

美国业务谱模式预报的系统性误差*

牟惟丰 宋文英

(国家气象局北京气象中心)

提 要

本文对美国业务数值预报图月平均误差分布特点及其季节变化情况进行了考察。

从系统性误差与标准差的比值分布,可以看出需要并适合于进行系统性误差订正的地区。这些地区主要在低纬度。

本文还对1985年4月模式的垂直分辨率和一些物理参数化项目改变前后的预报结果做了比较,又与同期欧洲中期天气预报中心的预报水平情况做了比较。

一、引 言

对数值预报产品进行统计检验以了解其性能和优缺点表现,对其系统性误差加以订正使用,已成为有效提高天气预报水平的重要一环,也是在建立一些客观预报程序时常常需要考虑的。

对数值形势预报比较系统的检验了解,应包含三部分内容,即对月或季平均误差分布情况的了解,对不同种类天气系统的移速和强度等平均误差情况的了解,和在一些特殊天气形势或过程下的特殊误差型式。我们已对欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的数值预报做过比较系统的检验总结^[1-3],但对美国国家气象中心(NMC, U.S.A.)数值预报的检验和应用尚缺乏。美国公开发布的数值预报图层次和项目较多,时效较长,预报水平与ECMWF相比不是相差很多^[4],也许有开发应用价值。本文对美国数值预报的月平均误差分布情况和年变化情况进行统计检验,并为了与ECMWF数值预报便于比较,取与对ECMWF数值预报月平均误差检验总结一文^[1]相同时期的资料,即从1984年5月到1985年4月的一年预报图资料,然后对新近的变化再做些前后期的比较。

在这一年期间美国所用业务模式为12层取40波(棱形截断)的全球谱模式,对该模式的物理内容在D.G.Marks等的文章^[5]中有简要介绍,在T.W.Bettge等的文章^[6]中有谱模式与以前原始方程格点模式主要特征的比较。从1985年4月17日以后,美国业务预报模式又改用新的18层全球谱模式^[7],增加了辐射效应,改变了边界层的参数化处理,增加了地形影响的考虑。

我们将仍沿用以前一些人^[6,8-10]关于系统性误差的定义,以月或季的月平均误差分布做为系统性误差。也与我们对ECMWF数值预报的检验总结一文^[1]一致。

* 本文于1987年2月9日收到,1988年3月3日收到修改稿。

二、500hPa高度预报平均误差随预报时效的变化

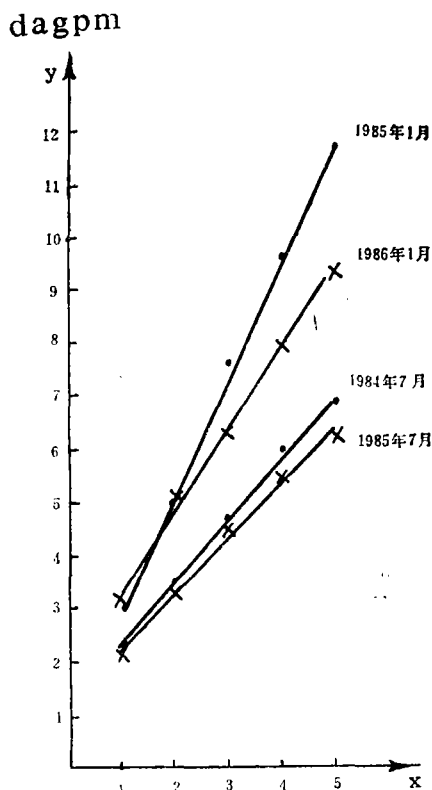


图 1 500hPa预报均方根误差北半球平均值(y, 单位: dagpm)随预报时效的变化(x, 单位: d)

各个主要正负误差区的分布位置随预报时效的变化一般甚小,而误差值的大小在五天之内是随预报时效近于线性增大的。现以7月与1月的均方根误差为代表点出其北半球平均值随预报时效的变化,可以看到误差值在五天内随预报时效的增长非常近于直线关系(图1)。这种情况与以前一些人的结果^[1,11-12]相一致。首先指出这一关系的存在,我们在后文中就可只示出第五天的预报误差分布情况,对其他各天可按比例估量出,并与其他文章中预报时效不同的误差资料也可以进行比较。

三、500 hPa 高度预报平均误差分布与系统的对应关系

许多数值预报的检验文章都指出,许多不同模式预报的平均误差型式常很相似,具有共同特征^[1,9,11-13]。各年之间也有相当大的持续性^[10]。主要的系统性误差是大尺度的,与静止波相联系而不是与

移动性波相联系^[8-10,11],在超长波槽底处多为正误差,脊处多为负误差,这种分布型式使准静止波的振幅变小,因而预报的环流经向不足。

Bettge等(1984)对1981年冬季的全球谱模式预报误差与1979年的半球格点模式预报误差做了比较。全球谱模式消除了原来半球格点模式在低纬存在的较大系统性误差,并使中高纬的误差也明显减小,预报的静止波振幅有所增强,但正负误差区的分布型式仍大致相似,也仍是静止波振幅较实况偏弱。

