

DOI: 10.20103/j.stxb.202209162651

林黛仪, 周平, 徐卫, 李吉跃, 林雯. 基于集成生物圈模型的南岭不同植被类型碳收支研究. 生态学报, 2024, 44(4): 1429-1440.

Lin D Y, Zhou P, Xu W, Li J Y, Lin W. Carbon budget of different vegetation types in Nanling based on IBIS. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1429-1440.

基于集成生物圈模型的南岭不同植被类型碳收支研究

林黛仪^{1,2}, 周平^{1,*}, 徐卫¹, 李吉跃², 林雯³

1 广东省科学院广州地理研究所, 广东南岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 广州 510070

2 华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642

3 广州市林业和园林科学研究院, 广州 510405

摘要:广东南岭保存着世界上同纬度带上最完整的亚热带植被, 森林资源丰富, 具有巨大的固碳潜力。然而, 目前该地区不同森林植被类型的碳收支年积累量特征及月动态规律尚不明确。选择广东南岭国家级自然保护区内沟谷常绿阔叶林、山地常绿阔叶林、针阔叶混交林和山顶常绿阔叶矮林 4 种典型森林植被为研究对象, 运用集成生物圈模型 (IBIS) 对其 2020 年总初级生产力 (GPP)、净初级生产力 (NPP)、净生态系统生产力 (NEP) 和土壤异养呼吸 (R_h) 进行模拟, 利用样地调查数据对 NPP 模拟结果进行验证, 分析该地区不同植被类型的碳收支年积累量特征及月变化特征。研究结果表明, 2020 年南岭不同植被类型 GPP、NPP、NEP 和 R_h 的平均值分别为 1.709、0.718、0.596 和 0.123 kg C m⁻² a⁻¹, 4 种植被类型中 GPP 最高的是沟谷常绿阔叶林, NPP、NEP 最高的是山地常绿阔叶林, 山顶常绿阔叶矮林的 GPP、NPP 和 NEP 均相对较低。南岭不同植被类型全年各月均表现出碳汇 (NEP>0), 逐月 NPP 和 NEP 均表现为双峰变化规律, 但不同植被类型的两个峰值所在月份不一致; 逐月 R_h 呈夏季高、冬季低的单峰曲线, 夏季时沟谷常绿阔叶林的 R_h 最高, 山顶常绿阔叶矮林的 R_h 最低。经验证, IBIS 模型较好地模拟南岭不同植被类型碳收支情况, 模拟值解释了 93% 的实际碳收支情况, 模型对各植被类型的模拟平均相对误差在 1.16%—6.07% 之间。该研究可为我国亚热带地区南岭森林生态系统的固碳能力评价和森林生态系统资源的管理提供重要参考价值。

关键词:森林碳收支; 集成生物圈模型 (IBIS); 生产力; 动态变化; 广东南岭国家级自然保护区

Carbon budget of different vegetation types in Nanling based on IBIS

LIN Daiyi^{1,2}, ZHOU Ping^{1,*}, XU Wei¹, LI Jiyue², LIN Wen³

1 Guangdong Nanling Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China

2 College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3 Guangzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture, Guangzhou 510405, China

Abstract: Nanling Mountains are abundant in forest resources, which have the most well-preserved subtropical vegetation in the same latitude zone in the world and great carbon sequestration potential. However, the characteristics of total annual carbon budget and the monthly dynamics of different vegetation types with different altitudes in this region are still not clear. In this study, four vegetation types in Guangdong Nanling National Nature Reserve were selected, including valley evergreen broad-leaved forest, mountain evergreen broad-leaved forest, coniferous and broad-leaved mixed forest, and mountaintop evergreen broad-leaved brushwood. The integrated biosphere simulator (IBIS) was used to simulate the gross primary productivity (GPP), net primary productivity (NPP), net ecosystem productivity (NEP), and soil heterotrophic respiration (R_h) of different vegetation types in 2020. The model simulation ability was accurately verified with the observed

基金项目:科技基础资源调查专项课题 (2021FY100702); 广东省科学院打造综合产业技术创新中心行动资金 (2022GDASZH-2022010106); 广东省自然资源科技项目 (GDZRZYKJ2023007); 广东省科学院打造综合产业技术创新中心行动资金 (2022GDASZH-2022010201)

收稿日期:2022-09-19; **网络出版日期:**2023-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pzhou@gdas.ac.cn

NPP based on sample plot tally data, and the characteristics of total annual carbon budget and their monthly dynamic changes were analyzed. The results showed that the average of GPP, NPP, NEP and R_h of all vegetation types in Nanling respectively were 1.709, 0.718, 0.596 and 0.123 kg C m⁻² a⁻¹ in 2020. Among four vegetation types, the valley evergreen broad-leaved forest had the highest GPP, the mountain evergreen broad-leaved forest had the highest NPP and NEP, while the mountaintop evergreen broad-leaved brushwood had relatively low GPP, NPP and NEP. Different vegetation types in the Nanling showed monthly carbon sink (NEP>0). The monthly NPP and NEP of different vegetation types both showed bimodal curves with two peaks appearing in different months. The monthly R_h of different vegetation types showed unimodal curves with a single peak appearing in summer, with the lower value in winter, and valley evergreen broad-leaved forest had the highest R_h in summer when mountaintop evergreen broad-leaved brushwood had the lowest value. It was verified that the IBIS well simulated the carbon budget of different vegetation types in Nanling with the simulated values explained 93% of the actual situation of carbon budget, and the mean relative errors between the simulated values and the observed values of different vegetation types were in range of 1.16% to 6.07%. This study provided an important reference value for the evaluation of carbon sequestration capacity and the management of forest ecosystem resources in Nanling in subtropical zone of China.

Key Words: forest carbon budget; Integrated Biosphere Simulator; productivity; dynamic change; Guangdong Nanling National Nature Reserve

亚热带森林生态系统在当前全球碳循环中起重要作用,研究表明东亚季风区亚热带森林总净生态系统生产力占全球森林的8%,碳汇能力高于亚洲热带和温带森林^[1]。作为森林生态系统碳循环过程和碳收支研究的重要组成部分,森林植被的总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)扣除植被自养呼吸量(Autotrophic Respiration, R_a)为净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP),NPP减去土壤中异养生物呼吸量(Heterotrophic Respiration, R_h)则为净生态系统生产力(Net Ecosystem Productivity, NEP)。GPP决定了进入陆地生态系统的初始物质和能量;NPP反映了植物固定和转化光合产物的效率;NEP表示大气CO₂进入生态系统的净光合产量,当NEP>0时,表示该生态系统为净碳汇,反之为碳源^[2-3]。

目前,关于森林生态系统碳收支的主要研究方法有样地清查法、涡度相关法、大气反演法、模型模拟法等^[4],国内外已开展了许多基于全球动态植被模型的森林生态系统碳循环相关研究,最为广泛应用的模型有VECODE^[5]、IBIS^[6-7]、CASA-DGVM^[8]、LPJ^[9]、CLM-DGVM^[10]、SEIB^[11]等模型。IBIS模型作为最复杂但描述过程最详细的全球动态植被模型之一,集陆面过程、植被冠层生理过程、植被物候过程、植被动态过程以及土壤生物地球化学过程于一体,可研究气候变化、植被变化、生态系统生产力、碳收支、水平衡和温室气体排放等^[6-7,12-13]。我国已有基于IBIS模型的森林生态系统碳收支年积累量特征研究,同时模型模拟结果发现不同纬度地区的不同植被类型NPP、NEP变化规律有明显差异^[14-17]。

