

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.05.001

# MODIS/Terra 遥感雪盖数据在青藏高原河源区的应用

郝振纯<sup>1</sup> 张磊磊<sup>1,2</sup> 童 凯<sup>1,2</sup> 康 颖<sup>3</sup>

( 1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 江苏 南京 210098 ;  
2. 中国科学院青藏高原研究所 北京 100085 ; 3. 浙江省水利水电勘测设计院 浙江 杭州 310002 )

**摘要 :** 基于 2000—2009 年 MODIS/Terra 积雪数据产品 , 分析我国青藏高原主要河源区雪盖的空间分布和季节变化。结果表明 : 五江源的积雪在空间上主要集中于雅鲁藏布江河谷、念青唐古拉山及横断山南部等地区 , 而北部积雪相对偏少 , 降雪主要集中于春冬季节 , 且雪盖变化呈现双峰形特点 , 峰值主要集中在 2 月和 11 月。不同季节雪盖表现出一定的趋势变化 , 春季雅鲁藏布江源区雪盖显著减少 , 秋季长江源区雪盖面积显著增加 , 冬季雪盖变化差异较大 , 黄河、澜沧江和怒江源区雪盖面积在减少 , 但趋势不显著 , 长江和雅鲁藏布江源区雪盖面积在增加 , 但仅长江源区增加趋势显著。总体而言 , 五江源地区雪盖面积表现出略微增加的趋势 , 但不显著。

**关键词 :** MODIS/Terra ; 青藏高原 ; 雪盖 ; 五江源

中图分类号 : P426.63+5

文献标志码 : A

文章编号 : 1000-1980( 2012 )05-0479-06

## Application of MODIS/Terra remote sensing data of snow cover to five rivers ' source regions in Tibetan Plateau

HAO Zhenchun<sup>1</sup> , ZHANG Leilei<sup>1,2</sup> , TONG Kai<sup>1,2</sup> , KANG Ying<sup>3</sup>

( 1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;  
2. Institute of Tibetan Plateau Research Chinese Academy of Sciences , Beijing 100085 , China ;  
3. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power , Hangzhou 310002 , China )

**Abstract :** Based on the MODIS/Terra snow cover datasets from 2000 to 2009 , the spatial distribution and seasonal variation of snow cover over five rivers ' source regions in the Tibetan Plateau were analyzed. The results show that in contrast to the north of the study areas , the most persistently snow-covered areas were concentrated in the Yarlung Zangbo Valley and the Nyainqentanglha and southern Hengduan mountains. In spring and winter , the mean snow cover fraction was at its maximum , with two peak values in February and November. Trend changes could be observed in the study areas in different seasons. There was a significant decreasing trend of snow cover in the source region of the Brahmaputra River in the spring and a significant increasing trend in the source region of the Yangtze River in the autumn. A slight decreasing trend of the snow cover was detected in the source regions of the Yellow River , the Lancang River , and the Salween River in the winter. The snow cover over the source regions of the Yangtze River and the Brahmaputra River was increasing , and the increasing trend was significant in the source region of the Yangtze River. In general , the snow cover over the five rivers ' source regions showed a slight increasing trend.

**Key words :** MODIS/Terra ; Tibetan Plateau ; snow cover ; five rivers ' source regions

积雪是气候系统中的一个重要而活跃的组成部分 , 其对气候变化十分敏感。在所有可变的 地表条件中 , 积雪是一个关键的可变因子。正是由于这个原因 , 积雪已被建议作为检验与监测全球气候变化的一个有效

收稿日期 : 2012-02-27

基金项目 : 国家重点基础研究计划( 973 计划 )( 2010CB951101 ) ; 国家自然科学基金( 40830639 , 50879016 ) ; 中央高校基本科研业务费专项( 2010B13814 ) ; 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项( 1069-50985512 )

作者简介 : 郝振纯( 1958 — ) 男 , 山西翼城人 , 教授 , 博士 , 主要从事水文水资源和气候变化影响研究。 E-mail : hzchun@hhu.edu.cn

指数<sup>[1]</sup>。同时,积雪作为下垫面的一种特殊自然景观,以高反射、低热导率以及融雪水文效应等对陆面水文过程和大气热状况产生重要的影响<sup>[2]</sup>,从而成为冰冻圈中最为敏感的组成部分。

