

叶坤辉,肖子牛,刘波. 云南地区季降水量和气温的潜在可预报性分析[J]. 气象,2012,38(4):402-410.

# 云南地区季降水量和气温的潜在可预报性分析<sup>\* 1</sup>

叶坤辉<sup>1</sup> 肖子牛<sup>2,4</sup> 刘 波<sup>3</sup>

1 中国气象科学研究院,北京 100081

2 中国气象局干部培训学院,北京 100081

3 国家气候中心,北京 100081

4 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

**提 要:** 利用云南地区 42 年气候资料,使用低频白噪声延伸法和方差分析方法,估计了该地区季节降水量和季节气温的气候噪声方差和潜在可预报性。分析结果表明:(1)云南季降水量的气候噪声方差随着季节降水量的增加而增加,空间上主要是由南往北减小,夏季降水量的气候噪声方差显著大于其他季节,季气温的气候噪声方差则随着季节气温的减小而增加,空间上春、冬季由东往西减小而夏、秋季由南往北增加;冬季气温的气候噪声方差显著大于其他季节;(2)云南季降水量和季气温的潜在可预报性同样具有显著的季节变化和空间变化,云南春季的降水量和气温的潜在可预报性均显著大于其他季节,夏季降水量和气温的潜在可预报性均较其他三个季节小;春、秋季降水量潜在可预报性西部大于东部,夏季北部大于南部,冬季则是南部大于北部,云南季气温除夏季外均是西部大于东部。(3)季风和冷空气活动可能对云南地区的季降水量和气温的潜在可预报性有重要影响。

**关键词:** 季节预报,潜在可预报性,季风活动,冷空气活动

## Analysis of Potential Predictability for Seasonal Precipitation and Temperature in Yunnan

YE Kunhui<sup>1</sup> XIAO Ziniu<sup>2,4</sup> LIU Bo<sup>3</sup>

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 CMA Training Centre, Beijing 100081

3 National Climate Centre, Beijing 100081

4 Institute of Atmosphere Physics, CAS, Beijing 100029

**Abstract:** With 42-year climate data in Yunnan, a low-frequency white noise extension method and a variance analysis method are used to estimate climate noise variance and potential predictabilities of the seasonal rainfall and temperature in Yunnan Province. The results show that, (1) the climate noise variance of seasonal precipitation in Yunnan increases when the seasonal precipitation increases and is mainly decreasing from south to north in terms of spatial distribution, the climate noise variance of summer rainfall is significantly greater than that in other seasons. However, climate noise variance of seasonal temperature, increases with the decreasing seasonal temperature and is mainly decreasing from east to west for spring and winter in terms of spatial distribution. While increasing from south to north for summer and autumn, the climate noise variance of winter temperature is significantly greater than that in other seasons. (2) Both potential predictabilities of seasonal precipitation and temperature in Yunnan also have the pronounced changes in season and space, the potential predictabilities of precipitation and temperature in spring are significantly higher than those in other seasons while in summer are significantly smaller than

\* 国家自然科学基金重点项目(U0833602)资助

2011 年 6 月 7 日收稿; 2011 年 10 月 22 日收修定稿

第一作者: 叶坤辉,主要从事气候预测和模拟研究. Email: yekunhui@sina.com

those in other seasons. In spring and autumn, the potential predictability of precipitation over the western is higher than that in the eastern, but in the southern is higher than that in northern in winter. As for seasonal temperature, except in summer, western is higher than eastern. (3) Both monsoon and the cold air may play an important role in affecting the potential predictability of seasonal precipitation and temperature in Yunnan Province.

**Key words:** seasonal forecast, potential predictability, monsoon activity, cold air

## 引言

气温和降水的季节预测是短期气候预测业务最为重要的内容之一。各季气温和降水的年际变率可以分成两部分:一部分是缓慢变化的外强迫产生的,如海表温度、积雪覆盖范围和海冰范围等的变化;这部分年际变率被认为是可预报的或者是潜在可预报的。另外一部分年际变率是日际天气振荡产生的,在气候上被认为是不可预报的。两者也被称为气候信号和气候噪声,两者的比值给出可预报性的度量,因此研究潜在可预报性,一般都要先估计气候信号和气候噪声,目前一般不直接估计气候信号而是通过估计总的年际方差和气候噪声方差来给出可预报性的度量。估计潜在可预报性主要有两个途径:一个是 Madden<sup>[1]</sup>提出的低频白噪声延伸方法,另外就是通过方差分析方法来检验潜在可预报性。Madden<sup>[2]</sup>最早利用低频白噪声延伸法估计北半球月平均海平面气压的气候噪声,并且讨论了其长期潜在可预报性。Trenberth<sup>[3-4]</sup>和 Yomamoto 等<sup>[5]</sup>用低频白噪声延伸法估计气候噪声时,分别使用了历年平均月内方差和历年最小月内方差。吴洪宝等<sup>[6]</sup>比较了这两种方法对广西夏季降水量的潜在可预报性的估计结果,并且给出了夏季降水量的预报正确率上限。赵晓川等<sup>[7]</sup>利用这两种方法对我国的季降水量进行了潜在可预报性分析,给出了我国季降水量潜在可预报性情况。董谢琼等<sup>[8]</sup>利用年降水量的气候噪声估计方法分析了我国年降水量的潜在可预报性。柳艳菊等<sup>[9]</sup>使用三种气候噪声估计方法估计了我国1,4,7,10月4个代表性月份降水量的气候噪声,但没有估计气候信号,未能给出潜在可预报性。对区域气候可预报性的研究可以帮助我们了解和把握每一个地区气候异常的变率特点,也有益于更好地理解气候预测产品的不确定性信息,从而有效地利用气候预测产品为社会经济生产服务。

