

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]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (1): 47-59.

动态植被模型模拟的植被季节变化及其评估

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 利用 MODIS 卫星观测资料, 对一个考虑了生态系统碳氮循环过程的动态植被模型 ICM 的模拟性能进行了评估。重点对反映植被动力学的关键参数——叶面积指数 (LAI) 的模拟结果与观测进行了对比分析, 评估了 ICM 对 LAI 季节变化特征的模拟能力。结果表明, ICM 基本能够模拟出植被的季节变化特征。总体而言, 模拟值在低纬度和高纬度地区大于观测值, 中纬度地区小于观测值; 模拟的植被生长常落后于观测, 造成了模拟偏小值的出现与植被的生长季节相对应; 模拟没有表现出热带常绿阔叶林和农作物 LAI 季节变化的双峰结构; 模式对草地的模拟总体上优于林地。结果可为进一步改进动态植被模式的参数化方案和优化模型参数提供一定参考。

关键词 陆面过程模拟 动态植被 季节变化 模式评估

文章编号 1006-9585 (2011) 01-0047-13 **中图分类号** P437 **文献标识码** A

Seasonal Cycle of Terrestrial Vegetation Simulated by a Dynamic Vegetation Model and Its Assessment

YU Miao, CHEN Haishan, and SUN Zhaobo

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

Abstract Based on the MODIS observations, the performance of Interactive Canopy Model (ICM), a dynamic vegetation model including the carbon and nitrogen cycles of the terrestrial ecosystem, has been assessed. The Leaf Area Index (LAI), a key parameter with seasonal variation in vegetation dynamics, is simulated by ICM and compared with the MODIS data. The results show that ICM can simulate the main characteristics of the seasonal LAI fluctuations. Compared to the observation, LAI is overestimated in high and low latitudes, but underestimated in middle latitudes by the model. The underestimation of the LAI in middle latitudes is followed by the vegetation sprout for the reason that the modeled growth is always slower than the observed one. The bimodal distributions for the tropical evergreen broadleaf trees and crops have not been well captured. In addition, the simulated results for the grassland are more reasonable than other Plant Function Types (PFTs). The results will provide important clues for the parameterization improvement and parameters optimization of the ICM.

Key words land surface modeling, dynamic vegetation, seasonal cycle, model assessment

收稿日期 2009-04-30 收到, 2010-10-08 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40875057, 公益性行业科研专项 GYHY (QX) 2007-25, 江苏省研究生培养创新工程创新计划项目 CX08B_018Z, 江苏省“六大人才高峰”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: yuuum@163.com

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

1 引言

植被对陆地表面与大气之间的物质、能量和动量交换起到重要的控制作用,能在不同的时间、空间尺度上对天气、气候产生显著影响 (Dickinson, 1995)。叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 指单位地表面上总叶片面积 (双面或多面) 的一半 (Chen and Cihlar, 1996), 它是植被系统的重要参数, 也是陆面模式中的关键量之一。LAI 的变化会引起陆面模式中的其他变量, 如净初级生产力、反照率、粗糙度等的变化, 从而影响到地气之间感热、潜热交换和水汽输送等 (Dickinson et al., 1993; Bonan, 1998; Myneni et al., 2002; 陈海山等, 2006)。因此, 如何能在陆面模式中准确地描述 LAI 的真实变化情况对于改进模式的模拟能力至关重要。

早期的植被参数化过程 (Dickinson et al., 1986; Sellers et al., 1986) 主要通过经验气孔模型对植被的生物物理过程进行描述。20 世纪 90 年代中期以后, 植被的生物化学过程, 包括光合作用模型被引入陆面模式 (Sellers et al., 1996; Bonan, 1998; Dai et al., 2003)。Dai et al. (2004) 还发展了一个对植被冠层辐射传输、气孔阻尼、蒸腾过程描述更为合理、完善的“双叶” (Two - Big - Leaf) 模型。这一阶段的陆面模式较为有效地反映了植被在地气间能量平衡、物质传输中的作用, 并被广泛应用于目前的气候模式 (Sellers et al., 1997)。然而这些模式中用到的 LAI 通常都是预先给定的, 不能反映出植被对大气的响应, 与实际的植被—大气间存在的复杂的动态相互反馈过程 (李伟平等, 2008) 不相符合。

事实上, 植被动力学的模拟一直是生态学领域所关注的焦点 (Martin, 1993; Cramer et al., 2001; Arora, 2002), 这既包括早期的植被地理学模型, 也包括目前应用最为广泛的生物地圈化学模型。植被地理模型, 代表性的如 BIOME (Prentice and Leemans, 1990) 和 MAPPS (Neilson, 1995), 以不同类型的植物对气候因素的生态生理适应性和资源竞争能力为基础模拟植被的分布状况。植被分布的变化只有在气候变化达到一定的程度以后才会产生, LAI 通过长时间积分

之后一年 (或者一个生长季节) 得到一次值。此类模式中, 植被的变化主要受气候条件的制约, 植被在与气候的反馈过程中处于较为被动的地位, 且对植被的季节变化缺乏描述, 因而在反映植被的动态变化过程中显得有些片面。生物地圈化学模型, 诸如 FOREST-BGC (Running and Gower, 1991)、TEM (Raich et al., 1991)、BIOME-BGC (Running and Hunt, 1993)、CENTURY (Parton et al., 1993)、CASA (Potter et al., 1993)、HYBRID (Friend et al., 1997)、SDGVM (Woodward et al., 1995; Woodward and Lomas, 2004)、IBIS (Foley et al., 1996; Kucharik et al., 2000)、LPJ-DGVM (Sitch et al., 2003)。此类模型多将植被当成一个整体, 模拟光合作用、呼吸作用和土壤微生物的分解过程, 可以完整描述碳、氮等元素在生态系统中的循环流动。模型多侧重于生物地球化学循环过程, 而对于植被形态特征比如 LAI 的变化模拟不足, 且这些模式所考虑的时间尺度也大多在年以上, 对于较短的时间尺度过程, 如植被的季节变化、年际变化情况缺乏模拟能力。

NCAR 在 LPJ-DGVM 和 IBIS 模型的基础上, 发展了一个全球动态植被模型 (DGVM), 并将其引入到陆面模式 CLM3.0 及气候模式中 (Bonan et al., 2003; Levis et al., 2004; Bonan and Levis, 2006)。但 DGVM 的研究对象侧重于时间尺度较长 (几十年甚至上百年) 的过程, 且在用于气候模式时, 通常需要较长的积分起步时间才能达到其气候平衡态。因此, 仅用此动态植被模型研究植被季节、年际尺度植被—气候相互作用存在很大局限性。

相比之下, Ji (1995) 发展了一个对季节、年际尺度上的植被动态过程具有更强针对性和描述能力的植被—大气相互作用模型 (Atmosphere - Vegetation Interaction Model, AVIM), 且在后期加入碳氮循环过程被不断改进至 AVIM2 (Huang et al., 2007), 并应用于植被—气候相互作用的研究中 (季劲钧和余莉, 1999; 何勇等, 2005; Dan et al., 2007, 2008; 季劲钧等, 2008)。毛嘉富等 (2005) 将 AVIM 的物理模块耦合到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) 的 GAMIL 大

