DOI: 10.5846/stxb201303070365

田柳茜,李卫忠,张尧,田立军,朱求安,彭长辉,陈槐.青藏高原 1979—2007 年间的积雪变化.生态学报,2014,34(20):5974-5983. Tian L X, Li W Z, Zhang Y, Tian L J, Zhu Q, Peng C H, Chen H. The analysis of snow information from 1979 to 2007 in Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20):5974-5983.

青藏高原 1979—2007 年间的积雪变化

田柳茜¹,李卫忠¹,张 尧¹,田立军²,朱求安¹,彭长辉^{1,3},陈 槐^{1,4,*}

(1. 西北农林科技大学生态预测与全球变化实验室,杨凌 712100; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 1000293. 魁北克大学环境科学研究所,蒙特利尔 H3C 3P8; 4. 中国科学院成都生物研究所,成都 610041)

摘要:利用雪深被动微波遥感数据产品,对青藏高原 1979—2007 年积雪深度、积雪日数的分布变化及其趋势进行了分析。结果 表明:青藏高原积雪日数、积雪深度和海拔三者之间在空间上具有显著正相关;青藏高原积雪在 1988 年发生突变,该年前后积 雪分布有显著不同,这与 20 世纪 80 年代中后期青藏高原由暖干时期进入暖湿时期有关;将青藏高原按夏季水汽来源不同将其 分为南北两部分,发现 29 年来北部积雪日数变化与全国积雪变化相反呈极显著增加趋势(*R*²=0.39,*P*<0.01),以 1.40 d/a 的趋 势增加,主要原因是西北部地区冬季积雪日数增加;南部积雪深度与全国积雪变化一致呈极显著减少趋势(*R*²=0.24,*P*<0.01), 以-0.04 cm/a 的趋势减少,主要原因是东南部春、夏、秋三季积雪深度减少。

关键词:青藏高原;雪深;积雪日数;回归分析

The analysis of snow information from 1979 to 2007 in Qinghai-Tibetan Plateau

TIAN Liuxi¹, LI Weizhong¹, ZHANG Yao¹, TIAN Lijun², ZHU Qiuan¹, PENG Changhui^{1,3}, CHEN Huai^{1,4,*}

1 Laboratory for Ecological Forecasting and Global Change, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 Institute of Environmental Science, University of Quebec at Montreal, Montreal H3C 3P8, Canada

4 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

Abstract: In this paper, we used long-term (1979—2007) snow depth dataset of China, which was provided by ' Environmental and Ecological Science Data Center for West China' and analyzed the change of snow depth and distribution on the Qinghai-Tibetan Plateau. The linear regression method was used to study the variation trends of mean snow cover days and snow depth on annual-scale and seasonal-scale. Results show that, first, there were significant positive relationship between either two of the mean annual snow cover days, the mean annual snow depth and elevation. Second, the snow distribution on the Qinghai-Tibet Plateau had a mutation in 1988. Before 1988 there were two different distribution areas, by contrast, three different distribution areas were observed after 1988. It may be caused by the transition from warm and dry period to warm and wet period on the Qinghai-Tibetan Plateau in the mid and late 1980's. Third, we separate the Qinghai-Tibetan Plateau into two different regions based on different air masses in summer. The dividing line was near $34^{\circ}N$ — $35^{\circ}N$ inherited from the research by Tian Lide. In the north, there was a significant increase in mean annual snow cover days from 1979 to 2007 at the rate of 1.40 d/a ($R^2 = 0.39$, P < 0.01), which was different from the tendency of the whole country. It was mainly caused by the increase in northwest during winter season. In the south, there was a significant decrease in mean annual snow depth from 1979 to 2007 at the rate of -0.04cm/a ($R^2 = 0.24$, P < 0.01), which was consistent with the tendency of the whole country. It was mainly caused by decrease in southeast during spring and summer and autumn seasons.

