

## 全球温度场信息熵的时空特征分析\*

冯爱霞<sup>1)</sup> 龚志强<sup>2)†</sup> 黄 琰<sup>3)</sup> 王启光<sup>1)2)</sup>

1) (兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

2) (国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081)

3) (中国气象科学研究院, 气候系统研究所, 北京 100081)

(2010年11月24日收到; 2010年12月19日收到修改稿)

本文基于信息熵理论定义气象要素信息熵,并运用其分析全球温度场在不同时空尺度上偏离气候态(1971—2000)的不确定性. 研究表明:1) 温度场气候态信息熵(CE)具有明显的纬向分布特征,总体表现为温度场CE由低纬度地区向中高纬度地区递增,且海陆差异显著,可以较好地地区分各个气候带;其垂直变化,在低纬度地区表现为随高度的升高而增加,但在中高纬度地区则以300hPa为界呈准对称分布,在此高度之上其值随高度升高而增加,之下则相反,这一特征在高纬度地区更为明显. 2) 温度场月信息熵(ME)的季节性差异显著,总体表现为ME在夏季最小,冬季最大,春秋居中的特点. 3) ME的年代际变化特征显著,不同月份、不同层次的ME值均具有5—10年的准周期振荡特征. 温度场信息熵的时空变化特征及其与气温较差的联系表明,信息熵在气象领域具有较好的应用前景,是分析气象要素不确定性的一种有效方法和工具.

**关键词:** 信息熵, 温度场, 可预测性

**PACS:** 92. 60. Wc

## 1. 引言

气候系统是一个包含非线性动力和热力过程且具有强迫耗散特征的复杂巨系统. 在外强迫的作用下,其内部会发生一系列复杂的物理化学变化和非线性相互作用,气象工作者对气候系统非线性和复杂性的研究已经取得了丰硕成果<sup>[1—12]</sup>,这极大地推动了气候预测的发展. 由于气候系统的复杂性,虽然气候预测尤其是动力气候预测取得了很大的进展<sup>[13,14]</sup>,但是气候预测仍面临巨大的困难,这一困难源于气候系统存在很大的不确定性,因而定量描述气候系统的不确定性就变得非常必要.

度量事物不确定性的指标称之为“熵”,它源于统计热力学,最早由克劳修斯(Clausius)提出. 1948年信息论创始人香农将这一概念引入通信领域并称之为“信息熵”,它反映了信息源的平均不确定性<sup>[15]</sup>. 如今,“信息熵”、熵原理等迅速被应用到除物理通信以外的化学、生物、信息等自然科学以及

工程技术领域.

信息熵在气象领域也得到了广泛的应用. 张学文<sup>[16,17]</sup>在上世纪80年代就对信息熵理论进行了系统研究,为信息论在气象领域的推广和应用奠定了坚实的理论基础. 此后,Leung和North<sup>[18]</sup>用信息熵和互信息熵刻画了气候的可预测性;张继国和刘新仁<sup>[19]</sup>分析了降水信息熵的时空分布特征;Delsole<sup>[20]</sup>指出了可预测性和各种信息熵之间的联系,并用信息熵来定义可预测性;赵佩章、赵文桐等<sup>[21]</sup>研究了信息熵和物理熵的联系,并指出两者的等价性;汪景焯等<sup>[22]</sup>对大气边界层湍流温度序列进行了信息熵分析;封国林等<sup>[23,24]</sup>运用信息熵研究了气候要素的非线性动力学特征,并对气候突变进行检测和成因分析;郝成元等<sup>[25]</sup>运用信息熵对气温和降水的复杂性进行了度量. 温度是气象预报的基本要素之一,从实际数据中系统地挖掘气温在不同时间尺度、空间范围和高度层次上不确定性的变化特征,以及这种不确定性的时间演化特征等,无疑在气候预测和气候变化研究上具有重要的理论价值

\* 国家自然科学基金(批准号:40930952,40875040和40905034),公益性行业专项(批准号:GYHY201006021)和国家科技支撑计划(批准号:2007BAC29B01)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: gzzq0929@126.com

和应用价值. 因此本文基于信息熵理论, 运用美国国家环境预测中心/国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 再分析资料, 从概率和统计分析的角度揭示了不同时空尺度上温度场的不确定性及其演变规律, 进而为气候系统的可预测性研究提供一定的理论参考.

## 2. 资料和理论方法

### 2.1. 资料

文中所用资料为 1966—2009 年的 NCEP/NCAR 日平均温度场再分析资料, 网格分辨率为  $5^\circ \times 5^\circ$ , 共计 2264 个格点, 垂直方向为 12 层 (1000 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 600 hPa, 500 hPa, 400 hPa, 300 hPa, 250 hPa, 200 hPa, 150 hPa, 100 hPa), 并以 1000 hPa 代表近地面状况, 500 hPa 代表高空形势. 时间序列可表示为  $X_i(t), i = 1, \dots, 2264; t = 1, \dots, 16060$  (为方便统一一年取 365 天). 由 1971—2000 年 (共 30 年) 资料计算得到各格点一年中每一天气象要素的基准序列:

$$\bar{X}_i(l) = \frac{1}{30} \sum_{\text{mod}(t, 365) = l} X_i(t),$$

$$(i = 1, \dots, 2264; l = 1, \dots, 365; t = 1826, \dots, 12775),$$

(1)

式中  $\text{mod}(t, 365)$  为求余函数. 为滤除日资料中包含的季节振荡信号, 对数据做中心化处理得到距平序列:

$$X'_i(t) = X_i(\text{mod}(t, 365)) - \bar{X}_i(l),$$

$$(i = 1, \dots, 2264; l = 1, \dots, 365; t = 1, \dots, 16060).$$

(2)

