

DOI: 10.5846/stxb201904140743

冯源, 田宇, 朱建华, 肖文发, 李奇. 森林固碳释氧服务价值与异养呼吸损失量评估. 生态学报, 2020, 40(14): 5044-5054.

Feng Y, Tian Y, Zhu J H, Xiao W F, Li Q. Evaluation of forest carbon fixation and oxygen release service value and heterotrophic respiration loss. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 5044-5054.

森林固碳释氧服务价值与异养呼吸损失量评估

冯 源^{1,2}, 田 宇^{1,2}, 朱建华^{1,2,*}, 肖文发^{1,2}, 李 奇^{1,2}

1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

2 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

摘要: 固碳释氧是森林最重要的生态系统服务之一, 将森林碳收支与固碳释氧服务价值评估相结合对于准确评估生态系统服务价值具有重要意义。应用森林碳收支模型 (CBM-CFS3), 分别基于净初级生产力 (NPP) 和净生态系统生产力 (NEP) 评估了 2009—2030 年湖北省兴山县森林生态系统总、净固碳释氧服务价值的时空动态, 量化了异养呼吸造成的固碳释氧服务价值损失。模拟期间兴山县森林生态系统 NPP 逐渐增加 (0.46—0.70 Tg/a), NEP 由 0.12 Tg/a 先增加至 0.21 Tg/a, 然后逐渐下降至 0.18 Tg/a; 所对应的森林总、净固碳释氧服务价值范围分别为 7.59—11.53 亿元/a 和 2.21—3.70 亿元/a。异养呼吸逐年增加, 导致固碳释氧价值每年损失平均值为 7.29 亿元/a 或 4509 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$, 约占总价值的 68.6%。兴山县东南部异养呼吸造成的森林固碳释氧服务价值损失较高, 而中部及西南部森林净固碳释氧价值较高。模拟期间兴山县森林为碳汇, 稳定地提供固碳释氧服务。与 NPP 相比, 使用 NEP 评估固碳释氧服务价值更为合理。忽视异养呼吸将严重高估森林生态系统固碳释氧服务价值; 因而必须将物质循环过程与生态系统服务评估相结合, 以降低评估结果的不确定性、提高生态系统服务的评估能力。

关键词: 碳平衡; 异养呼吸; 生态系统服务; NEP

Evaluation of forest carbon fixation and oxygen release service value and heterotrophic respiration loss

FENG Yuan^{1,2}, TIAN Yu^{1,2}, ZHU Jianhua^{1,2,*}, XIAO Wenfa^{1,2}, LI Qi^{1,2}

1 Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

2 Co-innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: Carbon fixation and oxygen release (CFOR) is one of the most important services provided by the forest ecosystem. It is crucial to combine the forest carbon budget with the CFOR service to conduct an accurate assessment of ecosystem service values. Using a forest carbon budget model (CBM-CFS3), this study evaluated both temporal and spatial dynamics of total and net CFOR service values based on estimation of net primary production (NPP) and net ecosystem production (NEP) of the forest ecosystem from 2009 to 2030 in Xingshan county, Hubei province, China. During the simulation period, the total NPP progressively increased from 0.46 Tg/a to 0.70 Tg/a, while the total NEP increased from 0.12 Tg/a to 0.21 Tg/a initially and then declined to 0.18 Tg/a. The total and net CFOR service values ranged from 759 to 1153 million RMB per year and from 221 to 370 million RMB per year, respectively. Heterotrophic respiration (HR) increased progressively with an average annual loss of CFOR value of 729 million RMB per year or 4509 RMB per hectare per year, which accounted for 68.6% of the total CFOR value. The HR loss was highest in the southeastern part of Xingshan, while the net value of CFOR was highest in the central and southwestern parts. The forest ecosystem in Xingshan

基金项目: 国家公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201406035); “十三五”国家重点研发计划项目 (2016YFD0600200)

收稿日期: 2019-04-14; 网络出版日期: 2020-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhucool@caf.ac.cn

acted as a carbon sink and provided the CFOR service steadily during the simulation period. Compared with NPP, NEP was more reliable for use in evaluating the value of the CFOR service. A severe overestimation of forest CFOR service value is likely to occur if the impact of HR is excluded. Therefore, to reduce the uncertainty in evaluation and enhance the capacity of ecosystem services assessment, it is necessary to combine the material cycle process with the ecosystem services assessment.

Key Words: carbon balance; heterotrophic respiration; ecosystem services; NEP

生态系统服务指人类从生态系统中得到的产品或惠益^[1]。作为陆地生态系统的主体^[2],森林持续地提供木材产品、气候调节、生物多样性保护及文化娱乐等多种生态系统服务,促进了人类生存及社会发展^[3],其服务价值约占陆地生态系统服务总价值的38%—46%^[4-5]。我国学者已对森林生态系统服务价值进行了大量研究^[6-8]。国家林业局颁布的《森林生态系统服务功能评估规范》^[9](以下简称《规范》, the “Specifications”)统一了评价指标并构建了完整的评估体系,有力地促进了我国此类研究的发展。王兵等^[6]、肖骁等^[7]、张春华等^[10]、黄龙生等^[8]等基于该方法分别对全国、东北地区、山东省和济南市的一种或多种森林生态系统服务价值进行了评估,构成了全国、区域、省级和市级等多尺度、多层次的评估结果。

在森林生态系统服务中,固碳释氧是最重要的服务之一,其价值约占总服务价值的18.5%—32.59%^[7,11]。固碳释氧服务来源于植被通过光合作用同化大气CO₂、同时通过呼吸作用分解有机质并释放到大气中的碳收支过程^[12],与森林碳源/汇状态密切相关。在碳收支过程中,植被光合作用所产生的有机质总量减去自养呼吸消耗量后可得到净初级生产力(Net primary production, NPP),而将NPP进一步减去死亡有机质分解释放量(即异养呼吸 Heterotrophic respiration, R_h)后即为净生态系统生产力(Net ecosystem production, NEP)。NEP可以反映无干扰条件下森林生态系统存留有机质的能力,是森林碳平衡状态的指示因子^[13];只有当NEP为正值、生态系统是碳汇时,森林才能提供固碳释氧服务。近年来,在以大气CO₂浓度升高为主要标志的全球变化背景下,森林固碳释氧服务作为应对气候变化的有效途径引起了国际社会的广泛关注^[14]。

