

地球轨道偏心率变化对东亚 季风气候模拟的影响^{*}

郑益群 于 革 王苏民

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘 要 采用较为真实的椭圆轨道代替了原区域气候模式中的圆近似轨道, 并进行了 10 年模拟试验, 用以了解该模式对东亚季风区气候年际变化的模拟能力, 同时比较地球轨道参数计算变化对现代东亚季风气候模拟的影响。结果表明: 当把模式中的地球轨道计算从圆形改为椭圆时, 中国东部的降水模拟有所改进, 东亚地区的温度、降水、比湿等气候要素均出现夏季降低(减少)而冬季升高(增加)的季节变化趋势, 而且亚洲冬、夏季风也均有减弱。但从总体上说, 现代气候状况的模拟对地球公转轨道的计算方案不敏感。通过该工作的模拟研究说明, 对较短时期的现代气候模拟, 地球公转轨道采用圆近似是可行的。

关键词: 区域气候模式; 轨道参数; 东亚季风

文章编号 1006-9895 (2004) 01-0048-11 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

1 引言

目前, 全球气候、环境急剧变化, 这些变化不仅与人类活动密切相关, 而且受控于气候演变自然趋势。太阳辐射是地球气候现象的最主要能源^[1]。天文因子是气候变化的外部原因, 天文因子影响地球气候主要通过三个方面: 一类是地球轨道参数的变化, 如米兰柯维奇综合地球轨道偏心率(约 96600 年周期)、地轴倾斜度(黄赤交角, 约 40000 年周期)和近日点相对于春分点的进动周期(简称“近日点进动周期”, 约 21000 年周期)^[2]等三种天文参数的变化较好地解释了第四纪冰期—间冰期旋回; 第二类是行星会聚的力矩效应的影响, 主要指月球、行星的位置及相互关系变化对地球气候的影响, 如近千年来中国出现的 5 个低温时期都出现在九大行星会合附近^[3]; 第三类是太阳辐射量变化的影响, 主要指太阳表面包括太阳黑子、日珥、耀斑、光斑等扰动现象对地球气候系统的影响。张先恭等^[4]的研究表明, 太阳活动减弱则中国受旱地区增加, 并出现低温时期。

由于地球气候系统及其外强迫因子的运动几乎覆盖了所有的时、空尺度, 因而在不同的时间尺度上, 需要侧重考虑不同的影响因子。虽然在 10~100 年时间尺度上,

2002-09-13 收到, 2003-03-13 收到再改稿

^{*} 中国科学院知识创新项目 KZCX3-SW-321, 国家自然科学基金资助项目 40201048、40205012、40231011, 国家重点基础研究发展规划项目 2002CB412300 和中国科学院知识创新重大项目 KZCX1-SW-12 共同资助。

太阳活动、火山活动、巨行星的力矩效应及人类活动可能是气候变化的主要影响因子，但对更长时间尺度的气候变化，则必须充分考虑地球轨道参数变化的影响。Hays 等^[5]和 Imbrie 等^[6]的研究表明，由地球轨道变化造成的太阳辐射季节变化是冰期—间冰期旋回的起搏器。而姚檀栋等^[7]通过对古里雅冰芯记录的研究也发现，太阳辐射变化是控制轨道时间尺度上气候变化的主要因子。施雅风等^[8]的研究则表明，距今 40~30 ka 的青藏高原特强夏季风事件与岁差周期密切相关。而 Prell 等^[9]已经查明亚洲夏季风对地球绕日轨道变化所导致的日射差别极为敏感。Peter 等^[10]也认为亚洲夏季风对轨道参数的变化敏感，但冬季风相对不敏感。另外，许多研究^[11~14]还表明，副热带非洲湖面高度及非洲、亚洲夏季风强度的变化具有与地球轨道变化一致的 23~19 ka 的主周期。国际古气候模拟比较计划（PMIP）组织目前世界上公认的优秀气候模式按照 Berger^[15]计算的地球轨道参数设置，对末次盛冰期和中全新世的气候进行了模拟研究，大量模拟研究进一步揭示了太阳辐射变化是全球间冰期气候和非洲、印度季风扩张的基本驱动力^[16~21]，尽管冰期、间冰期的出现时间相对太阳辐射变化的响应存在一定的滞后性。

地球绕太阳公转的轨道是个椭圆，太阳位于椭圆的一个焦点上，黄道面与赤道面存在交角。地球三个基本轨道参数的变化会显著改变地球接收太阳辐射的季节和地域分配。目前，地球轨道的偏心率为 0.016724，地球在近日点时所获得的太阳能比在远日点时约多 6.9%。而地球目前的倾斜率（即黄赤交角）是 23.446° ，当黄赤交角加大时，季节性变得显著。偏心率与黄赤交角共同作用能使一个半球比另一半球显著寒冷^[22]。另外，由于地球公转轨道长轴的旋转及近日点进动周期的影响，地球近日点出现的季节及四季长短约以 20900 年的周期循环。目前，地球近日点在 1 月 4 日前后，远日点在 7 月 5 日前后。虽然形成冬夏寒暑交替的决定性因素是日照时间长短和太阳高度的变化，但日地距离的变化对地表寒暑变化起着增强和削弱的作用^[23]。6000 年前地球近日点在 9 月初，北半球夏季接收的太阳辐射明显比现代多，使该时期成为距今最近的温暖时期（中全新世暖期）。同时，由于地球在远、近日点时的公转速度不同，使得视太阳每日所走的黄经度数也有所不同，并造成四季长短的变化。

