

# 风向变化特征在季风模拟评估中的应用

张丽<sup>1,2</sup> 李建平<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘 要** 作者抓住季风风向具有季节性反转这一最本质的特征, 引入了“有向转角”的新概念, 它与传统盛行风夹角的概念不同, 能够反映风向逐日变化的方向性和旋转角度的大小。用欧拉观点揭示了季风风矢量随时间演变的旋转特点, 体现了季风风向独具特色的季节演变过程。同时, 发现不同地区风向的季节循环有 6 种基本类型: (I) 先顺时针后逆时针旋转、(II) 先逆时针后顺时针旋转、(III) 完全顺时针旋转、(IV) 完全逆时针旋转、(V) 风向稳定型和 (VI) 风向变化不稳定型。且季风风向的季节性反转主要通过前四种旋转方式来实现。分析了这 6 种风向变化型的全球分布特征, 研究了它们与大气环流系统演变的联系。并进一步将“有向转角”概念用于 IPCC 第四次评估报告 AMIP 试验 8 个模式的模拟评估, 结果表明, 这一概念的引入能从逐日变化的角度凸显风向变化过程, 不仅能够客观反映模式模拟季风风向逐日变化的动力过程以及风矢量旋转方式的全球分布, 还能体现模式对大气环流系统季节演变的表征能力。研究还发现在这 8 个模式中, 大多数模式基本能把风矢量旋转方式的全球分布形式模拟出来, 但对于季风区风矢量旋转方式的模拟还有待于进一步提高。

**关键词** 季风 有向转角 风向变化 模式评估

**文章编号** 1006-9895(2008)01-0053-14

**中图分类号** P462

**文献标识码** A

## The Application of the Variation Characteristics of Wind Direction in Evaluating Monsoon Simulation

ZHANG Li<sup>1,2</sup> and LI Jian-Ping<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** It is acknowledged that seasonal reversal of wind vector is the essential characteristic of monsoon in widely recognitions and definitions. So the variation of wind direction with seasonal evolution is significant for monsoon research. On the other hand, how to evaluate the monsoon simulation well on daily scale in dynamic way is an important work in model evaluation as there are major shortcomings in our ability to simulate even basic aspects of the monsoon with atmospheric general models. Then based on the seasonal reversal of wind vector which is the essential characteristic of monsoon, a new concept, directed rotary angle that is quite different from the previous studies of angle between wind vectors, has been presented. Define the positive angles indicate counter-clockwise rotation of daily wind vector to reference vector (say January climatology wind) and negative angles indicate clockwise rotation. It reflect the daily variations of wind direction including the rotary direction and the degree of rotary angle, and reveals the inimitable features of monsoon seasonal evolution. Meanwhile, based on the concept, six categories of wind vector rotation with seasonal cycle have been detected and classified as follows: (I) Clockwise to counter-clock-

**收稿日期** 2006-06-05, 2006-09-21 收修定稿

**资助项目** 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目“气候系统模式研发及应用研究”, 优秀国家重点实验室研究项目 40523001

**作者简介** 张丽, 女, 1980 年出生, 博士生, 主要从事季风和气候模式评估研究。E-mail: zhangli@mail.iap.ac.cn

wise rotation; (II) counter-clockwise to clockwise rotation; (III) full clockwise rotation; (IV) full counter-clockwise rotation; (V) stable rotation; (VI) instable rotation. In addition, the wind in monsoon regions almost rotates in the forms of the first four categories. The authors analyze the global distribution character and investigate the relationship between the variation of wind direction and annual evolution of atmospheric circulation. It shows that different rotary styles of wind vector are closely related to annual evolution of atmospheric circulation, including the strength of trough and ridge, movement of trough and ridge, development of anticyclone or cyclone, movement and split of anticyclone or cyclone. Also, different monsoon systems indicate different rotary styles, which are possibly related to different circulation systems that influence the formation and onset of monsoon. Then the new concept is applied in evaluating the model output of 8 AGCMs of AMIP in IPCC 4th assessment. The results show that it reflects not only the dynamic process and global distribution of wind vectors' rotation styles in monsoon simulation, but also the ability to reproduce circulation seasonal variation. And most of models can simulate the global distribution pattern. However, so little skill is showed in the monsoon rotation style of some models, especially in the South China Sea and West Africa. A few models such as GISS-MODEL-E-R, INM-CM3-0, MIROC3.2-MEDRES, MPF-ECHAM5 and FGOALS-g1.0 can reproduce the rotation styles correctly in some monsoon regions.

**Key words** monsoon, directed rotary angle, wind vector, variation of wind direction

## 1 引言

季风作为一个古老的气候学概念,通常指近地面层冬夏盛行风向接近相反且气候特征迥异的现象。它具有复杂的结构、多重时空尺度、大的时空变率、变化的不规则性等基本特征。它的存在,夏季风爆发早晚以及强弱变化对季风区国家的国民经济尤其是农业生产具有重大影响。季风区又是全球大气运动能量和水汽的主要供应地,全球大气运动和天气气候变化中的许多重要现象都与季风活动有密切关联。所以,季风一直是大气科学永恒的话题之一。

早在 1957 年,高由禧和章名立<sup>[1]</sup>就指出用模式来研究季风的生成和结构问题是很急需的。近年来,随着全球环流模式(GCM)的发展,不少模式都应用于季风模拟及预测的研究,特别是对全球气候有重要影响的亚洲季风<sup>[2~7]</sup>。此外,不少学者还通过环流模式的敏感性试验或多模式的集合模拟来研究季风。如 Fennessy 等<sup>[8]</sup>通过改变地形、植被、土壤湿度和云量来研究 GCM 对印度季风模拟的敏感性;Cheng 等<sup>[9]</sup>用不同的积云参数化方案研究了全球大气环流模式(A GCM)在东亚季风模拟中的敏感性;Wang 等<sup>[10]</sup>用 11 个全球大气环流模式(A GCMs)研究了亚澳季风的变化。与此同时,我们自然会关注这些气候模式模拟季风的能力究竟达到了什么水平?虽然亚洲夏季风被认为是影响全球大气环流的重要因子,但从“大气环流模式比较计划(AMIP)”的结果来看,全球大气环流模式

(A GCM)甚至在模拟季风的一些基本特征上仍显不足<sup>[11]</sup>。Webster 等<sup>[4]</sup>指出,许多模式对季风的模拟还不太理想,即便对亚洲季风平均结构的模拟也让人难以捉摸。Gadgil 和 Sajani<sup>[12]</sup>也指出大多数 A GCM 都无法精确把握东亚夏季风主要结构的年际变化。因此,弄清模式模拟水平不高的原因以及明确那些对提高模式性能至关重要的物理过程将是未来的主要挑战之一。Annamalai 等<sup>[13]</sup>认为利用观测资料对季风机制作进一步的研究,包括其平均演变形式和时空变化等,对改进大气环流模式的模拟能力,从而推动气候模式的发展具有重要的意义。同时,如何衡量模式的可靠性、评价模式对季风的模拟能力也已成为气候模式评估中亟待解决的重要问题。

目前,对季风模拟性能的评估一般主要从风场、降水等方面来进行,且因季风会引起季节性雨带的变化和异常,从而导致大面积旱涝灾害,所以大多数研究更多聚焦于降水模拟的评估。而这些评估大多采用传统方法,即将模拟结果与实际观测在某一时段(一般取季节或月)平均的空间场或某一区域平均的时间场进行对比。此外,还有利用统计误差、相关系数等方法进行点对点的定量化评估<sup>[8, 14~16]</sup>。这些方法虽能从统计特征显示模式模拟季风性能的一些概况,但其基本只反映了模式对某些要素场在某一时段平均的空间静态分布特征的表现能力,无法得知模式对该时段内要素场的时空演变动态特征的模拟能力。当前,随着模式评估工

作的发展,要求气候模式的评估在时空尺度上不断细化和深入,在空间尺度上逐步由 20 世纪 90 年代初的全球大尺度模拟评估转移到区域气候模拟评估上<sup>[17]</sup>。在时间尺度上也由月、季、年平均变化的评估日渐趋于日变化、逐日变化和年际变化的评估。

另一方面,由于对季风的定义和研究目的各不相同,有关季风的模拟至今仍未建立起统一客观的评估标准。事实上,从最早提出季风概念的科学家哈雷的定义来看,季风风向冬夏大致应是相反的;而且,虽然不同气象学家<sup>[18~23]</sup>都从各自的研究角度对季风进行了定义,但这些定义都有一个基本共同点,即风向的季节性反转是季风的本质特征。此外,Liang 等<sup>[24]</sup>也指出,季风降水的模拟误差与季风风场的模拟误差是紧密相关的。由此可见,风向是表征季风的一个关键要素,而风向随时间的演变应是研究季风的一个重要切入点。