气环流模式中, 替换了 GAMIL 中的陆面模式 BATS。结果发现, 新版本明显改进冬、夏季陆地表面的感热、潜热场通量; 对于地表面温度场, 新版本的模拟结果也更加合理。Zeng et al. (2008a, 2008b) 将 AVIM 的物理模块和生理模态耦合进 LASG 的 SAMIL_R42L9 大气环流模式, 新的模式不论是在大气温度的、热量传输、降水、海平面气压等物理量场的模拟上, 还是在反映生物过程的 LAI、NPP 的模拟上都有更好的表现。

此外, Mao et al. (2007) 改进了动态植被模型 SDGVM, 能够合理再现实际的碳循环特征, 对水汽通量的模拟更加理想 (毛嘉富等, 2009)。刘少锋等 (2009) 通过引入一个考虑不同植被功能类型之间动态的生长和竞争的植被动力学模型 VEGAS (Zeng et al., 2005), 在 IAP9L_CoLM 的基础上, 初步建立了一个大气—陆面—植被耦合模式 IAP9L_CoLM-VEGAS, 结果显示, 新的耦合模式可以较好地模拟出观测的 LAI 的空间分布及其季节变化特征。

Dickinson and Shaikh (1998)、Dickinson et al. (2002) 发展了一个类似于 AVIM2 的动态冠层模型 (Interactive Canopy Model, ICM)。模型不仅包含了植被生态系统中更为完整的碳循环过程, 还考虑了氮循环过程对植被冠层动力学、碳循环过程的控制作用。模型详细描述了光合作用碳吸收, 到光合生成物转化的碳分配, 再到植物凋亡碳支出的过程, 能够基于过程更加客观、真实地反映植物的生长凋亡过程, 因而在描述植被的动态变化中具有一定优势。不同于 AVIM2 中的利用土壤氮的动态变化控制, ICM 中利用了叶氮的限制作用, 将植被的光合作用直接考虑进 LAI 的变化中, 在对植被的生物物理过程和生物化学过程中考虑得更为直接。ICM 在研究植被—气候相互作用中有很好的应用前景, 但其中的一些参数化过程仍存在一些不确定性, 其模拟效果究竟如何, 是本文拟分析的问题。

2 模式和资料

2.1 模式简介

所用模式为已将 ICM 引入 NCAR 公用陆面模

式 (Community Land Model, CLM3.0) 的 CLM3.0-ICM (为简便起见, 后文简称为 ICM)。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。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。

模式的结构流程如图 1 所示, 其中, P_{surf} 、 T_{atm} 、 P 、 R_s 、 R_l 、 v 、 q 分别为地面气压、气温、降水、短波辐射、长波辐射、风速和比湿; T 、 P_{AR} 代表植被或土壤各层温度和光合有效辐射; r_s 为气孔阻尼; G_{pp} 为总初级生产力, 即光合作用吸收的总碳量; L 为叶面积指数; C_p 、 C_l 、 C_w 、 C_r 和 C_s 分别为光合作用碳库、叶碳库、茎碳库、根碳库和土壤碳库。

(1) 生态模块

ICM 中相较于 CLM3.0 的不同主要在于加入的生态模块, 包含了生态系统中的碳氮循环过程。

模式中生态系统碳循环中的碳分为光合生成

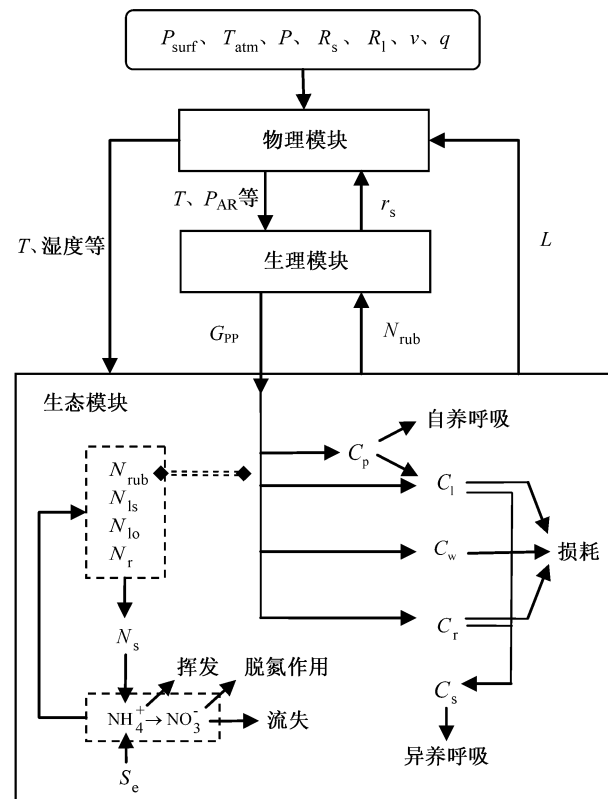


图 1 ICM 结构示意图

Fig. 1 Schematic of the ICM structure

物碳库 C_p 、叶碳库 C_l 、茎碳库 C_w 、根碳库 C_r 和土壤碳库 C_s 。由模式生理模块中计算得到的碳吸收量 (GPP) 被分配至 C_p 、 C_l 、 C_w 和 C_r ，用于植物的维持呼吸和生物量的增加。 C_p 主要参与不稳定糖的组成，可为植物的自养呼吸、萌芽阶段的快速生长提供碳源，部分将转化进入 C_l 。植物各组织部分在一定环境因素下死亡、损耗，其中 C_l 、 C_r 由于干旱、寒冷等自然条件随死亡的植物叶、根进入 C_l ，同时 C_l 、 C_w 和 C_r 会因为农作物的收割、被食草动物摄食而减少。而包含 C_s 的植物残骸在土壤微生物的参与下分解矿化，并向大气释放出 CO_2 ，其余部分进入土壤慢碳库。土壤慢碳库变化的时间尺度很长，模式中将其视为一个净的碳汇。

植物各组织中的碳氮比基本不变，氮是参与碳循环中各项生理活动，特别是光合作用、呼吸作用中蛋白酶的重要组成部分，因而生态系统中的碳氮循环紧密相连。模式中将生态系统中的氮分为植物氮库 N_p 、土壤有机物氮库 N_s 和土壤矿物氮库 N_m 。其中 N_p 又分为叶核酮糖-1, 5-二磷酸羧化酶 (RuBisCO) 氮库 N_{rub} 、叶组织结构氮库 N_{ls} 、叶中除去组成 RuBisCO 和组织结构的氮库 N_{lo} 和根氮库 N_r 。RuBisCO 是参与光合作用的关键酶，且与碳循环中的自养呼吸和叶生物量的损耗密切相关。 N_m 由铵盐 NH_4^+ 和硝酸盐 NO_3^- 组成。 NH_4^+ 和 NO_3^- 由根的吸收进入 N_p ，其中 N_{rub} 由叶的全部氮含量和叶中组织结构氮含量 N_{ls} 的经验关系式给出。在干旱、寒冷等环境胁迫因素下， N_p 随植物残骸进入 N_s 。土壤中含 N_s 的有机物在菌类活动的作用下矿化形成铵盐 NH_4^+ ；由于外界大气沉降、生物固氮和人工施肥的作用，也使 NH_4^+ 增加；而另一方面，部分 NH_4^+ 转化为游离态 NH_3 挥发进入大气，部分 NH_4^+ 在有氧的条件下硝化形成硝酸盐 NO_3^- 。土壤中 NO_3^- 通过地表和地下径流流失，或者在缺氧的作用下因为脱氮作用转化为分子态氮 N_2 或 N_2O 进入大气。

