

曹晓云, 陈爱军, 肖建设, 等. 2019. 地表反照率与高原夏季风爆发关系分析 [J]. 气候与环境研究, 24(6): 785-794. CAO Xiaoyun, CHEN Aijun, XIAO Jianshe, et al. 2019. Indicative Significance of Land Surface Albedo over the Tibetan Plateau to the Onset of Plateau Summer Monsoon [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(6): 785-794. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18153

## 地表反照率与高原夏季风爆发关系分析

曹晓云<sup>1,2</sup> 陈爱军<sup>3</sup> 肖建设<sup>1,2</sup> 卞林根<sup>4</sup> 郑照军<sup>5</sup>

1 青海省气象科学研究所, 西宁 810001

2 青海省防灾减灾重点实验室, 西宁 810001

3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

4 中国气象科学研究院, 北京 100081

5 国家卫星气象中心, 北京 100081

**摘要** 利用2000~2016年MODIS地表反照率和ECMWF/ERA-Interim再分析资料, 选取有代表性的高原季风指数DPMI, 统计分析了青藏高原地表反照率与高原季风之间的联系, 结果表明: 1) 11月高原地表反照率大小与次年高原夏季风爆发存在密切关系: 11月高原地表反照率偏低(高), 次年4月高原夏季风爆发偏早(晚), 强度偏强(弱)。2) 可能的影响机制为: 当前期11月高原地表反照率偏低时, 后期高原主体对大气的感热加热信号更强, 从而引起4月高原上空近地面层上升运动明显加强, 这有利于热量向高空传输, 导致对流层加热作用加强, 高原上空对流层温度偏高, 使得高原季风环流系统加强, 最终导致高原季风季节变化相应提前; 反之亦然。

**关键词** 地表反照率 高原夏季风 青藏高原

文章编号 1006-9585(2019)06-0785-10

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18153

## Indicative Significance of Land Surface Albedo over the Tibetan Plateau to the Onset of Plateau Summer Monsoon

CAO Xiaoyun<sup>1,2</sup>, CHEN Aijun<sup>3</sup>, XIAO Jianshe<sup>1,2</sup>, BIAN Lingen<sup>4</sup>, and ZHENG Zhaojun<sup>5</sup>

1 Institute of Qinghai Meteorological Science Research, Xining 810008

2 Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Qinghai Province, Xining 810008

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

4 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

5 National Satellite Meteorology Center, Beijing 100081

**Abstract** In this study, the relationship between the land surface albedo over the Tibetan Plateau and the plateau summer monsoon are statistically analyzed using a representative plateau monsoon index, i.e., Dynamic Plateau Monsoon Index (DPMI) based on MODIS surface albedo and ECMWF/ERA-Interim reanalysis data from 2000 to 2016. The main results are as follows: 1) There is a close relationship between the land surface albedo over the Tibetan Plateau in November and the onset of plateau summer monsoon. The land surface albedo of the Tibetan Plateau in November is low (high), and the plateau summer monsoon starts early (late) in April of the following year. 2) When the land surface albedo

收稿日期 2018-12-05; 网络预出版日期 2019-09-15

作者简介 曹晓云, 女, 1993年出生, 助理工程师, 主要从事青藏高原气候与环境研究。E-mail: xaioyun\_cao@126.com

通讯作者 陈爱军, E-mail: chenaijun@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目41761078, 科技部公益性行业(气象)科研专项GYHY201206040

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grant 41761078), Special Fund for Meteorological Scientific Research in the Public Interest (Grant GYHY201206040)

over the Tibetan Plateau in November is low, the sensible heat flux of the main body of the plateau on the atmosphere is strong in the latter period, which significantly strengthens the uplifting movement of the plateau in April. Thus, the plateau becomes conducive to the transfer of heat to the upper air, resulting in enhanced tropospheric heating, increased tropospheric temperature in the plateau, and strengthened plateau monsoon circulation system, eventually leading to the early plateau monsoon seasonal changes, and vice versa.

**Keywords** Land surface albedo, Plateau summer monsoon, Tibetan Plateau

## 1 引言

青藏高原（以下简称高原）平均海拔在 4500 m 以上，除了范围广阔、地表覆盖类型复杂多样外，还广泛分布着如积雪、冰川和冻土等强反射率的地表类型，其大范围地形动力作用和热力强迫作用会对大气环流和天气气候变化产生显著影响（叶笃正，1979；赵勇等，2013；岑思弦等，2014）。伴随着高原热力作用的季节性变化，在 600 hPa 出现明显的季风进退现象，温度、湿度和气压等气象要素也会随之变化，形成了高原上独有的“高原季风”（徐淑英和高由禧，1962；汤懋苍等，1979）。高原季风反映了高原上空总体的大气热力状况，它会显著影响高原及周围地区的旱涝情况，同时也对高原甚至中国天气和气候的形成产生重要影响（马振锋等，2003；白虎志等，2005）。

地表反照率表征地表对太阳辐射的反射能力，定义为地表反射的太阳辐射与入射的太阳辐射之比，它制约着陆面辐射能量收支，是反映高原热力状况的一个重要因子，其细微变化会显著影响地—气系统的辐射能量收支分配，造成大气环流形势异常，从而影响局地、区域乃至全球的气候变化（肖登攀等，2011；陈爱军等，2018）。已有研究指出：青藏高原的地表反照率存在较大时空差异性且随着全球气候变暖已经发生了显著变化（陈爱军等，2018），这对高原上空大气环流必然会产生一定的影响。然而，关于高原地表反照率与高原季风之间关系的研究仍然不多见，学者们更关注于高原热源作用对亚洲季风环流的影响（Nitta, 1983; He et al., 1987; 王同美等, 2008）以及高原季风对其周围地区气温和夏季降水的影响（岑思弦等，2014；王颖等，2015）。仅有刘晓东等（1989）通过数值模拟方法研究了青藏高原地表反照率与东亚夏季风之间的关系，结果表明：高原地表反照率变化是决定我国中短期气候变化的重要因子之一，东亚夏季风减弱与高原地表反照率增加有关（刘晓东和马柱国，

