

太阳常数变化对冬季全球辐射强迫及气候影响的数值模拟研究

曹美春 林朝晖 张贺

(中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029)

摘要: 利用中国科学院大气物理研究所第四代大气环流模式IAP AGCM4.0, 通过在模式中将太阳常数从 $1367\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 减少至 $1361\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 探讨了太阳总辐射减弱对冬季(12—2月)全球辐射强迫及气候模拟的影响。结果表明:(1)大气顶入射太阳辐射在全球范围内平均减少 $1.54\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 南半球中高纬地区显著减少 $2.15\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。北美、西西伯利亚、中东以及澳洲东部大气顶与地表的净短波辐射则出现增加, 这与上述地区总云量减少相对应;(2)地表温度在全球范围内平均降低约 0.05°C , 北美南部、南美南部、非洲东部与南部、澳洲西部以及亚欧大陆地表温度出现降低, 其中亚欧大陆降温幅度达到 2°C 以上, 北美北部、南美北部、非洲西部以及澳洲东部地表温度则为升高, 其中澳洲东部平均升温幅度约为 0.5°C ;(3)降水在全球范围内平均减少约 $0.003\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 其中澳洲大陆降水平均减少约 $0.6\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 与该地区地表蒸发减少、水汽源减少以及夏季风减弱有关。

关键词: 太阳活动, 辐射强迫, 地表温度, 降水, 大气环流模式

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.04.006

A Modeling Study of the Response of Radiative Forcing and Climate to Solar Constant Variation in Boreal Winter

Cao Meichun, Lin Zhaohui, Zhang He

(International Center for Climate and Environmental Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract: In this paper, the impact of total solar irradiance (i.e., solar constant) variation upon global radiative forcing and climate change in winter (December - February) is investigated by using a global atmospheric general circulation model (IAP AGCM4.0). Two sets of numerical experiments are designed, with one using the default solar constant ($1367\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) and the other adopting the latest value ($1361\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Comparisons of the model results from both experiments demonstrate that with the reduction of solar constant: (1) Incoming solar radiation decreases $1.54\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ globally and $2.15\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ over areas of the mid- and high-latitudes in the Southern Hemisphere. Corresponding to less total cloud cover, net solar radiation at the top of the atmosphere and the surface increases in regions such as North America, West Siberia, Middle East, and Eastern Australia; (2) Surface temperature decreases 0.05°C globally and more than 2°C over Eurasia, while it increases about 0.5°C over Eastern Australia. In other regions such as Southern North-America, Southern South-America, Eastern and Southern Africa, and Western Australia, surface temperature becomes colder. Over regions including Northern North-America, Northern South-America, and Western Africa, surface temperature becomes warmer. (3) Precipitation exhibits negligible variations when averaged globally, which only drops by $0.003\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$. Owing to the combined effects of decreased surface evapotranspiration, reduced surface humidity, and weakened Australian summer monsoon, precipitation over Eastern Australia is on average reduced by about $0.6\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$.

Keywords: solar variation, radiative forcing, surface temperature, precipitation, atmospheric general circulation model

1 引言

目前, 全球气候及环境急剧变化, 已经成为各国政治、经济、科学等领域广泛关注的重大问题。从归

因的角度而言, 气候变化受包括自然和人为外强迫以及地球气候系统内部变率的共同影响^[1]。太阳作为地球气候系统的最主要能量来源, 决定了地球的能量收支, 是引起地球气候变化的最重要天文因子之一。古气候学证据表明, 全新世北大西洋冷事件与太阳活动处于低谷具有很好的一致性^[2]; 北半球中纬度地区太阳辐射在距今6000年左右变率最大, 该特征与青藏高原东部地区中全新世季风气候转型相匹配^[3]。近百年

收稿日期: 2013年11月28日; 修回日期: 2014年3月31日
第一作者: 曹美春(1984—), E-mail: mcao@mail.iap.ac.cn
资助信息: 国家重大科学研究计划项目(2012CB957803);
中国科学院战略性先导科技专项项目II(XDA05110200);
国家自然科学基金项目(41305093)

