

长江科学院院报

Journal of Yangtze River Scientific Research Institute

ISSN 1001-5485, CN 42-1171/TV

《长江科学院院报》网络首发论文

题目: 2010-2015 年三江源植被净初级生产力变化特征及影响因素分析
作者: 贺倩, 杨雪琴, 戴晓爱
收稿日期: 2019-02-13
网络首发日期: 2019-06-12
引用格式: 贺倩, 杨雪琴, 戴晓爱. 2010-2015 年三江源植被净初级生产力变化特征及影响因素分析[J/OL]. 长江科学院院报.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20190612.0857.030.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

2010-2015 年三江源植被净初级生产力变化特征及影响因素分析

贺倩¹, 杨雪琴¹, 戴晓爱^{1,2}

(1. 成都理工大学 地球科学学院, 成都 610059; 2. 国土资源部 地学空间信息技术重点实验室, 成都 610059)

摘要：三江源地区生态环境先天脆弱，掌握其植被净初级生产力（NPP）的时空变化特征及其影响因素对于环境保护具有重要意义。本文基于改进的 CASA 模型估算该地区 2010-2015 年的 NPP 空间分布及变化特征，引入地理探测器探讨植被、气候和地形因素及其交互作用对 NPP 的影响。结果表明：（1）整体上三江源地区 NPP 表现为自东向西逐渐减小的空间分布特征；2015 年较 2010 年中部地区 NPP 减少最为严重，其次为西部地区，而东部 NPP 增加，且 NPP 的减少量大于 NPP 的增加量。（2）各因素对 NPP 的影响程度不同，从 NPP 空间分布现状角度分析，对 NPP 的作用力由大到小依次为 NDVI、太阳辐射、降雨量、温度、高程、坡度、坡向；从 NPP 动态变化角度分析，作用力依次为 NDVI、降雨量、太阳辐射、温度。（3）各因素的交互作用对 NPP 的空间分布现状及动态变化都表现出双因子或非线性增强作用，且 NDVI 与降雨量的交互作用最强。（4）地理探测器能够较好的指示各因素及其交互作用对 NPP 的影响，具有较好的效果。

关键词：NPP; CASA; 地理探测器; 影响因素

Variation Characteristics and Influence Factors of Net Primary Productivity of Vegetation in the Three-River Headwaters Region from 2010 to 2015

HE Qian¹, YANG Xue-qin¹, Dai Xiao-ai^{1,2}

(1. College of Geosciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Key Laboratory of Geoscience Spatial Information Technology, Ministry of Land and Resources of China, Chengdu 610059, China.)

Abstract: The ecological environment in the Three-River Headwaters Region is inherently fragile, so it is of great significance for environmental protection to grasp the temporal and spatial variation characteristics of the net primary productivity of vegetation (NPP) and its influence factors. Based on the improved CASA model, this paper estimated the spatial distribution and variation characteristics of NPP in the region from 2010 to 2015, and introduced Geodetector to explore the influence of vegetation, climate and topography and their interactions on NPP. The results show that: (1) The spatial distribution of NPP in the Three-River Headwaters Region decreases gradually from east to west on the whole; compared with 2010, NPP decreased most seriously in the central region, followed by the western region, while NPP increased in the eastern region in 2015. And the decrease of NPP was greater than the increase of NPP. (2) The influence degree of various factors on NPP is different. From the perspective of the current spatial distribution of NPP, the influence declines as following: NDVI, solar radiation, precipitation, temperature, elevation, slope and aspect; From the perspective of dynamic variation of NPP, NDVI, precipitation, solar radiation and temperature are the main forces. (3) The interaction of various factors on the spatial distribution status and dynamic variation of NPP showed a double-factor or nonlinear enhancement, and

收稿日期：2019-02-13; **修回日期：**2019-04-17

基金项目：2018 年国家级大学生创新创业训练计划项目(201810616018)

作者简介：贺倩 (1996-), 女, 主要从事地理信息科学研究。E-mail: 18215671290@163.com.

通信作者：戴晓爱 (1979-), 女, 博士, 副教授, 主要从事地理信息系统研究。E-mail: daixiaoai@cdut.cn.

the interaction between NDVI and precipitation is the strongest. (4) Geodetector can indicate the influence of various factors and their interaction on NPP better, and has a good effect.

