

近 50 年阿留申低压地区凝结加热的变化

钱 诚^{1,2} 符淙斌¹

1 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘 要 利用 1948~2003 年 NCEP 再分析凝结加热率资料, 研究了北太平洋地区整层凝结加热的季节演变, 着重研究了阿留申低压地区 (30~50°N, 160~210°E) 凝结加热的长期变化, 探讨了它对北太平洋年代际变率可能的反馈。研究表明: 冬季阿留申低压地区上空存在较强的凝结加热, 它与阿留申低压的强度存在显著的正相关关系; 该处凝结加热的垂直分布不均匀可引起大气环流热力适应, 从而可能有利于阿留申低压的加强; 该处凝结加热在 20 世纪 70 年代末发生了一次明显的阶段性转折, 70 年代末以后增强, 它可能对阿留申低压的强度形成反馈, 从而有利于阿留申低压在 70 年代末以后加强。作者进一步讨论了该处凝结加热发生这种阶段性转折的原因和传播机制。

关键词 凝结加热 年代际变化 阿留申低压

文章编号 1006-9585 (2006) 03-0340-07 **中图分类号** P443 **文献标识码** A

Variation of the Condensation Heating in the Region of the Aleutian Low during the Last 50 Years

QIAN Cheng^{1, 2} and FU Cong-Bin¹

1 *Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; START Regional Center for Temperate East Asia, Beijing 100029*

2 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*

Abstract Long-term NCEP-NCAR reanalysis condensation heating data were used to investigate its geographic pattern in the northern Pacific, especially its long-term variation in the region of the Aleutian Low. Feedback effects of the condensation heating in this region on interdecadal variability of the North Pacific ocean-atmosphere system are explored. The results show that there is strong condensation heating in the region of the Aleutian Low only in winter, and there is a significantly positive correlation between this condensation heating and the intensity of the Aleutian Low; The vertical structure of heating in this region will lead to the atmospheric adaptation to diabatic heating, which may be in favor of the intensification of the Aleutian Low; There was an obvious regime shift to stronger condensation heating in this region in the late 1970s, which may be in favor of the intensification of the Aleutian Low in the same period. We further discussed possible cause of the regime shift of condensation heating and its propagation mechanism.

Key words condensation heating, interdecadal variation, the Aleutian Low

1 引言

早在 20 世纪 60 年代, Namias^[1] 就发现北太

平洋海平面气压 (SLP) 存在 10 年以上长周期的变化, 这种变化与 Alaska 冬季气温异常密切相关。70 年代以后, 一系列的研究^[2~4] 表明, 自

收稿日期 2006-04-01 收到, 2006-04-20 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-218 和国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400504

作者简介 钱诚, 男, 1980 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化方面的研究。E-mail: qianch@tea.ac.cn

1976/1977 年冬季起, 贯穿于整个北太平洋对流层系统的显著变化主要表现为冬季阿留申低压的加强东移; 海洋上则表现为赤道中、东太平洋地区大面积增暖, 而中太平洋北部显著变冷。以阿留申低压为主要活动中心的大气年代际振荡被称为北太平洋涛动 (NPO), 它与北大西洋涛动 (NAO) 一起构成年代际气候变动最重要的观测依据。20 世纪 90 年代后, 年代际尺度的气候变率问题引起了国际气候界的高度关注, 近年来越来越多的研究开始关注年代际变率的内部因子, 并提出了不少可能导致海气系统年代际变率的动力学机制。目前关于北太平洋年代际变率的产生机制依然存在争论, 主要有两种看法: 一是以 Trenberth^[2]为代表的认为热带海洋对中纬度海气系统年代际变率的强迫作用是其产生机制的观点^[3,5~7], 二是以 Latif 等^[8,9]为代表的不少学者^[10,11]认为, 年代际振荡的强迫源在北太平洋中纬度海域, 并提出看法: 北太平洋中纬度不稳定海气相互作用产生年代际振荡的机制。

大气环流的年代际变化必然受到外界强迫, 尤其是海洋热状况异常的影响, 但大气内部动力过程也有不可忽视的作用。因此, 年代际气候变化的机理既有海洋等外强迫的重要作用, 也要考虑大气内部的动力过程, 同时还要研究外强迫和内部动力过程的相互作用。

