

涪江流域植被净初级生产力时空变化及对气候的响应*

邓小菲^{1,2}, 杜华明^{1,2}, 王雪梅^{1,2}, 陈浩²

(1. 绵阳师范学院生态安全与保护四川省重点实验室; 2. 绵阳师范学院资源环境工程学院, 四川绵阳621000)

摘要:为涪江流域内生态环境的保护、自然资源的有效管理以及相应社会和经济发展战略的制订提供科学依据,基于MODIS NPP、年均气温、年降水量和年累计日照时数数据,采用重心法和相关分析研究了2000—2020年涪江流域植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)时空变化及对气候的响应。结果显示:在研究时段内涪江流域植被NPP呈“西北高东南低”的空间格局,多年平均NPP值以植被的碳质量计为 $568.22 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,以年均 $8.25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ($R^2 = 0.8023$)速率呈波浪式递增趋势,流域植被NPP重心总体向东南方向演进。涪江流域内面积占比为64.96%的区域植被NPP变化受气候的影响,植被NPP与气候因子的相关性在宏观上都表现为正相关与负相关并存的空间格局,气候因子对流域植被NPP的影响程度和范围最大的为降水,然后依次是气温和日照。由上述结果可知,2000—2020年涪江流域植被NPP的时序变化存在波动性、空间分布及变化存在不均衡性;降水是影响流域内植被NPP时空变化的主要气候因子;建议在该流域上游地区侧重进行植被恢复、生态保护和预防灾害工作而在中、下游地区注重气象的定点预测与预报工作。

关键词:涪江流域;净初级生产力;重心;气候响应

中图分类号:Q948;TP79

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2024)03-0047-12

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是指绿色植物在单位时间、单位面积上由光合作用所产生的有机干物质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分^[1]。NPP作为碳收支和气候变化研究的核心内容,是判定生态系统健康状况和可持续发展水平的重要指标^[2]。目前,学者们对陆地生态系统NPP的时空格局^[3-4]、时空变化^[5-9]、影响因子^[10-12]等进行了大量研究,研究尺度涉及全球、国家、区域、某一地域单元等。研究表明,在全球尺度上,NPP总体上随纬度的增加而减少^[13];受全球气候变暖的影响,中国NPP呈明显增长趋势^[14]。在中国不同区域,气候因子对植被NPP的影响存在较大差异^[15-16],例如:2000—2016年降水在中国干旱半干旱区植被变化中起决定性作用,而温度是高寒植被变化的主导因子,太阳辐射有利于中国大部分地区植被的生长^[14];降水是影响黄河流域2000—2019年植被NPP主要的自然因子^[17];由于近几十年来气温升高和降雨量增加,印江河流域NPP累积受到了较大的负面影响^[18]。总而言之,植被NPP随着研究区域以及时空尺度的变化而对气候变化的响应机制是有所差异的。在全球气候变化这一背景下,对不同区域开展植被NPP的时空演变机制具有十分重要的理论意义和实践价值^[2,19]。

涪江位于中国西南地区、长江上游,为长江支流嘉陵江的右岸最大支流,先后流经四川省和重庆市,在重庆市合川区汇入嘉陵江。涪江流域上游地区地形复杂,为多种地貌类型组合的综合体;中游地区是高原气候向亚热带气候过渡区;下游地区人口众多、城镇密集,全域为自然和人工景观的共同体。涪江流域生态系统健康状况和环境质量变化不仅影响当地居民生活,对长江流域上游的生态屏障建设和气候变化都会产生重要影响。过去对涪江流域生态方面的研究多集中在生态风险评价^[20-21]、土地利用变化对生态环境的影响^[22-23]、生态系统服务价值等^[24]方面,缺乏对流域生态系统的植被NPP时空变化及对气候响应机制的研究。因此,本研究基于MODIS NPP、年平均气温、年降水量和年累计日照时数等数据,采用重心法和相关分析研究了2000—2020年涪江流域植被NPP的时空变化及对气候的响应,希望有关研究成果能为该流域内生态环境的保护、自然资源的有效管理以及相应社会和经济发展战略的制订提供科学依据,同时为植被NPP的时空演变机制提供新的实证

* 收稿日期:2022-09-26 修回日期:2023-04-01 网络出版时间:2024-07-31T16:39

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 32101363);国家社会科学基金重点项目(No. 14AZD094);生态安全与保护四川省重点实验室开放基金项目(No. ESP2107);四川县域经济发展研究中心课题(No. xy2017030, No. xy2019018, No. xy2021028)

第一作者简介:邓小菲,女,讲师,研究方向为生态遥感及区域可持续发展研究, E-mail: xiyufeilong2021@mtc.edu.cn

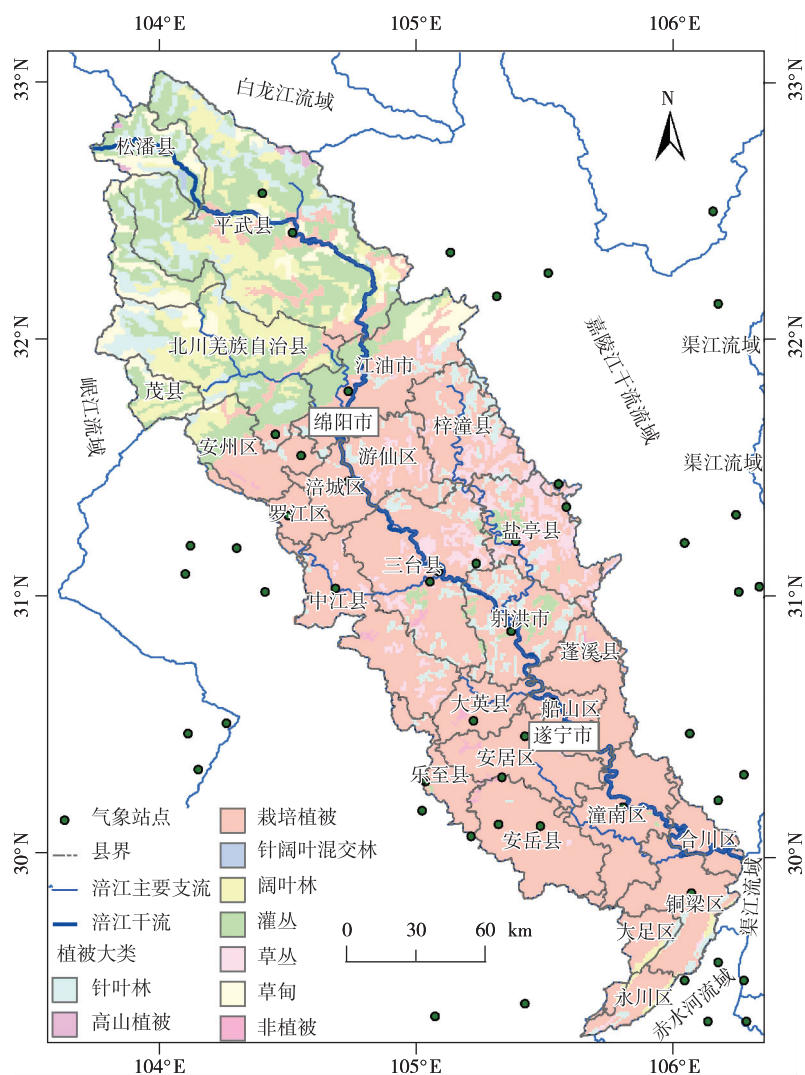
网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20240731.1612.006>