Key words: NPP; CASA; Geodetector; influence factor

1 研究背景

了解区域碳含量对于制定气候变化等环境政策至关重要^[1]。NPP 是指植被在一定时期内通过光合作用捕获的碳净量,反映了自然环境条件下植物群落的生产能力,是研究碳估算和气候变化的核心生态指标^[2]。其影响着生物多样性,水文循环,碳含量等生态系统服务^[3]。准确估算 NPP 的时空动态变化规律及其与各种影响因子的关系已成为当前研究碳平衡和气候变化的焦点之一^[2],引起了学者的广泛关注。

目前,许多学者对 NPP 进行了大量研究,取得了一系列成果^[4],在全球和区域等不同尺度上探讨了 NPP 时空动态变化及其影响因素,例如 Yangyang Liu 等人分析了不同干旱梯度下全球草地生态系统的 NPP 对气候变率的响应模式^[5];张振宇等人研究了我国西北地区的 NPP 变化及其对干旱的响应^[6]。这些研究的结论虽然不完全相同,但都指出区域温度和降水等气候因素变化是影响 NPP 变化的主导因素^[7]。虽然目前在 NPP 的影响因素尤其是在其与气候因子的相关性方面有着大量研究,但多集中在单一的动态变化角度,即通过建立气候变化和 NPP 变化的关系来分析两者之间的相关性^[8],关于静态的空间分布现状上的相关性研究较少。而影响 NPP 空间分布现状的主导因子与 NPP 变化的驱动因子可能不完全相同。NPP 驱动力研究的方法主要有趋势线法^[8]、区间统计法^[9]、Person 相关性系数法^[10]、偏相关系数法^[11]等。这些方法能够判断气候等因素对 NPP 的影响,但它们忽略了驱动因子与 NPP 之间的空间关系或受到各因子之间多重共线性的阻碍,且无法判定各因子的交互作用对 NPP 的影响,缺乏定量的探索。地理探测器的提出可以较好的解决上述驱动力研究中的局限性,其是由王劲峰等人^[12-13]提出的基于地理信息系统(GIS)中常用变量的一系列新的统计学方法。该方法无线性假设,利用空间方差来检验和研究单一因子的相对贡献以及自变量之间的相互作用,从而提供空间分层异质性的客观测量。目前已在土壤金属污染^[14]、土地^[15]等许多领域得到了应用。

青藏高原被认为是世界上对气候变化最敏感的地区之一,而位于青藏高原腹地的三江源地区生态

地位更加重要,是研究植被对气候变化的理想场所。本文针对目前研究中的不足,利用改进的 CASA 模型估算三江源地区的 NPP,掌握其时空变化规律;引入地理探测器,定量分析 NPP 的影响因素以及各因素的交互作用。研究结果将为三江源地区的生态环境保护工作提供依据。

2 研究区及数据

2.1 研究区概况

三江源地区位于青海省南部(E89°24'—102°15', N31°32'—36°17')总面积为 35.06×10⁴ km²,是长江、黄河、澜沧江的发源地,也是我国和亚洲最重要的河流的上游关键源区^[16]。该地区地形复杂,山脉绵延,主要以山地地貌为主,平均海拔约 4588.60m,西北部有少量冰川分布。该地区属于典型高原大陆性气候,年平均气温为-5.4~4.2℃,年平均降水量在 262.2~772.8 mm,降水空间分布不均匀,年蒸发量相对较大,一般在 730-1700mm^[17]。三江源地区热量和水分由东南向西北递减,植被空间分布呈明显的高原地带性规律,自东向西依次为山地森林、高寒灌丛草甸、高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠,沼泽植被和垫状植被则主要镶嵌于高寒草甸和高寒荒漠之间^[18]。

三江源地区是我国大部分地区的生命之源,是世界上海拔最高面积最大的高原湿地区,也是世界上高海拔地区生物多样性最集中的地区,是我国生态安全的重要屏障。此外,三江源区也是我国生态系统最脆弱和最原始的地区之一,随着全球气候的变化以及人类活动的加剧导致三江源地区的生态环境恶化,出现了草地退化和沙化严重,水土流失严重等生态环境问题^[17, 19]。

2.2 数据来源与处理

(1) 植被数据包括 2010、2015 年月度(24 期) SPOT-NDVI 栅格数据集,为减少由云雾等对数据造成的影响,提高精度,该数据集采用最大值合成法(MVC)生成^[20]。中国 100 万植被类型空间分布数据,植被类型包括疏林地、灌丛、草甸等共 22 种类型^[21]。植被数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。

