浙 江 农 林 大 学 学 报, 2026, **43**(1): 1−10 https://zlxb.zafu.edu.cn
Journal of Zhejiang A&F University DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20240586

引用格式: 刘奇悦, 郑兆东, 毛方杰, 等. 浙江省森林净初级生产力时空模拟及对季节性干旱的响应[J]. 浙江农林大学学报, 2026, **43**(1): 1−10. LIU Qiyue, ZHENG Zhaodong, MAO Fangjie, *et al*. Spatiotemporal simulation of forest net primary productivity in Zhejiang Province and its response to seasonal drought[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, **43**(1): 1−10.

浙江省森林净初级生产力时空模拟及对季节性干旱的响应

刘奇悦[1,2]，郑兆东[1,2]，毛方杰[1,2]，李雪建[1,2]，张婉晴[1,2]，盛丽娜[1,2]，麻璐雅[1,2]

（1. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室，浙江 杭州 311300；2. 浙江农林大学 环境与资源学院，浙江 杭州 311300）

摘要：【目的】模拟并分析浙江省森林净初级生产力 (NPP) 时空特征，揭示季节性干旱对净初级生产力时空演变的影响，为浙江省森林响应和适应气候变化提供科学依据。**【方法】**利用标准化降水蒸散指数分析了 1990—2015 年浙江省季节性干旱时空变化特征，基于 BEPS 模型模拟了浙江省森林净初级生产力时空格局，并探讨了季节干旱对森林净初级生产力的影响。**【结果】**①浙江省干旱总体上处于中等强度，其中，夏季为浙江省遭受干旱最严重的季节，严重及以上干旱面积占 42.20%，其次为冬季。另外，除春季外，其他 3 个季节均有干旱化趋势。②1990—2015 年浙江省森林净初级生产力均值为 371.53 $g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$，其中最高的为春季 (95.22 $g\cdot m^{-2}\cdot 月^{-1}$)。③干旱对浙江省森林净初级生产力影响最大的为夏秋两季，偏差分别为−4.88% 和−4.62%，春季和冬季相对较小，偏差分别为−3.31% 和−3.56%。对四季净初级生产力影响最大的市 (县) 分别为松阳 (−12.49%)、龙泉 (−12.79%)、宁波 (−17.90%) 和建德 (−11.77%)。**【结论】**1990—2015 年浙江省森林净初级生产力季节和空间变化均较为明显，季节性干旱对浙江省森林净初级生产力的时空影响不容忽视。图 5 表 3 参 26

关键词：森林生态系统；BEPS 模型；净初级生产力；季节性干旱；浙江

中图分类号：S728.5 **文献标志码：**A **文章编号：**2095-0756(2026)01-0001-10

Spatiotemporal simulation of forest net primary productivity in Zhejiang Province and its response to seasonal drought

LIU Qiyue[1,2], ZHENG Zhaodong[1,2], MAO Fangjie[1,2], LI Xuejian[1,2], ZHANG Wanqing[1,2], SHENG Lina[1,2], MA Luya[1,2]

（1. Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration of Zhejiang Province, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. College of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China）

Abstract: [**Objective**] This study aims to simulate and analyze the spatiotemporal characteristics of forest net primary productivity (NPP) in Zhejiang Province, reveal the impact of seasonal drought on the spatiotemporal evolution of NPP, and provide a scientific basis for forest response and adaptation to climate change. [**Method**] The spatiotemporal characteristics of seasonal drought in Zhejiang Province from 1990 to 2015 were analyzed using the standardized precipitation evapotranspiration index. The spatiotemporal pattern of forest NPP in Zhejiang Province was simulated based on the BEPS model, and the impact of seasonal drought on forest NPP was further investigated. [**Result**] (1) The drought was of generally moderate intensity, with summer being the most severe season for drought, accounting for 42.20% of the area with severe or above drought, followed by

收稿日期：2024-10-23；修回日期：2025-03-10

基金项目：百山祖国家公园科研项目 (2022JBGS02)；浙江省科技厅“尖兵”“领雁”计划项目 (2023C02035)；国家自然科学基金资助项目 (32171785, 32201553, 31901310)

作者简介：刘奇悦 (ORCID: 0009-0007-1346-652X)，从事森林碳汇监测与模拟研究。E-mail: liuqiyue@stu.zafu.edu.cn。通信作者：毛方杰 (ORCID: 0000-0003-2005-3452)，副教授，博士，从事森林碳汇监测与模拟研究。E-mail: mfangjie@gmail.com

winter. In addition, except for spring, there was a trend of aridification in the other three seasons. (2) The average forest NPP from 1990 to 2015 was 371.53 g·m^{-2}·a^{-1}, with the highest value in spring (95.22 g·m^{-2}·month^{-1}). (3) The impact of drought on forest NPP was the greatest in summer and autumn, with deviations of −4.88% and −4.62%, respectively, and relatively smaller in spring and winter, with deviations of −3.31% and −3.56%, respectively. The cities (counties) that had the greatest impact on NPP in 4 seasons were Songyang (−12.49%), Longquan (−12.79%), Ningbo (−17.90%), and Jiande (−11.77%). [**Conclusion**] This study reveals significant seasonal and spatial changes in forest NPP in Zhejiang Province from 1990 to 2015. The spatiotemporal impact of seasonal drought on NPP cannot be ignored. [Ch, 5 fig. 3 tab. 26 ref.]

