

俞淼, 陈海山, 孙照渤. 2011. 动态冠层模型 ICM 的改进及其对中高纬地区植被季节和年际变化的模拟试验 [J]. 大气科学, 35 (3): 571 - 588. Yu Miao, Chen Haishan, Sun Zhaobo. 2011. Seasonal and interannual variations of boreal vegetation simulated by an improved interactive canopy model (ICM)[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (3): 571 - 588.

动态冠层模型 ICM 的改进及其对中高纬地区 植被季节和年际变化的模拟试验

俞淼 陈海山 孙照渤

南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

摘 要 植被动态冠层模型 Interactive Canopy Model (ICM) 考虑了生态系统中较完整的碳氮循环过程, 能够较为客观真实地描述较短时间尺度上植被的动态变化特征。本文在 ICM 原有碳氮分配方案基础上, 考虑了植物花、果实等新生组织对碳氮分配的影响, 假设新生组织碳库是花期以后植物的主要碳汇之一, 并利用物候模型 ForcSar 预测花期, 调控碳氮分配过程; 用卫星观测的 LAI (Leaf Area Index) 产品对模拟的北半球中高纬度地区植被的季节和年际变化过程进行了对比分析。结果表明, 改进后的 ICM 能够更好地模拟北半球中高纬植被的季节变化过程。7 月前是模拟的植被生长最旺盛的时间, 与实际情况更为一致, 从而较好修正了原方案中模拟的植被生长落后于实际观测的问题; 模拟与观测值的季节变化相关系数有了显著提高, 各类型植被的模拟误差也都不同程度减小。改进后模拟与观测的年际变化相关性也有了一定程度的提高, 但年际变化趋势的改进效果稍弱。模拟的 LAI 变化改变了地表能量平衡和水汽收支状况, 对于美国东部温带落叶阔叶林来说, 植被吸收太阳辐射、叶面和地面的感热、潜热通量在植被生长前期的变化量最大, 说明改进后的 ICM 将会引起模拟下垫面物理状况的改变。

关键词 植被动态冠层模型 碳分配 物候模型 模型改进 中高纬地区

文章编号 1006 - 9895 (2011) 03 - 0571 - 18 **中图分类号** P464 **文献标识码** A

Seasonal and Interannual Variations of Boreal Vegetation Simulated by an Improved Interactive Canopy Model (ICM)

YU Miao, CHEN Haishan, and SUN Zhaobo

Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract The dynamic vegetation model, Interactive Canopy Model (ICM), which includes the ecosystem carbon and nitrogen cycling processes, is able to model the vegetation variations on short time scales. A reproductive organs carbon pool that constitutes flowers and fruits has been added into the original carbon and nitrogen reservoirs. It is assumed that the reproductive organs carbon pool will be a main carbon sink from the dates of vegetation flowering. A phenological model, ForcSar, is used to predict the flowering dates when the main partitioning positions of carbon and nitrogen change. The simulated LAI (Leaf Area Index) from the modified ICM is compared with the observa-

收稿日期 2010-08-03, 2011-01-05 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40875057, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY(QX)2007-25, 江苏省研究生培养创新工程 CX08B_018Z, 江苏省“333 高层次人才培养工程”资助项目

作者简介 俞淼, 女, 博士研究生, 主要从事陆气相互作用、陆面过程与气候数值模拟研究。E-mail: yuum@163.com

通讯作者 陈海山, E-mail: haishan@nuist.edu.cn

tions from satellite data in boreal middle and high latitudes where the vegetation varies the most severely all the year round. It shows that the seasonal variations of boreal vegetation can be better simulated than before. The modified ICM represents its maximal LAI in July, conforming to the reality, so that the problem of modeled vegetation growth lag in the original ICM has been rectified. The correlation coefficients of observed and simulated seasonal LAI are obviously higher than before. And the errors are decreased for all types of boreal vegetations. Besides, the correlation of observed and simulated interannual LAI is increased to some extent, even not very prominent. The changeable LAI from the ICM will alter the land surface conditions such as energy balance and water cycle. Solar radiation absorbed by vegetation, sensible heat fluxes and latent heat fluxes change significantly before the blossom of vegetation in the case of temperate deciduous broadleaf trees in eastern USA. And therefore the modeled physical properties of land surface will be influenced.

Key words interactive canopy model (ICM), carbon allocation, phenological model, model improvement, middle and high latitude regions

1 引言

作为地表覆盖的重要组成部分之一,植被是全球气候系统变化的关键因子和自然纽带。植被通过与大气之间的相互反馈过程,可以对不同时空尺度上的天气、气候产生影响。植被也是地球生态系统的主要成员之一,是全球碳氮循环及其他各种物质交换的驱动力。如何更深入理解植被与大气之间的相互作用机制是区域和全球变化研究的重要课题之一。生态学领域侧重于对植被变化过程的研究,更多关注生态系统与大气之间的碳交换过程、氮循环对碳交换过程的作用以及全球气候变化和人类活动对植被覆盖的影响(Peng, 2000; 曹明奎和李克让, 2000; 周广胜等, 2004; 毛嘉富等, 2006; 毛留喜等, 2006),全球以及区域气候变化研究中则更注重植被的地理覆盖、形态结构等的变化对下垫面物理状况、地气之间能量、水分等交换过程的影响以及植被变化所引起的气候效应(Henderson-Sellers and McGuffie, 1995; 符淙斌和袁慧玲, 2001; Li and Xue, 2005; Denman et al., 2007; 刘少锋等, 2009; 曾红玲等, 2010)。作为当前气候模式重要组分之一的陆面模式对植被的参数化经历了从无到有,从简单到复杂的过程。Deardorff (1978)提出的“大叶”模型使植被对地表蒸散过程的控制作用引起了广泛关注。之后,植物的生物物理过程通过经验气孔模型被引入到陆面过程模式中(Dickinson et al., 1986, 1993; Sellers et al., 1986)。到20世纪90年代中期,为描述植物的生物生化过程对气孔阻抗的影响,光合作用模型被应用于陆面模式(Sellers et al., 1996b; Bonan, 1998; Dai et al.,

2004),而生化过程的引入正逐渐成为陆面模式对植被进行更细致考虑的重要方向之一(Monteith, 1995)。陆面模式中常用叶面积指数(Leaf Area Index, 简称 LAI)来表征植被结构的变化特征, LAI是指单位地表面上总叶片面积(双面或多面)的一半(Chen and Cihlar, 1996),它能够反映出植被的生长状况和生理特征(Holben et al., 1980),是陆面模式中影响到植被与大气之间能量和质量交换的关键变量之一(陈海山等, 2006)。

在绝大多数用于气候模拟的陆面模式中, LAI通常是根据观测或经验预先给定,而事实上,植被的结构和生理等特征参数化与气候因素密切相关,并随着环境的变化而表现出明显的动态变化过程。由 Dickinson and Shaikh (1998)、Dickinson et al. (2002)发展的植被动态冠层模型 ICM (Interactive Canopy Model) 将 LAI 视为一个与外界因素和自身生理过程密切相关的变量, LAI 值由其中包含的生态系统碳氮循环过程中的碳含量计算得到。模型中较完整地考虑了 CO₂ 通过光合作用进入植物体内生成有机物并在氮含量的调控作用下分配至植物各个组织器官的过程,同时, LAI 影响到陆面各物理通量的计算,由此, ICM 可以描述植被与大气之间的相互反馈作用,能够更加客观地反映植被对气候变化的动态响应。ICM 中的 LAI 计算与每一时步的碳氮循环过程有关,能够模拟较短时间尺度上的植物生物物理过程,这也是与以往一些着重于年代际时间尺度上的动态植被模型有所不同之处。Ji (1995) 和 Huang et al. (2007) 也在大气植被相互作用模式 AVIM2 中将植被的变化过程与生态系统碳氮循环相联系,并取得了许多令人鼓舞的结果

(毛嘉富等, 2005; Dan et al., 2007a, 2007b; Dan and Ji, 2007; Zeng H L et al., 2008a, 2008b; 季劲钧等, 2008; Zhi et al., 2009)。但与 AVIM2 中由土壤氮的控制作用不同, ICM 直接对植物中的叶氮含量进行描述, 使得模式对植物叶中的生物化学过程考虑更为直接。

我们之前的工作, 将 ICM 引入到美国国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric Research, 简称 NCAR) 公用陆面模式 CLM3.0 中 (Oleson et al., 2004), 并对该模式模拟的植被变化过程进行了较全面的评估 (俞淼等, 2010, 2011)。结果表明, ICM 对植被季节和年际尺度上的动态变化过程具有一定的模拟能力, 但模式模拟结果和观测在量值大小和位相上均存在显著差异, 具体表现为: 模拟值在低纬度和高纬度地区偏大, 中纬度地区偏小; 模拟的植被生长多数情况下落后于观测, 对于季节变化特征显著的中高纬地区植被, 这种现象尤其明显, 而位相上的差异一定程度上加大了模拟与观测之间的偏差。考虑到所使用的对比观测资料本身存在的质量问题, 其反映的植被位相变化比量值大小更为可信, 因此, ICM 模拟与观测的季节位相偏差, 即模拟的植被生长落后于实际应是 ICM 模型存在的更为本质上的问题。

中高纬地区植被的季节变化特征鲜明, 春季, 随着温度的升高和降水的增加, 植物开始进入生长条件适宜的时节, 常于夏季最为茂盛, 至冬季由于温度等环境因素的胁迫作用落叶进入休眠期。而热带地区全年温度高、温差小, 在降水充沛的地区植物的形态结构和生理特征变化幅度不大, LAI 冬夏季的差值比中高纬地区植被的要小得多 (武吉华等, 2004)。除了季节变化, 中高纬度地区也是年际尺度上植被变化最为显著的区域 (Myneni et al., 1997; Zhou et al., 2003; 方精云等, 2003)。在植被的生长发育过程中, 温度对中高纬地区植被的影响尤为关键 (陈效述, 2000; Zhang et al., 2004), 而热带地区植被的生长受到诸如太阳辐射 (Thomas and Vince-Prue, 1996; Borchert et al., 2005a)、温度 (Wielgolaski, 1966; Borchert et al., 2005b)、降水 (Maass et al., 1995; Chen and Li, 2008)、土壤湿度 (Borchert et al., 2004; Yoshifuji et al., 2006)、营养元素 (Sigurdsson, 2001) 等等外界因素和植物本身的生理调节等非气象因素的交叉影

响, 各影响因子的作用复杂多样。模型中考虑热带地区植被的生长状况时, 除温度以外的其他一些因素如土壤湿度等的控制作用不可忽略。因而相较于中高纬地区植被, 模式对热带地区植被生理生化过程的模拟存在更多的不确定性因素。

中高纬地区与低纬度地区植被的结构形态和生理机能等变化特征, 以及各气象因子对它们的影响存在很大不同, 考虑到 ICM 模拟的植被生长落后的问题对于中高纬地区更加突出, 我们将不同纬度带即气候带的植被变化过程分开讨论, 重点先对中高纬地区植被的动态过程模拟改进做探索性的尝试。

