

DOI: 10.5846/stxb201812282833

王乐, 杜灵通, 丹杨, 宫菲, 郑琪琪, 马龙龙, 孟晨. 不同气候变化情景下荒漠草原生态系统碳动态模拟. 生态学报, 2020, 40(2): 657-666.

Wang L, Du L T, Dan Y, Gong F, Zheng Q Q, Ma L L, Meng C. Carbon dynamic simulation of desert steppe ecosystem in different climate scenarios. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 657-666.

不同气候变化情景下荒漠草原生态系统碳动态模拟

王 乐^{1,2}, 杜灵通^{1,2,*}, 丹 杨^{1,2}, 宫 菲^{1,2}, 郑琪琪³, 马龙龙^{1,2}, 孟 晨^{1,2}

1 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 银川 750021

2 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

3 宁夏大学农学院, 银川 750021

摘要:荒漠草原生态系统对气候变化十分敏感,但其碳循环过程如何响应气候变化尚不明确。基于 Biome-BGC 模型和 1958—2017 年的气象观测资料,模拟了宁夏盐池荒漠草原生态系统在 4 种不同气候情景下的碳储量变化。结果表明:(1)4 种气候情景下,盐池荒漠草原生态系统年均总碳储量在 2.3208—2.3652 kg/m²,土壤碳储量占总碳储量的 94.03%,枯落物与植被碳储量分别占 4.03%和 1.94%。(2)近 60 a 间,基准情景下的土壤碳储量以每年 0.0020 kg/m² 的速度累积,总碳储量呈波动性上升趋势。(3)植被、枯落物碳储量的年内变化与季节变化紧密相关,土壤碳储量在夏秋季较低,冬春较高。(4)单独的气温升高会导致土壤碳、植被碳及枯落物碳储量的略微降低,而单独降水波动增加会导致碳储量的明显增高,二者综合作用会导致碳储量的升高;此外,枯落物碳储量对气候变化的响应最敏感,其次是植被碳储量,土壤碳储量对气候变化的响应敏感度最低。研究结果揭示了荒漠草原碳储量随不同气候变化情景的变化规律,可为地方政府制定应对气候变化策略和生态恢复政策提供科学依据。

关键词:荒漠草原;碳循环;Biome-BGC 模型;气候变化;盐池县

Carbon dynamic simulation of desert steppe ecosystem in different climate scenarios

WANG Le^{1,2}, DU Lingtong^{1,2,*}, DAN Yang^{1,2}, GONG Fei^{1,2}, ZHENG Qiqi³, MA Longlong^{1,2}, MENG Chen^{1,2}

1 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

3 School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: Desert steppe ecosystems are sensitive to climate change. How does the carbon cycle respond to climate change is still ambiguous. This study simulated the carbon dynamic of desert steppe ecosystems in four kinds of climate scenarios using the Biome-Bio Geochemical Cycles (Biome-BGC) model based on meteorological data set from 1958 to 2017 in Yanchi county, Ningxia province. The results indicated that the average annually total carbon storage of desert steppe ecosystem ranged from 2.3208 kg/m² to 2.3652 kg/m² in the four climate scenarios. The soil carbon storage accounts for 94.03% of the total carbon storage. The litter and vegetation carbon storage account for 4.03% and 1.94% of the total carbon storage, respectively. In the past 60 years, the soil carbon storage in the benchmark scenario, which means in the scenario without climate change, accumulated at the rate of 0.0020 kg/m² per year while the total carbon storage presented a rising trend in fluctuation. The annual change of vegetation and litter carbon storage were closely related to the change of seasons. The soil

基金项目:国家自然科学基金项目(41661003,41967027);中国科学院“西部之光”计划(XAB2017AW01);宁夏高等学校一流学科建设(生态学)项目(NXYLXK2017B06)

收稿日期:2018-12-28; 网络出版日期:2019-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dult80@qq.com

carbon storage was lowest in summer and autumn over the whole year. The increasing temperature resulted in the minor decrease of a variety of carbon storage, whereas, the increasing of precipitation led to the significant rise of these carbon storages. Therefore, the combination of temperature and precipitation explains the increment of carbon storage in climate change. In addition, the litter carbon storage is the most sensitive kind of carbon to climate change, followed by vegetation carbon storage and soil carbon storage. The results revealed the changing laws of carbon storage in desert steppe ecosystem in various climate scenarios. These can provide scientific basis for local governments to adopt proper strategies for adapting climate change and to make policies for the ecological restoration.

Key Words: desert steppe; carbon cycle; Biome-BGC model; climate change; Yanchi county

全球变化已影响到不同陆地生态系统的碳循环过程^[1],在全球变暖背景下,陆地生态系统碳循环对厄尔尼诺/南方涛动(El Niño/Southern Oscillation, ENSO)等气候事件的敏感性将增加^[2],但不同季节、不同区域间非均一的气候变暖特性,对各气候情景下的陆地生态系统碳循环模拟提出了挑战^[3]。目前,有关气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响大多集中在增温控制试验^[4],已有文献的 Meta 分析表明,气候变暖使陆地生态系统地上和地下植物碳储量分别增加 6.8% 和 7.0%^[5]。但区域大尺度的生态系统碳循环如何响应气候变暖过程,则需要通过耦合气候模型和生态系统过程模型来实现^[6],而如何简化复杂的气候模型和在区域尺度上本地化生态系统过程模型参数是当前急需解决的难题。

