

喀斯特常绿与落叶阔叶混交林 过去 50 年来的碳循环模拟

李梦德^{1 2 3}, 刘立斌^{1 2 3}, 倪健^{1 2 *}

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

2. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站 贵州 普定 562100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 通过对 Forest-DNDC 模型的植被和土壤参数本地化校准, 以气象插值数据为输入, 模拟了贵州省普定县高原型喀斯特次生常绿与落叶阔叶混交林 1965~2014 年的土壤、植被和生态系统碳循环特征。结果表明, 与冷模拟和实测值相比, 参数本地化校准后的模型能更准确地模拟春、秋、冬 3 个季节的土壤呼吸动态, 而模拟的夏季土壤呼吸偏小; 但统计检验指出, 参数修订后的 Forest-DNDC 模型能够较好地模拟喀斯特森林土壤呼吸, 降低了模拟误差, 可用于喀斯特常绿与落叶阔叶混交林碳动态的模拟。进一步分析发现, 1965~2014 年喀斯特森林的碳通量除模拟早期的前 3~4 年急剧增加之外, 随后总初级生产力(GPP)保持相对稳定, 植物呼吸(R_{plant})和生态系统呼吸($R_{\text{ecosystem}}$)随着森林发育而增加, 土壤呼吸(R_{soil})减少, 植被净初级生产力(NPP)呈迅速减小趋势; 净生态系统碳交换量(NEE)亦较迅速下降, 在 2013 年达到最低值 -0.17 tC/ha , 喀斯特森林由碳汇变为弱碳源。相关分析表明, 年均温度和年降水对喀斯特常绿与落叶阔叶混交林的 GPP 和 R_{soil} 没有显著影响, 但却显著影响 NPP、 R_{plant} 、 $R_{\text{ecosystem}}$ 和 NEE。

关键词: Forest-DNDC; 喀斯特; 常绿与落叶阔叶混交林; 碳循环

中图分类号: Q94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2017)01-0096-10 **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2017.01.013

碳在大气、植被、土壤和水体间的流动与交换是全球生物地球化学循环的主体,也是影响当今全球气候变化的关键生态过程。科学家们利用野外观测、控制实验、航空遥感、计算机模型等手段,分别从不同时间和空间尺度上研究碳流和碳库的动态变化,集成分析和估算全球及区域碳循环的主要特征。作为碳循环研究的重要手段之一,碳循环模型可通过对碳循环主要过程和机理的计算机描述,综合集成分析、模拟和预测全球及区域碳循环的格局与动态,进一步阐述气候变化、 CO_2 浓度升高以及人类活动导致的土地利用和土地覆盖变化对碳循环的影响及其反馈^[1-2]。

在众多的全球、区域、景观尺度基于过程的碳循环模型中,Forest-DNDC 生物地球化学模型能够模拟不同时间尺度(1~几百年)和较小空间尺度森林生态系统中植被和土壤的 C、N 动态,以及土壤呼

吸产生的 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等温室气体的排放^[3-4]。该模型已被成功应用于多种森林生长和土壤呼吸的研究,比如,对俄罗斯西部地区两个土壤条件差异显著的湿地云杉林模拟发现,气候和土地利用变化导致的水文变化可改变欧洲泰加林湿地的土壤碳平衡^[5]。该模型能较好地预测澳大利亚东南部地区不同林龄桉树林的生物量与森林生长^[6]。将 Forest-DNDC 模型与一个普适性反演模型 UCODE (地下水优化模型)结合,可对该模型进行自动校准,并显著提高德国西南部云杉林的逐日 N_2O 排放模拟精度^[7]。对明尼苏达州云杉和佛罗里达州湿地松研究表明,准确的参数输入对模型模拟植被和土壤碳以及水文特性等非常重要^[8]。Forest-DNDC 模型也能较好地模拟我国川中丘陵区桉柏混交林的土壤 CO_2 释放,发现土壤表层有机质含量是影响该地区土壤 CO_2 释放的主要因子^[9]; 对贡嘎山冷杉

收稿日期: 2016-06-27; 改回日期: 2016-11-01

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2013CB956704)。

第一作者简介: 李梦德(1989-),男,硕士研究生,主要从事生态环境地球化学和碳循环模型研究。E-mail: limengder@gmail.com。

* 通讯作者: 倪健(1968-),男,研究员,博士生导师,主要从事宏观尺度全球变化生态学、喀斯特植被生态学和古生态学研究。E-mail: nijian@vip.skleg.cn。

林土壤 CO₂ 通量的模拟与验证也表明,该模型的参数本土化可提高冬季土壤 CO₂ 释放模拟的准确性^[10]。

喀斯特是主要由碳酸盐岩(石灰岩和白云岩)组成的一类特殊地貌类型,在北美、地中海沿岸和中国南方连片、大面积分布^[11]。我国作为世界喀斯特分布区的主体,喀斯特地貌面积约占全国陆地总面积的 36%、全球喀斯特面积的 15.6%;尤以西南地区的滇东、黔、桂所占面积最大、最具代表性,是世界上最大的喀斯特区之一,面积达 31.17 × 10⁴ km²,占南方喀斯特分布总面积的 61.6%^[12]。亚热带温暖、潮湿的气候,喀斯特地貌生境的严酷性和特殊性,以及非地带性的碱性石灰土的存在,使得喀斯特地区生态系统非常特殊^[13],隐性常绿与落叶阔叶混林成为该地区的代表性植被^[14],地上生物量低^[15],根系生物量比例高于典型的亚热带常绿阔叶林^[16],碳酸盐风化碳汇,以及水生生物光合作用利用岩石风化溶解无机碳变为有机碳汇在喀斯特碳循环中占据同等重要的地位^[17]。

然而,喀斯特地貌的严酷立地条件限制了喀斯特碳循环的研究,目前大部分工作集中在岩溶碳汇方面^[18-20],对于碳在喀斯特植被、大气和土壤的循环观测与模拟工作涉及较少^[21-23],喀斯特生态系统碳循环的格局与过程仍亟待研究。在野外观测和实验匮乏的喀斯特地区,其植被和土壤以及大气系统碳的交换过程是怎样的?喀斯特森林生态系统作为一种非地带性的植被类型,其碳循环是否与亚热带其它森林类型存在差异?其主要影响因素和限制因子是哪些?为探究这些科学问题,本文以位于贵州省中部高原面上中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站的后寨河流域作为研究区域,选取典型喀斯特常绿与落叶阔叶混交林作为研究对象,利用野外实测数据和文献数据集成对 Forest-DNDC 模型的植被、土壤、大气等参数进行喀斯特本土化,并以野外观测数据对模拟结果进行对比验证,尝试模拟典型喀斯特森林的碳循环特征。

