

# 未来气候情景下中国植被净初级生产力稳定性

陈 惺<sup>1,2</sup>, 王军邦<sup>1,2\*</sup>, 何启凡<sup>3</sup>, 王春雨<sup>4</sup>, 叶 辉<sup>3</sup>, Watson, A. E.<sup>1</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院生态系统网络  
观测与模拟重点实验室, 生态系统大数据与模拟中心, 北京 100101;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 九江学院旅游与地理学院,  
九江 332005; 4. 齐鲁师范学院, 济南 250200

**摘 要:** 生态系统模型模拟是研究全球变化背景下区域气候变化对生态系统影响的重要方法之一, 大多数气候模型预测全球大部分区域的 NPP 将增加, 然而未来气候情景下近百年的长时间尺度下 NPP 及其稳定性的变化却鲜有研究。本数据结合建立在生理生态学基础上的 CEVSA 模型, 通过强迫法发展了遥感驱动的生态系统过程模型——CEVSA-RS 模型, 采用的基于区域气候模型第 4 版 (RegCM4.6) 和 CMIP5 的 HadGEM2-ES 数据情景, 输入驱动的气候变量, 包括时、空间分辨率分别为 0.25°, 3 h 的气温、降水量、云量和空气相对湿度, 后将其处理为以旬为时间步长, 0.1°空间分辨率, 使用 Chinacover2010 的土地覆盖数据, 模型输出为空间分辨率为 0.1°的 2006–2099 年的 NPP 及其变化趋势, 以及全期 (2006–2099 年)、前期 (2006–2035 年)、中期 (2036–2065 年) 和远期 (2066–2099 年) NPP 稳定性多年均值。通过共享本数据集, 以期积极开展减缓和适应气候变化行动, 如双碳行动, 提供具有科学和现实意义的数据参考。

**关键词:** 净初级生产力 NPP; CEVSA-RS 模型; 未来气候情景; 稳定性

**DOI:** <https://doi.org/10.3974/geodp.2023.02.05>

**CSTR:** <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2023.02.05>

## 数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2023.06.01.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2023.06.01.V1>.

## 1 前言

植被净初级生产力 (Vegetation Net Primary Productivity, NPP) 表征大气碳的固定和生物质的累积<sup>[1]</sup>, 是研究全球陆地生态系统对气候变化响应的基础<sup>[2]</sup>。驱动碳汇变化的气候因

收稿日期: 2023-03-10; 修订日期: 2023-06-18; 出版日期: 2023-06-25

基金项目: 国家自然科学基金 (31861143015, 31971507); 中国科学院-青海省人民政府三江源国家公园联合研究专项 (LHZX-2020-07)

\*通讯作者: 王军邦 0000-0001-5169-6333, 中国科学院地理科学与资源研究所, [jbwang@igsrr.ac.cn](mailto:jbwang@igsrr.ac.cn)

数据引用方式: [1] 陈惺, 王军邦, 何启凡等. 未来气候情景下中国植被净初级生产力稳定性[J]. 全球变化数据学报, 2023, 7(2): 172–179. <https://doi.org/10.3974/geodp.2023.02.05>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2023.02.05>.

[2] 陈惺, 王军邦, 何启凡等. 未来百年气候情景下中国植被净初级生产力稳定性估算数据集 [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2023. <https://doi.org/10.3974/geodb.2023.06.01.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2023.06.01.V1>.

素具有较强的时空异质性<sup>[3]</sup>,生产力的波动会对碳固定也有一定的影响<sup>[4]</sup>。如何应对全球变化下,升高的气温,变化的降水格局,判断 NPP 的稳定程度,是目前的热门研究课题之一。

生态系统模型模拟是研究区域生态系统对气候变化的响应的重要方法之一<sup>[5,6]</sup>,通常分为气候统计模型、遥感参数模型和生态过程模型<sup>[7,8]</sup>。以小尺度精细试验分析为基础的生态过程模型,从机理层面出发,具有较好的未来变化预测能力,通过结合遥感参数模型,实现尺度融合,以追求更高精度的生态系统碳动态模拟<sup>[9-12]</sup>。将水文、大气、二氧化碳、土地覆盖、物种组成和氮沉降等过程考虑进气候碳循环模型中,可以提高模型模拟近期和未来气候变化的能力,是未来模型的发展方向之一<sup>[13]</sup>。遥感驱动的生态系统过程模型(CEVSA-RS),对生态系统生产力的模拟具有较高的精度<sup>[14,15]</sup>。本数据通过使用关闭遥感驱动模型,在气候驱动下模拟未来气候情景陆地生态系统碳循环时空动态,为碳循环模拟研究提供了方法基础。

