

混浊水体的反射率及辐射平衡的一个观测分析*

陈家宜 吕乃平
(北京大学地球物理系)

提 要

本文分析了1959年3月至8月长江水面上及重庆蒸发实验站100米²蒸发池上的反射率和辐射平衡观测资料。

混浊水体的反射率随含沙量的增加而增加，含沙量愈大增加趋于缓和。无浪时100米²蒸发池的反射率与我国官厅水库和美国海夫纳湖面的反射率十分相近。

文中计算了春夏季节各种天气条件及含沙量情况下江水的辐射平衡，并与100米²蒸发池及草地的辐射平衡进行了比较。

一、引 言

水面辐射平衡是下垫面热量平衡研究中的重要问题之一，它在相当大的程度上与水面反射率特性有关。水面反射率受到水体和水面特性的影响，例如波浪、水的混浊度等等。因而，必须对不同水面的反射率进行实验研究才能对水体辐射平衡规律得到更精确的结果。

文献[1—6]分别对水库、湖泊和海洋水面的反射率及辐射平衡进行了理论与实验研究。但是关于混浊水体的研究尚没有进行过，而它对于计算江河或不大的湖泊之热量平衡是必须的。

本文采用了北京大学地球物理系等单位于1959年3月至8月间在重庆漂浮蒸发实验站及重庆蒸发站观测的资料，分析了长江水面不同混浊度(文中均以含沙量表示)情况下的水面反射率和辐射平衡。为了比较，也简单分析了100米²蒸发池的情形。

二、实验方法

在重庆漂浮蒸发实验站的长江水面上和蒸发实验站的草地上及100米²蒸发池上分别观测辐射平衡(长波辐射除外)分量。两站均采用直接辐射表，天空辐射表和反射率表进行测量。所使用的辐射仪器在实验期间经常与备用的直射表(由埃斯川姆绝对日射仪校准过)比较、校准;所以观测记录可靠。

江面反射率的观测是在漂浮蒸发站的木筏上进行，木筏为12米长的等边三角形，置于长江鲁家沱之迴水区内，筏面与水面平齐，离岸约50米。木筏的位置及仪器的安装见图1。反射率表安装在木筏的一个尖角上，感应部分伸出木筏头部4米，离水面高70厘米。为了解仪器阴影及木筏本身对于测量水面反射率的影响，在不同太阳高度角下，做了

* 本文1964年8月10日收到。

反射率表安装高度和反射率关系的实验。试验时, 仪器分别在离水面 100, 70, 50, 30 厘米各高度上往返移动观测。比较结果表明: 100 厘米高度上观测到的平均反射率¹⁾较 70 厘米高度测到的高 0.5% (反射率的相对值), 而比 50 厘米和 30 厘米高度测到的分别高 3.3% 和 4.8%。在极端情况下(太阳高度角大) 100 厘米处比其他三个高度处分别偏高 2%, 5%, 9%。这可能为仪器和支撑用竹杆的阴影所致。100 厘米和 70 厘米高度的观测结果很接近, 因而将仪器安装在 70 厘米高度上是合适的。100 米²蒸发池上反射率的观测与木筏上的情况相同, 反射率表伸向池中心, 离水面高 70 厘米。不同高度的观测结果相比较得到与木筏的情况相同的结论, 故选 70 厘米做观测高度同样有代表性。

我们曾用 A. Ångström 长波绝对辐射仪进行了十五次测量, 并用 A. Ångström^[7] 经验公式(分别选用两种系数)和 Д. Брент^[7] 经验公式进行计算。由于重庆地面比较潮湿, 水汽含量大, 观测仪器的使用受到很大限制, 并且使测量结果的精确度受到一定影响。我们选用 A. Ångström 经验公式进行计算, 表达式为:

$$F = (1 - \alpha\omega)[\sigma T^4 - \sigma T_w^4] + (1 - \alpha\omega)[\sigma T^4(A + B \times 10^{-\alpha})] \quad (1)$$

其中, α 是云量订正系数, 高云 $\alpha = 0.20$, 中云 $\alpha = 0.61$, 低云 $\alpha = 0.71$, A, B, C 是实验系数, 选用 H. M. Bolz 及 G. Falckenberg 给出的结果, $A = 0.180, B = 0.250, C = 0.126$ 。 T 是 2 米高空气绝对温度; e 是 2 米高水汽压; T_w 是下垫面绝对温度; ω 是云量(总云量 = 1); $\sigma = 8.26 \times 10^{-11}$ 卡/厘米²·度·分⁴, 为斯蒂芬-波兹曼常数。

