

许立言, 武炳义. 2012. 欧亚大陆积雪两种物理效应对 2010 年春末夏初华南降水的影响 [J]. 大气科学, 36 (2): 271–282, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11054. Xu Liyan, Wu Bingyi. 2012. Two physical effects of Eurasian snow cover on the late-spring and early-summer rainfall in South China of 2010 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 271–282.

欧亚大陆积雪两种物理效应对 2010 年 春末夏初华南降水的影响

许立言^{1,2} 武炳义¹

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 南京信息工程大学, 南京 210044

摘 要 本文基于欧亚大陆积雪深度资料和中国台站降水资料的奇异值分析 (SVD) 结果, 使用大气环流模式 (CAM3.1) 分别进行三组集合试验来研究欧亚大陆积雪的反照率效应和水文效应对 2010 年 5~6 月华南降水的影响: 第一组试验综合考虑积雪的两种物理效应, 既有反照率效应又有水文效应; 第二组试验仅考虑积雪反照率效应, 忽略水文效应; 第三组试验只考虑积雪水文效应, 忽略反照率效应。试验结果表明, 积雪的两种物理效应都会对后期华南降水产生影响, 但是三组试验中积雪不同物理效应所导致的异常幅度和范围存在较大差异, 其中积雪水文效应比反照率效应引起的变化幅度大。当两种效应共同作用时产生的异常与统计分析结果最为接近, 变化幅度也最大, 但是并不等于单纯反照率效应和单纯水文效应作用之和。

关键词 欧亚大陆积雪 华南降水 数值试验 积雪反照率效应 积雪水文效应

文章编号 1006-9895 (2012) 02-0271-12

中图分类号 P426.6

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11054

Two Physical Effects of Eurasian Snow Cover on the Late-Spring and Early-Summer Rainfall in South China of 2010

XU Liyan^{1, 2} and WU Bingyi¹

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract This study investigated the snow albedo and hydrological effects on the precipitation in South China in 2010, based on the singular value decomposition (SVD) analysis of the Eurasian snow depth dataset and the 160-station rainfall dataset in China. Three ensemble simulations were conducted by using community atmosphere model 3.1 (CAM3.1). The first ensemble simulation includes both the snow albedo and the snow hydrological effect. The second ensemble simulation only considers the snow albedo effect but ignores the hydrological effect. The third ensemble simulation only considers the snow hydrological effect but ignores the albedo effect. The results indicate that both these effects could have impacts on the South China rainfall. However, there are great differences in amplitudes

收稿日期 2011-03-11, 2011-07-12 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40921003、40875052, 中国气象局行业专项项目 GYHY200906017, 国家重点基础研究发展规划项目 2007CB411505

作者简介 许立言, 女, 1982 年出生, 博士研究生, 主要从事欧亚积雪对东亚季风影响的气候模拟研究。E-mail: xuliyan_008@163.com

通讯作者 武炳义, E-mail: wby@cma.cma.gov.cn

and ranges of abnormities induced by those three simulations. The magnitude of abnormities caused by the snow hydrological effect is larger than that by the albedo effect. When those two effects work together, the result agrees well with observations and the magnitude is the largest. However, the magnitude is not equal to the sum of that caused by the snow albedo and hydrological effects respectively.

Key words Eurasian snow cover, late-spring and early-summer rainfall in South China, numerical experiment, snow albedo effect, snow hydrological effect

1 引言

研究指出, 欧亚大陆积雪与我国洪涝灾害的发生关系密切 (Yang and Xu, 1994; 杨秋明, 1997a, 1997b; 陈兴芳和宋文玲, 2000; Wu and Kirtman, 2007; Wu et al., 2009), 长期以来, 大量的统计诊断分析结果揭示了欧亚大陆积雪, 特别是青藏高原积雪与亚洲季风、大气环流以及气候变化的关系 (谭言科等, 1999; 陈乾金等, 2000; Chen and Wu, 2000; 陈烈庭, 2001; 陈海山和孙照渤, 2003; Wu and Qian, 2003; Zhang et al., 2004; Zhao et al., 2007; 穆松宁和周广庆, 2009, 2010), 指出欧亚大陆积雪异常能够引起显著的气候效应。伴随着卫星观测资料的应用和积雪站点观测资料的整理以及计算技术和数值模式的迅速发展和应用, 积雪方面的数值研究取得了长足的进步, 国内外的学者先后采用复杂程度不等的数值模式开展了大量的关于欧亚大陆积雪的试验模拟研究。

有关欧亚积雪影响降水的数值试验早期是从印度夏季风降水对欧亚积雪异常响应的敏感性试验开始的, 其中 Barnett et al. (1989)、Yasunari et al. (1991) 和 Vernekar et al. (1995) 采用不同的试验方案, 分别进行了积雪反照率效应和积雪水文效应的强迫试验。Zwiers (1993) 和 Dong and Valdes (1998) 进行了多年的数值模拟, 找出结果中的多雪年和少雪年进行分析。Douville and Royer (1996) 以及 Bamzai and Marx (2000) 的试验结果表明, 积雪与季风的关系中包含了水文过程。Ose (1996) 和 Dash et al. (2005) 进行了区域性的积雪强迫试验。有关积雪水文效应和反照率效应的作用显著性问题, 研究结果存在分歧, 最新的研究工作还比较了青藏高原地区积雪反照率效应和积雪水文效应对东亚夏季风降水的影响 (Souma and Wang, 2010)。有些结论认为积雪水文效应重要, 是积雪影响气候的主要机制, 而积雪反照率效应不明显

(Barnett et al., 1989; Vernekar et al., 1995); 有些则认为积雪反照率效应在某个阶段或者某个区域的影响更为显著 (Yasunari et al., 1991; Souma and Wang, 2010)。

青藏高原积雪影响中国地区降水的数值模拟研究也随之展开 (卢咸池和罗勇, 1994; 董敏和余建锐, 1997; Souma and Wang, 2009), 大多数工作均强调了高原积雪的重要性, 认为和整个欧亚大陆积雪相比, 青藏高原积雪的影响更加显著 (陈丽娟等, 1996; 范广洲等, 1997; 郑益群等, 2000; Qian et al., 2003), 并且提出了一些影响机理的概念模型, 认为在积雪融化后, 土壤长时间的湿度异常是地气系统“记住”积雪异常的物理机制, “湿土壤”在延长高原积雪对天气气候的影响过程中起了重要作用, 是高原积雪影响我国降水的主要机理 (张顺利和陶诗言, 2001; 朱玉祥等, 2009)。

欧亚积雪影响北半球大气环流、气候以及降水变化的数值试验研究起步较晚, 不同学者利用不同数值模式以及观测资料的强迫, 模拟了冬、春季欧亚大陆积雪对北半球不同季节大气环流和气候的影响, 并提出影响机制 (陈海山等, 2003; Hardiman et al., 2008; Orsolini and Kvamstø, 2009; Matsumura et al., 2010)。其中关于欧亚积雪异常影响中国地区降水变化的试验研究相对较少, 并且均为春季欧亚积雪异常影响中国夏季降水的数值试验 (杨琨, 2008; 李震坤等, 2009), 其中积雪强迫仅仅改变了初始场, 没有考虑积雪异常的持续性作用, 数值试验也没有统计分析作为依据, 模拟效果并不十分理想, 试验方案有待改进。