(2) 气象数据为月平均温度(℃)、月降雨量(mm)和月太阳总辐射(MJ/m²)栅格数据。基于

SPSS25 平台计算三江源及其周围共 143 个气象站点的日降雨量和日平均温度得到月平均温度和月降雨量数据。然而该地区的太阳辐射实测站点较少,为提高数据精度,与其他气象数据站点保持一致,本文利用目前模拟精度较高且应用广泛的 Angstrom 模型,利用日照时数数据模拟得到 143 个气象站点的月太阳辐射值^[22]。最后利用计算得到的各站点的气象数据利用 ANUSPLIN 的平滑样条函数进行气象数据的插值,得到气象栅格数据,该插值方法将地形对气候的影响考虑在内,相比于传统的反距离权重等插值方法具有更高的精度^[23]。气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。

(3) 地形数据包括高程、坡度和坡向。高程数据为 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) 制作的数字高程模型,利用 ArcGIS 计算得到坡度坡向数据,数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。本文栅格数据空间分辨率均统一为 1km。

3 研究方法

3.1 NPP 估算模型

CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型是一种光能利用率模型,该模型由 Potter C S 等于 1993 年提出^[24],后由朱文泉等改进^[21],其具有坚实的理论基础、相对简单的模型结构、易于获取的输入参数和较强的普适性等优势,在区域或全球尺度上的植被净初级生产力估算中得到了广泛的应用^[25]。本文基于改进的 CASA 模型进行植被净初级生产力的估算^[21, 26],模型中所估算的 NPP 可以由植物吸收的光合有效辐射 (APAR) 和实际光能利用率 (ε) 两个因子表示,公式如下:

$$NPP(x,t) = APAR(x,t) \times \varepsilon(x,t) \quad (1)$$

$$APAR(x,t) = SOL(x,t) \times FPAR(x,t) \times 0.5 \quad (2)$$

$$\varepsilon(x,t) = T_{\varepsilon 1}(x,t) \times T_{\varepsilon 2}(x,t) \times W_{\varepsilon}(x,t) \times \varepsilon_{\max} \quad (3)$$

式中, $NPP(x,t)$ 表示净初级生产力 ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{a}$), $APAR(x,t)$ 表示像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射 ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{month}$), $\varepsilon(x,t)$ 表示像元 x 在 t 月的实际光能利用率 (gC/MJ)。 $SOL(x,t)$ 表示 t 月份在像元 x 处的太阳总辐射量 ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{month}$); $FPAR(x,t)$ 为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例; 常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例。 $T_{\varepsilon 1}(x,t)$ 和 $T_{\varepsilon 2}(x,t)$ 表示低温和高温对光能利用率的胁迫作用; $W_{\varepsilon}(x,t)$ 为水分胁迫影响系数, 反映水分条件的影响; $\varepsilon_{\max}$ 是理想条件下的最大光能利用

率 (gC/MJ)。

3.2 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的一种新的统计学方法^[13], 其结合了 GIS 空间叠加技术和集合论, 该方法以空间数据层内方差最小、层间方差最大为条件, 可以有效地判别变量的空间分层异质性、识别多因子之间的关系。该方法主要用于探测地理要素的差异性及其对研究对象空间分布的影响因素^[27], 可以更加广泛的运用到人文与经济地理过程和现象的空间异质性识别以及多因子关系认知的研究中^[28]。该探测器包括四个模块: 因子探测器, 交互作用探测器, 风险探测器和生态探测器。

因子探测器探测因变量的空间分异性以及自变量多大程度上解释了因变量空间分异。用 q 值度量^[27], 表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (4)$$

式中, $h = 1, \dots, L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层 (Strata), 即分类或分区; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的

方差。 q 的值域为 $[0, 1]$, 值越大说明 Y 的空间分异性越明显; 如果分层是由自变量 X 生成的, 则 q 值越大表示自变量 X 对属性 Y 的解释力越强, 反之则越弱。

交互作用探测器是地理探测器相对于其他统计方法的最大优势^[29], 用于识别不同风险因子之间的交互作用, 即评估两个影响因子共同作用时是否会增加或减弱对因变量的解释力, 或这些因子对因变量的影响是否相互独立。风险探测器用于判断两个子区域间的属性均值是否有显著的差别, 探测因子对于 NPP 空间分布和变化是否具有风险性。生态探测器用于比较各影响因子对 NPP 的空间分布的影响是否有显著的差异, 通过 F 统计量来衡量。

地理探测器的输入变量需要转换为分类变量, 需要对连续变量进行离散化。基于王劲峰等提出的数据离散化方法^[13]和先验知识, 本文利用自然断点法对各个影响因素进行离散, 将各个影响因子分为 9 类。

