周连童, 温李明. 2016. 我国春夏季地气温差的时空变化特征及其与夏季降水的联系 [J]. 气候与环境研究, 21 (6): 621-632. Zhou Liantong, Wen Liming. 2016. Characteristics of temporal and spatial variations in land-air temperature difference in China and its association with summer rainfall [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (6): 621-632, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15196.

## 我国春夏季地气温差的时空变化特征及其与 夏季降水的联系

## 周连童1 温李明2

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心,北京 100190 2 成都市气象局,成都 610072

**摘 要**利用 1960~2006 年我国地温、气温逐日 4 个时次[02:00 (北京时间,下同)、08:00、14:00 和 20:00]的和 中国降水台站观测资料以及 NCEP/NCAR 再分析资料,分析了我国春季(3~5月)和夏季(6~8月)地气温差 的时空变化特征及其与夏季降水的联系。分析结果表明:我国春季地气温差主要存在着 3 种空间模态分布,第1 模态表现出我国西部地区地气温差为正值,我国东部地区从南至北呈现出"一、+、一、+"空间分布特征;而 第 2 模态则呈现"+、一、+"的空间分布特征;第 3 模态则表现出一致的空间分布特征。我国夏季地气温差同 样存在着 3 种空间模态分布,第 1 模态表现出我国东部和西部地区夏季地气温差反相的空间分布特征;第 2 模态 则呈现出"-、+、-"的空间分布特征;而第 3 模态则表现出"+、一、+、一"的空间分布特征。

分析结果进一步表明我国春季和夏季地气温差第 1 模态与我国长江中下游地区夏季降水均存在正相关关 系,而与华北地区出现负相关关系。而且,夏季更加显著。这主要是由于我国东部和西部热力差异增强,有利于 在我国东部地区出现西北风异常,这说明东亚夏季风偏弱,不利于水汽向北输送,有利于华北地区降水偏少。并 且,在我国东南部地区出现水汽辐合和上升运动,从而有利于我国长江中下游地区夏季降水偏多。

关键词 地气温差 时空变化特征 夏季降水 文章编号 1006-9585 (2016) 06-0621-12 doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15196

中图分类号 P467

文献标识码 A

## Characteristics of Temporal and Spatial Variations in Land–Air Temperature Difference in China and Its Association with Summer Rainfall

ZHOU Liantong<sup>1</sup> and WEN Liming<sup>2</sup>

Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190
 Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu 610072

**Abstract** Based on daily observations and NCEP/NCAR reanalysis data from 1960 to 2006, the characteristics of temporal and spatial variations in land-air temperature difference are analyzed by using EOF (Empirical Orthogonal Function) analysis. The results show that there are three principal spatial patterns of spring land-air temperature difference in China. The most dominant pattern shows a spatial distribution of "-" "+" "-" "+" from south to north in the spring land-air temperature difference. The second pattern shows spatial distribution of "+" "-" "+". The third

收稿日期 2015-08-24; 网络预出版日期 2016-04-06

作者简介 周连童, 男, 1974年出生, 研究员, 主要从事陆气相互作用研究。E-mail: zlt@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41175055、41475053,国家重点研发计划 2016YFA0600603

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41175055 and 41475053), National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0600603)

pattern shows a spatially uniform distribution. There are also three principal spatial patterns of the summer land-air temperature difference in China. The most dominant pattern shows opposite spatial distributions of land-air temperature difference in eastern and western China. The second pattern shows a spatial distribution of "-" "+" "-". The third pattern shows a spatial distribution of "+" "-" "+".