2 模式简介

ICM 计算 LAI 的过程中主要包括两个模块, 即光合作用模块和光合生成物在植物体内的分配模块。光合作用模块主要采用 Farquhar 模型 (Farquhar et al., 1980; Collatz et al., 1990, 1991), 同时利用四层混合模型对植物冠层接收的光合有效辐射进行处理。由光合作用所吸收的碳按照一定的比例分配给植物的叶、茎干、根和一个可以提供给植物呼吸损耗的光合生成物碳库。当植物受到寒冷、干旱等外界胁迫作用时, 叶、茎干和根将按照一定比例衰亡。这期间, 受到温度、湿度以及与光合作用和呼吸作用有关的 1, 5-二磷酸核酮糖羧化酶/加氧酶 Rubisco 含量的影响。在光合生成物分配这一模块中, 植物体内各组织的碳氮比基本保持不变, 氮循环与碳循环过程相伴而存, 因而在碳向不同组织的分配过程中同时进行氮的分配。此外, 氮以 NH_4^+ 和 NO_3^- 的形式从土壤中被植物吸收进入体内, 并输送至叶和根两个部分。叶氮中的 Rubisco 含量是 ICM 中的关键变量之一, 它的变化也受到温度、湿度的影响, 同时, Rubisco 对光合作用和呼吸作用起到控制作用, 并影响到植物体内碳的分配过程。自此, ICM 详细考虑了生态系统中相互制约而共存的碳循环和氮循环过程。在这一过程中, ICM 将温、湿等的控制作用包含进每一时步的参数化方案中, 对 LAI 的计算甚至可以精确到小时的时间尺度上。

在植物的生长发育过程中, 其自身的结构形态呈现出相当稳定的季节变化规律, 且这种节律性变化与气候要素的季节变化密切相关, 并形成了植物

自身的生长发育节律。特别是对中高纬度地区植被,随着外界气候因素,尤其是温度的变化(Hopkins, 1938; 郑景云等, 2002; Linkosalo et al., 2006),植物依次出现种子萌发、叶伸展、开花、结实、落叶、休眠的现象(Rathcke and Lacey, 1985),这种现象称为植物生长的物候,各个阶段的开始和结束称为物候期(武吉华等, 2004)。植物的物候现象是植物生长过程中的一个重要指标,物候期决定了植物处于生长期的长短,关系到植物光合作用活跃时段的长短,继而影响到植物的碳分配过程以及整个陆面生态系统中的碳循环(Jackson et al., 2001)。研究植物这种季节性变化规律与环境因素关系的物候学古已有之(竺可桢和宛敏渭, 1963),并在生态学领域的研究中得到逐步重视(Running and Hunt, 1993; Myneni et al., 1997; Schwartz, 1998)。对植物物候的模拟是诸多生态系统模型中的重要组成部分(Running and Hunt, 1993; Schwartz, 1998),区域和全球气候模式中,也从各个角度对植物物候进行了较为详细的考虑(Sellers et al., 1996a; Kucharik et al., 2000; Bonan et al., 2003; Sitch et al., 2003; Krinner et al., 2005)。相对而言,ICM中的碳氮循环参数化方案以及对LAI的计算过程中,着重于模拟植物结构特征的连续性变化,弱化了对植物物候的描述(Dickinson et al., 2002)。

另一方面,ICM中LAI的增大减小过程对应了叶面生物量的累积消耗过程,叶面生物量的净获得,即碳向叶的分配量减去叶面碳损耗,与光合作用生成物在植物体内的分配过程密切相关。实际光合作用生成物在向植物各个组织器官分配的过程中,不仅使得植物的各营养器官即叶、茎干和根的生物量不断增多,同时在植物成熟期以后产生新的组织器官,如花和果实(潘瑞炽等, 2008)。这其中,碳的分配流向很大程度上决定于植物所处的物候期(Nelson and Isebrands, 1983),植物开花以后,由光合作用所产生的碳水化合物将主要流向花和果实等器官,用于植物新生组织的生长发育或生物量的增加,而不是继续流向叶碳库用于叶的生长。

基于以上两点考虑,对ICM提出一个改进的方案,在原有碳氮分配方案的基础上进一步细化,考虑新生组织对碳氮分配过程的影响,同时利用对植物物候的模拟预测碳在叶碳库和新生组织碳库之

间的分配流向。假设植物在花期以后,光合作用生成的碳主要分配向新生组织碳库 C_o ,新生组织碳库包括如花、果实等和其他组织器官的生物量增加所需的碳。 C_o 的变化方程如下:

$$\frac{dC_o}{dt} = f_o \cdot X_c + C_{p,o} - (k_s \cdot S_{cd} + k_{ot} + k_{oh}) \cdot C_o, \quad (1)$$

同时,叶碳含量 C_l 的变化:

$$\frac{dC_l}{dt} = f_l \cdot X_c + C_{p,l} - (k_s \cdot S_{cd} + k_{lt} + k_{lh}) \cdot C_l, \quad (2)$$

其中, X_c 为光合作用模块计算得到的碳总量, f_o 和 f_l 分别为碳总量向 C_o 和 C_l 的分配比重, $C_{p,o}$ 和 $C_{p,l}$ 分别为光合生成物碳库 C_p 向 C_o 和 C_l 的转化率, $k_s \cdot S_{cd}$ 为由于温度、土壤湿度的胁迫作用造成的碳损耗系数, k_{ot} 、 k_{oh} 和 k_{lt} 、 k_{lh} 分别为新生组织和叶因为被捕食和人为收割而造成的碳损耗系数,均设为常数。(1)、(2)式中 f_o 和 f_l 由下式给出:

$$f_o = (1 - f_p) \cdot e^{-0.2L} \cdot S_n \cdot H(F_c - F^*), \quad (3)$$

$$f_l = (1 - f_p) \cdot e^{-0.2L} \cdot S_n \cdot [1 - H(F_c - F^*)], \quad (4)$$

其中, f_p 为碳总量向光合生成物碳库的分配比重, L 为叶面积指数LAI, S_n 为Rubisco作用部分。(1)、(2)式中 C_p 向 C_o 和 C_l 的转化率分别为:

$$C_{p,o} = k_p \cdot C_p \cdot F \cdot H(F_c - F^*), \quad (5)$$

$$C_{p,l} = k_p \cdot F \cdot C_p \cdot [1 - H(F_c - F^*)], \quad (6)$$

其中, k_p 和 F 为转化系数,光合生成物碳库 C_p 的变化方程为:

$$\frac{dC_p}{dt} = f_p \cdot X_c - C_{p,l} - C_{p,o} - R_{\text{auto}}. \quad (7)$$

C_p 用于提供植物的呼吸损耗 R_{auto} ,也提供叶和新生组织中用于生命活动的糖和用于生物体构成的淀粉之间的相互转换。 f_p 的具体计算可以参考Dickinson et al. (2002)。除去分配向光合生产物、叶和新生组织的碳以外,光合作用生成的总碳量将按一定的比重非配给茎和根。

(3)–(6)式中, H 为Heaviside函数,

$$H(F_c - F^*) = \begin{cases} 0 & F_c < F^* \\ 1 & F_c \geq F^* \end{cases} \quad (8)$$

表示植物的物候效应项。对于温寒带植物的物候变化,温度是主要的控制因子(Landsberg, 1974; Cannell and Smith, 1983),因此,(8)式中的 F_c 是与温度有关的量,称为促进温度或促进状态,而 F^* 则为植物物候转变的温度阈值或促进单位阈值,

这里为植物花期或碳主要分配向新生组织碳库时的阈值。参考一个简单的物候模型 ForcSar (Sarvas, 1974; Chuine et al., 1999), F_c 由下式计算:

$$F_c(t) = \sum_{t_0}^t R_f(x_{t_i}), \quad (9)$$

$$R_f(x_{t_i}) = \frac{28.4}{1 + e^{-0.185(x_{t_i} - 18.4)}}, \quad x_{t_i} > 0^\circ\text{C},$$

其中, x_{t_i} 为日平均温度, $R_f(x_{t_i})$ 为促进率方程, t_0 为促进单位累积开始日, 或积温开始日, 模式中在北半球取为每年的 1 月 1 日, 南半球取为每年的 7 月 1 日。式中的系数 28.4、-0.185 和 18.4 由 Hänninen (1990) 根据 Sarvas (1974) 针对芬兰桦树的试验数据给定, 因而对北半球所有种类的植物来说, 这里用到的 3 个系数存在一定的局限性。

相应的, ICM 氮循环中增加了植物新生组织氮库 N_o , 其含量由 C_o 的含量和新生组织中的碳氮比计算得出。

根据已有的工作所给定的植物花开时期阈值 (Cannell and Smith, 1983; Chuine et al., 1999; Linkosalo, 2000; 张银锁等, 2001; Linkosalo et al., 2008; García-Mozo et al., 2009) 和模式中模拟的不同类型植被的生长状况, F^* 取值在表 1 中给

表 1 不同 PFT 花开时期的温度阈值 F^* 和比叶面积 L_c
 Table 1 Critical values of state of forcing for the transition from quiescence to flowering (F^*) and specific leaf area (L_c) for each plant functional type

编号	植被功能类型	$F^*/^\circ\text{C}$	$L_c/\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$
1	温带常绿针叶林	600	50
2	寒带常绿针叶林	550	40
3	落叶针叶林	400	300
4	热带常绿阔叶林	—	24
5	温带常绿阔叶林	—	24
6	热带落叶阔叶林	—	30
7	温带落叶阔叶林	1300	55
8	寒带落叶阔叶林	350	180
9	常绿阔叶灌丛	—	12
10	温带落叶阔叶灌丛	350	30
11	寒带落叶阔叶灌丛	200	120
12	C3 极地草	70	100
13	C3 非极地草	250	200
14	C4 草	—	30
15	农作物	2600(45°S~45°N) 1200(45°N~90°N 和 45°S~90°S)	50

出, 包括温带常绿针叶林、寒带常绿针叶林、落叶针叶林、温带落叶阔叶林、寒带落叶阔叶林、温带落叶阔叶灌丛、寒带落叶阔叶灌丛、C3 极地草、C3 非极地草和农作物, 其中农作物又根据所处的纬度带取不同值。因为温度不能作为热带地区物候转变的唯一标准, 表 1 中没有考虑热带常绿阔叶林、温带常绿阔叶林、热带落叶阔叶林、常绿阔叶灌丛和 C4 草的温度限制作用。

ICM 中 LAI 由叶碳含量 C_l 和比叶面积 L_c (Specific Leaf Area, SLA) 的乘积给出, 即

$$L = C_l \cdot L_c. \quad (10)$$

L_c 表示单位干重的叶面积, 其取值根据不同的植被类型给定 (表 1)。

3 试验设计和资料

ICM 垂直方向上分为 1 层植被、10 层土壤和最多 5 层雪盖, 水平采用多层嵌套网格, 各网格之间没有相互作用。采用普林斯顿大学全球陆面强迫场资料 (Sheffield et al., 2006) 驱动 ICM, 强迫场包括近地面的气压、气温、降水、太阳短波辐射、大气长波辐射、风速和比湿。设计两组试验, 一组由改进前的模型进行模拟 (ICM-O), 另一组由将上述方案加入 ICM 后进行的模拟 (ICM-M)。两组试验的模拟时间都是从 1970 年 1 月到 2006 年 12 月, 1970~1981 年作为模拟平衡时间。模式空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间步长为 30 min。

LAI 实况资料采用搭载在 TERRA 卫星上的中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectrometer, 简称 MODIS) 获取的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 2000 年 2 月到 2006 年 12 月月平均的 MOD15A2 LAI 产品 (Knyazikhin et al., 1998; Myneni et al., 2002; Yang et al., 2006a, 2006b), 以及 1982 年 1 月到 2002 年 12 月最新版本模拟与制图研究全球数据集 (Global Inventory Monitoring and Modeling Studies, 简称 GIMMS) 的 LAI 产品 (Zhou et al., 2001; Tucker et al., 2005)。采用两套 LAI 产品的主要原因是 MODIS 的高分辨率和 GIMMS 的长时间尺度, 在分析植被季节和年际尺度变化上各具优势。