云南位于青藏高原的东南侧,处于东亚季风和南亚季风结合部,气候变率大,影响当地的气候系统复杂,其高海拔、低纬度和季风气候的三大特点形成了云南特殊的气候环境<sup>[10-11]</sup>,也使云南的气候预测问题较之其他地区更为复杂,预测难度也更大。许多学者开展了关于云南天气气候的研究工作<sup>[12-18]</sup>,但目前尚未有针对云南地区气候可预报性的研究,了解和把握云南地区的气候可预报性特性,是做好云南气候预测的前提条件之一。本文将基于这个目的,研究分析在复杂地形环境中及东亚、南亚两支季风的共同影响下,云南季降水量和气温的气候噪声,初步分析影响云南季降水量和气温的潜在可预报性的主要天气气候背景,认识云南季降水和气温的季节预报的不确定性,为做好云南短期气候预测提供参考。

## 1 方法和资料

### 1.1 低频白噪声延伸法

低频白噪声延伸法<sup>[1]</sup>要求逐日资料满足平稳性,在使用此方法进行潜在可预报性估计前要先移除逐日资料中的年循环<sup>[1-4]</sup>。本文中我们消去原始序列中的年循环使用的是文献[4]中的15天高斯滤波方法。设消去了年循环后的逐日距平序列为  $X_{i,j}$ , 以下的公式(1)~(8)均是基于此逐日距平序列  $X_{i,j}$ , 其中  $i=1, \dots, N$  是日序号,  $N$  为季内天数,  $j=1, \dots, M$  是年序号,  $M$  为资料年数。本文中春季(3—5月)取  $N=92$ , 夏季(6—8月)取  $N=92$ , 秋季(9—11月)取  $N=91$ , 冬季(12月至次年2月)取  $N=90$ 。

每年的季内平均为

$$\bar{x}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{i,j} \quad (1)$$

然后计算样本的年际方差

$$S_m^2 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \bar{x}_j^2 \quad (2)$$

总体年际方差的无偏估计是

$$\hat{\sigma}_m^2 = \frac{M}{M-1} S_m^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M \bar{x}_j^2 \quad (3)$$

式中,  $\hat{\sigma}_m^2$  既包含气候噪声方差, 又包含气候信号方差。

在估计气候噪声方差前, 我们先对每年的序列估计月内(或季内)样本方差, 第  $j$  年序列的估计记为  $S_j^2$

$$S_j^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{i,j} - \bar{x}_j)^2 \quad (4)$$

然后进行多年平均

$$S^2 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M S_j^2 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{i,j} - \bar{x}_j)^2 \quad (5)$$

然后气候噪声方差估计为

$$\hat{\sigma}_N^2 = \frac{T_0}{N - T_0} S^2 \quad (6)$$

式中

$$T_0 = 1 + 2 \sum_{L=1}^N \left(1 - \frac{L}{N}\right) r_L \quad (7)$$

$r_L$  为滞后  $L$  天的自相关函数,  $r_L = C_L / C_0$ ,  $C_L$  是滞后  $L$  天的自协方差, 即有

$$C_L = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{1}{N} \sum_{i=L+1}^N (x_{i-L,j} - \bar{x})(x_{i,j} - \bar{x})$$

其中  $\bar{x} = \frac{1}{NM} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N x_{i,j}$ 。为了检验是否有潜在可预报的气候信号存在以及估计潜在可预报性, 可以建立原假设: 没有潜在可预报的气候信号存在。因此  $\hat{\sigma}_m^2$  和  $\hat{\sigma}_N^2$  是年际方差的两个相互独立的估计,  $\hat{\sigma}_m^2$  是根据月(或季)平均, 而  $\hat{\sigma}_N^2$  是根据月内(或季节内)变化。可以定义信噪比<sup>[6,19]</sup>

$$F = \frac{\hat{\sigma}_m^2}{\hat{\sigma}_N^2} \quad (8)$$

在原假设成立的情况下,  $F$  服从分子自由度为  $M-1$  和分母自由度为  $M(N_{eff}-1)$  的  $F$  分布,  $N_{eff} = N/T_0$ 。给定置信水平  $\alpha$ , 可以查表得临界值  $F_\alpha$ , 如果  $F$  大于  $F_\alpha$ , 则拒绝原假设, 认为存在潜在可预报的气候信号。

