

毛嘉富, 王斌, 戴永久, 等. 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. 大气科学, 2008, 32 (6): 1379~1391
Mao Jiafu, Wang Bin, Dai Yongjiu, et al. Simulation and evaluation of carbon and water fluxes at 15 Europe forest sites with a dynamic global vegetation model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32 (6): 1379~1391

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

毛嘉富¹ 王斌¹ 戴永久² MORALES Pablo³

1 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, 北京 100029

2 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875

3 Department of Agriculture Economics, Universidad de Chile, Casilla 1004

摘要 对动态全球植被模型 M-SDGVM (Modified Sheffield Dynamic Global Vegetation Model), 在 1996~1998 年 15 个欧洲森林通量站碳通量和水汽通量的季节和年际变化进行模拟和评估研究, 总的来说, 模型能够合理再现各个站点春、夏季节碳的吸收, 秋、冬季节碳的释放, 以及水汽释放的季节变化趋势, 其中, 对水汽通量的模拟更为理想。对模型的上述适应性评估研究表明, 改进后的 M-SDGVM 有能力研究不同气候条件下欧洲森林生态系统碳、水循环过程及其响应机制, 但是, 模型对部分站点的模拟仍存在不确定性, 通过对这些偏差及其可能的产生机理进行分析, 有助于模型的进一步发展和应用研究。

关键词 动态全球植被模型 M-SDGVM 评估 欧洲通量监测网 碳水通量

文章编号 1006-9895 (2008) 06-1379-13

中图分类号 P463

文献标识码 A

Simulation and Evaluation of Carbon and Water Fluxes at 15 Europe Forest Sites with a Dynamic Global Vegetation Model

MAO Jiafu¹, WANG Bin¹, DAI Yongjiu², and MORALES Pablo³

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

2 School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875

3 Department of Agriculture Economics, Universidad de Chile, Casilla 1004

Abstract The M-SDGVM was evaluated against the eddy-covariance measurements of seasonal and annual carbon and water fluxes at 15 forest sites within the EUROFLUX project from 1996 to 1998. Generally, the M-SDGVM can reasonably reproduce the seasonal trend of carbon and water exchange among different sites. It correctly simulated the net uptake of carbon during spring and summer months and the release of carbon during autumn and winter months. And the M-SDGVM also did a better job in predicting the release of water to the atmosphere during all the seasons. The results shown here suggest that in general the M-SDGVM can be used as a useful tool for studies of climate change impacts on carbon and water cycles of forests in Europe and their possible feedbacks. However, the

收稿日期 2007-02-27, 2007-05-16 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2005CB321703, 国家自然科学基金资助项目 40221503, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY (QX) 2007-25

作者简介 毛嘉富, 男, 1979 年出生, 助理研究员, 主要从事陆地生态系统和气候系统相互作用的模拟及动态全球植被模型的发展、应用研究。E-mail: maojiafu@mail.iap.ac.cn

model shows some biases at part of the sites. Analyzing and quantifying the case studies with poor performance will lead to further insights on modifications and improvements of the current version of M-SDGVM.

Key words dynamic global vegetation models, M-SDGVM, evaluation, EUROFLUX, carbon and water fluxes

1 引言

近百年来,全球气候正经历以变暖为主要特征的显著变化,除自然气候变动外,化石燃料燃烧、工农业生产、土地利用/土地覆盖变化等人类活动导致的 CO₂、CH₄ 等温室气体浓度的升高及其引起的温室效应是近 50 年全球气候变暖的主要原因之一^[1~3]。气候与环境的变化是气候系统各圈层(大气圈、水圈、陆地表面、冰雪圈、生物圈)复杂的非线性相互作用结果,因此,预测未来气候变化趋势、评价生态系统对全球变化响应与适应特征,是现代地球系统科学、生态与环境科学共同关注的重大科学问题,这些科学问题也成为 IGBP、WCRP、IHDP 和 DIVERSITAS 等国际合作研究计划的核心研究内容^[4~8]。

由于人们无法在区域和全球尺度上直接、全面地测量陆地生态系统水、热和碳循环过程以及它们对气候系统的反馈效应,因此,针对陆地生态系统生物地球物理、生物地球化学循环机理模拟的不同复杂程度陆地生态系统模型,成为当前一种既重要而又广泛接受的研究工具。根据不同的出发点和研究目的,陆地生态系统和气候系统相互作用研究中,经常使用比较成熟的生态系统模型,包括生物地理模型、经验统计模型、森林林窗模型、陆面模型、生物地球化学循环模型、基于遥感信息的生产力模型以及动态全球植被模型等^[9~12]。其中的动态全球植被模型(Dynamic global vegetation models, DGVMs)是目前发展较快、最具有同气候系统模式直接耦合潜力的新一代陆地生态系统模型^[13~15]。动态全球植被模型综合了上述几类陆地生态系统模型的优点,能在统一系统内模拟不同时间尺度陆地生态系统水分、能量和营养物质循环,以及植被生长、演替和各种扰动(火灾、虫灾、土地利用等)等复杂过程。因此,动态全球植被模型的校验、发展以及模拟应用研究正成为气候学、生态学以及全球变化研究领域重点的研究对象之一^[16~18]。

大尺度、长期和连续的生物圈-大气圈之间碳、

水和能量通量观测数据网络(FLUXNET)^[19]通过采用多种手段和多种方法,对土壤、植被和大气的各种要素,以及生态系统碳循环与水循环等的多种关键过程进行综合观测,它的建立为开展陆地生态系统碳、水循环和能量传输过程综合研究提供了有效的数据集和实验研究平台,也为评价和检验陆地生态系统模型对 CO₂、H₂O 和能量交换的模拟性能提供了重要的基础数据库^[6, 20, 21]。

因此,本文通过使用高质量、连续观测的 EUROFLUX^[21]通量监测资料,以及针对这些站点所展开的模型比较结果^[22],对一个新改进的动态植被模型 M-SDGVM^[23, 24]在欧洲森林碳/水循环模拟过程中的适应性进行评估研究。同时,分析模拟时段内不同气候条件下 15 个欧洲森林生态系统碳、水循环的变化趋势,尤其是季节变化趋势,研究模型模拟与观测结果之间偏差的可能来源,为 M-SDGVM 的进一步发展以及在全球不同区域陆地生态系统的模拟和应用研究提供重要的基础工作。

2 模型及实验介绍

2.1 模型简介

M-SDGVM 是以英国谢菲尔德大学陆地碳动力研究中心(CTCD, Center for Terrestrial Carbon Dynamics) SDGVM (Sheffield Dynamic Global Vegetation Model) 模型为基础发展的新一代动态全球植被模型,它使用气候变化的历史资料、土壤质地资料以及 CO₂ 浓度为驱动场,研究植被结构和功能对气候变化和二氧化碳浓度升高的响应,以及陆地生态系统与大气圈之间潜在的相互作用^[13, 23, 24]。M-SDGVM 的模块结构如图 1 所示,共有五个主要模块:水循环模块(HYDROLOGY)、用于计算植被光合生产、植被呼吸的生产力模块(NPP)、模拟植被随季节变化的物候子模块(PHENOLOGY)、植被生长和演替模块(GROWTH)以及处理土壤碳、氮循环模块(CENTURY)。HYDROLOGY、NPP 和 PHENOLOGY 模块以一天为积分步长,CENTURY 的土壤碳、氮计算以月为时间步长,而 GROWTH 则在每一年的年底下一年的年初计算