The analysis identifies a significant positive correlation between the land-air temperature difference and the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River, and a negative correlation over North China that more significant in the summer. The analysis results suggest that with increased thermal contrast between eastern and western China, northwesterly wind anomalies become more significant in eastern China. This will result in weaker than normal summer monsoon and is unfavorable for northward moisture transport. Moreover, under this circulation pattern, ascending motions and moisture convergence are located at southeastern China, which contribute to an increase in summer rainfall over the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Keywords Land-air temperature difference, Temporal and spatial variation, Summer rainfall

## 1 引言

目前,国际气候与环境问题的日益尖锐,气候 变化异常以及所造成的灾害已成为各国人民和政 府极为关注的重要科学问题。我国地域广大,幅员 辽阔,同时也面临着种类繁多,分布广泛的各类气 象灾害,尤其是以降水分布不均造成的大范围的旱 涝灾害一直以来都极为严重地影响着我国的社会 经济生活。同时,由于我国具有多种类型的典型下 垫面,既有戈壁、沙漠等典型干旱区、黄土高原和 草原等半干旱区,又有季风湿润区,还有全球最高 的高原——青藏高原,这些全球具有代表性和典型 性的下垫面的能量和水分循环特征的差异对于全 球气候和水文的变化,特别是对气候灾害的发生都 有严重影响。其中,我国东部地区是全球强季风区, 华南和长江流域是年降水量在 1400 mm 以上的典 型季风湿润区,这些区域植被茂密、土壤湿润,地 表感热加热相对较弱;而我国西北是具有戈壁和沙 漠的典型干旱区,这里年降水量不足 50 mm,而且 此区域太阳辐射强烈,年蒸发能力达到 3000 mm 以 上,大片土地裸露或植被稀疏,土壤极为干燥,地 表感热强,这个区域是典型干旱区。

在陆气相互作用的过程中,感热对于陆面和大 气边界层热力交换起着极为重要的作用。(叶笃正 和高由禧,1979;赵平和陈隆勋,2001;李栋梁等, 2003;赵勇和钱永甫,2007)。我国西北干旱区感 热异常对我国气候也有着重要的影响。西北干旱区 陆—气相互作用观测试验研究(NWC-ALIEX)的 研究结果对于理解我国西北地陆气相互作用有着 重要科学意义(张强等,2005)。布和朝鲁等(2002)

利用再分析资料分析指出,我国西北干旱、半干旱 区是整个欧亚大陆上陆面感热最强的区域之一。周 连童和黄荣辉(2008)、周连童(2010)利用观测 资料计算得出,我国西北干旱、半干旱地区是欧亚 大陆中的"热垫" (warm lying surface), 是整个欧 亚大陆陆面感热最强的地方之一。Zhou (2009) 利 用台站观测资料分析了我国西北地区 1960~2000 年春季和夏季的地表感热通量特征。而且,我国西 北地区春季和夏季的地表感热通量存在显著的年 代际变化特征(Zhou et al., 2010)。范丽军等(2004) 指出,地气温差是计算地表感热通量的一个主要因 子,并且分析了西北干旱区地气温差的时空变化特 征。Wei et al. (2002)、周连童和黄荣辉(2006)分 析了我国西北干旱、半干旱区春季和夏季地气温差 的年代际变化特征及其与夏季降水的联系。周连童 和黄荣辉(2008)利用台站观测资料和再分析资料 研究分析了我国西北干旱、半干旱地区感热与中国 夏季降水的关系。Zhou and Huang (2010)则是从 动力角度分析了西北地区感热输送的变化对该地 区夏季降水的影响的物理过程。此外,周长春等 (2009)指出我国西北地区感热对当地的温度和降 水都有明显的影响。并且, 高荣等(2008)利用数 值模式模拟了西北地区感热异常影响局地和周围 的大气环流异常。因此,从这些研究中我们可以发 现,我国西北地区是一个显著的感热热源,并且对 周围及局地地区的气候变化产生影响(周连童和黄 荣辉, 2008; Zhou and Huang, 2010)。因此, 研究 我国陆面感热异常变化对气候的影响具有重要的 科学意义和应用价值。

众所周知,季风是由海陆热力差异所引起的, 我国西北干旱区与东部季风湿润区也同样存在明

6 期	周连童等: 我国春夏季地气温差的时空变化特征及其与夏季降水的联系	
No. 6	ZHOU Liantong et al. Characteristics of Temporal and Spatial Variations in Land-Air Temperature Difference in China	623