1996）。可是，针对高原地表反照率与高原夏季风爆发关系的研究仍然较为缺乏，尤其是利用高精度、高时空分辨率的卫星遥感资料来探讨二者关系的研究。这对于提前预测高原季风爆发并防范降水和气温的异常变化，制定相关的预警方案，从而有效减少由于降水和气温异常引起的自然和经济损失十分必要。

本文采用美国 MODIS（MODerate resolution Imaging Spectroradiometer）地表反照率产品、欧洲 ECMWF（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts）的 ERA-Interim 再分析资料，统计分析了青藏高原地表反照率与高原季风之间的相关性，并通过合成分析方法，初步探讨了二者间可能的影响机制，以期为深入认识青藏高原气候变化、提高我国天气预报和气候预测提供一些参考。

## 2 资料和方法

### 2.1 MODIS 地表反照率产品

本文采用 MODIS 地表反照率气候网格产品 MCD43C3 (Collection 006)，时间分辨率为 8 d，空间分辨率为  $0.05^\circ$ （纬度） $\times 0.05^\circ$ （经度），采用等经纬度投影方式，选用的时间范围为 2000 年 3 月至 2016 年 12 月。该数据集由过去 16 d 期间经过大气校正的 Terra 和 Aqua 卫星 MODIS 数据采用半经验线性 RossThick-LiSparse-R 核驱动的 BRDF 模型每 8 天反演一次得到（[https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/modis\\_products\\_table/mcd43c3](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mcd43c3)[2017-01-03]），数据集包括当地太阳正午时刻 1~7 通道、可见光、近红外和短波波段的黑空反照率(Black-Sky Albedo, BSA)与白空反照率(White-Sky Albedo, WSA)、积雪覆盖率、太阳天顶角以及数据质量信息(曹晓云，2018)。

本文所用短波波段的真实地表反照率是由 MCD43C3 数据集提供的短波波段的黑空反照率和白空反照率以及正午时分的太阳天顶角信息，通过

线性加权平均法获得(陈爱军等, 2015, 2018), 然后, 采用算术平均获得高原月平均地表反照率。

### 2.2 ECMWF/ERA-Interim 再分析资料

本文采用欧洲中期天气预报中心空间分辨率为  $0.75^\circ$  (纬度)  $\times 0.75^\circ$  (经度) 的 ECMWF/ERA-Interim 经向风、纬向风、平均位势高度、地表感热通量、垂直速度以及对流层温度的逐月产品数据 ([http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/\[2017-01-03\]](http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/[2017-01-03]))。数据的时间范围为2000年3月至2016年12月。研究表明: ECMWF/ERA-Interim 再分析资料在青藏高原的精度较高、适用性较好, 尤其是近20年以来的数据(Bao and Zhang, 2013; Gao et al., 2014; 吴国雄等, 2014; 何冬燕等, 2014)。

### 2.3 高原季风指数

高原季风指数是量化高原季风爆发时间和强度的重要指标。高原季风指数大于0时, 高原近地面层为热低压, 夏季风爆发; 指数小于0时, 冬季风爆发; 其绝对值反映高原季风强度。本文选用在传统高原季风指数基础上增加高原近地面低压系统中心位置参数, 从600 hPa位势高度场角度出发定义的动态高原季风指数(Dynamic Plateau Monsoon Index, DPMI)进行下文的相关分析(Xun et al., 2012), 其计算公式为

$$DPMI = H_1'(\lambda + \delta\lambda, \varphi) + H_2'(\lambda - \delta\lambda, \varphi) + H_3'(\lambda, \varphi + \delta\varphi) + H_4'(\lambda, \varphi - \delta\varphi) - 4H_0'(\lambda, \varphi) \quad (1)$$

其中,  $(\lambda, \varphi)$  为高原600 hPa低压系统中心位置参数,  $(\delta\lambda, \delta\varphi)$  是沿东西和南北方向高原四侧距中心位置的距离,  $H_0'$ 、 $H_1'$ 、 $H_2'$ 、 $H_3'$  和  $H_4'$  分别代表高原600 hPa低压系统中心和四周中心位置上的高度距平,  $\delta\lambda = 9^\circ$ ,  $\delta\varphi = 6^\circ$  (荀学义等, 2017)。

### 2.4 合成分析法

本文采用常规的合成分析法(魏凤英, 1999)来探讨可能影响机制, 它是对偏强年和偏弱年对应要素场进行平均处理, 然后相减得到一个差值场, 通过分析差值场以便把偏强年和偏弱年对应要素场的差异放大, 进而探寻其中的物理机制。

## 3 高原地表反照率和高原季风的关系

图1给出了2000~2016年青藏高原多年月平均标准化高原地表反照率和DPMI的年变化曲线, 可以看出, 在年变化中, 1月、2月高原地表反照率

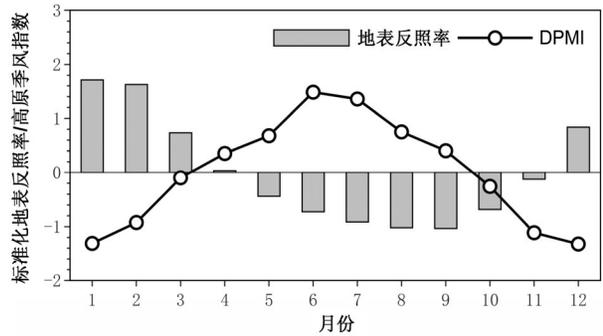


图1 2000~2016年月平均标准化高原地表反照率与高原季风指数的年变化

Fig. 1 Annual variations of the monthly average standardized land surface albedo over the Tibetan Plateau and the plateau monsoon index during 2000-2016