欧亚积雪异常影响大气环流、气候变化的数值试验研究已经取得了很多的成果, 主要集中在揭示物理机制方面, 这在很大程度上加深了人们对积雪有关物理过程的认识。然而其中仍然存在一些值得深入探讨的问题, 例如, 目前尚无法比较细致地对比亚积雪的反照率效应和水文效应对我国天气、

气候变化的影响; 模拟结果和统计诊断结果之间也存在较大差异, 不具可比性; 很多数值试验仅仅强调初始场中积雪异常强迫的程度, 没有考虑大气环流对积雪异常的持续响应。

因此, 本文在统计分析的基础上以积雪异常的实际情况为依据 (Aoki et al., 2003), 选用具有比较全面积雪参数化方案的 CAM3.1 模式来进行数值试验, 针对当前数值模拟研究中存在的问题, 把积雪强迫加入到模式积分过程中去, 考虑了积雪的持续性影响, 以此研究欧亚积雪不同的物理效应对地表热通量、大气环流以及降水场的影响, 深入分析欧亚大陆积雪异常与后期中国华南降水的联系。

2 观测资料的统计分析

除热带海温外, 欧亚大陆积雪对我国华南降水也是一个重要的影响因子, 有时热带海温并不能完全解释华南降水异常, 这与中、高纬外强迫也有关系, 所以本文分析欧亚大陆积雪深度和中国降水的耦合关系。文中所用积雪资料是日本气象厅 (JMA) 和中央电力工业研究所 (CRIEPI) 提供的 1979~2010 年全球月平均积雪深度再分析资料 (JRA-25) (单位: m), 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。降水资料为 1979~2010 年中国 160 个台站月平均降水资料。统计分析部分使用奇异值分解方法 (SVD 分析), 选取 ($25^{\circ}\text{N} \sim 80^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ} \sim 180^{\circ}\text{E}$) 区域每年 2~4 月的积雪深度与后期 5~6 月中国 160 站降水进行分析, 研究时段取为 1979~2010 年。

以中国 5~6 月平均降水为左场, 欧亚大陆 2~4 月平均雪深为右场, 左右场中的元素均已做过标准化处理, 利用 SVD 方法分析欧亚积雪与后期我国降水的时滞耦合关系。第一模态解释协方差平方和百分比的 24%, 当积雪场在欧亚大陆范围内以正异常为主, 仅在青藏高原中部和东亚等小部分地区出现负异常时 (图 1a), 降水场在华南、华北和我国西部等地区可能为多雨, 在长江黄河中上游和东北等地区为少雨 (图 1b), 反之亦然。与之对应的积雪与降水的时间序列均从 20 世纪 80 年代以后基本呈现一种上升趋势, 相关系数 (R) 达到 0.76 (图 1c), 积雪时间序列表现为一种低频变化, 与降水时间序列在年代际尺度上有很好的相关性, 但是并不能很好地反映两者的年际变化关系。可见第一模态代表整体趋势项, 表现的是积雪与降水的年代际

变化。

SVD 第二模态解释协方差平方和百分比的 14%, 当积雪场在欧亚大陆范围内 60°N 以北地区以负异常为主, 在 60°N 以南区域以正异常为主时 (图 2a)。我国华南、东北和西部等地区的降水则异常偏多, 在华东、华中和西南等地区则降水异常偏少 (图 2b), 反之亦然。与第一模态不同的是第二模态积雪与降水的时间序列并没有表现出明显的年代际变化, 而是呈现一种强烈的年际变化, 相关系数达 0.8, 2010 年表现为降水和积雪的异常偏多年 (图 2c)。当欧亚大陆 60°N 以南地区积雪异常偏多, 同时 60°N 以北地区异常偏少时, 后期华南降水也异常偏多。

2010 年 5~6 月期间, 我国华南地区发生了罕见特大暴雨, 图 3 为 2010 年 2~4 月雪深异常分布和 5~6 月降水异常分布, 在西伯利亚地区雪深以负异常为主, 在欧亚大陆 60°N 以南地区雪深以正异常为主 (图 3a); 后期中国降水在华南地区有正异常, 西南和华东地区有负异常 (图 3b)。欧亚大陆雪深和中国降水的空间分布特征均与第二模态的分布特征相似, 与第一模态相比, 第二模态时间序列在年际尺度上有更好的一致性, 积雪和降水的年际变化关系更为密切, 积雪和降水的空间分布特征与观测结果也更为一致。因此 SVD 第二模态在研究积雪异常影响 2010 年华南降水异常的机制上是非常重要的, 而第一模态体现的是欧亚大陆积雪整体的变化趋势, 与观测分布形式不同, 体现年代际变化的第一模态对于本文的研究是不合适的。另外, Wu and Kirtman (2007) 的研究结果表明: 华南降水与春季积雪在北欧地区负相关, 在西西伯利亚和青藏高原正相关, 与本文 SVD 第二模态的分析结果相一致。采用蒙特卡洛技术检验 SVD 第二模态的显著性。实测资料计算出的方差贡献 $C_2 = 0.079$ 。根据左右变量场空间点数, 利用随机数发生器生成随机序列进行 100 次模拟 SVD 计算, 模拟出的方差贡献 $U_2^{99} = 0.072$, $C_2 > U_2^{99}$ 则认为第二对 SVD 模态在 99% 显著性水平上是显著的。所以本文中以 SVD 第二模态的结果为依据进行数值试验, 来研究欧亚大陆积雪的两种物理效应对后期 5~6 月华南降水的影响。

