

文章编号: 1000-2022(2003) 03-0341-08

半球月平均位势高度场的若干环流指数及其变化特征

李巧萍, 王盘兴, 李丽平

(南京气象学院 大气科学系, 江苏 南京 210044)

摘 要: 给出了表征半球月平均位势高度场性质的若干环流指数: 气候场强度 I_c 、气候异常场平均强度 I_a 、气候场不稳定性 I_{us} 。用 NCEP/NCAR 40 a 再分析月平均位势高度场资料作了计算和分析, 结果表明, 这些环流指数存在清晰的时空结构和北、南半球差异, 它们概括地给出了地球大气位势高度场气候及其异常的基本特点。

关键词: 月平均位势高度场; 气候场及异常场集; 环流指数; 时空结构; 北、南半球差异
中图分类号: P461 **文献标识码:** A

在表征气候及气候异常状况的诸要素中, 月平均位势高度场无疑具有特别重要的意义。但是, 长期以来受制于观测, 在短期气候预测研究及业务中, 可供使用的月平均高度场资料仅限于少数层次(如 100、500 和 1 000 hPa), 因此过去的工作主要讨论了有限层次位势高度场的多年平均状况(即气候态)及年际变化(即气候异常态)的时空特征, 这种分析对于全面认识地球大气位势高度场的气候及其异常的规律, 无疑存在局限性。

美国环境预报中心与大气研究中心(NCEP/NCAR)联合进行的 40 a 大气资料再分析计划及相应成果^[1-2], 有可能全面和系统地分析全球大气月平均位势高度场的时空变化。这种分析不仅包括地球大气位势高度场气候态随高度、季节的变化以及上述变化在北、南半球间的差异, 而且包括对气候异常态的总体特征作类似气候态的分析以及对它的年际及年代际异常作较细致的研究。因此, 这一分析所面临的任務, 较之传统的分析工作(大多以半球一层或少数层为分析对象)大为拓展; 使用传统的分析方法, 将因分析过细而使论文冗长。

基于 Lorenz 环流分解原理^[3], 本文构造了描述某月、某层、某半球位势高度的气候场及异常场集最基本特征的一组环流指数, 它包含气候场强度(intensity of climate field, 简记为 I_c)、气候异常场平均强度(mean intensity of climate anomaly field, 简记为 I_a)、气候场不稳定性指数(index of unstability of climate field, 简记为 I_{us})。将其用于 NCEP/NCAR 40 a 月平均位势高度场的分析, 简要给出了半球大气位势高度气候场强度、气候异常场平均强度和气候场不稳定度的时(季节)空(高度)结构及北、南半球差异。

收稿日期: 2002-09-04; 改回日期: 2003-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(49735170)

作者简介: 李巧萍(1970-), 女, 山西忻州人, 工程师, 博士生, 研究方向: 大气环流

1 资 料

论文使用 NCEP/NCAR40 a 再分析计划的位势高度场月平均资料, 该资料的有关参数为: 1) 覆盖时段为 1958—1997 年 1—12 月, 共 40 a, 480 个月。2) 自上而下为 10、20、30、50、70、100、150、200、250、300、400、500、600、700、850、925 和 1 000 hPa, 共 17 层。3) 均匀矩形经纬格点网的格距为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

2 指数 I_c 、 I_a 及 I_{us} 的定义

将某年、某月、某层全球月平均高度场区分为北、南半球高度场 $H_n(\varphi, \lambda)$ 、 $H_s(\varphi, \lambda)$ 。为简单, 记某半球、某月、某层月平均高度场的时间序列为

$$\{H(\varphi, \lambda, t_y), t_y = 1 \sim T\}。 \quad (1)$$

这里 t_y 是年序, T 是总年数。按 Lorenz 环流分解原理^[3], 在时域上它可分解为

$$H(\varphi, \lambda, t_y) = \overline{H}(\varphi, \lambda) + H'(\varphi, \lambda, t_y)。 \quad (2)$$

