

青藏高原不同季节植被 NPP 空间分异的定量归因

王鸿艺, 汪东川, 王思润, 王志恒, 赵爽, 马颖异, 柴华, 龙慧

(天津城建大学地质与测绘学院, 天津 300384)

摘要: 对人类活动量化中考虑区域生态条件的差异, 基于季节尺度, 利用潜在 NPP 与实际 NPP 计算 HAI, 选取植被类型、高程、坡度等 7 个自然因子与 HAI 进行空间分异探测分析, 以更细的季节尺度揭示多因子的影响规律。结果表明: 在描述青藏高原人类活动对植被 NPP 的空间分异影响方面, HAI 的解释力与显著性均优于人类活动值, 其解释力最高为 0.714。在多因子影响植被 NPP 空间分异方面, 自然与人为因子均表现出明显季节差异, 夏季人类活动解释力最高, 春、秋季减弱, 冬季则主要受自然因子影响。其中, 坡度、温度、法向直射辐射量与散射辐射量在春、秋、冬季表现出单一的驱动影响, 植被生存条件较好的夏季, 因子出现明显拐点, 降水因子的限制阈值随季节变化。因子交互作用中, 人类活动、降水、气温及植被类型 4 个因子之间产生的交互作用是影响青藏高原 NPP 的主要驱动力。综合人类活动及多个自然因子, 在青藏高原植被生态工程建设中, 需主要考虑人类活动、降水、气温及植被类型 4 个因子, 各季节主导因子不同。在干旱少雨地区, 人类活动应被重点考虑。研究结果可为不同植被生境条件下的区域提供生态系统管理的参考依据。

关键词: 净初级生产力; 青藏高原; 地理探测器; 人类活动; 季节差异

中图分类号: X87; X24

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0225-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.03.029

Quantitative Attribution of Spatial Variability of NPP in Different Seasons of Qinghai-Tibet Plateau

WANG Hongyi, WANG Dongchuan, WANG Sirun, WANG Zhiheng,

ZHAO Shuang, MA Yingyi, CHAI Hua, LONG Hui

(School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384)

Abstract: The human activity impact index (HAI) was calculated based on the potential NPP and the actual NPP. Seven natural factors, such as vegetation type, elevation and slope, were further selected and analyze the spatial differentiation combined with HAI, so as to reveal the influence rules of multiple factors at a more detailed seasonal scale. The results showed that the explanatory power and significance of HAI were better than that of human activities in describing the spatial differentiation of vegetation NPP in the Qinghai-Tibet Plateau. In terms of the spatial differentiation of NPP affected by multiple factors, both natural factors and man-made factors showed obvious seasonal differences. The explanatory power of human activities was the highest in summer, weakened in spring and autumn, and was mainly affected by natural factors in winter. Among them, slope, temperature, normal direct radiation and scattered radiation showed a single driving influence in spring, autumn and winter, in summer when vegetation living conditions were better, the factors appeared obvious inflection point, precipitation factor limit threshold changed with the season. In the interaction of factors, the interaction among human activities, precipitation, temperature, and vegetation types was the main driving force which affect NPP in the Qinghai-Tibet Plateau. Combining HAI and multiple natural factors, in the construction of vegetation ecological engineering on the Qinghai-Tibet Plateau, four factors (human activities, precipitation, temperature, and vegetation type) should be mainly considered, and the dominant factors were different in different seasons. In arid and rainless areas, human

收稿日期: 2022-11-08

资助项目: 第二次青藏高原科学考察项目(2019QZKK0608); 国家自然科学基金项目(41971310)

第一作者: 王鸿艺(1998—), 女, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事景观遥感与生态保护研究。E-mail: wanghongyi03@163.com

通信作者: 汪东川(1972—), 男, 河北唐山人, 博士, 硕士生导师, 主要从事景观遥感与生态保护研究。E-mail: mrwangdc@126.com

activities should be given priority. The study aims to provide a reference basis for regional ecosystem management in areas under different vegetation habitat conditions.

Keywords: net primary productivity; Qinghai-Tibet Plateau; geographic detector; human activity; seasonal difference

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)指生态系统中植物群落在单位时间与面积上产生有机碳量,是衡量生态系统健康和生态平衡的重要指标^[1]。过多碳排放导致气候变化等全球性环境及人类安全问题^[2-4],近 30 年,全球植被 NPP 总体上显著增加^[5],青藏高原作为地球上海拔最高的地理单元,生态系统脆弱且对气候变化和人类活动十分敏感^[6-7]。青藏高原环境变化不仅影响当地居民生活,对世界气候变化也产生重要影响。因此,青藏高原生态与环境问题愈加引起人们的重视。

