

时空结构对短期气候预测影响的初步分析

王革丽 杨培才 吕达仁

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 作者试图通过滤波以及分区等方法进行预测误差的订正, 以便讨论滤波对短期气候预测的影响, 在一定意义上, 它代表了时空结构的变化对预测结果的影响。通过自然正交展开 (EOF) 和奇异谱分析 (SSA) 以及考察空间分辨率的变化, 对 500 hPa 月平均高度场进行不同形式的滤波后, 利用“场时间序列”预测分析方法进行预测试验, 结果表明, 预测能力有所提高。另外, 对原预测对象进行分区后的预测试验表明, 分区有可能改善时空序列的“相容”性, 并有利于提高预测精度。

关键词 去噪 场时间序列 短期气候预测

文章编号 1006-9585 (2005) 02-0193-08 **中图分类号** P456 **文献标识码** A

Preliminary Analysis on Effect of Spatio-Temporal Structure on Short-Term Climate Prediction

WANG Ge-Li, YANG Pei-Cai, and LÜ Da-Ren

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The prediction error correction is analyzed by filter methods and region-divided to discuss its effect on short-term climate prediction. To a certainty, it stands for the effect of spatio-temporal structure on prediction. By means of spatio-temporal series prediction model, regional prediction experiments is carried out on the monthly mean geopotential height anomaly of the 500 hPa isobaric surface in the Northern Hemisphere according to such filter methods as EOF, SSA and change of spatial resolution. The preliminary results show that it can somewhat approve the prediction skill. In addition, it can also improve the “compatibility” of the spatio-temporal series by the fitful region-divided to develop the prediction level.

Key words denoise, spatio-temporal series, short-term climate prediction

1 引言

气候变化和气候预测是当今大气科学研究的热点和难点问题。短期气候预测一般指月、季到年际尺度的气候预测, 尽管近些年短期气候预测研究及业务有了一些进展, 但目前预测水平还很

低。短期气候预测的困难在于目前人们对复杂气候系统中物理本质的认识不足, 另外动力模式的不完善加上实际气候资料的数量以及噪音等因素的存在, 在某些方面制约着气候预测水平的提高。研究表明^[1, 2], 时空尺度越小, 预报误差增长越快。很多工作证实, 低波数的波动具有较长的可预报时效^[3~5]。在这些工作的基础上, 一些学者

收稿日期 2004-03-31 收到, 2005-02-03 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金重点项目 40035010、国家自然科学基金项目 90411009 及南京信息工程大学 KLME 开放课题 KJS0405

作者简介 王革丽, 女, 1970年8月出生, 副研究员, 主要从事时空序列分析及非线性大气化学动力学等研究工作。

E-mail: wgl@mail.iap.ac.cn

提出通过滤波等方法来订正预测误差^[6, 7]。因此, 充分利用历史资料, 尽可能提取其有效信息, 分析气候过程的预测及模拟中误差增长情况, 对预测误差进行适当订正, 有可能对短期气候预测水平的提高有所改进。

另一方面, 重构状态空间理论(重构奇异吸引子)以及嵌入定理的提出, 使单变量时间序列分析方法和预报方法发展起来^[8~11]。然而, 对于描述气候过程的时间序列, 它们的长度是很有限的, 远不及那些理论判据所要求的资料数量^[12, 13], 这个难题被称之为时间序列理论应用上的“数量瓶颈”。从本质上讲, 对于一个系统未来状态的预测, 依赖于对它过去所经历的状态的了解, 这是遍历性的问题。因此, 过短的历史自然不可能对系统的状态集合给出一个完整的描述。为了解决上述难题, 大气科学家开展了被称之为“多变量时间序列分析”或“场时间序列分析”的试验研究。他们考虑用不同空间位置上的观测资料来重构动力系统, 试图用空间资料来弥补时间资料的不足, 以改善系统的遍历性。这些试验首先从气候吸引子的维数估计开始, 并获得了成功^[14~16]。最近, Yang 等^[17]参考场时间序列的思想, 利用神经网络方法对大气臭氧浓度垂直总量的月平均值在我国的分布进行了预测试验, 臭氧距平值的预测场和相应的实况场之间的相关系数, 对一个月的预报而言, 达到 43% 以上。利用场时间序列分析思想, Chen 等^[18]改进月动力延伸预报, 得到较好的结果; Wang 等^[19]建立“场时间序列”局域近似预测模型, 对北半球 500 hPa 月平均高度场的预测试验, 同样得到令人鼓舞的结果。可以说, 场时间序列预测理论研究是单变量时间序列研究的一个自然延伸, 或者说是一个必然的发展。尽管这些试验是初步的, 但是结果却是令人鼓舞的, 我们有理由认为场时间序列分析在区域气候预测领域已显示了一定的应用前景^[20]。

