

贝加尔湖南侧大陆高压与东亚夏季风和 中国夏季气候的关系

谭桂容¹ 孙照渤¹ 林朝晖² 贾建颖¹

¹ 南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室, 南京 210044

² 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 利用 NCEP/NCAR 再分析逐日 500 hPa 高度场资料, 尝试对夏季亚洲中纬度出现的大陆高压(脊)进行统计分析。结果表明: 50 a 夏季大陆高压以维持日数在 3 d 及以上的占绝大多数; 大陆高压存在较明显的年代际变化, 其中在贝加尔湖南侧(35~55°N, 90~105°E)区域的大陆高压自 20 世纪 70 年代末期以来异常偏多, 尤其在 7 和 8 月。这正与气候突变后我国北方干旱的频繁发生相对应, 说明大陆高压的异常活动与中国的气候年代际异常有密切的关系。运用 NCEP/NCAR 再分析月平均高度、势函数、风场和我国 160 站月降水、气温资料, 分析了贝加尔湖南侧大陆高压与东亚夏季风环流和我国夏季气候的关系。结果表明: 大陆高压正异常年, 东亚 Hadley 环流偏强, 导致贝加尔湖南侧发生异常偏强的下沉运动, 在我国东部的低层存在北风异常; 高低纬环流相互作用削弱了东亚夏季风, 与其相联系的季风水汽输送减弱, 造成我国夏季长江以北大部分地区水汽通量散度正异常, 华北大部降水偏少, 长江流域降水偏多, 中国北方地区气温偏高。

关键词 大陆高压 东亚夏季风 气候异常

文章编号 1006-9585 (2008) 06-0791-09 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

Land High over Area South to Lake Baikal and Its Relation with East Asian Summer Monsoon and Climate Anomalies of China

TAN Gui-Rong¹, SUN Zhao-Bo¹, LIN Zhao-Hui², and JIA Jian-Ying¹

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster and Environmental Variation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Summer land highs (LH) at mid-latitudes over Asian are analyzed by using NCEP/NCAR daily 500 hPa height reanalysis data. Results show that most LH last more than 3 days, and those over (35—55°N, 90—105°E) area have marked decadal variation, increasing greatly after the end of the 1970s, especially in July and August. It suggests that anomalous activities of LH may closely relate to the decadal climate variation of China for the increasing of LH corresponds to frequent droughts in North China after the abrupt climate change. Relationship between LH over south to Lake Baikal and East Asian summer monsoon is investigated based on monthly NCEP/NCAR reanalysis multi-level data including height, wind, velocity potential and water vapor content etc. Evidences suggest that stronger Hadley circulation leads to anomalous sinking in the whole troposphere over south to Lake Baikal, companying with northerly flow anomalies in East China at lower level when LH occur more frequently. East

收稿日期 2007-10-16 收到, 2008-09-16 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40331010、江苏省气象灾害重点实验室基金资助项目 KLME060212 和中国科学院知识创新工程重要方向项目 ZKCX3-SW-226

作者简介 谭桂容, 女, 1970 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事短期气候异常及其预测研究。E-mail: tanguirong@nuist.edu.cn

Asian summer monsoon is weakened by the interaction between abnormal circulation systems at high and low latitudes, and thereby the related water transportation is also weakened with deficit water vapor content over most area on the north to the Yangtze River, accordingly with less rainfall and higher temperature in North China.

Key words land high, East Asian summer monsoon, climate anomaly

1 引言

中国地处亚洲东部,属于季风性气候。已有研究表明,我国的干旱、洪涝、冻害以及酷暑等一系列的灾害性天气气候现象都与季风的的活动密切相关^[1, 2]。

20 世纪 70 年代末东亚夏季风强度发生了年代际突变^[3~5],东亚夏季风显著减弱,对应东亚夏季风的年代际突变,我国北方的干旱频繁发生,引起了学者和政府的广泛重视^[6~13]。早期针对低空 700 hPa 系统的天气气候分析表明,大陆高压控制华北是华北干旱的重要流型之一^[10]。也有一些研究从遥相关方面分析中高纬环流异常与华北干旱的关系,但由于遥相关的中心位置及强度不稳定^[11],遥相关环流异常与华北干旱的关系也在发生变化。近来一些学者在探讨华北干旱成因时发现:当华北发生干旱时,在贝加尔湖南侧局地上空存在显著的正高度距平,表明有异常的高压脊活动^[7, 9, 11~13]。这种中纬度的高气压系统既非阻塞高压也非副热带高压^[9]。在华北典型干旱年,大陆高压出现在贝加尔湖以南。由于大陆高压的存在,500 hPa 中纬度在贝加尔湖南侧为显著的正距平,其以东的朝鲜到日本上空为显著的负距平,因而中纬度贝加尔湖西侧的平均脊东移控制华北,整个对流层为异常的下沉运动,有利于大陆高压在华北上空维持;而常年在华北上空的槽东移到朝鲜日本一带,不利于西太平洋副高的西伸北挺,西太平洋副高易偏东^[14]。也有一些学者从地面气压场和季风的角度的角度,考虑了中纬度大陆高压(低压)系统对我国气候的影响^[15]。国外的研究也表明,这种中纬度大陆高压的频繁活动常与干旱高温天气相伴出现^[16]。在夏季,当美国中部大平原出现持续性干旱时,在干旱区上空出现一个高空异常反气旋^[17~19]。

