#### DOI: 10.5846/stxb201810182256

田义超,黄远林,张强,陶进,张亚丽,黄鹄,周国清.北部湾南流江流域植被净初级生产力时空分布及其驱动因素.生态学报,2019,39(21): - . Tian Y C, Huang Y L, Zhang Q, Tao J, Zhang Y L, Huang H, Zhou G Q.Spatiotemporal distribution of net primary productivity and its driving factors in the Nanliu River basin in the Beibu Gulf.Acta Ecologica Sinica,2019,39(21): - .

## 北部湾南流江流域植被净初级生产力时空分布及其驱 动因素

田义超<sup>1,2</sup>,黄远林<sup>1,\*</sup>,张 强<sup>1</sup>,陶 进<sup>1</sup>,张亚丽<sup>1</sup>,黄 鹄<sup>2</sup>,周国清<sup>3</sup>

1 北部湾大学 资源与环境学院・海洋地理信息资源开发利用重点实验室, 钦州 535000
 2 北部湾大学 广西北部湾海洋生物多样性养护重点实验室, 钦州 535000
 3 桂林理工大学 广西空间信息与测绘重点实验室, 桂林 541004

摘要:分析北部湾南流江流域净初级生产力时空动态变化特征及其驱动机制,为该区域生态环境保护及应对气候变化提供科学 依据。基于光能利用率模型(CASA),利用遥感数据、气象数据和植被类型数据估算了研究区 2000—2015 年流域的净初级生产 力(NPP),借助于 Theil—Sen 趋势、Mann—Kendall 检验以及 Hurst 指数等数理统计方法对研究区 NPP 的时空变化特征、未来趋势及其驱动因素进行了定量化分析。结果表明:①时间尺度上,流域 NPP 总体上呈现出波动上升趋势,增速为44.03 g C/m<sup>2</sup>/10 a,快于广西自治区,上游和下游地区 NPP 快于全区,而中游地区慢于全区;②空间尺度上,流域 NPP 的分布规律表现出明显的 地域分异,中游最高(1098.99 g C/m<sup>2</sup>),下游次之(1041.71 g C/m<sup>2</sup>),而上游最小(1013.22 g C/m<sup>2</sup>)。NPP 的 Sen 趋势度介于 -77.10—74.80 g C/m<sup>2</sup>/a 之间,在空间上呈现出增加的趋势。③空间波动性上,流域 NPP 的变异系数较大,其值介于 0.01— 0.71,其中洪潮江水库、小江水库周边以及玉林市的城乡建设用地扩张区域处于高波动状态,而流域中部的六万大山以及五皇 山地带则处于低波动状态;④未来变化趋势上,流域 NPP 的 Hurst 指数范围介于 0—0.99 之间,平均值为 0.70,呈现单峰右偏分布,预示着流域 NPP 未来处于持续性增加的趋势;⑤驱动机制上,流域 NPP 与多年平均气温呈正相关关系,与年均降水量呈负 相关关系,气温是该流域植被 NPP 的主控因子。由耕地转化为建设用地所导致的 NPP 损失值最大,其值达到 4715.62 t/a,而草 地转换为建设用地导致 NPP 损失值最小,其值仅为 184.63t/a。

关键词:净初级生产力;Theil—Sen 趋势;Hurst 指数;时空变化;影响因素;北部湾南流江流域

# Spatiotemporal distribution of net primary productivity and its driving factors in the Nanliu River basin in the Beibu Gulf

TIAN Yichao<sup>1, 2</sup>, HUANG Yuanlin<sup>1, \*</sup>, ZHANG Qiang<sup>1</sup>, TAO Jin<sup>1</sup>, ZHANG Yali<sup>1</sup>, HUANG Hu<sup>2</sup>, ZHOU Guoqing<sup>3</sup>

1 College of Resources and Environment, Key Laboratory of Marine geographic information resources development and utilization in the Beibu Gulf, Beibu Gulf University, Qinzhou 535000, China

2 Guangxi Key Laboratory of Beibu Gulf Marine Biodiversity Conservation, Beibu Gulf University, Qinzhou 535000, China

3 Guangxi Key Laboratory for Geospatial Informatics and Geomatics Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

**Abstract**: By analyzing the spatiotemporal dynamic characteristics of net primary productivity and its driving mechanism in the Nanliu River basin of the Beibu Gulf, the goal of this study was to provide a scientific basis for the protection of the ecological environment and the response to climate change in the region. Based on the light energy utilization model

基金项目:广西自然科学基金联合资助培育项目(2018JJA150135);广西教育厅基金资助项目(ZD2014138);广西创新驱动发展专项 (AA18118038)广西"海洋生态环境"院士工作站能力建设(AD17129046)

收稿日期:2018-10-18; 网络出版日期:2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: huangyuanlin@ yeah.net

http://www.ecologica.cn

(CASA), the net primary productivity (NPP) of the Nanliu River basin in the Beibu Gulf from 2000 to 2015 was estimated using remote sensing data, meteorological data, and vegetation type data. The spatiotemporal variation characteristics, the future trend of NPP and its driving factors in the study area were analyzed with the aid of mathematical statistics, such as the Theil-Sen trend, Mann Kendall test, and Hurst index. The results indicated: (1) Regarding temporal variation, the annual average NPP increased with a fluctuation in the study area from 2000 to 2015, with a growth rate of 44.03 g  $C/m^2/$ 10 a, which is faster than that of the Guangxi autonomous region. The annual average NPP in the upstream and downstream of the river basin was faster than that of the entire region, whereas that in the middle reaches was slower than that of the entire region. (2) Regarding spatial distribution, the distribution law of NPP showed obvious regional differentiation, with the net primary productivity of vegetation in the middle reaches being the highest (1098.99 g C/m<sup>2</sup>), followed by that downstream (1041.71 g C/m<sup>2</sup>), and that upstream smallest (1013.22 g C/m<sup>2</sup>). The Sen trend of NPP was from -77.10 to 74.80 g C/m<sup>2</sup>, and the net primary productivity of the basin showed an increasing trend. (3) Regarding the volatility of NPP, the CV of NPP was larger, being from 0.01 to 0.39. The expansion area of urban and rural construction land around the Hongchao River reservoir, Xiaojiang reservoir, and Yulin City was in a state of high fluctuation, whereas the Liuwandashan mountain in the middle of the basin and in the the Wuhuang mountain belt were in a state of low fluctuation. (4) Regarding the future trend of NPP, the NPP value of the Hurst index was from 0 to 0.99, with a mean of 0.70, and it presented a right unimodal distribution, which indicated that the overall NPP would take on a continuously increasing trend in the future. (5) Regarding the driving mechanism, the watershed NPP had a significant positive correlation with the annual average precipitation, and had a non-significant negative correlation with the annual average temperature, indicating that precipitation was the main climatic factor affecting the vegetation NPP in this basin. The value of NPP loss caused by conversion from cultivated land to construction land was maximal, and its value was 4715.62 t/a. The conversion of grassland to construction land will lead to a minimum value of NPP loss, being only 184.63t/a.

