sky}}y]E_d(\lambda, 0^+), \quad (5)$$

在上式中,  $\rho_{\text{sun}}$  的计算相对较为复杂, 本文采用射线跟踪法<sup>[14~17]</sup>, 根据采样点的经度、纬度、采样时间、 $y$  以  $v$  及计算而得不同波长的直射辐射在水气交界面处的反射率。根据 Cox 和 Munk<sup>[18,19]</sup> 得出的风速与表面波斜率的统计关系, 对  $\rho_{\text{sun}}$  进行多波数的平均求得其平均值  $\bar{\rho}_{\text{sun}}$ , 即可得出紧邻水表下方的平均下行辐照度  $\langle E_d(\lambda, 0^-) \rangle$ 。从而可知,  $\langle E_d(\lambda, 0^-) \rangle$  是不受船舶的遮光及表面波的影响<sup>[5,11,12]</sup>。

### 3.2 下行光的平均漫射消光系数的计算

下行光的漫射消光系数

$$K_d(\lambda, z) \equiv \frac{-1}{E_d(\lambda, z)} \frac{\partial E_d(\lambda, z)}{\partial z}$$

系表观光学特性。其受水体本身的特性、大气状况、太阳的位置及水表粗糙度的共同影响, 表征了下行辐照度随水深的衰减程度。然而由于水体表面波及船舶影响造成的  $E_d(\lambda, z)$  在小范围内水平方向上不均匀, 使得用单一的  $E_d(\lambda, z)$  廓线计算  $K_d(\lambda, z)$  存在较大的差, 甚至出现负值<sup>[5]</sup>。由于表面波和船舶对  $E_d(\lambda, z)$  的影响均随深度减小<sup>[5,11]</sup>, 由此选择受外界因素影响最小的接近真光层的下行辐照度作为准确值, 其深度为  $z_0$ , 并由此利用 Zaneveld 等<sup>[5]</sup> 提出的方法计算  $K_d(\lambda)$ 。

考虑到  $E_d(\lambda, z)$  的水平非均匀性, 因而用  $\overline{E_d(\lambda, z)}$  表示在水平方向上较大范围的平均下行辐照度。因而可以认为表面波对其没有影响<sup>[5]</sup>。同时根据朗伯-比格定律,  $\overline{E_d(\lambda, z)}$  随深度的变化可描述为:

$$\overline{E_d(\lambda, z)} = \overline{E_d(\lambda, 0^-)} \exp[-K_d(\lambda)z], \quad (6)$$

然后对其从  $z_0$  到紧邻水汽交界面下方进行积分, 可写为

$$I(\lambda) = \int_{z_0}^0 \overline{E_d(\lambda, z)} dz = \frac{\overline{E_d(\lambda, 0^-)}}{K_d(\lambda)} \{ \exp[K_d(\lambda)z_0] - 1 \}, \quad (7)$$

在实际积分过程中, 用观测的  $E_d(\lambda, z)$  代替  $\overline{E_d(\lambda, z)}$ 。其形式如下<sup>[5]</sup>:

$$I'(\lambda) = \int_{z_0}^0 E_d(\lambda, z) dz = \frac{E_d(\lambda, 0^-)}{K_d(\lambda)} \{ \exp[K_d(\lambda)z_0] - 1 \}, \quad (8)$$

如果  $E_d(\lambda, 0^-)$  已知, 就完全可以确定  $K_d(\lambda)$ , 然而由于  $E_d(\lambda, 0^-)$  实际上受到诸多因素的影响, 较难确定。于是可以通过从  $z_0$  逐步向水面方向积分, 以避免该问题:

$$I'(\lambda, z) = \int_{z_0}^z E_d(\lambda, z) dz \approx I(\lambda, z) = \frac{E_d(\lambda, 0^-)}{K_d(\lambda)} \{ \exp[K_d(\lambda)z_0] - \exp[K_d(\lambda)z] \}, \quad (9)$$