很多研究气候变化的工作都集中分析和人类息息相关的的海表变量的变化, 如温度和降水, 但是要理解它们为什么会产生这种变化, 考虑大气环流和产生这种变化的局地物理过程尤为重要。由于北半球冬季温度的变动是和大气中的定常波紧密联系的^[12], 而定常波又是由地形和非绝热加热强迫的, 北半球非绝热加热的变化会改变定常波和向极热量输送^[13]。

凝结加热是非绝热加热的一种, 在大气运动中处于一种特殊地位, 一方面在某种意义上意味着上升运动、云、降水等一系列的物理现象, 且这些物理现象又是受整个大气环流背景的影响和制约; 另一方面作为一种大气热源, 又反作用于这个大的环流背景, 使其发生变化。以往, 由于受资料所限, 对凝结加热的研究多半是用模式模拟或用短期资料分析。近年来, NCEP/NCAR 再分析资料的发布, 为我们研究凝结加热的长期变

化提供了可能。Liu 等^[14]指出, 虽然 NCEP 再分析资料中的非绝热加热资料并不是严格的观测资料, 而是依赖物理参数化的大气环流模式 (GCM) 产品, 但是 NCEP 再分析加热率资料 and 用 ECMWF 资料、TOGA 资料计算的视热源 (Q_1) 之间的对比研究^[15~17]表明, 他们的垂直加热廓线和整层积分后的加热率水平分布都是相似的。Duan 等^[18]比较了 NCEP 再分析加热率资料 and 另两套实测资料, 结果表明, NCEP 再分析凝结加热资料 and 两套观测资料在变化和振幅上都没有显著差异。而且, NCEP 凝结加热率资料的时间跨度也比较长, 从 1948~2003 年共 56 年。因此, 可以用来研究凝结加热的长期变化。

本文将从北太平洋地区凝结加热的空间分布出发, 研究凝结加热的长期变化特征, 从外强迫和内部动力过程相互作用的角度来探讨它对北太平洋年代际变率可能的反馈。

2 资料

本研究中使用的凝结加热资料是美国 NCEP/NCAR 再分析数据集月平均资料子集的非绝热加热率资料^[19], 资料描述: 时间长度 1948 年 1 月~2003 年 12 月; 该资料为高斯网格资料, 纬向上从 $88.542^{\circ}\text{N}\sim 88.542^{\circ}\text{S}$, 格距 1.875° , 经向上从东经 0° 向东, 格距 1.875° ; 垂直方向为 28 层 σ 坐标; 该资料包括深对流加热率、大尺度凝结加热率、浅对流加热率, 三者相加为总的凝结加热率 (Q), 对 Q 进行垂直积分得到整层凝结加热率 ($\langle Q \rangle$) (单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)。文中用 Xie-Arkin 全球格点降水资料^[20]进行对比分析, 时间长度为 1979~2003 年, 网格距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。月平均 SLP 使用美国 NCEP/NCAR 再分析数据集, 时间长度为 1948~2003 年, 网格距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。月平均海表温度 (SST) 使用美国 NCEP 资料, 时间长度为 1948~2003 年, 网格距为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。阿留申低压指数 (ALPD)^[21]定义为: 冬季北太平洋海平面气压值 $< 100.5 \text{ kPa}$ 的区域平均后所得的序列, 被这个序列的平均值所减得到的序列, 与“距平”的概念相反, 其指数为正值时表示阿留申低压相对较强。该指数由美国 NCAR 逐月格点北半球海平面气压资料计算得到, 时间长度从 1948~2003 年。