## 1.2 日际相互独立假设的方差分析方法

方差分析模型写为<sup>[19-23]</sup>

$$x_s = u + a_s + b_s \quad (9)$$

式中,  $x_s$  是原始的逐日资料序列, 无须进行 1.1 节中所述的移除逐日资料中的年循环步骤,  $s=1, \dots, M$  是年序号,  $M$  为资料年数,  $t=1, \dots, N$  是季内日序号,  $N$  为季内天数。本文中春、夏、秋、冬四季  $N$  分别取 92、92、91、90。式(9)中,  $u$  是总的平均值,  $a_s$  和  $b_s$  是均值为零, 方差为  $\sigma_a^2$  和  $\sigma_b^2$  的随机变量, 是否存在潜在可预报信号等价于检验原假设  $\sigma_a^2=0$ 。在逐日降水相互独立的情况下, 可导出以下统计量<sup>[6,19]</sup>

$$F = \frac{\sum_{s=1}^M (x_s - x_{..})^2 / (M-1)}{\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N (x_{s,t} - x_s)^2 / NM(N-1)} \quad (10)$$

式中,  $x_s = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_{s,t}$ ,  $x_{..} = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M x_s$ 。

在原假设成立的条件下, 这个比率服从分子自由度为  $M-1$ , 分母自由度为  $M(N-1)$  的  $F$  分布。式(10)的分子就是季降水量的年际方差  $\sigma_m^2$ , 而分母就是季降水量的气候噪声方差  $\sigma_N^2$ , 本节中的  $F$  即是 1.1 节定义的信噪比  $F$ , 检验是否有潜在可预报的气候信号, 具体过程同 1.1 节, 此处不再赘述。

## 1.3 预报正确率上限

讨论预报正确率一定要先规定一个预报质量评定标准<sup>[6,19]</sup>。预报正确率上限  $P$  可表示为<sup>[10]</sup>

$$P = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{0.68\beta} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (11)$$

其中,  $\beta$  是年际方差和气候噪声方差之比的均方根 ( $\sqrt{F}$ ), 即是  $\sqrt{\sigma_m^2 / \sigma_N^2}$ 。

## 1.4 资料

本文所用资料为云南 117 测站 1960—2001 年 (42 年) 的逐日降水和气温资料。根据站点均匀分布和观测记录质量好的原则, 从中选取了 97 站的降水资料和 106 站的气温资料。图 1 给出了站点的分布。鉴于气温的平稳性较好而降水的平稳性较差, 本文使用低频白噪声延伸法分析季气温的潜在可预报性而使用日际独立假设的方差分析方法分析季降水的潜在可预报性。

## 2 气候噪声方差的季节和空间分布

气候噪声方差由日际天气振荡产生, 反映的是

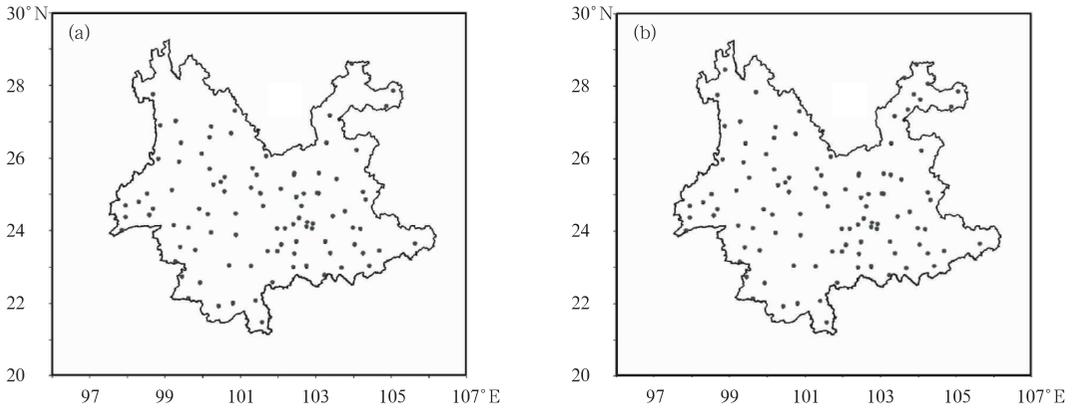


图 1 选取站点的分布

(a) 降水资料站点, (b) 气温资料站点

Fig. 1 The distribution of stations selected in Yunnan Province

(a) stations of precipitation data, (b) stations of temperature data

天气系统活动所带来的影响。云南夏季受到南亚季风和东亚季风的共同影响<sup>[10-11,24-28]</sup>,而冬季受东亚冬季风的较强影响<sup>[10-11]</sup>,季风的活动会给季节降水量带来较大的季节内降水的日际天气扰动,尤其是暴雨的时空分布<sup>[29]</sup>,同时影响云南地区的冷空气也

会给云南地区气温带来较大的季节内的日际扰动<sup>[30-32]</sup>,冬半年云南东部主要受昆明准静止锋影响,影响云南的冷空气路径主要为东北、偏东和东南路径,所以冷空气的强弱首先在云南东部体现出来<sup>[33]</sup>。