现有评估森林固碳释氧服务价值的方法主要分为2类:(1)将NPP作为森林最终固碳量来评估固碳释氧服务价值^[10,15-16];(2)基于蓄积量或生物量现存量估算森林年净固碳量^[17-18]或是通过两期清查数据推算森林碳储量现存量的变化来评估固碳释氧服务价值^[19]。第1类研究未考虑碳收支过程中异养呼吸造成的碳排放,由于异养呼吸占NPP的比例可达26.3%—98.9%^[20-21],忽略异养呼吸可能高估森林实际提供的固碳释氧服务价值。第2类方法应用于较大时空尺度时可能会因未考虑木材采伐量而低估生态系统固碳释氧服务价值^[19],而且使用该方法的研究往往未将土壤有机质动态纳入评估过程^[17],造成生态系统组分估算不完整。由此可见,已有研究通常未考虑森林碳收支过程或对生态系统碳库划分不全,导致对固碳释氧服务价值评估具有较高的不确定性。

近期孙滨峰^[12]基于NPP和NEP两个生产力指标对东北森林带的固碳服务进行评估,分别将基于这两个指标的估算结果作为总固碳量和净固碳量,较为准确地估算了生态系统总、净固碳服务物质量。但由于其NEP是使用MODIS MOD17A3的NPP减去基于土壤呼吸估算的异养呼吸得到,无法区分出NEP中的释氧组分(即植被净生长部分),因此并不能有效评估森林的净释氧服务及价值。目前在区域尺度上,基于NPP和NEP估算的森林生态系统总、净固碳释氧服务价值如何随着森林生长而变化以及异养呼吸将造成多大程度的固碳释氧服务价值损失尚未有报道。本文应用森林碳收支模型(Operational-scale Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector, CBM-CFS3)尝试将碳收支过程与生态系统固碳释氧服务价值评估相结合,估算并预测2009—2030年湖北省兴山县森林总、净固碳释氧服务价值的时空动态以及异养呼吸造成的固碳释氧服务价值损失,为降低生态系统服务价值评估的不确定性、提高生态系统服务价值评估能力、深刻认识物质循环对生态系统服务的影响机制提供数据支持及理论依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

兴山县位于湖北省宜昌市西部(110°25′—111°06′ E, 31°04′—31°34′ N)、长江西陵峡北侧,地处巴山余脉、巫山和荆山之间。该县东西横距 66 km,南北纵距 54 km,面积 2327 km²。其地势东北高、南部低,海拔范围为 109.5—2426.9 m。兴山县属亚热带大陆性季风气候,年均温为 15.3℃,年均降水量为 900—1200 mm,具有明显的垂直气候特征。兴山县森林资源丰富,2009 年森林面积为 1.62×10⁵ hm²,蓄积量为 9.55×10⁶ m³,森林覆盖率达 69%。

1.2 数据来源

将湖北省兴山县最近一次(2009 年)森林资源规划设计调查作为主要数据源,将兴山县乔木林(包括纯林和混交林,共 18998 个小班)作为研究对象。根据优势树种组将兴山县森林划分为 8 种类型(表 1),分别提取各森林类型中所有小班面积、平均胸径、树高、起源、林龄、立地条件等数据作为 CBM-CFS3 模型的输入数据。兴山县 8 种森林类型分别是马尾松林(*Pinus massoniana* forests, PMF)、柏木林(*Cupressus funebris* forests, CFF)、杉木林(*Cunninghamia lanceolata* forests, CLF)、以华山松(*Pinus armandii*)和巴山松(*Pinus tabulaeformis*)占优的温性松林(Temperate pine forests, TPF)、以栓皮栎(*Quercus variabilis*)和麻栎(*Quercus acutissima*)为主的落叶阔叶林(Deciduous broadleaved forests, DBF)、以丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)和青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)等为主的常绿阔叶林(Evergreen broadleaved forests, EBF)、以马尾松杉木混交林和马尾松柏木混交林为主的针叶混交林(Coniferous mixed forests, CMF)、以马尾松栎类混交林和柏木栎类混交林等为主的针阔混交林(Coniferous and broadleaved mixed forests, CBF),各森林类型分布见图 1。

表 1 兴山县森林概况表

Table 1 Description of forests in Xingshan county

森林类型 Forest type	平均胸径 Diameter at breast height/cm	平均树高 Height/m	平均林龄 Age/a	面积 Area/hm ²	蓄积 Volume/m ³
柏木林 <i>Cupressus funebris</i> forests (CFF)	7.4	8.1	30	2093.7	11.05
常绿阔叶林 Evergreen broadleaved forests (EBF)	11.8	8.9	41	30173.2	173.41
落叶阔叶林 Deciduous broadleaved forests (DBF)	10.2	8.8	36	77421.3	456.45
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forests (PMF)	12.6	9.5	31	23260.8	153.17
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forests (CLF)	10.8	8.4	21	1099.6	7.82
温性松林 Temperate pine forests (TPF)	12.5	11.1	36	5323.5	54.49
针阔混交林 Coniferous and broadleaved mixed forests (CBF)	11.0	8.5	31	19043.4	116.33
针叶混交林 Coniferous mixed forests (CMF)	13.5	8.5	29	3248.0	19.59

1.3 CBM-CFS3 模型介绍

CBM-CFS3 是加拿大林业局开发的区域尺度森林碳收支模型^[22]。该模型包含两大碳库系统:生物量碳库和死亡有机质(Dead organic matter, DOM)碳库。DOM 碳库包含枯落物碳库(Litter)、死木碳库(Deadwood)和土壤有机质碳库(Soil organic matter)。这 3 个碳库又分别由 3—4 个分解速率不同的子碳库组成。受模型结构及算法设计影响,CBM-CFS3 不能估算自养呼吸^[22],而且其异养呼吸仅指 DOM 在自然状态下通过机械

