

DOI: 10.5846/stxb201404090692

刘晓雪, 张丽娟, 李文亮, 张学珍, 姜春艳. 中国陆地植被氧气生产量变化模拟及其影响因素. 生态学报, 2015, 35(13): 4314-4325.

Liu X X, Zhang L J, Li W L, Zhang X Z, Jiang C Y. Simulating the changing oxygen production of terrestrial vegetation and its influencing factors in China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13): 4314-4325.

中国陆地植被氧气生产量变化模拟及其影响因素

刘晓雪¹, 张丽娟^{1,*}, 李文亮², 张学珍³, 姜春艳¹

1 黑龙江省普通高等学校地理环境遥感监测重点实验室, 哈尔滨师范大学, 哈尔滨 150025

2 美国威斯康星大学密尔沃基分校地理系, 密尔沃基 53211

3 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要: 大气中氧气主要来源于陆地绿色植物的光合作用, 其含量高低直接影响大气质量。基于植被归一化指数 (NDVI)、气温、辐射等要素, 运用 C-FIX 模型, 在模拟绿色植物净生态系统生产力 (NEP) 基础上, 依据碳氧平衡原理, 并结合 ArcGIS 空间叠加、裁切、栅格计算、空间统计等方法, 估算了 2001 年、2005 年和 2009 年中国陆地植被年氧气生产量, 并通过控制实验分析了影响其变化的因素。结果表明: (1) 2001 年、2005 年、2009 年中国陆地植被年平均氧气生产量为 531.618×10^7 t, 云南省、内蒙古自治区、黑龙江省、四川省年氧气生产量最多。中国植被氧气生产量随季节变化明显, 夏季最多, 其值是春、秋季的 2 倍, 冬季的 8 倍。 (2) 中国陆地植被年氧气生产量空间分布为东南高、西北低, 以福建省、浙江省、台湾省、云南南部、西藏东南部最高。各季节氧气生产量春季以云南省南部、西藏东南部和中国华东地区为最高, 夏季以大、小兴安岭及长白山一带最高, 秋季位于东南沿海、云南省、西藏东南部, 冬季集中分布在云南南部与海南省。 (3) 2001—2009 年中国陆地植被年氧气生产量呈增加趋势, 增加率为 7.886%。宁夏回族自治区增加最多, 山西省次之。 (4) 植被覆盖变化是决定年氧气生产量增加的主要因素, 贡献率约为 60%, CO₂ 浓度增加、气候变化分别承担了 28%、12% 的贡献率。

关键词: 氧气生产量; 陆地植被; 模拟; 影响因素; 中国

Simulating the changing oxygen production of terrestrial vegetation and its influencing factors in China

LIU Xiaoxue¹, ZHANG Lijuan^{1,*}, LI Wenliang², ZHANG Xuezhen³, JIANG Chunyan¹

1 Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring of Geographic Environment, College of Heilongjiang Province, Harbin Normal University, Harbin 150025, China

2 Department of Geography, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee 53211, USA

3 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The amount of oxygen in the atmosphere directly affects air quality. Photosynthesis of terrestrial green vegetation is the main source of oxygen for the atmosphere. Therefore, simulating oxygen production generated from terrestrial vegetation has been used as a popular approach to assessing atmospheric environment quality. With the C-FIX model in this study, we simulated the Net Ecosystem Productivity (NEP) from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and climatic data such as temperature and radiation. Following the principle of the carbon-oxygen balance, annual oxygen productions of terrestrial vegetation in China in 2001, 2005, and 2009 were spatially estimated in ArcGIS, and their influencing factors were analyzed via model simulation. Our results suggest that (1) the total annual oxygen production of terrestrial vegetation in China is 531.618×10^7 t. The provinces of Yunnan, Heilongjiang, and Sichuan and the Inner

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42171217); 全球变化研究国家重大科学研究计划资助项目 (2010CB95901); 教育部博士点基金资助项目 (20142329110001)

收稿日期: 2014-04-09; 网络出版日期: 2015-03-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zlj19650205@163.com

Mongolia Autonomous Region contribute the largest source of oxygen, accounting for more than 35×10^7 t. Provinces of Hunan, Jiangxi, Hubei and Autonomous Regions of Guangxi and Tibet have the total oxygen production higher than 20×10^7 t. Areas with the lowest amount of oxygen production include the provinces of Taiwan, Hainan, the municipalities of Beijing, Tianjin, Shanghai, Hong Kong Special Administrative Region, and Ningxia Autonomous Region, accounting for 5×10^7 t in total. (2) A significant seasonal change in terrestrial oxygen production is detected with the highest totals occurring in the summer (259.438×10^7 t), about twice of the total in spring and fall, and eight times higher than that in the winter. Yunnan and Sichuan provinces have the highest production in the spring. The Inner Mongolia Autonomous Region and Heilongjiang Province have the highest in the summer, while Yunnan and Guangxi Autonomous Region have the highest in fall and winter. (3) Oxygen production in China shows a basic descending trend from southeast to northwest. The highest totals are located in Fujian, Zhejiang, Taiwan, southern Yunnan, and southeastern Tibet. Seasonally, there is a spatially significant variation in peak oxygen production, with the highest occurring in southern Yunnan, southeastern Tibet and east China in the spring, Daxinganling and Xiaoxinganling Mountain ranges in the summer, along the southeastern coast, Yunnan, and southeastern Tibet in the fall, and over southern Yunnan and Hainan Provinces in the winter. (4) Overall there is an increasing trend of oxygen production by terrestrial vegetation across China between 2001 and 2009 with a growth rate of 8%. The highest growth rates are observed in Ningxia Autonomous Region (>48%) Shanxi Province (35%), and provinces of Shaanxi, Hainan and Yunnan (20%) In contrast with the generally increasing trend in most areas, provinces of Xinjiang, Inner Mongolia, Guizhou, Chongqing, Shanghai, Hubei and Hunan reveal decreasing trends, in which Hunan reaches the highest decreasing rate of 10%. (5) Our results also indicate that the changing vegetation cover is the most significant factor in influencing the elevated oxygen production, accounting for 60% of total change. The increases in CO_2 and climate change contribute about 28% and 12%, respectively. Regionally, the increased vegetation cover plays a major role in northern China, while climate change is the major control in southern China.