3 北太平洋地区整层凝结加热的季节变化

分析北太平洋地区 1948~2003 年 56 年气候平均的整层凝结加热率 (Q) 的季节演变 (图略) 可以看到, 凝结加热基本集中在赤道辐合带 (ITCZ) 中, 最大值超过 $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。它是水汽的主要辐合带, 水汽辐合上升后凝结释放凝结潜热。从冬 (DJF) 到夏 (JJA), 180°E 以西地区的凝结加热大值区向西北方向推进。在夏季, $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的等值线越过 20°N , 到达了副热带西太平洋暖池地区, 这和东亚夏季风爆发后雨带的推进是一致的。从夏到冬, 180°E 以西地区的凝结加热大值区向南撤退到原来的位置; 而 180°E 以东地区的凝结加热大值区则基本终年位于 10°N 附近。值得注意的是, 北太平洋 ($30^\circ\sim 50^\circ\text{N}$, $160^\circ\sim 210^\circ\text{E}$) 区域只在冬季存在 $>150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的较强凝结加热 (图 1a)。用 1979~2003 年气候平均的 Xie-Arkin 全球格点降水资料同样可以发现该区域只在冬季存在 $>4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 的较强降水 (图 1b)。从图 1 中可以看到 Xie-Arkin 的降水和 NCEP/NCAR 的凝结加热率的空间分布基本是一致的。 ($30^\circ\sim 50^\circ\text{N}$, $160^\circ\sim 210^\circ\text{E}$) 是阿留申低压所在的位置, 为简便起见, 本文将该区域称之为“阿留申低压地区”。

4 冬季阿留申低压地区整层凝结加热的长期变化

取 1948~2002 年冬季阿留申低压地区区域平

均的整层凝结加热率, 对其进行距平化处理, 定义为阿留申低压地区冬季凝结加热指数 (condensation heating index, 简称 CHI), 然后对 CHI 进行 11 年滑动平均, 得到 CHI 的时间演变 (图 2)。可以发现, CHI 在 20 世纪 70 年代末发生了一次明显的阶段性转折。具体表现为 1977 年后凝结加热增强, 1976/1977 年为两个稳定态的转折点, 1948~1976 年为凝结加热的负位相期, 1977~2002 年为凝结加热的正位相期, 而且呈现增强趋势。这和北太平洋地区很多其他要素在 1976/1977 年前后发生显著的年代际变化^[2,4]的结果是一致的。

5 凝结加热和阿留申低压的关系

Trenberth^[2]研究发现, 阿留申低压在 1976 年以后加强, 而且这种加强只在冬季存在。我们的上述研究也发现, 阿留申低压地区的凝结加热在 1976 年冬季后出现增强, 而且该处凝结加热只在冬季明显存在。这似乎表明, 该处的凝结加热和阿留申低压的强度存在一定的联系。图 3 是 1948~2003 年阿留申低压地区冬季 CHI 和平均海平面气压 (SLP) 的同期相关。可以看到, CHI 和 ($30^\circ\sim 60^\circ\text{N}$, $150^\circ\sim 220^\circ\text{E}$) 区域的 SLP 存在显著负相关, 这表明 CHI 和阿留申低压强度存在显著的相关关系, 该区域上空的凝结加热强 (弱) 时, 海平面气压低 (高), 也就是阿留申低压强 (弱)。图 4 是阿留申低压地区冬季 CHI 和 ALPI 的时间演变, 可以看到, 两者在年代际时间尺度上的变化是一致的。经过超前滞后相关分析 (图略), 两者的同期相关最

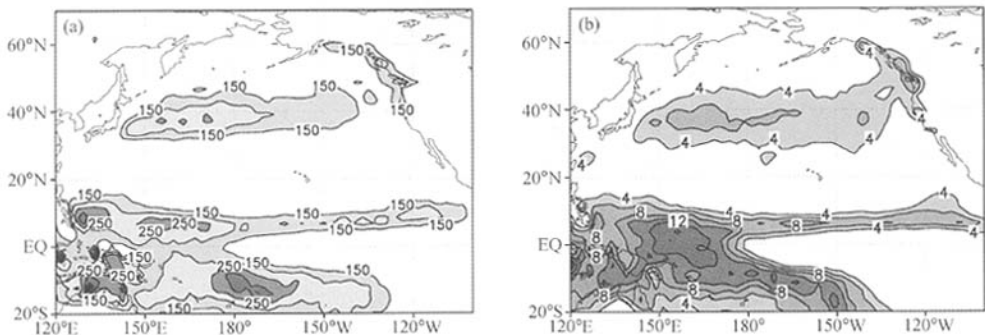


图 1 1980~2003 年平均的冬季 (a) 整层凝结加热率 (单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 和 (b) Xie-Arkin 降水 (单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

Fig. 1 Winter (a) column-integrated condensation heating rate (units: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) and (b) Xie-Arkin precipitation (units: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) both averaged from 1980 to 2003

