

文章编号:1004-9045(2007)03-0205-06

基于 NLCCA 的中国夏季降水与东亚夏季风关系的探讨

居丽丽, 郭品文

(南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044)

摘 要:运用一种基于人工神经网络的非线性典型相关分析方法(NLCCA),对中国夏季降水与东亚夏季风之间的非线性关系进行了分析。结果表明,夏季降水对东亚夏季风的响应具有一定的非线性,当夏季风较强与较弱时,对应的中国夏季降水异常分布呈现明显的不对称性。夏季降水与夏季风之间的关系可分离为线性响应和非线性响应,其中非线性响应部分占总方差贡献的 52.1%,说明我国夏季降水异常分布与东亚夏季风相互之间的关系既有线性特征也有非线性特征,非线性响应略显重要。

关键词: NLCCA; 降水异常; 东亚夏季风; 非线性响应

中图分类号: P458.1+21 **文献标识码:** A

1 引言

中国位于东亚季风气候区,大范围的降水分布、降水带移动以及旱涝灾害在很大程度上受东亚夏季风的控制,因此季风的研究为制作和改进汛期的降水与旱涝预报提供了一条重要途径^[1]。徐建军等^[2]于 1998 年以海陆气压差定义的夏季风强度指数为依据,通过对东亚夏季风年际异常与中国夏季降水关系的讨论发现,东亚夏季风强(弱)时,中国夏季降水以少雨(多雨)为主。同年,张庆云等人^[3]的研究表明,夏季热带季风槽偏弱(弱季风),东亚副热带梅雨锋偏强时,江淮流域降水偏多,夏季热带季风槽偏强(强季风),梅雨锋偏弱时,江淮流域降水则偏少。郭其蕴等^[4]也认为,东亚夏季风与中国东部夏季降水在年代际尺度上有密切关系,弱季风时期,中国东部降水自北向南为“负—正—负”分布,强季风时期则相反。从上述文献报道发现,它们对中国夏季降水与东亚夏季风的相互关系大多基于一种线性响应。

近年来,随着神经网络的应用越来越广泛^[5],基于神经网络的非线性典型相关分析法(NLCCA)日益受到关注。2001 年 Hsieh^[6]用 NLCCA 对热带太平洋海表温度距平和海平面气压之间的关系进行了分析,发现两者之间存在明显的非线性关系。Aiming W U^[7]于 2003 年通过对热带海表温度和北半球冬季 500 hPa 高度场的非线性典型相关分析,得到了北半球冬季大气对 ENSO 的非线性响应特征。影响中国降水的因素很多,也很复杂,降水的产生并不是单个因子作用的结果,而是多个因子综合配置而产生的结果^[8]。那么,

夏季降水与东亚夏季风之间是否也存在非线性关系呢?为此,利用基于人工神经网络的非线性典型相关分析方法(NLCCA),对中国夏季降水与东亚夏季风之间的非线性关系进行了研究探讨。

2 资料与方法

2.1 资料来源和资料预处理

该文所使用的资料有:(1)国家气候中心提供的 1951 年 1 月至 2004 年 2 月中国 160 站逐月降水资料,通过计算出每年夏季平均降水,再减去其对应的气候态,得到我国夏季的降水距平场;(2)美国 NCEP/NCAR 再分析资料中 1951 年 1 月至 2003 年 12 月共 53 年的夏季 850 hPa 低空风场资料,全球格点数 144×73,网格距 2.5°×2.5°;所取范围 10°~50°N,70°~170°E。

2.2 方法

利用一种非线性典型相关分析法 NLCCA,即基于三个前反馈网络组成的人工神经网络方法,分析中国夏季降水与东亚夏季风之间的关系。根据陈隆勋^[9]等人对东亚季风的研究理论,本文以 850 hPa 的 u、v 风场代表东亚夏季风。实现 NLCCA 的神经网络结构见图 1。

