青藏高原前期冬春季地面热源与我国夏季降水关系的初步分析

刘晓冉[1,2] 李国平[2] 程炳岩[1]

1 重庆市气候中心，重庆 401147
2 成都信息工程学院大气科学系，成都 610225

摘 要 首先对青藏高原地表热通量再分析资料与自动气象站（AWS）实测资料进行对比，结果表明：相对于美国国家环境预报中心和国家大气中心 20 世纪 90 年代研制的 NCEP/NCAR（Kalnay 等 1996）和 NCEP/DOE（Kanamitsu 等 2002）再分析资料，ECMWF（Uppala 等 2004）资料在高原地区的地表热通量具有较好的代表性。进一步利用奇异值分解（SVD）方法分析了 ECMWF 资料反映的高原地面热源与我国夏季降水的关系，发现前期青藏高原主体的冬季地面热源与长江中下游地区夏季降水量呈负相关，与华北和东南沿海地区的夏季降水量呈正相关。而长江中下游地区夏季降水量还与春季高原南部的地面热源存在负相关、与高原北部的地面热源存在正相关。高原冬、春季地面热源场的变化是影响我国夏季降水的重要因子。

关键词 青藏高原 地面热源 自动气象站 夏季降水 奇异值分解
文章编号 1006－9895（2008）03－0561－11 **中图分类号** P426 **文献标识码** A

The Preliminary Analysis of the Relationships between the Surface Heat Source over the Tibetan Plateau in Winter and Spring and the Summer Rainfall over China

LIU Xiao-Ran[1,2], LI Guo-Ping[2], and CHENG Bing-Yan[1]

1 *Chongqing Climate Center*, *Chongqing* 401147
2 *Department of Atmospheric Sciences*, *Chengdu* 610225

Abstract It is well known that the thermal effects of the Tibetan Plateau play an import role in the general circulation of atmosphere and climate in East Asian, even in the global world. The reanalysis data can server as a beneficial supplement to research the thermal effects of the Tibetan Plateau. There are few researches on the relationships between the summer rainfall over China and the surface heat source over the Tibetan Plateau through the use of the surface heat fluxes of reanalysis data. However, there is a doubt about the reliability of the surface heat fluxes of the reanalysis data over the Tibetan Plateau. Therefore, the surface fluxes of sensible heat and latent heat for the three sets of reanalysis data of NCEP/NCAR (NCEP1), NCEP/DOE (NCEP2), and ECMWF (ERA) are compared with those of Automatic Weather Station (AWS) data over the Tibetan Plateau under the China-Japan cooperation research project on the Asian monsoon mechanism and the Global Energy and Water Balance Experiment-Tibetan Monsoon Experiment (GAME/Tibet). The results show that the variation trends of both daily and monthly surface heat fluxes of reanalysis data are basically in accordance with those of AWS data. The surface heat fluxes of ERA data have better representations compared to those of NCEP1 data and NCEP2 data, especially for the sensible

收稿日期 2006－12－31，2007－04－16 收修定稿
资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418302
作者简介 刘晓冉，男，1982 年出生，硕士，主要从事天气、气候动力学研究。E-mail：liuxiaoran8283@126.com

heat flux in western Tibetan Plateau. The sensible heat flux of ERA data can also show the interannual change of the sensible heat flux of AWS data.

On the basis of the above, the relationships between surface heat source over the Tibetan Plateau with ERA data and the summer rainfall in China are investigated with singular value decomposition (SVD) method. It is found that the previous surface heat source over the plateau region in winter is negatively correlated with the summer rainfall over the mid-lower reaches of the Yangtze River, and positively correlated with rainfall in North China and the coast of southeastern China. And the summer rainfall in the mid-lower reaches of the Yangtze River also has negative correlation with the surface heat source over the southern plateau and positive correlation with the surface heat source over the northern plateau in spring, with the distinctive correlation areas in the Karakorum Mountain and the Nyainqentanglha Mountains. The surface heat sources over the Tibetan Plateau in both winter and spring are important influence factors on the summer rainfall in China. The long-term trends of surface heat sources over the Tibetan Plateau in winter and spring are both in accordance with the interdecadal variation of snow cover over the Tibetan Plateau, and their effects on the summer rainfall in China can be confirmed well by each other.

Key words the Tibetan Plateau, surface heat source, Automatic Weather Station, summer rainfall, singular value decomposition

1 引言

青藏高原是世界上海拔最高、地形最复杂的高原，被称之为地球上的“第三极”，它东西长约3000 km，接近大气长波的半波长尺度；南北宽约 1000 km，相当于大气长波的振幅；平均海拔高度在 4000 m 以上，约达到对流层高度的 1/3。多年来的研究表明，青藏高原热状况的变化对东亚乃至全球的大气环流和天气气候有重要影响。早在 20 世纪 50 年代，叶笃正等[1]和 Flohn[2]就指出夏季青藏高原上空为一热源。Flohn[3]指出南亚高压的形成是由于青藏高原热力作用造成的。Yanai 等[4]指出青藏高原热源维持着高原及临近地区的垂直环流。Li 等[5]指出春季青藏高原感热加热是独立于低纬度印度洋地区潜热加热的重要热源，它是导致高原南侧气温梯度反向的重要原因。吴国雄等[6]阐明了青藏高原夏季的抬升加热影响亚洲气候的机理。

青藏高原地区测站稀少，而天气气候又存在明显的空间差异和年际变化，所以时间连续性好，空间范围大的再分析资料就成为研究高原热力作用的有益补充。目前，应用较为广泛的再分析资料是美国国家环境预报中心（NCEP）和国家大气中心（NCAR）20 世纪 90 年代相继研制的 NCEP/NCAR（简称 NCEP1）[7]和 NCEP/DOE（简称 NCEP2）[8]再分析资料，以及 ECMWF 第二代再分析资料（简称 ERA）[9]。近年来，已有不少学者利用高原地区的 NCEP1 地表热通量再分析资料来研究青藏高原的热力作用及其影响，姚永红等[10]和衷雅芳等[11]分析了青藏高原附近地表感热通量的时空分布变化特征。张永生等[12]和张艳等[13]的研究都表明春季高原地表感热加热对亚洲夏季风的爆发有重要作用。董敏等[14]研究了青藏高原地表感热、潜热的气候状况及其与初夏东亚大气环流之间的关系。关于青藏高原积雪作用的研究表明，高原冬春积雪与我国长江中下游夏季降水呈显著正相关，与华北和华南夏季降水呈负相关[15~17]。陈乾金等[17]和董敏等[18]在探讨高原积雪的影响机制中都指出高原冬春积雪多（少）减弱（增强）了高原冬春的地面热源作用。那么，高原冬春地面热源与我国夏季降水是否确实存在类似的关系？目前在这方面的研究还较少。