3 模式说明及试验设计

本文采用美国国家大气研究中心 (NCAR) 的

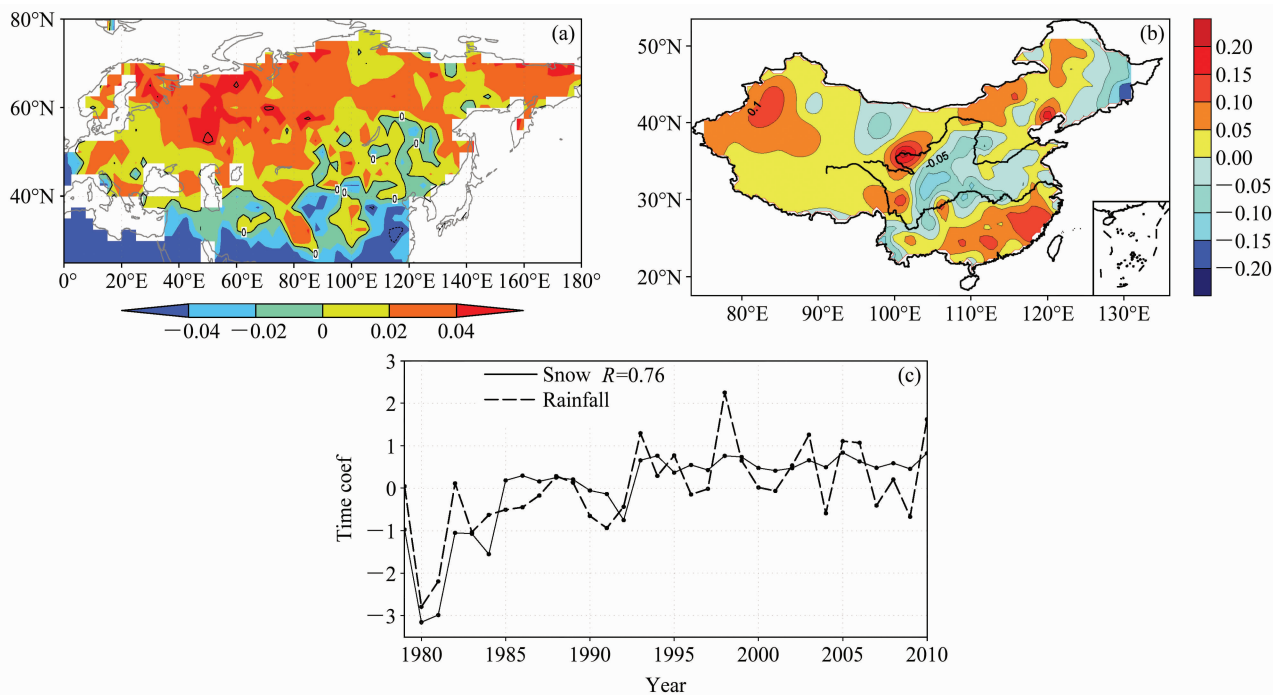


图1 SVD第一模态对应的时间序列及空间分布型(无量纲): (a) 积雪场; (b) 降水场; (c) 时间序列(实线: 积雪场; 虚线: 降水场)
Fig.1 The time series and spatial distributions of the leading SVD (singular value decomposition) mode for the snow depth and rainfall fields (arbitrary): (a) Feb - Apr Eurasian snow depth; (b) May - Jun rainfall in China; (c) normalized time series of snow depth (solid line) and rainfall (dashed line)

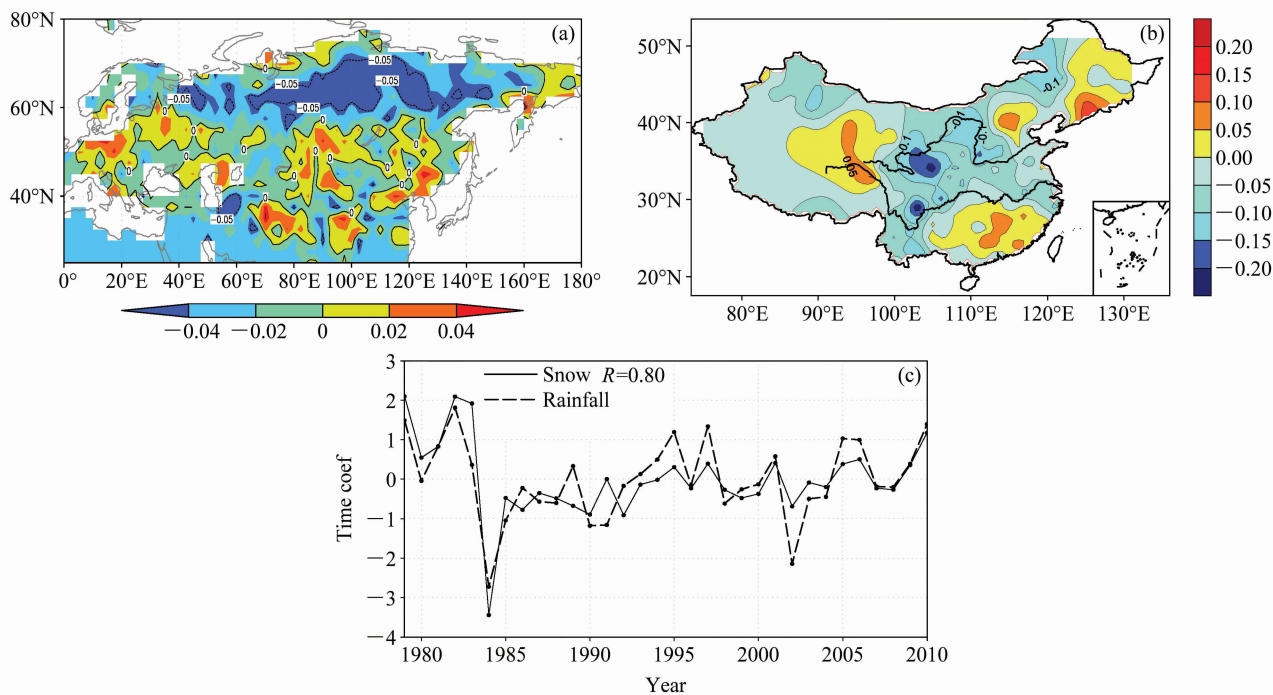


图2 同图1, 但为第二模态
Fig.2 Same as that in Fig. 1, but for the second SVD mode

具有比较完整积雪参数化方案的大气环流模式 (CAM3.1) 来进行数值试验, 选取欧拉普动力核

心, 水平分辨率为 T42, 垂直方向采用 $\sigma-p$ 混合坐标系, 共分为 26 层, 模式积分步长为 20 分钟, 使

表 1 试验方案设计

Table 1 Experimental design

	试验名称	积雪反照率效应	积雪水文效应	积分时间	试验个例
第一组	①积雪反照率+水文效应试验(简称 SAH)	方案 I	方案 II	2 月 1 日~6 月 30 日	9 个
	②与 SAH 对应的控制试验(简称 CAH)	不变	不变	2 月 1 日~6 月 30 日	9 个
第二组	③积雪反照率效应试验(简称 SA)	方案 I	无	2 月 1 日~6 月 30 日	9 个
	④与 SA 对应的控制试验(简称 CA)	不变	无	2 月 1 日~6 月 30 日	9 个
第三组	⑤积雪水文效应试验(简称 SH)	无	方案 II	2 月 1 日~6 月 30 日	9 个
	⑥与 SH 对应的控制试验(简称 CH)	无	不变	2 月 1 日~6 月 30 日	9 个

用气候态月平均海温资料。其中陆面部分详细考虑了积雪的反照率效应和水文效应,包括降雪的融化、新雪和旧雪的相互作用以及积雪层之间的融合、压缩和形变、分层等过程,组成了一个完整的相互作用的系统。

首先将模式运行 15 年,在后 9 年中,把每年的 2 月 1 日作为初始场进行数值试验。数值试验分为三组,每组均包含敏感性试验和与之相对应的控制试验(见表 1),第一组模拟积雪反照率效应和水文效应同时存在的情况,敏感性试验(表 1①)基于 SVD 第二模态积雪场空间分布特征(图 2a),在(30°N~40°N, 70°E~100°E)和(40°N~60°N, 0°~140°E)这两个区域内同步增加积雪反照率和雪水当量,同时在(60°N~80°N, 40°E~160°E)区域减小积雪反照率和雪水当量来表征积雪的异常偏多和偏少。与之对应的控制试验(表 1②)模式不做任何更改,积雪反照率和雪水当量均为模式原有设置(图 4a)。

第二组模拟积雪反照率效应忽略水文效应,敏感性试验(表 1③)采用方案 I(图 4b)在(30°N~40°N, 70°E~100°E)和(40°N~60°N, 0°~140°E)两个区域内同步增加积雪反照率,同时在(60°N~80°N, 40°E~160°E)区域减小积雪反照率来体现积雪的异常分布。与之对应的控制试验(表 1④)也忽略了积雪水文效应,反照率效应不做改变采用模式固有设置。

第三组模拟积雪水文效应忽略反照率效应,敏感性试验(表 1⑤)采用方案 II(图 4c)在(30°N~40°N, 70°E~100°E)和(40°N~60°N, 0°~140°E)两个区域内同步增加雪水当量,同时在(60°N~80°N, 40°E~160°E)区域减少雪水当量。与之对应的控制试验(表 1⑥)同样忽略积雪反照率效应,水文效应不做改变采用模式固有设置。

