张海宏,肖建设,陈奇,等,2019. 青海省甘德两次降雪过程的微气象特征分析[J]. 气象,45(8):1093-1103. Zhang H H, Xiao J S, Chen Q, et al,2019. Micro-meteorological characteristics analysis of two snowfall processes in Gande of Qinghai Province[J]. Meteor Mon,45(8):1093-1103(in Chinese).

# 青海省甘德两次降雪过程的微气象特征分析\*

张海宏<sup>1,2</sup> 肖建设<sup>1,2</sup> 陈 奇<sup>1,2</sup> 姜海梅<sup>3</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 南京信息工程大学大气物理学院,南京 210044

提 要:利用青海省甘德两次降雪过程的微气象观测数据,探讨了两场降雪过程雪深、雪密度、雪中含冰量、雪中含水量和雪面温度的变化情况,分析了地表反照率与雪密度、雪中含冰量及雪中含水量的关系,结合降雪过程近地面温、湿、风廓线特征分析了积雪对近地面温、湿、风梯度的影响。结果表明:积雪覆盖会导致地表反照率显著增加,降雪过后正午时地表反照率可高达 0.8~0.9。随着积雪的消融,地表反照率逐渐减小;积雪反照率与雪密度和雪中含冰量呈正相关,与雪中含水量呈负相关;地表积雪覆盖会导致近地面温度梯度绝对值减小,相对湿度梯度绝对值在凌晨减小、午后增大,地表积雪覆盖对近地面风速梯度变化并无特定的影响。

关键词:青藏高原,积雪,微气象,陆面过程 中图分类号:P404,P416 文献标志码:A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.08.006

# Micro-Meteorological Characteristics Analysis of Two Snowfall Processes in Gande of Qinghai Province

ZHANG Haihong<sup>1,2</sup> XIAO Jianshe<sup>1,2</sup> CHEN Qi<sup>1,2</sup> JIANG Haimei<sup>3</sup>

1 Qinghai Institute of Meteorological Science, Xining 810001

2 Key Laboratory for Disaster Prevention and Mitigation of Qinghai Province, Xining 810001

3 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Techndogy, Nanjing 210044

Abstract: Using observed micro-meteorological data of two snowfall processes in Gande of Qinghai Province, the snow depth, snow density, ice content in snow, water content in snow and snow surface temperature are discussed, and the relationships between surface albedo and snow density, ice content in snow, water content in snow are analyzed. Besides, the influence of accumulated snow on air temperature gradient, relative humidity gradient and wind speed gradient of snow cover are also analyzed. The results show that surface albedo increases obviously while ground is covered by snow. Albedo can be 0.8-0.9 at noon after snowfall. Albedo reduces along with snow melting. Snow albedo is positively related with snow density and ice content in snow and negatively related with water content in snow. Snow cover reduces absolute value of air temperature gradient. The absolute value of relative humidity gradient gets lower at dawn and higher at noon. Snow cover has no effect on wind speed gradient.

Key words: Tibetan Plateau, accumulated snow, micro-meteorology, land surface process

2018年7月16日收稿; 2019年6月18日收修定稿

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41505006 和 41761078)、青海省科技厅项目(2018-SF-142)、科技部中国科技基础资源调查专项(2017FY10050) 及公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001)共同资助

