

DOI: 10.20103/j.stxb.202303200524

鲁韦坤, 李蒙, 程晋昕, 窦小东. 基于 BEPS 模型的云南省碳源/汇时空特征及其适用性分析. 生态学报, 2024, 44(4): 1441-1455.

Lu W K, Li M, Cheng J X, Dou X D. Spatio-temporal characteristics and applicability of carbon source/sink in Yunnan Province based on BEPS model. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1441-1455.

基于 BEPS 模型的云南省碳源/汇时空特征及其适用性分析

鲁韦坤¹, 李 蒙^{1,*}, 程晋昕¹, 窦小东²

¹ 云南省气候中心, 昆明 650034

² 云南省气象科技服务中心, 昆明 650034

摘要: 净初级生产力(NPP)和净生态系统生产力(NEP)是估算陆地生态系统碳源/汇的重要指标, 云南为我国碳汇的主要区域之一, 开展云南 NPP 和 NEP 时空变化特征分析对科学评估陆地生态系统碳源/汇功能, 以及开展碳排放交易具有重要意义。基于 BEPS 模型 1981—2019 年 NPP 和 NEP 产品, 采用线性趋势分析、文献对比等方法, 研究云南 NPP 和 NEP 时空变化特征及其在云南的适用性。结果表明: (1) 1981—1999 年云南 NPP 和 NEP 呈水平波动, 2000 年后云南 NPP 和 NEP 呈明显波动上升趋势, 2000—2019 年云南 NPP 高值区域主要分布在西部和南部, 而 NEP 高值区则主要分布在东部和西部局部地区; (2) 2000—2019 年云南 NPP 和 NEP 除西北部部分地区为下降趋势外, 其余大部地区为上升趋势; (3) 云南 NPP 峰值出现在 7、8 月, 谷值出现在 2 月, NEP 峰值出现月份与 NPP 基本相同, 但谷值出现月份较 NPP 滞后 1—3 个月, 6—10 月是云南碳汇的主要月份; (4) BEPS 模型估算的 NPP 与目前广泛应用的 CASA 和遥感模型结果较为一致, 时空变化特征与云南生态恢复措施和气候特征吻合, 其估算的 NEP 与陆地生物圈模型(IBIS)模型和中国通量观测研究联盟(ChinaFLUX)碳水通量观测数据较为接近, 时空变化大部地区与云南生态恢复措施和气候特征基本吻合, 表明 BEPS 模型在云南具有较好的适用性。

关键词: BEPS 模型; NPP; NEP; 适用性; 云南

Spatio-temporal characteristics and applicability of carbon source/sink in Yunnan Province based on BEPS model

LU Weikun¹, LI Meng^{1,*}, CHENG Jinxin¹, DOU Xiaodong²

¹ Yunnan Climate Center, Kunming 650034, China

² Yunnan Meteorological Service Center, Kunming 650034, China

Abstract: Net primary productivity (NPP) and net ecosystem productivity (NEP) are important indicators for estimating the carbon source/sink of terrestrial ecosystems. NEP is the net carbon absorption of vegetation ecosystems, which can quantitatively describe the carbon source/sink capacity of vegetation ecosystems. It is great significance to analyze the spatiotemporal variation characteristics of NPP and NEP for scientific assessment of carbon source/sink function of terrestrial ecosystem and carbon emission trading, because Yunnan is one of the main regions of carbon sink in China. Based on the boreal ecosystem productivity simulator (BEPS) of gross primary productivity (GPP), NPP and NEP products from 1981 to 2019, the spatiotemporal variation characteristics of NPP and NEP and their applicability in Yunnan were studied by using linear trend analysis, literature comparison, and other methods. The results show that: (1) the NPP and NEP in

基金项目: 云南省科技厅重点研发计划项目(202203AC100005); 云南省气象局创新团队(2022CX05); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J047)

收稿日期: 2023-03-20; **网络出版日期:** 2023-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: limeng5945@sina.com

#BEPS 模型: 北方陆地生态系统碳平衡的计算机模拟系统。

Yunnan fluctuated horizontally from 1981 to 1999, and increased significantly after 2000. The average values of NPP and NEP per unit area from 2000 to 2019 were 739.0 gC/m^2 and 70.1 gC/m^2 , respectively, with a total amount of 0.291 Pg C/a and 0.028 Pg C/a . Compared to 1981 to 1999, it increased by 12.4% and 150.4% respectively. The high value areas of NPP were mainly distributed in the west and south, most regions had an annual average NPP of over 700 gC/m^2 , while the NEP were mainly distributed in the eastern and partial western from 2000 to 2019. (2) During the 2000 to 2019, most areas of Yunnan NPP and NEP showed an upward trend, except for the northwest, where NPP showed a downward trend. (3) The peak value of NPP occurred in July or August, and the valley value occurred in February. The month of NEP peak occurrence was basically the same as NPP, but the valley month was delayed 1—3 months. June to October were the main months of carbon sink. (4) The NPP simulated by the BEPS model was consistent with the widely used Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) and remote sensing models, and the spatiotemporal change characteristics were conformed with the ecological restoration measures and climate characteristics of Yunnan. The simulated NEP was same as the integrated biosphere simulator (IBIS) and the carbon and water flux observation data of ChinaFLUX. Most of the spatiotemporal changes were also basically consistent with the ecological restoration measures and climate characteristics of Yunnan, indicating that the BEPS model had good applicability in Yunnan.

Key Words: boreal ecosystem productivity simulator; net primary productivity; net ecosystem productivity; applicability; Yunnan

陆地生态系统碳循环是全球碳循环的重要组成部分,目前相关研究从 GPP(总生产力)、NPP(净初级生产力)的研究,进一步发展到对 NEP(净生态系统生产力)的估算,以及定量的评估气候因素变化、人类活动对植被碳储量的影响^[1-3]。NEP 是 NPP 与 R_h (土壤异养呼吸)的差值,是植被生态系统碳的净吸收,可定量描述植被生态系统碳源/汇能力,当 $NEP > 0$ 时,表示生态系统为碳汇功能,反之则为碳源。因此,NEP 的准确估算有助于定量评估区域植被生态系统的固碳潜力。

目前国内外发展了大量森林生态系统碳循环模型,主要包括统计模型和过程模型^[4]。统计模型虽然简单直观,但其完全依赖于地面观测数据,在不同的区域不具有普适性。过程模型基于植被生理生态学理论,综合考虑碳循环的多种影响因子,集成多个过程,结合气候、土壤和植被生理生态参数,能模拟生态系统与大气间的相互作用。因此过程模型以其完整的理论框架、严谨的结构分析和清晰的过程机理,逐渐被广泛应用。过程模型又可分为地球化学过程模型(CENTURY、BEPS、Biome-BGC 等),陆面物理过程模型(AVIM、IBIS 等),生物过程模型(Biome、MAPSS 等)^[4],已有较多的研究基于不同的过程模型对中国陆地生态系统碳源/汇进行了分析^[5-13],就目前研究进展来看,关于 NPP 估算、时空变化特征的研究较多也较为成熟,但由于 R_h 估算较为困难,导致 NEP 研究起步较晚,研究也相对较少。近年来出现了一些新的碳源/汇的评估方法,如 Zeng 等^[14]应用 FLUXNET2015 中的 GPP、 R_h 和 NEP,遥感 LAI,光能利用率,气温、相对湿度和太阳辐射等数据,通过机器学习方法,研究了全球 GPP、 R_h 和 NEP 空间分布特征;Zhang 等^[15]利用 GOSAT 遥感资料研究了 2009—2010 年中国生态系统的碳汇能力;Wang 等^[16]结合碳监测数据、遥感数据等,利用世界领先的碳同化模型证明了中国陆地生态系统碳汇可能被严重低估。但不同的模型和方法所得结果差异较大^[17],给学者们正确认识中国陆地生态系统碳源/汇能力造成了困扰。

云南作为我国四大林区之一,是我国主要的碳汇区域^[18],2021 年云南林地面积达到 2826.67 万 hm^2 ,森林蓄积量 20.67 亿 m^3 ,森林覆盖率达到 65.04% ^[19],因此开展云南植被碳源/汇时空变化研究,对深刻认识和了解云南陆地生态系统碳源/汇能力,以及开展碳排放交易具有重要的科学意义。但由于云南地形地貌复杂,立体气候显著导致植被类型复杂多样,目前涉及云南陆地生态系统碳源/汇空间特征大多数研究,一是存在空间分辨率不够精细,不能有效体现云南复杂地形和立体气候对陆地生态系统碳源/汇的影响,导致碳源/汇估算精度存疑;二是不同研究碳源/汇估算总量和空间分布存在明显差异,模型的适用性和合理性缺乏验证;三

是以云南作为研究区域和月尺度的碳源/汇空间变化研究未见报道。因此利用高分辨率且适用于云南的 NEP 估算模型,定量估算并分析云南生态系统碳源/汇的时空变化具有重要的理论与实践意义。