案例。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

涪江流域为长江流域上游区域,位于北纬 $29.10^{\circ} \sim 33.04^{\circ}$ 、东经 $103.30^{\circ} \sim 106.30^{\circ}$,涉及川渝两地 28 个县(市、区)(图 1),流域面积为 $35\,900\text{ km}^2$ 。涪江流域地势自西北向东南倾斜,区域内海拔范围为 $159 \sim 5\,502\text{ m}$ 。在涪江流域,四川省江油市武都镇以上(或以北)为上游地区,武都镇至四川省遂宁市为中游地区,在遂宁市以下(或以南)为下游地区^[25]。上游地区海拔大于 $1\,000\text{ m}$,气候类型以川西高原气候为主,植被随海拔由低到高由常绿阔叶林向针阔混交林、针叶林,高山灌林草甸过渡;中、下游地区地形多为低山、丘陵和平坝,地势起伏平缓,人口众多,城镇密集,土地利用类型以耕地和建设用地为主,气候类型为亚热带湿润季风气候^[21]。根据对 2000—2020 年涪江流域气象数据进行统计,得知这一时期该流域年均降水量为 965.82 mm 、年均气温为 $14.61\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、年均累计日照时数为 $1\,240.24\text{ h}$ 。



注:底图来源于全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn/main.do?method=index>),审图号:GS(2016)2556 号,下同。

图 1 涪江流域概况

Fig. 1 The overview of Fujiang River Basin

1.2 数据来源与处理

植被 NPP 遥感数据来源于美国国家航空航天局(<https://lpdaac.usgs.gov>)的 MOD17A3HGF 数据,时间分辨率为 1 a,空间分辨率为 500 m ;植被 NPP 以植被的碳质量计,单位为 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。利用 MRT 转换工具

对 MOD17A3HGF 数据进行拼接、系统投影、去除无效值和裁剪得到 2000—2020 年的研究区植被 NPP 基础数据。该数据质量控制文件中涪江流域植被 NPP 数据质量中、高等级范围占比为 84.70%~99.25%;反演失败的像元占比为 0.91%,主要为涪江干流、水库、湖泊等水域覆盖类型,为突出陆地生态系统,将它们作为无效值加以剔除。

气温和降水数据来源于国家青藏高原科学数据中心的 1 km 分辨率逐月降水量和平均气温数据集^[26];日照数据及相关站点来源于中国气象科学数据共享服务网中国地面气候资料日值数据集(2000—2020)(<http://data.cma.cn>),采用协同地形的 Krigging 法对日照数据进行插值并计算累计日照时数。将气象日数据或月数据合成年度数据并与研究区植被 NPP 数据空间分辨率保持一致。

其他数据如涪江流域和长江流域范围数据来源于全球河流水文数据库(<https://hydrosheds.org>);流域内支流数据和县级行政区划数据来源于 1:100 万公众版基础地理信息数据(2021)(<https://www.webmap.cn>);中国植被类型和气候区划数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>);DEM 数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)的 GDEM V2 数据集,空间分辨率为 30 m。

2 研究方法

2.1 重心法

植被 NPP 的重心空间变化特征能够反映地理现象的变化程度和变化趋势^[2],具体计算公式^[27]如下:

$$\bar{X}_w = \sum_{i=1}^n (w_i x_i) / \sum_{i=1}^n w_i, \bar{Y}_w = \sum_{i=1}^n (w_i y_i) / \sum_{i=1}^n w_i,$$

其中: w_i 为第 i 个栅格单元的植被 NPP 值, x_i, y_i 分别为第 i 个栅格单元的横、纵坐标值,点 $(\bar{X}_w, \bar{Y}_w)$ 为 n 个栅格单元组成的植被 NPP 值的空间均值。

重心偏离的方向指向植被 NPP 的“高密度”区域,而重心偏离的距离则描述不均衡分布的程度^[2]。重心移动的方向和距离计算公式如下:

$$\theta = \arctan((y_{t+m} - y_t) / (x_{t+m} - x_t)), d_m = \sqrt{(x_{t+m} - x_t)^2 + (y_{t+m} - y_t)^2},$$

其中: θ 与 d_m 分别表示植被 NPP 重心移动的方向与距离; y_{t+m} 和 x_{t+m} 分别表示在时间 $t+m$ 的植被 NPP 纬向和经向投影坐标; y_t 和 x_t 分别表示在时间 t 的植被 NPP 纬向和经向投影坐标。

2.2 相关分析

相关分析是研究变量之间相关关系的统计方法^[28]。首先计算两变量的简单 Pearson 线性相关系数,然后计算偏相关系数和复相关系数,对相关系数和偏相关系数进行 t 检验,对复相关系数进行 F 检验。Pearson 相关系数计算公式^[29]如下:

$$r_{XY} = \sum_{k=1}^K (X_k - \bar{X})(Y_k - \bar{Y}) / \sqrt{\sum_{k=1}^K (X_k - \bar{X})^2 \sum_{k=1}^K (Y_k - \bar{Y})^2},$$

其中: r_{XY} 为变量 X, Y 的相关系数, $\bar{X}, \bar{Y}$ 为对应变量的多年平均值,这里 X 为气温(降水量、日照时数), Y 为植被 NPP,在本研究中 $K=21$ 。

3 个变量的一级偏相关系数以及 4 个变量二级偏相关系数计算公式^[28-29]分别如下:

$$r_{ad \cdot c} = \frac{(r_{ad} - r_{ac} r_{bc})}{\sqrt{(1 - r_{ac}^2)(1 - r_{bc}^2)}}, r_{ab \cdot cd} = (r_{ab \cdot c} - r_{ad \cdot c} r_{bd \cdot c}) / \sqrt{(1 - r_{ad \cdot c}^2)(1 - r_{bd \cdot c}^2)},$$

其中: r_{ad} 为变量 a 和 d 的相关系数; $r_{ad \cdot c}$ 为固定变量 c 后变量 a 与 d 之间的一级偏相关系数; $r_{ab \cdot cd}$ 为固定变量 c, d 后变量 a 与 b 之间的二级偏相关系数;其余变量的含义以此类推。

在本研究中,设平均气温为 x_1 、降水量为 x_2 、累计日照时数为 x_3 、植被 NPP 为 x_4 ,则这 4 个变量的复相关计算公式^[29]如下:

$$R_{4 \cdot 123} = \sqrt{1 - (1 - r_{41}^2)(1 - r_{42 \cdot 1}^2)(1 - r_{43 \cdot 12}^2)}$$

其中: $R_{4 \cdot 123}$ 为 x_4 与 x_1, x_2 和 x_3 的复相关系数; r_{41} 为 x_4 与 x_1 的相关系数, $r_{42 \cdot 1}$ 为固定 x_1 后 x_4 与 x_2 之间的一级偏相关系数, $r_{43 \cdot 12}$ 为固定 x_1, x_2 后 x_4 与 x_3 之间的二级偏相关系数。

