

DOI: 10.5846/stxb201410262092

杨延征, 马元丹, 江洪, 朱求安, 刘金勋, 彭长辉. 基于 IBIS 模型的 1960—2006 年中国陆地生态系统碳收支格局研究. 生态学报, 2016, 36(13):

Yang Y Z, Ma Y D, Jiang H, Zhu Q A, Liu J X, Peng C H. Evaluating the carbon budget pattern of Chinese terrestrial ecosystem from 1960 to 2006 using Integrated Biosphere Simulator. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(13):

基于 IBIS 模型的 1960—2006 年中国陆地生态系统碳收支格局研究

杨延征¹, 马元丹², 江洪^{2,3}, 朱求安^{1,*}, 刘金勋⁴, 彭长辉^{1,5}

1 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

2 浙江农林大学浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 杭州 311300

3 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093

4 美国地质调查局 (USGS) 陆地观测数据中心, 门洛帕克 美国 94025

5 魁北克大学蒙特利尔分校环境科学研究所, 蒙特利尔 加拿大 C3H3P8

摘要: 定量评估区域陆地生态系统碳收支是生态系统与全球变化科学研究的重要科学问题。本研究利用集成生物圈模型 (IBIS) 对中国陆地生态系统历史时期 (1960—2006 年) 气候及 CO₂ 浓度变化条件下碳收支时空变异特征和发展趋势进行了模拟分析。模拟结果表明, 1960—2006 年间, 中国陆地生态系统净初级生产力 (NPP) 总量水平约为 2.46 GtC/a, 总体呈上升趋势, 在东南及西南地区最高, 其次是长白山及大小兴安岭地区, 西北内陆地区的净初级生产力水平最低; 1960—2006 年间, 中国陆地生态系统净生态系统生产力 (NEP) 总量水平约为 0.11 GtC/a, 总体呈上升趋势, 绝大部分区域表现为碳汇效应, 大小兴安岭、长白山、东南地区及西南部分地区碳汇效应较强, 西北内陆区表现出弱碳源效应, 温带湿润区、高原温带区和高原寒带区碳汇效应呈显著上升趋势; 中国 11 个气候区, NPP 与降水均为正相关, 除了中温带湿润区、寒温带湿润区、高原温带和高原寒带外, 降水是限制植被生长的主要因子。除了高原寒带外, NEP 同样表现出与降水的更强相关性, 与气温的相关性较弱。经验证, IBIS 模型对于中国陆地生态系统碳收支的模拟结果合理, 可以为科学预测生态系统的固碳潜力和制定区域碳管理政策提供科学依据。

关键词: 陆地生态系统; 碳收支; NPP; NEP; IBIS 模型; 中国

Evaluating the carbon budget pattern of Chinese terrestrial ecosystem from 1960 to 2006 using Integrated Biosphere Simulator

YANG Yanzheng¹, MA Yuandan², JIANG Hong^{2,3}, ZHU Qiu'an^{1,*}, LIU Jinxun⁴, PENG Changhui^{1,5}

1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China

3 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

4 Western Geographic Science Center, U.S. Geological Survey, Menlo Park 94025, USA

5 Institute of Environment Sciences, Quebec University at Montreal, Montreal C3H3P8, Canada

Abstract: Estimating the carbon budget is one of the most important scientific steps for observing worldwide biological changes. In this study, we used the Integrated Biosphere Simulator (IBIS) to evaluate the effects of climate change and

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (41201079); 国家重点基础研究发展计划 (2013CB956602); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20120204120007); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2012JQ3016)

收稿日期: 2014-10-26; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qiu'an.zhu@gmail.com

elevated CO₂ concentration on the temporal and spatial variation in carbon budget pattern in the terrestrial ecosystem of China during 1960 to 2006. The results from the model were validated against forestry inventory and flux observation data, and compared with other data from previous publications. The following results were obtained: (1) IBIS accurately simulated the carbon budget pattern of the terrestrial ecosystem of China. The highest net primary productivity (NPP) was observed in southeastern and southwestern China, while the lowest NPP was distributed in northwestern China. (2) The NPP showed an increasing trend from 1960 to 2006 in all climate zones except in the wet-warm-temperate zone. From 1960 to 2006, the total NPP of the terrestrial ecosystem of China showed an increasing trend at a rate of 6 MtC/a and the range of NPP was between 2.2 GtC/a and 2.7 GtC/a, with a mean value of 2.46 GtC/a; peak values occurred in 1990, 1993, 1996, 1998, and 2002 in the last two decades. (3) In 11 climate zones, NPP was significantly correlated with precipitation and temperature, and precipitation was the main limiting factor except in the wet-middle temperate, cold temperate, plateau temperate, and plateau frigid zones. (4) The net ecosystem productivity (NEP) showed that most terrestrial ecosystems in China acted as carbon sinks. Only the dry-warm-temperate zone in northwestern China and the southwestern part of the Tibet plateau acted as a small carbon source, while Daxinganling, Xiaoxinganling, and Changbai mountains as well as southeastern and southwestern China acted as a large carbon sink. (5) The NEP showed a significant increasing trend in the wet-middle-temperate, plateau temperate, and plateau frigid zones, while other zones remained in a stable state from 1960 to 2006. The total NEP of the terrestrial ecosystem of China also showed an increasing trend at a rate of 1.6 MtC/a and the range of NEP was between -0.10 GtC/a and 0.25 GtC/a, with a mean value of 0.11 GtC/a from 1960 to 2006. (6) The NEP showed a stronger correlation with precipitation than temperature. Except for temperature, precipitation, increasing CO₂, land-use change, and the program “Grain for Green” were also among the most important factors that caused the change in the carbon budget of China, and the response of terrestrial ecosystem to these factors will be the priority for research in future. Above all, IBIS produced reasonable and reliable results on the terrestrial carbon budget of China, and these results can be applied in predicting the potential of carbon sequestration and providing the scientific basis for regional carbon management.

Key Words: terrestrial ecosystem; carbon budget; climate change; NPP; NEP; IBIS; China

