

文章编号: 1673-1719 (2009) 04-0196-06

春季欧亚积雪异常影响中国夏季降水的数值试验

李震坤^{1,2}, 武炳义², 朱伟军¹

(1 南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室, 南京 210044;

2 中国气象科学研究院, 北京 100081)



摘要: 利用NCAR的新一代GCM CAM3.1版本模式, 研究了欧亚大陆春季积雪异常对北半球大气环流和中国夏季降水的影响。结果表明, 春季积雪异常通过改变其后夏季的土壤湿度和温度分布, 造成对流层厚度场的异常, 激发一个从欧洲西部到东亚的500 hPa高度场异常波列。我国南、北方处于符号相反的高度场异常区, 同时降水也呈现南北相异的态势, 这表明春季欧亚积雪异常是影响我国夏季降水分布的一个重要因子。

关键词: 欧亚积雪; 中国夏季降水; 数值模拟; 大气环流

中图分类号: P461.6 **文献标识码:** A

引言

积雪是气候系统中一个重要的组成部分, 对于全球和区域气候的形成及其异常的维持和发展起着非常重要的作用。积雪是径流和土壤湿度的重要水分来源。积雪的辐射特性和热力性质会影响地表的辐射收支、热量平衡和水分平衡过程, 在中高纬水循环过程中也起着重要作用。所以, 积雪会影响到天气系统的许多物理过程, 从而对大气环流和气候产生重要影响。

近年来, 关于积雪异常影响气候变化的物理机制的研究成为了这一领域的热点问题。国内外学者先后采用了复杂程度不等的数值模式开展了大量关于积雪与季风关系以及积雪异常影响大气环流的研究^[1-13], 如Yeh等^[1]模拟研究了雪的水文效应, 指出化雪时不仅消耗了太阳能, 并且化雪后土壤湿度增加, 又进一步降低了地表温度, 引起短期气候的变化;

Yasunari等^[2]的模拟结果表明, 春季积雪反照率是影响地表温度的主要因素, 尤其在青藏高原地区, 而夏季中纬度地区的积雪水文效应显著; Barnett等^[3]研究指出, 春季欧亚大陆积雪偏多会导致东南亚季风较弱, 积雪偏少时情况相反; 等等。这在很大程度上加深了人们对积雪有关的物理过程的认识。

针对积雪对东亚气候异常的影响, 国内的学者重点研究了青藏高原的积雪异常对东亚夏季风和中国夏季气候的影响^[10-12], 而对于欧亚大陆整个区域的积雪研究较少。随着积雪资料的增加, 尤其是卫星资料的应用, 欧亚积雪的研究得以深入发展^[14-15]。Wu等^[15]利用积雪水当量卫星资料发现春季欧亚积雪水当量和我国夏季降水的SVD第一模态之间相关关系较好, 20世纪80年代末春季欧亚积雪和我国夏季降水有一个明显的年代际变化, 80年代后期以来, 欧亚大陆积雪明显减少, 我国降水也由南方少雨、北方多雨向南方多雨、北方少雨的形势转变, 积雪

收稿日期: 2008-08-25; 修订日期: 2008-10-14

基金项目: 973项目(2007CB411505); 行业专项(GYHY200706005); 自然科学基金项目(40875052)资助

作者简介: 李震坤(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事积雪和冻土对气候变化影响的研究。通讯作者: 武炳义, E-mail: wby@cma.gov.cn

异常衍生的 500 hPa 高度场异常波列结构是我国夏季南涝北旱的可能原因。Yasunari 等^[2]和 Barnett 等^[3]都指出过欧亚积雪的异常可以引起大气环流场的局地遥响应,那么欧亚大陆积雪异常是否能产生这样的波列结构呢?积雪的异常是否能对我国南北方降水异常产生不同的贡献呢?本文试图通过数值模拟来验证和解释上述观测分析的结果。

1 模式和试验方案

1.1 模式简介

数值试验选取的是水平分辨率 T42 的欧拉谱 CAM3.1 模式。该模式为美国大气研究中心 (NCAR) 的公用气候模式的大气部分。CAM 模式是 NCAR 发展的第六代大气环流模式,在 CAM 模式之前是 CCM 系列。与前几代大气模式相比, CAM 做了很多改进,模式性能有了很大提高。很多学者利用 CAM 模式做了大量的数值模拟,如魏东等^[16]研究了大气环流对初夏日本东部附近海域海温异常的响应,濮冰等^[17]检验了中国气温变化的两个基本模态在 CAM 中的表现。