4 结果分析

以下将对比实际观测资料, 分别从季节和年际

尺度上分析 ICM-O 和 ICM-M 的模拟结果差异, 验证改进后模型的模拟效果。并通过对改进前后模拟的能量通量值比较, 初步说明由于模型中植被参数化的改变, 模拟的地表状况将会产生怎样的变化。

4.1 北半球中高纬植被季节变化模拟情况对比

与 ICM 中的植被类型分类不同, MODIS 资料根据国际地圈生物圈计划 (International Geosphere-Biosphere Programme, 简称 IGBP) 将地表覆盖分为 17 种类型 (Friedl et al., 2002), 其中植被按照生物群落的划分方式分为 12 类。ICM 将其中 7 种基本植被类型, 即常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、灌丛、草地和农作物按照不同的气候要素扩展分为 16 种 (Bonan et al., 2002), 并称为植被功能类型 (Plant Functional Type, 简称 PFT)。图 1 (见文后彩图) 给出北半球 30°N 以北地区主要 PFT 分布图, 其中包括了温带常绿针叶林 (PFT1)、寒带常绿针叶林 (PFT2)、落叶针叶林 (PFT3)、温带落叶阔叶林 (PFT7)、温带落叶阔叶灌丛 (PFT10)、寒带落叶阔叶灌丛 (PFT11)、C3 极地草 (PFT12)、C3 非极地草 (PFT13) 和农作物 (PFT15)。ICM 中农作物分为玉米和小麦两种, 但目前模式中仅用玉米的各项参数统一代替, 因此, 表 1 和图 1 中将玉米和小麦统归为农作物 1 种类型。

根据 MODIS 的地表覆盖类型图 (图略) 和 ICM 植被功能类型分布 (图 1), 选取了加拿大东南部 (45°N~50°N, 75°W~85°W)、东欧 (60°N~65°N, 45°E~60°E)、西伯利亚 (57°N~62°N, 120°E~130°E)、美国东部 (35°N~40°N, 70°W~85°W)、美国西南部 (30°N~35°N, 110°W~120°W)、亚洲北部 (65°N~70°N, 70°E~100°E)、北美西北部 (65°N~75°N, 150°W~160°W)、亚洲中部 (45°N~50°N, 50°E~80°E) 和中国东部 (30°N~35°N, 110°E~120°E) 作为温带常绿针叶林、寒带常绿针叶林、落叶针叶林、温带落叶阔叶林、温带落叶阔叶灌丛、寒带落叶阔叶灌丛、C3 极地草、C3 非极地草和农作物的分析区域, 以重点分析对于不同类型植被的模拟情况。

对于温带常绿针叶林 (图 2a), ICM-M 模拟的 LAI 最大值比 ICM-O 模拟的最大值出现时间提前了 1 个月, 与观测的 7 月份情形更为一致。5~9 月模拟值与观测值之间的差别显著减小。ICM-O 模

拟的寒带常绿针叶林 (图 2b) 全年大于观测, LAI 最大值出现在 8 月, 改进后 ICM-M 模拟的 LAI 最大值出现在 7 月, 与观测一致。1~3 月和 8~12 月模拟与观测的差值也有了大幅减小。落叶针叶林 (图 2c) 的最大 LAI 值在 ICM-O 模拟中出现在 8 月, 比实际观测晚了 1 个月, 除 5、6 月以外模拟值都大于观测, 9 月份模拟与观测差值最大。改进后, 模拟的 LAI 最大值出现在 7 月, 修正了改进前模拟的位相落后问题, 模拟值各月大多小于观测, 除 6、7 月外, 模拟与观测之差较改进前减小。ICM-M 模拟的温带落叶阔叶林 (图 2d) 的季节变化特征要明显好于 ICM-O 中的模拟, LAI 不仅在位相变化上, 且在量值大小上都相当接近于实际观测, 模拟与观测值的差别各月均减小, 4~8 月减小幅度最为显著。温带落叶阔叶灌丛 (图 2e) 的 LAI 量值不大, 其季节变化幅度也稍弱于其他类型植被, LAI 在 4 月和 8 月有两个极大值, ICM-M 模拟对 4 月极大值的表现较为明显, 而 8 月的较弱, 8 月份 ICM-M 模拟的 LAI 与观测差值差别最大, 改进后的模拟与观测的差值在 3~7 月和 10、11 月份得到明显减小。寒带落叶阔叶灌丛 (图 2f) 在改进前的模拟中也有位相落后的问题, 这在 ICM-M 模拟中也得到了修正。改进后 6、7 月模拟与观测的差值显著减小, 但 9、10 月份差值增大, 改进后的模型对寒带落叶阔叶灌丛生长后期的 LAI 模拟偏小。ICM-O 模拟的 C3 极地草 (图 2g) LAI 除 6 月外都偏大, 差值在 8、9 月最为明显, 这也与 ICM-O 模拟的 C3 极地草 LAI 位相落后有关。改进后, 除 5、6 月以外, 各月模拟与观测差值均有显著减小。C3 非极地草 (图 2h) 的 LAI 在 ICM-O 的模拟中落后于观测 2 个月, 改进后 ICM-M 的模拟也修正了这个问题, 但改进后的模拟值在 4、5 月较明显偏大, 7~9 月较明显偏小。对于农作物 (图 2i), 除 6~8 月以外, 改进后的模拟与观测差值均有减小。5 月和 8 月观测 LAI 有两个极大值, 但 ICM-M 模拟的极大值仅出现在 7 月, 仍无法表现出两个极值的特点。农作物的这种双峰结构特征应该与此区域内的播种收割有关, 模型中如何考虑人为因素的影响, 对农作物的模拟至关重要。

对于北半球中高纬度的各个类型植被来说, 改进后的模型 ICM-M 的模拟结果都在一定程度上修正了改进前模型模拟的 LAI 位相落后于实际的问

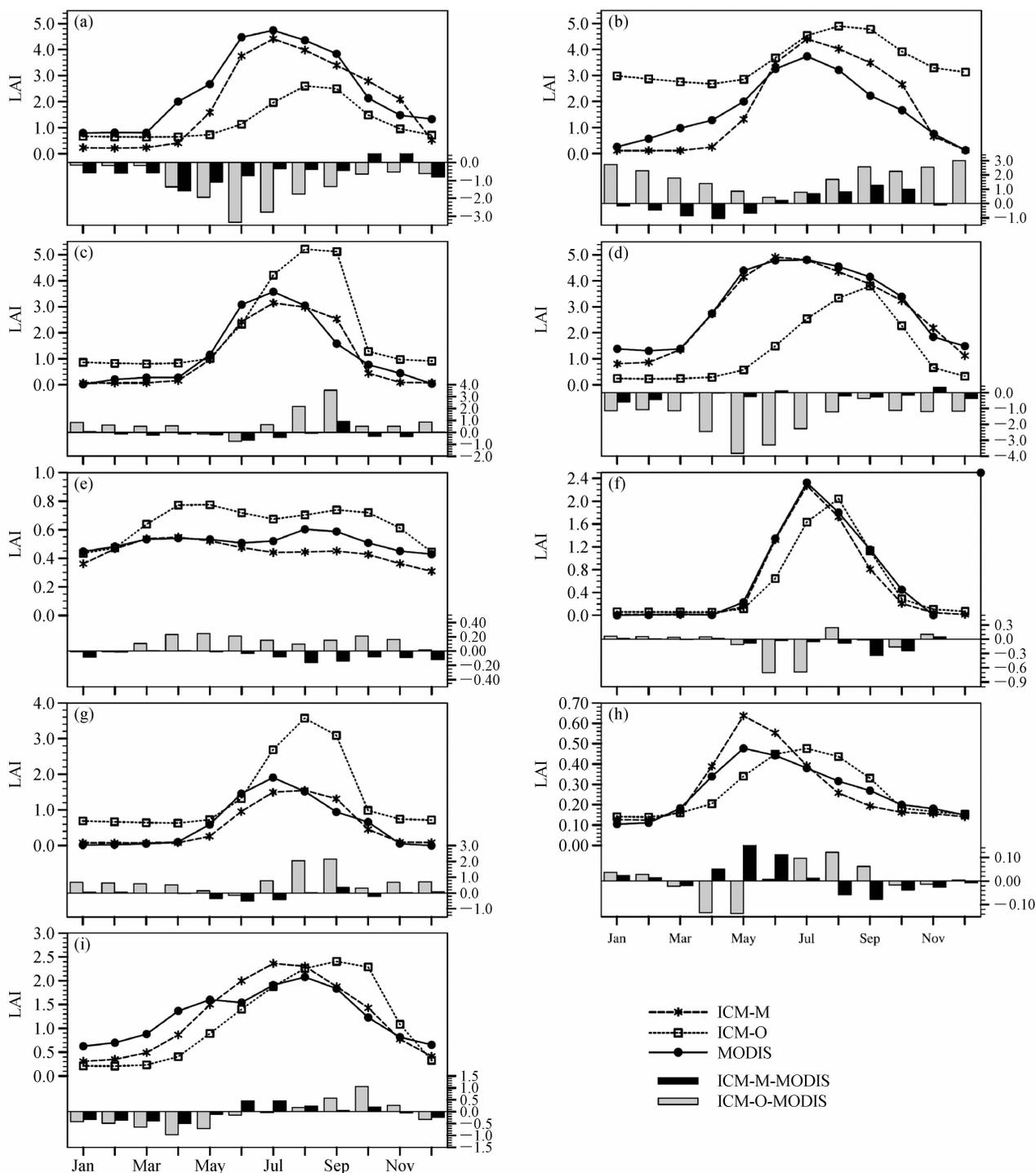


图2 MODIS观测、ICM-O和ICM-M模拟的LAI季节变化及两组模拟与观测的差值:(a)加拿大东南部温带常绿针叶林;(b)东欧寒带常绿针叶林;(c)西伯利亚落叶针叶林;(d)美国东部温带落叶阔叶林;(e)美国西南部温带落叶阔叶灌丛;(f)亚洲北部寒带落叶阔叶灌丛;(g)北美西北部C3极地草;(h)亚洲中部C3非极地草;(i)中国东部农作物

Fig. 2 Seasonal variations of observed LAI in MODIS and simulated ones in ICM-O and ICM-M and their differences for (a) temperate evergreen needleleaf trees (EN) in southeastern Canada, (b) boreal evergreen needleleaf trees in eastern Europe, (c) deciduous needleleaf trees (DN) in Siberia, (d) temperate deciduous broadleaf trees (DB) in eastern USA, (e) temperate deciduous broadleaf shrub in southwestern USA, (f) boreal deciduous broadleaf shrub in northern Asia, (g) C3 arctic grass in northwestern North America, (h) C3 grass in central Asia, and (i) crop in eastern China

题，同时模拟与观测之间的差值也得到不同程度的减小，特别是对原先差值较大的月份。ICM-M 中引入的物候模型 ForcSar 最早是建立在对温带植物候的模拟预测之上，可以看出，ICM-M 对温带落叶阔叶林模拟的改进效果最为显著(图 2d)。此外，ICM-M 对林地，如温带常绿针叶林、寒带常绿针叶林、落叶针叶林、温带落叶阔叶林季节变化的模拟效果要好于对温带落叶阔叶灌丛、寒带落叶阔叶灌丛和 C3 非极地草的模拟。灌丛和 C3 非极地草的生长地区大多属于最易受气候变化影响的生态敏感区，其生长过程对水分等外界条件具有更高的依赖性。Zeng X D et al. (2008) 对灌丛地区的模拟区别对待，可提高对全球干旱半干旱灌木林的模拟效果。

