

风场标准化季节变率的显著性及其表征 季风的合理性*

李建平 曾庆存

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘要 从理论上探讨风场标准化季节变率的显著性, 揭示出它的临界值与季风区定义的内在联系, 从而说明用它表征季风区的合理性. 据此, 利用 1958~1997 年 NECP/NCAR 再分析资料, 分析了风场的显著季节变率的空间结构, 证实在垂直方向上大气环流季节变化显著的斜压性, 发现热带地区东西半球显著季节变率的反对称分布特征, 并指出季风与副热带高压、极夜急流、西风通道等重要系统有密切关系.

关键词 标准化季节变率 季风 季风区 显著性 斜压性 西半球热带季风

季风是季节性风, 是全球气候系统中的一个重要成员^[1-3], 在传统上它是一个带有地域性的气候学概念^[1-3], 它对全球热带地区大气环流的季节和年际变化起着重要作用^[1-6]. 季风变异严重影响着季风区的旱涝等灾害性天气和灾害性气候的发生, 并带来严重的经济损失^[7-9], 因此, 季风研究无疑是非常重要的. 为定量研究季风就必须给出一些能反映季风主要特征的客观指标, 否则, 一切将无从谈起. 因为(经典的)季风是概括发生于热带以及与之相关联的中低纬度带内某些地区的强烈季节变化现象^[1-3], 所以用风场季节变化的大小来刻画季风是自然的思路并有较清晰的物理意义. 基于此, 曾庆存等人^[1,2]提出标准化季节变率的新概念来研究大气环流的季节变化和季风问题, 得到季节变化的十分鲜明的三维图像, 并有新的发现. 他们的结果表明在对流层低层, 经典的季风区(即热带季风区)均是季节变率最大的区域, 除此之外, 在副热带和北半球中高纬地区还有标准化季节变率最大的地带, 并分别称为副热带和温带季风区; 在对流层上层和平流层低层, 除已知的南亚-非洲的一支行星季风区外, 还新发现中东太平洋-南北美洲-大西洋热带地区的一支行星季风区(这里简称为西半球热带季风); 在平流层中层, 南北半球副热带各有一个环绕整个纬圈的行星季风区, 即平流层季风. 进而, 他们推广了季风的定义, 即定义(广义)季风区为具有显著的季节变化的地区, 而经典的季风区即是狭义季风区. 曾庆存等人的这些研究从实践的角度说明风场的标准化季节变率确实是反映季风的一个客观指标. 然而, 这里有一个重要的问题还需要解决, 就是标准化季节变率的显著性与季风区在定量上的内在联系(显然, 这个定量标准多少带有人为性, 为此, 我们将文献[8]中的指标作为标准). 本文建立了标准化季节变率在定义季风区问题上与通用方法的关系, 并结合观测资料进行了分析.

1999-10-20 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(批准号: G1998040900, Part I)和国家自然科学基金重点资助项目(批准号: 49735160)

1 标准化季节变率

在讨论之前, 阐明基本的概念是非常必要的. 曾庆存等人^[1,2]所提出的标准化季节变率定义如下:

$$\delta = \frac{\|F_s - F_w\|}{\|\bar{F}\|}, \quad (1)$$

其中 F 是被研究气象要素的特征量; F_s 和 F_w 分别表示 F 的典型夏季和冬季的值(例如 F_s 为 7 月份平均, F_w 为 1 月份平均); \bar{F} 是年平均值或冬夏两季的平均值, 即 $\bar{F} = (F_s + F_w)/2$; $\|A\|$ 则为量 A 的范数, 即

$$\|A\| = \left(\iint_S |A|^2 dS \right)^{1/2}, \quad (2)$$

其中 S 代表所计算的区域. 显然, 标准化季节变率 δ 是刻画量 F 季节变化大小的相对度量. 就平均状况而言, 在全球绝大部分地区, 因为 1 月和 7 月确是极值月份, 所以标准化季节变率 δ 也自然可以理解为标准化的年振幅^[1,2]. 本文只讨论 F 为风场的情形, 即 $F \equiv V$, 此时 V_s 与 V_w 可分别理解为夏、冬季的盛行风. 另外, 根据气象实际情况, 以下考虑数域 K 为实数域.

