

曾红玲, 季劲钧, 吴国雄. 2010. 全球植被分布对气候影响的数值试验 [J]. 大气科学, 34 (1): 1-11. Zeng Hongling, Ji Jinjun, Wu Guoxiong. 2010. Numerical experiment of the influence of global vegetation distribution on climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 1-11.

全球植被分布对气候影响的数值试验

曾红玲^{1, 3} 季劲钧² 吴国雄^{3*}

1 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029

3 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘要 利用一个新的陆-气双向耦合模式 R42_AVIM, 通过有无植被覆盖的对比试验分析, 探讨了全球植被分布对气候和大气环流产生的潜在影响。得出: 陆面植被覆盖使得地表特征参数发生行星尺度的明显改变, 在叶面积指数大的热带和中高纬度森林带尤其显著。在现实植被分布下, 陆地表面反照率减小, 地表净辐射收支和地表潜热通量增加, 而地表感热通量减小。植被叶面积指数比较大的区域地表温度降低, 并且这种温度的改变一直延伸到对流层中上层, 在热带表现为斜压结构, 而在中高纬表现为相当正压结构。植被的存在使热带和中高纬度森林带的蒸发和相应的高层凝结潜热加热增强, 从而增强了经圈环流的上升支, 使得冬季在热带和南半球中纬度降水增多, 夏季在热带和北半球中高纬地区降水明显增多; 而经圈环流下沉支的增强致使副热带降水减少且更干旱。同时, 植被的存在使大陆潜热释放增强, 气温下降, 减小了海陆温度对比, 亚洲夏季风也有所减弱。

关键词 陆-气双向耦合模式 R42_AVIM 植被分布 气候 大气环流

文章编号 1006-9895 (2010) 01-0001-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

Numerical Experiment of the Influence of Global Vegetation Distribution on Climate

ZENG Hongling^{1, 3}, JI Jinjun², and WU Guoxiong^{3*}

1 *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

2 *Regional Center for Temperate East Asia and Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

3 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract The authors adopt a new two-way land-atmosphere coupled model R42_AVIM. By contrast of experiments with and without vegetation cover, the possible impact of global vegetation distribution on climate and atmosphere circulation is discussed. The results show that the actual vegetation coverage on land can alter the surface characteristic parameters obviously on planetary scale, especially for tropical rainforest and boreal forest. Under the distribution of actual vegetation, the surface net radiation and the latent heat flux will increase, while the surface sensible

收稿日期 2008-09-17, 2009-06-29 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403607, 中国科学院重要方向项目 KZCX2-YW-Q11-01, 国家自然科学基金资助项目 40875034、40821092、40730106

作者简介 曾红玲, 女, 1977 年出生, 博士, 高工, 主要从事陆面过程及陆气相互作用的数值模拟研究。E-mail: zenghl@cma.gov.cn

* 通讯作者 E-mail: gxwu@lasg.iap.ac.cn

heat flux will decrease. In the areas where the leaf area index (LAI) is relatively large, the surface temperature will decrease. Moreover, this effect can also extend to the middle and upper troposphere. In addition, the present vegetation distribution enhances the evaporation as well as the corresponding condensation latent heating in the tropics and mid-high latitudes, which makes the meridional circulation stronger. And then, the precipitation increases in the tropics and mid-high latitudes, while decreases in the subtropics. Meanwhile, vegetation can also reduce the sea-land temperature contrast and weaken the Asian summer monsoon.

Key words two-way land-atmosphere interaction model R42_AVIM, vegetation distribution, climate, atmosphere circulation

1 引言

森林砍伐、城市化、将林地草原变成耕地等人类活动已明显改变了地表覆盖,这种地表覆盖的改变和由此产生的影响是全球性的,并且日益加剧。与此同时,近 20 多年的卫星遥感观测资料显示北半球中高纬度植被出现“绿化”现象,这表明行星尺度的植被生产力(生活力)在增强。对于这些事实,我们自然会提出,全球范围的地表覆盖变化是否会对全球气候产生影响?影响的程度又有多大?

太阳辐射照射到旋转的、有海陆分布的地球表面形成了地球上的气候,在对流层存在以东、西风带和三圈经向环流为特征的基本流型,加之海陆分布的差异,造成陆地表面存在不同冷暖和干湿的气候状态,也就形成了与之对应的各种陆地生态系统。在热而多雨的赤道地区分布有热带雨林,中高纬广泛分布相对冷湿气候下的森林区,干热的副热带是荒漠和稀疏的丛林,而在森林和荒漠之间形成了草原。另一方面,植被的覆盖又改变了地表的特征,如反照率、动力粗糙度和气孔导度等,这样又改变了地表的能量收支、感热、潜热的分配以及水分平衡,反过来又会对气候产生影响。一般来说,植被覆盖对气候的影响不会改变全球基本的环流型,但是会在一定程度调节气候,那么植被覆盖在多大程度上改变了地球上的气候,在哪些地区、对哪些气候带的影响较大?这是我们要加以考虑的。

研究表明,植被覆盖与局地气候特征关系密切。周广胜和张新时(1996)根据对热量平衡方程和水量平衡方程的探讨,指出植被的存在将使一地的径流量减少,增加了保水能力。范广洲等(1998)、吕世华和陈玉春(1999)、郭建侠等(2005)利用数值模式研究发现,局地植被覆盖的变化对降水量及其分布、平均地表温度、环流场、土壤湿度和径流量等都会产生明显影响。而周定文

等(2009)利用长期的归一化植被指数(NDVI)资料,得出我国春季降水与青藏高原冬季 NDVI 有较明显的相关关系。至于更大尺度的植被变化对气候造成的重大影响,很多学者也做过这方面的工作,研究主要集中在几个热点区域,如 Sahel 地区沙漠化的气候效应和亚马孙流域热带雨林砍伐的气候效应等(Charney, 1975; Henderson-Sellers and Gornitz, 1984; Laval and Picon, 1986; Dickinson and Henderson-Sellers, 1988; Sud and Molod, 1988; Lean and Warrilow, 1989; Salati and Nobre, 1991; Xue and Shukla, 1993; Dirmeyer and Shukla, 1996; Zeng, 1996; Zheng and Eltahir, 1997, 1998; Zeng et al., 1999; Clark et al., 2001)。Xue and Shukla (1993) 的数值模拟结果表明,将 Sahel 地区的半沙漠改变为沙漠后,该地区的湿度辐合和降水均减少,而在其南部却有所增加。这与观测到的非洲最大降水向南偏移的干旱类型非常接近。Zeng et al. (1999) 研究发现,植被的反馈可以使得 Sahel 地区气候年代际变率加强。关于热带森林砍伐对气候的影响,相关的数值模拟工作很多,而且由于所用的模式不同结果也存在较大差异,但他们的基本结论却是一致的:热带森林面积减少会造成砍伐区降水减少、温度升高、蒸腾减少及局地水循环减弱。Pielke et al. (1998) 对观测和模式的研究成果做了总结,得出无论是通过短期的生物物理过程作用,还是通过长期的生物地球化学过程作用,陆地生态系统对天气和气候都有很明显的影 响。在过去和将来的气候变化研究中,陆地生态系统作为地球气候系统的一个很有影响力的组成部分,它的变化是非常重要的。

