

智海, 王盘兴, 俞永强, 等. 2009. 一个海陆气耦合模式中大气-植被的年际变化及其相互作用 [J]. 气候与环境研究, 14 (5): 509-522. Zhi Hai, Wang Panxing, Yu Yongqiang, et al. 2009. Climate-vegetation interannual variability and interaction in a coupled atmosphere-ocean-land model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (5): 509-522.

# 一个海陆气耦合模式中大气-植被的年际变化及其相互作用

智海<sup>1,2</sup> 王盘兴<sup>1</sup> 俞永强<sup>2</sup> 丹利<sup>3</sup> 徐永福<sup>4</sup> 郑伟鹏<sup>2</sup>

1 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室和大气科学学院, 南京 210044

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

3 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

4 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

**摘要** 含有动态植被过程的陆面模式 Atmosphere-Vegetation Interaction Model (AVIM) 与中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (IAP/LASG) 的 9 层大气环流模式 AGCM 及 20 层的海洋环流模式 (OGCM) 耦合, 建立了一个全球模式 (GOALS-AVIM) 并进行 100 年的模拟积分。后 40 年的结果分析表明, 该耦合模式能够合理地模拟大气及陆地生态系统显著的年际变化。用奇异值分解 (SVD) 分析了东亚地区植被生长和气候变化的相互关系, 发现在东亚区域的植被净初级生产力 (NPP) 强弱的变化对应着大气环流的变化, 特别是 NPP 分别与 850 hPa 的风场和 500 hPa 的高度场表现出很强的时空一致性。在东亚地区, 由于植被类型的不同, 导致 NPP 年际变化与降水、表面气温、短波辐射的年际变化的相关性不同, 它们的年际变化与相关物理量场的年际变化表现出很强的植物种类的区别。

**关键词** 年际变化 耦合模式 动态植被过程 双向作用

**文章编号** 1006-9585 (2009) 05-0509-14 **中图分类号** P461+.2 **文献标识码** A

## Climate - Vegetation Interannual Variability and Interaction in a Coupled Atmosphere-Ocean-Land Model

ZHI Hai<sup>1,2</sup>, WANG Panxing<sup>1</sup>, YU Yongqiang<sup>2</sup>, DAN Li<sup>3</sup>, XU Yongfu<sup>4</sup>, and ZHENG Weipeng<sup>2</sup>

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education and College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

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

3 Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**收稿日期** 2008-07-08 收到, 2009-06-26 收到修定稿

**资助项目** 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 IAP07114, 国家自然科学基金资助项目 40605025、40675049, 中国科学院知识创新项目 KZCX2-YW-214, 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400506

**作者简介** 智海, 男, 1966 年出生, 博士, 主要从事陆气相互作用与气候模拟研究。E-mail: zhihai@mail.iap.ac.cn

**通讯作者** 俞永强, E-mail: yyq@lasg.iap.ac.cn

**Abstract** A coupled atmosphere-ocean-land model, GOALS-AVIM, is developed in the Institute of Atmospheric Physics (IAP), and its performance is described. The coupled model is based on an IAP/LASG climate model (GOALS) and a land-surface model with dynamic vegetation processes (Atmosphere - Vegetation Interaction Model, AVIM). It has been run 100 model years and the last 40-year output is analyzed. The coupled model (GOALS-AVIM) simulates some significant interannual variability of atmospheric circulation and terrestrial ecosystem. Using singular value decomposition (SVD) analysis, the relationship between ecosystem and atmospheric circulation in the East Asia is explored. It shows that the strengthening and weakening of East Asian monsoon characterized by the geopotential height at 500 hPa and the wind field at 850 hPa correspond to the spatiotemporal pattern of net primary production (NPP). The correlation coefficients between NPP and air temperature, precipitation and solar radiation are different in interannual variability because of the variation in vegetation types.

**Key words** interannual variability, coupled model, AVIM, two-way interaction

## 1 引言

气候模式是研究气候系统的工具之一,除了大气环流模式之外,还包括海洋模式、海冰模式以及陆面模式等气候系统分量模式。对于耦合气候模式来说,任何一个分量模式所需要的边界条件都可以从其他分量模式输出得到,因此耦合模式能够更合理地反映圈层之间的相互作用(Lorenz et al., 1955; 张韬等, 2006)。人们在气候系统内部之间的相互反馈作用方面做了大量的研究(Charney et al., 1975; Schlesinger et al., 1991; Sellers et al., 1997; Pielke, 1998; Cramer et al., 2001; Brovkin 2002; Sitch et al., 2003), Brovkin (2002) 指出气候因子是控制全球植被分布的主要因素,反过来植被的变化通过改变陆面的反射率、粗糙度、水分含量等物理特性影响气候变化。

中国科学院大气物理研究所(IAP)从1993年开始研制并发展了包括海洋、大气、海冰和陆面相互作用的全球耦合环流模式GOALS(Global Ocean-Atmosphere-Land System Model)。该模式是在一个20层海洋环流模式(Zhang et al., 1996)和一个9层大气环流谱模式(Wu et al., 1996)的基础上发展起来的。Liu et al. (1996)最先将上述两个模式初步耦合起来,随后俞永强等(1998)进一步改善了这个耦合模式,成功地抑制了气候漂移并将耦合区域由开洋面扩展到海冰区。同时,大气模式本身也在不断地改进,引进了先进的辐射方案、陆面过程和云辐射参数化方案(Liu et al., 1997, 1998);最后,又成功地完成了改进的大气模式与海洋模式的耦合,真正

实现了一个完整的海洋-大气-陆面耦合系统模式(吴国雄等, 1997)。

随着模式分辨率提高和物理过程改进,模式对气候平均态的模拟效果有显著地改进(吴统文等, 2004a),特别是动态植被模式加入到了陆面过程中,为陆面生物大气的双向相互作用研究奠定了基础。其中值得一提的是Ji(1995)提出的植被大气相互作用模式(AVIM),该陆面过程实现了生态系统和气候系统之间的双向耦合。其他一些陆面模式,如SiB2(Henderson-Sellers et al., 1996)和LSM(Bonan, 1996),尽管都可以模拟植被与大气之间的热量水分交换,但它们与AVIM相比主要差别在于其植被特征参数的年变化是给定的,不受气候变化的影响,而AVIM中植被的变化由植被生长模式计算,因而随气候而改变,实现了大气与植被的相互作用过程(季劲钧等, 1999)。目前AVIM已经与中国科学院大气物理研究所的IAP/LASG L9R15大气环流模式完成了物理过程(Dan et al., 2002)和生物过程(Dan et al., 2005a)的耦合,实现了陆气相互作用的双向耦合。最近,AVIM与大气谱模式(SAMIL\_R42L9)耦合(Zeng et al., 2008a, 2008b),为研究气候和生物圈的相互作用、全球陆地生态系统的碳循环提供了新的研究工具。

本文把一个含有动态植被过程的陆面模式,即植被大气相互作用模式(AVIM)与大气环流模式(AGCM)、海洋环流模式(OGCM)耦合,完成了全球海陆气耦合模式(GOALS-AVIM)。利用GOALS-AVIM在植被-大气双向作用背景下模拟气候特征,在长时间积分的基础上,模拟研究相关物理量的年际变化信号,着重研究东亚地区的气候系

统与陆面净初级生产力 (NPP) 的变化关系。

为了上述的研究目的, 本文的第二节简单介绍了耦合的各分量模式及实验方案; 第三节第一部分评估了耦合模式对年际变化的模拟能力; 第二部分通过分析大气的风场、高度场、陆面过程 NPP 年际变化及相关关系, 来解释全球气候变化对陆面 NPP 的作用, 找出不同物理量的“相关模态”关系; 第三部分针对不同植被类型对 NPP 与降水、表面气温、太阳辐射的年际变的关系进行了分析。在此基础上, 探讨了气候变化对 NPP 的影响机理。

