

文章编号: 1000-2022(2004) 01-0011-09

平均经圈环流质量流函数两种计算方案的比较

顾兴军, 王盘兴, 李丽平

(南京气象学院 大气科学系, 江苏 南京 210044)

摘 要: 质量流函数(ψ)是直观、定量描述纬向平均经圈环流的物理量。用相同格点网、相同资料(1958—1998 年 NCEP/NCAR 再分析资料)比较了迭代方案、叠加方案求得 ψ 在描述平均经圈环流气候态、强 El Nino 年异常态以及 Hadley 环流双层结构时的异同。比较表明,二者计算结果间不存在明显差异;但叠加方案只用 v 资料,计算也简单。

关键词: 平均经圈环流; 质量流函数; 迭代方案; 叠加方案; 计算结果比较

中图分类号: P434 **文献标识码:** A

平均经圈环流(MMC, Mean Meridional Circulation)是由子午面上风分量 v 和垂直运动分量 ω 沿纬圈的平均值 $[v]$ 、 $[\omega]$ 决定的环流,构成 MMC 的主要系统是 Hadley 环流圈、Ferrel 环流圈和极地环流圈。关于 MMC 的重要意义,叶笃正等^[1]、Lorenz^[2]的经典著作已作全面论述。早在 20 世纪 60 年代,Palmen 等^[3]、Vuorela 等^[4]便使用子午面上的质量流函数 ψ 表示 MMC,因其具有直观定量的特性而成为表示 MMC 的常用方法。

但是,如 Lorenz^[2]指出, $[v]$ 、 $[\omega]$ 实质上是由具有相反符号的大值平均得到的统计余数,其可靠性在许多场合下较 $[u]$ 小,无论实际大气或模式大气资料求得的 $[v]$ 、 $[\omega]$,其精度都不能严格满足质量连续性原理的要求。因此,在实际计算 $[v]$ 、 $[\omega]$ 场对应的 MMC 的质量流函数 ψ 场时出现了一些不同的方法,其中, Kidson 方案^[5]和吴国雄方案^[6-7]得到了广泛应用。吴国雄方案在求 ψ 时使用了迭代法,故本文称其为迭代方案。

王盘兴在分析 IAP 2-L GCM 模式大气 MMC 时给出了一种求质量流函数 ψ 的方案^[8]。该方案的实质是从质量平衡的角度出发,使子午面上 $[v]$ 引起的穿越等 φ 线向北的质量输送净值为 0。该方案的明显特征是它仅用了 $[v]$ 分量,在求取 ψ 时采用了线性权重叠加法,故本文称其为叠加方案。尽管 IAP 2-L GCM 垂直分辨率甚低,用它分析模式大气得到的 MMC 的气候态及年际异常态却合乎气候学和物理学的一般原理。

近年来文献[9]用迭代方案和 NCEP/NCAR 41 a(1958—1998 年)再分析资料求得了历年逐月 MMC 的 ψ ,并对其气候态及 El Nino 年异常态作了分析,得到了在物理上与文献[7-8]一致的结果。文献[10]用叠加方案和 NCEP/NCAR 52 a(1948—1999 年)再分析资料求得了

收稿日期: 2003-03-14; 改回日期: 2003-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40233037)

作者简介: 顾兴军(1977-),男,山东济宁人,硕士生,研究方向: 大气环流异常与短期气候预测。

历年逐月 MMC 的 ψ , 并对其作了类似于文献[9]的分析, 也得到了类似的结果。

文献[9-10]表明, 对同一资料, 用迭代方案和叠加方案计算得到月平均 MMC 的 ψ 场很接近, 但并未对此作严格的比较。本文取用 NCEP/NCAR 41 a (1958—1998 年) 再分析资料, 在同样的计算网格及资料前处理下, 求得了并列的两组 ψ 资料。分析表明, 它们对于月 MMC 的气候及异常态的研究都是适用的, 而叠加方案较迭代方案的计算简单。

1 资料及预处理

1.1 资料

使用 NCEP/NCAR 再分析资料的 v 及垂直速度 ω ($\omega = dp/dt$) 分量月平均资料^[11-12], 其有关参数为: 1) 覆盖时段: 1958 年 1 月—1998 年 12 月, 共 41 a, 492 个月; 2) 分层: 1 000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10 hPa 共 17 层; 3) 网格距: $\Delta\lambda \times \Delta\varphi = 2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

