

复经验正交函数方法在黄海水温 预报中的应用*

李繁华 尹逊福 王宗山 曾宪模

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛)

摘要 本文介绍了复经验正交函数(CEOF)方法, 并首次将其应用于黄海的水温预报, 同时与依据同样资料采用经验正交函数(EOF)方法所作的预报进行了对比. 比较可知, 在黄海表层水温预报中, 应用复经验正交函数方法所作的预报, 其精度较应用经验正交函数方法提高 0.20°C 左右, 底层预报精度相当.

关键词 复经验正交函数 预报量 预报因子 预报时效

前 言

统计预报方法, 是根据预报量及预报因子的历史资料的统计规律通过外推实现预报的. 对于海水温度的统计预报, 目前已由既不考虑水温量之间的内在联系, 又不考虑外界因子影响的单站预报方法, 发展到二者同时考虑的场预报方法, 如优选因子场预报方法和正交综合因子场分解预报方法^[1,2]. 这两种场预报方法均采用了经验正交函数(EOF)方法. 其正交分解后的新的预报量(或预报因子)所包含的信息是彼此独立的, 而且其全体包含原预报量(或预报因子)的全部信息, 这既考虑到预报量之间的内在联系, 又符合统计预报所要求的预报因子之间相关性要小的原则, 因而较其他方法明显地提高了预报精度.

复经验正交函数(complex empirical orthogonal function, 简称 CEOF), 是由 Barnett 于 1983 年提出的一种能从要素场的时间变化中识别空间尺度行波和驻波的方法, 并已应用于天气过程的诊断分析中^[3]. 在天气过程诊断分析中, 对于局部地区或空间点分布不规则的范围, 应用交叉谱分析十分困难, 而经验正交函数(EOF)只能描述空间波动的驻波振动, 则复经验正交函数(CEOF)可以兼顾上述两种方法的优点, 作为一种新的工具近年来在天气过程诊断分析中得到应用.

众所周知, 海洋通过海面吸收太阳的辐射热量, 但同时又与大气进行热量交换, 因而水温的变化与大气具有直接的关系, 而且其变化规律与大气具有诸多相似之处, 故本文在吸取上述两种经验正交预报方法的优点的基础上, 将复经验正交函数应用于黄海的水温预报, 期

本文于 1994-05-18 收到, 修改稿于 1994-11-15 收到.

* 山东省科学技术委员会资助项目.

望进一步提高预报的精度.

1 预报方法概述

复经验正交函数预报方法与经验正交函数预报方法的主要不同点是将会要素场及预报因子场的实时间序列构成复时间序列, 并进行复经验正交分解.

1.1 复时间序列的构成

设有一个预报量(水温量)或预报因子的复时间序列为

$$U_j(t) = u_j(t) + i\hat{u}_j(t), \quad (1)$$

其中, t 为时间变量, j 为空间点数. 其实部 $u_j(t)$ 为原实数序列, 虚部 $\hat{u}_j(t)$ 可用 Hilbert 变换构成:

$$\hat{u}_j(t) = \sum_{I=-\infty}^{\infty} u_j(t-I)h(I), \quad (2)$$

$$h(I) = \begin{cases} \frac{2}{I\pi} \sin^2\left(\frac{\pi I}{2}\right), & I \neq 0, \\ 0, & I = 0. \end{cases}$$

若从频率域方面来看, 其复时间序列可写为

$$U_j(t) = \sum_{\omega} C_j(\omega) e^{-i\omega t}, \quad (3)$$

式中, $C_j(\omega) = a_j(\omega) + ib_j(\omega)$, ω 为频率, $a_j(\omega)$, $b_j(\omega)$ 为傅氏系数. 展开后, 其新的复数形式为

$$U_j(t) = \sum_{\omega} \{ [a_j(\omega)\cos\omega t + b_j(\omega)\sin\omega t] + i[b_j(\omega)\cos\omega t - a_j(\omega)\sin\omega t] \},$$

那么, $U_j(t)$ 的实部为

$$u_j(t) = \sum_{\omega} [a_j(\omega)\cos\omega t + b_j(\omega)\sin\omega t], \quad (4)$$

其虚部可表示为

$$\hat{u}_j = \sum_{\omega} [b_j(\omega)\cos\omega t - a_j(\omega)\sin\omega t]. \quad (5)$$

式(2)是 Hilbert 变换在时域上的表现形式, 由此方法构成复时间序列的方法称为卷积方法; 式(5)是 Hilbert 变换在频域上的表现形式, 其复序列是通过求傅立叶系数 $a_j(\omega)$, $b_j(\omega)$ 得到的, 这种方法称为直接方法. 根据实测资料, 依据任何一种方法均可构成复时间序列.

