

谢瑶瑶,王盘兴,李丽平,等. 2013. 改进的奇异值分解方法及其效果验证[J]. 大气科学学报,36(4):466-471.

Xie Yao-yao, Wang Pan-xing, Li Li-ping, et al. 2013. Advanced singular value decomposition and its effect verification[J]. Trans Atmos Sci, 36(4): 466-471. (in Chinese)

改进的奇异值分解方法及其效果验证

谢瑶瑶^{1,2}, 王盘兴¹, 李丽平¹, 周国华^{1,3}, 罗小莉^{1,4}

(1. 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044; 2. 湖北省气象信息与技术保障中心, 湖北 武汉 430074;

3. 扬州市气象局, 江苏 扬州 225009; 4. 广西壮族自治区崇左市气象局, 广西 崇左 532200)

摘要:改进的奇异值分解(advanced singular value decomposition, ASVD)方法,是对经过空间均匀化订正的格、站点网资料的奇异值分解(singular value decomposition, SVD)方法。根据奇异向量与经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)的关系,给出了格、站点网资料SVD方法中均匀化订正的方法,进而得到了改进的奇异值分解(ASVD)方法。将ASVD方法、SVD方法用于中国60 a(1951—2010年)160站冬季气温、降水同期相关系数矩阵 C 的分析,结果表明:ASVD方法的前4个主要模态的模方拟合率和累积模方拟合率均明显高于SVD方法;ASVD方法前两个奇异向量典型场图上高绝对值区与 C 模方图上高值区的关系明显较SVD方法合理。由此论证了SVD方法中资料均匀化订正的必要性,验证了实际分析中ASVD方法的效果。

关键词:均匀化订正;改进的奇异值分解方法;效果验证;冬季气温与降水的相关

中图分类号:P468 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-7097(2013)04-0466-06

Advanced singular value decomposition and its effect verification

XIE Yao-yao^{1,2}, WANG Pan-xing¹, LI Li-ping¹, ZHOU Guo-hua^{1,3}, LUO Xiao-li^{1,4}

(1. School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China;

2. Hubei Meteorological Information and Technology Support Center, Wuhan 430074, China;

3. Yangzhou Meteorological Bureau, Yangzhou 225009, China; 4. Chongzuo Meteorological Bureau, Chongzuo 532200, China)

Abstract: The advanced singular value decomposition (ASVD) method is the singular value decomposition (SVD) method of homogeneity adjustment for the grid and station network data. Based on the relationship between SVD and EOF (empirical orthogonal function), it gives a homogeneity adjustment method of the grid and station network data in SVD method, in such a way that the advanced singular value decomposition (ASVD) method is achieved. Using the ASVD and SVD methods, this paper analyzes the correlation coefficient matrix C between temperature and precipitation of 160 stations over China in winter during 1951—2010. Results show that both the squarefitting rate and the accumulated squarefitting rate of the preceding four principal modes by ASVD method are obviously higher than those by SVD method. Comparing with SVD method, the relationship between the high value area in C squarefitting figure and the high absolute value area in the preceding two typical singular vector fields by using the ASVD method is more reasonable. It is verified that the homogeneity adjustment is necessary by using the SVD method, and there is more reasonable effect in practical analysis by using the ASVD method.

Key words: homogeneity adjustment; advanced singular value decomposition method; effect verification; correlation between temperature and rainfall in winter

收稿日期:2012-03-14; 改回日期:2012-10-15

基金项目:公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY200806009; GYHY201006017; GYHY201006020); 国家科技支撑计划项目(2010CB951601)

通信作者:谢瑶瑶, 硕士, 助理工程师, 研究方向为大气环流异常与短期气候预测, xyy_maggie@163.com.

0 引言

在大气环流和气候异常关系的研究中,奇异值分解(singular value decomposition, SVD)方法广泛用于两个要素场序列间线性相关关系的分析。Prohaska(1976)最早将SVD方法运用于上述目的的分析,并在国际上得到推广(Weare, 1977; Wallace and Gutzler, 1981; Roger, 1984; Palmer and Sun, 1985)。国内王建新(1989)最早将其用于长江中下游地区梅雨期雨量场与500 hPa月平均高度场间的相关分析。许多研究(孙照渤等, 1991; 赵红旭和葛玲, 1991; 丁裕国和江志红, 1996)相继将其用于实际问题的分析。王盘兴等(1997)给出了涉及风场的SVD方法,并将其用于热带海气相互作用区域差异的比较研究,得到了热带东、中太平洋为一元区(ENSO为主)、热带西太平洋、印度洋为二元区(ENSO与季风)和热带大西洋为多元区的分析结果(Wang et al., 2001)。