一次。

相对标准版本的 SDGVM 模型, M-SDGVM 改进的地方有: (1) 采用分辨率更高的全球多层土壤质地资料; (2) 使用新的入射太阳辐射、净辐射方案; (3) 引入细致的全球根廓线分布参数化过程; (4) 修改土壤中根廓线分布对蒸腾限制的模拟方案; (5) 引入一个简单的冠层截留方案和土壤湿度、湿度对异氧呼吸限制过程; (6) 对土壤水分传

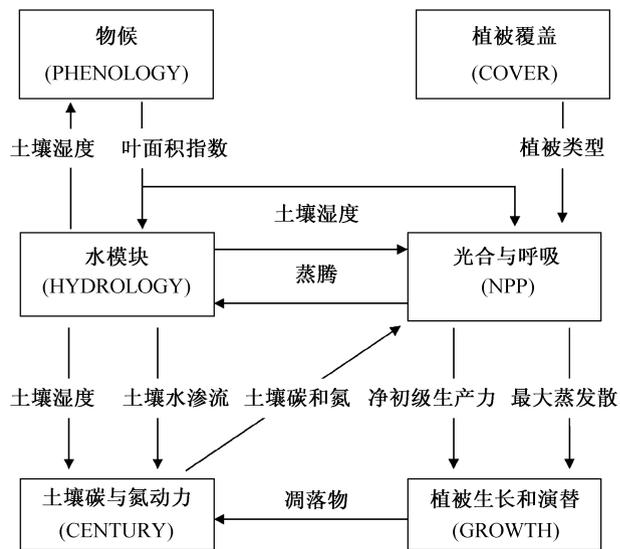


图1 M-SDGVM 各个模块之间流程示意图

Fig. 1 Flow of modules in the M-SDGVM

输所涉及到的土壤物理特性参数化公式进行了部分的替换等。修改后的 M-SDGVM 模型能更充分地使用气象、植被以及土壤等站点观测信息, 对单点森林生态系统碳、水循环动态变化过程的模拟更为合理^[24, 25]。

2.2 站点介绍

EUROFLUX 观测网结合了欧洲不同气候区域、不同地理位置、不同植被年龄以及不同植被种类组成的通量塔观测资料, 以研究整个欧洲大陆陆地生态系统碳源、汇分布为目的的综合观测试验^[21]。EUROFLUX 所有通量观测站点对大气和陆地生态系统之间二氧化碳通量、水汽通量, 以及能量通量观测均采用统一的观测标准^[26], 数据每隔半小时或一小时采集一次, 对缺测的资料最终通过一套标准化办法^[27]进行填补, 以获得连续的观测资料。本研究选用 1996~1998 年 15 个欧洲森林生态系统 (表 1) 逐月净陆地生态系统碳通量 (Net Ecosystem Exchange, 简称 NEE) 和水汽通量 (Actual Evapotranspiration, 简称 AET) 观测值, 对其进行模拟和比较研究。

2.3 数据及实验设计

气象驱动场取自英国 East Anglia 大学 Climatic Research Unit (简称 CRU) 1901~2000 年逐月气象资料, 同时, 用天气发生器将逐月气象资料变

表 1 15 个欧洲森林生态站植被类型及其主要特征^[22]

Table 1 Biomes classification and main features of the 15 forest sites in the EUROFLUX project^[22]

植被类型	站名	国家	纬度 (°N)	树龄 (截止 1998 年)	年平均降水/mm·a ⁻¹	年平均温度/°C
北方针叶林	Norunda	瑞典	60°51'	99	527	5.5
北方针叶林	Hyytiälä	芬兰	61°51'	38	640	3.5
北方针叶林	Flakaliden	瑞典	64°07'	30	587	1.9
北方落叶林	Gunnarsholt	冰岛	63°50'	7	1117	3.6
温带针叶林	Bayreuth	德国	50°10'	39	885	5.8
温带针叶林	Tharandt	德国	50°58'	107	820	7.5
温带针叶林	Brasschaat	比利时	51°18'	70	750	10.0
温带针叶林	Winand	荷兰	52°10'	79	786	9.8
温带针叶林	Aberfeldy	英国	56°36'	19	1200	8.0
温带落叶林	Sarrebourg	法国	48°40'	29	/	/
温带落叶林	Vielsam	比利时	50°18'	89	1000	7.5
温带落叶林	Soroe	丹麦	55°36'	77	510	8.1
地中海常青树	Castelporziano	意大利	41°42'	49	781	15.6
地中海常青树	Bordeaux	法国	44°43'	30	950	13.5
山地落叶林	Collongio	意大利	41°51'	104	1180	6.3

为逐日强迫场^[13, 23, 28], 二氧化碳浓度变化资料来源于碳循环模型比较计划 (Carbon Cycle Model Linkage Project)^[29]提供的结果。M-SDGVM 使用站点观测的植被分布、土壤质地和土壤深度等信息, 通过反复使用 1980~1995 年气象资料, 积分 600 年, 直到该点生态系统达到平衡态, 即 $NEE=0$ 为止。然后, 模型以 1996~1998 年气象资料为驱动场, 选取此三年逐月 NEE 和 AET 模拟结果进行分析。还将 M-SDGVM 对 15 个欧洲森林生态系统的模拟结果与文献^[22]中所使用的 GOTILWA⁺^[30]、RHESys^[31, 32]、LPJ-GUESS^[33, 34] 以及 ORCHIDEE^[35]等模型的模拟结果进行对比。为便于比较, 同这些模型类似, 在 M-SDGVM 模拟过程中没有考虑自然或人为扰动对每个森林生态系统碳、水循环所造成的影响。

2.4 统计方法

当前, 多种统计方法可用于比较模型模拟与观测之间的接近程度, 其中, 简单、初步的对比包括: 模拟与观测之间线性回归斜率 (slopes)、截距 (intercepts) 和相关系数 (R) 等。对于线性回归而言, 斜率为 1、截距为 0, 并且相关系数接近 1, 代表模拟与观测非常接近。为了进一步评价 M-SDGVM 的模拟性能, 本文还使用了偏差 (B)、绝对偏差 (A)、均方根误差 (S)、模拟效率 (E) 以及平均偏

