

DOI: 10.20103/j.stxb.202307311643

袁洪艺, 杜灵通, 乔成龙, 王玉霞, 薛斌, 魏采用, 周峰, 李明涛. 人工灌丛总初级生产力和蒸散对气候变化的响应模拟——以宁夏盐池县荒漠草原区为例. 生态学报, 2024, 44(8): 3515-3524.

Yuan H Y, Du L T, Qiao C L, Wang Y X, Xue B, Wei C Y, Zhou F, Li M T. Simulation of GPP and ET response to climate change for the planted shrub ecosystem in desert steppe area of Yanchi county, Ningxia. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(8): 3515-3524.

# 人工灌丛总初级生产力和蒸散对气候变化的响应模拟 ——以宁夏盐池县荒漠草原区为例

袁洪艺<sup>1,2</sup>, 杜灵通<sup>1,2,\*</sup>, 乔成龙<sup>1,2</sup>, 王玉霞<sup>1,2</sup>, 薛斌<sup>1,2</sup>, 魏采用<sup>3</sup>, 周峰<sup>4</sup>, 李明涛<sup>4</sup>

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 宁夏回族自治区遥感调查院, 银川 750021

4 宁夏回族自治区矿产地质调查院, 银川 750021

**摘要:** 荒漠草原区人工灌丛生态系统的总初级生产力 (GPP) 和蒸散 (ET) 如何响应全球气候变化, 不仅是全球变化生态学研究的核心问题, 也关乎干旱半干旱风沙区生态建设的可持续性。利用参数优化后的生物群区生物地球化学循环 (Biome-BGC) 模型和气象环境驱动数据, 考虑不同气候变化情景和未来趋势, 模拟了盐池荒漠草原区人工灌丛生态系统 GPP 和 ET 对气候变化的响应。结果表明: (1) 增温会显著抑制生态系统的 GPP, 大幅度的增温 (3 °C) 会导致 GPP 急剧下降, 但增温对 ET 的抑制作用非常微弱; (2) 降水是限制 ET 变化的重要因素, 相对于增温诱发干旱胁迫所引起的 ET 小幅下降, 降水多寡则更直接地控制着生态系统的 ET 大小; (3) 中国西北地区未来气候的“暖湿化”趋势和大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高会对荒漠草原区人工灌丛生态系统产生综合驱动效应, 增强陆地和大气间的碳水交换通量。研究成果可为干旱半干旱区应对全球变化及指导地方政府制定生态保护修复政策提供科学依据。

**关键词:** 人工灌丛生态系统; 生物群区生物地球化学循环 (Biome-BGC) 模型; 总初级生产力; 蒸散; 气候变化; 盐池县

## Simulation of GPP and ET response to climate change for the planted shrub ecosystem in desert steppe area of Yanchi county, Ningxia

YUAN Hongyi<sup>1,2</sup>, DU Lingtong<sup>1,2,\*</sup>, QIAO Chenglong<sup>1,2</sup>, WANG Yuxia<sup>1,2</sup>, XUE Bin<sup>1,2</sup>, WEI Caiyong<sup>3</sup>, ZHOU Feng<sup>4</sup>, LI Mingtao<sup>4</sup>

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 Ningxia Institute of Remote Sensing Survey, Yinchuan 750021, China

4 Ningxia Institute of Geological and Mineral Resources Survey, Yinchuan 750021, China

**Abstract:** How the gross primary productivity (GPP) and evapotranspiration (ET) of the planted shrub ecosystem in desert steppe areas responds to global climate change is not only a key scientific problem of global change ecology, but also relates to the sustainability of regional ecological restoration in arid and semi-arid areas. Considering different climate change scenarios and future trends, this study used meteorological and environmental data to drive the Biome-BGC model. The response of GPP and ET of the planted shrub ecosystem in the desert steppe area of Yanchi county to climate change was studied. The results show that: (1) air temperature rising significantly inhibits the GPP of the ecosystem. High-intensity

**基金项目:** 宁夏自然科学基金重点项目 (2022AAC02011); 国家自然科学基金项目 (41967027); 宁夏地质局财政项目 (NXCZ20220203)

**收稿日期:** 2023-07-31; **网络出版日期:** 2024-01-29

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

warming (3 °C) leads to a sharp decline in GPP, but the inhibitory effect of warming on *ET* is very weak. (2) Precipitation is a critical factor limiting the change of *ET*. Compared with the decrease of *ET* caused by drought stress under regional warming, the amount of precipitation controls the *ET*'s magnitude of the ecosystem more directly. (3) The warm and humid climate and the increase of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration in the future will have comprehensive effects on the ecosystem and ultimately promote the flux of carbon and water between land and atmosphere. The research can provide a scientific basis for human to adapt to global changes in arid and semi-arid areas and for local governments to implement ecological protection and restoration policies.

**Key Words:** planted shrub ecosystem; Biome-BGC model; gross primary productivity; evapotranspiration; climate change; Yanchi county

当前气候变化对陆地生态系统的影响愈加复杂,一方面因温室气体排放增加引起的气温上升,会改变植物生长和发育的环境条件并引发干旱胁迫<sup>[1]</sup>,另一方面 CO<sub>2</sub>的施肥作用又增强了生态系统的生产力<sup>[2]</sup>,因 CO<sub>2</sub>浓度升高引起的水文循环强迫,又会影响到干旱区生态系统的植被格局与过程<sup>[3]</sup>,最终对生态系统的碳水循环产生深远影响<sup>[4-5]</sup>。干旱半干旱区占全球 41% 的陆地表面,草地是这一区域中最主要的生态系统类型,强烈的人类活动和气候变化对干旱区草地的生态系统过程影响显著<sup>[6]</sup>。气候变化通过改变植物碳输入和微生物代谢过程来影响草地生态系统的碳储量<sup>[7]</sup>,因此,模拟不同气候变化情景下草地生态系统的碳水通量响应,对理解干旱区生态系统过程的未来变化至关重要<sup>[8]</sup>。