图 4 中试验方案的参数修改均以观测数据为依据[见 Aoki et al. (2003) 图 2],积雪的可见光反照率和近红外反照率都随积雪量的改变而变化,可见光反照率总是大于近红外反照率,可见光最大时几乎接近 1,最小可达 0.8,甚至达到 0.6;近红外最大可达 0.8,最小达到 0.4;雪深季节内变化可从几厘米(几十厘米)增加(减少)至几十厘米(几厘米)。为了符合客观事实,又要兼顾突出敏感性试验的积雪异常,文中把积雪近红外反照率分别改为 0.8、0.55,积雪可见光反照率改为 0.99、0.85;同时把雪水当量值分别乘以 3.0、乘以 0.5。通过在每一时步都同时增加和减少积雪反照率的值和雪水当量值来表征积雪的异常偏多与偏少,积雪异常强迫与观测异常范围具有可比性。

在有关积雪的数值研究中,模式陆面过程部分是否能够真实刻画积雪变化以及准确描述雪—气界面的各种物理量至关重要。图 5 为 SAH-CAH 试验的 2~4 月地表位温(图 5a)和雪水当量(图 5b)异常分布,在欧亚大陆(30°N~40°N, 70°E~100°E)、(40°N~60°N, 0°~140°E)地区以积雪异常偏多为主,(60°N~80°N, 40°E~160°E)地区以积雪的异常偏少为主,模拟结果与试验设计相一致,较好地再现了统计分析结果中积雪异常的分布特征,说明 CAM3.1 模式能够较为真实的模拟积雪变化过程,该模式可以用于研究积雪的物理效应对我国华南降水的影响,也说明试验方案具有一定的可信度。每组试验均从 2 月 1 日开始积分 5 个月,运行至 6 月 30 日,每个试验由 9 个个例组成,最后以集合平均结果作为数值试验结果。

4 数值试验结果分析

4.1 欧亚大陆地表热通量模拟结果变化分析

图 6 给出了三组控制试验中各项地表热通量在

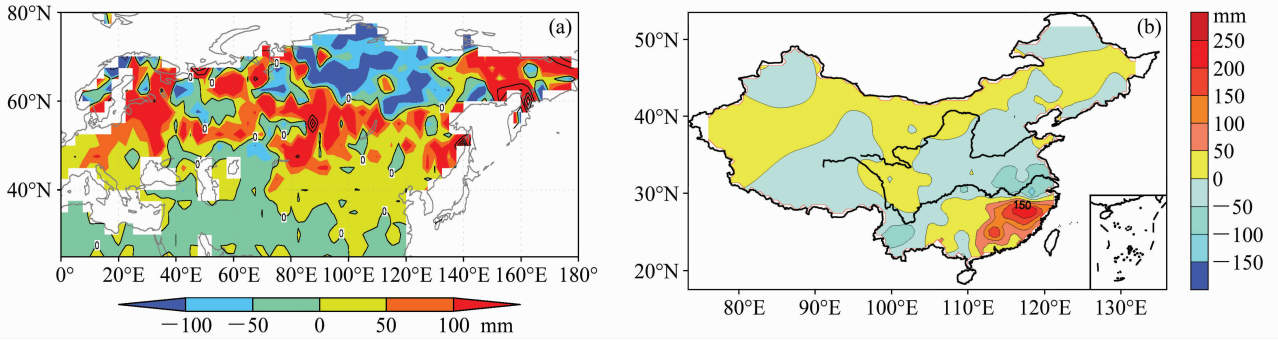


图3 2010年(a)2~4月雪深异常和(b)5~6月降水异常(单位: mm)

Fig. 3 (a) Feb - Apr mean of Eurasian snow depth anomaly and (b) May - June mean of 2010 rainfall anomaly in China in 2010

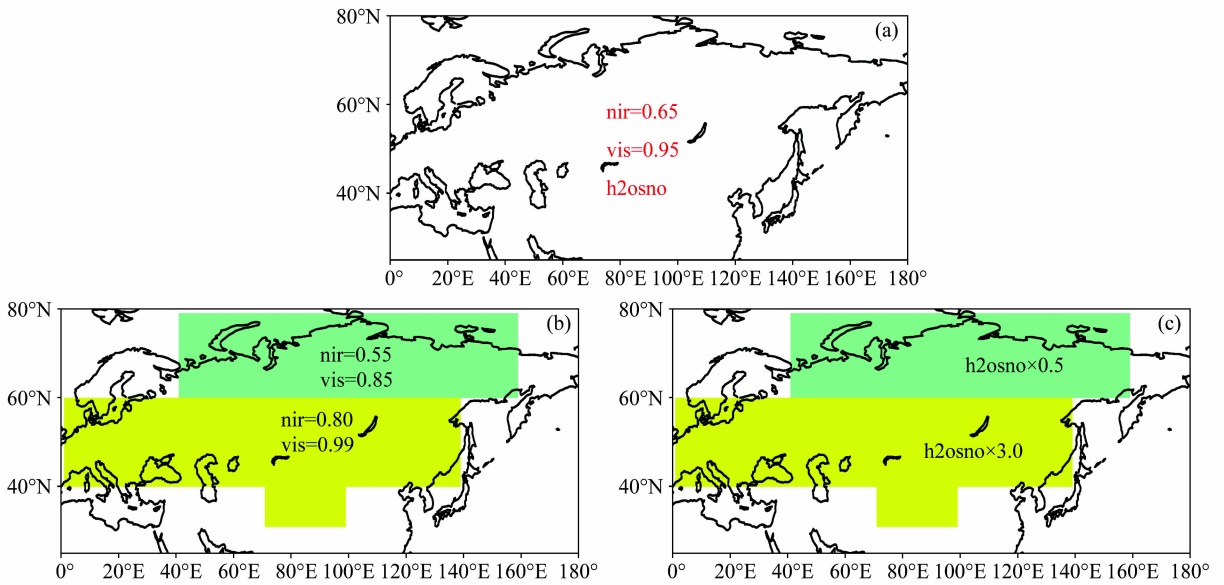


图4 试验方案参数和区域的设置: (a) 模式原有参数设置; (b) 方案I: 积雪反照率参数设置; (c) 方案II: 积雪水文参数设置。nir: 近红外积雪反照率, vis: 可见光积雪反照率, h2osno: 雪水当量; 黄色: (30°N~40°N, 70°E~100°E) 和 (40°N~60°N, 0°~140°E), 蓝色: (60°N~80°N, 40°E~160°E)

Fig. 4 Experimental parameters design scheme: (a) The original parameters setting mode; (b) scheme I: snow albedo parameters; (c) scheme II: snow hydrological parameters. nir: near-infrared albedo of snow; vis: visible snow albedo; h2osno: snow water equivalent; yellow area: (30°N - 40°N, 70°E - 100°E) and (40°N - 60°N, 0° - 140°E); blue area: (60°N - 80°N, 40°E - 160°E)

