

基于 ZGS 和 TW 模型的长江流域 植被 NPP 时空演变特征

徐勇¹, 周清华^{1,2}, 窦世卿¹, 郭振东¹, 吴杰峰¹, 郑志威¹

(1. 桂林理工大学 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541006; 2. 玉林市福绵区自然资源技术信息中心, 广西 玉林 537000)

摘要: [目的] 研究长江流域陆地植被生态系统初级净生产力(NPP)的时空演变特征,为政府部门建立和调整生态功能恢复项目提供参考。[方法] 以长江流域为研究区,基于 2000—2019 年的降水和气温数据,采用周广胜—张新时模型(ZGS)和 Thornthwaite Memorial (TM)模型估算 NPP,并进一步利用皮尔逊相关分析、一元线性回归分析、Mann-Kendall 显著性检验等,对比分析长江流域陆地植被生态系统 NPP 时空演变特征。[结果] ①基于上述两个模型模拟得到的长江流域 NPP 时空演变趋势基本一致,相关系数 R 为 0.982,呈现显著正相关关系;②2000—2019 年长江流域陆地植被生态系统实际 NPP 与潜在 NPP 均呈上升趋势,上升速率分别为 6.85, 2.74 g/(m²·a)。③长江流域实际 NPP 和潜在 NPP 在空间上呈东南高西北低的分布格局,低值区域主要分布在草地生态系统;高值区域大部分分布在森林生态系统和农田生态系统。④2000—2019 年长江流域实际 NPP 与潜在 NPP 呈上升趋势的面积分别占研究区总面积的 80.65% 和 84.81%,主要分布在云南、青海、西藏、四川北部及浙江、上海大部分区域;呈下降趋势的面积分别占研究区总面积的 19.35% 和 15.19%,主要分布在河南、湖北等地区。[结论] 2000—2019 年来长江流域各植被生态系统植被 NPP 均呈上升趋势。长江流域自然资源管理和环境保护政策在促进生态系统保护与发展方面成效显著。

关键词: 长江流域; 植被生态系统; 植被净初级生产力; 潜在 NPP; 实际 NPP

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)01-0225-08

中图分类号: Q948

文献参数: 徐勇, 周清华, 窦世卿, 等. 基于 ZGS 和 TW 模型的长江流域植被 NPP 时空演变特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 225-232. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.030; Xu Yong, Zhou Qinghua, Dou Shiqing, et al. Spatiotemporal characteristics of vegetation net primary productivity in Yangtze River Basin based on ZGS and Thornthwaite Memorial models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 225-232.

Spatiotemporal Characteristics of Vegetation Net Primary Productivity in Yangtze River Basin Based on ZGS and Thornthwaite Memorial Models

Xu Yong¹, Zhou Qinghua^{1,2}, Dou Shiqing¹, Guo Zhendong¹, Wu Jiefeng¹, Zheng Zhiwei¹

(1. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China; 2. Technology Information Center, Natural Resources Bureau of Fumian District, Yulin, Guangxi 537000, China)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial evolution characteristics of net primary productivity (NPP) of the terrestrial vegetation ecosystem in the Yangtze River basin were studied to provide a reference for government departments to establish and adjust ecological function restoration projects. [Methods] The Zhou Guangsheng-Zhang Xinshi model (ZGS) and the Thornthwaite Memorial model were used to estimate NPP in the Yangtze River basin based on precipitation and temperature data from 2000 to 2019. Furthermore, Pearson correlation coefficient, linear regression analysis, and the Mann-Kendall trend test were applied to analyze the spatiotemporal variation of vegetation NPP of terrestrial ecosystems in the Yangtze River basin.

收稿日期: 2021-07-06

修回日期: 2021-09-05

资助项目: 国家自然科学基金项目“球面空间下的矢量要素与 DEM 的同步综合方法研究.”(42061059); 广西八桂学者专项项目; 广西自然科学基金资助项目(2020GXNSFBA297160); 广西空间信息与测绘重点实验室资助课题(191851016); 桂林理工大学科研启动资助项目(GUTQDJJ2019172); 2021 年大学生创新创业训练计划项目(202110596006)。

第一作者: 徐勇(1988—), 男(汉族), 湖南省益阳市人, 博士, 讲师, 主要从事气候变化和植被覆盖反演研究。Email: yongxu@glut.edu.cn。

通讯作者: 窦世卿(1977—), 女(汉族), 河北省定州市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事三维 GIS 与遥感技术应用方面的研究。Email: doushiqing@glut.edu.cn。

[Results] ① The spatial and temporal variation of NPP derived from the above two models were basically homogeneous in the Yangtze River basin. Actual NPP and potential NPP were positively correlated (0.982). ② Both actual NPP and potential NPP in the Yangtze River basin increased over time at a rate of 6.85 g/(m² · yr) and 2.74 g/(m² · yr), respectively, from 2000 to 2019. ③ Actual NPP and potential NPP were higher in the southeast and lower in the northwest portions of the Yangtze River basin. The low values were mainly distributed in grassland ecosystems, and the high values were mostly distributed in forest ecosystems and farmland ecosystems. ④ The areas with increasing trends for actual NPP accounted for 80.64% of the total area, and 84.79% of the total area for potential NPP in the Yangtze River basin, mainly distributed in Yunnan, Qinghai, Tibet, the north of Sichuan, and most regions of Zhejiang and Shanghai. The areas with decreasing trends actual NPP accounted for 19.36% of the total area and 15.19% of the total area for potential NPP in the Yangtze River basin, mainly distributed in He'nan and Hubei Province. [Conclusion] The NPP of vegetation ecosystems in the Yangtze River basin has increased in the past 20 years, indicating that natural resource management and environmental protection policy implementation in the Yangtze River basin has produced remarkable positive effects on regional ecosystem protection and development.

