

遗传神经网络释用气候模式预测产品的试验研究

张礼平^{1,2} 丁一汇^{2,3} 李清泉^{2,3} 张乐飞⁴

1 武汉区域气候中心, 武汉 430074

2 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

3 国家气候中心, 北京 100081

4 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079

摘要 从业务需求出发, 提出了面向气候模式产品释用的神经网络。选用主分量作为网络的输入和输出, 大大减少了其节点数, 重点突出了大尺度影响变化关系, 提高了实际预测的稳定性; 用全局寻优的遗传算法取代经典 BP 算法, 为高质量的网络学习训练提供了保证; 针对实际设计代价函数, 保证了网络学习训练能适应气候模式产品释用的基本要求, 学习目的更明确, 针对性更强。分别以夏季(6~8月) NCEP/NCAR 500 hPa 高度场、国家气候中心海气耦合模式 500 hPa 高度预测场主分量为外界输入信号, 同期中国降水场、华中区域降水场主分量为网络输出信号, 进行了拟合预测和独立预测试验。结果表明: 用模式 500 hPa 高度预测场主分量为外界输入信号, 网络输出(降水场主分量)反演的中国、华中地区降水场预测距平与实况同号率, 有可能接近用 NCEP/NCAR 500 hPa 高度场主分量为外界输入信号相当的技巧水平。

关键词 模式产品释用 神经网络 遗传算法 可预测性

文章编号 1006-9585 (2008) 05-0681-07 **中图分类号** P456 **文献标识码** A

Research on Reexplanation and Reanalysis of Products of Climate Model Using Genetic Algorithm Neural Networks

ZHANG Li-Ping^{1,2}, DING Yi-Hui^{2,3}, LI Qing-Quan^{2,3}, and ZHANG Le-Fei⁴

1 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074

2 Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 National Climate Center, Beijing 100081

4 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079

Abstract Artificial neural networks for reexplanation and reanalysis of products of climate model are proposed according to professional requirements. As principal components are selected for the input and output of the networks, number of the nodes are decreased greatly, a large scale influence is stressed and prediction is stabilized. Because of the substitution of global genetic algorithms (GA) for classical BP the neural networks obtain perfect knowledge through enough practice. The cost function designed for vocational work ensures the practiced neural networks suitable for reexplanation and reanalysis of products of climate model. Practice of neural networks have a definite purpose exactly. Principal components of JJA (June, July, August) NCEP/NCAR 500 hPa geopotential height fields and 500 hPa geopotential height fields of National Climate Center coupled ocean-atmosphere model are selected for the input, and principal components of same time rainfall fields over both of China and the middle areas of China are selected for the output of the networks, both of imitative and untrained samples have tested. The results show that

收稿日期 2007-06-05 收到, 2008-02-26 收到修定稿

资助项目 中国气象局气候研究开放实验室开放课题和武汉区域气象中心科技发展基金项目

作者简介 张礼平, 男, 1956 年出生, 正研级高级工程师, 主要从事短期气候预测及方法研制。

E-mail: Zhangliping_wuhan@yahoo.com.cn

using principal components of 500 hPa geopotential height fields of model as the input, the fields of rainfall recovered by the output (principal components of rainfall fields) may approach the skill level of forecast using principal components of 500 hPa geopotential height fields of NCEP/NCAR as the input.

Key words reexplanation and reanalysis of products of model, artificial neural networks, genetic algorithm, predictability

1 引言

目前,短期气候预测以统计方法为主,预测水平仍然不高。数值预测已成为世界各国发展短期气候预测的共同方向。国家气候中心海气耦合模式已业务化运行,输出有大量预测产品,具有一定的预测能力^[1,2]。为更好地发挥国家气候中心海气耦合模式的作用,研制其在中国及各大区域的释用技术势在必行。

由于目前气候模式预测误差明显大于中短期预报模式,气候模式 500 hPa 高度场预测距平与实况相关系数还未达到 0.5^[3],因而大多数气候模式在正式业务中只作为一种重要参考。为了改进这种动力模式预测结果,尤其对于区域的预测,需要研究产品的释用技术,对误差进行订正,但目前气候模式产品释用技术研究还不多。

王会军等^[4]根据模式输出降水总体变化有两年周期的特点,提出了降水距平百分率订正方案。赵彦等^[5]也对模式输出降水距平百分率订正进行了研究。Henrik 等^[6]用 SVD 提取的模式输出北美雨季降水场和实况场时间系数,构造线性函数,改进降水场预测。

