

DOI: 10.5846/stxb201912042633

张雪蕾, 肖伟华, 王义成. 基于改进的 CASA 模型三峡库区 NPP 时空特征及气候驱动机制. 生态学报, 2021, 41(9): 3488-3498.

Zhang X L, Xiao W H, Wang Y C. Temporal-spatial variations of NPP and its climatic driving mechanism in the Three Gorges Reservoir Area based on modified CASA model. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3488-3498.

基于改进的 CASA 模型三峡库区 NPP 时空特征及气候驱动机制

张雪蕾, 肖伟华*, 王义成

中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038

摘要: 采用改进后的 CASA 模型对三峡库区 2001—2015 年的 NPP 进行了估算。通过 Sen 斜率的方法, 对 NPP 的年内及年际时空变化趋势及分布特征进行了分析; 基于相关性分析方法, 深入探讨了气候因子对 NPP 的驱动机制; 并以气候模式模拟结果为输入项, 对 NPP 的未来变化趋势进行了预测, 得到如下结论: (1) 2001—2015 年间, 三峡库区 NPP 的月值呈单峰型季节变化趋势, 峰值达到 $160 \text{ gC m}^{-2} \text{ month}^{-1}$, 发生于 7 月。NPP 年际变化呈波动型上升趋势, 幅度较小, 多年平均值为 $727 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。空间分布上, 主要表现为库首库尾较高、库腹较低和长江以北高于长江以南的特点。(2) NPP 与降水、气温及净辐射等气候因子之间均呈显著正相关, 其中与气温的相关性最强, 与降水的相关性最弱, 植被生产力对气温的变化更为敏感。(3) 未来 15 年 NPP 多年平均值为 $859 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 总体呈微弱减小趋势, 幅度为 $4.14 \text{ gC m}^{-2} 10\text{a}^{-1}$ 。与现状对比来看, 未来 NPP 表现出一定程度的增加, 总体而言, 三峡库区植被长势趋好, 呈良性稳定态势发展。

关键词: 净初级生产力(NPP); 改进的 CASA 模型; 驱动机制; 三峡库区

Temporal-spatial variations of NPP and its climatic driving mechanism in the Three Gorges Reservoir Area based on modified CASA model

ZHANG Xuelei, XIAO Weihua*, WANG Yicheng

State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

Abstract: Net primary production (NPP) in the Three Gorges Reservoir Area (TGRA) during 2001—2015 was estimated using a modified parameter CASA model. The spatial and temporal variation and distribution characteristics of the NPP were analyzed on annual and inter-annual scale based on Sen's slope. According to the correlation analysis method, the driving mechanism of climate factors to NPP was discussed. Then, the NPP in the future was predicted with climate model simulation results as input. The results showed that: (1) from 2001 to 2015, the monthly value of NPP in the TRGA presented a single-peak seasonal variation trend, reached its maximum value of $160 \text{ gC m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ in July. The annual variability of NPP showed a rising trend of fluctuation with a small range, and the multiyear average value of NPP was $727 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. In terms of the spatial distribution, the main features are higher in head and tail of the reservoir, lower belly of the reservoir and higher north of the Yangtze River than south. (2) The NPP was significantly positively correlated with precipitation, temperature and solar radiation, with the strongest correlation with temperature and the weakest correlation with precipitation, indicating that the vegetation productivity was more sensitive to the change of temperature. (3) In the next 15 years, the multiyear average value of NPP was $859 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, showed a slight decrease trend, with a range of

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFA0601500)和国家重点研发计划项目(2017YFC0404410)资助

收稿日期: 2019-12-04; 网络出版日期: 2021-03-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xwsen998@126.com

$4.14 \text{ gC m}^{-2} 10\text{a}^{-1}$. Compared with the current situation, the NPP showed a certain increase in the future. Generally speaking, the vegetation in the TGRA was growing well and developing in a benign and stable way.

Key Words: net primary productivity; modified CASA model; driving mechanism; the Three Gorges Reservoir Area

植被净初级生产力(Net Primary Production, NPP)是指绿色植物在单位面积、单位时间内所累积的有机物数量^[1],可直接反映植被在自然条件下的生产能力^[2]。NPP 作为评价陆地生态系统生产力的重要指标^[3],受到包括地学、生物学和水文学等多个学科领域研究的重视^[4-7]。

在植被 NPP 研究的起步阶段,由于资料的欠缺和技术的落后,关于 NPP 的研究方法相对简单,仅通过气候要素与 NPP 实测资料建立关系来对 NPP 进行估算,构建了一系列 NPP 的气候生产力模型,如 Miami 模型^[8]、Thornthwaite Memorial 模型^[9]和 Chikugo 模型^[10],该类模型形式简单,得到广泛应用。但由于未充分考虑植被的生理生态过程,也忽略了植物对环境的反馈作用以及下垫面因素,估算结果误差较大,准确性不高。基于上述认知,学者们以植被生理生态学特征为基础,充分考虑气象、环境及土壤等因素,发展建立了生理生态过程模型,如 TEM 模型^[11]、BIOME-BGC 模型^[12]、SILVAN^[13]、CENTURY 模型^[14]等,此类模型对 NPP 的估算精度较高,但因模型复杂,所需参数较多,难以得到推广。近年来,随着 NPP 研究手段的逐步发展和完善,特别是遥感与地理信息系统等空间观测与分析技术的发展,以遥感数据驱动的光能利用率模型得到了快速发展,其中以 CASA 模型为典型代表^[15-16]。CASA 模型以遥感数据为输入源,从植被的生理过程出发,基于资源平衡观点^[17],结合 Monteith^[18]提出的光能利用率建立起来。相对其他模型来说,CASA 模型所需参数较少且易于获取,避免了因数据缺失及人为因素造成的误差,易于推广使用。另外,CASA 模型基于遥感数据进行估算,一定程度减小了实测数据由点及面造成的误差,模拟精度较高。又因遥感数据时空分辨率多样,时效性好等优点,在不同时间尺度和空间尺度上都具有较好的适用性。

