

# 华北地区夏季高温闷热天气特征的分析

卫捷 孙建华

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

**摘要** 依照日最高温度( $T_{\max}$ )超过 35 为高温天气、最低温度( $T_{\min}$ )超过 25 为闷热天气的定义, 首先, 讨论 20 世纪 50 年代以后华北地区夏季高温和闷热天气的变化特点及其大气环流的统计特征, 并将高温、闷热天气分为高温、高温并闷热以及闷热这 3 类过程。之后, 挑选 1999 和 2002 年夏季发生的 3 类过程进行个例分析。60 年代, 夏季亚洲中高纬 500 hPa 高度场在乌拉尔山、贝加尔湖及鄂霍茨克海地区分别出现长波槽、脊及槽的环流占优势, 华北地区易受大陆高压脊的控制, 出现了高温但不闷热天气的一个高峰。90 年代, 夏季亚洲中高纬地区, 再次出现类似 60 年代的环流, 而且, 盛夏西太平洋副热带高压的影响可以向北扩展到华北东部地区。华北地区受大陆高压脊、西太平洋副高或两者共同影响, 出现高温闷热天气并重的峰值时段。华北地区夏季出现的 3 类高温天气过程, 亚洲中高纬度的大气环流在空间分布、垂直结构以及湿度和大气稳定度等方面存在明显差异。最后, 利用反映温度、湿度及风速大小等气象要素对人体影响的体感温度, 分析了这些要素对高温闷热天气的综合影响。

**关键词** 高温闷热 大气环流 大陆高压 副热带高压

**文章编号** 1006-9585 (2007) 03-0453-11 **中图分类号** P434 **文献标识码** A

## The Analysis of Summer Heat Wave and Sultry Weather in North China

WEI Jie and SUN Jian-Hua

*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

**Abstract** This work studies the heat wave, defined as the daily maximum temperature  $T_{\max}$  35, and the sultry weather, defined as the daily minimum temperature  $T_{\min}$  25 in summer over North China. Their variation during the past several decades and atmospheric circulation characteristics are discussed. Three cases of heat wave and sultry weather, occurred in June and July 1999 as well as late July 2002, are analyzed for their circulation and weather systems. In the 1960s, during summer when there was circulation over Asian mid-high latitude on 500 hPa, a high pressure ridge controlled most part of northern China, while a low pressure trough developed over Ural Mountain and Okhotsk Sea, the high pressure ridge leads to heat wave in northern China. In the 1990s, during summer the combined influence of the high pressure ridge similar to the circulation in the 1960s and the western Pacific subtropical high lead to both heat wave and sultry weather in northern China. The circulation and weather systems of the three cases differ in terms of the spacial distribution, vertical structure as well as the characteristics of humidity and stability. This work uses the apparent temperature (AT) to discuss the case of sultry weather.

**Key words** heat wave and sultry weather, atmospheric circulation, continental high, subtropical high

## 1 引言

我国定义日最高温度 ( $T_{\max}$ ) 超过 35 为高

温天气、日最低温度 ( $T_{\min}$ ) 超过 25 为闷热天气<sup>[1,2]</sup>。高温闷热天气是一种灾害性天气, 可造成电力负荷持续升高、供水紧张, 对工农业生产

收稿日期 2007-03-06 收到, 2007-04-10 收到修定稿

资助项目 国家科技部科技奥运项目 2001BA904B09 和中国科学院奥运科技项目 KACXI-02

作者简介 卫捷, 女, 1966 年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事气候变化与预测方面的研究。E-mail: wjje@mail.iap.ac.cn

有很大影响。高温闷热会使人体不适,影响生理、心理健康,引发疾病甚至导致死亡。

在华北,特别是华北东部地区每年夏季都会出现高温闷热天气,对华北地区高温闷热天气的研究以某个地区的高温天气统计及其大气环流分析居多<sup>[2~4]</sup>。张尚印等<sup>[1]</sup>指出北京、石家庄和济南夏季高温日数在 20 世纪 60~70 年代初偏多;70~90 年代初偏少;90 年代后期高温日数显著偏多。他们认为在 90 年代后期,夏季西太平洋副热带高压脊线位置偏北,副高控制华北地区,造成了华北地区高温日数和高温过程偏多。谢庄等<sup>[4]</sup>利用北京 1940~1992 年 7 月的逐日最低和最高气温资料,发现 40 年代以来夏季最高气温呈下降趋势,而最低气温则缓慢增加。王迎春等<sup>[2]</sup>统计分析了北京地区夏季高温闷热天气的季节内分布特征,指出高温天气主要集中在 6 月下旬和 7 月,而闷热天气约 3/4 以上集中在 7 月中旬至 8 月上旬。谢庄等<sup>[5]</sup>研究了 1999 年夏季华北和北京持续性高温酷暑天气的环流特征,孙建华等<sup>[6]</sup>对 1999 年 6、7 月华北的两段高温过程进行了模拟研究。郑祚芳等<sup>[7]</sup>探讨了河套高压的形成机理及其与北京高温天气的联系,钱婷婷等<sup>[8]</sup>也指出河套高压所伴随的晴空区辐射增温和绝热增温有利于北京持续性高温天气的形成。华北其他地区夏季高温及闷热天气的分析得出的主要结论基本上与北京一致<sup>[9~11]</sup>。

近 50 年华北地区夏季高温总日数的变化呈双峰型<sup>[1]</sup>,而最低气温则呈缓慢增加的特点<sup>[4]</sup>,因此,需要进一步综合分析近几十年高温和闷热总日数的变化,研究形成高温和闷热天气不同变化特点的大气环流差异。华北地区高温闷热天气的主要成因是受大陆高空暖高压脊或西太平洋副热

带高压的控制<sup>[1,2,10]</sup>,受不同性质的高压脊控制,产生高温天气的特征也会不同,有必要剖析这两类高压系统对华北地区夏季高温影响的特点。此外,由于高温闷热天气不仅与气温有关,还与湿度与风力大小有关,需要在高温闷热天气分析中综合考虑它们的影响。

本文首先利用华北地区北京、天津、石家庄、太原、济南和青岛 1961~2004 年夏季逐日最高和最低气温资料,分析夏季高温与闷热日数的变化特点及其大气环流特征,讨论高温和闷热天气出现年代际变化不同步的可能原因。然后,以北京高温、闷热天气过程为主,对近几十年的高温闷热天气进行分型,并对每种天气型选择典型个例进行了具体分析。