CAM3.1 已经和一个较成熟的陆面模式 CLM3.0 进行了耦合,垂直方向上采用 σ - P 混合坐标系,共分为 26 层。该模式中,积雪是一个预报量,由陆面模式 CLM 计算求得,模式中的积雪根据其厚度,最多可以分为 5 层,积雪以下的土壤分为 10 层,积雪的模拟考虑了降雪和融化、新雪和旧雪的相互作用以及积雪层之间的融合、压缩和形变过程。模式积分时间步长为 20 min,使用气候学月平均海温资料。

1.2 试验方案

根据研究需要,首先用模式自带的气候平均标准初始场从第 0 年 9 月运转到第 5 年 3 月,取第 5 年 2 月 24 日至 3 月 5 日共 10 d 的模式输出初始场作为 10 组试验的初始场。由于模式中积雪本身是个预报量,因此仅仅通过改变初始场就可得到积雪的异常分布。正如 Barnett 等^[3]所指出的那样,积雪异常的大小对模式的结果起到至关重要的作用。为了研究欧亚大陆积雪整体偏多或偏少时的影响,我们设计

了两组试验,把上述 10 d 的欧亚大陆范围内 ($25^{\circ} \sim 75^{\circ} \text{N}$, $20^{\circ} \sim 135^{\circ} \text{E}$) 区域积雪初始深度分别乘以 1.2 (下称 EXPA1) 和 0.8 (下称 EXPA2), 10 个 EXPA1 试验的初始场平均减去 10 个原始初始场的平均,得到模式的初始积雪异常的合成图 (图 1)。另外,为了说明我们驱动模式所加的异常强迫跟积雪的自然变率的相似性以及量级上的合理性,利用美国国家冰雪资料中心提供的卫星反演的 1979—2004 年月平均的积雪水当量 (SWE) 资料 (该资料来源于 SMMR 和 SSM/I 传感器,在高山、森林以及岸边区域存在一定的误差),得到 3 月份积雪水当量的标准差分布 (图 2)。由图 1 可以看出,所加的积雪异常强迫主要分布在欧亚大陆中高纬度地区和青藏高原上,其中,高纬地区积雪深度的异常可达到 15 cm 以上,而在高原上最大超过 20 cm。与图 2 相比 (考虑到积雪的密度),除了高原地区积雪异常值稍稍偏大以外,两者在地理分布和量级上较为吻合,说明模拟试验采用的积雪异常具有一定的合理性。在此基础上,每个试验各自连续积分至 8 月 31 日,选取 6—8 月平均进行分析,且重点关注东亚地区。在以下的工作

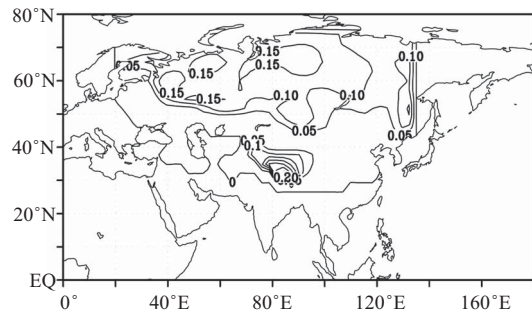


图 1 合成的模式初始积雪深度异常 (m)

Fig. 1 Composite initial snow depth anomaly (m) for model runs EXPA1

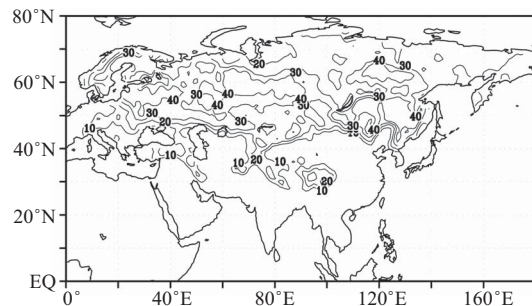


图 2 观测的积雪水当量 3 月份的标准差 (mm)

Fig. 2 Observed March snow water equivalent (SWE) standard deviation (mm)