(2) 式右端 1、2 项分别为多年平均场(即气候场)、 t_y 年的距平场(即气候异常场)。

下面, 对 (1)、(2) 式中的半球月平均高度场集, 给出指数 I_c 、 I_a 及 I_{us} 的定义。

2.1 气候场强度 I_c 定义

在半球球面空间域 D 上, 按文献[3]将 $\overline{H}(\varphi, \lambda)$ 分解为

$$\overline{H}(\varphi, \lambda) = [\overline{H}] + \overline{H}^*(\varphi, \lambda)。 \quad (3)$$

(3) 式右端 $[\overline{H}]$ 是以单位半径球球面积为权重的等压面气候高度场的半球平均值(注: 不同于 Lorenz, 这里的空间平均 $[\]$ 对半球球面区域进行), 是 $\overline{H}$ 中半球均匀部分的度量, 它与气候场空间起伏(二维波动)无关; $\overline{H}^*(\varphi, \lambda)$ 是该等压面气候高度场对 $[\overline{H}]$ 的偏差, 它包含了气候场空间起伏的全部信息。然后, 用 $\overline{H}^*(\varphi, \lambda)$ 的模的平方(简称模方)

$$\|\overline{H}^*\|^2 = \int_D \overline{H}^{*2}(\varphi, \lambda) \sin \theta d\theta d\lambda。 \quad (4)$$

定义了气候场强度

$$I_c = \{\|\overline{H}^*\|^2 / (2\pi)\}^{1/2}。 \quad (5)$$

因为 $\|\overline{H}^*\|^2$ 是以单位半径球球面积为权重的空间偏差平方的半球积分, 2π 为单位半径球的半球总面积, 故 I_c 是半球、某层、某月气候位势高度场的面积平均起伏, 它与 H 同单位, 是半球气候场强度的绝对度量。 I_c 越大, 该气候等压面在半球范围内起伏越大, 气候高度场越强; 反之亦然。

2.2 气候异常场平均强度 I_a 定义及分解

同理, 按文献[3], 可以定义气候异常场平均强度

$$I_a = \left\{ \sum_{t_y=1}^T \|H'(\varphi, \lambda, t_y)\|^2 / (2\pi T) \right\}^{1/2}。 \quad (6)$$

显然, I_a 是场集距平平方的时(多年)空(以单位半径球球面积为权重的半球球面区域)平均, 它与 H 同单位, 是异常场集平均强度的绝对度量。 I_a 越大, 该等压面异常越大(注: 对整个时空的几何平均); 反之亦然。

但是, 根据文献[3], $H'(\varphi, \lambda, t_y)$ 可作如下分解

$$H'(\varphi, \lambda, t_y) = [H'(\varphi, \lambda, t_y)] + H''(\varphi, \lambda, t_y)。 \quad (7)$$

其中, $[H'(\varphi, \lambda, t_y)]$ 是 t_y 年半球等压面的整体升降, 与 t_y 年该等压面以下大气热状况异常的半球

平均状况有关, 它对 t_y 年高度场(空间)起伏的异常无影响; 而 $H^*(t_y)$ 起伏的异常集中反映在 $H^*(t_y)$ 上。因此, 可以根据(7)式将 I_a 细分为两类:

1) 均匀气候异常场平均强度

$$I_{a1} = \left\{ \sum_{t_y=1}^T \| [H^*(t_y)] \|^2 / (2T) \right\}^{1/2} = \left\{ \overline{[H^*(t_y)]^2} \right\}^{1/2}. \quad (8)$$

式中, $-$ 为多年平均算符。

2) 非均匀气候异常场平均强度

$$I_{a2} = \left\{ \sum_{t_y=1}^T \| [H^*(t_y)] \|^2 / (2T) \right\}^{1/2} = \left\{ \overline{[H^*(t_y)]^2} \right\}^{1/2}. \quad (9)$$

容易证明, I_a 与 I_{a1} 、 I_{a2} 三者满足分解关系

$$I_a^2 = I_{a1}^2 + I_{a2}^2. \quad (10)$$

2.3 气候场不稳定性 I_{us} 定义及分解

由于(7)~(9)式定义的是气候异常平均强度的绝对度量, 当它们被用于全球大气气候高度场异常时空结构的分析时, 局限性是明显的, 因为气候高度场强度 I_c 本身存在明显的时(季节)空(高度、半球)差异。