如前所述,风向随时间的演变对于季风的研究具有重要意义,特别是风向季节性反转的时间演变。而传统的标量概念——风向夹角不能很好地反映出季风区的这种演变特征,为此,本文引入“有向转角”的新概念来解决这个问题。首先从分析全球风矢量逐日的欧拉变化特征的宏观角度入手,指出这一特征在季风区和非季风区的差别及其可能成因,并将这种特征建立的新方法应用于“政府间气候变化专门委员会”(IPCC)第四次评估报告“大气环流模式比较计划”(AMIP)试验的 8 个模式对季风风场演变模拟能力的评估。

## 2 资料与分析方法

### 2.1 资料介绍

本文使用的资料是 NCEP/NCAR 850 hPa 等压面上全球风场逐日再分析资料,分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ,时段为 1979 年 1 月 1 日~1999 年 12 月 31 日,分析时采用这 21 年的逐日气候平均场序列。模式资料为参加 IPCC 第四次评估报告中 8 个全球大气环流模式最新的 AMIP 试验结果。AMIP 是全球大气环流模式的标准输出试验协议,为从事全球气候模式的诊断分析、验证、比较、整合和数据交流提供了一个基本平台<sup>[25]</sup>。至今,AMIP 已经批准了几乎覆盖大气环流和气候研究各个方面的分析子计划,其中包括东亚季风与全球环流异常的关系、亚洲季风的模拟等<sup>[26]</sup>。

来自 6 个国家的这 8 个全球大气环流模式均提交了逐日的模拟结果。除 NASA 的 GISS-MODEL-E-R、俄罗斯的 INM-CM3.0 和中国科学院大气物理研究所的 FGOALS-g1.0 为格点模式外,其余的均为谱模式。有关这些模式的基本信息见表 1<sup>[27]</sup>。由于各模式组提交的积分时间不尽相同,为了统一比较起见,本文选取了 1979~1999 年 850 hPa 全球风场逐日的模拟结果。

### 2.2 方法介绍

为了与本文提出的“有向转角”概念进行比较,先给出传统的盛行风向夹角概念。记场中某一点 A 上每日的风矢量为  $V_j (j = 1, \dots, 365)$ ,某一参照时刻的风矢量为  $V_R$ ,则它们之间的夹角为:

$$\theta_j = (V_j, V_R) = \arccos \left( \frac{(V_j, V_R)}{|V_j| |V_R|} \right), \quad (j = 1, \dots, 365), \quad (1)$$

其中,  $(V_j, V_R)$  为内积,  $| \cdot |$  表示矢量的模。显然,  $0 \leq \theta_j \leq 180^{\circ}$ 。

前人大多是从季风的冬夏盛行风向之间的夹角出发进行研究<sup>[20, 28]</sup>,这个角度没有考虑风矢量的旋转方向,不会大于  $180^{\circ}$ 。然而实际中,风向是随时间(季节)变化的,如果考虑了风矢量的旋转方向,其相对于初始时刻所转过的实际角度并不一定正好等于它们之间的夹角,就是说风矢量一年所转过过的实际角度不一定小于  $180^{\circ}$ ,而且场中每个点上的风矢量也不是都按照同一个方向旋转,有的时而顺时针旋转,有的时而逆时针旋转。所以,非常有必要将风矢量的旋转方向考虑进来以考察其实际转过的角度(称为有向转角)。确切地说,有向转角

表 1 参加 IPCC 第四次评估报告的 AMIP 全球大气环流模式基本情况

Table 1 The information about AGCMs of AMIP in IPCC 4th assessment report

| 模式名称            | 国家  | 分辨率  | 模拟时段      | 试验次数 |
|-----------------|-----|--|-----------|------|
| BCC-CM1         | 中国  | T63L16                                     | 1979~2003 | 4    |
| CNRM-CM3        | 法国  | T42L45                                     | 1979~2000 | 1    |
| GISS-MODEL-E-R  | 美国  | $4^{\circ} \times 5^{\circ}$ L20           | 1979~2000 | 1    |
| INM-CM3.0       | 俄罗斯 | $4^{\circ} \times 5^{\circ}$ L21           | 1979~2003 | 1    |
| MIROC3.2-MEDRES | 日本  | T42L20                                     | 1979~2002 | 1    |
| MRFCGCM2.3.2a   | 日本  | T42L30                                     | 1979~2002 | 1    |
| MPPECHAM5       | 德国  | T63L32                                     | 1978~1999 | 3    |
| FGOALS-g1.0     | 中国  | $2.8125^{\circ} \times 2.8125^{\circ}$ L26 | 1979~1999 | 3    |

角就是每日风矢量相对于某一固定参考时刻风矢量所旋转过的角度，这个角度是有方向性的，规定相对于参考时间风矢量的顺时针旋转方向为负，逆时针旋转方向为正。有向转角可以描述风向随时间逐日演变的实际情况。为使方向性更准确，考虑到气候态风场的逐日变化应具有渐变特性，我们采用如下逐日递推的方法来计算有向转角的大小，

$$\theta_1 = (V_1, V_R) = \theta_0, \quad (2)$$

$$\theta_i = (V_i, V_R) = \theta_{i-1} + (V_i, V_{i-1}), \quad (i = 2, \dots, 365) \quad (3)$$

其中， $\theta$  为方向判别函数，若  $V_i$  在  $V_{i-1}$  的顺时针方向  $\theta = -1$ ，逆时针方向  $\theta = 1$ 。 $\theta$  为每日相对前一日的夹角。从计算公式可以看出，有向转角这一概

念用欧拉观点考虑了风矢量旋转的方向性，可用于研究季风风向的逐日变化，比用传统的夹角概念来研究具有明显的优越性。为更好的描述北半球季风风向的变化，这里参考时间风矢量选取 1 月平均的风向。为了计算结果的稳定性，需去掉一些瞬变过程的影响，因此，计算过程中使用了 5 天滑动平均且不考虑短时天气系统的影响。

### 3 季风风向演变分析和风矢量旋转方式

#### 3.1 季风风向演变分析

经过对季风区风矢量有向转角和普通夹角曲线的分析（见图 1），发现季风风向随季节的反转具有

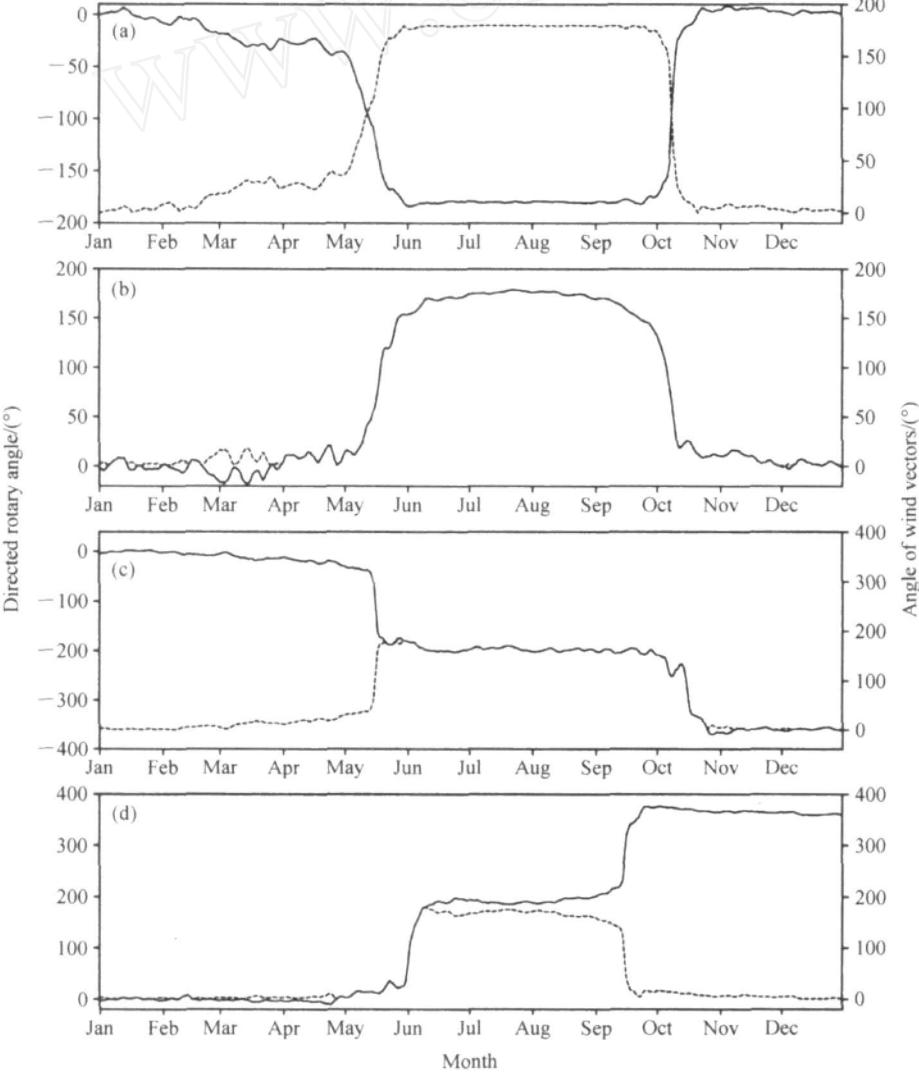


图 1 季风区中四个点上风矢量有向转角（实线）和夹角（虚线）时间演变图：(a) (10°N, 50°E)；(b) (12.5°N, 62.5°E)；(c) (10°N, 110°E)；(d) (12.5°N, 42.5°E)

