

一种基于 SVD 的迭代方法及其用于气候资料场的插补试验

张永领^{1,2} 丁裕国² 高全洲¹ 王兆礼¹

1 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275

2 南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室, 南京 210044

摘 要 提出一种基于 SVD 的迭代对气象场序列缺测记录插补延长的技术方法, 对长江流域 20 个测站 1 月份气温做插补试验, 平均均方误差为 0.25, 插补精度明显优于迭代 EOF, 插补效果良好且性能稳定; 而且插补站数所占比例越小效果越好。此研究表明, 基于 SVD 迭代的插补方法是一种非常有效的插补途径。

关键词 SVD 迭代 气候资料 插补

文章编号 1006-9895(2006)03-0526-07

中图分类号 P468

文献标识码 A

The Method Based on SVD Iteration and Its Application to Interpolation of Climate Data

ZHANG Yong-Ling^{1,2}, DING Yu-Guo², GAO Quan-Zhou¹, and WANG Zhao-Li¹

1 School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

2 Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract A new method of interpolating the missing meteorology data based on the singular value decomposition (SVD) iteration is designed in this paper. On the basis of SVD mathematics technique, making the former computation results being replaced to the next computation via the singular value decomposition iteration calculation, the precision of computation results increases little by little.

In the course of interpolating missing meteorology data based on the singular value decomposition iteration, factors of missing meteorology data are introduced into calculation equation, so the missing meteorology data can be interpolated and the calculation precision increases gradually through iteration calculation. Consequently, interpolation of the missing data is realized.

Interpolating experiments are done by SVD iteration method:

(1) Based on the data of January mean air temperature at 48 stations during the period from 1955 to 2000 in the Yangtze River Basin, on the assumption that the data at 20 stations from 1955 to 1964 have been missed, interpolating experiments are done for the missing data of 20 stations. The results show that when iteration precision ϵ is 0.05 and truncated rank K is 4, interpolation precisions are the best, and the average mean square error is only 0.25.

(2) On the same condition, i. e., missing data of 20 stations and the same factors mentioned above, interpolating experiments are done using the method of EOF iteration, and the average mean square error is 0.39. Compared experimentations show that interpolative precision by the singular value decomposition iteration method is better

than that by EOF iteration method with good result and stable capacity.

(3) On the other hand, other interpolation experimentations are done on the assumption that there are 10 stations' and 5 stations' meteorological data of 48 stations from 1955 to 1964 missed in the Yangtze River Basin. The interpolation results show that when iteration precision ϵ is still 0.05 and truncated rank K is still 4, interpolation precisions are the best, and the average mean square error is 0.238 and 0.092, respectively. Thus it can be seen that the fewer data of interpolation stations are in the original data field, the better the precisions are.

This study shows that the method of interpolating the missing meteorology data based on the singular value decomposition (SVD) iteration is a useful interpolation technique, and it can be used to interpolate missing meteorology data.

Key words SVD iteration, climate data, interpolation

1 引言

研究区域气候的长期变化必须具有连续均一且有相当精度的气象场序列资料。但是,由于各种原因所造成的历史气象记录序列缺测现象却始终存在,其中,有些站点仅有个别年份缺测,而有的站点缺测年份还相当长,对一个气象要素场序列而言,缺测站点的时空分布往往并不是均匀的,这就给某些区域性的长期气候变化研究造成了一定的困难。因此,利用先进的技术方法将缺测资料在时空上加以增补配齐,使之成为较完整的气候资料集,很有必要。

早在 20 世纪 50 年代,采用统计方法插补延长单个测站的气象观测记录即已流行。么枕生^[1]在 1963 年就提出气象观测记录序列订正的一系列标准问题,并系统地阐述了这一观点。近 40 多年来,随着气候变化研究的深入,借助于更为复杂的多元统计方法,已经将单一测站资料插补订正方法推广到气象要素场资料序列的插补延长,并引入树木年轮等资料来重塑历史时期的气候变化,许多学者^[2~10]对此作过有益的、必要的探讨,并取得良好的效果,其目的都是探讨关于气象场序列插补延长以及重建历史时期气候资料序列的多种方法、途径,力图寻找最优化方案。

