

文章编号:2096 - 5389(2022)04 - 0034 - 06

贵州乌江流域植被 *NPP* 的时空分布 及其对气候变化的响应

张明祥, 田鹏举, 谷晓平

(贵州省生态气象和卫星遥感中心, 贵州 贵阳 550002)

摘 要: 基于 MODIS/NDVI 数据和贵州省地面气象观测资料, 估算了 2000—2020 年贵州乌江流域的植被净初级生产力 (*NPP*), 采用相关分析、多元线性回归等方法, 对流域植被 *NPP* 的时空分布特征及其对气候变化的响应关系进行研究, 结果表明: ①近 21 a 贵州乌江流域植被 *NPP* 呈显著增加的趋势, 平均每 10 a 增长率为 $74 \text{ g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。流域内植被 *NPP* 的空间分布不均匀, 大部分地区在 $780 \text{ g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上。②植被 *NPP* 与气温、日照时数具有显著的相关性。在 *NPP* 与气温的相关系数空间分布中, 流域大部分地区以正相关为主, 显著正相关区占到流域面积的 69.98%。*NPP* 与日照时数的相关性中, 空间分布以正相关为主, 其中显著正相关分布较为零散, 主要集中在流域中南部和下游中部地区, 西部和下游的南北部为负相关。*NPP* 与降水的相关系数空间分布上仍然以正相关为主, 显著正相关主要出现在西部边缘、中部和下游南北部地区, 而负相关分布在流域的西南部、下游中北部地区。③植被 *NPP* 与不同气候因子的响应关系中, 人类活动的影响作用显著并且具有差异性。此外, 该文基于气候因子尝试建立了流域植被 *NPP* 的预报预测模型。

关键词: *NPP*; 气候变化; 响应; 乌江流域

中图分类号: P463.22 **文献标识码:** A

Spatio - temporal Distribution of Vegetation *NPP* in Wujiang River Basin, Guizhou and Its Response to Climate Change

ZHANG Mingxiang, TIAN Pengju, GU Xiaoping

(Guizhou Ecological Meteorology and Satellite Remote Sensing Center, Guiyang 550002, China)

Abstract: Based on MODIS/NDVI data and surface meteorological observation data in Guizhou Province, the net primary productivity (*NPP*) of vegetation in Wujiang River Basin was estimated from 2000 to 2020. The temporal and spatial distribution characteristics of *NPP* and its response to climate change were studied by using correlation analysis and multiple linear regression methods. The results show that: ①The *NPP* of basin increased significantly at a rate of $74 \text{ g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ per 10 years in recent 21 years, and the spatial distribution of multi - year mean *NPP* was not uniform, with more than $780 \text{ g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ in most areas. ②The spatial distribution of correlation between *NPP* and temperature was mainly positive, and 69.98% of basin area was significantly positive. The correlation between *NPP* and sunshine duration was mainly positive in most of basin. Significant positive correlation was scattered, which concentrated in central and southern part of basin and the middle part of lower reaches, while negative correlation was found in western and the southern and northern part of lower reaches. The correlation was also mainly positive between *NPP* and precipitation in basin. Significant positive correlation mainly occurred in

收稿日期: 2021 - 08 - 16

第一作者简介: 张明祥 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事生态气象和遥感应用研究工作, E - mail: 1250122751@qq.com。

通讯作者简介: 田鹏举 (1980—), 男, 高工, 主要从事生态气象和遥感应用研究工作, E - mail: 729106280@qq.com。

资助项目: 山地生态气象遥感应用系统 (FY - 3(03) - AS - 12.13); 风云三号 03 批气象卫星工程地面应用系统 2021 年区域特色应用项目; 贵州省气象局科研业务项目 (黔气科登 [2021] 03 - 04 号); 基于气候因子的区域关键生态要素预报预测研究——以贵州乌江流域为例。

western edge, central part and southern and northern parts of lower reaches, while negative correlation was distributed in southwest, middle part and northern parts of lower reaches. ③In the response between NPP and climate factors, the impact of human activities was obvious and different. Based on climate factors, this paper attempted to establish a prediction model for vegetation NPP.

