

实验室测定浮游藻类光谱 反射率 R_{∞}^{**} 的方法*

平仲良 臧汝波
(中国科学院海洋研究所)

地物的光谱反射率，是遥感图象分析的基础和依据。同样，藻类的光谱反射率 R_{∞} ，是遥感海洋叶绿素的基础和依据，也是影响海洋光谱特性的重要因素。

在海面上，用野外分光光度计测定某种藻类、某种浓度的光谱反射率是最直接的方法。但是，海上测定受到气象、海况、太阳高度、船舶颠簸、仪器使用条件等多种因素的影响，实验数据分布离散，工作条件差。在实验室测定某种藻类样品的光谱透射率和光谱反射率，通过换算，计算出“无限深”海面上某种藻类；某一浓度的光谱反射率 R_{∞} ，与野外测定相比，是较为方便的，数据也是正确的。目前，应用的资料，很多是实验室测得的数据。本文以扁藻（叶绿素A）为例，介绍这种方法具体的测定过程。

一、样品的准备

将实验室培养的藻类样品，配制三种不同的浓度，放在分光光度计样品池内。由于扁藻的“负趋光性”，在测量过程中它逐渐地避开“光路”，致使原来样品池中均匀分布的藻类逐渐形成一条光线的通道。在每一波长处，透射率缓慢地不停地增加，因此得不到确定的数据和曲线。为解决此问题，我们将样品抽滤在滤纸上，三个浓度不同的样品，形成厚度不同的三张藻类薄膜，均匀地分布在滤纸上。用二块玻璃片（或有机玻璃片），将吸附样品的滤纸夹起来，便于插入分光光度计的样品架内应用。

二、样品光谱透射率T和光谱反射率R的测定

样品的光谱透射率T和光谱反射率R是在日本岛津QV-50型分光光度计上测定的。

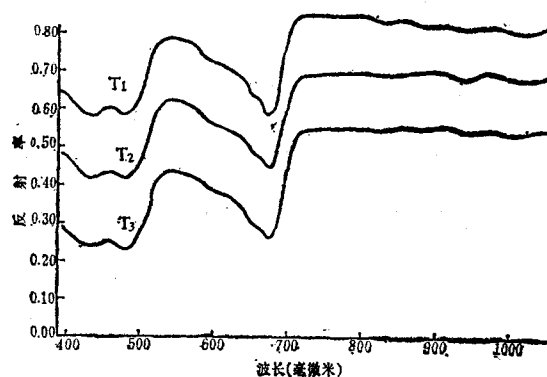


图1 扁藻三种浓度（叶绿素A浓度为67毫克/米³，134毫克/米³，201毫克/米³）的光谱透射率

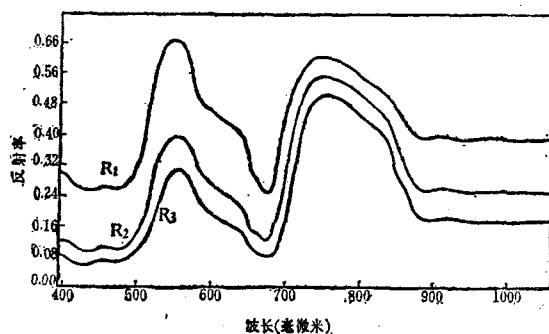


图2 扁藻三种浓度（叶绿素A浓度为67毫克/米³，134毫克/米³，201毫克/米³）的光谱反射率

* 本文得到吴超元先生指导。陈椒芬提供实验用样品扁藻。一并致谢。

** R_{∞} ：从光学角度来说，是无限深的海水的光谱反射率。

吸附样品的滤纸, 必须保持适当的潮湿度, 才能保持测定过程中数据的稳定。

扁藻三种浓度¹⁾的光谱透射率曲线示于图 1, 光谱反射率曲线示于图 2。

如图所示, 扁藻反射率曲线峰的位置, 正好是透射率曲线峰的位置。反射率曲线谷的位置正好是透射率曲线谷的位置。小峰的位置也一一对应。

在可见光区, 扁藻薄膜的透射率曲线、反射率曲线与陆生植物绿叶的相似。在红外区, 由于水的吸收率急剧增大, 扁藻薄膜的反射率曲线升高不多接着就逐渐下降, 略有波动后趋于定值, 不象陆生植物叶子反射率急剧地升高, 有明显的峰谷形状。

三、样品光谱回散射系数 b 和光谱吸收系数 a 的计算

由漫射材料的光学性质得:

$$P = \frac{(a-a')b + (b-b')(b'+f')}{(a'^2 - a^2) + 2a'(f'+b') - 2ab + (f'+b')^2} = 0$$

$$Q = \frac{(a+a')f' + (b+f')(b'+f')}{(a'^2 - a^2) + 2a'(f'+b') - 2ab + (f'+b')^2} = 0$$

$$R = \frac{b \sinh K}{(a+b) \sinh K + K \cosh K}$$

$$\log_{10} \frac{1}{T} = \log_{10} \frac{(a+b) \sinh K + K \cosh K}{K}$$

将 $K = [a(a+2b)]^{\frac{1}{2}}$ 代入得:

$$R = \frac{b \sinh [a(a+2b)]^{\frac{1}{2}}}{(a+b) \sinh [a(a+2b)]^{\frac{1}{2}} + a(a+2b)^{\frac{1}{2}} \cosh [a(a+2b)]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{1}{T} = \frac{(a+b) \sinh [a(a+2b)]^{\frac{1}{2}} + a(a+2b)^{\frac{1}{2}} \cosh [a(a+2b)]^{\frac{1}{2}}}{[a(a+2b)]^{\frac{1}{2}}}$$