公式(1)计算的结果比测量值偏高 35%, 但是, 在官厅水库水面上曾用仪器进行了多次实测, 和公式(1)的计算值十分相近^[8]。虽然, 由于两个地区的自然条件不同, 将会引起长波有效辐射值的一定差别, 但重庆地区的测量值偏低较多, 我们认为这是由于仪器的测量误差所造成的。因此, 采用公式(1)进行计算是比较合适的。

三、水面短波反射率

水面短波反射率与太阳高度角、云量、云状、水面粗糙度(波浪等的作用)、水的混浊度以及大气的透明度等有关。文献[1]曾分别对水面直接辐射的反射率, 散射辐射的反射率以及由浪花和水分子引起的反射作用进行了理论探讨, 并且给出了水面反射率随风速变化的经验关系。在文献[2—6]中先后进行了海洋或湖泊水面反射率及辐射平衡的关系研究。到目前为止, 尚缺乏水体的混浊度对水面反射率影响的实验资料。由长江水面观测结果知道, 江水的含沙量对水面反射率有很大的影响。

鲁家沱之江面上风速较小, 水面平静无浪, 但江水的含沙量随涨水及退水而变化。在前述观测期间, 我们选择了晴天、曇天、阴天以及不同含沙量情况下进行了反射率测量。

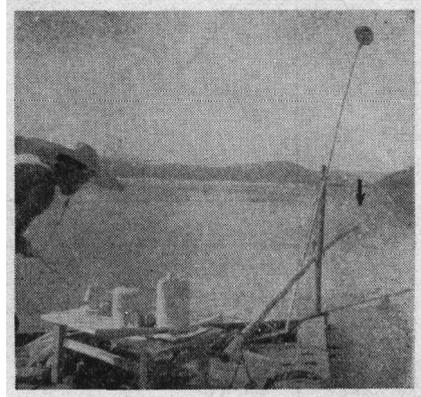


图 1 反射率表在木筏上的安装
(箭头处为反射率表)