为了弥补 I_a 、 I_{a1} 、 I_{a2} 的不足, 对某层、某月构造

1) 气候场不稳定性

$$I_{us} = I_a / I_{c0} \quad (11)$$

2) 气候场均匀不稳定性

$$I_{us1} = I_{a1} / I_{c0} \quad (12)$$

3) 气候场非均匀不稳定性

$$I_{us2} = I_{a2} / I_{c0} \quad (13)$$

I_{us} 和 I_{us1} 、 I_{us2} 是半球的异常、均匀异常和非均匀异常平均强度的相对度量, 因而无量纲。其中, I_{us} 的分子部分既包含年际变化中半球均匀部分的异常也包含起伏部分的异常, 而 I_{us1} 、 I_{us2} 的分子部分则仅包含半球均匀部分的异常、单纯的起伏异常; 而分母均为相应半球气候场强度。因为有意义的气候场恒有起伏, 故 I_c 恒大于 0, 而气候异常场强度指数 I_a 、 I_{a1} 、 I_{a2} 也均大于 0, 因此, 三种不稳定性均大于 0。不稳定性越大, 表示相应气候场的年际变化越大, 即越不稳定。特别是 I_{us2} , 它直接与气候高度场形势有关, 当其值大到一定程度, 例如接近或超过 1.0 时, 气候场是否与多数年份场形势相似, 值得怀疑。

类似于(10)式, I_{us} 与 I_{us1} 、 I_{us2} 三者满足分解关系

$$I_{us}^2 = I_{us1}^2 + I_{us2}^2. \quad (14)$$

王盘兴等^[2]曾对 500 hPa 月平均位势高度场计算了上述部分指数, 并用于分析。本文将使用上述指数对 NCEP/NCAR 月平均高度场资料(北、南半球、17 层、1—12 月、40 a)作全面分析, 以获得半球位势高度场的气候场强度、气候异常场平均强度和气候场不稳定性时空结构的认识。文中, 时间特指季节, 分辨率为月; 空间特指层(或高度)及两半球。由于 NCEP/NCAR 资料给出在 10~1 000 hPa, 根据美国标准大气的分层, 它属于对流层(地面~约 200 hPa)、低平流层(约 200~70 hPa)、中平流层(约 70~10 hPa), 故在下面使用相应术语^[4]。

1) 李雅芬, 李巧萍, 王盘兴. 500 hPa 气候位势高度场的时空结构分析.

2) 王盘兴, 何金海, 李雅芬, 等. 500 hPa 气候异常位势高度场集的时空结构分析.

3 气候场强度 I_c 时空结构分析

图 1 给出了北、南半球位势高度场的气候场强度 I_c 的时空结构, 其主要特点可归纳为:

(1) 定性地, 两半球 I_c 随季节、高度的变化具有类似结构: 对流层顶附近(约 200 hPa) 全年为 I_c 的极大值带(图中粗实线), 中平流层(约 70 hPa 以上) 夏半年存在 U 形 I_c 的极小值带, 其底部出现在夏季季中月; 由此给出的气候高度场强度随季节、高度变化的特征列于表 1。

表 1 气候场强度随季节、高度变化的特征

Table 1 Variations of I_c with season and height

层次	高度变化	季节变化
对流层(地面~约 200 hPa)	随高度上升增大	冬大夏小、年周期振荡
低平流层(200~70 hPa)	随高度上升减小	冬大夏小、年周期振荡
中平流层(70~10 hPa)	随高度上升冬夏增大、 春秋先降后增	冬夏大、春秋小, 半年周期振荡

(2) 定量地, 北半球 I_c 小于南半球相应季节、层次的 I_c , 例外只发生在夏季(北半球 6—8 月与南半球 12—2 月) 的中平流层(约 70 hPa 以上)。