3 结果与分析

3.1 植被 NPP 时序变化特征

逐年计算涪江流域 2000—2020 年植被 NPP 均值并统计间隔 $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的植被 NPP 分组情况,结果如图 2 所示:植被 NPP 均值呈波动增加趋势,年均增长速率为 $8.25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.8023$),多年平均 NPP 值为 $568.22 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;NPP 均值最小和最大的年份分别为 2001 年(NPP 均值为 $456.40 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、2019 年(NPP 均值为 $664.74 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$);植被 NPP 均值在 2000—2010 年呈阶段性波动增加趋势,在 2010—2020 年呈平稳增加趋势。上述结果说明 2000—2020 年涪江流域植被 NPP 总体是增加的,但它的时序变化是不稳定的,存在波动性、阶段性。不同分组年际变化展现了涪江流域植被 NPP 时序波动的详细情况。植被 NPP 均值范围为 $>400 \sim 600 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的区域面积占比年均值最大,21 年间它所对应的面积占比在 $13.48\% \sim 62.65\%$ 波动;该植被 NPP 均值范围所对应区域的面积占比在 2001 和 2006 年急剧变少均在 15% 以下,在 2019 年为 28% ,在其余年份都高于 40% ,而在 2009 年则高达 62.65% ;植被 NPP 值范围为 $<200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的区域面积占比最小,只占流域总面积的 $0.86\% \sim 1.40\%$ 。

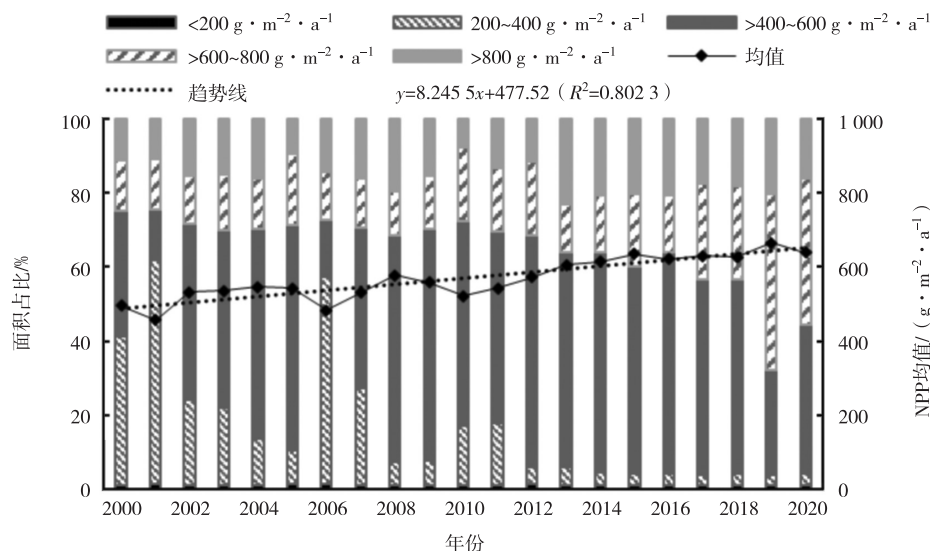


图 2 2000—2020 年涪江流域植被 NPP 年际变化

Fig. 2 Inter-annual variation of vegetation NPP in Fujiang River Basin from 2000 to 2020

3.2 植被 NPP 空间变化特征

3.2.1 空间格局变化

2000—2020 年涪江流域植被 NPP 空间上呈现由西北缘向东南递增后又减少的趋势,宏观上表现为“西北高东南低”的空间格局(图 3),上游地区是植被 NPP 的高生产力聚集区,下游区是植被 NPP 的低生产力聚集区。涪江流域植被 NPP 空间分布是不平衡的,NPP 高值区域($>800 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)主要分布于流域上游东北部的平武、北川、茂县、松潘等县域内。NPP 低值区域($<400 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)呈现 2 种分布格局:一是沿涪江干流分布的城镇及周边分布,尤其是在绵阳市与遂宁市的主城区周边;二是分布于流域北缘的松潘县、平武县海拔 4100 m 以上的地区。NPP 中值区域($400 \sim 800 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)广布于流域的其他地区。2000—2020 年涪江流域植被 NPP 空间格局的动态特征为:NPP 低值区域范围逐渐缩小,主要收缩到水域、河漫滩、城镇区等区域的边缘;NPP 高值区域分布范围比较稳定;NPP 中值区域范围由上游地区逐步向中、下游地区扩展。

3.2.2 重心变化

重心位移变化详细展现了研究区植被 NPP 空间变化的程度和方向。2000—2020 年涪江流域植被 NPP 重心中有 12 年的重心向东南方向演进,2020 年较 2000 年而言流域植被 NPP 重心向东南方向的偏移量可达 17171.63 m (图 4,表 1)。流域植被 NPP 重心整体向东南方向即中、下游方向推移,说明涪江流域中、下游地区植被 NPP 增速较快、增量较大。2000—2020 年涪江流域植被 NPP 重心沿游仙区与三台县一线呈西北—东南方向波动,2010—2020 年植被 NPP 重心偏移程度大于 2000—2010 年期间;2014、2019 和 2020 年的流域植被 NPP

重心均在三台县境内,其余年份中该重心则多集中在游仙区。这说明流域植被 NPP 增量与增速总体呈波动增加趋势,年际间流域植被 NPP 重心变化具有不平衡性,呈现出稳定性和波动性并存的空间动态格局。

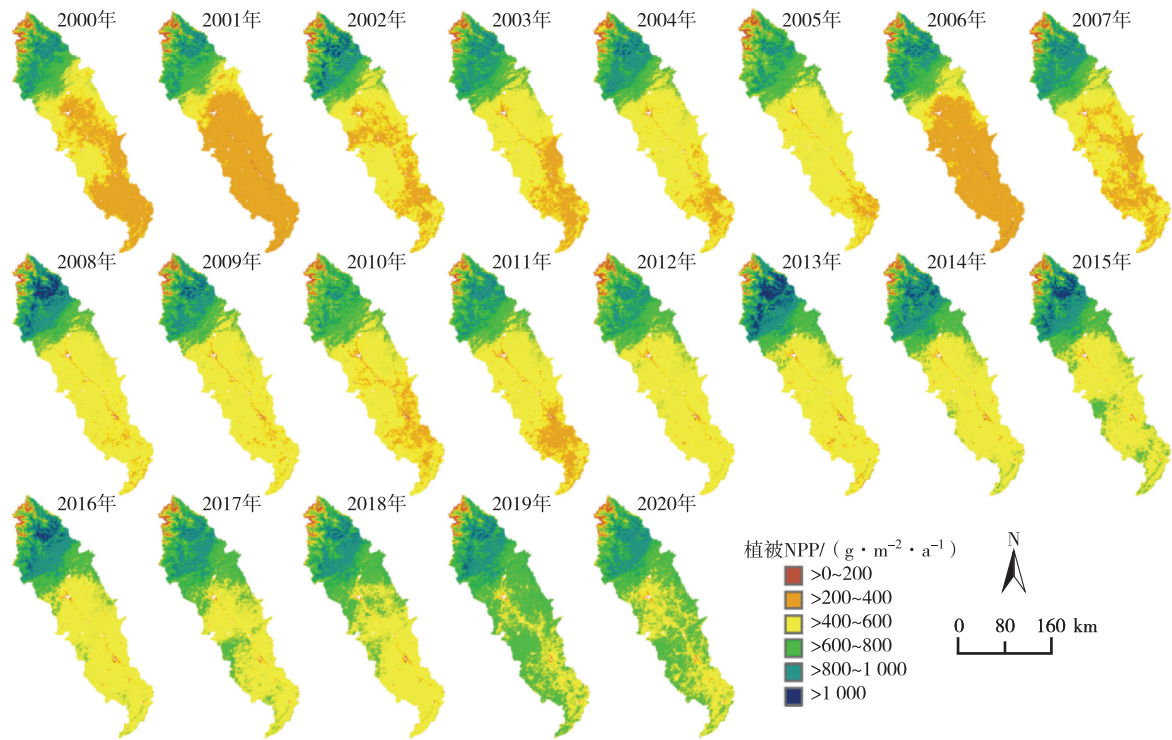


图 3 2000—2020 年涪江流域植被 NPP 时空格局动态变化

Fig. 3 Variability of spatial and temporal pattern of vegetation NPP in Fujiang River Basin from 2000 to 2020