1) 指对不同太阳高度角下反射率的算术平均。

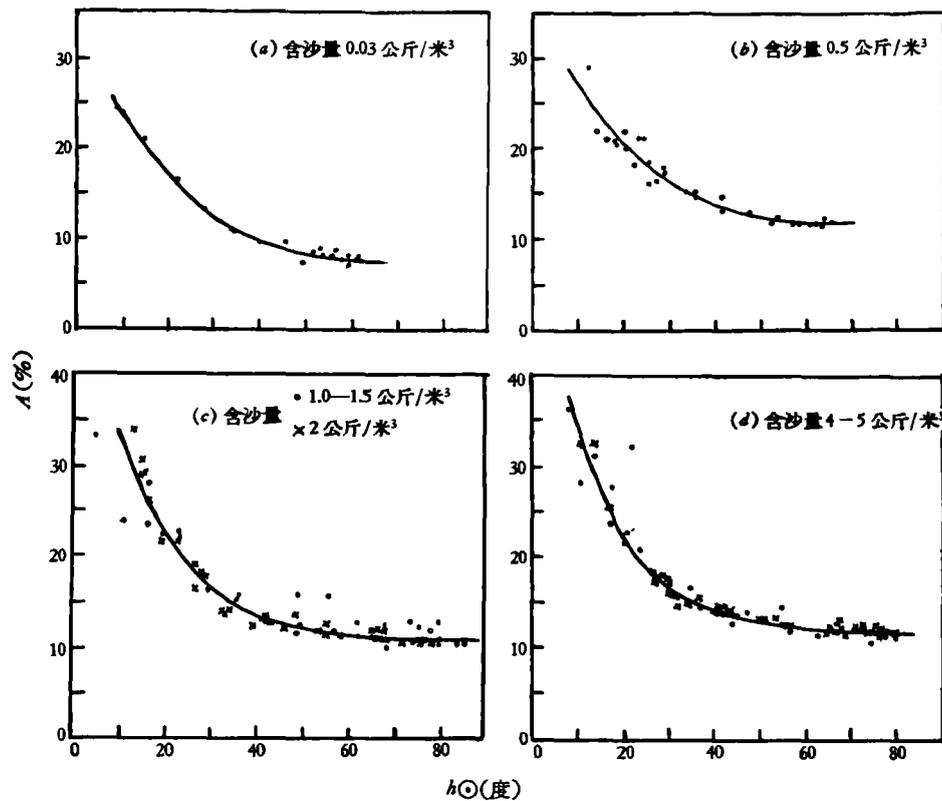


图 2 晴天时江面反射率随太阳高度角的变化

表 1 反射率随太阳高度角的变化¹⁾

观测 场地	云及 日光	含沙量 (公斤/ 米 ³)	太 阳 高 度 角 (h_{\odot})									反射率 ²⁾ 平均值
			10°	15°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	
草地	晴☉ ³		0.227	0.225	0.236	0.205	0.177	0.172	0.168	0.165	0.164	0.202
100米 ³ 蒸发池	晴☉ ³	清水	0.203	0.160	0.130	0.091	0.070	0.063	0.060	0.060	0.060	0.099
长 江 水 面	晴 (☉ ³)	0.03	0.233	0.202	0.173	0.124	0.098	0.084	0.077	0.077	0.077	0.127
		0.50	0.273	0.264	0.210	0.163	0.136	0.123	0.115	0.115*	0.115*	0.168
		1—2	0.350	0.271	0.224	0.170	0.138	0.124	0.117	0.113	0.113	0.180
		5	0.353	0.281	0.227	0.173	0.149	0.134	0.125	0.120	0.119	0.187
长 江 水 面	多云 (☉ ³) (☉ ³)	0.03	0.208	0.183	0.162	0.130	0.108	0.094	0.085	(0.085)	(0.085)	0.127
		1—2	0.246	0.224	0.203	0.168	0.145	0.132	0.123	0.120	0.119	0.165
		3—3.5	0.282	0.252	0.222	0.177	0.152	0.138	0.132	0.130	0.130	0.180

1) 该数值略有偏高,可能是由观测误差所致。
2) 为简便计算,这里是取表列各太阳高度角的算术平均值。

图 2 为晴天不同含沙量时水面反射率随太阳高度角之变化。表 1 中列举了晴天和曇天不

同含沙量时水面反射率随太阳高度角的变化以及晴天 100 米² 蒸发池和浅草地的反射率和太阳高度角的关系。为了便于比较,图 3 综合给出了 Fresnel 的理论曲线,我国官厅水库^[8]和美国的海夫纳湖^[11]在晴天、无浪、清水时的典型实验结果,以及 100 米² 蒸发池、浅草地和我国长江含沙量为 0.03 公斤/米³ 和 5.0 公斤/米³ 时江面反射率曲线。这些图和表说明,晴天时混浊水体反射率有如下特点:

(1) 混水的水面反射率随水体混浊度增加而加大,例如晴天含沙量为 5.0 公斤/米³ 时的平均反射率相当于含沙量为 0.03 公斤/米³ 时的 147%;

(2) 太阳高度角大于 10° 时,混水面反射率均大于清水;

(3) 含沙量较小时(小于 0.5 公斤/米³),反射率随含沙量增加而很快加大,含沙量较大时增加较弱。例如,含沙量从 0.03 公斤/米³ 增加到 0.5 公斤/米³ 时,反射率增大 4—5%,而含沙量从 0.5 公斤/米³ 增至 5.0 公斤/米³ 时,反射率只增大 1—2%。

(4) 含沙量愈大,反射率随太阳高度角变化曲线和草地的反射率曲线愈接近。这表明,含沙量愈大,混浊水体的反射愈接近漫反射。

Fresnel 理论曲线与清水面反射率随太阳高度角之变化曲线有差别,太阳高度角大时,理论值小于观测值;太阳高度角低时,理论值大于观测值。自然,它与混水面反射率曲线偏离更远,不能代表混水之情形。

当含沙量相同,在低太阳高度角时,曇天水面反射率小于晴天,太阳高度角增加时,稍大于晴天,平均反射率相近。这和清水曇天时的规律相同。曇天时混浊水面反射率特点和上述晴天时特点类同。