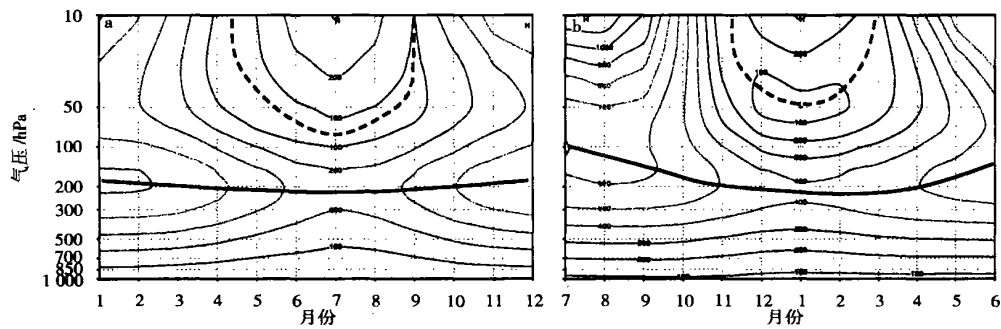


图 1 气候场强度(I_c)季节—高度剖面

a. 北半球; b. 南半球 (等值线间隔 100 gpm; 图中粗实(虚)线分别为极大(小)值线)

Fig. 1 Season-height section of the intensity of climate fields(I_c)

a. Northern Hemisphere; b. Southern Hemisphere

(Contour interval is 100 gpm; Heavy solid(dashed) line indicates the maximum(minimum) value)

I_c 时空结构在对流层与低、中平流层的明显差别以及它们在北、南半球间的不同, 显示气候位势高度场强度这个指数有很好的物理内涵。根据文献[4], 在对流层中, 无论冬夏, 从热带指向极地的纬向平均温度的经向梯度控制了大部分地区, 对流层中各层的北、南半球气候位势高度场的基本部分为绕极气旋, 且其强度随高度增大、冬强于夏; 由此造成 I_c 在该层的相应时空变化。低平流层情况较复杂, 表现为纬向平均气温梯度全部(夏季)或部分(冬季)逆转, 指向赤道, 故半球尺度气旋式环流被削弱; 相应地, I_c 随高度减小, 冬强夏弱。进入中平流层, 纬向平均温度梯度冬季主要由赤道指向极地, 且在中高纬度变得很强, 使被削弱的气旋式环流随高度迅速加强, 夏季则保持由极地指向赤道, 使气旋式环流继续削弱并最终转变为反气旋式环流; 使 I_c 在该层出现复杂结构。中平流层的低值带(粗虚线)实际给出了半球环流从气旋形态向反气旋形态过渡的季节和高度; 在分析范围内, 它们首先出现在春末夏初的中平流层上部

(10 hPa), 约经两个月, 在盛夏到达中平流层底; 然后作相反变化, 在夏末秋初退出中平流层。

至于北、南半球间 I_c 的差异, 应归结于半球大气下界面的差异, 主要是海陆面积比及其分布的差异, 地形差异也可能有一定影响。原则上, 这可以通过数值试验验证。

4 气候异常场平均强度 I_a 时空结构分析

图 2~4 为北、南半球气候异常场强度(I_a 、 I_{a1} 、 I_{a2}) 的季节—高度剖面图。其特点如下:

(1) 气候异常场强度 I_a (图 2) 基本随高度增大, 明显例外发生在夏半年对流层顶至低平流层, 存在年周期振荡; 但极大(小) 值北半球一致地出现在冬(夏) 季中月, 而南半球出现明显滞后和存在上下位相差。

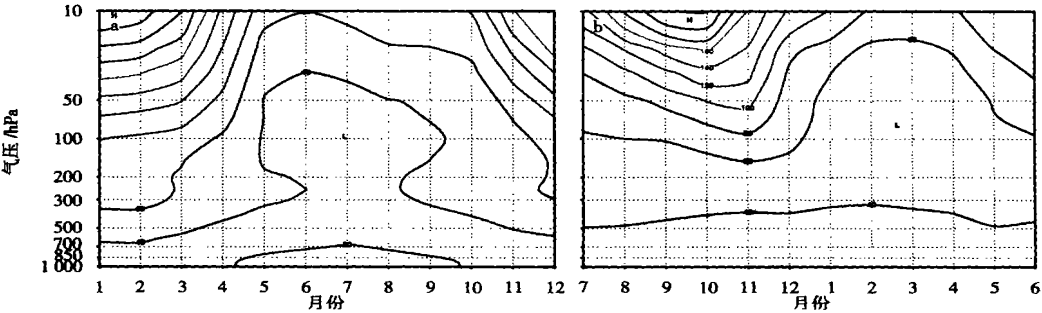


图 2 气候异常场平均强度(I_a) 季节—高度剖面
a. 北半球; b. 南半球(等值线间隔: 20 gpm)

