

南海北部海区太阳辐射观测分析与计算方法研究*

王 举 姚华栋¹ 蒋国荣 何金海²

阎俊岳¹ 郑 静³ 陈奕德³

(南京气象学院大气科学系 南京 210044; 解放军理工大学气象学院 南京 211101)

¹(中国气象局国家气候中心 北京 100081)

²(南京气象学院大气科学系 南京 210044)

³(解放军理工大学气象学院 南京 211101)

提要 利用 2000 年与 2002 年南海海气通量观测资料及同期西沙站资料, 研究分析了 4—6 月份南海北部海区太阳总辐射与云量以及日照时间等因子的对应关系。研究发现, 日均太阳辐射与日总日照时间对应关系最好, 依次是低云量、总云量。据此首先利用 2000 年资料建立了除考虑云量外还包括日总日照时间的计算日均太阳辐射的估计公式, 并利用 2002 年观测资料进行独立检验。误差分析结果表明, 包括日总日照时间的经验公式远优于单纯考虑云量的计算公式, 误差减少了近 50%。最后, 应用该经验公式对观测期间缺测段资料进行了补插及外推估算, 分析了 2000 年与 2002 年南海季风爆发前后太阳辐射的一些变化特征, 估算结果表明, 季风爆发前太阳辐射日均值缓慢增加并始终处于较高值。

关键词 南海, 海气通量观测, 太阳辐射计算方法, 云量, 日照时间

中图分类号 P731

太阳辐射是地球大气-海洋系统的能量来源(吉尔, 1988)。大气和海洋的许多运动与变化都与太阳辐射的相应变化有关, 如海表水温的日变化和季节变化。由大气状况和云的变化导致的太阳辐射的变化也是短期气候变化的重要因素之一, 例如, 在大气 30—60 天季内振荡中, 云-辐射反馈效应起着重要作用(Wang *et al.*, 1998); 在南海夏季风期间, 南海海洋上层的热状况变化也与太阳辐射的变化有着密切的关联(白学志等, 1999)。太阳辐射的变化也影响着高纬近海海冰的变化(岳前进等, 2000); 借助于光合作用, 它也影响着海洋中光能自养植物的生产力(张新玲等, 2001; 张宝玉等 2003)。因此, 无论是海洋与大气学科还是生态学科(张运林等, 2004; 杨桂朋等, 2003), 太阳辐射的研究都有着重要的意义。

由于太阳辐射研究的重要性, 国内外学者都对其进行了较为深入的研究(Dobdon *et al.*, 1988;

Schiano *et al.*, 1993; 斯塔尔等, 1991; Muhammad Iqbal, 1983; 康德拉捷夫, 1962), 并提出许多计算太阳辐射经验估计方法(王名才, 1994), 模式种类也较多, 按不同时间分辨率划分, 有逐时模式(Dobdon *et al.*, 1988)、逐日模式和逐月模式(Dobdon *et al.*, 1988; Schiano *et al.*, 1993; 王名才, 1994; 翟盘茂, 1991), 这些经验估计方法通常只需使用一些常规观测资料, 因而应用较为广泛。辐射观测不属于常规观测, 而国内辐射观测站又较少, 加上海洋观测较为困难, 海上太阳辐射资料则更是缺乏, 因此, 以往的许多理论研究大多使用的是上述经验公式的气候估计值, 比如月平均值(邵庆秋等, 1991)。但是, 有时候更关心的是一些天气尺度过程、短期气候过程, 如季风的活跃与中断。一些数值研究结果(卢里等, 1987; 王谦谦等, 1997)还表明, 在气候模拟中也不能忽略太阳辐射日变化。这就需要对逐日太阳辐射强度进行估算。以

* 国家自然科学基金资助项目, 90211011 号与 40075003 号。王 举, 博士, E-mail: wangjqy@vip.sina.com

收稿日期: 2004-03-11, 收修改稿日期: 2004-09-18

往由于海上太阳辐射资料的缺乏, 相关研究很少, 故本文中作者利用《南海季风试验》延续课题 2000 年和 2002 年《南海季风爆发前后海气通量观测研究》的外场观测的辐射资料和同期西沙气象站常规气象观测资料探讨了相关问题, 并通过对比分析和相关研究, 建立了适合于计算南海北部海区太阳辐射逐日变化的经验公式。

1 南海北部海区太阳辐射强度观测分析

1.1 资料来源

本文中辐射资料来自《南海季风试验》项目的延续课题《2000 年南海海气通量观测》和《2002 年南海海气通量观测》, 观测地点选在南海北部西沙永兴岛(16°50'N, 112°20'E)西南面礁盘边缘, 距岛约 300m, 采用建塔方式进行观测(蒋国荣等, 2002)。

2000 年观测塔塔高 18m, 由 3 层 9 根桩线固定; 塔基为 1.5m × 1.5m × 1.5m 的水泥平台, 台面基本位于海面平均水位以下 0.9m, 以平均水位为基准, 辐射仪器安装在由塔体向前伸出的横杆上, 横杆距海面 3m 高, 横杆长 2m。辐射感应器为

Epply 公司生产的半球式感应器, 此感应器经过电缆连接到数字采集器上(1min 采样一次), 再连接到微型计算机上将数据储存下来。辐射观测资料记录全天完整的资料为 5 月 8 日—6 月 16 日(共 40 天)。