目前，许多气候模式对天文因子的影响考虑较为简单。如美国国家大气研究中心（NCAR）的区域气候模式（RegCM2）中起初主要考虑了地球倾斜率的影响，而对地球公转轨道作了圆近似，在后来的改进版本中则采用经验公式考虑了日—地距离变化的影响。这对于较短时间的现代气候模拟是合适的，但如果进行古气候模拟或长时间积分则仍需作进一步改进。本工作采用较为合理的方案改进了 RegCM2 中地球轨道参数的计算，并进行了 10 年连续积分，用以了解该模式对东亚季风区气候年际变化的模拟能力，同时比较地球轨道参数计算变化对现代东亚季风气候模拟的影响，为未来进行长期气候及古气候模拟作准备。

2 模式及地球轨道计算方案

本工作数值试验采用 NCAR 的第二代区域气候模式（RegCM2）。该模式下垫面物理过程的计算采用 Dickinson 设计的 BATS1e 方案^[24, 25]，该方案较为详细地考虑了土

壤、植被与大气之间的水、热交换。为更好地反映大气边界层对下垫面强迫的响应,作者采用湍流动能 (TKE) 闭合方法代替了 RegCM2 中原边界层参数化方案。该方案可以更真实地描述大气边界层的物理过程,使模式的整体模拟效果得到改善^[26]。本工作模拟范围为包括青藏高原在内的东亚区域,模式的水平格点数分别为 72×50 , 水平格距为 120 km, 采用 5 圈海绵侧边界嵌套方案, 垂直方向取 11 层。

原模式中地球公转轨道为圆形。本工作对此进行了改进, 主要计算方案如下:

由于太阳对于地球的相对运动也遵循开普勒定律, 即: 太阳对于地球的行径是一个椭圆, 地球在其一个焦点上; 太阳相对地球运动的面积速度不变。因而, 日—地距离 r 可由极坐标中的椭圆方程^[27] 给出:

$$r = a(1 - e \cos u), \quad (1)$$

其中, a 为椭圆的长半轴, e 为偏心率, u 为太阳的偏近点角。

根据开普勒第二定律:

$$u - e \sin u = \frac{2\pi}{A}(t - t_0) = M, \quad (2)$$

其中, 太阳过近日点的历元 $t_0 = t_{\text{sp}} - \frac{A}{2\pi}(360 - l_p)$, A 为一年的天数, 取为 365.2422, t_{sp} 为春分点 (黄经度数为 0) 的日期, 而 t 为实际时间, l_p 为近日点的黄经度数, M 为平近点角。因而, (1) 式还可写为

$$r \approx a(1 - e \cos M + \dots), \quad (3)$$

而日—地平均距离 r_0 可表示为

$$r_0 = \frac{a+b}{2} = \frac{a(1+\sqrt{1-e^2})}{2}, \quad (4)$$

其中, b 为椭圆的短半轴。任一时刻的太阳黄经度数 l 可近似表示为

$$l \approx l_p + M + 2e \sin M. \quad (5)$$

对于气候模拟问题, 公式 (3)、(5) 仅取到含有 e 为止的项已经足够精确。

由太阳黄经度数 l 和黄赤交角 ϵ 即可计算出太阳的直射纬度, 也就是赤纬 δ :

$$\delta = \arcsin(\sin \epsilon \sin l), \quad (6)$$

而太阳时角 ω 可表示为

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau}(t_l - 12), \quad (7)$$

其中, τ 为一昼夜所需的时间, t_l 为平均太阳地方时。

这样就可得到不同纬度 φ 的太阳天顶角余弦:

$$\cos Z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega, \quad (8)$$

并进而计算出地球任一经、纬度大气上界处的太阳入射通量:

$$S_h = \frac{r_0^2}{r^2} S_0 \cos Z = \frac{(1+\sqrt{1-e^2})^2}{4(1-e \cos M)^2} S_0 \cos Z, \quad (9)$$

其中, S_0 为太阳常数。

在上述计算中所需要的偏心率 e 、近日点出现时的黄经度数 l_p 及黄赤交角 ϵ , 可采用近似公式或从有关天文表中得到。

为研究地球公转轨道计算方法对东亚季风气候的影响, 本工作利用 NCEP/NCAR

的 1986~1995 年月平均气候场作为模拟试验的初始及侧边界强迫场，进行了 10 年积分的对比模拟试验，其中控制试验 E0 采用圆近似的公转轨道，而 Eobi 采用椭圆形轨道（当今位相）；除时间演变分析外，其余各种分析均以略去第 1 年结果后的平均值来进行。下垫面植被都采用 NASA AVHRR（1987）卫星遥感的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 资料插值到模式网格，其余各种设置也完全相同。

3 模拟结果

从控制试验的结果可以看到（图略），尽管对地球公转轨道进行了圆近似，但 RegCM2 仍能较好地模拟降水、温度等气候要素的季节演变及季风的爆发、推进过程，同时对积雪的累积、消融等下垫面状况的变化也有较好模拟能力^[28]，并能根据下垫面状况的改变产生合理的气候响应^[29]。下面，通过对试验结果的对比来具体分析地球轨道变化对东亚季风气候的影响。