1 研究方法

1.1 研究区概况

后寨河流域(105°40′41″~105°48′4″E、26°12′14″~26°17′6″N)位于黔中高原安顺市普定县境内,处于长江流域和珠江流域的分水岭地区,流域面积 81 km²,平均海拔为 1 300 m,是高原型喀斯

特流域的典型代表。流域内常见的植被类型包括常绿针叶林、针叶与阔叶混交林、落叶阔叶林、常绿阔叶林、常绿与落叶阔叶混交林,以及落叶灌丛、常绿灌丛和常绿与落叶阔叶混交灌丛。其中常绿与落叶阔叶混交林是该地区的代表性次生森林类型。

研究设在后寨河流域的赵家田观测点,海拔 1 365 m 左右,属北亚热带季风湿润气候,据普定县 1961~2013 年的气象记录该地区年平均温度 15.6 °C,极端高温和极端低温分别为 34.7 °C 和 -11.1 °C,年日照 1 177 h,年平均降水 1 342 mm,但受季风气候影响,降水的年内、年际分配不均,降雨多集中在夏季。山体坡度为 24°,岩石类型为石灰岩,岩石裸露率为 40%左右。土壤以黄色石灰土为主,土层平均厚度为 20~50 cm。植被类型为次生常绿与落叶阔叶混交林,处于演替的次顶极阶段。乔木层树种高 8~12 m,盖度 80%,主要优势种包括云南鼠刺(*Itea yunnanensis*)、化香树(*Platycarya strobilacea*)、猴樟(*Cinnamomum bodinieri*)、短萼海桐(*Pittosporum brevicalyx*)、槲栎(*Quercus aliena*)等。灌木层一般 1~2 m,盖度 25%左右,常见的灌木有异叶鼠李(*Rhamnus heterophylla*)、铁仔(*Myrsine africana*)、刺异叶花椒(*Zanthoxylum dimorphophyllum* var. *spinifolium*)、贵州花椒(*Zanthoxylum esquirolii*)、倒卵叶旌节花(*Stachyurus obovatus*)等。草本层高度一般 50 cm 以下,盖度 20%左右,主要物种有矛叶荩草(*Arthraxon lanceolatus*)、千里光(*Senecio scandens*)和多种苔草(*Carex*)等。

1.2 Forest-DNDC 模型及其本地参数化

Forest-DNDC 模型主要基于模拟农田生态系统碳氮循环的 DNDC 模型构建^[24],根据生物地球化学的量、场、群、流 4 个基本概念,以追踪模拟碳、氮和水分在生态系统的运动为线索,将植物净初级生产力、有机质在土壤中的转化及大气-生物界面气体交换联结成一个整体,从而模拟森林生态系统的生物地球化学循环特征^[25]。模型主要包括 2 部分:第一部分由气候、土壤、植被生长、分解子模块组成,预测植物-土壤环境参数的变化;第二部分由硝化、反硝化、发酵子模块组成,预测微生物对 C 和 N 的迁移转化规律。

各模块以日或小时为最小时间步长,可以模拟一年至几百年的大气-植物-土壤相互作用下植被、土壤碳氮的动态变化。模型输入为研究点的日气象数据、土壤性质、植被特征及管理措施,可模拟植

物生长、土壤水分和碳氮动态、CO₂ 及多种微量气体的排放。

为准确模拟喀斯特地区常绿与落叶阔叶混交林的碳循环特征,我们有必要对 Forest-DNDC 模型进行本地参数化。根据我国南方地区喀斯特植被的观测研究以及后寨河流域的野外调查和实验^[26-36],我们对模型的关键大气、植被和土壤参数进行了修订,包括大气 CO₂ 浓度、降雨中的氮浓度;森林中乔木层或灌木层类型和林龄、叶片枝干根初始生物量、叶片初始氮浓度、叶片碳氮比、枝干碳氮比、比叶重、水分利用效率;森林腐殖质类型、土壤质地、pH、容重、含水量、岩石比例等(表 1)。

1.3 模拟框架

Forest-DNDC 模型以逐日最高和最低气温或逐日平均气温以及逐日降水量作为输入数据。基于贵州省 19 个国家基准站 1961~2014 年的日均温度和日均降水记录,利用地理参照的三维(经度、纬度和海拔高度)薄板光顺样条法^[37]和 ANUSPLIN 4.36 结合 SRTM 数字高程模型^[38],将上述 2 个气候变量插值为 1 km 空间分辨率的栅格数据,提取赵家田样点所在栅格作为模型的输入数据。

模型模拟采取 2 种方式:冷模拟与完全本地参数化模拟。前者选择 Forest-DNDC 模型提供的 15 种森林类型之一常绿林为模拟对象,其森林生长子模型涉及到的树木生长生理参数设定为模型默认值。后者是对喀斯特常绿与落叶阔叶混交林的参数进行全面本地化(表 1)进行的校准模拟。模拟时间跨度为 1965~2014 年。

1.4 模型校验

喀斯特植被和土壤碳通量的监测数据缺乏,验证数据较少,普定站仅在其沙湾主站址,采用 LI-8150 多通道土壤碳通量自动测量系统,连续测定了 2015 年 3 月至 2016 年 3 月的土壤 CO₂ 通量,原始数据是每 2 小时记录一次。为便于比较,计算出每天的平均值,个别天数缺失值采用临近天数的平均值处理。本研究即以此一年的监测数据进行模型验证,但由于无 2015 年的模拟值,因此我们选取离实测年份最近的 2005~2014 共 10 年模拟数据进行逐日平均处理,分别获得冷模拟和参数本地化后的 365 天土壤呼吸数据,以便与实测值进行对比分析。同时,参考相邻地区开阳县常绿与落叶阔叶混交林的土壤呼吸季节变化^[27]作为校验数据之一,该数据采用 LI-6400 便携式光合作用测量系统及 6400-09

