丹利,符传博,吴涧. 2011. 陆气双向耦合模式中全球感热和潜热通量的时空特征模拟 [J]. 气候与环境研究, 16 (2): 113-125. Dan Li, Fu Chuanbo, Wu Jian. 2011. Spatial and temporal characteristics of the global sensible and latent heat fluxes simulated by a two-way land-air coupled model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (2): 113-125.

# 陆气双向耦合模式中全球感热和潜热通量的 时空特征模拟

丹利1 符传博1,2 吴涧2

1 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

2 云南大学资源环境与地球科学学院大气科学系,昆明 650091

摘 要 利用中国科学院大气物理研究所(IAP/CAS)含有动态植被过程的海一陆一气耦合模式 AVIM-GOALS的积分结果,与ERA-40 再分析资料的感热和潜热通量场进行对比分析,结果表明:AVIM-GOALS模拟的感热和潜热通量的气候态、季节变化等特征和ERA-40 一致,其中感热通量的纬向分布为双峰型,而潜热通量从 1~7月是一个从单峰型到双峰型的转变过程。空间分布特征说明,1月的通量高值区主要分布在南半球和北半球的低纬地区,7月北半球的中高纬度感热和潜热通量有很大的增加,而7月南半球的地表通量仍保持较大数值的分布,变化相对较小,达到 0.01 的显著性水平。感热和潜热通量标准差分布均表现为低纬地区小、高纬地区大的特征,模拟效果与ERA-40 资料较为一致。北半球的年变化相关系数(感热通量和潜热通量的相关系数分别为 0.97 和 0.89)大于南半球。进一步分析感热、潜热通量模拟结果和再分析资料的年变化相关系数空间分布特征表明,相关系数较大的区域主要分布在南、北半球的高纬地区,其中 30°N 以北的大部分地区,澳大利亚南部和南美洲南部以及南极洲地区都通过了 0.01 的显著性检验,这也说明耦合模式在这几个地区有较强的感热、潜热通量模拟能力。另外,对耦合模式输出的感热、潜热通量和全球平均的感热、潜热通量相关系数分析表明,北半球的相关系数大部分地区在 0.6 以上,这和再分析资料的结果比较一致,且 20°N 以北的大部分地区及 20°S 附近的非洲地区通过 0.05 的显著性检验,这说明上述地区在全球平均的尺度上地表通量年变化较为显著。

关键词 耦合模式 再分析资料 感热通量 潜热通量 时空特征
 文章编号 1006-9585 (2011) 02-0113-13 中图分类号 P461.2 文献标识码 A

# Spatial and Temporal Characteristics of the Global Sensible and Latent Heat Fluxes Simulated by a Two-Way Land – Air Coupled Model

DAN Li1, FU Chuanbo1,2, and WU Jian2

- 1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
- 2 Department of Atmospheric Science, College of Resource, Environment and Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650091

Abstract Using the simulation of AVIM - GOALS (Atmosphere - Vegetation Interaction Model and Global

作者简介 丹利,男,博士,研究员,主要从事陆气相互作用与气候模拟研究。E-mail: danli@tea.ac.cn

**收稿日期** 2009-10-08 收到, 2011-01-13 收到修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金项目 40730106,财政部/科技部公益性行业(气象)科研专项 GYHY200806007,中国科学院重要方向青年人才项目 KZCX2-EW-QN208

气	候	与	环	境	研	究
Climatic and Environmental Research						

Ocean - Atmosphere- Land System) which is developed in the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (IAP/CAS), the sensible and latent heat fluxes are analyzed and compared with the ERA-40 reanalysis data, the results showed that AVIM-GOALS basically reproduce main features of the annual mean climatologic state and seasonal cycle of the surface fluxes. The zonal distribution of the sensible heat flux is bimodal, and the latent heat flux has an obvious change from January to July, shifting from a single peak type to the double peak type. The spatial distribution shows that a high value area of the surface fluxes is mainly distributed in the Southern Hemisphere and low-latitude regions of the Northern Hemisphere in January, where a big increasing of the surface fluxes occurs in the high latitudes of the Northern Hemisphere, and the surface fluxes in the Southern Hemisphere still remain greater values, and the spatial correlation coefficients of AVIM-GOALS and ERA-40 reanalysis data are all above 0.01 significance level according to the t-test. The standard deviation distribution of the surface fluxes is small in low latitudes and large in high latitudes, and it agrees with ERA-40 reanalysis data, which shows the good simulation performance of AVIM-GOALS. The correlation coefficient of the annual variation in the Northern Hemisphere is larger than that in the Southern Hemisphere, which are 0.97 and 0.89 for the sensible heat flux and latent heat flux, respectively. Further analysis on the surface fluxes from AVIM-GOALS and reanalysis data for annual changes of the correlation coefficient in spatial distribution shows that the larger correlation coefficient is mainly distributed in high latitudes of the Northern and Southern hemispheres. The most areas north of 30°N, South America, South Australia, and the Antarctic region are above 0.01 significance level according to the *t*-test, which shows the coupled model captures the obvious signal of the seasonal change in these regions. In addition to the analysis of the correlation coefficient between the surface flux and its global mean value, the result shows that the correlation coefficient in most areas of the Northern Hemisphere is larger than 0.6, similar to the reanalysis data. The areas to the north of 20°N in the Northern Hemisphere and Africa beside 20°S are above 0.05 significance level according to the *t*-test, which indicates the regions significantly contribute to the seasonal change of the global mean surface fluxes. coupled model, ERA-40 reanalysis data, sensible heat flux, latent heat flux, spatial and temporal Key words characteristics

