



甘南藏族自治州植被净初级生产力时空变化及驱动力

孙强 张立峰 何毅 姚圣 曹胜鹏 赵占鳌

Spatio-temporal changes and driving force analysis of vegetation net primary productivity in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture

SUN Qiang, ZHANG Lifeng, HE Yi, YAO Sheng, CAO Shengpeng, ZHAO Zhan'ao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0204>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

祁连山国家公园植被净初级生产力时空演变及驱动因素分析

Spatio-temporal evolution of vegetation net primary productivity in Qilian Mountain National Park and its driving factors

草业科学. 2020, 37(8): 1458 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0613>

基于光能利用率模型的甘南州植被净初级生产力研究

Study of vegetation net primary productivity in Gannan based on light use efficiency model

草业科学. 2019, 36(10): 2455 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0018>

生态奖补对牧民生产生活和植被覆盖度的影响：以甘南藏族自治州为例

Impact of the grassland ecological compensation policy on household livelihood and vegetation coverage: A case study in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture

草业科学. 2019, 36(6): 1674 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0450>

基于地上净初级生产力与地上生物量的若尔盖高原放牧强度遥感监测

Remote sensing monitoring of grazing intensity in Zoige Plateau based on aboveground net primary productivity and aboveground biomass

草业科学. 2021, 38(3): 544 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0410>

张家口市供用水结构时空演变及驱动力分析

Spatio-temporal evolution analysis and underlying driving forces of water supply and consumption structures in Zhangjiakou, China

草业科学. 2020, 37(7): 1354 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0283>

2000-2014年博斯腾湖流域NPP时空变化特征及影响因子分析

Spatio-temporal variations and impacting factors of vegetation NPP in the Bosten Lake Drainage Basin from 2000 to 2014

草业科学. 2018, 12(7): 1743 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0622>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0204

孙强, 张立峰, 何毅, 姚圣, 曹胜鹏, 赵占鳌. 甘南藏族自治州植被净初级生产力时空变化及驱动力. 草业科学, 2023, 40(7): 1729-1741.

SUN Q, ZHANG L F, HE Y, YAO S, CAO S P, ZHAO Z A. Spatio-temporal changes and driving force analysis of vegetation net primary productivity in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture. Pratacultural Science, 2023, 40(7): 1729-1741.

甘南藏族自治州植被净初级生产力 时空变化及驱动力

孙 强^{1,2,3}, 张立峰^{1,2,3}, 何 毅^{1,2,3}, 姚 圣^{1,2,3}, 曹胜鹏^{1,2,3}, 赵占鳌^{1,2,3}

(1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 自 2003 年开始甘南藏族自治州推行了“退耕还草”等一系列生态保护政策, 对区域植被状态产生了一定的影响。目前针对甘南州不同植被类型下植被净初级生产力 (NPP) 与归一化植被指数 (NDVI)、太阳辐射、气温、降水间响应机制的研究尚不明晰, 且关于该区域植被 NPP 时空特征变化及重心迁移的探讨尚少。本研究基于 MODIS 遥感数据、气象数据、植被类型数据, 利用 Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) 模型估算了甘南州 2000–2019 年植被 NPP, 分析了 NPP 时空变化特征, 探讨了不同植被类型下植被 NPP 与 NDVI、气温、降水以及太阳辐射之间的响应关系。结果表明: 1) 2000–2019 年植被 NPP 年均值为 $621.79 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 96.63% 区域呈现为增长趋势。2) 2000–2019 年植被 NPP 重心整体呈现西北向东南迁移, 东南部植被 NPP 增速高于西北部。3) 植被 NPP 与气温、降水、太阳辐射间整体上呈明显的正相关关系, 北部边缘及东部中心地带呈负相关关系。4) 林地、灌丛、草地的 NPP 均呈稳定增长, 湿地类型下除 NPP 外气温亦呈明显增长。本研究可为评价生态质量及生态工程的实施效果提供理论支撑。

关键词: 净初级生产力; CASA 模型; 时空特征; 植被变化; 重心移动; 遥感; 环境监测

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2023)07-1729-13

Spatio-temporal changes and driving force analysis of vegetation net primary productivity in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture

SUN Qiang^{1,2,3}, ZHANG Lifeng^{1,2,3}, HE Yi^{1,2,3}, YAO Sheng^{1,2,3}, CAO Shengpeng^{1,2,3}, ZHAO Zhan'ao^{1,2,3}

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Since 2003, the Gannan Tibetan Autonomous Prefecture has implemented a series of regional ecological protection policies, including “returning farmland to grass”. The response mechanisms between net primary productivity (NPP) and the normalized difference vegetation index (NDVI), solar radiation, temperature, and precipitation in different vegetation types in Gannan are still unclear. Furthermore, the spatial and temporal characteristics of vegetation NPP and the migration of the center of gravity in the region have not been investigated. In this study, based on MODIS remote sensing, meteorological, and vegetation type data, the Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) model was used to estimate vegetation NPP in Gannan from 2000 to 2019, analyze the spatial and temporal variation characteristics of NPP, and explore

收稿日期: 2022-03-22 接受日期: 2022-06-06

基金项目: 国家自然科学基金 (42161063); 甘肃省自然科学基金 (20JR10RA249); 甘肃省青年科学基金 (20JR10RA272)

第一作者: 孙强 (1995-), 男, 河南永城人, 在读硕士生, 研究方向为生态环境遥感。E-mail: 87451954@qq.com

通信作者: 张立峰 (1982-), 男, 吉林农安人, 副教授, 博士, 研究方向为遥感应用。E-mail: 119273207@qq.com

the response relationships between vegetation NPP and NDVI, temperature, precipitation, and solar radiation under different vegetation types. The annual average value of vegetation NPP from 2000 to 2019 was $621.79 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, and 96.63% of the area showed an increasing trend. The center of gravity of vegetation NPP from 2000 to 2019 showed an overall northwest to southeast migration, and the growth rate of vegetation NPP in the southeast was higher than that in the northwest. The overall positive relationship between vegetation NPP and temperature, precipitation, and solar radiation was obvious, and the northern edge and the eastern center showed a negative relationship. Finally, the NPP of woodland, scrub, and grassland showed a stable increase, and the temperature of the wetland type also showed a significant increase in addition to NPP. The findings provide theoretical support for the evaluation of ecological quality and implementation of ecological projects.

Keywords: net primary productivity; CASA model; spatial and temporal characteristics; vegetation change; center of gravity shift; remote sensing; environmental monitoring

Corresponding author: ZHANG Lifeng E-mail: 119273207@qq.com

植被净初级生产力 (net primary production, NPP) 指绿色植物在单位面积单位时间内所累积的有机物数量, 不仅是陆地生态系统中物质与能量转换的基础, 而且能反映植物群落的生产力。此外, 植被 NPP 还可用于评估生态系统的功能协调性及其与其他环境因素的相互作用^[1]。因此, 在全球气候变化的大背景下, 植被 NPP 对气候变化的响应机制方面发挥着重要作用。随着“退耕还草”等一系列生态保护和生态恢复工程的推行, 长时序、定量化的植被 NPP 研究分析对于评价生态系统质量状况, 监测区域植被变化具有重要意义。

随着国内外学者对 NPP 研究的逐渐深入, NPP 获取方法也在不断革新。实地测量法^[2-3] 最先被应用, 但由于工作量大, 获取周期长等诸多因素不能被推广。随后利用模型模拟间接估计的多种方法被提出, 其中属于遥感反演法之一的 Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) 模型具有模型简单、数据获取方便、精度较高等优势, 被广泛应用^[4-5]。朴世龙等^[6] 采用 CASA 模型估算了中国 1997 年植被 NPP 分布情况; 张美玲等^[7] 将顺序分类系统和温湿度指标引入 CASA 模型, 得到 2004—2008 年中国草地 NPP 时空分布, 并分析得到影响 NPP 的决定因素。此后, 对于 NPP 的研究^[8-13] 更倾向于基于典型区域、多源数据的 NPP 时空分布特征和驱动力响应机制研究, 旨在揭示 NPP 和独特区域特征间 (高程、坡向、气候因子等) 的内在联系。近年来我国针对类似甘南藏族自治州的脆弱生态区推行了“退耕还草”等一系列生态保护和生态恢复工程, 这一系列举措对区域植被变化造成了一定的改变, 引起