3.1 降水

降水是东亚季风气候系统中最重要的要素之一，它综合反映了大气环流及大气温、湿状况的特征。从 Eobi—E0 的年均降水率差值图中可以看到（图 1a），当地球公转轨道由正圆变为椭圆后导致模拟区域内许多地区的年降水减少，但中国东部，尤其是江

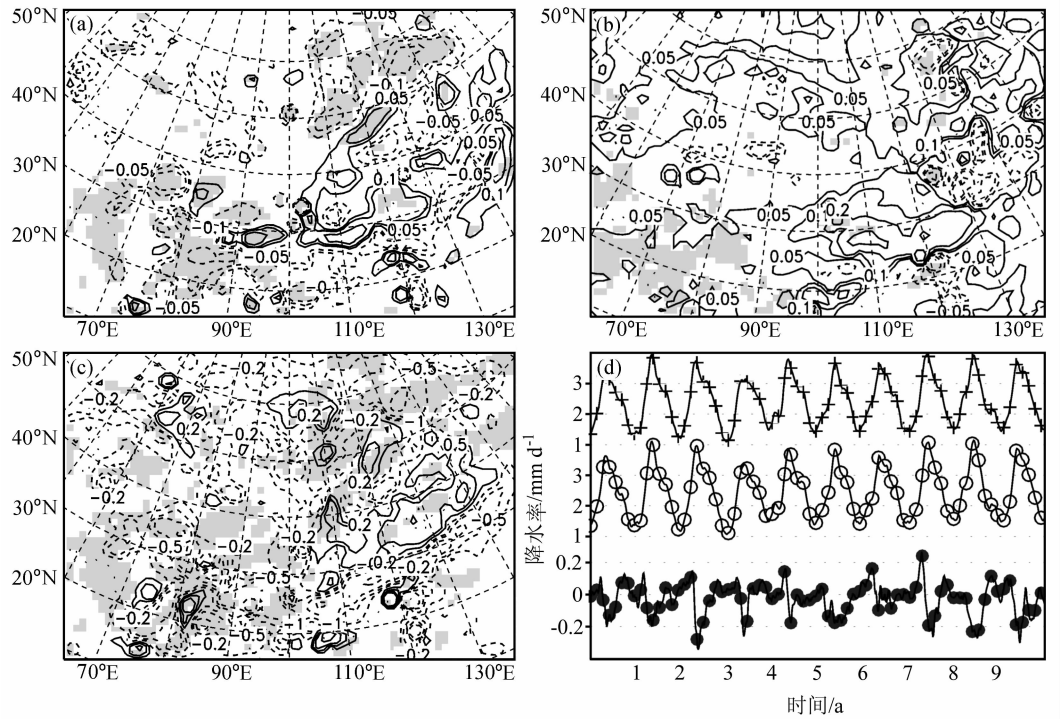


图 1 各试验模拟的降水差值分布及时间演变（单位： mm d^{-1} ）

（a）Eobi—E0 年均降水率差值；（b）Eobi—E0 冬季降水率差值；（c）Eobi—E0 夏季降水率差值；
（d）Eobi（十字线）、E0（空心圆圈线）、Eobi—E0（实心圆圈线）模拟区域平均的降水率差值时间演变
a、b、c 中阴影代表通过 95% 显著性检验的区域

淮流域的降水有所增加,这使得控制试验模拟的中国东部降水中心偏北的现象得到了一定的修正。但总体上降水变率较小,基本上未超过 10%。图 1b 为 Eobi—E0 的冬季降水率变化图,从中可以看到, Eobi 的冬季降水有所增多,尤其是中国东部及印度半岛,但较高纬度地区冬季降水变化不大,这与采用椭圆轨道后北半球冬季太阳辐射增加主要集中在中、低纬度,并使这些地区冬季降温减弱、地表潜热通量增大有关。采用椭圆轨道后许多地区的夏季降水明显减少(图 1c),尤其是 30°N 以南的中、低纬度地区,但中国东部及日本半岛的降水有所增加。

从中国东部的夏季降水变化分布来看,华南降水减少、江淮及黄淮流域增多而以北又减少,呈现出明显的“负、正、负”相间分布,这与东亚弱夏季风年的降水变化分布十分相似^[28, 30]。而印度半岛及孟加拉湾北部的降水减少则与印度夏季风的减弱有关。图 1d 为 Eobi、E0、Eobi—E0 的模拟区域平均的降水率时间演变曲线,从中可以发现, Eobi 及 E0 均能较好地模拟出东亚季风区降水的季节变化特征,即夏季降水最为集中,而冬季降水较少,地球公转轨道参数计算方法的变化并不会明显改变降水模拟的季节特征。但从 Eobi—E0 的差值演变图中可以看到,采用椭圆轨道后,夏季降水有所减少而冬季略有增加,使得降水的季节循环特征减弱,且夏季的降水变化幅度要大于冬季,但从总体上来说,相对变化数值都不大。

