

悬浮体的光密度*

范守志 金翔龙 潘忠正

(中国科学院海洋研究所)

悬浮体是一种物质的许多颗粒存在于另一种介质中构成的离散体系。它是自然界中物质存在的一种常见形态。因而测定悬浮物质的含量及其粒度组成特征,对于地质、生物、气象和海洋光学以及水利工程的研究是很有意义的。

光电测量法做为一种自动记录和易于同步观测的新技术已日益受到重视。它的基本原理是测定悬浮体的光密度,再换算出浓度。在这方面,国内外的研究者们自从五十年代以来就进行过若干实验研究^[1-8]。结果表明,在悬浮体含量低时,悬浮体的光密度 E 和含量 C 成正比,即有所谓比耳定律,比例系数依赖于测试对象;而在高含量下,正比关系不成立,实验曲线 $E-C$ 呈饱和和弯曲形态。因此,光密度 E 和含量 C 之间的函数关系值得从理论上加以探讨。

本文依据颗粒光学的定律,应用统计方法推导了光密度的近似公式。

设有一束强度 I_0 、截面积 S 的单色平行光射入悬浮体之中(图1)。

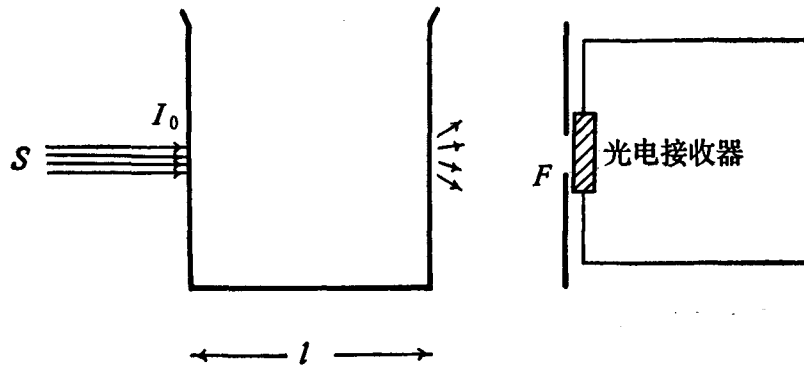


图1 基本原理

于是入射光通量是

$$F_0 = I_0 S \quad (1)$$

如果是清水,仪器接收到的光通量认为即是 F_0 。在含有悬浮体时,由于悬浮粒子对光的吸收和散射,透射光要减弱而且向各方发散。于是仪器接收到的光通量 F 就小于 F_0 ,可以写成

$$F = F_0 e^{-E} \quad (2)$$

其中

$$E = \ln(F_0/F) \quad (3)$$

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第634号,本文图件系李清同志清绘,谨致谢意。
本刊编辑部收到稿件日期:1978年5月30日。

称为仪器测到的光密度。

颗粒光学的研究表明^[9], 平行光场中的单个球粒子吸收和散射的光通量不是 $I_0\pi r^2$ 而是

$$f_0 = I_0\pi r^2 K(x), \quad (4)$$

这里 I_0 是入射光强, $x = 2\pi r/\lambda$, r 是粒子半径, λ 是光波在周围介质中的波长。

但是仪器的光系总是具有一定大小的接收角 β , 并且在满足一定的技术条件之下, 仪器的接受角对于位于仪器测量光场中的每一个悬浮粒子来说都是相同的。因此, 若照射到某粒子上的光强为 I , 则散射光中尚有一部分

$$f_\beta = \iint_{(\Omega)} df = I\pi r^2 \iint_{(\Omega)} j(x, \theta) d\Omega \quad (5)$$