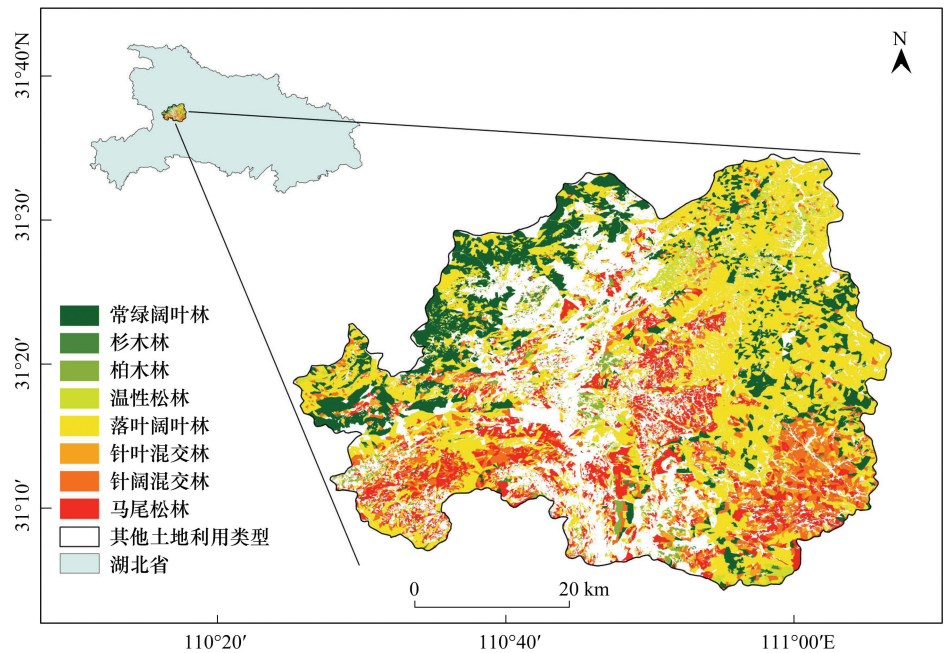


图 1 兴山县森林分布图

Fig.1 Distribution of forests in Xingshan county

CFF: 柏木林 *Cupressus funebris* forests; EBF: 常绿阔叶林 Evergreen broadleaved forests; DBF: 落叶阔叶林 Deciduous broadleaved forests; PMF: 马尾松林 *Pinus massoniana* forests; CLF: 杉木林 *Cunninghamia lanceolata* forests; TPF: 温性松林 Temperate pine forests; CBF: 针阔混交林 Coniferous and broadleaved mixed forests; CMF: 针叶混交林 Coniferous mixed forests

破碎和土壤微生物酶解的过程;该模型以经验方程描述 DOM 多级碳库的分解及周转,不考虑动物采食、淋溶、分泌等途径的碳损失^[23]。DOM 碳储量及分解周转量计算见公式(1—2)。CBM-CFS3 所需的生物量估算参数和蓄积生长曲线均来自付甜^[24]对三峡库区相同森林类型的研究成果;生物量周转参数指生物量各组分每年脱落、死亡而转入枯落物和死木碳库的比例^[25](表 2)。

$$DOM_i(t, T) = 100 (1 - k_i(T))^t \tag{1}$$

$$\tau_{ri}(t) = \tau_{ci} C_i(t - 1) k_i(T) \tag{2}$$

式中,DOM_i为第*i*类 DOM 库的碳储量,Mg;*i*指特快库、快速库、中速库和慢速库这 4 种分解速率不同的碳库;*t*为时间,a;*T*为气温,℃;*k_i(T)*为实际分解率,模型将根据研究区气温进行修正;*τ_{ci}*为上级碳库转移到慢速库的比例。

表 2 CBM-CFS3 生物量周转参数修正

Table 2 Modified parameters of biomass turnover in CBM-CFS3

森林类型 Forest type	树干 Stem		树枝或粗根 Branch or coarse root		树叶 Folia		来源 Sources
	默认值 Default value/ (%/a)	修正值 Modified value/ (%/a)	默认值 Default value/ (%/a)	修正值 Modified value/ (%/a)	默认值 Default value/ (%/a)	修正值 Modified value/ (%/a)	
落叶阔叶林 DBF	0.45—0.67	2.89	2—4	2.96	95	95.24	[25]
常绿阔叶林 EBF	0.45—0.67	3.11	2—4	3.91	95	61.35	
针叶 林 CFF, PMF, CLF, TPF, CMF	0.45—0.67	1.94	2—4	1.79	5—15	33.56	
针阔混交林 CBF	0.45—0.67	2.61	2—4	2.66	95	58.82	

1.4 森林固碳释氧物质量及价值计算

《森林生态系统服务功能评估规范》^[9]将森林生态系统分为植被和土壤两部分(图2),固碳释氧物质量及价值计算见公式(3—5)。

$$V = V_c G_c + V_o G_o \quad (3)$$

$$G_c = G_v + G_s = A(1.63R_c C_v + C_s) \quad (4)$$

$$G_o = 1.19AC_v \quad (5)$$

式中, V 为森林固碳释氧价值,元; V_c 表示固碳价格,采用瑞典碳税率 1200 元/Mg; V_o 为氧气价格,1000 元/Mg; G_c, G_o 分别为固碳物质量和释氧物质量, Mg; G_v, G_s 分别为植被和土壤每年总固碳量, Mg/a; C_v, C_s 分别为植被和土壤单位面积固碳量, $\text{Mg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; A 为森林面积, hm^2 ; R_c 为 CO_2 中的碳含量, 27.27%。

CBM-CFS3 模型除生物量碳库(即植被部分)和土壤有机质碳库外,还设置了枯落物碳库和死木碳库作为关联植被及土壤部分的中间碳库。该模型所定义的 NPP 除包含每年植被部分碳储量增量(ΔBio_i)外,还包括每年周转进入 DOM 碳库的碳(即总周转量 $\text{Turnover}_{\text{total}}$)(公式6)。将生态系统作为统一整体来考虑时,土壤有机质、枯落物及死木碳库的碳均依赖植被生物量的周转输入。CBM-CFS3 中森林生物量通过光合作用固碳,并且通过死亡凋落周转到枯落物碳库和死木碳库,随后一部分枯落物和死木中的碳通过异养呼吸分解释放到大气中,剩余部分则转移到下一级碳库进行分解,最终输入土壤有机质碳库进行缓慢分解释放(图2)。CBM-CFS3 模型中每年生物量碳库转入枯落物和死木碳库的那部分碳($\text{Turnover}_{\text{total}}$)在当年尚未分解(有机质在转入后的下个时间步长中才开始分解,模型时间步长为 1 年),因而在周转当年具有固碳释氧功能。碳收支和主要碳库年碳增量的计算见公式(6—12)。

$$\text{NPP} = \Delta\text{Bio} + \text{Turnover}_{\text{total}} = \Delta\text{Bio} + \Delta L_{\text{total}} + \Delta DW_{\text{total}} + \Delta S_{\text{total}} \quad (6)$$

$$\text{NEP} = \text{NPP} - R_h = \Delta\text{Bio} + (\Delta L_{\text{total}} - R_l) + (\Delta DW_{\text{total}} - R_d) + (\Delta S_{\text{total}} - R_s) \quad (7)$$

