

热带气旋路径预报的遗传算法客观综合决策研究*

杨元琴 ** 王继志

(中国气象局国家气象中心, 北京 100081; 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要 研究了一种采用遗传算法(GA)用于台风移动的多预测结论的客观综合决策方法. 通过对 1884~2002 年的台风数据超大样本训练学习, 设计了用于台风路径预测的遗传学习人工神经网络(GLANN), 可以把台风移动的预测转化为在其移动中对运动环境动态变化的适应. 采用 GA 进行网络结构描述, 提出一种遗传选择适应度函数设计, 并给出获得适应度最高(误差最小)的计算方法. 采用人工神经网络遗传算法与其他方法, 对近年来异常路径台风进行了预报能力的平行对比分析. 参加对比试验的台风有多种类型, 包括海、陆生命史较长, 且登陆影响严重的 9711 号台风(Winnie), 20 世纪 90 年代以来登陆并影响我国的 10 个疑难路径台风, 1998 年登陆及影响我国的台风, 以及 2000 年在西北太平洋和南中国海生成的台风 24~48 h 预报. 试验结果表明, GA 方法优于其他方法, 对异常路径台风表现出明显的预报能力.

关键词 遗传算法 综合决策 热带气旋预报

台风袭击给人类带来的灾害损失为自然灾害之首. 一个孟加拉湾强热带风暴竟夺走 30 万人的生命. 亚洲及西太平洋地区是全球遭受台风灾害最严重的地区^[1]. 提高台风路径预报的准确率是国际上重要研究课题. Landesea 等人指出^[2], 对热带气旋的成功预报, 只考虑某种单一机理是不够的, 数万公里的洋面上, 热带气旋遇到的环境影响差异甚大. 不同的数值预报模式对大气物理过程的描写具有不同的表现能力, 特别是在不同地理位置上, 移动的热带气旋会遇到周边不同环流系统的影响. 为此, 近年来世界各

国发展了多种台风模式. 在中国中央气象台日常业务中, 可获得美国关岛、日本、菲律宾等多国台风预报结果. 美国迈阿密国家飓风中心业务发布的预报方法有 10 种之多. 王继志等人^[3,4]采用近百年台风路径资料, 通过对 10 种有影响的模式平行对比试验研究, 表明没有一种模式可达到对所有台风路径预报能力都最好, 也没有一种方法对所有试验台风预报都最差. 因此, 对多种预报方法的结论进行客观评估与综合决策, 不仅是台风预警减灾业务发展的需要, 也是理论上尚需要研究的重要科学问题之一.

2003-08-08 收稿, 2003-12-22 收修改稿

* 科学技术部重点专项资助(编号: 2001DIA20026)

** E-mail: yangyq@rays.cma.gov.cn

当前, 难度最大的问题是如何根据多家预报的主要结果制作出客观综合预报. 大多数情况下, 各主要预报中心通常给出各不相同, 甚至完全相反的预报结论, 使首席预报员的“综合”结论难以形成. 更为典型的现象是, 几家预报结论“惊人的一致”之时又可能是预报彻底失败之日, 这时, “少数派”意见又成为得出综合意见时不得不考虑的. 准确客观地把多家的数值预报结果进行综合, 形成一套客观综合决策数据流程, 得出最佳预警决策服务数据, 意义十分重大.

近年来, 多结论综合决策评估对热带气旋的可预报性问题研究引起了广泛重视. Luo等人^[5,6]指出, 台风可预报性研究可从实际观测资料和理论两个方面进行. 计算台风路径的分维数十分重要. 肖天贵等人^[7]研究指出, 台风移动的“初始小误差”特征、“累计距离分布函数”及“关联维数”对台风移动可预报能力关系甚大, 并讨论了台风的经度序列、纬度序列与大样本台风资料的时间序列在解决台风可预报问题规则中的关系. 这启发人们通过大样本资料研究和寻求智能模拟台风移动动力学规则的可能性和可预报性. Carver^[8]和Heywood等人^[9]研究表明, 如果把每种结论看作为规则, 即是研究一种对多规则的综合评估方法, 称之为MCE(Mult-Criteria Evaluation). 这种方法在地理信息系统(GIS)研究中, 已经取得初步成果. MCE方法的核心是: 第一步, 对每两个规则(结论)进行简单淘汰, 这就是非此即彼的简单原则; 第二步, 通过对样本的学习获取规律; 第三步, 构造集成函数. 常见的描述神经网络的函数是Sigmoid函数, 也称为神经元激励函数. 在通常采用的B-P算法中, 有一定的优点. 然而Sui^[10]及Zhou等人^[11]研究表明, B-P算法存在局限性: 第一, 通过历史样本进行规则训练学习有时过程很慢, 梯度计算消耗机时较大; 第二, B-P算法对起始(或称为初始)联接的权重十分敏感; 第三, B-P算法的搜索步骤, 很难找到一个模型使自然系统与其表现的特征有一致的对应关系. 因此MCE方法关键的第三步, 即神经元激励函数的设计是人们研究与关注的焦点. 特别是如何解决在“传统”MCE方法中遇到的困难, 如对初始联接权重的过分依赖等.