为了更进一步说明改进前后模拟的北半球中高纬 LAI 的季节变化情况，图 3 给出 30°N~80°N 范围内 LAI 的纬度—月份剖面图。MODIS 观测的纬向平均 LAI 最大值出现在 60°N 附近的 7 月份，LAI 等值线分布较为均匀，说明北半球中高纬各个纬度上的植被季节变化规律较为协同一致，4~10 月生长茂盛(图 3a)。ICM-M 模拟的纬向平均 LAI 最大值出现在

7 月和 8 月，生长期主要处于 4~10 月，与观测情形一致，但 60°N 的最大值明显弱于观测(图 3b)。相较于 ICM-O 模拟中 LAI 最大值出现在 8 月份的情况，改进后的模拟将植被生长最茂盛的时间提前了 1 到 2 个月。改进前，60°N 附近全年的 LAI 纬向平均值都在 1.0 以上，而 50°N 以南的 LAI 在 7 月份才能达到 1.0，9 月份以后开始减小。植被生长较茂盛的区域主要集中在了 50°N~70°N 一带，模拟的 30°N~50°N 区域植被生长季节短于观测(图 3c)，这在改进后的模拟中也有了一定的改善。可见，改进后的模拟能够表现出北半球中高纬植被生长的季节变化特征，但部分纬带上量值偏小。

根据图 1，60°N 附近最主要的植被类型有寒带常绿针叶林 (PFT2)、落叶针叶林 (PFT3)、寒带落叶阔叶灌丛 (PFT11)、C3 极地草 (PFT12) 和 C3 非极地草 (PFT13)，这几种类型植被的 LAI 在 ICM-M 模拟中 7 月份均有不同程度偏小(图 2b、c、f、g、h)，造成这一纬带上 ICM-M 的模拟值小于观测。与寒带常绿针叶林 (PFT2)、落叶针叶林 (PFT3) 和 C3 极地草 (PFT12) 不同的是，寒带落

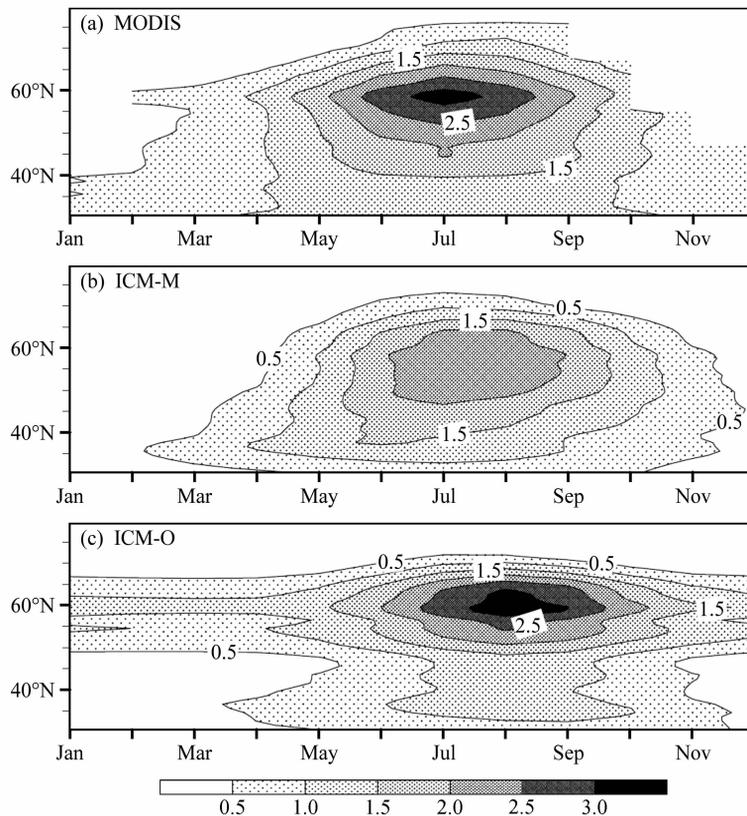


图 3 2000~2006 年平均的 (a) MODIS 观测、(b) ICM-M 和 (c) ICM-O 模拟的 LAI 纬度—月份剖面
Fig. 3 Spatio-temporal variations of LAI from (a) MODIS, (b) ICM-M, and (c) ICM-O

阔叶灌丛 (PFT11) 和 C3 非极地草 (PFT13) 更多表现为生长后期的模拟值偏小, 同时表现出模拟的植物衰亡速度过快, 使得改进后模拟的 60°N 附近 LAI 偏小持续至 8 月份。

相较于原有的参数化方案, ICM-M 中增加了新生组织对碳分配过程的考虑, 使得原先全部分配给植物叶的光合产物还分配给了新生组织, 引起改进后的模型对部分地区的 LAI 模拟偏小。模拟的寒带落叶阔叶灌丛和 C3 非极地草的衰亡过程过快加剧了这一现象。ICM 模拟的衰亡过程与植被在受到寒冷和干旱条件时的衰减速率有关, 衰减速率为 (2) 式中的 $k_s \cdot S_{cd}$, S_{cd} 为温度和土壤湿度的函数。模拟的寒带落叶阔叶灌丛和 C3 非极地草的 LAI 减小过程偏快说明模式中对这两种类型植被衰亡过程的参数化过程存在不足, 而这也可能与温度和土壤湿度的模拟状况有关。改进前后模拟 LAI 的位相和量值差异将影响植被的蒸腾和蒸发能力以及对降水的截留等过程, 从而可能引起地气之间的能量交换和水文循环的季节变化特征和强度的改变。

利用 2000~2006 年的月平均 LAI 值分别做 MODIS 观测与 ICM-O、ICM-M 模拟的相关系数图, 由图 4 可见, 由于前述对植被生长期的模拟提前了 1 到 2 个月, 改进后的模拟值与观测值的相关系数在大部分地区都达到了 0.9 以上 (通过 99.9% 置信水平的显著性检验), 比改进前有了显著提高 (图 4a、b)。

以上是对各年平均的 LAI 季节变化进行的分析, 为了说明每一年的情况, 对所选 9 种类型植

被, 分别计算 2000 年 2 月至 2006 年 12 月共 83 个月月平均的 MODIS 观测 LAI 与 ICM-O、ICM-M 模拟值的相关系数和均方差比并表示在泰勒图上 (Taylor, 2001) (图 5)。图 5 中点到原点的距离表示模拟值与观测值的均方差比值, 点所在的半径与水平方向夹角的余弦值表示模拟与观测值的相关系数, 点到 REF (表示观测值) 的距离表示模拟与观测的均方根误差。点与 REF 越接近, 说明模拟值与观测值越一致, 模拟的效果越好。对比图中 ICM-M 和 ICM-O 的模拟结果可以看出, 各个类型植被在改进后的方案中与观测值的相关系数都有所提高; 除寒带常绿针叶林 (PFT2) 外, 改进后方案模拟的 LAI 与观测值的误差都有一定程度的减小; 改进后方案模拟的各个类型植被, 特别是温带常绿针叶林 (PFT1)、落叶针叶林 (PFT3)、温带落叶阔叶林 (PFT4)、寒带落叶阔叶灌丛 (PFT6) 和 C3 极地草 (PFT7) 的 LAI 振幅变化也在不同程度上更接近于实际情况 (半径为 1.0 的圆弧)。

前述结果均说明改进后的 ICM 模型能够更好地模拟北半球中高纬地区植被的季节变化特征, 植被 LAI 位相的变化得到了更好的表现, 模拟的植被最茂盛的时段更加接近于实际, 大部分模拟值与观测值的差异得到减小。但改进后模型存在模拟的 60°N 附近纬向平均 LAI 偏小的问题。

4.2 北半球中高纬植被年际变化模拟情况对比

年际变化是植被动态变化过程中另一方面重要特征, 利用具有较长时间尺度的 GIMMS 卫星观测

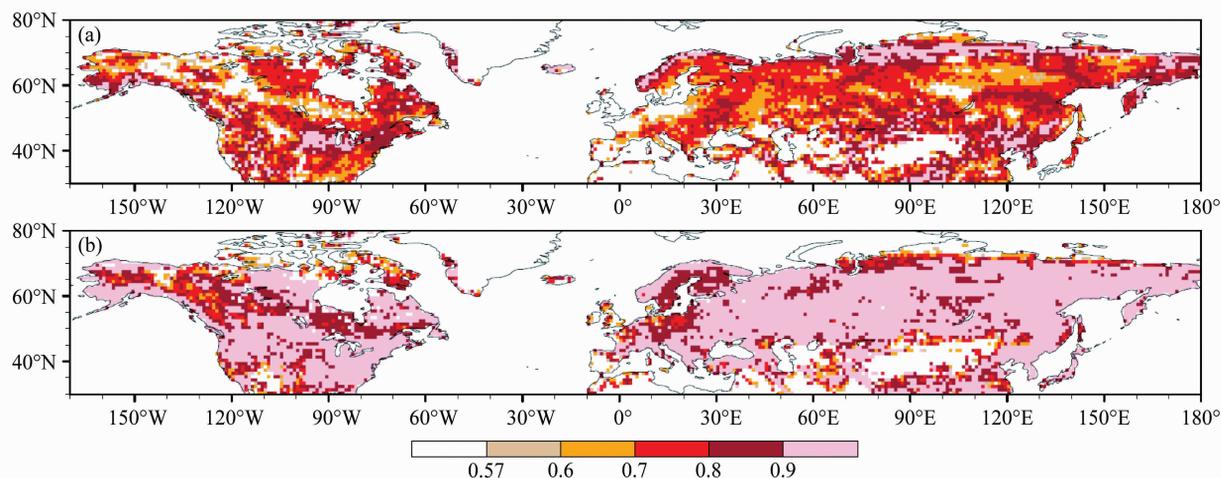


图 4 (a) MODIS 观测与 ICM-O 模拟、(b) MODIS 观测与 ICM-M 模拟的 LAI 季节变化的相关系数分布。彩色阴影: 通过了 95% 置信水平的显著性检验

Fig. 4 Correlation coefficients of annual LAI for (a) MODIS and ICM-O results and (b) MODIS and ICM-M results. Only values above 95% confidence level are presented

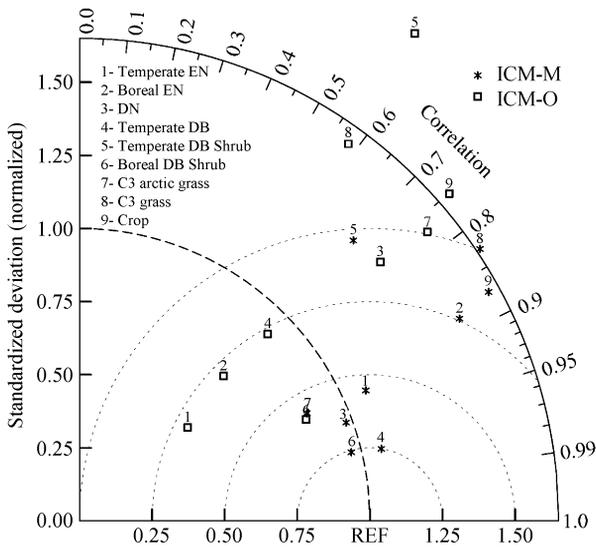


图5 ICM-O(方块)和ICM-M(星号)模拟的9种类型植被 LAI 与 MODIS 观测值比较结果的泰勒图

Fig. 5 Statistics of LAI simulated by ICM-O and ICM-M compared to MODIS data

LAI 产品,与改进前后的模拟结果对比分析,仍选取以上 9 个区域分别分析北半球中高纬各个类型植被的年际变化情况。图 6 给出植被生长最茂盛的 7 月份 LAI 年际变化曲线,它们的相关系数由表 2 给出。美国西南部落叶阔叶灌丛(图 6e)的模拟效果改进最为明显,改进后模拟 LAI 与观测值的相关系数由之前的 0.65 提高到了 0.75,分别通过 99.8%和 99.9%置信水平的显著性检验,其变化趋势与观测情形也更加接近。美国东部温带落叶阔叶林的模拟效果改进次之,但改进后的年际变化相关系数没有通过 90%置信水平的显著性检验。加拿大东南部温带常绿针叶林,东欧寒带常绿针叶林和西伯利亚落叶针叶林的年际变化相关系数仅有些微增大,但也没有通过相关信度检验。其他类型植被即亚洲北部寒带落叶阔叶灌丛,北美西北部 C3 极地草,亚洲中部 C3 非极地草和中国东部农作物的模拟结果与观测值的年际变化相关系数在改进后的模拟中降低。中国东部农作物的模拟结果与改进前结果变化不大,仍出现准两年周期振荡的变化特征。总体看来,对林地植被年际变化的模拟改进效果要好于灌木或草地,对温带植被的改进效果要好于寒带植被。说明相对于林地,对灌丛模拟可能还要考虑更多因素,而前述提到的 ForcSar 模型更适用于模拟温带植被可能也是制约因素之一。

