

跨季度动力气候预测系统 IAP DCP-II^{*}

曾庆存 林朝晖 周广庆

(中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029)

摘 要 概述中国科学院大气物理研究所研制的跨季度动力气候预测系统 (IAP DCP-II), 及其在我国夏季降水距平预测业务中的应用情况。该系统的试用始于 1988 年, 1998 年定型为现今版本 (即 IAP DCP-II)。1998 年起至今, 每年预测的检验说明, 该系统有较好的跨季度预测能力, 能预报出夏季降水距平的大范围分布形势。

关键词: 气候预测; 夏季旱涝; ENSO 预测; 季度预报

1 引言

短期气候预测 (季度到年际) 方法的研究, 尤其是数值 (即动力学) 的预测方法及其在实际预测业务中的应用, 是世界气候研究计划 (WCRP)^[1] 及其他的一些具体计划诸如 TOGA^[2]、GEWEX^[3] 和 CLIVAR^[4] 的中心问题。本来, 由于旱涝灾害对我国国计民生的严重影响, 中国早就注意长期气象预报 (即今称气候预测) 问题, 积累了许多宝贵的经验。WCRP 的提出就立即得到中国学者们的高度关注和积极参与, 为此, 中国作出了巨大的贡献。

这里单讲中国科学院大气物理研究所为此而作的努力。该所在 1988 年就用自行研制的海气耦合环流模式 (其中大气环流模式包括陆表过程模式) 作出了第一个跨季度 (甚至长达三个季度) 的降雨距平预测, 并取得了令人鼓舞的成功^[5]。此后, 便形成了我们的短期气候预测系统 (IAP PSSCA) 并作准业务的夏季降雨距平的跨季度预测, 参加中国气象局每年 3 月份的气候预测会商和国务院防汛指挥部的相应会商。在实践中这个系统不断得到改进和完善, 于 1998 年定型为现行的正式用于业务气候预测的版本, 即 IAP DCP-II (也曾用过简写 IAP NCP-II, 不过此处 N 指“数值方法的”, 不确切, 确切的应是“动力学方法的”, 即 D)^[6~19]。从 1998 年起的业务预测检验说明该系统有较好的预测能力, 每年都能较好地报出我国夏季降雨距平的大范围分布形势。

2 IAP DCP-II 系统的构成

IAP DCP-II 由 5 个分系统组成: (1) IAP ENSO 预测系统 (IAP-TOGA. I 加海洋

2003-01-03 收到, 2003-02-10 收到修改稿

^{*} 本文为第二届中国科学院—第三世界科学院—世界气象组织气候论坛特邀报告。该工作得到国家重点基础研究发展规划项目 G1998040900-1 和国家自然科学基金资助项目 40233027 联合资助

初值形成技术), (2) 积分方案和“距平耦合”技术系统, (3) 集合预测技术系统, (4) 订正系统, (5) 预测产品和分析系统。系统的框图如图 1 所示。

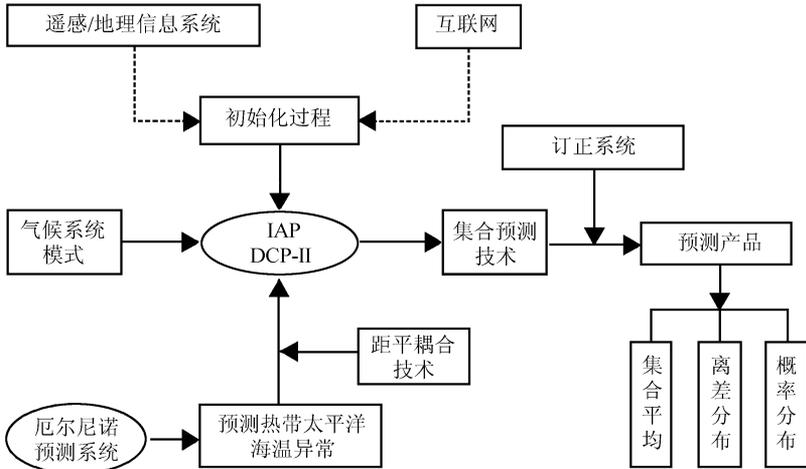


图 1 IAP DCP-II 跨季度数值预测系统框图

下面各节将逐一简介各分系统。

在这里先指出, 在系统定型以前, 我们曾用直接积分海气耦合环流模式的方法作跨季度预测。但几年后发现, 这样做很费时, 不方便, 结果也不见得更好, 于是后来就采用“两步法”, 即先用别的方法 (例如用中等复杂程度的海气耦合模式, IAP TOGA-I 就是如此) 预报海表温度距平 (SSTA), 再将其与实测的初始海表温度距平作某种混合, 然后由这样得到的 SSTA 为大气环流模式提供海面上的边界条件, 积分大气环流模式 (包括陆表过程模式) 来作出气候预测。

3 IAP ENSO 预测系统 (IAP TOGA-I 和海洋初值形成技术)

已知 ENSO 对东亚季风从而对中国夏季降水有较大影响, 可见热带太平洋海表温度 (SST) 分布的预测, 对中国夏季降水距平的预测是很重要的一环。

我们利用一个自己研制的中等复杂程度的海气耦合环流模式 (IAP TOGA-I)^[20] 来预测海表温度距平 (SSTA), 其海洋环流模式覆盖范围是 (121°E~69°W, 30°S~30°N), 分辨率是经度 2°, 纬度 1°, 垂直方向 14 层 (其中 9 层在海表至水深 240 m 的水层内); 而大气环流模式即为 IAP 全球二层格点大气环流模式, 分辨率为 5° (经度) × 4° (纬度)。我们研制了一种“统计订正法” (SCM) 来修订大气对海洋的作用而使海洋与大气环流模式耦合起来, 成功地克服了耦合模式中的“气候漂移”^[13], 并得到 ENSO 类型的演变^[15], 此即 IAP TOGA-I。

为了作预测, 我们研制出一种叫做“距平初值形成方案”, 只用到初始时刻及以前的实测海表温度距平分布 (即只用观测到的 SSTA, 而非 SST)。1981 年 11 月至 1997 年 12 月的历史模拟表明, 用 IAP TOGA-I 及“距平初值形成方案”所作的模拟, 在 Niño 3 区 (150°W~90°W, 30°S~30°N), 模拟和实测的 SST 相关系数高达 0.91。同

期的“后报”试验表明，Niño 3 区的“预测”也较好。图 2 给出“后报”试验中该区“预测”和观测的距平的相关系数 (a) 和根方差 (b) 沿该区的平均值随“预报”时间 (以月为单位) 的变化。作为对比，图中还给出持续性 (persistence) 预测曲线 (虚线)。可见，用 IAP ENSO 系统作出的“预测”直至第 15 个月相关系数仍高于 0.54，根方差为 0.89°C，都远远胜于持续性预测。前 4 个月相关系数略低于持续性预测的原因是由于我们没有海表下斜性层的足够的观测资料。