总结以往的研究工作,对于地表特征参数敏感性研究方面,从生物学角度上,这些参数仅仅代表了植被的不同方面,它们并不是独立的,而是相互影响、相互依赖的,某些参数的改变势必会对其它

参数造成影响。至于植被覆盖变化对气候影响的模拟研究，又往往把问题集中在一个特定的区域上，很少有研究涉及到全球陆地植被分布对全球气候和大气环流的影响。Chase et al. (1996) 研究了模式对全球叶面积指数 (LAI) 变化的敏感性，结果发现相对于潜在的植被分布，在热带和南亚季风区，现实植被 LAI 使得地表潜热通量减小、感热通量增加、降水量减小。Fraedrich et al. (1999) 和 Kleidon et al. (2000) 比较了全球完全覆盖森林和完全覆盖裸土两种情况，但他们只是从水循环的角度出发，得出了植被的存在加快了全球的水循环速率。然而，植被的空间分布主要是由气候特征决定的，全球范围的地表覆盖变化对气候系统的可能影响是在现有植被覆盖的基础上产生的，因此，需要首先考察现有的地表覆盖在现代气候形成中的作用。本文主要从这个角度出发，从全局、整体上研究全球植被的存在对大尺度气候和环流所起的作用。

2 模式及试验方案设计

本文所用的陆气双向耦合模式是 R42_AVIM (Zeng et al., 2008a, 2008b)。其中，大气环流模式是中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG/IAP) 发展

的较高分辨率的大气环流谱模式 SAMIL-R42L9，它在水平方向上为菱形 42 波截断，分辨率相当于 2.8125° 经度 $\times 1.66^\circ$ 纬度，垂直方向上采用 σ 坐标，分为 9 层 (即 R42L9)。关于此模式详尽的动力框架和物理过程介绍可参看 Zhang et al. (2000) 和王在志等 (2004) 的研究工作。而陆面过程模式是植被-大气相互作用模式 AVIM (Atmosphere-Vegetation Interaction Model)。此模式是 Ji (1995) 在其简化的一维地表过程模式 LPM (Ji and Hu, 1989) 的基础上加入了植被生理模块发展而来的，包括完整的物理过程和生理过程。关于此模式，已经针对不同的生态系统进行了验证 (Ji, 1995; 季劲钧和余莉, 1999; 吕建华, 1999; Li and Ji, 2001; 吕建华和季劲钧, 2002a, 2002b; Lü and Ji, 2006)。

R42_AVIM 中的地表植被类型分布见图 1，总共分为 12 类，加上陆地冰可以看做是 13 类，依次为热带雨林、落叶阔叶林、混交林、常绿针叶林、落叶针叶林、有地被层的阔叶林、草地、有地被层的阔叶灌丛、有裸土的灌丛、有地被层矮林、裸土、农作物和冰。

为了研究植被分布的存在对气候和大气环流产生的可能影响，我们分别做了有无植被覆盖情况下的两种气候状态的对比研究。R42_AVIM 是一个

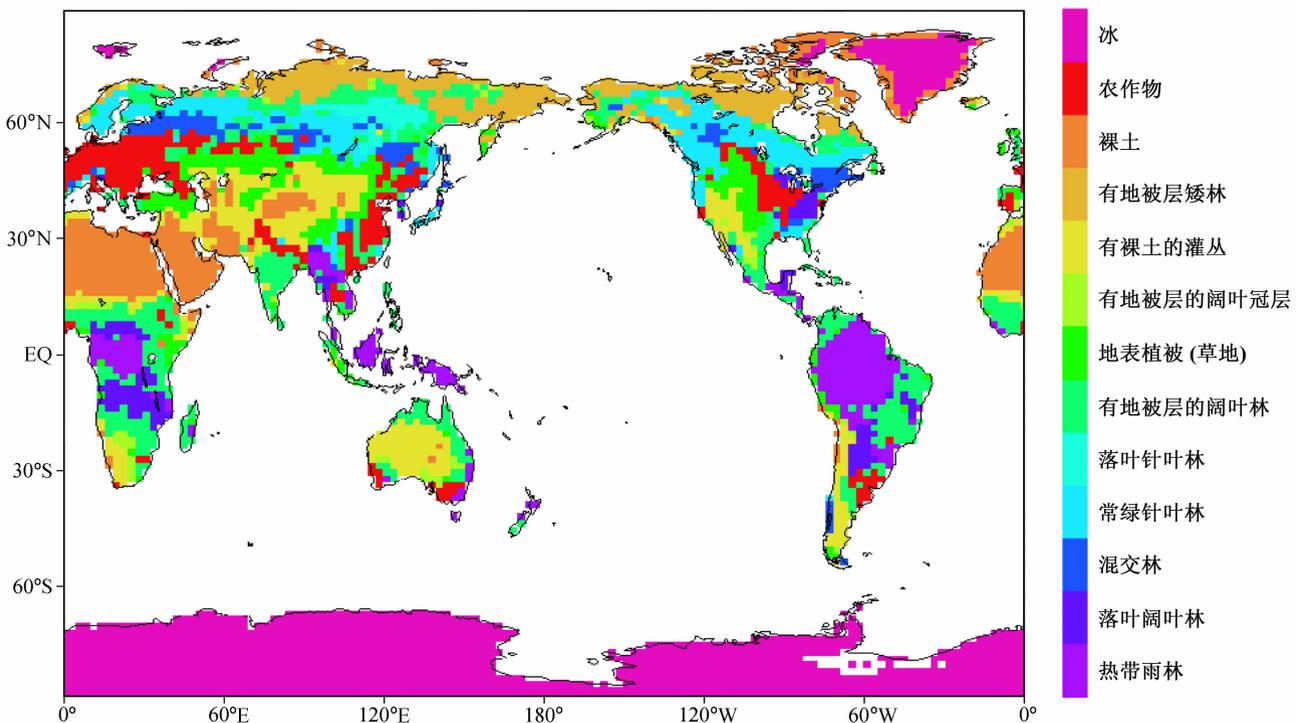


图 1 R42_AVIM 中的植被类型分布图

Fig. 1 Vegetation classification distribution map in R42_AVIM

陆气双向耦合模式,也就是说植被叶面积指数的变化不是给定的,而是通过植被的生理过程模块自己决定的。但本文主要是研究植被分布的存在对气候和大气环流的影响,所以,在控制试验中将植被的生理过程模块关闭,采用实际地表植被分布和相应的植被叶面积指数季节变化;而在敏感性试验中则假定全球除格陵兰岛和南极大陆之外的陆地都为裸土所覆盖,这是全球地表覆盖变化的一种极端情况,是植被被全部清除的“下限”。通过对控制试验与敏感性试验的结果进行比较,来研究陆地下垫面植被的存在对气候和大气环流产生的潜在影响。在我们的试验中,都是运用气候平均的海冰和海温分布,其目的是排除试验中海洋的反馈作用。分别将控制试验和敏感性试验都运行 15 年,前 5 年作为陆气之间的调整过程,取后 10 年平均的冬季和夏季的要素场做分析。以下如不做特殊说明,均是后 10 年平均的结果,不再赘述。