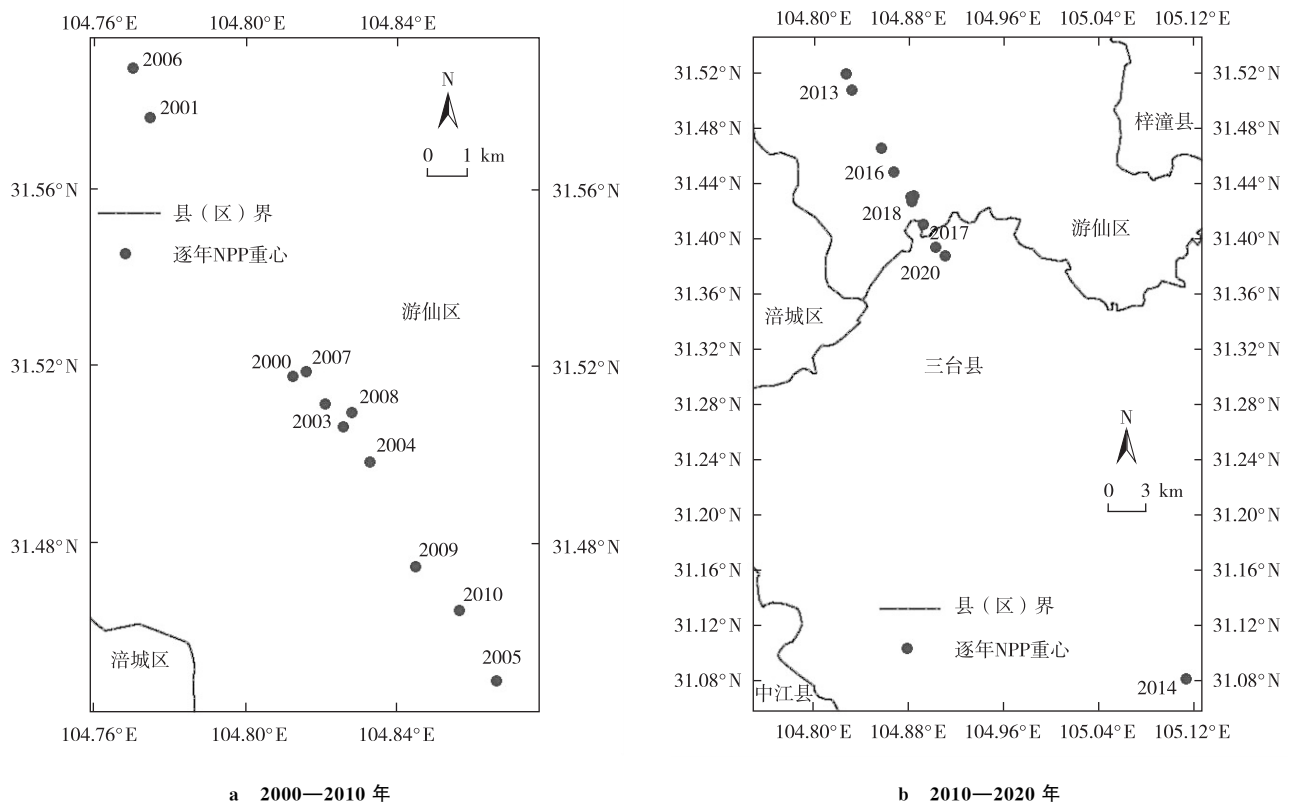


图 4 2000—2020 年涪江流域植被 NPP 重心演化格局

Fig. 4 The evolution pattern of vegetation NPP gravity center in Fujiang River Basin from 2000 to 2020

表 1 2000—2020 年涪江流域植被 NPP 重心空间变化参数

Tab. 1 Spatial variation parameters of vegetation NPP gravity center in Fujiang River Basin from 2000 to 2020

起始年份	终点年份	偏离距离/m	偏离角度/(°)	偏向	起始年份	终点年份	偏离距离/m	偏离角度/(°)	偏向
2000	2001	7 408.16	331.26	西北	2012	2013	11 113.82	330.75	西北
2001	2002	9 133.61	148.02	东南	2013	2014	55 458.89	150.59	东南
2002	2003	725.38	321.65	西北	2014	2015	44 027.35	330.08	西北
2003	2004	1 835.98	142.35	东南	2015	2016	2 742.95	328.03	西北
2004	2005	6 323.56	150.07	东南	2016	2017	4 797.31	149.85	东南
2005	2006	17 832.14	329.33	西北	2017	2018	2 413.79	334.15	西北
2006	2007	8 758.74	150.28	东南	2018	2019	4 498.60	153.06	东南
2007	2008	1 541.84	131.75	东南	2019	2020	1 027.22	131.96	东南
2008	2009	4 146.41	157.54	东南	2000	2010	7 193.95	144.51	东南
2009	2010	1 561.06	135.47	东南	2010	2020	10 000.59	149.02	东南
2010	2011	5 185.81	333.22	西北	2000	2020	17 171.63	147.13	东南
2011	2012	9 743.86	149.54	东南					

注:偏离角度以正北方向为 0°并沿顺时针方向进行计算。

3.3 植被 NPP 对气候的响应

3.3.1 气候因子变化分析

如图 5 所示,2000—2020 年涪江流域年均气温、年降水量、年累计日照时数都有不同程度的年际波动。年降水量变幅在 724.71(2006 年)~1 091.13 mm(2019 年)之间,呈较强的增加趋势,以年均 10.7 mm 的速率递增;多年平均累计日照时数为 1 040.24 h,有较弱的增加趋势;年均气温在 14.18~14.99 ℃之间波动,最大、最小值分别出现在 2006、2000 年,在研究时段内增势极弱。涪江流域内年平均气温和年降水量在空间上呈现由西北向东南递增、日照时数由西北向东南依次递减的空间分异规律。