收稿日期:2013-03-07; 网络出版日期:2014-06-23

基金项目:国家自然科学基金项目(31100348, 41201205, 41201079)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: chenhuai81@ gmail.com

Key Words: the Qinghai-Tibetan Plateau; snow depth; snow cover days; regression analysis

积雪是气候系统中一个重要的组成部分。积雪 的高反射率使地表吸收的太阳辐射减少,近地面气 温降低。积雪的相变也将影响热量的变化。因而积 雪的存在对地气系统的辐射平衡有很大影响^[1-2]。 同时,积雪是一种重要的淡水资源,可提供生活和生 产用水,为河流提供了水源。积雪的相关研究是理 解气候变化的重要依据。我国的积雪主要分布在东 北、西北和青藏高原等地区,青藏高原地势复杂,积 雪地理分布极不均匀,是亚欧大陆的重要积雪区域, 是年际变化和异常变化的敏感区域,对北半球甚至 全球气候变化有指示意义。近百年来青藏高原积雪 一直是中外气候学家的研究重点。

最早的积雪观测是用雪标竿观测的地面雪的厚 度。现在的地面观测主要是气象站所观测的积雪日 数和积雪深度。但在偏远地区受地形影响没有站 点,而积雪受地形、风向、热量的影响空间分布极不 均匀,所以地面观测数据在对偏远地区估测上存在 很大误差。遥感技术的发展为获取积雪空间的分布 提供了有效的数据。其中,光学遥感主要用于提取 雪盖信息,也可提取雪深信息,但主要基于统计模 型,缺乏理论依据。微波遥感则因其较强的穿透能 力可到达地表以下,可用于雪深的反演,且其不受云 层影响,可进行全天候观测^[3-4]。Blanford^[5]用很少 的气象资料分析指出喜马拉雅山冬春积雪和印度夏 季风降水的反相关关系。韦志刚[6]根据青藏高原72 个气象站数据分析,指出高原 20 世纪 60 年代中到 80年代末,积雪是增加趋势,20世纪90年代积雪又 表现出减少趋势。柯长青[7]通过对遥感和台站数据 进行了综合分析,指出随着全球变暖,青藏高原积雪 增加。王叶堂^[8]通过对 MODIS 数据分析,得出青藏 高原积雪面积总体上呈现冬春季减少、夏秋季增加 的趋势的结论。Foster^[9]利用 SMMR 和 SMM/I 被动 微波数据对 1979—2006 年的南美的季节雪盖和积 雪当量进行了分析。

国外被动微波遥感全球雪深的反演算法在青藏 高原存在较大误差。车涛则在 Chang^[10]算法基础上 提出针对中国区域改进的算法。利用这一算法反演 出的基于 SMMR 和 SMM/I 被动微波数据的雪深数 据集总体精度平均达到 86.4%^[11]。虽然已有大量对 青藏高原区域的积雪研究,但我国利用微波数据对 积雪日数和雪深在青藏高原的不同区域对全球变暖 的不同响应研究还较少。本文利用这一雪深数据 集,分析了 1979—2007 共 29a 的积雪深度、积雪日数 的分布变化及对其趋势进行了线性回归分析。发现 积雪日数和雪深在西北部和东南部与不同季节存在 不同的趋势,并对其原因进行了讨论。这对更好的 理解青藏高原对气候变化的响应有重要意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

青藏高原是世界上最高、最年青的高原。青藏 高原平均海拔 4000m 以上,有"世界屋脊"和"第三 极"之称。青藏高原东西长 2000 多公里,南北宽 1000多公里,其范围为 26°00′12″N-39°46′50″N, 73°18′52″E—104°46′59″E^[12]。青藏高原西起喀喇昆 仑山,东到横断山脉,北至昆仑山,南抵喜马拉雅山, 面积 250 多万 km²,约占我国领土面积的四分之一。 地形复杂,有冰峰、雪岭、宽谷、盆地、草原、湖泊、河 流。青藏高原是亚洲许多大河的发源地,水力资源 丰富。海拔高,年平均气温和最热月气温均低于我 国其他地区,是全国热量资源最少的地区。空气比 较干燥,稀薄,太阳辐射比较强。夏季温暖潮湿,冬 季寒冷干燥。降水主要集中在夏季。受辐射、温度 及水分条件影响,高原气候由东南暖热湿润向西北 寒冷干旱变化,植被依次表现为东南部的半湿润的 高山草甸和山地针叶林以及湿润的山地常绿阔叶林 和热带常绿雨林、中部的半干旱高山草原和山地灌 丛草原、西北部的高寒半荒漠和荒漠^[13]。

青藏高原冰雪覆盖面积大,积雪的变化将带来 地表反射率的改变,进而影响气候。由于青藏高原 又是我国许多大江大河的发源地,积雪的变化将影 响当地及其下游许多地区的气候。当积雪过多时, 将造成雪灾,给当地人民生活造成影响。