了学者们的兴趣。学者们开始对甘南藏族自治州后植被 NPP 进行研究, 采用趋势分析法和变异系数法探究了 NPP 时空变化规律与气温和降水的响应关系, 并分析了区域内 NPP 在不同植被类型下的变化趋势分布^[14-16]。但针对甘南藏族自治州植被 NPP 的已有研究中, 长时序下该地区植被 NPP 重心有无迁移缺乏探讨, 此外, 不同植被类型下探究甘南藏族自治州 NPP 与归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI)、太阳辐射、气温、降水各因子之间的响应机制及趋势分布未见报道。

本研究基于 MODIS 遥感数据、气象站点数据、植被类型数据, 利用 CASA 模型计算了甘南藏族自治州 2000—2019 年的植被 NPP; 利用相关系数法探究 NPP 与 NDVI、气温、降水、太阳辐射间的响应关系及不同区间下的变化和分布。通过一元线性回归趋势分析 NPP 的变化趋势, 基于重心模型^[17-18] 揭示长时序下植被 NPP 在空间上的差异和重心迁移规律, 并进一步探究 NPP 在不同植被类型下与太阳辐射、气温、降水的变化趋势, 明确甘南藏族自治州 NPP 与各因子间的相应机制。本研究旨在为认识区域生态环境、生态措施制定与实施实效提供理论支撑。

1 研究区概况

甘南藏族自治州 ($100^{\circ}46' \sim 104^{\circ}44' \text{ E}$, $33^{\circ}06' \sim 36^{\circ}10' \text{ N}$) 地处甘肃省西南部, 青藏高原和黄土高原过渡地带, 全州下辖夏河、玛曲、碌曲、卓尼、迭部、临潭、舟曲和合作共 7 县 1 市; 东部山地交错, 农牧业兼营; 西北部为广阔草原, 是重要的农牧业生产基地和国家级生态主体功能区 (图 1)。甘南藏族自

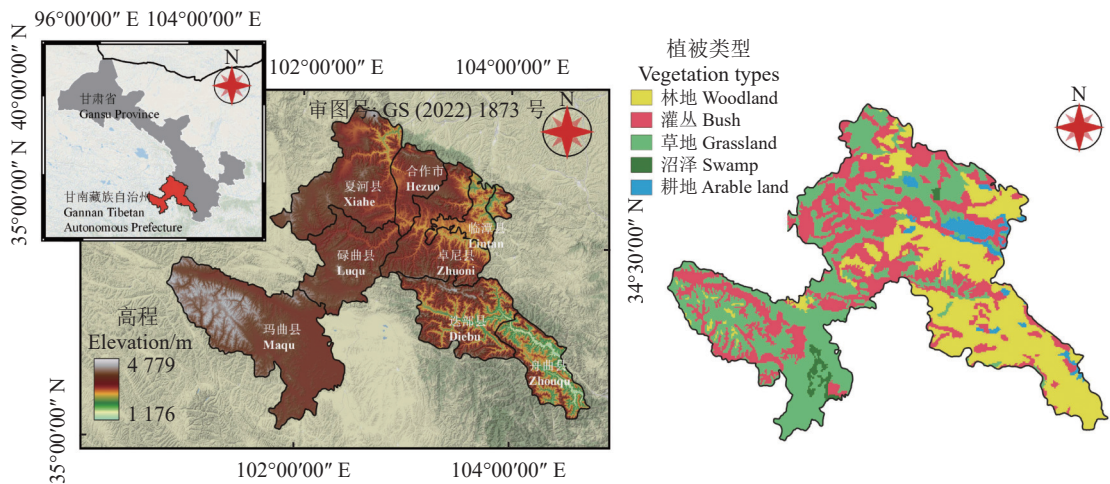


图 1 研究区行政区划图及植被类型分类图

Figure 1 Administrative division map and vegetation cover classification map of the study area

治州年平均气温在 1~13℃, 年内高于 10℃ 的月份不足 3 个月, 昼夜温差极其明显, 年均降水在 440~800 mm 间且集中在 7 月—9 月, 其气候为典型的高原大陆性季风气候^[19-20]。甘南藏族自治州独特的气候特征和境内丰富的植被资源为植被 NPP 的研究提供了自然基础。

2 材料与方法

2.1 数据来源及处理

本研究所用气温和降水等气象数据均来源于国家气象科学数据中心中国地面气候资料月值数据集 (<http://data.cma.cn/data/>)。由于甘南藏族自治州气象数据有限, 获取时空数据插值误差较大, 为提高精度选取西北地区 110 个气象站点的月平均气温和降水量数据插值得到西北地区气候时空数据, 最后裁剪出研究区范围数据, 站点分布如图 2 所示。数据预处理过程中, 首先对缺测值和异常值进行预处理, 将缺测值超过 6 个月的数据予以剔除, 未超过 6 个月的通过 MATLAB R2018b 进行线性插值后得到, 将降水量低于 0 mm 的数据用前后月份的均值作为替换。之后利用 ANUSPLIN 软件对研究区域的气温、降水数据在西北地区尺度上插值处理后裁剪出研究区 2000—2019 年逐月气温和降水分布图, 进行波段组合后得到年平均气温、降水分布图, 通过 ANUSPLIN 方法插值时引入了数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 数据, 以提升局部和全局的插值精度。

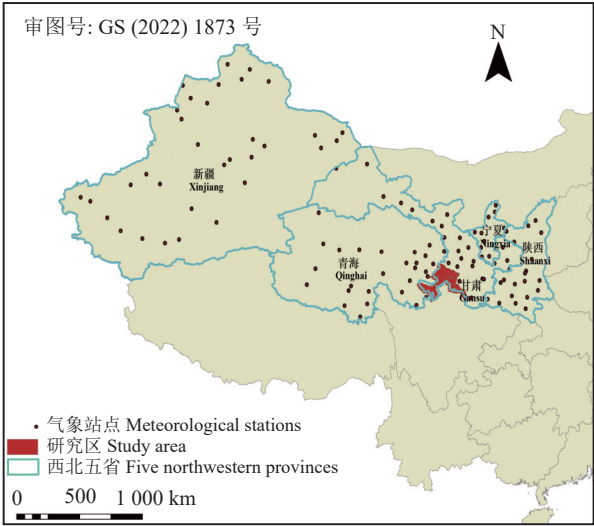


图 2 气象站点分布图

Figure 2 Distribution of meteorological stations

太阳辐射数据来自于国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/>) 的中国辐射气候标准值月值数据集。经筛选和预处理后共选取 118 个气象站点数据, 处理方法与生成气温、降水图一致。

NDVI 数据来自于美国地质调查局土地过程分布活动档案中心 (<https://lpdaac.usgs.gov/>) 发布的 MOD13Q1 全球产品, 数据周期为 16 d, 空间分辨率为 500 m。选取覆盖研究区甘南州的影像, 利用 MODIS Reprojection Tool (MRT) 软件进行影像的批量拼接、转投影、最大值合成处理。将 NDVI 在 0.10 以上的区域定义为植被覆盖区, 去除 NDVI 小于 0.10 的无植被覆盖区。借助 ArcGIS 10.3 软件提取甘南 2000—2019 年各月份 NDVI 数据, 并统一定义为

Albers 投影。最后与气象数据处理方法相同,将全年 12 个月的数据进行波段组合后得到年均 NDVI 分布图。

数字高程模型 (DEM) 数据来源于 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 的 SRTM 数据 (<http://srtm.csi.cgiar.org/>), 空间分辨率为 500 m。利用嵌套在 ANUSPLIN 包中的薄板平滑样条进行空间插值, 其中薄板平滑样条包含了温度和降水数据的高度依赖性, 协变量的引入能够使得插值精度更高, 插值结果更为平滑。

用来与 CASA 模型反演 NPP 结果进行一致性分析的 MOD17A3 NPP 产品数据来源于 MODIS MOD17A3H 版本产品中年度净初级生产力数据集, 时间分辨率为 1 年, 空间分辨率为 500 m, 且已经通过大气校正、辐射校正、几何校正和去云等处理。数据下载完成后使用 ArcGIS 10.3 软件进行拼接、裁剪、重投影后剔除其异常值, 得到 2000—2020 年的 NPP 精度验证数据集。

植被类型数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>) 提供的共分为 22 种植被类型的栅格数据, 掩膜提取出甘南藏族自治州植被类型数据, 经整合后重分类为研究区主要的 5 种植被类型 (林地、灌丛、草地、湿地、耕地), 并定义为 Albers 投影, 用于 CASA 模型中最大光能利用率的确定。