其中  $\ln[dI'(\lambda, z)/dz]$  的斜率为  $K_d(\lambda)$ 。于是通过从  $z_0$  到  $z_1$ 、 $z_0$  到  $z_2$ 、 $\dots$ , 其积分值分别记为:  $I'(\lambda, z_1)$ 、 $I'(\lambda, z_2)$ 、 $\dots$ , 其中  $z_0 > z_1 > z_2 \dots$ 。 $K_d(\lambda)$  即可通过对  $\Delta I'(\lambda, z)/\Delta z$  进行最小二乘法拟合得到。

### 3.3 计算下行辐照度随水深的波动

根据 3.1、3.2 的介绍, 通过不受船舶、表面波的影响  $\langle E_d(\lambda, 0^-) \rangle$  和  $K_d(\lambda)$ , 可以进而求出水中各深度上的平均下行辐照度  $\langle E_d(\lambda, z) \rangle$ , 相应地, 它也消除了船舶及表面波的影响。而且可以通过  $\Delta E_d(\lambda, z)$  [见(10)式] 来表征船舶及表面波对水中下行辐照度的影响:

$$\Delta E_d(\lambda, z) = E_d(\lambda, z) - \langle E_d(\lambda, z) \rangle. \quad (10)$$

## 4 结果分析

### 4.1 船舶对水体表层下行光场的影响

一般情况下, 水下辐照度的测量是在靠近船舶的位置将仪器悬于水中进行的, 由于船舶存在, 会产

生对光场分布的干扰<sup>[11]</sup>,而这种影响一般情况下是无法避免的。但直射光不被遮挡时,其受到的干扰相对较小,而漫射光受到的干扰却相对较大。所以可以通过安排观测位置,使其位于向阳的一面,以尽可能地减小船舶对光传输的阻碍作用;太湖属于大型浅水湖泊,其水中悬浮物浓度高,多次散射相对较强,因而船舶对水下光场的影响随深度减小<sup>[5]</sup>,为此我们仅考察船舶对水体表层下行辐照度的影响,即通过各站点的  $y(\lambda)$  与的  $\Delta E_d(\lambda, 0^-)/\langle E_d(\lambda, 0^-) \rangle$  关系,说明在太湖梅梁湾因船舶对漫射光的遮挡而造成的相对误差与漫射光比例的关系。图 2 给出每个采样点  $y(\lambda)$  与  $\Delta E_d(\lambda, 0^-)/\langle E_d(\lambda, 0^-) \rangle$  的线性相关系数,其波长范围为 415~722 nm,样本数为 308。

从图 2 中可以看出,表层水体下行光场的相对误差与漫射光占总辐射的比例存在明显的相关性,其最小相关系数为 0.8894,最大为 0.998。即说明表层水体下行光场的相对误差主要受到漫射光占总辐射的比例的影响。根据 Stramski 的研究,在  $y(\lambda)$  小于 0.6 时,由其引起的水下光场波动的变化很小<sup>[9]</sup>。然而在  $y(\lambda)$  越大时,船体遮挡漫射光势必也就越多,因而由其引起的表层水体下行光场的相对误差也就越大;在 13 个采样点中的 415~722 nm 范围内,各点的  $y(\lambda)$  均小于 0.6,也说明了船舶对漫射

光的阻挡是引起表层光场扰动的主要原因。

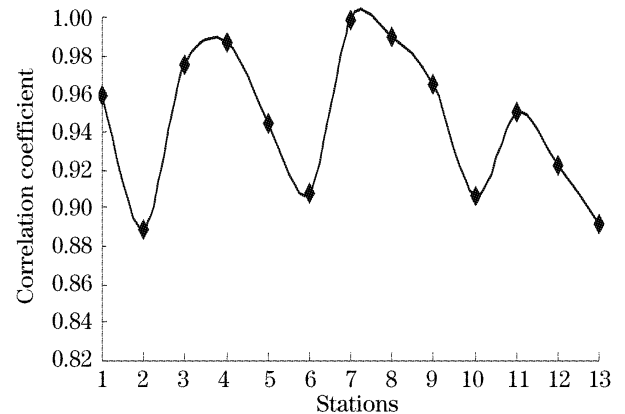


图 2  $y(\lambda)$  与  $\Delta E_d(\lambda, 0^-)/\langle E_d(\lambda, 0^-) \rangle$  的相关系数