李维京等^[7]从大尺度大气动力学方程组出发,推导出月 500 hPa 高度场与月降水的关系,建立了降水预测方程,利用月动力延伸模式 500 hPa 高度预测场和实况降水确定方程系数。张礼平等^[8]用 SVD 从模式 500 hPa 高度预测场中提取大尺度信号,借助最优化技术,改进降水场的预测。

近年来,为解决气象预测中因子与预测对象非线性关系问题,通过引进前向人工神经网络,取得了一定的成效^[9]。本文主要针对夏季(6~8月)降水场预测,尝试和探讨用人工神经网络释用国家气候中心海气耦合模式预测产品的可能性及其应用前景。

2 基本原理

2.1 前向网络

前向网络是人工神经网络的一种,它通过简单非线性处理单元的复合映射以获得处理非线性问题的能力。对于 3 层前向网络,若 $a_{ij}^{(2)}$ 表示第 2 层(隐层)第 j 个神经元与第 3 层(输出层)第 i 个神经元的连接权, $b_{ij}^{(1)}$ 表示第 1 层(输入层)第 j 个神经元与第 2 层第 i 个神经元的连接权, $N^{(1)}$ 、 $N^{(2)}$ 、 $N^{(3)}$ 分别为第 1 层、第 2 层、第 3 层神经元(节点)数, $w_i^{(1)}$, $w_i^{(2)}$ 分别为输入层到隐层,隐层到输出层的阈值, $x_i^{(2)}$ 为第 2 层输出,则外界输入 u_j ($j=1, 2, \dots, N^{(1)}$) 和网络输出 $y_i^{(3)}$ 的关系可表示为^[10]

$$x_i^{(2)} = \sum_{j=1}^{N^{(1)}} b_{ij}^{(1)} u_j + w_i^{(1)}, \quad i = 1, 2, \dots, N^{(2)} \quad (1)$$

$$y_i^{(3)} = \sum_{j=1}^{N^{(2)}} a_{ij}^{(1)} g(x_j^{(2)}) + w_i^{(2)}, \quad i = 1, 2, \dots, N^{(3)} \quad (2)$$

其中, $g(r) = \frac{1}{1+e^{-r}}$ 。

2.2 学习训练

网络结构确定后由已知的样本反复调节各层各神经元的连接权和阈值,直至使预先设计的代价函数极小(或极大)化,这个过程就称为网络的学习训练。BP 算法是前向网络经典的学习算法,它对前向网络的发展起过历史性的推动作用。在众多领域,包括气象科学, BP 算法得到了广泛的应用^[9]。然而,对于网络学习训练如此复杂的非线性优化问题,代价函数往往存在多个分布无规则的局部极小点。BP 算法实为一种梯度下降法,算法每次都是向改进解的方向,也即负梯度方向搜索,这是使代价函数值在当前邻域内下降最快的方向。因此这种算法不能在全局范围内搜索最优解,易陷入局部极小,对初值依赖较大,不能满足应用的高要求。

为此我们引入遗传算法^[11] (Genetic Algorithms, 简称 GA) 取代传统的 BP 算法。GA 是近年受生物进化论启发提出的一种基于“适者生存”的高度并行、随机和自适应的新颖优化算法。它的两个最显著的特点就是隐含并行性和全局解空间搜索, 为高质量的网络学习训练创造了条件。

2.3 代价函数设计

实质上, 网络学习训练就是确定连接权和阈值, 使代价函数极小 (或极大) 化。因此代价函数的设计对于网络学习训练起着至关重要的导向作用, 直接决定着网络的性能。若代价函数设计不当, 还有可能误导网络学习训练过程。因而代价函数的形式, 及其参数的确定本身也是一个复杂的优化问题, 理论上难以解决, 目前只有较多地依赖于经验。一般应用而言, 代价函数常取为

$$E = \sum_{i=1}^n (z_i - z_i^0)^2, \quad (3)$$

其中, z_i 为网络输出, z_i^0 为期望输出, 即预测对象值; n 为训练样本个数, 也即使人工构造的神经网络输出最大可能地接近预测对象值本身, 数值拟合误差最小。但由于现有气候模式技术水平的局限, 不可能高精度地预测出气象要素值本身。在这种情形下, 区域内距平符号预测正确的站数 N_0 就显得格外重要, 它是通用的技巧评分公式

$$S = \frac{N_0 - N'}{N - N'} \times 100\% \quad (4)$$

中最重要的参数 (式中, N 为总站数, N' 为随机预测正确的站数)。定性预测正确是业务工作的基本要求。显然, N_0 是关于 $a_{ij}^{(2)}$ 、 $b_{ij}^{(1)}$ 、 $w_i^{(1)}$ 、 $w_i^{(2)}$ 的函数, 选取 N_0 为代价函数。

