

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.017

# 中国陆地植被生态系统 NPP 空间格局变迁分析

孙金珂<sup>1</sup> 牛海鹏<sup>1</sup> 袁 鸣<sup>2</sup>

(1. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454000; 2. 河南省测绘工程院, 郑州 450003)

**摘要:** 基于2000—2015年全国温度和降水量数据,利用 Thornthwaite Memorial 模型(TW)和周广胜-张新时(ZGS)模型计算了全国净初级生产力(NPP),结合土地利用数据,采用变化斜率法分析了农田生态系统、森林生态系统、草地生态系统净 NPP 年际变化、波动趋势以及空间变化特征。结果表明,基于上述两种方法模拟的全国 NPP 空间格局、变化趋势基本一致,整体相关性较高, $R^2$ 达到0.770 7,对各陆地植被生态系统相关性而言,由大到小依次为:森林生态系统、农田生态系统、草地生态系统;我国植被净初级生产力在空间分布上呈“南高北低”的状态,由东南向西北呈逐渐递减趋势;近16年,全国植被潜在生产力和实际生产力均呈缓慢下降趋势,如不采取任何措施,将继续保持缩减趋势。本研究为必须采取强制措施保护我国生态系统这一论断提供了科学依据。

**关键词:** 生态系统; TW 模型; ZGS 模型; 净初级生产力; 时空变化

中图分类号: Q948      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2020)06-0162-07      OSID: 

## Spatial Pattern Change and Analysis of NPP in Terrestrial Vegetation Ecosystem in China

SUN Jinke<sup>1</sup> NIU Haipeng<sup>1</sup> YUAN Ming<sup>2</sup>

(1. School of Surveying and Mapping and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China  
2. Henan Institute of Surveying and Mapping Engineering, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** Based on temperature and precipitation data of the whole country from 2000 to 2015, the Thornthwaite Memorial model (TW) and Zhou – Zhang (ZGS) model were used to calculate the potential net primary productivity (NPP) and the actual net primary productivity, the data of land-use change slope method was combined to analyze the farmland ecosystem, forest ecosystem, grassland ecosystem net NPP, interannual fluctuation trend and spatial variation characteristics, and the correlation between the actual productivity and potential productivity was evaluated. The results showed that the spatial pattern and change trend of national NPP simulated by the above two methods were basically the same, and the overall correlation was very high, the determination coefficient  $R^2$  can reach 0.770 7. For the correlation of all land vegetation ecosystems, from most significant to least significant was as follows: forest ecosystem, farmland ecosystem, grassland ecosystem; the spatial distribution of the net primary productivity of vegetation in China presented the spatial difference of “high in the south and low in the north”, which showed a gradual decline trend from southeast to northwest; in the past 16 years, both potential and actual productivity of vegetation in China showed a slow decrease trend, if no measures were taken, decreasing trend would be maintained. The research results provided a scientific basis for China to take compulsory measures to protect the ecosystem.

**Key words:** ecosystem; TW model; ZGS model; net primary productivity; change of time and space

### 0 引言

在全球气候变化响应研究中,监测长时间序列绿色植被活动的年际变化特征是理解和模拟生态系

统动态变化特征的重要手段<sup>[1-5]</sup>。目前,全球变暖给全球资源配置和农业生产带来了不可忽视的影响,绿色植被作为陆地生态系统中不可或缺的一部分,对全球变化具有极其重要的反馈作用,环境变化

收稿日期: 2019-11-15    修回日期: 2020-04-02  
基金项目: 河南理工大学创新型科研团队项目(T2018-4)和河南省科技攻关项目(182102110260)  
作者简介: 孙金珂(1992—),男,博士生,主要从事遥感科学与技术研究,E-mail: 111804010003@home.hpu.edu.cn  
通信作者: 牛海鹏(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事土地资源管理研究,E-mail: niuhaipeng@126.com

会导致森林减少<sup>[6]</sup>、土壤沙化、草地退化<sup>[7]</sup>等。我国陆地面积辽阔、生态系统多样,在全球气候变化的大背景下,研究我国陆地植被生态系统长时间序列的变化趋势,对我国合理配置资源、提高生产力水平、采取趋利避害的生态环境保护措施,以及促进社会经济的稳定发展具有重要意义。

陆地植被净初级生产力(NPP)是研究生态系统中物质与能量运转的基础,NPP 是指植物在初级生产过程中,单位时间和单位面积积累的有机物质总量,受多方面因素的影响,如气候、土壤类型、养分含量、CO<sub>2</sub>浓度等<sup>[8-10]</sup>。假设在其他因子处于最佳状态,充分利用光、热、水气候资源时,将单位面积土地上可能获得的最高生物学产量或农业产量称为气候生产潜力<sup>[11-13]</sup>。气候生产潜力计算模型有多种,在众多研究中认为 Thornthwaite Memorial (TW) 模型<sup>[14-17]</sup>属于统计经验模型,将其作为潜在气候生产力模型模拟潜在 NPP;周广胜-张新时(ZGS)模型<sup>[18-21]</sup>将植被生产力与气温、降水等联系起来,有利于研究气候变化与植被的相互作用关系,模拟生产力模型与实际较为接近<sup>[22-24]</sup>,因此通常将其模拟结果作为实际值。本研究运用 TW 模型和 ZGS 模型分析全国以及各陆地植被(农田、森林和草地)潜在生产力、实际生产力时空分布及其变化规律,研究近 16 年全国气候生产力的时空演变特征,并分析实际生产力与潜在生产力之间的相关关系,为指导全国充分利用气候资源、提高生产力水平及促进农业可持续发展提供科学依据。