## 1 引言

近百年来,由于化石燃料燃烧、工农业生产、 土地利用土地覆盖变化等人类活动的影响,全球 气候正经历以变暖为主要特征的显著变化 (Houghton et al., 2001), 而这种变化是全球气 候系统各大圈层(大气圈、水圈、岩石圈、冰雪 圈和生物圈)复杂的非线性相互作用的结果,因 此,耦合了各圈层的气候系统模式是研究气候变 化的重要工具之一 (Gates et al., 1995; Covey et al., 2001), 且已经广泛应用于气候和全球环境变 化的研究和预测中(陈克明等, 1997; 俞永强和 张学洪, 1998)。地表通量一般指陆面与大气和海 表与大气之间的动量、感热和潜热交换,这种交 换过程发生在近地面附近(丁一汇, 1997)。本文 主要重点研究全球陆面上的地表感热通量和潜热 通量,因为在陆气耦合模式的设计中,陆面与大 气间的交换主要是通过这两个变量在大气方程组 中的垂直扩散项进行的 (Dan et al., 2002),因而 地表通量的模拟是否合理会直接影响到其他分量 的模拟输出,进而影响到整个耦合模式的模拟效 果,因此,作为表征下垫面强迫及其与其上大气 相互作用的一个重要参数,地表通量在数值预报 和气候耦合模式中都占有重要的地位 (丁一汇, 1997; 韩兴和汤燕冰, 2006)。

在区域和单点的尺度上对地表通量的研究前 人已有不少工作,例如布和朝鲁等(2002)认为 夏季我国干旱、半干旱区在整个欧亚大陆上是陆 面感热通量最强的地方,与此对应的陆面潜热通 量则最弱;李栋梁等(2003a,2003b)利用青藏 高原地面气象台站资料来计算地表感热通量并分 析其冬、夏季的气候特征;马耀明等(2003)指 出利用卫星遥感与地面观测相结合的手段可以得 到非均匀下垫面上的区域地表通量;季劲钧和黄 玫(2006)利用陆面模式以 0.1°(纬度)×0.1° (经度)的分辨率模拟研究了青藏高原地区地表通 量的分布特征;李茂善等(2008)利用青藏高原 纳木错圈层相互作用综合观测研究站资料,分析 了纳木错地区地表通量的日变化和季节变化; Cui and Wang (2009)利用3种再分析资料研究分析 了 1998 年青藏高原干湿转换季节地表感热和潜热 通量的变化,指出应改进该地区陆面模式的感热 和潜热参数化方案。此外还有许多站点和区域尺 度上的地表通量的相关研究(鲍艳等, 2004; Ma et al., 2005; 张耀存和况雪源, 2006; 高荣等, 2008; 卢萍和宇如聪, 2008; 张鹏飞等, 2009), 不再赘述。但由于在全球尺度上地表通量观测资 料的缺乏,很少有在全球尺度上进行地表通量模 拟和分析的工作 (Dan and Ji, 2007), 然而鉴于气 候模式里地表通量是陆气间水热传输的纽带,对 气候具有重要影响(吴国雄等,2005),因此利用 耦合模式分析地表通量的时空变化特征是一个具 有迫切性的较为困难的科学问题。本文主要把 1900~2004年百年海温资料月平均序列(Centennial in-situ Observation Based Estimates of variability of SST, COBE-SST) 的月平均序列数据加 入到陆气双向耦合模式 AVIM-GOALS 中,将观 测海温资料作为耦合模式的外强迫条件对耦合模 式进行了长期积分,研究海温强迫下耦合模式模 拟的陆地感热和潜热通量特征并与 ERA-40 再分 析资料的结果进行对比分析研究。

