

## 千里崖海域真光层光衰减\*

杨 生 光

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266003)

**摘要** 根据1986年6月在黄海中部的千里崖海域的水光学实测资料和实验室光学测量, 讨论了真光层内光衰减系数在遥感和初级生产力中的应用, 定量估算影响光衰减的主要物质成分对光衰减的贡献; 并探讨了真光层深度、光衰减系数和透明度三者之间的统计关系。

**关键词** 真光层 光衰减 遥感

光在海水中的透射受制于真光层的厚薄。大部分海洋浮游植物的光合作用在真光层内进行。研究表明, 真光层深度及其量子辐照度的分布水平与浮游植物现存量、初级生产力和水色之间有一定的统计关系<sup>[1]</sup>。近二十年来, 由于人们对水色遥感和生态学研究的浓厚兴趣, 真光层光衰减研究正日益受到广泛的重视。

我们于1986年6月对千里崖海域的真光层光衰减做了实验测量, 并结合实验室的必要光学测量, 探讨了真光层光衰减的有关问题, 旨在为近岸水域的水色遥感和初级生产力的应用研究方面提供有效的参考依据。

### 一、材料与方 法

按一般规定, 取海面辐照度1%的深度为真光层深度。用日本的Sθ-161型水下量子照度计测定真光层内的辐照度随海水深度的分布。该设备测量波长范围为350—700nm, 量子数精度( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )大于10%。辐照度向下垂直衰减系数利用公式

$$E_d(Z) = E_d(0)e^{-K_d Z}$$

计算出。式中,  $E_d(Z)$ ,  $E_d(0)$  分别为Z深度和海面向下辐照度值;  $K_d$  为0—Zm区间的垂直衰减系数的平均值。

在真光层内取海面及海面辐照度的50%, 25%, 10%和1%的五点深度上的叶绿素a浓度的总和作为水体中叶绿素总含量, 该含量可作为浮游植物生物量的量度。叶绿素a浓度是按照联合国科教文组织推荐的分光光度法测量程序测定的, 应用Jeffrey-Humphrey的计算公式计算<sup>[8]</sup>。海水透明度(D)用半径0.3m的白色圆盘测定。所用的水光学现场观测资料, 取自黄海中部千里崖海域(36—36°40'N, 120°00'E), 观测点位置如图1所示。

在实验室内还测定了叶绿素a和过滤海水的消光系数。叶绿素a的消光系数测定要经过藻类悬浮液的离心浓缩, 并在实验室培养10天左右。培养的藻类悬浮液的叶绿

\* 攻关课题, 76-04-06。

接受日期: 1990年6月14日。

素  $a$  浓度是利用非萃取法测定的<sup>1)</sup>, 海水样品取自实验水域的表层水, 叶绿素  $a$  浓度为  $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ , 使用混合纤维素酯微孔滤膜 ( $\phi 60$ , 孔径  $0.45\ \mu\text{m}$ ) 进行过滤。它们的消光系数是应用日本的 UV-260 型分光光度计, 以  $10\text{nm}$  间隔, 借助于  $10\text{cm}$  的光路径测得的, 参考 Lorenzen 的计算方法<sup>2)</sup>。计算结果  $1\text{mg}$  叶绿素  $a$  衰减系数  $K_c = 0.0148\text{m}^{-1}$ , 海水消光系数  $K_w = 0.0654\text{m}^{-1}$ 。

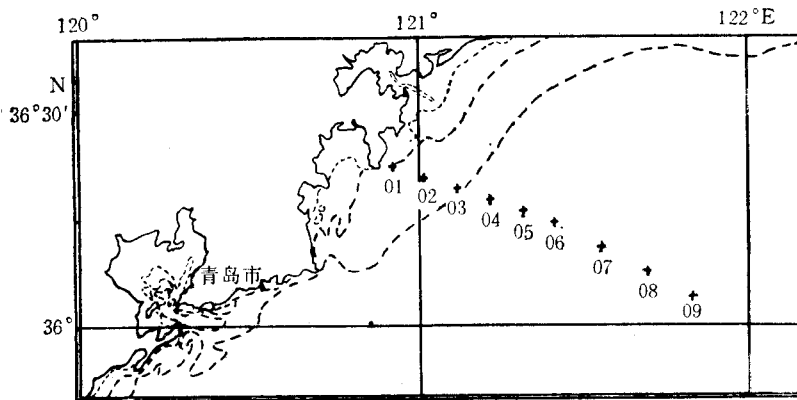


图 1 千里崖海域光学观测站

Fig.1 Optical observation stations in Qianliya waters in middle Yellow Sea

## 二、结果与讨论

### 1. $K_d$ 在遥感和初级生产力中的应用

表 1 中的各站  $K_d$  值均为不同时间内的 13 次测量平均值。该值由辐照度值随深度变化可十分容易的直接计算出。况且,  $K_d$  与海水固有光学特性单位 ( $\text{m}^{-1}$ ) 相同<sup>[3]</sup>, 因此, 在水光学应用中经常被测量。