4 结果分析

4.1 NPP 空间分布现状

据三江源 2010 年和 2015 年的 NPP 空间分布图 (图 1), 该地区 NPP 整体呈现出东高西低的空间格局, 这种特点与降水和热量分布条件一致。在三江源的中西部地区集中分布着荒漠草原和高寒草原^[30], 植被稀少, 大部分地区的 NPP 较低, 部分地区接近于 $0 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 。东部地区 NPP 较高, 分析认为这是因为东部地区地势相对较低、水热条件较好、植被生长茂盛^[17]。NPP 值最高的地区主要集中在兴海县、同德县、泽库县以及河南县。2010 年三江源地区 NPP 最高值为 $1302.79 \text{ gC/m}^2/\text{a}$, 平均值为

$397.43 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 。2015 年 NPP 最高值为 $1356.51 \text{ gC/m}^2/\text{a}$, 平均值为 $345.44 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 。从图中可以看出 NPP 值在 $300 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 以下的范围在扩大, 面积从 2010 年的 59270 km^2 增加到 2015 年的 95300 km^2 , 所占面积比例从 2010 年的 37.28%, 增加到 2015 年的 49.64%。NPP 值在 $300 \sim 700 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 范围内的地区面积呈现缩小的趋势, 由 210378 km^2 减少到 2015 年的 162466 km^2 , 减少了 47912 km^2 。然而, NPP 值在 $750 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 以上的区域面积却有略微的增加, 从 9569 km^2 增加到 14118 km^2 。

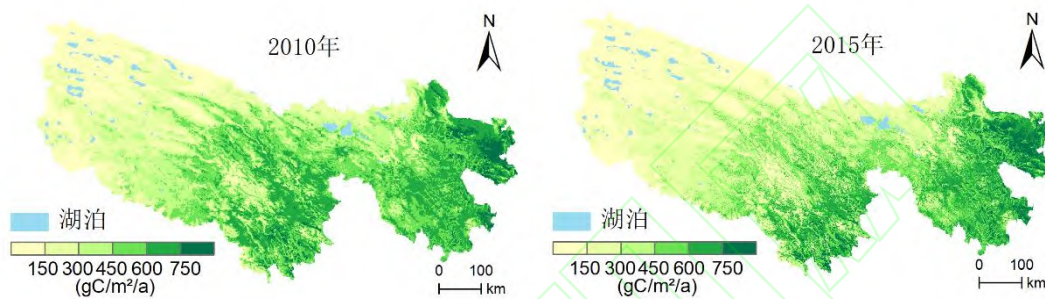


图 1 2010、2015 年三江源 NPP 空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of NPP in the Three-River Headwaters Region in 2010 and 2015

4.2 NPP 时空动态变化特征

从图 2(a)可以看出 2010 到 2015 年 NPP 的变化存在明显的空间差异性, 变化最剧烈的地区集中分布于三江源中部地区, 而东西两边的变化幅度相对较小。其中西部地区的 NPP 呈降低趋势, 大部分地区降低幅度较小, 在 $0 \sim 100 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 之间; 中部地区的 NPP 降低幅度较大, 降幅在 $200 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 以上; 而东部地区的 NPP 呈增高的趋势, 但其增幅较小, 在 $0 \sim 100 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 之间。NPP 减小 $200 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 以上的地区所占面积为 21207 km^2 , 而增加 $200 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 以上的区域面积仅为 1657 km^2 。可以看出三江源地区在 5 年间, NPP 整体呈现出下降的变化趋势, 且 NPP 增加的区域面积明显小于 NPP 减小的面积

(NPP 减少的区域所占面积为 265804 km^2 , 增加区域面积仅为 84862 km^2)。从 NPP 变化统计图 (图 2(b)) 中可以看出, NPP 减少范围在 $0 \sim 100 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 之间的区域所占的面积最大, 为 181947 km^2 ; 其次是 NPP 略微增加 (增加 $0 \sim 100 \text{ gC/m}^2/\text{a}$) 的区域, 面积为 74011 km^2 ; NPP 增加 $200 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 以上的区域面积最小, 仅为 1657 km^2 。并且在对应区间的减少区域面积都大于增加区域的面积。由此可见, 在

