

纬圈谱在中期数值预报产品 统计释用中的应用

钟元 程煜 简根梅
(浙江省气象科学研究所)

李秀莉
(浙江省气象台)

提 要

本文对 ECMWF 输出的 500hPa 高度的 72, 96 及 120 小时预报值, 用谐波分析的方法将高度场的扰动分解成纬圈谱, 并由不同简谐波的扰动叠加得到合成波。以波参数谱, 物理量谱及合成波高度为预报因子, 对浙江省春季中期天气过程作相关分析, 并用逐步回归的方法建立中期 MOS 预报方程。业务使用表明, 由波谱因子组成的预报方程对中期天气过程有一定的预报能力。

一、前言

中期天气过程与行星尺度环流系统或天气尺度系统的变化密切相关。大气长波的发展与消亡是中期天气演变的最基本过程, 超长波的活动构成中期环流形势演变的背景。

中期数值预报的输出产品给中期 MOS 预报提供了预报信息。目前, 欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 输出的预报产品已达到一定的准确度, 500hPa 高度预报的有效期已达到第 7 天^[1]。

对 ECMWF 输出的 500hPa 高度的 72、96 及 120 小时预报值, 用谐波分析的方法将高度场的扰动分解成纬圈谱, 滤去大气波动中高频部分的短波, 突出超长波与长波, 使之与中期天气过程的时空尺度一致。以波参数谱, 物理量谱及合成波高度为因子, 对浙江省春季连阴雨天气过程和强降温过程作相关分析, 用逐步回归的方法建立了中期 MOS 预报方程。

1986 年 3—4 月的业务使用结果表明, 由波谱因子组成的预报方程对中期天气过程有一定的预报能力。

二、纬圈谱

将高度场沿纬圈的分布分解出不同波数的波动得到纬圈谱。500hPa 高度场 $H(\lambda, \varphi)$ 的富里叶级数展开:

$$H(\lambda, \varphi) = \frac{1}{2} a_0(\varphi) + \sum_{k=1}^n [a_k(\varphi) \cos k\lambda + b_k(\varphi) \sin k\lambda]$$

式中 λ 为经度, φ 为纬度, k 为波数, n 为展开波数极限。 $a_0(\varphi)$, $a_k(\varphi)$ 及 $b_k(\varphi)$

为富里叶系数, 其表达式为:

$$a_0(\varphi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} H(\lambda, \varphi) d\lambda$$

$$a_k(\varphi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} H(\lambda, \varphi) \cos k\lambda d\lambda$$

$$b_k(\varphi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} H(\lambda, \varphi) \sin k\lambda d\lambda$$

展开后各波的振幅 $C_k(\varphi)$, 位相 $\theta_k(\varphi)$, 相对振幅 (方差比) $I_k(\varphi)$ 及波能密度 $E_k(\varphi)$ 为:

$$C_k(\varphi) = [a_k^2(\varphi) + b_k^2(\varphi)]^{\frac{1}{2}}$$

$$\theta_k(\varphi) = \frac{1}{k} \operatorname{tg}^{-1} \frac{b_k(\varphi)}{a_k(\varphi)}$$

$$I_k(\varphi) = \frac{C_k^2(\varphi)}{2\sigma^2(\varphi)} \cdot 100\%$$

$$E_k(\varphi) = \frac{1}{2} \rho C_k^2(\varphi) k^2$$

其中, 总方差

$$\sigma^2(\varphi) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [H_i(\varphi) - \bar{H}(\varphi)]^2$$

m 为 φ 纬圈所取格点数 $\bar{H}(\varphi)$ 为 φ 纬圈上的高度平均。 ρ 为大气在 5500gpm 处的密度, 取 $\rho = 0.69711 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

本文还计算了以下物理量谱^[2,3]:

经向扰动动能 $E_k^{(v)}(\varphi)$, 纬向扰动动能 $E_k^{(u)}(\varphi)$, 角动量输送 $J_k(\varphi)$, 扰动动能与平均动能转换率 $\{E', \bar{E}\}_k(\varphi)$ 。

三、资料与因子场计算

在进行波谱分析时, 考虑到中期天气过

程的时空尺度,波数K取1—7,它们包括了大气波动的超长波和长波等基本成分〔4,5〕。

将ECMWF输出的1983—1985年3月1日—4月30日逐日72、96及120小时500hPa高度预报值,从20°N到85°N,每隔5度取一纬圈,共14个纬圈,一个纬圈每隔10经度取一格点,共36个格点高度资料,用求和代替积分,由下式:

$$a_0(\varphi) = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{36} H_i(\varphi);$$

$$a_k(\varphi) = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{36} H_i(\varphi) \cos(k \cdot i \cdot 10);$$

$$b_k(\varphi) = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{36} H_i(\varphi) \sin(k \cdot i \cdot 10).$$