Key Words: oxygen production; terrestrial vegetation; simulation; influencing factors; China

矿物燃料、氢气能源的开发利用、世界人口迅猛增长以及森林面积大幅度减少等诸多原因导致大气含氧量逐渐降低^[1]。研究表明,地球大气中氧气含量曾发生过多重大波动,由史前大气平均含氧量 30%—35% 降至当前 21%,并且低层大气氧气体积分数以平均每年 2 mg/m^3 的速率降低^[2-3]。大气低层空气含氧量长期处于或低于 19.5% 时,人类会产生缺氧症状,缺氧是癌症、心脏病以及严重损害人类健康的变质性疾病的主要原因^[4-5]。因此,研究大气中氧气含量的变化,也日益引起学术界广泛关注。

陆地上的氧气主要来源于绿色植物的光合作用^[6-7]。绿色植物通过光合作用生产有机物和释放氧气的同时,还通过呼吸作用消耗有机物和氧气。按照光合作用和呼吸作用方程中有机物和氧气质量比,通过模拟植被生产力,换算出植被生产或消耗的氧气量,是目前较多学者用于估算区域氧气生产量所采用的主要方法^[8-10]。绿色植物通过光合作用单位时间内所固定的有机碳量,称为总初级生产力(GPP);通过自养呼吸消耗,剩余的有机碳量称为净初级生产力(NPP);通过异养呼吸后净剩余有机碳,称为净生态系统生产力(NEP)^[11]。在已有研究中,估算区域植被氧气生产量的依据有所不同,有的学者按 GPP 估算^[12],没有考虑植被呼吸消耗;有的学者按 NPP 估算^[13-16],没有考虑植被异养呼吸消耗。而从机理上,按照 NEP 估算植被氧气生产量,因其充分考虑了植被呼吸消耗,所以更接近植被实际生产的氧气量,更能准确反映区域内大气氧气含量的变化。而目前依据 NEP 估算中国区域内陆地植被氧气生产量,并研究其时空变化的成果还较少。

本文采用植被生产力模拟模型(C-FIX 模型),在模拟植被 NEP 基础上,估算了 2001 年、2005 年和 2009 年中国区域陆地植被氧气生产量,结合 ArcGIS 空间叠加、裁切、栅格计算、空间统计等方法,揭示了 2001—2009 年中国区域内氧气生产量及其时空分布与变化。并通过控制实验,分析了影响中国区域内氧气生产量变化的主要因素。

1 数据来源与处理

归一化植被指数(NDVI)、月平均气温、月平均辐射是驱动 C-FIX 模型的主要参数,按照如下方法获取与处理。

1.1 归一化植被指数(NDVI)

归一化植被指数(NDVI)是 MOD13A2 产品,时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 1 km。覆盖中国区域的 NDVI 产品影像共有 34 景,本文共下载 2001 年、2005 年与 2009 年 1 月 1 日至 12 月 31 日 2346 景 NDVI 产品影像。利用 ERDAS8.7 软件将影像进行格式转换、图像拼接与投影转换等处理。由于 MOD13A2 产品时间分辨率为 16 d,有些月份有一幅 NDVI 产品,有些月份有两幅 NDVI 产品,对于两幅 NDVI 产品的月份,本文采用 ERDAS8.7 软件将两幅影像进行叠加平均。最终获得 2001 年、2005 年、2009 年各月 NDVI 产品共计 36 幅。

1.2 月平均气温数据

英国东英吉利大学气候研究所(CRU)提供的气象要素数据集,是根据陆面实际观测资料插值到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 得到的网格数据集。在反映我国年平均温度年际变化时,CRU 重建的序列资料与实际气温资料的相关系数达 0.84,所以 CRU 数据与实际观测资料吻合得很好^[17]。本文通过 Fortran 编程,界定中国区域经纬度,在 <http://badc.nerc.ac.uk/home/> 网站上,下载覆盖中国区域共 4904 个网格数据。

需要说明的是,中国境内共有 4000 多个气象观测台站,少于 CRU 数据提供的网格数据,而 CRU 数据也是根据观测资料进行插值的数据集,所以本文直接采用 CRU 数据,而没有采用气象观测资料。运用 ArcGIS10 软件中 Spatial Analyst 模块对逐月平均气温数据进行 Kriging 空间插值,获得中国区域内 2001 年、2005 年和 2009 年 1—12 月分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 共 36 幅气温数据栅格图层。

1.3 月太阳辐射通量

CRU 资料中没有地面辐射要素,只提供了月平均云量数据,本文依据云量和天文辐射估算地面辐射通量^[18]:

$$S_{g,d} = C_a S_{o,d} \quad (1)$$

式中, $S_{g,d}$ 为地面辐射日总量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); C_a 为地面总辐射与天文辐射的比例; $S_{o,d}$ 为天文辐射日总量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$),其计算公式为^[19]:

$$S_{o,d} = \frac{T}{\pi} \frac{I_0}{\rho^2} (\omega_0 \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_0) \quad (2)$$

式中, $S_{o,d}$ 为天文辐射日总量; $\frac{T}{\pi} = 458.4$; δ 为太阳赤纬; ρ 为日地平均距离修正项; ω_0 为时角; φ 为纬度。

采用 1.2 中方法,下载 2001 年、2005 年、2009 年中国区域 CRU 中各月云量数据,利用 Kriging 空间插值得到 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 云量网格数据。从南到北选取 20°N 、 22°N 、 24°N 、 25°N 、 26°N 、 28°N 、 30°N 、 32°N 、 34°N 、 35°N 、 36°N 、 38°N 、 40°N 、 42°N 、 44°N 、 45°N 、 47°N 、 48°N 、 50°N 、 52°N 、 54°N 共 21 条纬线,计算各纬度天文辐射日总量。每隔 0.1° 经度与纬线相交设置网格点(共 6205 个),按式(1)计算各网格点日地面辐射通量,再进行 Kriging 空间插值,得到中国区域 2001 年、2005 年和 2009 年 1—12 月分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 各月日均地面辐射通量数据图层,共 36 幅。

2 研究方法

2.1 植被净生态系统生产力(NEP)模拟

由 Frank Veroustraete 等建立的 C-FIX 模型是基于 Monteith 理论的光能利用率模型,可以实现区域尺度上 GPP、NPP 和 NEP 3 个基本碳循环分量的估算,模型的实用性与实效性较强^[20-22]。对于每一个给定的网格, C-FIX 模型使用如下公式来计算每天的 GPP、NPP 和 NEP 值 ($\text{gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$),公式中的下标 d 代表日值:

$$GPP_d = p(T_{atm}) \times CO_2fert \times \varepsilon \times fAPAR \times c \times S_{g,d}$$
 (3)

$$NPP_d = GPP_d \times (1 - A_d)$$
 (4)

$$NEP_d = NPP_d - R_{h,d}$$
 (5)

其中:

$$p(T_{atm}) = \frac{e^{(C_1 - \frac{\Delta H_{a,p}}{R_g \cdot T})}}{1 + e^{(\frac{\Delta S \cdot T - \Delta H_{d,p}}{R_g \cdot T})}}$$
 (6)

$$CO_2fert = \frac{[CO_2] - \frac{[O_2]}{2\tau} \frac{K_m \left(1 + \frac{[O_2]}{K_0}\right) + [CO_2]^{ref}}{[CO_2]^{ref} - \frac{[O_2]}{2\tau} \frac{K_m \left(1 + \frac{[O_2]}{K_0}\right) + [CO_2]}}$$
 (7)

$$fAPAR = 1.1638 \times NDVI - 0.1426$$
 (8)

$$A_d = (7.825 + 1.145T_a)/100$$
 (9)

$$R_{h,d} = k_{s,y} \cdot Q_{10}^{T_a/10}$$
 (10)

