

中国八大经济区 GPP 变化及影响因子协同机制

徐勇*, 赵纯, 郭振东, 戴强玉, 盘钰春, 郑志威 (桂林理工大学测绘地理信息学院, 广西 桂林 541006)

摘要: 以中国和八大综合经济区为研究区, 全面分析人文因子、土地利用类型、气候因子和地形因子对植被总初级生产力(GPP)空间分异的影响差异。利用 MODIS GPP 数据、气象数据、土地利用类型、DEM 数据、夜间灯光和人口密度数据等, 基于 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验和地理探测器模型, 在全国和经济区尺度上分析 2000~2020 年植被 GPP 时空变化特征, 探测植被空间分异的影响因子及影响因子间的协同机制。结果表明, 2000~2020 年中国及八大经济区植被 GPP 整体呈波动上升趋势, 呈上升趋势的区域占总面积的 84.46%, 其中, 呈极显著上升区域占 19.86%, 主要分布在黄河中游综合经济区中部和大西北综合经济区东部。影响因子探测结果表明, 湿度、日照时数、降水和土地利用类型是中国植被 GPP 空间分异的主要影响因子, 其中, 湿度的影响力最高, q 值为 0.64。经济区尺度上, 湿度、日照时数、降水是影响东北、黄河中游、大西南和大西北综合经济区植被 GPP 空间分异的主导因子, 而人文因子对东部和南部沿海综合经济区植被空间分异的影响较大。交互作用探测结果表明, 中国植被 GPP 空间分异主要受土地利用类型 \cap 湿度的协同影响, q 值为 0.75。经济区尺度上, 除黄河中游和大西南综合经济区植被 GPP 空间分异主要受降水 \cap 其他因子协同影响外, 其他经济区植被 GPP 空间分异主要受土地利用类型 \cap 其他因子或湿度 \cap 其他因子的协同影响。

关键词: 八大经济区; 植被总初级生产力; 地理探测器; 人文因子; 土地利用类型

中图分类号: X22 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)01-0477-11

Spatio-temporal variation of gross primary productivity and synergistic mechanism of influencing factors in the eight economic zones, China. XU Yong*, ZHAO Chun, GUO Zhen-dong, DAI Qiang-yu, PAN Yu-chun, ZHENG Zhi-wei (College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China). *China Environmental Science*, 2023,43(1): 477~487

Abstract: China and the eight economic zones were considered as the study area. This study aimed to comprehensively analyze the impact of anthropogenic factors, land use types, climatic factors, and topographic factors on the spatial differentiation of vegetation GPP. Using MODIS GPP time series, in situ meteorological data, land use type, DEM, nighttime light, and population density data based on Theil-Sen Median trend analysis, Mann-Kendall significance test, and geo-detector model, the spatio-temporal variation of vegetation GPP from 2000 to 2020 were analyzed, and the influencing factors affecting the spatial differentiation of vegetation GPP were detected both on country and regional scales. The results showed that the vegetation GPP showed a fluctuating upward trend both in China and the eight economic zones from 2000 to 2020. The areas with an upward trend accounted for 84.46% of the total area, of which the areas with extremely significant increases accounted for 19.86%, mainly distributed in the middle of the Yellow River economic zone and east of the Northwest economic zone. The factor detection results showed that relative humidity, sunshine duration, precipitation, and land use types were the dominant factors affecting the spatial differentiation of vegetation GPP in China. On regional scale, relative humidity, sunshine duration, and precipitation were the dominant factors affecting the spatial differentiation of vegetation GPP in the Northeast, middle reaches of the Yellow River, Southwest, and Northwest economic zones, while anthropogenic factors exerted the spatial differentiation of vegetation GPP in the Eastern and Southern coastal economic zones. Interaction detection results showed that the interaction between land use type and relative humidity exhibited the greatest influence on the spatial differentiation of vegetation GPP in China with a q value of 0.75. On regional scale, the spatial differentiation of vegetation GPP in the middle reaches of the Yellow River and Southwest economic zones was mostly affected by the interaction between precipitation and other influencing factors, while the spatial differentiation of vegetation GPP in other economic zones was mainly affected by the interaction between land use type and other influencing factors or relative humidity and other influencing factors.

Key words: eight economic zones; vegetation gross primary productivity; geo-detector model; anthropogenic factor; land use types

植被总初级生产力(GPP)是指陆地植被生态系统中绿色植物通过光合作用固定 CO_2 制造的有机物总量, 表征进入陆地生态系统循环的初始能量, 体现了陆地生态系统植被在自然条件下的生产力^[1-4]。

收稿日期: 2022-06-17

基金项目: 广西自然科学基金资助项目(2020GXNSFBA297160); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD21220133); 国家自然科学基金资助项目(42061059, 42161028)

* 责任作者, 副教授, yongxu@glut.edu.cn

植被群落的演替和繁衍进程在长时间内主要受气候和地形条件的影响,短时间内主要受人类活动的影响.探究植被 GPP 时空演变特征及其驱动因素^[5-8],对于研究全球生态系统植被发展动态和碳循环估算具有重要意义.