进行逐圈分解,计算波参数谱和物理量谱以及1—7波的合成值。

各简谐波的扰动高度由下式计算:

$$H'_k(\lambda, \varphi) = a_k(\varphi) \cos(k\lambda) + b_k(\varphi) \sin(k\lambda).$$

由以下定义求各种合成波高度:

$$\text{超长波 } HS(\lambda, \varphi) = H_0(\varphi) + \sum_{k=1}^3 H'_k(\lambda, \varphi);$$

$$\text{长波 } HL(\lambda, \varphi) = H_0(\varphi) + \sum_{k=4}^6 H'_k(\lambda, \varphi);$$

$$\text{合成波 } HI(\lambda, \varphi) = H_0(\varphi) + \sum_{k=1}^n H'_k(\lambda, \varphi).$$

其中,合成波K上限n的合理取值〔5〕,按表1进行。

表1 合成波波数k上限n的取值

纬度 (°N)	85—80	75—65	60—55	50—45	40—20
n	3	4	5	6	7

1983年4月21日ECMWF更换业务模式,启用改进地形影响的谱模式。为了全年预报样本容量统一,1983年3月1日至1983年4月20日采用旧模式资料。

从与预报量高相关的波谱因子中抽取若干个,计算了它们与500hPa实况波谱〔6〕1983—1984年两年的相关(表2),两者的高相关表明,ECMWF预报的波谱与实况波谱的变化趋势基本一致。超长波比长波更接近实际情况,这与文献〔1〕是一致的。

表2 ECMWF预报波谱与实况波谱相关

因子 时次	超长波	长波	波参数 f _K (φ)	
	HS(λ, φ)	HL(λ, φ)		
72	0.94 4月 (140, 50)	0.80 3月 (20, 30)	0.82 4月 H ₀ (30)	0.76 4月 E ₁ (50)
96	0.90 3月 (270, 50)	0.85 4月 (70, 30)	0.82 4月 H ₀ (30)	0.74 3月 θ ₁ (60)
120	0.91 4月 (140, 50)	0.78 4月 (150, 30)	0.82 4月 H ₀ (30)	0.69 4月 I ₁ (30)

四、谐波参数谱、物理量谱因子与中期天气过程的相关

对浙江省春季3—4月的中期MOS预报,取杭州、宁波、温州和衢州4个代表站。预报对象为连阴雨天气过程(连阴雨日数)强降温天气过程(过程降温幅度)以及逐日晴雨天气。

在普查波谱因子与各地中期天气过程相关时,选取40个左右信度通过0.01的高相关因子,按浙北(杭州与宁波平均情况)、浙南(温州与衢州平均情况)两片分别统计各类因子出现的频率(表3、4)。

1. 高相关波谱因子的波数K分布

表3为高相关波谱因子(72小时预告)随波数K分布的频率。

晴雨天气 逐日晴雨天气是包括大气短波在内的各种波动共同作用的结果,显然,长波的调整与超长波的背景是不可忽视的。3月份在浙北影响显著的是中纬带(50—55°N)的6波,而在浙南为高纬带(70—85°N)的3波。4月份低纬(25—30°N)

表3

天气过程	月份	频率 地区	k							
			0	1	2	3	4	5	6	7
逐日晴雨	3	浙北	6	5	10	0	2	0	60	0
		浙南	3	9	0	40	3	6	15	16
	4	浙北	4	0	26	8	25	8	8	8
		浙南	0	14	39	0	25	0	3	17
连阴雨	3	浙北	0	29	28	0	2	4	27	0
		浙南	0	22	5	20	16	30	0	0
	4	浙北	15	0	13	7	0	12	41	0
		浙南	0	4	52	0	16	0	0	7
强降温	3	浙北	0	0	4	0	31	15	12	35
		浙南	0	7	3	0	19	20	20	25
	4	浙北	0	4	0	4	12	12	19	50
		浙南	0	7	3	0	1	2	19	53