Keywords: the Yangtze River Basin; vegetation ecosystem; net primary productivity (NPP); potential NPP; actual NPP

植被净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 是指绿色植物在单位时间单位面积上所积累的有机物数量, 是由光合作用所产生的有机物总量扣除自养呼吸后的剩余部分^[1], 气候生产力的大小能够反映当地光、温资源的配合效果^[2], 用于评价陆地植被生态系统的可持续发展^[3], 是生态学研究的重要内容。全球气候变暖, 环境问题受到越来越多学者的关注, 并采用 Thornthwaite Memorial 模型 (TW 模型)、周广胜—张新时模型 (ZGS 模型) 对 NPP 进行估算^[4-7], 对 NPP 的时空分布特征进行研究, 进一步探究了不同因子对 NPP 的影响, 结果表明, 温度、降水等气候因子对 NPP 的影响较为明显, ZGS 模型和 TW 模型在估算 NPP 时具有较高的准确性, 已被广泛应用于 NPP 估算方面的研究。

虽然长江流域气候温暖湿润, 水热条件充足, 适合植被生长, 但流域内部分地区生态基础脆弱, 生态系统稳定性差, 生态问题仍然不可忽视^[8-9]。因此, 亟需对长江流域陆地植被生态系统 NPP 进行研究, 用以评估其植被生态系统的稳定程度。本文利用 2000—2019 年的降水和气温数据, 采用 ZGS 模型、TW 模型、皮尔逊相关分析、一元线性回归分析和 Mann-Kendall 显著性检验, 研究长江流域陆地植被生态系统 NPP 时空演变特征, 以期政府部门建立和调整生态功能恢复项目提供借鉴, 并进一步了解长江流域生态系统的地表碳循环。

1 研究区概况

长江流域位于 90°30'—122°25'E, 24°30'—35°45'N 之间, 包含青海、江西、四川、湖南、湖北等省份, 流域

面积约 1.80 × 10⁶ km², 约占中国国土面积的 19%。流域内自然资源丰富, 植被覆盖率较高, 广西、江西这两个区域的森林覆盖率达到 60% 以上, 陆地植被生态系统占长江流域总面积的 91.5%, 其中森林、农田、草地 3 个陆地植被生态系统分别占 41.46%, 26.74%, 23.30%, 其他生态系统仅占 8.5%。森林生态系统主要分布在长江流域的中部和东南部地区; 农田生态系统主要分布在四川盆地以及长江流域的东北部地区; 草地生态系统主要分布在长江流域西北部地区。长江流域大部分地处亚热带季风区, 年降水量约 1 098 mm, 年均气温约 14 °C, 大部分地区雨热同期, 光、热、水等条件优越, 是中国重要的农粮产品基地。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 气象数据 气象数据资料来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>) 提供的 2000—2019 年 2 416 个气象站点的日降水和日平均气温, 其中长江流域覆盖站点数为 718 个。首先, 采用邻近点的线性趋势法对缺失值进行填补, 进一步计算得到月累积降水和月平均气温; 然后采用克里金插值法对降水和气温进行插值, 得到时间分辨率为每月, 空间分辨率为 1 km, 投影坐标系为 Albers_WGS_1984 的月累积降水和月平均气温栅格时间序列。气温单位为 °C, 精度为 0.1 °C, 降水数据单位为 mm, 精度为 0.1 mm。

2.1.2 遥感数据 土地利用遥感监测数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.Resdc.cn>), 本研究采用的是该平台提供的 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年的中国土地利用遥感监测数据, 用以统计 2000—2019 年长江流域陆地植被生

态系统的实际 NPP 与潜在 NPP,具体方法详见孙金珂等^[10]研究。土地利用遥感监测数据主要分为耕地,林地,草地,水域,城乡、工矿、居民用地,未利用地 6 大类,本文为了研究陆地植被生态系统的 NPP 时空演变特征,根据生态系统分类标准,将土地利用数据重分类,通过掩膜提取得到长江流域草地、森林、农田 3 个生态系统,空间分辨率为 1 km,投影坐标系为:Albers_WGS_1984。

2.1.3 其他数据 中国行政区矢量数据和 9 大流域矢量数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.Resdc.cn>)。根据九大流域矢量数据的属性,提取得到长江流域的矢量数据;基于长江流域矢量数据,裁剪得到长江流域的行政区划矢量数据,投影坐标系为:Albers_WGS_1984。

2.2 研究方法

2.2.1 ZGS 模型 周广胜和张新时根据植物生理生态学特点,基于水量、热量平衡方程,建立了植物净第一性生产力模型^[11],计算得到实际 NPP,计算公式如下:

$$NPP = 100R_{rdi} \frac{rR_n(r^2 + R_n^2 + rR_n)}{(R_n + r)(R_n^2 + r^2)} \cdot \exp(-\sqrt{9.87 + 6.25R_{rdi}}) \quad (1)$$

$$R_n = rR_{rdi}L_i \quad (2)$$

$$R_{rdi} = (0.629 + 0.237P_{per} - 0.00313P_{per}^2) \quad (3)$$

$$P_{per} = \frac{P_{pet}}{r} = \frac{58.93B_T}{r} \quad (4)$$

$$B_T = \frac{\sum t}{365} = \frac{\sum T}{12} \quad (5)$$

$$L_i = 597 - 0.6T \quad (6)$$

式中: t 为日均温($^{\circ}\text{C}$); T 为月均温($^{\circ}\text{C}$); B_T 为生物温度($^{\circ}\text{C}$); R_n 为年净辐射(mm); R_{rdi} 为辐射干燥度; L_i 为蒸发潜热(kJ/g); P_{pet} 为可能蒸散量(mm); P_{per} 为可能蒸散率; r 为年降水量(mm); NPP 为植被净第一性生产力(g/m^2)。