BEPS(Boreal ecosystem productivity simulator)模型是在 Forest-BGC 过程模型的基础上发展起来的生态遥感耦合模型,多用于生态系统中碳、水的循环过程模拟。该模型引入了先进的辐射传输理论和精细的光合作用模块,融合了多源数据作为模型的输入,并耦合了碳水过程模块,模型时间分辨率为日,能较好的模拟较大空间尺度陆地生态系统净初级生产力。但该模型未考虑现实生活中的各种扰动因子及林龄对森林生态系统生产力的影响,其模拟精度强烈依赖于土地覆被类型等驱动因子的准确性^[4]。近年来随着 BEPS 模型在不同尺度和生态类型碳源/汇估算中的广泛应用^[20-27],为云南陆地生态系统碳源/汇精细化的研究提供了支撑。本研究以高空间分辨率 BEPS 模型产品为基础,对 1981—2019 年时段云南陆地生态系统的 NPP、NEP 时空动态变化及其在云南的适用性进行分析,探索云南陆地生态系统碳源/汇时空变化趋势,量化云南陆地生态系统的碳固定能力,揭示碳源/汇变化规律,从而为云南碳源/汇评估提供数据支持和研究依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源及处理

本研究使用国家生态科学数据中心(<http://www.nesdc.org.cn>)基于 BEPS 模型计算的 1981—2019 年全球逐日 GPP、NPP 和 NEP 数据产品。该产品利用植被参数(叶面积指数、聚集度指数、地表覆盖)遥感数据、气象数据和大气 CO₂浓度等,驱动日步长的机理性生态模型 BEPS,模拟生成全球 1981—2019 年逐日 GPP、NPP 和 NEP 数据产品,空间分辨率 0.072727°。本数据集从 1981 年 1 月 1 日开始至 2019 年 12 月 31 日,每年 365 期数据,范围为全球。NPP 和 NEP 采用日累加方式计算和存储,将当日与前一日 NPP(NEP)相减再乘以比例因子 0.1,即可得到当日 NPP(NEP)值,单位为 gC m⁻²d⁻¹^[28-30]。为分析云南月 GPP、NPP 和 NEP 时空变化特征,首先计算每年逐日 GPP、NPP 和 NEP,在此基础上通过日值计算 1981—2019 年逐月 GPP、NPP 和 NEP。

MODIS-NPP(MYD17A3)数据来自(<https://www.ntsug.umd.edu>),空间分辨率为 0.0083°,通过裁剪和重投影等预处理,得到 2000—2015 年云南年 NPP 数据集。云南 125 个国家级基本气象站月、年平均气温、降水量和站点信息来自云南气象信息中心,其中年平均气温、降水量空间插值采用 AnuSplin 软件计算而成。

表 1 研究所用数据相关信息汇总
Table 1 Information related to the data used in this study

数据 Data	格式 Format	空间分辨率 Spatial resolution	时间分变率 Time resolution	范围 Scope	数据时段 Data phase	数据来源 Data sources	备注 Notes
BEPS GPP、NPP、NEP	img	0.073°	日	全球	1981—2019	http://www.nesdc.org.cn	基于日数据统计月、年数据
MODIS NPP	GeoTIFF	0.0083°	年	全球	2000—2015	https://www.ntsug.umd.edu	MYD17A3 产品
平均气温、降水量 Average temperature and precipitation	xls		月、年	云南	1981—2019	云南气象信息中心	云南 125 个国家级基本气象站

BEPS:北方生态系统生产力模拟器 Boreal ecosystem productivity simulator;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;MODIS:中分辨率成像光谱仪 Moderate-resolution imaging spectroradiometer

1.2 研究方法

1.2.1 BEPS 逐月、年 GPP、NPP 和 NEP 格点平均值和总量计算

在 ArcMap 平台下,利用云南行政边界对逐月、年 GPP、NPP 和 NEP 数据进行裁剪,提取云南区域逐月 GPP、NPP 和 NEP,其中年值采用每年第 365 天进行裁剪提取。然后利用 ArcMap 空间分析模块中的区域统计功能,统计云南区域逐月、年 GPP、NPP 和 NEP 格点平均值,利用栅格计算功能计算年、月平均 GPP、NPP 和 NEP。

1.2.2 云南陆地生态系统碳源/汇时空变化趋势分析

NPP 和 NEP 年变化趋势采用一元线性回归分析,可以分析每个像元的变化趋势,该变化率可定义为 NPP (NEP) 年际变化的最小次方线性回归方程的斜率^[31-33]。本文通过每个像元逐年 NPP (NEP) 值,计算该像元 NPP (NEP) 年际变化趋势,斜率(slope)采用最小二乘法求得,以 NPP 为例,其计算公式如下:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NPP}_i - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \left(\sum_{i=1}^n \text{NPP}_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中,变量 i 为年的序号, NPP_i 表示第 i 年的平均 NPP 值。某像元点的趋势线是这个像元点多年平均 NPP 值用一元线性回归模拟出来的一个总的变化趋势, slope 是这条趋势线的斜率。当 $\text{slope} > 0$ 时,说明 NPP 在时段内呈现上升的趋势; $\text{slope} = 0$ 时,说明 NPP 没有变化; $\text{slope} < 0$ 时, NPP 呈现下降的趋势。

1.2.3 云南陆地生态系统碳源/汇时空变化趋势显著性检验

研究对象是时间序列 NPP 和 NEP, 所得到的结果为每一像元对应的 NPP (NEP) 值与年份的回归系数, 得到的相关系数 r 可以用来检验 NPP (NEP) 变化趋势的可信度^[34]。将 NPP (NEP) 变化趋势和不同显著性水平 ($P=0.05$ 和 $P=0.01$) 叠加分析, 可得到极显著上升、显著上升、变化不显著、显著性下降和极显著性下降 5 种变化趋势组合。本研究利用一元线性回归法分别对时段内云南 NPP、NEP 变化的显著性进行了逐像元的计算和评估。以 NPP 为例, r 其计算公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

式中, n 为样本数, x_i 为年份, $\bar{X}$ 为年份的均值, y_i 为第 i 年 NPP 值, $\bar{Y}$ 为时段平均 NPP 值。

1.2.4 BEPS 模型在云南的适用性评估方法

NPP 和 NEP 模型估算值验证方式大致有与实测值验证、与其它模型研究成果对比和与其它遥感数据对比等^[35], 本文因研究区生态系统类型复杂多样, 每个类型的实测数据获取难度非常困难, 故选取与其他研究成果和与遥感产品进行对比, 并结合云南气候特征, 对 BEPS 模型所估算的 NPP 和 NEP 进行适用性评估。

2 结果与分析

2.1 1981—2019 年云南 NPP 和 NEP 年尺度变化特征

基于 BEPS 模型 1981—2019 年云南单位面积 NPP 和 NEP 平均的值变化见图 1, 从图 1 中可以看出, 云南 NPP 和 NEP 年度变化趋势基本一致。其中 1981—1999 年 NPP 和 NEP 呈水平波动, NPP 和 NEP 分别在 $631.1\text{—}693.1\text{gC/m}^2$ 和 $-13.6\text{—}55.8\text{gC/m}^2$ 之间波动, 除 1998 年 NEP 为负值外, 其余年份均为正值。1981—1999 年云南单位面积 NPP 和 NEP 平均值分别为 657.3gC/m^2 和 28.0gC/m^2 。2000 年后云南单位面积 NPP 和 NEP 平均值呈明显波动上升趋势, 2000—2019 年云南单位面积 NPP 和 NEP 平均值分别为 739.0gC/m^2 和 70.1gC/m^2 。较 1981—1999 年分别增加了 12.4% 和 150.4%。

1981—1999 年云南单位面积 NPP 平均值以每年 1.47gC/m^2 上升, 而 NEP 则以 -0.20gC/m^2 下降 (图 2); 2000 年实施天保工程后, 2000—2019 年云南单位面积 NPP 和 NEP 平均值均呈明显上升趋势, NPP 和 NEP 分别以每年 8.08gC/m^2 和 4.50gC/m^2 上升 (图 3)。鉴于 1981—1999 年 NPP 和 NEP 变化不明显, 故本文重点分析 BEPS 模型 2000—2019 年云南陆地生态系统碳源汇时空变化特征及其在云南的适用性。

云南省总面积为 $39.4 \times 10^4 \text{km}^2$, 通过计算可得云南 2000—2019 年 NPP 和 NEP 总量分别为 0.291PgC/a 和 0.028PgC/a , NPP 空间分布特征见图 4, NPP 高值区域主要分布在云南西部和南部的迪庆州、怒江州、丽江市西部、德宏州、普洱市、西双版纳州和昭通市北部等地区, 大部地区 NPP 年平均值为 700gC/m^2 以上, 其余大部

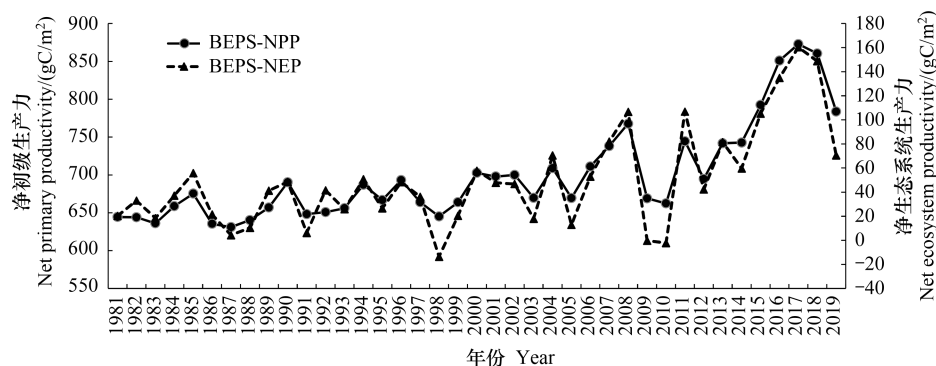


图 1 1981—2019 年云南单位面积 NPP 和 NEP 平均值变化

Fig.1 Change of average NPP and NEP per unit area in Yunnan from 1981 to 2019

BEPS-NPP: BEPS 模型估算的净初级生产力 Net primary productivity simulated by boreal ecosystem productivity simulator; BEPS-NEP: BEPS 模型估算的净生态系统生产力 Net ecosystem productivity simulated by boreal ecosystem productivity simulator

