

基于模式误差分布特征的中国夏季旱涝预测可信度研究*

杨杰^{1)†} 龚志强²⁾ 赵俊虎²⁾ 许遐祯¹⁾

1) (江苏省气象局气候中心, 南京 210000)

2) (中国气象局国家气候中心, 北京 100081)

(2014年1月14日收到; 2014年2月28日收到修改稿)

基于美国气候预报中心组合降雨分析资料对国家气候中心海气耦合模式多年夏季降水预报误差进行统计分析, 以揭示模式预报误差的分布规律及特征. 研究发现, 模式预报误差分布特征满足正态分布, 基于误差分布特征分析模式对中国夏季降水的预测能力, 通过误差分布的高斯拟合曲线特征对比模式预报与动力统计方法的预测技巧, 进而得到动力统计方法改进误差分布特征的两种类型: 1) 变幅型改进; 2) 均值型改进. 在此基础上, 根据模式误差的统计特征提出了一种新的旱涝预测可信度计算方法, 用于量化地评估动力统计方法在不同地区的预测可信度大小, 并应用于实际预测. 最后以2012和2013年夏季降水为例, 给出了实况、预测以及可信度检验. 结果显示该方法能较好地反映出预测的不确定性, 较其他检验方法更具针对性, 对异常降水的预测可信度反映更为准确, 验证了方法的有效性, 可进一步提高动力统计方法的预测服务水平.

关键词: 误差分布, 动力统计, 汛期降水, 预测可信度

PACS: 92.60.Wc

DOI: 10.7498/aps.63.149202

1 引言

由于近年来旱涝灾害的频繁发生, 以夏季旱涝预测为中心的短期气候预测已成为气候领域中重要的研究课题之一^[1-3]. 其预测方法包括以数理统计为基础的统计学方法和以数值模式为基础的动力学方法, 二者均存在各自的优缺点^[4-7]. 目前普遍的共识是两种方法需要相互融合, 取长补短, 共同发展^[8-13]. 在动力和统计相结合的方法和策略方面, 国内外已经开展了大量的研究^[14-21]. 2008年以来, 中国气象局公益性行业科研专项“由历史资料改进动力季节预测的关键技术研究”, 利用国家气候中心(NC-C)实际业务模式CGCM和较全面的历史资料, 发展了利用相似年的模式误差信息实现对预报

年气候模式预报误差预报的汛期降水动力-统计预测方法, 建立了动力与统计集成的季节降水预测系统(FODAS)并投入业务运行^[22-27]. 在2009—2013年汛期降水预测中, 该方法的平均PS评分达到72分, ACC为0.17, 显示出良好的预测水平^[28].

气候系统具有高度的复杂性和非线性, 所有预测模型都是对实际系统的简化和抽象, 考虑的影响因素有所选择且十分有限^[29-33]. 因此, 不论哪种预测方法都存在一定局限性, 预测结果也不可避免地存在误差^[34-38]. 动力统计方法在实际业务预测中取得了一定成效, 但在部分区域也会出现预测与实况误差较大的情况, 且进一步改进其预报水平的难度越来越大^[39-42]. 动力统计预测同样存在一定的不确定性, 其本质上是一种概率预测, 预测信

* 公益性行业科研专项(批准号: GYHY201306021, GYHY201106016)、国家自然科学基金(批准号: 40930952, 41375069)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB955902, 2013CB430204)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yangjie19840827@163.com

息应由概率密度函数完整地体现^[43-44]. 误差是不确定性最直观的表现形式, 预测结果的不确定性可由误差的分布及其变化规律很好地展现出来. 因此, 对预报误差的变化规律及统计特征的研究是非常有必要的. 通过对预报误差分布特征的统计分析进而评估预报结果的不确定性, 有望进一步提高预测服务水平.

本文针对国家气候中心CGCM模式的多年夏季降水预报结果及误差进行统计研究, 以揭示模式预报误差的分布规律及特征, 基于实况与预报的离散方差分析该模式对中国夏季降水的预测能力. 在此基础上, 根据预报误差的统计特征提出了模式预报结果可信度的度量方法, 以此来量化地评估数值模式预报结果在不同地区的可信度大小, 以便动力方法与统计方法更好地结合起来, 进一步提高短期气候的预测水平.

2 资料与分区

2.1 资料介绍

1) 文中的动力统计预测方法采用的前期因子资料为国家气候中心气候系统诊断预测室提供的74项环流特征量和美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的40项气候指数, 考虑到业务应用以及影响因子更新等问题, 将114项指数在当年1, 2月份因子和上一年3—12月份的因子作为预测年前期因子, 共有 $114 \times 12 = 1368$ 个因子.

2) 以美国气候预报中心组合降雨分析(CMAP)资料的降水量作为实况观测资料, 用30年模式预报数据中的汛期预报降水场, 来计算汛期降水预报误差场, 并以1981—2010年资料计算气候平均态, 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$.

2.2 分区

我国地处东亚季风区, 气候条件复杂, 降水年际变率大、分布很不均匀、区域差异十分明显. 根据研究需要, 把中国划分为八个区, 如图1所示. 八个区分别为: 1, 华南地区, 包括广东、广西东部、福建、江西南部、湖南南部, 覆盖15个格点; 2, 华东地区, 包括江苏、浙江、安徽、河南、湖北等地, 覆盖18个格点; 3, 华北地区, 包括河北、山东、山西东部、北京和天津, 覆盖12个格点; 4, 东北地区, 包括黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古东北大部, 覆盖55个格点; 5, 西

北西部, 为新疆地区, 覆盖28个格点; 6, 西北东部, 包括内蒙古中段及西部、陕西北部、宁夏、甘肃北部, 覆盖42个格点; 7, 西藏地区, 包括西藏、青海西南部, 覆盖24个格点; 8, 西南地区, 包括云南、贵州、广西西部、四川、重庆、湖南西部、陕西南部, 覆盖20个格点.

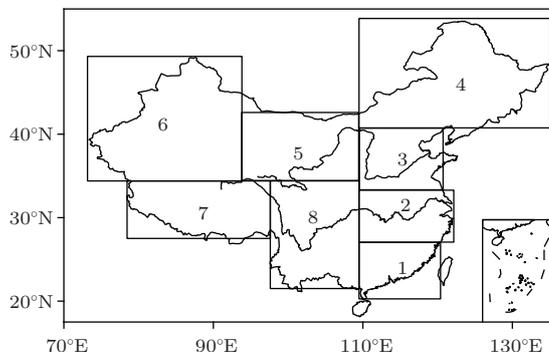


图1 区域划分示意图

3 基于误差分布特征的预报效果对比

3.1 模式预报误差统计特征分析

首先以全国为整体进行统计分析. 以全国范围内所有格点为单位, 基于CMAP降水资料统计了1983—2012年中国夏季不同量级的降水发生频次分布特征并做直方图, 如图2所示. 图2(a)为不同量级的实况降水的发生频次分布, 这里采用50 mm作为一个等级, 如0—50 mm, 50—100 mm, 100—150 mm, ..., 以此类推, 将中国区域内每个格点在近30年不同等级降水量的发生频次分别进行了统计, 再将区域内的所有格点不同等级降水量的发生频次进行相加, 得到的近30年中国区域内不同等级降水量的总发生频次. 从图中可以看出, 实况降水的分布特征表现为单峰型分布. 单峰型分布是自然界较为普遍的规律之一, 如正态分布、对数正态分布、 Γ 分布、 β 分布、Weibull分布、Gumbel分布等, 基本上能够拟合各种无偏或有偏的分布. 其中尤以 Γ 分布拟合正偏分布及 β 分布拟合负偏分布时的参数估计较为复杂, 而且正态分布是用来拟合偏度为0或很接近0的分布, 其参数估计较为容易^[45,46]. 实况降水的分布特征整体趋向于对数正态分布, 频次随降水量级的增加先快速增大并达到最高值, 而后随降水量级的不断增加呈现缓慢的衰减趋势, 全国范围内夏季平均降水量在100—400 mm之间的频次最高. 图2(b)

为模式回报的近30年夏季降水量的发生频次分布特征,可以看出,模式对于降水分布的总体变化趋势上具有一定的模拟能力,但是具体到各个量级的降水量特征则与实况有一定差异,对比实况与模式的分布曲线特征(图3(c))可以看出,模式对于量级较小的降水(0—200 mm)与较大量级的降水(600—900 mm)模拟不足,模式模拟明显少于实况,而对于中等量级的降水(200—500 mm)的频次模拟则远远超过实况频次.图3(d)为统计了近30年的夏季降水预报误差分布特征,可以看出预报误差的分布特征很好地满足了正态高斯分布,其偏度很接近0,误差的波动范围主要在-300—300 mm之间变化,而其中又以-100—100 mm的预报误差为主,最大值在0值附近,由0值分别向两边呈递减趋势.