土壤呼吸叶室,于 2008 年 3 月至 2009 年 2 月间监测获得。

采用通用的统计检验方法评估模型模拟效果^[39-40],包括预测结果的平均误差(\bar{e})、绝对平均误差(MAE)、标准差(RMSE)和决定系数(r^2)。通过森林碳通量与年均温度和年降水总量分别作多元相关分析,探讨气候变化对森林碳通量的影响,其中复相关系数和偏相关系数分别采用 F 检验和 t 检验。

2 结果与分析

2.1 喀斯特森林土壤呼吸模拟及其校验

Forest-DNDC 模型对喀斯特混交林的冷模拟与参数本地化后的模拟都能较好地刻画喀斯特森林土壤呼吸的年际变化特征(图 1),冬季 1 月份 CO₂ 释放最低,至 4 月份逐渐升高,5 月份至 9 月中旬波动上升并达到最高,10 月份开始逐渐降低,至 12 月底达到一个低值,但仍高于 1 月份的土壤呼吸 CO₂ 释放。模型参数本地化能够更好地模拟春、秋、冬三季的土壤呼吸,但是夏季呼吸的模拟值相对偏低;而默认参数的冷模拟所获得的夏季土壤呼吸与实测值较接近(表 2)。从全年土壤呼吸平均值来看,参数本地化后更接近实测值(表 2)。

从统计检验结果来看,参数本地化后的平均误差(\bar{e})从 13.5 kgC/(ha·d) 下降为 4.75 kgC/(ha·d),绝对平均误差(MAE)从 14.86 kgC/(ha·d) 下降为 8.14 kgC/(ha·d),标准差(RMSE)从 17.09 kgC/(ha·d) 下降到 11.69 kgC/(ha·d),而决定系数(r^2)从 0.48 提高到 0.51。说明本地化模拟和冷模拟,明显降低了模拟值与实测值的误差,提高了模拟精度。

因此,经过参数调整后,Forest-DNDC 模型对春、秋、冬三个季节的土壤呼吸模拟精度显著提高,只是低估了夏季土壤呼吸量,导致年均土壤呼吸值小于实测值;但仍然模拟出全年的土壤呼吸动态变化特征,降低了模拟误差。虽然缺少植被和生态系统碳通量观测数据的校验,但从土壤呼吸特征的验证来看,参数经本地化后,Forest-DNDC 模型能够较好地模拟喀斯特常绿与落叶阔叶混交林的碳动态。由此,下面将具体分析模型参数化后所模拟的 1965~2014 年喀斯特森林植被、土壤和生态系统的碳循环特征。

2.2 喀斯特森林植被碳通量

模拟发现,逐年的植被总初级生产力(GPP)、

表 1 Forest-DNDC 模拟喀斯特森林碳循环的主要参数

Table 1 Major parameters of Forest-DNDC model in simulating carbon cycles of karst forest

参数	单位	含义	值	来源
N in rainfall	mg/L	年均降雨氮浓度	0.72	实测值
Leaf(upperstory)	kg C/ha	乔木层模拟初始叶生物量	455.97	实测值
Wood(upperstory)	kg C/ha	乔木层模拟初始枝干生物量	2 735.80	实测值
Root(upperstory)	kg C/ha	乔木层模拟初始根生物量	1 477.61	实测值
MaxL(upperstory)	kg C/ha	乔木层最大叶生物量	455.97	实测值
MinL(upperstory)	kg C/ha	乔木层最小叶生物量	241.13	实测值
BudC(upperstory)	kg C/ha	乔木层萌芽初始有效碳储量	214.30	实测值
WoodC(upperstory)	kg C/ha	乔木层枝干初始有效碳储量	1 285.83	实测值
PlantC(upperstory)	kg C/ha	乔木层初始有效碳储量	1 500.13	实测值
Leaf(shrubs)	kg C/ha	灌木层模拟初始叶生物量	5.80	实测值
Wood(shrubs)	kg C/ha	灌木层模拟初始枝干生物量	23.43	实测值
Root(shrubs)	kg C/ha	灌木层模拟初始根生物量	29.28	实测值
Max(shrubs)	kg C/ha	灌木层最大叶生物量	5.80	实测值
MinL(shrubs)	kg C/ha	灌木层最小叶生物量	3.07	实测值
BudC(shrubs)	kg C/ha	灌木层萌芽初始有效碳储量	2.96	实测值
WoodC(shrubs)	kg C/ha	灌木层枝干初始有效碳储量	11.95	实测值
PlantC(shrubs)	kg C/ha	灌木层初始有效碳储量	14.91	实测值
Initial leaf N content %	—	叶片初始氮含量	1.7	杨成等 ^[26]
Respiration Q10	—	呼吸作用 Q10 值	3.19	丁访军等 ^[27]
Water use efficiency	—	水分利用效率	11.56	姜霞等 ^[28]
Leaf start TDD	°C	叶片开始生长时累计生长度日	373	实测值
Wood start TDD	°C	枝干开始生长时累计生长度日	373	实测值
Leaf end TDD	°C	叶片停止生长时累计生长度日	1 207	实测值
Wood end TDD	°C	枝干停止生长时累计生长度日	1 207	实测值
Leaf N retranslocation	—	叶片氮转移量	0.33	卢晓强等 ^[29]
Senesce start day	—	落叶之儒略日	295	中国科学院地理研究所 ^[30]
Leaf C/N	—	叶碳氮比	30.24	实测值
Wood C/N	—	枝干碳氮比	246.2	实测值
C fraction of dry matter	—	干物质碳比例	0.47	实测值
Specific leaf weight	g/m ²	比叶重	130	姜霞等 ^[28]
Min wood/leaf	—	木本/叶片最小比例	1.4	刘玉国等 ^[31]
Thickness of forest floor	m	森林有机层厚度	0.09	刘映良等 ^[32]
Thickness of mineral soil properties	m	森林土壤矿物层厚度	0.5	实测值
pH	—	土壤酸碱度	6.64	实测值
SOC(5 cm)	kg C/kg	土壤 0~5 cm 层有机碳含量	0.065 56	胡忠良等 ^[33]
SOC	kg C/ha	土壤有机碳储量	52 500	刘玉国等 ^[31]
Stone fraction	—	土壤岩石比例	0.1	测定值
Bulk density	g/cm ³	土壤容重	0.85	测定值
Clay %	%	粘粒含量	0.264	刘映良等 ^[32]
Hydrologic conductivity	cm/min	土壤饱和导水率	0.250 8	李孝良等 ^[34]
Porosity	—	孔隙度	0.642 3	刘映良等 ^[32]
Field Capacity	—	田间持水量	0.32	程星等 ^[35]
Wilting Point	—	土壤萎蔫点	0.12	李孝良等 ^[36]