$$R_h = R_l + R_d + R_s \quad (8)$$

$$\Delta\text{Bio} = C_{\text{Bio}, t_2} - C_{\text{Bio}, t_1} \quad (9)$$

$$\Delta L_{\text{total}} = \Delta L_{\text{net}} + R_l = C_{\text{litter}, t_2} - C_{\text{litter}, t_1} + R_l \quad (10)$$

$$\Delta DW_{\text{total}} = \Delta DW_{\text{net}} + R_d = C_{\text{deadwood}, t_2} - C_{\text{deadwood}, t_1} + R_d \quad (11)$$

$$\Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{net}} + R_s = C_{\text{soil}, t_2} - C_{\text{soil}, t_1} + R_s \quad (12)$$

$$C_{v, \text{total}} = \Delta\text{Bio} + \Delta L_{\text{total}} + \Delta DW_{\text{total}} \quad (13)$$

$$C_{s, \text{total}} = \Delta S_{\text{total}} \quad (14)$$

$$C_{v, \text{net}} = \Delta\text{Bio} + \Delta L_{\text{net}} + \Delta DW_{\text{net}} \quad (15)$$

$$C_{s, \text{net}} = \Delta S_{\text{net}} \quad (16)$$

$$V_{\text{total}} = AV_c(1.63R_c C_{v, \text{total}} + C_{s, \text{total}}) + 1.19AV_o C_{v, \text{total}} \quad (17)$$

$$V_{\text{net}} = AV_c(1.63R_c C_{v, \text{net}} + C_{s, \text{net}}) + 1.19AV_o C_{v, \text{net}} \quad (18)$$

$$R_{\text{hloss}} = V_{\text{total}} - V_{\text{net}} \quad (19)$$

式中: NPP 为净初级生产力, Mg/a; NEP 为净生态系统生产力, Mg/a; $\text{Turnover}_{\text{total}}$ 表示从生物量碳库周转到 DOM 碳库的总碳储量, Mg/a; ΔBio 为生物量碳储量的年增量, Mg/a; $\Delta L_{\text{total}}, \Delta L_{\text{net}}$ 分别为枯落物碳储量每年总、净增量, Mg/a; $\Delta DW_{\text{total}}, \Delta DW_{\text{net}}$ 分别为死木碳储量每年总、净增量, Mg/a; $\Delta S_{\text{total}}, \Delta S_{\text{net}}$ 分别为土壤碳储量每年总、净增量, Mg/a; R_h 为生态系统异养呼吸(即为 DOM 分解释放量), Mg/a; R_l, R_d, R_s 分别为枯落物、死木和土壤有机质碳库每年的异养呼吸量, Mg/a; $C_{v, \text{total}}, C_{s, \text{total}}$ 分别为植被、土壤每年总固碳量, Mg/a; $C_{v, \text{net}}, C_{s, \text{net}}$ 分别为植被、土壤每年净固碳量, Mg/a; $V_{\text{total}}, V_{\text{net}}$ 分别为生态系统总、净固碳释氧价值, 元/a; R_{hloss} 为异养呼吸导致的价值损失, 元/a。

将上述碳库每年总、净增量的计算公式与《规范》中固碳释氧物质量公式结合, 分别得到植被及土壤的总固碳量(公式13—14)和净固碳量(公式15—16), 代入公式(17—19)即可得到生态系统总、净固碳释氧价值

和异养呼吸导致的价值损失。将 2009 年兴山县森林资源规划设计调查数据输入 CBM-CFS3 模型,并且假设 2009—2030 年兴山县森林在无任何干扰条件下自然生长、所有森林类型面积均无变化,基于上述公式估算该时段内兴山县森林总、净固碳释氧服务价值动态。

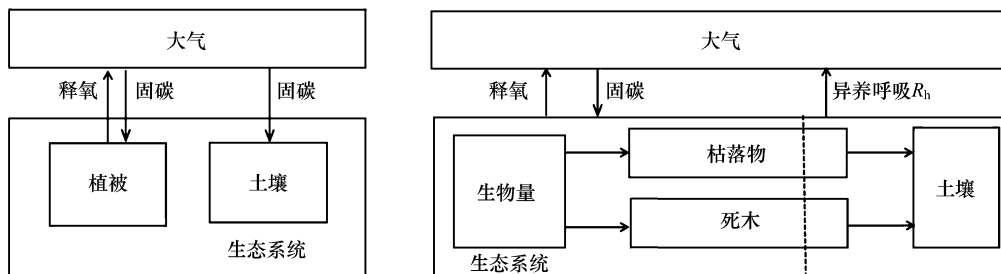


图 2 森林固碳释氧服务评估示意图

Fig.2 Sketch map of forest carbon sequestration and oxygen release service evaluation

1.5 CBM-CFS3 模拟 NPP 结果验证

由于兴山县缺乏森林生产力的相关研究,因此将本文估算结果与具有相同森林类型、气候条件相似的三峡库区样地实测 NPP 结果^[26-28]进行比较。由表 3 可知,除针阔混交林外,兴山县其他森林类型与三峡库区对应森林类型的实测 NPP 较为吻合。兴山县针阔混交林与三峡库区该森林类型的林龄结构差异是导致其 NPP 模拟值高于实测值的主要原因。总体而言,兴山县森林 NPP 模拟结果较为合理。

表 3 CBM-CFS3 模拟 NPP 与样地实测值比较

Table 3 Compare the NPP simulated by CBM-CFS3 with the filed measured values

地点 Sites	NPP/(Mg hm ⁻² a ⁻¹)								来源 Sources
	柏木林 CFF	常绿阔叶林 EBF	落叶阔叶林 DBF	马尾松林 PMF	杉木林 CLF	温性松林 TPF	针阔混交林 CBF	针叶混交林 CMF	
兴山 Xingshan	1.92	3.67	4.09	2.21	2.12	2.61	6.85	3.89	本文
三峡库区	1.61	3.72	3.02	3.07	3.79	3.03	2.79	3.06	[26]
The Three Gorge	2.11	4.56	3.28	3.60	2.09	3.25	3.22	3.45	[27]
Reservoir Area	4.40	—	4.38	5.46	4.05	—	3.87	6.19	[28]

2 结果分析

2.1 兴山县森林碳收支及固碳释氧服务价值

2009—2030 年兴山县森林生态系统 NPP 和异养呼吸均逐渐增加(图 3),变化范围分别是 0.46—0.70 Tg/a 和 0.33—0.50 Tg/a。在 NPP 和异养呼吸变化趋势的共同作用下,NEP 先由 0.12 Tg/a(2005 年)逐渐增长到 0.21 Tg/a(2017 年),之后又逐渐下降至 0.18 Tg/a(2030 年)。模拟期间兴山县表现为碳汇,NEP 平均值为 0.19 Tg/a,仅占 NPP 的 29.9%,而异养呼吸平均值为 0.45 Tg/a,占比为 70.1%。