显的热力差异,这必然会引起大气环流的变化,从 而对我国气候变化产生影响。并且,这些全球具有 代表性和典型性的下垫面的感热通量的差异对于 我国夏季降水的变化,特别是对气候灾害的发生有 着重要的影响。汤懋苍等(1986)的研究指出了我国 冬季地温与春夏降水的关系。汤懋苍等(1987,1988) 可以根据地温异常预报汛期的降水。因此, 地温对于 我国汛期降水的预报是一个重要物理因子之一。但 是,关于我国陆气温差对我国气候影响的研究还比 较少,之前的研究限于我国西北地区地气温差对降 水的影响。曲迎乐等(2008)分析并比较了我国东 部和西部地区气温和降水的差异,他们指出我国东 部和西部地区在气温和降水方面有着明显的差别。 Zhou and Huang (2014)利用再分析资料分析得出 了我国东部和西部地区的感热和潜热通量存在明 显的差异。温李明等(2014)利用台站资料分析我 国东部和西部地区地气温差有显著差异。并且, Zhou and Du (2016)利用 CMIP5 模式资料分析也 发现中国东部和西部的长波辐射、短波辐射以及感 热和潜热通量都有显著差异。也指出感热通量的变 化主要受到地气温差的影响(范丽军等, 2004; Zhou, 2009)。但是, 对于我国地气温差的时空变 化特征以及对气候变化的影响还很少研究。因此, 研究我国地气温差的时空变化特征及其与降水的 联系具有重要的科学意义和应用价值。因此,本文 主要将利用 EOF 方法分析我国春季和夏季地气温 差的时空变化特征及其和我国夏季降水的联系。

#### 2 资料

(1)中国 218个台站观测的地表面温度和地表 气温资料:1960~2006年中国 218站的逐日 4个时次[02:00(北京时间,下同)、08:00、14:00和 20:00] 的地温和气温观测资料(图 1);

(2) 中国 160 个台站降水资料: 1960~2006 年 中国 160 站的逐月降水观测资料;

(3) NCEP/NCAR 再分析资料: 1960~2006 年 各层次的风场、气温、比湿和海平面气压资料。

## 3 我国春季和夏季地气温差的时空 变化特征

关于我国西北干旱区陆气相互作用的研究,近

年来已经引起很多学者的关注和研究。周连童 (2010)利用再分析资料分了欧亚大陆地区感热通 量的时空变化特征。并且,我国西北干旱、半干旱 地区的地气温差存在着明显的年代际变化特征 (Wei et al., 2002; 周连童和黄荣辉, 2006; 范丽 军等,2004)。温李明等(2014)利用观测资料分 别分析了东部地区和西部地气温差的年代际变化 特征。因此,为了进一步深入了解我国地气温差的 时空变化特征以及对降水的影响。有必要对我国春 夏季地气温差的时空变化特征进行分析。本文选取 我国 218 个台站的地温、气温逐日的 4 个时次 (02:00、08:00、14:00 和 20:00)的站点资料,把 每天 4 个时次观测值的平均值作为每日的地温 (Ts) (0 m)、气温 (Ta) (2 m) 数据, 然后根据 此日资料计算出我国春季(3~5月)和夏季(6~8 月)地气温差(地温减去气温)的距平,取1961~ 2000年各月平均值为气候值。下面,利用经验正交 函数分析方法 (EOF) 对我国春季和夏季的地气温 差的时空变化特征进行分析。经验正交函数分析 (EOF) 又称为主成份分析或者是主分量分析, 它 可以用来研究气象场主导的时空变化型,可以最大 限度的解释原始数据的方差变化。因此,本文就采 用此方法对我国春季和夏季地气温差的时空变化 特征进行分析,以便对我国地气温差的时空变化特 征有更为清晰的认识和了解。