图2是将全国作为一个整体进行降水及误差分布特征的统计,而我国降水区域性差别很大,预报时往往需要分区域进行预报.根据图1中的分区给出8个区域的降水分布特征以及对应的模式预报误差分布特征.图3(a)—(i)分别给出了8个分区以及全国的30年夏季观测的降水量发生频次分布特征,可以看出,所有区域的降水分布都呈现单峰型分布,各个区域的降水量频次分布差异较大,虽然区域的降水频次分布特征都呈现出中间大两边小

的分布特征,但是其形态各异,并不统一.从各个区域的降水分布特征来看,其频次分布为:随着降水量等级的不断增大,其相应的发生频次也显著提高,而当降水量达到一定阈值以后则频次随着降水量的增大而衰减.出现频次最高的降水量级基本上代表了这个区域降水的主要特征.

从图3中可以看出,华南区域夏季降水出现频次最高的降水量级为600—800 mm,华东地区为500—600 mm,华北地区为200—400 mm,东北地区为200—300 mm,西北西部为50—80 mm,西北东部为50—70 mm,西藏地区为250—350 mm,西南地区为500—600 mm.各个区域的降水频次变化趋势较为一致,随着降水量级的增大其发生频次快速增大并达到最大值,随着降水量级的进一步增加而呈现发生频次逐渐减小的趋势,整体表现为单峰分布,但是两边并不对称,各个区域具体形态也是大相径庭,其偏度参数估计较为复杂,并没有统一的描述形式,要找到各个区域降水频次分布的准确描述形式较为困难.

图4(a)—(i)依次给出了8个分区以及全国的模式预报误差频次分布特征.从图中可以看出,各个区域的预报误差频次分布特征满足正态高斯分布,从总体的预报误差来看,误差的变化范围在-400—400 mm之间,各个区域的变化范围有所不