近 20 年来气候学领域的进展为全球变化模拟研究提供了新途径,世界气候研究计划组织的耦合模式比较计划(CMIP)得到了国际社会的高度认可<sup>[3]</sup>,其中,基于 CMIP5 排放情景模拟未来陆地生态系统的碳水通量是其重要应用领域,如康满春等<sup>[9]</sup>根据 CMIP5 中的 RCP4.5 和 RCP6.0 排放情景,研究了中国北方杨树人工林碳水通量对气候变化的响应。最新发布的 CMIP6 气候模式在分辨率等方面有进一步提升<sup>[10]</sup>,其基于不同的共享社会经济路径(SSPs)及最新的人为排放趋势,提出了新的预估情景<sup>[11]</sup>,能更好地衡量不同社会经济发展模式与气候变化风险的关系,并在生态系统过程模拟中得到了应用,如孙倩等<sup>[12]</sup>基于 CMIP6 气候情景数据驱动 Daycent 模型,分析了 2015—2100 年甘肃草地生态系统碳收支未来的时空特征和影响因素;桑春云等<sup>[13]</sup>利用 CMIP6 中加拿大地球系统模式(CanESM5)数据分析了三江源地区的作物参考蒸散(*ET*<sub>0</sub>)变化特征及在未来不同情景下的变化。

在沙化、退化荒漠草原区,人工种植耐旱灌木进行防风固沙是中国西北重要的生态治理措施,这一措施在荒漠草原区形成的大量人工灌丛成为区域重要的生态系统类型和景观结构,该生态系统受人类活动干扰强烈,已引起科学界广泛关注<sup>[14-17]</sup>。但在全球气候变化背景下,荒漠草原区人工灌丛的碳水循环过程如何变化尚需开展模拟研究,特别是厘清其在不同气候变化模式和社会经济发展路径下的响应规律,对理解该人工生态系统的可持续性和稳定性至关重要,其不仅具有重要的科学意义,而且对干旱半干旱区生态治理具有指导价值。为此,本文以宁夏盐池荒漠草原区中间锦鸡儿(*Caragana liouana*)人工灌丛为例,利用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次气候变化评估报告中提出的五种 SSPs,结合盐池的降水、气温等变化情景,在生物群区生物地球化学循环(Biome-BGC)模型中模拟总初级生产力(GPP)和蒸散(*ET*)对未来气候变化的响应,以期揭示其生态过程的响应机制,为荒漠草原区应对气候变化提供依据。

## 1 研究区概况及研究数据和方法

### 1.1 研究区概况

盐池县位于宁夏回族自治区东部,其幅员辽阔,总面积达 6769 km<sup>2</sup>,最高海拔 1953 m,地形由南到北逐渐降低,气候从半湿润区向半干旱区过渡,植被类型从典型草原向荒漠草原过渡<sup>[18-19]</sup>。气候以中温带半干旱大陆性气候为主,盐池气象站记录地近 60 年来的年平均气温 8.3 °C,年平均降水量在 297 mm<sup>[20]</sup>。因处在华东

季风气候的末界,全年降水分布不均,夏秋多而冬春少,其中7—9月的降水量约占全年的62%<sup>[15]</sup>。土壤结构松散,渗透性强,易受侵蚀,南部黄土丘陵区主要以黑垆土、黄绵土为主,北部风沙区以风沙土和灰钙土为主<sup>[21]</sup>。盐池县近几十年持续推进防沙治沙、造林种草、封山育林等生态建设工程,极大地改善了区域植被结构,在荒漠草原区形成约 $8.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 以中间锦鸡儿等灌木为优势种的成林人工灌丛景观<sup>[19]</sup>。

## 1.2 模型及驱动数据

### 1.2.1 Biome-BGC 模型

Biome-BGC 模型是一种典型的以日尺度为步长的生理生态过程模型<sup>[22]</sup>,能够模拟水、碳、氮在陆地生态系统的植被、凋落物和土壤中的存储与流通过程,模型设计遵循物质与能量守恒定律,即进入系统的物质和能量等于留在系统中的物质和能量加上离开系统的物质和能量,具体模拟原理参见文献<sup>[22]</sup>。模拟过程包括初始化模拟和常规模拟两个阶段,初始化模拟基于设定的生理生态指标,利用大气 $\text{CO}_2$ 浓度、氮沉降值和研究区气象数据进行循环,直至模型状态变量、碳库和氮库等达到平衡态<sup>[23]</sup>,初始化模拟需要需要输入描述站点属性的初始化文件、气象数据文件和生理生态参数文件,当模型初始化运行到模拟的年土壤碳储量差异小于 $0.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 就达到了平衡态。之后运用被模拟时期的气象资料、 $\text{CO}_2$ 含量年际变化数据以及生态生理参数,来实现生态系统碳、氮、水的存储和通量模拟。

### 1.2.2 数据来源

Biome-BGC 模型所需的日尺度气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),研究获取了盐池县1986—2018年逐日最高温度、最低温度及降雨量。利用逐日降水、气温数据驱动山地小气候模拟模型(MTCLIM)模型,模拟获得驱动 Biome-BGC 模型所需的其他气象指标,大气 $\text{CO}_2$ 浓度数据来源于青海省瓦里关大气本地观测站。本文采用 PEST 参数优化方法和宁夏大学盐池荒漠草原定位研究站的涡度相关观测数据,对 Biome-BGC 模型中的28个生态生理参数进行了优化,各生态生理参数的优化结果及具体取值参照文献<sup>[20]</sup>。

## 1.3 气候变化情景模拟

本文分别模拟气温升高、降水增加与大气 $\text{CO}_2$ 浓度升高等单一因子和组合变化对生态系统总初级生产力(GPP)和蒸散(ET)的可能影响,以及预测在IPCC第六次气候变化评估报告中的五种SSPs下研究区GPP和ET未来的变化特征。

### 1.3.1 升温与降水增加的组合情景模拟方案

预计到21世纪末,中国区域气温会增加 $1.3\text{—}5^\circ\text{C}$ ,北方地区的降水量可能将上升 $5\%\text{—}15\%$ <sup>[24—25]</sup>。因此,本研究基于1986—2018年的气温、降水和大气 $\text{CO}_2$ 浓度数据,通过设定气温升高 $1^\circ\text{C}$ 、 $2^\circ\text{C}$ 、 $3^\circ\text{C}$ 和降水增加 $5\%$ 、 $10\%$ 、 $15\%$ 的气候变化幅度,由此构建出包括初始情况(TOP0)在内的2个变量组合的16种变化情景(表1),模拟各情景下研究区GPP和ET的变化。