注意到 N_0 为不连续函数, 无法求得导数。BP 算法需要代价函数的导数 (梯度) 信息, 因此 BP 算法不可能完成这类网络学习训练。而 GA 算法是一种随机优化算法, 并不需要代价函数的导数信息, 不受其有无导数的影响, 仍可完成网络学习训练。这也是我们引入 GA 算法取代 BP 算法的另一个重要原因。

3 预测试验

3.1 资料

国家气候中心海气耦合模式以国家气象中心

中期数值预报模式 (T63 版本) 动力框架为基础, 进行改进后形成的一个有完整物理过程, 能描述全球大气运动变化的三维大气环流模式。模式输出包括全球月平均 17 层环流场及地面要素场预测产品。大气初始场利用 1983~2002 年 3 月 11~14 日 0 时 (北京时间, 下同) 和 12 时资料 (20 年, 每年 8 个时次) 的 NCEP/NCAR 再分析资料插值到模式网格上得到; 海洋初始场采用国家气候中心海洋资料同化系统制作的 1983~2002 年 2 月 28 日海洋同化资料 (包括海温、洋流等物理量)。每一个回报试验中, 模式自初始时刻积分到 8 月 31 日。因此文中使用的海气耦合模式回报结果是每年 8 个预报成员集合平均结果。考虑到气候模式输出的环流场较为可靠, 且 500 hPa 高度场与地面降水等要素场关系密切, 我们由该模式回算的 1983~2002 年 6、7、8 月平均 500 hPa 高度场生成夏季预测场。NCEP/NCAR 再分析资料^[12] 作为 500 hPa 高度实况场 (截取 1971~2000 年)。范围均取 (30°S~60°N, 0°~360°E), 水平分辨率为 5°×5°, 包含了影响中国, 特别是影响长江流域夏季降水主要系统, 如东亚阻塞高压、西太平洋副热带高压等。同期对应时段中国降水场 (160 站)、华中区域降水场取自 160 站中河南、湖北、湖南、安徽和江西省 27 测站资料。

3.2 方案设计

气候模式预测产品回算样本极为有限 (仅 20 年), 构造复杂网络将增加待定参数数目, 降低网络的泛化能力。构造简单的 3 层前向网络, 即输入层、隐层和输出层, 隐层取 2 个节点。为使输入、输出信号既含有大量信息, 且随机波动小, 个数又不至于太多, 分别选取夏季模式 500 hPa 高度预测场和 NCEP/NCAR 500 hPa 高度场主分量为外界输入信号, 同期中国降水场和华中区域降水场主分量为网络输出信号。用 EOF (Empirical Orthogonal Function) 处理时先对 500 hPa 高度场、降水场每个格点 (测站) 分别进行方差标准化 (多年平均基准气候模式为 1983~2002 年, NCEP/NCAR 为 1971~2000 年, 降水与之对应)。

定义训练年段内平均每年区域内距平符号拟合正确的站数乘以 -1, 即 $-N_0$ 为代价函数 ($-N_0$ 极小等价 N_0 极大), 这样设计的代价函数, 可直接使网络输出 (降水场主分量) 反演的降水

场距平符号拟合正确的站次尽可能地多，而不是由网络输出尽可能接近降水场主分量，然后间接使距平符号拟合正确的站次多。利用（1）和（2）式，建立输入与输出非线性关系的映射，用 GA 算法完成网络学习训练。

3.3 预测试验

按照上述的方案，我们先做 NCEP/NCAR 500 hPa 高度场预测降水场试验，以考查 500 hPa 高度场预测降水的最大可能能力，然后进行模式 500 hPa 高度场预测降水场试验。NCEP/NCAR 和模式 500 hPa 高度场均截取前 5 主分量为外界输入，累积方差贡献都在 70% 以上，代表了热带和北半球中高纬范围 500 hPa 高度场主要变化信息。综合考虑降水可预测性和网络泛化能力，中国和华中降水场均截取前 3 主分量为网络输出。尽管累积方差贡献比例并不大（见表 1），但事实上，方差大的主分量可预报性大，方差小的主分量可预报性小，多次的试验也表明，再增加降水场主分量作为网络输出， N_0 并没有明显变大，待定参数却明显增加（对于本网络，每增加 1 个网络输出，待定参数将增加 3 个）。