贝加尔湖南侧大陆高压与副热带和季风环流直接作用,它的异常活动通过高低纬环流相互作

用,很可能会影响到东亚夏季风,从而造成中国的气候异常。因此,本文拟分析贝加尔湖南侧地区大陆高压与东亚夏季风和中国气候的关系,以进一步探讨中纬度环流异常对中国夏季气候异常的影响。

2 资料和方法

2.1 资料

采用 NCEP/NCAR 逐日位势高度 (H)、纬向风 (u)、经向风 (v)、比湿 (q) 和地面气压 (p_0),以及月平均风场、高度场、势函数资料,网格点密度为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,使用国家气候中心整编的我国 160 站月平均气温和月降水量资料。所有资料长度为 1952~2001 年。

2.2 方法

纬向和经向水汽输送通量 Q_λ 与 Q_φ 的计算按如下公式:

$$Q_\lambda = \frac{1}{g} \int_{200}^{p_0} u q dp, \quad (1)$$

$$Q_\varphi = \frac{1}{g} \int_{200}^{p_0} v q dp, \quad (2)$$

水汽通量散度为

$$Q_w = \nabla \cdot Q = \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial Q_\lambda}{\partial \lambda} + \frac{1}{a} \frac{\partial Q_\varphi}{\partial \varphi}, \quad (3)$$

其中, u 和 v 分别为东西风和南北风分量, q 是该单位气柱各层大气的比湿, a 为地球半径, φ 和 λ 分别为纬度和经度。利用公式 (1) ~ (3) 和 NCEP 逐日各层比湿及风场资料,计算出逐月的纬向、经向水汽输送通量和水汽输送散度,然后再取平均得到夏季 (6~8 月) 的相应量。

3 大陆高压统计特征

对大陆高压进行统计时,按照以下标准: 1) 500 hPa 日平均高度场上 (每隔 4 dagpm 分析一条等值线) 存在明显的反气旋弯曲,即每根等值线脊顶到脊底所在纬度的垂直距离超过 2.5 个纬距;

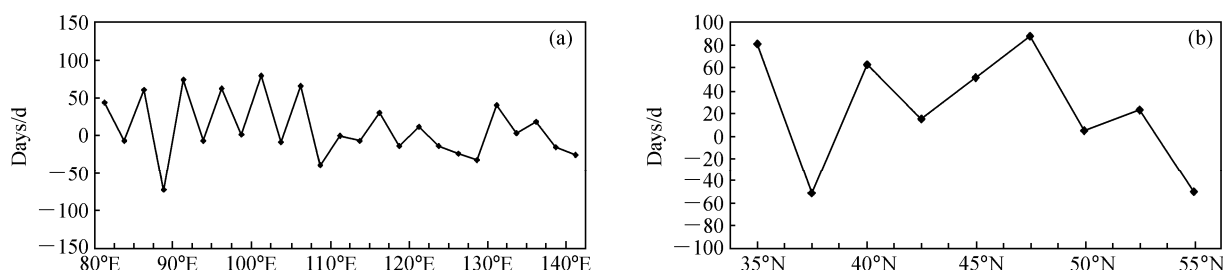


图 1 1979~2001 年与 1955~1977 年夏季 (35~55°N, 80~140°E) 区域大陆高压日数差值沿 (a) 经度和 (b) 纬度的分布
Fig. 1 Differences of summer land highs between 1979–2001 and 1955–1977 over (35–55°N, 80–140°E) area along (a) longitudes and (b) latitudes

2) 以高压脊脊线所在经度为平均经度；3) 以大陆高压脊最南端等值线脊顶所在纬度为大陆高压的南界纬度；4) 大陆高压维持时间是指 500 hPa 日平均高度场上具有明显反气旋弯曲的大陆高压个例在给定区域的出现日数。以规定时间区域内所有个例维持日数之和为个日数。这里贝加尔湖南侧大陆高压指脊线所在的平均南界纬度在 35~55°N 之间，经度在 90~105°E 以内，并且 (35~55°N, 90~105°E) 区域高度距平为正值。

夏季亚洲中纬度多年平均的大陆高压个日数在 90~110°E 及 130~140°E 处为两个相对高发区，而 80~90°E 及 112.5~127.5°E 附近出现的机会较少，这与夏季平均长波槽脊的位置对应。但 1979 年以来，大陆高压出现的个日数在 105°E 以西地区异常增多（见图 1a），其中最多的在 100°E 附近。从大陆高压的南界纬度分布看，大陆高压多数源于 50°N 以南的纬度，占总数的 66.2%。1979~2001 年与 1955~1977 年夏季相比，大陆高压在 55°N 以南区域有明显增加（见图 1b）。