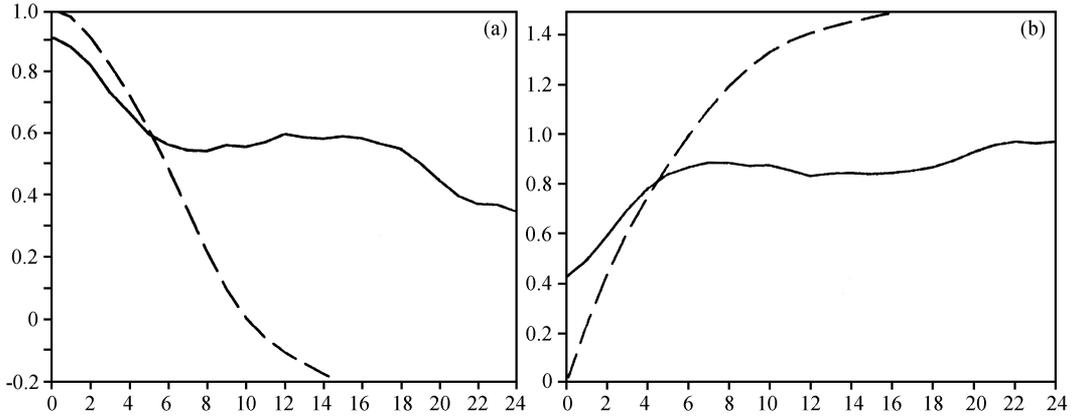


图 2 IAP ENSO 预测系统“后报”试验在 Niño 3 区的平均预测指标随时间的变化
(a) 相关系数；(b) 根方差。实线：预测；虚线：持续性预测

下面给出 IAP ENSO 预测系统近年来的适时 (也可译为“即时”，但译为“实时”是以讹传讹了) 预测的例子。

图 3 给出了 Niño 3 区 SSTa 从 1996 年夏季到 1999 年春季的预测结果。对初值分别为 1996 年 4、5、6 月的三个预测结果进行了集合，表明这次 El Niño 在 1997 年春天开始爆发，年底达到顶峰，从 1998 年开始逐渐减弱，在 1998 年夏季结束，并转为 La Niña。气候监测表明，上述预报的 Niño 3 区 SST 异常与实况相当一致，只是预测

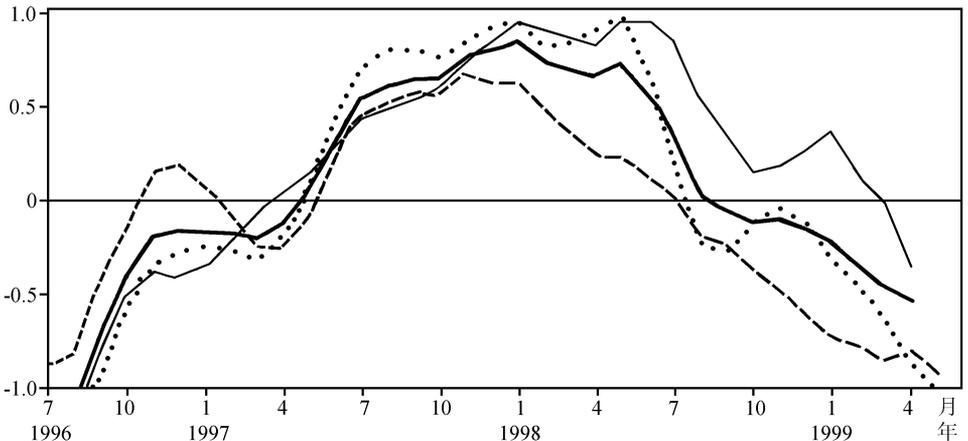


图 3 用 IAP ENSO 预测系统对 1996~1999 年的实时预测结果
细实线、虚线和点线表示以 1996 年 4 月、5 月、6 月为初始时刻的
Niño 3 区 SSTA 的预测，粗实线表示上述 3 个预报的集成

的 1998 年 ENSO 位相的转换时间比观测的晚了 3 个月, 预报强度也明显偏弱, 为 1°C 左右, 远远小于实况的 4°C 左右。这可能与耦合模式本身和预报初值的不足密切相关。

图 4 则给出了 IAP ENSO 预测系统分别利用 1998 年 4、5、6、7、8、9 月 1 日为初值的预报及其集合预报结果。从图 4 我们可以看到, 在 1998 年夏季转为 La Niña 后, 1999 年至 2000 上半年海温都将维持负距平。

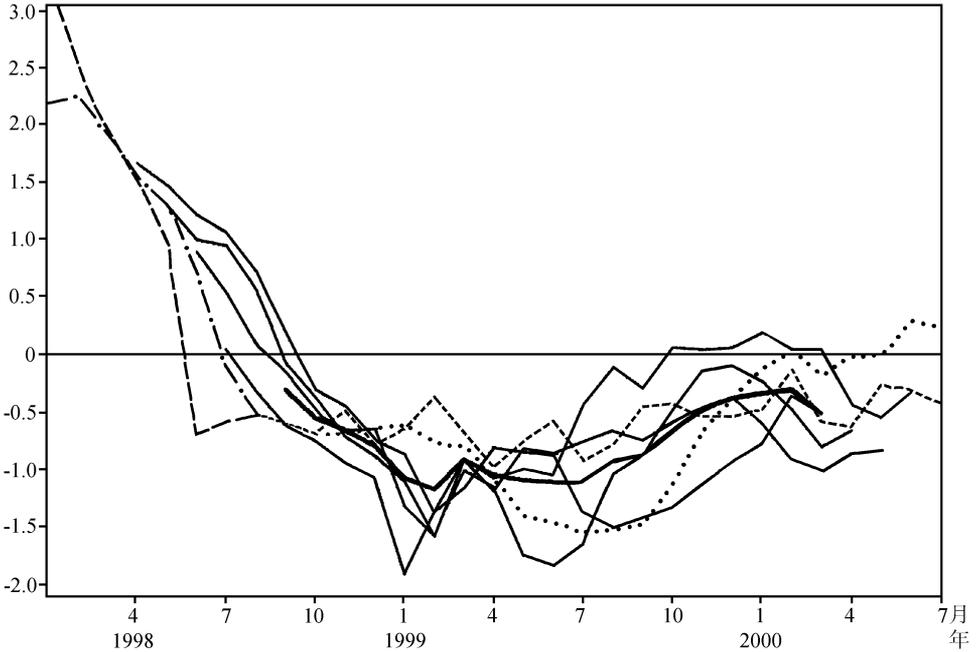


图 4 分别以 1998 年 4、5、6、7、8、9 月 1 日为初值的预报及其集合预报
粗虚线: 观测; 点虚线: 初始化结果; 粗实线: 集合预测结果
其他细线分别为不同初值预测结果

图 5 给出了分别以 1998 年 11、12 月和 1999 年 1、2、3 月 1 日为初值的预报及其集合预报结果。从图 5 可以看到, Niño 3 区的海温负距平要维持到 2000 年初, 但强度会逐渐减弱。事实是在 1999 年初负海温距平确实有所减弱, 但随后又再次加强, 一直到 2000 年。预测 1999 年整年维持负距平是正确的, 但其再次加强没有预测出来。利用 IAP ENSO 预测系统, 我们在 2000 和 2001 年都预测海温负距平将逐渐减弱并转为弱的正距平, 但事实上海温一直维持为负距平, 直到 2002 年。值得注意的是 1999、2000、2001 每一年年初到春季, 负海温距平都有所减弱, 甚至恢复正常, 但随后负距平又都再次加强, 而模式都预测其转为正距平, 这其中导致负距平再次加强的机制需要研究, 我们的模式目前尚缺乏对这种机制的描述能力。