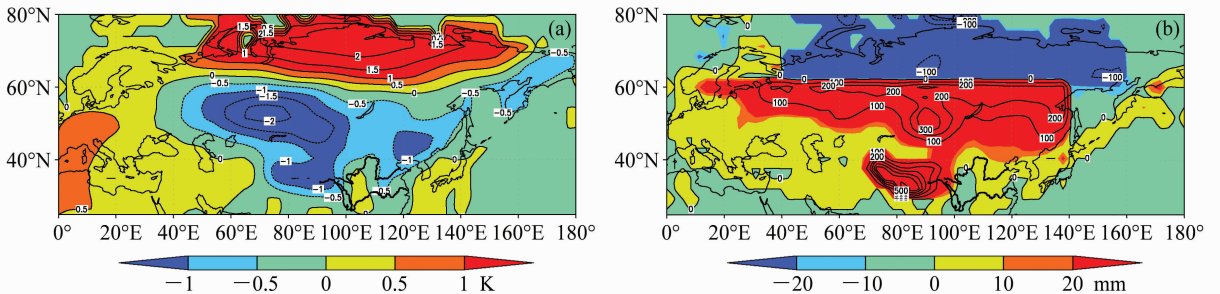


图5 SAH-CAH 试验结果2~4月平均地表位温(a, 单位: K)和雪水当量(b, 单位: mm)的异常分布

Fig. 5 (a) Potential temperature anomaly and (b) snow water equivalent anomaly averaged over Feb - Apr in the SAH-CAH experiment

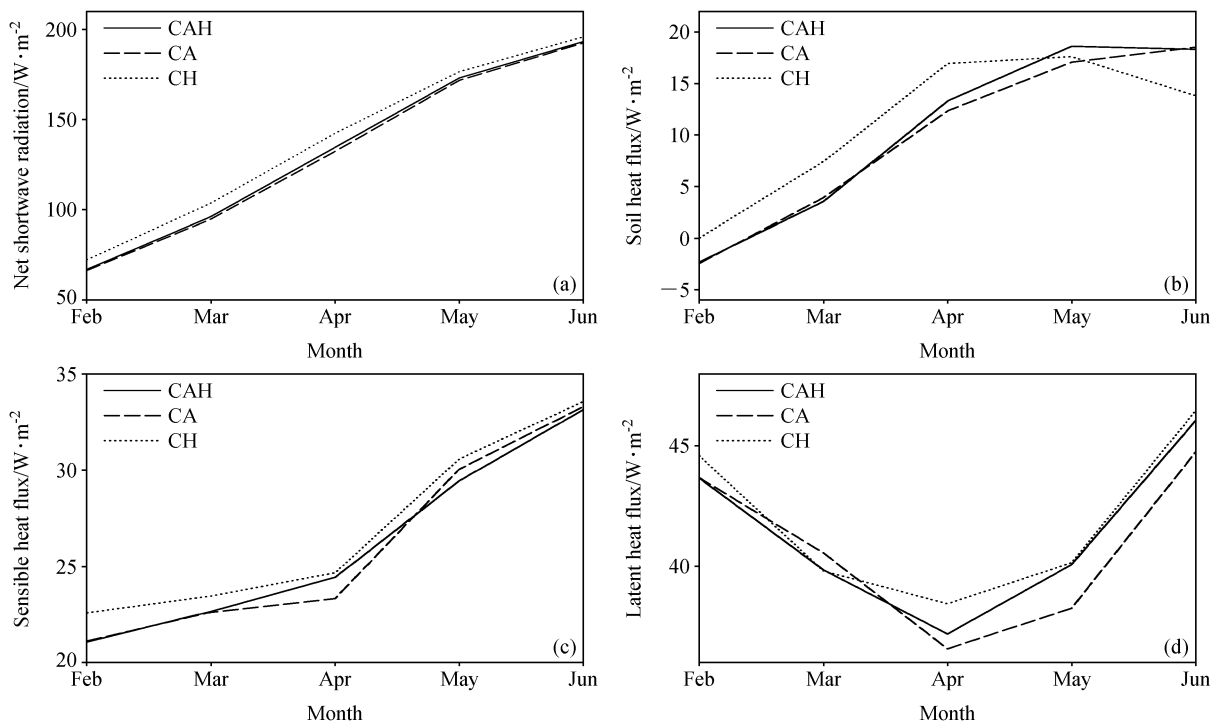


图 6 控制试验模拟的欧亚大陆地区地表热通量时间序列 (单位: W/m^2): (a) 净短波地表通量; (b) 土壤热通量; (c) 地表感热通量; (d) 地表潜热通量

Fig. 6 The time series of the land surface heat fluxes over Eurasia: (a) Net shortwave radiation; (b) soil heat flux; (c) sensible heat flux; (d) latent heat flux

($25^{\circ}N \sim 80^{\circ}N$, $0^{\circ} \sim 180^{\circ}E$) 区域平均值的时间序列, CA 试验体现的是积雪反照率效应, 水文效应被忽略, 与 CAH 试验相比, 由于积雪反照率效应存在, 净短波通量基本不变 (图 6a), 但是积雪水文效应不存在, 则没有融雪渗透进入土壤, 土壤水含量必然减少, 这将导致土壤热通量减少 (图 6b)、感热通量增加 (图 6c)、潜热通量减少 (图 6d)。在 CH 试验中仅体现积雪水文效应, 忽略反照率效应, 与 CAH 试验相比, 没有积雪反照率存在, 则净短波通量增加 (图 6a)、感热通量增加 (图 6c), 这些特征均在试验结果中得到证实。

上述结果表明, 积雪的高反照率能引起地面吸收的太阳辐射减少, 进而改变地表的热力状况及地气之间的热量交换, 产生冷却效应。另外, 积雪水文效应通过积雪融雪对地表的水分平衡产生影响, 引起土壤水分及蒸发的异常, 从而影响地气系统之间的水汽、能量交换。总之, 积雪可以通过反照率效应和水文效应影响地表的热量交换以及水汽和能量的平衡。

4.2 大尺度大气环流试验结果变化分析

图 7a、b、c 为三组试验 5~6 月近地面位温的异常分布, 仅有积雪反照率效应时 (图 7a), 蒙古高原地区位温有负异常, 最小值达 $-1 K$ 。在西伯利亚到哈萨克斯坦地区位温有正异常, 但是幅度很小最大值仅 $0.5 K$ 。仅有积雪水文效应时 (图 7b), 在东欧至西西伯利亚平原地区位温有显著负异常, 最小值达到 $-2 K$ 。在蒙古高原北部至中西伯利亚地区有显著位温正异常, 最大值达到 $1 K$ 。当两种效应共同存在时 (图 7c), 显著的负异常出现在青藏高原地区, 中心值可达 $-2.5 K$, 在我国华南也有显著负异常存在, 中心值达 $-1 K$ 。在中西伯利亚至蒙古高原地区存在显著正异常, 中心值可达 $2 K$ 。三组试验的位温异常分布各不相同, 虽然在 $60^{\circ}N$ 以北积雪异常偏少地区位温均以正异常为主, 但是当单纯积雪水文效应存在时, 东欧平原北部出现位温的负异常 (图 7b)。在 $60^{\circ}N$ 以南积雪异常偏多区域位温均有负异常, 但是单纯反照率效应作用时, 负异常出现在东亚蒙古高原地区, 单纯水文