表1 气候变化情景设计

Table 1 Climate change scenarios design

序号 Serial number	气候变化情景模拟 Climate change scenario simulation	气温 Temperature	降水 Precipitation	序号 Serial number	气候变化情景模拟 Climate change scenario simulation	气温 Temperature	降水 Precipitation
1	TOP0	不变	不变	9	T2P0	增加 $2^\circ\text{C}$	不变
2	TOP1	不变	增加 $5\%$	10	T2P1	增加 $2^\circ\text{C}$	增加 $5\%$
3	TOP2	不变	增加 $10\%$	11	T2P2	增加 $2^\circ\text{C}$	增加 $10\%$
4	TOP3	不变	增加 $15\%$	12	T2P3	增加 $2^\circ\text{C}$	增加 $15\%$
5	T1P0	增加 $1^\circ\text{C}$	不变	13	T3P0	增加 $3^\circ\text{C}$	不变
6	T1P1	增加 $1^\circ\text{C}$	增加 $5\%$	14	T3P1	增加 $3^\circ\text{C}$	增加 $5\%$
7	T1P2	增加 $1^\circ\text{C}$	增加 $10\%$	15	T3P2	增加 $3^\circ\text{C}$	增加 $10\%$
8	T1P3	增加 $1^\circ\text{C}$	增加 $15\%$	16	T3P3	增加 $3^\circ\text{C}$	增加 $15\%$

### 1.3.2 未来气候情景设置

基于 IPCC 第六次气候变化评估报告中所提出的五种 SSPs<sup>[26]</sup>, 模拟未来全球变暖和大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加对荒漠草原区人工灌丛生态系统 GPP 和 ET 的影响。在设计模拟情景时, 气温与降水以盐池荒漠草原人工灌丛区 1986—2018 年的实际上升率为基准, 每 20 a 设置一个增加, CO<sub>2</sub> 浓度来源于 IPCC 的预测排放情景(表 2)。本研究选择五种 SSPs 中的低排放情景(SSP1-1.9)、中等排放情景(SSP2-4.5)和高排放情景(SSP5-8.5), 模拟 21 世纪早期(2021—2040 年)、中期(2041—2060 年)和末期(2081—2100 年)荒漠草原区人工灌丛生态系统的 GPP 与 ET 变化。

表 2 未来气候变化情景设计

Table 2 Scenarios design of climate change in future

年份 Year	增温/°C Temperature increasing	降水增加/mm Precipitation increasing	共享社会经济路径 Shared Socio-economic Pathways	CO <sub>2</sub> 浓度/(μmol/mol) CO <sub>2</sub> concentration
2021—2040	0.49	49.63	SSP1-1.9	433.79
			SSP2-4.5	448.14
			SSP5-8.5	458.47
2041—2060	0.98	99.26	SSP1-1.9	436.94
			SSP2-4.5	510.55
			SSP5-8.5	573.81
2081—2100	1.95	198.52	SSP1-1.9	403.95
			SSP2-4.5	598.04
			SSP5-8.5	1012.79

## 2 结果和分析

### 2.1 盐池荒漠草原区气候变化基本特征

盐池荒漠草原人工灌丛区 1986—2018 年的气温、降水及 CO<sub>2</sub> 浓度变化特征见图 1。从中可以看出, 研究期内的多年平均气温为 12.44 °C, 最低值出现在 1986 年, 为 11.43 °C, 最高值出现在 1998 年, 为 13.63 °C, 年平均气温呈波动上升趋势, 上升率为 0.02 °C/a。研究期内的多年平均降水量为 296.40 mm, 2011 年为丰水年, 年降水量达到最高的 402.80 mm, 2000 年为极端干旱年份, 年降水量仅仅只有 160.80 mm, 与气温变化趋势一样, 年降水量也表现出波动增加的趋势, 上升率为 2.48 mm/a。由于盐池缺乏大气本底 CO<sub>2</sub> 浓度观测, 故采用离本地最近的青海省瓦里关大气本底站观测数据来研究本区域 CO<sub>2</sub> 浓度变化, 1986—2018 年间区域 CO<sub>2</sub> 浓度呈极显著上升趋势, 年增幅为 2.02 μmol/mol, 其中 CO<sub>2</sub> 浓度在 1986 年为 340.23 μmol/mol, 是这一期间的最小值, 在 2018 年达到 407.28 μmol/mol, 为这一期间的最大值。可见, 在全球变化背景下, 盐池荒漠草原人

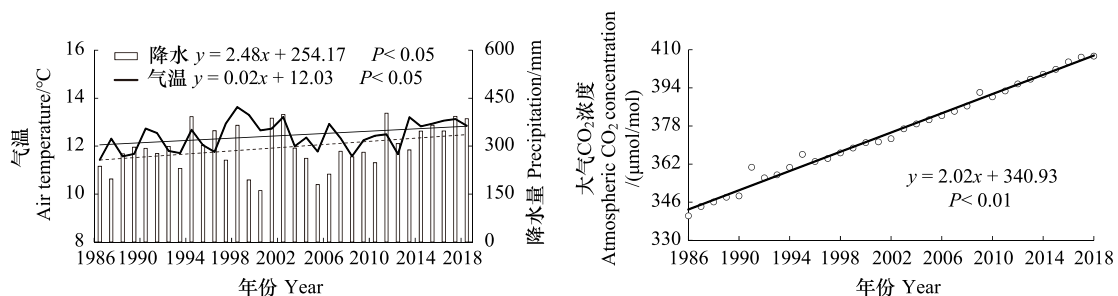


图 1 盐池 1986—2018 年气候因子及 CO<sub>2</sub> 浓度变化情况

Fig.1 Changes of climatic factors and CO<sub>2</sub> concentration in Yanchi County from 1986 to 2018

工灌丛区表现出了大气 CO<sub>2</sub>浓度持续增高、气候向“暖湿化”演变的基本特征。

## 2.2 GPP 和 ET 对不同增温与降水增加组合情景的响应

基于 1986—2018 年期间的气象数据驱动参数优化后的 Biome-BGC 模型,模拟了当前大气 CO<sub>2</sub>浓度背景下 16 种增温与降水增加组合情景(含基准情景 TOP0)的生态系统 GPP 和 ET(表 3)。结果可以看出,在基准情景下,盐池荒漠草原区人工灌丛生态系统的 GPP 年均值为 535.56 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,灌木入侵会增强原始荒漠草原生态系统的总初级生产力;ET 年均值为 293.28 mm,ET 基本与多年平均降水量持平。气温的增高会显著抑制荒漠草原区人工灌丛生态系统的 GPP,当气温增加 3 °C 后,不同降水情景下的 GPP 平均值为 63.91 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,仅为基准情景下的 11.9%,可见气温升高的强烈胁迫可能会导致这种干旱区的人工灌丛生态系统生产力彻底毁灭,极有可能导致人工灌丛完全退化。气温的增高也会显著抑制荒漠草原区人工灌丛生态系统的 ET,但增温导致 ET 降低的幅度并不大,当气温增加 3 °C 后,不同降水情景下的 ET 平均值为 305.77 mm。从不同增温与降水增加的组合情景来看,只有降水不变(P0)且气温增加的情况下,ET 年均值才会比基准情景下(TOP0)略微有所降低,其它增温与降水增加组合均会导致 ET 增加。可见,盐池荒漠草原人工灌丛区在当前气候“暖湿化”变化趋势(图 1),尤其是降水增加,会促进生态系统的水分消耗的增强。