3 全球植被分布对气候影响的数值模拟

在这一部分,我们通过有无植被覆盖试验的对比,研究了全球植被的存在对气候和大气环流产生的潜在影响。在结果分析中,除非具体指出,冬季和夏季均指北半球的冬季和夏季。

3.1 地表特征参数对植被覆盖的响应

植被覆盖的变化会改变地表的物理和生物学特征,植被冠层的反照率比裸土要小,影响对太阳辐射的吸收。植被还改变了地表动力学粗糙度和零平面位移,影响地气间水汽、热量和动量的交换强度。冠层还改变叶丛的气孔导度,从而影响植物的蒸腾。至于植物的光合、呼吸作用等生理过程改变大气与地表的 CO_2 交换、影响太阳辐射等,在此就不予讨论了。

在植被的形态参数中,很关键的就是叶面积指数(LAI),地表的物理和生物特征都直接与 LAI 相关。在现实植被类型分布下(图 1),冬季, LAI 的大值区主要分布在非洲南部、澳大利亚的东部和西南部、南美洲、印度尼西亚和中南半岛北部等分布有热带雨林和阔叶林的地区。另外,在北半球中高纬度地区的混交林和针叶林分布区叶面积指数也比较大。夏季,中国东部农田分布区以及 60°N 附近欧亚大陆和北美大陆的北方森林地区叶面积指数相对冬季明显增大,而此时南半球叶面积指数大值

区较冬季也出现比较明显的北移。当地表为裸土覆盖时,相对于现实植被分布,冬季,在南半球和北半球低纬度叶面积指数变化最大,而夏季,北半球中高纬度也成为叶面积指数变化的大值区。也就是说,叶面积指数变化的大值区都对应于大气对流活动的上升支所在的森林带。

当不考虑陆地上的植被覆盖后,地表特征参数会产生相应的变化,其中很重要的是地表反射率。冬季,地表反照率的差异主要分布在南半球大陆,在现实植被分布下,冠层反照率明显减小,而北半球仅在低纬度如印度、中南半岛和墨西哥有一定程度的减小。因为此时北半球中高纬的温度比较低,不适宜植被的生长,而且大部分地区都为积雪所覆盖,植被的覆盖对反照率的影响并不大。夏季,随着植被的生长、叶面积指数迅速增大,北半球中高纬的反照率也明显减小,特别是在针叶林分布的区域,而此时南半球反照率的差异相对于冬季有一定程度的北移和减小。

3.2 陆面物理过程的变化

有无植被覆盖的地表,其物理和生物学特征会有明显差异,由此将改变地、气间的热量、水分和动量通量,从而影响到气候和大气环流。下面主要分析陆面植被分布的存在对地表热通量的影响。地表的感热通量和潜热通量的变化之和是近似与地表净辐射能量的收支相平衡的。图 2a、b 给出了冬、夏季控制试验和敏感性试验中地表净辐射收支的差异,从图中看出,它的变化与地表反照率的变化有比较好的对应,在现实植被分布下,在原本植被覆盖状况比较好的区域,冠层反照率减小,而净辐射收支增大。如冬季,在南半球大陆和北半球的热带地区,净辐射收支表现为增大;夏季,几乎整个大陆上的净辐射收支都增大了。从冬、夏地表潜热通量差值图(图 2c、d)可以看出,潜热通量的变化和植被分布的变化也有很好的对应,当有植被存在时,植被蒸腾使地表潜热通量大大增加。在冬季,这种增加主要分布在南半球,增加的幅度最大可以达到 150 W/m^2 ,而北半球除了低纬度有较明显的地表潜热通量的增加外,中高纬度的变化很小。夏季,相应于北半球植被的快速生长,全球陆地上地表潜热通量都表现为增加,增加最大的区域是热带森林和中高纬度地区,尤其是北半球中高纬度大陆增加最为明显,在大部分地区幅度可达 $60\sim 90 \text{ W/m}^2$ 。