Key words: forest ecosystem; BEPS model; net primary productivity; seasonal drought; Zhejiang

植被净初级生产力 (NPP) 为植被光合作用产物扣除自养呼吸消耗后的剩余有机物[1]，是评估森林碳汇功能的重要指标[1]。过程模型综合考虑植被光合、呼吸等生理生态过程，能从一定程度上克服样地调查、遥感反演等的缺陷，在植被净初级生产力时空估算和未来预测中得到广泛应用[2]。然而，亚热带地区的气候、地形条件复杂，森林净初级生产力时空格局存在巨大的不确定性[3]。BEPS 模型基于 FOREST-BGC 模型开发，最初用于加拿大北方森林净初级生产力的估算[4]，在不断完善与发展中先后成功应用于全球不同森林生态系统碳循环的模拟[5−6]。

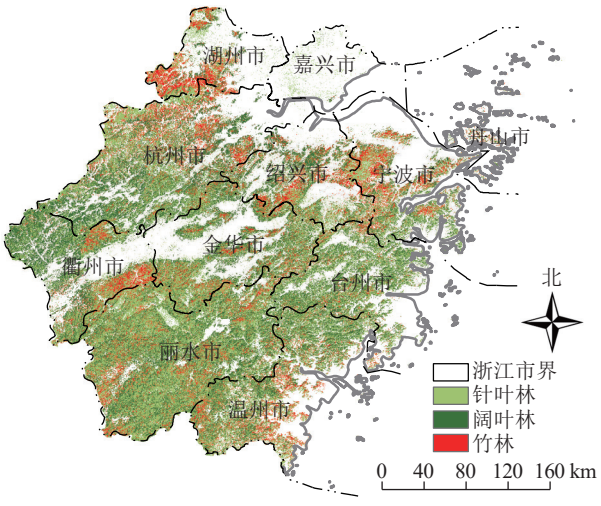
干旱是指因长期降水量小蒸发量大而导致的水分收支不平衡现象。短期干旱可引发植物叶片气孔关闭、光合作用停滞等现象；长期干旱则可能抑制植被的生长速率，并降低森林生态系统的生产力[7]。由于不同地区的气候特点、土壤条件和森林生长模式的异质性，干旱对森林的影响在不同空间和时间尺度上各不相同[8]。浙江省是季节性干旱的高发区域，如 2019 年 11 月全省气象干旱面积达 90% 以上，2022 年 8 月季节性干旱致 1.5 万 hm^2 农作物受灾等。然而，当前针对浙江省干旱时空分布及对植被影响研究较少。鹿翔等[9] 基于相对湿润指数对浙江省茶叶气象干旱特征进行了分析，王蓓等[10] 对浙江省杂草稻种子在不同干旱强度下的萌发能力进行了鉴定等。

本研究利用标准化降水蒸散指数分析 1990—2015 年浙江省季节性干旱时空特征，利用 BEPS 模型模拟浙江省森林净初级生产力的时空格局，并探讨季节性干旱对森林净初级生产力的定量影响。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

浙江省地处亚热带中部 (27°02′~31°11′N，118°01′~123°10′E)，属季风性湿润气候，气温适中，四季分明，光照充足，雨量丰沛。年平均气温为 15.0~18.0 ℃，年日照时数为 1 100.0~2 200.0 h，年平均降水量为 1 100.0~2 000.0 mm。浙江省受西风带和东风带天气系统的双重影响，气象灾害繁多，是中国受干旱灾害影响较为严重的地区之一。浙江省植被以常绿阔叶林、常绿针叶林以及针阔混交林和竹林为主。2014 年浙江森林分布情况如图 1 所示。



地图审图号：浙S(2025)29号。

图 1 研究区域及 2014 年森林空间分布

Figure 1 Study area and forest distribution in 2014

1.2 数据处理

1.2.1 气象数据 从中国气象局国家气象中心 (http://data.cma.cn/) 获取 1990—2015 年浙江省相关市 (县)70 个地面气象站点数据，包括日最高气温、日最低气温、日降水量、日相对湿度和日照时数

等。采用反距离加权法插值获得空间分辨率为 1 km 的日尺度栅格数据，再利用数字高程模型数据对气温进行海拔校正，并利用日照时长估算太阳辐射[11]。最后，通过求和 (或均值) 获取月和年尺度的气象指标数据。

1.2.2　叶面积指数　叶面积指数 (LAI) 是指单位地表面积上单面植物光合作用面积的总和，是影响植被冠层结构的关键因子[12]。本研究采用 1990—2000 年的 GLASS LAI 数据，通过裁剪和重采样后获得空间分辨率为 1 km 的叶面积指数。该数据产品来源于国家地球系统科学数据共享服务平台，时间分辨率为 8 d，空间分辨率为 0.05°。利用 3 次样条帽盖平滑算法对拼接转换后的 2001—2015 年 MODIS LAI 数据进行平滑去噪处理，通过粒子滤波同化算法对平滑后的数据进行同化处理后获取叶面积指数[13]。最后，将得到的高精度叶面积指数作为 BEPS 模型的输入参数，实现浙江省森林净初级生产力的精准模拟。

1.2.3　森林丰度数据　研究区 1990—2015 年 300 m的阔叶林和针叶林分布数据来源于欧洲空间局 (ESA) 气候变化倡议 (CCI) 土地覆盖数据集 (http://www.esa-landcover-cci.org/)。将 2 种森林分布数据裁剪至浙江省范围，然后利用线性尺度上推方法获取 1 km分辨率的 2 种森林丰度时空分布。根据已知 1 km 分辨率的 2003、2008、2014 年竹林丰度数据[14]，逐像元提取时间序列，进行线性拟合并推算所有年份丰度。2014 年每个像元占比最大的森林类型如图 1 所示。

1.2.4　土壤含水量　土壤质地数据来源于世界土壤数据库 (HWSD 1.2) (https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/)。首先将原始土壤质地裁剪到浙江省范围，然后根据其与土壤含水量对应关系转换为土壤含水量[15]。

1.2.5　植物生理生态参数　BEPS 模型所需的主要生理生态参数如表 1 所示。竹林聚集度指数和比叶面积通过实测获得，数据来源于浙江省安吉县山川乡和浙江省杭州市临安区太湖源 2 个竹林生态系统监测通量塔。阔叶林、针叶林和竹林的叶片平均碳储量、茎平均碳储量和根平均碳储量参数以及阔叶林和针叶林的聚焦度指数通过相关文献调查获取；其余生理生态参数利用迭代算法计算，参数的初始值根据 CHEN 等[4] 方法建立。每个参数设置的迭代范围为±100%。