## 2 模式简介及试验方案

本文使用的模式为 GOALS-AVIM, 模式中的 AGCM 为 15 个菱形截断波, 垂直分为 9 层, 水平分辨率为  $7.5^{\circ}$  (经度)  $\times 4.5^{\circ}$  (纬度); OGCM 垂直不等距分为 20 层, 水平分辨率为  $5^{\circ}$  (经度)  $\times 4^{\circ}$  (纬度); AVIM 分辨率为  $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ , 模式包括 3 层土壤、1 层植被和 12 种植被类型。陆面物理过程具有 8 个预报量, 即植被对降水的截留量、地表雪盖量、植被冠层、土壤表层和土壤深层的温度以及土壤含水量; 生物物理过程预报量主要有叶面积指数; AVIM 预报量主要有植被 NPP 和生物量 (丹利, 2003)。由于大气模式分辨率较低, 陆面模式分辨率较高, 所以采用了垂直方向单位网格嵌套耦合的方法 (Dan et al., 2002)。利用各个子模式独立运行的平衡态作为耦合模式的各分模式初始场, 连续运行 100 年, 对后 40 年输出结果进行分析。

地面气温对比资料采用 1949 ~ 2006 年 NCEP/NCAR 再分析逐月资料 (Kalnay et al. 1996), 网格分辨率  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。降水对比资料采用 1979 ~ 2003 年 NOAA CMAP [Climate Prediction Center (CPC) Merged Analysis of Precipitation] 全球逐月资料, 网格点分辨率  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  (Xie et al., 1997)。

## 3 结果分析

### 3.1 年际变化

研究表明 (季劲钧等, 1999), 植被的生理过

程、物理过程对水热条件依赖很大, 同时植被的改变也影响着其与大气的水热交换。对耦合模式年际变化的模拟评估时, 特意选择地面气温、降水与 NPP。为了分析耦合模式输出场的年际变化特征, 分别计算相应变量在每一个网格点上的标准差, 其结果描述了时间序列样本资料与平均值差异的平均状况的统计量, 代表了与资料平均值的平均变化幅度 (黄嘉佑, 2004)。对于每一个格点, 都可以得到一个 40 年年平均数据的时间序列。对于 NPP、叶面积指数 (LAI)、地面气温、降水资料, 分别作了距平的标准化处理, 对代表年际变化的标准差进行分析比较。

#### 3.1.1 净初级生产力与叶面积指数

从图 1 看到, 在植被生长季节分明的地区, NPP 与 LAI 标准差分布和它们自身的气候态分布相似, 即 NPP 和 LAI 的大值区对应 NPP 和 LAI 的标准差的大值区, 反之亦然。而在荒漠、冰原和受海洋性气候影响的地区, 不论 NPP 的值大小, 标准差都很小, 并且年际变化也都很小。在北半球, NPP 标准差的大值区分布在西伯利亚和东欧平原以及北美的北部, 这些地区分布着长绿针叶林; 在太平洋沿岸, 印度半岛、中南半岛受海洋气候和季风气候的影响, NPP 的年际变化很小, NPP 标准差值为 6~12 之间; 北半球 NPP 标准差的最大值出现在中南半岛上, 数值达到 18 左右。北半球 NPP 标准差的小值区分布在格陵兰岛、青藏高原、阿拉伯及撒哈拉沙漠地区, 这里由于被冰雪覆盖或属于沙漠地区, 常年植物稀少。南半球的高值区位于赤道附近的非洲中部和南美亚马逊平原, 全球的最大值出现在亚马逊, 最大值超过 20。澳大利亚东部的 NPP 值很高, 但标准差却很小, 因为该地区植被常年有较为旺盛的生长。

NPP 和 LAI 标准差的全球分布模态非常相似, 从全球角度来看, NPP 和 LAI 有很强的同期相关, 这点从两个量的生态学意义上可以得到解释 (Dan et al., 2007b)。

#### 3.1.2 表面气温场

图 2a 为 GOALS-AVIM 模拟的表面气温标准差, 从空间分布上看与表面温度气候态的分布模态十分相似。代表气温年际变化的标准差普遍大于比海面, 这是因为受下垫面海洋特性的影响,

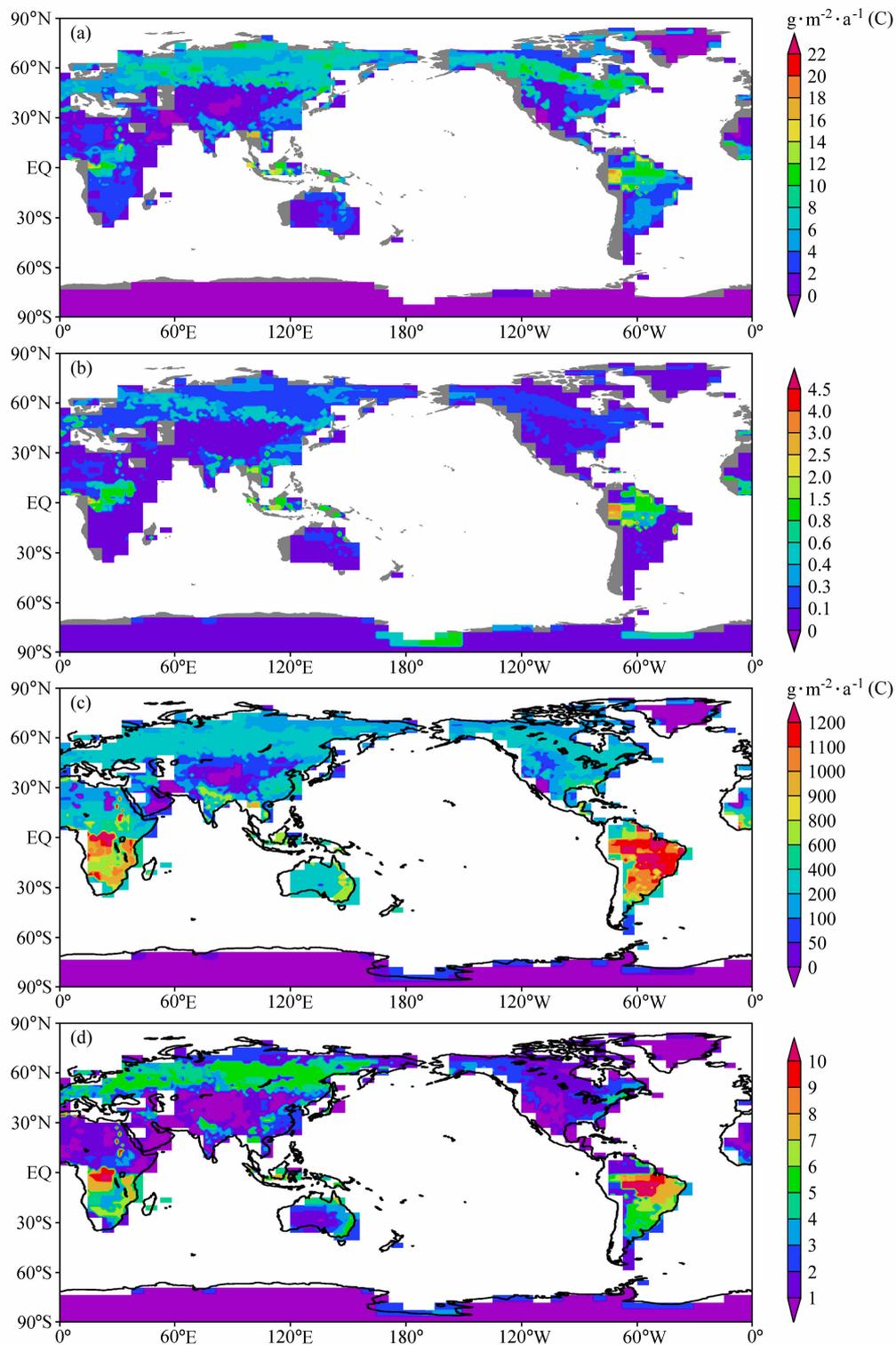


图1 (a) NPP、(b) LAI年际变量年平均标准差分布；模式模拟的 (c) NPP、(d) LAI年平均气候态  
Fig.1 Annual mean (a) NPP and (b) LAI ; global distribution of the standard deviation (STD) of (c) NPP and (d) LAI