当全天布满中云或低云时,水面反射完全是散射辐射引起的。E. R. Anderson (引自文献[1])在美国海夫纳湖上的观测以及 N. M. Neiburger^[4]的观测结果表明,阴天水面反射率仍然与太阳高度角有关,但反射率随太阳高度角之变化比晴天时小。我们以官厅水库和 3 月 31 日长江水面观测及 5 月 11 日、12 日 100 米² 蒸发池和 6 月 25 日、27 日江面观测为例,得到阴天时反射率与太阳高度角的关系如图 4 a, b 所示。图 4 b 中反射率随太阳高度角有微弱变化,其变化范围在 5—15% 之内。图 4 a 中反射率与太阳高度角无关。其原因是 3 月 31 日江面观测时全天布满低云(Scop),云层厚,而且为混水。这两个因素都削弱了反射率和太阳高度角的关系。在官厅水库清水情形下的实验也表明,阴天云层薄时,水面反射率随太阳高度角减少有少量增加,云层厚时反射率与太阳高度角无关。可以认为:阴天水面反射率与太阳高度角有一定关系,但这种关系随云层加厚而减

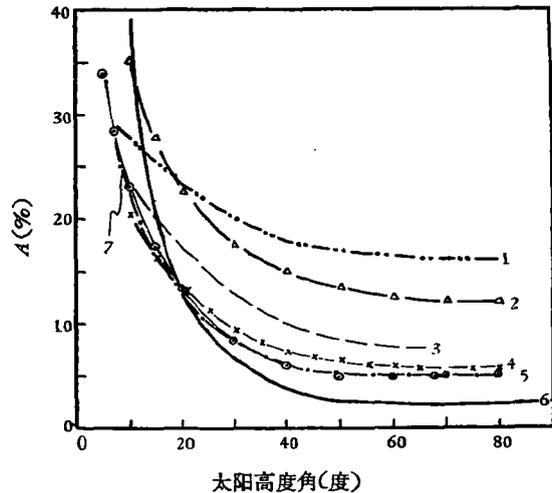


图 3 晴天,无浪时,江面、蒸发池的反射率与我国官厅水库、美国海夫纳湖(清水时)反射率的比较
1 江面含沙量 5.0 公斤/米³, 2 浅草地, 3 江面含沙量 0.03 公斤/米³, 4 100 米² 蒸发池, 5 我国官厅水库, 6 美国海夫纳湖, 7 Fresnel 理论曲线

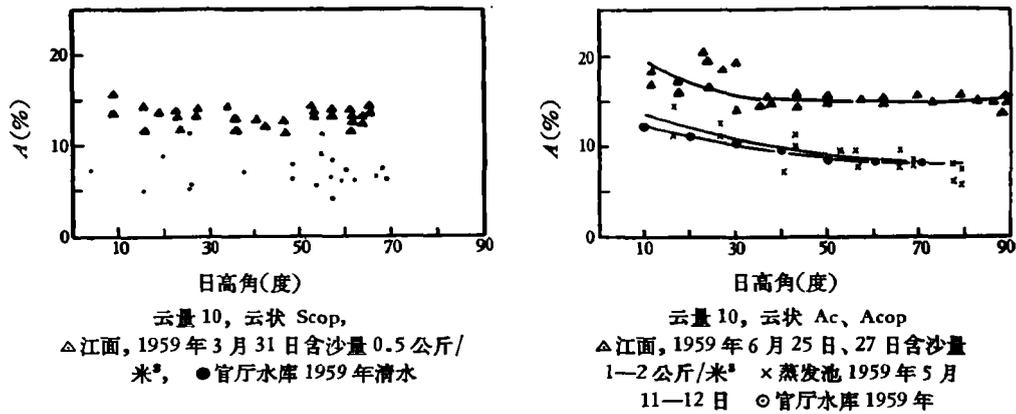


图4 阴天水面反射率随太阳高度角的变化

弱,以致完全无关,而水体的混浊度会增强这种作用。由于厚云层可使太阳直接辐射完全变为漫射,故此结论也是很合理的。

为了清楚地得到阴天时江水混浊度对反射率的影响,做了总辐射(Q)与反射辐射(R)的关系,如图5 a, b, c, d为四种含沙量情况下 $Q-R$ 的关系。由图可见,点子的相关较

