

DOI: 10.5846/stxb202111053112

毕凡, 潘竞虎. 2000 年以来中国潜在植被净初级生产力的时空分布模拟. 生态学报, 2022, 42(24): 10288-10296.

Bi F, Pan J H. Estimation of temporal and spatial distribution of potential vegetation net primary productivity in China since 2000. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10288-10296.

2000 年以来中国潜在植被净初级生产力的时空分布模拟

毕 凡, 潘竞虎 *

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘要: 潜在植被的净初级生产力 (PNPP) 是在无人干扰情况下, 立地所能发育形成最稳定成熟植被的净初级生产力, PNPP 能够直接反映自然生态系统的质量状况, 是分离人类活动对生态环境影响的重要指标。研究改进了 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型, 引入潜在光合有效辐射吸收比例 (PFPAR) 模拟了 2000—2020 年中国植被 PNPP 的时空分布格局。结果表明: 中国 PNPP 空间分布差异较大, 东南沿海和东北大、小兴安岭地区 PNPP 较高, 新疆、西藏等西部干旱、高寒地区 PNPP 较低, 呈现以 400 mm 等降水量线为界的空间分异格局。2000—2020 年, 中国 PNPP 总体上呈现递增趋势, 年际波动小, PNPP 减少的区域与增加的区域面积基本相等。PNPP 波动较大的地区主要位于青藏高原、四川盆地和贵州高原。研究结果量化了气候变化背景下真实的生态状况和潜在生态状况的差异, 可分离出人类活动对自然生态系统的直接影响, 为制定针对性的生态修复对策提供了科学依据。

关键词: 潜在植被; 净初级生产力; CASA 模型; 时空分布

Estimation of temporal and spatial distribution of potential vegetation net primary productivity in China since 2000

BI Fan, PAN Jinghu *

College of Geography and Environmental Science of Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Potential vegetation net primary productivity (PNPP) is the NPP of the most stable and mature vegetation type without human interference in the current climate conditions. PNPP can directly reflect the quality of natural ecosystems, which is an important index to separate the impact of human activities on ecological environment. This paper improves the CASA model and introduces the potential fraction of photosynthetically active radiation (PFPAR) to simulate the temporal and spatial distribution pattern of PNPP in China's vegetation from 2000 to 2020. The results show that the spatial distribution of China's PNPP is quite different. The PNPP is higher in the coastal areas of southeast China and the Greater and Lesser Khingan Range in northeast China, and lower in the arid and alpine regions of western China such as Xinjiang and Tibet, presenting a spatial differentiation pattern with 400 mm isoprecipitation line as the boundary. From 2000 to 2020, China's PNPP generally showed an increasing trend over time, but the interannual fluctuation was small. The area of PNPP decreased and increased was almost the same. The changes of PNPP in most regions are small, and the areas with large PNPP fluctuation are mainly located on Qinghai-Tibet Plateau, Sichuan Basin and Guizhou. The research results can separate the impact of human activities and climate change on natural ecosystem, and quantify the difference between real ecological status and potential ecological status under external pressure. It provides a scientific basis for formulating

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42071216); 甘肃省自然科学基金项目 (21JR7RA145)

收稿日期: 2021-11-05; **网络出版日期:** 2022-07-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: panjh@nwnu.edu.cn

differentiated Ecological Restoration Countermeasures.

Key Words: potential vegetation; net primary productivity; CASA model; temporal and spatial distribution

陆地生态系统是一个巨大、庞杂的系统,而碳元素循环在气候变化和环境演化中起着举足轻重的作用,也是陆地生态系统各圈层相互作用、相互影响、相互制约的关键因素^[1]。作为陆地碳循环的重要组成部分^[2-4],植被净初级生产力(NPP)是绿色植被一定时间内进行光合作用所产生的有机物量减去绿色植被自身的维持呼吸和生长呼吸消耗以后的残余部分^[5-6]。NPP 是估算陆地生态系统碳源、碳汇以及描述碳循环的重要内容。潜在自然植被的净初级生产力(PNPP)则是指在没有人类干扰的情况下自然植被的净初级生产力,一般认为是人类对于生态环境未造成影响时,自然状态下可能产生的 NPP 值^[7]。对于 PNPP 的定量评估,有助于理解人类活动对生态系统的影响程度,为实现“碳达峰”“碳中和”目标提供科学依据,为应对气候变化和指导生态系统恢复工作提供重要参考。

目前,国内外已有许多学者对植被 PNPP 展开了研究,Klemm 等^[8]利用全球动态植被模型 MC2 研究了 21 世纪气候变化对潜在植被类型的影响,并模拟了 NPP 的时空分布。任正超等^[9]基于 CSCS(Comprehensive sequential classification system)理论,采用改进的 CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型模拟中国潜在自然植被 NPP 及其时空分布格局,并给出了其对地形和气候的响应模式。潘竞虎^[7]等利用分类回归树模型模拟出了中国潜在归一化植被指数(NDVI),用改进的 CASA 模型模拟了中国 PNPP 的空间分布。赵军等^[10]以综合顺序分类系统为基础,用 NPP 分类指数模型模拟了内蒙古自治区各植被类型的 PNPP,并分析了 NPP 与气候因子间的关系。唐正宇^[11]采用改进的集成生物圈模型(IBIS)模拟了伊犁河流域植被的 PNPP,并对人类活动的影响作出分析。总体而言,现今对于 PNPP 的研究还较为缺乏,在模拟方式和理论上均不够成熟,不同学者模拟出的 PNPP 及其分布格局也存在较大的差异^[7]。