研究表明, GA(Genetic Algorithms)是对自然界事件评估的一种全方位搜索方法^[12~14]. 用它描述与评估一个自然事件, 可起始于任意一组有效的初始评估, 或者起始于一组GA中的染色体(chromosome). 这些染色体根据达尔文的适者生存的竞争法则产生下一代. 当大量的评估生成的后代能以群组形势保留的那些染色体就是有希望的最优解. 近年来, GA方法在水文分析和海洋学中的研究正在开展. Cheng等人^[15]在设计模型中, 用GA解决多站点降水径流的定标方法. Alvarez等人^[16]采用GA制作阿拉伯海海温的时空分布预报. 这些工作由于训练样本有限, 导致结果不稳定, 从而引发的GA问题尚有待探索.

本文在研究 MCE 方法基础上引入 GA, 采用 1884~2002 年共 119 a 台风超大样本训练学习, 力图把台风路径预报转化为在移动过程中对其生存环境的动态变化适应. 以 GA 进行网络结构的描述, 提出一种用遗传理论选择适应度函数的设计, 给出获得适应度最高(误差最小)的计算方法, 并用于多家台风路径数值预报结果的客观综合决策试验.

1 MCE 方法及概念模型

1.1 问题的回顾

多结论的客观决策是对策理论的研究范畴. 对策理论是上世纪 20 年代由著名数学家与计算机理论奠基人Neumann提出的^[17]. 随着计算机技术的发展, 对策理论研究应用领域得到广泛地扩展. 近年来国内外已出现新的研究发展^[18], 在减灾对策研究与应用方面取得了显著的经济效益和社会效益. 杨元琴等人^[19,20]讨论台风路径预报采用了MCE客观综合方法, 取得了较好的进展.

模拟人的思维神经元通常有 2 个特征相元. 第一是学习, 即是通过训练(培训)使系统搭建学习样本中各事件中的联系. 第二是回忆, 就是联想. 聪明的决策系统是在样本多的基础上训练得到所期望的结果. 如上所述, 神经网络中学习算法通常采用BP(Back Propagation)算法^[21]. 在通过一组样本进行训练学习时, 连接的权重自动向梯度下降方向调整, 以使网络的实际输出矢量之间的差达到最小, 并求得所期望的矢量.

设计一个神经网络的可推广能力，或者对一个未曾学习训练过的资料的掌握能力是这个网络设计的关键。网络的推广能力可通过回访历史，建立一组测试样本来衡量。王继志等人^[3]采用百年热带气旋资料，应用仿生学原理，以无后效的马尔可夫过程描述台风在西北太平洋中的运动。近年来发展的MCE方法是一种较好的学习算法，本文在讨论MCE方法基础上引入GA，并应用于热带气旋路径综合决策预报。

1.2 MCE 方法概述

如上所述，如果把对自然事件的判断和结论的形成看作是对规律的寻找，每种结论看作为规则，那么决策问题就是研究一种对多规则的综合评估方法，即 MCE。为了讨论 GA，我们先对已有的 MCE 方法做简要说明。

图 1 给出了 MCE 方法的概念模型。由图 1 可以看到，通常多结论的综合评估可由以下步骤实现。

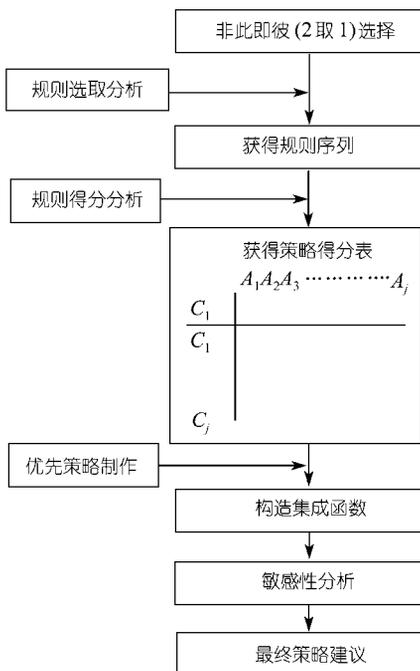


图 1 MCE 方法概念模型^[22]

() 非此即彼淘汰。第一步，对每 2 个规则(结论)进行简单淘汰，这就是非此即彼的简单原则。这种方法是最初级、低智能的方法，在电子计算机中为

二进制最易表达的(0, 1)算法。

() 获得规则。MCE方法的第二步是通过对本学习，获取规律。对每项规则的重要性做出判断。Benediktsson 等人^[23]，Civco^[24]和Davis^[25]研究指出，模拟人类思维中的“同情(弱者)”，是对上述非此即彼简单思维的补偿(compensatory)。通过模拟人类思维的理智和同情心，实现对规则策略打分的客观和公正。这种补偿性原理被广泛应用。自反馈、自适应等思维的模拟设计也与此概念有一定联系。模拟人类对上述思考问题的神经网络如图 2。其中， W_0 是神经元的端点。图 2 中用output设计，以避免(0, 1)低级思维。其补偿性原理可通过图 2 中对 f 的构造给出非线性评估来实现。这是人们采取各种方案实现和研究的重点。

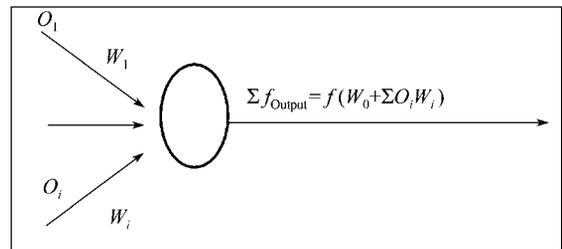


图 2 人工神经网络的神经元设计

() 构造集成函数。在Back-Propagation模型中采用的输入输出变换函数可表示为Sigmoid函数模型^[9]：

$$Y_i = f(u_i) = \frac{1}{1 + e^{-ui}} \quad (1)$$

一个神经网络由多个神经元单位组成。神经元连接的路径决定了神经网络的结构。Sigmoid 函数是最常见的描述人工神经网络的函数，也称为神经元激励函数。它在通常采用的 B-P 算法中，具有明显的可操作性。但如上所述，也有明显的局限性。