值最高, 6月、7月高原夏季风指数值最强; 8月、9月高原地表反照率值最低, 12月和1月高原冬季风指数最强。显然, 高原地表反照率相对于高原季风指数DPMI在相位变化上超前几个月(图1)。该结果表明: 高原季风与超前几个月的高原地表反照率之间必然存在一定关系。

图2给出了2000~2016年地表反照率相对于高原季风指数提前  $m$  个月 ( $m$  分别为0、1、...、6) 的标准化高原地表反照率与高原季风指数的年际变化曲线, 进一步具体分析二者之间的关系。从图中可以发现: 同期的高原地表反照率与DPMI的相关系数为-0.51、通过  $\alpha=0.001$  显著性水平检验, 存在较好的负相关关系(图2a)。超前3~6个月的高原地表反照率与DPMI的相关系数均超过0.45, 通过  $\alpha=0.001$  显著性水平检验, 存在很好的正相关关系, 尤其是当地表反照率超前4~5个月的时候最明显, 超前4~5个月的高原地表反照率与DPMI的相关系数均达到0.7(图2d-2g)。该结果表明, 超前3~6个月的高原地表反照率与高原季风之间存在很好的相关关系, 尤其是当地表反照率超前4个月和超前5个月的时候, 说明二者间存在较为稳定的对应关系。

为了进一步明确上述关系, 分别计算了各月同时、超前4个月和超前5个月的高原地表反照率与高原季风指数之间的相关系数。从表1、表2和表3可以看出: 11月高原地表反照率与次年4月DPMI的相关系数为-0.6, 通过  $\alpha=0.05$  显著性水平检验。由于高原夏季风爆发的过渡时期正好发生在4

表1 青藏高原各月份高原季风指数与同期的地表反照率的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between plateau monsoon index and land surface albedo in the same period over the Tibetan Plateau for each month

月份	相关系数
1月	-0.07
2月	0.12
3月	0.25
4月	0.46
5月	-0.1
6月	-0.31
7月	-0.15
8月	0.1
9月	0.01
10月	-0.05
11月	0.12
12月	0.01

注: \*表示通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验, 样本数 $N=16$ 。

表2 青藏高原各月份高原季风指数与超前4个月的地表反照率的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between plateau monsoon index and land surface albedo four months ahead of schedule over the Tibetan Plateau for each month

月份	相关系数
1月	0.11
2月	-0.41
3月	-0.13
4月	0.11
5月	-0.1
6月	0.19
7月	0.38
8月	-0.11
9月	0.18
10月	-0.18
11月	-0.12
12月	-0.28

注: \*表示通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验, 样本数 $N=16$ 。

月, 该结果表明, 11月高原地表反照率大小与次年高原夏季风爆发存在密切关系, 并且对次年高原夏季风爆发有很好的指示意义: 11月高原地表反照率偏低(高), 次年4月高原夏季风爆发偏早(晚), 强度偏强(弱)。

表3 青藏高原各月份高原季风指数与超前5个月的地表反照率的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between plateau monsoon index and land surface albedo five months ahead of schedule over the Tibetan Plateau for each month

月份	相关系数
1月	-0.33
2月	-0.35
3月	-0.01
4月	0.13
5月	-0.01
6月	0.08
7月	-0.16
8月	0.13
9月	0.13
10月	-0.11
11月	-0.6*
12月	-0.28

注: \*表示通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验, 样本数 $N=16$ 。

## 4 影响机制分析

图3给出了标准化4月高原季风指数与前期11月高原地表反照率的年际变化情况, 从图中可以看出: 二者的相关系数为-0.6, 其年际变化在很大程度上呈显著负相关关系。依据图3, 以标准化的前期11月地表反照率绝对值 $\geq 1$ 为标准(封国林, 2012), 确定前期11月高原地表反照率的异常偏高年为2007年、2009年和2014年, 前期11月高原地表反照率的异常偏低年为2004年、2013年和2016年(图3)。

图4给出了11月高原地表反照率异常偏低年(2003年、2012年和2015年)和偏高年(2006年、2008年和2013年)的平均分布情况, 可以看出: 在11月高原地表反照率偏高年, 高原中部地区地表反照率比11月高原地表反照率偏低年大0.2~0.3左右, 尤其在高海拔山脉地区, 地表反照率甚至大0.5。由于地表反照率表征地表对太阳辐射的反射能力, 这说明在地表反照率偏低年, 地表能吸收更多的太阳辐射能。此外, 由于地气能量交换是地表与大气相互作用的重要一环, 地表反照率是影响地面吸收净辐射能的一个重要参数, 地表吸收的净辐射能在地气能量交换过程中以感热和潜热形式对大气进行加热作用, 对于高原, 在雨季到来之前以感