然而, 在 Wang 等^[19]的工作中没有考虑到高度场资料中的噪音问题, 因此, 本文试图通过滤波以及分区等方法进行预测误差的订正, 以便讨论滤波对高度距平场预测的影响, 在一定意义上, 它代表了时空结构的变化对预测的影响。本文安排如下: 第 2 节简要介绍“场时间序列”预测分

析方法的基本思路, 第 3 节将分析通过 EOF 变换和奇异谱分析方法(SSA)以及空间分辨率的变化, 对短期区域气候预测的影响, 并给出适当分区后对预测结果的影响, 最后是小结。

2 场时间序列预测分析的理论基础及预测思路

利用单变量时间序列建立非线性预报模式, 至今仍是非线性科学中最活跃的研究领域之一。非线性预报方法大多是以重构状态空间理论为基础的。

状态空间动力学预报模式本质上是建立在寻求动力学相似的基础之上, 亦即利用历史上相似状态的演变来预报当前态未来的演变。对于一个给定的时间序列, 适当选取嵌入维数和延滞时间之后, 就可以在一个重构的状态空间中, 恢复原来系统的动力学。它表现为一条描述系统状态演变的轨线, 这条轨线缠绕在状态空间中的吸引子上, 系统状态就按照这个规律演变发展。因此, 我们可以在当前状态附近找出一个点域, 这个点域中的相点按照轨线所指示的动力学演变到新的相点, 结合这些邻近相点的信息, 就可以建立当前时刻与未来时刻状态之间的映射关系, 并用它来预测当前点未来的演变。

作为单变量时间序列的推广, 下面介绍场时间序列局域近似方法的基本思路。

首先, 对空间区域的某一个点, 重构其状态空间。如果空间区域上的所有点都是处在同一个动力学系统控制之下, 那么经过状态空间重构后, 这些描写系统动力学的轨线段都将缠绕在同一个吸引子上。也就是说, 对于空间区域内的某一个点, 它的信息不仅保留在它自身的发展序列中, 而且还应“保留”在整个区域内的其他空间点中。

为了寻找吸引子上某个相点的最邻近点, 我们不局限于它自身的时间序列, 而是在区域内所有点的时间序列所构成的轨线上寻找, 或者说是在整个吸引子上寻找。

假设在吸引子上对应于空间点 P 和时间点 t 的轨线段上的当前点为 $y(P, t_N)$, 它的最邻近点 $y(q^*, t_K)$ 应满足

$$\|y(p_1 t_N) - y(q^*, t_K)\| = \min_{\substack{q=1,2,\dots,Q \\ i=1,2,\dots,N-(m-1)\tau \\ i \neq K}} \{ \|y(p, t_N) - y(q, t_i)\| \}, \quad (1)$$

其中 Q 是区域内的站点数目。上式表示 $y(P, t_K)$ 的最邻近点是在区域中所有的站点的轨线段上挑选出来的。 $y(p, t_N)$ 的最邻近点集则表示在吸引子上与当前点距离最近的前若干个相点的集合。

在此意义下寻找的最邻近点，是单变量时间序列动力学预报思想的推广，也就是说，要综合考虑空间区域其他点的信息，用空间资料来弥补时间资料的不足，以求改善系统的遍历性。然后，对于得到的最邻近点的集合以及它们所对应的映象，参照单变量时间序列的局域近似法思想^[11]，建立映射关系。