2 台风路径预报的 GA 客观综合决策

2.1 遗传算法 GA

GA规定，一条染色体由 1 比特字符串(遗传单体)组成，每一条染色体都有与其相关的适应度评价。客观遗传算法就是使适应度函数达到最大。在GA中，

有一种算法机制称为选择操作法, 这种方法可提供更多次再创(繁殖)机会, 使具有最大适应度的染色体保留下来. 选择方法是根据对适应度的实际评估(即轮回选择法)或按适应度排序(即排队法)进行. 染色体通过 2 种基本的遗传操作过程: 交叉(crossover)与变异(mutation)来繁殖后代^[10]. 变异的算法是把描写染色体的比特位做 0 与 1 的颠倒. 例如, 子辈染色体比特位 0 由父辈染色体 1 来替换. 交叉是取父母染色体同一位置的比特位经交叉换位后, 父亲的给女儿, 母亲的给儿子, 产生下一代.

于是, 用 GA 表达的神经网络可由图 3 表示. 图 3 是如何用一种染色体概念表示一个神经元的示意图. 实际上, 染色体可以用一组实数来描述. 对于任意一个神经网络通常会有多个不同解^[11,25].

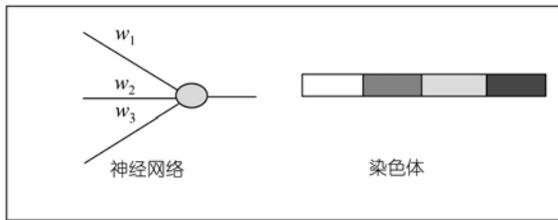


图 3 神经元的 GA 表达示意图

如图 3 所示, 神经网络中一条染色体编码可为一组自然数列 (x_1, x_2, \dots, x_n) , 表示不同台风路径的选择, 或映射一族台风生命史的最佳延伸方案. 其中, $x_n \in [1, m_i]$, 即第 i 次台风位置(即台风的生命延续点)选择第 x_n 组台风样本序列. 这样, 每条染色体编码中的各项, 必须在响应可选的(生命)延伸族内. 于是有定义 1: 一条有效染色体编码是指 (x_1, x_2, \dots, x_n) 的任意一项 x_n 满足 $1 < x_n < m_i$. 这样, 动态“蛙跳”(即台风的生命延续点)选择问题就转换为利用 GA 求解最优染色体编码.

2.2 适应度函数

本文以对中国、美国和日本等多家国际知名气象预报中心的台风路径预报的多种结论为例, 采用 GA 研究综合决策方法. 首先, 作为第一印象打分, 先给出初始选择权重, 以确认不同的预报效果. 重要的问题是如何自动地经过多次训练选择操作, 由适应度

函数动态调整修改各家的初始参数来改变权重. 也就是把台风的预报综合决策问题, 看成是一种遗传选择, 进一步把台风的生命延续点的选择问题转换为利用 GA 求解最优染色体编码. 李全龙^[26]针对动态结盟伙伴优化选择问题, 提出一种遗传的选择适应度函数. 对染色体 i 的适应度函数可表示为

$$f_i = \frac{(1-\mu)^{i-1}}{\mu}, \quad (2)$$

其中, i 为经过排序后的染色体索引序号, i 越小染色体越好, 适应度越大; $\mu \in (0, 1)$, 为一常数. 图 4 为当 i 取 1~5 时的 f_i 分布, 其中, 横坐标 μ 的取值为 0.1~1.0, 取值间隔为 0.1.

由图 4 可见, 当染色体 i 编号为 1, μ 值越小, 则适应性越好, μ 由 0.1 变化到 0.9 其适应度分别由 10 变化到 1. 当染色体 i 编号为 2, 适应度有所下降. 在染色体标号未知的情况下, μ 值越小, 则适应度越大. 如果把 μ 值作为对各家预报信度的判据, 对任何染色体而言, 都可求出相应的最大适应度.

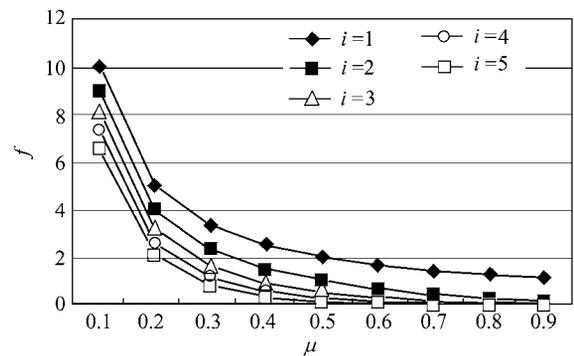


图 4 当 i 取为 1~5 时的 f_i 分布

于是, 我们在控制试验中, 可模拟领班预报员的预报思维, 即不对任何一家的预报给予固定的偏见. 对每个台风的每次预报, 采用其贡献的分量的原则是“厚今薄古, 重在近期表现”^[19]. 根据图 2, 综合决策预报最终结果为:

$$\begin{aligned} \text{Output } X &= f(W_0 + X_i W_i) \quad (X \text{ 为经度}), \\ \text{Output } Y &= f(W_0 + Y_i W_i) \quad (Y \text{ 为纬度}). \end{aligned} \quad (3)$$

