

## 南极气候变化的季节特征<sup>†</sup>

葛 玲 梁佳兴

(南京气象学院气象学系, 南京 210044)

**摘 要** 利用 1962~1993 年南极 16 站地面至 30 hPa 10 个标准层上月平均温度、南极臭氧总量以及 2 800 MHz 太阳通量资料, 采用最大熵功率谱方法, 研究了各季中月南极诸高度气候的线性趋势变化、熵谱特征及其可能原因。结果显示: 南极平流层气温(臭氧总量)在各月均呈变冷(减少)趋势, 10 月 100 hPa 气温(臭氧总量) 10 年的变率最大达  $-1.8^{\circ}\text{C}$  ( $-14.8\%$ )。南极对流层气温(2 800 MHz 太阳通量)在各月均呈显著增暖(增强)趋势, 1 月 500 hPa 气温(太阳通量) 10 年的变率高达  $0.4^{\circ}\text{C}$  (22.1 个单位)。各月太阳通量均呈显著的 3 年及 9~10 年甚低频—年代际周期变化。而对流层 850~500 hPa 气温变化熵谱仅在 7 月具有相应的特征, 南极对流层顶气温在各季中月均无显著的趋势变化及周期性变化。提出南极春季臭氧的显著减少及夏季太阳通量的增强是平流层显著变冷及对流层变暖的重要原因; 南极夏季对流层显著增暖导致南极大陆边缘部分冰雪消融, 可能是近年来全球海平面升高的重要原因之一。

**关键词** 南极, 季中月, 气候变化

**分类号** P467

作者曾利用南极 16 站地面至 30 hPa 10 个标准层月平均气温均值序列, 讨论了诸层月、季以上时间尺度的气候变化<sup>[1]</sup>, 指出近 30 年来南极气候变化的主要趋势特征是对流层变暖、平流层变冷, 且以 700 hPa 增暖、100 hPa 降温最为显著, 10 年的变率分别为 0.21、-0.68, 并指出各层气候变化的主要频谱特征。本文的重点在于研究南极各层之间以及同期南极臭氧总量、2 800 MHz 太阳通量等外源在近 30 余年来各季中月的长期趋势变化以及年尺度以上的甚低频—年代际频谱特征, 并讨论温度变化与外源变化之间的可能联系, 进一步揭示南极气候变化的特征及原因。与文献 [2] 相比, 本文使用的资料年代更长, 研究的内容更多, 时空分辨率亦有明显提高。

### 1 资料处理及计算方法

以 1962~1993 年 1、4、7、10 月南极 16 站(分布如图 1) 在 10 个标准层上的同期月平均气温距平均值序列  $T_j(p)$  作为本文计算的基础资料。其中,  $j=1, 2, \dots, 32$  为资料年序;  $p$  包含地面、850、700、500、300、200、150、100、50、30 hPa 等 10 层。

季中月各量计算采用 Burg<sup>[3]</sup> 最大熵谱方法, 它满足下列关系

<sup>†</sup> 长期天气预报理论和方法研究项目资助

$$S(T) = \frac{\sigma_m^2 \Delta t}{1 - \sum_{j=1}^m b_{m,j} e^{-ij2\pi\Delta t/T}} \quad (1)$$

式中,  $\Delta t$  为离散序列数据间的时间间隔, 本文取  $\Delta t = 1$  年;  $i = \sqrt{-1}$  为虚数;  $T$  为谱波分量的周期;  $b_{m,j}$  为  $m$  阶自回归系数;  $\sigma_m^2$  为预报误差的方差。

为提取序列随时间的线性趋势变化, 对  $T_j(p)$  序列作一阶差分

$$T_j(p) = T_j(p) - a(p)(j - \frac{N+1}{2})$$

$$N = 32 \quad (2)$$

其中

$$a(p) = \frac{\sum_{j=1}^m T_j(p)(j - \frac{N+1}{2})}{\sum_{j=1}^N (j - \frac{N+1}{2})^2} \quad (3)$$

表示单位时间内序列随时间的平均变化程度。序列作熵谱计算时, 为了满足平稳性条件, 线性趋势明显的已去掉, 否则未予考虑。

本文根据序列自相关函数  $R(1) > 0.20$  ( $< 0.20$ ), 分别采用红(白)噪声谱估计对最大熵谱分析结果进行显著性检验。

对 2 800 MHz 太阳通量距平序列以及南极 Amundsen-Scott (89.59 S, 24.48 W)、Halley Bay (75.31 S, 26.44 W)、Syowa (69.00 S, 39.35 E) 以及 Faraday (65.15 S, 64.16 W) 等 4 站臭氧总量距平百分率均值序列亦采用同样的计算方案。

