0577-6619/2009/67(6)-1032-44 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

东亚地区陆地植被净初级生产力与夏季气候的模拟*

智 海[1,2] 丹 利[3] 俞永强[2] 徐永福[4] 王盘兴[1]

ZHI Hai[1,2] DAN Li[3] YU Yongqiang[2] XU Yongfu[4] WANG Panxing[1]

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

1. *Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education and College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044, *China*
2. *LASG Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*
3. *Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*
4. *The State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*

2009-06-29 收稿，2009-08-13 改回.

Zhi Hai, Dan Li, Yu Yongqiang, Xu Yongfu, Wang Panxing. 2009. Simulation of summer development about vegetation net primary production and climate. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(6):1032－1044

Abstract The results from the coupled model, GOALS-AVIM, developed by a research group of the Global Ocean Model and Coupling Model (LASG) at the Institute of Atmospheric Physics (IAP) of the Chinese Academy of Sciences . The model was used to study the climate change in East Asia. Analysis based on the mean results of the later 50 integration years (100 integration years in all) suggests that the coupled model basically reproduce main features of multi-year mean July large-scale pattern of precipitation, surface air temperature and 850 hPa wind fields in East Asia. Based on contrastive analyzed standardization of the vegetation net primary productivity (NPP), precipitation, surface air temperature and shortwave radiant, seasonal variety of NPP is related to climate change closely because of two-way interaction of vegetation and atmosphere. The relation reveals the characteristic that those interrelated relationship are different in respective spatio-temporal distribution. According to singular value decomposition (SVD) analysis, the relationship between ecosystem and precipitation in the East Asia is explored. It shows that the onset and retreat of East Asian monsoon characterized by the precipitation belt at East Asia corresponds to the spatiotemporal pattern of NPP, and the spatiotemporal pattern can reproduce migration route of East Asia in summer. The correlation coefficients between NPP and precipitation are different in interannual variability because of the variation in vegetation types.

Key words East Asia, GOALS-AVIM, Net primary production, Seasonal cycle

摘 要 利用中国科学院大气物理研究所(IAP)一个海洋-大气-动态植被耦合模式(GOALS-AVIM)，进行了100年模拟积分。基于模拟结果，对东亚地区的植被净初级生产力(NPP)、降水、地面气温和短波辐射的季节变化进行了标准化对比，分析

* 资助课题：中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX2-YW-214)、国家自然科学基金项目(40605025，40730106，40675049)、财政部/科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY200806007)。

通讯作者：俞永强，主要从事全球耦合气候系统模式的发展、热带海气相互作用的数值模拟和古气候数值模拟的研究。E-mail：yyq@lasg.iap.ac.cn

了 NPP 的时空格局与气候因子(气温、短波辐射和降水)的关系;利用奇异值分解(SVD)对东亚夏季降水场和 NPP 的关系进行分解。结果表明,夏季东亚地区植被 NPP 及相关气候因子的时空变化规律明显,耦合模式可以很好地模拟出观测存在的降水及 NPP、LAI(叶面积指数)大值区随季节北移南退的形态;由于耦合模式中 AVIM 的双向特点,模式模拟的 NPP 与其他物理场的季节变化有很强的对应关系,而且在不同时间和地区,NPP 与降水、地面气温、短波辐射表现出不同的对应关系,其中植被 NPP 时间变化与气温和降水的相关性都较高;从 NPP 场和降水场夏季逐月标准化距平奇异值分解的空间分布模态来看,NPP 与降水在时空场上表现出很强的耦合性,NPP 的空间格局与降水存在较好的相关性,不同地理位置的相关性强弱不同,分解出的降水场异常相关模态也再现了东亚夏季降水移动的时空特征,同时东亚雨带随季节变化与 NPP 的气候变率表现出不同的对应模态。

关键词　东亚,GOALS-AVIM,净初级生产力, 季节变化

中图法分类号　P461$^{+.7}$

1　引　言

目前,利用耦合的全球模式已能较为准确地模拟大尺度运动的特征,但气候系统既有大尺度的全球特征也具有中、小尺度的区域特征。我们关注的不只是全球的气候变化,而且还有区域尺度上的气候变化。东亚地区是世界上典型的季风气候区之一,特殊的地理条件造就了特别的气候变化特征,在全球气候变化中扮演着非常重要的角色,准确模拟东亚气候特征、变化机制及变化规律等成为气象学者一直关注的问题。目前大量气候模式广泛地应用于东亚气候变化的研究,并在模拟温度、降水趋势、植被变化趋势等方面取得了一系列成果(Clausse, 1998; Zeng, et al, 2000; Doherty, et al, 2000; Sun, et al, 2001; Foley, et al, 2003)。Xue 等(2004)利用与不同的陆面过程耦合的 GCM(Global Climate Model)对东亚季风的机制进行了研究,发现植被的扰动过程影响着东亚季风的强度和降水的空间分布。鞠丽霞等(2006)将区域气候模式 RegCM2 与 9 层全球格点大气环流模式(IAP-AGCM)单向嵌套,对东亚气候进行数值模拟研究,捕捉到了地面气温和降水的中尺度信号,且较与之嵌套的 IAP-AGCM 的模拟效果相比有较大改善,对地面气温和降水的空间分布形势和季节变化趋势都有较强的模拟能力。Grotch 等(1991)比较了 4 种 GCM 模拟结果与观测之间的差别,发现全球平均模拟的气温与观测值相比偏小。Yu 等(1996)则利用 IAP/CGCM 模拟结果初步分析了模式对东亚区域年平均温度和降水的空间分布以及中国东部 3 个地区季节循环和异常气候的模拟能力。上述结果表明,这些模式都有一定的模拟能力,但同时存在着明显的系统误差。另外,不同模式在模拟不同季节的多个变量时各有所长,也表现出了对于具有独特季风气候特征的东亚地区模拟能力较弱。

LASG 气候模拟研究组从 1993 年开始研制、发展了一个包括海洋、大气、海冰和陆面相互作用的全球耦合环流模式(Global Ocean-Atmosphere-Land System Model),称为 GOALS 模式(Zhang, et al, 1996;Wu, et al, 1996; Liu, et al,1996, 1997; 俞永强等,1998;吴统文等,2004),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,耦合了更多对气候系统有重要影响的物理过程,模式对气候平均态(包括海洋、陆地、大气)的模拟效果有显著的改进。Ji(1995)提出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,模式中植被变化由植被生长模式计算,可随气候变化而改变,实现了模式中的大气与植被的相互作用过程(季劲钧等,1999),克服了传统模式由于单向耦合带来的模式不确定性和系统误差,能够更好地刻画气候与生态的双向反馈过程及变化。目前 AVIM 已经与 IAP/L9R15 大气环流模式完成了物理过程的耦合(Dan, et al, 2002)和生物过程的耦合(Dan, et al, 2005),实现了陆气相互作用的双向耦合。

智海(2008)利用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 IAP/LASG 的 GOALS 耦合成 GOALS-AVIM,通过比较耦合 AVIM 前后的模拟结果,发现模式耦合 AVIM 后可以更加合理地描述出实际大气、海洋的季节、年际变

化,而且对于北半球的模拟改进大于南半球、夏季大于冬季、陆地大于海洋。此外,在植被随季节变化比较明显、分布比较均匀的地区,模拟结果有明显的改善。这说明动态植被过程改进了陆气相互作用,尤其对降水和温度的影响比较大。而且耦合后的谱密度值普遍大于耦合前,说明模式耦合 AVIM 后的周期变化更加明显;对赤道太平洋 SST、ENSO 的空间分布和时间变化模拟更加接近观测。

本文利用 GOALS-AVIM 研究区域植被对气候变化的响应,主要利用 GOALS-AVIM 在植被大气双向作用下模拟东亚气候特征,研究东亚气候的季节和年际变率。主要目的是通过在季节和年际尺度上分析东亚夏季 NPP 的变化特征,特别是通过对应夏季降水强弱、空间分布变化分析,针对特定区域——东亚,探讨气候变化对陆面植被的影响机理。

