

海温场的递归滤波分析

王同美 梁必骐

陈子通

(中山大学大气科学系, 广州 510275)

(广州热带海洋气象研究所, 广州 510275)

摘要 递归滤波(RF)是一种属于经验线性插值类的客观分析方法. 因其处理边界和背景场的独特能力以及在计算机处理上的快速便捷优于其他的传统分析方法, 适合于分析诸多资料量大(如卫星资料)、不同来源的不均匀资料. 本文主要发展这一客观分析方法在海温场分析上的应用. 综合利用各种时空分布和精确度均不相同的海温资料, 对几个基本参数的取法进行调试并选取适当的值, 分析得出细网格的海温场. 结果表明, 递归滤波方法不仅灵活简便, 而且分析出的海温场质量好, 基本上可以反映海温的实际情形. 对海温场的分析还可为其他从卫星等提取的非常规资料分析提供借鉴.

关键词 海表温度 递归滤波 非常规资料

中图法分类号: P731.3

1 引言

气象学尤其是热带气象学研究历来重视对海表温度的研究应用^[1]. 准确的海表温度分布及其变化规律的情报对于海洋天气分析和预报以及海洋与大气之间的能量交换研究是非常有用的. 在海气耦合模式中, 海温场的准确性也至为重要. 此外海面温度分布还能用来确定鱼群的位置, 为渔场预报提供信息; 用来绘制海洋流图, 为海上石油开发和海洋科学研究提供资料. 但是我们获得的海温资料的精度和质量因观测手段和分析方法的限制受到很大的影响. 以前所用的海温数据库资料主要依靠商船海洋监测提供, 空间覆盖也仅限于主要的商业航线, 资料相当粗糙^[2]. 随着探测技术的发展及越来越多非常规资料的处理和分析技术的提高, 尤其是使用卫星测量后, 获取准确、覆盖面广、时空分辨率高的海温资料已成为可能. 但是这些资料的密度和精确度都各不相同, 要综合利用各种资料得出质量足够好的海温场, 必须有合适的分析方法.

比较现今业务上普遍使用的较为成熟的分析方法, 如逐步订正法和最优插值法(OI)^[3], 递归滤波(recursive filter, 简称为 RF)有其独特的优点: 它通过观测资料的质量和数量决定局地可变尺度, 使分析场在严格的质量控制下, 逐步逼近观测场. 这种方法属于经验线性插值类, 从严格的统计意义上讲并不是最佳, 但在计算机处理方面, 它具有灵活多变、效率极高的特

本文于 1998-03-10 收到; 修改稿于 1998-09-01 收到.

第一作者简介: 王同美, 女, 25 岁, 助教, 硕士, 从事热带气象研究.

点,用于三维分析时可使各有效层的观测值很容易地插入,比传统方法具有明显的优势,这一点对云迹风分析尤为重要.使用者可以指定观测的权重,通过简单的质量控制,很容易地识别观测值的过失误差并将其权重清零以排除错误数据干扰.此外,产生的可信度场在分析的适用性方面也相当有用.近年来国外很重视这种方法的研究应用^[4~8].国内有关的研究则很少.

本文主要讨论递归滤波分析方法在海温场分析中的应用.综合利用各种时空分布和精确度均不相同的海温资料,对几个基本参数的取值进行调试选取,最后给出细网格的海温场.

2 递归滤波算法简介

2.1 RF 特征尺度

RF 指的是对网格的平滑,其一维基本算法是:

$$A'_i = (1 - \alpha) + \alpha A'_{i-1}, \quad 0 < \alpha < 1, \quad (1)$$

若网格距为 δ , 定义特征尺度 R 表示为

$$R^2 = 2L(\lambda\delta)^2, \quad (2)$$

并得到 R 与平滑参数一个重要的关系表达式(具体推导步骤见文献[4]):

$$R^2 = 2L\alpha\delta^2/(1 - \alpha)^2. \quad (3)$$

在 RF 中, L 和 δ 均为常数,由分析步决定 R 和平滑参数 $\beta = (1 - \alpha)$. 这里假定了无限的边界,并通过选择适当的初始条件,使滤波反复循环的效果大致可抵消实际边界插入产生的谬误的影响.