Fig. 2 Season-height section of the mean intensity of climate anomaly fields(I_a)
a. Northern Hemisphere; b. Southern Hemisphere(Contour interval is 20 gpm)

(2) 均匀气候异常场平均强度 I_{a1} (图 3) 随高度增大, 对流层及低平流层中季节变化较小; 中平流层中季节变化明显。中平流层 I_{a1} 北半球为半年周期振荡, 极大(小) 值略滞后于 I_c 极大值出现季节; 南半球则为年周期振荡, 极大(小) 值分别出现在夏(冬) 季季中月, 与 I_c 的极大值出现季节接近。与 I_{a2} 比, I_{a1} 值明显地小。

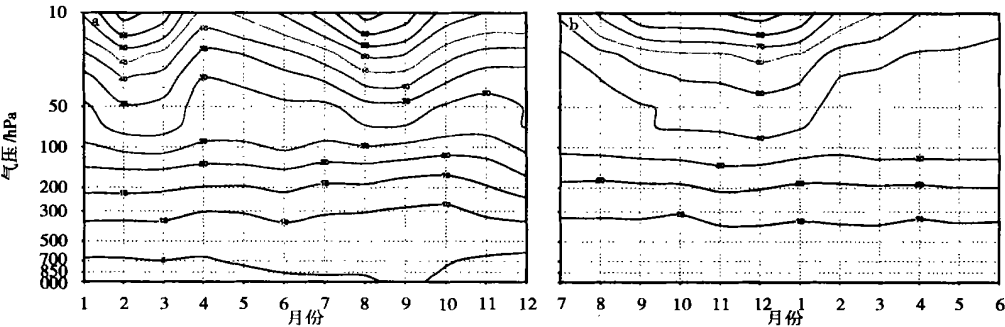


图 3 均匀气候异常场平均强度(I_{a1}) 季节—高度剖面
a. 北半球; b. 南半球(等值线间隔: 5 gpm(a)、10 gpm(b))

Fig. 3 Season-height section of the mean intensity of even climate anomaly fields(I_{a1})
a. Northern Hemisphere; b. Southern Hemisphere (Contour interval is 5 gpm(a) and 10 gpm(b))

(3) 非均匀气候异常场平均强度 I_{a2} (图 4) 明显大于均匀异常场强度 (I_{a1}), 是 I_a 的主要组成部分; 它构成了 I_a 的主要部分, 故其随季节、高度变化规律基本同图 2。

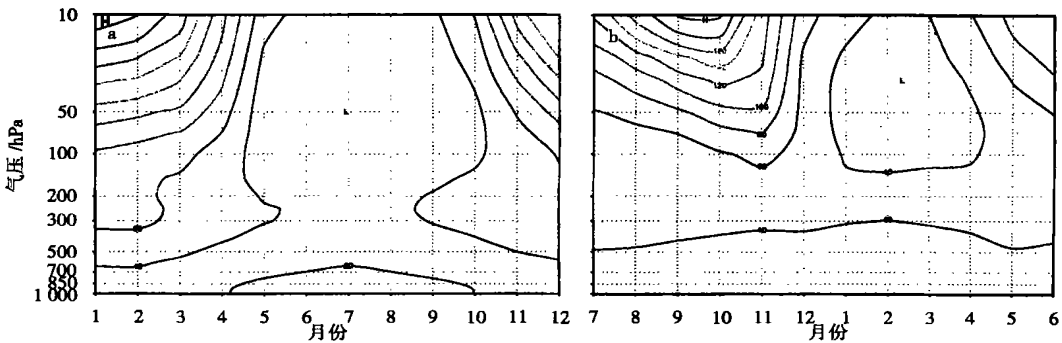


图 4 非均匀气候异常场平均强度 (I_{a2}) 季节—高度剖面
a. 北半球; b. 南半球 (等值线间隔: 20 gpm)