目前对 PNPP 的模拟多借助于实际 NPP 的估算模型,常见的方法有:(1)以综合顺序分类法模拟潜在植被类型,利用光能利用率模型对植被 PNPP 进行模拟^[9-11]。(2)识别无人影响点,利用机器学习的方法估算 PNPP^[12]。(3)利用气候模型或过程模型来模拟 PNPP^[1,13]。(4)通过改进实际 NPP 估算模型中的主要参数,达到计算 PNPP 的目的^[7,14],此方法多用于光能利用率模型的改进。CASA 模型是计算 NPP 及 PNPP 时应用最为广泛的模型,虽然该模型充分考虑到环境条件的差异和植被的特性,但在参数的求算过程中仍然存在以下不足:(1)CASA 模型只能在估算光合有效辐射的吸收比例(FPAR)中的比值植被指数最大值(SR_{max})时根据不同植被类型来取值,不能很好地反映植被类型与 NPP 的关系;(2)CASA 模型中最大光能利用率(ϵ_{max})的取值固定为 0.389 gC/MJ,实际上不同植被类型的光能利用率并不相同,最大光能利用率的取值自然也应该有所差异;(3)在 CASA 模型中水分胁迫系数 $W_e(x, t)$ 的计算用到了土壤水分子模型,求算过程涉及到大量参数,数据的获取较为困难,并且精度难以保证^[15]。基于此,本文引入 CSCS 法的气候指标,改进 CASA 模型中水分胁迫因子和最大光能利用率的计算取值,利用潜在叶面积指数(PLAI)估算潜在光合有效辐射的吸收比例(PFPAR),最终模拟出 2000—2020 年中国 PNPP 的空间分布,以期提出一种 PNPP 时空模拟的新视角,丰富人类活动对植被 NPP 影响的研究,为预测气候变化和人类活动对生态环境的影响提供科学依据,进而为制定合理的生态修复政策提供参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源及处理

本文所需气象数据来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的全国 696 个气象站点的 2000—2020 年气象观测数据,采用 AMMRR(Analytic method based on multiple regression and residues)^[16-17]的插值方法插值为 1km 分辨率的栅格数据。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据来自

于 Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution_System (LAADS) 网站 2000—2020 年的 MOD13A3 数据,空间分辨率为 1 km,时间分辨率均为月。地表反射率数据来自于 LAADS 网站的 MOD09A1 数据,其空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 8 天。数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 数据取自中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/Default.aspxDEM>),空间分辨率为 1 km。植被类型数据取自中国 1:100 万植被图 (<https://www.resdc.cn/Default.aspx>),空间分辨率为 1 km。中国干湿分区矢量边界是由地之图网 (<http://map.ps123.net/china/11468.html>) 提供的中国干湿分区图导入 ArcGIS,经过几何校正后手动矢量化得到。

1.2 研究方法

1.2.1 PNPP 的估算方法

本文以 CASA 模型为基本计算式,在改进了模型中水分胁迫系数和最大光能利用率等参数的基础上,通过毛德华^[14]提出的计算潜在光合有效辐射吸收比例 (PFPAR) 的方法计算出 PFPAR,来代替原 CASA 模型中的光合有效辐射吸收比例 (FPAR),从而达到计算 PNPP 的目的。这种方法的优点在于避免了使用气象模型时过多强调气象数据与植被间的线性关系,从而无法精确估算潜在条件下植被 NPP 的问题。此外,与基于遥感数据估算的实际 NPP 相比,解决了空间上数据一致性较低的问题^[14]。PNPP 的计算式为:

$$\text{PNPP}(x, t) = \text{PFPAR}(x, t) \times \text{SOL}(x, t) \times T_{\varepsilon 1} \times T_{\varepsilon 2} \times W_{\varepsilon}(x, t) \times \varepsilon_{\max} \times 0.5 \quad (1)$$

式中,PFPAR (x, t) 为潜在光合有效辐射吸收比例, SOL (x, t) 表示像元 x 在 t 月的太阳总辐射量, $T_{\varepsilon 1}$ 和 $T_{\varepsilon 2}$ 表示温度对光能利用率的影响, W_{ε} 为水分胁迫影响系数, $\varepsilon_{\max}$ 为理想状态下的最大光能利用率,常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例。式 (1) 中主要参数的计算如下:

(1) 潜在光合有效辐射吸收比例 (PFPAR) 计算

本文中的 PFPAR 是计算 PNPP 的重要参数,在以往对实际 NPP 的研究中,FPAR 是用 NDVI 来代表植被生长的状况,但 NDVI 由于遥感的现势性不能反映出“潜在”的特性,因此本文在改进 CASA 模型的基础上,采用毛德华使用的 PFPAR 计算方法^[14],计算 PFPAR 来代替 CASA 模型中的 FPAR,此方法被用来模拟 2000—2010 年东北地区沼泽湿地植被 PNPP 时,表现出较好的效果。由于此方法是通过整合 VPM (Vegetation photosynthesis model) 模型和 TEM (Terrestrial ecosystem model) 模型子模块得到,而 VPM 模型和 TEM 模型都可用于区域和全球尺度的研究,因此本文将其用于中国 PNPP 的估算。PFPAR 的计算式如下:

$$\text{PFPAR} = 1 - e^{-k \times \text{PLAI}} \quad (2)$$

式中, k 取值为 0.5, PLAI 为潜在叶面积指数,参数的确定主要依据地表水平衡理论,参考区域大气模型系统中陆面过程方案以及生物圈-大气传输模式,使用水平衡理论可估算平衡潜在蒸发和降水所需的叶面积,由此产生的叶面积规避了人类活动的影响^[18]。PLAI 计算式如下:

$$\text{PLAI} = \text{LAI}_{\min} + \text{fsw} \times \text{fst} \times (\text{LAI}_{\max} - \text{LAI}_{\min}) \quad (3)$$

其中, $\text{LAI}_{\max}$ 和 $\text{LAI}_{\min}$ 分别是最大和最小叶面积指数,其值由不同植被类型决定; fst 和 fsw 分别表示土壤温度对植被的影响和土壤水分对植被生长的影响。

土壤水分对植被光合作用的影响参照 VPM 模型中利用地表水分指数 (Land surface water index, LSWI) 来计算^[14],公式如下:

$$\text{fsw} = \frac{1 + \text{LSWI}}{1 + \text{LSWI}_{\max}} \quad (4)$$

式中, $\text{LSWI}_{\max}$ 是各像元 LSWI 在生长季中的最大值。

地表水分指数 LSWI 的计算式如下:

$$\text{LSWI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{MIR}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{MIR}}} \quad (5)$$

式中, ρ_{NIR} 代表近红外波段地表反射率, ρ_{MIR} 代表中红外波段地表反射率。

温度对植被光合作用的影响系数 f_{st} 计算式如下:

$$f_{st} = \frac{(T - T_{\min})(T - T_{\max})}{(T - T_{\min})(T - T_{\max}) - (T - T_{\text{opt}})^2} \quad (6)$$

式中, T 是大气温度($^{\circ}\text{C}$); $T_{\max}$, $T_{\min}$, T_{opt} 分别表示各单元生长季(4 月—10 月)植被光合速率所对应的最高温度、最低温度和最适温度。

(2) 水分胁迫系数 $W_e(x, t)$ 计算

在 CASA 模型中水分胁迫系数 $W_e(x, t)$ 的计算用到了土壤水分子模型, 求算过程涉及到大量的参数, 数据的获取较为困难, 并且精度难以保证。张美玲等^[15]在模拟 2004—2008 年中国草地 NPP 的研究中, 改进了水分胁迫系数, 在 CASA 模型应用中取得了较好的结果, 因此, 本文引入其对于水分胁迫系数的改进办法, 计算式如下:

$$W_e(x, t) = \frac{\text{EET}}{\text{PET}} = \frac{(0.29K^{0.5} + 0.6)(K \times L(K) + 0.469K^{0.5} + 9.33(\sum \theta)^{-1})}{(K + 0.469K^{0.5} + 0.966)(L(K) + 0.933K^{-1})} \quad (7)$$

$$L(K) = K + 0.906K^{0.5} + 0.22 \quad (8)$$

式中, EET 为估算的实际蒸散, PET 为潜在蒸散。 $\sum \theta$ 为 $>0^{\circ}\text{C}$ 月积温, K 为湿润度指标, 计算式如下:

$$K = \frac{P}{0.1 \sum \theta} \quad (9)$$

式中, P 为月降水量。

(3) 最大光能利用率 $\varepsilon_{\max}$ 计算

最大光能利用率 $\varepsilon_{\max}$ 的取值参考朱文泉等^[19]在模拟中国典型植被光能利用率研究中的取值, 如表 1 所示。

表 1 最大光能利用率取值/(gC/MJ)

Table 1 Values of maximum light energy utilization

序号 Serial number	植被类型 Vegetation types	最小值 Min	最大值 Max	模拟值 Analog value
1	落叶针叶林	0.159	2.453	0.485
2	常绿针叶林	0.204	2.553	0.389
3	落叶阔叶林	0.256	2.521	0.692
4	常绿阔叶林	0.407	2.194	0.985
5	针阔混交林	0.242	0.74	0.475
6	常绿、落叶阔叶混交林	0.461	1.295	0.768
7	灌丛			0.429
8	耕作植被			0.542
9	草地			0.542
10	其他			0.542

CASA 模型中其余参数的计算见参考文献^[13]