以上分析表明，1979 年以来 (35~55°N, 90~105°E) 区域的大陆高压活动异常频繁。因此，下面就贝加尔湖南侧 (35~55°N, 90~105°E) 的大陆高压进行分析。由夏季大陆高压个例数随维持时间的分布（见图 2）可见，波动过程随维持时间的增长呈指数型减少。夏季大陆高压生命期不足 3 d 的波动过程共 730 d，占总个日数的 33.5%。其中维持日数在 3 d 及以上的占总维持日数的 60% 以上，可见大陆高压的异常活动足以引起中国的气候异常。夏季大陆高压存在闭合中心的有 103 d，占总数的 11.9%。即存在闭合中心的大陆高压只是少数，约为大陆高压总数的 10%

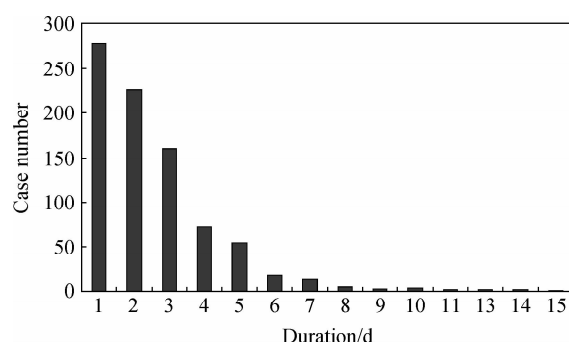


图 2 1952~2001 年夏季 (35~55°N, 90~105°E) 大陆高压个例数随维持时间长度的分布
Fig. 2 Case number distribution of summer land highs against maintaining days

左右。

夏季 (35~55°N, 90~105°E) 区域大陆高压日数平均每年有 43 d，最多的一年发生在 2001 年，为 65 d；最少的是发生在 1976 年，仅 22 d。从 1952~2001 年的年际变化曲线看（见图 3a），大陆高压的个日数自 20 世纪 70 年代中期以来年际距平增加，尤其在 7、8 月份（图略）。

大陆高压与环流的纬向非对称有关，现有的研究一般针对正高度距平，所以本文也主要分析正距平的大陆高压 (DG+)。1952~2001 年以来，DG+出现的日数占大陆高压总日数的 65%，且以 6 月大陆高压出现日数最多。夏季 DG+大陆高压平均每年出现将近 26 d，最多为 2001 年，出现 62 d；最少为 1973 年，只出现 2 d。由 1952~2001 年大陆高压日数的时间变化（见图 3b）可见，大陆高压在 70 年代末以来年际异常明显，多数年份偏多；而在此之前主要为偏少，特别是在中国北方偏涝的 50 年代至 60 年代初。根据大陆高压日数的年际变化，选取大陆高压典型正异常年为：

1954、1979、1980、1986、1997、1998、1999 和 2001 年；负异常年为：1960、1961、1973、1987、1990、1991、1993 和 1995 年。

4 大陆高压异常与东亚夏季风的关系

4.1 环流场特征

图 4 为典型大陆高压正负异常年环流场差值。可见，贝加尔湖附近为一正高度距平的反气旋环流异常，在这种环流控制下，中国东部为异常的

偏北风。这说明典型大陆高压正异常年，东亚夏季风偏弱。

由典型大陆高压正负异常年速度势和散度风差值可见（图 5），贝加尔湖南侧在低层为一辐散异常，高层为辐合。在其周围分别从朝鲜到日本上空、热带西太平洋、青藏高原西侧的异常上升气流中有大气质量的流入。此时，北太平洋东部至北大西洋南部地区为低层辐合、高层辐散的异常环流，北非和热带大西洋中东部为相反的异常。通过对大陆高压典型年前期冬、春季及夏季海温的合成分析表明（图略），热带西太平洋和大西洋

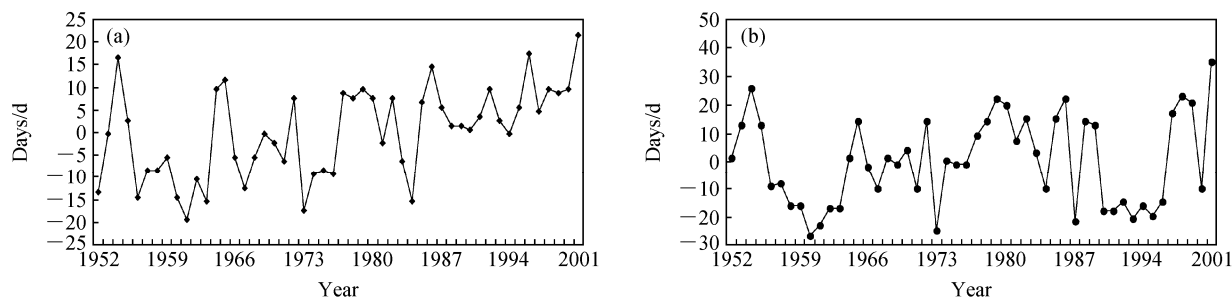


图 3 1952~2001 年夏季 (35~55°N, 90~105°E) 大陆高压日数的年际变化：(a) 大陆高压 (DG)；(b) 正距平大陆高压 (DG+)
 Fig. 3 Annual variation of summer land highs over (35~55°N, 90~105°E) area: (a) land highs (DG); (b) land highs with positive height anomaly (DG+)