模型输入选择 CMIP5 中基于不同温室气体排放情景,其中, RCP4.5 模拟经济均衡发展模式,作为气候变化的“底线”; RCP8.5 作为在不实施有效气候变化减缓措施条件下,代表本世纪最恶劣的气候情景。

本数据仅选择了这两种情景数据,作为模型输入,应用 CEVSA-RS 模型模拟了未来气候情景下 2006–2099 年全国植被 NPP,分析了 NPP 的大小、变化趋势和稳定性,以期为全国陆地生态系统的碳汇管理,生态恢复措施实施及生态系统管理策略制定等提供科学基础。目前鲜有对 NPP 稳定性的定义,本数据通过变异系数的概念,将 NPP 稳定性定义为变异系数的倒数,由此表征 NPP 面对气象因子等变化因素的稳定程度。同理,目前也少有 NPP 稳定性的数据,以此数据为后人提供参考,为缓解气候变化的政策提供基础。

## 2 数据集元数据简介

《未来百年气候情景下中国植被净初级生产力稳定性估算数据集》<sup>[16]</sup>的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

## 3 数据研发方法

### 3.1 数据采集方法

本数据的模型输入使用了 2006–2099 年中国陆地生态系统气候情景数据<sup>[18,19]</sup>。该数据是基于区域气候模型第 4 版(RegCM 4.6)和 CMIP5 中的 HadGEM2-ES 数据情景,本数据使用其中的中(RCP4.5)、高(RCP8.5)排放气候情景数据。原数据的时、空间分辨率分别为 0.25°, 3 h,包括气温、降水量、云量和空气相对湿度,后将其处理为以旬为时间步长,0.1°空间分辨率,用于模型输入。

本数据使用的土地利用类型输入数据是基于 Landsat TM/ETM、HJ-1 卫星数据、野外调查数据得到的 2010 年中国土地覆盖遥感数据,原数据空间分辨率为 30 m,全国尺度一级分类精度为 94%,二级分类精度为 86%<sup>[20,21]</sup>。后对其二级分类进行归并,并采用邻近值法空间重采样得到空间分辨率为 0.1°的模型输入数据。详细的模型输入输出见表 2。

本工作基于中、高排放气候情景下 2006–2009 年全国陆地生态系统气候情景数据，采用 2010 年中国土地覆盖遥感数据，根据发展的基于卫星遥感驱动的 CEVSA-RS 模型模拟计算了不同未来气候情景下的 NPP 数据。

表 1 《未来百年气候情景下中国植被净初级生产力稳定性估算数据集》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	未来百年气候情景下中国植被净初级生产力稳定性估算数据集
数据集短名	RCPsNPPChina
作者信息	陈 惺 0009-0006-4886-3974, 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院大学, chenx.20s@igsnrr.ac.cn 王军邦 0000-0001-5169-6333, 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院大学, jbwang@igsnrr.ac.cn 何启凡 0009-0009-9554-4812, 九江学院旅游与地理学院, 2051936579@qq.com 王春雨 0000-0002-9960-5530, 齐鲁师范学院, 1871302580@qq.com 叶辉 0000-0003-0278-5406, 九江学院旅游与地理学院, fever2cn.huiye@outlook.com
地理区域	地理范围为 3°51'N–53°33'N, 73°33'E–135°05'E
数据年代	2006–2009 年
空间分辨率	0.1°
数据格式	.tif
数据量	4.26 MB (压缩后)
数据集组成	一共 16 个栅格数据文件, 包括 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下多年平均的 NPP 及其变化趋势、NPP 稳定性的多年平均栅格数据
基金项目	国家自然科学基金 (31861143015, 31971507); 中国科学院–青海省人民政府三江源国家公园联合研究专项 (LHZX- 2020- 07)
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据 (中英文)、通过《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报 (中英文)》发表的数据论文。其共享政策如下: (1) “数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载; (2) 最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源; (3) 增值服务用户或以任何形式散发和传播 (包括通过计算机服务器) “数据”的用户需要与《全球变化数据学报 (中英文)》编辑部签署书面协议, 获得许可; (4) 摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则, 即从本数据集中抽取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[17]</sup>
数据和论文检索系统 DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS	