3.2 大气温、湿状况及环流

地球公转轨道变化造成南、北半球及不同季节接收的太阳辐射发生变化,其最直接的后果是导致地表及大气热状况的调整。图 2a 为 Eobi—E0 的年均地表温度差值,从中可以看到,许多地区都出现了降温趋势,但变化幅度较小。而在印度半岛、中南半岛北部出现的温度升高则与这些地区云量及降水减少有关(图 1a)。从地表温度变化的季节分布来看,采用椭圆轨道几乎使整个模拟区域的冬季地表温度都有所升高(图 2b),尤其是在中、低纬度陆地,升温中心可超过 1℃,这与改变轨道计算后冬季中、低纬度地区增加的太阳辐射最为显著相一致。而夏季则与冬季基本相反,采用椭圆轨道使大部分地区都出现了明显降温现象,尤其是中纬度地区,降温中心可超过 1.5℃(图 2c),但在印度半岛却存在显著增温,这与印度夏季风减弱,导致云量和降水减少有关(图 1c)。图 2d 为 Eobi、E0 及 Eobi—E0 的模拟区域平均的地表温度时间演变曲线。比较 Eobi 与 E0 的地表温度季节变化情况可以发现,两者十分类似,这说明地球轨道采用圆近似并不会对南、北半球的寒暑季节交替产生明显影响。但从 Eobi—E0 的地表温度差值曲线图上可以发现,采用椭圆轨道后东亚地区夏季明显降温而冬季有所升温,使得东亚地表温度的季节循环减弱,这是目前地球近日点出现在冬季而远日点出现在夏季的结果。另外,从中、高层大气中也能明显看出采用椭圆轨道后出现的夏季降温而冬季升温的现象(图 3a、b),而且夏季降温比冬季升温更为显著。从相应的垂直剖面图上可以发现(图略),无论是夏季降温还是冬季升温都是一种深厚的大气行为,均能从模式底部一直延伸到模式顶(100 hPa)。而且升、降温幅度均以中、低纬度最为明显。

地球轨道变化造成的北半球冬、夏季太阳辐射的变化,使得高、低纬度之间及海、陆之间的热力对比发生了相应变化,并影响到亚洲冬、夏季风的爆发强度。图 4a 为 Eobi—E0 的 850 hPa 夏季差值风环流,从中可以发现,在中国东部及东南部均存在明

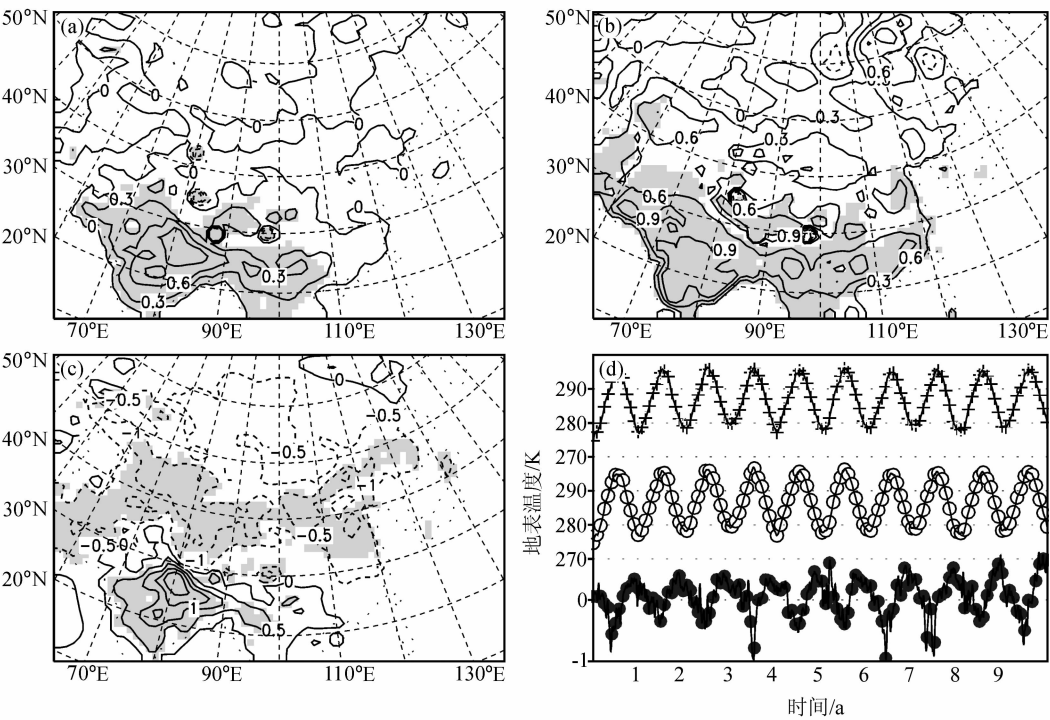


图 2 各试验模拟的地表温度差值分布及时间演变 (单位: K)

(a) Eobi—E0 年均地表温度差值; (b) Eobi—E0 冬季地表温度差值; (c) Eobi—E0 夏季地表温度差值;
(d) Eobi (十字线)、E0 (空心圆圈线)、Eobi—E0 (实心圆圈线) 模拟区域平均的地表温度差值时间演变
a、b、c 中阴影代表通过 95% 显著性检验的区域

