

# 关于海面反照率的初步探讨

张 一 夫

(国家气象局气象科学研究院, 北京)

## 摘 要

本文根据实测资料, 分析了海面反照率随太阳天顶角的变化规律, 推导出了反照率的一般表达式

$$A_E = (A \cos z + \beta A_{Ed}) / (\cos z + \beta),$$

讨论了日光情况<sup>1)</sup>为 $\odot^2$ 且天空少云条件下的海面反照率. 取 $\beta = 0.5$ 时, 得

$$A_{Ed} = 0.042e^{0.018z} (1 - \cos z) + 0.052,$$

由此得出该条件下的海面反照率的经验公式. 利用该公式求出在太阳直射的纬度上, 海面反照率全天平均为0.093, 并可根天文参数求出其他纬度带海面反照率全天平均值. 讨论了日光情况为 $\odot$ 的条件下的海面反照率, 求出其全天平均值为0.082. 讨论了日光情况为 $\odot^\circ$ 、 $\Pi$ 条件下的海面反照率, 求得其全天平均值0.068. 这个数值适用于任何纬度的海域.

了解大气中的辐射过程, 已成为对气候作一般研究的基础, 同时, 它也与研究个别天气过程有关<sup>[1]</sup>.

在地-气系统内部, 太阳和红外辐射的传输, 代表着驱动大气环流和洋流的主要物理过程<sup>[2]</sup>. 显然, 要了解气候和气候变化的机制, 就必须详细了解辐射过程以及地球和大气的辐射平衡问题. 有关大气中辐射过程的研究, 是一个涉及面极广的专门学科. 它的研究成果, 已被用于中长期数值天气预报以及大气环流与气候变化的数值模拟试验中.

在所有气象和气候问题中, 基本的下边界条件是要求地表能量平衡, 即向上的潜热和感热通量密度以及进入地面向下的热量之和, 与短波和长波辐射两者的净辐射输入相等. 在不同的下垫面上, 有着不同的能量平衡关系. 由于海洋占地球表面的三分之二, 精确确定海面反照率, 进而计算不同海域的能量平衡就显得特别重要.

在世界气候计划的TOGA计划实施过程中, 中美热带西太平洋海气相互作用联合考察的第一航次(1985年12月12日至1986年2月24日), 进行了总辐射观测, 第二航次(1986年11月15日至1987年3月4日)又增加了海面反射及净辐射观测, 获取了大量宝贵资料. 关于观测方法的可行性和资料的可靠性, 将另文讨论. 本文仅根据第二航次中, 1987年1月

本文于1987年12月15日收到, 修改稿于1988年4月1日收到.

1) 日光情况即云遮日光的程度, 分4种情况.  $\odot^2$ ——太阳面上无云;  $\odot$ ——日光可透过云, 地物影子明显;  $\odot^\circ$ ——日光微弱透过厚云层, 地物影子模糊不清;  $\Pi$ ——通过厚云层看不见太阳轮廓.

24—31日停航作业期间的定点 (11.5°S, 139°E) 连续观测资料, 讨论有关海面反照率的一些问题。

## 一、海面反照率的观测结果及经验公式

### 1. 反照率的一般表达式

采用总辐射表观测的总辐射  $E_g \downarrow$  为下式。

$$E_g \downarrow = S \cos z + E_d \downarrow, \quad (1)$$

式中,  $S$  是太阳直接辐射,  $z$  为太阳天顶角,  $E_d \downarrow$  是天空向下的散射辐照度。

采用总辐射表观测的下垫面总反射  $E_r \uparrow$  为

$$E_r \uparrow = S_r \cos z + E_{dr} \uparrow. \quad (2)$$

其中,  $S_r$  是太阳直接辐射的反射, 即  $S_r = A \cdot S$ ,  $A$  为反射率,  $E_{dr} \uparrow$  是自下垫面向上的散射辐照度。

根据定义, 反照率  $A_E = E_r \uparrow / E_g \downarrow$  [3], 则

$$A_E = (S_r \cos z + E_{dr} \uparrow) / (S \cos z + E_d \downarrow). \quad (3)$$

令  $\beta = E_d \downarrow / S$ ,  $A = S_r / S$ ,  $A_{Ed} = E_{dr} \uparrow / E_d \downarrow$ , 得到反照率的一般表达式,

$$A_E = (A \cos z + \beta A_{Ed}) / (\cos z + \beta). \quad (4)$$

由定义可知,

$A$  是直接辐射的反射率;