第一作者:张海宏,主要从事青藏高原陆面过程及气候变化影响研究.Email:pkuzhh@163.com

通信作者:肖建设,主要从事青藏高原积雪、冰川遥感研究. Email: xiaojianshe@126. com

引 言

积雪对东亚地区短期气候有重要影响,已成为 我国气象部门短期气候预测,特别是统计预测中的 重要因子(陈兴芳和宋文玲,2000;孙林海和宋文玲, 2001;彭京备等,2006)。积雪作为气候系统中冰冻 圈的一部分,因其高反射率和隔绝热量交换特性以 及其消融引起的水文效应,可通过改变地表能量平 衡、水循环和大气环流对全球气候和水循环系统产 生重要影响,在天气气候的变化中占据重要地位(张 若楠等,2014)。积雪作为一种重要的陆面强迫因子 可对气候产生重要影响(卢楚翰等,2014;周利敏等, 2016)。积雪覆盖地表会阻碍地气之间的能量交换, 积雪通过表面不同的反照率和不同的湍流通量形成 了陆面与大气间独特的能量交换,影响近地层气象 要素特征,反过来对湍流和能量交换又有重要影响 (李丹华等,2017)。青藏高原积雪被视为中国短期 气候预测的重要因子(李栋梁和王春学,2011)。高 原积雪对其周围的大气有重要的热力影响,雪盖较 高的反射率会影响地面对辐射能的吸收,改变地气 之间的能量交换(过霁冰等,2012)。积雪陆面过程 的研究对改进气候模式、提高短期气候预测水平有 重要的参考价值(吴统文等,2004a;2004b)。

目前大气科学界对于高寒地区积雪陆面过程及 微气象要素变化特征的研究已经取得了一些成果。 高培等(2012)利用中国天山积雪雪崩站干湿雪雪层 内雪温数据,探讨了一次降雪过程后干湿雪的雪层 温度特征,对比分析了干湿雪的雪面能量平衡方程 中各分量的差异,发现雪温日变化振幅由雪面向下 逐渐减小,积雪深层温度的波峰(谷)值稍滞后于积 雪浅层温度极值1~2 d,太阳辐射对湿雪的穿透深 度大于干雪,雪层温度振幅变化与能量吸收随雪深 都呈指数衰减分布,干雪雪面的感热通量和潜热通 量几乎都为负值,湿雪雪面的潜热通量与感热通量 方向相反,净辐射是导致湿雪消融的主要因素。李 丹华等(2017)利用黄河源区玛曲站的观测资料,分 析了积雪过程及前期无雪时的近地层气象要素特 征,研究了积雪对大气温度层结特征的影响,发现当 地表有积雪覆盖时,早上温度随高度减小的变化趋 势出现时间比无雪覆盖时落后1h,傍晚温度随高 度增大的变化趋势较之提前1h出现,积雪可减小 白天气温分布范围及各层温度梯度绝对值。卢盼盼

和吴晓庆(2009)的研究表明雪面上辐射和能量平衡 特征多导致其上温度层结为近中性和稳定状态,随 着新雪的沉积,夜晚大气的稳定性呈增强趋势,白天 正午附近大气呈中性到不稳定的状况略有增加。卞 林根等(2006)利用北冰洋浮冰站的观测资料对北冰 洋的大气边界层垂直结构进行了研究,发现浮冰区 大气边界层可分为稳定型、不稳定型和多层结构等 几种类型,白天的对流边界层高度大于夜间的稳定 边界层高度,来自高空较强的暖湿气流与冰面近地 层冷空气强烈相互作用会形成强风切变和逆温、逆 湿过程。师春香等(2018)采用改进后的 CLDAS Prcp 驱动 Noah 陆面模式对积雪变量进行模拟,并 对中国主要的积雪区(东北区域、新疆区域、青藏高 原区域)的积雪覆盖率、雪深、雪水当量的模拟效果 进行了评估,改善了在冬季由于低估降水所造成的 模拟积雪量偏少的情况。

由于青藏高原腹地人迹罕至,交通不便,观测资料匮乏,高原地区降雪过程对近地层微气象要素影响的研究结果较少。本文利用青海省气象科学研究所甘德边界层气象观测站的观测资料,通过对 2018年2月和4月两场降雪过程微气象要素的分析,探讨了雪深、雪密度、雪中含冰量、雪中含水量和雪面温度的变化情况,分析了地表反照率与雪密度、雪中含冰量及雪中含水量的关系,结合降雪过程近地面温、湿、风廓线特征分析了积雪对近地面温、湿、风梯度的影响,为全面认识青藏高原地区积雪陆面过程及对近地层气象要素特征的影响提供科学支持。

## 1 观测站情况与资料介绍

青海省气象科学研究所甘德边界层气象观测站 位于中国青海省果洛州甘德县(33°57′N、99°54′E) 境内,海拔4107 m,下垫面为高寒草甸。图1为甘 德站梯度塔和积雪测量系统的照片,该站建立时间 为2016 年 7月,2017 年增添了 SPA-2 积雪分析测 量系统。观测的物理量包括空气温度、空气湿度、风 速、风向、大气压、短波辐射、长波辐射、积雪深度、风 雪密度、雪水当量等。除仪器拆装和天气原因造成 供电短暂中断外,一直连续进行观测。表1给出了 该站的观测物理量及安装高度。