本文把1984年5月到1985年4月一年中各月的月平均误差分布与该月平均初始场图相对照,可以看到以上一些文章中所指出的共同特征仍然明显存在,即槽区为预报正误差区,脊处为负误差区。现只示出1984年7月与1985年1月的分布图(图2a、2b)来代表冬、夏季情况。此时期所用模式的水平分辨率已从1983年10月起由取30波改为取40波。与上述Bettge等文章中1981年和1982年冬季的误差分布情况相比较,虽然已相隔数年,误差的分布情况仍非常相似,各个主要误差区的强度也大致相近。

对许多不同数值模式都有以上共同性误差特征的原因,尚未见有明确的结论。Wallace等(1983)^[12]曾认为是由于对山脉地形的作用低估了,因此他们把包络地形引入ECMWF

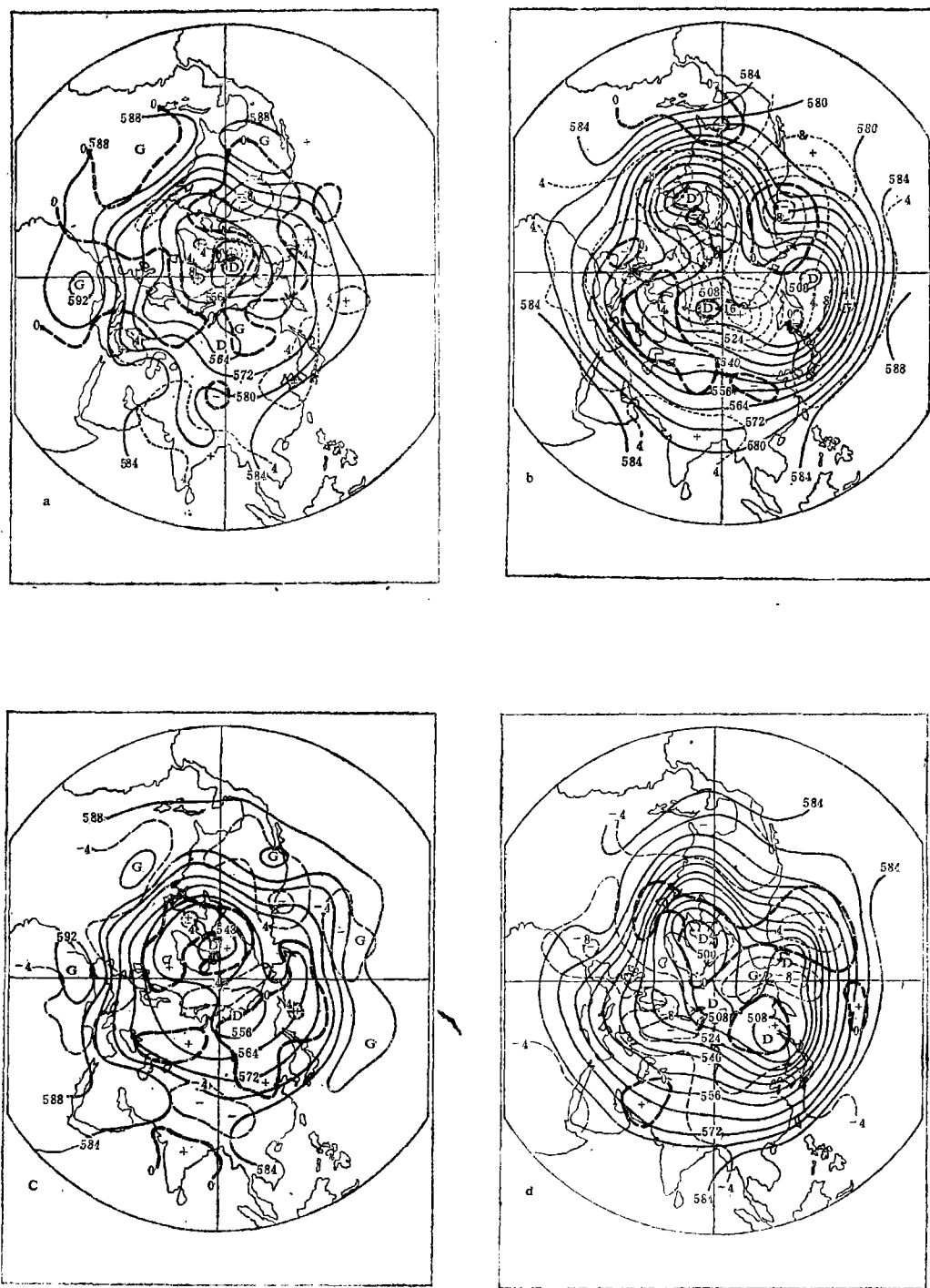


图 2 500hPa月平均初始场(实线)与月平均预报误差场(断线)分布图

(图a,b,c,d分别为1984年7月,1985年1月,1985年7月,1986年1月;预报误差场等值线间隔为4dagpm)