特别是在高纬度的海洋边界地区，年际变化的标准差更大，可能与海冰的年际变化有关。而在北冰洋的大部分区域，由于海面终年被冰覆盖，海

温的年际变化比较小；在南极大陆周围冰水过渡带地区，由于海冰的年际变化十分明显，海温年际变化的标准差也较大（俞永强，1997）。表面气

温的标准差表现出以下特点：在陆地上，中高纬地区的年际变化标准差明显比低纬地区的大，并陆地大于海洋；在特殊下垫面的区域有很强的标准差，如在澳大利亚西部的沙漠地区和巴西高原标准差就较大。

与观测资料相比（图 2c），在大部分区域模拟的值偏小，耦合模式对于有些区域模拟的不够好，尤其在海上偏小的程度较大，说明模式中的海表面温度（SST）年际变化对表面气温的年际变化有重要影响，在海洋上起决定性作用（吴统文等，2004b）。

从耦合 AVIM 前后表面气温标准差的比较来看（图 2a、b），两个模式都能模拟出表面气温年际变率的基本分布特征。相比而言，耦合前后模式模拟的标准差都较强，而且大值区在中高纬度尤其明显，另外标准差大值中心的位置都模拟的不准确。标准差偏强的缺点在陆地上耦合 AVIM 后有所改善；同时，耦合 AVIM 后在青藏高原西侧出现了大值区，与实测相符，而耦合前没有模拟出这一中心。在热带海洋上，由于耦合了 AVIM，模拟结果比耦合前有所改善，其强度大于耦合前，但同观测相比仍偏弱。尽管耦合

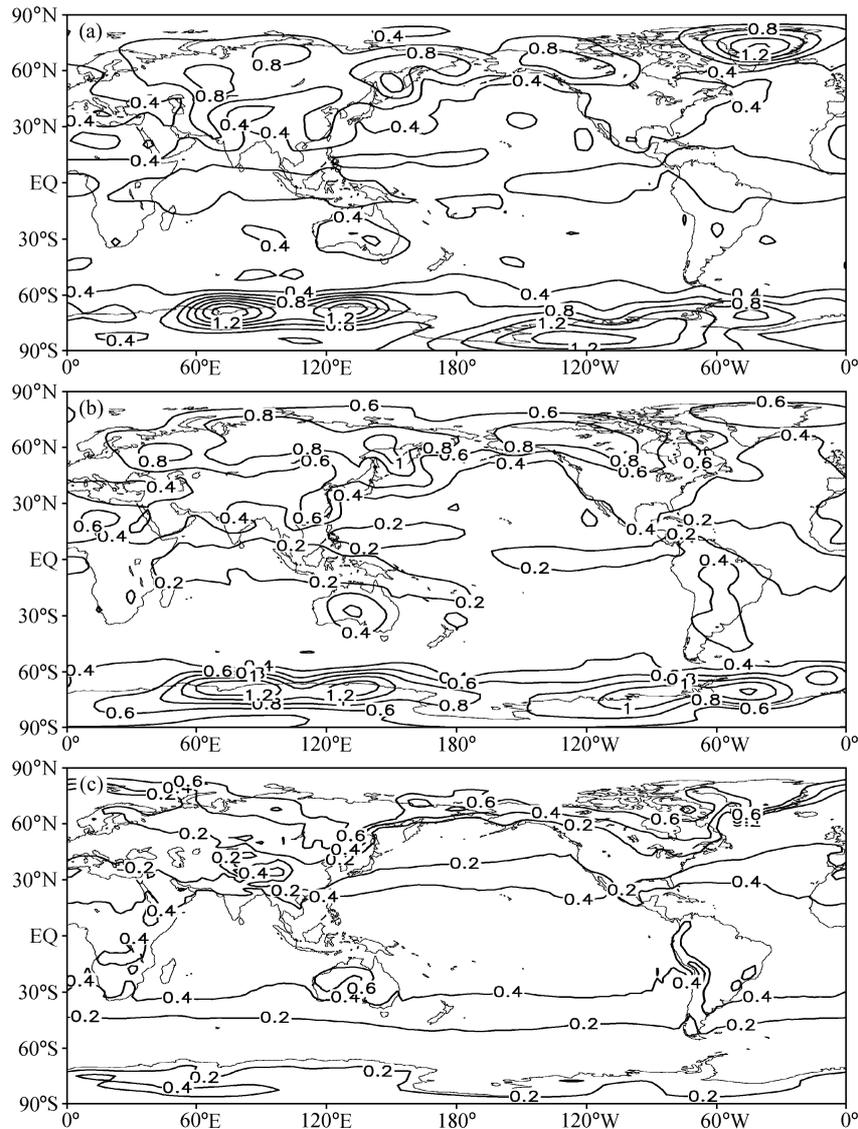


图 2 全球表面气温年平均标准差分布（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）：(a) 耦合 AVIM 后；(b) 耦合 AVIM 前；(c) NCEP 再分析资料

Fig. 2 Global distribution of the standard deviation (STD) of surface air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ): (a) Coupled model; (b) before coupled with AVIM; (c) NCEP re-analysis data

AVIM 前后的结果相差不大, 但耦合后改善了耦合前在陆地上偏强、海洋上偏弱的缺点, 同时模拟出了青藏高原附近的高值中心, 在北半球大陆上模拟表面温度的年际变率空间分布也较耦合前准确, 可能由于模式耦合 AVIM 的下垫面的不同植被类型与大气的双向作用产生了效果。

### 3.1.3 降水场

如图 3a 所示, 降水量标准差的空间分布与年平均降水量气候态分布十分相似, 即降水量大(小)的区域年际变化也大(小), 降水量小的地区年际变化也小, 变率的大小与降水量成正相关。

耦合模式模拟出了印尼和东南亚一带、南美、非洲东南部和热带中太平洋等地的变率高值区。与观测相比(图 3c), 海洋上模拟值偏小, 非洲北部、亚洲和北美内陆等地的低值区与实测值较吻合; 而赤道太平洋和大西洋的东部、副热带沙漠地区都是降水量年际变化较小的区域, 标准差的数值较小; 在南亚地区模式模拟出实测不存在的大值区, 这与模式对高原地形的处理有关(Dan et al., 2005b)。