表 3 不同气候变化情景下盐池荒漠草原区人工灌丛 GPP 和 ET 的变化

Table 3 The variation of GPP and ET of planted shrub in the desert steppe of Yanchi County under different climate change scenarios

气候变化情景模拟 Climate change scenario simulation	总初级生产力 Gross primary productivity(GPP)			蒸散 Evapotranspiration(ET)		
	1986—2018 年 的总值 Total amount/ (g C/m <sup>2</sup> )	年均值 Annual average/ (g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	年均值变化量 Amount of change/ (g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	1986—2018 年 的总值 Total amount/mm	年均值 Annual average/ (mm/a)	年均值变化量 Amount of change/ (mm/a)
	TOP0	17673.32	535.56	/	9678.33	293.28
TOP1	18251.41	553.07	17.51	10133.59	307.08	13.80
TOP2	18685.67	566.23	30.67	10580.05	320.61	27.33
TOP3	18982.43	575.23	39.67	11026.70	334.14	40.86
T1P0	13414.83	406.51	-129.05	9593.82	290.72	-2.56
T1P1	13507.86	409.33	-126.23	10037.79	304.18	10.90
T1P2	13366.99	405.06	-130.50	10475.32	317.43	24.15
T1P3	13704.55	415.29	-120.27	10916.39	330.80	37.52
T2P0	6270.28	190.01	-345.55	9532.19	288.85	-4.43
T2P1	6268.48	189.95	-345.61	9971.05	302.15	8.87
T2P2	6266.28	189.89	-345.67	10392.42	314.92	21.64
T2P3	6267.85	189.93	-345.63	10802.51	327.35	34.07
T3P0	2109.38	63.92	-471.64	9505.23	288.04	-5.24
T3P1	2109.16	63.91	-471.65	9895.78	299.87	6.59
T3P2	2108.76	63.90	-471.66	10286.20	311.70	18.42
T3P3	2108.70	63.90	-471.66	10674.10	323.46	30.18

盐池荒漠草原区人工灌丛生态系统的 GPP 和 ET 对增温和降水量增加的响应存在差异(图 2)。GPP 明显受控于气温,增温会显著抑制 GPP,线性斜率显示,气温每增加 1 °C,GPP 会降低 183.79 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。GPP 受降水增加的影响微弱,在基准气温情景下(T0),降水量增加 15%会导致 GPP 增加 39.67 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,但在气温增加 3 °C 的情景下(T3),降水量增加不再对 GPP 产生任何影响,由此可见,随着增温幅度的增大,降水量变化对 GPP 的影响越来越微弱(图 2)。与之相反,ET 明显受控于降水变化,降水增加会显著增强 ET;气温增加只能微弱的抑制 ET,线性斜率显示,气温每增加 1 °C,ET 只降低 2.65 mm。在基准气温情景下(T0),降水量增加 15%会导致 ET 增加 40.86 mm;在气温增加 3 °C 的情景下(T3),降水量增加 15%依然会导致 ET 增加 35.42 mm(图 2)。盐池荒漠草原区人工灌丛生态系统的生产力受控于气温,全球气候的变暖对这一生态系统

的生产力将会产生致命性打击,极端升温 3 °C 会摧毁其生物生产过程,导致灌丛生态系统退化;但生态系统的水分消耗受气候变暖的影响不大,这是因为蒸散由土壤蒸发和植物蒸腾共同构成,人工灌丛生产力受损后,地表水分依然能通过土壤蒸发途径输送回大气,即气候变暖会改变人工灌丛生态系统的蒸腾与蒸发比例结构,但对地气水文循环强度的影响不大。

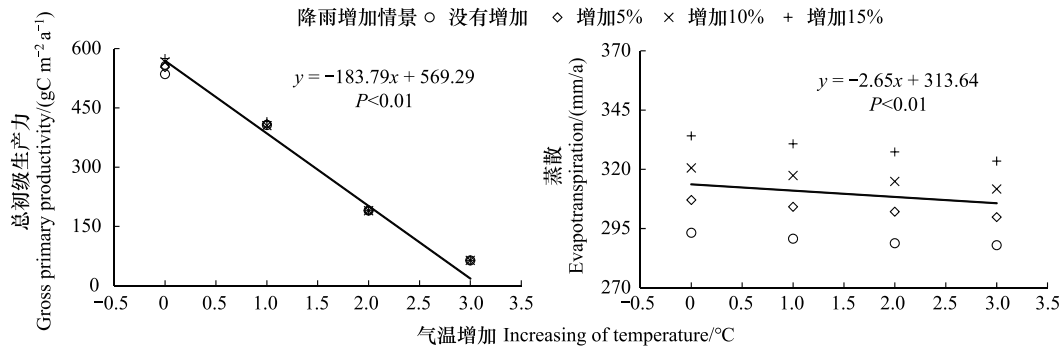


图 2 不同增温与降水增加组合情景下的总初级生产力(GPP)、蒸散(ET)模拟结果及影响差异

Fig.2 Simulated Gross Primary Productivity (GPP), Evapotranspiration (ET), and their variation under different scenarios with combined temperature and precipitation increasing

## 2.3 未来气候变化对人工灌丛生态系统 GPP 和 ET 的影响

### 2.3.1 未来气候变化对 GPP 的影响

在未来的 SSP1-1.9、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 气候情景下(表 2),盐池荒漠草原区人工灌丛生态系统在 21 世纪早期(2021—2040 年)、中期(2041—2060 年)和末期(2081—2100 年)的年平均 GPP 基本呈现逐渐递增趋势(图 3)。在低排放的 SSP1-1.9 情景下,早期 GPP 年均值与末期 GPP 年均值比较接近,中期 GPP 年均值则达到最大值 1128.74 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,GPP 出现先增后跌的现象。在中等排放的 SSP2-4.5 情景下,早期 GPP 年均值为 980.56 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,中期到达 1219.54 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,末期达到 1362.09 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,GPP 逐渐增强。在高排放的 SSP5-8.5 情景下,GPP 也是逐渐增强,且比同时期中等排放情景下的 GPP 略高。因此,在未来“暖湿化”增温和降水的增加趋势下,中、高排放情景均会导致盐池荒漠草原区人工灌丛生态系统 GPP 的持续增加,而低排放情景则导致这一生态系统的 GPP 在 21 世纪中期达到峰值。同时期的三种排放情景间相比,高排放情景下盐池荒漠草原植被生产力的增加幅度更大,即在未来降水量增加、气温升高的情景下,大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高会对荒漠草原人工灌丛生态系统带来施肥效应,促进其生产力增强(图 3)。