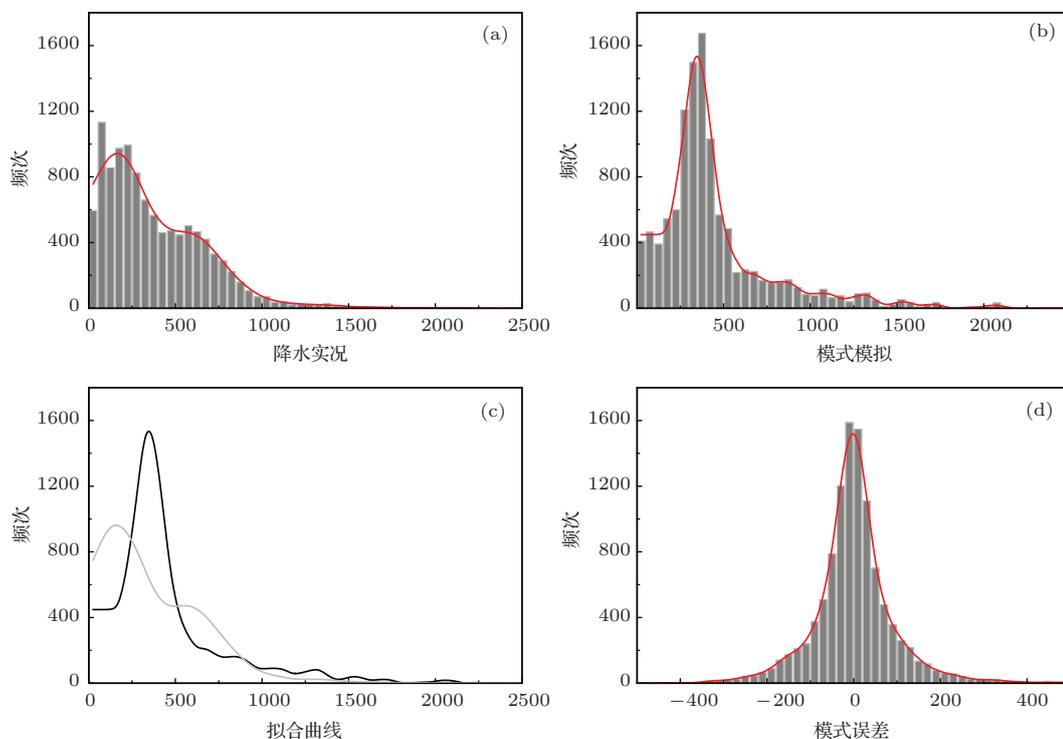


图2 近30年(a)实况降水频次分布,(b)模式模拟降水频次分布,(c)实况降水与模式降水拟合曲线对比,(d)模式预报误差分布特征

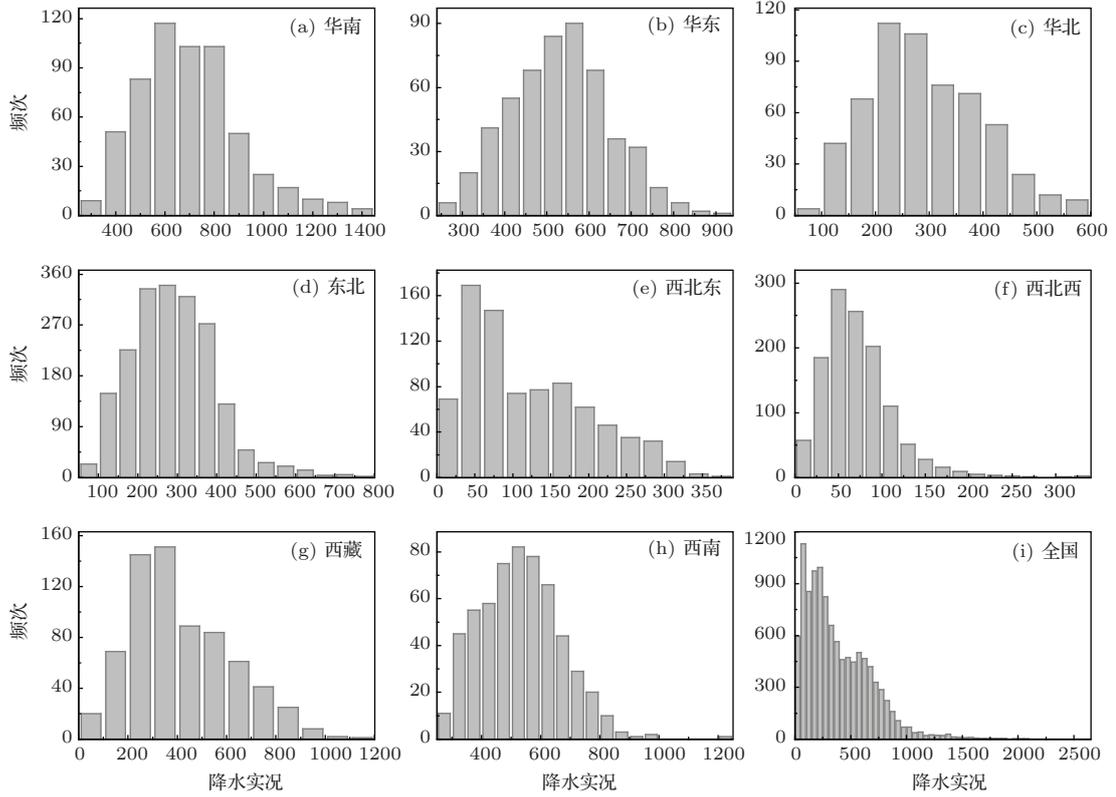


图3 各区域近30年夏季降水分布

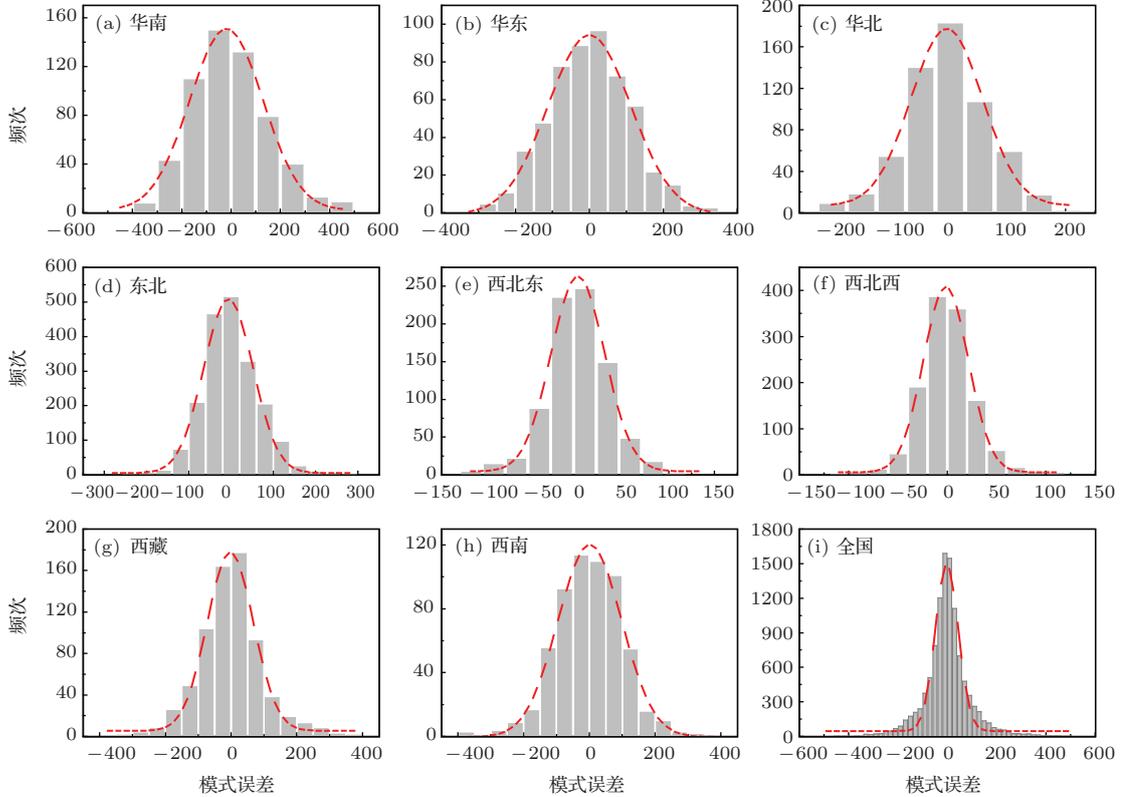


图4 各区域近30年模式预报误差分布特征

同. 由于华南区域夏季降水量较大, 因此该地区的误差变化范围也相应较大, 在 $-400\sim 400$ mm 之间, 华东地区、西南地区的误差变化范围为 $-300\sim 300$ mm, 华北、东北地区误差变化范围是 $-200\sim 200$ mm, 而西北地区由于其夏季总降水量最少, 相应的误差变化范围也最小, 在 $-100\sim 100$ mm 之间. 各区域的误差变化范围有着较大的差异, 这与该区域的实际降水量和模式对于该区域降水的模拟能力有关. 从各个分区来看, 其发生频次最高的误差值并不都是 0, 而图中所示的全国区域预报误差频次最高的值为 0, 可以看出华南地区的误差频次分布相对于 0 值明显地左偏, 误差的最概然值小于 0, 说明模式对于该区域的降水量预报不足, 大部分情况下预报值小于实况观测, 存在预报偏少的系统性偏差; 而西藏地区、西南地区的模式预报误差分布相对 0 值明显地右偏, 说明模式对于该区域降水的预报偏多于实况的频次发生较多, 存在预报偏多的系统性偏差. 总之, 模式预报误差的频次分布特征可以从一定程度上体现出模式对于该区域的降水预报性能, 通过其误差分布形式可以直观地了解模式对于各个区域的降水模拟能力及其存在的不足. 由于区域的模式误差频次分布特征满足高斯分布, 可通过高斯函数来对其进行拟合, 其参数估计相对简单, 通过计算拟合的各个参数可以对模式预报误差的分布特征给出量化的指标, 从而量化地评估模式的预报性能.

综上所述, 不管是从整体还是各个分区来看, 实况降水虽然分布形式都呈单峰型分布, 但要准确地描述其各个区域的概率密度分布函数并进行参数估计则相对较为复杂. 而模式误差的分布形式则较好地满足正态分布, 其参数估计相对容易, 并且拟合曲线可以反映出预报误差的状态, 可将其作为一种模式预报性能的评估方法, 即采用正态分布对预报误差的概率密度分布函数进行拟合, 得到不同预测方案预报误差的拟合曲线, 通过拟合曲线的特征来判断预报效果.

3.2 基于误差分布的预报性能对比

前面给出了模式预报结果的误差分布特征, 对动力统计预测方法的近 30 年交叉检验误差分布特征进行了统计分析. 这里的动力统计预测方法是基于动力-统计相似预报原理, 利用 114 项指数来表征前期的气候系统状态, 从中筛选出对降水预报误

差进行较好订正的因子作为关键预报因子, 以此为标准筛选与预报年具有关键性相似特征的 4 个历史相似年, 并将相似年模式预报误差进行加权平均后的结果作为预报年的模式预报误差, 最后将该预报误差叠加到模式降水的原始预报结果, 得到汛期降水的客观化预报结果.

统计结果显示, 动力统计预测结果的误差分布特征也同样较好地满足正态分布. 可通过高斯函数对其进行拟合, 并将拟合后的曲线与模式预报误差的拟合曲线进行对比, 分析动力统计预测是否对误差的分布形态有所改变, 从而评估其预报效果. 从高斯拟合曲线的形态来看, 其形态越细长, 表明预报误差的离散方差越小, 预报误差的频次分布中接近于 0 的发生频次越多, 预报准确率越高. 而有的误差分布形态虽然较为细长, 但是其最大值位置偏离 0 值较远, 说明预报的最概然值与实况之间存在较大的偏差. 因此, 对于预报性能的评估不仅要看概率密度函数的形态, 还要看中心位置, 中心位置越接近于 0, 表示方法对该区域的预报最可能发生的误差值就越接近于 0, 预报越准确, 方法的预报技巧越高. 根据误差分布形式所代表的模式预报性能, 给出预报误差的分布形式的变化与预报性能之间的关系(图 5). 从图 5(a) 中可以看出, 动力统计预测后的预报误差较预测前更向 0 值收缩, 其变化幅度的范围缩小, 使得更多的预报误差值在正常波动范围, 减少了预报误差异常值出现的次数. 而图