气候变化对陆地生态系统碳循环的影响及陆地生态系统碳循环对气候变化的反馈作用是当前全球气候变化研究的核心问题^[1-2]。中国森林生态系统碳汇总量为 (75.2±34.7) TgC/a, 灌木生态系统碳汇总量为 (21.7±10.2) TgC/a, 草地生态系统碳汇总量为 (7.0±2.5) TgC/a, 中国陆地生态系统碳汇占全球碳汇的 6.5%—19.0%^[3]。中国陆地生态系统碳汇评估仍存在很大的不确定性, 准确定量评估历史时期的中国及区域尺度的碳收支格局, 不但可以为科学认识中国陆地生态系统与气候变化之间的关系提供理论基础, 而且可以为制定区域气候变化管理规划 and 政策提供依据^[4]。目前对大尺度碳循环的评估和模拟主要有两种方法。一是基于遥感数据的方法, 遥感数据获取较快, 空间范围广, 已经在全国和区域尺度碳收支研究中得到广泛应用^[5-8]。二是基于模型的方法。模型有简单的统计模型及相对复杂的生态系统过程模型, 其中生态过程模型可以对陆地生态系统的过程及功能进行详细的研究, 有助于进行陆地生态系统碳循环机理的探究。关于气候变化对于中国和区域陆地生态系统的碳循环的影响, 国内开展了许多基于模型的相关研究。近些年来, 陈强等^[9]利用 CASA 模型和 MODIS-NDVI 数据对黄河流域 2001—2010 年的净初级生产力 (NPP) 进行了估算; Yang 等^[10]使用 CASA 模型对新疆地区土地利用对 NPP 的影响进行了分析; 封晓辉等^[11]使用 LPJ-GUESS 对马尾松林生产力和碳动态进行了研究; 刘曦等^[12]使用 IBIS 模型对东北东部森林 NPP 及其影响因子进行了分析; 于颖等^[13]使用 InTEC 模型对 1901—2008 年小兴安岭森林 NPP 进行了估算; 李登秋等^[14]结合 BEPS 模型和通量观测数据模拟分析了太阳辐射变化对千烟洲常绿针叶林 GPP 的影响。

在生态模型中, 研究生物物理和生物地球化学过程与气候过程的相互作用至关重要, 因此既能同时描述

生态系统结构和功能的动态变化,又能模拟生物物理和生物地球化学过程相互作用的综合动态全球动态植被模型(DGVM,Dynamic Global Vegetation Model)成为全球生态系统模型的发展方向^[15]。集成生物圈模型(IBIS,Integrated Biosphere Simulator)作为一种全球动态植被模型,描述了植被组成变化、再分布和演替等动态过程以及这些过程涉及物种迁移、种间竞争、种群建立和死亡,扰动和景观结构变化等^[16-17]。目前已经有运用 IBIS 模型对中国陆地生态系统的水分平衡过程和区域碳收支的模拟及验证工作^[12,18],但是在气候及 CO₂浓度变化的条件下,对中国陆地生态系统碳收支格局的报道还很少。因此,本文利用 IBIS 模型,基于历史时期(1960—2006 年)气候条件及 CO₂浓度条件,着重研究:(1)中国陆地生态系统净初级生产力水平的时空格局和发展趋势;(2)中国陆地生态系统碳收支源汇效应的时空格局和发展趋势;(3)中国陆地生态系统净初级生产力、碳收支格局对气候变化因子的响应。

1 数据与方法

1.1 IBIS 模型简介

集成生物圈模拟器 IBIS(Integrated Biosphere Simulator)由美国威斯康星大学全球环境与可持续发展中心(SAGE)的 Foley 等于 1996 年开发,是一个综合的陆地生物圈模型,属于新一代动态植被模型(DGVM)^[16-17]。IBIS 模型包括陆面过程、冠层生理、植被物候、植被动态和土壤地球生物化学等 5 大模块^[16-17]。模型中各个过程的时间尺度从 1 小时至 1 年,将生态的、生物物理的及植物生理的等发生在不同时间尺度上的过程进行有机整合^[16-17]。本研究依据中国植被类型特点,剔除原来模型中北方落叶针叶林(据中华人民共和国植被图(1:100 万)^[19]),各个相关具体的生理参数采用 IBIS 推荐值(表 1)。并依据土地利用/土地覆盖数据^[20]将植被覆盖比例因子加入到模型中以更好反映中国陆地生态系统植被分布实际情况。

表 1 不同植物功能型部分生理参数
Table 1 Definition of some physiological parameters in different plant functional types

植物功能型 Plant functional types	15℃最大光合速率 Maximum rubisco capacity of top leaf at 15 °C/ (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻²)	比叶面积 Specific leaf area/ (m ² /kg)	生物量转换时间/a Residence time of carbon			碳分配系数 Allocation fraction of total photosynthate		
			叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem
热带雨林	55.0	25	1.01	1	25	0.3	0.2	0.5
热带季雨林	55.0	25	1	1	25	0.3	0.2	0.5
亚热带常绿阔叶	40.0	25	1	1	25	0.3	0.2	0.5
温带常绿针叶林	30.0	12.5	2	1	50	0.3	0.4	0.3
温带落叶阔叶林	30.0	25	1	1	50	0.3	0.2	0.5
北方常绿针叶林	25.0	12.5	2.5	1	100	0.3	0.4	0.3
北方落叶针叶林	30.0	25	1	1	100	0.3	0.2	0.5
常绿灌木	27.5	12.5	1.5	1	5	0.45	0.4	0.15
落叶灌木	27.5	25	1	1	5	0.45	0.35	0.2
C ₄ 草	15.0	20	1.25	1	999	0.45	0.55	0
C ₃ 草	25.0	20	1.5	1	999	0.45	0.55	0

1.2 数据来源

模型所需的主要输入数据包括 DEM、气象数据、植被与土壤图层(空间分辨率统一为 0.085 度)。DEM 数据采用 SRTM 数据;依据中国 1:400 万植被数据构建植被图层,并将其分类标准归并到 IBIS 模型的植被类型;依据中国 1:100 万土壤数据构建土壤图层,主要包括土壤类型和六个土壤层深度的粘粒、粉砂和砂粒的含量比例;依据 1955—2006 年 650 个中国标准气象站点地面气候资料构建气象数据库(站点分布如图 1),包括逐月的降水、气温、相对湿度、日照时数、风速。所有气象数据利用 ANUSPLIN^[21]将站点数据插值生成,并与 DEM、植被、土壤层的空间分辨率保持一致。模型模拟过程中历史 CO₂浓度数据采用美国国家海洋和大气管

理局(NOAA)公布的全球观测数据^[22]。

1.3 模型模拟设置

本研究中将模型模拟时间设置为 1800—2006 年,其中 1800—1954 年为模型预热期,利用多年平均的气象数据进行计算。1955—2006 年模型根据逐月实测数据正式计算期,1960—2006 年的结果为本文的分析对象,并依据全国气候区划(图 1)对结果进行分析。

2 结果与讨论

2.1 模型验证分析

2.1.1 基于通量站点数据的验证

验证分析以于贵瑞等^[23]文章中所总结的 2003—2005 年中国部分通量站通量数据为基础,分析时将通量站点叠加到 IBIS 模型 2003—2005 年的模拟总初级生产力(GPP)结果上,得到对应站点对应年份的模拟 GPP 值。所有通量站点的信息及 GPP 观测值与模拟值的对比如表 2。

所有站点的所有年份的观测值与模拟值之间吻合程度较好($r=0.82, P<0.01$)。其中长白山站、当雄站和海北 01 站观测值与模拟值差距相对较大。一方面,植被类型对照上有差异,如当雄和海北的三个站点,实际植被类型为高寒草甸,模型模拟的植被类型为苔原,不同植被类型条件下的模拟,模型中采用不同的植被生理参数,植被类型相差较大,对应的相关参数值也会有较大的差别,从而必然造成生产力水平的差异;另一方面,仍然是站点与栅格的尺度匹配问题,如海北 02 站与海北 03 站,它们的观测值有将近 0.3 的差距,而对应于模拟结果图层,两个站点则位于同一个栅格上。IBIS 相关的单点研究表明生产力水平与通量站的实测值匹配较好^[24],因为单点的研究能更好的控制输入数据的精度及植被类型的变化等。就区域模拟水平来看,模型模拟结果是相对合理的。