以往对青藏高原植被 NPP 研究集中自然条件作用以及其与人类活动综合作用的分析,其时间尺度多为年际。刘杰等^[8]研究表明,植被 NPP 与气温和降水量变化显著正相关,暖湿化气候变化趋势是促进植被 NPP 显著增加的重要动力;栗忠飞等^[9]发现,植被类型和区域地理条件均影响 NPP 对气候变化的响应;陈舒婷等^[10]研究青藏高原人类活动与自然因子对 NPP 影响的相对关系的年际变化分异发现,气候变化和人类活动在青藏高原植被 NPP 变化过程中的相对作用存在显著的时空差异性,在空间上,呈现“四线一五区”的格局;Luo 等^[11]研究表明,青藏高原植被 NPP 空间分异受到自然条件与人类活动共同作用,其中,人类活动的影响更甚。由于数据尺度限制,人类活动与自然条件对植被 NPP 作用的变化规律很难精确到季节时间尺度上。

NPP 季节变化受到植物生长阶段、干热季节变化^[12]以及农业施肥、放牧等人类活动^[13]的影响,主要包括自然条件与人类活动两方面。当前,关于自然条件的因子选取较为成熟,但针对人类活动指标研究还不完善。人类活动主要通过农种、放牧等活动影响,相较自然因子难以定量,当前人类活动描述方法分为直接空间化与间接空间化^[14]。例如,基于直接空间化(土地利用变化^[15]、行政区统计数据^[16])表征人类活动,方法受制于当量折算方法,适用于小尺度的精细化研究^[17]。而依据间接空间化量化人类活动的方法,数据空间细节丰富,适用于大尺度区域研究^[14]。不同植被生境条件下,人类活动对植被的影响程度不同^[18]。人类活动对植被 NPP 空间分异的相对影响仍需进一步研究。

将无人类活动影响下的潜在 NPP 作为区域植被条件,构建人类活动影响指数(human activity impact

index, HAI),定量描述区域人类活动对植被 NPP 的作用方向及影响。基于地理探测器,综合坡度、植被类型等 7 个自然因子以及改进的人类活动因子,探究青藏高原植被 NPP 空间分异单因子影响规律及多因子交互作用的季节差异。在不同植被生境条件下,以更细的季节尺度揭示多因子的影响规律,以期优化区域生态系统管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青藏高原(73°18′52″—104°46′59″E, 26°00′12″—39°46′56″N)平均海拔 4 500 m,是中国面积最大、世界上海拔最高的高原(图 1)。青藏高原地理位置和生态环境特殊,高原腹地年均气温在 0℃以下,年平均降水量地理差异明显,全年干湿季分明。区域生态脆弱,加之植被的种类多、人口少、经济发展水平低等问题的存在,一定程度上制约该地区的保护力度。但近年来,国家保护区及其他生态保护工程的积极建设,使得青藏高原植被情况转好,植被 NPP 整体呈现上升的趋势^[19]。

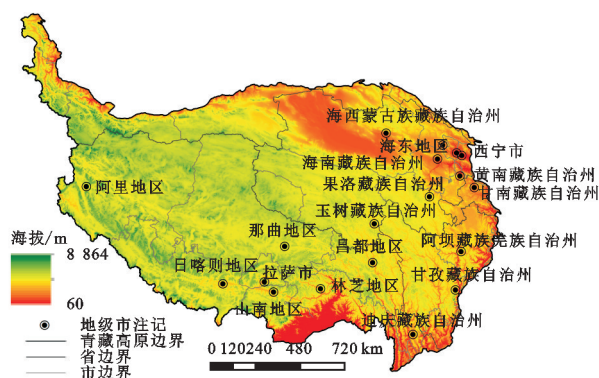


图 1 研究区概况

1.2 数据来源及其预处理

NPP 数据源自 MODIS 数据集(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),空间分辨率为 1 km,时间范围为 2000—2020 年。降水、气温数据源自哥白尼气候数据 ERA5 数据集(<https://cds.climate.copernicus.eu/>),分辨率为 0.5°。高程与青藏高原生态保护和农牧业调控区划数据源自国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>),基于高程计算得到坡度数据。植被类型源自中国科学院资源环境科学与技术中心(<http://www.resdc.cn>)。法向直射辐射量、散射辐射量源自 Solar-gis 数据集(<https://solargis.com/cn>)。数据处理于

2021 年 12 月开始,以上数据均通过裁剪、投影及变换等处理,处理范围统一为青藏高原边界。

1.3 研究方法

1.3.1 人类活动量化及影响指数 当前研究^[10]中多以区域潜在 NPP 与实际 NPP 的差(NPP_h)表征人类活动对植被 NPP 产生的影响,但区域条件不同造成人类活动影响程度的差异。NPP_h本身代表人类活动影响 NPP 变化的绝对值,区域之间的经济发展和区域生态条件差异使得土地利用效率及相对影响程度不同^[20],通过 NPP_h不能准确反映人类活动对区域 NPP 的影响程度。将 NPP_p作为区域条件,构建 HAI 定量描述区域人类活动对植被 NPP 的作用方向及相对影响程度。基于此,考虑区域条件构建指数 HAI,以期准确描述不同区域条件下人类活动对植被 NPP 的影响。