差 (M) 作为检验手段^[22, 36]。有关上述统计方法的具体含义见附录。

3 模拟结果及分析

3.1 对生态系统净碳通量的模拟

在大部分站点, M-SDGVM 模拟的 NEE 与观测值之间相关性显著, 相关系数在 0.37204~0.88794 之间 (表 2, 图 2a), E 从 0.78125~−3.1891 (表 2), 均方根误差从 24.14803 $g \cdot m^{-2} \cdot 月^{-1}$ 变化到 85.9292 $g \cdot m^{-2} \cdot 月^{-1}$ (图 2b, 表 2)。对月碳通量的模拟, M-SDGVM 在 60% 的站点 (9 个站) 存在不同程度的偏差 (表略), 模型模拟的碳吸收偏低是偏差的主要来源。对位于地中海气候区域内的 Castelporziano 站, R 值和 E 值仅为 0.51516 和 −3.1891, 偏差相对明显。但总的来说, 模型能够模拟出 15 个森林生态系统净碳通量季节变化趋势, 即在春、夏季能较好地模拟碳的吸收, 秋、冬季模拟出碳的释放。

图 3 为不同类型生态系统 NEE 的观测与模拟值的比较。三个北方针叶林生态系统中 (图 3a~c), Norunda 站模拟与观测之间偏差最大。在 Norunda 站, 观测的森林生态系统最大碳吸收发生在 5 月份, 最大碳释放发生在 10 月份。虽然模拟的生态系统最大碳吸收量级同观测相当, 但是, 由于模

表 2 模型模拟的所有站点生态系统净碳通量 (NEE) 性能随纬度变化

Table 2 Performances of models predictions of net ecosystem exchange along the latitude across all sites

纬度 (°N)	站名 (简称)	斜率	截距	相关系数	偏差	绝对偏差	均方根误差	模拟效率
41.7	Castelporziano (CA)	0.78257	30.96401	0.51516	42.12	47.46417	45.00074	−3.1891
41.85	Collelongo (CO)	0.26725	16.99833	0.62873	73.24368	85.22895	85.9292	−0.04806
44.72	Bordeaux (BO)	0.59185	18.01834	0.70076	36.86875	37.94542	38.5707	−0.35497
48.67	Sarrebouurg (SA)	0.4525	−7.77109	0.55201	5.58094	42.08469	60.14252	0.22714
50.17	Bayreuth (BA)	0.74964	−7.63673	0.7694	−8.2329	21.18	24.14803	0.49992
50.3	Vielsam (VI)	0.51168	16.39874	0.7817	38.44267	42.60467	47.55848	0.11065
50.97	Tharandt (TH)	0.73431	22.43594	0.82819	34.875	39.52433	42.09016	0.25792
51.3	Braaschaat (BR)	0.91128	−10.92513	0.86657	−11.14774	24.79677	26.74568	0.66688
52.17	Winand (WI)	0.93823	17.24982	0.79919	18.61733	24.016	30.28246	0.26752
55.6	Soroe (SO)	0.71839	0.8568	0.88794	1.98258	26	27.83597	0.78125
56.6	Aberfeldy (AB)	0.26362	6.46507	0.40281	42.40208	44.65625	51.5049	−0.64379
60.85	Norunda (NO)	0.30364	−15.74664	0.37204	−21.19091	64.88606	75.53143	−0.14114
61.85	Hyytiaala (HY)	0.77282	15.09788	0.84756	20.52303	20.88364	28.78383	0.46483
63.83	Gunnarsholt (GU)	0.56693	6.02475	0.85319	16.64174	21.92348	25.01764	0.57106
64.12	Flakaliden (FL)	0.55574	1.07989	0.72412	5.36	21.60645	30.65899	0.50957

注: 截距、偏差、绝对偏差、均方根误差的单位为 $g \cdot m^{-2} \cdot 月^{-1}$ 。

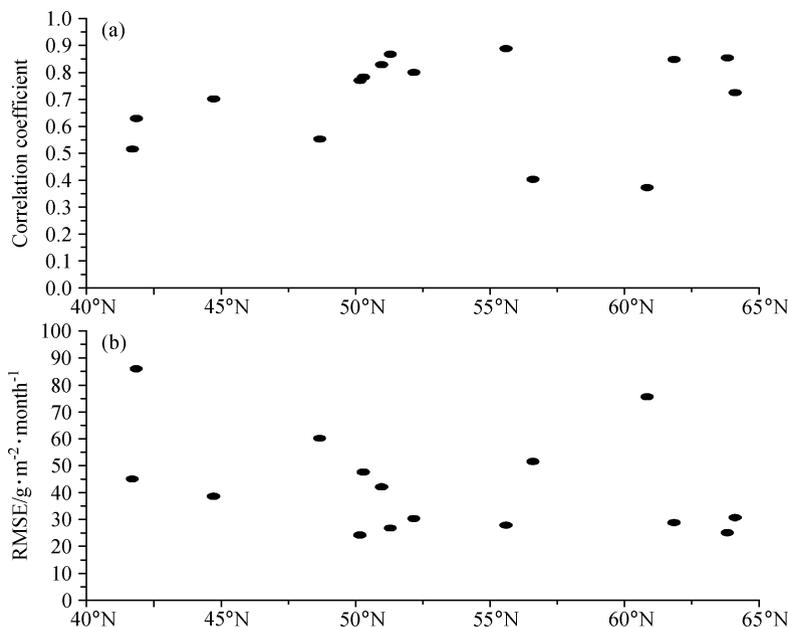


图2 模拟与观测的生态系统净碳通量 (NEE) 相关系数 (a) 和模拟的生态系统净碳通量的均方根误差 (b) 随纬度的分布。各站点从左向右依次为: CA, CO, BO, SA, BA, VI, TH, BR, WI, SO, AB, NO, HY, GU, FL

Fig. 2 Variations of (a) correlation coefficients between the simulated and observed net ecosystem exchange and (b) root mean square errors (RMSE) of the simulated net ecosystem exchange with latitude. Sites from the left to the right: CA, CO, BO, SA, BA, VI, TH, BR, WI, SO, AB, NO, HY, GU, FL

拟的夏季生长季开始时间滞后于观测生长季开始时间, 模型模拟的最大碳吸收出现在 6 月份, 最大碳释放出现在 11 月份, 而且最大碳释放的量级也略低于观测值 (图 3c)。对另外两个北方针叶林森林生态系统 Flakaliden 和 Hyytiaala 站 (图 3a、b), 模型模拟的结果相对理想。

对温带北方落叶林生态系统 Gunnarsholt 站 (图 3d), 模型模拟同观测结果比较接近, 其相关系数达 0.85319, 模型模拟效率 (E) 为 0.57106 (> 0.5), 而均方根误差仅为 $25.01764 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ (表 2)。

山地落叶林 Collelongo 站位于地中海区域, 该地域气候特点是年平均降水较多 (1180 mm/a), 而年平均温度较低 ($6.3 \text{ }^\circ\text{C}$)。M-SDGVM 对该站 1996 年、1997 年最大的碳吸收模拟均偏低 (图 3e), 同样的低估也存在于 RHESys 和 LPJ-GUESS 在该站的模拟结果 (图 1e, 见文献[22])。

对 5 个温带针叶林生态系统 (图 3f~j), 模型在大部分年份模拟的 NEE 为负值 (净碳吸收), 同观测相近。在 Winand 和 Tharandt 站 (图 3g、i), 模型高估了冬季碳的释放, 此外, 在 Aberfeldy 站,