Key Words: Net primary productivity; Theil-Sen trend; Hurst index; temporal and spatial variation; influencing factors; Nanliu river basin in the Beibu Gulf

全球气候变化与陆地生态系统响应(GCTE)是当前全球变化研究的重要内容,有关地表植被覆盖与环境 演变的关系是全球变化中最复杂、最具活力的研究内容<sup>[1]</sup>。在全球生态系统中,植被是该系统的重要组成部 分,植被在保持水土流失、调节大气、维持气候及整个生态系统稳定等方面具有重要的作用<sup>[2]</sup>。植被净初级 生产力是表征全球气候变化和陆地生态系统响应的重要指标<sup>[3-4]</sup>,它作为陆地生态系统中物质循环与能量流 动的重要组成部分<sup>[5]</sup>,不仅反映植物群落在自然环境和生态系统中的生产能力,也是判定生态系统的碳源、 碳汇和评价陆地调节生态系统生态过程的主要因子<sup>[6]</sup>。因此,始于 1987 年的国际地圈—生物圈计划 (IGBP)<sup>[7]</sup>、全球变化与陆地生态系统(GCTE)<sup>[8]</sup>和全球碳项目(GCP)<sup>[9]</sup>都将植被净初级生产力的研究作为 其核心研究内容之一。通过对历史时期不同地域的植被净初级生产力时空变化进行动态监测,可以理清区域 维汇时空变化情况,这对于理解全球气候变化对陆地生态系统植被变化过程的作用机制,掌握研究区域碳源

早期在进行区域净初级生产力监测时,主要依靠传统的站点实测方法,该方法观测效率低,难以在大尺度 上进行推广,因此采用模型模拟 NPP 成为一种可行且广为接受的研究方法。自 1876 年 Ebermayer 开始对净 初级生产力的模型进行研究之后<sup>[10]</sup>,国内外学者和专家提出了众多的计算和观测 NPP 的研究方法,并在模 型模拟方面取得了一系列可喜的成果,推动了净初级生产力模型及其模拟方法的进一步发展。目前,用于估 算净初级生产力的模型大体上可分为气候相关统计模型<sup>[11]</sup>,生态系统生态过程模型<sup>[12,13]</sup>和光能利用模型 CASA (Carnegie Ames Stanford Approach)<sup>[14]</sup>等。CASA 模型是光能利用率模型的一种,该模型利用光合有效 辐射和光能利用率两个参数来估算区域的净初级生产力,同时引入最适温度、水分利用效率等光合作用胁迫 因子,比较适用于区域或者大尺度上的 NPP 时空动态监测与分析,甚至在全球尺度上的 NPP 时空动态监测 方面得到了广泛的应用。国内很多学者应用 CASA 模型对 NPP 时空变化特征及其对气候变化的响应进行了 定量研究,部分学者如朴世龙等<sup>[15]</sup>、朱文泉等<sup>[16]</sup>、周广胜等<sup>[17]</sup>、穆少杰等<sup>[18]</sup>基于 CASA 模型或改进的 CASA 模型对中国以及 NPP 的时空分布特征开展了大量的研究工作。从研究的空间尺度来看,国内的 NPP 研究集 中在全国以及东北、华北等区域,研究尺度多为省域、县域以及乡镇等行政区单元<sup>[19]</sup>,已有的流域尺度上净初 级生产力的研究成果也主要集中于北方典型流域,如黄河流域<sup>[20]</sup>、黑河流域<sup>[21]</sup>等。然而,对中国南亚热带独 流入海河流自 20 世纪初期以来净初级生产力的演变规律、空间差异特征及其对气候变化和人类活动的响应 认识比较薄弱。

南流江流域,位于广西壮族自治区东南部,是广西独流入海第一大河,发源于玉林市北流市大容山南侧, 自北向南流经北流、玉东、玉州、福绵、博白,是玉林的母亲河。近年来,由于玉林市及其周边市政府对流域的 生态环境保护工作重视不够,导致流域电厂、工业园区以及采矿场侵占流域中的自然保护区的现象时有发生, 滥砍乱伐导致区域的水土流失严重,致使河流水质下降,目前针对该流域的生态环境缺乏定量化评估,已有研 究关于生态环境的定量化评估多以定性分析为主,而关于南亚热带独流入海河流 NPP 时空变化规律、气候变 化对植被的主控因素以及人类活动通过改造地表土地覆被类型继而影响到流域 NPP 受化等方面的研究成果 较少。另外,由于南流江流域地貌类型多样,山地丘陵地貌分布于上游、河谷平原地貌分布于中游,而下游则 以滨海湿地地貌为主,在如此复杂的陆海交错地貌区如何定量识别气候变化和人类活动对植被净初级生产力 的影响,在国际上不但缺少相关数据支持,更缺少方法技术上的经验和贡献。鉴于此,本研究以北部湾南流江 流域为研究对象,基于光能利用率模型,利用遥感、气象和植被类型等数据估算了南流江流域 2000—2015 年 的净初级生产力,借助于 Theil—Sen 趋势、Mann—Kendall 检验以及 Hurst 指数等数理统计方法对研究区 NPP 的时空变化特征、未来趋势及其驱动力因素进行了定量分析。本研究不仅意义重大,同时可为南流江流域新 时期水土保持工作,生态环境建设以及流域生态系统可持续性管理等工作的开展提供数据支撑和理论依据。

## 1 研究区概况

选择北部湾南流江流域为研究区,该区位于广西壮 族自治区东南部,地处北纬 21°21′—23°04′,东经 105° 47′-107°41′之间,东西长约139.22 km,南北长约155. 06.28 km, 面积 9337.26 km<sup>2</sup>。该地区气候属南亚热带 季风气候,具有亚热带向热带过渡性质的海洋季风气候 特点,气候温暖,冬短夏长,流域多年平均气温在21.5— 22.4℃,四季适宜农作物生长。均日照 1630—1800 hr, 冬季偶有轻霜,无霜期长达 320 d 以上;多年平均降水 量为1400—1760mm。南流江流域是广西独流入海第 一大河,发源于北流市大容山南侧,自北向南流,故称南 流江。流域内地势平坦,有玉林盆地、博白盆地和南流 江三角洲,土地肥沃,农业发达。在下游,南流江分流入 海,并且在出海处形成网状河系,造就了广西最大的三 角洲——南流江三角洲。三角洲地势低平,是广西重要 的稻谷、甘蔗、花生生产区,其外沿也多岛屿、滩涂,适宜 捕捞和海产养殖。



图 1 北部湾南流江流域在广西区地理位置 Fig.1 Location of the Nanliu River basin in the Beibu Gulf in Guangxi Autonomous Region

