

遥感数据结合 Biome-BGC 模型估算黄淮海地区 生态系统生产力

胡波^{1,2,3,4}, 孙睿^{1,2,3*}, 陈永俊^{1,2,3}, 冯丽超^{1,2,3}, 孙亮^{1,2,3}

(1. 遥感科学国家重点实验室(北京师范大学/中国科学院 遥感应用研究所), 北京 100875;

2. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 3. 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875;

4. 宁波市气象局, 浙江 宁波 315012)

摘要: 植被净生态系统生产力(NEP)和净第一性生产力(NPP)作为表征植被活动的关键变量,在全球变化研究及区域生态环境评价中起着很重要的作用。Biome-BGC 是一个模拟生态系统植被和土壤中的能量、水、碳、氮的流动和存储的生物地球化学循环模型。论文利用 2004 年时间序列 MODIS LAI 遥感产品和气象数据,对黄淮海地区的 NEP 和 NPP 进行了模拟估算,由于 Biome-BGC 模型没有农作物生理生态参数,农作物模拟通过修改草地生理生态参数,并在增加施肥、灌溉和收割代码基础上实现。结果表明,2004 年黄淮海地区 NEP、NPP 呈现南部大于北部的空间分布特征;不同植被类型平均 NEP 和 NPP 大小顺序分别为:混交林>落叶阔叶林>常绿针叶林>农作物>灌木>草地、混交林>农作物>落叶阔叶林>常绿针叶林>灌木>草地;与观测数据、MODIS NPP 产品和统计数据进行对比,表明 Biome-BGC 模型可较好用于区域植被生产力的模拟,农作物模拟结果与统计数据的决定系数达到 0.612 3,且模拟得到的黄淮海地区农作物 NPP 比 MODIS NPP 产品更接近统计值。

关键词: 净生态系统生产力;净初级生产力;Biome-BGC 模型;MODIS LAI;黄淮海地区

中图分类号: Q148

文献标志码: A

文章编号: 1000-3037(2011)12-2061-11

植被作为陆地生态系统中的重要组分和核心环节,在地表与大气之间能量、物质与动量交换中扮演着非常重要的角色^[1],植被净生态系统生产力(Net Ecosystem Production, NEP)和净第一性生产力(Net Primary Productivity, NPP)作为表征植被活动的关键变量,对其准确估计不但有助于了解全球碳循环,也有助于定量了解区域生态资产,为我国制定有关生态政策,应对全球变化及合理开发利用自然资源提供科学依据。

基于陆地生态系统生产力的重要性,国内外许多科学家在这个领域进行了广泛的研究。其中通过建立模型进行植被生产力模拟估算是主要的研究方法之一。NPP 模型包括气候相关模型、光能利用率模型和过程模型^[2-5]。过程模型建立在人们对生态系统过程机制理解基础上,是揭示生物生产力形成、植被与环境相互作用机制,以及探索生态系统对气候变化响应的重要工具。Biome-BGC 模型^[6]、TEM 模型^[7]、CASA 模型^[8-9]、SiB3 模型^[10-11]等都是过程模型。Biome-BGC 是一个以日为步长模拟陆地生态系统植被和土壤中的能量、水、碳、氮的流动和存储的生物地球化学循环模型^[6],可以比较好地模拟 NPP 与 NEP, Thornton

收稿日期: 2010-11-29; 修订日期: 2011-08-04。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40971221, 40501045);北京市重点实验室共建项目(000-105803)。

第一作者简介: 胡波(1983-),男,湖北武汉人,硕士,主要研究应用气象与遥感。E-mail: hbhutaog@gmail.com

* 通信作者简介: 孙睿(1970-),男,甘肃通渭人,教授,博士生导师,主要从事全球变化与遥感应用研究。E-mail: sunrui@bnu.edu.cn

等^[12]利用该模型对美国西部 7 种常绿林的碳通量进行了模拟,Turner 等^[13]也利用 Biome-BGC 模型和由 TM 数据生成的土地覆盖数据模拟分析了美国西部不同植被 NEP 的年际变化。卫星遥感不仅可以提供土地覆盖数据,还可以提供遥感资料反演的植被参数,如叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)、归一化植被指数(Normalised Difference Vegetation Index, NDVI)等,为更加准确地模拟区域生态系统生产力提供保障。目前,将遥感反演的植被参数与过程模型结合模拟区域 NPP 的相关研究较多^[5-6],但模拟区域 NEP 的相关研究比较少。本文利用 2004 年的 MODIS LAI 遥感产品,在 Biome-BGC 过程模型基础上进行黄淮海地区 NEP 和 NPP 的模拟,探索 Biome-BGC 模型结合遥感数据进行区域生产力研究的可行性。

1 观测区域及数据

黄淮海平原土地面积约占全国平原面积的 30%^[14],是“北粮南调”的重要农产品基地。本文研究区选择黄淮海平原及其周边地区,包括北京、天津、山东、山西、河北、河南、安徽和江苏 8 省(市),范围为 29°~42°N、110°~122°E,植被类型主要包括落叶阔叶林、常绿针叶林、混交林、灌木丛、草地、农田等(如图 1)。

