

太阳辐射日变化对气候模拟的影响

卢理 曾庆存

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文用两层大气环流模式,作气候模拟对于太阳辐射日变化的敏感性试验。取实测的七月纬圈平均气候资料作为初始场,积分四十天,对后三十天的结果进行平均,作为模拟的月平均状态。另一个试验则是在模式中去掉太阳辐射的日变化,其它都和第一个试验相同。比较这两个试验的计算结果,发现:若忽略太阳辐射的日变化,(i)使纬圈平均降水和蒸发都减少,尤其在中纬陆地上更为显著;(ii)部分地区土壤湿度减少;(iii)云量增加;(iv)大气顶净辐射收入明显减少;(v)地表净加热明显减少;并使土壤湿度变化不大的地区地表温度明显降低。

我们还取了一月纬圈平均气候资料作为初始场,作了同样的数值试验,得到了类似的结果。

本文的结果表明,要作出正确的气候预测,以及作中、短期降水预报,考虑太阳辐射的日变化都是必要的。

一、引 言

对于长期数值预报和气候模拟,可按 Lorenz (1975)^[1] 的概念分为两种:一种是预报各种时间尺度(月、年)内大气的平均值及其与多年平均的偏差——第一类气候预测问题;另一种则是计算大气平均状态对于各种外部强迫因子变化的响应——第二类气候预测问题。后者又常被称为敏感性试验,显然,它对自然和人为的气候变化的研究是十分必要的。

由于大气环流模式(GCM)本身已很复杂,计算量又大,为了节省计算量,在过去相当长的时间内,人们在用GCM作数值天气预报、气候模拟以及各种敏感性试验时,大都忽略了太阳辐射的日变化,即将各纬度白天的辐射总量除以24小时,作为任一时刻的太阳辐射值。Manabe (1961)^[2] 曾较详细地给出了这一处理过程及资料来源,并在其后若干年的工作中均采用这种简化。NCAR (1984)^[3] 的气候模拟也是如此。那么,采用这一简化是否合理呢?换句话说,忽略了太阳辐射的日变化,对于天气过程以及即使是长期的气候平均值的预测,是否会带来不可忽视的误差呢?这一问题长期没有引起人们的足够重视。虽然在另外一些模式中也含有太阳辐射日变化,如郭晓岚、钱永甫(1982)^[4] 就曾作了青藏高原日变化对于天气过程的影响的研究,还用同样模式作夏季风动力学研究; Gates

的二层气候模式(1982)^[9]也计入了太阳辐射日变化。但前者是区域模式,且只积分了数天;而后者虽然作了长时间积分,但没有另外作试验以考察忽略太阳辐射日变化对模拟结果的影响。显然,为了揭示出太阳辐射日变化在天气过程和气候形成及预测中的作用,有必要用同一的模式作试验,对有无太阳辐射日变化的模拟结果作对比分析。应该说,这是另一种类型的敏感性试验。

为了说明太阳辐射日变化确实是重要的,在这里我们首先观察一下实测的降水日变化。图 1^[6]是南京地区 1930—1934 年夏季平均的降水日变化曲线,它鲜明地显示出在清晨(当地 6—8 时)和午后(当地 16—18 时)有两次极大值,尤以午后者为大。其它地区的降雨量日变化曲线虽然和图 1 不尽相同,但大都显示出日变化。对于降水日变化问题,有人曾把已有的说法归为热力说和动力说两种^[7]。显然,单一的热力说或动力说都是片面的。不过,辐射加热的日变化是调节降水日变化的主要因子则是无疑的。那么,在作气候预测中辐射日变化是否仍然重要呢?如果对降水重要,对其它要素是否也重要呢?这些都是很值得研究的问题。

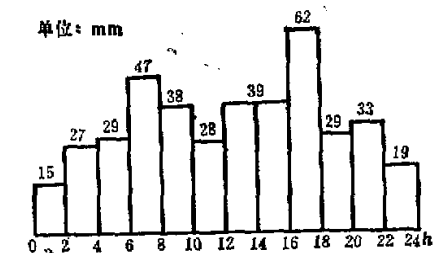


图 1 南京地区夏季降雨量的日变化

时间为地方时,降雨量单位为毫米。

本工作将利用现有的两层大气环流模式作数值模拟,试图澄清上述的问题。首先简单介绍模式及忽略太阳辐射日变化的具体处理方法,其次介绍模拟的结果和分析讨论,在此基础上,最后作一初步小结。

