

气候预测中的集合方法初探*

袁重光 赵彦 李旭 曾庆存

(中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘要 介绍了气候预测中的集合方法。该文作者曾在1996年论证了在西太平洋暖池区海温异常与东亚夏季风的共同作用下存在一个可预测的气候异常区, 部分地改变了气候不可预测的论断。如何从与大量不可预测结果混杂在一起的结果中提炼出可预测部分是集合方法的重要目的之一。文中也讨论了由于大气运动固有的动力学特性, 其集合预测与经典的数学考虑有所区别, 天气与气候预测有不同的特点, 其集合方法、目的也应有所不同, 由此对集合方法提出了一些新的建议。文中同时介绍了首次在气候预测中发现的多平衡态现象, 建议了如何判定多平衡的出现, 以及如何利用多平衡态来改善对不同区域的预测。

关键词: 短期气候; 降水距平; 集合预测

1 中、短期数值天气预告中的集合预告及其发展

天气、气候数值预测须有一定的初始场, 但实测场存在着各种误差, 其中有: 观测误差, 不同地区采用不同观测设备的差异, 资料传输中发生的错误, 分析误差, 为协调非定时观测资料而进行同化产生的误差, 观测资料稀少地区替代以模式输出资料发生的误差。这种含有多种性质误差的初始场在积分过程中必然使模式的结果逐渐偏离真解, 因而产生了集合预告的想法, 主要是从数学上考虑, 认为将足够多的含有不同随机误差初始场的积分结果加以算术平均, 其结果应更接近真解。这种想法始于中、短期数值天气预告。但现在并未在短期数值天气预告中应用, 欧洲中期数值天气预告中心已将此法付诸应用, 并将此方法加以发展。在初始场上加上30种不同的小扰动, 形成30个含不同附加小扰动的初始场, 作30个积分, 再加上当天、前一天、前二天初始场所作积分, 共33个积分取平均作为集合预告结果, 在此做法中, 所加小扰动必须是发展的, 强度不能太强, 通过试验而定, 做法甚为繁杂。近年来认识到中期问题也存在不确定性, 又发展了概率预告。

集合方法在短期数值天气预告中没有应用, 其原因是: 所有不同随机误差都是加在有误差的初始场上, 平均结果只能消除加上去的随机误差, 观测误差则在所有初始场上都有, 根本不能抵消, 同时这样做还有一前提, 就是大气运动是线性的而且不存在适应过程, 适应过程的作用使得误差迅速达到适应, 不再具有随机误差的性质, 因而从纯数学上的设想在大气中是行不通的。在中期预告中所作改变则主要是大气中存在适应过程, 加在气压场上的随机误差, 在尺度不大时会很快向风场适应而频散殆尽, 而不发展

1998-09-14收到, 1999-05-12收到再改稿

* 国家科委攀登项目 95-预-21“气候动力学和气候预测理论的研究”以及国家自然科学基金资助项目 49505070 共同资助

的小扰动则会为长波槽脊所吸收, 不产生预期的作用。这就是欧洲中心将随机误差改变为加发展的小扰动的原因, 经过质量控制后的误差总是小的, 一般不会使大尺度环流发生大的改变, 为模拟其作用, 所加小扰动当然不能太强, 因而, 这样的改变其出发点仍然是着眼于如何消除初值误差的影响。气候预测已远不只是大气的初值问题, 应该有不同的目的与做法, 下面我们将讨论这一问题。

2 气候预测中的集合方法

中、高纬地区的气候变化迄今仍被认为是不可预测的, 我们曾在探讨东亚地区夏季旱、涝成因及物理过程与机理的基础上提出了一个“持续异常区假说”^[1], 指出有一可预测的异常区存在。在论证了东亚部分地区夏季可预测之后, 问题就是如何确定这一异常区。东亚季风与西太平洋的异常海温区都是持续而稳定的, 垂直运动异常区的影响在相当长一段时间内经常发生影响, 它与背景环流共同作用下产生降水异常区, 有明确的物理过程, 应是可预测的。但是大气中有大量的瞬变扰动, 模式不能确定性地预测其活动, 因而在预测结果中既有有意义的可预测的异常区存在, 又有大量不可确定性预测的结果与之相混杂。于是问题就变为如何将它们区分出来。我们设想: 由于季风与海温两者的持续和稳定性, 从不同初始场时刻作预测, 其结果应该差别较小, 而不可预测部分带有一定随机性, 不同初始场预测结果会有明显差别, 因而可由此判断有无可预测的持续异常区存在及其所在地区。这种设想曾在文献[2]中作过初步讨论。此方法可简单叙述为用多个初始场预测的结果进行综合判断, 以确定持续异常区最可能出现的位置及强度。本文建议气候预测中的集合可以按照下列方法进行。