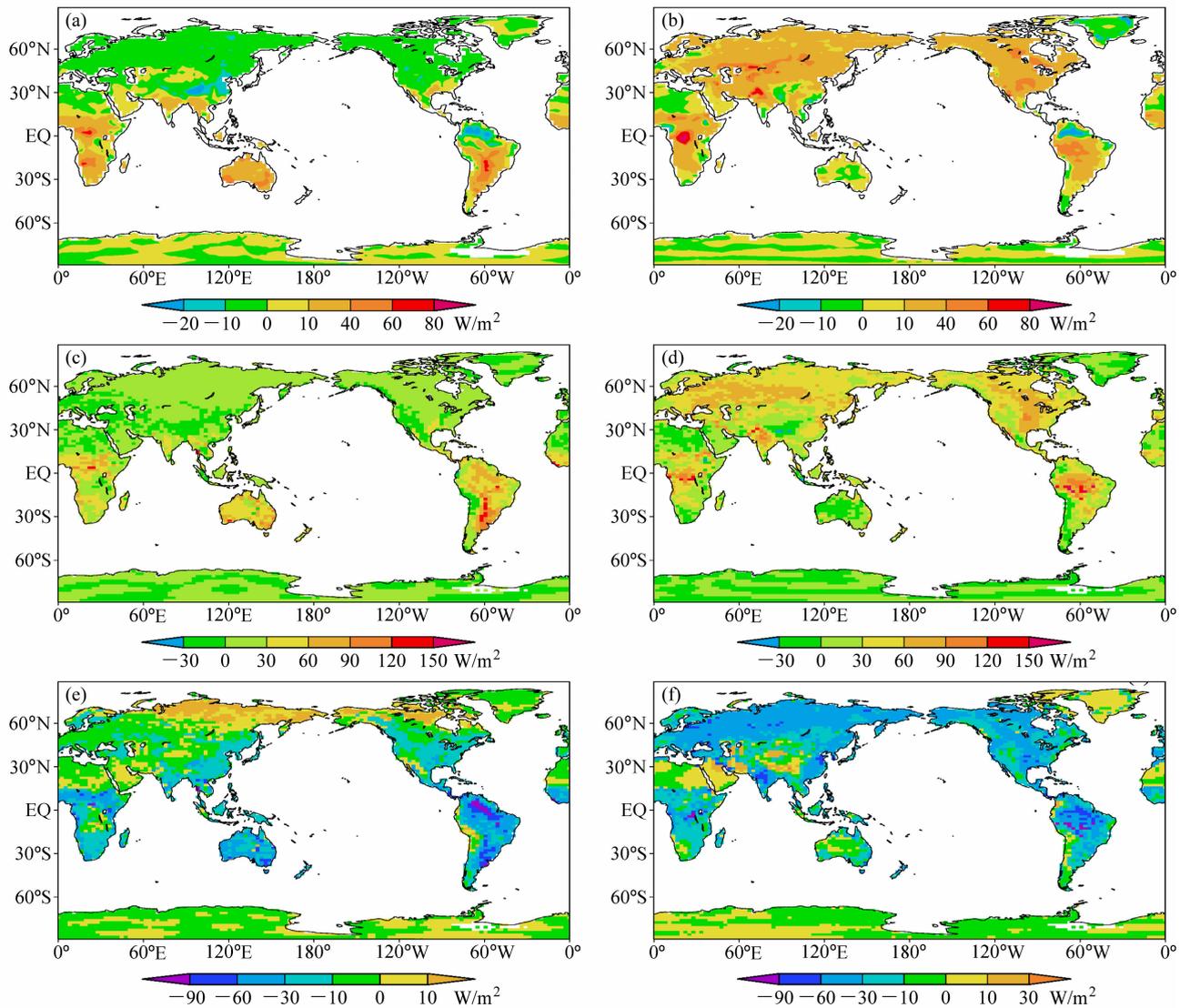


图2 (a、c、e) 冬季和 (b、d、f) 夏季控制试验与敏感性试验中各物理量的差异分布：(a、b) 地表净辐射；(c、d) 地表潜热通量；(e、f) 地表感热通量

Fig. 2 The differences of (a, b) surface net flux, (c, d) surface latent heat flux, and (e, f) surface sensible heat flux in (a, c, e) Dec-Jan-Feb (DJF) and (b, d, f) Jun-Jul-Aug (JJA) between control and sensitivity run

而在副热带中纬度潜热有所下降，这与环流的改变有关。而从地表感热通量差值图（图 2e、f）中看出，冬、夏植被的存在都会使地表感热通量减小。这是因为对比地表净辐射收支的变化和潜热通量变化的量值，潜热通量的增加超过了地表净辐射的增加，所以会通过地表温度下降以及感热通量减小来使地表能量得以平衡。冬季，在南半球植被生长状况好的地区，感热通量有比较明显的减小，大部分地区都超过了 30 W/m^2 ，差异最大中心甚至达到了 90 W/m^2 以上。而在北半球，在低纬度叶面积指数变化比较大的地区，减小也比较明显，在高纬度，

感热通量有所增加，这是因为在积雪覆盖的地区，净辐射变化主要是由感热通量来补偿。夏季，除了非洲撒哈拉沙漠、西亚以及高原附近的荒漠外，全球所有的大陆上感热通量都有明显减小，幅度最大可达 60 W/m^2 以上。

以上是从空间分布的差异进行分析的，为了从直观上反映植被的存在对地表热通量的影响，表 1 给出了控制试验和敏感性试验中冬、夏季全球陆地平均的地表净辐射、地表感热通量和地表潜热通量。从表 1 中可以看出，在控制试验中，冬季全球陆地平均的地表净辐射是 40.3 W/m^2 ，夏季是

表 1 控制试验和敏感性试验中冬(夏)季全球陆地平均的地表热通量(单位: W/m^2)

Table 1 Global land-averaged surface heat fluxes in control and sensitivity run. Units: W/m^2

| | DJF (JJA) | | |
|-------|-------------|-------------|-------------|
| | 地表净辐射 | 地表感热通量 | 地表潜热通量 |
| 敏感性试验 | 35.9 (73.0) | 18.7 (51.1) | 15.3 (17.5) |
| 控制试验 | 40.3 (87.2) | 4.7 (29.0) | 31.6 (48.1) |

$87.2 W/m^2$; 而在敏感性试验中, 地表净辐射在冬季和夏季分别为 $35.9 W/m^2$ 和 $73.0 W/m^2$ 。可以看出, 无论冬季和夏季, 植被的存在都会使得地表反照率减小, 地表净辐射收支增大。对于地表感热通量, 从表 1 中可以看出冬季控制试验中的地表感热通量为敏感性试验的 25.1%, 夏季约为 56.8%, 植被的存在使得地表感热通量明显减小, 并且在冬季尤为明显。而冬季控制试验中的地表潜热通量是敏感性试验的 2.1 倍, 夏季为 2.7 倍, 植被的存在使得潜热通量明显增大, 而且夏季的增幅超过了冬季。

3.3 气候状况和大气环流的变化

前面给出了陆面植被分布的存在对地表特征参数以及地表热通量的影响, 下面进一步分析由此造成的气候以及大气环流场的变化。首先是地表温度, 图 3a、b (见文后彩图) 给出了冬季和夏季有无植被覆盖试验中地表温度差异的空间分布, 从图中可以清楚地看出, 冬季, 植被的存在使得南半球以及北半球除非洲撒哈拉沙漠和阿拉伯半岛以外的中低纬度地区地表温度明显下降, 这是因为植被的存在会使得由它引起的蒸腾所耗散的能量明显增加, 造成地表温度的下降, 特别是在南半球的热带雨林地区如南美北部以及赤道非洲地表温度下降最为明显, 幅度可达 $12^\circ C$ 以上。而在北半球高纬度贝加尔湖以北地区以及美国阿拉斯加附近地区, 地表温度呈现升高。这些地区冬季大都为积雪所覆盖, 地表温度的变化可能与改变地表植被分布后的环流场变化有关。夏季, 随着北半球中高纬的积雪消退以及气温升高, 植被叶面积指数的差异较冬季明显增大, 由此造成几乎所有陆地上的地表温度明显下降, 在北半球中高纬度的部分地区, 幅度都超过 $12^\circ C$ 以上。而南半球的地表温度差异大值区, 相应于冬季有一定程度的北移减弱。图 3c、d (见文后

彩图) 是陆地上纬向平均的地表温度差值场, 从图中看出, 冬季, 在 $50^\circ N$ 以南的陆地上温度差异都为负, 尤其在 $35^\circ S \sim 15^\circ N$ 之间的区域差异最大, 纬向平均差异接近 $8^\circ C$, 而在 $60^\circ N$ 附近有 $2^\circ C$ 左右的温度偏高; 夏季, 在所有纬度上纬向平均地表温度差异都是负的, 有两个降温最大的纬度带, 一个位于赤道附近, 另一个位于北半球的中高纬度, 都对应于叶面积指数差异的大值区, 而差异较小对应的是副热带的荒漠地区和两极, 也就是有无植被覆盖试验中叶面积指数的差异小值区。这与图 3a、b 中地表温度差异的空间分布都有很好的对应。