2 模式简介、分析方法

耦合模式 GOALS-AVIM 中的大气子模式(AGCM)为 15 个截断波,垂直分 9 层,水平分辨率为 7.5°×4.5°;海洋模式(OGCM)垂直分 20 层,水平分辨率为 5°×4°;陆面模式(AVIM)水平分辨率为 1.5°×1.5°,模式包括 3 层土壤和 1 层植被,主要包括物理交换子模块、植物生长子模块和物理参数转换子模块(Ji,1995)。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,用热量平衡方程计算植被冠层、土壤和雪盖中的温度,用质量守恒方程计算植被冠层、土壤的水分变化(Ji, et al, 1989;吕建华等,1999)。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办法,实现耦合的具体技术细节参见文献(Dan, et al, 2005)。

利用各分量模式独立运行的平衡态作为耦合模式的各分量模式初始场,连续运行 100 年,取后 50 年模式输出结果进行分析。

本文利用了奇异向量分解(SVD)和标准化资料比较降水、地面气温、短波辐射和 NPP 等变量在夏季的时空变化强弱。由于要比较的要素的单位不一样,平均值和标准差亦有所不同,为使它们在同一水平上比较,使用了标准化的方法使它们变成同一水平的无单位变量(黄嘉佑,2004)。对要素样本量为 n 的资料,标准化变量记为 $x=(x_{z1}x_{z2}\cdots x_{zn})$,其中

$$x_{zi}=\frac{x_i-\bar{x}}{s} \qquad i=1,2,3\cdots12 \qquad (1)$$

式(1)中,x_i 为多年月平均,$\bar{x}$ 为多年年平均值,s 为多年年平均值的标准差。x_{zi} 为第 i 月的标准化值,x_z 反映出了资料的季节变化。

3 结果分析

3.1 净初级生产力(NPP)模拟

GOALS-AVIM 由于耦合 AVIM,具有了陆面植被 NPP 可以作为模式输出量的特点,为上述陆面植被 NPP 和区域气候场的分析提供了条件。一般比较常用的是年平均 NPP,而不是月平均 NPP。由于全球尺度上目前尚缺乏 NPP 观测资料,故利用 IGBP (International Geosphere-Biosphere Program)综合了 17 个模式的集成结果进行对比分析,IGBP 的结果被认为在全球尺度上具有广泛的代表性(Cramer,et al, 1999),图 1 是全球植被年平均 NPP 的 IGBP 结果和模拟。IGBP 的年平均 NPP 最高的地区分布在赤道附近及热带雨林地区,包括赤道附近的非洲、中南半岛和印度尼西亚一带以及南美地区,其值可超过 1100 g/(m^2 · a)。低值区分布在青藏高原及西亚沙漠区。模式模拟结果在北半球比观测值偏低,其中偏低区域主要位于 60°N 以北的地区、青藏高原、中国的东部和北美洲南部等。出现误差的原因主要是耦合模式在这些地区气温模拟的偏低造成了植被生产力模拟值的下降。加之对于模式中青藏高原雪盖的物理过程不完善使得对青藏高原 NPP 的模拟结果偏低(丹利,2003)。总体上,耦合模式可以合理地模拟全球植被净 NPP 的分布。

智海(2008)在对 GOALS-AVIM 评估的基础上,利用 AVIM 的双向特点分析了全球 NPP 分布与气候场的相关关系,结果显示 NPP 分布与全球 SST、降水和气温有很好的区域相关关系,区域的降水和气温间接影响着 NPP;SST 的变化通过影响东亚地区的降水和温度,间接地影响东亚地区的 NPP,并分析了东亚地区 NPP 对当地水热条件的响应。下面就东亚区域的 NPP 与降水及气候场的变化关系做进一步的分析。

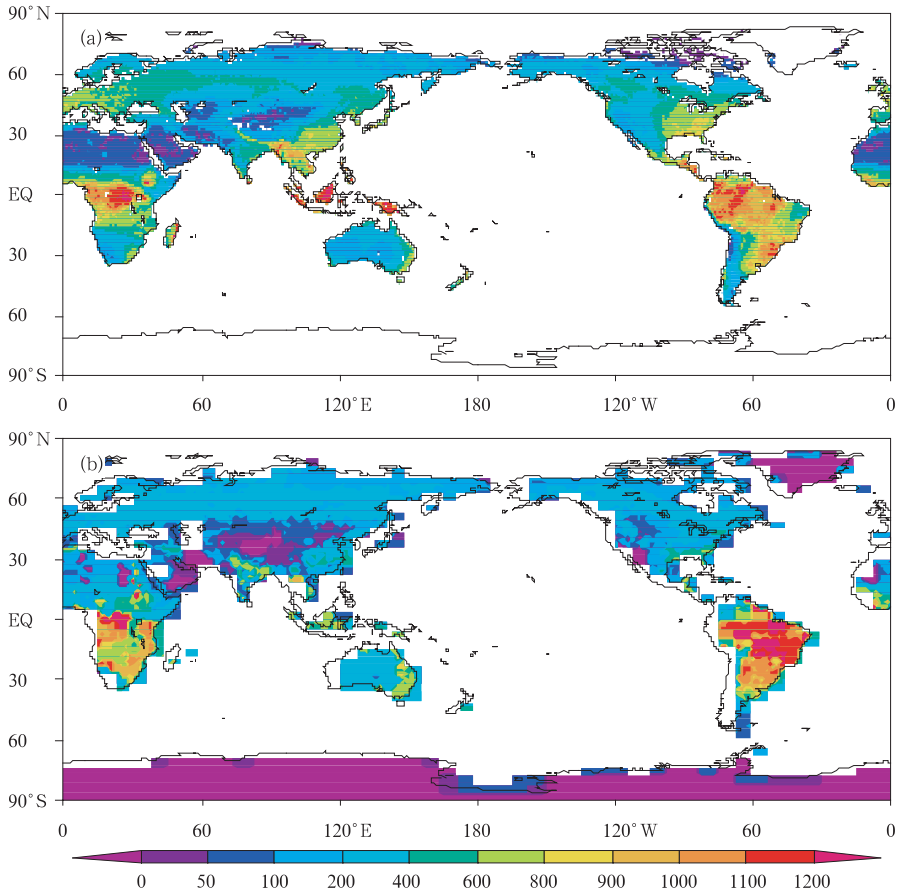


图 1　年平均陆面净初级生产力(NPP)(a. IGBP 集成结果,b. 耦合模式,单位:g/(m² · a)

Fig. 1　Global annual mean of NPP (a. IGBP data, b. GOALS-AVIM; units: g/(m² · a))

3.2　夏季东亚气候场和 NPP 对季节变化的响应

20 世纪 50—60 年代,叶笃正和陶诗言等对亚洲大气环流和季风的结构、季节突变等进行了大量研究(Yeh, et al, 1957,1958,1959; Dao, et al, 1958)。对于东亚季风区的降水来说,表现出很强的季节、年际和年代际变化。特别是在中国中东部存在明显的干/湿变化,这些变化与大气环流、陆面过程有着很强的关联(Xue, et al, 2004)。林之光(1987a, 1987b)利用中国的降水资料对中国东部和西部大陆地区降水的季节变化进行了研究,结果表明夏半年中国大陆降水起始于长江以南的江南地区,提出雨带除了华南—长江—华北的跳跃外,还应加上长江—江淮—华北的跳跃。

Chen 等(1999)利用多年降水资料证实了这个事实,探讨了东亚夏季雨带的时空演变过程,研究发现:东亚地区的雨季于 4 月初开始于华南北部和江南地区,随后向南和向西南扩展,于 4 月末扩展到华南沿海和中南半岛,随后原来由江南移到华南沿岸的副热带季风雨带随副热带高压北进而北进,形成梅雨期和江淮及华北雨季。指出东亚地区气候存在明显的季节变率和年际变率,导致了东亚雨带的季节性北跳和南移(Chen, et al, 2001)。