Key words: NPP; climate change; response; Wujiang River Basin

0 引言

植被净初级生产力(NPP)是指绿色植物在单位面积、单位时间内通过光合作用所制造的有机物质,即总初级生产量与呼吸消耗之差,又称植被净初级生产量。植被 NPP 是评价植被活力的重要指标,可直接反映植被群落在自然条件下的生产能力^[1-2]。中国幅员辽阔,地形复杂,气候多样,植被种类丰富,分布着针叶林、落叶阔叶林、常绿阔叶林和热带雨林等多种自然植被^[3]。近几十年尤其是 20 世纪 60 年代以来,关于 NPP 及植被覆盖的课题受到了国内外众多学者的广泛研究。梁妙玲等^[4]基于 1961—2000 年的降水和气温资料对中国近 40 a 的植被动态变化进行研究,指出降水是影响植被 NPP 的主要因子,不同地区温度对植被 NPP 的影响差别很大。谷晓平等^[5]利用大气—植被相互作用模型(AVIM2)模拟西南地区植被 NPP,结果表明 NPP 的空间分布与降水、海拔高度等因素密切相关。杨江州等^[6]利用空间统计降尺度方法分析贵州乌江流域 NDVI 的变化特征,指出该方法得到的降尺度数据误差较小,具有一定的适应性和科学性。王秀春等^[7]基于长时间序列的 SPOT/NDVI 数据,对贵州乌江流域的植被覆盖动态变化进行研究,结果显示流域的森林和灌木林地植被覆盖生长较为稳定,而草地和耕地差异较大。张蓓蓓等^[8]基于 2000—2017 年遥感与气象数据,讨论了贵州植被覆盖变化与气候变化的响应规律,研究发现 NDVI 与气温的相关性大于降水,但对降水的滞后性却高于气温。除了气候因素,大气中 CO₂ 的浓度也是影响植被 NPP 的重要因素。CO₂ 作为植物光合作用的原料,通过对温度、植物水分及营养物质需求等作用来影响 NPP。许多研究显示,CO₂ 浓度升高对森林 NPP 增加具有促进作用^[9-10]。另外,对于 NPP 的估算目前也发展了多种模型,大体可分为统计模型、过程模型和参数模型 3 类。随着遥感技术的发展,以遥感数据驱动(光能利用率模型)的植被 NPP 估算得到了广泛应用^[11-12]。

乌江是长江上游南岸的最大支流,发源于贵州省乌蒙山东麓,全长 1044 km,流域面积 8.79 万

km²。在贵州境内,乌江流经了毕节、六盘水、安顺、贵阳、黔南、遵义和铜仁等 8 个市州(如图 1)。流域内高山、峡谷密布,江河、坑洞纵横,地势西高东低,属于典型的喀斯特地形地貌。在独特的水热条件驱动下,岩溶地貌发育强烈,75.6% 的区域为抗侵蚀能力强、造土能力差的碳酸盐^[13],是典型的生态脆弱区。作为长江重要的生态功能保护区之一,乌江受人类活动的影响,曾一度成为全省八大水系水质达标率最低的河流。近年来,随着退耕还林、自然保护地移民等一系列生态建设工程的实施,流域的植被生态质量逐渐改善,干流的水生态环境问题得到有效遏制。因此,研究贵州乌江流域植被 NPP 的时空变化特征以及与气候变化的响应关系,有助于揭示流域内的生态环境演化特征,为重点生态功能区的保护提供科学依据,对于推进全省生态文明建设也具有重要意义。

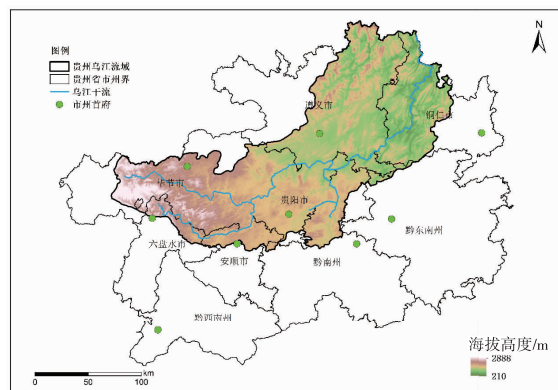


图 1 贵州乌江流域位置示意图

Fig. 1 Location diagram of Wujiang River Basin in Guizhou

1 数据来源及处理

卫星遥感数据来源于美国 EOS/MODIS 数据库提供的 2000—2020 年的归一化植被指数 NDVI 月合成数据,空间分辨率为 1 km × 1 km。气象数据来自贵州省气象信息中心的全省 84 个气象站(其中乌江流域包含 32 个站点),包括年平均气温、降水量、日照时数等资料,时间段为 2000—2020 年。根据全省气象站点的地理信息,基于 GIS 技术采用克