近年来,植被 GPP 时空变化及其影响因素成为研究的热点.已有研究在全球^[9]、喀斯特地区^[10]和中国陆地植被生态系统^[11]等不同尺度下对植被 GPP 时空变化进行了分析,研究表明全球尺度上植被 GPP 呈上升趋势,全球喀斯特地区植被 GPP 呈上升趋势是由中国和欧洲主导.例如,中国实施的退耕还林工程主导了中国喀斯特地区植被 GPP 的上升.在中国,人类活动对 GPP 变化具有双重影响,且呈现较大区域差异.例如,人类活动促进了华南地区和华北平原植被 GPP 上升,而对内蒙古东部、东北平原北部和青藏高原西部植被 GPP 变化则具有负向影响.以上研究主要分析植被 GPP 时空变化以及影响植被 GPP 变化的主导驱动因子,但影响因子对植被 GPP 变化的影响程度及影响因子间的协同机制未充分明晰.

许多学者利用地理探测器^[12]定量探测了影响因子对植被 GPP 空间分异的解释力,并分析了影响因子间协同作用的关系类型和影响力大小.研究发现,不同时空尺度下植被覆盖空间分异受不同因子的主导.例如,土地利用类型对中缅经济走廊^[13]和三江源区^[14]植被覆盖空间分异存在较大影响;京津风沙源区^[15]植被覆盖空间分异主要受降水的影响,其中,降水与其他因子的协同作用对植被覆盖空间分异的影响也大于其他因子间的协同作用;而长江流域上游和下游植被覆盖空间分异分别受气候因子和人文因子的主导^[16].以上研究都聚焦在探究某一区域植被空间分异的主要影响因子及其影响力大小,鲜有研究从不同空间尺度上全面探究人文因子、土地利用类型、气候因子和地形因子对植被空间分异的影响及影响因子间的协同机制.综上所述,已有研究一方面揭示了植被时空变化特征及其影响因素,另一方面探测了单一尺度下影响因子对植被影响力大小及影响因子间的协同作用,但并未考虑不同空间尺度下植被空间分异主要影响因子及其影响力大小的差异以及影响因子间协同机制的空间分异性.

中国幅员辽阔,经济发展呈明显地域差异,一方面,城市化程度由 2000 年的 36.22%提升到了 2020 年的 63.89%(中国统计年鉴 2001~2021),经济快速发展导致土地利用类型发生改变,进而改变了植被生产能力;另一方面,中国实施退耕还林还草、三北防护林和植树造林等林生生态工程也在短时间内增加了植被生产能力^[10,17-19].因此,本研究以中国为研究区,以八大经济区为研究单位,首先,结合 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 显著性检验,分析中国及八大经济区 2000~2020 年植被 GPP 的时空变化特征;然后,利用地理探测器,揭示人文因子(人口密度、夜间灯光)、土地利用类型、气候因子(气压、湿度、气温、降水、日照时数和风速)和地形因子(坡度、坡向、曲率和高程)对中国及八大经济区植被 GPP 空间分异的影响力及影响因子间的协同机制.研究结果可为生态建设和生态修复等工程的实施提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中国位于亚洲东部,陆地面积约为 960 万 km²,位于 135°2'E~73°40'E,3°52'N~53°33'N 之间.海拔整体呈西高东低的空间分布特征.如图 1 所示,本研究将中国(Y)划分为八大经济区:东北综合经济区(Y1)、北部沿海综合经济区(Y2)、东部沿海综合经济区(Y3)、南部沿海综合经济区(Y4)、黄河中游综合经济区(Y5)、长江中游综合经济区(Y6)、大西南综合经济区(Y7)和大西北综合经济区(Y8).从气候类型上看,东部、南部、大西南和长江中游综合经济区以亚热带季风气候为主,东北和北部沿海综合经济区以温带季风气候为主,黄河中游北部以温带大陆性气候为主,大西北综合经济区南部以高原山地气候为主.植被类型的空间分布主要受气候类型的影响,东部、南部、大西南和长江中游综合经济区以亚热带常绿阔叶林为主,大西北综合经济区以青藏高原高寒草地和温带荒漠为主,北部综合经济区以暖温带落叶阔叶林为主.黄河中游综合经济区主要以温带草原和温带荒漠为主.从土地利用类型上看,东北、北部、东部、南部、大西南综合经济区主要分布耕地和林地,大西北综合经济区主要分布草地和未利用地,而黄河中游综合经济区主要分布草地、