该时间段内三江源地区的生态系统遭到了一定程度的破坏, NPP 值的下降侧面说明了该地区的生态环境的恶化。

4.3 影响因素分析

4.3.1 NPP 空间分布现状影响因素

本文通过选取表征植被、气候和地形 3 类要素共 7 个指标来从静态角度定量分析各因素对 NPP 空间分布现状的影响, 其中 NPP 及各因素的空间分布现状以两年数据的平均值表示。因子探测可以用来衡量各个影响因子对 NPP 的影响强度, q 值越大, 说明该影响因子对 NPP 空间分布现状的作用力越大, 探测结果见表 1。在 7 个影响因子中, q 值从大到小顺序依次是, $\text{NDVI} > \text{太阳辐射} > \text{年降雨量} > \text{年均温度} > \text{高程} > \text{坡度} > \text{坡向}$, p 值均小于 0.01, 通过显著性检验。因子探测的结果表明, 影响 NPP 空间分布的主导因素是 NDVI, 其贡献率高达 0.9598, 接近于 1, 除坡度和坡向外其余因子的 q 值均大于 0.5, 坡向的贡献率最小, 仅为 0.0198。可见植被因子、气候因子和地形因子在不同程度上解释了 NPP 的空间分布现状, 整体上表现为植被 > 气候 > 地形。

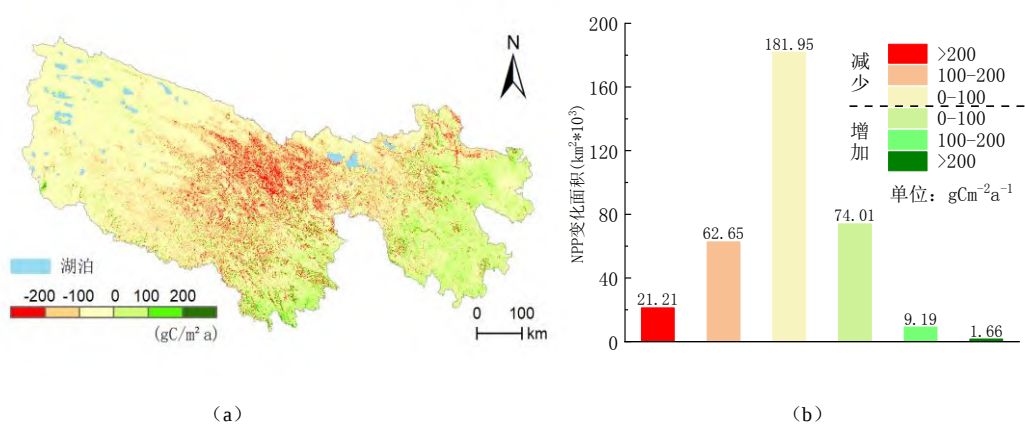


图 2 2010-2015 年三江源 NPP 空间变化及统计图

Fig. 2 The spatial variation of NPP in Three-River Headwaters Region and statistical graph from 2010 to 2015

表 1 各因子对 NPP 空间分布现状的贡献率

Table 1 The contribution rate of each factor to the spatial distribution of NPP

	植被	气候			地形		
	NDVI	太阳辐射	年降雨量	年均温度	高程	坡度	坡向
q	0.9589	0.7407	0.7029	0.6427	0.5371	0.2498	0.0198
p	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

利用交互探测器探测不同影响因子在影响 NPP 空间分布现状方面是否具有交互作用, 结果见表 2。结果显示, 各因子之间均有着双因子增强的作用, 表明各个因子之间的两两交互对于 NPP 的空间分布影响更大。交互探测的结果表明, 任意两个影响因子的交互作用都大于单个因子的影响, 即 NPP 空间分布不是由单一因子起作用, 而是受不同影响因子的相互作用共同影响。其中, 年均温度与 NDVI 交互作用的 q 值最高, 为 0.9667。整体上各个因子

与 NDVI 的交互作用 q 值都很高, 坡度与坡向因子的 q 值最低, 为 0.2677。这也解释了植被与气候因子是影响 NPP 空间分布现状的主要因素, 而地形因子的影响程度较低。

通过生态探测可以比较各个影响因子之间对于 NPP 空间分布的影响是否具有显著差异。采用显著性水平为 0.05 的 F 检验, 经检验, 各个影响因子之间均存在显著差异 (表 2)。这表明, 植被、气候和地形因子对于 NPP 空间分布的影响显著不同。

表 2 各因子交互作用对 NPP 空间分布现状的影响

Table 2 The influence of the interaction of factors on the spatial distribution of NPP

	NDVI	太阳辐射	年降雨量	年均温度	高程	坡度	坡向
NDVI	0.9598**						
太阳辐射	0.9644**	0.7407**					
年降雨量	0.9644**	0.8063**	0.7029**				
年均温度	0.9667**	0.8252**	0.8495**	0.6427**			
高程	0.9652**	0.8277**	0.8618**	0.6757**	0.5371**		
坡度	0.9657**	0.7788**	0.7307**	0.7815**	0.7103**	0.2498**	
坡向	0.9606**	0.7465**	0.7162**	0.6502**	0.5546**	0.2677**	0.0198**