1.2 数据来源及预处理

本文采用由"中国西部环境与生态科学数据中 心"(http://westdc.westgis.ac.cn)提供的中国雪深长 时间序列数据集(1978—2010)^[11,14-15]。该数据集采 用了 EASE-GRID 和经纬度两种投影方式,空间分辨 率为 25km,时间分辨率为每天。经度范围为 60°— 140°E,纬度范围为 15°—55°N。用于反演该雪深数 据集 的原始数据来自美国国家冰雪数据中心 (NSIDC)处理的 SMMR(1978—1987年),SSM/I (1987—2008年)和 AMSR-E(2002—2010年)逐日 被动微波亮温数据。本文应用了其中 SMMR 和 SSM/I 的亮度温度资料反演的 1978年12月和 1979—2007年的积雪数据。形式为 ASCII 码。所用 的 DEM 数据为 SRTM 90m 分辨率高程数据(http:// datamirror.csdb.cn/)。气象数据下载于中国气象科 学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn/home. do)。

通过 ARCGIS 软件分析了青藏高原积雪深度及 积雪日数的空间分布及时间变化。在不同的研究 中,积雪日数的定义和划分的标准是不同的。一种 定义为视野范围内一半以上被积雪覆盖;另一种定 义为当积雪深度达到一定深度。基于这两种不同的 标准在青藏高原的研究中积雪日数差别在 10d 以 上^[16]。为了便于定量统计本文采用第二种。本文 规定当积雪深度>1cm 时,为一个积雪日。四季的划 分为前冬(前年 12—2 月),春季(3—5 月),夏季 (6—8 月),秋季(9—11 月)。本文根据田立德^[17]的 相关研究因青藏高原夏季水汽来源不同将其分为南 北两部分,北部受西风影响,而南部受印度季风影 响。这条分界线在青藏高原中部 34°N—35°N 附近 (图1)。利用 spss 软件对积雪深度、积雪日数及海 拔随机生成的的空间相关关系进行了分析,对青藏 高原不同区域、青藏高原及中国的 1997—2007 年积 雪深度和积雪日数变化及其与气象数据的相关关系 进行了线性回归分析,对青藏高原积雪深度及积雪 日数的四季变化进行了线性回归分析。

2 结果

2.1 青藏高原积雪空间变化分析

2.1.1 青藏高原积雪空间变化

青藏高原84%以上区域的年均积雪深度在0—3 cm,其中雪深为0—1 cm 的区域主要分布在中部沿 东北到西南方向的条形地带,而雪深为1—3 cm 的 区域主要分布在这条形地带的两侧。积雪深度为 3—19 cm 的分布地区极少,主要集中在西南缘及东 南地区,共占青藏高原总面积的16%以下(图1)。

青藏高原 50%以上年积雪日数在 121—240d;积 雪日数在 241—365d 的分布面积最小,仅占总面积 的 6%,主要分布在青藏高原西缘;0—30d 占 11.76%,主要分布在中部沿东北到西南方向的条形 地带;31—60d 和 61—90d 分布较零散(图 1)。本文



Fig.1 Mean snow depth and snow cover days and DEM with climate stations during 1979—2007 on Qinghai-Tibetan Plateau

表 1 青藏高原 1979—2007 平均积雪深度、积雪日数、海拔的相关系数

| Table 1 Correlation coefficients between the altitude, snow depth or snow cover days during 19/9–2007 on Qinghai-Tibetan Platea | Table 1 | Correlation coefficients between | the altitude, snow | w depth or snow cover | days during 1979- | –2007 on Qinghai-Tibetan Plateau |
|---|---------|----------------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------------|
|---|---------|----------------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------------|

| 相关因子 Correlation factors | 雪深 Snow depth | 积雪日数 Snow cover days | 海拔 Latitude |
|--------------------------|---------------|----------------------|-------------|
| 雪深 Snow depth | 1 | | |
| 积雪日数 Snow cover days | 0.83 ** | 1 | |
| 海拔 Latitude | 0.32 ** | 0.39 ** | 1 |