2波与4波的明显相关在全省是一致的。

连阴雨天气过程 3月份超长波的影响是明显的。在浙北是中高纬(55—70°N)的1波,中纬(40—55°N)的2波与中纬(50—55°N)6波共同作用的结果,在浙南则为中纬(40—50°N)1波与低纬(25—35°N)5波。4月份浙北过程的显著因子为中纬(45°N)2波与低纬(20—25°N)6波,浙南过程中纬带(35—55°N)2波因子有极显著的优势。

强降温过程 由于春季寒潮个例少而浙

江省大部分处30°N以南,冷高压移到江南往往变性,多数仅表现为强降温过程。无论3月还是4月,也无论是浙南还是浙北,长波的影响是主要的,尤其是7波的相关最为突出,3月份集中于中高纬(50—70°N),而4月份移到中低纬带(25—45°)。此外3月份高纬(80—85°N)4波的影响在全省也是一致的。4月份6波因子主要集中于中高纬(60—65°N)与低纬(30—35°N)。

2. 高相关波谱因子的类型分布

表4为高相关波谱因子(72小时预报)

表4

天气过程	月 份	频率因子		a_k	a_k	b_k	c_k	θ_k	I_k	E_k	$E_k^{(u)}$	$E_k^{(v)}$	J_k	π	$\{E'E\}$
		地区													
逐日晴雨	3	浙 北	6	5	20	9	4	17	9	10	9	0	6	2	
		浙 南	3	6	10	16	0	0	16	6	16	9	3	13	
	4	浙 北	4	13	4	4	17	13	4	17	4	9	4	4	
		浙 南	0	35	24	0	22	0	0	11	0	0	0	6	
连阴雨	3	浙 北	0	8	7	17	0	6	13	13	13	2	6	14	
		浙 南	0	5	32	5	5	0	5	0	10	20	0	16	
	4	浙 北	13	6	40	7	0	19	0	0	0	0	13	0	
		浙 南	0	15	0	4	0	20	13	9	13	9	9	4	
强降温	3	浙 北	0	4	27	4	8	12	4	19	4	0	0	12	
		浙 南	0	5	27	4	12	11	7	17	7	4	0	6	
	4	浙 北	0	23	0	8	23	4	12	0	12	12	0	8	
		浙 南	0	20	8	2	20	3	3	3	3	14	0	25	

的类型分布。

逐日晴雨天气 3月浙北较突出因子为低纬的 $b_k(\varphi)$,中纬的 $I_k(\varphi)$,浙南为高纬 $C_k(\varphi)$ 及 $E_k^{(v)}$ 。4月份浙北显著的因子为 $\theta_k(\varphi)$ 与 $E_k^{(u)}$ (φ),与浙南关系密切的是 $a_k(\varphi)$ 、 $b_k(\varphi)$ 及 $\theta_k(\varphi)$ 。

连阴雨天气过程 3月的 $\{E'E\}$ 是全省一致的主要影响因子,其中1波的动能转换 $\{E'E\}_1$ 占50%。中纬 $\{E'E\}_1(45)$ 对温州连阴雨过程表现出0.61的高相关。扰动振幅 $C_k(\varphi)$ 及扰动动能 $E_k^{(u)}$ (φ)及 $E_k^{(v)}$ (φ)都是浙北的显著因子,其中 $E_2^{(u)}$ (45)对浙北两站3个时次都出现0.44—0.52的高相关,这并非偶然,说明中纬带2波的动能变化与连阴雨过程关系十分密切。浙南的显著因子是 $b_k(\varphi)$ 及 $J_k(\varphi)$,前者是综合整个纬圈信息的权重因子,后者是纬带间的角动量输送。输送集中在中纬(50—60°N)带的1波与5波。

4月份全省一致的显著因子是 $I_k(\varphi)$ 。 $I_k(\varphi)$ 为k谐波振幅在总波动振幅中占的比重。在浙北,中纬带2波 $I_2(45)$ 体现出优势,而浙南是中高纬的7波 $I_7(60—65)$ 体现出优势,特别是 $I_7(65)$ 对温州连阴雨天气过程有0.67的高相关。另一个突出因子是低纬平均纬向风速 $\bar{U}(25)$,该因子明显地出现在全省每个地点及每个时次,普遍达到0.50—0.60的高相关。其天气学意义十分明显, $\bar{U}$ 相当西风指数,中低纬西风占优势的大气环流正是连阴雨天气过程典型的平直纬向型环流。

强降温过程 3月份全省一致的显著因子为 $B_k(\varphi)$ 及 $E_k^{(u)}$ (φ)。 $E_k^{(u)}$ 集中于长波段的5—7波与中高纬带(50—70°N)。中高纬(55—65°N)6波的动能转换 $\{E'E\}$ 对浙北过程也是较显著的因子。