### 2.2. 信息熵

事物所处的可能状态及其相应的出现概率, 可用数学上的概率空间来描述. 对于事物  $X$ , 其概率空间可表述为

$$[X, P] = \left[ \begin{array}{c} a_1, a_2, \dots, a_q \\ p(a_1), p(a_2), \dots, p(a_q) \end{array} \right]$$

或

$$\left[ \begin{array}{c} (a, b) \\ p(x) \end{array} \right] \text{ 或 } \left[ \begin{array}{c} R \\ p(x) \end{array} \right],$$

(3)

第一式表示离散变量的情况, 后两式表示连续变量的情况.  $a_1, a_2, \dots, a_q$  为事物所处的可能状态,

$p(a_1), p(a_2), \dots, p(a_q)$  表示其相应的概率.  $(a, b)$  表示事物所处的状态可以用实数区间  $(a, b)$  来表示,  $R$  表示事物的可能状态可用整个实数范围来表示,  $p(x)$  表示相应的概率密度函数. 显然,  $p(a_i) (i = 1, 2, \dots, q)$  或  $p(x) (x \in (a, b) \text{ 或 } x \in R)$  应满足

$$\sum_{i=1}^q p(a_i) = 1$$

或

$$\int_a^b p(x) dx = 1$$

或

$$\int_R p(x) dx = 1. \tag{4}$$

相应的信息熵定义为

$$H(X) = - \sum_{i=1}^q p(a_i) \log p(a_i)$$

或

$$- \int_a^b p(x) \log p(x) dx$$

或

$$- \int_R p(x) \log p(x) dx, \tag{5}$$

代表事物  $X$  所处状态的平均不确定性.

### 2.3. 气象要素场信息熵的计算

文中气象要素信息熵定义为: 在某一时段内, 要素场在所选尺度内偏离气候态的平均不确定性, 即表示要素场在所选尺度上偏离气候均值的总体不确定性.

气候态信息熵 (climate entropy, CE) 表示在某一气候态上, 要素场偏离该气候态总的平均不确定性. 计算公式为

$$H_i^c = - \sum_{j=1}^q p(X'_{ij}) \log p(X'_{ij}), \tag{6}$$

其中  $H_i^c$  表示格点  $i$  的气候态信息熵,  $X'_{ij} (i = 1, \dots, 2264)$  为气象要素距平序列 (文中以 1971—2000 年为气候态, 所以  $t = 1826, \dots, 12775$ ),  $X'_{ij}$  表示格点  $i$  处于状态  $j$  时的值 ( $X'_{ij} = 0$  表示格点  $i$  处于气候态上),  $p(X'_{ij})$  表示相应的概率. 当  $H_i^c = 0$  时, 表示气象要素在格点  $i$  上的值在研究时段内的任一时刻均处于气候平均态或者偏离气候态的程度都相同, 即  $p(0) = 1$  或  $p(X'_{ij}) = 1$ , 由 (6) 式可知, 此时气候系统的不确定性为 0, 系统完全可预测. 当  $H_i^c \rightarrow \infty$ , 表示格点  $i$  的气象要素在研究时段内, 处于气候态

或其他状态的概率都非常小,即  $p(X'_{ij}) \rightarrow 0$ , 不确定性趋于无穷,则系统完全不可预测. 由此可知,信息熵越大不确定性也就越大,预报时需要的信息也就越大,可预测性就越小,反之亦然<sup>[16, 26]</sup>. 若  $p(X'_{ij})$  服从高斯分布,则

$$H_i^C = \log(\sqrt{2\pi e\sigma_i^2}), \quad (7)$$

其中  $e$  为自然对数,  $\sigma_i$  为格点  $i$  的气象要素时间序列标准差. 若为自然对数,则上式可简化为

$$H_i^C = 0.5 + \ln(\sqrt{2\pi\sigma_i^2}), \quad (8)$$

此时信息熵的单位为奈特,记为 nat.

月信息熵(month entropy, ME)则表示在月时间尺度内气象要素偏离气候态的平均不确定性,计算公式与气候态信息熵的(6)式相似,不过时间尺度为一个月.

气候态信息熵表示气象要素偏离气候态的整体不确定性,其空间分布可以揭示该不确定性的不均匀性及其相应的分布规律;而月信息熵表示气象要素在月尺度上的不确定性和可预测性,可用于进一步探讨气象要素这种不确定性的时间演化规律. 前者侧重研究大时间尺度不确定性的空间分布规律,后者侧重研究小时间尺度不确定性的时间演化规律,从而揭示不确定性的时空特征.

### 3. 结果和分析

#### 3.1. 温度场气候态信息熵的空间分布

图 1(a), (b) 分别给出了 1000 hPa 和 500 hPa 温度场信息熵 30 年(1971—2000)平均的不确定性水平分布图. 从图中可以看出温度场 CE 呈明显的