二、模式简介

1. 大气环流模式

本文选用 OSU 的两层大气环流模式^[4]进行模拟。这是因为它是当今世界上最简单然而物理过程又比较全面的模式,在世界上亦比较著名,有较多模拟结果于世所知。而本工作主要研究辐射日变化的影响,特别是对降水、蒸发、云量、土壤湿度等物理量的影响以及它们之间的相互关系,所以选用 OSU 模式是合适的。该模式的详细介绍请参阅文献[5]。图 2 给出该模式的垂直结构和主要物理量分布。其中: $P_T = 200\text{hPa}$, $\sigma = (P - P_T)/(P_s - P_T)$, S 为短波辐射通量, R 为长波辐射通量, α_s 为表面反照率, $\dot{H}$ 为大气非绝热加热率, $\dot{Q}$ 为水汽源, F 为摩擦项, H_s 为表面感热通量, P 为降水强度, E_s 为表面蒸发强度, τ_s 为表面动量通量, S 为积雪量, W 为土壤湿度, $CL_1 - CL_4$ 为模式中四种类型云。

除 CL 外, 下标数目字代表 σ 面的不同层次: 等于零对应大气顶(200hPa); 等于 1 对应地面; 等于 1/4、1/2、3/4 分别对应 1、2、3 层。

2. 关于去掉太阳辐射日变化的方法

在大气顶的人射太阳辐射可以表示成:

$$F^{\downarrow} = S_0 \cdot \cos \zeta \quad (2.1)$$

其中, S_0 是太阳常数, ζ 是太阳天顶角, 它满足:

$$\cos \zeta = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h \quad (2.2)$$

其中, φ 是地理纬度, δ 是太阳赤纬, h 为太阳的时角。忽略太阳辐射的日变化, 也就是忽略太阳时角 h 的变化所引起的辐射通量 $F^{\downarrow}$ 的变化。当 δ (日期)、 φ (纬度) 确定时, 我们有:

$$\overline{\cos \zeta} = \bar{a} + \bar{b} \cdot \overline{\cos h} \quad (2.2)'$$

其中 a 和 b 为依赖于 φ 和 δ 的常数。这样, 当知道了某一天的日出、日落时刻 h_1, h_2 , 即可求出:

$$\begin{aligned} \overline{b \cdot \cos h} &= b \cdot \int_{h_1}^{h_2} \cos h dh / 24 \text{ (小时)} \\ \bar{a} &= a \cdot (h_2 - h_1) / 24 \text{ (小时)} \end{aligned}$$

在(2.2)式中, 代入给定的 δ 和 φ , 并令 $\cos \zeta = 0$, 可得到 $\cos h$ 的两个解, 它们分别对应应该天和该地的日出、日落时刻。为节省计算量起见, 在本文中中以当地每月 15 日的 $\overline{\cos h}$ 代入方程(2.2)', 再代以每天当地的 δ 和 φ 值, 来求出当地当天的 $\overline{\cos \zeta}$ 值。这样, 当日期和纬度确定时, $F^{\downarrow}$ 是相同的, 即去掉了太阳辐射的日变化, 而且不影响全天的总辐射量; 当日期不同时, $F^{\downarrow}$ 却是变化的, 这样就又考虑了太阳赤纬变化引起的太阳辐射日际变化。

在 Manabe^[2] 及其后来的工作中, 是以一个月平均的 $\overline{\cos \zeta}$ 代入(2.1)式的, 即同时忽略了太阳赤纬 δ 的变化。显然, 本工作的处理方法更全面些。

三、模拟结果及其讨论

我们取七月和一月的的气候资料作为初条件, 作了两组数值模拟, 每组模拟的积分长度都是四十天。

为简单、明确起见, 我们这里只给出模拟结果中纬圈平均量的对比。每张图中实线和虚线分别对应于有、无太阳辐射日变化的模拟结果。另外, 我们主要考虑的是忽略辐射日变化对一些物理过程的影响, 以及它们的相互联系, 因而选取了与热力过程有关的降水、蒸发、云量、土壤湿度及辐射收支、地面温度等进行分析和讨论。