由奇异值分解方法原理(柳重堪, 1982), SVD方法中求奇异值、奇异向量的计算与经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)分析方法中求特征值、特征向量的计算所依据的数学原理一致。而在EOF分析方法用于大气环流和气候异常分析中,发现需对格、站点网的空间不均匀性进行均匀化处理(Craddock and Flood, 1969; Kutzbach, 1970)。实际EOF分析中,采用适当挑选格、站点(Craddock and Flood, 1969; Kutzbach, 1970; 王晓春和吴国雄, 1996; 黄少妮等, 2009)和引入面积订正系数(Jones et al., 1982, 1986; 林学椿和于淑秋, 1990; 祝昌汉, 1992; 丁裕国和江志红, 1995; Chung and Nigam, 1999)消除失真。Chung and Nigam(1999)对均匀矩形格点网资料给出的订正和王盘兴等(2011)对站网资料给出的订正,理论根据充分,方法合理,订正效果明显。

本文介绍了ASVD(advanced singular value decomposition)方法,它是引入站网资料均匀化订正(罗小莉等, 2011; 王盘兴等, 2011)后的奇异值分解方法,称为改进的奇异值分解方法,简记为ASVD方法。重点从理论和实际两方面论述和验证ASVD方法分析效果优于SVD方法。

1 ASVD方法原理

选择标准化距平场序列

$$\mathbf{F}_{m_1 \times n}, \mathbf{G}_{m_2 \times n} \quad (1)$$

为分析对象。其中, m_1, m_2 为 \mathbf{F}, \mathbf{G} 的场点数, n 为时间序列长度; 标准化对 s 行行向量(s 点要素距平时间序列)进行, 标准化定义为 $\|\mathbf{F}_s\|, \|\mathbf{G}_s\| = 1$ 。(1)式两矩阵之积为

$$\mathbf{C}_{m_1 \times m_2} = \mathbf{F}_{m_1 \times n} \mathbf{G}_{m_2 \times n}^T \quad (2)$$

\mathbf{G} 右上角标 T 为矩阵转置符号。 \mathbf{C} 是奇异值分解(SVD)的直接对象, 其 s_1 行、 s_2 列元素

$$C_{s_1 s_2} = (\mathbf{F}_{s_1}, \mathbf{G}_{s_2}) = \sum_{t=1}^n F_{s_1 t} G_{s_2 t}$$

是 s_1 点 \mathbf{F} 与 s_2 点 \mathbf{G} 的相关系数。

1.1 奇异值分解(SVD)

SVD 指对 \mathbf{C} 的如下正交变换

$$\mathbf{C}_{m_1 \times m_2} = \sum_{h=1}^H \sigma_h \mathbf{X}_h \mathbf{Y}_h^T = \sum_{h=1}^H \mathbf{C}_h \quad (3)$$

其中: $\sigma_h > 0$ 是第 h 模态的奇异值, 已作非升序排列; $H \leq \min(m_1, m_2, n - 1)$ 是模态总数; m_1, m_2 维列向量 $\mathbf{X}_h, \mathbf{Y}_h$ 是 \mathbf{C} 的左(与 \mathbf{F} 场集对应)、右(与 \mathbf{G} 场集对应)奇异向量, 它们是标准正交向量, 即

$$\|\mathbf{X}_h\| = 1, \|\mathbf{Y}_h\| = 1,$$

$$(\mathbf{X}_h, \mathbf{X}_{h'}) = 0, (\mathbf{Y}_h, \mathbf{Y}_{h'}) = 0, h' \neq h.$$

$\mathbf{C}_h = \sigma_h \mathbf{X}_h \mathbf{Y}_h^T$ 是 \mathbf{C} 的第 h 个正交向量。

SVD 方法中的时间系数指

$$\mathbf{Q}_h = \mathbf{X}_h^T \mathbf{F}, \mathbf{R}_h = \mathbf{Y}_h^T \mathbf{G}, h = \overline{1, H} \quad (4)$$

它们均是 n 维行向量。可以证明: 不同 h 的 $\mathbf{Q}_h(\mathbf{R}_h)$ 间不正交, 即 $h' \neq h$ 时, $(\mathbf{Q}_h, \mathbf{Q}_{h'}) \neq 0, (\mathbf{R}_h, \mathbf{R}_{h'}) \neq 0, h' \neq h$; 相同 h 的 $\mathbf{Q}_h, \mathbf{R}_h$ 内积等于奇异值, 即 $(\mathbf{Q}_h, \mathbf{R}_h) = \sigma_h$ 。