从东亚地区(20°—60°N, 100°—150°E)降水观测值的月平均时间-纬度剖面图(图 2a)看到,随着季节的变化东亚地区降水的大值区向高纬度移动,6—7 月移至 50°—55°N,随后南退,5—8 月在 30°N 保持降水的大值区。相比模式积分结果(图 2b),模式基本模拟出了降水随季节的变化形态,但与观测相比,降水大值区北移的时间提前和南退的时间滞后,而且夏季大值区较偏北,在 55°—60°N 出现了 8—9 mm/d降水。从东亚地区叶面积指数(LAI)月平均时间-纬度剖面图(图 3a、3b)看出,东亚地区 LAI 和降水一样,模拟和观测都表现出随季节变化北移和南退的分布形态,从 3 月开始 LAI 大值区逐

渐北移,到了 7—8 月在 50°—60°N 出现了 LAI 高值区,9 月开始南退。夏季 50°—60°N 的区域模拟结果比观测值高,而且大值区北移的纬度比观测值更偏北。与 LAI 联系比较紧密的 NPP 也表现出与降水和 LAI 相同的形态,模式也模拟出了 NPP 随季节变化而北移南退的形态,从图 4 看到从 3 月开始 NPP 的大值区向高纬度移动,6—7 月移至 60°N 后逐渐南退,而且夏季在 50°—60°N 存在着 NPP 的大值区。至于误差的原因,智海(2008)对 GOALS-AVIM 评估时指出:由于模式未能处理好如喜马拉雅山之类高大地形,在东亚中部模拟出虚假的强降雨中心,这显然与模式的分辨率不够有关。另外,由于东亚地区的植被较复杂,模式对相应的植被分类处理存在着问题(丹利,2003),造成 GOALS-AVIM 对于东亚地区的地面气温模拟得偏高,也使得模式结果在春秋两季的温度比实测值偏高,使得东亚地区中纬度地区的模拟雨量偏大,造成了降水大值区北移的时间提前和南退的时间滞后,而且在夏季大值区较偏北。由于降水和地面气温的模拟偏高,相应使得在东亚中纬度地区的 LAI 出现了一个虚假的中心。关于 LAI 与温度、降水的对应关系将在下文中进一步分析。

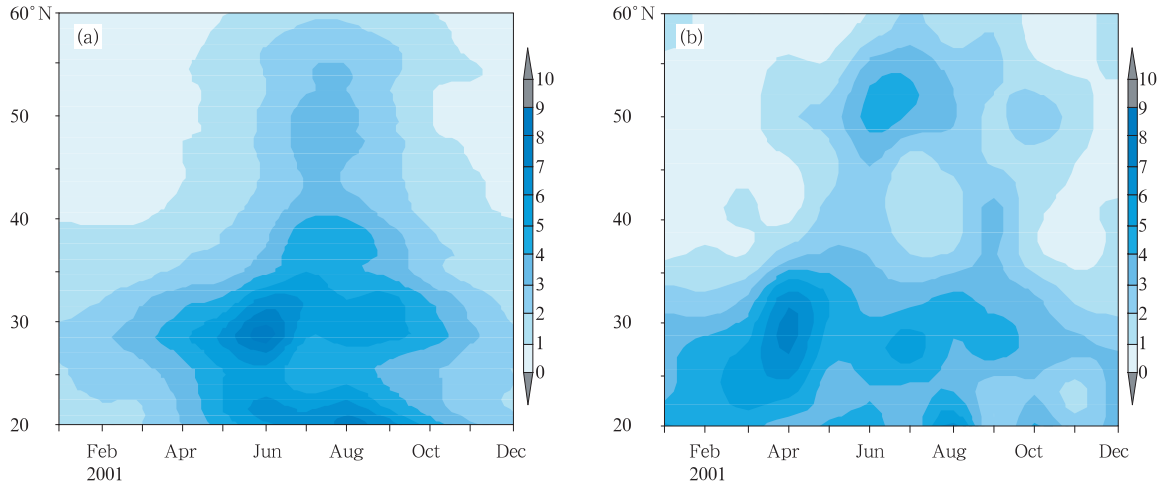


图 2 东亚地区月平均降水时间-纬度(100°—150°E 纬向平均)剖面

(a. Xie-Arkin 降水资料, b. GOALS-AVIM 模拟,单位:mm/d)

Fig. 2 The latitude-time diagram (100°—150°E) of the East Asia monthly mean precipitation

(a. Xie-Arkin, b. GOALS-AVIM, units: mm/d)

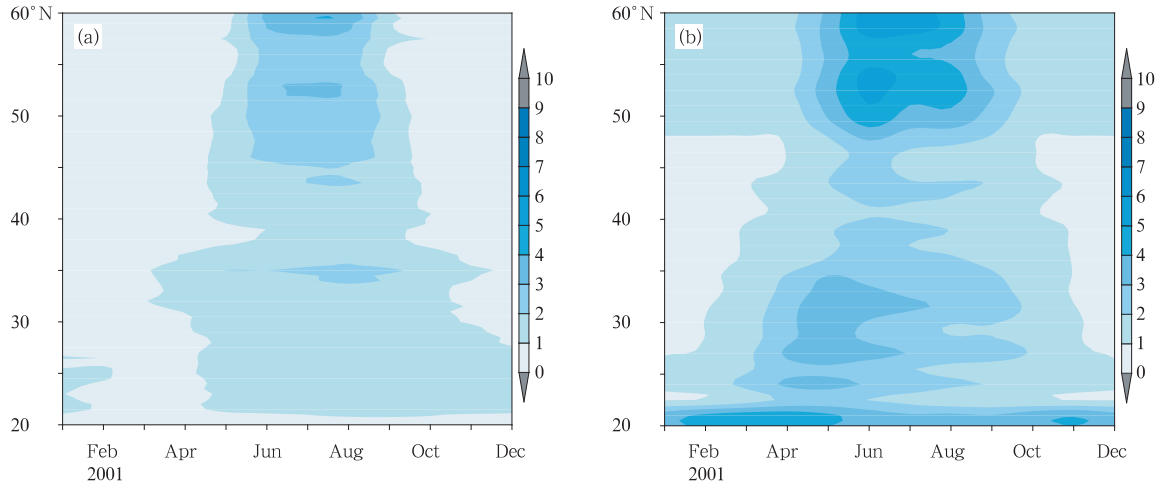


图 3 东亚地区月平均叶面积指数(LAI)时间-纬度(100°—150°E 纬向平均)剖面

(a. 马普气象研究所 0.5°×0.5°的叶面积指数观测资料, b. GOALS-AVIM 模拟)

Fig. 3 The latitude-time diagram (100°—150°E) of the East Asia monthly mean LAI

(a. observation from Max Planck Institute for Meteorology, b. GOALS-AVIM)

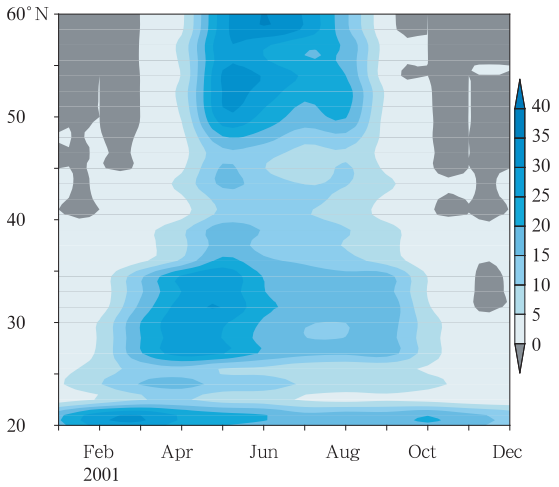


图 4　GOALS-AVIM 模拟东亚地区月平均净初级生产力(NPP)时间-纬度(100°—150°E 纬向平均)剖面(单位：g/m²)