里金法将气候要素空间插值成与遥感数据具有相同像元大小的栅格数据集,再通过掩模提取得到研究区的数据集。

2 研究方法

2.1 植被 NPP 估算

利用贵州省范围内 1 km 分辨率的 EOS/MODIS 月 NDVI 合成数据,结合地面气象观测资料,根据植被光能利用原理,由陆地生态系统碳通量 TEC 模型^[14]计算月植被 NPP。

$$NPP = GPP - R^* \quad (1)$$

$$GPP = \varepsilon \times FPAR \times PAR \quad (2)$$

式中, NPP 、 GPP 、 R^* 分别为月植被净初级生产力、总初级生产力、生长与维持呼吸消耗量之和($g \cdot C \cdot m^{-2} \cdot month^{-1}$); ε 为实际光能利用率,根据植被类型、温度胁迫系数、水分胁迫系数等数据进行计算; $FPAR$ 为植被有效光合辐射吸收比例,利用逐月 NDVI 估测逐月 $FPAR$; PAR 为入射光合有效辐射($MJ \cdot m^{-2} \cdot month^{-1}$),根据光合有效辐射占太阳总辐射的比例为 0.48 计算 PAR 。以月植被 NPP 为基础,作全年 12 个月累加得到年植被 NPP 。基于 GIS 技术通过掩模提取得到研究区的年植被 NPP 。

2.2 相关性分析

对贵州乌江流域内近 21 a(2000—2020 年)的植被 NPP 与气候因子进行相关性分析,分别计算 NPP 与各个气候因子之间的皮尔逊相关系数^[15]。计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中, R 为植被 NPP 与气候因子的相关系数,取值范围在 $-1.0 \sim 1.0$ 之间。变量 x 、 y 分别代表气候因子、植被 NPP 。当 $R > 0$ 时,表明两变量呈正相关,越接近于 1.0,正相关越显著;当 $R < 0$ 时,表明两变量呈负相关,越接近于 -1.0 ,负相关越显著。

2.3 多元线性回归

假设预报量与预报因子(又称自变量) $x_1, x_2, \dots, x_m$ 符合线性关系^[15],则建立 y 的 m 元线性回归模型:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_m x_m + e \quad (4)$$

式(4)中: $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ 为回归系数, e 为服从正太分布 $N(0, \sigma^2)$ 的随机误差。根据实测的 y_i 与 $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}$ 样本,则有:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_m x_{mi} + e_i \quad (5)$$

建立多元回归方程的基本方法:由观测值确定

回归系数 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m$ 的估计, $b_0, b_1, \dots, b_m$ 得到 y_i 对 $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}$ 的线性回归方程:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_{1i} + \dots + b_m x_{mi} + \pi_i \quad (6)$$

式(6)中, $\hat{y}_i$ 表示 y_i 的估计; π_i 称为误差估计或残差;对回归效果进行统计检验;利用回归方程进行预报。通过计算 2000—2020 年植被 NPP 与各个气候因子(气温、降水、相对湿度、日照时数和蒸发量等)去趋势后的相关系数(表 1),并结合已有的研究^[16-17],本文选取了气温、降水和日照时数作为预报因子,将植被 NPP 确定为预报量 y 。

表 1 贵州乌江流域植被 NPP 与气候因子的相关系数

Tab. 1 Correlation between NPP and climate factors in Wujiang River Basin, Guizhou