我国亚热带地区的南岭山地拥有独特的地理位置和水热条件,有别于世界上同纬度的稀树草原或热带沙漠地区,其保存着同纬度带上最完整的亚热带植被,包括亚热带常绿阔叶林、针阔叶混交林、山顶矮林等多种森林植被类型^[18-19]。尽管当前有研究表明我国南岭山地部分森林在过去二十多年NPP较高^[20],但南岭沟谷常绿阔叶林、山顶常绿阔叶矮林等典型森林植被的碳收支年积累量特征研究仍相对较少。南岭山地森林碳收支变化特征研究多集中土壤CH₄通量月特征^[21-22],但该地区不同森林植被类型的NPP、NEP和 R_h 月动态规律尚不明确,有待进一步研究。本研究运用IBIS模型对南岭沟谷常绿阔叶林、山地常绿阔叶林、针阔叶混交林和山顶常绿阔叶矮林的GPP、NPP、NEP和 R_h 进行模拟,结合基于样地调查数据的NPP估算结果进行验证,探究南岭不同植被类型的碳收支年积累量特征,揭示不同植被类型碳收支的月变化特征,以期为我国亚热带地区南岭森林生态系统碳收支的研究、森林植被固碳能力的评价和森林资源的管理提供参考依据。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广东南岭国家级自然保护区区内,该保护区地处广东省韶关市和清远市的行政区域内,地理坐标为 $24^{\circ}37'—24^{\circ}57'N$, $112^{\circ}30'—113^{\circ}04'E$ 。保护区在南亚热带与中亚热带过渡区中,属亚热带湿润季风气候,多年平均气温 $17.7^{\circ}C$,极端最低气温 $-4.2^{\circ}C$,极端最高气温 $34.4^{\circ}C$, $\geq 10^{\circ}C$ 积温为 $6483^{\circ}C$;区内降水丰富,多年平均降水量为 $1705mm$,降水多集中于 3—10 月,占全年降雨量的 82% 左右;历年平均日照时数为 $1234h$,年平均日照百分率为 40%^[23]。区内植被型主要有亚热带常绿阔叶林、亚热带常绿与落叶阔叶混交林、亚热带常绿针叶林、亚热带常绿针阔叶混交林、亚热带草甸、亚热带灌丛等,优势种多隶属于壳斗科、樟科、山茶科、木兰科、金缕梅科、安息香科^[18,24]。

1.2 样地设置

本研究选择广东南岭森林生态系统国家野外科学观测研究站于 2017 年根据植物调查样地的设置原则和体系^[25]建设的南岭生态监测永久固定样地,海拔跨度从 $413m$ 到 $1698m$,植被类型随海拔升高变化趋势为“沟谷常绿阔叶林—山地常绿阔叶林—针阔叶混交林—山顶常绿阔叶矮林”4 种典型森林植被,共有 21 个样地(图 1);每个样地面积均为 $40m \times 40m$,具体信息见表 1。在 2017 和 2020 年对样地内所有胸径(DBH) $\geq 1cm$ 的木本植物进行每木调查,逐株记录其种名、胸径、树高、冠幅。同时,对样地内所有的枯立木胸径及树高、枯倒木和残枝的中央直径、长度及分解程度进行调查;并在每个样地中选择三个凋落物取样点,使用 $1m \times 1m$ 的收集框对地表上未分解、半分解的凋落物进行收集取样和称重。

1.3 IBIS 模型数据及参数化

IBIS 模型由美国威斯康星大学麦迪逊分校全球环境与可持续发展研究中心开发,涵盖从 60 min 到 1 a 的时间尺度;模型使用 Richardson 天气发生器将月平均气象数据模拟出以 60min 为时间步长的天气条件,并通过累加每小时碳通量(包括总光合作用和维持呼吸作用)来计算不同植被的每种植物功能型的碳平衡^[6]。IBIS 模型运行所需输入数据包括气候数据、土壤数据、植被数据。气象数据包括月均气温、月均日温差、月降水量、月降水日数、月均相对湿度、月均风速和月均云覆盖率气象变量,土壤数据指各土层深度的土壤质地数据,植被数据包括植物残体碳储量等。

研究中的模型主要参数包括植被参数和土壤性质参数。植被参数根据南岭不同植被类型特点,选择 IBIS 模型中亚热带常绿阔叶、亚热带常绿针叶、常绿灌木和 C_3 草本 4 种植物功能型,对应的部分相关参数值见表 2,包括 $15^{\circ}C$ 最大光合速率^[17]、比叶面积^[16-17]、生物量转换时间常数和自然植被的碳分配系数^[16],其余生理参数如初始化水分胁迫因子、气孔导度等均使用模型原有参数^[6-7]。土壤性质参数包括饱和导水率、土壤孔隙度、土壤饱和持水量和持续萎蔫点含水量、水势等,均使用模型原有设定参数^[7]。

1.4 数据来源及处理

1.4.1 气象数据

本研究所用气象数据的时间序列为 2020 年 1 月—2020 年 12 月,具体数据详见图 2。平均气温、月均最

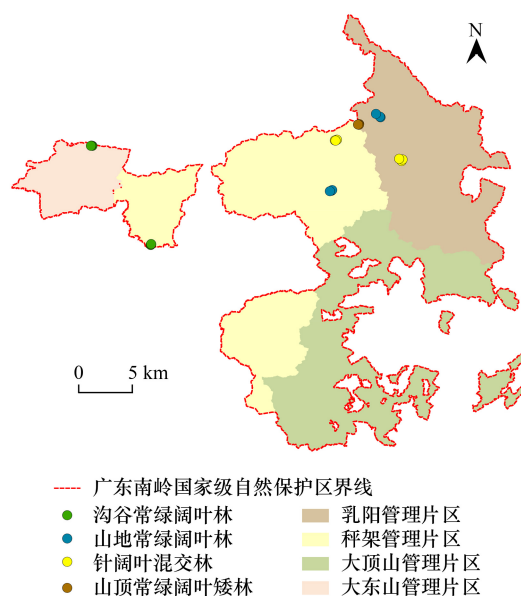


图 1 南岭研究样地分布图

Fig.1 Distribution of sample plots in Nanling Mountains

高温、月均最低气温、降水量、降水日数、相对湿度和平均风速气象变量为月统计数据,来源于广东南岭森林生态系统国家野外科学观测研究站的逐时监测数据;云覆盖率来源于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的第五代再分析资料 ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present 数据集 (<https://cds.climate.copernicus.eu>)。温度和降水作为植物生长的重要条件,是影响不同植被类型生产力的重要气候驱动因子^[26],本研究使用联合国粮食及农业组织 (FAO) 提供的 New_LocClim V1.10 天气模拟器结合上述数据来估算各样地 2020 年气温和降水的逐月数据。