耕地和未利用地。

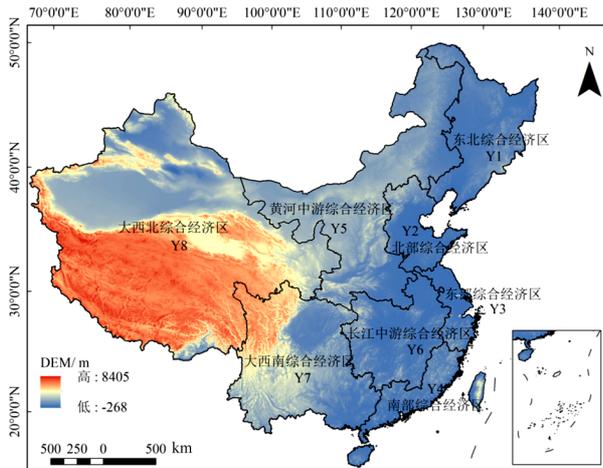


图1 中国八大经济区高程空间分布

Fig.1 Spatial distribution of elevation in the eight economic zones, China

审图号:GS(2020)4632 号

1.2 数据来源

中分辨率成像光谱仪(MODIS) GPP 的时间和空间分辨率分别为 8d 和 500m,每年包括 46 个时相,由美国国家航空航天局提供(<https://www.nasa.gov/>).经最大值合成、裁剪、重采样和重投影等预处理,得到覆盖中国 2000~2020 年最大值合成 MODIS GPP 时间序列.数字高程模型(DEM)数据、土地利用类型数据、人口密度数据和夜间灯光数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心平台(<https://www.resdc.cn/>),时间分辨率为每年,空间分辨率为 1km,所有数据经过重采样到 500m 空间分辨率. DEM 数据经过投影转换、坡度分析、坡向分析和曲率分析等预处理,得到覆盖中国的坡度、坡向和曲率栅格图.2000~2020 年气象数据来自于国家气象局数据共享中心提供的 2416 个气象站点的逐日气象数据(<https://data.cma.cn/>),主要包含湿度、平均气温、气压、降水、风速和日照时数.首先,基于 SPSS 24 对各站点年缺失值少于 5%的数据使用线性内插法进行插补,否则对该站点该年数据进行舍弃;然后,使用 Anusplin 模型,在考虑经度、纬度和高程的前提下插值得到 2000~2020 年 500m 空间分辨率的各气象因子栅格图.

1.3 研究方法

1.3.1 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 显著性检验

Theil-Sen Median 趋势分析与

Mann-Kendall 显著性检验^[20]可用于分析 2000~2020 年植被 GPP 时空演变特征并检验其在时间序列上变化的显著性.Theil-Sen Median 趋势分析可有效剔除异常数据和离散数据对总体趋势结果的影响.计算公式如下:

$$\beta_{\text{GPP}} = \text{Median}\left(\frac{\text{GPP}_j - \text{GPP}_i}{j - i}\right), 2000 \leq i < j \leq 2020 \quad (1)$$

式中: GPP_j 为第 j 年的植被 GPP 的值; GPP_i 为第 i 年的植被 GPP 的值; β_{GPP} 为 2000~2020 年植被 GPP 变化速率,当 $\beta_{\text{GPP}} > 0$,表明研究区植被 GPP 为上升趋势;当 $\beta_{\text{GPP}} = 0$,表明研究区植被变化基本保持稳定;当 $\beta_{\text{GPP}} < 0$,表明研究区植被 GPP 为下降趋势.

Mann-Kendall 显著性检验被用来揭示 2000~2020 年中国植被 GPP 变化趋势的显著性.根据 Mann-Kendall 显著性检验的检验统计量 Z 值,将植被 GPP 变化趋势划分为 6 个变化等级:极显著下降、显著下降、不显著下降、不显著上升、显著上升和极显著上升.当 $|Z| > 2.58$,即置信区间为 99%,为极显著变化特征;当 $1.96 < |Z| \leq 2.58$,即置信区间为 95%,为显著变化特征;当 $0 < |Z| \leq 1.96$,为不显著变化特征.

1.3.2 地理探测器 地理探测器^[12]主要分为 4 个模块,分别为:影响因子探测、交互作用探测、风险探测和生态探测.影响因子探测主要用于探测自变量 X 对因变量 Y 空间分异的解释程度 q , q 值的值域范围为 $[0, 1]$, q 值的数值越接近数值 0,证明影响因子对因变量 Y 的解释力越弱,反之则越强.交互作用探测可以探测任一双因子组合对因变量 Y 空间分异的交互作用,即推断双因子共同作用时是否会增强或削弱对因变量 Y 的解释力或影响是否独立存在,交互作用探测结果分类如表 1 所示.风险区探测可以判断不同影响因子 X 的子区域间的属性均值是否存在显著性的差异,从而得到因变量 Y 的最适宜区间.生态探测可用于探测双因子 X_1 和 X_2 对 Y 的地理空间分布的影响是否存在显著性的差异.已有研究表明^[21-24],植被生长与区域人类活动强度、土地利用类型、气候条件和地形状况息息相关.因此,本研究选取的影响因子包含人文因子、土地利用类型、气候因子和地形因子四大类,共 13 个因子作为植被 GPP 空间分异的影响因子,如表 2.本研究使用 2000~2020 年植被 GPP、气候因子和人文因子多年平均值,2010 年土地利用类型数据为地理探测器输入数据.