研究将潜在 NPP 作为区域植被生境条件,通过 HAI 指数定量描述人类活动对植被 NPP 的区域相对作用强度,用以替代当前研究中的人类活动值即 NPP_h。指数依据潜在 NPP 与 NPP 实际值^[21]计算,计算公式为:

$$HAI = \frac{NPP_h}{NPP_p} = \frac{NPP_t - NPP_p}{NPP_p} \quad (1)$$

式中:NPP_h为人类活动产生的 NPP 变化值(gC/m²);NPP_t为实际 NPP(gC/m²);NPP_p为潜在 NPP(gC/m²)。当 HAI 为负值时,表示人类活动对植被 NPP 起到负面干扰作用;反之,表示人类活动对区域植被起到保育甚至治理作用,促进植被 NPP 的增加。

NPP_t变化受气候和人类活动影响,NPP_p估算模型基于气象条件运行。为减小气候变化带来的影响,计算 20 年间平均气象数据,得到 2000—2020 年间 NPP_p以及 NPP_t均值数据。研究利用 Miami 模型^[10]估算 NPP_p,公式为:

$$NPP_p = \min \left\{ \left[1 + \frac{3000}{\exp(1.315 - 0.119T)} \right] \cdot \left(3000 [1 - \exp(-0.00064P)] \right) \right\} \quad (2)$$

式中: T 为年均温度(°C); P 为年降水量(mm)。

1.3.2 地理探测器 基于地理探测器中的因子探测器与交互探测器^[22]探究多因子对植被 NPP 空间分异的影响。同时,基于因子探测器验证 HAI 与人类活动影响值对人类活动描述的准确性。其中,因子探测器探测因子对因变量空间分布的解释力大小,用 q 值度量。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (3)$$

式中: $h=1,2,\dots,L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层,即分类或分区; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h 和 σ 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。 q 的取值范围为 $0 \sim 1$,值越大表示自变量 X 对因变量 Y 的解释力越强,反之则越弱。同时,探测器采用 p 值检验 q 值的显著性。交互探测器可探测影响因子间的交互作用,包括非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立及非线性增强 5 类。

1.3.3 因子选取 NPP 空间分异主要受到植被类型、自然条件和人类活动的影响。其中,植被类型与自然条件均通过影响植物的固碳机制使植被 NPP 的累积量发生变化,结合前人研究^[8-11]选取植被类型、气温、降水等 7 个因子。而人类活动则主要通过影响植物覆盖度来进行区域植被 NPP 总量的影响,通过潜在 NPP 与实际 NPP 差值全面描述。研究考虑数据分辨率及地理探测器的数据上限,创建全区范围内 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ 的网格,结果输入到地理探测器中进行计算。基于地理探测器进行空间分异驱动分析,非类型数据需进行离散化分级处理(表 1),基于王劲峰等^[22]提出的数据离散化方法和先验知识进行,选取所得的 q 值最大的分级。其中,坡度按照水土保持综合治理规划通则(GB_T 15772—1995)^[23]划分为 6 类。

对 HAI 进行合理性验证的结果显示,按照等间距法将其划分为 4~6 类,可以最大程度地拟合青藏高原当前人类活动空间分异。但合理性验证中,数据经过区域统计处理,原数据为栅格数据且内部差异更大,对应的原有分类方法不能覆盖整个数据。因此,文章基于合理性验证的分类方法,多次试验选取 q 值最大的分类方法。

2 结果与分析

2.1 植被 NPP 及人类活动空间分异特征

将青藏高原植被 NPP 年内变化分为 4 个阶段(图 2),对应春(3—5 月)、夏(6—8 月)、秋(9—11 月)、冬(12—翌年 2 月)。为使得分布图在季节间具有对比性,将各季节 NPP 统一等距划分为低($[0, 10) \text{ gC/m}^2$)、较低($[10, 20) \text{ gC/m}^2$)、一般($[20, 30) \text{ gC/m}^2$)、较高($[30, 40) \text{ gC/m}^2$)和高($[40, +\infty) \text{ gC/m}^2$)。基于间接空间化法量化青藏高原 NPP_h值即人类活动对植被 NPP 的扰动值,并基于此计算 HAI 指数,其空间分布见图 3。

由图 2 可知,表 2 季节 NPP 各等级的空间分布及面积占比,青藏高原 NPP 仍以低值区域为主,在空间上呈由东南部地区并向西北递减的态势。四季低值区域占比均 $> 55\%$,主要位于西北地区,且 HAI

均值绝对值均 <1 。在低—较低—一般—较高 4 个等级,植被 NPP 等级升高区域面积占比降低。高值区域占比在夏、春季分别升高至 22.568%,2.991%,在秋、冬季持续下降至 2.944%,0.007%。

表 1 植被 NPP 影响因子及其离散化

类型	符号	影响因子	离散化分级	单位
自然因子	X_1	植被类型	[青藏高原高寒植被、温带荒漠、温带草原、热带季雨林、亚热带常绿阔叶林、暖温带落叶阔叶林]	—
	X_2	气温(月均温)	[0,260);[260,270);[270,280);[280,290);[290,+\infty)	K
	X_3	降水(月总量)	[0,0,1.5);[1.5,3.0);[3.0,4.5);[4.5,6.0);[6.0,+\infty)	mm
	X_4	坡度	[0,5);[5,8);[8,15);[15,25);[25,35);[35,90)	(°)
	X_5	海拔	[0,1);[1,2);[2,3);[3,4);[4,5);[5,6);[6,7);[7,+\infty)	km
	X_6	法向直射辐射量	[0,1163);[1163,1440);[1440,1717);[1717,939);[1939,+\infty)	MJ/m ²
	X_7	散射辐射量	[322.88,534.36);[534.36,594.99);[594.99,645.76);[645.76,697.26);[697.26,865.64)	MJ/m ²
人为因子	X_8	人类活动影响指数(HAII)	[-1,0);[0,1);[1,2);[2,3);[3,4);[4,+\infty)	—