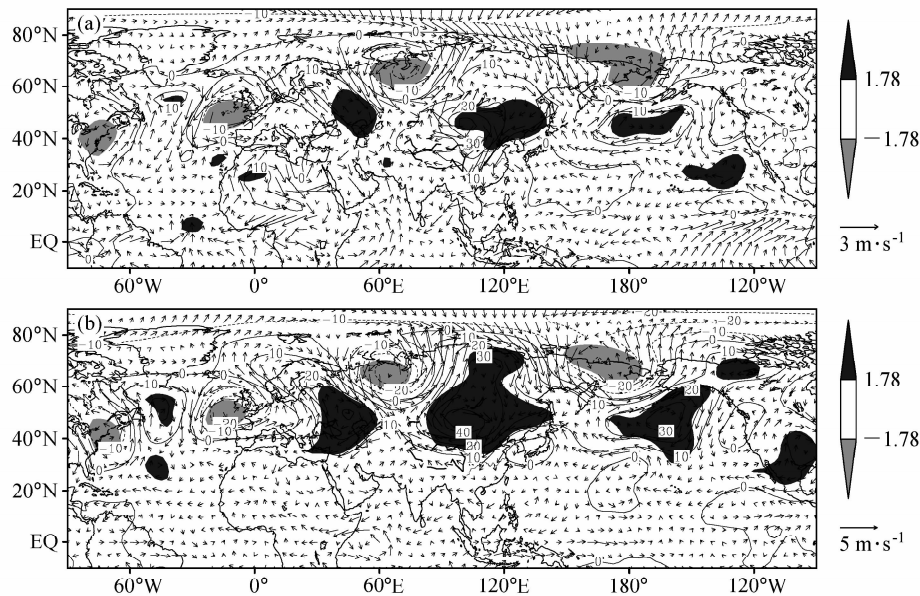


图 4 典型大陆高压正负异常年位势高度和水平风差值场：(a) 850 hPa；(b) 500 hPa（阴影区为位势高度统计检验信度达到 95% 的区域；矢量为风场，单位：m·s⁻¹；等值线为高度，单位：gpm）
 Fig. 4 Differences in composite summer height and wind fields between positive and negative land high years: (a) 850 hPa; (b) 500 hPa (shaded areas denote the confidence level above 95% of heights; arrows denote wind, units: m·s⁻¹; contours denote height, units: gpm)

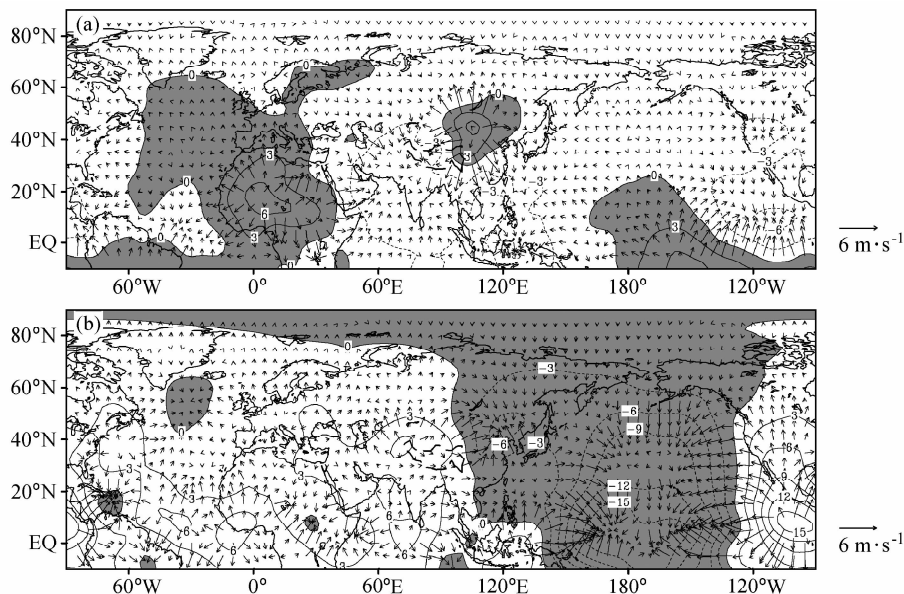


图 5 典型大陆高压正负异常年势函数和散度风差值场：(a) 850 hPa；(b) 200 hPa（阴影区为势函数负距平区，矢量为辐散风，单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；等值线为势函数，单位： $10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）

Fig. 5 Differences in composite summer velocity potential and divergent wind vector between positive and negative land high years: (a) 850 hPa; (b) 200 hPa (shaded areas denote negative velocity potential anomaly areas; arrows denote divergent wind vector, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; contours denote velocity potential, units: $10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

中东部海温异常偏高，对应异常辐散辐合引起的上升运动，相应 Hadley 环流偏强，导致北非和贝加尔湖南侧发生异常偏强的下沉运动，产生异常的高压系统。因此，在低层贝加尔湖南侧的高压异常使得中国东部存在异常向南的空气运动，即有北风异常，高低纬大气相互作用使东亚夏季风减弱。另外，从图中还可以看到，北非到地中海地区的下沉运动偏强，对应北非副热带高压的异常增强，通过上下游影响也有利于贝加尔湖南侧大陆高压异常的发生。