表 1 双因子交互作用的类型
Table 1 Types of two-factor interaction

交互作用类型	判断标准	交互作用类型	判断标准
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) \text{ and } q(X_2)$	双因子非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < q(X_1) \text{ and } q(X_2)$
双因子非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	双因子独立	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$
单因子非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < q(X_1) \text{ or } q(X_2)$		

表 2 影响因子类型
Table 2 Types of influencing factors

因子类别	影响因子	因子类别	影响因子
人文因子	人口密度(X_1);夜间灯光(X_2)	土地利用类型	土地利用类型(X_3)
气候因子	气压(X_4);湿度(X_5);气温(X_6);降水(X_7); 风速(X_8);日照时数(X_9)	地形因子	坡度(X_{10});坡向(X_{11});曲率(X_{12});高程(X_{13})

2 结果与分析

2.1 植被 GPP 时空变化特征

2.1.1 植被 GPP 时间变化特征 由图 2 可知, 2000~2020 年中国 GPP(以 C 计,下同)整体呈波动上升趋势,上升速率为 $3.84\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.研究时段内植被 GPP 均值为 $478.72\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,植被 GPP 最大值出现在 2018 年,为 $587.72\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,最小值出现在 2000 年,为 $436.72\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.八大经济区植被 GPP 均呈波动上升趋势,其中,东北综合经济区的增长速率最快,为

$5.68\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,其次是黄河中游综合经济区,为 $5.58\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,增长速率最低的是东部沿海综合经济区,仅为 $0.96\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.八大经济区中,2000~2020 年东北综合经济区植被 GPP 均值最大,为 $681.13\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,其次是南部沿海综合经济区,为 $661.22\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.最小值为大西北综合经济区,仅为 $249.05\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.由上可知, 2000~2020 年中国及八大经济区植被 GPP 整体呈改善趋势.其中,东北综合经济区和黄河中游综合经济区的上升速率最快.而东北综合经济区的年均植被 GPP 最高,大西北经济区的年均植被 GPP 最低.

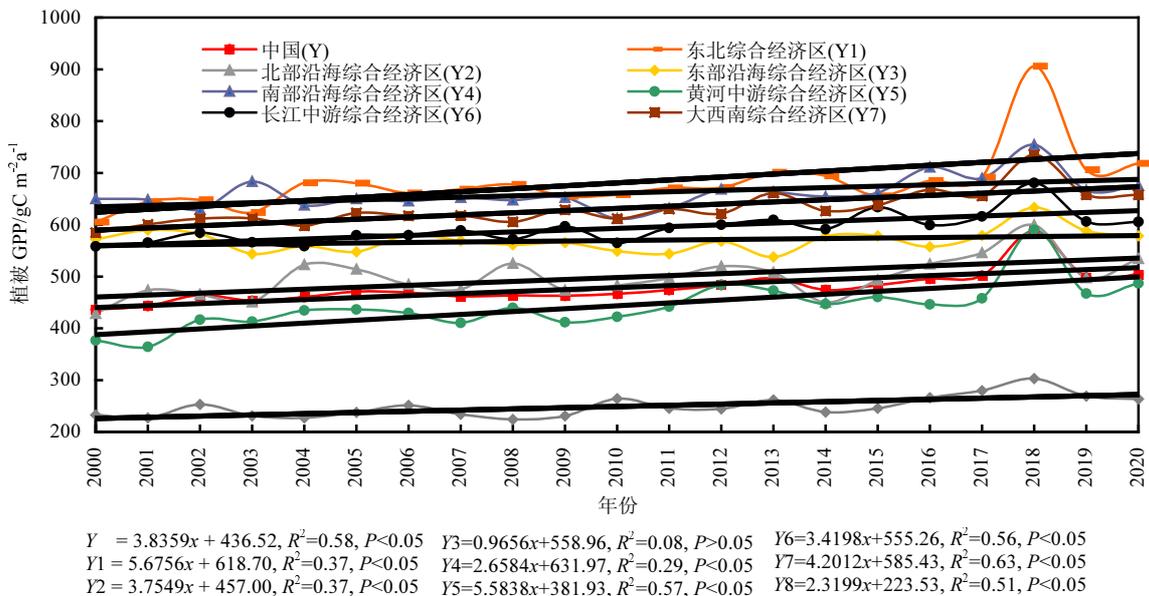


图 2 2000~2020 年中国植被 GPP 时间变化趋势图
Fig.2 Temporal variation of vegetation GPP in China from 2000 to 2020

2.1.2 植被 GPP 空间变化特征 由图 3(a)可知,中国植被 GPP 多年均值呈明显空间异质性,整体呈现

东南高、西北低的分布规律.植被 GPP 多年平均值小于 $200\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的区域占总面积的 18.57%,主要分

布在黄河中游和大西北综合经济区.植被 GPP 多年平均值大于 $200\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的区域占总面积的 81.43%,其中,植被 GPP 大于 $600\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的区域主要分布在长江中游综合经济区、东北综合经济区东部、南部沿海经济区南部和大西南综合经济区南部.