化简得:

1) 扁藻样品叶绿素A的浓度是在国产72型分光光度计上测定的。

$$T = \frac{QK + Pe^{-(a'+b'+f')x} b \sinh Kx}{(a+b) \sinh Kx + K \cosh Kx}$$

$$-(Q-1)e^{-(a'+b'+f')x}$$

$$R = \frac{PK e^{-(a'+b'+f')x} + Qb \sinh Kx}{(a+b) \sinh Kx + K \cosh Kx}$$

$$P = \frac{(a-a')b' + (b-b')(b'+f')}{(a'^2 - a^2) + 2a'(f'+b') - 2ab + (f'+b')^2}$$

$$Q = \frac{(a+a')f'}{(a'^2 - a^2) + 2a'(f'+b') - 2ab + (f'+b')^2}$$

式中, $K = [a(a+2b)]^{\frac{1}{2}}$; 当材料厚度 x 为无限大时, $T' = 0, R_{\infty} = Qb/(a+b+K) - P$ 。式中, a 为漫射光吸收系数; a' 为入射光吸收系数; b 为漫射光回散射系数; b' 为入射光回散射系数; f 为漫射光前向散射系数; f' 为入射光前向散射系数; T 为透射率; R 为反射率; x 为光学材料的厚度; P 、 Q 、 K 为中间变量。

因为浮游藻类的直径 (8—25 μ m) 很小, 同时, 浮游藻类在海洋中分布的位置和方位完全是随机的, 因此得: $b+f=b'+f'$, $b=f$, $b'=f'$, $b=b'=f=f'$, $a=a'$ 。

并设 $x=1$, 得:

$$b = \frac{2R}{\sqrt{[(1-R)^2 - T^2][(1+R)^2 - T^2]}} \ln \frac{1}{2T} \left\{ \sqrt{[(1-R)^2 - T^2][(1+R)^2 - T^2]} + 1 - R^2 + T^2 \right\}$$

$$a = \sqrt{\frac{(1-R)^2 - T^2}{(1+R)^2 - T^2}} \ln \frac{1}{2T} \left\{ \sqrt{[(1-R)^2 - T^2][(1+R)^2 - T^2]} + 1 - R^2 + T^2 \right\}$$

用上述二式可以求得每一浓度、每一波长处扁藻的回散射系数和吸收系数。用国产441B-III型电子计算机进行计算。

四、本底水的光谱数据

本底水的光谱吸收系数和光谱回散射系数，在430—650nm波段，采用美国John E. Tyler和Dr. Raymond C. Smith 1968年在美国加利福尼亚湾南部海面上测得的数据。这是一种蓝色的清澈的海水，是典型的贫瘠海水。

五、光谱反射率 R_∞ 的计算

样品的光谱回散射系数 b 和光谱吸收系数 a 乘上一个浓度系数，与本底水相应的系数相加，就得到含某一浓度藻类的海水的光谱回散射系数 b 和光谱吸收系数 a 。由此，可以计算出“无限深”海水的光谱反射率 R_∞ 。

$$R_\infty = \frac{\left(\frac{b}{a}\right)}{1 + \left(\frac{b}{a}\right) + \sqrt{1 + 2\left(\frac{b}{a}\right)}}$$

四种浓度的光谱反射率曲线示于图3。

六、结论

1. 本文应用Duntley, S.O. 的漫射材料的光学理论，测定含浮游藻类的海水的光谱反射率 R_∞ 。由于大部分浮游藻类具有“趋光性”或“负趋光性”，悬液样品在测定过程中数据不稳。为克服这个困难，采用了薄膜样品，得

到了和悬液样品形状相似，但比悬液样品更精细的光谱透射率和光谱反射率曲线，并计算得到含叶绿素某一浓度的海水的光谱反射率 R_∞ 曲线。

2. 扁藻薄膜的光谱透射率曲线和光谱反射率曲线与陆生植物绿叶的十分相似，在波长550nm处，为最大值，在680nm处，为最小值。

如图3所示，清澈的海水的光谱反射率曲线在蓝区有较高的反射率 R_∞ ，叶绿素引起海水的光谱反射率在绿区升高，蓝区降低。叶绿素浓度愈高，这种现象愈为显著。

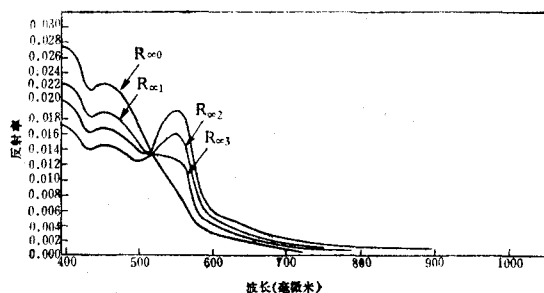


图3 四种浓度(叶绿素A浓度为0.112毫克/米³, 0.447毫克/米³, 0.78毫克/米³, 1.117毫克/米³)的光谱反射率

参 考 文 献

- [1] H.H.朱波夫, 1958. 海洋学常用表。
- [2] Eugeme T. Rabimowitch, 1951. Photosynthesis, Vol.2, Part 1, p. 686—717.
- [3] Duntley, S.O., 1942. J. Opt. Soc. Am. 32:61.
- [4] Duntley, S.O., 1942. Detection of Ocean Chlorophyll from Earth Orbit, p. 1—37.
- [5] Jerlov, 1976. Marine Optics, p. 52.
- [6] Jerlov, 1974. Optical Aspects of Oceanography, p.2—23.