由于模型对生长季模拟偏短, 因此, 对全年碳吸收模拟偏低 (图 3f)。对另外两个站 Braaschatt 和 Bayreuth 站 (图 3h、j), 模拟的碳通量季节变化同观测非常接近, 其原因很可能是由于模拟过程中, 充分考虑了站点的土壤碳库、植被叶面积指数等观测信息。

M-SDGVM 对三个温带落叶森林净碳通量的季节变化形态的模拟相对较好 (图 3k~m), 模拟值同观测值相关系数以及模拟效率 (表 2) 都较高。尤其在 Sarebourg 站, 参加比较计划的所有模型对此站夏季碳吸收和冬季碳释放都模拟偏高 (图 3c, 见文献[22]), 而 M-SDGVM 则较好地模拟了该站碳通量的季节变化。但是, 对于 Vielsam 站 (图 3l), 由于模型对碳释放的时间模拟偏长, 导致模型低估了夏季碳的吸收。在两个常青森林 Bordeaux 和 Castelporziano (图 3n、o) 站中, 模拟的碳通量偏差最大的出现在 Castelporziano 站 ($E = -3.1891$), 模型过高地估计了冬季的碳释放。

3.2 对实际蒸发散的模拟

大多数站点中, M-SDGVM 所模拟的实际蒸散发与观测值相关性显著, 其中 R 最高可达 0.95935

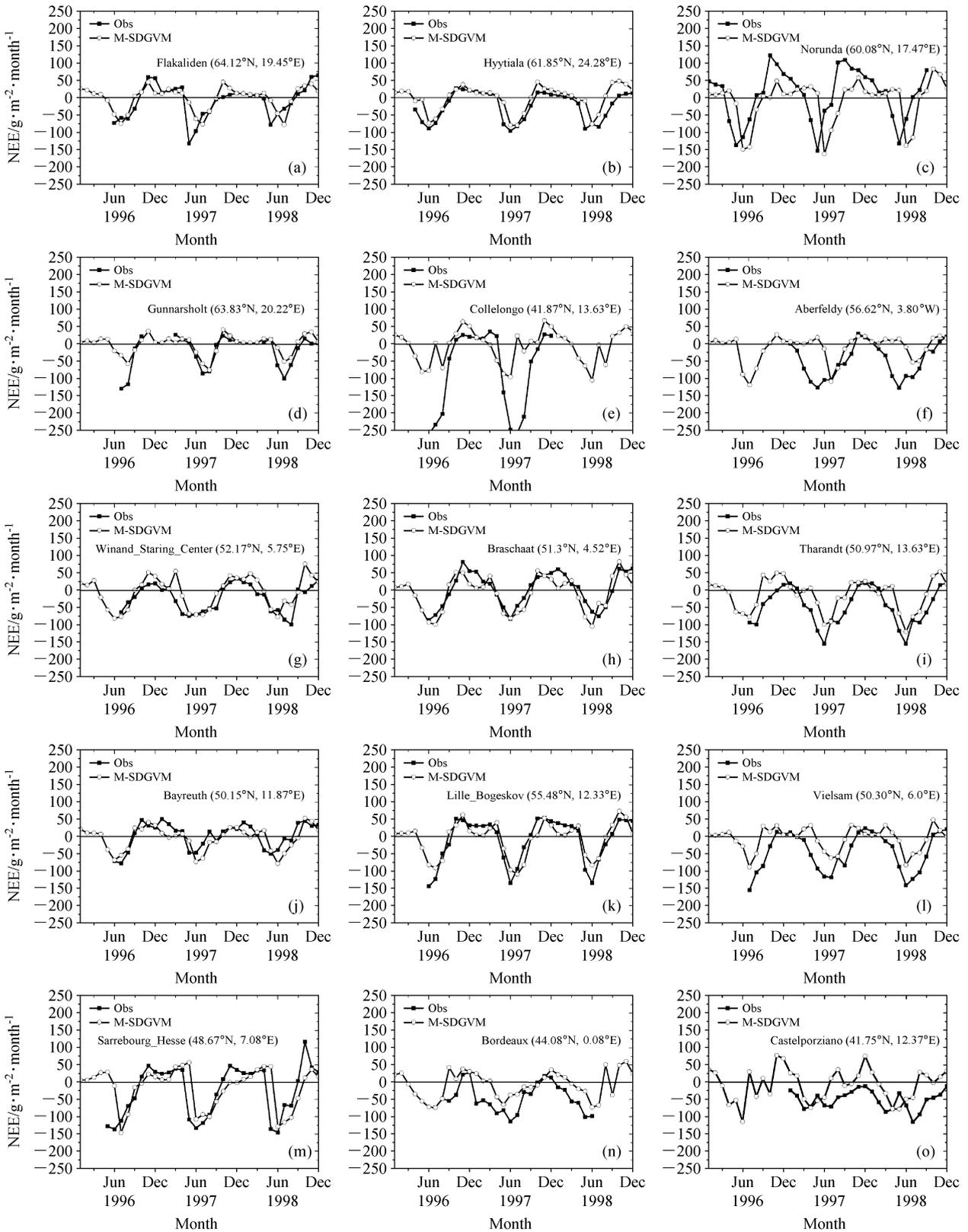


图3 观测和模拟的1996~1998年逐月二氧化碳净通量(NEE)(单位: $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$)

Fig. 3 Observed and modeled monthly mean net ecosystem exchange (NEE) from 1996 to 1998

(图 4a, 表 3), E 从 0.9169 到 -0.55678 (表 3), 均方根误差从 5.15985 mm/月变化到 18.77467 mm/月 (图 4b, 表 3)。此外, M-SDGVM 仅对 40% (6 个站) 的站点存在不同程度的偏差 (表略)。但是, 位于地中海气候区域内的 Castelporzi-

ano 站, R 值和 E 值仅为 0.19629 和 -0.55678 , 偏差相对明显。但总的来说, 模型对实际蒸发的模拟较为成功, 能够模拟出 15 个森林生态系统夏季的最大蒸发散量和秋、冬季最小的水汽释放。

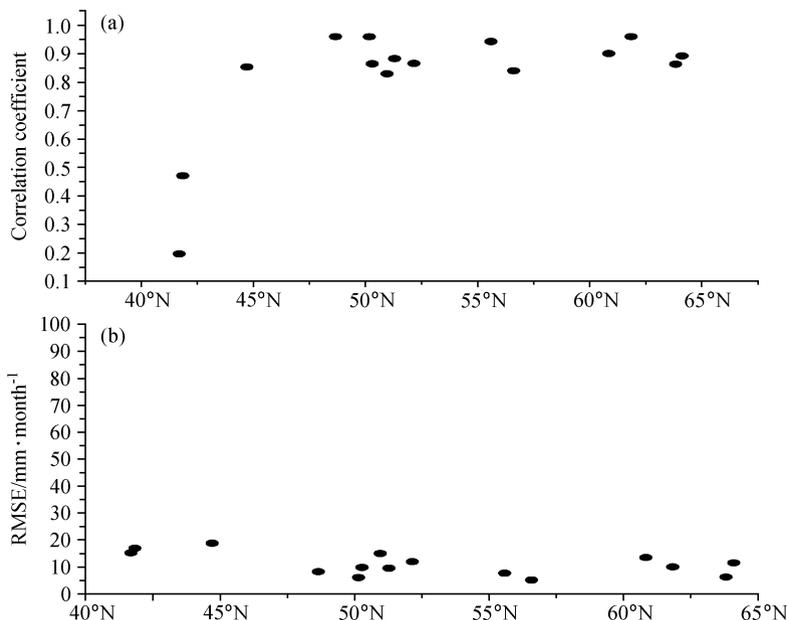


图 4 同图 2, 但为模拟与观测的实际蒸发散 (AET) 相关系数 (a) 和模拟的实际蒸发散的均方根误差 (b)