#### 3.1 我国春季地气温差的时空变化特征

图2表示我国春季地气温差EOF的第1模态及 其时间系数(第1模态的方差贡献占16.3%)。EOF 第1模态表明,我国西北、东北以及长江中下游地 区地气温差大部分为正值。而华南和华北地区则为 负值。由此可见,东部地区从南至北呈现出"一、 +、一、+"空间分布特征。第1模态的时间系数 显示出地气温差呈现显著的年际变化特征,从 20 世纪 70 年代末期开始,时间系数跃变为正值,表 明在 20 世纪 70 年代末期以后,我国西北、东北和 长江中下游地区地气温差值显著大,而华南和华北 地区地气温差值则明显减小。需要指出的是,我国 西藏地区明显正的大值区,但是由于青藏高原地区 几乎没有站点,由于插值原因,造成该地区数值偏 大。其它模态和季节也出现类似问题。

图 3 表示我国春季地气温差 EOF 的第 2 模态 及其时间系数(第 2 模态的方差贡献占 11.2%)。 EOF 第 2 模态表明,我国西北大部分地区地气温差





为负值,东部地区从南至北呈现"+、-、+"的 空间分布特征。从时间系数可以发现,20世纪80 年代中期以前大部分年份是负值,之后转变为大部 分年份是正值,说明春季地气温差的第2模态表现 出20世纪80年代中期发了显著的年代际变化。 图4表示我国春季地气温差EOF的第3模态及 其时间系数(第3模态的方差贡献占10.3%)。EOF 的第3模态表明,我国大部分地区是负值,即春季 我国地气温差显示出一致空间分布特征。从其时间 系数上看,20世纪60年代大部分为负值,70年代



图 3 我国春季地气温差的 EOF (a) 第 2 模态及其 (b) 时间系数

Fig. 3 (a) The second EOF mode of the spring land-air temperature difference in China and (b) the corresponding time coefficients



图 4 我国春季地气温差的 EOF (a) 第 3 模态及其(b) 时间系数 Fig. 4 (a) The third EOF mode of spring land-air temperature difference in China and (b) the corresponding time coefficients

到 90 年代中后期转变为正值,90 年代后期又转变 为负值。第 3 模态显示出我国地气温差也表现出明 显的年代际变化特征。

#### 3.2 我国夏季地气温差的时空变化特征

图 5 表示我国夏季地气温差 EOF 的第 1 模态 及其时间系数(第 1 模态的方差贡献占 20.1%)。 EOF 第 1 模态表明,我国西北地区除新疆西部小 部分地区以外,其余大部分地区地气温差是正值, 而华南地区、长江中下游地区以及华北地区为负 值,即其空间分布呈现出东西反相的分布特征。从 时间系数可以看到,20世纪70年代末以前为负值, 70 年代末以后跃变为正值,即我国西部地区地气 温差从 70 年代末以后跃变增大,而东部地区则开 始变小。

图6表示我国夏季地气温差EOF的第2模态及 其时间系数(第2模态的方差贡献占8.9%)。EOF 第2模态表明,我国西北地区地气温差为负值,华 南地区为负值,华北地区为正值,而东北地区为负 值,也即在我国东部地区夏季地气温差呈现出"一、 +、一"的三极子空间分布特征。从时间系数来看, 20世纪60年代主要为负值,自20世纪60年代末 至90年代末主要为正值,之后又转变为负值,表 明夏季的地气温差存在着比较明显的年代际变化 特征。

图 7 表示我国夏季地气温差 EOF 的第 3 模态及 其时间系数(第 3 模态的方差贡献占 8.0%)。EOF 第 3 模态表明,我国西北大部分地区地气温差为负 值,而东部地区从南至北则表现出"+、-、+、 -"的空间分布特征。从其时间系数的变化则可以 看出地气温差存在年际变化特征。

## 4 我国春夏季地气温差与我国夏季 降水的联系

周连童和黄荣辉(2006,2008)及 Zhou and Huang(2010)的分析指出,西北地区地气温差以 及感热的变化对我国夏季降水有着明显的影响。那 么,我国地气温差的不同分布特征势必也会和我国 夏季降水有着明显的联系。因此,本节将利用相关 分析方法分析我国地气温差和我国夏季降水的联 系。