2.2 空间插值方法

本研究中站点数据采用国际上认可并被广泛应用的 ANUSPLIN 软件进行插值, 由于引入数字高程模型数据, 其插值结果精度更高, 结果的细节展示也更为突出。本研究中主要使用薄盘光滑样条函数和 LAPGRD (局部薄盘光滑样条表面估值并计算贝叶斯标准误差) 等主要程序模块。ANUSPLIN 软件的核心是局部薄盘光滑样条法, 其理论模型为:

$$z_i = f(x_i) + b^T y_i + e_i (i = 1, \dots, N)。 \quad (1)$$

式中: z_i 为空间中 i 点的因变量, $f(x_i)$ 为 x_i 的光滑函数, x_i 为关于样条独立变量的 d 维向量, b^T 为 y_i 的 p 维系数, y_i 为 p 维独立协变量, e_i 是期望为 0 且方差为 $w_i \sigma^2$ 的随机误差项, w_i 为已知的相对误差方差, σ^2 为未知的所有数据点上的误差方差常数, N 为观测值的个数。光滑函数 f 和系数 b , 通过数据点及其

周边已知点插值, 由最小二乘法确定。

2.3 CASA 模型估算 NPP 方法

选取改进后的 CASA 模型^[5] 来估算 NPP。该模型以 NDVI 为驱动, 借助气温、降水、太阳辐射为主要驱动因子, 在对相关参数 (ϵ 、SR、 $SR_{\min}$ 、 $SR_{\max}$) 进行了适宜性调整后对 NPP 进行反演。模型表达如下:

$$NPP_{(x,t)} = APAR_{(x,t)} \times \epsilon_{(x,t)}。 \quad (2)$$

式中: $APAR_{(x,t)}$ 为像元 x 在 t 月份吸收的光合有效辐射 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), $\epsilon_{(x,t)}$ 为像元 x 在 t 月份的实际光能利用率 ($\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$)。在此基础上, 将植被覆盖分类引入模型, 根据误差最小的原则, 利用中国的 NPP 实测数据, 模拟出各植被的最大光能利用率, 其中植被吸收的光合有效辐射取决于总太阳辐射 (S) 和光合有效辐射分量 ($FPAR$)。

$$APAR_{(x,t)} = S_{(x,t)} \times FPAR_{(x,t)} \times 0.5。 \quad (3)$$

式中: $S_{(x,t)}$ 为像元 x 在 t 月份的太阳辐射量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); $FPAR_{(x,t)}$ 为植被层对光合有效辐射的吸收比例; 常数 0.5 表示植被所能利用的有效辐射占总辐射的比例。其中 $FPAR$ 、 $NDVI$ 、比值植被指数 (SR) 之间的关系公式如下:

$$FPAR_{(x,t)} = \min\left(\frac{SR - SR_{\min}}{SR_{\max} - SR_{\min}}, 0.95\right)。 \quad (4)$$

式中: $SR_{\min}$ 和 $SR_{\max}$ 分别对应各植被 NDVI 的 5% 和 95% 下侧百分位数, $SR_{(x,t)}$ 可由 $NDVI_{(x,t)}$ 求得, 公式如下:

$$SR_{(x,t)} = \frac{1 + NDVI_{(x,t)}}{1 - NDVI_{(x,t)}}。 \quad (5)$$

式中: $NDVI_{(x,t)}$ 为像元 x 在 t 月份的 NDVI。

2.4 相关性分析

相关性分析主要用来反映各个因子之间相关程度和相关方向, 本研究采用皮尔森相关系数法探讨 Z-score 标准化后的 NPP 与各因子的响应关系, 公式如下:

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

式中: x_i 、 y_i 为其他因子 (x) 和 NPP (y) 第 i 年的值。 R_{xy} 为变量 x 和 y 年际值的相关性系数, 取值范围为

-1.0 到 1.0。采用 F 显著性检验结果, 将相关性分为 8 个等级: 显著负相关 ($r < -0.8$)、中度负相关 ($-0.8 < r < -0.5$)、轻度负相关 ($-0.5 < r < -0.3$)、弱负相关 ($-0.3 < r < 0$)、弱正相关 ($0 < r < 0.3$)、轻度正相关 ($0.3 < r < 0.5$)、中度正相关 ($0.5 < r < 0.8$)、显著正相关 ($0.8 < r$)。

2.5 趋势分析

一元线性回归分析通过拟合一条数据趋势线来模拟每一个像元的年际变化趋势, 其优点是可消除特定年份由于异常因素对 NPP 变化趋势的影响, 真实反映 NPP 的演化趋势。计算公式:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NPP_i - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \left(\sum_{i=1}^n NPP_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (7)$$

式中: θ_{slope} 为拟合得到的年际 NPP 数值变化速率, 负值表示 NPP 呈下降趋势, 正值则表示 NPP 呈增长趋势。 n 为所研究时间序列长度, NPP_i 为第 i 年的 NPP 值。根据 Slope 和显著性检验结果 (P 值) 将 NPP 空间变化趋势分为 5 个等级: 显著减少 (Slope < 0 , $P < 0.05$), 不显著减少 (Slope < 0 , $P \geq 0.05$), 不显著增加 (Slope > 0 , $P \geq 0.05$), 显著增加 (Slope > 0 , $0.01 \leq P < 0.05$) 和极显著增加 (Slope > 0 , $P < 0.01$)。

2.6 Z-score 标准化

在研究不同量纲的因子间变化趋势分布时, 将它们的趋势值分别做 Z-score 标准化处理用于后续的研究分析, 表达式如下:

$$Z_{X(i)} = \frac{X[\text{Mean}(X)]}{\text{Std}(X)} \quad (8)$$

式中: X 为要进行 Z-score 标准化的一元线性回归后的趋势像元值, 其中 $X(i)$ 为第 i 年的趋势像元值, $\text{Mean}(X)$ 和 $\text{Std}(X)$ 是研究期间内 X 的平均值和标准偏差。Z-score 标准化在多个目标值上界和下界已知的情况下, 将有量纲表征的数据规约变换成相同尺度内无量纲的数据, 消除样本奇异值。

2.7 NPP 重心分析

“重心”的迁移方向和距离可以反映某一地理现象的程度和趋势的变化。重心模型被广泛应用于研究经济社会问题, 包括人口分布及其迁移、区域经济增长趋势、粮食分布及其变化、土地利用分布及其

变化、生态环境变化等。该模型对事物内部变化趋势有着较强的展示, 本研究利用重心模型分析植被 NPP 增速在空间上的差异和植被 NPP 重心迁移规律。

重心定义为一对坐标 (x, y) , 模型内笛卡尔坐标设为 (x_i, y_i) 。然后将 n 个空间单元 (像元) 组成的区域的空间均值定义为笛卡尔坐标。结合植被 NPP 像元特点, 应用于研究区 NPP 重心模型迁移时的公式为:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n NPP_i x_i}{\sum_{i=1}^n NPP_i}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n NPP_i y_i}{\sum_{i=1}^n NPP_i} \quad (9)$$

式中: x_i 和 y_i 是要素 i 的坐标, n 等于要素总数。 NPP_i 为第 i 个像元处 NPP 的值。

3 结果与分析

3.1 甘南藏族自治州植被 NPP 时空变化特征

甘南藏族自治州 2000—2019 年植被 NPP 总体呈稳定增长趋势且年均植被 NPP 具有明显的时间分异性 (图 3)。植被 NPP 年均增长率约为 $7.5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 变化范围为 $556 \sim 691 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 其中表现为增长趋势的时间段为 2000—2002 年、2003—2008 年、2011—2015 年、2018—2019 年, 且增长率大致相同, 约为 $15 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。表现为减少趋势的时间段为 2002—2003 年、2008—2011 年、2015—2018 年, 其中 2002—2003 年和 2008—2011 年下降趋势大致相同, 下降率为 $12.3 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 2015—2018 年下降较为缓慢, 下降率约为 $6.7 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ (此处增长率和下降率是由 CASA 模型反演得出的 2019 年 NPP 与 2000 年 NPP 的差值与时间跨度得出, 并非是拟合后的趋势)。总体上, 甘南藏族自治州植被 NPP 在 2000—2019 年间呈现出稳定增长趋势, 虽然时有下降趋势但并不明显。

2000—2019 年年平均 NPP 为 $621.79 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 主要分布在 $450 \sim 750 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 且表现出明显的空间分布差异 (图 4a)。其中植被 NPP 低于 $200 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 的区域占比最低 (0.78%), 主要分布在卓尼县南部和迭部县北部交界地带、玛曲县东北部小范围区域和南部边界区域; $200 \sim 450 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 的区域占比为 4.44%, 主要分布在玛曲县西北部和迭部县境内; $450 \sim 650 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 的区域占 46.73%, 主要分布在卓

