

DOI: 10.5846/stxb201812312853

张帅帅, 崔耀平, 傅声雷, 付一鸣, 刘小燕, 唐希颖, 陈良雨, 李楠. 中国森林面积变化及其温室气体储量模拟研究. 生态学报, 2020, 40(4): 1140-1149.

Zhang S S, Cui Y P, Fu S L, Fu Y M, Liu X Y, Tang X Y, Chen L Y, Li N. Modeling greenhouse gas sequestration potential of forest change in China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1140-1149.

中国森林面积变化及其温室气体储量模拟研究

张帅帅^{1,2}, 崔耀平^{1,2,*}, 傅声雷², 付一鸣², 刘小燕², 唐希颖², 陈良雨², 李楠²

1 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004

2 河南大学环境与规划学院, 开封 475004

摘要: 陆地生态系统承载的温室气体对全球碳循环及气候调节服务意义重大, 森林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 量化森林对温室气体的储量有利于从生物地球化学角度研究全球变化问题。针对中国森林生态系统承载的温室气体在大尺度上无法有效量化的问题, 基于 2000 与 2010 年两期土地利用数据和前人的相关研究, 通过一个生态系统温室气体值模型, 模拟得到中国森林生态系统承载的三大主要温室气体 (CO_2 , CH_4 , N_2O) 的量。结果表明: (1) 中国森林生态系统的面积从 2000 年的 $224.3 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 略增到 2010 的 $224.6 \times 10^6 \text{ hm}^2$; 其中落叶阔叶林、常绿阔叶林和针叶林的面积减少, 而混交林与灌木林的面积增加; (2) 对应地, 2000 和 2010 年中国森林的温室气体储量分别为 154.03 和 154.37 Pg CO_2 当量, 10 年间增加了 0.34 Pg CO_2 当量。其中, 常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林在研究时段内的 GHG 储量减少, 而混交林和灌木林增加。分区来看, 温室气体储量增长较多的区域有华北、西北与西南地区, 分别增长了 0.13 Pg CO_2 、0.12 Pg CO_2 与 0.15 Pg CO_2 当量。温室气体储量减少较明显的是东北地区, 减少了约 0.1 Pg CO_2 当量。本研究分别用本地化参数和模型自带参数, 首次尝试对中国森林生态系统的 GHG 储量进行了模拟研究, 并与其他人的研究做了对比分析。研究同时发现, 当前的相关研究存在很多不确定性, 未来需要多源数据和方法提升精度, 而模型模拟是一个重要的手段。

关键词: 森林生态系统; 温室气体封存; 二氧化碳; 气候调节; 甲烷

Modeling greenhouse gas sequestration potential of forest change in China

ZHANG Shuaishuai^{1,2}, CUI Yaoping^{1,2,*}, FU Shenglei², FU Yiming², LIU Xiaoyan², TANG Xiyang², CHEN Liangyu², LI Nan²

1 Key Laboratory of Digital Geography and Technology, Ministry of Education, Middle and Lower Reaches of the Yellow River, Kaifeng 475004, China

2 School of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China

Abstract: Greenhouse gases carried by terrestrial ecosystems are of great significance to the global carbon cycle and climate regulation services. Forests are an important part of terrestrial ecosystems and quantifying the greenhouse gas sequestration potential of forests can analyze global change directly from a biogeochemical perspective. However, greenhouse gases carried by China's forests have not currently be effectively quantified on a large scale. In this study, based on land use data of 2000 and 2010, and previous studies on forest carbon storage, we simulated the sequestration potentials of three main greenhouse gases (CO_2 , CH_4 , N_2O) in forests in China through a greenhouse gas value model. The results showed that: (1) China's forest area increased slightly from 2.243 million km^2 in 2000 to 2.246 million km^2 in 2010; among them, areas of deciduous broad-leaved, evergreen broad-leaved, and coniferous forests all decreased, whereas the areas of mixed and shrub forests increased; (2) correspondingly, the sequestration potential of greenhouse gas for China's forests was equivalent to 154.03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671425, 41401504)

收稿日期: 2018-12-31; 网络出版日期: 2019-11-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cuiyp@lreis.ac.cn

and 154.37 Pg CO₂ in 2000 and 2010, respectively, increasing by about 0.34 Pg CO₂ during our study period. The sequestration potential in evergreen coniferous, evergreen broad-leaved, and deciduous broad-leaved forests decreased during 2000—2010, whereas the sequestration potential in mixed and shrub forests increased. Regarding spatial patterns, sequestration potentials in North, Northwest, and Southwest China all increased largely, with an increase of 0.13, 0.12, and 0.15 Pg CO₂, respectively. The sequestration potential in Northeast China was obviously decreased, with a reduction of about 0.1 Pg CO₂. This study used the localization parameters and model's own parameters to simulate the sequestration potential of greenhouse gases in China's forests for the first time, and compared our simulated results with those from others research. This study also found that various definitions and data sources on forests had many problems. In the future, it is necessary to refine the model parameters within ecosystems under a unified framework and consider using multi-resource data to improve the accuracy of sequestration potential. Model simulation should be used as an important and effective study method.

Key Words: forest ecosystem; greenhouse gas sequestration; CO₂ equivalent; climate regulation; CH₄

土地覆被变化既影响陆地生态系统的格局和功能,又影响陆地生态系统的温室气体 (Greenhouse Gas, GHG) 排放与吸收,对调节全球气候变化有重要作用^[1-4]。陆地生态系统碳主要贮存在森林生态系统中^[5-7],有研究表明,1850—2000 年全球土地覆被变化导致 156 Pg CO₂ 的 CO₂ 净排放,而其中约 87% 是源于森林砍伐^[8-10]。在中国,森林生态系统变化剧烈,仅 1990—2000 年森林的土壤碳储量减少量就超过了 38.9 Tg C^[10-11]。研究中国森林面积的变化并量化其封存的主要 GHG 储量对研究其气候调节效应具有重要意义。