## 2 华北地区高温闷热天气的年代际与年际变化

### 2.1 华北地区夏季平均气温的变化

根据国家“九五”项目“我国短期气候预测系统的研究”在华北地区均匀选取 17 个代表站(承德、北京、天津、石家庄、德州、邢台、安阳、烟台、青岛、潍坊、济南、临沂、菏泽、郑州、长治、太原、临汾),将各站夏季气温距平进行算术平均作为华北区域平均的气温距平(图 1)。对于华北地区,20 世纪 50 年代夏季平均气温以基本正常或偏低的年份居多,而 60 年代气温偏高的年份较多。70 年代气温又以偏低年份居多,到了 80 年代至 90 年代初期气温在正常范围内波动。自 90 年代中期以来气温表现出上升的趋势,特别

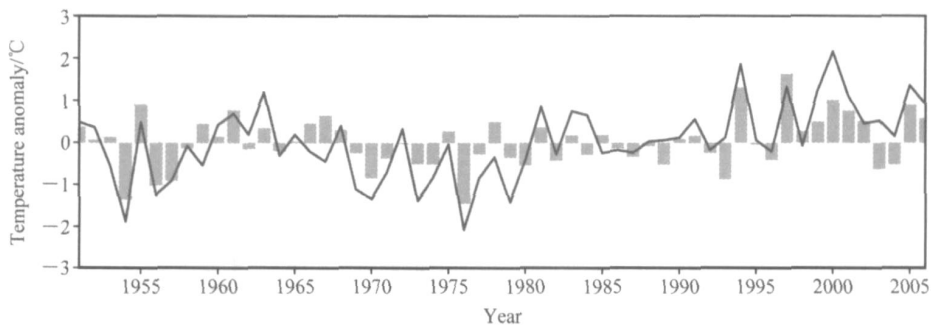


图 1 1951~2006 年夏季气温距平(直方:华北 17 站平均,曲线:北京)

Fig. 1 The anomalies of temperature in the summer from 1951—2006, the mean anomalies of temperature of 17 stations in North China (bar) and Beijing (curve)

是 1997~2002 年夏季连续 6 年气温偏高。北京地区夏季平均气温的变化与华北地区基本一致，只是单站气温的变率更大而已，而且，从 90 年代中期开始气温显著偏高的特点更明显，1999~2006 年夏季连续 8 年气温偏高。

### 2.2 华北地区夏季最高和最低气温的变化

按照  $T_{max}$  超过 35 为高温天气、 $T_{min}$  超过 25

为闷热天气的定义，对北京、天津、石家庄、济南、青岛和太原 1960~2004 年夏季高温与闷热日数进行统计。结果显示：地处太行山以东、燕山以南的华北东部地区，在 60~70 年代初高温发生的频率较高，另一个高峰出现在 90 年代中后期（图 2）。北京高温天气发生频率最高的年份出现在 1965、1999 和 2000 年，为 20 天以上（图 2a），

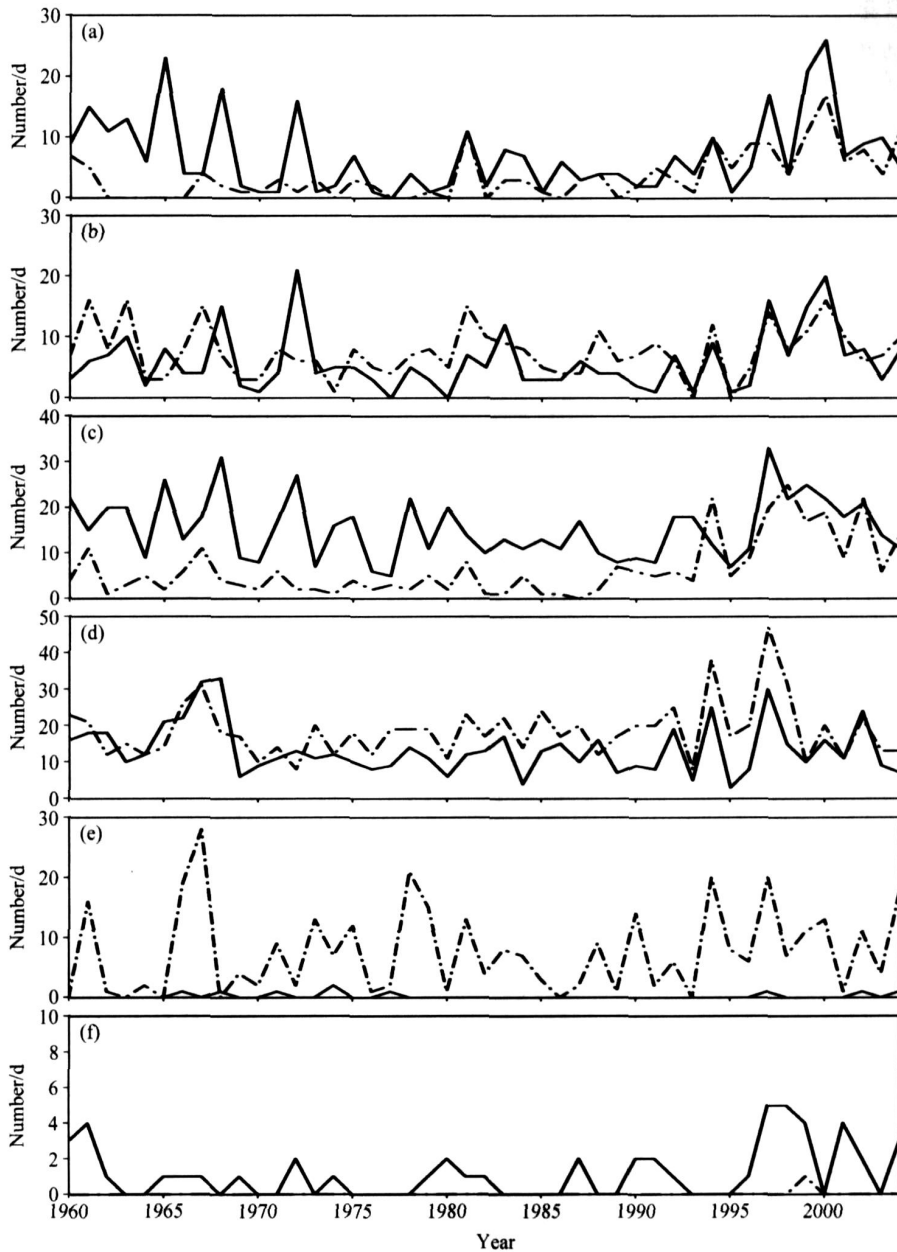


图 2 1960~2004 年夏季（6~8 月）高温天气日数（实线）和闷热天气日数（虚线）：(a) 北京；(b) 天津；(c) 石家庄；(d) 济南；(e) 青岛；(f) 太原

Fig. 2 The days of heat wave (solid line) and sultry weather (dashed line) in the summer from 1960—2004: (a) Beijing; (b) Tianjin; (c) Shijiazhuang; (d) Jinan; (e) Qingdao; (f) Taiyuan

