

超长波波谱参数持续和转折规律的统计研究

丁裕国 柳又春

戴福山

(南京气象学院)

(空军气象学院)

摘要 本文以游程理论和Markov链模型探讨北半球中纬度500hPa超长波(2, 3波)波谱参数的时变规律, 获得各个分波波幅增衰及位相进退的持续性和转折性的有关信息, 从而为中长期天气预报提供一种统计气候学背景。

关键词 超长波, Markov链, 波谱参数, 统计气候学

大型天气过程的演变和发展始终处于一种相对静止和相对变动交替循环的往复变化之中。换言之, 天气由一种状态持续之后往往转变为另一种状态的持续, 这种天气状态之间的转折往往具有突变性。根据大量研究分析表明, 超长波是构成长期天气过程的主导系统, 而长波则是中期天气过程的主要系统^[1]。从这个意义上说, 大型环流的持续与转折是由超长波和长波的活动所决定的。因此, 为提高中长期预报的准确率, 把握天气持续时间和转折时间, 有必要掌握超长波的持续与转折特征。

关于超长波或长波的活动规律, 已有许多有益的探讨^[2-4]。一般说来, 超长波活动(如波数或振幅)的变化常常受大气的斜压性、冷热源和大地形的影响。因此, 可从动力和热力学方面研究其形成、维持的机制。但由于超长波对于长期地面天气过程具有直接的联系, 揭示各波振幅增衰及位相进退所表现出的持续与转折规律很有意义。故本文用统计学方法探讨中纬度(30—50°N)500hPa超长波(2, 3波)振幅、位相的持续和转折规律。

1 资料与方法

据文献〔5〕提供的500hPa波谱参数资料, 选取30°N和50°N(代表中纬度地区)的2波和3波逐候振幅、位相记录组成多年候际波幅、位相资料序列。为研究方便, 取逐候距平序列作为研究的基础资料。

假定任一波数的波振幅距平序列为两状态(正距平与负距平)一阶Markov链, 则由文献〔6〕的推导可求得波振幅正距平持续 k (候)的概率, 就是从正距平(候)开始经过 k (候)转移, 首次出现负距平(候)的概率。因而有

$$\left. \begin{aligned} P\{H_r = k\} &= (1 - P_{H/H})P_{H/H}^{k-1} \\ P\{L_r = k\} &= (1 - P_{L/L})P_{L/L}^{k-1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $k = 1, 2, \dots$, H_k 和 L_k 分别表示超长波波振幅正距平和负距平游程长度(即持续时间), $P_{H/H}$ 表示前 1 候为正距平, 后 1 候仍为正距平的条件概率; $P_{L/L}$ 则表示前 1 候为负距平, 后 1 候仍为负距平的条件概率。同样, 也可由高阶 Markov 链推得关于长度为 k (候) 的正、负游程概率分布公式(见文献〔7〕)。

游程的概率分布表明各种不同长度的正(负)距平持续时间出现的可能性。从气候意义上说, 最为关心的是游程的平均长度以及它们的方差。例如, 对于逐候不同波数的超长波, 我们尤其关心其振幅或位相持续正距平在一段时间中的平均状况, 因此有必要进一步引入与上述概率分布有关的统计参数, 其表达式为

$$\left. \begin{aligned} RL_H &= \frac{1}{1 - P_{H/H}} \\ RL_L &= \frac{1}{1 - P_{L/L}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} RV_H &= \frac{P_{H/H}}{(1 - P_{H/H})^2} \\ RV_L &= \frac{P_{L/L}}{(1 - P_{L/L})^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} T_H &= 1 + \frac{P_{L/H}}{P_{H/L}} \\ T_L &= 1 + \frac{P_{H/L}}{P_{L/H}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_c &= \frac{1}{1 - P_{H/H}} + \frac{1}{1 - P_{L/L}} \\ \sigma_c^2 &= \frac{P_{H/H}}{(1 - P_{H/H})^2} + \frac{P_{L/L}}{(1 - P_{L/L})^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