植物呼吸 (R_{plant}) 和植被净初级生产力 (NPP) 在模拟初始的前 3 年里迅速增加, 而后 GPP 保持相对稳定在 20 tC/(ha·a) 左右。但 R_{plant} 却随着森林发育而不断增大, 在 2013 年达到最大值 19.6

tC/(ha·a) 50 年平均值为 13.4 tC/(ha·a); NPP 反而迅速减小, 从 1968 年的 12 tC/(ha·a) 下降到 2014 年的 2.9 tC/(ha·a), 50 年平均值为 7.6 tC/(ha·a) (图 2)。

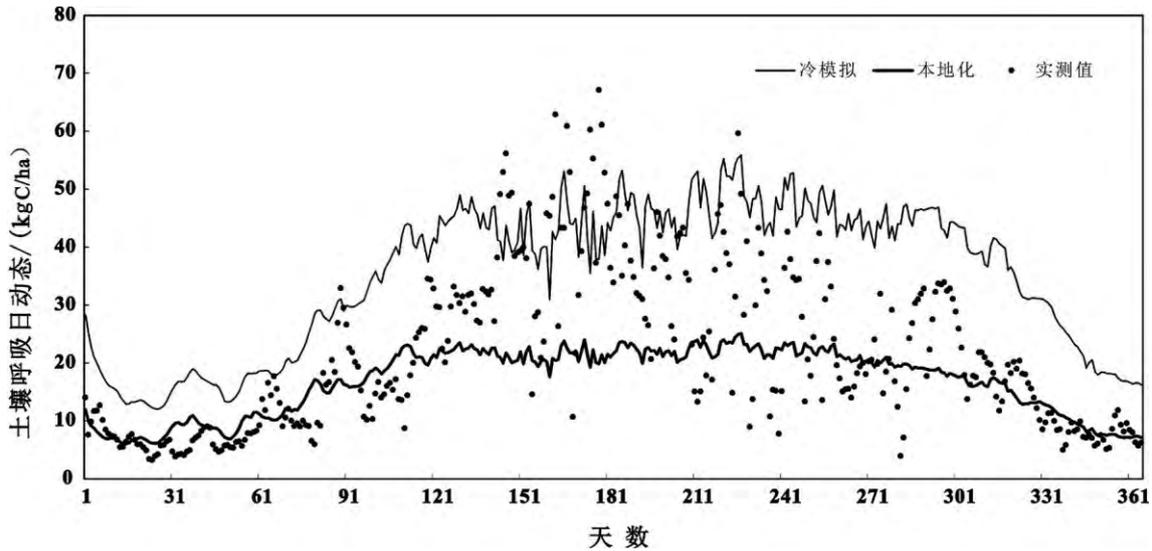


图1 喀斯特常绿与落叶阔叶混交林土壤 CO₂ 释放实测值和模拟的对比

Fig.1 Comparison of measured and simulated values of soil CO₂ emissions in karst evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest

表2 喀斯特常绿与落叶阔叶混交林土壤 CO₂ 释放日平均值的季节变化

Table 2 Seasonal variation of observed and simulated soil CO₂ emissions of evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest in karst region of Guizhou Province

土壤 CO ₂ 释放	春季(3~5月)	夏季(6~8月)	秋季(9~11月)	冬季(12~2月)	全年平均	来源
沙湾实测值	22.17±11.47	35.10±13.63	21.39±8.05	6.99±2.05	21.53±14.00	2015.3~2016.3 实测值
开阳实测值	25.30	35.46	23.85	7.78	23.12	丁访军等 ^[27]
赵家田冷模拟	34.65±9.61	45.65±5.05	42.05±5.59	17.44±3.88	35.02±12.58	2005~2014 年模拟平均
赵家田本地化	18.18±4.09	21.99±1.40	18.49±3.05	8.31±1.55	16.78±5.77	2005~2014 年模拟平均

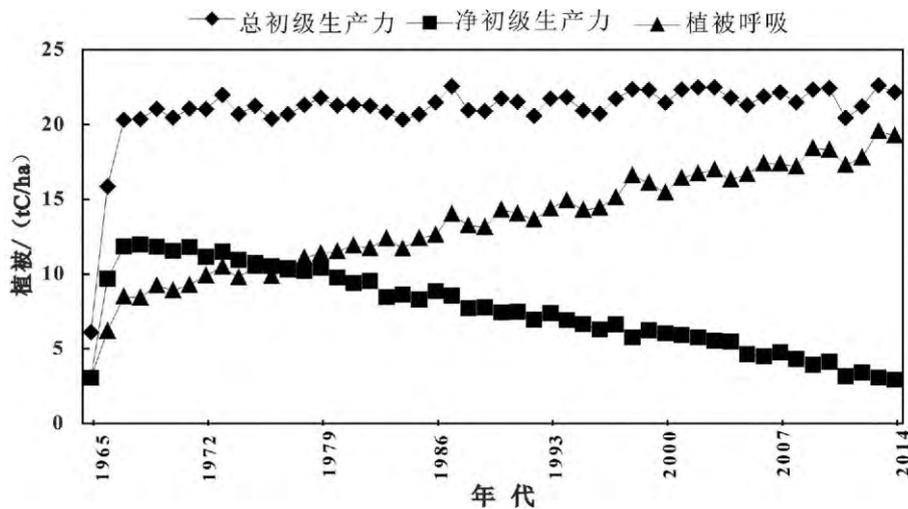


图2 Forest-DNDC 模拟的 1965~2014 年喀斯特常绿与落叶阔叶混交林植被碳通量

Fig.2 Vegetation carbon fluxes of evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest in Zhaojiatian from 1965 to 2014 simulated by the Forest-DNDC model