由于训练样本容量 NCEP/NCAR 大于模式，所以不能单从预测距平与实况同号率的大小比较技巧水平。试验结果表明（见表 1）：即使可准确预测出 500 hPa 高度场时，即模式 500 hPa 高度预测场与 NCEP/NCAR 完全相同，我们的网络最多可预测出中国 63%、华中地区 70% 测站降水趋势。用模式 500 hPa 高度预测场，网络可预测出中国 64%、华中地区 70% 测站降水趋势，与 NCEP/NCAR 水平相当。中国降水场的预测距平

与实况同号率低于华中地区主要有两方面原因：1) 预测中国 160 测站，仅用 3 主分量能力显然不足，但为了保持网络一定的泛化能力，又不能含有较多的待定参数；2) 500 hPa 高度场仅能反映降水场大尺度特征，长江流域夏季降水与东亚阻高、西太平洋副热带高压等大尺度系统有更密切的关系，因而用 500 hPa 高度场预测降水场，华中较中国其他地区有更大的可预报性。

长江流域夏季降水异常主要有 5 个方面原因^[3]：1) 赤道太平洋海温异常；2) 青藏高原下垫面热状况异常；3) 亚洲夏季风异常；4) 500 hPa 东亚中高纬环流异常；5) 西太平洋副热带高压异常。其中 1)、2) 为前期非大气内部因子，3)、4)、5) 为同期大气内部因子。3) 可由夏季海平面气压场表征；4)、5) 由夏季 500 hPa 高度场反映。可以认为，降水异常包含大尺度、中小尺度和气候噪音等。500 hPa 高度场能解释的主要是其中的大尺度特征，而对中小尺度和气候噪音等无能为力。就 1971~2000 年 500 hPa 高度场实况（NCEP/NCAR 资料）而言，对于长江中游 1980、1983、1996、1998 和 1999 大涝年，由于 5 年都受西太平洋副高影响，4 年受东亚阻高（仅 1983 年无阻高）大尺度系统影响，因而网络都可拟合华中地区这些年 67% 以上测站降水的距平符号（见图 1）。对于华中地区 1972、1974、1978 和 1985 年为旱年，其中 1972、1974 两年西太平洋副高明明显偏弱，1978、1985 两年欧亚地区纬向环流占优势，西太平洋副高位置偏北，网络也可拟合 67% 以上测站降水的距平符号。而 1975、1981、1982 和 1997 年距平符号拟合均在 50% 以下，

表 1 拟合预测试验结果
Table 1 The results of synthesizing tests

	全国		华中	
	NCEP	气候中心模式	NCEP	气候中心模式
训练样本个数	30	20	30	20
降水场站数	160	160	27	27
500 hPa 主分量个数（输入节点）	5	5	5	5
500 hPa 累积方差贡献/%	71.3	75.0	71.3	75.0
降水场主分量个数（输出节点）	3	3	3	3
降水场累积方差贡献/%	29.7	35.2	57.7	58.8
降水场距平符号拟合率/%	62.8	64.1	69.6	69.6

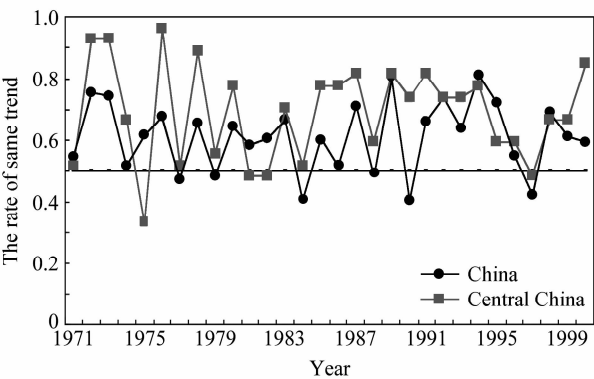


图1 夏季 NCEP/NCAR 500 hPa 高度场拟合中国、华中降水距平与实况同号率（横直线为同号率 0.5 等值线）

Fig. 1 The rates of same trend of the JJA (Jun, Jul, Aug) precipitation anomalous over China and central China synthesized by NCEP/NCAR 500 hPa height fields with observation