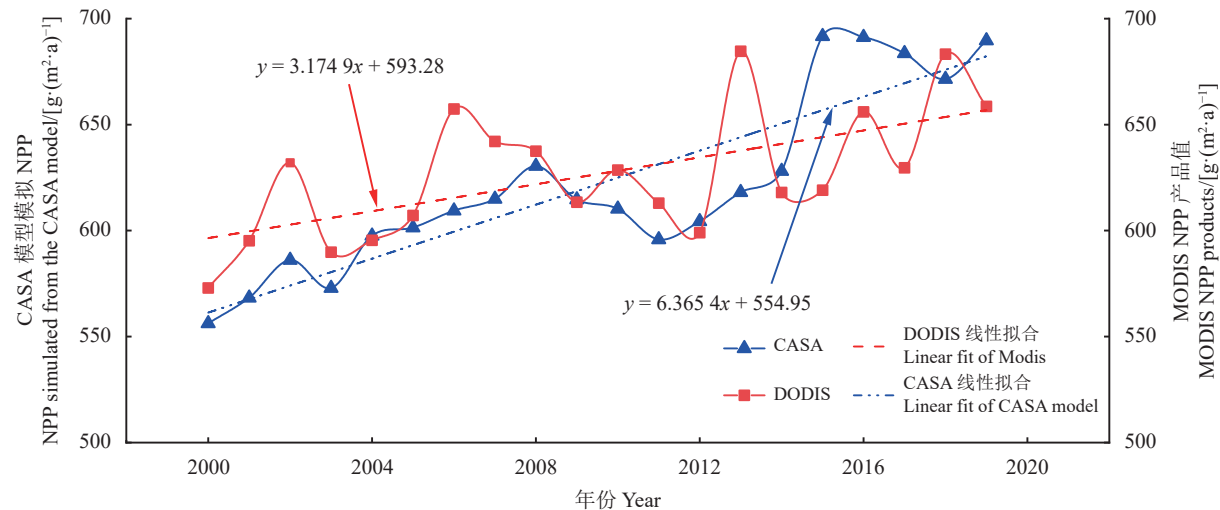


图 3 2000—2019 年甘南藏族自治州 CASA 模型模拟年际 NPP 值及 MODIS NPP 产品年际值

Figure 3 Interannual net primary production (NPP) value simulated by CASA model and interannual value of MODIS NPP products in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture from 2000 to 2019

尼县迭部县舟曲县和玛曲县大部地区。 $650\sim 750\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 占比 41.52%，主要分布在玛曲县东部、碌曲县，夏河县、合作市和临潭县大部地区。高于 $750\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 的区域占比 6.53%，聚集在甘南东北边境区、卓尼县、临潭县的交邻地区。甘南藏族自治州 NPP 总体呈增长趋势，大部地区 (90.32%) 表现为极显著增加 (图 4b)；其中 6.3% 的地区表现为显著增加，其分布区域植被覆盖主要以常绿阔叶林和落叶阔叶林为主；3.11% 的地区表现为不显著增加，主要分布在迭部县南部、迭部县与卓尼县交界地区、和玛曲县，碌曲县，夏河县境内少数区域，这些区域植被主要以常绿阔叶林为主，其次为落叶阔叶林；仅有 0.22% 的地区表现为不显著减少，主要分布在迭部县和碌曲县少数地区；表现为显著减少的区域极少可忽略不计。植被 NPP 表现为极显著增加的区域的高占比 (90.32%) 空间分布特征与稳定增长的时间分布特征并不排斥。甘南藏族自治州 2000—2019 年植被 NPP 年际变化趋势空间分布，植被 NPP 呈明显增加区域 (植被 NPP 年际变化斜率大于 $12\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$) 占比为 1.5%，主要分布在舟曲县东部边界和临潭县东部地区且主要以林地为主 (图 4c)；仅有极少区域植被 NPP 呈现明显退化 (植被 NPP 年际变化率小于 0)；其余区域大多呈现稳定增长趋势，植被 NPP 年际变化在 $0\sim 4\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 的地区占 16.02%， $4\sim 8\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 的区域占 74.85%， $8\sim 12\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 的区域占 6.64%。整体来看，研究区内大

部地区 (90.87%) 植被 NPP 处于 $0\sim 8\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 的变化率区间，植被 NPP 变化率小于 0 的区域远远小于变化率大于 $12\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 的区域，甘南藏族自治州植被整体生长状况良好。

3.2 甘南藏族自治州 NPP 重心迁移

年际 NPP 空间分布差异和增速的空间异质性可通过植被 NPP 重心的迁移有效呈现。在 CASA 模型反演植被 NPP 结果的基础上，通过计算 2000—2019 年年均 NPP 和逐年 NPP 的重心，并考虑到极端气候等因素的影响以 10 年为时间尺度分为 2000—2009 年、2010—2019 年 2 个时间段来研究甘南藏族自治州植被 NPP 的重心迁移规律 (图 5)。重心的迁移不仅反映出植被 NPP 聚集的转移，亦是植被 NPP 增速空间异质性的一种表现。如图 5a 所示，整体重心迁移呈“自西向东，从北到南”跳动偏移的趋势。2000—2002 年、2005—2006 年间 NPP 重心整体出现向南迁移的趋势，说明该时间段内南部植被 NPP 增速大于北部；2003—2009 年 NPP 重心整体呈现从西南向东北迁移的趋势，且西向迁移的趋势大于北向迁移的趋势，说明在此期间东部地区植被 NPP 增速远超西部地区。2010—2019 年甘南藏族自治州 NPP 重心迁移幅度较 2000—2009 年相比更大，跳跃也更明显，NPP 重心更为明显的跳跃说明研究区内植被 NPP 的变化较 2000—2009 年更为剧烈。其中 2010—2011 年、2012—2013 年、2014—

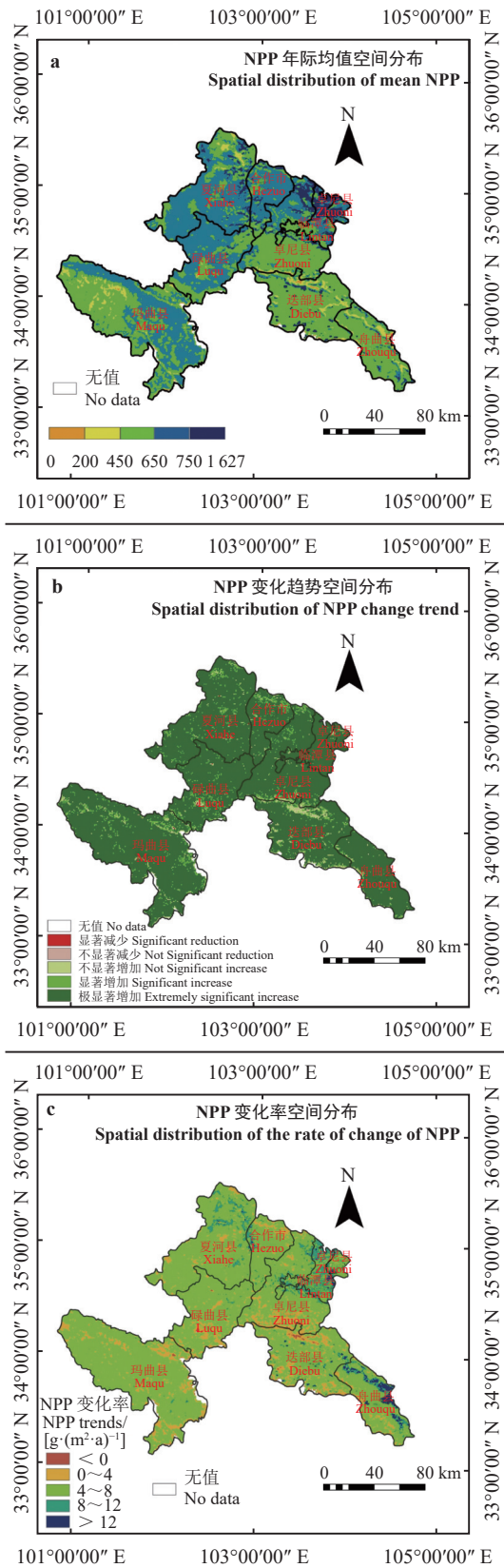


图 4 甘南藏族自治州 2000—2019 年 NPP 分布图

Figure 4 Net primary production (NPP) distribution map of Gannan Tibetan Autonomous Prefecture from 2000 to 2019