1.2 预处理

根据 Lorenz 环流分解原理^[2], 为了下文表述的方便, 这里给出本文所涉及要素的分解结果。

(1) 空间域上的分解

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} (i, j, k, t_y, t_m) = \begin{bmatrix} [v] \\ [\omega] \end{bmatrix} (j, k, t_y, t_m) + \begin{bmatrix} v^* \\ \omega^* \end{bmatrix} (i, j, k, t_y, t_m) \quad (1)$$

式中 i, j, k 分别为格点所在经度 λ 、纬度 φ 和所在等压面层 p_k 的下标; t_y, t_m 为年、月序。其中

$$\begin{bmatrix} [v] \\ [\omega] \end{bmatrix} (j, k, t_y, t_m) = \sum_{i=1}^{144} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} (i, j, k, t_y, t_m) / 144 \quad (2)$$

它们是子午面上要素场的时间序列。

(2) 时间域上的分解: 可以将(2)式给出的 $[v]$ 、 $[\omega]$ 及 ψ 作如下时域上的分解,

$$\begin{bmatrix} [v] \\ [\omega] \\ \psi \end{bmatrix} (j, k, t_y, t_m) = \begin{bmatrix} [\bar{v}] \\ [\bar{\omega}] \\ \bar{\psi} \end{bmatrix} (j, k, t_m) + \begin{bmatrix} [v] \\ [\omega] \\ \psi' \end{bmatrix} (j, k, t_y, t_m) \quad (3)$$

式中

$$\begin{bmatrix} [\bar{v}] \\ [\bar{\omega}] \\ \bar{\psi} \end{bmatrix} (j, k, t_m) = \sum_{t_y=1}^{41} \begin{bmatrix} [v] \\ [\omega] \\ \psi \end{bmatrix} (j, k, t_y, t_m) / 41 \quad (4)$$

它们是 t_m 月子午面上多年平均(即气候)的 $[v]$ 、 $[\omega]$ 和 ψ 场; 而

$$\begin{bmatrix} [v] \\ [\omega] \\ \psi' \end{bmatrix} (j, k, t_y, t_m) = \begin{bmatrix} [v] \\ [\omega] \\ \psi \end{bmatrix} (j, k, t_y, t_m) - \begin{bmatrix} [\bar{v}] \\ [\bar{\omega}] \\ \bar{\psi} \end{bmatrix} (j, k, t_m) \quad (5)$$

它们分别是 t_y 年 t_m 月子午面上 $[v]$ 、 $[\omega]$ 和 ψ 的距平(即异常)场。

2 格点网及 ψ 计算方案

2.1 格点网

在全子午面上建立如图 1 的格点网。横轴为纬度, 格距均匀($\Delta\varphi = 2.5^\circ$), 标量序数 j 与纬

度 φ 关系为 $\varphi = (j - 37) \times 2.5^\circ$; $j = 1, 73$ 分别对应南北极。纵轴为气压高度, 层距不均匀, 层数 $k = 2, 3, \dots, 13$ 分别对应 1 000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100 hPa; $k = 1, 14$ 分别对应 1 013、0 hPa。计算时不考虑地形。

2.2 ψ 计算方案

(1) 迭代方案^[7]

在 Lorenz 球面—气压坐标系中, 沿纬圈平均的连续方程为

$$\frac{\partial}{\partial \varphi}([v] \cos \varphi) + \frac{\partial}{\partial p}([w] \cos \varphi) = 0. \quad (6)$$

据此可以定义总质量流函数 ψ

$$A = -2\pi a^2 [w] \cos \varphi g = \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \quad (7)$$

$$B = 2\pi a [v] \cos \varphi g = \frac{\partial \psi}{\partial p}. \quad (8)$$

式中, A 是单位时间内自下而上通过子午面上单位纬度 (1 弧度) 等压线的质量输送, B 是单位时间内自南向北通过子午面上单位气压差 (1 hPa) 等纬线的质量输送。

利用全微分性质, 文献[7]中的边界条件有 (9) 式, 它保证在质量守恒和分布定常下得到求取全部内点 ψ 的迭代方案。

边界条件为

$$\begin{pmatrix} [v] \\ [w] \\ \psi \end{pmatrix}_{j=1,73} = 0, \quad \begin{pmatrix} [v] \\ [w] \\ \psi \end{pmatrix}_{k=1,14} = 0. \quad (9)$$

(2) 叠加方案^[8]