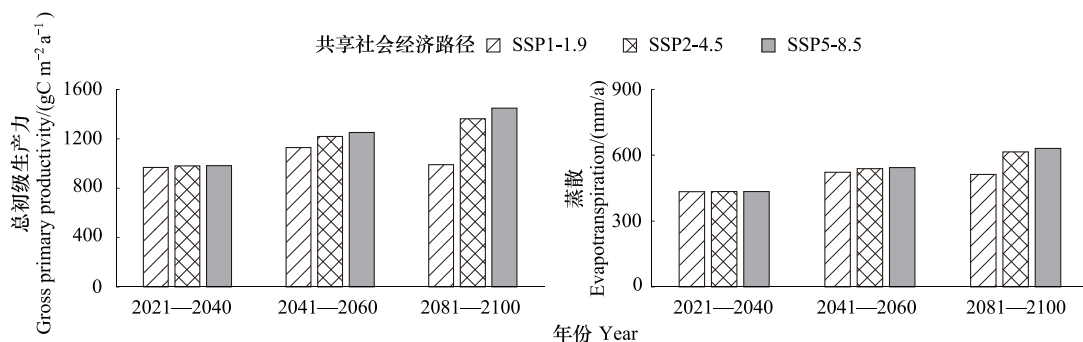


图 3 不同共享社会经济路径(SSPs)情景下 GPP 和 ET 的年均值

Fig.3 Annual mean GPP and ET under different Shared Socio-economic Pathways (SSPs) scenarios

2021—2100 年盐池荒漠草原区人工灌丛生态系统在不同排放情景下的 GPP 年内变化如图 4 所示,从中可以看出,不管哪种排放情景和哪一时期,GPP 在年内都表现出一个规律的单峰增长形态,其年内变化特征

与以往研究得出的该区域历史时期 GPP 年内变化规律一致<sup>[20]</sup>。在 4—10 月的人工灌丛生长期内,5—9 月的 GPP 相对较高,这几个月是人工灌丛生产力最旺盛的月份,其中 8 月 GPP 达到年内最高值。在 21 世纪早期,三种排放情景对 GPP 的影响差异较小;21 世纪中期,不同排放情景下 GPP 的差异逐渐显现,即人类活动排放强度逐渐开始对人工灌丛生态系统的生产力产生影响;而到 21 世纪末期,中、高排放情景会显著增强 GPP,明显高于低排放情景下的各月 GPP,即人类活动排放强度对人工灌丛生态系统的生产力影响完全显现。

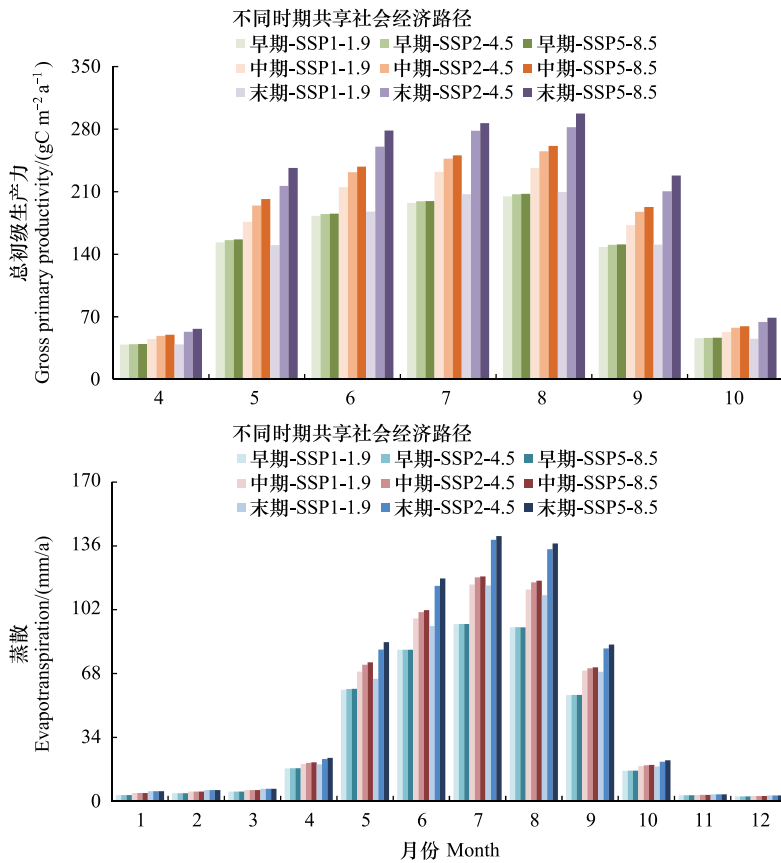


图 4 不同 SSPs 情景下 GPP 和 ET 的年内变化

Fig.4 Monthly GPP and ET under different SSPs scenarios

### 2.3.2 未来气候变化对 ET 的影响

SSP1-1.9、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 气候情景下未来各时期的 ET 变化规律如图 3 所示。由图可知,盐池荒漠草原区人工灌丛生态系统在 21 世纪早期、中期和末期的年平均 ET 值基本呈现逐期递增的趋势。在 21 世纪早期,ET 在三种排放情景下的年均值模拟结果相差不大,在 433.38—434.14  $\text{mm/a}$  之间;在 21 世纪中期,三种排放情景下的 ET 逐渐拉开差距,年均值在 522.03—543.40  $\text{mm/a}$  之间;在 21 世纪末期,中、高排放情景与低排放情景下的 ET 年均值差异非常明显,高排放情景下的 ET 年均值比低排放情景下的 ET 年均值高出 118.50  $\text{mm/a}$  (图 3)。不同排放情景和不同时期的 ET 年内变化情况如图 4 所示,ET 在年内也表现出了和 GPP 一样的变化规律,在 4—10 月的生长期数值较高,尤以 5—9 月最为显著。与 GPP 不同的是 ET 在 7 月达到最顶峰,这是因为 7 月份气温最高,土壤蒸发年内最大,而 8 月份灌生长最为旺盛,植被生产力最大。不同排放情景对 21 世纪早期的逐月 ET 影响不大,到了中期开始有所显现,而到了末期则明显会影响逐月 ET,这一规律与年尺度上的结果一致。综上所述,未来在持续增温和降水增加的趋势下,盐池荒漠草原区人工灌丛生态系统的 GPP 和 ET 均会持续增加的态势,虽然增温会抑制 GPP,但降水量的成倍强烈增加依然会促进 GPP 的增加;而人类活动排放强迫对碳水循环的影响需要长时间积累,即在 21 世纪早期、中期和末期的三个阶段,排放强迫对碳水循环的影响会越来越强。