表 2 模型的输入及输出数据统计表

数据类型	指标	时间分辨率	空间分辨率	单位
输入气象数据	气温 (Tas)	旬均值	0.1°	℃
	降水 (Prc)	旬均值	0.1°	mm
	相对湿度 (Hum)	旬均值	0.1°	%
	云量 (Clo)	旬均值	0.1°	%
输入土地利用数据	土地覆盖数据 (Chinacover2010)	年值 (2010 年)	0.1°	无
输出变量	植被净初级生产力 (NPP)	年值	0.1°	$\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$
输出变量	NPP 稳定性	年值	0.1°	无量纲

### 3.2 数据处理

将得到的 NPP 数据进行趋势分析和变异型分析, 得到对应的全时段 NPP 变化趋势和分时段(前期、中期、远期)的 NPP 稳定性空间数据, 数据处理具体包括以下几个部分:

(1) 趋势分析能更好地表达 NPP 对气候变化的响应, 公式如下:

$$Slope = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times X_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n X}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中, Slope 为像元尺度线性回归方程的斜率,  $X_i$  为第  $i$  年的 NPP 值;  $n$  为研究的时间长度。

(2) 稳定性可以表示一个系统保持不变或者规律性变动的稳定程度, 变异系数本身表达波动性<sup>[20]</sup>, 因此通常采用变异系数倒数的绝对值量化稳定性, 计算公式如下:

$$S_{X(i,j)} = \left| \frac{M_{X(i,j)}}{STD_{X(i,j)}} \right| \quad (2)$$

式中, SX、MX 和 STD<sub>X</sub> 分别表示给定时间范围内生态系统生产力、气候系统中气温和降水等量的稳定性、均值和标准偏差, 其中, 气温数据有负值, 因此通过取绝对值的方法以消除气温的负值影响。 $i$  代表第  $i$  年,  $j$  代表第  $j$  个像元点。

## 4 数据结果与验证

### 4.1 数据集组成

本数据集一共 16 个栅格数据文件, 包括 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下多年平均的 NPP 及其变化趋势、NPP 稳定性的多年平均栅格数据<sup>[22, 23]</sup>。以 30 年为一个时期, 分为近期、中期、远期。

(1) RCP45 代表 RCP4.5 气候情景, RCP85 代表 RCP8.5 气候情景;

(2) np<sub>p</sub>\_mean 代表 2006–2099 年的 NPP 均值;

(3) npptrend20062099 代表 2006–2099 年像元级别的 NPP 变化趋势;

(4) P20062099 代表 2006–2099 年像元级的 NPP 变化趋势的显著性水平;

(5) R220062099 代表 2006–2099 年像元级的 NPP 变化趋势的决定系数;

(6) stable 代表稳定性多年均值, 其中 20062035 代表 2006–2035 年近期的多年平均 NPP 稳定性, 20362065 代表 2036–2065 年中期的多年平均 NPP 稳定性, 20652099 代表 2066–2099 年远期的多年平均 NPP 稳定性, 20062099 代表 2006–2099 年全时段的多年平均 NPP 稳定性。

关于单位的说明:

(1) NPP:  $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;

(2) NPP 稳定性: 无量纲;

(3) NPP 变化趋势:  $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;

(4) 显著性水平、决定系数：无量纲。

4.2 数据结果

本数据在像素尺度准确量化了两个未来气候情景下的 NPP 的空间异质性及其变化趋势以及 NPP 稳定性的多年均值。2006–2009 年中国陆地生态系统植被净初级生产力多年均值总体上呈现东高西低，南高北低的空间格局（图 1）。其中，在 RCP4.5 的情景下，全国的 NPP 总值达到了  $4.41 \text{ Pg C}\cdot\text{a}^{-1}$ ，相比于 RCP8.5 情景，RCP4.5 情景略高，NPP 的空间差异较大，相同气候区内的 NPP 较相似，如青藏高原区的 NPP 总量为  $0.57 \text{ Pg C}\cdot\text{a}^{-1}$ ，是中国四大气候区中总 NPP 量最少的区域，热带-亚热带季风区是四大区域中 NPP 总量最大的，为  $2.09 \text{ Pg C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