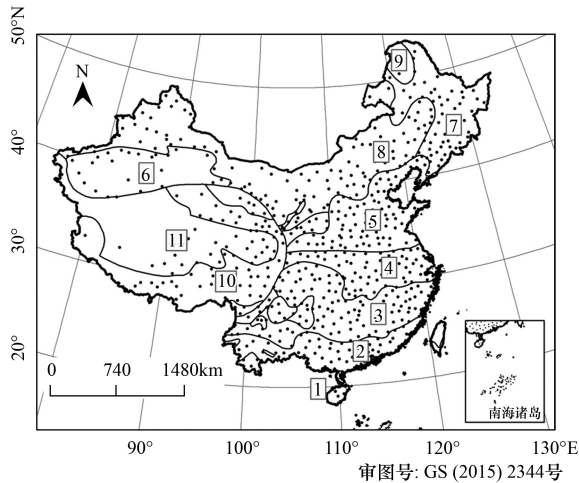


图 1 气象站点分布图及气候区划(据中央气象局,1994)
Fig.1 Meteorological station map of China and the geographical delineation of climate zones in China

气候区划代码:1:边缘热带湿润区,2:南亚热带湿润区,3:中亚热带湿润区,4:北亚热带湿润区,5:暖温带湿润区,6:暖温带干旱区,7:中温带湿润区,8:中温带干旱区,9:寒温带湿润区,10:高原温带,11:高原寒带 CZ1: Marginal Tropical; CZ2: Southern Subtropical; CZ3: Middle Subtropical; CZ4: Northern Subtropical; CZ5: Wet-Warm Temperate; CZ6: Dry-Warm Temperate; CZ7: Wet-Middle Temperate; CZ8: Dry-Middle Temperate; CZ9: Cold Temperate; CZ10: Plateau Temperate; CZ11: Plateau Frigid

表 2 通量站点测定的 GPP 值(据于贵瑞等^[23])与 IBIS 模型模拟 GPP 值
Table 2 Simulated and observed GPP for selected China-FLUX stations

站点 Sites	代码 Code	站点植被类型 Vegetation types	纬度/(°) Latitude	经度/(°) Longitude	GPP/ (kg C/m ² /a)	年份 Year	IBIS GPP/ (kg C/m ² /a)
长白山	CBS	温带针阔混交林	42.40	128.47	1.53	2003	0.81
					1.50	2004	0.81
					1.33	2005	0.81
千烟洲	QYZ	亚热带常绿针叶林	26.73	115.05	1.61	2003	1.24
					1.87	2004	1.40
					1.66	2005	1.32
鼎湖山	DHS	亚热带常绿阔叶林	23.17	112.53	1.53	2003	2.15
					1.51	2004	2.01
					1.40	2005	1.91
西双版纳	XSBN	热带季雨林	21.95	101.20	1.93	2003	2.26
当雄	DX	草原化高寒草甸	30.85	91.08	0.19	2004	0.34

续表							
站点 Sites	代码 Code	站点植被类型 Vegetation types	纬度/(°) Latitude	经度/(°) Longitude	GPP/ (kg C/m ² /a)	年份 Year	IBIS GPP/ (kg C/m ² /a)
海北 01	HB01	高寒金露梅灌丛草甸	37.67	101.33	0.14	2005	0.34
					0.45	2003	0.11
					0.50	2004	0.11
					0.53	2005	0.11
海北 02	HB02	高寒矮嵩草草甸	37.62	101.30	0.70	2003	0.62
海北 03	HB03	高寒沼泽化草甸	37.60	101.32	0.43	2003	0.50
					0.40	2004	0.45
					0.43	2005	0.48
内蒙古	NMG	温带羊草草原	44.50	117.17	0.31	2004	0.42
					0.04	2005	0.33

2.1.2 基于发表文献相关研究结果的对比

表 3 列举了 IBIS 模型模拟的全国陆地生态系统碳通量和碳储量(1980—2006 年平均)及与其他研究结果的比较。可以看到,NPP 总量值与孙睿等^[7]及 Feng 等^[25]的结果最为接近,整体上处于研究结果的范围中;生物量的结果稍高于其它研究结果;净生态系统生产力(NEP)总量略高于季劲钧等^[33]和 Cao 等^[30-31]的结果;对于 NPP 的模拟结果,朴世龙等^[25]指出很多情况下模型没有考虑植被覆盖的情况,计算出来的是潜在的陆地生态系统净第一生产力,从而使得模型估算值偏高。本研究中考虑了乔木层和灌草丛的覆盖比率因子,故 NPP 的模拟结果与大部分研究结果相比要偏低一些。

表 3 IBIS 模型模拟的中国陆地生态系统 NPP、生物量及 NEP(1980—2006 年平均)及与其他研究结果的比较

Table 3 Comparison of carbon budget results of IBIS (mean value of 1980—2006) and other researches			
研究结果 Results	NPP 总量/(GtC/a) Total NPP	生物量总量/(GtC) Total biomass	NEP 总量/(GtC/a) Total NEP
IBIS	2.46	18.05	0.11
Xiao, et al., 1998 ^[26]	3.65	—	—
孙睿等,2001 ^[7]	2.65	—	—
朴世龙等,2001 ^[27]	1.80	—	—
陶波等,2003 ^[28]	3.09	—	—
李克让等,2003 ^[29]	—	13.33	—
Cao, et al., 2003a ^[30]	—	—	0.07
Cao, et al., 2003b ^[31]	3.09	—	0.07
黄玫等,2006 ^[32]	—	14.04	—
Feng, et al., 2007 ^[25]	2.235	—	—
季劲钧等,2008 ^[33]	2.94	13.74	0.10

2.2 中国陆地生态系统 NPP 和 NEP 时空变化特征

2.2.1 中国陆地生态系统 NPP 和 NEP 空间格局

图 2 可以看出,IBIS 模型模拟的全国陆地生态系统 NPP 从 1980 年至 2006 年 NPP 的多年平均值的分布格局。从图中可以看到,西北地区为 NPP 的低值区,这一地区主要是沙漠和荒漠分布区,NPP 值在 50 gC/m²/a 以下;青藏高原,黄土高原及内蒙古高原等地区,NPP 值约位于 50—200 gC/m²/a 的区间上;东北的大兴安岭、小兴安岭、秦岭、长江中上游及青藏高原东坡地区,NPP 值约位于 200—450 gC/m²/a 的区间上;长白山及西南大部分地区 NPP 在 450—700 gC/m²/a 的区间上;东南地区及西南西双版纳地区大部分地区 NPP 值在 700—1000 gC/m²/a 的区间上,部分地区在 1000 gC/m²/a 以上,其主要原因在于这些地区水热条件优越,多为热带/亚热带常绿阔叶林。