# 2 模式介绍

大气植被相互作用模式 AVIM (Atmosphere-Vegetation Interaction Model) 是由中国科学院东 亚区域气候一环境重点实验室 (RCE-TEA) 发展 起来的大气植被相互作用模式 (Ji, 1995),该模 式主要包括物理交换子模块、植被生长子模块和 物理参数转换子模块。物理交换子模块根据土壤、 植被以及大气连续体内的质量和能量守恒来决定 状态量的变化,用热量平衡方程和质量守恒方程 计算植被冠层、土壤和雪盖中的温度以及冠层、 土壤的水分变化。植被生长子模块包括了植被完 整的光合作用、呼吸作用、分配、凋落以及物候 过程。模式包括 3 层土壤和 1 层植被,分辨率为 1.5°(纬度)×1.5°(经度)。该模式在不同的地区、 不同的植被类型中(余莉, 1996; 吕建华, 1999) 均能很好地模拟出局地、区域尺度上的陆面物理 和植被生态过程。目前 AVIM 已经与中国科学院 大气物理研究所的谱模式 (Global Ocean - Atmosphere - Land System, GOALS) 完成了物理 过程和生物过程的耦合 (Dan et al., 2002; Wu et al., 2003),实现了陆气相互作用的双向耦合并取 得了较好的模拟效果。GOALS 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/CAS) 发展的海一陆 一气耦合的全球气候模式,其中大气部分为9层 15 波菱形截断谱模式,垂直方向采用 $\sigma$ 坐标,不 等间距分层,最低层离地面只有几十米,引进了 标准大气扣除法,分辨率为 4.5°(纬度)×7.5°(经 度)。由于大气模式分辨率较低,模式耦合的方法 采用了垂直方向单位网格嵌套进行耦合,具体的 耦合过程和原理参见 Dan et al. (2002)。

本文主要利用 AVIM-GOALS 耦合模式,在 植被一大气双向作用背景下对耦合模式的地表通 量场进行分析。耦合模式的初始场利用各个分量 模式的气候态作为耦合模式的初始场 (Dan et al., 2002), 使用日本气象厅 (Japan Meteorological Agency, JMA) 提供的 1900~2004 年百 年海温资料(COBE-SST)月平均序列作为强迫 场, AVIM-GOALS 耦合模式积分 105 年, 对后 40年的输出结果进行分析。利用欧洲中期天气预 报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 提供的 1957 年 9 月至 2002 年 8 月分辨率为 2.5°(纬度)×2.5°(经 度)的ERA-40再分析资料的地表通量场作为对 比资料,对耦合模式模拟的感热通量和潜热通量 场的气候态、季节变化和年变化等方面进行对比 和相关分析。鉴于目前还缺少准确估算地面通量 的有效途径和方法, ERA-40 资料仍然不失为研究 陆面通量变化的参考变量(惠小英等,2005;韩 兴和汤燕冰, 2006)。

# 3 模拟结果分析

### 3.1 感热、潜热通量纬向平均分布

由图1可见,感热通量的纬向分布主要表现为 双峰型,以赤道为中心,南、北半球的两个副热带 地区的感热通量最大,且随着季节的推移,两个峰 值在赤道南北两侧移动。比较而言,1月两极地区



图 1 全球 (a、c) 1月和 (b、d) 7月 (a、b) 感热通量和 (c、d) 潜热通量的纬向平均分布 Fig. 1 Global zonal mean distributions of the (a, b) sensible heat flux and (c, d) latent heat flux in (a, c) Jan and (b, d) Jul

的误差相对较大主要是气温模拟偏低造成的(Dan and Ji, 2007), 30°S的峰值模拟比 ERA-40 资料 偏小 30 W·m<sup>-2</sup>左右,其他纬度带都比较一致。7 月纬向分布特征模拟比较合理,但数值有不同程 度的偏小。潜热通量 1 月的纬向平均是一个单峰 型,且 40°S~20°N 均为峰值区,最大值达 110 W·m<sup>-2</sup>左右,模拟结果与 ERA-40 资料较为一 致,7月潜热通量的分布特征从单峰型转变为双 峰型,主要是在 40°N~70°N 之间潜热通量有一个 很大的增长,该纬度带的植被类型主要为针叶林 区,7月北半球为夏季,降水较多,植被生长旺 盛,潜热通量有很大的增加,相比而言,耦合模 式在该纬度带的峰值模拟偏小了 30 W·m<sup>-2</sup>左右。

## 3.2 陆面1月和7月地表感热与潜热通量

3.2.1 感热通量场

从图 2 可见, AVIM-GOALS 模式能较合理 地模拟出感热通量的季节空间分布特征,且1月 和7月模拟与 ERA-40 资料的空间相关系数分别 为0.55 和0.54,均达到0.01 的显著性水平。1 月(图 2 a 和 2b),感热通量高值区主要分布在南 半球的非洲、澳大利亚和南美洲的南部以及北半 球的印度半岛、中南半岛、我国华南和北美洲南