2002 年的观测塔位置比 2000 年的塔位置略向海中前移 10m, 塔高 16m, 梯度观测系统(风速、干湿球温度表)分为 5 层, 分别距标准水面 2、3、5、9、14m; 辐射仪器安装在由塔体向西南方向支出的横杆上, 横杆长 2m, 外端上下两面分别安装向下、向上短波辐射表和长波辐射表, 辐射表距水面(平均水面)约 2m。观测时间为 4 月 24 日—6 月 21 日(共 59 天), 由于辐射数据接收用的计算机在 5 月 1—8 日出现故障, 导致这段时间段所有辐射资料缺测, 故实际辐射资料为 51 天。

为消除高频变化影响以及减小随机观测误差, 作者对原始的 1min 观测记录先做了 30min 平均, 然后转化为日平均值。所使用的云量及日照时间资料来自同期西沙气象站常规观测资料。

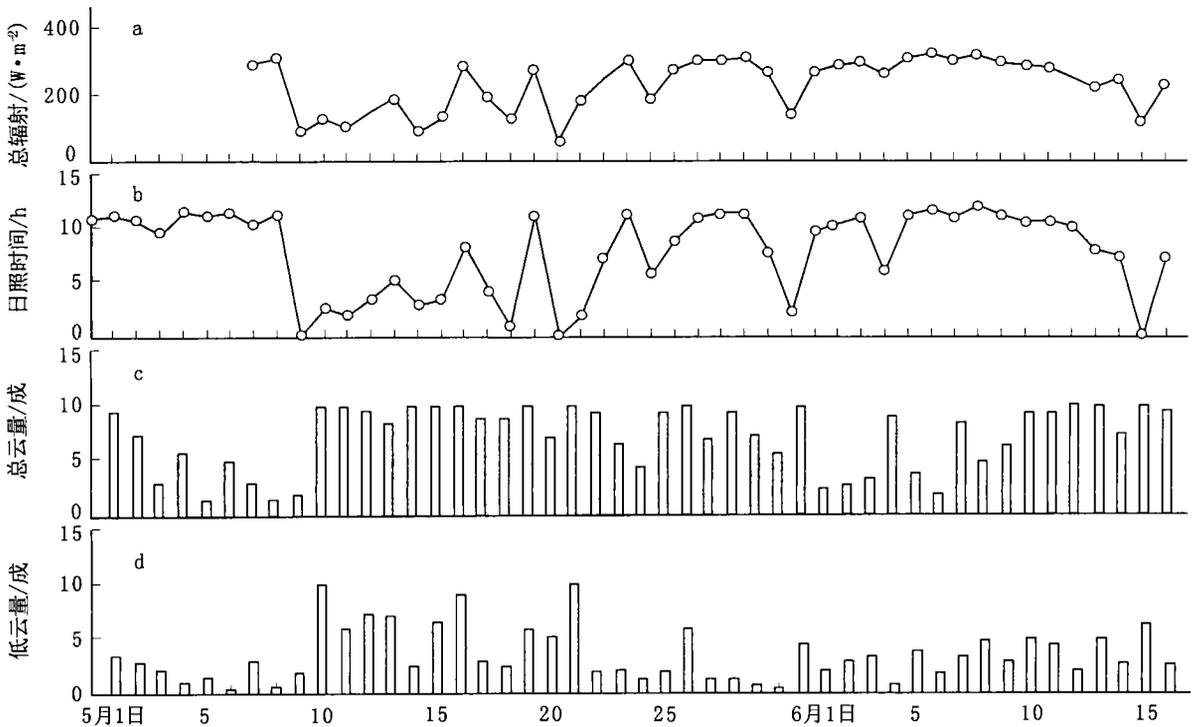


图 1 2000 年观测期间西沙海区太阳辐射日均值及云量、日照时间的逐日变化
a. 太阳辐射日均值; b. 日照时间; c. 总云量; d. 低云量

Fig. 1 Daily variation in total solar radiation, cloud cover and duration of sunshine during observation in Xisha Island in 2000
a. total solar radiation; b. duration of sunshine; c. total cloud cover; d. lower cloud cover