本文所用观测资料的时间段为 2018 年 2 月 16-24 日和 2018 年 4 月 4-7 日,为青海南部地区 2018 年春季两次较大规模的降雪过程。两次降雪



图 1 甘德站梯度塔(a)和 积雪测量系统(b)照片 Fig. 1 Gradient tower (a) and snow measuring system (b) at Gande Observation Station

#### 表1 观测仪器及安装高度

#### Table 1 Observation instruments and installation height

观测物理量	安装高度/m
风速、风向	2,4,8,16
空气温度	2,4,8,16
空气湿度	2,4,8,16
辐射四分量	1.5
积雪特性(雪深、雪密度、 雪水当量等)	1.5

过程期间甘德边界层气象观测站数据较完整,在对 观测资料进行分析之前,去除因仪器故障、天气原因 等产生的野点,舍弃质量较差的数据。文中所用时 间为北京时。

### 2 结果与分析

#### 2.1 降雪过程积雪特性要素的变化

积雪深度是近地面多种气象要素共同作用的结 果,降水相态、降雪量、降雪强度、气温、地温和风速 均对其产生影响(杨成芳和刘畅,2019)。青藏高原 腹地积雪的消融与日照时数、雪的形态、消融程度、 升华过程等均有一定联系(周扬等,2017)。图 2 为 两次降雪过程的雪深、雪密度、雪中含冰量、雪中含 水量和雪面温度的变化情况。第一次降雪过程持续 时间较长,雪深最大达到 8 cm,融雪过程雪深下降 较为缓慢,雪密度较小,维持在 40~60 kg•m<sup>-3</sup>,雪 中含冰量维持在 6%左右,由于气温较低融雪过程 以升华为主,雪中含水量极低。第二次降雪过程持续时间较短,雪深最大达到 9 cm,融雪过程雪深下降较为迅速,雪密度较大,最高达到 100~160 kg•m<sup>-3</sup>,雪中含冰量达到 10%~14%,由于气温较高,积雪融化导致雪中含水量升高。两次降雪过程的雪密度和雪中含冰量存在一定的对应关系,变化趋势基本一致。雪中含水量变化的不连续性可能是由于积雪蓬松导致消融的雪水下渗所致。

#### 2.2 积雪对地表反照率的影响

冰雪反照率在地气能量平衡中起重要作用,其 大小取决于两个方面,即冰雪面的反射属性以及大 气或天空的状况,影响冰雪反照率的物理属性有雪 粒径、密度、含水量、杂质和污化程度等(蒋熹, 2006)。冰雪反照率是影响地表辐射平衡的重要因 子之一,雪粒的大小和结构是影响冰雪反照率的重 要因素(杨兴国等,2012)。张强等(2011)通过对黄 土高原地区地表反照率的研究发现土壤湿度和表面 积雪变化均可影响反照率的日变化,冬、春季地表反 照率的"V"型日变化大多明显向左倾,反映了白天 积雪消融过程的影响特征。图3为甘德地区这两次 降雪过程地表反照率的逐日变化情况,降雪过程发 生前地表反照率中午的值大概在0.27 左右,降雪过 后地表反照率中午的值达到0.8~0.9 左右,可见当 地表有积雪覆盖时,地表反照率的值显著升高。

图 4 给出了地表反照率与雪密度、雪中含冰量 及雪中含水量的关系,其中地表反照率与雪密度和 雪中含冰量的关系所用数据为 2 月 16—24 日降雪 过程,地表反照率与雪中含水量的关系所用数据为 4 月 4—7 日降雪过程,这主要是由于两次降雪过程 温度差异较大,第一次降雪过程气温较低导致积雪 大部分升华,消融形成的雪水很少,第二次降雪过程 气温较高导致积雪融化,雪中含水量较高。可以看 出,地表反照率与雪密度和雪中含冰量呈显著的正 相关,而与雪中含水量呈负相关关系。