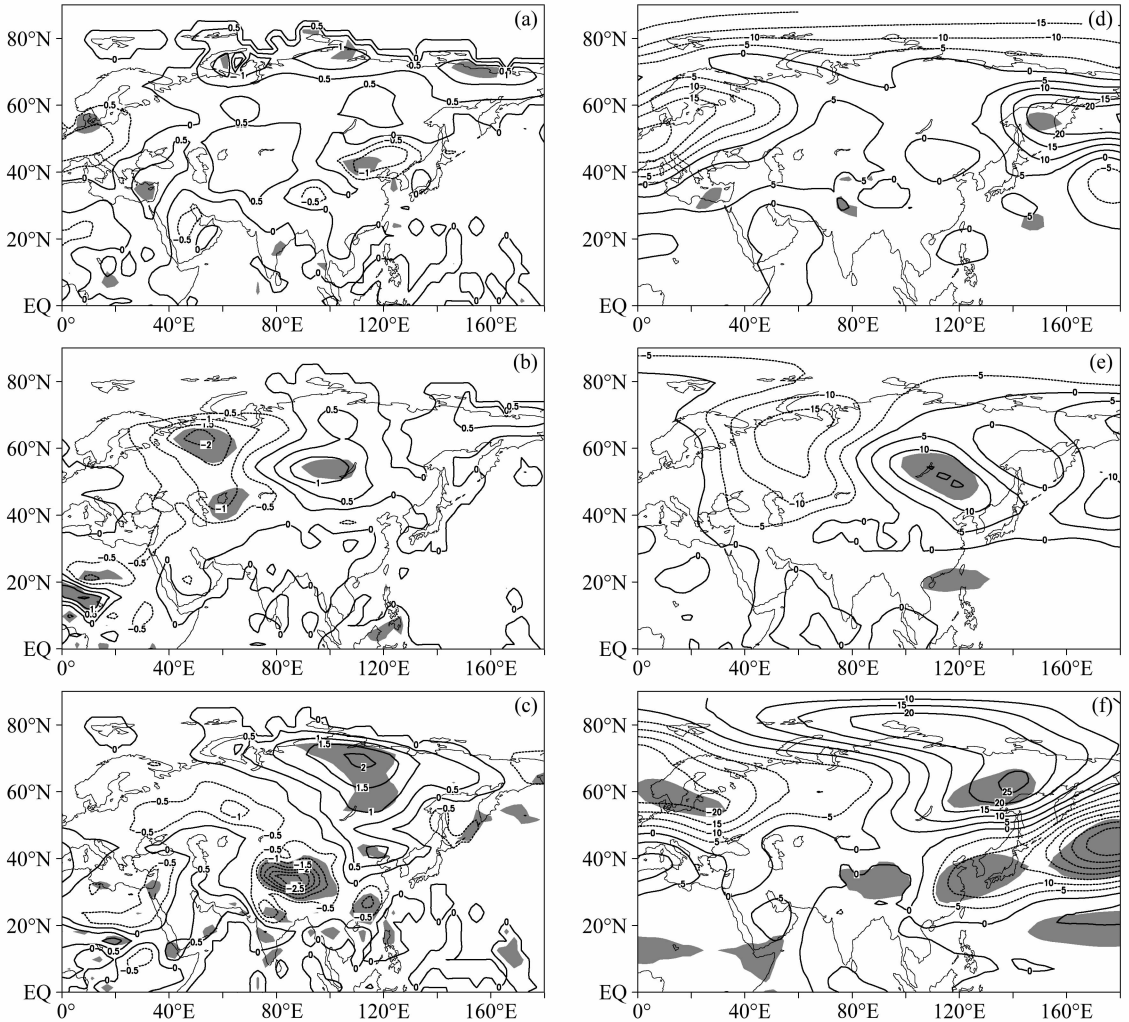


图 7 试验结果 5~6 月 (a-c) 近地面位温异常分布 (单位: K, 等值线间隔 0.5 K) 和 (d-f) 700 hPa 位势高度异常分布 (单位: m, 等值线间隔 5m): (a, d) SA-CA; (b, e) SH-CH; (c, f) SAH-CAH。阴影: 通过 90% 信度检验

Fig. 7 (a-c) May-Jun mean potential temperature anomaly (the contour interval is 0.5 K) and (d-f) May-Jun mean 700-hPa geopotential height anomaly (the contour interval is 5 m): (a, d) SA-CA expt; (b, e) SH-CH expt; (c, f) SAH-CAH expt. Regions over 90% confidence level are shaded

效应作用时则出现在巴尔喀什湖以西地区 (图 7a)。两种效应共同存在的情况与 SVD 第二模态的积雪场分布特征最为匹配 (图 2a), 变化幅度也最大, 但并不等于两种效应单独作用之和。

图 7 还显示了 5~6 月 700 hPa 位势高度异常分布, 积雪反照率效应试验 (图 7d) 中鄂霍次克海地区有正异常, 中心值达到 20 m。积雪水文效应试验 (图 7e) 中在贝加尔湖地区至我国东北有显著正异常, 中心值达到 10 m, 在我国华南沿海地区有显著负异常。两种效应共同作用时 (图 7f), 在西伯利亚东部存在显著高值系统, 中心值达 25 m, 我国东部沿海区域有显著负异常, 中心值可达 -35 m,

华南地区受异常低压控制。500 hPa 位势高度异常分布 (图略) 与 700 hPa 类似。

三组试验的位势高度异常基本上与各自的位温异常相匹配, 在近地面位温增暖区对应位势高度升高, 异常冷却区对应位势高度降低, 反映了与积雪下垫面有关的热力过程。三组试验中大气环流对积雪异常的响应各不相同, 其中积雪水文效应的空间结构与同时考虑两种效应时的情况更为接近, 但是变化幅度明显要弱。

4.3 春末夏初中国降水异常试验结果分析

图 8 给出了三组试验结果 5~6 月降水异常分布特征, 降水在华南均有异常偏多, 积雪反照率

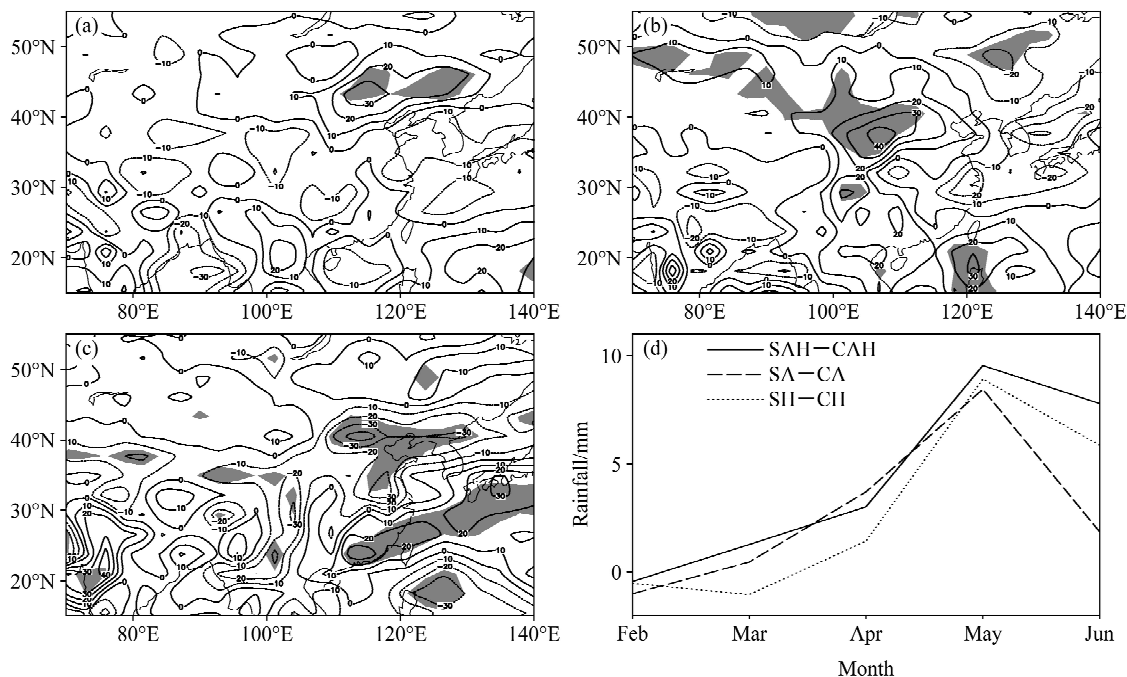


图 8 试验模拟 5~6 月 (a) SA-CA、(b) SH-CH、(c) SAH-CAH 降水场异常分布 (单位: mm, 等值线间隔: 10 mm, 阴影: 通过 90% 信度检验) 以及 (d) 区域平均华南降水量时间序列