因此，本文利用高原地表热量通量再分析资料，对高原前期冬春季地面热源与后期我国夏季降水的关系进行初步探讨，从中得到的一些统计结果可为我国汛期降水的预测提供参考依据。由于地表热通量再分析资料的可靠性，特别是其在高原地区代表性存在质疑，关于再分析资料在我国的应用检验已有一些工作[19~23]，宋敏红等[24]也对青藏高原地区 NCEP 地面辐射通量资料进行了检验，但目前对高原地表热通量再分析资料的检验工作还较少。有鉴于此，本文利用中日亚洲季风机制合作研究计划和 GAME/Tibet 项目设置在青藏高原的 6 个自动气象站（简称 AWS）计算得到的地表感热、潜热通量，对 NECP1、NCEP2 和 ERA 三套再分析资料

的地表感热、潜热通量资料进行初步的比较、验证。在此基础上，用奇异值分解（SVD）方法分析了冬春季高原地面热源与我国夏季降水的关系。

2　资料和方法

本文利用中日亚洲季风机制合作研究计划设置在青藏高原东部地区拉萨、日喀则、那曲和林芝四地的自动气象站（1993 年 7 月～1999 年 3 月），以及 GAME/Tibet 项目设置在高原西部改则和狮泉河两地的自动气象站（1997 年 9 月～1999 年 3 月）的近地层梯度观测资料，应用近地层通量-廓线法计算得到各站的 AWS 地表感热、潜热通量[25, 26]。同时，选用高原范围（27.5°N～40°N，75°E～102.5°E）1958～2002 年 ERA 的地表感热、潜热通量再分析资料，1993～1999 年 NCEP1 和 NCEP2 的地表感热、潜热通量资料，以及国家气候中心提供的 1958～2002 年全国 160 个测站的月平均降水量资料。

SVD 是研究两个要素场相关结构的方法，能够最大限度地分离出两场的高相关区。一些研究也表明，SVD 方法在气候诊断分析中具有普适性，特别适合于大尺度气象场的遥相关型研究[27]。因此，本文采用 SVD 方法研究青藏高原前期冬春季地面热源异常（左场）对我国夏季降水异常（右场）的影响，而同性相关系数的分布反映展开系数置身气象场时间变化程度大小的地理分布，在一定程度上代表了左、右气象场的耦合相关特征。

3　再分析资料的检验

为了对地表热通量再分析资料与 AWS 观测资料计算得到的地表热通量进行定量对比，首先采用双线性插值方法将格点再分析资料插值到实际站点，然后再作比较。

3.1　逐日地表热通量资料的对比

由图 1 可见，1998 年日喀则的 NCEP1、NCEP2 和 ERA 三套逐日地表感热通量再分析资料与 AWS 资料计算值的时间变化趋势都基本吻合，AWS 感热通量在 1998 年 1～3 月呈持续上升后，在 4 月呈现下降趋势，5 月又呈上升趋势达到最大，6 月以后开始呈下降趋势，这些变化趋势在三套再分析资料中也都反映得较为清楚。AWS 潜热通量在春、夏季变化比较剧烈，因此，再分析资料与 AWS 资料的吻合程度不如感热通量，数值明显比 AWS 值偏小，但还是能够反映潜热通量在上半年的总体上升和下半年的总体下降趋势。

通过计算 1993 年 7 月～1999 年 3 月高原 6 个站逐日的 NCEP1、NCEP2 和 ERA 三套地表热通量再分析资料与对应 AWS 观测资料的相关系数（表 1），表明这 6 个站的三套感热通量再分析资料与 AWS 资料的相关系数都通过了 0.001 的显著性水平检验，而且以感热为主的高原西部狮泉河和改则两站的 AWS 感热通量与 ERA 感热通量的相关系数明显比其与 NCEP1 和 NCEP2 资料的相关系数高。对于潜热通量，只有 ERA 资料与 AWS 资料在 6 个站的相关系数全都远超过 0.001 的显著性水平检验，而且对于夏季潜热同样重要的高原东部地区的那曲和林芝站的 AWS 潜热通量与 ERA 资料的相关系数远远大于其与 NCEP1 和 NCEP2 资料的相关系数。

我们进一步计算了三套地表热通量再分析资料与 AWS 观测资料之间的均方根误差，结果表明（表 2），ERA 资料是 6 个站的平均感热通量均方根

表 1　逐日地表热通量再分析资料与 AWS 资料的相关系数

Table 1　Correlation between daily surface heat fluxes of reanalysis data and those of AWS data

站名	感热相关系数			潜热相关系数		
	(AWS,NCEP1)	(AWS,NCEP2)	(AWS,ERA)	(AWS,NCEP1)	(AWS,NCEP2)	(AWS,ERA)
狮泉河	**0.54**(417)	**0.52**(417)	**0.75**(417)	0.08(185)	0.02(185)	**0.44**(185)
改则	**0.47**(393)	**0.47**(393)	**0.63**(393)	**0.52**(193)	**0.63**(193)	**0.62**(193)
日喀则	**0.37**(1516)	**0.26**(1516)	**0.31**(1516)	**0.49**(897)	0.07(897)	**0.37**(897)
拉萨	**0.37**(1603)	**0.34**(1603)	**0.32**(1603)	**0.59**(880)	**0.56**(880)	**0.59**(880)
那曲	**0.39**(1430)	**0.39**(1430)	**0.44**(1430)	**0.08**(1133)	**0.18**(1133)	**0.58**(1133)
林芝	**0.14**(1202)	**0.15**(1202)	**0.29**(1202)	**0.11**(870)	0.05(870)	**0.53**(870)

注：黑体为通过 0.001 的显著性水平检验，括号内数值为样本长度。

表 2 逐日地表热通量再分析资料相对于 AWS 资料的均方根误差(单位:W/m²)

Table 2 The root mean square errors of daily surface heat fluxes of reanalysis data vs those of AWS data (W/m²)

站名	感热均方根误差			潜热均方根误差		
	(AWS,NCEP1)	(AWS,NCEP2)	(AWS,ERA)	(AWS,NCEP1)	(AWS,NCEP2)	(AWS,ERA)
狮泉河	0.96	0.98	0.70	1.36	1.40	1.06
改则	1.03	1.03	0.86	0.98	0.87	0.87
日喀则	1.12	1.22	1.17	1.01	1.36	1.13
拉萨	1.12	1.15	1.17	0.90	0.94	0.90
那曲	1.10	1.11	1.06	1.36	1.28	0.92
林芝	1.31	1.31	1.19	1.33	1.38	0.97
平均	1.11	1.13	1.02	1.16	1.20	0.97