Fig. 1 Time evolutions of the directed rotary angle (solid line) and angle (dashed line) of wind vectors at (a) (10°N, 50°E), (b) (12.5°N, 62.5°E), (c) (10°N, 110°E) and (d) (12.5°N, 42.5°E) in the monsoon area

方向性，在不同的地区旋转方向表现了不同的特征，且旋转程度也存在地域差别。如在点 (10°N, 50°E)，有向转角 1~6 月顺时针旋转到夏季状态，转角达 -180°左右并维持一段时间后，9~12 月则逆时针旋转回冬季状态 (图 1a)，将其记为 (I) 先顺时针后逆时针旋转。在点 (12.5°N, 62.5°E) 处，则与图 1a 正好相反，有向转角 1~6 月为逆时针旋转到夏季状态，然后 10~12 月则转为顺时针旋转回冬季原状态 (图 1b)，将其记为 (II) 先逆时针后顺时针旋转。又如在点 (10°N, 110°E)，有向转角 1~6 月为顺时针旋转到夏季状态，转角达 -180°左右并维持一段时间后，9~12 月继续为顺时针旋转 (图 1c)，将其记为 (III) 完全顺时针旋转。而点 (12.5°N, 42.5°E) 处，则与图 1c 反向，有向转角 1~6 月为逆时针旋转到夏季状态，9~12 月仍继续逆时针旋转 (图 1d)，将其记为 (IV) 完全逆时针旋转。后两种情况虽然风向最终回到原状态，但实际上一年却旋转了 360°左右。而在夹角曲线中风矢量的旋转方向和旋转程度已被忽略，无法体现出季风风向演变的不同特征。

对全球的有向转角和夹角曲线进行分析后发现，相比季风区，在非典型季风区中曲线不太平稳，小波动较多，但总体趋势也存在类似季风区的 4 种旋转方式。除此之外，还存在两种与季风风向变化截然不同的现象。一种是风向变化很小，如在点 (2.5°S, 215°E)，其基本维持在盛行风向附近振

荡，最大转角仅在 5°左右 (图 2a)。另一种则是风向变化随季节演变没有规则的旋转方向，如点 (45°N, 7.5°E)，曲线波动非常大 (图 2b)，一年中时而顺转，时而逆转，风向没有显著的维持在某个旋转方向。

3.2 风矢量旋转方式的分类

根据以上全球风向随季节变化的 6 种不同现象，将一年中全球不同地区风向随着季节演变 (冬 - 夏 - 冬) 分为如下 6 种不同类型：

(I) 先顺时针后逆时针旋转：风矢量旋转主要趋势为先逐渐顺时针旋转到某一状态，然后再逐渐逆时针旋转回初始状态。

(II) 先逆时针后顺时针旋转：风矢量旋转主要趋势为先逐渐逆时针旋转到某一状态，然后再逐渐顺时针旋转回初始状态。

(III) 完全顺时针旋转：风矢量旋转主要趋势为先逐渐顺时针旋转到某一状态，然后再继续逐渐顺时针旋转回初始状态。一年旋转了 -360°左右。

(IV) 完全逆时针旋转：风矢量旋转主要趋势为先逐渐逆时针旋转到某一状态，然后再继续逐渐逆时针旋转回初始状态。一年旋转了 360°左右。

(V) 风向稳定型：风矢量旋转变化很小，大都维持在盛行风向附近振荡，最大有向转角基本不超过 ±20°。在热带，这与气象上的信风相一致。

(VI) 风向变化不稳定型：风矢量没有明显的旋转方向和一定时间的维持期，时而顺时针旋转，

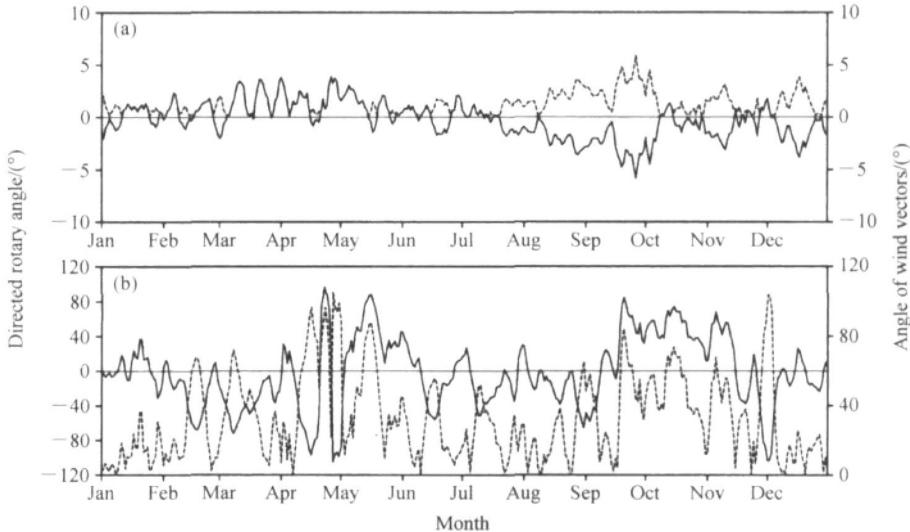


图 2 非典型季风区中两个点上风矢量有向转角 (实线) 和夹角 (虚线) 时间演变图：(a) (2.5°S, 215°E)；(b) (45°N, 7.5°E)

Fig. 2 Time evolutions of the directed rotary angle (solid line) and angle (dashed line) of wind vectors at (a) (2.5°S, 215°E) and (b) (45°N, 7.5°E) in the atypical monsoon area

时而逆时针旋转。有向转角曲线波动非常大, 最大有向转角超过  $\pm 20^\circ$ 。

以上 6 种类型基本概括了全球风向随季节变化的旋转方式。那么, 这 6 种类型的具体分布特征是什么, 具有怎样的地域性, 以及不同季风系统与旋转方式又有何联系?

### 3.3 风矢量旋转方式的全球分布

由上述定义的分类, 我们给出 850 hPa 面上上述 6 种旋转方式的全球分布如图 3 (见文后彩图) 所示, 显而易见, 风矢量随季节演变的旋转形式具有明显的地域性, 既有显著的纬向分布特征, 同时也沿着纬线交错分布。由图 3 可得风矢量旋转方式 6 种类型的地域分布特征如下。

(I) 型和 (II) 型的分布地区较大, 主要沿着纬线交错分布。亚欧大陆中部、美洲大陆东岸、北太平洋的东部和北大西洋中部以 (I) 型为主; 此外, 热带太平洋东部, 南美洲北部、南印度洋及南半球高纬度的部分地区也属于这一类型。而欧亚大陆的东岸、北太平洋的西部以及北美大陆的中部和东部则以 (II) 型为主; 且南亚及北极和南半球中纬度部分地区也属这种类型。

(III) 型和 (IV) 型的分布区域相对较小, 且不太连续。(III) 型主要集中在南亚季风区的中南半岛、菲律宾以南地区和中非。(IV) 型则分布在我国东岸及台湾以东、孟加拉湾和北极的部分地区。此外, 其他地区也有 (III) 型和 (IV) 型零星的分布。

(V) 型的分布面积较大且较连续。在热带地区与信风区位置非常接近, 并呈现西北 - 东南走向。除此之外, 在南半球整个西风带几乎成带状分布。

(VI) 型在北半球主要集中在亚欧大陆西部、北大西洋东岸、北美东北部、中西伯利亚和北冰洋中部; 南半球则在西风带  $180^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{W}$  地区。另外, (VI) 型也存在于 (I) 型和 (II) 型分布区域的交界处, 如北太平洋中部等。

由上述分布形式可知, 南北半球差异较大, 特别在南半球  $30^\circ\text{S} \sim 60^\circ\text{S}$  地区, 旋转方式与北半球截然不同。这可能与南北半球的海陆分布和地形影响有较大关系。

从 Khromov<sup>[20]</sup> 以及李建平和曾庆存<sup>[29, 30]</sup> 划分的全球季风区来看, 风矢量随时间的演变虽在旋转方向和程度上有地域差异, 但这种地域差异并非以季风区和非季风区为界。同时也说明了季风作为重