上面各式中: RL_H 、 RL_L 分别为波参数(振幅或位相, 下同)正、负距平逐候游程平均长度(单位: 候); RV_H 、 RV_L 分别为它们的正、负距平逐候游程长度的方差(单位: 候); T_H 、 T_L 分别为它们的正、负距平逐候游程的平均返回时间; μ_c 、 σ_c^2 则分别为它们的正、负距平逐候循环平均长度和方差。

利用 Markov 链模拟正、负距平游程有一个最基本的前提, 即转移概率矩阵的稳定性。在文献〔8〕中, 作者曾提出转移概率稳定性问题, 并证明 10 年某月份逐日降水转移概率矩阵已趋稳定, 实质上在文献〔9〕中也已证明 30 年以上逐月干湿转移概率矩阵趋于稳定, 表明样本容量达到 300 以上时, 转移概率矩阵已趋稳定。本文根据同样的理由, 选取 5 年(1971—1975 年)北半球 500hPa 高度场(30°N 和 50°N)各个分波逐候资料进行游程计算, 以保证满足转移概率矩阵稳定的大样本。

此外, 利用 Markov 链的遍历性, 可分析波幅或位相正、负距平转移矩阵的极限分布。根据正则 Markov 链理论, 设 P 为正则转移矩阵, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, $P^n \rightarrow P^*$, 其中 P 具有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P_{ik}^{(n)} = \alpha_k \quad \alpha_k \text{ 与 } i \text{ 无关} \quad (6)$$

上式中 P^* 称为 P 的极限转移矩阵, α_k 为与 i 无关的概率向量。理论上可以证明, 转移概率矩阵的极限概率就是气候概率。

本文除应用上述方法以外, 还进一步引用马氏链无后效性定义多种状态转移概率, 类似于文献〔10〕考虑前期状态演变的历史连续性, 讨论波振幅和位相的持续性特征。

2 波参数正、负游程统计特征

利用公式(1)一(5)分别计算 30°N 和 50°N 地带2波和3波振幅、位相正、负距平(候)游程统计特征, 这里我们选择纬带和波数是任意的, 类似的工作也对其它波数或纬带适用。只不过本文是考虑中纬度地带超长波2波与3波作为代表。从计算结果来看, 发现不少有意义的信息。表1列出了 50°N 的2波、3波游程统计量, 表2列出了 30°N 的2波、3波游程统计量。由表可见, 50°N 和 30°N 的2波、3波振幅负距平游程平均长度

表1 50°N 的2波、3波游程统计量(单位: 候)

参 数 项 目	2 波		3 波	
	振 幅	位 相	振 幅	位 相
RLH	2.08(1.59)	2.27(1.70)	2.30(1.10)	2.96(2.41)
RLL	3.00(2.45)	3.17(2.62)	3.16(2.61)	2.14(1.57)
TH	2.44	2.39	2.44	1.72
TL	1.69	1.72	1.70	2.38
μ_c	5.08(2.87)	5.44(3.12)	5.36(2.83)	5.10(2.87)

注: 项目符号同(2)一(5)式, 括号内数字为相应标准差

表2 30°N 的2波、3波游程统计量(单位: 候)

参 数 项 目	2 波		3 波	
	振 幅	位 相	振 幅	位 相
RLH	2.32(1.75)	3.67(3.13)	2.46(1.90)	2.23(1.65)
RLL	2.48(1.92)	2.21(1.64)	2.58(2.02)	2.53(1.96)
TH	2.07	1.60	2.05	2.13
TL	1.94	2.66	1.95	1.88
μ_c	4.80(2.59)	5.82(3.53)	5.04(2.77)	4.76(2.56)