表 3 月平均的地表热通量再分析资料与 AWS 资料的相关系数

Table 3 Correlation between monthly surface heat fluxes of reanalysis data and those of AWS data

站名	感热相关系数			潜热相关系数		
	(AWS,NCEP1)	(AWS,NCEP2)	(AWS,ERA)	(AWS,NCEP1)	(AWS,NCEP2)	(AWS,ERA)
狮泉河	**0.75**(15)	**0.69**(15)	**0.91**(15)	0.24(6)	−0.05(6)	0.03(6)
改则	0.67(13)	0.67(13)	**0.86**(13)	0.74(6)	0.86(6)	0.76(6)
日喀则	**0.45**(51)	0.33(51)	**0.43**(51)	**0.77**(29)	**0.68**(29)	**0.61**(29)
拉萨	**0.48**(53)	**0.47**(53)	**0.43**(53)	**0.84**(29)	**0.82**(29)	**0.82**(29)
那曲	**0.66**(47)	**0.61**(47)	**0.62**(47)	**0.61**(37)	**0.59**(37)	**0.66**(37)
林芝	0.38(41)	0.35(41)	**0.46**(41)	**0.72**(30)	0.03(30)	**0.74**(30)

注:黑体为通过 0.01 的显著性水平检验,括号内数值为样本长度。

误差中最小的(为 1.02 W/m²),其中又以高原西部两站 ERA 感热通量的均方根误差远比 NCEP1 和 NCEP2 资料的误差小。6 个站平均的 ERA 潜热通量均方根误差为 0.97 W/m²,也都小于 NCEP1 和 NCEP2 资料的平均误差。其中除日喀则外,其他 5 个站的 ERA 潜热通量的均方根误差都比 NCEP1 和 NCEP2 资料的误差小。因此,对于逐日的地表通量资料,三套再分析资料都能够反映高原地表热通量总的变化趋势,但 ERA 资料明显优于 NCEP1 和 NCEP2 资料,尤其以高原西部的感热通量及东部的潜热通量最为明显。

3.2 月平均地表热通量资料的对比

由图 2 可见,那曲的月平均 NCEP1、NCEP2 和 ERA 三套地面感热、潜热通量再分析资料与 AWS 资料在变化趋势上都比较吻合,能很好地反映高原感热通量和潜热通量的季节变化趋势,具有较大的应用价值。但需要注意的是,冬季 NCEP1 和 NCEP2 的感热通量明显比 AWS 值偏小。

1993 年 7 月～1999 年 3 月高原 6 个站月平均的地表热通量再分析资料与对应 AWS 资料的相关系数(表 3)表明,只有 ERA 感热通量与 AWS 资料的相关系数在 6 个站全都通过了 0.01 的显著性水平检验,特别是在以感热为主的高原西部两站的相关系数明显高于 NCEP1 和 NCEP2 感热通量与 AWS 资料的相关系数。对于潜热通量,由于高原西部两站 AWS 资料的样本序列较短,它们的 AWS 潜热通量与三套再分析资料的相关系数都没有通过 0.01 的显著性水平检验,而东部 4 个站的 AWS 潜热通量与 ERA 和 NCEP1 资料的相关系数都通过了 0.01 的显著性检验。

月平均的地表热通量再分析资料与 AWS 观测资料之间的均方根误差表明(表 4),6 个站平均的感热通量均方根误差中,ERA 资料的误差是最小的,为 0.83 W/m²,尤其是高原西部两站 ERA 感热通量的均方根误差明显小于 NCEP1 和 NCEP2 资料的误差。6 个站平均的潜热通量均方根误差中,NCEP1 资料最小,其次是 ERA 资料。

3.3 春夏月平均感热通量年际变化的对比

由于资料缺测导致年际变化结果的不连续,故我们主要计算高原东部4个站在春、夏季各月的月

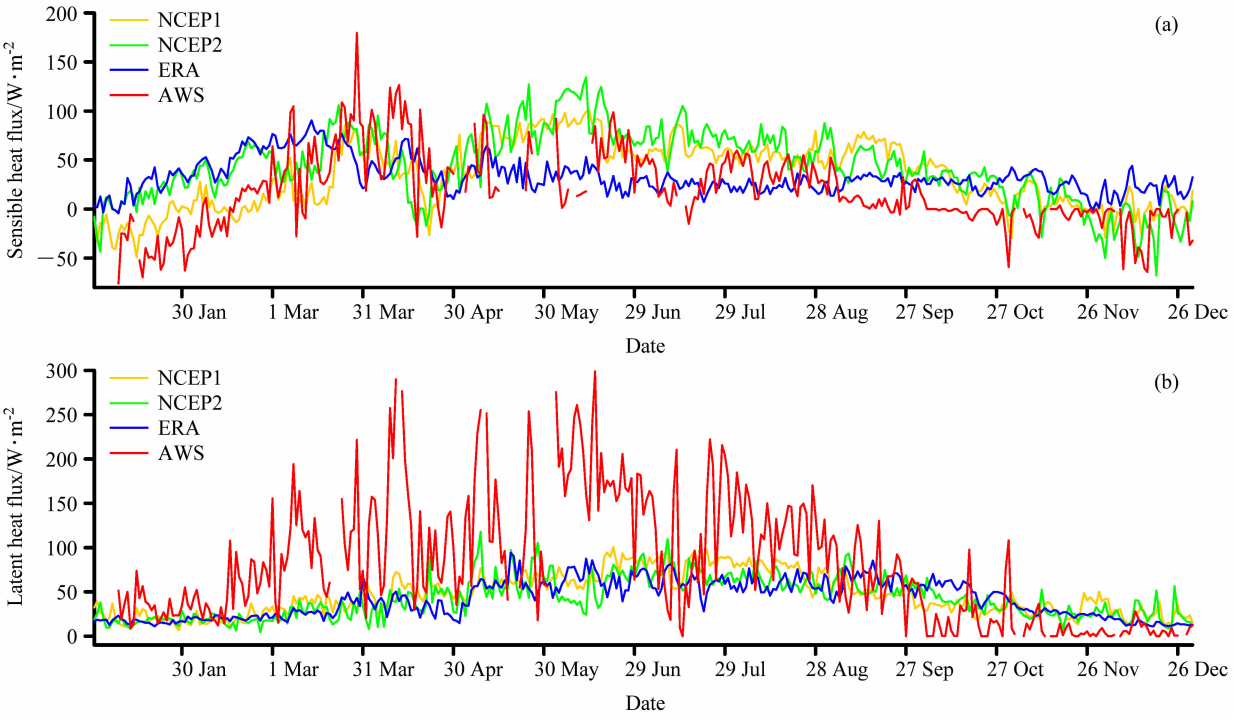

图 1　1998 年日喀则逐日的地表感热（a）和潜热（b）通量再分析资料与 AWS 资料的比较

Fig. 1　Comparison between daily (a) sensible heat fluxes and (b) latent heat fluxes of reanalysis data and those of AWS data in Rikeze in 1998