国内外学者对 CASA 模型和植被 NPP 进行了大量研究,张方敏等^[19]基于遥感和过程模型对亚洲东部陆地生态系统的 NPP 进行了分析,得到,NPP 的空间格局主要由气候因子决定,不同国家 NPP 差异较大,总体自东南向西北显著减少,我国西北荒漠区为 NPP 低值区。Li 等^[20]对我国自 20 世纪 80 年代后期以来 NPP 对土地利用和土地覆被变化的响应进行了研究,指出,近 30 年来我国由于城市化的发展导致 NPP 总量产生一定程度的损失,其中大部分损失由农田转变为城镇所致。周伟等^[21]采用 CASA 模型对近 30 年来我国草地的 NPP 进行了研究,结果表明,近 30 年来我国草地 NPP 呈增加趋势,空间特征表现为东南部高西北部低,多种草地类型的 NPP 与降水呈显著正相关关系。Liu 等^[22]探讨了我国草地生产力对气候变化和人类活动的响应特征,认为,我国草地 NPP 减小主要由人类活动所致,而气候变化则促进了 NPP 的增加。刘建峰等^[23]以河南省为例,综合利用 CASA 模型和 VPM 模型,在像元尺度上对最大光能利用效率进行了研究,认为,最大光能利用率在空间上呈西北、西南高,其他区域低的特点,最大光能利用率值的变化是自然、人为因素共同影响的结果。Li 等^[24]利用光能利用效率模型对内蒙古自治区的 NPP 进行了估算和分析,指出,研究区 NPP 自东北向西南递减,NPP 与气温和降水高度相关。上述研究在不同的时间和空间尺度上验证了 CASA 模型估算 NPP 的准确性和适用性,同时也论证了 NPP 研究的使用价值和科学意义。

作为我国长江上游重要的生态功能区^[25],西南地区重要的生态屏障和生态走廊^[26],三峡库区生态系统的健康稳定发展关系到周边区域乃至长江流域的可持续发展。大量研究表明该区目前面临一系列问题,如水土流失^[27-28]和生物多样性丧失^[29]、植被破坏^[30]等。本文从植被生长力的角度出发,以 2001—2015 年水文气象和遥感产品等时间序列为数据源,基于改进的 CASA 模型对三峡库区植被净初级生产力进行估算,分析三峡库区不同时间尺度植被净初级生产力的变化特征及空间差异。结合气候变化特征,初步探讨气候因子对 NPP 的驱动机制,分析 NPP 对气候变化的响应特征。在此基础上,对气候模式模拟成果进行对比遴选和矫正,对未来 15 年三峡库区的 NPP 进行预测。研究有助于深入了解三峡库区植被生长力的变化特征及其对气

候变化的响应,正确认识三峡库区目前的生态状况,为生态系统服务功能的有效评估提供理论依据与数据支撑,为库区未来生态建设及可持续发展规划布局提供决策依据。

1 研究区概况

三峡库区是指三峡大坝建成以来,库区成功蓄水后,坝址与水库回水末端之间的集水区。地处长江上游末端,介于东经 $105^{\circ}50'$ — $111^{\circ}40'$ 、北纬 $28^{\circ}31'$ — $31^{\circ}44'$ 之间(图 1),总面积为 $59,326\text{ km}^2$ 。该区北攀大巴山南麓、南抵云贵高原北缘,地处大巴山褶皱带、川东褶皱带和川鄂湘黔隆起带三大构造单元交汇处,山地、丘陵、盆地、谷地交错分布,主要以东北部和长江南缘的山地和中西部的丘陵为主,高程介于 $54\text{—}3099\text{ m}$ 之间。三峡库区属亚热带湿润季风气候,多年平均气温为 $17.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。库区内雨量充沛但时空分布不均,多年平均降水量为 1130 mm 。三峡库区四季分明,具有冬暖春早、夏热伏旱,秋迟雨多的特点^[31]。区内植被类型丰富,主要为常绿阔叶林、落叶阔叶混交林、落叶阔叶与常绿针叶混交林、针叶林和灌丛等,NDVI 多年均值为 0.89 (图 1)。

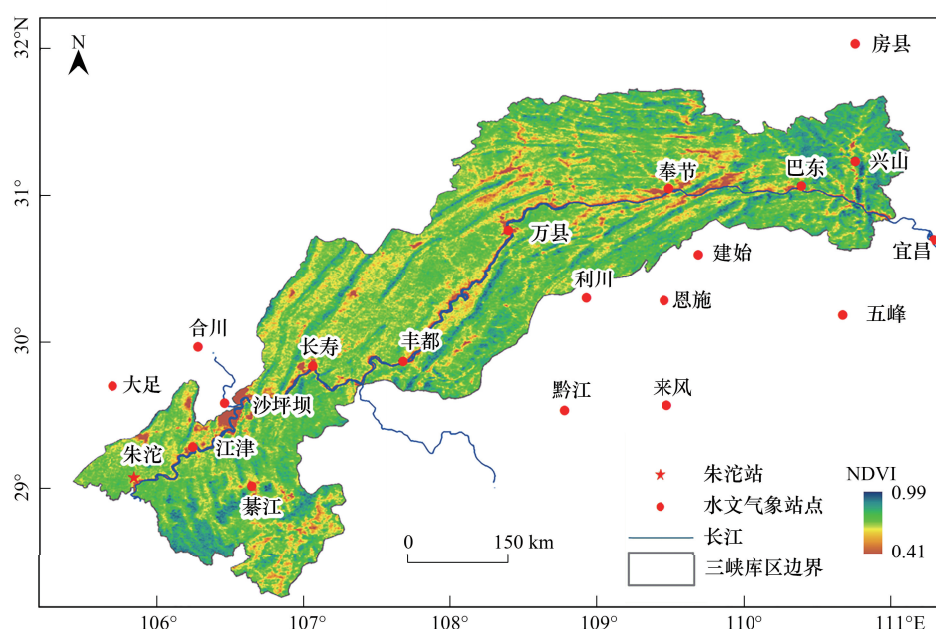


图 1 三峡库区地理位置及站点分布

Fig.1 Location and sites distribution of the TGRA

2 数据与方法

2.1 数据

2.1.1 水文气象数据

系统收集和整编三峡库区内及周边 19 个基准气象站 2001—2015 年的逐日水文气象观测序列,内容主要包括常规地面观测数据(平均气温、最低和最高气温、降水量、气压、风速、日照时数、相对湿度和实际蒸散发),数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>);采用 P-M(Penman-Monteith)公式^[32]计算得到潜在蒸散发和净辐射序列,将各站点日值资料进行汇总得到月值和年值序列,通过 ArcGIS 平台,采用样条插值法分别对降水、气温、蒸散发(潜在和实际)及太阳净辐射的月值和年值进行插值得到空间数据,用于后续分析及计算。