图 2 给出了云南省季降水量的气候噪声方差分

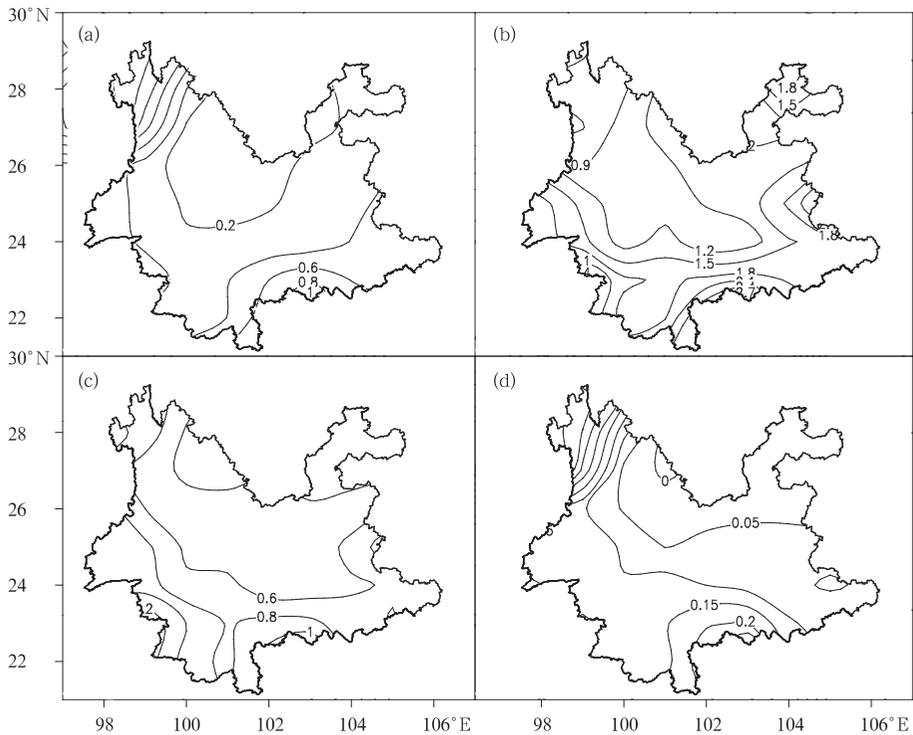


图 2 1960—2001 年云南省季降水量的气候噪声方差分布(单位:  $\text{mm}^2$ )

(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

Fig. 2 The distribution of climate noise variance of seasonal precipitation (unit:  $\text{mm}^2$ )

over Yunnan during 1960—2001

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

布。从图 2 中可见,季降水量的气候噪声方差的季节变化明显,夏季的气候噪声方差最大,其次是秋季和春季,最小是冬季,并且冬季的气候噪声方差约为夏季的气候噪声方差的 20%。季降水量的气候噪声方差的季节和地理分布同云南季降水量的季节和地理分布较为一致,云南季降水量的气候噪声方差在四个季节总体上都是由南向北减少,这和赵晓川等<sup>[7]</sup>指出的中国季降水量的气候噪声方差由南往北减小的结论基本一致,南部地区在四个季节都是季降水量气候噪声方差的极大值中心,表明云南季

节降水日际振荡强烈的地方在南部,尤其是两支季风活跃的夏季。

图 3 给出了云南省季气温的气候噪声方差分布。从图中可见,季气温的气候噪声方差季节变化明显,冬季气温的气候噪声方差最大,其次是春季和秋季,夏季最小。春、冬季气温的气候噪声方差主要是经向分布,东部大于西部,东部密集的等值线分布说明冷空气对东部地区气温的扰动相当大,这种扰动影响在冬季尤其突出。而夏、秋季气温则主要是纬向分布,由南往北增加,和云南北高南低的地形高

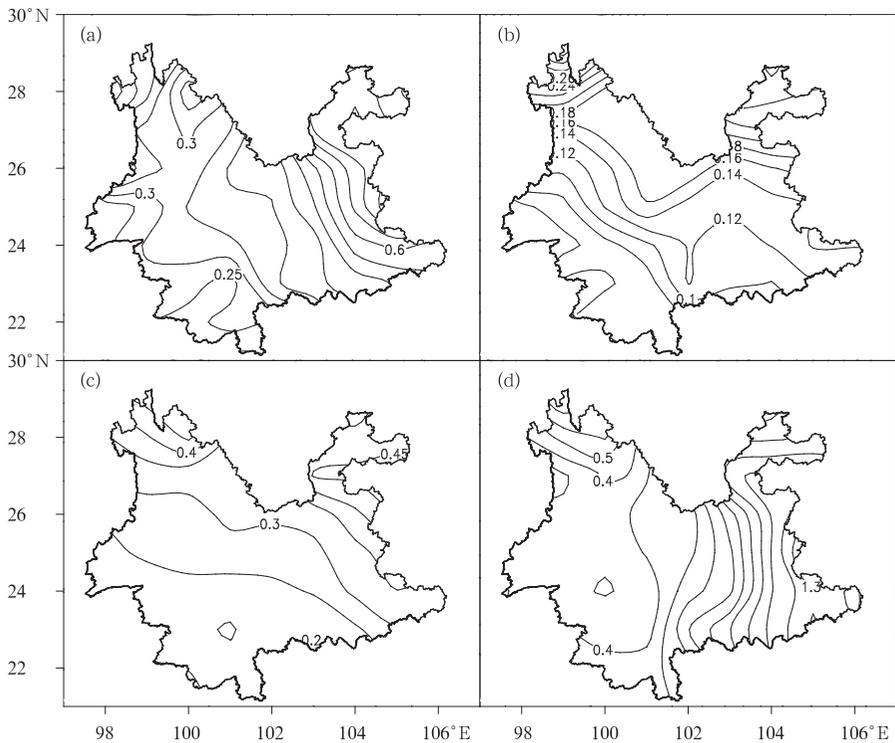


图 3 1960—2001 年云南省季气温的气候噪声方差分布(单位:  $^{\circ}\text{C}^2$ )