Fig. 2 Linear correlation coefficient between  $y(\lambda)$  and  $\Delta E_d(\lambda, 0^-)/\langle E_d(\lambda, 0^-) \rangle$

## 4.2 水下光场的扰动

由于水体中多次散射的效果,使得船舶的影响最大的位置应在水体表层,而随深度的增加,其影响减小<sup>[11,12]</sup>。但各站点 415 nm 的  $\Delta E_d$  却随深度出现了增大、减小周期性的变化(见图 3),可见这种周期性波动并非是船舶的影响造成的。从其变化的振幅来看,13 个站点均有随深度减小的趋势,这种现象与 Walker 等<sup>[13]</sup>的研究结果基本一致。

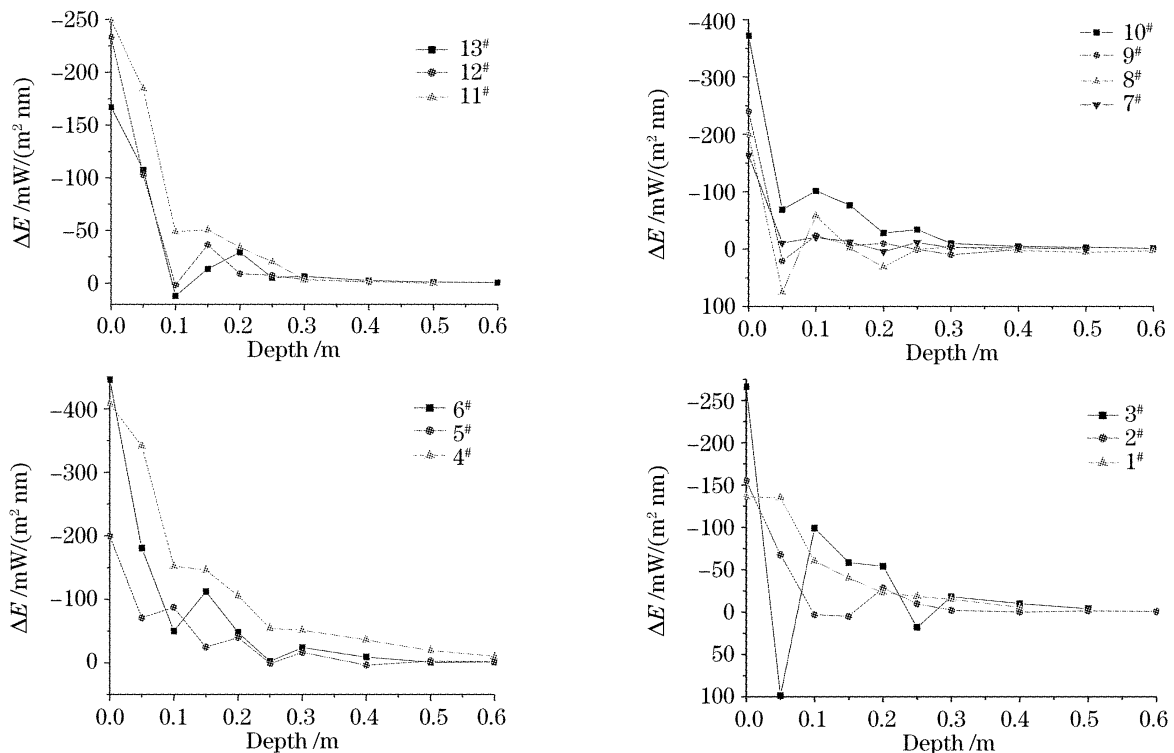


图 3 各站点 415 nm 处的  $\Delta E_d$  随深度的变化

Fig. 3 The variation of  $\Delta E_d$  in 415 nm of each sampling location with the depth

从图 3 中还可以看出,  $E_d$  增大幅度最大的深度一般小于 20 cm,而对应的深度在海洋中一般在几米

的范围内<sup>[5]</sup>。在深度超过 30 cm 时,  $\Delta E_d$  波动的现象基本消失。而且各站点  $\Delta E_d$  波动的周期、出现的深