2.3 喀斯特森林土壤碳通量

模拟发现,喀斯特森林逐年的土壤呼吸(R_{soil}) (不包括植物根呼吸) 总体呈逐渐减少趋势,但前 20 年降幅较大,而后 30 年在略有波动中有上升趋势,

50 年平均值为 3.1 tC/(ha·a) (图 3)。

2.4 喀斯特生态系统碳循环

作为植被和土壤呼吸的总和,生态系统呼吸 ($R_{ecosystem}$) 也表现出相似的动态变化趋势,前 3 年急

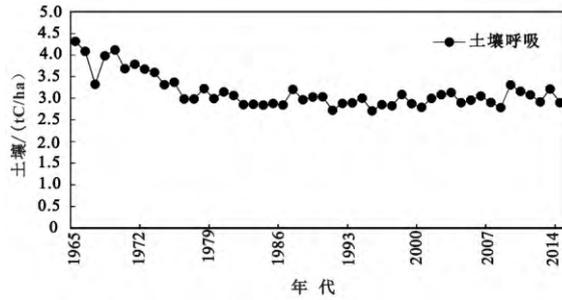


图 3 Forest-DNDC 模拟的 1965~2014 年喀斯特常绿与落叶阔叶混交林土壤碳通量

Fig.3 Soil carbon fluxes of evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest in Zhaojitian from 1965 to 2014 simulated by the Forest-DNDC model

剧增加而后保持平稳的上升趋势,在 2013 年达到最大值 $22.8 \text{ tC}/(\text{ha} \cdot \text{a})$,50 年平均值为 $16.5 \text{ tC}/(\text{ha} \cdot \text{a})$;净生态系统 C 交换量 (NEE) 先迅速升高,在 1967 年达到最大值 $8.5 \text{ tC}/(\text{ha} \cdot \text{a})$,然后较迅速下降,在 2013 年达到最低值 $-0.17 \text{ tC}/(\text{ha} \cdot \text{a})$,50 年平均值为 $4.4 \text{ tC}/(\text{ha} \cdot \text{a})$ (图 4)。

在喀斯特森林发育初期,光合作用保持较大优势而呼吸相对较弱,所以生态系统净碳交换量较高。随着森林的迅速生长,光合作用趋于稳定,呼吸作用却不断增大,导致 NEE 逐渐降低。最后,生态系统呼吸大于光合,喀斯特常绿与落叶阔叶混交林开始排放 CO_2 , 变成一个弱碳源。

2.5 气候对喀斯特森林碳循环的影响

年均温度和年降水总量改变对喀斯特常绿与

落叶阔叶混交林的 GPP 、 R_{soil} 没有显著影响,但对 R_{plant} 、 $R_{\text{ecosystem}}$ 、 NPP 和 NEE 有显著影响。温度升高导致年均净初级生产力降低、植被呼吸增强、净生态系统碳交换减小。年均生态系统呼吸受温度和降水的共同影响,温度升高促进生态系统呼吸,降水增加则抑制生态系统呼吸(表 3)。

在过去 50 年间,当地气候的变化趋势是温度升高、降水减少(图 5),所以从长期来看, GPP 和土壤呼吸受气候变化影响较弱;植物呼吸和生态系统呼吸随气候变化有增加趋势,而 NPP 和 NEE 有逐渐减少的趋势。至 2013 年 NEE 已经为负值,推测气候变化很有可能使喀斯特常绿与落叶阔叶混交林从 CO_2 汇变成弱源。

3 讨论与结论

Forest-DNDC 经参数本地化后,可较好模拟喀斯特常绿与落叶阔叶混交林的碳通量,但对夏季土壤呼吸的模拟不够精确,其原因可能是获取土壤通量观测值的沙湾与模拟碳通量的赵家田样点有一定的距离,二者的植被、土壤和气候存在差异,后者森林覆盖度较低,导致土壤温度较高,因而有较高的呼吸。另外,本地区夏季降雨集中,且温度较高,岩溶碳循环作用强烈,但 Forest-DNDC 模型却无法模拟岩溶碳作用。由于喀斯特地区植被将光合作用产物更多地分配给根系^[16],而 Forest-DNDC 模拟的根系生物量偏低,这也可能是模拟夏季和全年土壤呼吸偏低的一个原因,对贡嘎山冷杉林土壤呼吸

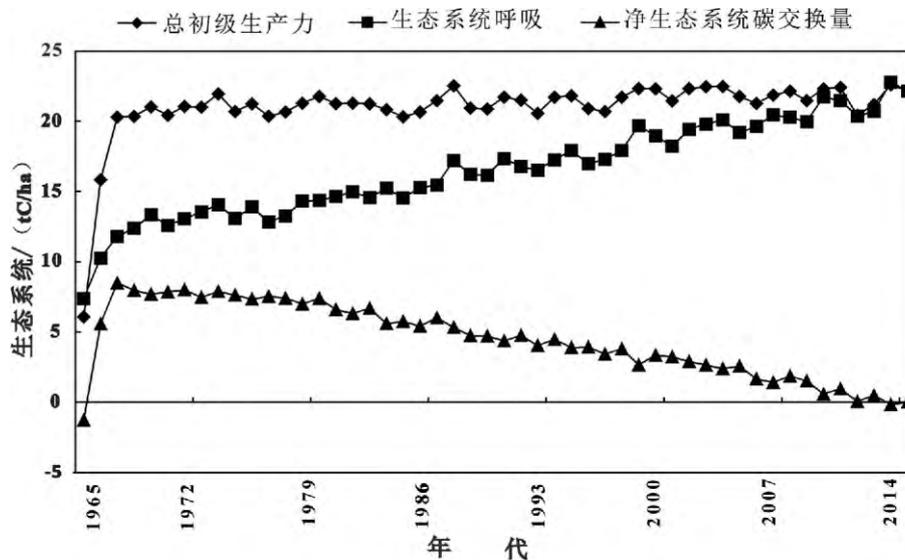


图 4 Forest-DNDC 模拟的 1965~2014 年喀斯特常绿与落叶阔叶混交林生态系统碳交换

Fig.4 Ecosystem carbon exchange of evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest in Zhaojitian from 1965 to 2014 simulated by the Forest-DNDC model