2.2.2 Thornthwaite Memorial 模型(TM 模型)

Thornthwaite Memorial 模型^[12]主要考虑影响植被生长的降水量、温度等气候因子,计算得到潜在 NPP,具体的计算公式如下:

$$NPP_T = 3000 \times [1 - e^{-0.0009695(v-20)}] \quad (7)$$

$$v = \frac{1.05r}{\sqrt{1 + (1 + \frac{1.05r}{L})^2}} \quad (8)$$

$$L = 300 + 25y + 0.05y^3 \quad (9)$$

式中: v 为年均实际蒸散量(mm); r 为年降水量(mm); y 为年均温度($^{\circ}\text{C}$); L 为年均最大蒸散量

(mm); NPP_T 为由蒸散量决定的植被气候生产潜力(g/m^2)。

2.2.3 皮尔逊相关系数法 皮尔逊相关系数法是英国统计学家皮尔逊提出的以数值的方式精确反映两个变量之间线性相关的强弱程度,是相关性分析中的常用方法^[13]。本文拟利用相关分析法计算实际 NPP 和潜在 NPP 的相关系数,计算公式如下:

$$R_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

式中: x 为变量; y 为变量; \bar{x} 为变量 x 的均值; \bar{y} 为变量 y 的均值; n 为样本数; $R_{x,y}$ 为 x, y 变量的相关系数。

2.2.4 一元线性回归分析法 本文基于最小二乘法的一元线性回归方程^[1],计算长江流域陆地植被生态系统实际 NPP 和潜在 NPP 近 20 a 的年际变化趋势,计算公式如下:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times NPP_i) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n NPP_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (11)$$

式中: n 为研究的总年数; slope 为变化斜率; NPP_i 为第 i 年的 NPP 值。

2.2.5 Mann-Kendall 显著性检验 采用 Mann-Kendall 显著性检验^[13]来检验潜在 NPP 和实际 NPP 在 2000—2019 年变化趋势的显著性。

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^i \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (12)$$

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (13)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (14)$$

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (15)$$

$$UB_k = -UF_k, k = n + 1 - k \quad (16)$$

式中: S_k 为第 i 个样本的累积量; $E(S_k)$ 为 S_k 的均值; $\text{var}(S_k)$ 为 S_k 的方差; UF_k 为 S_k 的标准差。

3 结果与分析

3.1 实际 NPP 与潜在 NPP 相关性分析

采用皮尔逊相关系数法计算 2000—2019 年长江流域实际 NPP 与潜在 NPP 的相关系数,结果如图 1 所示,长江流域实际 NPP 与潜在 NPP 的相关系数在 0.612~0.999 之间,全部通过 $p < 0.01$ 显著性检验,表明实际 NPP 与潜在 NPP 呈显著正相关关系。农田、森林和草地植被生态系统的相关性由大到小为:农田生态系统、森林生态系统、草地生态系统,相关系

数依次为 0.985, 0.982, 0.979。综上可知, 基于 ZGS 模型和 TW 模型估算得到的实际 NPP 与潜在 NPP 相关性极强, 说明通过两个模型模拟得到的陆地植被生态系统的 NPP 能够弥补单个模型的不足, 可以提高估算结果的准确性。

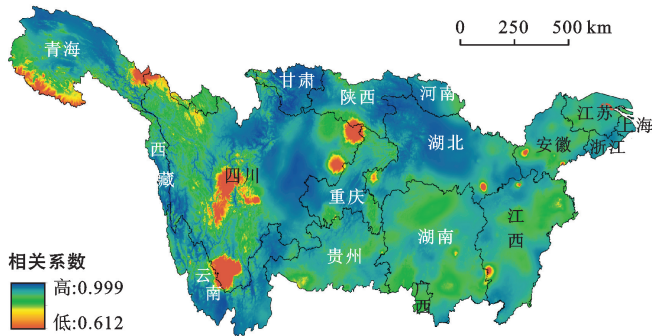


图 1 长江流域实际 NPP 和潜在 NPP 相关性空间分布

3.2 植被生态系统 NPP 时间变化特征

本文利用一元线性回归分析探究长江流域及各陆地植被生态系统 NPP 的时间变化趋势。由图 2a 可知, 2000—2019 年长江流域实际 NPP 呈上升趋势, 上升斜率为 $6.85 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 最低值出现在 2011 年, 为 $1466.06 \text{ g}/\text{m}^2$, 这是由于 2010 年长江流域遭遇大面积洪涝灾害, 植被遭到严重破坏, 导致长江流

域实际 NPP 急剧下降^[14-16]。农田、森林、草地生态系统 NPP 呈波动上升趋势, 草地生态系统 NPP 上升最快, 速率为 $7.82 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 其次为森林生态系统, 上升速率为 $7.64 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。以上结果表明, 3 个植被生态系统的实际 NPP 均呈上升的趋势, 其中草地生态系统的上升趋势最为明显, 农田生态系统的上升趋势最为缓慢。综上可知, 长江流域不同陆地植被生态系统的时间变化趋势存在一定的差异, 一方面由于不同植被生态系统光合作用能力和固碳能力不同, 另一方面由于长江流域从 1989 年开始实施长江流域防护林建设, 构建长江流域生态屏障, 森林覆盖面积变化较大, 导致森林生态系统的 NPP 年际变化趋势有较大的变化^[17-18]。

