

文章编号: 1004-4353(2023)04-0378-07

# 吉林省植被 NPP 的动态演变及其与气候因子的相关性

刘山林, 李春景

( 延边大学 地理与海洋科学学院, 吉林 延吉 133002 )

**摘要:** 根据吉林省的 MOD17A3 数据,采用趋势分析和相关性分析等方法研究了 2000—2021 年吉林省植被净初级生产力(NPP)的动态演变特征及其与气候因子的相关性,并采用重标极差(R/S)分析方法预测了吉林省植被 NPP 的未来变化趋势.研究表明:在时间尺度上,2000—2021 年吉林省植被 NPP 的年际变化呈缓慢波动性增长趋势,不同土地覆盖类型的年均植被 NPP 存在明显的差异,其中森林最高( $626.95 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ),裸地最低( $170.85 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ );在空间格局上,植被 NPP 由吉林省西北部向东南部呈逐渐递增趋势,且整体变化趋势以增加为主,其中呈极显著增加和显著增加趋势的区域占吉林省总面积的 45.41%;Hurst 指数小于 0.5 的区域占吉林省总面积的 61.15%,植被 NPP 的未来变化以反持续特征为主;植被 NPP 与太阳辐射、降水量之间的相关关系大于其与温度的相关关系.该研究可为吉林省的生态管理和保护提供参考.

**关键词:** 植被净初级生产力; MOD17A3 数据; 动态演变; Hurst 指数; 气候因子

**中图分类号:** K903

**文献标志码:** A

## Dynamic evolution of vegetation NPP and its relationship with climatic factors in Jilin Province

LIU Shanlin, LI Chunjing

( College of Geography and Ocean Sciences, Yanbian University, Yanji 133002, China )

**Abstract:** Based on MOD17A3 data of Jilin Province, the dynamic evolution characteristics of vegetation net primary productivity (NPP) and its correlation with climate factors during 2000–2021 were studied by trend analysis and correlation analysis, and the future change trend of vegetation NPP in Jilin Province was predicted by using R/S analysis. The results show that the interannual variation of vegetation NPP in Jilin Province from 2000 to 2021 presents a slow and fluctuating growth, in terms of time scale and the average annual vegetation NPP of different land cover types is significantly different, among which forest is the highest ( $626.95 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ) and bare land is the lowest ( $170.85 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ). In terms of spatial pattern, vegetation NPP gradually increased from the northwest to the southeast of Jilin Province, and the overall change trend was mainly increase, and the areas with extremely significant increase and significant increase trend accounted for 45.41% of the total area of Jilin Province. The area with Hurst index less than 0.5 accounted for 61.15% of the total area of Jilin Province, and the future change of vegetation NPP was mainly characterized by anti-persistence. The correlation between vegetation NPP and solar radiation and precipitation is greater than that between vegetation NPP and temperature. The results can provide references for ecological management and protection in Jilin Province.

**收稿日期:** 2023-06-22

**基金项目:** 中国科学院东北地理与农业生态研究所项目(413090011)

**第一作者:** 刘山林(1998—),男,硕士研究生,研究方向为自然地理学.

**通信作者:** 李春景(1966—),女(朝鲜族),博士,副教授,研究方向为自然地理学.

**Keywords:** net primary productivity; MOD17A3data; dynamic evolution; Hurst index; climatic factor

## 0 引言

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是指单位面积的绿色植物在单位时间内通过光合作用产生的有机干物质总量在扣除自养呼吸所消耗的能量后所剩余的部分<sup>[1]</sup>,它能够表征陆地植被系统的整体生态质量<sup>[2]</sup>.近年来,已有学者对吉林省的植被 NPP 进行了研究.例如:罗玲等<sup>[3]</sup>利用 2000—2006 年 MOD17A3 数据集的年均植被 NPP 数据对吉林省西部草地生长的主要影响因素进行了研究;汤洁等<sup>[4]</sup>利用 CASA 模型和土壤微生物呼吸模型计算了 2001—2010 年吉林省西部的陆地植被 NPP 和土壤微生物呼吸 RH;刘舒<sup>[5]</sup>对 2000—2016 年吉林省西部的湿地面积及其 NPP 的时空动态变化规律进行了研究.但是,目前相关研究大多针对的是吉林省的局部区域,且对植被 NPP 未来发展变化趋势的预测以及不同土地覆盖类型的植被 NPP 与气候因子的相关性研究得较少,因此本文将研究 2000—2021 年吉林省植被 NPP 的动态演变,并在此基础上分析不同土地覆盖类型的植被 NPP 与气候因子的相关性以及植被 NPP 未来发展的变化趋势,以期对吉林省植被生态环境的评价和保护提供参考.