中, 试验结果主要是两组试验结果的差值, 并都进行了显著性水平为0.05的统计检验。

2 模拟结果分析

2.1 地表温度和对流层低层气温的异常

已有的研究表明, 积雪通过其高反照率减少入射太阳辐射, 而且融雪过程消耗大量的热量及融雪产生的水分导致的蒸发吸热会使地表降温, 总之, 积雪有强烈的局地制冷作用。为此, 我们首先来分析地表温度的差异。

图3是EXPA1与EXPA2试验春季和夏季地表温度的差值场。由图3(a)可以看出, 春季在欧亚大陆中高纬度大部分地区都是温度负距平, 西西伯利亚平原降温最为显著, 可达 0.4°C ; 低纬的青藏高原上也有弱的负距平; 亚洲中纬度地区出现了一个显著增温中心, 增温幅度达 0.6°C 。到了夏季(图3b), 随着积雪的融化, 在东亚中高纬度地区温度负距平加强, 范围增大, 显著的降温区在贝加尔湖附近及其以东地区, 最大降幅达 0.9°C 。在东亚地区, 无论春季还是夏季, 贝加尔湖附近及其以北地区都是温度

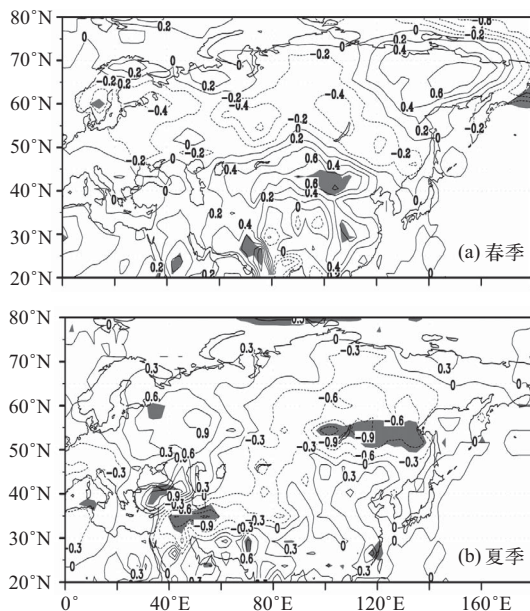


图3 EXPA1与EXPA2试验地表温度($^{\circ}\text{C}$)差值场 (阴影为超过0.05显著性水平的区域)

Fig. 3 Spring (a) and summer (b) surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) differences between EXPA1 runs and EXPA2 runs (Shaded areas are statistically significant at the 0.05 level)

负距平, 以南为温度正距平。比较图1和图3(a)可见, 温度负距平出现的区域与积雪异常偏多的区域基本吻合, 而随着季节的推移, 地表温度场虽有一定的调整, 但总体上积雪异常对地面的冷却效应得到了体现。

在春、夏两季, 对流层低层850 hPa温度场的差异(图略)与地表温度距平分布大致相同。大气的热力场对积雪的异常表现出了明显的响应, 在积雪偏多的区域气温偏低。这说明积雪异常能对地面和对流层低层产生直接的冷却效应, 使得地表温度及地面对大气的加热都发生了明显的变化。

2.2 土壤湿度的异常

Yasunari等^[2]指出夏季积雪的影响以水文效应为主, 尤其是在中纬度地区, 地表水分的增加将导致异常的冷却。土壤湿度的差值场由图4给出。由图4(a)可见, 春季欧亚大陆中高纬土壤湿度整体呈现弱的正距平, 量级较小, 说明春季的温度异常主要是积雪的反照率引起的。而到了夏季, 正距平的范围有所缩减, 但由于融化的积雪进入地表, 土壤湿度的量级迅速增大。值得注意的是, 在图4(b)上, 东亚地区显著的正异常出现在贝加尔湖地区, 而在贝

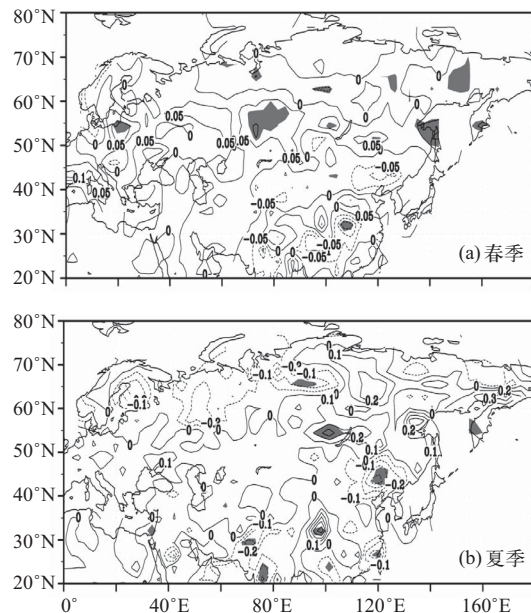


图4 EXPA1与EXPA2试验土壤湿度(%)差值场 (阴影为超过0.05显著性水平的区域)