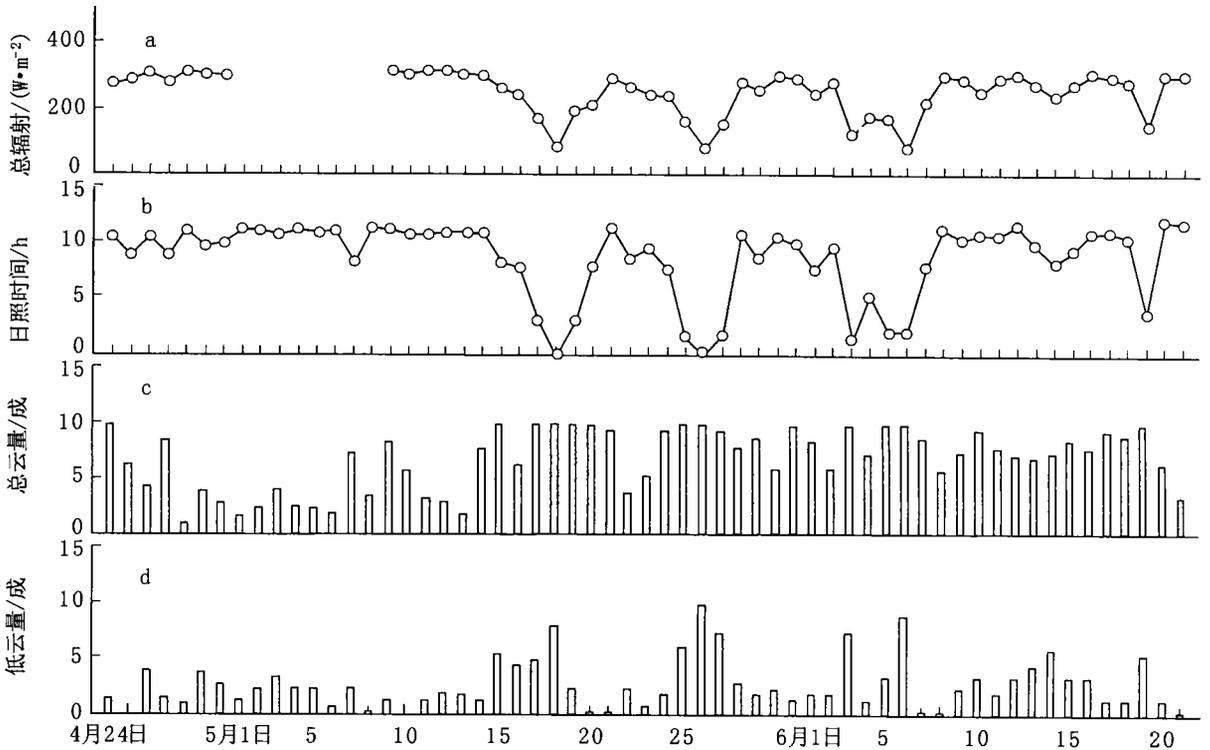


图 2 2002 年观测期间西沙海区太阳辐射日均值及云量、日照时间的逐日变化

a. 太阳辐射日均值; b. 日照时间; c. 总云量; d. 低云量

Fig. 2 Daily variation in total solar radiation, cloud cover and duration of sunshine during observation in Xisha Island in 2002

a. total solar radiation; b. duration of sunshine; c. total cloud cover; d. lower cloud cover

1.2 观测结果分析

2000 年和 2002 年南海海气通量观测的目的之一是利用观测来探求南海夏季风爆发前后南海海气通量(辐射通量、动量通量、潜热通量及感热通量)的变化情况。为方便后面的分析,作者首先给出对应 2000 年和 2002 年观测期间南海夏季风过程的一些基本情况(具体分析过程略):2000 年南海季风爆发日期为 5 月 10 日左右,2000 年整个观测过程期间(5 月 8 日—6 月 16 日)的南海夏季风过程是:爆发前仅有两天观测资料,为 5 月 8—9 日;爆发期为 5 月 10 日—5 月 28 日;中断期为 5 月 29 日—6 月 6 日;活跃期为 6 月 7—16 日;而 2002 年南海季风爆发日期为 5 月 14 日左右;整个观测过程期间(4 月 24 日—6 月 21 日)的南海夏季风过程是:爆发前为 4 月 24 日—5 月 13 日;爆发期为 5 月 14 日—6 月 12 日;中断期为 6 月 13—21 日。

图 1 和图 2 分别给出了 2000 年和 2002 年观测期间太阳总辐射逐日变化曲线(图 1a 和 2a)。图 1 和图 2 中同时给出了日照时间和云量的逐

日变化,以方便对比。季风爆发前,太阳总辐射一直较强,2002 年虽然爆发前有部分资料缺测(图 2a),但由于观测资料较长,故更能说明这一点;2000 年虽然只有两天资料但却反映出太阳总辐射都比较强;季风爆发后,太阳总辐射明显减弱,爆发期尤为明显。进一步对比可以明显看出:第一,日总日照时间与太阳总辐射的变化较为一致(相关系数为 0.96),日照时间长,则太阳总辐射强,反之亦然;第二,无论总云量还是低云量,云量多一般对应弱太阳总辐射,云量少则太阳总辐射强;但如果从量的大小上看,低云量与太阳总辐射的对应关系更好一些(相关系数为 -0.70),它要比总云量与太阳总辐射的对应关系(相关系数为 -0.62)更为明显,总云量多有时太阳总辐射并不弱。以上观测分析结果对两次观测而言都完全一致。众所周知,通常使用的太阳总辐射经验公式一般仅考虑总云量,而上述结论则表明对观测海区这并不合理,就云量而言,在该海区低云量对太阳总辐射的影响比总云量更有效,这是应注意的。

2 南海北部海区太阳辐射的计算

海面处太阳辐射的简单计算模式比较多,但有许多仅适用于气候估计(王名才,1994;翟盘茂,1991;邵庆秋等,1991),本文中作者采用以下思路建立海面太阳辐射的计算模式:首先,任意时刻大气上界水平面太阳辐照度一般由下式计算(Muhammad Iqbal, 1983):

$$S = S_0 \left[\frac{R_0}{R} \right]^2 \cos \theta = S_0 \left[\frac{R_0}{R} \right]^2 \sin \phi \quad (1)$$

式中, S 为大气上界水平面太阳辐照度, R_0 为日地平均距离, R 为计算时刻日地实际距离; S_0 为太阳常数(= 1370W/m²), θ 和 ϕ 分别为太阳天顶角和太阳高度角,可由下式计算(Muhammad Iqbal, 1983):

$$\cos \theta = \sin \phi = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (2)$$

