

# 青藏高原对全球大气温度和水汽分布的影响

姚杰 温琴 沈星辰 邵星 杨海军<sup>†</sup>

北京大学气候与海-气实验室, 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871;

<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: hjyang@pku.edu.cn

**摘要** 利用耦合的气候模式CESM, 定量研究青藏高原对全球大气温度和水汽分布的影响。通过对比采用真实地形的参考实验(Real)和去掉青藏高原的敏感性实验(NoTibet)发现, 去掉青藏高原会使北半球大气变冷、变干, 对南半球的影响不明显。北半球中高纬度从地表至平流层均有强烈降温, 地表的降温中心在北大西洋, 年平均降温幅度达5°C, 高空的降温中心在100 hPa的平流层, 年平均降温幅度达2°C。北大西洋和南亚地区湿度减少, 南大西洋和东非地区湿度增加。北半球变冷主要是海洋向北经向热量输送减少的结果, 一方面增强了北半球的经向温度梯度, 导致Hadley环流增强, 加强了中低纬度地区向北的大气热量输送, 部分补偿了海洋向北减少的热量输送, 维持了北半球中低纬度的能量平衡; 另一方面, 使得北半球中高纬度蒸发作用减弱, 大气中水汽含量减少, 北半球变得寒冷干燥。初步的研究表明, 青藏高原对北半球气候有重大影响, 影响范围可达北半球高纬度地区。

**关键词** 青藏高原; Hadley环流; 经向热量输送

**中图分类号** P461

## Impact of Tibetan Plateau on Global Atmospheric Temperature and Water Vapor Distribution

YAO Jie, WEN Qin, SHEN Xingchen, SHAO Xing, YANG Haijun<sup>†</sup>

Laboratory for Climate and Ocean-Atmosphere Studies, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; <sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: hjyang@pku.edu.cn

**Abstract** The impact of Tibetan Plateau on the global atmospheric temperature and water vapor distribution is studied using a fully coupled climate model CESM. Comparison of the sensitivity test without the Tibetan topography (NoTibet) and the reference experiment of realistic topography (Real) shows that the northern hemisphere becomes cold and dry in NoTibet, the southern hemisphere is much the same. Specifically, in the high latitudes of the northern hemisphere, there is a strong cooling from the surface to the stratosphere. The surface cooling centre is in the North Atlantic ocean where the mean annual temperature falls by 5°C. Another cooling centre is at the 100 hPa which falls by 2°C. The humidity decreases in the North Atlantic and South Asia, but increases in the South Atlantic and East Africa. Due to the reduction of ocean meridional heat transport, the meridional poleward temperature gradient strengthens, leading to the enhancement of the Hadley circulation. Then it enhances atmospheric meridional heat transport, partly compensates for the depressed northward ocean heat transport, and maintains energy balance in the mid-low latitudes of the northern hemisphere; on the other hand, the humidity reduces in the mid-high latitudes, the northern hemisphere becomes cold and dry. The study shows that Tibetan Plateau has a significant impact on the climate in the northern hemisphere, the sphere of influence can reach to the high latitude.

**Key words** Tibetan Plateau; Hadley circulation; meridional heat transport

国家自然科学基金(91737204, 41376007, 41725021)资助

收稿日期: 2017-12-14; 修回日期: 2018-02-14; 网络出版日期: 2018-09-12

作为世界上最高的高原,青藏高原平均海拔在4500 m以上。青藏高原以其巨大的热力及动力效应,对整个亚洲季风系统及全球大气环流产生重大影响。Hoskins等<sup>[1]</sup>和Held等<sup>[2]</sup>通过简单的大气斜压模型,发现青藏高原可以激发大气Rossby波,绕过极地地区,进而影响北大西洋地区。Wu等<sup>[3]</sup>通过对观测资料的详细分析,并利用耦合的气候模式进行大量的敏感性实验,证实夏季青藏高原的热力强迫是东亚季风产生及强度的决定性因素。周秀骥等<sup>[4]</sup>总结了关于青藏高原热力作用的气候特征及对北半球区域气候的研究成果,指出青藏高原热力作用不仅对亚洲季风和降水变率有重要影响,而且通过激发类似亚洲-太平洋涛动的大尺度遥相关,影响北美、欧洲以及南印度洋的大气环流和气候。Bothe等<sup>[5]</sup>、Sun等<sup>[6]</sup>以及Gao等<sup>[7]</sup>利用耦合模式结果和再分析资料,同样证实欧亚大陆-北大西洋之间存在遥相关的关系。过去的研究表明,青藏高原绝对不是仅仅影响亚洲的气候,还影响着整个北半球甚至全球的气候。最近,Fallah等<sup>[8]</sup>通过比较真实地形的控制实验以及去除青藏高原的敏感性实验发现,去除青藏高原会改变北大西洋的风生环流,减少向北的海表热量输送,导致北大西洋海表温度下降;同时会减弱索马里急流,导致南亚次大陆的水汽输送减少。2017年,Maffre等<sup>[9]</sup>利用耦合模式进行削减全球地形高度至200 m的平板实验,与真实世界相比,全球平板实验中地表温度升高0.6°C;亚洲夏季风的减弱会减少中国和东南亚地区的水汽输送。由此可见,地形强迫作用对温度和水汽的分布有很大的影响。