图 6 给出的是 2002 年 3 月份发布的, 分别以 2002 年 1、2、3 月 1 日为初值的预报及其集合预报结果。预测结果表明, 在 2002 年春季维持近 4 年的海温负距平将结束, 并转为正距平, 但正距平强度不会很大, 是一次中等 (偏弱) 的厄尔尼诺, 这与事实吻合。

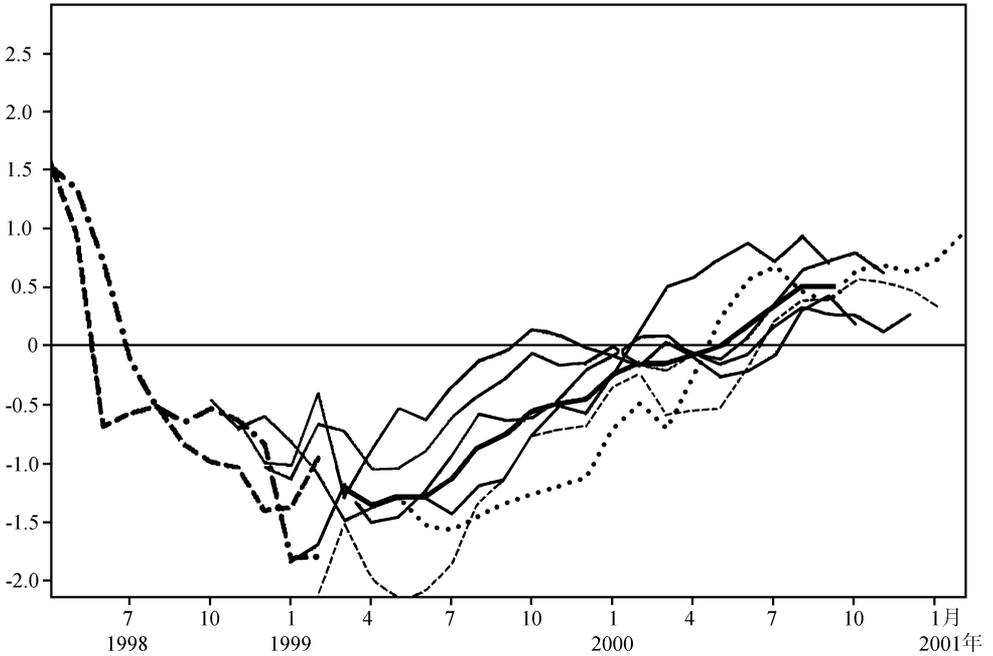


图 5 分别以 1998 年 11、12 月和 1999 年 1、2、3 月 1 日为初值的预报及其集合预报，其余同图 4

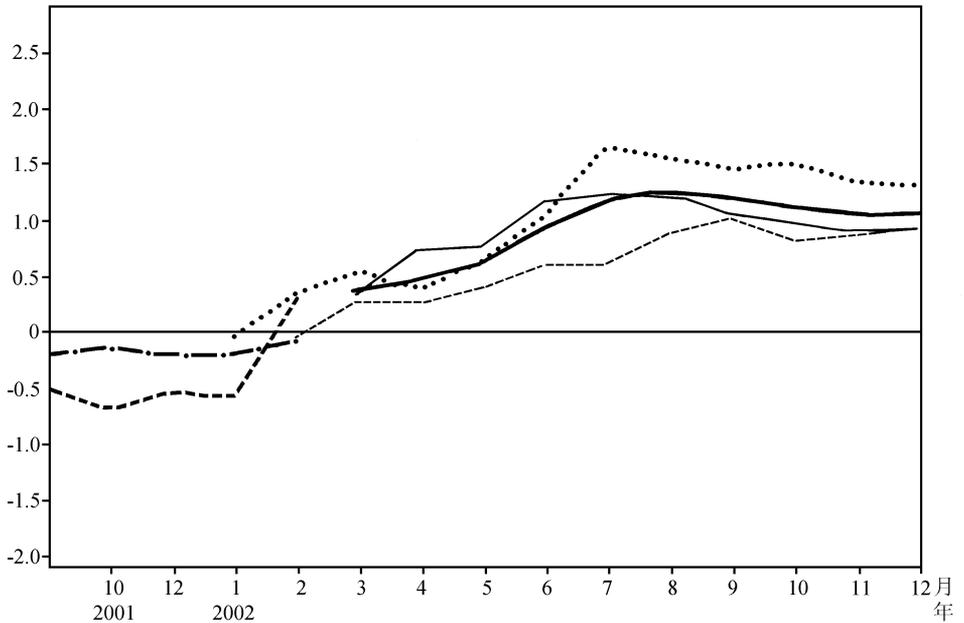


图 6 分别以 2002 年 1、2、3 月 1 日为初值的预报及其集合预报，其余同图 4

4 积分和距平耦合技术系统

我们已将改进过的陆表过程模式用到 IAP DCP-II 中^[12]，故在陆面上不需向大气环流模式提供下边界条件。但在海洋上，我们必须知道 $T_{ss}(t)$ 才能写出海气界面上的能

流通量方程, 为大气环流模式提供下边界条件。记 $T_{ss}(t)$ 的气候平均为 $\bar{T}_{ss}(t)$, 于是有 $T_{ss}(t) = \bar{T}_{ss}(t) + \Delta T_{ss}(t)$, 其中 T_{ss} 表示海表温度, $\Delta T_{ss}(t)$ 表示海表温度距平, t 表示时刻。我们取

$$\Delta T_{ss,p}(t) = \alpha \Delta T_{ss}(t) + \beta \Delta T_{ss}(t_0), \quad (1)$$

其中, $\Delta T_{ss,p}(t)$ 为用某种方法 (我们这里取为由 IAP ENSO 预测系统) 提供的预测海表温度距平, 而 $\Delta T_{ss}(t_0)$ 为初始时刻 (t_0) 的实测海表温度距平; α 和 β 为两经验系数, 可依赖于地理坐标。

采用上述的边界条件, 并取 t_i 时刻 ($t_i \geq t_0$) 的大气 (包括地表层) 状态作初值, 向前积分大气环流模式到二个季度 (以上), 得到 t 时刻的气象要素 F 的个案粗预测为 $F_i(t)$, 然后对所预测的量作季节平均, 即为该季的个案预测, 记作 $F(i)$, 当然 F 是倚赖于空间坐标的。

在这里, F 为降雨距平或距平百分率, 要作预测的季节为夏季 (6 至 8 月)。我们取个案预测的初始时刻 t_i 分别为 2 月份的第 i 天, 从而有 28 个个案样品。 $\Delta T_{ss}(t_0)$ 取为实测的 2 月平均海表温度距平分布。