青藏高原地处我国中低纬度区域,平均海拔在4000 m以上,由于特殊的地理位置和海拔高度使其成为北半球中纬度最重要的积雪场,也使青藏高原积雪在东亚乃至全球气候形成与异常变化中起着相当重要的作用。因此,许多学者针对青藏高原的积雪进行了广泛的研究。李培基<sup>[3]</sup>利用气象台站资料分析后认为青藏高原的积雪在增加,近36 a雪深平均增加了1.9%。柯长青等<sup>[4]</sup>采用卫星遥感结合气象台站资料进一步验证了高原积雪在增加的结论,并指出冬季的降水增加是其主要原因。针对青藏高原积雪空间分布,虽然不同学者采用不同的数据来源(遥感资料<sup>[5-6]</sup>,再分析资料<sup>[7]</sup>,气象台站数据<sup>[8]</sup>)进行分析,但所得结论接近一致:青藏高原的积雪主要分布于高原的西部兴都库什、天山山脉和帕米尔高原以及南部喜马拉雅山脉地区,而中部唐古拉山脉和北部昆仑山脉等积雪稀少。此外,很多学者针对青藏高原积雪变化对我国西南地区<sup>[9]</sup>、长江流域<sup>[10]</sup>、全国<sup>[11]</sup>及亚洲<sup>[12-13]</sup>夏季降水的影响等都开展了诸多研究。

积雪资料主要来源有2种:(a)台站实测资料,但由于台站的分布受到多方因素的影响,分布很不均匀,大多数分布于高原东部,而且台站多位于河谷地区,经常发生台站无雪或少雪而周围山区积雪很多的情形,这样必然对积雪的代表性及准确性产生重要的影响<sup>[14]</sup>。(b)卫星监测资料(NOAA,MODIS以及SSM/I等),该方法可以监测人类无法观测到地区的降雪情况,同时空间覆盖范围大,可以有效弥补台站观测的缺陷。然而由于卫星传感器以及其他技术的不同,卫星资料在青藏高原地区的精度也有较大的差异。郭艳君等<sup>[15]</sup>利用30a的NOAA遥感资料和台站雪深资料对比分析后认为:NOAA数据由于分辨率较低,导致其结果在青藏高原偏高。车涛等<sup>[16]</sup>利用被动微波SSM/I数据反演的雪深与台站资料对比分析后也表明SSM/I数据在青藏高原被高估。由于资料所限,针对MODIS雪盖资料的精度,Pu等<sup>[17]</sup>对高原115个气象台站的雪深资料进行对比分析,认为MODIS/Terra数据的精度与积雪持续期和雪深有关,当连续3d及以上积雪存在时,其误报率在10%以内。当雪深在14 cm以上时,其预报数据的准确率为100%,随着雪深的减小,其预报数据的准确率在降低,当雪深在5 cm时预报数据的准确率为75%。青藏高原的气象台站主要分布在东部地区,处于我国江河源区的区域。Li等<sup>[18]</sup>分析了青藏高原积雪的时间及雪深分布,指出我国江河源区的积雪时间大部分在60 d以上,平均雪深在7 cm左右,因此认为MODIS能够很好地反映江河源区积雪的分布与变化情况。

然而,很多研究往往针对的是青藏高原整体,很少有研究关注区域内的差异。尽管高原东部积雪相对较少,但Vemekar等<sup>[19]</sup>指出青藏高原东部积雪的变化是欧亚大陆积雪变化最显著地区之一,而高原的东部刚好位于长江、黄河、澜沧江等我国和南亚主要河流的源头地区。因此,江河源区积雪在整个青藏高原中具有重要的主导作用<sup>[20]</sup>和代表意义,而积雪又是江河源区主要的水资源之一,积雪变化所引起的融水年际及年内分配变化直接影响到该区域水资源的重新分配。因此,研究江河源区积雪的时空变化对于该区域及下游水资源利用、灾害分析、人民生活以及气候演变等均具有重要的指导意义。笔者以MODIS/Terra卫星遥感雪盖数据集分析江河源区积雪的时空变化规律。