气候研究表明, 1850—1980年全球平均海表温度异常与太阳活动的强度(11年滑动平均的黑子数)之间有显著的正相关, 且太阳活动的强度变化是超前于海表温度变化的^[4]; 对1959—2004年全球平均气温进行去趋势处理后, 其年际变化与太阳周期呈正相关关系, 且超过了98%信度水平^[5]。就太阳活动对中国区域气候的影响, 张先恭等^[6]早就指出, 太阳活动减弱则我国受旱地区增加, 并导致低温气候; Soon等^[7]用多种实测和再分析资料证实, 1880—2002年我国陆表气温变化与太阳辐射变化存在紧密联系; 基于对近百年中国夏季降水与太阳活动关系的分析, Zhao等^[8]指出太阳黑子周期位相在一定程度上决定了东亚夏季风爆发期季风区雨带纬度位置的年代际变化。

气候系统模式是开展气候变化机理研究的重要工具, 其发展始于1956年Phillips发展的准地转大气环流模式。气候系统模式的发展历程, 是从单独的大气模式、简单的海—气耦合模式, 到海—陆—气—冰多圈层耦合模式逐步完善起来的^[9]。近几年来, 随着人们对气候系统认识的深入, 气候系统模式逐渐走向地球系统模式, 除了更加细致地考虑地球表层各圈层之间的相互作用, 也进一步考虑固体地球和与太阳活动有关的空间天气过程^[10]。地球气候系统对太阳活动的响应是一个复杂的过程, 包括辐射过程、动力学过程以及微观物理过程等。现阶段, 利用气候系统模式模拟太阳活动对气候的影响仍存在不少困难, 其中之一便是对太阳总辐照度(即太阳常数)变化的精确测定。对太阳总辐照度(Total Solar Irradiance, TSI)的测定主要有两种方式: 一为地面观测, 另一为卫星测量。由于卫星能剔除大气对太阳光的吸收影响, 所以卫星测量相比地面观测更加准确。TSI的卫星观测始于1978年发射的NIMBUS-7卫星^[11], 其配备的HF空腔辐射计测得TSI值为1372~1375 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。随后, 各国相继发射多颗卫星对TSI进行连续监测。其中, 美国国家航空航天局于2003年发射的SORCE卫星上装载的太阳总辐照度监测仪(TIM), 被认为是目前最精确的TSI探测仪器。根据TIM的监测结果^[12], 在2008年太阳活动极小期里, TSI的最精确值应为 $1360.8\pm 0.5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 这明显低于目前气候系统模式普遍采用的经典值 $1365.4\pm 1.3\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。虽然与自1978年以来的卫星测量值相比, TIM给出的TSI值较低, 但这并不意味着太阳活动的减弱, 而是因为散射光导致上一代太阳辐射计测量值偏高, TIM的特殊设计则限制了漫射光进入仪器空腔, 因此TSI测量值偏低^[13]。

在气候系统模式中, TSI是地球能量平衡计算

的基准, 通常单独留在能量平衡方程的一边。如果考虑TSI测量的不准确性(从 $1365.4\pm 1.3\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 减少至 $1360.8\pm 0.5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), 模式中中原有的全球辐射平衡必然将遭到破坏, 进而导致模式模拟气候态的变化。本文利用中国科学院大气物理研究所发展的新一代大气环流模式IAP AGCM4.0^[14], 通过改变模式中太阳常数的取值, 考察: (1) 如果用现有的观测数值($1361\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)替代模式中的默认取值($1367\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), 究竟对模式模拟结果有怎样的影响? 模式的响应是否显著? (2) 如果模式的响应是显著的, 那具体的影响过程又是如何的? 本文的研究结果, 亦将是我们后续利用IAP AGCM4.0的气候系统模式, 模拟验证天文因子对近百年气候变化影响的一个基础。