(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

Fig. 3 The distribution of climate noise variance of seasonal temperature (unit:  $^{\circ}\text{C}^2$ ) over Yunnan during 1960—2001

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

度分布比较一致。

### 3 信噪比 $F$ 和潜在可预报性估计

季降水量和气温的年际变率由气候信号和气候噪声组成,假设它们之间相互独立,根据方法和资料定义的信噪比  $F$ ,我们得知若信噪比  $F > 1$ ,则表明有气候信号的存在,若信噪比  $F > 2$ ,则表明气候信号大于气候噪声,即是外强迫引起的年际变率部分

大于日际天气振荡引起的年际变率部分,信噪比越大,表明外强迫对总的年际方差的贡献部分相对越大,即是气候信号相对越强(这部分方差被认为是在气候尺度上是可预报的或者是潜在可预报的),从而表明对于给定的置信水平潜在可预报性越大,信噪比通过检验的地区表明该地区的该气象变量存在可预报的气候信号相对可信,信噪比越大,则表明潜在可预报性也大,否则潜在可预报性小。

图 4 是云南省季降水量的信噪比分布。春季全

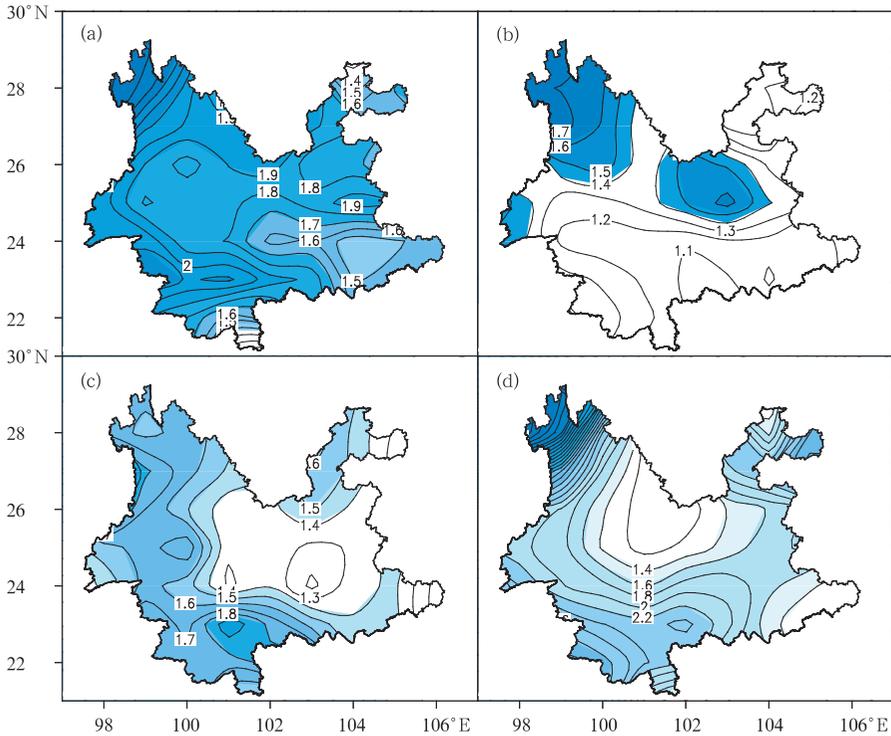


图 4 1960—2001 年云南省季降水量的信噪比  $F$  分布(单位:1)

(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

(阴影区表示通过  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验)

Fig. 4 The distribution of signal to noise ratio  $F$  of seasonal precipitation (unit:1)

over Yunnan during 1960—2001

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

(Shadows denote passing through the test at  $\alpha=0.05$  significance level)

区信噪比较大,均通过  $\alpha=0.05$  显著性水平检验,存在的潜在可预报气候信号较强,信噪比主要是南北经向分布,西部大于东部,云南西部的潜在可预报性大于东部;随着南亚季风和东亚季风共同影响云南,夏季信噪比显著小于春季,存在的潜在可预报气候信号较弱,总的来说夏季信噪比呈纬向分布,北部大于南部,南部地区信噪比偏小,北部的潜在可预报性大于南部;秋季同春季大致情形类似,但信噪比小于春季,存在的潜在可预报气候信号较春季弱,西部和南部的信噪比较其他地区显著大,西部和南部的潜在可预报性大于其他地区;随着冬季风开始影响云南,冬季信噪比主要是同夏季相似的纬向分布,但南部明显大于北部,部分地区信噪比可达 2 以上,潜在可预报的气候信号大于气候噪声,南部的潜在可预报性显著大于北部。但从总体上看春季的潜在可预报性较其他三个季节明显大,其次是冬季和秋季,夏季最小,这和赵晓川等<sup>[7]</sup>指出的中国季降水量冬季