4月份全省一致的显著因子为 $a_k(\varphi)$, $\theta_k(\varphi)$ 及 $J_k(\varphi)$ 。反映槽脊位置的 θ_k 因

子集中于高纬带 (65—80°N) 的 6 波与 7 波及低纬 (20—30°N) 的 7 波。动量输送集中于中纬带 (40—50°N) 的 J_6 与 J_7 。此外, 对浙南来说, 整个中高纬带 (40—70°N) 的 5—7 波的动能转换 $\{E'/\bar{E}\}$ 有突出贡献, 尤其是 60°N 的 $\{E'/\bar{E}\}$ 。对浙北、浙南的强降温过程都有 0.43—0.44 的高相关。

五、波谱因子在中期 MOS 预报中的应用

1. 波谱因子对预报因子信息量及其性能的改善

目前, 中期数值预报产品的品种较少, 限于通信传递, 资料收集等条件, 仅能对 500hPa 高度预报值加以应用。对于中期天气过程的预报, 只有一个层次的高度预报, 信息量显然是太少。

ECMWF 的 500hPa 高度值经过纬圈谱分解和高度合成后, 增加了波参数谱、物理量谱及合成波高度三类波谱因子, 使预报因子从 5 百个增加到近 3 千个。从而使高相关因子成倍地增加, 最高相关系数也大大提高。

引入波谱因子后, 高相关因子数增加了 4—6 倍。最高相关系数提高 0.06—0.16。这种提高幅度是相当可观的, 而且, 在中期天气过程中的提高明显超过逐日晴雨天气, 说明波谱因子确实与中期天气过程密切相关。

2. 中期 MOS 预报方程及拟合结果

对浙江省 4 个代表站 3、4 月份的逐日晴雨, 连阴雨及强降温天气过程用逐步回归的方法分别建立了 66 个预报方程, 其拟合结果的全省平均情况如表 5。

表 5 中期 MOS 预报方程的拟合结果 (全省平均)

天气过程	连 阴 雨						强 降 温						逐 日 晴 雨					
月 份	3			4			3			4			3			4		
时 次	72	96	120	72	96	120	72	96	120	72	96	120	72	96	120	72	96	120
复相关系数 R	0.78	0.75	0.74	0.82	0.83	0.83	0.74	0.73	0.69	0.75	0.72	0.72	0.68	0.68	0.73	0.74	0.73	0.69
方差缩减 RV	0.61	0.57	0.55	0.67	0.68	0.68	0.55	0.54	0.47	0.56	0.53	0.53	0.47	0.47	0.52	0.55	0.54	0.49
拟合率	91	89	85	83	86	86	98	98	95	99	98	97	85	85	89	90	89	88
CSI*	78	80	84	50	51	68	93	83	72	92	85	80	78	77	83	83	82	81
气候概率	27	27	27	30	30	29	10	10	10	11	11	11	59	57	58	56	58	58

* 逐日晴雨天气的 CSI 系指降水过程的 CSI

逐日晴雨天气预报方程的方差缩减 RV 值较低, 说明其预报能力不甚高。连阴雨天气过程与强降温天气过程预报方程的 RV 值有较显著的提高。

预报方程的拟合情况甚好, 成功界限指数 CSI 值都大大超过了气候概率。

在连阴雨和强降温天气过程的个别回归

预报方程 $Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i$ 中, 入选的因子

与上一节中所述的因子基本是一致的, 如在杭州 4 月强降温天气过程预报方程的预报因子中, 长波 (5—7 波) 的优势, 尤其是 7 波因子比重最大。因子主要集中于高纬 (75—85°N) 与低纬 (25—30°N)。反映高纬 (75°N) 1 波与 7 波及低纬 (30°N) 7 波的槽脊位置的 θ_K 在预报因子中占了较大比重。此外, 高相关的 $\{E'/\bar{E}\}_{(60)}$ 与 $J_6(30)$ 入选, 说明 6 波在 30°N 的主动量输送与中纬 60°N 的动能转换, 对杭州强降温天气过程有较突出的贡献。