采用相同于迭代方案的边界条件, 以保证质量守恒和分布定常。按文献[8]分两步计算格点网 (图 1) 全部内点的 ψ 值。

1) 求 $\psi_1(\psi_2)$: 从边界 $k = 0 (k = 14)$ 处向上 (向下) 积分求 $\psi_1(k) (\psi_2(k))$, 算式为

$$\psi_1(k) = \sum_{k'=1}^k B(k', k'-1) \Delta p(k', k'-1), \quad k = 2 \sim 14, \quad (10)$$

$$\psi_2(k) = \sum_{k'=k}^{14} B(k', k'+1) \Delta p(k', k'+1), \quad k = 1 \sim 13. \quad (11)$$

式中 $B(k'-1, k)$ 为第 $k'-1, k$ 层等压面间的平均向北质量输送强度,

$$B(k'-1, k) = \frac{2\pi a \cos \varphi}{g} ([v]_{k'-1} + [v]_k) / 2. \quad (12)$$

显然, $\psi_1(k)$ 连同边界条件 $\psi_1(0) = 0$ 是自下而上求得的由第 k 层以下 $[v]$ 决定的 $\psi_1(k)$; $\psi_2(k)$ 连同边界条件 $\psi_2(14) = 0$ 是自上而下求得的由第 k 层以上 $[v]$ 决定的 $\psi_2(k)$ 。

2) 由 $\psi_1(k)$ 、 $\psi_2(k)$ 求以 W_1 、 W_2 为权重的叠加值 $\psi(k)$,

$$\psi(k) = W_1(k) \psi_1(k) + W_2(k) \psi_2(k), \quad k = 1 \sim 14. \quad (13)$$

其中 W_1 、 W_2 按下式构造, 如图 2 所示。

$$\begin{cases} W_1(k) = P(k) / P(0), \\ W_2(k) = 1 - W_1(k); \end{cases} \quad k = 1 \sim 14. \quad (14)$$

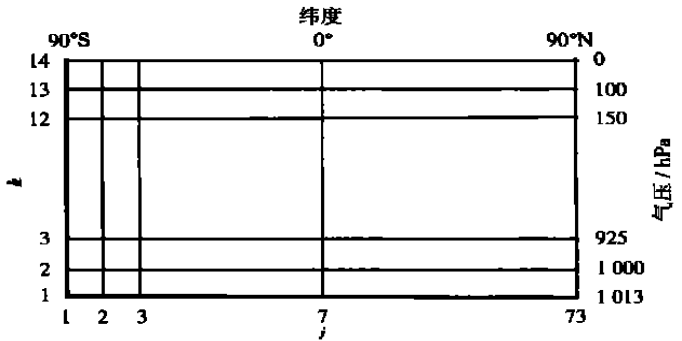


图 1 计算 ψ 的格点网

Fig.1 Grids for calculating ψ

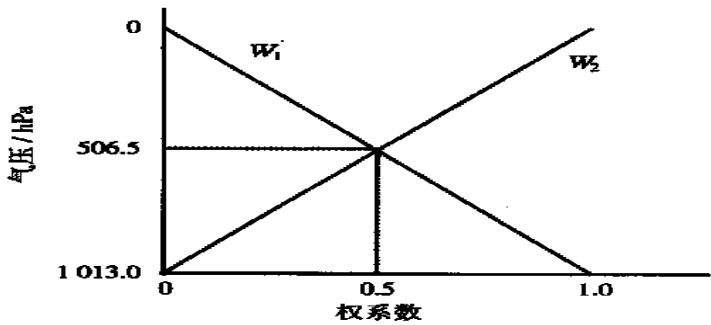


图 2 计算使用的权函数

Fig. 2 Weight function used in calculation

3 平均经圈环流质量流函数气候态比较

为方便, 下面分别以右下标 1、2 标识和区分迭代方案、叠加方案的结果。
按(4)式两种方案求得的气候态分别为 $\bar{\psi}_1$ 、 $\bar{\psi}_2$ (图3、图4), 它们的差为 $\Delta \bar{\psi} = \bar{\psi}_2 - \bar{\psi}_1$ (图略)。