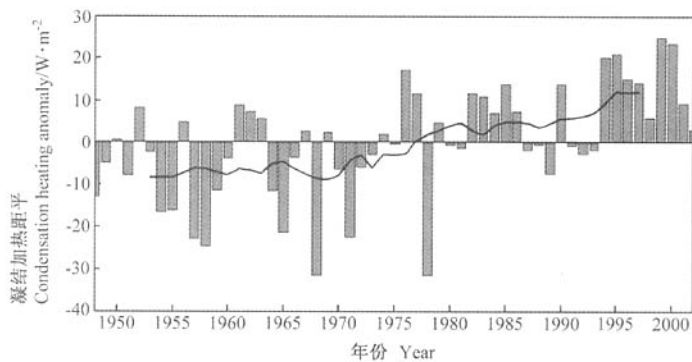


图 2 冬季阿留申低压地区整层凝结加热的时间演变（直方条为距平值，实线为 11 年滑动平均后的值）
Fig. 2 Time series of winter column-integrated condensation heating rate averaged between the region of (30°–50°N, 160°–210°E). Bar indicates anomaly, and solid line indicates values after 11-year running mean

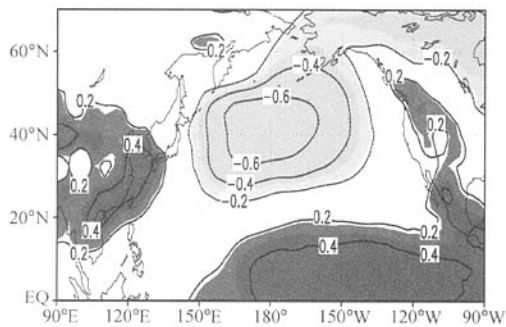


图 3 阿留申低压地区冬季凝结加热指数 (CHI) 和 SLP 的同期相关（阴影部分为超过 95% 显著检验）
Fig. 3 Contemporaneous correlation between SLP and winter condensation heating index (CHI) in the region of Aleutian Low. Shading indicates significant at the 95% level

大，相关系数达到 0.53，明显超过 99% 的显著检验，表明两者为显著正相关关系。

冬季阿留申低压的加强，可使低层水汽辐合加强，进而通过上升凝结释放凝结热，使其上空的凝结加热增强。同时，水汽凝结释放的凝结热又会对阿留申低压的强度形成反馈。Liu 等^[14]研究发现，非绝热加热在垂直方向上分布不均匀会引起大气环流热力适应。分析阿留申低压地区冬季凝结加热的垂直分布（图 5）发现，该区域低空的凝结加热随高度递增，而中部的凝结加热随高度递减。由于凝结加热主要分布在对流层中部，故该区域凝结加热的垂直分布总体是随高度递减的（即 $\partial Q / \partial z < 0$ ）。

根据 Liu 等^[14]的倾斜涡度发展理论，涡度方程中的 βv 项正比于

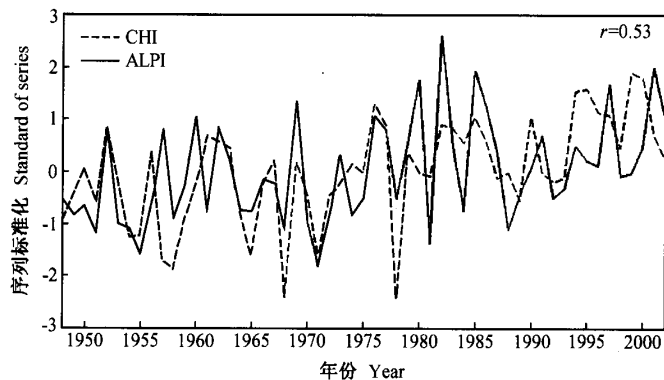


图 4 1948~2002 年阿留申低压地区冬季 CHI 和 ALPI 的时间演变
Fig. 4 Time series of winter CHI in the region of Aleutian Low and ALPI from 1948 to 2002