部等低纬地区,最大值达 140  $W \cdot m^{-2}$ 以上。此时 北半球处于冬季,地面温度偏低,地气温差较小, 使得地面与大气间的能量交换比较弱,40°N以 北, 感热通量基本为负值, 60°N 以北的感热通量 模拟值为-40 W·m<sup>-2</sup>,和 ERA-40 资料相比偏 低了 20 W·m<sup>-2</sup>, 这主要和此处的地面气温模拟 偏低有关(张韬等,2002)。青藏高原上的雪盖模 拟较薄,导致模拟值比 ERA-40 资料略有偏高 (Dan and Ji, 2007)。非洲南部、澳大利亚南部和 南美洲南部的感热通量中心值达到100W·m<sup>-2</sup>以 上,和 ERA-40 资料相比,偏弱了近 40 W·m<sup>-2</sup>, 这种偏差反映了不同的陆面过程参数化方案对地 表通量的影响,正如陆地表面水分能量通量的模 式比较计划(Project for Intercomparison of Landsurface Parameterization Schemes, PILPS) 的结 果表明,即使使用相同的气象驱动资料,不同模 式的感热通量和潜热通量模拟结果可达 40 W•m<sup>-2</sup>以上 (Pitman et al., 1999)。

7月(图2c和2d)北半球正处于夏季,地表获得能量盈余较多,地面温度升高,地气温差大,地面与大气间的能量交换加快,感热通量比较大,中心值达80W・m<sup>-2</sup>以上的地区有青藏高原、伊



图 2 (a、b) 1 月和 (c、d) 7 月全球地表感热通量: (a、c) AVIM-GOALS 模式; (b、d) ERA-40 资料

Fig. 2 The global surface sensible heat flux in (a, b) Jan and (c, d) Jul: (a, c) AVIM-GOALS; (b, d) ERA-40 reanalysis data

朗高原以及北美洲的西海岸一带,非洲撒哈拉沙 漠地区也出现了几片不连续的感热加热中心,高 值中心比 ERA-40 资料偏弱了 20 W・m<sup>-2</sup>左右。 此时南半球的感热通量场和1月的相比明显北移, 高值区分布在赤道附近的非洲地区、澳大利亚北 部和南美洲北部,中心值和分布特征都和 ERA-40 资料比较一致。

3.2.2 潜热通量场

潜热通量的模拟结果也较为合理,1月和7月 的模拟值与 ERA-40 资料的相关系数分别为 0.65



图 3 同图 2, 但为潜热通量 Fig. 3 Same as Fig. 2, but for latent heat flux

和 0.33,也都达到 0.01 显著性水平。1 月(图 3 a 和 3b),北半球处于冬季,降水较少,土壤中可用于蒸发的水较少,大部分陆地表面的潜热通量都较小,只有我国华南、中南半岛和北美洲南部等低纬地区潜热中心值可达 60 W•m<sup>-2</sup>,其余均

在 20 W·m<sup>-2</sup>以下。在赤道附近的非洲热带雨林 有一个很大的潜热中心,强度在 140 W·m<sup>-2</sup>以 上,这与该地区高温高湿的环境有关,和 ERA-40 资料相比,中心值模拟较好,位置偏北。南半球 大部分地区潜热通量都很大,非洲潜热通量基本 在 80 W·m<sup>-2</sup>以上,澳大利亚的潜热通量分布为 东高西低,南美大部分地区的潜热通量在 100 W·m<sup>-2</sup>以上,在赤道附近的热带雨林地区潜 热通量可达 120 W·m<sup>-2</sup>,比 ERA-40 资料偏低 了 20 W·m<sup>-2</sup>,这一结果与 Dan and Ji (2007) 类似。

7月(图3c和3d)北半球为夏季,降水较 多,使得大部分地区相对于1月潜热通量都大幅 度增加,其中非洲西北部、中国的华南和北美洲 东南部中心值达到100W·m<sup>-2</sup>以上,非洲北部比 ERA-40资料偏高,而华南和北美洲东南部模拟偏 低,60°N附近从欧洲一直延伸到北美洲北部,潜 热通量有大幅度的增加,但数值比ERA-40资料 要低一些,这与不同模式的模拟性能有关(Dan et al.,2002)。南半球此时是冬季,潜热通量较 大值都分布在15°S以北,其中以非洲赤道热带 雨林地区和南美洲热带雨林地区的潜热通量比较 大,最大值在100W·m<sup>-2</sup>以上。非洲南端、澳大 利亚南部和南美洲南部潜热通量都在20W·m<sup>-2</sup> 以下。