SVD 的一个重要性质(柳重堪, 1982)是, 方阵

$$\mathbf{A}_{m_1 \times m_1} = \mathbf{C}_{m_1 \times m_2} \mathbf{C}_{m_1 \times m_2}^T, \mathbf{B}_{m_2 \times m_2} = \mathbf{C}_{m_1 \times m_2}^T \mathbf{C}_{m_1 \times m_2} \quad (5)$$

的特征值 λ_h 与 \mathbf{C} 的奇异值 σ_h 间存在关系: $\lambda_h = \sigma_h^2$, 标准化特征向量 $\mathbf{X}_h, \mathbf{Y}_h$ 即(3)式中的 SVD 的相应奇异向量。

据此, 得 SVD 方法中第 h 个模态的方差贡献 ρ_h 和前 h 个模态的累积模方拟合率 P_h ,

$$\rho_h = \sigma_h^2 / \sum_{h'=1}^H \sigma_{h'}^2, P_h = \sum_{h'=1}^h \rho_{h'} \quad (6)$$

1.2 改进的奇异值分解(ASVD)

据随机函数论(卡札凯维奇, 1974), (1)式的 \mathbf{F}, \mathbf{G} 是取自连续母体的离散样本, 以

$$f(s_1, t), g(s_2, t), s_1 \in D_1, s_2 \in D_2, t \in T,$$

记与 \mathbf{F}, \mathbf{G} 对应的标准化随机函数, 则(2)式的 \mathbf{C} 是连续域上相关系数场集

$$C(s_1, s_2) = \int_0^T f(s_1, t)g(s_2, t)dt, s_1 \in D_1, s_2 \in D_2 \quad (7)$$

的近似。若离散过程中面元 $\Delta s_1, \Delta s_2$ 和时间间隔 Δt 足够小(即 m_1, m_2, n 足够大),且 $\Delta s_1, \Delta s_2, \Delta t$ 均匀,则(3)式中由 SVD 方法求得的 C 的奇异值 σ_h 、奇异向量 X_h, Y_h 是以(7)式 C 为核的积分方程的近似解。

气候资料,如 NCEP/NCAR 再分析全球格点网资料及中国 160 站站网气温、降水资料,它们在时域上的离散化是均匀的,空域上则都不均匀。一些研究(Jones et al., 1982, 1986; 林学椿和于淑秋, 1990; 祝昌汉, 1992; 丁裕国和江志红, 1995; Chung and Nigam, 1999)指出,直接用它们作 EOF 分析,结果必然是失真的。由于 SVD 与 EOF 分析的内在联系($\sigma_h = \sqrt{\lambda_h}$, C 的奇异向量 X_h, Y_h 也是 A, B 的特征向量),故(3)式给出的 SVD 结果也必然是失真的。为消除格、站点网不均匀性对 SVD 结果的影响,必须恰当地引进对资料(1)式或(2)式的订正。

对均匀矩形经纬格点网($\Delta\lambda, \Delta\varphi$ 为常量)上资料的 EOF 分析,Chung and Nigam(1999)给出了格点网的面元参数 $d_s = \cos\varphi_s$; 因为 s 格点代表的面元面积为 $d_s = 2a^2\Delta\lambda\sin\frac{\Delta\varphi}{2}\cos\varphi_s$ (a 为地球半径; φ_s 为 s 点所在纬度),故 d_s 不是实际面积,而是正比于元面积参数。对空间不均匀性严重的站点网,王盘兴等(2011)、罗小莉等(2011)给出了站域面积 d_s 的一般计算方法。

由 SVD 与 EOF 分析的内在联系, SVD 方法中的面积订正权重系数矩阵为

$$\begin{aligned} {}_f\mathbf{w}_{m_1 \times m_1} &= \text{diag}(\sqrt{d_1}, \sqrt{d_2}, \dots, \sqrt{d_{m_1}}), \\ {}_g\mathbf{w}_{m_2 \times m_2} &= \text{diag}(\sqrt{d_1}, \sqrt{d_2}, \dots, \sqrt{d_{m_2}}). \end{aligned} \quad (8)$$

其中: ${}_f d_{s_1}$ 为左场(与 F 对应) s_1 点元面积参数或站域面积, ${}_g d_{s_2}$ 是右场(与 G 对应) s_2 点元面积参数或站域面积。