表 1　BEPS 模型输入的主要植物生理生态参数

Table 1　Main vegetation biophysical parameters of BEPS model inputs

林分类型	聚集度指数	比叶面积/($m^2 \cdot kg^{-1}$)	25 ℃最大羧化速率/($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	叶片 Q10	茎 Q10	根 Q10	叶片平均碳储量/($kg \cdot m^{-2}$)	茎平均碳储量/($kg \cdot m^{-2}$)	根平均碳储量/($kg \cdot m^{-2}$)
阔叶林	0.68[16]	30☆	20☆	1.4☆	1.3☆	1.2☆	0.60[17]	5.80[17]	2.40[17]
针叶林	0.65[16]	28☆	30☆	0.8☆	0.8☆	0.8☆	0.30[17]	0.65[4]	1.22[4]
竹林	0.50★	27★	50☆	1.4☆	1.3☆	1.2☆	0.15[19]	1.76[18]	1.15[18]

说明：★. 经实测获取；☆. 经迭代计算获取。叶片 Q10. 叶片温度影响因子；茎 Q10. 茎干温度影响因子；根 Q10. 根部温度影响因子。

1.3　方法

1.3.1　标准化降水蒸散指数计算方法及干旱等级划分　本研究通过计算季节尺度标准化降水蒸散指数 (SPEI)，研究 1990—2015 年季节性干旱时空格局。季节尺度标准化降水蒸散指数为降水与蒸散差值的标准化处理结果，综合考虑气温、湿度、降水和蒸散等气象因素，能够稳定地评价干旱特征。季节尺度标准化降水蒸散指数的计算过程详见 VICENTE-SERRANO 等[19] 的研究结果。干旱随时间变化的趋势采用线性回归方程计算。

$$\theta = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} i \times S_i - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} S_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i \right)^2}。\tag{1}$$

式 (1) 中：θ 为变化趋势 (当 $\theta>0$ 时，代表季节尺度标准化降水蒸散指数正在增加，当 $\theta<0$ 时，代表季节尺度标准化降水蒸散指数正在减小)，n 为发生干旱年数，i 指研究的第 i 年 (i=1，2，···，n)，S_i 是第 i 年的季节尺度标准化降水蒸散指数值。

干旱频率 (F) 为发生干旱的年数 (n) 占总年数 (N_t) 的比率。

$$F = \frac{n}{N_t} \times 100\%。 \quad (2)$$

干旱影响范围 (A) 指对应年份内发生不同等级干旱的像元数量 (n_d) 占总像元数量 (N) 的比率。

$$A = \frac{n_d}{N} \times 100\%。 \quad (3)$$

干旱强度 (I) 为干旱期间平均累积季节尺度标准化降水蒸散指数的绝对值，其值大小反映该地区干旱强度的大小，数值越大代表干旱强度越强。

$$I = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} S_i \right|。 \quad (4)$$

基于干旱强度指数可将干旱等级及干旱强度进行划分 (表 2)，其中干旱等级可划分为无干旱、轻度干旱、中度干旱、严重干旱、极端干旱 5 个等级。

表 2　干旱等级划分及干旱强度划分

Table 2　Drought classification and drought intensity classification

干旱等级	干旱等级含义	干旱强度	干旱等级	干旱等级含义	干旱强度	干旱等级	干旱等级含义	干旱强度
1	无干旱	＜0.5	3	中度干旱	[1.0，1.2)	5	极端干旱	≥1.5
2	轻度干旱	[0.5，1.0)	4	严重干旱	[1.2，1.5)			

1.3.2　*BEPS 模型介绍与净初级生产力模拟*　BEPS 主要包括辐射传输、光合作用、呼吸作用、土壤水分平衡 4 个模块[15]。通过气孔导度的逐日积分对 Farquhar 模型模拟的叶片瞬间光合作用进行时间尺度的转换，以获得单叶片逐日的光合作用总量。然后将冠层结构分为阳生叶和阴生叶 2 个部分，分别计算阳生叶与阴生叶的光合作用，再利用叶面积指数获得冠层总初级生产力 (GPP)，然后扣除自养呼吸得到净初级生产力，其中生长呼吸取总初级生产力的 30%，维持呼吸利用各器官生物量单位呼吸速率与温度影响因子 (Q10) 的温度方程估算得到。

1.3.3　*季节性干旱对浙江省森林净初级生产力的影响*　基于以上分析，本研究首先提取不同干旱强度对应的森林净初级生产力时空分布格局，利用公式 (5) 计算不同干旱强度下森林净初级生产力 (P_d) 相对于未受干旱森林净初级生产力 (P_n) 的偏差 (E_{bias})，并以此评价季节性干旱对净初级生产力的影响。

$$E_{bias} = \frac{P_d - P_n}{P_n} \times 100\%。 \quad (5)$$

2　结果与分析

2.1　浙江省季节性干旱时空演变

图 2 为 1990—2015 年浙江省不同季节的干旱趋势、干旱强度、干旱频率和干旱影响面积时空分布。总体上浙江省干旱处于中等以下强度，但是不同季节的干旱特征有所区别。

春季浙江省总体干旱强度中等，较严重区域主要分布在杭州西北部 (图 2A)。受灾面积峰值出现在 2009 年，达 79.00%。2011 年发生 1 次极端干旱事件，受灾面积为 59.00%。全省春季干旱发生频率为 39.40%，干旱高发区主要分布在浙江省东部，尤其以杭州湾沿岸地区最为突出。春季标准化降水蒸散指数呈现明显下降趋势，表明干旱化倾向，该趋势主要分布于浙江省北部，尤其在湖州西北部以及杭州与嘉兴、绍兴三市交界处，最大下降趋势为 0.049。