1.2.2 时空变化分析方法

(1) 年际变化率

研究时间段内 PNPP 年际变化率的计算采用最小二乘法实现, 计算式如下^[20—22]:

$$\text{斜率} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{PNPP}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{PNPP}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (10)$$

式中, $Solpe$ 是 2000—2020 年 $PNPP_i$ 的年际变化趋势; i 代表年份, n 代表总年份 ($n=21$), $PNPP_i$ 代表第 i 年的 $PNPP$ 。

(2) 稳定性分析

$PNPP$ 空间变化的稳定性分析通过变异系数实现^[23–24], 计算式如下:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\bar{x}} \quad (11)$$

式中, CV 为 $PNPP$ 变异系数, i 为年份, x_i 为第 i 年的 $PNPP$, $\bar{x}$ 为 2000—2020 年 $PNPP$ 均值。

2 结果与分析

2.1 $PNPP$ 的空间分布

2000—2020 年, 中国年均 $PNPP$ 的空间分布如图 1 所示。由图 1 可知, $PNPP$ 在空间分布上总体呈现自西北向东南递增的趋势。以 400 mm 等降水量线为界, 位于其东侧区域的 $PNPP$ 值几乎都大于 600 gC/m², 而在其西侧的值则几乎都小于 600 gC/m²。 $PNPP$ 的高值区域 (>800 gC/m²) 主要集中在降水充沛、气温利于植被生长的大兴安岭、小兴安岭、长白山、华南沿海、东南沿海以及藏南和云南边境地区; 贵州、重庆和四川虽然也处于湿润区内, 但由于其特殊的地形和气候的影响, 夏季潮湿, 冬季阴冷, 阴天及云雾天气较多, 日照时间较短, 导致太阳辐射量少, $PNPP$ 值不足 800 gC/m²。 $PNPP$ 次高值区主要分布在 400 mm 等降水量线附近, 包括新疆南部、西藏中北部、青海中部、甘肃中南部、宁夏、山西、河北、辽宁、吉林北部、黑龙江南部和内蒙古东北部地区, $PNPP$ 值一般在 400—800 gC/m²。 $PNPP$ 低值区主要分布在西北地区, 这些地方多沙漠、戈壁, 年降水量不足 200 mm, 植被稀少、气候干燥, 植被生产力较低, $PNPP$ 值多在 0—400 gC/m² 之间。新疆的伊犁河谷及阿尔泰山地区、甘肃的祁连山等地存在的特殊地形导致这些地区降水量相对较高, $PNPP$ 值也高出其周围地区。按干湿区划来看, 干旱区的 $PNPP$ 值最低, 湿润区的 $PNPP$ 值最高, 年均 $PNPP$ 大小排序为: 湿润区 (898.84 gC/m²) > 半湿润区 (808.95 gC/m²) > 半干旱区 (588.399 gC/m²) > 干旱区 (335.33 gC/m²)。

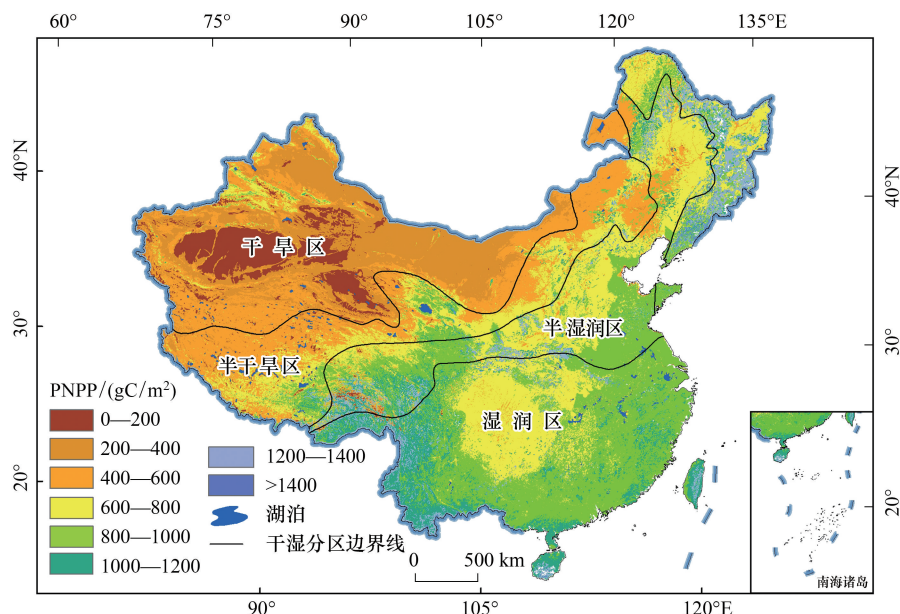


图 1 2000—2020 年中国年均 $PNPP$ 空间分布

Fig.1 Spatial distribution of annual mean $PNPP$ in China during 2000—2020

$PNPP$: 潜在净初级生产力 Potential net primary productivity

2.2 PNPP 的年际变化

2000—2020 年,中国 PNPP 年均值为 663.62 gC/m^2 ,PNPP 年均最高值出现在 2013 年,为 706.19 gC/m^2 ,最低值出现在 2020 年,为 628.41 gC/m^2 。总体来看,20 年间 PNPP 以年均 2.9 gC/m^2 的速度缓慢增加,但年际波动较大(图 2)。