在遥感应用中,  $K_d$  值的重要作用在于它与 90% 光子穿透深度有关。假若海水不存在层状结构,  $1/K_d$  深度, 即光学深度内其光子后向散射出海面的占 90%; 而大于  $1/K_d$  深度上的光子仅占 10%<sup>[4]</sup>。因此,  $K_d$  值可用来估算遥感传感器观测海洋的深度。计算结果表明, 实验水域的光学深度变化范围为  $2.3\text{--}8\text{m}$ , 平均光学深度  $1/\bar{K}_d$  约等于  $4.8\text{m}$ , 由此推算出, 该水域实际遥感观测海水深度约为  $5\text{m}$ 。

在海洋初级生产力方面,  $K_d$  值也相当重要。因为, 光合作用实际上是一种量子过程, 该过程把光合作用的可用辐射能  $E_q(\lambda)$  经  $E_q(\lambda) = \lambda E_d(\lambda)/hC$  转化为量子。式中,  $C$  为光速;  $h$  为 Planck 常数。光合作用总辐射能 ( $PAR$ )<sup>[4]</sup> 则为:

$$PAR(Z) = \int_{350}^{700} E_q(\lambda) d\lambda.$$

所以,  $PAR(Z)$  实际测量值是光波长  $350\text{--}700\text{nm}$  撞击在深度  $Z$  上单位面积、单位时间的量子数(见表 1)。

1) 杨生光, 叶绿素  $a$  与光密度的关系。

2) Lorenzen, C.N., Extinction of light in the ocean by phyto plankton.

表 1 千里崖水域各站  $K_d$  测量值Tab.1 Observed quantities of  $K_d$  from stations in Qianliya waters in middle Yellow Sea

站号	序号	辐照度	Z(m)	$K_d(m^{-1})$	$1/\bar{K}_d$	站号	序号	辐照度	Z(m)	$K_d(m^{-1})$	$1/\bar{K}_d$	
01	1	166	0			02	6	120.0	0			
	2	83	2.5	0.27			7	60.0	2.5	0.28		
	3	41.5	4.1	0.43	2.3		8	30.0	0.5	0.12		3.9
	4	16.6	6.3	0.42			9	12.0	12.5	0.25		
	5	1.6	10.0	0.60			10	2.1	16.9	0.37		
03	11	92.2	0			04	16	53.2	0			
	12	48.3	7.9	0.08			17	26.6	7.1	0.10		
	13	23.6	15.1	0.13	5.9		18	13.6	13.3	0.11		6.5
	14	9.5	17.7	0.24			19	5.6	18.6	0.17		
	15	1.0	21.9	0.23			20	0.54	28.5	0.24		
05	21	74.5	0			06	26	43.5	0			
	22	37.5	5.5	0.12			27	21.4	5.5	0.13		
	23	19.6	11.5	0.11	6.7		28	10.7	14.8	0.08		8.0
	24	7.6	19.3	0.12			29	4.46	25.8	0.10		
	25	0.74	28.4	0.75			30	4.43	33.1	0.19		
07	31	71.2	0									
	32	36.1	4.1	0.16								
	33	18.4	11.4	0.09	6.9							
	34	7.1	21.4	0.09								
	35	0.71	33.7	0.24								

辐照度单位:  $\times 10^{15}$  Quanta  $cm^{-2} \cdot s^{-1}$ 。

而向下量子衰减系数定义为:

$$K_q = -d(\ln[PAR(Z)])/dZ$$

所以  $K_q$  与  $K_d(\lambda)$  有一定的关系。由  $K_d(\lambda)$  测量可推算出光合作用辐射能。其次,由表 1 看出,实验水域的真光层实测深度为 10.0—33.7m,该值也可由 0.01 的自然对数除  $1/\bar{K}_d$  (设真光层均匀)估算出。总之,目前  $K_d$  在遥感和初级生产力等方面均得到很好的应用。