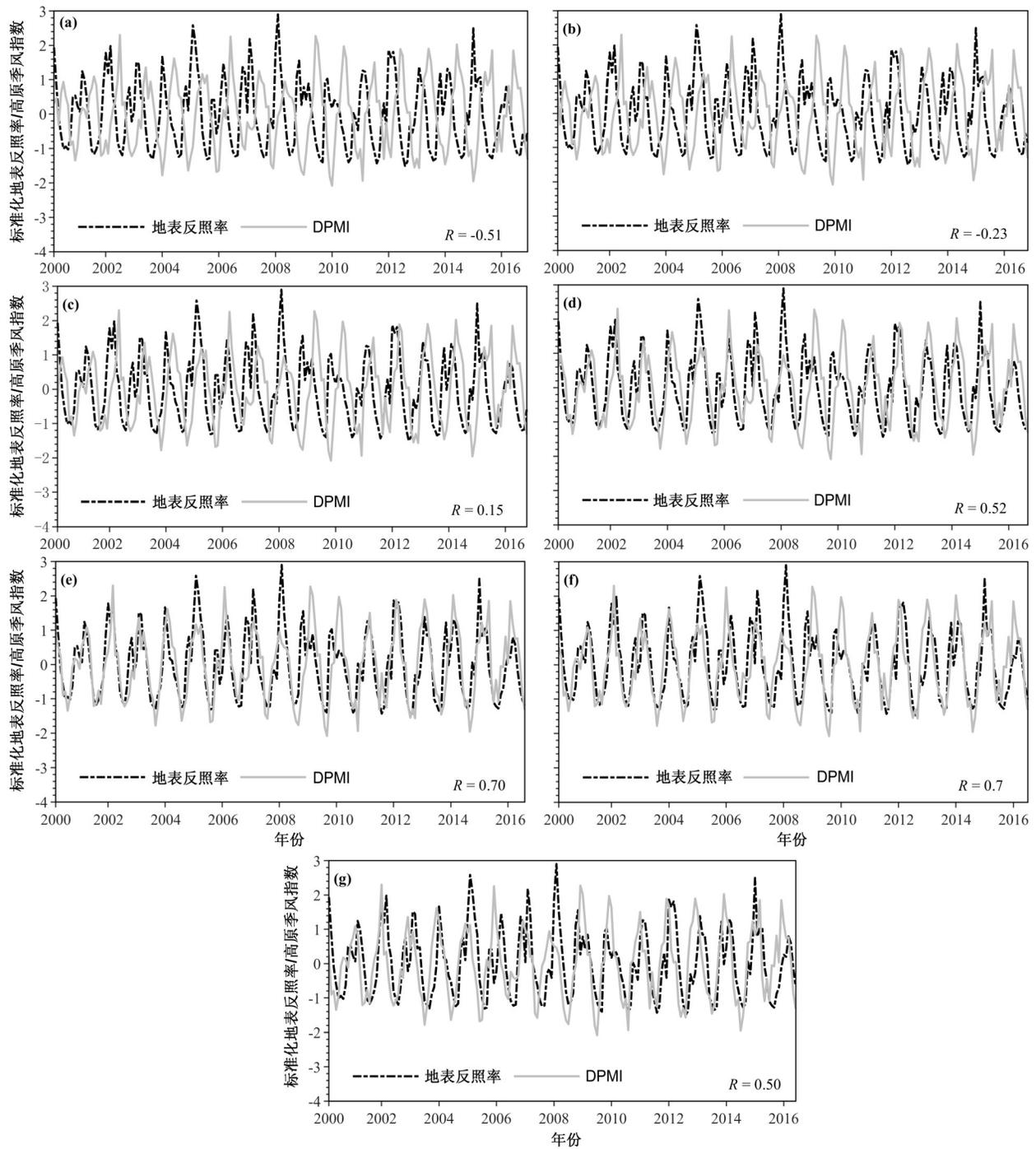


图2 2000~2016年同期和超前1~6个月的标准化高原地表反照率与高原季风指数的年际变化：(a)-(g)分别代表地表反照率相对于高原季风指数提前的月数为 $m=0$ 、 $m=1$ 、……、 $m=6$

Fig. 2 Interannual variations of the standardized land surface albedo over the Tibetan Plateau and the plateau monsoon index in the same period and 1 - 6 months ahead during 2000-2016: (a) - (g)  $m = 0, m = 1, \dots, m = 6$  ( $m$  is the number of month) land surface leads the plateau monsoon index

热输送为主，近地面层大气垂直运动将热量传输，对大气进行加热，进而影响大气环流系统（王介民和高峰，2004）。因此下文采用合成分析方法，分别比较前期11月高原地表反照率偏低年和偏高年对应后期高原感热通量差异、4月大气垂直速度、

对流层温度和大气环流形势差异特征，初步探讨二者间可能的影响机制。

#### 4.1 地表感热通量

地表感热通量指的是地表与大气间的湍流热量，它是地表将吸收的太阳净辐射向大气输送热量

的主要表现形式之一，对东亚季风异常具有显著影响（武正敏和陈权亮，2018），青藏高原冬季积雪对高原地面感热加热作用的影响可以持续到6月

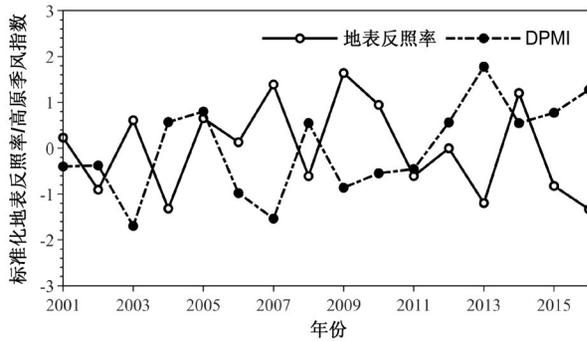


图3 标准化4月高原季风指数与前期11月高原地表反照率的年际变化

Fig. 3 Interannual variations of the standardized plateau monsoon index in April and the land surface albedo over the Tibetan Plateau in the preceding Nov

（朱玉祥等，2009），春季感热信号异常会通过非绝热加热—局地环流正反馈机制维持到夏季，进而影响东亚夏季风（白彬人和胡泽勇，2016）。从前期11月高原地表反照率偏低年、偏高年对应11月至次年4月平均感热通量合成分布（图5a和5b）及其差值分布（图5c）可以看出，在前期11月高原地表反照率异常偏低年，高原绝大部分地区11月至次年4月对大气的感热加热比异常偏高年多 $5 \text{ J m}^{-2}$ 左右，尤其在高原中部地区，部分地区地表感热通量甚至高于 $10 \text{ J m}^{-2}$ 。这说明在前期11月高原地表反照率异常偏低年时，11月至次年4月高原主体对大气的感热加热作用更强。

#### 4.2 垂直运动

大气垂直运动将近地面热量传输到高空，从前期11月高原地表反照率偏低年、偏高年对应4月 $25^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 平均垂直速度合成分布（图6a和6b）及其差值分布（图6c），可以看出，在前期11月高