气候变化会对全球陆地生态系统碳循环产生深远的影响^[7],而草地占全球陆地面积的 1/5,在全球陆地生态系统碳循环中发挥着重要作用^[8],中国的草地碳储量占全球草地碳储量的 9%—16%^[9],因此研究气候变化对中国草地碳储量的影响具有重要的科学意义。草地作为对气候变化最敏感的陆地生态系统^[10],不仅生物量会随着年际间气候变化而波动^[11]、其碳固定能力也会随之发生变化^[12]。以内蒙古典型草原为例,其在湿润年表现出弱碳汇的性质,而在干旱年则迅速变为碳源^[13],这表明水分亏缺会严重抑制草地生态系统碳吸收能力^[14-15]。同时,温度通过影响草地生态系统的光合与呼吸过程也成为影响草地生产力和碳通量的因子之一^[12]。目前我国关于草原生态系统碳循环的研究主要集中在青藏高原典型高寒草甸生态系统及内蒙古典型温带草原生态系统^[16],对于气候过渡地带的荒漠草原生态系统的碳循环研究报道较少。而有研究表明,不同区域及下垫面性质的生态系统碳储量对气候变化的响应存在差异^[17],因此需要针对不同的草地类型进行针对性的定量研究,明确其碳储量变化规律。盐池荒漠草原位于干旱区与半干旱区、草原与荒漠的过渡地带,这种地理上的过渡性使得其荒漠草原生态系统对气候变化的响应极其敏感^[18],但目前尚未见到该生态系统对气候变化响应的研究报道。同时,由于该区域缺少生态系统长期定位监测数据,很难从长时间序列上对盐池荒漠草原的各类碳储量动态进行研究。鉴于此,本研究基于 Biome-BGC 模型和 1958—2017 年的气象观测资料,模拟 60 a 间盐池县荒漠草原生态系统在 4 种气候情景下的土壤碳、植被碳、枯落物碳及总碳含量的动态变化,在此基础上定量分析气候变化对荒漠草原生态系统碳循环影响,以期揭示过渡带荒漠草原生态系统碳循环规律,为地方政府制定应对气候变化策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

盐池县位于宁夏回族自治区东部,37°04′—38°10′N 和 106°30′—107°47′E 之间,总面积 6769 km²,海拔 1295—1951 m^[18]。北邻毛乌素沙漠,东南与黄土高原相连,地势南高北低,自东南向北由黄土丘陵向鄂尔多斯沙地过渡,气候从半干旱区向干旱区过渡,植被从干草原向荒漠草原过渡,属于典型的过渡地带^[18]。这种地理上的过渡性造成了自然资源多样性和脆弱性的特点。盐池县 1958—2017 年间的年平均气温为 8.34 ℃,年均降水为 296.99 mm,属于典型的温带大陆性气候,研究区土壤结构松散,地带性土壤以灰钙土为主,非地

带性土壤主要有风沙土和草甸土等。植被类型以沙生植被和荒漠植被为主^[19],主要物种有中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)和长芒草(*Stipa bungeana*)等。

1.2 数据

本研究驱动 Biome-BGC 模型所需数据有气象数据和其他描述性数据,气象数据包括盐池县 1958—2017 年的逐日最高温度、最低温度及降水量等,描述性数据包括观测站点属性、土壤属性、CO₂ 浓度数据、植被类型及生理生态参数等(表 1)。植物生理生态参数为光合类型(C3/C4)、叶片碳氮比、物候过程、根茎分配、冠层比叶面积、最大气孔导度等,参数含义参考康满春等^[20]文献,其中,依据宁夏农业勘查设计院编著的《宁夏植被》一书中的描述,判断盐池荒漠草原主要为 C3 植物,模型选择 C3 光合类型。气象数据从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)获取,CO₂ 数据采用青海省瓦里关大气本底站的 CO₂ 浓度观测数据。

表 1 驱动 Biome-BGC 模型所需的数据集
Table 1 Driven data set of Biome-BGC model

数据类型 Data type	数据内容 Data content	时间分辨率 Temporal resolution	数据来源 Data sources
站点属性 Physical characteristics of site	高程、海拔和经纬度等	—	观测站实测
气象数据 Meteorological data	日最高温度、最低温度和降水量	天	中国气象数据网
土壤质地 Soil texture data	土壤砂粒、粉粒和黏粒百分含量	—	世界和谐土壤数据库
大气 CO ₂ 浓度 Atmospheric carbon dioxide levels	青海省瓦里关 CO ₂ 浓度观测值	年	http://co2now.org
植物生理生态 Eco-physiological parameters of vegetation	44 个生理生态参数 ^[20]	—	模型缺省值

1.3 方法

为探究不同气候情景下荒漠草原生态系统碳储量特征及动态变化,本研究结合宁夏盐池县的气候实际,设计了 4 种不同的气候变化情景。不同于以往单一的气温增温或降水按比例增加情景模拟,本研究假定盐池县 1958—2017 年期间存在着气候变化过程,即降水与温度因子存在内在的波动和增减趋势。为剥离这种气候变化影响,通过时间序列数据分析方法,剥离降水的气候波动影响和气温的趋势变化,并通过重构后的降水和气温序列组合来驱动 Biome-BGC 模型,模拟不同气候情景下盐池荒漠草原生态系统的碳动态。

1.3.1 气候情景设计

根据史培军等对我国气候区划的研究,宁夏盐池存在着明显的气候增温和降水波动特征^[21]。为此,本研究设计了 4 种气候情景模式(表 2)。

表 2 4 种气候情景
Table 2 4 kinds of climate scenarios

气候情景 Climate scenarios	气温特征 Temperature characteristics	降水特征 Precipitation characteristics	情景模拟状态 Description of climate scenarios
情景 A Scenario A	增温	降水波动增强	盐池县近 60 年经历的真实气候过程
情景 B Scenario B	不增温	降水波动增强	模拟的是无气候变暖,但存在降水波动异常增强的气候情景
情景 C Scenario C	增温	降水波动不增强	模拟的是气候存在变暖,但没有降水异常波动增强的气候情景
情景 D Scenario D	不增温	降水波动不增强	模拟的是没有发生气候变化的基准情景

1.3.2 集合经验模态分解

Huang 等^[22]提出的集合经验模态分解法(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)是一种被广泛

应用于信号分析的时间序列分析方法,其可将时间序列的数据分解成多个固有模态分量(IMF)和一个残余趋势分量。分离原理是将极大值与极小值分别用样条函数曲线连接起来,构成上下两条包络线, m_1 为均值线序列,将原始数据序列 $X(t)$ 与 m_1 序列求差得到 h_1 ,经过 k 次筛选,使 h_1 的极大值全部为正数,极小值全部为负值,且使得波峰与波谷的形态关于正坐标轴对称,得到了第一个本征模态函数 IMF1:

$$C_1(t) = h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) \quad (1)$$

其中 t 是时间, C_1 是原始序列中尺度最短、频率最高的分量。把 C_1 从原始序列 $X(t)$ 中分离出剩余序列 r_1 ,然后重复上述步骤得到第二个分量 IMF2。重复 n 次就可将原始序列 $X(t)$ 分离成 n 个不同频率的分量。

$$X(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) + r_n(t) \quad (2)$$

本研究使用 EEMD 方法分解 1958—2017 年气温、降水量观测序列中的内在趋势,并从原始观测气温序列中剔除内在趋势,用以重建无气候变化过程影响的气温和降水量序列。