Fig. 4　The latitude-time diagram (100°—150°E) of the East Asia monthly mean NPP of GOALS-AVIM (Units: g/m²)

以上的分析表明 GOALS-AVIM 可以模拟出夏季东亚地区气候场的季节变化,同时也反映出在东亚夏季的气候演变中,陆面和大气都能表现出季节性的移动。以往研究结果(肖向明等,1996;高琼等,1997;王玉辉等,2002)表明无论是降水或温度变化对陆面的生产力都有显著影响。季劲钧等(2005)通过气温和降水变化的敏感性探讨了气候变化对草地初级生产力的影响机理,降水增加,生产力增加;而温度增加,生产力下降。气候变化对生产力影响的机理是:降水增加改善了土壤的水分供给条件,增大了光合速率。实际上气候状况的变化是综合的,温度、降水、日照等的变化都会直接或间接影响生态系统的生理、生态过程,从而改变生产力(周广胜等,2004;王遵娅等,2004)。

本文利用耦合模式输出的降水月平均标准化资料来说明东亚雨带季节性的强弱变化和空间分布,同时将同期对应的地面气温、短波辐射、NPP 月平均标准化值模拟结果对比,从季节变化的角度来分析地面气温、短波辐射和降水与 NPP 存在的时间和空间分布变化的对应关系。

东亚降水在空间分布与时间变化上的特征主要是由于季风活动影响造成的(汤绪等,2006)。在夏季风正常活动的年份,6 月夏季风推进到长江中下游,秦岭—淮河以南的广大地区进入雨季。在 6 月(图5a)的东亚地区除西北地区,大部分区域的降水

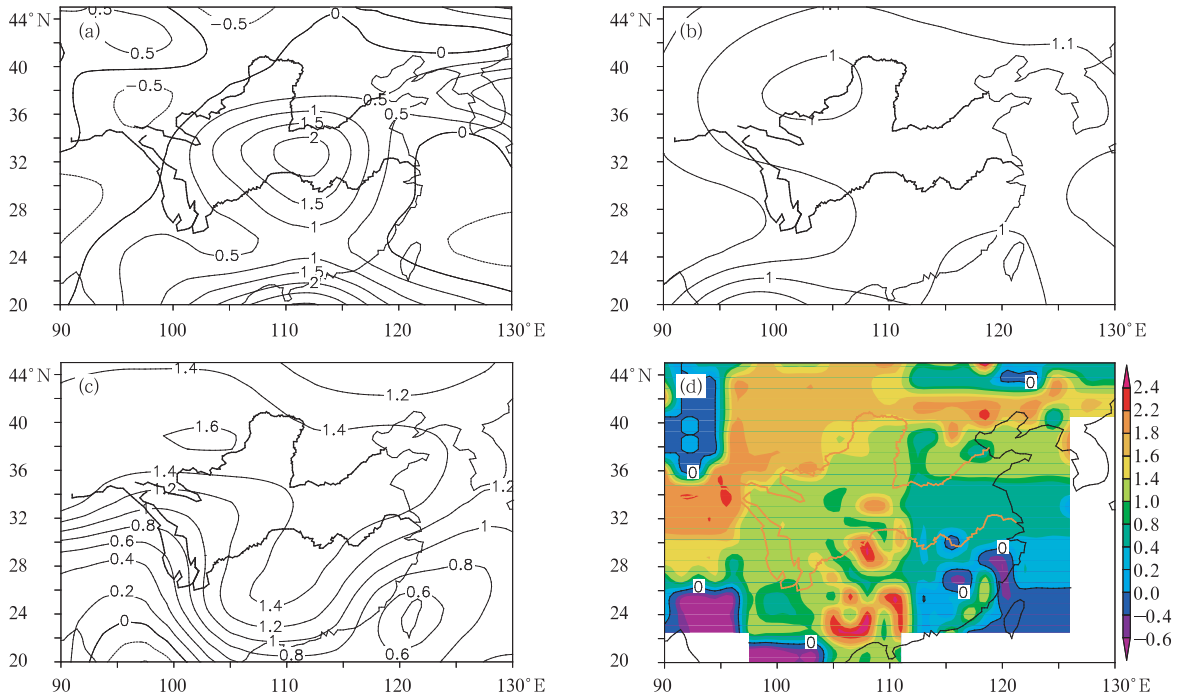


图 5　东亚地区 6 月物理场标准化值分布(a. 降水，b. 地面气温，c. 短波辐射，d. NPP)

Fig. 5　Distribution of East Asia physical standardized variate in June (a. precipitation, b. surface temperature, c. short wave radiation, d. NPP)

标准化值为正值,表明中国大部分降水趋势是增加的,尤其长江中下游与黄河中下游之间分布着最大值区。与此相反,中国东南沿海包括台湾岛是负值区,西北有一个西南—东北向条形的降水减少区域。表明6月东亚区域的雨带开始向北移动,南方雨区开始减弱。图5b、5c为6月的地面气温和短波辐射标准化分布,由于地面气温和短波辐射的物理关联性,它们季节变化的形态很相似,在东亚区域都为正值,最大值包括了黄河流域,中心位于黄河上游及华北平原,地面气温和短波辐射开始在中国北方地区显著增加。从对应的6月NPP标准化值分布看到(图5d),正的大值区分布在华南及长江中下游的区域,负值区位于东南沿海,这些区域的变化趋势与降水相同。但在西北地区呈带状的NPP正值区却对应着降水的负值区,在这个区域的NPP趋势与降水相反。相对于地面气温和短波辐射来说,与NPP变化趋势相同,都为正值区,说明6月西北地区地面温度和短波辐射的变化趋势确定了当地NPP的变化。

7月,华北、东北等地进入雨季,降水明显增多。从图6a可以看到降水正值区域的主体较前期继续北抬,呈东西带状,正的大值中心由华北地区西进到黄土高原。位于华东沿海的负值区登陆北抬,区域扩大。在华北北部的河套附近出现了东亚区域的正值最大区。在华北北部和西北地区有一负值区,表明在这个时期,这个地区仍然维持着少雨趋势。从图6b、6c可看出,地面气温和短波辐射在东亚区域基本为正值区,地面气温的变化趋势是北方大于南方,短波辐射的正的最大值区位于华北,变化的趋势明显大于上个月。从对应的NPP分布(图6d)上,可看到NPP正负区域的分布大致与地面气温、短波辐射的变化趋势相同。在东亚大部分区域为NPP的正值区,在华北北部到黄土高原的正值中心与短波辐射对应,尤其在河套附近,东亚区域NPP的正值最大区域对应着降水正值最大区域。在西北到华北部分地区的NPP与降水对应比较特殊,降水的负值区对应着NPP的正值区。在华东及华南的NPP的负值区也逐渐北抬,分别对应着降水的负值区。可以说温度和短波辐射、降水在东亚地区的夏季逐渐成为共同主导NPP变化的因素,降水的增加和减少决定了NPP的多少,但在个别地区NPP的变化趋势与降水的趋势相反,如在西北地区,可能由于植被的类型原因,NPP增加表现出对降水减少的响应。