$A_{Ed}$ , 按反照率的定义, 它就是散射辐射的反照率;

$\beta$  是天空向下的散射辐射  $E_d \downarrow$  与太阳直接辐射  $S$  之比。

### 2. 日光情况 $\odot^2$ 且天空少云条件下的海面反照率

#### (1) 反射率 $A$

由于海面反射辐射的观测采用连续曲线记录, 并取其中线读值, 使观测值代表了海面随机波动的平均效果。对观测值而言, 海面可视为平面。

根据费涅耳公式,

$$A = \frac{1}{2} \left[ \sin^2(z-x) / \sin^2(z+x) + \operatorname{tg}^2(z-x) / \operatorname{tg}^2(z+x) \right]. \quad (5)$$

其中,  $z$  为入射角 (对太阳直接辐射而言, 即太阳天顶角),  $x$  为折射角, 取折射率  $n = 1.34$ 。

#### (2) $\beta$

参数  $\beta$  与日光情况、大气状况、云量等因素有关, 但主要取决于日光情况。在日光情况为 $\odot^2$ , 天空少云的条件下,  $\beta$  可近似视为常数, 取  $\beta = 0.5$  (详见后面的讨论)。

#### (3) 散射辐射的海面反照率 $A_{Ed}$

根据实际观测的  $A_E$  值, 由式 (4) 计算得到  $A_{Ed}—z$  关系曲线, 可由下式拟合

$$A_{Ed} \approx 0.042 e^{0.018z} (1 - \cos z) + 0.052. \quad (6)$$

#### (4) 经验公式

将上述结果代入式 (4), 得到在日光情况为 $\odot^2$ 且天空少云条件下的海面反照率经验

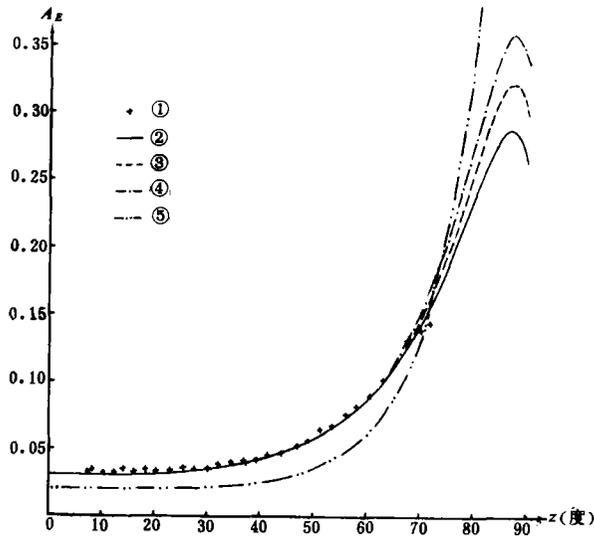


图 1 日光情况 $\odot^2$ 且天空少云条件下海面反照率

- ①—— $\odot^2$ 且天空少云条件下观测值
- ②——经验公式 (取 $\beta = 0.5$ ) 曲线
- ③——经验公式 (取 $\beta = 0.4$ ) 曲线
- ④——经验公式 (取 $\beta = 0.3$ ) 曲线
- ⑤——反照率 $A$ 理论曲线

公式

$$A_E \approx [A \cos z + 0.021e^{0.018z}(1 - \cos z) + 0.026] / (\cos z + 0.5). \quad (7)$$

由式 (7) 计算得到的  $A_E - z$  关系曲线绘于图 1. 图中同时给出实际观测值随  $z$  的分布, 可见两者在精度为 0.005 范围内吻合.

### 3. 日光情况 $\odot^\circ$ 、 $\Pi$ 且天空多云条件下的海面反照率

在该条件下,  $S \approx 0, S_r \approx 0$ .

由式 (3) 得到

$$A_E \approx \frac{E_{dr} \uparrow}{E_d \downarrow}, \quad (8)$$

令半球天空中散射辐射的分量为  $I_D(\theta, \varphi, z)$ , 略去涌升光不计, 则有

$$E_{d \downarrow} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} I_D(\theta, \varphi, z) \cos \varphi \sin \varphi d\theta d\varphi,$$

$$E_{dr \uparrow} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} A(\varphi) I_D(\theta, \varphi, z) \cos \varphi \sin \varphi d\theta d\varphi.$$

式中,  $\varphi$  为入射角,  $\theta$  为方位角,  $z$  为太阳天顶角,  $A(\varphi)$  是入射角为  $\varphi$  时的反射率.