由图 3、表 2 季节 NPP 各等级的 HAII 均值可知,NPP 空间分布差异显著。夏季 HAII 均值随着青藏高原 NPP 升高而升高,两者空间分布格局相似。同时,其他季节 NPP 与 HAII 均值分布格局差异明显,除较低区域 HAII 均处于低值外,各季节其余区

域均值相近。表明青藏高原植被 NPP 受人类活动的影响效应多集中在夏季,区域属高寒干旱区,夏季雨水充足、温度适宜,满足农耕放牧的基本条件。人类活动是影响 NPP 的主要因子之一,从而间接影响其值分布。

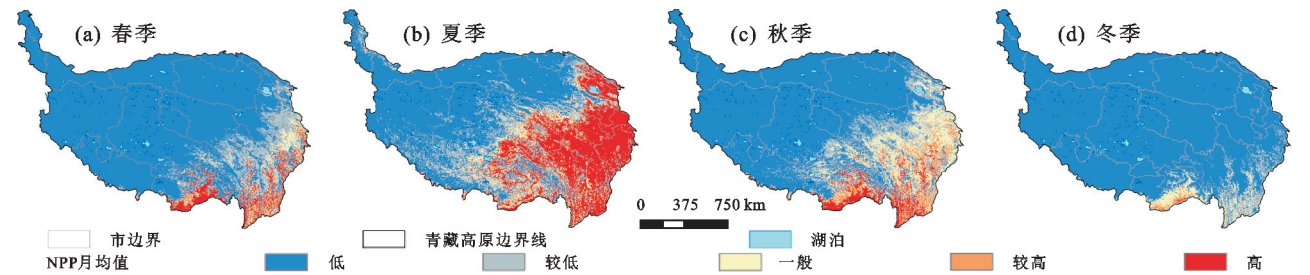


图 2 2000—2020 年青藏高原植被 NPP 各季节的月均值

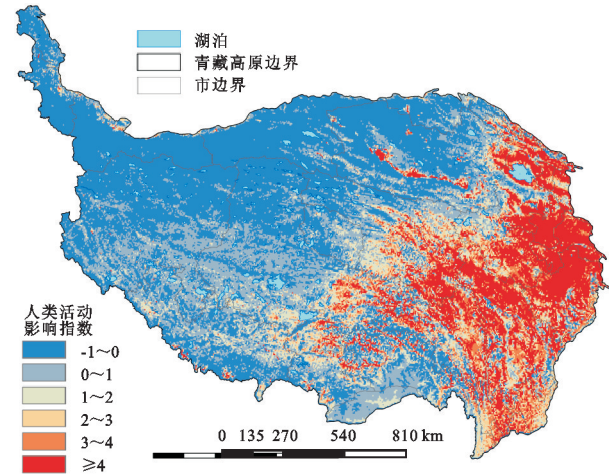


图 3 2000—2020 年青藏高原 HAII 空间分布

2.2 人类活动影响指数与人类活动值

青藏高原植被 NPP 主要受到生态保护与农牧业活动等形式下人类活动的影响^[24],青藏高原生态保护和农牧业调控区划可以体现青藏高原人类活动的空间差异。通过地理探测器,分析不同离散化条件下区域 NPP_h与 HAII 的均值与总值对青藏高原生态保护和农牧业调控空间分异的解释力 q 值,结果见图 4。

结果表明,在不同离散化条件下,HAII 对青藏高原生态保护和农牧业调控活动空间分异的解释力与显著性均高于 NPP_h,其解释力最高为 0.714。在空间分异上,通过 HAII 定量描述人类活动对植被 NPP 的区域作用强度具有一定的合理性。同时,在一定程度上优化现有植被 NPP 空间分异中的人类活动因子。

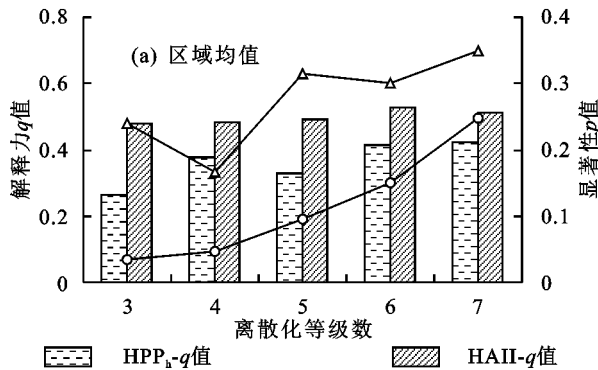
表 2 2000—2020 年植被 NPP 不同季节各等级面积占比及 HAII 区域均值