1 数据源

采用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),该平台提供中国 1980 年以来逐年年平均气温、年降水量空间插值数据集,是基于全国 2 400 多个气象站点的日观测数据,通过整理、计算和空间插值处理生成,本研究采用 2000—2015 年的温度、降水量数据,年平均气温单位为℃,年降水量单位为 mm,空间分辨率为 1 km。

采用 2000、2005、2010、2015 年的中国土地利用现状遥感监测数据,基于 Landsat 遥感影像解译得到的 1 km 栅格数据,是目前我国精度较高的土地利用遥感监测数据。由于植被的年变化量不大,通过 2000 年代表 2000、2001、2002、2003 年的土地利用,2005 年代表 2004、2005、2006、2007 年的数据,2010 年代表 2008、2009、2010、2011 年的数据,2015 年代表 2012、2013、2014、2015 年的数据。此产品将土地利用覆盖类型划分为 6 类,分别为耕地、林地、草地、水体、居民地和未利用土地。利用其分类标准将土

地利用数据划分为森林生态系统、草地生态系统、农田生态系统等,为后续研究各陆地植被生态系统 NPP 年际变化提供数据支撑。

2 研究方法

2.1 气候生产力模型

2.1.1 Thornthwaite Memorial 模型

Thornthwaite 模型基于蒸腾蒸发量(ET)与气温、降水和植被之间的关系,建立了 NPP 与 ET 之间的统计关系;在此基础上,LEITH 等<sup>[25]</sup>根据世界 5 个大洲 50 个不同地点的植被净初级生产力资料,在 1975 年提出了 TW 模型。此模型考虑的气候要素较为简单,且能够较好地反映气温、降水量和蒸散量等影响植物生长发育的关键因子,拟合度较高,其计算式为

$$NPP_T = 3\,000 [1 - e^{-0.000\,969\,5(v-20)}]$$
 (1)

其中 
$$v = \frac{1.05r}{\sqrt{1 + \left(1 + \frac{1.05r}{L}\right)^2}}$$
 (2)

$$L = 300 + 25y + 0.05y^3$$
 (3)

式中  $NPP_T$ ——由蒸散量决定的植被气候生产潜力,g/m<sup>2</sup>

$v$ ——年均实际蒸散量,mm  
 $r$ ——年均降水量,mm  $y$ ——年均温度,℃  
 $L$ ——年均最大蒸散量,mm

2.1.2 周广胜-张新时模型

周广胜、张新时根据植物生理生态学特点,基于能量平衡方程和水量平衡方程的区域蒸散模式,建立了结合植物生理生态学特点和水热平衡关系的自然植被净第一性生产力模型,计算式为

$$NPP = 100R_{rdi} \frac{rR_n(r^2 + R_n^2 + rR_n)}{(R_n + r)(R_n^2 + r^2)} \cdot \exp(-\sqrt{9.87 + 6.25R_{rdi}})$$
 (4)

其中 
$$R_n = rR_{rdi}L_i$$
 (5)

$$R_{rdi} = (0.629 + 0.237P_{per} - 0.003\,13P_{per}^2)^2$$
 (6)

$$P_{per} = \frac{P_{pet}}{r} = \frac{58.93B_T}{r}$$
 (7)

$$B_T = \frac{\sum t}{365} = \frac{\sum T}{12}$$
 (8)

$$L_i = 597 - 0.6T$$
 (9)

式中  $t$ ——日均温,℃  $T$ ——月均温,℃  
 $B_T$ ——生物温度,℃  
 $R_n$ ——年净辐射,mm  
 $R_{rdi}$ ——辐射干燥度  
 $L_i$ ——蒸发潜热,kJ/g  
 $P_{pet}$ ——可能蒸散量,mm

$P_{per}$ ——可能蒸散率

2.2 变化斜率法

为研究 2000—2015 年全国 NPP 的时间序列变化趋势,在采用上述两种方法计算 NPP 结果的基础上,采用变化斜率法对其结果的年际变化进行模拟,计算式为

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n i A_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n A_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (10)$$

式中  $k$ ——变化斜率  $n$ ——时间年数  
 $A_i$ ——第  $i$  年每一个栅格像元内的 NPP 值  
 $k$  为正,表明 NPP 呈增加趋势; $k$  为负,表明 NPP 呈降低趋势。