## 1 研究区域及数据资料

青藏高原主要的江河源区包括长江、黄河、澜沧江、怒江以及雅鲁藏布江的源头(简称五江源)地区。其地处我国西部、青藏高原东部(图1)。五江源流域面积为58.2万km<sup>2</sup>,占青藏高原总面积的23.3%。其中雅鲁藏布江源区面积最大,为20.1万km<sup>2</sup>,占五江源面积的34.5%;其次为长江源、黄河源、怒江源,面积分别为13.8万km<sup>2</sup>、12.2万km<sup>2</sup>和6.8万km<sup>2</sup>,分别占五江源面积的23.7%、21%和11.7%,面积最小的为澜沧江(5.38万km<sup>2</sup>),占五江源面积的9.1%。五江源地理位置介于北纬27°~36°、东经80°~105°之间,全年平均气温为-3~7℃,年平均降水量在410~565 mm之间<sup>[21]</sup>,但区域降水量变化较大,气温、降水大致是由东南向西北逐步减少。

中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer,MODIS)是美国EOS系统中主要的传感器之一,它具有较高的空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率。由于MODIS具有诸多优点且提供数据共享,因此被广泛应用于诸多领域。笔者选取Terra卫星的MOD10CM产品,资料获取从2000年3月开始到2009年12月结束,时间分辨率为月,空间分辨率为0.05°×0.05°。由于积雪在波长约为0.5 μm(绿光)时有较高的反射率,而在波长约为1.6 μm(近红外)时的反射率较低,因此主要采用归一化差分积雪指数来分辨积雪。主要

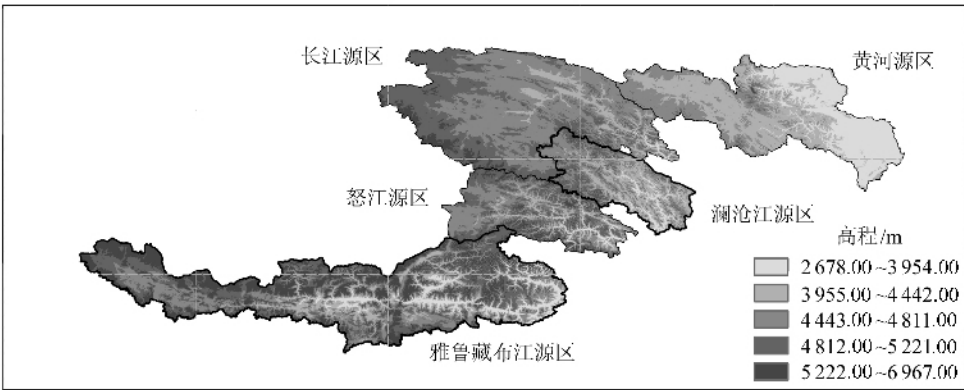


图 1 五江源分布示意图

Fig. 1 Location of five rivers ' source regions in Tibetan Plateau

的计算方程为

$$I = \frac{R_4 - R_6}{R_4 + R_6} \tag{1}$$

式中： $I$ ——归一化差分积雪指数； $R_4$ ——第 4 波段的反射率； $R_6$ ——第 6 波段的反射率。  
积雪信息采用积雪在栅格内所占百分比来表示，0 表示网格内无积雪，100 表示栅格被积雪完全覆盖。

2 积雪的空间分布及季节性变化

通过算术平均计算得到五江源 2000—2009 年多年季节平均雪盖分布(图 2)。从图 2 可以看出由于受五江源复杂地形的影响，积雪在该地区的分布具有非常大的不均匀性和明显的季节性变化。空间上积雪主要集中于雅鲁藏布江河谷、念青唐古拉山及横断山南部等地区，而北部地区积雪相对偏少；时间上降雪主要集中于春冬季节，这主要是由来自于南亚季风的潮湿水汽沿雅鲁藏布江河谷前行受到喜马拉雅山地形的影响<sup>[14]</sup>，水汽受阻，进而造成五江源腹地地区积雪相对较少。而在夏季，仍然有部分积雪存在于五江源的高海拔(5000 m 以上)地区，如阿尼玛卿山、念青唐古拉山、横断山及喜马拉雅山等。