Fig. 8 May-Jun mean rainfall anomaly in (a) SA-CA, (b) SH-CH, (c) SAH-CAH expts (the contour interval is 10 mm, regions over 90% confidence level are shaded) and (d) the time series of regional-average rainfall in South China

效应试验中 (图 8a), 降水在我国东北地区显著偏多, 在华南降水正异常幅度很小, 只达到 10 mm。积雪水文效应试验中 (图 8b), 降水在内蒙古高原西部和南海有显著正异常, 在我国东北部分地区有显著负异常。在华南降水最大正异常达到 20 mm, 比反照率试验的变化幅度大, 但是正异常主要集中在华南的中西部地区。当综合考虑两种效应时 (图 8c), 降水在华南至东海显著异常偏多, 在华北和南海有显著异常偏少, 分布形势与统计分析结果基本一致。可见两种效应共同存在的试验结果与统计结果最为接近, 华南降水异常幅度也最大, 可达 30 mm。图 8d 显示了华南降水异常在 (22°N~26°N, 105°E~122°E) 区域平均的时间序列, 降水从 2 月开始逐渐加强, 在 5 月达到最大, 两种效应都有的试验中降水量最大, 在 5、6 月份, 水文效应对降水的影响比反照率效应大, 可见在欧亚大陆积雪对春末夏初时期华南降水的影响中, 积雪水文效应的作用比反照率效应的作用强。

5 结论和讨论

本文针对欧亚大陆积雪对 2010 年春末夏初时

期中国华南地区降水的影响, 在统计分析的基础上, 设计数值试验方案指定积雪反照率和雪水当量的变化幅度, 研究欧亚积雪的反照率效应和水文效应对后期华南降水的影响, 以及两者的相对重要性。研究表明, 欧亚积雪异常对后期华南降水存在明显的影响, 当积雪在 60°N 以南地区异常偏多, 在 60°N 以北地区异常偏少时, 通过反照率效应和水文效应改变地表热状况, 进而影响大尺度环流场, 最终可导致春末夏初时期华南降水异常偏多。欧亚大陆积雪异常作为一个中高纬的强迫因子, 通过大气环流的调整引起大气异常的遥响应, 对更远的范围乃至对低纬地区气候产生影响是可能的。

本文所进行的三组数值试验中, 地表热状况、大尺度大气环流以及华南降水对积雪变化响应的幅度和范围存在较大差异, 当同时考虑两种物理效应时, 数值试验结果与统计分析结果基本一致, 变化幅度也最大。当仅考虑单纯一种物理效应时, 变化幅度明显减弱, 其中水文效应试验和两种效应共同存在的试验结果, 其主要形态更为接近。而且水文效应引起的近地面位温、700 hPa 位势高度和降水

异常分布的变化幅度都大于反照率效应引起的变化幅度,这可能是由于冬、春季积雪反照率效应持续时间短,而水文效应持续时间长,可见积雪水文效应似乎扮演了更为重要的角色。单纯积雪反照率效应和单纯积雪水文效应对大气环流及华南降水的影响中,反馈过程非常复杂,两者之间不是线性变化关系。

目前,由于模式的耦合系统无法分割等因素,国内外关于积雪的数值试验研究还无法确切模拟现实积雪的异常情况,试验研究普遍无法客观地反映出积雪异常分布,虽然文中数值试验在区域选取以及积雪反照率和水文参数值的设计上存在主观性,但是并不影响对揭示物理效应机理的探讨。本文的研究为加深欧亚大陆积雪对中国气候影响的理解,以及积雪的不同物理效应在其中所起的作用提供一个参考依据。

但是,本文还不能回答为什么单纯积雪反照率效应与单纯积雪水文效应所导致的大气环流分布形势不一致,这个问题值得进一步深入研究。本文研究的是季节尺度的变化情况,关于大气环流对积雪异常的瞬态响应过程将是今后研究的重点。

参考文献 (References)

Aoki T, Hachikubo A, Hori M. 2003. Effects of snow physical parameters on shortwave broadband albedos [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D19): 4616, doi: 10.1029/2003JD003506.

Bamzai A S, Marx L. 2000. COLA AGCM simulation of the effect of anomalous spring snow over Eurasia on the Indian summer monsoon [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126 (568): 2575–2584.

Barnett T P, Dümenil L, Schlese U, et al. 1989. The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46 (5): 661–685.

陈海山, 孙照渤. 2003. 欧亚积雪异常分布对冬季大气环流的影响 I. 观测研究 [J]. *大气科学*, 27 (3): 304–316. Chen Haishan, Sun Zhaobo. 2003. The effects of Eurasian snow cover anomaly on winter atmospheric general circulation. Part I: Observational studies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (3): 304–316.

陈海山, 孙照渤, 朱伟军. 2003. 欧亚积雪异常分布对冬季大气环流的影响 II. 数值模拟 [J]. *大气科学*, 27 (5): 847–860. Chen Haishan, Sun Zhaobo, Zhu Weijun. 2003. The effects of Eurasian snow cover anomaly on winter atmospheric general circulation. Part II: Model simulation [J]. *Chinese Journal of At-*

mospheric Sciences (in Chinese), 27 (5): 847–860.

陈丽娟, 吕世华, 罗四维. 1996. 青藏高原春季积雪异常对亚洲季风降水影响的数值试验 [J]. *高原气象*, 15 (1): 122–130. Chen Lijuan, Lü Shihua, Luo Siwei. 1996. The numerical experiment of influence of anomalous snow cover over Qinghai–Xizang Plateau in spring on summer monsoon rainfall in Asia [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 15 (1): 122–130.

陈烈庭. 2001. 青藏高原异常雪盖和 ENSO 在 1998 年长江流域洪涝中的作用 [J]. *大气科学*, 25 (2): 184–192. Chen Lieting. 2001. The role of the anomalous snow cover over the Qinghai–Xizang Plateau and ENSO in the great floods of 1998 in the Changjiang River valley [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (2): 184–192.

Chen Lieting, Wu Renguang. 2000. Interannual and decadal variations of snow cover over Qinghai–Xizang Plateau and their relationships to summer monsoon rainfall in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 17 (1): 18–30.

陈乾金, 高波, 张强. 2000. 青藏高原冬季雪盖异常与冬夏季风变异及其相互联系的物理诊断研究 [J]. *大气科学*, 24 (4): 477–492. Chen Qianjin, Gao Bo, Zhang Qiang. 2000. Studies on relation of snow cover over the Tibetan Plateau in winter to the winter–summer monsoon change [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24 (4): 477–492.

陈兴芳, 宋文玲. 2000. 冬季高原积雪和欧亚积雪对我国夏季旱涝不同影响关系的环流特征分析 [J]. *大气科学*, 24 (5): 585–592. Chen Xingfang, Song Wenling. 2000. Circulation analysis of different influence of snow cover over the Tibetan Plateau and Eurasia in winter on summertime droughts and floods of China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24 (5): 585–592.