从大陆高压纬向平均的风场可见（见图 6），大陆高压对应偏强的局地 Hadley 环流和偏弱的冷空气运动，反映锋区位置偏北或南支锋区偏弱，大陆高压区为显著偏强的下沉运动。这进一步说明，大陆高压的发生与局地 Hadley 环流异常有密切的关系。

4.2 夏季风特征

表 1 为大陆高压正负异常年东亚夏季风指数值和南海季风爆发时间（侯）。季风强度指数按文献 [20] 中的方法计算，设 S_{M10} 为夏季 6~8 月 10~50°N 纬圈内每隔 10° 在 110°E 与 160°E 上海平

面气压差小于 5 hPa 的等压线总根数，夏季风强度指数则为 $S_{M10} / \overline{S_{M10}}$ 其中 $\overline{S_{M10}}$ 是 S_{M10} 的多年平均值。指数值 >1.1 和 <0.9 的年份分别表示季风偏强和偏弱的年份。南海季风爆发时间由国家气候中心确定。由表可见，大陆高压偏多年，除 1998 年外，夏季风为正常或偏弱；大陆高压偏少年，7/8 年东亚夏季风为正常或偏强。从南海季风爆发时间来看，大陆高压偏多年有 6/8 年正常偏早；大陆高压偏少年则有 6/8 年偏晚。说明夏季大陆高压的频繁发生，使我国东部地区处于偏北风距平的控制，高低纬环流相互作用将削弱东亚夏季风的强度，对应东亚夏季风偏弱；反之，对应东亚夏季风偏强。大陆高压的异常发生与南海夏季风的爆发时间也存在一定的联系，即大陆高压频发对应南海夏季风爆发时间多数为偏早，反之南海夏季风爆发时间多数为偏晚。这与以往研究的南海季风爆发早晚与东亚夏季风的关系不太一致。其实并不矛盾，因为南海夏季风的爆发与大陆高压之间并不存在因果对应关系，但南海季风的爆发与热带环流异常有密切的关系，联系到大陆高压的发生与 Hadley 环流的关系可理解南海季风爆

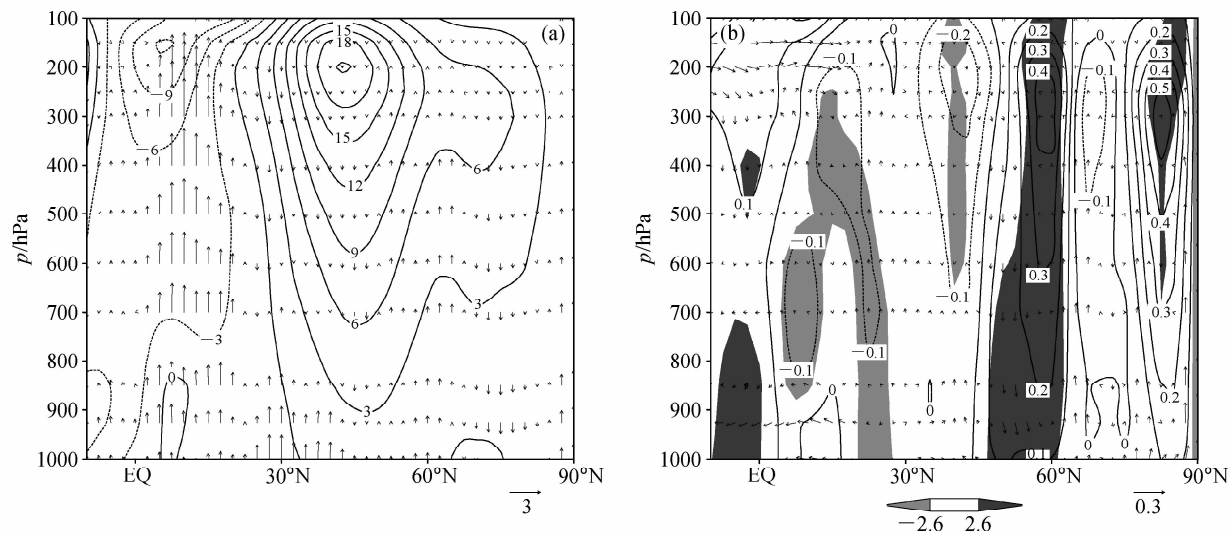


图6 纬向平均风场：(a) 1952~2001年平均；(b) DG+合成（等值线为纬向风，阴影区为纬向风统计检验信度达到99%的区域；垂直速度取相反值，且扩大了100倍。单位：水平风速为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；垂直风速为 $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ）

Fig. 6 Composite zonal mean wind: (a) mean of 1952–2001; (b) composite of DG+ (shaded area means the confidence level above 99% of u ; the vertical component is reversed and expanded 100 times; units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ for the horizontal wind; $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ for the vertical wind)