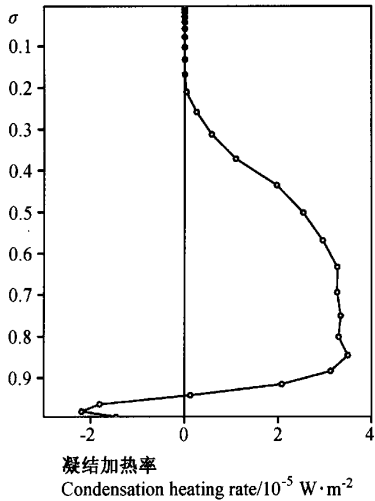


图 5 阿留申低压地区 1948~2002 年平均的冬季凝结加热的垂直分布
Fig. 5 Vertical profile of winter condensation heating in the region of Aleutian Low averaged from 1948 to 2002

$$\theta_z^{-1}(f+\zeta)\frac{\partial Q}{\partial z} \quad (\theta_z \neq 0, \quad \theta_z = \frac{\partial \theta}{\partial z}).$$

其中, θ 为位温, f 为科里奥利参数, ζ 为涡度, Q 为非绝热加热, $\beta = \partial f / \partial y$, v 为经向速度。对于稳定的大气, $\theta_z > 0$, 又因为北半球的 $f > 0$, 故在阿留申低压地区有

$$v \propto Q_z \quad (Q_z = \frac{\partial Q}{\partial z}).$$

由于阿留申低压地区冬季凝结加热的 $Q_z < 0$, 因此, 凝结加热在垂直方向上随高度递减的分布会产生

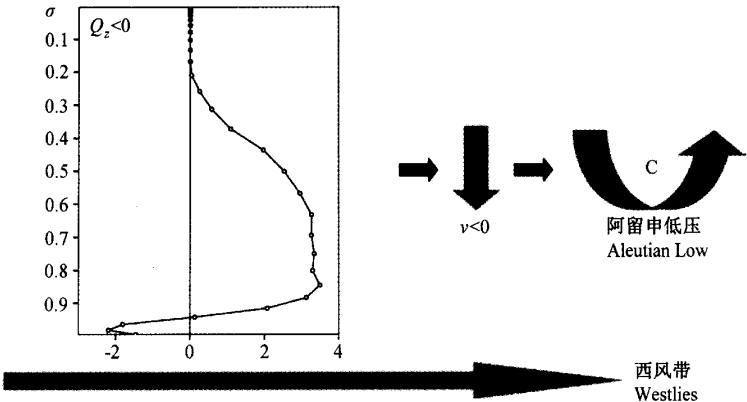


图 6 因阿留申低压地区凝结加热的垂直分布不均匀而有利于阿留申低压加强的示意图
Fig. 6 Schematic diagram indicating the vertical differential heating in the region of the Aleutian Low may be in favor of the intensification of the Aleutian Low

$v < 0$ (北风异常); 又因为在北太平洋中纬度地区冬季盛行西风, 因此, 其北侧的阿留申低压地区因凝结加热垂直分布不均匀而产生的北风异常将产生逆时针旋转, 形成气旋性异常, 这有利于阿留申低压的加强 (图 6)。因此, 阿留申低压地区冬季凝结加热的存在, 和在垂直方向上的不均匀分布, 对阿留申低压的强度有一定的反馈作用, 有利于阿留申低压的加强。而阿留申低压地区冬季凝结加热在 1976 年后的增强也可能有利于阿留申低压的增强。

6 阿留申低压地区冬季凝结加热年代际变化的成因讨论

分析 1948~2002 年冬季 ALPI 和北太平洋地区整层凝结加热的同期相关 (图 7) 发现, 阿留申低压和其上空的凝结加热存在显著的正相关, 和北太平洋中部的凝结加热为显著负相关, 而和赤道中东太平洋的凝结加热为显著正相关, 即从南到北呈现一 Rossby 波列, 类似 Wallace 等^[22]发现的太平洋—北美遥相关型 (PNA)。阿留申低压地区和赤道中东太平洋地区的位相相同, 刚好位于该波列的波峰 (或波谷)。这表明, 阿留申低压的强度可能和其上空的凝结加热以及赤道中东太平洋的凝结加热有一定的联系。分析 1948~2002 年阿留申低压地区的冬季 CHI 和 Niño 3 区冬季海表面温度 (SST) 的时间序列 (图略), 发现它们之间存在显著的正相关关系, 相关系数为 0.35, 超过 99% 的显著检验。这表明, 阿留申低压地区冬季的凝结加热可能和 Niño 3