* * 表示 P<0.01

在青藏高原随机生成了146个点,并提取了与这些 点所对应的青藏高原积雪深度、积雪日数及海拔,进 行了相关性分析。发现这三者之间有极显著的正相 关关系(表1)。

2.1.2 青藏高原年际积雪空间变化

整体上青藏高原积雪深度的颜色是由深变浅, 积雪日数的颜色是由浅变深,浅色代表小值,深色代 表大值,即整体上青藏高原雪深是减少趋势,而日数 则是增加趋势。青藏高原在 1988 年前后积雪分布 有显著不同。1988年之前,主要形成了西北和东南 两大不同的积雪区域;1988年之后,主要形成了西 北、中部沿东北到西南方向的条形地带、东南3个不 同的积雪区域(图2)。青藏高原东南部是雪深大值 区,也是变化最显著的地方,该区域 1979—2007 年 雪深基本呈减少的趋势,但有异常年份的出现,如 1985、1986、1990、1997 和 1998 年,在这些年份长江 中下游地区均出现天气异常现象[18-20]。由此可见积 雪异常研究对预测长江流域降水具有重要作用。青 藏高原中部地区是雪深小值区,比较稳定,但在1985 年和1997年也出现异常现象。青藏高原西北部地 区是积雪日数显著变化的区域。东南部地区与雪深 变化相比积雪日数变化则比较平缓。积雪日数在雪 深出现异常的年份也出现异常现象(图2)。

2.1.3 青藏高原积雪季节空间变化

青藏高原雪深和积雪日数都有明显的季节变化 特征,空间分布差异明显。前冬(前年12—2月)积 雪达到最大,雪深和积雪日数的分布具有较强的一 致性。雪深平均达到 3.47 cm,积雪日数平均达到 52.36d。东南部和西缘是积雪最深,持续时间最长 的地方。春季(3—5月)积雪开始消融,积雪大幅减 少,雪深平均为1.82 cm,积雪日数平均为33d。东南 部和西缘仍是积雪大值区。夏季(6—8月)青藏高 原积雪达到最小,只有西北角因地势较高有少量积 雪,雪深平均只为0.20 cm,积雪日数平均只为4d。 秋季(9—11月)青藏高原开始积雪,雪深和积雪日数的分布特征与春季类似。雪深平均为1.11cm,积雪日数平均为22d。从整体看,东南部区域积雪深度和积雪日数季节变化都很大,而西北部地区积雪日数四季变化比雪深变化大(图3)。

2.2 青藏高原积雪时间变化分析

2.2.1 青藏高原年际变化分析

本文根据田立德的研究划分出南北区,其分界 线如图 1。1979—2007 年青藏高原北部地区积雪雪 深小于全国平均积雪深度,南部地区积雪深度大于 全国平均积雪深度。南部年际波动要明显大于北 部。1986 年北部积雪深度达到最大值,为 2.20cm。 1998 年南部积雪深度达到最大值,为 3.54cm(图 4)。 进一步进行统计发现,全国雪深变化趋势与青藏高 原雪深趋势有极显著的相关性(*R*²=0.26,*P*<0.01)。

与积雪深度不同,1979—2007 年青藏高原北部 和南部积雪日数都明显大于全国平均积雪日数。 1979—1987 年南部地区积雪日数大于北部地区, 1987—1999 年南部地区和北部地区积雪日数相差不 多,1999—2007 年北部地区积雪日数大于南部地区, 可见北部积雪日数在增加(图4)。1979—2007 年青 藏高原南部积雪深度与全国变化趋势一致,呈极显 著减少趋势($R^2 = 0.24$, P < 0.01),其减少趋势为 -0.04cm/a,积雪日数变化不显著。青藏高原北部积 雪日数则与全国变化趋势相反,呈极显著增加趋势 ($R^2 = 0.39$, P < 0.01),其增加趋势为 1.40 d/a,积雪深 度变化不显著(表 2)。

利用青藏高原气象站点数据,根据南北分界线 (图1),计算出青藏高原北部、南部以及青藏高原整 体的1979—2007年各年年均气温和降雨量,以分析 其与相应区域积雪的相关性。通过分析发现青藏高 原积雪与气温有很好的相关性,南部和北部积雪深 度以及南部积雪日数与其气温都呈极显著的负相关 关系,而北部积雪日数与气温呈显著正相关关系(r=