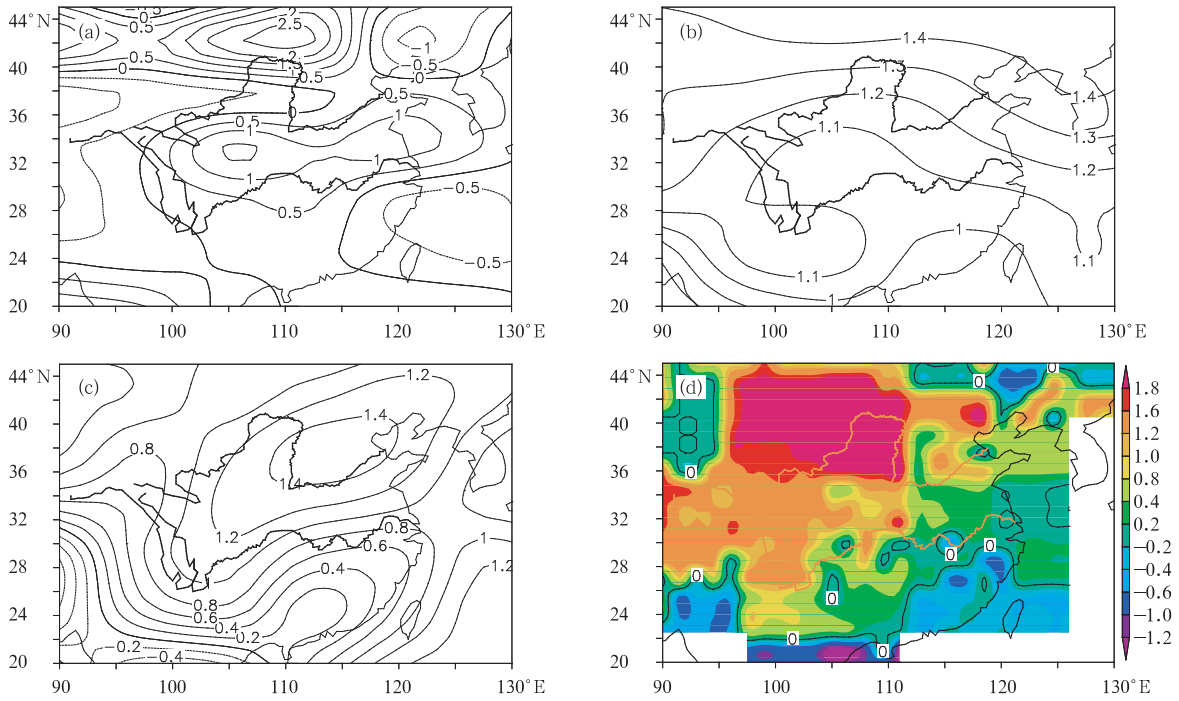


图6 同图5,但为7月

Fig. 6 Same as Figure 5, but for July

进入 8 月,从图 7a 看到,东亚地区的雨带继续北跳至 30°—35°N,降水在整个黄河流域处于正值区,正的最大值中心移至东北地区和渤海湾。位于华南的负值区同样北抬,东亚的 30°N 以南为负值区。东亚区域的地面温度和短波辐射的变化(图 7b、c)维持着夏季的增势,但变化趋势减弱,在东南沿海出现了短波辐射的负趋势。相应的 NPP 的分布也表现出北抬的趋势(图 7d),位于华东和华南的负值区向北扩展,NPP 正值区占据了东亚区域的大部分区域,大值区也北移至西北、华北、东北地区。从对 7、8 月 NPP 与降水、地面温度、短波辐射的标准化值分布的分析来看,模式模拟的降水、温度和短波辐射基本上再现了东亚夏季风北移的变化趋势,从对应的 NPP 分布上,基本上也随东亚降水带的移动而北扩,对于东亚的夏季来说 NPP 空间和时间的分布趋势基本上和降水、短波辐射、地面温度的变化趋势吻合。

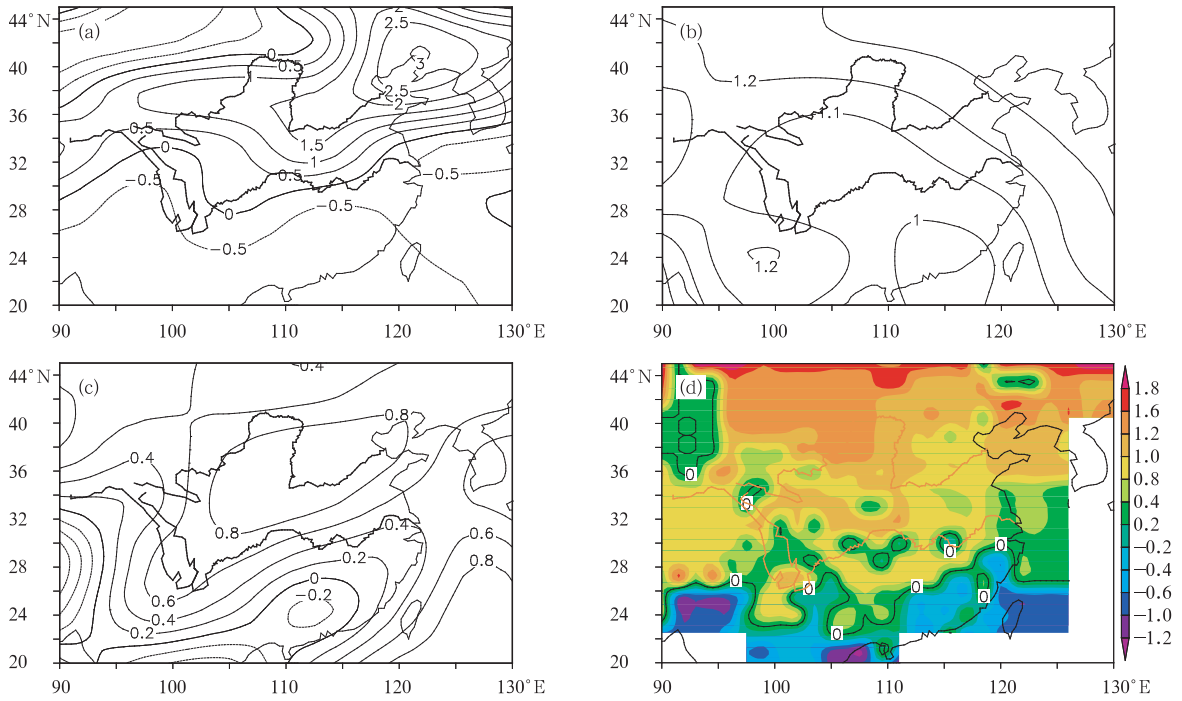


图 7　同图 5,但为 8 月

Fig. 7　Same as Figure 5, but for August

对于季节变化来说,NPP 对于水热条件的依赖性,北方大于南方(孙睿等,2001)。中国东部大部分地区,由于当前的水热条件能够满足植物的生长,因此气候变化对 NPP 的影响比较小,另外温度升高也能导致呼吸作用的增加,因此 NPP 相对增加量比较小甚至出现负值。在北方,植被 NPP 受水分及温度的限制比较大,温度升高、降水增加都会减小这两个因素的限制作用,因此 NPP 的相对季节变化较为明显。

通过地面温度、短波辐射、降水和 NPP 标准化值季节变化的分布分析东亚气候的季节变化特点,可以看到 GOALS-AVIM 可以合理地模拟夏季东亚地区物理场季节变化特征。东亚区域 NPP 的变化趋势与东亚降水、地面温度和短波辐射的时间与空间变化趋势上有很强的关联。由于影响 NPP 变化的复杂性,降水、地面温度、短波辐射的变化趋势不能与 NPP 的变化趋势在空间上一一对应,对于东亚不同的区域和特定的时间,NPP 变化趋势与上述的 3 个物理场表现出不同的对应特征。

3.3　夏季陆面植被 NPP 与东亚降水场的年际变率及响应

通过陆面生态的数值模拟,可以了解东亚季风区气候和生态系统相互作用的基本特征、气候变化对生态系统的影响和植被覆盖状况的变化。符淙斌等(2002)指出:东亚季风区是气候与生态系统相互作用最为强烈的地区之一,这里陆地生态系统的时空变率表现出明显的对季风气候的响应特征,较大的季节和年际变率使该地区的植物生长对气候较为

敏感。何勇等(2005)对陆地植物生理研究表明,外界环境(温度、水分、CO_2 浓度等)对陆地植被净初级生产力的影响非常复杂,不同地区温度和降水对陆地植被 NPP 的影响也不相同,对中国陆地植被 NPP 与气候的相关性分析表明,降水是影响中国陆地生态系统 NPP 的主要原因。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,进而影响东亚地区 NPP 的变化。