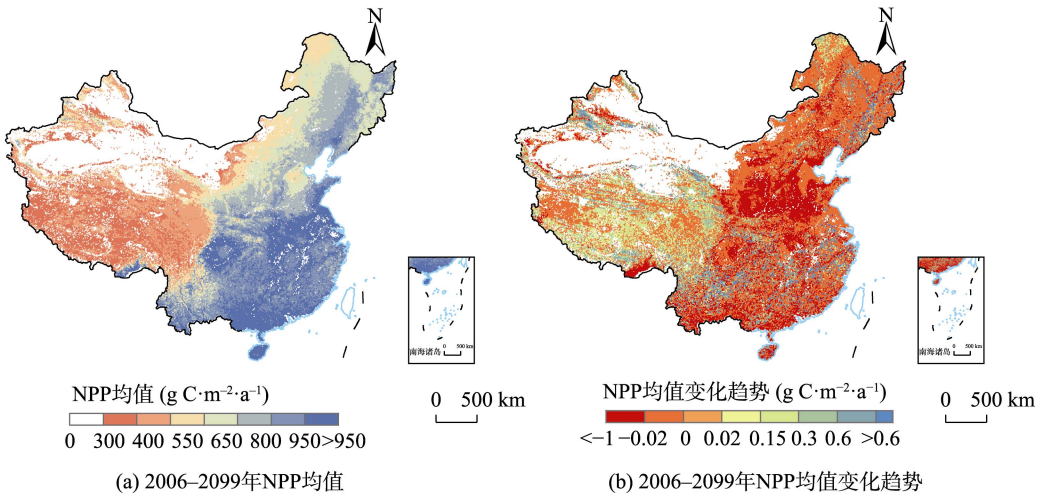


图 1 RCP4.5 情景下 2006–2009 年中国陆地生态系统 NPP 均值及其变化趋势图  
(注：该图基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2016)1594 号的标准地图制作，底图无修改)

然而，根据 NPP 的变化趋势空间格局，除了青藏高原气候区，其余气候区大部分地区都为下降趋势（图 1）。未来百年的 NPP 变化不容乐观。全国 NPP 总量的 94 年年际变化趋势结果显示，RCP4.5 情景和 RCP8.5 情景下都呈现显著下降的趋势（图 2），其中，中等排放情景的下降速率要大于高排放情景。并且，值得注意的是，在 21 世纪 60 年代前后，NPP 总量的变化将出现转折，转折点的形成原因值得探讨。

分时段的 NPP 稳定性空间分布格局结果显示（图 3），2006–2009 年 NPP 稳定性青藏高原区呈现高值，而温带季风区，温带大陆气候区呈现低值；2006–2035 年（近期）的 NPP 稳定性呈现南高北低；2036–2065 年（中期）NPP 稳定性同样呈现南高北低，但南部的高值相对近期较高；2066–2099 年（远期）青藏高原区 NPP 稳定性相对高，出现大量的 NPP 稳定性较差的区域。其中，值得注意的是，青藏高原区呈现出较强的空间异质性。