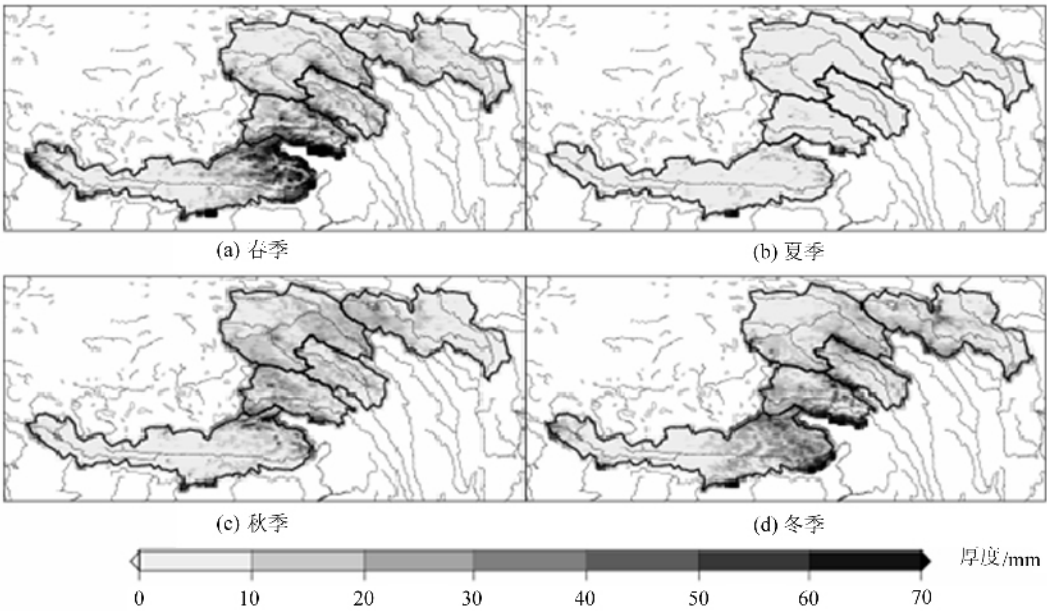


图 2 五江源雪盖多年季节分布(2000—2009 年)

Fig. 2 Distribution of mean seasonal snow cover from 2000 to 2009 in five rivers ' source regions

图 3 表示不同高程带雪盖面积的多年平均年内变化，其表明五江源地区积雪具有强烈的季节性。曲线呈现双峰形特点，峰值分别出现在 2 月和 11 月。2 月的雪盖面积大约为 18%，随后雪盖较为稳定，4 月后雪

盖面积迅速减小并在7月达到最低(约1%)。9月起雪盖面积又逐步增加,并在11月达到最大(19%),此后雪盖面积又逐步减少。同时,高程对雪盖的变化也具有很大影响,图3中虚线、细实线、粗实线及点线分别表示雪盖在海拔4000 m以下、4000~5000 m范围、5000 m以上及五江源区平均的年内变化,从中可以看出雪盖面积随海拔的增高而增大。源区平均雪盖的变化与海拔4000~5000 m内雪盖的变化相近,说明该地区的积雪主要分布在海拔4000~5000 m内,该海拔区间内积雪的变化对源区积雪变化有着重要的影响,而在海拔5000 m以上地区积雪的累积时间相对更长,其2个峰值出现的时间分别比其他高程带延迟(3月)和提前1个月(10月)。对于高海拔地区雪盖的年内变化,通过分析江河源区内38个气象台站的多年平均月气温、降水、风速(2000—2009年)等变化,认为雪盖的变化主要受降水和温度的影响。源区负温集中于11月至翌年3月,而降水则呈现单峰型分布,且峰值发生在7月,因此雪盖在3月之前主要处于累积增加的趋势,3月到夏季随着温度的升高总体上呈现下降的趋势。秋冬季的降水主要发生在9—10月,随着温度的降低,雪盖面积在增加。尽管在12月风速没有显著增加,但由于该月没有有效的降水,因此吹雪可能是导致该月份雪盖减小的原因之一。Moore<sup>[22]</sup>利用NCEP再分析风速资料以及进行MODIS积雪数据分析之后也认为吹雪对青藏高原地区雪盖的变化具有重要影响。Qin等<sup>[23]</sup>利用SMMR以及气象台站资料分析青藏高原积雪变化时认为升华是冬季积雪减小的一个重要原因。