本文的目的在于提出一种新的基于 SVD 的迭代方法,并用于气象场资料序列的插补延长。

2 基于 SVD 的迭代方法

奇异值分解(SVD)方法是用以提取两个气象场耦合振荡信号的主要工具之一,被广泛应用于气象、气候的诊断分析和预测等方面^[11~18]。丁裕国等^[19]也从理论上证明了 SVD 方法是一种通用的广

义诊断分析工具。

设有两个气象要素场,分别记为 $\mathbf{X}_1$ 和 $\mathbf{X}_2$, 根据 SVD 原理,设 $\mathbf{X}_1$ 为左场, $\mathbf{X}_2$ 为右场,将其写为矩阵式,应有

$$\mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{p1} & x_{p2} & \cdots & x_{pn} \end{bmatrix}_{(1)} \quad (1)$$

$$\mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{q1} & x_{q2} & \cdots & x_{qn} \end{bmatrix}_{(2)} \quad (2)$$

假定左场 $\mathbf{X}_1$ 有部分记录缺测或未知,为推导方便,令其中第 p_1+1 到 p 行,第 n_1+1 到 n 列为缺测或未知,则左场 $\mathbf{X}_1$ 又可写成分块阵,

$$\mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11} & \mathbf{X}_{12} \\ \mathbf{X}_{21} & \mathbf{X}_{22} \end{bmatrix}_{(1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11} & \mathbf{X}_{12} \\ \mathbf{X}_{21} & 0 \end{bmatrix}_{(1)} \quad (3)$$

上式中,子矩阵 $\mathbf{X}_{11}$ 为 $p_1 \times n_1$ 阵; $\mathbf{X}_{12}$ 为 $p_1 \times (n-n_1)$ 阵; $\mathbf{X}_{21}$ 为 $(p-p_1) \times n_1$ 阵; $\mathbf{X}_{22}=0$ 为 $(p-p_1) \times (n-n_1)$ 阵。而相应的右场 $\mathbf{X}_2$ 也可写为分块形式,

$$\mathbf{X}_2 = [\mathbf{X}_{11} \quad \mathbf{X}_{12}]_{(2)} \quad (4)$$

这里,子矩阵 $\mathbf{X}_{11}$ 为 $q \times n_1$ 阵; $\mathbf{X}_{12}$ 为 $q \times (n-n_1)$ 阵。根据 SVD 理论,构造交叉协方差矩阵,就有

$$\boldsymbol{\Sigma}_{12} = \langle \mathbf{X}_1 \mathbf{X}_2' \rangle = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11} & \mathbf{X}_{12} \\ \mathbf{X}_{21} & \theta \end{bmatrix}_{(1)} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11} \\ \mathbf{X}_{12} \end{bmatrix}_{(2)} \quad (5)$$

上式中的下标(1)、(2)分别表示左、右场矩阵。由此,可得对应的奇异值分解式

$$\mathbf{L}' \boldsymbol{\Sigma}_{12} \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Lambda} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{L}$ 和 $\mathbf{M}$ 分别为左奇异向量场和右奇异向量场, $\mathbf{L}'$ 为左奇异向量矩阵的转置矩阵,等式右边为

不完全对角阵, 分块子阵 $\mathbf{A}$ 为关于奇异值 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, \lambda)$ 的对角阵:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & 0 \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \lambda_h \end{bmatrix}. \quad (7)$$