表 1 南岭研究样地信息表

Table 1 Information of sample plots in Nanling

植被类型 Vegetation types	样地编号 Plots	海拔/m Altitude	坡向 Aspect	坡度/(°) Slope	优势树种 Dominant tree species
沟谷常绿阔叶林 Valley evergreen broad-leaved forest	V1	413	南	22	广东润楠 <i>Machilus kwangtungensis</i> 、赤楠 <i>Syzygium buxifolium</i> 、港柯 <i>Lithocarpus harlandii</i> 、柯 <i>Lithocarpus glaber</i> 、鹿角锥 <i>Castanopsis lamontii</i> 、马醉木 <i>Pieris japonica</i>
	V2	421	南	25	
	V3	439	西南	30	
	V4	843	北	12	青冈 <i>Quercus glauca</i> 、米槎 <i>Castanopsis carlesii</i> 、广东润楠
	V5	839	北	10	<i>Machilus kwangtungensis</i> 、杜英 <i>Elaeocarpus decipiens</i> 、罗浮锥
	V6	842	北	15	<i>Castanopsis faberi</i> 、羊角杜鹃 <i>Rhododendron cavaleriei</i>
山地常绿阔叶林 Mountain evergreen broad-leaved forest	M1	920	东南	30	甜槠 <i>Castanopsis eyrei</i> 、杨桐 <i>Adinandra millettii</i> 、杜鹃
	M2	918	东南	32	<i>Rhododendron simsii</i> 、米槎 <i>Castanopsis carlesii</i> 、羊角杜鹃
	M3	925	东南	33	<i>Rhododendron cavaleriei</i> 、水青冈 <i>Fagus longipetiolata</i>
	M4	1170	东	30	青冈 <i>Quercus glauca</i> 、尖叶毛柃 <i>Eurya acuminatissima</i> 、罗浮锥
	M5	1182	东南	25	<i>Castanopsis faberi</i> 、千年桐 <i>Vernicia montana</i> 、杨桐 <i>Adinandra</i>
	M6	1205	东南	15	<i>millettii</i> 、羊角杜鹃 <i>Rhododendron cavaleriei</i>
针阔叶混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	C1	1360	东	8	荷木 <i>Schima superba</i> 、广东松 <i>Pinus kwangtungensis</i> 、青冈 <i>Quercus glauca</i> 、甜槠 <i>Castanopsis eyrei</i> 、红淡比 <i>Cleyera japonica</i> 、五列木
	C2	1504	东南	5	<i>Pentaphylax euryoides</i>
	C3	1398	东北	25	
	C4	1360	东南	35	广东松 <i>Pinus kwangtungensis</i> 、五列木 <i>Pentaphylax euryoides</i> 、荷
	C5	1388	东南	35	木 <i>Schima superba</i> 、甜槠 <i>Castanopsis eyrei</i> 、长苞铁杉 <i>Nothotsuga</i>
	C6	1517	东南	33	<i>longibracteata</i> 、罗浮锥 <i>Castanopsis faberi</i>
山顶常绿阔叶矮林 Mountaintop evergreen broad-leaved brushwood	B1	1698	西北	15	野茉莉 <i>Styrax japonicus</i> 、柃 <i>Eurya japonica</i> 、青冈 <i>Quercus glauca</i> 、
	B2	1691	西北	20	少花桂 <i>Cinnamomum pauciflorum</i> 、冬青 <i>Ilex chinensis</i> 、厚皮香八
	B3	1687	西北	25	角 <i>Illicium ternstroemioides</i>

表 2 IBIS 模型中不同植物功能型部分生理参数

Table 2 Definition of some physiological parameters of different plant functional types in IBIS

植物功能型 Plant functional types	Rubisco 酶最大羧化速率 Maximum Rubisco capacity of top leaf/ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	比叶面积 Specific leaf area/ (m^2/kg)	生物量转换时间常数 Residence time of carbon/a			碳分配系数 Allocation fraction of total photosynthate		
			叶			叶		
			叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem
亚热带常绿阔叶 Subtropical evergreen broadleaf	40	25	1.00	1.00	25.00	0.30	0.20	0.50
亚热带常绿针叶 Subtropical evergreen conifer	40	15	2.50	1.00	25.00	0.30	0.40	0.30
常绿灌木 Evergreen shrub	28	12.5	1.50	1.00	5.00	0.45	0.40	0.15
C ₃ 草本 C ₃ grass	25	20	1.50	1.00	—	0.45	0.55	—

1.4.2 土壤数据

IBIS 模型中的土壤质地数据包括沙粒含量、粉粒含量和粘粒含量的百分比,数据来源于广东南岭森林生态系统国家野外科学观测研究站的实测数据,详见表 3。

1.4.3 植被数据

植物残体作为森林生态系统的结构组成部分和十分重要的碳库,存储于土壤表面的凋落物、枯立木、倒木

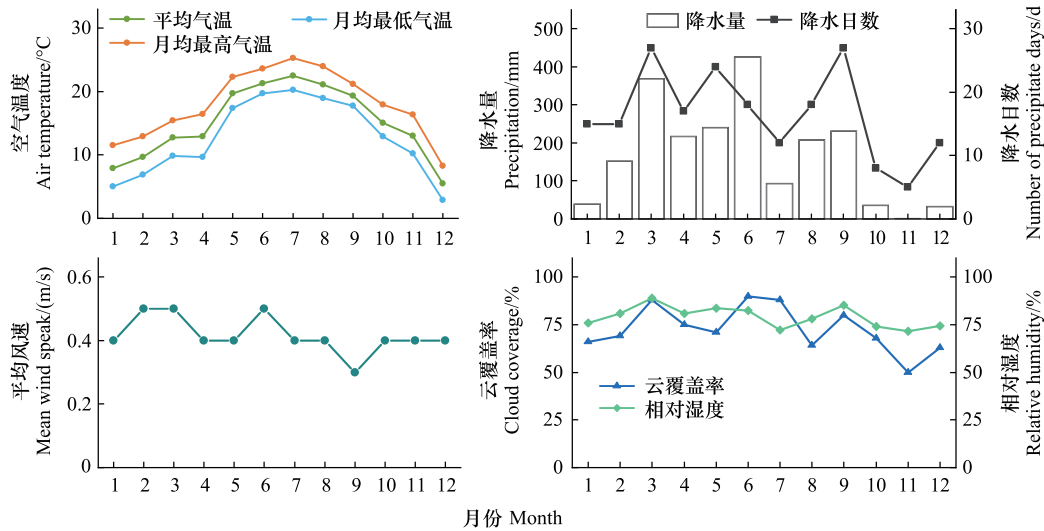


图2 2020年1月至12月的主要气象数据

Fig.2 Major meteorological data from January to December in 2020

和地下死亡细根中,参与了森林生态系统的物质循环、能量流动和信息传递^[7,27]。本研究所用数据中凋落物量数据采用现存量实测数据,木质残体贮量数据采用经验方程^[28–29]结合样地中枯立木及倒木等实测数据进行估算,死亡细根贮量数据采用死根输入量数据。以上数据结合含碳率估算出对应的碳储量,具体如表4所示。

表3 南岭不同植被类型各土层中各土粒含量百分比/%

Table 3 Percentage of soil content of each soil layer of different vegetation types in Nanling