为了看出地表参数的改变对对流层中上层的影响, 这里也给出了有无植被覆盖试验中纬向平均气温的垂直分布差异 [图 3e、f (见文后彩图)]。从图 3e、f 中看出, 冬季, 在对流层中低层 $700 hPa$ 以下, 纬向平均气温偏差随纬度的分布和纬向平均地表温度偏差随纬度的分布是一致的 (见图 3c), 但是在赤道附近的热带地区, 对流层下层和 $700 hPa$ 以上的对流层中上层, 温度偏差呈现反号, 为斜压分布。而在其余纬带, 温度偏差都呈现出上下一致, 为相当正压结构, 尤其在 $30^\circ S$ 附近的温度负异常在对流层中上层也表现很明显。夏季, 同冬季的情况类似, 在赤道附近的温度异常同样表现为斜压结构, 而在北半球中高纬度的负异常则一直延伸到对流层上层, 表现为准相当正压结构。从以上的分析看出, 植被的存在通过对下垫面的特征参数及能量收支产生影响, 不仅使得地表温度发生变化, 而且还影响到对流层的中高层, 引起全球气候的变化。

植被的存在对海平面气压场的影响也很明显。鉴于全球的海陆分布状况, 陆地和海洋的热容量不同, 冬季大陆上主要表现为冷高压, 而夏季则表现为一个热低压系统。同样, 对比有无植被覆盖试验发现, 当陆地地上有植被存在后, 冬季除北半球 $60^\circ N$ 附近的中高纬度大陆有气压偏低外, 其余陆地地上都表现为正的气压偏差, 这和植被的存在使得地表温度下降是对应的, 同时说明了冬季植被的存在造成了蒙古高压、阿留申低压以及冰岛低压减弱, 也进一步解释了植被存在使冬季北半球高纬度贝加尔湖以北地区以及美国阿拉斯加附近地区地表温度偏高的问题。夏季, 植被的存在使得所有陆地上的地表温度明显下降, 从海平面气压差异图中看到, 全球大陆上的气压差异都为正值, 这意味着植被存在使

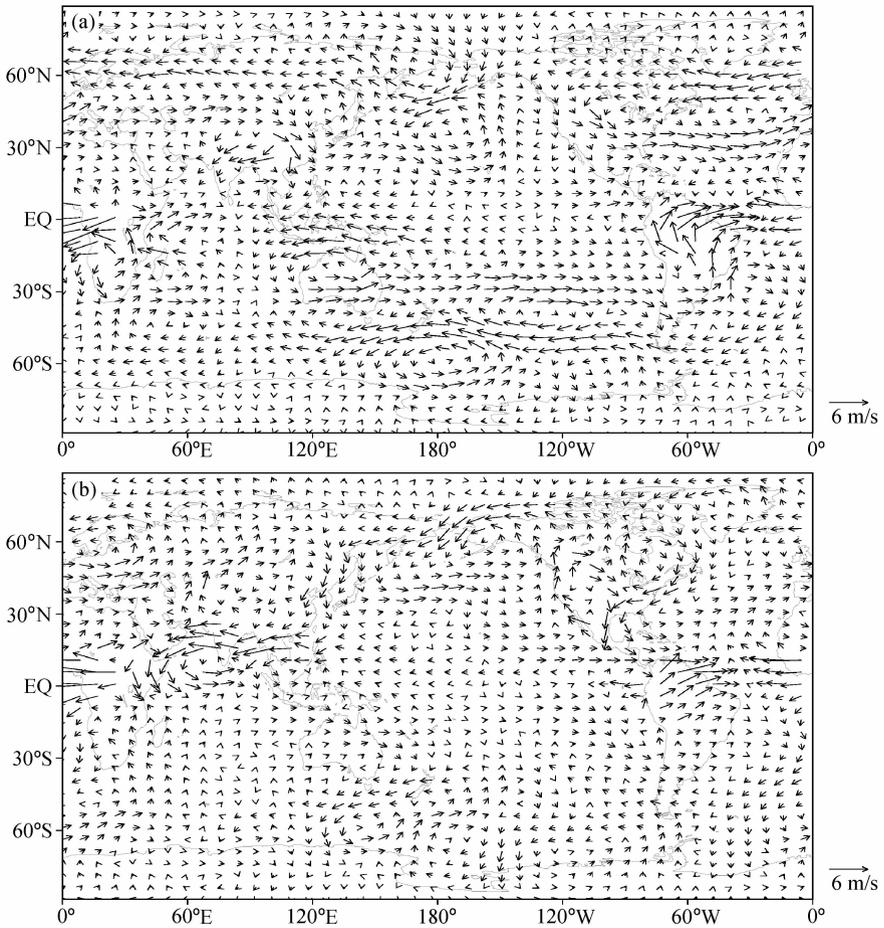


图 4 (a) 冬季和 (b) 夏季控制试验与敏感性试验中 850 hPa 风场的空间分布差异
 Fig. 4 The differences of 850-hPa wind in (a) DJF and (b) JJA between control and sensitivity run

得大陆热低压减弱。同样，从 850 hPa 风场差异图中也可以看到风场的变化与海平面气压场的变化有很好的对应，夏季，亚洲大陆东部的偏北气流偏差和亚洲大陆南部的偏东气流偏差，说明亚洲夏季风减弱（图 4b）。

通过有无植被覆盖试验的对比，同样可以看出植被的存在对降水有明显的影响。图 5（见文后彩图）分别给出了冬季和夏季控制试验和敏感性试验中降水率的空间分布差异以及纬向平均差异，从对比看出：冬季，当植被存在时，沿赤道的多雨带如南印度洋、西太平洋以及南美的北部和西大西洋都出现了降水的增多，另外在南半球的中纬度也有降水的增多。这两个降水偏多区都对应着森林地区。夏季，从纬向平均差异图可以看出，植被的存在使得热带及北半球中高纬度有很明显的降水偏多，在热带的降水偏多区较冬季稍向北移，而副热带地区

降水偏少。上面的分析表明，植被分布的存在会对降水产生明显的影响，在植被分布状况比较好的热带雨林、北方森林等地区，植被的存在会使得降水明显增多，而在热带多雨带南北两侧，则为降水偏少带。

进一步研究经向环流的变化。图 6 是 1 月和 7 月有无植被覆盖试验中经向环流的差值场，从中看出：在植被存在的情况下，1 月，在热带近赤道地区，有明显的上升气流偏差，而在 30°N 附近有下沉气流偏差，说明热带森林使潜热释放增强，加强了垂直对流，热带 Hadley 环流增强。7 月，同样可以发现近赤道的 Hadley 环流加强。另外，在 60°N 附近也有明显的上升气流偏差。这种经圈环流上升支的偏差分布与中纬度森林分布及降水偏多的区域相对应，也就是说植被分布的存在使得热带和中高纬度锋带对流加强，降水凝结潜热加热增强，由此