3 结果分析

3.1 TW 模型模拟潜在 NPP

3.1.1 全国潜在 NPP 空间分布

TW 模型对中国气候生产潜力计算值如图 1 所示。由图 1 可知,2000—2015 年全国气候生产潜力年际变化较大,整体呈轻微下降趋势,近 16 年平均值为 899.40 g/m<sup>2</sup>,其中 2012 年达到最大,为 945.54 g/m<sup>2</sup>,2015 年最小,为 794.49 g/m<sup>2</sup>。在整体呈减少的趋势下,全国潜在 NPP 反复波动,2009—2010 年增加明显,增加了 80.78 g/m<sup>2</sup>;2012—2015 年减小明显,减小了 151.05 g/m<sup>2</sup>。

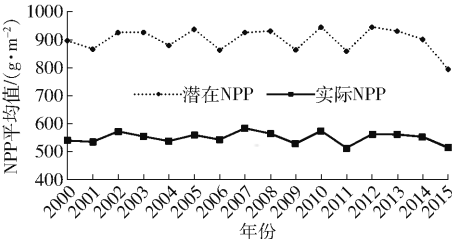


图 1 2000—2015 年全国 NPP 年均值

Fig. 1 Annual average of NPP in China from 2000 to 2015

图 2 为基于 TW 模型的 NPP 均值空间分布,由于不同年份气候因子、地形因子、物候特征以及植被种类的不同,使得全国潜在生产力的空间分布也有所不同。全国范围内,潜在 NPP 出现明显的区域差异,呈“南高北低”的分布差异,由东南向西北呈逐渐递减趋势,分布状况始终保持不变。西北干旱区域潜在 NPP 低于全国平均水平,基本处于 600 g/m<sup>2</sup> 以下;而秦岭—淮河以南地区潜在 NPP 较高,基本分布在 1 200 g/m<sup>2</sup> 以上。从气候生产潜力年际的区域分异特征来看,由大到小依次为华南区域、西南地区、华中地区、华东大部分地区、东北地区、华北地区、青藏高原地区、西北干旱区。

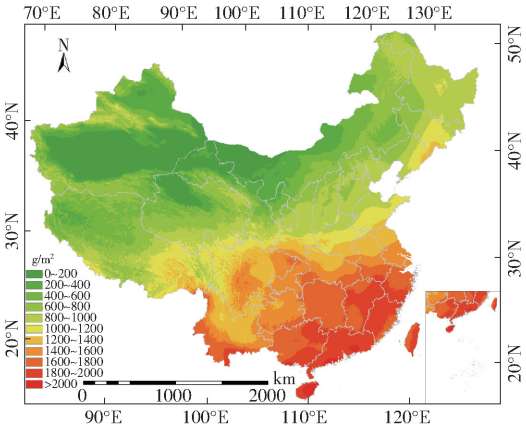


图 2 基于 TW 模型模拟的全国 2000—2015 年 NPP 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of NPP in 2000—2015 simulated based on TW model

根据近 16 年历年潜在 NPP 的变化可知,2000—2002 年华南地区气候潜在生产力明显增加,高值区域扩张显著,以广西壮族自治区为中心,迅速向四周扩张,蔓延至湖南、广东、江西等省,这也致使气候潜在生产力增加;而北部区域变化较不明显,只有东北地区呈轻微增加趋势。自 2003 年开始,南方地区气候潜在生产力高值区域出现缩减,该缩减态势持续到 2009 年,期间北方地区仍然呈小范围波动,其中 2008 年南方出现特大暴雪灾害,致使 2009 年全国平均气候生产潜力持续较少。随着灾后恢复,2009—2010 年南方高值区域又迅速扩张,致使年均值出现回升;2010 年初,我国云南、广西等省份发生特大旱灾,6 月末,湖南、江西等地发生洪灾,湖南湘江遭遇新世纪最大洪峰,这些灾害的发生,必然会对绿色植被的生长造成巨大影响,因此 2010—2011 年南方气候生产潜力高值区域较少,也必然会影响全国平均值的降低。2011 年之后秦岭—淮河以南区域,气候潜在生产力开始出现增长,高值区域开始向东部地区扩张,由西南地区逐渐扩张到华南、华东地区。

综上所述,近 16 年全国气候生产潜力整体呈南高北低、由南向北逐渐递减、南部变化大、北部变化缓慢等特点。且从近 16 年全国气候生产潜力空间分布来看,藏南地区气候生产潜力相对于周边地区偏高,原因是西藏东南部地区森林覆盖率达 90% 以上,有资料显示该区域温暖而多雨,年平均降水量在 9 000 mm 以上,是世界上降水量最大的地区之一。由此可见在其他气候条件一定的情况下,降水量对气候生产力的影响较大。

3.1.2 陆地植被生态系统潜在 NPP 空间分布

为了解陆地生态系统 NPP 空间变化动态,利用 2000、2005、2010、2015 年土地利用数据分类系统

(耕地、林地、草地)将全国 NPP 分为农田、森林、草地生态系统潜在 NPP,并分别从数值和空间分布上分析各陆地生态系统近 16 年年际变化、波动趋势及空间变化特征。基于 TW 模型和 ZGS 模型,2000—2015 年草地生态系统、农田生态系统、森林生态系统的 NPP 如表 1 所示。