根据 Wang 等^[19]建立的北半球 500 hPa 月平均高度场预测模型，在下一节里我们将重点讨论滤波对高度距平场预测的影响。

3 时空结构对预测结果的影响

3.1 经验正交展开

经验正交函数分析 (EOF)，是被气象科学广泛采用的统计方法，它有以下几个特点：(1) 分解的函数没有固定的形式，它常把成因不同而表现相同的资料场变化分解为同一个函数，故而是属于经验性质的；(2) 用 EOF 分解得到的函数基具有正交性，且 EOF 分解的不同典型场和时间函数无关，各自独立地代表一定的原始资料特性；(3) 收敛速度快，EOF 分解的前几个变量代表了原资料场的主要特征，研究主分量随时间变化的规律，可以代替对场的随时间变化的研究。用前几个对方差贡献较大的时间函数与其对应的空间函数的乘积之和，可作为原要素场的估计。而且通过 EOF 分解的特征向量具有稳定的特性，尤其前几个分量的典型场，稳定性更好。

尽管主分量的解释方差大部分集中在前几个主分量上，但是收敛速度随分析对象和地区范围而有所不同。那么是否保留前几个主分量最为合适？下面我们根据 O’Lenic 和 Livezey^[21]给出的保

留主分量个数（或称截断阶数）的判别准则，给出北半球 500 hPa 高度距平场进行 EOF 展开后，各主分量所解释的方差百分率随主分量个数变化的分布曲线（图 1，由大到小排列）。图中曲线并不光滑，存在一些坡度相对于两边都比较小的线段，这些线段被称为“阶梯”。在同一个阶梯上的几个模态所解释的方差百分率比较接近，它们被认为是信号；在最后一个阶梯之后的所有模态被认为是噪音，可以舍去。从中可定出它的截断模态为 10。前 10 个主分量占总方差贡献的 67.4%，说明前 10 个主分量已可以表征原序列的主要信息特征。

实际上，上述做法等价于对原来的时空序列进行了滤波分析，除去了对方差贡献较小的那部分模态。下面利用场时间序列的局域近似方法对处理后的时空序列进行预测试验，比较一下，当那些被视为“噪音”的模态被滤掉之后，预测精度将受到怎样的影响。

首先对北半球 500 hPa 高度场进行 EOF 分解（资料由 NCAR/NCEP 提供，长度为 1958 年 1 月至 1997 年 12 月），然后利用 Wang 等^[19]建立的北半球 500 hPa 月平均高度场预测模型，进行预测分析（其中 1958 年 1 月至 1993 年 12 月的资料被用来建立预测模型，1994 年 1 月至 1997 年 12 月的资料被用来检验预测效果）。考虑到，夏季的预测能力亟待提高^[22,23]，我们给出夏季 1994 年夏季