度大小也不尽相同,波动的振幅基本随深度递减。

由于各站点辐照度的观测基本均在 3 min 之内完成,因而就各个站点来说,其气象条件、太阳天顶角,太阳辐射等基本上可以看成是稳定的,水体光学特性在一个小区域内也基本上是均匀的,因而引起  $\Delta E_d$  随深度周期性变化的原因就只有连续变化的水体表面波。其主要原因是由于水体表面在高度及波面斜率上的连续变化,改变了光线的传播路程及方向,使得光线出现聚合或发散的作用造成的<sup>[8]</sup>。但由于在海上风的吹程比太湖梅梁湾的大,因而在太湖梅梁湾波浪造成的光场扰动出现的深度较浅。另由于太湖系一大型浅水湖泊,风浪的扰动造成水中悬浮颗粒物的浓度甚高,增加了光子在水中传播过程中被散射的概率,加上该水体的黄质和悬浮颗粒物丰富,吸收能力强,因而随光线传播路程的增加,减弱了水体表面波对光线折射的影响,使得水下辐照度波动的振幅随深度呈现强烈的减小趋势,因此光场扰动消失的深度也较浅。

影响水下光场随深度变化原因主要有入射光的几何结构、水体表面的结构及水体光学特性<sup>[9]</sup>。而且这几种作用相互耦合,使得其机理解释尤为复杂。然而该次采样过程中,各站点的漫射光的比例均小于 0.6 ( $\lambda \geq 415 \text{ nm}$ ),根据 Stramski<sup>[9]</sup> 的研究,当漫射光比例小于 0.6 时,其引起水下光场波动的变化较小。因而可以就水体光学特性及水表几何结构两个方面讨论它们对水下光场波动的影响。

图 4、图 5 分别给出了 13#、3# 站点的 415 nm、525 nm、575 nm 和 675 nm 的  $\Delta E_d$  随水深的变化。在这两个站点的观测过程中,由于观测时间较短,因而就各个站点来说,其太阳的高度角、方位角及水表结构基本是相同的,唯一不同的是对应不同的波长,

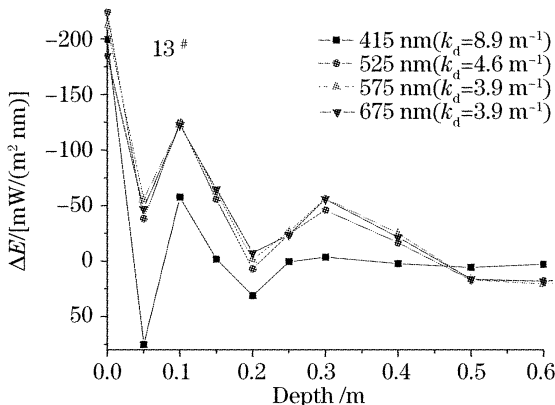


图 4 13# 站点  $\Delta E_d$  随深度的变化

Fig. 4 Variation of  $\Delta E_d$  with the depth in 13# sampling location

而不同波长的水体光学特性有着明显的不同,所以可以根据每个站点的、不同波长的  $\Delta E_d$  随水深的变化,探讨水体光学特性对其的影响。

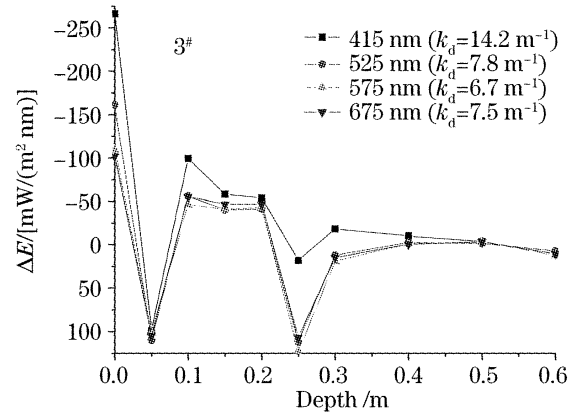


图 5 3# 站点  $\Delta E_d$  随深度的变化

Fig. 5 Variation of  $\Delta E_d$  with the depth in 3# sampling location

从图 4、图 5 中可以看出,两图均存在一个共同现象,即 415 nm 的  $\Delta E_d$  随水深衰减的较快,相对其它波段而言,其在较浅的深度上就基本上处于平稳状态,即基本上接近于 0。该现象出现的主要原因是 415 nm 的下行漫射消光系数均较大程度上超过了 525 nm、575 nm、675 nm 的下行消光系数,而下行漫射消光系数表征的是下行辐照度随水深的衰减程度,因而随着下行辐照度衰减的越多,水体表面波的对水下光场的扰动作用相对也就表现得越不明显。