表 1 基于 TW 模型和 ZGS 模型的各生态系统 NPP  
Tab.1 NPP of each ecosystem based on TW model and ZGS model g/m<sup>2</sup>

| 年份   | 农田       |        | 森林       |        | 草地     |        |
|------|----------|--------|----------|--------|--------|--------|
|      | TW       | ZGS    | TW       | ZGS    | TW     | ZGS    |
| 2000 | 1 135.57 | 806.04 | 1 362.08 | 894.03 | 741.75 | 343.72 |
| 2001 | 1 051.56 | 778.67 | 1 339.51 | 900.30 | 730.71 | 348.25 |
| 2002 | 1 131.46 | 827.29 | 1 402.15 | 945.92 | 768.68 | 365.21 |
| 2003 | 1 205.83 | 837.41 | 1 326.72 | 872.81 | 786.45 | 364.60 |
| 2004 | 1 107.30 | 800.85 | 1 323.07 | 874.19 | 734.78 | 349.89 |
| 2005 | 1 170.13 | 819.12 | 1 373.76 | 903.92 | 789.87 | 366.16 |
| 2006 | 1 088.98 | 802.94 | 1 336.82 | 908.02 | 700.37 | 345.81 |
| 2007 | 1 129.57 | 826.32 | 1 321.88 | 919.77 | 771.30 | 367.92 |
| 2008 | 1 153.97 | 826.32 | 1 384.50 | 919.77 | 784.61 | 367.92 |
| 2009 | 1 097.71 | 789.95 | 1 289.85 | 861.35 | 720.23 | 345.93 |
| 2010 | 1 163.00 | 821.87 | 1 406.78 | 938.67 | 780.24 | 370.70 |
| 2011 | 1 058.03 | 756.50 | 1 242.42 | 819.80 | 749.99 | 344.78 |
| 2012 | 1 181.40 | 818.89 | 1 404.90 | 921.24 | 788.22 | 359.85 |
| 2013 | 1 160.63 | 825.63 | 1 387.07 | 917.52 | 792.11 | 371.78 |
| 2014 | 1 122.72 | 814.27 | 1 354.68 | 908.21 | 761.17 | 365.01 |
| 2015 | 1 131.74 | 822.29 | 1 329.18 | 900.23 | 537.24 | 283.78 |

由表 1 可知,潜在年均 NPP 由小到大为草地生态系统、农田生态系统、森林生态系统,且 2000—2015 年各生态系统 NPP 都存在一定范围内的波动,多年变化斜率依次为 -0.69、-2.19、-0.03,说明各陆地植被生态系统 NPP 总体均呈轻微下降趋势,其中农田生态系统 NPP 下降速度较其他两类生态系统下降速度较快。在空间分布上,农田生态系统、森林生态系统和草地生态系统潜在 NPP 均呈“南高北低”状态。农田 NPP 高值区域主要分布在我国南部中部地区,2000—2005 年河南、山东、山西 NPP 增加较快,2005—2015 年华北平原 NPP 又出现减少趋势,特别是作为我国主要作物生长区的河南、山东地区较为明显。森林生态系统同样出现分层现象,从南到北逐渐递减,西藏南部区域一直处于高值区域,近 16 年空间分布几乎不变,但就数值上看,有轻微下降趋势,并保持该趋势继续减少。草地生态系统从东南地区向西北地区逐渐降低,直至新疆西北部, NPP 又出现回升,该区域的雪山融水以及气候条件更有利于草地的生长。

3.2 ZGS 模型计算 NPP 空间分布

3.2.1 全国实际 NPP 空间分布

根据 ZGS 模型对我国气候生产潜力计算得出,

从数值上来看(图 1 实际 NPP),2000—2015 年全国气候实际生产力年际变化趋势与潜在生产力变化趋势一致,整体处于下降趋势。近 16 年平均值为 550.52 g/m<sup>2</sup>,最大值出现在 2007 年,为 583.75 g/m<sup>2</sup>,超出多年平均值 33.23 g/m<sup>2</sup>;2011 年达到最小,为 513.94 g/m<sup>2</sup>。2002—2003 年、2007—2008 年呈下降趋势,该阶段变化趋势与 TW 模型模拟结果相反,其余年份波动情况则完全一致。2000—2015 年气候实际生产力的变化斜率为 -1.5168,表明近 16 年气候实际生产力有不明显的下降趋势,其中 2002 年和 2010 年达到波峰期,2015 年达到波谷期。