要的行星尺度大气环流系统, 并不是孤立存在的。且各夏季风子系统的动力结构特征相当不同<sup>[31]</sup>。此外, 我们由图 3 注意到一个有趣的现象, 即在热带季风区,  $80^\circ\text{E}$  以东的大片区域为逆时针旋转, 而其以西则为顺时针旋转。Li 和 Zeng<sup>[32]</sup> 曾指出南亚季风区以  $70^\circ\text{E}$  为界分为两个相对独立的子系统。另外, 我们还注意到  $100^\circ\text{E}$  左右也有一个明显不同旋转方式的分界线, 早在 20 世纪 80 年代我国学者就提出: 东亚季风和南亚季风是亚洲季风系统中两个相对独立的子系统<sup>[33, 34]</sup>, 且它们的分界线在  $100^\circ\text{E}$  附近<sup>[35, 36]</sup>, 这与上述结果是相一致的。朱乾根等<sup>[36]</sup> 和 Zhu 等<sup>[37]</sup> 又将东亚季风系统又可化分为南海 - 西太平洋热带季风和中国大陆 - 日本的副热带季风。同时, 我们也可以看到在东亚季风区子系统中, 以  $20^\circ\text{N}$  左右为界的热带季风区和副热带季风区也呈现出不同的旋转方式, 这也再次验证了朱乾根等<sup>[37]</sup> 和 Zhu 等<sup>[38]</sup> 关于东亚季风两个子系统的划分的合理性。此外, 在东亚热带季风区中, 阿拉伯海、中南半岛南部和南海为 3 种不同的旋转方式。热带西太平洋、南海及孟加拉湾东部为 (I) 型旋转方式, 该地区为东亚季风区, 其形成和性质与南亚季风不同, 不仅与南半球越赤道气流有关, 而且还受副热带高压的影响<sup>[39]</sup>。因此, 在从冬到夏的季节演变中, 受副热带高压东撤的影响, 东北风顺时针旋转为东南风, 而随着南半球越赤道气流的推进, 东南风继续顺时针旋转为西南风。阿拉伯海则为 (II) 型旋转方式, 主要是由于非洲 - 阿拉伯海的次级海陆热力差异<sup>[34]</sup>, 使阿拉伯海存在强的夏季西南风和冬季偏北风中心。冬季在阿拉伯半岛的东部低层存在一个反气旋, 东侧形成明显的偏北气流。随着向夏季的演变, 该反气旋减弱消失, 偏北风向逐渐逆转, 索马里越赤道气流的发展使风向逆转 of 西南风。西非季风区主要受北大西洋副热带高压的影响, 随着从冬到夏的季节演变, 北大西洋副热带高压逐渐向四周伸展, 西非位于其东南侧, 因而该地区的风向发生逆时针旋转。因此, 不同季风系统, 由于形成原因和影响系统不同, 其风向旋转方式可能是不同的 (图 3)。

从以上分析可以看出, 有向转角概念的引入能够较好地刻画风场时空变化的总体特征, 从逐日变化尺度上体现了全球风向变化的异同; 更重要的是可以揭示季风风向实现季节性反转的演变特征及不

同季风系统之间的差异，这对于更好的认识和深入研究季风具有重要的意义。然而，风矢量（特别是季风区内的风矢量）的旋转方向及旋转程度为什么会呈现这种地域性差异呢？下面，我们将作进一步的探讨。

4 风矢量旋转方式与大气环流演变的可能关系

季风系统内部有很多复杂的动力、热力过程，包含着不同空间尺度和不同时间尺度的系统，它们之间的相互作用对于季风活动有着重要的影响。并且，季风环流的动力稳定性对于季风活动与维持也有重要作用<sup>[40]</sup>。高由禧等<sup>[1]</sup>曾提到：地球上有海陆分布的不同，季风因素使同纬度海陆间常常出现完全不同的闭合气压系统，在此相反的气压系统间又出现季风环流，而季风环流的出现却又使海陆间不同气压系统得到维持和发展。同时季风因素也是大气环流活动中心的形成和变化的重要原因之一。

从对大气环流（位势高度场和流场）随时间演变分析中（图略），上述风矢量的这 6 种旋转方式与环流演变有着密切联系，大尺度大气运动经常是处于准地转平衡状态，其发展和演变是缓慢的，特别是在海洋上和中高纬度地区，实际风与地转风相差很小。因此，根据地转风关系可假设风矢量与等高线平行。经过研究发现，风矢量旋转的分布可能主要与季节性槽脊的加强（减弱）及移动、气旋反气旋的季节演变、移动分裂和变性有关。

图 4 给出了风向变化与几种主要环流系统演变的关系示意图。在中高纬地区，从冬到夏槽脊逐渐减弱（见图 4a），槽前脊后的西南风逐渐偏南，使得这一地区的风矢量为顺时针旋转；而槽后脊前的西北风逐渐偏北，使其风矢量呈逆时针旋转。此外，槽脊的移动也会引起类似的变化（见图 4b），原来位于槽前脊后的西南风顺转为西北风，而位于槽后脊前的西北风逆转为西南风。若槽脊的调整基本与季节变化尺度相当，则会出现（I）~（IV）型旋转

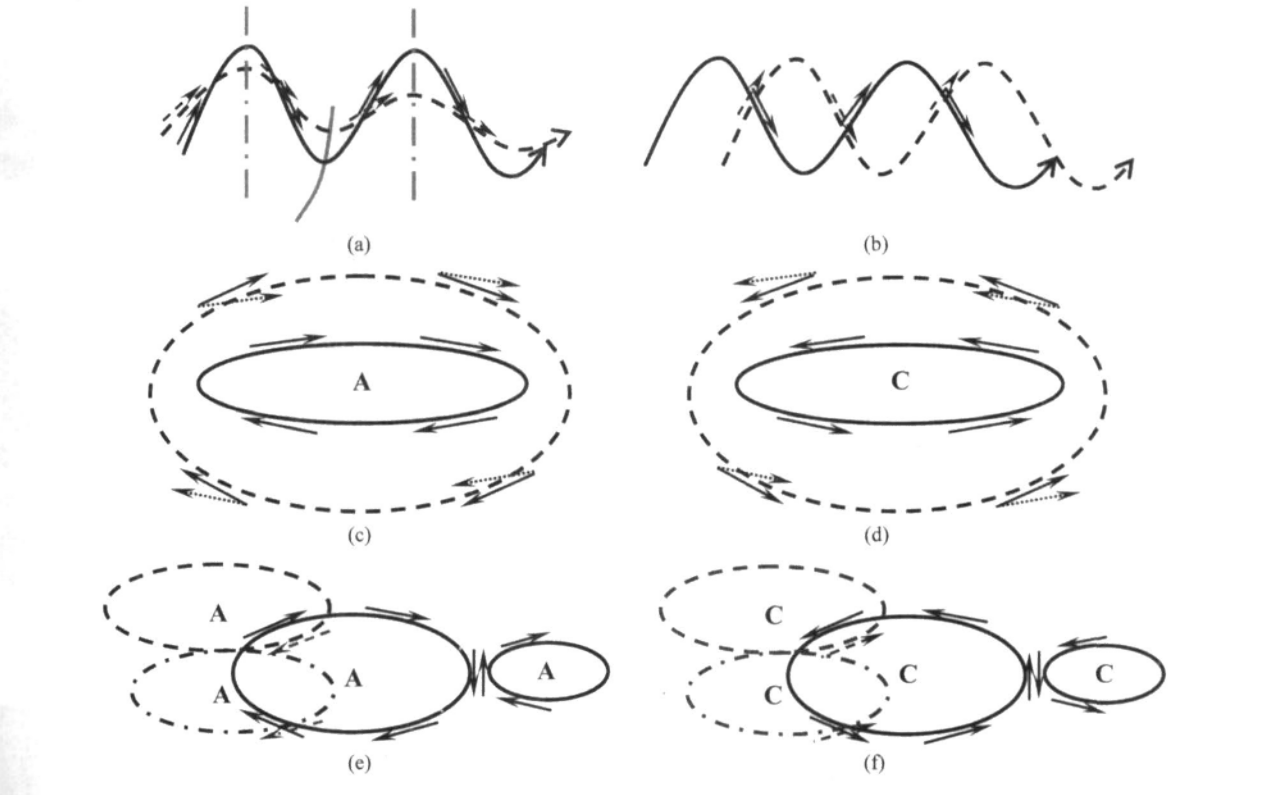


图 4 热带外地区风向变化与几种主要环流系统演变关系示意图：(a) 槽脊的强度变化；(b) 槽脊的移动；(c) 反气旋 (A) 的发展；(d) 气旋 (C) 的发展；(e) 反气旋的移动和分裂；(f) 气旋的移动和分裂的关系

Fig. 4 The sketch maps of the relationship between wind direction variation and circulation system evolution in the extratropical regions: (a) Strength of trough and ridge; (b) movement of trough and ridge; (c) development of anticyclone (A); (d) development of cyclone (C); (e) movement and split of anticyclone; (f) movement and split of cyclone

方式。若槽脊或系统的变化很频繁,则会出现(VI)型旋转方式。这与北半球中高纬度风矢量旋转方式的分布形态是基本吻合的。

我们知道,在北半球从冬至夏的季节演变中,反气旋逐渐向四周伸展(见图4c),结果反气旋东北和西南地区的风矢量为顺时针旋转,反气旋西北东南地区的风矢量为逆时针旋转,图3中北半球太平洋副高和大西洋副高区风矢量的旋转方式正与此一致。但在南半球并未呈现出类似的形态,这可能与北半球因海陆分布,副高带断裂成几个单体,而南半球的副高带却比较连续有关。同时,从图4d中也可以看到气旋的演变也有一致的结果。