## 2 南极气候变化的季节特征

### 2.1 长期趋势

由表 1 南极地面至 30 hPa 各标准层气温在季中月的长期线性趋势, 可见平流层下部诸层表 1 季中月南极气温、臭氧总量、2 800 MHz 太阳通量的长期线性趋势变化(每 10 年的变率)

Table 1 Long-term linear trend variation in temperature ( /decade), total ozone (1%/decade) over Antarctic and 2 800 MHz solar flux (unit/decade) in mid-season month

月份	南极气温( )										太阳通量 (%)	臭氧总量 (个单位)
	30	50	100	150	200	300	500	700	850	地面		
1	-0.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.0	0.4	0.3	0.3	0.3	22.1	-2.5
4	-0.1	-0.0	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.3	0.2	0.3	0.2	19.0	-1.8
7	-0.2	-0.2	-0.3	-0.1	0.0	0.2	0.2	0.3	0.2	0.4	17.3	-1.3
10	-1.0	-1.6	-1.8	-0.9	-0.4	0.1	0.1	0.2	0.2	0.0	17.5	-14.8

各季均呈变冷趋势, 其中春季(10月)变冷最明显, 100 hPa 10 年的变率(下同)达 -1.8 ; 其次是 1 月, 平流层底部变率为 -0.4 ; 4 月变率最小, 各高度的变率均不超过 -0.1 。对流层各高度均呈变暖趋势, 增暖最甚的夏季(1月)500 hPa 达 0.4 , 其下各高度为 0.3 , 10 月对

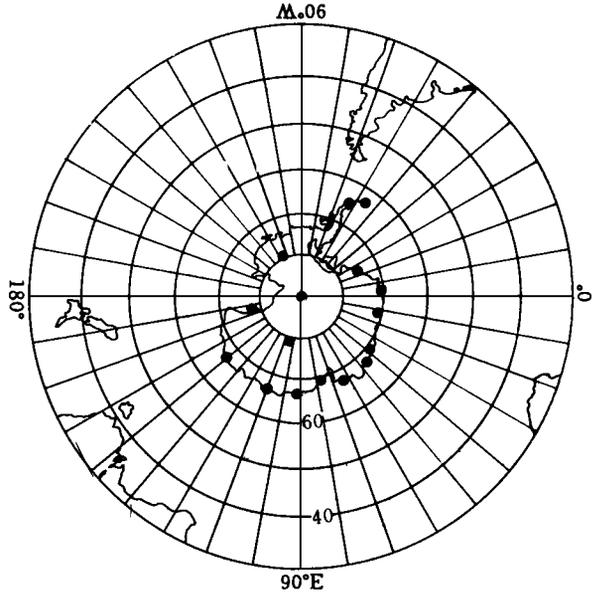


图 1 南极选站分布

Fig. 1 Distribution of stations in Antarctic

流层增暖最弱, 各高度均 0.2。在各季中月对流层顶气温均无显著的趋势变化。从 1 月 500 hPa 温度距平年际变化及线性趋势变化(图 2), 也可看出南极夏季对流层中上部气候的显著变暖特征。

## 2.2 变化周期

表 2 为季中月南极各标准层气温、臭氧总量以及 2 800 MHz 太阳通量序列自相关函数值  $R(1)$ 。可见, 除了 1 月 50 hPa、4 月地面、7 月 700 hPa 以下各层、10 月地面气温以及各季中月 2 800 MHz 太阳通量年际序列的熵谱需采用红噪声谱估计作谱检验外, 对表 2 中的

其余序列均采用白噪声估计作功率谱检验。根据各季中月南极各标准层气温计算周期熵谱强度给出的以年为单位的信度达 0.05 的显著周期长度(\* 为信度达 0.01, \*\* 为信度达 0.001) 列于表 3。1 月、7 月南极各高度气温最大熵功率谱示于图 3。由表 3、图 3 可见:

表 2 季中月南极气温、臭氧总量、2 800 MHz 太阳通量序列自相关函数

Table 2 Autocorrelation function of the series of temperature, total ozone and 2 800 MHz solar flux for the mid-season months in the study region