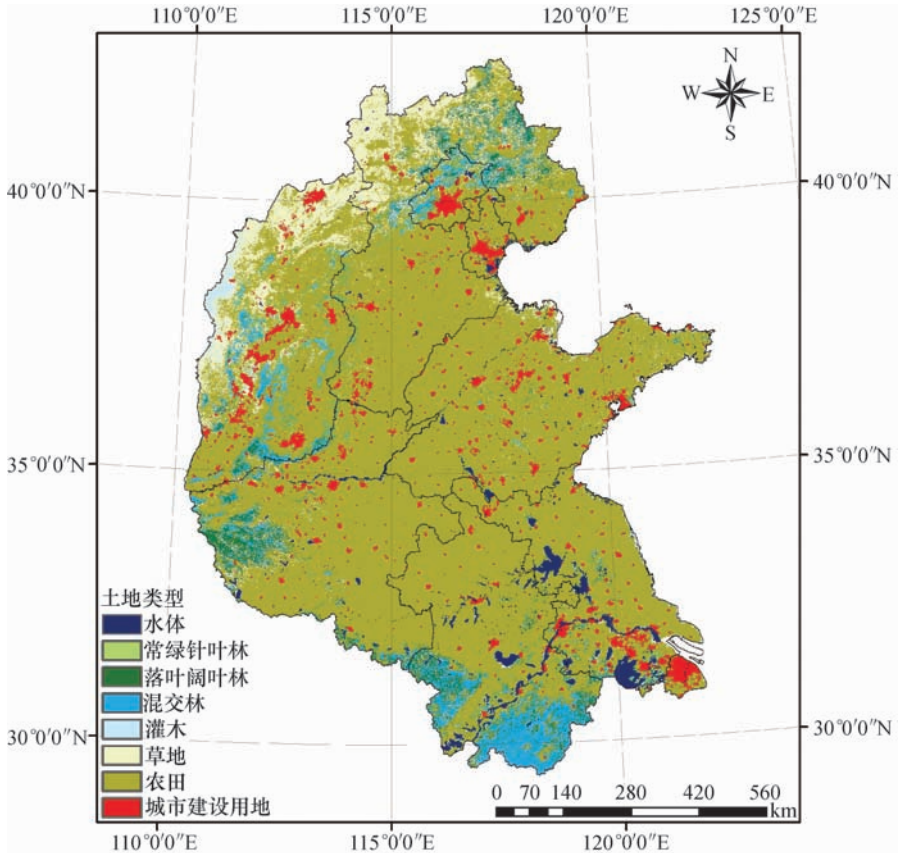


图 1 2004 年黄淮海地区 EOS-MODIS 土地类型分布

Fig. 1 EOS-MODIS land cover map in the Huang-Huai-Hai Region in 2004

模型输入数据包括气象数据、1:14 000 000 全国土壤质地图^[15]、中国农业物候图^[16]、美国 NASA 的 1 km 分辨率 SRTM DEM 数据、1 km 分辨率的 MODIS LAI 和土地覆盖产品(图

1),其中全国土壤质地图和中国农业物候图数字化后采样成 1 km 栅格图像,LAI 数据采用 2004 年 MODIS 每 8 天合成的 LAI 产品,全年共 46 个时相。由于受天气影响,LAI 产品中部分数据仍未完全消除云层的影响,为了得到更加合理的时间序列 LAI 数据,笔者采用 Chen 等^[17]的局部三次样条采样方法,经过数据插补及平滑处理,最后得到 2004 年黄淮海地区 LAI 逐日数据。

所用到的气象数据包括黄淮海及其相邻地区的 239 个气象台站 2004 年日最高气温、日最低气温和日降水量数据(国家气象局气象资料室提供)。1 km 分辨率降水格网数据直接利用克里金法插值得到。气温在插值时参考了文献[18]的研究结果,对高程的影响进行了订正:①根据气温递减率表^[18]、气象站点所处类型区域及观测时间,将站点温度转换为海平面气温;②利用克里金插值法对海平面气温进行空间插值,生成 1 km 分辨率的海平面高度日最高气温和日最低气温分布图;③通过气温递减率分布图和 DEM 将海平面高度日最高气温和日最低气温分布图转换为实际海拔高度日最高气温和日最低气温分布图。在 239 个气象台站中,春季型、夏季型、秋季型和冬季型的台站个数分别为 29、150、52、8 个。

利用山地小气候模拟模型^[19](Mountain Microclimate Simulation Model, MTCLIM),由日最高温度、日最低温度、日降水量、DEM、坡度、坡向和纬度数据,计算得到 Biome-BGC 模型所需的每日白天平均温度、日短波辐射和白天水汽压差。其中坡度和坡向数据由 DEM 在 ENVI 中计算得出。

2 研究方法

2.1 模型简介

Biome-BGC 模型考虑了碳、水和能量在生态系统中输送通量的计算方法,主要用来模拟三个关键循环:碳、水和氮循环^[6],是估算生态系统生产力的重要方法。模型主要驱动数据和参数包括 3 部分:①初始化文件,主要包括研究区的经纬度、海拔、土壤有效深度、土壤质地、大气 CO₂浓度、植被类型、土壤初始碳氮含量以及输入输出文件的设定等;②以日为步长的气象数据,包括最高温、最低温、白天平均温、降水、饱和水汽压差、太阳辐射等;③生理生态参数,包括 44 个参数,如叶片 C:N 比、细根 C:N 比、气孔导度、冠层消光系数、冠层比叶面积、羧化酶中叶氮百分含量等。输出包括总初级生产力(GPP)、净初级生产力(NPP)、净生态系统生产力(NEP)等,其中, $NPP = GPP - \text{自养呼吸}(R_a)$, $NEP = NPP - \text{异养呼吸}(R_h)$ 。