夏季严重及以上强度的干旱面积占比达 42.20%，主要分布在杭州、金华和绍兴三市交界处，金华、丽水、台州和温州四市交界处，丽水南部以及宁波东部 (图 2B)。2005 年夏季发生受灾面积峰值干旱，波及约 81% 的省域面积。夏季干旱频率为 29.20%，高频地区主要分布在嘉兴。标准化降水蒸散指数下降区域占比 23.8%，主要分布在嘉兴、杭州及衢州等地，干旱化趋势不明显。值得注意的是，夏季干旱影响面积呈现明显的“凸”型波动，在 2000—2010 年经历了明显的“上升—下降”趋势。

秋季干旱强度以中等及以下为主，占比超过 90.65%(图 2C)。然而，秋季干旱频率较高 (40.7%)，高频地区主要分布在浙江省西部，尤其是杭州、湖州、温州西南部。1996 年秋季发生受灾面积峰值干旱，

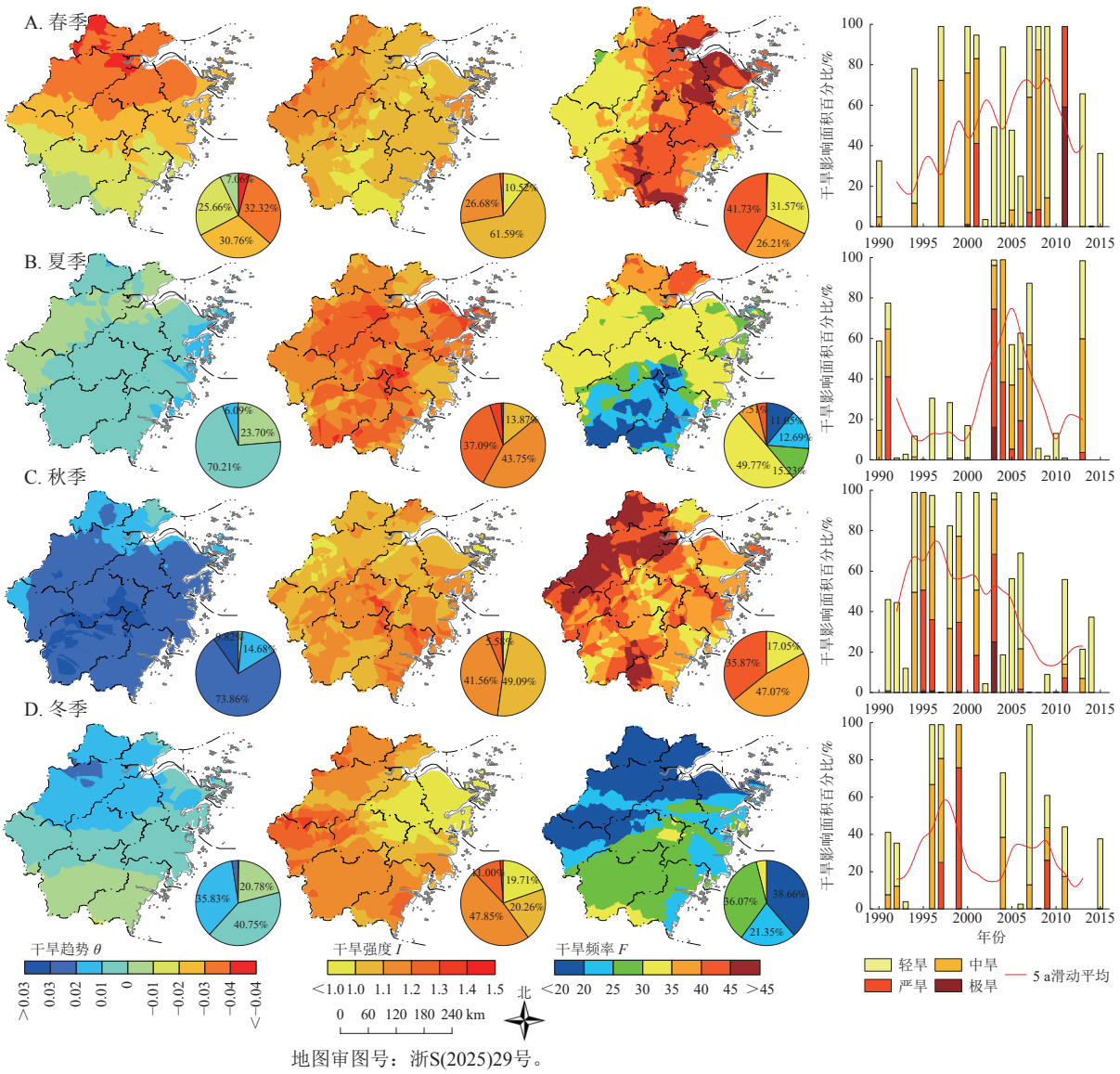


图 2　1990—2015 年浙江省四季干旱趋势、强度、频率和影响面积时空分布

Figure 2　Temporal and spatial distribution of drought trends, intensity, frequency and impact area in four seasons in Zhejiang Province from 1990 to 2015

影响 76.00% 的省域面积。2003 年发生极端干旱事件，受灾面积为 25.00%。与前两季不同，秋季标准化降水蒸散指数呈正趋势，显示湿润化态势，尤其在丽水以及金华、台州交界处最为显著，最大上升幅度为 0.032。

冬季严重及以上干旱面积占比为 12.19%，是全年干旱影响程度第 2 位的季节，主要分布在杭州、金华与衢州三市交界处 (图 2D)。受灾范围最大的干旱发生在 1997 年，约 59.00% 的省域面积受灾，但未发生极端干旱事件。冬季干旱发生频率与夏季相当，为 23.10%，主要在浙南区域。1993—2000 年冬季干旱影响面积同样呈现“上升—下降”趋势，但干湿变化特征不显著，仅南部 20.90% 的区域标准化降水蒸散指数呈现下降趋势。