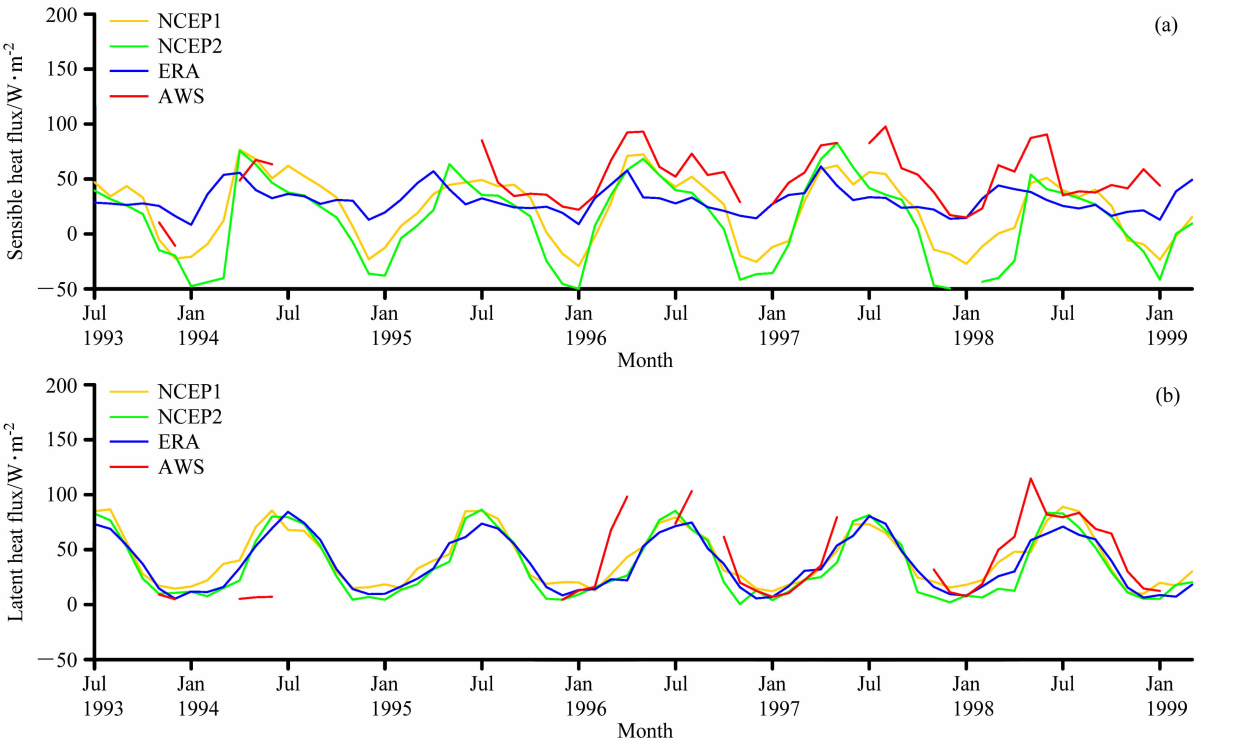

图 2　那曲月平均的地表感热（a）和潜热（b）通量再分析资料与 AWS 资料的比较

Fig. 2　Comparison between monthly (a) sensible heat fluxes and (b) latent hear fluxes of reanalysis data and those of AWS data in Naqu

表 4 月平均的地表热通量再分析资料相对于 AWS 资料的均方根误差(单位：W/m²)

Table 4 The root mean square errors of monthly surface heat fluxes of reanalysis data vs those of AWS data (W/m²)

站名	感热均方根误差			潜热均方根误差		
	(AWS,NCEP1)	(AWS,NCEP2)	(AWS,ERA)	(AWS,NCEP1)	(AWS,NCEP2)	(AWS,ERA)
狮泉河	0.70	0.79	0.43	1.23	1.45	1.40
改则	0.81	0.81	0.54	0.72	0.52	0.70
日喀则	1.05	1.03	1.06	0.68	0.80	0.89
拉萨	1.02	1.03	1.06	0.57	0.60	0.60
那曲	0.83	0.89	0.87	0.88	0.91	0.82
林芝	1.11	1.14	1.04	0.74	1.39	0.72
平均	0.92	0.97	0.83	0.80	0.95	0.85

表 5 春夏高原东部 4 站月平均再分析感热通量与 AWS 资料年际变化的距平符号相符率

Table 5 The anomaly sign accordance rate between monthly sensible heat fluxes of reanalysis data and that of AWS data in eastern Tibetan Plateau

站名	再分析资料	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	总体
日喀则	NCEP1	2/4	4/4	3/3	2/4	3/4	3/5	17/24
	NCEP2	2/4	3/4	2/3	4/4	2/4	3/5	16/24
	ERA	2/4	3/4	0/3	2/4	2/4	1/5	10/24
拉萨	NCEP1	2/4	3/4	3/4	1/4	2/5	2/5	13/26
	NCEP2	2/4	3/4	3/4	1/4	1/5	2/5	12/26
	ERA	2/4	3/4	4/4	4/4	3/5	4/5	20/26
那曲	NCEP1	1/3	3/4	2/4	1/3	4/4	5/5	16/23
	NCEP2	1/3	3/4	3/4	1/3	2/4	4/5	14/23
	ERA	3/3	3/4	1/4	0/3	4/4	5/5	17/23
林芝	NCEP1	3/4	2/3	1/3	2/3	3/4	1/4	12/21
	NCEP2	2/4	2/3	0/3	1/3	2/4	2/4	9/21
	ERA	1/4	1/3	2/3	2/3	4/4	3/4	13/21

平均再分析感热通量与 AWS 资料的距平符号相符率（表 5），4 个站 NCEP1 的 6 个月总体相符率都要高于 NCEP2 的总体相符率。除日喀则站外，其他 3 站 ERA 资料的总体相符率都超过了 50%，并且都高与 NCEP1 和 NCEP2 资料的总体相符率，这说明 ERA 感热通量资料在一定程度上还是能够反映 AWS 资料的年际变化。其中拉萨的 5、6 月，那曲的 3、7、8 月，林芝的 7 月 ERA 感热通量与 AWS 资料的距平符号完全相符。同时需要注意的是日喀则的 3、8 月，那曲的 5、6 月，林芝的 3、4 月 ERA 感热通量距平符号的相符率较差。