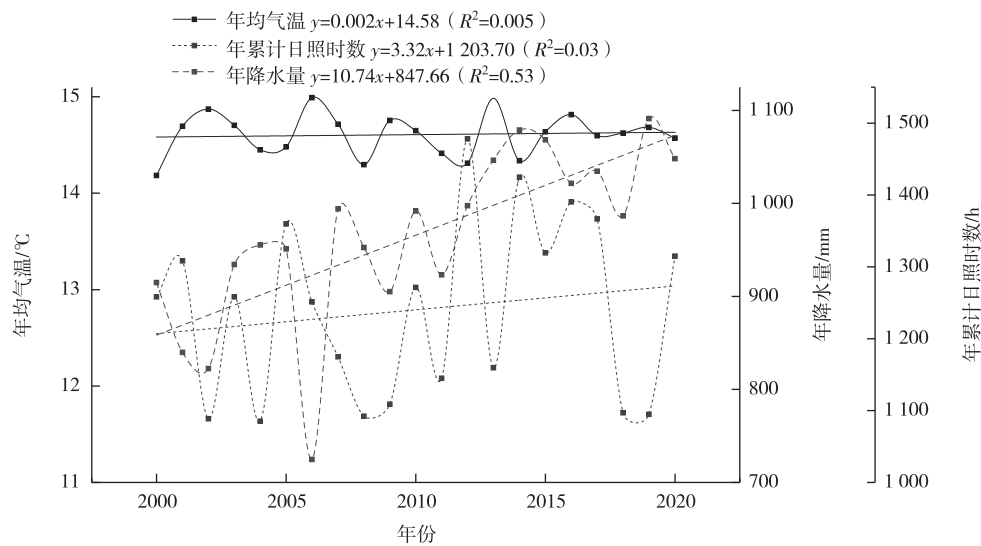


图 5 涪江流域 2000—2020 年气候因子的年际变化

Fig. 5 Inter-annual variation of climate factors in Fujiang River Basin from 2000 to 2020

3.3.2 植被 NPP 与气候的时序变化关系

由图 6 可知,植被 NPP 均值与年降水量、年累计日照时数呈正相关关系且与年均气温呈负相关关系,特别

是与降水量呈高度正相关关系($r=0.822, p<0.01$)。这一结果说明降水是影响涪江流域植被 NPP 时序变化的最主要气候因子。

3.3.3 植被 NPP 与气候因子的相关性分析

由于气候因子对植被 NPP 的影响具有交叉性,故逐像元计算 2000—2020 年涪江流域植被 NPP 与年均气温、年降水量和年累计日照时数的复相关系数及偏相关系数,结果如图 7 所示。

涪江流域植被 NPP 与年均气温、年降水量和年累计日照时数的复相关系数及 F 检验结果分别如图 7a、e 所示。在整个流域内,复相关系数值由西北向东南递增,该数值在上游地区于 $0\sim0.5$ 之间波动,在大部分中、下游地区高于 0.5 。复相关系数在统计检验水平 $0.01<p\leq0.05$ 与 $p\leq0.01$ 下的区域面积占比分别为 15.84% 和 49.12% ,且主要位于中、下游地区,表明流域内面积占比达 64.96% 的区域内气温、降水和日照与植被 NPP 有密切关系,气候是影响流域植被 NPP 空间变化的主要原因。植被 NPP 与气候因子的关系不密切的区域主要分布于流域上游地区以及中游地区的江油市、安州区和涪城区。

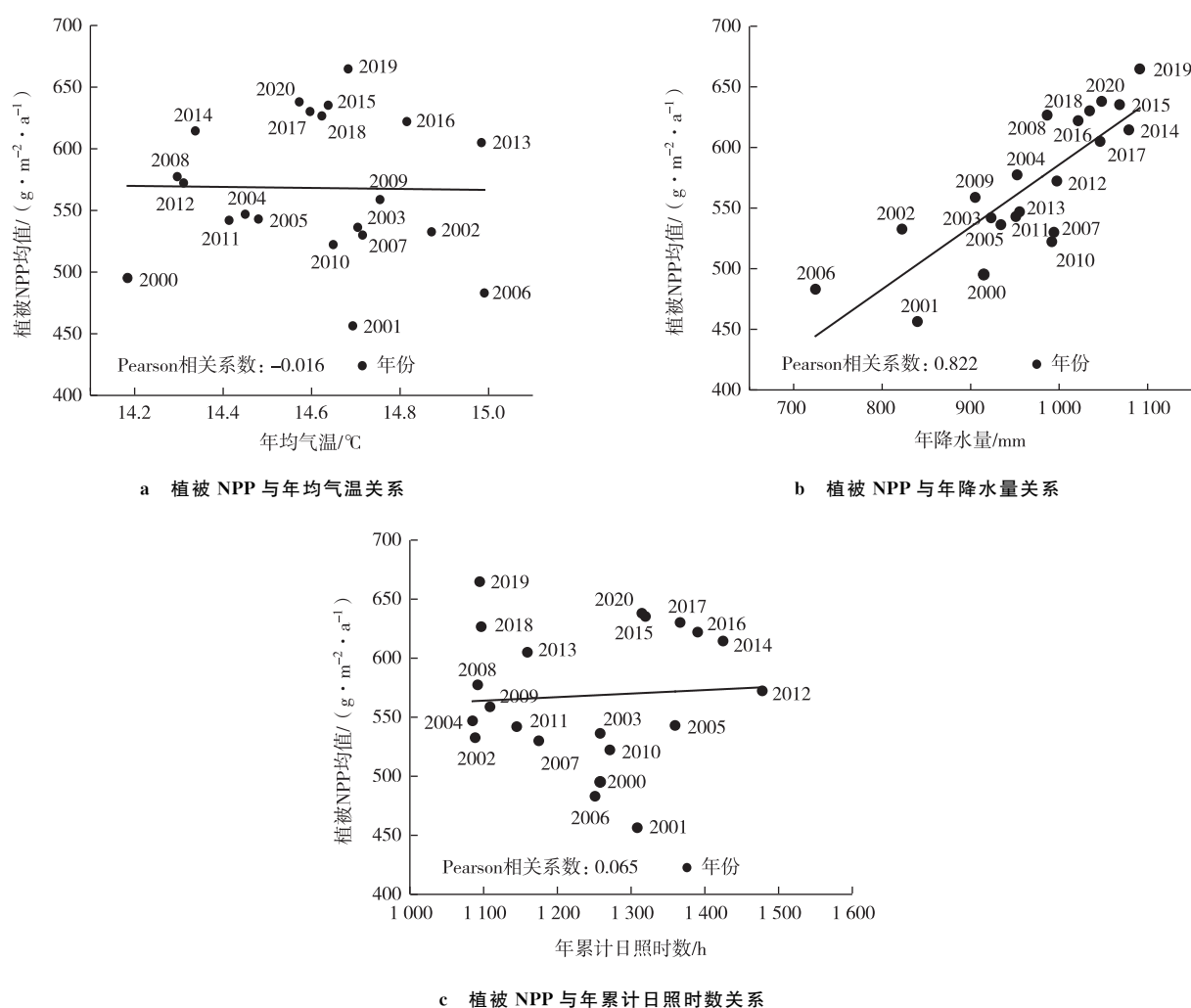


图 6 2000—2020 年涪江流域植被 NPP 与气温、降水、日照时数关系的散点图

Fig. 6 Scatter plot of the relationship of vegetation NPP and temperature, precipitation, and sunshine hours in Fujiang River Basin from 2000 to 2020

为进一步了解不同气候因子对植被 NPP 的影响程度和范围,由图 7b、c、d、f、g、h 可知:涪江流域植被 NPP 与气温、降水、日照等 3 个气候因子的相关性在宏观上都表现为正相关与负相关并存的空间格局,植被 NPP 与气温呈正、负相关关系的面积占比为 73.58% 与 26.42% ;NPP 与气温呈正相关关系的区域在上游地区主要集中于涪江干流和支流的河谷地区,在中、下游地区除了涪江以西的三台县和中江县外则散布于区域全境;流域内面积占比为 86.78% 的区域中植被 NPP 与降水呈正相关关系,且主要集中于中、下游地区,尤其是下游地区东南部