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for (a) correlation coefficients between the simulated and observed actual evapotranspiration and (b) root mean square errors of the simulated actual evapotranspiration

表 3 模型模拟的所有站点实际蒸发散 (AET) 性能随纬度变化

Table 3 Performances of models predictions of actual evapotranspiration along the latitude across all sites

纬度 (°N)	站名	斜率	截距	相关系数	偏差	绝对偏差	均方根误差	模拟效率
41.7	CA	0.14247	22.45017	0.19629	-8.37917	14.25417	15.21139	-0.55678
41.85	CO	0.39931	24.29017	0.47088	8.59421	19.12684	16.9301	-0.0654
44.72	BO	0.58918	7.54159	0.85292	-14.48208	16.70708	18.77467	0.50473
48.67	SA	0.97077	0.38062	0.95916	-0.52063	6.46	8.24663	0.9169
50.17	BA	0.89652	-0.26083	0.95882	-2.90774	5.22903	6.07645	0.89881
50.3	VI	0.89396	1.66481	0.86402	-0.721	6.67033	9.80829	0.71613
50.97	TH	0.96664	-3.32641	0.82866	-4.51433	11.937	14.96246	0.53744
51.3	BR	0.90416	0.05841	0.88192	-2.27067	7.47667	9.55977	0.74526
52.17	WI	0.96285	-8.05257	0.86484	-9.28633	11.665	11.95699	0.36909
55.6	SO	0.89196	-0.43513	0.94197	-3.025	5.99812	7.64699	0.86908
56.6	AB	0.85974	2.03228	0.83924	-0.21	5.36667	5.15985	0.66966
60.85	NO	0.87317	-3.66156	0.89967	-7.66424	9.97212	13.49558	0.72228
61.85	HY	0.74252	0.2872	0.95935	-6.25061	6.9403	9.97749	0.82193
63.83	GU	0.85887	0.40034	0.86288	-2.06609	21.92348	6.26422	0.57106
64.12	FL	0.64632	2.00929	0.89159	-5.61452	8.86806	11.51681	0.70724

注: 截距、偏差、绝对偏差、均方根误差的单位为 mm/月。

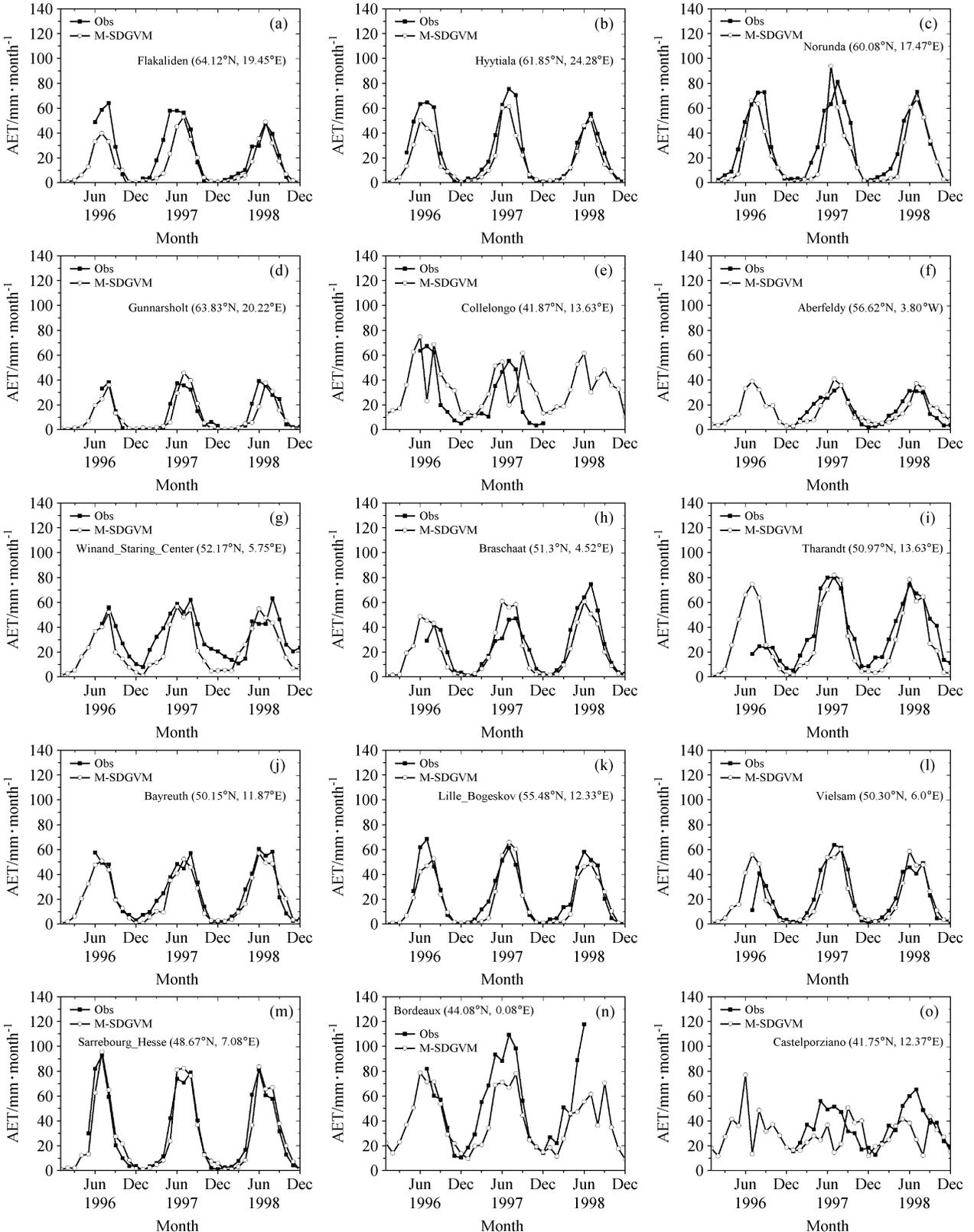


图 5 同图 3, 但为逐月实际蒸散发 (AET) (单位: mm/月)

Fig. 5 Observed and modeled monthly mean actual evapotranspiration (AET) from 1996 to 1998