图 3 显示了模型模拟的 1980 年至 2006 年 NEP 多年平均值的分布情况,从图中可以看到西北地区、内蒙古北部地区、东北平原部分地区及青藏高原西南等表现出弱的碳源,约为 0—30gC/m²/a,青藏高原、内蒙古东北部、华北及黄淮地区,西南大部分地区表现为弱的碳汇区,约为 0—30gC/m²/a,东北大兴安岭、小兴安岭、长白山地区、东南地区及西南部分地区表现为较强的碳汇,NEP 值为 30—55 gC/m²/a,少数地方为 55—100 gC/m²/a,喜马拉雅山脉南端少数地方在 100 gC/m²/a 以上。

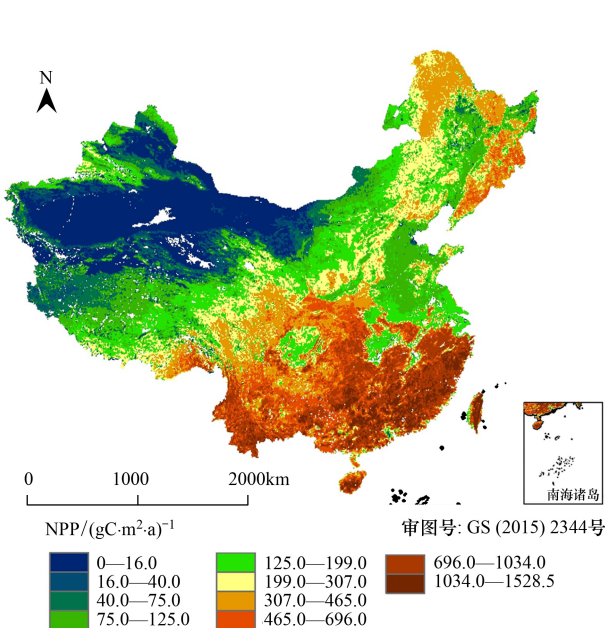


图 2 IBIS 模型模拟的中国陆地生态系统 NPP 的分布 (1980—2006 年多年平均值)
Fig.2 Simulated NPP result map of China with IBIS (Mean NPP of 1980 to 2006)

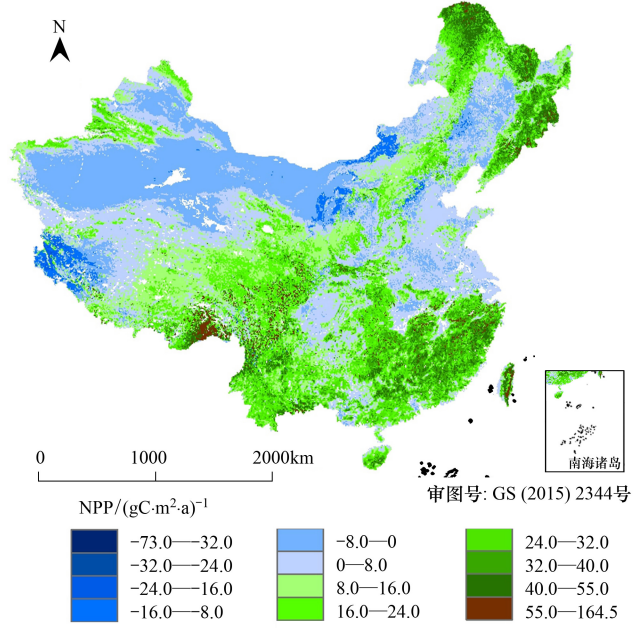


图 3 IBIS 模型模拟的中国陆地生态系统 NEP 分布 (1980—2006 年多年平均值)
Fig.3 Simulated NEP result map of China with IBIS (Mean NEP of 1980 to 2006)

2.2.2 中国陆地生态系统 NPP 和 NEP 总量时间格局

在 1960 年至 2006 年期间,全国陆地生态系统 NPP 总量总体呈上升趋势,年际间有波动(图 4)。NPP 总量变化范围在 2.2 GtC/a 至 2.7 GtC/a 之间,均值为 2.46 GtC/a。全国 NPP 总量的上升变化幅度约为 60 MtC/10a($P<0.01$)。在 80 年代以来,在 1990 年、1993 年、1996 年、1998 年及 2002 年出现了几个较大的峰值,这一结果与朴世龙等^[27]利用 CASA 模型模拟的 1982—1999 年中国植被净第一性生产力的结果基本一致,其结果在 1990 年、1993 年和 1998 年出现峰值,他提出这一结果与当年的年平均降水量比其它年份降水量要丰沛有关,并指出我国的植被净第一性生产力与年平均降水量显著相关。本研究的结果对应在 1997 年和 1998 年出现了相对低值和相对高值。从上述研究结果对比来看,本研究模拟的全国 NPP 总量水平处于 Fang 等^[34]与 Cao 等^[31]的结果之间。Cao 等^[31] NPP 高峰值出现在 1985 年、1990 年和 1998 年。本研究中,中国陆上生态系统 NPP 年际变化与这些研究规律表现出较好的一致性,这些年份中国区域可能与受到了厄尔尼诺等极端气候的影响有关。

在 1960 年至 2006 年期间,全国陆地生态系统 NEP 总量总体呈上升趋势,上升变化幅度约为 16 MtC/10a ($P<0.05$)(图 5)。全国 NEP 总量变化范围在 -0.10 GtC/a 至 0.25 GtC/a 的区间上,均值为 0.11GtC/a。全国 NEP 总量基本表现为弱碳汇效应,1990 年出现最高值。NEP 年际间的波动也较大,这可能与降水气温等气候条件的变化有关。对照 NPP 总量的年际变化图(图 4)来看,NEP 与 NPP 的峰值点与谷值点基本对应,NPP 的变化的量级直接影响着 NEP 的变化趋势,NPP 高的年份均表现为较强的碳汇效应,而 NPP 的谷值年份,绝大部分对应 NEP 值均表现为较弱汇效应。Cao 等^[31]利用 CEVSA 模型对中国 1981—2000 年的 NEP 进行了

模拟,模拟结果表明,中国年 NEP 总量范围位于 -0.32 GtC/a 至 0.25 GtC/a 的区间上,平均值为 0.07 GtC/a 。本研究在相应的时段上中国年 NEP 总量范围位于 0.05 GtC/a 至 0.24 GtC/a 的区间上,平均值为 0.12 GtC/a ,略高于 Cao 等^[31]的结果。从 20 世纪 90 年代开始中国区域降水量出现递减趋势,造成一定程度的干旱^[35]。模拟时段上,从 1960 年到 1990 年 NEP ($k=0.03$, $P<0.01$) 表现为明显的上升趋势,从 1991 到 2006 年 NEP ($k=-0.0052$, $P=0.11$) 表现出一定的下降趋势,可能与从 20 世纪 90 年代的干旱程度加剧有关,但是统计意义不显著,需要更长序列的模拟值来证实。