由图 2a 和 2b 可知, 基于 TW 模型模拟得到的长江流域陆地植被生态系统潜在 NPP 与基于 ZGS 模型得到的实际 NPP 时间变化趋势一致, 均呈现缓慢上升的趋势。由图 2b 可知, 2000—2019 年长江流域潜在 NPP 呈上升的趋势, 上升斜率为 $2.74 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 最大值出现在 2016 年, 最小值出现在 2011 年。其中, 农田生态系统、森林生态系统、草地生态系统的变化斜率分别为 $2.61, 2.53, 2.51 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 农田生态系统的上升速度最快, 森林生态系统和草地生态系统的上升速度较为接近。

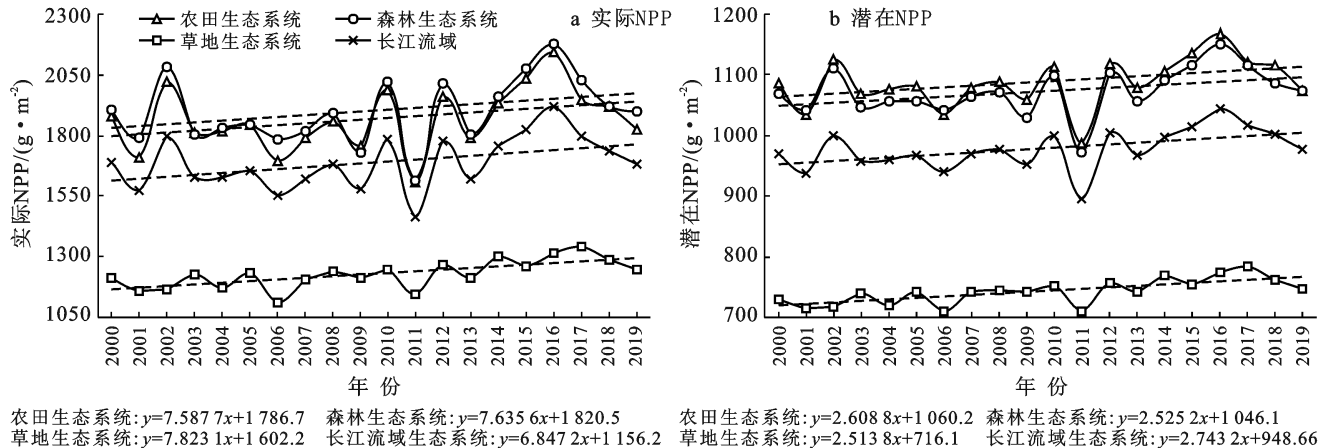


图 2 长江流域陆地植被生态系统实际 NPP 和潜在 NPP 时间变化趋势

3.3 植被生态系统 NPP 空间分布特征分析

图 3a 为基于 ZGS 模型模拟得到的 2000—2019 年实际 NPP 均值空间分布特征。如图 3a 所示, 长江流域实际 NPP 呈东南高西北低的空间分布格局。实际 NPP 在 $0 \sim 800 \text{ g}/\text{m}^2$ 范围内的占 9.07%, 主要集中在分布在西藏、青海、甘肃以及四川北部这几个草地资源较丰富的区域; 实际 NPP 大于 $2300 \text{ g}/\text{m}^2$ 的占 13.98%, 主要集中分布在江西、广西这两个森林覆盖

率在 60% 以上, 森林资源较丰富的省份。从空间分布来看, 农田生态系统的年均实际 NPP 呈现南高北低, 东南高西北低的空间格局, 仅有 0.07% 的年均实际 NPP 低于 $800 \text{ g}/\text{m}^2$, 高值区域 ($>2300 \text{ g}/\text{m}^2$) 主要分布江西、广西这两个区域, 占 12.10%; 森林生态系统的年均实际 NPP 呈东南高西北低的空间格局, 主要分布在长江流域的中部、东部地区, 低值区域 ($<800 \text{ g}/\text{m}^2$) 占 0.17%, 高值区域 ($>2300 \text{ g}/\text{m}^2$) 占

22.85%；草地生态系统的实际 NPP 分布较为零散，主要集中在长江流域的西北地区，总体的年均实际 NPP 较低。

如图 3b 所示，长江流域多年平均潜在 NPP 呈东南高西北低的空间分布格局，整体空间分布特征与长江流域实际 NPP 相似。长江流域多年平均潜在 NPP 高值区域($>1\ 200\ \text{g}/\text{m}^2$)主要分布在江西、广西、湖

南等区域，占 19.62%，低值区域($<600\ \text{g}/\text{m}^2$)主要分布在青海省，占 11.64%。长江流域陆地植被生态系统年均潜在 NPP 的高值区域($>1\ 200\ \text{g}/\text{m}^2$)主要分布在森林生态系统，占长江流域年均潜在 NPP 高值区域($>1200\ \text{g}/\text{m}^2$)的 61.29%；低值区域($<600\ \text{g}/\text{m}^2$)主要分布在草地生态系统，占长江流域年均潜在 NPP 低值区域($<600\ \text{g}/\text{m}^2$)的 70.43%。