森林在地圈、生物圈的生物地球化学过程中起着重要的“缓冲器”和“阀”功能^[12-13],约 80% 的地上碳和约 40% 的地下碳贮存在森林生态系统中^[14-15]。当前在森林碳循环方面的研究往往基于实测样点或站点数据展开,且多关注 CO₂,而在区域大尺度上对森林承载的其他主要 GHG,如 CH₄ 和 N₂O 等的模拟研究还相对不足。

森林生态系统的变化既直接改变地表植被,也对土壤也造成影响^[16]。对植被碳储量,Fang 等估算中国 70 年代后期到 80 年代初的森林碳储存量为 4.38 Pg^[17];周玉荣利用 1989—1993 森林清查资料估算结果为 6.02 Pg^[18],2000 年下降到 5.9 Pg^[19];李克让估算中国森林碳储量为 8.72 Pg^[20];根据国家第八次森林清查资料显示森林总碳储量达 8.43 Pg^[21]。对土壤碳储量,解宪丽基于 1979—1985 年第二次全国土壤普查数据估算中国森林 1 m 厚度土壤有机碳储量达 17.39 Pg^[22],周玉荣利用 1989—1993 年森林清查资料估算结果为 21.02 Pg^[19];而李克让估测的中国森林土壤碳储量为 23.21 Pg^[21]。可见,纵然是森林碳循环方面的研究,在森林植被及土壤碳储量方面,不同学者的结果已存在很大差异,而对其他主要 GHG (CH₄ 和 N₂O) 当前更是缺乏足够的认知。因此,在评估中国森林生态系统的气候调节服务时,如何量化中国森林封存的主要 GHG 储量就成为了一个亟待解决的问题。

本研究通过引入一个新的生态系统温室气体值模型 (Greenhouse Gas Value of Ecosystem model, GHGV)^[6-23],在模型自带参数和本地化参数的支持下,模拟分析中国森林生态系统对三大主要温室气体 (CO₂、CH₄ 和 N₂O) 的储量。

1 数据与方法

1.1 数据获取

本研究数据包括土地利用数据和植被类型数据两部分,数据均来自中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 1 km,共有 2000 和 2010 年两期。本研究基于土地利用数据,参考中国 1:100 万植被类型图,调整土地利用类型为“国际地圈-生物圈计划”的地表植被覆盖类型 (International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP),最终划分中国森林为常绿针叶林 (CLZ)、落叶阔叶林 (LYK)、常绿阔叶林 (CLK)、针阔混交林 (HJ) 和灌木林 (GM) 等 5 种类型^[23]。同时为更好地反映中国各类型森林生态系统

时空变化,依据地理区位将中国划分为东北、华北、西北、西南、中南、华东六个大区。其中东北包含黑龙江、吉林、辽宁 3 省;华北包含山西、河北、内蒙古、北京、天津等 5 省及自治区;西北包括陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆等 5 省及自治区;西南包括西藏、云南、贵州、四川、重庆等 5 省及自治区;中南包括河南、湖北、湖南、广东、广西及港澳等 7 省及自治区;华东包括山东、安徽、江苏、江西、浙江、福建、台湾及上海等 8 个省及直辖市。

1.2 生态系统的温室气体值模型

GHGV 模型是一个可以量化维持特定生态系统气候效应值的指标^[23]。该模型考虑了生态系统被完全清除后生态系统与大气之间所发生的所有 GHG 的交换情况,包括三块内容:1)有机物(植被)清除后的 GHG 释放;2)生态系统与大气之间稳定的 GHG 通量;3)其他扰动引起的 GHG 交换。模型主要是通过辐射强迫代换将其他 GHG 统一转换成 CO₂来衡量不同生态系统的 GHG 释放量。

$$\text{GHGV}_{\tau_A}^{\tau_E} = \frac{\int_{t_A=0}^{\tau_A} [R F_{\text{GHG}}^{\tau_E}(t_A) \omega(t_A)] dt_A}{\int_{t_A=0}^{\tau_A} [R F_{\rho\text{CO}_2}^{\tau_E}(t_A) \omega(t_A)] dt_A} \quad (1)$$

式中, $R F_{\text{GHG}}^{\tau_E}(t_A)$ 代表在 τ_A 时间段内在 t_A 时间清理 1 hm² 特定生态类型所排放的 GHG 导致的辐射强迫增加值。 $R F_{\rho\text{CO}_2}^{\tau_E}(t_A)$ 是当 $t_A=0$ 时 1 mg CO₂ 一个脉冲引起的辐射强度值。分析时间 t_A 跨度采用 100 年,通过与分母比值即可以转化成 CO₂ 当量。在分析时间段内,额外的辐射强迫 $R F_{\text{GHG}}^{\tau_E}(t_A)$ 与 $R F_{\rho\text{CO}_2}^{\tau_E}(t_A)$ 值是把每一年所有的相关 GHG 的辐射强迫值进行累积求和。

$$RF(t_A) = \sum_x a_x C_x^{\tau_E}(t_A) \quad (2)$$

式中, a_x 是温室气体 x 的辐射效率值($a_{\text{CO}_2} = 1.4 \times 10^4$, $a_{\text{CH}_4} = 4.9 \times 10^5$, $a_{\text{N}_2\text{O}} = 3.03 \times 10^6 \text{ nWm}^{-2} \text{ ppb}^{-1}$),涉及到 CO₂、CH₄ 和 N₂O 三种主要 GHG 的辐射率值。 $C_x^{\tau_E}(t_A)$ 是清除 1 hm² 生态系统释放的温室气体量。

$$C_x^{\tau_E}(t_A) = \int_{t_E=0}^{\min(\tau_E, t_A)} \left[\frac{I_x(t_E)}{A} \rho_x(t_A - t_E) \right] dt_E \quad (3)$$

式中, I_x (kmol x hm⁻² a⁻¹) 是生态系统到大气的 GHG 输送量, A 是大气的摩尔值。 ρ_x 是在 t_A 时间大气中存在的 GHG, 可通过 x 一个脉冲的衰减来计算。

$$I_x(t_E) = S_x(t_E) - F_x(t_E) - D_x(t_E) \quad (4)$$

式中, S_x 是在清除土地上有有机物后 GHG 的潜在释放量, F_x 是生态系统的 GHG 年度通量, D_x 是自然干扰引起的差异。

有机物分解燃烧的 GHG 表示为:

$$S_x(t_E) = \sum_p \left(OM_p \begin{cases} f_p^c E_{x,p}^c & t_E = 0 \\ (1 - f_p^c) E_{x,p}^d d_p(t_E) & t_E > 0 \end{cases} \right) \quad (5)$$