2.2 网格点调整

每次分析前将观测点资料的影响插值到网格点上.创建两套网格,其一为余差网格: $X_K = W_K(O_K - A_K)$, 表示观测值 O_K 与背景场估测值 A_K 的差异;其二为权重网格: $W_K = QW = Q * W$, 质量系数 Q 与观测值的质量有关, W 为拟资料的可信度,根据资料情况而定,即 W_K 与资料的密度和质量有关.

两套网格均表示一个网格范围内多个观测点的影响在其周围网格点上的累加意义,并且都适于用多重步的递归滤波处理.在 W, X 的网格场确定后,经递归滤波的多重迭代,可给出新的分析场,则第 m 次分析的背景场更新为

$$A^m = A^{m-1} + \frac{\{G * X\}}{\{G * W\}}, \quad (4)$$

这里, $\{G * \}$ 表示对网格点的多次累加、迭代.

2.3 逐步近似与局地可变尺度

对初始步,所有格点的特征尺度均取为初始特征尺度 R_0 , 为可调参数;之后各步的特征尺度(进而是平滑参数)根据周围资料的质量和密度每格点各不相同.对第 m 步,正常的空间尺度 $R_m = R_\infty + S^m(R_0 - R_\infty)$, 取为第 m 步的下限,则有: $R_m \leq R_i \leq R_0$. 其中, $R_\infty = R_0/L$, $S = \left[\left(0.3 - \frac{R_\omega}{R_0} \right) \left(1 - \frac{R_\omega}{R_0} \right)^{-1} \right]^{\frac{1}{M-1}}$ 是决定特征尺度和容忍度变化率的常数.

$$R_i = \frac{f\delta}{W_i^{\frac{1}{D}}}, \quad (5)$$

式中,参数 f 倍乘 δ 以控制平滑的程度,并通过平滑参数影响分析过程; D 为滤波的维数; W_i

与资料的密度和质量有关。

由式(3)可以看到, R 越大则 α 越大, 平滑量也增大, 因此可以说: 资料的密度小 $\rightarrow W_i$ 小 $\rightarrow R_i$ 大 $\rightarrow \alpha$ 大 \rightarrow 平滑量大; 资料的质量低 $\rightarrow W_i$ 小 $\rightarrow R_i$ 大 $\rightarrow \alpha$ 大 \rightarrow 平滑量大。

2.4 质量控制

定义初始容忍度 T_0 为对观测值可容忍的最大误差, $T_\infty = T_0/L$, T_m 是与迭代步有关的容忍度, 取为 $T_m = T_\infty + S^m(T_0 - T_\infty)$, 它随步数 m 增大而减小。在每一个分析里, 给出观测值的质量系数 Q :

$$Q = \left(1 + \left[\frac{(O - A)_K}{T_m} \right]^n \right)^{-1} \quad (6)$$

对超出容忍度的观测值, 只需将其权重清零以去除其影响, 参数 T_0 的取值据不同气象要素的分析及资料情况决定。

2.5 最后质量标识

完成分析后, 附加一步求算最后质量标识。 n 取其初值的一半以提高灵敏度, 容忍度 T 亦取其 $1/2$, 求出质量因子 Q_K , 最后质量标识 $q_K = (Q_K * W_K)^{1/2}$, 并将每一个格点上的值除以全场最大值使之正规化。最后质量标识反映了观测值的拟合程度及其领域分析的质量。