#### 2.3 降雪过程近地面温、湿、风廓线特征

图 5 为两次降雪过程近地面温度廓线在降雪前、降雪后和消融后的日变化,从气温变化随高度的分布来看,2 m 高度气温日变化幅度最大,而 16 m 高度气温日变化幅度最小,两次降雪过程均表现为 降雪后气温降低,消融后气温升高,白天最高温度较 夜间最低温度的降幅更加明显,降雪前会出现清晨 06:00 左右气温随高度增加而递增、下午 15:00 左 有所减弱,积雪消融后又重新出现这种趋势。 右气温随高度增加而递减的趋势,降雪后这种趋势 图 6 为两次降雪过程近地面相对湿度廓线在降

10 (a)

8

0 200

14

4

0 3

2.5

15

-24

雪面温度/°C 5

雪中含水量/%

雪中含冰量/%

(c) 160

雪深/cm 6 Z

(b) (d) (f) \$ 4 4



图 2 2018年2月16—24日(a,c,e,g,i)和4月4—7日(b,d,f,h,j)甘德地区 两次降雪过程雪特性要素变化

(a,b)雪深,(c,d)雪密度,(e,f)雪中含冰量,(g,h)雪中含水量,(i,j)雪面温度 Fig. 2 Variations of snow elements during snowfall processes in Gande Region in 16–24 February (a, c, e, g, i) and 4–7 April (b, d, f, h, j) 2018 (a, b) snow depth, (c, d) snow density, (e, f) ice content in snow, (g, h) water content in snow, (i, j) temperature on snow



(a,b)降雪前,(c,d)降雪后,(e,f)消融后

Fig. 5 Air temperature profile during snowfall processes in Gande Region in 16-24 February (a, c, e) and 4-7 April (b, d, f) 2018
(a, b) before snowfall, (c, d) after snowfall, (e, f) after snow melting

不大,降雪后低层(2~4 m)相对湿度日变化幅度小

于高层(8~16 m),消融后低层(2~4 m)和高层(8~16 m)相对湿度日变化幅度再度接近。

图 7 为两次降雪过程近地面风速廓线在降雪前、降雪后和消融后的日变化,从风速变化随高度的 分布来看,2 m高度风速日变化幅度最小,而16 m



图 6 同图 5,但为相对湿度廓线 Fig. 6 Same as Fig. 5, but for relative humidity profile



图 7 同图 5,但为风速廓线 Fig. 7 Same as Fig. 5, but for wind speed profile

高度风速日变化幅度最大,风速日变化幅度随高度 的增加而显著增大。风速较大的时间段出现在 15:00—18:00,这可能是由于甘德边界层气象站所 处地理位置的小气候因素所致。

2.4 积雪对近地面温、湿、风梯度的影响

图 8 为两次降雪过程 2~4,4~8 和 8~16 m 温 度梯度的逐 3 h 分布情况,2~4 m 温度梯度的波动 幅度最大,而 8~16 m 温度梯度的波动幅度最小, 温度梯度的波动幅度随着高度的增加而减小。

图 9 为两次降雪过程降雪前、降雪后和消融后 温度梯度日变化。当地表无积雪覆盖时,夜间温度 梯度为正值,近地面大气为稳定层结,白天温度梯度 为负值,近地面大气为不稳定层结,温度梯度全天呈 "V"字形变化。降雪后夜间正温度梯度和白天负温 度梯度均减小且有趋向于 0℃•m<sup>-1</sup>的变化趋势,这



图 8 2018 年 2 月 16—24 日(a,b,c)和 4 月 4—7 日(d,e,f)甘德地区两次降雪过程温度梯度逐 3 h 分布 (a,d)2~4 m,(b,e)4~8 m,(c,f)8~16 m

Fig. 8 Air temperature gradient distribution every 3 h during snowfall processes in Gande Region in 16-24 February (a, b, c) and 4-7 April (d, e, f) 2018

(a, d) 2-4 m, (b, e) 4-8 m, (c, f) 8-16 m



图 9 2018 年 2 月 16—24 日(a,b,c)和 4 月 4—7 日(d,e,f)甘德地区降雪前、降雪后和消融后温度梯度日变化 (a,d)2~4 m,(b,e)4~8 m,(c,f)8~16 m