季节	低		较低		一般		较高		高	
	面积占比/%	HAII _{mean}	面积占比/%	HAII _{mean}	面积占比/%	HAII _{mean}	面积占比/%	HAII _{mean}	面积占比/%	HAII _{mean}
春季	83.052	0.403	8.869	4.536	3.086	4.573	2.002	4.215	2.991	4.303
夏季	55.017	-0.358	11.804	0.695	5.910	1.430	4.701	2.158	22.568	4.519
秋季	71.868	-0.003	11.391	3.099	8.755	4.576	5.042	4.208	2.944	4.327
冬季	94.485	0.930	3.312	4.111	2.037	3.588	0.159	2.486	0.007	8.830

注:HAII_{mean}表示对应区域内 HAII 的均值。

2.3 植被 NPP 空间分异驱动力识别

2.3.1 因子探测 为进一步探究相关指标对青藏高原植被 NPP 的影响情况,采用地理探测器分析多因子空间分异驱动力,其定量结果 q 值见图 5。结果表明,各因子对青藏高原地区植被 NPP 空间分异的影响程度在时间上均有差异性,各季节主导驱动因子不同。 X_8 (HAI)因子在夏季达到最高值,其解释力远超其余因子,表明夏季期间植被 NPP 的分布与人



类活动密切相关。因此,进一步证明,影响植被 NPP 的人类活动聚集在夏季。春、秋季主导因子变更为 X_3 (降水),解释力分别为 0.405, 0.565。期间 X_8 解释力度下降,受自然因子影响大于人为因子影响,但其解释力仍位于前 3。冬季影响植被 NPP 的主导因子为 X_1 (植被类型), X_8 解释力最弱,表明冬季植被 NPP 空间分布受人为因子作用较小,其主要受自然因子影响。

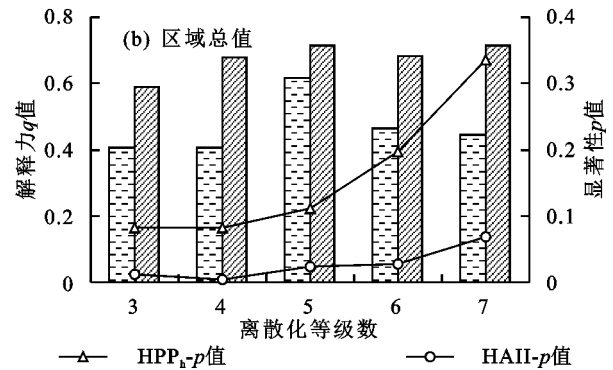


图4 人类活动值与人类活动影响指数对比

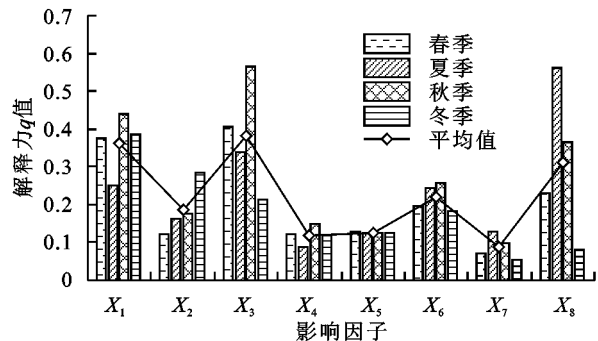


图5 各季节因子贡献度对比

自然因子包括植被类型、气象、地形及太阳辐射 4 类,除高程季节差异较小外,其余因子均存在一定的递变规律。太阳辐射类因子中, X_6 (法向直射辐射量)各季节解释力均大于 X_7 (散射辐射量), X_6 对 NPP 空间分异的解释力在秋季达到最高,而 X_7 则在夏季。两因子解释力变化幅度较小, X_6 、 X_7 波动幅度仅为 0.077, 0.075。 X_1 (植被类型)因子的各季节解释力均位于前 3。其中,夏季解释力较低,仅为 0.249,其余 3 个季节则均 > 0.375 。地形因子中的 X_4 (坡度)在夏季达到最低值,其解释力较强的季节为秋季。 X_5 (高程)各季节解释力度相差不足 0.010, q 值在 0.125~0.129 波动。气象类因子中 X_2 (气温)呈现递增趋势,在冬季达到最高。同时, X_2 解释力仅在冬季大于 X_3 (降水),其余季节 X_3 解释力远大于 X_2 。7 个自然因子中,高程、散射与坡度因子解释力较弱, q 值均不足 0.200。

2.3.2 单因子影响探测 为探究单因子对青藏高原植被 NPP 的影响规律,统计青藏高原各因子等级内

的植被 NPP 均值,其统计结果见表 3。结果表明,青藏高原植被 NPP 对因子的响应呈现正向增长的包括 X_8 、 X_7 、 X_2 、 X_3 及 X_4 。其中,随因子等级升高呈现明显递增规律的只有 X_8 ,其余因子均在高等级出现一定幅度的反向变化。负向响应因子包括 X_5 、 X_6 ,表现为青藏高原植被 NPP 随因子等级升高而降低。 X_1 的等级之间不存在强度递变关系,为单独的对应关系。