图 3 为基于 ZGS 模型的 NPP 均值空间分布,与图 2 对比可得,实际 NPP 的空间分布与潜在 NPP 结果较为一致,存在明显的区域差异,由东南向西北呈逐渐递减趋势,且近 16 年分布状况始终保持不变。从区域分异特征来看,由大到小依次为华南地区、西南地区、华中地区、华东大部分地区、东北地区、华北地区、青藏高原地区、西北干旱区。但是高值区域范围有所不同,基于 ZGS 模型模拟的南方地区实际生产力明显高于基于 TW 模型模拟的结果,范围较广。高值区域不仅包括云南省、广西壮族自治区、海南省、台湾省以及藏南南部,还包括广东省、福建省、贵州省、江西省、湖南省以及藏南大部分地区。而新疆西北部 NPP 处于 600 ~ 800 g/m<sup>2</sup> 区域较少,大多处在 400 ~ 600 g/m<sup>2</sup> 之间,且北方地区近 16 年实际生产力变化较为缓慢,无论是区域还是数值都较南方变化小。同样地,实际生产力的变动在空间上也存在几个波动,2000—2002 年华南地区高值区域扩张显著,迅速扩张至华南大部分地区,而北部地区在空间分布上几乎没有变化。2003—2009 年南方地区气候实际生产力高值区域出现缩减,但与 TW 模型模拟结果相比该缩减速度明显减缓,东北三省 NPP 在 600 ~ 800 g/m<sup>2</sup> 范围内的区域相对增加,而藏南地区高值区域未受到任何影响。2009—2010 年南方高值区域又迅速扩张,扩张范围较大,整个华南地区均出现大于 1 400 g/m<sup>2</sup> 高值区域;2010 年,我国南方多数地区出现洪涝灾害,南方气候生产力高值区域较少,致使 2011 年实际生产力出现骤降。2011 年之后秦岭—淮河以南区域,气候实际生产力开始出现增长,高值区域开始向东部地区扩张,由西南地区逐渐扩张到华南、华东地区,中部地区如河南省处于 600 ~ 800 g/m<sup>2</sup> 范围内的区域也越来越多。

3.2.2 陆地植被生态系统实际 NPP 空间分布

利用 2015 年土地利用数据分类系统(耕地、林

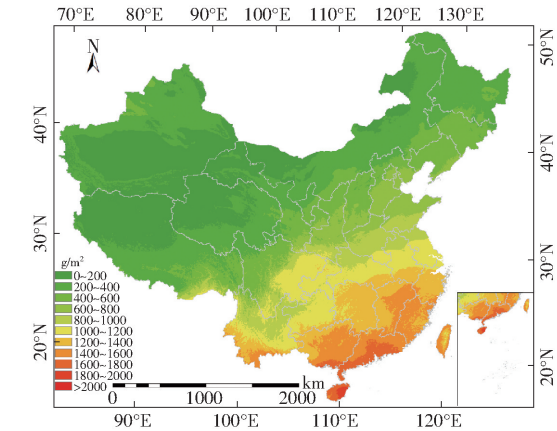


图3 基于ZGS模型模拟的全国2000—2015年NPP空间分布  
Fig.3 Spatial distribution of NPP in 2000—2015 simulated based on ZGS model

地、草地)将全国实际NPP分为农田、森林、草地生态系统实际NPP(图4),并分别从数值和空间分布

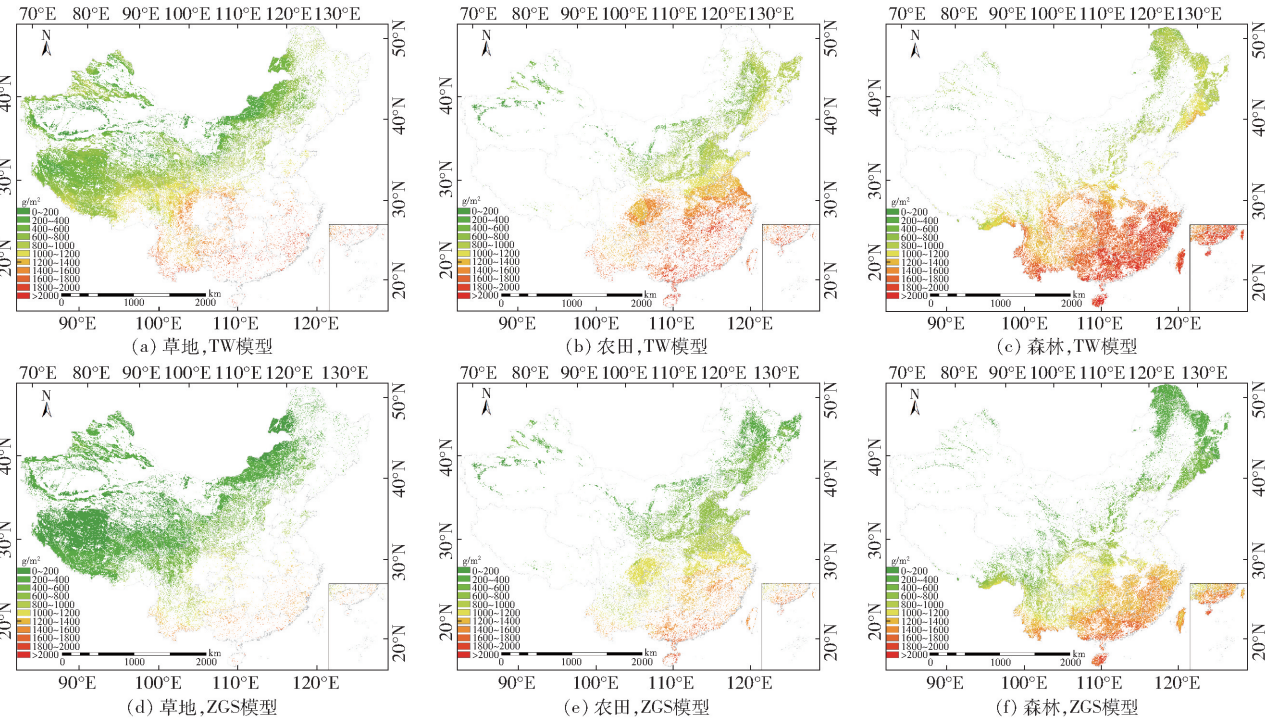


图4 2000—2015年各个生态系统平均NPP分布图  
Fig.4 Average distributions of NPP in each ecosystem from 2000 to 2015