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

吉林省位于中纬度欧亚大陆的东侧(40°50′~46°19′N, 121°38′~131°19′E),面积为 18.74 万 km<sup>2</sup>.气候从东南部向西北部由湿润气候逐渐过渡到半湿润气候和半干旱气候;地势东南高、西北低;东部地区主要为典型的山地森林植被,中部地区主要为森林草原过渡带,西部主要为草甸草原植被<sup>[6]</sup>.图 1 为研究区的概况图.

### 1.2 数据来源

本研究采用的数据主要包括 NPP 数据、气象数据、土地覆盖数据. NPP 数据来自美国国家航空航天局(NASA)的 MOD17A3 数据(<https://lpdaac.usgs.gov>),时间分辨率为 1 a,空间分辨率为 500 m. 气温、降水数据集来自国家青藏高原科

学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>)的中国 1 km 分辨率逐月平均气温数据集和中国 1 km 逐月降水量数据集<sup>[7]</sup>;太阳辐射数据来自 Terra Climate 气象数据集(<https://www.climatologylab.org/>);土地覆盖数据来自武汉大学杨杰和黄昕团队发布的 1985—2021 中国逐年土地覆盖数据集(<https://www.zenodo.org/>)<sup>[8]</sup>. 为避免因空间分辨率和坐标系等不同而在后续处理数据时产生误差,本文将所有数据统一投影至 WGS84/Albers 坐标系,并将其分辨率设置为 500 m.

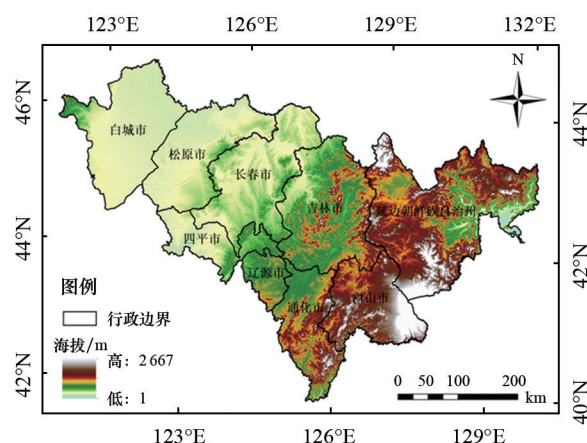


图 1 研究区概况图

## 2 研究方法

### 2.1 趋势分析法

趋势分析法是一种对时间变量进行线性回归分析的方法<sup>[9]</sup>.由于该方法可以综合表征一定时间序列内区域格局的演变规律,因此其可用于衡量植被 NPP 的变化情况.趋势分析法的表达式为:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times M_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n M_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}.$$

式中:  $\theta_{\text{slope}}$  为趋势线斜率,即 NPP 的年际变化速率;  $M_i$  是第  $i$  年的 NPP 值;  $i$  为年变量;  $n$  ( $n=22$ ) 为监测年数.当  $\theta_{\text{slope}} > 0$  时,表示植被 NPP 呈增加趋势;反之则呈减少趋势.植被 NPP 变化趋势的显著性由 F 检验来判断.本文根据 F 检验结果,将变化趋势分为以下级别:极显著减少( $\theta_{\text{slope}} < 0$ ,  $P < 0.01$ )、显著减少( $\theta_{\text{slope}} < 0$ ,  $0.01 < P < 0.05$ )、

不显著减少( $\theta_{\text{slope}} < 0, P > 0.05$ )、不显著增加( $\theta_{\text{slope}} > 0, P > 0.05$ )、显著增加( $\theta_{\text{slope}} > 0, 0.01 < P < 0.05$ )、极显著增加( $\theta_{\text{slope}} > 0, P < 0.01$ )。