另外,研究发现气旋反气旋的移动和分裂也可能使风矢量随时间顺(逆)时针旋转(见图4e、f),甚至是完全顺(逆)时针旋转。例如,初始时刻位于反气旋西北部的风矢量,随着反气旋向西北方向移动最后处于反气旋东南部,两时刻的矢量方向接近反转,若系统继续移动,则有可能出现完全顺(逆)时针旋转。此外,随着季节演变,气旋反气旋的分裂和合并会使位于其中心处的风向变化较大,出现(VI)型旋转方式,如北太平洋中部地区等。

在热带地区,地转平衡不成立,但从流场季节变化的初步分析来看,风向随时间的演变主要与越赤道气流的变化有关。李建平和曾庆存提到,热带季风系统与冬、夏热带辐合带(ITCZ)中心线所包含的区域正好吻合<sup>[30]</sup>,并指出这一现象绝非偶然的巧合,而是热带季风的两大推动力(行星热对流和地表面特性差异)及其相互作用的必然结果<sup>[41]</sup>。同时,他们认为与季风系统相联系的半永久性气压系统从冬到夏其性质发生了变化(即高压变成低压或反之)或者位置有显著移动<sup>[29]</sup>。而中低纬度系统的变性或移动会引起越赤道气流方向的改变,从而使风向顺转(逆转)。因此,这一现象的发现对季风的深入研究具有重要的意义。

由此可见,风矢量旋转方式的不同不仅包括不同地区季风风向实现季节性反转的差异,也包括大气环流系统季节演变的特征。同时,季风因素还可以解释(至少部分的)海陆间平均高低气压系统的形成和季节变化<sup>[1]</sup>。因此,风矢量旋转方式与大气环流的演变是密切相关的。风矢量不同类型的旋转方式反映了各环流系统的不同变化过程,而模式能否将这一过程模拟出来不仅对大气环流演变的模拟

能力具有代表性,还对客观评价季风风向的模拟提供了一个新的方法。

## 5 模式对季风风矢量旋转季节性演变的模拟

### 5.1 模式对风矢量旋转方式全球分布的模拟

下面,我们主要将上述方法应用于评估IPCC第四次评估报告AMIP试验8个模式的模拟结果,图5为这8个模式对850 hPa风矢量旋转方式的模拟情况(其中BCC-CM1、MPI-ECHAM5和FGOALS-g1.0为多个初始场积分的集合平均结果,单个初始场积分的图略)。

BCC-CM1一共进行了4次实验,实验1和实验2的结果比较接近,而实验3和实验4的结果比较接近,但无论是4次单个试验还是4次试验的集合平均,模拟结果都与实际观测都差异较大,特别是在季风区。总体而言,4次试验的集合平均较单个试验较好些。该模式基本未能把亚洲季风区风向的季节演变形式模拟出来。此外,对信风区、南半球西风带、北太平洋以及风向变化不稳定型的分布区域的模拟结果都不太好。

法国的CNRM-CM3在北半球模拟的较好,特别是中低纬度,大部分地区都与实际观测相一致。但在南海季风区、西非季风区、还有一定差异。风向变化不稳定型的分布区域在南半球西风带模拟的过大,而在亚欧大陆东部则模拟的过小。大西洋的信风区也略小了些。北半球高纬地区则模拟的较差,这对极涡变化的模拟可能也会有一定的影响。

GISS-MODEL-E-R和INM-CM3.0都为分辨率较低的格点模式,模拟结果相对较粗糙,但对大体分布形式仍有一定的模拟能力。在亚洲热带季风区和南半球西风带,GISS-MODEL-E-R模拟的较差,而INM-CM3.0除了在南海季风区略差一些外,基本模拟的较好。对于太平洋信风区GISS-MODEL-E-R模拟的较好,而大西洋信风区则INM-CM3.0模拟的较好。此外,它们在北极和亚欧大陆东部的风向变化不稳定型都模拟的不太好。

日本东京大学的MIROC3.2-MEDRES和日本气象中心的MRI-CGCM2.3.2a都为T42谱模式。二者的模拟结果在北半球比较接近,但从整体形式来说前者模拟的稍好一些,特别在南亚季风区和对风向变化不稳定型的模拟。不过对于信风区的



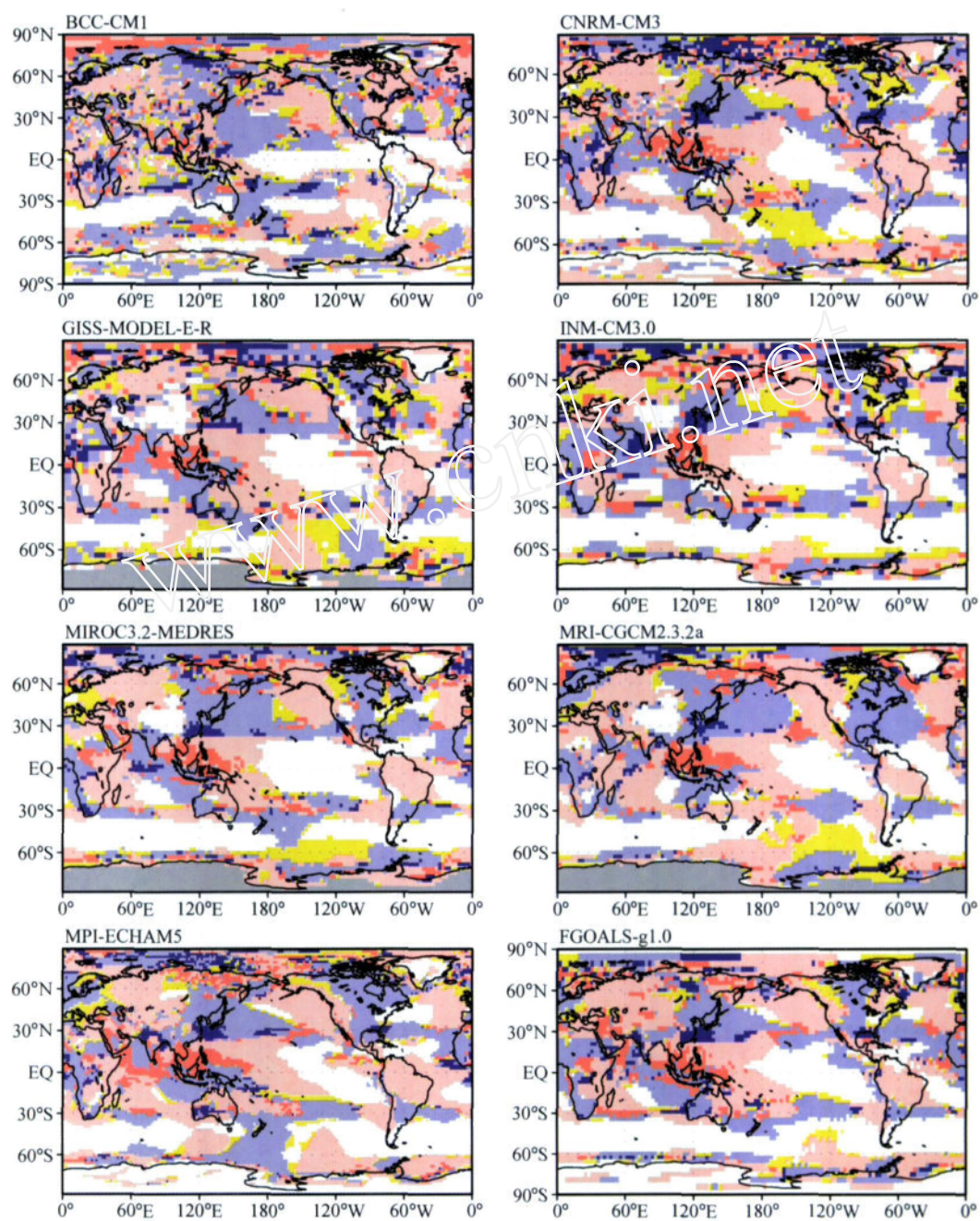


图5 同图3，但为模式模拟的风矢量旋转方式全球分布图（灰色为缺测）  
Fig. 5 The same as in Fig. 3, but for the simulated wind vectors' rotation styles, and the gray is missed values

模拟，则后者明显与观测更接近。对南半球西风带模拟，二者在 180°E ~ 90°W 都模拟的不太好，特别是 MRI-CGCM2.3.2a，与实际观测相比差异较大。MPI-ECHAM5 为德国马普的 T63 谱模式，是这 8 个模式中分辨率最高的，模拟结果比较精细，共进行了 3 次试验，除部分地区有较小的差别外，结果大致相同。但将 3 次试验进行集合平均后，南