1.3.3 Biome-BGC 模型

Biome-BGC 是一种广泛应用于模拟陆地生态系统碳氮水循环的模型^[23],由 FOREST-BGC 生态过程模型发展而来^[24]。Biome-BGC 模型的机理为物质与能量守恒定律,即每天进入生态系统的能量与离开生态系统的能量之差就是积累在该生态系统中的能量。BGC 模型的驱动需要输入初始化文件、气象数据和生理生态参数文件,初始化文件定义模拟过程的一般信息,包括站点物理特性、时间框架描述、输入输出文件名称及输出变量列表等。气象数据包括日尺度的最高气温、最低气温、平均气温、降水量、平均水汽压亏缺、短波辐射强度和昼长。由于盐池气象站无全部要素的观测,因此利用观测的最高气温、最低气温和降水量驱动 MTCLIM 模型模拟前述气象 7 要素。生理生态参数包括叶片 C:N 比、最大气孔导度等 44 个参数。

2 结果与分析

2.1 气候情景模拟及碳储量模拟结果验证

本研究设计和模拟了 4 种气候情景,即当前真实经历的气候变化过程(情景 A)、只存在降水波动增强但无气温增温的情景(情景 B)、只存在气温增温但无降水波动增强的情景(情景 C)以及不发生气候变化的基准情景(情景 D)。其中,情景 A 是当前真实经历的气候变化过程,即经历了气温增温和降水波动增强两种变化过程,气象资料也真实记录了这一过程,故不需要对历史降水量和气温观测资料进行处理。其他三种情景均需模拟无气温增温或无降水波动增强的气候变化过程,为实现这一模拟,需对历史观测的气温和降水资料进行处理,剔除自然气候变化过程的影响。本研究使用了 EEMD 方法,对 1958—2017 年间的日最高气温、最低气温及降水量进行分解,从分解结果来看,原始气温与降水序列均存在内在残余趋势(图 1),因此将原始气温序列减去了 EEMD 分解的残余趋势变量,以重建无气候变化影响的气温序列。EEMD 分解还得到多个固有模态分量,由于降水序列不仅存在内在趋势,更重要的是随着气候变化,极端洪涝事件增多,降水波动性在增强。为还原无气候变化影响的降水过程,降水序列不仅减去了内在残余趋势,还减去了代表极端洪涝过程的第一高频分量(IMF1),从而重建没有气候变化影响的降水量序列,结果如图 1 所示。

利用重建的 4 种气候情景下降水量和气温序列数据驱动 Biome-BGC 模型,模拟 1958—2017 年盐池荒漠草原生态系统植被碳、枯落物碳、土壤碳和总碳储量的动态变化。由于盐池县没有长达 60 年或较为连续的碳储量观测资料,本研究利用前人已经发表的 2000—2016 年宁夏草地的植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)数据^[19],通过转换为对应的碳储量,来验证 Biome-BGC 模型在本区域的模拟结果。朱玉果等^[19]报道的 NPP 数据为宁夏全部草地的平均 NPP,依据程积民等^[25]报道的典型草原和荒漠草原植被碳密度的比例,本研究将宁夏草地 NPP 数据乘以 0.8 的系数转换为荒漠草原生态系统当年植被净初级生产的碳储量。植被净初级生产的碳储量对应为 Biome-BGC 模拟的植被碳储量与新增枯落物碳储量,因当年植被净初级生产的枯落物主要在生长季结束至下年初累积,且枯落物蓄积的同时也在分解^[26],故将其次年 1/3 的枯

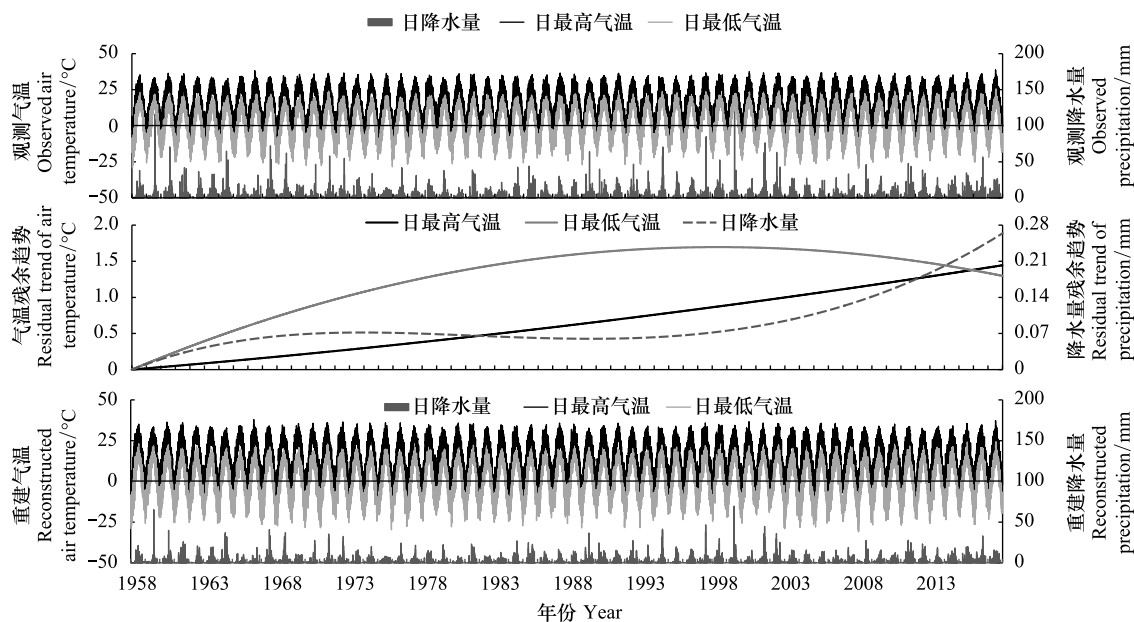


图1 近60年盐池气温及降水序列、EEMD残余趋势及气候重建结果

Fig.1 Temperature, precipitation, EEMD residual trend and the results of climate reconstruction in Yanchi county from 1958 to 2017