图 1 中, NLCCA 由 3 个前反馈网络组成,左边是双排套装网络, x 和 y 输入后成像到各自的“隐”层 h(x) 和 h(y),再从隐层成像到典型相关变量 u、v,最后以 u、v 之间的相关系数达最大、与 x 之间及与 y 之间的均方误差最小为原则,分别将 u、v 成像输出 x'、y'。计算 h(x)、h(y)、u 和 v 分量的公式是:

$$h_k^{(x)} = \tanh \left[(W^{(x)} X + b^{(x)})_k \right] \quad (1)$$

收稿日期:2007-03-10;定稿日期:2007-05-09

作者简介:居丽丽,女,1981 年生,南京信息工程大学,主要从事天气气候诊断分析研究。E-mail:julili1215@yahoo.com.cn

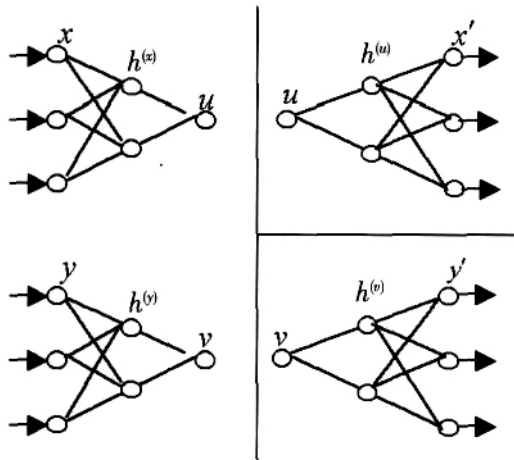


图 1 实现 NLCCA 的神经网络

$$h_n^{(y)} = \tanh[(W^{(y)}Y + b^{(y)})_n] \quad (2)$$

$$u = W_2^{(x)} \cdot h(x) + \bar{b}^{(x)} \quad (3)$$

$$v = W_2^{(y)} \cdot h(y) + \bar{b}^{(y)} \quad (4)$$

式(1)-(4)中, $W^{(x)}$ 是 l_1 行 m_1 列权系数矩阵, $W^{(y)}$ 是 l_2 行 m_2 列权系数矩阵, $b^{(x)}$ 是 l_1 维列向量, $b^{(y)}$ 是 l_2 维列向量, 偏斜参数 \tanh 表示双曲正切函数, $W_2^{(x)}$ 是 l_1 维列向量, $W_2^{(y)}$ 是 l_2 维列向量, 偏斜参数 $\bar{b}^{(x)}$ 和 $\bar{b}^{(y)}$ 是单个实数。

为了降低资料场的噪声、浓缩夏季降水距平场和

东亚夏季风距平风场各自的资料信息, 运用 NLCCA 之前, 对中国夏季降水和东亚夏季风分别做主成分分析(PCA), 分别截取前 4 列主成分(PC)作为 NLCCA 的 x 场、 y 场输入。NLCCA 方法的具体实现步骤见文献^[10-12]。NLCCA 算法利用 MATLAB 软件实现最小化功能, 此外为防止网络训练陷入“过适应”, 即出现损失函数局部最小情况, 损失函数 $J = -\text{Cor}(u,v)$ 可增加权重惩罚系数过大的项, 将其修改为

$$J = -\text{Cov}(u,v) + (u^2)^2 + [(u^2)^{1/2} - 1]^2 + [(v^2)^{1/2} - 1]^2 + p \left\{ \sum_{ki} [W_{ki}^{(x)}]^2 + \sum_{nj} [W_{nj}^{(y)}]^2 \right\} \quad (5)$$

其中 p 为非负的权重惩罚系数, 网络随机选取不同的初始权重系数和偏斜参数运行 50 次, 将 u, v 间相关系数 $\text{Cor}(u,v)$ 达最大值时的网络执行选作最后的结果。

3 中国夏季降水与东亚夏季风的 NLCCA 第一模态的建立

为了减少原始资料的噪声影响, 对夏季降水和东亚夏季风分别作主成分分析, 即进行降维处理, 分别取前 4 个 PC 作为 NLCCA 的输入 x (左场)和 y (右场)。所得的夏季降水 EOF 空间分布见图 2。