注: 同表1

略比正距平游程平均长度长。例如, 50°N 的2波振幅正游程为2.08候, 约10.4天, 而负游程为3候, 约15天; 30°N 的2波振幅正游程为2.32候, 约11.6天, 而负游程为2.48候, 约12.4天。综观表1和表2, 不难看出所有波参数(振幅、位相)的正、负游程都有2—3

候的持续时间, 这种持续性特征明显地反映出超长波振幅增衰具有 4—5 候的准循环性, 即通常所谓准 2—3 周振荡。就位相来说, 它的正、负距平恰好反映超长波的东进与西退, 例如, 表 1 与表 2 中, 50°N 2 波位相持续西退(即负游程)的平均时间长度比持续东进(即正游程)的平均时间长度要长一些; 但 3 波位相则与其相反即持续西退平均要短于持续东进的时间。而 30°N 情况正好相反。

根据游程理论^[6], 波振幅和位相的正、负游程平均返回时间标志着超长波的波参数从某种状态(如正距平)开始直至后来首次回复到该种状态为止的加权时间平均值。例如表 2, 30°N 2 波振幅的正游程平均返回时间为 2.07(候), 表明由振幅正距平状态首次回复到正距平状态所需要的平均时间大约 10 天左右, 即从 2 波的高振幅状态到下一次最早的高振幅状态, 平均需经 2 候左右。而它的负游程平均返回时间则仅有 1.94(候), 这也表明由振幅负距平(低振幅)首次回复到负距平(低振幅)平均间隔大约不到 10 天的时间。这正好与表 1 和表 2 中列出的天气气候循环长度相吻合。这也恰好代表了一次天气气候意义下的循环(见表 1、2)。由表可见, 无论在中纬或是偏低纬(30°N), 各波(2, 3 波)振幅、位相都具有约 5 候左右的循环。显然, 这种超长波波参数的同步性循环变化, 正是大气环流指数循环的另一种反映。因为大气环流的中期演变主要表现为纬向环流阶段与经向环流阶段的相互转换和交替出现, 这种交替出现的周期, 据实际资料统计的结果表明^[1], 一个循环(即高一低一高或低一高一低)的平均长度约为 5.5 候, 最长为 9 候, 最短为 4 候, 最多的循环为 5 候, 最少的循环为 7—9 候。这里所说高、低指数环流, 实质上表现为纬向环流盛行(波幅减小)、西风强大, 或者为经向环流盛行(波幅增大)、西风减弱。因此, 从另一侧面证明了超长波参数状态转移的概率统计特征和天气气候意义。

值得指出的是, 指数循环变化只能从超长波波幅(即槽脊振幅)的增衰来揭示大气环流状况的变化, 并不能揭示槽脊振幅在什么经度上变化(参见文献[2]), 而这个问题却对预报至关重要。本文对位相资料所计算的正、负游程统计特征, 就可从多方面揭示出有关特征, 例如, 表 1 和表 2 所列的位相的天气气候循环长度与振幅的天气气候循环长度具有一定的同步性, 大体上相匹配。位相的正游程意味着超长波的持续东进或偏东, 位相的负游程则意味着超长波的持续西退或偏西。因此, 从表 1 和表 2 所得的位相信息可大致识别各个纬度上超长波峰谷位置的东摆西摆状况。

3 波参数转移概率的极限分布

对振幅、位相的正、负距平状态分别记正距平为“0”状态, 负距平为“1”状态, 考察它们各自的时间序列一阶转移概率。

例如 50°N 的 2, 3 波振幅一阶转移矩阵和极限矩阵分别为(相应的位相转移矩阵从略):

(1) 2 波振幅

$$P = \begin{pmatrix} 0.5192 & 0.4808 \\ 0.3333 & 0.6667 \end{pmatrix}$$

$$P^* = P^{(6)} = \begin{pmatrix} 0.4094 & 0.5906 \\ 0.4094 & 0.5906 \end{pmatrix}$$