式中, OM_p (Mg dry matter hm⁻²) 是生态类型 p 片区的有机物生物量, f_p^c 和 $1 - f_p^c$ 分别是有机物氧化燃烧及腐化分解所占有的比重, $E_{x,p}^c$ 和 $E_{x,p}^d$ 分别代表单位有机物通过氧化燃烧和腐化分解所产生的温室气体 x 的释放比例, $d_p(t_E)$ 是有机质每年的腐化分解比例 ($0 < d_p(t_E) < 1$), 通常用指数衰减函数表示。

1.3 本地化参数 Meta 分析

考虑到参数是基础,本研究不仅使用了模型自带的参数,还接合现有对中国区域的研究,开展模型参数的本地化工作。根据模型及本研究的目标要求,结合国内文献数据可获得性,对这 5 种森林类型的生物量密度、地表生物量密度、地下根系生物量密度、凋落物/枯枝落叶有机质密度、土壤有机质密度和生态系统 CO₂ 年通量等数据进行了收集整理与分析。在具体的选取过程中,不局限与长期监测数据等,主要标准有:一是对空间尺度的考虑,要求是全国性的研究,以便参数更具有广泛的代表性;二是时间尺度的考虑,虽然长时间的模拟(100 年)会使初始参数值的敏感性有所减弱,但本研究要求一定是多年平均的结果,如果有多个研究结果则用平均值,以便使参数尽量保持稳态,去契合模型的长时间尺度模拟。最终,在对以上数据进行 Meta 分析基

础上,得到本地化参数(表 1)。

表 1 中国各森林生态系统的参数选取

Table 1 Model parameters for various forest ecosystems in China

森林类型 Forest type	植被总生 物量密度 Vegetation total biomass density/ (Mg/hm ²)	地表生物 量密度 Surface biomass density/ (Mg/hm ²)	地下根系 生物量密度 Underground root biomass density/ (Mg/hm ²)	凋落物/枯枝 落叶生物 量密度 Litter biomass density/ (Mg/hm ²)	土壤有机质密度 Soil organic matter density/ (Mg/hm ²)	CO ₂ 年均通量 Annual average flux of CO ₂ / (kmol/hm ²)	参考文献 References
落叶阔叶林 Deciduous broad- leaved forest	128.65	101.70	26.96	12.72	194.65	92.29	[18-22, 24-35]
常绿阔叶林 Evergreen broad- leaved forest	222.59	175.96	46.63	10.63	187.09	37.00	
混交林 Mixed forest	120.21	95.02	25.19	19.00	235.46	59.36	
针叶林 Coniferous forest	126.37	99.90	26.48	13.65	150.07	70.26	
灌木林 Shrub forest	15.85	8.30	7.56	9.07	74.20	55.68	

2 研究结果

2.1 本地参数与模型自带参数的模拟结果比较

将中国各类型森林生态系统的本地化参数带入 GHGV 模型后,由于输入参数的差异,得到的模拟结果也与世界相近生态系统类型的模拟结果存在差异(图 1)。中国 3 种阔叶林 GHGV 数值及其年际变化均非常接近,但在 100 年模拟时段内,中国阔叶林与世界温带森林的 GHGV 之间的差值越来越大。中国针叶林的 GHGV 值及其年际变化与世界针叶林系统的情况比较接近;而中国灌木林的 GHGV 初始值与世界灌木林的比较接近,但随后两者之间的差异逐渐变大。

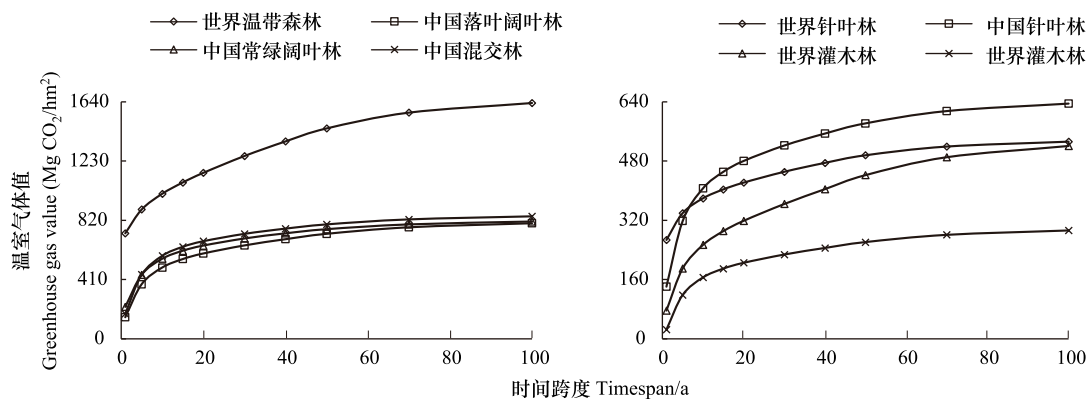


图 1 中国和世界数据森林 GHGV 结果的对比

Fig.1 Comparison of China and World Data Forest GHGV Results

I_{CO_2} (kmol CO₂/hm²) 代表着生态系统有机质氧化分解的 GHG 到大气的净输送量。中国混交林生态系统的有机质 GHG 净释放量 I_{CO_2} 初始值是最高的,达 3 939.61 kmol CO₂/hm²(图 2);世界针叶林的 I_{CO_2} 值较中国针叶林要小,且初始值差异非常大;而世界灌木林与中国灌木林的 I_{CO_2} 初始值与值得衰减速度接近。中国两类阔叶林生态系统的 I_{CO_2} 初始值非常接近,衰减幅度也一致,但世界温带森林的 I_{CO_2} 在初始时远小于以上三种中国温带森林生态系统。尽管如此,世界温带森林的 GHGV 值却高于中国森林的。究其原因,世界温带森林