指向仪器的接收范围 (Ω) , 式中 $j(x, \theta)$ 是散射函数 (图 2)。

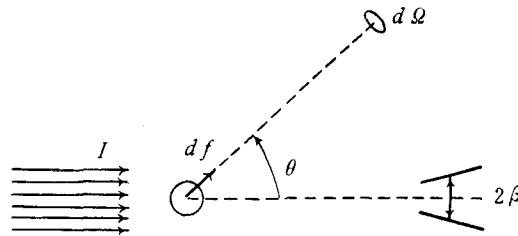


图 2 一次散射

因此, 在解释测量结果的时候, 应当认为单个球粒子的消光值不是 $I\pi r^2 K(x)$, 而是

$$f = f_0 - f_\beta = I\pi r^2 \left[K(x) - \iint_{(\Omega)} j(x, \theta) d\Omega \right] \quad (6)$$

记

$$\phi(x, \beta) = \iint_{(\Omega)} j(x, \theta) d\Omega \quad (7)$$

及

$$\varphi(x, \beta) = K(x) - \phi(x, \beta) \quad (8)$$

则

$$f = I\pi r^2 \varphi \quad (9)$$

因子 φ 的物理意义是粒子在测量光场中的有效消光截面与其几何截面之比。

对于由相同的粒子构成的悬浮体来说, 考虑到 β 角小, f_β 可以当成是平行光, 由图 3,

$$Sdl = -NSdl \cdot I\pi r^2 \varphi,$$

从而

$$I = I_0 e^{-Ql}$$

或

$$F = F_0 e^{-Ql} \quad (10)$$

其中

$$Q = N\pi r^2 \varphi \quad (11)$$

N 是悬浮粒子群的数密度。

悬浮体的含量(克/升)是

$$C = N \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \quad (12)$$

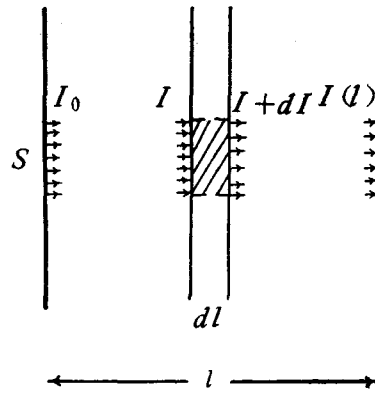


图3 一次散射消光

ρ ——粒子的物质密度。

由此可得光密度

$$E = Ql = \frac{3l}{4\rho r} C \quad (13)$$

若悬浮体颗粒有一粒度分布

$$dN = f(r)dr \quad (14)$$

则由同样的方法可得

$$F = F_0 e^{-Ql} \quad (10-1)$$

但

$$Q = \int_0^{\infty} \pi r^2 \phi f(r) dr \quad (11-1)$$

表 1

$x\beta$	$\phi(x, \beta)$	$x\beta$	$\phi(x, \beta)$	$x\beta$	$\phi(x, \beta)$
0.0	0.000	83	0.837	12.0	0.948
0.2	010	4.0	838	13.0	952
0.4	039	2	839	14.0	953
0.6	086	4.5	844	15.0	958
0.8	148	0.7	850	16.0	961
1.0	221	5.0	861	17.0	962
1.2	301	0.5	883	18.0	965
1.4	385	6.0	901	20.0	968
1.6	468	0.5	909	22.0	972
1.8	546	7.0	910	24.0	973
2.0	617	0.5	911	28.0	978
2.2	679	8.0	916	34.0	981
2.4	729	0.5	924	40.0	984
6.6	769	9.0	932	50.0	987
2.8	798	0.5	936	60.0	989
3.0	817	10.0	938	70.0	991
3.2	829	10.5	938	80.0	992
3.4	835	11.0	939	90.0	993
3.6	837	11.5	943	100.0	994