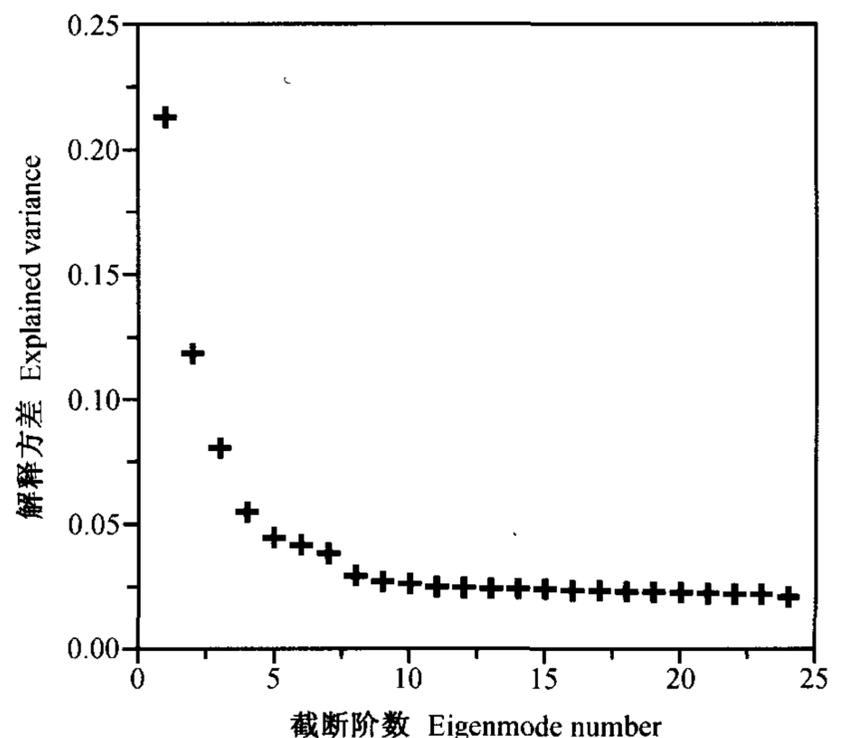


图 1 500 hPa 高度距平场 EOF 分解后解释方差随模态的分布
Fig. 1 Eigenmode number dependence on explained fractional variance by means of EOF for 500 hPa geopotential height anomaly

至 1997 年夏季 (6~8 月) 共 12 个预测个例。所用的重构参数和预测参数 (二阶方程、时间滞后参数 τ 及嵌入维数 m , 邻近点数目) 均取文献 [19] 的结果。表 1 为 EOF 分解前后预测与实况相关系数的比较。该表说明, 进行 EOF 展开后, 500 hPa 高度距平场的预测能力稍有提高。下面我们使用另一种滤波形式, 即奇异谱分析 (SSA) 方法, 进行预测试验。

3.2 奇异谱分析

奇异谱分析方法 (Singular Spectrum Analysis, SSA) 是一种被用于数字信号处理的分析方法。在非线性动力学分析中广泛应用, 这主要是由于它对于资料具有自适应能力。

SSA 实质上是将时间序列 $\{x_t\}$ 中隐含的尺度小于 m (m 为嵌入维数) 的波形信号从噪声系统中提取出来, $\{x_t\}$ 的某种排列阵 X_T 的时滞经验正交展开 TEOF 具有明显的物理意义: 对于给定的最大时间后延 m , 其行向量中蕴含的波形信号被集中于各个特征向量之中, 而与其具有最大相关 (协方差) 的那些波形信号的变动特征则被提取到它相应的时间主分量上 (即时间权重系数)。在选择最大后延 m 时, SSA 也比经典谱估计更具优越性, 这是因为经典谱估计的方差、分辨力都与最大后延 m (谱窗宽度) 密切相关。不

同的 m , 谱估计的结果也有差别, SSA 只需对 m 作敏感性试验, 一旦发现显著周期信号存在, 就有一个适宜的 m 存在, 即有稳定的奇异谱, 这对实际应用很有价值。以往功率谱的估计方法中, 实质上是将时间序列视作不同频率正弦波叠加而成的振动波的离散采样。然而严格地说, 大气系统是非线性系统, 将一个本质上是非线性的振动波分解成大量的正弦振动之和, 显然是不恰当的。奇异谱分析则从根本上克服了这一缺陷。由于它不需要正弦性的假定, 其识别的波形信号 (不一定是正弦波) 是直接由实际序列确定的, 而且对功率谱信号具有强化放大作用, 适合于识别蕴含于非线性动力学系统中的弱信号, 是一种有效的研究序列频域结构的分析工具^[24]。

Broomhead 和 King^[25] 最早利用 SSA 方法, 通过在单变量时间序列中嵌入一个窗口, 进行非线性吸引子的重建, 在一个新的延滞坐标空间中, 能够从一个有限长度有噪音的资料序列中提取吸引子的维数信号。SSA 方法通过分解序列中的时间主分量, 提取具有显著振荡行为的信号分量。在此基础上对这些振荡信号加以组合, 可作为有预报意义的因子集。Keppenne 和 Ghil^[26] 用 SSA 对 ENSO 做预报, 结果在一定程度上优于多个 GCM 的预报。

表 1 EOF 分解前后预测相关系数的比较

Table 1 Correlation coefficient comparison between prediction and observed by means of EOF