半球中纬西风带的效果比单个试验好转不少。总体来说，MPI-ECHAM5 的 3 次试验及其集合平均都将大体形式基本模拟出来了，在亚洲热带季风区，孟加拉湾和中南半岛地区模拟的较好，但完全顺时针旋转区域模拟的偏大，尤其在南海地区。此外，对大西洋信风区和亚欧大陆东部的风向变化不稳定型的区域模拟偏小，且南半球西风带的模拟不太

好。

FGOALS-g1.0 是中国科学院大气物理研究所的新一代全球格点大气环流模式。从三次单个试验模拟结果来看,相差不是很大。与 MPF-ECHAM5 类似,将 3 次试验进行集合平均后,南半球中纬西风带的效果比单个试验改进不少。相比实际观测,FGOALS-g1.0 模拟的整体形式与观测比较接近,但在热带季风区不是非常好,同时,对于南半球西风带和亚欧大陆东部的风向变化不稳定型的模拟也不太好。

根据以上分析,虽然 8 个模式中的 7 个模式都能将风矢量旋转方式全球分布的基本形式大致模拟出来,但在一些地区的模拟能力仍有待提高。对于信风区和南半球西风带一些模式模拟较好,但对亚洲热带季风区风向的季节演变模拟的都不是非常好。此外,不少模式未能将风向变化不稳定型的分布区域很好地模拟出来。多个初始场积分的集合平均结在某些区域虽然较单个初始场结果好些,尤其在南半球西风带,但总体改进不是很大,ECMWF 对季风降水的模拟也有类似的结果<sup>[26]</sup>。

## 5.2 模式对季风风矢量旋转方式的模拟

为了更好的定量评估各模式对季风风矢量旋转方式的模拟,根据图 3 中季风区旋转方式的不同特点,选取了南亚、东亚、中南半岛、南海和西非等北半球几个关键季风区中的典型区域进行分析[图 6 (见文后彩图)]。它们的范围分别是南亚区 (0°~20°N, 50°E~80°E)、东亚区 (20°N~40°N, 115°E~140°E)、南海区 (0°~20°N, 110°E~120°E)、中南半岛南部-南海西部区 (2.5°N~15°N, 97.5°E~110°E)、西非区 (5°N~15°N, 20°W~40°E)。先取区域平均再计算有向转角。

由上述分析,BCC-CM1 的模拟结果与观测相差较大,特别在季风区,因而在这部分的分析中,将主要讨论其他 7 个模式的结果。此外,以下分析中,对于 MPF-ECHAM5 和 FGOALS-g1.0 将取其 3 次试验集合平均的结果进行分析,多个模式的集合平均不含 BCC-CM1。

图 6a 为南亚地区的有向转角曲线图,由图可见,南亚地区为 (II) 型旋转方式,虽然各模式结果与观测有一定差异,但 7 个模式及其集合平均都正确模拟出了这种旋转方式,相比之下,MRFCGCM2.3.2a 的曲线趋势差异稍大。图 6b 为东亚

地区的模拟情况,东亚为 (IV) 型旋转方式,与南亚地区类似,这 7 个模式及其集合平均也都正确模拟出了这种旋转方式。而在南海地区,属 (I) 型旋转方式 (见图 6c),仅 GISS-MODEL-E-R、INM-CM3.0 和 FGOALS-g1.0 正确模拟出了这种旋转方式,7 个模式的集合平均及其他 4 个模式都模拟成 (III) 型旋转方式。在中南半岛南部-南海西部地区 (见图 6d),各模式及其集合平均也都正确模拟出了 (III) 型旋转方式。图 6e 为西非地区,各模式间差异较大,仅 MRFCGCM2.3.2a 和 MPF-ECHAM5 正确模拟了该地区的 (III) 型旋转方式。GISS-MODEL-E-R 模拟成 (I) 型旋转方式,而其余 4 个模式和集合平均则模拟成 (II) 型旋转方式。

表 2 为各模式模拟的有向转角曲线与观测的相关系数。不难发现,CNRM-CM3 对南海地区和西非地区的模拟并不好,但对中南半岛南部-南海西部地区的模拟却与实际观测很吻合。GISS-MODEL-E-R 和 INM-CM3.0 除对西非较差外,在其他几个区域都不错。尤其是 INM-CM3.0 在南亚和中南半岛南部-南海西部地区,相关系数都达 0.99。日本的 MIROC3.2-MEDRES 和 MRFCGCM2.3.2a 对南海地区的模拟均较差,且对于其他地区,相比之下 MRFCGCM2.3.2a 的模拟效果不如 MIROC3.2-MEDRES。对于 MPF-ECHAM5 和 FGOALS-g1.0,前者在南海地区模拟较差,后者则在西非地区不理想。总的来看,各模式在南海和西非地区的模拟效

表 2 模式与观测之间的季风有向转角相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the simulated and observed directed rotary angles of monsoon

| 模式                | 观测    |       |       |             |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------------|-------|
|                   | 南亚    | 东亚    | 南海    | 中南半岛南部-南海西部 | 西非    |
| BCC-CM1           | -0.47 | -0.19 | -0.11 | 0.83*       | 0.55  |
| CNRM-CM3          | 0.94* | 0.93* | 0.14  | 0.99*       | 0.17  |
| GISS-MODEL-E-R    | 0.93* | 0.95* | 0.87* | 0.96*       | -0.07 |
| INM-CM3.0         | 0.99* | 0.96* | 0.83* | 0.99*       | -0.05 |
| MIROC3.2-MEDRES   | 0.97* | 0.98* | 0.03  | 0.99*       | 0.93* |
| MRFCGCM2.3.2a     | 0.62* | 0.92* | -0.06 | 0.89*       | 0.38  |
| MPF-ECHAM5        | 0.97* | 0.96* | 0.14  | 0.97*       | 0.94* |
| FGOALS-g1.0       | 0.95* | 0.97* | 0.92* | 0.97*       | 0.01  |
| 集合平均 (不含 BCC-CM1) | 0.95* | 0.94* | 0.10  | 0.99*       | 0.17  |

注: 黑体: 通过 99% 的信度检验, \*: 模拟的旋转方式与观测为同一类型。

果均不是很好,但在中南半岛南部-南海西部地区效果还是令人满意的,从它们的集合平均中也能看出这一趋势。那么,导致大多模式在南海和西非地区模拟效果不佳的原因是什么?是与物理过程有关还是由动力框架决定?这些还有待于进一步研究。

## 6 结论与讨论

本文引入了“有向转角”这一新概念来研究季风风向的季节性反转过程。一方面,发现不同地区风向的季节循环有6种基本类型:(I)先顺时针后逆时针旋转;(II)先逆时针后顺时针旋转;(III)完全顺时针旋转;(IV)完全逆时针旋转;(V)风向稳定型和(VI)风向变化不稳定型。且季风风向的季节性反转主要通过前四种旋转方式来实现。同时,风矢量的旋转方向和旋转程度的地域差异不仅由不同地区季风风向实现季节性反转的差异引起,而且也与大气环流系统的季节性演变过程(如槽脊、气旋反气旋的变化等)密切相关。因此,“有向转角”概念的引入,从逐日变化的角度凸显了风向变化过程,并且用欧拉观点揭示了风矢量随时间演变的旋转特点,特别是季风风场时空演变的特征。

另一方面,随着大气环流模式的不断发展和完善,评估气候模式对季风的模拟已成为一项重要课题提上议程。本文进一步将“有向转角”概念应用于IPCC第四次评估报告AMIP试验的8个模式的模拟评估。首先从宏观上对风矢量旋转方式的全球分布进行对比评估,然后聚焦于季风区的模拟评估。研究发现大多数模式基本能把风矢量旋转方式的全球分布形式模拟出来。但对于季风区风向季节性反转方式的模拟还有待提高,尤其在南海和西非地区,只有少部分模式能够较好模拟出季风风矢量的旋转方式。且多个初始场积分的集合平均对模拟结果改进不大。该方法明显区别于传统统计上的评估方法,从时空演变角度反应了季风风向的动力变化过程,且这一过程还包含了大气环流系统演变的特征。因此,对季风的模拟评估来说是一种较为客观合理的方法。

之前,不少研究工作对AMIP试验的季风降水模拟进行了比较。例如Lau等<sup>[42]</sup>研究指出,许多模式无法再现印度西部和孟加拉湾这两个最大降水中心。Kang等<sup>[43]</sup>通过10个GCMs模式的比较,认为在模拟印度季风区降水的季节变化中,大多数

结果偏大。而Liang等<sup>[24]</sup>指出季风降水的模拟误差与季风风场的模拟误差是紧密相关的。事实上,本文通过分析表明,这些区域的旋转方式在一些模式中也未能很好的模拟出来。那么,季风降水模拟的失真是否确实是由季风风向演变和大气环流各系统季节变化的模拟失真造成的,二者之间是否存在相互作用,季风风向旋转方式的模拟误差与降水模拟误差是否有联系等等,非常值得我们进一步深入研究和探讨。