2015 年、2016—2017 年和 2018—2019 年这些时段内植被 NPP 出现由西北向东南方向迁移的趋势,说明在此时间段内研究区东南地区植被 NPP 增速大于东北地区(图 5b)。2011—2012 年、2013—2018 年植被 NPP 重心出现明显的由东南向西北方向迁移的趋势。

3.3 甘南藏族自治州植被 NPP 对各因子的响应

采用皮尔森相关性分析了植被 NPP 与 NDVI、太阳辐射、气温和降水间响应关系(图 6)。有 77.29% 的区域显示 NPP 与 NDVI 正相关,仅 22.71% 的区域显示 NPP 与 NDVI 之间呈负相关关系。其中呈现负

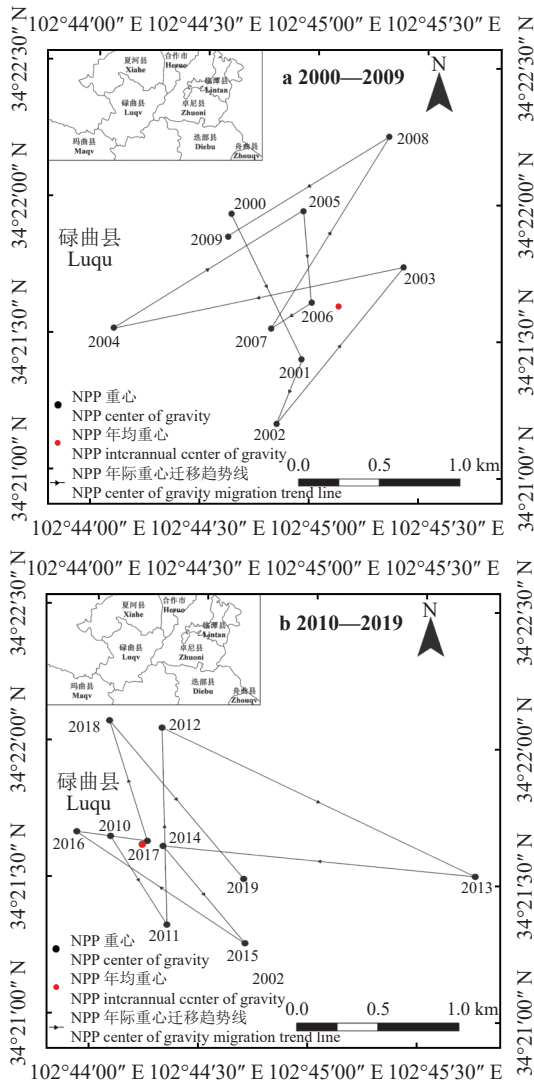


图 5 甘南藏族自治州 2000—2019 年植被 NPP 重心迁移图

Figure 5 Center of gravity migration of vegetation net primary production (NPP) in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture from 2000 to 2019

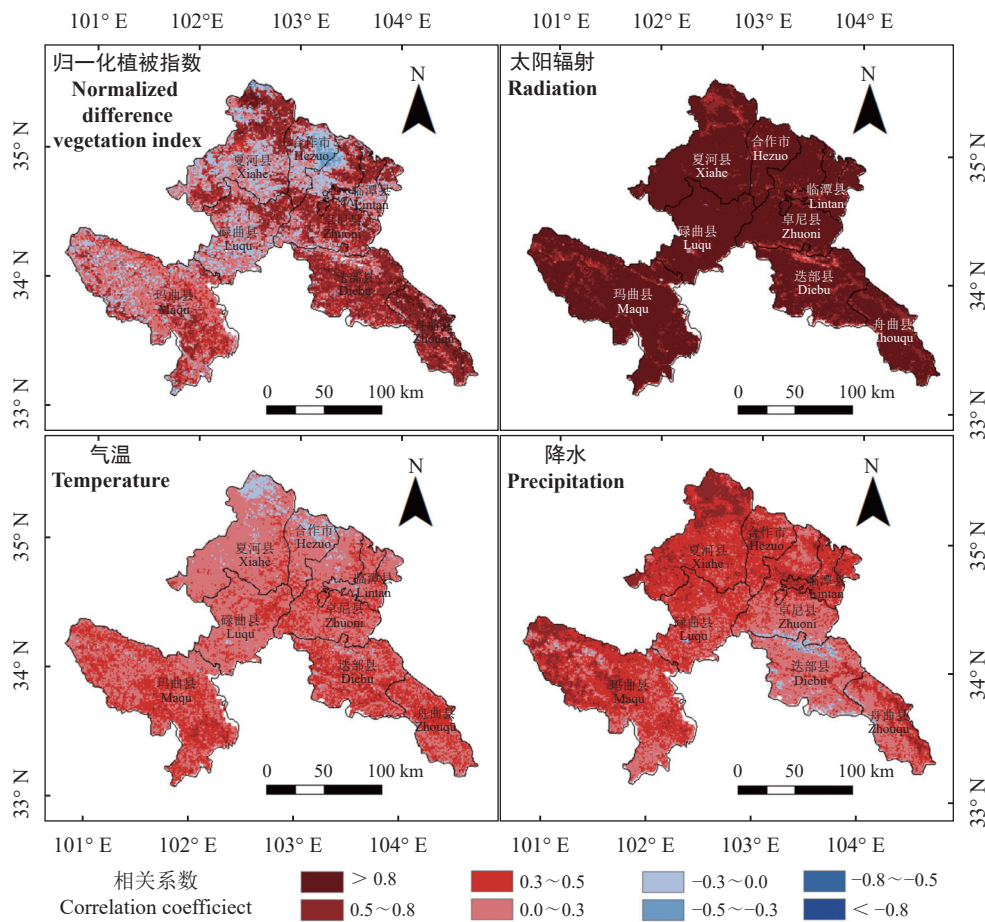


图 6 植被 NPP 与各因子相关性系数空间分布

Figure 6 Spatial distribution of correlation coefficient between vegetation net primary production (NPP) and various factors

相关关系的面积主要集中在弱负相关 (占比 21.05%), 呈现正相关关系主要集中在弱正相关 ($0 < r < 0.3$) (占比 31.41%)。弱正相关 ($0 < r < 0.3$) 的面积占比 31.41%, 轻度正相关 ($0.3 < r < 0.5$) 的面积占比 13.11%, 中度正相关 ($0.5 < r < 0.8$) 的面积占比 27.83%, 显著正相关 ($0.8 < r$) 的面积占比 4.92% (表 1)。从空间分布上来看, 除夏河县、合作市、卓尼县部分地区显示为负相关, 甘南其余大部地区都呈正相关。

甘南藏族自治州 NPP 与太阳辐射间具有显著的相关性特征 (图 6), 超过 85% 区域呈现出显著正相关。呈现弱、轻度、中度正相关的区域分别占比 0.61、1.57 和 11.34%, 极少区域 (0.1%) 显示为负相关, 显示为负相关的区域主要分布在迭部县北部边界地带和碌曲县西南地带。植被 NPP 与气温呈现正相关的区域占研究区总面积的 94.88%, 呈负相关关系的区域主要集中在夏河县北部和合作市北部地带 (图 6)。植被 NPP 与降水呈正相关的区域面积占

比为 96.76%, 仅卓尼县和迭部县交界处高海拔地带和迭部县南部高海拔地带呈现负相关关系。从空间分布上来看, 绝大多数区域植被 NPP 与太阳辐射、气温、降水间都呈现明显的正相关关系, 其中与太阳辐射间的正相关尤为明显。综上, 从空间分布上来看甘南藏族自治州植被 NPP 与太阳辐射、气温、降水间都呈现明显的正相关关系, 其中与辐射间的正相关尤为明显。

3.4 不同植被类型下 NPP 对气候因子的响应

本研究中将研究区划分为林地、灌丛、草地、湿地、耕地共 5 种植被类型 (图 1), 分析 2000—2019 年间 NPP 与各驱动因子间的变化特征, 并与其他区域 NPP 对气候因子响应研究对比。NPP 和主要气候因子在不同植被类型下的分布存在明显差异 (图 7)。其中降水和辐射由于研究区相同的原因, 在 5 种植被类型下的总体趋势一致且不同类型下差异不大。与降水和辐射相比, 气温在 5 种类型下的差异尤为