由图 3(b)可知,2000~2020 年中国植被 GPP 的变化斜率在 $-42.38\sim 39.22\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 之间,植被 GPP 变化斜率整体呈“中部高,两翼低”的空间分布格局.由图 3(c)和(d)可知,中国植被 GPP 呈上升趋势的区域占总面积的 84.46%,其中,呈极显著上升的区域占总面积的 19.86%,主要分布在黄河中游综合经济区中部和大西北综合经济区东部;呈下降趋势的区域仅占总面积的 15.54%,其中,呈极显著下降的区域占总面积的 0.68%,

主要分布在东部沿海、长江中游、大西北、大西南西和南部沿海综合经济区.八大经济区中,植被 GPP 呈上升趋势的面积均大于呈下降趋势的面积.其中,呈极显著上升区域的面积占比最高的是大西北综合经济区,为 52.02%,其次是长江中游综合经济区,为 50.70%,东部沿海综合经济区最低,为 8.57%.呈极显著下降区域的面积占比最高的是东部沿海综合经济区,为 6.00%,大西北综合经济区最低,仅为 0.53%.由上可知,2000~2020 年中国植被 GPP 呈上升趋势的面积远高于呈下降趋势的面积,植被覆盖总体呈改善态势,其中,东北综合经济区的植被改善面积占比高于其他经济区,而大西北、大西南、长江中游和黄河中游综合经济区的植被改善程度强于其他经济区.