兴山县生物量碳储量的年增量先由 0.21 Tg/a(2009 年)增加至 0.25 Tg/a(2012 年),随后逐渐减少至 0.18 Tg/a(2030 年),模拟期间生物量碳储量平均每年增长 0.22 Tg/a。DOM 碳库中枯落物碳储量的年增量最高(范围为 0.17—0.35 Tg/a);其次为土壤有机质碳库和死木碳库,二者碳储量的年增量范围分别是 0.06—0.10 Tg/a 和 0.02—0.06 Tg/a。DOM 碳库中枯落物碳库的异养呼吸最高(模拟期间平均值为 0.31 Tg/a),其次为土壤有机质碳库(0.09 Tg/a),死木碳库的异养呼吸最低(0.05 Tg/a)。

2009—2030 年兴山县森林生态系统总释氧物质质量的平均值为 6.64×10^5 Mg(或 4.11 Mg/hm²),约为总固碳物质质量 3.33×10^5 Mg(或 2.06 Mg/hm²)的 2 倍(图 4);去除异养呼吸消耗后,森林净释氧物质质量平均值

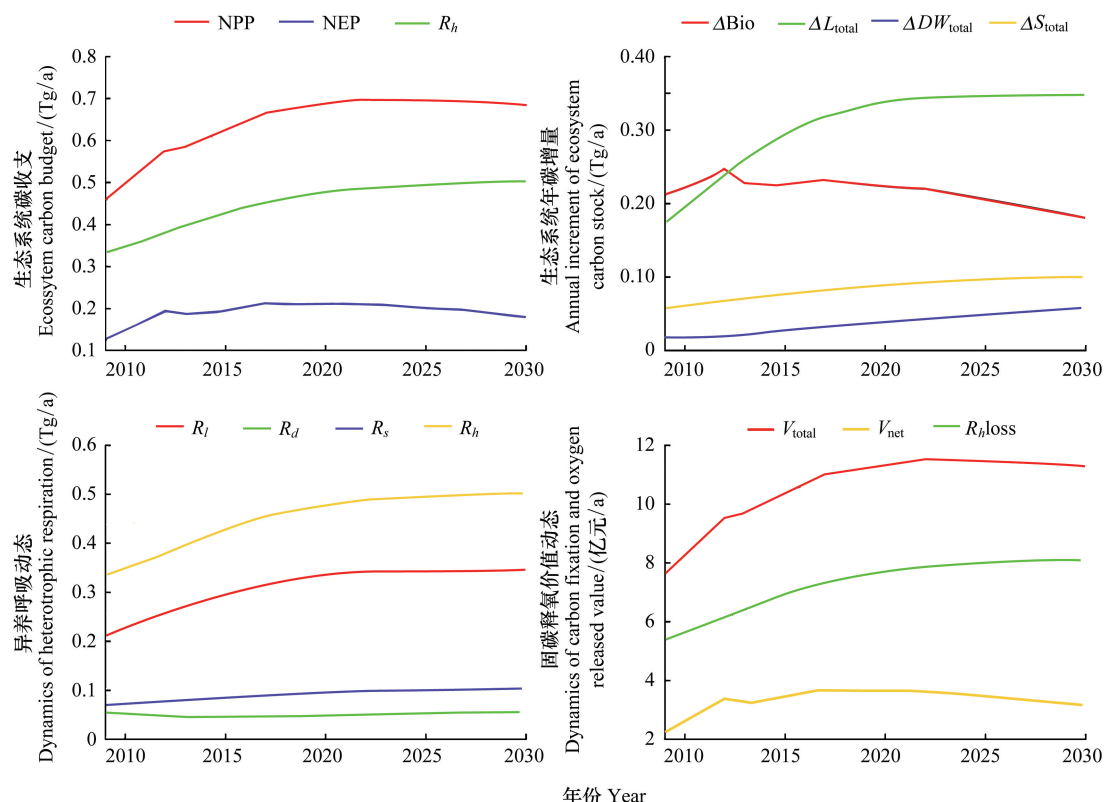


图3 兴山县森林碳收支及固碳释氧价值动态

Fig.3 Carbon budget and dynamics of carbon fixation and oxygen released value of forests in Xingshan county

NPP:净初级生产力 net primary production; NEP:净生态系统生产力 net ecosystem production; R_h :异养呼吸 heterotrophic respiration; ΔBio 、 ΔL_{total} 、 ΔDW_{total} 、 ΔS_{total} :分别为生物量、枯落物、死木和土壤有机质的碳储量年总增量 total annual increments of carbon stocks of biomass, litter, deadwood and soil organic matter pools, respectively; R_l 、 R_d 、 R_s :分别为枯落物、死木和土壤有机质碳库每年异养呼吸量 annual heterotrophic respirations of litter, deadwood and soil organic matter pools, respectively; V_{total} 、 V_{net} :分别为森林生态系统总、净固碳释氧价值 total, net value of carbon fixation and oxygen release of forest ecosystem, respectively; R_{hloss} :异养呼吸导致的价值损失 value loss caused by heterotrophic respiration

(2.36×10^5 Mg 或 1.46 Mg/hm²) 接近净固碳物质质量 (8.19×10^4 Mg 或 0.51 Mg/hm²) 的 3 倍。与兴山县森林碳收支变化趋势高度相似, 2009—2030 年兴山县森林总、净固碳释氧价值变化范围分别为 7.59—11.53 亿元/a 和 2.21—3.70 亿元/a, 二者平均值分别为 10.63 亿元/a 或 6577 元 hm⁻² a⁻¹、3.34 亿元/a 或 2067 元 hm⁻² a⁻¹ (图 4)。异养呼吸造成的价值损失逐年增加 (5.39—8.13 亿元/a), 年均损失量为 7.29 亿元/a 或 4509 元 hm⁻² a⁻¹, 约占总价值的 68.6%, 导致兴山县净固碳释氧价值在模拟后期呈下降趋势。

2.2 主要森林类型的总、净固碳释氧服务价值

兴山县单位面积总固碳释氧价值及异养呼吸价值损失在针阔混交林中最高 (图 4), 平均值分别为 11420 元 hm⁻² a⁻¹ 和 9835 元 hm⁻² a⁻¹, 而在柏木林中最低 (分别为 3162 元 hm⁻² a⁻¹ 和 1307 元 hm⁻² a⁻¹)。单位面积净固碳释氧价值在落叶阔叶林中最高 (2653 元 hm⁻² a⁻¹), 在温性松林中最低 (360 元 hm⁻² a⁻¹)。