我们首先分析了春季地气温差第1模态时间系数(PC1)与我国夏季降水的关系。图8表示我国

春季(3~5月)地气温差 EOF 第1模态 PC1 与我 国夏季(6~8月)降水的相关系数分布。由图 8 可 见,我国春季地气温差第1模态与我国西北地区、 长江中下游地区夏季降水存正相关区域,而在华北 地区出现负相关区域。通过以上分析表明,我国春 季地气温差和我国夏季降水有着密切的联系。

对比图 2 和图 5 可以发现,全国春季陆气温差 大部分地区为正值,只有华南和华北小部分地区为 负值,东部地区从南到北呈现"一、+、一、+" 的分布。然而到了夏季,可以发现地气温差的负值 区域增大了,整个东部地区变为负异常,造成我国 东部和西部地区地气温差相反的分布特征。从而造 成我国东部和西部地区热力差异增强,影响降水和 环流异常

我们又分析了夏季地气温差第1模态PC1与 我国夏季降水联系。图9表示我国地区夏季地气 温差EOF第1模态PC1与我国夏季降水的相关系 数分布。由图9可见,我国夏季地气温差第1模 态与我国西北地区,长江中下游地区夏季降水存 在显著的正相关,而在华北地区出现显著的负相 关。通过以上分析表明,我国夏季东部和西部的 地气温差的差异和我国夏季降水有着更显著的联 系。这也说明从春季到夏季,我国东部和西部地 区地气温差的差异增强,和我国夏季降水的联系 越来越显著。

# 5 我国春夏季地气温差与大气环流的联系

众所周知,降水异常与大气环流有着密切的联 系。因此,本节将分析我国地气温差和大气环流的 联系。图 10 表示我国春季地气温差 EOF 第 1 模态 PC1 与夏季 850 hPa 风场、水汽辐合辐散和上升运 动的回归及相关分析。从图 10a 可以发现,在蒙古 国地区上空出现了一个异常反气旋,这使得我国西 部地区明显的南风异常。而使我国东部地区出现显 著的西北风异常,这会有利于东亚夏季风环流减 弱,同时不利于水汽向北输送。并且,华北地区上 空出现水汽辐散(图 10b)和下沉运动(图 10c), 有利于华北地区降水偏少。然而,从图 10a 也可以 发现东南部地区出现弱气旋性环流异常,容易造成 水汽在我国南方地区出现水汽辐合(图 10b)和上 升运动加强(图 10c),从而有利于我国长江中下游



图 5 我国夏季地气温差的 EOF(a) 第1 模态及其(b) 时间系数

Fig. 5 (a) The first EOF mode of summer land-air temperature difference in China and (b) the corresponding time coefficients



图 6 我国夏季地气温差的 EOF (a) 第 2 模态及其 (b) 时间系数 Fig. 6 (a) The second EOF mode of summer land-air temperature difference in China and (b) the corresponding time coefficients



图 7 我国夏季地气温差的 EOF(a) 第 3 模态及其(b) 时间系数

Fig. 7 (a)The third EOF mode of summer land-air temperature difference in China and (b) the corresponding time coefficients



图 8 我国春季地气温差 EOF 第 1 模态 PC1 与我国夏季降水量的相关系数分布。深、浅填色区表示通过 99%、95%信度的相关显著性检验 Fig. 8 Spatial pattern of the correlation coefficient between the first EOF mode (PC1) of spring land-air temperature difference and summer rainfall for the period of 1960–2006. The dark and light shaded regions indicate the correlation at/above the 99% and 95% confidence levels, respectively

地区夏季降水偏多。

到了夏季,这种环流形式依然存在,而且,相 比于春季,夏季地气温差和我国大气环流异常有着 更加显著的关系(图11)。 6 结论

利用我国 1960~2006 年月平均的地温和气温



图 9 我国夏季地气温差 EOF 第 1 模态 PC1 与我国夏季降水量的相关系数分布。深、浅填色区表示通过 99%、95%信度的相关显著性检验 Fig. 9 Spatial pattern of the correlation coefficient between PC1 of spring land-air temperature difference and summer rainfall for the period of 1960–2006. The dark and light shaded regions indicate the correlation is at/above the 99% and 95% confidence levels, respectively