左场即 $\mathbf{X}_1$ 场相应的时间权重系数阵即为

$$\mathbf{U}_t^{(0)} = \mathbf{L}'^{(0)} \mathbf{X}_1, \quad (8)$$

这里, 为方便起见, 对每次求得的左奇异向量场及其时间权重系数阵, 分别以相应的上标 (i) , $i=0, 1, 2, \dots, l$, 标注第 i 步。式(8)中的 $\mathbf{U}_t^{(0)}$ 和 $\mathbf{L}'^{(0)}$ 分别表示第 0 步迭代运算中左场的时间权重系数矩阵和左奇异向量场矩阵的转置矩阵, 利用左奇异向量场及其时间权重系数阵, 就可重建左场即 $\mathbf{X}_1$ 的原始场序列, 由(8)式可得

$$\hat{\mathbf{X}}_1^{(1)} = \underset{P \times N}{\mathbf{L}}^{(0)} \underset{P \times K^{(0)}}{\mathbf{U}_t^{(0)}} \underset{K^{(0)} \times N}{\mathbf{X}_1}, \quad (9)$$

式(9)中的 $K^{(0)}$ 为第 0 步迭代的截断阶数。根据(3)式, 可得到左场重构序列阵的分块阵

$$\hat{\mathbf{X}}_1^{(1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11}^{(0)} & \mathbf{X}_{12}^{(0)} \\ \mathbf{X}_{21}^{(0)} & \mathbf{X}_{22}^{(0)} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中, $\mathbf{X}_{22}^{(0)}$ 即由首次 SVD 得到的恢复记录。为了提高恢复精度, 将恢复结果 $\mathbf{X}_{22}^{(0)}$ 代回(3)式, 并记为 $\mathbf{X}_1^{(1)}$, 则

$$\mathbf{X}_1^{(1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11} & \mathbf{X}_{12} \\ \mathbf{X}_{21} & \mathbf{X}_{22} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

这样, 在 $\mathbf{X}_1^{(1)}$ 既保留了原始场记录信息, 又增加了恢复值部分 $\mathbf{X}_{22}^{(0)}$, 于是, 以新一步 $\mathbf{X}_1^{(1)}$ 与 $\mathbf{X}_2$, 求其交叉协方差矩阵, 并作新一次 SVD, 从而又得

$$\mathbf{L}'^{(1)} \mathbf{\Sigma}_{12}^{(1)} \mathbf{M}^{(1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

则左场新的相应的时间权重系数阵为

$$\mathbf{U}_t^{(1)} = \mathbf{L}'^{(1)} \mathbf{X}_1. \quad (13)$$

显然, 重复(9)式的运算, 即可有新一步的重建场序列

$$\hat{\mathbf{X}}_1^{(2)} = \underset{P \times N}{\mathbf{L}}^{(1)} \underset{P \times K^{(1)}}{\mathbf{U}_t^{(1)}} \underset{K^{(1)} \times N}{\mathbf{X}_1}, \quad (14)$$

其中, $K^{(1)}$ 是第 1 步迭代的截断阶数, 同理, 仿(11)式, $\hat{\mathbf{X}}_1^{(2)}$ 可构成成分块矩阵

$$\hat{\mathbf{X}}_1^{(2)} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11}^{(1)} & \mathbf{X}_{12}^{(1)} \\ \mathbf{X}_{21}^{(1)} & \mathbf{X}_{22}^{(1)} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

$\mathbf{X}_{22}^{(1)}$ 就是将上一次恢复结果 $\mathbf{X}_{22}^{(0)}$ 代回原矩阵, 得到的新的恢复值, 其精度要高于 $\mathbf{X}_{22}^{(0)}$ 。同样, 为了提

高预测精度, 依此类推, 相应得到 $\mathbf{X}_1^{(2)} \rightarrow \mathbf{X}_1^{(3)} \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{X}_1^{(i)} \rightarrow \mathbf{X}_1^{(i+1)}$, 等等。显然, 对于第 i 步迭代运算, 应有

$$\hat{\mathbf{X}}_1^{(i+1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11}^{(i)} & \mathbf{X}_{12}^{(i)} \\ \mathbf{X}_{21}^{(i)} & \mathbf{X}_{22}^{(i)} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