注: “_”表示 X1 和 X2 的交互作用为非线性增强, 无下划线表示双因子增强。**表示在生态探测中, X1 和 X2 对 NPP 的空间分布现状的影响存在着显著的差异。

风险探测可以确定影响因子对于 NPP 分布的具体影响, 探测结果表明所有因子均存在明显差异性, 说明所研究的影响因子对 NPP 分布具有风险性。从图 3 中可以看出, 各个因子对于 NPP 的影响不同, NPP 平均值随着 NDVI 级别的增加而逐渐增

加, 为正相关; NPP 随着太阳辐射级别的增加呈现出先平缓后降低的变化趋势, 为负向相关; 与太阳辐射特点相反的是, 随着降雨量级别的增加 NPP 先增加后平缓, 为正相关; NPP 随着年均温度级别的增加呈现出先增加后降低的变化趋势, 而随着高

程级别的增加表现出相反的特点。NPP 随着坡度级别的增加呈现出先增加后平缓的特点，但整体变化

幅度较小，可见坡度对于 NPP 的影响显著性较低。

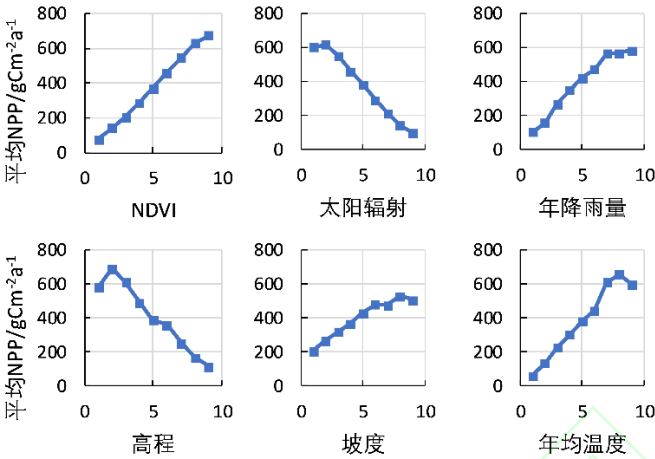


图 3 风险探测

Fig. 3 Results of the Risk detector

4.3.2 NPP 变化影响因素

通过差值法得到 2010-2015 年三江源地区的 NPP、NDVI、太阳辐射、年降雨量和年均温度的栅格变化数据，按照自然断点法将各指标的数据分为 9 个级别，最后采用地理探测器分析各因素的变化对 NPP 变化的贡献率以及交互作用的影响。得到如下结果：

据表 3 可知，2010-2015 年间，因子探测器中各因素变化对 NPP 变化的贡献率计算中 p 值均小于 0.01，均通过了显著性检验。贡献率从大到小依次为 NDVI>年降雨量>太阳辐射>年均温度，其中 NDVI 变化对 NPP 变化的贡献率为 0.4637，年降雨量为 0.4464，贡献率基本相同，表明该地区 NDVI 和降雨量的变化是 NPP 变化的主导因子，且两者对

NPP 变化的影响程度相近。太阳辐射与年均温度的变化对 NPP 变化的贡献率相对较小，年均温度变化的贡献率最小，该结果与倪向南等人利用相关系数法对 NPP 变化的气候因素相对重要性的结论相符^[31]。与静态角度下 NPP 的空间分布现状各因素的贡献率相比，NPP 变化的影响因子的贡献率相对较低，各影响因素的 q 值均小于 0.5，表明静态角度下 NPP 空间分布现状的主导影响因子与动态角度下 NPP 变化的主导影响因子存在差异性。结合前人已有的研究分析认为，这是由于 NPP 的空间分布现状主要受植被和气候等自然因素的影响，而 NPP 的变化则同时受到自然和人类活动的影响（如城镇扩张，过度放牧，生态保护工程等）^[32-33]，且在一定程度上尤其是人类活动密集的地区人类活动对 NPP 变化的影响大于气候等自然因素。

表 3 各因子变化对 NPP 变化的贡献率

Table 3 The contribution rate of the variation of each factor to the variation of NPP

	NDVI	太阳辐射	年降雨量	年均温度
q	0.4637	0.2926	0.4464	0.1110
p	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

通过对各因素的交互探测发现（表 4），不同因素的两两组合对 NPP 的变化都具有交互作用，且表现为双因子增强或者非线性增强。其中 NDVI 与太阳辐射、NDVI 与年降雨量、NDVI 与年均温度、太阳辐射与年降雨量的交互作用对 NPP 的变化的交互作用为双因子增强，太阳辐射与年均温度、年降雨量与年均温度的交互作用为非线性增强。NDVI 与年降雨量的交互作用对 NPP 变化的相对影响最大（q=0.6306），其次为年降雨量与年均温度的交互