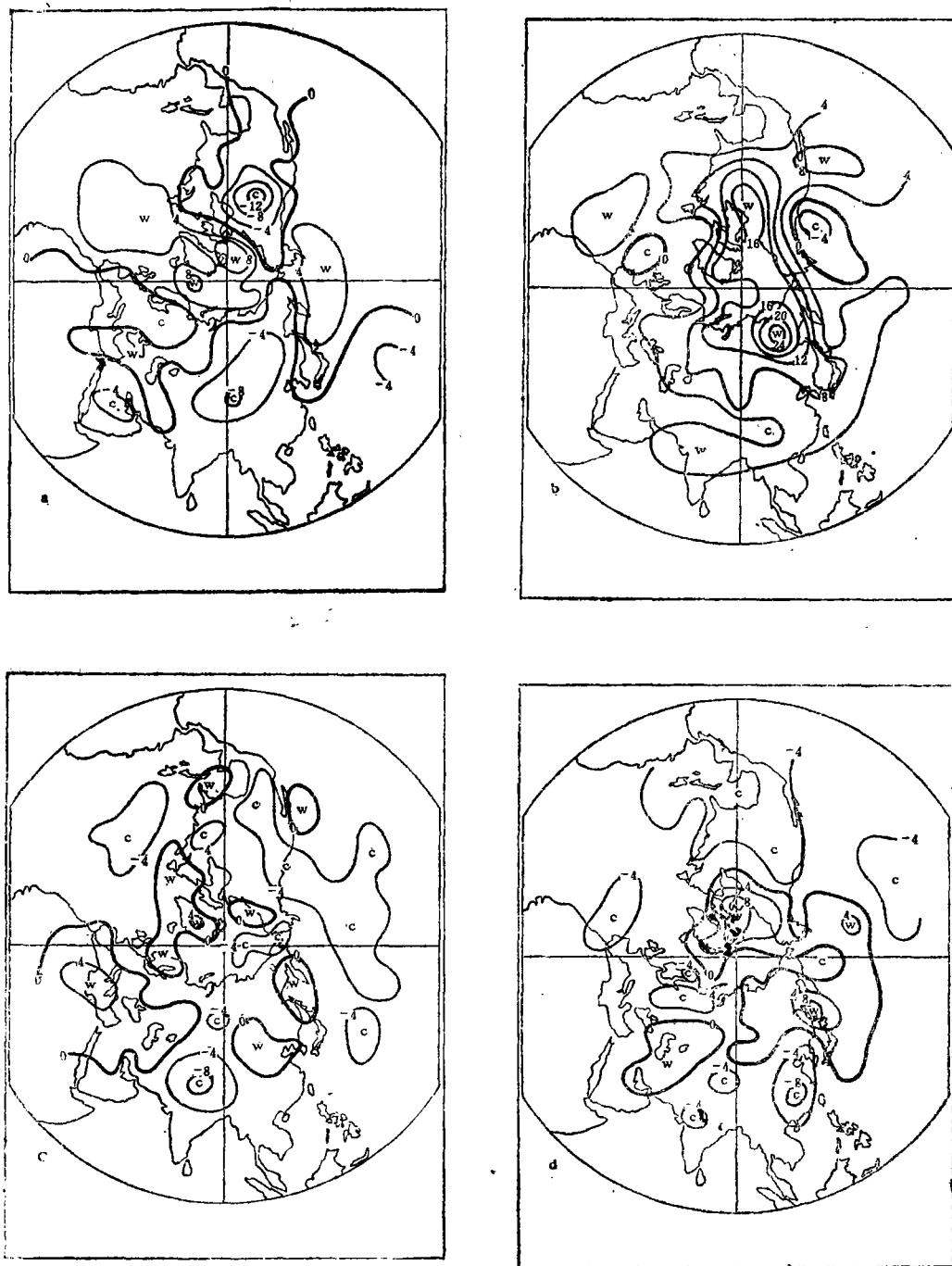


图 3 500—1000hPa厚度预报月平均误差分布图
(C为偏冷中心,W为偏暖中心,其余说明同图2)

的模式进行了试验。Bettge 等也认为对山区地形强迫作用表达不适当可能是许多模式的共同误差来源。Sumi等(1984)^[11]也认为是由于数值模式中对于维持流场静止波部

分的强迫作用不适当所造成的。但Wallace等^[12]引用包络地形以加强地形强迫作用做了一系列试验的结果,对1—4天的短期预报并无改进,相反误差型式在有的地区变得复杂甚至误差加大,而对4天以上的中期预报有明显改进,使后期有效预报可增长半天以上。但引入包络地形与否的误差分布型式仍具有“令人惊讶的相似性”,并未因加大了地形强迫作用而使静止波预报偏浅的特征有明显改变。因而仍应有共同性误差产生的其他原因。

Miyakoda等(1972)^[15]早就发现,“令人惊讶的是,较高的水平网格分辨率可以改进行星波振幅的预报”。Baumhefer等(1978)^[13]也曾推测,“瞬变波预报偏慢和振幅不足可能与截断误差有联系”,而“瞬变扰动对于维持行星波振幅有作用”。由多年来的变化趋势看,一些业务模式的分辨率在不断提高(当然还有许多其他改进),系统性误差在逐步减小,虽然正负误差区与超长波槽脊的位置对应关系并无明显改变,但预报超长波偏浅的程度却在越来越减轻,这反映分辨率的直接间接影响可能与超长波振幅有重要关系。