## 2.2 重标极差(R/S)分析法

重标极差分析法是一种定量描述数据在时间序列内其持续性特征的方法,它能够反映出时间序列的长期变化情况(通过计算 Hurst 指数)<sup>[10]</sup>。Hurst 指数( $H$ )的取值区间为 $[0, 1]$ : ①当 $0.5 < H < 1$ 时,表示序列的过去与未来变化一致,且 $H$ 越高表示序列的持续性越强。② $H = 0.5$ 时,表示在任意时间条件下,序列(此时为随机序列)的未来发展趋势与过去没有任何相关性。③ $0 < H < 0.5$ 时,表示序列为反持续性变化,且 $H$ 值越小,序列的反持续性越强。

## 2.3 相关系数

由于相关系数可以直观地反映出各要素之间的相互影响程度,因此本文通过计算气候因子与植被 NPP 变化的相关系数来分析其相关性。相关系数的计算公式<sup>[11]</sup>为:

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

式中: $R_{xy}$ 为变量 $x$ 、 $y$ 之间的相关系数; $x_i$ 、 $y_i$ 分别为第 $i$ 年的 NPP 值和气象数据(气温、降水、太阳辐射的数据); $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别表示 NPP 年平均值及相应的气候要素平均值; $i$ 为年变量; $n$  ( $n = 22$ )为研究年数。相关系数的显著性由 T 检验来判断。本文根据 T 检验的结果,将相关性划分为 5 个等级:极显著负相关( $R_{xy} < 0, P < 0.01$ )、显著负相关( $R_{xy} < 0, P < 0.05$ )、不显著相关( $P > 0.05$ )、显著正相关( $R_{xy} > 0, P < 0.05$ )、极显著正相关( $R_{xy} > 0, P < 0.01$ )。

## 3 植被 NPP 的时空动态演变特征

### 3.1 植被 NPP 的时间变化特征

图 2 为 2000—2021 年吉林省植被 NPP 的年际变化情况。由图 2 可以看出:2000—2021 年吉林省植被 NPP 的最大值和平均值都出现缓慢波动性的增长趋势,年均植被 NPP 在  $351.71 \sim 497.66 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  范围内。其中:峰值出现在

2014、2017、2019 年,分别达到  $1098.00$ 、 $1101.00$ 、 $1100.10 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;谷值出现在 2010、2016、2018 年,分别达到  $871.04$ 、 $961.21$ 、 $996.24 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

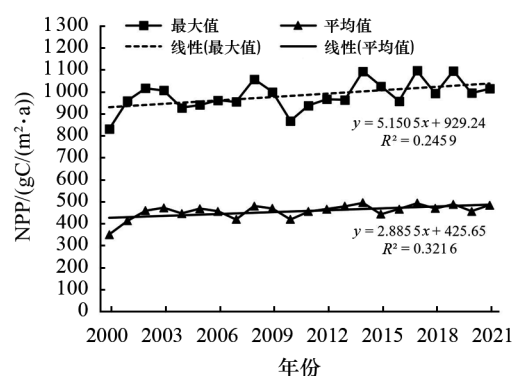


图 2 2000—2021 年吉林省植被 NPP 的年际变化

图 3 为 2000—2021 年吉林省不同土地覆盖类型的植被 NPP 年际变化情况。由图 3 可以看出,2000—2021 年吉林省不同土地覆盖类型的植被 NPP 都出现了缓慢波动性的增长趋势,但不同土地覆盖类型的植被 NPP 值差异较大。其中:森林的植被 NPP 值变化范围为  $495.03 \sim 685.24 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,其年均值为  $626.95 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (最高);耕地和湿地的植被 NPP 值变化范围分别为  $244.81 \sim 382.57 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和  $219.55 \sim 372.17 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,其年均值分别为  $339.87 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和  $317.19 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;草地的植被 NPP 值变化范围为  $162.29 \sim 329.11 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,其年均值为  $243.44 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ;裸地的植被 NPP 值变化范围为  $104.10 \sim 233.30 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,其年均值为  $170.85 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

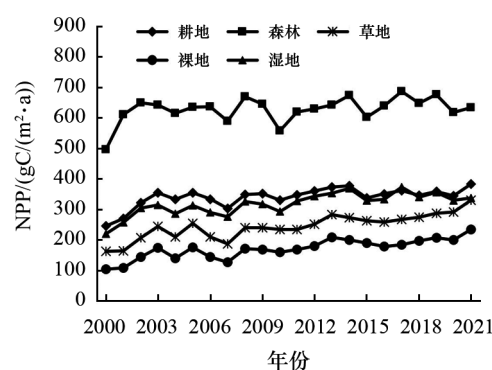


图 3 不同土地覆盖类型植被 NPP 的年际变化

### 3.2 植被 NPP 的空间变化特征

#### 3.2.1 植被 NPP 年均值的空间分布格局





续减少的趋势. 植被 NPP 呈持续显著和持续极显著增加的区域分别占吉林省总面积的 6.47% 和 11.63%, 主要分布在松原市、长春市西部、四平市

中西部等地区. 这表明, 该区域的植被 NPP 在未来会呈持续增加的趋势.