气候模式(General Circulation Model, GCM)又称为大气环流模式,是基于旋转球体的纳维-斯托克斯动力

学原理的、用于描述地球大气、陆面和海洋的数学模型^[33-34]。全球气候模式可通过降尺度方法得到区域尺度的气象数据,是现阶段预测未来气候变化及其相应研究的主要途径^[35-36]。本文对 ISI-MIP 提供的 5 套全球气候模式的历史期数据与实测数据进行对比分析,发现 5 套气候模式对历史气温的模拟效果较好,相关系数超过 0.9;对降水的模拟效果均较差,相关系数在 0.4 左右。因此需对气候模式的模拟结果作进一步的订正,才可用于未来气候情景及 NPP 的预测。比较而言, HadGEM2-ES 模式的模拟效果最好,因此采用分位图法对 HadGEM2-ES 模式的模拟结果进行订正,具体步骤见参考文献^[37-39]。订正后的降水模拟值与历史同期观测值相关系数在 0.8 以上,基本满足要求。

2.1.2 遥感数据

本文涉及两类遥感影像,分别是归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和植被类型图。NDVI 是国际上比较通用的一种植被指数,可用于反演植被生长状态及覆盖度等植被特征^[40],应用广泛。本文 NDVI 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>);数据时间跨度为 2001 年 1 月到 2015 年 12 月,空间分辨率为 500 m, NDVI 年值由月值通过最大合成法(Maximum Value Composite, MVC)^[41]计算所得。植被类型数据为 2000 年中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)提供 1 km 的栅格数据,用于 CASA 模型中最大光能利用率的确定。

2.2 方法

2.2.1 基于修正的 CASA 模型的 NPP 估算

CASA 模型强调气候条件和植被本身的光能利用效率,在估算陆地生态系统 NPP 中得到广泛的应用^[42]。计算公式为^[43]:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (1)$$

式中, $APAR(x, t)$ 为像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射 (MJ/m^2), $\varepsilon(x, t)$ 为像元 x 在 t 月的实际光能利用率 ($\text{g C}/\text{MJ}$), 具体计算方法如下。

光合有效辐射 $APAR$ 由太阳总辐射和植物特征参量计算, 公式如下:

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (2)$$

式中, $SOL(x, t)$ 表示 t 月在像元 x 处的太阳总辐射量 (MJ/m^2); $FPAR(x, t)$ 表示植被层对入射光合有效辐射的吸收比例; 常数 0.5 表示光合有效辐射占总辐射的比例。

太阳总辐射量 ($SOL(x, t)$) 一般利用原始辐射气象记录, 但气象辐射数据较少, 不利于插值的精确性, 可采用太阳净辐射 R_s 代替^[44]:

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (3)$$

R_s 是太阳净辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), R_a 是大气上界辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), n 是实际日照时间 (hour), N 白昼长度 (hour), n/N 相对日照时间, $a_s = 0.25$ 是回归常数, $b_s = 0.5$ 。

实际光能利用率 ε 主要受温度和水分的胁迫作用, 计算公式为:

$$\varepsilon(x, t) = T_{\varepsilon 1}(x, t) \times T_{\varepsilon 2}(x, t) \times W_{\varepsilon}(x, t) \times \varepsilon_{\max} \quad (4)$$

式中, $T_{\varepsilon 1}$ 和 $T_{\varepsilon 2}$ 分别为低温和高温胁迫因子; W_{ε} 为水分胁迫因子, 反映水分条件的影响; $\varepsilon_{\max}$ 为理想条件下最大光能利用率 ($\text{g C}/\text{MJ}$), 取值因植被类型而异。本文对原模型中的 $\varepsilon_{\max}$ 统一为 $0.389 \text{ g C}/\text{MJ}$ 进行了调整, 详情见参考文献^[45-46]。

2.2.2 Sen 斜率

Sen 斜率^[47]是地学领域较为成熟的一种统计方法, 主要用于分析各要素的变化趋势和幅度。该方法以样本在不同长度的变化率构造秩序列, 基于一定显著性水平进行统计量检验, 并以斜率的中值大小判断时间序列变化趋势及幅度。Sen 斜率能降低或避免数据缺失及异常对统计结果的影响, 公式为:

$$\text{Sen}_{ij} = \text{Median} \left[\frac{x_j - x_i}{j - i} \right], \forall j > i \quad (5)$$

式中, Sen_{ij} 为 Sen 斜率; x_i 和 x_j 分别为第 i 和第 j 时刻的序列值, $1 < i < j < n$; n 为序列长度。

2.2.3 相关性分析

Pearson 相关系数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^[48]。计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中, x, y 为两组变量, R_{xy} 为两变量的相关系数; $\bar{x}$ 为变量 x 的均值; $\bar{y}$ 为变量 y 的均值; n 为样本数。 R 的值域为 $[-1, 1]$ 。 R 大于 0, 表明两个变量呈正相关, 小于 0 则表示变量呈负相关; 绝对值越大表明相关性越高, 反之亦然。通常, 以 0.3 和 0.6 作为相关系数绝对值的拐点, 分别代表弱相关 ($0 < |R| \leq 0.3$)、低度相关 ($0.3 < |R| \leq 0.6$)、显著相关 ($0.6 < |R| \leq 1$)。

3 结果与讨论

3.1 三峡库区 NPP 时空特征分析

2001—2015 年间 NPP 年内及年际变化趋势如图 2 所示, 由图可知, 就年内特征来看, NPP 的年内变化呈单峰型季节变化趋势, 峰值达到 $160 \text{ gC m}^{-2} \text{月}^{-1}$, 发生在 7 月, 谷值发生于 1 月和 12 月, 体现了植被生长初期和凋谢期 NPP 值较低的状况, 多年月均值为 $12 \text{ gC m}^{-2} \text{月}^{-1}$ 。 NPP 的年内特征体现了研究区冷暖季植被生长力的差异, 暖季光热及水分条件俱佳, 在气温、辐射及降水等利好因素的共同作用下, 植被生长力最强, NPP 趋高。冷季库区水热条件较差, 且呈现一定程度的水文干旱, 不利于植被生长。就年际特征来看, NPP 多年平均值为 $727 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 最高值和最低值分别为 $926 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 $562 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 分别发生于 2011 年和 2006 年。在统计时段内, NPP 波动显著, 总体呈一定程度的增加趋势, 增幅较小。