四、500hPa与1000hPa高度以及500—1000hPa厚度 预报误差之间的对应关系

Bettge等在Bengtsson等(1981)和Wallace等(1983)之后,也指出美国业务谱模式对1981年冬季的预报平均误差具有上下层定性相似的“相当正压”(equivalent barotropic)关系。但从本文各月平均误差图的上下层比较可以看到,虽然一般说来500hPa与1000hPa误差的同号对应区面积可能比反号区稍大些,但这种规律性已不明显。在不同的文章中对反映系统性误差具有“相当正压”关系所用的图表层次有些具体差异,但这些差异对于了解月平均误差的垂直对应关系不应有明显影响。近些年来NMC, U.S.A.业务数值预报模式经过1982年8月、1983年10月和1985年4月的几次改进,系统性误差值在逐步减小,这可能是使其“相当正压”的垂直结构变得不明显的原因。

500hPa高度与500—1000hPa厚度的正负误差区分布总的说来有很好的同号对应关系(由图2与图3相比较可看出),甚至一些正、负区的范围和形状都很相象。而厚度正负误差区与1000hPa高度正负误差区(图略)的对应关系则较乱。

五、平均误差的纬度变化和年变化

点出各月500与1000hPa误差的纬圈平均值随纬度的变化廓线,可以看到这些廓线在逐月之间的变化是很有规律的,为简略起见现只示出四个季的平均廓线。

由图4a可看到,在高纬地区,各季的500hPa预报都明显偏高而1000hPa明显偏低,同时厚度预报明显偏暖。这种误差情况在春季与夏季相对稍轻,秋、冬季最严重。厚度预报误差值较同期ECMWF预报的误差值^[11]大出数倍。与上节对“相当正压”情况的讨论相比较,可以看出对于高纬地区平均来说,500hPa预报越偏高的月份或季节,1000hPa预报一般也越低,上下层基本是反相变化的趋势,并不存在“相当正压”关系,反映主要是热力因素主导了这一变化。

纬圈平均误差值向中低纬减小(见图4a)。中纬度的500与1000hPa平均误差以夏季

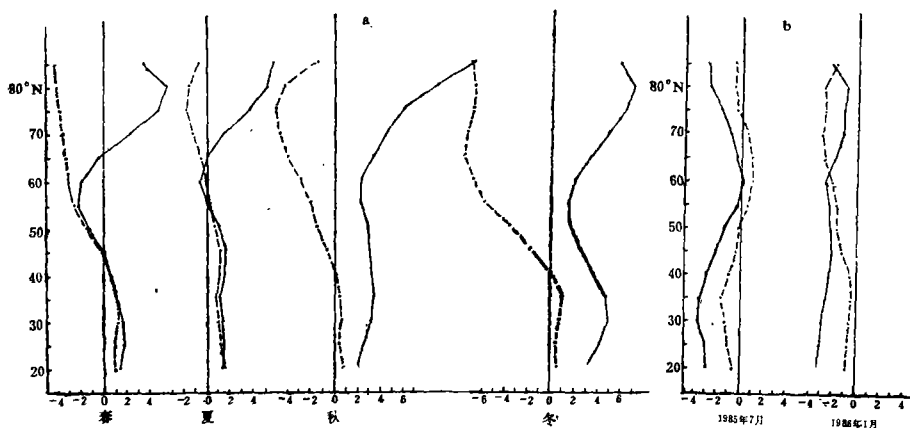


图 4 各季平均误差值(单位: dagpm)随纬度的变化廓线
(实线为 500hPa, 虚线为 1000hPa, a 为模式改变前, b 为模式改变后)

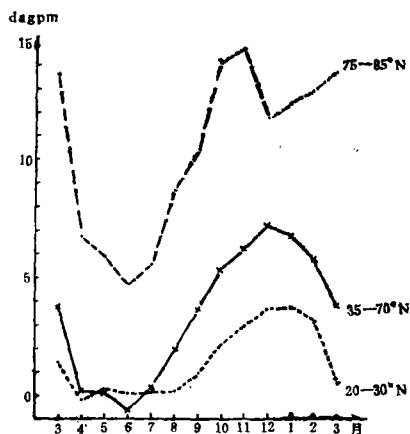


图 5 3 个纬带上厚度预报平均误差值的年变化曲线

最小冬季最大。厚度预报偏暖的大值区从夏到冬自北向南扩伸, 从冬到夏再由南向北收缩, 似与太阳位置的南北季节推移相对应。

在 40°N 以南地带, 纬圈平均的 1000 hPa 误差全年较稳定, 季节变化很小; 500hPa 预报误差春、夏季较小, 秋、冬季加大; 厚度误差的季节变化基本是由 500 hPa 高度预报误差的季节变化造成的。不存在同时期 ECMWF 预报在夏季低纬 500 hPa 高度明显偏低和厚度明显偏冷现象^[1]。

把逐月的厚度预报平均误差分成 $75-85^{\circ}\text{N}$ 、 $35-70^{\circ}\text{N}$ 、 $20-30^{\circ}\text{N}$ 3 个纬带分别求出平均值, 点出各纬带平均的年变化曲线 (图 5)。可以看到 3 个纬带的平均厚度误差都有明显的年变化周期性。 $75-85^{\circ}\text{N}$ 地带的平均误差值各月都最大, $20-30^{\circ}\text{N}$ 纬带平均误差值最小, $35-70^{\circ}\text{N}$ 的广大中纬地带年变化规律性最清楚。