降水与植被 NPP 呈高度正相关,此外植被 NPP 与降水呈负相关关系的区域面积占比仅为 13.22%;植被 NPP 与日照呈正、负相关关系区域的面积占比分别为 43.24%、56.76%——中游以东地区和下游东南部地区植被 NPP 与日照呈正相关关系,其他区域内这一相关关系都为负相关。上述结果说明:增温增湿均有利于涪江流域植被 NPP 的积累,日照时长的增加并未使植被 NPP 增加,植被 NPP 对不同气候因子的响应存在区域差异性。植被 NPP 与降水量偏相关系数在统计检验水平 $0.01 < p \leq 0.05$ 与 $p \leq 0.01$ 下的区域面积占比分别为 3.63% 和 85.99%,总和达 89.62%;植被 NPP 与气温、日照在上述检验水平下的区域面积占比总和分别为 52.89%、48.81%。由此可见,对涪江流域植被 NPP 的影响范围与程度最大的气候因子是降水、然后依次是气温和日照。

4 讨论

2000—2020 年涪江流域植被 NPP 空间上呈现由西北缘向东南递增而后又减少的趋势,这和流域内气候、地形、植被等自然条件有关。将涪江流域图与中国气候区划图相叠加,可以发现该流域从北向南依次为高原气候区、北亚热带区、中亚热带区。涪江流域上游地区的西北部为高原气候区,当地海拔在 2 000~5 552 m 之间,地形多为多山地,气候和植被的垂直地带性规律明显,植被随海拔低到高逐渐由常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林向高山灌林草甸、流石滩植被过渡,植被覆盖逐渐减少,植被 NPP 也随之减少。涪江流域上游地区的东南部和中、下游地区属于亚热带气候区,当地海拔在 159~2 000 m 之间,光照适中,夏热冬暖,雨量充沛;海拔 1 000~2 000 m 的区域植被以常绿阔叶林、针阔混交林、针叶林为主,且随海拔的升高而植被愈加茂盛,植被 NPP 增加;海拔 1 000 m 以下的区域,随海拔的降低而人工栽培植被逐步占据主导地位,植被 NPP 随之降低。因此,在这些因素共同作用下涪江流域植被 NPP 在宏观上表现出“西北高东南低”的空间格局。

为了进一步深入分析植被 NPP 对气候的响应机制,统计了在检验水平 $p < 0.05$ 下不同气候因子与植被 NPP 偏相关系数在涪江流域不同分区的面积占比情况,如图 8 所示。

在涪江流域上游地区,植被 NPP 与气温、降水呈正相关关系区域的面积占比分别为 14.62%、14.24%,植被 NPP 与日照呈负相关关系区域的面积占比为 16.03%。此外,在上游地区植 NPP 与 3 个气候因子多呈弱相关关系,表明气候因子不是影响上游地区植被 NPP 空间变化的唯一因素,同时也印证了植被 NPP 与气候因子复相关性分析结果。在涪江流域上游地区,随着地形海拔变化和地面坡度变化,气温、降水、日照等气候因子也存在局部差异。局部地区气候多变,会出现日照强、年降雨量少、气温低的情况,植被 NPP 因而处于低值状况;或者持续降雨造成泥石流、滑坡、洪涝灾害和次生灾害的发生,植被因此遭到破坏,进而影响植被 NPP。在地形复杂的流域,需将气候因子和其他因子的共同作用考虑在内才能更好地解释流域内植被 NPP 的空间变化。

在涪江流域中、下游地区,植被 NPP 与降水呈高度、中度正向相关关系区域的面积占比分别为 19.32%、44.72%,植被 NPP 与气温、日照呈弱相关关系区域的面积占比分别为 28.38%、22.73%,均高于其他相关类型占比。这表明降水、气温和日照都能影响涪江流域中、下游地区植被 NPP,但降水是影响该区域植被 NPP 时空变化的主要气候因素。这是因为涪江流域中、下游地区位于亚热带季风气候区,区域内光照适中、热量条件好、气温年较差小,且降水增多将影响植被生长气候条件,加之区域内地貌由盆周山地、丘陵向平原过渡又促进了降水向流域下游地区的东南部集聚,所以降水就成为影响该区域植被 NPP 空间变化的主要因素,且在下游地区的东南部体现得更加明显。

整体上看,气候是影响涪江流域植被 NPP 时空变化的主要原因,其中降水是影响涪江流域植被 NPP 变化的主要气候因子。

5 结束语

本研究基于 MODIS NPP 和气象数据,采用重心法和相关分析研究了 2000—2020 年涪江流域植被 NPP 的时空变化及对气候的响应,主要结果如下:

1) 涪江流域植被 NPP 时序变化不稳定,存在波动性、阶段性,多年平均 NPP 值为 $568.22 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,并以年均 $8.25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ($R^2=0.8023$) 速率呈波浪式递增趋势;植被 NPP 均值在 2000—2010 年呈阶段性波动增加趋势,在 2010—2020 年呈平稳增加趋势。

2) 涪江流域植被 NPP 呈“西北高东南低”的空间格局。2000—2020 年,涪江流域内植被 NPP 低值区域 ($<400 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 空间范围在缩小;NPP 中值区域 ($400 \sim 800 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 由上游地区逐步向中、下游地

区扩展;NPP 高值区域($>800 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)分布范围比较稳定;2000—2020 年流域植被 NPP 重心总体向东南方向演进,东南部地区植被 NPP 在增速和增量上均大于西北部地区植被 NPP。

