2003年10月

文章编号: 1000-2022(2003) 05-0638-08

半球月平均位势高度场均匀和非均匀异常指数的时滞性分析

李巧萍, 王盘兴

(南京气象学院 大气科学系, 江苏 南京 210044)

摘 要:将半球月平均位势高度场异常分解为半球均匀和非均匀两部分,构造了均匀 异常指数 ξ和非均匀异常指数 η。对ξ、η的时滞性分析表明:北(南)半球ξ的时滞性 较强,1月(7月)可达1a(3a)以上。η的时滞性较弱,显著时滞通常不足1 个月;较 强时滞出现在北半球夏季平流层,最长可达4 个月。

关键词: 半球月平均位势高度场;均匀异常指数;非均匀异常指数;时滞相关分析 中图分类号: P434 文献标识码: A

一般认为^[1],导致月季尺度短期气候异常的直接原因是月季平均环流异常,而月季平均环流异常的形成在空间上具有全球性。因此,全球或半球范围月季平均环流异常的分析是短期气候预测环流分析的重要内容。

受观测资料限制,长期以来,人们对于月平均位势高度场的统计分析仅局限于少数层次 (如 100、500 和 1 000 hPa),分析方法也相应地侧重于细节。例如,相关的时空结构分析通常指 相对联系随季节与地理位置的变化,这方面的工作不胜枚举。NCEP/NCAR 再分析计划^[2]在 一定程度上打破了上述资料限制(时域、层次、项目),大气环流的时空结构有可能从全球或半 球角度概括地被研究,从全球或半球角度揭示大气环流的性质。例如,在文献[3]中对半球月平 均位势高度场引进气候场强度指数 I_c,气候异常场平均强度指数 I_a 和气候场不稳定度 I_{us},系 统地分析了其气候及异常的时空结构(这里 '空间 '是指不同层次和北、南半球),获得了对地球 大气位势高度场气候及异常统计性质的清晰认识。

环流异常的时滞性是可供短期气候预测直接利用的统计属性。理论分析表明,大气环流异常的时滞性与异常的尺度有关,行星尺度环流异常才可能有较强的时滞性^[1]。类似于文献[3],本文根据 Lorenz 环流分解原理^[4],将半球环流异常分解成半球均匀、半球非均匀异常两个部分,构造相应的环流指数ξ、η,用时滞相关分析的方法,分析地球大气异常位势高度场时滞性。

1 半球环流异常指数

按 Lorenz 环流分解原理^[4],对于某半球(以 D 记其域)、某等压面月平均位势高度场时间 序列

收稿日期: 2001-11-14; 改回日期: 2002-09-03

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1998040900)第一部分; 国家自然科学基金资助项目(49975025) 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.

$$H(\lambda, \boldsymbol{\theta}, t_{y}, t_{m}), \lambda, \boldsymbol{\theta} \quad D, t_{y} = 1 \sim T_{y}, t_{m} = 1 \sim 12 \ \boldsymbol{\beta}_{o}$$
(1)

可作时域上的分解

$$H(\lambda, \theta, t_{y}, t_{m}) = H(\lambda, \theta, t_{m}) + H(\lambda, \theta, t_{y}, t_{m})$$
⁽²⁾

(2) 式右端第 1、2 项分别是半球位势高度气候场、异常场, (1)、(2) 式中, λ θ 为经度、余纬, *D* 为北、南半球区域, t_y 、 t_m 为年、月序, T_y 为总年数。

对异常场 $H(\lambda, \theta, t_y, t_m)$, 可作空域上的分解

$$H (\lambda, \boldsymbol{\theta}, t_{y}, t_{m}) = [H (t_{y}, t_{m})] + H^{*} (\lambda, \boldsymbol{\theta}, t_{y}, t_{m})$$
(3)

(3) 式右端第1项

$$[H (t_{y}, t_{m})] = \frac{\iint_{D} H (\lambda, \theta, t_{y}, t_{m}) \sin\theta d\lambda d\theta}{2\pi}, \qquad (4)$$