用 ${}_f\mathbf{w}$ 对 F 、 ${}_g\mathbf{w}$ 对 G 订正,得

$$\hat{F} = {}_f\mathbf{w}F, \hat{G} = {}_g\mathbf{w}G. \quad (9)$$

它们的积

$$\hat{C} = \hat{F}\hat{G}^T = {}_f\mathbf{w}C_g\mathbf{w}^T. \quad (10)$$

\hat{C} 已完全(对格点网)或较好(对站点网)地消除了格、站点网空间不均匀性的影响。称对 \hat{C} 的 SVD 分解为改进的 SVD 分解,简记为 ASVD。

对 C 的 ASVD(即对 \hat{C} 的 SVD),得

$$\hat{C} = \sum_{h=1}^H \sigma_h \hat{X}_h \hat{Y}_h^T = \sum_{h=1}^H \hat{C}_h. \quad (11)$$

σ_h 及 \hat{X}_h, \hat{Y}_h 是 ASVD 方法的奇异值和左、右奇异向量,其性质与(3)式中的 σ_h 及 X_h, Y_h 相同; $\hat{C}_h = \sigma_h \hat{X}_h \hat{Y}_h^T$ 是 \hat{C} 的第 h 个正交分量。

ASVD 的时间系数为

$$\hat{Q}_h = \hat{X}_h^T \hat{F}, \hat{R}_h = \hat{Y}_h^T \hat{G}. \quad (12)$$

其性质与(4)式中的 Q_h, R_h 相同。

类似地, ASVD 方法的第 h 个模态的模方拟合率 $\hat{\rho}_h$ 和前 h 个模态的累积模方拟合率 \hat{P}_h 为

$$\hat{\rho}_h = \hat{\sigma}_h^2 / \sum_{h'=1}^H \hat{\sigma}_{h'}^2, \hat{P}_h = \sum_{h'=1}^h \hat{\rho}_{h'}. \quad (13)$$

2 ASVD 方法效果验证方案

在理论上 ASVD 方法无疑优于 SVD 方法。问题是,在实际分析中怎样验证其改进效果。这里给出 ASVD 方法的模方拟合率和空域特征两方面的验证方案。

2.1 模方拟合率比较方案

因为 \hat{C} 在理论上合理,故比较对其模方 $\|\hat{C}\|^2$ 进行。为此,用(8)式的 ${}_f\mathbf{w}, {}_g\mathbf{w}$ 对(3)式作正变换,结果为

$$\hat{C} = \sum_{h=1}^H \sigma_h X_h^+ Y_h^{+T} = \sum_{h=1}^H C_h^+. \quad (14)$$

其中: $\hat{C} = \sum_{h=1}^H {}_f\mathbf{w}C_g\mathbf{w}^T$; $X_h^+ = {}_f\mathbf{w}X_h$, $Y_h^+ = {}_g\mathbf{w}Y_h$; $C_h^+ = {}_f\mathbf{w}C_h{}_g\mathbf{w}^T$; + 为正变换结果标识。

(14)式中的 X_h^+, Y_h^+, C_h^+ 不具正交性;故称 X_h^+, Y_h^+ 是与 X_h, Y_h 对应的典型场, C_h^+ 是与 C_h 对应的典型分量。由 C_h^+ 可求得 SVD 方法第 h 个模态典型场对 \hat{C} 的模方拟合率 ρ_h^+ 和前 h 个模态典型场对 \hat{C} 的累积模方拟合率 P_h^+ ,

$$\rho_h^+ = \|C_h^+\|^2 / \|\hat{C}\|^2, P_h^+ = \left\| \sum_{h'=1}^h C_{h'}^+ \right\|^2 / \|\hat{C}\|^2. \quad (15)$$

若主要模态的 ρ_h^+ 明显大于 ρ_{h+1}^+ 、 P_h^+ 明显大于 P_{h+1}^+ , 则判断 ASVD 方法明显优于 SVD。

2.2 空域特征比较方案

以 ${}_f\mathbf{V}$ 记 C 的行向量模方场, ${}_g\mathbf{V}$ 记 C 的列向量模方场,它们分别是由 A, B 主对角元素构成的向量

$${}_f\mathbf{V} = (A_{11}A_{22}\dots A_{m_1m_1})^T, {}_g\mathbf{V} = (B_{11}B_{22}\dots B_{m_1m_1})^T. \quad (16)$$

其 s_1, s_2 点值为

$$\begin{aligned} {}_fV_{s_1} &= A_{s_1s_1} = \sum_{s_2=1}^{m_2} C^2(s_1, s_2), \\ {}_gV_{s_2} &= B_{s_2s_2} = \sum_{s_1=1}^{m_1} C^2(s_1, s_2). \end{aligned} \quad (17)$$