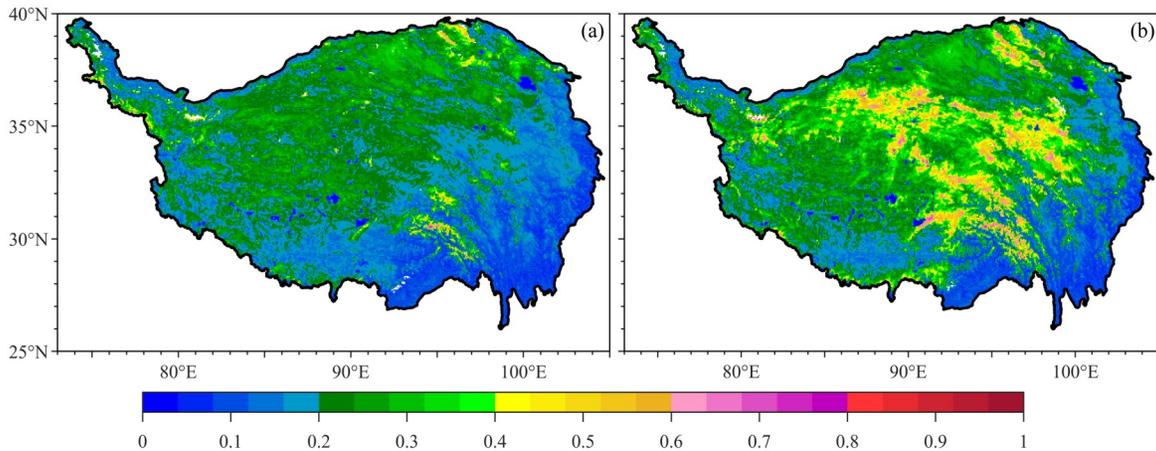


图4 11月高原地表反照率 (a) 偏低年和 (b) 偏高年的平均分布

Fig. 4 Spatial distributions of average land surface albedo over the Tibetan Plateau in Nov in (a) low and (b) high-value years

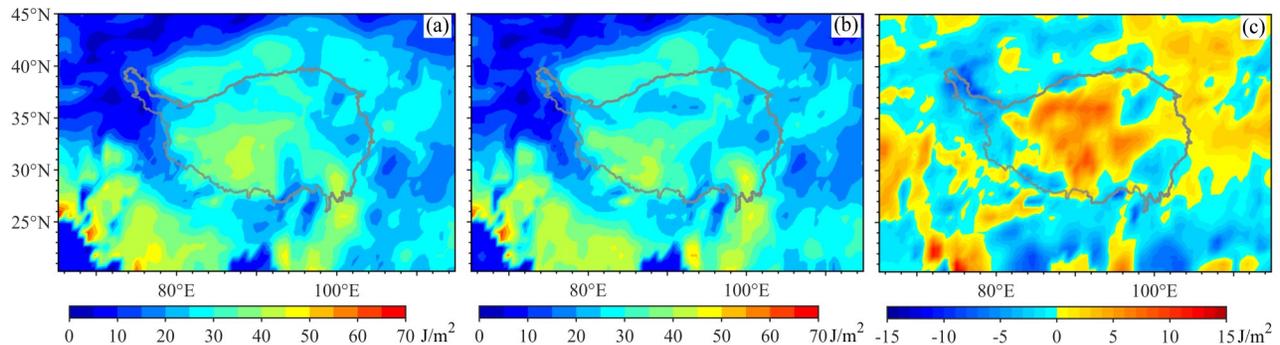


图5 前期11月高原地表反照率 (a) 偏低年、(b) 偏高年对应11月至次年4月平均感热通量合成分布及其 (c) 合成差值分布

Fig. 5 Composite distributions of the sensible heat flux averaged from Nov to next Apr when the land surface albedo in the preceding Nov is (a) low or (b) high and (c) their difference

原地表反照率异常偏低年，高原主体区域（75°E~100°E）近地面层（约600 hPa左右）4月均为上升运动，平均速度约为0.04 Pa s<sup>-1</sup>；在偏高年，高原主体大部分区域近地面层4月为上升运动，平均速度约为0.02 Pa s<sup>-1</sup>；二者平均速度差值约为0.02 Pa s<sup>-1</sup>。上述结果表明：在前期11月高原地表反照率异常偏低年高原主体近地面层大气的垂直上升运动更显著。

### 4.3 对流层温度

高原季风是青藏高原对大气加热的直接结果（叶笃正等，1957）。地表反照率发生改变后会影响到对流层中上层气温从而对季风环流产生影响（彭公炳等，1992）。图7给出了前期11月高原地表反照率偏低年、偏高年对应4月平均对流层（100 hPa）温度合成分布（图7a和7b）及其差值分布（图7c），可以发现：在前期11月地表反照率偏低年，4月高原主体对流层温度约为201~212 K；在前期11月地表反照率偏高年，4月高原主体对流层温度

约为199~211 K；二者相差约1.3 K左右，尤其是高原南部地区差值达到2 K左右。该结果表明：在前期11月高原地表反照率偏低年时，4月高原主体对其上空对流层大气加热作用更强。

### 4.4 大气环流形势

图8给出了前期11月高原地表反照率偏低年和偏高年的4月高原及其附近地区600 hPa位势高度场及风场的合成分布（图8a和8b）及其差值分布（图8c），从位势高度场的等值线分布来看：4320 gpm等值线在高原主体形成一个低压槽，在前期11月高原地表反照率偏低年，该低压槽气旋性曲率大、覆盖范围较大、横跨15个经度，环流系统强度较强；在前期11月高原地表反照率偏高年，低槽的气旋性曲率小、覆盖范围小、横跨5个经度，环流系统强度较小。从风场分布来看：相比于前期11月高原地表反照率偏低年，在偏高年高原主体风场纬向梯度更小，偏南和偏北气流较弱，南北风切变较小。由于高原夏季风爆发的过渡时期出现在