通过以上分析,耦合模式 AVIM-GOALS 能 够较合理地模拟出陆地上感热通量和潜热通量的 空间分布和季节变化,1月的通量场高值区主要 分布在南半球以及北半球的中南半岛、北美洲南 部等低纬地区,7月北半球的中高纬度通量场均 有很大的增加,而南半球的陆地由于纬度都比较 低,感热通量和潜热通量的数值仍较大。

#### 3.3 感热和潜热通量场的标准差

为了研究不同区域物理量的时间变率,图4 给出了全球地表通量标准差分布,这里用气候态 12个月资料进行分析。感热通量场(图4 a 和 4b) 和潜热通量场(图4 c 和 4d)的标准差分布均表 现为低纬地区小、高纬地区大的分布特征,感热 通量标准差达到10 W·m<sup>-2</sup>以上的地区有30°N~ 60°N的亚洲中部地区、北美洲西部、30°S 附近的 非洲南部、澳大利亚南部、南美洲南部和南极洲 等地,潜热通量标准差达到10 W·m<sup>-2</sup>以上的地 区有欧洲地区、我国东部沿海、北美洲的东部以 及 30°S 附近的非洲南部和南美洲南部地区,反映 出这些地区是潜热通量变化较为明显的地区。低 纬地区的植被类型主要为阔叶林,由于纬度较低, 太阳辐射和降水量的季节变化不大,感热通量和 潜热通量的变化也相对较小,而高纬地区的植被 类型主要为针叶林,冬夏季的太阳辐射和降水明 显不同,感热通量和潜热通量都表现出了较大的 标准差分布。比较而言,耦合模式能较好地模拟 出地表通量的标准差全球分布特征,而局部地区 的模拟范围和数值有所偏差,南极洲感热通量的 标准差模拟偏大,主要原因是该地区的地面气温 模拟偏高,而由于陆地降水量的模拟偏低,潜热 通量局部地区的模拟与再分析资料相比有所偏大 (Dan and Ji, 2007)。

#### 3.4 感热和潜热通量年变化及其与 ERA-40 资料 的相关分析

3.4.1 感热和潜热通量场的年变化

感热和潜热通量的年变化特征与辐射加热和 地表湿润状况有密切联系,总体而言,感热通量 和潜热通量的年变化特征模拟得比较好, 感热通 量全球、北半球和南半球模拟结果和再分析资料 之间的相关系数分别为 0.81、0.94、0.97, 潜热 通量全球、北半球和南半球模拟结果和再分析资 料之间的相关系数分别为 0.90、0.67、0.89,均 通过 0.01 的显著性水平,其中南半球的相关系数 比北半球要高一些,分别为 0.97 (感热通量) 和 0.89(潜热通量)。全球和北半球平均的感热通量 (图 5a 和 5b)和潜热通量(图 5d 和 5e)呈现单 峰型,最大值都出现在6、7和8月,北半球此时 正处于夏季, 地表热量收支盈余较多, 辐射加热 增强,另外,北半球大部分地区此时都处于雨季, 土壤湿度加大, 感热通量和潜热通量都有较大的 提高。相反地,南半球的地表通量(图 5c 和 5f) 最大值出现在11、12和1月,而且最大值比北半 球要大一些,这和南半球的地理特征有关,南半 球的这3个月正好是当地夏季,与北半球相反。 相比而言,耦合模式输出的地表通量最大值比再 分析资料要偏小,再次反映了不同陆面参数化方 案的影响 (Pitman et al., 1999)。

#### 3.4.2 感热和潜热通量年变化相关场分析

从图 6 中可以看出,相关系数较大的区域主要分布在南、北半球的高纬地区,包括 30°N 以北的亚洲大陆和北美洲地区、非洲南部、澳大利亚南部、南美洲南部以及南极洲地区。比较图 6a 和 6b 可见,北半球的我国华东地区感热通量相关系数较小,在 0.3 以下,而潜热通量相关系数较大,



图 4 (a, c) AVIM-GOALS 模式和 (b, d) ERA-40 资料的全球地表 (a, b) 感热通量和 (c, d) 潜热通量标准差分布 Fig. 4 Standard deviations (STDs) of the global (a, b) sensible heat flux and (c, d) latent heat flux from (a, c) AVIM-GOALS and (b, d) ERA-40 reanalysis data

南半球的澳大利亚地区感热通量相关系数最高值 达0.9以上,而潜热通量相关系数分布较小,大 部分都在0.4以下。30°N以北的大部分地区、澳 大利亚南部、非洲南部和南美洲南部以及南极洲 地区都通过了 0.05 的显著性检验,这也说明耦合 模式在这几个地区地表通量的模拟在季节变化尺 度上与 ERA-40 资料结果较为一致。