2.2　浙江省森林净初级生产力时空格局

图 3 为浙江省森林净初级生产力的时间变化趋势。在 1990—2015 年共计 26 a 中，春、夏季浙江省森林净初级生产力整体呈波动上升趋势，整体上升速率分别为 0.280 0 和 0.140 0 g·m^{-2}·a^{-1}，春季为 54.35~142.99 g·m^{-2}·月$^{-1}$，夏季为 74.93~111.76 g·m^{-2}·月$^{-1}$。秋、冬季浙江省森林净初级生产力整体呈波动下降趋势，整体下降速率分别为 0.036 1 和 0.180 5 g·m^{-2}·a^{-1}，秋季为 69.71~108.91 g·m^{-2}·月$^{-1}$，冬季为 74.65~117.58 g·m^{-2}·月$^{-1}$。春、夏、秋、冬四季均值分别为 95.22、94.61、88.93、92.76 g·m^{-2}·月$^{-1}$。1992

和 2005 年季节间森林净初级生产力均值差距最为明显，分别为 29.15 和 44.88 g·m^{-2}·月$^{-1}$，其余年份各季节间差距相对较小。各季节中，春季森林净初级生产力波动幅度最为剧烈，其余 3 个季节波动相对平缓。

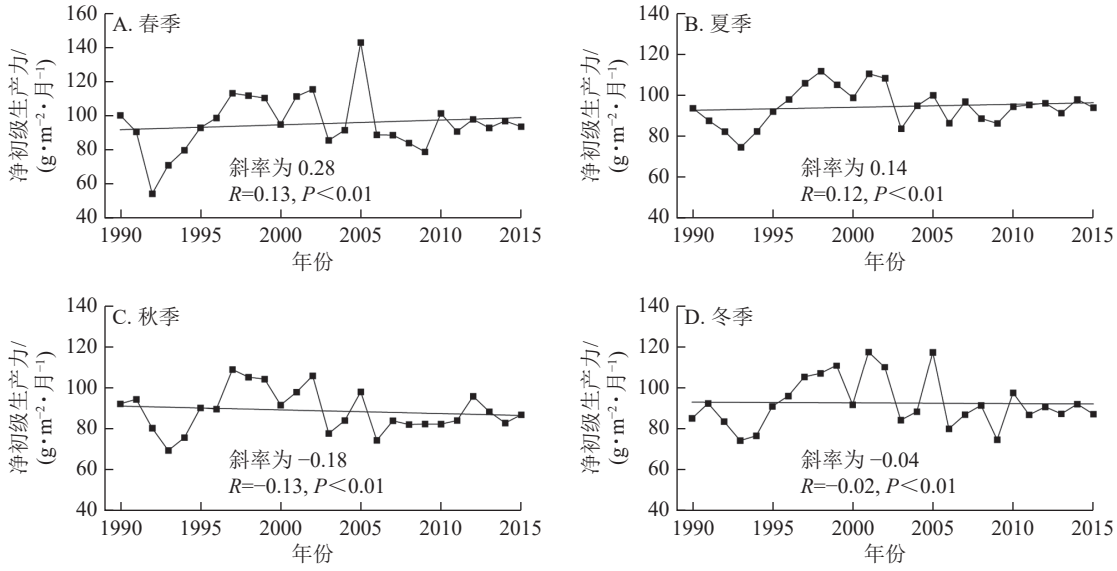


图 3 1990—2015 年不同季节浙江省森林净初级生产力月均变化

Figure 3 Monthly mean variation series of forest NPP in Zhejiang Province in different seasons from 1990 to 2015

图 4 为 1990—2015 年浙江省各个季节森林净初级生产力月均值的空间分布和变化趋势。空间分布上，浙江省森林净初级生产力平均值呈现出由中、北部向东、南、西部递增的趋势。东部的台州、宁波，南部的丽水、温州，西部的衢州、杭州，其森林净初级生产力平均值普遍高于北部湖州、嘉兴和中部绍兴、金华。但同时，在森林净初级生产力平均值较高的浙江西南部各市 (县) 中，沿海地区的森林净初级生产力都较低。从时空变化趋势来看，浙江省中部森林净初级生产力整体上表现出较明显的增长趋势，东部、南部、西部则表现出下降趋势。结合行政区划可以看出，中部金华、绍兴以及靠近中部的衢州、杭州和宁波沿海部分地区，森林净初级生产力增长幅度较大，其余大部分地区增长较缓甚至下降。