2 模式和试验方案

2.1 IAP AGCM4.0 模式

本文采用的是中国科学院大气物理研究所近年发展的第四代大气环流模式IAP AGCM4.0。IAP AGCM4.0的物理过程基本采用美国国家大气研究中心(NCAR)大气环流模式CAM3.1的物理过程参数化包, 其中陆面模块采用CLM3, 积云对流参数化方案除了CAM3.1中的Zhang-McFarlane方案外, 还增添了修改的Zhang-McFarlane方案和Emanuel方案2个可选方案。在动力框架方面, IAP AGCM4.0沿用了前几代模式的一些方法和技术(如标准层结扣除、IAP变换、总有效能量守恒差格式等), 引入了许多新的特色(如时间分解算法、高纬灵活性跳点、可允许替代等), 更新了水汽平流过程的算法, 增加了对云水和云冰平流过程的计算^[15]。IAP AGCM4.0的水平分辨率为 $1.4^\circ\times 1.4^\circ$ (经圈上128个格点, 纬圈上256个格点), 垂直方向采用 σ 坐标共26层, 模式顶高度约为2.2hPa。对IAP AGCM4.0进行了17年的气候态积分试验, 表明该模式对全球基本气候态有较好的模拟能力, 其中对海平面气压场、纬向风场及温度场的模拟, IAP AGCM4.0要明显优于CAM3.1^[15]。另外, 利用观测资料对IAP AGCM4.0模拟的20世纪气候进行检验, 表明其对全球和东亚气候有较强的模拟能力, 能较好地再现地表气温的长期变化^[16], 同时对北半球冬季(12—2月)气候也具有较好的模拟能力^[17]。

2.2 试验方案

本文设计了两组试验来研究太阳活动变化对冬季(12—2月)辐射强迫及气候模拟的可能影响。两组试验的地球轨道参数均设为1950年时的值, 下边界

采用HadISST逐月海温及海冰分布，外强迫包括温室气体、气溶胶、臭氧、太阳常数等。两组试验所使用的太阳常数和温室气体等参数如表1所示：S1367为参照试验，太阳常数取 $1367\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ；S1361为敏感性试验，太阳常数取 $1361\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。两组试验积分步长均为10min，共积分31a（1978—2008年），这里重点分析后30a（1979—2008年）的结果。通过比较两组试验结果的差异，来探讨太阳常数变化对模式模拟结果的影响，后文给出的结果均为S1361试验与S1367试验冬季要素30年平均的差值场，其中冬季为前一年12月和当年1月与2月的平均。

3 模拟结果及分析

3.1 净短波辐射

由于太阳直射点的回归运动，冬季（12—2月）太阳直射南半球，南半球中低纬（ 10° — 60°S ）地区的入射太阳辐射最强，并沿纬圈向南北两极逐渐减弱。当把太阳常数从 $1367\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 减小至 $1361\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时，全球范围内大气顶入射太阳辐射沿纬圈均有不同程度的减弱，全球范围内平均减少 $1.54\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，其中北半球中高纬地区略有减弱，南半球中低纬（ 10° — 60°S ）地区则显著减弱了 $2.15\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ （图1a）。入射到大气顶的太阳辐射，一部分被反射回太空，另一部分则用于驱动地球气候系统。由于大气本身对太阳辐射的直接吸收较少，大部分被陆面、海洋、冰面所吸收，因而造成地球表面温度升高。不同于入射太阳辐射全球一致减少的特征，净短波辐射在不同区域有增有减。对大气顶净短波辐射，海洋上以减少为主，且南半球洋面的减少更明显；在陆地上，非洲大部 and 南美大部表现为减少，北美、西西伯利亚、中东以及澳洲东部则表现为增加，其中澳洲东部的大气顶净辐射增加尤为显著（图1b）。对地表净短波辐射，除了北美、西西伯利亚、中东以及澳洲东部所呈现的增加趋势变得更明显以外，其余地区的变化趋势与大气顶的情形非常一致（图1c）。

3.2 云辐射强迫

云及其对辐射的影响是决定气候敏感性的最大不确定性因素。云在大气系统的辐射收支中也有着十分重要的作用：一方面，云吸收和散射太阳短波辐射，对大气系统起降温作用（负的云短波辐射强迫）；另

一方面，云能有效吸收和反射地表及云下大气放射的长波辐射，起到加热地气系统的作用（正的云长波辐射强迫），因此云净辐射强迫在气候变化中起着关键作用。图2给出了总云量、大气顶云净辐射强迫及地表云净辐射强迫对太阳常数变化的响应。由图2a可见，总云量也并非纬向一致减少，其中洋面上的总云量变化要弱于陆面。陆地上的总云量以减少为主，减少较显著的地区主要有西西伯利亚、中东以及澳洲东部等，其减幅基本都超过了5%。这些地区的总云量减少与大气顶及地表净短波辐射增加是相互对应的，由于总云量减少使得云反照率降低，进而行星反照率降低、大气顶净短波辐射增加；另一方面，地表吸收