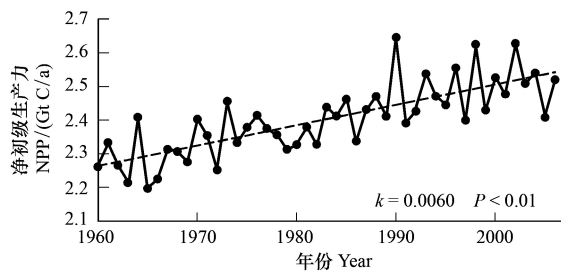


图 4 1960—2006 年 IBIS 模型模拟的中国陆地生态系统年 NPP 总量变化

Fig.4 The variation of total NPP of China from 1960—2006

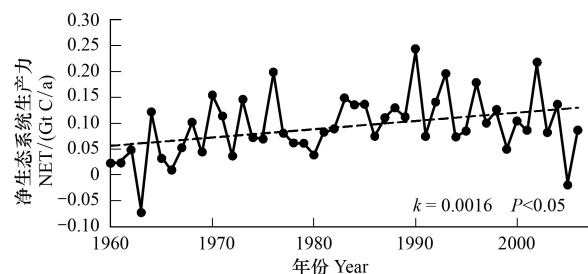


图 5 1960—2006 年 IBIS 模型模拟的中国陆地生态系统年 NEP 总量变化

Fig.5 The variation of total NEP of China from 1960—2006

2.3 基于不气候区划中国陆地生态系统 NPP 和 NEP 变化特征

2.3.1 中国陆地生态系统 NPP 在不同气候区域变化特征分析

气候区划体现了不同地理区域上热量与水分的分配状况,热量与水分状况对植被的生产力有极为重要的影响,在归并整理的 11 个气候区域(图 1)的基础上对全国陆地生态系统 NPP 情况进行了分析。图 6 显示了各个气候区 1960 年至 2006 年 NPP 的年际变化情况及多年平均值水平,并对时间序列上的 NPP 作线性回归,判断其变化趋势。

整体而言,除了暖温带湿润区(CZ05)和中温带干旱区(CZ08)外,其它各个气候区的 NPP 水平在过去的几十年中都表现出增加的趋势。从 NPP 的平均水平来看,高原温带(CZ10)的 NPP 平均水平高于高原寒带(CZ11),南亚热带湿润区(CZ02) NPP 平均水平高于中亚热带湿润区(CZ03),中亚热带湿润区(CZ03)高于北亚热带湿润区(CZ04)。从干湿状况来看,暖温带湿润区(CZ05) NPP 水平要高于暖温带干旱区(CZ06) NPP 的平均水平,中温带湿润区(CZ07)的 NPP 平均水平要大大高于中温带干旱区(CZ08)的 NPP 平均水平,说明了水分因子对生产力水平的影响,在一定范围里,水分越充沛,生产力水平越高,此结论与朴世龙等^[27]的研究一致。NPP 受辐射的影响也较大,1991 年 6 月份的菲律宾 Pinatubo 火山爆发^[36]导致中国区域辐射锐减,间接造成了 11 个分区(图 6)和中国陆地生态系统整体 NPP(图 5)的显著下降。

2.3.2 中国陆地生态系统 NEP 在不同气候区域变化特征分析

在气候区划(图 1)的基础上对全国陆地生态系统 NEP 情况进行了分析。图 7 显示了各个气候区 1960 年至 2006 年平均 NEP 的年际变化情况,并对时间序列上的 NEP 作线性回归(细直实线表示),判断其变化趋势。结果表明,仅暖温带干旱区(CZ06)的 NEP 平均水平表现为碳源效应;边缘热带湿润区(CZ01)、南亚热带湿润区(CZ02)、中温带干旱区(CZ08)和寒温带湿润区(CZ09)在 1960 至 2006 年整体上基本维持相同的碳汇效应水平;中温带湿润区(CZ07)、高原温带(CZ10)和高原寒带(CZ11)碳汇效应呈显著上升趋势。总体来看,碳汇水平最高为寒温带湿润区(CZ09),平均碳汇水平为 $30.0 \text{ gC/m}^2/\text{a}$,但其碳汇水平在 2000 年之后有所减弱;其次是南亚热带湿润区(CZ02) ($20.8 \text{ gC/m}^2/\text{a}$),中亚热带湿润区(CZ03) ($19.6 \text{ gC/m}^2/\text{a}$),边缘热带湿润区(CZ01) ($19.4 \text{ gC/m}^2/\text{a}$) 和中温带湿润区(CZ07) ($18.2 \text{ gC/m}^2/\text{a}$)。

11 个气候分区,除了中温带湿润区(CZ07)、高原温带(CZ10)和高原寒带(CZ11),其它分区的变化趋势均不显著,说明中国大多数的气候分区的碳源汇格局效应已经趋于平衡,没有明显的变化趋势。NEP 为 NPP