式中需要说明的参数见表 1。

表 1 C-FIX 模型中参数的描述
Table 1 Description of parameters in the C-FIX model

参数 Parameter	意义 Significance	取值 Value	单位 Unit	参数 Parameter	意义 Significance	取值 Value	单位 Unit
$p(T_{atm})$	归一化气温依赖因子			ΔS	CO ₂ 动态熵平衡	704.98	J K ⁻¹ mol ⁻¹
CO ₂ fert	归一化 CO ₂ 施肥效应因子			$\Delta H_{d,p}$	惰性分子能量	211000	J/mol
ε	光能利用率	1.10	gC/MJ	[CO ₂]	目前测定的大气 CO ₂ 混合浓度		mg/m ³
c	气候效率因子	0.48		[O ₂]	目前测定的大气 O ₂ 混合浓度	20.9	mg/m ³
$S_{g,d}$	地面辐射日总量		MJ m ⁻² d ⁻¹	τ	CO ₂ 对 O ₂ 浓度比例		
A_d	植被自养呼吸率			K_m	Rubisco 与 CO ₂ 亲和力常数		
$R_{h,d}$	土壤异养呼吸通量		gC m ⁻² d ⁻¹	K_0	O ₂ 的阻止力常数		
C_1	常数	21.77		[CO ₂] ^{ref}	基准大气中 CO ₂ 混合浓度	285	mg/m ³
$\Delta H_{a,p}$	有活力分子能量	52750	J/mol	NDVI	归一化植被指数		
R_g	普适气体常数	8.31	J K ⁻¹ mol ⁻¹	T_a	日平均气温		℃
T	日平均气温		K	$k_{s,y}$	全年日平均异养呼吸效率		gC m ⁻² d ⁻¹
fAPAR	植被可吸收的光合作用有效辐射比例			Q_{10}	温度每升高 10℃,植物异养呼吸相对增加的倍数	1.5	

其中 K_m 、 K_0 、 τ 、 $k_{s,y}$ 需要进一步计算:

$$K_m = Ae^{(-E_a/R_gT)}$$
 (11)

式中,当 $T \geq 15^\circ\text{C}$, $E_{a1} = 59.4 \text{ kJ/mol}$, $A_1 = 2.419 \times 10^{13}$; 当 $T < 15^\circ\text{C}$, $E_{a2} = 109.6 \text{ kJ/mol}$, $A_2 = 1.976 \times 10^{22}$ 。

K_0 根据式 (11) 进行计算, 其中 $A_0 = 8240$, $E_{a0} = 13.9135 \text{ kJ/mol}$ 。

$$\tau = A_\tau e^{(-E_{a\tau}/R_gT)}$$
 (12)

式中, $A_\tau = 7.87 \times 10^{-5}$, $E_{a\tau} = -42.8969 \text{ kJ/mol}$ 。

$$k_{s,y} = \frac{\sum_{d=1}^{365} \frac{GPP_d}{b_y}}{\sum_{d=1}^{365} p(T_{atm})_d}$$
 (13)

式中, b_y 表示土壤异养呼吸年平均标定系数, 取值 1.0。

2.2 通过净生态系统生产力估算植被氧气生产量

净生态系统生产力 (NEP) 是植物光合作用生成的有机碳, 再经过呼吸作用消耗剩余的有机碳量, 因此, 所对应的氧气量为植被净氧气生产量。本文在实际计算过程中, 按“2.1 植被净生态系统生产力 (NEP) 模拟”标题下的公式逐级模拟植被日均 GPP、NPP、NEP。再依据光合作用方程中的净生态系统生产力 (NEP) 与释放氧气的质量比 (1:2.667), 根据 NEP 换算成植被日均氧气生产量。

2.3 控制实验法

为了研究中国陆地植被氧气生产量变化原因, 设计控制实验, 即通过控制驱动因子, 模拟不同情景下的植被氧气生产量, 并与实际情景下氧气生产量对比, 定量分析不同因子对氧气生产量的影响 (表 2)。

表 2 控制实验

Table 2 Controlled experiments

控制实验 Controlled experiments	年份 Year		模拟结果 Simulated results	变化量 Δ variation	意义 Significance
	2001	2009			
控制实验 1	NDVI	$T_a; S_{g,d}; [CO_2]$	$O_{2,control}$	$O_{2,2009} - O_{2,control}$	植被引起变化
控制实验 2	$[CO_2]$	$T_a; S_{g,d}; NDVI$	$O_{2,control2}$	$O_{2,2009} - O_{2,control2}$	CO_2 浓度引起变化
控制实验 3	NDVI; $[CO_2]$	$T_a; S_{g,d}$	$O_{2,control3}$	$O_{2,control3} - O_{2,2001}$	气候引起变化 (气温与辐射)

$O_{2,control2}$ 、 $O_{2,control3}$ 分别为控制实验 2 与控制实验 3 模拟的植被氧气生产量

以控制实验 1 为例说明。如分析植被变化对氧气生产量的影响, 设计控制实验为: 假设 2001 年以来植被覆盖性质 (NDVI) 不变, 采用 2001 年植被 NDVI、2009 年气候要素驱动 C-FIX 模型模拟 NEP, 得到控制实验下中国陆地植被氧气生产量模拟值。将 2009 年实际植被氧气生产量模拟值减去控制实验模拟值, 差值为植被变化引起的年氧气生产量变化值, 表达式为:

$$\Delta_{\text{variation}} = O_{2,2009} - O_{2,control} \quad (14)$$

式中, $\Delta_{\text{variation}}$ 表示由于植被变化引起的氧气变化量; $O_{2,2009}$ 为 2009 年实际模拟植被氧气生产量; $O_{2,control}$ 为控制实验模拟的植被氧气生产量。

2.4 空间分析方法

采用 ArcGIS 空间叠加、裁切、栅格计算、空间统计等方法^[23], 在 1 km×1 km 栅格日均植被氧气生产量基础上, 计算全国及各行政区月、季及年氧气生产量。

具体操作过程为: 采用月平均气温、月平均辐射通量代替日气温、辐射通量值, 其它参数如表 1, 驱动 C-FIX 模型, 利用 ERDAS 逐次计算 GPP、NPP、NEP。按 1:2.667 比例, 依据 NEP 计算氧气生产量。在日值基础上, 乘以每月天数计算各月氧气生产量。将 2001 年、2005 年、2009 年各月图层, 采用 ArcGIS 空间叠加、栅格计算、空间统计等方法, 得到中国区域内各季节、年植被氧气生产量。利用 ArcGIS 空间裁切、空间统计, 得到各行政区各季节、年植被氧气生产量。