比较耦合 AVIM 前后(图 3a、b), 两个模式都模拟出了全球降水年际变率的基本特征, 如降

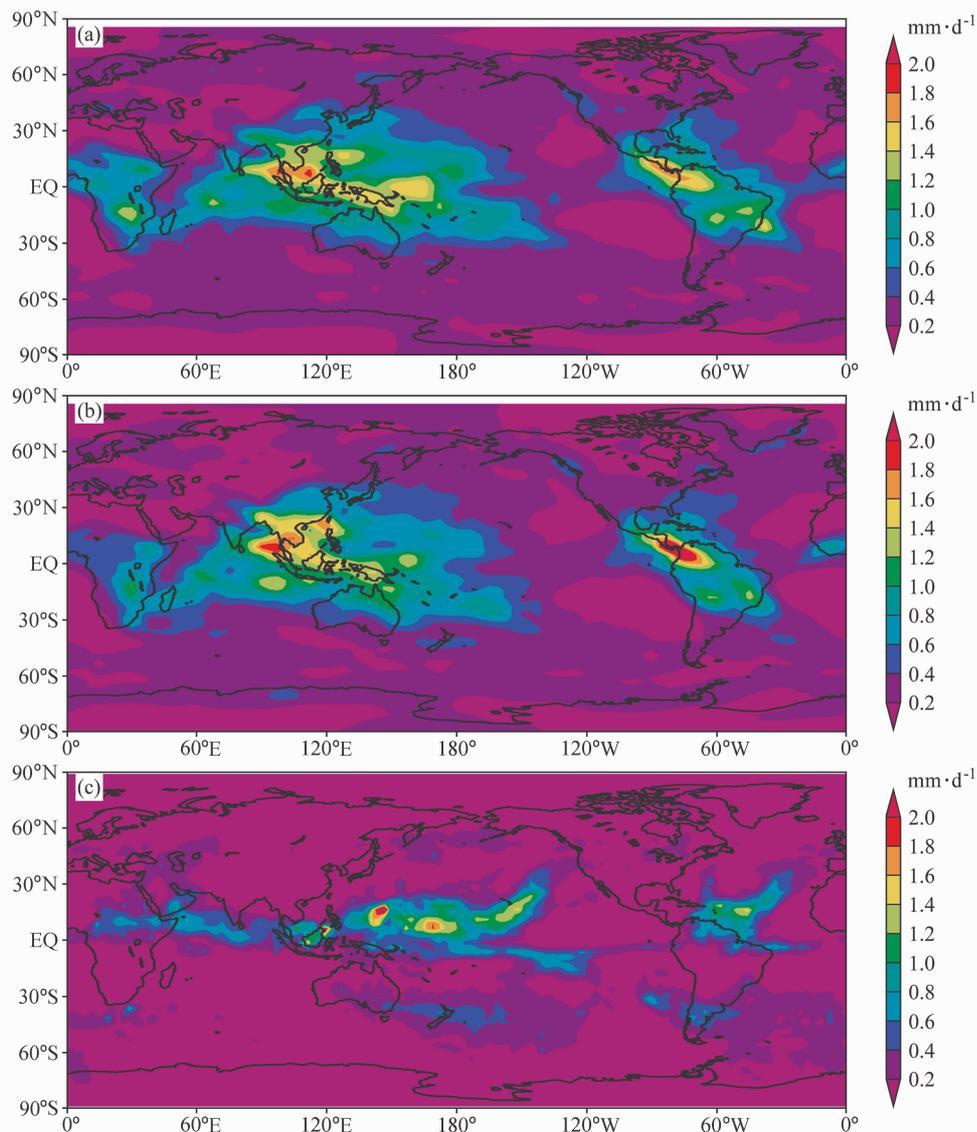


图 3 全球降水场年平均标准差分布 (STD): (a) 耦合 AVIM 后; (b) 耦合 AVIM 前; (c) Xie-Arkin 降水观测资料

Fig. 3 Global distribution of the standard deviation (STD) of precipitation: (a) Coupled model, (b) before coupled with AVIM, (c) Xie-Arkin precipitation observation data

水变率较大的区域主要集中在热带地区，而且大值区都位于赤道，全球年际变率最大的区域位于东南亚、中美洲地区，降水量大的区域对应变率较大的中心等。对于耦合 AVIM 前后的模拟相比，耦合前的模式也模拟出了主要变率中心，如从热带印度洋、热带太平洋到中美洲亚马逊平原的强变率中心等，但耦合 AVIM 前位于陆地上结果比观测资料的年际变率偏强，年际变率大于 0.6 的区域较观测大，而且在南部非洲出现了虚假的变率中心。耦合 AVIM 后，模拟结果显示变率中心的值相比耦合前降低，向观测值靠近；在海上，耦合 AVIM 前后的模拟结果都比实测偏弱，但耦合后变率大于 0.6 区域沿赤道东延的程度比耦合前大，改善了耦合 AVIM 前赤道降水变率偏弱的现象；同时，耦合后降低了耦合前位于亚洲南部的虚假变率值。

### 3.2 耦合模式相关场的奇异值分解

利用奇异值分解 (SVD) 分别计算它们各特征值左、右场展开时间系数间的相关模态，而且相关系数反映了每一模态左、右场的相关程度。其意义表示一个场的时间变化对另一个场的相关分布状况，显著相关区代表了两要素场相互影响的关键作用区，有利于寻找指标左、右奇异向量场代表自身场的分布结构 (吴洪宝等, 2005)。

本文将耦合模式输出的 NPP 与 500 hPa 高度场和 850 hPa 风场进行距平标准化后，进行 SVD 分析。将 NPP 作为左场，时间序列为 40 年夏季 (JJA) 的区域距平值，区域按照东亚的地理区域取 ( $20^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ )，即亚洲东部、太平洋西侧；500 hPa 高度场、850 hPa 的风场分别作为右场，也同样取同期 40 年夏季 (JJA) 的距平值，所取区域为了分析较完整大气环流系统，区域做了相应的外延，定为 ( $0\sim 60^{\circ}\text{N}$ ,  $60^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{E}$ )。

#### 3.2.1 NPP 与 850 hPa 风场奇异值分解

由奇异值分解结果 (表 1) 可见，前两对奇异向量可解释 46% 的总协方差，相关系数也很高，说明前两对奇异向量在相关函数构成中有特别重要的意义。年际尺度上，SVD 前两对模态的总方差的贡献率 ( $\rho$ ) 分别为 26.3%、19.8%，相关系数 ( $\gamma$ ) 为 0.849、0.835，利用 Monte Carlo 显著性检验 ( $t$  检验) 分析 SVD 分解出的 NPP 与 850

hPa 的风场前两对模态的相关性，当  $\alpha=0.05$  时，实验给出协方差的临界值 ( $\rho_{\alpha}$ ) 为 25.6%，相关系数的临界值 ( $\gamma_{\alpha}$ ) 为 0.661。由于  $\rho_1 > \rho_{\alpha}$ ,  $\gamma_1 > \gamma_{\alpha}$ , SVD 分解的第一对模态通过 Monte Carlo 显著性检验，表明第一特征值的一对模态二者间遥相关存在显著的准同步性。

表 1 NPP 与 850 hPa 风场奇异值分解结果

Table 1 The SVD of NPP and 850-hPa wind field

奇异值	协方差 $\rho$	相关系数 $\gamma$	NPP 方差	850 hPa 风场方差
第一对	26.3%	0.849	17.1%	17.8%
第二对	19.8%	0.835	4.2%	8.6%

从图 4a 看到左场 NPP 的正相关系数主要分布在贝加尔湖以东、日本列岛中部、黄海及辽东半岛、云贵高原；负值区分布在贝加尔湖及以南地区，我国东北、华北、华东沿海，负距平最小区域位于我国西北地区，总的特征是负值区域大于正值区域，既东亚区域 NPP 减少的趋势大于 NPP 增加的趋势。

右场为对应的 850 hPa 风场距平的特征向量模态 (图 4b)，因为所分析的时间序列为每年的夏季，因此关注的是南风距平即夏季风的变化。图上异常的特征是相关系数的大值区位于海上，纬向分量明显大于经向分量。南风风量异常区域由低纬东风带经中南半岛向北延伸分支，其中一支向西折往印度半岛，再向北延伸至巴尔克什湖转为偏东风异常；另一支向北经过我国华南地区，距平逐渐变小，沿我国大陆沿岸一直向北至日本海北部。比较而言，我国内陆地区风场的异常值很小。图 4c 为 SVD 分解的左、右场的时间系数，可以看到它们相关性很好，而且表现出很好的年际变化特征。

对东亚陆地植被与气候的相关性研究表明：陆地植被与降水表现为其相关系数高于与温度的相关系数，降水是影响东亚陆地植被净初级生产力的主要因子 (何勇等, 2005)。通过分析 SVD 分解出风场与降水场的时间变化关系，可以解释风场与 NPP 的内在的关联。图 5 为第一分量右场 850 hPa 风场的时间系数与降水场的同期相关东亚分布，可见经 SVD 分解的第一特征值的右场 850 hPa 风场分布模态与东亚地区的降水场正相关区