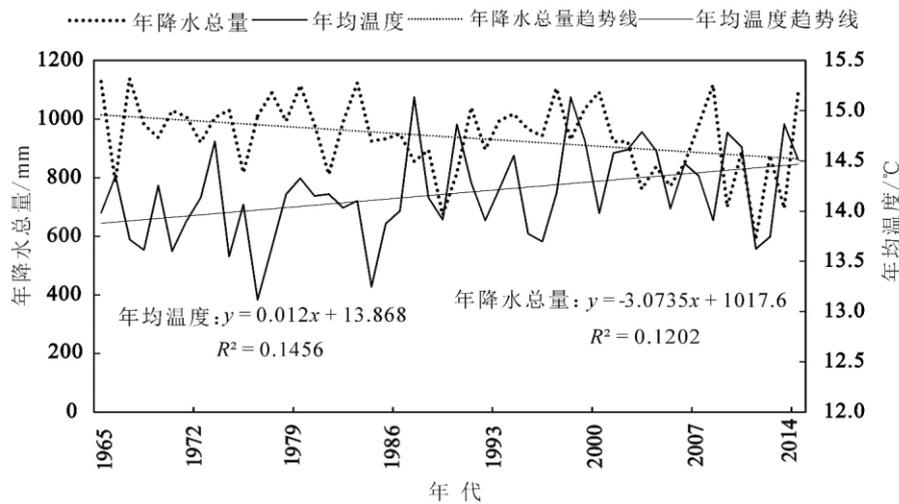


图5 喀斯特森林样点的年均气温和降水变化

Fig.5 Changes of annual mean temperature and precipitation in karst forest site of Zhaojitian

表3 喀斯特森林碳循环与年均温度和降水的相关分析

Table 3 Correlation analyses between annual mean temperature or precipitation and karst forest carbon cycles

碳循环 指标	复相关系数			偏相关系数					
	<i>r</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	年均温			年降水		
				<i>r</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
GPP	0.313	2.553	0.089	0.265	1.855	0.070	-0.114	-0.797	0.430
R_{plant}	0.520	8.707	0.001**	0.398	3.100	0.003**	-0.251	-1.950	0.057
NPP	0.408	4.705	0.014*	-0.298	-2.101	0.041*	0.227	1.652	0.105
R_{soil}	0.035	0.029	0.972	0.010	0.066	0.948	-0.036	-0.240	0.811
$R_{\text{ecosystem}}$	0.558	10.651	0.000**	0.425	3.409	0.001**	-0.272	-2.182	0.034*
NEE	0.429	5.313	0.008**	-0.300	-2.209	0.032*	0.242	1.783	0.081

注: * 代表显著相关, ** 代表极显著相关。

模拟的主要误差也在于根呼吸^[10]。尤其是土壤呼吸较高时,模型模拟值低于实际观测值,说明模型在响应灵敏度方面有待进一步改善^[9]。但总体来说,本地化后的模型能比较准确地模拟喀斯特森林的碳循环特征。

过去50年来,植被净初级生产力、植物呼吸、生态系统呼吸、净生态系统碳交换量与气候变化相呼应,而总初级生产力、土壤呼吸表现不敏感;这与贡嘎山冷杉林总初级生产力主要受温度影响^[41]不一致。大多数研究认为,土壤温度和湿度是影响森林土壤呼吸的主要因素^[42],但喀斯特森林土壤呼吸在雨季的月变化或日变化却与土壤温度和湿度均无相关性^[22],Forest-DNDC模拟结果也表明,土壤呼吸年通量和年均气温和降水无显著性相关。这可能

与土壤呼吸是一个非常复杂的过程,受多种因素控制有关系^[43]。

一般认为喀斯特地区的植被NPP偏低。Forest-DNDC模拟的1999~2003年NPP平均值为5.9 tC/(ha·a),高于亚热带常绿与落叶阔叶混交林的实测值(4.8 tC/(ha·a))和CASA模型模拟值(5.1 tC/(ha·a))^[44];但接近基于遥感数据所估算的喀斯特地区NPP范围内(3.1~5.5 tC/(ha·a))^[45]。本研究NPP模拟值显著低于我国亚热带常绿阔叶林实测NPP平均值,二者相差1.9~2.2倍^[46-47]。模拟得出50年来地下年均总呼吸量为5.8 tC/(ha·a),接近茂兰喀斯特森林的5.3 tC/(ha·a)^[48],但小于鼎湖山季风常绿阔叶林的11.5 tC/(ha·a)和针阔混交林10.4 tC/(ha·a)^[49]。

本研究也有不足之处。首先,虽然我们尽最大可能收集野外实测和文献数据来确定模型的准确参数,但总是存在一些误差。其次,模型本身对喀斯特地区特殊的物质转化与能量流动的模拟存在一定缺陷,尤其是对地下过程的描述方还有待改进。而且,喀斯特土壤-岩石景观的高度异质性,也为喀斯特碳循环模拟带来很大的不确定性与挑战。再次,野外监测数据的匮乏,限制了对模型模拟效果的评价,这也是今后需要努力的方向。最后,喀斯特地区的碳循环是水-岩-土-气-生五个圈层共同作用的结果,传统的基于大气-植被-土壤系统的碳循环认识在喀斯特地区并不适用,所以需要加强对喀斯特碳循环的更深层次的认识和理解,才能更好地模拟喀斯特森林生态系统的碳循环特征。

总之, 本文以位于黔中高原面上中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站的后寨河流域作为研究区域, 选取典型喀斯特常绿与落叶阔叶混交林作为研究对象, 利用野外实测数据和文献数据集成对 Forest-DNDC 模型的植被、土壤、大气等参数进行喀斯特本土化, 并以野外观测数据对模拟结果进行对比验证, 尝试模拟喀斯特常绿与落叶阔叶混交林的碳循环特征及其气候驱动因子。主要结论如下:

(1) Forest-DNDC 模型的喀斯特参数化及其校验

根据喀斯特植被的观测研究以及后寨河流域的野外调查和实验, 我们对模型的关键大气、植被和土壤参数进行了修订, 包括降雨中的氮浓度; 森林中乔木层或灌木层类型和林龄、叶片枝干根初始生物量、叶片初始氮浓度、叶片碳氮比、枝干碳氮比、比叶重、水分利用效率; 森林腐殖质类型、土壤质地、pH、容重、饱和导水率、岩石比例等。经过校准模拟的喀斯特常绿与落叶阔叶混交林 2005~2014 年平均春、夏、秋、冬、全年平均土壤呼吸速率分别为 18.18 kgC/(ha·d)、21.99 kgC/(ha·d)、18.49 kgC/(ha·d)、8.31 kgC/(ha·d)、16.78 kgC/(ha·d)。且本地化模拟的平均误差、绝对平均误差、标准差均有所下降, 决定系数有所提高。参数修订后的 Forest-DNDC 模型能够较好地模拟喀斯特常绿与落叶阔叶混交林的土壤呼吸, 降低了模拟误差, 可进一步用于喀斯特常绿与落叶阔叶混交林碳动态的模拟。

(2) 喀斯特常绿与落叶阔叶混交林的碳循环特征模拟

1965~2014 年喀斯特森林的碳通量除模拟早期的前 3~4 年急剧增加之外, 随后总初级生产力 (GPP) 保持相对稳定, 植物呼吸 (R_{plant}) 随着森林发育而增加, 土壤呼吸 (R_{soil}) 减少, 植被净初级生产力 (NPP) 呈迅速减小趋势; 净生态系统碳交换量 (NEE) 亦较迅速下降, 在 2013 年达到最低值 -0.17 tC/ha, 喀斯特森林由碳汇变为弱碳源。在过去 50 年里, 喀斯特常绿与落叶阔叶混交林年均 GPP 和 NPP 分别为 20.98 tC/ha、7.58 tC/ha; 年均生态系统呼吸 (Recosystem) 和年均 NEE 分别达 16.54 tC/ha、4.44 tC/ha。

(3) 气候对喀斯特常绿与落叶阔叶混交林碳循环特征的影响

通过对过去 50 年来年均温度、年降水总量与碳循环指标的多元相关分析, 本地气候变化趋势对喀斯特常绿与落叶阔叶混交林的 GPP 和 R_{soil} 没有显著影响; 但显著影响 NPP、 R_{plant} 、 $R_{\text{ecosystem}}$ 和 NEE。具体表现为: 本地气候变化促进 R_{plant} 和 $R_{\text{ecosystem}}$, 抑制 NPP 和 NEE, 气温和降水共同控制着喀斯特生态系统的碳循环。

致谢: 本研究得到中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站的支持。特别感谢环境地球化学国家重点实验室王世杰主任给予的建设性意见以及王彦伟、周再兴、邓佳、郑循华、王小国、鲁旭阳、周运超、蔡先立、徐玥、吴洋洋、郭纯子等在数据收集、参数化和模型模拟等方面的大力帮助。

参 考 文 献

- [1] Prentice I C, Heimann M, Sitch S. The carbon balance of the terrestrial biosphere: Ecosystem models and atmospheric observations [J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(6): 1553-1573.
- [2] Prentice I C, Bondeau A, Cramer W, et al. Dynamic global vegetation modeling: Quantifying terrestrial ecosystem responses to large-scale environmental change [A]. In *Terrestrial Ecosystems in a Changing World* [M]. Canadell J, Pitelka L F, Pataki D. Springer Berlin Heidelberg, 2007, 175-192.
- [3] Li C, Aber J, Stange F, et al. A process-oriented model of N_2O and NO emissions from forest soils: 1. Model development [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D4): 4369-4384.
- [4] Stange F, Butterbach-Bahl K, Papen H, et al. A process-oriented model of N_2O and NO emissions from forest soils: 2. Sensitivity analysis and validation [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2000, 105(D4): 4385-4398.
- [5] Kurbatova J, Li C, Varlagin A, et al. Modeling carbon dynamics in two adjacent spruce forests with different soil conditions in Russia [J]. *Biogeosciences*, 2008, 5(4): 969-980.
- [6] Miehle P, Livesley S J, Feikema P M, et al. Assessing productivity and carbon sequestration capacity of *Eucalyptus globulus* plantations using the process model Forest-DNDC: Calibration and validation [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 192(1): 83-94.
- [7] Lamers M, Ingwersen J, Streck T. Modelling N_2O emission from a forest upland soil: A procedure for an automatic calibration of the biogeochemical model Forest-DNDC [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 205(1): 52-58.