植被类型 Vegetation types	样地编号 Plots	粒级 Soil particles	土层深度 Soil depth/cm				
			0—10	10—15	15—25	25—50	50—100
沟谷常绿阔叶林 Valley evergreen broad-leaved forest	V1	沙粒	43.29	46.75	44.50	47.10	59.95
	V2	粉粒	28.16	15.81	25.12	20.58	16.65
	V3	粉粒	28.55	37.44	30.38	32.32	23.40
	V4	沙粒	66.71	60.98	43.08	62.82	51.16
	V5	粉粒	13.72	17.22	33.34	13.33	26.70
	V6	粉粒	19.57	21.80	23.58	23.85	22.14
山地常绿阔叶林 Mountain evergreen broad-leaved forest	M1	沙粒	54.26	51.30	42.31	46.34	43.93
	M2	粉粒	19.51	22.38	23.82	19.64	22.98
	M3	粉粒	26.23	26.32	33.87	34.02	33.09
	M4	沙粒	59.44	69.97	65.16	48.01	57.24
	M5	粉粒	23.14	16.05	21.27	35.05	27.99
	M6	粉粒	17.43	13.98	13.57	16.94	14.77
针阔叶混交林 Coniferous and broad- leaved mixed forest	C1	沙粒	66.60	68.36	57.87	61.81	62.63
	C2	粉粒	13.02	12.05	22.26	17.14	14.49
	C3	粉粒	20.38	19.59	19.87	21.05	22.88
	C4	沙粒	30.46	44.10	43.36	49.75	57.03
	C5	粉粒	57.03	40.84	38.09	26.68	24.24
	C6	粉粒	12.51	15.06	18.55	23.57	18.73
山顶常绿阔叶矮林 Mountaintop evergreen broad-leaved brushwood	B1	沙粒	52.76	59.51	62.68	58.57	57.83
	B2	粉粒	20.12	16.36	14.75	13.85	16.84
	B3	粉粒	27.12	24.13	22.57	27.58	25.33

表 4 南岭不同植被类型的植物残体碳储量
Table 4 Carbon storage of plant debris of different vegetation types in Nanling

植被类型 Vegetation types	样地编号 Plots	植物残体碳储量 Carbon storage of plant debris/(kg C/m ²)		
		凋落叶 Litter	木质残体 Woody debris	死亡细根 Dead fine root
沟谷常绿阔叶林 Valley evergreen broad-leaved forest	V1	0.215	0.804	0.059
	V2	0.219	0.265	0.060
	V3	0.183	0.311	0.088
	V4	0.136	0.135	0.079
	V5	0.205	0.480	0.074
	V6	0.336	0.677	0.076
山地常绿阔叶林 Mountain evergreen broad-leaved forest	M1	0.266	0.328	0.075
	M2	0.232	0.068	0.060
	M3	0.158	0.264	0.065
	M4	0.175	0.051	0.087
	M5	0.215	0.404	0.092
	M6	0.198	0.312	0.078
针阔叶混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	C1	0.175	0.074	0.028
	C2	0.230	0.038	0.037
	C3	0.119	0.164	0.081
	C4	0.190	0.709	0.097
	C5	0.210	0.248	0.106
	C6	0.203	0.653	0.106
山顶常绿阔叶矮林 Mountaintop evergreen broad-leaved brushwood	B1	0.151	0.052	0.038
	B2	0.165	0.112	0.065
	B3	0.142	0.043	0.059

1.4.4 模型验证数据

本研究采用基于样地调查数据的 NPP 估算结果来验证 IBIS 模型的 NPP 模拟结果^[15]。NPP 估算数据由样地乔木生物量年均净增量(Δ*B*)与 2020 年凋落物产量(*L*)、死根输入量(*F*)和木质残体产量(*W*)总和来进行估算^[27],具体见公式(1)。乔木生物量年均净增量为 2017 与 2020 年样地内乔木生物量现存量之差的年平均值^[30],见公式(2)。乔木生物量现存量为样地内活立乔木的生物量之和,乔木生物量通过样地每木调查数据结合相关异速生长方程计算而出^[31–34]。年凋落物产量采用相关的经验方程进行估算^[35],见公式(3)。年死根输入量采用(4)式进行估算^[36–37]。木质残体年产量为每年样地内死亡乔木个体的生物量之和,见公式(5),本研究假定两期调查间每年样地内的木质残体产量相等。

$$NPP = \Delta B + L + F + W \tag{1}$$

$$\Delta B = \frac{1}{3}(B_{2020} - B_{2017}) \tag{2}$$

$$L = \frac{1}{\frac{e}{B} + f} = \frac{B}{e + fB} \tag{3}$$

$$F = \frac{L}{AGB} \times B_r \tag{4}$$

$$W = \frac{1}{3S} \sum_{i=1}^n B_{wi} \tag{5}$$

式(2)中,*B*₂₀₂₀和*B*₂₀₁₇分别为 2020 年和 2017 年样地内单位面积的乔木生物量现存量。式(3)(4)中,*L*为森林植被年凋落量,*B*为单位面积的乔木生物量现存量,*e*、*f*为不同森林类型的常数,分别取值为 20.507、

0.0383^[35]; F 为死根输入量, AGB 为单位面积的地上生物量, B_r 为单位面积的根系生物量。式(5)中的 B_{wi} 代表样地内第 i 株死亡乔木个体的生物量, S 为样地面积。本研究采用 0.5 作为生物量碳转换系数(含碳率), 以避免低估生物量碳库^[27]。以上参数单位均为 kg C/m^2 。

1.5 数据验证与统计分析

为评估 IBIS 模型对南岭不同植被碳收支模拟准确性, 研究采用平均相对误差(MRE)来判断 IBIS 模型对不同植被类型的模拟精确度^[15], 见公式(6); 采用 NPP 模拟值与实测值采用一元线性回归模型进行拟合分析, 拟合优度 R^2 计算见公式(7)。

$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

式中, y_i 代表第 i 个观测点实测值, $\hat{y}_i$ 代表第 i 个观测点模拟值, $\bar{y}$ 代表实测值的平均值, n 代表同一植被类型观测点数量, k 代表全部观测点数量。MRE 值越接近于 0, 表明模拟效果越精确。 R^2 值越接近于 1, 表明线性回归模型的拟合程度越好, 可解释程度越高。

同时, 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)对 IBIS 模型模拟的 GPP、NPP、NEP 结果的显著性差异进行多重比较, 假设显著性水平为 0.05。本研究在 SPSS 中完成数据分析, 在 Origin 中制图。

2 结果与分析

2.1 模型验证

南岭不同植被类型 2020 年 NPP 观测值和 IBIS 模型模拟值之间的关系如图 3 所示。结果显示, IBIS 模型的 NPP 模拟值对基于样地调查数据的 NPP 观测值的可解释程度为 93%, 说明 IBIS 模型较好地模拟了南岭不同植被类型的 NPP 情况, 具有良好的模拟能力。

在不同植被类型的模拟结果中, 山顶常绿阔叶矮林和山地常绿阔叶林的模拟情况较好, 平均相对误差分别为 1.16% 和 1.36%; 沟谷常绿阔叶林的模拟效果次之, 平均相对误差为 2.49%, 相对误差范围在 0.18%—13.35% 之间; 模拟结果中平均相对误差较大的植被类型为针阔叶混交林, 平均相对误差为 6.07%, 相对误差范围在 0.29%—17.58% 之间。总体而言, IBIS 模型在常绿阔叶(矮)林模拟结果好于针阔叶混交林。