对感热、潜热通量场求全球平均得到一个逐



图 5 (a, b, c) 感热通量和 (d, e, f) 潜热通量逐月变化: (a, d) 全球平均; (b, e) 北半球平均; (c, f) 南半球平均 Fig. 5 Monthly variations of the (a, b, c) sensible heat flux and (d, e, f) latent heat flux: (a, d) Global average; (b, e) the Northern Hemisphere average; (c, f) the Southern Hemisphere average

月变化的序列,全球每一个格点的感热、潜热通 量在12个月份中也有一个序列,求全球各个格点 与全球平均的地表通量相关系数和通过0.05显著 性水平的分布,这样的相关系数分布表示不同区 域对全球平均的地表通量的相对贡献(Dan and Ji,2007)。从图7可以看出,北半球的相关系数 分布都比较高,大部分在0.6以上,这和ERA-40 资料的结果(图8)非常一致,通过0.05显著性 水平的地区主要有20°N以北的北半球大部分地 区,以及20°S非洲一带,这说明上述地区在全球 平均的地表通量年变化上贡献较大。

## 4 结论

利用中国科学院东亚区域气候一环境重点实 验室(RCE-TEA)发展起来的耦合模式 AVIM-GOALS的积分结果,与欧洲中期天气预报中心 (ECMWF)提供的 ERA-40 再分析资料感热、潜 热通量场进行对比分析,得出以下主要结论:

(1) 耦合模式能够较合理地模拟出地表通量的纬向分布特征。其中感热通量的纬向分布为双峰型,以赤道为中心,南、北半球的两个副热带



图 6 AVIM-GOALS 和 ERA-40 的 (a、c) 感热通量和 (b、d) 潜热通量 (a, b) 相关系数分布及 (c, d) 统计检验。(c, d) 阴影表 示通过 0.05 显著性检验

Fig. 6 Distributions of (a, b) the correlation coefficients of the (a, c) sensible heat flux and (b, d) latent heat flux between AVIM-GOALS and ERA-40 reanalysis data and (c, d) their significance tests. Shaded areas in (c, d) are above the 95% confidence level according to the *t*-test



图 7 AVIM-GOALS模拟的和全球平均的(a、c)感热通量和(b、d)潜热通量(a,b)相关系数分布及(c,d)统计检验。(c,d) 阴影表示通过 0.05 显著性水平

Fig. 7 Correlation coefficients of (a, c) sensible heat flux and (b, d) latent heat flux between AVIM-GOALS simulation and its global mean and (c, d) their significance tests. Shaded areas in (c, d) are above the 95% confidence level according to the *t*-test



图 8 同图 7,但为 ERA-40 资料 Fig. 8 Same as Fig. 7, but for ERA-40 reanalysis data

地区的感热通量最大,而且随着季节的推移,两 个峰值在赤道南北两侧移动。而潜热通量从1~7 月是一个从单峰型到双峰型的转变过程,其中北 半球中高纬地区的潜热通量在7月有一个很大的 增长,这体现了这一地区明显的季节变化趋势 (Dan and Ji, 2007)。

(2) 对感热、潜热通量的空间分布特征分析 表明,耦合模式能够较合理地模拟出陆地上感热 通量和潜热通量的空间分布,1月的通量场高值 区主要分布在南半球,以及北半球的中南半岛、 北美洲南部等低纬地区,7月北半球的中高纬度 通量场均有很大的增加,而南半球的陆地由于纬 度都比较低,地表通量数值仍较高,反映了北半 球的季节变化比南半球明显。感热、潜热通量的 模拟与 ERA-40 资料空间相关系数分别为 0.55 (1 月)和 0.54 (7月)、0.65 (1月)和 0.33 (7 月),均通过 0.01 的显著性检验。

(3)全球感热、潜热通量标准差分布均表现 低纬地区小、高纬地区大的特征,耦合模式能够 较好地模拟出来,而局部地区的模拟范围和数值 有所偏差,这也说明进一步改进气候模式里的陆 面过程具有重要意义,对气候和天气的模拟改善 将具有促进作用。

(4) 感热、潜热通量的年变化特征模拟较好,

全球、北半球和南半球模拟输出和再分析资料之间均有较高的相关系数,且都通过了 0.01 的显著性检验,其中北半球的相关系数达到了 0.97 (感热通量)和 0.89 (潜热通量)。全球和北半球平均的地表通量呈现单峰型,最大值都出现在 6、7 和 8月。相反的,南半球由于季节与北半球相反,感热、潜热通量最大值出现在 11、12 和 1 月,而且最大值比北半球要大一些。