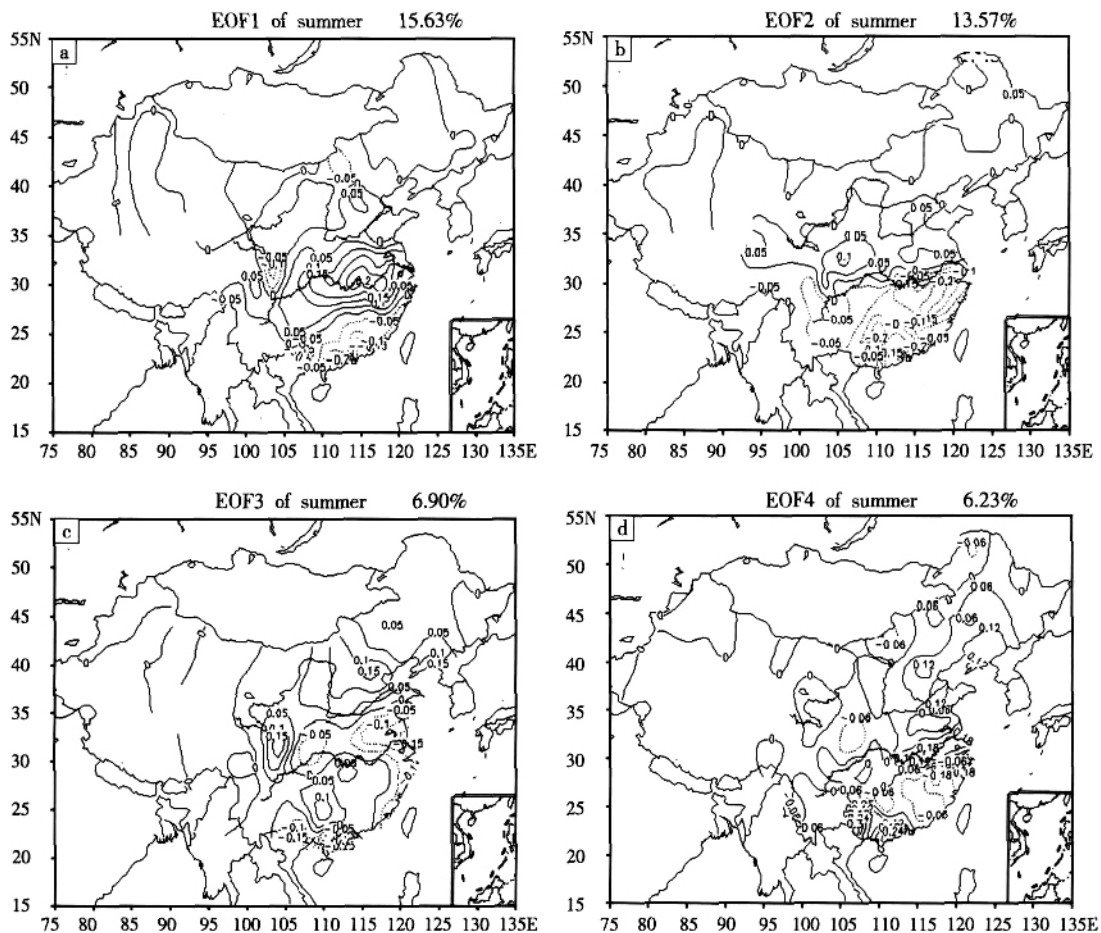


图 2 1951 年 1 月至 2003 年 12 月中国夏季降水距平 EOF 的前四个特征向量分布图

从夏季降水的第一特征向量空间分布图中可见, 当对应的时间序列为正值时, 夏季降水距平场呈“负-正-负”分布, 降水空间变化比较剧烈的区域主要分布在长江流域和华南沿海。与第一特征向量空间分布相比, 第二特征向量则大体呈南北分布, 但降水距平的显著变化以长江及其以南地区为主, 主要集中在华南地区。从图中还可看出, PCA 第一特征向量所描述的夏季降水空间变化梯度比第二特征向量中降水的空间变化梯度大。

夏季降水的前四个 PCA 模态分别解释其总方差的 15.63%、13.57%、6.90%和 6.23%, 四个模态的总方差贡献在 40%以上, 且都能通过 0.05 的显著性检验。经过降维处理后, 分别将夏季降水和夏季风进行 PCA 分析后所得的前四个主成分即时间系数作为左、右场, 输入到图 1 所示神经网络中进行网络训练, 训练完成后便得到夏季降水与东亚夏季风之间非线性典型相关分析的第一模态(NLCCA 第一模态), 此模态在 PC 空间的散布见图 3。