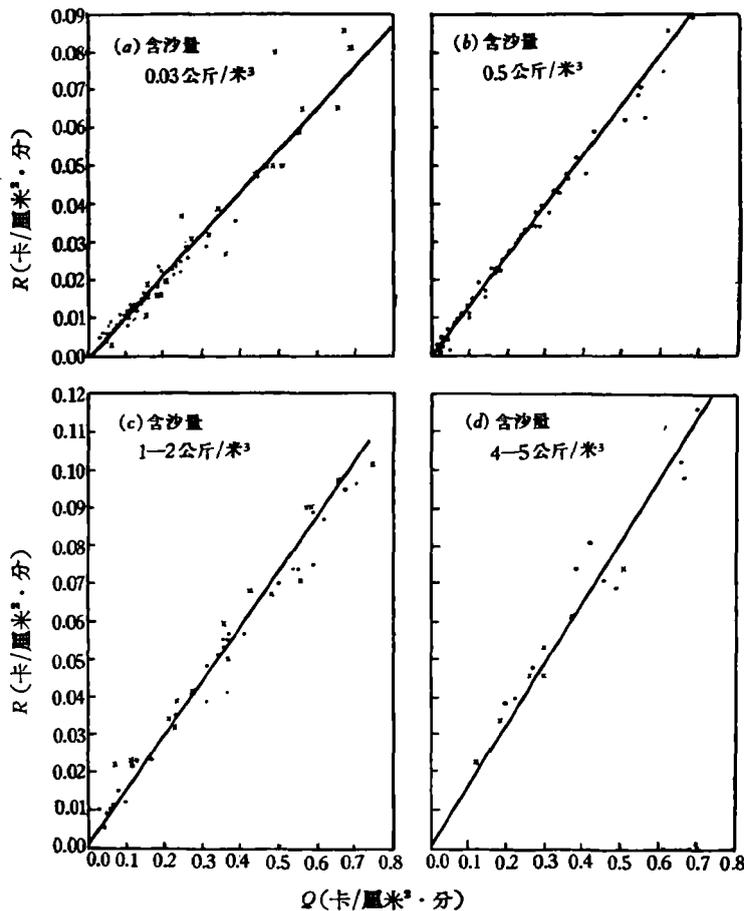


图5 阴天的总辐射与反射辐射的关系

好。在实际工作中经常进行水面反射辐射的测量是困难的, 根据图 5 可以得到四种含沙量情况下 $Q-R$ 的经验公式为:

含沙量(公斤/米 ³)	经验公式
0.03	$R = 0.109 Q$ (2)
0.50	$R = 0.133 Q$ (3)
1—2	$R = 0.141 Q$ (4)
4—5	$R = 0.159 Q$ (5)

上述经验公式便于在实际工作中应用。由于阴天时辐射强度甚弱, 故不论云层厚薄, 上列经验公式的误差均不大。(2)—(5)公式表明, 阴天时混浊水体的反射率同样比清水大, 含沙量增大反射率也增大。

许多大型水库, 湖泊实验站都设有大型蒸发池, 水文学上经常以大型蒸发池之蒸发量代替自然水体蒸发量。从上述的综合比较, 可以得到 100 米²蒸发池的辐射特性和自然水体清水无浪的情形相近的结论。理由如下: 邻近地区不同下垫面的辐射特性主要区别是下垫面反射率和长波有效辐射。图 3 表明, 我国官厅水库与美国海夫纳湖晴天无浪时的反射率与太阳高度角曲线基本上重合, 100 米²蒸发池的反射率与上两曲线相近, 平均值仅略高 1%。阴天时我国官厅水库同 100 米²蒸发池的反射率与太阳高度角曲线亦颇相近, 因此可以采用 100 米²蒸发池的水面反射率代替自然水体清水无浪时的水面反射率。下垫面长波有效辐射较小, 它主要由下垫面温度和其上气层状况决定。这些条件在邻近地区的自然水体和蒸发池之间差别不显著, 故两者的长波辐射差别亦不会大。