为了分析陆面植被与气候年际变化的对应关系,利用 SVD 对 GOALS-AVIM 结果中的 NPP 与降水场进行时空分解,分析它们之间的对应模态。在东亚降水比较集中的 5—9 月,逐月分析 NPP 和降水第一相关模态,着重分析东亚夏季降水北移的过程对 NPP 分布的对应关系。定义:东亚地区(20°—60°N ,100°—150°E)NPP 场为左场,698 个格点。同期亚洲地区(0—60°N, 60°—180°E)降水场为右场,425 个格点;两场时间序列为 50 年逐月资料,进行距平标准化处理后,进行 SVD 分析。利用 Monte Carlo 显著性检验分析 SVD 逐月 NPP 与降水场模态的相关性。发现前两对模态通过了 Monte Carlo($\alpha=0.05$)显著性检验,表明 NPP 与降水的前两个特征值对应的每一对模态的二者间遥相关存在显著的准同步性。

从 5 月 NPP 场和降水场空间分布型的模态看(图略),降水场以 34°N 为界,东亚南部为正值区域。负值区位于 34°N 以北,黄河流域及华北地区、西北地区都位于负距平区域,这种降水距平异常分布模态对应的 NPP 奇异值空间分布为:除中国西北地区外,东亚大部分地区为正值区,正大值区位于秦岭以南,负值区位于西北河西走廊一带。5 月降水与 NPP 距平的奇异值对应分布模态为:位于长江流域降水增加(减少)对应着中国中东部地区 NPP 的增加(减少),但对应着西北地区 NPP 的减少(增加)。

到了 6 月(图 8),降水场正值区的范围北延到 40°N,包括沿海、华东、华北、华南及西北部分地区,负值区位于西北北部、东北及西南地区,大致形态与东亚地区的 6 月降水分布特点相同。对应的 NPP 奇异值分布,正值区分别位于西北和华东沿海,最大值区位于河套以西。中国南方大部分地区、华北和东北为负距平区,最大值区位于长江中下游和黄河中下游之间及渤海湾周围地区。与前期对比,相应变化是降水的正距平区在地理上不再对应 NPP 正值区,而是相反。比如在华北地区,降水增加(减少)区域对应着 NPP 减少(增加)。因为进入 6 月后,在东亚的一些区域对于决定植被生长的因素不再取决于单一降水,其他因素(短波辐射、温度等)可能更大地影响了 NPP 变化,有时降水增加反而间接地影响到了温度和短波辐射强度,使当地 NPP 减少。

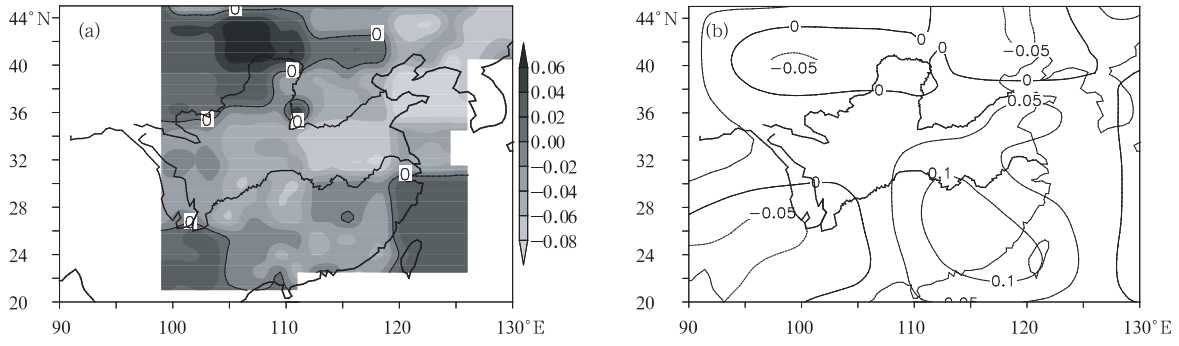


图 8 模式输出的东亚地区 6 月净初级生产力(NPP)与东亚地区降水场的奇异值分解(SVD)的第一对特征值对应的左、右向量场(a. 为左场 NPP 距平奇异向量,b. 为右场降水场距平奇异向量)

Fig. 8 The first pair of eigenvalues of SVD for NPP and the precipitation in June

(a. The left singular vector of the NPP anomaly, b. The right singular vector of the precipitation anomaly)

7 月(图 9),对应的降水场正值区继续北扩,大值区也北跃到长江及中原地区。负值区位于河套以西,在华东、华南及沿海地区也出现了负值区,负值的最大区域位于辽东半岛,表征了雨带北移的特征,标志着北方的雨季开始,南方雨季结束。对应 NPP 分布型,正值区位于东亚西部和北部的带状区域里,大值区位于青藏高原的南侧。负值区占东亚中部的大部分地区,最大值区位于黄河和长江的中下游地

区。以上表明进入7月,降水带北移到黄河流域时,中原地区的降水的增加(减少),对应中国大部分区域NPP减少(增加),即呈反相关变化。说明影响NPP变化的因子逐渐演变为除降水因素外的其他综合因素开始起了更大的作用,比如地形、短波辐射、地温、植被类型等。

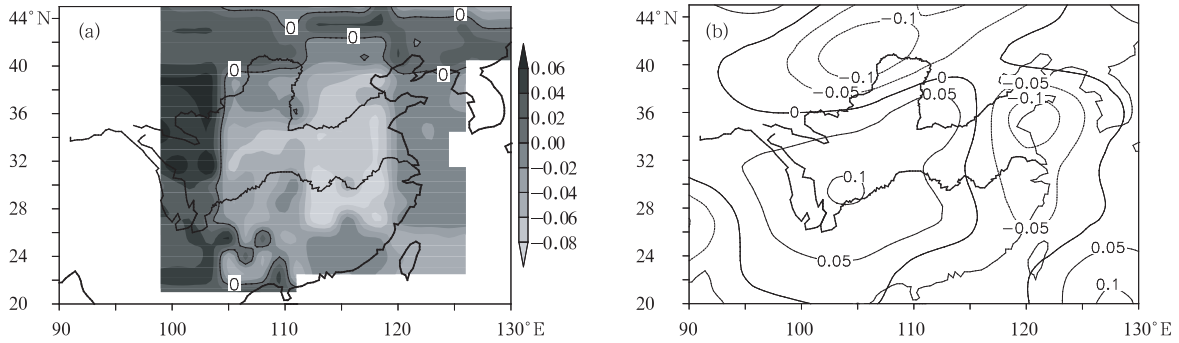


图9　同图8,但为7月

Fig. 9　Same as Figure 8, but for July

8月为北半球的盛夏,从分解的空间分布模态(图10)看到,降水场正值区北端移到河套以北及河西地区,包括华北、西北北部地区和华东地区,呈西北—东南带状分布。青藏高原南侧、黄土高原及华南地区为负值区,最大值区位于黄河上游地区。对应NPP分解的空间模态,河套及河套以西、东南及沿海地区为正值区,东亚其余的地区都为负值区。发现当代表北方雨带降水正距平区域增强(减弱)时,对应着东南沿海及河套地区NPP增加(减少),其他地区NPP减少(增加)。