2.5 年变化率

2001—2009 年氧气生产量年变化率计算公式为:

$$R = \left(\frac{O_{2,2009} - O_{2,2001}}{O_{2,2001}} \right) \times 100\% \quad (15)$$

式中, R 为年变化率; $O_{2,2001}$ 为 2001 年实际模拟植被氧气生产量; $O_{2,2009}$ 为 2009 年实际模拟植被氧气生产量。

3 结果与分析

3.1 中国陆地植被氧气生产量及分布

将 2001 年、2005 年、2009 年的植被氧气生产量平均, 用以说明 2001—2009 年中国区域年氧气生产量及分布。中国陆地植被年氧气生产总量为 531.618×10^7 t。云南省、内蒙古自治区、黑龙江省、四川省明显高于其

它省份,年氧气生产量在 35×10^7 t 以上;广西壮族自治区、湖南省、江西省、湖北省、西藏自治区年氧气生产量在 20×10^7 t 以上;台湾省、海南省、北京市、宁夏回族自治区、天津市、上海市及香港 7 个行政区年氧气生产量低于 5×10^7 t(表 3)。

表 3 中国各行政区氧气生产量、年变化量及年变化率

Table 3 The oxygen production, annual oxygen change amount, and annual oxygen change rate in different administrative divisions of China

行政区 Administrative division	氧气生产量 Oxygen production/ 10^7 t					单位面积量 Amount per unit area / (t/km^2)	年变化量 Annual oxygen change amount / 10^7 t (2001—2009)	年变化率 Annual oxygen change rate/% (2001—2009)
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Fall	冬季 Winter	年总量 Annual total			
云南	14.897	10.522	12.361	8.258	46.039	1204.989	10.298	24.578
内蒙古	5.008	31.288	4.111	0.065	40.473	353.813	-0.403	-1.013
黑龙江	4.706	26.895	4.123	0.038	35.762	792.483	0.259	0.710
四川	10.303	14.926	7.578	2.660	35.467	734.192	3.948	11.964
广西	5.864	8.350	9.809	2.899	26.922	1144.682	2.774	10.195
湖南	5.492	9.390	7.048	1.233	23.163	1092.622	-2.423	-9.721
江西	5.100	7.757	6.584	1.464	20.905	1251.827	0.266	1.240
湖北	6.039	9.242	4.595	0.881	20.757	1116.294	-1.525	-7.175
西藏	4.287	8.172	5.828	1.842	20.129	166.462	2.417	12.526
新疆	3.245	13.833	2.260	0.024	19.363	118.412	-0.114	-0.609
陕西	5.062	10.446	3.307	0.455	19.269	935.880	4.369	27.392
广东	3.745	4.865	6.736	2.634	17.981	1036.431	1.298	7.042
贵州	4.650	7.710	4.300	1.072	17.732	1008.140	-0.773	-4.177
河南	5.874	7.521	2.954	0.535	16.884	1020.668	1.329	8.289
福建	3.910	5.444	5.348	1.839	16.540	1387.496	1.068	6.358
安徽	5.286	6.618	3.620	0.735	16.259	1159.033	1.546	10.133
河北	3.678	9.383	2.838	0.133	16.032	857.300	0.780	5.055
吉林	2.312	10.896	2.314	0.034	15.556	816.917	1.303	8.335
山东	3.931	7.046	2.582	0.244	13.803	908.806	1.732	13.135
浙江	3.632	4.915	3.890	0.925	13.361	1346.128	1.715	13.752
甘肃	2.540	7.625	1.970	0.223	12.359	304.957	2.086	18.985
辽宁	1.867	8.288	2.034	0.045	12.234	849.615	1.915	16.426
山西	2.522	7.321	2.129	0.121	12.094	773.233	3.438	35.060
青海	0.944	7.795	1.604	0.112	10.455	145.977	0.904	9.037
江苏	3.378	4.159	2.212	0.426	10.176	1012.340	1.082	11.491
重庆	2.506	4.086	1.833	0.390	8.815	1069.139	-0.436	-5.093
台湾	1.125	1.479	1.316	0.627	4.547	1296.739	0.171	3.675
海南	0.933	0.841	1.274	0.965	4.013	1213.393	0.957	26.333
北京	0.412	0.957	0.300	0.014	1.682	1026.768	0.057	3.539
宁夏	0.206	0.976	0.213	0.007	1.403	270.495	0.552	48.230
天津	0.215	0.523	0.228	0.007	0.972	841.108	0.025	2.560
上海	0.137	0.167	0.131	0.022	0.457	757.833	-0.030	-6.519
香港	0.003	0.003	0.005	0.003	0.013	162.276	0.002	19.347
全国	123.812	259.438	117.435	30.932	531.618	560.394	40.488	7.886

澳门因数据缺失,无植被氧气生产量模拟结果

比较单位行政区面积年植被氧气生产量,排列次序与总量相比发生了明显变化。南方省份由于年平均温度高,植被覆盖率高,所以单位面积植被氧气生产量偏高,如福建省、浙江省、台湾省、江西省、海南省、云南省名列前 6 位,植被生产氧气量在 $1200 \text{ t}/\text{km}^2$ 以上,但香港特区,由于植被覆盖面积较低,行政区内单位面积氧气生产量也较低;北方省份年平均气温较低,单位行政区面积植被氧气生产量相对较低,但同时与区域内植被覆盖率有关,如黑龙江省年平均气温全国最低,但区域内植被覆盖率较高,单位行政区面积植被氧气生产量为

792.483 t,排在 23 位;而植被覆盖率偏低的省份,如西藏自治区、青海省、新疆维吾尔自治区则在 200 t 以下,行政区之间最大相差 6 倍以上(表 3)。

植被氧气生产量随季节变化明显。北方省份夏季气温明显高于冬季,因此,夏季氧气生产量显著高于其它季节,冬季氧气生产量很少;南方省份季节间温差小于北方,故季节间氧气生产量差异较小,但也以夏季为最多,个别省份出现秋季高于夏季的情景。平均而言,中国区域夏季植被氧气生产量最多,为 259.438×10^7 t,是春、秋季的两倍,冬季的 8 倍。春季云南省、四川省最高;夏季内蒙古自治区、黑龙江省最高;秋季、冬季均以云南省和广西壮族自治区为最高(表 3)。

3.2 中国陆地植被氧气生产量时间变化

2001—2009 年间中国陆地植被年氧气生产量呈持续上升趋势,2001 年、2005 年、2009 年分别为 513.399×10^7 t、 524.259×10^7 t、 553.887×10^7 t,2009 年比 2001 年增加了 7.886%,但各行政区变化趋势不一致。新疆、内蒙古、贵州省、重庆市、湖南省、湖北省、上海市 7 个行政区表现为减少趋势,其它省份均呈现增加趋势。其中,宁夏回族自治区增加显著,达 48%,山西省次之,为 35%;陕西省、海南省及云南省均在 20% 以上;湖南省植被氧气生产量减少最多,约为 10%(表 3)。