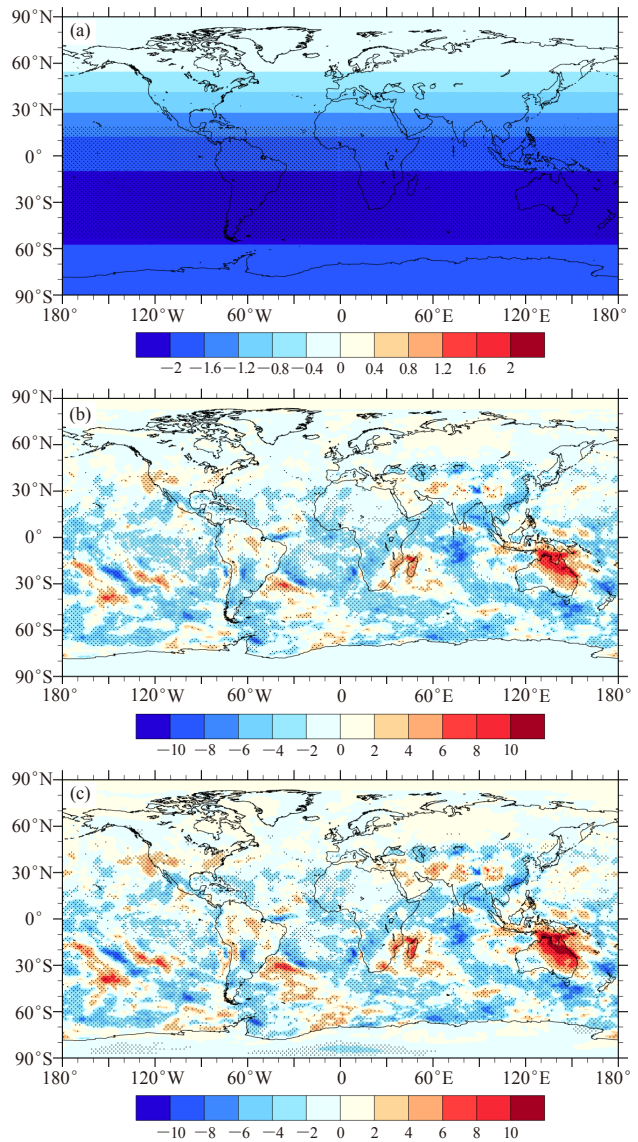


图1 S1361试验与S1367试验冬季入射太阳辐射（ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ）（a）、大气顶净短波辐射（ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ）（b）及地表净短波辐射（ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ）（c）的差值分布。点阴影区为通过95%显著性检验的区域

表1 模拟试验所使用的太阳常数及温室气体浓度

试验名称	太阳常数	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
S1367	$1367\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	355ppm	270ppb	760ppb
S1361	$1361\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	355ppm	270ppb	760ppb

注：ppb = 10^{-9} ；ppm = 10^{-6}

太阳辐射的多寡也受云量变化的调控，总云量减少使得云吸收和发射的太阳辐射减少，从而有利于地表净短波辐射出现增加。就云对辐射收支的影响，从图2b中看到，大气顶云净辐射强迫在西西伯利亚和中国东部略有减少（减幅小于 $2\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ）；在南美北部、西亚以及澳洲东部，大气顶云净辐射强迫则有所增加，其中澳洲东部的增幅超过了 $5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。地表的的情况比较类似，但与大气顶不同的是，在冬半球的中纬度地区（如我国东北地区），由于太阳入射辐射减少，地表云长波辐射强迫较大，即正的云长波辐射强迫作用大于负的云短波辐射强迫作用，地表云净辐射强迫呈现略微的增加（图2c）。