I_{CO_2} 的初始值较低主要是由 CO_2 通量和土壤有机质密度引起的,而植被的生物密度(包括:地表、根系和枯枝落叶凋落物)对应全球温带森林的相应值是高于中国森林的。生态系统不同碳库输入到大气的 GHG 量及其衰减函数(会影响 GHG 的积分时长)、以及辐射效率的差异最终导致了 GHGV 的不同。

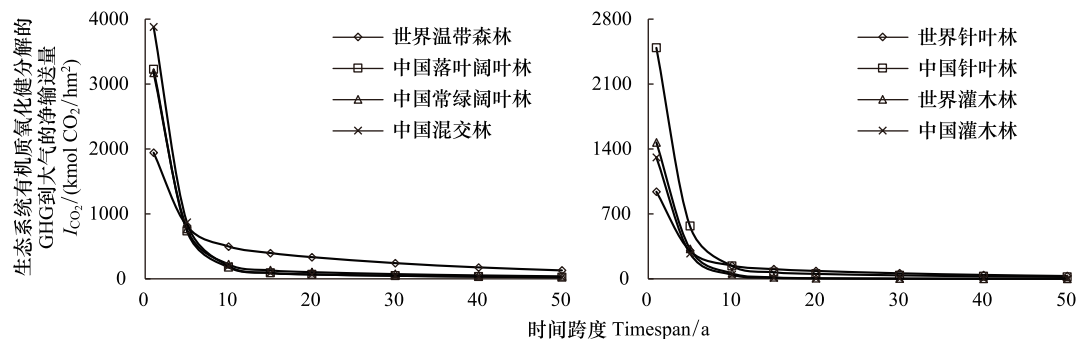


图2 中国和世界单位面积森林温室气体潜在净释放量的对比

Fig.2 Comparison of potential net greenhouse gas emissions per unit area of forests in China and world

2.2 中国森林面积变化分析

中国森林主要分布在华东、中南地区的南部、西南地区的东部,以及东北和华北地区的北部山区。研究时段内,东北、华东地区的森林面积减少,而华北、西北、西南及中南地区森林面积有所增加(图3)。具体而言,东北地区森林面积减少明显,减少了 122400 hm^2 ,主要是针叶林及落叶阔叶林面积减少;西南地区森林面积增加最多,超过 200000 hm^2 ,主要是 HJ 及 GM 增加;华北与西北地区森林面积也呈增长态势,HJ 面积增加显著;

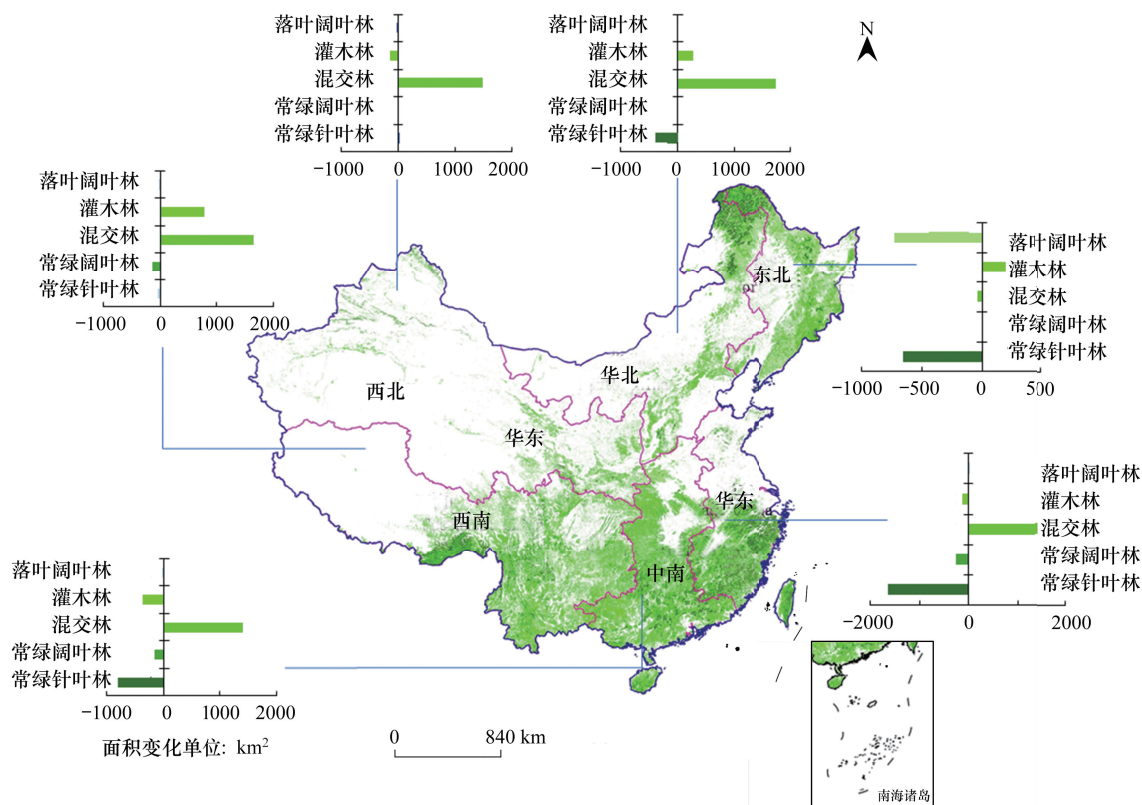


图3 中国各区域森林时空变化

Fig.3 Temporal and spatial changes in forests in various regions of China

华东与中南地区由于 CLZ 减少与 HJ 增加相抵消使整个区域森林面积变化并不明显。

在森林植被中, HJ 所占面积比重最大, 大于 48%, CLK 面积占比最小, 占 5% 左右。2000—2010 年, 中国森林面积由 $224.3 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 增加到 $224.6 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 共增加了 339000 hm^2 , 其中 LYK、CLK、CLZ 面积是减少的, CLZ 面积减少最多, 达到 351600 hm^2 , 而 HJ 与 GM 的面积是增加的, HJ 的面积增加多达 767700 hm^2 (图 4)。