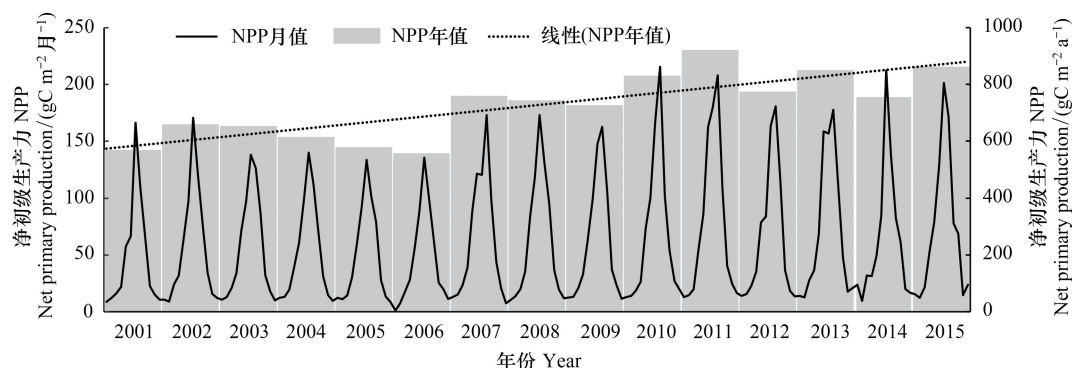


图 2 三峡库区 NPP 月值、年值变化趋势

Fig.2 The trend of monthly and annual values of NPP in the TGRA

三峡库区 NPP 的多年平均值及基于 Sen 斜率的空间分布特征如图 3 所示, 由图可知, 三峡库区 NPP 的多年平均值介于 $115\text{—}2121 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 之间, 空间分布上, 东西差异主要体现在库首库尾较高、库腹较低, 南北差异主要表现为江北高于江南的特征。结合三峡库区的土地利用及植被类型分布情况, NPP 较高的区域林地草地分布较为集中, 主要为常绿阔叶林、落叶阔叶混交林、落叶阔叶与常绿针叶混交林、针叶林和灌丛等, NPP 相对较低的区域主要为农田, 比较而言, 农田受季节限制, 仅在生长季表现出较高的生产力水平, 因此总体生产力水平低于林地草地, 另外土壤类型及地形地势导致的水热差异等因素综合作用造成了这一空间分异特征。统计时段内, 三峡库区 NPP 除极少数区域呈减小趋势外, 绝大部分地区呈增加趋势。Sen 斜率介于 $-58\text{—}93 \text{ gC m}^{-2}$

10a^{-1} 之间,空间均值为 $18\text{ gC m}^{-2} 10\text{a}^{-1}$ 。变化幅度相对较小,且均未通过显著性检验,说明研究区 NPP 在 2001—2015 年间变化不显著。就空间分布而言,NPP 增加幅度较大的区域主要集中于库首及库腹东地区的长江两岸区域,以及库尾长江以南地区。自 1988 年以来,三峡库区相继开展了“长江防护林工程”、“天然林保护”、“退耕还林”等改善生态的工程,森林面积增加,生态环境得以恢复。区内植被 NPP 普遍呈增加趋势。大坝建成以后,三峡库区湖北段以及重庆主城区周边大力推进植树造林等水土保持和生态修复工程,使得库区中东部和西部地区 NPP 发生显著增加趋势。NPP 减小的区域主要分布于库腹西和库尾部分地区,该区主要为城区,2000 年以后城市化进程大力推进,建设用地面积不断扩张,导致植被破坏,NPP 减少。

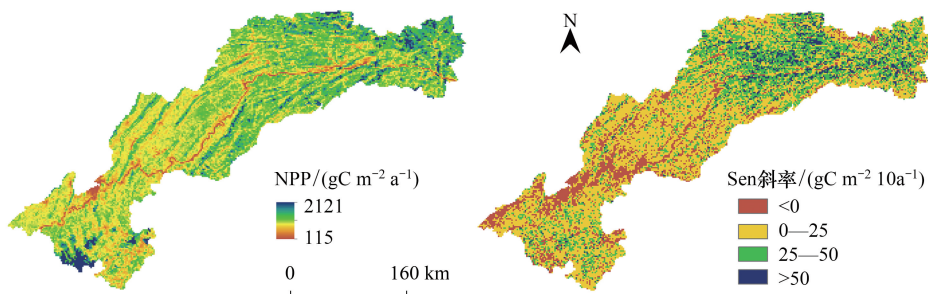


图 3 三峡库区 NPP 的多年平均及基于 Sen 斜率统计的空间分布

Fig.3 Distribution of multi-year average NPP and its Sen's slope tested variation in the TGRA

本文关于 NPP 时空变化特征的研究,与其他学者的成果进行了对比。陆逸^[49]基于 CASA 模型对三峡库区 2000—2009 年间的 NPP 进行了估算,结果表明在研究时段内 NPP 呈增加趋势,但增幅较小,基本保持平稳状态,与本文关于 NPP 变化趋势的结论一致。范立红^[50]对 2000—2015 年间的三峡库区的 NPP 进行了研究,认为 NPP 呈显著增加趋势,主要由于仅选取 2000、2005、2010 及 2015 年来代表 2000 年以来的变化趋势,研究结果存在较大的不确定性,与本文结论存在一定差异。范立红估算所得 NPP 年均值介于 $528\text{—}602\text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 之间,陆逸仅统计了作物生长季(3—11 月)的累积 NPP,得到 NPP 的多年平均值为 $487\text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$,由于统计时段不一,遥感数据来源及分辨率不同,以及统计手段的差异,结果略低于本文的研究,总体差异在可解释范围内,结论大体一致。两者关于 NPP 月值特征的结果均表明 NPP 月值变化呈先增后减的特征,并在 7 月达到峰值,12 月与 1 月值最小,与本文结论一致。综上所述,本文关于 NPP 的研究结果与前人基本一致,证明了本研究的可靠性和合理性。

3.2 三峡库区 NPP 的气候驱动机制

3.2.1 气候要素变化特征

三峡库区主要气候要素的多年平均值及基于 Sen 斜率的变幅统计如表 1 所示。由表可知,2001—2015 年间,研究区降水的多年平均值为 1130 mm ,变化幅度为 $32.32\text{ mm}/10\text{a}$;库区多年平均气温为 $17.13\text{ }^{\circ}\text{C}$,统计时间段内,气温呈微弱减小趋势,减小幅度为 $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,这一结论与全国乃至全球变暖的趋势略有不同,可能与统计时段及地区差异有关;净辐射也成一定的减小趋势,减小速率为 $8.41\text{ MJ m}^{-2} 10\text{a}^{-1}$,与气温的变化互为因果。总体来看,在 2001—2015 年间,三峡库区的气候变化主要表现为降水的增加和气温辐射项小幅度的减少。