2.2 Biome-BGC 模型修改

(1) Biome-BGC 模型本身可以模拟得到 LAI 的日变化,但由于模型在模拟时只考虑气象因子,模拟的 LAI 值与地表真实值可能有较大差别,因此通过对模型代码进行修改,将 MODIS LAI 的遥感产品与模型结合,在植被生长期,用 MODIS LAI 数据代替模型模拟的 LAI 值。图 2 为 2004 年黄淮海地区 Biome-BGC 模拟得到的各植被类型平均 LAI 和对应的 MODIS LAI 日变化曲线。

(2) Biome-BGC 模型主要模拟自然植被的碳氮循环,没有专门针对农作物的生态参数,也没有考虑农作物田间管理措施。为了估算农田生态系统生产力,笔者对草地生理参数进行了修改(表 1),并简单考虑了施肥、灌溉和收割等过程的影响,以更好地模拟研究区域内主要农作物(玉米、水稻、小麦)的碳循环。植被生理参数的修改主要体现在茎秆参数(新茎与叶片含碳量比、新的活木质与总木质含碳量比)、冠层平均比叶面积等。农作物施肥效应通过假定土壤中的氮含量为一恒定值实现,以保证农作物在生长阶段不会因为缺氮影响生

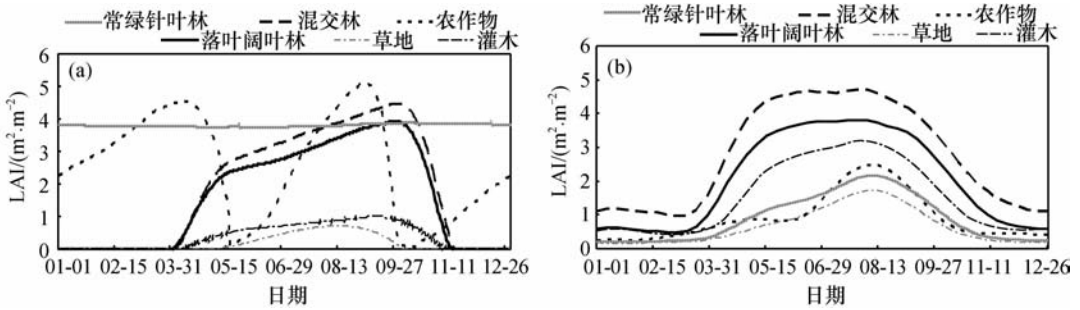


图 2 2004 年黄淮海地区 Biome-BGC 模拟的 LAI (a) 和 MODIS LAI (b) 日变化曲线

Fig. 2 The simulated daily LAI (a) by Biome-BGC and MODIS LAI (b) over the Huang-Huai-Hai Region in 2004

长, 本文取值为 0.0004 kgN/m^2 [20]。农田灌溉针对不同农作物分别处理: 冬小麦在越冬和返青期进行两次灌溉, 模拟时使土壤含水量等于土壤饱和含水量, 灌溉具体日期参见中国农业物候图 [16]; 夏玉米由于雨热同期, 在生长季雨水较多, 不考虑灌溉; 水稻模拟时, 使土壤含水量等于土壤饱和含水量。在收获期, 将农作物地上部分叶和茎的碳氮含量分别减少 80% [16], 以模拟农作物收割的影响。

2.3 模拟方案

模拟包括三个步骤。首先通过 spin-up 模拟, 生成每个像元地下部分 13 个参数的图像。然后在第一步结果基础上, 分别对草地、灌木、森林和农作物等进行第二步模拟, 生成完整的 restart 文件。其中农作物按一年两熟处理, 仅选取研究区主要农作物冬小麦、夏玉米和水稻进行模拟, 三种作物的物候期和分布范围根据《中国农业物候图集》[16] 确定。森林植被生产力模拟时, 树木年龄的影响很大。第六次全国森林资源清查 (1998—2003 年) 结果 [21] 表明, 研究区域林地以幼龄林和中龄林为主, 约占全区总林地面积的 85%, 其中幼龄林约占 51%, 中龄林约占 34%, 同时考虑到 1958—1961 年“大跃进”时期, 森林资源遭到严重破坏, 1961 年后, 国家逐步调整林业政策, 加强了森林保护和人工林建设 [22], 在没有详细的研究区林龄数据情况下, 假设研究区森林植被树木年龄都为 40 a, 在 spin-up 程序运行结果基础上再模拟 40 a, 生成新的完整的 resart 文件。最后, 在生成的 restart 文件基础上, 添加经插值平滑处理后的 2004 年 MODIS LAI 逐日数据, 继续模拟, 得到 2004 年研究区逐日 NEP、NPP 结果。表 1 中列出了部分重要的植被生理生态参数。

表 1 模型模拟各种植被类型的部分植被生理生态参数 [6, 23-26]