表 2 1982~2002 年 GIMMS 观测与 ICM-O、ICM-M 模拟的 LAI 年际变化相关系数

Table 2 Correlation coefficients between observed LAI from GIMMS and simulated ones from ICM-O and ICM-M from 1982 to 2002

	GIMMS 观测 与 ICM-O 模拟	GIMMS 观测 与 ICM-M 模拟
(a)加拿大东南部温带常绿针叶林	-0.15	-0.11
(b)东欧寒带常绿针叶林	0.22	0.24
(c)西伯利亚落叶针叶林	0.29	0.32
(d)美国东部温带落叶阔叶林	0.04	0.25
(e)美国西南部温带落叶阔叶灌丛	0.65*	0.75*
(f)亚洲北部寒带落叶阔叶灌丛	0.56*	0.34
(g)北美西北部 C3 极地草	0.28	0.26
(h)亚洲中部 C3 非极地草	0.55*	0.36
(i)中国华北农作物	-0.15	-0.25

注:各个植被类型对应图 6 中情况;*表示通过 99%置信水平的显著性检验

再给出 30°N 以北改进前后模型模拟的 4 月和 7 月 LAI 与 GIMMS 观测值的相关系数分布图[图 7 (见文后彩图)]。4 月,ICM-O 模拟的 LAI 与观测值在 50°N 以北的北美洲以及欧洲北部、西西伯利亚至中国东北一带为负相关(图 7a),而改进后的模拟结果与观测值在北美洲的大部分区域相关为正,通过 90%置信水平显著性检验的区域增多,尤其是北美大陆和西欧部分地区(图 7b)。7 月,改进前的模拟值与实际观测在 50°N 以北的欧亚大陆大部分地区以及北美东部、东北部和西北部为负相关(图 7c),改进后,60°N 以南的欧亚大陆区域都为正相关,改进后 50°N 以南的北美东部和欧亚大陆部分地区相关性有所提高,能够通过 90%置信水平的显著性检验(图 7d)。可以看出,植被生长初期的 4 月,ICM-M 的模拟结果与观测值的相关系数在北美洲中部和北部有所提高,而在植被生长旺盛的 7 月,相关系数提高的区域主要位于欧亚大陆南部,对比图 1 中的植被类型分布,两个区域都大部分为农作物生产区。前述提到,对中国东部地区(30°N~35°N, 110°E~120°E)农作物,ICM-M 的模拟值与观测值年际相关性比 ICM-O 的模拟并没有提高,这在图 7 中也可以看出,但就整个北半球中高纬地区来说,其他农作物分布区的年际相关性有较明显增大。说明即使对于同一种植被类型,模拟结果也有不同的表现,而所选区域仅能说明中国

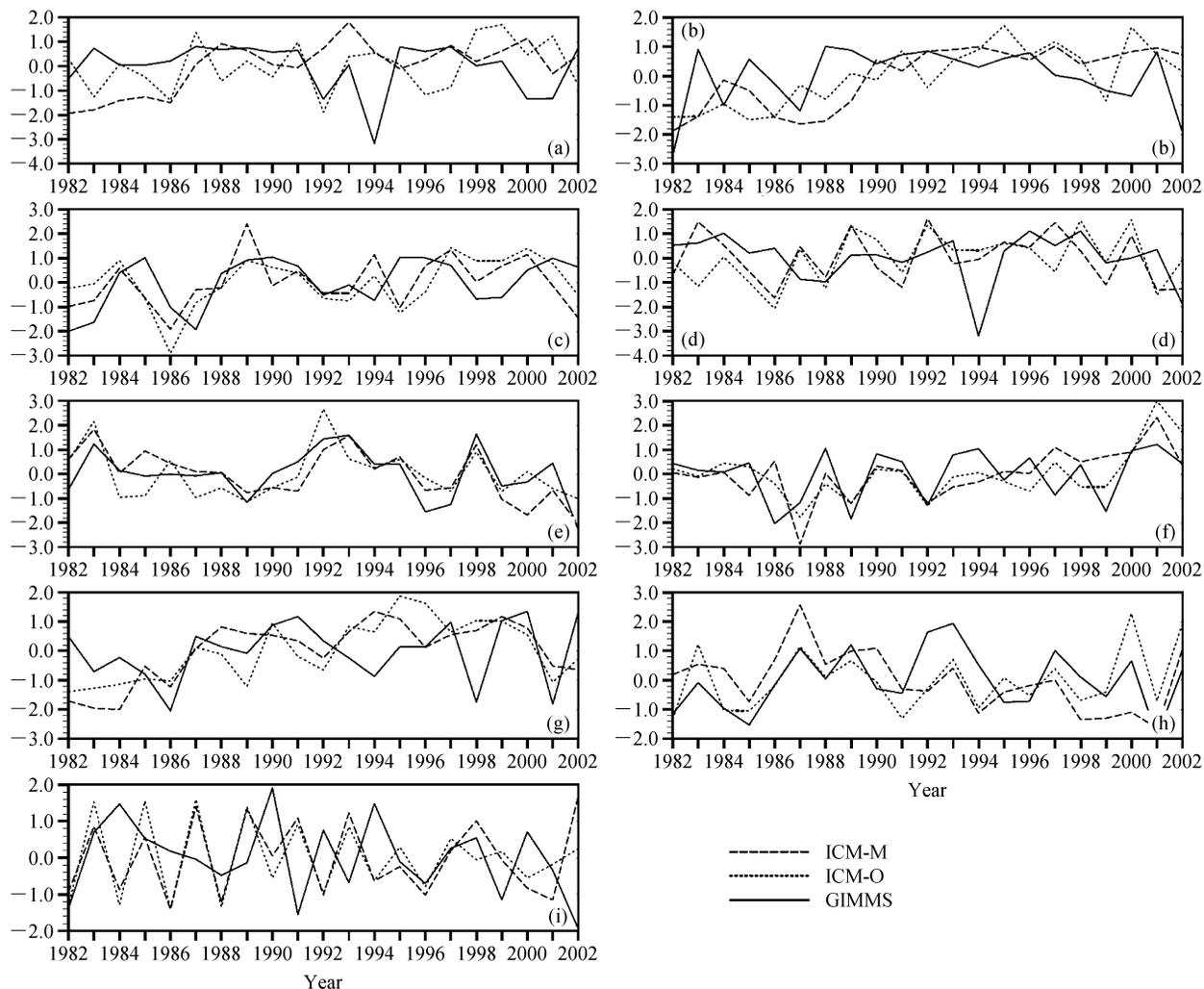


图6 GIMMS观测(实线)、ICM-O(点线)和ICM-M(虚线)模拟的7月份LAI年际变化,其余同图2
 Fig. 6 The same as Fig. 2, but for interannual variation of Jul LAI from GIMMS, ICM-O, and ICM-M results

东部范围内农作物的变化情况,用以代表整个北半球中高纬的农作物变化特征尚显不足,也说明了模式中将各类农作物统一为一种进行模拟是不够的。年际与季节尺度是植被变化的两个侧面,对于农作物来说,自然因素对其年际变化的影响权重似乎要大于对季节变化。此外,7月美国东部地区的年际变化相关性也有显著提高,这些区域大部分对应了图1中的温带落叶阔叶林的分布区。7月欧洲北部C3极地草的年际变化相关性有减小的趋势。ICM模型在引入ForcSar物候模型以后,能更好地模拟温带落叶阔叶林的年际变化规律,但对于处于高寒地带的植被仍存在不足,这可能与前述提到过的ForcSar本身的局限性有关。

4.3 地表能量通量的模拟结果比较

植被的结构变化会影响到地表反照率等物理属

性,改变太阳辐射在植被冠层和地表之间的分配,影响到地表能量平衡状况。植被的蒸腾作用和光合作用等生物生理特征也会有所改变,从而影响到地气之间的水分收支,且植被在通过蒸腾作用向大气释放水汽的过程中又伴随了潜热输送。ICM改进前后,地气之间的能量通量会怎样改变,选取ICM-M中模拟效果最好的美国东部温带落叶阔叶林(图2d),分析ICM-O和ICM-M模拟的各能量通量情况(图8)。

改进前,植被吸收的太阳辐射在8月份达到最大,而改进后最大值在6月份,与改进后LAI最大值的出现时间一致。4月份改进后的植被吸收太阳辐射比改进前增加了约 50 W/m^2 ,2~6月二者差值较大,主要处于植被生长前期(图8a)。2~6月改进后植被叶面感热通量的模拟值大于改进前,其