其中, $\mathbf{X}_{22}^{(i)}$ 就是第 i 步迭代运算的恢复结果, 当满足条件

$$\|\mathbf{X}_{22}^{(i)} - \mathbf{X}_{22}^{(i-1)}\| < \epsilon, \quad (17)$$

即可终止迭代, 以终值阵 $\mathbf{X}_{22}^{(i)}$ 作为其恢复的值。式中 $\|\dots\|$ 为矩阵的范数, ϵ 则为给定的小量(视其要求的精度而定)。综上所述, 所谓 SVD 迭代法, 就是利用左、右原始场序列中的已知信息, 通过不断地逼近其未知真值区, 最终得到左原始场中的未知值。

当上述方法用于气候资料的插补延长问题时, 可假定左场 $\mathbf{X}_1$ 有部分缺测或未知记录, 令其中第 p_1+1 到 p 行, 第 1 到 n_1 列记录缺测或未知, 故左场 $\mathbf{X}_1$ 就可写成如下的分块阵,

$$\mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11} & \mathbf{X}_{12} \\ \mathbf{X}_{21} & \mathbf{X}_{22} \end{bmatrix}_{(1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{11} & \mathbf{X}_{12} \\ 0 & \mathbf{X}_{22} \end{bmatrix}_{(1)}, \quad (18)$$

式中子矩阵 $\mathbf{X}_{11}$ 为 $p_1 \times n_1$ 阵; $\mathbf{X}_{12}$ 为 $p_1 \times (n-n_1)$ 阵; 缺测场 $\mathbf{X}_{21} = 0$ 为 $(p-p_1) \times n_1$ 阵; $\mathbf{X}_{22}$ 为 $(p-p_1) \times (n-n_1)$ 阵。再将右场 $\mathbf{X}_2$ 写为分块型, 即式(4)的形式, 共同构造交叉协方差矩阵进行迭代运算。

3 对长江流域 1 月份平均气温的插补试验

选取长江流域 48 个测站 1 月份的平均气温场(1955~2000 年)作插补试验。假设其中有 20 个随机分布的测站 1955~1964 年 1 月份气温记录缺测, 则将这 20 个测站作为插补对象(即左场的子场 $\mathbf{X}_{21} = 0$)。影响因子的选择也是基于 SVD 迭代方法进行气象序列插补的重要所在, 影响长江流域冬季气温的主要原因之一是同期或前期的海温异常, 其中冬季黑潮海域海温是影响长江流域冬季气温的关键海域^[20]。我们用 EOF 方法把长江流域近 46 年 48 个站 1 月份气温展开, 其中第一主分量的方差贡献为 80.3%, 远远大于其他各个主分量的方差贡献, 用第一主分量的时间系数分别与黑潮区同期 1 月份的海温求相关, 选择了相关系数大于 0.45 的 26 个格点资料组成因子场, 即右场 $\mathbf{X}_2$ 。现以插补 1955 年(20 个站)气温为例, 说明初始场 $\mathbf{X}_1$ 、 $\mathbf{X}_2$ 的具体构成。由式(18), 可将 $\mathbf{X}_1$ 构成方块矩阵为

$$\mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,45} & x_{1,46} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{28,1} & x_{28,2} & \cdots & x_{28,45} & x_{28,46} \\ 0 & x_{29,2} & \cdots & x_{29,45} & x_{29,46} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & x_{48,2} & \cdots & x_{48,45} & x_{48,46} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

其中，子矩阵 $\mathbf{X}_{11}$ 和 $\mathbf{X}_{12}$ 为具有原记录的 28 个测站 1955~2000 年的 1 月份气温。 $\mathbf{X}_{21}=\mathbf{0}$ 则是作为插补对象的初始 0 值，即作为插补对象的 20 个测站 1955 年 1 月份气温初始值为 0。 $\mathbf{X}_{22}$ 为 20×45 阶矩阵，为作为插补对象的 20 个测站 1956~2000 年 1 月份的气温值。右场 $\mathbf{X}_2$ 为 26×46 矩阵，为黑潮区所选 26 个格点 1955~2000 年 1 月份的海温。