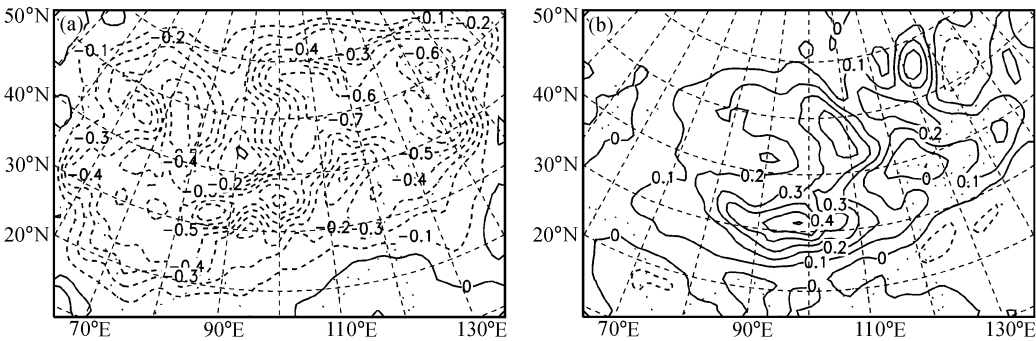


图 3 Eobi—E0 的夏季 (a)、冬季 (b) 500 hPa 温度差值分布 (单位: K)

显东北向差值风环流, 说明采用椭圆轨道后东亚夏季风有减弱的趋势。同时, 在印度半岛及孟加拉湾地区也存在明显的偏东或偏北的差值风环流, 表明印度夏季风也有减弱的趋势。而从 Eobi—E0 的 850 hPa 冬季差值风环流图 (图 4b) 中可以看到, 在东亚地区存在明显的偏南差值风环流, 说明东亚冬季风也是减弱的, 这进一步证实了前面分析得出的有关采用椭圆轨道使北半球气候的季节循环减弱的结论。据此还可以推测, 采用椭圆轨道后南半球的季节循环应该增大, 但变化幅度可能比北半球小, 因为南半球大部分地区都被热容量巨大的海洋所覆盖。从 200 hPa 及 500 hPa 的位势高度变化图

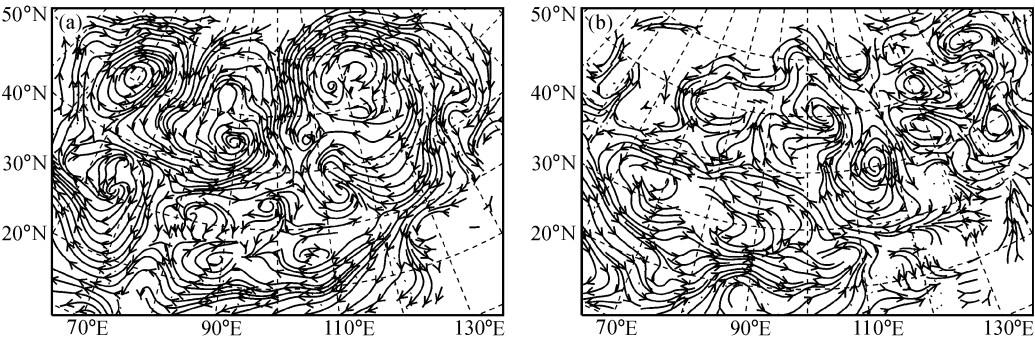


图 4 Eobi-E0 的夏季 (a)、冬季 (b) 850 hPa 差值风环流

(图略) 上可以发现, 采用椭圆轨道后夏季南亚高压及西太平洋副热带高压均有减弱的趋势, 但相对变化幅度都较小。

图 5a 为 Eobi-E0 在 $x=45$ (约 110°E) 处的比湿高度—纬度剖面图, 从中可以看到, 由于采用椭圆轨道后北半球夏季接收的太阳辐射减少, 使得地表蒸散减弱, 海—陆水循环降低, 并导致许多地区出现了夏季大气湿度的降低。但在中纬度地区存在比湿增加的现象, 这与该地区出现的降水增加相对应 (图 1c)。这主要是由于夏季风较弱时, 南方的暖湿气流不能较快地向北推进, 而在江、淮流域与冷空气相持较长时间, 从而造成该地区大气湿度和降水的增加^[28]。从冬季的相应剖面图 (图 5b) 中可以看到, 与夏季相反, 采用椭圆轨道后冬季大部分地区的大气湿度有所增加, 尤其是中、低纬度地区, 增加中心可超过 0.3 g kg^{-1} 。但总体上夏季的大气湿度变化幅度要大于冬季的变化。与此同时, 大气的垂直运动也发生了相应的调整。图 6a 为 Eobi-E0 的夏季垂直速度差值 (P 坐标系, 负值表示上升运动) 在 $x=45$ (约 110°E) 处的高度—纬度剖面, 图中显示, 采用椭圆轨道后许多地区出现了下沉运动增强的趋势, 但在中纬度地区却存在明显的上升运动增强, 并与该地区夏季出现的湿度增加相配合 (图 5a), 导致江淮、黄淮流域夏季降水的增加 (图 1c)。