式中, φ 为地理纬度, ω 为太阳时角, δ 为太阳赤纬。其次,由于存在大气层,海面处太阳辐照度将减少,如果用 S_c 表示海面处太阳辐照度,通常定义下式:

$$T = S_c / (S_0 \sin \phi) \quad (3)$$

T 为天空透射率(Dobdon *et al.*, 1988),代表太阳辐射到达海面的百分数。关于天空透射率的计算,简单参数化方案一般有两种:第一种方案最典型的是Lumb模式(Dobdon *et al.*, 1988), T 用下式表示:

$$T = a + b \sin \phi \quad (4)$$

式中, a 和 b 是与云量有关的常数,即对应不同云量, a 和 b 取不同值; ϕ 为太阳高度角。Lumb模式也是逐时模式,可用于逐时太阳辐射的计算,该模式的最大特点是将云的效应和大气层的其他效应(散射、吸收)共用常数 a 、 b 值的变化体现出来。第二种方案是先计算晴空状况下海面处太阳辐照度,然后再考虑云的效应, T 一般可写成以下形式(Dobdon *et al.*, 1988):

$$T = T_0 \times F(C) \quad (5)$$

式中, T_0 是无云状况下的天空透射率, $F(C)$ 为云效应项; T_0 的计算也有不同方法,比如可用下式(岳前进等, 2000)计算 T_0 :

$$T_0 = a^m \quad (6)$$

式中, a 为大气层透光度, m 为大气层光学质量。而Burridge(斯塔尔, 1991)则把 T_0 表示成太阳高度角的函数:

$$T_0 = 0.2 + 0.6 \sin \phi \quad (7)$$

式中, ϕ 为太阳高度角。云效应项 $F(C)$ 的计算

式也有许多(Dobdon *et al.*, 1988; 斯塔尔, 1991), 这里不一一例举, 在下面的讨论中将涉及其中一些具体表达式。

由于受资料限制,本文中太阳辐射的计算模式建立采用第二种方案,其中,无云状况下的天空透射率 T_0 的计算使用Burridge的简单形式(7式),而在云的效应 $F(C)$ 的计算上也有大的改动。体现云效应 $F(C)$ 的表达式一般都是总云量的线性(王名才, 1994)或二次多项式(王名才, 1994; 翟盘茂, 1991),即可写成:

$$F(C) = 1 - aC - bC^2 \quad (8)$$

式中, a 和 b 是经验常数;不同模式 a 、 b 的取值不同,但常数项都取值 1;上述 $F(C)$ 表达式中云量用的是总云量,也有用高、中、低云量的模式,如Burridge(斯塔尔, 1991):

$$F(C) = (1 - 0.4C_H) \cdot (1 - 0.47C_M) \cdot (1 - 0.4C_L) \quad (9)$$

式中, C_H 、 C_M 、 C_L 分别代表高、中、低云量,但台站常规气象观测中一般不进行高、中云量观测,所以上述表达式对台站常规气象的观测并不实用。本文中云效应项的表达式则借助观测资料采用线性回归方法建立。需指出的是,以下经验公式建立时所用资料均使用 2000 年的观测资料,2002 年的观测资料将用于独立检验。

2.1 仅考虑云量的云效应项的表达式

为与前人的研究结果进行对比,同时也为了方便在仅有云量资料的情形下对南海北部逐日太阳辐射强度的估算,先建立仅考虑云量的太阳辐射经验估计公式。由上面观测分析结果可知,总云量和低云量与海面太阳辐射有较好对应关系,其中,低云量更好。为此,作者分别用总云量和低云量为因子建立了计算海面太阳辐射的经验公式。但与观测结果对比发现,无论 $F(C)$ 的表达式采用线性还是二次多项式,无论是总云量还是低云量,计算的日均误差都较大(均在 55W/m² 左右);如果考虑总云量和低云量两个因子,则日均误差最小(49W/m² 左右)。具体表达式为:

$$S = S_0 \sin \phi (0.2 + 0.6 \sin \phi) \cdot (1.0720 - 0.0484C - 0.0529C_L) \quad (10)$$

式中各项的含义同上,云量单位是成,采用十分制。图 3a 是用考虑总云量和低云量两个因子建立的经验公式计算的结果与实测结果的对比图。由该图可以看出,计算值与实测值在变化趋势上

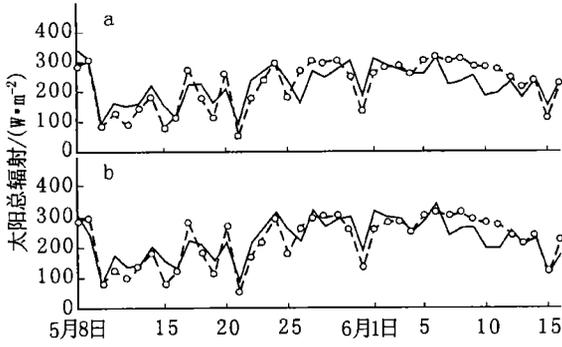


图 3 使用不同经验公式计算的太阳辐射日均值与 2000 年观测期间实测值的对比。图中空心圆虚线为实测值, 实线为计算值(图 4、图 5、图 6 同)
a. 考虑总云量和低云量; b. 增加水汽修正项