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for soil moisture (%)

加尔湖以南,土壤湿度是负异常,结合图3(b)可以发现,该地区两者在南北方向上正好是反位相分布,即正的土壤湿度对应负的地表温度,反之亦然,并且贝加尔湖附近的土壤湿度与地表温度显著区相当吻合。这种良好的对应关系说明积雪引起的水分异常是夏季地表热状况发生改变的重要因子,从一定程度上印证了 Yasunari 等的结论。

2.3 位势高度场的异常

一些观测分析和数值模拟结果均表明,欧亚大陆积雪的异常可以引起大气环流的局地 and 遥响应,图5给出了500 hPa高度差值场。在春季500 hPa高度场上,欧亚大陆北部为正的高度异常,地中海附近和西西伯利亚平原至贝加尔湖一带均有异常的负中心,鄂霍次克海地区为正值区,北太平洋上维持负的高度异常(图5a)。在随后的夏季,地中海西侧出现了负的高度异常,欧洲北部的正异常向东移动且出现了闭合中心,贝加尔湖以西的负值区移到其东部,地中海附近的负中心移到里海以东,鄂霍次克海地区的正距平移动到西北太平洋上(图5b)。上述几个异常中心构成了一个明显的波列结构,尤其在夏季陆地上的中心都通过了0.05显著性水平的统

计检验。观测分析表明^[15],与春季欧亚大陆积雪异常对应的500 hPa高度异常也呈现波列结构。

需要强调的是,从图5(b)中可以看出,东亚中纬度地区是一个纬向负距平带,零等值线在35°N附近横跨我国,华北和东北附近地区为较强的负距平,南方为正距平。孙林海等^[18]的研究表明,20世纪90年代后期以来盛夏亚洲中纬度大陆高压的异常发展(对流层500 hPa高度异常偏高)是南涝北旱的一个重要原因。那么上述的高度场异常分布在欧亚大陆春季多雪时应该有利于我国北方降水偏多,南方降水偏少,少雪时情况相反。

春季和夏季500~1000 hPa厚度场的差值图(图略)与对应季节的高度场具有大致相同的分布特征。高度场和厚度场的这种异常分布完全可以由积雪异常引起的地面加热的异常得到解释。前面的分析表明,积雪异常对地表温度和对流层低层气温都产生了直接的冷却作用。那么异常冷却的区域,高度场降低,对流层低层的厚度减小;异常增暖的区域,高度场升高,对流层低层的厚度增加。这种温度场和厚度场的配置关系表明积雪异常对大气的冷却效应可以延续到对流层中层,引起大气环流的异常,进而对东亚气候产生显著影响。

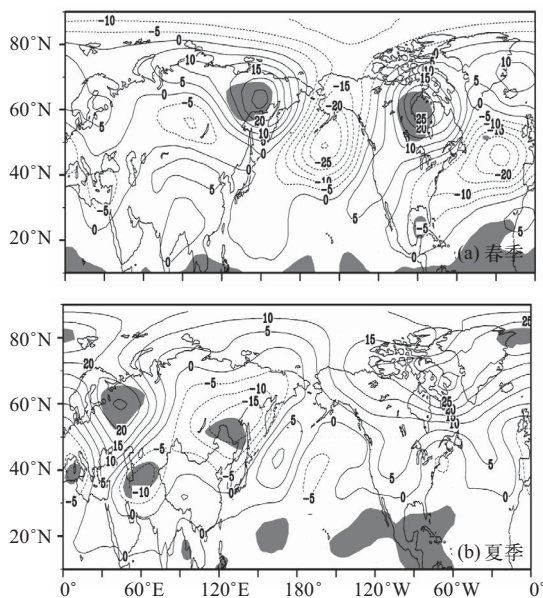


图5 EXPA1与EXPA2试验500 hPa高度(gpm)差值场(阴影为超过0.05显著性水平的区域)