图 5 给出了每个站点、不同类型生态系统 AET 观测值与模拟值的比较。三个北方针叶林生态系统中 (图 5a~c), 模型在 1996 年和 1997 年均低估了 Flakaliden 站和 Hyytiaala 站的水汽释放。其中, 在 Flakaliden 站 (图 5a), 1996 年模拟的最大实际蒸发散低于观测值, 而 1997 年夏季, 虽然模拟的最大实际蒸发散量级同观测相当, 但是, 由于模拟的夏季生长季开始时间滞后于观测的生长季开始时间, 模型模拟的最大实际蒸发散出现在 7 月份。在 Hyytiaala 站 (图 5b), 模型则均低估了头两年的最大实际蒸发散。但是, 在 1998 年, 模型对两个站的模拟都非常成功 (图 5a、b)。此外, 对另一个北方针叶林森林生态系统 Norunda 站 (图 5c), 模型模拟的结果则相对理想。

对温带北方落叶林生态系统 Gunnarsholt 站 (图 5d), 模型模拟同观测结果比较接近, 相关系数达 0.86288, 模型模拟效率 (E) 为 0.57106 (>0.5), 而均方根误差仅为 6.26422 mm/月 (表 3)。

对年平均降水较多而年平均温度较低的山地落叶林 Collelongo 站, M-SDGVM 模拟的 1996 和

1997 年最大实际蒸发散量级与观测相当 (图 5e), 但是, 由于模型对逐月降水异常较为敏感 (图略), 使得模型在一年内模拟出两次最大值。同样的现象也存在于 LPJ-GUESS 和 RHESys 模型的模拟结果中 (图 4e, 见文献[22])。

模型能够合理模拟出 5 个温带针叶林生态系统水汽通量的季节变化 (图 5f~j)。对 5 个站点冬季 (11~1 月份) 水汽通量变化的模拟, 除 Winand 站外, 其他几个站都模拟得相对较好。根据观测, Winand 站 (图 5g) 在冬季仍有大量的水汽通量输入大气, 而 M-SDGVM 模型以及参加比较计划的其他模型, 都没能很好地抓住这一过程, 均低估了该站冬季的水汽释放。此外, 由图 5h 可知, 位于温带针叶林生态系统的 Braaschaat 站, 1996~1998 年观测的水汽通量年际变化很大, 模型虽然抓住了这一特征, 但是与观测相比, 模拟的最大水汽释放量值仍存在偏差。与其他模型在 Tharandt 站模拟的结果进行比较可以发现, M-SDGVM 对实际蒸发散的模拟值与观测值对应的最好 (图 5i), R 值和 E 值分别都达到了为 0.82866 和 0.53744 (表 3), 而

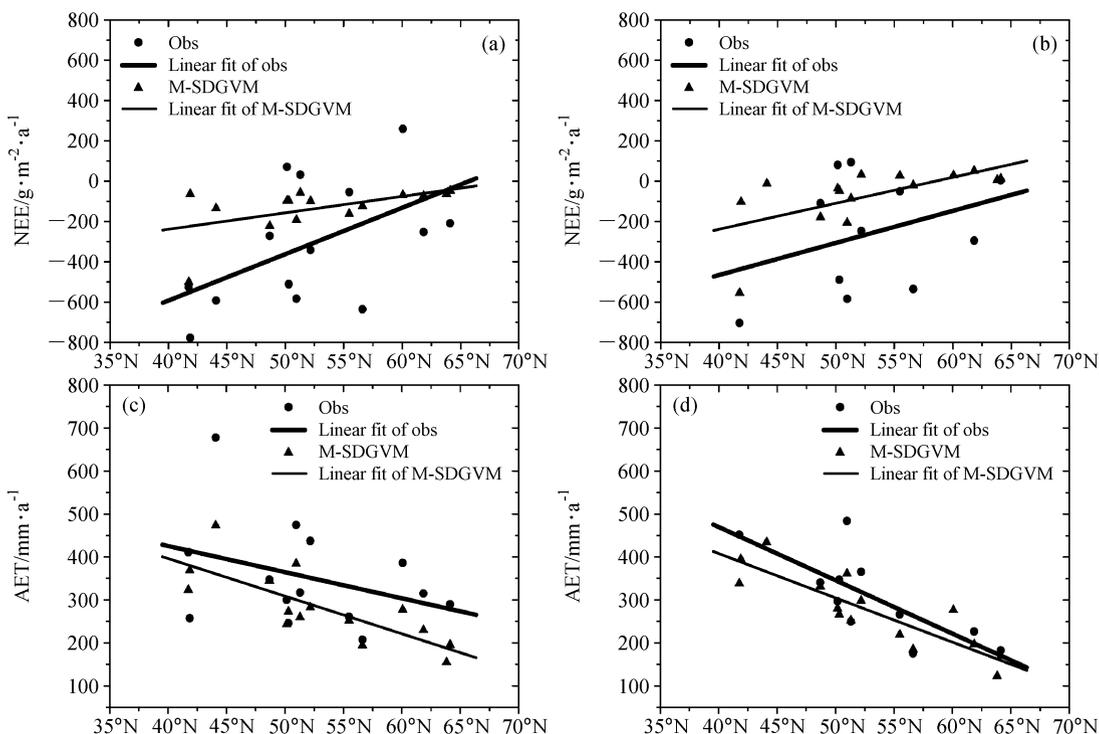


图 6 观测和模拟的所有森林站 1997 年 (a、c) 和 1998 年 (b、d) 逐年二氧化碳净通量总量 (NEE) (a、b) 和实际蒸发散总量 (AET) (c、d) 随纬度的分布

Fig. 6 The observed and modeled annual mean net ecosystem exchange (a, b) and actual evapotranspiration (c, d) along the latitude across all sites in 1997 (a, c) and 1998 (b, d)

其他模型则高估了此站的水汽碳释放(图 5d, 见文献[22])。

M-SDGVM 对三个温带落叶林实际蒸发散季节变化趋势的模拟都比较理想(图 5k~m), 模拟值同观测值相关系数以及模拟效率(表 3)都非常高, 其中在 Sarrebourg 站, 模拟的 R 值和 E 值分别高达 0.95916 和 0.9169(表 3), 而均方根误差仅为 8.24663 mm/月。然而, 在 1996 年夏季, 模型高估了 Soroe 和 Vielsam 站的水汽释放(图 5k、l)。对位于海边地中海区域的两个常青森林 Bordeaux 和 Castelporziano 站(图 5n、o), 模型则低估了夏季的水汽释放通量。

3.3 对年总碳吸收和实际蒸发散的模拟

观测的 15 个森林站在 1997 年最大碳吸收为 $778.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 最大碳释放为 $258.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 1998 年的二氧化碳最大碳吸收和最大碳释放为 $703.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $95 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 6a、b)。模拟的 1997 年最大碳吸收为 $501.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 最大碳释放为 $47.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 1998 年的最大碳吸收和最大碳释放分别为 $553.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $51.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 6a、b)。虽然 M-SDGVM 模拟的年总碳吸收和年总碳释放偏低, 但是, 1997 和 1998 年所模拟的净碳通量线性变化趋势同观测相近, 均有随纬度增加而碳吸收不断降低的趋势, 其中, 1998 年模拟的碳吸收减小的趋势同观测更为接近。