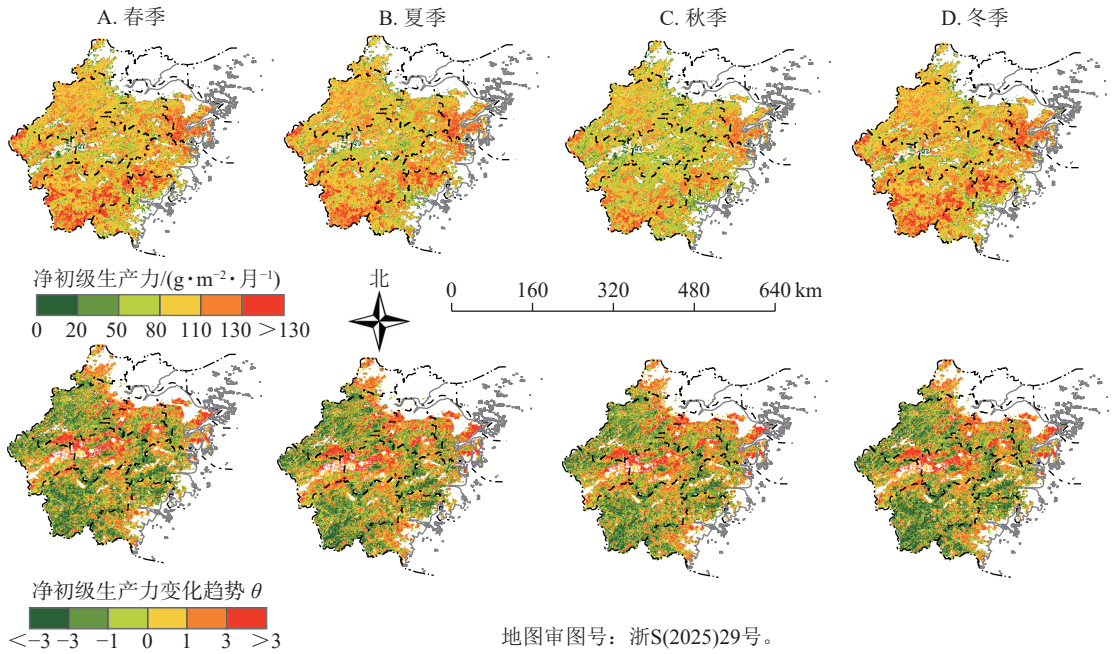


图 4 1990—2015 年不同季节浙江省森林净初级生产力时空格局及空间变化趋势

Figure 4 Spatiotemporal pattern and variation trend of forest NPP in Zhejiang Province from 1990 to 2015

2.3　季节性干旱对森林净初级生产力的影响

图 5 为不同干旱强度对浙江省森林净初级生产力的影响时空变化。总体而言，季节性干旱对浙江省森林净初级生产力影响较小，平均 E_{bias} 为−4.09%。其中，夏秋两季的影响相对较大，E_{bias} 分别为−4.88% 和−4.62%，春冬两季的影响相对较小，E_{bias} 分别为−3.31% 和−3.56%。不同季节干旱对净初级生产力影响具有明显的空间异质性。春季干旱的影响区域集中在浙西南，受影响最严重的市 (县) 包括松阳、云和和泰顺，E_{bias} 分别为−12.49%、−11.03% 和−10.17%；夏季干旱影响范围较广，但最严重的区域主要在浙西南，包括龙泉、松阳和淳安，E_{bias} 分别为−12.79%、−12.58% 和−12.34%；秋季干旱的影响区域主要位于浙东南，受影响最严重的区域为宁波、瓯海和缙云，E_{bias} 分别为−17.90%、−14.96% 和−11.29%；冬季干旱的影响主要分布在浙中地区，受影响最严重市 (县) 为建德、东阳和绍兴，E_{bias} 分别为−11.77%、−10.43% 和−10.15%。

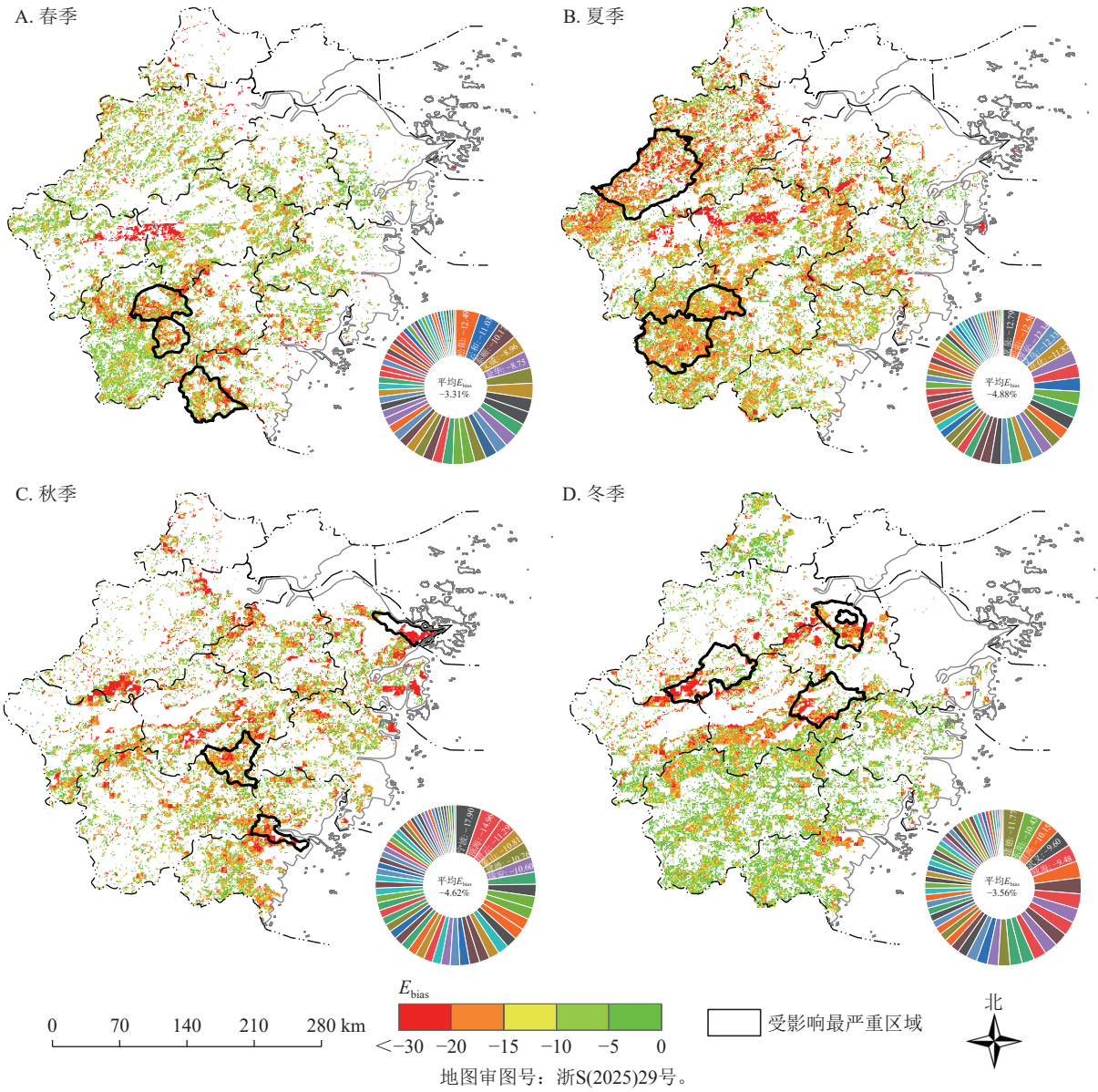


图 5　不同季节干旱对浙江省森林净初级生产力的影响

Figure 5　Effects of drought on forest NPP in Zhejiang Province in different seasons