六、厚度预报误差沿纬圈的变化

冬季, 各个经度上的平均厚度误差都是明显偏暖的 (图 6 上图), 整个北半球平均偏暖达 7.2 dagpm, 两大陆所在的经度尤甚, 偏暖达 10 余 dagpm, 两大洋所在的经度偏暖较轻。沿纬圈的变化呈明显的两波型。从图 3 b 上还可具体看到 1 月在北美大陆北部与西伯利亚东部的偏暖区中心强度达 24 dagpm 以上。预报偏暖的程度如此之大, 以及明显的沿纬圈 (海陆) 变化, 都反映主要与未考虑辐射效应^[5,6,16]有关。

夏季, 厚度预报偏暖较小, 整个北半球的平均仅为 1.7 dagpm, 远不像冬季那样严

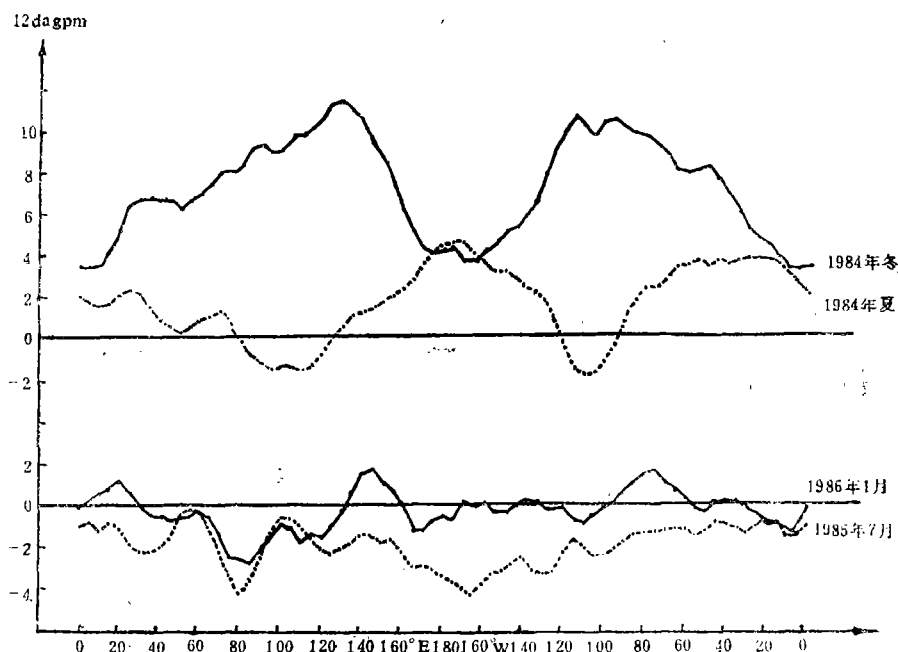


图 6 厚度预报平均误差沿纬圈的变化
(上图模式改变前的情况, 下图模式改变后的情况。)

重。但冬夏平均仍达 4.4 dagpm, 反映年总热量有很大不平衡。

七、1985 年 5 月以后模式预报的改进以及与 ECMWF 预报的比较

从 1985 年 4 月 17 日起美国采用的业务全球谱模式垂直分辨率由以前的 12 层增为 18 层, 增加了辐射效应, 改变了边界层的参数化处理, 增加了地形影响的考虑^[7]。由于这些变化, 模式预报的效果也有了一些变化。现以 1985 年 7 月与 1986 年 1 月分别代表模式改变后的夏季和冬季情况与前期做些比较。

1. 500 hPa 与 1000 hPa 高度预报的均方根误差整个北半球冬夏平均比前期降低了 16% (可由表 1 中数据算出, 可参看图 1)。

2. 在此时期 ECMWF 模式也有一些改变, 从 1985 年 5 月 1 日起模式的水平分辨率由 T 63 (三角截断纬向取 63 波) 改为 T 106, 在物理参数化格式方面也有一些改变。预报效果与改变前相比, 冬夏 500 hPa 与 1000 hPa 平均的北半球均方根误差降低了 6% (可由表 1 中给出的数据算出), 平均误差和标准差也都有大致相近的减小, 改进的程度不如美国显著。

3. 把美国预报的均方根误差与同期 ECMWF 的预报做比较, 各个项目 (500 hPa 或 1000 hPa, 冬季或夏季, 均方根误差或平均误差或标准差) 都是美国大于 ECMWF 误差, 1984 年 7 月与 1985 年 1 月平均的美国预报均方根误差比同期 ECMWF 大 45%, 在模式改进以后的 1985 年 7 月与 1986 年 1 月 500 hPa 与 1000 hPa 平均的均方根误差仍比 ECMWF 大 30% (可从表 1 中数据算出), 但差距已缩小。