基于 SVD 迭代法对气温插补，试验表明迭代精度 ϵ 即范数 $\|\mathbf{X}_{22}^{(i)}-\mathbf{X}_{22}^{(i-1)}\|$ 的取值对试验结果也有一定的影响，表 1 给出在对长江流域 20 个测站 1955~1964 年 1 月份气温插补时，当 ϵ 取不同数据时，原始数据与插补数据大量实验的平均均方误差。显然，当迭代精度 ϵ 取 0.05 时插补效果最好。

另外，在 SVD 迭代运算中，每次重建原始场序列所选取截断阶数 $K^{(i)}$ 也是影响插补精度的一个主要因素。为了方便，我们每次迭代取统一的截断阶数 K 。图 1 对长江流域 20 个站 1955~1964 年 1 月份气温插补的平均均方误差随迭代 K 的变化关系。由图可知当截断阶数 K 取 4 时，插补场的均方误差最小，即当 K 取 4 时精度最高。

表 2 给出当迭代精度 ϵ 取 0.05 截断阶数 K 取 4 时，SVD 迭代方法对长江流域 20 个测站 1955~1964 年 1 月份气温的插补情况。从表 2 可以看出，在这 10 年的插补试验中平均均方误差为 0.25，仅在 1955 年和 1962 年的平均均方误差高于 0.4，但也低于 0.5，稳定性非常好，插补效果远好于用其

表 1 不同迭代精度下的插补效果

Table 1 Mean interpolation results as a function of iteration precision			
迭代精度 ϵ	Iteration precision	均方误差	Mean square error
	0.1		0.344
	0.05		0.273
	0.02		0.293
	0.01		0.354
	0.001		0.372

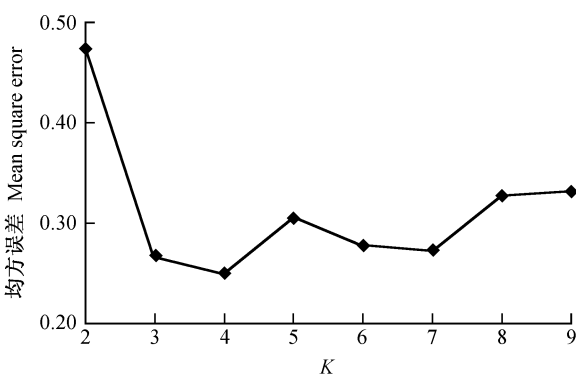


图 1 插补精度随截断阶数 K 的变化关系
Fig. 1 Mean interpolation precision as a function of truncated rank K

表 2 基于迭代 SVD 的 1 月份气温插补场的均方误差(20 站)
Table 2 Mean square errors of Jan temperature interpolation field based on SVD iteration method (20 stations)

年份	Year	均方误差	Mean square error
	1955		0.449
	1956		0.224
	1957		0.125
	1958		0.320
	1959		0.292
	1960		0.091
	1961		0.078
	1962		0.462
	1963		0.387
	1964		0.068
	平均		0.250

表 3 基于迭代 EOF 的 1 月份气温插补场的均方误差(20 站)
Table 3 Mean square errors of Jan temperature interpolation field based on EOF iteration method (20 stations)

年份	Year	均方误差	Mean square error
	1955		0.523
	1956		0.324
	1957		0.403
	1958		0.160
	1959		0.182
	1960		0.082
	1961		0.157
	1962		0.449
	1963		1.398
	1964		0.167
	平均		0.384

他方法^[6]。试验证明,用迭代 SVD 的方法对气温插补的应用,其性能稳定、效果优良。

为了证明其插补效果的优良性,本文也同时试验了其他方法,例如,用基于迭代 EOF 方法,在长江中下游地区 48 个测站中选择相同的 20 个测站,相同的影响因子(同期 1 月份 26 个格点黑潮区的海温资料)做插补试验,表 3 列出了用迭代 EOF 方法对 20 个站 1 月份气温插补场的平均均方误差,1955 年平均均方误差为 0.523,而 1963 年平均均方误差竟为 1.387,10 年平均为 0.387。对比表 2 和表 3 可见,迭代 SVD 方法明显优于迭代 EOF 方法。