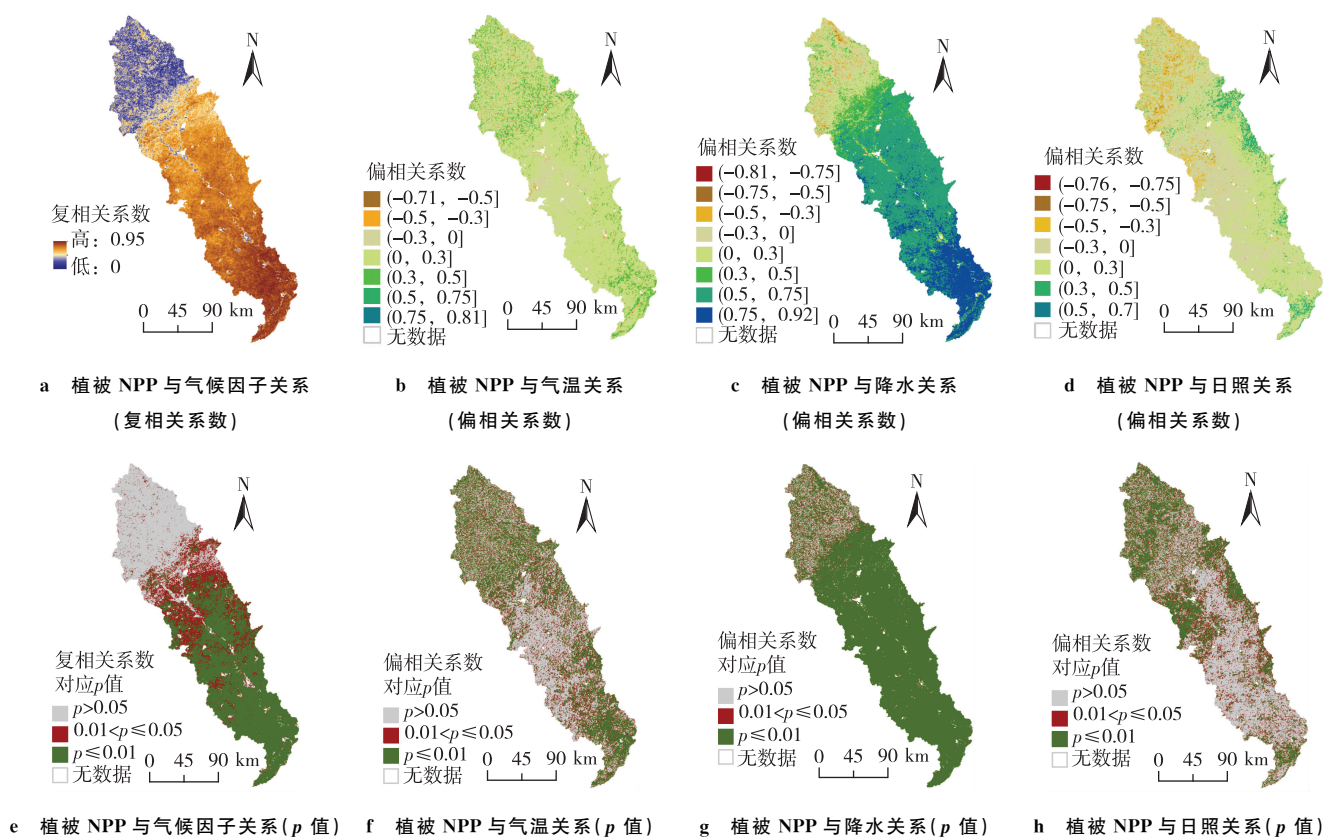


图 7 2000—2020 年植被 NPP 与气候因子复相关系数和偏相关系数

Fig. 7 Complex and partial correlation coefficients between vegetation NPP and climate factors from 2000 to 2020

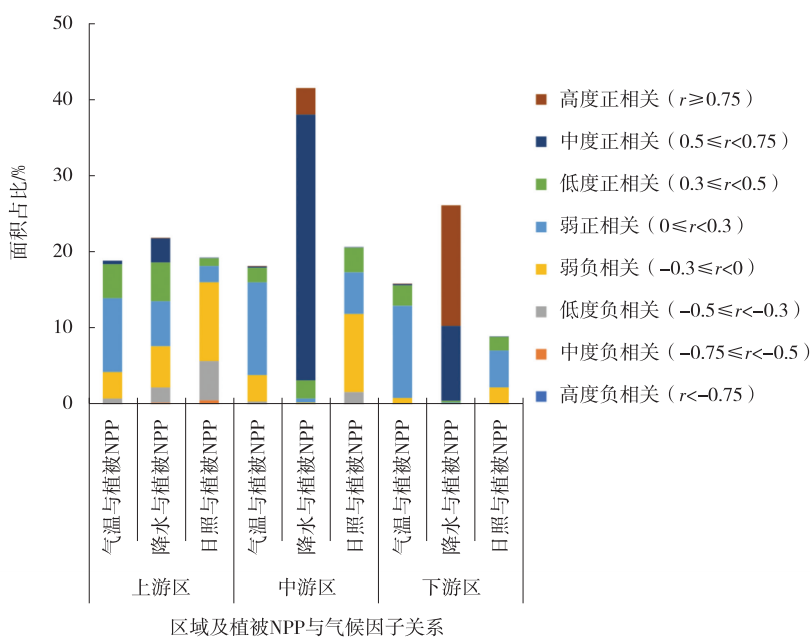


图 8 涪江流域植被 NPP 与气候因子偏相关系数分区面积占比统计

Fig. 8 Statistics of area proportion of partial correlation coefficients between vegetation NPP and climate factors in the Fujiang River Basin

3) 气候是影响涪江流域植被 NPP 时空变化的主要原因,流域内植被 NPP 与气温、降水、日照等气候因子的

相关性在宏观上都表现为正相关与负相关并存的空间格局;气候因子对流域植被 NPP 的影响程度和范围最大的为降水,然后依次是气温和日照。

上述结果表明,2000—2020 年涪江流域植被净初级生产力时序变化存在波动性,空间分布及变化存在不均质性;降水是影响区域植被 NPP 时空变化的主要气候因子。此外,虽然从整体上看在研究时段内涪江流域植被生态质量有提升趋势,但气候变化对流域上游地区的自然植被 NPP 的增加没有起到积极的促进作用。即使上游地区设有国家级或省级自然保护区,但在 2000—2020 年该区大部分植被 NPP 时空变化基本趋于稳定,有些地方还存在植被退化现象。因此涪江流域上游县域的有关部门应加强灾害预防、植被恢复和生态保护工作,进一步提升当地生态质量。对于涪江流域中、下游地区而言,气候变化对植被 NPP 增加的促进作用较为明显,但还需加强这些区域的气象预测与预报工作,实现气象的定点预测将更有利于当地植被 NPP 的增加。

参考文献:

- [1] 牛翠娟,娄安如,孙儒泳,等. 基础生态学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2015:205.
NIU C J, LOU A R, SUN R Y, et al. Foundations in ecology[M]. 3rd edition. Beijing: Higher Education Press, 2015: 205.
- [2] 陈舒婷,郭兵,杨飞,等. 2000—2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2020, 35(10): 2511-2527.
CHEN S T, GUO B, YANG F, et al. Spatial and temporal patterns of NPP and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2015[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(10): 2511-2527.
- [3] WANG J W, ZHANG D N, YING L Z, et al. Spatial patterns of net primary productivity and its driving forces: a multi-scale analysis in the transnational area of the Tumen River[J]. Frontiers of Earth Science, 2019, 14(1): 124-139.
- [4] 张静,任志远. 汉江流域植被净初级生产力时空格局及成因[J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7667-7677.
ZHANG J, REN Z Y. Spatiotemporal pattern of net primary productivity in the Hanjiang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7667-7677.
- [5] 周雷雷,郑诗军,尹捷,等. 以“胡焕庸线”为界的中国东西部净初级生产力变化分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(4): 916-925.
ZHOU L L, ZHENG S J, YIN J, et al. Analysis on the change of net primary productivity in the east and west of China bounded by “the Hu Huanyong Line”[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(4): 916-925.
- [6] 洪辛茜,黄勇,孙涛. 我国西南喀斯特地区 2001—2018 年植被净初级生产力时空演变[J]. 生态学报, 2021, 41(24): 9836-9846.
HONG X Q, HUANG Y, SUN T. Spatiotemporal evolution of vegetation net primary productivity in the karst region of southwest China from 2001 to 2018[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9836-9846.
- [7] 严俊霞,黄浩,高彦华,等. 吉林省长时间序列陆地生态系统 NPP 时空变化特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 172-180.
YAN J X, HUANG H, GAO Y H, et al. Estimation and spatial-temporal dynamics of long-term sequenced vegetation net primary productivity in Jilin Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 172-180.
- [8] 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.
XU Y, ZHOU Q H, DOU S Q, 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.
- [9] 李登科,王钊. 基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(3): 397-405.
LI D K, WANG Z. The characteristics of NPP of terrestrial vegetation in China based on MOD17A3 data[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(3): 397-405.
- [10] 蒋爱萍,靳甜甜,张丽萍,等. 西南地区道路建设对植被净初级生产力的影响分析[J]. 生态学报, 2022, 42(9): 3624-3632.
JIANG A P, JIN T T, ZHANG L P, et al. Influence of road construction on vegetation net primary productivity in southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3624-3632.
- [11] 周妍妍,朱敏翔,郭晓娟,等. 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[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5127-5137.
ZHOU Y Y, ZHU M X, GUO X J, et al. Relative effects of climate change and human activities on net primary productivity in Shule River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5127-5137.
- [12] 李传华,殷欢欢,朱同斌,等. 干旱对河西走廊植被净初级生产力的影响[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 145-155.
LI C H, YIN H H, ZHU T B, et al. Impact of drought on net primary productivity of vegetation in arid and semi-arid areas: a case study of Hexi Corridor[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 145-155.
- [13] ŠÍMOVÁ I, STORCH D. The enigma of terrestrial primary productivity: measurements, models, scales and the diversity-