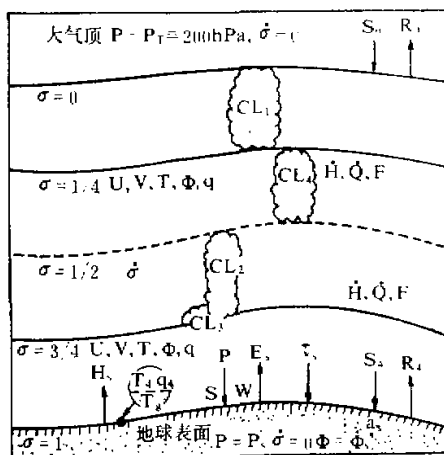


图 2 模式垂直分层和主要变量

1. 降水

1) 总降水量

设想降水主要由空气对流上升所致,而对流强度日变化则由太阳辐射日变化引起。显然,由于对流而产生的垂直速度 W 在白天为正(上升气流),在夜间为负或为零(下沉运动),而在午后 W 有最大值,如图3曲线 a 所示(我们设大尺度系统在该地导致上升气流,但很小,不足以抵消夜间辐射冷却所导致的下沉气流)。若不考虑辐射日变化,则由于下层空气是稳定的或微弱不稳定的,垂直速度比较小,且变化小,如图3曲线 b 所示(这里我们假设大尺度系统导致的垂直速度为正)。虽然在曲线 a 中,夜间垂直速度为负,没有降水,但白天的垂直速度很大,降水强度大增;而曲线 b 的垂直速度小,降水量也就小,甚至不形成降水(如果 W 很小或为零)。可见太阳辐射日变化导致了降水日变化,而且是使降水量比无太阳辐射日变化者增大。此外,由于昼夜交替,在有云覆盖情况下,在云顶附近,有时还可以在清晨形成某种位势不稳定层结,也有利于强对流的产生,这点在图3中我们还未表示出来。

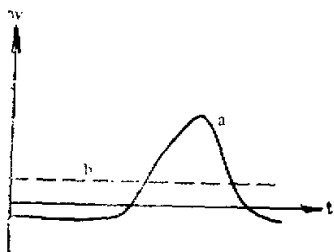


图 3

图4.1(a)给出了七月份纬圈平均的降水分布的模拟结果。从图中可以看出:考虑太阳辐射日变化时,降水量在绝大多数纬度带内都比忽略太阳辐射日变化时的要多,尤其是在北半球中纬度(那里陆地面积大,且太阳辐射比较强)。这和我们的预想及上面的分析推论是一致的。

2) 对流降水

在模式输出中,总降水量由对流降水和大尺度凝结降水组成。对比两次试验中对流降水的大小,更能反映出太阳辐射日变化的影响,如图4.2(a)所示。将它与图4.1(a)比较,可以看到其差别确实更加明显了。此外,除高纬地带外,降水量主要由对流降水所致。

3) 陆地降水

容易想象,太阳辐射日变化对降水的影响在陆地上更为突出。这是因为陆地比海洋比热小,升温或降温显著(昼夜温差达 10°C 以上,有些地方可达 20°C 以上^[6]),近地面层以及低层大气层结不稳定,利于产生强对流。而海洋的昼夜温差一般小于 2°C ,因而对是否计入辐射日变化影响不大。图4.3(a)和图4.4(a)即分别是七月份各纬度带陆地部份的总降水和对流降水曲线。两组模拟结果的差别又分别比图4.1(a)和图4.2(a)大得多。

图4.1(b)至图4.4(b)是一月份的模拟结果。由图可以看出,赤道附近及南半球仍是有辐射日变化的降水大,尤其在陆地上更是如此。而北半球的差别则不很明显,但低纬地区不计太阳辐射日变化时降水量反略增,其机理不明。