区冬季 SST 异常 (SSTA) 有一定的联系。两者分别经过 10 年低通滤波后, 正相关系数更是达到了 0.61, 超过 99% 的显著检验, 这表明两者在年代际时间尺度上可能有一定的联系。从 1948~2002 年经过 10 年低通滤波后的 Niño 3 区冬季 SSTA 的时间演变 (图 8) 中, 我们可以清楚地看到, Niño 3 区冬季的 SST 在 20 世纪 70 年代末发生了一次明显的阶段性转折, 1948~1976 年为冷位相期, 1977~2002 年为暖位相期, 即 70 年代末以后 Niño 3 区冬季的 SST 增温。这表明, 阿留申低压地区冬季凝结加热在 70 年代末的阶段性转折可能和赤道中东太平洋年代际尺度的 SSTA 有一定的联系。

Pierce 等^[11]在模拟太平洋赤道和中纬度海温的年代际关系时指出, 这两地间的海温在年代际尺度上存在很好的同期相关, 这种关系是通过大气过程

联系的。就本文目前的分析, 阿留申低压地区冬季凝结加热在 20 世纪 70 年代末发生阶段性转折的原因可能有两个: 其一, 信号可能起源于赤道中东太平洋年代际模态 (ENSO-like) 的 SSTA, 因为海洋过程相对比较缓慢, 年代际变化信号较为显著。赤道中东太平洋 SSTA 的年代际变化信号可能通过海气相互作用传递给大气, 使赤道中东太平洋上空的凝结加热产生变化, 进而通过凝结加热的非绝热加热作用激发 PNA 型波列, 把这种年代际变化的信号向中纬度传播, 使北太平洋阿留申低压地区上空的凝结加热在 70 年代末发生阶段性转折。而阿留申低压地区上空的凝结加热作为大气中的一个热源, 又将反作用于中纬度的大气环流, 使其发生变化, 这可能有 利于阿留申低压的强度在同期发生阶段性转折。其二, 信号可能来自于北太平洋中纬度海温的年代际异常, 经中纬度海气相互作用使阿留申低压在 70 年代末以后加强, 进而导致其上空的凝结加热在同期出现加强, 而凝结加热作为大气中的一个热源, 又将对其他地区的天气气候系统产生一定的影响。无论这种年代际变化的信号是起源于赤道中东太平洋 SST 的年代际异常还是起源于北太平洋中纬度 SST 的年代际异常, 大气过程在北太平洋中低纬海气相互作用中都起着重要作用。

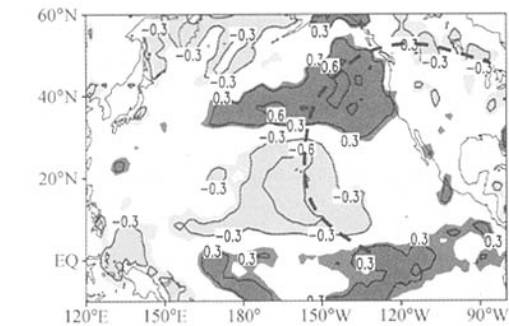


图 7 冬季 ALPI 和凝结加热的同期相关 (阴影部分为超过 95% 显著检验)
Fig. 7 Contemporaneous correlation between winter condensation heating index in the region of Aleutian Low and ALPI. Shading indicates significant at the 95% level

7 结论

本文通过研究北太平洋地区凝结加热的季节演变, 着重研究了冬季阿留申低压地区凝结加热的长期变化特征及垂直结构, 得到以下结论:

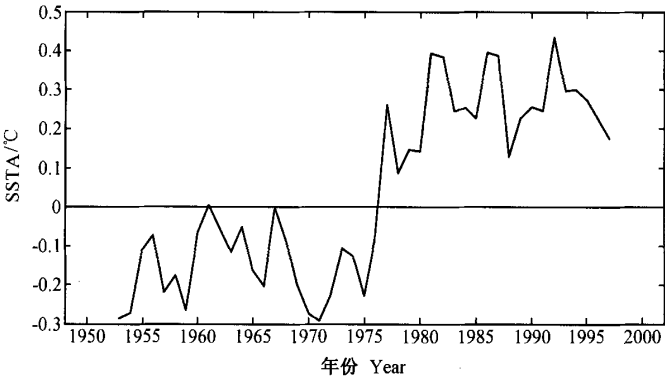


图 8 10 年低通滤波后的 Niño 3 区冬季 SSTA 序列
Fig. 8 Time series of winter SSTA in Niño 3 region after 10-year low-pass