作用（q=0.6105），而太阳辐射与年均温度的交互作用对 NPP 变化的影响最小（q=0.4861）。该结果表明，自然因素中植被和降雨的协同作用是 NPP 变化的主导因子。与静态角度下 NPP 的空间分布现状各因素的交互作用贡献率相比，整体上各交互贡献率 q 值较小，分析认为这也是没有考虑人类活动得影响导致的。因此，在环境治理中除考虑自然因素的影响外，还应将人类活动的影响纳入考虑范围内。

通过生态探测比较各个影响因子变化对于 NPP

变化影响的显著差异性,结果表明除 NDVI 和年降雨量无明显显著性外,其余因素之间均存在显著差异(表 4)。

表 4 各因子交互作用对 NPP 变化的影响

Table 4 The influence of interaction of various factors on the change of NPP

	NDVI	太阳辐射	年降雨量	年均温度
NDVI	0.4637**			
太阳辐射	0.5773**	0.2926**		
年降雨量	0.6306	0.6004**	0.4464**	
年均温度	0.5515**	0.4861**	0.6105**	0.1110**

注:“_”表示 X1 和 X2 的交互作用为非线性增强,无下划线表示双因子增强。**表示在生态探测中, X1 和 X2 对 NPP 动态变化的影响存在着显著的差异。

5 结 论

本文基于改进的 CASA 模型估算三江源地区 2010 和 2015 年 NPP 空间分布及动态变化,并利用地理探测器探讨了影响因子及其之间交互作用对 NPP 空间分布现状与动态变化的影响,主要得出以下结论:

(1) 整体上三江源地区 NPP 空间分布差异明显,自东向西 NPP 逐渐减小。2015 年较 2010 年 NPP 平均值降低 $51.99\text{gC/m}^2/\text{a}$,其中中部地区 NPP 减小幅度大于西部地区, NPP 减小主要集中在 $0\sim 100\text{gC/m}^2/\text{a}$,而东部地区 NPP 增加,并且 NPP 减少量大于增加量。

(2) 利用地理探测器从静态角度定量探讨 7 个影响因子对 NPP 空间分布现状的影响,发现 7 个影响因子的贡献率不同,整体上表现为植被因素>气候因素>地形因素。NDVI 的贡献率最高,其次为太阳辐射和年降雨量,坡向的贡献率相对最小,各因子的交互作用都表现为双因子增强。

(3) 从动态角度分析各因子变化对 NPP 变化的影响,NDVI 仍是贡献率最大的因子,其次为年降雨量,且各因子的交互作用除双因子增强外,部分因子之间还表现出非线性增强。相较于 NPP 的空间分布现状,各因子及其交互作用对 NPP 变化的贡献率均较低,表现出 NPP 空间分布和变化影响要素的复杂性和多样性。

(4) 地理探测器在定量评价 NPP 的影响因素中具有较好的效果,这也是在全球或区域尺度中研究植被空间分布及其变化的一种思路。

需要说明的是,本文考虑到研究区的实际概况及数据获取等原因,仅从植被、气候和地形方面探讨了 NPP 的自然影响因素。而人类活动例如人口密度增加、过度放牧等指标也是影响 NPP 变化的重要因素,未来的研究会将人类活动因素纳入考虑范围,

共同探讨自然因素和人类活动对 NPP 的影响。

参考文献(References):

- [1] Liang W, Yang Y, Fan D, et al. Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 204: 22-36.
- [2] Chen T, Peng L, Liu S, et al. Spatio-temporal pattern of net primary productivity in Hengduan Mountains area, China: impacts of climate change and human activities[J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(6): 948-962.
- [3] Xu H, Wang X, Zhang X. Alpine grasslands response to climatic factors and anthropogenic activities on the Tibetan Plateau from 2000 to 2012[J]. Ecological Engineering, 2016, 92: 251-259.
- [4] Wang X, Tan K, Chen B, et al. Assessing the Spatiotemporal Variation and Impact Factors of Net Primary Productivity in China[J]. Scientific Reports, 2017, 7:44415.
- [5] Liu Y, Yang Y, Wang Q, et al. Evaluating the responses of net primary productivity and carbon use efficiency of global grassland to climate variability along an aridity gradient[J]. Science of The Total Environment, 2019, 652: 671-682.
- [6] 张振宇,钟瑞森,李小明,孙浩.中国西北地区NPP变化及其对干旱的响应分析[J].环境科学研究,2019,32(03):431-439.
- [7] Chu C, Bartlett M, Wang Y, et al. Does climate directly influence NPP globally?[J]. Global Change Biology, 2016, 22(1): 12-24.
- [8] 朱士华,艳燕,邵华,李超凡.1980—2014年中亚地区植被净初级生产力对气候和CO₂变化的响应[J].自然资源学报,2017,32(11):1844-1856.