表 1 三峡库区降水,气温和净辐射基于 Sen 斜率的变幅统计(2001—2015)

Table 1 Sen's slope tested amplitude of precipitation (P), temperature (T) and solar radiation (R_s) in the TGRA

	P/mm	$T/^{\circ}\text{C}$	$R_s/(\text{MJ}/\text{m}^2)$
多年平均 Multiyear average value	1130	17.13	2299
Sen 斜率 Sen's slope($/10\text{a}$)	32.32^*	-0.19^{**}	-8.41^*

* 为通过 0.05 显著性检验, ** 为通过 0.01 显著性检验

3.2.2 相关性分析

植被的生产力和生物量的累积不仅受本身生理条件的限制,还受土壤条件、水分状况、气候条件及人类活动等因素的影响^[22,51]。在大范围人类活动扰动有限、具备天然覆被本底特征的地区,水热条件的影响起决定性作用。许多植物生产力模型都是以温度、降水、蒸散等气候要素为基础建立的,因此,NPP 与气候因子的相互关系及响应机制受到广泛关注^[52]。本文考虑到三峡库区天然覆被占据主导的事实,就 NPP 与降水、气温净辐射等关键气候要素之间的关系进行统计分析。

采用 2001—2015 年间 NPP、降水、气温、净辐射等要素的月值进行线性回归,得到 NPP 与各气候因子的相关系数,见表 2。由表可见,NPP 与各要素之间均呈正相关($R_{xy}>0$);NPP 与气温的相关性最强,与降水的相关性最弱;按相关性等级划分,NPP 与三者均为显著相关($R_{xy}>0.6$)。表明三峡库区的光、热、水分对该流域的植物生产力有着决定性的作用,其中光热条件占主导作用。NPP 与降水相对较低的相关性表明在三峡库区降水对植被生长的影响较小。其他学者关于 NPP 的驱动因子及气候要素关系的研究^[46,53],均表明在我国大部分地区,植被生长力与气温和降水等因子有较强相关性。

表 2 NPP 与各气候因子的相关系数
Table 2 Correlation coefficients of NPP to climate factors

	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>R_s</i>
相关系数 Correlation coefficients (R_{xy})	0.61	0.76	0.73

相关系数均通过 0.01 显著性检验

采用 2001—2015 年间 NPP、降水、气温及净辐射等要素栅格数据的年值,对 NPP 与三者的相关性进行空间分析,见图 4。由图可知,NPP 与降水相关系数的空间分布,除了库首部分区域和库区边界部分地区为负相关外,其他区域均呈正相关,显著相关的区域集中在库腹区。NPP 与气温的相关系数大于零的区域的面积占库区总面积的 56%,负相关区域主要集中在库首和库尾,显著正相关的区域主要分布于森林腹地,以长江为界,主要分布于江北。NPP 与净辐射的相关系数空间分异显著,负相关区域主要集中于库腹东,其他地区均为正相关,其中显著相关的区域主要分布于库腹区的边缘地区。总体而言,NPP 与三者相关关系的正负分布

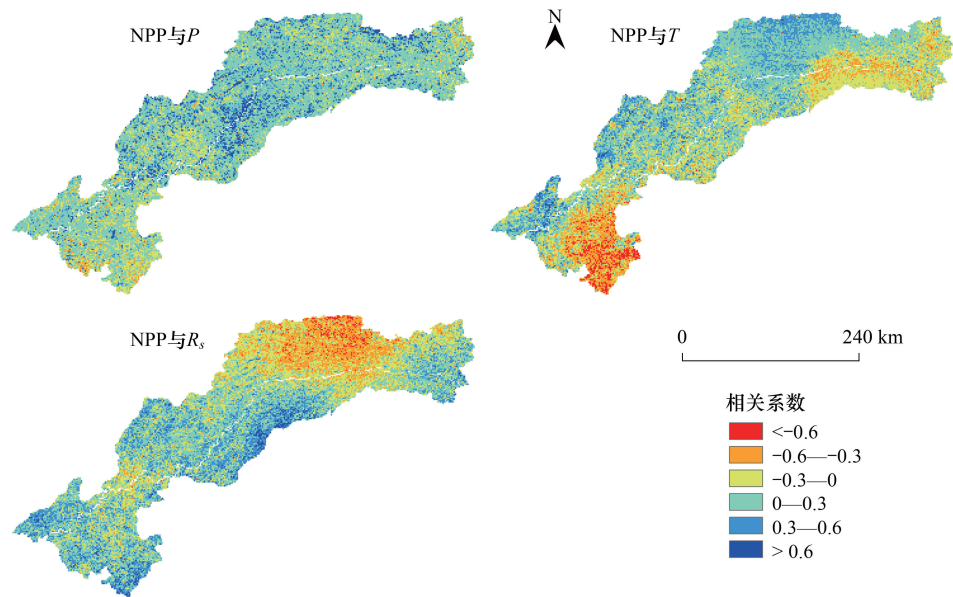


图 4 NPP 与降水,气温和净辐射的相关系数的空间分布
Fig.4 Spatial distribution of correlation coefficients of NPP to *P*, *T* and *R_s*
P: 降水 Precipitation; *T*: 气温 Temperature; *R_s*: 净辐射 Solar radiation

不一,相关系数的空间差异较为显著,表明三峡库区在地势、地理位置及植被类型等要素的综合作用下,光热和水分对植被生产力的影响体现较强的空间异质性;NPP 与三者正相关的区域占比较高,且正相关系数的绝对值较大,总体呈显著正相关关系,与表 2 结果一致。

3.2.3 驱动机制

3.2.2 中的相关性分析表明,三峡库区 NPP 与降水、气温及净辐射之间均有较强的线性相关,为探讨三峡库区 NPP 对气候要素的响应机制,欲构建 NPP 与各气候要素的回归模式。用月值进行拟合,得到 NPP 与降水、气温和净辐射之间的回归关系,根据复相关系数最大的原则择优,得到 NPP 与各要素之间的指数拟合关系的复相关系数最高,结果列于表 3。