落物总量作为当年植被生产的枯落物累积量。验证结果表明(图2),Biome-BGC模拟的植被净初级生产碳储量与NPP转换碳储量的相关性系数为0.64 ($P < 0.01$),模型估算的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为0.0188 kg/m²,表明模型估算精度较高,能够表征盐池荒漠草原生态系统碳储量状况。

2.2 不同气候情景下荒漠草原生态系统碳储量特征

盐池荒漠草原生态系统的枯落物碳和植被碳在4种气候情景下普遍偏低,其碳储量主要来自于土壤碳(表3),4种气候情景下土壤碳储量平均占生态系统总碳储量的94.03%,枯落物碳储量占4.03%,植被碳储量只占到了1.94%。对比未发生气候变化的基准情景(情景D)和真实气候变化情景(情景A)下的生态系统碳储量,可以看出气候变化导致近60 a盐池荒漠草原生态系统年总碳储量平均增加了0.0412 kg/m²,其中植被碳、枯落物碳和土壤碳储量各增加了0.0093、0.0188和

0.0131 kg/m²,增幅分别为22.63%、22.04%和0.60%。这可能是由于气候变化引起区域植被活动增强^[27],植被盖度增高,生产力增强,导致生态系统植被和枯落物碳储量明显增加、气候变暖也增加了土壤呼吸作用^[28],加速了土壤碳排放,因此土壤碳储量的增幅微弱、此外,由于荒漠草原植被稀疏,植被和枯落物碳储量占生态系统碳储量的比例较低,故整个生态系统的总碳储量只增加了1.77%。对比气温增温情景(情景C)、降水波动增强情景(情景B)和基准情景(情景D)可以看出,单独的气温增温会导致植被碳储量略微增加,但会导致枯落物碳储量和土壤碳储量略微降低,进而导致生态系统总碳储量降低。单独的降水波动增强会明显导致生态系统各类型碳储量的增加,进而导致生态系统总碳储量增加。由此可见,降水变化是导致荒漠草原地区生态系统碳动态变化的主要因素。

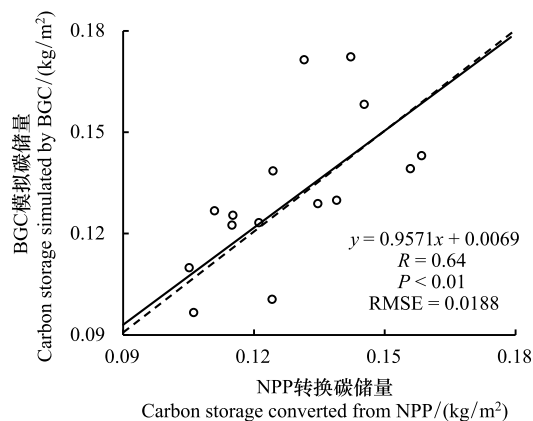


图2 Biome-BGC模拟碳储量与NPP转换碳储量对比

Fig.2 Comparison of Biome-BGC simulated carbon storage and NPP converted carbon storage

NPP:净初级生产力,Net Primary Production

表 3 不同气候情景下近 60 年盐池荒漠草原生态系统年平均碳储量

Table 3 Average carbon storage of Yanchi desert steppe ecosystem in different climate scenarios in recent 60 years

气候情景 Climate scenarios	年平均碳储量(kg/m^2)及占总碳比例 Average annual carbon storage (kg/m^2) and its proportion			
	植被碳储量 Vegetation carbon storage	枯落物碳储量 Litter carbon storage	土壤碳储量 Soil carbon storage	总碳 Total carbon storage
情景 A Scenario A	0.0504 (2.13%)	0.1041 (4.40%)	2.2108 (93.47%)	2.3653
情景 B Scenario B	0.0490 (2.07%)	0.1048 (4.43%)	2.2107 (93.50%)	2.3645
情景 C Scenario C	0.0417 (1.80%)	0.0835 (3.60%)	2.1956 (94.60%)	2.3208
情景 D Scenario D	0.0411 (1.77%)	0.0853 (3.67%)	2.1977 (94.56%)	2.3241

2.3 年际碳储量变化规律

从 4 种气候情景下盐池荒漠草原 1958—2017 年生态系统植被碳、枯落物碳、土壤碳和总碳储量的动态变化来看,植被碳储量存在较强的年际间的波动特征,且与同期降雨量的波动特征一致(图 3),这是因为荒漠草原地区的植被生长和碳积累主要受制于降水量,降水丰沛的年份植被生长丰茂,植被碳储量增加,干旱年分植被生长稀疏,植被碳储量降低。枯落物碳储量的波动特征与植被碳储量相似,但变化较为缓慢,这可能与枯落物碳储量有一定的蓄积和延迟效应有关(图 3)。枯落物碳储量在 1980 年前后表现出一个明显的趋势转折,以基准情景(情景 D)为例,1958—1980 年间存在着 $-0.0011 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的下降趋势($P < 0.01$)、而在 1980 年以后则表现出 $0.0007 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的上升趋势($P < 0.01$),但波动性更强。土壤碳储量有明显的累积效应,基准气候情景(情景 D)下,近 60 a 以每年 $0.0020 \text{ kg}/\text{m}^2$ 的速度累积(图 3)。生态系统总碳储量为植被、枯落物与土壤碳储量的总和,故总碳储量在 60 a 中呈波动性上升(图 3)。以上结果可知,荒漠草原生态系统的地上生物量较少,植被与枯落物碳储量较低,且受降水波动的影响较大。荒漠草原生态系统的大部分碳储存于土壤之中,而土壤碳储量受降水波动的影响较小。从不同气候情景来看,真实气候变化情景(情景 A)与降水波动增强情景(情景 B)下的 4 种碳储量较为相近,气温增温情景(情景 C)与基准情景(情景 D)下的 4 种碳储量较为相近,4 种气候情景下各类型碳储量的年际波动形态较为一致。但不同气候情景下碳储量随时间的累积效应存在差异,对比情景 A 和情景 D 可以得出,植被碳储量不存在随气候变化而累积的效应,但枯落物碳储量、土