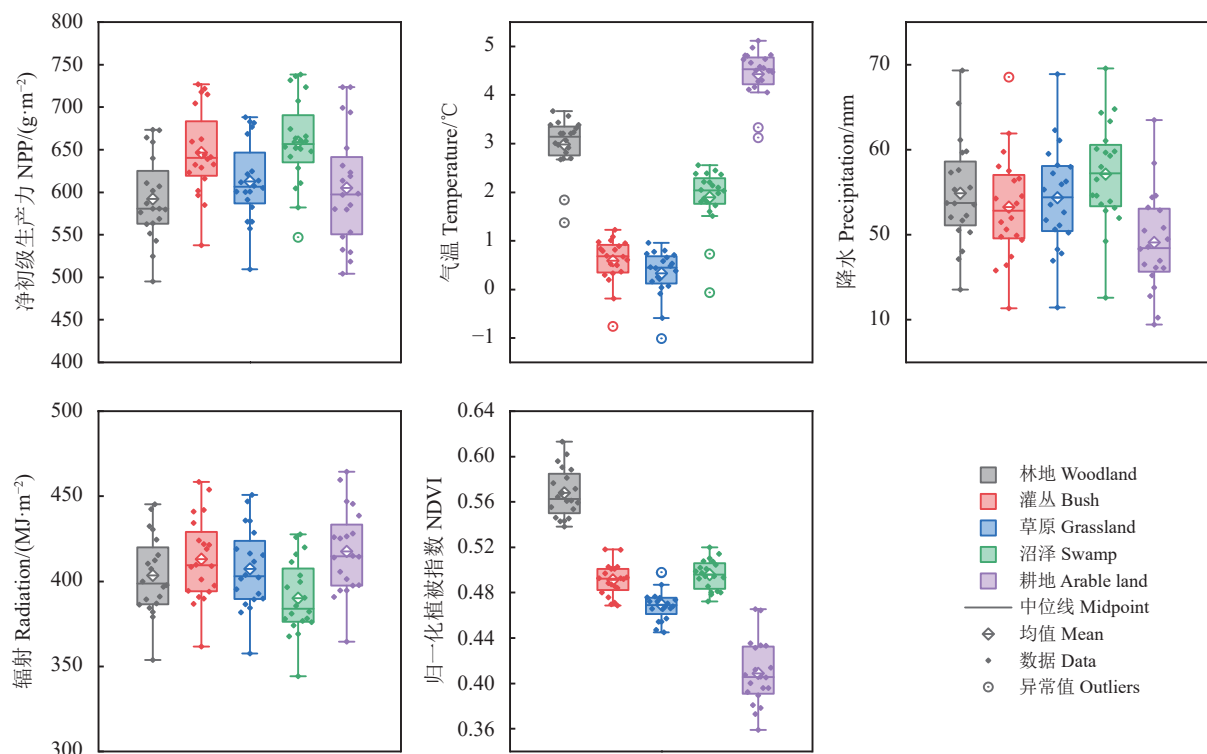


图 7 不同植被类型下 NPP 与各因子分布

Figure 7 Distribution of net primary production (NPP) and factors under different vegetation types

明显，结合研究区植被分布特点和相关文献结论，气温的明显差异主要是由于不同植被的蒸腾与呼吸作用的差异导致^[7]。相比气温、降水、辐射这 3 种气候因子在不同类型下的不同趋势，NPP 在不同类型下的差异相对较小并稳定维持在 575~650 g·m⁻²，符合 NPP 与气候因子内在相关性，即多种气候因子共同影响 NPP 的变化，NPP 是响应各个因子变化后的结果^[10]。

在对 NPP 和各个因子做长时序趋势分析后，对其趋势分析结果(各因子年际增量)分别进行 Z-score 标准化处理后发现：研究区林地 NPP 高度集中在 0.4~0.6 趋势区间内(84.62%)，NPP、太阳辐射、气温、降水趋势分布集中在 0.2~0.6 趋势区间内；灌丛 NPP 与降水分布高度集中在 0.4~0.6 趋势区间内(分别为 86.62%、61.59%)，NPP、太阳辐射、气温、降水多分布在 0.2~0.6 趋势区间内；草地 NPP 的分布仍高度集中在 0.4~0.6 趋势区间内，其余因子的分布集中于 0.4~0.8 趋势区间内，降水亦偏向 0.4~0.6 趋势区间(61.92%)；湿地的各因子分布与林地、灌丛、草地分布差异明显，NPP 高度集中在 0.4~0.6 趋势区间内(87.56%)，太阳辐射集中分布于

0~0.2、0.2~0.4 区间内(分别占比 66.98%、20.09%)，气温、降水分别高度集中在 0.6~0.8、0~0.2 趋势区间内(分别占比 91.83%、98.87%)(图 8)。在 2000—2019 年间，林地、灌丛、草地的 NPP 的年际变化趋势大致相同呈稳定增长趋势，集中在 0.4~0.6 趋势区间，其他因子的趋势分布差异并不明显且在各个趋势区间上分布相对均匀。湿地的各因子趋势变化差异较大，其中气温在研究时段增长相对明显，降水和辐射主要集中在低增长率区间内，NPP 呈现平稳增长趋势。耕地的降水和气温变化不明显，NPP 呈现平稳增长趋势，辐射呈现相对明显的增长趋势。

4 讨论

4.1 CASA 模型反演 NPP 与 MOD17A3H 系列的 NPP 数据的一致性分析

本研究将 CASA 模型反演的 NPP 数据集与 MOD17A3H 系列的 NPP 数据集对比分析以验证 CASA 模型反演的 NPP 数据集的精度。结果表明，两者的年际 NPP 值差异不大，在 1.2~72.6 g·m⁻² 间波动，整体变化趋势都表现为稳定上升趋势，线性拟合后的起始最值也差异较小保持在 50.0 g·m⁻² 内

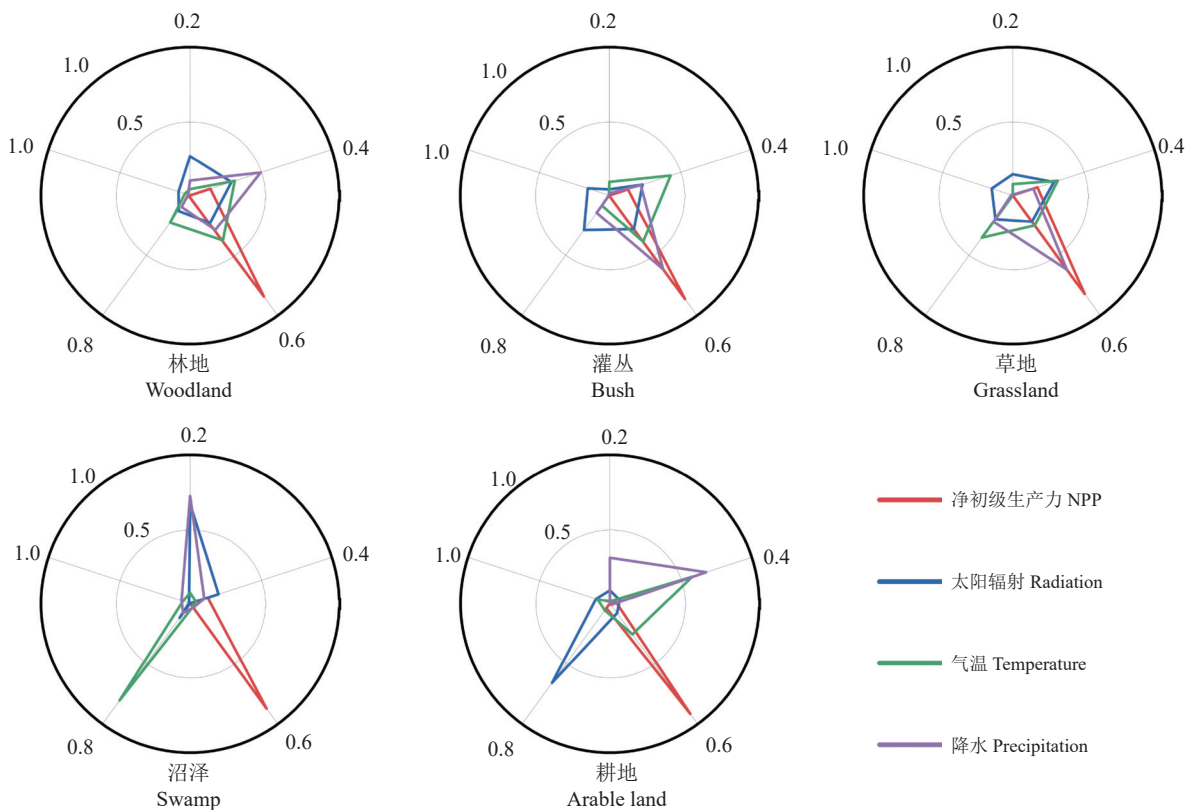


图 8 不同植被类型下 NPP 和各因子的趋势分布

Figure 8 Trend distribution of net primary production (NPP) and factors under different land use types