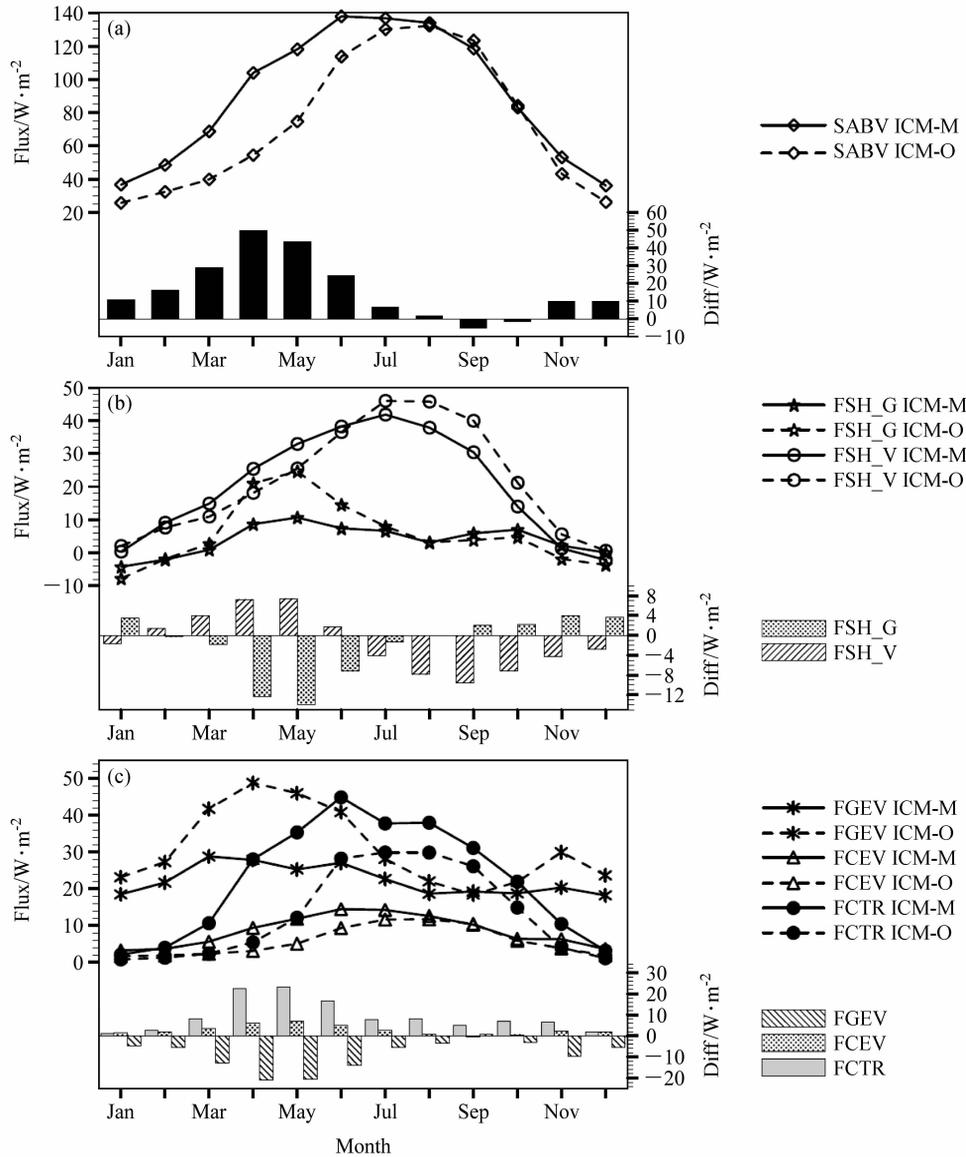


图 8 ICM-O (虚线) 和 ICM-M (实线) 模拟的各能量通量情况以及它们在两组试验结果中的差值 (柱状图, ICM-M 减去 ICM-O) (单位: W/m^2): (a) 植被吸收太阳辐射 (SABV); (b) 植被叶面感热通量 (FSH_V) 和地表感热通量 (FSH_G); (c) 植被叶面蒸腾潜热通量 (FCTR)、植被叶面蒸发潜热通量 (FCEV) 和地表蒸发潜热通量 (FGEV)

Fig. 8 Seasonal variations of ICM-O (dashed lines) and ICM-M (solid lines) simulated fluxes and their differences (histogram, ICM-M minus ICM-O); (a) Solar radiation absorbed by vegetation (SABV); (b) leaf (FSH_V) and soil (FSH_G) sensible heat fluxes; (c) leaf transpiration heat fluxes (FCTR), leaf (FCEV) and soil (FGEV) evaporation latent heat fluxes

他月份小于改进前。地面感热通量输送则有相反的变化趋势, 2~7 月改进后的模拟值小于改进前, 1 月和 9~12 月大于改进前 (图 8b)。叶面感热通量的最大值在 ICM-O 和 ICM-M 模拟中都出现在 7 月, 改进前后模拟值的差值在 4~5 月以及 8~10 月较大, 而地面感热通量的模拟差值主要在 4~6 月较大。改进后感热通量的模拟值曲线在 7 月前和 7 月后呈较为对称的结构, 而改进前则为明显的不对称结构。

对称结构。

陆地表面不仅通过地表的水汽蒸发与大气之间产生潜热输送, 还有在植被覆盖的地区通过植被的蒸发和蒸腾作用产生潜热交换。因为改进后各月的 LAI 都大于改进前, 植被叶面蒸腾潜热的模拟全年都增大。植被的蒸发潜热通量除了与 LAI 有关外, 也与植被冠层截留的降水量有关, 植被的叶面蒸发潜热除 9 月外, 其他月份都增大。地表潜热通量除

9月外,其他月份都减小。4~7月模拟的 LAI 变化最为明显,使得这一时段各潜热通量的变化量也比其他月份大(图 8c)。

由于 LAI 的模拟值在改进前后模型模拟中的变化,使得植被冠层和地表的能量输送相应改变。美国东部落叶阔叶林的 LAI 在改进后模拟中的振幅和位相都最接近于观测值,好于改进前的模拟情况,改进前后的 LAI 差值在 4~7 月的植被生长前期较大,使得各能量通量在改进前后的模拟差异也主要发生在植被生长前期。同时,改进后模拟的通量值曲线全年表现出一种对称结构,这与 LAI 的变化特征也有很大关系。

5 结论和讨论

本文在植被动态冠层模型 ICM 的参数化方案中考虑了包括花和果实等在内的植物新生组织对生态系统碳氮循环过程的影响,对原有的碳氮分配方案进行了更进一步的细化,假设花期以后,新生组织碳库是植物的主要碳汇之一,并参考 Sarvas (1974) 的工作,利用物候模型 ForcSar 预测植物花期,调控叶碳库与新生组织碳库之间的分配过程。

结果表明,增加了新方案以后的 ICM 模型能够更有效模拟北半球中高纬地区植被 LAI 的变化过程,特别是模拟的 LAI 季节变化位相更加接近于实际观测,使得模拟与观测之间的差值有所减小,改进后的模型模拟结果与观测值的季节相关性有了显著提高。花和果实等组织器官是目前大多数植物必不可少的组成部分,开花结果是植物生长发育过程中的关键阶段,它们在植物的碳氮循环过程中占有相当大的影响比重。改进的方案中由于考虑了新生组织对植物碳氮分配的影响,使得植物花期以后模拟的叶碳含量不会继续累积增加, LAI 增长趋缓,从而使得植被生长最茂盛的季节基本处于 7 月前后,原先 ICM 模拟中的 LAI 落后于实际观测的问题得到了修正。

同时,模拟与观测 LAI 的年际变化相关性也有一定的提高,但不如季节变化的改进效果明显。4 月,年际相关性提高明显的地区主要位于北美中部和南部,7 月主要位于欧亚大陆南部。美国西南部温带落叶灌丛的年际相关性提高最为显著。美国东部温带落叶阔叶林不论是在季节还是在年际尺度上的相关性都有明显提高,其中又以季节变化的模

拟改进效果最为明显,这与所引入的 ForcSar 模型最先的建立基础就是对温带植物的物候预测不无关系。此外,北美大陆的农作物区 4 月 LAI 年际相关提高明显,欧亚大陆农作物则表现在 7 月,而中国东部地区农作物年际相关性没有提高。说明即使对于不同地区的同一种植被类型,模拟的年际变化情况也存在地区和季节差异。季节和年际尺度上的变化是植被动态变化过程中的两个重要方面,改进后的 ICM 模型对植被变化模拟能力的提高更多侧重于季节尺度,而对年际尺度上的模拟效果改进并不明显,说明模型对植被生长发育过程的考虑仍然存在不足之处。植被的变化过程与太阳辐射、温度、湿度、营养元素等等的调控有关,在解决好植被季节变化模拟的同时如何更合理考虑这些因素对植被生态系统中碳氮循环的控制作用,是解决好年际变化模拟的关键。

由于模式中没有考虑到人为因素的影响,对中国东部农作物生产区 LAI 季节变化上的双峰结构仍没能表现出来。对于农作物这一受人类活动影响尤其显著的植被类型来说,其生长凋亡过程除了受自然因素影响之外,人类活动在其中的调控作用不可忽视,且不同类型的农作物也有各自不同的变化特征(陈锋和谢正辉,2008),使得对于这一类型植被的模拟比自然植被更加复杂。另一方面,人类活动对气候的影响很大一部分与农作物生产有关,如何能在 ICM 模型中更好地模拟农作物的动态变化过程对于理解人类活动对气候的影响也有十分重要的意义。目前,国际上已有的较为成熟的农作物模型(Ritchie, 1972; Gao et al., 1992; Goudriaan and Van Laar, 1994) 或许可为 ICM 对农作物模拟的改进提供一定的参考(Tsvetsinskaya et al., 2001a, 2001b; 宋帅等, 2003)。

ICM 模拟的 LAI 变化会直接影响到植被吸收的太阳辐射和地气之间的水汽交换以及感热、潜热输送。对改进效果最好的美国东部温带落叶阔叶林来说,改进后各能量通量值在春季和秋季相当,这应该更加接近于实际情况。由此, LAI 模拟值的变化将会影响到陆气之间的相互作用过程,影响下垫面的物理状态。

总体而言,在考虑了植物新生组织对碳氮循环的影响后, ICM 模型在模拟植被的季节变化上更趋合理,尤其对中高纬地区植被的季节变化过程模拟

更加接近实测,这或许也能为更进一步提高 ICM 对热带地区植被变化过程的模拟能力提供一定的参考。但由于对气候和生态系统碳氮循环之间相互作用关系理解的局限性,对植物年际变化的模拟仍有不足。对生态系统氮循环的细致考虑比如花、果实等的凋落对土壤中养分转化等的后续影响也是目前模型参数化过程中需要继续深入理解和加强的部分。此外,模型中光合作用模块参数化方案的设计 (Chen et al., 2010) 以及陆面模式中对土壤水模拟的不确定性 (Oleson et al., 2008; Stöckli et al., 2008) 都将对植被状况的模拟产生影响。

下一步,我们将对比实地观测通量资料更深入细致分析模型模拟的其它物理参量以进一步改进模型参数化方案,优化模型参数,并与大气模式进行耦合以增进对植被—大气相互作用机制的理解。

致谢 感谢 U. Montana 赵茂盛, U. Boston 气候与植被变化研究小组和普林斯顿大学陆面水文研究小组提供 MODIS LAI, GIMMS LAI 和陆面强迫场资料! 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室提供了 SGI 超级计算机的硬件和技术支持,在此一并致谢!

参考文献 (References)