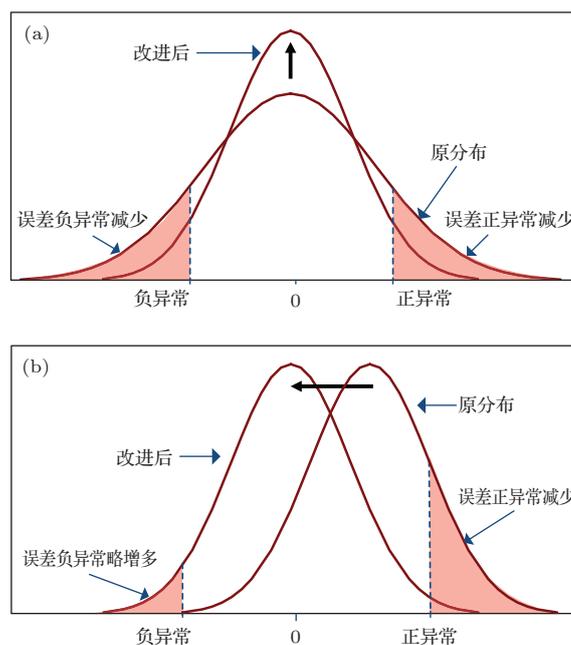


图 5 误差分布改进方式示意图 (a) 变幅改进; (b) 均值改进

5(b) 显示改进后的预报误差分布函数均值发生了变化, 整体向0值靠近, 预报误差的正异常概率明显减小, 虽然负异常概率略微增大, 但整体而言预报误差发生异常的概率明显减小.

根据图5中的变化关系, 将动力统计预测性能的改进分为两种类型: 一是变幅改进(方差减小), 即通过动力统计订正以后的预报误差的离散方差减小, 使得误差形态更向0值收缩, 预报误差在正常范围内的概率较高; 二是均值改进(修正系统订正漂移, 并不改正其分布形式), 即通过动力统计修正以后的预报误差分布形态没有改变, 但是能够修正其均值, 使得模式误差分布形态的均值(最概然值)更接近于0, 也使得预报误差在正常范围的概率增大.

对2002—2011年中国夏季降水进行的10年的动力-统计预测独立样本回报结果和模式系统订正预报的误差概率密度函数进行统计, 并对其分布函数进行高斯拟合, 如图6所示. 图6(a)—(d)中分别为华南、华东、华北和东北4个分区的十年独立样本回报检验后的误差概率密度函数的高斯拟合, 虚线为模式预报的误差频次分布, 实线为基于动力统计预测误差频次分布. 可以看出, 华南区域动力统计预测不如模式预报的效果好(图6(a)), 通过动力

统计订正后的预报误差离散方差变大, 使得预报误差发生异常的概率增大, 整体的预报技巧没有提高反而降低; 华东地区经过动力统计方案修正后预报误差的分布形式均值发生了变化, 整体向0值靠近, 属于均值型改进, 误差负异常的频次明显减小(图6(b)); 华北区域的动力统计方案修正的预报误差分布类型是典型的变幅型改进, 预报误差离散方差减小, 修正后的误差正异常和负异常的频次都明显减小(图6(c)); 东北地区模式预报误差明显左偏, 误差负异常的发生频率非常高, 通过动力统计修正后的预报误差既存在均值的改变也存在变幅的改进, 分布得到明显纠正, 误差负异常明显减少, 但误差正异常略有增多(图6(d)).

图7(a)—(d)依次为西北东部、西北西部、西藏以及西南4个区域的模式预报与动力统计预报误差分布对比. 由图可见, 西北东部、西北西部以及西藏地区的模式预报误差分布都呈现出右偏的分布, 模式在这三个区域的预报结果较实况偏小的概率高, 存在预报结果偏小的系统性偏差, 通过动力统计修正后误差分布改变了原分布的右偏形态, 使得误差正异常的概率明显减小, 但同时也使得误差负异常的概率略增大, 但整体还是使得误差发生异常的概率减小. 经过动力统计方案修正后预报误差的均值