对于雪盖的年际变化主要采用非参数的Mann-Kendal(M-K法)趋势分析方法来进行检测。M-K方法是用来评估气候要素时间序列趋势的检验方法,以适用范围广、人为性少、定量化程度高而著称,因此近年来应用较为广泛<sup>[24-25]</sup>,其方程如下:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sgn}(x_i - x_j)$$

(2)

其中sgn(\*)为符号函数。当 $x_i - x_j$ 小于、等于或大于零时,sgn( $x_i - x_j$ )分别为-1、0或1;M-K统计量公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}} & S < 0 \end{cases}$$

(3)

Z为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势。Z的绝对值大于或等于1.28表示通过信度90%的显著性检验。

表1给出了黄河、长江、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江源区及平均五江源雪盖M-K趋势检验统计值,表明五江源近10a来雪盖面积呈增加趋势,然而除长江源区通过了90%显著性检验外,黄河源区及澜沧江源区趋势并不显著。怒江和雅鲁藏布江源区雪盖面积呈现下降趋势,但都不显著。同时不同季节雪盖面积也表现出一定的变化趋势,具体情况为(a)春季所有源区雪盖面积在减少,但减少趋势不明显,只有雅鲁藏布江源区通过90%的显著性检验。(b)秋季雪盖面积在增加,除长江源区雪盖面积增加明显外,其余地区增加趋势不显著。(c)冬季雪盖变化差异较大,黄河、澜沧江和怒江源区雪盖面积在减少,但是趋势不显著,长江和雅鲁藏布江源区冬季雪盖面积在增加,但仅长江源区增加趋势显著。总体而言,长江源区除春季雪盖面积减少外,其余季节及年平均雪盖面积均呈现增加趋势,且增加趋势显著;其他源区虽然呈现出不同的变化趋势,但变化趋势不显著;五江源地区雪盖面积表现出略微增加趋势,但不显著。

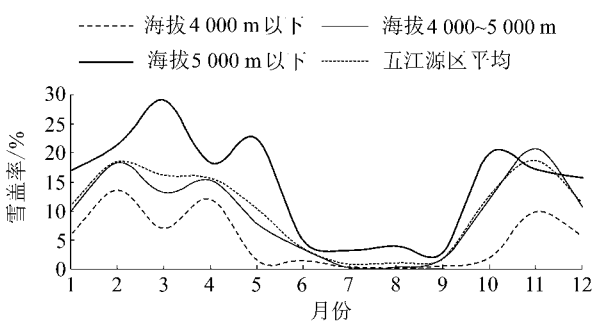


图3 五江源海拔与雪盖分布关系

Fig. 3 Monthly mean snow cover fraction at different elevations

表 1 五江源雪盖趋势 M-K 法季节及年际统计检验值

| Table 1 M-K statistics of seasonal and inter-annual snow cover trends in study areas |     |    |     |     | %       |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|----|-----|-----|---------|
| 研究区域                                                                                 | 春季  | 夏季 | 秋季  | 冬季  | 10 a 平均 |
| 黄河源区                                                                                 | -1  | 0  | 8   | -3  | 2       |
| 长江源区                                                                                 | -2  | 2* | 20* | 12* | 8*      |
| 澜沧江源区                                                                                | -4  | 1  | 12  | -1  | 2       |
| 怒江源区                                                                                 | -11 | 1  | 10  | -1  | -1      |
| 雅鲁藏布江源区                                                                              | -9* | -1 | 1   | 6   | -1      |
| 五江源                                                                                  | -5  | 0  | 10* | 3   | 2       |