(2) 3 波振幅

$$P = \begin{pmatrix} 0.5455 & 0.4545 \\ 0.3166 & 0.6834 \end{pmatrix}$$

$$P^* = P^{(8)} = \begin{pmatrix} 0.4106 & 0.5895 \\ 0.4106 & 0.5895 \end{pmatrix}$$

用相同的方法求得 30°N 各波参数的转移矩阵和极限矩阵(见表3和表4)。

表3 30°N 各波振幅转移概率及其极限分布

	2 波 振 幅		3 波 振 幅	
	p	p*	p	p*
p_{00}	0.5690	p_{00}^* 0.4833	p_{00} 0.5938	p_{00}^* 0.4431
p_{01}	0.4310	p_{01}^* 0.5167	p_{01} 0.4062	p_{01}^* 0.5118
p_{10}	0.4022	p_{10}^* 0.4933	p_{10} 0.3874	p_{10}^* 0.4867
p_{11}	0.5968	p_{11}^* 0.5167	p_{11} 0.6126	p_{11}^* 0.5118

表4 各波波参数极限转移步数与预报时效

纬 度	项 目	2 波		3 波	
		振 幅	位 相	振 幅	位 相
50°N	转移步数 k	6 候	8 候	8 候	6 候
	预报时效 $k-1$	25(天)	35(天)	35(天)	25(天)
30°N	转移步数 k	8 候	8 候	8 候	6 候
	预报时效 $k-1$	35(天)	35(天)	35(天)	25(天)

由表可见, 不论初始状态如何, 其后持续出现同种状态的概率一般都大于转为另一状态的概率, 即有 $P_{ii} > P_{ij} (i, j = 0, 1)$ 。可见各波波参数持续性都大于转折性。特别值得注意的是, 不论是 50°N 或 30°N , 2波、3波的波幅正距平的极限概率都小于出现负距平的极限概率, 而位相却没有明显的规律。在表4中, 归纳上述两个纬度带各波波参数极限转移的步数并标出相应的预报时效, 可供中长期环流预报的参考。根据Markov链理论, 极限分布的到达步数 k 描述了初始状态的影响时效, 于是, 初始状态仅对 $k-1$ 步以内状态提供较多信息。因此它可作为超长波振幅增衰、位相进退的预报背景。

4 超长波转折性的Markov链模拟

为了更好地模拟转折规律, 尤其是超长波波谱参数所反映的超长波强度增衰和位相进退的转折特点, 我们进一步对超长波波谱参数“状态”作如下规定: 记正距平为状态“0”, 正距平后第一个负距平为状态“1”, 第二个负距平为状态“2”, 依此类推, 第n个负距平则记为“n”。于是, 对各个纬带上各波振幅和位相距平序列就可分别得到特殊的多状态一阶Markov链转移概率矩阵, 例如

(1) 50°N的2波振幅转移矩阵为

$$P = \begin{pmatrix} 0.5192 & 0.4808 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3676 & 0 & 0.6324 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1724 & 0 & 0 & 0.8276 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2083 & 0 & 0 & 0 & 0.7917 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5263 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4737 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.6667 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.6667 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 \\ 0.7500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2500 & 0 \\ 0.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

由P可见, 500hPa 2波振幅由持续负距平突然转折变为持续正距平的第一个转折点是在持续4候以后第5候转为正距平的可能性为0.5263(它大于出现振幅正距平的气候概率0.4094), 换言之, 若2波振幅持续减弱4候以后, 则第5候发生转折性增强的可能性很大, 若已持续8候振幅减弱, 则第9候发生转折的可能性极大, 其转移概率为0.75。

(2) 30°N的2波振幅转移矩阵为

$$P = \begin{pmatrix} 0.5690 & 0.4310 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4667 & 0 & 0.5333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3250 & 0 & 0 & 0.6750 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2963 & 0 & 0 & 0 & 0.7037 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3158 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.6842 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4615 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5385 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1429 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8571 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