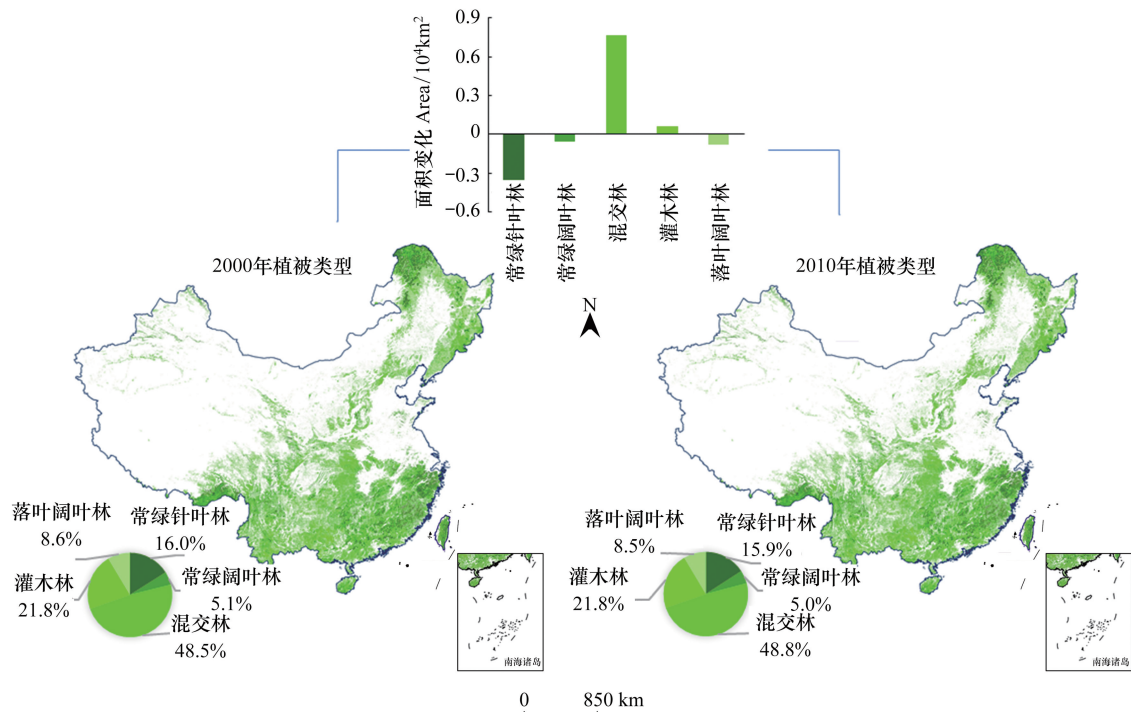


图 4 中国森林时空变化

Fig.4 Time and space changes of forests in China

2.3 森林生态系统的温室气体储量

整体上,在研究时段内中国森林生态系统的 GHG 储量有所提升。对森林生态系统承载的三大 GHG 的量进行分析,结果表明:中国森林生态系统的 GHG 储量由 154.03 Pg CO_2 当量增长为 154.37 Pg CO_2 当量,10 年间增加了约 0.34 Pg CO_2 当量。其中,CLZ、CKJ、LYK 在研究时段内的 GHG 储量是减少的(图 5),减少量分别为 0.22 、 0.05 和 0.06 Pg CO_2 当量, HJ 与 GM 的 GHG 储量分别增加了 0.65 与 0.01 Pg CO_2 当量。可见, GHG 储量变化较为明显的是 CLZ 与 HJ 两类。

分区来看,中西部地区的森林对 GHG 的储量普遍增加,而东部森林的 GHG 储量确有所减少。具体而言,华北、西北、西南、中南地区的 GHG 储量均增加;而东北与华东地区的 GHG 储量减少。其中, GHG 储量在华北、西北与西南地区,分别增长了 0.13 、 0.12 与 0.15 Pg CO_2 当量; GHG 储量减少较为明显的区域是东北地区,十年来共减少约 0.1 Pg CO_2 当量。

3 不确定性分析

模型参数选取和模型算法的不确定性。在选取中国森林生态系统模型参数值时发现,参数的选取本身存在很多挑战。很多学者对中国各生态系统的碳循环开展了多尺度的研究,但在最基本的碳循环问题上仍无法保持一致,且这个问题在全球范围内的各个生态系统均一直存在^[36-37]。方精云等人用 700 多个剖面数据得到中国仅植被碳储量就已超过 120 Pg ^[38]; Yu 等的研究显示,中国的碳储量为 97.95 — 118.93 Pg ^[39];而 Tang 等利用 14 多万个样点得到的碳储量为 89.3 Pg ^[40]。实际上,不同研究所获得的植被碳储量和土壤碳储量差异

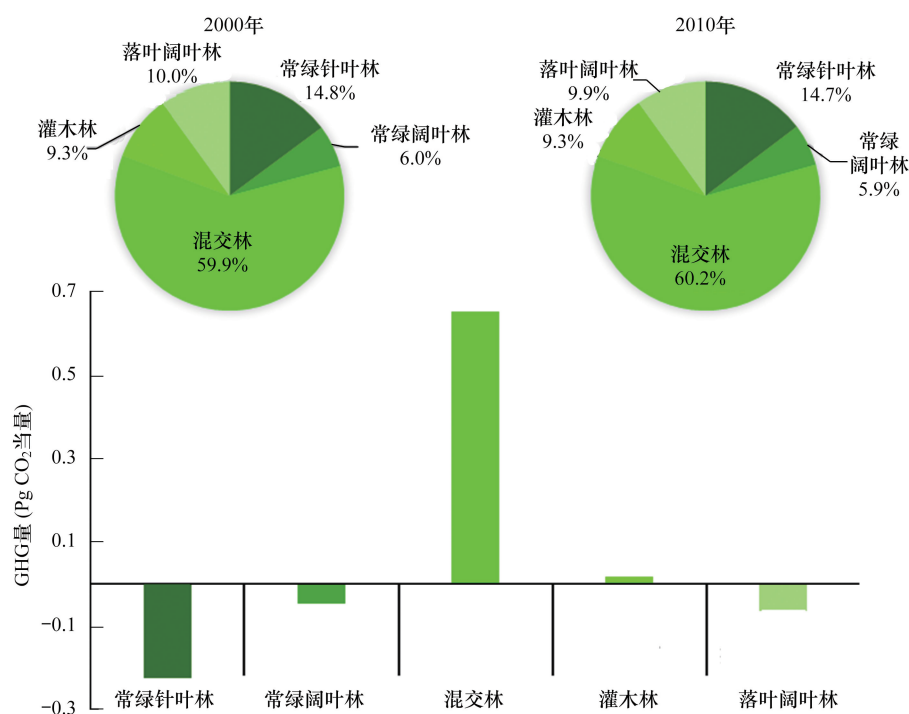


图5 森林系统 GHGV 的变化 (2000—2010)