Fig. 3 Comparison in total solar radiation between the estimated using different estimation formulas and the observational data in 2000. The open circle-dotted line represents the observation and the solid line for the estimated (the same as fig. 4, fig. 5, fig. 6)
a. in combination with total cloud cover and lower cloud cover; b. in combination of additional vapor item

基本上一致,但在量值上差异较大,比如在 6 月 7 日—6 月 13 日这一段差别明显。那么为什么仅用云量进行估值会造成较大的量值差别呢? 作者认为有二方面原因: 第一,可能与云量的观测方式有关,众所周知,云量的观测采用目测方式,对同一云况不同的观测者可能会得到不同结果,尤其云量在 2—8 成之间时; 第二,晴空状况下的大气透射率表达式(2—7 式)过于简单,因为不同海区大气状况不同,其晴空大气透射率也应不同,甚至同一海区不同季节大气状况也会发生改变,此时晴空大气透射率也自然会产生相应的变化。对第一种情况,因云量观测方式暂无法改变而较难修正,下面的论述考虑第二种情况。

2.2 水汽修正

对晴空大气透射率作者使用了一个统一的表达式(7 式),这显然并不合理,需要加以修正。由于水汽对辐射影响较大,因此再引入海面饱和水汽压因子,建立回归方程,得到如下经验公式:

$$S = S_0 \sin \psi (0.2 + 0.6 \sin \psi) (0.0511E - 0.6073 - 0.0388C - 0.0353C_L) \quad (11)$$

式中, E 为海面饱和水汽压,其余各量含义同前。由上式可以看出,当低云量 C_L 与总云量 C 为零时(对应晴空状况),云效应项并不等于 1 而与海

面饱和水汽压 E 有关,这相当于对晴空大气透射率进行了修正,与实测结果比较,日均误差减少到 42 W/m^2 左右,太阳辐射日均值计算结果有一定提高。图 1b 给出了由(11)式计算的结果与实测结果的图示,与无水汽修正结果(图 1a)相比,计算结果有一定改善。但与 Dobdon 等(1988)使用太平洋海洋气象站观测资料对相同季节用 Okta、Lind 和 Reed 模式计算的误差(32 W/m^2)相比,误差仍偏大。

2.3 考虑日照时间的海面太阳辐射的计算

由观测分析结果可知,日照时间与太阳辐射的对应关系最好,显然有必要考虑日照时间这一因子。以往也有单独使用日照时间建立计算太阳辐射的表达式,但大多用于陆面且为气候估计(王名才, 1994)。利用 2000 年实测资料分别建立了太阳辐射仅与日照时间(日均误差 22 W/m^2)、太阳辐射与日照时间及海面饱和水汽压(日均误差 22 W/m^2)、太阳辐射与日照时间及云量(日均误差 18.5 W/m^2)以及考虑全部因子的情形表达式。误差分析结果发现,考虑全部因子的海面太阳辐射计算式误差最小,故给出此表达式:

$$S = S_0 \sin \psi (0.2 + 0.6 \sin \psi) (0.0511E - 0.6073H - 0.0388C - 0.0353C_L) \quad (12)$$

式中, H 为日总日照时间(单位: h),计算结果与实测结果对比,日均误差小于 18 W/m^2 ,若以观测期间的太阳辐射日均值(225 W/m^2 左右)为基准,误差小于 10%,此结果已有较好应用价值。图 4 是用 2000 年资料计算的太阳辐射计算结果与实测结果的对比图示。由该图可以看出,除个别日子

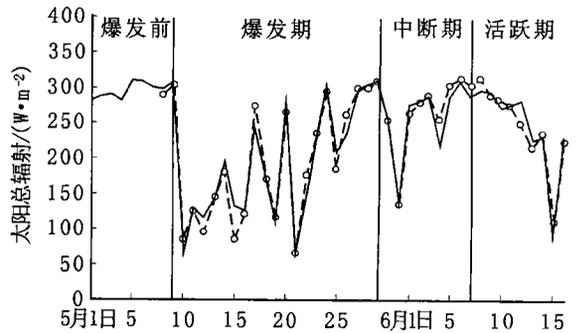


图 4 使用考虑日照时间的经验公式计算的太阳辐射日均值与观测期间实测值的对比

Fig. 4 Comparison in total solar radiation between the estimated using empirical formula based on the duration of sunshine and the observation in 2000

外, 计算结果与实测结果吻合得很好, 因此下面以 (12) 式为基准进行观测海区太阳辐射估算。图 4 中还给出了 2000 年 5 月 1—7 日海面太阳辐射估算值, 实测中这段时间没有观测值, 由于误差小于 10%, 因此可以推断估算值与实际值差异不会太大。由估算值可以看出, 季风爆发前, 太阳辐射始终维持高值, 这与由 2002 年实测资料分析结果完全一致。

3 检验与应用

作者用 2000 年辐射观测资料和同期云量、日照时间等常规观测资料建立了计算海面太阳辐射的经验公式 (11) 式和 (12) 式, 并进行了对比分析, 得到了单独使用云量估计海面太阳辐射误差较大, 而考虑水汽修正和日照时间提高了计算海面太阳辐射的精度这一结论, 尤其是考虑了日照时间后精度大大提高。为了进一步说明这一结论的可靠性, 作者使用 2002 年的观测资料做独立检验。2002 年的观测地点在 2000 年观测地点附近 10m 处, 观测仪器与 2000 年相同, 有关观测资料的详细情况请参看 1.1 资料来源小节。图 5a、b 给出了分别用经验公式 (10) 式和 (11) 式计算的 2002 年观测期间海面处太阳辐射估计值与实测值逐日变化的对比图示, 由该图可以看出, 估计值