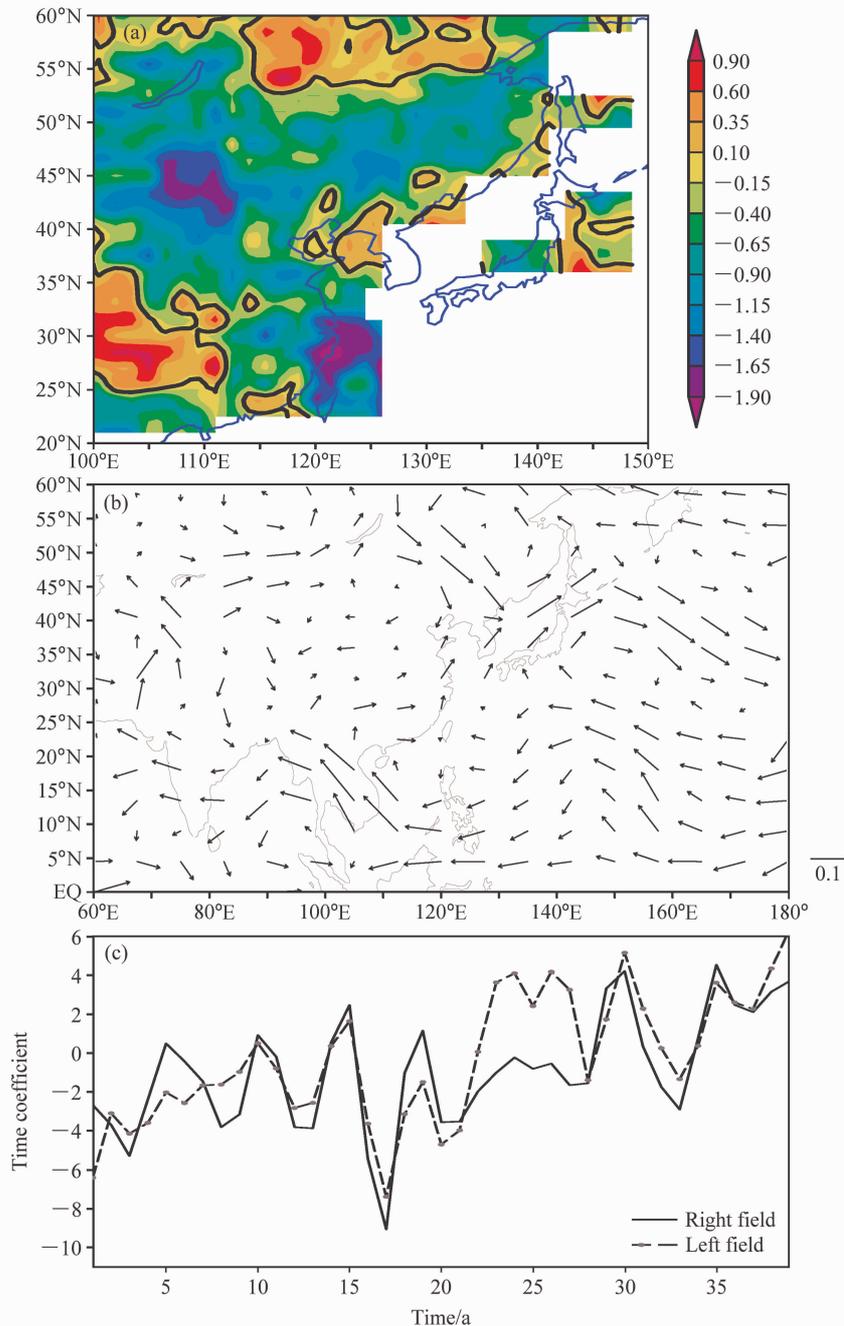


图4 模式输出的东亚地区NPP与850 hPa风场的SVD第一特征值对应的左、右向量场及时间系数:(a)为左场NPP距平奇异向量,(b)为右场850 hPa风场距平奇异向量,(c)为SVD分解的左、右向量场的时间系数(实线为左场的时间系数,点线为右场的时间系数)

Fig. 4 The first pair of eigenvalue of SVD for NPP and 850-hPa wind field; (a) The left singular vector of NPP anomaly; (b) the right singular vector of 850-hPa wind anomaly; (c) the time coefficients of the left and right fields from SVD (solid line is for the left field and dotted line for the right)

域分布在中国华南、华中一直延伸到东北地区,西北地区及西亚部分地区850 hPa风场的时间变率与降水场的变率有着同期正相关(时间序列的样本数为40,  $\alpha=0.1$ ,  $r_a=0.215$ ),即夏季风强

的年份对应着降水强的年份。相应负相关区分布在青藏高原、蒙古高原及东南沿海,表现为850 hPa风场的时间变率与降水场有着相关性很强的同期负相关。

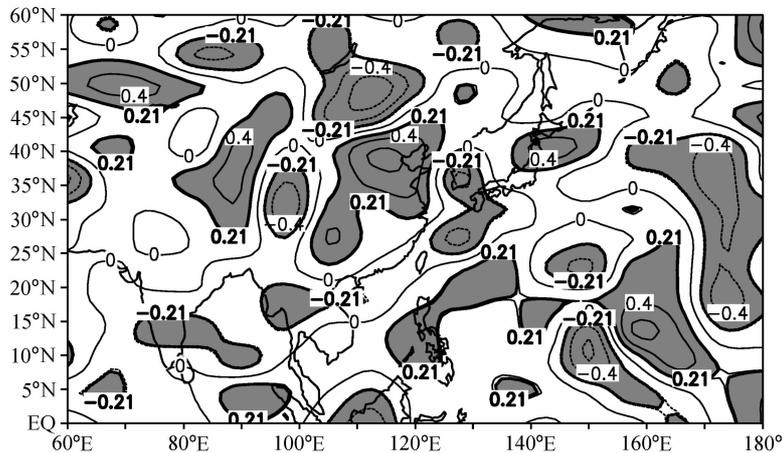


图5 第一特征量的右场 850hPa 的风场时间系数与夏季降水场的同期相关分布。阴影区为通过检验的区域

Fig. 5 The contemporaneous correlation distribution between the time coefficient of the right field of 850-hPa wind and summer precipitation, shadow is the area passing significance test

综合左、右特征值向量场的耦合特征，左场的 NPP 的正相关区域即 NPP 增加的区域对应着 850 hPa 风场的南风异常区域，也就是夏季风影响着 NPP 的大小，说明在东亚地区 850 hPa 风场与陆面植被的 NPP 有很强的同期正相关。东亚夏季风指东亚地区夏季盛行的偏南风，汤绪等（2006）指出东亚地区降水场、比湿场、风场、水汽输送场所描述的东亚夏季风边缘带位置基本一致，大致沿西南—东北走向自西向东经过黄河上游—华北北部—东北。夏季风边缘带附近的降水年际变化较大，且夏季降水量与季风强度呈正相关。当夏季风影响到西北、华北北部时，西北、华北夏季降水偏多，反之则偏少。如果东亚夏季风较强，偏南风会将热带地区充沛的水汽输送到偏北地区，我国北方降水将会增多，如果东亚夏季风较弱，则南方地区降水就会偏多，北方少雨，进而影响东亚地区 NPP 的变化（Dan et al., 2007a）。

### 3.2.2 NPP 与 500 hPa 高度场奇异值分解

从表 2 可知，500 hPa 高度场的 SVD 前两特征值协方差百分比为 39.0%、25.0%，分解的左右向量场的相关系数为 0.73、0.758，利用 Monte Carlo 显著性检验分析 SVD 分解出的 NPP 与 500 hPa 的高度场前两对模态的相关性 ( $\alpha = 0.05$ )，试验给出的  $\rho_\alpha$  为 36.2%， $\gamma_\alpha$  为 0.730， $\rho_1 > \rho_\alpha$ ， $\gamma_1 > \gamma_\alpha$ ，SVD 分解的第一对模态通过 Monte Carlo 显著性检验，表明第一特征值的一对模态二者间遥相关存在显著的准同步性。

表 2 NPP 与 500hPa 高度场奇异值分解结果

Table 2 The SVD of NPP and 500-hPa geopotential height

奇异值	协方差	相关系数 $\gamma$	NPP 方差	500 hPa 高度 场方差
第一对	39.0%	0.730	16.8%	21.6%
第二对	25.0%	0.758	8.9%	13.0%

由图 6a 可见左场 NPP 奇异值特征向量的正值区分布在贝加尔湖以东、以南区域，以及我国华东沿海、长江中下游、渤海湾、东北地区。NPP 的负值区分布在我国西北地区，外兴安岭地区，及部分华南地区，但负值区绝对值较小，负值的大值区位于我国西北地区。总的特点是正负相关区域成片分布，较为完整，且正相关区域大于负相关区域。对应右场 500 hPa 高度场的特征向量空间分布型可以看出（图 6b），从亚洲中纬度到赤道为广大的正值区，由我国华北地区向南到热带海洋有着明显位势高度距平的增加趋势。我国东北附近为主要的负值中心，远东基本为负值区。同样，从图 6c 可以看到 SVD 的左、右场的相关性很好，具有明显的年际特征。

作为大气最基本特征的高度场，是大范围天气气候形成和演变的基本原因之一。等压面的异常，尤其是持续异常，必然引起大范围或区域性天气气候的变化（李跃清等，2001）。李跃清等（2001）利用 SVD 方法研究了北半球 500 hPa 高度场与春季川榆地区气温场的关系，结果表明，