## 2. 千里崖海域真光层光衰减的特征

图 2 给出了千里崖水域垂直断面站(01—07)的光衰减分布。由图 2 看出,  $K_d$  有如下分布特征:(1)光衰减随深度增加而增加;(2)靠岸越近,衰减越大,而且垂直变化也越大;(3)该水域垂直衰减系数的分界线走向基本上与海底地形走向相一致。

以上分析看出,实验水域真光层内层状结构明显,光的垂直衰减除与海水中影响光衰减的物质成分有关外,还间接与海底地形,以及与地形相联系的悬浮物和沉积物输运等因素有关;再加上潮汐、风生湍流等混合搅拌,多种有机、无机颗粒的相互混合和叠加,给水色遥感的定性、定量解释带来相当大的困难。

## 3. 千里崖海域真光层内主要物质对光衰减作用的定量估计

在此仅对影响光衰减的主要物质成分——纯水、浮游植物及其它悬浮和溶解物质的

光衰减作用进行定量估计。

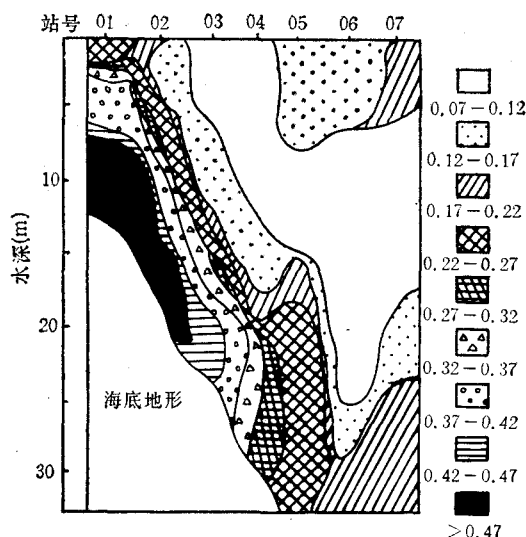


图2 垂直断面站  $K_d(m^{-1})$  分布

Fig.2 Distribution of the attenuation coefficient  $K_d(m^{-1})$  in the vertical section stations in Qianliya in middle Yellow Sea

虽然，海水中的光衰减受到多种因素影响但光衰减仍可表示为：

$$-K_d Z = \ln E_z/E_0 \quad (3.1)$$

式中， $K_d$  为辐照度向下垂直衰减系数； $Z$  为光穿透的深度区间(单位 m)； $\ln E_z/E_0$  为深度 0 和  $Z$  上光辐照度比的自然对数。

光穿透整个真光层时，其辐照度降至海面光辐照度的 1%，所以，方程(3.1)可改写为：

$$-K_d Z = -4.605 \quad (3.2)$$

考虑到真光层中的各主要物质成分对光衰减的贡献，方程(3.2)又可改写为<sup>[6]</sup>：

$$K_d Z_{eu} = K_w Z_{eu} + K_c C_T + K_x Z_{eu} X = 4.605 \quad (3.3)$$

式中， $K_w$  为海水消光系数 ( $0.0654m^{-1}$ )； $K_c$  为 1mg 叶绿素的消光系数 ( $0.0148m^{-1}$ )； $K_x$  为溶解和悬浮颗粒物质的消光系数； $Z_{eu}$  为真光层深度(单位 m)； $C_T$  为真光层内总叶绿素浓度； $X$  为溶解和悬浮物质的平均浓度。利用方程(3.3)和表 2 中的数据，可以定量估算出水、浮游植物、溶解和悬浮颗粒物质对光的衰减作用。

由 0.01 的自然对数确定的真光层总衰减(-4.605)减去水 ( $K_w Z_{eu}$ ) 与浮游植物的衰减 ( $K_c C_T$ )，得到溶解和悬浮物质对光的衰减 ( $K_x Z_{eu} X$ )。实验水域不同深度的真光层内各物质成分对光衰减的贡献由各物质的衰减量 ( $K$ ) 与总衰减 ( $K_T$ ) 之间的比值反映出(如图 3 所示)。由图 3 看出，在 40m 真光层深度内， $K_w Z_{eu}/K_T$  与真光层深度的关系为线性关系； $K_c C_T$  随着真光层的深度增加呈对数减少。统计结果表明，实验水域水的衰减约占 25%，浮游植物衰减约占 6%，而黄色物质和悬浮颗粒对光衰减约占 69%。黄色物质和悬浮颗粒占如此大的比例，其原因在于该水域地处黄海中部，有大沽河、五龙河、