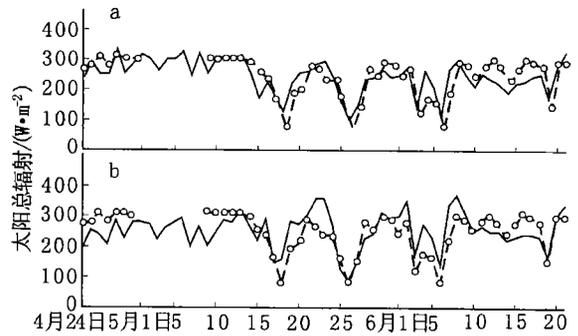


图 5 利用 2002 年观测资料进行的独立检验对比

a. 考虑总云量和低云量; b. 增加水汽修正项

Fig. 5 Comparison between independence test and observation in 2002

a. in combination with total cloud cover and lower cloud cover;

b. in combination with additional vapor item

基本再现了实测结果的变化趋势。图 6 是用综合考虑了云量、水汽压和日照时间的经验公式 (12) 式计算的 2002 年观测期间海面处太阳辐射估计值与实测值逐日变化的对比图示, 可以看出, 与 2000 年计算结果类似, 计算值与实测值吻合得较好, 均优于图 5a、5b 的结果; 误差分析结果见表 1。因此, 用 (12) 式计算的海面处太阳辐射估计值优于用 (11) 式和 (10) 式计算的结果。

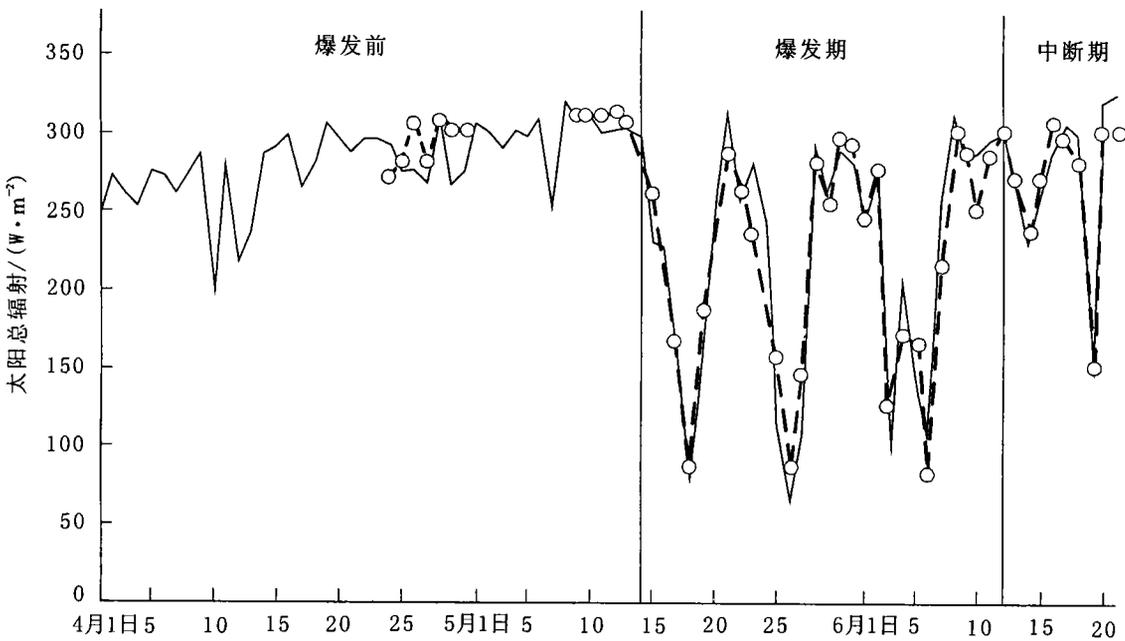


图 6 利用经验公式 (12) 式计算的 2002 年 4—6 月太阳总辐射日均值及与实测结果的对比

Fig. 6 Comparison between the observation data from April to June in 2002 and

the estimation calculated by empirical fomula (12)

表 1 日均太阳辐射计算误差(W/m^2) 分析结果
Tab. 1 The error analysis result for daily total solar radiation

误差	2000 年检验结果			2002 年独立检验结果		
	(12) 式	(11) 式	(10) 式	(12) 式	(11) 式	(10) 式
均值偏差	0.0093	- 0.0296	- 0.2776	- 1.4114	2.2392	- 11.2588
均方差	17.95	42.3415	49.2111	21.0798	56.1144	38.8419