X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_7 以 X_8 及对青藏高原植被 NPP 整体呈现正向影响,因子影响规律可分为 3 类。1 类为仅在夏季出现因子限制增长趋势,包括 X_2 、 X_3 及 X_4 。植被 NPP 均在夏季表现为升高—降低趋势,而在其余季节表现为随等级升高而平稳上升的趋势。1 类为多季节出现因子限制增长趋势,包括 X_7 。除冬季外,均出现回落。其中,夏季在第 5 阶段出现,而春秋 2 季则在第 4 阶段出现。第 3 类为 X_8 ,其对植被 NPP 空间分异呈现明显的正向影响。随着 X_8 等级升高植被 NPP 均值升高,且在夏季影响强度明显高于其余 3 个季节。

X_5 、 X_6 对植被 NPP 的空间分异呈现负向影响。其中,青藏高原植被 NPP 随高程升高呈现降低趋势,最终在高程 > 7 km 区域趋近于 0。四季均在高程 < 1 km 区域达到最高值,在 3~4 km 区域出现小幅度回升。 X_6 在夏季则表现为升高—降低趋势,在第 2 阶段达到最高值,其余季节则表现为随 X_5 升高而降低。 X_1 对植被 NPP 的空间分异呈现单独的对应关系,在不同生长阶段多呈现先增加后减少的趋势,除热带季雨林外,均在

夏季达到最高值。占据青藏高原大部分的高寒植被整体 NPP 较低,夏季升高幅度较小。

在水热条件较好的夏季,过高的 X_2 、 X_4 、 X_6 以 X_7 会对植被 NPP 造成负面影响,其影响拐点分别出现在 $280\sim 290\text{ K}$, $15^\circ\sim 25^\circ$, $1\,163\sim 1\,440\text{ MJ/m}^2$ 及 $645.76\sim 697.26\text{ MJ/m}^2$ 。 X_3 在春、夏、秋季均出现明显的

的最优区域,夏季为 $4.5\sim 6.0\text{ mm}$,春、秋季则降低至 $3.0\sim 4.5\text{ mm}$ 。 X_8 则呈现显著正向影响,无明显的限制作用。 X_5 通过影响水热条件、土壤成分等因子,造成不同等级的区域植被生存环境不同,形成垂直带性分异,从而造成植被 NPP 纵向分布格局的差异。

表 3 不同季节因子各等级对应植被 NPP 均值变化 单位:gC/m²

因子	季节	离散化等级							
		1	2	3	4	5	6	7	8
植被类型(X_1)	春	2.873	1.368	9.317	20.145	18.114	16.938	—	—
	夏	17.682	9.500	54.759	22.260	47.582	84.383	—	—
	秋	5.560	2.286	12.640	27.146	23.530	23.206	—	—
	冬	0.331	0.091	0.844	11.625	6.382	2.751	—	—
气温(X_2)	春	0.208	2.788	9.353	13.946	—	—	—	—
	夏	—	1.573	11.716	32.913	2.388	—	—	—
	秋	0.316	4.368	11.969	26.678	—	—	—	—
	冬	0.409	2.447	15.592	22.076	—	—	—	—
降水(X_3)	春	1.850	13.262	22.080	21.067	23.867	—	—	—
	夏	1.687	5.073	18.451	43.502	40.793	—	—	—
	秋	2.139	15.663	26.689	26.116	30.525	—	—	—
	冬	1.201	9.297	10.493	13.908	17.865	—	—	—
坡度(X_4)	春	1.918	2.997	4.629	8.608	10.812	13.967	—	—
	夏	11.413	15.523	23.368	32.456	30.352	28.443	—	—
	秋	3.474	5.225	7.885	12.705	14.848	17.564	—	—
	冬	0.168	0.510	0.937	2.494	3.849	5.765	—	—
海拔(X_5)	春	51.891	31.269	8.910	11.374	5.116	1.702	0.535	0
	夏	40.000	34.002	18.587	38.061	23.927	8.579	2.407	0
	秋	41.356	31.144	9.368	15.237	8.795	3.400	1.201	0
	冬	31.866	17.041	3.390	3.418	1.215	0.290	0.124	0
法向直射辐射量(X_6)	春	15.615	11.086	8.306	3.055	1.607	—	—	—
	夏	28.755	40.136	38.369	16.348	8.278	—	—	—
	秋	19.510	16.108	13.013	5.171	3.113	—	—	—
	冬	6.796	3.346	1.901	0.494	0.224	—	—	—
散射辐射量(X_7)	春	1.624	2.089	5.924	8.606	7.241	—	—	—
	夏	7.739	12.076	25.342	33.428	13.570	—	—	—
	秋	3.322	4.138	8.869	12.777	9.618	—	—	—
	冬	0.331	0.242	1.351	2.457	3.197	—	—	—
HAII(X_8)	春	1.914	3.755	7.785	9.536	13.371	15.109	—	—
	夏	6.788	14.043	28.022	35.690	50.444	63.244	—	—
	秋	3.197	6.065	11.658	14.779	19.477	21.816	—	—
	冬	0.581	1.041	2.396	2.917	3.802	3.747	—	—