表 2 在  $Z_{eu}$  内各主要物质对光衰减的贡献Tab.2 Effect of the main substance in  $Z_{eu}$  on light attenuation in Qianliya in middle Yellow Sea

站号	$Z_{eu}$ (m)	$C_0$	$Z_{eu}$ 内 chl. 含量 (mg/L)	$K_W \cdot Z_{eu}$	$K_C \cdot C_T$	$K_X \cdot X \cdot Z_e$	$\frac{K_W \cdot Z_{eu}}{K_t}$	$\frac{K_C \cdot C_T}{K_t}$	$\frac{K_X \cdot X \cdot Z_e}{K_t}$
1	10.6	0.87	4.97	0.693	0.074	3.838	0.151	0.016	0.824
2	16.4	0.10	3.40	1.073	0.051	3.483	0.232	0.011	0.756
3	22.0	0.48	3.57	1.432	0.053	3.125	0.312	0.012	0.678
4	28.5	0.41	3.04	1.864	0.045	2.696	0.404	0.011	0.600
5	26.7	0.96	3.14	1.746	0.046	2.812	0.327	0.013	0.611
6	33.1	0.28	2.32	2.165	0.034	2.406	0.072	0.08	0.522
7	33.9	0.26	2.23	2.217	0.033	2.354	0.482	0.07	0.610

$C_0$  为海面叶绿素  $a$  浓度;  $C_T$  为真光层内五点深度上,即海面、海面辐照度的 50%,25%,10%和1%的深度上的叶绿素  $a$  浓度总和;  $K_t$  为各主要物质对光衰减的总贡献。

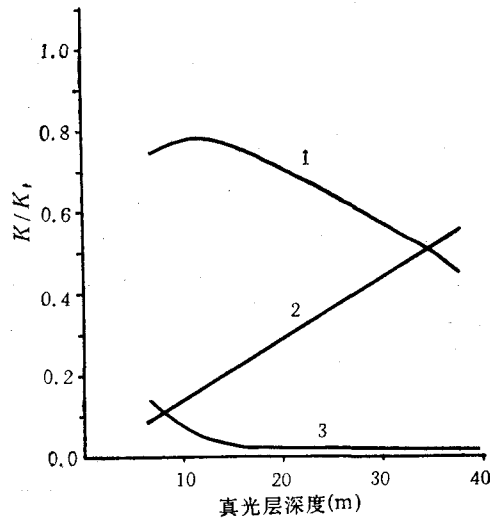


图 3 千里崖水域真光层内浮游植物、水、黄色物质和悬浮泥沙对光衰减的贡献

Fig.3 Effect of phytoplankton, water, yellow substance and tripton in  $Z_{eu}$  on light attenuation in Qianliya waters in middle Yellow Sea

1.黄色物质和非生物颗粒;2.水;3.浮游植物。

乳山河、老母猪河和黄垒河等内陆河常年不断地往该水域输入大量悬浮物质和溶解物质。

#### 4. 垂直衰减系数 $K_t$ 与真光层深度 $Z_{eu}$ 的关系

真光层也称有光层或光合层,它的厚薄与太阳高度、海水的固有光学特性,以及海表层的辐射几何学有关。然而,大部分生物学研究,对于给定的水团,通常把真光层看作是一个恒量,与昼光状况无关。我们利用表 3 中所给出的现场观测资料,统计分析了真光层深度  $Z_{eu}$  与海水透明度  $D$  的关系,得到:

$$Z_{eu} = 3.2D \quad (4.1)$$

标准偏差为 0.30。而向下垂直衰减系数  $K_d$  与  $D$  的关系:

$$K_d D = 1.6 \quad (4.2)$$

标准偏差为 0.24。将(4.2)式代入(4.1)式,得到:

$$Z_{eu} = \frac{5.1}{K_d} \quad (4.3)$$

表 3  $Z_{eu}, D$  和  $K_d$  观测值

Tab.3 Observed quantities of  $Z_{eu}, D$  and  $K_d$  in Qianliya in middle Yellow Sea

站 位	水深(m)	$Z_{eu}$ (m)	$D$ (m)	$K_d$ ( $m^{-1}$ )
1	13	10.6	2	0.43
2	18	16.4	2	0.21
3	22	22.0	5	0.28
4	30	28.5	7.5	0.16
5	33	26.7	10	0.17
6	34	33.1	13	0.14
7	41	33.9	14	0.14

由以上统计结果可以看出,利用简单的海水透明度 ( $D$ ) 的测量,就能计算出真光层深度、 $K_d$  值以及  $K_d$  与  $Z_{eu}$  的关系。