Fig. 4 Season-height section of the mean intensity of uneven climate anomaly fields (I_{a2})
a. Northern Hemisphere; b. Southern Hemisphere (Contour interval is 20 gpm)

5 气候场不稳定性时空结构分析

图 5~7 给出了北、南半球位势高度场的气候场不稳定性 (I_{us} 、 I_{us1} 、 I_{us2}) 的季节—高度剖面图。其主要特点可归纳为:

(1) 在中平流层, 存在一个极大气候场不稳定性层, 其高度随季节而变。它在图 5~7 上的位置与图 1 上气候场强度极小层基本一致, 说明弱气候场在年际变化中是不稳定的。另外, 比较图 6、7, 该不稳定层构成中, 均匀与非均匀异常的贡献, 在北半球是相当的; 而在南半球非均匀异常的贡献较大。此外, 在近地面层, 存在一个次大不稳定性层, 其强度远弱于中平流层中的不稳定层。比较图 6、7, 该不稳定层构成中, 非均匀异常的贡献相对大些。

(2) 除(1)以外的季节和层次, 半球气候位势高度场都是稳定的; 其年际异常相对于气候场是小扰动。

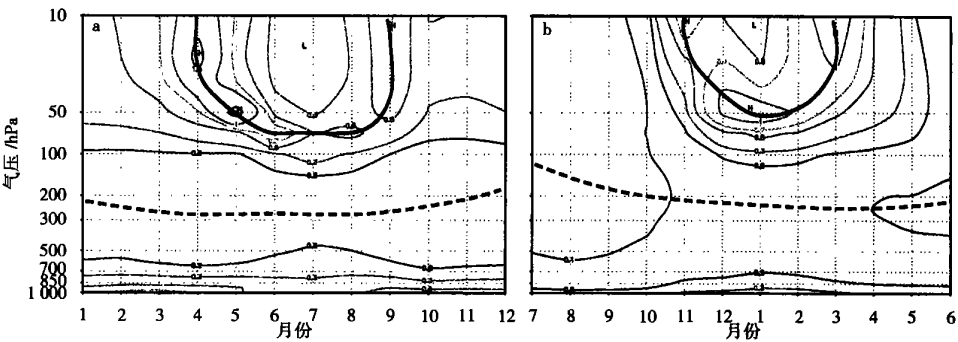


图 5 气候场不稳定性 (I_{us}) 季节—高度剖面
a. 北半球; b. 南半球 (图中粗实(虚)线分别为极大(小)值线)

Fig. 5 Season-height section of the instability of climate fields (I_{us})
a. Northern Hemisphere; b. Southern Hemisphere
(Heavy solid(dashed) line indicates the maximum(minimum) value)

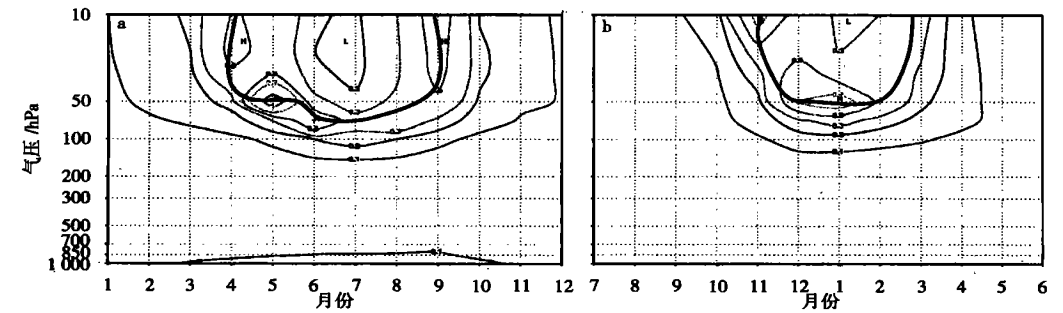


图6 气候场均匀不稳定性(I_{us1})季节—高度剖面
a. 北半球; b. 南半球 (图中粗实(虚)线分别为极大(小)值线)
Fig. 6 Season-height section of the even instability of climate fields(I_{us1})
a. Northern Hemisphere; b. Southern Hemisphere
(Heavy solid(dashed) line indicates the maximum(minimum) value)