2.3.3 多因子交互探测 交互探测器运行结果中,解释力前五的主导因子见表 4,青藏高原任意两因子交互作用下 q 值均大于单因子 q 值,呈增强趋势。同时,交互探测器结果显示因子间交互作用均为双因子增强。各时期的最强主导交互因子对青藏高原 NPP 的解释力均在 0.488 以上,且多为该时期主导因子与其他因子的组合,尤其体现在夏季。

人为因子与自然因子的交互作用影响力均有增

强态势,进一步说明植被 NPP 空间分异受自然条件与人类活动的共同作用。人为因子与自然条件共同作用的交互因子与自然因子相互作用的交互因子各占 50%。从时间维度的季节来看,除冬季外,其余 3 个季节的最强主导交互因子均为 $X_3 \cap X_8$,最高为夏季的 0.641。人类活动在此期间均表现明显的解释力。春、秋季主导因子组成相似,多为 X_3 与 X_1 与其他因子的交互,并存在部分包含 X_8 的交互因子。表明人类活动在夏季解释力最强,春、秋季虽然减弱但仍存在一定的解释力度。各季节均存在 $X_1 \cap X_8$ 因子,最低为冬季的 0.413。表明 X_1 与 X_8 因子在各季节对植被 NPP 空间分异的解释力均较为显著。

3 讨论

人类活动因子研究结果表明,植被 NPP 高值地区 HAI 值普遍较高,受人类活动影响较大,其空间分布与陈舒婷等^[10]研究基本一致。对比发现,HAI 相较人类活动因子 NPP_h ,生态条件较差的区域影响指数相对较高。尤其是在柴达木盆地,区域气候干旱少雨,不适宜植被生长。但生态治理工程成果显著,区域绿洲面积扩大,人类影响较高,导致 HAI 值较高。相对于 NPP_h 直接反映土地利用强度的改变,HAI 考虑区域条件,从区域相对影响的角度分析人类活动对植被 NPP 的影响。结果充分反映不同植被生境条件下人类活动影响的空间异质性,为植被 NPP 的空间分异研究提供一种新思路,在一定程度上弥补现有研究的不足。

表 4 各季节主导交互因子及其影响力

季节	因子/解释力	DIF 1	DIF 2	DIF 3	DIF 4	DIF 5
春季	因子	$X_3 \cap X_8$	$X_2 \cap X_3$	$X_1 \cap X_5$	$X_1 \cap X_2$	$X_1 \cap X_8$
	解释力	0.488	0.484	0.479	0.465	0.462
夏季	因子	$X_3 \cap X_8$	$X_1 \cap X_8$	$X_6 \cap X_8$	$X_7 \cap X_8$	$X_2 \cap X_8$
	解释力	0.641	0.621	0.608	0.597	0.591
秋季	因子	$X_3 \cap X_8$	$X_2 \cap X_3$	$X_1 \cap X_8$	$X_1 \cap X_3$	$X_3 \cap X_5$
	解释力	0.633	0.610	0.607	0.605	0.600
冬季	因子	$X_1 \cap X_2$	$X_1 \cap X_5$	$X_1 \cap X_3$	$X_2 \cap X_6$	$X_1 \cap X_8$
	解释力	0.510	0.482	0.434	0.424	0.413

基于改进的人类因子,结合多个自然因子进一步分析青藏高原植被 NPP 的空间分异驱动。2000—2020 年间,青藏高原植被 NPP 空间分异受自然条件与人类活动的共同影响,总体上,人类活动对植被 NPP 的影响力要强于自然条件,与 Luo 等^[11]研究结果一致。在 8 个因子中,解释力平均值从大到小依次是人类活动>降水>植被类型>法向直射辐射量>气温>海拔>散射辐射量。其中,植被类型>气候

(气温、降水)>地形(高程、坡向),与贺倩等^[25]研究结果一致。但上述研究区域为三江源保护区,人类活动单一,自然因子的解释 q 值相对较高,青藏高原整体情况相对三江源保护区更为复杂。植被 NPP 具有季节性,影响植被 NPP 变化的降水、气温以及人类变化同样有年内变化,进一步分析季节间各因子对青藏高原地区植被 NPP 空间分异的解释力差异,主要体现在各季节主导驱动因子及主导交互作用因子不同。人类活动在夏季解释力最强,春、秋季虽然减弱但仍存在一定的解释力度,冬季则主要受自然因子影响。

4 结论

(1)HAI 相较当前研究中人类活动影响值描述更准确。青藏高原 NPP 以低值区域为主,HAI 均值整体随 NPP 升高而升高。夏季两者空间分布格局相似,表明人类活动主要集中在夏季。

(2)各季节主导驱动因子不同。夏季对青藏高原地区植被 NPP 空间分异的解释力最强的因子为人类活动,春、秋季虽然减弱但仍存在一定的解释力度,主导因子变更为降水,冬季人类活动影响最小,主导因子为植被类型。

(3)不同季节下人类活动因子对植被 NPP 空间分异的影响规律相似,自然因子影响规律则在夏季与其他季节相差较大。人类影响指数在四季均呈现随因子等级升高植被 NPP 均值升高的趋势。在春、秋、冬季,植被 NPP 均值随着自然因子的等级升高出现升高或降低的单一影响趋势,夏季则出现明显影响拐点,尤其体现在气温、降水等因子。

(4)交互探测器结果表明,植被 NPP 的空间分异受自然条件与人类活动的共同作用,两类因子的交互作用影响力均有增强态势。人类活动、降水、气温及植被类型 4 个因子之间产生的交互作用是影响青藏高原 NPP 的主要驱动力。

参考文献:

[1] 高艳妮,于贵瑞,张黎,等.中国陆地生态系统净初级生产力变化特征:基于过程模型和遥感模型的评估结果[J].地理科学进展,2012,31(1):109-117.