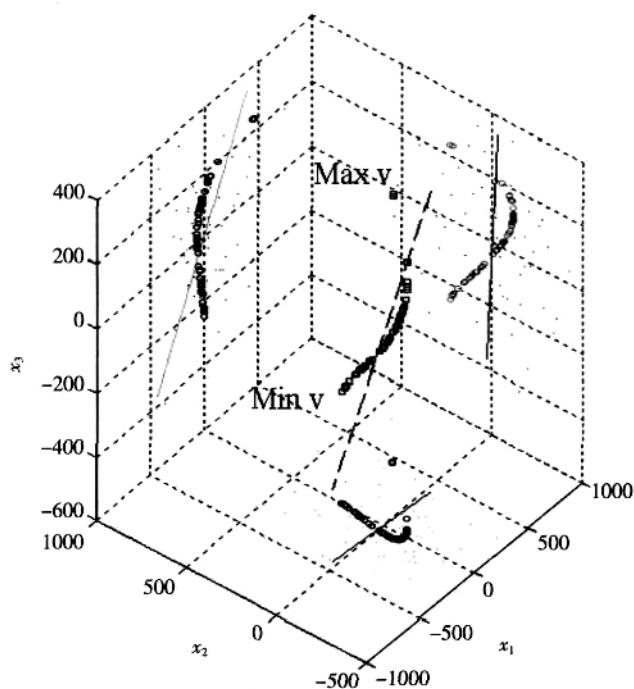


图3 NLCCA 所提取的中国夏季降水对东亚夏季风响应的三维空间分布图(虚直线表示由 CCA 提取的线性关系, 空心圆曲线、实线分别是 NLCCA 提取的响应和 CCA 提取的线性响应在 PC1-PC2、PC2-PC3、PC1-PC3 平面上的投影)

图 3 只给出了降水距平前 3 个 PC 的 NLCCA 近似 x' , 因为前三个主成分解释的方差贡献相对较大, 可以从一定程度上表示降水的异常情况。从其三维空间分布图中可看到, 方格小框组成了一条平滑曲线, 它是由神经网络提取出来的降水 PC 值的近似, 图中的空心圆组成的曲线是 NLCCA 第一模态在 PC1-

PC2、PC2-PC3、PC1-PC3 平面中的投影。此外, 网络训练后还分别得到降水和季风的典型相关变量 u 和 v , 当 v 从最小值变化到最大值即当夏季风从最弱过渡到最强时, 中国夏季降水对东亚夏季风是一个类似二次曲线的非线性响应。与此相比, 三维空间中的虚直线是由线性 CCA 所提取出来的两者关系, 它则表示出夏季降水与夏季风之间的线性关系。

NLCCA 模拟出来的非线性关系与传统 CCA 得到的线性关系有所不同, 特别是线性关系下, 时间序列取不同值时对应的降水异常分布型是固定的, 只是正负值的变化和强度有差异, 而非线性特征则随着典型相关变量值的变化, 对应不同的降水异常分布型。为了更清楚地研究降水对夏季风的非线性响应, 分别对夏季风极强年、极弱年下的降水距平场进行研究探讨。当典型相关变量分别取最大值和最小值时, 对应的夏季降水 NLCCA 模态中 4 个 PC 序列的近似 x' 与 PCA 所得的 4 个空间特征向量相乘, 便可得到强、弱夏季风情况下中国夏季降水异常的恢复场(图 4)。

当线性 CCA 模态对应的典型相关变量取极大值和极小值时, 即东亚夏季风极强年和极弱年份下, 对应的夏季降水距平分布型一致, 只是旱涝情况相反(图 4a、b); NLCCA 模态下的恢复场则不同, 当典型相关变量取极大值(max v)时, 即在极强夏季风影响下(图 4c), 我国夏季降水分布主要呈南旱北涝, 旱涝分界线位于长江以南, 长江中下游为降水偏涝中心区域, 而强的负距平地区则位于华南沿海。当夏季风极弱时(min v) (图 4d), 我国夏季降水距平场大体呈“负-正-负”形势分布, 主要多雨带位于黄河与长江之间, 江淮流域、长江中游及下游部分地区偏涝, 其中强距平中心位于江苏附近和陕西与四川交界处。除了两广、福建与浙江极少部分沿海地区外, 黄河以北地区、长江上游及其以北、长江下游及其以南地区为降水负距平区域, 其中湖北、华南大部地区和北京附近尤为偏旱, 与极强夏季风(max v)影响下的夏季降水异常分布相比, 降水距平场在强度上存在显著差异, 且分布型也明显不同。可见, 中国夏季降水与东亚季风之间存在一定的非线性关系。