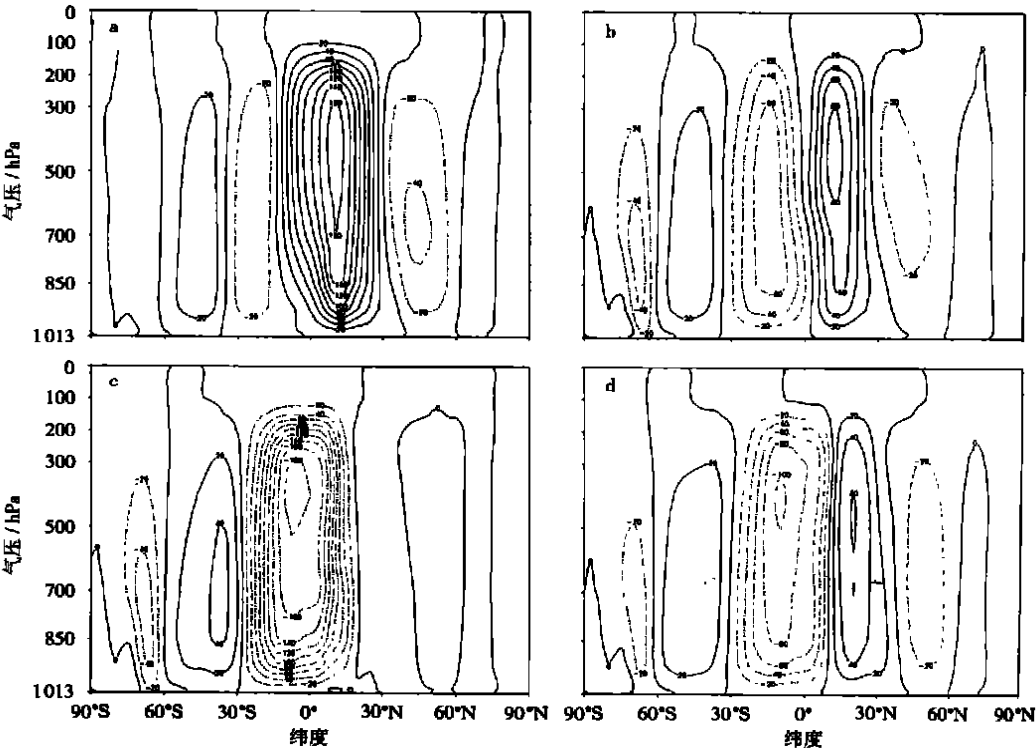


图 3 迭代方案的质量流函数气候 $\bar{\psi}_1$ (单位: $10^6 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$, 等值线间隔 20)

a. 1月; b. 4月; c. 7月; d. 10月

Fig. 3 $\bar{\psi}_1$ calculated using an iteration method(units: $10^6 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$; intervals: 20)

a. January; b. April; c. July; d. October

由图3、图4可知, 气候态两种 $\bar{\psi}$ 的主要特征为: 三圈环流的位置、强度(以内圈等值线标

记)、Hadley 环流上升支位置、强度(以北半球 Hadley 环流内圈等值线之差标记), 以及它们的季节变化都很一致。稍有差异的是, 4、7 月 $\bar{\psi}_2$ 上 Ferrel 环流较 $\bar{\psi}_1$ 略强。 $\Delta \bar{\psi}$ 图上, 除南半球高纬(60°S) 以南及 1 月北半球 30°N 附近出现小范围高于 $20 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 $\Delta \bar{\psi}$ 值外, 其余地方二者差别很小。因此, 从 MMC 的气候态看, $\bar{\psi}_1$ 、 $\bar{\psi}_2$ 无明显差别。