月份	南极气温										太阳通量	臭氧总量
	30	50	100	150	200	300	500	700	850	地面		
1	0.11	0.21	-0.08	0.01	0.03	0.01	-0.38	-0.34	-0.29	-0.19	0.66	0.19
4	0.02	-0.02	-0.07	-0.07	-0.17	-0.32	0.09	-0.20	0.07	0.31	0.71	0.02
7	-0.13	-0.44	0.17	-0.02	0.02	0.12	0.16	0.26	0.34	0.20	0.70	-0.01
10	-0.07	-0.01	-0.18	-0.15	-0.24	-0.11	0.08	0.03	0.06	0.23	0.71	-0.17

(1) 南极对流层气温序列的显著周期主要存在于冬、夏季: 7 月 500 hPa 以下各高度气温有 8~11 年周期, 即甚低频到年代际变化周期, 谱峰在 9~10 年; 在 700~850 hPa 信度达 0.001, 500~850 hPa 气温变化的 3 年周期亦存在; 1 月在 500 hPa 及 700 hPa 有 3 年周期; 4 月 500 hPa、700 hPa 及地面气温变化的显著周期长度分别为 9 年、4 年及 8 年; 春季 10 月, 对流层气温年际序列不存在显著的变化周期。

(2) 平流层气温变化的周期性特征不及对流层明显。冬、秋季仅 200 hPa 气温变化周期较显著: 7 月有 4 年、7 年周期; 4 月有 3 年、5 年周期。而 30(50) hPa 气温在 4(10) 月分别存在 9(11) 年周期。

(3) 南极对流层顶(即 300 hPa) 气温在各季均无显著的周期性变化。

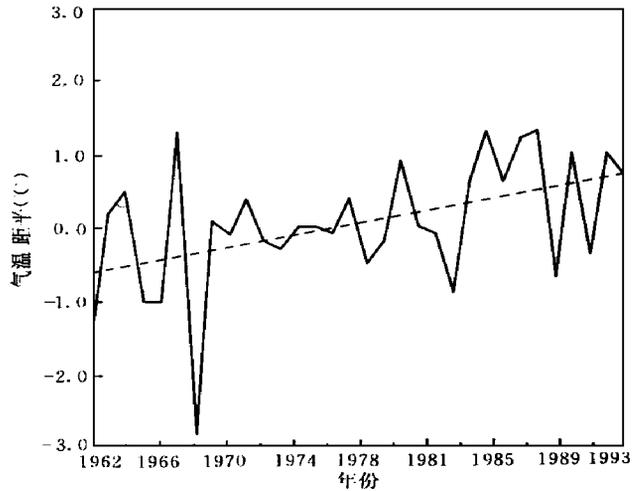


图 2 1 月南极 500 hPa 气温距平变化(—)及线性趋势变化(---)曲线  
Fig. 2 Variation in 500 hPa January temperature anomaly (—) and linear trend curve (---) over Antarctic

表 3 季中月南极气温、臭氧总量和 2 800 MHz 太阳通量显著变化周期长度

Table 3 Periods of the temperature, total ozone over Antarctic and solar flux a

月份	南极气温									太阳通量	臭氧总量
	30	50	100	150	200	300	500	700	850		
1							3*, 8	3			3** , 10*
4	9				3, 5*			9	4		8 3** , 10**
7					4, 7		3, 10*	3, 10**	3*, 10**	9	3** , 9**
10		11									3** , 10**