是 t_y 年、 t_m 月半球平均异常, 是均匀异常的度量。(3) 式右端第二项 $H^{*}(\lambda, \theta, t_y, t_m)$ 是 t_y 年、 t_m 月半球异常的非均匀部分, 异常场的 "起伏"或 '形势"均由它决定; 着眼于非均匀异常场的强 度, 并考虑到与(4) 式的一致性(半球面积平均), 将其处理为空间平均模方根

$$\begin{bmatrix} H^{*}(t_{y}, t_{m})^{-2}\end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} = \left\{ \underbrace{\iint_{D} H^{*2}(\lambda, \theta, t_{y}, t_{m}) \sin\theta d\lambda d\theta}_{2\pi} \right\}^{\frac{1}{2}}$$
(5)

将其转变为一个数(量纲与[*H*(*t*_y,*t*_m)]相同),是 '起伏 '或 '形势 '异常的度量。为方便,记(4)、 (5)式定义的两个量为

 $\xi(t_{y}, t_{m}) = [H(t_{y}, t_{m})], \eta(t_{y}, t_{m}) = [H^{*}(t_{y}, t_{m})^{-2}]^{\frac{1}{2}}.$ (6) 并称其为 t_{y} 年 $t_{t_{m}}$ 月半球均匀异常指数和半球非均匀异常指数。

因为 ξ(*ty*, *t*m)、*η*(*ty*, *t*m) 给出了半球场高度异常两个基本属性的度量,故可通过对其演变特性时(季节)空(半球、层)结构的全面分析了解半球环流异常随时间变化的规律,这直接与半球环流异常的长期预报有关。但本文的分析仅限于其时滞性。

2 ξ, η 的时滞性分析方案

由(6)式确定序列

$$\xi(t_{y}, t_{m}), \eta(t_{y}, t_{m}), t_{y} = 1 \sim T_{y}, t_{m} = 1 \sim 12 \ \beta_{o}$$
⁽⁷⁾

的另一形式为

$$\xi(t) , \eta(t), t = 1 \sim T = 12 \times T_{y_{o}}$$
(8)

式中 $t = 12(t_y - 1) + t_{m_o}$

(7)、(8) 式中的 ξ 或 η 是随机过程的一个 "现实 '或 '样本 '; 因为它们是离散的, 又称为随 机序列。一类具有如下性质的随机过程被称为 "平稳随机过程 '(简称 '平稳过程 '):1) 过去情况 对未来情况的发生有着很强的作用; 2) 统计特性不随时间而变。理论研究^[5]指出, 对 '平稳过 程 "一阶矩(数学期望)、二阶矩(相关函数 $R(\tau)$)的研究能解决许多应用上的重要问题。本文将 通过随机序列自相关函数的计算, 对随机序列 $\xi(t)$ 、 $\eta(t)$ 的时滞性作分析。为了便于不同半球、 层、月间的比较, 以自相关系数 $r(\tau)$ 替代一般意义的自相关函数 $R(\tau)$ 。

某半球、层、第 tm 月为起始月的向后时滞自相关系数的定义式为

T

$$r(t_{\rm m}, \vec{\tau}) = \frac{x^{-2}(12(t_{\rm y} - 1) + t_{\rm m})(12(t_{\rm y} - 1) + t_{\rm m} + \vec{\tau})}{\{x^{-1}_{y_{\rm y} = 1} x^{-2}(12(t_{\rm y} - 1) + t_{\rm m})\}^{\frac{1}{2}}\{x^{-1}_{y_{\rm y} = 1} x^{-2}(12(t_{\rm y} - 1) + t_{\rm m} + \vec{\tau})\}^{\frac{1}{2}}},$$
(9)