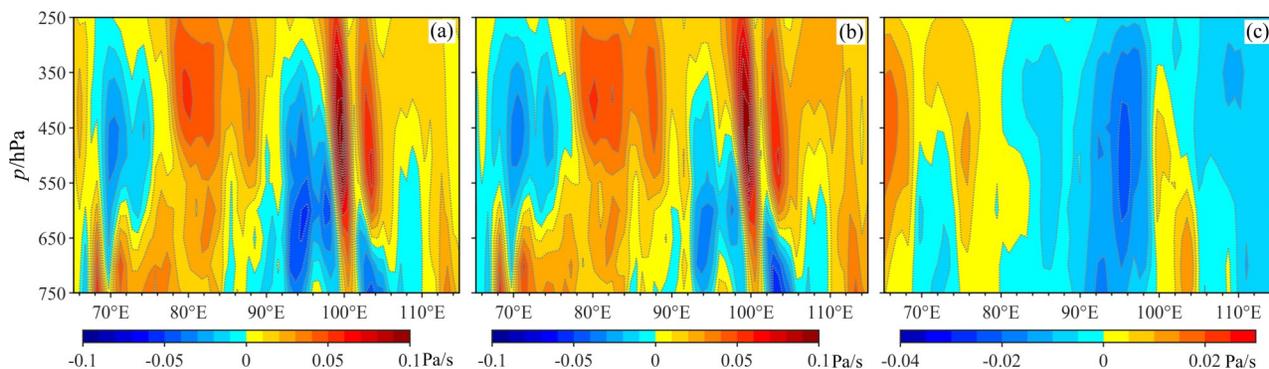


图6 前期11月高原地表反照率 (a) 偏低年、(b) 偏高年对应4月25°N~40°N平均垂直速度合成分布及其 (c) 合成差值分布  
Fig. 6 Composite distributions of the vertical velocity averaged in April between 25°N~40°N when the land surface albedo in the preceding Nov is (a) low or (b) high and (c) their difference

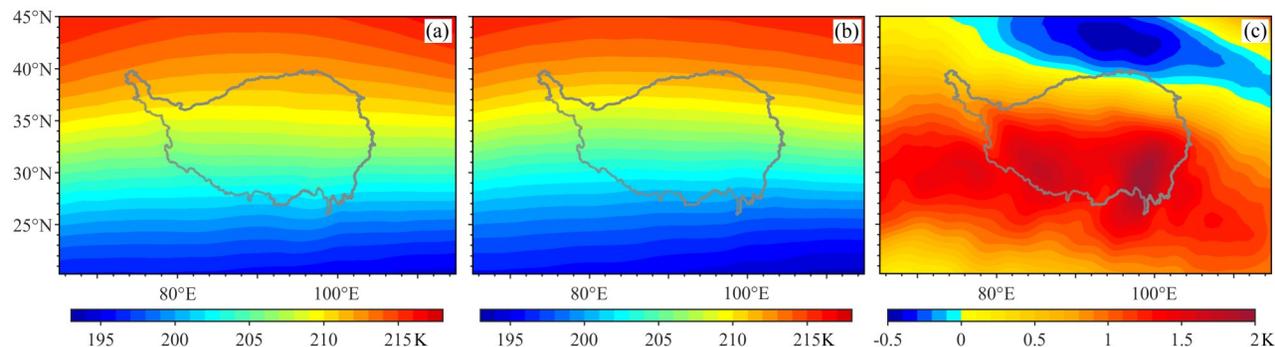


图7 前期11月高原地表反照率 (a) 偏低年、(b) 偏高年对应4月平均对流层（100 hPa）温度合成分布及其 (c) 合成差值分布  
Fig. 7 Composite distributions of the tropospheric (100 hPa) temperature averaged in April when the land surface albedo in the preceding Nov is (a) low or (b) high and (c) their difference

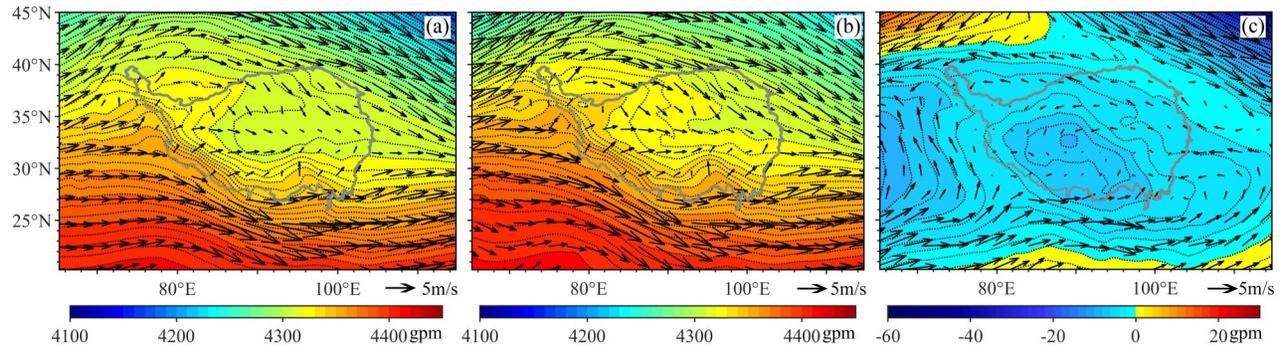


图8 前期11月高原地表反照率 (a) 偏低年、(b) 偏高年对应4月600 hPa位势高度场及风场的合成分布及其 (c) 差值分布

Fig. 8 Composite distributions of the height fields and wind fields at 600 hPa averaged in April when the land surface albedo in the preceding Nov is low (a) or high (b) and (c) their differences

4月, 上述分析结果表明: 当前期11月高原地表反照率偏低时, 次年4月高原夏季风爆发过渡期间高原主体上空大气环流系统更强, 向气候平均态方向发展得越快。

综合上述分析, 可能的影响机制为: 当前期11月高原地表反照率偏低时, 后期高原主体对大气的感热加热信号更强, 从而引起4月高原上空近地面层上升运动明显加强, 这有利于热量向高空传输, 导致对流层加热作用加强, 高原上空对流层温度偏高, 使得高原季风环流系统加强, 最终导致高原季风季节变化相应提前; 反之亦然。