纬向分布,并可清晰地分为低纬度地区和中高纬度地区. 南半球 1000hPa 更细致地体现了温度场 CE 的水平分布与地理上气候带(热带(0—30°S)、温带(30°S—60°S)和寒带(60°S—90°S))的划分相符合,且两者的分界线也几乎重合(热带和温带的分界线 30°S、温带和寒带的分界线 60°S). 整体上低纬度地区温度场 CE 较小,而中高纬度地区的较大,表明低纬度地区偏离气候态的不确定性较小,因而其气候系统的可预测性较大,而中高纬度地区则偏离气候态的不确定性较大,导致该地区气候系统可预测性较小. 由图 1(a)可知,1000 hPa 温度场 CE 分布形势同海陆分布相符合,充分体现了海陆热力性差异对不同地区气候系统可预测性的影响:海洋热力性质均一稳定且比热容大,使得温度变化范围小,偏离气候态的不确定性小,从而 CE 小、可预测性大;而陆地受地形、植被覆盖等各种下垫面因素的影响,其热力性质不稳定,因而不确定性较大,可预测性较小. 从图 2(a)中可以看出,500 hPa 温度场 CE 几乎不受地表影响,因此其纬向分布的特征更为明显:低纬度地区的 CE 值较小,副热带地区次之,中高纬度的较大,其中又以 50°N—80°N 的 CE 值最大,这充分体现了 500 hPa 温度场上不确定性和可预测性在不同地区的差异,即低纬度温度的不确定性最小而可预测性最大,副热带地区次之,中高纬度温度的不确定性最大而可预测性最小. 这一结论同李建平等<sup>[27, 28]</sup>得出的 500 hPa 温度场可预报期限的结论相一致,亦同支蓉等<sup>[29—31]</sup>得出的温度场的关联性分布类似,从侧面说明了信息熵方法运用于全球温度可预测性分析的可靠性和有效性.

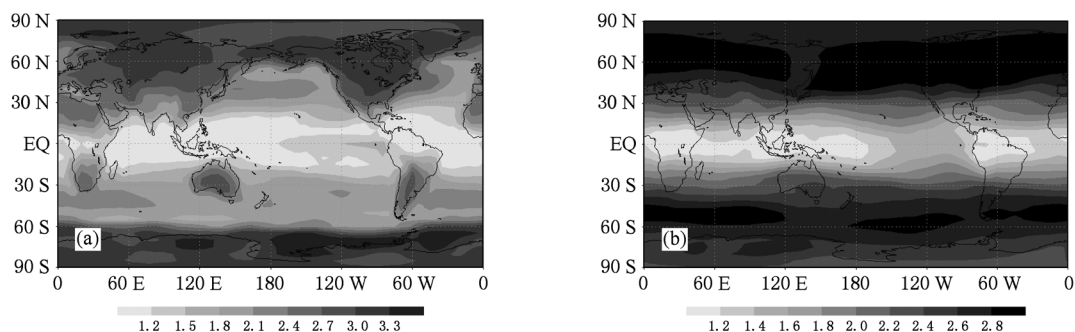


图 1 温度场气候态信息熵水平分布(单位:nat) (a)1000 hPa;(b)500 hPa

造成温度场 CE 呈现纬向分布特征的可能原因是温度年变化的差异. 一年中最热月和最冷月平均

气温的差值,称为气温年较差. 本文中选取 1000 hPa 和 500 hPa 的 7 月和 1 月 30 年(1971—2000

年)平均气温年较差的绝对值进行分析,其空间分布情况如图 2 所示. 比较图 2 和图 1 可以发现两者的分布相似,为了定量度量两者间的相似程度,本文引入相似系数<sup>[32,33]</sup>,其计算公式为

$$\cos(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^m x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m y_i^2}}, m = 2264, \quad (9)$$

其中  $\cos(\theta)$  是温度 CE 场和气温年较差场相似程度的定量指标,  $x_i$  和  $y_i$  分别是第  $i$  个格点温度场 CE 值和平均气温年较差的绝对值,  $m$  为格点的数目. 为了消除格点代表面积不同的影响,将相似系数定义为:

$$\cos(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^m x_i y_i \cos^2(\varphi_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_i^2 \cos^2(\varphi_i)} \sqrt{\sum_{i=1}^m y_i^2 \cos^2(\varphi_i)}}, \quad (10)$$

$m = 2264$ ,  $\varphi_i$  为格点  $i$  所处的纬度. 相似系数的取值范围在  $-1$  到  $1$  之间,当相似系数等于  $1(-1)$  时,表明两个变量场中各格点要素值的分布情况完全相同(相反),并且正值越接近于  $1$ ,相似程度越高,负值越接近  $-1$ ,则差异性越大;相似系数等于  $0$  时表示两个变量场完全不相似. 经计算温度场 CE 的空间分布于气温年较差场在  $1000 \text{ hPa}$  和  $500 \text{ hPa}$  的相似系数分别为  $0.81$  和  $0.83$ ,充分说明温度场 CE 和平均气温年较差绝对值的分布特征相似. 气温年较差的影响因素大体包括太阳辐射能随纬度的变化、海陆热力性差异、地形和植被覆盖状况等. 从以上分析可以看出,温度场 CE 的空间分布也应受上述因子的影响. 由于 CE 的分布情况表征了温度可预测性分布状况,因而各地区温度可预测性的大小也很可能受上述因子的影响.