它们分别给出了 s_1 点 F 与 G 场、 s_2 点 G 与 F 场相关强弱的度量。

因为 ${}_fV, {}_gV$ 与 C 的模方对应,故对 SVD, ${}_fV, {}_gV$ 可与 X_h, Y_h 直接比较;而对 ASVD, 必须用(8)式的逆矩阵 ${}_fW^{-1}, {}_gW^{-1}$ (元素分别为 $1/\sqrt{{}_f d_{s_1}}, 1/\sqrt{{}_g d_{s_2}}$) 对(11)式的 ASVD 分析结果作逆变换

$$C = \sum_{h=1}^H \hat{\sigma}_h \hat{X}_h^- \hat{Y}_h^{-T} = \sum_{h=1}^H \hat{C}_h^-. \quad (18)$$

其中: $C = {}_fW^{-1} \hat{C}_g W^{-1}$; $\hat{X}_h^- = {}_fW^{-1} \hat{X}_h$, $\hat{Y}_h^- = {}_gW^{-1} \hat{Y}_h$; $\hat{C}_h^{-1} = {}_fW^{-1} \hat{C}_h W^{-1T}$; 右上角 $-$ 为逆变换结果标识。

(18)式中的 $\hat{X}_h^-, \hat{Y}_h^-, \hat{C}_h^-$ 均不具正交性;故称 \hat{X}_h^-, \hat{Y}_h^- 是与 \hat{X}_h, \hat{Y}_h 对应的典型场, \hat{C}_h^{-1} 是与 \hat{C}_h 对应的典型分量。

比较前若干个主要的 \hat{X}_h^-, X_h 与 ${}_fV, \hat{Y}_h^-, Y_h$ 与 ${}_gV$, 若 \hat{X}_h^-, \hat{Y}_h^- 上高绝对值区与 ${}_fV, {}_gV$ 上的高值区位置重合程度明显好于 X_h, Y_h , 则判断 ASVD 方法优于 SVD。

3 应用举例

以中国 60 a (1951—2010 年) 160 站冬季 (12 月—次年 2 月) 平均气温与降水量场的同期相关分析为例, 则(1)式的 F 为气温的标准化距平序列集合, G 为降水量的标准化距平序列集合, C 为气温、降水相关系数场集合。 $\hat{F}, \hat{G}, \hat{C}$ 是它们的均匀化订正结果。订正使用了王盘兴等(2011)和罗小莉等(2011)等求得的中国 160 站站网的 $d_s, s = 1, 160$ 。对 C 作 SVD、ASVD, 得订正前、后奇异值分解结果。下面给出其模方拟合率和空间特征比较。

表 1 1951—2010 年中国 160 站冬季气温、降水同期相关的 ASVD、SVD 模方拟合率分析

Table 1 The ASVD/SVD analysis of the rate of squarefitting on the correlation coefficient between temperature and precipitation in winter during 1951—2010

统计量	h									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\hat{\rho}_h$	43.5	23.2	16.0	6.1	3.2	1.3	1.1	0.9	0.7	0.6
ρ_h^+	39.3	16.4	14.0	5.7	6.7	1.1	1.5	0.9	0.8	0.8
$\Delta\rho_h$	4.2	6.8	2.0	0.4	-3.5	0.2	-0.4	0.0	-0.1	-0.2
\hat{P}_h	43.5	66.7	82.7	88.8	92.0	93.3	94.4	95.3	96.0	96.6
P_h^+	39.3	55.9	70.0	76.8	86.3	87.4	89.9	91.4	92.5	93.5
ΔP_h	4.2	10.8	12.7	12.0	5.7	5.9	4.5	3.9	3.5	3.1

注: $\Delta\rho_h = \hat{\rho}_h - \rho_h^+$; $\Delta P_h = \hat{P}_h - P_h^+$ 。

3.1 模方拟合率比较

据(15)式和(13)式求得 SVD、ASVD 的模方拟合率 ρ_h^+, P_h^+ 和 $\hat{\rho}_h, \hat{P}_h$ (表 1), 中国冬季气温、降水的同期相关最主要 4 个模态 ($h = 1, 4$) 的 $\hat{\rho}_h$ 均大于 ρ_h^+ ; 前 4 个模态的 \hat{P}_h 达到 88.8%, 且它们的 \hat{P}_h 明显大于相应的 P_h^+ 。因此, 模方分析表明站网均匀化订正明显改进了 SVD 方法的分析效果。