5 集合预测系统

应该指出, 将一组“小扰动” (尽管它们对某些理想模式来说是“最优的”) 加到“同时刻”即“某一天 (t_0')”的初始场中去, 而由此个案预测样品集作集合预测 (ensemble prediction), 并不能改进季度和跨季度的气候预测。这是因为气候预测的时效远远超过了初值误差所决定的时限, 而预测误差可能主要由模式中的误差 (不确定性) 所决定。故上述方法不可取。作为第一阶段的尝试, 我们取“不同时刻”的实测初始场来得到个案样本集 (见第 4 节), 即扰动是“足够大的”但不是“同时刻的”, 于是 F 的集合预测 $\langle F \rangle$ 可取为

$$\langle F \rangle = \sum_{i=1}^{28} \gamma_i F_i, \quad (2)$$

其中, γ_i 为经验概率 (系数), 可依赖于地理坐标^[9,11]。

6 订正系统

须知, 在 $\langle F \rangle$ 中仍有误差, 甚至是系统性的, 为此, 我们引入了订正系统对 $\langle F \rangle$ 进行订正, 以便提高预测的精度, 于是最后的“正式预报”就是

$$\langle F \rangle_{\text{final}} = \langle F \rangle + \delta, \quad (3a)$$

或

$$\langle F \rangle_{\text{final}} = \sum_{i=1}^{28} \gamma_i (F_i + \delta_i) = \sum_{i=1}^{28} \gamma_i F'_i, \quad (3b)$$

其中, δ 或 δ_i 为订正, 依赖于地理坐标, 可用统计方法由“后报试验”定出^[8,12,14]。

我们对 1980~1995 期间作了后报试验。

7 预报产品

既然有了一个个案预测样品集, 我们不仅可以算出集合预测 (数学期望), 还可算出样品对数学期望的标准离差 (离散度) D , 出现某距平状态 $F'_i \in F^{(k)}$ 的概率 $P(F \in F^{(k)})$, 等等。这些都是对使用预测结果很有用的量。我们有

$$D^2 = \sum_{i=1}^{28} \gamma'_i [F'_i - \langle F \rangle_{\text{final}}]^2, \quad (4)$$

$$P(F \in F^{(k)}) = \frac{1}{28} N^{(k)}, \quad (5)$$

其中, γ'_i 是经验概率 (系数), $N^{(k)}$ 是出现 $F'_i \in F^{(k)}$ 的个案预测个数, 依赖于地理坐标。

作为第一步, 简单地取 $\gamma'_i = \gamma_i = 1/28$ (等概率, 这当然不是必需的), 而且只取一个 $F^{(k)}$, 即距平为正算作一个状态, 改记作 $F^{(+)}$, 相应的概率记作 $P^{(+)}$ 。当然, 如能按分“多几成”分级算概率更有用, 这有待改善。

8 适时预测及其检验

我们每年对全球夏季 (JJA) 降水距平作适时的跨季度预测, 但只对中国作检验。我们得不到国外的降水观测资料, 无法检验。

此处简述 1998 年起的结果。1998~2002 年我国每年都有洪涝和干旱灾害, 而且相当多的还是重灾。事后预测检验表明, 每年我们作出的跨季度预测都能报对降水距平的大范围形势分布^[12,16,19]。图 7 给出了 1998 年的例子。

从图 7 可以发现, IAP DCP-II 很好地预报出我国绝大部分地区降水偏多的观测事实, 对我国华北 (黄淮之间) 存在的较小负距平区域也较好地预报出来了。同时 IAP DCP-II 还预测出我国东北西部的强降水中心以及新疆西北部的强降水中心, 虽然其中心略有偏移, 中心强度比实测的略偏小。从预测图上还可以发现, 在整个长江流域预测的降水距平百分率均为正值, 同时在长江下游还存在着降水正距平的大值区, 这都与实测较为相符, 虽然长江中、上游预测的降水异常幅值与实测相比偏小^[12]。

图 8 则给出了 1999 年的预测结果, 其中图 8a 和 b 为观测场和预测结果, 图 8c 和 d 则为 D 和 $P^{(+)}$ 的分布, 具有 D 小值的区域预测在某种程度上是比较可信的, 具有 $P^{(+)}$ 大值的区域是出现降水正距平概率较大的地区, 而具有 $P^{(+)}$ 小值的区域则意味着干旱的可能更大。比较图 8a 和 b 可以发现, IAP DCP-II 很好地预报出 1999 年我国南涝北旱的大范围旱涝形势分布, 此外预测的长江中下游以及新疆北部地区的降水正距平中心也均与实测结果十分相符。但是对于我国华北地区存在的小范围降水正距平区, IAP DCP-II 并没有很好地预报出来; 另外 IAP DCP-II 预报的我国南方多雨区的范围也比实测要稍微偏北, 这些可能与预测系统所采用的气候模式的水平分辨率较低有关^[16]。另外, 我们还在图 8c 和图 8d 中给出了集合预报的离差以及降水距平百分率大于零的概率分布。从图 8c 可以发现, 在我国南方的大部分地区, 以及华北和东北的大部分地区集合预测的离差较小, 因此预测的可信度较高。另外从概率分布图 (图 8d) 可以看到,