根据 RF 算法, 可以列出递归滤波分析的基本流程图(图 1)。

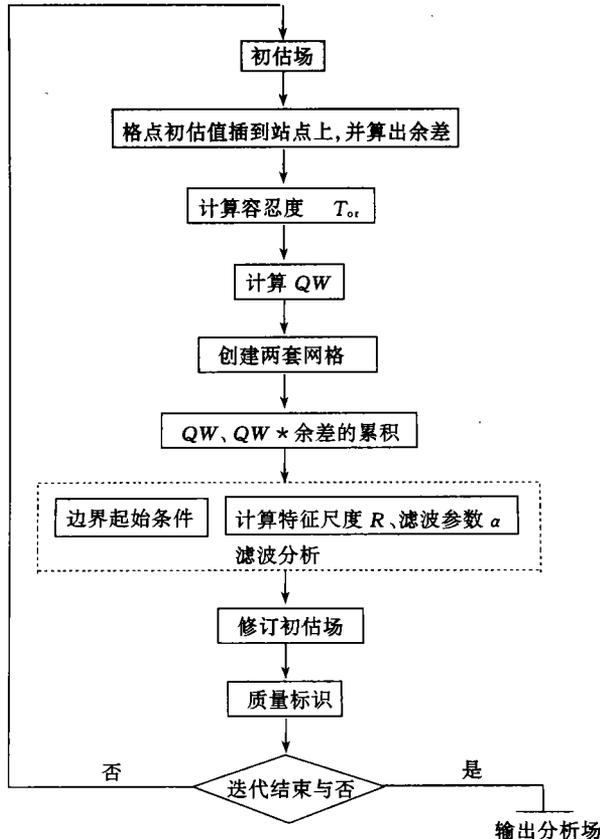


图 1 递归滤波分析基本流程图

3 海温场的递归滤波分析

本文的海温场分析利用了两种观测资料,其一为 GFS 上获取的船舶站点每天 4 次(00 时、06 时、12 时、18 时)的海温观测资料;其二是实时接收静止卫星 GMS5 的红外通道资料(每天 3 次:00 时、06 时、12 时),用经验回归方法估算得到的海温. 初估场通过将 GTS 上传送的 $5^\circ \times 5^\circ$ 全球海温资料用双线性插值法插到 $1^\circ \times 1^\circ$ 的经纬网格上来获取. 这里取范围 $0^\circ \sim 15^\circ \text{N}$, $100^\circ \sim 150^\circ \text{E}$, 通过递归滤波,最后得到每日 4 个时次的 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格海温分析场.

3.1 资料分析方案

为使分析尽可能精确,我们将该时刻之前的观测资料提供的信息更新为现在分析时的信息,从而补充现有观测资料中信息. 由于海温观测值比较稳定,日变化不大,因此在作递归滤波时可将每日 4 次的观测资料作一准同化处理,即除 00 时外,分别用上时刻的分析场作为下一时刻递归滤波的初估场,以期不断将新的观测信息注入到分析场中.

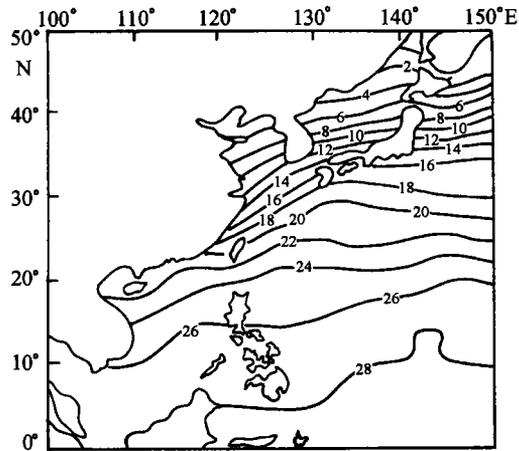


图 2 1997 年 2 月 26 日 GTS($5^\circ \times 5^\circ$)资料插值得到的海温场

3.2 参数调试

根据海温场分析的具体情况,对其中某些参数可以取经验值^[4],这里主要对几个基本参数 f , T_0 , R_0 进行调试,考查其对滤波效果的影响,以 1997 年 2 月 26 日 4 个时次的海温场分析为例,由全球粗网格资料插值得到的海温场如图 2 所示. 可以看出,除 28°C 线有一向北凸起的小暖舌外,海温等值线与纬线基本平行,没有明显的冷暖中心. 试验中将它作为 00 时海温分析的初估场.