上述模式为 NPP 与降水、气温和净辐射单要素之间的回归模式,将三者对 NPP 的指数拟合作为自变量,与 NPP 进行线性模拟得到 NPP 与三者的拟合关系:

$$NPP = 3.91e^{0.13T} + 1.29e^{0.01P} + 0.06e^{0.02R_s} - 2.47 \quad (7)$$

NPP 基于 CASA 模型的计算结果及气候要素回归模式的模拟结果的散点对应关系如图 5 所示,由图可见,三峡库区 NPP 计算结果及模拟结果的复相关系数较高,为 0.87,表明该回归模式精度良好。

为了进一步对模拟精度的稳定性进行评价,对回归模式的 Nash 系数进行计算,方法如下:

$$NES = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \overline{O_i})^2} \quad (8)$$

式中, O_i 为采用 CASA 模型计算得到的 2001—2015 年 NPP 月值, S_i 为回归模式估算的 NPP 月值, $\overline{O_i}$ 为回归模型估算的 NPP 均值。

根据式(8)计算所得,NPP 与气候因子回归模式的 Nash 系数为 0.85,较高的 NSE 表明上述模式构建比较合理,能够较好地刻画三峡库区 NPP 对气候变化的响应特征。

从三峡库区 NPP 的驱动机制来看,所构建回归模式的底数相同,均为自然常数 e,指数均为线性方程。通过对比发现,在指数方程和指数方程构成的线性方程中,气温的权重均高于降水,表明三峡库区植被生产力对气温的作用更为敏感,同时也论证了在降水充足的区域,水分对该区植被生产力的制约或胁迫较小,植被的生长主要受光热条件制约^[54]。

上述回归模式在三峡库区得到了较好的验证,适用于三峡库区 NPP 与气候因子的相互关系及互馈机制,但受研究区域和研究时段所限,其他时间尺度以及研究区的适应性尚未得到验证,具体应根据实际情况适当调整。另外,三峡库区天然植被所占比重较高,人类活动主要集中蓄水区周边的城镇地区,从区域尺度上来看,人类活动可以忽略不计,但三峡大坝的建设、水库调度、城市化进程的加剧、土地利用的变化等对蓄水区周边的区域尤其是消落带生态系统的影响不可忽视,本文仅考虑气候要素对 NPP 的作用,未来研究中需进一步深入探讨人类活动的影响。

表 3 NPP 与降水,气温和净辐射的回归模式及复相关系数

Table 3 Regression model and multiple correlation coefficients of NPP with P , T and R_s

回归模式 Regression model	复相关系数 Multiple correlation coefficients
$NPP = 13.86e^{0.01P}$	0.78
$NPP = 4.46e^{0.13T}$	0.83
$NPP = 1.61e^{0.13R_s}$	0.81

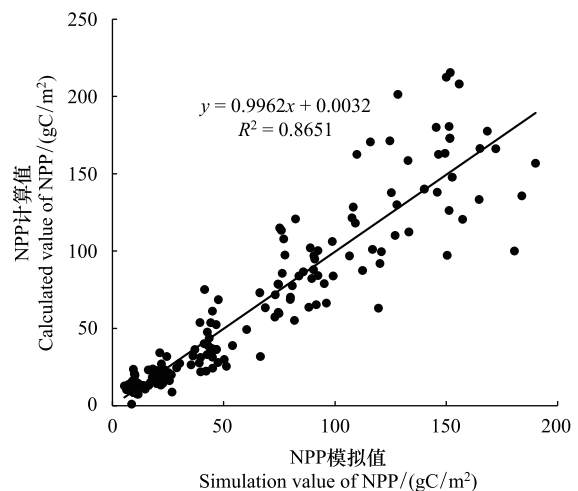


图 5 三峡库区 NPP 模式验证

Fig.5 Model validation of NPP in the TGRA

3.3 NPP 的未来预测

对 HadGEM2-ES 气候模式中不同排放情景的模拟结果进行对比分析,发现四种(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5)排放情景的模拟结果差别不大,因此,最终选取高排放情景(RCP8.5)的模拟结果对未来 NPP 的变化特征进行预测。分析发现,净辐射与气温之间存在较强的线性关系,考虑到净辐射需要通过其他气候要素的计算得到,而气候模式的预测与实测数据存在一定的误差,为避免在计算过程中误差叠加造成更大的不一致。净辐射由气温拟合得出,用于 NPP 的预测。考虑到未来气候变化的不确定性,本文仅对未来 15 年的 NPP 进行预测。

将气候模式估测的未来降水和气温的结果进行汇总,并利用气温对净辐射进行拟合,最终得到关键气候要素降水、气温及净辐射 2016—2030 年的年值序列,通过 Sen 斜率检验对三者进行变幅统计,结果列于表 4。由表可知,降水呈显著增加趋势,增加速率为 18.06 mm/10a,气温和净辐射表现为一定程度的减小态势,趋势不显著;与 2001—2015 年比较来看,未来气候因子均呈现一定程度的增加,但幅度较小。表明全球气候变化态势在三峡库区的表现不显著,与该区气候条件、地理位置、下垫面情况等有关。

表 4 三峡库区降水,气温和净辐射预测值基于 Sen 斜率的变幅统计(2016—2030)
Table 4 Sen's slope tested amplitude of predicted P, T and R_s in the TGRA

	P/mm	T/℃	R _s / (MJ/m ²)
多年平均 Multiyear average value	1286	17.66	2394
Sen 斜率 Sen's slope(/10a)	18.06 **	-0.21	-15.59 *

将气候模式的模拟结果代入 NPP 与气候因子的回归模式(7)中,得到 2016—2030 年间 NPP 的逐月趋势特征,将月值汇总得到未来 15 年的 NPP 的变化趋势,如图 6 所示。由图可知,未来 15 年 NPP 的预测值变化趋势相对比较平缓,无明显波动,最大值和最小值分别为 974 gC m⁻² a⁻¹ 和 806 gC m⁻² a⁻¹,多年平均值为 859 gC m⁻² a⁻¹。总体呈减小趋势,减小速率为 4.14 gC m⁻² 10a⁻¹,且未通过显著性检验,表明气候变化对三峡库区植被活动的影响相对较小。未来 NPP 减小趋势不显著。结合气候要素的变化,NPP 的减小是研究区降水增加和气温及辐射的减小综合作用的结果,降水增加对 NPP 的正向驱动与气温和辐射减少对 NPP 的负向驱动相互抵消,使得 NPP 保持相对平稳的趋势。与 2001—2015 年比较来看,NPP 略有增加,表明在气候变化背景下,三峡库区植被长势趋好,总体呈良性态势发展。