2.2 南岭不同植被类型碳收支年积累量特征

南岭 4 种植被类型 2020 年 GPP、NPP 和 NEP 总积累量的模拟结果显示(图 4), 南岭 4 种植被类型 2020 年 GPP、NPP、NEP 和 R_h 积累量的平均值分别为 1.709、0.718、0.596 和 0.123 $\text{kg C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。不同植被类型 GPP 年积累量差异较大, 沟谷常绿阔叶林显著高于其他 3 种植被类型($P < 0.05$), 山顶常绿阔叶矮林显著低于其他 3 种植被类型($P < 0.05$), 具体表现为沟谷常绿阔叶林($1.980 \text{ kg C m}^{-2} \text{a}^{-1}$) > 山地常绿阔叶林($1.782 \text{ kg C m}^{-2} \text{a}^{-1}$) > 针阔叶混交林($1.716 \text{ kg C m}^{-2} \text{a}^{-1}$) > 山顶常绿阔叶矮林($1.358 \text{ kg C m}^{-2} \text{a}^{-1}$)。NPP 年积累量表现为山地常绿阔叶林 > 沟谷常绿阔叶林 > 针阔叶混交林 > 山顶常绿阔叶矮林, 山顶常绿阔叶矮林显著低于其他 3 种植被类型($P < 0.05$); NEP 年积累量则表现为山地常绿阔

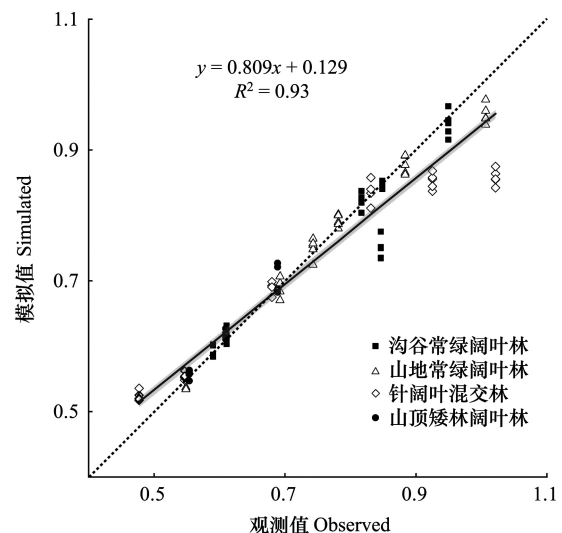


图 3 NPP 观测值与 IBIS 模型 NPP 模拟值

Fig.3 The observed NPP and the simulated NPP of IBIS

叶林>针阔叶混交林>沟谷常绿阔叶林>山顶常绿阔叶矮林。沟谷常绿阔叶林、山地常绿阔叶林、针阔叶混交林和山顶常绿阔叶矮林对应的 R_a 分别占其 GPP 的 61.56%、56.83%、58.13% 和 53.98%，对应的 R_h 约占其 GPP 的 9.06%、6.99%、6.01% 和 6.14%。

2.3 南岭不同植被类型碳收支月变化特征

如图 5 所示,在 2020 年碳收支逐月模拟结果中,南岭 4 种植被类型的逐月 NPP 总体上均具有双峰。沟谷常绿阔叶林的逐月 NPP 呈明显的双峰,峰值主要在 4 月和 10 月,基本表现为:从 1 月开始升高至 4 月达第一峰值,后于 7 月到达波谷,之后开始升高到至 10 月达到第二峰值。山地常绿阔叶林的双峰主要在 5 月和 10 月,逐月 NPP 从 1 月开始升高至 5 月峰值后开始下降至 7 月,再继续升高至 10 月后逐月下降,其中 4 月稍低于 3 月。针阔叶混交林的双峰在 5 月和 9 月,逐月 NPP 从 1 月开始升高至 5 月达一个峰值,在 6 月稍低,而后继续升高至 9 月达到峰值再逐渐下降。山顶常绿阔叶矮林的双峰在 5 月和 7 月,逐月 NPP 从 1 月开始升高至 5 月达到一个峰值,之后 6 月的 NPP 低于 5 和 7 月,在 7 月达到峰值后再逐渐下降,整体上呈现为“倒钟”型。沟谷常绿阔叶林、山地常绿阔叶林、针阔叶混交林和山顶常绿阔叶矮林的月均 NPP 分别为 0.063、0.064、0.060 和 0.052 kg C/m²,4 种植被类型均出现冬季(12、1 和 2 月)各月 NPP 低于全年月均 NPP 的情况,其中沟谷常绿阔叶林夏季(6—8 月)各月 NPP 也低于全年月均 NPP,山顶常绿阔叶矮林 5—10 月的各 NPP 均高于全年月均 NPP。

2020 年南岭不同植被类型 R_h 的逐月变化趋势大致相同,全年总体呈现冬季低、夏季高的单峰型(图 5),其中在 1 月最低、7 月最高。沟谷常绿阔叶林、山地常绿阔叶林、针阔叶混交林和山顶常绿阔叶矮林 7 月 R_h 比 1 月分别增长了 0.024、0.017、0.013 和 0.012 kg C/m²。夏季时 4 种植被类型的月均 R_h 值表现为沟谷常绿阔叶林(0.024 kg C/m²)>山地常绿阔叶林(0.017 kg C/m²)>针阔叶混交林峰(0.014 kg C/m²)>山顶常绿阔叶矮林(0.012 kg C/m²)。

图 5 中南岭不同植被类型全年各月均表现出净碳汇(NEP>0),与逐月 NPP 动态特征相似,4 种植被类型逐月 NEP 变化趋势总体上呈双峰曲线。沟谷常绿阔叶林双峰最为明显,峰值分别位于 3 月和 10 月,逐月 NEP 整体从 2 月开始升高至 3 月达第一峰值,于 7 月到达波谷后开始升高至 10 月,达到第二峰值之后逐月下降,其中 1 月的 NEP 比 2 月稍高。山地常绿阔叶林的峰值也位于 3 月和 10 月,逐月 NEP 基本表现为从 1 月升高至 3 月达到峰值,在 7 月的 NEP 值较低,后升高至 10 月达到另一峰值再逐渐下降。针阔叶混交林的双峰分别在 5 月和 10 月,逐月 NEP 从 1 月开始升高至 3 月,在 4 月稍低、在 5 月达到一个峰值,6 月降低之后继续升高至 10 月达到一个峰值,之后逐月下降。山顶常绿阔叶矮林逐月 NEP 变化趋势表现为从 1 月开始升高至 5 月达到一个峰值,在 6 月时较低,于 8 月又达到峰值之后开始逐渐降低,也即是峰值为 5 月和 8 月。在季节尺度上,沟谷常绿阔叶林夏季 NEP 积累量低于其他季节 NEP 积累量,山地常绿阔叶林、针阔叶混交林和山顶常绿阔叶矮林冬季 NEP 积累量低于其他季节 NEP 积累量;而山顶常绿阔叶矮林夏季的 NEP 值高于其他季节的 NEP 值,除此之外的其他植被类型春季(3—5 月)的 NEP 值高于其他季节的 NEP 值。从图 5 中可以看出,不同植被类型 7 月 NEP 表现为山顶常绿阔叶矮林>针阔叶混交林>山地常绿阔叶林>沟谷常绿阔叶林,其中沟谷常绿阔叶林 7 月 NPP 非全年最低值而 NEP 位于全年最低值。

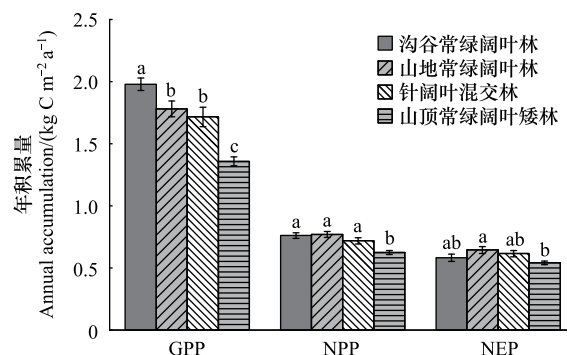


图 4 南岭不同植被类型的 GPP、NPP 及 NEP

Fig. 4 The GPP, NPP and NEP of different vegetation types in Nanling

GPP: 总初级生产力 Gross primary productivity; NPP: 净初级生产力 Net Primary Productivity; NEP: 净生态系统生产力 Net Ecosystem Productivity; 图中数值为平均值±标准误差;同时,在不同植被类型的 GPP、NPP 和 NEP 指标中,采用 a, b, c 表示每一指标内分别多组比较后的结果是否存在显著差异