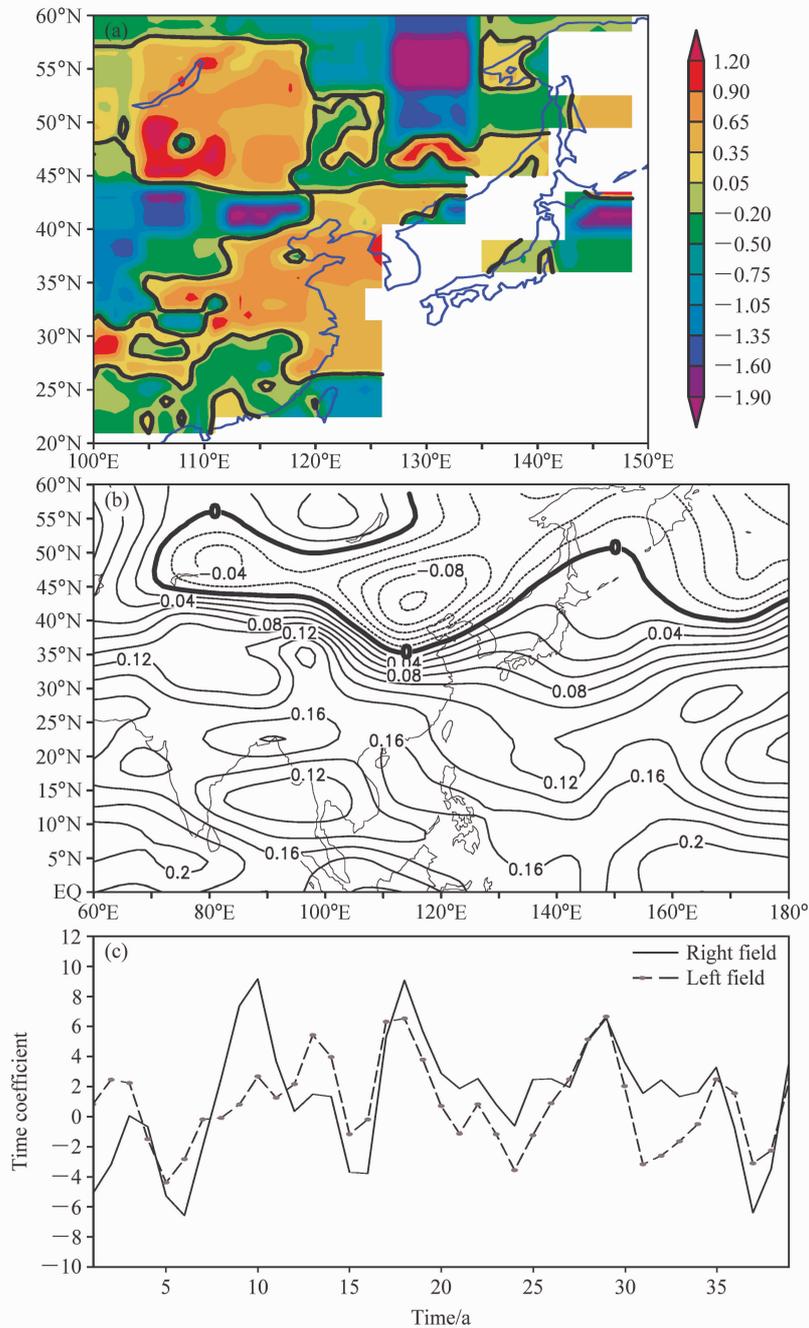


图6 模式输出的东亚地区NPP与500 hPa高度场SVD第一特征值对应的左、右向量场及时间系数：(a)左场NPP距平奇异向量，(b)右场500 hPa高度场距平奇异向量，(c)SVD分解的左、右向量场的时间系数（实线为左场的时间系数，点线为右场的时间系数）  
Fig. 6 The first pair of eigenvalue of SVD of NPP and 500-hPa geopotential height: (a) the left singular vector of NPP anomaly; (b) The right singular vector of 500-hPa geopotential height anomaly; (c) the time coefficients of SVD of the left and right fields (solid line is for the left and dotted line for the right)

前期10月和同期春季500 hPa高度场与川渝地区气温场具有密切的同步及非同步时空相关，两场间的主要耦合特征是我国东部500 hPa高度场升高（降低），相应地区春季气温升高（降低），大

气环流的异常演变，影响区域降水的大小。

同样，利用SVD分解的第一分量的右场500 hPa高度场的时间序列与降水场作同期相关，通过其时间变率相关关系来解释与高度场对应的

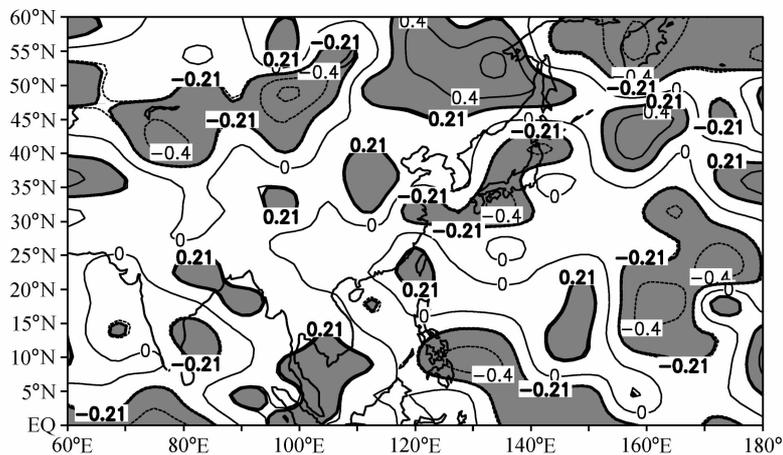


图7 第一特征量的右场 500 hPa 的高度场时间系数与夏季降水场的同期相关分布，阴影区为通过检验的区域

Fig. 7 The contemporaneous correlation distribution between the time coefficient of the right field of 500-hPa geopotential height and summer precipitation for the first eigenvalue, shadow is the area passing significance test

NPP 的相关的模式。从图 7 可以看到：正相关区从中南半岛伸向我国华南、西北、华北以及青藏高原，向北延伸到东北到贝加尔湖以东地区，正相关系数大的区域在贝加尔湖以西和华北地区。负值区分布在太平洋北部、日本海、我国华东地区及西西伯利亚地区。以上分析说明对于 NPP 和 500 hPa 高度场的 SVD 分解出的第一特征值的右场（500 hPa 高度场）时间系数与降水场的时间序列存在着相关关系（时间序列的样本数为 40，显著性水平  $\alpha=0.1$ ， $r_c=0.215$ ），所以可以认为 500 hPa 高度场通过影响降水场与 NPP 存在相关。高留喜等（2004）利用 SVD 方法探讨了 500 hPa 高度场与夏季降水的关系，指出，东亚春、夏季降水与北半球 500 hPa 高度场关系密切，降水与东亚上空 500 hPa 高度场具有很好的同步联系。500 hPa 高度距平场东高西低型是造成东亚夏季降水的主要大气环流形势，是造成少雨的主要大气环流形势。魏峰等（2005）指出，7 月上旬至 9 月上旬可代表主要降水区的雨季，西北地区雨季降水除与同期环流有关外，还与前期 500 hPa 环流有关，但不同时期的影响关键区有很大的不同。

从 NPP 与 500 hPa 高度场奇异值分解的第一对模态看，夏季西太平洋副热带高压和鄂霍次克海低压成为影响东亚 NPP 的最主要环流系统，这是由于这两个系统夏季的位置和强弱变化对应着奇异值分解的东亚 NPP 变化模态。也就是夏季季风系统的强弱和位置，导致东亚地区的年 NPP 的