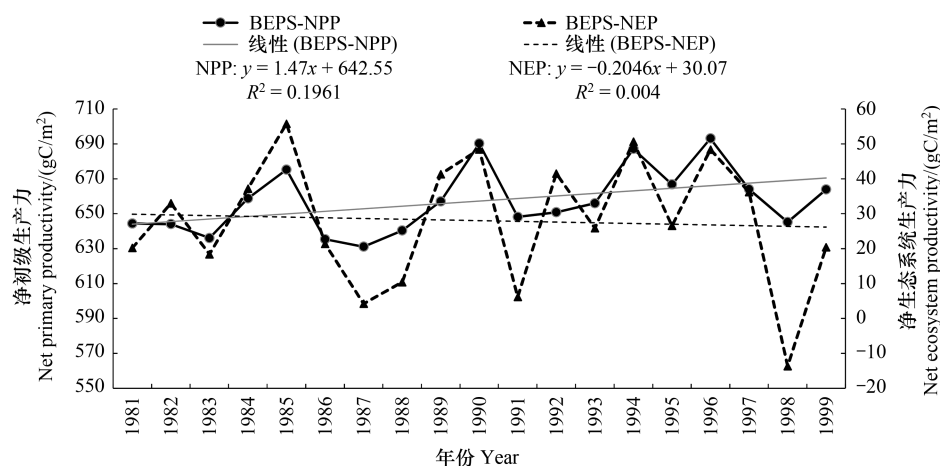


图 2 1981—1999 年云南单位面积 NPP 和 NEP 平均值变化

Fig.2 Annual average NPP and NEP changes per unit area in Yunnan from 1981 to 1999

地区为相对低值区,大部地区 NPP 年平均值小于 $600\text{gC}/\text{m}^2$ 。而 NEP 高、低值分布与 NPP 差异较大(图 5),并非与 NPP 完全对应,云南 NEP 年平均值高值区主要分布在昭通中部以南、曲靖市北部、文山州东部、普洱市中部及西部、保山市西部和丽江市中部等地, NEP 年平均值为 $100\text{gC}/\text{m}^2$ 以上,表明这些地区的碳汇能力较强。

2000—2019 年云南 NPP 一元线性回归趋势值空间分布见图 6,除云南西北部的迪庆州大部、丽江市西部、怒江州北部、大理市东部局部和中部主城区等地区 NPP 为下降趋势外,其余大部地区 NPP 上升趋势均在 $4\text{gC m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 以上,上升速度较快($>14\text{gC m}^{-2}\text{a}^{-1}$)的区域主要分布在云南中部以东和以南的昭通市、曲靖市和文山州。NPP 回归趋势显著性检验见图 7,除城区所在地呈极显著下降外,其余地区均为变化不显著—极显著上升,其中上升速度较快的区域大部地区均为极显著上升。

2000—2019 云南年 NEP 一元线性回归趋势空间分布见图 8,空间分布与 NPP 大致相似,不同之处为西双版纳州局部呈下降趋势,全省大部地区 NEP 变化趋势为 $2\text{—}8\text{gC m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 。NEP 回归趋势显著性检验显示(图 9),与 NPP 相比,通过显著和极显著检验的区域明显偏小,仅变化幅度大于 $4\text{gC m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 的区域通过了显著性检验。

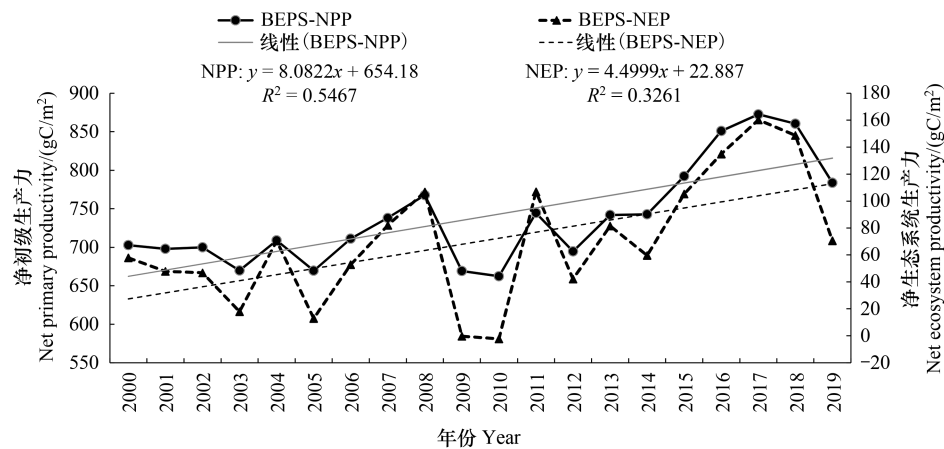


图 3 2000—2019 年云南单位面积 NPP 和 NEP 平均值变化

Fig.3 Annual average NPP and NEP changes per unit area in Yunnan from 2000 to 2019

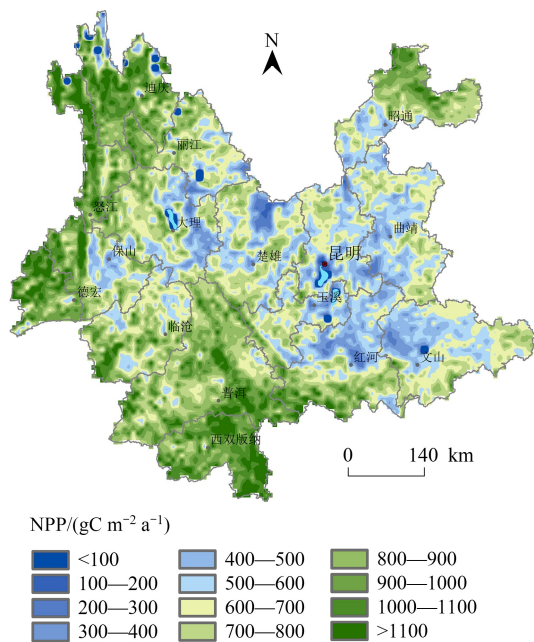


图 4 2000—2019 年云南 NPP 年平均值空间分布

Fig.4 Annual average NPP spatial distribution in Yunnan from 2000 to 2019

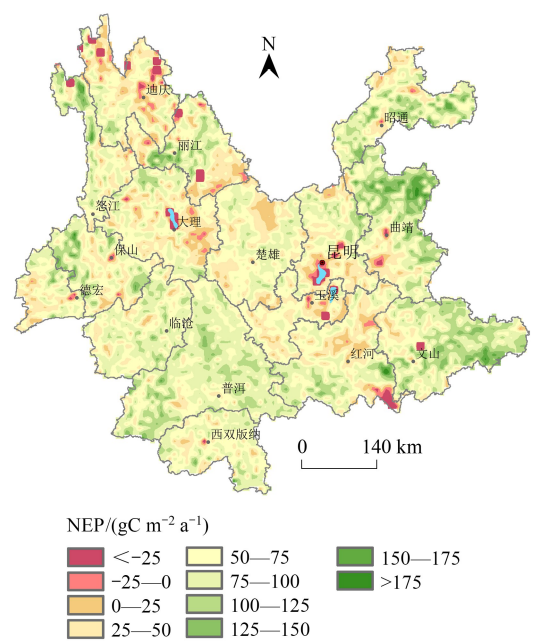


图 5 2000—2019 年云南 NEP 年平均值空间分布

Fig.5 Annual average NEP spatial distribution in Yunnan from 2000 to 2019

2.2 2000—2019 年云南 NPP 和 NEP 月尺度变化特征

基于 BEPS 模型云南 2000—2019 年逐月单位面积 NPP 和 NEP 平均值变化见图 10, 云南 NPP 峰值一般出现在 7、8 月之间, 之后开始持续下降, 除个别年份外, 大部分年份均于 2 月下降到最低值, 之后开始反转上升。NEP 最大值出现月份与 NPP 基本相同, 但最低值出现月份较 NPP 滞后 1—3 个月, 如 2005 年, 2010 年, 2012 年, 2019 年 NEP 最低值出现在 5 月。

从 2000—2019 年多年月平均值来看(图 11), 云南 NPP 峰值为 $105.1\text{gC}/\text{m}^2$, 最低值为 $25.9\text{gC}/\text{m}^2$, 而 NEP 峰值为 $27.9\text{gC}/\text{m}^2$, 最低值为 $-15.5\text{gC}/\text{m}^2$, 除 2—5 月 $\text{NEP} < 0$ 为碳源外, 其他月份 NEP 均 > 0 为碳汇。值得注意的是云南 2—5 月 $R_h (R_h = \text{NPP} - \text{NEP})$ 大于 NPP, 从而导致 NEP 出现负值, 而 6—10 月是云南碳汇的主要月份。