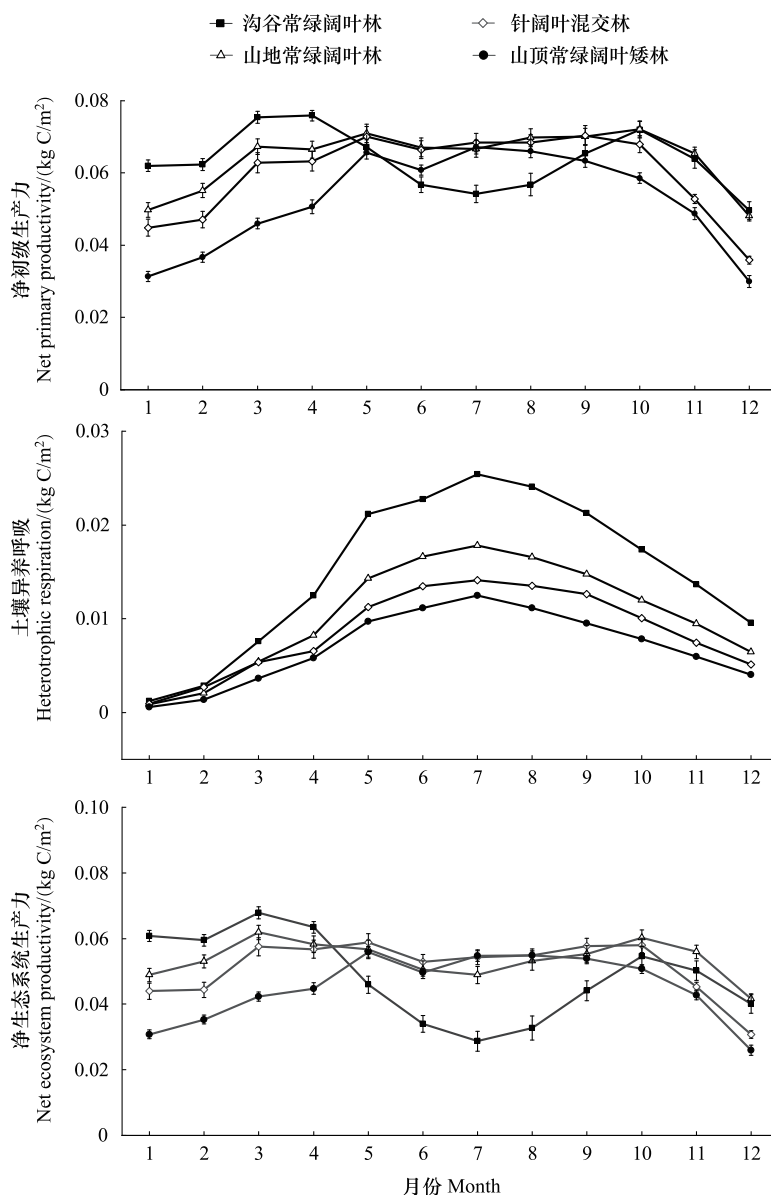


图5 南岭不同植被类型的碳收支逐月情况

Fig.5 Monthly carbon budget of different vegetation types in Nanling

3 讨论

3.1 南岭森林碳收支与其他研究结果的比较

在我国不同纬度地区森林植被 GPP 研究的比较中,由于植被 GPP 易受到地带性、气候、植被类型等多重因素的影响^[38—39],南岭典型森林植被平均 GPP 年积累量高于我国温带长白山^[40]和石羊河流域^[41]、亚热带长江流域^[42]等地区多种森林植被的 GPP 多年平均值,符合我国“南高北低”的 GPP 空间分布特征,可见南岭典型森林植被的总光合作用较高。与我国亚热带其他地区森林植被 NPP 研究相比,南岭森林植被 NPP 年积累量低于赣南森林的 NPP 多年平均值,但高于神农架林区森林以及赣南中部、东部和北部等部分森林地区^[43—44],处于亚热带森林植被中的平均水平,总体上位于前人研究结果的范围内,结果具有可信度^[17,20,45]。同时,南岭不同植被类型 NEP 积累量均处于我国由南向北的热带雨林、常绿阔叶林、常绿针叶林和落叶阔叶林森林生态系统 2003—2012 年 NEP 的多年观测值范围之中^[46],说明南岭典型森林植被具有较好的净碳汇

能力。

3.2 南岭不同植被类型碳收支特征

南岭 4 种植被类型 GPP 年积累量与“沟谷常绿阔叶林—山地常绿阔叶林—针阔叶混交林—山顶常绿阔叶矮林”的植被类型垂直分布规律相一致,总体上呈现垂直梯度变化,原因可能与海拔影响了植被生长环境的水热条件有关^[23,40,47]。在不同的水热条件下,南岭 4 种植被的植物光合碳同化能力也进一步受到影响,出现了海拔低、气温高的植被 GPP 高的现象^[48];另一方面,温度较高可能加速了土壤氮矿化,增加了植物可吸收的土壤养分,进而促进植物的生长^[49-50]。水热条件影响着植被自养呼吸和土壤异养呼吸,温度较高的环境促进植物自养呼吸,也促进了土壤微生物的活性进而增加土壤呼吸速率^[51-52]。因此,南岭出现山地常绿阔叶林 NPP 年积累量高于沟谷常绿阔叶林的情况,也出现不同植被类型 NEP 年积累量随海拔变化趋势呈单峰曲线分布格局。

植物的生长发育随海拔升高而逐渐受到光水热的条件限制,因而在不同海拔梯度的环境下所采取的生存策略不同^[53]。有研究表明,高海拔地区的植物主要通过调节叶形态机构、叶绿素含量、酶的作用以及营养分配等途径来减少高海拔低温、紫外线等不利环境因子对光合器官的损伤,降低光能的吸收和消耗、减弱对光合系统的压力以保证自身的正常生存,因此光合固碳量下降^[54-55]。相比其他植被类型,山顶常绿阔叶矮林 GPP、NPP 和 NEP 均表现较低,推测可能是在海拔高、风速大、光合有效辐射强的南岭山顶特殊环境中,植物的生长发育受到温度、水分和光照为主的环境限制,因而矮林森林群落的生存策略更倾向于对自身存活的保护,对能量和资源的分配更多用于抵御恶劣的生境。

3.3 南岭森林碳收支动态变化规律

在植被生产力动态规律上,南岭不同植被类型的全年逐月 NPP 总体上呈双峰曲线的变化特征,该特征与已有亚热带地区人工林逐月 NPP 均呈明显双峰特征^[16]、中温带地区东北东部森林逐月 NPP 呈明显单峰^[15]、寒温带地区针阔混交林和灌丛逐月 NPP 呈双峰曲线^[14]的现象有所不同。亚热带南岭不同植被类型全年逐月 NPP 双峰值所在月份不一致,海拔由低到高的植被类型的逐月 NPP 双峰值所在位置逐渐由春秋季节向夏季集中,出现了夏季时沟谷常绿阔叶林 NPP 较低、山顶常绿阔叶矮林 NPP 较高的现象。分析原因,可能是南岭沟谷地区的水热条件延长了植被生长季的长度,进而影响了植物在春秋季节对碳的固定能力^[56];同时夏季高温促进了植被自养呼吸,光合作用所同化的碳分配到自养呼吸的比例较多,因此沟谷常绿阔叶林夏季 NPP 较低^[51,57-58]。