[2] Wang S J, Fang C L, Ma H T, et al.Spatial differences and multi-mechanism of carbon footprint based on GWR model in provincial China[J].Journal of Geographical Sciences,2014,24(4):612-630.

[3] Karauskas K B, Miller S L, Schapiro A C. Fossil fuel combustion is driving indoor CO₂ toward levels harmful to human cognition [J]. GeoHealth, 2020, 4 (5): e2019GH000237.

- [4] Cromar K, Howard P, Vásquez V N, et al. Health impacts of climate change as contained in economic Models estimating the social cost of carbon dioxide [J]. *Geo-Health*, 2021, 5(8): e2021GH000405.
- [5] Chen S T, Guo B, Zhang R, et al. Quantitatively determine the dominant driving factors of the spatial-temporal changes of vegetation NPP in the Hengduan Mountain area during 2000—2015 [J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(2): 427-445.
- [6] 刘飞, 刘峰贵, 周强, 等. 青藏高原生态风险及区域分异 [J]. *自然资源学报*, 2021, 36(12): 3232-3246.
- [7] Wei Y Q, Lu H Y, Wang J N, et al. Dual influence of climate change and anthropogenic activities on the spatiotemporal vegetation dynamics over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1981 to 2015 [J]. *Earth's Future*, 2022, 10(5): e2021EF002566.
- [8] 刘杰, 汲玉河, 周广胜, 等. 2000—2020 年青藏高原植被净初级生产力时空变化及其气候驱动作用 [J]. *应用生态学报*, 2022, 33(6): 1533-1538.
- [9] 栗忠飞, 王小莲, 徐钰涛, 等. 1996—2015 年滇西北香格里拉植被净初级生产力变化 [J]. *生态学报*, 2022, 42(1): 266-276.
- [10] 陈舒婷, 郭兵, 杨飞, 等. 2000—2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应 [J]. *自然资源学报*, 2020, 35(10): 2511-2527.
- [11] Luo Z H, Wu W C, Yu X J, et al. Variation of net primary production and its correlation with climate change and anthropogenic activities over the tibetan plateau [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): e1352.
- [12] 崔林丽, 史军, 唐娉, 等. 中国陆地净初级生产力的季节变化研究 [J]. *地理科学进展*, 2005, 24(3): 8-16, 127.
- [13] 涂海洋, 古丽·加帕尔, 于涛, 等. 中国陆地生态系统净初级生产力时空变化特征及影响因素分析 [J]. *生态学报*, 2023, 43(3): 1-15.
- [14] 段群滔, 罗立辉. 人类活动强度空间化方法综述与展望: 以青藏高原为例 [J]. *冰川冻土*, 2021, 43(5): 1582-1593.
- [15] 张心茹, 曹茜, 季舒平, 等. 气候变化和人类活动对黄河三角洲植被动态变化的影响 [J]. *环境科学学报*, 2022, 42(1): 56-69.
- [16] 杨安乐, 张小平, 李宗省, 等. 气候变化和人类活动对祁连山国家公园植被净初级生产力的定量影响分析 [J]. *生态学报*, 2023, 43(5): 1-9.
- [17] 徐勇, 孙晓一, 汤青. 陆地表层人类活动强度: 概念/方法及应用 [J]. *地理学报*, 2015, 70(7): 1068-1079.
- [18] 耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧, 等. 中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应 [J]. *生态学报*, 2022, 42(9): 3557-3568.
- [19] 张懿铨, 胡忠俊, 祁威, 等. 基于 NPP 数据和样区对比法的青藏高原自然保护区保护成效分析 [J]. *地理学报*, 2015, 70(7): 1027-1040.
- [20] 张燕杰, 武俊喜, 潘影, 等. 净初级生产力的人类占用研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2022, 41(2): 341-350.
- [21] 毛德华. 定量评价人类活动对东北地区沼泽湿地植被 NPP 的影响 [D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2014.
- [22] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 15172—2008. 水土保持综合治理规划通则 [S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2008.
- [24] 聂倩文, 何理, 殷闯, 等. 青藏高原农牧业生态风险时空变化特征与分区防控 [J]. *自然资源学报*, 2022, 37(1): 250-262.
- [25] 贺倩, 杨雪琴, 戴晓爱. 2010—2015 年三江源地区植被净初级生产力变化特征及影响因素分析 [J]. *长江科学院报*, 2020, 37(5): 59-66.