天津的高温日数与北京基本相当 (图 2b)。石家庄与济南的高温日数一般比北京、天津多 5~10 天 (图 2c、d), 虽然高温日数的高峰时段与北京、天津基本一致, 但高温天气发生频率最高的年份有所不同, 其中 1968 和 1997 年的峰值更明显 (30 天左右)。地处黄海之滨的青岛夏季最高温度很少能达到高温标准。对闷热天气日数的统计表现出与高温日数变化不同的特点: 北京只有 90 年代中后期一个高峰。石家庄和济南的闷热天气都呈现双峰变化的特征, 而济南的闷热日数一般比石家庄多 5~10 天, 双峰的特点也更显著。地处渤海之滨的天津闷热日数在 60 年代比石家庄多 10 天左右, 而 90 年代则少 5 天左右, 年际变化突出。青岛夏季闷热天气较多, 年际变化也比较显著, 闷热天气发生频率最高的年份依次出现在 1967、1978 和 1994 年。位于华北中西部的太原, 夏季高温日数在多数年份少于 2 天, 90 年代中后期达到 5 天左右的峰值, 且鲜有闷热天气 (图 2f)。

综上所述, 华北地区夏季高温闷热天气的分析主要针对东部地区。此外, 高温和闷热天气在华北中北部 80 年代前很少同时发生, 80 年代以后高温和闷热天气同时发生的概率显著增加; 在华北南部高温和闷热天气同时发生的概率较大。夏季分月统计分析表明: 华北地区高温一般出现在 6、7 月, 6、7 月的高温日数各占夏季总高温日数的 50% 左右 8 月很少出现高温天气。与高温天气不同, 华北的闷热天气主要集中在 7、8 月, 6 月很少出现 (图略)。

### 2.3 1960~2004 年夏季北京的高温与闷热天气过程

由图 1 和 2 可以看出, 不论是夏季平均气温、还是高温和闷热日数的变化, 北京与华北地区基本一致。北京的高温 and 闷热天气过程具有一定代表性。

表 1 中列出了北京 1960~2004 年夏季持续 3 天以上的高温天气过程 (其中持续 3、4 和 5 天的过程分别为 9、8 和 7 次)。持续 5 天以上的过程除 1965 年的一次外, 其他都出现在 1997 年以后。90 年代北京共发生了 4 次持续时间超过 5 天的高温天气过程: 1997 年 7 月 8~15 日, 1999 年 6 月 24 日~7 月 2 日, 1999 年 7 月 23~29 日, 2002 年

表 1 1960~2004 年北京持续 3 天以上的高温天气

Table 1 The durative heat wave (the days of  $T_{\max} \geq 35$  are more than 3 days) in the summer from 1960 to 2004 in Beijing

起始日期	持续天数/d	最高温度变化/	最低温度变化/	类型
1963-06-11	3	37.9~36.2	16.8~22.8	1
1963-06-22	3	39.0~35.2	17.8~24.7	1
1965-06-21	5	38.3~35.1	23.0~18.8	1
1965-07-29	3	37.2~36.3	24.6~22.2	1
1968-06-23	3	36.2~35.9	23.6~20.2	1
1968-07-02	4	38.7~35.0	21.6~20.4	1
1968-07-09	3	36.7~36.0	21.7~20.2	1
1972-07-11	4	36.4~35.0	22.8~17.9	1
1981-07-20	4	35.1~35.0	27.5~25.6	3
1983-07-21	3	36.8~36.6	25.2~23.2	3
1988-06-12	3	38.1~37.0	22.8~18.9	1
1994-06-15	4	36.1~35.0	24.0~22.8	1
1997-07-08	8	38.2~35.1	26.9~20.6	3
1999-06-24	9	39.3~35.2	24.5~17.3	1
1999-07-16	3	36.3~35.3	24.4~23.0	1
1999-07-23	7	41.9~35.4	26.7~24.9	3
2000-06-12	4	39.1~35.3	22.7~17.3	1
2000-06-18	4	37.3~35.3	23.8~21.0	1
2000-07-11	4	38.8~36.3	25.7~24.0	3
2000-07-22	5	37.8~35.6	26.5~24.1	3
2000-07-28	4	37.4~35.6	25.2~22.6	1
2001-06-02	5	36.6~35.0	22.6~17.9	1
2002-07-12	6	41.1~35.3	28.2~21.7	3
2003-08-03	3	36.5~35.5	24.3~23.3	1

7 月 12~17 日, 其中以 1999 年 6 月 24 日~7 月 2 日的时间最长, 为 9 天。在表 1 中的高温过程中有两次也是持续的闷热天气, 1981 年 7 月 20~23 日和 1999 年 7 月 23~29 日。1981 年的这次过程虽然最低温度较高, 但最高温度只有 35, 而 1999 年的过程最高温度也很高, 因此, 1999 年 7 月 23~29 日的过程是 40 年来北京最强的高温闷热天气过程。对夏季北京的高温天气过程进行大气环流特征与形成机理分析时, 我们主要分析 1999 年的这两次过程。

表 2 中列出了北京 1960~2004 年夏季持续 3 天以上闷热天气的过程。持续闷热天气比持续高温天气少的多, 5 天以上的过程只有 5 次, 除 1981 年的一次外, 其他几次在 90 年代后期。60~70 年代基本无持续 3 天以上的闷热天气。

表 2 1960~2004 年北京持续 3 天以上的闷热天气  
Table 2 The durative sultry weather (the days of  $T_{min} \geq 25$  are more than 3 days) in the summer from 1960 to 2004 in Beijing

起始日期	持续天数/ d	最低温度变化/ 最低温度变化/	最高温度变化/ 最高温度变化/	类型
1981-07-18	6	27.5~25.0	35.1~33.3	3
1981-07-29	3	26.7~25.9	34.7~33.0	2
1991-08-20	4	25.2~24.9	35.7~33.3	3
1996-08-17	3	26.3~25.0	33.2~32.4	2
1997-07-12	3	26.9~25.1	38.2~35.7	3
1997-07-21	5	26.6~24.5	35.2~31.2	3
1999-07-23	9	26.7~24.9	41.9~33.7	3
2000-07-07	7	26.5~24.7	38.8~32.8	3
2000-07-17	8	28.1~24.6	37.8~30.0	3
2002-07-30	6	28.1~22.3	34.8~32.6	2

根据 1960~2004 年北京夏季高温天气过程普查分析, 以北京地区温度的变化为代表, 将华北地区的高温天气分为 3 种类型:

- (1) 高温型: 最高气温  $\geq 35$ , 最低气温一般  $\geq 25$ , 1980 年以前多发, 6~7 月中旬多发;
- (2) 闷热型: 最低气温  $\geq 25$ , 最高气温高一般  $\geq 35$ , 1980 年以后多发, 8 月多发;
- (3) 高温闷热混合型: 由高温型演变为闷热型, 或由闷热型转化为高温型, 1980 年以后多发, 7 月多发。

1960~2004 年北京持续 3 天以上的 24 次高温天气过程中, 高温型占 17 次, 混合型都发生在 1980 年以后, 有 7 次。持续闷热天气除 1981 年的一次外, 其他几次在 90 年代后期。在闷热天气过程中 (10 次), 也以混合型居多 (7 次), 单纯的闷热型仅有 3 次。

### 3 华北地区高温天气的环流特征

20 世纪 60 与 90 年代持续 3 天的高温天气过程较多, 而持续 3 天以上的闷热天气, 除 1981 年的一次外, 其他几次均出现在 90 年代后期。潘婕等<sup>[12,13]</sup>将夏季欧亚中高纬 500 hPa 高度场持续流型划分为 W、E、C 型, 其中 C 型的特点是乌拉尔山、贝加尔湖及鄂霍茨克海地区分别为长波槽、脊、槽。他们指出在 60 年代, C 型过程出现的频数最高, 90 年代为次高。这种夏季欧亚中高纬流

型的年代际变化是形成华北地区高温与闷热天气变化特点的主要原因。60 年代, 华北地区易受大陆高压脊的控制。当大陆暖高压发展强盛时, 在其上空出现空气强烈下沉运动, 空气块下沉 (压缩) 引起绝热增温; 另外, 空气的绝热增温会造成静力稳定度加大抑制云层发展, 而高压区的低空辐散会抑制水汽通量辐合和锋生过程, 使得增温更为显著。到了夜间, 天空无云的状况使得辐射降温很显著, 造成昼夜温差很大。因而, 华北出现高温但不闷热的天气。90 年代, 夏季亚洲中高纬度地区出现类似于 60 年代的环流, 华北地区常常受大陆高压脊的控制; 另一方面, 1979 年以来的卫星观测显示南北两半球纬度在  $14^{\circ} \sim 45^{\circ}$  之间对流层明显变暖<sup>[14]</sup>, 与 60 年代相比, 90 年代西太平洋副热带高压的影响明显向北、向西扩展 (图略)。盛夏西太平洋副高从海上伸向我国大陆, 其北界 (588 dagpm 线) 可以到达  $35^{\circ}$  以北地区, 在这种情况下, 地处副高西北边缘的华北东部地区, 虽受下沉气流控制产生增温, 但因空气湿度大、云较多, 不利于气温在日间升温及夜间降温, 最高气温虽不是特别高, 但最低气温多高于  $25$ 。

由此可见, 90 年代以来, 夏季华北地区经常受到大陆高空暖高压脊、西太平洋副热带高压的共同影响, 容易产生既高温又闷热的灾害性天气。鉴于 NCEP/NCAR 再分析资料可靠性分析<sup>[15]</sup>, 华北地区高温天气的环流分析采用 NCEP/NCAR 1981~2004 年逐日和每 6 h 一次的再分析资料。图 3 是利用华北 6 站平均的 1981~2004 年夏季高温和闷热日数, 回归分析得到的同期 500 hPa 高度距平场。高温天气的环流主要特征是: 在欧亚中高纬地区, 存在显著的正负相间的相关波列, 欧洲中北部为正距平区, 乌拉尔山地区与鄂霍茨克海西南地区为负距平区, 贝加尔湖以南地区为正距平区, 其中心位于 ( $40^{\circ}N, 110^{\circ}E$ ) 以北地区;  $40^{\circ}N$  以南的西太平洋上, 距平场呈现纬向正负相间的分布, 表示西太平洋副高可能位置偏东 (图 3a)。与闷热天气对应的 500 hPa 高度距平场上, 欧亚大陆  $40^{\circ}N$  以北地区的相关波列并不清楚, 中心位于 ( $40^{\circ}N, 120^{\circ}E$ ) 附近的正距平区范围更大、强度更强; 而  $40^{\circ}N$  以南的西太平洋上, 距平场出现北正南负的特点, 表示西太平洋副高呈带状, 位置偏北偏西 (图 3b)。华北地区

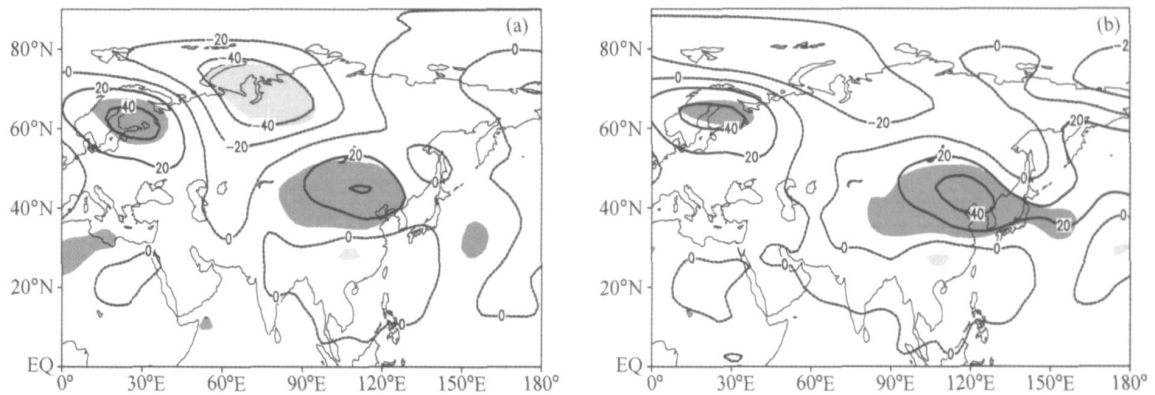


图3 由1981~2004年夏季华北地区6站平均的(a)高温日数和(b)闷热天气日数回归得到的500 hPa高度距平场(单位: dagpm, 深、浅阴影区分别表示正、负异常的信度大于90%区域)

Fig. 3 The distributions of the 500 hPa geopotential height anomalies, regressed by the mean days of (a) heat wave and (b) sultry weather for 6 stations in the summer from 1981 to 2004 (units: dagpm, light and heavy shading indicates negative and positive anomalies significantly greater than the 90% confidence level, respectively)