3.3 中国陆地植被氧气生产量空间分布

由于中国区域内,东部植被覆盖较高,且年内变化较少,所以中国区域植被年氧气生产量表现为东部高于西部、东南部较高的基本趋势。但植被空间分布并不均匀,所以植被氧气生产量也出现空间不均匀性,表现为台湾中东部、海南、云南南部、西藏东南部、浙江、福建、安徽南部植被年氧气生产量较高(图 1)。

中国植被氧气生产量季节性空间分布表现为以下特征:1) 季节气温、辐射不同,不同季节单位面积植被氧气生产量不同。以最高值为例,夏季为 978 t/km^2 ,比春季高 100 t/km^2 ,比秋季、冬季高 300 t/km^2 以上;2) 受到温度影响,植被光合作用受到限制,不同季节生产氧气量的空间覆盖面积不同。以大于 100 t/km^2 为例,夏季、春季、秋季、冬季空间覆盖面积分别为 619.050 万 km^2 、402.851 万 km^2 、399.531 万 km^2 、104.248 万 km^2 ,夏季约为冬季的 6 倍;3) 四个季节均表现出东部高、西部低的特征,但各季节氧气生产量最高值空间分布却差异明显(图 2—图 5)。春季最高值位于云南省南部、西藏东南部,安徽省部分区域也较高;夏季氧气生产量最高值明显北移,东北地区的大、小兴安岭及长白山一带最高,秦岭一带也有部分最高值;秋季和冬季最高值则集中在东南部,秋季东南沿海、云南、西藏东南部均为氧气生产量高值区;冬季生产氧气的区域明显减少,高值区位于云南南部及海南省。

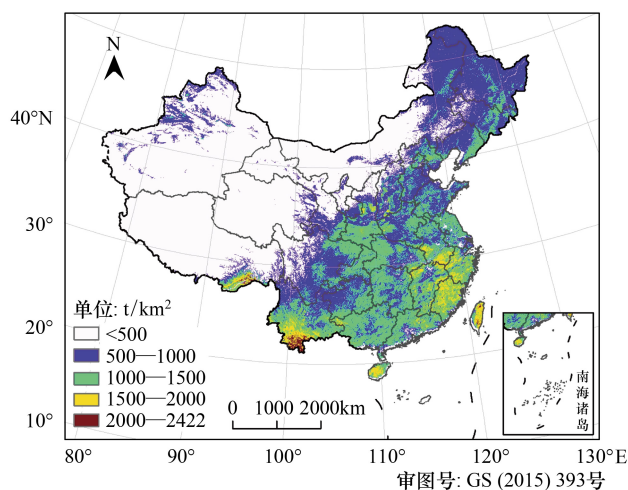


图 1 中国年氧气生产量空间分布

Fig.1 Spatial distribution of annual oxygen production of China

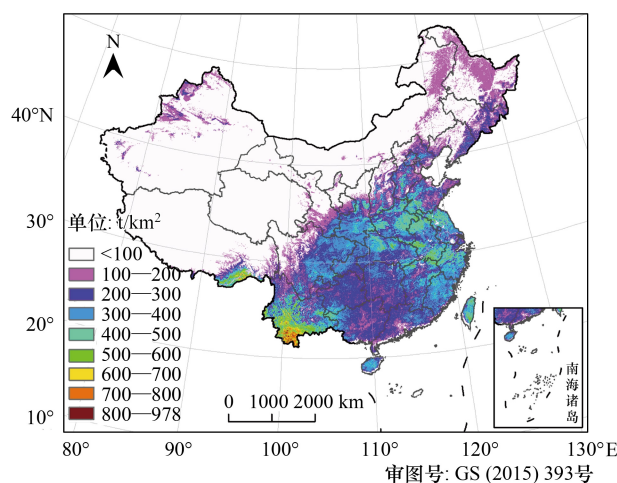


图 2 中国春季氧气生产量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of oxygen production of China in spring

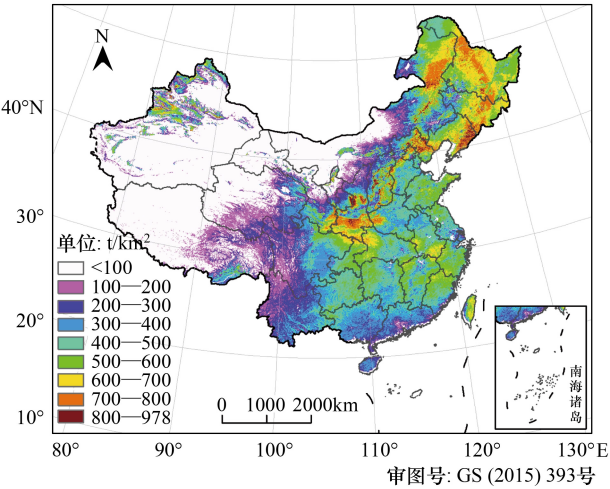


图 3 中国夏季氧气生产量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of oxygen production of China in summer

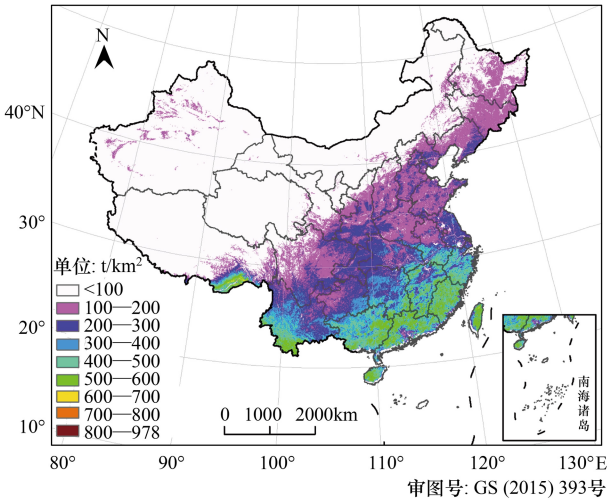


图 4 中国秋季氧气生产量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of oxygen production of China in fall

3.4 中国陆地植被氧气生产量空间变化

将 2009 年植被氧气生产量分布图与 2001 年氧气生产量分布图叠加相减,得到 2001—2009 年中国植被年氧气生产量空间分布变化图(图 6)。2001—2009 年中国植被氧气生产量增加的区域面积为 648.867 万 km²,减少的区域面积为 311.133 万 km²,增加区域约为减少区域的 2.1 倍。陕西省、山西省、云南省植被氧气生产量增加的区域面积较多,内蒙古东部、重庆市、贵州省、湖北省、湖南省植被氧气生产量减少的面积较大。