过去的研究更多地集中在青藏高原对亚洲季风区气候的影响方面,关于青藏高原对全球气候平均态的影响及程度,尚不清楚,需要更多的模式和敏感性实验去验证。本文利用目前广泛使用的耦合模式CESM,探讨青藏高原对全球大气温度和水汽的影响,定量地揭示青藏高原在全球气候系统中扮演的角色。与Fallah等<sup>[8]</sup>逐步降低青藏高原高度的实验设计不同,本文实验中直接一次性地将青藏高原移除掉。另外,经向热量输送对维持地球气候系统的热量平衡很重要,以往的研究认为,尽管存在很大的不确定性,经向热量输送的分布基本上是稳定的<sup>[10-13]</sup>,从而使得总的经向热量输送基本上不变。同样地,本文也探究在没有青藏高原的情况下,经向热量输送的分布情况及其各个分量的变化。

## 1 模式和实验设计

本研究使用的模式是美国国家大气研究中心开发的地球系统模式(Community Earth System Model, CESM1.0) (<http://journals.ametsoc.org/page/CCSM4/CESM1>),该模式已得到广泛的应用和验证。

为了定量地研究青藏高原对大气和海洋气候态的影响,设计一组对比实验(图1):参考实验(Real)和去除青藏高原的敏感性实验(NoTibet)。其中Real积分2000年达到平衡态, NoTibet从Real第2001年开始积分,400年达到平衡态。为方便比较,Real从2001年也积分400年。本文利用最后100年的年平均资料来表征大气和海洋的平均气候态。

本文所有的实验都在北京大学物理学院大气与海洋科学系的超级计算机上完成。

## 2 大气层顶能量平衡

将青藏高原移除后,主要影响北半球大气层顶的净辐射通量(图2)。南半球净的出射长波通量(net radiation flux of long wave,  $NET_{LW}$ )和净的人射短波通量(net radiation flux of short wave,  $NET_{SW}$ )变化量很小,总的净辐射通量(net radiation flux at the top of atmosphere,  $NET_{TOA}$ )几乎没有变化。北半球30°N附近变化最显著,  $NET_{SW}$ 增加0.12 PW (1 PW=10<sup>15</sup> W),  $NET_{LW}$ 也增加0.07 PW,导致 $NET_{TOA}$ 增加0.05 PW;在40°N以北的地区,地表温度降低(图3),  $NET_{LW}$ 减少,同时海冰和云的增加也导致 $NET_{SW}$ 减少(图略),  $NET_{SW}$ 的变化能够很好地被 $NET_{LW}$ 的变化补偿,  $NET_{TOA}$ 变化不显著。

$NET_{LW}$ 和 $NET_{SW}$ 在绝大多数纬度均呈现同向变化,变化幅度在4%以内。 $NET_{SW}$ 的减少(增加)可以被 $NET_{LW}$ 的减少(增加)补偿,使得 $NET_{TOA}$ 的变化幅度比 $NET_{SW}$ 和 $NET_{LW}$ 小,大气层顶能量达到准平衡态。

## 3 温度和水汽

与Real相比, NoTibet的北半球变得寒冷,南半球变化不明显。图3显示去除青藏高原之后,地表气温(surface air temperature, SAT)和海表水温(sea surface temperature, SST)的变化。SST和SAT在南半球几乎没有变化,在北半球差异明显。65°N左右, SST和SAT均降低近4°C。与以往的地形强迫实验<sup>[9,14-15]</sup>不同,去除青藏高原后全球平均SAT降低