观测的 1997 年最大水汽释放为 677.49 mm/a, 最小水汽释放为 207.52 mm/a, 1998 年水汽释放的最大、最小值分别为 484.07 mm/a 和 176.17 mm/a(图 6c、d)。而模拟的 1997 年最大水汽释放为 472.9 mm/a, 最小水汽释放为 155 mm/a, 1998 年水汽释放的最大、最小值分别为 434.5 mm/a、123.2 mm/a(图 6c、d)。模型在 1997 和 1998 年都能模拟出各站实际蒸发散总量随纬度增加而不断递减的趋势, 尤其在 1998 年, 这种递减的趋势同观测更为接近。

4 主要结论及讨论

通过以上的各种比较可以发现, 在大部分站点, M-SDGVM 都能较好地模拟 1996~1998 年 15 个欧洲森林站碳通量和水汽通量的季节和年际变化趋势, 对水汽通量的模拟更为理想。总的来说, 模

型能够合理地再现各个站点在春、夏季节碳的吸收和秋、冬季节碳的释放, 以及水汽释放的季节变化。对模型的上述适应性评估研究表明, 改进后的 M-SDGVM 模型有能力研究不同气候条件下欧洲森林生态系统碳、水循环过程及其响应机制。但是, 模型对部分站点的模拟仍存在不确定性, 通过对这些偏差及其可能的产生机理进行分析, 有助于模型的进一步发展和应用研究。

M-SDGVM 对针叶林二氧化碳净通量的模拟较为成功, 原因是模型对这类常青树种物候过程处理得较好。但是在 Aberfeldy 站, 模型模拟的生长季偏短, 全年碳吸收总量模拟偏低, 估计这种偏低的另一原因可能是, 模型模拟的夏季光合作用总量(Gross Primary Production, GPP)由于受土壤含水量偏低的限制, 导致该针叶林系统对碳的吸收整体偏低。模型对山地落叶林(Collelongo)和地中海常青林(Castelporziano)的碳吸收模拟偏低, 蒸发散季节变化趋势的模拟也不很理想。在夏季, 模型明显低估了山地落叶林 Collelongo 站的碳吸收, 这种低估原因可能是: 该站在夏季降水较少的情况下, 仍能够通过较深层次的根吸收水分继续进行光合和蒸腾作用, 而模型对该站的模拟过程中, 由于缺少观测的根廓线分布信息, 所以难以将这一机理模拟出来。在 Castelporziano 站, 实际观测表明, 该常青林在冬季仍能继续进行光合作用, 而模拟结果却在冬季的大部分时间都释放碳。模型在此站对土壤呼吸的过高估计, 以及对光合总量的偏低模拟是造成这种低估的可能原因。位于海边的 Bordeaux 站, 模型在夏季模拟的碳吸收以及实际蒸发散都相对于观测偏低, 原因可能是在夏季模拟的植被叶面积指数比观测偏低, 导致总的碳吸收和冠层的蒸腾、蒸发偏小。

M-SDGVM 对部分站点碳、水通量模拟的偏差还可能由气象输入场的偏差造成的。在本文模拟中, 所有气象场, 包括: 降水, 温度, 最大、最小温度, 相对湿度等, 都是由月平均 CRU 资料通过“天气发生器”插值成逐日的气象输入场, 而这种插值后的逐日气象场与该站的观测资料仍存在一定偏差。例如, 山地落叶林 Collelongo 站, 1996 年夏季和 1997 年冬季观测的降水都比 CRU 资料强, 其中在 1997 年冬季, 最大降水观测值为 500 mm 左右, 而 CRU 降水仅为 150 mm 左右, 平均气温也比

CRU 温度偏低 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ (图略)。因此, 这种气象输入场的偏差也是模型模拟和观测之间偏差的重要来源。此外, 模型的模拟和校验过程中, 因缺少足够的植被和土壤碳、水和营养等状态变量的观测信息, 如冠层截留降水量、土壤水分含量季节变化、土壤碳库和氮库大小; 缺少站点的火灾、虫灾以及人类活动的信息; 缺乏理想的数据缺测填补方法, 以及模型自身的物理、生理参数化过程仍不成熟等原因, 都会给模型模拟结果造成更多的不确定性。

致谢 英国谢菲而德大学 (University of Sheffield, UK) F Ian Woodward 教授和 Mark L M 博士对 SDGVM 和 M-SDGVM 模型的调试和应用均提出许多宝贵建议和热情帮助, 在此表示感谢!

附录

以下方程中, O_i 代表观测值, P_i 代表模拟值, \bar{O} 代表观测值的平均, \bar{P} 代表预报值的平均, n 为样本数目。

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i), \quad (1)$$

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|, \quad (2)$$

以上的偏差 (B) 能够直观地提供预报结果偏高或偏低的趋势, 绝对偏差 (A) 用于研究预测值较观测值的偏离程度, 而均方根误差 (S) 则用于研究模拟结果的平均偏差, 计算方程如下:

$$S = \frac{100}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}. \quad (3)$$

在本文, 均方根误差表示为百分比, 即: $S \times \bar{O}/100$ 。

模型模拟效率 (E) 由以下方程计算:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2}, \quad (4)$$

E 值的范围从 1 到负无穷大, E 值为 1 代表模拟与观测值相同。

平均偏差 (M) [37] 用于检验模拟值是系统性偏低或偏高:

$$M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}. \quad (5)$$

平均偏差 (M) 又进一步可以与 t 相联系:

$$t = \frac{M}{s_d/\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2/n}}{s_d/\sqrt{n}}}, \quad (6)$$

其中,

$$s_d^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - M)^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n ((O_i - P_i) - (\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2/n))^2}{n-1}, \quad (7)$$

d_i 为观测值与模拟值之间的偏差。通过比较平均偏差 (M) 与某个信度范围内的 t 值, 则可以检验模型模拟相对于观测的偏差是否在统计上显著^[22, 38]。

参考文献 (References)

- [1] 王绍武. 气候系统引论 (第一版). 北京: 气象出版社, 1994. 250pp
Wang Shaowu. *Introduction of Climate System* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1994. 250pp
- [2] IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wgl/index.html
- [3] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 等. 中国气候与环境演变评估 (I): 中国气候与环境变化及未来趋势. 气候变化研究进展, 2005, **1** (1): 4~9
Qin Dahe, Ding Yihui, Su Jilan, et al. Assessment of climate and environment changes in China (I): Climate and environment changes in China and their projection. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 2005, **1** (1): 4~9
- [4] 方精云, 唐艳鸿, 林俊达, 等. 全球生态学——气候变化与生态响应. 北京: 高等教育出版社, 2000. 326pp
Fang Jingyun, Tang Yanhong, Lin Junda, et al. *Global Ecology—Climate Change and Ecological Responses* (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2000. 326pp
- [5] 陈洋勤, 黄耀, 于贵瑞. 地球系统碳循环. 北京: 科学出版社, 2004. 585pp
Chen Panqin, Huang Yao, Yu Guirui. *Carbon Cycles in the Earth System* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2004. 585pp
- [6] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 等. 亚洲区域陆地生态系统碳通量观测研究进展. 中国科学 (D辑), 2004, **34**: 15~29
Yu Guirui, Zhang Leiming, Sun Xiaomin, et al. Advances in carbon flux observation and research in Asia. *Science in China* (Ser. D) (in Chinese), 2004, **34**: 15~29
- [7] 孙菽芬. 陆面过程的物理、生化机理和参数化模型. 北京: 气象出版社, 2005. 307pp
Sun Shufen. *Parameterization Study of Physical and Biochemical Mechanism in Land Surface Process* (in Chinese).