综合上面分析，我们认为相对于 NCEP1 和 NCEP2 再分析资料，ERA 再分析资料中青藏高原地区的地表热通量总体具有较好的代表性，利用它可以研究高原的地表热通量及高原加热的变化尤其是长时间尺度的变化，这对于弥补目前高原测站稀少且缺少长时间序列的地面加热资料的现状具有重要的现实意义。故下面选用高原地区 ERA 再分析资料的地表热通量，对前期青藏高原冬、春季地面热源场与后期我国特别是长江中下游地区夏季降水场的关系进行初步分析。需要指出的是，本文所选的 6 个 AWS 站位于高原南部的 29°N～33°N 范围，因此高原北部地区的再分析地表热通量资料还有待进一步工作的检验。

4 前期青藏高原冬春季地面热源与后期我国夏季降水场的关系

气候学上，地面热源可由简化的地面热量平衡方程[28]表示，即

$$H_S = R_B - F_S = F_H + F_L,$$

式中，R_B 为地表净辐射，F_S 是地表层土壤热交换通量，F_H 为地面（湍流）感热通量，F_L 为土壤（蒸发）潜热通量。当 $H_S>0$ 时，说明该地区下垫面有热量从地面输送给大气。下面，利用 SVD 方法来分析前期高原冬、春季地面热源与后期我国夏季降水的关系，进而探究高原地面加热作为我国汛期降水预报因子的可能性。

4.1　前期高原冬春季地面热源与我国夏季降水场的 SVD 分析

对 1958～2002 年 45 年的前期青藏高原冬季（前一年 12 月～当年 2 月）地面热源场与后期我国夏季降水场做 SVD 分析，第一模态平方协方差贡献百分率为 27%，相应的模态相关系数为 0.70，其他模态的平方协方差贡献百分率都比较小，本文将不予考虑。

第一模态左右场的同性相关系数分布如图 3 所示。从图 3b 可以看出，我国东部夏季降水场呈“－＋－”型分布，长江中下游地区为正异常，华北和东南地区为负异常。与之相对应的是，高原冬季地面热源场（图 3a）的空间分布型以负异常为主，最显著异常区位于高原主体，说明冬季高原地面热源空间变化具有一致性。这对空间分布型表明：青藏高原主体前期冬季地面热源与我国长江中下游地区夏季降水量呈负相关，与华北和东南沿海地区的夏季降水量呈正相关，即当前期高原主体的春季地面热源强偏弱（强）时，后期长江中下游地区夏季降水偏多（少），而华北和东南沿海地区往往偏少（多）。从第一模态时间系数曲线（图 3c）可以看出，高原冬季地面热源与我国夏季降水的变化趋势比较一致，几乎呈同位相变化。同时可以看出，从 20 世纪 60 年代中期到 80 年代末，高原冬季地面热源明显减弱，90 年代地面热源又表现出增强的趋

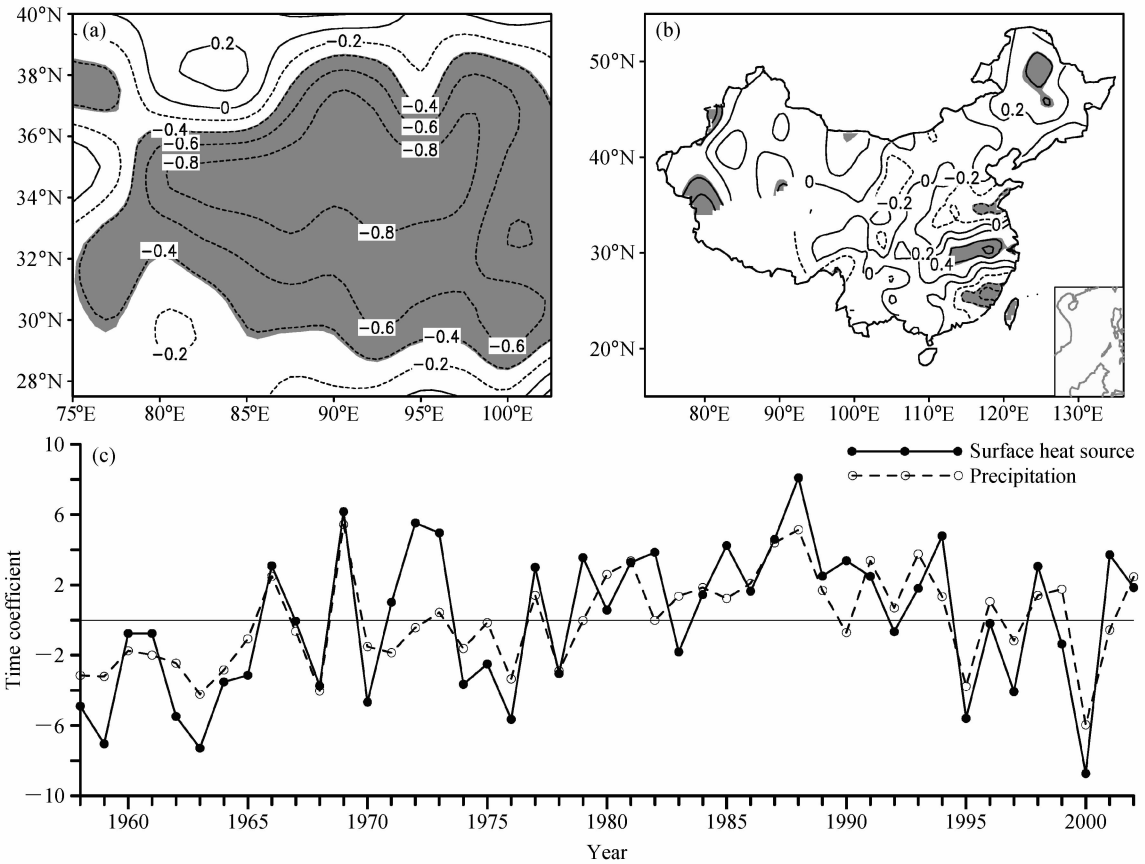

图 3　前期青藏高原冬季地面热源（a）与后期我国夏季降水（b）SVD 分析的第一模态同性相关型和时间系数（c）。阴影表示相关系数绝对值大于 0.38 并通过 0.01 显著性水平检验

Fig. 3　The first SVD mode homogeneous correlation between previous surface heat source over the Tibetan Plateau in winter (a) and summer precipitation over China (b), and the series of their time coefficients (c). The shaded areas show the absolute values of correlation coefficients are larger than 0.38 and over the 0.01 significance level