注 : \* 表示通过 90% 置信度检验。

3 结 论

a. 五江源的积雪空间上主要集中于雅鲁藏布江河谷、念青唐古拉山及横断山南部等地区 ,而北部地区积雪相对偏少 ,时间上降雪主要集中于春冬季节。

b. 五江源积雪具有强烈的季节性 ,雪盖变化呈现出双峰形特点 ,海拔 5 000 m 以下雪盖面积的峰值主要集中在 2 月和 11 月 ,而海拔 5 000 m 以上其峰值分别延后和提前 1 个月 ,分别出现在 3 月和 10 月。同时雪盖面积随海拔的增高而增大。源区平均雪盖变化与海拔 4 000 ~ 5 000 m 内雪盖的变化相近 ,说明该地区的积雪主要分布在海拔 4 000 ~ 5 000 m 范围内。

c. 近 10 a 来五江源雪盖面积呈增加趋势 ,然而除长江源区增加趋势明显外 ,黄河及澜沧江源区增加趋势不显著。怒江和雅鲁藏布江源区雪盖面积呈现下降趋势 ,但都不显著。总体而言 ,五江源地区雪盖面积表现出略微增加趋势 ,但不显著。

d. 不同季节雪盖表现出一定的趋势变化 ,具体情况为 :春季源区雪盖在减少 ,但减少趋势不明显 ,只有雅鲁藏布江源区通过了显著性检验 ,秋季雪盖面积在增加 ,但仅有长江源区变化显著 ,冬季雪盖变化差异较大 ,黄河、澜沧江和怒江源区雪盖面积在减少 ,但趋势不显著 ,长江和雅鲁藏布江源区雪盖面积在增加 ,但仅长江源区增加趋势显著。

致谢 : 本文在 MODIS 数据处理过程中得到了中国科学院青藏高原研究所苏凤阁研究员的帮助和支持 ,在此表示感谢。

参考文献 :

[ 1 ] ROBINSON D A , DEWEY K F. Recent secular variations in the extent of Northern Hemisphere snow cover[ J ]. Geophysical Research Letters ,1990 ,17( 10 ) :1557-1560.

[ 2 ] BARNETT T P , DUMENIL L , SCHLESE U , et al. The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations[ J ]. Journal of the Atmospheric Sciences , 1989 ,46( 5 ) :661-685.

[ 3 ] 李培基. 青藏高原积雪对全球变暖的响应[ J ]. 地理学报 ,1996 ,51( 3 ) :260-265. ( LI Peiji. Response of Tibetan snow cover to global warming[ J ]. Acta Geographica Sinica , 1996 ,51( 3 ) :260-265.( in Chinese ))

[ 4 ] 柯长青 ,李培基. 青藏高原积雪分布与变化特征[ J ]. 地理学报 ,1998 ,53( 3 ) :209-215. ( KE Changqing , LI Peiji. Spatial and temporal characteristics of snow cover over the Qinghai-Xizang Plateau[ J ]. Acta Geographica Sinica , 1998 ,53( 3 ) :209-215. ( in Chinese ))

[ 5 ] 韦志刚 ,吕世华. 青藏高原积雪的分布特征及其对地面反照率的影响[ J ]. 高原气象 ,1995 ,14( 1 ) :67-73. ( WEI Zhigang , LU Shihua. Distribution of snow cover on the Qinghai-Xizang Plateau and its influence on surface albedo[ J ]. Plateau Meteorology , 1995 ,14( 1 ) :67-73. ( in Chinese ))

[ 6 ] IMMERZEEL W W , DROOGERS P , DE JONG S M , et al. Large-scale monitoring of snow cover and runoff simulation in Himalayan river basins using remote sensing[ J ]. Remote Sensing of Environment , 2009 ,113( 1 ) :40-49.

[ 7 ] 高文良 ,刘宣飞 ,管兆勇. 青藏高原积雪时空变化特征的对比分析. 四川气象 ,2002 ,22( 3 ) :8-10. ( GAO Wenliang , LIU Xuanfei , GUAN Zhaoyong. The comparison analysis of spatial and temporal of snow cover over the Tibetan Plateau[ J ]. Journal of Sichuan Meteorology , 2002 ,22( 3 ) :8-10. ( in Chinese ))