表 1 为经过非线性典型相关分析之后, 当典型相关变量取极大值和极小值时夏季降水主成分的值, 当东亚夏季风取较强值时, 对应夏季降水的 PC1 为较大的正值, PC2、PC3 大致相当且均为中等大小正值, PC4 则是一个很小的负值; 当夏季风极弱时, 降水的 PC1 是一个较小负值, PC2 是一个相对大的正值, PC3、PC2 数值相当但符号相反, PC4 与强季风情况相似, 也是一个很小的负值。

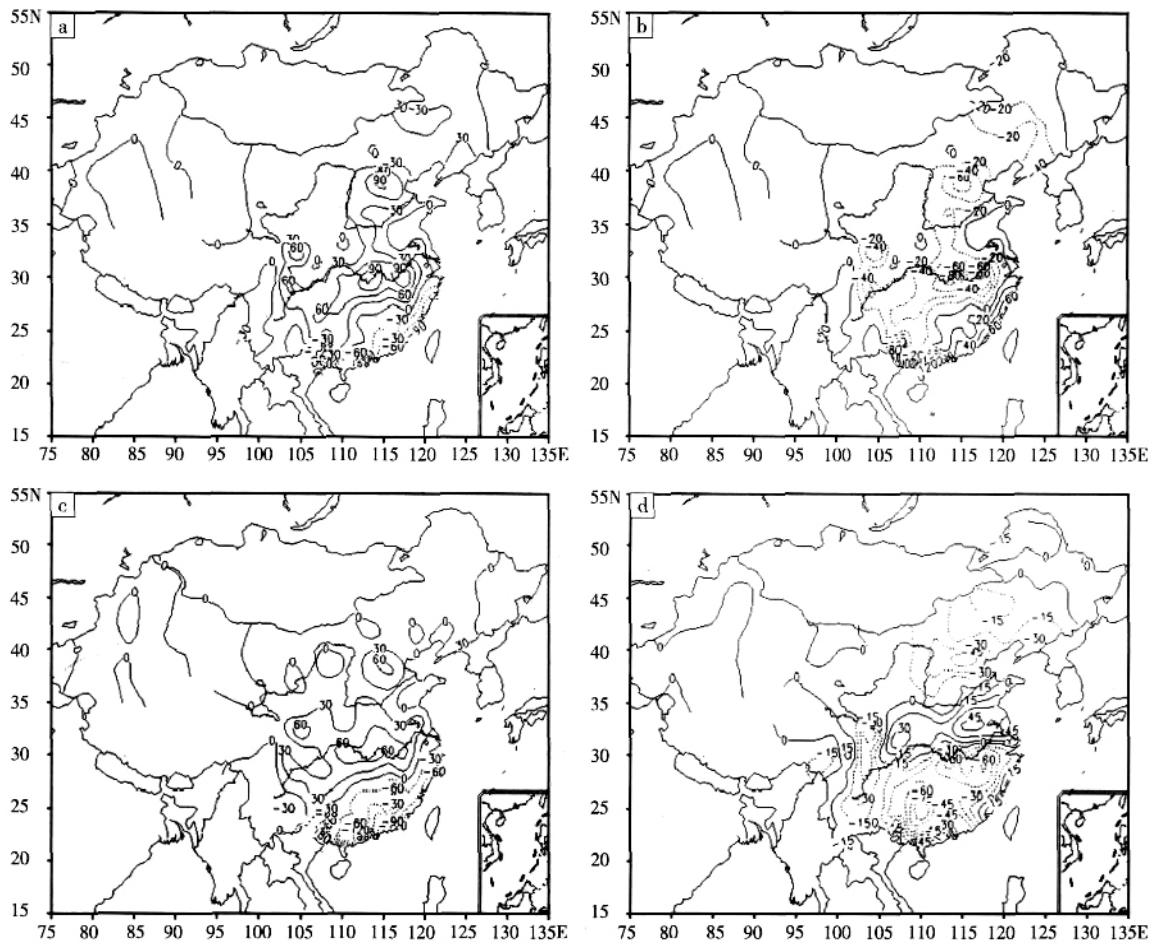


图 4 CCA 模态与 NLCCA 模态下东亚夏季风分别取极强值(max v)(a、c)和极弱值(min v)(b、d)时返回的夏季降水异常分布图(a、b 对应 CCA 模态,c、d 对应 NLCCA 模态)