图 10 我国春季地气温差 EOF 第 1 模态与夏季(a) 850 hPa 风场(单位: m s<sup>-1</sup>)、(b) 整层积分水汽辐合辐散(单位: 10<sup>2</sup> g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)和(c) 垂直 运动(单位: 10<sup>2</sup> Pa s<sup>-1</sup>)的回归分析。填色为超过 99%信度的相关显著性检验

Fig. 10 Regressions of (a) summer winds at 850 hPa (m s<sup>-1</sup>), (b) the water vapor convergence (integrated over 1000–100 hPa, units:  $10^2$  g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), and (c) vertical velocity at 700 hPa ( $10^2$  Pa s<sup>-1</sup>) with respect to PC1 of spring land-air temperature difference for the period of 1960–2006. The shaded regions are for values significant at/above the 99% confidence level



图 11 我国夏季地气温差 EOF 第 1 模态与夏季(a) 850 hPa 风场(单位: m s<sup>-1</sup>)、(b) 整层积分水汽辐合辐散(单位: 10<sup>2</sup> g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)和(c) 垂直 运动(单位: 10<sup>2</sup> Pa s<sup>-1</sup>)的回归分析。填色为超过 99%信度的相关显著性检验

Fig. 11 Regressions of (a) summer winds at 850 hPa (m s<sup>-1</sup>), (b) the water vapor convergence (integrated over 1000–100 hPa, units:  $10^2$  g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), and (c) vertical velocity at 700 hPa ( $10^2$  Pa s<sup>-1</sup>) with respect to PC1 of summer land-air temperature difference for the period of 1960–2006. The shaded regions are for values significant at/above the 99% confidence level

观测资料对我国春季和夏季地气温差(地温减去气温)做了 EOF 分析。分析结果表明:我国春季地气温差主要存在着3种空间模态分布,第1模态表现了我国春季地气温差西北地区为正值,而东部地区从南至北呈现出"-、+、-、+"空间分布特征;第2模态也显示出我国西北地区地气温差大部分为负值,东部地区从南至北呈现"+、-、+"的空间分布特征;第3模态则表示我国春季地气温差空间分布的一致性。此外,地气温差的3个模态都表现出较为明显的年代际变化特征。

分析结果还表明,我国夏季地气温差同样存在 着3种空间模态分布,第1模态比较明显表现出我 国东部和西部地区夏季地气温差反相的空间分布 特征;第2模态可以发现我国西北大部分地区地气 温差为负值,而东部地区夏季地气温差呈现出"一、 +、一"的三极子空间分布特征。第3模态表明, 我国夏季西北大部分地区地气温差为负值,而东部 地区从南至北则表现出"+、-、+、-"的空间 分布特征。此外,第1模态和第2模态表现出较明 显的地气温差的年代际变化特,而第3模态的年际 变化则更为明显。

我国春季和夏季地气温差第1模态与我国西北 地区,长江中下游地区夏季降水均存正相关关系, 而在华北地区出现负相关关系。而且,夏季更加显 著。由于夏季第1模态的地气温差表现东部和西部 更加明显的反向变化特征。因此,我国东部和西部 地区热力差异和我国夏季降水有着显著的联系。

我国春季和夏季地气温差与大气环流的相关 分析表明,我国东部和西部热力差异增强,有利于 在我国东部地区出现显著的西北风异常,这说明东 亚夏季风环流减弱了,同时不利于水汽向北输送。 并且,华北地区上空出现水汽辐散和下沉运动,有 利于该地区降水偏少。然而在我国东南部地区出现 水汽辐合和上升运动,从而有利于我国长江中下游 地区夏季降水偏多。并且,从春季到夏季,我国东 部和西部地区地气温差的差异的增强和我国夏季 降水的联系越来越显著。