式中, T_y 为计算 $r(\tau)$ 时的样本容量, 一律取 $T_y = T_y - (\tau/12) - 1$ 。

实际计算使用了 NCEP/NCAR 40 a 再分析计划⁶¹的月平均位势高度场资料^[6],该资料的 有关参数为: 1)覆盖时段为 1958—1997 年 1—12 月, T_y 共 40 a, T 共 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 $\Delta \Theta \times \Delta \lambda = 2.5 \times 2.5$ 。对于 ξ,因其北、南半球时滞性存在明 显差异, τ 的截断分别取 48 个月(4 a)、132 个月(11 a),故 T_y 分别为 35 和 28,由文献[7]求得 的 $r(\eta \approx 0.05$ 的值分别为 0.325 和 0.350;而对于 η,因其时滞性很差, τ 的截断均取为 4 个月,故 T_y 为 39,相应的 $r(\eta \approx 0.05$ 为 0.304。

3 半球均匀异常指数 ε 的时滞性

3.1 ξ 的年际变化分析

ξ 的年—高度剖面图(图 1、图 2)给出了北、南半球冬、夏季季中月逐年各层[H]的变化,ξ 值的分布有两个明显特点:1)ξ高绝对值出现在高层(中平流层,层的命名根据美国标准大气 分层^[8]),近地面值近于 0。2)ξ存在明显的年际、年代际尺度的变化,其中,两半球 1977—1978、



图 1 北半球 ξ 的年—高度剖面(等值线间隔为 20 gpm) a. 冬季(1月); b. 夏季(7月)

Fig. 1 Time-height cross-section of ξ over Northern Hemisphere(The contour interval is 20 gpm) a. winter (Jan.); b. summer (Jul.)



图 2 南半球 ξ 的年—高度剖面(等值线间隔为 20 gpm) a.冬季(7月);b.夏季(1月)

Fig. 2 Time-height cross-section of ξ over Southern Hemisphere(The contour interval is 20 gpm) a.winter (Jul.); b. summer(Jan.)

1993—1994 年及北半球 1965 年前后平流层 ξ 发生了符号的变化, 是年代际变化的转折期。

因为两相近等压面 $p > p^2(p < p^2)$ 间位势高度差(即位势厚度) $H = H^2$ 与其间气层平均 温度 T_m 间存在关系

$$H_{1} - H_{2} = \frac{RT_{m}}{g} \ln \frac{p_{2}}{p_{1}}, \qquad (10)$$

式中, R为干空气气体常数, g为重力加速度。对(10)式作距平及半球平均得

$$[H_{1}] = [H_{2}] + \frac{RT_{m}}{g} \ln \frac{p_{2}}{p_{1}}$$
(11)

故上层等压面异常可看作下层等压面异常与气层平均气温异常的累积结果,高层大气[H]与 半球平均气温异常关系密切。因为 ξ的时滞性特征主要根据平流层[H]的年际、年代际变化 分析得出,故上述结论意味着半球大气平均气温异常具有年际、年代际时滞特征。

3.2 ξ的时滞相关分析

为了给出 ξ 时滞性的定量描述, 用[H]资料计算了它们的时滞相关系数(图 3、图 4)。由图 3 知: 1)对北半球, 无论冬夏, 几乎整层大气 ξ 1 a 以上的时滞相关系数均达到 α = 0.05 以上的显著性水平, 而低平流层 ξ 的显著时滞相关系数可延续至 3 a 以上, 时滞性的冬、夏差异较明显; 2) 南半球 ξ 的时滞性明显强于北半球, 除对流层下部外, 显著自相关可持续 2 ~ 3 a, 而对流层上部和低平流层显著自相关可持续到近 10 a。



图 3 北半球 ξ 的时滞相关系数 r 的 τ—高度剖面(τ= 0~48 个月) (等值线间隔为 0.2,图中阴影区未通过 α= 0.05 显著性检验)

a.冬季(1月);b.夏季(7月)

Fig. 3 τ -height cross-section of the time-lag(τ = 0~48 months)

correlation coefficients r of ξ over Northern Hemisphere(The contour interval is 0.2,

shaded areas denote where correlations don't pass the significancetest $\alpha = 0.05$)

a.winter (Jan.); b.summer (Jul.)