2 季节变率的显著性和季风

令风矢量 V_s 与 V_w 之间的夹角为 α , $\alpha \in [0, \pi]$, 则有

$$\cos \alpha = \frac{(V_s, V_w)}{\|V_s\| \|V_w\|}. \quad (3)$$

定理 1 当 $\|V_s\|$ 与 $\|V_w\|$ 固定时, V_s 与 V_w 之间的夹角 α ($\alpha \in [0, \pi]$) 是标准化季节变率 δ 的严格增函数.

证: 对于实域 K 成立

$$\begin{aligned} \|V_s - V_w\|^2 &= \|V_s\|^2 + \|V_w\|^2 - 2(V_s, V_w), \\ \|V_s + V_w\|^2 &= \|V_s\|^2 + \|V_w\|^2 + 2(V_s, V_w), \end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned} \delta &= 2 \sqrt{\frac{\|V_s\|^2 + \|V_w\|^2 - 2(V_s, V_w)}{\|V_s\|^2 + \|V_w\|^2 + 2(V_s, V_w)}} \\ &= 2 \sqrt{\frac{\|V_s\|^2 + \|V_w\|^2 - 2\|V_s\| \|V_w\| \cos \alpha}{\|V_s\|^2 + \|V_w\|^2 + 2\|V_s\| \|V_w\| \cos \alpha}}, \end{aligned} \quad (4)$$

而

$$\cos \alpha = \frac{(\|V_s\|^2 + \|V_w\|^2)(4 - \delta^2)}{2\|V_s\| \|V_w\| (4 + \delta^2)}. \quad (5)$$

令 $f = \cos \alpha$, $c = (\|V_s\|^2 + \|V_w\|^2) / 2\|V_s\| \|V_w\|$, 则当 $\|V_s\|$ 与 $\|V_w\|$ 固定时, c 固定, 且

$$f'_\delta = -\frac{16c\delta}{(4+\delta^2)^2} < 0 \quad (\delta > 0), \tag{6}$$

所以 $\cos\alpha$ 是 δ 的严格减函数, 换言之, α 为 δ 的严格增函数.

根据(4)式不难有

定理 2 令 V_s 与 V_w 之间的夹角为 α , 则有

- (i) 当 $0 \leq \alpha < 90^\circ$ 时, $\delta < 2$;
- (ii) 当 $\alpha = 90^\circ$ 时, $\delta = 2$;
- (iii) 当 $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ 时, $\delta > 2$.

定理 1 揭示出 δ 与风的季节变化的内在联系, 表明标准化季节变率 δ 确是表征季风明显程度的指标, δ 大的地区一定是风系方向变化大的地区. 定理 2 表明若季风区的定义取为冬夏季的风方向差别至少大于 90° (这比 Ramage 定义^[8]稍小一些), 则季风区相当于标准化季节变率 $\delta > 2$ 的区域, 而 $\delta = 2$ 就是风场季节变化是否显著的临界值(若取 Ramage 定义, 即季风区的一个条件是 1 月和 7 月风向之间的夹角 $\alpha \geq 120^\circ$ ^[8], 则季风区相当于 $\delta > \delta_c$, 这里 δ_c 与 120° 对应; 但 δ_c 是一个空间函数, 不利于应用分析). 至于临界 δ 为 2 及为 δ_c 所包括的区域之间有多大差别, 我们利用 NECP/NCAR 再分析资料 1958 ~ 1997 年的气候平均风场(垂直方向为从 1 000 hPa 直至 10 hPa 共 17 层)对它们进行了计算比较(这里 S 取为 5 个经纬距的区域), 图 1 给出 850 hPa 等压面上的结果. 由图 1 可见, 两者所包括的区域是非常接近的(在其他层次上亦是如此), 说明用 2 作为临界 δ 是合理且简便的. 总之, 由以上结果可知, 显著的标准化季节变率能够反映季风是盛行风向有显著的转变这一主要特征, 因此用它表征季风是客观合理的. 因为标准化季节变率的定义并不局限于热带地区, 所以文献[1,2]推广季风的观念, 即定义季风区是季节变化显著的地区是正确的. 这样, 显著的标准化季节变率 δ 的分布就是世界季风的地理分布.