3.5 中国陆地植被氧气生产量变化原因分析

控制实验结果表明,2001—2009 年中国区域内植被变化使年氧气生产量增加了 32.589×10^7 t, CO₂ 浓度增加使氧气生产量增加了 15.307×10^7 t, 气候变化(气温与地面辐射)使氧气生产量减少了 6.500×10^7 t(表 4)。如与 2001—2009 年中国陆地植被氧气变化量总值进行对比分析,可得植被性质变化引起的变化量占 59.911%, CO₂ 浓度引起的变化量占 28.139%, 气候变化占 11.950%, 说明植被变化对氧气生产量变化的贡献率约为 CO₂ 浓度贡献率的 2 倍, 气候变化贡献率的 5 倍。

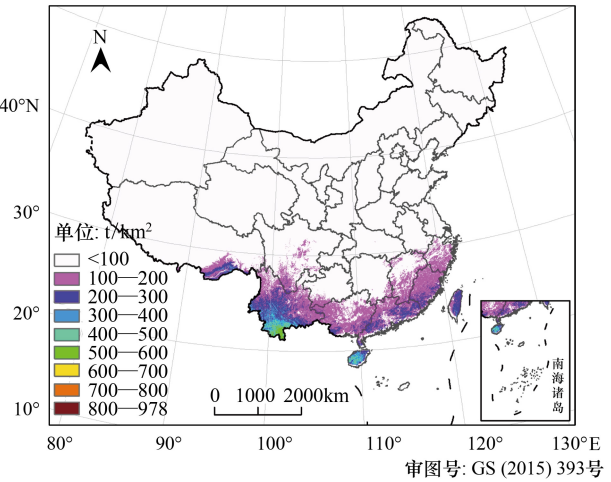


图 5 中国冬季氧气生产量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of oxygen production of China in winter

表 4 控制实验结果

Table 4 Results of controlled experiments

控制实验 Controlled experiment	控制实验模拟值/ 10^7 t $O_{2, control}$	实际模拟值/ 10^7 t Actual analog value	差值/ 10^7 t Δ variation
控制实验 1	521.298	553.887	32.589
控制实验 2	538.580	553.887	15.307
控制实验 3	506.899	513.399	-6.500

控制实验结果空间分布图如图 7—图 9, 可得: (1) 全国范围内植被变化使氧气生产量增加区域的面积为 506.536 万 km², 减少区域面积为 453.464 万 km²。陕西省北部、山西省、河南省、云南省中东部植被氧气生产

量显著增加;CO₂浓度增加使全国植被氧气生产量均表现为增加趋势,东部地区增加明显;气候变化引起沿海省份及云南西部增加显著,南方地区中部省市植被氧气生产量对气候变化较敏感,呈显著减少趋势。(2)将图7—图9与图6对比,除CO₂浓度增加使全区域增加外,引起不同区域氧气生产量的变化原因不一样。由于植被NDVI增加引起的区域有:黑龙江省与吉林省交界区域、河北、河南、山西、陕西、山东、安徽境内的氧气生产量增加区、云南省东部;由于气候变化引起的区域有:浙江省、海南省、台湾省、云南省西部。而在重庆、贵州、湖北、湖南交界区域,植被变化使氧气生产量增加,但气候变化使氧气生产量减少,最终导致此区域内氧气生产量减少。

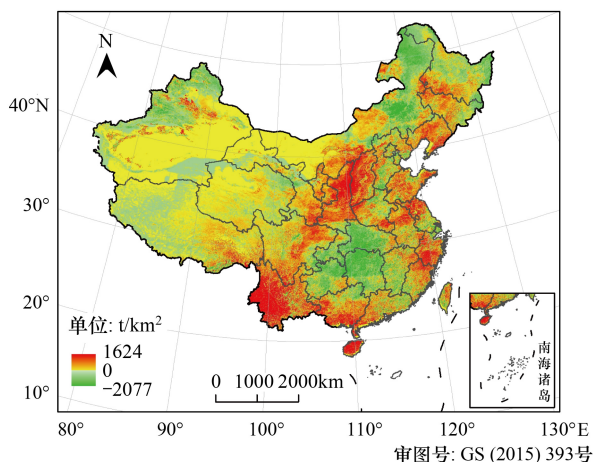


图6 中国2001—2009年氧气生产量差值空间分布

Fig.6 Spatial distribution of the oxygen production differences between 2001 and 2009 in China

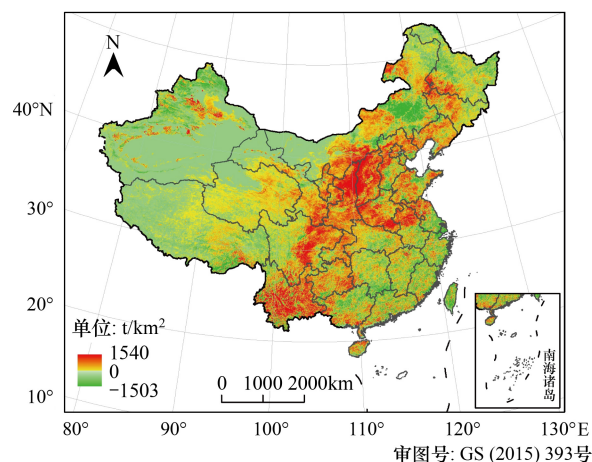


图7 植被覆盖变化引起的氧气生产量变化空间分布

Fig.7 Spatial distribution of oxygen production change induced by vegetation change

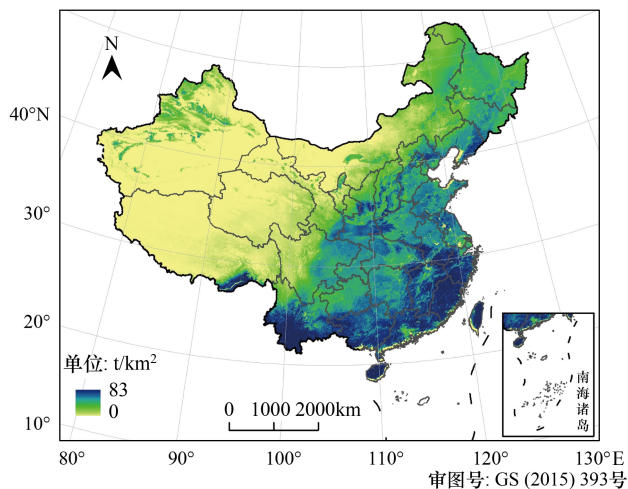


图8 CO₂浓度变化引起的氧气生产量变化空间分布

Fig.8 Spatial distribution of oxygen production change induced by CO₂ density change