**致谢** 本研究得到了以下支持和帮助,国际模式工作组提供了模式分析资料,气候模式诊断与比较计划(PCMDI)搜集和整理了模式资料,从事耦合模式及模式比较计划(CMIP)的JSC/CLIVAR工作组和气候模拟成员组织了模式资料的分析工作,IPCC WGI TSU提供了技术支持。Lawrence Livermore 国家实验室的IPCC资料归档工作由美国能源部科学办公室赞助支持。同时,中国科学院大气物理研究所应明和占瑞芬博士以及中国气象科学研究院温敏博士提供了诸多帮助和有益讨论,审稿人也对本文提出了不少好建议,在此,一并表示感谢。

## 参考文献 (References)

- [1] 高由禧,章名立. 东亚季风问题及其某些特征. 地理学报, 1957, **23** (1): 55~67  
Gao Youxi, Zhang Mingli. On the monsoon problem of the Far East and some of its characteristics. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1957, **23** (1): 55~67
- [2] Shukla J M, Fennessy J. Simulation and predictability of monsoons. Proc. of the Inter. Conference of Monsoon Variability and Prediction. Tech. Rep. WCRP-84, WCRP, Geneva, Switzerland, 1994. 567~575
- [3] Zhang Y, Sperber K R, Boyle J S, et al. East Asian winter monsoon: Results from eight AMIP models. *Climate Dyn.*, 1997, **13**: 792~820
- [4] Webster P J, Magaña V O, Palmer T N, et al. Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 14451~14510
- [5] Sperber K R, Slingo J M, Annamalai H. Predictability and the relationship between subseasonal and interannual variability during the Asian summer monsoon. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2000, **126**: 2545~2574
- [6] Lau N-C, Nath M J. Impact of ENSO on the variability of the Asian - Australian monsoons as simulated in. GCM experiments. *J. Climate*, 2000, **13**: 4287~4309
- [7] 吴国雄,刘屹岷,刘新,等. 青藏高原加热如何影响亚洲夏季的气候格局. 大气科学, 2005, **29** (1): 47~56  
Wu Guoxiong, Liu Yimin, Liu Xin, et al. How the heating over the Tibetan Plateau affects the Asian climate in summer.

- Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (1): 47 ~ 56
- [8] Fennessy M J, Kinter J L III, Kirtman B, et al. The simulated Indian monsoon: A GCM sensitivity study. *J. Climate*, 1994, **7**: 33 ~ 43
- [9] Cheng Anning, Chen Wen, Huang Ronghui. The sensitivity of numerical simulation of the East Asian monsoon to different cumulus parameterization schemes. *Adv. Atmos. Sci.*, 1998, **15**: 204 ~ 220
- [10] Wang B, Kang I-S, Lee J-Y. Ensemble simulations of Asian - Australian monsoon variability by 11 AGCMs. *J. Climate*, 2004, **17**: 803 ~ 818
- [11] Sperber K R, Palmer T N. Interannual tropical rainfall variability in general circulation model simulations associated with the atmospheric model intercomparison project. *J. Climate*, 1996, **9**: 2727 ~ 2750
- [12] Gadgil S, Sajani S. Monsoon precipitation in the AMIP runs. *Climate Dyn.* 1998, **14**: 659 ~ 689
- [13] Annamalai H, Slingo J M, Sperber K R, et al. The mean evolution and variability of the Asian summer monsoon: Comparison of ECMWF and NCEP-NCAR reanalysis. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, **127**: 1157 ~ 1186
- [14] Liu Yongqiang, Giorgi F, Washington W M. Simulation of summer monsoon climate over East Asia with an NCAR regional climate model. *Mon. Wea. Rev.*, 1994, **122**: 2331 ~ 2348
- [15] Rajendran K, Kitoh A, Yukimoto S. South and East Asian summer monsoon climate and variation in the MRI coupled model (MRI-CGCM2). *J. Climate*, 2004, **17**: 763 ~ 782
- [16] Wang Zaizhi, Wu Guoxiong, Wu Tongwen, et al. Simulation of Asian monsoon seasonal variations with climate model R42L9/LASG. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**: 879 ~ 889
- [17] 赵宗慈, 丁一汇, 李晓东, 等. 海气耦合模式在东亚地区的可靠性评估. *应用气象学报*, 1995, **6** (增刊): 9 ~ 18  
Zhao Zongci, Ding Yihui, Li Xiaodong, et al. Evaluation of CGCMCL climate simulation in East Asia region. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1995, **6** (Supplement): 9 ~ 18
- [18] Pedelaborde P. *The Monsoon* (Translated by M.J. Clegg). London, Methuen, 1963. 196pp
- [19] Ramage C S. *Monsoon Meteorology*. New York: Academic Press, 1971. 6
- [20] Khromov S P. *Great Soviet Encyclopedia* (A Translation of the Third Edition). New York: Macmillan London, Collier Macmillan Publishers, 1978, **17**: 129
- [21] Webster P J. The elementary monsoon. *Monsoons*, Fein J S, Stephens P L, Eds. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1987. 3 ~ 32
- [22] Krishnamurti T N. Monsoons. *Encyclopedia of Climate and Weather*. Vol. 2, Schneide S H, Ed. New York, Oxford: Oxford University Press, 1996. 512 ~ 515
- [23] Hann J. *Handbuch der Klimatologie. Engelhorn* (Vol. 1), Stuttgart. 1998
- [24] Liang X-Z, Wang W-C, Samel A N. Biases in AMIP model simulations of the East China monsoon system. *Climate Dyn.*, 2001, **17**: 291 ~ 304
- [25] Gates W L. AMIP Newsletter No. 6. Lawrence Livermore National Laboratory, 1995. 23 pp
- [26] 王会军. 国际大气环流模式比较计划 (AMIP) 进展. *大气科学*, 1997, **21** (5): 633 ~ 637  
Wang Huijun. The advance of the atmospheric model inter-comparison project (AMIP). *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1997, **21** (5): 633 ~ 637
- [27] [http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about\\_ipcc.php](http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php)
- [28] 李建平, 曾庆存. 风场标准化季节变率的显著性及其表征季风的合理性. *中国科学 (D 辑)*, 2000, **30** (3): 331 ~ 336  
Li Jianping, Zeng Qingcun. Significance of the normalized seasonality of wind field and its rationality for characterizing the monsoon. *Science in China (D)*. 2000, **30** (3): 331 ~ 336
- [29] Li Jianping, Zeng Qingcun. A new monsoon index and the geographical distribution of the global monsoons. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20**: 299 ~ 302
- [30] 李建平, 曾庆存. 一个新的季风指数及其年际变化和雨量的关系. *气候与环境研究*, 2005, **10** (3): 351 ~ 365  
Li Jianping, Zeng Qingcun. A new monsoon index, its inter-annual variability and relation with monsoon precipitation. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (3): 351 ~ 365
- [31] 陈际龙, 黄荣辉. 亚澳季风各子系统气候学特征的异同研究 I. 夏季风流场结构. *大气科学*, 2006, **30** (6): 1091 ~ 1102  
Chen Jilong, Huang Ronghui. The comparison of climatological characteristics among Asian and Australian monsoon subsystems. Part I. The wind structure of summer monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (6): 1091 ~ 1102
- [32] Li Jianping, Zeng Qingcun. A unified monsoon index. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29** (8): 1151 ~ 1154
- [33] Tao Shiyan, Chen Longxun. A review of recent research on East summer monsoon in China. *Monsoon Meteorology*, Chang C P, Krishnamurti T N, Eds. Oxford: Oxford University Press, 1987. 60 ~ 92
- [34] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991. 8 ~ 362  
Chen Longxun, Zhu Qian'gen, Luo Huibang, et al. *Eastern Asia Monsoon* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 8 ~ 362pp
- [35] 陈隆勋, 高辉, 何金海, 等. 夏季东亚和印度热带季风环流系统动能和对流扰动的纬向传播特征. *中国科学 (D 辑)*,