气候因子	气温	降水	日照时数	相对湿度	蒸发量
相关系数	0.74**	0.24	0.50*	-0.07	0.14

注: **、* 分别表示 α 通过 0.05、0.01 的显著水平检验

3 结果与分析

3.1 植被 NPP 的时空变化特征

根据 2000—2020 年贵州乌江流域植被 NPP 年际变化(图 2a),可以看出,近 21 a 贵州乌江流域的植被 NPP 呈上升的趋势,平均每 10 a 增长 $74 g \cdot C \cdot m^{-2}$ 。最大值出现在 2016 年,为 $972.7 g \cdot C \cdot m^{-2}$,最小值出现在 2001 年,为 $779.5 g \cdot C \cdot m^{-2}$ 。近 5 a 来流域的植被 NPP 均处于历史较高水平,可见随着退耕还林、自然保护区移民等一系列生态保护工程的推进,全省重点生态功能区的生态保护成效显著。从 NPP 多年均值的空间分布(图 2b)来看,贵州乌江流域植被 NPP 分布不均匀,大部分区域 $780 g \cdot C \cdot m^{-2}$ 以上,其中西南部、南部部分地区和北部边缘相对较高,超过了 $950 g \cdot C \cdot m^{-2}$,而在人口密集的城镇区域则相对较小。

3.2 植被 NPP 变化与气候因子的响应

3.2.1 气候因子的年际变化 气候是人类赖以生存的自然环境,也是经济社会可持续发展的重要基础资源。受自然和人类活动的共同影响,全球气候正经历以变暖为主要特征的气候变化^[18]。由 2000—2020 年贵州乌江流域年平均降水量和气温的变化(图 3a)可见,流域的降水、气温呈增加、升高的趋势,年平均降水量最少出现在 2011 年,为 $804.5 mm$;最多出现在 2014 年,达到 $1319.5 mm$ 。年平均气温最高为 2013 年和 2016 年,达到 $15.9 ^\circ C$,最低出现在 2012 年,为 $14.4 ^\circ C$ 。从日照时数的变化来看(图 3b),2000—2020 年贵州乌江流域年平均日照时数总体呈略减少的趋势。流域内年日

照时数最多出现在 2013 年,达到 1337.4 h,最少出现在 2012 年,为 846.5 h。结合前面的分析可以得

出,贵州乌江流域总体气候条件变化(即降水的增多和气温的升高)有利于植被 NPP 增强。

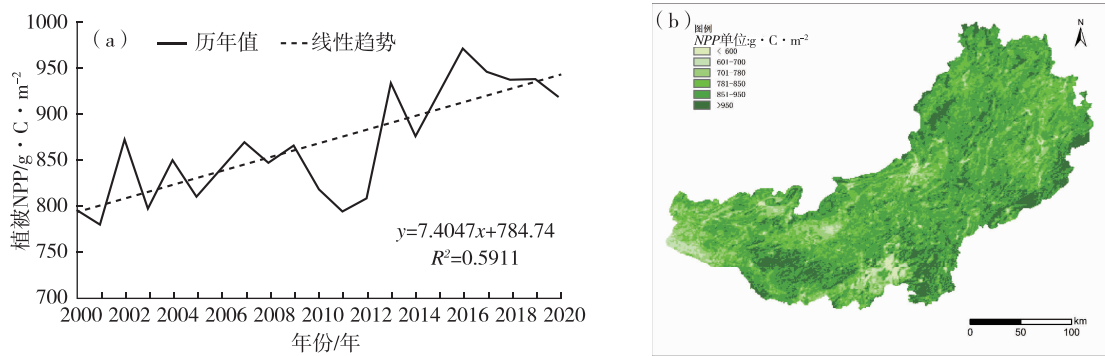


图2 2000—2020 年贵州乌江流域植被 NPP 年际变化(a)和多年均值空间分布(b)

Fig. 2 The annual variation(a)and spital distribution of multi – year mean(b) of vegetation NPP in Wujiang River Basin, Guizhou from 2000 to 2020