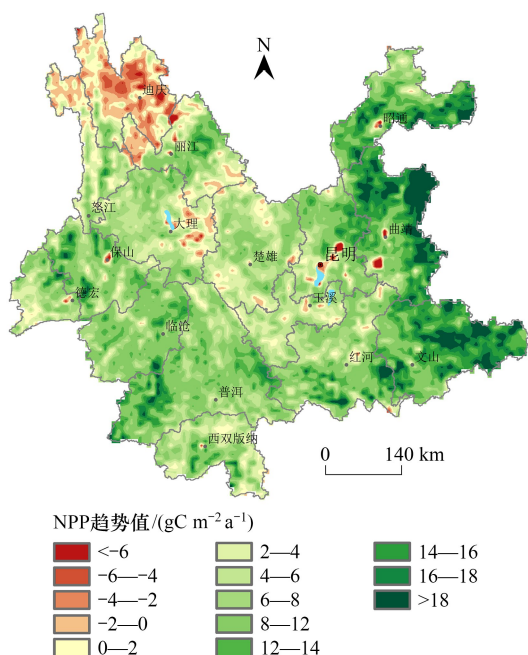


图6 2000—2019年云南NPP一元线性回归趋势

Fig.6 Univariate linear regression trend of NPP in Yunnan from 2000 to 2019

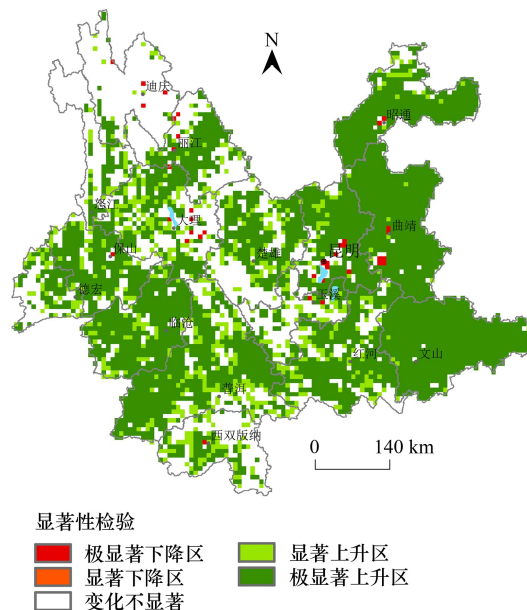


图7 2000—2019年云南NPP一元线性回归趋势显著性检验

Fig.7 Significance test of univariate linear regression trend for NPP in Yunnan from 2000 to 2019

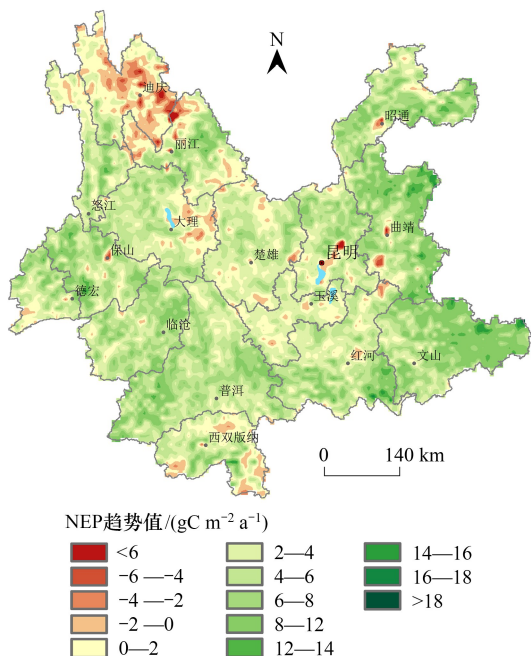


图8 2000—2019年云南NEP一元线性回归趋势

Fig.8 Univariate linear regression trend and significance test of NEP in Yunnan from 2000 to 2019

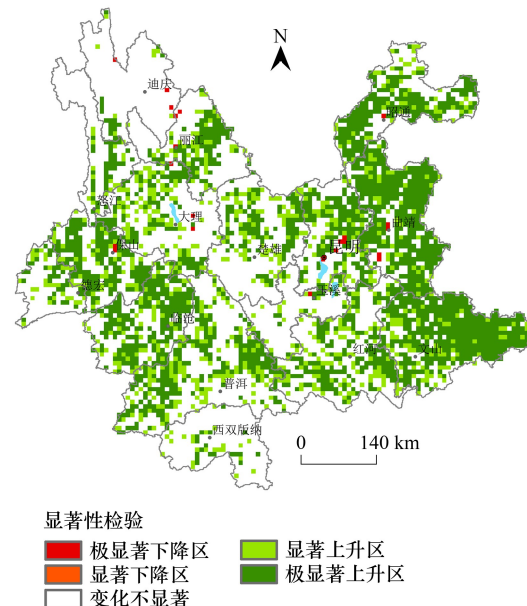


图9 2000—2019年云南NEP一元线性回归趋势显著性检验

Fig.9 Significance test of univariate linear regression trend for NEP in Yunnan from 2000 to 2019

2000—2019年云南月平均NPP空间分布见图12,如前所述云南NPP于7—8月达到峰值,绝大部分地区NPP在 80gC/m^2 以上,其中迪庆州、丽江市、怒江州、德宏州、西双版纳州大部地区在 120gC/m^2 以上,随着降水的减少,9月NPP开始自东向西和西南方面开始下降,10月云南中部以东大部分地区NPP降到 60gC/m^2 以下,到次年2月,全省绝大部分地区NPP降至 40gC/m^2 以下,部分地区降至 20gC/m^2 以下,3—4月怒江州北部

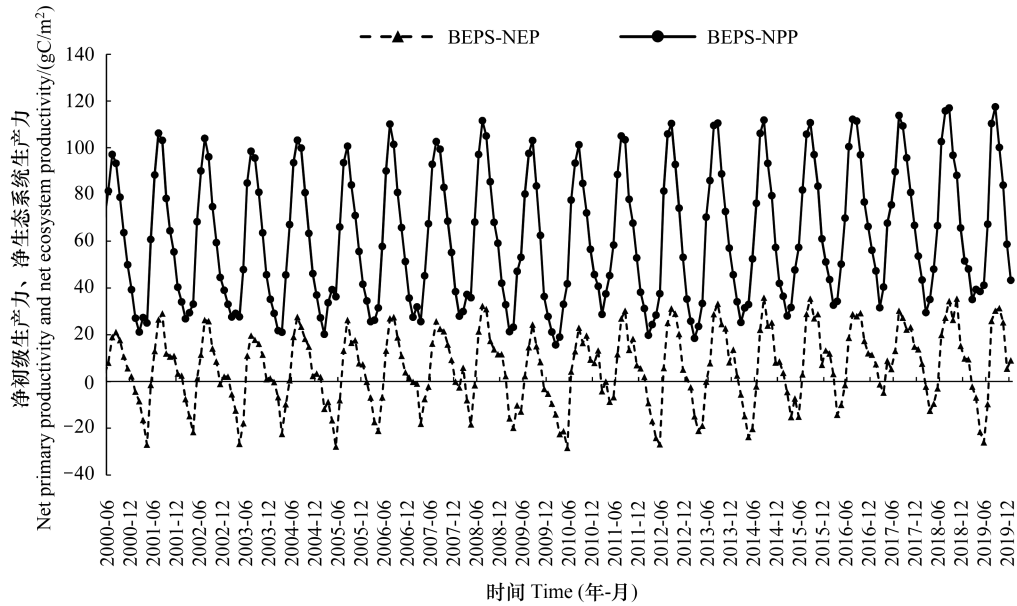


图 10 2000—2019 年云南 NPP、NEP 逐月变化

Fig.10 Monthly change of NPP and NEP in Yunnan from 2000 to 2019

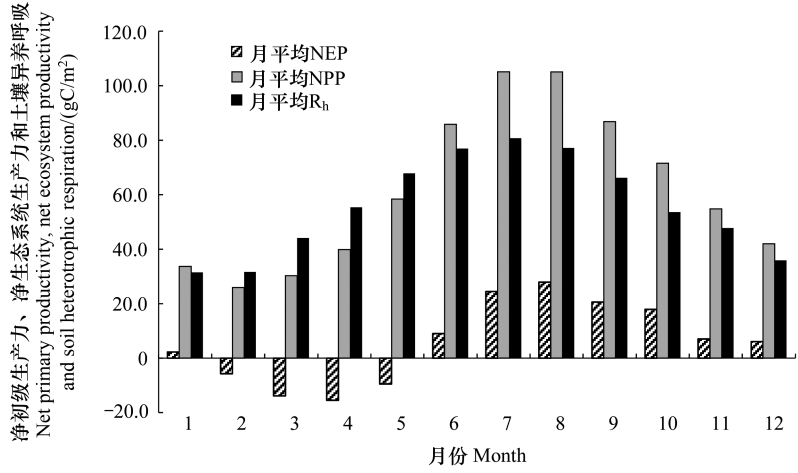


图 11 2000—2019 年云南 NPP、NEP 和 R_h 月平均值变化

Fig.11 Monthly average change of NPP, NEP and R_h in Yunnan from 2000 to 2019

月平均 NEP:月平均净生态系统生产力 Monthly average net ecosystem productivity simulated;月平均 NPP:月平均净初级生产力 Monthly average net primary productivity;月平均 R_h :月平均土壤异养呼吸 Soil heterotrophic respiration