表 2

$\varphi \backslash \beta$ x	8°36'	5°44'	4°	2°52'	2°	1°43'	1°26'	1°09'	52'
10	1.653	1.859	1.965	2.019	2.050	2.058	2.065	2.070	2.074
12	521	765	905	1.981	024	035	044	053	059
14	408	672	844	942	1.999	014	027	038	046
16	321	582	782	902	975	1.994	011	025	036
18	260	498	718	861	950	974	1.995	013	026
20	223	423	655	819	925	954	979	001	018
22	203	358	593	776	899	933	964	1.989	009
24	196	304	533	732	872	912	947	977	002
26	193	262	477	688	844	890	930	965	1.996
28	190	231	425	644	815	867	913	953	985
30	183	209	377	600	786	842	895	941	977
32	172	196	335	557	757	820	877	928	969
34	158	188	299	516	726	795	859	915	961
36	143	185	268	476	696	770	839	901	952
38	130	183	242	438	666	744	819	887	943
40	120	182	222	403	635	719	799	872	934
42	113	180	207	370	605	693	779	857	925
44	109	177	194	340	575	667	758	842	915
46	107	171	187	312	545	641	737	827	905
48	107	163	182	287	517	615	715	811	895
50	105	155	179	265	489	589	694	795	885
52	102	145	178	247	462	564	673	779	877
54	098	136	176	230	436	539	651	762	864
58	087	119	175	205	387	490	608	726	842
60	082	113	174	196	364	467	586	712	830
65	075	104	167	181	313	412	534	670	801
70	074	101	155	175	271	362	484	627	771
80	062	094	123	172	212	281	393	542	709
100	050	070	098	147	171	191	257	391	581
125	040	056	079	101	165	169	181	256	432
150	033	048	068	095	133	161	168	188	312
200	026	036	051	066	094	104	143	166	187
300	017	024	033	045	065	071	092	102	159
400	013	018	024	034	049	054	064	086	102
500	010	014	020	027	039	044	052	064	091
600	008	012	016	023	032	037	044	054	070
800	006	009	012	017	023	028	033	040	053
1000	005	007	010	013	019	022	026	033	043
3000	002	002	003	005	006	008	009	011	015

dN 是单位体积悬浮体中半径在 r 到 $r + dr$ 中的颗粒数。

此时悬浮体的含量是

$$C = \int_0^{\infty} \frac{4}{3} \pi r^3 f(r) dr \quad (12-1)$$

光密度是

$$E = Ql = \int_0^{\infty} \pi r^2 \varphi l f(r) dr$$

或写成

$$E = \frac{3l}{4\rho R} C \quad (13-1)$$

这里

$$\frac{1}{R} = \int_0^{\infty} \frac{\varphi}{r} \cdot \frac{dC}{C} \quad (15)$$