由此可见,半球平均ξ具有明显的时滞性,对同一半球其季节差异甚小,而北、南半球差异 明显,南半球时滞性明显强于北半球。由于上层ξ与半球大气平均气温异常间的联系,ξ的显 著时滞性意味着半球、乃至全球大气平均气温异常存在显著的时滞性。因此,基于ξ的时滞性, 对上层ξ(或半球、全球大气平均温度异常)作出有技巧的预测是可能的。

4 半球非均匀异常指数η的时滞性

4.1 *n*的年际变化分析

图 5、图 6 是北、南半球冬、夏季季中月 7 的年—高度剖面图。 可见,其年际变化的时滞性



图 4 南半球 ξ 的时滞相关系数 r 的 r—高度剖面(τ 0 ~ 132 个月)

(等值线间隔为 0.2,图中阴影区未通过 a= 0.05 显著性检验)

a. 冬季(7月); b. 夏季(1月)

Fig. 4 τ -height cross-section of the time-lag (τ = 0 ~ 132 months)

correlation coefficients r of ξ over Southern Hemisphere (The contour interval is 0.2,

shaded areas denote where correlations don't pass the significance test $\alpha = 0.05$)

a.winter(Jul.); b.summer(Jan.)

较差(因 η 恒大于 0,时滞性由其高、低值的持续时间衡量);特别对于南半球,年际关联甚弱。 因为 η 是半球高度场起伏(形势)异常强度的度量,年际时滞性变弱且南半球更弱的特点是可 以理解的。这一特点意味着跨年度环流形势异常预测的困难很大。



图 5 北半球 η 的年—高度剖面(等值线间隔为 30 gpm(a) 和 5 gpm(b)) a. 冬季(1月); b. 夏季(7月)

Fig. 5 Time-height cross-section of η over Northern Hemisphere

(The contour interval is 30 gpm(a) and 5 gpm(b))

a.winter(Jan.); b.summer(Jul.)

4.2 ¹的时滞相关分析

为了描述¹月际时滞性,按(9)式计算了北、南半球冬、夏季¹的自相关系数(图 7、图 8)。 由图 7a 可见,对于北半球,冬季除对流层顶个别层次外, τ 0时无显著自相关;由¹意义知,几 乎所有层次 1月强或弱的形势异常与 2月形势异常的强弱无显著相关。而由图 7b 可见,夏季 的显著时滞相关系数在平流层及近地面层延长至 2个月,低平流层的个别层次(70hPa)甚至 可延长至 4个月,即这些层次 7月形势异常的强度具有较强的时滞性。需要强调的是,"形势异 常"的强度有可能可以保持到 2个月,但不一定表示"形势异常"本身可以延续至 2个月;因前



图 6 南半球 η 的年—高度剖面(等值线间隔为 20 gpm(a) 和 5 gpm(b)) a. 冬季(7月); b. 夏季(1月)

Fig. 6 Time-height cross-section of η over Southern Hemisphere

(The contour interval is 20 gpm(a) and 5 gpm(b))

a.winter(Jul.); b.summer(Jan.)

者仅要求半球范围存在明显正、负异常区,而后者还要求异常区的地理位置稳定。 由图 8 知,南半球冬、夏季季中月 η 的自相关系数的显著性在大部分层次上都不足 1 个月 (夏季平流层除外),与北半球相仿。



图 7 北半球 η 的时滞相关系数 r 的 τ—高度剖面(τ= 0 ~ 4 月) (等值线间隔为 0.2,图中阴影区未通过 α= 0.05 显著性检验) a. 冬季(1月):b. 夏季(7月)

Fig. 7 τ -height cross-section of the time-lag ($\tau = 0 \sim 4 \text{ months}$)

correlation coefficients r of η over Northern Hemisphere(The contour interval is 0.2,

shaded areas denote where correlations don't pass the significance test $\alpha = 0.05$)

a.winter(Jan.); b.summer(Jul.)