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for 500 hPa height (gpm)

2.4 降水场的差异

图6给出了积雪异常引起的我国夏季降水异常分布。由图可见,华北北部有弱的降水负距平,我国西南、黄河中下游地区及东北降水明显增加,长江中下游地区和华南降水显著减少。整体呈南负北正的形势,说明当春季欧亚积雪偏多时,我国北方易出现多雨,南方降水偏少,反之也成立,这与Wu等^[15]的观测分析结果基本一致。

尽管与500 hPa高度异常的南北分界相比,图6表征的雨带异常的分界明显偏南,但我国夏季降水的异常分布与同期500 hPa高度异常有着非常好的对应关系,北方负的位势高度异常对应降水增多,南方位势高度正异常对应降水偏少。这在一定程度上反映了积雪异常引起500 hPa高度场的调整,从而影响冷暖空气的活动,造成降水的异常。考虑到降水是多种大气环流因子共同作用的产物,积雪

只是其中之一，雨带的位置模拟出现偏差是可以理解的。

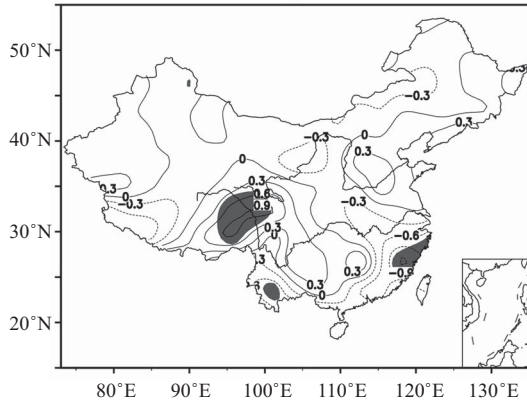


图6 EXPA1与EXPA2试验夏季降水率 (mm/d) 差值场 (阴影为超过0.05显著性水平的区域)

Fig. 6 Summer precipitation rate (mm/d) differences between EXPA1 runs and EXPA2 runs (Shaded areas are statistically significant at the 0.05 level)

3 结论

(1) 欧亚大陆积雪异常对大气环流有重要的反馈作用。春季反照率的作用是主要的；而在夏季，水文效应是主要的，积雪融化后进入土壤，土壤湿度的异常引起地表温度和对流层低层气温的异常分布。

(2) 在夏季，积雪异常能在500 hPa高度场欧亚范围内激发一个从欧洲西部到东亚的异常波列。积雪的反馈作用可以延续到对流层中层，引起大气环流的调整。

(3) 上述500 hPa的异常波列结构对我国夏季降水异常有重要影响。积雪偏多时，北方负的高度距平对应降水偏多，南方正的高度距平对应降水偏少。积雪偏少时情况相反。

参考文献

[1] Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. Model study of the short-term climatic and hydrologic effects of sudden snow cover removal [J]. *Mon Wea Rev*, 1983, 111 (5): 1013–1024

[2] Yasunari T, Kitoh A, Tokioka T. Local and remote responses to excessive snow cover mass over Eurasia appearing in the northern spring and summer climate—a study with the MRI-GCM [J]. *J Meteor Soc Japan*, 1991, 69: 473–487

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

[4] Meeh G A. Influence of land surface in the Asia summer monsoon: external conditions versus internal feedbacks [J]. *J Climate*, 1994, 7: 1033–1049

[5] Barnett T P, Dumnit L, Schlese U, *et al.* The effect of Eurasian snow cover on global climate [J]. *Science*, 1988, 239: 504–507

[6] Cohen J, Rind D. The effect of snow cover on the climate [J]. *J Climate*, 1991, 4: 689–706

[7] Vernekar A D, Zhou J, Shukla J. The effect of Eurasian snow cover on the Indian monsoon [J]. *J Climate*, 1995, 8: 248–266

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

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

[10] Zhao P, Zhou Z J, Liu J P. Variability of Tibetan spring snow and its associations with the Hemispheric extratropical circulation and East Asian monsoon rainfall: an observational investigation [J]. *J Climate*, 2007, 20: 3942–3955

[11] 卢成池, 罗勇. 青藏高原冬春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*, 1994, 5 (4): 385–393

[12] 董敏, 余建锐. 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*, 1997, 8 (增刊): 100–109

[13] 陈海山, 孙照渤, 朱伟军. 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*, 2003, 27 (5): 847–860