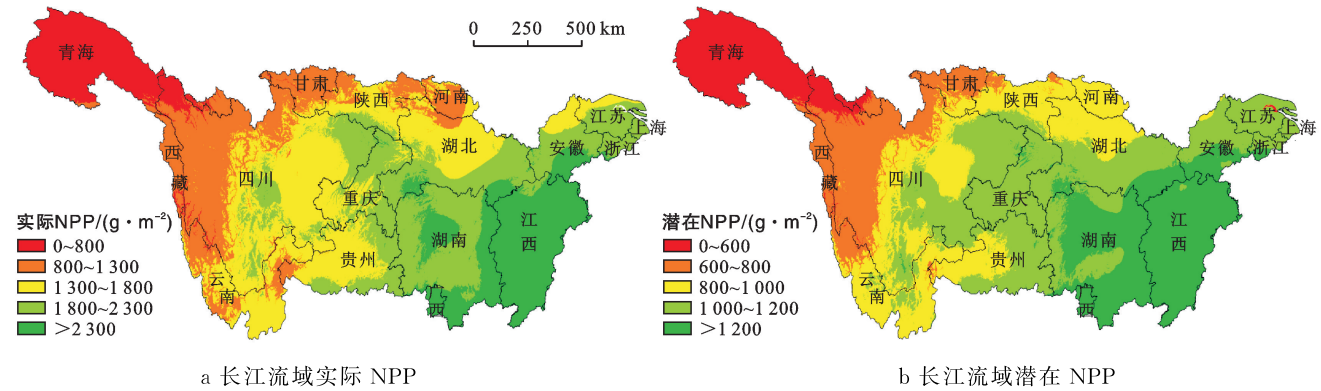


图 3 2000—2019 年长江流域植被 NPP 空间分布

3.4 植被生态系统 NPP 空间变化特征

3.4.1 植被生态系统实际 NPP 空间变化特征 采用一元线性回归分析法计算得到的 2000—2019 年长江流域 NPP 变化斜率，当变化斜率大于 0 时，表明 NPP 呈上升趋势；当变化率小于 0 时，表明 NPP 呈下降趋势，并结合 Mann-Kendall 显著性检验对长江流域 NPP 变化趋势进行显著性检验，当 $0.01 \leq p < 0.05$ 时，表明上升或下降趋势显著，当 $p < 0.01$ 时，表明上升或下降趋势极显著。

由图 4a 可知，长江流域实际 NPP 的变化斜率在

−29.19~44.26 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间，其中浙江、安徽等大部分区域实际 NPP 呈上升趋势；河南、湖北、云南等省份大部分区域实际 NPP 呈下降的趋势。农田、森林和草地生态系统实际 NPP 的变化斜率分别在 −29.16~40.35，−13.16~12.87，−28.49~42.30 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间，由上可知，相较于农田和草地生态系统，森林生态系统较为稳定，NPP 变化斜率较小，这与森林生态系统植被抵御外界干扰能力较强，草地和农田生态系统对气候变化和人类活动响应敏感有关。

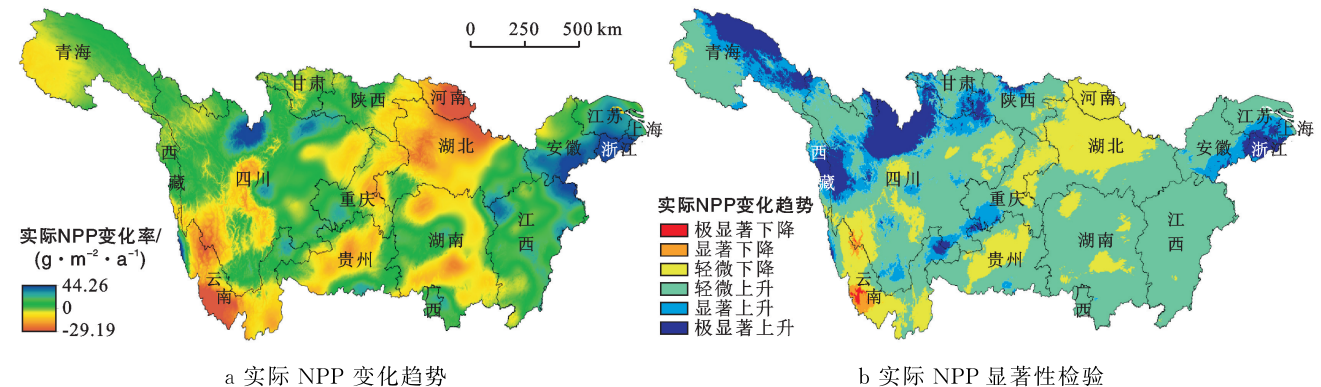


图 4 2000—2019 年长江流域植被 NPP 变化趋势

由表 1 和图 4b 可知，长江流域实际 NPP 呈上升趋势的面积占 80.65%，呈下降趋势的面积占 19.35%，其中呈显著下降和极显著下降的面积占 0.70%，主要分布在云南省；呈极显著上升和显著上升趋势分别占 8.03%，11.38%，主要分布在青海、西藏、浙江等区域，由上可知，长江流域实际 NPP 总体

呈现上升的趋势，其中河南、湖北、云南、贵州省中部呈现轻微下降的趋势，云南省由于人类的过度砍伐导致森林面积不断减少，水土流失严重，加上泥石流、滑坡等地质灾害的影响，环境污染严重，植被数量不断下降，导致云南整体的实际 NPP 呈下降趋势，因此，极显著下降和显著下降的区域主要分布在云南