和迪庆州受“桃花汛”影响,NPP 开始回升,5 月随着雨季的陆续到来,云南南部和西北部 NPP 开始明显回升,云南中部及以东地区由于雨季开始期相对较晚,大部地区 NPP 回升缓慢。6 月除大理州东部、楚雄州北部、红河州中部、文山州西部、等地区低于 $30\text{gC}/\text{m}^2$ 外,其余大部地区均在 $50\text{gC}/\text{m}^2$ 以上。

2000—2019 年云南月平均 NEP 空间分布如图 13 所示,云南碳汇期主要在 6—10 月,其中 7—8 月为 NEP 峰值期,除迪庆州、怒江州北部、保山市北部和昭通市北部部分地区为碳源区外,其余大部地区地区 NEP 在 $20\text{gC}/\text{m}^2$ 以上,其中 NEP 在 $40\text{gC}/\text{m}^2$ 以上的高值区主要分布在云南东部和西部。碳源期主要在 2—5 月,其中 3—4 月为 NEP 谷值期,与 7—8 月相反,除迪庆州、怒江州北部、昭通市北部为碳汇区外,全省大部分地区

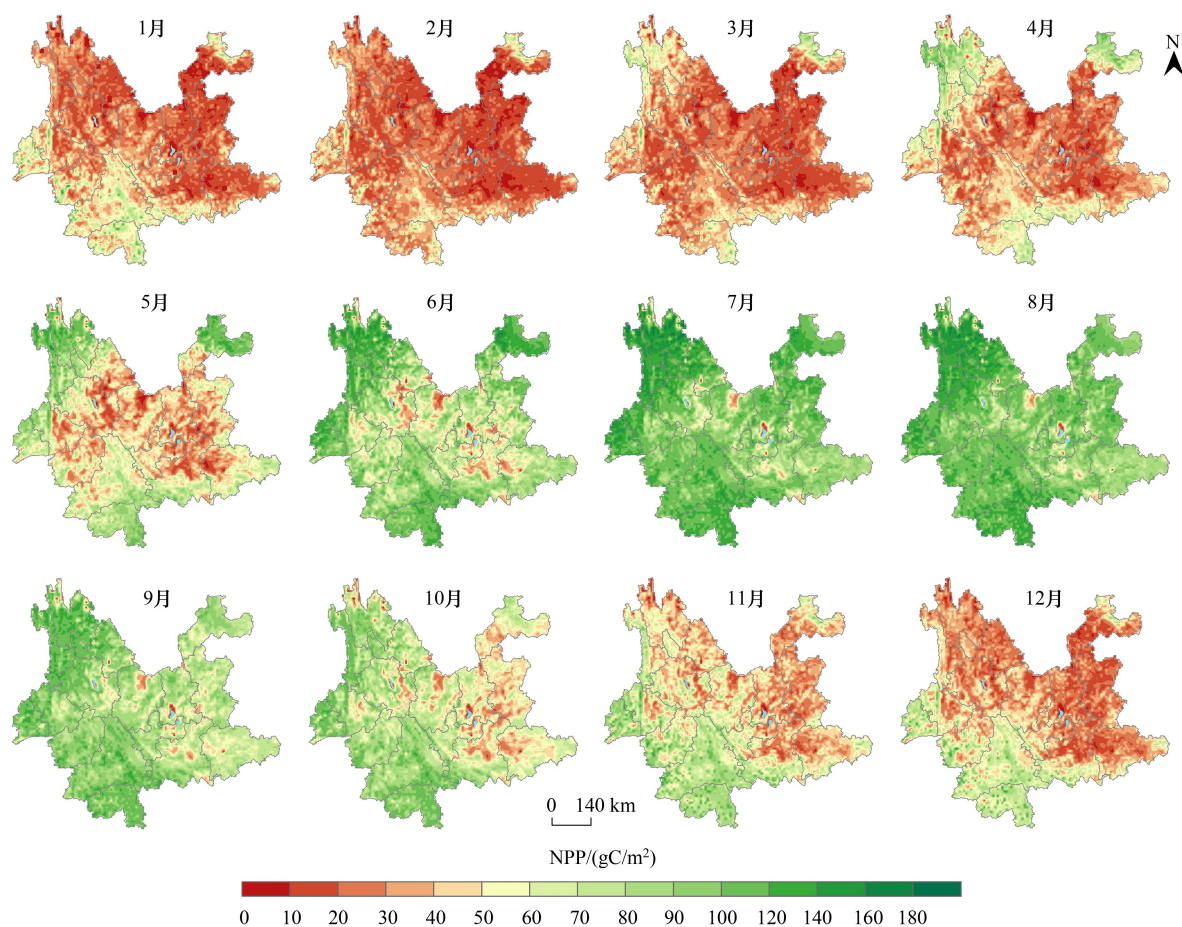


图 12 2000—2019 年云南月平均 NPP 分布图

Fig.12 Monthly average NPP distribution of Yunnan from 2000 to 2019

NEP 降至 $-10\text{gC}/\text{m}^2$ 以下,其中云南西南部的德宏州、临沧市、普洱市、西双版纳州降至 $-20\text{gC}/\text{m}^2$ 以下。

5—6 月为云南碳源向碳汇转变期,5 月全省 NEP 自东向西开始回升,至 6 月除大理市东部、楚雄州西部等雨季开始较晚的区域为碳源区外,其余大部地区转变为碳汇区;而 11 月—次年 2 月为碳汇向碳源转变期,11 月后全省 NEP 自东向西开始逐渐降低,至次年 2 月全省大部地区均为碳源区。

2.3 BEPS 模型在云南的适用性

虽然目前关于 NPP 估算、时空变化特征的研究较多,但涉及云南全省范围 NPP 统计的研究较少,王思云等^[10]基于 CASA 模型估算 2015 年云南 NPP 为 $0.317\text{PgC}/\text{a}$,本文基于 BEPS 估算的云南 2015 年 NPP 值为 $0.312\text{PgC}/\text{a}$,较前者偏低 1.6%;李贵才^[36]在 CASA 模型基础上估算的 2001 年云南 NPP 为 $0.222\text{PgC}/\text{a}$,本研究 BEPS 模型估算同时期 NPP 为 $0.275\text{PgC}/\text{a}$,较前者偏高 23.8%;何云玲等^[37]基于气候生产潜力模型估算 1960—2000 年云南平均 NPP 为 $0.19\text{PgC}/\text{a}$,本文 1981—2000 年 BEPS 模型估算值为 $0.07\text{PgC}/\text{a}$,较前者偏低 63.1%(表 2)。2000—2015 年 MODIS-NPP 与 BEPS-NPP 对比(图 14)显示,MODIS-NPP 与 BEPS-NPP 具有较好的一致性,较前者偏低 13.4%—27.3%;从 NPP 估算总量来看,BEPS 模型与 CASA 和遥感模型结果最为接近。从空间分布来看,BEPS 模型与 CASA^[36]和 MODIS-NPP 的空间分布趋势基本一致。CASA 模型是目前主流的 NPP 估算模型^[38—39],其准确性已被观测站点和树轮等实测方法得出的多年 NPP 广泛证实^[40—41],以上分析表明,从总量和空间分布趋势来看,BEPS 模型估算的 NPP 可信度和精度较高。