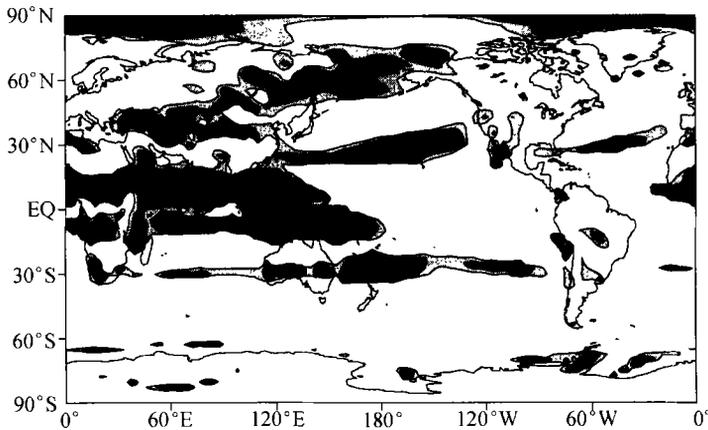


图 1 850 hPa 风场的标准化季节变率 $\delta = 2$ 和 $\delta = \delta_c$ 的全球分布
其中风场为 1958 ~ 1997 年的气候平均, 浅色和深色阴影区分别为 $\delta = 2$ 和 $\delta = \delta_c$ 所包括的区域

概括地说, 图 1 所确定的季风区分为 3 个大区域: 热带、副热带和温寒带季风区^[3], 经典季风区如亚澳季风区(包括印度季风)、热带非洲季风区等均在其中, 且所谓的北非季风区、北美季风区、南非季风区、澳大利亚南部季风区和欧洲季风趋势区在图中亦有反映. 与经典季风区所不同的是, 图 1 表明在副热带的太平洋、北半球大西洋以及印度洋上均存在明显的季风

区^[3], 在沿伊朗高原及青藏高原的北部边缘的中亚地区(图 1 中在伊朗和青藏高原上的显著标准化季节变率区是虚假的, 因为那里的地面已高出 850 hPa)、在远东和阿拉斯加北部以及北极地区也有季风区。

3 显著季节变率的垂直分布

为了清楚简明地展示显著的季节变率的垂直结构及其与某些重要天气气候系统之间的作用和联系, 图 2 给出标准化季节变率的纬向平均及纬向平均的 1 月、7 月和这两个月平均的东西风零线的分布。由图可知: (1) 南、北半球的季节变率分布虽比较相似, 但差别是很明显的, 一个明显差别是在各个层次上北半球的季节变化都较南半球强, 换句话说, 就是北半球的季风确比南半球强, 这与北半球海陆分布较南半球复杂有关。另一个明显差别是在对流层低层, 南半球中高纬地区季节变率很小, 而北半球则有温寒带季风。(2) 大气环流的季节变化呈显著的斜压性^[2]。在 500 hPa 以下的对流层低层, 全球存在 4 个季节变率的显著区, 即热带、副热带及北半球温寒带季风区。在对流层(200 hPa 以下)中, 位于副热带的两支 δ 显著区均随高度升高向赤道倾斜; 且北半球的一支强度随高度增加而加强, 南半球的一支却相反。在对流层上层至平流层底层(约 350~400 hPa), 南半球的一支消失, 全球仅剩北半球的一支显著区, 其强度达到一个极大值且范围扩展到热带。此时, 热带和副热带季风合二为一。在平流层中, 位于南半球副热带的一支季节变率显著区又出现, 两支副热带 δ 显著区呈现出与对流层中相反的特征即它们随高度升高而向中高纬倾斜。环绕整个纬圈的这两支平流层季风与极夜急流的建立、维持和崩溃有关^[2]。(3) 显著的季节变率与副热带高压有紧密联系。根据图 2, 1 月和 7 月平均的东西风零线基本上与显著 δ 的轴线重合, 1 月和 7 月的东西风零线之间所包括范围基本上与显著 δ 区重合, 而副热带高压的脊线就位于东西风零线上, 所以副热带季风是与副热带高压的季节性位移^[1,2]密切相关。造成季节变率的上述垂直结构的主要物理原因可能是太阳辐射的季节变化、大气成分的垂直分布及海陆差异等。