取第一组参数($f = 2.0$, $T_0 = 4.0$, $R_0 = 4.0$)时输出海温分析场(见图 3),将它们与各自的初估场相比较,00 时分析场(图 3a)在赤道附近出现一个明显的冷区,这在初估场上是没有的,此处对初估场的订正值达到 -1.5°C . 对照该时刻船舶站观测值,发现对应分析场冷区有一较低温度的值,说明分析与实际情况基本吻合. 初估场 28°C 线上的小暖舌被平滑拉大,等温线上出现一些小波动,并且明显北抬. 图 3b 是以图 3a 为初估场的 06 时海温分析场,两图差异也相当显著,分析场上赤道附近的冷区减弱, 28°C 线断裂为两个闭合中心,在低纬地区形成一西伸的暖舌, 16°C 等温线上暖舌更向北伸. 12 时分析场(图 3c)则在低纬形成更强的暖区,中低纬处出现几个小的闭合中心. 18 时分析场(图 3d)形势也明显比初估场复杂,这是因为参与滤波的信息增加的缘故.

递归滤波对初估场的订正体现在海温值的变化上(图略),在一些资料稀疏的地方,海温场的订正相当大,这是因为资料少,特征尺度 R_m 大,因而平滑量也大的缘故,即资料密度小,则有效资料的影响区域相对较大. 这对从 18 时的分析看尤其明显,由于未用 GMS 卫星反演资料,只有为数很少的船舶站观测资料用来订正(53 个有效值),资料的影响扩散太大,致使分析不够精确,不适合用于细网格分析.

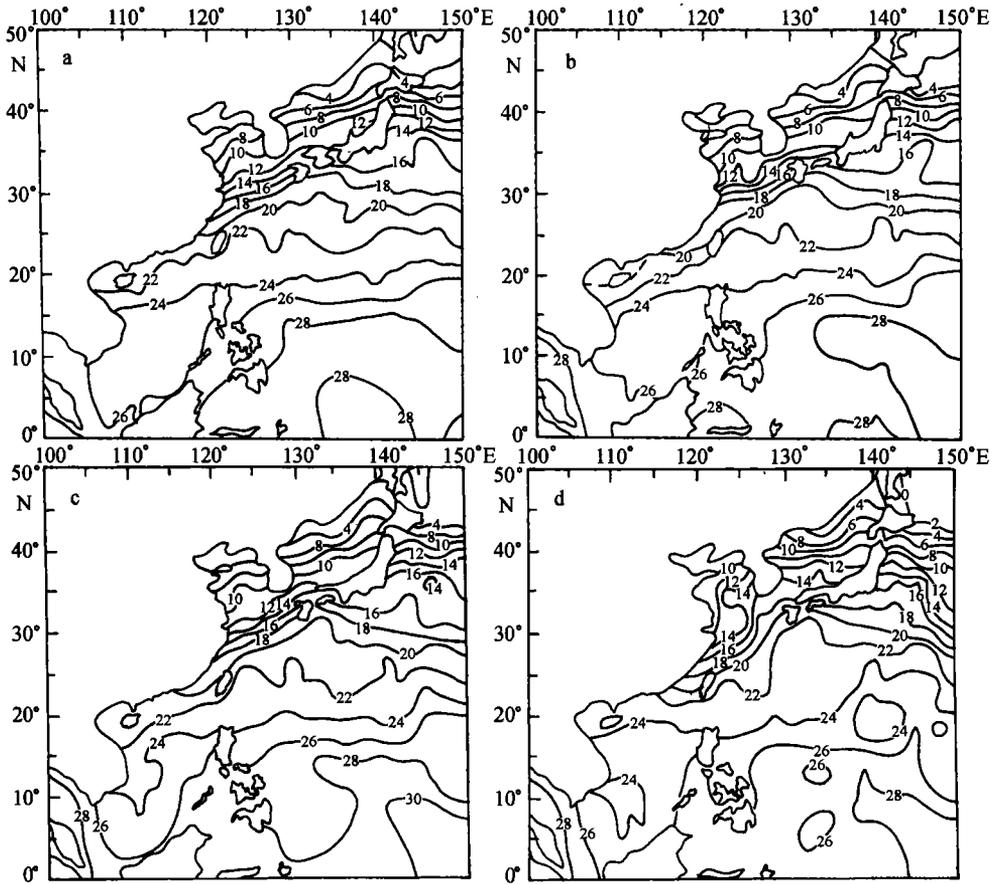


图3 取参数 $f=2.0$, $T_0=4.0$, $R_0=4.0$ 分析 1997 年 2 月 26 日海温场

a. 00 时 b. 06 时 c. 12 时 d. 18 时

为检验分析场的好坏,我们还计算了初估场和分析场与观测值的余差均方差. 结果表明,递归滤波后的均方差分别为 0.34, 0.29, 0.23, 0.18, 比分析之前(1.28, 1.12, 0.18, 3.17)明显减小.