2.1 看图识字

直接观测由不同初始场作出的若干个预测结果, 如图 1, 它们分别是用 1995 年 2 月份 8 个初始场各自积分至 8 月 31 日得到的 1995 年 6~8 月总降水距平百分率预测图, 仔细比较可以发现在沿 (30°N , 110°E) 以东 8 张预测图上均为正距平区, 呈东西狭长状, 仅其中心强度位置略有差异。但在沿 40°N 一线的华北至西北, 8 张图上多雨区与少雨区的分布几乎各不相同, 有些甚至正好相反。这样就可以不经过计算而最简单地作出初步判断, 在长江中、下游的这块正距平区就是由西太平洋暖池区负海温距平影响产生的可预测的异常区, 其最可能出现的位置与强度则可通过下面介绍的定量方法得出。

2.2 算术平均

这是最简单的一种集合方法, 即将参加集合的若干个结果取算术平均, 这样得出的结果, 从统计上来说其出现概率是最大的。图 2a 就是 9 个预测进行算术平均而得, 可以看到长江中、下游有一块正距平区, 中心大于 40%, 多雨区向南伸, 在华南沿海也有一正的中心, 华北则为一负距平区。图 2b 是该年的观测实况, 二者对比可见: 长江中下游的正距平区正是该年最为重要的多雨区, 它与华南沿海的正中心一起都与观测实况颇为一致。