表 1 美国前后期水平比较及其与 ECMWF 的比较表

单 位	项 目 年 月	月平均误差 E 120 h	均方根误差 rms 120 h	标准差 σ 120 h
ECMWF	1984年7月500hPa	1.9	5.9	5.1
	1985年7月 500	1.9	5.4	4.9
	1984年7月1000	1.3	3.3	2.8
	1985年7月1000	1.1	3.0	2.7
	1985年1月 500	2.1	8.3	7.7
	1986年1月 500	2.1	8.0	7.3
	1985年1月1000	1.4	5.0	4.6
	1986年1月1000	1.1	4.8	4.5
美 国	1984年 7 月 500	2.7	6.8	5.7
	1985年 7 月 500	2.4	6.2	5.1
	1984年 7 月1000	2.4	5.3	4.1
	1985年 7 月1000	1.6	4.7	3.9
	1985年 1 月 500	5.1	11.7	9.7
	1986年 1 月 500	3.1	9.3	8.3
	1985年 1 月1000	4.1	8.9	7.1
	1986年 1 月1000	2.3	7.4	6.6

4. 平均槽处预报偏高和脊处偏低的情况仍占主要地位,但随着模式的改进和系统性误差的减小,超长波振幅预报偏浅的特征已变得越来越不明显。

5. 500 hPa 高度与厚度预报误差的同号对应关系 仍很明显, 厚度预报误差 分布与 1000 hPa 误差的对应关系仍较乱, “相当正压”的规律性仍不明显。

6. 美国数值模式在改变以后的最突出变化是厚度的预报误差大为减小,特别在冬季高纬地区,原来非常明显的纬圈平均偏暖10余 dagpm 已减小到不过 2—3 dagpm (比较图 4 a 与 4 b), 对应的 500 hPa 与 1000 hPa 误差也相应减小。1 月各个经度上的厚度误差一般只在正负 2 dagpm 之间 (见图 6 下图), 沿纬圈方向的明显海陆变化也已消除。不过在高纬地区平均仍略偏暖, 而低纬已变为略偏冷 (见图 4 b), 反映模式对不同纬度之间的调整并不完全平衡。7 月份的平均误差也同样明显减小, 但各个经度上的厚度预报误差平均值 (图 6 下图) 和各个纬圈的平均值 (图 4 b) 由偏暖都变为略偏冷, 整个北半球的平均值为 -1.8 dagpm, 反映模式对夏季的调整略过。

八、对订正的考虑

本文仍沿用在对 ECMWF 预报的检验总结^[1]时使用过的判据, 以系统性误差(E)与标准差(σ)的比值大小做为判断标准。在系统性误差越大时越需要加以订正; 当各天的预报误差越稳定少变时, 即标准差越小时, 越适于进行订正。于是系统性误差与标准差的比值 (E/σ) 大小可以反映需要并适合于进行订正的程 度。