年份 Year	月份 Month	EOF 分解前的相关系数 Before EOF	EOF 分解后的相关系数* After EOF*	EOF 分解后的相关系数** After EOF**
1994	6	0.04	0.02	-0.01
	7	0.12	0.12	0.04
	8	0.20	0.43	0.30
1995	6	-0.05	0.09	0.06
	7	0.21	-0.01	-0.04
	8	0.08	0.13	0.09
1996	6	0.05	0.07	0.08
	7	0.20	0.17	0.24
	8	0.10	0.21	0.38
1997	6	0.30	0.32	0.20
	7	0.06	0.03	0.02
	8	0.11	0.09	0.06
平均 Average		0.12	0.14	0.12

* 截断阶数为 10, ** 截断阶数为 20。* Eigenmode 10, ** Eigenmode 20.

在他们工作的启发下，我们先对北半球 500 hPa 月平均高度距平场的时间序列逐点进行 SSA 分析（保留前 10 个主分量），然后对上节中所选择的预报个例进行预测试验对比。表 2 为进行 SSA 后 500 hPa 高度距平场的相关系数的变化。

试验表明，SSA 方法对 500 hPa 高度场进行滤波后，对预测精度产生了积极的影响。同时还表明，滤波方法的不同也将对场时间序列的预测带来不同的影响。就此个例来说，SSA 分析方法优于 EOF 分析方法。

表 2 SSA 分析对 500 hPa 高度距平场预测相关系数的影响
Table 2 Correlation coefficient in terms of SSA method

年份 Year	月份 Month	相关系数 Correlation coefficient
1994	6	0.07
	7	0.23
	8	0.13
1995	6	0.42
	7	0.07
	8	0.07
1996	6	-0.06
	7	0.49
	8	0.20
1997	6	0.36
	7	0.05
	8	0.39
平均 Average		0.20

3.3 空间分辨率

文献 [19] 选用的 NCEP 500 hPa 高度场格点资料的空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。现在我们在这样的空间区域上，每隔一点去掉一点，即形成一个空间分辨率为 $5^\circ \times 5^\circ$ 的新序列，对这样的新序列进行预测试验，看看空间观测站点的疏密对预报精度有何种影响。我们仍采用上节中所选择的预报个例，并对这些资料进行 EOF 分解（截断阶数取 10）。表 3 为两种不同分辨率下 500 hPa 高度距平相关系数的变化。

就这个给定的算例来讲，低空间分辨率带来了较高的预报精度。这表明，剔除某些空间尺度较小的运动分量，有助于改善 500 hPa 高度距平场的预报。另外一些 AGCM 试验的结果也显示了相同的结论^[27, 28]。

以上 3 种不同的滤波方式给出的结果表明，对 500 hPa 高度距平场进行滤波处理后，有可能提高预报技巧。

3.4 分区

在文献 [19] 以及前面的预报试验中，将北半球 500 hPa 高度距平场不同空间点上的资料进行了“合并”，在这个大的状态集合中寻找最邻近点建立方程。这里面实际隐含了一个可以称之为“相容性”的假设，即这些点上的动力学都是处于同一个系统控制之下。对于北半球这样大的区域来讲，这样的假设究竟在多大程度上成立，或者说

表 3 不同资料空间分辨率下 500 hPa 高度距平场相关系数比较
Table 3 Correlation coefficient with different data resolutions

年份 Year	月份 Month	$2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (高) 空间分辨率 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ Resolution	$5^\circ \times 5^\circ$ (低) 空间分辨率 $5^\circ \times 5^\circ$ Resolution
1994	6	0.02	0.01
	7	0.12	0.21
	8	0.43	0.45
1995	6	0.09	0.16
	7	-0.01	0.02
	8	0.13	0.10
1996	6	0.07	0.07
	7	0.17	0.15
	8	0.21	0.18
1997	6	0.32	0.49
	7	0.03	0.07
	8	0.09	0.14
平均 Average		0.14	0.17