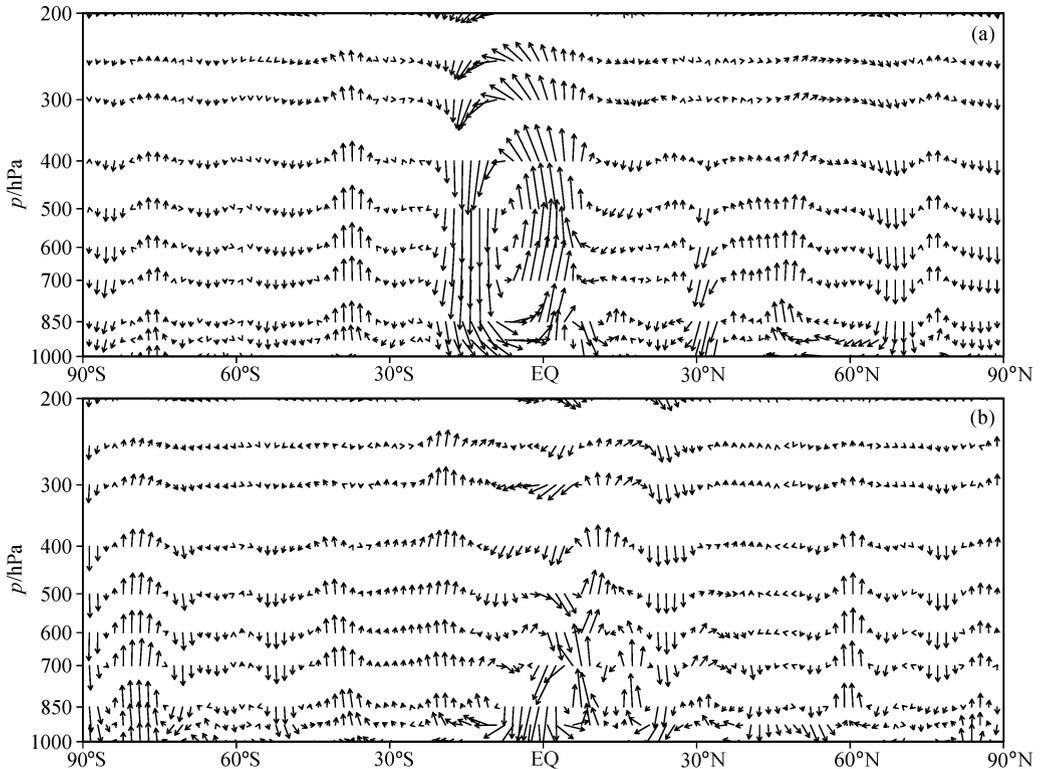


图 6 (a) 1 月和 (b) 7 月控制试验与敏感性试验中平均经圈环流的差异分布

Fig. 6 The differences of mean meridional circulation in (a) Jan and (b) Jul between control and sensitivity run

三圈环流加强，而副热带则变得更干，从而，现有的气候和植被分布更加稳定。

4 结论及讨论

本文利用一个新的陆-气双向耦合模式 R42_AVIM，通过全球有无植被覆盖试验，探讨了植被分布的存在对气候和大气环流产生的可能影响，得出以下主要结论：

(1) 陆面植被的覆盖使得地表特征参数发生行星尺度的明显改变。在现实植被分布下，冬季在南半球大陆及北半球低纬度的印度、中南半岛、墨西哥等地反照率显著减小；夏季几乎在全球陆地地表反照率都是减小的，特别是在北半球针叶林、混交林和热带森林分布区减小明显。

(2) 地表能量通量收支发生改变。在植被覆盖大的地区，尤其是森林地带一般有地表净辐射收支和地表潜热通量的增加以及地表感热通量的减小。现实植被叶面积指数比较大的区域地表温度降低，并且这种温度的改变在对流层中上层都有明显反映，在热带表现为斜压结构，而在中高纬表现为相

当正压结构。

(3) 植被分布的存在造成上述地表特征和地气能量及水分通量行星尺度上的差异，导致大气环流和气候的变化。热带和中高纬度森林带的蒸发和相应的高层凝结潜热加热增强，从而增强了经圈环流的上升支，使得冬季在热带和南半球中纬度降水增多，夏季在热带和北半球中高纬地区降水明显增多，而经圈环流下沉支的增强致使副热带降水减少且更干旱。

(4) 植被分布的存在使得中高纬度锋带增强和粗糙度增大，使南北交换增强，北半球大陆北部冬季温度增高，夏季降低。另外，植被使大陆潜热释放增大，气温下降，减小了海陆温度对比，季风因子减弱，因而，亚洲夏季风也有所减弱。

总之，现实植被通过改变地表特征参数，从而改变地表能量通量的收支，进而会对气候和大气环流产生影响。而且，这种影响不只是局限在陆地表面及近地层，还可以向上延伸到对流层的中高层。植被的存在增强了三圈环流，从而使现有的气候和植被分布更加稳定。

从上述的试验结果, 已经看到在现实的全球气候态中已经包含了植被对气候的反馈作用。就全球来说, 植被的存在降低了反射率, 增大了对太阳辐射的吸收, 同时, 蒸发的增大, 加强了全球水循环, 在行星尺度上, 植被的存在加强了经圈环流, 还影响了季风环流。这加深了我们对现代气候形成的认识。同时, 也提出一些新问题, 植被的存在及其季节变化在什么地区、在多大程度上影响着经圈环流及行星风带, 在多大程度上影响季风系统的变化等等。这些问题都有待进一步深入研究。

现实全球植被分布对气候的反馈作用也为分析和研究大尺度植被变化对气候的影响提供了总的背景情况。在我们关注区域性植被覆盖变化、中国北方草原、撒哈拉、巴西森林对环流和气候影响的同时, 还要关注大范围植被覆盖变化对行星尺度环流和气候影响的变化。例如, 热带大规模森林采伐是否会减弱低纬度的经圈环流, 大气中二氧化碳浓度持续增长使北半球高纬度植被生产力增加是否会促进该地区对流活动, 从而使降水增加等等。

另一方面, 在更长时间尺度上, 如在全球变暖的进程中, 现实植被的分布和功能也在不断的变化, 这种变化对长期气候趋势有什么影响也是应该加以考虑的。

但是, 本文的讨论也是有一定的局限性。首先, 这是理想试验, 没有植被的情况是一种极端的情况, 是从最大的可能性上研究了植被的分布对气候产生的可能影响。其次, 我们在试验积分过程中都是用气候平均的海温, 没有考虑海洋的反馈作用。最后, 植被的作用和造成全球变暖的温室气体对气候的影响在这里也没有进行对比分析。综上所述, 我们目前的工作还是初步的, 在以后的工作中必须从更深层次上探讨植被对气候的影响以及与其它反馈因子之间的关系。

参考文献 (References)

Charney W, Stone P H, Quirk W J. 1975. Drought in the Sahara: A biogeophysical feedback mechanism [J]. *Science*, 187: 434 - 435.

Chase T N, Pielke R A, Kittel T G F, et al. 1996. Sensitivity of a general circulation model to global changes in leaf area index [J]. *J. Geophys. Res.*, 101: 7393 - 7408.

Clark D B, Xue Y K, Harding R J, et al. 2001. Modeling the impact of land surface degradation on the climate of tropical North Africa [J]. *J. Climate*, 14: 1809 - 1822.

Dickinson R E, Henderson-Sellers A. 1988. Modelling tropical deforestation: A study of GCM land - surface parameterizations [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 114: 439 - 462.