为叙述方便, 仅讨论 3 家的情形. 当 $T = t$ 时, 令 $W_c(t)$, $W_u(t)$ 和 $W_j(t)$ 分别为中、美、日 3 家预报初始 t 时刻的权值, 重要的是当 $T = \tau$ 时, $W_c(\tau)$, $W_u(\tau)$ 和

$W_j(\tau)$ 参量则根据神经网络的GA选择操作训练进行动态调整. 例如 $W_c(\tau)$ 取决于 $X_c(\tau-1, \tau-2, \tau-3\dots)$ 及 $Y_c(\tau-1, \tau-2, \tau-3\dots)$ 等. 于是某家的预报试验结论(即规则序列)和台风发生的实际位置序列误差越小, 则它对综合决策预报贡献越大, 反之贡献越小. 本文以 1884~2002 年西北太平洋及南中国海热带气旋路径资料为实验基本数据源^[4], 进行GLANN学习, 以求解最佳解.

3 台风路径预报的 GA 训练

图 5 是采用遗传训练人工神经网络 GLANN (Genetic Learning Artificial Neural Network)方法对 2002 年第 9 号台风-风神(FENGSHEN)的网络训练过程. 由图 5 可见, 第一层是输入层, 分别为上述中国中央气象台值班定位预测组、日本气象厅、美国关岛

台风警报中心以及统计预报方法的结果. Lippmann^[27]研究指出, 过去基于统计模式的专家系统对经济、自然等规律的模拟能力是有限的, 不能反映现象间的复杂的空间动态过程. 如上所述, GLANN通过百余年大样本训练学习, 可以把环境及适应环境动态变化的网络结构加以描述连接, 并快速获得适应度最高(误差最小)的那些遗传“密码”. 图 5 的末段输出是令人满意的.

图 6 是 GA 算法对 2002 年 9 号台风预测最小误差学习测试. 我们已积累了 119 a(1884~2002 年)西北太平洋台风活动约 27600 个生命史样本. 在实际测试中我们定义预测台风的误差最小为适应度最好. 如上所述, 根据适应度函数设计, 考虑 μ 的变化范围为 0.0~1.0, 我们采用逐步逼近-迭代法, 以一个极小值作为初值为 0.09, 然后逐步增加 μ 值, 观察其适应度