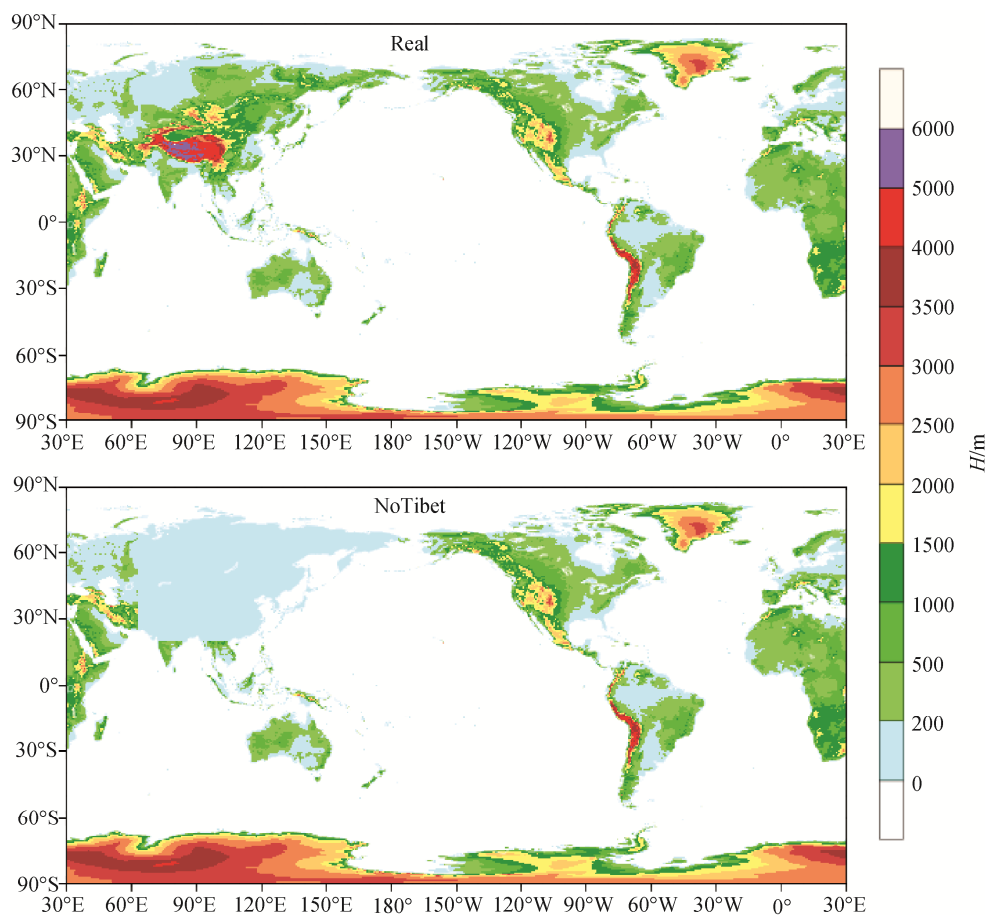


图 1 模式地形设置

Fig. 1 Topography configuration in coupled model experiments

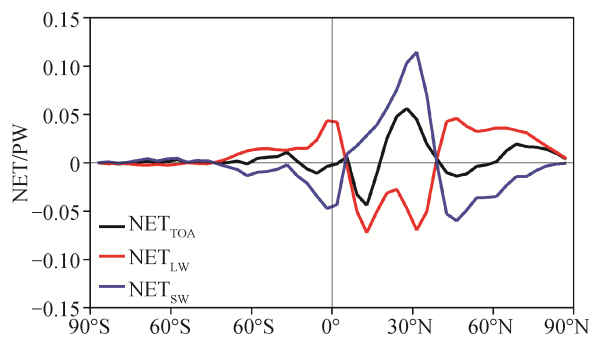
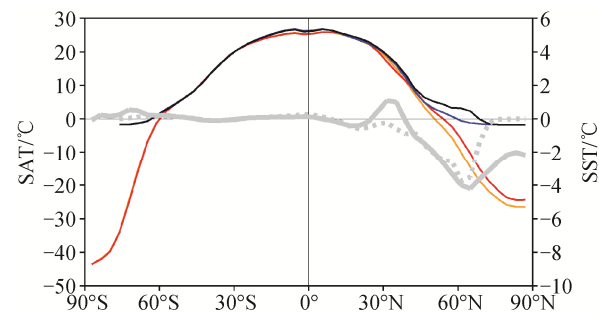