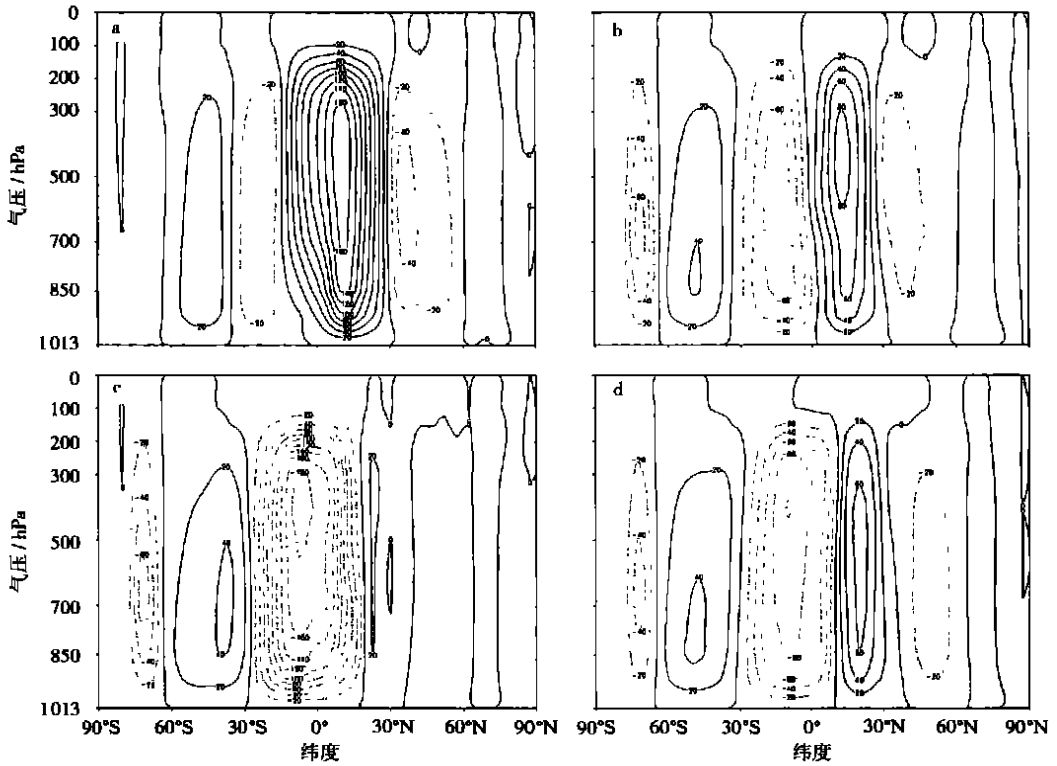


图 4 叠加方案的质量流函数气候 $\bar{\psi}_2$ (单位: $10^6 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$, 等值线间隔 20)

a. 1 月; b. 4 月; c. 7 月; d. 10 月

Fig. 4 $\bar{\psi}_2$ calculated using a superposition method (units: $10^6 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$; intervals: 20)

a. January; b. April; c. July; d. October

4 平均经圈环流年际异常比较

4.1 年际变率

年际变率是对年际异常气候平均状况的描述。用 ψ_1 、 ψ_2 求得了迭代方案、叠加方案的年际变率分布(图 5、图 6)。年际变率 σ 定义为

$$\sigma(j, k, t_m) = \left\{ \frac{1}{41} \sum_{t_y=1}^{41} \psi^2(j, k, t_m, t_y) \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (15)$$

由图 5 可见, 1、4 月 σ_1 最强, 7 月次之, 10 月最弱。变率中心在热带对流层上部, 它主要反映了 Hadley 环流的年际变化。比较图 5、图 6, 除图 6 中 1 月 σ_2 极值中心稍高外, 其余季节二者的分布形态、极值均十分接近。因此, 从 ψ 的年际变率看, 两种方案差异不大。

4.2 极端年份 ψ 比较

如同文献[10], 本文用两种方案求得了出现于 20 世纪 80 年代、90 年代的 4 次最强 El Nino 事件中代表月的 ψ_1' 、 ψ_2' 。图 7、图 8 给出了 4 个代表月中 ψ 最强代表月(1998 年 3 月)、最