- [8] Cui J, Li C, Trettin C. Analyzing the ecosystem carbon and hydrologic characteristics of forested wetland using a biogeochemical process model [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(2): 278-289.
- [9] 王小国, 朱波, 高美荣, 等. 川中丘陵区桉柏混交林地土壤 CO₂ 释放与 Forest-DNDC 模型模拟 [J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 27-32.
- [10] 鲁旭阳, 范继辉, 霍常富, 等. 贡嘎山冷杉林土壤 CO₂ 释放的模拟研究 [J]. *浙江林业科技*, 2009, 29(6): 11-16.
- [11] Sweeting M M. *Karst Landforms* [M]. London: Macmillan, 1972, 362 pp.
- [12] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [13] 郭柯, 刘长成, 董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性及石漠化治理 [J]. *植物生态学报*, 2011, 35(10): 991-999.
- [14] 屠玉麟. 论亚热带喀斯特植被的顶极群落: 以贵州喀斯特植被为例 [J]. *贵州林业科技*, 1992, 20(4): 9-15.
- [15] 朱守谦, 魏鲁明, 陈正仁, 等. 茂兰喀斯特森林生物量构成初步研究 [J]. *植物生态学报*, 1995, 19(4): 358-367.
- [16] Ni J, Luo D H, Xia J, *et al.* Vegetation in karst terrain of southwestern China allocates more biomass to roots [J]. *Solid Earth*, 2015, 6(3): 799-810.
- [17] Liu Z, Dreybrodt W, Wang H. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO₂ budget: Considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99(3-4): 162-172.
- [18] 袁道先. *碳循环与岩溶地质环境* [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [19] 刘再华. 岩石风化碳汇研究的最新进展和展望 [J]. *科学通报*, 2012, 57(2-3): 95-102.
- [20] 张春来, 黄芬, 杨慧, 等. 岩溶生态系统中的碳循环特征与碳汇效应 [J]. *地球与环境*, 2013, 41(4): 378-387.
- [21] 吴鹏, 崔迎春, 杨婷, 等. 茂兰喀斯特森林主要演替群落土壤呼吸研究 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2013, 37(4): 57-62.
- [22] 吕文强, 王世杰, 刘秀明. 喀斯特原生林土壤呼吸动态变化及其影响因素 [J]. *地球与环境*, 2011, 39(3): 313-317.
- [23] 胡乐宁, 苏以荣, 何寻阳. 西南喀斯特典型土壤在不同植被类型下的土壤呼吸特征 [J]. *生态环境学报*, 2012, 21(7): 1218-1222.
- [24] Li C, Froking S, Harriss R. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8(3): 237-254.
- [25] 李长生. 生物地球化学的概念与方法-DNDC 模型的发展 [J]. *第四纪研究*, 2001, 21(2): 89-99.
- [26] 杨成, 刘丛强, 宋照亮, 等. 贵州喀斯特山区植物营养元素含量特征 [J]. *生态环境*, 2007, 16(2): 503-508.
- [27] 丁访军, 高艳平, 吴鹏, 等. 喀斯特地区 3 种林型土壤呼吸及其影响因素 [J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 217-221.
- [28] 姜霞, 张喜. 贵州喀斯特山地几种常见树种的光合特性比较 [J]. *林业科技开发*, 2011, 25(3): 17-22.
- [29] 卢晓强, 方升佐. 黔中喀斯特山地 8 种树种早期生长和叶片养分动态的研究 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(1): 38-42.
- [30] 中国科学院地理研究所. *中国动植物物候观测年报* [M]. 北京: 科学出版社, 1965.
- [31] Liu Y G, Liu C C, Wang S J, *et al.* Organic carbon storage in four ecosystem types in the karst region of southwestern China [J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(2): e56443.
- [32] 刘映良. 喀斯特典型山地退化生态系统植被恢复研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2005.
- [33] 胡忠良, 潘根兴, 李恋卿, 等. 贵州喀斯特山区不同植被下土壤 C、N、P 含量和空间异质性 [J]. *生态学报*, 2009, 29(8): 4187-4195.
- [34] 李孝良, 陈效民, 周炼川, 等. 西南喀斯特地区土壤饱和和导水率及其影响因素研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(5): 74-76.
- [35] 程星, 於芳. 喀斯特土壤水分变化研究 [J]. *地球与环境*, 2005, 33(增刊): 139-143.
- [36] 李孝良. 贵州喀斯特石漠化演替阶段土壤质量属性变化特征 [D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [37] Hancock P A, Hutchinson M F. Spatial interpolation of large climate data sets using bivariate thin plate smoothing splines [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2006, 21(12): 1684-1694.
- [38] Farr T G, Rosen P A, Caro E, *et al.* The shuttle radar topography mission [J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2): 37-55.
- [39] Miehle P, Battaglia M, Sands P J, *et al.* A comparison of four process-based models and a statistical regression model to predict growth of *Eucalyptus globulus* plantations [J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220(5): 734-746.
- [40] Wang X, Zhu B, Li C, *et al.* Dissecting soil CO₂ fluxes from a subtropical forest in China by integrating field measurements with a modeling approach [J]. *Geoderma*, 2011, 161(1): 88-94.
- [41] Lu X, Cheng G, Xiao F, *et al.* Simulating carbon sequestration and GHGs emissions in *Abies fabric* forest on the Gongga Mountains using a biogeochemical process model Forest-DNDC [J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, 5(3): 249-256.
- [42] 冉景丞, 何师意, 曹建华. 亚热带森林岩溶区土壤 CO₂ 迁移动态初步研究 [J]. *贵州地质*, 2001, 18(4): 247-252.
- [43] 易志刚, 蚁伟民. 森林生态系统中土壤呼吸研究进展 [J]. *生态环境*, 2003, 12(3): 361-365.
- [44] 董丹, 倪健. 利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力 [J]. *生态学报*, 2011, 31(7): 1855-1866.
- [45] 王冰, 杨胜天, 王玉娟. 贵州省喀斯特地区植被净第一性生产力的估算 [J]. *中国岩溶*, 2007, 26(2): 98-104.
- [46] 李高飞, 任海. 中国不同气候带各类型森林的生物量和净第一性生产力 [J]. *热带地理*, 2004, 24(4): 306-310.
- [47] 方精云, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量 [J]. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.

- [48] 冉景丞, 何师意, 曹建华, 等. 亚热带喀斯特森林土壤 CO₂ 排放量动态研究[J]. 贵州科学, 2002, 20(2): 42-47.
- [49] 易志刚, 蚁伟民, 周国逸, 等. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳释放研究[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1673-1678.

Modelling Carbon Cycle of Karst Evergreen and Deciduous Broad-leaved Mixed Forest during the Last 50 Years

LI Mengde^{1 2 3}, LIU Libin^{1 2 3}, NI Jian^{1 2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding Guizhou 562100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Carbon cycle of plant, soil, and the whole ecosystem of plateau-type karst evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest in Puding, central Guizhou was simulated from 1965 to 2014 based on the newly parameterized Forest-DNDC model and driven by interpolated daily climate data. Results showed that, compared with default parameter simulation and observations, the re-parameterized model can more accurately simulate soil respiration rates of spring, autumn and winter, but the summer soil respiration rate was under-simulated. However, statistical tests indicated that the modified Forest-DNDC model could generally simulate soil respiration of karst forest. Modelling errors from the default parameter simulation have been reduced. The model can be further used to simulate carbon dynamics of karst evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest. Further simulations indicated that carbon fluxes of karst forest increased rapidly in the beginning of 3-4 years. Then with forest grew, the gross primary productivity (GPP) remained relatively stable, plant respiration (R_{plant}) and ecosystem respiration ($R_{\text{ecosystem}}$) increased continuously, and soil respiration (R_{soil}) and net primary productivity (NPP) rapidly decreased. The net ecosystem exchange (NEE) reduced rapidly and achieved its minimum value of -0.17 tC/ha in 2013, implying that karst evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest became from a CO₂ sink to a weak CO₂ source. Correlation analyses indicated that the annual mean temperature and annual total precipitation had no statistically significant effects on GPP and R_{soil} , but had significant effects on NPP, R_{plant} , $R_{\text{ecosystem}}$, and NEE.

Key words: Forest-DNDC; karst; evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest; carbon cycle