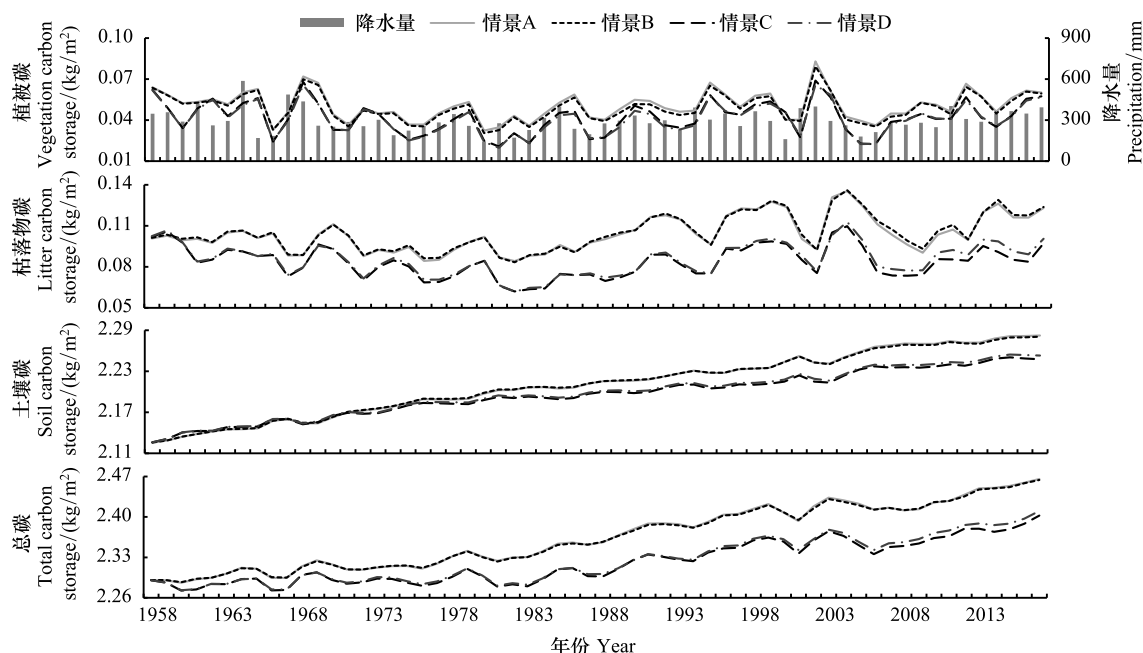


图 3 不同气候情景下的年际碳储量变化

Fig.3 Interannual carbon storage fluctuation in different climate scenarios

壤碳储量和总碳储随气候变化而累积的效应非常明显,即气候变化导致盐池荒漠草原生态系统的碳储量逐渐升高,且随着时间的推移累积效应逐渐增大(图3)。

2.4 年内碳储量变化规律

不同类型碳储量的年内变化差异较大,植被碳储量在冬季非常低,从春季(3月)开始逐渐增加,在秋季(9—10月)达到最大值,之后开始迅速降低,植被碳储量的年内变化与盐池荒漠草原的物候节律非常一致(图4)。枯落物碳储量在8月底最低,随着生长季的结束,地上植物组织开始自然死亡和凋落,枯落物碳储量开始增加,到冬季12月底达到最大值、随着枯落物的逐渐分解,其碳储量从1月份开始逐渐下降,直至夏末秋初(图4)。枯落物的累积受植物生命周期操控,一般在植物生命末期激增^[29],故导致枯落物碳储量的年内变化规律与植被碳储量呈相反态势。土壤碳储量在4月到10月期间降低,而11月到次年3月期间逐渐增高(图4),其年内变化过程不仅与枯落物分解后的碳归还有关,还与气温的季节变化有关。土壤碳储量主要输入源为枯落物,枯落物通过物理淋溶、生物化学分解和破碎等过程,将2/3左右的碳以可溶性碳或碎屑形式输入土壤^[30],因此在冬春季枯落物量大的时候,土壤的碳储量也开始增加。然而,4月份以后,随着气温的升高,降雨的增多,可能是由于土壤呼吸作用开始加大^[31],土壤向大气排出的CO₂增多,导致土壤碳储量下降。由于荒漠草原生态系统中土壤碳储量占生态系统总碳储量的绝大部分,故生态系统总碳储量的年内变化与土壤碳储量变化相似(图4)。从不同气候情景间的差异来看,各类碳储量变化趋势线形态一致,但数值存在大小差异,即气候变化不会影响各类型碳储量的年内变化趋势,但对年内碳储量的数值大小有一定影响。真实气候变化情景(情景A)与降水波动增强情景(情景B)下的4种碳储量近乎一样,气温增温情景(情景C)与基准情景(情景D)下的4种碳储量较为相近,由此得出,降水波动性增强过程一定程度增加了荒漠草原生态系统的碳储量(图4)。