(图 2)。出现这些差异主要是由于获取机理的不同导致。MOD17A3H 系列 NPP 数据集侧重于地表 NPP 的反馈,受地物类型影响大,而作为 NPP 光能利用率反演模型的 CASA 模型是以遥感数据 NDVI 为驱动因子,结合主要驱动因子(气温、降水、太阳辐射等),在遥感数据的基础上对 NPP 值进行反演。结合以上两种 NPP 数据源获取机理的不同^[10],本研究认为出现的数值上的和整体变化趋势的较小差异是正常的,也从侧面印证所用 CASA 模型反演的 NPP 数据集的可靠性。

4.2 甘南藏族自治州植被 NPP 时空变化及重心迁移

基于 CASA 模型估算甘南藏族自治州植被 NPP,发现在 2000—2019 年间甘南藏族自治州植被 NPP 整体呈稳定增长趋势,表现出明显的时间分布上的差异。其中 2000—2002 年、2003—2008 年、2011—2015 年、2018—2019 年呈增长趋势,2002—2003 年、2008—2011 年、2015—2018 年呈现出下降趋势。相关政策资料显示:2003 年以来我国开始实行退耕还林还草政策,同年甘肃、四川等 8 个省(区)开始推行

退牧还草计划^[21];甘肃省在 2005 年继续推进退牧还草工程实施;2011—2015 年间,中央每年在内蒙、宁夏、甘肃等 8 个省(区)拨款以推进草原生态保护补助奖励政策。对比本研究分析结果,这些政策实施的时间节点 2003 年、2005 年、2011—2015 年内甘南藏族自治州 NPP 都处于明显的增长趋势。研究认为表现为增长和下降趋势的年份分布的差异性主要是由于降水、气温和太阳辐射的时滞效应造成^[22]。这与叶许春等^[13]对气候因子时滞性效应的研究结论是一致的,不同降水量、气温、太阳辐射对年际 NPP 变化均会产生滞后性的表现。适宜的降水量、气温和太阳辐射对随后时间内 NPP 的累积有决定性作用。

从 NPP 变化趋势和变化率的空间分布上看,出现明显增加或减少的年份和地区更值得关注。研究发现仅有不到 2% 的区域出现植被 NPP 激增以林地为主,仅有极少区域 NPP 呈明显退化。出现 NPP 下降趋势的区域或因此时间节点前段时间内地区极端气候的滞后性表现导致。值得关注的是,由于不同植被类型气候的时滞效应程度不同,处于高寒地区的卓尼县和迭部县交界处、碌曲县中部偏南区

域、舟曲县西北边界区域的 NPP 变化趋势和变化率尤为明显,其区域内的植被类型主要以灌丛和草地为主。从地方政策落实程度角度来看,这些表现为稳定增长趋势的地区反映出政府政策落实有效,植被质量状况发展良好。

重心理论在众多领域被广泛应用^[17-18],本研究通过构建 NPP 重心,将研究区内 2000—2019 年年均 NPP 重心和逐年 NPP 重心以 10 年尺度分段,探究甘南藏族自治州近 20 年植被 NPP 重心迁移规律和甘南藏族自治州 NPP 的空间分异性。甘南藏族自治州 NPP 重心迁移方向及幅度的不同说明了在此期间地区间植被长势的差异,可以得出西北部植被长势不如东南部,或因近 20 年内气候变化、人类活动、政策实效不同所导致。

4.3 甘南藏族自治州植被 NPP 与各因子间的响应关系

近年来众多专家学者对 NPP 与各影响因子(NDVI、辐射、气温、降水)的相关性和潜在的响应机制研究分析^[23-24]。本研究发现,2000—2019 年间甘南藏族自治州植被 NPP 与 NDVI、辐射、气温、降水间均存在明显的相关关系,且相关关系在空间上有明显差异。结果显示绝大部分地区上植被 NPP 与四者之间显著正相关,而 Zhang^[23] 研究显示, NPP 与降水负相关,这种差异可能是由于地域和植被类型不同导致。仅有少数地区呈负相关关系且并不显著,呈负相关关系的区域有着植被稀疏、高海拔的共同特征。光热条件和水分状况对 NPP 的影响占据主导地位,高海拔对植物产生的胁迫作用或是造成负相关的主要原因^[25]。在本研究中, NPP 与降水和太阳辐射显示出较高的相关性,对研究区特征分析后得出区域高海拔特点和独特植被覆盖特质是导致差异的主要因素。区域特征往往是影响研究结果的决定因素^[26],目前以生态指标为基础的气候模型很难具有区域普适性,在之后的研究中会聚焦此问题。

研究期间人口增长导致农田和建设用地增加,林地减少。随着人口和粮食消费的增加,土地资源变得有限,通过化肥、机械和农用化学品等生产要素的投资,土地利用资源利用效率得到提高,单位面积内植被 NPP 也得到了提高,在此背景下分别研究不同植被类型下 NPP 和各因子的变化和响应十

分必要^[27]。本研究将研究区划分为林地、灌丛、草原、湿地、耕地 5 种类型后,分别探究 NPP 和各驱动因子在不同利用类型下的变化和响应机制后发现:辐射在不同植被类型下变化趋势大致相同,气温在不同植被类型下差异明显,或与不同植被的蒸腾作用和呼吸作用的不同有关; NPP 在不同植被类型下的差异相对较小,稳定维持在 $575\sim 650\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。以上结论与贾俊鹤^[28]等得出的结论基本一致,并符合 NPP 与各气候因子内在相关性,且与多种气候因子共同影响着 NPP 的变化, NPP 是响应各个因子变化后的结果。在不同植被类型下对 NPP 及各个因子做归一化趋势分析后发现:在林地、灌丛、草原植被类型上, NPP 高度集中在中度增长趋势的区间($0.4\sim 0.6$),其他因子趋势分布差异并不明显,在各个趋势区间上分布相对均匀而湿地区域内各因子趋势分布差异较大。与相关研究结论^[18]不同的是,本研究中降雨在不同土地类型下变化分布差异相对明显,可能是植被类型不同导致^[21]。对于趋势分布差异较大的区域因地制宜地丰富植被种类,实行适宜的生态恢复计划是植被活动增加的主要驱动力^[17]。

5 结论

本研究基于 MODIS 遥感数据、气象站点数据、植被类型数据等,采用 CASA 模型反演 2000—2019 年甘南藏族自治州植被 NPP,反演结果得到 MOD13A 系列 NPP 数据集的验证。获得如下主要结果:

1) 2000—2019 年甘南藏族自治州植被 NPP 年均值为 $621.79\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,平均 NPP 变化率为 $2.38\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$,超过 80% 的区域处于 $450\sim 750\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 水平。

2) NPP 重心迁移呈由东向西、从北到南跳动的趋势,研究区东部植被 NPP 增速远超西部; 2010—2019 年 NPP 重心迁移幅度较 2000—2009 年相比更大,跳跃更为明显。

3) 研究区内植被 NPP 与各因子大体呈现明显的正相关关系,仅有极少区域呈负相关关系;辐射和气温对 NPP 的影响占据主导地位。林地、灌丛、草地 NPP 与各因子均呈稳定增长趋势且趋势分布差异不明显,湿地类型下气温处于明显增长趋势区间,降水和辐射处于低增长率区间, NPP 呈平稳增长趋势。整体表明甘南藏族自治州所实施的生态保护政策效果良好。

参考文献 References:

- [1] GUO B, YANG F, HAN B, FAN Y W, CHEN S T, YANG W N, JIANG L. A model for the rapid monitoring of soil salinization in the Yellow River Delta using Landsat 8 OLI imagery based on VI-SI feature space. *Remote Sensing Letters*, 2019, 10(8): 796-805.
- [2] CLARK D A, BROWN S, KICKLIGHTER D W, CHAMBERS J Q, THOMLINSON J R, NI J. Measuring net primary production in forests: Concepts and field methods. *Ecological Applications*, 2001, 11(2): 356-370.
- [3] 李高飞, 任海, 李岩, 柳江. 植被净第一性生产力研究回顾与发展趋势. *生态科学*, 2003(4): 360-365.
LI G F, REN H, LI Y, LIU J. Review and tendency of net primary productivity study. *Ecologic Science*, 2003(4): 360-365.
- [4] 周平, 武威, 王瑞, 刘涛, 孙成明. 不同草地NPP估算模型对中国草地的模拟计算分析. *草业科学*, 2018, 35(10): 2381-2388.
ZHOU P, WU W, WANG R, LIU T, SUN C M. Analysis of grassland simulation using different estimation models of grassland net primary productivity in China. *Pratacultural Science*, 2018, 35(10): 2381-2388.
- [5] 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.
ZHU W Q, CHEN Y H, XU D, LI J. Advances in terrestrial net primary productivity (NPP) estimation models. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24 (3): 296-300.
- [6] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用CASA模型估算我国植被净第一性生产力. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 603-608.
PIAO S L, FANG J Y, GUO Q H. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(5): 603-608.
- [7] 张美玲, 蒋文兰, 陈全功, 柳小妮. 基于CSCS改进CASA模型的中国草地净初级生产力模拟. *中国沙漠*, 2014, 34(4): 1150-1160.
ZHANG M L, JIANG W L, CHEN Q G, LIU X N. Estimation of grassland net primary production in China improved CASA model based on the CSCS. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(4): 1150-1160.
- [8] 许静, 陈迪, 李文龙, 魏巍. 基于光能利用率模型的甘南州植被净初级生产力研究. *草业科学*, 2019, 36(10): 2455-2465.
XU J, CHEN D, LI W L, WEI W. Study of vegetation net primary productivity in Gannan based on light use efficiency model. *Pratacultural Science*, 2019, 36(10): 2455-2465.
- [9] 刘铮, 杨金贵, 马理辉, 柯增鸣, 胡宇美, 岩晓莹. 黄土高原草地净初级生产力时空趋势及其驱动因素. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 113-122.
LIU Z, YANG J G, MA L H, KE Z M, HU Y M, YAN X Y. Spatial-temporal trend of grassland net primary production and their driving factors in the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1): 113-122.
- [10] 徐雨晴, 肖凤劲, 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. *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. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(14): 4710-4723.
- [11] 张月, 袁泉, 房磊, 韩艳刚, 朱琪, 齐麟, 周旺明, 周莉, 于大炮. 长白山自然保护区高海拔云冷杉林净初级生产力时空格局及其驱动因子. *生态学杂志*, 2021, 40(11): 3483-3492.
ZHANG Y, YUAN Q, FANG L, HAN Y G, ZHU Q, QI L, ZHOU W M, YU D P. Spatiotemporal variation of net primary productivity of spruce-fir forest at high altitudes and the driving forces in Changbai Mountain Nature Reserve. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(11): 3483-3492.
- [12] XIONG Q L, XIAO Y, LIANG P H, LI L J, ZHANG L, LI T, PAN K W, LIU C G. Trends in climate change and human interventions indicate grassland productivity on the Qinghai-Tibetan Plateau from 1980 to 2015. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 108010.
- [13] 叶许春, 杨晓霞, 刘福红, 吴娟, 刘佳. 长江流域陆地植被总初级生产力时空变化特征及气候驱动因子分析. *生态学报*, 2021, 41(17): 6949-6959.
YE X C, YANG X X, LIU F H, WU J, LIU J. Spatio-temporal variations of land vegetation gross primary production in the Yangtze River Basin and correlation with meteorological factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(17): 6949-6959.
- [14] 同琳静, 刘洋洋, 王倩, 杨悦, 李建龙. 西北植被净初级生产力时空变化及其驱动因素. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 367-374.
TONG L J, LIU Y Y, WANG Q, YANG Y, LI J L. Spatial and temporal dynamic of net primary productivity and its driving factors in northwest China. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(4): 367-374.
- [15] 朱莹莹, 韩磊, 赵永华, 奥勇, 李军军, 许凯波, 刘冰, 葛媛媛. 中国西北地区NPP模拟及其时空格局. *生态学杂志*, 2019, 38(6): 1861-1871.

- ZHU Y Y, HAN L, ZHAO Y H, AO Y, LI J J, XU K B, LIU B, GE Y Y. Simulation and spatio-temporal pattern of vegetation NPP in northwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(6): 1861-1871.
- [16] 王莺, 夏文韬, 梁天刚, 王超. 基于MODIS植被指数的甘南草地净初级生产力时空变化研究. *草业学报*, 2010, 19(1): 201-210.
WANG Y, XIA W T, LIANG T G, WANG C. Spatial and temporal dynamic changes of net primary product based on MODIS vegetation index in Gannan grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(1): 201-210.
- [17] 赵晶, 冯健, 王洋. 西安新石器时代聚落遗址文化重心迁移与环境考古研究. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(5): 87-93.
ZHAO J, FENG J, WANG Y. Research on the cultural gravity migration and environmental archaeology of Xi'an Neolithic settlement sites. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(5): 87-93.
- [18] ABULA K, ABULA B. An analysis of gravity model based on the impact of China's agricultural exports: A case study of western and Central Asia along the economic corridor. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 2021, 71(6): 432-442.
- [19] 何国兴, 柳小妮, 张德罡, 杜月红, 李强, 刘志刚, 关文昊, 杨军银, 韩天虎, 孙斌, 潘冬荣. 甘肃省草地NPP时空变化及对气候因子的响应. *草地学报*, 2021, 29(4): 788-797.
HE G X, LIU X N, ZHANG D G, DU Y H, LI Q, LIU Z G, GUAN W H, YANG J Y, HAN T H, SUN B, PAN D R. Spatio-temporal variation of NPP and its response to climate factors in grassland, Gansu Province. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(4): 788-797.
- [20] 刘洁, 孟宝平, 葛静, 高金龙, 殷建鹏, 侯蒙京, 冯琦胜, 梁天刚. 基于CASA模型和MODIS数据的甘南草地NPP时空动态变化研究. *草业学报*, 2019, 28(6): 19-32.
LIU J, MENG B P, GE J, GAO J L, YIN J P, HOU M J, FENG Q S, LIANG T G. Spatio-temporal dynamic changes of grassland NPP in Gannan Prefecture, as determined by the CASA model. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(6): 19-32.
- [21] 李胜连, 张丽颖, 王宪明. 退牧还草“完善政策”效应评价与西部地区畜牧业转型发展的政策探析. *家畜生态学报*, 2020, 41(6): 69-73.
LI L S, ZHANG L Y, WANG X M. Evaluation on the effects of improving policies on returning grazing land to grassland and policy analysis on strengthening the transformation and development of modern animal husbandry in western China. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2020, 41(6): 69-73.
- [22] 段艺芳, 任志远, 孙艺杰. 陕北黄土高原植被生态系统水分利用效率气候时滞效应. *生态学报*, 2020, 40(10): 3408-3419.
DUAN Y F, REN Z Y, SUN Y J. Time-lay effects of climate on water use efficiency in the Loess Plateau of northern Shaanxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10): 3408-3419.
- [23] ZHANG L F, YAN H W, QIU L S, CAO S P, HE Y, PANG G J. Spatial and temporal analyses of vegetation changes at multiple time scales in the Qilian Mountains. *Remote Sensing*, 2021, 13(24): 5046.
- [24] HE Y, YAN H W, MA L, ZHANG L F, QIU L S, YANG S W. Spatiotemporal dynamics of the vegetation in Ningxia, China using MODIS imagery. *Frontiers of Earth Science*, 2020, 14: 221-235.
- [25] 潘竟虎, 黄克军, 李真. 2001—2010年疏勒河流域植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系. *生态学报*, 2017, 37(6): 1888-1899.
PAN J H, HUANG K J, LI Z. Spatio-temporal variation in vegetation net primary productivity and its relationship with climatic factors in the Shule River basin from 2001 to 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(6): 1888-1899.
- [26] 邱丽莎, 何毅, 张立峰, 王文辉, 唐源蔚. 祁连山MODIS LST时空变化特征及影响因素分析. *干旱区地理*, 2020, 43(3): 726-737.
QIU L S, HE Y, ZHANG L F, WANG W H, TANG Y W. Spatiotemporal variation characteristics and influence factors of MODIS LST in Qilian Mountains. *Arid Land Geography*, 2020, 43(3): 726-737.
- [27] WEI X, YANG J, LUO P. Assessment of the variation and influencing factors of vegetation NPP and carbon sink capacity under different natural conditions. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108834.
- [28] 贾俊鹤. 气候变化与人类活动对西北地区植被NPP不同时间尺度变化影响的相对重要性. 南京: 南京师范大学硕士学位论文, 2018.
JIA J H. The relative importance of climate change and human activities on the change of vegetation NPP at different time scales in northwest China. Master Thesis. Nanjing: Nanjing Normal University, 2018.

(责任编辑 王芳)