## 5 小结与讨论

地表反照率通过制约地表对太阳辐射的吸收量, 进而影响地表感热, 地表感热信号异常通过非绝热加热—局地环流正反馈机制从而影响高原季风。本文通过统计分析高原地表反照率与高原季风之间的关系及可能的影响机制, 得到如下主要结论:

(1) 11月高原地表反照率大小与次年高原夏季风爆发存在密切关系, 并且对次年高原夏季风爆发有很好的指示意义: 11月高原地表反照率偏低(高), 次年4月高原夏季风爆发偏早(晚), 强度偏强(弱)。

(2) 可能的影响机制为: 当前期11月高原地表反照率偏低时, 后期高原主体对大气的感热加热信号更强, 从而引起4月高原上空近地面层上升运动明显加强, 这有利于热量向高空传输, 导致对流层加热作用加强, 高原上空对流层温度偏高, 使得高原季风环流系统加强, 最终导致高原季风季节变

化相应提前; 反之亦然。

影响高原季风的因素很多, 地气相互作用和大气运动过程较为复杂, 本文仅基于统计方法分析了高原地表反照率和高原季风之间的联系, 并对其可能影响机制进行了初步探讨, 未来, 有待于通过数值模拟进一步分析和检验地表反照率与高原夏季风爆发之间的关系, 并量化高原地表反照率对高原夏季风爆发的贡献率。

## 参考文献 (References)

- 白虎志, 马振锋, 董文杰. 2005. 青藏高原地区季风特征及与我国气候异常的联系 [J]. 应用气象学报, 16(4): 484-491. Bai Huzhi, Ma Zhenfeng, Dong Wenjie. 2005. Relationship between Qinghai-Xizang Plateau region monsoon features and abnormal climate in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16(4): 484-491. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2005.04.009
- 白彬人, 胡泽勇. 2016. 高原热力作用对高原夏季风爆发的指示意义 [J]. 高原气象, 35(2): 329-336. Bai Binren, Hu Zeyong. 2016. Indicative significance of thermal effects over the Qinghai-Xizang Plateau to the onset of plateau summer monsoon [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35(2): 329-336. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00016
- Bao Xinghua, Zhang Fuqing. 2013. Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Climate, 26(1): 206-214. doi: 10.1175/jcli-d-12-00056.1
- 曹晓云. 2018. 基于MODIS的青藏高原地表反照率时空变化研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 9-10. Cao Xiaoyun. 2018. Spatial and temporal change of surface albedo over the Tibetan Plateau based on MODIS [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 9-10.
- 岑思弦, 巩远发, 赖欣. 2014. 青藏高原及其周围地区大气热源对川渝盆地夏季降水的影响 [J]. 高原气象, 33(5): 1182-1189. Cen Sixian, Gong Yuanfa, Lai Xin. 2014. Impact of heat source over

- Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding areas on rainfall in Sichuan-Chongqing basin in summer [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 33(5): 1182-1189. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00122
- 陈爱军, 胡慎慎, 卞林根, 等. 2015. 青藏高原 GLASS 地表反照率产品精度分析 [J]. *气象学报*, 73(6): 1114-1120. Chen Aijun, Hu Shenshen, Bian Linggen, et al. 2015. An assessment on the accuracy of the GLASS albedo products over the Tibetan Plateau [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 73(6): 1114-1120. doi:10.11676/qxxb2015.074
- 陈爱军, 曹晓云, 韩琛惠, 等. 2018. 2000~2016年青藏高原地表反照率时空分布及动态变化 [J]. *气候与环境研究*, 23(3): 355-365. Chen Aijun, Cao Xiaoyun, Han Chenhui, et al. 2018. Spatial-temporal distribution and variation of land surface albedo over the Tibetan Plateau during 2000-2016 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 23(3): 355-365. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17113
- 封国林. 2012. 极端气候事件的检测、诊断与可预测性研究 [M]. 北京: 科学出版社, 3. Feng Guolin. 2012. *Detection, Diagnosis and Prediction of Extreme Climate Events (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press, 3.
- Gao Lu, Hao Lu, Chen Xingwei. 2014. Evaluation of ERA-interim monthly temperature data over the Tibetan Plateau [J]. *J. Mt. Sci.*, 11(5): 1154-1168. doi:10.1007/s11629-014-3013-5
- He Haiyan, McGinnis J W, Song Zhengshan, et al. 1987. Onset of the Asian summer monsoon in 1979 and the effect of the Tibetan Plateau [J]. *Monthly Weather Review*, 115(9): 1966-1995. doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1966:ootasm>2.0.co;2
- 何冬燕, 田红, 邓伟涛. 2014. 青藏高原不同季节地表温度变化特征分析 [J]. *南京信息工程大学学报*, 6(6): 558-569. He Dongyan, Tian Hong, Deng Weitao. 2014. Characteristics of seasonal surface temperature variation over the Tibetan Plateau [J]. *Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese)*, 6(6): 558-569. doi:10.3969/j.issn.1674-7070.2014.06.010
- 刘晓东, 罗四维, 钱永甫. 1989. 青藏高原地表热状况对夏季东亚大气环流影响的数值模拟 [J]. *高原气象*, 8(3): 205-216. Liu Xiaodong, Luo Siwei, Qian Yongfu. 1989. Numerical simulations of influences of different thermal characteristics on ground surface of Tibetan Plateau on the over se-Asia [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 8(3): 205-216.
- 刘晓东, 马柱国. 1996. 中国短期气候变化的一个重要原因: 青藏高原地表反射率的变化 [J]. *热带气象学报*, 12(3): 240-245. Liu Xiaodong, Ma Zhuguo. 1996. An important cause leading to short term climatic variation in China: The change in the surface albedo in Tibetan Plateau [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 12(3): 240-245.
- Lu G, Lu H, Chen X W, 2014. Evaluation of ERA-interim monthly temperature data over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Mountain Science*, 11(5): 1154-1168.
- 马振锋, 高文良, 刘富明, 等. 2003. 青藏高原东侧初夏旱涝的季风环流分析 [J]. *高原气象*, 22(S1): 1-7. Ma Zhenfeng, Gao Wenliang, Liu Fuming, et al. 2003. A study on monsoon circulations of drought and wet years on the east side of Qinghai-Xizang Plateau in early summer [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 22(S1): 1-7. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2003.z1.001
- Nitta T. 1983. Observational study of heat sources over the eastern Tibetan Plateau during the summer monsoon [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 61(4): 590-605. doi: 10.2151/jmsj1965.61.4\_590
- 彭公炳, 李靖, 钱步东. 1992. 气候与冰雪覆盖 [M]. 北京: 气象出版社, 49-57. Peng Gongbing, Li Qian, Qian Budong. 1992. *Climate and Snow Cover (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 49-57.
- 汤懋苍, 沈志宝, 陈有虞. 1979. 高原季风的平均气候特征 [J]. *地理学报*, 34(1): 33-42. Tang Maocang, Shen Zhibao, Chen Yonyu. 1979. On climatic characteristics of the Xizang Plateau monsoon [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 34(1): 33-42. doi:10.11821/xb197901004
- 王介民, 高峰. 2004. 关于地表反照率遥感反演的几个问题 [J]. *遥感技术与应用*, 19(5): 1-9. Wang Jiemin, Gao Feng. 2004. Discussion on the problems on land surface albedo retrieval by remote sensing data [J]. *Remote Sensing Technology and Application (in Chinese)*, 19(5): 1-9. doi:10.3969/j.issn.1004-0323.2004.05.001
- 王同美, 吴国雄, 万日金. 2008. 青藏高原的热力和动力作用对亚洲季风区环流的影响 [J]. *高原气象*, 27(1): 1-9. Wang Tongmei, Wu Guoxiong, Wan Rijin. 2008. Influence of the mechanical and thermal forcing of Tibetan Plateau on the circulation of the Asian summer monsoon area [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27(1): 1-9. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2008.01-0001-09
- 王颖, 李栋梁, 王慧, 等. 2015. 青藏高原冬季风演变的新特征及其与中国西南气温的关系 [J]. *高原气象*, 34(1): 11-20. Wang Ying, Li Dongliang, Wang Hui, et al. 2015. New variation characteristics of winter monsoon over Qinghai-Xizang Plateau and its influences on temperature over southwest China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 34(1): 11-20. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00196
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 43-47. Wei Fengying. 1999. *Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 43-47.
- 吴国雄, 林海, 邹晓蕾, 等. 2014. 全球气候变化研究与科学数据 [J]. *地球科学进展*, 29(1): 15-22. Wu Guoxiong, Lin Hai, Zou Xiaolei, et al. 2014. Research on global climate change and scientific data [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 29(1): 15-22. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.01.0015
- 武正敏, 陈权亮. 2018. 基于多种资料的青藏高原地表感热的对比分析 [J]. *高原山地气象研究*, 38(1): 1-10. Wu Zhengmin, Chen Quanliang. 2018. Comparison and analysis of surface sensible heat flux in the Tibetan Plateau based on a variety of data [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese)*, 38(1): 1-10. doi: 10.3969/j.issn.1674-2184.2018.01.001
- 肖登攀, 陶福禄, Moiwu Juana P. 2011. 全球变化下地表反照率研究

- 进展 [J]. 地球科学进展, 26(11): 1217-1224. Xiao Dengpan, Tao Fulu, Moiwu J P. 2011. Research progress on surface albedo under global change [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 26(11): 1217-1224. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2011.11.1217
- 徐淑英, 高由禧. 1962. 西藏高原的季风现象 [J]. 地理学报, 17(2): 111-123. Xu Shuying, Gao Youxi. 1962. The monsoon phenomenon on the Tibet Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 17(2): 111-123. doi: 10.11821/xb196202002
- Xun Xueyi, Hu Zeyong, Ma Yaoming. 2012. The dynamic plateau monsoon index and its association with general circulation anomalies [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29(6): 1249-1263. doi: 10.1007/s00376-012-1125-9
- 荀学义, 胡泽勇, 崔桂凤, 等. 2017. 青藏高原季风对我国西北干旱区气候的影响 [C]// 第34届中国气象学会年会 S4 重大气象干旱成因、物理机制、监测预测与影响论文集, 201-214. Xun Xueyi, Hu Zeyong, Cui Guifeng, et al. The Effect of Tibetan Plateau Monsoon on the Climate in the Arid Area of Northwest China [C] // The 34th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society S4 Proceedings of the causes, physical mechanisms, monitoring predictions and effects of major meteorological droughts, 201-214.
- 叶笃正. 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 89-101. Ye Duzheng. 1979. *Meteorology of the Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press, 89-101.
- 叶笃正, 罗四维, 朱抱真. 1957. 西藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡 [J]. 气象学报, 15(2): 20-33. Yeh Tucheng, Lo Szuwei, Chu Paochen. 1957. The wind structure and heat balance in the lower troposphere over Tibetan Plateau and its surrounding [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 15(2): 20-33. doi: 10.11676/qxxb1957.010
- 赵勇, 李如琦, 杨霞, 等. 2013. 5月青藏高原地区感热异常对北疆夏季降水的影响 [J]. 高原气象, 32(5): 1215-1223. Zhao Yong, Li Ruqi, Yang Xia, et al. 2013. Impact of the anomaly of surface sensible heat in Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding areas on summertime precipitation in northern Xinjiang [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 32(5): 1215-1223. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00117
- 朱玉祥, 丁一汇, 刘海文. 2009. 青藏高原冬季积雪影响我国夏季降水的模拟研究 [J]. 大气科学, 33(5): 903-915. Zhu Yuxiang, Ding Yihui, Liu Haiwen. 2009. Simulation of the influence of winter snow depth over the Tibetan Plateau on summer rainfall in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese)*, 33(5): 903-915. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.05.02