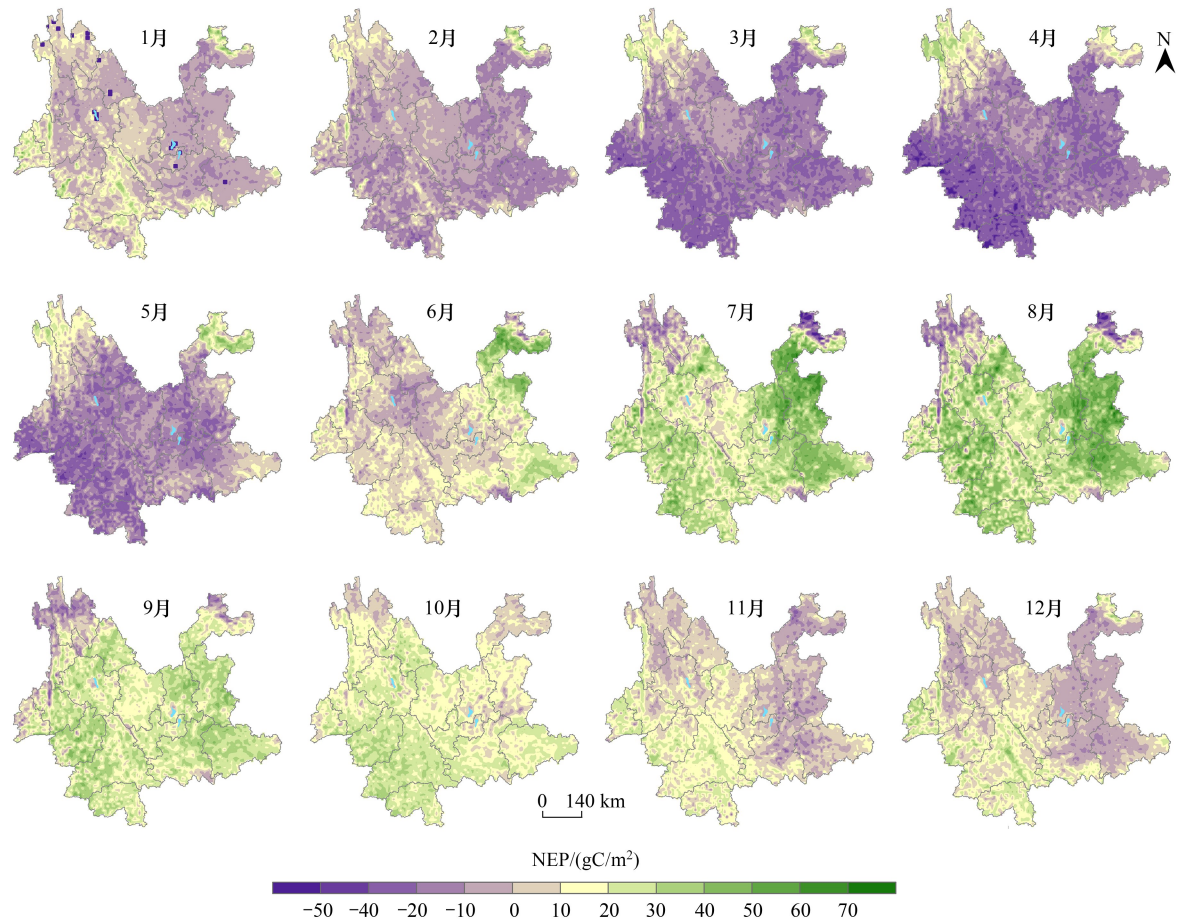


图 13 2000—2019 年云南月平均 NEP 分布图

Fig.13 Monthly average NEP distribution of Yunnan from 2000 to 2019

表 2 云南 BEPS-NPP 与其他研究对比

Table 2 Comparison between BEPS-NPP and other studies of Yunnan

区域范围 Area	时段 Time	云南 NPP 年 平均值/(PgC/a) Annual average NPP of Yunnan	方法 Method	本文 NPP 年 平均值/(PgC/a) Annual average of NPP in this article	备注 Notes
云南 ^[10]	2015	0.317	CASA	0.312	
全国 ^[36]	2001	0.222	CASA	0.275	
云南 ^[37]	1960—2000	0.19	气候生产潜力模型	0.07	本文为 1981—2000 年
云南	2000—2015	0.351	光能利用率模型	0.281	MOD17A3

CASA: 卡内基-埃姆斯-斯坦福模型 Carnegie-Ames-Stanford Approach

目前较多 NEP 研究多为基于 NPP 和温度、降水量(或温度、降水量与土壤有机碳密度)回归方程计算而得,但不同 NPP 数据和回归方程,导致 NEP 估算结果存在明显差异,如徐勇等^[11]、张梅等^[12]和张思蕊^[13]研究云南 NEP 总量多年平均值为 0.127—0.194PgC/a,而本文所用 BEPS 模型估算的同时期 NEP 多年平均值仅为 0.028PgC/a(70.1gC m⁻²a⁻¹)(表 3),仅为上述模型的 14.2%—21.6%。但 BEPS 模型与杨延征等^[42]基于陆地生物圈模型(IBIS)估算的 1960—2006 年的 NEP 结果(16—55gC m⁻²a⁻¹)较为接近,空间分布也大体一致;与 2003—2005 年中国通量观测研究联盟(ChinaFLUX)碳水通量站观测数据^[43]也较为接近。较季劲钧等^[44]利用大气—植被相互作用模型(AVIM2)和 Cao 等^[45]利用生态系统机理模型(CEVSA)模拟的 NEP 值偏高。

总体而言,BEPS 模型估算的 NEP 处于中间位置。此外 BEPS 模型 NEP 占 GPP、NPP 比例多年平均值分别为 8.1%和 9.1%,何洪林等^[46] 基于文献整合我国 57 个典型陆地生态系统 NEP 和 GPP 数据显示,其 NEP 占 GPP 比例平均值为 15.2%,由于文献^[11—13] 未给出 GPP 和 NPP 值,若以本文的 GPP 和 NPP 值计算,其 NEP 占 GPP、NPP 比例分别在 38.7%—58.9%和 43.8%—66.7%,较 BEPS 模型偏高明显,表明利用温度、降水量和土壤有机碳密度的回归方程所估算的 R_h 值偏低,从而导致 NEP 偏高。

从 NPP 和 R_h 月尺度变化结合云南气候特征分析来看,BEPS 模型估算的月平均 NPP、 R_h 峰、谷值与云南月平均气温、降水量谷峰值相对应(图 15)。云南干湿季节分明,一般云南雨季开始期正常年份在 5 月下旬由南向北开始^[47],于 10 月结束,随着雨季的结束和气温的下降,植被逐渐进入休眠期,至次年 3 月,植被开始恢复生长,但受降雨量限制,植被旺长期从雨季开始后方才开始。NPP 变化趋势与云南气候特征和雨季开始期、结束期完全对应,符合普遍认知。 R_h 变化趋势则进一步验证了温度、降水量与 R_h 呈正相关的结论^[11—12]。

从 NPP 和 NEP 月尺度空间变化特征来看,如前所述(本文 2.2 节)NPP 和 NEP10 月后自东向西南方向逐渐减少趋势与云南冬季气温变化特征一致,此外还较好的反映了西北地区“桃花汛”对 NPP 和 NEP 的影响,综上所述,BEPS 模型估算的 NPP 和 NEP 可信度较高,在云南具有较好的适用性。

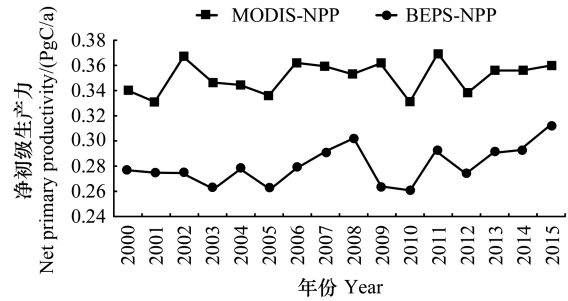


图 14 2000—2015 年云南 MODIS-NPP 与 BEPS-NPP 对比

Fig.14 Comparison of NPP estimated by Yunnan MODIS and BEPS from 2000 to 2015

MODIS-NPP:基于中分辨率成像光谱仪产品估算的净初级生产力
Net primary productivity simulated by moderate-resolution imaging spectroradiometer product

表 3 云南 BEPS—NEP 与其他研究对比

Table 3 Comparison between BEPS—NEP and other studies of Yunnan

区域范围 Area	时段 Time	NEP 年平均值 Annual average NEP/ ($\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$)	NEP 总量年平均值 Annual average of total NEP/(PgC/a)	方法 Method
西南地区 ^[11]	2000—2020	493	0.194	CASA 模型和温度、降水量回归方程
全国 ^[12]	2000—2015	324	0.127	温度、降水量和土壤有机碳密度回归方程
全国 ^[13]	2000—2018	418	0.165	温度、降水量和土壤有机碳密度回归方程
本文	2000—2019	70	0.028	

文献[12]缺中国港澳台统计数据

3 讨论与结论

3.1 讨论

(1) 在生态恢复工程对云南碳汇能力的影响方面,2000 年以前,云南作为我国西南地区主要林区和木材产地,经营性采伐和气候年际波动是 1981—1999 年 NPP 和 NEP 呈水平波动的主要原因。2000 年后随着天保工程的实施,云南开展了退耕还林、封山育林等生态恢复工程。从该时间节点来看,林业生态工程的实施在很大程度上促进了云南 NPP 和 NEP 的增加^[48];证明了云南植被生态系统的保护和恢复成效明显,同时也表明生态恢复工程是云南增加碳汇的主要途径。

(2) 2000—2019 年,云南 NPP 和 NEP 整体均呈现显著上升趋势,碳汇功能不断增强,这与已有研究结

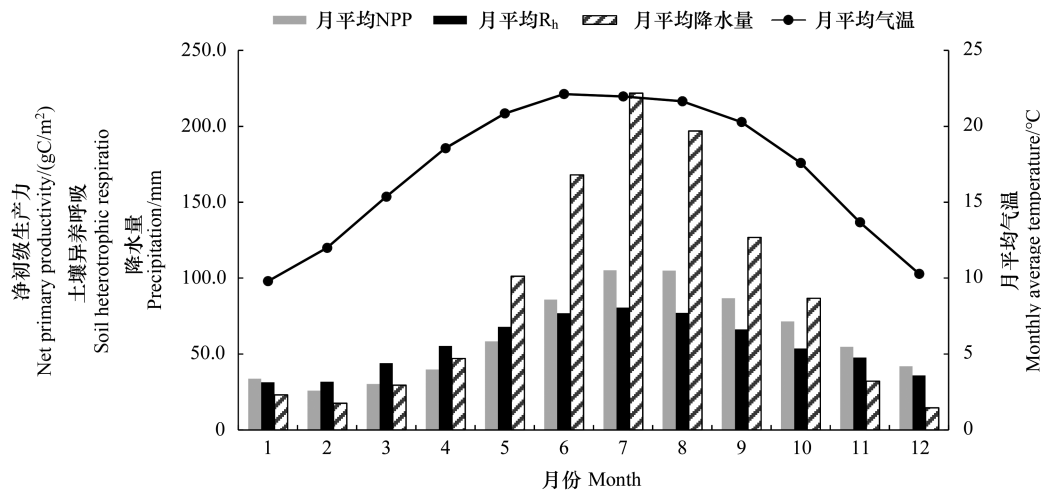


图 15 2000—2019 年云南月平均 NPP、R_h 和平均气温、降水量对比

Fig.15 Comparison of monthly average NPP, R_h, temperature and precipitation in Yunnan from 2000 to 2019