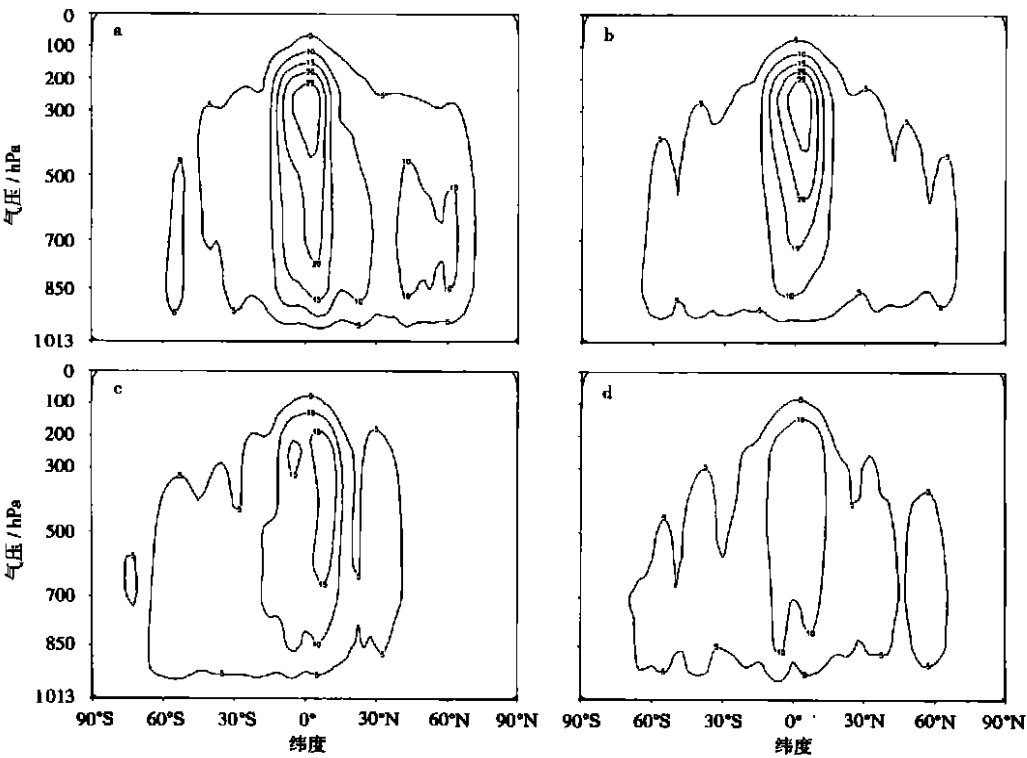


图 5 ψ_1 的年际变率 σ_1 (单位: $10^6 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$, 等值线间隔 5)

a. 1 月; b. 4 月; c. 7 月; d. 10 月

Fig. 5 The interannual variability (σ) of ψ_1 (units: $10^6 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$; intervals: 5)

a. January; b. April; c. July; d. October

弱代表月(1987 年 4 月)的情况。比较发现, 4 个代表月的 ψ_1 、 ψ_2 图上由 El Nino 事件强迫产生的异常经圈环流的位置相同, 均位于赤道附近, 异常上升、下沉支分别偏于南、北半球。这验证了文献[8-9]的结果。而两种方案求得的与 El Nino 事件有关的异常经圈环流强度也十分接近。因此, 就个别年份的月 ψ 图看, 两种方案求得的 ψ 均适于 MMC 气候异常的分析。

5 Hadley 环流双层结构诊断

迭代方案在用于 ECMWF 资料分析时, 曾揭示出 Hadley 环流的双层结构^[6]。之后, Hoskins 等^[13]用该方案和 1979—1989 年 ECMWF 资料求得了 12 月—次年 2 月、6—8 月 10 a MMC 平均图, 其 6—8 月 $\bar{\psi}$ 上也出现了明显的双层结构。

用迭代方案、叠加方案和 NCEP/NCAR 资料作了与文献[13]平行的计算, 所得 10 a 季平均 $\bar{\psi}$ 图(略)上无论冬夏均无 Hadley 环流双层结构出现。可见本文计算结果有别于文献[13]的原因在于 NCEP/NCAR 资料与 ECMWF 资料的差异, 而不在两种方案的差异。根据叠加方案的算法设计, 如果 $[v]$ 在对流层中随高度发生三次明显正负号改变(这被认为是双层结构出现的原因^[6]), 它也应当可以得到 Hadley 环流双层结构的计算结果; 但实际上, 对 NCEP/NCAR 资料, 无论 12 月—次年 2 月、6—8 月, 其 $[v]$ 的 10 a 平均均未出现 $[v]$ 三次变号的情况(图略)。