2.3 聚类及多平衡态

在逐个审视由各个初始场所作积分时, 发现在某些年份它们可以按降水距平的分布

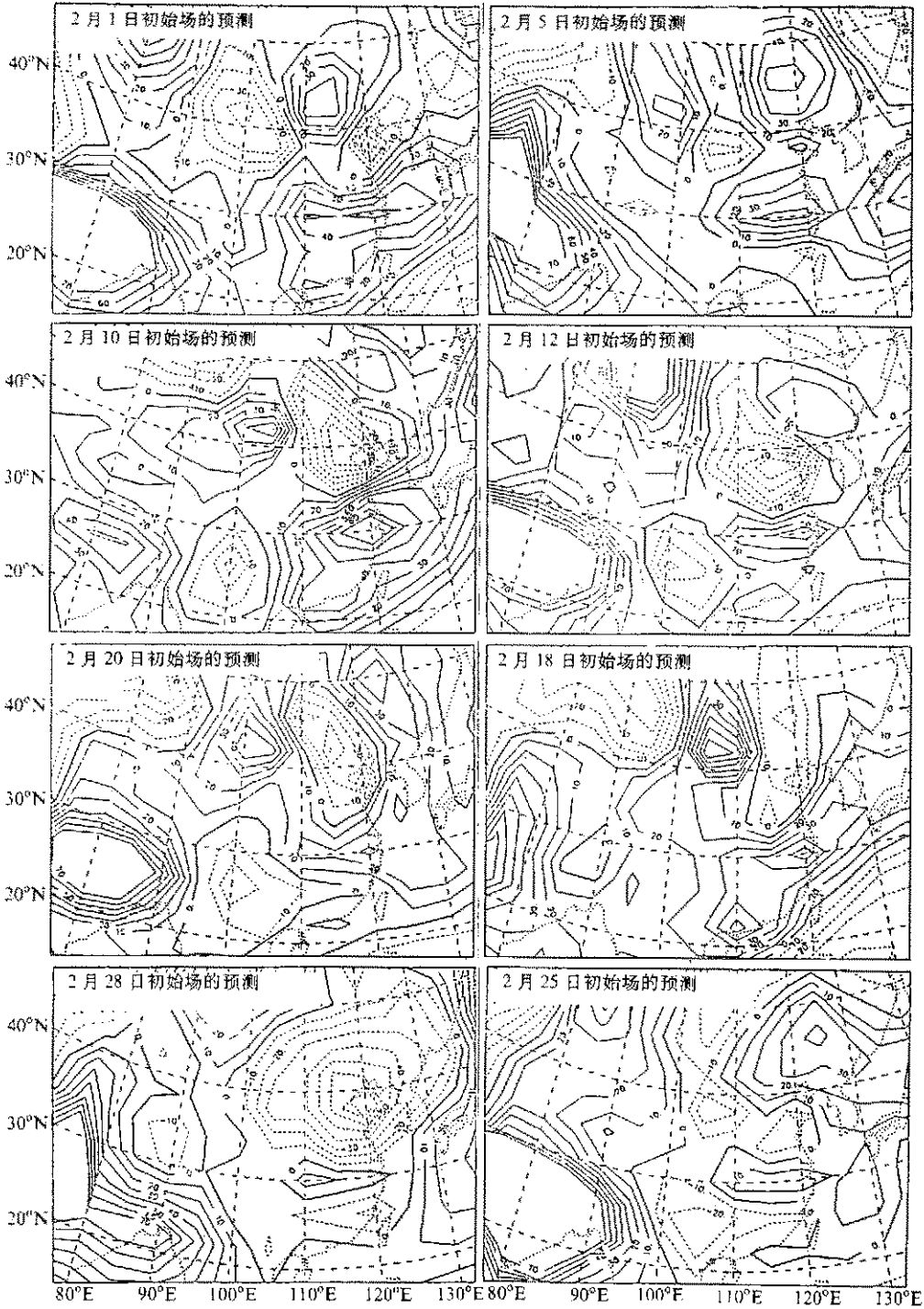


图 1 1995 年几个不同初始场预测的 6~8 月降水距平百分率

特点分为几类, 它们的距平分布截然不同, 1997 年夏季降水距平的预测即是一例。1997 年的预测取了 2 月份 17 天的初始场作了 17 个积分, 察看后发现可以分为两类:

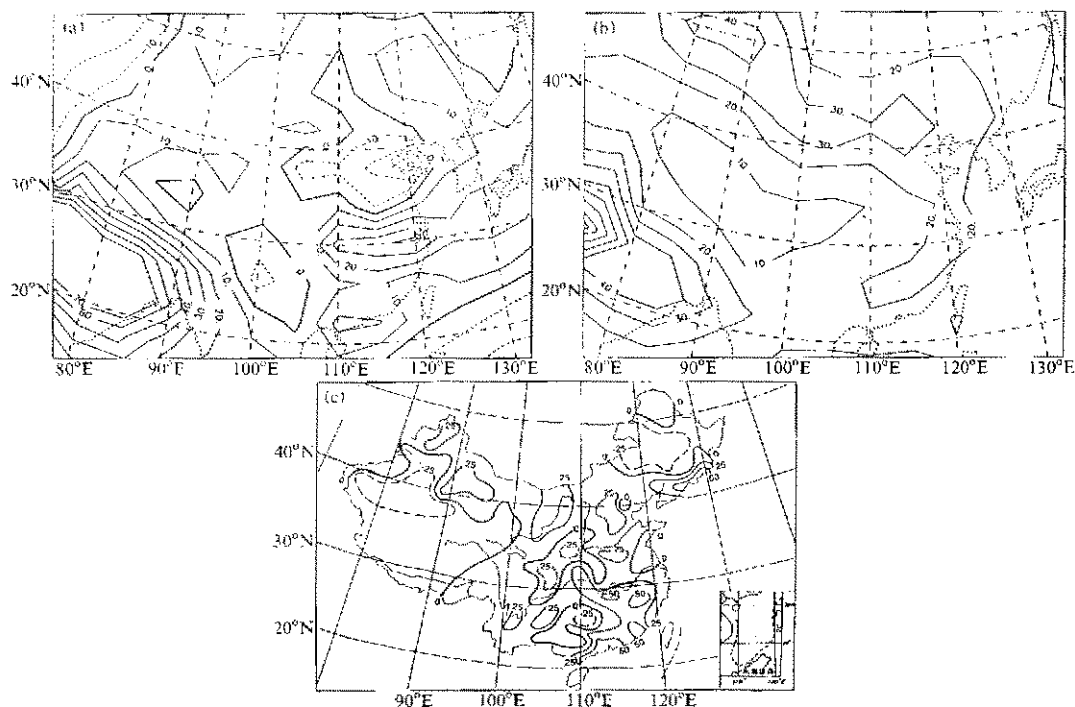


图2 1995年6~8月降水距平百分率的集合预测及标准差

(a) 集合预测; (b) 标准差; (c) 实况

第一类在黄海有一强的正距平区, 有8个积分属于这一类, 其平均如图3b; 第二类在我国南方为正距平区, 黄海的正距平区很弱, 有9个积分属于此类, 其平均如图3c。图3a是17个积分的平均。

图4是1997年我国区域的观测实况, 仔细比较可以发现我国的主要降水异常区从长江下游向南、向西延伸直至广西, 第二类预测效果甚佳, 第一类对此预测不成功。第一类预测在黄海有一强的正距平区, 图4只有国内资料, 不能给出这一正距平区, 据报道1997年韩国及日本南部暴雨成灾, 为多年少有, 国家气候中心的月气候监测公报中载有月降水量百分位分布图(Γ 分布), 由图可见7月份日本南部、韩国及我国长江口有集中的降水距平百分率大于90th的降水显著偏多区, 6月、8月降水也偏多, 表示黄海区域确有重大降水异常, 对此第一类预测甚为成功, 但第二类在此区域却只能预测出一个很弱的正距平区。

这是首次在气候预测中发现的多平衡态, 这里不准备涉及多平衡态的理论及其发生原因, 只指出它可以用来改善不同区域的预测。当取17个积分平均集合预测时如图3a, 两个多雨区都报的不好, 如分成两类各自集合, 则两个区域预测都很成功。

可以注意到的是参加集合的积分个数 N 不够大时不能发现多平衡态的存在, N 以取9~15为宜, 如发现多平衡态出现, N 还应加大, 以达到分类后每类达到7~9个积分为好。这里还有一个问题: 是否出现不同分布都可以认为是多平衡态? 为了与气候预测中的随机性的多样分布相区别, 建议从如下一些方面考虑进行判断: (1) 作为平衡态