Table 1 Eco-physiological parameters for the Biome-BGC model

参数	常绿针叶林	落叶阔叶林	混交林	C3 草	C4 草	玉米	冬小麦	水稻	灌木
C3 PSN	1	1	1	1	0	0	1	1	1
新细根与叶片含碳量比	0.8	0.8	0.8	2.0	2.0	1.1	1.1	1.1	1.4
新茎与叶片含碳量比	2.00	2.20	2.00	0.00	0.00	1.70	1.70	1.60	0.22
新的活木质与总木质含碳量比	0.071	0.071	0.071	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
细根 C/N/(kgC/kgN)	58	48	50	42	42	85	85	85	58
死木质部分 C/N/(kgC/kgN)	730	550	600	0	0	200	200	180	730
冠层水截流系数/(1/LAI/d)	0.045 0	0.045 0	0.045 0	0.021 0	0.021 0	0.022 5	0.022 5	0.022 5	0.045 0
冠层消光系数	0.52	0.54	0.54	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.55
冠层平均比叶面积/(m ² /kgC)	12	40	35	45	45	30	35	35	15
边界层导度/(m/s)	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04	0.01	0.03	0.03	0.02

3 结果与讨论

3.1 NEP 和 NPP 空间分布规律

黄淮海地区植被 NEP、NPP 的分布见图 3。该地区植被 NEP、NPP 的分布主要受水分和光照条件的限制,总体呈从南到北递减趋势。黄淮海南部地区植被 NEP、NPP 分别在 $100 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $200 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上,山西、河北西北部等地植被的 NEP、NPP 大部分小于 $100 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $200 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在部分比较干旱的地区,如山西西北部和河北西北部地区 2004 年年 NEP 较小,该地区多为草地和灌木,且地势较高、温度较低、降水量也偏少,导致该地区有些草地和灌木的光合作用不强。

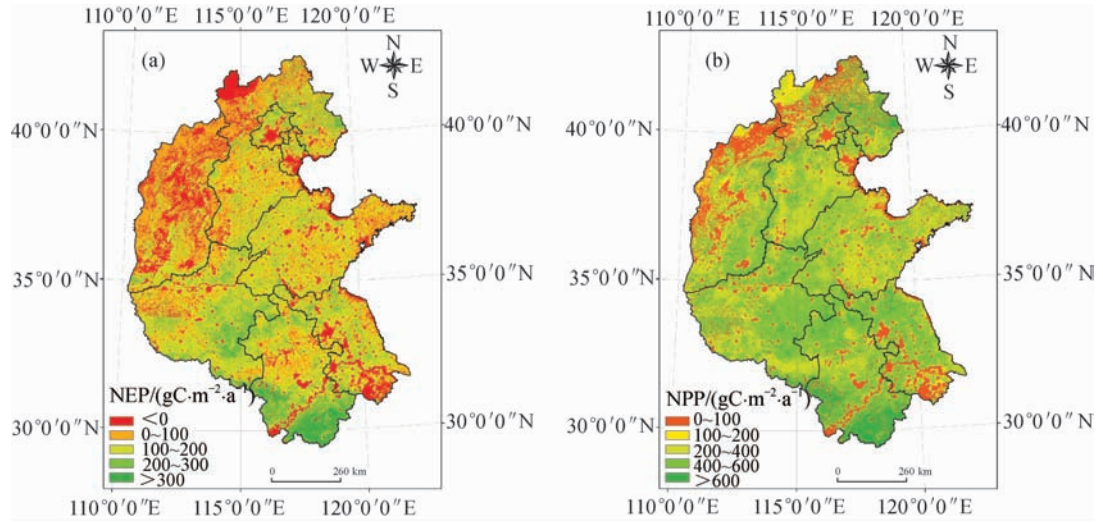


图 3 2004 年黄淮海地区年 NEP(a) 和 NPP(b) 分布

Fig. 3 The spatial pattern of NEP (a) and NPP (b) over the Huang-Huai-Hai Region in 2004

不同植被类型年 NEP 均值统计结果(表 2)表明,混交林 NEP 最大,其值为 $212 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,主要分布在安徽南部、河南西部和河北西北部地区;其次落叶阔叶林 NEP 为 $159 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;第三是常绿针叶林,NEP 比落叶阔叶林稍小,为 $158 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;农作物 NEP 位居第四,为 $122 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;灌木 NEP 较小,为 $35 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;草地 NEP 最小,其值为 $22 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,主要分布在山西和河北西北部地区。不同植被类型年 NPP 均值统计结果(表 3)表明,混交林最大,其值为 $545 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;其次是农作物 $434 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;随后是落叶阔叶林;常绿针叶林 NPP 位居第四,大小是 $371 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;灌木 NPP 较小,为 $186 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;草地 NPP 最小,其值为 $91 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

3.2 模型验证

为了验证模拟结果合理性,这里选择相近研究结果进行比较分析,表 2 和表 3 分别为不同植被类型 NEP、NPP 研究结果的比较。从表 2 可以看出,NEP 模拟结果与其他研究接近,但草地模拟结果明显比 Turner 等^[13]的模拟结果偏低,分析其原因,这可能与草地的分布区域有关,本文中草地主要分布在研究区西北部温度较低、降水较少的地区,而 Turner 等^[13]研究的是美国西部地区的大草原。模拟的落叶阔叶林 NEP 结果小于 White^[27]的模拟结果,但都在 Falge 等^[28]的实测值之间。

表 2 不同植被类型 NEP 模拟结果及实测值的比较

Table 2 Comparison between the simulated NEP and other study results for different vegetation