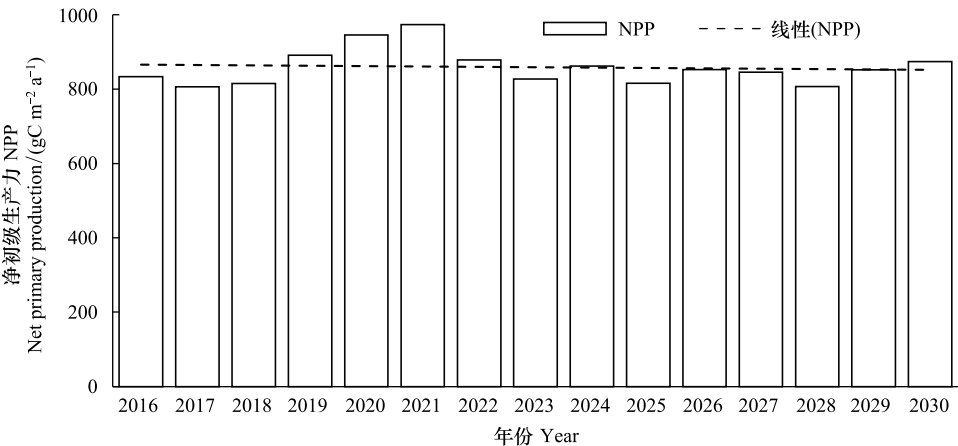


图 6 NPP 未来预测值的变化趋势(2016—2030)
Fig.6 Change trend of predicted value of NPP from 2016 to 2030

NPP 的预测,直接受到气候模式模拟结果的影响,由于气候模式的模拟是基于全国乃至全球尺度进行,具体到较小空间尺度的研究区,可能存在一定的误差,并且模式本身存在系统误差^[55],虽通过一系列方法予

以矫正,但对未来气候变化预测仍存在较大的不确定性^[56],未来研究中需引进更为准确的模式产品,并根据区域实际气候状况选择适应性较好的气候模式,以提高预测精度。

4 结论

(1)2001—2015 年间,三峡库区 NPP 的月值呈单峰型季节性变化趋势,峰值为 $160 \text{ gC m}^{-2} \text{ 月}^{-1}$,出现在 7 月。NPP 年际变化波动显著,总体呈增加趋势,幅度较小,最高值和最低值分别为 $926 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $562 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,多年平均值为 $727 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。空间分布上,主要体现在库首库尾较高、库腹较低的东西差异,和长江以北高于长江以南的南北差异上。

(2)相关性分析结果表明,NPP 与降水、气温和净辐射等气候因子之间均呈正相关,其中与气温的相关性最强,与降水的相关性最弱;按相关性等级划分,NPP 与三者均为显著相关关系。从三峡库区 NPP 的驱动机制来看,所构建的回归模式中,气温的权重高于降水,表明三峡库区植被生产力对气温的变化更为敏感。

(3)将气候模式的模拟成果代入气候要素与 NPP 的回归模式中,对 2016—2030 年的 NPP 进行预测。得到,未来 15 年 NPP 的变化趋势无明显波动,最大值和最小值分别为 $974 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $806 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,多年平均值为 $859 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。总体呈微弱减小趋势,减小幅度为 $4.14 \text{ gC m}^{-2} \text{ 10a}^{-1}$ 。与 2001—2015 年对比来看,未来 NPP 呈一定程度的增加,总体而言,三峡库区植被长势趋好,呈良性态势发展。

参考文献 (References):

- [1] 程春晓,徐宗学,张淑荣,王志慧.黑河流域 NPP 对气候变化及人类活动的响应.北京师范大学学报:自然科学版,2016,52(5): 571-579.
- [2] 仇洁.青藏高原植被降水利用效率时空特征分析[D].南京:南京信息工程大学,2013.
- [3] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [4] 杨东辉,赵军,张智慧,付鹏,刘春雨.近 10 年甘南牧区草地净初级生产力变化研究.干旱地区农业研究,2011,29(1): 257-263.
- [5] 卞鸿雁,庞奖励,任志远,文雯.干旱区内陆流域净初级生产力时空分异模拟及自然因素分析——以泾河流域为例.资源科学,2012,34(9): 1790-1797.
- [6] 高艳妮,于贵瑞,张黎,刘敏,黄玫,王秋凤.中国陆地生态系统净初级生产力变化特征——基于过程模型和遥感模型的评估结果.地理科学进展,2012,31(1): 109-117.
- [7] 谢宝妮,秦占飞,王洋,常庆瑞.黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素.农业工程学报,2014,30(11): 244-253.
- [8] 朱文泉,陈云浩,徐丹,李京.陆地植被净初级生产力计算模型研究进展.生态学杂志,2005,24(3): 296-300.
- [9] Lieth H. Primary production: terrestrial ecosystems. *Human Ecology*, 1973, 1(4): 303-332.
- [10] Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1985, 40(4): 343-352.
- [11] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, Moore B, Vorosmarty C J, Schloss A L. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363(6426): 234-240.
- [12] Running S W, Hunt Jr E R. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models//Ehleringer J R, Field C B, eds. *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe: A volume in Physiological Ecology*. San Diego, CA: Academic Press, 1993: 141-158.
- [13] Kaduk J, Heimann M. A prognostic phenology scheme for global terrestrial carbon cycle models. *Climate Research*, 1996, 6(1): 1-19.
- [14] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, Gilmanov T G, Scholes R J, Schimel D S, Kirchner T, Menaut J C, Seastedt T, Garcia Moya E, Kamnalrut A, Kinyamario J I. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 785-809.
- [15] Bao G, Bao Y H, Qin Z H, Xin X Q, Bao Y L, Bayarsaikhan S, Zhou Y, Chuntai B. Modeling net primary productivity of terrestrial ecosystems in the semi-arid climate of the Mongolian Plateau using LSWI-based CASA ecosystem model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 46: 84-93.
- [16] Pei F S, Li X, Liu X P, Wang S J, He Z J. Assessing the differences in net primary productivity between pre-and post-urban land development in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171-172: 174-186.
- [17] Field C B, Randerson T J, Malmström C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 74-88.
- [18] Monteith J L. Solar Radiation and productivity in Tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 1972, 9(3): 747-766.
- [19] 张方敏,居为民,陈镜明,王绍强,于贵瑞,韩士杰.基于遥感和过程模型的亚洲东部陆地生态系统初级生产力分布特征.应用生态学报,2012,23(2): 307-318.
- [20] Li J, Wang Z L, Lai C G, Wu X Q, Zeng Z Y, Chen X H, Lian Y Q. Response of net primary production to land use and land cover change in