从以上分析可以得出如下结论:忽略太阳辐射日变化主要影响夏季半球的降水量,尤以中纬度陆地部份为甚,可减少 $2/7$ 到一半。

2. 蒸发

图 4.5(a) 和图 4.6(a) 分别是七月的纬圈平均和陆地部份的蒸发曲线。与降水情况类似,有日变化时白天辐射强,蒸发量大,足以弥补夜间的蒸发不足,使其平均值大于无日变化时的蒸发量,尤以陆地上更为显著。中、低纬地带都如此。不考虑太阳辐射日变化使蒸发量减少 $1/4$ 至一半。注意,在计及太阳辐射日变化时,在陆地上白天因降水多使土壤水份增大,再加上白天辐射强,使蒸发量相对差别更为明显。

图 4.5(b) 和 4.6(b) 是一月的模拟结果。与降水的情况相似,辐射强度大的地区,有辐射日变化的蒸发量大。实际上也就是:两者之差决定于有辐射日变化时白天的强烈蒸发是否大于无日变化时缓慢蒸发的累积效果。

3. 土壤湿度

图 4.7(a) 给出七月份平均的土壤湿度分布曲线。将此图与图 4.3(a) 的陆地降水曲线及图 4.6(a) 的陆地蒸发曲线相比较即可发现: 35°N — 20°S 区域内,降水量之差大于蒸发量之差(有日变化的减去无日变化的),因而土壤湿度之差大于零,亦即考虑日变化时的土壤湿度大。而在 40° — 70°N , 降水量之差小于蒸发量之差,因而土壤湿度之差小于零。这一结果显然是合理的。Priestley 和 Taylor (1972)^[9] 的模拟结果也表明,土壤水份 w 不只是依赖于降水量,而是与降水量、蒸发量之差有更好的关系。

图 4.7(b) 是一月份的情况。将其与图 4.3(b) 和图 4.6(b) 相比较,也可得出同样结论。

下面我们将降水、蒸发和土壤湿度的变化看作一个反馈过程,来讨论一下太阳辐射日变化在其中的作用。考虑辐射日变化,对流增加,使降水量增加,而土壤湿度增大,蒸发量增大,大气中的水汽含量增加,于是又可导致降水量的增加。显然,降水通过土壤湿度到蒸发是个正反馈过程。我们的计算结果表明,虽然不论是否计入太阳辐射日变化,其在一天当中辐射总量相同,但考虑日变化后,降水量和蒸发量都增加了,这说明反馈过程加快了。如形象地将有、无日变化的大气运动过程比作两部不同效率的热机,则虽然输入的能量相同,但因其内部结构不同,工作效率也就不同。

4. 云量

图 4.8(a)、(b) 给出了模拟的七月和一月的云量分布曲线。可以看到,在赤道及夏季半球,不考虑辐射日变化时云量增多。由于云量在辐射过程中的重要作用,这一差别必将影响辐射收支。

为什么对云量会有这样的影响呢? 比较图 4.8(a)、(b) 可见,在北半球(除 20°N 以南以外),七月(夏季)模拟云量明显少于一月(冬季),即对流旺盛时平均云量反而减少。这也许是对流强时虽然对流云量多些,但在空中停留时间短;而在空中停留时间长的大尺度系统的云量反而减少了,结果是对流强时平均云量反而减少。这问题还需要深入研究。