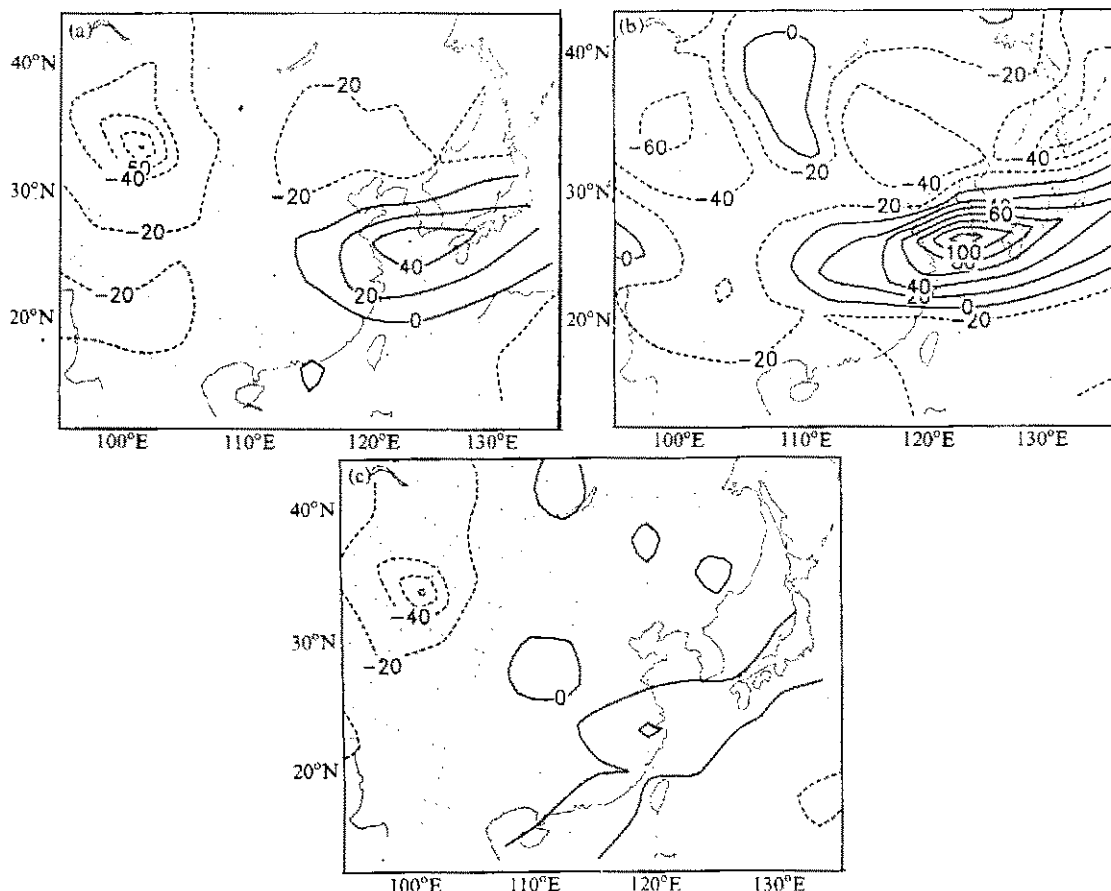


图3 短期气候预测中的多平衡态

(a) 17个积分集合; (b) 8个积分集合; (c) 9个积分集合

该降水异常区应该是较强的; (2) 在代表该平衡态的一类若干个积分间, 此异常区应该差别不大。当然还可以从当年的海温异常及西风异常作一些推测。进一步发展一些辅助工具以确认多平衡态的出现是很有用的。

2.4 加权平均法

气候预测中的集合方法有别于中、短期问题, 并非着眼于初值误差影响的消除, 当然不必限于算术平均, 文献[3]中曾指出可以采取加权平均进行集合。本文建议取权重函数 $G(d, t)$ 为

$$G(d, t) = G(d) \cdot G(t),$$

$G(d)$ 表示 N 个积分不同离散度的权重, 可以考虑使预测向概率大的集中, 可增大中心强度; $G(t)$ 为不同初始场所作积分的权重, 它们的选取可以由多年预测结果的统计、经验来选取, 可以用各种表达方式。本文建议一种取法如下:

$$G(d) = \frac{1}{1 + |a - \bar{a}| / 100},$$

a 为某一天预测的距平百分率, $\bar{a}$ 为 n 天平均值;