假定散射是均匀的, 则有

$$A_E = \int_0^{\pi/2} A(\varphi) \sin \varphi \cos \varphi d\varphi / \int_0^{\pi/2} \cos \varphi \sin \varphi d\varphi. \quad (9)$$

式 (9) 计算得到的均匀散射辐射的反照率  $A_E$  约为 0.068.

考虑船体对仪器探头的遮拦影响（船长160m,平均高约7m,观测海面反射的仪器探头置于靠近船尾部的外侧海面上,距海面平均高度约2.5m,距船舷约4.5m),计算结果的海面反照率减小约16%。即在受船体遮拦影响的条件下,均匀散射的反照率 $A_E$ 约为0.057。

日光情况 $\odot^\circ$ 、 $\Pi$ 且天空多云条件下,海面反照率的实测值绘于图2。由图可见,该条件下, $A_E$ 的日变化呈很小的波动状态,全天的平均值 $\bar{A}_E$ 均为0.056。

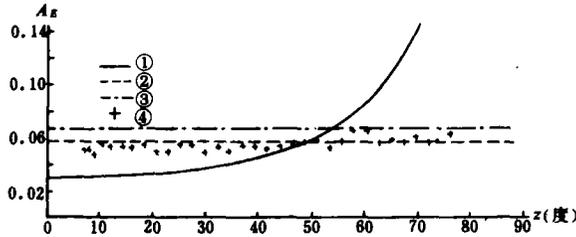


图2 日光情况 $\odot^\circ$ 、 $\Pi$ 且天空多云条件下的海面反照率

- ①—— $\odot^\circ$ 、 $\Pi$ 条件下 $A_E$ 观测值
- ②—— $\odot^2$ 条件下 $A_E-z$ 曲线
- ③——均匀散射的 $A_E-z$ 曲线
- ④——受船体遮拦影响的均匀散射的 $A_E-z$ 曲线

由前面讨论可得到如下结论：日光情况 $\Pi$ 、 $\odot^\circ$ 且天空多云的条件下,散射辐射基本上是均匀的,其海面反照率 $A_E$ 约为0.068。

#### 4. 日光情况 $\odot$ 条件下的海面反照率

由式(4)可见,虽然 $A$ 仅是 $z$ 的函数,而 $\beta$ 和 $A_{Ed}$ 还与日光情况、大气状况、云量等因素有关。也就是说,大气状况是通过影响 $\beta$ 、 $A_{Ed}$ 而影响 $A_E$ 的。云量及其分布影响散射辐射的分布,而主要影响 $A_{Ed}$ 。日光情况主要是通过影响 $S$ ,进而影响参数 $\beta$ 。

在日光情况为 $\odot$ 这个等级中,由于遮拦日光的云层状态、厚度不同,使得 $S$ 变化高达数倍。显然,这一日光情况等级中,对同一 $z$ 值而言, $A_E$ 的变化很大,它分布在日光情况 $\odot^2$ 与日光情况 $\odot^\circ$ 、 $\Pi$ 的两条曲线之间的夹带内(参看图3)。

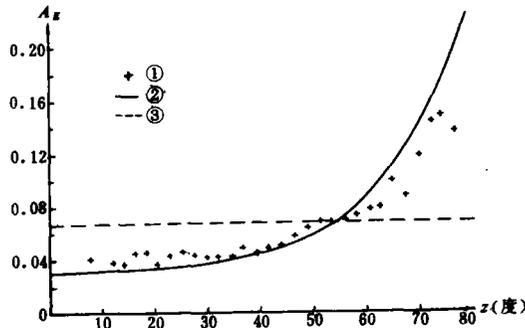


图3 日光情况 $\odot$ 条件下海面反照率随 $z$ 的分布

- ①—— $\odot$ 条件下 $A_E$ 观测值
- ②—— $\odot^2$ 条件下 $A_E-z$ 曲线
- ③—— $\odot^\circ$ 、 $\Pi$ 条件下 $A_E-z$ 曲线