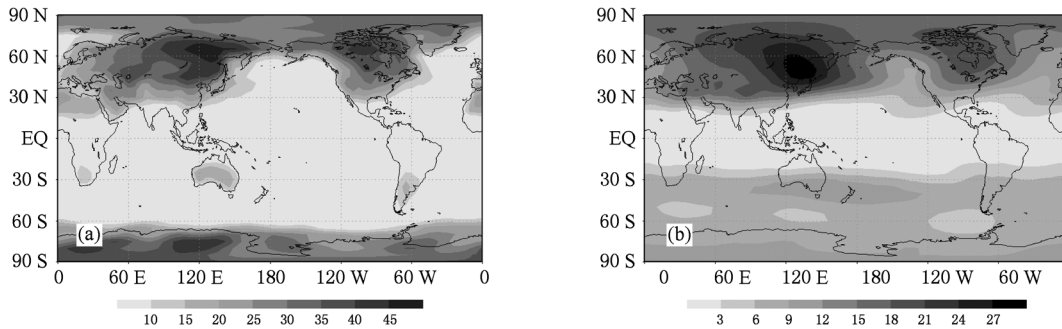


图 2 平均气温年较差绝对值的水平分布(单位:℃) (a)1000hPa;(b)500hPa

图 3 反映了纬圈平均的温度场 CE 值随高度的变化. 由图 3(a)可知,在热带地区,  $150 \text{ hPa}$  高度以下的温度场 CE 都较小,其值介于  $1.5-1.7 \text{ nat}$  之间,而在  $150 \text{ hPa}$  高度以上 CE 随高度递增. 值得注意的是,在  $90^\circ \text{W}-160^\circ \text{W}$  地区  $1000 \text{ hPa}-150 \text{ hPa}$  的高度上,温度场 CE 达  $1.7-1.9 \text{ nat}$ ,高于同一高度上其他地区,而这一经度范围正是厄尔尼诺和拉尼娜现象发生的区域,这说明厄尔尼诺和拉尼娜的作用极有可能使得温度场偏离气候态的不确定性增大,并表现为温度场 CE 比同一高度其他地区的大,且海温异常对温度可预测性的影响可达到  $150 \text{ hPa}$  的高度. 高纬地区温度 CE 场以  $300 \text{ hPa}$  为界,呈准对称分布,在  $300 \text{ hPa}$  高度以上温度场 CE 随高度升高而增加,以下则随高度的升高而减小(见图 3(b)). 高纬度地区的对流层顶大约为  $8-9 \text{ km}$ ,即在  $300 \text{ hPa}$  附近;且该层的特性与对流层截然不同,

其主要特征是气温的垂直递减率变小或成等温、甚至成逆温型. 此外,在对流层顶之上为平流层. 大气状态随高度的这一变化可能对温度场 CE 随高度的变化趋势产生影响. 从图 4(b)的气温年较差可以看出,  $300 \text{ hPa}$  附近的气温年较差也最小,且同图 3(b)的相似系数为  $0.95$ ,两者的分布特征非常相似. 说明气温年较差也是造成高纬地区温度场 CE 这种准对称垂直分布特征的重要原因之一. 中纬度地区温度场 CE 随高度的变化特征同高纬地区类似,但其垂直变化没有高纬度地区的显著(图略). 图 4(a)为经向平均气温年较差的垂直分布图,该图表明气温年较差在垂直方向上纬向差异也很显著. 为了更好地了解温度场 CE 同气温年较差的关系,图 5 给出了两者随高度的变化(北半球的平均情况,南半球情况类似),由(9)式计算可得两变量垂直变化场的相似系数为  $0.98$ . 结合两者在空间分

布的特征,可以发现气温年较差是造成温度场 CE 空间分布(水平和垂直分布)特征的主要原因.