Dash S K, Singh G P, Shekhar M S, et al. 2005. Response of the Indian summer monsoon circulation and rainfall to seasonal snow depth anomaly over Eurasia [J]. *Climate Dyn.*, 24 (1): 1–10.

Dong B W, Valdes P J. 1998. Modelling the Asian summer monsoon rainfall and Eurasian winter/spring snow mass [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124 (552): 2567–2596.

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

Douville H, Royer J F. 1996. Sensitivity of the Asian summer monsoon to an anomalous Eurasian snow cover within the Météo-France GCM [J]. *Climate Dyn.*, 12 (7): 449–466.

范广洲, 罗四维, 吕世华. 1997. 青藏高原冬季积雪异常对东、南亚夏季风影响的初步数值模拟研究 [J]. *高原气象*, 16 (2): 140–152. Fan Guangzhou, Luo Siwei, Lü Shihua. 1997. The preliminary numerical experiments of effect of anomalous snow cover over plateau in winter on east and south Asian summer monsoon

- [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 16 (2): 140–152.
- Hardiman S C, Kushner P J, Cohen J. 2008. Investigating the ability of general circulation models to capture the effects of Eurasian snow cover on winter climate [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D21123): doi: 10.1029/2008JD010623.
- 李震坤, 武炳义, 朱伟军. 2009. 春季欧亚积雪异常影响中国夏季降水的数值试验 [J]. *气候变化研究进展*, 5 (4): 196–201. Li Zhenkun, Wu Bingyi, Zhu Weijun. 2009. Numerical simulation on effect of spring Eurasian snow cover on summer rainfall in China [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 5 (4): 196–201.
- 卢咸池, 罗勇. 1994. 青藏高原冬春季雪盖对东亚夏季大气环流影响的数值试验 [J]. *应用气象学报*, 5 (4): 385–393. Lu Xianchi, Luo Yong. 1994. Numerical experiments on the effects of Qinghai–Xizang Plateau snow cover in winter and spring on general circulation over East Asia in summer [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 5 (4): 385–393.
- Matsumura S, Yamazaki K, Tokioka T. 2010. Summertime land-atmosphere interactions in response to anomalous springtime snow cover in northern Eurasia [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D20107): doi: 10.1029/2009JD012342.
- 穆松宁, 周广庆. 2009. 欧亚大陆季节增(融)雪盖面积变化特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 14 (5): 491–508. Mu Songning, Zhou Guangqing. 2009. Analyses of seasonal fresh snow extent over Northern Eurasia [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 14 (5): 491–508.
- 穆松宁, 周广庆. 2010. 冬季欧亚大陆北部新增雪盖面积变化与中国夏季气候异常的关系 [J]. *大气科学*, 34 (1): 213–226. Mu Songning, Zhou Guangqing. 2010. Relationship between winter northern Eurasian fresh snow extent and summer climate anomalies in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (1): 213–226.
- Orsolini Y J, Kvamstø N G. 2009. Role of Eurasian snow cover in wintertime circulation: decadal simulations forced with satellite observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 114 (D19108): doi: 10.1029/2009JD012253.
- Ose T. 1996. The comparison of the simulated response to the regional snow mass anomalies over Tibet, Eastern Europe, and Siberia [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 74 (6): 845–866.
- Qian Y F, Zheng Y Q, Zhang Y, et al. 2003. Responses of China's summer monsoon climate to snow anomaly over the Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Climatology*, 23 (6): 593–613.
- Souma K, Wang Y Q. 2009. Improved simulation of the East-Asian summer monsoon rainfall with satellite-derived snow water equivalent data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137 (6): 1790–1804.
- Souma K, Wang Y Q. 2010. A comparison between the effects of snow albedo and infiltration of melting water of Eurasian snow on East Asian summer monsoon rainfall [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D02115): doi: 10.1029/2009JD012189.
- 谭言科, 何金海, 祝从文. 1999. 欧亚冬季雪盖对北半球夏季大气环流的影响及其与东亚太平洋型遥相关的可能联系 [J]. *大气科学*, 23 (2): 152–160. Tan Yanke, He Jinhai, Zhu Congwen. 1999. Impact of Eurasian winter snow cover on the northern hemisphere summer circulation and its possible relation to East Asia Pacific teleconnection pattern [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23 (2): 152–160.
- Vernekar A D, Zhou J, Shukla J. 1995. The effect of Eurasian snow cover on the Indian monsoon [J]. *J. Climate*, 8 (2): 248–266.
- Wu Bingyi, Yang Kun, Zhang Renhe. 2009. Eurasian snow cover variability and its association with summer rainfall in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (1): 31–44.
- Wu Renguang, Kirtman B P. 2007. Observed relationship of spring and summer East Asian rainfall with winter and spring Eurasian snow [J]. *J. Climate*, 20 (7): 1285–1304.
- Wu Tongwen, Qian Zheng'an. 2003. The relation between the Tibetan winter snow and the Asian summer monsoon and rainfall: an observational investigation [J]. *J. Climate*, 16 (12): 2038–2051.
- 杨秋明. 1997a. 欧亚雪盖准 2 年振荡对中国降水的影响 [J]. *气候与环境研究*, 2 (1): 83–91. Yang Qiuming. 1997a. The effect of biennial oscillation of snow cover in Eurasia on the rainfall in China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 2 (1): 83–91.
- 杨秋明. 1997b. 欧亚 500hPa 环流、雪盖和中国降水量 3–4 年耦合振荡 [J]. *气候与环境研究*, 2 (4): 347–355. Yang Qiuming. 1997. The coupled oscillations of 500hPa circulations/snow cover in Eurasia/rainfall in China on the time scale of 3–4 years [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 2 (4): 347–355.
- 杨琨. 2008. 欧亚大陆积雪的时空分布特征及其与东亚气候变化的联系 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文, 65pp. Yang Kun. 2008. Temporal and spatial distribution characteristics of Eurasia snow and its associations with East Asia climate change [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences, 65pp.
- Yang S, Xu L Z. 1994. Linkage between Eurasian winter snow cover and regional Chinese summer rainfall [J]. *International Journal of Climatology*, 14 (7): 739–750.
- Yasunari T, Kitoh A, Tokioka T. 1991. Local and remote responses to excessive snow mass over Eurasia appearing in the northern spring and summer climate: a study with the MRI GCM [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 69 (4): 473–487.
- 张顺利, 陶诗言. 2001. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究 [J]. *大气科学*, 25 (3): 372–390. Zhang Shunli, Tao Shiyang. 2001. The influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (3): 372–390.
- Zhang Yongsheng, Li Tim, Wang Bin. 2004. Decadal change of the spring snow depth over the Tibetan Plateau: The associated cir-

- ulation and influence on the East Asian summer monsoon [J]. *J. Climate*, 17 (14): 2780–2793.
- Zhao Ping, Zhou Zijiang, Liu Jiping. 2007. Variability of Tibetan spring snow and its associations with the hemispheric extratropical circulation and East Asian summer monsoon rainfall: an observational investigation [J]. *J. Climate*, 20 (15): 3942–3955.
- 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 2000. 青藏高原积雪对中国夏季风气候的影响 [J]. *大气科学*, 24 (6): 761–774. Zheng Yiqun, Qian Yongfu, Miao Manqian, et al. 2000. Effect of the Tibetan Plateau snow cover on China summer monsoon climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24 (6): 761–774.
- 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 Sciences (in Chinese)*, 33 (5): 903–915.
- Zwiers F W. 1993. Simulation of the Asian summer monsoon with the CCC GCM-1 [J]. *J. Climate*, 6 (3): 469–486.