潜在可预报性最好有所不同。

图 5 是云南省季气温的信噪比  $F$  分布,春季云南东部受到冷空气较强的影响,包括昆明静止锋的影响,春季信噪比呈经向分布,由西往东减小,西部存在的潜在可预报气候信号较强,西部的潜在可预报性显著大于东部;夏季信噪比相对春季显著减小,主要是纬向分布,存在的潜在可预报气候信号较弱,潜在可预报性较小;秋季信噪比主要是和春季类似的经向分布,较春季小,但大于夏季,同时中部和南部地区信噪比大于其他地区,中部和南部地区潜在可预报性大于其他地区;冬季影响云南中东部的冷空气相对春、秋季更为活跃,冬季信噪比仍然维持秋季的经向分布,但小于秋季而大于夏季,西部部分地区信噪比较大,潜在可预报性较其他地区大。但从总体上看春季的潜在可预报性较其他三个季节大,其次是秋季和冬季,夏季最小。

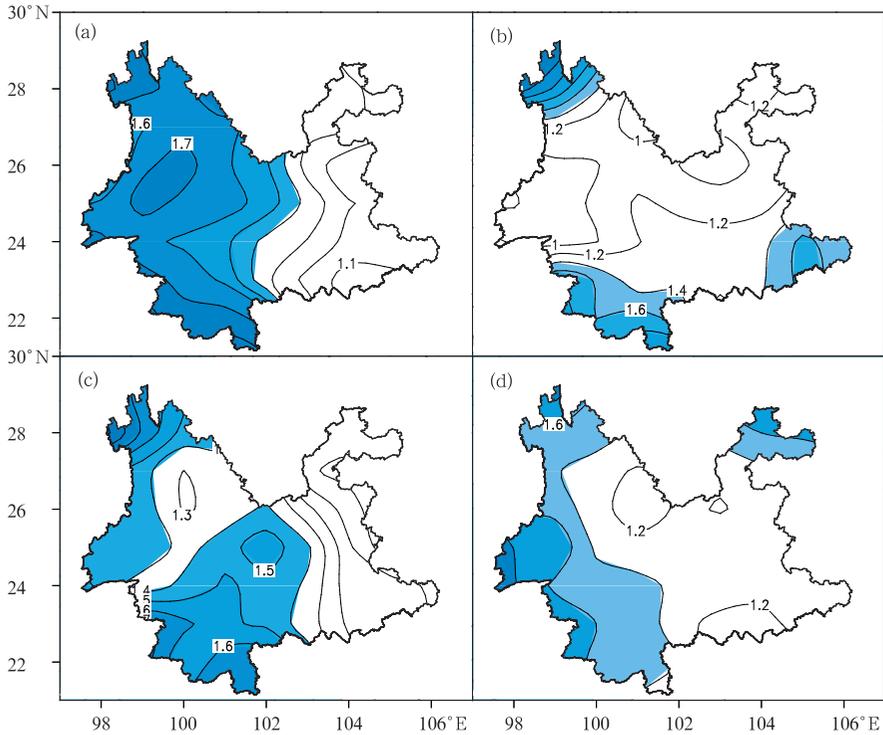


图 5 1960—2001 年云南省季气温的信噪比  $F$  分布(单位:1)

(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

(阴影区表示通过  $\alpha=0.05$  的显著性水平检验)

Fig. 5 The distribution of signal to noise ratio  $F$  of seasonal temperature (unit:1) over Yunnan during 1960—2001

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

(Shadows denote passing through the test at  $\alpha=0.05$  significance level)

## 4 预报正确率上限

图 6 给出的是云南省季降水量的预报正确率上限。春季,整个云南大部分地区降水量的预报正确率上限处于 70%~75%之间;夏季降水量的预报正确率上限处于 50%~70%之间;秋季降水量的预报正确率上限南部处于 70%~75%之间,中东部预报正确率上限较小;冬季预报正确率上限处于 60%~90%之间,北部地区预报正确率上限较小,南部地区可达 80%~90%之间。

图 7 给出的是云南省季气温的预报正确率上限。春季气温的预报正确率上限西部明显高于东部,可达 70%以上;夏季气温的预报正确率上限大部分地区小于 65%,正确率上限较小;秋季降水量的预报正确率上限云南大部分地区处于 65%~70%之间,正确率上限较小;冬季预报正确率上限处于 55%~70%之间,中东部地区较西部地区明显小。

## 5 结论和讨论

在东亚季风和南亚季风交替影响下,加之云南地区复杂的地形和较强的冷空气活动,云南地区的季降水量和气温潜在可预报性有着比较复杂的时空分布。本文利用云南地区 42 年的逐日降水和气温资料讨论了云南地区季降水量和气温的气候噪声方差、信噪比以及预报正确率上限,主要得出以下结论。

(1) 云南季降水量的气候噪声方差随着季节降水量的增加而增加,空间上主要是由南往北减小,季气温的气候噪声方差则随着季节气温的减小而增加,空间上春、冬季由东往西减小而夏、秋季由南往北增加。