Fig.5 Changes in the forest system GHGV from 2000 to 2010

甚至超过一个数量级,差距最多可达 12.5 倍^[36]。除此之外,对 CH_4 和 N_2O 的研究也面临更加严重的参数缺乏及不统一的问题。本研究在具体的参数选取时,虽然有一定的标准,但并不能解决参数差异性问题(图 6),因此本研究还同时运算出了模型自带参数的 GHGV 结果,以便有更多的具体数据值可以做参考。具体到两套参数而言,在地表生物量密度方面,世界温带森林比国内常绿阔叶林、落叶阔叶林和混交林都要大,世界针叶林和灌木林的地表生物量值比中国的也要高,这可能与中国森林多次生林、林龄较小有关。在地下生物量密度方面,各森林类型与地表生物量接近,而中国森林的生物量密度较模型自带参数总体偏低。世界温带森林和针叶林的枯落物生物量密度及 CO_2 年均通量也存在参数差异性问题。此外,剖析算法可以发现,模型算法本身采用辐射强迫转换 CH_4 和 N_2O 的单位为 CO_2 当量时,在时间序列上为一组固定的经验参数值,这说明该模型算法本身也有进一步完善的空间^[23]。

森林面积和模拟结果的不确定性。实际上,森林面积这一基本问题由于基本其定义和数据源等问题而仍不一致。本研究用的是中国科学院资源环境科学数据中心的遥感解译数据,包括灌木林,中国森林面积约 $224 \times 10^6 \text{ hm}^2$,这个数值较方精云、李克让等学者^[17-20,41]采用的森林面积要大,但与第八次中国森林清查数据 ($208 \times 10^6 \text{ hm}^2$) 接近^[21],也与 Qin 基于多种卫星数据测得的 2010 年中国森林面积 ($202 \times 10^6 \text{ hm}^2$) 接近^[42]。同时,本研究直接模拟得到的结果是森林生态系统变化对应的三大主要 GHG 的储量,该结果是无法与其他学者对碳储量的结果直接对比的。为了使本研究的值与他人的研究具有可比性,这里进一步简单利用摩尔质量转换 GHGV 模拟值为碳量开展了对比分析(图 7)。结果表明本研究本地化参数模拟的中国森林 2000—2010 年碳汇速率为 $0.09 \text{ PgC}/10\text{a}$,而采用模型自带参数计算结果为 $0.012 \text{ PgC}/\text{a}$,均介于其他学者的结果值范围 ($-0.09 \text{ PgC}/10\text{a}$ — $0.98 \text{ PgC}/10\text{a}$)^[26-27,43]。但也有差异,可能的原因除了与研究数据及对森林定义有关,还可能是因为 GHGV 是设定在长时间的一种潜量模拟,其考虑 GHG 在大气中衰减的逐年积分量,从而造成模型的最终模拟结果对短期的森林面积波动虽可以体现,但并不十分敏感^[23]。同时,对比结果也说明了利用模拟手段可以作为实测或清查资料结果的一个补充。虽然模型模拟无法替代实测分析,但也应意到模拟研究在大