果^[49—50]一致.在部分时段(如 2009—2010 和 2019 年) NPP 和 NEP 出现较大幅度下降,这是由于干旱灾害影响,使得部分地区植被枯死,致使植被覆盖下降,固碳能力随之减弱,导致部分时段内 NEP 呈下降趋势^[51].从空间分布看,云南大部地区 NPP 和 NEP 呈极显著上升区,除受生态工程的实施影响外,还与气候变化有关,研究显示温度的升高对植被的光合作用有促进作用^[52—53],在气候变暖背景下,2000 年后云南气候呈干暖化趋势发展,大部地区增温明显,降水量呈减少趋势,虽然气温的升高有利于云南植被固碳能力的提高,但云南中部以东和以北地区年降水量原本就偏少,降水量的减少理论上将对上述地区的固碳能力产生不利影响,但从本文的分析结果来看,上述地区 NPP 和 NEP 部分地区仍为增长趋势,因此气候变化和人为干扰对云南固碳能力的影响还有待进一步深入研究。

(3) BEPS 模型估算的云南 2000—2019 年的年平均 R_h 空间分布如图 16 所示,其空间分布趋势与陈书涛等^[54]基于温度、降水量与土壤有机碳密度回归方程估算结果基本一致。但云南 R_h 的空间分布与同时期年平均气温(图 17)、降水量(图 18)空间分布并不完全一致。研究表明 R_h 除了与气温和降水量密切相关外,土壤有机碳密度也是重要影响因子,因此仅采用 NPP 和温度、降水量回归方程计算 NEP 将导致结果可信度降低^[11,55]。而引入土壤有机碳密度回归方程对结果精确度有所提高,但大都应用第二次土壤普查结果,而 2000 年后云南土壤有机碳随 NPP 的增长呈增加趋势,按照静态土壤碳密度计算将导致 2000 年以后土壤异养呼吸偏小^[54],这可能是导致基于该方法 NEP 估值偏高的主要原因。

(4) 在地形地貌复杂且立体气候显著的云南, BEPS 模型具有较好的适用性,借此可推测该模型在其他区域也应具有较好适用性,但鉴于该模型在云南部分区域估算结果存疑和各地气候存在差异,在使用该数据前

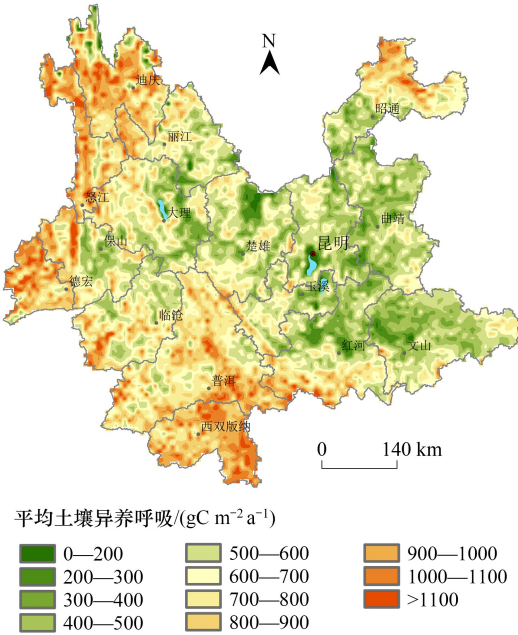


图 16 2000—2019 年云南年平均土壤异养呼吸

Fig.16 Annual average soil heterotrophic respiration in Yunnan from 2000 to 2019

建议还是先进行全面评估。此外目前关于不同模型的 NPP 和 NEP 对比多从估算的总量进行对比,很少从空间分布方面进行对比,但实际情况为不同模型估算的 NPP 和 NEP 在空间分布上差异较大,对模型适用性评估不能仅通过总量进行评估,还应从空间分布是否科学合理进行评估。

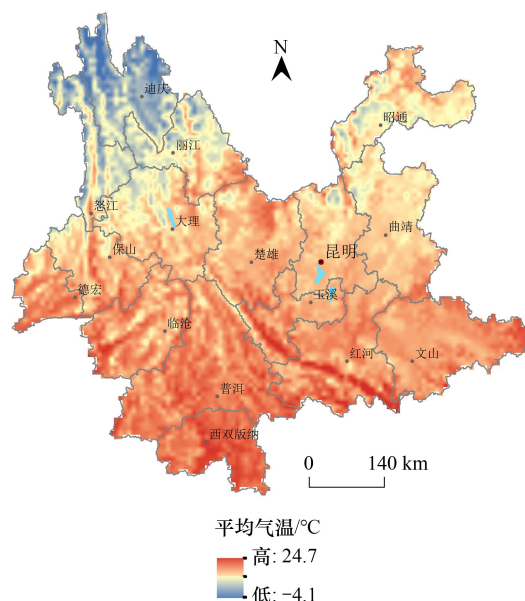


图 17 2000—2019 年云南年平均气温

Fig.17 Annual average temperature in Yunnan from 2000 to 2019

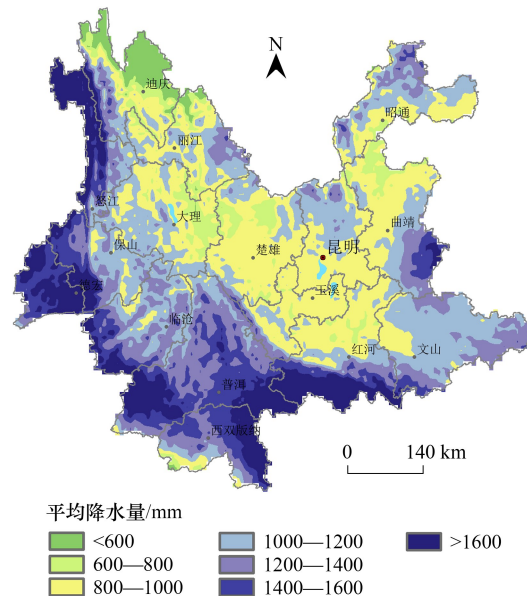


图 18 2000—2019 年云南年平均降水量

Fig.18 Annual average precipitation in Yunnan from 2000 to 2019

3.2 结论

(1) 1981—1999 年云南 NPP 和 NEP 呈水平波动,2000 年后云南 NPP 和 NEP 呈明显波动上升趋势,2000—2019 年 NPP 和 NEP 较 1981—1999 年增加了 12.4% 和 150.4%。

(2) NPP 高值区域主要分布在云南西部和南部,大部地区年平均 NPP 为 $700\text{gC}/\text{m}^2$ 以上。NEP 的高值区主要分布在东部和西部局部地区。2000—2019 年云南 NPP 和 NEP 除西北部部分地区为下降趋势外,其余大部地区为上升趋势。

(3) 云南 NPP 峰值一般出现于 7、8 月之间,随之开始持续下降,谷值出现在 2 月,NEP 峰值出现月份与 NPP 基本相同,但谷值出现月份较 NPP 滞后 1—3 个月,6—10 月是云南碳汇的主要月份。

(4) BEPS 模型估算的 NPP 与目前广泛应用的 CASA 模型结果较为一致,时空变化特征与云南生态恢复措施和气候特征吻合。BEPS 模型估算的 NEP 与陆地生物圈模型 (IBIS) 和中国通量观测研究联盟 (ChinaFLUX) 碳水通量观测数据较为接近,空间分布大部地区也与云南生态恢复措施和气候特征基本吻合,表明 BEPS 模型在云南具有较好的适用性。

参考文献 (References):

- [1] 吴艳艳, 吴志峰, 余世孝. 定量评价人类活动对净初级生产力的影响. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2535-2544.
- [2] 王伯炜, 牟长城, 王彪. 长白山原始针叶林沼泽湿地生态系统碳储量. 生态学报, 2019, 39(9): 3344-3354.
- [3] 刘凤, 曾永年. 2000—2015 年青海高原植被碳源/汇时空格局及变化. 生态学报, 2021, 41(14): 5792-5803.
- [4] 谢馨瑶, 李爱农, 新华安. 大尺度森林碳循环过程模拟模型综述. 生态学报, 2018, 38(1): 41-54.
- [5] 张越, 刘康, 张红娟, 张丹丹, 陈慕亚. 基于 BIOME-BGC 模型的秦岭北坡太白红杉林碳源/汇动态和趋势研究. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(3): 235-249.
- [6] 潘竟虎, 文岩. 中国西北干旱区植被碳汇估算及其时空格局. 生态学报, 2015, 35(23): 7718-7728.
- [7] 曹云, 张称意, 孙应龙, 刘昌义, 胡琦, 赵子健, 王晓晨, 潘学标, 王世坤. 2000—2020 年华北地区植被固碳能力时空变化特征及其气象