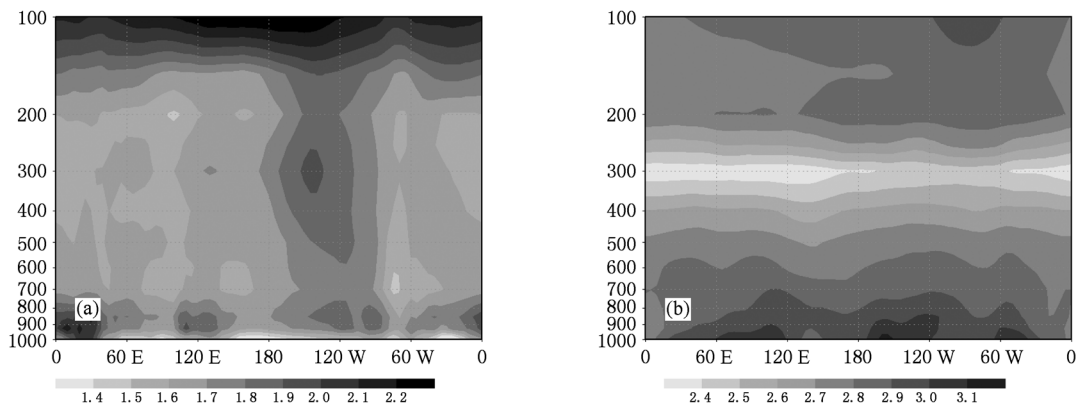


图3 温度场气候态信息熵垂直分布(单位:nat) (a)30°S—30°N 纬向平均;(b)60°N(S)—90°N(S) 纬向平均

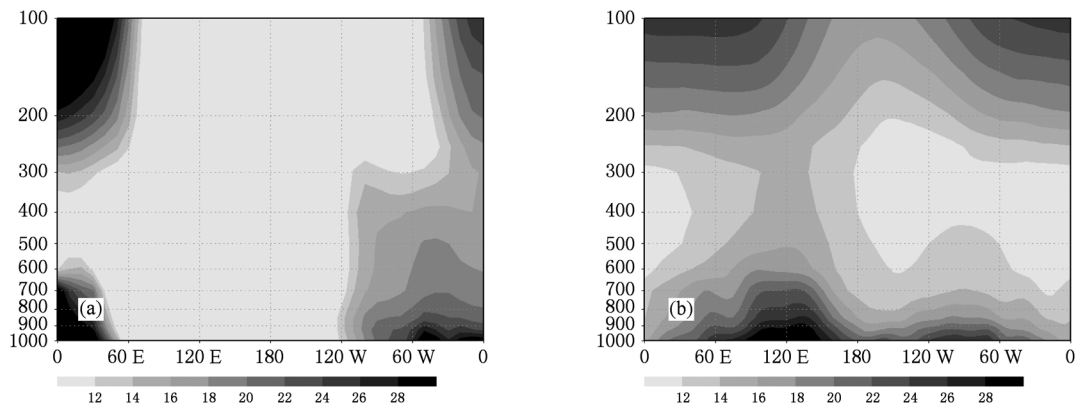


图4 平均气温年较差绝对值的垂直分布(单位:°C) (a)经向平均;(b)高纬地区(60°N(S)—90°N(S)) 纬向平均

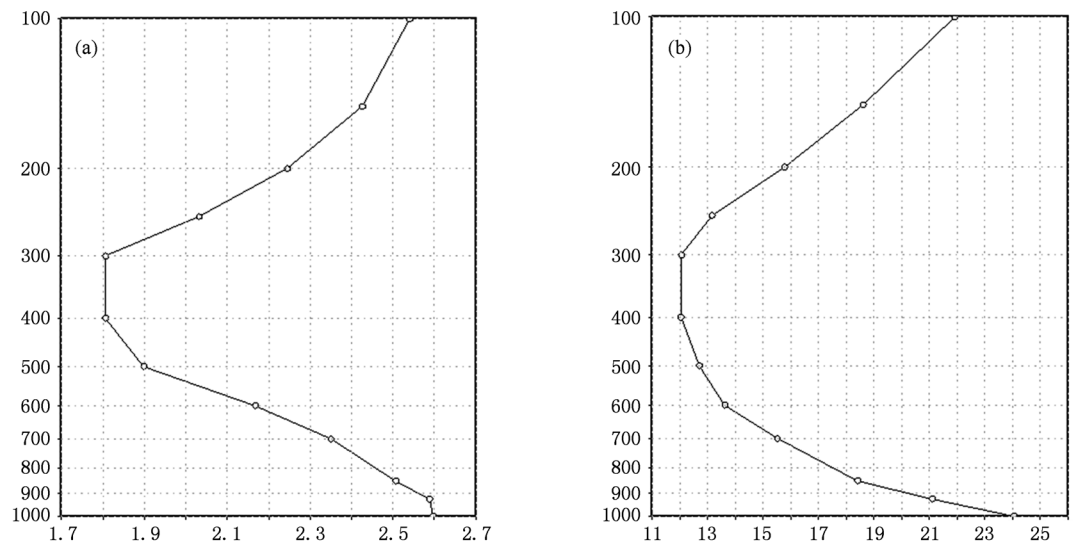


图5 北半球温度场平均气候态信息熵(a)和平均气温年较差绝对值(b)的垂直分布(单位分别为 nat 和°C)

### 3.2. 温度场月信息熵的季节变化及年代际变化特征

#### 3.2.1. 温度场月信息熵的季节变化

为了研究月时间尺度上温度场偏离平衡态的平均不确定性,本文引入温度场月信息熵(ME). 不同月份 1000hPa 的温度场 ME 在 1966—2009 年的平均状况如图 6 所示. 由图 6(a)可知温度场 ME 纬向分布显著:低纬度地区 ME 的季节变化不显著;到副热带地区 ME 的季节性差异开始显现,其中北半球副热带地区 ME 的季节变化比南半球同纬度地区的明显;寒带地区 ME 的季节变化最明显. 温度场 ME 的季节变化特征具体表现为夏季(北半球 JJA, 南半球 DJF)最小,冬季(北半球 DJF, 南半球 JJA)最大,而春秋月份的处于两者之间. 图 6(b)为南、北半球温度场 ME 的逐月平均值,它更为清晰地展现了这一季节性变化. 夏季温度场 ME 最小均值在 1.8 nat 左右,冬季最大,北半球为 2.5 nat 左右,南半球约为 2.3 nat.

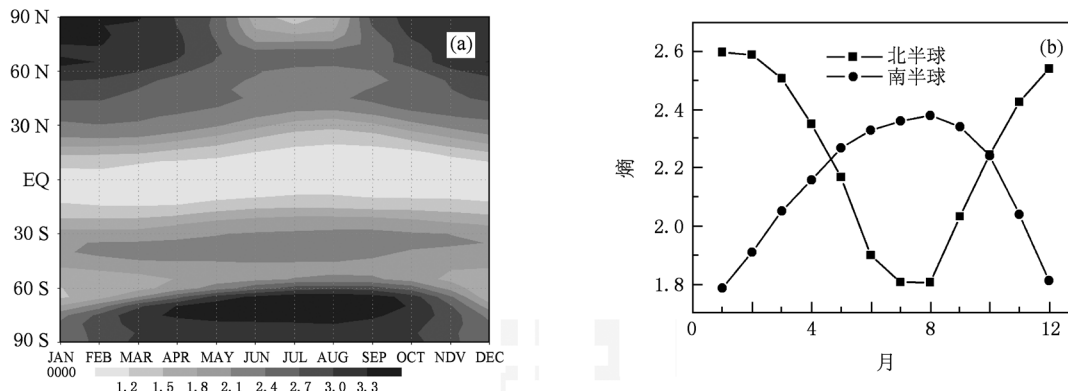


图 6 温度场月信息熵的季节变化 (a) 纬向平均; (b) 南、北半球平均

不同月份温度场 ME 的垂直变化如图 7 所示: 各个高度上 ME 的季节变化仍然比较显著,但在不同的高度上其显著程度不同. 在北半球(图 7(a))温度场 ME 的季节变化在 1000—500 hPa 高度上随高度的升高而减弱,到 400—300 hPa 高度时达到最小,该高度上冬季的 ME 也较小;300 hPa 高度之上温度场 ME 的季节差异又随高度的升高而增加,其季节变化仍保持夏季最小、冬季 ME 最大的特征. 南半球(图 7(b))温度场 ME 的季节性差异随高度

的变化相对北半球要弱,且与北半球不同的是,南半球 ME 的季节性差异在 1000—500 hPa 高度上随高度的升高而增大,到 400—300 hPa 时季节性差异最大,并且 ME 在 2,3 月最大,8,9 月最小;到了 200 hPa 高度 ME 在 11,2 月最大,8,9 月最小. 以上分析说明南半球温度场 ME 季节变化的垂直分布与北半球的明显不同,这可能与南北半球的海陆分布差异较大有关.