本文针对 13 个采样点、415~722 nm 范围内每个波长,通过用指数形式对  $\Delta E_d(\lambda, z)$  的绝对值进行拟合,并对二者求了相关。但由于不同波长的光在水中有不同的穿透能力,根据下行辐照度在水中衰减的程度,结合观测深度,确定其样本数。表 1 给出了不同站点,不同穿透深度(对应样本数)的相关系数中的最小值。从表 1 中可以看出,即使其最小相关系数,其信度也大于 0.95。说明在 415~722 nm 的范围内,水中下行辐照度的大小波动随水深呈 e 负指数减小的趋势,其衰减函数形式为  $|\Delta E_d(\lambda, z)| \approx A(\lambda) \exp[-B(\lambda)z]$ 。这一现象与 Walker<sup>[3]</sup> 的研究结果基本一致。其形成原因主要是由于下行辐照度在水中的衰减作用造成的。其中  $B(\lambda)$  表征的是  $|\Delta E_d(\lambda, z)|$  随水深的衰减的程度。

图 6 给出了每个站点的  $B(\lambda)$  与  $K_d(\lambda)$  的相关系数,各站点的样本数均为 308,从图 6 中可以看出,  $B(\lambda)$  与  $K_d(\lambda)$  存在着明显的正相关,这也进一步说明了  $|\Delta E_d(\lambda, z)|$  随深度衰减的主要原因,即由于水体中下行漫射消光系数对下行辐照度衰减作

用,使得下行辐照度随水深减弱,因而减弱了水体表面波对入射光的扰动作用,进而减弱了  $|\Delta E_d(\lambda, z)|$  随水深的变化幅度。

表 1 不同站点,不同波长的  $A(\lambda)\exp[-B(\lambda)z]$  和  $|\Delta E_d(\lambda, z)|$  的最小相关系数

Table 1 The smallest linear correlation coefficient between  $A(\lambda)\exp[-B(\lambda)z]$  and  $|\Delta E_d(\lambda, z)|$  of the different wavelength in each sampling location

Station	Sample (8)	Sample (9)	Sample (10)	Sample (11)
1 #	0.95758	0.9526	0.91862	0.8206
2 #			0.82979	0.60041
3 #		0.93123	0.97437	0.64073
4 #			0.96969	0.87909
5 #			0.93034	0.74339
6 #			0.94539	0.85218
7 #			0.84993	0.80441
8 #			0.89858	0.64826
9 #	0.8697	0.82629	0.83433	0.77606
10 #			0.90483	0.91896
11 #		0.95669	0.97185	0.95734
12 #	0.92691	0.94819	0.89934	0.82229
13 #			0.90928	0.8756

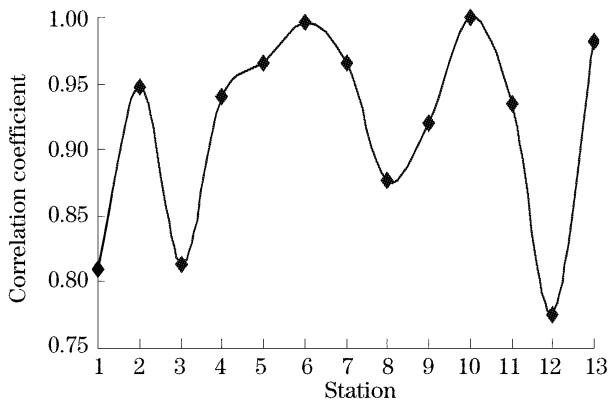


图 6 各站点  $B(\lambda)$  与  $K_d(\lambda)$  的相关系数

Fig. 6 Linear correlation coefficient between  $B(\lambda)$  and  $K_d(\lambda)$  in each sampling location