省^[19-21];极显著上升区域主要分布在浙江、青海、四川省;总的来说,长江流域实际 NPP 在长江流域东部和西北部呈上升趋势,北部和西南部呈下降趋势。

表 1 长江流域实际 NPP 变化的显著性统计

项目	实际 NPP	显著性水平	类别	面积/ 10 ⁴ km ²	比例/ %
长江流域	<0	$p < 0.01$	极显著下降	0.17	0.09
	<0	$0.01 \leq p < 0.05$	显著下降	1.09	0.61
	<0	$p \geq 0.05$	轻微下降	33.53	18.65
	>0	$p \geq 0.05$	轻微上升	110.11	61.24
	>0	$0.01 \leq p < 0.05$	显著上升	20.46	11.38
农田生态系统	>0	$p < 0.01$	极显著上升	14.43	8.03
	<0	$p < 0.01$	极显著下降	0.06	0.13
	<0	$0.01 \leq p < 0.05$	显著下降	0.16	0.34
	<0	$p \geq 0.05$	轻微下降	10.55	22.02
	>0	$p \geq 0.05$	轻微上升	33.02	68.93
森林生态系统	>0	$0.01 \leq p < 0.05$	显著上升	3.11	6.48
	>0	$p < 0.01$	极显著上升	1.00	2.10
	<0	$p < 0.01$	极显著下降	0.05	0.07
	<0	$0.01 \leq p < 0.05$	显著下降	0.67	0.91
	<0	$p \geq 0.05$	轻微下降	16.26	22.07
草地生态系统	>0	$p \geq 0.05$	轻微上升	46.99	63.79
	>0	$0.01 \leq p < 0.05$	显著上升	5.92	8.03
	>0	$p < 0.01$	极显著上升	3.78	5.13
	<0	$p < 0.01$	极显著下降	0.06	0.15
	<0	$0.01 \leq p < 0.05$	显著下降	0.23	0.56
草地生态系统	<0	$p \geq 0.05$	轻微下降	4.85	11.69
	>0	$p \geq 0.05$	轻微上升	20.69	49.93
	>0	$0.01 \leq p < 0.05$	显著上升	8.40	20.28
	>0	$p < 0.01$	极显著上升	7.21	17.39

长江流域实际 NPP 空间变化特征在不同的陆地植被生态系统中存在明显的差异性,造成这种差异性的原因可能与植被种类以及土地利用类型的分布不同有关。由表 1 可知,草地生态系统 NPP 呈上升趋势的面积占其总面积的 87.60%,而农田和森林生态系统 NPP 呈上升趋势的面积分别占其总面积的 77.51%和 76.95%。其中,草地生态系统 NPP 呈显著和极显著上升的面积为 37.67%,远高于农田和森林生态系统 NPP 的 8.58%和 13.16%。由上可知,2000—2019 年农田、森林和草地生态系统 NPP 均以上升为主,但草地生态系统 NPP 呈上升趋势的面积和强度均高于农田和森林生态系统。

3.4.2 植被生态系统潜在 NPP 空间变化特征 由图 5a 可知,长江流域潜在 NPP 的变化斜率在 $-13.36 \sim 12.93 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间,其中江苏、浙江、江西、甘肃、陕西以及四川、青海省等大部分区域变化斜率均大于 0,表明这些区域的潜在 NPP 呈上升趋势,云南、湖北、河南、贵州等区域的变化斜率均小于 0,表明长江流域这些区域的潜在 NPP 呈下降趋势;农田、森林和草地生态系统潜在 NPP 的变化斜率分别在 $-13.34 \sim 12.80$, $-13.16 \sim 12.87$, $-12.93 \sim 12.93 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间,这与长江流域陆地植被生态系统实际 NPP 的变化斜率在数值上有所差异,但变化趋势的空间分布特征一致,总体来说,长江流域陆地植被生态系统潜在 NPP 与实际 NPP 的大部分区域呈上升的趋势,河南、湖北、云南这 3 个区域变化斜率大部分小于 0,呈下降趋势。

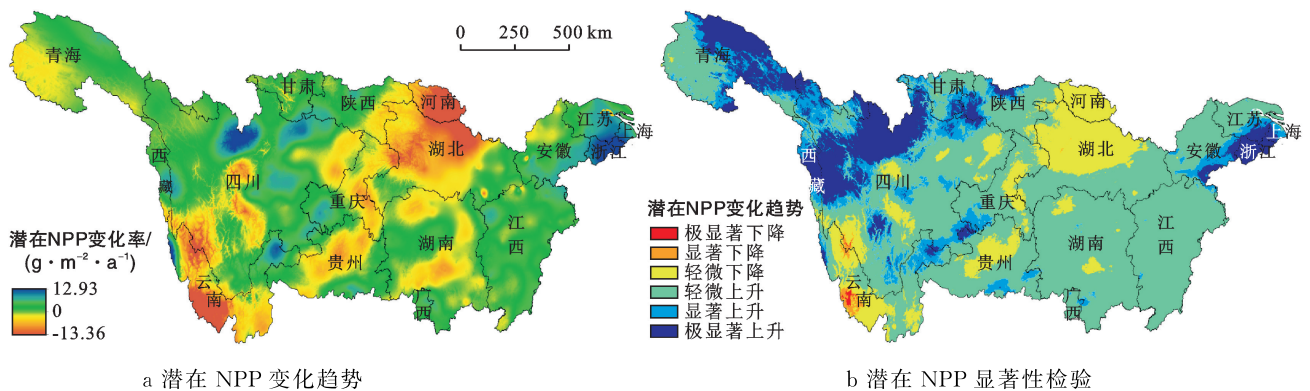


图 5 2000—2019 年长江流域植被潜在 NPP 变化趋势

由表 2 和图 5b 可知,长江流域潜在 NPP 呈上升趋势的面积占 84.81%,呈下降趋势的面积占 15.19%。其中,呈显著上升和极显著上升趋势的面积分别占 13.02%和 12.07%,主要分布在青海、四川、浙江、上海等区域。长江流域潜在 NPP 呈极显著下降和显著下降趋势的面积分别占 0.07%,0.48%,主要分布在云南省。由上可知,长江流域实际 NPP 与潜在 NPP