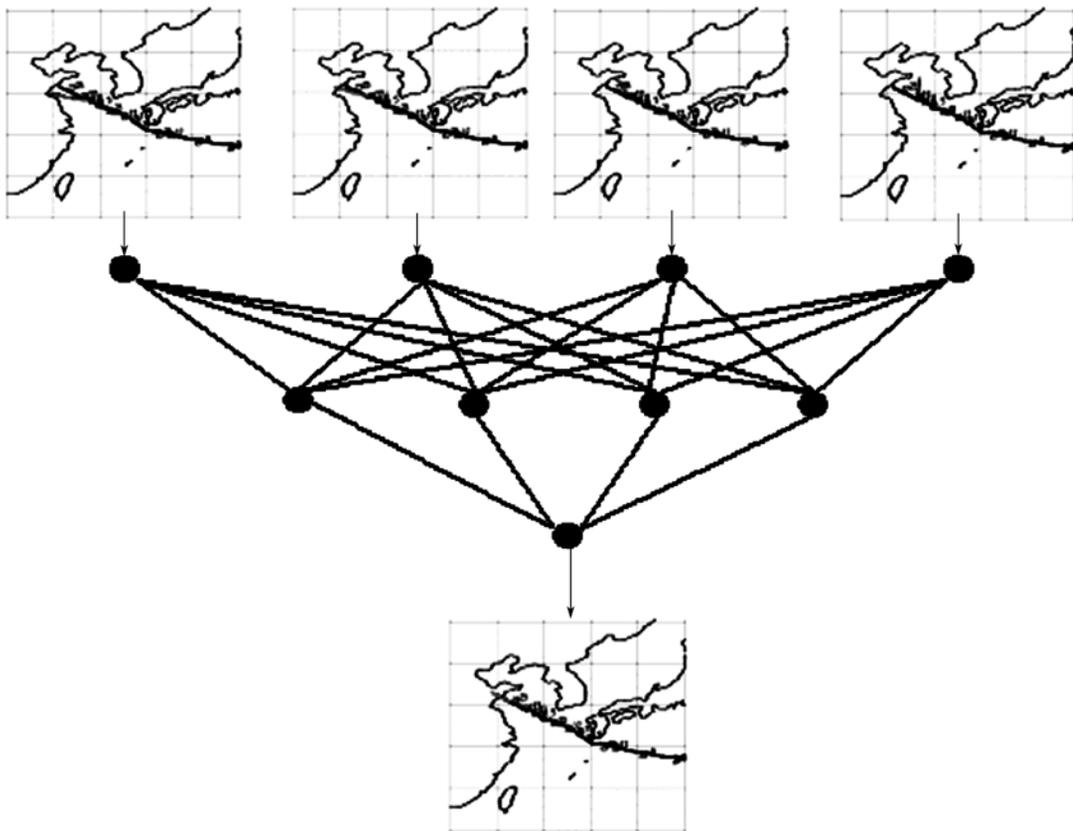


图 5 采用 GLANN 方法对 2002 年第 9 号台风-风神(FENGSHEN)的网络训练

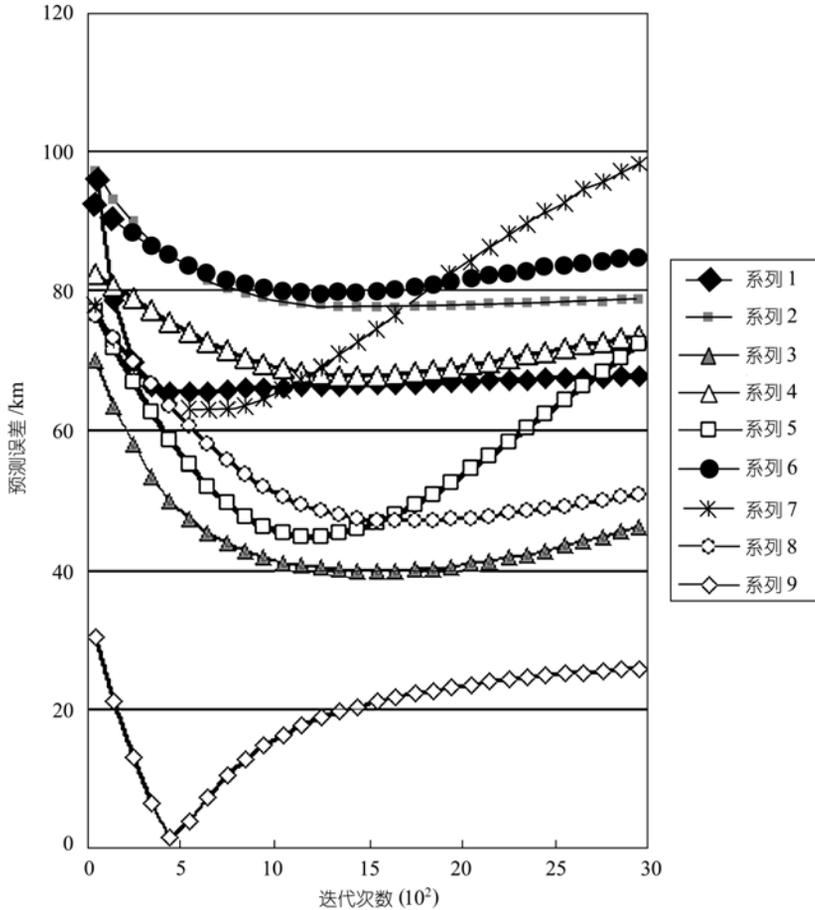


图 6 2002 年 9 号台风的 GA 算法预测最小误差学习测试

的变化. 由图 6 可见, 在对 2002 年第 9 号台风-风神 (FENGSHEN) 预测试验中, 适应度对 μ 值十分敏感, 达到适应度最好的迭代收敛速度十分迅速. 于是 f 值可从大量样本学习中获得.

在遗传过程中, 设较差个体的交叉概率为 P_{c0} , 最优个体的交叉概率为 P_{c1} , 最大变异概率为 P_{m0} , 最小变异概率为 P_{m1} , 则自适应交叉与遗传概率由以下公式表示^[25]:

$$P_c = \begin{cases} P_{c0}, & f \leq \bar{f} \\ P_{c0} \exp\left[-\left(\frac{f-f_0}{\sigma}\right)\right], & f > \bar{f} \end{cases} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{f_{\max} - \bar{f}}{\sqrt{\ln P_{c0} - \ln P_{c1}}}, \quad (5)$$

$$P_m = P_{m0} \exp\left[-\left(\frac{f_{\max} - \bar{f}}{\sigma_1}\right)\right], \quad (6)$$

$$\sigma_1 = \frac{10f}{\sqrt{\ln P_{m0} - \ln P_{m1}}}, \quad (7)$$

式中, f 是执行交叉操作双方较大的适应度, f_{\max} 是群体中的最大适应度, \bar{f} 是群体平均适应度. 在平行对比试验中, 采用含有地球曲率变化公式计算各家台风路径预报误差^[19,28]

$$\varepsilon = \{[(X_0 - X_f) \cos[(Y_0 + Y_f)/2]]^2 + (Y_0 - Y_f)^2\}^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

其中, ε 以纬距为单位, (X_f, Y_f) 和 (X_0, Y_0) 分别代表台风预测和当前位置(经度和纬度)的预报值和观测值. 预报误差是提供给 GLANN 系统对预报过程进行

学习和积累经验的重要信息。根据上述百余年台风数据记忆库, 通过对预报实际误差信息的测试获得每种预测的适应度, GLANN 系统可依此进行对染色体编码的分析和学习过程, 最终给出决策结果。

4 GA 客观综合决策方法及多种方法台风路径预报误差对比分析

4.1 GA 客观综合决策方法对 9711 号台风的预报

9711 号台风(Winnie)于 1997 年 8 月 10 日在太平洋中部海面上生成, 即(15°N, 155°E)附近。其生命史长达 10 d 之久, 先后经历了海上移动-登陆运动-内陆北上等复杂路径, 是一个典型的多下垫面、复杂环境下维持生命史较长、灾害严重的台风, 预报难度大。研究其运动过程, 其移动有 5 个阶段: 第一阶段为 8 月 10 日 00 时~8 月 14 日 00 时, 稳定西北方向移动; 第二阶段为 14 日 00 时~18 日 00 时, 转为西北偏西移动并进入东海; 第三阶段为 18 日 00 时~19 日 00 时, 移向我国沿海并登陆; 第四阶段为 19 日 00 时~20 日 00 时, 登临后在内陆转为北上移动; 第五阶段为从 20 日 00 时~20 日 12 时, 转向东北方向并从黄河口出海。