dC/C 是粒径在 r 到 $r + dr$ 中的悬浮物质的百分含量。

量 R 具有长度的量纲。对比(13)和(15)两式知, R 的物理意义是悬浮体的等效光学粒径。

式(13-1)即是比耳定律的具体表达式。

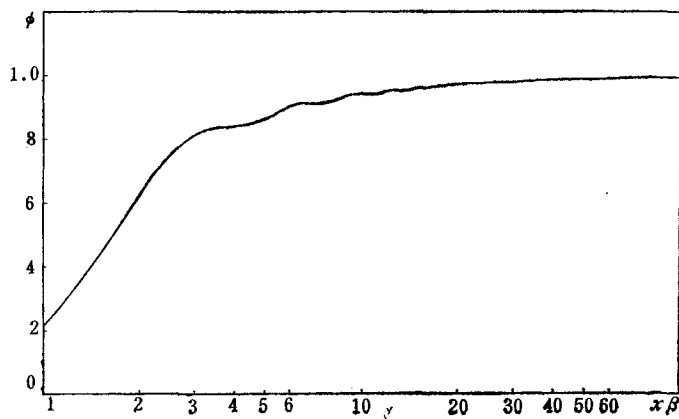


图 4 ϕ 曲线

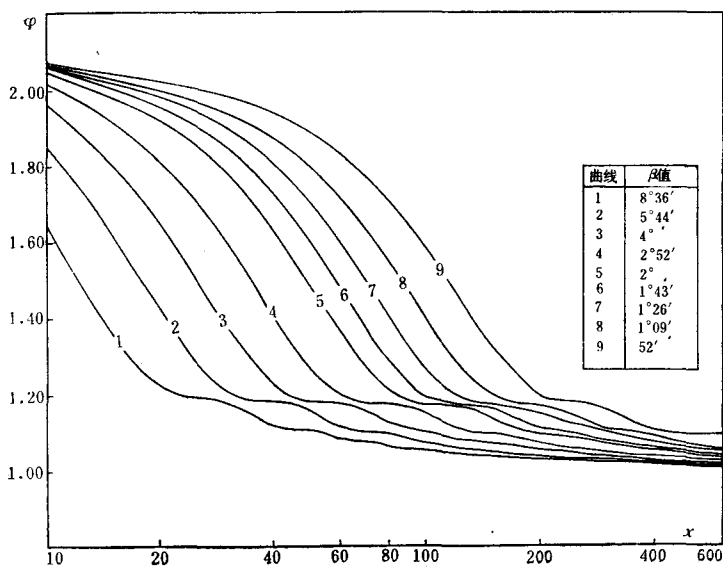


图 5 φ 曲线

R 的估算则牵涉到 φ 因子。在表 1 和表 2 中分别列出了 ϕ 和 φ 的数值, 在图 4 和图 5 中给出了相应的图形。在计算中, 用到了贝塞尔函数表^[2] 和下列公式^[9]

$$K(x) \approx 2 \left(1 + \frac{0.4}{x} \right)$$

和

$$j(x, \theta) = \frac{x^2}{4\pi} \left[2 \frac{J_1(x\theta)}{x\theta} \right]^2$$

$$\phi(x, \beta) = 1 - J_0^2(x\beta) - J_1^2(x\beta)$$

所得的结果表明, φ 的数值能在 1 和 2 之间变化。若轻取 $\varphi = 1$ 将会在结果的折算中给出偏高的 C 值。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院大气物理研究所, 1973. 激光测烟. 中国科学院大气物理研究所集刊 1:21—31 页.
- [2] Chistova, E. A., 1959. Tables of Bessel Functions. Pergamon Press.
- [3] Das, M., 1972. Mechanics of sediment suspension due to oscillatory water waves. in: Sedimentation. ed. & pub. by Hsien Wen Shen. Fort Collins, Colorado, 1972. Chapter 11, pp. 1—23.
- [4] Jerlov, N. & B. Kullenberg, 1953. The Tyndall effect of uniform mineral suspensions. *Tellus* 5(3): 306—307.
- [5] Rose, H. E., 1951. Relationship between the extinction coefficient and the particle size. *Nature* 168(4279): 784—785.
- [6] Архангельский, М. и А. Букина, 1955. Физические основы оптического метода измерения концентрации речных наносов. *Изв. АН СССР. сер. Геофи.* 1955 (5): 435—444.
- [7] Иванов, К. И., 1950. Изменение коэффициента ослабления света в зависимости от изменения диаметров взвешенных в воде частиц. *Д. АН СССР.*, 74 (5): 925.
- [8] Иванов, А. и А. Хайруллина, 1966. Об определении коэффициента экстинкции мутных сред. *Изв. АН СССР. сер. Физика атмос. и океа., II* (7): 721—728.
- [9] Шифрин, К., 1951. Рассеяние света в мутной среде. Госу. Тех-Теор. Литер. Изд-во. Москва-Ленинград. стр. 140—150.

THE OPTICAL DENSITY OF THE SUSPENDED PARTICLES IN WATER*

Fan Shouzhi Jin Xianglong and Pan Zhongzheng

(Institute of Oceanology, Academia Sinica)

ABSTRACT

The formula of the optical density of the suspended particles is obtained by means of the calculation of the single scattering. A factor φ , which is the ratio of the effective cross-section for scattering of a particle to its geometrical cross-section, and a parameter R , which may be called the average optical radius of the suspended particles, are shown to be necessary for determining the concentration of the suspended particles from its optical density measured.

*Contribution No. 634 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.