参数 f 倍乘特征尺度 R_m 后,通过影响平滑参数影响分析场. 考查滤波过程中各步的特征尺度,发现 R_m 偏大,多取为上界 R_0 值,因此我们尝试将 f 变小,取第二组参数: $f=1.0$, $T_0=4.0$, $R_0=4.0$ (其他参数不变). 从分析得到的海温场(图略)来看,基本形势与第一组相近,但从海温订正值的分布发现,由于 R_m 变小,相应观测值影响区域变小,在资料密集的地方有一些海温改变值的小闭合区,这说明滤波过程中海温场的平滑量变小,一些小尺度系统信息也反应了出来. 分析场与观测场的余差均方差变为 0.20, 0.18, 0.11, 0.10, 分析效果明显比第一组好. 试验中曾将 f 继续调小以期进一步减小观测值的影响域使分析场更逼近于实测值,但结果表明这样做使某些资料稀疏区得不到很好的订正,效果反而不如 $f=1$ 时理想.

初始容忍度 T_0 也是影响递归滤波的一个重要因子. 它决定递归滤波对资料误差的最大容忍,其后各步分析的容忍度 T_m 也都与 T_0 有关. 容忍度越小,容许资料与背景场的差异越小,即对资料的质量控制越严格,则用于订正背景场的观测值越少. 对于海温场分析,取 $T_0 =$

4.0 时,对资料的控制不够严密,也导致分析场质量不够好.因此在第三组试验中我们将 T_0 减小,取参数 $T_0=2.0$, $f=1.0$, $R_0=4.0$ (其他参数不变),得到的分析场与前两组试验的结果比较,发现 $5^\circ\sim 150^\circ\text{E}$ 处的冷中心消失.这是因为在质量控制加强的情况下,订正过程中剔除了该处一个船基站观测资料的影响.

我们以船基站资料的最后标识来考查 T_0 变化对质量控制和滤波效果的影响.将分析订正中用到的船基站点上插上小旗作为标识,比较取第二组(a)和第三组(b)参数的结果(图略),发现 b 组插上小旗的船基站明显减少,即 T_0 变小使质量控制加强.同时我们也注意到, T_0 若取得太小,则参与滤波分析逐步订正的观测资料变得更少,对背景场的更正会减弱,分析场与观测资料的逼近将变慢并且平滑,有可能会漏掉一些小系统的信息.

对分析场与观测值求余差均方差的分析也表明, T_0 取为 2.0 时,分析效果比取其他值佳(均方差分别为 0.09, 0.09, 0.08, 0.11).事实上,若将 T_0 按经验取为资料标准差的两倍,而本文用到的 GMS 卫星反演资料的标准差接近于 1.0,亦与试验结果相一致.

在第二组试验中曾将 f 值调小以直接减小各步分析的特征尺度.若将初始步的特征尺度 R_0 变小,则在每一步资料影响域的上界减小情况下,可根据资料本身的质量和密度来适当减小其特征尺度,并调节递归滤波的分析效果.取第四组参数 $R_0=2.0$, $f=1.0$, $T_0=2.0$ 后输出的海温分析场(图略)可以看到,尽管 T_0 仍然取小值,但第三组试验中被“剔除”的站点又被用到,这说明在 R_0 变小后,小尺度信息的充分刻划使得几次更正后的分析场与观测场余差渐渐变小,以致在前几步分析中未用到的资料又在容忍度之内,从而对订正起作用.若干试验中,以该组试验的结果近于最好,4 个时次分析场与观测场均方根误差分别为 0.04, 0.05, 0.05, 0.07.

图 4 分别给出了初估背景场与观测值、最后分析场与观测值的匹配结果.可以看出,分析前(图 4a)偏差在 1°C 左右,均方根误差亦达 1.29;而分析后的海温场则与实测资料基本吻合(错误资料除外),平均偏差只有 0.02°C .