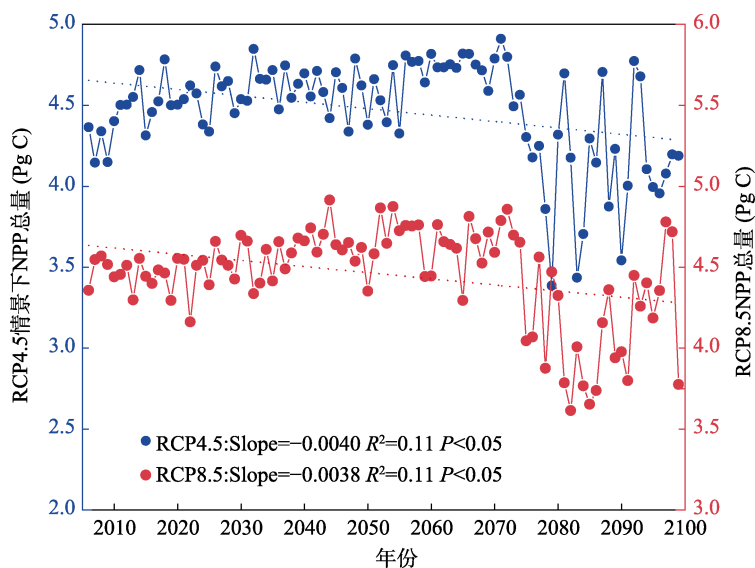


图 2 2006–2099 年中国陆地生态系统 NPP 总量年际变化图

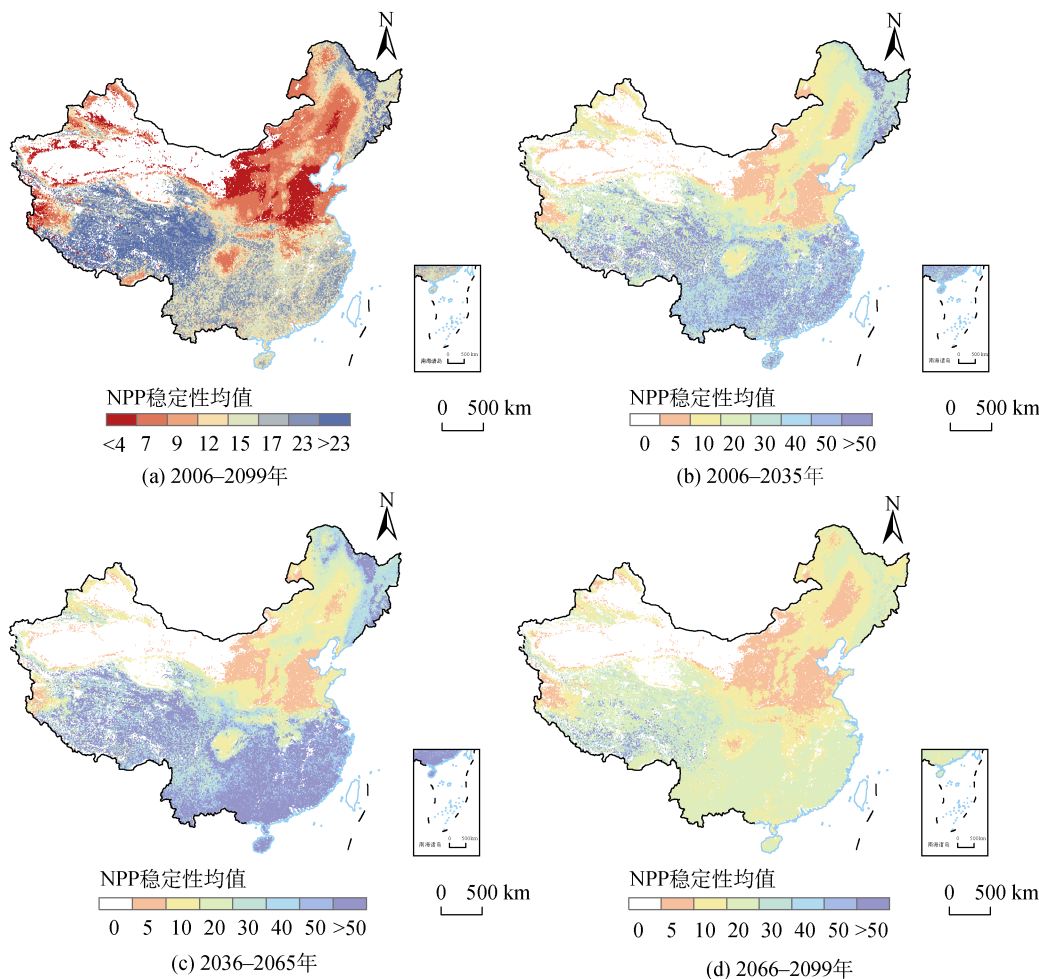


图 3 RCP4.5 情景下不同时段的中国陆地生态系统 NPP 稳定性均值图

### 4.3 数据结果验证

该模型在发展过程中基于中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 观测数据进行了验证评价研究。模拟结果与内蒙古、长白山和禹城站点的涡度相关碳通量观测数据对比表明, 模型能够解释总初级生产力 (GPP) 观测值季节变化的 58%–94%<sup>[14]</sup>; 同时与 MODIS 的 GPP 遥感产品 (MYD17A2H) 表现出了较好的一致性<sup>[14]</sup>, 说明 CEVSA-RS 模型具有较高的可靠性<sup>[16]</sup>。

## 5 讨论和总结

本数据不仅包括 CEVSA-RS 模型模拟的两种未来气候情景下 NPP 空间格局, 还包括近期、中期、远期 NPP 稳定性的空间格局。可用于评估不同分区下的 NPP 总量, 还可用于评估 NPP 应对气候变化的稳定程度。CEVSA-RS 模型已应用于多区域, 多种生产力的评估, 数据结果可靠。本数据研究气候变化情景下植被生产力及其稳定性的变化, 可为考虑区域差异开展诸如生态保护与修复及双碳行动等减缓和适应气候变化的举措等提供科学参考。根据数据显示, 未来百年的 NPP 总体趋势表现为显著下降, 并且中远期的 NPP 稳定性空间分布结果显示, 我们应该重视未来百年的 NPP 变化, 从对 NPP 总量的定量分析转化为 NPP 稳定性的定量分析, 并且青藏高原地区展示了独特的区域异质性, 我们应该有差异地决策不同气候区对未来气候变化如何进行响应。