表1 典型大陆高压异常年季风指数特征

Table 1 Index values of East Asian summer monsoon in typical land high years

偏多年			偏少年		
年份	季风指数	季风爆发日期（侯）	年份	季风指数	季风爆发日期（侯）
1954年	1.03	31	1960年	1.30	30
1979年	0.90	27	1961年	1.30	28
1980年	0.80	28	1973年	1.10	32
1986年	0.80	27	1987年	1.00	32
1997年	0.80	28	1990年	1.10	28
1998年	1.20	28	1991年	1.00	32
1999年	1.10	30	1993年	0.90	30
2001年	0.90	26	1995年	1.10	27

发早（晚）与大陆高压多（少）的一致性。

4.3 水汽输送特征

东亚季风区夏季水汽输送矢量的分布与东亚夏季风环流系统一致^[21~24]。大陆高压活动使得东亚中纬度西风带环流异常，同时通过中低纬度环流相互作用，引起了东亚季风环流的异常，因此其很可能造成东亚季风区内水汽输送异常。故为了解大陆高压异常对中国气候的影响，下面对大陆高压典型年季风异常引起的水汽输送特征进行分析。

由图7a可见，在长江以北地区基本为显著的

负异常，长江以南地区除在西南到中南半岛外为正异常，中心在东部沿海地区。由图7b可见，大陆高压正异常年经向水汽输送除了在中国西北地区为显著的正异常外，100°E以东地区为显著的负异常，负异常中心在长江中下游地区。

水汽输送只是影响降水的必要条件，且对局地大气来说，强的输送并不意味着局地水汽状况好，因此为考察局地水汽收支，对水汽通量散度进行了分析。由图7c可见，在中国黄河以南的大部分地区水汽通量散度为负，其中显著异常的区域在长江以南地区；北方大部分地区为正异常，尤其在河套及以西地区。

5 大陆高压异常与中国气候异常的关系

以上的分析表明，大陆高压正异常对应东亚夏季风环流偏弱，相应的季风水汽输送偏弱。那么这种异常会使中国的气候发生怎样的变化呢？为了弄清楚这个问题，下面对大陆高压异常年的夏季降水 and 气温异常进行分析。

由典型大陆高压正负异常年降水的距平百分率合成图可见（图8a），显著的负异常在黄河中下游及东北东部地区；长江流域到江南北部地区存

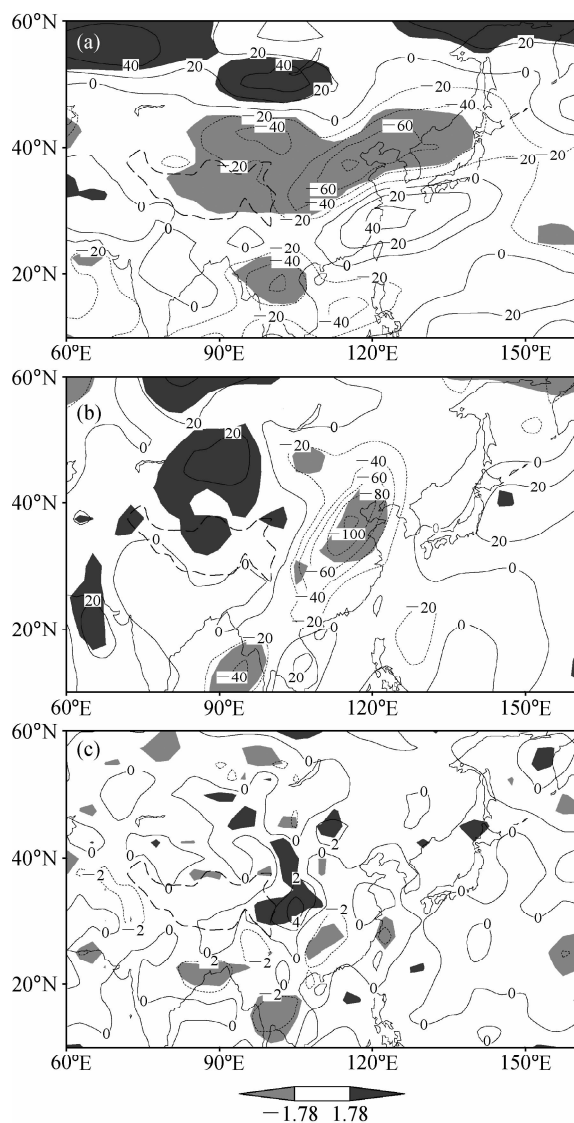


图 7 典型大陆高压正负异常年纬向水汽输送差值场 (阴影区统计检验信度达到 95%): (a) 纬向 (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) 经向 (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); (c) 水汽通量散度 (单位: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 Differences in composite summer water transportation and divergence between positive and negative land high years (shaded areas denote the confidence level above 95%): (a) zonal (units: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) meridional (units: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); (c) divergence (units: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

在显著的正异常。由图 8b 可见, 在长江流域以北的黄河下游到华北北部、东北东部地区存在显著的负相关, 与图 8a 的负异常区对应; 长江中下游地区存在显著的正相关区, 与图 8a 的明显正异常区对应。分析表明, 在大陆高压偏多年, 中国东北、西北部分地区的夏季气温显著偏高 (图略)。