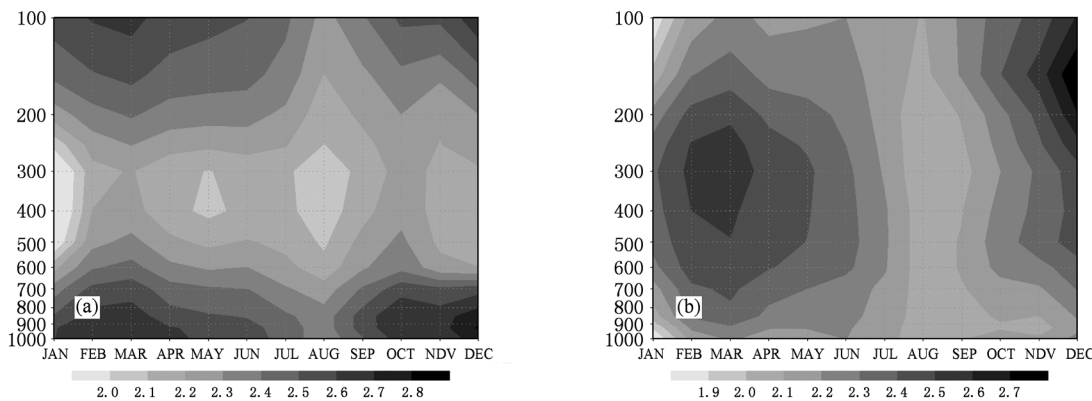


图 7 各月份温度月信息熵的垂直分布 (a) 北半球平均; (b) 南半球平均

3.2.2. 温度场月信息熵的年代际变化

由于月信息熵具有明显的季节变化,即夏季ME最小,冬季最大,且在北半球这种季节差异更为显著,所以在研究温度场ME的年代际变化时重点研究北半球冬夏季,且以北半球的1月代表冬季,7月代表夏季.自1966年起,取窗口宽度为10a,滑动步长为1a,计算温度场ME,北半球1000hPa1月和7月ME的距平如图8所示.1月温度场ME显示出较好的年代际振荡特征:上世纪60年代后期为正距平,70年代前期转为负距平,70年后后期到80年代前期又回到正距平,80年代后期到90年代前期又跳转为负距平,90年代后期为正距平.7月温度场ME同样也显现出较好的年代际振荡特征,但与1月不同,60年代后期到70年代前期为负距平,70年代后期到80年代前期为正距平,80年代后期到90年代前期距平正负不显著,到90年代后期为负距平.此外,由图9可知,温度场ME的这种年代际振荡在各个高度上都保持了较好的一致性,而7月的ME值在1985年以后正负振荡的幅度加大,且高层与低层的一致性更好.以上分析说明ME在气候态附近呈年代际的周期振荡变化.

4. 结论和讨论

本文通过定义气候态信息熵(CE)和月信息熵(ME),分析了全球温度场在不同时间尺度上偏离气候平均态(1971—2000)的不确定性的时空特征.得到以下结论:

1. 温度场CE纬向分布特征显著,根据其值的大小,可清晰地分为低纬度地区和中高纬度地区两部分.在1000hPa,温度场CE的水平分布形势同海陆分布相一致,且在南半球其分布同地理上气候带

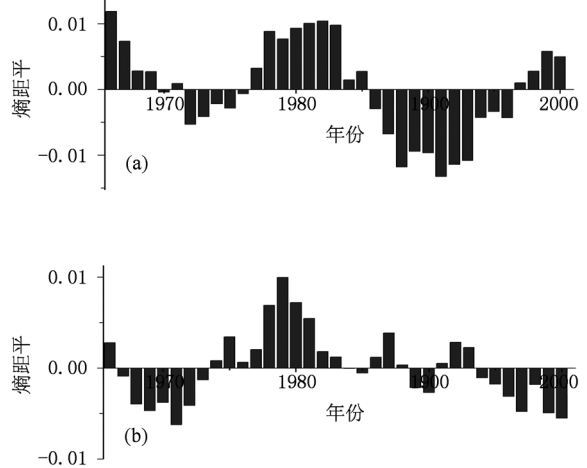


图8 北半球1000 hpa 温度场1月(a)和7月(b)的月信息熵年代际变化

(热带、温带、寒带)的划分较符合.温度场CE和平均气温年较差的分布特征相似,相似系数高达0.8以上,气温年较差的空间差异可能是造成温度场CE纬向分布特征的重要原因.温度场CE分布也应受影响气温年较差的太阳辐射随纬度的变化、海陆热力性差异、地形以及植被覆盖状况等因素的影响.气温年较差一般用来划分气候,研究表明温度场CE也可以作为气候划分的指标;同时温度场CE又表示温度场偏离气候态的不确定性,可以作为衡量可预测性的指标.