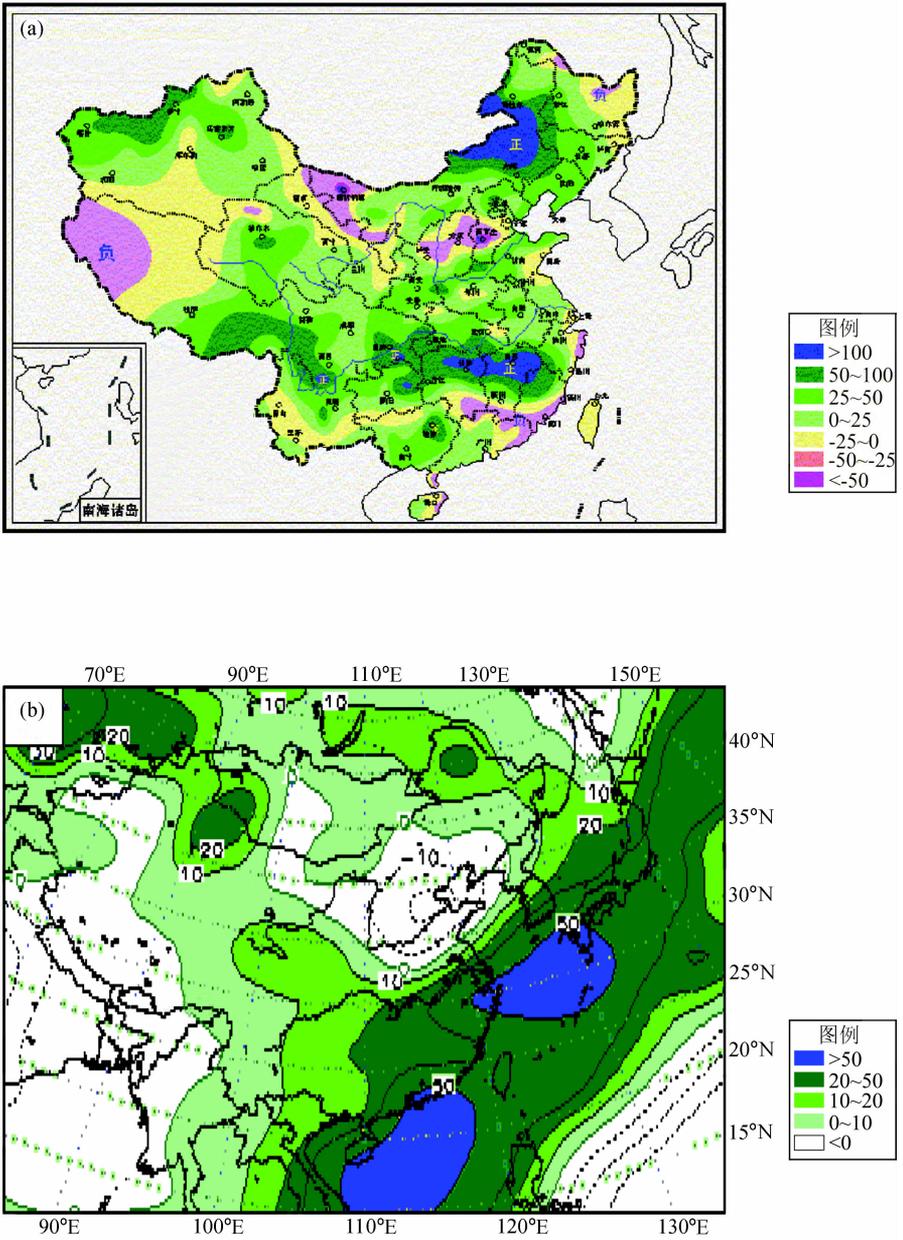


图 7 1998 夏季 (6~8 月) 全国降水距平百分率 (%)

(a) 观测结果; (b) IAP DCP-II 集合预测的结果

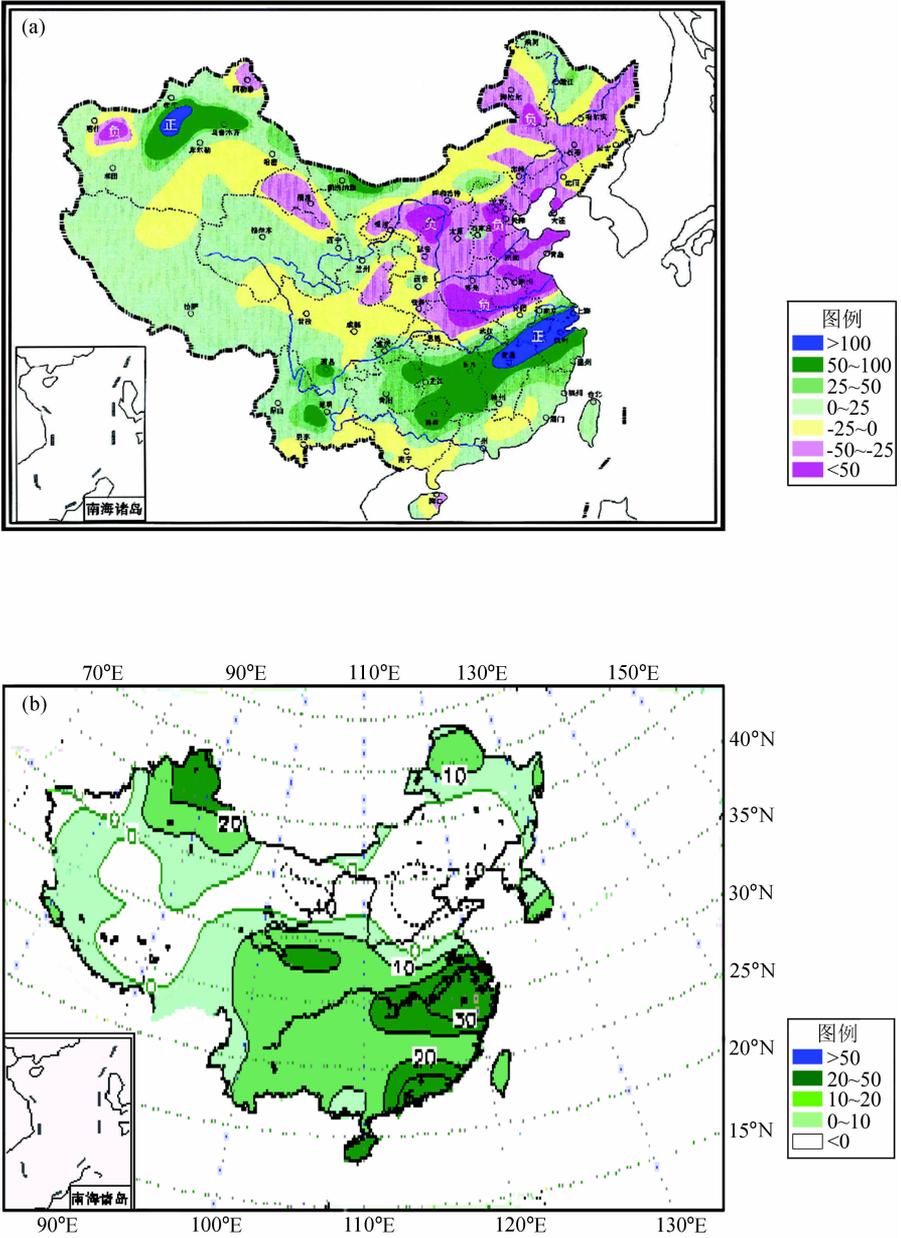


图 8 1999 夏季 (6~8 月) 全国降水距平百分率 (%)