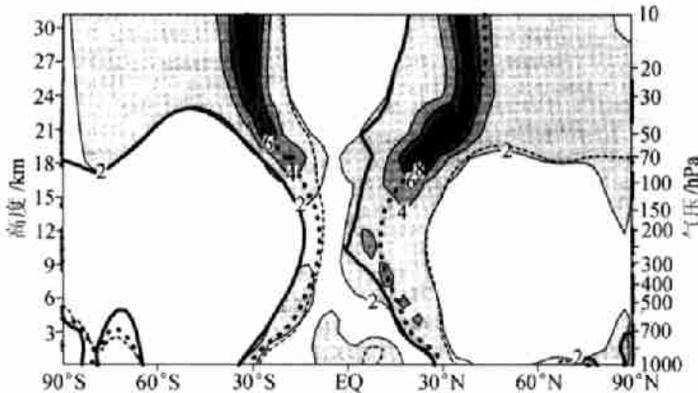


图 2 风场标准化季节变率 δ 的纬向平均分布

粗实线、虚线和点线分别表示 1 月、7 月和这两个月平均的东西风零线

季节变率并非纯粹的纬向带状分布, 它存在明显的地区差异, 表现出纬向不对称性。图 3(a)、(b)分别给出东、西半球 δ 的平均经向分布。由图可见, 这两个半球的风场标准化季节变率分布是不同的, 尤以 50 hPa 层以下明显。不同之处表现在: (1) 东半球囊括经典热带季风(即

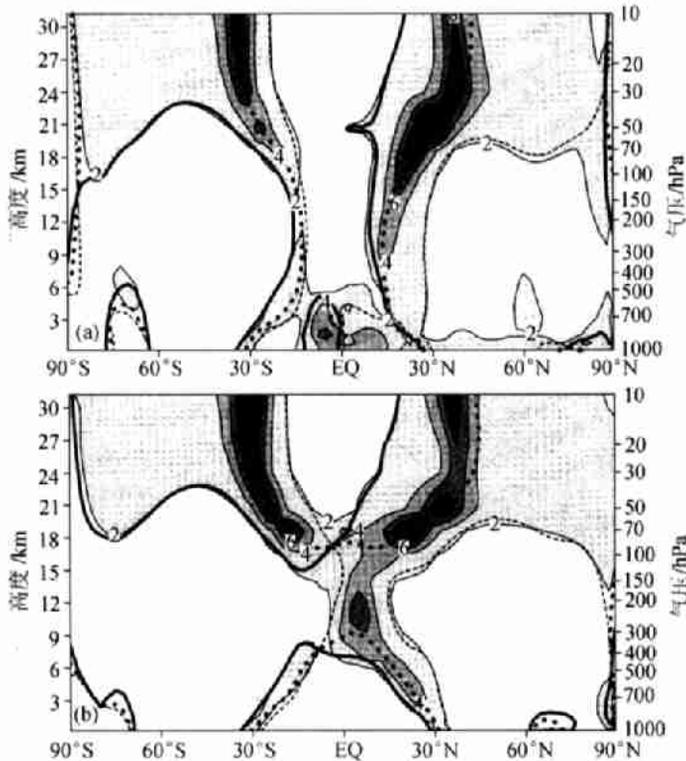


图3 东半球(a)和西半球(b)风场标准化季节变率的平均经向分布
其他同图2

亚澳季风, 非洲季风), 其中显著 δ 呈近似U型分布, 西半球中的显著 δ 呈近似X型分布. (2) 在对流层低层(500 hPa 以下), 在东半球中热带、副热带、温寒带季风并存, 并以热带季风最为强大; 在西半球, 只存在副热带季风, 不存在热带季风. 在对流层中层以上, 东半球以副热带季风为主要特征而不存在热带季风; 西半球则明显不同, 在 500 ~ 100 hPa 层上两支副热带季风合并, 并转变为以热带性质为主的季风, 这就是曾庆存等人^[1,2]所发现的中东太平洋-南北美洲-大西洋热带地区的行星季风, 这里称为西半球热带季风, 再往高层它又分叉为两支副热带季风. 西半球热带季风与中东太平洋和大西洋地区热带地区上空的西风通道处于相当的位置, 它与这两个地区西风通道的季节变化关系密切. (3) 东半球副热带地区显著的 δ 随高度的倾斜程度明显比西半球的弱. 另外, 上述分析表明在热带地区 50 hPa 层以下, 东西半球的显著季节变率区有对称性. 这在图 4 中的热带地区(15° S ~ 15° N) δ 的平均纬向分布上反映得非常清楚. 在热带地区, 东半球对流层低层为热带季风, 在对流层高层及平流层基本没有显著的季节变率; 在西半球则恰好相反. 这种反对称结构以国际日期变更线和 500 hPa 层为分界线, 它是热带季风垂直分布的一个重要特征. 此外, 上述结果也表明, 季节变率的纬向不对称性主要表现在 50 hPa 层以下.