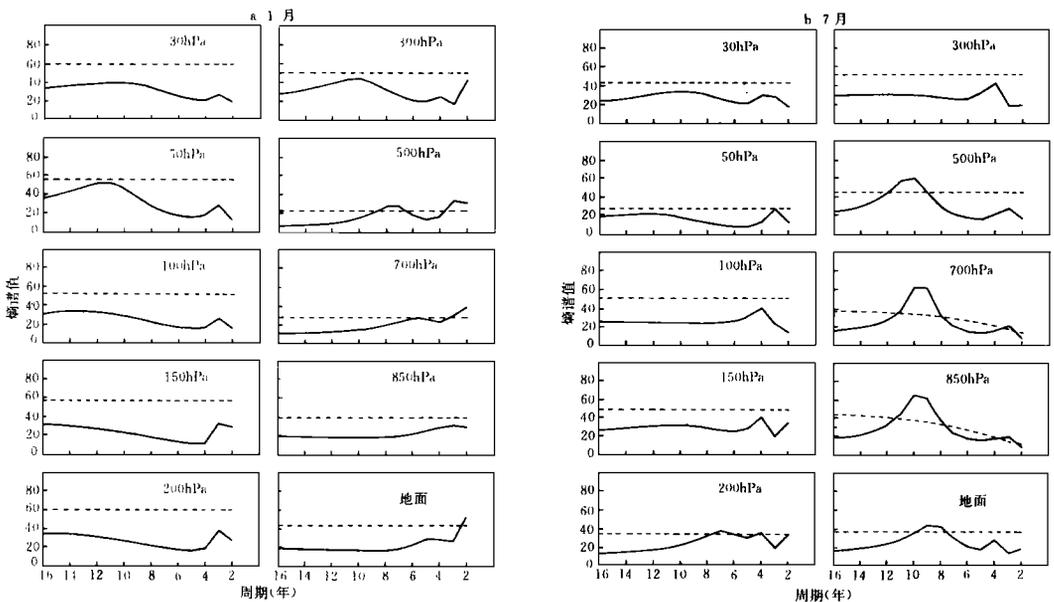


图 3 南极气温变化熵谱

a. 1月; b. 7月

Fig. 3 Entropy spectrum of temperature change in Antarctic

a. January; b. July

### 3 季中月外源变化特征及其与南极气候变化的关系

#### 3.1 2 800 MHz 太阳通量变化及其与对流层气候变化

表 1 的 2 800 MHz 太阳通量变化趋势表明: 各季中月 10 年的变率均呈增强趋势, 以夏季 (1 月) 增强最明显, 达 22.1 单位, 7 月、10 月增长较弱。值得注意的是: 太阳通量增强率大 (小) 的季节与南极对流层 850~500 hPa 气温增暖趋势相对强 (弱) 的季节基本对应。

图 4 为 2 800 MHz 太阳通量、南极臭氧总量异常值在季中月的周期谱。图 4a 结合表 3 可见: 2 800 MHz 太阳通量在各季中月均存在谱峰值为 3 年及 9~10 年的甚低频—年代际变化周期, 与冬季对流层气温变化的显著周期的谱峰一致。夏季对流层气温变化的主要周期 (即 3 年周期) 恰与太阳通量的较短周期长度一致。秋季对流层各高度气温变化的显著周期长度不同, 500 hPa、700 hPa 及地面分别为 9 年、4 年及 8 年周期, 它们与太阳通量显著周期相近。对

季中月太阳黑子相对数作变化趋势和熵谱计算, 得到了与太阳通量变化大致相同的结果。

### 3.2 南极臭氧总量变化与平流层气候变化

由表 1 可见, 各季中月臭氧总量 10 年变率均呈减少趋势, 以春季(10 月)减少最为显著, 达 -14.8%, 其次是夏季, 冬季变化趋势最弱, 仅及 -1.3%。臭氧减少趋势最明显的春季, 也是臭氧分压最大层附近的 100 ~ 50 hPa 气层气温变冷最为显著的季节。这是由于南极由冬季极夜逐渐转变为早春的极日状态后, 辐射、动力学、光化学过程相互作用的结果。近年来, 人类活动引起的早春南极极区臭氧量的显著减少是南极平流层显著变冷的直接原因。

表 3 结合图 4b 可见: 各季中月南极臭氧总量均无显著的周期性变化, 而臭氧最大层附近气温变化则具有与此大体相应的特征。

## 4 结论与讨论

(1) 南极平流层在各季中月的 10 年变率均呈变冷趋势, 10 月 100 hPa 变冷最显著达 -1.8, 最大变冷层正处于气候平均最大臭氧层高度附近, 4 月变冷最弱。南极臭氧总量在各季中月亦呈减少趋势。人类活动引起的 70 年代末以来南极早春臭氧显著减少导致的辐射加热率下降, 是早春极区平流层显著变冷的直接原因。南极平流层气温变化的频谱特征不甚显著, 这可能与臭氧变化无明显的周期性特征有关。

(2) 各季中月南极对流层气温均呈增暖趋势, 1 月最甚, 各高度的 10 年变率均达 0.3 ~ 0.4。10 月增暖最弱。对流层增暖最大的季节也是 2 800 MHz 太阳通量增强最显著的季节。各季中月 2 800 MHz 太阳通量均有显著的 3 年甚低频周期以及 9 ~ 10 年甚低频—年代际周期。而南极 500 ~ 850 hPa 气温变化熵谱仅在冬季与前者一致。