### 3 讨论

#### 3.1 增温会抑制碳水循环

气候变化通过改变陆地生态系统的碳水循环过程,进而影响到生态系统 GPP 分布格局,并改变区域水资源分布状况,引发陆地生态系统对气候变化和 CO<sub>2</sub> 浓度增加等的进一步反馈。现有研究表明,增温会对草地生态系统的碳循环产生影响<sup>[27-28]</sup>,但在不同地区得出结果不尽相同。Wu 等<sup>[29]</sup>通过 Meta 分析得出,增温在大多数情况下对草地生产力产生负面影响。但高寒草地的一些研究结果显示,气温升高可以提高草地生产力。Mowl 等<sup>[30]</sup>发现增温并不是简单的对草地生产力产生负面影响,其与降水具有强烈的交互作用,可见,草地生态系统的水分条件在很大程度上决定着增温对其生产力是正面影响还是负面影响。盐池荒漠草原区由于沙土的保水能力差,增温会进一步加剧人工灌丛生态系统的干旱胁迫,进而对 GPP 产生抑制作用。本研究模拟得出 GPP 随气温上升而降低,即增温会抑制荒漠草原区人工灌丛生态系统的生产力,当气温增加 3 °C 后,可能会导致人工灌丛生产力彻底奔溃,引起生态系统结构和功能的彻底退化(表 3、图 2)。叶兵等<sup>[31]</sup>认为气温上升会导致植物叶片内部水汽压的急剧增大,相比于稳定的大气水汽压,两者之间的饱和差会大大增加,进而使得植物的蒸腾作用显著地提高,但在干旱区植物的水分利用策略可能有所不同。

从模型机理来看, Biome-BGC 使用 Farquhar 叶片光合模型模拟 GPP, 由于受到增温的影响, 与光合作用有关的酶活性降低, 进而对 GPP 产生抑制作用。而 Biome-BGC 使用 Penman-Monteith 模型模拟水循环过程, 在模拟增温条件下, 理论上会引起水汽压亏缺增大, 土壤蒸发和冠层截留蒸发的动力增强, 但增温又会抑制植物的光合过程, 减弱植物蒸腾量, 进而导致增温有抑制 *ET* 的作用, 只是作用非常微弱(图 2)。增温抑制碳水循环的模拟结果也符合宁夏盐池县的实际, 研究区处在半干旱的荒漠草原区, 区域气候干旱, 多年平均降水量为 296.40 mm, 而模拟的多年 *ET* 均值为 293.28 mm, 仅 *ET* 耗水就接近降水供给量, 人工灌丛生态系统的总耗水量甚至在一些时期会超过供水量<sup>[17]</sup>。在这种极限耗水模式下, 增温带来的蒸发动力对其促进作用微弱, 反而因增温抑制光合, 进而减弱蒸腾, 并在一定程度上抑制了生态系统的总 *ET*。虽然 Biome-BGC 模型基于生态、生物及气象等领域长期实验得出的规律, 对光合、分配、死亡、分解和呼吸等碳循环过程及降水分配、植物蒸腾、冠层截留蒸发和土壤蒸发等水循环过程进行定量模拟, 具有较强的普适性。针对宁夏盐池荒漠草原区人工灌丛生态系统的特性, 丹杨等<sup>[32]</sup>实测和改进了 Biome-BGC 模型中部分生理生态参数, 袁洪艺等<sup>[20]</sup>又进一步利用涡度相关通量观测的结果, 使用参数估计(PEST)对模型参数进行优化, 这些改进极大地提升了模型本地化效果和模拟精度。当然, 由于模型是对真实生态过程的定量描述, 其从本质上无法完全逼近真实生态过程, 因此发展和改进模型机理是提高模拟精度的根本路径, 如植物-土壤-大气间碳交换(CEVSA)模型改进生态系统水碳交换关键过程的定量表达方法, 在模拟陆地生态系统碳循环过程时有优异的表现<sup>[33-34]</sup>。

#### 3.2 持续的降水增加会加速碳水循环

在干旱地区, 降水以及由此产生的土壤水分动态是植被变化的主要限制性因素<sup>[35]</sup>, 强降水事件会通过补给土壤水来促进草地 GPP<sup>[36]</sup>。Wu 等<sup>[29]</sup>收集了全球 85 个站点的观测和模拟实验数据, 得出降水增加可以增加光合和呼吸作用, 加速生态系统碳水循环过程。但是, 降水增加的强度和多长时间累积会对生态系统碳水循环过程产生质的改变尚有很大不确定性。本研究从当前气候背景下的模拟得出, 降水增加会增强荒漠草原区人工灌丛生态系统的 *ET*, 但在增温胁迫条件(1—3 °C)下, 降水增加 15% 也不会提升生态系统的生产力。在当前气温和降水增加的线性趋势下(图 1), 经过近一个世纪的持续气候变化, 21 世纪末期将增温 1.31 °C, 降水将增加 144.24%, 这种长时间尺度的降水增加则会彻底加速荒漠草原区人工灌丛生态系统的碳水循环过程, 即在未来长期气候变化情景下, 降水增加会促进生态系统 GPP 和 *ET*(图 3)。

从现实情况来看, 中国西北地区的“暖湿化”会缓解干旱区的水资源短缺状况, 增加土壤可利用水分, 增强水资源匮乏区的各类生态系统的生产力, 荒漠草原区人工灌丛生态系统也不例外。Biome-BGC 模型所模拟的生态系统蒸散(*ET*)是蒸发(*E*)和蒸腾(*T*)的总和, 气候变化对 *ET* 的影响实质上是对 *E* 和 *T* 影响的累积,



康满春等<sup>[9]</sup>通过模拟气候变化对  $E$  和  $T$  的影响,发现降水增加导致  $E$  和  $T$  均增加,两者叠加后的  $ET$  对降水增加的响应也为正向,这与本研究的结果一致。在蒸发动力强盛、蒸腾需求大的盐池荒漠草原区,人工灌丛生态系统只有降水和凝结两种水分获取途径,故降水是限制  $ET$  的主要原因,降水的增加势必会增强  $ET$ ,从而加速生态系统水循环强度。