在森林生态系统碳汇动态规律上,南岭典型森林植被全年各月均表现为净碳汇($NEP > 0$),不同植被类型的全年逐月 NEP 呈现出双峰规律且峰值位置也有所不同,原因与土壤异养呼吸速率有关。南岭不同植被类型全年逐月 R_h 均呈夏季高、冬季低的单峰型曲线,可能是南岭山地夏季气温高、降水集中在 3—9 月,适宜的土壤温度及水分条件有利于土壤异养微生物的代谢活动^[59]。南岭沟谷地区温度及凋落物等土壤微生物可利用底物含量相对于其他植被类型较高,其适宜的条件增强了土壤微生物活性,因此夏季时沟谷常绿阔叶林 R_h 较高^[59-60],进而导致沟谷常绿阔叶林夏季 NPP 较低,尤其 7 月 NEP 处于全年最低水平。而位于南岭山顶的山顶常绿阔叶矮林在夏季 NEP 高于其他季节,加上此时土壤微生物代谢活动较弱,从而植被净碳汇能力达到最大值。

4 结论

本研究运用 IBIS 模型对南岭沟谷常绿阔叶林、山地常绿阔叶林、针阔叶混交林和山顶常绿阔叶矮林的总初级生产力、净初级生产力、净生态系统生产力和土壤异养呼吸量进行模拟,并结合净初级生产力估算数据验证,系统研究了南岭不同森林植被碳收支特征。主要结论如下:

(1) 2020 年南岭 4 种典型森林植被 GPP、NPP、NEP 和 R_h 积累量的平均值为 1.709、0.718、0.596 和 0.123 $\text{kg C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。GPP 总体上高于其他纬度地区的森林植被,具有较高的植被总光合作用;NPP 和 NEP 均处于

亚热带森林植被中的平均水平,表现了该地区森林具有较好的固碳作用。

(2) 在南岭 4 种植被类型碳收支年积累量比较中,GPP 最高的是沟谷常绿阔叶林,NPP、NEP 最高的是山地常绿阔叶林;与其他植被类型相比,山顶常绿阔叶矮林的 GPP、NPP 和 NEP 均相对较低。

(3) 南岭全年各月均表现为碳汇,不同植被类型的全年逐月 NPP 和 NEP 总体上呈现出双峰曲线的变化特征,但其两个峰值所在月份不一致,表现为沟谷常绿阔叶林—山地常绿阔叶林—针阔叶混交林—山顶常绿阔叶矮林的双峰值位置逐渐由春秋季向夏季集中。沟谷常绿阔叶林夏季 R_n 相对较高,其夏季 NEP 尤其在 7 月处于全年最低水平,而山顶常绿阔叶矮林夏季 NEP 高于其他季节。

参考文献 (References):

- [1] Yu G R, Chen Z, Piao S L, Peng C H, Ciais P, Wang Q F, Li X R, Zhu X J. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(13): 4910-4915.
- [2] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, Likens G E, Delwiche C C, Botkin D B. The biota and the world carbon budget. *Science*, 1978, 199(4325): 141-146.
- [3] 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.
- [4] 朴世龙,何悦,王旭辉,陈发虎. 中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望. *中国科学:地球科学*, 2022, 52(6): 1010-1020.
- [5] Brovkin V, Ganopolski A, Svirezhev Y. A continuous climate-vegetation classification for use in climate-biosphere studies. *Ecological Modelling*, 1997, 101(2/3): 251-261.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Potter C S, Klooster S A. Dynamic global vegetation modelling for prediction of plant functional types and biogenic trace gas fluxes. *Global Ecology and Biogeography*, 1999, 8(6): 473-488.
- [9] Sitch S, Smith B, Prentice I C, Arneth A, Bondeau A, Cramer W, Kaplan J O, Levis S, Lucht W, Sykes M T, Thonicke K, Venevsky S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 161-185.
- [10] Levis S, Bonan B, Vertenstein M, Oleson K. The Community Land Model's Dynamic Global Vegetation Model (CLM-DGVM): Technical description and user's guide (No. NCAR/TN-459+IA). Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research, 2004.
- [11] Sato H, Itoh A, Kohyama T. SEIB-DGVM: a new Dynamic Global Vegetation Model using a spatially explicit individual-based approach. *Ecological Modelling*, 2007, 200(3/4): 279-307.
- [12] 杨延征,王焱,朱求安,温仲明,彭长辉,林光辉. 植物功能性状对动态全球植被模型改进研究进展. *科学通报*, 2018, 63(25): 2599-2611.
- [13] 刘金勋,卢学鹤,朱求安,袁文平,苑全治,张臻,国庆喜,Deering C. 陆地生态系统模拟研究中 IBIS 模型开发应用的回顾和展望. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13(1): 2-16.
- [14] 王萍. 基于 IBIS 模型的东北森林净第一性生产力模拟. *生态学报*, 2009, 29(6): 3213-3220.
- [15] 刘曦,国庆喜,刘经纬. IBIS 模型验证与东北东部森林 NPP 季节变化模拟研究. *森林工程*, 2010, 26(4): 1-7, 10.
- [16] 周平,林雯,符式培,李威,李吉跃. 南亚热带六种典型人工林碳收支研究. *生态科学*, 2015, 34(6): 111-117.
- [17] 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): 3911-3922.
- [18] 董安强,陈林,王发国,邢福武. 广东南岭国家级自然保护区的植被研究. *仲恺农业工程学院学报*, 2012, 25(2): 1-7.
- [19] 周平,刘智勇. 南岭同纬度带典型区域气候特征差异与成因分析. *热带地理*, 2018, 38(3): 299-311.
- [20] Li T, Li M Y, Ren F, Tian L. Estimation and spatio-temporal change analysis of NPP in subtropical forests: a case study of Shaoguan, Guangdong, China. *Remote Sensing*, 2022, 14(11): 2541.
- [21] 王瑶,沈燕,张强,黄志宏,张宇鸿,凌威. 南岭三种主要森林类型土壤甲烷通量研究. *湖南林业科技*, 2017, 44(2): 8-14.
- [22] 张强,沈燕,韩天宇,勾蒙蒙. 湖南莽山 4 种林型甲烷通量及其影响因子. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(9): 104-111.
- [23] 徐卫,杨婷,李泽华,周平. 广东南岭植物群落物种多样性沿海海拔梯度分布格局. *林业与环境科学*, 2022, 38(1): 9-17.
- [24] 陈锡沐,李镇魁,冯志坚,李秉滔. 南岭国家级自然保护区种子植物区系分析. *华南农业大学学报*, 1999, 20(1): 97-102.
- [25] 方精云,王襄平,沈泽昊,唐志尧,贺金生,于丹,江源,王志恒,郑成洋,朱江玲,郭兆迪. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. *生物多样性*, 2009, 17(6): 533-548.
- [26] 余明,刘效东,薛立. 温度和降水对森林生物量分配的影响研究进展. *生态科学*, 2021, 40(2): 204-209.