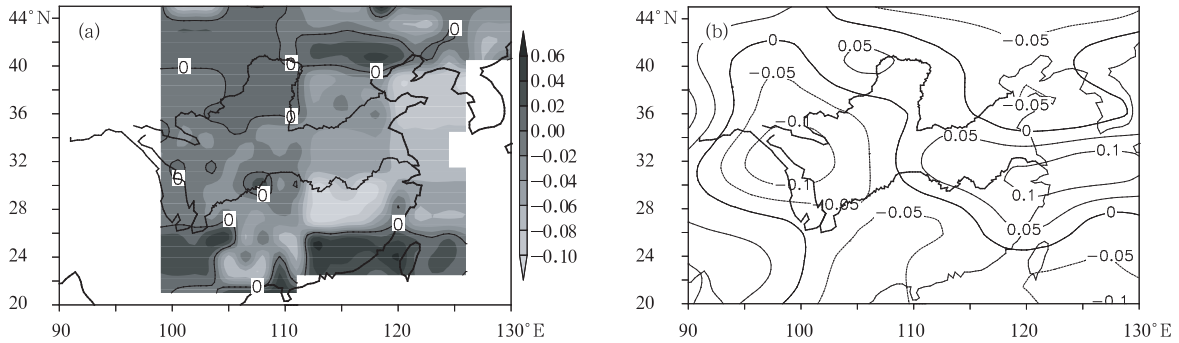


图10　同图8,但为8月

Fig. 10　Same as Figure 8, but for August

9—10月北方雨带南移,夏季风从中国大陆上退出,东亚雨季也随之结束。从9月的空间分布模态(图略)看到,降水场正值区北端的零距平线比上1个月南退,导致正值区南退到黄河和长江中下游之间,最大值区位于华北平原南部。对应NPP正值区都位于28°N以南,最大值区位于西南的云贵川地区,长江流域及以北的地区都为负值区,负极值区位于西北地区。降水场正值区南退表征了降水带南退,东亚大部分地区NPP出现了季节性减少。

上述分析也验证了孙睿等(2000)的分析,东亚地区植被净第一生产力的分布主要受水分条件的影响。仅从降水来看,影响从东南到西北呈递增的趋势(侯英雨等,2007)。通过NPP对气候因子(降水)变化响应分析表明,东亚降水对北方植被NPP季节性变化的驱动作用高于南方,驱动作用(强度、方向)随季节及纬度的不同而不同,NPP的空间格局与降水存在较好的相关性,不同地理位置的相关性强弱不同。

4　结　论

通过评估一个全球耦合模式(GOALS-AVIM)

模拟区域气候,尤其针对于东亚地区季节和年际尺度的气候变率模拟,对夏季 NPP 及其对气候演变的响应做了重点分析,得到下面的结论:

(1) GOALS-AVIM 可以模拟出东亚地区夏季雨带的南北移动。随着季节的变化,东亚地区降水的大值区向高纬度移动,6—7 月移至 50°—55°N,随后南退,而 5—8 月在 30°N 保持降水的大值区。模拟结果与观测资料相近,模拟的降水大值区北移的时间提前和南退的时间滞后,而且在夏季大值区较偏北。同时,NPP 和 LAI 在东亚夏季的气候变化中也明显地表现出了北移的分布型态。

(2) 通过比较地面温度、短波辐射、降水和 NPP 标准化值的分布,分析东亚夏季气候场季节变化的对应关系,表明东亚区域 NPP 的变化趋势与降水、地面气温、短波辐射的时间和空间变化趋势有很强的关联。在东亚夏季的降水带北移南退的过程中,降水、地面气温、短波辐射的变化趋势在特定的时间和空间上,综合影响着 NPP 分布形势。6 月,东亚大部分区域 NPP 的变化趋势与降水相同。西北地区,地面温度和短波辐射的变化趋势与 NPP 表现出了同趋势的变化,而与降水相反。7 月,NPP 的变化趋势在从华北北部到黄土高原的一带地区与短波辐射变化趋势相同,尤其在河套附近,表现最为明显。可以说温度和短波辐射、降水在夏季东亚地区逐渐成为共同主导 NPP 变化的因素。8 月,从对应的 NPP 分布上看,基本上也随东亚降水带的移动而北扩,NPP 空间和时间的分布趋势基本上和降水、短波辐射、地面温度的变化趋势吻合。

(3) 从年际变化的角度,利用 SVD 对夏季逐月的 NPP 和降水的对应空间分布模态进行分析。发现,降水场分解的空间分布模态可以合理地再现东亚地区的夏季雨带移动。同时对降水和 NPP 的对应模态分析,5 月降水场的正距平区对应着 NPP 的正距平区,在地域上有较好的一一对应关系,降水多少影响着 NPP 的增减,是决定 NPP 的主要因子。从 6 月开始到 8 月,随着雨带的北移,降水与 NPP 变化的地域的正相关关系逐渐减弱,可以说对于东亚地区的夏季,影响 NPP 变化有时是单一的降水因子,有时为综合的结果,取决于不同的时间及区域。

References

Chen L X, Zhu C W. 1999. Characteristics and mechanism analysis of SCS aummer monsoon onset during SCSMEX in 1998// Ding Y H. Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and Its Interaction with the Ocean. Beijing: China Meteorological Press, 210-215

Chen L X, Li W, Zhao P, et al. 2001. On the process of summer monsoon onset over East Asia. Acta Meteor Sinica, 15(4): 436-449

Clausse M. 1998. On multiple solutions of the atmosphere-vegetation system in present-day climate. Global Change Biology, 4: 549-559

Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, et al. 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results. Global Change Biology, 5(Suppl): 1-15

Dan L, Ji J J, Li Y P. 2002. Climate simulate based on a different-grid nested and coupled model. Adv Atmos Sci, 19(3): 487-499

Dan L. 2003. Simulation of multi-scale variation in the two-way interaction model between biosphere and atmosphere[D] (in Chinese). Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 192pp

Dan L, Ji J J, Zhang P Q. 2005. The soil moisture of china in a high resolution climate-vegetation model. Adv Atmos Sci, 22(5): 720-729

Dao S Y, Chen L S. 1957. The structure of general circulation over continent of Asia in summer. J Meteor Soc Japan, 215-229

Doherty R, Foley J, Kutzbach J, et al. 2000. Fully coupled climate/dynamical vegetation model simulations over Northern Africa during the mid-Holocene. Clim Dyn, 16: 561-573

Foley J A, Coe M T, Scheffer M, et al. 2003. Regime shifts in the Sahara and Sahel: interactions between ecological and climatic Systems in Northern Africa. Ecosystems, 6: 524-539. doi:10.1007/s10021-002-0227-0

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 Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 38(2): 281-294

Gao Qiong, Yu Mei, Zhang Xinshi, et a1. 1997. Dynamic modelling of Northeast China transect responses to global change: A regional vegetation model driven by remote sensing information. Acta Botanica Sinica (in Chinese), 39(9): 800-810

Grotch S L, MacCracken M C. 1991. The use of general circulation models to predict regional climate change. J Clim, 4 , 286-303

He Yong, Dong Wenjie, Ji Jinjun, et al. 2005. The net primary production simulation of terrestrial ecosystems in china by AVIM. Adv Earth Sci (in Chinese), 20(3): 345-349

Hou Yinyu, Liu Qinhuo, Yan Hao, et al. 2007. Variation trends of China terrestrial vegetation net primary productivity and its responses to climate factors in 1982-2000. Chinese J Appl Ecology (in Chinese), 18 (7): 1546-1553

Huang Jiayou. 2004. The Methods of Statistical Analysis and Prediction in Meteorology (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 256pp

Ji J J, Hu Y C. 1989. A simple land surface process model for use in the climate study. Acta Meteor Sinica, 3: 344-353

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

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

Ji Jinjun, Huang Mei, Liu Qing. 2005. Modeling studies of response mechanism of steppe productivity to climate change in middle latitude semiarid regions in china. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 63(3): 257-267

Ju Lixia, Wang Huijun. 2006. Modern climate over East Asia simulated by a regional climate model nested in a global grid point general circulation model. Chinese J Geophys (in Chinese), 49 (1): 52-60

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. Adv Atmos Sci, 13(2): 133-146

Liu H, Wu G X. 1997. A impact of land surface on July mean climate and onset of monsoon study with an AGCM plus SSiB. Adv Atmos Sci, 14(3): 289-308