上述 5 个阶段的运动有 4 个关键性的决策点的预报是十分重要的。这 4 个关键预报点如下:

第一, 8 月 14 日 00 时, 当台风移至(21°N, 140°E)附近时, 台风有明显的北上运动趋势。根据百年台风移动的历史资料研究发现, 该地区是台风运动的“叉路口”所在位置。台风要么北上转向日本列岛(占 40%); 要么取向偏西路径, 影响我国长江以北(占 50%)。此时决策预报尤其重要。

第二, 8 月 18 日 00 时, 当 9711 号台风移至我国

台湾东北方约 300 km 附近, 如果登陆大陆沿海, 有不到 24 h 的时效, 是发紧急警报的时刻。因此, 此时决策预报的成败至关重要。

第三, 当 8 月 19 日 00 时, 台风移至杭州湾以西, 未来是就地减弱消失, 还是偏西进入河南, 或者北上影响华北甚至东北地区, 此时是台风登陆影响预警服务难度很大的关键时刻。

第四, 20 日 00 时, 当 9711 号台风移入鲁西南地区, 台风深入内陆, 未来台风是否可出海再登陆影响华北和东北地区, 是预报服务的关键时刻。表 1 给出了 GA 与美国关岛、日本和中国中央气象台台风定位值班预报对这 4 次预报的平行对比分析结果(各对比预报方法的预报时间完全一致)。

由表 1 可以看到: () GA 客观综合决策预报方法给出了好的预报结果, 包括对几个关键时刻的预报和台风路径全程预报以及平均预报误差结果。() 在台风登陆点的关键预报中, 本文 GA 决策方法给出了仅 50 km 的最小预报误差。() 在台风起始阶段, 各家客观预报方法在资料较少的时段, 中国中央气象台的值班预报效果是最好的。

4.2 GA 客观综合决策方法对疑难路径台风的预报

台风异常路径是指其移动方向突然改变, 如打转、滞缓、摆动及蛇型路径等。表 2 给出 1990~1996 年 10 个疑难台风, 如其中的 1990 年第 12 号台风(9012, Yancy), 在台湾海峡附近打转 3 圈, 是一个典型的异常路径台风。本文用 GA 对这 10 例台风作了 380 次的客观综合决策预报, 并与日本、美国以及中国常规值班预报进行平行对比。表 2 是 1990~1996 年中选取的 10 个疑难台风 380 次预报过程的结果的对比。表 2 结果表明, 本文 GA 决策方法预报效果优于

表 1 9711 号台风客观决策预报及其他方法的预报误差比较^{a)}

| 预报关键点 | 起报时间 | 中国中央气象台 定位值班预报 | 日本预报 | 美国关岛预报 | GA 决策预报 |
|-----------------|------------------|-------------------|------|--------|---------|
| 台风西行预报 | 8 月 14 日 00 时 | 67 | 82 | 94 | 70 |
| 台风登陆预报 | 8 月 18 日 00 时 | 60 | 64 | 78 | 50 |
| 台风(含低压)内陆转向北上预报 | 8 月 19 日 00 时 | 60 | 73 | 77 | 56 |
| 台风低压出海预报 | 8 月 20 日 00 时 | 74 | 84 | 83 | 57 |
| 以上 4 次预报平均误差 | 8 月 10~20 日 00 时 | 65 | 76 | 83 | 58 |
| 9711 号台风全程预报 | | 78 | 94 | 104 | 66 |

a) 预报误差指预报点与实况点之间的距离, 单位为 km, 下同

其他方法.

4.3 GA 客观综合决策方法对 1998 年台风的预报

众所周知, 1998 年我国长江流域发生了全流域性特大暴雨洪水, 当年也是台风活动少、路径怪异多的一年. 表 3 给出的是 1998 年用 GA 客观综合预报方法与多家(日本、美国以及中国常规值班预报)台风路径预报误差对比. 由表 3 可见, 本文 GA 决策预报效果较优.

表 2 10 例疑难路径台风 GA 的 24 h 客观决策与多家预报误差对比

| 台风号 (预报次数) | 中国中央气象台 定位值班预报 | 日本预报 | 美国关岛 预报 | GA 方法决 策预报 |
|--------------------|-------------------|--------|------------|---------------|
| 9012, Yancy(45) | 216.45 | 166.28 | 166.28 | 154.29 |
| 9104, Walt(42) | 138.75 | 120.99 | 149.85 | 119.88 |
| 9120, Mireille(58) | 169.83 | 154.29 | 147.63 | 139.86 |
| 9215, Omar(44) | 144.30 | 145.41 | 122.10 | 129.87 |
| 9302, Koryn(43) | 156.51 | 157.62 | 172.05 | 153.18 |
| 9401, Owen(31) | 202.02 | 159.84 | 186.48 | 167.61 |
| 9408, Walt(53) | 184.26 | 154.29 | 188.70 | 170.94 |
| 9420, Ivy(28) | 165.39 | 153.18 | 175.38 | 149.85 |
| 9425, Melissa(28) | 177.60 | 157.62 | 159.84 | 146.52 |
| 9606, Frankie(8) | 220.89 | 202.02 | 203.13 | 200.91 |
| 380 次的平均值 | 177.60 | 157.15 | 167.14 | 153.29 |