(a) 观测结果; (b) IAP DCP-II 集合预测的结果

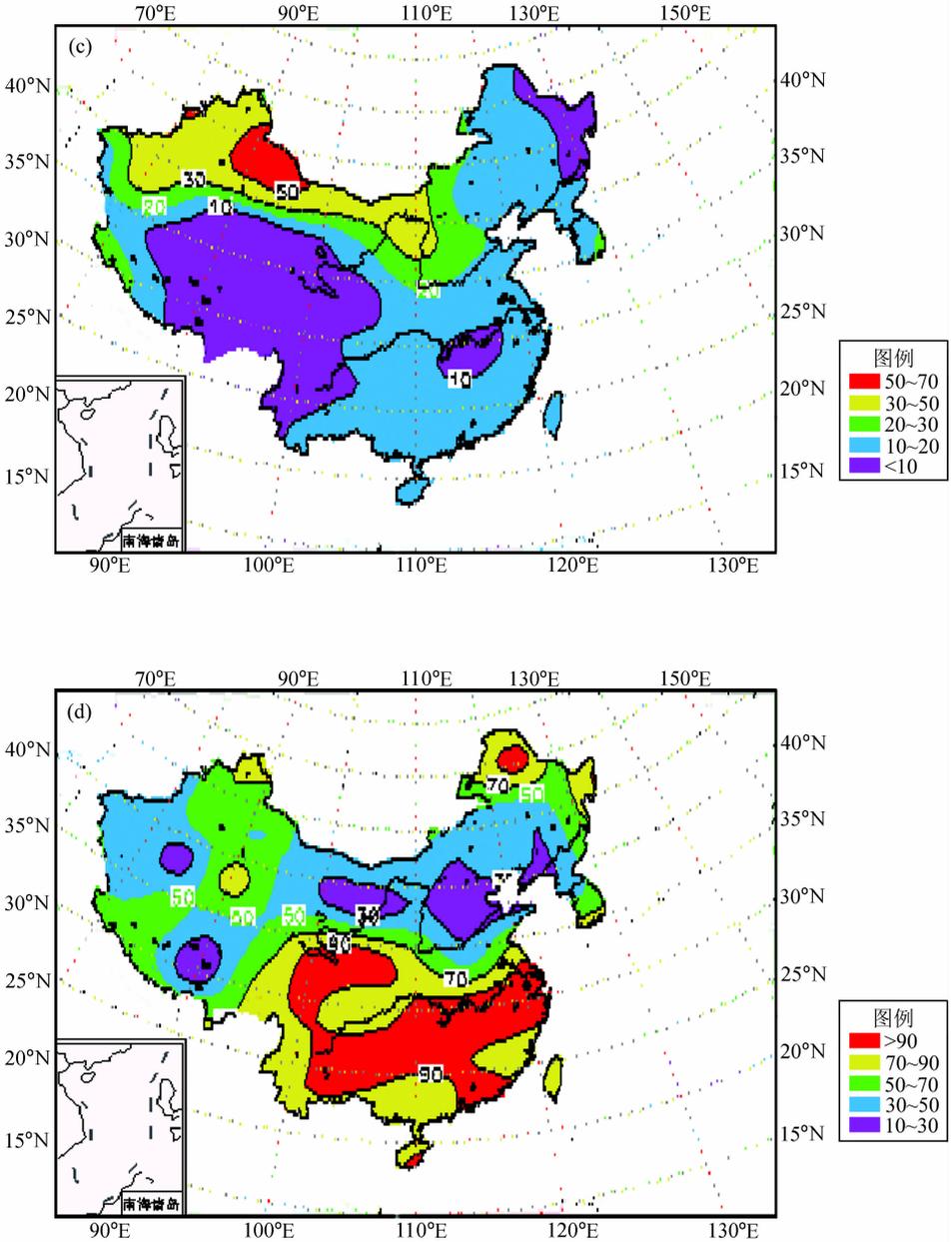


图8 1999夏季(6~8月)全国降水距平百分率(%)
(a) 集合观测的标准偏差; (b) 降水正距平的概率分布

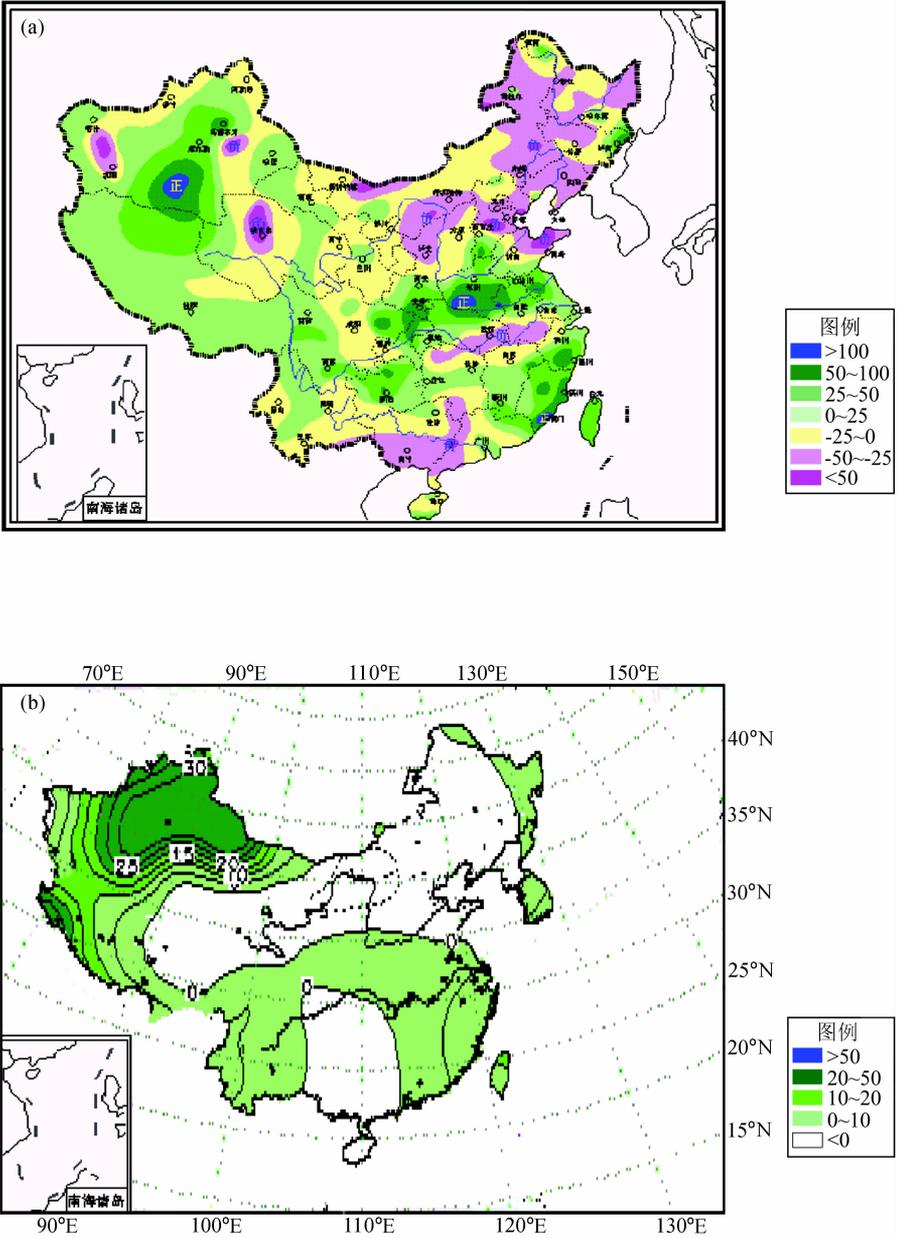


图 9 2000 夏季 (6~8 月) 全国降水距平百分率 (%)