3.3 TW模型与ZGS模型计算结果相关性分析

近16年全国NPP以及陆地生态系统潜在生产力和实际生产力的空间分布如图5所示。由图5可知,基于2个模型得出的NPP具有较好的一致性,决定系数为0.7707。

尽管草地生态系统模拟结果相关性较低,但从整体上看,模拟结果相关性极高,表明通过结合2个模型模拟全国生态系统NPP,能够弥补单个模型使用时在空间或时间分析上的不足,更好地揭示NPP的时空分布特征。

图6为2000—2015年1 km × 1 km 栅格内采用变

上分析各陆地生态系统近16年年际变化、波动趋势及空间变化特征。由表1可知,实际NPP在数值上与潜在NPP一致,由小到大依次为草地生态系统、农田生态系统、森林生态系统,但采用ZGS模型模拟的各生态系统NPP均低于基于TW模型模拟的结果。草地、农田和森林生态系统多年变化斜率依次为-0.69、-2.19、-0.03,说明各陆地植被生态系统NPP总体均呈轻微下降趋势,草地生态系统和农田生态系统减少速率较慢,尤其是森林生态系统实际NPP几乎保持不变。而在空间分布上,各生态系统均呈由东南向西北逐渐降低的地理分层,近16年各生态系统空间分布几乎保持不变。但多年来由于气候变暖、自然灾害以及人为破坏,使得生态系统污染严重,该结果很好地验证了这一现象,对于制定生态安全保护政策以及加强公众的环保意识有一定的促进作用。

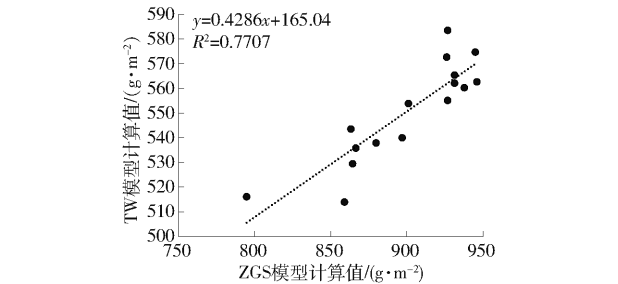


图5 2000—2015年TW模型和ZGS模型所得均值结果相关性  
Fig.5 Correlation between mean results of TW model and ZGS model from 2000 to 2015

化斜率法计算的年均 NPP 变化趋势。由图可知,基于 TW 模型计算的气候生产潜力在东北三省、西北干旱区、华南地区变化斜率大于 0,说明该区域潜在 NPP 的变化呈上升趋势且增加较快,在未来短时间内,仍有可能继续增加并保持该趋势。就局部变化来看,在中部地区如河南省、山东省、陕西省、山西省、河北省,西北地区如甘肃省、内蒙古自治区和新疆北部地区以及重庆市、贵州省、西藏自治区等地区变化斜率小于零,表明近 16 年来潜在 NPP 在该区域呈减小趋势,并且在未来短时间内仍有可能继续减小。基于 ZGS 模型计算的实际生产力变化斜率与基于 TW 模型的计算结果较为一致,年尺度 NPP 变化的空间有

相似之处,变化斜率小于 0 的地区主要分布在河南省、山东省、山西省和河北省以及贵州省,而在东北三省以及华南大部分地区变化斜率大于 0,其余地区变化斜率稳定在 0 左右,出现小幅度的变动。基于 TW 模型计算的变化斜率最高值为 13.1,小于基于 ZGS 模型计算的变化斜率最高值,且最高值、最低值分布区域不同,基于 TW 模型计算结果 NPP 增加最快的区域为吉林省西部区域以及新疆西部区域,而基于 ZGS 模型增加最快的区域则是在台湾省、云南省西部、广东省西部以及广西壮族自治区东部地区;基于 TW 模型计算结果 NPP 减少最快的地方在中部地区,而基于 ZGS 模型减少最快的地区主要分布在藏南地区。