出现高温闷热混合型过程的环流, 兼有高温和闷热环流的特点。由于有从高温型演变为闷热型的, 也有由闷热型转化为高温型的等等情况, 过程之间的差异明显。

#### 4 典型高温和闷热天气过程的个例分析

以上对高温和闷热天气的大气环流进行了统计分析, 下面选取1999和2002年发生的3类典型高温闷热天气过程进行个例分析。

(1) 1999年6月24日~7月2日, 北京高温过程持续9天, 7月2日最高气温为39.3, 此

次高温天气过程最低气温皆在闷热天气标准以下(最高为6月27日的24.5), 属于高温型过程。

6月24日~7月2日的平均场显示, 500 hPa(图略)的特点是在中高纬度(约60°N)乌拉尔山脉以西的欧洲大陆, 为一较强的脊所控制, 而俄罗斯亚洲沿岸也为一脊, 其间西伯利亚为一宽槽。在中纬度(约40~50°N)里海至巴尔喀什湖为一槽, 而在朝鲜半岛至日本还为另一槽, 在上述二槽之间我国北方地区及蒙古为高压脊所控制。表面看, 此高压脊甚至向东北远伸至外兴安岭, 其实后者是西风带的脊, 与前面讲的高压及高压脊是两个系统。这在700 hPa(图4a)清楚, 700 hPa与500 hPa的情况大体相似, 但值得注意的

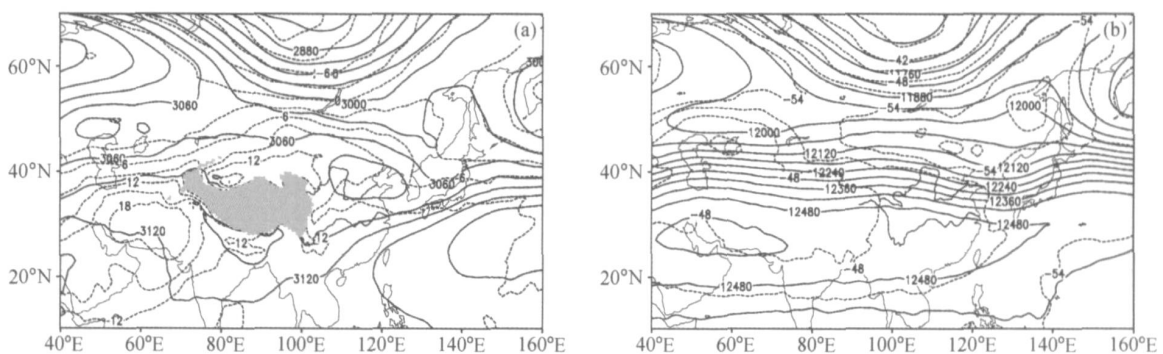


图4 1999年6月24日~7月2日的平均环流:(a)700 hPa平均高度场(实线, 单位: gpm)和温度场(虚线, 单位: , 阴影为地形高度大于3000 m); (b)200 hPa平均高度场和温度场

Fig. 4 The mean circulation of 24 Jun—2 Jul 1999: (a) The geopotential height (solid line, units: gpm) and temperature on 700 hPa (dashed line, units: , shaded represents topography higher than 3000 m); (b) the geopotential height and temperature on 200 hPa

是，在 700 hPa 上，渤海至我国华北地区为一大陆高压所控制，此大陆高压位于日本海槽的槽后。此槽将大陆高压与外兴安岭的西风带高压脊明显地分隔开，也把大陆高压与西太平洋副高分隔开，它们是 3 个系统，正是这一大陆高压与华北及北京的高温天气有联系。高层（200 hPa）高纬度地区为一低槽，30~50°N 地区为平直西风气流，表明华北的高压位于中低层（图 4b）。

这次过程中低层的湿度很低（图 5），特别是中层，相对湿度为 20%~30%，而低层为 40%~60%，仅在 6 月 28 日达到了 70% 以上。7 月 3 日以后，高温天气结束，中低层的湿度迅速增大到 80% 以上。在高温持续过程中，低层为偏南风（南风或西南风），中层为偏东风，高层为西风。6 月 25 日的探空观测显示，早上 8 时（北京时，下同）只有部分出现逆温层，但很明显，早上出现逆温层，日最高气温一般较高，整层较干，晚上逆温层消失，20 时地面气温为 35（图略）。

(2) 1999 年 7 月 23~29 日，北京高温持续 7 天，这段时期也达到闷热天气标准，是近 50 年来北京地区高温闷热并重，而且维持时间较长的一次过程。其中，7 月 24 日最高气温达 42.2，达到了 50 年来北京最高气温极值，同时，最低气温也是最高（26.7）。

7 月 23~29 日高温天气的形势为：500 hPa 上（图略）在中高纬度（约 60°N）为两槽一脊型，欧洲为一宽槽，而俄罗斯亚洲沿岸也为一槽区，在二槽之间西伯利亚为一脊区。而在中纬度

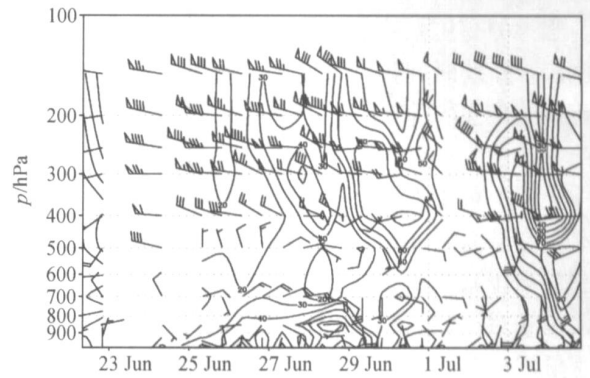


图 5 1999 年 6 月 22 日~7 月 4 日的北京探空风场（单位： $m \cdot s^{-1}$ ）和相对湿度（%）分布  
Fig. 5 The distribution of horizontal wind (units:  $m \cdot s^{-1}$ ) and relative humidity (%) from 22 Jun to 4 Jul 1999

地区（约 40~50°N），乌拉尔地区为一脊，但是比 6 月 24 日~7 月 2 日个例的欧洲脊要弱，未达到阻塞的程度，而在其东边，我国北方地区与蒙古一带有明显的脊区。在 500 hPa 上，我国北方甚至有 5 880 gpm 等高线围成的闭合高压中心，显然它与其北的西风带脊不是一个系统，而是属于大陆热高压（这从 700 hPa 更能清楚看出）。在此高压东侧，朝鲜半岛处为一槽，槽前为西太平洋副热带高压。所以，大陆高压与西太平洋副高，很清楚为两个系统。700 hPa 的情况（图 6a）与 500 hPa 相近，值得注意的是也有一个闭合的大陆高压在中蒙边境，中心达到 3 140 gpm，不过比个例一的位置更偏西些，强度更大些。高层强大的高压脊控制我国北方地区（图 6b），从高压的强