应该在多大的空间区域上可以考虑这样的假设,目前还没有一个行之有效的办法去认定它们。从理论上讲,可以根据场时间序列中不同空间点的一些动力学不变量(Lyapunov 指数、维数等)的差异来建立某种划分,但是遗憾的是,由于实际资料的数量和质量的限制,不可能得到这些动力学不变量的准确值。在一般情况下,人们还不得不依赖某些已有的物理学知识,给出一些猜测,然后通过试验来修正它们。在这样的考虑下,我们尝试按照大尺度环流控制系统的差异,将北半球分为低纬、中高纬、极地 3 个区域,即($0^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$)为低纬度区;($27.5\sim 60^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$)为中高纬度区;($62.5\sim 90^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$)为极地区。

在同一个区域中,我们认为它们受同一个动力学系统控制。在这样的假设下,在各自的区域内寻找邻近点建立方程。采用与前面完全相同的重构参数、模式参数和试验个例,得到的结果列于表 4。

从上面的结果我们可以看出,分区后重新预报,对于这个算例来说,可以提高预测精度。这表明,适当的分区,有可能改善时空系统的“相容性”,或者说,更符合于场时间序列的“合并”的要求。

4 小结

本文试图通过滤波以及分区等方法进行预测误差的订正,以便讨论滤波对短期气候预测的影响,在一定意义上,它代表了时空结构变化对预测结果的影响。通过 EOF 和 SSA 以及考察空间分辨率等的变化,对 500 hPa 月平均高度场进行不同形式的滤波后,基于状态空间重构理论,利用“场时间序列”的局域近似方法进行预报试验,得到以下初步结果:

(1) 利用 EOF 和 SSA 对北半球 500 hPa 月平均高度距平场进行不同形式的滤波后,建立预测模型,12 个夏季预报个例的结果显示,预测相关系数稍有提高,表明通过滤波有可能改善月预报的预报水平。

(2) 场时间序列进行“合并”的前提是,所有格点上的动力学受同一个系统的控制(我们称它们是动力学“相容”的)。为此我们将北半球分为低纬、中高纬和极地 3 个区域,并在各自的区域内寻找最邻近点建立预测方程。对于 12 个预报个例的预测来讲,通过分区将预测与实况的相关系数提高了 0.06,表明适当分区有可能改善时空序列的“相容”性,并有利于提高预测精度。有关其他分区方法有待进一步研究。

表 4 分区前后北半球 500 hPa 高度距平相关系数比较

Table 4 Correlation coefficient by different divisions

年份 Year	月份 Month	未分区的高度距平场的相关系数 Correlation coefficient for nonregion-divided	分区后的高度距平场的相关系数 Correlation coefficient for region-divided
1994	6	0.04	0.08
	7	0.12	0.1
	8	0.2	0.39
1995	6	-0.05	0.06
	7	0.22	0.16
	8	0.08	0.05
1996	6	0.05	0.22
	7	0.20	0.33
	8	0.1	0.03
1997	6	0.30	0.34
	7	0.06	0.1
	8	0.11	0.29
平均 Average		0.12	0.18

“场时间序列”预测分析方法，存在以下优点：(1) 性质上仍然是“动力”的，尽管所建立的预测模型与原动力系统的控制方程意义不同；(2) 较好的保留了系统本身的非线性特征，一定程度上反映了非线性反馈机制；(3) 可以改善单点时间序列的“遍历性”。当然，对资料数量较强的依赖性以及对参数选取的某些人为性，仍然是该方法的不足之处，其预测效果包括预测结果的稳定性也在一定程度上受到限制。不过，充分利用历史资料，尽可能提取其有效信息，分析气候过程的预测和模拟中的误差增长情况，对预测误差进行适当订正，把非线性动力学预测思想引入区域气候预测中可能不失为一种新思路。