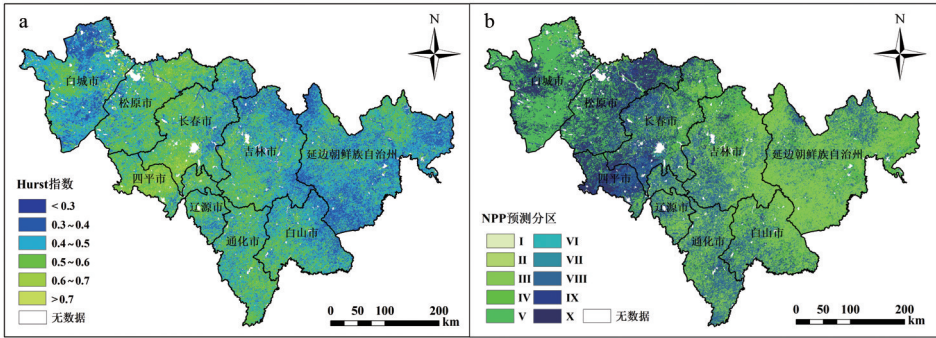


图 7 吉林省植被 NPP 的 Hurst 指数分布(a)和未来变化趋势的预测结果(b)

表 1 吉林省植被 NPP 的未来变化趋势

Hurst 指数	判断依据	植被 NPP 未来变化的预测结果	面积占比/%
$0 < H < 0.5$	$\theta_{slope} < 0; P < 0.01$	I 反持续极显著减少	0.05
$0 < H < 0.5$	$\theta_{slope} < 0; 0.01 < P < 0.05$	II 反持续显著减少	0.03
$0 < H < 0.5$	$P > 0.05$	III 反持续无显著变化	33.76
$0 < H < 0.5$	$\theta_{slope} > 0; 0.01 < P < 0.05$	IV 反持续显著增加	9.11
$0 < H < 0.5$	$\theta_{slope} > 0; P < 0.01$	V 反持续极显著增加	18.21
$0.5 < H < 1$	$\theta_{slope} < 0; P < 0.01$	VI 持续极显著减少	0.26
$0.5 < H < 1$	$\theta_{slope} < 0; 0.01 < P < 0.05$	VII 持续显著减少	0.29
$0.5 < H < 1$	$P > 0.05$	VIII 持续无显著变化	20.19
$0.5 < H < 1$	$\theta_{slope} > 0; 0.01 < P < 0.05$	IX 持续显著增加	6.47
$0.5 < H < 1$	$\theta_{slope} > 0; P < 0.01$	X 持续极显著增加	11.63

5 植被 NPP 与气候因子的相关性

研究表明,气候因子对植被 NPP 的影响具有区域差异性<sup>[12-14]</sup>. 在诸多气候因子中,由于气温、降水、辐射量与植物生长的关系最为密切<sup>[15]</sup>,因此本文选取这 3 个因素来分析其对植被 NPP 的影响.

图 8 为 2000—2021 年吉林省气温、降水、太阳辐射与植被 NPP 的相关性. 由图 8(a)可以看出:植被 NPP 与气温呈不显著相关的区域占吉林省总面积的 88.68%,呈显著正相关和极显著正相关的区域占吉林省总面积的 11.32%. 这表明吉林省大部分地区的植被 NPP 与气温的相关性较小. 呈显著正相关和极显著正相关的区域主要分布在延边朝鲜族自治州北部、通化东南部和白山市等地区.

由图 8(b)可以看出:植被 NPP 与降水的相关性呈极显著正相关和显著正相关的区域分别占

吉林省总面积的 22.32% 和 6.17%, 这些区域主要分布在白城市、松原市、四平市西部以及长春市和松原市的交界地区. 其原因是吉林省西部平原区为温带大陆性季风气候,蒸发量大于降水量,易形成干旱<sup>[16]</sup>. 植被 NPP 与降水量呈极显著负相关和显著负相关的区域占吉林省总面积的 0.23% 和 2.18%, 这些区域主要分布在延边朝鲜族自治州和白山市. 其原因主要是:一是吉林省东部地区夏季降雨较多,易使土壤入渗量达到阈值,进而易造成林地的根系形成厌氧环境;二是阴雨天气会降低植物的光合作用,进而会抑制植被生长<sup>[17]</sup>.