- 2004, **34**: 171 ~ 179
- Chen Longxun, Gao Hui, He Jinhai, et al. Zonal propagation of kinetic energy and convection in the South China Sea and Indian monsoon regions in boreal summer. *Science in China (D)* (in Chinese), 2004, **34**: 171 ~ 179
- [36] 钱永甫, 江静, 张艳, 等. 亚洲热带夏季风的首发地区和机理研究. *气象学报*, 2004, **62**: 129 ~ 139
- Qian Yongfu, Jiang Jing, Zhang Yan, et al. The earliest onset area of the tropical Asian summer monsoon and its mechanisms. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62**: 129 ~ 139
- [37] 朱乾根, 何金海. 亚洲夏季风建立及其中期振荡的高空环流特征. *热带气象学报*, 1985, **2** (1): 9 ~ 18
- Zhu Qian'gen, He Jinhai. On features of the upper circulation in the establishment of Asian monsoon in 1979 and its medium-range oscillation. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), **2** (1): 9 ~ 18
- [38] Zhu Qian'gen, He Jinhai, Wang Panxing. A study of circulation differences between East-Asian and Indian summer monsoons with their interactions. *Adv. Atmos. Sci.*, 1986, **3** (4): 466 ~ 477
- [39] 何金海, 宇婧婧, 沈新勇, 等. 有关东亚季风的形成及其变率的研究. *热带气象学报*, 2004, **20** (5): 449 ~ 459
- He Jinghai, Yu Jingjing, Shen Xinyong, et al. Research on mechanism and variability of East Asian monsoon. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2004, **20** (5): 449 ~ 459
- [40] 黄荣辉, 黄刚, 任保华. 东亚夏季风的研究进展及其需进一步研究的问题. *大气科学*, 1999, **23** (2): 129 ~ 141
- Huang Ronghui, Huang Gang, Ren Baohua. Advances and problems needed for further investigation in the studies of the East Asian summer monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (2): 129 ~ 141
- [41] 曾庆存, 李建平. 南北两半球大气的相互作用和季风的本质. *大气科学*, 2002, **26**, (4) 433 ~ 448
- Zeng Qingcun, Li Jianping. On the interaction between northern and southern hemispheric atmospheres and the essence of tropical monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2002, **26** (3): 207 ~ 226
- [42] Lau K-M, Sud Y, Kim J H. Intercomparison of hydrologic processes in AMIP GCMs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 2209 ~ 2227
- [43] Kang I-S, Jin K, Wang B, et al. Intercomparison of the climatological variations of Asian summer monsoon precipitation simulation by 10 GCMs. *Climate Dyn.*, 2002, **19**: 383 ~ 395



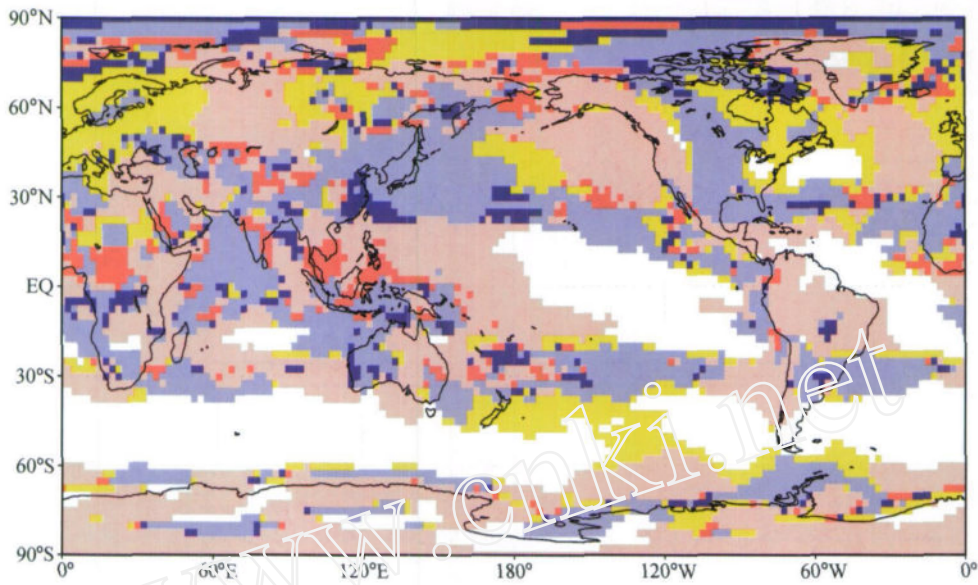


图 3 850 hPa 上风矢量旋转方式全球分布图。浅红色为 (I) 先顺时针后逆时针旋转; 浅蓝色为 (II) 先逆时针后顺时针旋转; 深红色为 (III) 完全顺时针旋转; 深蓝色为 (IV) 完全逆时针旋转; 白色为 (V) 风向稳定型; 黄色为 (VI) 风向变化不稳定型

Fig. 3 The global distribution of wind vectors' rotation styles at 850 hPa. (I) The clockwise to counterclockwise rotation is shown as light red; (II) the counterclockwise to clockwise rotation is shown as light blue; (III) the full clockwise rotation is shown as deep red; (IV) the full counterclockwise rotation is shown as deep blue; (V) the stable rotation is shown as white; (VI) the instable rotation is shown as yellow

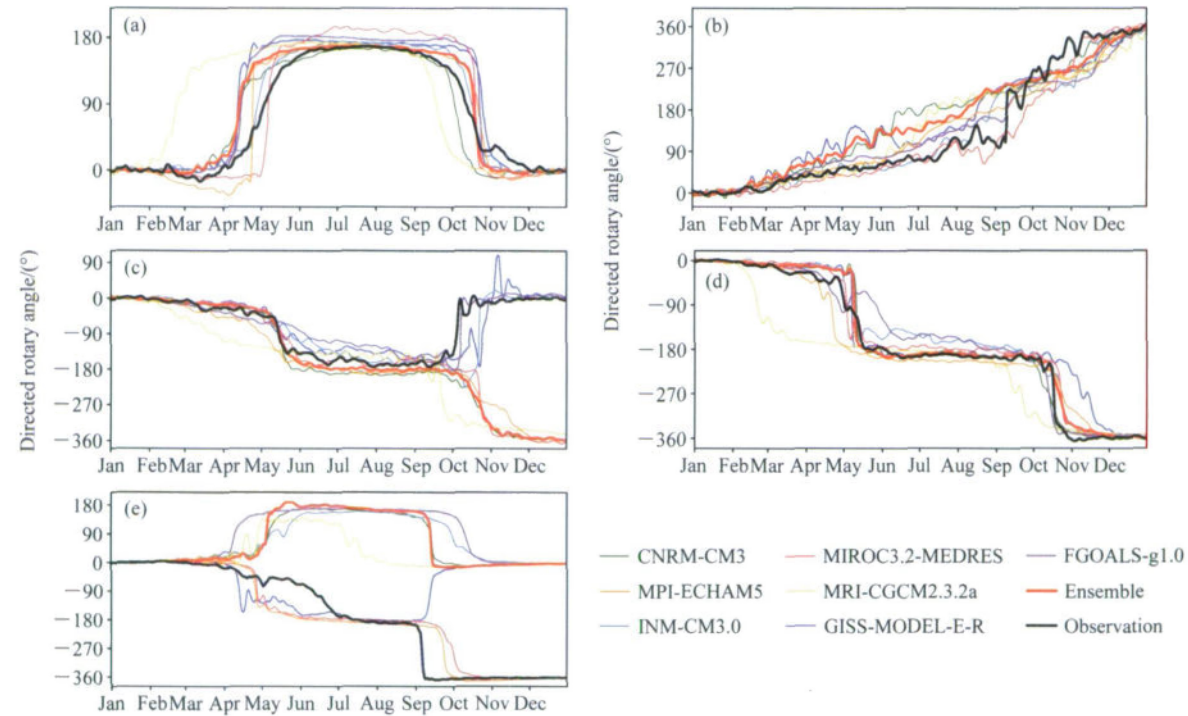


图 6 季风区风矢量有向转角变化的模拟及与观测结果的对比: (a) 南亚区 ( $0^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$ ,  $50^{\circ} \text{E} \sim 80^{\circ} \text{E}$ ); (b) 东亚区 ( $20^{\circ} \text{N} \sim 40^{\circ} \text{N}$ ,  $115^{\circ} \text{E} \sim 140^{\circ} \text{E}$ ); (c) 南海区 ( $0^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$ ,  $110^{\circ} \text{E} \sim 120^{\circ} \text{E}$ ); (d) 中南半岛南部 - 南海西部区 ( $2.5^{\circ} \text{N} \sim 15^{\circ} \text{N}$ ,  $97.5^{\circ} \text{E} \sim 110^{\circ} \text{E}$ ); (e) 西非区 ( $5^{\circ} \text{N} \sim 15^{\circ} \text{N}$ ,  $20^{\circ} \text{W} \sim 40^{\circ} \text{E}$ )

Fig. 6 The comparison among the simulated and observed directed rotary angles of wind vectors in the monsoon areas: (a) South Asia ( $0^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$ ,  $50^{\circ} \text{E} \sim 80^{\circ} \text{E}$ ); (b) East Asia ( $20^{\circ} \text{N} \sim 40^{\circ} \text{N}$ ,  $115^{\circ} \text{E} \sim 140^{\circ} \text{E}$ ); (c) the South China Sea ( $0^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$ ,  $110^{\circ} \text{E} \sim 120^{\circ} \text{E}$ ); (d) southern Indo-China Peninsula-western South China Sea ( $2.5^{\circ} \text{N} \sim 15^{\circ} \text{N}$ ,  $97.5^{\circ} \text{E} \sim 110^{\circ} \text{E}$ ); (e) West Africa ( $5^{\circ} \text{N} \sim 15^{\circ} \text{N}$ ,  $20^{\circ} \text{W} \sim 40^{\circ} \text{E}$ )