就总量而言, 兴山县森林总、净固碳释氧价值以及异养呼吸损失在面积最大的落叶阔叶林中值最高 (表 4), 三者平均值分别为 5.24 亿元/a、2.05 亿元/a 和 3.19 亿元/a; 而在面积最小的杉木林中值最低, 分别为 0.04 亿元/a、0.02 亿元/a 和 0.02 亿元/a。模拟期间常绿阔叶林、温性松林和针阔混交林的总、净固碳释氧价值均表现为逐渐减小趋势, 而其他森林类型的总、净价值则逐渐增大。温性松林异养呼吸损失占总价值的比例最高 (91.5%), 而柏木林的异养呼吸损失比例最低 (41.3%), 说明柏木林可相对有效地将总固碳释氧价值转化为净价值。

2.3 森林固碳释氧价值的空间分布

兴山县中部森林较少,而东部和西部森林分布相对集中(图5)。总、净固碳释氧价值的低值区主要分布在兴山县西北边缘、东北部和东南部;而高值区则分布在中东部和西南部。与之对应,异养呼吸造成的价值损失在兴山县东南部较高,在中部和西南部较低。

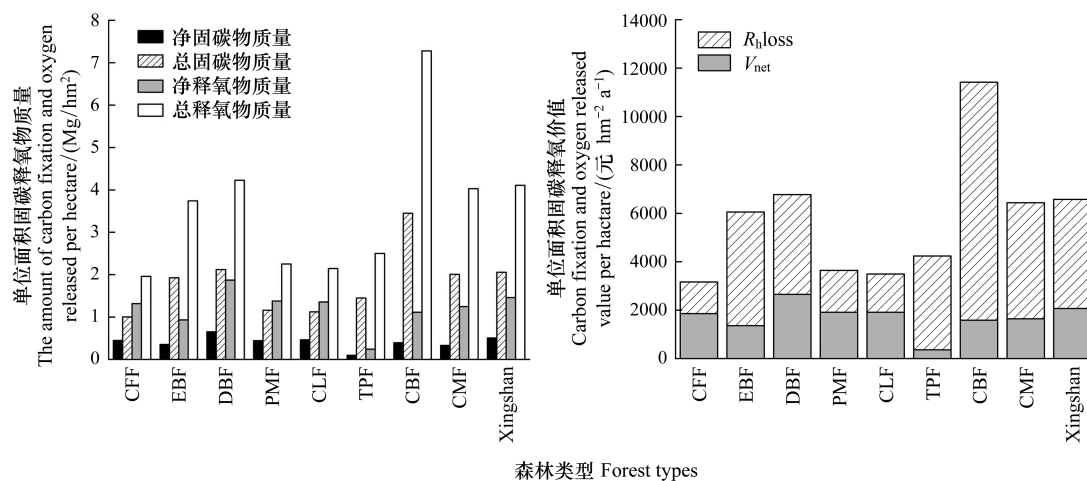


图4 兴山县主要森林类型单位面积固碳释氧物质量与价值

Fig.4 The amounts and values of carbon fixation and oxygen released of main forest types in Xiangshan county per hectare

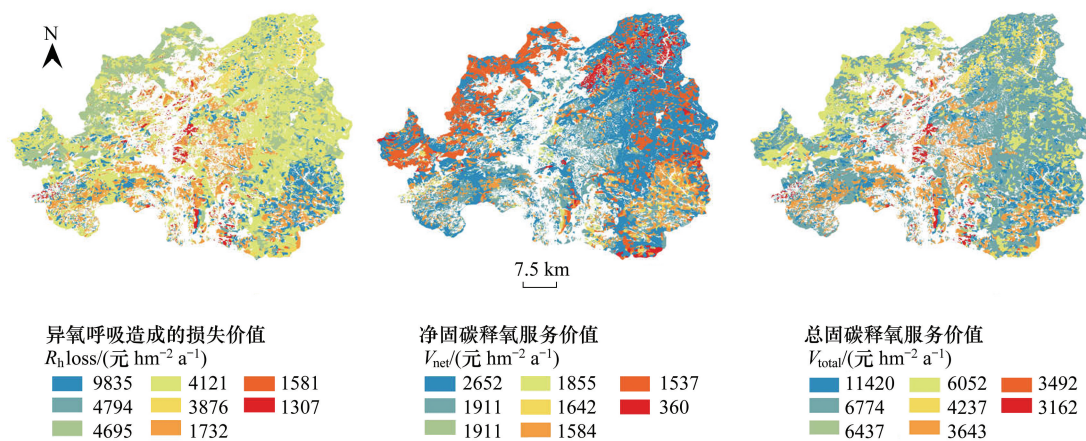


图5 兴山县森林异养呼吸价值损失、净固碳释氧价值与总固碳释氧价值空间分布格局

Fig.5 Spatial distribution of $R_{h\text{loss}}$, V_{net} and V_{total} of forests in Xiangshan county

3 讨论

2009—2030 年间兴山县森林 NPP、NEP 平均值分别为 $3.97 \text{ Mg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $1.19 \text{ Mg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 异养呼吸占 NPP 比例约为 70.1%, 与付甜^[24] 对三峡库区森林生态系统碳收支估算结果极为接近, 说明兴山县森林与三峡库区森林整体状况相似。对比国内碳收支研究结果可知, 兴山县森林异养呼吸占 NPP 的比例符合前人研究结果范围 (47.5%—98.9%)^[21, 24, 29-32], 说明 CBM-CFS3 模型对森林生态系统碳收支的评估合理可信, 基于该模型估算结果能够较为准确地评估固碳释氧服务价值。本文结果显示异养呼吸将导致固碳释氧服务价值年均损失 7.29 亿元/a 或 $4509 \text{ 元 hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 约占总价值的 68.6%, 因此若忽略异养呼吸将会高估森林实际提供的固碳释氧服务价值。本文结果有助于降低固碳释氧服务评估的不确定性, 但在计算过程中未考虑固碳价格和

氧气价格的波动,未来仍需加强对森林总、净固碳释氧服务价值的研究,以提高对生态系统服务时空变化规律的认识、增强森林应对气候变化的潜力和维持区域可持续发展。

表 4 兴山县主要森林类型总、净固碳释氧价值
Table 4 Both V_{total} and V_{net} of main forest types in Xingshan county