Fig. 9 Daily variations of air temperature gradients before snowfall, after snowfall and after snow melting during snowfall processes in Gande Region in 16-24 February (a, b, c) and 4-7 April (d, e, f) 2018 (a, d) 2~4 m, (b, e) 4~8 m, (c, f) 8~16 m

表明当地表有积雪覆盖时,近地面大气接近于中性 层结,消融后夜间正温度梯度和白天负温度梯度又 有所增加,低层(2~4 m)温度梯度较高层(8~ 16 m)温度梯度在降雪前、降雪后和消融后的变化 更加显著。

图 10 为两次降雪过程 2~4,4~8 和 8~16 m 相对湿度梯度的逐3 h 分布情况,可以看出,2~4 m 相对湿度梯度的波动幅度最大,而 8~16 m 相对湿 度梯度的波动幅度最小,2~4 m 相对湿度梯度有正 有负,4~8 和 8~16 m 相对湿度梯度基本维持在负 值,表明在低层(2~4 m)相对湿度随高度增加并无 明显的增加或减少趋势,而在中层(4~8 m)和高层 (8~16 m)相对湿度随高度增加呈逐渐递减趋势。

图 11 为两次降雪过程降雪前、降雪后和消融后

相对湿度梯度日变化。由图可见,当地表无积雪覆 盖时,2~4和4~8m相对湿度梯度均表现为凌晨 至上午升高,下午至傍晚降低。降雪后凌晨相对湿 度梯度升高,下午相对湿度梯度降低,消融后凌晨相 对湿度梯度降低,下午相对湿度梯度升高。地表积 雪覆盖会导致凌晨相对湿度梯度趋于零或正值,下 午相对湿度梯度趋于负值,从而导致近地面大气竖 直方向上相对湿度差异性在凌晨减小,在午后增大。

积雪融化除受温度影响之外,还与风速等因素 有密切关系(杨建平等,2007)。图 12 为两次降雪过 程 2~4,4~8 和 8~16 m 风速梯度的逐 3 h 分布变 化情况,可以看出,2~4 m 风速梯度的波动幅度最 大,而 8~16 m 风速梯度的波动幅度最小,风速梯 度的波动幅度随着高度的增加而减小。



# 图 10 同图 8,但为相对湿度梯度





图 11 同图 9, 但为相对湿度梯度

Fig. 11 Same as Fig. 9, but for relative humidity gradient

图 13 为两次降雪过程降雪前、降雪后和消融后 风速梯度日变化,由图可见,风速梯度在夜间和上午 较小,在下午较大,这可能是由于下午气温较高导致 地气温差增大加剧了地表的湍流作用,从而导致风 速梯度增大。第一次降雪过程在降雪后白天风速梯 度减小,第二次降雪过程在降雪后白天风速梯度增 大,地表积雪覆盖对近地面风速梯度变化并无特定 的影响。

### 3 结 论

本文利用青海省甘德边界层气象观测站 2018

年2月16—24日和4月4—7日两次降雪过程的梯 度塔和积雪特性观测数据,探讨了两场降雪过程雪 深、雪密度、雪中含冰量、雪中含水量和雪面温度的 变化情况,分析了地表反照率与雪密度、雪中含冰量 及雪中含水量的关系,结合降雪过程近地面温、湿、 风廓线特征分析了积雪对近地面温、湿、风梯度的影 响,主要结论有:

(1)积雪覆盖会导致地表反照率显著增加,无 积雪覆盖时地表反照率正午的值为0.27,有积雪覆 盖时地表反照率可高达0.8~0.9,随着积雪的消 融,地表反照率逐渐减小。

(2) 积雪反照率与雪密度和雪中含冰量呈正相



图 12 同图 8,但为风速梯度

Fig. 12 Same as Fig. 8, but for wind speed gradient





Fig. 13 Same as Fig. 9, but for wind speeds gradient

关,与雪中含水量呈负相关。

(3)地表积雪覆盖会导致近地面温度梯度绝对 值减小,使得近地面大气维持中性层结状态,近地面 大气竖直方向上相对湿度梯度绝对值在凌晨减小、 午后增大,而积雪覆盖对近地面风速梯度变化并无 特定的影响。