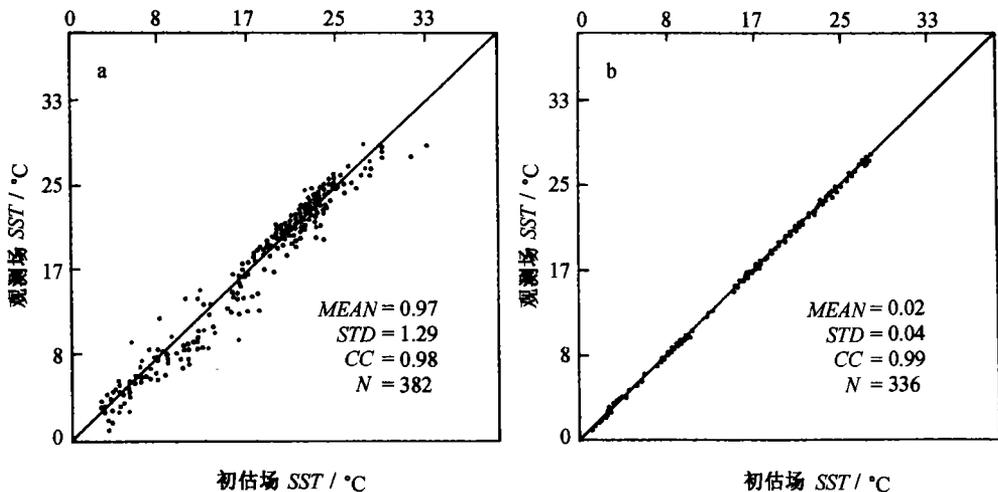


图 4 散点图: 初估场与测值(a)、分析结果与测值(b)的匹配
MEAN: 平均偏差 STD: 均方根误差 CC: 相关系数 N: 样本数

3.3 海温场在分析各步中的变化

文中给出的多组参数调试都是8步分析.事实上,递归滤波分析中间输出的结果表明,对于场中大形势的调整在分析的第一步、第二步已大致完成,后面各步的分析只是实现一种类似“微调”的对细微处刻画.取第四组参数实验时,发现分析4步后输出的海温场同3.2中第四组试验结果相当接近.计算分析场与观测场余差的均方差也表明,分析四步得到的场效果甚至比取第三组参数分析8步的效果还好(均方差分别为0.06, 0.07, 0.07, 0.13),这说明分析的质量更大程度上取决于对参数的选取.如果参数取得好,那么即使分析步不多,也比取不恰当的参数分析多步的效果好.这从另一方面说明了若参数取得好,不仅可以提高分析效果,而且在一定程度上提高分析的速度.

在取相同参数的情况下,调节分析步数的结果表明,在综合考虑分析场质量、分析速度等因素的前提下,对于海温场的递归滤波,以分析8步比较适宜.

3.4 初估场质量对分析的影响

为考察初估场质量对分析质量的影响,选用2月4日的全球粗网格背景场(图略)作为26日00时的初估场作分析试验.与图2比较,4日海温比26日明显偏低.4日背景场与观测值的余差平均值为 2.07°C ,而同一时刻(26日)的全球粗网格海温资料,余差平均值只有 0.97°C .显然,用4日资料产生26日分析的初估场,其质量比用26日的资料差许多.

然而试验结果却发现,尽管初估场质量不很理想,输出的分析场却并不那么糟糕.尤其是00时以后的几个时次,由于海温场已包含有00时的若干信息,用它作为下一时刻的背景场,效果就相当理想了.计算余差均方差,00时在分析之前(初估场与观测值)为2.378,分析后则为0.05.说明RF在很大程度上能排除较差的初估场的影响,而对资料的准同化处理将使这一初估场对后面时次分析的影响更小.

不用初始猜值场的分析试验(可看作是初估场质量非常差)发现,分析出来的海温场与观测值有很大差别,特别是在某些边界区域,海温等值线非常密集,甚至重合为一条粗线.这是因为在边界一些资料贫乏区,观测值与背景场差异过大,其影响无法延及,相应分析效果也就很差了.