根据模拟的 PNPP 空间分布,计算 2000—2020 年栅格尺度上 PNPP 的年际变化,结果如图 3 所示。由图 3 可知,20 年间 PNPP 增加的区域与 PNPP 减小的区域面积基本相等。PNPP 年际变化率在 $-2\sim 6 \text{ gC/m}^2$ (基本不变和小幅减少)的面积就占到了全国陆地总面积的 68.24%,这说明 PNPP 的年际变化虽存在一定的波动,但变化幅度总体而言较小。PNPP 年际增加的区域占全国陆地面积的 50.81%,PNPP 显著增加的区域主要分布在两大片区:一是东北地区,包括大小兴安岭、长白山、内蒙古呼伦贝尔和辽宁中东部地区;二是西南地区的川鄂黔交界地区。PNPP 年际变化减少的区域则占全国陆地面积的 49.19%,PNPP 显著减少的区域集中在青藏高原,散布在西北干旱区以及海南岛的南部。

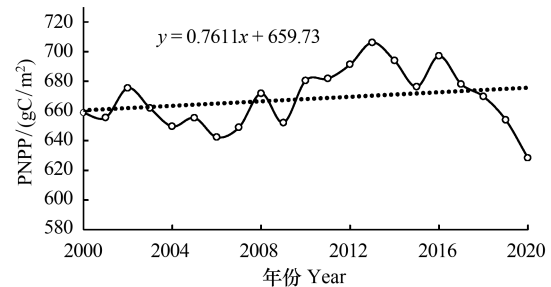


图 2 中国 PNPP 年均值年际变化

Fig.2 Interannual variation of annual mean value of PNPP in China

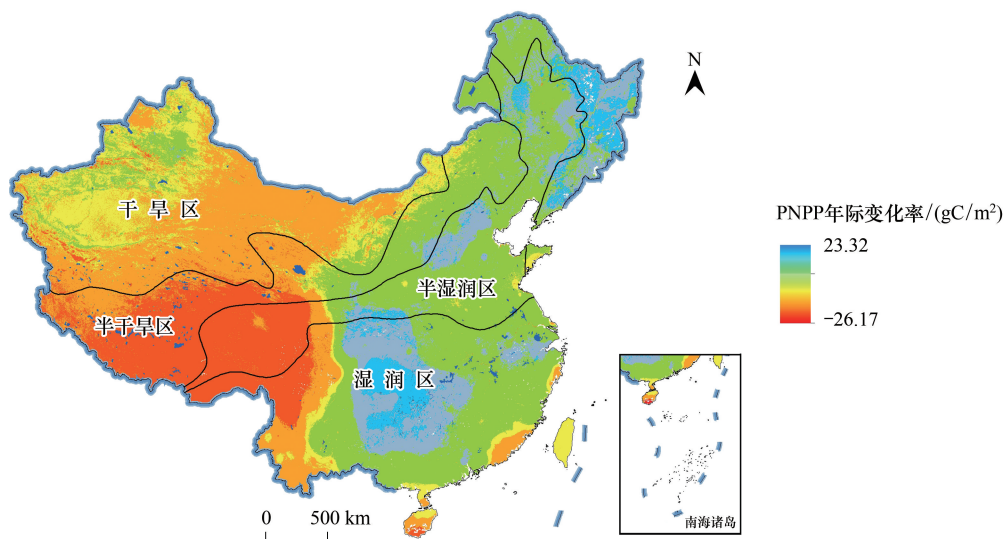


图 3 2000—2020 年中国 PNPP 的年际变化率

Fig.3 Annual change rate of PNPP in China from 2000 to 2020

2.3 PNPP 的空间稳定性

为了探索 PNPP 在空间上的稳定性,基于像元尺度计算了中国 PNPP 的变异系数,借鉴前人对变异系数的分级标准^[24],将 PNPP 波动程度划分为五个等级(表 2),分析全国植被 PNPP 的波动变化特征。2000—2020 年,中国 PNPP 变异系数的平均值为 0.088,表明中国 PNPP 的变化整体较小。图 4 是 PNPP 变异系数的空间分布,由图 4 和表 2 可知,中国大部分地区 PNPP 的变异系数都较小,变异系数 < 0.1 的低波动地区面积达 660.82 万 km^2 ,占全国总面积的 68.87%,说明中国大部分地区的 PNPP 都处于较为稳定的状态。PNPP 中等波动变化($0.1 < \text{变异系数} \leq 0.15$)和相对较高波动变化($0.15 < \text{变异系数} \leq 0.2$)的地区主要在青藏高原、长江中上游和华北地区中部,面积分别为 245.74 万 km^2 和 33.93 万 km^2 ,占全国总面积的 25.61% 和 3.54%。高波动变化(变异系数 > 0.2)的地区则主要集中在贵州,零散分布在西藏东部和新疆部分地区,所占比例为 1.98%。