由于甘德边界层气象观测站地处青藏高原腹 地,人迹罕至,交通不便,观测资料获取非常不易,本 文仅仅选用了 2018 年 4 月两次数据较完整的降雪 过程的观测资料,样本代表性不强,相关结论具有一 定的局限性。日后会考虑获取更丰富更全面的观测 资料,以深入分析青藏高原地区降雪过程的微气象 特征和积雪覆盖对大气边界层及陆气相互作用的影 响。

#### 参考文献

- 卞林根,陆龙骅,张占海,等,2006.北冰洋浮冰站大气边界层结构的 观测研究[J].极地研究,18(2):87-97.BianLG,LuLH,Zhang ZH,et al,2006.Analysis of structure of atmospheric layer in ice camp over Arctic Ocean[J]. Polar Res, 18(2): 87-97 (in Chinese).
- 陈兴芳,宋文玲,2000. 欧亚和青藏高原冬春季积雪与我国夏季降水 关系的分析和预测应用[J]. 高原气象,19(2):214-223. Chen X F,Song W L,2000. Analysis of relationship between snow cover on Eurasia and Qinghai-Xizang Plateau in winter and summer rainfall in China and application to prediction[J]. Plateau Meteor,19(2):214-223(in Chinese).
- 高培,魏文寿,刘明哲,2012. 中国西天山季节性积雪热力特征分析 [J]. 高原气象,31(4):1074-1080. Gao P, Wei W S, Liu M Z, 2012. Characteristic analysis on temperature change in snow layer in western Tianshan Mountain in China[J]. Plateau Meteor,31 (4):1074-1080(in Chinese).
- 过霁冰,徐祥德,施晓晖,等,2012. 青藏高原冬季积雪关键区视热源 特征与中国西南春旱的联系[J]. 高原气象,31(4):900-909. Guo J B,Xu X D,Shi X H,et al,2012. Characteristics of winter apparent heat source in the key area of snow cover on Qinghai-Xizang Plateau and spring drought in Southwest China[J]. Plateau Meteor,31(4):900-909(in Chinese).
- 蒋熹,2006. 冰雪反照率研究进展[J]. 冰川冻土,28(5):728-738. Jiang X,2006. Progress in the research of snow and ice albedo [J]. J Glaciol Geocryol,28(5):728-738(in Chinese).
- 李丹华,文莉娟,隆霄,等,2017. 积雪对玛曲局地微气象特征影响的 观测研究[J]. 高原气象,36(2):330-339. Li D H, Wen L J, Long X, et al, 2017. Observation study on effects of snow cover on local micro meteorological characteristics in Maqu[J]. Plateau Meteor, 36(2): 330-339(in Chinese).