- Bonan G B. 1998. The land surface climatology of the NCAR land surface model coupled to the NCAR Community Climate Model [J]. *J. Climate*, 11: 1307–1326.
- Bonan G B, Levis S, Kergoat L, et al. 2002. Landscapes as patches of plant functional types: An integrating concept for climate and ecosystem models [J]. *Global Biogeochem. Cycles*, 16 (2), 1021, doi: 10.1029/2000GB001360.
- Bonan G B, Levis S, Sitch S, et al. 2003. A dynamic global vegetation model for use with climate models: Concepts and description of simulated vegetation dynamics [J]. *Global Change Biology*, 9 (11): 1543–1566.
- Borchert R, Meyer S A, Felger R S, et al. 2004. Environmental control of flowering periodicity in Costa Rican and Mexican tropical dry forests [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 13: 409–425.
- Borchert R, Renner S S, Calle Z, et al. 2005a. Photoperiodic induction of synchronous flowering near the Equator [J]. *Nature*, 433: 627–629.
- Borchert R, Robertson K, Schwartz M D, et al. 2005b. Phenology of temperate trees in tropical climates [J]. *Int. J. Biometeorol.*, 50: 57–65.
- Cannell M G R, Smith R I. 1983. Thermal time, chill days and prediction of budburst in *Picea sitchensis* [J]. *J. Applied Ecology*, 20: 951–963.
- 曹明奎, 李克让. 2000. 陆地生态系统与气候相互作用的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 15 (4): 446–452. Cao Mingkui, Li Kerang. 2000. Perspective on terrestrial ecosystem-climate interaction [J]. *Advance in Earth Science (in Chinese)*, 15 (4): 446–452.
- 陈锋, 谢正辉. 2008. 农作物分布对南水北调受水区陆面过程模拟的影响 [J]. *地理科学进展*, 27 (4): 28–36. Chen Feng, Xie Zhenghui. 2008. Effects of crop distribution on land surface simulations over the intake Area of the South-to-North Water Transfer Project [J]. *Progress in Geography (in Chinese)*, 27 (4): 28–36.
- 陈海山, 倪东鸿, 李忠贤, 等. 2006. 植被覆盖异常变化影响陆面状况的数值模拟 [J]. *南京气象学院学报*, 29 (6): 725–734. Chen Haishan, Ni Donghong, Li Zhongxian, et al. 2006. Modeling of impacts of vegetation coverage change on land surface conditions [J]. *Journal Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 29 (6): 725–734.
- Chen H S, Dickinson R E, Dai Y J, et al. 2010. Sensitivity of simulated terrestrial carbon assimilation and canopy transpiration to different stomatal conductance and carbon assimilation schemes [J]. *Climate Dynamics*, 36: 1037–1054, doi: 10.1007/s00382-010-0741-2.
- Chen J M, Cihlar J. 1996. Retrieving leaf area index of boreal conifer forest using Landsat TM images [J]. *Remote Sens. Environ.*, 55: 153–162.
- Chen X S, Li Q J. 2008. Sexual systems and ecological correlates in an azonal tropical forests, SW China [J]. *Biotropica*, 40 (2): 160–167.
- 陈效述. 2000. 论树木物候生长季节与气温生长季节的关系——以德国中部 Taunus 山区为例 [J]. *气象学报*, 55 (6): 726–737.
- Chen Xiaoqi. 2000. Relationships between growing seasons determined by trees' phenology and air temperature: The case of the Taunus mountain area in central Germany [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 58 (6): 726–737.
- Chuine I, Cour P, Rousseau D D. 1999. Selecting models to predict the timing of flowering of temperate trees: Implications for tree phenology modeling [J]. *Plant, Cell and Environment*, 22: 1–13.
- Collatz G J, Berry J A, Farquhar G D, et al. 1990. The relationship between the Rubisco reaction mechanism and models of photosynthesis [J]. *Plant, Cell and Environment*, 13: 219–225.
- Collatz G J, Ball J T, Grivet C, et al. 1991. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 54: 107–136.
- Dai Y J, Dickinson R E, Wang Y P. 2004. A two-big-leaf model for canopy temperature, photosynthesis, and stomatal conductance [J]. *J. Climate*, 17 (12): 2281–2299.
- Dan L, Ji J J. 2007. The surface energy, water, carbon flux and their intercorrelated seasonality in a global climate-vegetation cou-

- pled model [J]. *Tellus*, 59B: 425–438.
- Dan L, Ji J J, He Y. 2007a. 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.
- Dan L, Ji J J, Li Y P. 2007b. The interactive climate and vegetation along the Pole-Equator belts simulated by a global coupled model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24 (2): 239–249.
- Denman K L, Brasseur G, Chidthaisong A, et al. 2007. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry [M] // Solomon S, Qin D, Manning M, et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Deardorff J W. 1978. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation [J]. *J. Geophys. Res.*, 83 (C4): 1889–1903.
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al. 1986. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR community model [R]. NCAR/TN-275+STR.
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kenedy P J. 1993. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model [R]. NCAR/TN-387+STR.
- Dickinson R E, Shaikh M. 1998. Interactive canopies for a climate model [J]. *J. Climate*, 11 (11): 2823–2836.
- Dickinson R E, Berry J A, Bonan G B, et al. 2002. Nitrogen controls on climate model evapotranspiration [J]. *J. Climate*, 15 (3): 278–295.
- 方精云, 朴世龙, 贺金生, 等. 2003. 近 20 年来中国植被活动在增强 [J]. *中国科学 (C 辑)*, 33 (6): 554–565. Fang Jingyun, Piao Shilong, He Jinsheng, et al. 2004. Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982–1999 [J]. *Science in China (Ser. C)*, 47 (3): 229–240.
- Farquhar G D, von Caemmerer S, Berry J A. 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species [J]. *Planta*, 149: 78–90.
- Friedl M A, McIver D K, Hodges J C F, et al. 2002. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results [J]. *Remote Sens. Environ.*, 83: 287–302.
- 符淙斌, 袁慧玲. 2001. 恢复自然植被对东亚夏季气候和环境影响的一个虚拟试验 [J]. *科学通报*, 46 (8): 691–696. Fu Congbin, Yuan Huiling. 2001. An virtual numerical experiment to understand the impacts of recovering natural vegetation on the summer climate and environmental conditions in East Asia [J]. *Chinese Science Bulletin*, 46 (14): 1199–1202.
- Gao L Z, Jin Z Q, Huang Y, et al. 1992. Rice clock model—A computer model to simulate rice development [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 60: 1–16.
- García-Mozo H, Galán C, Belmonte J, et al. 2009. Predicting the start and peak dates of the Poaceae pollen season in Spain using process-based models [J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 149: 256–262.
- Goudriaan J, Van Laar H H. 1994. *Modelling Potential Crop Growth Processes* [M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 239pp.
- Hänninen H. 1990. Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions [J]. *Acta Forestalia Fennica*, 213: 1–47.
- Henderson-Sellers A, McGuffie K. 1995. Global climate models and ‘dynamic’ vegetation changes [J]. *Global Change Biology*, 1: 63–75.
- Holben B N, Tucker C J, Fan C-J. 1980. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass [J]. *Photogram. Eng. Remote Sens.*, 46: 651–656.
- Hopkins A D. 1938. *Bioclimatics: A Science of Life and Climatic Relations* [M]. Washington, D. C.: U. S. Dept. of Agriculture Misc. Publication No. 280, 188pp.
- Huang M, Ji J J, Li K R, et al. 2007. The ecosystem carbon accumulation after conversion of grasslands to pine plantations in subtropical red soil of South China [J]. *Tellus*, 59B: 439–448.
- Jackson R B, Lechowicz M J, Li X, et al. 2001. Phenology, Growth, and Allocation in Global Terrestrial Productivity [M] // Roy J, Saugier B, Mooney H A. *Terrestrial Global Productivity*. San Diego: Academic Press.
- Ji J J. 1995. A climate-vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface [J]. *J. Biogeography*, 22: 445–451.
- 季劲钧, 黄玫, 李克让. 2008. 21 世纪中国陆地生态系统与大气碳交换的预测研究 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 38 (2): 211–223. Ji Jinjun, Huang Mei, Li Kerang. 2008. Prediction of carbon exchanges between China terrestrial ecosystem and atmosphere in 21st century [J]. *Science in China (Ser. D)*, 51 (6): 885–898.
- Knyazikhin Y, Martonchik J V, Myneni R B, et al. 1998. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (D24), 32257–32276, doi: 10.1029/98JD02462.
- Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudré N, et al. 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system [J]. *Global Biogeochem. Cycles*, 19, GB1015, doi: 10/1029/2003GB002199.
- Kucharik C J, Foley J A, Delire C, et al. 2000. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure [J]. *Global Biogeochem. Cycles*, 14 (3): 795–825.
- Landsberg J J. 1974. Apple fruit bud development and growth; analysis and an empirical model [J]. *Annals of Botany*, 38: 1013–1023.
- Li W P, Xue Y K. 2005. Numerical simulation of the impact of vegetation index on the interannual variation of summer precipitation

- in the Yellow River basin [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 6: 865–876.
- Linkosalo T. 2000. Analyses of the spring phenology of boreal trees and its response to climate change [D]. Ph. D. dissertation, Department of Forest Ecology, U. Helsinki, 55pp.
- Linkosalo T, Häkkinen R, Hänninen H. 2006. Models of the spring phenology of boreal and temperate trees: Is there something missing? [J]. *Tree Physiology*, 26: 1165–1172.
- Linkosalo T, Lappalainen H K, Hari P. 2008. A comparison of phenological models of leaf bud burst and flowering of boreal trees using independent observations [J]. *Tree Physiology*, 28: 1873–1882.
- 刘少锋, 林朝晖, 蒋星, 等. 2009. IAP 大气—植被耦合模式的建立及其模拟试验 [J]. *气候与环境研究*, 14 (3): 258–272. Liu Shaofeng, Lin Zhaohui, Jiang Xing, et al. 2009. The IAP coupled atmosphere—vegetation model and its numerical simulation [J]. *Climate and Environment Research (in Chinese)*, 14 (3): 258–273.
- Maass J M, Vose J M, Swank W T, et al. 1995. Seasonal changes of leaf area index (LAI) in a tropical deciduous forest in west Mexico [J]. *Forest Ecology and Management*, 74: 171–180.
- 毛嘉富, 王斌, 丹利, 等. 2005. 新一代格点大气环流模式与陆面生态模式 AVIM 的耦合研究 [J]. *大气科学*, 29 (6): 897–910. Mao Jiafu, Wang Bin, Dan Li, et al. 2005. Coupling of an atmosphere-vegetation interaction model (AVIM) to a new generation grid point atmospheric general circulation model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (6): 897–910.
- 毛嘉富, 王斌, 戴永久. 2006. 陆地生态系统模型及其与气候模式耦合的回顾 [J]. *气候与环境研究*, 11 (6): 763–771. Mao Jiafu, Wang Bin, Dai Yongjiu. 2006. Perspective on terrestrial ecosystem models and their coupling with climate system models [J]. *Climate and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (6): 763–771.
- 毛留喜, 孙艳玲, 延晓冬. 2006. 陆地生态系统碳循环模型研究概述 [J]. *应用生态学报*, 17 (11): 2189–2195. Mao Liuxi, Sun Yanling, Yan Xiaodong. 2006. Modeling of carbon cycling in terrestrial ecosystem: A review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese)*, 17 (11): 2189–2195.
- Monteith J L. 1995. A reinterpretation of stomatal responses of humidity [J]. *Plant, Cell and Environment*, 18 (4): 357–364.
- Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 [J]. *Nature*, 386: 698–702.
- Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, et al. 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 83: 214–231.
- Nelson N D, Isebrands J G. 1983. Late-season photosynthesis and photosynthate distribution in an intensively cultured *Populus nigra* × *laurifolia* clone [J]. *Photosynthetica*, 17 (4): 537–549.
- Oleson K W, Dai Y, Bonan G, et al. 2004. Technical description of the Community Land Model (CLM) [R]. NCAR/TN–461+STR.
- Oleson K W, Niu G-Y, Yang Z-L, et al. 2008. Improvements to the Community Land Model and their impact on the hydrological cycle [J]. *J. Geophys. Res.*, 113, G01021, doi: 10.1029/2007JG000563.
- 潘瑞炽, 王小菁, 李娘辉. 2008. 植物生理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 315pp. Pan Ruichi, Wang Xiaojing, Li Nianguhui. 2008. *Plant Physiology (in Chinese)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 315pp.
- Peng C. 2000. From static biogeographical model to dynamic global vegetation model: A global perspective on modelling vegetation dynamics [J]. *Ecological Modelling*, 135: 33–54.
- Rathcke B, Lacey P E. 1985. Phenological patterns of terrestrial plants [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 16: 179–214.
- Ritchie J T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with in complete cover [J]. *Water Resour. Res.*, 8 (5), 1204–1213, doi: 10.1029/WR008i005p01204.
- Running S W, Hunt E R. 1993. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models [M]//Ehleringer J R, Field C B. *Scaling Physiological Processes: Leaf to Global*. New York: Academic Press.
- Sarvas R. 1974. Investigations on the annual cycle of development of forest trees. II. Autumn dormancy and winter dormancy [J]. *Communications Instituti Forestalis Fenniae*, 84: 1–101.
- Schwartz M D. 1998. Green-wave phenology [J]. *Nature*, 394: 839–840.
- Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. 1986. A simple biosphere model (SIB) for use within general circulation models [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43: 505–531.
- Sellers P J, Bounoua L, Collatz G J, et al. 1996a. Comparison of radiative and physiological effects of doubled atmospheric CO₂ on climate [J]. *Science*, 271: 1402–1406.
- Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. 1996b. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation [J]. *J. Climate*, 9: 676–705.
- Sheffield J, Goteti G, Wood E F. 2006. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling [J]. *J. Climate*, 19 (13): 3088–3111.
- Sigurdsson B D. 2001. Elevated [CO₂] and nutrient status modified leaf phenology and growth rhythm of young *Populus trichocarpa* trees in a 3-year field study [J]. *Trees*, 15: 403–413.
- 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.
- 宋帅, 符淙斌, 周林, 等. 2003. REGCM2 和 SUCROS 模式的双向耦合模拟试验 [J]. *气象学报*, 61 (6): 702–711. Song Shuai, Fu Congbin, Zhou Lin, et al. 2003. Two-way simulations from REGCM2 coupling with SUCROS in the Huang-Huai-Hai Plain in East China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61 (6): 702–711.