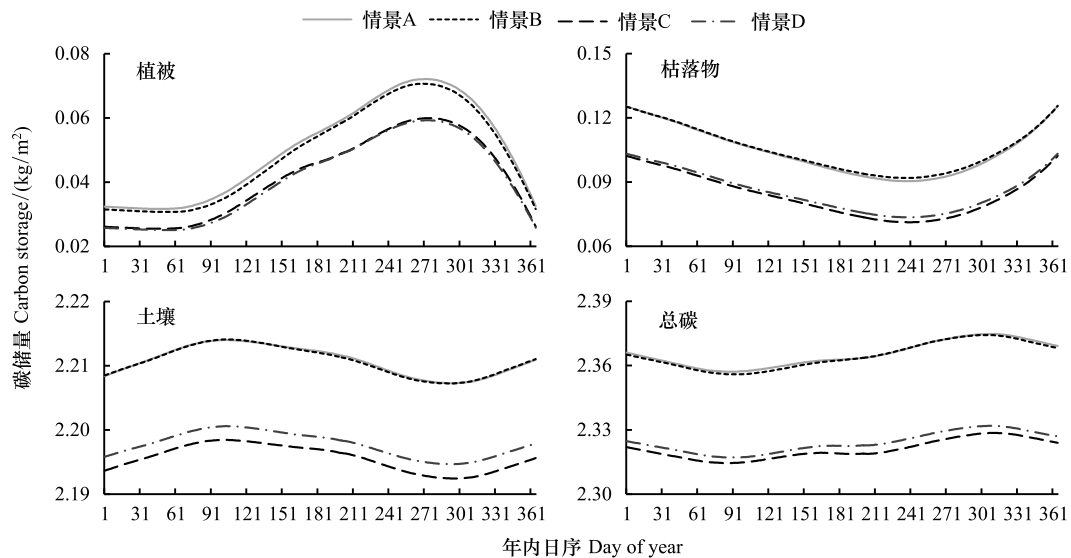


图4 不同类型碳储量的年内变化

Fig.4 Various kinds of carbon storage fluctuation during a year

2.5 不同气候变化对荒漠草原生态系统碳储量的影响

前述已得出气候变化对荒漠草原生态系统各类型碳储量及总碳储量在年际尺度上都应影响,但不同情景的气候变化对碳储量影响的强弱存在差异,且每种气候情景如何影响各类型碳储量尚不明确。本节以未发生气候变化的基准情景(情景D)为基准,对比其与真实气候变化情景(情景A)、降水波动增强情景(情景B)和气温增温情景(情景C)等3种不同气候情景下,植被、枯落物、土壤以及总碳储量的变化。结果可以看出,不同类型的气候变化过程对荒漠草原生态系统各类型碳储量的影响存在差异,降水波动增强普遍增强了荒漠草

原生态系统的各类型碳储量,但气温增温对各类型碳储量的影响微弱。真实气候变化情景导致植被碳储量在低值部分增强明显,但在高值部分增强较弱、降水波动增强情景引起的植被碳储量变化规律与真实气候变化情景相同、气温增温情景下的植被碳储量与基准情景的碳储量散点靠近 1:1 线,即单独的气温增温对植被碳储量的影响不大(图 5)。真实气候变化情景和降水波动增强情景均促进了枯落物碳储量的增强,但气温增温情景却略微降低了枯落物的碳储量(图 5)。土壤碳储量与植被碳储量的结果相反,真实气候变化情景导致土壤碳储量在低值部分略有降低,但导致土壤碳储量高值部分增强明显(图 5)。对于荒漠草原生态系统总碳来言,真实气候变化情景和降水波动增强情景均明显增强了其储量(图 5)。以上结果可得出,在不考虑降水因素的作用下,气温升高会导致各类型碳储量的略微降低、在不考虑气温因素的作用下,降水波动增加会导致各类型碳储量的明显增高、而宁夏盐池荒漠草原生态系统近 60 a 经历了气温增温和降水波动增加的复杂过程,降水与气温变化的综合作用导致生态系统的各种碳储量的明显增高。同时,研究也发现,在各类型碳储量中,枯落物碳储量对气候变化的响应最敏感,其次是植被碳储量,土壤碳储量对气候变化的响应敏感度最低。

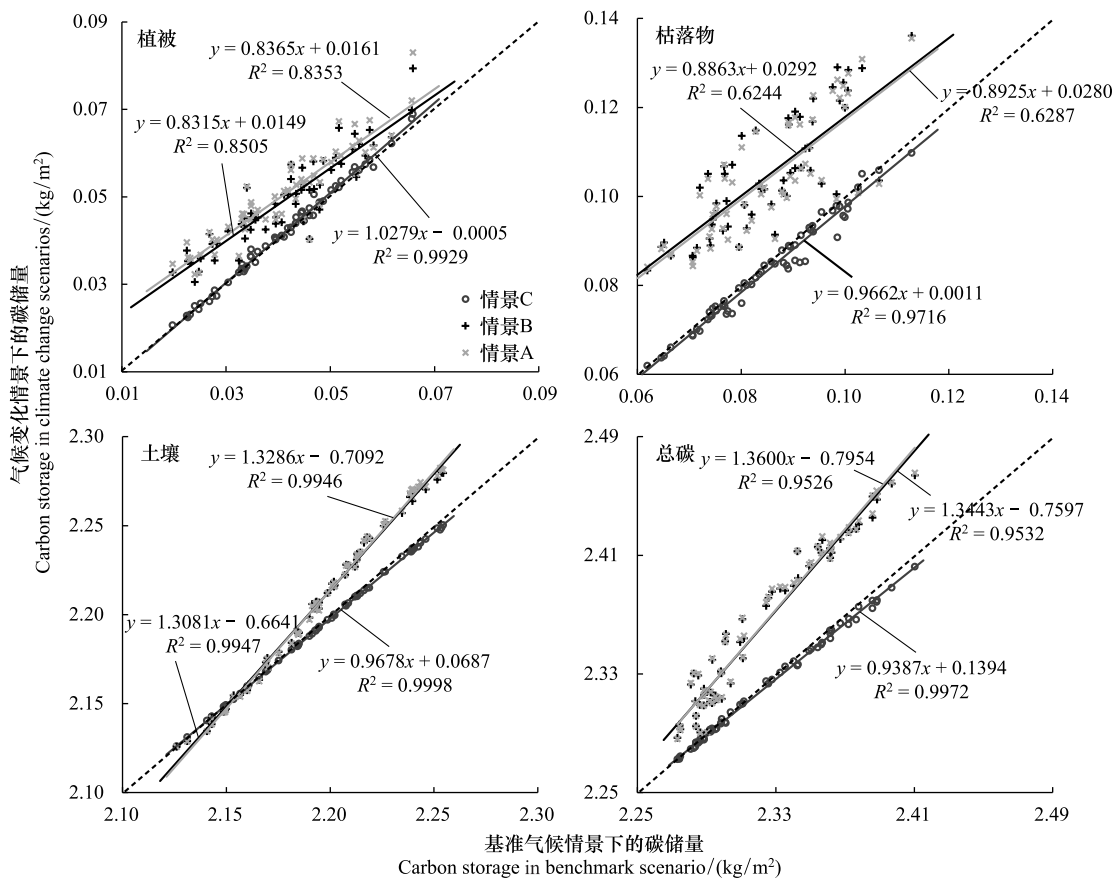


图 5 气候变化情景与基准情景下各类型碳储量的关系

Fig.5 The correlation of various carbon storages between climate change scenarios and benchmark scenario