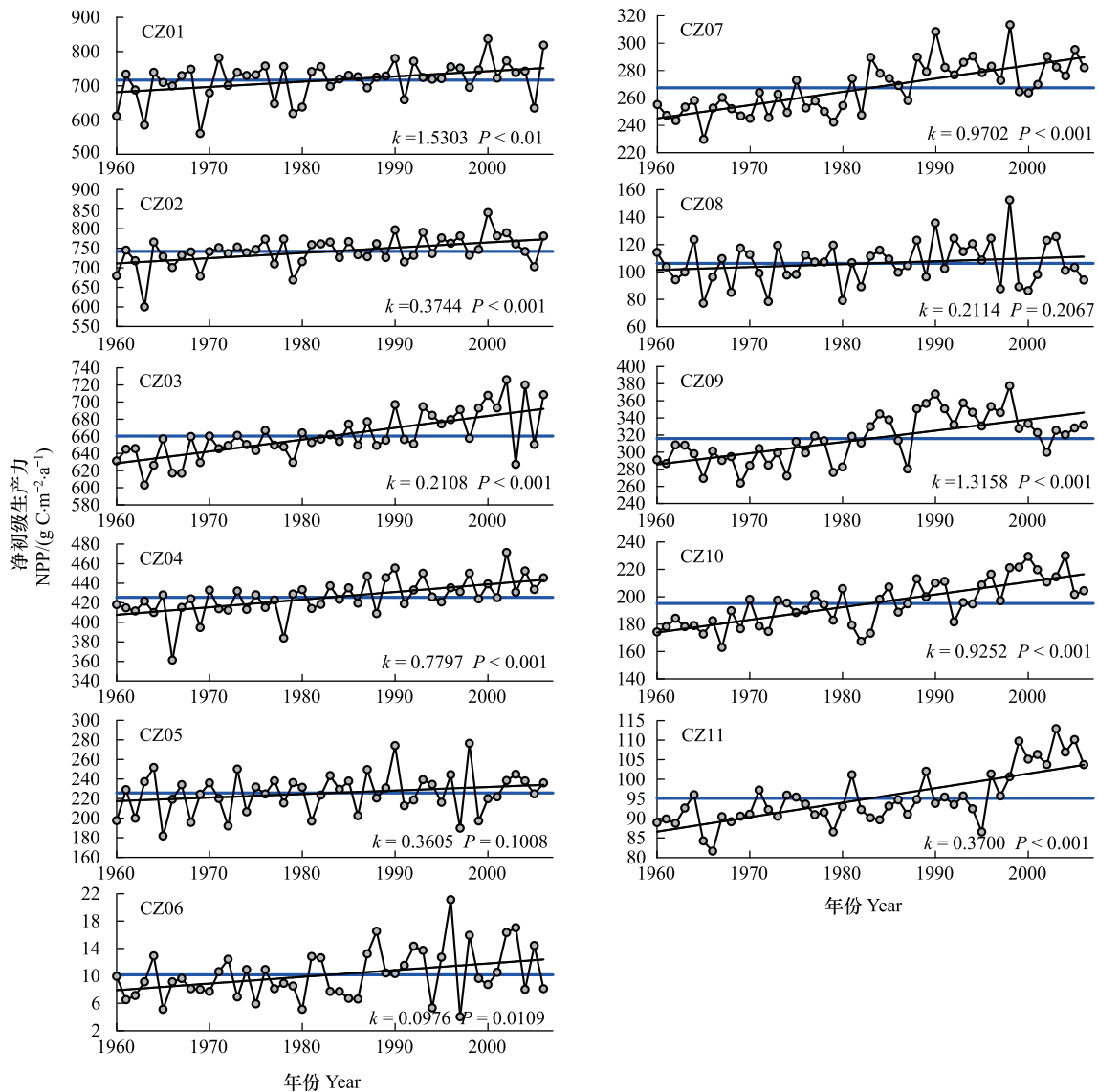


图6 全国各气候区1960—2006年NPP的年际变化,多年平均值水平(粗直线),及时间序列上的NPP的简单线性回归(细直线),其斜率 k 与 p 值标注于图上

Fig.6 Variation of NPP for each climate zone from 1960 to 2006 with the multi-year mean NPP line. The slope and p value of simple linear regression for each zone marked in the graphs

与土壤异养呼吸(HR)的差值。土壤呼吸一般是随着降水量的增加而升高的,但雨量充沛的地方,土壤呼吸与降水量会呈现负相关^[37],因此NEP的估算结果不确定性远远超过NPP。

2.4 中国陆地生态系统NPP、NEP和降水、温度、CO₂浓度的相关性分析

为研究NPP与气温及降水之间的关系,对1960年至2006年全国年平均气温及年平均降水量进行了统计(图8),并与当年的NPP总量值进行相关性分析,NPP与降水及温度均显著相关,并且NPP与气温的相关程度更高。NPP与降水的相关系数 $r=0.38$ ($P<0.01$, $N=47$),NPP与气温的相关系数 $r=0.69$ ($P<0.01$, $N=47$)。

在上述基础上,基于不同气候区划条件下,进一步对1960年至2006年各年各区域年平均气温及年降水量进行了统计,并与当年各区域的NPP和NEP平均值进行相关性分析。NPP和NEP与降水和气温表现出不同程度的相关性(表4)。中国11个气候区,NPP与降水均为正相关,除了中温带湿润区、寒温带湿润区、高原温带和高原寒带外,降水是限制植被生长的主要因子。除了高原寒带外,NEP表现出与降水的更好相关

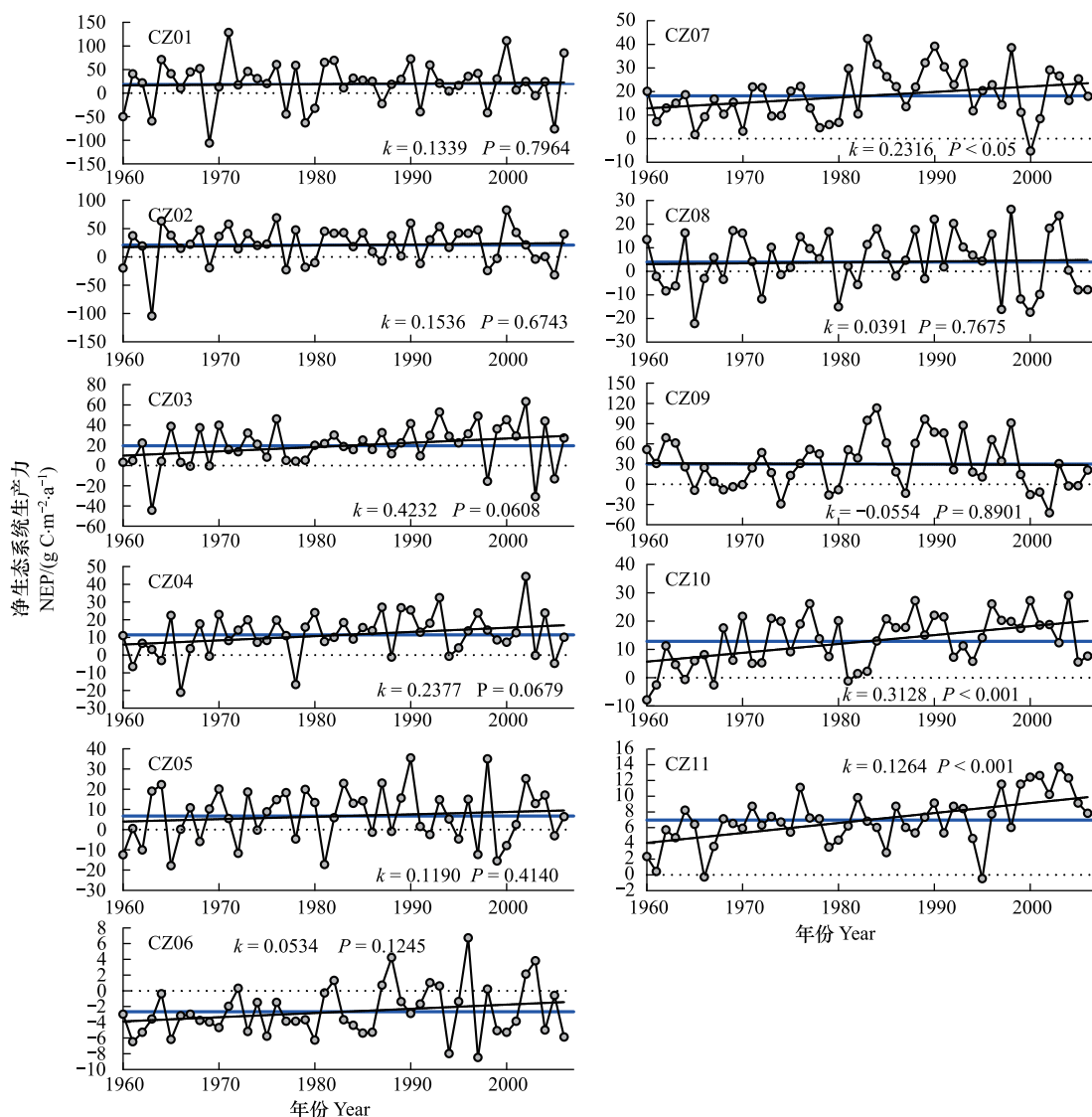


图7 各气候区 1960 年至 2006 年 NEP 的年际变化,多年平均值水平(蓝线),及时间序列上的 NEP 的线性回归(细直线)