N_{rub} 是碳氮循环之间相互联系的关键参数，会影响到下一步生理模块中 CO_2 吸收速率以及 GPP 向各个碳库的分配比例，进而影响 LAI 的变化。

模式在碳氮循环的计算过程中用到植被层及土壤各层的温度、湿度参数，由模式中物理模块

给出。同时，生态模块中输出 LAI 到下一步物理模块，影响太阳辐射、反照率等的变化，从而影响温度、湿度等的计算。

(2) 物理模块和生理模块

物理模块和生理模块主要包括陆面能量、水分、动量平衡的物理过程和植被生理过程的参数化方案 (Oleson et al., 2004)。

太阳短波辐射到达植被冠层，被植被反射、吸收，其余透过冠层到达土壤表面。被植被吸收的辐射部分通过长波辐射、湍流热输送和蒸发蒸腾以感热、潜热的形式返回大气，部分用于植被层的加热和光合作用。到达地表的太阳辐射被地表反射，吸收并向下传导，或者向上放出长波辐射。降水落在有植被覆盖的地区被植被冠层截留，其中部分蒸发返回大气，部分穿过植被层落至地表。落至地表的降水或者作为地表径流流失，或者下渗进入地下，或者由地表蒸发和植物蒸腾作用返回大气。物理模块中，植被与土壤各层温度由太阳辐射与感热、潜热的能量收支情况以及热传导方程决定。在计算蒸腾作用时用到生理模块中的气孔阻力方案。有雪盖时，积雪厚度随降雪强度、雪面蒸发和融雪过程而变化。

植被生理过程的参数化方案主要包括如叶片气孔阻力、光合作用量和水汽蒸腾等的计算，气孔阻力也与光合作用量的计算有关，它又影响到生物物理模块中的能量平衡、水循环状态。模式中将整个植被冠层分为 4 层直接接收和间接接收太阳辐射的部分区别对待，其中与光合作用量有关的氮含量对碳的吸收至关重要。

2.2 实验方案和资料

用普林斯顿大学全球陆面强迫场资料 (Sheffield et al., 2006) 驱动 ICM，模拟时间为 1970~2006 年，空间分辨率 $1^\circ(\text{纬度}) \times 1^\circ(\text{经度})$ ，步长 30 min。取 2000~2006 年作为分析时段；采用非初始化条件，1970~1999 年作为模式达到自我平衡 (即 spin-up) 的时间。LAI 的初始值在模式中根据不同的植被类型由经验参数给出。模拟关闭了 CLM3.0 中的 DGVM 过程 (Levis et al., 2004)。

观测资料采用搭载在 TERRA 卫星上的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 获取的空间分辨率为 $0.25^\circ(\text{纬度}) \times 0.25^\circ(\text{经度})$ 、2000 年 2 月至 2006

年 12 月月平均的 MOD15A2 LAI 产品。MODIS 地面工作组根据 MODIS 提供的光谱数据由主算法和备用算法生产 LAI 数据。主算法基于三向传输理论 (Knyazikhin et al., 1998), 备用算法基于归一化植被指数 (NDVI) 和 LAI 的回归关系 (Knyazikhin et al., 1998; Myneni et al., 2002; Yang et al., 2006a, 2006b)。由于云覆盖、大气气溶胶、季节性的雪覆盖、传感器的观测几何和观测故障等问题, MOD15A2 LAI 产品与实地观测值存在一定偏差。尽管如此, 其对分析全球范围内季节到年际尺度上的植被动态变化过程仍然具有重要的参考价值 (Kang et al., 2003; Heinsch et al., 2006; Cohen et al., 2006; Myneni et al., 2007)。

3 结果分析

3.1 全球范围

由 ICM 模拟的 LAI 月平均图 (图略), 模拟基本能够反映出植被的季节变化趋势, 但与观测存在一定偏差 (图 2)。1 月, 模拟的北半球 25°N ~ 50°N 范围基本偏小, 尤其是在北美东南部、欧洲西部和中国东南部, 其他地区则基本偏大。北半球高纬度的空白区与 MODIS 卫星资料在冬季极

区的缺测有关; 4 月, 北半球模拟值偏小区面积扩大, 北美东南部、欧洲和中国东南部地区的偏小距平增大。热带和南半球基本维持偏大。北半球高纬度地区也为偏大值区覆盖; 7 月, 北半球 30°N 以北的模拟偏小趋势达到最大, 中国南部部分地区由偏小区转为偏大。除此之外, 澳大利亚东南部局部地区出现了模拟值偏小; 10 月, 热带地区 30°S ~ 30°N 范围主要仍为模拟值偏大区, 北美东南部和欧洲的模拟值偏小区较 7 月缩小, 中国大部分区域转为偏大值覆盖。

为更好地说明不同纬度带上 LAI 差值随时间的演变过程, 图 3 给出 LAI 模拟与观测差值的纬向平均时间序列图。 20°N 以南的广大区域全年基本为偏大值覆盖, 特别是在 10°S 附近的上半年和 10°N 附近的下半年。 25°S 以南地区的偏大值主要发生在 12 月至次年 6 月期间。北半球 35°N 附近 4 月开始出现偏小区, 5~7 月最为明显, 6 月偏小区向北扩展到 60°N 附近。北半球高纬度地区也主要为模拟值偏大, 尤其是在 4 月以前和 8 月以后的植被非生长季节, 且 8 月以后的植被凋亡阶段较 4 月以前植被生长之前的阶段, 偏大值更加显著。 30°N 附近的差值不大, 可能与这一纬度范围内主要为沙漠地区、平均的植被覆盖稀疏有关。

总体看来, 热带地区模拟值全年总是偏大;