0.6667	0	0	0	0	0	0	0	0.3333	0	0
0.000	0	0	0	0	0	0	0	0	1.000	0
0.5000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5000
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

由P可见, 500hPa的2波位相由持续负距平(西退)突然转为正距平(东进)的第一个转折点是在持续11候以后, 第12候转折为正距平(东进)其可能性为0.6667(它大于出现位相正距平的气候概率0.5600), 即2波持续西退时, 一般在第11候以后转为东进的可能性很大; 而2波位相一般不大可能持续西退13候以上的时间。

类似地, 亦可对波参数状态作相反的规定, 并计算其转移矩阵。这样就可描述由持续正距平突变为负距平的可能期限和最可能期限。表5中分别列出各波波参数状态的最可能转折点及其概率。表中除2波振幅为持续负距平转为正距平的转折外, 其余均为持续正距平转为负距平的转折。对位相, 除30°N 3波为持续东进转为西退外, 全为持续西退转为东进的转折期限。

表5 超长波波参数的转折期限和转折概率*

		50°N		30°N	
		转折期限	转折概率	转折期限	转折概率
2波	振幅	5候	0.5263 (0.4094)	8候	0.6667 (0.4833)
	位相	9候	0.6667 (0.4178)	9候	0.6667 (0.6241)
3波	振幅	7候	0.6000 (0.4105)	7候	0.6667 (0.4882)
	位相	5候	0.7000 (0.5799)	5候 9候	0.5714 0.6667 (0.4685)

*括号内为气候概率

5 小 结

1. 波参数的正、负游程特征, 揭示了超长波主要分波的持续增衰和进退的天气气候信息。这些信息与以往天气和气候研究结果吻合, 例如波参数(振幅、位相)正、负游程平均长度一般都有2—3候, 而它们的循环长度为4—5候, 恰好从一个侧面表明中高纬度大气环流具有准2—3周振荡的物理特性。

2. 波参数的转移概率极限分布, 从统计意义上表明波参数初始状态的影响时效和可预报时效, 因而可作为500hPa波参数预报的气候背景。

3. 利用有限状态一阶Markov链模拟超长波波参数的转折特征, 充分表明某一波状态

维持的最可能期限(即转折时间)以及转折的最大可能性, 这对中长期预报是有应用意义的。

参 考 文 献

- 1 Palmen E. Newton C W. Atmospheric circulation systems, Academic Press, 1969
- 2 章基嘉, 葛 玲. 中长期天气预报基础. 北京: 气象出版社, 1983
- 3 章基嘉. 大气科学, 1979; 3 (2): 99—108
- 4 黄忠恕. 波谱分析在水文气象学中的应用. 北京: 气象出版社, 1986
- 5 陈新强, 许展海. 500毫巴波谱资料. 北京: 气象出版社, 1970
- 6 么枕生. 地理研究, 1986; 5 (3): 1—10
- 7 丁裕国, 牛 涛. 南京气象学院学报, 1990; 13 (3): 286—297
- 8 丁裕国, 张耀存. 南京气象学院学报, 1989; 12 (2): 146—155
- 9 么枕生. 气候统计学基础, 北京: 科学出版社, 1984

STATISTICAL STUDIES ON THE PERSISTENCE AND TRANSLATION FEATURES OF THE SPECTRUM PARAMETERS OF ULTRA-LONG WAVES

Ding Yuguo, Liu Youchun,
(Nanjing Institute of Meteorology)

Dai Fushan
(Airforce Institute of Meteorology)

Abstract The temporal variation features of spectrum parameters of the 500hPa ultra-long waves in the Northern Hemisphere are investigated based on the run theory and Markov model. Information of the persistence and translation of amplitude increase/decrease and phase advance/retreat is obtained, thus providing a statistical climatological background for long-range weather forecasting.

Key words ultra-long waves, Markov chain, spectrum parameter, statistical climatology