四、水体辐射平衡

为了清楚地了解天气条件, 水面特性等对水体辐射平衡的影响, 我们分析了重庆地区春夏季节各种天气条件以及不同含沙量时长江江面和 100 米²蒸发池的水体辐射平衡, 并与自然覆盖的陆面情况进行比较。作为例子, 图 6 a, b 给出 7 月份晴天(12 天)及阴天(4 天)含沙量为 3—5 公斤/米³江面的辐射平衡, 采用逐时观测记录进行平均, 图 7 a, b 为 3、4 月份晴天及阴天含沙量为 0.03 公斤/米³时江面的辐射平衡。将图例及其他天气和不同含沙量情况下的辐射平衡分量的平均日总量(用卡/日·厘米²表示), 反射辐射与总辐射强度之比值列于表 2。为了便于比较, 在表 2 中也给出了蒸发实验站 100 米²蒸发池及浅草地上的辐射平衡, 是采用和长江江面 7 月份相同的 12 天晴天的逐时记录平均。

从上述图表可以明显地看出, 晴天时, 在各种含沙量情况下, 辐射平衡的最大值出现在正午。7 月份曇天辐射平衡的数值小于晴天, 而散射辐射的强度大于晴天。长江江面上夏季(7 月)晴天为春季(3、4 月)的 135%。重庆地区春季散射辐射与总辐射的比值比夏季大, 例如 7 月份晴天散射辐射为总辐射的 19.5%, 而 3、4 月份为 42.3%。

特别值得指出, 下垫面的特性对反射辐射具有很大影响, 使得辐射平衡的数值有明显的差异。在同一场地、相同的时间、草地的反射辐射与总辐射强度之比值为 17.2%, 100 米²蒸发池(清水)为 6.6%, 草地的辐射平衡相当于 100 米²蒸发池的 86.8%。长江江水含沙量是 3—5 公斤/米³时, 反射辐射与总辐射的比值是 12.3%, 含沙量为 0.03 公斤/米³, 其比值为 8.5%。含沙量愈大, 反射辐射与总辐射的比值也愈大, 对于混浊水体而言, 正确地

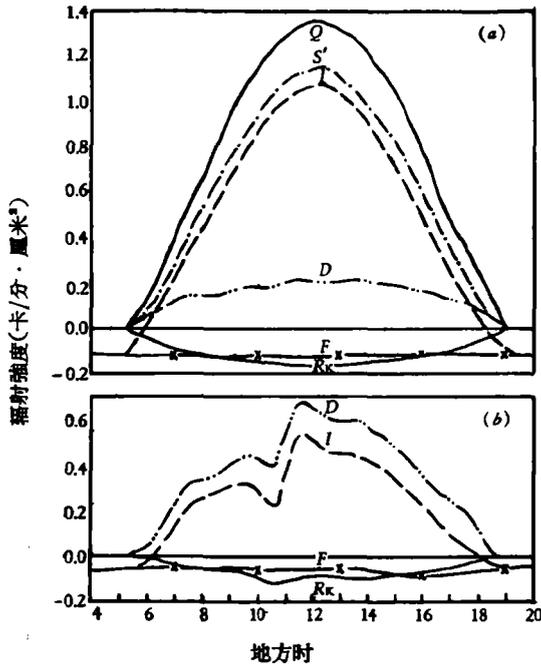


图 6 长江水体 7 月份(含沙量 3—5 公斤/米³) 辐射平衡日变化

a 晴天, 12 天平均 b 阴天, 4 天平均

(Q 总辐射, S' 直接辐射, D 散射辐射, R_K 下垫面短波反射, F 长波有效辐射, I 辐射平衡)

