集合预报最优初值形成的四维变分同化方法

龚建东 * 李维京④ 丑纪范

(兰州大学大气科学系, 兰州 730000; ④国家气候中心, 北京 100081; * 现址: 北京气象学院研究生部, 北京 100081)

摘要 提出一种利用四维变分同化方法吸纳Monte Carlo法具有明确统计意义的特点和滞后平均预报法包含多时刻初值信息的长处, 来形成一组与动力模式相协调的集合预报初值的方法, 以克服初值由Monte Carlo法或滞后平均预报法形成时的不足, 改善集合预报效果. 在已建立的T42谱模式四维变分同化系统基础上, 对6组个例分别进行控制、对比数值试验. 结果表明, 由四维变分同化方法形成集合预报初值的预报效果在旬尺度上要好于滞后平均预报法, 500 hPa高度场旬平均环流的距平相关系数高出0.01~0.04, 均方根误差减小0.2~0.4位势什米.

关键词 集合预报 初值形成方法 四维变分同化方法 数值预报试验

集合预报初值的优劣直接决定随后预报的效果. 已有的预报事实表明, 集合预报初值用Monte Carlo法(MCF)或滞后平均预报法(LAF)形成时, 各有自身的不足[1]. Monte Carlo方法是在一个分析场上叠加小扰动, 构成多个初值成员, 这些小扰动代表了初值误差范围内的各个可能取值. 尽管这种方法具有明确的统计意义, 但它的缺陷显而易见: 它只用了一个时刻的信息, 并且随机选取的初值, 不完全与动力模式协调. 虽然在初始时刻与实际大气靠近, 但由于模式的自身调整往往使预报结果迅速偏离实际大气演变. 作为一种改进, 滞后平均预报法选用前后多个时刻分析场, 这相当于Monte Carlo方法中的初值是用当前时刻以前的分析场积分而来, 而不是随机选取的. 这种方法不仅利用了多时刻资料的信息, 而且初值也与动力模式协调. 但是, 这种方法也有自身固有的缺陷, 所获得的初值(均指Monte Carlo意义下的初值)与实际大气的偏差也远超出初始或观测误差, 由这些初值做预报所得集合的期望与方差也就不具备Monte Carlo方法所具有的统计意义. 目前尚没有一个很好的集合预报初值形成方法. 本文从MCF和LAF这2种初值形成方法的不足着手, 提出利用四维变分同化方法[2~5]来解决这个问题. 该方法利用多个时刻的历史资料, 经由四维变分同化调整来减小初值与实际观测的偏差. 最后形成一组最优初值满足: 一方面它们与实际大气的偏差足够小, 不超过初始误差, 使预报所得的集合具有明确的统计意义, 即描述了初值和初始误差的演变; 另一方面它们包含了多个时刻的历史演变信息, 且对动力模式而言是协调的.

1 试验方法与资料

试验用T42谱模式做控制与对比试验. 集合预报初值先由滞后平均预报法产生, 即用当前时刻 t_0 的客观分析场, 以及当前时刻以前 t_p, $p=-8,-7,\cdots,1$, 间隔6 h共8个时次的客观分析场分别积分至 t_0 时刻, 作为集合预报的9个初值. 将这9个初值的预报结果以简单的平均作为集合预报结果, 由这种方法得到预报结果的试验称为控制试验.

利用四维变分同化方法形成最优初值时, 使用同样的客观分析场作为同化方法的初猜值, 对每个 t_p 时刻的初猜值通过四维变分同化方法进行调整, 使得同化后所得的同化场在 t_p 至 t_0 时刻的预报与相应时刻观测之间的距离最小. 为此, 可定义表征该距离的目标函数为

$$J(X(t_p)) = \frac{1}{2}\sum_{r=p}^{0}[X(t_r) - X^{obs}(t_r)]^T W(t_r)[X(t_r) - X^{obs}(t_r)],$$

式中 t_r 为同化时间区间 t_p 至 t_0 间的某一时刻, $X(t_r)$ 是包含 t_r 时刻上所有模式变量谱系数值的向量, $X^{obs}(t_r)$ 是与模式变量 $X(t_r)$ 相对应的观测场, 试验中取为客观分析场, $W(t_r)$ 是权重系数, 上标T表示矩阵转置. 每个同化场由四维变分同化方法叠代10次获得, 并分别积分至 t_0 时刻. 将同化方法得到的8个初值与 t_0 时刻的客观分析场共9个初值作为集合预报新初值. 由这种方法得到预报结果的试验称为对比试验.

试验首先建立了T42谱模式的四维变分同化系统. 对1998年3~4月每旬做集合预报的控制与对比试验, 共6组试验. 通过考察500 hPa位势高度的逐日与旬平均环流的距平相关系数(ACC)和均方根误差(RMSE)[6]来检验试验效果.

2 结果与讨论

表1和表2示出6个旬旬平均的距平相关系数和均方根误差. 除第4旬外, 对比试验的距平相关系数一般高于控制试验0.01~0.04, 均方根误差减少0.2~0.4位势什米.