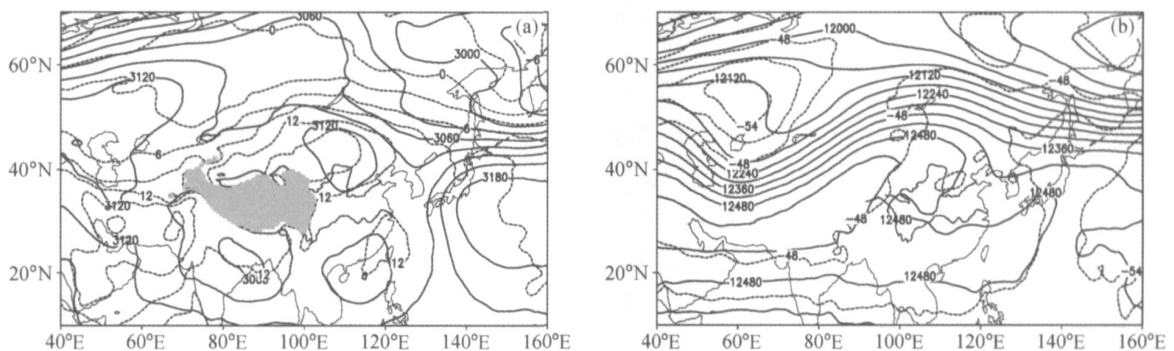


图 6 1999 年 7 月 23~29 日的平均环流：(a) 700 hPa 平均高度场（实线，单位：gpm）和温度场（虚线，单位：℃，阴影为地形高度大于 3 000 m），(b) 200 hPa 平均高度场和温度场

Fig. 6 The mean circulation of 23~29 Jul 1999: (a) The geopotential height (solid line, units: gpm) and temperature on 700 hPa (dashed line, units:  $^{\circ}C$ , dark shaded represents topography higher than 3 000 m); (b) the geopotential height and temperature on 200 hPa

度、控制范围和伸展高度来说, 该个例是最强的。与强大的高压系统相对应, 此次高温天气过程范围广, 持续时间长, 强度大, 是近年来华北地区出现的最强的过程。

与前次过程不同, 这次过程探空观测对流层中上层为东北风 (图 7), 而前一次过程中层为东北, 高层为西风 (图 5)。这说明造成这次高温过程的高压系统更深厚。此外, 这次过程中低层的湿度相对也要高。7 月 24 日的探空观测显示, 早上低层逆温层为 2, 925 hPa 的温度达到了 32 (图略), 按照干绝热递减率, 只要逆温层消失, 地面温度就可以达到 37 左右, 事实上 20 时地面气温接近 40。

(3) 2002 年 7 月 31 日~8 月 4 日华北东部地区的高湿闷热天气 (俗称“桑拿天气”), 7 月 30 日~8 月 4 日郑州最高气温为 36.0, 14 时的平均相对湿度为 61%。以温湿度组合的闷热指数衡量, 石家庄出现了近 50 年最强的持续闷热高温天气。

在高温、高湿且风力不大的气象条件下, 人体从原来的向大气辐射热量散热反过来变成大气向人体辐射热量, 感到非常难受。高温闷热天气的定义不尽相同, 本文所用的体感温度 (Apparent Temperature, 简称 AT) 是 Steadman<sup>[16,17]</sup> 在 20 世纪 70 年代末提出的, 以露点达到 14 为参照值对温度进行订正: 如果湿度比参照值高, AT 高于温度; 反之, 如果湿度比参照值低, AT 低于温度, 两者的偏差与温度、湿度和风力的大小有关, 由 Steadman 提出的模型来控制。体感温度能直观地反映出高湿闷热天气的特点, 在美国和澳大利亚应用于天气服务业务。

我们计算了北京市 2002 年夏季逐日 02 与 14 时的体感温度 (图 8), 在 2002 年夏季的绝大多数时间, 体感温度与相应时次的气温相差无几, 6 月 10~13 日出现了体感温度低于气温的情形。从 7 月 27 日~8 月 4 日, 体感温度开始明显连续高于气温, 在这段时间里 8 月 2 日气温最高, 达到了 34.8, 对应 14 时的体感温度高达 40.4, 8 月 2 日的最低气温为 27.2, 2 时的体感温度为 35.3, 体感温度增加 7 左右。高湿闷热天气虽不如高温天气的气温高, 但由于体感温度高, 昼夜温差小, 对人体的危害大于高温天气。

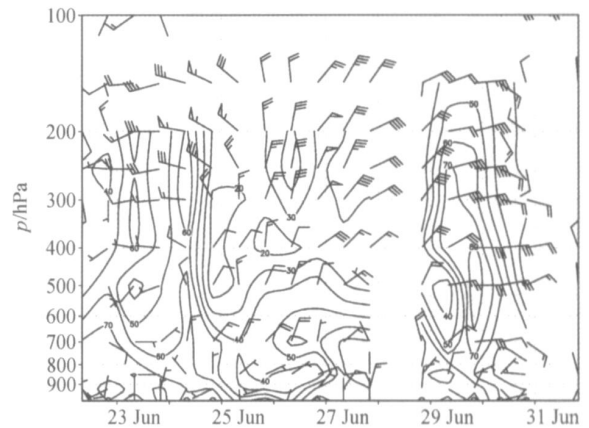


图 7 1999 年 7 月 22~31 日北京探空风场 (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 和相对湿度 (%) 分布

Fig 7 The distribution of horizontal wind (units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and relative humidity (%) from 22 to 31 Jul 1999

2002 年 7 月下旬, 在对流层高层中国的大部分地区除东北和新疆的北部外, 都处于青藏高原的控制下。从 7 月 31 日开始, 副高控制华北的大部分地区和长江中下游地区 (图 9a), 巴尔喀什湖以东的外蒙地区为一小脊, 北京处于副高的边缘地区, 另外, 从环流场上可以看到青藏高原东侧有一大陆小高压。8 月 1 日, 副高与大陆小高压打通。从 1 日 0 时到 2 日 12 时, 该高压系统控制中国北方以及长江流域的大部分地区, 2 日 12 时以后, 副高开始减弱, 3 日 12 时以后, 副高逐渐东退到海上。从 3 日 12 时开始, 巴尔喀什湖以西有一低槽沿青藏高原北侧东移, 4 日 12 时以后达到华北地区 (图 9b), 这股较强的冷空气使高温闷热天气结束。对流层低层, 副高西侧盛行偏南风, 副高西侧的西南气流可以将水汽输送到华北地区, 使对流层低层比较潮湿, 华北地区多次出现强对流天气。