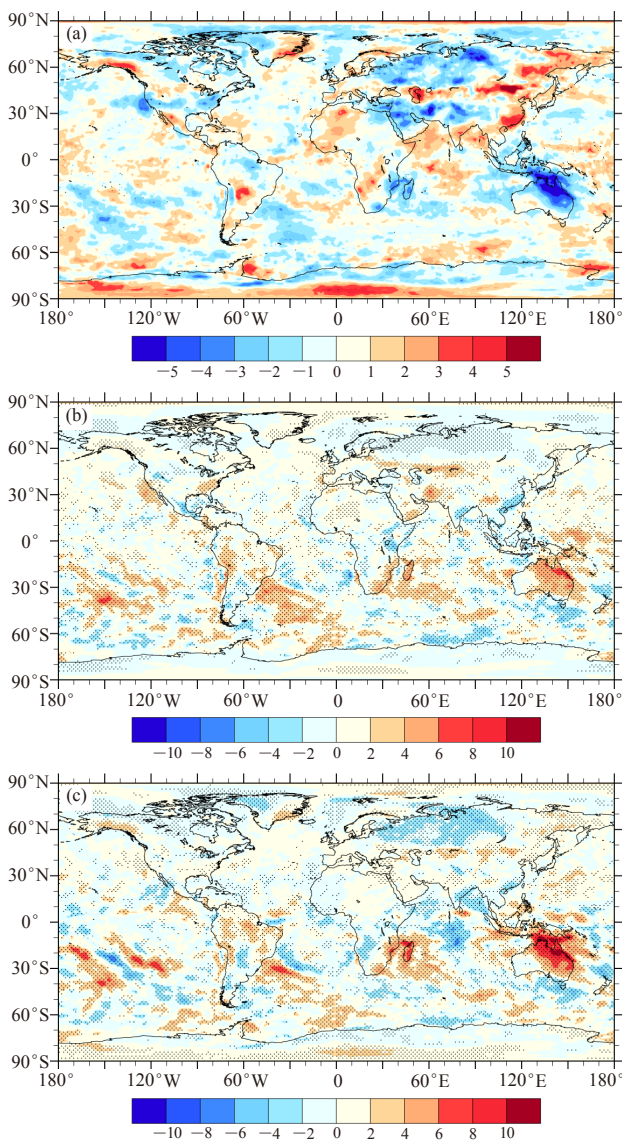


图2 S1361试验与S1367试验冬季云量 (%) (a)、大气顶云净辐射强迫 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) (b) 及地表云净辐射强迫 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) (c) 的差值分布。点阴影区为通过95%显著性检验的区域

3.3 地表温度

全球或区域平均地表气温是描述气候系统状态的最常用变量之一。太阳常数减小后，由于云对地气系统加热或冷却作用的变化，一个直接的后果是导致地表及大气热状况的调整。图3所示为S1361试验与S1367试验模拟的地表温度之差值分布，由于两组试验均使用HadISST逐月海温及海冰强迫，所以不存在海表温度的差异，这里仅就陆地上的情况进行分析。整体而言，太阳常数从 $1367\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 减小至 $1361\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 后，地表温度变化全球范围内平均约降低了 0.05°C 。但分区域来看，地表温度在不同区域有增有减，亚欧大陆地表温度几乎都为降低，以西西伯利亚至东欧一带降温尤为显著，最大降温幅度达到 2°C 以上。同样地，北美南部、南美南部、非洲东部与南部以及澳洲西部的地表温度也都出现了一定程度的下降。另一方面，当太阳常数减小后，北美北部、南美北部、非洲西部以及澳洲东部的地表温度则有所升高，其中澳洲东部升温较为显著，平均升温幅度约为 0.5°C 。另外结合图2可见，亚欧大陆北部地表温度降低与大气顶及地表云净辐射强迫减少相一致，而澳洲东部地表温度升高也与大气顶及地表云净辐射强迫增加是一致的。

地面温度变化后，也引起地表感热与地表潜热通量发生相应变化。从S1367试验的模拟结果（图略）可知，冬季（12—2月）北半球高纬陆地感热通量虽然量值不大，但符号为负，这说明地表为冷源，从大气获得能量；其他陆地感热通量则多为正值，表明地面向大气输送热量，其中以澳洲大陆的感热通量最大。从图4可看到，当太阳常数减小后，对应于地表温度的显著升高，澳洲东部地表感热通量显著增加，相应的地表潜热通量也明显减少。在亚欧大陆北部，一方面冬季地表为冷源，地表温度降低后，地—气温差负值增强；另一方面，近地面风速减弱（这可能与北极涛动减弱有关），增加