为了进一步说明插补空间分布的情况,图 2 给出了 1957 年和 1960 年 1 月份气温实际状况场和插补场的比较,从图中可以看出,2 个实况场的温度分布与插补场的温度分布相当一致。

另一方面,分别随机取 10 个测站和 5 个测站进行插补试验,结果表明,当截断阶数 K 取 4、精度取 0.05 时,效果仍最好(见表 4、5)。在上述试验中,当插补站数比分别约占 40%(20 站)、20%(10 站)、10%(5 站)时,其平均的均方误差分别为 0.250、0.238、0.092。由此可见,插补站数占原资料场的比例越小,效果越好。

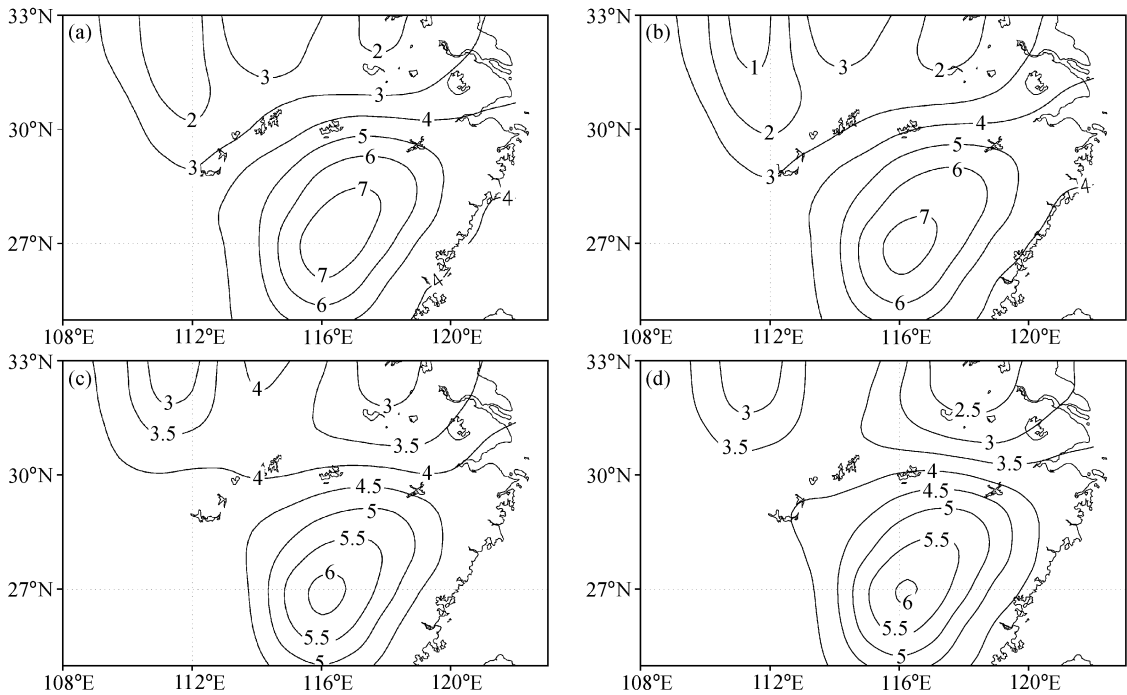


图 2 1957 年 (a, b) 和 1960 年 (c, d) 1 月份气温的实况场 (a, c) 与插补场 (b, d) 比较
Fig. 2 Comparison between observed (a, c) and interpolated (b, d) field of Jan temperature in 1957 (a, b) and 1960 (c, d)

表 4 基于迭代 SVD 的气温插补场的均方误差 (10 站)

Table 4 Mean square errors of the temperature interpolated field based on SVD iteration method (10 stations)

年份 Year	均方误差 Mean square error
1955	0.575
1956	0.166
1957	0.185
1958	0.286
1959	0.115
1960	0.105
1961	0.063
1962	0.217
1963	0.620
1964	0.050
平均	0.238