的积雪日数与其前冬降水呈极显著正相关关系(r=0.51, P<0.01);北部积雪深度则与其春季降水呈显

| 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 |
|------|------|------|------|--|
| 1984 | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 |
| 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 |
| 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 |
| 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 |
| 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 积雪深度/cm 01 13 35 59 919 |
| 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 |
| 1984 | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 |
| 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 |
| 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 |
| 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 |
| 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 积雪日数/d 030 3160 6190 91120 121240 241365 |

Fig.2 Spatial distributions of snow depth and snow cover days during 1979 to 2007 on Qinghai-Tibetan Plateau



图 3 青藏高原 1979—2007 季节平均积雪深度分布和积雪日数分布图

Fig.3 Seasonal spatial distribution of mean snow depth and snow conver days during 1979-2007 on Qinghai-Tibetan Plateau



http://www.ecologica.cn



图 4 1979—2007 青藏高原北部、青藏高原南部、青藏高原和中国的年平均积雪深度和积雪日数的时间序列

Fig. 4 Annual mean snow depth and snow cover days over northern TP, southern TP, Qinghai-Tibetan Plateau and China during 1979-2007

表 2 1979—2007 青藏高原北部、青藏高原南部、青藏高原和中国的年平均积雪深度和积雪日数的变化趋势和决定系数

Table 2Slope and decision coefficients of annual mean snow depth and snow cover days over northern TP, southern TP, Qinghai-TibetanPlateau and China during 1979—2007

| 统计量 | 积雪深度 Snow depth | | | | 积雪日数 Snow cover days | | | |
|---------------------|-----------------|----------|---------|----------|----------------------|----------|---------|----------|
| Statistics | 北部 North | 南部 South | 青藏高原 TP | 全国 China | 北部 North | 南部 South | 青藏高原 TP | 全国 China |
| 斜率 Slope | -0.01 | -0.04 | -0.03 | -0.02 | 1.40 | -0.54 | 0.30 | -0.35 |
| 决定系数 R ² | 0.07 | 0.24 ** | 0.24 ** | 0.64 ** | 0.39 ** | 0.10 | 0.04 | 0.44 ** |
| + | | | | | | | | |

* * 表示 P<0.01

5980

表 3 1979—2007 青藏高原北部、青藏高原南部、青藏高原平均积雪深度和积雪日数和气象站气温与降水的相关系数

| 影响因素 | 积 | R雪深度 Snow dept | h | 积雪日数 Snow cover days | | | | |
|------------------|----------|----------------|----------|----------------------|----------|---------|--|--|
| Factors | 北部 North | 南部 South | 青藏高原 TP | 北部 North | 南部 South | 青藏高原 TP | | |
| 气温 Temperature | -0.38 * | -0.54 ** | -0.53 ** | 0.37 * | -0.53 ** | -0.06 | | |
| 降水 Precipitation | 0.09 | 0.13 | 0.04 | -0.20 | -0.04 | -0.13 | | |
| 前冬降水 Winter | -0.02 | -0.20 | -0.2 | 0.51 ** | -0.04 | 0.26 | | |
| 春降水 Spring | 0.39 * | -0.48 ** | -0.36 | 0.19 | -0.43 * | 0.02 | | |
| 夏降水 Summer | -0.03 | 0.20 | 0.07 | 0.02 | 0.10 | 0.08 | | |
| 秋降水 Autumn | 0.02 | 0.163 | 0.08 | 0.17 | 0.13 | 0.22 | | |

Table 3 Correlation coefficients between snow variables and climate variables during 1979-2007

*表示 P<0.05, **表示 P<0.01

著正相关关系(r=0.39,P<0.05);南部积雪深度与其 春季降水呈极显著负相关关系(r=-0.48,P<0.01); 南部积雪日数则与其春季降水呈显著负相关关系 (r=-0.43,P<0.05)(表3)。</p>

2.2.2 青藏高原季节变化分析

青藏高原积雪前冬雪深的波动大于积雪日数的 波动。1986年和1998年雪深达到最大,是明显的异 常年,雪深分别为6.87 cm 和7.50 cm。积雪日数在 1998年达到最大值69.78d。春季,雪深和积雪日数 都是在1998年达到最大值,分别为3.09 cm 和 43.99d。夏季,雪深和积雪日数都是在1986年达到 最大值,分别为0.46 cm 和7.91d。秋季,雪深在 1985年达到最大值2.53 cm,积雪日数则在1997年 达到最大值32.18d(图5)。