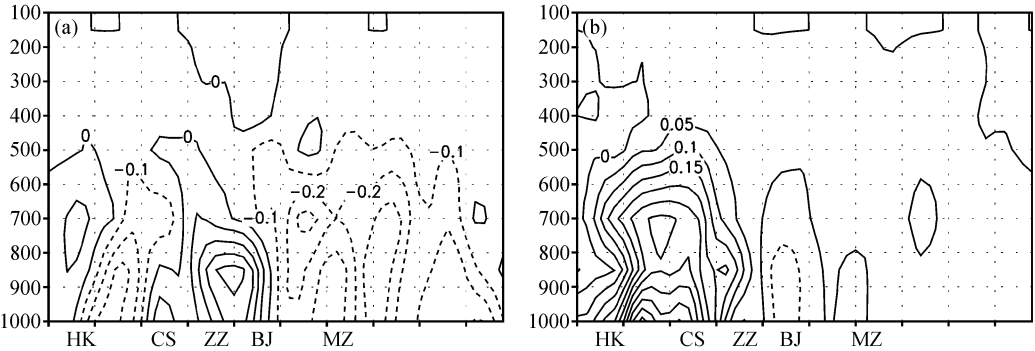


图 5 Eobi-E0 的夏季 (a)、冬季 (b) 比湿差值在 $x=45$ (约 110°E) 处的高度—纬度剖面 (单位: g kg^{-1})

横坐标字符: HK 代表海口, CS 代表长沙, ZZ 代表郑州, BJ 代表北京, MZ 代表满洲里

而冬季情况则基本相反, 在东亚大部分地区都出现了上升运动增强的趋势 (图 6b), 这主要是采用椭圆轨道后, 北半球接收的太阳辐射增多, 使得大气低层增暖、增

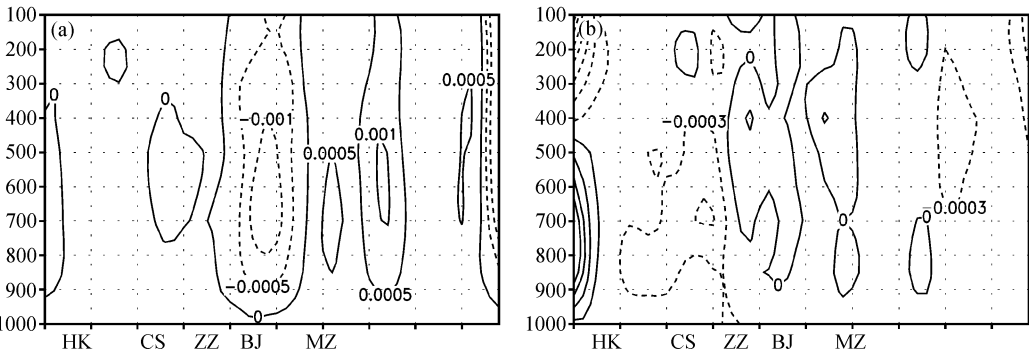


图 6 Eobi—E0 的夏季 (a)、冬季 (b) 垂直速度差值在 $x=45$ (约 110°E) 处的高度—纬度剖面 (单位: hPa s^{-1}) 其余同图 5

湿的结果。从 850 hPa 的 Eobi—E0 的水汽通量差值图中可以发现 (图略), 夏季的水汽通量变化较为明显, 在印度半岛、孟加拉湾等较低纬度地区存在明显的水汽辐散增强现象, 而在中国东部则存在水汽辐合增强的趋势, 从而导致该地区大气湿度增加 (图 5a)。与有关降水变化图相对照可以发现, 水汽输送状况的调整与降水的变化基本吻合。

通过对前面模拟结果的初步分析可以发现, 在 RegCM2 中采用椭圆形公转轨道后, 模拟的降水、大气温湿及环流状况均发生了变化, 从各季节的变化情况来看, 以夏季最为明显, 这可能与夏季太阳辐射的变化最显著以及夏季控制东亚地区的暖、湿大气更易受到太阳辐射变化的影响有关。Prel 等^[9]、Peter 等^[10]及施雅风等^[8]的研究也都表明, 亚洲夏季风对地球绕日轨道变化所导致的日射差最为敏感。将模拟结果与有关观测资料相比较可以发现 (图略), 采用椭圆轨道后, 一些气候参量在有些季节、有些地区的模拟有所改进, 而另一些季节、另一些地区的模拟改进不明显, 甚至变坏。从总体上来说, 地球轨道计算方案的改变对现代气候模拟的影响不大。

3.3 地表水、热平衡

采用椭圆轨道后, 地表年均积雪深度有减小的趋势 (图略), 这与冬季地表升温及中、高纬度降水减少有关, 但相对变化幅度很小。而土壤水含量的变化基本上与降水变化的分布形势类似, 但深层土壤水含量的调整对降水变化的响应存在滞后现象 (图略)。图 7 为 Eobi—E0 全区域平均的地表吸收太阳辐射及地表感热通量 (空心圆圈线) 变化的时间演变曲线, 从图中可以看到, 采用椭圆轨道后地表吸收的太阳辐射存在十分明显的季节变化特征, 即夏季减少而冬季增加, 地表吸收太阳辐射的季节循环减弱, 并导致地表温度