- 影响分析. 生态学报, 2023, 43(9): 3488-3499.
- [8] 何勇, 董文杰, 季劲均, 丹利. 基于 AVIM 的中国陆地生态系统净初级生产力模拟. 地球科学进展, 2005, 20(3): 345-349.
- [9] 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.
- [10] 王思云, 胡文英. 基于 CASA 模型的云南省植被净初级生产力遥感估算. 云南地理环境研究, 2019, 31(5): 71-78.
- [11] 徐勇, 黄雯婷, 郭振东, 郑志威, 李欣怡, 盘钰春, 戴强玉. 2000—2020 年我国西南地区植被 NEP 时空变化及其驱动因素的相对贡献. 环境科学研究, 2023, 36(3): 557-570.
- [12] 张梅, 黄贤金, 揣小伟, 解宪丽, 朱振宇, 汪煜. 中国净生态系统生产力空间分布及变化趋势研究. 地理与地理信息科学, 2020, 36(2): 69-74.
- [13] 张思蕊. 2000—2018 年中国陆地生态系统碳收支时空格局评估及未来预测[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2022.
- [14] Zeng J Y, Matsunaga T, Tan Z H, Saigusa N, Shirai T, Tang Y H, Peng S S, Fukuda Y. Global terrestrial carbon fluxes of 1999-2019 estimated by upscaling eddy covariance data with a random forest. Scientific Data, 2020, 7(1): 313.
- [15] Zhang L, Xiao J F, Li L, Lei L P, Li J. China's sizeable and uncertain carbon sink: a perspective from GOSAT. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(14): 1547-1555.
- [16] Wang J, Feng L, Palmer P I, Liu Y, Fang S X, Bösch H, O'Dell C W, Tang X P, Yang D X, Liu L X, Xia C Z. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. Nature, 2020, 586(7831): 720-723.
- [17] 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.
- [18] 官波, 施择, 宁平. 云南森林碳汇制度发展研究. 学术探索, 2012(11): 81-83.
- [19] 谭鑫, 杨怡. 云南生态产业化的林业碳汇发展路径探析. 西南林业大学学报: 社会科学, 2022, 6(6): 5-10.
- [20] Chen J M, Liu J, Cihlar J, Goulden M L. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications. Ecological Modelling, 1999, 124(2/3): 99-119.
- [21] Zhou Y, Zhu Q, Chen J M, Wang Y Q, Liu J, Sun R, Tang S. Observation and simulation of net primary productivity in Qilian Mountain, Western China. Journal of Environmental Management, 2007, 85(3): 574-584.
- [22] Wang P, Sun R, Hu J, Zhu Q, Zhou Y, Li L, Chen J M. Measurements and simulation of forest leaf area index and net primary productivity in Northern China. Journal of Environmental Management, 2007, 85(3): 607-615.
- [23] Wang S Q, Zhou L, Chen J M, Ju W M, Feng X F, Wu W X. Relationships between net primary productivity and stand age for several forest types and their influence on China's carbon balance. Journal of Environmental Management, 2011, 92(6): 1651-1662.
- [24] 李伟. 基于改进 BEPS 模型的中亚生态系统生产力时空变化研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2019.
- [25] 毛学刚, 焦裕欣, 张颖. 基于 BEPS 模型的东北三省森林生态系统 NPP 模拟. 森林工程, 2017, 33(1): 22-27.
- [26] 陈奕兆. 利用自主改进的草地生态系统模型 BEPS-GESS 对欧亚大陆草原带固碳能力的综合研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.
- [27] 周艳莲, 居为民, 柳艺博. 1981—2019 年全球陆地生态系统碳通量变化特征及其驱动因子. 大气科学学报, 2022, 45(3): 332-344.
- [28] 居为民, 周艳莲. 1981—2019 年全球逐日 GPP 模拟数据产品. 国家生态科学数据中心, 2021.
- [29] 居为民, 周艳莲. 1981—2019 年全球逐日 NPP 模拟数据产品. 国家生态科学数据中心, 2021.
- [30] 居为民, 周艳莲. 1981—2019 年全球逐日 NEP 模拟数据产品. 国家生态科学数据中心, 2021.
- [31] 栾金凯, 刘登峰, 黄强, 冯九梁, 林木, 李国宝. 近 17 年陕西榆林植被指数的时空变化及影响因素. 生态学报, 2018, 38(8): 2780-2790.
- [32] 夏会娟, 孔维静, 孙建新, 侯利萍. 基于 MODIS NDVI 的辽河保护区成立前后植被覆盖时空动态研究. 生态学报, 2018, 38(15): 5434-5442.
- [33] 宋怡, 马明国. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的中国寒旱区植被动态及其与气候因子的关系. 遥感学报, 2008, 12(3): 499-505.
- [34] 鲁韦坤, 李湘, 余凌翔, 朱勇. 云南省陆地生态系统和土地利用类型的 NDVI 时空变化特征. 气象与环境科学, 2020, 43(3): 71-77.
- [35] 王菲, 曹永强, 周姝含, 范帅邦, 姜雪梅. 黄河流域生态功能区植被碳汇估算及其气候影响要素. 生态学报, 2023, 43(6): 2501-2514.
- [36] 李贵才. 基于 MODIS 数据和光能利用率模型的中国陆地净初级生产力估算研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2004.
- [37] 何云玲, 张一平. 云南省自然植被净初级生产力的时空分布特征. 山地学报, 2006, 24(2): 193-201.
- [38] 李秀娟, 周涛, 何学兆. NPP 增长驱动下的中国森林生态系统碳汇. 自然资源学报, 2009, 24(3): 491-497.
- [39] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 于德永, 扈海波. 中国典型植被最大光利用率模拟. 科学通报, 2006, 51(6): 700-706.
- [40] Lobell D B, Hicke J A, Asner G P, Field C B, Tucker C J, Los S O. Satellite estimates of productivity and light use efficiency in United States agriculture, 1982-98. Global Change Biology, 2002, 8(8): 722-735.
- [41] Fang J Y, Piao S, Field C, Pan Y D, Guo Q, Zhou L M, Peng C, Tao S. Increasing net primary production in China from 1982 to 1999. Frontiers in Ecology and the Environment, 2003, 1(6): 293-297.
- [42] 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.

- [43] 张雷明, 罗艺伟, 刘敏, 陈智, 苏文, 何洪林, 朱治林, 孙晓敏, 王艳芬, 周国逸, 赵新全, 韩士杰, 欧阳竹, 张宪洲, 张一平, 刘琪璟, 郝彦宾, 闫俊华, 张德强, 李英年, 王安志, 吴家兵, 李发东, 赵风华, 石培礼, 张扬建, 何永涛, 林露湘, 宋清海, 王辉民, 刘允芬, 于贵瑞. 2003—2005 年中国通量观测研究联盟 (China FLUX) 碳水通量观测数据集. 中国科学数据, 2019, 4(1): 18-34.
- [44] 季劲钧, 黄玫, 李克让. 21 世纪中国陆地生态系统与大气碳交换的预测研究. 中国科学: D 辑, 2008(2): 211-223.
- [45] Cao M K, Tao B, Li K R, Shao X M, Stephen D P. Interannual variation in terrestrial ecosystem carbon fluxes in China from 1981 to 1998. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(5): 552-560.
- [46] 何洪林, 葛容, 任小丽, 张黎, 常青青, 徐茜, 周国逸, 谢宗强, 汪思龙, 王辉民, 张奇兵, 王安志, 范泽鑫, 张一平, 申为军, 尹华军, 林露湘, Mathew Williams, 于贵瑞. 2005—2015 年中国典型森林生态系统碳循环研究参照数据集. 国家生态科学数据中心, 2021.
- [47] 陶云, 郑建萌, 万云霞, 刘瑜. 云南雨季开始期演变特征分析. 气候与环境研究, 2006, 11(2): 229-235.
- [48] 舒明远, 吴家治, 李晨阳, 丁胜. 天保工程区森林碳汇效率演进分析. 林业经济问题, 2022, 42(5): 490-497.
- [49] 李美丽, 尹礼昌, 张园, 苏旭坤, 刘国华, 王晓峰, 奥勇, 伍星. 基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究. 生态学报, 2021, 41(3): 1138-1147.
- [50] Qiao Y N, Jiang Y J, Zhang C Y. Contribution of Karst ecological restoration engineering to vegetation greening in southwest China during recent decade. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107081.
- [51] Wang M, Ding Z, Wu C Y, Song L S, Ma M G, Yu P J, Lu B Q, Tang X G. Divergent responses of ecosystem water-use efficiency to extreme seasonal droughts in Southwest China. *The Science of the Total Environment*, 2021, 760: 143427.
- [52] 刘曦, 国庆喜, 刘经纬. IBIS 模拟东北东部森林 NPP 主要影响因子的敏感性. 生态学报, 2011, 31(7): 1772-1782.
- [53] 茆杨, 蒋勇军, 张彩云, 乔伊娜, 吕同汝, 邱菊. 近 20 年来西南地区植被净初级生产力时空变化与影响因素及其对生态工程响应. 生态学报, 2022, 42(7): 2878-2890.
- [54] 陈书涛, 黄耀, 邹建文, 史艳妹, 卢燕宇, 张稳, 胡正华. 中国陆地生态系统土壤呼吸的年际间变异及其对气候变化的响应. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(8): 1273-1281.
- [55] Pei Z Y, Ouyang H A, Zhou C P, Xu X L. Carbon balance in an alpine steppe in the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2009, 51(5): 521-526.