森林类型 Forest types	面积 Area/ (10^4 hm^2)	总固碳释氧价值 $V_{total}/(\text{亿元/a})$			净固碳释氧价值 $V_{net}/(\text{亿元/a})$			异养呼吸损失价值 $R_{hloss}/(\text{亿元/a})$			$R_{hloss}/$ V_{total}
		2009	年均 变化量	平均值	2009	年均 变化量	平均值	2009	年均 变化量	平均值	
柏木林 CFF	0.21	0.02	0.0024	0.07	0.01	0.0012	0.04	0.01	0.0012	0.03	41.3%
常绿阔叶林 EBF	3.02	1.47	-0.0033	1.83	0.67	-0.0296	0.41	0.80	0.0263	1.42	77.6%
落叶阔叶林 DBF	7.74	2.67	0.1618	5.24	0.66	0.0663	2.05	2.01	0.0955	3.19	60.8%
马尾松林 PMF	2.33	0.38	0.0341	0.85	0.05	0.0253	0.44	0.33	0.0088	0.40	47.5%
杉木林 CLF	0.11	0.02	0.0009	0.04	0.01	0.0003	0.02	0.01	0.0006	0.02	45.3%
温性松林 TPF	0.53	0.52	-0.0175	0.23	0.37	-0.0170	0.02	0.15	-0.0005	0.21	91.5%
针阔混交林 CBF	1.90	2.49	-0.0239	2.17	0.53	-0.0148	0.30	1.97	-0.0091	1.87	86.1%
针叶混交林 CMF	0.32	0.02	0.0204	0.21	-0.09	0.0127	0.05	0.11	0.0076	0.16	74.5%
兴山 Xingshan	16.17	7.59	0.1748	10.63	2.21	0.0444	3.34	5.39	0.1304	7.29	68.6%

现有研究在估算固碳释氧服务时均未考虑植被与土壤的联系。土壤之所以表现出固碳特征是由于生物量持续转入土壤有机质碳库的碳多于土壤异养呼吸的释放量。后者能抵消相当一部分固碳释氧服务却并未计入在内。相比之下 CBM-CFS3 可通过枯落物与死木碳库将生态系统内部碳库关联起来,对生态系统的描述较为完整。通过量化各组碳储量的年增量与异养呼吸,可得到森林每年总、净固碳释氧物质量及价值动态。DOM 分解是生态系统养分循环的重要组成部分,受温度、湿度等多种因素的影响^[33]。CBM-CFS3 能够根据研究区的气温和降水修正分解速率^[22, 33],可相对准确地计算研究区气候条件下的 DOM 分解释放量。加拿大自 20 世纪 90 年代即开展了长期的样地间分解实验(CIDET),测量不同森林类型及立地条件下枯落物和粗木质残体的分解过程,旨在持续改进 CBM-CFS3 模型的 DOM 分解参数^[23]。

模型是对客观世界的抽象,不同模型对生态系统的简化方式存在差异,因而对固碳释氧过程的描述也不尽相同。本文认为枯落物和死木碳库中每年转入的新碳是当年植被生物量的一部分,具有固碳释氧能力;土壤碳则由枯落物和死木经过多年分解和逐级周转而来,只能进行异养呼吸分解释放。但实际上土壤碳库也包含直接从生物量碳库周转而来的碳,例如细根脱落后大部分转入枯落物碳库,但也有少量直接进入土壤有机质碳库。由于这部分碳量较少且不易测量,因而未计算该部分的释氧价值。受 DOM 分解过程复杂性及野外测量的困难性影响,在森林为碳汇的前提下,如果不考虑枯落物和死木碳库中新碳的释氧作用、并将所有 DOM 碳库均视为仅有具分解释放功能时,计算出的净固碳释氧价值将低于本文结果。本文未考虑任何森林干扰,例如病虫害、风扰和冰雪灾害,这些干扰可能会降低森林 NPP 并产生大量 DOM,导致异养呼吸释放量增大^[34-35]。除此之外,火灾不仅会在短时间内造成生物量和 DOM 碳库的大量排放,还会在未来持续影响 DOM 分解^[36],因此未来需要深入研究干扰对森林固碳释氧服务的影响。

除研究方法的不确定外,CBM-CFS3 的模型设计、算法及模型参数也会导致结果的不确定性,其中生物量周转参数仅有极少文献提及^[25],而它对结果具有直接影响且不确定性较高。未来对异养呼吸及生态系统呼吸的研究需要建立长期观测体系,发展出符合我国森林类型和立地特征的关键参数^[37-38];同时需积极开发半机理或过程模型,以求更详细地描述生态系统碳平衡过程和开展生态系统服务评估。

为提高兴山县森林固碳释氧服务的供给能力,未来可以从两方面加强森林管理:(1)通过抚育和造林调整林龄结构、提高森林质量、营造混交林,在维持生物多样性的同时选择固碳能力较强的树种,以增强森林固碳能力;(2)加强林下管理、减弱森林遭受火和病虫害等干扰的风险,以避免剧烈的森林碳排放。未来需要利用其他模型估算森林固碳释氧服务价值并进行多模型结果对比,以降低结果的不确定性;同时需要进一步发

展和丰富生态系统固碳释氧服务价值的评估方法、提高对区域森林生态系统服务价值动态的认识以促进森林可持续发展和保障生态安全。

4 结论

本文基于 CBM-CFS3 模型评估了兴山县森林生态系统总、净固碳释氧服务价值时空动态及异养呼吸造成的价值损失。2009—2030 年兴山县森林生态系统表现为碳汇,总固碳释氧服务价值变化范围是 7.59—11.53 亿元/a,模拟期间平均值为 10.63 亿元/a 或 6577 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$,其中净固碳释氧价值和异养呼吸损失分别占比 31.4%和 68.6%。由此可见,若忽略异养呼吸将严重高估森林生态系统固碳释氧服务价值,以 NEP 估算森林实际提供的固碳释氧服务更为合理。因此在进行区域尺度森林生态系统服务评估时必须与物质循环过程相结合,以降低评估结果的不确定性。

参考文献(References):