- Beijing: China Meteorological Press, 2005. 307pp
- [8] 彭少麟, 张桂莲, 柳新伟. 生态系统模拟模型的研究进展. 热带亚热带植物学报, 2005, **13** (1): 85~94
Peng Shaolin, Zhang Guilian, Liu Xinwei. A review of ecosystem simulation models. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (in Chinese), 2005, **13** (1): 85~94
- [9] 曹明奎, 李克让. 地球科学进展, 2000, **15** (4): 446~452
Cao Mingkui, Li Kerang. Perspective on terrestrial ecosystem - climate interaction. *Advances in Earth Sciences* (in Chinese), 2000, **15** (4): 446~452
- [10] 郭建侠, 卞林根, 戴永久. 在华北玉米生育期观测的 16 m 高度 CO₂ 浓度及通量特征. 大气科学, 2007, **31** (4): 695~707
Guo Jianxia, Bian Lin'gen, Dai Yongjiu. Measured CO₂ concentration and flux at 16 m height during corn growing period on the North China plain. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (4): 695~707
- [11] 毛嘉富, 王斌, 丹利, 等. 新一代格点大气环流模式与陆面生态模式 AVIM 的耦合研究. 大气科学, 2005, **29** (6): 897~910
Mao Jiafu, Wang Bin, Dan Li, et al. Coupling of an Atmosphere - Vegetation Interaction Model (AVIM) to a new generation grid point atmospheric general circulation model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (6): 897~910
- [12] 毛留喜, 孙艳玲, 延晓冬. 陆地生态系统碳循环模型研究概述. 应用生态学报, 2006, **17** (11): 2189~2195
Mao Liuxi, Sun Yanling, Yan Xiaodong. Modeling of carbon cycling in terrestrial ecosystem; A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 2006, **17** (11): 2189~2195
- [13] Cramer W, Bondeau A, Woodward F I, et al. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: Results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 2001, **7**: 357~373
- [14] Prentice I C, Bondeau A, Cramer W, et al. Dynamic global vegetation modeling; Quantifying terrestrial ecosystem responses to large-scale environmental change. *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*, Canadell J G, Pataki D E, Pitelka L F, Eds. Berlin: The IGBP Series, Springer-Verlag, 2006. 336pp
- [15] 毛嘉富, 王斌, 戴永久. 陆地生态系统模型及其与气候模式耦合的回顾. 气候与环境研究, 2006, **11** (6): 763~771
Mao Jiafu, Wang Bin, Dai Yongjiu. Perspective on terrestrial ecosystem models and their coupling with climate system models. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (6): 763~771
- [16] Foley J A, Levis S, Costa M H, et al. Incorporating dynamic vegetation cover within global climate models. *Ecological Applications*, 2000, **10** (6): 1620~1632
- [17] Cox P M, Betts R A, Jones C D, et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 2000, **408**: 184~187
- [18] Peng C H. From static biogeographical model to dynamic global vegetation model; A global perspective on modelling vegetation dynamics. *Ecological Modelling*, 2000, **135**: 33~54
- [19] <http://daad.esd.ornl.gov/FLUXENT>
- [20] Baldocchi D, Falge E, Gu L, et al. Fluxnet: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2001, **82**: 2415~2434
- [21] Valentini R. *Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. 260pp
- [22] Morales P, Skies M T, Prentice I C, et al. Comparing and evaluating process-based ecosystem model predictions of carbon and water fluxes in major European forest biomes. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 2211~2233
- [23] Woodward F I, Lomas M R. Vegetation dynamics—simulating responses to climatic change. *Biological Reviews*, 2004, **79**: 643~670
- [24] Mao Jiafu, Wang Bin, Dai Yongjiu, et al. Improvements of a dynamic global vegetation model and simulations of carbon and water at an upland-oak forest. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, **24**: 311~322
- [25] 毛嘉富. Sheffield 动态全球植被模型的改进及应用研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2006
Mao Jiafu. Improvements and applications of the Sheffield dynamic global vegetation model. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. 2006
- [26] Leuning R, Moncrieff J. Eddy-covariance CO₂ flux measurements using open- and closed-path CO₂ analysers: Corrections for analyser water vapour sensitivity and damping of fluctuations in air sampling tubes. *Bound.-Layer Meteor.*, 1990, **53**: 63~76
- [27] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for long term energy flux data sets, a short communication. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, **107**: 71~77
- [28] Mitchell T D, Jones P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.*, 2005, **25**: 693~712
- [29] Kichlighter D W, Bruno M, Donges S, et al. A first-order analysis of the potential role of the potential role of CO₂ fertilization to affect the global carbon budget; A comparison of four terrestrial biosphere models. *Tellus*, 1999, **51B**: 343~366
- [30] Gracia C A, Tello E, Sabaté S, et al. GOTILWA: An integrated model of water dynamics and forest growth. *Ecology*

- of *Mediterranean Evergreen Oak Forests*, Rodà F, Reàtana J, Gracia C A, et al., Eds. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 163~180
- [31] White M A, Thornton P E, Running S W, et al. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: Net primary production controls. *Earth Interactions*, 2000, **4**: 1~85
- [32] Beven K, Kirkby M J, Schoffield N, et al. Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three UK catchments. *J. Hydrol.*, 1984, **69**: 119~143
- [33] Smith B, Prentice I C, Sykes M T. Representation of vegetation dynamics in the modelling of terrestrial ecosystems; Comparing two contrasting approaches within European climate space. *Global Ecology and Biogeography*, 2001, **10**: 621~637
- [34] Hickler T, Smith B, Sykes M T, et al. Using a generalized vegetation model to simulate vegetation dynamics in north-eastern USA. *Ecology*, 2004, **85**: 519~530
- [35] Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudré N, et al. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**: GB1015, doi: 10.1029/2003GB002199
- [36] Hanson P J, Amthor J S, Wullschleger S D, et al. Oak forest carbon and water simulations: Model intercomparisons and evaluations against independent data. *Ecological Monographs*, 2004, **74** (3), 443~489
- [37] Addiscott T M, Whitmore A P. Computer simulation of changes in soil mineral nitrogen and crop nitrogen during autumn, winter and spring. *Journal of Agricultural Sciences*, 1987, **109**: 141~157
- [38] Smith P, Smith J U, Powlson D S, et al. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using seven long-term experimental datasets. *Geoderma*, 1997, **81**: 153~225