**作者分工:**王军邦对数据集的开发做了总体设计; 陈惺采集和处理了 NPP 稳定性数据; 叶辉和何启凡采集和处理了 NPP 数据; 王军邦设计了模型和算法; 王春雨做了数据验证; 陈惺, Watson, A. E. 撰写了数据论文。

**利益冲突声明:**本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

### 参考文献

- [1] Behrenfeld, M. J., O'Malley, R. T., Siegel, D. A., *et al.* Climate-driven trends in contemporary ocean productivity [J]. *Nature*, 2006, 444(7120): 752–755.
- [2] Zhao, M. S., Running, S. W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 [J]. *Science*, 2010. 329(5994): 940–943.
- [3] Ostberg, S., Schaphoff, S., Lucht, W., *et al.* Three centuries of dual pressure from land use and climate change on the biosphere [J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(4): 044011.
- [4] Zhang, L., Ren, X. L., Wang, J. B., *et al.* Interannual variability of terrestrial net ecosystem productivity over China: Regional contributions and climate attribution [J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(1): 014003.
- [5] 傅伯杰. 地理学: 从知识、科学到决策[J]. 地理学报, 2017, 72(11): 1923–1932.
- [6] 彭书时, 朴世龙, 于家烁等. 地理系统模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 109–120.
- [7] 徐雨晴, 肖风劲, 於琨. 中国森林生态系统净初级生产力时空分布及其对气候变化的响应研究综述[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 4710–4723.
- [8] 孙庆龄, 李宝林, 李飞, 等. 三江源植被净初级生产力估算研究进展[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1596–1612.
- [9] Law, B. E., Turner, D., Campbell, J., *et al.* Disturbance and climate effects on carbon stocks and fluxes

- across Western Oregon USA [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(9): 1429–1444.
- [10] Wang, J. B., Liu, J. Y., Shao, Q. Q., *et al.* Spatial-temporal patterns of net primary productivity for 1988–2004 based on GLOPEM-CEVSA model in the “Three-river Headwaters” region of Qinghai province, China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(2): 254–269.
- [11] Zhao, Y. M., Niu, S. K., Wang, J. B., *et al.* Light use efficiency of vegetation: a review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(9): 1471–1477.
- [12] Dai, W. J., Jin, H. Y., Zhang, Y. H., *et al.* Advances in plant phenology [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(19): 6705–6719.
- [13] Chapin, F. S., McFarland, J., McGuire, A. D., *et al.* The changing global carbon cycle: linking plant-soil carbon dynamics to global consequences [J]. *Journal of Ecology*, 2009, 97(5): 840–850.
- [14] 王军邦, 杨屹涵, 左婵等. 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[J]. *生态学报*, 2021, 41(18): 7085–7099.
- [15] 杨屹涵. 2000 年以来人类活动和气候变化对中国陆地生态系统总初级生产力的影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [16] 陈惺, 王军邦, 何启凡等. 未来百年气候情景下中国植被净初级生产力稳定性估算数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2023. <https://doi.org/10.3974/geodb.2023.06.01.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2023.06.01.V1>.
- [17] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [18] 陈惺, 王军邦, 何启凡等. 未来气候情景下中国植被净初级生产力稳定性及气候影响[J]. *地理学报*, 2023, 78(3): 694–713.
- [19] 潘小多, 张磊. 基于 RegCM4.6 的中国西北未来气候预测(2007—2099)[DB]. 国家青藏高原科学数据中心, 2019. <https://doi.org/10.11888/Meteoro.tpd.270120>. <https://cstr.cn/18406.11.Meteoro.tpd.270120>.
- [20] Pan, X. D., Zhang, L., Huang, C. L. Future climate projection in Northwest China with RegCM4.6 [J]. *Earth and Space Science*, 2020, 7(2): e2019EA000819.
- [21] 吴炳方, 苑全治, 颜长珍等. 21 世纪前十年的中国土地覆盖变化[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 723–731.
- [22] 张磊, 吴炳方, 李晓松等. 基于碳收支的中国土地覆被分类系统[J]. *生态学报*, 2014, 34(24): 7158–7166.
- [23] 刘亮, 关靖云, 穆晨等. 2008–2018 年伊犁河流域植被净初级生产力时空分异特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(12): 4861–4871.