3.2 空间特征比较

比较只对前 2 个主要模态进行。比较中利用了 GrADS 绘图软件的空间均匀化功能。据(16)、(17)式求得了 ${}_fV, {}_gV$ (图 1)。由 ${}_fV$ (图 1a) 可见, 高值区连片地出现在 $40^\circ N$ 以南的南方地区, 高值中心位于东南、西南沿海 (东海、南海); 分布的组织性强, 这与季气温的空间代表性好有关。由 ${}_gV$ (图 1b) 可见, 其高值区分散出现在南方的长江流域、西藏中南部和北方的西北、东北、华北局部; 分布的组织性差, 这与季降水的空间代表性差有关。

重点分析 ASVD、SVD 空间型对 ${}_fV$ (图 1a) 的拟合。由图 2a 可见, ASVD 分析第 1 左奇异向量典型场 \hat{X}_1^- 的高绝对值区与 ${}_fV$ 高值区分布十分相似; 而由图 3a 可见, SVD 第 1 左奇异向量 X_1 的高绝对值区只在站点密集的 $100^\circ E$ 以东区域与 ${}_fV$ 相似。ASVD 分析第 2 左奇异向量典型场 \hat{X}_2^- (图 2b) 的高绝对值区有两块位于 $105^\circ E$ 以西, 且在西南地区及新疆西北部的分布, 相对于 SVD 的 X_2 (图 3b), 更接近 ${}_fV$ 的高低值分布; 而 SVD 第 2 左奇异向量 X_2 (图 3b) 的主要高绝对值区分别位于 $105^\circ E$ 以东的站点密集区和西部 (新疆), 且其位置均与 ${}_fV$ 的低值区对应。按空间特征比较方案, ASVD 左奇异向量典型场对 ${}_fV$ 的拟合明显优于 SVD。对 ${}_gV$ (图 1b) 与 \hat{Y}_h^-, Y_h 关系的分析, 也得到类似于 ${}_fV$ 的结果。

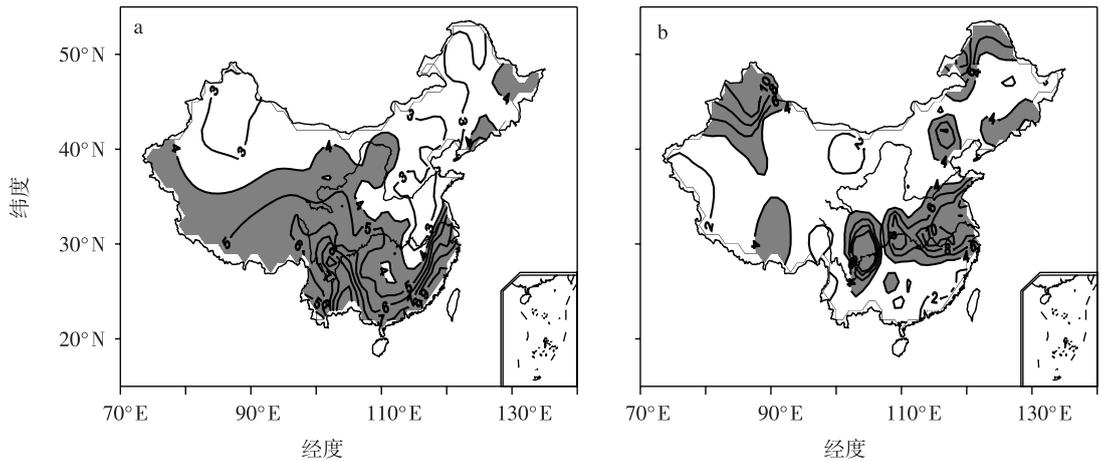


图 1 1951—2010 年中国 160 站冬季气温、降水同期相关系数的模方 (阴影区表示值大于等于 4)

a. V_f (单站气温与降水场); b. V_g (单站降水与气温场)

Fig. 1 The squarefitting of correlation coefficient between temperature and precipitation in winter during 1951—2010 (shadings show the values greater than or equal to 4) a. V_f (between temperature at single station and precipitation field); b. V_g (between precipitation at single station and temperature field)