Liu H, Zhang X, Wu G X. 1998. Cloud feedback on SST variability in western equatorial Pacific in a CGCM. Adv Atmos Sci, 15 (3):410-423

Lu Jianhua. 2003. The interaction simulation between atmosphere and vegetation under the regional and annual scales[D] (in Chinese). Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences,89pp

Sun L, Xue Y K. 2004. Validation of SSiB model over grassland with CHeRES field experiment data in 2001. Adv Atmos Sci, 21(4): 547-556

Sun Rui, Zhu Qijiang. 2000. Distribution and seasonal change of net primary productivity in China from April, 1992 to March, 1993. Acta Geographhica Sinica (in Chinese), 55(1):37-45

Sun Rui, Zhu Qijiang. 2001. Effect of climate change of terrestrial net primary productivity in China. J Remote Sensing (in Chinese), 5(1): 58-61

Tang Xu, Qian Weihong, Liang Ping. 2006. Climatic features of boundary belt for East Asian summer monsoon. Plateau Meteor (in Chinese), 25(3): 275-381

Wang Shuyu, Xiong Zhe. 2004. The preliminary analysis of 5 coupled ocean-atmosphere global climate models simulation of regional climate in Asia. Clim Environ Res (in Chinese), 9(2):240-250

Wang Yuhui, Zhou Guangsheng. 2002. Modelling study of productivity of aneurolepidium Chinese (Trin) Keng Community in Song-nen plain// Zhou Guangsheng. Global Change and North-East China Transect (NECT) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 145-155

Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2004. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 62(2): 228-236

Wu G H, Liu Z Y, Li W. A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance. Adv Atmos Sci, 13 (1): 1-18

Wu G X, Zhang X H, Liu H, et al. 1997. Global ocean-atmosphere-land system model of LASG (GOALS/LASG) and its performance in simulation study. Quart J App Meteor (in Chinese), 8(Suppl): 15-28

Wu T W, Wu G X, Yu R C. 2004. The evaluation of the ENSO like interannual variation in the GOALS/LASG model. Acta Meteor Sinica(in Chinese), 62(4): 154-166

Xiao Xiangming, Wang Yifeng, Chen Zuozhong. 1996. Dynamics of primary productivity and soil organic matter of typical steppe in the Xilin river basin of Inner Mongolia and their response. Acta Botanica Sinica (in Chinese), 38(1): 45-52

Xiong Zhe. 2004. Evolutionary character of climatology over East Asia by RIEMS. Clim Environ Res (in Chinese), 9(2): 295-302

Xue Y K, Juang H M, Li W P, et al. 2004. Role of land surface processes in monsoon development: East Asia and West Africa. J Geophys Res, 109: D03105, doi: 10. 1029/2003JD003556

Yeh Tucheng, Dao S Y, Li M C. 1959. The abrupt change of circulation over the Northern Hemisphere during June and October // The Atmosphere and Sea in Motion. New York: The Rockefelher Institute Press in Association with Oxford University Press, 246-267

Yeh Tucheng, Staff member of Academia Sinica. 1957. On the general circulation over the Eastern Asia (Ⅰ). Tellus, 9: 432-446

Yeh Tucheng, staff member of Academia Sinica. 1958. On the general circulation over the Eastern Asia(Ⅱ). Tellus, 10: 58-75

Yu Yongqiang, Guo Yufu, Zhang Xuehong. 1996. Features of regional climate as simulated by IAP coupled ocean-atmosphere model// Chen L X, et al. Collected Works on Climate Changes and Its Numerical Simulation Vol. 2. Beijing: China Meteorological Press, 192-201

Yu Y Q, Zhang X H. 1998. A modified monthly flux anomaly scheme for coupling an AGCM and an OGCM. Chinese Sci Bull (in Chinese), 43: 866-870

Zeng N, Neelin J D. 2000. The role of vegetation-climate interaction and interannual variability in shaping the African Savanna. J Clim, 13: 2665-2670

Zhang X, Chen K, Jin X, et al. 1996. Simulation of thermohaline circulation with a twenty-layer oceanic general circulation model. Theoretical Appl Clim, 55: 65-87

Zhi Hai. 2008. Evaluation of basic climate simulated by a coupled

GCM (GOALS-AVIM) [D] (in Chinese). Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 156pp

Zhou Guangshen, Wang Yuhui, Bai Liping, et al. 2004. Study on the interaction between terrestrial ecosystems and global change. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 62(5): 692-707

附中文参考文献

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]. 北京:中国科学院大气物理研究所, 192 pp

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. 南京大学学报(自然科学), 38(2): 281-294

高琼,喻梅,张新时等. 1997. 中国东北样带对全球变化响应的动态模拟——一个遥感信息驱动的区域植被模型. 植物学报, 39(9): 800-810

何勇, 董文杰, 季劲钧等. 2005. 基于 AVIM 的中国陆地生态系统净初级生产力模拟. 地球科学进展, 20(3): 345-349

侯英雨,柳钦火,延昊等. 2007. 我国陆地植被净初级生产力变化规律及其对气候的响应. 应用生态学报,18 (7):1546-1553

黄嘉佑. 2004. 气象统计分析与预报方法. 北京:气象出版社,256pp

季劲钧, 黄玫, 刘青. 2005. 气候变化对中国中纬度半干旱草原生产力影响机理的模拟研究. 气象学报,63(3):257-266

季劲钧, 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. 大气科学, 23(4):439-448

鞠丽霞,王会军. 2006. 用全球大气环流模式嵌套区域气候模式模拟东亚现代气候. 地球物理学报, 49(1): 52-60

林之光. 1987a. 我国东部地区夏季风雨带进退规律的进一步研究// 中国气象局气象科学研究院. 气象科学技术集刊(10). 北京: 气象出版社,24-31

林之光. 1987b. 我国西部地区夏季风雨季的进退// 中国气象局气象科学研究院. 气象科学技术集刊(11). 北京: 气象出版社,70-76

吕建华. 1999. 区域和年际尺度的大气和植被的相互作用模拟[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所,89pp

孙睿,朱启疆. 2000. 中国陆地植被净第一生产力及季节变化研究. 地理学报, 55(1): 37-45

孙睿,朱启疆. 2001. 气候变化对中国陆地植被净第一生产力影响的初步研究. 遥感学报, 5(1):58-61

汤绪,钱维宏,梁萍. 2006. 东亚夏季风边缘带的气候特征. 高原气象, 25(3): 275-381

王淑瑜,熊喆. 2004. 5 个海气耦合模式模拟东亚区域气候能力的初步分析. 气候与环境研究,9(2):240-250

王玉辉,周广胜. 2002. 松嫩平原羊草群落生产力的模拟研究// 周广胜等. 中国东北样带(NECT)与全球变化. 北京:气象出版社, 145-155

王遵娅, 丁一汇, 何金海等. 2004. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析. 气象学报, 62(2): 228-236

吴国雄,张学洪,刘辉等. 1997. LASG 全球海洋-大气-陆面系统模式(GOALS/LASG)及其模拟研究. 应用气象学报, 8(增刊): 15-28

吴统文, 吴国雄, 宇如聪. 2004. GOALS 模式对热带太平洋 ENSO 年际变化特征的模拟评估. 气象学报, 62(4): 154-166

肖向明,王义凤, 陈佐忠. 1996. 内蒙古锡林河流域典型草原初级生产力和土壤有机质的动态及其对气候变化的反应. 植物学报,38 (1): 45-52

熊喆. 2004. 区域气候模式对东亚气候时空演变特征的模拟研究. 气候与环境研究, 9(2): 295-302

俞永强, 张学洪. 1998. 一个修正的海气通量距平耦合方案. 科学通报, 43(8): 866-870

智海. 2008. 耦合模式-GOALS-AVIM 基本气候态模拟评估[D]. 南京:南京信息工程大学, 156 pp

周广胜,王玉辉,白莉萍等. 2004. 陆地生态系统与全球变化相互作用的研究进展. 气象学报,62(5):692-707