## 2 数据来源与研究方法

#### 2.1 数据来源

本研究所选用的数据包括气象、归一化指数 NDVI、植被覆被类型以及 DEM 数据。气象数据为 2000 年—2015 年研究区各个气象站点的逐日气温和逐日降水量数据,此数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (http://cdc.cma.gov.en)。净初级生产力的估算主要选择了气象因子数据(降水量、气温和太阳净辐射量)、 植被类型数据和归一化植被指数等数据。研究区植被覆被类型数据来源于全国 2000—2010 年生态环境调查 30m 分辨率的生态系统分类数据;NDVI 数据为研究区 2000—2015 年每月的 MODIS13Q1 遥感影像,来源于美 国国家宇航局(http://modis.gsfc.nasa.gov),该数据的空间分辨率为 250m,获取数据后利用 MRT(Modis Reprojection Tools)工具、ArcGIS10.2 以及 ENVI5.1 软件对下载的遥感数据进行投影变换、载剪等一系列操作, 所有空间数据统一投影为 WGS84、Albers Equal Area Conic 投影坐标系统。1:5 万 DEM 数据(http://www.gscloud.en/)来源于中国地理空间数据云,主要用于研究区流域的划定与提取,南流江流域矢量边界的确定是 通过 ArcGIS10.2 中的 Hydrology 模块进行流域边界自动提取,依据《广西水资源综合规划报告》南流江流域的 上游段以博白水文站以上的区域为集水区,中游段和下游段的集水区则以小江水文站为划分单元,下游段则 主要是地势比较平坦的南流江河口三角洲。

2.2 研究方法

2.2.1 净初级生产力估算 CASA 模型

净初级生产力作为陆地地表碳循环过程的重要组成部分,能反映出陆地生态系统的质量状况,但是直接 或全面的测量出区域或全球尺度的 NPP 是很困难的。所以利用模型估算已经成为一种重要的研究方法。目 前估算 NPP 的模型分为三类,分别为气候生产力模型、生态系统模型和光能利用率模型。CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型是一个基于过程的遥感模型<sup>[15]</sup>,耦合了生态系统生产力和土壤碳、氮通量,由网 格化的气候、辐射、土壤和遥感植被指数数据集驱动,模型在计算时主要由植被所吸收的光合有效辐射 (APAR)与光能转化率两个变量来确定。本研究在对北部湾南流江流域 2000—2015 年的陆地植被净初级生 产力进行估算时,采用的是朱文泉等改进的 CASA 光能利用率模型<sup>[18]</sup>。

## 2.2.2 Theil-Sen Median 趋势分析

该研究将 Theil-Sen 趋势分析方法与 Mann-Kendall 检验方法<sup>[22]</sup>使用到 NPP 时间序列的分析当中,可以解释植被 NPP 长期的变化的显著趋势。

Sen 趋势度( $\rho$ )计算公式为:

$$\rho = \text{median} \frac{x_j - x_i}{j - i}, 1 < i < j < n \tag{1}$$

式中: $x_j$ ,  $x_i$ 为 *NPP* 时间序列。当 $\rho$ <0 时,表示时间序列 NPP 成下降趋势,当 $\rho$ >0 时,表示时间序列呈上升趋势,通过 Mann-Kendall 方法进行显著性检验。

Mann-Kendall 检验(MK 检验)是在气象学和水文学中,比较常用的时间序列趋势检验方法之一。MK 检验能够剔除少数异常值,样本不需要遵从一定的分布,适用于非正态分布的数据。

Mann-Kendall 检验的公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{sign}(x_j - x_i)$$

$$\begin{cases} 1 & (x_i - x_i > 0) \end{cases}$$
(2)

$$\operatorname{sign}(x_{j} - x_{i}) = \begin{cases} 0 & (x_{j} - x_{i} = 0) \\ 0 & (x_{j} - x_{i} = 0) \\ -1 & (x_{i} - x_{i} < 0) \end{cases}$$
(3)

#### http://www.ecologica.cn

$$Z = \begin{cases} \frac{Q-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(Q)}} & (Q > 0) \\ 0 & (Q = 0) \\ \frac{Q+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(Q)}} & (Q < 0) \end{cases}$$
(4)

式中:Q为检验统计量;Z为标准化后的检验统计量;x<sub>j</sub>、x<sub>i</sub>为时间序列数据;n为样本数,当 n>8 时,Q 近似为 正态分布,其均值和方差计算公式为:

$$E(Q) = 0 \tag{5}$$

$$Var(Q) = \frac{n(n-1)(2n-5)}{18}$$
(6)

标准化后 Z 为标准正态分布,若|Z|>Z<sub>1-a/2</sub>,表示存在明显趋势变化。 $Z_{1-a/2}$ 为标准正态分布表在置信度 水平 a 下对应的值。本文中置信度水平 a 为 0.05,自由度为 15-2=13。根据研究区 15 年 NPP 年均值数据, 基于 Theil-Sen Median trend 和 Mann-Kendall 检验分析原理,借助于 MATLAB 软件编程实现 NPP 的逐象元栅 格计算。

2.2.3 净初级生产力 R/S 分析

英国的水文学家 Hurst<sup>[23]</sup>首先提出了 R/S 分析方法(Rescaled Range Analysis Method,重新标度极差分析法),后来该方法经过 Mandelbrot 和 Wallis 等学者的进一步修正和完善<sup>[24]</sup>,很快将其发展成为研究长时间序列数据的经典方法,目前该方法已在在水文学、经济学、气候学等领域得到了广泛的应用。不同的 Hurst 指数 H 的取值范围为 H(0<H<1),可以判断该时间序列是完全随机的或者存在趋势性成分,而趋势性成分可分为 持续性,或者是反持续性,H 一般存在以下几种情况:

(1)若 0.5<H<1,表明 NPP 时间序列具有长期相关特征,过程具有持续性;

(2) 若 H=0.5,表明 NPP 时间序列为互相独立的随机序列;

(3) 若 0<H<0.5,表明 NPP 时间序列数据具有反持续性,过去变量与未来趋势呈负相关,序列有突变跳 跃特性。H 值越接近 0,其反持续性越强;越接近 1,其持续性越强。

2.2.4 偏相关性分析

本研究采用基于象元分析的空间分析方法<sup>[25]</sup>,在 matlab19.0 软件的支持下计算 NPP 与气温和降水之间的关系,相关系数的分析公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[ (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y}) \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}}$$
(7)

式中: $R_{xy}$ 为 $x_y$ 净初级生产力与气温或者降水的相关系数; $x_i$ 为第 i 年的净初级生产力 NPP; $y_i$ 为第 i 年的多 年降水量或气温的平均值; $\bar{x}$ 为多年 NPP 的平均值; $\bar{y}$ 为多年降水量或气温的平均值;n 为研究区的 NPP 或 者气候因子的样本数。

偏相关系数计算公式如下:

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^2)(1 - R_{yz}^2)}}$$
(8)

式中: $R_{xy,z}$ 为固定自变量 z之后因变量 x 与之变量 y 的偏相关系数,偏相关系数的显著性检验一般采用 t 检验法<sup>[25]</sup>。