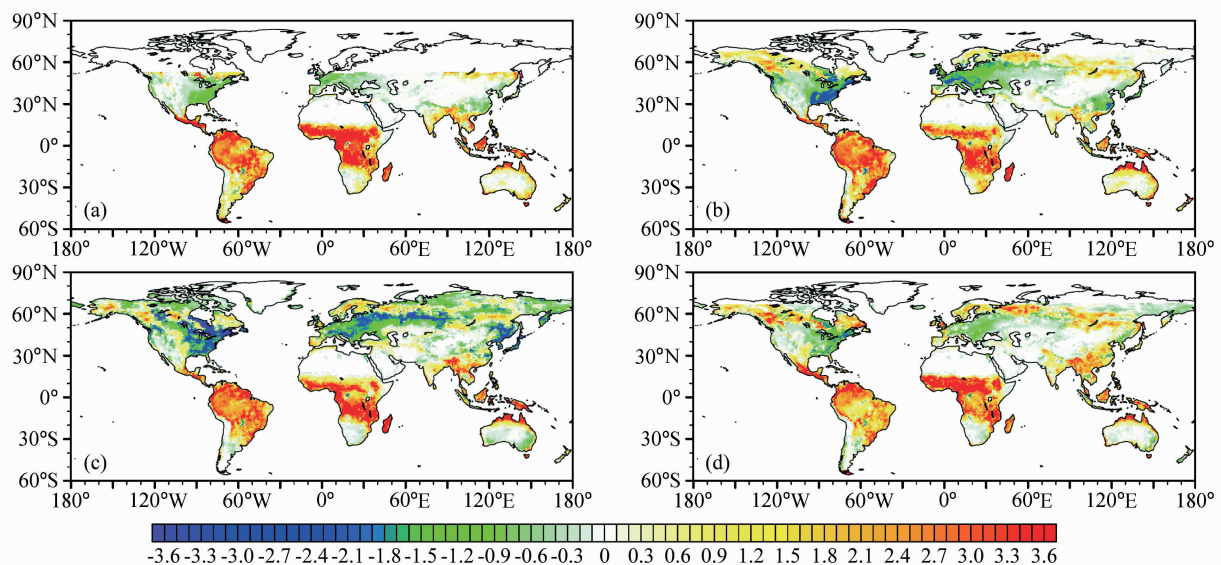


图 2 ICM 模拟与 MODIS 观测的 (a) 1 月、(b) 4 月、(c) 7 月、(d) 10 月 LAI 差值分布

Fig. 2 Spatial distributions of the difference of the Leaf Area Index (LAI) between ICM simulation and MODIS observation in (a) Jan., (b) Apr., (c) Jul., and (d) Oct

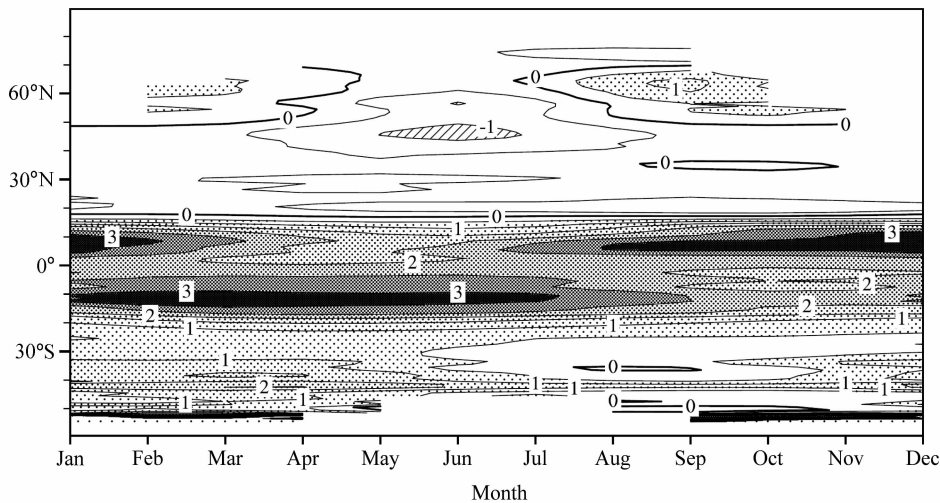


图3 ICM模拟与MODIS观测LAI差值(ICM减去MODIS)的纬度—时间剖面图

Fig. 3 Latitude-time cross section of the LAI difference between ICM simulation and MODIS observation (ICM minus MODIS)

北半球热带外地区, $40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 附近, 夏季的植被生长旺盛, 而此时的模拟值偏小。北半球中高纬度的偏小区有春季扩张、夏季极盛、秋冬撤退的趋势, 与植被的生长周期似乎恰好一致。南半球只有局部小范围区域在春、夏季节模拟值偏小, 这可能与南半球有植被分布的陆地主要位于 50°S 以北有关。 10°S 和 10°N 附近, 以及北半球高纬度地区的偏大值都在植被凋亡阶段表现更为明显。

需要指出的是, MODIS 的 LAI 产品在热带由于云覆盖的影响往往低估实际的 LAI 值, 高纬度或高海拔地区的 LAI 也会因为积雪覆盖产生类似问题, 因而, 以上所分析的模拟与观测的偏差中不仅包含了模拟与真实 LAI 的偏差, 还包含了由 MODIS 获得 LAI 时的反演误差。

3.2 区域较单一类型植被

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), 其中植被类型占到了 12 类。不同于这种按照生物群落的植被划分方式, ICM 中将其中最基本的 7 种植被类型按照不同的气候要素, 如气温、降水、生长期日等扩展分为 16 种 (Bonan et al., 2002), 并称之为植被功能类型 (Plant Functional Type, PFT)。农作物中玉米、小麦分别属 C4、C3 作物, 其光合特征不同, 因而在 ICM 中区分开来, 但目前实际运算中仅用一

种作物——玉米的各项植被参数统一代替。

为了分析 ICM 对不同 PFT 植被的模拟能力, 根据以上植被类型划分情况和二者的分布图 (图略), 兼顾二者特征, 选取部分区域, 以比较对不同类型植被的 LAI 模拟与观测的差异。

3.2.1 常绿针叶林

选取美国东北部 ($50^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\text{W}\sim 95^{\circ}\text{W}$) 和东欧 ($60^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$, $45^{\circ}\text{E}\sim 60^{\circ}\text{E}$) 分别作为温带常绿针叶林和寒带常绿针叶林的分析区。对于温带常绿针叶林 (图 4a), 除 5~7 月模拟值偏小以外, 其他月份的模拟值都偏大。且模拟值在 8 月达最大, 观测值在 7 月就已经达到, 模拟落后了观测 1~2 个月。寒带常绿针叶林 (图 4b) 的模拟值全年大于观测值, 7 月模拟与观测差异最小, 模拟的最大值也落后于观测 1~2 个月。温带常绿针叶林和寒带常绿针叶林的观测位相和振幅变化比较相似, 二者模拟的位相也比较类似, 但模拟的寒带常绿针叶林明显高估了实际情况。

3.2.2 常绿阔叶林

常绿阔叶林主要分布在低纬度地区, 选取亚马逊地区 ($0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{S}$, $60^{\circ}\text{W}\sim 75^{\circ}\text{W}$) 和巴西南部 ($25^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{S}$, $50^{\circ}\text{W}\sim 55^{\circ}\text{W}$) 作为热带常绿阔叶林和温带常绿阔叶林的分析区域。可以看到, 两个区域的 LAI 模拟值全年都大于观测值 (图 5a 和 5b)。热带常绿阔叶林的模拟与观测差值上半年都较大, 且没有反映出观测中的双峰结构, 模式中