由图 8(c)可以看出:太阳辐射与植被 NPP 呈极显著正相关和显著正相关的区域占吉林省总面积的 17.33% 和 12.71%, 这些区域主要分布在延边朝鲜族自治州、白山市和通化市东南部等地区. 其主要原因是这些区域夏季的阴雨天气使得植被接受的太阳辐射量不足,从而抑制了该地区

的植被生长. 太阳辐射与植被 NPP 呈极显著负相关和显著负相关的区域占吉林省总面积的 21.73%, 这些区域主要分布在白城市和松原市等地区. 其主要原因是该地区日照充足, 且降水较少, 易造成地表干旱和植物生长缓慢. 由以上可知, 太阳辐射和降水对吉林省植被 NPP 的影响相对更为显著.

表 2 为不同土地覆盖类型的植被 NPP 与气候因子的相关性. 由表 2 可以看出: 耕地的植被 NPP 与降水呈极显著正相关和显著正相关的区域分别占耕地总面积的 36.32% 和 11.54%, 与气温呈不显著相关的区域占耕地总面积的 92.61%, 与太阳辐射呈极显著负相关和显著负相关的区域占耕地总面积的 16.88% 和 19.29%. 这表明, 耕地的植被 NPP 与降水呈正相关, 与太阳辐射呈负

相关, 但与气温的相关性较小. 森林的植被 NPP 与太阳辐射、气温呈显著正相关和极显著正相关的区域分别占森林总面积的 58.57% 和 18.78%, 这表明森林的植被 NPP 受太阳辐射的影响较大. 草地的植被 NPP 与降水呈显著正相关和极显著正相关的区域分别占草地总面积的 4.89% 和 81.89%, 与太阳辐射呈极显著和显著负相关的区域分别占草地总面积的 48.17% 和 32.83%, 这表明绝大部分草地的植被 NPP 受降水和太阳辐射的影响较大, 即与降水呈正相关、与太阳辐射呈负相关. 湿地的植被 NPP 与降水呈极显著正相关和显著正相关的区域分别占湿地总面积的 37.78% 和 6.67%, 与气温呈不显著相关的区域占湿地总面积的 89.16%, 这说明湿地的植被 NPP 受降水的影响较大.