Fig.7 Variation of NEP for each climate zone from 1960 to 2006 with the multi-year mean NEP line. The slope and p value of simple linear regression for each zone marked in the graphs

性,与气温的相关性较弱。

已有研究证实,CO₂浓度的升高也是中国碳收入增加的原因之一^[3,38]。CO₂浓度决定了植物胞间与胞外 CO₂浓度(C_i/C_a),从而影响了 IBIS 模型的 C₃ 和 C₄ 植物碳水平衡。CO₂浓度主要影响光合作用,其浓度的对 NPP 和 NEP 的变化均有一定关系。CO₂浓度与 NPP 的相关性较强($r=0.76$, $P<0.01$),NEP 与 CO₂的相关性相对较弱($r=0.32$, $P<0.05$)。

2.5 模型模拟的不确定性分析

尽管与样地数据和其他研究相比较,本文的研究结果处于一个合理的范围,但是 IBIS 模拟中国净初级生产力和碳收支格局仍然存在很大的不确定性:(1)大部分参数采用的是模型原始的全球水平上的参数集,对于中国区域植被类型不一定完全适应,存在一定的不确定性;(2)模型驱动数据(气象、土壤、植被等)在空间尺度转换及匹配上存在不确定性;(3)不同研究的模拟时间段、模型参数、数据分辨率等均不相同,造成了模型结果对比的不确定性。另外,模型与样地的尺度不匹配也给模型校正和验证造成了一定难度;(4)除了气温、降水和 CO₂浓度升高外,土地利用变化和中国退耕还林等工程的实施也影响了中国陆地生态系统的碳收

支平衡^[3, 38], 在进一步的模型模拟研究中需要考虑相关人类活动的影响。

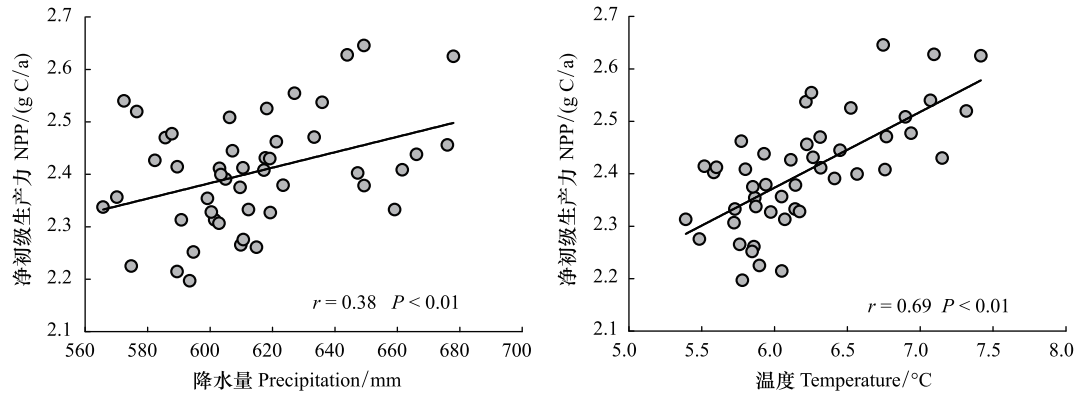


图 8 1960—2006 年全国年 NPP 总量分别与年平均气温、年降水量的相关性

Fig.8 Correlation relationship between annual total NPP and annual temperature, NPP and annual precipitation in period 1960—2006

P:降水 precipitation, T:气温 temperature

表 4 各个气候区的年 NPP 和 NEP 与各地区年平均气温和年降水量的相关关系

Table 4 Correlative coefficients and p values between annual mean NPP and annual temperature and annual precipitation for each climate zone in period 1960—2006

气候区划号 ID of Climatic zone	气候区划名称 Names of climate zones	降水-NPP P-NPP		温度-NPP T-NPP		降水-NEP P-NEP		温度-NEP T-NEP	
		<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
1	边缘热带湿润区	0.38	<0.01	0.12	0.42	0.46	<0.01	-0.23	0.12
2	南亚热带湿润区	0.48	<0.01	0.09	0.56	0.54	<0.01	-0.29	<0.05
3	中亚热带湿润区	0.38	<0.01	0.27	0.06	0.44	<0.01	-0.19	0.21
4	北亚热带湿润区	0.49	<0.01	0.33	<0.05	0.43	<0.01	-0.06	0.67
5	暖温带湿润区	0.59	<0.01	0.14	0.36	0.50	<0.01	-0.04	0.81
6	暖温带干旱区	0.90	<0.01	0.04	0.81	0.86	<0.01	-0.11	0.45
7	中温带湿润区	0.33	<0.01	0.73	<0.01	0.47	<0.01	0.37	<0.05
8	中温带干旱区	0.91	<0.01	0.07	0.66	0.88	<0.01	-0.16	0.27
9	寒温带湿润区	0.55	<0.01	0.70	<0.01	0.78	<0.01	0.18	0.22
10	高原温带	0.45	<0.01	0.71	<0.01	0.38	<0.01	0.28	0.06
11	高原寒带	0.49	<0.01	0.72	<0.01	0.18	0.22	0.39	<0.01

3 结论

本研究基于 IBIS 模型对中国陆地生态系统历史时期(1960—2006 年)气候变化条件及 CO₂ 浓度条件下, 碳收支时空变异特征和发展趋势进行了模拟分析。利用森林样地数据、通量站点数据对模型进行了验证, 并和其他相关研究结果进行了对比分析。结果表明 IBIS 模型对于中国陆地生态系统碳收支的模拟取得了合理的效果。中国陆地生态系统净初级生产力水平在东南及西南地区最高, 其次是长白山及大小兴安岭地区, 西北内陆地区的净初级生产力水平最低; 就气候区划而言, 除了暖温带湿润区和中温带干旱区外, 其它各个气候区的净初级生产力水平在过去的几十年中都表现出增加的趋势, 并依据各个气候区水热状况的不同, 净初级生产力水平与降水和气温表现出不同程度的相关性; 从时间序列上来看, 全国陆地生态系统净初级生产力水平总量总体呈上升趋势, 近 20 年来, 在 1990 年、1993 年、1996 年、1998 年及 2002 年出现了峰值。净生态系统生产力结果表明, 中国陆地生态系统绝大部分区域表现出碳汇效应, 西北内陆区表现出弱碳源效应, 大小兴安岭、长白山、东南地区及西南部分地区表现为较强的碳汇效应; 从气候区划来看, 仅暖温带干旱区的净生态系

统生产力的平均水平表现为碳源效应,温带湿润区、高原温带区和高原寒带区碳汇效应呈显著上升趋势;从时间序列上来看,中国陆地生态系统基本表现为弱碳汇效应,并且总体呈上升趋势,1990 年出现最高碳汇水平。中国 11 个气候区,NPP 与降水均为正相关,除了中温带湿润区、寒温带湿润区、高原温带和高原寒带外,降水是限制植被生长的主要因子。除了高原寒带外,NEP 表现出与降水的更好相关性,与气温的相关性较弱。