增加和减少。

根据 NPP 和大气环流场的 SVD 分析，表明它们之间存在着很强的时空对应关系。大量的研究证明陆地生态动力学和大气动力学、大气成分变化、海洋环流、冰原扩张和轨道扰动等等重要（Texier et al., 1997; Claussen, 1997; 郑益群等, 2004; 张佳华等, 2002）。植被在气地相互作用方面扮演着重要的角色，地表植被的变化改变了下垫面的特征，如粗糙度和反照率等，极大地影响了地面的能量平衡和地气之间的通量传输，继而通过边界层的气象条件变化对大气环流起到反馈和调节作用。

### 3.3 不同植被类型的 NPP 与降水、表面气温、太阳辐射的年际变化关系

东亚地区的气候由东向西依次为海洋性的亚热带季风气候、大陆性温带季风气候和温带大陆性气候。下垫面包括高原、草原、戈壁、沙漠、森林、海洋，表面状况变化很大，气候-植被相互作用的过程远比其他地区复杂，这里陆地生态系统的时空变率表现出明显的对气候变率的响应特征（符淙斌等, 2002）。为了分析东亚地区不同的植被类型对气候变化的响应，将东亚地区几种类型植被的 NPP 年际变化与降水、表面气温、太阳辐射的年际变化进行相关分析，时间序列的样本数为 40，显著性水平  $\alpha=0.1$ ， $r_c=0.215$ 。

不同的植被类型与降水、表面气温、短波辐射的相关性不同，而且同一种植被的 NPP 与降水、

温度、短波辐射的同期相关也有强弱之分 (Nemani et al., 2003)。从表 3 看到, 东亚地区的不同植被 NPP 分别与表面气温、降水、短波辐射的年际变化相关系数。通过同期相关分析, 热带雨林 NPP 与气候因子的相关关系主要是与短波辐射的正相关关系, 其次为陆面气温, 但和降水相关不大, 可以认为在亚热带热带雨林闷热多雨的环境下, 短波辐射是影响植被生长的主要要素。这些地区总辐射的高低, 决定了植被光合作用的强度。落叶阔叶林、阔叶林和常绿针叶林 NPP 的年际变化与陆面气温、降水、短波辐射都表现出很强的正相关, 相比而言, 与短波辐射的正相关最强。从年际变化的角度, 这些植被分布在我国华东、华北区。处于东亚季风的影响区域, 陆面气温的高低, 降水的多少, 短波辐射的大小, 都影响了这些植被光合作用的强度, 进而影响生物量的数值大小。植被为混交林的 NPP 与降水的年际变化表现出较强的正相关, 与温度和短波辐射年际变化的相关性较弱。混交林分布在受大陆性干旱、半干旱气候影响的西北及华北区域, 这里夏季高温少雨, 太阳辐射强, 影响陆面植被 NPP 年际变化的主要因子是当地的降水, 降水的强弱决定了植被的生长状况。对植被为落叶针叶林区域的 NPP 年际变化与温度和短波辐射的年际变化有着很强的正相关, 与降水为负相关。落叶针叶林分布在亚寒带的东北地区, 当地植被的光合作用过程对温度及短波辐射的依赖较大 (Dan et al., 2007b), 陆面气温和短波辐射的高低决定了植被 NPP 的量级。

表 3 不同植被类型陆面 NPP 与降水、表面气温、短波辐射的相关关系

Table 3 The correlation coefficients between terrestrial NPP and climate factors (precipitation, surface air temperature, and solar radiation)

	陆面气温	降水	短波辐射
热带雨林	0.17	0.04	0.54*
落叶阔叶林	0.21	0.22*	0.30*
混交林	0.10	0.40*	0.10
常绿针叶林	0.15	0.24*	0.26*
落叶针叶林	0.30*	-0.11	0.22*
阔叶林	0.35*	0.30*	0.43*

注: \* 表示通过  $\alpha=0.1$  显著性水平检验

综合上述 NPP 与陆面气温、降水、短波辐射年际变化的相关性分析可知, 不同植被类型的 NPP 年际变化与气候要素场的年际变化有着不同的相关关系。由于植被的类型和植被所处的气候环境的不同, 使得当地植被的年际变化与气候场不同要素的年际变化表现出不同程度的相关关系。说明 GOALS-AVIM 由于陆气过程的双向作用, 把植被变化的信号与大气动态联系起来, 可以很好地模拟出植被 NPP 和气候场的年际变化以及它们之间的相关关系, 这只是耦合模式的一个初步结果, 更多的分析有待于今后的深入研究。

## 4 结论

利用 GOALS-AVIM 的积分结果, 对气候场的年际变化及东亚地区 NPP 与气候场年际变化的关系进行了分析, 可以得到:

(1) 通过 GOALS-AVIM 输出场的标准差分析, 耦合模式可以体现出很明显的年际变化特征。对于地面气温、降水、NPP 和 LAI, 气候态分布的值越大, 表现出的年际变化越强; 对于地面气温和降水场, 高纬大于低纬, 洋面大于陆地。全球的标准差表现出年际变化有很强的地域性。耦合 AVIM 前后的模拟结果相比, 陆地耦合后, 变率中心的值降低, 向观测值靠近; 而海上耦合前后都比实测偏弱, 但耦合后改善了赤道物理场变率偏弱的现象, 同时降低了位于亚洲南部的虚假变率值。

(2) 由于 GOALS-AVIM 的特点是把植被—大气相互作用模式 AVIM 的物理部分和生物部分与大气环流模式进行双向耦合, 实现了植被和大气的双向反馈作用, 其陆面的输出量 NPP 与大气环流在时空分布上表现出很好的对应关系。在空间分布型上, 东亚季风和副热带高压的不同分布模态对应着东亚区域的 NPP 强弱的分布。

(3) 通过对不同的植被类型 NPP 与陆面气温、降水、短波辐射的年际变化的相关性分析可以得出, 植被类型的不同导致 NPP 年际变化与降水、表面气温、短波辐射的年际变化的相关性不同, 它们的年际变化与相关物理量场的年际变化表现出很强的植物种类的区别。