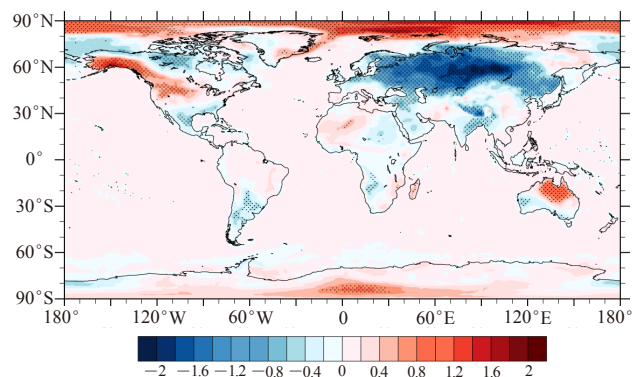


图3 S1361试验与S1367试验冬季地表温度 ($^\circ\text{C}$) 的差值分布。点阴影区为通过95%显著性检验的区域

了传热阻力。后者在较大程度上抵消了前者，减缓了控制试验（即S1367试验）中感热通量负值的增加，使得地表感热通量差异（S1361-S1367）在亚欧大陆北部呈现正值。相应地，地表潜热通量差异（S1361-S1367）则呈现负值。

3.4 降水

降水变化涉及全球水循环过程，由于直接影响降水的因子通常是一些大尺度环流系统，例如季风，因而研究降水变化对于揭示太阳影响气候的物理机制是有利的。虽然S1361试验模拟的冬季（12—2月）全球平均降水总体较S1367试验仅存在 $0.003\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 的微弱减少趋势，但从图5中不难看见，两组试验模拟的降水差异分布有着显著的空间不均匀性。在洋面上，太阳常数减小后，低纬地区的变幅相对高纬地区更大。不同于其他洋面降水出现减少或者变化不明显的特征，北印度洋与赤道中西太平洋地区降水呈现显著增多趋势。相较于海洋，陆地上降水的局地变幅则弱不少，除了南非、蒙古、加拿大等地区降水略有增加以外，许多地区（如亚欧大陆北部、西亚、澳洲大陆、南美北部等）的降水均有所减少，其中以澳洲大陆降水减少较为显著，平均减少了约 $0.6\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

大量研究结果已经表明，降水的多寡在相当程度

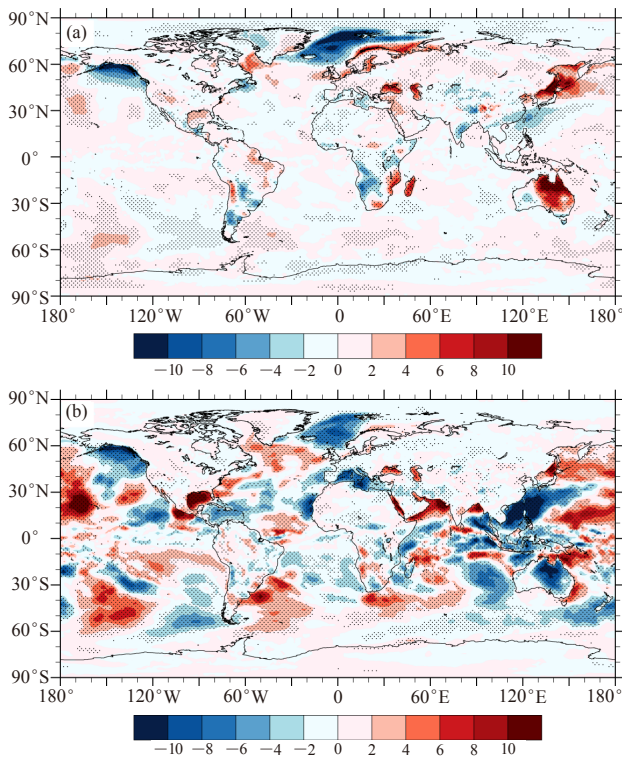


图4 S1361试验与S1367试验冬季地表感热通量 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) (a) 和地表潜热通量 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) (b) 的差值分布。点阴影区为通过95%显著性检验的区域

上与大气环流形势及其配置有关。鉴于澳洲大陆降水变化显著，我们以亚澳季风区为例展开进一步分析。从大的空间尺度而言，当亚洲地区盛行夏季风时，澳洲北部盛行冬季风，而亚洲地区盛行冬季风时，澳洲北部盛行夏季风。从S1367试验的模拟结果（图略）可知，南半球夏季（12—2月），印度尼西亚和澳洲北部低层流场盛行西风气流，东亚冬季风从南海和西太平洋地区携带大量水汽越赤道后转向，在澳大利亚与印度尼西亚之间汇合成水汽辐合带，直接导致北澳夏季风降水。由图6a可见，太阳常数减小后，澳洲大陆水汽源明显减少，与前述分析的地表潜热通量（蒸散发）减少、海—陆水分循环减弱相对应。另一方面，太阳常数减小后，印尼大陆地表温度降低，使得海陆热力对比减弱，印尼—北澳地区海域出现东风气流异常，意味着北澳夏季风的减弱（图6b）。同时结合图3看到，随着太阳辐射的减弱，澳洲大陆西部地表温度急剧降低，造成海陆热力对比减弱，进而从陆地吹向西侧洋面的偏东风减弱。加之南印度洋上空的马斯克林高压减弱，脊前东南气流减弱，使得澳洲大陆西侧出现西北气流异常，最终导致在澳洲大陆西北部形成一个反气旋式环流偏差，低层对流上升运动减弱。正是在低层水汽源减少与低层异常反气旋环流的共同作用下，澳洲大陆降水呈现出了较为显著的减少趋势。