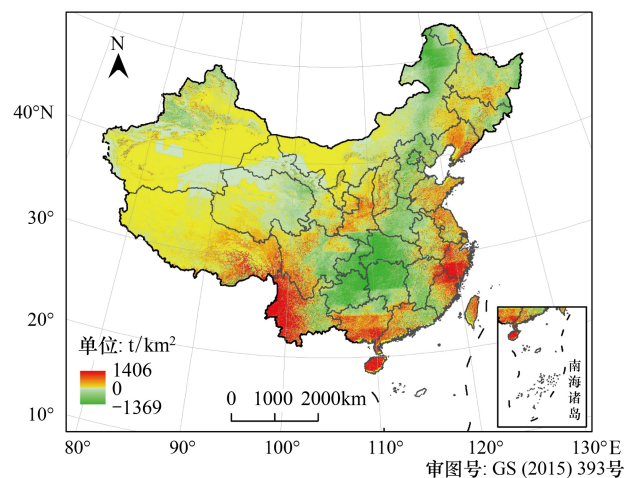


图9 气候变化引起的氧气生产量变化空间分布

Fig.9 Spatial distribution of oxygen production change induced by climate change

4 讨论

(1)近年来,国内外较多学者采用C-FIX模型模拟植被生产力,均取得较好的模拟效果。如Veroustraete等使用NOAA/AVHRR的NDVI数据分别对比比利时、全欧洲植被NPP和NEP进行了模拟^[24-25];卢玲使用

SPOT/VEGETATION 遥感数据估算了中国西部地区植被 NPP 和 NEP^[26];张丽娟、张冬有等利用 C-FIX 模型模拟了黑龙江省森林 NEP 和 NPP^[10,22],模拟精度较高。

(2)迄今为止,由于通过观测方法较难获取单位面积或区域内植被氧气生产量,故本文采用文献比较方法对模拟结果进行检验。国内外已有较多估算区域植被氧气生产量的研究成果,但由于采用的方法不同,结果有所不同。有的学者利用区域植被生物量估算氧气量,例如张颖等利用不同类型生态系统单位面积生物量释氧经验系数,乘以相应生态系统面积,估算郑州市绿色生态系统年氧气生产量为 15.759 t/hm^2 ^[27]。多数学者按照植被净初级生产力(NPP)估算氧气生产量,但模拟 NPP 方法不一样,如管东生等通过建立 NPP 与生物量关系方程,依据生物量估算 NPP,再按照碳氧质量比,估算广州市绿地年氧气生产量为 23.270 t/hm^2 ^[13];谢红霞等利用第一性生产力模型^[28]和农业生产力模型^[29],估算了陕北黄土高原农作物、果树、森林和牧草释氧量,平均为 7.169 t/hm^2 ^[15];刘宪锋等利用光能利用模型计算 NPP,估算青藏高原植被年氧气生产量为 4.312 t/hm^2 ^[16]。本文采用 NEP 估算的是植被呼吸消耗后的净氧气生产量,因此比以上结果低。为了与以上结果比较,将郑州市、广州市、陕北黄土高原、西藏高原行政区域与本文估算的氧气生产量空间叠加,提取以上区域的植被年氧气生产量分别为 8.850 、 8.346 、 4.737 、 1.584 t/hm^2 。相比,本文研究结果合理。

国外按生产力估算陆地植被氧气生产量的研究较少,但研究 NPP、NEP 较多,本文将 NPP、NEP 换算成植被氧气生产量。Nayak、Li 和 Potter 利用 CASA 模型分别估算了印度陆地植被、加利福尼亚中部海岸草原及美国新罕布什尔州巴特利特实验林的 NPP,换算成氧气生产量为 14.507 、 9.440 、 13.413 t/hm^2 ^[30-32];将 Arain 估算的加拿大安大略南部针叶林 NEP,换算成氧气量为 5.227 t/hm^2 ^[33];Nakazawa 等认为阔叶林年氧气生产量为 18.25 t/hm^2 ^[34];Berbigier 等估算法国森林年氧气生产量为 11.468 t/hm^2 ^[35]。本文裁切黑龙江省森林年氧气生产量为 8.399 t/hm^2 ,与 Arain 估算的加拿大森林氧气量相比,结果合理。

(3)空气负离子含量是生态旅游的评价指标,研究表明,空气负离子浓度达 700 个/cm^3 以上时对人体健康有益^[36]。植物通过光合作用释放氧气,氧气和水分比空气中其它分子亲电性更好,优先形成空气负离子^[37],故植被生产氧气量较多的地区,空气负离子浓度则较高。因此,本文模拟的区域陆地植被氧气生产量,也为人们选择最佳生态旅游区提供了参考。如夏季中国境内,东北地区的大、小兴安岭,长白山一带及秦岭一带氧气生产量最高,黑龙江省五大连池风景区、伊春市国家森林公园及牡丹江镜泊湖、吉林省长白山天池和龙湾群国家森林公园、辽宁省千山风景区、陕西省境内的秦岭国家植物园等位于其中,成为生态旅游首选;春季云南省西双版纳、西藏山南地区的雅鲁河风景名胜区是最佳生态旅游区;秋季如福建武夷山风景区、广东丹霞山风景名胜区、广西姑婆山国家森林公园、海南尖峰岭和亚龙湾森林公园、台湾省的阿里山与日月潭风景区、云南西双版纳、西藏雅鲁河风景区等均位于氧气生产量高值区;冬季云南省西双版纳和海南岛植被氧气生产量最多,是冬季旅游度假的最好选择。

(4)本文采用控制实验分析了植被、气候和 CO_2 浓度变化引起的氧气生产量变化,解释了三种因素在不同空间区域引起的变化。但由于缺乏详尽的中国区域内植被和 CO_2 浓度变化等资料,及受到文章篇幅限制,没能进一步结合气候空间变化进行实际比对,需要后续研究进一步验证。

(5)由于大气存在复杂的水平和垂直交换,大气本底也包含 20.9% 的氧气,因此,本文所模拟的区域氧气量也不能停留在源地,区域的氧气生产总量不能直接用来评价区域内大气质量。加之由于区域经济发展不平衡,工业矿物燃料燃烧、生物呼吸消耗的氧气量不相同,所以植被生产的氧气量换算成大气中氧气浓度,还需要进行深入的研究,本文仅以区域植被氧气生产量作为间接指标,为研究大气质量的变化提供参考。

本文在计算过程中,涉及到较为复杂的影像数据下载、图层叠加、裁切、栅格计算等,会出现图形纠正、矢量数据与栅格数据转化、界线对接、空间统计等误差,会影响模拟结果的精度。