势，这也与韦志刚等[29]指出的青藏高原积雪的年代际变化趋势相吻合。

同样，对 1958～2002 年的青藏高原春季（3～5 月）地面热源场与我国夏季降水场做 SVD 分析，第一模态平方协方差贡献百分率为 23%，相应的模态相关系数为 0.75，其他模态的平方协方差贡献百分率都比较小，本文也不予考虑。

第一模态左、右场的同性相关系数分布如图 4 所示。从图 4b 可以看出，我国夏季降水场主要的异常区出现在长江中下游地区，表现为显著的正异常。与之相对应高原春季地面热源场（图 4a）的空间分布型呈明显的南负北正的反位相分布，南部沿喀喇昆仑山-冈底斯山-念青唐古拉山一带的高山区为负异常，中心位于念青唐古拉山地区，相关系数达－0.7。高原北部的柴达木盆地和塔克拉玛干沙漠的地势低洼区为负异常区。这对空间分布型表明：长江中下游地区夏季降水量与春季青藏高原南部高山区特别是念青唐古拉山地区的地面热源存在负相关，而与北部地势低洼的柴达木盆地和塔克拉玛干沙漠存在正相关，即当春季高原南部高山区的地面热源弱（强）、北部地势低洼区的地面热源强（弱）时，长江中下游地区夏季降水偏多（少）。从第一模态时间系数曲线（图 4c）可以看出，高原春季地面热源与长江中下游夏季降水的变化趋势也比较一致，几乎呈同位相变化。并且存在明显的年代际变化，20 世纪 70 年代以前高原南部高山区春季地面热源强、北部的柴达木盆地和塔克拉玛干沙漠地面热源弱，长江中下游地区降水偏少，70 年代末以后高原南部地面热源减弱、北部地面热源强，长江中下游地区降水也明显增多。

因此，本文得到的前期冬、春季青藏高原地面热源与我国夏季降水的相关关系，能够很好地与冬春高原积雪和我国夏季降水的关系互相印证[15～17]。而 Yeh 等[30]的数值模拟结果表明陆面过程具有数月的记忆，吴国雄等[31]通过模式研究也指出春季的陆面过程可通过改变地表的能量平衡而影响初夏的气候。张顺利等[32]的研究也指出当高原冬、春季地面热源强（弱）持续到春、夏季，会引起高原

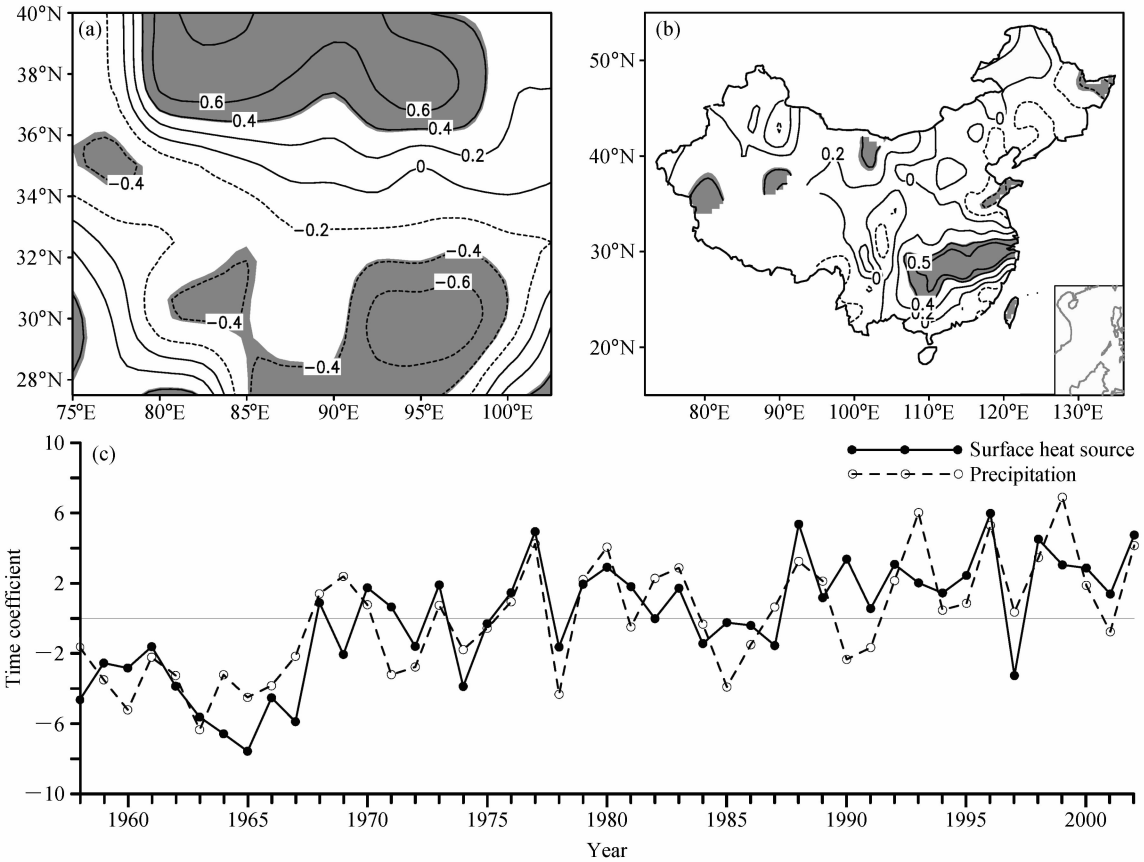

图 4 同图 3，但为春季地面热源

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the surface heat source in spring

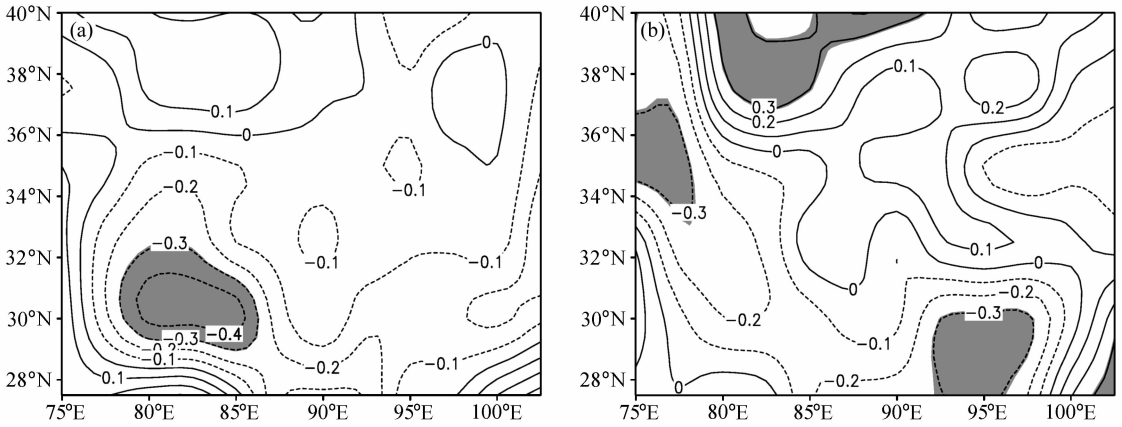

图 5　长江中下游地区平均夏季降水量与前期青藏高原冬季地面热源（a）和春季地面热源（b）的相关场。阴影表示相关系数绝对值大于 0.29 并且通过 0.05 显著性水平检验