表 5 基于迭代 SVD 的气温插补场的均方误差 (5 站)

Table 5 Mean square errors of the temperature interpolated field based on SVD iteration method (5 stations)

年份 Year	均方误差 Mean square error
1955	0.307
1956	0.307
1957	0.136
1958	0.057
1959	0.050
1960	0.045
1961	0.036
1962	0.044
1963	0.097
1964	0.027
平均	0.092

4 结论与讨论

本文设计了基于 SVD 迭代的插补方法, 它有良好的数学基础和严密的逻辑推理, 把影响因子引入到运算方程中去, 通过迭代运算, 把前一次的运算结果代回下一次运算中去, 这样可使计算精度不断提高, 收到良好的效果。在气候插补中, 可根据气候规律、观测事实等对缺测资料场进行不同尺度的插补。

本文通过对长江流域 20 个站 1955~1964 年 1 月份气温插补实验表明, 当迭代精度 ϵ 为 0.05、截断阶数 K 取 4 时, 插补效果最好, 平均均方误差为 0.25, 仅有 2 个年份高于 0.4, 但也低于 0.5。对同样 20 个缺测站和同样的影响因子, 用迭代 EOF 方法进行插补, 1955 年均方误差为 0.523, 而 1963 年均方误差为 1.387, 10 年平均为 0.387。迭代 SVD 方法明显优于迭代 EOF 方法。另外, 分别随机取 10 个测站和 5 个测站进行插补试验, 结果表明, 当截断阶数取 4、精度取 0.05 时, 效果仍最好。其平均的均方误差分别为 0.238 和 0.092。由此可见, 当插补站数占原资料场的比例越小, 效果越好。故从理论推理上和试验上都证明了基于 SVD 迭代的插补方法是一种非常有效的插补途径。

此外, 在认真考虑对预测对象有影响的天气过程并选择合理的预测因子基础上, 将 SVD 迭代的方法应用到短期气候预测中去, 也能取得良好的效果, 对此, 我们将另文探讨。总之, 基于 SVD 迭代的方法有很好的应用价值和更广阔的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] 么枕生. 概率论基本定理在气候统计中的应用. 气象学报, 1963, **33**(2): 246~260
Yao C S. Some applications of the fundamental laws in the theory of probability to the climatology. *Acta Meteorology Sinica* (in Chinese), 1963, **33**(2): 245~256
- [2] 吴祥定, 孙力, 湛绪志. 利用树木年轮资料重建西藏中部过去气候的初步尝试. 地理学报, 1989, **44**(3): 334~342
Wu Xiangding, Sun Li, Zhan Xuzhi. A preliminary study on reconstructing past climate in the middle Xizang Plateau by using tree-ring data. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1989, **44**(3): 334~341
- [3] 丁裕国, 冯燕华, 袁立新. 用统计模式重建热带太平洋环流资料的可行性试验. 热带气象, 1992, **8**(4): 297~305
Ding Yuguo, Feng Yanhua, Yuan Lixin. A feasibility test