我们以比值的绝对值 ≥ 1 的区域作为可以考虑进行系统性误差订正的区域; 以比

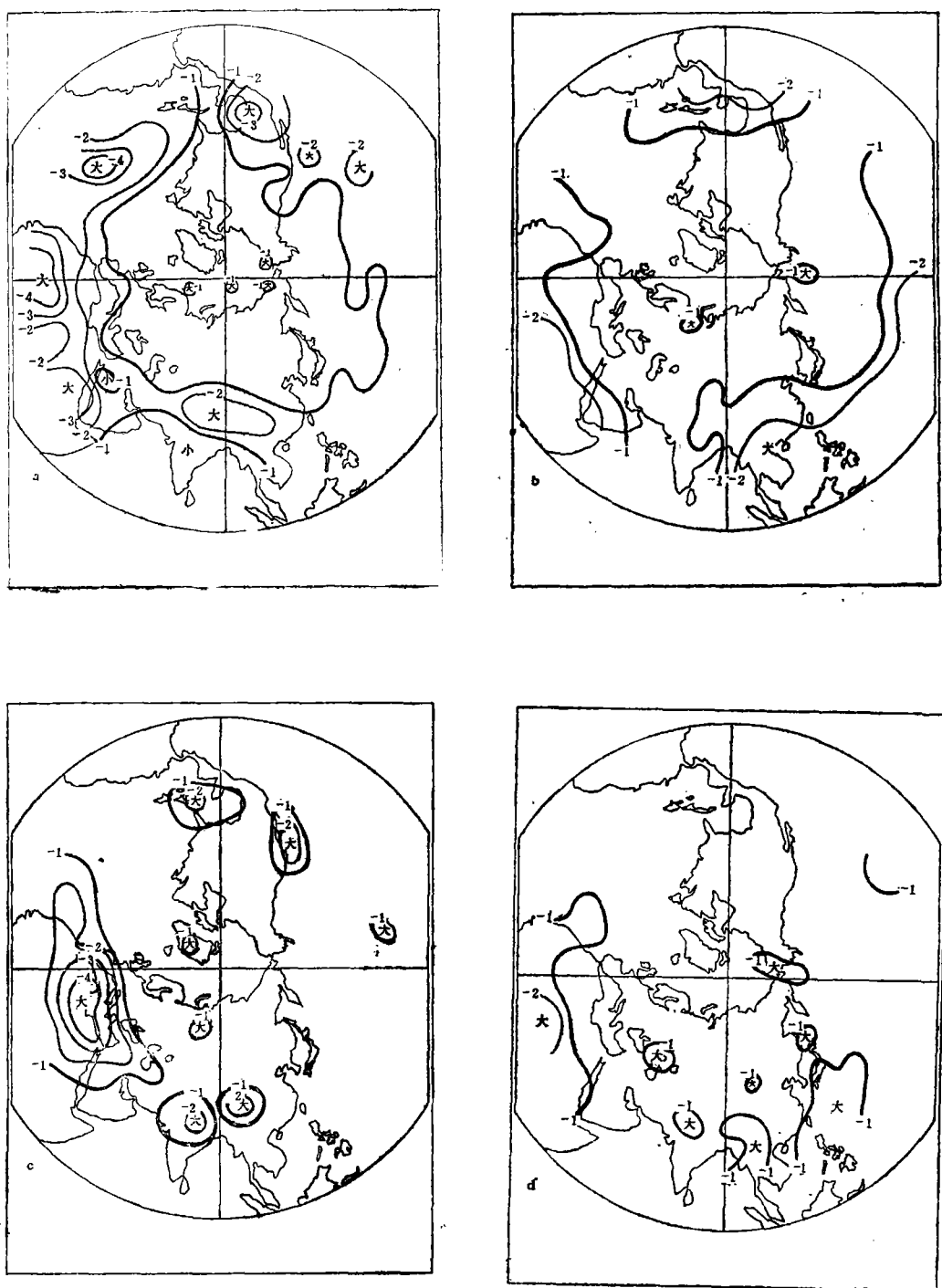


图 7 平均误差与标准差比值分布图

(a, b, c, d 分别为 1985 年 7 月 500hPa, 1986 年 1 月 500 hPa, 1985 年 7 月 1000hPa, 1986 年 1 月 1000 hPa)

值 ≥ 2 , 并且范围也较大, 作为明显适合于进行订正的区域。因为对于比值 ≥ 1 的区域, 在订正消去系统性误差后应有 68% 以上的机会其误差值小于现有误差值。但这个数据是在假定系统误差的历史值或气候值可以完全代表当前情况(实际上逐年之间系统误差分布上的相似性只是大体上的相似, 也有一些取样变化^[12]), 并且总体样本完全遵守正态分布的条件下得出的, 实际上会降低一些。在比值 ≥ 2 的区域, 订正掉系统性误差后应有 95% 以上的机会使误差值减小。对于比值 ≥ 3 的区域, 订正掉系统性误差后应有 99% 以上的机会使误差减小。对于比值 < 1 的区域, 进行系统性误差订正已无意义。

由图 7 a 与 7 b 可以看到, 在模式修改后的 1985 年 7 月与 1986 年 1 月 500 hPa 预报, 中高纬基本都是比值(指绝对值)小于 1 的区域。适合于进行订正的大比值区主要在低纬。其中 1985 年 7 月(图 7 a)在非洲北部、北大西洋 20—30°N 之间地区、墨西哥湾附近、我国青藏高原及其北侧和东侧, 比值普遍 ≥ 2 , 部分地区达到 4 以上, 在这些地区进行系统性误差订正有较大把握使预报得到改进。对我国直接影响比较重要的是西太平洋副高区预报系统性偏低, 和高原及其北侧与东侧的系统性偏低, 可在订正后得到改进。

1986 年 1 月的比值大区同样是在低纬一带, 但数值比 7 月一般要小些, 明显适合于进行订正的地区主要在我国华南西部到西南东部地区。

对于 1000 hPa 预报, 1985 年 7 月最适合于进行订正的地区是非洲北部到地中海一带, 为大范围的比值 ≥ 2 的预报偏低区, 其中还有相当大范围的 ≥ 4 的区域。其次是青藏高原东坡有一块比值 ≥ 2 的预报偏低区。1986 年 1 月, 仅在非洲北部、日本以南洋面、和我国西南地区有比值 ≥ 1 的预报偏低区。

总的说来, 中高纬地区一般已没有明显适合于进行系统性误差订正的地区, 适合订正的地区冬夏 500 hPa 与 1000 hPa 都在低纬附近。其中夏季的可订正区大于冬季, 主要表现在副高地带预报普遍偏低。

九、总 结

1985 年 4 月以前的美国全球谱模式预报有较明显的系统性误差, 500—1000 hPa 厚度的预报误差特别突出。500 hPa 高度预报误差分布与厚度预报误差分布之间有相当好的同号对应关系, 1000 hPa 与 500 hPa 的对应关系规律性则不甚明显, 但仍以同号对应者较多些。

厚度误差在各月都是高纬地区偏暖最多, 中纬次之, 低纬最少。有明显的年变化, 冬季偏暖多而夏季少。厚度误差沿纬圈方向的分布呈明显的二波型, 反映海陆变化。冬季在欧亚大陆的东北部和北美大陆的北部为两大最强偏暖中心, 两大洋区域的偏暖程度则较少。夏季与冬季正相反, 两大洋偏暖多而两大陆偏暖少或出现偏冷。这表现出非常显著的时空变化规律性。引起误差的原因应主要是由于模式中缺乏对辐射物理的考虑。

在模式修改后, 原来巨大的误差已大为减小。1 月北半球平均由偏暖 7.2 dagpm 降为偏冷 0.5 dagpm, 沿纬圈方向的明显海陆变化已基本消除, 冬夏的季节差异也变小。