 $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$

植被类型	White 等 ^[27]	实测值 ^[28]	Turner 等 ^[13]	本文模拟结果	本文各种植被类型所占面积百分比/%
常绿针叶林		-146 ~ 628 ^a	105	158	1.77
针阔混交林				212	0.44
落叶阔叶林	280 ~ 340	91 ~ 757 ^b	182	159	6.62
草地		-212 ~ 538	111	22	7.64
灌丛			-10	35	5.89
农作物		-115 ~ 588	166	122	77.64

注: a 为温带针叶林; b 为温带落叶林。

表 3 不同植被类型 NPP 模拟结果及实测值的比较

Table 3 Comparison between the simulated NPP and results from other studies for different vegetation

 $(\text{g} \cdot \text{Cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$

植被类型	Melillo 等 ^[33]	Liu 等 ^[34]	孙睿等 ^[1]	实测值 ^[35]	Turner 等 ^[13]	MODIS NPP	本文模拟结果	本文各种植被类型所占面积百分比/%
常绿针叶林	276	231	529	160 ~ 680	665	279	371	1.77
针阔混交林	669	384	403	250 ~ 1 000		306	545	0.44
落叶阔叶林	763	381	460	250 ~ 700	764	252	412	6.62
草地	274		154		425	213	91	7.64
灌丛	288 *				220	227	186	5.89
农作物		433			443	126	434	77.64

注: * 干旱稀树草原(savanna)、温带稀树草原和热带稀树草原。

为了分析农田 NEP 模拟结果是否合理,对研究区域内几个观测站点的涡度相关仪碳通量观测值与相应位置 Biome-BGC 模型模拟值进行比较(表 4)。从表 4 可看出,农作物生长季 NEP 模拟结果比观测结果偏小,可能的原因主要包括:①模型本身的不足,Biome-BGC 模型没有针对农田碳通量模拟的模块,本文虽然通过对草地生态参数的修改及部分农田管理措施的简单考虑进行 NEP 与 NPP 模拟,但农作物生长过程复杂,并没有考虑干物质的分配及转移随生长发育期的变化,另外影响农田土壤呼吸的因素众多,包括土壤有机质、土壤温湿度等,农田管理措施(如施肥、灌溉、收割、翻耕等)的考虑不足也会带来一定误差;②观测尺度的不同,地面观测下垫面类型单一,NEP 观测值比较大,而 MODIS 像元内部存在非作物(如建筑物、草地等),会使得像元 NEP 比实测作物的 NEP 偏低。

表 4 黄淮海平原农田 NEP 模拟值与观测值的比较

Table 4 Comparison between simulated NEP and observations from eddy fluxes over the Huang-Huai-Hai Region

观测地点及位置	观测时间 Melillo 等 ^[33]	农作物类型	碳通量观测值 $/(\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	Biome-BGC 模拟值 $/(\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$
山东微山(36°39'N, 116°03'E)	2005—2009 年生长季	玉米	201 ~ 204 ^[29]	173.80
安徽寿县(32°33'N, 116°47'E)	2008 年返青到成熟	水稻	300 ^[30]	170.37
河南浚县(35°41'N, 114°33'E)	2004—2007 年生长季	玉米	132 ~ 313 ^[31]	197.38
山东禹城(36°57'N, 116°38'E)	2004 年生长季	玉米	165.6 ^[32]	158.60

NPP 模拟结果(表 3)除草地的模拟结果偏小外,自然植被 NPP 与其他模拟结果相近,且都在陶波等^[35]的实测值之间。图 3(b)和图 4 分别为模拟 NPP 与 2004 年 MODIS NPP 产品,可以

看出,MODIS NPP 产品总体上比 Biome-BGC 模型模拟结果小,其中农作物尤其明显(表 3),MODIS NPP 值基本在 $0 \sim 300 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,平均 NPP 只有 $126 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,小于本文模拟结果和前人研究结果。MODIS NPP 偏小的主要原因是 MOD17 算法中的最大光合有效系数偏低造成的,对于农作物尤为如此^[36],另外在农作物 NPP 估算时,由于没有考虑灌溉,会使得土壤水分校正系数偏低,也会导致 NPP 偏低。

为了进一步验证农作物 NPP 模拟结果的合理性,利用 2004 年各省(市)农作物产量统计数据^[37],与 NPP 模拟结果、MODIS NPP 做对比分析。取小麦、水稻、玉米、大豆、棉花的经济系数分别为 0.35、0.47、0.35、0.18 和 0.28^[38],风干植株含水率为 0.145^[39],

干物量与碳值的换算系数为 0.45,由统计数据得到 2004 年黄淮海地区 93 个地市(除济源,无统计数据)各自农作物全株干物重的总重量。利用行政区划图统计农作物 NPP 模拟结果,得到各地市农作物 NPP 总量。本文模拟结果与统计值的相关性更好,决定系数达到 0.612 3 [图 5(a)],且通过置信度 $\alpha=0.01$ 的显著性检验;而 MODIS NPP 与统计值的相关性较差[图 5(b)],决定系数为 0.038 8,且 MODIS NPP 比统计值偏低。从图 5(a)也可看出,模拟值相对统计值偏高,这与 EOS-MODIS 土地分类中农田面积偏大有关,EOS-MODIS