- [27] 方精云, 朱剑霄, 李鹏, 吉成均, 朱江玲, 姜来, 陈国平, 蔡琼, 苏豪杰, 冯禹昊, 马素辉, 陶胜利, 严正兵. 中国森林生态系统碳收支研究. 北京: 科学出版社, 2021.
- [28] 魏平, 温达志, 黄忠良, 张倩媚, 孔国辉. 鼎湖山季风常绿阔叶林死木生物量及其特征. 生态学报, 1997, 17(5): 505-510.
- [29] Zhu J X, Hu H F, Tao S L, Chi X L, Li P, Jiang L, Ji C J, Zhu J L, Tang Z Y, Pan Y D, Birdsey R A, He X H, Fang J Y. Carbon stocks and changes of dead organic matter in China's forests. *Nature Communications*, 2017, 8: 151.
- [30] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 北京: 科学出版社, 1999.
- [31] 罗云建, 王效科, 逯非. 中国主要林木生物量模型手册. 北京: 中国林业出版社, 2015.
- [32] 左舒翟, 任引, 翁闲, 丁洪峰, 罗云建. 亚热带常绿阔叶林 9 个常见树种的生物量相对生长模型. 应用生态学报, 2015, 26(2): 356-362.
- [33] 周国逸, 尹光彩, 唐旭利, 温达志, 刘昌平, 旷远文, 王万同. 中国森林生态系统碳储量-生物量方程. 北京: 科学出版社, 2018.
- [34] 马志婷. 广州市栲类林碳储量及其影响因子[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
- [35] Wang B, Huang J Y, Yang X S, Zhang B A, Liu M C. Estimation of biomass, net primary production and net ecosystem production of China's forests based on the 1999—2003 National Forest Inventory. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2010, 25(6): 544-553.
- [36] Nadelhoffer K J, Raich J W. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. *Ecology*, 1992, 73(4): 1139-1147.
- [37] Harmon M E, Bible K, Ryan M G, Shaw D C, Chen H, Klopatek J, Li X. Production, respiration, and overall carbon balance in an old-growth *Pseudotsuga-Tsuga* forest ecosystem. *Ecosystems*, 2004, 7(5): 498-512.
- [38] Yu G R, Zhu X J, Fu Y L, He H L, Wang Q F, Wen X F, Li X R, Zhang L M, Zhang L, Su W, Li S G, Sun X M, Zhang Y P, Zhang J H, Yan J H, Wang H M, Zhou G S, Jia B R, Xiang W H, Li Y N, Zhao L, Wang Y F, Shi P L, Chen S P, Xin X P, Zhao F H, Wang Y Y, Tong C L. Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China. *Global Change Biology*, 2013, 19(3): 798-810.
- [39] 高振翔, 叶剑, 丁仁惠, 唐欢, 周红根, 李成. 中国植被总初级生产力对气候变化的响应. 水土保持研究, 2022, 29(4): 394-399, 414.
- [40] 李春波, 张园, 刘雅各, 吴家兵, 王安志. 长白山自然保护区总初级生产力时空变化特征及其影响因素. 应用生态学报, 2023, 34(5): 1341-1348.
- [41] 王大为, 周伟, 韩涛, 李丽丽, 罗天旭, 李金山. 2000—2019 年石羊河流域植被总初级生产力变化及其气候特征. 生态学杂志, 2023, 42(2): 406-414.
- [42] 陈亮, 王学雷, 杨超, 吕晓蓉. 2000 年—2015 年长江流域植被 GPP 时空变化特征及其驱动因子. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2021, 55(4): 630-638.
- [43] 李敏, 姚顽强, 任小丽, 张黎, 徐文婷, 顾峰雪, 何洪林. 1981—2015 年神农架林区森林生态系统净初级生产力估算. 环境科学研究, 2019, 32(5): 749-757.
- [44] 具琳静, 欧阳勋志, 潘萍, 刘军, 周巧晴, 叶青龙. 2000—2019 年赣南森林净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系. 东北林业大学学报, 2022, 50(12): 37-44.
- [45] 刘双, 阮宏华. 基于地统计学的广东省和广西省森林生物量和 NPP 空间格局分析. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2502-2509.
- [46] 吕富成, 马建勇, 曹云, 延晓冬. 基于 FORCCHN 模型的中国典型森林生态系统碳通量模拟. 生态学报, 2022, 42(7): 2810-2821.
- [47] 叶许春, 杨晓霞, 刘福红, 吴娟, 刘佳. 长江流域陆地植被总初级生产力时空变化特征及其气候驱动因子. 生态学报, 2021, 41(17): 6949-6959.
- [48] 宁朋, 王菲, 程小毛, 黄晓霞. 川滇高山栎光合特性对不同海拔梯度的响应. 西南林业大学学报: 自然科学, 2021, 41(6): 47-53.
- [49] 许辰森, 熊德成, 邓飞, 史顺增, 钟波元, 冯建新, 陈云玉, 陈光水, 杨玉盛. 杉木幼苗和伴生植物细根对土壤增温的生理生态响应. 生态学报, 2017, 37(4): 1232-1243.
- [50] 谭钠丹, 李旭, 吴婷, 列志阳, 刘旭军, 刘世忠, 陈平, 刘菊秀. 增温对鼎湖山混交林中 4 种优势树种生物量分配和养分积累的影响. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(4): 389-400.
- [51] 盛浩, 杨玉盛, 陈光水, 高人, 曾宏达, 钟羨芳. 植物根呼吸对升温的响应. 生态学报, 2007, 27(4): 1596-1605.
- [52] 王尧尧, 朱万泽, 赵广. 森林生态系统叶片暗呼吸时空动态及其影响因子. 世界林业研究, 2015, 28(5): 37-43.
- [53] 潘红丽, 田雨, 刘兴良, 蔡小虎, 何飞, 李迈和. 卧龙自然保护区华西箭竹(*Fargesia nitida*)生态学特征随海拔梯度的变化. 生态环境学报, 2010, 19(12): 2832-2839.
- [54] 祁建, 马克明, 张育新. 辽东栎(*Quercus liaotungensis*)叶特性沿海拔梯度的变化及其环境解释. 生态学报, 2007, 27(3): 930-937.
- [55] 胡启鹏, 郭志华, 孙玲玲, 王彬. 长白山林线树种岳桦幼树叶功能型性状随海拔梯度的变化. 生态学报, 2013, 33(12): 3594-3601.
- [56] 陈沁, 唐欣然, 薛乾怀, 王鑫洋, 杜彦君. 亚热带植物春季和秋季物候格局及其对气候变化的响应. 广西植物, 2022, 42(7): 1105-1115.
- [57] 吴君君, 杨智杰, 刘小飞, 熊德成, 林伟盛, 陈朝琪, 王小红. 米楮和杉木人工林土壤呼吸及其组分分析. 植物生态学报, 2014, 38(1): 45-53.
- [58] 刘义凡, 陈书涛, 胡正华, 沈小帅, 张旭. 亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究. 环境科学, 2015, 36(2): 644-651.
- [59] 杨智杰, 郑裕雄, 陈仕东, 刘小飞, 熊德成, 林伟盛, 胥超, 杨玉盛, 史思红. 应用小波多尺度分析亚热带森林土壤异养呼吸特征. 生态学报, 2018, 38(14): 5078-5086.
- [60] 黄石德. 武夷山不同海拔土壤呼吸对变暖和变冷的响应. 生态学杂志, 2022, 41(1): 98-107.