参考文献

- [1] Lorenz E N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, 1965, **21**: 289~307
- [2] Mureau R, Molteni F, Plamer T N. Ensemble prediction using dynamically-conditioned perturbation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1993, **119**: 299~323
- [3] Lorenz E N. Atmospheric predictability experiments with a large numerical model. *Tellus*, 1982, **34**: 505~513
- [4] Kalnay E, Dalcher A. Forecasting forecast skill. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 349~356
- [5] 李志锦, 纪立人. 实际可预报性的时空依赖分析. *大气科学*, 1996, **20**: 291~297
Li Zhijin, Ji Liren. Analysis of the independence of predictability on spatial and temporal scales from operational forecast. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1996, **20**: 291~297
- [6] Houtekamerr P L, Derome J. Methods for ensemble prediction. *Mon. Wea. Rev.*, 1995, **123**: 2181~2196
- [7] Branstator G, Mai A, Baumhefner D. Identification of highly predictable flow elements for spatial filtering of Medium- and extended-range numerical forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 1786~1802
- [8] Packard N H, Crutchfield J P, Farmer J D, Shaw R S. Geometry from a time series. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **45**: 712~715
- [9] Takens F. Detecting strange attractors in turbulence. *Dynamical systems and Turbulence*. Springer-Verlag, 1981. 366~381
- [10] Farmer J D, Sidorowich J. Predicting Chaotic Time Series. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**: 845~848
- [11] Casdagli M. Nonlinear prediction of chaotic time series. *Physica D*, 1989, **35**: 335~356
- [12] Smith L A. Estimating dimension in noisy chaotic time series. *J. Roy. Statist. Soc. B.*, 1992, **54**: 329~351
- [13] Ellner S. Detecting low-dimensional chaos in population dynamics data: a critical review. *Does chaos exist in Ecological system?* Charlottesville, VA: University of Virginia Press, 1991. 65~92
- [14] Essex C, Lookman T, Nerenberg M A H. The climate attractor over short timescales. *Nature*, 1987, **326**: 64~66
- [15] Keppenne C L, Nicolis C. Global properties and local structure of the weather attractor over western Europe. *J. Atmos. Sci.*, 1989, **46**: 2356~2370
- [16] Yang Peicai, Brasseur G P, Gille J C, Madronich S. Dimensionalities of ozone attractors and their global distribution. *Physica D*, 1994, **76**: 331~343
- [17] Yang Peicai, Zhou Xiuji, Bian Jianchun. A nonlinear regional prediction experiment on a short-range climatic process of the atmospheric ozone. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105** (D10): 12253~12258
- [18] Chen Bomim, Ji Liren, Yang Peicai, Zhang Daomin, Wang Geli. An approach to improving the dynamical extended-range (monthly) prediction, *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**: 696~703
- [19] Wang Geli, Yang Peicai, Lü Daren. On Spatio-Temporal Series Analysis and Its Application to Predict the Regional Short Term Climate Process. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, **21** (2): 296~299
- [20] 王革丽, 杨培才, 吕达仁. 场时间序列预测方法及其预测能力的试验分析. *大气科学*, 2004, **28** (4): 536~544
Wang Geli, Yang Peicai, Lü Daren. Method of spatio-temporal series and tests analysis on its predictable skill. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (4): 536~544
- [21] O'Lenic E A, Livezey R E. Practical consideration in the use of rotated principal components analysis in diagnostic studies of upper height fields. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **116**: 1682~1689
- [22] 王绍武, 朱锦红. 短期气候预测的评估问题. *应用气象学报*, 2000, **11**: 1~10
Wang Shaowu, Zhu Jinhong. Evaluation of short-term climate prediction. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2000, **11**: 1~10
- [23] 王会军, 周广庆, 林朝晖. 我国近年来短期气候预测研究的若干进展. *气候与环境研究*, 2002, **7** (2): 220~226
Wang Huijun, Zhou Guangqing, Lin Zhaohui. Reviews on study of short-term climate prediction in China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (2): 220~226
- [24] Vautard R, Ghil M. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics with applications to paleoclimatic time series. *Physica D*, 1989, **35**: 395~424

- [25] Broomhead D S, King G D. Extracting qualitative dynamics from experimented data. *Physica D*, 1986, **20**: 217 ~ 236.
- [26] Keppenne C L, M. Ghil. Adaptive filtering and prediction of the Southern Oscillation Index. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**: 20449~20454
- [27] Williamson D L, Kiehl J T, Hack J J. Climate sensitivity of the NCAR community climate model (CCM2) to horizontal resolution. *Climate Dyn.*, 1995, **11**: 370~397
- [28] Baumhefner D B. Numerical extended-range prediction: forecast skill using a low-resolution climate model. *Mon. Wea Rev.*, 1996, **124**: 1965~1980