## 二、 $\beta$ 值的讨论

根据青海省玉树、上海、福州及广州等站1983年1月、7月的观测资料,可以得到以下几点。

1. 参数 $\beta$ 与日光情况、大气状况、云量等有关,但主要取决于日光情况。大气状况对 $\beta$ 的影响也较大,而云量的影响不明显。

2. 对一天而言,在日光情况 $\odot^2$ 且天空少云的条件下,参数 $\beta$ 波动较小,说明 $\beta$ 值与太阳天顶角的关系甚小,被其他影响较大的因素所“淹没”。

3. 对全月而言,在日光情况 $\odot^2$ 且天空少云的条件下,不同日 $\beta$ 值波动变化的基线(即日平均值)有的相差较大,说明 $\beta$ 值受大气状况的影响较大。

4. 日光情况 $\odot^2$ 且天空少云条件下,各站的 $\beta$ 平均值列于表1。

表 1

站名	玉树	上海	福州	广州
$\beta$	0.13	0.23	0.30	0.39

$A_E$ 的实测值是多天观测值的平均,它代表大气平均状态下的海面反照率,因而 $\beta$ 值及 $A_{Ed}$ 也对应于海面上大气的平均状态。在此状态下, $\beta$ 值在经验公式中可作常数处理。

显然,选取不同的 $\beta$ 值,根据 $A_E$ 的实测值及式(4),可以得到相应的 $A_{Ed}-z$ 关系式。例如,取 $\beta=0.4$ ,则得到 $A_{Ed} \approx 0.030e^{0.023z}(1-\cos z)+0.060$ ;取 $\beta=0.3$ ,则得到 $A_{Ed} \approx 0.025e^{0.026z}(1-\cos z)+0.068$ 。与它们相应的 $A_E-z$ 关系曲线同时绘于图1。由图1可见,取 $\beta=0.5$ 时,所得到的经验公式(7)较为合理。

## 三、几点结论

1. 海面反照率与日光情况、云量以及太阳天顶角 $z$ 有密切关系。在日光情况 $\odot^2$ 的条件下,它有明显的日变化;在日光情况 $\odot^0$ 、 $\Pi$ 的条件下,它不随 $z$ 变化,仅因云层状态和分布不同有较小的波动;在日光情况为 $\odot$ 的条件下, $A_E$ 对 $z$ 不呈单值,而是分布在前面两种日光情况下的 $A_E-z$ 曲线之间。

2. 反射率 $A$ 是反射与入射的辐射强度之比,而反照率 $A_E$ 则不同,它是反射与入射的辐照度之比。显然,就太阳直接辐射而言,两者相同;但对整个半球空间的总辐射而言,由于散射辐射的影响,使两者产生明显的差别。

当 $z$ 较小时(约 $0-72^\circ$ ),由于入射角 $\varphi$ 较大的散射辐射分量 $I_D(\theta, \varphi, z)$ 的影响,使 $A_E > A$ ;当 $z$ 较大时(约 $72^\circ$ ),由于入射角 $\varphi$ 较小的散射辐射分量的影响,反而使 $A_E < A$ 。

随着太阳天顶角 $z$ 的增大,入射角较大的散射辐射分量增强〔3〕,因此,散射辐射的反照率 $A_{Ed}$ 也随之增大。从式(4)可见,只有当 $A_{Ed}=A$ 时, $A_E=A=A_{Ed}$ ,即图1中两曲线的交点, $z \approx 72^\circ$ , $A_E=A=A_{Ed} \approx 0.158$ 。

3. 云影响散射辐射的分布,进而影响反照率 $A_E$ 。图3中,日光情况 $\odot^2$ 的曲线,也是

无云的情况，而日光情况 $\odot^{\circ}$ 、 $\Pi$ 的曲线，则是云量10的情况。可以看出 $z$ 为 $0^{\circ}$ — $60^{\circ}$ 时，云对 $A_E$ 的影响较小；当 $z$ 大于 $60^{\circ}$ 时，云对 $A_E$ 的影响较大。考虑日光情况及云的影响，取上述两条曲线之间的中值线，求得全天平均反照率 $\bar{A}_E \approx 0.082$ 。因此，就系统性的大片云而言，被云覆盖的海面全天平均反照率应取0.082。未被云覆盖的海面，则可按本文给出的经验公式求出全天平均海面反照率。