表 1 网络训练后强夏季风年和弱夏季风年对应的夏季降水的主成分值(PC)

PC	Max v	Min v
PC1	451.740	-2.755
PC2	221.760	230.620
PC3	234.110	246.300
PC4	-30.057	-13.134

由此可知,在强夏季风和弱夏季风影响下,我国夏季降水异常并不是严格的线性响应,两者之间存在一定非线性关系。当最大时即夏季风较强时,降水 PC1 的数值很大,所以极强夏季风下的降水距平分布型与夏季降水的 EOF1 最为接近(图 2a),除华北部分地区及四川附近,其他区域的降水异常分布极为相似;当最小即夏季风极弱时,降水的 PC2 和 PC3 数值相当且相对较大,此时弱夏季风年影响下的降水分布型则结合了夏季降水的 EOF2 和 EOF3(图 2b、c)。

度量非线性关系与线性关系差异的程度可用 NLCCA 模态的均方误差 (MSE) 与线性 CCA 模态的 MSE 之比 R 作为判断标准,当 R 越接近 1 或近似为 1 时,表明夏季降水对东亚夏季风的响应主要表现为线性特征, R 越小则说明降水对夏季风响应的非线性特

征较线性越明显。网络训练完成后经计算可得,对于夏季降水异常,两者之比为 0.914,该比值进一步揭示了中国夏季降水对东亚夏季风的响应存在比较显著的非线性特征。

4 夏季降水对东亚夏季风的线性响应和非线性响应

为了深入了解夏季降水与东亚夏季风之间的非线性关系,将神经网络提取的特征分离成线性部分和非线性部分,其中线性部分的主成分为图 3 中的直线投影,非线性主成分则是用网络训练所得的 NLCCA 模态减去线性投影部分。分别将线性主成分和非线性主成分与其对应的空间特征向量相乘,得到降水对夏季风的线性响应和非线性响应。经计算可知,降水的线性和非线性响应部分分别占 NLCCA 第一模态的 47.9%、52.1%,虽然网络输入场 x (降水距平场 PCA 分析后的前 4 列主成分序列) 只解释了原降水距平资料场的 42.33%,但更高维的降水距平 PCA 模态包含的扰动更多,即实际夏季降水距平场对夏季风的非线性响应将表现的更加显著,因此可以认为我国夏季降水对东亚夏季风存在明显的非线性响应,且非线性响应