## 3 结果与分析

## 3.1 植被净初级生产力时间变化特征

2000—2015 年北部湾南流江流域植被 NPP 总体上呈现出上升趋势,增速为44.03 g C/m<sup>2</sup>/10 a(图 2.a), 明显快于广西自治区 2000—2011 年植被净初级生产力(全区植被 NPP 的平均增长速率 0.01g C/m<sup>2</sup>/10 a<sup>[26]</sup>),未通过显著性水平为 0.01 的检验。流域 NPP 的变化范围为 911.30—1075.44 g C/m<sup>2</sup>,平均值为 995.25 g C/m<sup>2</sup>,最大值出现在 2011 年,其值达到 1075.44 g C/m<sup>2</sup>,高出平均值 80.19 g C/m<sup>2</sup>,最小值则出现在 2006 年,低于平均值 83.95g C/m<sup>2</sup>,从整体上来看,流域植被净初级生产力呈现"波动一上升"趋势,其中 2011 年为 NPP 的变化阈值点,2011 年以前植被 NPP 呈现出上升趋势,2011 年以后则呈现下降趋势。由不同流域分区 净初级生产力(图 2.b、c、d)可知:不同分区植被 NPP 的多年平均值均呈现出波动增加的趋势,且 NPP 波动的 幅度及规律与研究区整体上的 NPP 波动规律保持一致,但是其增长的速度存在显著差异,具体来说,流域上 游和下游地区植被 NPP 快于总体,而中游地区由于植被基质较好,年内 NPP 值都保持较高趋势,增长速率慢 于全区。





3.2 植被净初级生产力空间变化特征

3.2.1 年均值分布特征及其波动性

受南流江流域地形地貌、水汽以及植被覆盖等自然因子空间格局的综合影响,北部湾南流江流域植被净 初级生产力多年均值表现出明显的地域分异规律。由图 3.a 可知:南流江流域的中游植被 NPP 最高(1098.99 g C/m<sup>2</sup>),下游次之(1041.71 g C/m<sup>2</sup>),而上游最小(1013.22 g C/m<sup>2</sup>)。受到地形和地貌多种因素的共同影响, 位于流域中游地区的六万大山地带、下游浦北县西部及其西南部五皇山地带是植被 NPP 的高值区域,由于该 区域属丘陵地貌类型,植被资源丰富,天然植被为南亚热带常绿季雨林,导致该该区域 NPP 较高,其值介于 1100—1233 g C/m<sup>2</sup>之间。位于流域中游博白县的南部地区以及流域下游灵山县的南部地区 NPP 次之,其值 范围为 900—1100 g C/m<sup>2</sup>,而玉林市的城郊地区以及流域下游的出海口的 NPP 则处于 500—700 g C/m<sup>2</sup>之 间。由于玉林市辖区和南流江三角洲合浦县受到城市化扩张等人类活动的影响较大,导致区域植被退化严 重,因此该区域植被 NPP 处于较低水平,其值为 300—500 g C/m<sup>2</sup>之间,局部地区甚至小于 300 g C/m<sup>2</sup>。综 上,流域多年 NPP 的平均值呈现出中游地区高,上游和下游地区低的空间分布格局。

7

2000—2015年植被净初级生产力的空间波动程度如图 3.b 所示,1)高波动性区域主要聚集于玉林市辖区 及其周边,南流江河口三角洲、合浦-钦州以及灵山的交错地区、浦北县与博白县过渡地区,其中玉林市辖区 周边以及南流江河口三角洲主要受到人类活动的干扰较大,而合浦-钦州以及灵山的交错地区,浦北县与博 白县过渡地区这两个片区分别为洪潮江水库以及小江水库,该地区水库周边湿地因季节性水位涨落而使周边 植被受到季节性淹没的影响,因此净初级生产力波动幅度较大;2)低波动性区域主要分布于六万大山地带以 及西南部五皇山地带,该区域植被主要与此区域的花岗岩性有关,属于典型的亚热带季风雨林植被、原始森林 等植被遍布于该区域,导致该区域净初级生产力呈现出稳定状态;3)中度波动性的 NPP 集中分布在合浦县的 低海拔地区,其次玉林市的乡郊区周边也有零星分布,该区域植被的中等波动性主要与该区域大片的农田植 被有关。总体上来看,南流江流域 NPP 的多年分布呈现出明显的空间分异规律,主要以低波动性为主,高波 动性镶嵌于低波动性周边,两个大型水库周边以及城乡建设用地扩张区域处于高波动状态,而流域的中部十 万大山地带则处于低波动状态。因此,未来应该适度加强对 NPP 高波动区域的保护和管理。



图 3 研究区 NPP 平均值及变异系数空间分布 Fig.3 Spatial distribution of average NPP and its variation coefficient in study area

## 3.2.2 NPP Sen 变化趋势及显著性检验

为了揭示北部湾南流江流域净初级生产力在过去 16 年的变化趋势及其变化过程,本研究基于 Theil— Sen 趋势以及 Mann—Kendall 检验方法,使用 ArcGIS10.2 软件对每年的 NPP 象元值进行提取,之后借助于 Matlab2013 软件对 16 年的 NPP 进行趋势分析,将趋势分析的结果与 MK 检验的结果进行叠加,可得到 NPP 增加与减少的空间分布情况,依据该方法可依次将 NPP 划分为显著减少,不显著减少,不显著增加以及显著 增加四种类别。由表 1 和图 4 可知:北部湾南流江流域 NPP 在空间上呈现出增加的趋势(增加区域的面积> 减少区域的面积),其中 NPP 轻微减少的区域所占的比重最大,其值为 46.57 %,轻微增加占 43.25%,明显增 加的区域为 8.60 %,显著减少的区域所占比重最小,其值仅为 1.58%。由图 4.a 可知,NPP 的 sen 趋势值介于 -77.10—74.80 g C/m<sup>2</sup>/a 之间,平均增长速率为 9.29 g C/m<sup>2</sup>/a。NPP 显著增加的区域主要集中在玉林市的南 部地区、浦北县的南部以及合浦县的西部地区;不显著增加的区域则主要分布于上游的河谷地区、浦北县与博 白县的交错地带,另外灵山县的东部地区也有大面积分布;不显著减少的地区则主要分布于博白县的六万大 山地区,该地区虽然植被的基质较好,植被净初级生产力的平均值较高,但是该区域的 NPP 在过去 16 年期间 则呈现出微度减少趋势;显著减少的区域则主要集中在玉林市的市辖区周边以及合浦县南流江流域的出海口 附近,其中,玉林市植被净初级生产力显著减少的原因主要与该地区的城市化水平有关,而南流江出海口 NPP 之所以呈现出显著减少趋势究其原因则主要与该地区植被受到大范围破坏,其植被大面积转变为虾塘 和鱼塘有关。