5. 辐射收支

大气顶的辐射通量抑或地-气系统的辐射能量收支向来是衡量模拟结果的一个重要

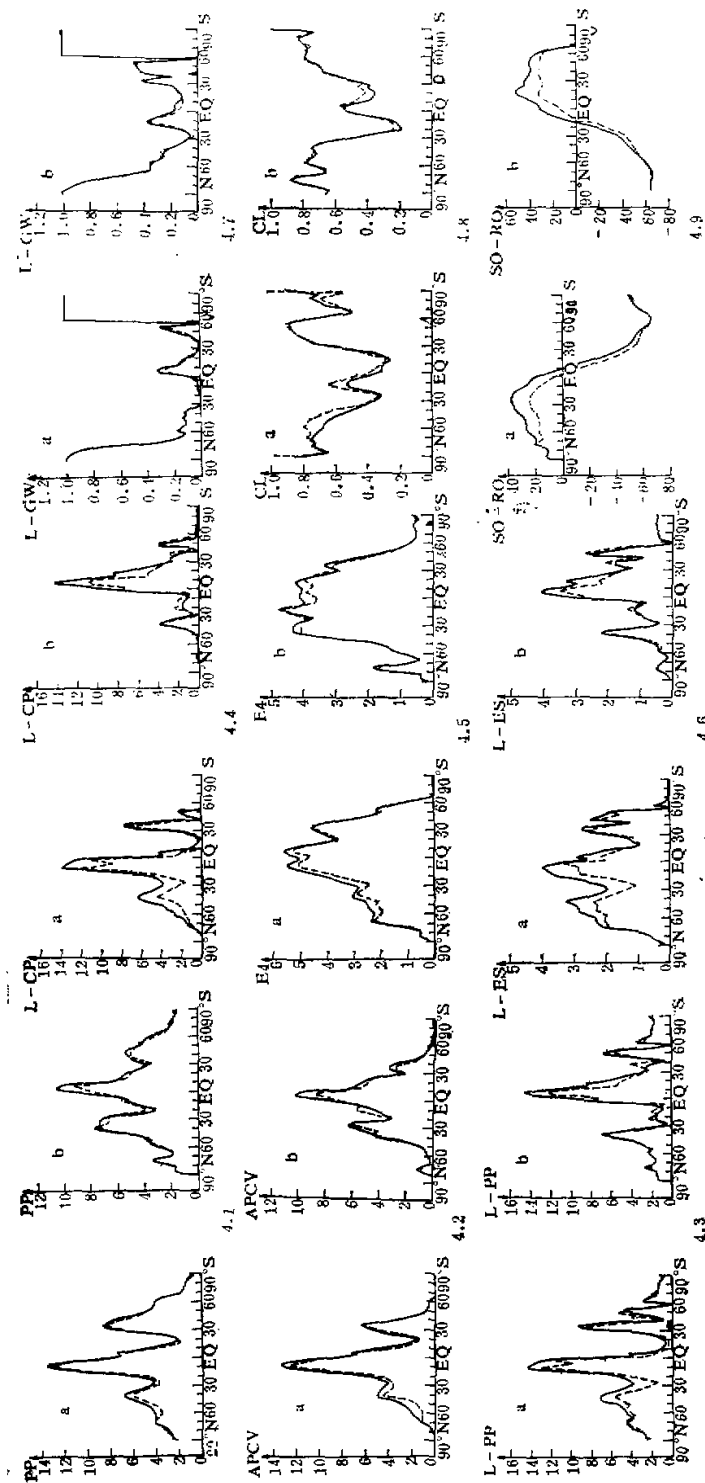


图 4.1 七月(a)和一月(b)纬圈平均降水曲线,单位:毫米/天

- 4.1 对流降水分布曲线,其他同图 4.1
- 4.2 陆地上降水分布曲线,其他同图 4.1
- 4.3 陆地上对流降水分布曲线,其他同图 4.2
- 4.4 蒸发分布曲线,其他同图 4.1
- 4.5 陆地上蒸发分布曲线,其他同图 4.3
- 4.6 土壤湿度分布曲线,其他同图 4.3
- 4.7 云量分布曲线,其他同图 4.7
- 4.8 大气顶净辐射收支分布曲线,单位: 10^2 瓦/天,其他同图 4.1
- 4.9

参量。图 4.9(a)、(b) 给出了它随纬度的分布。从图中可以明显看出, 忽略太阳辐射日变化时, 地-气系统在夏季半球净辐射能收入减少了很多, 而在冬半球则净辐射能支出略有增加。其原因是忽略太阳辐射日变化时, 在夏半球云量增多, 从而反射太阳辐射多; 但在冬半球云量差别不大, 从而反射太阳辐射差别不大。但为什么在冬半球净辐射能支出却增加, 从而导致整个地-气系统损失能量, 这是难于解释的。

6. 地表温度

我们在图 4.10(a)、(b) 中给出地面的净加热分布曲线。由图可以看出, 忽略了辐射日变化后, 由于云量增多, 到达地面的太阳辐射少, 使地面的净热量收入减少。这将引起地表温度的改变。不过, 地表温度的差异还和地表的特性(如水份)及其热容量的改变有关。将图 4.10 与图 4.7(土壤湿度曲线)进行对比可知, 在土壤湿度差别不大的地区, 考虑太阳辐射日变化时地表温度要高些; 而在土壤湿度差别比较大的地区, 则以土壤湿度的差异为主, 亦即土壤湿度大导致土壤热容量大, 进而导致地表温度变低。