所占比重相对较大。

用主成分分析法(PCA)分别对线性响应和非线性响应部分进行分析,可得到相应的空间特征向量分布图,并使得降水对夏季风响应的两种表现形式更加直观(图 5)。

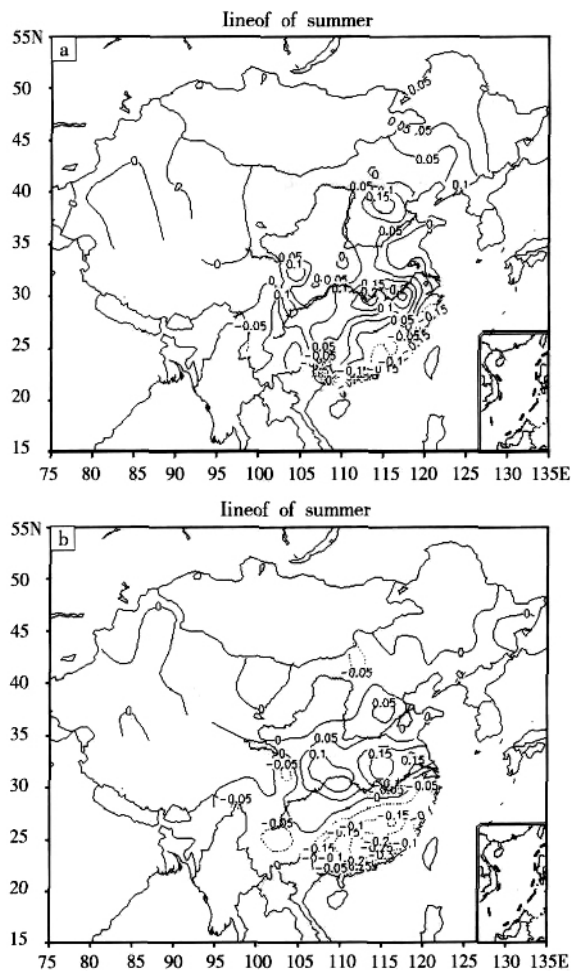


图 5 对分离出的夏季降水对东亚夏季风的线性响应(a)和非线性响应(b)恢复场分别进行 PCA 分析后得到的特征向量

对降水的线性响应和非线性响应进行主成分分析后,得到其相应的 PCA 第一模态,可分别解释线性响应场和非线性响应场的 99%和 64%,其中线性部分 PCA 第一模态的方差贡献接近 100%,因为它就是由线性 CCA 根据东亚季风的强弱提取出来的线性投影,除华北部分地区、黄河中上游和四川附近有差别之外,线性响应恢复场 PCA 第一模态特征向量分布图与原夏季降水距平场 PCA 第一模态空间分布图较为相似。而非线性响应场的 PCA 第一模态解释的方差也在 60%以上,说明我国夏季降水对东亚夏季风响应的非线性特征其存在形式并不复杂,如图 5b 中空间特征向量分布所示,降水距平场主要呈南北分布,旱涝分界线位于长江流域南侧,其中空间变化较剧烈的区域主要位于华南沿海地区。与之相比,线性响应的旱涝

分界线偏南,主要以长江中下游以及北京、河北附近的降水异常变化为主,也就是说,长江中下游以及北京、河北附近的降水在夏季风的影响下主要表现为线性响应,而华南地区降水与夏季风的相互关系则表现出较为显著的非线性特征。

综上所述,夏季降水对东亚夏季风的响应可分离为线性和非线性两部分,且表现形式都不复杂。分别将典型相关变量最大、最小时的降水距平场相减和相加,便可得到夏季风影响下降水的线性响应分布和非线性响应分布(图 6)。

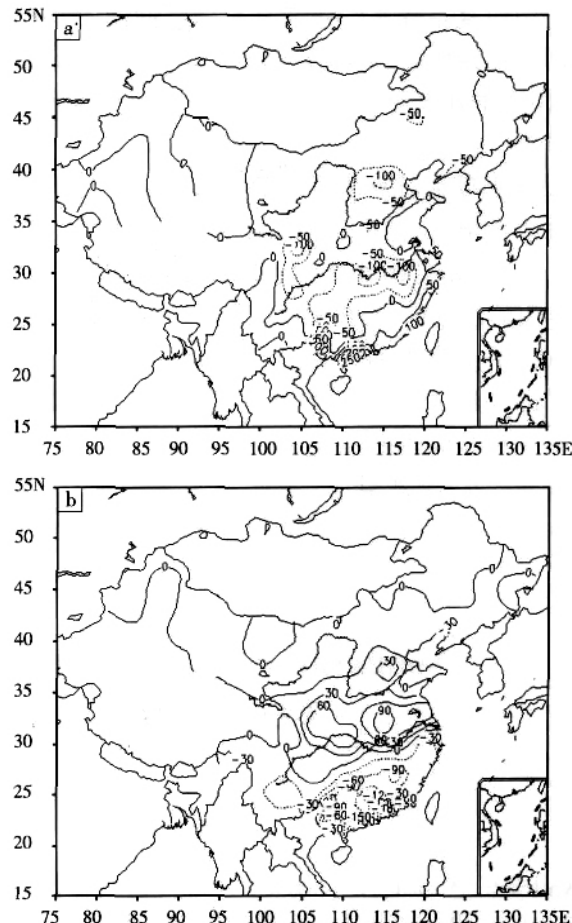


图 6 东亚夏季风的极强值(max v)、极弱值(min v)分别相减(a)和相加(b)时返回的夏季降水异常分布图

若我国夏季降水与东亚夏季风之间只存在线性关系,强弱季风情况下降水距平场相加后各地区降水应该接近 0,但图 6b 显示相加后的降水距平场不为零值并呈一定分布型;此外还发现,强夏季风与弱夏季风下夏季降水距平场相减和相加后得到的降水异常分布型分别与由神经网络提取的线性响应恢复场和非线性响应恢复场 PCA 第一模态空间特征向量分布型(图 5)十分相似。由此进一步说明,中国夏季降水与东亚夏季风相互之间既存在线性关系也存在非线性关系。