- with statistic model on reconstructing circulation data for tropical Pacific. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1992, **8**(4): 297~305
- [4] 张邦林, 丑纪范, 孙照渤. EOF 迭代方案恢复夏季大气环流场的试验. 大气科学, 1993, **17**(6): 673~678
Zhang Banglin, Chou Jifan, Sun Zhaobo. Reconstruction of the summer atmospheric circulation based on EOF iteration scheme. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1993, **17**(6): 673~678
- [5] 张秀芝, 孙安健. 利用车贝雪夫多项式进行资料缺测插补的研究. 应用气象学报, 1996, **7**(3): 344~352
Zhang Xiuzhi, Sun Anjian. Interpolation experiment of missing meteorological data by using Chebyshev polynomials method. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1996, **7**(3): 344~352
- [6] 张秀芝, 孙安健. 气候资料缺测插补方法的对比研究. 气象学报, 1996, **54**(5): 625~632
Zhang Xiuzhi, Sun Anjian. Study of interpolation methods of missing annual precipitation data for long-time series. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1996, **54**(5): 625~632
- [7] 江志红, 丁裕国, 屠其璞. 基于 PC-CCA 方法的气象场资料插补试验. 南京气象学院学报, 1999, **22**(2): 141~148
Jiang Zhihong, Ding Yuguo, Tu Qipu. Interpolation experiment of meteorological fields based on PC-CCA. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1999, **22**(2): 141~148
- [8] 江志红, 丁裕国, 屠其璞. 气象场序列几种插补方案的对比试验. 南京气象学院学报, 1999, **22**(3): 352~359
Jiang Zhihong, Ding Yuguo, Tu Qipu. Contrast study on the several interpolation schemes of meteorological fields series. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1999, **22**(3): 352~359
- [9] 刘洪滨, 邵雪梅. 采用秦岭冷杉年轮宽度重建陕西镇安 1755 年以来的初春温度. 气象学报, 2000, **58**(2): 223~233
Liu Hongbin, Shao Xuemei. Reconstruction of early-spring temperature at Zhenan from 1755 using tree ring chronology. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58**(2): 223~233
- [10] 刘洪滨, 邵雪梅. 利用树轮重建秦岭地区历史时期初春温度变化. 地理学报, 2003, **58**(6): 879~884
Liu Hongbin, Shao Xuemei. Reconstruction of early-spring temperature of Qinling mountains using tree-ring chronologies. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2003, **58**(6): 879~884
- [11] Wallace J M, Smith C, Bretherton C S. Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-mb height anomalies. *J. Climate*, 1992, **5**: 561~576
- [12] Newman M, Sardeshmukh P D. A caveat concerning singular value decomposition. *J. Climate*, 1995, **8**: 352~360
- [13] Cherry S. Singular value decomposition analysis and canonical

- correlation analysis. *J. Climate*, 1996, **9**: 2003~2009
- [14] Mavor T P, Bisagni J J.. Seasonal variability of sea surface temperature fronts on Georges Bank. *Deep-Sea Research II*, 2001, **48**: 215~243
- [15] 张礼平, 柯怡明, 胡江林, 等. SVD 方法在场分析和预测中的应用. 热带气象学报, 2002, **18**(3): 237~244
Zhang Liping, Ke Yiming, Hu Jianglin, et al. Singular value decomposition and its application in analysis and forecast of field. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2002, **18**(3): 237~244
- [16] 张永领, 丁裕国. 我国东部夏季极端降水与北太平洋海温的遥相关研究. 南京气象学院学报, 2004, **27**(2): 244~252
Zhang Yongling, Ding Yuguo. The teleconnection between summer extreme precipitation over East China and North Pacific SST. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2004, **27**(2): 244~252
- [17] 黄嘉佑, 刘舸, 赵昕奕. 副高、极涡因子对我国夏季降水的影响. 大气科学, 2004, **28**(4): 517~526
Huang Jiayou, Liu Ge, Zhao Xinyi. The influence of sub-tropical high indexes and polar vortex indexes on the summer-time precipitation in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28**(4): 517~526
- [18] Li Yuefeng, Luo Yong, Ding Yihui. The relationships between the global satellite-observed outgoing longwave radiation and the rainfall over China in summer and winter. *Advances in Space Research*, 2004, **33**: 1089~1097
- [19] 丁裕国, 江志红. SVD 方法在气象场诊断分析中的普适性. 气象学报, 1996, **54**(3): 365~372
Ding Yuguo, Jiang Zhihong. Generality of singular value decomposition in diagnostic analysis of meteorological field. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1996, **54**(4): 365~372
- [20] 周晓霞, 王盘兴, 祝昌汉, 等. 全球海温异常年代际分量的方差贡献及其与中国气候异常的相关. 应用气象学报, 2005, **16**(1): 96~104
Zhou Xiaoxia, Wang Panxing, Zhu Changhan, et al. Variance of interdecadal component of global sea surface temperature anomaly and the correlations to the climate of China. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2005, **16**(1): 96~104