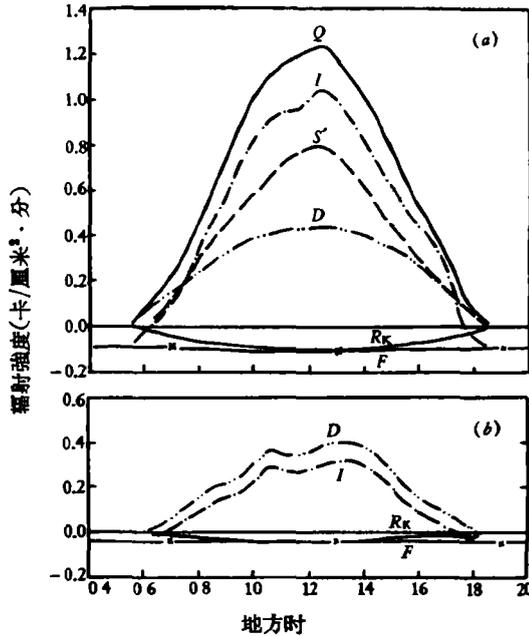


图 7 长江水体 3、4 月份(含沙量 0.03 公斤/米³)辐射平衡分量日变化

(a) 晴天, 11 天平均 (b) 阴天, 15 天平均

表 2

观测时期	观测场地	平均天数	天气条件	含沙量(公斤/米 ³)	辐射强度平均日总量(卡/日·厘米 ²)						R/Q
					S'	D	Q	R	F	I	
7 月	100 米 ² 蒸发池	12	晴	清水	549.05	116.78	665.83	43.79	94.08	527.96	6.6%
7 月	蒸发站草地	12	晴		549.05	116.78	665.83	113.54	94.08	458.21	17.2%
7 月	长 江 面	12	晴	3—5	555.54	134.63	690.17	84.89	90.83	515.45	12.3%
4 月		5	晴	0.5	318.36	181.92	500.28	53.06	68.22	379.00	10.6%
3、4 月		11	晴	0.03	260.44	191.50	451.94	38.30	76.60	337.04	8.5%
7 月		11	多云	3—5	381.17	186.53	567.70	77.86	70.56	419.28	13.8%
7 月		4	阴	3—5		(316.29)	316.29	54.34	48.66	213.29	17.1%
4 月		5	阴	0.5		(150.80)	150.80	22.62	30.16	98.02	15.0%
3 月		15	阴	0.03		(154.14)	154.14	14.68	29.36	110.10	9.5%

测量含沙量与反射辐射的关系对辐射平衡的计算有很大的作用。

五、结 论

1. 混浊水体的反射率随含沙量增大而增大,晴天含沙量为 5 公斤/米³时, 平均反射率

为 0.187, 含沙量等于 0.03 公斤/米³时为 0.127, 100 米²清水为 0.099. 含沙量的大小对水体辐射平衡数值有明显的影晌.

2. 含沙量相同时, 在低太阳高度角时, 曇天反射率小于晴天, 太阳高度角大时, 稍大于晴天.

3. 阴天布满中云时, 反射率随太阳高度角有少量改变. 布满低云时, 反射率和太阳高度角的变化无关.

4. 100 米²蒸发池和我国官厅水庫以及美国海夫納湖的反射率随太阳高度角的变化在晴天时一致, 阴天时, 我国官厅水庫的水面反射率和 100 米²蒸发池的反射率也很靠近. 在水汽条件相同时, 可以采用 100 米²蒸发池的反射率及辐射平衡代表无浪时水庫的反射率和辐射平衡.

本文资料与有关单位协作进行观测所得, 并承蒙严开伟先生指导, 章澄昌、李必光同志共同工作, 特此致谢.

参 考 文 献

- [1] Burt, W. B., *J. Met.*, **11** (1954), 283.
- [2] Грищенко, Д. А., *Труды ГГО.*, Вып. **46** (1955), 125.
- [3] Киллирова, Т. В., *Труды ГГО.*, Вып. **59** (1956), 121.
- [4] Neiburger, N. M., *Trans. Amer. Geophys. Union.*, **29** (1948), 647.
- [5] Burt, W. B., *Trans. Amer. Geophys. Union.*, **34** (1953), 199.
- [6] Тер-Маркрянц, Н. Е., *Труды ГГО.*, Вып. **68** (1957), 166.
- [7] Кондратьев К. Я., *Лучистый теплообмен в атмосфере*, 第六章.
- [8] 张霖琛、徐希孺、严开伟、王淑芳等, 北京大学学报 (自然科学), No. 1, 1961.

АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЯ НАД АЛЬБЕДОМ И РАДИАЦИОННЫМ БАЛАНСОМ МУТНОГО ВОДОЕМА

Чень Цзя-и, Люй Най-пинь

(Пекинский Университет)

Резюме

В этой статье анализируются данные по альбеду и радиационному балансу, измеренным над рекой Янцзы и прудом с площадью 100 м² в районе Чунцина. Результаты показывают, что альbedo водной поверхности растёт с ростом мутности водоёма. Альbedo прудов приближено к альбеду водохранилища Гуантин и озера Хефнелль (США) при штилевой погоде. Мы вычислим радиационный баланс водной поверхности при различных погодах и мутности водоёма, и сравним радиационный баланс с травой и прудом с площадью 100 м².