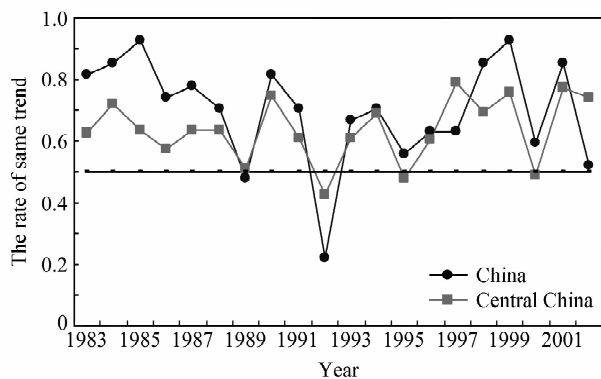


图2 夏季模式 500 hPa 高度场拟合中国、华中降水距平与实况同号率（横直线为同号率 0.5 等值线）

Fig. 2 The rates of same trend of the JJA precipitation anomalous over China and centra China synthesized by model 500 hPa height fields with observation

可能与这些年华中地区降水大尺度特征不明显及受中小尺度系统影响有关。就 1983~2002 年模式 500 hPa 高度预测场而言，拟合华中地区测站降水距平符号仅 1989、1992 两年在 50% 以下，2002 年略高于 50%，其余均明显高于随机预测（50%）（见图 2）。对于 1983、1996、1998 和 1999 大涝年，拟合率均在 63% 以上。旱年 1985、2001 年拟合率 85% 以上。事实上，降水负异常主要由大尺度系统异常造成，实况一般为大范围负距平；而降水正异常主要在大尺度系统异常背景下，中小尺度系统影响造成，实况正距平范围小于负异常负距平范围，因而旱年的可预报性大于涝年。

本文所用的降水资料，实际上是包含了各种不同时间尺度和空间尺度降水过程的单站记录，大尺度降水过程异常是造成大范围旱涝的主要原因之一。因此，这些旱涝年应比一般年有更大的

可预报性。我们逐个抽取模式回报时段内（1983~2002 年）华中地区旱涝年（1985、2001 年为旱年，1983、1996、1998 和 1999 年为涝年）资料，进行独立预测试验。试验完全模拟实际预测：1) EOF 处理 1983~2002 年模式 500 hPa 资料，提取其主分量；2) 抽出 1 个待预测年样本，其余降水资料用 EOF 处理，提取降水场主分量；3) 500 hPa 主分量抽出了待预测年后与降水场主分量参加网络训练；4) 将抽出的待预测年 500 hPa 主分量输入完成训练的网络，由输出的降水场主分量反演为待预测年降水场。试验结果表明：华中地区旱、涝年除 1999 年外，其余 5 年网络独立预测距平与实况同号率都高于随机预测（50%）。独立预测平均为 58%，已超出随机预测 8%，技巧水平按（4）式计算为 16%，因而具有一定的技巧水平（见表 2）。涝年独立预测同号率都低于拟合。

表 2 华中地区旱涝年独立预测试验结果
Table 2 The results of tests of dry and wet samples untrained by neural networks over centra China

	旱年		涝年			
	1985 年	2001 年	1983 年	1996 年	1998 年	1999 年
训练样本个数	19	19	19	19	19	19
独立预测样本个数	1	1	1	1	1	1
降水场站数	27	27	27	27	27	27
500 hPa 主分量个数（输入节点）	5	5	5	5	5	5
降水场主分量个数（输出节点）	3	3	3	3	3	3
降水场距平符号拟合率/%	68.62	69.59	68.81	68.23	68.42	68.03
独立预测距平与实况同号率/%	51.85	81.48	55.56	55.56	62.96	40.74

4 结语

随着人工神经网络研究成果广泛应用,不同学科从各自应用角度出发,提出了许多面向实际问题的神经网络。针对气候模式产品释用,我们也应提出相应的网络。本文的工作是一个尝试:用主分量作为网络的输入和输出,大大减少了其节点数,重点突出了大尺度影响变化关系,提高了实际预测的稳定性;用全局寻优的 GA 算法取代经典 BP 算法,为高质量的网络学习训练提供了保证;针对气候模式产品释用实际设计代价函数,使得极小化代价函数的学习训练过程,同时也极小化了降水场主分量预测误差和反演过程分析误差对降水趋势预测的影响,保证了网络学习训练能直接适应短期气候预测业务的基本要求,学习目的更明确,针对性更强。