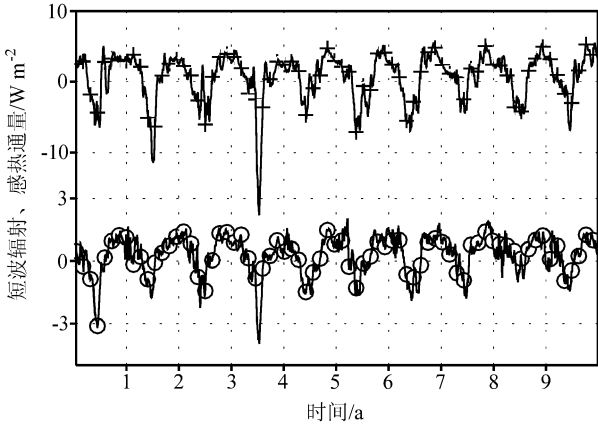


图 7 Eobi—E0 的模拟区域平均的地表吸收太阳辐射 (十字线)、感热通量 (空心圆圈线) 变化的时间演变 (单位: W m^{-2})

的相应变化。从各季节变化情况来看,以夏季太阳辐射的减少最为明显,而全年平均的地表吸收太阳辐射也略有减少。这与地球轨道变化后地球大气上界处太阳辐射通量的变化基本一致。当然,地表吸收太阳辐射的多寡还直接受到云量变化的调控。地表感热通量的变化也存在类似的季节变化特征,夏季减少而冬季增多,这与地表温度的变化相一致(图 2d)。但地表感热通量的变化幅度要比地表吸收太阳辐射的变化小得多。此外,地表射出的净长波辐射、潜热通量等也发生了相应变化,从而使地表在新的温度下达到热量平衡,但这两个热平衡量的季节变化趋势不明显,且变化幅度也比地表吸收太阳辐射的变化小得多,可见在地表热量平衡中,地表吸收太阳辐射的变化占据着明显的主导地位。

4 讨论与结论

本工作采用更为真实的椭圆地球公转轨道代替了原模式中的圆近似地球轨道,并对轨道改变后的模拟变化情况进行了较为详细的分析,结果表明:

在模式中采用椭圆公转轨道,对中国东部地区降水分布的模拟有所改进。其他气候要素则在某些季节、某些区域的模拟有所改进,而另一些季节和地区改进不明显。从总体上来说,现代气候状况的模拟对地球公转轨道的计算方案不敏感。

采用椭圆轨道后,东亚地区的温度、降水、比湿等气候要素均出现夏季降低(减少)而冬季升高(增加)的季节变化趋势。而且亚洲冬、夏季风也均有所减弱,说明该地区季风气候的季节循环特征减弱了。

从季节变化上来看,采用椭圆轨道后,夏季气候要素的变化比冬季更为明显,这与东亚地区夏季太阳辐射的变化最大及夏季风气候对地球绕日轨道变化所导致的日射差较为敏感有关。

通过本工作的模拟研究说明,对较短时期的现代气候模拟,地球公转轨道采用圆近似是可行的。

大气、海洋、冰雪圈、陆地表面和生物圈等构成的地球气候系统是一个十分复杂的非线性开放系统。影响该系统变化的因子很多,在不同时间尺度上需侧重考虑不同的影响因子。在较短时期内(如 0~10 年尺度),主要需考虑系统内部因子,如: ENSO、热盐环流、大气涛动、气温、降水的自身变化等,以及外部因子如: 太阳活动、火山活动、地球自转速率变化等。在 10~100 年尺度上则主要需考虑系统外部因子,如太阳活动、火山活动、地球轨道参数、月亮、行星及人类活动等,当然也还需要考虑系统内部因子的相互作用。而对于更长时间尺度的气候系统演变则不但要侧重考虑地球轨道参数、行星位置、人类活动等较长周期因子的影响,甚至还要考虑诸如地磁场逆转、地极位置的旋转、海陆分布的变化及山脉隆升、夷平过程及巨大陨击事件等超长周期因子的影响。目前,许多气候模式中关于太阳活动、地球轨道参数、行星位置变化等天文因子的描述十分粗略,而许多统计证据都表明太阳黑子数、黑子周期、九大行星的会合、地球自转速度等天文因子与地球气候系统中的降水、温度、西风环流等要素的变化具有十分密切的相关关系。因而在以后的气候模式改进中,可考虑将这些因子按不同模拟目的引入到模式中,以提高气候模式对地球气候系统的描述能力。