尺度上分析的可行性,且其可以在全球不同区域上开展类比,更利于尺度推绎^[6]。

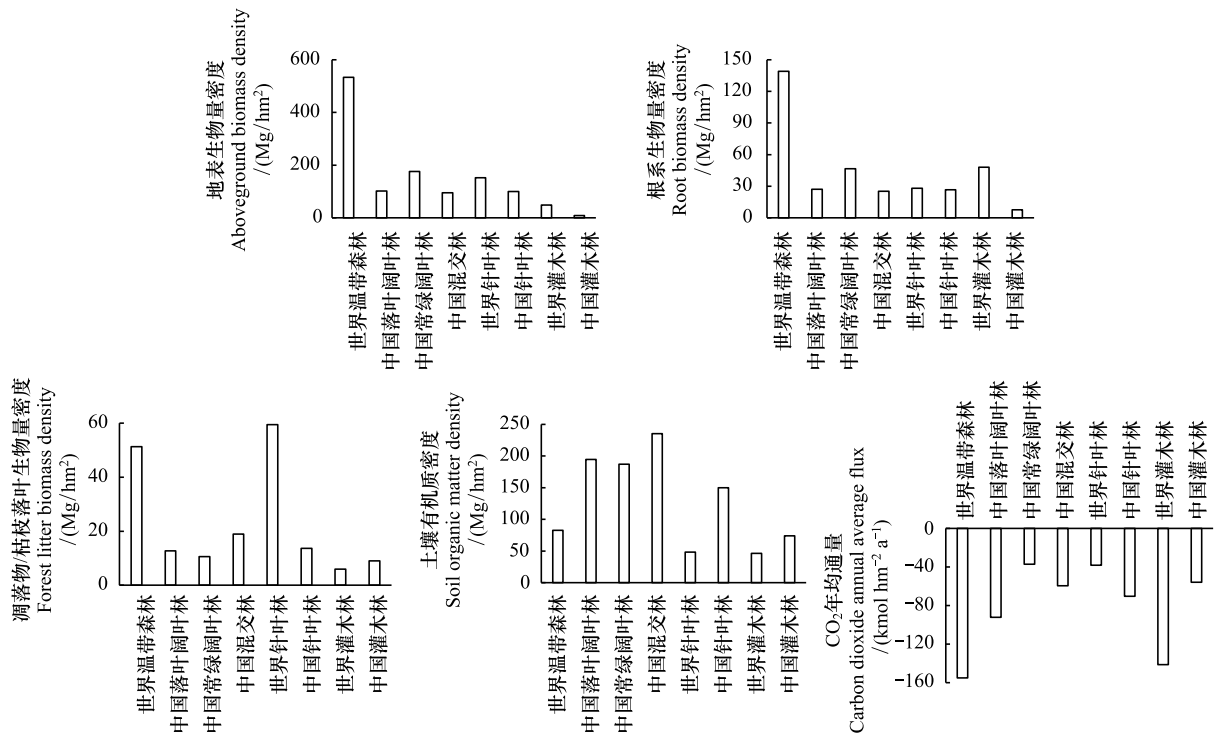


图 6 模型中国本地化参数与模型自带参数的对比

Fig.6 Comparison of model China local parameters and world parameters

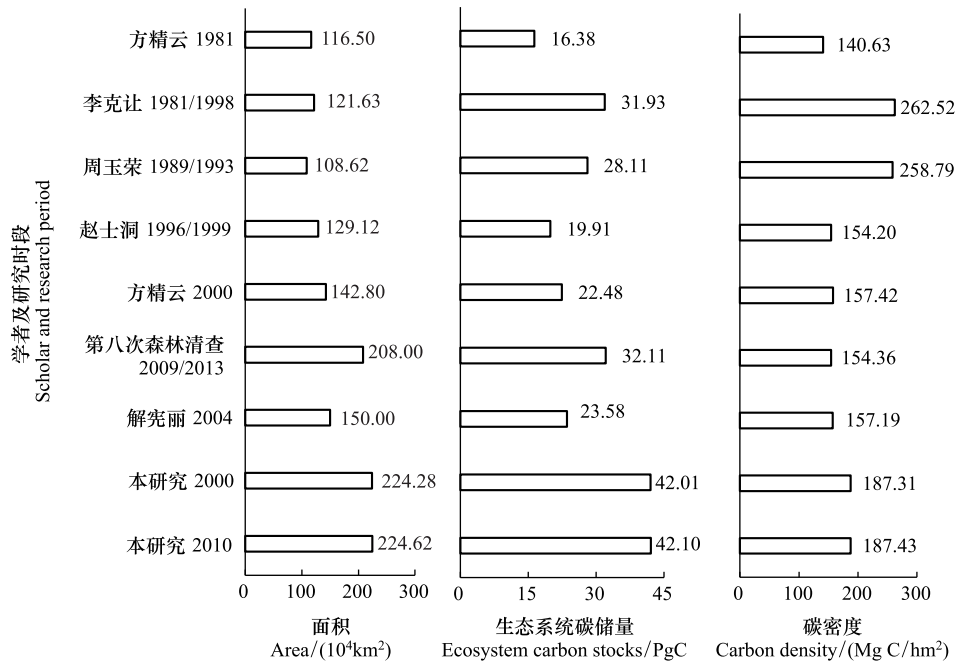


图 7 本研究结果与其他学者研究结果的比较

Fig.7 Comparison of the results of this study with those of other scholars

此外,本研究将中国森林类型划分为 5 类,这个尺度水平会掩盖区域同生态系统间的异质性带来的不确

定性。已有研究已经在继续探索精细分类,如有学者划分 6 种森林和 4 种灌木类型,在更精细的森林类型下开展研究^[40,44-45]。具体到某一区域,如东北,其森林承载的 GHG 量主要反映的是面积减少带来的结果(图 3),可能的原因包括了森林砍伐和耕地开荒等,限于本研究主题,这里没有加以具体分析。但根据新(2017 年)的《中国原始森林分布图》,中国原始森林面积占中国森林总面积的 7.59%,其中在大兴安岭分布广泛。因此,未来需要在一个统一框架下,细化生态系统内部的参数差异,并考虑用多源数据和多种手段来探讨区域森林生态系统承载的 GHG 储量问题。

4 结论

2000—2010 年,中国森林面积由 $224.3 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 增加到 $224.6 \times 10^6 \text{ hm}^2$,共增加了 $0.34 \times 10^6 \text{ hm}^2$,这个数据包含了灌木林的面积。其中落叶阔叶林、常绿阔叶林、针叶林面积是减少的,而混交林与灌木林的面积是增加的。相对应,中国森林生态系统的主要温室气体(CO_2 , CH_4 , N_2O)总的储量增加了 0.334 Pg CO_2 当量,说明了森林生态系统对温室气体的吸收和气候调节作用。

本研究还从森林面积、参数、模型算法和模拟结果等几个方面探讨了模型的不确定性,同时也揭示出相关研究存在的量值不一致问题。对比他人的结果,说明模拟手段可以作为实测或清查资料分析结果的一个有效补充,且其可以在大尺度上开展研究。

参考文献(References):