由于 η 的 $r(\eta$ 在月环流形势异常预测中的重要性,计算了北、南半球逐月 17 个层次 $\tau = 1$ ~2 个月时的 $r(\eta)$ (表略)。计算结果表明:北半球 $\tau = 1$ 个月时,中平流层夏季前后(4—8 月)自 相关系数较高,其他层次在春季(4 月份)有较高的自相关,也就是说,在这些层次和季节上出 现的异常形势,至少可以持续到下个月; $\tau = 2$ 个月时,持续性明显减弱,只有中平流层少数几 层在夏季具有持续性。南半球自相关系数特征与北半球相近, $\tau = 1$ 个月时,在中平流层夏季前 后(11—3 月)具有较强的持续性,其他层次无显著自相关。它们的总特征可以归纳为:1)北、南 半球 η 在夏季持续时间明显长于冬季,且显著自相关主要表现在中平流层;2)两半球的异常形 势在中平流层可至少持续1 个月,个别层次可持续2 个月;3)北半球形势异常的持续性比南半



图 8 南半球 η 的时滞相关系数 r 的 τ—高度剖面(τ=0~4月) (等值线间隔为 0.2,图中阴影区未通过 α= 0.05 显著性检验) a, 冬季(7月):b, 夏季(1月)

Fig. 8 τ -height cross-section of the time-lag (τ = 0 ~ 4 m on ths)

correlation coefficients r of η over Southern Hemisphere (The contour interval is 0.2,

shaded areas denote where correlations don't pass the significance test $\alpha = 0.05$)

a.winter(Jul.); b.summer(Jan.)

球略强。

由此可见, η 的时滞性远小于ξ 的时滞性。对北、南半球多数层次及季节, 其 τ= 1 的自相关 系数已不显著; η较大的时滞性出现在北、南半球 70~10 hPa 夏季前后。因此, 月平均大气环 流形势异常强度(更不必说形势异常本身)的时滞性是很差的, 基于其上的月际环流形势的统 计预报很难收到好的效果。

5 小 结

综上,本文依据 Lorenz 环流分解原理,对半球月平均位势高度场异常作了空间区域分解, 并用其构造了半球均匀异常指数 ξ 和非均匀异常指数 η 。对 ξ 、 η 的时滞性分析表明: 北(南) 半 球 ξ 的时滞性较强,1、7月可达1a(3a)以上。 η 的时滞性较弱,显著时滞通常不足1个月;较 强时滞出现在北半球夏季平流层,最长可达4个月。这一实际分析结果的理论意义在于,它与 理论分析结果^[4]存在一定的相似: ξ (波数为0、波长无限大)的时滞性明显强于 η (波数不为0、 波长有限大); ξ 普遍存在强时滞性、 η 在特定季节与层次存在1个月以上的强时滞性,因此可 作为短期气候预测的线索。

致谢:本文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] 章基嘉, 葛 玲, 孙照渤. 中长期天气预报基础(修订本) [M]. 北京: 气象出版社, 1994.
- [2] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77(3): 437-471.
- [3] 李巧萍, 王盘兴, 李丽平. 半球月平均位势高度场的若干环流指数及其变化特征[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(3): 341-348.
- [4] 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.
- [5] 复旦大学数学系. 概率论与数理统计[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1961: 188-223.
- [6] 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.

[7] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.

[8] Wallace J M, Hobbs P V. Atmospheric Science - An Introductory Survey [M]. New York: Academic Press, 1977: 21-28.

Time-lag Correlation Analysis of Homogeneous and Inhomogeneous Anomaly Indexes of Hemispherical Monthly Mean Geopotential Height Fields

LI Qiao-ping, WANG Pan-xing

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

Abstract: Hemispherical mean monthly abnormal geopotential height fields are divided into hemispherical homogeneous and inhomogeneous parts, and corresponding homogeneous anomaly index ξ and inhomogeneous anomaly index η constructed. The time-lag correlation analyses of ξ and η show that the duration of ξ in Northern (Southern) hemisphere is significant, and it can persist for 1 year (3 years) in January (July) respectively. The persistence of η is not obvious and the duration generally less than 1 month; the stronger perisistence occurs in stratosphere in northern summer with the longest being 4 months.

Key words: hemispherical monthly mean geopotential height fields; homogeneous anomaly index; inhomogeneous anomaly index; time-lag correlation analysis