[14] Wu R, Kirtman B P. Observed relationship of spring and summer East Asian rainfall with winter and spring Eurasian snow [J]. *J Climate*, 2007, 20 (7): 1285–1304

[15] Wu B, Yang K, Zhang R. Eurasian snow cover variability and its association with summer rainfall in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26 (1): 1–14

[16] 魏东, 王亚非, 董敏. NCAR CAM3模式大气环流对日本东部附近海域海温异常的响应 [J]. *热带气象学报*, 2007, 23 (5): 435–443

[17] 濮冰, 闻新宇, 王绍武, 等. 中国气温变化的两个基本模态的诊断和模拟研究 [J]. *地球科学进展*, 2007, 22 (5): 456–467

[18] 孙林海, 陈兴芳. 南涝北旱的年代气候特点和形成条件 [J]. *应用气象学报*, 2003, 14 (6): 641–647

Numerical Simulation on Effect of Spring Eurasian Snow Cover on Summer Rainfall in China

Li Zhenkun^{1,2}, Wu Bingyi², Zhu Weijun¹

(1 Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The effects of spring Eurasian snow cover on Northern Hemispheric atmospheric circulation and summer rainfall in China have been explored using the latest version of general circulation model (GCM) CAM3.1 developed by NCAR. Model results show that snow anomaly in spring can cause the thickness anomaly in the troposphere and trigger a wave train of geopotential height anomalies from western Europe extending to East Asia at 500 hPa by changing the distribution of the soil moisture and temperature in succeeding summer. As a result, 500 hPa height anomalies with opposite sign are located in southern and northern China. Meanwhile, summer precipitation anomaly in southern China is out of phase with that in northern China. The results demonstrate that spring Eurasian snow cover anomaly acts as an important factor affecting the distribution of summer rainfall in China.

Key words: Eurasian snow cover; summer rainfall in China; numerical simulation; atmospheric circulation

消息

气候科学中的几个重要问题

2007年诺贝尔和平奖被授予政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 和美国前副总统戈尔。全球变暖已被公认为是危及人类生存的事实,然而,人类关于全球变暖的认识建立在过去百年全球升温率的基础上,而这一结果的不确定性超过了50%。因此,科学界需要进一步澄清,以便人们理解产生地球系统正反馈的一些主要机制。在科学家给出更可靠的预测之前,这些机制需要被更好地理解。

结合 G8 峰会,日本北海道大学 2008 年 6 月召开了学术研讨会,讨论了气候科学中 5 个重要问题的最新进展。随着气候变化对人类社会造成的严重影响不断被发现和确认,这 5 个问题显得至关重要。其中包括:1) 海平面上升的原因和幅度;2) 冰川及格陵兰和南极冰盖的退缩;3) 夏季北极海冰的消失;4) 陆地生态系统的碳吸收和碳排放;5) 影响碳排放的海洋生态系统变化。

会上得到的主要结论如下:

(1) 对于海平面上升,最重要的是 2000 m 以下的海水变暖,以及格陵兰和西南极冰盖的消融。IPCC 给出的 21 世纪末海平面上升 59 cm 的预估结果,现在看来只是下限。

(2) 需要更多的对海平面上升有重要贡献的冰盖消融

的信息,尤其是冰盖滑动的基本情况。

(3) 夏季北极海冰正在以比 IPCC 预估结果更快的速度消失,这可能主要是由太平洋和大西洋的暖海水流入造成的。

(4) 由于全球变暖和干旱,陆地生态系统可能会在本世纪从碳汇变成碳源。

(5) 热盐环流减弱和海水酸化可能使海洋从碳汇变成碳源。

尽管 IPCC 对过去和未来的全球变暖都给出了全面的评论,少数怀疑论者的坚持还是造成了普遍的混淆。在这种情况下,科学界应当谏言献策,科学家应尽量在采取激进行动的政策外提供更多的信息,而不是仅仅抱怨可怕的后果,但并不采取任何行动。

而且,科学家应当在其学术圈内达成共识,并向公众澄清气候变化的关键机制,不要为了避免错误警报而过于保守。这是个微妙的平衡问题,因为一旦科学家被认定为过度吹嘘其研究领域或研究计划时,公众可能会失去对他们的信任。

苗秋菊编译自《Eos》, 2009-01-03

王绍武校对