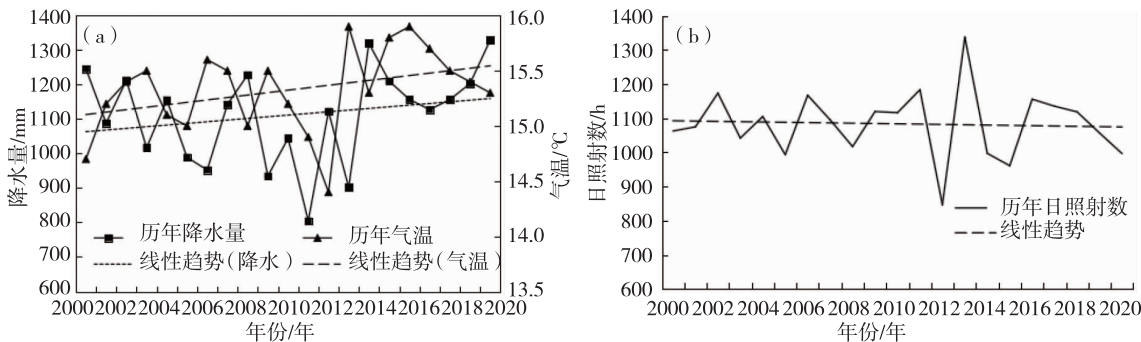


图3 2000—2020 年贵州乌江流域年平均降水量和气温(a)、日照时数(b)的变化

Fig. 3 The variation of annual mean precipitation and temperature(a)、sunshine duration(b) in Wujiang River Basin, Guizhou from 2000 to 2020

3.2.2 植被 NPP 对气候因子的响应分析 植被与气候因子之间存在显著的耦合关系,气候可通过改变环境条件在植被的生理结构、过程等方面控制植被 NPP 的形成,因而 NPP 变化能反映植被生态系统对环境气候条件的响应^[17]。对贵州乌江流域 2000—2020 年植被 NPP 与气候因子进行相关性分析,由表 1 可以看出,植被 NPP 与气温、日照时数的相关系数分别达到 0.74、0.50,通过了 99%、95% 信度的检验,明显高于植被 NPP 与其他气候因子的相关性,表明贵州乌江流域植被 NPP 的年际变化受气温和日照时数的影响更为明显。

为进一步揭示贵州乌江流域植被 NPP 对气候变化的响应关系,对逐个像元计算了植被 NPP 与气候因子的相关系数(2000—2020 年)。从植被 NPP 与气温的相关系数空间分布(图 4a)可以看出,除流域的局地存在负相关外,其余大部分区域均为正相关,其中显著正相关区域占到流域面积的 69.98%。从植被 NPP 与降水相关性(图 4b)可见,流域以正

相关分布为主,显著正相关区的占比为 21.66%,主要集中在西部边缘和中下游部分地区,负相关的区域较气温有所增加,主要出现在西南部、下游中部和北部以及南部局地。在植被 NPP 与日照时数的相关性中(图 4c)可以发现,流域仍以正相关分布为主,显著正相关区较气温明显减少,仅占 14.61%,主要出现在中南部和下游中部地区,且分布较为零散,流域的西部、下游的南部和北部区域为负相关。

3.3 植被 NPP 与气候因子的相关性对应的区域土地利用类型占比分析

结合贵州乌江流域的土地利用现状(以林地、草地和耕地等土地类型居多),从植被 NPP 与气温、降水、日照时数的正负相关性可知(表 2),从植被 NPP 与气温的正相关性占比可知,相较于林地和草地的占比,耕地(90.61%)有所降低,建设用地(78.65%)降低得更为明显,负相关区域占比则相反。从植被 NPP 与降水的正相关性占比可以看出,耕地、建设用地的占比分别为 82.04%、72.14%,明

显高于林地和草地,负相关性呈相反特点。由植被 *NPP* 与日照时数的正相关性占比可以看出,建设用地的占比明显高于林地、草地,耕地的正相关区占比略低于林地、草地。一般来说,建设用地(包括城镇、农村居民点等)的人口密集,是受人类活动影响

最为明显的区域,其次为耕地。由此可见,在植被 *NPP* 与不同气候因子的响应关系中,人类活动发挥着明显的影响作用并且具有差异性,尤其在建设用地的相关性占比中表现最突出。