2. 温度场CE的垂直分布:在低纬度地区,150hPa高度以下的温度场CE都较小,而在90°W—160°W地区1000hPa—150hPa的高度上温度场CE高于同一高度上其他地区的值,体现了厄尔尼诺和拉尼娜现象,即海温异常对该地区气温的影响;在150hPa高度以上CE随高度递增.高纬地区垂直温度场CE以300hPa为界,呈准对称分布,在300hPa

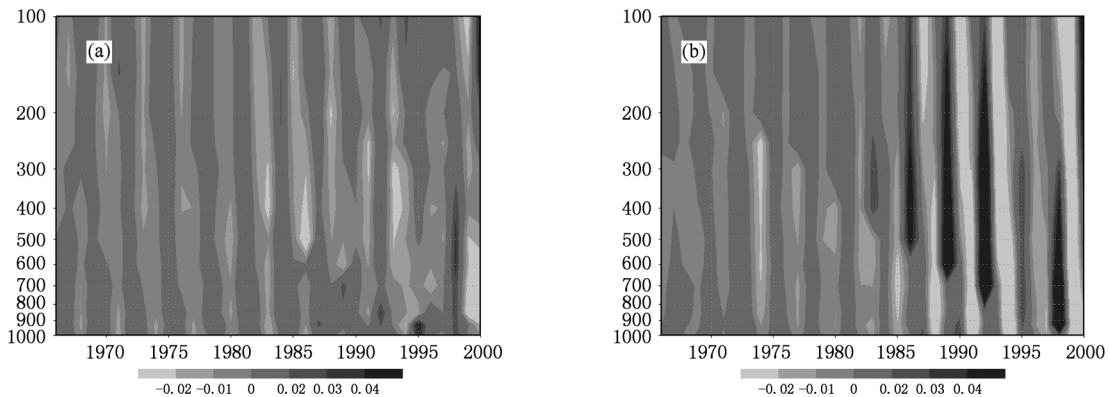


图9 北半球温度场不同高度层1月(a)和7月(b)的月信息熵年代际变化

高度以上温度场 CE 随高度升高而增加, 以下则随高度的升高而减小. 气温年较差的垂直变化同温度场 CE 的垂直变化较吻合, 进一步体现了气温年较差对温度场 CE 的重要作用.

3. 温度场 ME 具有明显的季节变化, 表现为夏季最小、冬季最大, 春秋月份的居中, 且北半球的季节性差异比南半球显著. ME 的季节变化在高纬度地区最显著, 中纬度地区次之, 低纬度地区最不明显; 在不同高度上, ME 的季节变化在北半球 400—300 hPa 最不明显, 在此高度之上其变化随高度增加而显著, 之下则相反; 南半球季节变化不如北半球显著, 且随高度不同有所变化.

4. 温度场 ME 具有明显的年代际周期振荡特

征. 通过分析北半球 1 月和 7 月 ME 随时间的变化可知, 这一周期为 5—10 年, 且这一周期特征在各个高度上都具有很好的一致性.

经以上研究表明, 温度场 CE 纬向分布特征显著既可以作为气候划分的指标, 又可以刻画可预测性, 同时也体现了厄尔尼诺和拉尼娜对低纬度对流层气温的影响. 温度场 ME 则具有较好的季节变化规律, 北半球 ME 的季节差异尤其显著. 温度场 ME 的年代际变化特征也很明显. 因此, 温度场 CE 的空间分布特征、ME 的季节变化及年代际演变等为气候带的划分和更全面的认识温度要素的可预测性等, 提供了一定的理论指导.