4 讨论

季风是重要的全球大气环流系统, 它是通过环流的显著季节变化表现出来. 本文在理论

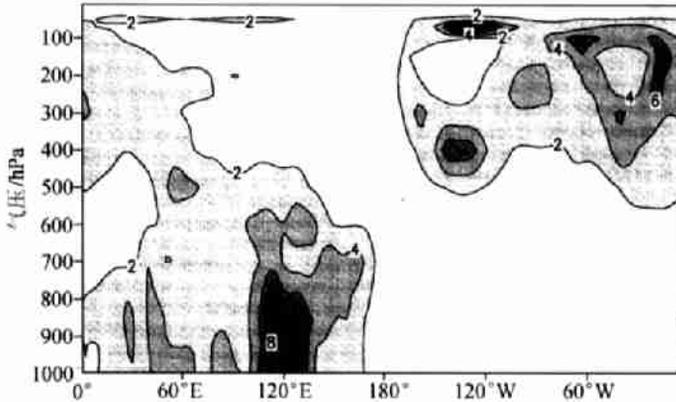


图 4 热带地区(15° S ~ 15° N)风场标准化季节变率的平均纬向垂直分布

上揭示出风场标准化季节变率与季风的关系,探讨了季节变率的显著性,说明显著季节变率表征季风的合理性。这里的理论结果实质上表明显著的标准化季节变率 δ 的分布就是世界季风的地理分布,即季风区就是环流季节变化显著的地区。利用 1958 ~ 1997 年 NECP/NCAR 再分析资料,分析了风场的显著标准化季节变率的空间结构,证实在垂直方向上大气环流季节变化显著的斜压性,发现热带地区东西半球显著季节变率的反对称分布特征,指出季风与副热带高压、极夜急流、西风通道等重要系统有密切关系。这种反对称结构、不同性质的季风系统之间以及季风与副热带高压、极夜急流、西风通道等重要系统之间相互作用与联系的深层次的物理机理及其在气候年际变化中的重要作用都是值得进一步深入研究的。

参 考 文 献

- 1 Zeng Qingcun, Zhang Banglin, Liang Youlin, et al. The Asian summer monsoon——A case study. *Proceedings of the Indian Science Academy, Part A*, 1994, 60(1): 81 ~ 96
- 2 曾庆存, 张邦林. 大气环流的季节变化和季风. *大气科学*, 1998, 22(6): 805 ~ 813
- 3 曾庆存, 梁信忠, 张明华. 季风和大气环流季节突变的数值模拟. *大气科学*, 1988, (特刊): 22 ~ 42
- 4 陶诗言. 季风研究中有待解决的问题. 见: *现代大气科学前沿与展望*. 北京: 气象出版社, 1996. 35 ~ 36
- 5 Tao Shiyan, Chen Longxun. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. In: Chang C P, Krishnamuri T N, eds. *Monsoon Meteorology*. Oxford: Oxford University Press, 1987. 60 ~ 92
- 6 Zhu Qiangen, He Jinhai, Wang Panxing. A study of the circulation differences between East Asian and Indian summer monsoons with their interaction. *Adv Atmos Sci*, 1986, 3: 466 ~ 477
- 7 黄荣辉. 关于东亚季风的研究. 见: *中国大气物理研究所编. 东亚季风和中国暴雨*. 北京: 气象出版社, 1998. 127 ~ 136
- 8 Ramage C S. *Monsoon Meteorology*. New York: Academic Press, 1971. 6
- 9 Webster P J, Magana V O, Palmer T N, et al. Monsoons: processes, predictability, and prospects for prediction. *J Geophys Res*, 1998, 103(C7): 14 451 ~ 14 510