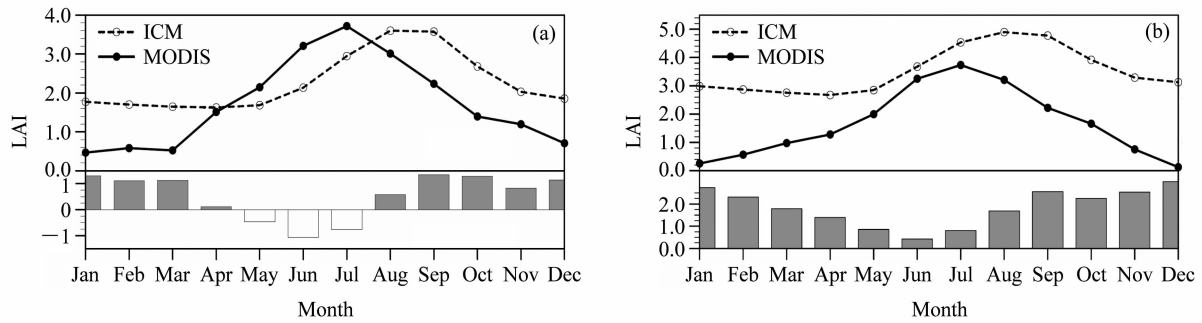


图4 (a) 美国东北部温带常绿针叶林和 (b) 东欧寒带常绿针叶林的观测与模拟的 LAI 季节变化及其差值 (柱形)

Fig. 4 Seasonal variations of the LAI from MODIS observation and ICM simulation, and their differences (column) for evergreen needle-leaf forest: (a) Temperate trees in northeastern part of the USA; (b) boreal trees in Eastern Europe

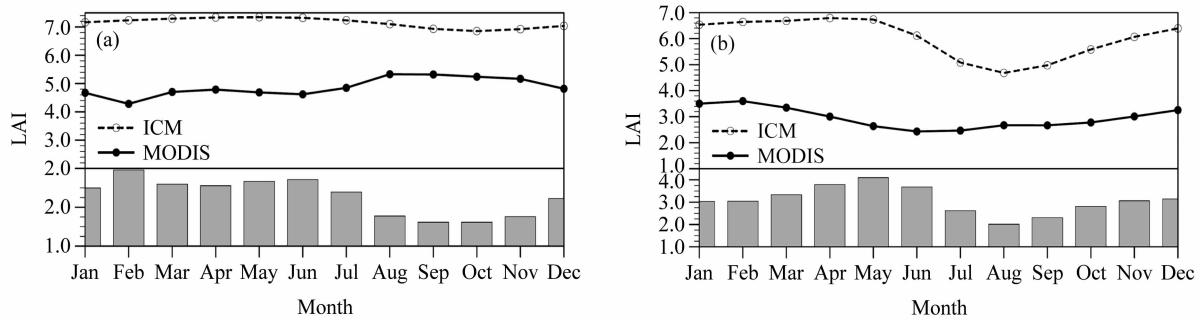


图5 同图4, 但为 (a) 亚马逊地区热带常绿阔叶林和 (b) 巴西南部温带常绿阔叶林

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for (a) tropical evergreen broadleaf forest in Amazon and (b) temperate evergreen broadleaf forest in southern part of Brazil

对植被生长的模拟应不仅仅依赖于太阳辐射的变化。温带常绿阔叶林的模拟与观测差值5月达最大, 观测的 LAI 变化较为平缓, 而模拟在8月有较明显的波谷出现。模拟的最大值落后观测2~3个月。

3.2.3 落叶针叶林

落叶针叶林在 ICM 中的划分没有其他气候条件限制, 与 IGBP 中的分布基本相同, 主要在温寒带地区。西伯利亚 ($57^{\circ}\text{N} \sim 62^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E} \sim 130^{\circ}\text{E}$) 主要为落叶针叶林分布。从图6可以看出, 除5、6月模拟值小于观测值外, 其他月份的模拟值都大于观测, 且在8月二者达到最大。观测的 LAI 在7月最大, 模拟的在8月最大, 9月变化不大, 模拟落后于观测1~2个月。

3.2.4 落叶阔叶林

落叶阔叶林从热带到寒带都有分布, 这里只分析热带和温带的情形。取南美中部 ($18^{\circ}\text{S} \sim 25^{\circ}\text{S}$, $60^{\circ}\text{W} \sim 70^{\circ}\text{W}$) 和北美东南部 ($35^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$, $75^{\circ}\text{W} \sim 85^{\circ}\text{W}$) 分别作为热带落叶阔叶林和温带落叶阔

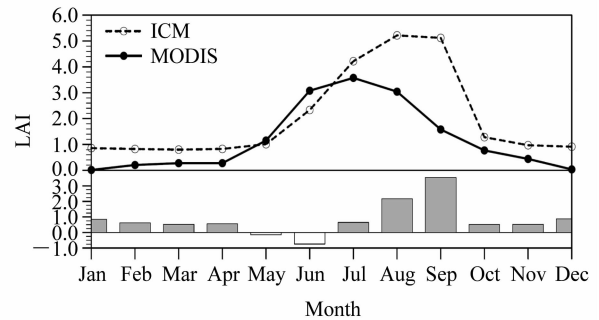


图6 西伯利亚落叶针叶林的观测与模拟的 LAI 季节变化及其差值 (柱形)

Fig. 6 Seasonal variations of the LAI from MODIS observation and ICM simulation, and their differences (column) for deciduous needleleaf forest in Siberia

叶林的分析区。对于热带落叶阔叶林 (图7a), 模拟值全年大于观测值, 且在6月差异达到最大。模拟值4月最大, 10月最小, 而观测值在3月最大, 9月最小, 模拟位相落后于观测值1个月。但总体看来, 模拟与观测差值的变化较为平缓, 模

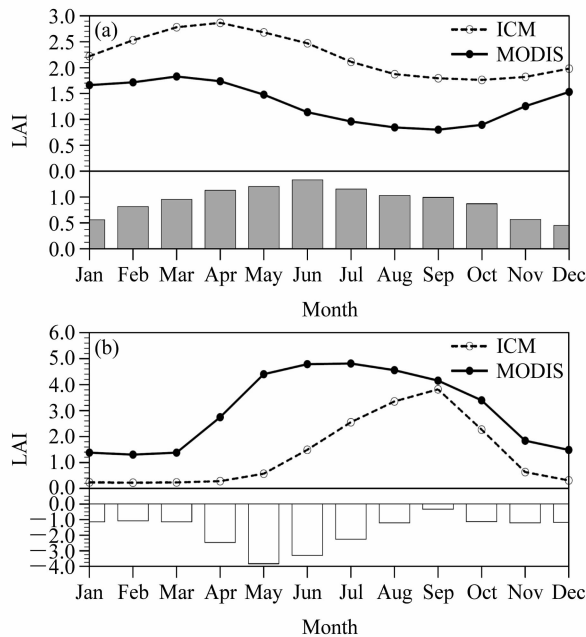


图7 同图4, 但为 (a) 南美中部热带落叶阔叶林和 (b) 北美东南部温带落叶阔叶林

Fig. 7 Same as Fig. 4, but for (a) tropical deciduous broadleaf forest in central South America and (b) temperate deciduous broadleaf forest in southeastern part of North America