Dirmeyer P A, Shukla J. 1996. The effect on regional and global climate of expansion of the world's deserts [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122: 451 - 482.

范广洲, 吕世华, 罗四维. 1998. 西北地区绿化对该区及东亚、南亚区域气候影响的数值模拟 [J]. *高原气象*, 17 (3): 300 - 309.

Fan Guangzhou, Lü Shihua, Luo Siwei. 1998. The influence of the NW China afforestation on regional climate in East and South Asia [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 17 (3): 300 - 309.

Fraedrich K, Kleidon A, Lunkeit F. 1999. A green planet versus a desert world: Estimating the effect of vegetation extremes on the atmosphere [J]. *J. Climate*, 12: 3156 - 3163.

郭建侠, 杜继稳, 郑有飞. 2005. 陕北生态治理对当地降水影响的数值模拟 [J]. *高原气象*, 24 (6): 994 - 1001.

Guo Jianxia, Du Jiwen, Zheng Youfei. 2005. Numerical simulation of influence of different vegetation schemes on local precipitation in northern Shaanxi region [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 24 (6): 994 - 1001.

Henderson-Sellers A, Gornitz V. 1984. Possible climatic impacts of land cover transformations, with particular emphasis on tropical deforestation [J]. *Climate Change*, 6: 231 - 258.

季劲钧, 余莉. 1999. 地表物理过程与生物地球化学过程耦合反馈机理的模拟研究 [J]. *大气科学*, 1999, 23 (4): 439 - 448.

Ji Jinjun, Yu Li. 1999. A simulation study of coupled feedback mechanism between physical and biogeochemical processes at the surface [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 23 (4): 439 - 448.

Ji Jinjun, Hu Yuchun. 1989. A simple land surface process model for use in climate studies [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 3: 342 - 351.

Ji Jinjun. 1995. A climate-vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface [J]. *J. Biogeography*, 22: 445 - 451.

Kleidon A, Fraedrich K, Heimann M. 2000. A green planet versus a desert world: Estimating the maximum effect of vegetation on the land surface climate [J]. *Climate Change*, 44: 471 - 493.

Laval K, Picon L. 1986. Effects of a change of the surface albedo on the Sahel on climate [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43: 2418 - 2429.

Lean J, Warrilow D A. 1989. Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation [J]. *Nature*, 342: 411 - 413.

Li Yinpeng, Ji Jinjun. 2001. Model estimates of global carbon flux between vegetation and the atmosphere [J]. *Adv. Atmos. Sci.* 18: 807 - 818.

吕建华. 1999. 区域性季节和年际尺度大气-植被相互作用的模拟研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. 156pp.

Lü Jianhua. 1999. The regional simulation of interaction between atmosphere and vegetation at seasonal and interannual scale [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Phys-

- ics, Chinese Academy of Sciences. 156pp.
- 吕建华, 季劲钧. 2002a. 青藏高原大气-植被相互作用的模拟试验 I: 物理通量和参数 [J]. 大气科学, 26 (1): 111-126. Lü Jianhua, Ji Jinjun. 2002a. A simulation study of atmosphere-vegetation interactions over the Tibetan Plateau. Part I: Physical fluxes and parameters [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 26 (1): 111-126.
- 吕建华, 季劲钧. 2002b. 青藏高原大气-植被相互作用的模拟试验 II: 植被叶面积指数和净初级生产力 [J]. 大气科学, 26 (2): 255-262. Lü Jianhua, Ji Jinjun. 2002b. A simulation study of atmosphere-vegetation interactions over the Tibetan Plateau. Part II: Net primary productivity and leaf area index [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 26 (2): 255-262.
- Lü J H, Ji J J. 2006. A simulation and mechanism analysis of long-term variations at land surface over arid/semi-arid area in north China [J]. J. Geophys. Res., 111: D09306, doi: 10.1029/2005JD006252.
- 吕世华, 陈玉春. 1999. 西北植被覆盖对我国区域气候变化影响的数值模拟 [J]. 高原气象, 18 (3): 416-424. Lü Shihua, Chen Yuchun. 1999. The influence of Northwest China afforestation on regional climate in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (3): 416-424.
- Pielke R A, Avissar R, Raupach M, et al. 1998. Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: Influence on weather and climate [J]. Global Change Biology, 4, 461-475.
- Salati E, Nobre C A. 1991. Possible climatic impacts of tropical deforestation [J]. Climate Change, 19: 177-196.
- Sud Y C, Molod A. 1988. A GCM simulation study of the influence of Saharan evapotranspiration and surface-albedo anomalies on July circulation and rainfall [J]. Mon. Wea. Rev., 116: 2388-2400.
- 王在志, 吴国雄, 吴统文, 等. 2004. ALGCM (R42) 气候系统大气模式 (ALGCM2.0.2) 参考手册. 中国科学院大气物理研究所 LASG 技术报告 [R]. No. 14. Wang Zaizhi, Wu Guoxiong, Wu Tongwen, et al. 2004. ALGCM (R42) atmosphere model (ALGCM2.0.2) reference manual [R]. Technical Report in LASG/IAP (in Chinese). No. 14.
- Xue Y, Shukla J. 1993. The influence of land surface properties on Sahel climate. Part I: Desertification [J]. J. Climate, 6: 2232-2245.
- Zeng N, Dickinson R E, Zeng X. 1996. Climate impact of Amazon deforestation—A mechanistic model study [J]. J. Climate, 9: 859-883.
- Zeng N, Neelin J D, Lau K-M, et al. 1999. Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction [J]. Science, 286: 1537-1540.
- Zeng Hongling, Wang Zaizhi, Ji Jinjun, et al. 2008a. An updated coupled model for land-atmosphere interaction. Part I: Simulations of physical processes [J]. Adv. Atmos. Sci., 25: 619-631.
- Zeng Hongling, Ji Jinjun, Wu Guoxiong. 2008b. An updated coupled model for land-atmosphere interaction. Part II: Simulations of biological processes [J]. Adv. Atmos. Sci., 25: 632-640.
- Zhang X H, Shi G Y, Liu H, et al. 2000. IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model [M]. Beijing: Science Press, 251pp.
- Zheng X Y, Eltahir E A B. 1997. The response to deforestation and desertification in a model of West African monsoons [J]. Geophys. Res. Lett., 24 (2): 155-158.
- Zheng X Y, Eltahir E A B. 1998. The role of vegetation in the dynamics of West African Monsoons [J]. J. Climate, 11 (8): 2078-2096.
- 周广胜, 张新时. 1996. 植被对于气候的反馈作用 [J]. 植物学报, 38 (1): 1-7. Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi. 1996. Feedbacks of vegetation on climate [J]. Acta Botanica Sinica (in Chinese), 38 (1): 1-7.
- 周定文, 范广洲, 华维, 等. 2009. 我国春季降水与青藏高原东南部冬季归一化植被指数变化的关系 [J]. 大气科学, 33 (3): 649-656. Zhou Dingwen, Fan Guangzhou, Hua Wei, et al. 2009. Relationship between spring rainfall in China and winter normalized difference vegetation index in the Southeast of Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 649-656.