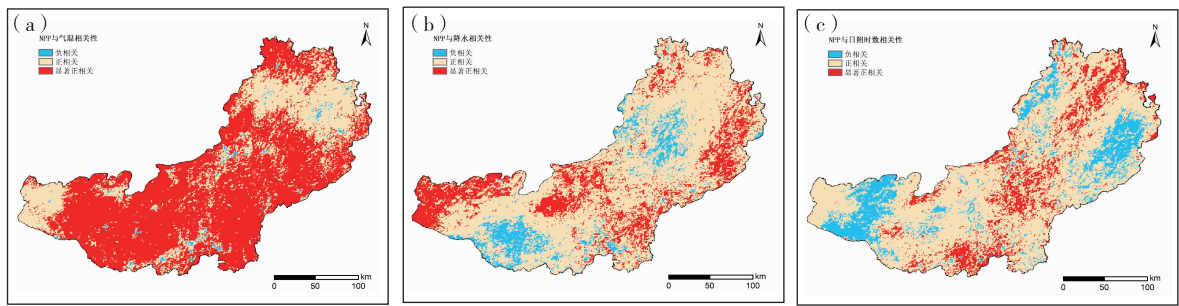


图 4 2000—2020 年贵州乌江流域植被 *NPP* 与气温(a)、降水(b)和日照时数(c)的相关系数空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of the correlation coefficient between *NPP* and air temperature (a), precipitation (b) and sunshine duration (c) in Wujiang River Basin, Guizhou from 2000 to 2020

表 2 贵州乌江流域植被 *NPP* 与气温、降水、日照时数的正负相关性所对应的土地类型占比情况
Tab. 2 Proportion of land types corresponding to different correlations between *NPP* and air temperature、Precipitation and sunshine duration in Wujiang River Basin, Guizhou

	气温				降水				日照时数			
	耕地	林地	草地	建设用地	耕地	林地	草地	建设用地	耕地	林地	草地	建设用地
正相关区域	90.61	92.96	93.93	78.65	82.04	56.59	62.82	76.14	60.31	65.83	61.26	78.76
负相关区域	9.39	7.04	6.07	21.35	17.96	43.41	37.18	23.86	39.69	34.17	38.74	21.24

3.4 基于气候因子的植被 *NPP* 预测模型

随着生态气象研究与服务的不断发展,开展关键生态要素的预报预测产品应用已成为研究重点之一。为此,本文采用多元线性回归方法建立模型,对贵州乌江流域的年植被 *NPP* 进行预报预测分析。从前面的分析可以看出,植被 *NPP* 与各个气候因子之间存在较好的相关性,假定预报量 y (植被 *NPP*) 与 3 个预报因子 x_1 (气温)、 x_2 (降水量) 和 x_3 (日照时数) 之间是线性关系。计算得到多元线性回归方程如下:

$$\hat{y} = -1040.09 + 106.699x_1 + 0.182x_2 + 0.066x_3 \tag{7}$$

其中回归平方和 $U = 2229.71$, 残差平方和 $Q = 1341.52$, 负相关系数 $R^2 = 0.62$, 统计量值 $F = 9.25$ 。根据 F 分布表:在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下,分子自由度为 3、分母自由度为 17 时, $F_{0.05}(3, 17) = 3.20$, $F > F_{0.05}$ 。线性回归方程(7)在 $\alpha = 0.05$ 的水平上是显著的。再利用因子值(气候预测产品)代入回归方程作出预报量的估计,求出置信区间^[19]。

4 结论与讨论

本文基于遥感数据和地面气象观测资料,采用相关分析、多元回归等方法,研究贵州境内乌江流域植被 *NPP* 的时空分布特征,分析植被 *NPP* 与不同气候因子的响应关系,同时建立植被 *NPP* 的预报预测模型。得出的结论如下:

①2000—2020 年贵州乌江流域的植被 *NPP* 呈显著上升趋势,平均每 10 a 增长率为 $74 \text{ g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。多年平均植被 *NPP* 的空间分布不均匀,流域大部分区域超过了 $780 \text{ g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$,流域的南部、西南部以及北部边缘相对较高。

②2000—2020 年贵州乌江流域年平均气温、降水呈升高、增加的趋势,而日照时数则呈现略微减少的趋势,气候条件总体趋势有利于植被 *NPP* 增强。

③贵州乌江流域植被 *NPP* 的年际变化受气温和日照时数的影响更为显著。在植被 *NPP* 与气温的相关性空间分布中,流域大部以正相关系数分布为主,其中显著正相关区域占到流域面积的

69.98%; *NPP* 与降水的相关性空间分布中以正相关为主,显著正相关区较气温明显较少,主要出现在流域的西部边缘、中部和下游南北部地区,负相关分布在流域的西南部和下游中北部区域;*NPP* 与日照时数的相关性空间分布中,以正相关为主,显著正相关分布较为零散,主要集中在中南部和下游中部地区,流域的西部、下游的南北部区域为负相关。在植被 *NPP* 与不同气候因子的响应关系中,人类活动的影响作用明显且具有差异性。