拟的趋势变化较好。对于温带落叶阔叶林 (图 7b), 模拟值全年小于观测值, 5 月二者差值最大。观测值 3~5 月增长速度快, 7、8 月达到最大, 之后至 11 月衰减速度较慢。而模拟值 4 月开始缓慢增长, 至 9 月最大, 9~11 月迅速减小, 其增速慢、减速快。模拟存在生长偏慢、凋亡偏快的问题, 且植被生长较为旺盛的时期维持时间没有观测的长。

3.2.5 灌丛

灌丛的南北分布也很广, IGBP 中分为郁闭灌丛 (closed shrub) 和稀疏灌丛 (open shrub)。ICM 中分为常绿阔叶灌丛、温带落叶阔叶灌丛和寒带落叶阔叶灌丛。分别取西班牙地区 ($35^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $3^{\circ}\text{W}\sim 8^{\circ}\text{W}$)、美国西南部 ($30^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{W}\sim 120^{\circ}\text{W}$) 和欧亚大陆北部 ($65^{\circ}\text{N}\sim 75^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{E}\sim 170^{\circ}\text{E}$) 作为三者的分析区。常绿阔叶灌丛 (图 8a) 除 1、2 月外, 模拟值都大于观测值, 且二者偏差在 6 月最大。观测的 LAI 变化平缓, 而模拟的在 4~8 月有明显的增减趋势, 11 月还有一次小的增长过程; 温带落叶阔叶灌丛 (图 8b) 的模拟 1、2 月稍小于观测, 其他月份都大于观测。

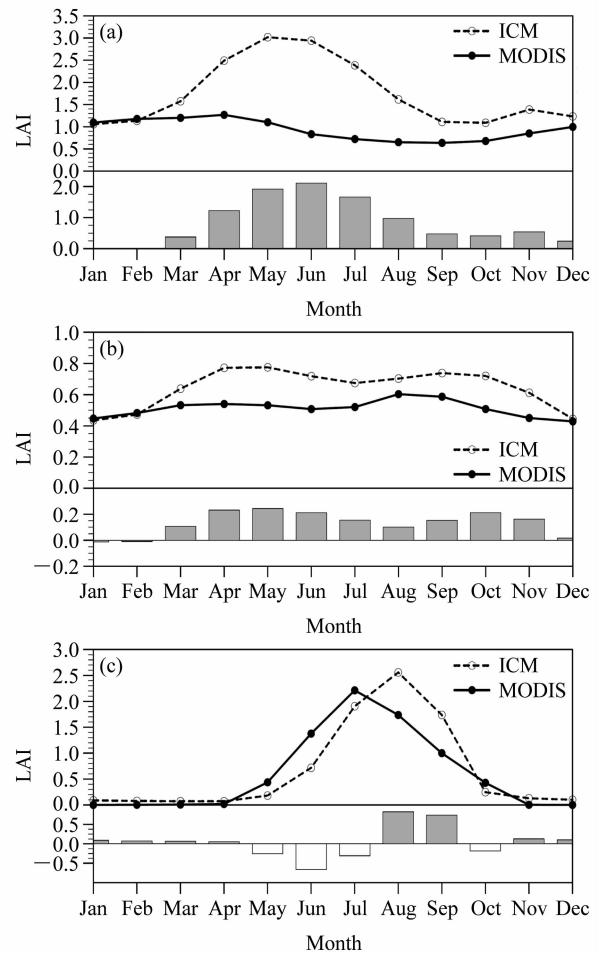


图8 (a) 西班牙常绿阔叶灌丛、(b) 美国西南部温带落叶阔叶灌丛和 (c) 欧亚大陆北部寒带落叶阔叶灌丛的观测与模拟的 LAI 季节变化及其差值 (柱形)

Fig. 8 Seasonal variations of the LAI from MODIS observation and ICM simulation, and their differences (column) for (a) broadleaf evergreen shrubs in Spain, (b) temperate broadleaf deciduous shrubs in southwestern part of the USA, and (c) boreal broadleaf deciduous shrubs in Northern Eurasia

虽然模拟的位相落后于观测, 且振幅变化稍大于观测, 但模拟表现出了明显的双峰结构; 对于寒带落叶阔叶灌丛 (图 8c), 模拟值在 4~7 月和 10 月小于观测, 其他月份大于观测, 模拟的 LAI 8 月最大, 落后于观测 (7 月最大) 1 个月。模拟的最大值也大于观测。

3.2.6 草地

IGBP 中的稀树大草原 (savanna) 又称萨王纳草地, 主要分布在 (亚) 热带, ICM 中将其并入草地 (grasslands) 一类。选取亚洲中部草原 ($45^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\text{E}\sim 80^{\circ}\text{E}$) 和北非稀树大草原

($5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{E}$) 作为分析区。对亚洲中部草原 (图 9a) 的模拟振幅较好, 但最大值落后了观测 2 个月。热带稀树大草原 (图 9b) 的模拟值全年大于观测值。模拟的 LAI 谷值位相落后于实际, 但却表现出了观测 10 月达峰值的特点。

3.2.7 农作物

中国华北地区 ($30^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 主要为农作物产区。从图 10 可以看出, LAI 观测值呈现双峰结构, 分别在 5 月和 8 月达到峰值, 这在模拟中没有表现出来。模拟值在 8~10 月大于观测值, 其他月份都偏小。中国华北地区的 LAI 双峰结构很可能与当地的作物。栽种形式有

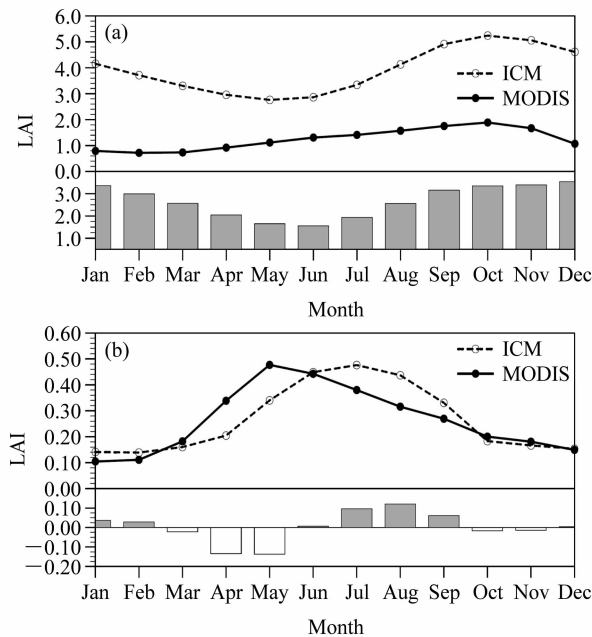


图 9 同图 4, 但为 (a) 北非稀树大草原和 (b) 亚洲中部草原

Fig. 9 Same as Fig. 4, but for (a) savanna in northern part of Africa and (b) grasslands in central Asia