季节尺度上,青藏高原雪深四季都为减少趋势, 除冬季为不显著减少外,其余三季均为显著减少(春 季: R^2 =0.25,P<0.01;夏季: R^2 =0.69,P<0.01;秋季: R^2 =0.15,P<0.05)。其中,春季减少系数最大,为 -0.03 cm/a。积雪日数四季趋势变化差异大:冬季 表现为极显著增加趋势(R^2 =0.32,P<0.01),为0.57 cm/a;春季则为不显著增加趋势;夏季为极显著减少 趋势(R²=0.68,P<0.01),为-0.19 cm/a;秋季则为不

显著减少趋势(表4)。



图 5 青藏高原 1979—2007 四季的平均积雪深度和积雪日数的时间序列

Fig.5 mean snow depth and snow cover days of different seasons during 1979-2007on Qinghai-Tibetan Plateau

| 表 4 | 1979-2007 | 青藏高原季 | 古平均积雪洌 | R度和积雪 | 日数的变 | 化趋势和决定 | 定系数 |
|-----|-----------|-------|--------|-------|------|--------|-----|
|-----|-----------|-------|--------|-------|------|--------|-----|

Table 4 Slope and decision coefficient of annual mean snow depth and snow cover days of different seasons during 1979—2007 on Qinghai-Tibetan Plateau

| 统计量 | 积雪深度 Snow depth | | | | 积雪日数 Snow cover days | | | |
|---------------------|-----------------|---------|---------|--------|----------------------|----------|---------|--------|
| 5000重 Statistics | 前冬 | 春 | 夏 | 秋 | 前冬 | 前冬 春 夏 | | 秋 |
| | Winter | Spring | Summer | Autumn | Winter | Spring | Summer | Autumn |
| 斜率 Slope | -0.03 | -0.03 | -0.01 | -0.02 | 0.57 | 0.01 | -0.19 | -0.08 |
| 决定系数 R ² | 0.04 | 0.26 ** | 0.70 ** | 0.15 * | 0.32 ** | 0.00 | 0.70 ** | 0.03 |

*表示 P<0.05, **表示 P<0.01

3 讨论

青藏高原积雪日数、积雪深度和海拔三者之间 在空间上具有显著的正相关。喜马拉雅山、念青唐 古拉山、昆仑山都为多雪区。柴达木盆地、藏北高原 都为少雪区。这与青藏高原地形及气候有关,高原 等温线的分布基本上与等高线相吻合,海拔越高,气 温愈低,积雪越深,持续时间越长。与本文观点不同 的是,马丽娟^[21]等指出积雪日数受气温影响显著, 但对海拔的依赖不大,这与所用分析方法不同有关, 本文是多年的平均积雪日数与海拔的关系的分析, 而他们则是四季平均相对积雪日数与海拔的关系的 研究。李培基^[22]采用年积雪日数 60d 以上为稳定 积雪区计算,依据台站 1980 年以前数据得出,青藏 高原稳定积雪区为 230 万 km²,而本文计算得到青藏 高原稳定积雪区为 209 万 km²,很可能存在减少的趋 势,也可能是使用数据不同导致。

牛涛[23] 根据青藏高原 1961—1998 年 123 个气

象台站数据发现 20 世纪 80 年代中后期青藏高原气 温、降水量、相对湿度显著增加,但是由于气象站点 主要集中在东部,这个结论并不包括西北部。本文 的研究发现青藏高原的积雪分布在 1988 年发生突 变,这可能与此气候突变有关。20 世纪 80 年代中后 期青藏高原由暖干时期进入暖湿时期。同时,本文 发现 1988 年突变使西北部积雪同样发生了显著 变化。

青藏高原降水主要发生在夏季,而根据夏季水 汽来源不同,将青藏高原分为南北两部分。南部地 区主要受印度洋西南季风影响,北部地区则主要受 西风气流影响。发现北部积雪日数呈极显著增加 (*R*²=0.39,*P*<0.01),且与其气温与前冬降水分别呈 显著正相关(*r*=0.37,*P*<0.05)、极显著正相关(*r*= 0.51,*P*<0.01)关系,即随着北部气温的升高和前冬 降雨量的增加积雪日数呈增加趋势,但北部积雪日 数对前冬降雨量的响应更加显著。而南部积雪深度 呈极显著减少(*R*²=0.24,*P*<0.01),且与其气温、春