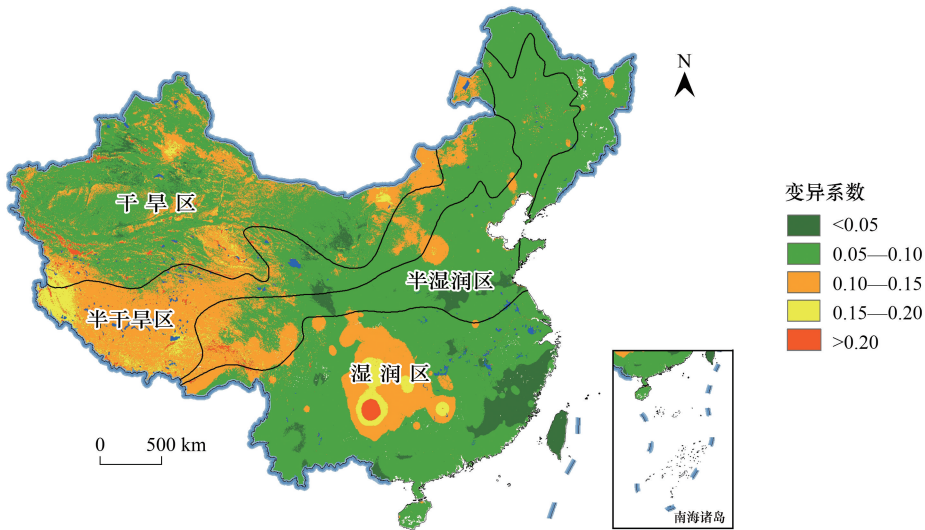


图 4 中国 PNPP 的变异系数空间分布
Fig.4 Spatial distribution of variation coefficient of PNPP in China

表 2 中国 PNPP 的变异系数面积统计
Table 2 Area statistics of variation coefficient of PNPP in China

变异系数 (CV) Coefficient of variation	变异程度 Degree of variation	面积 Area/km ²	占总面积百分数/% Percentage of total area
$CV \leq 0.05$	低波动变化	454410	4.73
$0.05 < CV \leq 0.1$	相对较低的波动变化	6153831	64.14
$0.1 < CV \leq 0.15$	中等波动变化	2457410	25.61
$0.15 < CV \leq 0.2$	相对较高的波动变化	339309	3.54
$CV > 0.2$	高波动变化	189760	1.98

PNPP: 潜在净初级生产力 Potential net primary productivity

3 讨论

3.1 与相关研究成果比较

目前尚未有普遍认可的 PNPP 估算方法,相关成果较少。将本文模拟的植被 PNPP 多年平均值与其他学者的研究结果进行对比(表 3):任正超等^[9]利用 CSCS 方法和 MODIS 数据模拟得到中国 1982—2012 年自然植被的 PNPP 平均值为 586.74 gC/m²。王玉涛^[12]通过识别无人区为影响点,估算了 2001—2017 年中国 PNPP,计算出中国 PNPP 年均值为 529.16 gC/m²。潘竞虎等^[7]采用分类回归树模型模拟中国潜在 NDVI,用改进的 CASA 和潜在 NDVI 计算得出中国 PNPP 多年均值为 468.94 gC/m²。张美玲等^[11]基于草原综合顺序分类法和 CASA 模型对中国 2004—2008 年的 PNPP 进行了计算,得到中国 PNPP 年均值为 503.8 gC/m²。本文估算出的中国 PNPP 多年均值为 663.62 gC/m²,高于前人的研究结果,其原因可能是本文使用朱文泉^[19]模拟的中国植被最大光能利用率,其主要植被类型的最大光能利用率取值基本都大于原式中的固定取值(0.389 gC/MJ),而张美玲等人的研究中其 PNPP 模拟值是生物量实测值与气象要素实测值之间进行回归后用插值方法获得,受插值方法的限制,其 PNPP 模拟结果较低^[11]。潘竞虎等的研究中由于其数据限制,海南等地的气象站点较少,气温空间化的结果并不理想,整体偏低^[7],可能导致模拟出的 PNPP 值较低。任正超等^[9]和王玉涛^[12]模拟的结果虽与本文的结果较为接近,但由于采用的估算模型和时间区间不同,导致模拟的结果也不尽相同。

表 3 不同学者估算中国 PNPP 的结果比较

Table 3 Comparison of different scholars' estimation results of PNPP in China

研究年限 Years	研究方法 Methods	主要结果 Results	参考文献 References
1982—2012	将草原综合顺序分类系统中的热量指标和湿润度指标引入 CASA 模型来计算 PNPP	PNPP 多年平均值为 586.74 gC/m ² , 总体上随着时间的推移呈现递增趋势	[9]
1981—2015	利用分类回归树模型计算潜在 NDVI, 在此基础上采用 CASA 模型计算 PNPP	PNPP 多年平均值为 468.94 gC/m ²	[7]
2004—2008	基于草原综合顺序分类系统改进 CASA 模型, 计算 PNPP	PNPP 多年平均值为 503.8 gC/m ² , PNPP 总体呈现增加趋势, 其总量增加了 23%	[11]
2001—2017	利用改进的 CASA 模型估算了实际 NPP, 再识别出无人为影响点, 在此基础上利用随机森林法估算 PNPP	PNPP 多年平均值为 529.16 gC/m ² , PNPP 以年均 1.48 gC/m ² 的速度呈增加趋势	[12]