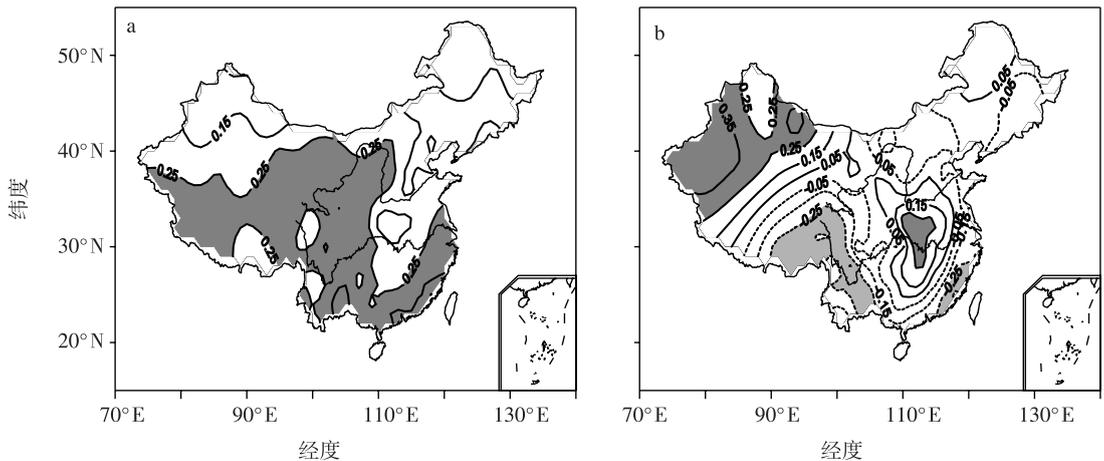


图 2 1951—2010 年中国 160 站冬季气温、降水同期相关系数矩阵 ASVD 左奇异向量的典型场 (阴影区表示绝对值大于等于 0.25) a. \hat{X}_1^- ; b. \hat{X}_2^-

Fig. 2 The typical fields of ASVD left singular vectors of correlation coefficient matrix between temperature and precipitation in winter during 1951—2010 (shadings show the absolute values greater than or equal to 0.25) a. \hat{X}_1^- ; b. \hat{X}_2^-

因此,对 1951—2010 年中国 160 站冬季气温、降水相关系数矩阵的 ASVD、SVD 结果 (模方拟合率和空间特征) 比较表明,ASVD 方法明显优于 SVD。

4 结论

据随机函数论阐明了奇异值分解 (SVD) 方法中格、站点网资料均匀化订正的必要性。据 SVD 与 EOF 分析关系给出了格、站点网资料 SVD 方法中均匀化订正的方法,由此得到了改进的奇异值分解 (ASVD) 方法。将 ASVD 方法、SVD 方法用于中国 60 a (1951—2010 年) 160 站冬季气温、降水同期相

关系数矩阵 C 的分析,结果表明:1) ASVD 方法的前 4 个主要模态的模方拟合率和累积模方拟合率均明显高于 SVD 方法。2) C 的模方图上高值区与 ASVD 方法前两个奇异向量典型场图上的高绝对值区关系明显较 SVD 方法更合理。由此验证了 ASVD 方法在实际分析中的效果。

致谢:基金委地学部南京大气资料服务中心提供了 1951—2010 年中国 160 站逐月平均气温、降水量资料,谨致谢。

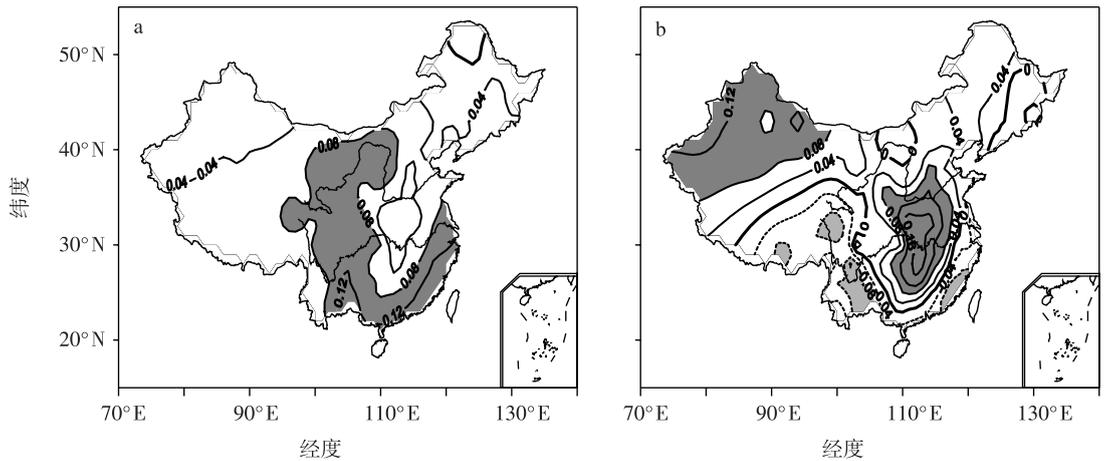


图3 1951—2010年中国160站冬季气温、降水同期相关系数矩阵SVD左奇异向量的典型场(阴影区表示绝对值大于等于0.08) a. X_1 ; b. X_2

Fig. 3 The typical fields of SVD left singular vectors of correlation coefficient matrix between temperature and precipitation in winter during 1951—2010 (shadings show the absolute values greater than or equal to 0.08) a. X_1 ; b. X_2