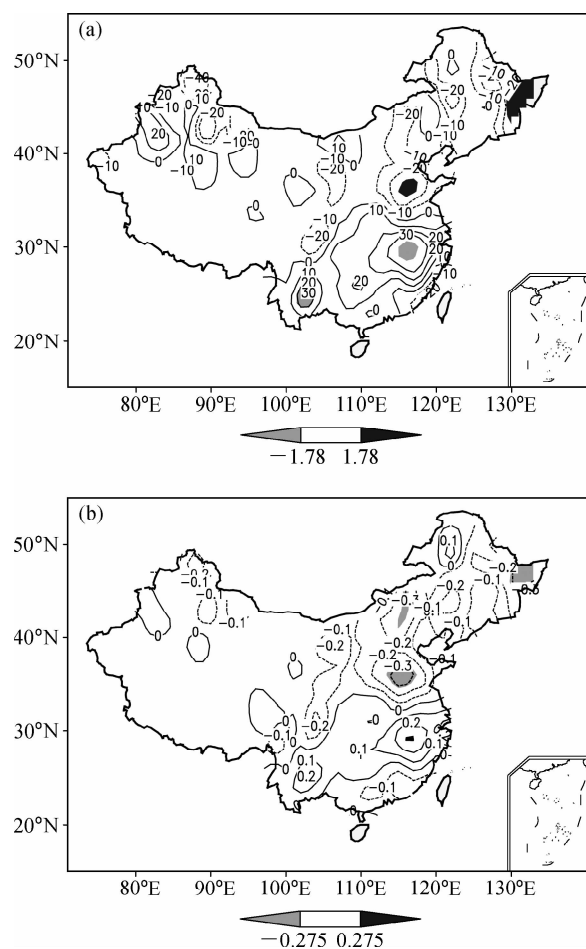


图 8 大陆高压与夏季降水的关系 (阴影区统计检验信度达到 95%): (a) 典型大陆高压正负异常年夏季降水距平百分率合成差值; (b) 夏季大陆高压日数与同期降水的相关分布

Fig. 8 Relation between land high and summer rainfall (shaded areas denote the confidence level above 95%): (a) composite differences between positive and negative land high years rainfall; (b) correlation distribution of summer DG+ days and rainfall

6 结论与讨论

利用 NCEP/NCAR 再分析逐日 500 hPa 高度场资料, 尝试对夏季亚洲中纬度出现的大陆高压 (脊) 进行统计分析, 结果发现夏季亚洲中纬度大陆高压存在明显的年代际变化, 尤其是在贝加尔湖南侧地区。对贝加尔湖南侧地区大陆高压的进一步分析表明, 夏季贝加尔湖南侧大陆高压维持日数在 3 d 及以上的占总维持日数的 60% 左右, 且其中存在闭合中心的大陆高压约占 10%。大陆

高压的个数自 20 世纪 70 年代末以来异常增加, 尤其在 7、8 月份。

贝加尔湖南侧大陆高压异常与环流和东亚夏季风有密切的关系: 当大陆高压异常频发时, 东亚 Hadley 环流偏强, 贝加尔湖南侧发生异常偏强的下沉运动, 在中国东部的低层存在异常向南的空气运动, 即有北风异常, 对应夏季风减弱。也即大陆高压异常频发时, 高低纬环流相互作用削弱了东亚夏季风。

对贝加尔湖南侧大陆高压典型异常年的夏季降水和气温分析表明: 当贝加尔湖南侧大陆高压异常频发时, 与东亚夏季风相联系的季风水汽输送减弱, 使中国夏季气候异常。大陆高压偏多年对应中国夏季长江以北大部分地区水汽通量散度正异常, 华北大部降水偏少, 长江流域降水偏多, 相应夏季北方地区气温偏高。

由于季风和气候异常的原因复杂, 特别是位于中纬度的我国气候既受西风带环流影响, 还受热带、低纬度系统的影响, 中纬度环流仅是原因之一。本文对中纬度贝加尔湖南侧大陆高压的研究, 只是初步的尝试, 还有许多问题需要进一步分析和探讨。

参考文献 (References)