## 5 结 论

水下光场受到水体表面波及船舶的干扰的影响。表面波引起了水下光场较为明显的波动现象,但由于该区域风的吹程较小,波动振幅最大的深度基本小于 20 cm 左右,远小于海洋中对应的深度;且因该水体消光作用大,所以当水深大于 30 cm 时,水下光场的波动现象基本消失。

水下光场波动的大小随深度呈 e 的负指数衰减,漫射消光系数越大,水下光场波动的衰减得也越快。

在船体未遮挡直射太阳光时,由船体引起的水体下层的下行光场的相对误差与漫射光的比例呈正相

关,即漫射比例也大,由此引发的相对误差也就越大。

## 参 考 文 献

- Dera J., Gordon H. R.. Light-field fluctuations in the photic zone[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1968, **13**(4): 697~699
- Walsh P., Legendre L.. Photosynthesis of natural phytoplankton under high frequency light fluctuations simulating those induced by surface wave[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1983, **28**(4): 688~697
- Walker R. E.. *Marine Light Field Statistics* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994. 494~502
- Stramski D.. Fluctuations of solar irradiance induced by surface waves in the Baltic[J]. *Oceanology*, 1986, **34**(3): 333~344
- Zaneveld J. R. V., Boss E., Barnard A.. Influence of surface waves on measurement and modeled irradiance profiles[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(9): 1442~1449
- Schenck H. Jr.. On the focusing of sunlight by ocean waves[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1957, **47**: 653~657
- Tessendorf J.. Downwelling irradiance fluctuations in the small-angle approximation[C]. *Proc. SPIE*, 1990, **1302**: 454~463
- Stramski D., Dera J.. On the mechanism for producing flashing light under a wind-disturbed water surface[J]. *Oceanologia*, 1988, **25**: 5~21
- Stramski D.. The effect of daylight diffuseness on the focusing of sunlight by sea surface waves [J]. *Oceanologia*, 1986, **24**: 11~27
- Zaneveld J. R. V., Boss E., Hwang P. A.. The influence of coherent waves on the remotely sensed reflectance[J]. *Optics Express*, 2001, **9**(6): 260~266
- Gordon H. R.. Ship perturbation of irradiance measurements at sea, 1; Monte Carlo simulation[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(23): 4172~4182
- Smith R. C., Baker K. S.. Analysis of ocean optical data II [C]. *Proc. SPIE*, 1986, **637**: 95~107
- Xiaoping Zheng, Tommy Dickey, Grace Chang. Variability of the downwelling diffuse attenuation coefficient with consideration of inelastic scattering [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41** (30): 6477~6488
- Qiming Cai, Ping Yang. Model of irradiance transfer in wavy water of lake Taihu[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993 (a), **24**(3): 286~293 (in Chinese)  
蔡启铭,杨平. 有风浪太湖水体的光照传输模式[J]. *海洋与湖沼*, 1993(a), **24**(3): 286~293
- Qiming Cai, Ping Yang. A model of PAR transfer in atmosphere-water system and primary productivity of lake[J]. *Advances in Water Science*, 1993(b), **4**(3): 171~178 (in Chinese)  
蔡启铭,杨平. 大气-水体系统中 PAR 传输模式及湖泊初级生产力[J]. *水科学进展*, 1993(b), **4**(3): 171~178
- Qiaohua Zhao, Boqiang Qin. Numerical research on waves of a water body affecting the mean cosine of downwelling light field just beneath the surface of water[J]. *Advances in Water Science*, (in Chinese)  
赵巧华,秦伯强. 风浪对水体表层下行光场平均余弦影响的数值研究[J]. *水科学进展*,
- Li Wei, Yang Kecheng, Zhang Xiaohui et al.. Simulation and computation of bubbles volume scattering function in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 647~651 (in Chinese)  
李微,杨克成,张晓晖等. 水中气泡上的体散射函数的模拟和计算[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 647~651
- Cox C., Munk W.. Statistics of the sea surface derived from sun glitter[J]. *J. Mar. Res.*, 1954(a), **13**: 198~227
- Cox C., Munk W.. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1954(b), **44**(11): 838~850