### 3.3 人为 $\text{CO}_2$ 排放增加对碳水循环的影响机制

盐池荒漠草原人工灌丛入侵背景下的生态系统碳水循环特征及受气候变化影响已有报道<sup>[14-15,17,37]</sup>,但鲜有考虑大气  $\text{CO}_2$  浓度升高对生态系统碳水循环的影响。然而,大气  $\text{CO}_2$  作为植物光合作用的原料,其浓度升高对植物起着“施肥”作用,能够在短期内促进植被生产力和生物量的增加<sup>[38]</sup>。本研究根据 CMIP6 气候情景,模拟了荒漠草原区人工灌丛生态系统 GPP 和  $ET$  对未来大气  $\text{CO}_2$  浓度升高的响应,从 21 世纪早期的模拟结果来看,大气  $\text{CO}_2$  浓度升高对碳水循环过程的影响均不明显,但随着气候变化的持续发展,在 21 世纪中期和末期,碳水循环过程开始显著响应大气  $\text{CO}_2$  浓度升高,这种响应不仅表现年 GPP 和  $ET$  的总量上,也表现在月 GPP 和  $ET$  的变化上(图 3、图 4),也就是说在区域气候持续“暖湿化”的变化背景下,大气  $\text{CO}_2$  浓度升高将成为盐池荒漠草原区人工灌丛碳水循环的另一控制因素。

本研究发现长期的大气  $\text{CO}_2$  浓度升高会促进生态系统生产力和蒸散耗水的增强,这与前人在不同地区、使用不同方法得出的结果一致。例如,Luo 等利用陆地生物圈模型模拟了大气  $\text{CO}_2$  浓度对青藏高原 GPP 年际变化和趋势的影响,结果表明,大气  $\text{CO}_2$  浓度上升的施肥效应会增强植物光合作用和生态系统 GPP<sup>[39-40]</sup>。在水循环方面,气孔作为蒸散过程中植物与大气进行水碳交换的通道,其开闭程度受控于植物生理和相关环境要素。一些植物的气孔导度会随着大气  $\text{CO}_2$  浓度的升高而降低,导致蒸腾减少;也有一些植物总的叶面积会随着大气  $\text{CO}_2$  浓度的升高而增加,从而抵消因气孔导度下降引起的蒸腾减少<sup>[40-41]</sup>。本研究发现, $ET$  对长期的大气  $\text{CO}_2$  浓度升高有响应,但其机制仍然不明。一方面,在气候持续“暖湿化”背景下,人工灌丛植被光合生产增强确实加速了植被蒸腾过程;另一方面“暖湿化”导致的降水量增加,引起土壤蒸发加大,这一过程与大气  $\text{CO}_2$  浓度升高趋势同步,但这种同步不存在内在驱动机制。

## 4 结论

基于参数优化后的 Biome-BGC 模型,考虑不同气候变化情景和未来趋势,模拟了盐池荒漠草原区人工灌丛生态系统 GPP 和  $ET$  对气候变化的响应,得出结论如下:(1)增温会显著抑制生态系统的 GPP,大幅度的增温( $3\text{ }^\circ\text{C}$ )会导致 GPP 急剧下降,但增温对  $ET$  的抑制作用非常微弱;(2)降水是限制  $ET$  变化的重要因素,相对于增温诱发干旱胁迫所引起的  $ET$  小幅下降,降水多寡则更直接地控制着生态系统的  $ET$  大小;(3)中国西北地区未来气候的“暖湿化”趋势和大气  $\text{CO}_2$  浓度升高会对荒漠草原区人工灌丛生态系统产生综合影响,并增强生态系统的碳水通量。

### 参考文献(References):

- [1] Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y E, Bjerke J W, Chen A P, Ciais P, Tømmervik H, Nemani R R, Myneni R B. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2019, 1(1): 14-27.
- [2] Ahlström A, Raupach M R, Schurgers G, Smith B, Arneth A, Jung M, Reichstein M, Canadell J G, Friedlingstein P, Jain A K, Kato E, Poulter B, Sitch S, Stocker B D, Viogy N, Wang Y P, Wiltshire A, Zaehle S, Zeng N. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land  $\text{CO}_2$  sink. *Science*, 2015, 348(6237): 895-899.
- [3] Cui J P, Piao S L, Huntingford C, Wang X H, Lian X, Chevuturi A, Turner A G, Kooperman G J. Vegetation forcing modulates global land monsoon and water resources in a  $\text{CO}_2$ -enriched climate. *Nature Communications*, 2020, 11: 5184.
- [4] Zeng Z Z, Piao S L, Li L Z X, Wang T, Ciais P, Lian X, Yang Y T, Mao J F, Shi X Y, Myneni R B. Impact of earth greening on the terrestrial water cycle. *Journal of Climate*, 2018, 31(7): 2633-2650.
- [5] Reich P B, Hobbie S E, Lee T D, Rich R, Pastore M A, Worm K. Synergistic effects of four climate change drivers on terrestrial carbon cycling. *Nature Geoscience*, 2020, 13(12): 787-793.
- [6] Li C J, Fu B J, Wang S, Stringer L C, Wang Y P, Li Z D, Liu Y X, Zhou W X. Drivers and impacts of changes in China's drylands. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(12): 858-873.
- [7] Bai Y F, Cotrufo M F. Grassland soil carbon sequestration: current understanding, challenges, and solutions. *Science*, 2022, 377(6606): 603-608.