南北剖面分析表明, 副高的西侧和北侧盛行西南风, 副高及其边缘地区的低层 (850 hPa 以下) 湿度比较大, 但高层较干。在中高层副高北侧与西风带之间有一个 300~400 km 的高湿区。对北京站高温期间观测探空的分析表明 (图 10), 高温期间低层的湿度较大, 而中层是较干的, 在低层的高湿层之上有一逆温层, 此逆温层阻碍了低层水汽的向上输送。逆温层的存在使低层大气较稳定, 对流抑制能量到达 30J, 但逆温层之上



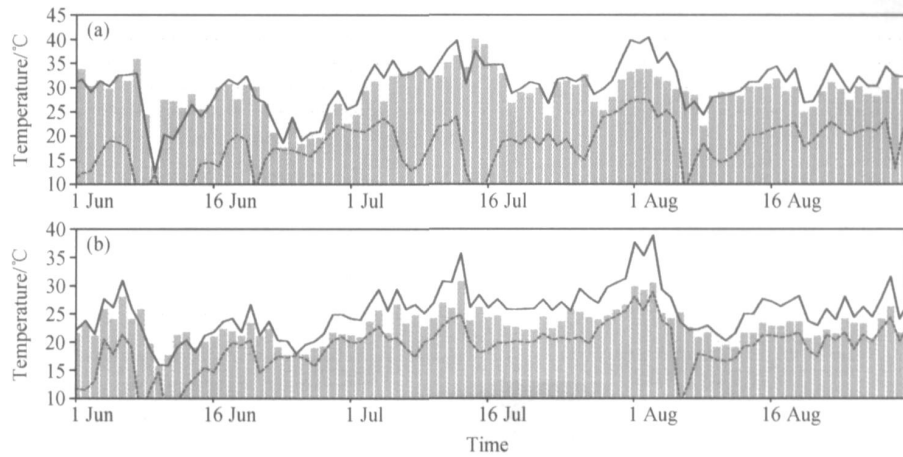


图 8 2002 年 6~8 月北京气温 (直方)、露点 (虚线) 及体感温度 (实线) (单位:  $^{\circ}\text{C}$ ): (a) 02 时, (b) 14 时  
Fig. 8 The daily temperature (bar), dew point (dashed line) and apparent temperature (solid line) in the summer of 2002 in Beijing: (a) 0200 LST; (b) 1400 LST

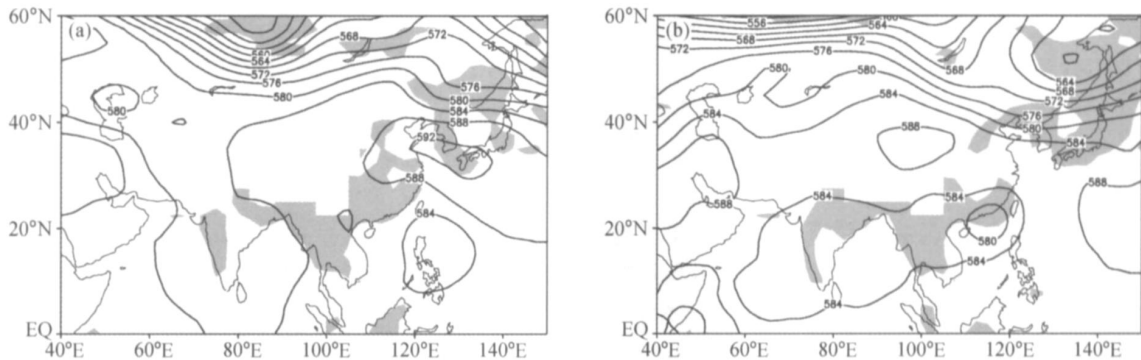


图 9 2002 年 500 hPa 位势高度场 (实线, 单位:  $\text{dagpm}$ ) 和 1000 hPa 相对湿度 (阴影区为相对湿度大于 90% 的区域): (a) 7 月 31 日, (b) 8 月 4 日  
Fig. 9 The geopotential height (solid line, units:  $\text{dagpm}$ ) on 500 hPa and relative humidity on 1000 hPa (shallow shaded is relative humidity greater than 90%) for (a) 31 Jul and (b) 4 Aug 2002

对流有效位能达到  $2\ 665\ \text{J}$ 。这种层结的分布, 如遇合适的触发机制 (冷空气的活动, 局地的上升运动) 使对流有效位能释放, 就会有强对流发展。

2002 年 7 月 30 日~8 月 4 日华北地区的闷热天气是历史上罕见的。这次过程与一般的高温闷热天气不同, 在 500 hPa 位势高度场上, 西太平洋副高的 588  $\text{dagpm}$  线向西伸到  $110^{\circ}\text{E}$ 、向北伸展到  $40^{\circ}\text{N}$  附近 (图 9a), 华北大部在副高的影响下, 下沉气流和低层逆温抑制低层的水汽向高空输送, 造成近地面空气层中湿度较大, 加上风比较小, 表现出最高和最低气温虽然不是很高, 但体感温度明显增加, 形成湿热天气。

## 5 主要结论

本文对华北地区近几十年夏季的高温与闷热天气做了统计分析和个例诊断, 主要的结论如下:

(1) 华北地区的高温天气在 20 世纪 60 和 90 年代出现两个高峰期。高温和闷热天气在华北中北部 80 年代前很少同时发生, 80 年代以后高温和闷热天气同时发生的概率显著增加; 在华北南部高温和闷热天气同时发生的概率还是比较大的。90 年代中后期出现多次持续性高温和闷热并重的过程。

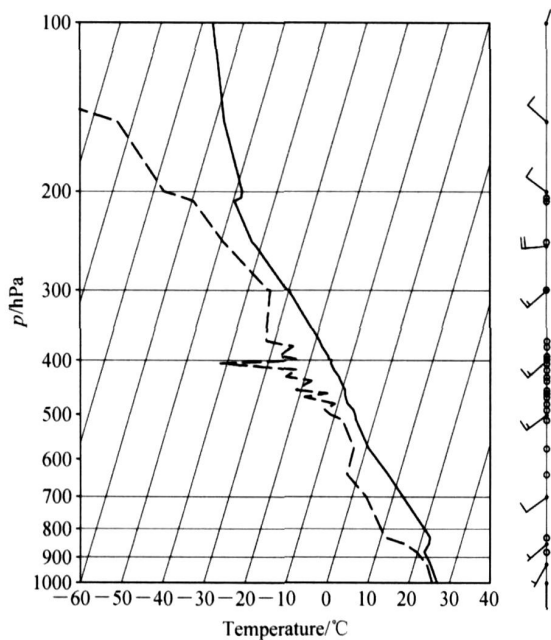


图 10 2002 年 7 月 31 日 08 时北京的探空曲线 (粗实线: 温度, 粗虚线: 露点)

Fig. 10 Composite sounding on skew  $T$ -log  $p$  diagrams on 0800 LST 31 Jul 2002 in Beijing (bold solid line: temperature; bold dashed line: dew-point)