图 2 NoTibet 实验中纬向平均的大气层顶净辐射通量相对于参考实验 Real 的变化

Fig. 2 Changes in the zonal averaged radiation fluxes at the top of atmosphere (TOA) in NoTibet, relative to the control run (Real)

0.4℃。从垂直方向上看, 50°N以北的地区, 地面至平流层均有0.5℃以上不同幅度的降温(图4(b)), 降温幅度最大的区域出现在平流层100 hPa处, 年平均降温幅度达2℃。整层积分的温度变化如图4(a)中实

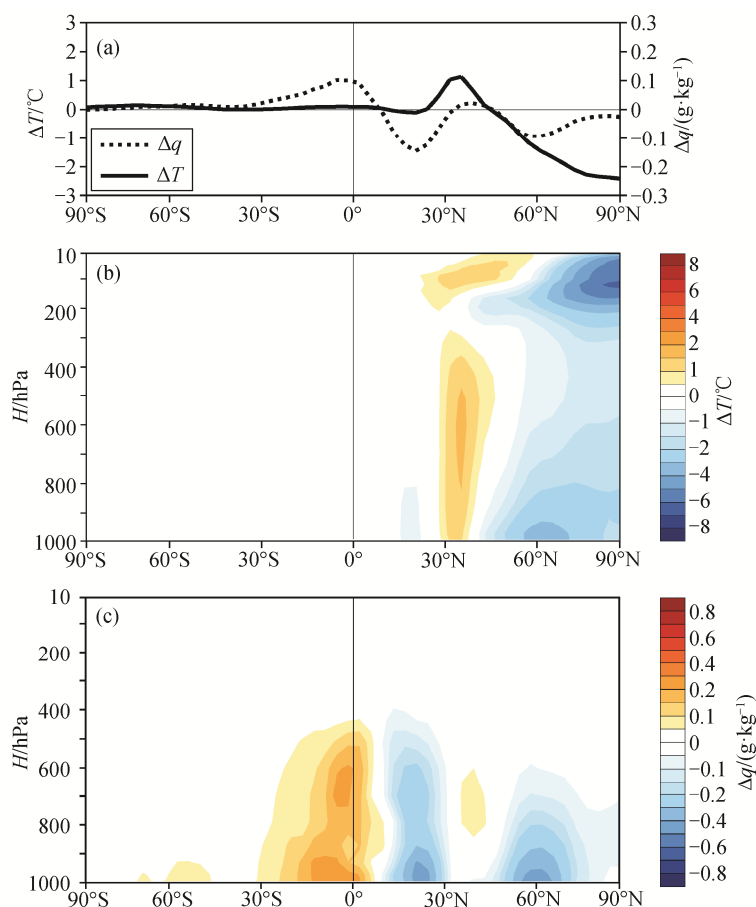


红线和橙线是Real和NoTibet的地表气温, 黑线和蓝线是Real和NoTibet的海面水温; 灰色实线和虚线分别表示相对参考实验Real, NoTibet实验中地表气温和海面水温的变化

图 3 纬向平均的地表气温(SAT)和海表水温(SST)及其在 Notibet 实验中的变化

Fig. 3 Zonal averaged SAT and SST and their changes in NoTibet

线所示, 温度变化集中在北半球中高纬度地区, 从40°N向极地, 大气温度逐渐降低, 在极地达到降温最大值2.4℃。



(a) 整层大气加权平均的温度变化( $\Delta T$ )和湿度变化( $\Delta q$ ); (b) 不同高度气温的变化; (c) 不同高度大气湿度的变化

图 4 NoTibet 实验中纬向平均的大气温度和湿度相对于 Real 实验的变化

Fig. 4 Zonal averaged changes in air temperature and humidity in NoTibet compared with Real

去除青藏高原, 不仅改变了温度, 还改变了水汽的分布, 北半球变得干燥, 南半球热带地区水汽增加。如图4(a)中虚线所示, 整层积分的水汽变化集中在5°S, 20°N和60°N附近, 变化幅度均超过0.1 g/kg。从垂直方向上看, 水汽变化主要发生在600 hPa以下, 热带地区水汽的变化可以达到更高的高度。上升支的南移是导致热带地区南、北半球水汽变化的主要原因, 南半球热带地区水汽增多, 北半球热带区域水汽减少。中高纬度地区水汽减少是温度降低、蒸发减弱所致(图4(c))。