3. 使用效果

1986 年 3 月 1 日至 4 月 30 日, 所有预报方程投入业务试报。并在 3 月 20 日至 4 月 20 日春播期间正式对县气象站发布指导预报。

中期 MOS 预报方程预报结果的全省平均情况如表 6。

各时次预报方程对逐日晴雨天气预报准确率不甚高。当将三个时次预报结果进行综合时, 预报结果有明显的改善。

各时次预报方程对连阴雨天气过程的预报结果比逐日晴雨预报有明显的提高。3 时次综合预报结果, 3 月份三天以上连阴雨天气过程除温州市漏报一次外, 其余各站点均无漏报。4 月份各地 3 天以上连阴雨过程无一漏报。

各时次预报方程对强降温天气过程的预报准确率均高于 75%, 三个时次综合预报结果, 3—4 月全省 4 次强降温过程 (日平均气温降温幅度 $\geq 6^\circ\text{C}$), 各地无一漏报。由于强降

表 6 中期MOS预报方程1986年预报结果

天气过程	逐 日 晴 雨				连 阴 雨				强 降 温			
月 份	3		4		3		4		3		4	
时 次	准确率	CSI*	准确率	CSI*	准确率	CSI	准确率	CSI	准确率	CSI	准确率	CSI
72	64.0	55.8	69.5	63.5	78.0	64.3	76.0	69.3	91.3	83.3	75.7	72.3
96	68.5	63.0	77.3	74.8	75.0	75.0	75.8	75.0	86.3	66.7	78.7	44.3
120	54.3	42.8	64.5	52.3	83.5	77.0	66.5	61.8	93.3	83.3	80.3	66.7
三时次 综合预报	71.3	68.0	82.5	78.8	77.8	76.3	85.8	83.3	100.0	100.0	66.7	66.7

温过程次数少,所以预报准确率的起伏较大。

六、小结与讨论

1. 中期天气过程与天气振动和全球振动尺度之间的谱变化相关联,应用谐波分析定量计算得到的纬圈波参数谱和物理量谱以及经函数滤波后的超长波和长波与大尺度环流的转换与调整密切相关,具有较明确的天气学意义。

2. 应用 ECMWF 输出 500hPa 高度预报值分解的纬圈谱变化与实际波谱变化趋势基本一致。随时效的延长,长波准确度的下降比超长波明显。

3. 在中期数值预报产品统计释用过程中,引入大量波谱因子供筛选,可在一定程度上解决当前中期 MOS 预报因子信息量过少的问题。波谱因子在时空尺度上与中期天气过程一致,因而 MOS 预报方程对中期天气过程有一定的预报能力。

4. 统计释用结果表明,引入波谱因子的中期 MOS 预报方程对中期天气过程的预报能力比对逐日晴雨天气的预报能力高。逐日晴雨天气受大气短波影响大,目前中期数值

预报由于惰性对短波过程反应较差,因而影响方程预报准确率。

5. 中期数值预报产品品种少,使预报因子信息量不足,如本文预报因子信息仅来自 500hPa 一个层次的高度预报值,这是造成中期 MOS 预报准确率不甚高的主要原因之一。在中期数值预报精度大大提高与输出产品品种增加之前,可采用对多时次预报结果进行综合,对不同预报方法的多种预报结果作综合决策等手段来有限量地提高预报准确率。

参 考 文 献

- [1] L. Bengtsson, 高良成译, 欧洲中期预报中心 (ECMWF) 的中期天气预报业务, 气象科技, 1985, 6, 16—24。
- [2] 仇永炎, 中期天气预报, 科学出版社, 28—62, 1985年。
- [3] 黄嘉佑, 李黄, 气象中的谱分析, 气象出版社, 188—196, 1984。
- [4] 章淹, 超长波与长波演变形势在中期预报上的试验, 中长期水文气象预报文集, 第一集, 254—262, 水力电力出版社, 1978。
- [5] 陈新强, 500mb 高度场富氏展开波数问题, 中期天气预报文集, 191—197, 气象出版社, 1981。
- [6] 陈新强, 许晨海, 仪清菊整编, 北半球 500 百帕波谱资料, 1983, 1984, 气象出版社。

The application of zonal spectral analysis to interpretation of medium range numerical prediction product

Zhong Yuan, Cheng Yu, Jian Genmei
(Institute of meteorological science, Zhejiang Province)

Li Xiuli
(Meteorological Observatory, Zhejiang Province)

Abstract

In this paper, the disturbance of ECMWF forecast height has been resolved into zonal wave spectrum by method of harmonic analysis. The integrated waves are composed of varied harmonics. The relations between the spectrum and medium range weather for spring over Zhejiang Province are analysed. By using stepwise regression the medium range forecast equations are established. The forecasting results indicated that the equations are efficacious.