1.2 复经验正交分解

水温场或预报因子场各空间点变量两两的复相关系数组成的复相关矩阵可依下式建立:

$$R_{jk} = \langle U_j^*(t)U_k(t) \rangle_t, \quad (6)$$

其中, $*$ 表示共轭复数, $\langle \dots \rangle_t$ 表示对时间的平均. R_{jk} 是 Hermitian 复相关矩阵, 是复数意义下的对称阵, 即 $R^{*'} = R$, R^* 为 R 的复共轭阵, “ $'$ ” 表示矩阵的转置. 如 R 是 m 阶 Hermitian

矩阵,则一定存在 $m \times m$ 西矩阵 V ,使 $V^*RV=D$, D 是实对角阵,因此由一般的线性代数计算即可得到 R 的实数特征值 λ_n 和对应的复特征向量 $V_n(j)$ (n 是各模态的编号, j 为空间点).

类似于经验正交分析,可得到对应于不同的 R 特征值的复时权系数.如对于第 k 个特征值的复时权系数,可由空间点变量的复时间序列与第 k 个复特征向量求得:

$$P_k(t) = \sum_{j=1}^m U_j(t) V_k(j). \quad (7)$$

若提取前 n 个复时权系数及复特征向量,则可给出随时间变化的恢复场:

$$\tilde{U}_j^n(t) = P_n(t) V_n^*(j). \quad (8)$$

1.3 水温场的预报

一般而言,水温场的复特征向量 V_n 在短时间内几乎是不变的.这样,可通过预报水温场未来时刻的复时权系数 ${}_{m+1}P_n$,再乘以水温场的复特征向量 V_n ,即可得到未来时刻 $(m+1)$ 水温场的预报.

由于复正交函数展开场的一个突出优点是收敛快,在水温场及预报因子场复正交分解后,如分别选取两个场的复时权系数的前几项 ${}_mP_v$ 和 ${}_mE_q$ (v, q 为选取项数),并将其视为线性相关,采用逐步回归建立实部与实部、虚部与虚部的统计关系,从而得到水温场未来时刻的复时权系数的实部和虚部的预报方程

$$P_{m+1,j} = a_{0j} + \sum_{i=1}^{s_j} a_{ij} e_{m+1,I}, \quad (j = 1, 2, \dots, v) \quad (9)$$

式中, a_{0j} 为常数项, a_{ij} 为回归系数 [$i=1, 2, \dots, s_j$, 为选入的时权系数的因子个数,对于不同的 j , 其个数不同, I 为第 i 次选入所对应的时权系数的因子标号, $I=f(i)$], $e_{m+1,I}$ 为近期预报因子复时权系数项.最后得到预报方程式

$${}_{m+1}U_n = {}_{m+1}P_n V_n, \quad (10)$$

取其实际部,为水温预报值.

2 预报实施方法

2.1 水温场构成及预报因子场的选配

由于黄海的范围广,水温分布和变化的区域差异较大.为了提高预报效果,根据其区域特征,将黄海分为北黄海区 and 南黄海区(以 37°N 为界),两区各选 7 个站分别组成水温场(见图 1).依据资料状况,尤其考虑到未来资料获取有保障,选取了这些站 1975~1988 年的标准断面水温调查资料组成水温预报量,并统一订正到每月的 15 日(月中值),其纵向序列最多为 14a.