#### 参考文献(References)

- 布和朝鲁, 纪立人, 崔茂常. 2002. 夏季我国干旱、半干旱区陆面过程能 量平衡及其局地大气环流 [J]. 气候与环境研究, 7 (1): 61–73. Bueh Cholaw, Ji Liren, Cui Maochang. 2002. Energy balance of land surface process in the arid and semi-arid regions of China and its relation to the regional atmospheric circulation in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7 (1): 61–73, doi: 10.3969/j.issn. 1006-9585.2002.01.007.
- 范丽军, 韦志刚, 董文杰. 2004. 西北干旱区地气温差的时空分布特征 分析 [J]. 高原气象, 23 (3): 360–367. Fan Lijun, Wei Zhigang, Dong Wenjie. 2004. The characteristic of temporal and spatial distribution of the differences between ground and air temperature in the arid region of Northwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (3): 360–367, doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2004.03.011.
- 高荣,董文杰,韦志刚. 2008. 西北干旱区感热异常对中国夏季降水影 响的模拟 [J]. 高原气象, 27 (2): 320–324. Gao Rong, Dong Wenjie, Wei Zhigang. 2008. Numerical simulation of the impact of abnormity of sensible heat flux in northwest arid zone on precipitation in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (2): 320–324.
- 李栋梁, 魏丽, 李维京, 等. 2003. 青藏高原地面感热对北半球大气环流 和中国气候异常的影响 [J]. 气候与环境研究, 8 (1): 60–70. Li Dongliang, Wei Li, Li Weijing, et al. The effect of surface sensible heat flux of the Qinghai–Xizang Plateau on general circulation over the Northern Hemisphere and climatic anomaly of China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (1): 60–70, doi: 10.3969/j.issn. 1006-9585.2003.01.008.
- 曲迎乐, 高晓清, 陈文, 等. 2008. 近 50 年来我国东、西部地面气温和降 水变化对比的初步分析 [J]. 高原气象, 27 (3): 524–529. Qu Yingle, Gao Xiaoqing, Chen Wen, et al. 2008. Comparison of surface air temperatures and precipitation in eastern and western China during 1951–2003 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (3): 524–529.
- 汤懋苍, 尹建华, 蔡洁萍. 1986. 冬季地温分布与春、夏降水相关的统计 分析 [J]. 高原气象, 5 (1): 40–52. Tang Maocang, Yin Jianhua, Cai Jieping. 1986. A statistical relationship between the field of soil temperature in winter and of the precipitation in spring and flood season [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 5 (1): 40–52.
- 汤懋苍,张建,王敬香. 1987. 用冬季地温预报汛期降水距平的初步方 法 [J]. 高原气象, 6 (2): 150–160. Tang Maocang, Zhang Jian, Wang Jingxiang. 1987. A primary method for predicting rainfall amount of flood season by winter's soil temperature [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 6 (2): 150–160.
- 汤懋苍,张建,王敬香,等. 1988. 我国季平均的 0.8 m 地温距平场与后 一季降水场的相关分析 [J]. 气象学报,46 (4): 481-485. Tang Maocang, Zhang Jian, Wang Jingxiang, et al. 1988. The similarity

between the seasonal anomalous maps of soil temperature and the precipitation of the subsequent season [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 46 (4): 481–485, doi: 10.11676/qxxb1988.061.