表 3 1998 年台风路径 24 h 预报误差 GA 与多家方法对比

| 台风号 (预报次数) | 中国中央气象台 定位值班预报 | 日本预报 | 美国关岛 预报 | GA 决策预报 |
|------------------|-------------------|--------|------------|---------|
| 9802, Otto (11) | 132.5 | 207.5 | 200.1 | 122.1 |
| 9803, Penny (16) | 125.6 | 120.3 | 133.6 | 98.2 |
| 9806, Todd (15) | 243.6 | 187.3 | 304.0 | 176.8 |
| 9807, Vicki (19) | 354.1 | 302.3 | 250.8 | 216.0 |
| 9810, Babs (36) | 83.8 | 93.2 | 112.4 | 79.6 |
| 100 次的平均值 | 187.92 | 182.12 | 200.18 | 138.54 |

4.4 2000 年台风路径的 24 和 48 h 的 GA 客观综合决策预报

表 4 和 5 分别给出 24 和 48 h 全年台风路径的 GA 客观综合预报方法与多家(日本、美国以及中国常规值班预报)预报误差的对比, 并给出各方法的平均误差对比. 由表 4 和 5 可见, GA 决策方法 48 h 预报也给出了较好的结果, 平均预报水平 GA 也取得好的效果. 对于 72 h 的预报效果, 目前进行平行对比的资料采集困难, 但从一些个例研究看, GA 对于 72 h 也有较好的预报前景.

表 4 2000 年台风路径 GA 的 24 h 预报误差与多家预报误差对比

| 台风号(预报次数) | 中国中央气 象台定位值 班预报 | 日本 预报 | 美国关岛 预报 | GA 方法 决策预报 |
|-------------------------|-----------------------|----------|------------|---------------|
| 0001, 达维 Damrey(18) | 165.0 | 187.0 | 180.0 | 156.2 |
| 0003, 鸿雁 Kirogi(21) | 148.6 | 148.9 | 129.4 | 121.8 |
| 0004, 启德 Kai-tak(17) | 226.2 | 157.5 | 221.3 | 156.8 |
| 0005, 天枰 Tembin(8) | 86.0 | 118.2 | 73.5 | 69.0 |
| 0006, 布拉万 Bolaven(17) | 126.7 | 129.2 | 114.9 | 106.0 |
| 0008, 杰拉华 Jelawat(35) | 89.4 | 91.3 | 77.0 | 76.9 |
| 0009, 艾云尼 Ewiniar(32) | 219.4 | 183.4 | 157.7 | 151.5 |
| 0010, 碧利斯 Bilis(17) | 109.1 | 97.7 | 90.6 | 87.9 |
| 0012, 派比安 Prapiroon(20) | 200.1 | 136.2 | 169.5 | 151.7 |
| 0013, 玛莉亚 Maria(9) | 161.0 | 202.5 | 135.8 | 134.7 |
| 0014, 桑美 Saomai(50) | 175.7 | 159.7 | 154.6 | 135.0 |
| 0015, 宝霞 Bopha(18) | 178.4 | 146.1 | 152.2 | 132.0 |
| 0016, 悟空 Wukong(15) | 92.1 | 94.3 | 76.3 | 70.4 |
| 0017, 清松 Sonamu(10) | 229.9 | 157.2 | 188.7 | 157.4 |
| 0018, 珊珊 Shanshan(24) | 168.2 | 157.6 | 169.8 | 140.1 |
| 311 次的平均值 | 158.39 | 144.45 | 139.42 | 123.16 |

表 5 2000 年台风路径 GA 的 48 h 预报误差与多家预报误差对比

| 台风号(预报次数) | 中国中央 气象台 定位值班 预报 | 日本预报 | 美国关岛 预报 | GA 方法 决策预报 |
|-------------------------|---------------------------|--------|------------|---------------|
| 0001, 达维 Damrey(14) | 314.7 | 268.7 | 275.5 | 252.2 |
| 0003, 鸿雁 Kirogi(17) | 248.6 | 217.8 | 208.2 | 203.4 |
| 0004, 启德 Kai-tak(3) | 341.1 | 441.8 | 426.8 | 354.1 |
| 0005, 天枰 Tembin(4) | 134.7 | 254.7 | 157.3 | 120.4 |
| 0006, 布拉万 Bolaven(13) | 218.1 | 225.3 | 188.9 | 186.7 |
| 0008, 杰拉华 Jelawat(31) | 261.2 | 264.4 | 247.6 | 246.2 |
| 0009, 艾云尼 Ewiniar(28) | 286.7 | 273.3 | 223.9 | 189.2 |
| 0010, 碧利斯 Bilis (13) | 149.0 | 179.1 | 107.7 | 110.5 |
| 0012, 派比安 Prapiroon(16) | 407.8 | 218.0 | 352.8 | 266.0 |
| 0013, 玛莉亚 Maria(5) | 419.5 | 548.1 | 508.4 | 448.8 |
| 0014, 桑美 Saomai(46) | 332.9 | 336.6 | 294.8 | 275.3 |
| 0015, 宝霞 Bopha(14) | 355.8 | 433.0 | 275.8 | 250.8 |
| 0016, 悟空 Wukong(11) | 132.2 | 143.8 | 102.5 | 87.9 |
| 0017, 清松 Sonamu(6) | 492.9 | 273.7 | 297.1 | 258.9 |
| 0018, 珊珊 Shanshan(20) | 290.7 | 263.6 | 286.2 | 241.4 |
| 241 次的平均值 | 292.39 | 289.46 | 263.57 | 232.77 |

5 小结与讨论

本文的研究可初步得到以下几点结论:

1) 本文研究了一种采用 GA 给出台风移动的多预测结论客观综合决策方法.