5 结论

本文基于植被 NDVI、气温、辐射及 CO_2 浓度等资料,在模拟植被净生态系统生产力基础上,估算了 2001—

2009 年中国陆地植被氧气生产量,并分析了影响因素。认为 2001—2009 年,中国陆地植被年氧气生产量为 531.618×10^7 t,呈增加趋势,共增加 40.488×10^7 t。植被性质变化、CO₂ 浓度增加使中国植被氧气生产量增加,气候变化使氧气生产量减少。植被增加是北方省份氧气生产量增加的主要原因,气候变化则是影响南方省份氧气生产量发生变化的主要因素。2001—2009 年,云南省、内蒙古自治区、黑龙江省、四川省年氧气生产量位居全国前四位。新疆、内蒙古、贵州省、重庆市、上海市、湖北省、湖南省 7 个行政区的植被氧气生产量表现为减少趋势,其它省份均呈现增加趋势。夏季植被氧气生产量最多,是春、秋季的 2 倍,冬季的 8 倍。春季云南省、四川省最高;夏季内蒙古自治区、黑龙江省最高;秋季、冬季均以云南省和广西壮族自治区为最高。各季节单位面积年氧气生产量最高值春季位于云南省南部、西藏东南部,夏季位于大兴安岭、小兴安岭及长白山一带,秋季位于东南沿海、云南、西藏东南部,冬季集中于云南南部及海南省。

参考文献 (References):

- [1] 徐春堂. “温室效应”与“氧气枯竭”. 枣庄学院学报, 2007, 24(2): 87-88.
- [2] Goldblatt C, Lenton T M, Watson A J. Bistability of atmospheric oxygen and the Great Oxidation. *Nature*, 2006, 443(7112): 683-686.
- [3] 秦涛, 姜莹英, 张红雨. 氧气起源及对生命进化的促进作用研究进展. 红河学院学报, 2011, 9(4): 9-12.
- [4] 陈一文. 对人类持续安全健康生存, 大气“氧气枯竭”造成比“全球温室效应”更为严重恶果. 中国人口·资源与环境, 2008, 18: 287-290.
- [5] 吴中全. 氧气区域生态补偿及其模型构建研究[D]. 成都: 西南大学, 2009.
- [6] 于潜. 地球上的氧气是怎样出现的. 生物学通报, 1991, (6): 10-10.
- [7] 杨玉东. 氧气的产生对大气圈和生物演化的影响. 生物学杂志, 1997, 14(1): 47-48.
- [8] 马长欣, 刘建军, 康博文, 孙尚华, 任军辉. 1999—2003 年陕西省森林生态系统固碳释氧服务功能价值评估. 生态学报, 2010, 30(6): 1412-1422.
- [9] 徐茜, 王晓峰, 任志远, 李晶. 草地植被净第一性生产力及固碳释氧量的估算. 测绘科学, 2012, 37(5): 132-134, 144-144.
- [10] 张丽娟, 姜春艳, 马骏, 张安康, 姜蓝齐, 吴霜. 黑龙江省 20 世纪森林变化及对氧气释放量的影响. 生态学报, 2014, 34(2): 430-441.
- [11] 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 陈安平. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系. 植物生态学报, 2001, 25(4): 414-419.
- [12] 江波, 欧阳志云, 苗鸿, 郑华, 白杨, 庄长伟, 方瑜. 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价. 生态学报, 2011, 31(8): 2236-2244.
- [13] 管东生, 陈玉娟, 黄芬芳. 广州城市绿地系统碳的贮存、分布及其在碳氧平衡中的作用. 中国环境科学, 1998, 18(5): 437-441.
- [14] 彭江颖. 珠江三角洲植被对区域碳氧平衡的作用. 中山大学学报: 自然科学版, 2003, 42(5): 105-108.
- [15] 谢红霞, 任志远, 李锐. 陕北黄土高原土地利用/土地覆被变化中植被固碳释氧功能价值变化. 生态学杂志, 2007, 26(3): 319-322.
- [16] 刘宪锋, 任志远, 林志慧. 青藏高原生态系统固碳释氧价值动态测评. 地理研究, 2013, 32(4): 663-670.
- [17] 闻新宇, 王绍武, 朱锦红, David V. 英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化. 大气科学, 2006, 30(5): 894-904.
- [18] 黄治钟, 潘毅群. 一种基于统计的逐时太阳辐射数据计算方法 // 上海市制冷学会 2005 年学术年会论文集. 上海: 上海制冷学会, 2005: 442-445.
- [19] 周淑贞, 张如一, 张超. 气象学与气候学. 北京: 高等教育出版社, 1997: 156-156.
- [20] Veroustraete F, Sabbe H, Eerens H. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-FIX model and Euroflux data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(3): 376-399.
- [21] 卢玲, 李新, Veroustraete F. 中国西部地区植被净初级生产力的时空格局. 生态学报, 2005, 25(5): 1026-1032.
- [22] 张冬有, 冯仲科, 李亦秋, 张丽娟, 董斌. 基于 C-FIX 模型的黑龙江省森林植被净初级生产力遥感估算. 林业科学, 2011, 47(7): 13-19.
- [23] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程. 北京: 科学出版社, 2006.
- [24] Veroustraete F, Patyn J, Myneni R B. Estimating net ecosystem exchange of carbon using the normalized difference vegetation index and an ecosystem model. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(1): 115-130.
- [25] Sabbe H, Eerens H, Veroustraete F. Estimation of the carbon balance of European terrestrial ecosystems by means of the C-FIX model // *Proceeding of 'The 1999 EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' Conference*. Copenhagen: EUMETSAT, 1999: 271-278.
- [26] 卢玲. 中国西部地区净初级生产力及碳循环研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003: 25-29.
- [27] 张颖, 王群, 李边疆, 王万茂. 应用碳氧平衡法测算生态用地需求量实证研究. 中国土地科学, 2007, 21(6): 23-28.
- [28] 周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究. 植物生态学报, 1996, 20(1): 11-19.
- [29] 郑元润, 周广胜, 张新时, 王建林, 太华杰. 农业生产力模型初探. 植物学报, 1997, 39(9): 831-836.
- [30] Nayak R K, Patel N R, Dadhwal V K. Estimation and analysis of terrestrial net primary productivity over India by remote-sensing-driven terrestrial

- biosphere model. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 170(1/4): 195-213.
- [31] Li S, Potter C, Hiatt C. Monitoring of net primary production in California rangelands using Landsat and MODIS satellite remote sensing. *Natural Resources*, 2012, 3(2): 56-65.
- [32] Potter C, Gross P, Genovese V, Smith M L. Net primary productivity of forest stands in New Hampshire estimated from Landsat and MODIS satellite data. *Carbon Balance and Management*, 2007, 2: 9.
- [33] Arain M A, Restrepo-Coupe N. Net ecosystem production in a temperate pine plantation in southeastern Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128(3/4): 223-241.
- [34] Nakazawa T. Variations of carbon dioxide and methane in the atmosphere and their global cycles. *Global Environment Research*, 1998, 2: 5-14.
- [35] Berbigier P, Bonnefond J M, Mellmann P. CO₂ and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(3): 183-197.
- [36] 邵海荣, 贺庆棠. 森林与空气负离子. *世界林业研究*, 2000, 13(5): 19-23.
- [37] 秦俊, 王丽勉, 高凯, 胡永红, 王玉勤, 由文辉. 植物群落对空气负离子浓度影响的研究. *华中农业大学学报*, 2008, 27(2): 303-308.