- productivity relationship[J]. *Ecography*, 2016, 40(2): 239-252.
- [14] GE W Y, DENG L Q, WAGN F, 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: 145684.
- [15] YANG J, ZHANG X C, LUO Z H, et al. Nonlinear variations of net primary productivity and its relationship with climate and vegetation phenology, China[J]. *Forests*, 2017, 8(10): 361.
- [16] 徐雨晴, 肖风劲, 於琨. 中国森林生态系统净初级生产力时空分布及其对气候变化的响应研究综述[J]. *生态学报*, 2020, 40(14): 4710-4723.
- XU Y Q, XIAO F J, YU L. Review of spatio-temporal distribution of net primary productivity in forest ecosystem and its responses to climate change in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(14): 4710-4723.
- [17] 王娟, 何慧娟, 董金芳, 等. 黄河流域植被净初级生产力时空特征及自然驱动因子[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(6): 213-222.
- WANG J, HE H J, DONG J F, et al. Spatio-temporal distribution of vegetation net primary productivity in the Yellow River Basin in 2000—2019 and its natural driving factors[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(6): 213-222.
- [18] 吴路华, 王世杰, 白晓永, 等. 近 60 年来印江河流域极端气候演变及其对净初级生产力和归一化植被指数的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(3): 960-981.
- WU L H, WANG S J, BAI X Y, et al. Extreme climate evolution and its impact on NPP and NDVI in Yinjiang River Basin in recent 60 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(3): 960-981.
- [19] 高旭旭, 于长文, 张婧, 等. 定量评估京津冀气候变化和人类活动对植被 NPP 变化的相对作用[J]. *中国农业气象*, 2022, 43(2): 124-136.
- GAO X X, YU C W, ZHANG J, et al. Quantitative assessment on the relative influence of climatic change and human activities on net primary productivity in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, 43(2): 124-136.
- [20] 张雪茂, 董廷旭, 杜华明, 等. 涪江流域景观生态风险空间异质性特征分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3): 156-163.
- ZHANG X M, DONG T X, DU H M, et al. Analysis on spatial heterogeneity of landscape ecological risk in Fujiang River Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(3): 156-163.
- [21] 张雪茂, 董廷旭, 杜华明, 等. 基于景观生态风险评价的涪江流域景观格局优化[J]. *生态学报*, 2021, 41(10): 3940-3951.
- ZHANG X M, DONG T X, DU H M, et al. Optimization of landscape pattern in Fujiang River Basin based on landscape ecological risk assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(10): 3940-3951.
- [22] 赵唯茜. 涪江流域土地利用/覆被变化及其生态环境效应研究[D]. 绵阳: 绵阳师范学院, 2019.
- ZHAO W X. Study on land use/cover change and its eco-environmental effects in Fujiang Basin[D]. Mianyang: Mianyang Normal University, 2019.
- [23] 王培. 涪江中上游土地利用动态变化与生态敏感性研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
- WANG P. Study on dynamic change and ecological sensitivity of land use in the middle and upper reaches of Fujiang River[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2022.
- [24] 杨伟青, 张会兰. 基于 GeoSOS-FLUS 的涪江流域生态系统服务价值评估及多情景模拟[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 253-262.
- YANG W Q, ZHANG H L. Ecosystem service value assessment and multi-scenario simulation of Fujiang River Basin based on GeoSOS-FLUS[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5): 253-262.
- [25] 王国庆, 李迷, 金君良, 等. 涪江流域径流变化趋势及其对气候变化的响应[J]. *水文*, 2012, 32(1): 22-28.
- WANG G Q, LI M, JIN J L, et al. Variation trend of runoff in Fujiang River catchment and its responses to climate change[J]. *Journal of China Hydrology*, 2012, 32(1): 22-28.
- [26] 彭守璋. 中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集 (1901—2022)[DS/OL]. [2022-09-26]. <https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/faae7605-a0f2-4d18-b28f-5cee413766a2>.
- PENG S Z. 1-km monthly precipitation dataset for China (1901—2022)[DS/OL]. [2022-09-26]. <https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/faae7605-a0f2-4d18-b28f-5cee413766a2>.
- [27] MITCHEL A. E. The ESRI guide to GIS analysis: spatial measurements & statistics[M]. Redlands: Esri Press, 2005.
- [28] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- XU J H. Mathematical methods in contemporary geography[M]. 3rd edition. Beijing: Higher education press, 2017.
- [29] 李传华, 朱同斌, 周敏, 等. 河西走廊植被净初级生产力时空变化及其影响因子研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(5): 1931-1943.
- LI C H, ZHU T B, ZHOU M, et al. Temporal and spatial change of net primary productivity of vegetation and its determinants in Hexi Corridor[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(5): 1931-1943.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area**Spatio-Temporal Variation of Net Primary Productivity of Vegetation and Its Response to Climate in Fujiang River Basin**DENG Xiaofei^{1,2}, DU Huaming^{1,2}, WANG xuemei^{1,2}, CHEN Hao²

(1. Ecological Security and Protection Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang Normal University;

2. College of Resources and Environment Engineering, Mianyang Normal University, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: Scientific support for the protection of the ecological environment, effective management of natural resources, and formulation of relevant socio-economic development strategies in the Fujiang River Basin is provided through the investigation of spatiotemporal changes in net primary productivity (NPP) of vegetation and its response to climate from 2000 to 2020. The analysis utilizes MODIS NPP data, average annual temperature, annual precipitation, and total annual sunshine hours with the centroid method and correlation analysis. Results indicate a spatial pattern of “high in the northwest and low in the southeast” for vegetation NPP in the Fujiang River Basin during the study period. The multi-year average NPP value, measured by the carbon mass of the vegetation, was $568.22 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, showing a wavelike increasing trend at an average annual rate of $8.25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ($R^2=0.8023$). The centroid of the basin’s vegetation NPP generally shifted southeastward. Climate influenced NPP changes in 64.96% of the basin’s area, with correlations between vegetation NPP and climate factors displaying a mixed spatial pattern of positive and negative correlations. Among the climate factors, precipitation exerted the greatest influence on the basin’s vegetation NPP, followed by temperature and sunshine duration. The temporal variation in vegetation NPP in the Fujiang River Basin from 2000 to 2020 exhibited fluctuations, while the spatial distribution and changes were uneven. Precipitation emerged as the primary climatic factor affecting the spatiotemporal changes in vegetation NPP within the basin. Recommendations include focusing on vegetation restoration, ecological protection, and disaster prevention efforts in the upstream areas, while emphasizing localized meteorological predictions and forecasting in the midstream and downstream areas.

Keywords: Fujiang River Basin; net primary productivity; spatiotemporal variation; climate response

(责任编辑 方 兴)