从全球分布来看, 如图5(a)所示, SAT在南半球没有变化, 北半球的降温区域主要在北大西洋, 年平均降温幅度达5°C。水汽的变化集中在热带地区和北大西洋。去除青藏高原减弱了孟加拉湾向北的水汽输送, 印度和中国区域水汽均减少<sup>[8]</sup>, 东非地区的水汽增多。北大西洋海表降温显著, 导致蒸发

减弱, 减少了地表的水汽含量; 南大西洋热带地区受Hadley上升支南移影响, 大气中水汽增多。

综上所述, 去除青藏高原后, 北半球的变化比南半球显著。北半球地表湿度减少0.2 g/kg, 温度降低0.8°C, 变得干燥和寒冷。

## 4 大气经圈环流

大气经圈环流主要受纬度温度梯度影响<sup>[16-18]</sup>, 北半球高纬度地区温度降低, 增加了大气经向温度梯度, 加强了北半球Hadley环流(图6), 因此从低纬度向高纬度输送的热量增多, 增强了低纬度的大气经向热量输送(图7(b)中红线)。另外, 低纬度的水汽是由Hadley的下沉支来完成输送, Hadley环流加强会导致向低纬度输送更多的水汽(图7(d)中蓝线); 同时, Hadley环流上升支的南移<sup>[19]</sup>使得南半球热带区域更多的水汽辐合上升, 湿度增大(图4(c))。

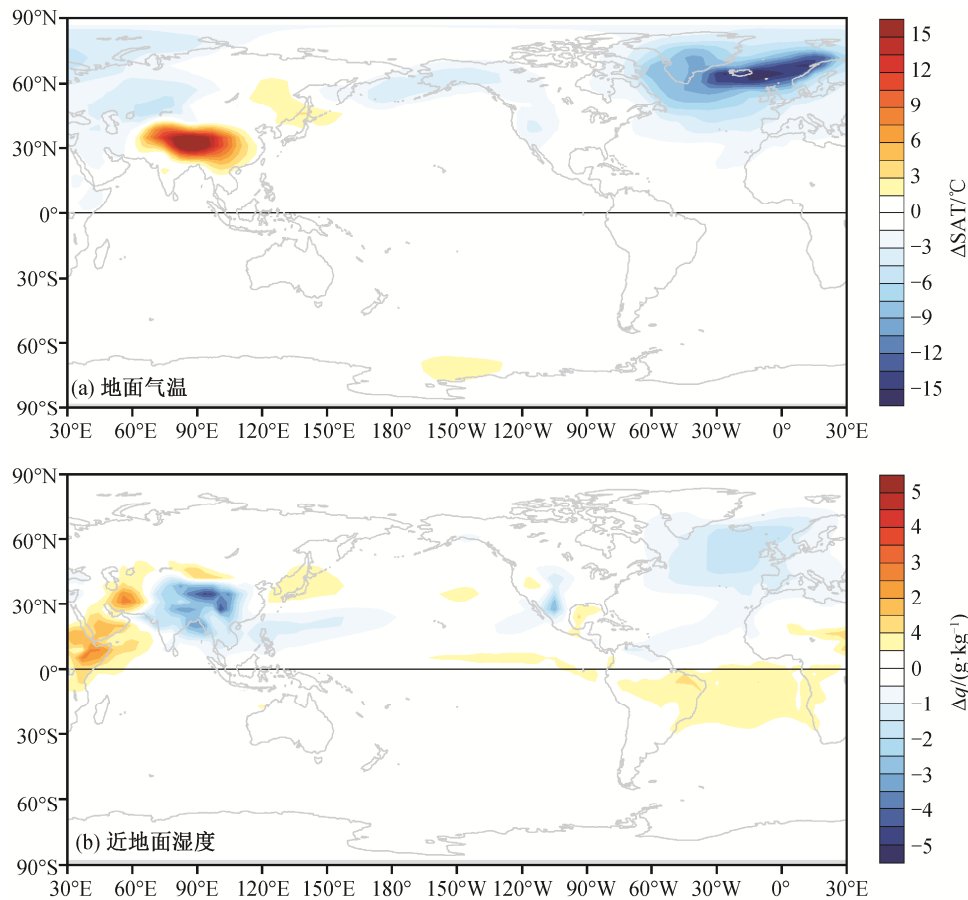
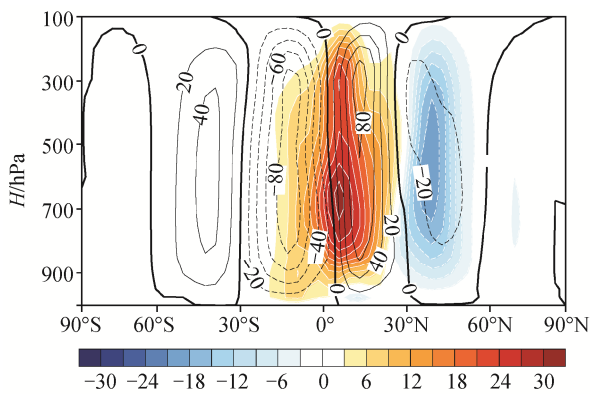