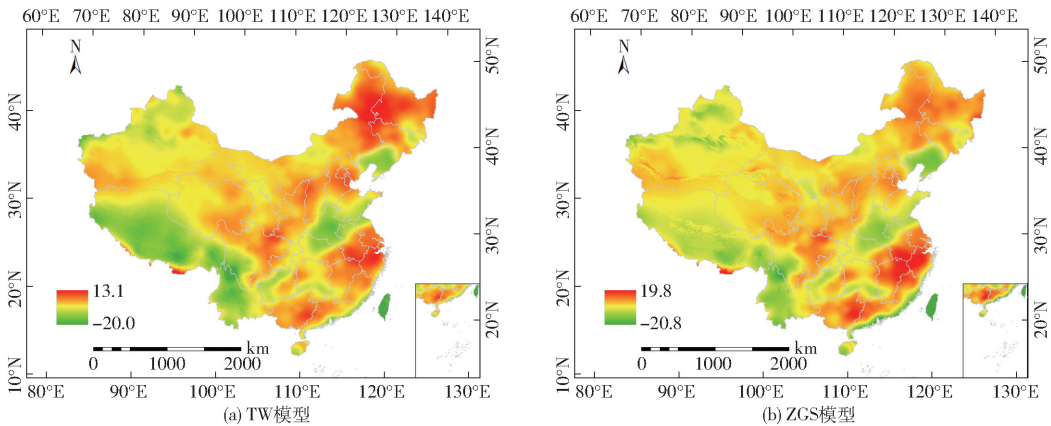


图 6 2000—2015 年全国 NPP 变化斜率

Fig. 6 National changing rates of NPP from 2000 to 2015

统计全国范围内潜在 NPP 变化斜率总和,基于 TW 模型计算的气候生产潜力变化斜率总和为  $-0.7766$ ,基于 ZGS 模型计算的实际生产潜力变化斜率总和为  $-1.3095$ ,由此可见,基于这两种方法计算的全国 NPP 较为一致,均为负值,说明全国气候生产力增加区域小于减少区域,因此全国气候生产力整体呈较少趋势,并在未来一段时间内仍然呈减少态势,但是变化率总和绝对值在 1 附近,表明虽全国 NPP 整体上有减少趋势,但变化并不明显。

4 结束语

以 2000—2015 年全国的温度和降水量为基础,利用 TW 模型和 ZGS 模型计算全国潜在净初级生

产力和实际净初级生产力,从陆地植被生态系统角度,分析 NPP 年际变化、波动趋势以及空间变化特征,并评价实际生产力和潜在生产力之间的相关性。研究表明,基于 TW 模型和 ZGS 模型模拟的全国潜在 NPP 和实际 NPP 空间格局以及变化趋势具有相似性,决定系数为  $0.7707$ ,森林生态系统、农田生态系统、草地生态系统也呈一定的相似性;我国植被净初级生产力在空间分布上主要呈“南高北地”的状态,并且由东南向西北呈逐渐递减趋势;近 16 年全国植被潜在生产力和实际生产力均呈缓慢下降趋势,在不采取任何措施的前提下,在未来一段时间将保持缩减趋势;在空间分布上,NPP 高值区域都有不同程度的缩减,但变化不明显。

参 考 文 献

[1] 马佳妮,张超,吕雅慧,等. 基于长时间序列遥感数据反演 NPP 的耕地质量评价[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(1):202–208. MA Jiani, ZHANG Chao, LÜ Yahui, et al. Land quality evaluation of NPP based on long time series remote sensing data [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 202–208. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190122&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190122&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.022. (in Chinese)

[2] 苏伟,刘睿,孙中平,等. 基于 SEBAL 模型的农作物 NPP 反演[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(11):272–279. SUN Wei, LIU Rui, SUN Zhongping, et al. Crop NPP inversion based on SEBAL model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 272–279. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20141142&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141142&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.042. (in Chinese)

[3] 李燕丽,潘贤章,王昌昆,等. 2000—2011 年广西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. 生态学报,2014,