七月份地表温度分布曲线(图略)确实如此, 当考虑了太阳辐射日变化时, 在北半球中纬度陆地表面温度可升高 $1-3^{\circ}\text{C}$ 。

一月的地表温差并不很明显, 这可能是因为南半球绝大部分是海洋的缘故。

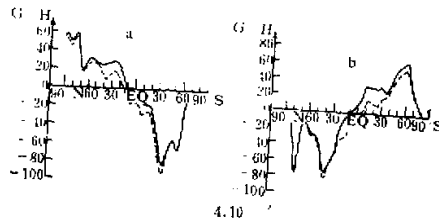


图 4.10 地面净加热分布曲线, 其他同图 4.9

四、小 结

本文所作的敏感性试验结果表明, 考虑太阳辐射日变化能正确反映对流运动的日变化及其对降水的影响; 忽略太阳辐射日变化则不能正确反映这一非线性过程, 从而影响到其它有关的一系列过程。结果是使得在辐射强的半球(夏半球)纬圈平均降水和蒸发有明显减少, 尤其在陆地上更为显著; 土壤湿度在低纬地区减小, 在中纬地区增加; 云量增加; 地-气系统的净辐射能收入明显减少; 地表净加热率变小, 从而使土壤湿度增加的地区(夏半球中纬度带)地表温度降低, 而土壤湿度减小的地区则由于土壤比热减小而使地表温度稍有增加。

由以上这些结果可以得出结论: 太阳辐射日变化通过大气中与热力学过程有关的极复杂的非线性反馈过程, 影响到整个大气运动过程, 因而影响到中、长期数值预报以及气候模拟的准确性。以往忽视太阳辐射日变化的作法虽可节省计算量, 但会给计算结果带

来系统偏差,是应该改正的。

致谢: 张学洪同志曾给予作者之一(卢理)许多具体指导;上机运算过程中,得到了包宁、梁信忠两位同志的大力帮助,谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] Lorenz, E. N., 1975, GARP Publication Series, No. 16, p. 132—136.
- [2] Manabe, S., 1961, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 89, p. 503—532.
- [3] W. M. Washington & G. A. Meehl 1984, *J. Geoph. Res.*, Vol. 89, No. D6 p. 9475—9503.
- [4] 郭晓岚、钱永甫 1982, 高原气象, Vol. 1, No.3.
- [5] Chan, S. J., 1982, A Documentation of The OSU Two-Level Atmospheric General Model, Report No. 35, Climate Research Institute, Oregon State University.
- [6] 黄润本、盛承禹 1961, 气象学与气候学, p. 109, 人民教育出版社.
- [7] 雷雨顺 1980, 自然杂志, 3 卷 10 期. p. 774—778.
- [8] 么枕生, 1959 气候学原理. 科学出版社.
- [9] Priestley, C. H. B. & Talor, R. J. 1972, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 100, p. 81—92.

THE IMPACT OF THE DIURNAL VARIATION OF SOLAR RADIATION ON THE CLIMATE MODELING

Lu Li Zeng Qingcun

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

In order to investigate whether or not the diurnal variation of solar radiation is important in the climate modeling, we have carried out a sensitivity study by using a Two-level Atmospheric General Circulation Model. Taking the climatological zonal mean of July as the initial state and integrating the model up to 40 days, the averaged for last thirty days state is taken as the simulated monthly mean. The diurnal variation of solar radiation is included in one run but excluded in the other run. Comparing the results of the two runs, we found that without the diurnal variation of solar radiation, (i) both zonal mean precipitation and evaporation are reduced, especially on continents; (ii) at low latitudes the soil moisture is reduced; (iii) cloudiness is increased almost at all latitudes; (iv) net incoming radiation energy at the top of the atmosphere is significantly reduced; and (v) the net heating ratio of the ground is reduced, and hence the ground temperature is also reduced except the areas where the soil moisture is reduced a lot.

The same experiment about January have also been done, and the similar results have been obtained.

Our results of numerical simulations show that the diurnal variation of solar radiation should be taken into account in the model for the climate modeling and the short to medium range prediction of precipitation, otherwise it might result in a considerable errors in the predictions.