## 参考文献 (References)

- Bonan G B. 1996. A Land surface model (LSM 1.0) for ecological, hydrological and atmospheric studies: Technical description and users guide [R]. NCAR/TN-417 + STR NCAR Technical Note, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado U. S. A. , 1 - 123
- Brovkin V. 2002. Climate - vegetation interaction [J]. *Journal de Physique IV (France)*, 12: 57 - 72
- Charney J G, Stone P H, Quirk W J. 1975. Drought in Sahara biogeophysical feedback mechanism [J]. *Science*, 187: 434 - 435.
- Claussen M. 1997. Modeling bio-geophysical feedback in the African and Indian monsoon region. *Climate Dyn.*, 13: 247 - 257.
- Cramer W, Bondeau A, Woodard F I, et al. 2001. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO<sub>2</sub> and climate change: Results from six dynamic global vegetation models [J]. *Global Change Biology*, 7: 357 - 373.
- 丹利. 2003. 大气和生物圈双向耦合模式中的多尺度变化模拟研究 [D]. 博士学位论文, 中国科学院大气物理研究所, 192pp.
- Dan Li. 2003. Simulation of multi-scale variation in the two-way interaction model between biosphere and atmosphere [D]. Ph. D dissertation. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 192pp
- Dan Li, Ji jinjun, Li Yingpeng. 2002. Climate simulate based on a different-grid nested and coupled model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 19 (3): 487 - 499.
- Dan Li, Ji Jinjun, Li Yinpeng. 2005a. Climatic and biological simulations in a two-way coupled atmosphere biosphere model (CABM) [J]. *Global and Planetary Change*, 47: 153 - 169.
- Dan Li, Ji Jinjun, Zhang Peiqun. 2005b. The soil moisture of china in a high resolution climate-vegetation model [J]. *Advance in Atmospheric Science*, 22 (5): 720 - 729.
- Dan Li, Ji Jinjun. 2007a. The surface energy, water, carbon flux and their intercorrelated seasonality in a global climate-vegetation coupled model [J]. *Tellus*, 59B: 425 - 438
- Dan L, Ji J, He Y. 2007b. Use of ISLSCP II data to intercompare and validate the terrestrial net primary production in a land surface model coupled to a general circulation model [J]. *J. Geophys. Res.*, 112, D02S90, doi: 10. 1029/2006JD007721.
- 符淙斌, 温刚, 谢力, 等. 2002. 东亚季风区气候和生态系统相互作用的诊断和模拟研究 [J]. *南京大学学报 (自然科学)*, 38 (3): 281 - 294. Fu Congbing, Wen Gang, Xie Li, et al. 2002. The diagnosis and simulation studies on climate and ecosystem interactions in East Asia monsoon region [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)* (in Chinese), 38 (3), 281 - 294.
- 高留喜, 安兴琴, 刘秦玉, 等. 2004. 500 hPa 环流变化与山东春季降水异常 [J]. *气象科学*, 24 (4): 440 - 447. Gao Liuxi, An Xingqing, Liu Qingyu, et al. 2004. 500 hPa Circulation variation and precipitation abnormality during Shandong spring [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 24 (4), 440 - 447.
- Henderson-Sellers A, McGuffie K, Pitman A J. 1996. The project for intercomparison of land surface parametrization schemes (PILPS): 1992 to 1995 [J]. *Climate Dyn.*, 12: 849 - 859
- 何勇, 董文杰, 季劲均, 等. 2005. 基于的中国陆地生态系统净初级生产力模拟 [J]. *地球科学进展*, 20 (3): 345 - 349 He Yong, Dong Wenjie, Ji Jinjun, et al. 2005. The net primary production simulation of simulation terrestrial ecosystems in china by AVIM [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 20 (3): 345 - 349.
- 黄嘉佑. 2004. 气象统计分析与预报方法 [M]. 气象出版社, 北京, 298pp. Huang Jiayou. 2004. *The Methods of Statistical Analysis and Prediction in Meteorology* [M]. Meteorological Press (in Chinese), Beijing, 298pp.
- 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, 余莉. 1999. 地表面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*, 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 Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 23 (4), 439 - 448.
- Kalnay E, Coauthors. 1996. The NCEP-NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437 - 471.
- 李跃清, 李崇银. 2001. 春季川渝地区气温与 500 hPa 高度场的奇异值分解 [J]. *高原气象*, 20 (2): 165 - 172. Li Yaoqing, Li Chongyin. 2001. Singular value decomposition analysis of air temperature in spring in Sichuan province and Chongqing city and 500 hPa geopotential height [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 20 (2), 165 - 172.
- Liu H, Jin X, Zhang X, et al. 1996. A coupling experiment of an atmosphere and an ocean model with a monthly anomaly exchange scheme [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 13 (2): 133 - 146.
- Liu H, Wu G. 1997. Impacts of land surface on climate of July and onset of Summer monsoon: A study with an AGCM plus SsiB [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 14 (3): 289 - 308.
- Liu H, Zhang X, and Wu G. 1998. Cloud feedback on SST variability in western equatorial Pacific in a CGCM [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 15 (3): 410 - 423.
- Lorenz E N. 1955. Available potential energy and the maintenance of general circulation [J]. *Tellus*, 7: 157 - 167.
- Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. *Science*, 300: 1560 - 1563.
- Pielke R A. 1998. Rethinking the role of adaptation in climate policy [J]. *Global Environmental Change*, 8 (2): 159 - 170.
- Schlesinger M E, Jiang X. 1991. Revised projection of future

- greenhouse warming [J]. *Nature*, 350: 219–221.
- Sellers P J, Dickinson R E, Randall D A, et al. 1997. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere [J]. *Science*, 275: 502–509.
- Sitch S, Smith B, Prentice I C, et al. 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model [J]. *Global Change Biology*, 9: 161–185
- 汤绪, 钱维宏, 梁萍. 2006. 东亚夏季风边缘带的气候特征 [J]. *高原气象*, 25 (3): 275–281. Tang Xu, Qian Weihong, Liang Pin. 2006. Climatic features of boundary belt for East Asian summer monsoon [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25 (3): 275–281.
- Texier D, Noblet N D, Harrison S P, et al. 1997. Quantifying the role of biosphere-atmosphere feedback in climate change: coupled model simulation for 6000 BP and comparisons with palaeodata for other Eurasia and northern Africa [J]. *Climate Dyn.*, 13: 865–882
- 魏锋, 丁裕国, 杨金虎, 等. 2005. 中国西北地区雨季降水与 500 高度场的分析 [J]. *干旱气象*, 23 (4): 17–23. Wei Fen, Ding Yuguo, Yang Jinhua, et al. 2005. SVD analysis of the relationship between 500 hPa height fields and precipitation fields in rainy season in Northwest China [J]. *Arid Meteorology (in Chinese)*, 23 (4): 17–23.
- Wu Guoxiong, Liu Hui, Zhao Yucheng, et al. 1996. A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance [J]. *Advances in Atmosphere Science*, 13 (1): 1–18.
- 吴国雄, 张学洪, 刘辉, 等. 1997. LASG 全球海洋—大气—陆地系统模式 (GOALS/LASG) 及其模拟研究 [J]. *应用气象学报*, 8 (增刊): 15–28. Wu Guoxiong, Zhang Xuehong, Liu Hui, et al. 1997. Global ocean-atmosphere-land system model of LASG (GOALS/LASG) and its performance in simulation study [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 8 (Suppl.), 15–28.
- 吴洪宝, 吴蕾. 2005. 气候变率诊断和预报方法 [M]. 气象出版社, 北京, 371pp. Wu Hongbao, Wu Lei. 2005. *Methods for Diagnosing and Forecasting Climate Variability [M]*. Meteorological Press (in Chinese), Beijing, 371pp.
- 吴统文, 吴国雄, 王在志, 等. 2004a. GOALS/LASG 模式对气候平均态的模拟 [J]. *气象学报*, 62 (1): 20–31. Wu Tongwen, et al, Wang Zaizhi. 2004a. Simulation of the climate mean state in the GOALS/LASG model [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (1): 20–31.
- 吴统文, 吴国雄, 宇如聪. 2004b. GOALS 模式对热带太平洋 ENSO 年际变化特征的模拟评估 [J]. *气象学报*, 62 (4): 154–166. Wu Tongwen, Wu Guoxiong, Yu Rucong. 2004b. The evaluation of the ENSO like interannual variation in the GOALS/LASG model [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (4): 154–166.
- Xie P, Arkin P A. 1997. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical outputs [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78: 2539–2558.
- 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.
- 俞永强. 1997. 海—冰—气耦合方案的设计及年代际气候变化的数值模拟研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所, 博士学位论文, 130pp. Yu Yongqiang. 1997. Design of ocean-sea ice-atmosphere coupling scheme and numerical simulation of interdecadal climate variability [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 130pp.
- Zeng Hongling, Wang Zaizhi, Ji Jinjun, et al. 2008a. An updated coupled model for land-atmosphere interaction. part I: Simulations of physical processes [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 25 (4): 619–631
- Zeng Hongling, Wang Zaizhi, Ji Jinjun, et al. 2008b. An updated coupled model for land-atmosphere interaction. part II: Simulations of Biological Processes simulations of physical processes [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 25 (4): 632–640
- Zhang Xuehong, Chen Keming, Jin Xiangzhe, et al. 1996. Simulation of thermohaline circulation with a twenty-layer oceanic general circulation model [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 55 (4): 65–87.
- 张佳华, 符淙斌, 延晓冬, 等. 2002. 全球植被叶面积指数对温度和降水的响应研究 [J]. *地球物理学报*, 45 (5): 631–637. Zhang Jiahua, Fu Chongbin, Yan Xiaodong, et al. 2002. Global response analysis of LAI versus surface air temperature and precipitation variations [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 45 (5): 631–637.
- 张韬, 吴国雄, 郭裕福. 2006. GOALS 模式中大气能量循环的诊断分析与不同版本计算结果的比较研究 [J]. *大气科学*, 30 (1): 38–55. Zhang Tao, Wu Guoxiong, Guo Yufu. 2006. The comparison between two versions of the GOALS Model on the atmospheric energy cycle diagnosis [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (1): 38–55.
- 郑益群, 于革, 薛滨, 等. 2004. 东亚区域气候模拟及其变化机制探讨 [J]. *第四纪研究*, 24 (1): 28–38. Zheng Yiqun, Yu Ge, Xue Bin, et al. 2004. Simulate of East Asian climate at 6ka B. P. [J]. *Quaternary Sciences (in Chinese)*, 24 (1): 28–38.