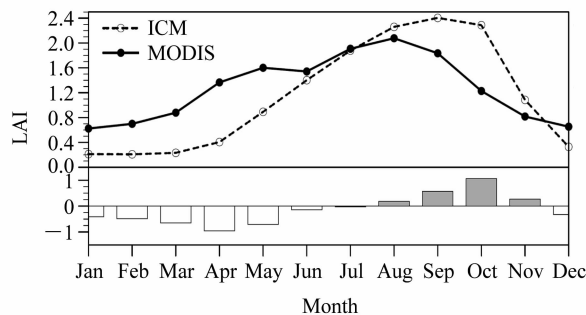


图 10 同图 6, 但为中国华北农作物

Fig. 10 Same as Fig. 6, but for crops in North China

关, 显然模拟中还没有考虑到

总地看来, ICM 模拟能够一定程度上反映植被生长、凋亡的季节变化规律。模拟值在低纬度和高纬度地区基本大于观测值, 除了温带落叶阔叶林模拟值全年偏小以外, 其他植被类型都会出现模拟值偏大。对植被生长状况的模拟存在一个共同的问题, 即模拟的 LAI 达到最大值的时间普遍得要晚于观测, 且模拟的生长偏慢、凋亡偏快。这也导致了前述全球范围内模拟与观测差值的季节性扩张与撤退。对比图 3 可以看出, 模拟的植被生长落后于实际不仅是对各植被功能类型如此, 更是一个全局性的问题。考虑到 MODIS 的 LAI 产品在低纬度和高纬度与实际情况的偏差, 模拟峰值的落后可能是更关键的问题所在。对农作物 LAI 变化的双峰结构, 模拟中尚没有表现出来。

4 讨论

ICM 中不仅考虑了碳的动态变化过程, 还考虑了氮的动态变化, 并将二者有机结合起来, 无疑在模拟生态系统碳、氮循环过程中具有一定优势, 因而在描述植被的季节变化上更加接近实际。从本研究中的模拟情况来看, ICM 能够反映出植被的季节变化特征, 但是其模拟能力仍有可以改进的空间。

对比 MODIS LAI 资料, 模式模拟结果在低纬度和高纬度地区偏大, 中纬度地区偏小。不论对于何种植被类型, 模拟位相总是落后于实际, 且可以发现, 观测的植被生长速度快、凋亡速度慢, 而模拟的生长慢、凋亡快。对植被生长季节模拟的偏迟也是模拟与观测差值的原因之一, 造成了某些温带区域的偏小值出现时间与植被的生长季节对应。虽然 MODIS LAI 本身存在一定的反演误差, 但其在反映 LAI 的增减趋势上却是可信的, 因而 ICM 模拟的植被生长落后于实际是一个更为本质的问题。

ICM 在描述植被动态变化过程中包括了碳生成、碳分配和碳损耗等植物生理生化过程的参数化。其中, 碳生成即光合作用过程是太阳辐射、叶面温度和与光合作用有关酶含量的函数; 碳分配过程与叶面温度、土壤湿度以及植物氮含量有关; 呼吸损耗受叶面温度和与呼吸作用有关酶含

量的控制, 由于寒冷或干旱引起的植物凋亡碳损耗主要受到温度和土壤湿度的影响。3 个环节的合理描述都将对整个模式的模拟效果产生影响。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, 没有在实际 LAI 达最大时达到平衡状态, 而仍然是得到大于损耗, 造成模拟的 LAI 落后于观测。这说明在植物生长季节的碳向叶的分配过程以及植被凋亡季节的碳损耗过程仍然带有很大的不确定性。

相比而言, 对草地的模拟, 或者其位相表现较好 (图 9a), 或者其振幅表现较好 (图 9b), 温带草地生长季节的模拟位相差产生了模拟与观测差值的假象。林地的模拟差于草地, 有可能与模式中对茎碳库 C_w 的考虑不够有关, 也从另一方面说明了 ICM 中碳分配过程的参数化可能更需优化。

温度和湿度是两个重要的控制生态系统氮循环的因素, 而植被氮含量在植物生长的各个环节都起到控制作用。热带地区的 LAI 变化较中高纬度的要平缓得多, 温度对热带植被的影响要比对中高纬地区植被小。对于不同的温度带, 植被的主要影响因素也不同。模拟的热带常绿阔叶林观测的 LAI 有明显的双峰结构, 模拟没有表现出来 (图 5a), 而对温带落叶阔叶灌丛的模拟却表现出了比观测更为明显的双峰特征 (图 8b)。这说明对太阳辐射、降水等一些具有双峰特性的气候要素, 不同的环境下、不同的植被类型其响应过程有所差别。尤其是对热带赤道附近地区植被的模拟, 降水对植被生长的影响可能要占更大的比重。

植被动态模拟过程中, 碳、氮循环密切相关, 二者的相互作用过程在实验和模型工作中也得到越来越多的关注 (任书杰等, 2006)。氮含量会影响到植物光合作用、同化产物的分配和有机质的分解, ICM 中如何考虑氮对光合作用, 进而对气孔导度、蒸腾作用的控制也是需要注意的问题之一 (Stöckli et al., 2008)。

此外, 农作物在 ICM 中现仅用一种类型参数表示, 中国华北地区的观测 LAI 有明显的双峰结构, 而模拟中目前无法表现出来。农作物的双峰结构应该与当地双季作物收播有关, 说明对于农

作物的模拟, 人为因素的影响不可忽略。

5 结论

本文利用一个考虑了生态系统碳、氮循环过程的动态植被模型——ICM 模拟的 LAI 值, 与 MODIS 卫星 LAI 产品对比分析, 以评估 ICM 对植被季节变化的模拟能力。以上研究结果表明, 尽管存在一些问题, 但模式基本能够反映出植被的季节变化特征, 具有一定的模拟能力。相较于 MODIS 的 LAI 资料, 模拟的 LAI 在低纬度和高纬度地区偏大, 而在中纬度温带地区偏小。模拟的植被生长落后于实际, 造成中纬度偏小值的出现常常与植被的季节性生长对应。对于不同的植被类型, 草地的模拟似乎要好于林地; 常绿阔叶林和温带落叶阔叶灌丛的观测 LAI 都有双峰特点, 但模拟没有表现出常绿阔叶林的双峰变化; 此外, 农作物的双峰变化很可能与人为因素有关, 目前模式中尚缺乏表现。

从 ICM 模式对植被生长凋亡过程的描述来看, 从光合作用碳吸收, 到光合生成物碳向植物各部分的分配, 再到由于寒冷、干旱造成的碳损耗都有可能造成对整个植被生长周期的模拟偏差。氮循环过程在这三个环节的作用关系也需要认真考虑。

需要指出的是, 尽管 MODIS LAI 产品在分析全球植被从季节到年际尺度上的动态变化过程具有很重要的指导意义, 但由于其本身的质量问题, 再加上模式所用强迫场的不确定性, 必然会给分析结果带来一些偏差, 因而结合场地观测资料加以检验十分必要。

ICM 中考虑了较为详细的生态系统碳、氮循环过程, 在植被—气候相互作用的研究中具有广阔的应用前景。在将其应用于此之前, 如何改善模型的参数方案、优化模型参数是下一步需要做的工作。