图1示出1998年3~4月共6个旬逐日全球500 hPa位势高度环流的距平相关系数和均方根误差. 在预报的前几天, 对比试验的距平相关系数高于控制试验, 均方根误差显著小于控制试验. 随预报时间的增加, 除第4旬同化效果迅速减弱变差外, 对比试验的距平相关系数与均方根误差均接近控制试验, 具有一定的持续性.

表1 6个旬旬平均的距平相关系数

距平相关系数	第1旬	第2旬	第3旬	第4旬	第5旬	第6旬
控制试验	0.69	0.64	0.63	0.45	0.51	0.58
对比试验	0.70	0.68	0.67	0.44	0.53	0.61

表2 6个旬旬平均的均方根误差 (单位: 位势什米)

均方根误差	第1旬	第2旬	第3旬	第4旬	第5旬	第6旬
控制试验	3.80	4.14	4.73	4.72	5.05	5.24
对比试验	3.60	3.77	4.46	4.60	4.63	5.02

试验发现, 对比试验高于控制试验的区域分布主要特征是北半球要好于南半球, 中、高纬要好于赤道和两极, 赤道地区基本没有改善. 这主要和观测资料精度的分布有关, 常规的探空资料主要分布在北半球陆地上空. 海洋和极地上空大气的观测资料要少得多, 所含的信息也少, 相应的同化效果也差. 因而对比试验在这一区域的改善不明显, 赤道地区则和该地区大气运动的特点有关.

相对于控制试验初值成员, 6个个例中对比试验各个初值成员与 t_0 时实况观测资料间均方根误差要小, 表明各个初值成员更为集中, 统计意义明显. 因各个初值成员由模式积分产生, 与动力模式协调. 此外, 对比试验得到的初值是经由同化过程消弱了客观分析场中误差增长最快的部分[7], 因而随后的预报效果也相应得到改善. 对比试验中各个初值成员的预报效果大部分与集合平均相当, 也有对比试验的距平相关系数高于控制试验0.1, 均方根误差小0.5位势什米的例子.

据文献[8, 9] 的观点, 大气对前期的天气演变有一定的自记忆特性, 并且不同尺度波其记忆持续时间有差别. 一般长波、超长波的记忆持续时间要远大于短波. 为此, 在同化过程中着