3　讨论

本研究发现：1990—2015 年浙江省呈现干旱化趋势，其中秋旱趋势有所下降，春、夏、冬旱都呈上升趋势，这与 LOU 等[20] 的研究结果一致。空间上从北到南春秋两季表现为“干—湿”趋势，夏冬两季

表现为“湿—干”趋势。其中，春旱的影响面积波动上升，但严重程度自 2010 年以后有所下降；夏旱、秋旱的影响面积有所下降，冬旱影响面积保持稳定。此外，秋季为浙江省 4 个季节中干旱频率最高的季节，秋旱的高频地区集中于浙江省西北部，这可能与浙江西北部秋季降水量少，蒸发量大以及浙江省水资源不足与污染问题有关[21]。

1990—2015 年，浙江省年均森林净初级生产力呈波动上升的趋势，表明浙江省森林生态系统的碳汇能力持续增强，这与尹世燕等[22] 对中国亚热带森林净初级生产力时空变化趋势的研究结果一致。从时间变化角度看，浙江省年均森林净初级生产力在 2006—2009 年下降明显，这可能与 2006—2009 年浙江省旱情加重[20]，干旱事件频繁发生有关；从空间格局上看，浙江省平均森林净初级生产力呈现从东南到西北逐渐递减的空间格局，这可能与浙江省年降水量的空间分布特征有关。在时空变化趋势上，浙江省中部地区森林净初级生产力表现出明显的增长趋势，而西南、西北部地区表现出下降趋势。这与 LIU 等[23] 的研究结果较为一致。

季节性干旱对浙江省森林净初级生产力的影响呈现出明显的空间异质性，这可能与浙江省复杂的气候条件有关，如具琳静等[24] 研究表明：2000—2019 年赣南森林净初级生产力年际变化主要受蒸散量和辐射影响，而受气温影响较小；王娟等[25] 得出：2000—2013 年秦岭林区植被净初级生产力与气温的相关性高于降水量等。此外，除了气候因子对净初级生产力的影响之外，还需综合考虑干扰因素 (火灾、虫害、洪涝、砍伐等) 的影响[26]。在本研究中，未考虑到其他人为干扰因素影响。不同干扰类型对森林净初级生产力的影响有显著的差异，这种差异也在一定程度上影响了森林净初级生产力时空分布格局，因此，应当采取合理经营措施，提高森林对干旱事件抵抗力，增强森林的持续固碳能力。

4 结论

总体上浙江省干旱强度中等，但春季、夏季、秋季、冬季分别在 2009、2005、1996 和 1997 年发生过超过省域面积 73% 的严重干旱。其中，夏季为浙江省遭受干旱最严重的季节，严重及以上干旱面积占 42.20%，其次为冬季，但干旱频率秋季和春季较高。另外，除秋季外，其他 3 个季节均有干旱化趋势。

1990—2015 年浙江省森林各季节月均净初级生产力为 88.93~95.22 g·m^{-2}·月$^{-1}$，其中最高的为春季。空间上东、西、南部山区较高，中部平原也呈现出明显的增长趋势。

干旱对浙江省森林净初级生产力影响最大的为夏秋两季，E_{bias} 分别为−4.88% 和−4.62%，春冬两季相对较小，E_{bias} 分分别为−3.31% 和−3.56%。春季、夏季、秋季和冬季影响最大的市 (县) 分别为松阳 (−12.49%)、龙泉 (−12.79%)、宁波 (−17.90%) 和建德 (−11.77%)。

5 参考文献

[1] WANG Guangjie, PENG Wenfu, ZHANG Lindan, *et al*. Quantifying the impacts of natural and human factors on changes in NPP using an optimal parameters-based geographical detector [J/OL]. *Ecological Indicators*, 2023, **155**(10): 111018[2024-09-23]. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111018.

[2] ZHAO Junfang, LIU Dongsheng, ZHU Yujie, *et al*. A review of forest carbon cycle models on spatiotemporal scales [J/OL]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **339**: 130692[2024-09-23]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130692.

[3] PAN Yude, BIRDSEY R A, PHILLIPS O L, *et al*. The enduring world forest carbon sink [J]. *Nature*, 2024, **631**(8021): 563−569. DOI: 10.1038/s41586-024-07602-x.

[4] CHEN Jingming, LIU Jane, CIHLAR J, *et al*. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications [J]. *Ecological Modelling*, 1999, **124**(2/3): 99−119.

[5] WU Wenli, ZHANG Jiahua, BAI Yun, *et al*. Aboveground biomass dynamics of a coastal wetland ecosystem driven by land use/land cover transformation [J/OL]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(16): 3966[2024-09-23]. DOI: 10.3390/rs15163966.

[6] MAO Fangjie, DU Huaqiang, ZHOU Guomo, *et al*. Coupled LAI assimilation and BEPS model for analyzing the spatiotemporal pattern and heterogeneity of carbon fluxes of the bamboo forest in Zhejiang Province, China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, **242**(9): 96−108.

[7] MÜLLER L M, BAHN M. Drought legacies and ecosystem responses to subsequent drought [J]. *Global Change Biology*, 2022, **28**(17): 5086−5103. DOI: 10.1111/gcb.16270.