- [9] 杨会巾, 李小玉, 刘丽娟等. 基于耦合模型的干旱区植被净初级生产力估算[J]. 应用生态学报, 2016, 27(06): 1750-1758.
- [10] 姬盼盼, 高敏华, 杨晓东. 中国西北部干旱区NPP驱动力分析——以新疆伊犁河谷和天山山脉部分区域为例[J/OL]. 生态学报, 2019(08):1-11[2019-04-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20190118.0923.008.html>.
- [11] 王雪, 于德永, 郝蕊芳, 乔建民, 杜金荣. 深圳市植被净初级生产力动态及其与气候因子的关系分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(03): 357-364.
- [12] Wang J, Zhang T, Fu B. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. Ecological Indicators, 2016, 67: 250-256.
- [13] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(01): 116-134.
- [14] Luo L, Mei K, Qu L, et al. Assessment of the Geographical Detector Method for investigating heavy metal source apportionment in an urban watershed of Eastern China[J]. Science of The Total Environment, 2019, 653: 714-722.
- [15] 赵小风, 李娅娅, 赵雲泰, 田志强. 基于地理探测器的土地开发度时空差异及其驱动因素[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(11): 2425-2433.
- [16] 马致远. 三江源地区水资源的涵养和保护[J]. 地球科学进展, 2004(S1): 108-111.
- [17] 沃笑, 吴良才, 张继平, 张林波, 刘伟玲. 基于CASA模型的三江源地区植被净初级生产力遥感估算研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(09): 45-50.
- [18] 曲艺, 王秀磊, 栾晓峰, 李迪强. 基于不可替代性的青海省三江源地区保护区功能区划研究[J]. 生态学报, 2011, 31(13): 3609-3620.
- [19] 石磊, 马俊飞, 杨太保. 基于“GIS/RS”技术的三江源地区生态环境建设的研究[J]. 水土保持研究, 2005(4): 212-214.
- [20] Lanorte A, Lasaponara R, Lovullo M, et al. Fisher-Shannon information plane analysis of SPOT/VEGETATION Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) time series to characterize vegetation recovery after fire disturbance[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 26: 441-446.
- [21] 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[J]. 植物生态学报, 2007(03): 413-424.
- [22] 罗悦, 俞文政, 袁真艳. 淮北平原太阳总辐射的估算及时空特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(05): 1031-1042.
- [23] 廖顺宝, 李泽辉, 游松财. 气温数据栅格化的方法及其比较[J]. 资源科学, 2003(06): 83-88.
- [24] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.
- [25] 孟元可, 叶许春, 徐力刚, 徐昔保, 范宏翔, 黄涛. 2000-2015年鄱阳湖区植被净初级生产力变化及驱动因素分析[J]. 湿地科学, 2018, 16(03): 360-369.
- [26] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 于德永, 扈海波. 中国典型植被最大光利用率模拟[J]. 科学通报, 2006(06): 700-706.
- [27] Wang, Jin - Feng, Li, Xin - Hu, Christakos G , et al. Geographical Detectors - Based Health Risk Assessment and its Application in the Neural Tube Defects Study of the Heshun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [28] 李佳泓, 陆大道, 徐成东, 李扬, 陈明星. 胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化[J]. 地理学报, 2017, 72(01): 148-160.
- [29] 王欢, 高江波, 侯文娟. 基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019(02): 271-286.
- [30] 黄玫, 季劲钧, 彭莉莉. 青藏高原1981~2000年植被净初级生产力对气候变化的响应[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(05): 608-616.
- [31] 倪向南, 郭伟, 乔凯. 陕北风沙过渡带植被净初级生产力变化特征及原因[J]. 中国沙漠, 2018, 38(04): 889-898.
- [32] 黄玫, 季劲钧, 彭莉莉. 青藏高原1981~2000年植被净初级生产力对气候变化的响应[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(05): 608-616.
- [33] Xu H, Wang X, Zhang X. Alpine grasslands response to climatic factors and anthropogenic activities on the Tibetan Plateau from 2000 to 2012[J]. Ecological Engineering, 2016, 92: 251-259.

说明：该文为经编委会审查通过的录用文章，由于尚未确定具体刊出日期，其内容可能与最后的发表版本稍有差异，请以最后发表为准。