致谢 感谢蒙大拿大学赵茂盛提供 MODIS 资料, 普林斯顿大学陆面水文研究小组提供陆面强迫场资料。感谢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 SGI 超级计算机的硬件和技术支持。

参考文献 (References)

- Arora V. 2002. Modeling vegetation as a dynamic component in soil - vegetation - atmosphere transfer schemes and hydrological models [J]. *Rev. Geophys.*, 40 (2): 1006.
- 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 Biogeochemical Cycles*, 16 (2): 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.
- Bonan G B, Levis S. 2006. Evaluating aspects of the community land and atmosphere model (CLM3 and CAM3) using a Dynamic Global Vegetation Model [J]. *J. Climate*, 19 (11): 2290 - 2301.
- 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 condition [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 29 (6): 725 - 734.
- 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.
- Cohen W B, Maersperger T K, Turner D P, et al. 2006. MODIS land cover and LAI collection 4 product quality across nine sites in the Western Hemisphere [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 44 (7): 1843 - 1857.
- Cramer W, Bondeau A, Woodward F I, et al. 2001. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: Results from six dynamic global vegetation models [J]. *Global Change Biology*, 7 (4): 367 - 373.
- Dai Y J, Zeng X, Dickinson R E, et al. 2003. The Common Land Model (CLM) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84 (8): 1013 - 1023.
- 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, He Y. 2007. 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.
- Dan L, Ji J, Liu H. 2008. Use of a land surface model to evaluate the observed soil moisture of grassland at the Tongyu reference site [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 25 (6): 1073 - 1084.
- 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, Kennedy 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. 1995. Land atmosphere interaction [J]. *Rev. Geophys.*, 33 (Suppl.): 917 - 922.
- Dickinson R E, Shaikh A 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.
- Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, et al. 1996. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 10 (4): 603 - 628.
- Friedl M A, Melver D K, Hodges J C F, et al. 2002. Global land cover from MODIS: Algorithms and early results [J]. *Remote Sens. Environ.*, 83: 287 - 302.
- Friend A D, Stevens A K, Knox R G, et al. 1997. A process-based, terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (Hybrid v3.0) [J]. *Ecological Modeling*, 95: 249 - 287.
- 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 [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 terrestrial ecosystems in China by AVIM [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 20 (3): 345 - 349.
- Heinsch F A, Zhao M, Running S W, et al. 2006. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 44 (7): 1908 - 1925.
- Huang M, Ji J, Li K, 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.
- Ji J. 1995. A climate - vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface [J]. *J. Biogeography*, 22 (2-3): 445 - 451.
- 季劲钧, 余莉. 1999. 地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 (3): 439 - 448.
- 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) (in Chinese), 38 (2): 211–223.
- Kang S, Running S W, Lim J, et al. 2003. A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forests, Korea: An application of MODIS leaf area index [J]. Remote Sens. Environ., 86: 232–242.
- 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 NISR data [J]. J. Geophys. Res., 103 (D24): 32257–32276.
- Kucharik C J, Foley J A, Delire C. 2000. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure [J]. Global Biogeochemical Cycles, 14 (3): 795–825.
- Levis S, Bonan G B, Vertenstein M, et al. 2004. The community land model's dynamic global vegetation model (CLM-DGVM): Technical description and user's guide [R]. NCAR/TN–459+IA.
- 李伟平, 季劲钧, 董文杰, 等. 2008. 年际时间尺度上全球植被与大气相互作用的诊断分析 [J]. 大气科学, 32 (1): 75–89.
- Li Weiping, Ji Jinjun, Dong Wenjie, et al. 2008. Diagnosis of global vegetation – atmosphere interactions at the interannual time scale [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (1): 75–89.
- 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 [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]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (3): 258–272.
- 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.
- Mao J, Wang B, Dai Y, et al. 2007. Improvements of a dynamic global vegetation model and simulations of carbon and water at an upland-oak forest [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 24 (2): 311–322.
- 毛嘉富, 王斌, 戴永久, 等. 2008. 一个动态植被模型在欧洲森林碳水循环模拟中的适应性评估研究 [J]. 大气科学, 32 (6): 1379–1391.
- Mao Jiafu, Wang Bin, Dai Yongjiu, et al. 2008. Simulation and evaluation of carbon and water fluxes at 15 Europe forest sites with a dynamic global vegetation model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (6): 1379–1391.
- Martin P. 1993. Vegetation responses and feedbacks to climate: A review of models and processes [J]. Climate Dyn., 8 (4): 201–210.
- 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.
- Myneni R B, Yang W, Nemani R R, et al. 2007. Large seasonal swings in leaf area of Amazon rainforests [J]. PNAS, 104 (12): 4820–4823.
- Neilson R P. 1995. A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance [J]. Ecological Applications, 5: 362–385.
- Oleson K W, Dai Y, Bonan G, et al. 2004. Technical description of the community land Model (CLM) [R]. NCAR/TN–461+STR.
- Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. 1993. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide [J]. Global Biogeochemical Cycles, 7: 785–809.
- Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. 1993. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data [J]. Global Biogeochemical Cycles, 7: 811–842.
- Prentice I C, Leemans R. 1990. Pattern and process and the dynamics of forest structure: A simulation approach [J]. J. Ecology, 78 (2): 340–355.
- Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, et al. 1991. Potential net primary productivity in south America: Application of a global model [J]. Ecological Appl., 1 (4): 399–429.
- 任书杰, 曹明奎, 陶波, 等. 2006. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展 [J]. 地球科学进展, 25 (4): 58–67.
- Ren Shujie, Cao Minghui, Tao Bo, et al. 2006. The effects of nitrogen limitation on terrestrial ecosystem carbon cycle: A review [J]. Progress in Geography (in Chinese), 25 (4): 58–67.
- Running S W, Gower S T. 1991. FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional application. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets [J]. Tree Physiology, 9: 147–160.
- Running S W, Hunt Jr 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, Eds. Scaling Physiological Processes: Leaf to Global. San Diego: Academic Press Inc., 141–158.
- 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, Randall D A, Collatz G J, et al. 1996. A revised land

- surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation [J]. *J. Climate*, 9: 676–705.
- 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.
- Sheffield J, Goteti G, Wood E F. 2006. Development of a 50-yr high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling [J]. *J. Climate*, 19 (13): 3088–3111.
- 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.
- Stöckli R, Lawrence D M, Niu G, et al. 2008. Use of FLUXNET in the community land model development [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: G01025.
- Woodward F I, Smith T M, Emanuel W R. 1995. A global land primary productivity and photogeography model [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 9 (4): 471–490.
- Woodward F I, Lomas M R. 2004. Vegetation dynamics—Simulating responses to climatic change [J]. *Biological Reviews*, 79 (3): 643–670.
- 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.
- Zeng H, Wang Z, Ji J, 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 H, Ji J, Wu G. 2008b. An updated coupled model for land–atmosphere interaction. Part II: Simulations of biological processes [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 25 (4): 632–640.
- Zeng N, Mariotti A, Wetzel P. 2005. Terrestrial mechanisms of interannual CO₂ variability [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 19: 2539–2558.