- [1] 曾庆存, 赵思雄, 林朝晖, 等. 前言—季风研究中的一些新问题和新方法. 气候与环境研究, 2005, **10**: 281~282
Zeng Qingcun, Zhao Sixiong, Lin Zhaohui, et al. Some new problems and new methods in the monsoon study—An introduction to the special issue. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10**: 281~282
- [2] 刘长征, 王会军, 姜大膀. 东亚季风区夏季风强度和降水的配置关系. 大气科学, 2004, **28**: 700~712
Liu Changzheng, Wang Huijun, Jiang Dabang. The configurable relationships between summer monsoon and precipitation over East Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28**: 700~712
- [3] 李崇银, 朱锦红, 孙照渤. 年代际变化研究. 气候与环境研究, 2002, **7**: 209~219
Li Chongyin, Zhu Jinhong, Sun Zhaobo. Study on decadal variation. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7**: 209~219
- [4] 彭加毅, 孙照渤, 朱伟军. 70 年代末大气环流及中国旱涝分布的突变. 南京气象学院学报, 1999, **22**: 455~462
Peng Jiayi, Sun Zhaobo, Zhu Weijun. The catastrophe of general circulation and China dry and wet pattern in the late 1970s. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1999, **22** (3): 455~462
- [5] Wu Renguang, Wang Bin. A contrast of the East Asian summer monsoon-ENSO relationship between 1962 — 77 and 1978 — 93. *J. Climate*, 2002, **15**: 3266~3279
- [6] 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势. 高原气象, 1999, **18**: 465~476
Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18**: 465~476
- [7] 张庆云, 卫捷, 陶诗言. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及大气环流特征. 气候与环境研究, 2003, **8**: 307~318
Zhang Qingyun, Wei Jie, Tao Shiyan. The decadal and interannual variations of drought and association with the circulations. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8**: 307~318
- [8] 陆日宇. 华北汛期降水量变化中年代际和年际尺度的分离. 大气科学, 2002, **26**: 611~624
Lu Riyu. Separation of Interannual and Interdecadal Variations of Rainfall in North China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26**: 611~624
- [9] 卫捷, 张庆云, 陶诗言. 1999 及 2000 年夏季华北严重干旱的物理成因分析. 气候与环境研究, 2004, **28**: 125~137
Wei Jie, Zhang Qingyun, Tao Shiyan. Physical causes of the 1999 and 2000 summer severe drought in North China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **28**: 125~137
- [10] 梁平德. 华北平原夏季干旱的天气气候分析. 见: 北方天气文集 (6). 北京: 北京大学出版社, 1987. 139~143
Liang Pingde. Synoptic and climatic analysis on the summer drought in northern China Plain. In: *Weather in Northern China* (6) (in Chinese). Beijing: Beijing University Press, 1987. 139~143
- [11] 杨秋明. 江淮地区夏季雨量与北半球 500hPa 环流遥相关的不稳定性. 应用气象学报, 2004, **15**: 612~622
Yang Qiuming. Instability of interannual teleconnections between the summer rainfall in Jianghuai regions and the 500 hPa circulation in Northern Hemisphere. *Journal of Applied Meteorology Science* (in Chinese), 2004, **15**: 612~622
- [12] Tan Guirong, Sun Zaobo, Chen Haishan. Diagnosis of summertime floods/drought and their atmospheric circulation anomalies over North China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, **17**: 257~273
- [13] 张培群, 何敏, 许力. 1999 年夏季长江及以南地区洪涝的大尺度环流成因初探. 高原气象, 2001, **21**: 243~250

- Zhang Peiqun, He Min, Xu Li. Preliminary study on circulation cause of abnormal rich precipitation in and to the south of Yangtze River in summer of 1999. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2001, **21**: 243~250
- [14] 于润玲, 孙照渤, 陈海山. 华北夏季降水与北半球环流及北太平洋海温关系的初步分析. 南京气象学院学报, 2002, **25**: 578~586
- Yu Runlin, Sun Zhaobo, Chen Haishan. Relationship between North China rainfall and north hemisphere circulation and North Pacific sea surface temperature. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2002, **25**: 578~586
- [15] 赵平, 周自江. 亚副热带夏季风指数及其与降水的关系. 气象学报, 2005, **63**: 933~941
- Zhao Ping, Zhou Zijiang. East Asian subtropical summer monsoon index and its relationships to rainfall. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63**: 933~941
- [16] Namias J. Some causes of United States drought. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1983, **22**: 30~39
- [17] Cheng F C, John M W. Meteorological conditions during heat waves and droughts in the United States Great Plains. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 1253~1263
- [18] Cheng F C, Smith E A. Hydrological and dynamical characteristics of summertime droughts over U. S. Great Plains. *J. Climate*, 2001, **14**: 2296~2316
- [19] Hong S Y. Role of sea surface temperature and Soil-moisture feedback in the 1998 Oklahoma-Texas drought. *Nature*, 2000, **408**: 841~844
- [20] 赵汉光, 何敏. 亚洲季风. 见: 赵振国主编, 中国夏季旱涝环境场. 北京: 气象出版社, 2000. 28~37
- Zhao Hanguang, He Min. Asian monsoon. In: *Circulation Surroundings of Summertime Flood/Drought over China* (in Chinese), Zhao Zhenguo, Ed. Beijing: China Meteorological Press, 2000. 28~768
- [21] 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别. 大气科学, 1999, **2**: 460~469
- Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. Characteristics of the water vapor transport in East Asian Monsoon Region and its difference from that in South Asian Monsoon Region in summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **2**: 460~469
- [22] 陈艳, 丁一汇, 肖子牛, 等. 水汽输送对云南夏季风爆发及初夏降水异常的影响. 大气科学, 2006, **30**: 25~37
- Chen Yan, Ding Yihui, Xiao Ziniu, et al. The impact of water vapor transport on the summer monsoon onset and abnormal rainfall over Yunnan Province in May. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30**: 25~37
- [23] Zhang Renhe. Relations of water vapor transport from Indian Monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18**: 1005~1017
- [24] 陈际龙, 黄荣辉. 亚澳季风各子系统气候学特征的异同研究 II. 夏季风水汽输送. 大气科学, 2007, **31**: 766~778
- Chen Jilong, Huang Ronghui. The comparison of climatological characteristics among Asian and Australian Monsoon subsystems. Part II: Water vapor transport by summer monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31**: 766~778