## 图 4 研究区净初级生产力空间变化趋势及显著性检验 Fig.4 Spatial distribution of NPP sen trend and its Mann-Kendall test in study area

## 表1 研究区净初级生产力变化趋势

Table 1	The trend	of net	primary	productivity	change	in th	e study	area
	The trend		Printing	producerry	B-		e seaay	

净初级生产力变化趋势		NZ west		
The trend of net primary productivity change		类型	面积/hm <sup>2</sup>	面积自分比/% D
Sen 趋势 Sen trend	Z value	Туре	Area	Percent
Sen 趋势小于零 Sen trend <0	Z >1.96	显著减少	2378	1.58
Sen 趋势小于零 Sen trend <0	Z ≤1.96	轻微减少	70277	46.57
Sen 趋势大于等于零 Sen trend ≥0	Z ≤1.96	轻微增加	65274	43.25
Sen 趋势大于零 Sen trend >0	Z >1.96	明显增加	12984	8.60

Sen trend: Theil-Sen 趋势;Z:显著性水平

## 3.2.3 植被净初级生产力 Hurst 指数及未来变化趋势

由图 5 可知,北部湾南流江流域净初级生产力 Hurst 的范围为 0—0.99993,平均值为 0.70,植被净初级生产力的反持续序列仅占到区域整体的 NPP 百分比为 0.3986 %,持续性序列占到区域整体的的 NPP 百分比为 99.6014 %。从图 6.b 中 NPP 的正态分布图中可知反持续性、弱反持续性、弱持续性和强持续性的面积百分比 分别为 0.34%、2.85%、75.73%和 21.08%。北部湾南流江流域净初级生产力 Hurst 指数的正态分布图的空间 形状表现出单峰右偏趋势,说明多年 NPP 的均值持续性趋势显著大于反持续性,由此可知南流量流域植被净 初级生产力 NPP 整体的变化趋势则处于持续性的状态。从净初级生产力 Hurst 指数空间分布状况(图 5.b) 可以看出,南流江流域 Hurst 指数分布的趋势为:弱持续性呈现出大面积分布状态,强持续性分布于流域的河 谷地带,而强反持续与弱反持续性则零星散布于研究区的上游以及下游地区。

为了更进一步明晰北部湾南流江流域净初级生产力 NPP 的变化趋势及其未来的可持续性特征,本研究 将 NPP Sen 趋势的显著性检验值(图 4.b)与 Hurst 指数的计算结果(图 5.b)在 ArcGIS10.2 中进行叠加分析,可以得到北部湾南流江流域植被净初级生产力增加、减少与未来可持续性的耦合图(图 6.a)。由(图 6.a 和表 2)可以看出:在 NPP 空间尺度上,南流江流域未来植被净初级生产力持续性增加的序列所占的百分比(51.64%)高于持续性减少的百分比(45.18%)。其中强持续性减少的组合所占的面积比重为 5.52%,主要分 布于玉林市的城乡过渡地区、博白县的东南部、灵山县的南部,其次,合浦县的南流江流域出海口也有大面积

分布;弱持续性减少的组合所占的百分比最大,其值为 39.66 %,主要分布于南流江流域中游的六万大山地带,另外,流域下游的五皇山地区也有大范围分布;弱持续性增加的组合所占的百分比与弱持续性减少的比重相当,其值为 36.07%,主要分布于流域上游河谷地区向山体的过渡地带,其次流域下游的河谷地区也有少量分布;强持续性增加的组合所占的百分比最小,仅为 15.57%,主要分布于流域的上游的河谷地带,而强反持续与弱反持续性则零星散布于研究区的上游以及下游地区十万大山的南麓地带、浦北县的东南部,另外,钦州-合浦-灵山的交错地带也呈现出片状分布状态,净初级生产力 Hurst 在该类区域呈现出持续性增加的区域,预示着未来净初级生产力将有持续性增加趋势。



图 5 Hurst 指数和 NPP 持续性特征

Fig.5 Hurst and sustainability of inter-annual NPP in study area





Fig.6 The spatial structure of Hurst+sen index and Normal distribution plot of the Hurst index

## 3.3 植被净初级生产力驱动因素

3.3.1 气象因子的特征及其变化趋势

由于南流江流域可用的气象站点数据非常稀少,本研究将运用泰森多边形对附近的雨量站进行插值,可 以得出南流江流域降水和气温的变化特征(图7)及其空间分布状况(图8)。南流江流域2000—2015年均降 水量介于1361.50—2431.16 mm之间,多年均值为1802.09 mm,其中2008年的年均降水量最大,而最小值则 出现在 2004 年,2000—2015 年降水量呈现出显著增加趋势(P<0.01),增加的速率为 177.35mm/10a;南流江 流域 2000—2015 年均气温介于 21.69—23.17 ℃之间,多年均值为 22.53 ℃,其中 2015 年的年均气温最高,而 最小值则出现在 2011 年,2000—2015 年气温呈现出波动不显著下降趋势,下降的速率为 0.019 ℃/10a。

净初级生产力变化趋势 The trend of net primary productivity change	显著性水平值 Z value	H 值 Hurst value	类型 Type	面积/hm <sup>2</sup> Area	百分比/% Percent
Sen 趋势小于零 Sen trend <0	Z >1.96	>0.75	强持续_显著减少	1650	1.09
Sen 趋势小于零 Sen trend <0	$ \mathbf{Z}  \leq 1.96$	>0.75	强持续_轻微减少	6669	4.43
Sen 趋势小于零 Sen trend <0	$ \mathbf{Z}  \leq 1.96$	0.5 < H < 0.75	弱持续_显著减少	716	0.47
Sen 趋势小于零 Sen trend <0	Z >1.96	0.5 < H < 0.75	弱持续_轻微减少	59137	39.19
Sen 趋势大于零 Sen trend> 0	$ \mathbf{Z}  \leq 1.96$	0.5 < H < 0.75	弱持续_轻微增加	49092	32.53
Sen 趋势大于零 Sen trend> 0	Z >1.96	0.5 <h<0.75< td=""><td>弱持续_明显增加</td><td>5347</td><td>3.54</td></h<0.75<>	弱持续_明显增加	5347	3.54
Sen 趋势大于零 Sen trend> 0	Z >1.96	>0.75	强持续_轻微增加	15864	10.51
Sen 趋势大于零 Sen trend> 0	$ \mathbf{Z}  \leq 1.96$	>0.75	强持续_明显增加	7634	5.06
_	—	< 0.5	未来变化无法确定	4804	3.18

表 2 净初级生产力 NPP 趋势以及 Hurst 指数统计特征 Table 2 Statistical result of NPP trends and the Hurst index

根据南流江流域 2000—2015 年的降水量和气温的多年均值空间分布特征(图 8)可以看出,气温多年平均的空间分布情况则呈现出明显的地域分异规律,气温较高的地区主要分布在南流江流域的南部地区以及流域的河谷地带,而流域西北部地区的浦北县由于地处于六万大山和五皇山的交接地区,平均海拔较高(六万大山主峰六万顶海拔 1115m),导致区域气温偏低。南流江流域由于受到季风气候的影响,降雨量从流域南部到流域中游地区呈现出减小趋势,且分布不均匀,东北部地区以及流域下游南部地区之间地区的降雨较多,尤其是下游的合浦县,降雨量最多,流域的东南部降水量偏少。