(2) 云南春季的降水量和气温的潜在可预报性均显著大于其他季节,而夏季降水量和气温的潜在可预报性均较其他三个季节小。春、秋季降水量潜

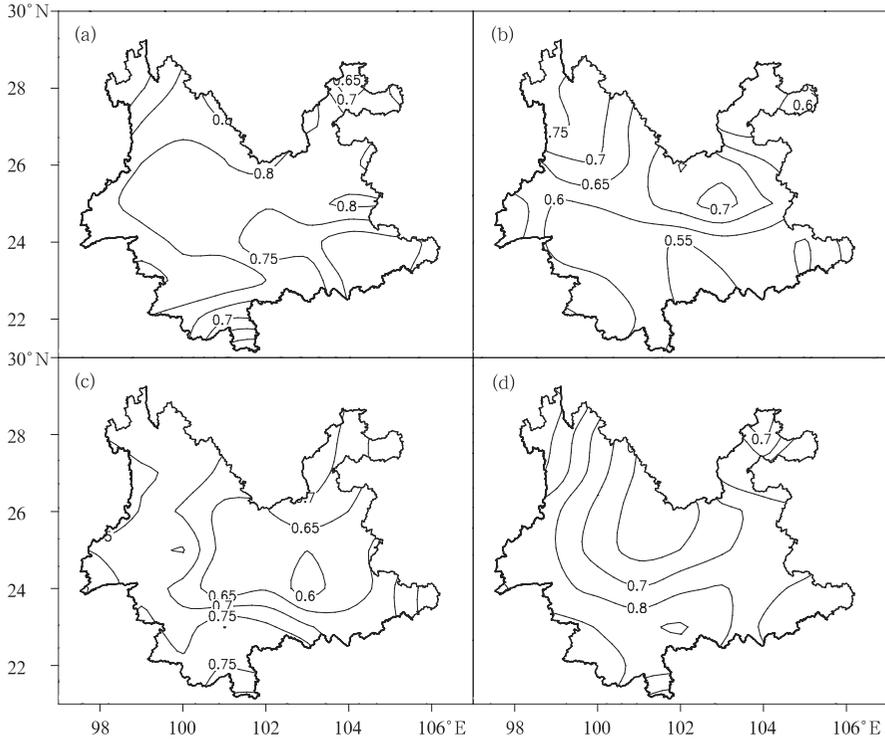


图 6 1960—2001 年云南省季降水量的预报正确率上限分布(单位:100%)

(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

Fig. 6 The upper limit of prediction accuracy of seasonal precipitation (unit:100%) over Yunnan during 1960—2001

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

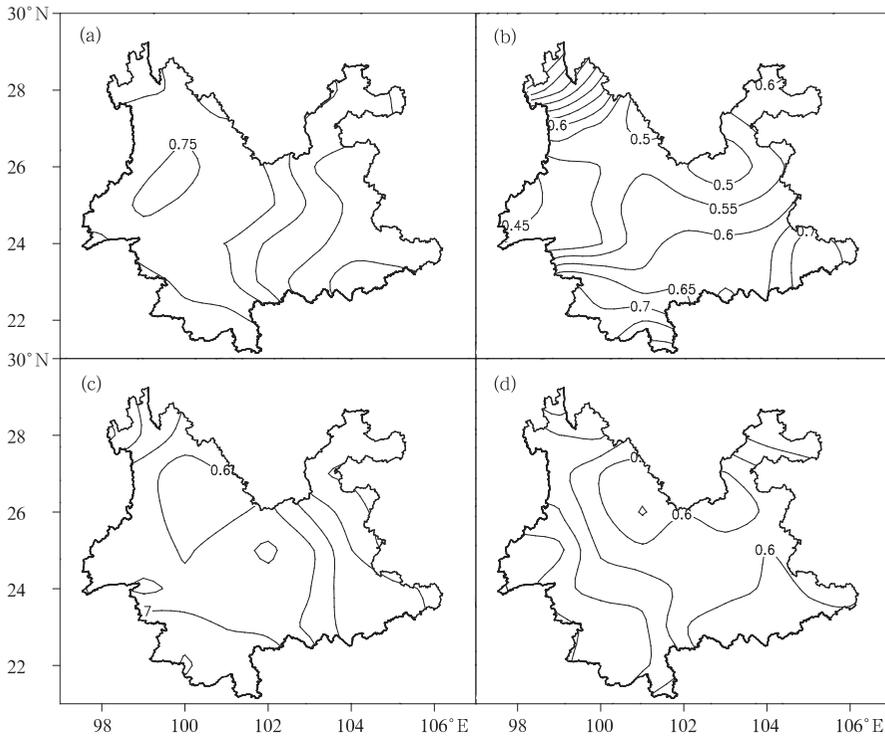


图 7 1960—2001 年云南省季气温的预报正确率上限分布(单位:100%)

(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

Fig. 7 The upper limit of prediction accuracy of seasonal temperature (unit:100%) in Yunnan Province

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

在可预报性西部大于东部,夏季北部大于南部,冬季则是南部大于北部,云南季气温除夏季外均是西部大于东部。

(3) 夏季云南降水量气候噪声方差较其他季节大而潜在可预报性偏小,冬季云南降水量北部气候噪声方差小于南部而潜在可预报性却显著小于南部,可能说明南亚季风和东亚季风对云南地区季降水量的潜在可预报性有着重要的影响;春、冬季云南气温东部地区是气候噪声方差的极大值中心而潜在可预报性偏小,则可能说明冷空气对云南地区季气温的潜在可预报性有较强的影响,尤其是对中东部地区。

应该注意的是,本文的研究是以气候信号和气候噪声相互独立的假设为前提,而实际上两者是可以相互影响的,因而这会对潜在可预报性的估计结果产生一定的影响,并且我们假设了气候噪声部分是不可预报的,因此本文的研究结果应该是相对的。