- Stöckli R, Lawrence D M, Niu G Y, et al. 2008. Use of FLUXNET in the Community Land Model development [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: G01025.
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. *J. Geophys. Res.*, 106: 7183–7192.
- Thomas B, Vince-Prue D. 1996. *Photoperiodism in Plants* [M]. San Diego: Academic Press, 428pp.
- Tsvetsinskaya E A, Mearns L O, Easterling W E. 2001a. Investigating the effect of seasonal plant growth and development in three-dimensional atmospheric simulations. Part I: Simulation of surface fluxes over the growing season [J]. *J. Climate*, 14 (5): 692–709.
- Tsvetsinskaya E A, Mearns L O, Easterling W E. 2001b. Investigating the effect of seasonal plant growth and development in three-dimensional atmospheric simulations. Part II: Atmospheric response to crop growth and development [J]. *J. Climate*, 14 (5): 711–729.
- Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, et al. 2005. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 26 (20): 4485–5598.
- Wielgolaski F E. 1966. The influence of air temperature on plant growth and development during the period of maximal stem elongation [J]. *Oikos*, 17: 121–141.
- 武吉华, 张坤, 江源, 等. 2004. *植物地理学* [M]. 北京: 高等教育出版社, 382pp. Wu Jihua, Zhang Shen, Jiang Yuan, et al. 2004. *Plant Geography (in Chinese)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 382pp.
- Yang W, Huang D, Tan B, et al. 2006a. Analysis of leaf area index and fraction of PAR absorbed by vegetation products from the Terra MODIS sensor; 2000–2005 [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 44: 1829–1842.
- Yang W, Shabanov N V, Huang D, et al. 2006b. Analysis of leaf area index products from combination of MODIS Terra and Aqua data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 104: 297–312.
- Yochifuji N, Kumagai T, Tanaka K, et al. 2006. Inter-annual variation in growing season length of a tropical seasonal forest in northern Thailand [J]. *Forest Ecology and Management*, 229: 333–339.
- 俞淼, 陈海山, 孙照渤, 等. 2010. 全球植被年际尺度动态过程的数值模拟及其评估 [J]. *大气科学学报*, 33 (3): 365–374. Yu Miao, Chen Haishan, Sun Zhaobo, et al. 2010. Numerical simulation and assessment of interannual variation in vegetation at global scale [J]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 33 (3): 365–374.
- 俞淼, 陈海山, 孙照渤. 2011. 动态植被模型模拟的植被季节变化及其评估 [J]. *气候与环境研究*, 16 (1): 47–59. Yu Miao, Chen Haishan, Sun Zhaobo. 2011. Seasonal cycle of terrestrial vegetation simulated by a dynamic vegetation model and its assessment [J]. *Climate and Environment Research (in Chinese)*, 16 (1): 47–59.
- Zeng H L, Wang Z Z, Ji J J, et al. 2008a. An updated coupled model for land-atmosphere interaction. Part I: Simulations of physical processes [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25 (4): 619–631.
- Zeng H L, Ji J J, Wu G X. 2008b. An updated coupled model for land-atmosphere interaction. Part II: Simulations of biological processes [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25 (4): 632–640.
- 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 inference of global vegetation distribution on climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (1): 1–11.
- Zeng X D, Zeng X B, Barlage M. 2008. Growing temperate shrubs over arid and semiarid regions in the Community Land Model—Dynamic Global Vegetation Model [J]. *Global Biogeochem. Cycles*, 22, GB3003, doi: 10.1029/2007GB003014.
- Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, et al. 2004. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data [J]. *Global Change Biology*, 10: 1133–1145.
- 张银锁, 宇振荣, Driessen P M. 2001. 夏玉米植株及叶片生长发育热量需求的试验与模拟研究 [J]. *应用生态学报*, 12 (4): 561–565. Zhang Yinsuo, Yu Zhenrong, Driessen P M. 2001. Growing degree-days requirements for plant and leaf development of summer maize (*Zea mays*)—An experimental and simulation study [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese)*, 12 (4): 561–565.
- 郑景云, 葛全胜, 郝志新. 2002. 气候变暖对我国近 40 年植物物候变化的影响 [J]. *科学通报*, 47 (20): 1582–1587. Zheng Jingyun, Ge Quansheng, Hao Zhixin. 2002. Impacts of climate warming on plants phenophases in China for the last 40 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47 (21): 1826–1831.
- 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 [J]. *气象学报*, 62 (5): 693–708. Zhou Guangsheng, Wang Yuhui, Bai Liping, et al. 2004. Study on the interaction between terrestrial ecosystems and global change [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (5): 692–708.
- Zhi H, Wang P X, Dan L, et al. 2009. Climate-vegetation interannual variability in a coupled atmosphere-ocean-land model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (3): 599–612.
- Zhou L, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. 2001. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999 [J]. *J. Geophys. Res.*, 106, 20069–20083, doi: 10.1029/2000JD000115.
- Zhou L, Kaufmann R K, Tian Y, et al. 2003. Relation between interannual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999 [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D1), 4004, doi: 10.1029/2002JD002510.
- 竺可桢, 宛敏渭. 1963. *物候学* [M]. 北京: 科学普及出版社, 107pp. Zhu Kezhen, Wan Minwei. 1963. *Phenology (in Chinese)* [M]. Beijing: Popular Science Press, 107pp.

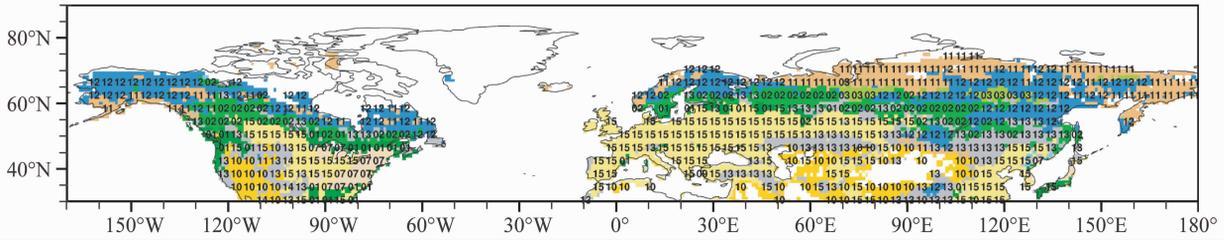


图1 30°N以北主要植被功能类型分布图。图中各编号对应表1中各类型

Fig. 1 Plant functional types (PFTs) in areas north of 30°N. Each number represents the PFT listed in Table 1

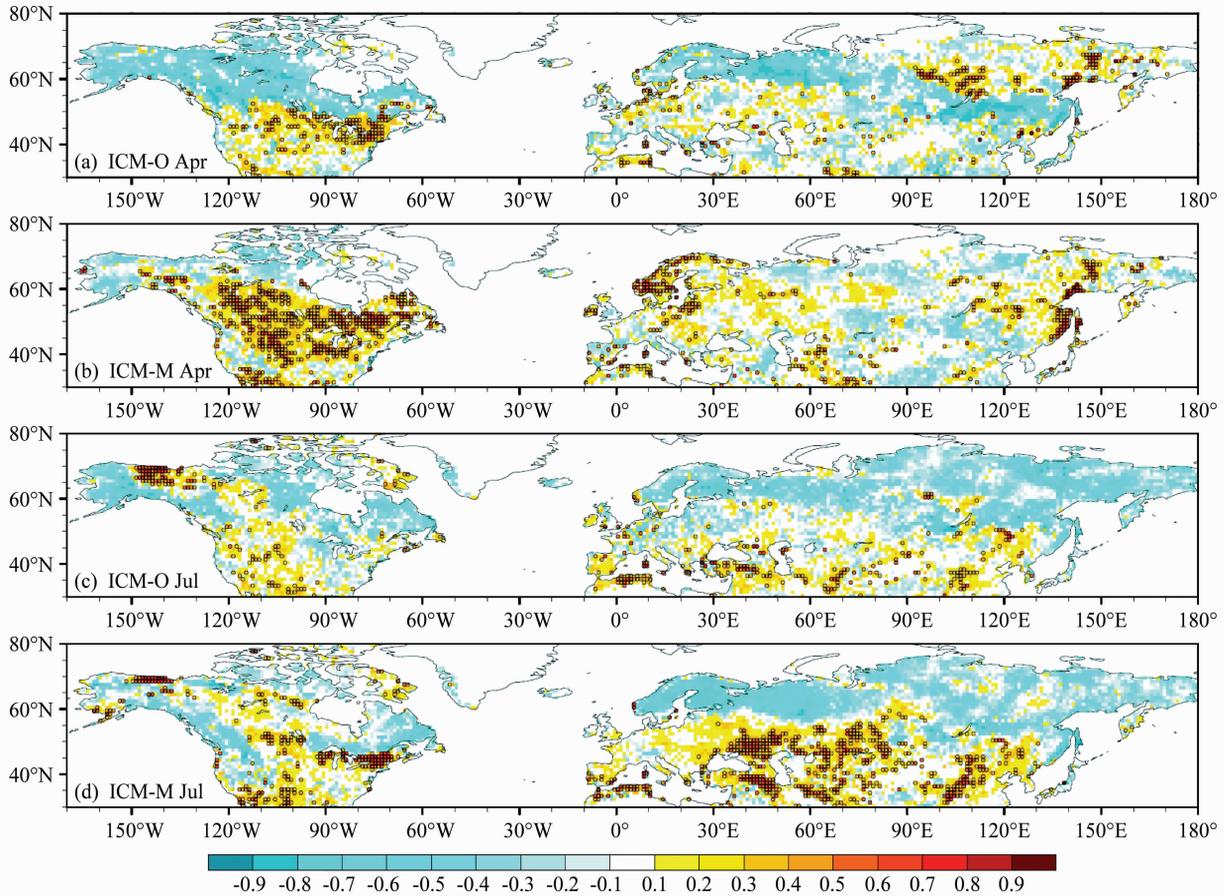


图7 GIMMS观测与ICM-O (a, c)、ICM-M (b, d)模拟的LAI年际变化相关系数分布:(a, b)4月;(c, d)7月。小圆圈表示通过90%置信水平的显著性检验的区域

Fig. 7 Correlation coefficients of interannual LAI in (a, b) Apr and (c, d) Jul between GIMMS observations with (a, c) ICM-O simulations and (b, d) ICM-M simulations. Regions where the values pass 90% confidence level have been marked with small cycles