Fig.7 Variation trend of annual precipitation and temperature in study area

## 3.3.2 植被 NPP 与气象因子之间的关系

降水和气温等气象因子的变化对陆表植被的生长具有重要的作用,为了定量识别流域净初级生产力对气 象因子的响应特性,本研究逐像元计算了流域 2000—2015 年的植被净初级生产力与年均降水量和年均气温 之间的偏相关系数(图9),由图可知,净初级生产力对气温和降水的响应特性表现出显著的空间差异特征,且 植被 NPP 对气温的相关系数高于对降水的偏相关系数。由植被 NPP 与年均气温的偏相关空间特征(图9.a) 可知,植被 NPP 对气温的偏相关系数介于-0.87—0.95 之间,平均值为 0.09,由均值可知植被 NPP 与气温之 间呈现出正相关关系,表明在南流江流域气温越高的地区净初级生产力越高。具体来说,在北部湾南流江流 域,植被 NPP 与气温的偏相关系数正负相关区域分别占流域总面积的 15.91%和 80.09%,其中只有 1.95%的



图 8 研究区多年平均降水量和气温空间分布 Fig.8 Spatial distribution of annual precipitation and temperature in study area

正相关区域通过了显著性水平为 0.01 的检验,主要分布于玉林市的西北部地区,而 21.93%的负相关区域通 过了显著性水平为 0.01 的检验,主要分布于南流江流域的中游地区,其次浦北县的西南部也有斑块状分布。 植被 NPP 对降水的偏相关系数介于-0.96—0.86 之间,平均值为-0.25,由均值可知植被 NPP 与气温之间呈现 出负相关关系,表明在南流江流域降水越高的地区净初级生产力越低。具体来说,在北部湾南流江流域,植被 NPP 与降水的偏相关系数正负相关区域分别占流域总面积的 62.56%和 37.44%,其中 18.26%的正相关区域 通过了显著性水平为 0.01 的检验,主要分布于浦北县与博白县的交接地带,而 21.93%的负相关区域通过了 显著性水平为 0.01 的检验,主要分布于浦北县的五皇山地区。综上,植被净初级生产力 NPP 与气温呈正相 关性,与降水呈负相关性的特征。



图 9 研究区 NPP 与气温和降水的偏相关系数

Fig.9 The partial correlation coefficient between NPP and temperature and precipitation in study area

## 3.3.3 植被 NPP 与土地利用之间的关系

流域净初级生产力 NPP 的变化主要受到气候变化和人类活动的影响,其中气候变化中的降水和气温对 植被净初级生产力的变化具有重要的作用,而人类活动对净初级生产力的影响则主要通过土地利用方式的改 变来体现。本研究为了揭示土地利用变化对植被 NPP 的损耗与增益效应,将南流江流域 2000—2015 年的土 地利用图进行空间叠置分析,在北部湾南流江流域土地利用变化图谱中(图 10.a),共有 36 类土地利用图谱 单元,1 类未发生转化,其中南流江流域上游玉林市的北部地区以及下游的合浦县是土地利用转移过程最为 复杂的区域,在上游中耕地转变为建设用地的区域所占的比重最大,而下游则以耕地变为湿地地类为主,当地 村民以渔业养殖为主,土地多用于虾塘和鱼塘养殖,分布区域主要集中在南流江流域的下游地区。将土地利 用发生变化的图谱单元按照面积递降的顺序进行排序,在 GIS 中计算每个图谱单元的变化率(表 3),其中前 15 类的土地利用图谱发生转移的面积累积百分比达到总变化面积的 95.31%。



图 10 研究区土地利用变化图谱及其空间集聚特征 Fig.10 Land use changes during the period of 2000—2015 in study area

从表 3 和图 10.b 中可以看出,近 16 年来南流江流域土地利用类型面积变化的最大的图谱单元为"耕地-建设用地",研究期内共有 4780.62hm<sup>2</sup>的耕地转化为建设用地,占总变化面积的百分比为 34.24%,由土地利用 面积变化导致的 NPP 损失值达到 4715.62 t/a,其面积分布区域主要集中在流域上游玉林市的城乡过渡地带。 林地转换为建设用地的面积所占的比重次之,占到变化面积的 20.20%,由林地转化为建设用地所导致的 NPP 损失值达到 2835.19 t/a,变化图谱主要分布灵山县与合浦县的交接地带,该地区主要是受到灵山县的扩张,周 边林地受到人类活动的滥砍乱伐导致林地面积大幅度降低;耕地转换为林地的图谱单元位居第三位,其面积 为 1408.59 hm<sup>2</sup>,占所有变化面积的 10.09 %,该图谱单元所导致的 NPP 损失值达到 2510.03t/a,空间分布区域 上主要集中在南流江流域中游的博白县南部的河谷地区,说明退耕还林还草使得人类对于森林干扰减少,使 其流域中游地区植被得到较好恢复;而草地转换为建设用地的比重最小,其值仅为 1.10%,导致 NPP 减少的 损失值仅为 184.63t/a。

3.3.4 不同分区气候因子及土地利用变化与 NPP 的关系

从表 4 中可以看出, 在不同波动区、不同变化区以及不同持续区多年平均 NPP 与降水的偏相关系数都为

12

负值,而与气温的相关系数均为正值,说明在北部湾地区气候因子中的气温对植被的净初级生产力起到控制 作用。就不同波动区而言,高波动区植被对气温的相关系数高于降水,且高波动性区域土地利用变化的幅度 显著大于低波动性区域;从不同变化趋势区可以看出,NPP 增加的区域与降水和气温的相关系数的绝对值都 为 0.27, 但是不同土地利用变化的面积核密度值在 NPP 增加区中小于 NPP 减少区, 说明在南流江流域 NPP 的增加趋势与土地利用的稳定性有着直接的关系,土地利用变化越剧烈,区域的 NPP 增长的趋势则越慢;就 NPP 未来变化趋势而言,持续性序列与降水和气温的相关系数都小于反持续性序列,且土地利用面积变化核 密度值在持续性区域中小于反持续性区域,这与不同变化趋势区 NPP 与土地利用的关系类似,流域土地利用