## 参考文献

- [1] Madden R A. A quantitative approach to long range prediction [J]. *J Geo Res*, 1981, 86(c10): 9817-9825.
- [2] Madden R A. Estimate of the natural variability of time averaged sea level pressure[J]. *Mon Wea Rev*, 1976, 104(7): 942-951.
- [3] Trenberth K E. Some effects of finite sample size and persistence on meteorological statistics. Part I: Autocorrelations [J]. *Mon Wea Rev*, 1984(12): 2359-2368.
- [4] Trenberth K E. Some effects of finite sample size and persistence on meteorological statistics. Part II: Potential predictability[J]. *Mon Wea Rev*, 1984(12): 2369-2379.
- [5] Yamamoto R, Iwashima T, Kuzadi S N. An estimate of climatic noise[J]. *J Meteor Soc Japan*, 1985, 63(6): 1147-1156.
- [6] 吴洪宝, 王盘兴, 林开平. 广西夏季降水量潜在可预报性估计[J]. *应用气象学报*, 2005, 16(4): 445-452.
- [7] 赵晓川, 吴洪宝, 何浪. 中国季降水量的气候噪声和潜在可预报性估计[J]. *南京气象学院学报*, 2008, 31(6): 819-827.
- [8] 董谢琼, 马开玉. 我国的降水资源及其稳定性与潜在可预报性(II)潜在可预报性[J]. *气象科学*, 1995, 15(1): 72-79.
- [9] 柳艳菊, 马开玉, 林振山. 我国月降水量气候噪声的估计[J]. *应用气象学报*, 2000, 11(2): 165-172.
- [10] 解明恩. 云南短期气候预测方法与模型[M]. 北京: 气象出版社, 2000.
- [11] 秦剑, 瑯建华, 解明恩. 低纬高原天气气候[M]. 北京: 气象出版社, 1997, 10.
- [12] 段长春, 朱勇, 尤卫红. 云南汛期旱涝特征及成因分析[J]. *高原气象*, 2007, 26(2): 402-408.
- [13] 段旭, 王恒康, 董谢琼. 云南春季低温标准的研究[J]. *气象*, 1998, 24(9): 16-20.
- [14] 周国莲, 普贵明, 李磊, 等. 2005年3月云南倒春寒天气的成因分析[J]. *气象*, 2006, 32(12): 82-87.
- [15] 王曼, 段旭, 李华宏, 等. 地形对昆明准静止锋影响的数值模拟研究[J]. *气象*, 2009, 35(9): 77-83.
- [16] 金少华, 葛晓芳, 艾永智, 等. 低纬高原两次冷锋切变天气对比分析[J]. *气象*, 2010, 36(6): 35-42.
- [17] 段长春, 段旭, 段苏岑, 等. 近50年云南省降雪的气候变化特征[J]. *气象*, 2011, 37(5): 599-606.
- [18] 郑建萌, 段旭. 2001年云南雨季开始偏早与孟加拉湾季风爆发的关系[J]. *气象*, 2005, 31(2): 59-63.
- [19] 吴洪宝, 吴蕾. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [20] Zwiers F W. Interannual variability and predictability in an ensemble of AMIP climate simulations conducted with the CCC GCM2 [J]. *Climate Dynamics*, 1996, 12(12): 825-847.
- [21] Zwiers F W, Khari V V. Intercomparison of interannual variability and potential predictability: An AMIP diagnostic subproject [J]. *Climate Dynamics*, 1998, 14(7-8): 517-528.
- [22] Klugman M R. Evidence of climate change in United States seasonal precipitation data, 1948-76[J]. *J Cli and Appl Met*, 1983, 22(8): 1367-1376.
- [23] Graybill F A. An introduction to linear statistical models[J]. *J Roy Stat Soci*, 1961, 124(4): 574-575.
- [24] 喻世华, 颜景容. 1997年东亚夏季风环流建立过程的分析[J]. *热带气象*, 1986, 2(1): 53-61.
- [25] 何立富, 武炳义, 管成功. 印度夏季风的减弱及其与对流层温度的关系[J]. *气象学报*, 2005, 63(3): 365-373.
- [26] 陈隆勋. 东亚季风环流系统的结构及其中期变动[J]. *海洋学报*, 1984, 6(6): 744-758.
- [27] Zhang R H. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China[J]. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(5): 1005-1017.
- [28] 晏红明, 杞明辉, 肖子牛. 冬季亚洲大陆的区域热力差异对亚洲季风活动的影响[J]. *大气科学*, 2005, 29(5): 549-564.
- [29] 杨明, 陶云. 亚洲夏季风对云南暴雨空间分布特征的影响[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2004, 26(3): 227-232.
- [30] 段旭, 李英, 孙晓东. 昆明准静止锋结构[J]. *高原气象*, 2002, 21(2): 205-209.
- [31] 段旭, 曾志刚. 云南寒潮特征及短期预报方法[J]. *云南气象*, 1987, 7(3): 8-10.
- [32] 李勇, 陆日宇, 何金海. 影响我国冬季温度的若干气候因子[J]. *大气科学*, 2007, 31(3): 505-514.
- [33] 解明恩, 张万诚. ENSO事件与云南冬季气温异常[J]. *应用气象学报*, 2000, 11(1): 115-122.