(5) 进一步分析感热、潜热通量模拟结果和 再分析资料的年变化相关系数空间分布特征表明, 相关系数较大的区域主要分布在南、北半球的高 纬地区,包括 30°N 以北的亚洲大陆和北美洲地 区、非洲南部、澳大利亚南部、南美洲南部以及 南极洲地区。其中 30°N 以北的大部分地区,南半 球的澳大利亚南部和南美洲南部以及南极洲地区 都通过了 0.01 的显著性水平,这也说明耦合模式 在这几个地区季节变化较为明显。另外对耦合模 式输出的地表通量和全球平均结果的相关系数分 析表明,北半球的相关系数大部分地区在 0.6 以 上,这和再分析资料的结果比较一致,而且通过 0.05 显著性检验的地区主要有 20°N 以北的北半 球大部分地区,以及 20°S 非洲一带,这说明上述 地区在全球平均的地表通量年变化上贡献较大, 是在季节尺度上通量变化的敏感区。

#### 参考文献 (References)

- 鲍艳,左洪超,吕世华,等. 2004. 干旱区陆面过程参数改进对气 候模拟结果的影响 [J]. 高原气象,23 (2): 220 227. Bao Yan, Zuo Hongchao, Lü Shihua. 2004. The effect of improved land surface process parameters in arid area on climatic simulation in GCM [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (2): 220 227.
- 布和朝鲁,纪立人,崔茂常. 2002. 夏季我国干旱、半干旱区陆面 过程能量平衡及其局地大气环流 [J]. 气候与环境研究,7(1): 61-73. Bueh Cholaw, Ji Liren, Cui Maochang. 2002. Energy balance of land surface process in the arid and semi-arid regions of China and its relation to the regional atmospheric circulation in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7(1): 61-73.
- 陈克明,张学洪,金向泽,等. 1997. 一个用于全球气候变化研究 的海洋大气环流耦合模式 I. 模式的形成及性能 [J]. 海洋学 报,19(3):21-32. Chen Keming, Zhang Xuehong, Jin Xiangze, et al. 1997. A coupled ocean - atmosphere general circulation model for studies of global climate change. I. Formulation and performance of the model [J]. Acta Oceanologia Sinica (in Chinese), 19(3): 21-32.
- Covey C, Joussaume S, Kattsov V, et al. 2001. Model Evaluation [M] // Climate Change 2001: The Science of Climate Change, Contribution of Working Group 1 to Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton T, Ding Y, Griggs D J, et al, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 881pp.
- Cui Yang, Wang Chenghai. 2009. Comparison of sensible and latent heat fluxes during the transition season over the western Tibetan Plateau from reanalysis datasets [J]. Progress in Natural Science, 19, 719-726.
- Dan Li, Ji Jinjun, Li Yinpeng. 2002. Climate simulations based on a different-grid nested and coupled model [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 19 (3): 487-499.
- Dan Li, Ji Jinjun. 2007. The surface energy, water, carbon flux and their intercorrelated seasonality in a global climate – vegetation coupled model [J]. Tellus, 59B (3): 425-438.
- 丁一汇. 1997. 地表通量的计算问题 [J]. 应用气象学报, 8 (1): 29-35. Ding Yihui. 1997. On some aspects of estimates of the surface fluxes [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 8 (1): 29-35.
- 高荣,董文杰,韦志刚. 2008. 西北干旱区感热通量异常对中国 夏季降水影响的模拟 [J]. 高原气象,27 (2):320-324. Gao Rong, Dong Wenjie, Wei Zhigang. 2008. Numerical simulation of the impact abnormity of sensible heat flux in northwest arid zone on precipitation in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (2): 320-324.

- Gates W L, Henderson-Selleres A, Boer G J, et al. 1995. Climate Models-Evaluation [M] // Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Contribution of Working Group 1 to Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton L T, Callander L G, Harris N, et al, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 572pp.
- 韩兴,汤燕冰. 2006. 我国范围内多个再分析地表通量数据集的可信度分析 [J]. 浙江大学学报(理学版),33 (2): 231-239.
  Han Xing, Tang Yanbing. 2006. Analysis on the reliability of reanalysis surface flux datasets for China [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition) (in Chinese), 33 (2): 231-239.
- Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis, Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1008pp.
- 惠小英,王澄海,左洪超,等. 2005. 中国北方干旱区感热及潜 热的异常特征 [J]. 高原气象,24(3):415-421. Hui Xiao ying, Wang Chenghai, Zuo Hongchao. 2005. Abnormal features of sensible and latent heat fluxes in arid region of Northern China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24(3):415-421.
- Ji Jinjun. 1995. A climate vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface [J]. Journal of Biogeography, 22: 445-451.
- 季劲均,黄玫. 2006. 青藏高原地表能量通量的估计 [J]. 地球科 学进展,21 (12): 1268 - 1272. Ji Jinjun, Huang Mei. 2006. The estimation of the surface energy fluxes over Tibetan Plateau [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 21 (12): 1268 - 1272.
- 李栋梁,魏丽,李维京,等. 2003a. 青藏高原地面感热对北半球 大气环流和中国气候异常的影响 [J]. 气候与环境研究,8(1): 60-70. Li Dongliang, Wei Li, Li Weijing, et al. 2003a. The effect of surface sensible heat flux of the Qinghai-Xizang Plateau on general circulation over the Northern Hemisphere and climatic anomaly of China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8(1): 60-70.
- 李栋梁,李维京,魏丽,等. 2003b. 我青藏高原地面感热通量及 其异常的诊断分析 [J]. 气候与环境研究,8(1):71-83. Li Dongliang, Li Weijing, Wei Li, et al. 2003b. A diagnostic study of surface sensible heat flux anomaly over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8(1):71-83.
- 李茂善, 马耀明, 孙方林, 等. 2008. 纳木错湖地区近地层微气 象特征及地表通量交换分析 [J]. 高原气象, 27 (4): 727 - 732. Li Maoshan, Ma Yaoming, Sun Fanglin, et al. 2008. Characteristics of micrometeorology and exchange of surgace energy in the Namco region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (4): 727 - 732.
- 吕建华. 1999. 区域性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, 160pp. Lü