(a) 观测结果; (b) IAP DCP-II 集合预测的结果

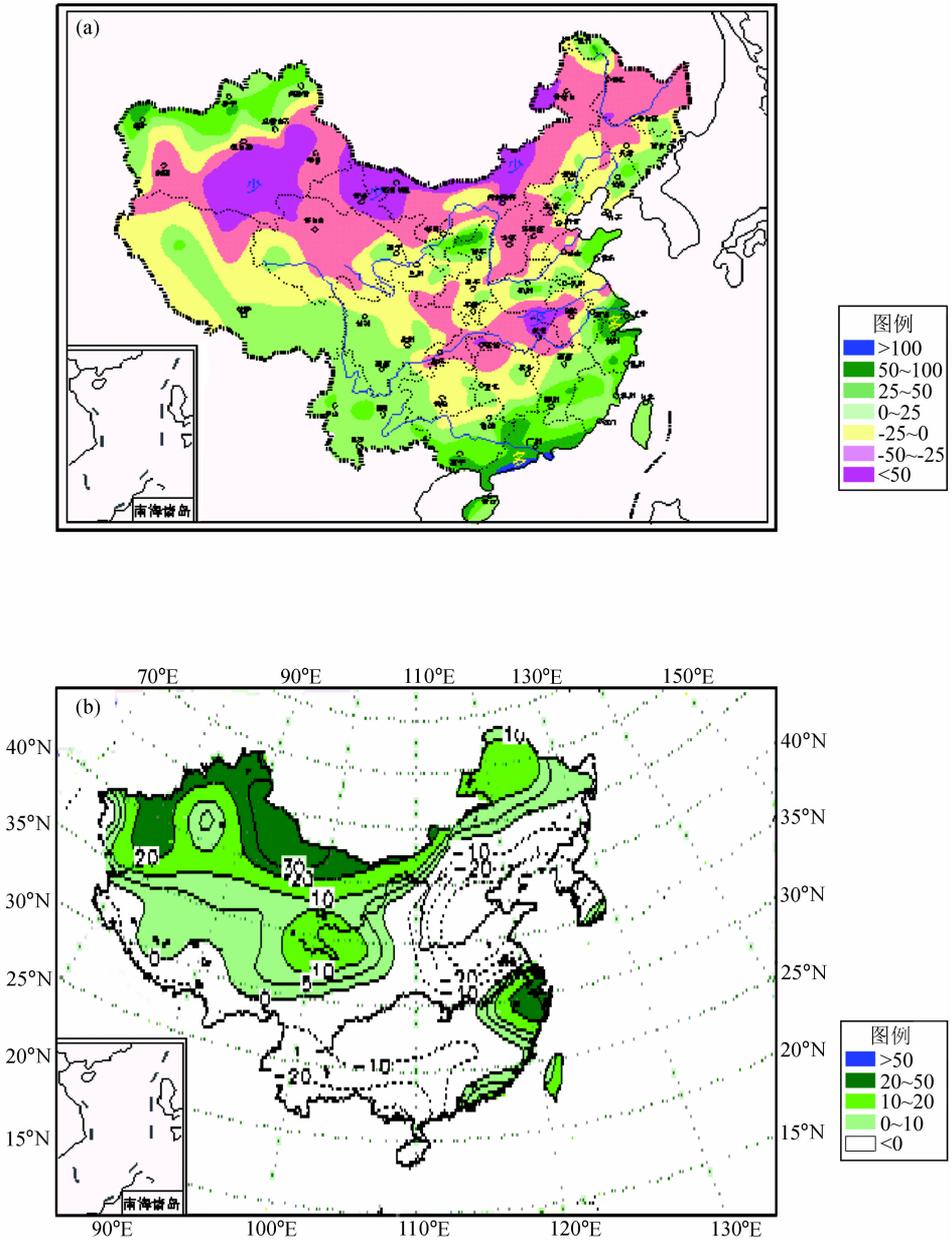


图 10 2001 夏季 (6~8 月) 全国降水距平百分率 (%)
(a) 观测结果; (b) IAP DCP-II 集合预测的结果

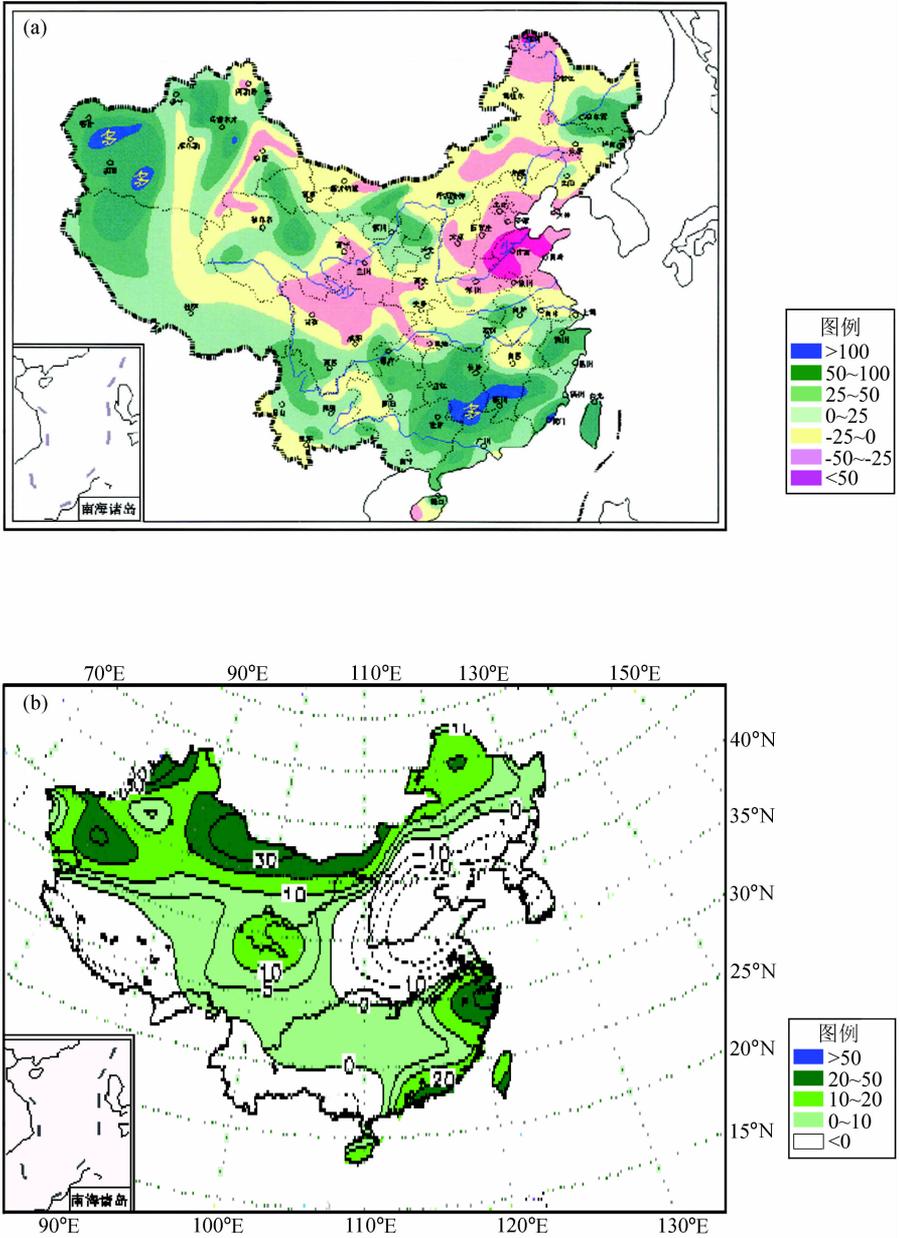


图 11 2002 夏季 (6~8 月) 全国降水距平百分率 (%)