(2) 夏季欧亚中高纬度环流与西太平洋副高的年代际变化, 是造成近 40 年来华北高温和闷热日数变化不同步的主要原因。在 20 世纪 60 年代, 华北地区易受大陆高压脊的控制, 气温具有白天升高而夜晚降低的特点, 出现高温但不闷热的天气。90 年代, 夏季亚洲中高纬出现类似于 60 年代的环流, 同时, 盛夏受西太平洋副高影响的区域明显向北、向西扩展, 华北地区受到大陆高压脊、西太平洋副高的共同影响, 容易产生既高温又闷热的天气。

(3) 典型高温闷热天气过程的个例分析表明: 不同类型的高温天气, 其大气环流在空间分布、垂直结构、以及湿度和大气稳定度等方面存在明显差异。高温型一般多为大陆高压控制, 天气干热; 闷热型一般多为副高影响; 高温闷热型多受大陆高压和副高的共同影响。

#### 参考文献 (References)

[ 1 ] 张尚印, 宋艳玲, 张德宽, 等. 华北主要城市夏季高温气候特征及评估方法. 地理学报, 2004, 59 (3): 383~390

- Zhang Shangyin, Song Yanling, Zhang Dekuan, et al. The climatic characteristics of high temperature and the assessment method in the large cities of Northern China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2004, 59 (3): 383~390
- [ 2 ] 王迎春, 葛国庆, 陶祖钰. 北京夏季高温闷热天气的气候特征和 2008 夏季奥运. 气象, 2003, 29 (9): 23~27  
Wang Yingchun, Ge Guoqing, Tao Zuyu. Climatic characteristics of estival muggy weather in Beijing related to 2008 Olympics. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2003, 29 (9): 23~27
- [ 3 ] 郑水红, 王守荣, 王有民. 气候灾害对北京可持续发展的影响及对策. 地理学报, 2000, 55 (增刊): 119~127  
Zheng Shuihong, Wang Shourong, Wang Youmin. Impacts of climate disaster on Beijing sustainable development and relevant strategies. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2000, 55 (Suppl.): 119~127
- [ 4 ] 谢庄, 曹鸿兴. 北京最高和最低气温的非对称变化. 气象学报, 1996, 54 (4): 501~507  
Xie Zhuang, Cao Hongxing. The asymmetric trend of change in maximum and minimum temperature in Beijing. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1996, 54 (4): 501~507
- [ 5 ] 谢庄, 崔继良, 刘海涛, 等. 华北和北京的酷暑天气. 历史概况及个例分析. 气象与环境研究, 1999, 4 (4): 323~333  
Xie Zhuang, Cui Jiliang, Liu Haitao, et al. A study on the severe hot weather in Beijing and North China. part I: Statistics and synoptic case study. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, 4 (4): 323~333
- [ 6 ] 孙建华, 陈红, 赵思雄, 等. 华北和北京的酷暑天气. 模拟试验和机理研究. 气象与环境研究, 1999, 4 (4): 334~345  
Sun Jianhua, Chen Hong, Zhao Sixiong et al. A study on the severe hot weather in Beijing and North China. Part II: Simulation and analysis. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, 4 (4): 334~345
- [ 7 ] 郑祚芳, 王迎春. 北京夏季持续高温过程特征分析. 气象, 2005, 31 (10): 16~20  
Zheng Zuofang, Wang Yingchun. A composite analysis of severe heat wave events in Beijing. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2005, 31 (10): 16~20
- [ 8 ] 钱婷婷, 王迎春, 郑祚芳, 等. 造成北京连续高温的河套高压结构分析. 应用气象学报, 2005, 16 (2): 167~173  
Qian Tingting, Wang Yingchun, Zheng Zuofang, et al. A case study of the structure of the Hetao high which caused long-lasting hot weather in Beijing. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2005, 16 (2): 167~173
- [ 9 ] 赵世林, 车少静. 石家庄的高温闷热天气. 气象, 2001, 27 (9): 23~25

- Zhao Shilin, Che Shaojing. High temperature and muggy weather in Shijiazhuang city. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2001, **27** (9) : 23 ~ 25
- [10] 连志鸾, 尤凤春. 石家庄高温闷热天气气候特征与预报方法. *气象*, 2005, **31** (6) : 17 ~ 21
- Lian Zhiluan, You Fengchun. Prediction of high temperature and muggy in Shijiazhuang, Hebei Province. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2005, **31** (6) : 17 ~ 21
- [11] 陈志梅, 刘秦玉, 沈小野, 等. 青岛近百年气温变化特征. *中国海洋大学学报*, 2005, **35** (2) : 189 ~ 194
- Chen Zhimei, Liu Qinyu, Shen Xiaoye, et al. The characteristics of temperature change in Qingdao during the past one hundred years. *Periodic of Ocean University of China* (in Chinese), 2005, **35** (2) : 189 ~ 194
- [12] 潘婕, 王盘兴, 纪立人. 夏季欧亚中高纬持续流型特征. 流型指数与持续流型. *气象科学*, 2004, **24** (2) : 127 ~ 136
- Pan Jie, Wang Panxing, Ji Liren. Study on the summertime persistent circulation pattern features over Asian-European mid-high latitude. Part I: circulation pattern index and persistent circulation pattern. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **24** (2) : 127 ~ 136
- [13] 潘婕, 彭京备, 王盘兴, 等. 夏季欧亚中高纬持续流型特征. 年代际变化和外部强迫. *气象科学*, 2004, **24** (3) : 253 ~ 260
- Pan Jie, Peng Jingbei, Wang Panxing, et al. Study on the summertime persistent circulation pattern features over Asian-European mid-high latitude. Part II: decadal variance and external source force. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **24** (3) : 253 ~ 260
- [14] Fu Qiang, Johanson C M, Wallace J M, et al. Enhanced mid-latitude tropospheric warming in satellite measurements. *Science*, 2006, **312** (26) : 1179 (2006), doi: 10.1126/science.1125566
- [15] 黄刚. NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料以及探空观测资料分析中国北方地区年代际气候变化. *气候与环境研究*, 2006, **11** (3) : 310 ~ 320
- Huang Gang. The assessment and difference of the interdecadal variations of climate change in Northern part of China with the NCEP/NCAR and ERA-40 reanalysis data. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (3) : 310 ~ 320
- [16] Steadman R G. The assessment of sultriness. Part I: A temperature humidity index based on human physiology and clothing science. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1979, **18**: 861 ~ 873
- [17] Steadman R G. The assessment of sultriness. Part II: Effects of wind, extra radiation and barometric pressure on apparent temperature. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1979, **18**: 874 ~ 885