海洋中局地水温的变化取决于局地的热量收支,而影响热收支的因素有太阳辐射、水温、气温、水气温差、风和云量等.对于统计预报而言,除这些直接影响因子外,还应考虑间接影响因子,如大气环流形势、天文因子等.根据黄海的情况,初步选取了 130 余个影响因子

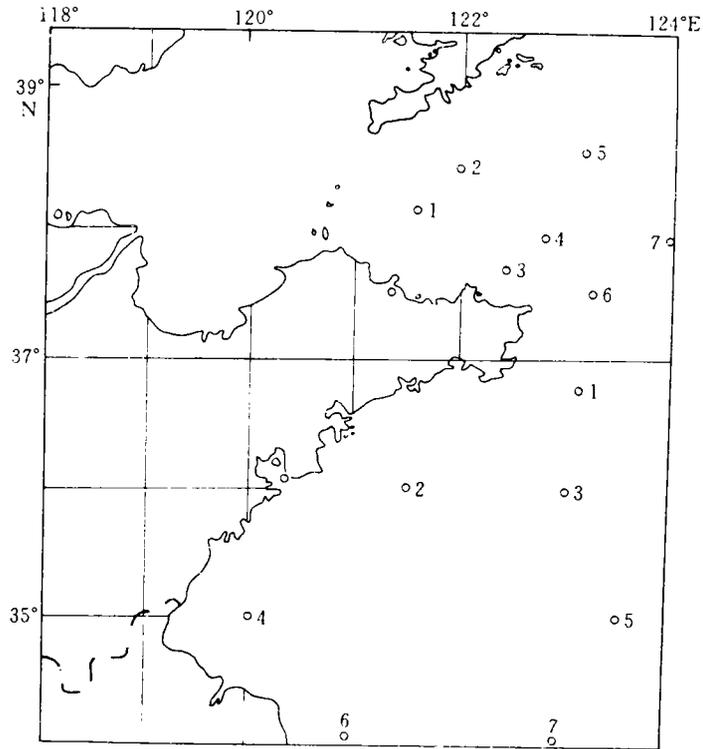


图1 预报站位图

作为其预报因子,且一般取其月平均值.为了使预报因子与水温之间的关系更加明确,将初步选定的因子分为两组,一组用于北黄海的水温预报,有70个因子;一组用于南黄海的预报,有62个因子(见表1).

因为统计预报要求预报因子之间的相关性越小越好,而预报因子与预报量(水温)之间的相关性越大越好,根据前人的经验,为避免相关性差的因子参与复正交分解产生不良影响,在复正交分解之前对预报因子场进行选配.其方法是求取水温场的距平平均值,将其与用于该海区初步选定的前1个月的预报因子进行相关普查(预报时限为1个月),选取相关系数较大者组成预报因子场.考虑到所选取的因子要适量,每次进行场的选配时,根据各月的具体情况确定相关系数的下限.一般而言,相关系数普遍较大的情况下,其下限要取大一些.

2.2 复经验正交分解及建立预报方程

在水温场构成和预报因子场选配之后,应用傅立叶方法(直接方法)分别组成水温场和预报因子场的复时间序列矩阵(预报因子场要考虑到近期因子),并按上面介绍的方法进行复经验正交分解,便得到两个场的复时权系数,然后分别提取复时权系数的前几项,采用逐步回归分析建立实部与实部、虚部与虚部的统计关系,按式(9)预报水温场未来时刻的复时权系数的实部和虚部,并按式(10)乘以水温场的复特征向量,便得到未来时刻的复水温场.取其实部,即为水温场的预报值.

表1 预报采用因子

北 黄 海		南 黄 海	
老虎滩	月平均气温 月平均水温 月平均水气温差 月平均风速 月南向风速 月北向风速 月大风日数	成山角	月平均气温 月平均水温 月平均水气温差 月平均风速 月北向风速 月南向风速 月大风日数
秦皇岛		石 岛	
龙 口		千里岩	
北隍城		小麦岛	
烟 台		石臼所	
成山角		连云港	
石 岛			
塘沽月大风日数			
副热带高压	月平均面积指数 月平均强度指数 月平均综合指数 月平均西伸脊点 月平均脊线 月平均北界	副热带高压	月平均面积指数 月平均强度指数 月平均综合指数 月平均西伸脊点 月平均脊线 月平均北界
太阳黑子相对数		太阳黑子相对数	
亚洲地区月平均经向和纬向环流指数		亚洲地区月平均经向和纬向环流指数	
青岛 700 hPa 月平均气温		上海月平均气温和风速	
弯弯沟、烟台、威海、石岛、长岛、		青岛 700 hPa 月平均气温	
成山角月日照量		石岛、成山角、日照、青岛月日照量	
黄河、辽河、鸭绿江、长江月径流量		黄河、辽河、鸭绿江、长江月径流量	