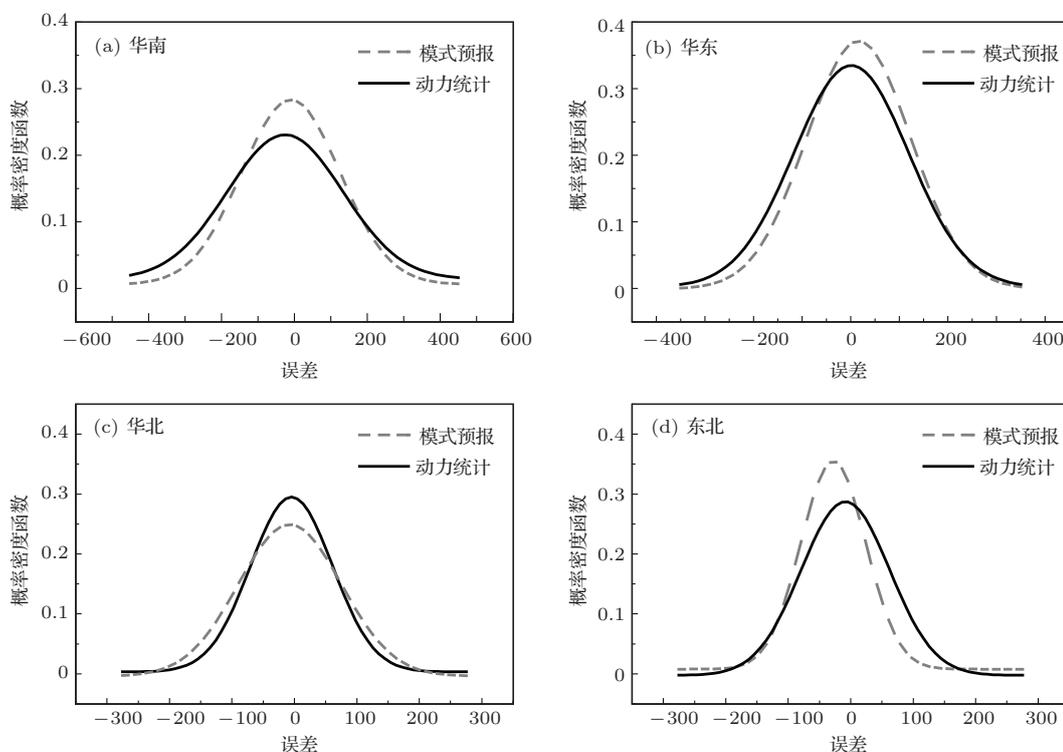


图6 东部4区动力统计预报与模式系统订正预报误差概率密度函数对比

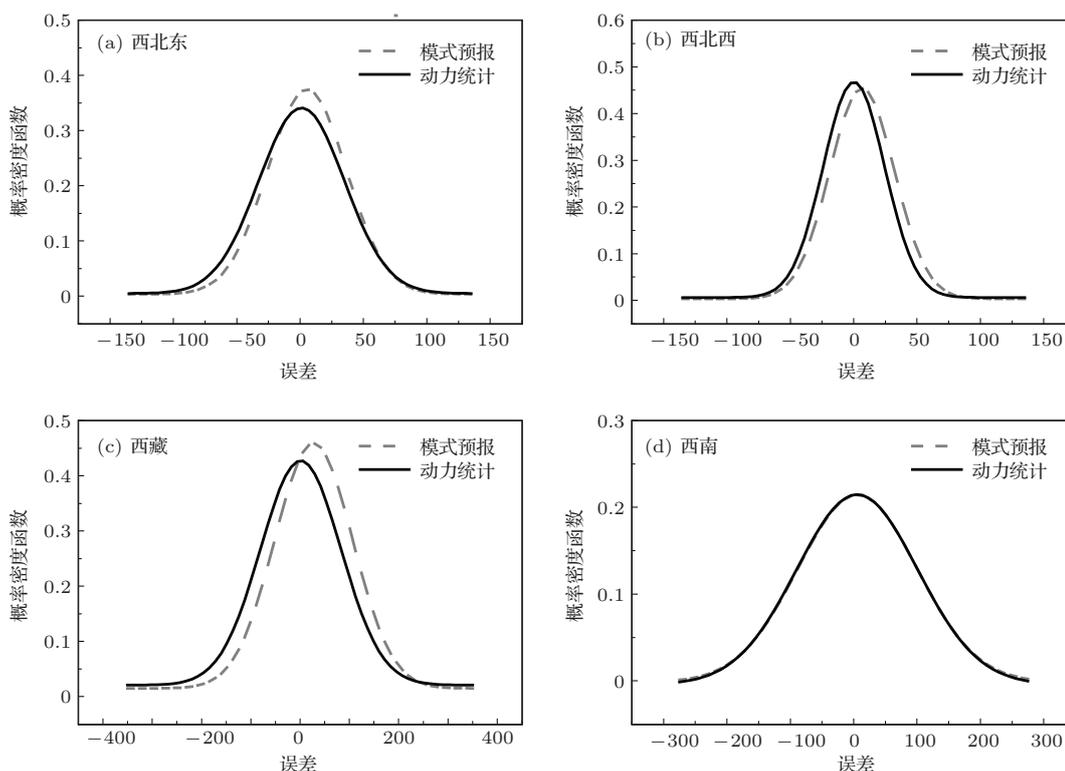


图7 西部4区动力统计预报与模式系统订正预报误差概率密度函数对比

发生了改变, 整体向0值靠近, 属于均值型改进. 西南区域动力统计预报与模式预报的误差分布形式几乎一致, 没有明显改变, 说明该方案对该区域的预报技巧没有提高.

从预报误差的概率密度函数分布可以较直观地看出预报技巧在原来的基础上是否有所改进, 并且能够判断出主要对误差的哪些方面进行了改进, 包括误差的变化范围和误差的类型, 哪些还需要进一步进行修正, 都可以通过误差的分布函数进行较好的把握.

3.3 模式预报误差分布的年代际特征

图8给出了模式预报误差频次分布的年代际特征. 图8(a)—(c)分别表示1983—1992, 1993—2002及2003—2012三个时段的频次分布特征. 由三个时段的分布特征可见其分布形式非常一致, 几乎没有变化, 三者的变化范围都在-400—400 mm之间, 且预报误差频次最大值都在0左右, 说明模式预报误差的分布形式非常稳定, 没有明显的年代际变化特征, 这为进一步利用预报误差的正态分布特征对预报结果进行旱涝概率的计算分析奠定了基础.

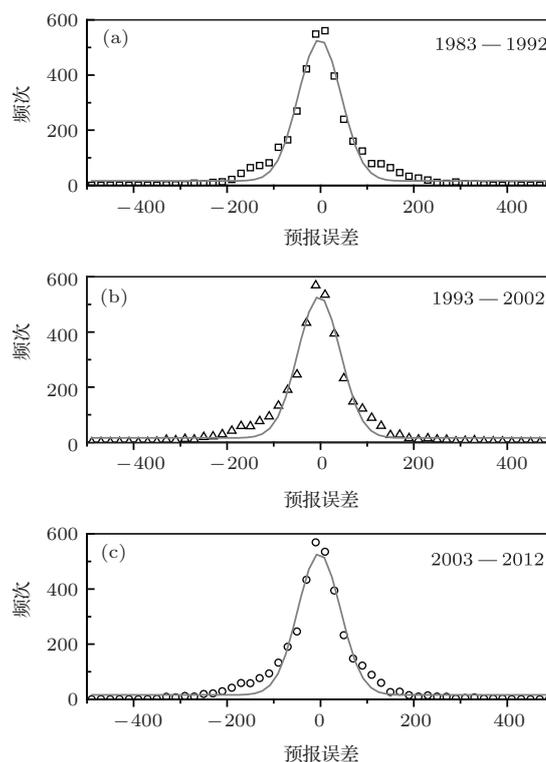


图8 模式预报误差分布的年代际特征

3.4 旱涝预测可信度计算方法

动力统计预测的降水预报结果 \hat{P} 可分为两个部分, 如(1)式所示: 一是模式预报部分 \hat{P}_M , 二是

模式预报误差的估计部分 \hat{P}_E . 对夏季降水进行实际业务预测时, \hat{P}_M 是采用每年2月底起报(3月初完成)的夏季集合平均的业务预报结果. 因此, 对动力统计预测而言, \hat{P}_M 是模式运行出来的客观结果, 相当于定值, 不确定的是误差估计 \hat{P}_E 的值, \hat{P}_E 则需要通过动力统计来进行估计, 通过两部分叠加便可得到最终的预报结果 \hat{P} .

$$\hat{P} = \hat{P}_M + \hat{P}_E. \quad (1)$$

由于 \hat{P}_M 是已经给定的值, 因此其预报结果的不确定性都体现在误差估计部分 \hat{P}_E 上, 如果能够对预报误差的发生概率进行估计, 那么便可以对预报结果的不确定性有较好的把握. 概率密度函数预测往往需要假设目标变量服从某种经典的概率分布, 最常用的是正态分布假设. 序列 x 的概率密度函数满足高斯分布, 即

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-x^2/2\sigma^2}, \quad (2)$$

这里, x 为距平值, σ 为标准差.

前面分析表明, 模式预报误差的概率密度函数满足正态高斯分布, 每个格点的预报误差的分布都是遵循正态分布的. 这里以格点为对象, 基于满足正态分布条件下, 我们可针对模式在每个格点上的预报结果来对其相应的误差发生概率进行计算. 定义 $p > (X)$ 为误差 x 大于 X 的概率, $p < (X)$ 为误差 x 小于 X 的概率, 即

$$\begin{aligned} p < (X) &= \int_{-\infty}^X p(x) dx, \\ p > (X) &= \int_X^{\infty} p(x) dx. \end{aligned} \quad (3)$$

通过动力统计方法对误差 \hat{P}_E 进行预报, 将其叠加到模式原始结果 \hat{P}_M 得到最终预报结果 \hat{P} . 假设预报结果 \hat{P} 是偏涝, 那么预测年实况为偏涝的概率有多大, 即 \hat{P} 预报正确的概率有多大, 需要进一步分析. 由于 $\hat{P} = \hat{P}_M + \hat{P}_E$, \hat{P}_M 相当于定值, 则 \hat{P} 预报正确的概率完全取决于 \hat{P}_E , 其不确定性可由 \hat{P}_E 完整地体现. 而 \hat{P}_E 的分布满足高斯分布, 则可用 (2) 式进行拟合成如图 9 中的形式. 如图 9 所示, \hat{P}_E 的值必须在大于 X 时才能使得最终预报结果 \hat{P} 值为偏涝, 而阴影区的面积大小就是 \hat{P}_E 大于 X 的概率, 通过 (3) 式中的 $p > (X)$ 可积分计算出误差 \hat{P}_E 大于 X 的概率, 即为预报结果 \hat{P} 偏涝的概率. 同理, 可计算出偏旱的概率. 在此基础上, 我们

还可以设置不同程度的偏涝或者偏旱等级并找到与之相对应的误差区域范围, 通过对该等级的误差区域面积进行积分计算, 得到不同等级的旱涝事件的发生概率, 即旱涝等级的预测可信度. 本文中的预测可信度计算是建立在模式预报误差的分布特征满足高斯分布这一前提下开展的, 只要是模式误差分布, 特征满足正态高斯分布就可以进行该预测可信度的计算. 除了 CGCM 模式, 我们还针对了国家气候中心二代模式 CSM 进行了初步统计, 发现其误差分布特征也满足高斯分布, 说明该分布规律并没有模式依赖性.

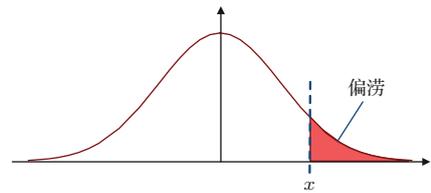


图9 基于误差分布的旱涝发生概率示意图

需要强调的是, 每年的模式运行出来的 \hat{P}_M 值不同, 但只要预报年确定, \hat{P}_M 就是已经给出的不变值, 因此, 由于每年的 \hat{P}_M 值不一样, 那么每年 \hat{P} 偏涝对应的图 9 中的阴影区域的面积大小就不一样, 相应的每年计算出的旱涝概率也不同.