[8] 孙占薇, 马岚, 梅雪梅, 等. 晋西黄土区不同水文年土壤水分特征及其主要影响因子分析[J]. 浙江农林大学学报, 2021, **38**(1): 10−20. SUN Zhanwei, MA Lan, MEI Xuemei, *et al*. Characteristics of soil moisture and its main influencing factors in different hydrological years in western Shanxi loess region [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(1): 10−20. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20200260.

[9] 鹿翔, 韩芙蓉, 高昕瑜, 等. 基于相对湿润指数的浙江省茶叶气象干旱特征分析[J]. 浙江农林大学学报, 2024, **41**(1): 57−66. LU Xiang, HAN Furong, GAO Xinyu, *et al*. Meteorological drought characteristics of tea in Zhejiang based on relative humidity index [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(1): 57−66.

[10] 王蓓, 孙莉, 肖婷, 等. 浙江省杂草稻种子逆境萌发能力鉴定[J]. 浙江农林大学学报, 2024, **41**(4): 688−695. WANG Bei, SUN Li, XIAO Ting, *et al*. Identification of seed germination ability of weedy rice under stress in Zhejiang Province [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(4): 688−695. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20230521.

[11] SUN Shanlei, LIU Yibo, CHEN Haishan, *et al*. Causes for the increases in both evapotranspiration and water yield over vegetated mainland China during the last two decades [J/OL]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, **324**(13): 109118[2024-09-23]. DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.109118.

[12] ZHOU Xuewen, XIN Qinchuan, ZHANG Shulei, *et al*. A prognostic vegetation phenology model to predict seasonal maximum and time series of global leaf area index using climate variables [J/OL]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, **342**: 109739[2024-09-23]. DOI: 10.1016/j.agrformet.2023.109739.

[13] MAO Fangjie, LI Xuejian, DU Huaqiang, *et al*. Comparison of two data assimilation methods for improving MODIS LAI time series for bamboo forests [J/OL]. *Remote Sensing*, 2017, **9**: 401[2024-09-23]. DOI: 10.3390/rs9050401.

[14] KANG Fangfang, LI Xuejian, DU Huaqiang, *et al*. Spatiotemporal evolution of the carbon fluxes from bamboo forests and their response to climate change based on a BEPS Model in China [J/OL]. *Remote Sensing*, 2022, **14**: 366[2024-09-23]. DOI: 10.3390/rs14020366.

[15] CAO Jiaxi, CHEN Ye, HU Yue, *et al*. Spatiotemporal trends of forest carbon stock and its response to environmental factors in the Yangtze River Basin during 2005-2020 [J/OL]. *Forests*, 2023, **14**: 1793[2024-09-23]. DOI: 10.3390/f14091793.

[16] 朱高龙. 2000—2013 年中国植被叶片聚集度系数时空变化特征[J]. 科学通报, 2016, **61**(14): 1595−1603. ZHU Gaolong. Spatial-temporal characteristics of foliage clumping index in China during 2000−2013 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, **61**(14): 1595−1603. DOI: 10.1360/N972015-00987.

[17] LUO Yiwei, ZHANG Leiming, GUO Xuebing, *et al*. Ecosystem carbon allocation of a temperate mixed forest and a subtropical evergreen forest in China [J/OL]. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, **9**(6): 642[2024-09-23]. DOI:10.5814/j.issn.1674-764x.2018.06.007.

[18] 徐娜, 胡海波, 朱燕飞, 等. 北亚热带毛竹林碳储量及其空间分配[J]. 林业科技开发, 2014, **28**(2): 37−41. XU Na, HU Haibo, ZHU Yanfei, *et al*. The carbon storage and spatial distribution of *Phyllostachys edulis* stands in northern sub-tropical areas [J]. *China Forestry Science and Technology*, 2014, **28**(2): 37−41.

[19] VICENTE-SERRANO S, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010, **23**: 1696−1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.

[20] LOU Weiping, WU Lihong, MAO Yuding, *et al*. Precipitation and temperature trends and dryness/wetness pattern during 1971−2015 in Zhejiang Province, southeastern China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, **133**: 47−57.

[21] LOU Weiping, SUN Shanlei, SUN Ke, *et al*. Summer drought index using SPEI based on 10-day temperature and precipitation data and its application in Zhejiang Province (southeast China) [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2017, **31**: 2499−2512. DOI: 10.1007/s00477-017-1385-0.

[22] 尹世燕, 毛方杰, 周国模, 等. 中国亚热带干旱多尺度时空格局及演变趋势[J]. 水土保持研究, 2022, **29**(6): 242−253. YIN Shiyan, MAO Fangjie, ZHOU Guomo, *et al*. Multi-scalar spatiotemporal pattern and evolution trend of drought in subtropical China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29**(6): 242−253.

[23] LIU Yibo, JU Weimin, HE Honglin, *et al*. Changes of net primary productivity in China during recent 11 years detected using an ecological model driven by MODIS data [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2013, **7**: 112−127. DOI: 10.1007/s11707-

012-0348-5.

[24] 具琳静, 欧阳勋志, 潘萍, 等. 2000—2019 年赣南森林净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系[J]. 东北林业大学学报, 2022, **50**(12): 37−44. JU Linjin, OUANYANG Xunzhi, PAN Pin, *et al*. Spatiotemporal variation in forest net primary productivity and their relationship with climate factors in southern Jiangxi Province from 2000 to 2019 [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2022, **50**(12): 37−44.

[25] 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*. Changes of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2012 in Qinling Mountainous area [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, **31**(5): 238−245. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2016.05.39.

[26] 孙静, 范文义, 于颖, 等. 基于 InTEC 模型的塔河森林净初级生产力影响因子定量分析[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(3): 793-804. SUN Jin, FAN Wenyi, YU Ying, *et al*. Quantitative analysis of impact factors on net primary productivity of Tahe forest based on InTEC model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(3): 793-804.