(3) 南极对流层顶附近气候在各季中月均无显著的趋势变化和周期性变化。

南极大气臭氧和平流层气温没有显著的周期性变化可能与人类活动、火山喷发以及大气中的光化学过程有关。

太阳辐射变化与气温变化的联系是一个比较复杂的问题, 而且太阳辐射并非影响南极对流层气候变化的唯一因子。其他诸如极冰、雪盖等对极地气候变化的影响已被许多工作所证实, 它们的共同影响机理也是一个有待进一步研究的课题。

南极平流层下部气候显著变冷、对流层变暖将导致极地大气层下部温度层结的改变, 特别

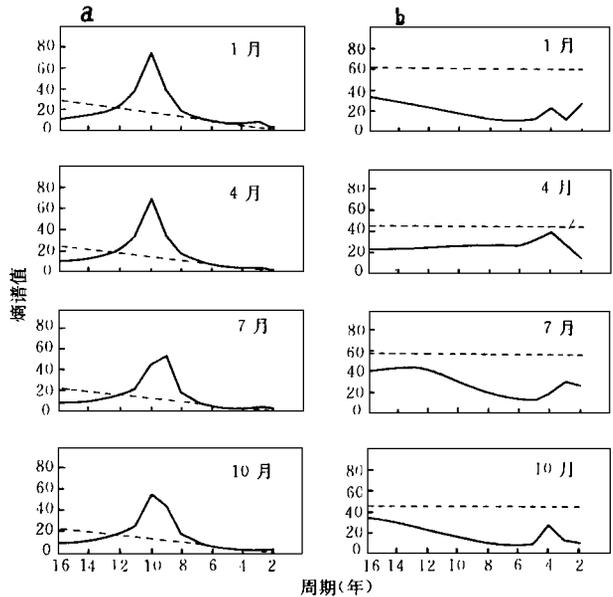


图 4 季中月 2 800 MHz 太阳通量(a)、南极四站臭氧总量距百分率均值(b)最大熵谱变化曲线

Fig. 4 Maximum entropy spectrum of mid-season month 2 800 MHz solar flux (a) and mean of total ozone percentage departures for selected 4 stations (b)

是春季。因此, 极地大气层下部气候和气候变化特征似应作为一个完整的问题加以描述, 进一步探讨它对全球气候变化的影响。

### 参 考 文 献

- 1 Ge Ling, Liang Jiaying, Chen Yiliang. Spatial/temporal features of Antractic climate change. AAS, 1996, 13(3):375 ~ 382
- 2 Angell J K. Annual and seasonal global temperature change in the troposphere and low stratospher, 1960 ~ 1985. Mon Wea Rev, 1986, 114(10): 1922 ~ 1930
- 3 Burg J P. Maximum entropy special analysis. 37th annual international meeting, Oklahoma: 1967

## SEASONAL FEATURES OF ANTARCTIC CLIMATIC CHANGE

Ge Ling Liang Jiaying

(Department of Meteorology, NIM, Nanjing 210044)

**Abstract** Used in this study are monthly mean temperatures at 10 standard levels from surface to 30 hPa, total ozone and 2 800 MHz solar flux over Antarctic 16 stations in 1962 ~ 1993 that are treated by a maximum entropy spectrum method with the aim to uncover the linear trend variation in climate and spectral features at all the levels alongside possible causes discussed for January, April, July and October (as mid-season months). Evidence shows that stratospheric temperature (total ozone) is becoming lower (smaller) for these months; 100 hPa temperature (total ozone) shows maximum variability in October of  $-1.8$  ( $-14.8\%$ ) per 10 years; tropospheric temperature (2 800 MHz solar flux) has a tendency to warm up (enhance) in these months; 500 hPa temperature (solar flux) has the variability of  $0.4$  ( $22.1 \times 2\ 800\ \text{MHz}$ ) per decade in January with the flux displaying salient periods of 3 and 9 ~ 10 years for these months; tropospheric 850 ~ 500 hPa temperature variation entropy spectrum exhibits corresponding features only in July; no appreciable trend and periods occur to tropopause temperature in the study months; pronounced decrease of ozone in spring and growth of solar flux in summer represent major causes of stratospheric cooling and tropospheric warming; Antarctic ice melting related to the summer tropospheric warming may be a major cause of sea level rise on a global basis.

**Keywords** Antarctic, mid-season month, climate change