4 结果与讨论

将递归滤波运用于海温场分析的研究表明,用这种易行可信的分析技术,得到的分析场时空分辨率高、质量较好,能基本反映海温的实际情况,可应用于数值模式中以及作为天气分析与预报的辅助资料.利用本文发展的方法还可以分析出时空分辨率更高的其他气象要素场.

递归滤波客观分析方法最近10年来始应用于对各种气象资料,尤其是非常规资料的处理加工.它对资料的处理是根据资料本身的质量和数量来决定一些与滤波直接有关的参数,因而具有很大的灵活性,同时算法又相当简便快捷,在小型计算机甚至一般微机上都可运作.但正因其灵活多变、伸缩性较强的特点(可变且相互关联的参数极多),掌握并决定参数的选取比较困难.本文在诸多试验的基础上,对海温场分析的基本参数,如网格尺度、平滑参数、误差容忍度等作了适当的选取,得到一些颇有意义的结果.

长期以来,对沿海及海上的天气分析研究都因海上测站稀少、资料贫乏而受到极大的限制.随着大气探测手段的发展,现在不仅有来自全球各地的探空站、地面站、测风站大量常规

观测资料,而且还越来越多地收集到各种非常规探测信息,而电子计算机的发展使得分析并充分利用这些信息成为可能,这对提高天气分析和预报起着重要作用.同时,根据这些资料揭示的现象,我们可以更进一步对大气运动的特征、规律及机制作研究.目前正在进行的对其他卫星资料的提取及应用,如分析地表参数、云迹风、水汽廓线、积雪覆盖、植被、地表反照率等等气候模式所需参数及其他一些生物海洋参数,都需要一种适合的加工处理方法,RF在海温场分析中的尝试或可为之提供有益的借鉴.

参考文献

- 1 梁必骥,王同美,陈子通等.热带气象学.广州:中山大学出版社,1990.335~362
- 2 罗滨逊 I S 著.卫星海洋学,吴克勤等译.北京:海洋出版社,1989.157~216
- 3 张玉玲,吴辉砦,王晓林.数值天气预报.北京:科学出版社,1986.380~432
- 4 Hayden C M, Purser R J. Three-dimensional recursive filter objective analysis of meteorological fields. In: Preprint of English Con. for Numerical Weather Prediction, Baltimore, MD Amer Meteor Soc, 1988. 185~190
- 5 Purser R J, McQuigg R. A successive correction analysis scheme using recursive numerical filters. Met. oll Tech. Note No. 154, British Meteor Service, 1982. 17
- 6 Hayden C M, Purser R J. Applications of a recursive filter, objective analysis in the processing and presentation of VAS data. In: Preprints of the 2nd Conf. on Satellite Meteor. /Remote Sensing and Applications, William Sburg, VA, AMS, 1986. 82~87
- 7 Hayden C M. GOES - VAS simultaneous temperature - moisture retrieval algorithm. J Appl Meteor, 1988, 27: 705~733
- 8 Hayden C M. Recursive filter objective analysis of meteorological fields; applications to NESDIS operational processing. J Appl Meteor, 1995, 35: 3~15
- 9 Hayden C M, Velden C S. Quality control and assimilation experiments with satellite derived wind estimates. In: Preprint of Ninth Conf. on Numerical Weather Prediction, Denver, CO, Amer, Meteor Soc, 1991. 19~23
- 10 Sasaki Y. Some basic formalisms in numerical variational analysis. Mon Wea Rev, 1970, 98: 875~883

The recursive filter objective analysis of sea surface temperature fields

Wang Tongmei, ¹ Liang Biqi, ¹ Chen Zitong ²

1. Department of Atmospheric Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275

2. Guangzhou Institute of Tropical and Oceanic Meteorology, Guangzhou 510275

Abstract— The recursive filter objective analysis method is falling in the category of empirical linear interpolation. It is a “successive approximation” system with the particular feature of locally varying scaling, making it especially appropriate for dealing with heterogeneous data. Attention is given to proper treatment of lateral boundaries, which permit its use in limited domains. This system provides estimates of input data quality that can be used for editing datasets before their distribution and for the weighting of data in application by other users. The application of this method for sea surface temperature fields is described in details here.

Key words Sea-surface temperature, recursive filter, abnormal observation data