Table3 Scheduling of main vary kinds of land use during 2000-2015 and its resulting NPP reduction in study area										
土地利用图谱变化 Land use map change	面积变化/hm <sup>2</sup> Area change	变化比率/% Rate of change	累积百分比/% Cumulative percentage	变化量/(t/a) Variable quantity						
耕地-建设用地 Cultivated land to construction land	4780.62	34.24	34.24	4715.62						
林地-建设用地 Forest land to construction land	2820.42	20.20	54.44	2835.19						
耕地-林地 Cultivated land to forest land	1408.59	10.09	64.53	2510.03						
林地-园地 Forest land to garden land	866.70	6.21	70.74	1748.34						
林地-耕地 Forest land to cultivated land	596.16	4.27	75.01	1598.70						
林地-草地 Forest land to grass land	541.08	3.88	78.88	1139.33						
草地-林地 Grass land to forest land	402.57	2.88	81.77	836.76						
湿地-水域 Wetland to water	374.22	2.68	84.45	810.13						
耕地-园地 Cultivated land to garden land	307.80	2.20	86.65	662.86						
耕地-草地 Cultivated land to grass land	292.41	2.09	88.75	653.37						
林地-水域 Forest land to water	227.61	1.63	90.38	492.97						
草地-耕地 Grass land to cultivated land	205.74	1.47	91.85	424.30						
耕地-水域 Cultivated land to water	175.77	1.26	93.11	347.56						
水域-林地 Water to forest land	153.90	1.10	94.21	190.60						
草地-建设用地 Grass land to construction land	153.09	1.10	95.31	184.63						

表 3	研究区 2000—2015 年土地利用变化类型变化排序及其导致的 NPP 减少值	
-----	--	--

变化越剧烈则区域的 NPP 的可持续性则呈现出降低趋势。

155.09	1.10	95.5

表 4 不同分区气候因子及土地利用变化与 NPP 的关系														
Table 4 Relationship between climate factors and land use change and NPP in different regions														
		不同波动区					不同变化趋势区				不同持续性区			
		Differer	nt fluctuati	on areas			Various trend zones			Different sustainable areas				
	低	较低	中等	较高	吉同	显著 减少	不显著 减少	不显著 增加	显著 增加	强反 持续	弱反 持续	弱持续	强持续	
NPP 与降水相关系数 The correlation coefficient between NPP and precipitation	-0.33	-0.22	-0.11	0.01	0.17	-0.23	-0.32	-0.22	-0.05	-0.45	-0.41	-0.28	-0.15	
与气温相关系数 The correlation coefficient between NPP and temperature	0.04	0.14	0.12	0.14	0.17	0.09	0.07	0.09	0.18	0.13	0.16	0.10	0.04	
土地利用面积变化核密度 Kernel density of land use area change/(hm <sup>2</sup> /km <sup>2</sup> )	11.39	17.81	19.91	21.24	22.31	20.49	21.97	21.30	19.45	23.36	22.31	21.55	20.73	

## 4 讨论

## 4.1 植被净初级生产力模型精度验证

区域净初级生产力的精度评价一直以来都是遥感学界以及生态学中的难点和有争议的环节, NPP 估算

的结果验证一般来说分为两种,一种为实测值验证,这 种方法是通过估算值与实测的 NPP 数值进行对比验 证。另外一种是相对法,即通过将模型的估算结果与其 他模型结果或者其他遥感产品进行对比来评价。第一 种方法是通过野外获得研究区的实测生物量,其数据比 较可靠,但是目前南流江流域植被生物量的实地调查数 据目前还未开展相关的研究工作。基于此,本研究采用 第二种方法对 CASA 模型的估算结果进行精度验证,所 采用的精度验证的产品为 MODIS 17 NPP 产品,该产品 是基于 BIOME-BGC 模型计算出的全球净初级生产力 数据<sup>[27]</sup>,国内也有大量的研究应用该产品验证了 CASA 模型估算结果的可靠性,如谢宝妮等<sup>[28]</sup>,孙庆玲等<sup>[29]</sup>





和张继平等<sup>[30]</sup>分别使用该产品对黄土高原、武陵山区以及三江源地区的净初级生产力进行了精度和可靠性 验证。本研究在进行模型验证时,由于原始的 MODIS17 NPP 产品的空间分辨率为 1000m,本研究首先对该数 据进行重采样到 250m,之后使用 GIS 的随机采样工具分别在 MODIS17 数据和本文结果上生成 30%的采样 点,以此来分析二者之间的相关关系。从图 11 可以看出,本文估算结果与 MODIS17 数据存在着显著的相关 性(P<0.01),相关系数为 0.7943,但是本研究通过 CASA 模型估算的结果略低于 MODIS17 的平均值,这可能 与 MODIS17 采用的是 16 天合成的植被指数中可能存在阴天或多云等情况,使得光合有效辐射吸收系数比实 际值偏大,导致光合有效辐射的结果偏大,进而增大 NPP 的估算值。

4.2 植被净初级生产力贡献率识别及其未来研究方向

由于本研究中的南流江流域气象站点偏少,尤其是太阳辐射站点较少,本文虽然采用了插值方法对气象 数据进行了处理,但是由于该流域广泛存在高山地貌、丘陵地貌以及河谷地貌。因此还需要发展更为精确的 插值方法以提高模型估算的精度。另外,本研究虽然采用偏相关分析方法量化了气候因子对植被 NPP 的响 应关系,利用土地利用变化转移矩阵分析了流域土地利用变化导致的 NPP 增加和减少值,但是未对气候变化 和人类活动对流域的贡献率和控制区域进行定量识别,因此未来可以从两方面进行入手,一方面可以采用相 关的数据模型,如残差分析模型<sup>[31]</sup>建立回归分析方程,对每年的 NPP 残差序列进行 Sen 趋势度分析,以得到 的趋势值为标准,如果趋势值为正值,说明 NPP 象元值受到人类活动的影响,反之,则 NPP 象元值则受到气 候变化的影响,利用正负值所占的比例可以计算气候变化和人类活动对植被 NPP 的贡献率。另一方面,可以 通过统计研究区牲口的数量、草地、坡耕地的面积在研究区植被恢复方面的贡献比例。因此,关于气候变化和 人类活动对净初级生产力的贡献率将是本研究以后重点的研究方向。

## 5 结论

本文以北部湾南流江流域为研究对象,基于光能利用率模型(CASA),利用遥感、气象和植被等数据估算 了研究区 2000—2015 年流域的净初级生产力,借助于 Theil-Sen 趋势、Mann-Kendall 检验以及 Hurst 指数等数 理统计方法对研究区 NPP 的时空变化特征、未来趋势及其驱动因素进行了定量化分析。研究结果表明:

(1)时间尺度上,2000—2015年北部湾南流江流域植被净初级生产力 NPP 总体上呈现出波动上升趋势, 增速为 44.03 g C/m<sup>2</sup>/10 a,明显快于广西自治区 2000—2011年植被净初级生产力,未通过显著性水平为 0.01 的检验。流域上游和下游地区植被 NPP 快于全区,而中游地区慢于全区,其中,流域上游、中游和下游的净初 级生产力年平均增加速度分别为:54.17g C/m<sup>2</sup>/10 a、31.74g C/m<sup>2</sup>/10 a 和 46.1g C/m<sup>2</sup>/10 a。多年平均净初级 生产力介于 911.30—1075.44 g C/m<sup>2</sup>之间,平均值为 995.25 g C/m<sup>2</sup>,最大值出现在 2011年,其值为 1075.44 g C/m<sup>2</sup>,高出平均值 80.19 g C/m<sup>2</sup>,最小值则出现在 2006年,低于平均值 83.95g C/m<sup>2</sup>。(2)空间尺度上,流域植 被净初级生产力的分布呈现出明显的地域分异规律,中游植被净初级生产力最高(1098.99 g C/m<sup>2</sup>),下游次 之(1041.71 g C/m<sup>2</sup>),而上游最小(1013.22 g C/m<sup>2</sup>)。NPP 的 Sen 趋势度介于-77.10—74.80 g C/m<sup>2</sup>/a 之间, 流域净初级生产力在空间上呈现出增加的趋势,其中 NPP 显著减少的区域所占 1.58%,轻微减少占 46.57%, 轻微增加占 43.25%,而明显增加占 8.60%。