空间变化趋势整体一致,呈上升趋势的面积远大于呈下降趋势的面积,极显著上升区域主要分布在西北部地区,轻微下降区域主要位于北部地区,大部分区域处于轻微上升趋势,与上文中实际 NPP 变化趋势相似。由此可见,通过采用 Mann-Kendall 趋势检验法验证 ZGS 模型和 TW 模型模拟的长江流域 NPP 的空间变化趋势可信度较高。

表 2 长江流域潜在 NPP 变化的显著性统计

项目	潜在 NPP	显著性水平	类别	面积/ 10 ⁴ km ²	比例/ %
长江流域	<0	$p < 0.01$	极显著下降	0.13	0.07
	<0	$0.01 \leq p < 0.05$	显著下降	0.87	0.48
	<0	$p \geq 0.05$	轻微下降	26.33	14.64
	>0	$p \geq 0.05$	轻微上升	107.38	59.72
	>0	$0.01 \leq p < 0.05$	显著上升	23.41	13.02
	>0	$p < 0.01$	极显著上升	21.70	12.07
农田生态系统	<0	$p < 0.01$	极显著下降	0.05	0.11
	<0	$0.01 \leq p < 0.05$	显著下降	0.14	0.28
	<0	$p \geq 0.05$	轻微下降	8.37	17.47
	>0	$p \geq 0.05$	轻微上升	34.27	71.54
	>0	$0.01 \leq p < 0.05$	显著上升	3.73	7.78
	>0	$p < 0.01$	极显著上升	1.35	2.82
森林生态系统	<0	$p < 0.01$	极显著下降	0.03	0.04
	<0	$0.01 \leq p < 0.05$	显著下降	0.50	0.68
	<0	$p \geq 0.05$	轻微下降	13.27	18.01
	>0	$p \geq 0.05$	轻微上升	46.37	62.94
	>0	$0.01 \leq p < 0.05$	显著上升	7.90	10.72
	>0	$p < 0.01$	极显著上升	5.60	7.61
草地生态系统	<0	$p < 0.01$	极显著下降	0.05	0.12
	<0	$0.01 \leq p < 0.05$	显著下降	0.20	0.48
	<0	$p \geq 0.05$	轻微下降	3.29	7.95
	>0	$p \geq 0.05$	轻微上升	17.17	41.43
	>0	$0.01 \leq p < 0.05$	显著上升	9.43	22.75
	>0	$p < 0.01$	极显著上升	11.30	27.27

由表 2 可知,农田、森林和草地生态系统潜在 NPP 呈上升趋势的面积占其总面积的 82.14%,81.27%,91.45%,其中,农田、森林和草地生态系统潜在 NPP 呈显著上升和极显著上升趋势的面积分别占其总面积的 10.60%,18.33%和 50.02%。2000—2019 年农田、森林和草地生态系统潜在 NPP 均以上升为主,且草地生态系统 NPP 呈上升趋势的面积和强度均高于农田和森林生态系统。这与上文得到的农田、森林和草地生态系统实际 NPP 变化趋势较为一致,但农田、森林和草地生态系统潜在 NPP 的上升趋势的面积和强度均高于农田、森林和草地生态系统实际 NPP 变化趋势。

4 讨论与结论

4.1 讨论

研究发现长江流域实际 NPP 与潜在 NPP 具有较强的相关性,相关系数为 0.98,在空间上均呈现东南高西北低的分布特点,此结论与苗茜等^[22]关于长江流域植被 NPP 的空间分布特征研究结果一致。森林、草地、农田 3 个生态系统的植被 NPP 分布情况也

呈现由东南向西北递减的趋势,高值区域主要分布在森林生态系统,集中分布在江西省及周边地区;低值区域主要分布在草地生态系统,集中分布在青海省及周边地区。根据 Running 等^[23]基于生态生理过程模型对 6 种植被类型模拟的结果可知,灌木林等植被的光能利用率比草地的光能利用率高,而在长江流域内江西省森林覆盖率较高,森林的光能利用效率较高,因此其 NPP 值较高,而青海省的海拔相对较高,植被多为草地,森林覆盖率较低,所以其 NPP 值较低。

从时间上看,2000—2019 年研究区的实际 NPP 与潜在 NPP 的最大值都出现在 2016 年,最小值出现在 2011 年,并且实际 NPP 以 6.85 g/(m²·a)的速率在上升,潜在 NPP 以 2.74 g/(m²·a)的速率在上升,植被 NPP 总体呈现上升的趋势,这表明长江流域的环境整体是向好的方向发展。森林生态系统和农田生态系统的植被 NPP 在 2000—2003,2010—2013,2016—2017 年出现较大的波动,整体呈现增加的趋势,与张凤英等^[24]模拟的长江流域森林植被 NPP 的变化趋势一致。相较于农田和森林生态系统,草地生态系统的变化情况较为平缓,这可能是由于不同植被类型、不同区域受到的影响不同引起的。

从空间上看,从 Mann-Kendall 趋势检验法得到的结果发现,实际 NPP 与潜在 NPP 呈显著下降趋势主要位于云南省。这个主要是因为云南省的西双版纳热带雨林面积不断减少,水土流失问题严重。云南省的生态环境遭到了破坏,植被 NPP 值下降。此结论与孙治娟等^[25]关于云南省净初级生产力时空演变特征研究结果较一致。实际 NPP 与潜在 NPP 呈轻微下降趋势则主要位于湖北省北部,这与车风等^[26]研究结果不一致,其主要原因可能是由于研究时段以及数据源的差异,导致研究结论有所差别。极显著上升主要分布在草地生态系统,轻微下降区域则主要分布在森林生态系统与农田生态系统,集中分布在河北、河南两个省份,这与孙金珂等^[10]分析得到的结果一致。