为了检验神经网络的普遍性和适用性,去除两个

季风极强年(1988、1994 年)和两个季风极弱年(1991、2002 年), 通过重复上述工作后得到的强弱夏季风影响下的降水距平分布图以及分离出的线性响应与非线性响应下的降水异常分布都分别与图 4、图 5、图 6 相似。

5 结论

运用基于人工神经网络的非线性典型相关分析法(NLCCA)对中国夏季降水和东亚夏季风之间的关系进行探讨研究, 得到以下几点结论。

(1)中国夏季降水与东亚夏季风之间的关系存在明显的非线性特征, 在极强夏季风和极弱夏季风影响下, 我国夏季降水异常分布表现出分布型和强度上的显著差异。

(2)夏季降水对夏季风的响应可以分离为线性部分和非线性部分, 其中, 非线性响应部分占总方差的 52.1%, 由此表明夏季降水对夏季风的线性响应与非线性响应的比重相当, 非线性特征略显重要。

(3)通过对降水的线性响应恢复场和非线性响应恢复场进行 PCA 分析, 可得到夏季降水对东亚夏季风线性响应和非线性响应的主要表现形式, 其中长江中下游以及北京、河北附近的降水在夏季风的影响下主要表现为线性响应, 而华南地区降水异常的非线性响

应最为显著。

参考文献:

- [1] 杨梅学,姚檀栋.亚洲季风研究进展[J].自然杂志, 1999,21(6):330-335.
- [2] 徐建军,朱乾根,周铁汉.东亚夏季风与中国夏季降水年际异常的分型研究[J].南京气象学院学报,1998, 21(3):313-320.
- [3] 张庆云,陶诗言.夏季东亚热带和副热带季风与中国东部汛期降水[J].应用气象学报,1998(增刊):17-23.
- [4] 郭其蕴,蔡静宁,邵雪梅.1873-2003 年东亚夏季风变化的研究[J].大气科学, 2004, 28:206-215.
- [5] 金龙.神经网络气象预报建模理论与应用[M].北京:气象出版社, 2004:3-8
- [6] William W H. Nonlinear canonical correlation analysis of the tropical pacific climate variability using a neural approach [J]. Journal of Climate, 2001, 14(12):2528-2539.
- [7] Aiming W U, William W H. The nonlinear northern hemisphere winter atmospheric response to ENSO [J]. Geophys Res Lett, 31(2): L02203 (1-4).
- [8] 严华生,严小冬.中国降水月季气候变化分析预测研究[M].北京:气象出版社, 2004:1-10.
- [9] 陈隆勋,朱乾根,罗会邦,等.东亚季风[M].北京:气象出版社, 1991:68-69.
- [10] 吴洪宝,吴蕾.气候变率诊断和预测方法[M].北京:气象出版社, 2005:156-160.
- [11] William W H. Nonlinear multivariate and time series analysis by neural network methods [J].Review of Geophysics, 2004, 42(RG):1003.
- [12] William W H. Nonlinear canonical correlation analysis by neural networks [J]. Neural Networks, 2000,13:1095-1105.

Nonlinear Association Between Summer Precipitation Over China and Summer Monsoon of East Asia

JU Li-li, GUO Pin-wen

(Institute of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044)

Abstract: A nonlinear projection of the East-Asian summer monsoon onto the summer precipitation over China was performed by applying a neural-network-based nonlinear canonical correlation analysis method (NLCCA). The results show that the response of the summer precipitation to east-Asian summer monsoon reveals some extent nonlinearity. When the summer monsoon appears the strongest or the weakest situation, the corresponding space distribution pattern of summer precipitation anomaly over China manifest obvious asymmetry. The summer precipitation response to the summer monsoon can be separated into a linear component and a nonlinear component, and the nonlinear component account for 52.1%, which suggest that the summer precipitation over China responds to the East-Asian summer monsoon linearly and nonlinearly, and nonlinearity is a bit more important.

Key words: NLCCA; Precipitation anomaly; East-Asian summer monsoon; Nonlinear response