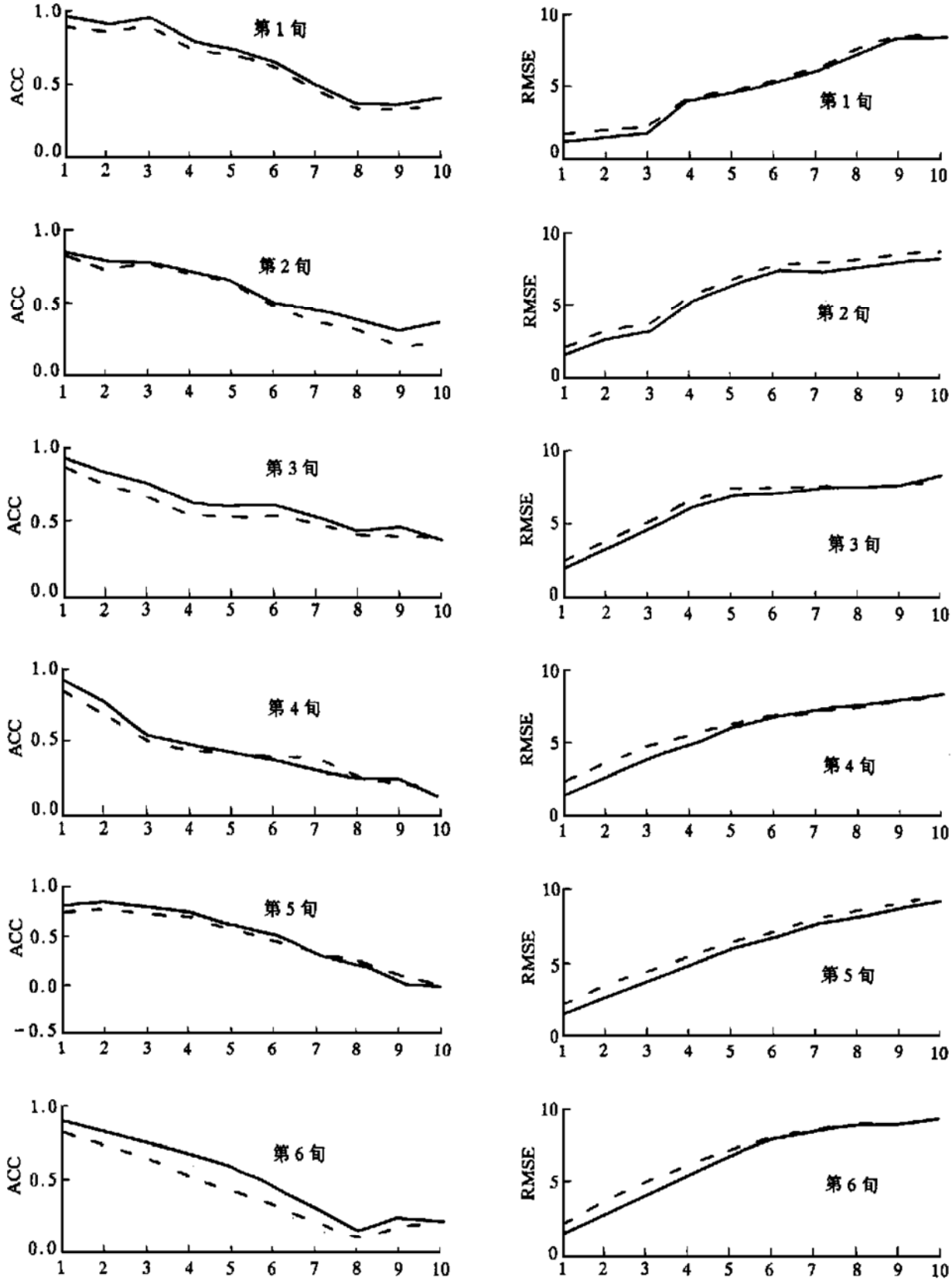


图 1 6 个旬逐日 500 hPa 距平相关系数(ACC) 和均方根误差(RMSE, 单位: 位势什米)
实线为对比试验, 虚线为控制试验. 横坐标表示天数

讨论

长庆气田天然气地球化学特征及奥陶系气藏成因

夏新宇 赵 林 李剑锋 张文正

(石油勘探开发科学研究院地质研究所, 北京 100083) (长庆石油勘探局, 庆阳 745101)

摘要 长庆气田奥陶系气藏天然气虽为高成熟气, 但其甲烷碳同位素组成仍反映出其气源以上古生界煤成气为主. 奥陶系气藏部分样品乙烷碳同位素组成表现出油型乙烷的特征, 主要原因是上古生界煤成气向下运移过程中发生了组分分馏而使煤型乙烷的贡献大为减少. 甲烷碳同位素组成平面分布表明该气藏不是完全连通的"整装"气藏, 上古生界煤成气向下运移方式主要是大面积垂向下渗.

关键词 甲烷 乙烷 碳同位素 天然气成因 长庆气田

长庆气田的主力气藏与奥陶系风化壳气藏的气源普遍认为包括石炭-二叠系煤成气和奥陶系自生油型气, 但对于哪一个是主力气源存在争议. 其中认为下古生界气源为主的观点的主要依据是风化壳气藏中乙烷碳同位素组成($\delta^{13}C_2$) 普遍较轻, 按照用 $\delta^{13}C_2$ 以及 $\delta^{13}C_2$- $\delta^{13}C_1$ 来划分煤成气和油型气的方案, 大多数样品落在油型气范围[1, 2], 与上古生界气源为主的观点在理论上和生产实践上所具有的证据显得矛盾[3~ 5]. 本文将根据长庆气田 170 余个天然气样品组分和碳同位素的资料, 讨论其所反映的地质意义, 以期合理解释该问题.

重考虑了长波、超长波的误差演变, 在目标函数中相应对大尺度波权重取的较大, 而对持续时间很短的中、小尺度波权重取的较小. 试验表明, 这对 3 d 以后预报效果的改善非常有益. 可见, 由四维变分同化方法形成集合预报初值的效果依赖于同化效果的好坏, 而同化过程对目标函数的定义与观测资料的精度和空间分布较为敏感. 试验中观测资料取为客观分析场, 权重系数由经验方法给出, 存在的误差较大. 此外, 四维变分同化方法本身对计算条件有较为严格的要求, 考虑到实际计算条件, 试验中每个同化场由四维变分同化方法仅叠代 10 次获得, 这些对形成初值都有影响. 这可以部分解释第 4 旬对比试验结果不好的原因.

致谢 本工作得到国家气象局国家气候中心预测室多方面的帮助, 在此表示衷心的感谢.

参 考 文 献

1 丑纪范, 郜吉东. 长期数值天气预报. 北京: 气象出版社, 1995. 177~ 180

2 顾震潮. 作为初值问题的天气形势数值预报与由地面天气历史演变做预报的等值性. 气象学报, 1958, 29(2): 176- 186

3 丑纪范. 天气数值预报中使用过去资料的问题. 中国科学, 1974(6): 635~ 644

4 丑纪范. 为什么要动力-统计相结合? ——兼论如何结合. 高原气象, 1986, 5(4): 367~ 372

5 邱崇践. 模式误差对变分同化过程影响的数值研究. 高原气象, 1994, 13: 449~ 456

6 梁益国. 500 百帕位势高度场月季业务数值预报的评估. 应用气象学报, 1997, 8(9 增刊): 154~ 162

7 Pu Z X, Kalnay E, Sela J, et al. Sensitivity of forecast errors to initial conditions with a quasi-inverse linear method. Mon Wea Rev, 1997, 125(10): 2479~ 2503

8 曹鸿兴. 自忆谱模式及其初步应用. 大气科学, 1998, 22(1), 119~ 126

9 谷湘潜. 一个基于大气自忆原理的谱模式. 科学通报, 1998, 43(9): 909~ 917

(1998-06-11 收稿, 1998-09-20 收修改稿)