从模拟结果的空间分布上来看, 本文计算出的 PNPP 值海南省最高, 为 1132.8 gC/m², 其次是台湾、云南和福建, PNPP 值分别为 1076.5 gC/m²、1030.6 gC/m² 和 961.1 gC/m², PNPP 值最小的省份是新疆, 为 323.1 gC/m², 而在任正超等^[9]的研究中, 全国 PNPP 值最高的省份是海南省 (664.3 gC/m²), 其次是福建 (520.6 gC/m²) 和云南 (518.9 gC/m²), 最低值同样是新疆 (54.6 gC/m²)。

从模拟的 PNPP 变化趋势来看, 本文发现中国自然植被 PNPP 在年际上总体表现出波动中增加的趋势, 这与任正超^[9]和张美玲等^[11]的研究结果类似, 但与赵东升等^[25]的研究结果相反。此外, 本文模拟出的 PNPP 最高值在 2013 年, 这与王玉涛^[12]的模拟结果一致, 这可能是由于 2013 年全国太阳辐射均值高于其他年份, 2020 年达到最低。本文发现青藏高原和四川盆地 PNPP 的波动较高, 这是因为青藏高原地处亚洲腹地, 区内高寒生态系统极其脆弱, 对气候变化的响应极为显著^[26]。四川盆地四周相接壤的高原阻隔了盆地内外低层大气的交换, 且盆地暴雨频繁, 降水强度、持续时间和影响范围年际变化较大^[27], 致使该地 PNPP 波动较大。

3.2 研究结果的不确定性

本文中的不确定性主要来自与数据有关的不确定性和模型相关的不确定性两方面。在数据方面, 由于植被类型数据更新时间长且可获取的时间有限, 因此本文研究的时间序列只选择了 2000—2020 年, 没有进行更长时间序列的分析。受数据获取的限制, 中国气象数据网中站点较多的年太阳辐射数据只提供到 2016 年, 本文 2017—2020 年的太阳辐射数据选择了太阳辐射日值数据集, 但其在青藏高原的站点较少, 一定程度上影响了太阳辐射的空间化, 可能导致估算出的 2017—2020 年 PNPP 值整体偏低。在模型方面, CASA 模型是依据北美地区植被所建立的, 全球各地植被类型差异较大, 模型中参数的修改较为困难, 本文将 CSCS 法中的积温和湿润度引入 CASA 模型水分胁迫系数的计算中, 简化了计算过程, 但同时也必然会在一定程度上牺牲 CASA 模型的过程机理优势。此外, 本文最大光能利用率的取值借鉴朱文泉等^[19]的研究, 依据不同的植被类型取值, 但其在当时的研究对灌木等的实测数据较少, 加之植被分类的精度也可能也会对模拟结果产生一定的影响。在广泛获取高精度数据的基础上, 改进最大光能利用率取值, 开展更长时间序列的 PNPP 时空分布研究, 深入分析城市化推进、重大生态工程的实施等人类活动对 NPP 的影响, 将是下一步研究的重要方向。

4 结论

本文将 CSCS 模型中的积温和湿润度计算方法引入 CASA 模型, 改进了模型中水分胁迫系数的计算, 利用潜在叶面积指数估算出 PFPAR, 模拟了中国 PNPP 的时空分布。主要结论如下:

(1) 基于 CASA 模型模拟 PNPP, 避免了使用气象模型时过多强调气象数据与植被间的线性关系, 从而无法精确估算潜在条件下植被 NPP 的问题。与基于遥感数据估算的实际初级生产力相比, 解决了空间上数据一致性较低的问题。

(2) 中国 PNPP 空间分布差异显著, 整体呈现出东南沿海和东北大小兴安岭地区高, 西北地区低的分布格局, 以 400 mm 等降水量线为界, 其东侧区域的 PNPP 值大都 >600 gC/m², 而其西侧的值则几乎都 <600

gC/m²。

(3) 2000—2020 年, 中国 PNPP 值总体呈现上升趋势, 年均 PNPP 最高值出现在 2013 年, 为 706.19 gC/m², 最低值出现在 2020 年, 为 628.41 gC/m²。PNPP 年际变化小, 大部分地区的 PNPP 空间变化稳定, PNPP 变异系数多年平均值为 0.088, 青藏高原, 四川盆地和贵州等地的 PNPP 波动变化较大。

参考文献 (References):