4 结论

本文利用大气环流模式IAP AGCM4.0，开展了太阳常数变化的敏感性试验，通过用TIM（目前被认为是最精确的太阳常数探测仪器）的测量值（约 $1361\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ）替代模式中太阳常数的默认取值（ $1367\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ），探讨了太阳活动变化所引起的冬季（12—2月）辐射强迫变化及其对气候模拟的影响和可能机制。结果表明，当太阳常数从 $1367\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 减小至 $1361\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 后：

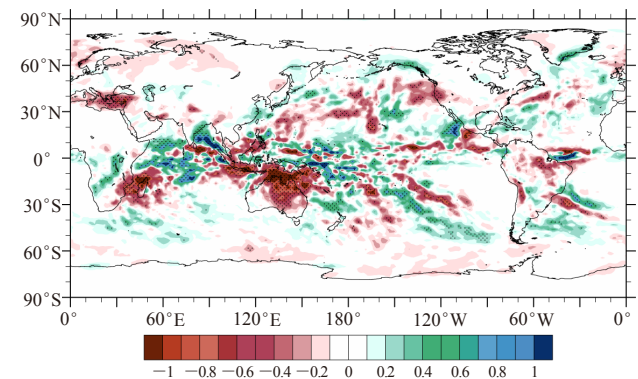


图5 S1361试验与S1367试验冬季降水 ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) 的差值分布。点阴影区为通过95%显著性检验的区域

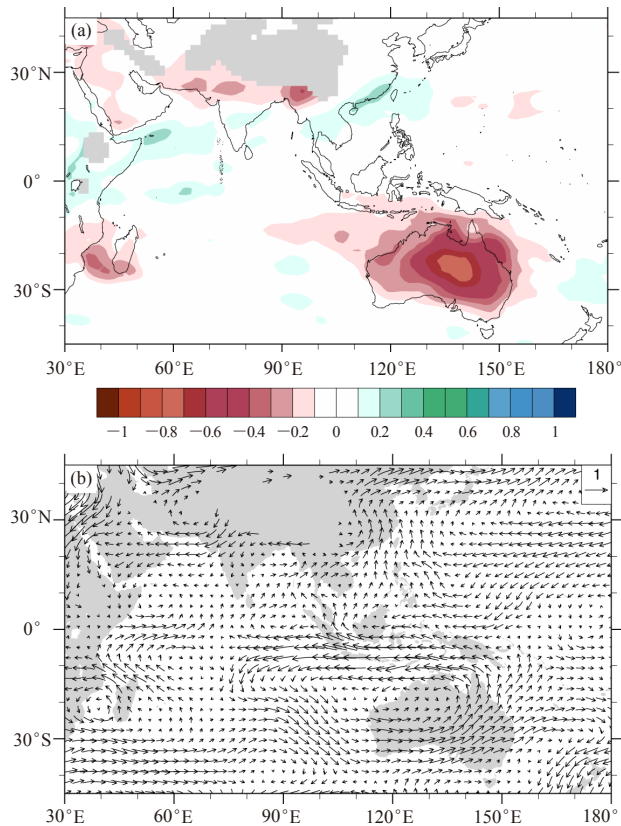


图6 S1361试验与S1367试验冬季亚澳季风区 (a) 850hPa水汽场 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 (b) 850hPa风场 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 的差值分布