致谢:感谢“中国气象科学数据共享服务网”提供的中国气象站点的历史观测数据。感谢国家自然科学基金委员“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn)和“地球系统科学数据共享网”(http://www.geodata.cn/Portal/)提供的 1km 中国地区土地覆盖综合数据集。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 456-552.
- [2] 徐小锋, 田汉勤, 万师强. 气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响. 植物生态学报, 2007, 31(2): 175-188.
- [3] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. Nature, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [4] 于贵瑞, 王秋风, 朱先进. 区域尺度陆地生态系统碳收支评估方法及其不确定性. 地理科学进展, 2011, 30(1): 103-113.
- [5] 黄金龙, 居为民, 郑光, 康婷婷. 基于高分辨率遥感影像的森林地上生物量估算. 生态学报, 2013, 33(20): 1-13.
- [6] 刘双娜, 周涛, 舒阳, 戴铭, 魏林艳, 张鑫. 基于遥感降尺度估算中国森林生物量的空间分布. 生态学报, 2012, 32(8): 2320-2330.
- [7] 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. 遥感学报, 2001, 5(1): 58-61.
- [8] 傅新, 刘高焕, 黄翀, 刘庆生. 湿地翅碱蓬生物量遥感估算模型. 生态学报, 2012, 32(17): 5355-5362.
- [9] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 蒋卫国, 侯鹏, 李营. 2001—2010 年黄河流域生态系统植被净第一性生产力变化及气候因素驱动分析. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2811-2818.
- [10] Yang H F, Mu S J, Li J L. Effects of ecological restoration projects on land use and land cover change and its influences on territorial NPP in Xinjiang, China. Catena, 2014, 115: 85-95.
- [11] 封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 王瑞丽, 王晓荣, 刘泽彬. 基于 LPJ-GUESS 模型的鸡公山马尾松林生产力和碳动态. 林业科学, 2013, 49(4): 7-15.
- [12] 刘曦, 国庆喜, 刘经纬. IBIS 模拟东北东部森林 NPP 主要影响因子的敏感性. 生态学报, 2011, 31(7): 1772-1782.
- [13] 于颖, 范文义, 杨曦光. 1901-2008 年小兴安岭森林 NPP 估算. 林业科学, 2014, 50(10): 16-23.
- [14] 李登秋, 周艳莲, 居为民, 王辉民, 柳艺博, 吴小翠. 太阳辐射变化对亚热带人工常绿针叶林总初级生产力影响的模拟分析. 植物生态学报, 2014, 38(3): 219-230.
- [15] 曹明奎, 李克让. 陆地生态系统与气候相互作用的研究进展. 地球科学进展, 2000, 15(4): 446-452.
- [16] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, Levis S, Pollard D, Sitch S, Haxeltine A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(4): 603-628.
- [17] Kucharik C J, Foley J A, Delire C, Fisher V A, Coe M T, Lenters J D, Young-Molling C, Ramankutty N, Norman J M, Gower S T. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance, and vegetation structure. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14(3): 795-825.
- [18] Zhu Q A, Jiang H, Liu J X, Wei X H, Peng C H, Fang X Q, Liu S R, Zhou G M, Yu S Q, Ju W M. Evaluating the spatiotemporal variations of water budget across China over 1951-2006 using IBIS model. Hydrological Processes, 2010, 24(4): 429-445.
- [19] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中华人民共和国植被图(1:100 万). 北京: 地质出版社, 2007.
- [20] 冉有华, 李新, 卢玲. 四种常用的全球 1km 土地覆盖数据中国区域的精度评价. 冰川冻土, 2009, 31(3): 490-500.
- [21] Hutchinson M F, Gessler P E. Splines-more than just a smooth interpolator. Geoderma, 1994, 62(1/3): 45-67.
- [22] Tans P, Keeling R. NOAA/ESRL. 2014-1-1[2014-10-23]. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.
- [23] 于贵瑞, 伏玉玲, 孙晓敏, 温学发, 张雷明. 中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 的研究进展及其发展思路. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(S1): 1-21.
- [24] Kucharik C J, Barford C C, Maayar M E, Wofsy S C, Monson R K, Baldocchi D D. A multiyear evaluation of a dynamic global vegetation model at three AmeriFlux forest sites: vegetation structure, phenology, soil temperature, and CO₂ and H₂O vapor exchange. Ecological Modelling, 2006, 196(1/2): 1-31.

- [25] Feng X, Liu G, Chen J M, Chen M, Liu J, Ju W M, Sun R, Zhou W. Net primary productivity of China's terrestrial ecosystems from a process model driven by remote sensing. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 563-573.
- [26] Xiao X M, Melillo J M, Kicklighter D W, Pan Y D, McGuire A D, Helfrich J V K III. Net primary production of terrestrial ecosystems in China and its equilibrium responses to changes in climate and atmospheric CO₂ concentration. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(2): 97-118.
- [27] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 1982-1999 年我国植被净第一性生产力及其时空变化. *北京大学学报: 自然科学版*, 2001, 37(4): 563-569.
- [28] 陶波, 李克让, 邵雪梅, 曹明奎. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟. *地理学报*, 2003, 58(3): 372-380.
- [29] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33(1): 72-80.
- [30] Cao M K, Prince S D, Li K R, Tao B, Small J, Shao X M. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 536-546.
- [31] Cao M K, Tao B, Li K R, Shao X M, Stephen D P. Interannual variation in terrestrial ecosystem carbon fluxes in China from 1981 to 1998. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(5): 552-560.
- [32] 黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 李克让. 中国区域植被地上与地下生物量模拟. *生态学报*, 2006, 26(12): 4156-4163.
- [33] 季劲钧, 黄玫, 李克让. 21 世纪中国陆地生态系统与大气碳交换的预测研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(2): 211-223.
- [34] Fang J Y, Piao S L, Field C B, Pan Y D, Guo Q H, Zhou L M, Peng C H, Tao S. Increasing net primary production in China from 1982 to 1999. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(6): 293-297.
- [35] 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 李栋, 于永涛. 1951-2009 年中国不同区域气温和降水量变化特征. *气象与环境学报*, 2011, 27(4): 1-11.
- [36] 肖栋, 李建平. 皮纳图博火山爆发对 20 世纪 90 年代初平流层年代际变冷突变的影响机理. *科学通报*, 2011, 56(4/5): 333-341.
- [37] 庞瑞, 顾峰雪, 张远东, 候振宏, 刘世荣. 西南高山地区净生态系统生产力时空动态. *生态学报*, 2012, 32(24): 7844-7856.
- [38] Piao S L, Yin G D, Tan J G, Cheng L, Huang M T, Li Y, Liu R G, Mao J F, Myneni R B, Peng S S, Poulter B, Shi X Y, Xiao Z Q, Zeng N, Zeng Z Z, Wang Y P. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1601-1609.