图5 NoTibet 实验中地面气温和近地面湿度的变化  
Fig. 5 Changes in SAT and near surface humidity in NoTibet



等值线表示Real实验中的年平均Hadley环流, 彩色阴影表示NoTibet实验中Hadley环流的变化(单位:  $10^9 \text{ kg/s}$ )

图6 大气 Hadley 环流及其在 NoTibet 实验中的变化  
Fig. 6 Atmosphere Hadley Cell and its changes in NoTibet

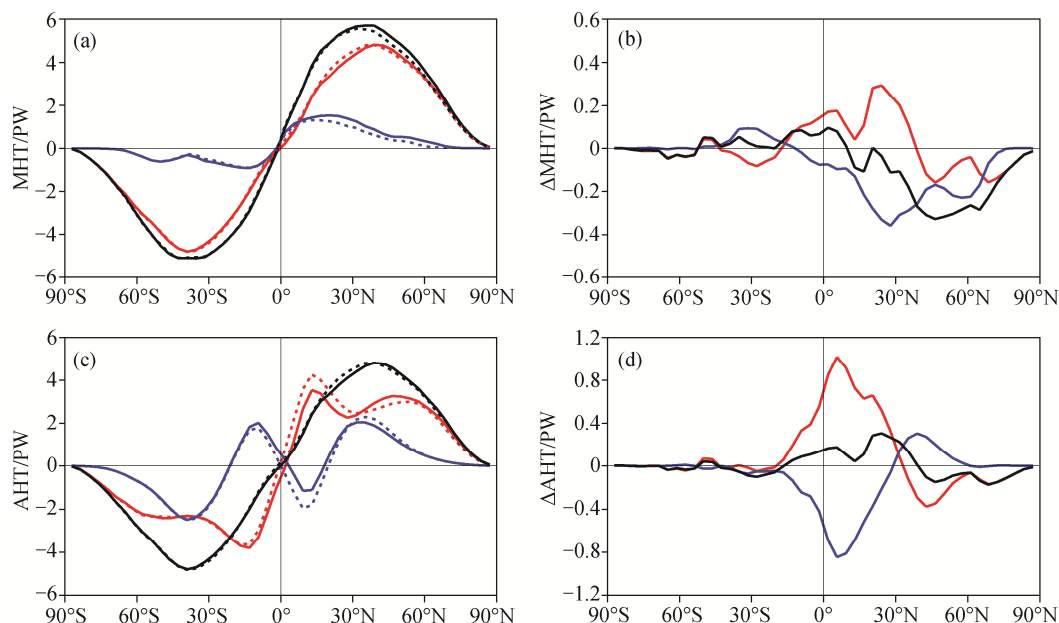
## 5 经向热量输送

经向热量输送(meridional heat transport, MHT)在地气系统能量平衡中扮演重要角色。与Real实验

相比, NoTibet总的经向热量输送(total heat transport, THT)及大气和海洋分量分布非常相似, MHT在 $35^\circ\text{N}$ 和 $35^\circ\text{S}$ 附近达到峰值(图7(a))。与海洋经向热量输送(ocean heat transport, OHT)相比, 大气经向热量输送(atmosphere heat transport, AHT)在绝大多数纬度占主导地位<sup>[12,20-23]</sup>。

从总体上看, 北半球MHT的变化比南半球更明显。图7(b)显示, OHT在北半球始终减弱, 在 $30^\circ\text{N}$ 减弱了0.4 PW左右, 这是导致北半球温度降低的主要原因。与OHT的变化不同, AHT在不同纬度的变化也不同。在中低纬度地区, Hadley环流的增强导致AHT增加, 部分补偿了OHT的减少, 维持了能量的平衡;  $40^\circ\text{N}$ 以北AHT减少, 与OHT共同作用, 导致高纬度地区获得的能量减少, 温度降低。