分别以夏季 NCEP/NCAR 500 hPa 高度场、国家气候中心海气耦合模式 500 hPa 高度预测场主分量为外界输入信号,同期中国降水场、华中区域降水场主分量为网络输出信号,进行了拟合预测和独立预测试验。试验结果表明:用模式 500 hPa 高度预测场主分量为外界输入信号,网络输出(降水场主分量)反演的中国、华中地区降水场预测距平与实况同号率,有可能接近用 NCEP/NCAR 500 hPa 高度场主分量为外界输入信号相当的技巧水平。模式 500 hPa 高度场独立预测华中地区旱涝年,除 1999 年外,绝大多数年预测距平与实况同号率都高于随机预测,具有一定的预测技巧。表明该网络具有一定的泛化能力和预测潜力,可在气候模式产品释用中应用。同时也表明国家气候中心海气耦合模式预测产品经释用后,可在业务中发挥更大的作用。

致 谢 国家气候中心王兰宁博士提供海气耦合模式 500 hPa 高度场资料,谨表谢意。

参考文献 (References)

- [1] 丁一汇,刘一鸣,宋永加,等.我国短期气候动力预测模式系统的研究及试验.气候与环境研究,2002,7(2): 236~246
Ding Yihui, Liu Yiming, Song Yongjia, et al. Research

- and experiments of the dynamical model system for short-term climate prediction. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, 7(2): 236~246
- [2] 李清泉,丁一汇,张培群.一个全球海气耦合模式跨季度汛期预测能力的初步检验和评估.气象学报,2004,62(6): 740~751
Li Qingquan, Din Yihui, Zhang Peiquan. A rough test and assessment of summer prediction over season of the global coupled ocean-atmosphere model. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, 62(6): 740~751
- [3] 王绍武.现代气候学研究进展.北京:气象出版社,2001. 247~257, 311~315
Wang Shaowu. *Advance in Modern Climatic Studies*. (in Chinese) Beijing: China Meteorological Press, 2001. 247~257, 311~315
- [4] 王会军,周广庆,赵彦.降水和大气环流距平年际预测的一个高效的修正方案.应用气象学报,2000,11(增刊): 40~50
Wang Huijun, Zhou Guangqing, Zhao Yan. An effective method for correcting the interannual prediction of summer precipitation and atmospheric general circulation. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2000, 11(Suppl.): 40~50
- [5] 赵彦,李旭,袁重光,等.IAP短期气候距平预测系统的定量评估及订正技术的改进研究.气候与环境研究,1999,4(4): 353~364
Zhao Yan, Li Xu, Yuan Chongguang, et al. Quantitative assessment and improvement to correction technology on prediction system of short-term climate anomaly. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, 4(4): 353~364
- [6] Feddersen H, Navarra A, Ward M N. Reduction of model systematic error by statistical correction for dynamical seasonal predictions. *J. Climate*, 1999, 12: 1974~1989
- [7] 李维京,陈丽娟.动力延伸预测产品释用方法的研究.气象学报,1999,57(3): 338~345
Li Weijing, Chen Lijuan. Research on reexplanation and reanalysis method of dynamical extended range forecast products. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, 57(3): 338~345
- [8] 张礼平,丁一汇,李清泉,等.国家气候中心海气耦合模式汛期降水预报的一种订正方案及其试验.气候与环境研究,2005,10(2): 209~219
Zhang Liping, Ding Yihui, Li Qingquan, et al. An approach and its tests to improve simulated summer rainfall fields of National Climate Center coupled ocean-atmosphere model. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, 10(2): 209~219
- [9] 胡江林,张礼平,宇如聪.神经网络模型预测湖北汛期降水量的应用研究.气象学报,2001,59(6): 776~783

- Hu Jianglin, Zhang Liping, Yu Rucong. The study on applying neural network models to prediction of summer precipitation in Hubei Province. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (6): 776~783
- [10] 史忠科. 神经网络控制理论. 西安: 西北工业大学出版社, 1997. 43~44
- Shi Zhongke. *Theory of Neural Networks Controlling* (in Chinese). Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1997. 43~44
- [11] Keane A J. Genetic algorithm optimization of multi-peak problems: studies in convergence and robustness. *Artificial Intelligence in Engineering*, 1995, **9** (2): 75~83
- [12] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NECP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77** (3): 437~471