- 李栋梁,王春学,2011. 积雪分布及其对中国气候影响的研究进展 [J]. 大气科学学报,34(5):627-636. Li D L, Wang C X,2011. Research progress of snow cover and its influence on China climate[J]. Trans Atmos Sci,34(5):627-636(in Chinese).
- 卢楚翰,管兆勇,李震坤,等,2014. 春季欧亚大陆积雪对春夏季南北 半球大气质量交换的可能影响[J]. 大气科学,38(6):1185-1197. Lu C H, Guan Z Y, Li Z K, et al, 2014. Effects on interhemispheric air mass exchange between the Southern and Northern hemisphere by Eurasian spring snow[J]. Chin J Atmos Sci, 38(6):1185-1197(in Chinese).
- 卢盼盼,吴晓庆,2009. 雪面上光学湍流的测量与估算[J]. 强激光与 粒子束,21(5):667-671. Lu P P, Wu X Q,2009. Estimation and measurements of optical turbulence over snow[J]. High Power Laser Part Beams,21(5):667-671(in Chinese).
- 彭京备,陈烈庭,张庆云,2006. 多因子和多尺度合成中国夏季降水预 测模型及预报试验[J]. 大气科学,30(4):596-608. Peng J B, Chen L T,Zhang Q Y,2006. The statistic prediction model and prediction experiments of the summer rain over China by multiple factors and multi-scale variations[J]. Chin J Atmos Sci,30 (4):596-608(in Chinese).
- 师春香,张帅,孙帅,等,2018. 改进的 CLDAS 降水驱动对中国区域 积雪模拟的影响评估[J]. 气象,44(8):985-997. Shi C X,Zhang S,Sun S, et al,2018. Effect of improved precipitation CLDAS on snow simulation in China[J]. Meteor Mon,44(8):985-997(in Chinese).
- 孙林海,宋文玲,2001. 冬季积雪对我国夏季降水预测的评估分析 [J]. 气象,27(8):24-27,35. Sun L H,Song W L,2001. Influence of the winter snow cover in Tibetan Plateau and Eurasia on summer rainfall in China[J]. Meteor Mon,27(8):24-27,35(in Chinese).
- 吴统文,钱正安,蔡英,2004a. CCM3 模式中 LSM 积雪方案的改进研 究(Ⅱ):全球模拟试验分析[J]. 高原气象,23(5):569-579. Wu T W, Qian Z A, Cai Y, 2004a. Inprovement study on snow scheme in LSM scheme of NCAR CCM3 model(Ⅱ): the GCM simulation experiment analyses[J]. Plateau Meteor,23(5):569-579(in Chinese).
- 吴统文,钱正安,宋敏红,2004b. CCM3 模式中 LSM 积雪方案的改进研究(I):修改方案介绍及其单点试验[J]. 高原气象,23(4):444-452. Wu T W, Qian Z A, Song M H,2004b. Improvement study on snow scheme in LSM scheme of NCAR CCM3 model (I):introduction to the modified snow scheme and its single station tests[J]. Plateau Meteor,23(4):444-452(in Chinese).
- 杨成芳,刘畅,2019. 一次江淮气旋暴雪的积雪特征及气象影响因子 分析[J]. 气象,45(2):191-202. Yang C F,Liu C,2019. Study on snow cover and its meteorological influence factors of Jianghuai cyclone snowstorm[J]. Meteor Mon,45(2):191-202(in Chinese).
- 杨建平,丁永建,叶柏生,等,2007.长江源区小冬克玛底冰川区积雪 消融特征及对气候的响应[J].冰川冻土,29(2):258-264. Yang

J P,Ding Y J,Ye B S,et al,2007. Snowmelt process on the Xiao Dongkemadi Glacier in the source region of the Yangtze River and its responses to meteorological factors[J]. J Glaciol Geocryol,29(2):258-264(in Chinese).

- 杨兴国,秦大河,秦翔,2012.冰川/积雪-大气相互作用研究进展[J]. 冰川冻土,34(2):392-402. Yang X G,Qin D H,Qin X,2012. Progress in the study of interaction between ice/snow and atmosphere[J].J Glaciol Geocryol,34(2):392-402(in Chinese).
- 张强,孙昭萱,王胜,2011. 黄土高原定西地区陆面物理量变化规律研究[J]. 地球物理学报,54(7):1727-1737. Zhang Q, Sun Z X, Wang S, 2011. Analysis of variation regularity of land-surface physical quantities over Dingxi Region of the Loess Plateau[J]. Chin J Geophys,54(7):1727-1737(in Chinese).
- 张若楠,张人禾,左志燕,2014.中国冬季多种积雪参数的时空特征及 差异性[J].气候与环境研究,19(5):572-586. Zhang R N, Zhang

R H, Zuo Z Y, 2014. Characteristics and differences of multisnow data in winter over China[J]. Climatic Environ Res, 19 (5):572-586(in Chinese).

- 周利敏,陈海山,彭丽霞,等,2016. 青藏高原冬春雪深年代际变化与 南亚高压可能联系[J]. 高原气象,35(1):13-23. Zhou L M, Chen H S, Peng L X, et al, 2016. Possible connection between interdecadal variations of snow depth in winter and spring over Qinghai-Xizang Plateau and South Asia High in summer[J]. Plateau Meteor, 35(1):13-23(in Chinese).
- 周扬,徐维新,白爱娟,等,2017. 青藏高原沱沱河地区动态融雪过程 及其与气温关系分析[J]. 高原气象,36(1):24-32. Zhou Y,Xu W X,Bai A J,et al,2017. Dynamic snow-melting process and its relationship with air temperature in Tuotuohe, Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor,36(1):24-32(in Chinese).