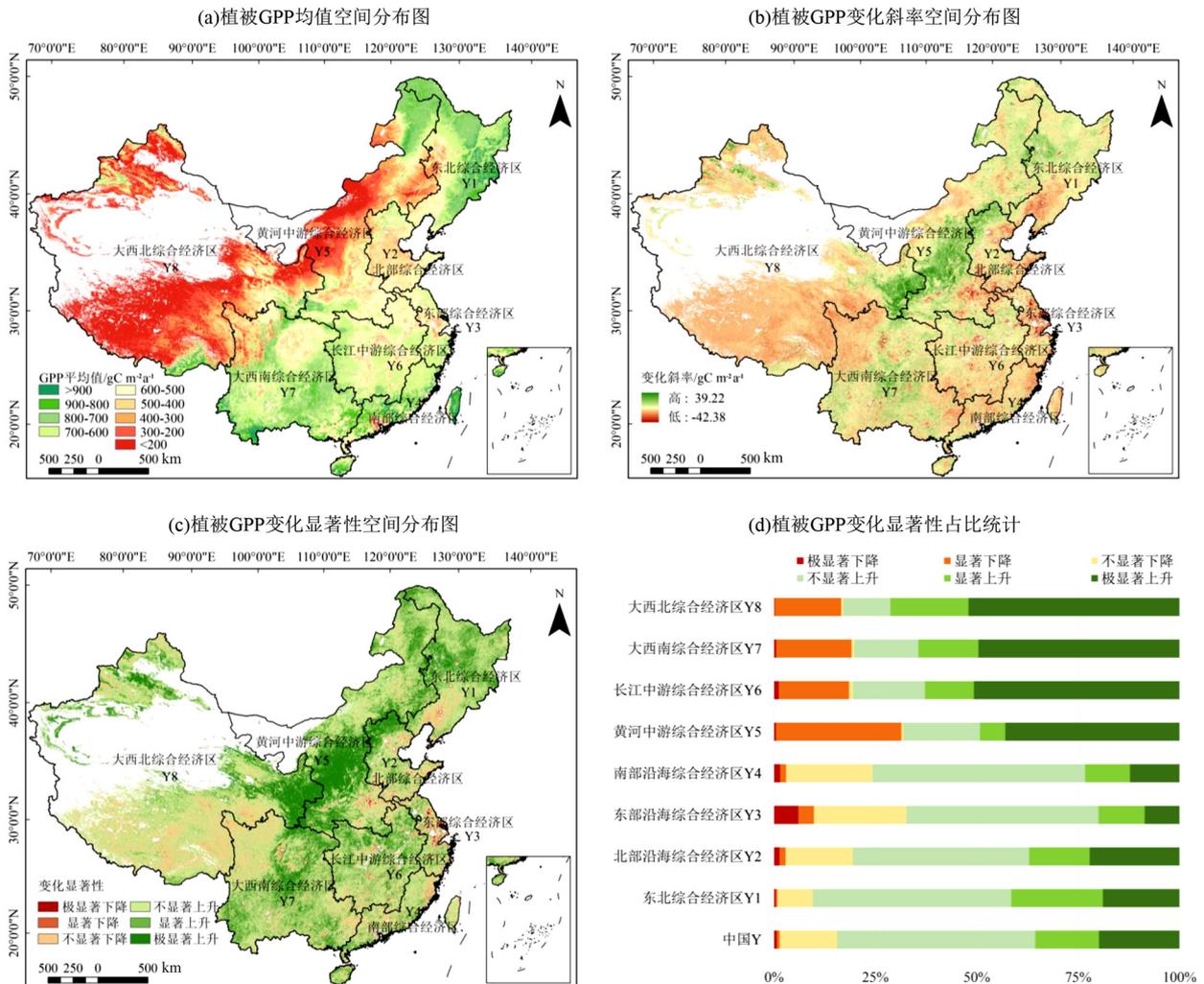


图 3 2000~2020 年中国植被 GPP 变化空间分布

Fig.3 Spatial variation of vegetation GPP in China from 2000 to 2020

审图号:GS(2020)4632 号

2.2 植被 GPP 空间分异影响因素地理探测

2.2.1 影响因子探测 地理探测器被用来在中国

和经济区尺度上揭示影响因子对植被 GPP 空间分异的解释力大小.全国尺度上,影响植被 GPP 空间分异最主要因子是湿度, q 值为 0.64,其次是土地利用类型、日照时数和降水, q 值分别为 0.48、0.46 和 0.40.坡度、坡向、曲率、人口密度和夜间灯光对中国植被 GPP 空间分异的影响较小, q 值均小于 0.1.经济区尺度上,湿度是影响东北、黄河中游和大西北综合经济区植被 GPP 空间分异的主要影响因子;土地利用类型是影响北部和东部沿海综合经济区植被 GPP 空间分异的主要影响因子;南部沿海和长江中游综合经济区植被 GPP 主要受坡度的影响;大西南综合经济区植被 GPP 空间分异主要受高程的影响.

由表 3 可知,气候因子中,湿度、气温、降水和日照时数在东北、黄河中游、大西南和大西北综合

经济区的 q 值均较高.地形因子中,坡向对八大经济区植被空间分异的影响微弱, q 值均小于 0.05;高程对北部沿海和南部沿海综合经济区的影响程度较小,对其他经济区植被 GPP 空间分异的影响程度较大.人文因子中,人口密度和夜间灯光对东部沿海和南部沿海综合经济区植被 GPP 空间分异的影响较大.土地利用类型对各经济区的 q 值均不低于 0.19,其对八大经济区植被空间分异的影响程度较高.

由上可知,湿度、日照时数、降水和土地利用类型是中国植被 GPP 空间分异的主要影响因子.经济区尺度上,东北、黄河中游、大西南和大西北综合经济区影响植被 GPP 空间分异主要受气候因子主导,南部沿海、长江中游和大西南综合经济区主要受地形因子的影响,而人文因子对东部沿海和南部沿海综合经济区植被 GPP 空间分异的影响较大.

表 3 单一影响因子探测 q 值
Table 3 q value of influencing factors

因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}
Y	0.00	0.00	0.48	0.37	0.64	0.25	0.40	0.16	0.46	0.01	0.00	0.02	0.39
Y_1	0.02	0.03	0.38	0.07	0.52	0.24	0.31	0.29	0.46	0.18	0.00	0.15	0.19
Y_2	0.06	0.10	0.23	0.09	0.06	0.11	0.05	0.02	0.03	0.15	0.02	0.15	0.10
Y_3	0.18	0.27	0.32	0.00	0.02	0.05	0.29	0.18	0.14	0.26	0.03	0.25	0.15
Y_4	0.14	0.15	0.21	0.00	0.00	0.01	0.01	0.11	0.00	0.22	0.01	0.14	0.07
Y_5	0.00	0.00	0.38	0.34	0.57	0.41	0.44	0.30	0.45	0.19	0.00	0.14	0.13
Y_6	0.06	0.05	0.25	0.09	0.06	0.02	0.04	0.15	0.10	0.27	0.01	0.19	0.22
Y_7	0.02	0.02	0.19	0.29	0.24	0.26	0.19	0.03	0.07	0.02	0.00	0.01	0.37
Y_8	0.00	0.00	0.30	0.17	0.47	0.13	0.14	0.28	0.39	0.08	0.00	0.05	0.30

2.2.2 交互作用探测 全国尺度上,双因子交互作用的 q 值均大于单因子的 q 值,双因子交互作用均表现为双因子增强或非线性增强,其中,双因子增强和非线性增强的占比分别为 43.96%和 56.04%.由表 4 可知,双因子交互作用 q 值前三为:土地利用类型 \cap 湿度(0.75)>降水 \cap 高程(0.71)>湿度 \cap 高程(0.70),因此可知,中国植被 GPP 空间分异主要受土地利用类型、湿度、降水和高程的协同影响.这与单因子影响力探测结果较为一致,即,湿度、土地利用类型和降水是中国植被 GPP 空间分异的主要影响因子.

为探究双因子交互作用对八大经济区植被 GPP 空间分异的影响,本研究统计了各经济区排前三的双因子交互作用 q 值.由表 5 可知,八大经济区双因子交互作用的解释力均大于单因子独立作用的解释力.除北部沿海综合经济区土地利用类型 \cap 降水和大西南

综合经济区的日照时数 \cap 高程的双因子协同作用为非线性增强外,其余经济区各影响因子间交互作用均表现为双因子增强.此外,除黄河中游和大西南综合经济区第一主导交互作用均为降水 \cap 其他因子外,八大经济区第一和第二主导交互作用均为土地利用类型 \cap 其他因子或湿度 \cap 其他因子,而第三主导交互作用中,北部、东部和南部沿海综合经济区为夜间灯光 \cap 其他因子,东北、黄河中游、大西南和大西北综合经济区为日照时数 \cap 其他因子.

由上可知,全国和八大经济区双因子交互作用探测结果表现出较好的一致性,全国和各经济区植被 GPP 空间分异主要受土地利用类型 \cap 其他因子或湿度 \cap 其他因子的协同影响,而北部沿海、东部沿海和南部沿海综合经济区植被 GPP 空间分异受夜间灯光 \cap 其他因子协同影响明显强于其他经济区.