(3)空间波动性上,流域净初级生产力的变异系数较大,其值介于 0.01—0.70。流域 NPP 的多年平均值 呈现出明显的空间分异规律,主要以低波动性为主,其中,洪潮江水库、小江水库周边以及玉林市的城乡建设 用地扩张区域处于高波动状态,而流域的中部六万大山以及五皇山地带则处于低波动状态。

(4)未来变化趋势上,流域净初级生产力 Hurst 的范围为 0—0.99,平均值为 0.70,植被净初级生产力的反 持续序列仅占到区域整体的 NPP 百分比为 0.3986 %,持续性序列占到区域整体的的 NPP 百分比为 99.6014 %,Hurst 指数正态分布图呈现单峰右偏分布,即 NPP 均值的持续性序列显著大于反持续性序列,预示着流域 NPP 未来处于持续增加的趋势。

(5)驱动机制上,流域 NPP 与多年平均气温呈正相关关系,与年均降水量呈负相关关系,表明温度是影响 该流域植被 NPP 的主要气候因子。由耕地转化为建设用地,导致的 NPP 损失值最大,其值达到 4715.62 t/a, 林地转换为建设用地所导致的 NPP 损失值次之,其值为 2835.19 t/a,而草地转换为建设用地导致 NPP 损失 值最小,其值仅为 184.63t/a。

#### 参考文献(References):

- [1] 潘耀忠,李晓兵,何春阳. 中国土地覆盖综合分类研究——基于 NOAA/AVHRR 和 Holdridge PE. 第四纪研究, 2000, 20(3): 270-281.
- [2] 孙红雨,王长耀,牛铮,布和敖斯尔,李兵.中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析.遥感学报, 1998,2(3):204-210.
- [3] Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(1): 74-88.
- [4] Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere. Berlin, Heidelberg: Springer, 1975.
- [5] 王新闯,王世东,张合兵.基于 MOD17A3 的河南省 NPP 时空格局.生态学杂志, 2013, 32(10): 2797-2805.
- [6] 彭少麟,侯爱敏,周国逸.气候变化对陆地生态系统第一性生产力的影响研究综述.地球科学进展,2000,15(6):717-722.
- [7] Walker B H, Steffen W L, Canadell J, Ingram J S I, eds. The Terrestrial Biosphere and Global Change: Implications for Natural and Managed Ecosystems. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 199-217.
- [8] Kicklighter D W, Bondeau A, Schloss A L, Kaduk J, Mcguire A D. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): global pattern and differentiation by major biomes. Global Change Biology, 1999, 5(S1): 16-24.
- [9] Raupach M R. The exponential eigenmodes of the carbon-climate system, and their implications for ratios of responses to forcings. Earth System Dynamics, 2013, 4(1): 31-49.
- [10] Ebermayer E. Die Gesammte Lehre der Waldstreu Mit Rücksicht Auf Die Chemische Statik des Waldbaues. Unter Zugrundlegung der in den Königl. Staatsforsten Bayerns angestellten Untersuchungen. Berlin: Springer, 1876: 116-116.
- [11] Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations: (1) Chikugo model for evaluating net primary productivity. Journal of Agricultural Meteorology, 1985, 40(4): 343-352.
- [12] 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.
- [13] Liu J, Chen J M, Cihlar J, Park W M. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. Remote Sensing of Environment, 1997, 62(2): 158-175.
- [14] Prince S D, Goward S N. Global primary production: a remote sensing approach. Journal of Biogeography, 1995, 22(4/5): 815-835.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 周广胜,张新时.全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究.植物生态学报,1996,20(1):11-19.
- [18] 杜梦洁,郑江华,任璇,蔡亚荣,穆晨,闫凯.地形对新疆昌吉州草地净初级生产力分布格局的影响.生态学报,2018,38(13): 4789-4799.
- [19] 陈强,陈云浩,王萌杰,蒋卫国,侯鹏,李营. 2001—2010 年黄河流域生态系统植被净第一性生产力变化及气候因素驱动分析. 应用生

态学报, 2014, 25(10): 2811-2818.

- [20] 贺振, 王珍, 厉玲玲, 贺俊平. 黄河流域植被 NPP 时空变化特征分析. 商丘师范学院学报, 2013, 29(6): 69-73.
- [21] 张福平, 冯起, 李旭谱, 魏永芬. 黑河流域 NPP 遥感估算及其时空变化特征. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1657-1664.
- [22] 刘洋,李诚志,刘志辉,邓兴耀. 1982—2013 年基于 GIMMS-NDVI 的新疆植被覆盖时空变化. 生态学报, 2016, 36(19): 6198-6208.
- [23] Hurst H E. Closure to "long-term storage capacity of reservoirs by H. E. Hurst". Transactions of the American Society of Civil Engineers, 2013, 116(1): 804-808.
- [24] Mandelbrot B B, Wallis J R. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence. Water Resources Research, 1969, 5(5): 967-988.
- [25] 龙慧灵,李晓兵,王宏,魏丹丹,张程.内蒙古草原区植被净初级生产力及其与气候的关系.生态学报,2010,30(5):1367-1378.
- [26] 李燕丽,潘贤章,王昌昆,刘娅,赵其国. 2000—2011 年广西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. 生态学报, 2014, 34(18): 5220-5228.
- [27] Silvestri S, Marani M, Settle J, Benvenuto F, Marani A. Salt marsh vegetation radiometry: data analysis and scaling. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(3): 473-482.
- [28] 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.
- [29] 孙庆龄, 冯险峰, 肖潇. 武陵山区植被净第一性生产力的时空格局及其与地形因子的关系. 地球信息科学学报, 2014, 16(6): 915-924.
- [30] 张继平,刘春兰,郝海广,孙莉,乔青,王辉,宁杨翠.基于 MODIS GPP/NPP 数据的三江源地区草地生态系统碳储量及碳汇量时空变化 研究.生态环境学报,2015,24(1):8-13.
- [31] 郭继凯,吴秀芹,董贵华,李延森,吴瑞.基于 MODIS/NDVI 的塔里木河流域植被覆盖变化驱动因素相对作用分析.干旱区研究,2017, 34(3):621-629.