季降水均呈极显著负相关关系(r=-0.54,r=-0.48; P<0.01),即随着南部气温升高和春季降水的增加积 雪深度呈减少趋势。北部积雪日数的增加主要是由 于西北部地区的冬季的积雪日数增加,而南部积雪 日数的减少主要是由于东南部春、夏、秋三季的积雪 深度的减少。可能是以下原因造成,东南地区受印 度季风控制,气候暖热湿润;西北地区受西风控制, 气候寒冷干旱。形成持续降雪的有利条件是寒冷湿 润,因而东南部对气温变化反应更敏感,而西北地区 则对降水的变化反应更敏感。青藏高原东南部因响 应气候变暖积雪深度呈减少趋势,而西北部则响应 青藏高原北部前冬降水的增加积雪日数呈显著增加 趋势。黄一民^[24]指出 1960—2000 年高原冬春降雨 呈显著增加趋势,本文则发现1979—2007年北部前 冬降雨呈显著增加趋势,南部春季降雨呈显著增加 趋势,至于是如何具体分别影响的积雪深度和积雪 日数,还有待进一步研究。高原腹地由于四周高山 地形阻碍了水汽的输送,成为积雪深度和积雪日数 的小值区。喜马拉雅山西段因降水即来自西风环流 又源于南亚季风,成为积雪深度和积雪日数的大 值区[25]。

致谢:本文使用的中国雪深长时间序列数据集 (1979—2007)数据下载于国家自然科学基金委员会 中国西部环境与生态科学数据中心。

References:

- Li P J. Distribution of snow cover over the high Asia. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(4): 291-298.
- [2] Zhao H L, Zhou R X, Zhao Y. Advance in snow ecology study in the world. Advances in Earth Science, 2004, 19(2): 296-304.
- Zhu Y X, Ding Y H. Influences of snow cover over Tibetan Plateau on weather and climate: Advances and problems. Meteorological Science and Technology, 2007, 35(1): 1-8.
- [4] Wu Y, Zhang J H, Xu H M, He J H. Advances in study of snow cover from remote sensing data. Meteorological Monthly, 2007, 33 (6): 3-10.
- [5] Blanford H F. On the connection of the Himalayan snowfall with dry winds and seasons of drought in India. Proceedings of the Royal Society of London, 1884, 37: 3-22.
- [6] Wei Z G, Huang R H, Chen W, Dong W J. Spatial distributions and interdecadal variations of the snow at the Tibetan Plateau weather stations. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 26(4): 496-508.
- [7] He C Q, Li P J. Spatial and temporal characteristics of snow cover

over the Qinghai-Xizang Plateau. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(3): 19-25.

- [8] Wang Y T, He Y, Hou S G. Analysis of the temporal and spatial variations of snow cover over the Tibetan Plateau based on MODIS. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(6): 855-861.
- [9] Foster J L, Hall D K, Kelly R E J, Chiu L. Seasonal snow extent and snow mass in South America using SMMR and SSM/I passive microwave data (1979—2006). Remote Sensing of Environment, 2009, 113(2): 291-305.
- [10] Chang A T C, Foster J L, Hall D K. Nimbus-7 SMMR derived global snow cover parameters. Annals of Glaciology, 1987, 9: 39-44.
- [11] Che T, Li X. Retrieval of snow depth in china by passive microwave remote sensing data and its accuracy assessment. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19 (5): 301-306.
- [12] Zhang Y L, Li B Y, Zheng D. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China. Geographical Research, 2002, 21(1): 1-8.
- [13] Lin Z Y, Wu X D. Climatic regionalization of the Qinghai-Xizang Plateau. Acta Geographica Sinica, 1981, 36(1): 22-32.
- [14] Che T, Li X, Gao F. Estimation of snow water equivalent in the Tibetan Plateau using passive microwave remote sensing data (SSM/1). Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3): 363-368.
- [15] Che T, Li X, Jin R, Armstrong R, Zhang T J. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China. Annals of Glaciology, 2008, 49(1): 145-154.
- [16] An D, Li D L, Yuan Y, Hui Y. Contrast between snow cover data of different definitions. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(6); 1019-1027.
- [17] Tian L D, Yao T D, Macclune K, White J W C, Schilla A, Vaughn B, Vachon R, Ichiyanagi K. Stable isotopic variations in west China: A consideration of moisture sources. Journal of Geophysical Research, 2007, 112 (D10), doi: 10. 1029/2006JD007718.
- [18] Li Y H, Liu Y Q. An analysis on the causes of the typical drought/flood over the valleys of the Yellow and the Changjiang Rivers during the last decades. Meteorological Monthly, 1993, 19 (5): 9-15.
- [19] Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. Surplus summer rainfall along the middle to lower reaches of Changjiang River in the 1990s. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 567-575.
- [20] Hu W Z, Zhong Z Y, Liu Q Q. On river hamessing & construction for Yangtze flood control in the light of 1998 flood. Yangtze River, 1999, 30(2): 48-50.
- [21] Ma L J, Qin D H, Bian L G, Xiao C D, Luo Y. Analysis of air temperature sensitivity of snow cover days on the Qinghai-Tibetan Plateau. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(1):