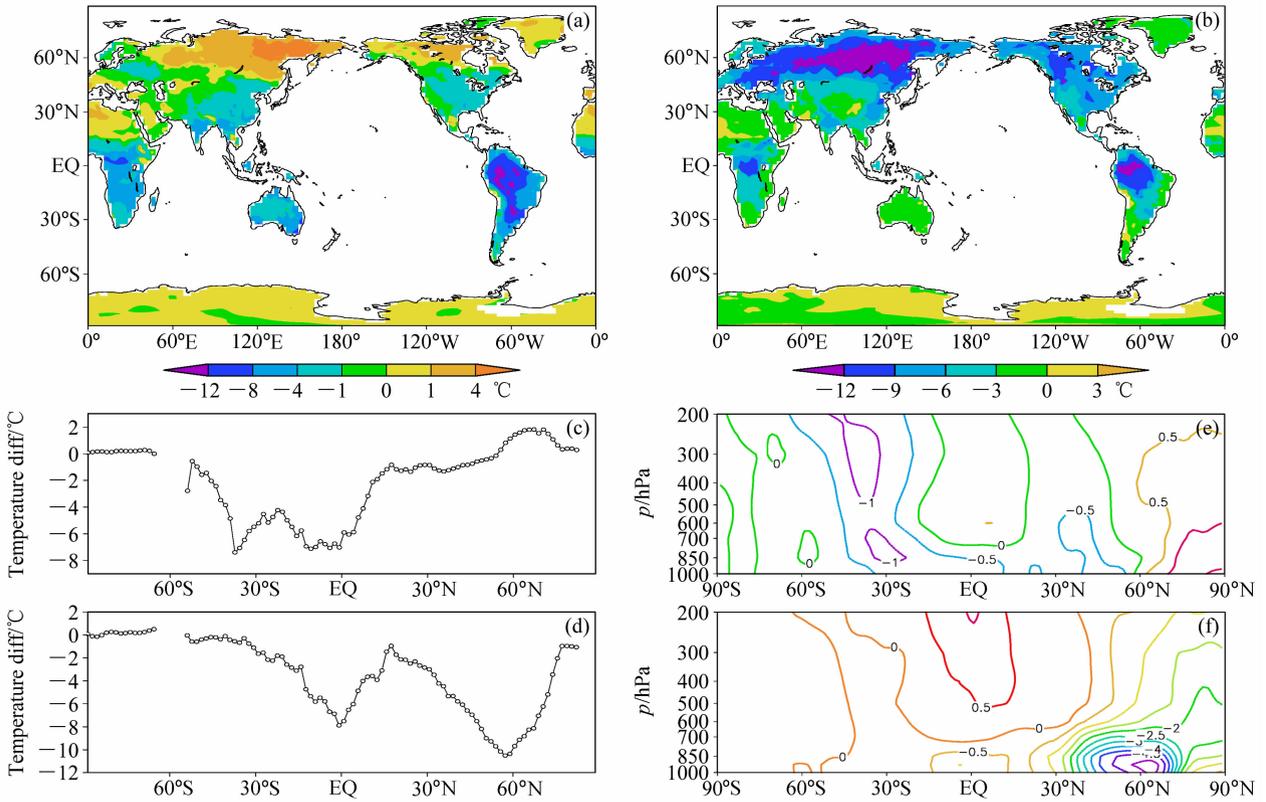


图3 同图2, 但为: (a、b) 地表温度空间分布差异; (c、d) 地表温度纬向平均差异; (e、f) 气温随高度分布的差异 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 3 The differences of (a, b) surface temperature, (c, d) zonal mean surface temperature, and (e, f) zonal mean air temperature ($^{\circ}\text{C}$) in (a, c, e) DJF and (b, d, f) JJA between control and sensitivity run

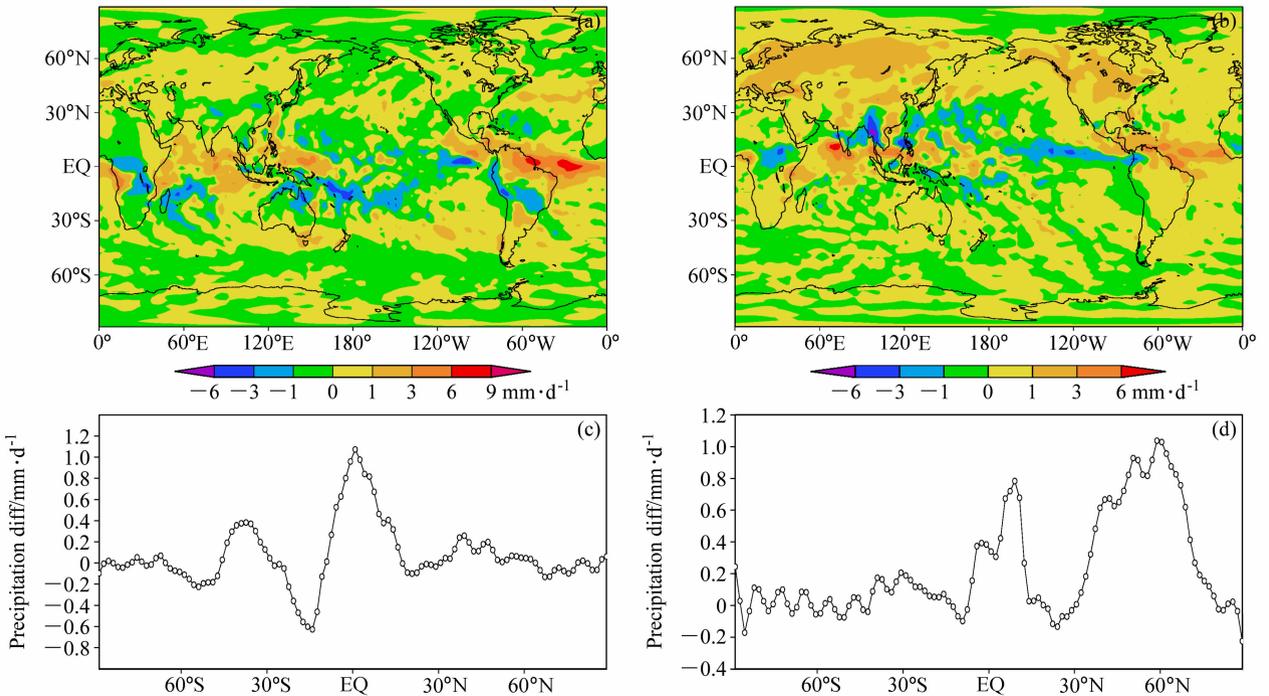


图5 (a、c) 冬季和 (b、d) 夏季控制试验与敏感性试验中降水的 (a、b) 空间分布差异和 (c、d) 纬向平均差异

Fig. 5 The differences of (a, b) precipitation and (c, d) zonal mean precipitation in (a, c) DJF and (b, d) JJA between control and sensitivity run