3.5 预报可信度检验

为检验预报旱涝预测可信度计算方法的有效性, 以 2012 年和 2013 年的汛期降水为例, 给出实况、动力统计预测以及预测结果可信度的检验结果, 此检验是实际预测检验并非回报检验. 在 2012 年全国汛期预测会商中我们给出了 2012 年动力统计方案的预测结果及其可信度分布, 如图 10 所示. 图 10 (a) 为 2012 年汛期降水的实况分布, 图 10 (b)—(d) 为 3 月的全国汛期会商中给出的降水预报结果、近 10 年回报的距平符号一致率以及基于误差分布的旱涝与预测可信度分布. 2012 年汛期降水大体呈北方涝长江旱的分布, 主雨带位于黄河流域及其以北, 降水异常偏多的区域主要位于西北大部、内蒙古和环渤海湾, 此外, 东北大部、西北部、江南等地区降水偏多. 黄淮、江淮、长江中游至广西北部及广东大部等地区降水偏少, 其中江汉至淮河上游降水异常偏少. 动力统计预测的 2012 年汛期降水整体偏多, 从北到南呈现“+ - +”的分布型, 有南北两条雨带, 北方雨带主要在内蒙

中西部、东北北部以及黄淮地区, 南方雨带主要位于西南以及华南, 整个长江流域、东北南部、华北西部等地区降水偏少. 图 10(c) 为距平符号一致率, 是基于 2002—2011 年 10 年的独立样本回报结果所得, 将预测结果(图 10(b))与信度检验结果结合可得西南、华南、江淮流域、华中地区的预测准确率较高, 其中可信度最高的为西南地区, 该区域偏涝的可信度较高. 由旱涝可信度检验图可见(图 10(d)), 东北北部、西北大部、江淮流域、华中地区的预测结果的发生概率较大, 这与图 10(c) 可信度高的区域分布较为一致, 而对比降水实况可见, 在这些区域预报结果与实况符合较好, 而在西南、华南以及东北南部地区旱涝等信度检验显示这种分布型的发生概率均相对较小, 尤其是西南地区, 其发生概率很小, 说明在西南、华南两个区域发生偏涝概率较小, 可信度较低, 这与距平符号一致率给出的结论并不一致, 甚至相反. 而通过对比实况与预测结果可以看出, 西南以及华南地区降水偏少, 显示了旱涝等级信度检验方法的有效性.

图 11 给出了 2013 年中国夏季降水动力统计预测及其可信度检验. 2013 年汛期降水实况分布与 2012 年较为类似, 总体呈现北方涝长江旱的分布,

主雨带位于黄河流域及其以北. 此外, 广东大部、西南南部等地区降水偏多, 江淮、长江中游至广西北部等地区降水偏少, 其中江汉至淮河上游降水异常偏少(图 11(a)). 2013 年的动力统计预测结果(图 11(b))对全国降水的“+ - +”分布型把握较为准确, 较好地抓住了主雨带位置. 对淮河流域、内蒙古东部以及西北北部等地预测与实况不符. 由两种检验结果可见(图 11(c)—(d)), 东北北部、西北大部、江淮流域、华中地区、西南大部的预测结果的发生概率较大, 对比实况降水发现, 对于两种检验可信度都较高的地区往往预测结果正确的概率很大, 而在两者信度检验不一致的区域, 如华北北部、西南、华南等地区, 基于误差分布的可信度较距平符号一致率分布准确率更高, 并且在这些区域都存在着一一定的降水异常, 该方法也能对其可信度有较好的把握, 更能体现出动力统计预测结果的不确定度.

通过 2012—2013 年两年的汛期预测及其信度检验可以看出, 基于误差分布的预测可信度检验相对距平符号一致率更好地体现出了预报结果的不确定性, 并且该方法更具针对性. 对比 2012 和 2013