- [1] Daily G C, Söderqvist T, Aniyar S, Arrow K, Dasgupta P, Ehrlich P R, Folke C, Jansson A, Jansson B O, Kautsky N, Levin S, Lubchenco J, Mäler K G, Simpson D, Starrett D, Tilman D, Walker B. The value of nature and the nature of value. *Science*, 2000, 289(5478): 395-396.
- [2] 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.
- [3] Bösch M, Elsasser P, Franz K, Lorenz M, Moning C, Olschewski R, Rödl A, Schneider H, Schröppel B, Weller P. Forest ecosystem services in rural areas of Germany: Insights from the national TEEB study. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 77-83.
- [4] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [5] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [6] 王兵, 任晓旭, 胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估. *林业科学*, 2011, 47(2): 145-153.
- [7] 肖骁, 穆治霖, 赵雪雁, 李京忠, 薛冰. 基于 RS/GIS 的东北地区森林生态系统服务功能价值评估. *生态学杂志*, 2017, 36(11): 3298-3304.
- [8] 黄龙生, 王兵, 牛香, 宋庆丰. 济南市森林生态系统服务功能的维持机制. *生态学报*, 2018, 38(23): 8544-8554.
- [9] 国家林业局. LY/T 1721—2008 森林生态系统服务功能评估规范. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-6.
- [10] 张春华, 居为民, 王登杰, 王希群, 王昕. 2004—2013 年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值. *生态学报*, 2018, 38(5): 1739-1749.
- [11] 冯继广, 丁陆彬, 王景升, 姚萍萍, 姚帅臣, 王志凯. 基于案例的中国森林生态系统服务功能评价. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1375-1382.
- [12] 孙滨峰, 赵红, 逯非, 王效科. 东北森林带森林生态系统固碳服务空间特征及其影响因素. *生态学报*, 2018, 38(14): 4975-4983.
- [13] Stinson G, Kurz W A, Smyth C E, Neilson E T, Dymond C C, Metsaranta J M, Boisvenue C, Rampley G J, Li Q, White T M, Blain D. An inventory-based analysis of Canada's managed forest carbon dynamics, 1990 to 2008. *Global Change Biology*, 2011, 17(6): 2227-2244.
- [14] Kruhlov I, Thom D, Chaskovskyy O, Keeton W S, Scheller R M. Future forest landscapes of the Carpathians: vegetation and carbon dynamics under climate change. *Regional Environmental Change*, 2018, 18(5): 1555-1567.
- [15] 苏常红, 王亚璐. 汾河上游流域生态系统服务变化及驱动因素. *生态学报*, 2018, 38(22): 7886-7898.
- [16] 缪建群, 孙松, 王志强, 黄国勤. 江西高天岩自然保护区生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 2017, 37(19): 6422-6430.
- [17] 王玉涛, 郭卫华, 刘建, 王淑军, 王琦, 王仁卿. 昆崙山自然保护区生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 2009, 29(1): 523-531.
- [18] 涂洁, 刘琪璟. 亚热带红壤丘陵区湿地松人工林固碳释氧效益研究. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(1): 30-35.
- [19] 胡峻嶒, 黄访, 铁烈华, 刘雄, 魏圣钊, 黄从德. 四川省森林植被固碳经济价值动态. *生态学报*, 2019, 39(1): 158-163.
- [20] 张娜, 于贵瑞, 赵士洞, 于振良. 长白山自然保护区生态系统碳平衡研究. *环境科学*, 2003, 24(1): 24-32.
- [21] 苏宏新, 李广起. 模拟蒙古栎林生态系统碳收支对非对称性升温的响应. *科学通报*, 2012, 57(17): 1544-1552.
- [22] Kurz W A, Dymond C C, White T M, Stinson G, Shaw C H, Rampley G J, Smyth C, Simpson B N, Neilson E T, Trofymow J A, Metsaranta J, Apps M J. CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling*, 2009, 220(4): 480-504.
- [23] Smyth C E, Trofymow J A, Kurz W A, CIDET Working Group. Decreasing uncertainty in CBM-CFS3 estimates of forest soil carbon sources and

- sinks through use of long-term data from the Canadian Intersite Decomposition Experiment. Victoria; Pacific Forestry Centre, 2010; 2-8.
- [24] 付甜. 基于 CBM-CF3S 模型的三峡库区主要森林生态系统碳计量. 北京: 中国林业科学研究院, 2013; 43-59.
- [25] 周涛, 史培军, 贾根锁, 李秀娟, Luo Y Q. 中国森林生态系统碳周转时间的空间格局. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(5): 632-644.
- [26] 曾立雄, 王鹏程, 肖文发, 万睿, 黄志霖, 潘磊. 三峡库区植被生物量和生产力的估算及分布格局. 生态学报, 2008, 28(8): 3808-3816.
- [27] 王鹏程, 邢乐杰, 肖文发, 黄志霖, 潘磊, 曾立雄. 三峡库区森林生态系统有机碳密度及碳储量. 生态学报, 2009, 29(1): 97-107.
- [28] 王雪军, 张煜星, 黄国胜, 马炜, 陈新云, 党永峰. 三峡库区森林生产力和固碳能力估算. 生态科学, 2014, 33(6): 1114-1121.
- [29] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 官凤英, 于小军, 申正其. 毛竹、杉木人工林生态系统碳平衡估算. 林业科学, 2010, 46(11): 59-65.
- [30] Zhu J X, Hu X Y, Yao H, Liu G H, Ji C J, Fang J Y. A significant carbon sink in temperate forests in Beijing: based on 20-year field measurements in three stands. *Science China Life Sciences*, 2015, 58(11): 1135-1141.
- [31] 李意德, 吴仲民, 曾庆波, 周光益, 陈步峰, 方精云. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究. 生态学报, 1998, 18(4): 371-378.
- [32] 康文星, 田微, 何介南, 崔莎莎. 广州市十种森林生态系统的碳循环. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2917-2924.
- [33] Smyth C E, Kurz W A. Forest soil decomposition and its contribution to heterotrophic respiration: A case study based on Canada. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 67: 155-165.
- [34] Hicke J A, Allen C D, Desai A R, Dietze M C, Hall R J, Hogg E H, Kashian D M, Moore D, Raffa K F, Sturrock R N, Vogelmann J. Effects of biotic disturbances on forest carbon cycling in the United States and Canada. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 7-34.
- [35] 王静, 温学发, 王辉民, 王晶苑. 冰雪灾害对中亚热带人工针叶林净初级生产力的影响. 生态学报, 2014, 34(17): 5030-5039.
- [36] Ghimire B, Williams C A, Collatz G J, Vanderhoof M. Fire-induced carbon emissions and regrowth uptake in western U.S. forests: Documenting variation across forest types, fire severity, and climate regions. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(G3): G03036.
- [37] 张修玉, 管东生, 张海东. 广州三种森林粗死木质残体(CWD)的储量与分解特征. 生态学报, 2009, 29(10): 5227-5236.
- [38] 赵嘉诚, 李海奎. 广东省森林死木碳库特征. 生态学报, 2018, 38(2): 550-559.