④基于多元线性回归分析方法,建立流域植被 *NPP* 的预报预测模型,得到的回归方程在 $\alpha = 0.05$ 水平上具有显著性,利用因子值可计算出对年植被 *NPP* 的估计。

本文主要研究气候因子与贵州乌江流域植被 *NPP* 的响应特征,而气候因素所引起的植被生长生理反应以及气候变化与植被生产力的相互作用机制还有待于进一步研究^[17]。从研究的结果来看,贵州乌江流域植被 *NPP* 与气温、日照时数表现出较好的正相关。需要指出的是对于不同区域,气候因子对植被 *NPP* 的影响具有差异性。如在干旱和半干旱地区,降水是影响植物生长的首要因素,因而与 *NPP* 的正相关更为突出^[20-21]。另外,文中基于历年资料建立的植被 *NPP* 预报预测模型,样本容量为 21 a,若要得到更加具有统计显著性的回归方程,还需要收集更长时间序列资料。

参考文献

- [1] 陈利军,刘高焕,冯险峰. 遥感在植被净第一性生产力研究中的应用[J]. 生态学杂志,2002,21(2):53-57.
- [2] 张雪萍. 生态学原理[M]. 北京:科学出版社,2011,5:122-123.
- [3] 朴世龙,方精云. 1982—1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. 地理学报,2003,58(1):119-125.
- [4] 梁妙玲,谢正辉. 我国气候对植被分布和净初级生产力影响的数值模拟[J]. 气候与环境研究,2006,11(5):582-592.
- [5] 谷晓平,黄玫,季劲钧,等. 近 20 a 气候变化对西南地区植被净初级生产力的影响[J]. 自然资源学报,2007,22(2):252-254.
- [6] 杨江州,周旭,熊军,等. 贵州乌江流域 NDVI 降尺度适应性评价[J]. 遥感信息,2020,35(6):129-137.
- [7] 王秀春,黄秋昊,蔡运龙. 贵州省乌江流域植被覆盖动态变化分析[J]. 水土保持研究,2008,15(5):15-17.
- [8] 张蓓蓓,蔡宏,田鹏举,等. 2000-2017 年贵州省植被覆盖时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. 地球与环境,2020,48(4):461-470.
- [9] 解雅麟,王海燕,雷相东. 基于过程模型的气候变化对长白落叶松人工林净初级生产力的影响[J]. 植物生态学报,2017,41(8):826-839.
- [10] 彭俊杰,何兴元,陈振举,等. 华北地区油松林生态系统对气候变化和 CO₂ 浓度升高的响应—基于 BIOME-BGC 模型和树木年轮的模拟[J]. 应用生态学报,2012,23(7):1733-1742.
- [11] 董丹,倪健. 利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力[J]. 生态学报,2011,31(7):1855-1866.
- [12] 王莺,夏文韬,梁天刚. 陆地生态系统净初级生产力的时空动态模拟研究进展[J]. 草业科学,2010,27(2):77-88.
- [13] 牛潜,周旭,许幼霞,等. 基于土地利用的贵州省乌江流域生态系统服务价值演变分析[J]. 生态科学,2018,37(5):168-176.
- [14] YAN H, WANG S Q, BILLESBACH D, et al. Improved global simulations of gross primary product based on a new definition of water stress factor and a separate treatment of C3 and C4 plants[J]. Ecological Modelling,2015,297:42-59.
- [15] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第2版)[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [16] 王强,张廷斌,易桂花,等. 横断山区 2004—2014 年植被 *NPP* 时空变化及其驱动因子[J]. 生态学报,2017,37(9):3084-3095.
- [17] 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.
- [18] 《2020 年中国气候公报》速览[N]. 中国气象报,2021-02-10(003).
- [19] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法(第3版)[M]. 北京:气象出版社,2004.
- [20] 李媛. 陆地植被净初级生产力估算及影响因素研究现状[J]. 宁夏大学学报:自然科学版,2018,39(4):362-366.
- [21] PENG D L, WU C Y, ZHANG B, et al. The influences of drought and land-cover conversion on inter-annual variation of *NPP* in the Three-North Shelterbelt Program Zone of China based on MODIS data[J]. PLoS One,2016,11(6):e0158173.