(1) 冬季阿留申低压地区上空存在较强的凝结加热, 而其他季节则没有那么强; 它和阿留申低压的强度存在显著的正相关, 该处凝结加热在垂直方向上分布的不均匀, 可引起大气环流热力适应, 从而可能有利于阿留申低压的加强。

(2) 冬季阿留申低压地区的凝结加热在 20 世纪 70 年代末发生了一次明显的阶段性转折, 70 年代末以后增强; 凝结加热的这种变化可能对阿留申低压的强度形成反馈, 因而有利于阿留申低压在 70 年代末以后加强。

致谢 感谢刘屹岷对本文的有益帮助。

参考文献 (References)

- [1] Namias J. Seasonal interaction between the North Pacific Ocean and atmosphere during the 1960's. *Mon. Wea. Rev.*, 1969, **97** (3): 173~192
- [2] Trenberth K E. Recent observed interdecadal climate changes in the northern hemisphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1990, **71**: 988~993
- [3] Trenberth K E, Hurrell J W. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dyn.*, 1994, **9**: 303~319
- [4] Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. A Pacific interdecadal oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**: 1069~1079
- [5] Graham N E, Barnett T P, Wilde R, et al. On the roles of tropical and midlatitude SSTs in forcing interannual to interdecadal variability in the winter Northern Hemisphere circulation. *J. Climate*, 1994, **7**: 1416~1441
- [6] Lau N C. Interactions between global SST anomalies and the mid-latitude atmospheric circulation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**: 21~33
- [7] Deser C, Phillips A S, Hurrell J W. Pacific interdecadal climate variability: Linkages between the tropics and the North Pacific during boreal winter since 1900. *J. Climate*, 2004, **17**: 3109~3124
- [8] Latif M, Barnett T P. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America. *Science*, 1994, **266**: 634~637
- [9] Latif M, Barnett T P. Decadal climate variability over the North Pacific and North America: Dynamics and predictability. *J. Climate*, 1996, **9**: 2407~2423
- [10] Latif M. Dynamics of interdecadal variability in coupled ocean-atmosphere models. *J. Climate*, 1998, **11**: 602~624
- [11] Pierce D W, Barnett T P, Latif M. Connections between the Pacific Ocean tropics and midlatitudes on decadal timescales. *J. Climate*, 2000, **13**: 1173~1194
- [12] Vanloon H, Williams J. The connection between trends of mean temperature and circulation at the surface: Part IV. Comparison of surface changes in the Northern Hemisphere with the upper air and with the Antarctic in winter. *Mon. Wea. Rev.*, 1977, **105**: 636~647
- [13] Nigam S, Held I M, Lyons S W. Linear simulation of the stationary eddies in a GCM. Part II: The "mountain" model. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 1433~1452
- [14] Liu Y M, Wu G X, Ren R C. Relationship between the subtropical anticyclone and diabatic heating. *J. Climate*, 2004, **17**: 682~698
- [15] Newman M, Sardeshmukh P D, Bergman J W. An assessment of the NCEP, NASA, and ECMWF reanalyses over the tropical west Pacific warm pool. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2000, **81**: 41~48
- [16] Rodwell M R, Hoskins B J. Subtropical anticyclones and monsoon. *J. Climate*, 2001, **14**: 3192~3211
- [17] Lin X, Jonson R H. Heating, moistening, and rainfall over the western Pacific warm pool during TOGA COARE. *J. Atmos. Sci.*, 1996, **53**: 3367~3383
- [18] Duan A M, Wu G X. Role of the Tibetan Plateau thermal forcing in the summer climate patterns over subtropical Asia. *Climate Dyn.*, 2005, **24**: 793~807
- [19] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~471
- [20] Xie P, Arkin P A. Global Precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**: 2539~2558
- [21] Beamish R J, Neville C E, Cass A J. Production of Fraser River sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to decadal-scale changes in the climate and the ocean. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, **54**: 543~554
- [22] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 784~812