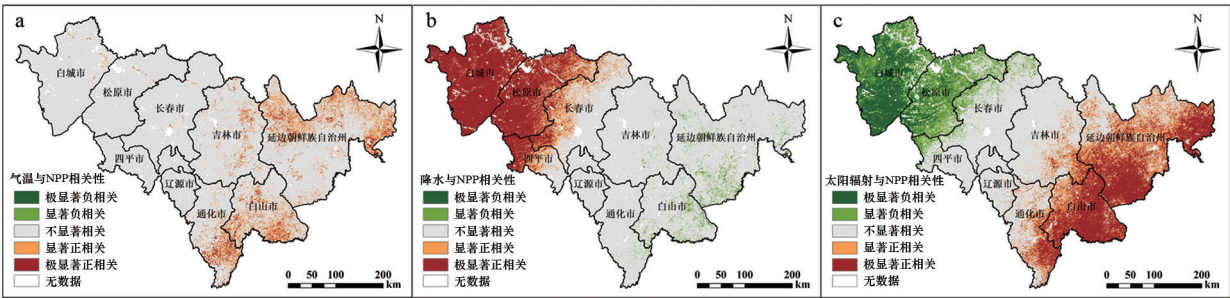


图 8 2000—2021 年吉林省气温(a)、降水(b)、太阳辐射(c)与植被 NPP 的相关性

表 2 2000—2021 年吉林省不同土地覆盖类型的植被 NPP 与气候因子的相关性

土地覆盖类型	气候因子	相关性的面积占比/%				
		极显著负相关	显著负相关	不显著相关	显著正相关	极显著正相关
耕地	气温	1.12	1.01	92.61	3.84	1.42
	降水	0.13	0.87	51.15	11.54	36.32
	太阳辐射	16.88	19.29	56.00	4.41	3.43
森林	气温	0.75	1.24	79.23	15.67	3.11
	降水	0.34	3.86	95.70	0.04	0.06
	太阳辐射	0.02	0.03	41.37	23.51	35.06
草地	气温	2.14	1.36	94.48	1.48	0.54
	降水	0.07	0.50	12.65	4.89	81.89
	太阳辐射	48.17	32.83	14.83	1.49	2.69
裸地	气温	1.73	0.04	96.18	1.92	0.13
	降水	0.56	0.03	6.12	8.24	85.06
	太阳辐射	28.31	41.68	29.95	0.03	0.03
湿地	气温	1.15	0.67	89.16	8.89	0.13
	降水	0.14	2.08	53.33	6.67	37.78
	太阳辐射	9.13	15.91	63.64	2.27	9.05

## 6 结论

对吉林省 2000—2021 年的植被 NPP 动态演变及其与气候因子的相关性等研究表明:

1) 2000—2021 年吉林省的植被 NPP 呈缓慢波动性增长趋势,其中白城市、松原市、长春市北部、吉林市北部、四平市西部等地区的增加趋势最为显著,在空间上则呈由西北向东南逐渐递增的趋势. 植被 NPP 年均值处于  $40.11 \sim 961.42 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  范围内,且不同土地覆盖类型的年均植被 NPP 存在较大差异,其中森林 > 耕地 > 湿地 > 草地 > 裸地.

2) 2000—2021 年吉林省的植被 NPP 的 Hurst 指数分布在  $0.15 \sim 0.88$  之间,其中呈反持续极显著增加和反持续显著增加的区域呈明显的分散性.

3) 2000—2021 年吉林省森林的植被 NPP 变化与太阳辐射具有较大相关性,耕地和草地的植被 NPP 变化与降水具有较大正相关性.

本文研究结果可为吉林省生态管理和保护提供参考. 本文在研究中仅在年尺度上对吉林省植被 NPP 进行了研究,而对于不同生长季的植被 NPP 变化未能进行具体分析;因此,在后续的研究中,我们将从季度和月份的角度对植被 NPP 进行分析,以期得到更为准确的研究结果.

## 参考文献:

- [1] LIETH H. Primary production: terrestrial ecosystems[J]. *Human Ecology*, 1973, 1(4): 303-332.
- [2] FIELD C B, RANDERSON J T, MALMSTROM C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 74-88.
- [3] 罗玲,王宗明,宋开山,等. 吉林省西部草地 NPP 时空特征与影响因素[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(11): 2319-2325.
- [4] 汤洁,姜毅,李昭阳,等. 基于 CASA 模型的吉林西部植被净初级生产力及植被碳汇量估测[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(4): 1-7.
- [5] 刘舒. 吉林西部湿地分布及 NPP 时空动态变化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [6] 张旭. 吉林省植被格局的遥感研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2006.
- [7] PENG S Z, DING Y X, LIU W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [8] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [9] 朱利欣,袁金国. 京津冀地区植被净初级生产力时空分布及其与地形因子的关系[J]. *科技通报*, 2019, 35(6): 197-203.
- [10] 张筠. 基于 CASA 模型的山东省植被 NPP 时空格局变化及其驱动因素研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2021.
- [11] 邵嘉豪,李晶,闫星光,等. 基于地理探测器的山西省 2000—2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(1): 312-322.
- [12] 薛梅,陈芸芝,闫敏,等. 中国东北地区植被 NPP 模拟与时空变化分析[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(6): 821-830.
- [13] 张少伟,张弓乔,惠刚盈. 内蒙古大兴安岭森林净初级生产力时空格局分析[J]. *林业科学研究*, 2019, 32(5): 74-82.
- [14] 具琳静,欧阳勋志,潘萍,等. 2000—2019 年赣南森林净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系[J]. *东北林业大学学报*, 2022, 50(12): 37-44.
- [15] 程春晓,徐宗学,王志慧,等. 2001—2010 年东北三省植被净初级生产力模拟与时空变化分析[J]. *资源科学*, 2014, 36(11): 2401-2412.
- [16] 李超. 吉林西部平原干旱特征时空演变规律及预测研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
- [17] YANG H F, HU D D, XU H, et al. Assessing the spatiotemporal variation of NPP and its response to driving factors in Anhui Province, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(2): 14915-14932.