参考文献:

丁裕国,江志红. 1995. 非均匀站网 EOFs 展开的失真性及其修正[J]. 气象学报, 53(2): 247-253.

丁裕国,江志红. 1996. SVD 方法在气象场诊断分析中的普适性[J]. 气象学报, 54(3): 365-372.

黄少妮,黄菲,黄健. 2009. 中国雨季降水主模态季节演变的时空特征[J]. 中国海洋大学学报, 39(6): 1158-1164.

卡札凯维奇 Д И. 1974. 随机函数论原理及其在水文气象中的应用[M]. 章基嘉,译. 北京:科学出版社: 245-270.

林学椿,于淑秋. 1990. 近 40 年我国气候趋势[J]. 气象, 16(10): 16-23.

柳重堪. 1982. 正交函数及其应用[M]. 北京:国防工业出版社: 206-210.

罗小莉,李丽平,王盘兴,等. 2011. 站网均匀化订正对中国夏季气温 EOF 分析的改进[J]. 大气科学, 35(4): 620-630.

孙照渤,章基嘉,华莱士 J M. 1991. 冬季北大西洋地区海表温度与 500 百帕高度的奇异值分解[J]. 南京气象学院学报, 14(3): 287-292.

王建新. 1989. 长江中下游地区梅雨期雨量场与 500 hPa 月平均高度场的相关分析[J]. 气象科学, 9(3): 311-321.

王盘兴,周伟灿,王欣,等. 1997. 气象向量场奇异分解方法及其应用[J]. 南京气象学院学报, 20(2): 152-157.

王盘兴,罗小莉,李丽平,等. 2011. 中国气候资料站网均匀化订正的一种方案及应用[J]. 大气科学学报, 34(1): 8-13.

王晓春,吴国雄. 1996. 利用空间均匀网格对中国夏季降水异常区域特性的初步分析[J]. 气象学报, 54(3): 324-332.

赵红旭,葛玲. 1991. 北半球臭氧总量及大气环流与臭氧总量年际异常的联系[J]. 南京气象学院学报, 1991, 14(3): 473-481.

祝昌汉. 1992. 我国气温变化诊断方法探讨[J]. 应用气象学报, 3(增刊): 114-118.

Chung C, Nigam S. 1999. Weighting of geophysical data in principal component analysis[J]. J Geophys Res, 104(14): 16925-16928.

Craddock J M, Flood C R. 1969. Eigenvectors for representing the 500 mb geopotential surface over the Northern Hemisphere[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 59: 576-593.

Jones P D, Wigley T M L, Kelly P M. 1982. Variations in surface air temperature: Part 1, Northern Hemisphere, 1881—1980 [J]. Mon Wea Rev, 110(2): 59-70.

Jones P D, Raper S C B, Bradley R S. et al. 1986. Northern Hemisphere surface air temperature variations: 1851—1984 [J]. J Climate Appl Meteor, 25(2): 161-179.

Kutzbach J E. 1970. Large scale features of monthly mean Northern Hemisphere anomaly maps of sea level pressure [J]. Mon Wea Rev, 98(9): 708-716.

Palmer T N, Sun Zhaobo. 1985. A modeling and observational study of the relationship between sea surface temperature in the northwest Atlantic and the atmospheric general circulation [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 111: 947-975.

Prohaska J. 1976. A technique for analyzing the linear relationships between two meteorological fields [J]. Mon Wea Rev, 104: 1345-1353.

Roger J C. 1984. The association between the North Atlantic oscillation and the Southern oscillation in the Northern Hemisphere [J]. Mon Wea Rev, 112: 1999-2015.

Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. Mon Wea Rev, 1981, 109: 784-812.

Wang Panxing, He Jinhai, Guo Pinwen, et al. 2001. Regional differences of temporal-spatial characteristics of air-sea interactions in tropical oceans [J]. Acta Meteor Sinica, 2001, 21(3): 407-419.

Weare B. 1977. Empirical orthogonal analysis of Atlantic Ocean surface temperature [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 103: 467-478.