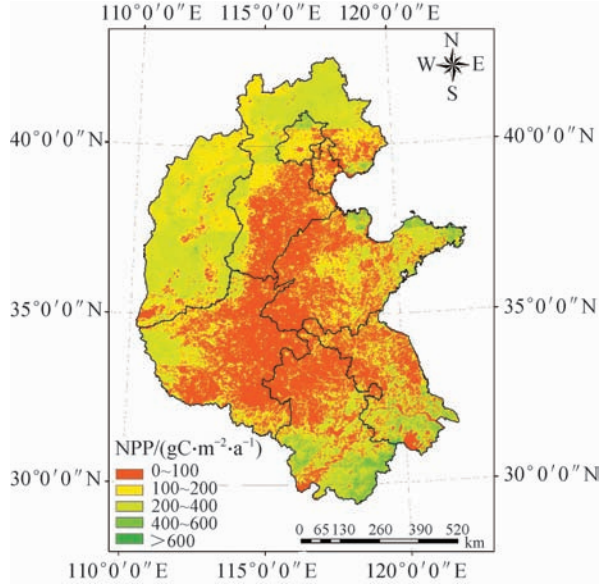


图 4 2004 年黄淮海地区 MODIS NPP 产品
Fig. 4 The product of MODIS NPP in the Huang-Huai-Hai Region in 2004

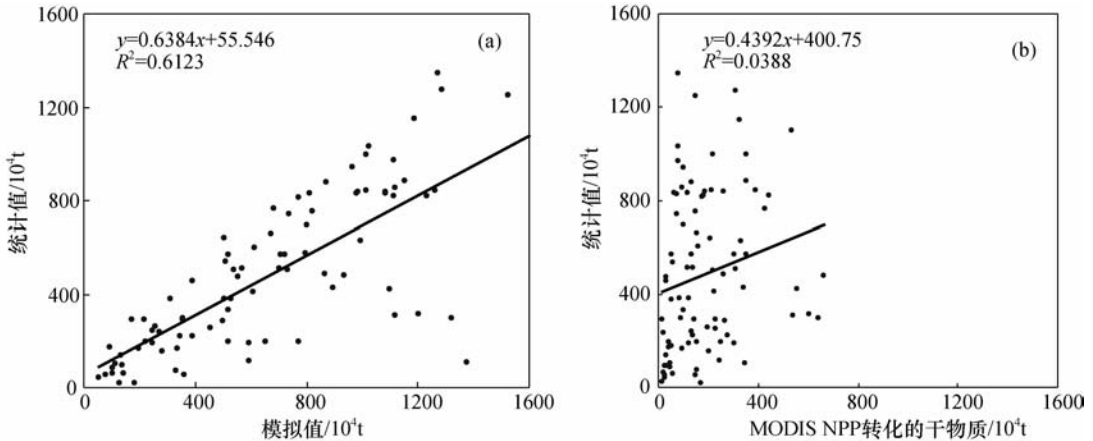


图 5 2004 年黄淮海地区地市级农作物干物重统计值和 NPP 模拟值(a)、干物质统计值与 MODIS NPP 转化的干物质(b)的比较

Fig. 5 Comparison between total crop dry weight derived from crop yield statistical data and simulated NPP (a), total crop dry weight derived from crop yield statistical data and MODIS NPP (b) in the huang-Huai-Hai Region in 2004

土地分类中农田面积为 $67\ 644.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 而 2004 年黄淮海地区各省(市)农作物播种面积为 $3\ 558.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[37]; EOS-MODIS 土地分类中农田面积偏大, 导致黄淮海地区 93 个地市模拟的 2004 年农作物 NPP 总量比实际统计值偏高。从以上分析可看出, 本文模拟得到的黄淮海地区农作物 NPP 比 MODIS NPP 产品更接近统计值。

4 结论

本文利用 Biome-BGC 模型, 结合 2004 年 MODIS LAI 产品模拟估算黄淮海地区生态系统生产力。农田生产力的模拟主要通过修改草地参数, 并简单考虑施肥、灌溉和收割等田间管理措施来实现。模拟结果表明: ①黄淮海地区 2004 年模型模拟得到的 NEP、NPP 呈现南部大于北部的空间分布特征, 南部地区植被 NEP、NPP 基本在 $100、200 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上, 北部地区除农作物外, 其余植被 NEP、NPP 大部分小于 $100、200 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; ②不同植被类型年 NEP、NPP 的大小顺序分别为: 混交林 > 落叶阔叶林 > 常绿针叶林 > 农作物 > 灌木 > 草地、混交林 > 农作物 > 落叶阔叶林 > 常绿针叶林 > 灌木 > 草地; ③与观测数据、MODIS NPP 产品和统计数据对比, 表明 Biome-BGC 模型可较好用于农田 NPP 的模拟, 模拟得到的黄淮海地区农作物 NPP 比 MODIS NPP 产品更接近统计值; 但由于 Biome-BGC 模型本身对作物生长发育过程及田间管理措施考虑不足, 异养呼吸模拟值偏大, 导致 NEP 模拟值比观测值偏低。

本文将 Biome-BGC 模型与遥感数据相结合, 尝试进行了黄淮海地区 NEP 与 NPP 的模拟, 表明 Biome-BGC 模型可以比较好地用于区域植被生产力的估算, 但不确定因素较多, 为了更准确估算植被生产力, 今后需在以下方面加以改进: ①农田生态系统生产力模拟是在修改后的草地植被生理生态参数基础上进行的, 对田间管理措施的考虑也不够全面, 今后可结合 DNDC 模型, 通过两种模型比较, 改进 Biome-BGC 模型; ②森林植被生产力模拟时, 将研究区森林取相同年龄, 这会带来一定误差, 今后可结合实际树木年龄分布图进行模拟; ③模型参数的取值对模拟结果影响很大, 本文相同类型植被取相同的参数值, 与实际情况不完全相符, 很有必要结合数据同化技术, 利用地面观测数据及遥感数据, 优化模型参数, 调整模型状态变量, 提高模拟精度。