(1) 大气顶入射太阳辐射在全球范围内均为减少, 全球平均减少 $1.54\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 其中南半球中高纬地区显著减少 $2.15\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。由于云与辐射的相互作用, 大气顶与地表的净短波辐射在不同区域有增有减, 海洋上主要为减少, 陆地上北美、西西伯利亚、中东以及澳洲东部则出现增加, 与这些地区云量减少相一致。对应于云量的变化, 大气顶与地表的云净辐射强迫在西西伯利亚和中国东部略有减少, 在南美北部、西亚以及澳洲东部则有所增加;

(2) 地表温度在全球范围内平均降低约 0.05°C , 其中北美南部、南美南部、非洲东部与南部、澳洲西部以及亚欧大陆地表温度均为降低, 其中亚欧大陆降温较为显著, 最大降温幅度可达 2°C 以上。在北美北部、南美北部、非洲西部以及澳洲东部, 地表温度则有所升高, 以澳洲东部升温较为显著, 平均升温幅度约为 0.5°C ;

(3) 降水在全球范围内平均减少约 $0.003\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 陆地上以澳洲大陆减少较为显著, 平均减少约 $0.6\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。一方面, 澳洲大陆地表潜热通量(蒸散发)减少,

海—陆水分循环减弱, 从而水汽源减少; 另一方面, 北澳夏季风减弱, 澳洲大陆西北部低层流场形成一个反气旋式环流偏差, 导致对流上升运动减弱。这些因素综合起来, 使得澳洲大陆降水出现减少。

太阳总辐照度是影响气候变化的一个重要驱动力, 不正确的太阳总辐照度输入必然会影响到气候模拟与预测的准确性, 所以分析气候系统对太阳总辐照度变化的敏感性是有必要的。但就本文而言, 其模拟结果主要基于一个气候系统模式得到的, 因此下一步我们将用其他的气候系统模式来进行类似的试验予以考察, 从而更好地揭示太阳总辐照度变化对全球气候变化的影响程度。

参考文献

- [1] Tett S F B, Stott P A, Allen M A, et al. Causes of twentieth century temperature change near the Earth's surface. *Nature*, 1999, 399: 569-572.
- [2] Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on north Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 2001, 294: 2130-2136.
- [3] Yu X, Zhou W, Liu Z, et al. Different patterns of changes in the Asian summer and winter monsoons on the eastern Tibetan Plateau during the Holocene. *The Holocene*, 2011, 21: 1031-1036.
- [4] Reid G C. Solar total irradiance variations and the global sea surface temperature record. *J Geophys Res*, 1991, 96: 2835-2844.
- [5] Tung K K, Camp C D. Solar cycle warming at the Earth's surface in NCEP and ERA-40 data: A linear discriminant analysis. *J Geophys Res*, 2008, 113: D05114.
- [6] 张先恭, 徐瑞珍. 我国大范围旱涝与太阳活动关系的初步分析及未来旱涝趋势, 气候变迁和超长期预报文集. 北京: 科学出版社, 1977.
- [7] Soon W, Dutta K, Legates D R, Velasco V, Zhang W. Variation in surface air temperature of China during the 20th century. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, 73: 2331-2344.
- [8] Zhao L, Wang J S, Zhao H J. Signature of the solar cycle on decadal variability in monsoon precipitation over China. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2012, 90: 1-9.
- [9] IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2001.
- [10] 王斌, 周天军, 俞永强, 等. 地球系统模式发展展望. *气象学报*, 2008, 66: 857-869.
- [11] Hoyt D V, Kyle H L, Hickey J R, et al. The Nimbus-7 solar total irradiance: A new algorithm for its derivation. *Geophys Res*, 1992, 97: 51-63.
- [12] Kopp G, Lean J L. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L01706.
- [13] Frohlich C. Total solar irradiance observations. *Surv Geophys*, 2012, 33: 453-473.
- [14] 张贺, 林朝晖, 曾庆存. IAP AGCM-4 动力框架的积分方案及模式检验. *大气科学*, 2009, 33: 1267-1285.
- [15] Zhang H, Zhang M, Zeng Q. Sensitivity of simulated climate to two atmospheric models: Interpretation of differences between dry models and moist models. *Mon Wea Rev*, 2013, 141: 1558-1576.
- [16] 张贺, 林朝晖, 曾庆存. 大气环流模式中动力框架与物理过程的相互响应. *气候与环境研究*, 2011, 16: 15-30.
- [17] Dong X, Xue F, Zhang H, et al. Evaluation of surface air temperature change over the globe and China during the twentieth century in IAP AGCM4.0. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 2012, 5: 435-438.