Fig. 5　The correlation fields between average summer precipitation over the mid-lower reaches of the Yangtze River and the previous surface heat source over the Tibetan Plateau in winter (a) and in spring (b). The shaded areas show the absolute values of correlation coefficients are larger than 0.29 and over the 0.05 significance level

上升运动强（弱），有（不）利于高原热量向上输送，使高原上空对流层加热强（弱），高原南侧温度梯度强（弱），造成亚洲夏季风偏强（弱），从而引起长江流域夏季易旱（涝）。这可能是高原前期冬春季地面热源的变化影响我国夏季降水的物理机制。因此，高原冬春季地面热源是影响我国夏季降水的重要因子，同时注意到前面 SVD 分析的第一模态平方协方差贡献百分率不是很高，在做我国夏季降水预测时，还需要考虑其他的物理因子。

4.2　前期高原冬春季地面热源场与后期长江中下游夏季降水的相关分析

前面 SVD 分析表明，前期青藏高原冬季地面热源与长江中下游夏季降水存在着一定的遥相关，为进一步确认这种关系存在的可靠性，我们选取长江中下游地区的 15 个代表站（南京、上海、杭州、安庆、屯溪、九江、汉口、钟祥、岳阳、常德、宁波、衢县、贵溪、南昌、长沙）平均的夏季降水量来代表该地区的总体夏季降水情况，分别计算它与前期高原冬季和春季的地面热源场的相关场。

从冬季相关场（图 5a）可以看出，长江中下游夏季降水量与前期冬季高原主体大部分地区的地面热源为负相关关系，其中冈底斯山西段地区的负相关通过了 0.05 的显著性水平检验。而春季相关场（图 5b）表明，长江中下游夏季降水量与春季高原南部沿喀喇昆仑山-冈底斯山-念青唐古拉山一带高山地区的地面热源存在负相关，其中与喀喇昆仑山和念青唐古拉山地区地面热源的负相关系数通过了 0.05 的显著性水平检验；而与高原北部低海拔地区的地面热源存在正相关。这进一步印证了前面 SVD 分析的结果。

5　结论

（1）青藏高原地区逐日及月平均的再分析地表热通量资料的变化趋势与 AWS 资料的变化趋势总体基本吻合，其中 ERA 资料较 NCEP1 和 NCEP2 资料的代表性更好，特别是对于高原西部的感热通量。并且 ERA 感热通量资料在一定程度上也能反映 AWS 资料的年际变化。

（2）前期青藏高原主体冬季地面热源与我国长江中下游地区夏季降水量呈负相关，与华北和东南沿海地区的夏季降水量呈正相关。

（3）长江中下游地区夏季降水量与春季高原南部高山区的地面热源存在负相关，显著相关区位于喀喇昆仑山和念青唐古拉山，而与高原北部地势低洼区的地面热源存在正相关。高原地面热源场与长江中下游夏季降水场在年代际变化趋势上基本一致，是影响我国夏季降水的重要因子。

（4）高原冬、春地面热源场变化趋势与高原积雪的年代际变化趋势相吻合，它们对我国夏季降水的作用能够很好地互相印证。

参考文献（References）

[1]　叶笃正，罗四维，朱抱真. 西藏高原及其附近的流场结构和

对流层的热量平衡. 气象学报，1957，**28**（2）：108～121
Ye Duzheng，Luo Siwei，Zhu Baozhen. The wind structure and heat balance in the lower troposphere over Tibetan Plateau and its surroundings. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese)，1957，**28**（2）：128～121

[2] Flohn H. Contributions to a meteorology of the Tibetan highlands. Atmos. Sci. Paper 130，Colorado State University，Fort Collins，1968. 120pp

[3] Flohn H. Recent investigation on the mechanism of the summer monsoon of Southern and Eastern Asia. *Proc. Symp. Monsoon of the World*，New Delhi：Hind Union Press，1960. 75～88

[4] Yanai M，Li Chengfeng，Song Z. Seasonal heating of the Tibetan Plateau and its effects on the evolution of the Asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*，1992，**70**（1）：319～351

[5] Li C F，Yanai M. The onset and interannual variability of the Asian summer monsoon in relation to land－sea thermal constrast. *J. Climate*，1996，**9**（2）：358～375

[6] 吴国雄，刘屹岷，刘新，等. 青藏高原加热如何影响亚洲夏季的气候格局. 大气科学，2005，**29**（1）：47～56
Wu Guoxiong，Liu Yimin，Liu Xin，et al. How the heating over the Tibetan Plateau affects the Asian climate in summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese)，2005，**29**（1）：47～56

[7] Kalnay E，Kanamitsu M，Kistler R，et al. The NCEP-NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*，1996，**77**：437～471

[8] Kanamitsu M，Ebisuzaki W，Woollen J，et al. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*，2002，**83**：1631～1643

[9] Uppala S，Kallberg P，Angeles H，et al. ERA-40：ECMWF 45-year reanalysis of the global atmosphere and surface conditions 1957－2002. *ECMWF Newsletter Meteorology*，2004，**101**：2～21

[10] 姚永红，王谦谦，葛朝霞. 青藏高原及其临近地区旬感热通量基本气候特征. 南京气象学院学报，2000，**23**（3）：404～411
Yao Yonghong，Wang Qianqian，Ge Zhaoxia. Climatological features of decade sensible heat flux over the Tibetan Plateau and its surrounding area. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese)，2000，**23**（3）：404～411

[11] 衷雅芳，钱永甫. 亚洲季风区地面感热通量的区域变化特征. 南京气象学院学报，2001，**24**（3）：398～404
Zhong Yafang，Qian Yongfu. Characteristics of spatial variation of surface sensible heat flux in Asian monsoon region. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese)，2001，**24**（3）：398～404

[12] 张永生，吴国雄. 关于亚洲夏季风爆发及北半球季节突变的物理机制的诊断分析：II 青藏高原及临近地区地表感热加热的作用. 气象学报，1999，**57**（1）：56～73
Zhang Yongsheng，Wu Guoxiong. Diagnostic investigations on the mechanism of the onset of Asian summer monsoon and abrupt seasonal transitions over the Northern Hemisphere. Part II：The role of surface sensible heating over Tibetan Plateau and surrounding regions. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese)，1999，**57**（1）：56～73