- [ 8 ] Wang Z Q, Chang J F, Peng S S, Piao S L, Ciais P, Betts R. Changes in productivity and carbon storage of grasslands in China under future global warming scenarios of 1.5°C and 2°C. *Journal of Plant Ecology*, 2019, 12(5): 804-814.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] Eyring V, Bony S, Meehl G A, Senior C A, Stevens B, Stouffer R J, Taylor K E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(5): 1937-1958.
- [ 11 ] O'Neill B C, Tebaldi C, van Vuuren D P, Eyring V, Friedlingstein P, Hurtt G, Knutti R, Kriegler E, Lamarque J F, Lowe J, Meehl G A, Moss R, Riahi K, Sanderson B M. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(9): 3461-3482.
- [ 12 ] 孙倩, 张美玲, 王鑫婧, 徐士博. 不同气候情景下甘肃草地碳收支时空模拟与预测. *环境科学*, 2023, 44(10): 5842-5851.
- [ 13 ] 桑春云, 王倩, 金淑媛, 张占豪, 郭建茂. 三江源地区作物参考蒸散量的时空分布特征变化及未来趋势预测. *节水灌溉*, 2022(11): 94-103, 110.
- [ 14 ] Du L T, Ma L L, Pan H Z, Qiao C L, Meng C, Wu H Y, Tian J, Yuan H Y. Carbon-water coupling and its relationship with environmental and biological factors in a planted *Caragana liouana* shrub community in desert steppe, northwest China. *Journal of Plant Ecology*, 2022, 15(5): 947-960.
- [ 15 ] Du L T, Zeng Y J, Ma L L, Qiao C L, Wu H Y, Su Z B, Bao G. Effects of anthropogenic revegetation on the water and carbon cycles of a desert steppe ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 300: 108339.
- [ 16 ] 乔成龙, 杜灵通, 潘海珠, 马成龙, 田静, 袁洪艺, 吴宏玥. 基于 SEBAL 模型评估干旱半干旱区人工灌丛植被对地表蒸散的影响. *农业工程学报*, 2021, 37(10): 110-117.
- [ 17 ] 马成龙, 杜灵通, 丹杨, 王乐, 乔成龙, 吴宏玥. 基于茎流-蒸渗仪法的荒漠草原带人工灌丛群落蒸散特征. *植物生态学报*, 2020, 44(8): 807-818.
- [ 18 ] Wang Y S, Cui X, Zhang X R, Wen Q. Exploring the sustainable use strategy of scarce water resources for rural revitalization in Yanchi County from arid region of northwest China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(23): 16347.
- [ 19 ] 郑琪琪, 杜灵通, 官菲, 丹杨, 王乐. 基于 GF-1 遥感影像的宁夏盐池柠条人工林景观特征研究. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2019, 39(1): 152-159.
- [ 20 ] 袁洪艺, 杜灵通, 潘海珠, 乔成龙, 田静, 易志远, 吴宏玥, 张祎, 施光耀, Irumva Olivier. 基于参数优化的人工灌丛生态系统碳水通量模拟. *生态学报*, 2023, 43(13): 5546-5557.
- [ 21 ] 聂明鹤, 沈艳, 陆颖, 王科鑫, 张小菊. 宁夏盐池县荒漠草原区不同群落优势植物叶片-土壤生态化学计量特征. *草地学报*, 2021, 29(1): 131-140.
- [ 22 ] White M A, Thornton P E, Running S W, Nemani R R. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. *Earth Interactions*, 2000, 4(3): 1-85.
- [ 23 ] Peckham S D, Gower S T. Simulated long-term effects of harvest and biomass residue removal on soil carbon and nitrogen content and productivity for two Upper Great Lakes forest ecosystems. *GCB Bioenergy*, 2011, 3(2): 135-147.
- [ 24 ] 崔艳红. 总体国家安全观视角下我国气候变化治理研究. *区域与全球发展*, 2022, 6(6): 20-35, 155.
- [ 25 ] Qin J C, Su B D, Tao H, Wang Y J, Huang J L, Li Z J, Jiang T. Spatio-temporal variations of dryness/wetness over Northwest China under different SSPs-RCPs. *Atmospheric Research*, 2021, 259: 105672.
- [ 26 ] Nicholls Z, Meinshausen M, Lewis J, Smith C J, Forster P M, Fuglested J S, Rogelj J, Kikstra J S, Riahi K, Byers E. Changes in IPCC scenario assessment emulators between SR1.5 and AR6 unraveled. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(20): e2022GL099788.
- [ 27 ] Piao S L, Tan K, Nan H J, Ciais P, Fang J Y, Wang T, Vuichard N, Zhu B. Impacts of climate and CO<sub>2</sub> changes on the vegetation growth and carbon balance of Qinghai-Tibetan grasslands over the past five decades. *Global and Planetary Change*, 2012, 98/99: 73-80.
- [ 28 ] 周夏飞, 於方, 曹国志, 杨威杉, 周颖. 2001—2015 年青藏高原草地碳源/汇时空变化及其与气候因子的关系. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 76-81.
- [ 29 ] Wu Z T, Dijkstra P, Koch G W, Peñuelas J, Hungate B A. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 927-942.
- [ 30 ] Mowl W, Blumenthal D M, Cherwin K, Smith A, Symstad A J, Vermeire L T, Collins S L, Smith M D, Knapp A K. Climatic controls of aboveground net primary production in semi-arid grasslands along a latitudinal gradient portend low sensitivity to warming. *Oecologia*, 2015, 177(4): 959-969.
- [ 31 ] 叶兵. 北京延庆小叶杨与刺槐林的蒸腾耗水特性与水量平衡研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [ 32 ] 丹杨, 杜灵通, 王乐, 马成龙, 乔成龙, 吴宏玥, 孟晨. 荒漠草原人工灌丛化对蒸散发及其组分的影响——以盐池县为例. *生态学报*, 2020, 40(16): 5638-5648.
- [ 33 ] 王军邦, 杨屹涵, 左婵, 顾峰雪, 何洪林. 气候变化和人类活动对中国陆地生态系统总初级生产力的影响厘定研究. *生态学报*, 2021, 41(18): 7085-7099.
- [ 34 ] 顾峰雪, 陶波, 温学发, 于贵瑞, 李克让. 基于 CEVSA2 模型的亚热带人工针叶林长期碳通量及碳储量模拟. *生态学报*, 2010, 30(23): 6598-6605.
- [ 35 ] 彭俊杰, 何兴元, 陈振举, 崔明星, 张先亮, 周长虹. 华北地区油松林生态系统对气候变化和 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应——基于 BIOME-BGC 模型和树木年轮的模拟. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1733-1742.
- [ 36 ] Hao Y B, Zhou C T, Liu W J, Li L F, Kang X M, Jiang L L, Cui X Y, Wang Y F, Zhou X Q, Xu C Y. Aboveground net primary productivity and carbon balance remain stable under extreme precipitation events in a semiarid steppe ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 240/241: 1-9.
- [ 37 ] 王乐, 杜灵通, 丹杨, 官菲, 郑琪琪, 马成龙, 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.
- [ 38 ] 李剑泉, 李智勇, 易浩若. 森林与全球气候变化的关系. *西北林学院学报*, 2010, 25(4): 23-28.
- [ 39 ] Jia B H, Luo X, Wang L H, Lai X. Changes in water use efficiency caused by climate change, CO<sub>2</sub> fertilization, and land use changes on the Tibetan Plateau. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2023, 40(1): 144-154.
- [ 40 ] Luo X, Jia B H, Lai X. Contributions of climate change, land use change and CO<sub>2</sub> to changes in the gross primary productivity of the Tibetan Plateau. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2020, 13(1): 8-15.
- [ 41 ] Leipprand A, Gerten D. Global effects of doubled atmospheric CO<sub>2</sub> content on evapotranspiration, soil moisture and runoff under potential natural vegetation. *Hydrological Sciences Journal*, 2006, 51(1): 171-185.