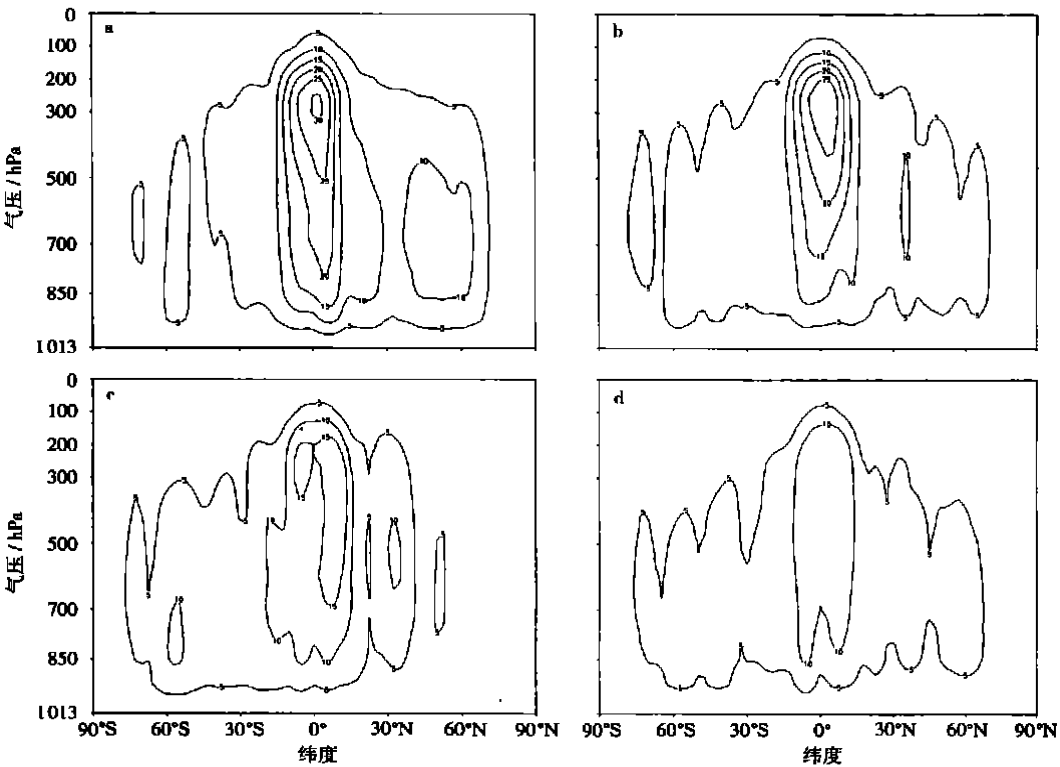


图 6 Ψ_2 的年际变率 σ_2 (单位: $10^6 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$, 等值线间隔 5)

a. 1 月; b. 4 月; c. 7 月; d. 10 月

Fig. 6 The interannual variability (σ_2) of Ψ_2 (units: $10^6 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$; intervals: 5)

a. January; b. April; c. July; d. October

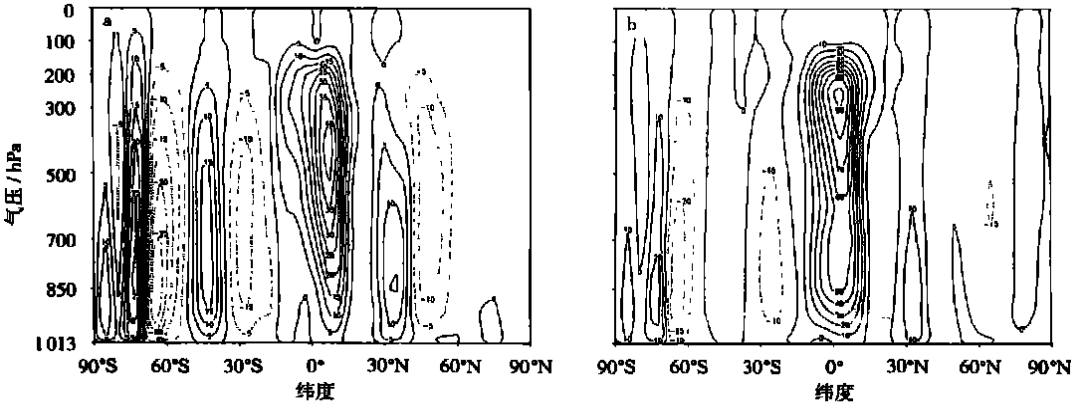


图 7 强 El Nino 事件代表月的 Ψ_1' 图(单位: $10^6 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$, 等值线间隔 10)

a. 1987 年 4 月; b. 1998 年 3 月

Fig. 7 Ψ_1' in the typical month of the strongest El Niño event

(units: $10^6 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$; intervals: 10)

a. April in 1987; b. March in 1998

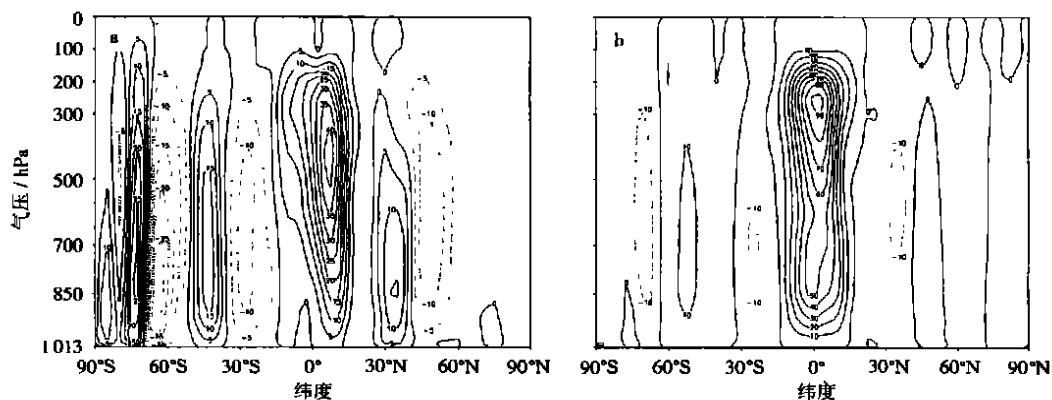


图 8 强 El Nino 事件代表月的 Ψ_2 图(单位: $10^6 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$, 等值线间隔 10)