4. 在日光情况为 $\odot^{\circ}$ 、 $\Pi$ 且天空多云的条件下，全天平均海面反照率 $\bar{A}_E \approx 0.068$ 。这种条件下，海面反照率与太阳天顶角 $z$ 无关，仅因云层的状态（厚度、分布）不同而有较小的波动。

5. 将经验公式（7）求得的海面反照率 $A_E$ 在 $0^{\circ}$ — $90^{\circ}$ 区间内求平均，得到日光情况 $\odot^2$ 且天空少云条件下的全天平均海面反照率 $\bar{A}_E \approx 0.093$ 。显然，该值仅适用于太阳直射纬度（即时角 $\omega = 0^{\circ}$ 时， $z = 0^{\circ}$ ）的海域。随着纬度的南北偏移，全天平均海面反照率将增大。例如，在偏离的纬度上，若 $\omega = 0^{\circ}$ 时， $z = 20^{\circ}$ ，则取 $z$ 为 $20^{\circ}$ — $90^{\circ}$ 间的平均值，得到该纬度海域全天平均海面反照率 $\bar{A}_E \approx 0.111$ 。在日光情况为 $\odot^{\circ}$ 、 $\Pi$ 的条件下，全天平均海面反照率 $\bar{A}_E \approx 0.068$ ，适用于任何纬度的海域。

6. 图4给出了本文经验公式（7）计算得到的 $A_E-z$ 曲线及帕尔特里奇给出的 $A_E-z$ 曲线〔1〕。比较两曲线，可以得到以下3点。

（1） $z$ 在 $0^{\circ}$ 至 $80^{\circ}$ 之间，两曲线吻合。

（2） $z$ 在 $80^{\circ}$ 至 $90^{\circ}$ 之间， $A_E(z)$ 之值相差甚大，但两曲线变化趋势相同。 $A_E$ 随 $z$ 增大而增大，最大值出现在 $z \approx 87^{\circ}$ 时，然后 $A_E$ 随 $z$ 增大而减小。

（3）在 $z = 90^{\circ}$ 时，由式（3）可得， $A_E = E_{d, \uparrow} / E_{d, \downarrow}$ 。即反照率 $A_E$ 仅取决于散射辐射的分布状况。由于日光情况 $\odot^2$ 条件下，在与 $z$ 相近的入射方向上，散射辐射最强，因此，在 $z = 90^{\circ}$ 时，入射角愈大的散射辐射愈强。在这样的散射辐射场条件下，其反照率显然远大于均匀散射场的反照率值（约0.068）。所以，帕尔特里奇给出的 $A_E-z$ 曲线，在 $z = 90^{\circ}$ 处， $A_E \approx 0.03$ ，此结果与事实相差较大。

#### 四、结 束 语

海面反照率观测、分析是一新的课题，从观测仪器的试用，到观测方法的确定均是探索性的。本文用实测资料进行分析，得到了初步的结果。以往的文献中，曾讨论过云对反照率的影响。本文发现，日光情况是最主要的影响因子，并首次讨论了不同日光情况下海面反照率的分布状况，结果的物理意义基本清楚。相信它对研究海面能量平衡，进行大气环流数值试验和气候模拟是有参考意义的。对考察中获得的资料，将进一步进行分析研究。

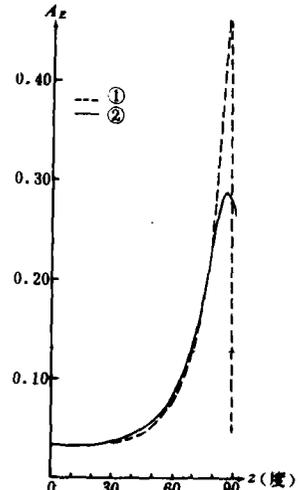


图4 本文经验公式所得 $A_E$ 与文献〔1〕给出的曲线的比较  
①——帕尔特里奇曲线  
②——本文经验公式（7）曲线

本文得到陈隆勋、王炳忠、吴其勋和祝昌汉的大力帮助，在此谨表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] G. W. 帕尔特里奇和 C. M. R. 普拉特著, 吕达仁等译, 气象学和气候学中的辐射过程, 科学出版社, 1981.
- [2] 廖国男著, 周诗健等译, 大气辐射导论, 气象出版社, 1985.
- [3] E. B. 柯劳斯著, 山东海洋学院海洋气象专业译, 大气和海洋的相互作用, 科学出版社, 1979.