表 4 全国影响因子交互作用探测 q 值
Table 4 q value of interaction detection between influencing factors in China

因子	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃
X ₁	0.00*												
X ₂	0.00**	0.00*											
X ₃	0.48*	0.49*	0.48*										
X ₄	0.38*	0.38*	0.60**	0.37*									
X ₅	0.65*	0.65*	0.75**	0.68**	0.64*								
X ₆	0.26*	0.26*	0.62**	0.59**	0.69**	0.25*							
X ₇	0.41*	0.41*	0.63**	0.65**	0.67**	0.43**	0.40*						
X ₈	0.17*	0.17*	0.58**	0.53**	0.67**	0.36**	0.44**	0.16*					
X ₉	0.47*	0.47*	0.65**	0.63**	0.66**	0.52*	0.52**	0.52**	0.46*				
X ₁₀	0.02*	0.02**	0.50*	0.49*	0.67*	0.31*	0.45*	0.20*	0.49*	0.01*			
X ₁₁	0.00*	0.00*	0.48*	0.38*	0.64**	0.25*	0.41**	0.17*	0.46**	0.02*	0.00*		
X ₁₂	0.02**	0.03**	0.50**	0.46*	0.66**	0.29*	0.44*	0.18**	0.48**	0.03**	0.03*	0.02*	
X ₁₃	0.39*	0.40*	0.62**	0.47**	0.70**	0.60**	0.71**	0.53**	0.66**	0.53*	0.39*	0.50*	0.39*

注:*表示非线性增强,**表示双因子增强.

表 5 八大经济区排名前三的影响因子交互作用解释力

Table 5 q value of the interaction of the top three influencing factors in the eight economic zones, China

经济区	交互作用 1	q 值	交互作用 2	q 值	交互作用 3	q 值
Y1	X ₃ ∩X ₅	0.69**	X ₅ ∩X ₈	0.63**	X ₃ ∩X ₉	0.62**
Y2	X ₃ ∩X ₇	0.33*	X ₃ ∩X ₆	0.31**	X ₂ ∩X ₃	0.30**
Y3	X ₃ ∩X ₂	0.49**	X ₃ ∩X ₇	0.47**	X ₂ ∩X ₇	0.45**
Y4	X ₃ ∩X ₁₀	0.33**	X ₃ ∩X ₈	0.33**	X ₂ ∩X ₁₀	0.32**
Y5	X ₆ ∩X ₇	0.73**	X ₃ ∩X ₅	0.70**	X ₆ ∩X ₉	0.69**
Y6	X ₃ ∩X ₁₀	0.36**	X ₃ ∩X ₁₃	0.35**	X ₃ ∩X ₈	0.34**
Y7	X ₇ ∩X ₁₃	0.50**	X ₃ ∩X ₁₃	0.47**	X ₉ ∩X ₁₃	0.45*
Y8	X ₃ ∩X ₅	0.61**	X ₅ ∩X ₁₃	0.58**	X ₉ ∩X ₁₃	0.58**

注:*表示非线性增强,**表示双因子增强.

组合对植被 GPP 空间分异的解释力大小存在显著差异和无显著差异的占比分别为 68%和 32%.其中,土地利用类型与人文因子和地形因子对植被 GPP 空间分异的解释力均存在显著差异,土地利用类型与除湿度外的气候因子均不存在显著差异,以上结果进一步证明土地利用类型与湿度和地形因子之间的协同作用是植被 GPP 空间分异的主要影响因子.高程与湿度、降水和日照时数等气候因子对植被 GPP 空间分异的解释力大小存在显著差异,这与高程和气候因子的交互作用主导植被 GPP 空间分异的结果基本一致.

2.2.3 生态探测 由表 6 可知,全国尺度上,双因子

表 6 全国影响因子生态探测结果

Table 6 Ecological detection result of influencing factors in China

因子	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃
X ₁													
X ₂	N												
X ₃	Y	Y											
X ₄	Y	Y	N										
X ₅	Y	Y	Y	Y									
X ₆	Y	Y	N	N	N								
X ₇	Y	Y	N	Y	N	Y							
X ₈	Y	Y	N	N	N	N	N						
X ₉	Y	Y	N	Y	N	Y	Y	Y					
X ₁₀	N	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y				
X ₁₁	N	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N			
X ₁₂	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y		
X ₁₃	Y	N	Y	N	Y	N	Y	N	Y	Y	Y	Y	

注:Y表示双因子组合对植被GPP空间分异存在显著差异,N表示双因子组合对植被GPP空间分异无显著差异.

经济区尺度上,东北、黄河中游、大西南和大西北综合经济区的生态探测结果与全国基本一致,即双

因子组合存在显著差异的占比较大.北部沿海、东部沿海、南部沿海和长江中游综合经济区的影响因子组合对植被 GPP 空间分异的解释力大小存在显著差异占比较低,均不超过 30%,这四个经济区中气候因子与土地利用类型以及坡度和曲率等地形因子不存在显著差异,而土地利用类型与人文因子、坡向和曲率等地形因子存在显著差异.综上所述,除北部沿海、东部沿海、南部沿海和长江中游综合经济区外,其他经济区影响因子的生态探测结果与交互作用探测结果基本一致,即土地利用类型、高程、湿度和降水等是各经济区植被 GPP 空间分异的主要影响因子.