由于综合考虑云量、水汽和日照时间的经验公式计算精度较高,且二年的观测资料均证实了这一点,因此,可以使用该公式对观测海区海面处太阳总辐射值进行估算。

为了解南海季风爆发前较长一段太阳总辐射强度的逐日变化情况,进一步估算了 2002 年 4 月 1—23 日(南海季风爆发前一个多月)的太阳总辐射日均值(图 6)。分析结果发现,在南海季风爆发前一个月,太阳总辐射日均值始终处于一种缓慢增加的过程,从 4 月初的 $250W/m^2$ 左右增加到 5 月初的 $300W/m^2$ 左右,这一变化过程显然与太阳辐射的季节进程相对应,这是一个缓慢变化的过程,但爆发后,太阳总辐射日均值出现明显的减弱,2002 年南海季风爆发期间,有 3 次减弱过程,最低日均值在 $50W/m^2$ 左右,有明显突变现象。

4 结论与讨论

本文中作者首先利用 2000 年与 2002 年《南海海气通量观测研究》项目的二次外场辐射观测资料和西沙站常规气象观测资料分析了影响太阳辐射日均值的关键因子,在此基础上,先利用 2000 年的资料建立计算南海北部海区海面太阳辐射的经验公式,然后使用 2002 年外场辐射观测资料进行了独立检验并进行了误差分析,得到以下结论:

(1) 虽然从常规推断,云是影响太阳辐射的最直接因子,但是利用仅考虑云量建立的经验公式对海面太阳辐射进行计算,获得的日均误差较大;

(2) 考虑水汽修正后的经验公式虽有一定修正效果,但精度提高不大;

(3) 综合考虑云量、水汽和日照时间的简单经验公式的计算精度较高,尤其是考虑日照时间后效果更佳,用其进行实际估算较为可靠。

那么,为什么会产生上述结果呢?作者认为这可能有两方面的原因:第一,与一些观测量的观

测方式有关。虽然从物理学的角度来看,影响太阳辐射变化的更直接因子是云,但是目前的云量观测有较多的主观随意性,而日照时间则是由日照时间记录给出,因此使用日照时间更为客观。第二,日照时间也能代表了太阳辐射的强弱。日照时间代表了太阳辐射透过云层照射海面的时间,虽然它不能直接影响太阳辐射的强弱,但它从时间的角度反映了太阳辐射与云的关联,因此,它间接地代表了太阳辐射的强弱,这可能也是为什么太阳辐射的变化与日照时间的变化对应的较好的原因。

本文的研究结果也说明,对一些在岛屿上建的常规气象站,增设日照时间的观测,对海上太阳辐射逐日变化的研究是十分有益的,它可以大大提高逐日太阳辐射强度的估算精度。

当然,需指出的是,由于作者所用的辐射观测资料只有 4—6 月份的,所导出的经验公式是否适合其他月份需要做进一步的检验。就从此意义上来说,进一步开展南海海气通量观测仍是十分必要的。

致谢 中国气象局国家气候中心李江龙、吕战军和解放军理工大学气象学院李训强、肖义国,为获得 2000 年外场观测资料付出了艰辛的劳动;中国气象局国家气候中心丁一汇、罗勇、张秀芝以及解放军理工大学气象学院沙文钰在后方提供了指导和后勤保障,确保了外场观测的顺利完成;中国气象局西沙气象台提供了同期西沙站气象资料,谨致谢忱。

参 考 文 献

- 王名才, 1994. 大气科学常用公式. 北京: 气象出版社, 430—435
- 王谦谦, 钱永甫, 1997. 太阳辐射日变化对夏季风模拟特征的影响. 气象学报, 55(3): 334—358 [Wang Q Q, Qian Y F, 1997. The impact of the diurnal variation of solar