2) 通过对 1884~2002 年期间共 119 a 台风超大量本训练学习, 设计了台风路径预报的 GLANN 算法,

可以把台风移动的预测转化为对其运动环境的动态变化的适应, 以 GA 进行网络结构描述. 提出一种遗传选择适应度函数的设计, 并给出获得适应度最高, 预报误差最小的计算方法, 尤其适应于异常路径台风的预报.

3) 本文以近年来对我国沿海地区影响较大、生命史较长的 9711 号台风(WINNIE)预报为例, 使用 GA 的 GLANN 客观综合决策与日本、美国关岛联合台风预警中心以及中国常规值班预报进行了对比试验. 结果表明, 对于 9711 号台风的全程预报及几个关键时刻的决策预报, 即登陆、台风转向北上及从内陆移动出海的转向预报等, GA 方法取得较佳预报结果, 平均预报误差最小.

4) 本文采用 GA 还对上世纪 90 年代以来影响我国的异常路径台风, 其中包括 10 个疑难预测台风, 异常路径较多的 1998 年, 以及 2000 年在西北太平洋和南中国海生成的台风进行的 24~48 h 预报进行平行对比分析研究. 结果表明, 本文的 GA 客观综合决策方法与其他方法及平均预报水平比较, 特别是对台风异常路径的预报, 均取得较好的效果.

参 考 文 献

- 1 陈联寿, 徐祥德, 罗哲贤, 等. 热带气旋动力学引论. 北京: 气象出版社, 2003. 17~26
- 2 Landsea C, Neumann C J. The Atlantic hurricane database re-analysis project results for 1851~1985. In: American Meteorological Society, ed. 24th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology Fort Lauderdale, FL. Boston: Boston Massachusetts, 2000. 542~544
- 3 王继志, Neumann C J. 一个西北太平洋台风预报的 Markov 相似模式. 中国科学, B 辑, 1984, (5): 468~475
- 4 王继志, Neumann C J. 近百年西北太平洋台风活动. 北京: 海洋出版社, 1992. 117~126
- 5 Luo Z X, Ma J X. Study of the randomness inherent in typhoon movement. Acta Metro Sinica, 1993, 7: 153~161
- 6 罗哲贤. 台风轴对称环流和非对称扰动非线性相互作用的研究. 中国科学, D 辑, 2003, 33(7): 686~694[摘要] [PDF]
- 7 肖天贵, 罗哲贤. 西太平洋台风路径动力学系统重建的初步研究. 北京: 气象出版社, 1995. 350~357
- 8 Carver S J. Integrating multi-criteria evaluation into geographic information systems. International Journal of Geographical Information Systems, 1991, 5(3): 321~339
- 9 Heywood I, Oliver J, Tomlinson S. Building an Exploratory Multi-Criteria Modeling Environment for Spatial Decision Support Innovations in GIS. Massachusetts: Taylor & Francis, 1995. 127~136
- 10 Sui D Z. Integrating neural networks with GIS for spatial decision making. The Operational Geographer, 1993, 11(2): 13~20
- 11 Zhou J, Civco D L. Using genetic learning neural networks for spatial decision making in GIS. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1996, 62(11): 1287~1295
- 12 Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975. 53~76
- 13 Goldberg D E. Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning. Massachusetts: Addison-Wesley Press, 1989. 71~76
- 14 Villers D, Barnard E. Backpropagation neural nets with one and two layers. IEEE Transactions on Neural Networks, 1992, 4(1): 136~141[DOI]
- 15 Cheng C T, Ou C P. Combining a fuzzy optimal model with a genetic algorithm to solve multi-objective rainfall-runoff model calibration. Journal of Hydrology, 2002, 268(14): 72~86[DOI]
- 16 Alvarez A, Riera M. Forecasting the SST space-time variability of the Arabian Sea with genetic algorithms. Geophysical Research Letters, 2000, 27(17): 2709~2712[DOI]
- 17 Wroblef H B. 对策论讲义. 北京: 人民教育出版社, 1960. 35~42
- 18 王继志, 杨元琴. 现代天气工程学. 北京: 气象出版社, 2000. 432~442
- 19 杨元琴, 王继志. 热带气旋多预报结论客观综合决策方法. 见: 中央气象台编著. 天气预报方法与业务系统研究. 北京: 气象出版社, 2002. 158~166
- 20 杨元琴. 多种台风警报结论计算机综合决策系统的研究. 见: 85-906-09 课题组主编. 台风暴雨预报报警系统研究. 北京: 气象出版社, 1996. 75~80
- 21 Rumelhart D E, Hinton G E. Learning representation by back-propagation errors. Nature, 1986, 323(6088): 533~536
- 22 Jankowski P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. International Journal of Geographical Information Systems, 1995, 9(3): 251~273
- 23 Benediktsson J A, Swain P H. Neural network approaches versus statistical methods in classification of multi-source remote sensing data. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1990, 28(4): 540~511[DOI]
- 24 Civco D L. Artificial neural network for land cover and mapping. International Journal of Geographical Information System, 1993, 7(2): 173~86
- 25 Davis L. Handbook of Genetic Algorithms. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 370
- 26 李全龙. 动态联盟伙伴选择一种自适应遗传算法. 高科技通讯, 2001, 10: 66~69
- 27 Lippmann R P. An introduction to computing with neural nets. IEEE ASSP Magazine, 1987, 4(2): 4~22
- 28 Wang J Z, Yang Y Q. An analyzing forecasting and data-processing operational system. Seventh International Conference on Interactive Information for Met Jan 14~18. New Orleans: American Meteorological Society, 1991. 135~139