综上所述,虽然同为气候生产力模型,但是由于估算的方法不同,模拟得到的 NPP 数值也会存在一定的差异,但是在空间分布和时间变化情况上来看,两个模型模拟得到的结果是一致的,具有一定的可靠性。

4.2 结论

本文采用 ZGS 模型和 TW 模型估算长江流域的实际 NPP 和潜在 NPP,探讨了长江流域整体以及农田、森林、草地 3 个生态系统 2000—2019 年植被 NPP 的时空演变特征。

(1) 2000—2019 年长江流域实际 NPP 与潜在 NPP 在空间上都呈现东南高西北低的空间格局,农田生态系统 NPP 的空间分布情况与森林生态系统的相似,主要分布在长江流域的中部和东部地区,草地生态系统主要分布在长江流域的西北部地区。

(2) 实际 NPP 与潜在 NPP 的年际变化趋势均呈现上升趋势,实际 NPP 上升区域占 80.65%,下降区域占 19.35%;潜在 NPP 上升区域占 84.81%,下降区域占 15.19%;实际 NPP 与潜在 NPP 显著上升趋势的区域主要位于青海、西藏、四川北部和浙江等地,显著下降区域主要位于云南省,整体上,实际 NPP 和潜在 NPP 的变化趋势一致。

[参 考 文 献]

- [1] 李辉,红英,邓国荣,等.1982—2015 年气候变化和人类活动对内蒙古草地净初级生产力的影响[J].应用生态学报,2021,32(2):415-424.
- [2] Chen Yizhao, Chen Leyin, Cheng Yuan, et al. Afforestation promotes the enhancement of forest LAI and NPP in China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 462:117990.
- [3] 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.
- [4] Yin Le, Dai Erfu, Zheng Du, et al. What drives the vegetation dynamics in the Hengduan Mountain region, Southwest China: Climate change or human activity? [J]. *Ecological Indicators*, 2020,112:106013.
- [5] Chen Tao, Bao Anming, Jiapaer G, et al. Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on arid and semiarid grasslands in Central Asia during 1982—2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,653:1311-1325.
- [6] 周广胜,周莉.生态气象:起源、概念和展望[J].科学通报,2021,66(2):210-218.
- [7] Ge Wenyan, Deng Liqiang, Wang Fei, et al. Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016 [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,773:145648.
- [8] 黄磊,吴传清.深化长江经济带生态环境治理[N].中国社会科学报,2021(3):1-2.
- [9] Qu Sai, Wang Lunche, Lin Aiwen, et al. What drives the vegetation restoration in Yangtze River basin, China: Climate change or anthropogenic factors? [J]. *Ecological Indicators*, 2018,90:438-450.
- [10] 孙金珂,牛海鹏,袁鸣.中国陆地植被生态系统 NPP 空间格局变迁分析[J].农业机械学报,2020,51(6):162-168.
- [11] 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.
- [12] 李振杰,段长春,金莉莉,等.云南省气候生产潜力的时空变化[J].应用生态学报,2019,30(7):2181-2190.
- [13] 徐勇,黄雯婷,靖娟利,等.京津冀地区植被 NDVI 动态变化及其与气候因子的关系[J].水土保持通报,2020,40(5):319-327.
- [14] 王晓芳,汪小康,徐桂荣.2010 年长江中游梅雨期 β 中尺度系统环境特征的分析[J].高原气象,2013,32(3):750-761.
- [15] 邹红梅,陈新国.2010 年与 1998 年长江流域洪水对比分析[J].水利水电快报,2011,32(5):15-17,27.
- [16] 樊建华,曹正池.2010 年长江九江段洪水分析[J].江西水利科技,2011,37(3):171-173.
- [17] Xu Xibao, Jiang Bo, Chen Minkun, et al. Strengthening the effectiveness of nature reserves in representing ecosystem services: The Yangtze River Economic Belt in China [J]. *Land Use Policy*, 2020,96:104717.
- [18] Wang Jianyu, Delang C O, Hou Guolong, et al. Net primary production increases in the Yangtze River basin within the latest two decades [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021,26:e01497.
- [19] 杨庆媛,汪军,王锡桐,等.云南省金沙江流域生态环境建设的问题与对策研究:长江上游生态屏障建设重点地区调查报告之一[J].西南师范大学学报(自然科学版),2003,28(3):487-491.
- [20] 刘世梁,田韞钰,尹洁洁,等.云南省植被 NDVI 时间变化特征及其对干旱的响应[J].生态学报,2016,36(15):4699-4707.
- [21] 朱若柠,沈文娟,张亚丽,等.基于时间序列 MODIS-VCF 数据的云南省森林覆盖变化及破碎化分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(2):184-190.
- [22] 苗茜,黄玫,李仁强.长江流域植被净初级生产力对未来气候变化的响应[J].自然资源学报,2010,25(8):1296-1305.
- [23] Running S W, Thornton P E, Nemani R, et al. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system [M]// *Methods in Ecosystem Science*. New York: Springer, 2000:44-57.
- [24] 张凤英,张增信,田佳西,等.长江流域森林 NPP 模拟及其对气候变化的响应[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(1):175-181.
- [25] 孙治娟,谢世友.基于地理探测器的云南省净初级生产力时空演变及因子探测[J/OL].生态学杂志:1-16 [2021-08-22]. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202111.033>.
- [26] 车风,黄国清,刘韬,田艳红,徐庆华,邹秀琼,聂荔.2004-2015 年湖北省植被 NPP 时空分布特征及其与气候因素关系[J].水土保持研究,2019,26(6):198-204,225.