1-7.

- [22] Li P J, Mi D S. Distribution of snow cover in China. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(4): 9-18.
- [23] Niu T, Liu H L, Song Y, Chen L X. Study on decade change of climate shift from warm--dry period to warm-wet period over Tibetan Plateau. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, 16(6): 763-771.
- [24] Huang Y M, Zhang X P.Character analysis in variation of seasonal precipitation over the Tibetan Plateau. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(4): 537-542. (未链接到本条 文献信息)
- [25] Qin D H. The glaciers and the ecological environment of the Qinghai Tibet Plateau. Beijing: China Tibetology Publishing House, 1998; 10-10. (未链接到本条文献信息)

参考文献:

- [1] 李培基. 高亚洲积雪分布. 冰川冻土, 1995, 17(4): 291-298.
- [2] 赵哈林,周瑞莲,赵悦.雪生态学研究进展.地球科学进展, 2004, 19(2): 296-304.
- [3] 朱玉祥,丁一汇.青藏高原积雪对气候影响的研究进展和问题.气象科技,2007,35(1):1-8.
- [4] 吴杨,张佳华,徐海明.卫星反演积雪信息的研究进展.
 象,2007,33(6):3-10.
- [6] 韦志刚,黄荣辉,陈文,董文杰.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.
- [7] 柯长青,李培基.青藏高原积雪分布与变化特征.地理学报, 1998,53(3):19-25.
- [8] 王叶堂,何勇,侯书贵. 2000-2005年青藏高原积雪时空变化

分析.冰川冻土,2007,29(6):855-861.

- [11] 车涛, 李新. 利用被动微波遥感数据反演我国积雪深度及其 精度评价. 遥感技术与应用, 2004, 19(5); 301-306.
- [12] 张镱锂,李炳元,郑度.论青藏高原范围与面积.地理研究, 2002,21(1):1-8.
- [13] 林振耀, 吴祥定. 青藏高原气候区划. 地理学报, 1981, 36 (1): 22-32.
- [14] 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. 冰川冻土, 2004, 26(3): 363-368.
- [16] 安迪,李栋梁,袁云,惠英.基于不同积雪日定义的积雪资料 比较分析.冰川冻土,2009,31(6):1019-1027.
- [18] 李月洪, 刘永强. 黄河与长江流域近期大旱、大涝成因的初步 分析. 气象, 1993, 19(5): 9-15.
- [19] 龚道溢,王绍武,朱锦红. 1990年代长江中下游地区多雨的 机制分析. 地理学报, 2000, 55(5): 567-575.
- [20] 胡维忠,仲志余,刘巧清.从 1998 年洪水看长江防洪治理及 建设.人民长江, 1999, 30(2):48-50.
- [21] 马丽娟,秦大河,卞林根,效存德,罗勇.青藏高原积雪日数 的气温敏感度分析. 气候变化研究进展, 2010, 6(1):1-7.
- [22] 李培基,米德生.中国积雪的分布.冰川冻土,1983,5(4): 9-18.
- [23] 牛涛,刘洪利,宋燕,陈隆勋. 青藏高原气候由暖干到暖湿时 期的年代际变化特征研究. 应用气象学报, 2005, 16(6): 763-771.
- [24] 黄一民,章新平.青藏高原四季降水变化特征分析.长江流域 资源与环境,2007,16(4):537-542.
- [25] 秦大河. 青藏高原的冰川与生态环境. 北京: 中国藏学出版 社, 1998: 10-10.