(a) 观测结果; (b) IAP DCP-II 集合预测的结果

在长江中下游以及我国南方大部地区降水距平百分率大于零的概率均要大于 90%，显然这也说明我们所预测的 1999 年夏季我国南方大部地区多雨的可信度是较高的。

图 9 为 2000 年我国夏季旱涝形势的集合预测结果及与实测的比较。同样，我们可以发现 IAP DCP-II 很好地预报出我国北方大部为早年的大范围旱涝形势，而且对于河套附近较强的降水负距平区也预报得很好；另外，IAP DCP-II 预报的我国夏季主要雨带位于黄淮之间、以及我国的西南和东南沿海，这些均与观测的分布十分相近；另外，对位于新疆的降水正距平区，IAP DCP-II 也很好地预测出来了^[19]。

图 10 为 2001 年夏季情形，从图中可以看到，IAP DCP-II 很好地预报出我国华北干旱少雨的形势，同时也很好地预报出长江下游地区存在强降水中心。另外，IAP DCP-II 预报的新疆北部的多雨区也与观测较为吻合。但是对于我国东南沿海以及西南地区的多雨区，IAP DCP-II 并没有很好地预测出来。

最后，我们在图 11 中给出了 IAP DCP-II 对 2002 年我国夏季旱涝形势的预测结果。比较观测与预测结果可以发现，IAP DCP-II 很好地预测出 2002 年夏季我国华北、东北干旱少雨的大范围形势；同时预报出的长江下游以及我国南方大部的降水正距平区也与观测实况十分接近；另外，对于河套西部存在的多雨区，以及新疆西部、北部的多雨区，也均被 IAP DCP-II 较好地预测出来了。但对我国南方存在的强降水中心，IAP DCP-II 并没有很好地预测出来，其预测的幅值与实测相比明显偏弱。

9 对于改进的讨论

应用 IAP DCP-II 作跨季度预测的实践结果是令人鼓舞的，但为了能满足国家对气候预测的精度和广度的要求，现有系统的 5 个分系统都需要改进。例如，气候系统模式 (A-L-O) 将至少在分辨率和某些物理过程上进行改进；初值形成方案将要改进（将用四维变分方案^[21]，遍及大气、陆表层和海洋模式）；集合预测方案有可能考虑不同模式不同分辨率的结果、更好的概率分布、统计预测，甚至某些定性的经验规律；订正系统将精细化等等。

同时，还要将预测推广到四季和其他气象要素。

所有上述工作都在进行中，有望今后几年内完成。

参 考 文 献

- 1 WCRP, Scientific plan for the World Climate Research Programme, WCRP Pub. No. 2, WMO/TD-No. 6, World Meteorological Organization, Geneva, 1984.
- 2 WCRP, Scientific Plan for the Tropical Ocean Global Atmosphere Programme, WCRP Pub. No. 3, World Meteorological Organization, Geneva, 1985, 146 pp.
- 3 WCRP, Global Energy and Water Cycle Experiment (scientific plan), WCRP Pub. No. 40, WMO/TD-No. 376, World Meteorological Organization, Geneva, 1990.
- 4 WCRP, CLIVAR science plan, WCRP Pub. No. 89, WMO/TD-No. 690, World Meteorological Organization, Geneva, 1995.
- 5 曾庆存、袁重光、王万秋等, 跨季度气候距平数值预测试验, 大气科学, 1990, 14 (1), 10~25.
- 6 李旭, 短期气候异常的数值模拟与预测研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1992, 136pp.

- 7 Zeng Qingcun et al., Experiment of seasonal and extraseasonal predictions of summer monsoon precipitation, Proceedings of the International Conference on Monsoon variability and Prediction (Trieste, Italy, 1994), WCRP, WMO/TD-No.619, 1994.
- 8 Zeng Qingcun et al., Note on some methods suitable for verifying and correcting the prediction of climate anomaly, *Adv. Atmos. Sci.*, 1994, **11**(2), 121~127.
- 9 Zeng Qingcun, Predictions of summer precipitation anomalies by GCMS, Proceedings of the International Scientific Conference on the Tropical Ocean Global Atmosphere (TOGA) Programme, (2-7, April, 1995, Melbourne), WCRP-91, WMO/TD-No.717, 1995.
- 10 Yuan Chongguang, Advances in the research of short-term climate prediction, *Progress in Natural Science*, 1995, **5**(2), 188~194.
- 11 Zeng Qingcun, Yuan Chongguang, Li Xu et al., Seasonal and extraseasonal predictions of summer monsoon precipitation by GCMs, *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, **14**(2), 163~176.
- 12 林朝晖、李旭、赵彦等, IAP 短期气候预测系统的改进及其对 1998 年全国汛期旱涝形势的预测, 气候与环境研究, 1998, **3** (4), 339~348.
- 13 周广庆、李旭、曾庆存, 一个可供 ENSO 预测的海气耦合环流模式及 1997/1998 ENSO 预测, 气候与环境研究, 1998, **3** (4), 349~357.
- 14 Lin Zhaohui, Li Xu, Xhou Guangqing et al., Extraseasonal prediction of summer rainfall anomaly over China with improved IAP PSSCA, *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1999, **23**(4), 351~366.
- 15 Zhou Guangqing, Zeng Qingcun, and Zhang Ronghua, An improved coupled ocean-atmosphere general circulation model and its numerical simulation, *Progress in Natural Science*, 1999, **9**(5), 374~381.
- 16 林朝晖、赵彦、周广庆等, 1999 中国夏季气候的预测与检验, 气候与环境研究, 2000, **5** (2), 97~108.
- 17 Wang Huijun, Zhou Guangqing, and Zhao Yan, An effective method for correcting the seasonal-interannual prediction of summer climate anomaly, *Adv. Atmos. Sci.*, 2000, **17**, 234~240.
- 18 Zhou Guanqing, and Zeng Qingcun, Prediction of ENSO with a coupled atmosphere-ocean general circulation model, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**(4), 587~603.
- 19 林朝晖、赵彦、周广庆等, 2000 年中国夏季降水异常的数值预测, 自然科学进展, 2002, **12** (7), 771~774.
- 20 Zhang Ronghua, and M. Endoh, Simulation of the 1986-1987 El Niño and 1988 La Niña events with a free surface tropical Pacific Ocean general circulation model, *Journal of Geophysical Research*, 1994, **99**(C4), 7743~7759.
- 21 Zhu, J., and M. Kamachi, An adaptive variational method for data assimilation with imperfect models, *Tellus*, 2000, **52A**, 265~279.

Dynamical Extraseasonal Climate Prediction System IAP DCP-II

Zeng Qingcun, Lin Zhaohui, and Zhou Guangqing

(International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The IAP dynamical extra-seasonal climate prediction system (IAP DCP) and its application to the operational prediction of summer rainfall anomalies over China has been briefly described. The trial use of this system initiated in 1988, and the second generation of IAP DCP (IAP DCP-II) was fixed in 1998. The verification of prediction results since 1998 shows that IAP DCP-II has pretty high predictive skill and can well predict the large-scale patterns of the summer rainfall anomalies over China.

Key words: climate prediction; flood/drought; ENSO prediction; seasonal forecast