[ 8 ] 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[ J ]. 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[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 26(4):496-508. (in Chinese))
- [9] 周浩,唐红玉,程炳岩. 青藏高原冬春季积雪异常与西南地区夏季降水的关系[J]. 冰川冻土, 2010, 32(6):1144-1151. (ZHOU Hao, TANG Hongyu, CHEN Bingyan. Relation between the abnormal snow cover in winter and spring over the Tibetan Plateau and Summer precipitation over the Southwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(6):1144-1151. (in Chinese))
- [10] 高荣,钟海玲,董文杰,等. 青藏高原积雪、冻土对中国夏季降水影响研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2):254-260. (GAO Rong, ZHONG Hailing, DONG Wenjie, et al. Impact of snow cover and frozen soil in the Tibetan Plateau on summer Precipitation in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(2):254-260. (in Chinese))
- [11] 朱玉祥,丁一汇,刘海文. 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, 2009, 33(5):903-915. (ZHU Yuxiang, DING Yihui, LIU Haiwen. Simulation of the Influence of Winter Snow depth over the Tibetan Plateau on summer rainfall in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(5):903-915. (in Chinese))
- [12] 王叶堂,何勇,侯书贵. 青藏高原冬春季积雪对亚洲夏季风降水影响的研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(3):452-460. (WANG Yetang, HE Yong, HOU Shugui. Recent progress in researches of the impact of winter and spring snow cover on the Asian summer monsoon precipitation in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(3):452-460. (in Chinese))
- [13] WU Tongwen, QIAN Zhengang. The relation between the Tibetan winter snow and the Asian summer monsoon and rainfall: an observational investigation[J]. Journal of Climate, 2003, 16:2038-2051.
- [14] PU Zhaoxia, LI Xu. MODIS/Terra observed snow cover over the Tibet Plateau: distribution, variation and possible connection with the East Asian Summer Monsoon (EASM) [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 97(3):265-278.
- [15] 郭艳君,翟盘茂,李威. NOAA 卫星遥感与常规观测中国积雪的对比研究[J]. 冰川冻土, 2004, 26(6):755-760. (GUO Yanjun, ZHAI Panmao, Li Wei. Snow cover in China, Derived from NOAA satellite remote sensing and conventional observation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(6):755-760. (in Chinese))
- [16] 车涛,李新,高峰. 青藏高原积雪深度和雪水当量的被动微波遥感反演[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3):363-368. (CHE Tao, LI Xin, GAO Feng. Estimation of snow water equivalent in the Tibetan Plateau using passive microwave remote sensing Data (SSM/I) [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3):363-368. (in Chinese))
- [17] PU Zhaoxia, LI Xu, SALOMONSON V V. MODIS/Terra observed seasonal variations of snow cover over the Tibetan Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(6):L06706.
- [18] LI Xin, CHENG Guodong, JIN Huijun, et al. Cryospheric change in China[J]. Global and Planetary Change, 2008, 62:210-218.
- [19] VERNEKAR A D, ZHOU J, SHUKLA J. The effect of Eurasian snow cover on the Indian monsoon[J]. Journal of Climate, 1995, 8(2):248-266.
- [20] 杨建平,丁永建,刘俊峰. 长江黄河源区积雪空间分布与年代际变化[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5):648-655. (YANG Jianping, DING Yongjian, LIU Junfeng. Distribution of snow cover and its inter-decadal variation in the Source Regions of the Yangtze and Yellow Rivers[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(5):648-655. (in Chinese))
- [21] 郝振纯,江微娟,鞠琴,等. 青藏高原河源区气候变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(6):1130-1135. (HAO Zhenchun, JIANG Weijuan, JU Qin, et al. The features of climate changes in the Five River Source Regions of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(6):1130-1135. (in Chinese))
- [22] MOORE G W K. Mount Everest snow plume: a case study[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(22):L22102.
- [23] QIN Dahe, LIU Shiyin, LI Peiji. Snow cover distribution, variability, and response to climate change in western China[J]. Journal of Climate, 2006, 19(9):1820-1833.
- [24] 秦年秀,姜彤,许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5):589-594. (QIN Nianxiu, JIANG Tong, XU Chongyu. Trend and abruptness analysis on the discharge in the Yangtze Basin[J]. Resource and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(5):589-594. (in Chinese))
- [25] YUE Sheng, PILON P, CAVADIAS G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. Journal of Hydrology, 2002, 259(1/2/3/4):254-271.