利用VT方法<sup>[20]</sup>, 可以将AHT分解为干静力能( $\text{AHT}_{\text{DSE}}$ )以及湿静力能( $\text{AHT}_{\text{LE}}$ )(图7(c))。在热带地区,  $\text{AHT}_{\text{LE}}$ 和 $\text{AHT}_{\text{DSE}}$ 反向变化,  $\text{AHT}_{\text{LE}}$ 部分抵消了 $\text{AHT}_{\text{DSE}}$ 向极地的能量输送; 在热带以外地区, 两者



(a) 年平均经向热量输送(MHT), 黑线、红线和蓝线分别表示总的输送(THT)、大气输送(AHT)和海洋输送(OHT), 实线和虚线分别代表Real实验和NoTibet实验; (b) NoTibet实验中经向热量输送的变化( $\Delta$ MHT), 黑线、红线和蓝线分别表示THT, AHT和OHT的变化; (c) 大气热量输送(AHT)及其分解, 黑线、红线和蓝线分别表示总大气热量输送、干空气热量输送和水汽热量输送, 实线和虚线分别代表Real实验和NoTibet实验; (d) 大气热量输送及其分量的变化( $\Delta$ AHT), 黑线、红线和蓝线分别表示总大气输送、干空气和水汽热量输送的变化

图7 大气-海洋经向热量输送及其在NoTibet实验中的变化  
Fig. 7 Meridional heat transport (MHT) and its changes in NoTibet

同向变化, 共同向极地输送热量。

去除青藏高原后,  $AHT_{LE}$ 和 $AHT_{DSE}$ 的变化集中在低纬度地区(图7(d))。Hadley环流增强有利于增加 $AHT_{DSE}$ 向极地的输送, 但同时向低纬度地区输送更多的水汽, 导致 $AHT_{LE}$ 向南输送也增多。 $AHT_{DSE}$ 在5°N增加1.0 PW,  $AHT_{LE}$ 补偿了0.8 PW的变化, 最终AHT只向北输送了0.2 PW的热量。在北半球中高纬度地区,  $AHT_{LE}$ 增加, 部分抵消了 $AHT_{DSE}$ 的减小, 导致AHT向极地的热量输送减少。

## 6 总结与讨论

本文利用耦合的气候模式CESM, 通过对比参考实验Real和敏感性实验NoTibet, 定量地描述了青藏高原对大气温度和水汽的影响, 得到如下结论。

1) 与Real实验相比, NoTibet实验中北半球变得寒冷干燥, 南半球基本上没有变化。去除青藏高原的热力和动力作用后, 在中低纬度地区, 季风系统减弱, 水汽输送和云量都减少; 在中高纬度地区, 云量和海冰均增加。这样的变化改变了行星的反照率, 从而改变大气层顶总的净辐射通量, 大气的平均气候态也随之发生变化。北半球高纬度地区海表水温 and 地表气温均明显下降; 北半球热带地区和北

大西洋水汽减少, 南半球热带地区水汽增多。

2) NoTibet实验中北支Hadley环流增强。北半球高纬度地区温度降低, 加强了高、低纬度之间的经向温度梯度, 高纬度地区需要从低纬地区获得更多的热量来补偿能量的损失, 从而维持地-气系统的平衡, 而这些能量的运输主要靠Hadley环流的增强来实现。

3) NoTibet实验中北大西洋降温明显。青藏高原不仅影响大气环流, 还影响海洋环流。与Real实验的真实世界相比, 去除青藏高原使得北半球向极地的海洋经向热量输送减弱, 低纬度地区向高纬度地区的热输送减弱, 致使北大西洋地区出现大幅度的降温。

虽然本文的实验设计和所用模式与Fallah等<sup>[8]</sup>的实验不同, 但结果相似。去除青藏高原后, 北大西洋经向热量输送减弱, 降温幅度为8~9°C, 南亚和中国区域水汽明显减少。在Maffre等<sup>[9]</sup>的平板实验中, 全球平均地表气温比真实世界升高0.6°C。与他们的研究结果不同, 本文NoTibet实验中全球平均地表气温反而比Real实验下降0.4°C。本文的实验中保留了落基山脉和冰盖等, 它们之间的相互作用最终可能导致全球地表温度不是升高, 反而下降。气