- mainland China since the late 1980s. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 237-247.
- [21] 周伟, 牟凤云, 刚成诚, 官冬杰, 何锦峰, 李建龙. 1982—2010 年中国草地净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系. *生态学报*, 2017, 37(13): 4335-4345.
- [22] Liu Y Y, Wang Q, Zhang Z Y, Tong L J, Wang Z Q, Li J L. Grassland dynamics in responses to climate variation and human activities in China from 2000 to 2013. *Science of the Total Environment*, 2019, 690: 27-39.
- [23] 刘剑锋, 陈琳, 孟琪, 王璇, 王远征, 王来刚, 张喜旺. 基于 CASA-VPM 模型的植被最大光能利用率研究. *河南农业科学*, 2019, 48(12): 157-163.
- [24] Li J, Cui Y P, Liu J Y, Shi W J, Qin Y C. Estimation and analysis of net primary productivity by integrating MODIS remote sensing data with a light use efficiency model. *Ecological Modelling*, 2013, 252: 3-10.
- [25] 吴四平. 基于 RS 与 GIS 的三峡库区植被覆盖度时空变化研究——以湖北省段为例. *科技视界*, 2016, (8): 233-234.
- [26] 李潇然, 李阳兵, 韩芳芳. 基于土地利用的三峡库区生态屏障带生态风险评价. *水土保持通报*, 2015, 35(4): 188-194.
- [27] Xu X B, Tan Y, Yang G S, Li H P, Su W Z. Impacts of china's three gorges dam project on net primary productivity in the reservoir area. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(22): 4656-4662.
- [28] Bao Y H, He A B, Wen A B, Gao P, Tang Q, Yan D C, Long Y. Dynamic changes of soil erosion in a typical disturbance zone of China's Three Gorges Reservoir. *CATENA*, 2018, 169: 128-139.
- [29] Yuan X Z, Zhang Y W, Liu H, Xiong S, Li B, Deng W. The littoral zone in the Three Gorges Reservoir, China: challenges and opportunities. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(10): 7092-7102.
- [30] 黄春波, 滕明君, 曾立雄, 周志翔, 肖文发, 朱建华, 王鹏程. 长江三峡库区土地利用/覆盖的长期变化. *应用生态学报*, 2018, 29(5): 1585-1596.
- [31] 李月臣, 刘春霞, 闵婕, 王才军, 张虹, 汪洋. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价. *生态学报*, 2013, 33(1): 168-178.
- [32] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [33] Xu Y, Xu C H, Gao X J, Luo Y. Projected changes in temperature and precipitation extremes over the Yangtze River Basin of China in the 21st century. *Quaternary International*, 2009, 208(1/2): 44-52.
- [34] Charney J G. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1975, 101(428): 193-202.
- [35] 成爱芳, 冯起, 张健恺, 李宗省, 王岗. 未来气候情景下气候变化响应过程研究综述. *地理科学*, 2015, 35(1): 84-90.
- [36] 张磊, 王春燕, 潘小多. 基于区域气候模式未来气候变化研究综述. *高原气象*, 2018, 37(5): 1440-1448.
- [37] Li H B, Sheffield J, Wood E F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(D10): D10101.
- [38] 陆桂华, 杨桦, 吴志勇, 何海, 肖恒. 未来气候情景下长江上游区域积雪时空变化分析——基于 CMIP5 多模式集合数据. *水科学进展*, 2014, 25(4): 484-493.
- [39] 赵芳芳, 徐宗学. 统计降尺度方法和 Delta 方法建立黄河源区气候情景的比较分析. *气象学报*, 2007, 65(4): 653-662.
- [40] 汪权方, 张海文, 孙杭州, 王倩. 基于时序 MODIS/NDVI 影像的鄂东南低山丘陵区植被覆盖度季节变化特征. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(8): 884-889.
- [41] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [42] He C Y, Liu Z F, Xu M, Ma Q, Dou Y Y. Urban expansion brought stress to food security in China: evidence from decreased cropland net primary productivity. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 660-670.
- [43] 李传华, 曹红娟, 范也平, 韩海燕, 孙皓, 王玉涛. 基于校正的 CASA 模型 NPP 遥感估算及分析——以河西走廊为例. *生态学报*, 2019, 39(5): 1616-1626.
- [44] 张笑鹤. 西南地区 NDVI 和 NPP 时空动态及其与气候因子相关性分析[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- [45] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [46] Zhang Y, Zhang C B, Wang Z Q, Chen Y Z, Gang C C, An R, Li J L. Vegetation dynamics and its driving forces from climate change and human activities in the Three-River Source Region, China from 1982 to 2012. *Science of the Total Environment*, 2016, 563-564: 210-220.
- [47] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [48] 杨思遥, 孟丹, 李小娟, 吴新玲. 华北地区 2001-2014 年植被变化对 SPEI 气象干旱指数多尺度的响应. *生态学报*, 2018, 38(3): 1028-1039.
- [49] 陆逸. 基于 MODIS 数据的三峡库区净初级生产力遥感估算研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [50] 范立红. 三峡库区土地利用/覆盖变化对净初级生产力的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
- [51] 贾俊鹤, 刘会玉, 林振山. 中国西北地区植被 NPP 多时间尺度变化及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2019, 39(14): 5058-5069.
- [52] Jiang H L, Xu X, Guan M X, Wang L F, Huang Y M, Jiang Y. Determining the contributions of climate change and human activities to vegetation dynamics in agro-pastoral transitional zone of northern China from 2000 to 2015. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 134871.
- [53] Wen Y Y, Liu X P, Bai Y, Sun Y, Yang J, Lin K, Pei F S, Yan Y C. Determining the impacts of climate change and urban expansion on terrestrial net primary production in China. *Journal of Environmental Management*, 2019, 240: 75-83.
- [54] 崔林丽, 杜华强, 史军, 陈昭, 郭巍. 中国东南部植被 NPP 的时空格局变化及其与气候的关系研究. *地理科学*, 2016, 36(5): 787-793.
- [55] 周文翀, 韩振宇. CMIP5 全球气候模式对中国黄河流域气候模拟能力的评估. *气象与环境学报*, 2018, 34(6): 42-55.
- [56] 段青云, 夏军, 缪驰远, 孙巧红. 全球气候模式中气候变化预测预估的不确定性. *自然杂志*, 2016, 38(3): 182-188.