参考文献 (References):

- [1] 孙睿, 朱启疆. 中国陆地植被第一性生产力及季节变化研究[J]. 地理学报, 2000, 55(1): 36-45. [SUN Rui, ZHU Qi-jiang. Distribution and seasonal change of net primary productivity in China from April, 1992 to March, 1993. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1): 36-45.]
- [2] 孙睿, 朱启疆. 陆地植被净第一性生产力的研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(6): 757-760. [SUN Rui, ZHU Qi-jiang. Net primary productivity of terrestrial vegetation: A review on related researches. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(6): 757-760.]
- [3] Hunt E R, Piper S C, Nemani R, et al. Global net carbon exchange and intra-annual atmospheric CO₂ concentrations predicted by an ecosystem process model and three-dimensional atmospheric transport model[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10: 431-456.
- [4] 孙睿, 朱启疆. 气候变化对中国陆地植被净第一性生产力影响的初步研究[J]. 遥感学报, 2001, 5(1): 58-61. [SUN Rui, ZHU Qi-jiang. Effect of climate change of terrestrial net primary productivity in China. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(1): 58-61.]
- [5] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型模拟估算我国植被净第一性生产力[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603-608. [PIAO Shi-long, FANG Jing-yun, GUO Qing-hua. Application of CASA model to the estimation of Chinese ter-

- restrial net primary productivity. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2001, 25(5): 603-608.]
- [6] Running S W, Hunt E R. 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 Globe*. San Diego: Academic Press, 1993.
- [7] McGuire A D, Melillo J M, Kicklighter D W, *et al.* Equilibrium responses of soil carbon to climate change: Empirical and process-based estimates[J]. *Journal of Biogeography*, 1995, 22: 785-796.
- [8] Potter C S, Randerson J T, Field C B, *et al.* Terrestrial ecosystem production: A process model based global satellite and surface data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [9] Field C B, Randerson J T, Malmstrom C M. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51: 74-88.
- [10] Baker I T, Denning A S, Hanan N, *et al.* Simulated and observed fluxes of sensible and latent heat and CO₂ at the WLEF-TV Tower using SiB2.5[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1262-1277.
- [11] Baker I T, Denning A S, Prihodko L, *et al.* Global Net Ecosystem Exchange (NEE) of CO₂ [EB/OL]. <http://www.daac.ornl.gov>. Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U. S. A. 2008.
- [12] Thornton P E, Law B E, Gholz H L, *et al.* Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 185-222.
- [13] Turner D P, Ritts W D, Law B E, *et al.* Scaling net ecosystem production and net biome production over a heterogeneous region in the western United States[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2007, 4: 1093-1135.
- [14] 侯满平. 黄淮海平原农业结构调整及农业发展战略研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004. [HOU Man-ping. Study of Agricultural Structure Adjustment and Agricultural Development Stratagem on the Huang-Huai-Hai Plain. Beijing: China Agricultural University, 2004.]
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤图集[M]. 北京: 地图出版社, 1986. [Institute of Soil Science, CAS. The Soil Atlas of China. Beijing: SinoMaps Press, 1986.]
- [16] 张福春, 王德辉, 丘宝剑. 中国农业物候图集[M]. 北京: 科学出版社, 1987. [ZHANG Fu-chun, WANG De-hui, QIU Bao-jian. The Agriculture Phenology Atlas of China. Beijing: Science Press, 1987.]
- [17] Chen J M, Deng F, Chen M Z. Locally adjusted cubic-spline capping for reconstructing seasonal trajectories of a satellite-derived surface parameter[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44: 2230-2238.
- [18] 翁鸣鸣, 孙治安. 我国山地气温直减率的初步研究[J]. 地理研究, 1984, 3(2): 24-34. [WENG Du-ming, SUN Zhi-an. A preliminary study of the lapse rate of surface air temperature over mountainous regions of China. *Geographical Research*, 1984, 3(2): 24-34.]
- [19] <http://www.unc.edu/courses/2007fall/geog/711/001/software/mtclim/> [EB/OL].
- [20] Zhong Q, Su G L, Zhang J E, *et al.* Identification of important factors for water vapor flux and CO₂ exchange in a cropland[J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221: 575-581.
- [21] 林业科学数据中心. 第6次一类清查森林资源统计数据[EB/OL]. <http://www.cfsdc.org/>. [Data Centre of Forestry Science. The 6th Class One inventory of forest resources statistics. <http://www.cfsdc.org/>.]
- [22] 李文华, 李飞. 中国森林资源研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996: 12-13. [LI Wen-hua, LI Fei. Research of Forest Resources in China. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996: 12-13.]
- [23] Schmid S, Zierl B, Bugmann H. Analyzing the ecosystem carbon dynamics of central European forests: Comparison of Biome-BGC simulations with measurements[J]. *Regional Environmental Change*, 2006, 6: 167-180.
- [24] Cienciala E, Tatarinov F A. Application of Biome-BGC model to managed forests: 2. Comparison with long-term observations of stand production for major tree species[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 237: 252-266.
- [25] 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[J]. *Earth Interactions*, 2000, 43: 1-85.
- [26] Thornton P E. User's Guide for Biome-BGC, Version 4.1.1 [EB/OL]. ftp://daac.ornl.gov/data/model_archive/BIOME_BGC/biome_bgc_4.1.1/comp/bgc_users_guide_411.pdf. 2000.
- [27] White M A, Running S W, Thornton P E. The impact of growing-season length variability on carbon assimilation and evapotranspiration over 88 years in the eastern US deciduous forest[J]. *International Journal of Biometeorology*, 1999, 42:

- 139-145.
- [28] Falge E, Baldocchi D D, Tenhunen J D, *et al.* Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 53-74.
- [29] Lei H M, Yang D W. Seasonal and interannual variations in carbon dioxide exchange over a cropland in the North China Plain[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16: 2944-2957.
- [30] 李琪, 胡正华, 薛红喜, 等. 淮河流域典型农田生态系统碳通量变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2545-2550. [LI Qi, HU Zheng-hua, XUE Hong-xi, *et al.* Variation of ecosystem carbon flux over typical agro-ecosystem in Huaihe River Basin. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2545-2550.]
- [31] 曲奕威. 豫北平原冬小麦-夏玉米典型农田生态系统碳通量的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2008. [QU Yi-wei. Studies on the Carbon Flux of Typical Farmland Ecosystem of Winter Wheat Double Cropped with Summer Maize in the North Henan Plain. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2008.]
- [32] 李俊, 于强, 孙晓敏, 等. 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控机制[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(增刊 1): 210-223. [LI Jun, YU Qiang, SUN Xiao-min, *et al.* Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China Plain. *Science in China Series D*, 2006, 36(Supp 1): 210-223.]
- [33] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, *et al.* Global climate change and terrestrial primary production[J]. *Nature*, 1993, 363: 234-240.
- [34] Liu J, Chen J M, Cihlar J, *et al.* A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62: 158-175.
- [35] 陶波, 李克让, 邵雪梅, 等. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟[J]. 地理学报, 2003, 58(3): 372-380. [TAO Bo, LI Ke-rang, SHAO Xue-mei, *et al.* Temporal and spatial pattern of net primary production of terrestrial ecosystems in China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(3): 372-380.]
- [36] Zhang Y Q, Yu Q, Jiang J, *et al.* Calibration of Terra/MODIS gross primary production over an irrigated cropland on the North China Plain and an alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14: 757-767.
- [37] [http://tongji.cnki.net/Kns55/Nav/Navidefault.aspx?uid=WEEvREdiSUtucE1BV1VFSHc1ZjBzVESzbDRmSEpZdz0=&p=\[EB/OL\]](http://tongji.cnki.net/Kns55/Nav/Navidefault.aspx?uid=WEEvREdiSUtucE1BV1VFSHc1ZjBzVESzbDRmSEpZdz0=&p=[EB/OL]).
- [38] http://www.china001.com/show_hdr.php?xname=PPDDMV0&dname=78NSK41&xpos=9[EB/OL].
- [39] 张希彪. 陇东黄土高原沟壑区农业资源生产潜力及其开发[J]. 水土保持学报, 2004, 11(3): 95-97. [ZHANG Xi-biao. A probe on potential and exploitation of agricultural nature resources on Longdong Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(3): 95-97.]

Estimation of the Net Ecosystem Productivity in Huang-Huai-Hai Region Combining with Biome-BGC Model and Remote Sensing Data

HU Bo^{1,2,3,4}, SUN Rui^{1,2,3}, CHEN Yong-jun^{1,2,3}, FENG Li-chao^{1,2,3}, SUN Liang^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and the Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100875, China;

2. School of Geography and Remote Sensing Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Beijing Key Lab for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing 100875, China;

4. Ningbo Meteorological Bureau, Ningbo 315012, China)

Abstract: As two key variables to represent vegetation activities, the Net Ecosystem Production (NEP) and the Net Primary Productivity (NPP) played important roles in the study of global change and regional ecological environment evaluation. Biome-BGC was a biogeochemical cycles model, which could simulate the storage and fluxes of water, carbon and nitrogen within the vegetation and soil components of a terrestrial ecosystem. In this paper, in use of the series of MODIS LAI product and the meteorological data in 2004, we simulated the NEP and NPP in the Huang-Huai-Hai Region. Since there was no crop eco-physiological parameters in the Biome-BGC model, we simulated the crop by modifying the grass eco-physiological parameters, and adding the code of fertilizers, irrigation and harvest. The simulated results showed that the NEP and NPP were greater in the southern part of the region. The respective order of average NEP and NPP of different vegetation types was as follows: mixed forest, deciduous broadleaf forest, evergreen needleleaf forest, crop, shrub and grassland; and mixed forest, crop, deciduous broadleaf forest, evergreen needleleaf forest, shrub and grassland. Compared to the observation data, MODIS NPP product and the statistical data, we found that Biome-BGC model successfully simulated the regional vegetation productivity, and the coefficient of determination between the simulated NPP of crop and the statistical data had reached 0.6123. In addition, the simulated result of crop NPP in the Huang-Huai-Hai Region was closer to the statistical data than the MODIS NPP product.

Key words: net ecosystem productivity; net primary productivity; Biome-BGC model; MODIS LAI; Huang-Huai-Hai Region