3 讨论

气候情景设置与模拟是本研究的基础,我国气候模拟总体分为两类,一种是未来气候变化的预测模拟^[32],一种是关于缺失观测数据的古气候重建^[33],而本研究的气候情景设计则是基于过去 60 a 的观测资料,模拟不发生气候变化或发生不同的气候变化过程,对荒漠草原生态系统碳储量的影响。目前有关这类型的气候情景模拟大多为通过简单的气温线性抬升或降水按比例增加来实现^[34],但气候变化过程复杂,气温升高或降水增多往往并非非线性过程,因此要扣除气候变化的影响,需要做非线性的剥离。为此,本研究通过集合经验

模态分解法,分离出宁夏盐池县过去 60 a 间因气候变化引起的气温与降水量的残余趋势,对其剥离后重组不同的气候情景,使重建的气候情景更逼近事实。相对于 IPCC 的未来气候情景模式^[35]和 RegCM3 等其他复杂的气候模式^[36],本研究所采用的模拟方法降低了气候情景重建的复杂性,又比其他复杂模型易于实现,这为今后不同气候变化情景模拟相关研究提供了思路。

本研究模拟得出,盐池荒漠草原生态系统在 4 种气候情景下的年均总碳储量在 2.3208—2.3652 kg/m²,土壤碳储量在 2.1956—2.2108 kg/m²,植被碳储量在 0.0411—0.0504 kg/m²,枯落物碳储量在 0.0835—0.1048 kg/m²。其中植被碳储量接近于马文红等^[37]计算的中国北方草地上生物碳储量,其平均值为 0.0490 kg/m²。植被和枯落物碳储量合计稍高于实测值,程积民等^[25]实测的荒漠草原草地植被(含枯落物)年均碳储量为 0.0477—0.0707 kg/m²。土壤碳储量接近与 CENTURY 模型模拟的近 30 a 内蒙古草地表层平均土壤碳储量(1.99 kg/m²)^[38]。尚二萍等^[39]用 InVEST 模型模拟的新疆伊犁河谷草地生态系统的碳储量在 0.8450—1.2260 kg/m²,其中地上部分(不含死亡枯落物)在 0.0450—0.0900 kg/m²,与本研究植被碳储量较为一致。Han 等^[24]模拟的新疆干旱区草原的植被碳储量在 0.0411—0.1548 kg/m²,接近于本研究结果,但土壤碳储量在 5.0826—15.5237 kg/m²,高于本研究结果,其研究区涵盖新疆的典型草原、草甸草原和荒漠草原,同时对模型进行了放牧调整,这可能是导致土壤碳储量偏高的原因。

Biome-BGC 是一种被广泛应用于陆地生态系统碳水循环过程模拟的模型^[40],但关于荒漠草原生态系统的生理生态参数鲜有报道,因此,本研究的大部分生理生态参数只能采用模型中 C3 类型草地的缺省值,这可能会对模拟结果的数值有一定影响,但对不同气候情景下的差异影响较小。同时,本研究模拟的是不同气候情景下未受干扰的理想荒漠草原生态系统碳动态过程,未考虑放牧、封育禁牧、防沙治沙等干扰因素,而荒漠草原生态系统碳循环过程会明显受到人为干扰影响^[25]。因此,今后应在模型生理生态参数本地化和考虑人为干扰方面开展深入研究,而卡尔曼滤波算法、模拟退火算法^[41]等模型同化技术也为今后的荒漠草原生态系统碳循环模拟提供了思路。

4 结论

本文利用基于 EEMD 方法重建的 4 组气候数据驱动 Biome-BGC 模型模拟了宁夏盐池荒漠草原生态系统 1958—2017 年间的植被、枯落物、土壤及总碳储量的变化,分析了气候变化对各类型碳储量的影响以及碳储量对气候变化的响应,得出如下几点结论:(1)4 种气候情景下年均总碳储量在 2.3208—2.3652 kg/m²,其中土壤碳储量平均占生态系统总碳储量的 94.03%,枯落物与植被碳储量之和占比不到 10%,分别占 4.03%和 1.94%。(2)在近 60 a 间,植被碳储量的年际波动与同期降雨量的波动一致,枯落物碳储量存在着先降低后增加的趋势,在基准气候情景下土壤碳储量以每年 0.0020 kg/m² 的速度累积,总碳储量呈波动性上升。(3)植被、枯落物碳储量的年内变化与荒漠草原植物的生长和枯落过程息息相关,而土壤碳储量年内变化不仅与枯落物碳的输入有关,还与气温的季节变化有关,随着气温升高和降水增多,土壤呼吸作用增强,会消耗土壤碳储量。(4)单独的气温升高会导致各类型碳储量的略微降低,而单独降水波动增加会导致各类型碳储量的明显增高、在各类型碳储量中,枯落物碳储量对气候变化的响应最敏感,其次是植被碳储量,土壤碳储量对气候变化的响应敏感度最低。

参考文献(References):

- [1] Mitchard E T A. The tropical forest carbon cycle and climate change. *Nature*, 2018, 559(7715): 527-534.
- [2] Kim J S, Kug J S, Jeong S J. Intensification of terrestrial carbon cycle related to El Niño-Southern Oscillation under greenhouse warming. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1674.
- [3] Xia J Y, Chen J Q, Piao S L, Ciais P, Luo Y Q, Wan S Q. Terrestrial carbon cycle affected by non-uniform climate warming. *Nature Geoscience*, 2014, 7(3): 173-180.
- [4] Niu S L, Sherry R A, Zhou X H, Luo Y Q. Ecosystem carbon fluxes in response to warming and clipping in a tallgrass prairie. *Ecosystems*, 2013, 16(6): 948-961.
- [5] Lu M, Zhou X H, Yang Q, Li H, Luo Y Q, Fang C M, Chen J K, Yang X, Li B. Responses of ecosystem carbon cycle to experimental warming:

- a meta-analysis. *Ecology*, 2013, 94(3): 726-738.
- [6] Qian H F, Joseph R, Zeng N. Enhanced terrestrial carbon uptake in the northern high latitudes in the 21st century from the coupled carbon cycle climate model intercomparison project model projections. *Global Change Biology*, 2010, 16(2): 641-656.
- [7] 李克让. 全球气候变化及其影响研究进展和未来展望. *地理学报*, 1996, 51(S1): 1-14.
- [8] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, Gilmanov T G, Scholes R J, Schimel D S, Kirchner T, Menaut J C, Seastedt T, Moya E G, Kamnalrut A, Kinyamario J I. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 785-809.
- [9] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(2): 205-218.
- [10] 任继周, 梁天刚, 林慧龙, 冯琦胜, 黄晓东, 侯扶江, 邹德富, 王翀. 草地对全球气候变化的响应及其碳汇潜势研究. *草业学报*, 2011, 20(2): 1-22.
- [11] Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 736-753.
- [12] Wang Y L, Zhou G S, Wang Y H. Environmental effects on net ecosystem CO₂ exchange at half-hour and month scales over *Stipa krylovii* steppe in northern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(5): 714-722.
- [13] Hao Y B, Wang Y F, Sun X M, Huang X Z, Cui X Y, Niu H S, Zhang Y H, Yu G R. Seasonal variation in carbon exchange and its ecological analysis over *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(S2): 186-195.
- [14] Meyers T P. A comparison of summertime water and CO₂ fluxes over rangeland for well watered and drought conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 106(3): 205-214.
- [15] Suyker A E, Verma S B, Burba G G. Interannual variability in net CO₂ exchange of a native tallgrass prairie. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 255-265.
- [16] 曹广民, 李英年, 张金霞, 赵新全. 高寒草甸不同土地利用格局土壤 CO₂ 的释放量. *环境科学*, 2001, 22(6): 14-19.
- [17] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 杨红飞, 章超斌, 居为民. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系. *生态学报*, 2013, 33(12): 3752-3764.
- [18] 宋乃平, 杜灵通, 王磊. 盐池县 2000—2012 年植被变化及其驱动力. *生态学报*, 2015, 35(22): 7377-7386.
- [19] 朱玉果, 杜灵通, 谢应忠, 刘可, 宫菲, 丹杨, 王乐, 郑琪琪. 2000—2015 年宁夏草地净初级生产力时空特征及其气候响应. *生态学报*, 2019, 39(2): 518-529.
- [20] 康满春, 朱丽平, 许行, 查同刚, 张志强. 基于 Biome-BGC 模型的北方杨树人工林碳水通量对气候变化的响应研究. *生态学报*, 2019, 39(7): 2378-2390.
- [21] 史培军, 孙劭, 汪明, 李宁, 王静爱, 金赞赞, 顾孝天, 尹卫霞. 中国气候变化区划(1961—2010 年). *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(10): 2294-2306.
- [22] Huang N E, Shen Z, Long S R, Wu M C, Shi H H, Zheng Q A, Yen N C, Tung C C, Liu H H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [23] Wang Q X, Watanabe M, Ouyang Z. Simulation of water and carbon fluxes using Biome-BGC model over crops in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131(3/4): 209-224.
- [24] Han Q F, Luo G P, Li C F, Xu W Q. Modeling the grazing effect on dry grassland carbon cycling with Biome-BGC model. *Ecological Complexity*, 2014, 17: 149-157.
- [25] 程积民, 程杰, 杨晓梅, 刘伟, 陈芙蓉. 黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征. *生态学报*, 2012, 32(1): 226-237.
- [26] 李学斌, 陈林, 张硕新, 谢应忠. 围栏条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物枯落量及其蓄积动态. *生态学报*, 2012, 32(20): 6575-6583.
- [27] 杜灵通, 宋乃平, 王磊, 候静, 胡悦. 近 30a 气候变暖对宁夏植被的影响. *自然资源学报*, 2015, 30(12): 2095-2106.
- [28] Xu X, Shi Z, Li D J, Zhou X H, Sherry R A, Luo Y Q. Plant community structure regulates responses of prairie soil respiration to decadal experimental warming. *Global Change Biology*, 2015, 21(10): 3846-3853.
- [29] 李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用. *生态学报*, 2014, 34(14): 3807-3819.
- [30] 陈婷, 郝敏, 孔范龙, 李悦, 庞立华. 枯落物分解及其影响因素. *生态学杂志*, 2016, 35(7): 1927-1935.
- [31] 马志良, 赵文强, 刘美, 朱攀, 刘庆. 土壤呼吸组分对气候变暖的响应研究进展. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3477-3486.
- [32] 赵宗慈, 罗勇. 二十世纪九十年代区域气候模拟研究进展. *气象学报*, 1998, 56(2): 225-241.
- [33] 杨保, 史锋, Sonechkin D M, 王章勇, 秦春. 过去千年气候变化重建研究新进展. *中国沙漠*, 2011, 31(2): 485-491.
- [34] 韩其飞, 罗格平, 李超凡, 叶辉, 冯异星. 基于 Biome-BGC 模型的天山北坡森林生态系统碳动态模拟. *干旱区研究*, 2014, 31(3): 375-382.
- [35] 车彦军, 赵军, 张明军, 王圣杰, 齐月. 不同气候变化情景下 2070—2099 年中国潜在植被及其敏感性. *生态学报*, 2016, 36(10): 2885-2895.
- [36] 高学杰, 石英, 张冬峰, Giorgi F. RegCM3 对 21 世纪中国区域气候变化的高分辨率模拟. *科学通报*, 2012, 57(5): 374-381.
- [37] 马文红, 方精云, 杨元合, 安尼瓦尔·买买提. 中国北方草地生物量动态及其与气候因子的关系. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(7): 632-641.
- [38] 郭灵辉, 高江波, 吴绍洪, 郝成元, 赵东升. 1981—2010 年内蒙古草地土壤有机碳时空变化及其气候敏感性. *环境科学研究*, 2016, 29(7): 1050-1058.
- [39] 尚二萍, 张红旗. 1980s—2010s 新疆伊犁河谷草地碳存储动态评估. *资源科学*, 2016, 38(7): 1229-1238.
- [40] Thornton P E, Law B E, Gholz H L, Clark K L, Falge E, Ellsworth D S, Goldstein A H, Monson R K, Hollinger D, Falk M, Chen J, Sparks J P. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 185-222.
- [41] 张廷龙, 孙睿, 张荣华, 张蕾. 基于数据同化的哈佛森林地区水、碳通量模拟. *应用生态学报*, 2013, 24(10): 2746-2754.