- radiation on the summer monsoon modeling. *Acta Meteorologica Sinica*, 55(3): 334—358]
- 卢里, 曾庆存, 1987. 太阳辐射日变化对气候模拟的影响. *大气科学*, 11(4): 351—358 [Lu L, Zeng Q C, 1987. The impact of the diurnal variation of solar radiation on the climate modeling. *Scientia Atmospherica Sinica*, 11(4): 351—358]
- 白学志, 吴爱明, 赵永平, 1999. 南海季风爆发前后南海南部 SST 和海表热通量变化机制分析. 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出版社, 157—165
- 吉尔 A E 著, 张立政等译, 1988. 大气-海洋动力学. 北京: 海洋出版社, 3—15
- 张运林, 秦伯强, 陈伟民等, 2004. 太湖水体光学衰减系数的特征及参数化. *海洋与湖沼*, 35(3): 209—213 [Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M *et al*, 2003. Regression analysis of beam attenuation coefficient under water in Lake Taihu. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 35(3): 209—213]
- 张新玲, 郭心顺, 吴增茂等, 2001. 渤海海面太阳辐照强度的观测分析与计算方法研究. *海洋学报*, 23(2): 46—51 [Zhang X L, Guo X S, Wu Z M *et al*, 2001. The observation analyses and calculation method studies of solar irradiation at sea surface for the Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 23(2): 46—51]
- 张宝玉, 李夜光, 李中奎等, 2003. 光照、温度和 pH 对雨生红球藻(*Haematococcus pluvialis*) 光合作用和生长速率的影响. *海洋与湖沼*, 34(5): 558—566 [Zhang B Y, Li Y G, Li Z K *et al*, 2003. Effects of temperature, light intensity and pH on photosynthesis and growth rate of *Haematococcus pluvialis*. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 34(5): 558—566]
- 邵庆秋, 周明煜, 李兴生, 1991. 洋面动量、感热和潜热通量计算的研究. *大气科学*, 15(3): 9—17 [Shao Q Q, Zhou M Y, Li X S, 1991. Computations of momentum, sensible heat and latent heat fluxes on Pacific Ocean. *Scientia Atmospherica Sinica*, 15(3): 9—17]
- 岳前进, 季顺迎, 苗文东等, 2000. 辽东湾冰季太阳辐射分析. *海洋与湖沼*, 31(5): 562—567 [Yue Q J, Ji S Y, Miao W D *et al*, 2000. Solar radiation on sea ice in liaodong bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 31(5): 562—567]
- 杨桂朋, 戚佳琳, 2003. 海水中萘的光化学降解研究. *海洋与湖沼*, 34(1): 56—66 [Yang G P, Qi J L, 2003. Study on photochemical degradation of naphthalene in seawater. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 34(1): 56—66]
- 康德拉捷夫著, 李怀瑾等译, 1962. 太阳辐射能. 北京: 科学出版社, 68—550
- 斯塔尔著, 徐静琦, 杨殿荣译, 1991. 边界层气象学导论. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 173—180
- 蒋国荣, 沙文钰, 阎俊岳等, 2002. 南海季风爆发前后辐射特征分析. *热带气象学报*, 18(1): 29—37 [Jiang G R, Sha W Y, Yan J Y *et al*, 2002. The analysis of the radiation features before and after South China Sea Monsoon Onset. *Journal of Tropical Meteorology*, 18(1): 29—37]
- 翟盘茂, 1991. 海洋表面辐射计算方法. *海洋通报*, 10(6): 79—90 [Zhai P M, 1991. On computation models of radiation estimation at sea surface. *Marine Science Bulletin*, 10(6): 79—90]
- Dobson F W, Smith S D, 1988. Bulk models of solar radiation at sea. *Q J R. Meteorol Soc*, 114: 165—182
- Muhammad Iqbal, 1983. An introduction to solar radiation. Ontario: Academic Press Canada, 43—278
- Schiano M E, Santoleri R, Bignami F *et al*, 1993. Air-sea interaction measurements in the West Mediterranean Sea during the Tyrrhenian Eddy Multi-Platform Observations Experiment. *J Geophys Res*, 98(C2): 2461—2474
- Wang B, Xie X, 1998. Coupled modes of the warm pool climate system Part I: The role of air-sea interaction in maintaining Madden-Julian oscillation. *J Climate*, 11: 2116—2135

ANALYSES AND CALCULATION OF SOLAR RADIATION OVER NORTHERN SOUTH CHINA SEA

WANG Ju, YAO Hua-Dong¹, JIANG Guo-Rong, HE Jia-Hai²,

YAN Jun-Yue³, ZHENG Jing³, CHEN Yi-De³

¹(*Department of Atmospheric Sciences, Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing, 210044;*

Meteorological College, PLA Science/Technology University, Nanjing, 211101)

²(*National Climate Center of China Meteorological Administration, Beijing, 100081)*

³(*Department of Atmospheric Sciences, Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing, 210044)*

(Meteorological College, PLA Science/Technology University, Nanjing, 211101)

Abstract Lack of solar radiation data in the study area limited the theoretical research in simple empirical estimation formula for solar radiation and mostly for climate estimation. But sometimes we are interesting in synoptic scale and short-range climate process, in which daily solar radiation intensity needs to be estimated. This paper dealt with related problems based on the data collected in the marine survey in Xisha Island area ($16^{\circ}50'N$, $112^{\circ}20'E$) in 2000 and 2002.

The observation site was located in northern central South China Sea in the fringe of a reef about 300m to the southwest of Yongxing Island. Observation was done in an observatory tower. The solar radiation data were obtained twice in stages between May 8 and June 16 in 2000 (total 40days), and between April 24 and June 21 in 2002 (total 59 days). In this study, we analyzed the total solar radiation and possible influencing factors first, and then determined which factors were better for our calculation. Secondly, we built up empirical estimation formulas that mostly used cloud cover data that is fundamental for maritime meteorological study. We also tried other empirical estimation formula using total solar radiation based on cloud cover. Required corrections, such as vapor correction, were made to our calculations to obtain daily solar radiation data in the area in all possible conditions.

So, firstly we carried on the contrast analysis among the solar total radiation, total cloud cover, lower cloud cover, and sunshine duration. It was found that the total solar radiation was best related to sunshine duration, followed by lower cloud cover and total cloud cover. Secondly, from the sake of calculation, we constructed a formula for getting solar total radiation, parameterized by total cloud cover, lower cloud cover and vapor, by multivariate linear regression out of the observed radiation data in 2000, with necessary error analysis and contrast analysis with the predecessors. We found that vapor correction can only improve the precision a little of total solar radiation. Thirdly, we constructed an estimation formula for solar total radiation out of all the factors above-listed. Error analysis showed that considering sunshine duration in observation area could raise estimation precision for daily solar radiation intensity, which would reduce error by 50%. Finally, we performed an independence test using Year 2002 data and confirmed the reliability of the result above. And we also apply the formula to the estimation for daily variation of the solar total radiation in phases before the SCS monsoon break. It was found that the total solar radiation increase slowly all the times.

In overall, tagging item of observed sunshine duration in calculation for some area is very useful to research daily solar radiation variation, which can greatly enhance the estimation precision for daily solar radiation intensity.

Key words SCS, Air-sea fluxes observation, Calculation method for solar radiation, Cloud cover, Sunshine duration