a. 1987 年 4 月; b. 1998 年 3 月

Fig. 8 Ψ_2 in the typical month of the strongest El Niño event

(units: $10^6 \text{ t} \cdot \text{s}^{-1}$; intervals: 10)

a. April in 1987; b. March in 1998

6 结 论

质量流函数(Ψ)是直观、定量描述纬向平均经圈环流(MMC)的物理量。本文用相同格点网、相同资料(1958—1998 年 NCEP/NCAR 再分析资料)比较了迭代方案、叠加方案所得 Ψ 在描述 MMC 气候态、强 El Nino 年异常态以及 Hadley 环流双层结构时的异同。比较表明,二者计算结果间不存在明显差异;但叠加方案方案只用 v 资料,计算也简单。

参考文献:

- [1] 叶笃正,朱抱真. 大气环流的若干基本问题[M]. 北京: 科学出版社, 1958: 44-56.
- [2] Lorenz E N. 大气环流的性质和理论[M]. 北京: 科学出版社, 1976: 26-27.
- [3] Palmen E, Vuorela L A. On the mean meridional circulations in the Northern Hemisphere during the winter season [J]. Q J R Meteorol Soc, 1963, 89(379): 131-138.
- [4] Vuorela L A, Tuominen I. On the mean zonal meridional circulations and the flux of moisture in the Northern Hemisphere during the summer season [J]. Pure and Appl Geophys, 1964, 57(1): 167-180.
- [5] Kidson J W, Vincent D G, Newell R E. Observational studies of the general circulation of the tropics: long term mean values [J]. Q J R Meteorol Soc, 1969, 95(404): 258-287.
- [6] 吴国雄, 刘还珠. 全球大气环流时间平均统计图[M]. 北京: 气象出版社, 1987: 1-16.
- [7] 吴国雄, Stefano Tibaldi. 关于大气平均经圈环流的一种计算方案[J]. 中国科学(B辑), 1988, 17(4): 442-450.
- [8] 王盘兴. 垂直低分辨率 GCM 模式大气平均经圈环流的诊断[J]. 南京气象学院学报, 1994, 17(2): 200-204.
- [9] 程亚军, 王盘兴, 李丽平. 低纬平均经圈环流异常与低纬平均海温异常关系的诊断分析[J]. 热带气象学报, 2002, 18(3): 193-202.
- [10] 龚振淞, 王盘兴, 马 杰. 平均经圈环流质量流函数简化方案的应用[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(3): 328-333.
- [11] 吴洪宝. 国家自然科学基金委员会地球科学部南京气象学院大气资料服务中心资料通讯[J]. 南京气象学院学报, 1998, 21(3): 455-458.
- [12] 吴国雄, Cubasch U. El Niño 海温异常对纬向平均经圈环流及大气输送特征的影响[J]. 中国科学(B辑), 1986, 15(10): 110-120.
- [13] Hoskins B J, Hsu H H, James I N. Diagnostics of Global Atmospheric Circulation Based on ECMWF Analyses 1979—1989[R]. UGAMP Technical Report(7). Reading: University of Reading, 1989: 217.

Comparison of Two Computational Schemes of Mass Stream Function of Zonally Mean Meridional Circulation

GU Xing-jun, WANG Pan-xing, LI Li-ping

(Department of Atmospheric Sciences, NIM, Nanjing 210044, China)

Abstract: Mass stream functions (ψ) is a physical quantity describing mean meridional circulation(MMC) directly and quantitatively. Using the same grid data(1958—1998 NCEP/NCAR reanalysis data), this paper calculates ψ by using an iteration and superposition method respectively, and compares the differences and sameness of ψ in describing the MMC climatic state, anomalous MMC in the years of strong El Nino events and the double-layer structure of Hadley circulation. Results show that there is no apparent difference between them, however the superposition scheme only uses v -wind data and involves relatively simply computation.

Key words: zonally mean meridional circulation; mass stream function; iteration method; superposition method; comparison of computational results