7 月的误差由以前的北半球平均偏暖 1.7 dagpm 变为偏冷 1.8 dagpm, 似调整略过。由于模式的显著改进, 误差值在减小的同时, 其时空变化规律性也变得较为复杂。但槽底处高度误差多为正误差, 脊处多为负误差, 误差使超长波振幅预报偏浅的倾向仍然存在, 只是程度在减轻。500 hPa 高度预报偏差与厚度预报偏差之间仍保持有很好的同号对应关系, 1000 hPa 与 500 hPa 之间误差对应关系的规律性仍不明显。

在模式修改前后美国模式预报的均方根误差北半球平均值减小了 16%, 同时期 ECMWF 则仅减小了 6%。但美国数值预报水平仍略低于 ECMWF, 1985 年 7 月与 1986 年 1 月的 500 hPa 与 1000 hPa 平均均方根误差, 美国仍比 ECMWF 大 30%。

本文以系统性误差与标准差的比值大小来反映需要并适合于进行误差订正的程度。以比值 ≥ 1 的区域做为可以考虑进行误差订正的区域, 以比值 ≥ 2 做为明显适合于进行误差订正的区域。由比值分布图上可以看到, 适合于进行误差订正的区域基本只限于低纬度。

美国全球谱模式的数值业务预报水平虽比 ECMWF 低一些, 但仍有较好的质量和使用价值, 尤其中纬地带是预报效果最好的地带。低纬附近则许多地区是需要订正使用的。

以往国内对 ECMWF 数值预报图的检验总结大多只限于一个月或一个季节的情况, 对美国数值预报的检验和使用尚缺乏, 本文比较系统地调查了美国业务数值预报误差分布特征的季节变化情况、近期的改进、与 ECMWF 预报水平的比较、以及对订正使用的判断办法, 这对于增进对模式性能的了解和业务应用会有帮助。

参 考 文 献

- [1] 牟惟丰、杨元琴、宋文英, 对 ECMWF 数值预报图月平均误差的检验总结, 气象科学研究院刊, 第 2 卷第 1 期, 24—35, 1987。
- [2] 潘汉明等, 对欧洲中心冬半年 500 hPa 和地面天气系统短期预报的检验, 中央气象台技术报告 8629 号, 1986。
- [3] 欧华千等, 欧洲中心冬季预报产品的检验分析, 中央气象台技术报告 8626 号, 1986。
- [4] 骆继宾译, 数值预报国际评比, 气象科技, 1982 年第 3 期, 9—10。
- [5] Marks, D. G., 谱模式在美国国家气象中心应用一年的统计性能, 气象科技, 1983 年第 5 期, 33—38, (黄文杰译)。
- [6] Bettge, T. W., and D. P. Baumhefner, Total and planetary scale systematic errors in recent NMC operational model forecasts, *Mon. Wea. Rev.*, 112, 11, 2317—2325, 1984。
- [7] 崔玉玺, 国外气象业务的近期变动, 气象, 1986 年第 1 期, 43。
- [8] Fawcett, E. B., Systematic errors in operational baroclinic prognoses at NMC, *Mon. Wea. Rev.*, 97, 9, 670—682, 1969。
- [9] Hollingsworth, A., et al., The performance of a medium range forecast model in winter—Impact of physical parameterizations, *Mon. Wea. Rev.*, 108, 11, 1736—1773, 1980。
- [10] Wallace, J. M., and J. K. Woessner, An analysis of forecast error in the NMC hemispheric primitive equation model, *Mon. Wea. Rev.*, 109, 12, 2444—2449, 1981。
- [11] Sumi Akimasa, and Masao Kanamitsu, A study of systematic errors in a numerical weather prediction model, Part 1: General aspects of the systematic errors and their relation with the transient eddies, *J. Met. Soc. Japan*, 62, 2, 234—251, 1984。
- [12] Wallace, J. M., S. Tibaldi and A. J. Simmons, Reduction of systematic forecast errors in the ECMWF model through the introduction of an envelope orography, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 109, 462, 683—717, 1983。
- [13] Baumhefner, D. P., and P. H. Downey, Forecast intercomparisons from three numerical weather prediction models, *Mon. Wea. Rev.*, 106, 9, 1245—1279, 1978。

- [14] Lambert, S. J., and P. E. Merilees, A study of planetary wave errors in a spectral numerical weather prediction model, *Atmosphere—Ocean*, **16**, 2, 197—211, 1978.
- [15] Miyakoda, K., G. D. Hembree, R. F. Strickler and I. Shulman, Cumulative results of extended forecast experiments: 1. Model performance for winter cases, *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 12, 836—855, 1972.
- [16] Ward, J. H., Systematic errors in the NMC global spectral model, 10th conference (AMS) of weather forecasting and analysis, 341—348, 1984.

SYSTEMATIC ERRORS IN U. S. A. OPERATIONAL SPECTRAL MODEL FORECASTS

Mou Weifeng Song Wenying

(Beijing Meteorological Center, State Meteorological Administration)

Abstract

The distribution of monthly mean errors and its seasonal variations are investigated.

The ratio of monthly mean error to standard deviation is used to find out where the systematic errors should be applied. These areas are mainly in low latitude.

The improvements made after the vertical resolution and some physical parameters had been changed for April 1985 were investigated. The quality of U. S. A. operational model forecasts have also compared with ECMWF.