- Wei Z G, Fan L J, Huang R H, et al. 2002. The correlation analysis between the spring (Ts-Ta) in the arid region in Northwest China and Chinese summer rainfall[C]//International Workshop on the Air–Land Interaction in Arid and Semi-Arid Areas and Its Impact on Climate (IWALI). Dunhuang-City, Gansu Province, China, 17–21 August, 182–185.
- 温李明,周连童,黄荣辉,等. 2014. 我国东西部地区地气温差的年代际 变化特征 [J]. 气候与环境研究, 19 (5): 636-648. Wen Liming, Zhou Liantong, Huang Ronghui, et al. 2014. Characteristics of interdecadal variability in the difference between surface temperature and surface air temperature in Southeast and Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (5): 636-648, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13106.
- 叶笃正,高由禧. 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 278pp.
  Ye Duzheng, Gao Youxi. 1979. The Meteorology of Tibet Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 278pp.
- 张强,黄荣辉,王胜,等. 2005. 西北干旱区陆—气相互作用试验 (NWC-ALIEX) 及其研究进展 [J]. 地球科学进展, 20 (4): 427–441.
   Zhang Qiang, Huang Ronghui, Wang Sheng, et al. 2005. NWC-ALIEX and its research advances [J]. Advance in Earth Science (in Chinese), 20 (4): 427–441, doi: 10.3321/j.issn:1001-8166.2005.04.008.
- 赵平, 陈隆勋. 2001. 35 年来青藏高原大气热源气候特征及其与中国降 水的关系 [J]. 中国科学 (D 辑), 31 (4): 327–332. Zhao Ping, Chen Longxun. 2001. Climatic features of atmospheric heat source/sink over the Qinghai–Xizang Plateau in 35 years and its relation to rainfall in China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 44 (9): 858–864, doi: 10.1007/BF02907098.
- 赵勇, 钱永甫. 2007. 青藏高原地表热力异常与我国江淮地区夏季降水 的关系 [J]. 大气科学, 31 (1): 145–154. Zhao Yong, Qian Yongfu. 2007. Relationships between the surface thermal anomalies in the Tibetan Plateau and the rainfall in the Jianghuai area in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (1): 145–154, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.01.15.
- 周长春, 高晓清, 陈文, 等. 2009. 中亚感热异常对我国西北温度、降水 的影响 [J]. 高原气象, 28 (2): 395–401. Zhou Changchun, Gao Xiaoqing, Chen Wen, et al. 2009. The impact of sensible heat flux anormaly over central Asia on temperature and precipitation in Northwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (2): 395–401.
- Zhou L T. 2009. Difference in the interdecadal variability of spring and summer sensible heat fluxes over Northwest China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2 (2): 119–123, doi: 10.1080/16742834.2009. 11446785.
- 周连童. 2010. 欧亚大陆干早半干旱区感热通量的时空变化特征 [J]. 大 气科学学报, 33 (3): 299–306. Zhou Liantong. 2010. Characteristics of temporal and spatial variations of sensible heat flux in the arid and semi-arid region of Eurasia [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 299–306, doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2010.03.005.
- 周连童,黄荣辉.2006. 中国西北干旱、半干旱区春季地气温差的年代际 变化特征及其对华北夏季降水年代际变化的影响 [J]. 气候与环境研 究,11 (1): 1–13. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2006. Characteristics

of interdecadal variability of the difference between surface temperature and surface air temperature in spring in arid and semi-arid region of Northwest China and its impact on summer precipitation in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (1): 1–13, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2006.01.01.

- 周连童,黄荣辉. 2008. 中国西北干旱、半干旱区感热的年代际变化特征 及其与中国夏季降水的关系 [J]. 大气科学, 32 (6): 1276–1288. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2008. Interdecadal variability of sensible heat in arid and semi-arid Regions of Northwest China and its relation to summer precipitation in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (6): 1276–1288, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895. 2008.06.04.
- Zhou L T, Huang R H. 2010. Interdecadal variability of summer rainfall in Northwest China and its possible causes [J]. International Journal of Climatology, 30 (4): 549–557, doi: 10.1002/joc.1923.
- Zhou L T, Huang R H. 2014. Regional differences in surface sensible and latent heat fluxes in China [J]. Theor. Appl. Climatol., 116 (3–4): 625–637, doi: 10.1007/s00704-013-0975-0.
- Zhou L T, Du Z C. 2016. Regional differences in the surface energy budget over China: An evaluation of a selection of CMIP5 models [J]. Theor. Appl. Climatol., 124 (1–2): 241–266, doi: 10.1007/s00704-015-1407-0.
- Zhou L T, Wu R G, Huang R H. 2010. Variability of surface sensible heat flux over Northwest China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 3 (2): 75–80, doi: 10.1080/16742834.2010.11446847.