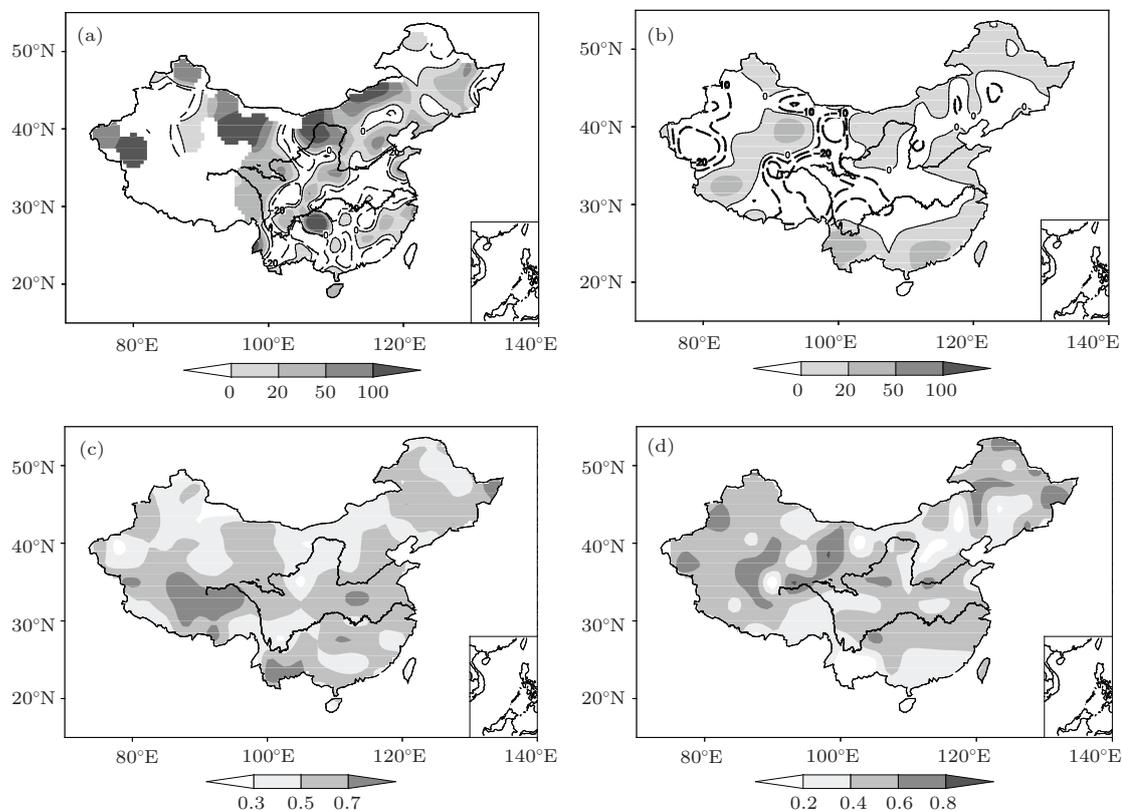


图 10 2012 年中国夏季降水动力统计预测及可信度检验 (a) 降水实况; (b) 动力统计预测; (c) 距平符号一致率; (d) 预测可信度

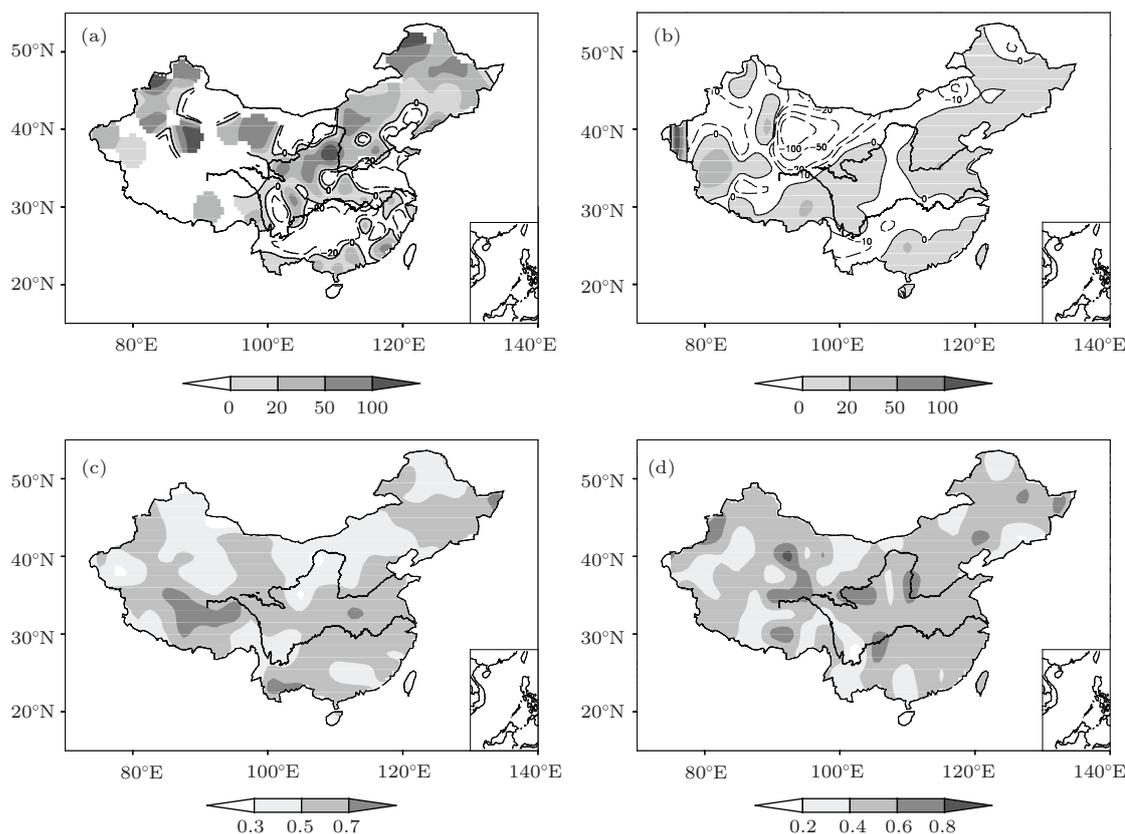


图 11 2013 年中国夏季降水动力统计预测及可信度检验 (a) 降水实况; (b) 动力统计预测; (c) 距平符号一致率; (d) 预测可信度

年的距平符号一致率分布图可以发现, 两幅图在总体分布上基本一致, 只是在小区域内有所差别, 这是由于这里的距平符号一致率是统计前十年独立样本回报的符号准确率, 而 2012 年和 2013 年只有一年的数据差异, 因此不会影响到其总体的信度分布, 在大的趋势上是一致的. 因此, 该检验缺乏一定的针对性. 而基于误差分布的旱涝预测可信度检验是建立在每年模式预报结果的基础上的, 同一个区域在不同年份得到不同的旱涝发生概率, 因此, 该方法具有较强的针对性, 且其可信度分布总体的正确率较高, 在可信度较高的区域其预报与实况较为一致, 而在可信度较小的区域预测结果错误也相对较多, 检验准确率较高, 较好地反映出预报结果的可信度特征, 显示了该方法的有效性.

4 结果与讨论

本文基于 CMAP 降水资料对国家气候中心业务系统模式 CGCM 的多年夏季降水预报结果及误差进行统计研究, 以揭示模式预报误差的分布规律及特征, 基于预报误差分布曲线分析该模式对中国夏季降水的预测能力. 在此基础上, 基于预报误差

统计特征提出了预测可信度的度量方法, 量化地评估预报结果在不同地区的可信度大小, 主要结论如下.

1) 从误差分布的位置上来看, 其均值越接近 0 其预报效果越好, 从拟合的形状来看, 其分布形态越细长则预报效果越好. 动力-统计方法的预报性能明显优于模式系统误差订正方案的预报性能, 其误差分布的改进存在两种类型: 变幅型改进 (离差减小) 和均值型改进 (修正系统订正漂移).

2) 基于模式预报误差分布可近似采用高斯函数进行拟合这一假设, 提出一种新的旱涝发生概率计算方法, 将其应用于预测可信度检验. 基于每年预报结果, 设置不同程度的偏涝或者偏旱等级并计算与之相对应的模式误差区域范围, 通过对该等级的误差区域面积进行积分计算, 得到不同等级的旱涝事件的发生概率, 将其作为预测结果的可信度.

3) 以 2012—2013 年夏季降水为例, 给出了实况、预测以及信度检验分析, 发现信度较大的区域实况与预测具有较好的一致性, 而在信度较小的区域预测错误则相对较多, 显示出方法的有效性和针对性, 可进一步提高动力统计方法的预测服务水

平, 增加决策部门对于旱涝预测可信度的把握, 更好地为减灾防灾服务.