- [1] 唐正宇. 2000—2017 年伊犁河流域植被 NPP 潜在变化及人类活动影响分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [2] 王莉娜, 宋伟宏, 张金龙, 马晓芳, 赵鸿雁, 黄晓东. 祁连山国家公园植被净初级生产力时空演变及驱动因素分析. 草业科学, 2020, 37(8): 1458-1474.
- [3] Zhang Y, Hu Q W, Zou F L. Spatio-temporal changes of vegetation net primary productivity and its driving factors on the Qinghai-Tibetan plateau from 2001 to 2017. Remote Sensing, 2021, 13(8): 1566.
- [4] Xing W X, Chi Y, Ma X J, Liu D H. Spatiotemporal characteristics of vegetation net primary productivity on an intensively-used estuarine alluvial island. Land, 2021, 10(2): 130.
- [5] Potter C S, Klooster S, Brooks V. Interannual variability in terrestrial Net primary production: Exploration of trends and controls on regional to global scales. Ecosystems, 1999, 2(1): 36-48.
- [6] 张仁平, 郭靖, 张云玲. 新疆草地净初级生产力(NPP)空间分布格局及其对气候变化的响应. 生态学报, 2020, 40(15): 5318-5326.
- [7] 潘竞虎, 徐柏翠. 中国潜在植被 NPP 的空间分布模拟. 生态学杂志, 2020, 39(3): 1001-1012.
- [8] Klemm T, Briske D D, Reeves M C. Potential natural vegetation and NPP responses to future climates in the U.S. great plains. Ecosphere, 2020, 11(10): e03264.
- [9] 任正超, 朱华忠, 史华, 柳小妮. 中国潜在自然植被 NPP 时空分布格局变化及其对气候和地形的响应. 草地学报, 2017, 25(3): 474-485.
- [10] 赵军, 师银芳, 王大为. 基于 IOCS 的内蒙古潜在植被 NPP 空间分布特征研究. 自然资源学报, 2012, 27(11): 1870-1880.
- [11] 张美玲, 蒋文兰, 陈全功, 柳小妮. 基于 CSCS 改进 CASA 模型的中国草地净初级生产力模拟. 中国沙漠, 2014, 34(4): 1150-1160.
- [12] 王玉涛. 2000 年以来人类活动对中国植被净初级生产力的影响[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- [13] 周妍妍, 朱敏翔, 郭晓娟, 李凯, 苗俊霞, 郭建军, 徐晓峰, 岳东霞. 疏勒河流域气候变化和人类活动对植被 NPP 的相对影响评价. 生态学报, 2019, 39(14): 5127-5137.
- [14] 毛德华. 定量评价人类活动对东北地区沼泽湿地植被 NPP 的影响[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2014.
- [15] 张美玲, 陈全功, 蒋文兰, 柳小妮. 基于草地综合顺序分类法的 CASA 模型改进. 中国草地学报, 2011, 33(4): 5-11.
- [16] 郭靖, 柳小妮, 任正超. 基于 AMRRR 插值法的草地综合顺序分类研究——以甘肃省为例. 草业科学, 2012, 29(3): 384-391.
- [17] 王红霞, 柳小妮, 郭靖, 任正超, 王凤萍, 潘冬荣. AMRRR 插值法的改进及其在内蒙古草地综合顺序分类中的应用. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 904-912.
- [18] Myneni R B, Los S O, Asrar G. Potential gross primary productivity of terrestrial vegetation from 1982-1990. Geophysical Research Letters, 1995, 22(19): 2617-2620.
- [19] 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.
- [20] Liu Y Y, Yang Y, Wang Q, Du X L, Li J L, Gang C C, Zhou W, Wang Z Q. Evaluating the responses of net primary productivity and carbon use efficiency of global grassland to climate variability along an aridity gradient. Science of the Total Environment, 2019, 652: 671-682.
- [21] Chen T T, Peng L, Liu S Q, Wang Q. Spatio-temporal pattern of net primary productivity in Hengduan Mountains area, China: impacts of climate change and human activities. Chinese Geographical Science, 2017, 27(6): 948-962.
- [22] 任晋媛, 佟斯琴, 包玉海, 郭晓萌. 内蒙古地区极端气候变化及其对植被净初级生产力的影响. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2410-2420.
- [23] 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.
- [24] 刘洋洋, 章钊颖, 同琳静, 王倩, 周伟, 王振乾, 李建龙. 中国草地净初级生产力时空格局及其影响因素. 生态学杂志, 2020, 39(2): 349-363.
- [25] 赵东升, 吴绍洪. 气候变化情景下中国自然生态系统脆弱性研究. 地理学报, 2013, 68(5): 602-610.
- [26] 刘飞, 刘峰贵, 周强, 陈琼, 汪生珍, 郭蓉, 马伟东. 青藏高原生态风险及区域分异. 自然资源学报, 2021, 36(12): 3232-3246.
- [27] 周斌, 王春学, 张顺谦, 邓彪, 陈文秀, 孙蕊. 四川盆地区域性暴雨过程相似度指标及其与灾情的关系研究. 气象与环境科学, 2021, 44(5): 33-39.