- [1] Miles L, Kapos V. Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and forest degradation: global land-use implications. *Science*, 2008, 320 (5882): 1454-1455.
- [2] Kirschbaum M U F, Saggar S, Tate K R, Thakur K P, Giltrap D L. Quantifying the climate-change consequences of shifting land use between forest and agriculture. *Science of the Total Environment*, 2013, 465(6): 314-324.
- [3] Curtright A E, Johnson D R, Willis H H, Skone T. Scenario uncertainties in estimating direct land-use change emissions in biomass-to-energy life cycle assessment. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 47: 240-249.
- [4] McGuire A D, Sitch S, Clein J S, Dargaville R, Esser G, Foley J, Heimann M, Joos F, Kaplan J, Kicklighter D W, Meier R A, Melillo J M, Moore III B, Prentice I C, Ramankutty N, Reichenau T, Schloss A, Tian H, Williams L J, Wittenberg U. Carbon balance of the terrestrial biosphere in the Twentieth Century: analyses of CO_2 , climate and land use effects with four process-based ecosystem models. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(1): 183-206.
- [5] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [6] Bayer A D, Pugh T A M, Krause A, Arneth A. Historical and future quantification of terrestrial carbon sequestration from a Greenhouse-Gas-Value perspective. *Global Environmental Change*, 2015, 32: 153-164.
- [7] Bradshaw C J A, Warkentin I G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux. *Global and Planetary Change*, 2015, 128: 24-30.
- [8] Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2003, 55(2): 378-390.
- [9] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The U.S. carbon budget: contributions from land-use change. *Science*, 1999, 285(5427): 574-578.
- [10] 刘纪远, 王绍强, 陈镜明, 刘明亮, 庄大方. 1990—2000 年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化. *地理学报*, 2004, 59(4): 483-496.
- [11] Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, Canadell J, Canfield D, Elser J, Gruber N, Hibbard K, Höglberg P, Linder S, Mackenzie F T, Moore III B, Pedersen T, Rosenthal Y, Seitzinger S, Smetacek V, Steffen W. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system. *Science*, 2000, 290(5490): 291-296.
- [12] 蒋有绪. 中国森林生态系统结构与功能规律研究: 国家自然科学基金重大项目期中论文集. 北京: 中国林业出版社, 1996.
- [13] 谢馨瑶, 李爱农, 靳华安. 大尺度森林碳循环过程模拟模型综述. *生态学报*, 2018, 38(1): 41-54.
- [14] Miller A D, Dietze M C, Delucia E H, Anderson-Teixeira K J. Alteration of forest succession and carbon cycling under elevated CO_2 . *Global Change Biology*, 2016, 22(1): 351-363.
- [15] 陶波, 葛全胜, 李克让, 邵雪梅. 陆地生态系统碳循环研究进展. *地理研究*, 2001, 20(5): 564-575.
- [16] Thuille A, Buchmann N, Schulze E D. Carbon stocks and soil respiration rates during deforestation, grassland use and subsequent Norway spruce afforestation in the Southern Alps, Italy. *Tree Physiology*, 2000, 20(13): 849-857.

- [17] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [18] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518-522.
- [19] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, Chen A P. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, (1981—2000). *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(9): 1341-1350.
- [20] Li K R, Wang S Q, Cao M K. Vegetation and soil carbon storage in China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 47(1): 49-57.
- [21] 国家林业和草原局. 第八次全国森林资源清查主要结果(2009—2013年). 北京: 国家林业和草原局, 2014
- [22] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子. *土壤学报*, 2004, 41(5): 687-699.
- [23] Anderson-Teixeira K J, Delucia E H. The greenhouse gas value of ecosystems. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 425-438.
- [24] Tao Bo, Cao M K, Li K R, Gu F X, Ji J J, Huang M, Zhang L M. Spatial patterns of terrestrial net ecosystem productivity in China during 1981—2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(5): 745-753.
- [25] Gong P, Xu M, Chen J, Chen J M, Qi Y, Biging G, Liu J Y, Wang S Q. A preliminary study on the carbon dynamics of China's terrestrial ecosystems in the past 20 years. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 55-61.
- [26] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.
- [27] 方精云, 黄耀, 朱江玲, 孙文娟, 胡会峰. 森林生态系统碳收支及其影响机制. *中国基础科学*, 2015, 17(3): 20-25.
- [28] 王绍强, 周成虎, 刘纪远, 李克让, 杨晓梅. 东北地区陆地碳循环平衡模拟分析. *地理学报*, 2001, 56(4): 390-400.
- [29] 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.
- [30] NOAA Earth System Research Laboratory. CarbonTracker CT2017. (2017-01-01) [2019-03-12]. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/carbontracker>.
- [31] Xiao X M, Zhang Q Y, Braswell B, Urbanski S, Boles S, Wofsy S, Moore III B, Ojima D. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(2): 256-270.
- [32] Xiao X M, Zhang Q Y, Hollinger D, Aber J, Moore III B. Modeling gross primary production of an evergreen needleleaf forest using MODIS and climate data. *Ecological Applications*, 2005, 15(3): 954-969.
- [33] Fu S L, Ferris H. Plant species, atmospheric CO₂ and soil N interactively or additively control C allocation within plant-soil systems. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2006, 49(6): 603-612.
- [34] 罗云建, 王效科, 张小全, 逯非. 中国森林生态系统生物量及其分配研究. 北京: 中国林业出版社, 2013.
- [35] 赵士洞. 中国生态系统研究网络(CERN)—简介和进展. *AMBIO-人类环境杂志*, 1999, 28(8): 636-638.
- [36] Ni J. Carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems: approaching a more accurate estimate. *Climatic Change*, 2013, 119(3/4): 905-917.
- [37] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(6): 804-812.
- [38] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统碳库. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- [39] Yu G R, Li X R, Wang Q F, Li S G. Carbon storage and its spatial pattern of terrestrial ecosystem in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(2): 97-109.
- [40] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, Tang Z Y, Wang W T, Zhao Y C, Wan H W, Xie Z Q, Shi X Z, Wu B F, Wang G X, Yan J H, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y X, Hu H F, He N P, Yang Y H, Han W X, He H L, Yu G R, Fang J Y, Zhou G Y. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [41] Watson R T, Noble I R, Bolin B, Ravindranath N H, Verardo D J, Dokken D J. *Land Use, Land Use Change, and Forestry*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 23-51.
- [42] Qin Y W, Xiao X M, Dong J W, Zhang G L, Shimada M, Liu J Y, Li C G, Kou W L, Moore III B. Forest cover maps of China in 2010 from multiple approaches and data sources: PALSAR, Landsat, MODIS, FRA, and NFI. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 109: 1-16.
- [43] Zhang X Q, Xu D Y. Potential carbon sequestration in China's forests. *Environmental Science & Policy*, 2003, 6(5): 421-432.
- [44] 方精云, 于贵瑞, 任小波, 刘国华, 赵新全. 中国陆地生态系统固碳效应——中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展. *中国科学院院刊*, 2015, 30(6): 848-857.
- [45] Tang Z Y, Xu W T, Zhou G Y, Bai Y F, Li J X, Tang X L, Chen D M, Liu Q, Ma W H, Xiong G M, He H L, He N P, Guo Y P, Guo Q, Zhu J L, Han W X, Hu H F, Fang J Y, Xie Z Q. Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4033-4038.