- [1] Chou J F, 1997 *Bull. Chin. Acad. Sci.* **5** 325 (in Chinese)[丑纪范 1997 中国科学院院刊 **5** 325]
- [2] Feng G L, Dong W J 2004 *Chin. Phys.* **13** 413
- [3] Feng G L, Gong Z Q, Dong W J, Li J P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5494 (in Chinese)[封国林、龚志强、董文杰、李建平 2005 物理学报 **54** 5494]
- [4] Feng G L, Dong W J, Gong Z Q, Hou W, Wan S Q, Zhi R 2006 *Nonlinear theories and methods on spatial-temporal distribution of the observational data* (Beijing: Metrological Press) (in Chinese)[封国林、董文杰、龚志强、侯威、万仕全、支蓉 2006 观测数据非线性时空分布理论和方法(北京:气象出版社)]
- [5] Feng G L, Gao X Q, Dong W J, Li J P 2008 *Chaos Soli. Fract.* **37** 487
- [6] Feng G L, Gong Z Q, Zhi R, Zhang D Q 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2745
- [7] Li J P, Gao L 2006 *Chin. J. Atmos. Sci.* **30** 834 (in Chinese)[李建平、高丽 2006 大气科学 **30** 834]
- [8] Li J P, Wang X L 2003 *Adv. Atmos. Sci.* **20** 661
- [9] Li J P, Chou J F 1997 *Acta Meteor. Sin.* **11** 57
- [10] Li J P, Zeng Q C, Chou J F 2000 *Sci. China. (E)* **30** 550 (in Chinese)[李建平、曾庆存、丑纪范 2000 中国科学(E 辑) **30** 550]
- [11] Dai X G, Wang P, Chou J F 2004 *Pro. Nat. Sci.* **14** 73
- [12] Gong Z Q, Zhou L, Zhi R, Feng G L 2008 *Acta Pyhs. Sin.* **57** 5351 (in Chinese)[龚志强、周磊、支蓉、封国林 2008 物理学报 **57** 5351]
- [13] Ding Y H, Li Q Q, Li W J, Luo Y, Zhang P Q, Zhang Z Q, Shi X L, Liu Y M, Wang L N 2004 *Acta Meteor. Sin.* **62** 598 (in Chinese)[丁一汇、李清泉、李维京、罗勇、张培群、张祖强、史学丽、刘一鸣、王兰宁 2004 气象学报 **62** 598]
- [14] Liu H B, Zhang D L, Wang B 2006 *Climatic Environ. Res.* **11** 649 (in Chinese)[刘鸿波、张大林、王斌 2006 气候与环境研究 **11** 649]
- [15] Shannon C E 1948 *Bell Sys. Tech. J.* **27** 379
- [16] Zhang X W 1981 *Weather forecasting using information analysis* (Beijing: Science Press) (in Chinese)[张学文 1981 气象预报问题的信息分析(北京:科学出版社)]
- [17] Zhang X W, Ma L 1992 *Entropy Meteorology* (Beijing: Meteorology Press)(in Chinese)[张学文、马力 1992 熵气象学(北京:气象出版社)]
- [18] Leung L Y, North G R 1990 *J. Climate* **3** 5
- [19] Zhang J G, Liu X R 2000 *Advan. Water Sci.* **11** 133 (in Chinese)[张继国、刘新仁 2000 水科学进展 **11** 133]
- [20] Delsole T 2004 *J. Atmos. Sci.* **61** 2425
- [21] Zhao W T, Chen X, Zhao P Z 1988 *Entropy and cross Science: Information Entropy in Meteorology* (Beijing: Meteorology Press) p127—130 (in Chinese)[赵文桐、陈霞、赵佩章 1988 信息熵于气象熵, 熵与交叉科学(北京:气象出版社)第 127—130 页]
- [22] Wang J Y, Fu Z T, Zhang L, Liu S D 2005 *Plate. Meteor.* **24** 38 (in Chinese)[汪景焯、付遵涛、张霖、刘式达 2005 高原气象 **24** 38]
- [23] Wang Q G, Zhang Z P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1976 (in Chinese)[王启光、张增平 2008 物理学报 **57** 1976]
- [24] Feng G L, Wang Q G, Hou W, Gong Z Q, Zhi R 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 4 (in Chinese)[封国林、王启光、侯威、龚志强、支蓉 2009 物理学报 **58** 4]
- [25] Hao C Y, WU S H, Li S C 2007 *Geo. Graphi. Res.* **26** 46 (in Chinese)[郝成元、吴绍洪、李双成 2007 地理研究 **26** 46]
- [26] Zhang Z S, Gong Z Q, Zhi R, Feng G L, Hu J G 2011 *Chin. Phys. B* **20**
- [27] Li J P, Ding R Q 2008 *Chin. J. Atmos. Sci.* **32** 975 (in Chinese)[李建平、丁瑞强 2008 大气科学 **32** 975]
- [28] Ding R Q, Li J P 2009 *Acta Meteor. Sin.* **67** 343 (in Chinese)[丁瑞强、李建平 2009 气象学报 **67** 343]



- [29] Zhi R, Gong Z Q, Feng G L, Zhou L 2010 *Acta Meteor. Sin.* **24** 150  
 [30] Feng G L, Gong Z Q, Zhi R, Zhang D Q 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2745  
 [31] Gong Z Q, Wang X J, Zhi R, Feng G L 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 4342 (in Chinese) [龚志强、王晓娟、支 蓉、封国林 2009 物理学报 **58** 4342]  
 [32] Wang Y, Shi N, Gu J Q, Feng G L, Zhang L B 2006 *Chin. J. Atmos. Sci.* **30** 162 (in Chinese) [王 颖、施 能、顾俊强、封国林、张立波 2006 大气科学 **30** 162]  
 [33] Shi N 2005 *Chin. Phys.* **14** 844

## Spatiotemporal analysis of information entropy of the global temperature \*

Feng Ai-Xia<sup>1)</sup> Gong Zhi-Qiang<sup>2)†</sup> Huang Yan<sup>3)</sup> Wang Qi-Guang<sup>1)2)</sup>

1) (Department of Atmospheric and Sciences Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

2) (Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

3) (Institute of Climate System, Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China)

(Received 24 November 2010; revised manuscript received 19 December 2010)

### Abstract

Based on the concept of entropy in information theory, the entropy of meteorological elements is determined and used to analyze the uncertainty of the global temperature field anomaly from the climate state (1971—2000) on different time and spatial scales. It is found that the temperature climate entropy (CE) possesses a zonal distribution, increases from tropics to mid-high latitudes and has an obvious difference between the ocean region and the continent, thereby being able to distinguish the climatic zones properly. The temperature CE in low-mid troposphere increases with altitude increasing, while in extratropical the situation retains above 300 hPa but below 300 hPa the situation is reversed, and this feature is more obvious in high latituderegions. On the whole, the temperature monthly entropy (ME) is obviously dependent on season change; it is smallest in summer and largest in winter. Besides, there exists a distinguishable interdecadal period. Different monthly ME values from low atmosphere to high atmosphere each have an obvious five -to-ten year quasi-period oscillation. All the spatiotemporal characteristics and their relationships with annual temperature range verify the usefulness of the entropy in meteorology, and it is an effective method to measure the uncertainty of the meteorological elements.

**Keywords:** information entropy, temperature field, predictability

**PACS:** 92. 60. Wc

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40930952, 40875040 and 40905034), the Meteorological Special Project of China (Grant No. GYHY201006021), and the State Key Program of Science Technology of China (Grant No. 2007BAC29B01).

† Corresponding author; E-mail: gzq0929@126.com