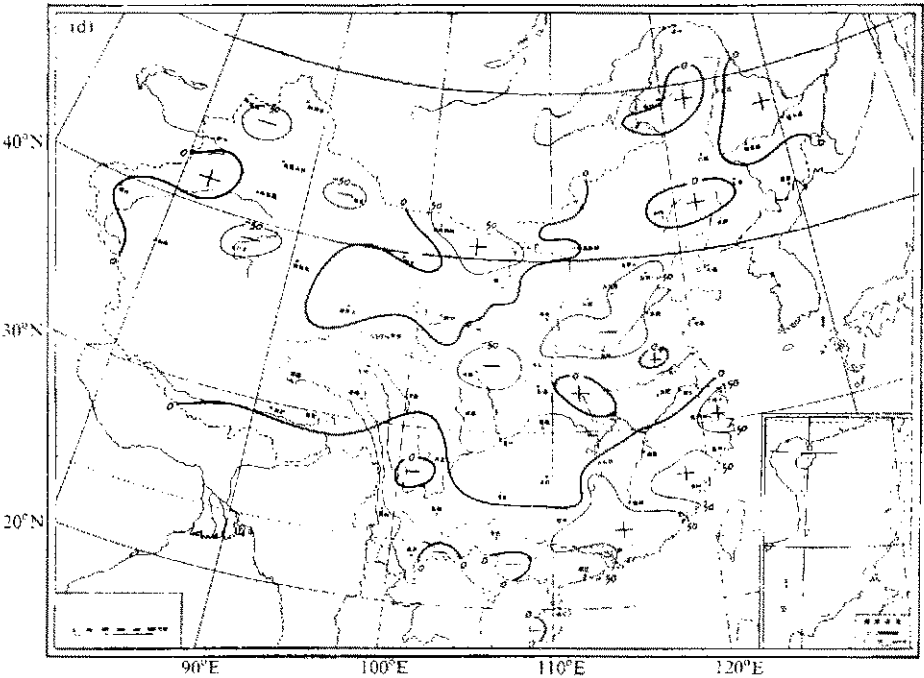


图 4 1997 年夏季中国降水距平

$$G(t)=R_n+1,$$

R_n 为若干年第 n 天的预测与实况的相关系数，由多年的预测统计而得。

在实践中，可将 $G(d)$ 、 $G(t)$ 取为 $G^n(d)$ 、 $G^n(t)$ 或 $\sqrt[n]{G(d)}$ 、 $\sqrt[n]{G(t)}$ ， $n=1, 2, \cdots$ ，以调节加权作用的强、弱。 $G(d)$ 可使出现概率大的结果在集合中更多地得到反映， $G(t)$ 则使效果好的积分在集合中占有更大的作用。权重因子的计算在每个网格点上进行。

表 1 是采用加权集合后预测与实况降水距平百分率空间相关系数 15 年平均结果的比较，常规集合指用算术平均进行的集合，由表列数字可见，经 $G(d)$ 加权后相关系数几乎未变，经审视发现预测距平百分率中心强度大约增大 5%； $G(t)$ 加权后相关系数有明显改进； $G(d, t)$ 加权结果与 $G(t)$ 相近，相关系数在各个区域均有增加，最多的增加了 0.07，与我们的预期效用相符。在进一步调整加权因子的强、弱后可能还会有进一步改进。

表 1 常规集合与加权集合相关系数的比较

集合方法	相 关 系 数									
	3~5 月					6~8 月				
	全国	105°E 以西	东北	华北	江淮至华南	全国	105°E 以西	东北	华北	江淮至华南
算术平均	0.14	0.01	0.14	0.15	0.39	0.16	0.06	0.14	0.25	0.33
$G(d)$ 加权	0.14	0.01	0.13	0.14	0.39	0.17	0.07	0.13	0.25	0.33
$G(d)$ 加权	0.20	0.06	0.21	0.21	0.44	0.22	0.14	0.18	0.31	0.37
$G(d, t)$ 加权	0.20	0.07	0.22	0.22	0.44	0.23	0.14	0.19	0.32	0.37

从表列数字还可以看到, 只有全国平均相关系数 0.20 及江淮至华南的 0.40 达到信度检验的要求, 其余分区的相关系数均不能达到检验要求, 且相关较低。这说明中高纬度的预测仍是不确定的, 集合预测并不能消除它。只有江淮至华南较好, 这正是我们分析的有物理基础其预测可能性大有改善的情况。海洋的作用也只有一个很重要的因素。预测效果如何改善则是很复杂的, 不在本文范畴。

在实际预测中还可发现, 某些地区预测距平百分率与实况间常出现负相关, 在集合时可以将预测距平百分率变号参加集合。在负相关数值较小时可考虑提高出现概率小的距平百分率的作用, 即取 $1/G(d)$ 为权重。在某些地区由于海洋模式对 SSTa 的预测时效不够长, 保持 2 月份 SSTa 不变的假定也只能在前 3~4 个月较好, 因此在跨季度预测的后期, 模式中的 SSTa 与实况偏离增大, 使得一些地区后期的降水预测也受到影 响, 如华北地区, 降水大都出现在 7~8 月份, 详细考察可发现, 这里出现概率小的积分效果较优, 在这些地区也可以采取 $1/G(d)$ 作为权重进行集合。

现阶段由于多种因素的限制, 数值方法的效果难以在短期内迅速提高。通过一些技术措施来充分利用其结果, 可收事半功倍之利, 上述设想可能没有足够理论依据, 但在实用上会是有效的。