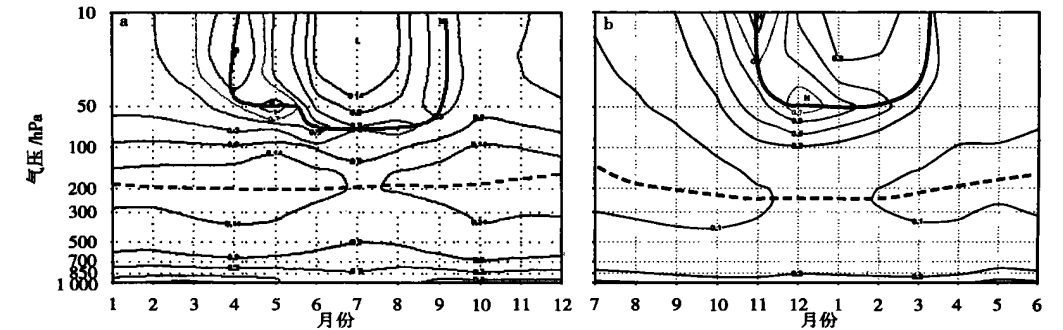


图7 气候场非均匀不稳定性(I_{us2})季节—高度剖面
a. 北半球; b. 南半球 (图中粗实(虚)线分别为极大(小)值线)
Fig. 7 Season-height section of the uneven instability of climate fields(I_{us2})
a. Northern Hemisphere; b. Southern Hemisphere
(Heavy solid(dashed) line indicates the maximum(minimum) value)

(3) 比较图 5~7 的 a 和 b, 北半球气候位势高度场的不稳定性高于南半球。
由图 5~7 知, 以往短期气候预测业务中选取预报信息的主要层次均为气候场相对稳定的层次。春末秋初中平流层不稳定气候场是否能为此提供预报线索, 值得研究。

6 结 论

综上所述, 本文对半球月平均位势高度场构造了高度概括的气候场强度、气候异常场平均强度及气候场不稳定性指数 I_c 、 I_a 、 I_{us} , 计算并分析了它们随季节、高度、半球的变化, 指出这些变化的环流意义。所得结果, 简要给出全球大气位势高度场及其异常的时空结构。平流层月平均高度场上述指数时空结构的复杂性表明, 短期气候预测业务中应重视平流层位势高度场异常的分析研究。

致谢: 资料由美国环境预报中心(NCEP) 汪学良 博士、朱跃建先生整理并提供, 谨致谢。

参考文献:

- [1] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77(3): 437-471.
- [2] 吴洪宝. NCEP/NCAR 再分析计划提供的 1958—1997 年月平均场介绍[J]. 南京气象学院学报, 1998, 21(3): 455-458.
- [3] 洛伦兹 E N. 大气环流的性质和理论[M]. 北京大学地球物理系气象专业译. 北京: 科学出版社, 1976: 26-27.
- [4] Wallace J M, Hobbs P V. Atmospheric Science—An Introductory Survey[M]. New York: Academic Press, 1977: 21-28.

Some Circulation Indices and Their Variation Character of Hemispherical Monthly Mean Geopotential Height Fields

LI Qiao-ping, WANG Pan-xing, LI Li-ping

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

Abstract: To describe the nature of hemispherical monthly mean geopotential height fields, several circulation indices, such as intensity of climate fields I_c , intensity of climate anomaly fields I_a , instability of climate fields I_{us} , are defined. Calculation and analysis are performed based on the monthly mean geopotential height fields from NCEP/NCAR 40 a reanalysis datasets. Results suggest that the indices exhibit evident spatial-temporal structure and significant difference between Northern and Southern Hemisphere. The basic characteristics of the climatology and anomaly of atmospheric geopotential height field are generally presented by the indices proposed.

Key words: monthly geopotential height fields; climatic and anomalous fields; circulation index; temporal and spatial structure; difference between Northern and Southern Hemisphere