[13] 张艳，钱永甫. 青藏高原地面热源对亚洲季风爆发的热力影响. 南京气象学院学报，2002，**25**（3）：298～306
Zhang Yan，Qian Yongfu. Thermal effect of surface heat source over the Tibetan Plateau on the onset of Asian summer monsoon. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese)，2002，**25**（3）：298～306

[14] 董敏，朱文妹，徐祥德. 青藏高原地表热通量变化及其对初夏东亚大气环流的影响. 应用气象学报，2001，**12**（4）：458～468
Dong Min，Zhu Wenmei，Xu Xiangde. The variation of surface heat flux over Tibetan Plateau and its influences on the East Asia circulation in early summer. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese)，2001，**12**（4）：458～468

[15] 韦志刚，罗四维，董文杰，等. 青藏高原积雪资料分析及其与我国夏季降水的关系. 应用气象学报，1998，**9**（增刊）：39～46
Wei Zhigang，Luo Siwei，Dong Wenjie，et al. Snow cover data on Qinghai-Xizang Plateau and its correlation with summer rainfall in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese)，1998，**9** (Supplement)：39～46

[16] 陈兴芳，宋文玲. 欧亚和青藏高原冬春积雪与我国夏季降水关系的分析和预测应用. 高原气象，2000，**19**（2）：215～223
Chen Xingfang，Song Wenling. Analysis of relationship between snow cover on Eurasia and Qinghai-Xizang Plateau in winter and summer rainfall in China and application to prediction. *Plateau Meteorology* (in Chinese)，2000，**19**（2）：215～223

[17] 陈乾金，高波，张强. 青藏高原冬季雪盖异常与冬季风变异及其相互联系的物理诊断研究. 大气科学，2000，**24**（4）：477～491
Chen Qianjin，Gao Bo，Zhang Qiang. Studies on relation of snow cover over the Tibetan Plateau in winter to the winter－summer monsoon change. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese)，2000，**24**（4）：477～491

[18] 董敏，余建锐. 青藏高原春季积雪对大气环流影响的模拟研究. 应用气象学报，1997，**8**（增刊）：100～109
Dong Min，Yu Jianrui. A simulation study for the influences of Tibetan Plateau spring snow cover on the general circulation. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese)，1997，**8** (Supplement)：100～109

[19] 苏志侠，吕世华，罗四维. 美国 NCEP/NCAR 全球再分析资料及其初步分析. 高原气象，1999，**18**（2）：209～218
Su Zhixia，Lü Shihua，Luo Siwei. The examinations and a-

nalysis of NCEP/NCAR 40 years global reanalysis data in China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18** (2): 209～218

[20] 徐影，丁一汇，赵宗慈. 美国 NCEP/NCAR 近 50 年全球再分析资料在中国气候变化研究中可信度的初步分析. 应用气象学报，2001，**12** (3)：337～347
Xu Ying, Ding Yihui, Zhao Zongci. Confidence analysis of NCEP/NCAR 50-year global reanalyzed data in climate change research in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2001, **12** (3): 337～347

[21] 赵天宝，艾丽坤，冯锦明. NCEP 再分析资料和中国站点观测资料的分析与比较. 气候与环境研究，2004，**9** (2)：278～294
Zhao Tianbao, Ai Likun, Feng Jinming. An intercomparison between NCEP reanalysis and observed data over China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (2): 278～294

[22] 赵天宝，符淙斌. 中国区域 ERA-40、NCEP-2 再分析资料与观测资料的初步比较与分析. 气候与环境研究，2006，**11** (1)：14～32
Zhao Tianbao, Fu Congbin. Preliminary comparison and analysis between ERA-40, NCEP-2 reanalysis and observations over China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (1): 14～32

[23] 张文君，周天军，宇如聪. 我国东部水分收支的初步分析. 大气科学，2007，**31** (2)：330～345
Zhang Wenjun, Zhou Tianjun, Yu Rucong. A preliminary analysis on the moisture budget of East China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (2): 330～345

[24] 宋敏红，吴统文，钱正安. 高原地区 NCEP 热通量再分析资料的检验及其在夏季降水预测中的应用. 高原气象，2000，**19** (4)：467～495
Song Minhong, Wu Tongwen, Qian Zheng'an. Verification of NCEP surface heat fluxes over Qinghai-Xizang Plateau and its application to summer precipitation forecast. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2000, **19** (4): 467～495

[25] Li Guoping, Duan Tingyang, Shigenori Haginoya, et al. Estimates of the bulk coefficients and surface fluxes over the Tibetan Plateau using AWS data. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2001, **79** (2): 625～635

[26] 李国平，段廷扬，巩远发. 青藏高原近地层通量特征的合成分析. 气象学报，2002，**60** (4)：453～460
Li Guoping, Duan Tingyang, Gong Yuanfa. A composite study of the surface fluxes on the Tibetan Plateau. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (4): 453～460

[27] 丁裕国，江志红. SVD 方法在气象诊断分析中的普适性. 气象学报，1996，**54** (3)：365～372
Ding Yuguo, Jiang Zhihong. Generality of singular value decomposition in diagnostic analysis of meteorological field. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 1996, **54** (3): 365～372

[28] 李国平. 青藏高原动力气象学. 北京：气象出版社，2002. 87～89
Li Guoping. *Dynamic Meteorology of the Tibetan Plateau* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2002. 87～89

[29] 韦志刚，黄荣辉，陈文，等. 青藏高原地面站积雪的空间分布和年代际变化特征. 大气科学，2002，**26** (4)：496～508
Wei Zhigang, Huang Ronghui, Chen Wen, et al. Spatial distributions and interdecadal variations of the snow at the Tibetan Plateau weather stations. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (4): 496～508

[30] Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. A model study of the short-term climate and hydrologic effects of sudden snowcover removal. *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111** (5): 1013～1024

[31] 吴国雄，薛纪善，王在志，等. 青藏高原化雪迟早的辐射效应对季节变化的影响. 见：黄荣辉主编. 灾害性气候的模拟和预测. 北京：气象出版社，1996. 151～161
Wu Guoxiong, Xue Jishan, Wang Zaizhi, et al. Radiation impacts on seasonal variation of the spring snow-melt over the Tibetan Plateau. In: *The Simulation and Prediction of Disastrous Climate* (in Chinese). Huang Ronghui, Ed. Beijing: China Meteorological Press, 1996. 151～161

[32] 张顺利，陶诗言. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究. 大气科学，2001，**25** (3)：372～390
Zhang Shunli, Tao Shiyan. Influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (3): 372～390