2.5 标准差的应用

计算不同初始场所作预测的标准差 σ , 如作了 n 个积分, 计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}},$$

x 为预测的要素, $\bar{x}$ 为其平均值, 由下式计算:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

计算在每个网格上进行, 最后可得到 σ 的水平分布。标准差大的地区, 表示预测的离散程度大可信度小, 小值区表示离散程度小可信程度较好。它可以配合其他量对预测结果进行综合判断以确定可预测的气候异常区。 σ 表示预测结果在该格点上的离散程度, 可以将预测值加上 σ 得到预测值的上限, 将预测值减去 σ 则为预测值的下限, 这样就得到要预测的量在未来可能出现的区间。图 2c 是 1995 年 6~8 月总降水距平百分率的标准差 ($N=9$), 在 100°E 以东地区, 35°N 以南 σ 较小, 北部 σ 较大, σ 的大小分布与图 2a 相配合可得到比看图识字较为定量的结果。如 (110°E , 30°N) 之东一线, 图 2a 上预测距平百分率约 35%, 图 2b 上标准差约 15%, 该处降水距平百分率有可能出现在 20% 到 50% 这一区间, 显然, 这样的预测有很好的参考价值。而在 (110°E , 40°E) 处, 预测值约为 5% 而标准差约为 25%, 预测值可能出现的区间为 -20% 到 30%, 这样的预测参考价值就很小了, 这也反映了较高纬度地区目前仍属不可预测的范畴, 采用算术平均并不能够消除预测的不确定性, 图 2 中北方的预测效果不佳, 原因就在此。如何才能获得较为确定的结果, 将是一个有待进一步探讨的很困难的问题。由此还可看到: 数值方法作出的预测单独看预测的距平百分率图是不行的, 必须配合其他信息才能确认其可信程度, 从而进行取舍。

3 结束语

本文分析了天气和气候预测中集合方法的特点及其异同。它们的不同之处为: 在天气预测中主要是消除初值误差的影响, 而在短期气候距平预测中则是为识别有意义的、可预测的持续异常区; 天气预测中的集合方法由其理论设想所规定应是算术平均, 而在短期气候距平预测中则可不受限制; 天气预测中加在初始场上的小扰动不能太强, 而在短期气候距平预测中则希望所选初始场间有较大差异; 作为最简单的方法它们在集合中都可以采用算术平均, 这一点是相同的。本文对天气、气候预测中的集合方法进行了一些分析、讨论, 提出了一些看法, 并介绍了气候预测中的多平衡态现象, 希望有助于认识气候预测的特有问题, 有益于进一步研究的参考。

参 考 文 献

- 1 袁重光、李旭、曾庆存, 跨季度气候距平数值预测研究小结, 气候与环境研究, 1996, 1(2), 150~159.
- 2 袁重光、杨芳林、李旭、曾庆存, 汛期预测的集合预告模拟研究, 大气科学, 1996, 20(5), 593~598.
- 3 Zeng Qingcun, Yuan Chongguang, Li Xu et al., Seasonal and extraseasonal predictions of summer monsoon precipitation by GCMs, *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, 14(2), 163~176.

A Note on Ensemble Methods for Climate Prediction

Yuan Chongguang, Zhao Yan, Li Xu and Zeng Qingcun

(State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Ensemble methods for climate prediction are approached in this paper. It has been argued that there exists a predictable climate anomaly region which results from the efforts of SST anomalies in the warm pool of the western Pacific and the Asian monsoon, so the predictability in this effected region increases. How to extract the predictable part which mixes with a large amount of unpredictable results is one of the most important objectives for ensemble prediction. It is pointed out that due to the inherent dynamic characteristics of the atmospheric motion, the feature of climate prediction is different from that of weather prediction, therefore the ensemble method and objectives should not be the same. Some new ensemble proposals for climate prediction are put forward. Moreover, the phenomenon of multi-equilibrium-state found in climate prediction is presented for the first time. How to determine the multi-equilibrium-state and how to use the phenomenon to improve the prediction skill in different areas are discussed.

Key words: short-term climate; precipitation anomaly; ensemble prediction