候系统中总的经向热量输送及其在大气与海洋之间的分配有很强的稳定性,这与前人实验结果<sup>[12,20-23]</sup>一致。但是,也有一些细微的差别。在NoTibet实验中,海洋经向热量输送在北半球明显减弱,在Fallah等<sup>[8]</sup>和Maffre等<sup>[8]</sup>的敏感性实验中,海洋经向热量输送同样减弱。为何地形强迫作用可以引起海洋经向热量输送的变化,从而影响北大西洋的海表水温?这是一个非常有趣的问题,后续工作中将着重探讨。

### 参考文献

- [1] Hoskins B J, Karoly D J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1981, 38 (6): 1179–1196
- [2] Held I M, Ting M. Orographic versus thermal forcing of stationary waves: the importance of the mean low-level wind. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1990, 47(4): 495–500
- [3] Wu G, Liu Y, He B, et al. Thermal controls on the Asian summer monsoon. *Sci Rep*, 2012, 2(5): doi: 10.1038/srep00404
- [4] 周秀骥, 赵平, 陈军明, 等. 青藏高原热力作用对北半球气候影响的研究. *中国科学: 地球科学*, 2009, 39(11): 1473–1486
- [5] Bothe O, Fraedrich K, Zhu X. Large-scale circulations and Tibetan Plateau summer drought and wetness in a high – resolution climate model. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(6): 832–846
- [6] Sun J, Wang H. Changes of the connection between the summer North Atlantic Oscillation and the East Asian summer rainfall. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117(D8): 393–407
- [7] Gao Y, Wang H, Li S. Influences of the Atlantic Ocean on the summer precipitation of the south-eastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, 118(9): 3534–3544
- [8] Fallah B, Cubasch U, Prömmel K, et al. A numerical model study on the behaviour of Asian summer monsoon and AMOC due to orographic forcing of Tibetan Plateau. *Climate Dynamics*, 2016, 47(5/6): 1485–1495
- [9] Maffre P, Ladant J B, Donnadiou Y, et al. The influence of orography on modern ocean circulation. *Climate Dynamics*, 2017, 50(3): 1–13
- [10] Bjerknes J. Atlantic air-sea interaction. *Advances in Geophysics*, 1964, 10: 1–82
- [11] Stone P H. Constraints on dynamical transport of energy on a spherical planet. *Dynamics of Atmospheres & Oceans*, 1978, 2(2): 123–139
- [12] Czaja A, Marshall J. The partitioning of poleward heat transport between the atmosphere and ocean. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2006, 63(5): 1498–1511
- [13] Enderton D, Marshall J. Explorations of atmosphere-ocean-ice climates on an aquaplanet and their meridional energy transports. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2009, 66(6): 1593–1611
- [14] Barron E J, Washington W M. The role of geographic variables in explaining paleoclimates: results from Cretaceous climate model sensitivity studies. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1984, 89(D1): 1267–1279
- [15] Kitoh A. Effects of large-scale mountains on surface climate: a coupled ocean-atmosphere general circulation model study. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2002, 80: 1165–1181
- [16] Yang H, Wen Q, Yao J. Bjerknes compensation in meridional heat transport under freshwater forcing and the role of climate feedback. *Journal of Climate*, 2017, 30: 5167–5185
- [17] Dai H, Yang H, Yin J. Roles of energy conservation and climate feedback in Bjerknes compensation: a coupled modeling study. *Climate Dynamics*, 2017, 49 (5/6): 1513–1529
- [18] Yang H, Dai H. Effect of wind forcing on the meridional heat transport in a coupled climate model: equilibrium response. *Climate Dynamics*, 2015, 45 (5/6): 1451–1470
- [19] Broccoli A J, Dahl K A, Stouffer R J. Response of the ITCZ to northern hemisphere cooling. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(1): L01702
- [20] Yang H, Li Q, Wang K, et al. Decomposing the meridional heat transport in the climate system. *Climate Dynamics*, 2015, 44(9/10): 2751–2768
- [21] Trenberth K E, Caron J M. Estimates of meridional atmosphere and ocean heat transports. *Journal of Climate*, 2000, 14(16): 3433–3443
- [22] Held I M. The partitioning of the poleward energy transport between the tropical ocean and atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, 58(8): 943–948
- [23] Wunsch C. The total meridional heat flux and its oceanic and atmospheric partition. *Journal of Climate*, 2005, 18(21): 4374–4380