在此顺便指出,(4.2)式的统计结果与许多研究者得到的结果相似。例如, Poole 和 Atkins 在英吉利海峡, Clark 在加利比东部水域测定的  $K_d D = 1.7$ ; Graham 在东北太平洋获得  $K_d D = 1.6$ ; Steemann Nielsen 在丹麦沿岸水域获得  $K_d D = 1.85$ , 他认为所有海水类型均能满足此关系<sup>[1-3,6,7]</sup>。

### 三、结 语

根据以上计算、分析和讨论,可以得出如下几点结论。

1. 辐照度衰减系数  $K_d$  是水光学的重要参数之一,在遥感中它可用来估算遥感海洋深度;在海洋初级生产力研究方面,它可用来推算真光层深度和光合作用的可用辐射能。

2. 实验水域真光层光衰减的明显特征为,离岸越近,  $K_d$  值越大,随着真光层深度增加  $K_d$  值变化也越大,同时,  $K_d$  分布基本上与海底地形走向相一致。

3. 近岸水域光衰减受陆源物质影响较大,统计结果表明,黄海中部(千里崖)水域水介质对光衰减约占 25%,浮游植物约占 6%,而溶解和悬浮颗粒(包括生物碎屑)约占 69%。水本身对光衰减是随着真光层深度增加而线性增加;浮游植物对光衰减作用是随着真光层深度增加而对数减少;溶解和悬浮颗粒物质对光衰减作用受陆源物质影响较大。

4. 虽然该水域受陆源物质影响较大,但真光层深度、光垂直衰减系数和海水透明度三者之间仍存有一定的统计相关,此相关可利用简单的海水透明度测量计算出,并具有一定的普遍意义。

5. 近岸水域光衰减受多种因素制约,因此水色解释有一定困难。

## 参 考 文 献

- [1] Baker, K. S. and Smith, R. C., 1976, Quasi-inherent characteristics of the diffuse attenuation coefficient for irradiance, *Soc. Photo-opt. Instrum. Eng.*, **208**: 60—63.
- [2] Clarke, G. L., 1941, Observations on transparency in the southwestern section of the North Atlantic Ocean, *J. Mar. Res.*, **4**: 221—246.
- [3] Graham, J. J., 1969, Secchi disc observations and extinction coefficient in the Central and Eastern North Pacific Ocean, *Oceanogr.*, **11**: 184—191.
- [4] Gordon, H. R. and Morel, A., 1983, *Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Imagery*, New York, Berlin Heidelberg Tokyo, p. 37.
- [5] Hjernslev, H. K., 1979, Water color and its relation to primary production, *Boundary-Layer Meteorology*, **18**(1980): 203—220.
- [6] Poole, H. H. and Atkins, W. R. G., 1929, Photoelectric measurements of submarine illumination throughout the year, *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, **16**: 297—324.
- [7] Steemann Nielsen, E., 1975, *Marine Photosynthesis, with Special Emphasis on the Ecological Aspects*, Elsevier, Amsterdam, p. 123.
- [8] SCOR-UNESCO Working Group 17, 1966, Determination of photosynthetic pigments in sea water, 1966: 1—6.

## THE LIGHT ATTENUATION OF EUPHOTIC ZONE IN QIAN-LIYA WATERS IN MIDDLE YELLOW SEA

Yang Shengguang

(First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266003)

### ABSTRACT

Recently, the study of light attenuation in euphotic zone is emphasized increasingly due to a increasing interest in water color remote sensing and ecological study.

The application of the coefficient of light attenuation in euphotic zone in remote sensing and primary production are discussed by means of observed optical data in Qianliya waters in middle Yellow Sea, and optical measurements in the laboratory.

Analyses of light attenuation in tested waters show that the slight attenuation coefficient is related to topography, generally the nearer to the shore, the bigger the  $K_d$  value, and with the increase of the depth in euphotic zone,  $K_d$  values increase too.

The effect of the main matter components on light attenuation is estimated as follows:

The percentages of light attenuation for phytoplankton, water itself, and tripton are 6%, 25%, and 69% respectively, which is much affected by terrigenous matter near coastal waters, but statistical dependences can still be found among the depth of euphotic zone, the coefficient of light attenuation, and water transparency.

Due to light attenuation in near coastal waters being controlled by many factors, so it is difficult to interpret quantitatively or qualitatively the water color remote sensing.

**Key words** Euphotic zone, Attenuation, Remote sensing.