3 预报结果讨论

根据整理后的标准断面水温调查资料及预报因子资料,对1986~1988年南、北黄海区的表、底层水温进行了几个月的预报试验,同时根据同样的资料采用“正交”方法进行了预报,以作对比分析.在进行预报因子场的选配时,相关系数所取下限的范围为0.4~0.6,每次挑选上的因子为10个左右,且有较明显的规律;在春、夏季表层水温预报中,相关性较好而被选上的因子多是沿岸水文站的表层水温、气温、水气温差、风速等因子,而在10~12月,副高指数、环流指数等与大气环流有关的因子被选上的次数较多;在底层水温预报中,除上述因子外,大风日数也是主要预报因子,它是风扰动程度的标志,直接关系到底层水温的变化.在进行复正交或正交分解后,进行回归分析时均提取复时权系数或时权系数的前5项,其逼近原场的程度均超过95%.在利用逐步回归建立预报方程时, F (阈值)取2.0左右.

表2为采用前1个月的因子分别用“正交”和“复正交”方法所作的预报时限为1个月的水温纵向预报结果.可以看出,北黄海表温预报,采用“正交”法,其均绝差(均绝差= $\sum |预报量 - 实况值|/n$)为0.26~1.59℃,总体均绝差为1.04℃,而应用“复正交”方法,

其总体均绝差为 0.79°C ，提高 0.25°C ；南黄海表温预报，采用“正交”法的总体均绝差为 0.72°C ，用“复正交”方法的总体均绝差为 0.54°C ，提高 0.18°C 。总起来说，利用“复正交”方法预报表温比用“正交”方法精度提高 0.20°C 左右。底层水温预报，两者的预报精度相差不大。另外还可看出，凡应用“正交”方法预报较差的月份，应用“复正交”方法的预报效果均比较好。

表2 “复正交”与“正交”预报结果对比

海域、要素	预报时间	“正交”预报均绝差	“复正交”预报均绝差
北黄海表温	1986-06-01	0.26	0.35
	1987-06-01	1.59	1.41
	1986-07-01	1.32	0.62
	1986-11-01	1.45	1.12
	1986-12-01	0.56	0.47
平均		1.04	0.79
北黄海底温	1986-07-01	0.94	0.94
南黄海表温	1987-05-01	0.76	0.61
	1988-05-01	0.55	0.27
	1986-12-01	0.76	0.61
	1986-07-01	0.80	0.65
平均		0.72	0.54
南黄海底温	1986-07-01	0.25	0.27

目前，CEOF方法在气象学研究方面已有大量应用，但在海洋学上则首见于 White 等人 (1987) 将其用于 ENSO 事件的预报上^[4]。本文首次将该方法应用于水温预报，而且得到较为满意的结果。究其原因，从方法本身来看，经验正交函数的本征向量仅能反映温度分布的驻波性质，而复经验正交函数则还能反映温度波的传播，即海洋中的热平流效应；从海洋的实际情况看，上层海洋的平流远大于底层，因而其热平流也大于底层，因而应用该方法预报表层水温，其精度有明显提高。当然，上述物理机制，尚待进一步探讨。

参考文献

- 1 苏育嵩，苏志清. 考虑影响因子的经验正交预报方法的研究. 海洋与湖沼, 1980, 11(3): 189~203
- 2 杜碧兰等. 表层海水温度场的正交综合因子场分解预报方法. 海洋学报, 1982, 4(2): 149~156
- 3 周发瑛, M L Pan. 冬季东亚主要行星尺度环流分量的时空特征及其相互作用. 山东海洋学院学报, 1987, 17(2): 25~35
- 4 White W, S Pazan and M Inoue. Hindcast/forecast of ENSO events based upon the redistribution of observed and model heat content in the western tropical Pacific, 1964~86. J. of Phys. Oceanogr., 1987, 17(4): 264~280