参考文献

- [1] Huang R H, Cai R S, Chen J L, Zhou L T 2006 *Chin. J. Atmosph. Sci.* **30** 730 (in Chinese) [黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 周连童 2006 大气科学 **30** 730]
- [2] Chou J F, Xu M 2001 *Chin. Sci. Bull.* **46** 890 (in Chinese) [丑纪范, 徐明 2001 科学通报 **46** 890]
- [3] Yang J, Wang Q G, Zhi R, Feng G L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 029204 (in Chinese) [杨杰, 王启光, 支蓉, 封国林 2011 物理学报 **60** 029204]
- [4] Barnett T P, Preisendorfer R W 1978 *J. Atmos. Sci.* **35** 1771
- [5] Gu Z C 1958 *Acta Meteorol. Sin.* **29** 93 (in Chinese) [顾震潮 1958 气象学报 **29** 93]
- [6] Chou J F 1974 *Sci. China* **6** 635 (in Chinese) [丑纪范 1974 中国科学 **6** 635]
- [7] Chou J F 1986 *Plateau Meteorol.* **5** 367 (in Chinese) [丑纪范 1986 高原气象 **5** 367]
- [8] Chou J F, Ren H L 2006 *Quart. J. Appl. Meteorol.* **17** 240 (in Chinese) [丑纪范, 任宏利 2006 应用气象学报 **17** 240]
- [9] Qiu C J, Chou J F 1987 *Sci. China B* **17** 903 (in Chinese) [邱崇践, 丑纪范 1987 中国科学 (B辑) **17** 903]
- [10] Huang J P, Yi Y H, Wang S W, Chou J F 1993 *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **119** 547
- [11] Huang J P, Chou J F 1990 *Sci. China B* **33** 851
- [12] Huang J P, Wang S W 1992 *Sci. China B* **35** 207
- [13] Huang J P, Yi Y H, Wang S W 1993 *Acta Meteorol. Sin.* **51** 118 (in Chinese) [黄建平, 衣育红, 王绍武 1993 气象学报 **51** 118]
- [14] Ren H L, Zhang P Q, Li W J, Chou J F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4388 (in Chinese) [任宏利, 张培群, 李维京, 丑纪范 2006 物理学报 **55** 4388]
- [15] Gong J D, Chou J F 1999 *Plateau Meteorol.* **18** 392 (in Chinese) [龚建东, 丑纪范 1999 高原气象 **18** 392]
- [16] Ren H L, Chou J F 2007 *Sci. China D* **37** 1101 (in Chinese) [任宏利, 丑纪范 2007 中国科学 (D辑) **37** 1101]
- [17] Zheng Z H, Ren H L, Huang J P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7359 (in Chinese) [郑志海, 任宏利, 黄建平 2009 物理学报 **58** 7359]
- [18] Cao H X 1993 *Sci. China B* **23** 104 (in Chinese) [曹鸿兴 1993 中国科学 (B辑) **23** 104]
- [19] Feng G L, Dong W J, Chou J F 2004 *Chin. Phys.* **13** 413
- [20] Feng G L, Cao H X, Wei F Y, Chou J F 2001 *Acta Meteorol. Sin.* **59** 206 (in Chinese) [封国林, 曹鸿兴, 魏凤英, 丑纪范 2001 气象学报 **59** 206]
- [21] Feng G L, Cao H X, Dong W J, Chou J F 2001 *Chin. Phys.* **10** 1004
- [22] Wang Q G, Feng G L, Zheng Z H, Zhi R 2011 *Chin. J. Atmosph. Sci.* **35** 287 (in Chinese) [王启光, 封国林, 郑志海, 支蓉 2011 大气科学 **35** 287]
- [23] Xiong K G, Feng G L, Huang J P, Chou J F 2011 *Acta Meteorol. Sin.* **25** 316
- [24] Xiong K G, Zhao J H, Feng G L, Huang J P, Hu J G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 149204 (in Chinese) [熊开国, 赵俊虎, 封国林, 黄建平, 胡经国 2012 物理学报 **61** 149204]
- [25] Yang J, Zhao J H, Zheng Z H, Xiong K G, Shen B Z 2012 *Chin. J. Atmosph. Sci.* **36** 11 (in Chinese) [杨杰, 赵俊虎, 郑志海, 熊开国, 沈柏竹 2012 大气科学 **36** 11]
- [26] Zheng Z H, Ren H L, Huang J P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7367 (in Chinese) [郑志海, 任宏利, 黄建平 2009 物理学报 **58** 7367]
- [27] Zhao J H, Feng G L, Yang J, Zhi R 2012 *Acta Meteorol. Sin.* **70** 1021 (in Chinese) [赵俊虎, 封国林, 杨杰, 支蓉, 王启光 2012 气象学报 **70** 1021]
- [28] Feng G L, Zhao J H, Zhi R, Gong Z Q, Zheng Z H, Yang J, Xiong K G 2013 *Quart. J. Appl. Meteorol.* **24** 656 (in Chinese) [封国林, 赵俊虎, 支蓉, 龚志强, 郑志海, 杨杰, 熊开国 2013 应用气象学报 **24** 656]
- [29] Chen L J, Li W J, Zhang P J, Wang J G 2003 *Quart. J. Appl. Meteorol.* **14** 648 (in Chinese) [陈丽娟, 李维京, 张培群, 王锦贵 2003 应用气象学报 **14** 648]
- [30] Wei F Y, Huang J Y 2010 *J. Tropical Meteorol.* **26** 483 (in Chinese) [魏凤英, 黄嘉佑 2010 热带气象学报 **26** 483]
- [31] Wei F Y 2011 *Quart. J. Appl. Meteorol.* **22** 1 (in Chinese) [魏凤英 2011 应用气象学报 **22** 1]
- [32] Fan K, Wang H J, Choi Y J 2007 *Chin. Sci. Bull.* **52** 2900 (in Chinese) [范可, 王会军, Choi Young-Jean 2007 科学通报 **52** 2900]
- [33] Ji F, Zhao J H, Shen Q, Zhi R, Gong Z Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 059201 (in Chinese) [季飞, 赵俊虎, 申茜, 支蓉, 龚志强 2014 物理学报 **63** 059201]
- [34] Zhao J H, Yang J, Gong Z Q, Zhi R 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 099206 (in Chinese) [赵俊虎, 杨杰, 龚志强, 支蓉 2013 物理学报 **62** 099206]
- [35] Feng G L, Dong W J 2003 *Chin. Phys. B* **12** 1076
- [36] Zhang Z S, Gong Z Q, Zhi R, Feng G L, Hu J G 2011 *Chin. Phys. B* **20** 019201
- [37] Wang K, Feng G L, Zeng Y X, Wang X J 2013 *Chin. Phys. B* **22** 129202
- [38] Gao L, Ren H L, Li J P, Chou J F 2006 *Chin. Phys. B* **15** 882
- [39] Li W J, Zhang P Q, Li Q Q, Wang L N, Liu Y M, Shi X L, Zhang Z Q, Liu Y M, Hu G Q, Dang H Y, Zhang F, Chen L J, Sun C R, Zhao Q G, Dong M 2005 *Quart. J. Appl. Meteorol.* **6** 1 (in Chinese) [李维京, 张培群, 李清泉, 王兰宁, 刘益民, 史学丽, 张祖强, 刘一鸣, 胡国权, 党鸿雁, 张芳, 陈丽娟, 孙除荣, 赵其庚, 董敏 2005 应用气象学报 **6** 1]
- [40] Li W J, Chen L J 1999 *Acta Meteorol. Sin.* **57** 338 (in Chinese) [李维京, 陈丽娟 1999 气象学报 **57** 338]
- [41] Chen G Y, Zhao Z G 1998 *Quart. J. Appl. Meteorol.* **9** 178 (in Chinese) [陈桂英, 赵振国 1998 应用气象学报 **9** 178]
- [42] Huang J P, Yi Y H, Wang S W 1993 *Acta Meteorol. Sin.* **51** 118 (in Chinese) [黄建平, 衣育红, 王绍武 1993 气象学报 **51** 118]

- [43] Li F 2012 *Acta Meteorol. Sin.* **70** 183 (in Chinese) [李芳 2012 气象学报 **70** 183]
 [44] Wang H J, Fan K 2009 *Weather and Forecasting* **24** 548
 [45] Feng G L, Yang J, Wan S Q, Hou W, Zhi R 2009 *Acta Meteorol. Sin.* **67** 61 (in Chinese) [封国林, 杨杰, 万仕全, 侯威, 支蓉 2009 气象学报 **67** 61]
 [46] Yang J, Hou W, Feng G L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 664 (in Chinese) [杨杰, 侯威, 封国林 2010 物理学报 **59** 664]

Predictive reliability of summer precipitation in China based on error distribution of numerical model*

Yang Jie^{1)†} Gong Zhi-Qiang²⁾ Zhao Jun-Hu²⁾ Xu Xia-Zhen¹⁾

1) (*Jiangsu Climate Center, Jiangsu Meteorological Administration, Nanjing 210000, China*)

2) (*National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*)

(Received 14 January 2014; revised manuscript received 28 February 2014)

Abstract

In this paper, we made some statistical analyses on precipitation prediction errors of coupled global climate model of National Climate Center based on CPC merged analysis of precipitation. Through the statistics of the forecast results of summer precipitation in many years and the errors, we find that the distribution of the model prediction errors satisfies the Gaussian distribution. Based on the Gaussian distribution characteristics, the ability to predict the mode for summer precipitation in China can be analyzed and compared. The forecast performance of the dynamic-statistics scheme is significantly better than that of system error correction scheme of the model. The dynamic-statistics optimal combination of factor revise is corrected, relative to error distribution pattern of the system revised forecast, and there are obtained two kinds of error distribution characteristics: 1) improvement of the amplitude; 2) improvement of the displacement. Based on the statistical characteristics of the prediction error, measure of the credibility of model forecast results is proposed to quantitatively assess the credibility of the numerical model forecast results in different regions. Taking the summer precipitations in 2012 and 2013 for example, we analyze the credibility of actual observations, prediction and drought or flood level. Comparing actual observations and prediction, we find that there is a good consistency where the credibility of them is larger, while there are many bad predictions in the region where the credibility of them is smaller. What is more, compared with other reliability test method, the credibility of the abnormal precipitation forecast by this method is more accurate, showing the effectiveness of the method.

Keywords: error distribution, dynamic-statistics, summer precipitation, predictive reliability

PACS: 92.60.Wc

DOI: 10.7498/aps.63.149202

* Project supported by the Special Scientific Research Project for Public Interest of China (Grant Nos. GYHY201306021, GYHY201106016), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40930952, 41375069), and the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2012CB955902, 2013CB430204).

† Corresponding author. E-mail: yangjie19840827@163.com