- 34(18):5220–5228.
- LI Yanli, PAN Xianzhang, WANG Changkun, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and driving factors of net primary productivity of vegetation in Guangxi from 2000 to 2011 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(18): 5220–5228. (in Chinese)
- [4] 王芳,汪左,张运. 2000—2015年安徽省植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2018, 38(8): 2754–2767.
- WANG Fang, WANG Zuo, ZHANG Yun. Spatial and temporal distribution characteristics and driving factors of net primary productivity of vegetation in Anhui Province from 2000 to 2015 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(8): 2754–2767. (in Chinese)
- [5] 王娟,卓静,何慧娟,等. 2000—2013年秦岭林区植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(5): 238–245.
- WANG Juan, ZHUO Jing, HE Huijuan, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and driving factors of net primary productivity of vegetation in Qinling forest region from 2000 to 2013 [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(5): 238–245. (in Chinese)
- [6] 王钊,李登科. 2000—2015年陕西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1876–1884.
- WANG Zhao, LI Dengke. Spatial and temporal distribution characteristics and driving factors of net primary productivity of vegetation in Shaanxi from 2000 to 2015 [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(6): 1876–1884. (in Chinese)
- [7] 张宏运. 1961—2014年渭河流域干旱特征及其对植被净初级生产力的影响研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016.
- ZHANG Hongyun. Study on drought characteristics and its impact on net primary productivity of vegetation in Weihe river basin from 1961 to 2014 [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2016. (in Chinese)
- [8] GUO Bing, ZANG Wenqian, YANG Fei, et al. Spatial and temporal change patterns of net primary productivity and its response to climate change in the Qinghai–Tibet plateau of China from 2000 to 2015 [J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(1): 1–17.
- [9] LIU Yangyang, YANG Yue, WANG Qian, et al. Assessing the dynamics of grassland net primary productivity in response to climate change at the global scale [J]. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(5): 725–740.
- [10] LI Haili, KE Changqing, ZHU Qinghui, et al. Spatial-temporal variations in net primary productivity in the arctic from 2003 to 2016 [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(8): 111–121.
- [11] TARUN K T, SWAMY S L, ARVIND B M, et al. Assessment of biomass and net primary productivity of a dry tropical forest using geospatial technology [J]. *Journal of Forestry Research*, 2019, 30(1): 157–170.
- [12] YAN Zhiming, SHAO Longyi, WANG Hao, et al. Using geophysical logs to identify milankovitch cycles and to calculate net primary productivity (NPP) of the late permian coals, western Guizhou, China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 8(1): 31–42.
- [13] LI Yanan, SHAO Longyi, YAN Zhiming, et al. Net primary productivity and its control of the middle Jurassic peatlands: an example from the southern Junggar coalfield [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2018, 61(11): 1633–1643.
- [14] YANG Qing, MA Zhuguo, ZHENG Ziyang, et al. Sensitivity of potential evapotranspiration estimation to the Thornthwaite and Penman-Monteith methods in the study of global drylands [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(12): 1381–1394.
- [15] ZHU Guofeng, QIN Dahe, TONG Huali, et al. Variation of thornthwaite moisture index in Hengduan mountains, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26(5): 687–702.
- [16] SUN Binfeng, ZHAO Hong, WANG Xiaoke. Effects of drought on net primary productivity: roles of temperature, drought intensity, and duration [J]. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26(2): 270–282.
- [17] 李颜颜,康国华,张鹏岩,等. 基于 Thornthwaite Memorial 模型的近 54 年河南省农业气候生产力时空变化特征分析 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(7): 287–293.
- LI Yanyan, KANG Guohua, ZHANG Pengyan, et al. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of agricultural climate productivity in Henan Province in recent 54 years based on Thornthwaite Memorial model [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(7): 287–293. (in Chinese)
- [18] 周筠珺,周立华. 用 Thornthwaite 与 Holdridge 植被的 PE 指标对柴达木地区植被——气候关系的初步分析 [J]. *干旱区研究*, 1996, 13(1): 46–51.
- ZHOU Yunjun, ZHOU Lihua. A preliminary analysis of the relationship between vegetation and climate in the Qaidam area using the PE index of Thornthwaite and Holdridge vegetation [J]. *Arid Zone Research*, 1996, 13(1): 46–51. (in Chinese)
- [19] 张新时,杨莫安,倪文革. 植被的 PE(可能蒸散)指标与植被—气候分类(三)几种主要方法与 PEP 程序介绍 [J]. *植物生态学与地植物学学报*, 1993, 17(2): 97–109.
- ZHANG Xinshi, YANG Dianan, NI Wenge. PE (possible evapotranspiration) index of vegetation and introduction of several main methods and PEP program of vegetation-climate classification (iii) [J]. *Acta Phytocologica and Geobotanica Sinica*, 1993, 17(2): 97–109. (in Chinese)
- [20] 周广胜,张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究 [J]. *植物生态学报*, 1996, 20(1): 11–19.
- ZHOU Guangsheng, ZHANG Xinshi. Net primary productivity of natural vegetation in China under global climate change [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(1): 11–19. (in Chinese)
- [21] 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式 [J]. *植物生态学报*, 1994, 18(1): 1–16.
- ZHANG Xinshi. Ecological background of Maowusu sandy land and the principle and optimization model of grassland construction [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18(1): 1–16. (in Chinese)
- [22] 张山清,普宗朝,伏晓慧,等. 气候变化对新疆自然植被净第一性生产力的影响 [J]. *干旱区研究*, 2010, 27(6): 905–914.
- ZHANG Shanqing, PU Zongchao, FU Xiaohui, et al. Effects of climate change on net primary productivity of natural vegetation in Xinjiang [J]. *Arid Zone Research*, 2010, 27(6): 905–914. (in Chinese)
- [23] 王琳,景元书,张悦. 基于 MODIS 的长江中下游地区植被净第一性生产力时空变化规律 [J]. *浙江农林大学学报*, 2015, 32(6): 829–836.
- WANG Lin, JING Yuanshu, ZHANG Yue. Spatial and temporal variation of net primary productivity of vegetation in the middle and lower reaches of the Yangtze River based on MODIS [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2015, 32(6): 829–836. (in Chinese)
- [24] 梁瑞,任志远. 陕南地区植被净第一性生产力时空动态演变 [J]. *水土保持通报*, 2014, 34(2): 86–90, 94, 2.
- LIANG Rui, REN Zhiyuan. Spatiotemporal dynamic evolution of net primary productivity of vegetation in southern Shaanxi [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(2): 86–90, 94, 2. (in Chinese)
- [25] LEITH H, WITTAKER R H. Modeling the primary productivity of the world [C] // *Primary Productivity of the Biosphere*. New York: Springer Verlag, 1975: 237–263.