参 考 文 献

- 1 张家诚、林之光, 中国气候, 上海: 上海科学技术出版社, 1985, 603pp.
- 2 任振球, 全球变化, 北京: 科学出版社, 1990, 153pp.
- 3 任振球、李致森, 行星运动对中国五千年来气候变迁的影响, 全国气候变化学术讨论会 (1978) 文集, 北京: 科学出版社, 1981, 89~128.
- 4 张先恭、徐瑞珍, 我国大范围旱涝与太阳活动关系的初步分析及未来旱涝趋势, 气候变迁和超长期预报文集, 北京: 科学出版社, 1977, 193pp.
- 5 Hays, J. D., J. Imbrie, and N. J. Shackleton, Variations in the earth's orbit: Pacemaker of the ice ages, *Science*, 1976, **194**, 1121~1132.
- 6 Imbrie, J., J. D. Hays, D. G. Martison et al., The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record, In: *Milankovitch and Climate*, Eds. Berger, A. L., J. Imbrie, J. Hays et al., Dordrecht, Netherlands, Part I, 1984, 269~305.
- 7 姚檀栋、徐柏青、蒲健辰, 青藏高原古里雅冰芯记录的轨道、亚轨道时间尺度的气候变化, 中国科学 (D 辑), 2001, 增刊, 287~294.
- 8 施雅风、刘晓东、李炳元等, 距今 40~30ka 青藏高原特强夏季风事件及其与岁差周期关系, 科学通报, 1999, **44** (14), 1475~1480.
- 9 Prell, W. L., and J. E. Kutzbach, Sensitivity of the Indian Monsoon to forcing parameters and implications for its evolution, *Nature*, 1992, **360**, 647~650.
- 10 Peter, B. D., and D. Rind, Sensitivity of Asian and African climate to variations in seasonal insolation, glacial ice cover, sea surface temperature, and Asian orography, *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(D4), 7265~7287.
- 11 Pokras, T. N., and A. C. Mix, Eolian evidence for spacial variability of the late Quaternary climates in tropical Africa, *Quaternary Research*, 1985, **24**, 137~149.
- 12 McIntyre, A., W. F. Ruddiman, K. Karlin et al., Surface water response of the equatorial Atlantic Ocean to orbital forcing, *Paleoceanography*, 1989, **4**, 19~55.
- 13 Clemens, S., and W. Prell, Late Pleistocene variability of Arabian Sea summer monsoon winds and continental aridity: Eolian records from the lithogenic component of deep-sea sediments, *Paleoceanography*, 1990, **5**, 109~146.
- 14 Clemens, S., W. Prell, D. Murray et al., Forcing mechanisms of the Indian Ocean monsoon, *Nature*, 1991, **353**, 720~725.
- 15 Berger, A. L., Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes, *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35**, 2362~2367.
- 16 de Noblet, N., P. Braconnot, S. Joussaume et al., Sensitivity of simulated Asian and African summer monsoons to orbitally induced variations in insolation 126, 115 and 6 kBP, *Climate Dynamics*, 1996, **12**, 589~603.
- 17 Dong, B. W., P. J. Valdes, and N. M. J. Hall, The changes of Monsoonal climates due to earth's orbital perturbations and ice age boundary conditions, *Palaeoclimates*, 1996, **1**, 203~240.
- 18 Kutzbach, J. E., G. Bonan, J. Foley et al., Vegetation and soil feedbacks on the response of the African monsoon to orbital forcing in the early to middle Holocene, *Nature*, 1996, **384**, 623~626.
- 19 Texier, D., N. de Noblet, S. P. Harrison et al., Quantifying the role of biosphere-atmosphere feedbacks in climate change: coupled model simulations for 6000 years BP and comparison with palaeodata for northern Eurasia and northern Africa, *Climate Dynamics*, 1997, **13**, 865~883.
- 20 Kutzbach, J., R. Gallimore, S. P. Harrison et al., Climate and biome simulation for the past 21,000 years, *Quaternary Science Reviews*, 1998, **17**, 473~506.
- 21 Joussaume, S. et al. (36 authors), Monsoon changes for 6000 years ago: results of 18 simulations from the Palaeoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP), *Geophysical Research Letters*, 1998, **26**, 859~862.

22 王会军, 古气候模拟与气候模式, 第四纪研究, 2001, **21** (2), 147~151.

23 郭瑞涛, 地球概论, 北京: 北京师范大学出版社, 1988, 210pp.

24 Dickinson, R. E. , A. H. Sellers, P. J. Kennedy et al. , Biosphere-Atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model, NCAR Technical Note, NCAR/TN-275+STR, Boulder, Colorado, 1986, 69pp.

25 Dickinson R. E. , A. H. Sellers, and P. J. Kennedy, Biosphere atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model, NCAR Tech. Note, NCAR/TN-387+STR, Boulder, Colorado, 1993, 72pp.

26 郑益群、苗曼倩、钱永甫, 湍流动能闭合方法在区域气候模式中的应用, 气象学报, 1999, **57** (6), 641~650.

27 Danjon, A. 著, 李衍译, 球面天文学和天体力学引论, 北京: 科学出版社, 1980, 487pp.

28 郑益群、钱永甫、苗曼倩等, 青藏高原积雪对中国夏季风气候的影响, 大气科学, 2000, **24** (6), 762~774.

29 Zheng Yiqun, Yu Ge, Qian Yongfu et al. , Simulations of regional climatic effects of vegetation change in China, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* , 2002, **128**, 2089~2115.

30 金祖辉、村上胜人, 东亚季风区对流活动的年际变异及与江淮地区旱涝关系的研究, 亚洲季风的新进展, 北京: 气象出版社, 1996, 88~97.

The Effects of Changes of Earth Orbital Parameters on East Asian Monsoon Simulation

Zheng Yiqun, Yu Ge, and Wang Sumin

(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

Abstract The authors developed the calculating method of the earth orbital parameters in a regional climate model and operated 10 years' simulations to compare the influence of changes of earth orbital parameters on modern east Asian monsoon. From these studies, some preliminary conclusions could be drawn as follows: A slight improvement takes place in the precipitation simulation in East China after modified the earth orbital parameters from circle to ellipse in the model. The climate elements, e. g. temperature/precipitation/specific humidity etc. , reveal a seasonal variation trends that fall (decrease) in summer and rise (increase) in winter, and the winter/summer monsoon of Asia are weakened. In general, the results of simulation would not be notably affected by change of computing methods of earth orbit parameters. So it is viable to adopt a circle approach in the earth orbit calculation while simulating modern climate in a shorter span.

Key words: regional climate model; earth orbital parameter; East Asian monsoon