Jianhua. 1999. The simulation of interaction between atmosphere and vegetation on regional and annual scale [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 160pp.

- 卢萍, 宇如聪. 2008. 地表潜热通量对四川地区降水影响的数值 分析 [J]. 高原山地气象研究, 28 (3): 1-8. Lu Ping, Yu Rucong. 2008. Numerical analysis on the impacts of surface latent heat flux transport on Sichuan rainfall process [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 28 (3): 1-8.
- Ma Y J, Fan S A, Ishikawa H. 2005. Diurnal and inter-monthly variation of land surface heat fluxes over the central Tibetan Plateau area [J]. Theor. Appl. Climatol., 80: 259-273.
- 马耀明,李茂善,马伟强,等. 2003. 西北干旱区及高原上卫星遥 感非均匀地表区域能量通量研究 [J]. 干旱气象,21 (3):34-42. Ma Yaoming, Li Maoshan, Ma Weiqiang, et al. 2003. The study of regional land surface heat fluxes over heterogeneous landscape in northwest arid areas and Tibetan Plateau by using satellite remote sensing [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 21 (3): 34-42.
- Pitman A J, Henderson-seller A, Desborough C E, et al. 1999. Key results and implications from phase 1 (c) of the project for intercomparison of land-surface parameterization schemes [J]. Climate Dyn., 15: 673-684.
- 吴国雄,刘屹岷,刘新,等. 2005. 青藏高原加热如何影响亚洲 夏季的气候格局 [J]. 大气科学,29 (1):47-56. Wu Guoxiong, Liu Yimin, Liu Xin, et al. 2005. How the heating over the Tibetan Plateau affects the Asian climate in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (1): 47-56.
- Wu Tongwen, Liu Ping, Wang Zaizhi, et al. 2003. The perform-

ance of atmospheric component model R42L9 of GOALS/LASG [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 20 (5); 726-742.

- 余莉. 1996. 草原生态系统植被与大气、土壤相互作用的数值模 拟[D]. 中国科学院大气物理研究所硕士学位论文, 148pp. Yu Li. 1996. The simulation of interaction between vegetation, atmosphere and soil in the grass ecosystem [D]. M. S. thesis (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 148pp.
- 俞永强,张学洪. 1998. 一个修正的海气通量距平耦合方案 [J].
  科学通报,43 (8): 866-870. Yu Yongqiang, Zhang Xuehong.
  1998. A modified monthly flux anomaly scheme for coupling an AGCM and an OGCM [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 43 (8): 866-870.
- 张鹏飞,李国平,尹建昌. 2009. 青藏高原西部地表通量输送的 低频特征 [J]. 高原气象,28 (3): 556-563. Zhang Pengfei, Li Guoping, Yin Jianchang. 2009. Low frequency oscillation characteristics of the surface heat fluxes in western Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (3): 556-563.
- 张韬,吴国雄,郭裕福. 2002. 海一陆一气全球耦合模式能量收 支的误差 [J]. 气象学报,60(3):278-289. Zhang Tao, Wu Guoxiong, Guo Yufu. 2002. Energy budget bias in global coupled ocean - atmosphere - land model [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese),60(3):278-289.
- 张耀存,况雪源. 2006. 一个气候系统模式 FGCM0 对东亚副热带 西风急流季节变化的模拟 [J]. 大气科学,30(6):1177-1188. Zhang Yaocun, Kuang Xueyuan. 2006. Simulation of seasonal variation of the East Asian subtropical westerly jet in a coupled climate system model FGCM0 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1177-1188.