2.2.4 风险探测 如表 7 所示,全国尺度上,不同人文因子中,当人口密度在 0~893 人/km²,夜间灯光在

0.00~1.29 时,植被 GPP 均值最高,可见人类活动干扰频率越低,植被生产力越高.不同地形因子中,当坡度在 25.05~49.32°,高程在 404~912m 时,植被 GPP 均值最高,表明在海拔较低,地表起伏适中的区域植被覆盖程度更高,植被生长力更强.不同气候因子中,气温在 19.69~25.47℃,日照时数在 1265.82~1547.02h,降水在 1797.17~2688.6mm,湿度在 65.82~71.42%之间时,植被 GPP 均值最高,表明在降水和日照充足,气温和湿度适宜的区域有利于植被群里的繁衍和植被生长.不同土地利用类型中,林地的植被 GPP 均值最高.由上可知,较低强度的人类活动,适宜的土地利用类型、地形条件、以及气温、降水和湿度等气候条件有利于中国植被的生长.

表 7 全国及八大经济区影响因子适宜范围和 GPP 平均值
Table 7 Average vegetation GPP and its suitable range of influencing factors in China

因子	Y	GPP 均值	Y1	GPP 均值	Y2	GPP 均值	Y3	GPP 均值	Y4	GPP 均值	Y5	GPP 均值	Y6	GPP 均值	Y7	GPP 均值	Y8	GPP 均值
X_1 (人/km ²)	0.00~893	4.85	0.00~893	7.03	10720~19654	6.00	0.00~893	6.13	0.00~893	7.03	0.00~893	4.53	0.00~893	6.14	0.00~893	6.50	893~4467	3.54
X_2	0.00~1.29	4.85	0.00~1.29	7.04	0.00~1.29	5.08	0.00~1.29	6.21	0.00~1.29	7.02	0.00~1.29	4.55	0.00~1.29	6.12	0.00~1.29	6.50	1.29~4.74	3.00
X_3	林地	6.88	林地	7.85	林地	6.11	林地	6.76	林地	7.33	林地	6.72	林地	6.52	林地	7.06	林地	5.36
X_4 (Pa)	973.37~1021.10	6.17	925.63~973.37	7.88	925.63~973.37	5.61	925.63~973.37	6.17	837.25~881.45	7.00	925.63~973.37	5.92	925.63~973.37	7.11	881.45~925.63	7.55	725.88~784.22	4.28
X_5 (%)	65.82~71.42	6.88	71.42~76.57	7.44	71.42~76.57	6.00	76.57~86.26	6.26	76.57~86.26	6.92	65.82~71.42	6.47	76.57~86.26	6.35	76.57~86.26	6.93	71.42~76.57	7.50
X_6 (°C)	19.69~25.47	7.13	-4.11~0.16	7.91	5.59~8.02	5.79	16.57~19.69	6.12	19.69~25.47	6.94	-4.11~0.16	7.17	10.68~13.80	7.00	19.69~25.47	7.23	13.80~16.57	7.04
X_7 (mm)	1797.17~2688.6	6.90	853.29~1094.51	7.87	633.05~853.29	5.23	1566.44~1797.17	6.79	1094.51~1335.72	7.17	1335.72~1566.44	6.60	1566.44~1797.17	6.39	1566.44~1797.17	7.42	1094.51~1335.72	5.50
X_8 (m/s)	0.90~1.34	6.69	1.61~1.85	7.93	3.11~3.83	5.62	2.81~3.11	9.00	1.34~1.61	7.17	0.90~1.34	6.61	0.90~1.34	6.95	1.34~1.61	6.74	0.90~1.34	7.07
X_9 (h)	1265.82~1547.02	6.69	2069.23~2340.38	7.99	2601.49~2832.47	5.37	1547.02~1798.08	6.35	1265.82~1547.02	7.12	1265.82~1547.02	6.25	844.03~1265.82	7.11	1265.82~1547.02	6.96	1265.82~1547.02	7.16
X_{10} (°)	25.05~49.32	5.44	15.61~19.65	9.00	12.14~15.61	6.33	12.14~15.61	7.17	19.65~25.05	9.00	15.61~19.65	7.33	19.65~25.05	7.50	25.05~49.32	6.83	25.05~49.32	4.52
X_{11} (°)	76.55~116.04	4.97	238.72~278.20	7.08	156.93~197.82	5.23	238.72~278.20	6.27	76.55~116.04	7.06	197.82~238.72	4.71	76.55~116.04	6.18	37.07~76.55	6.64	317.68~359.98	2.72
X_{12} (m ⁻¹)	0.03~0.06	5.41	0.03~0.06	7.90	0.11~0.37	8.00	0.03~0.06	7.20	0.03~0.06	7.71	0.11~0.37	7.00	0.11~0.37	7.50	-0.10~-0.06	6.67	-0.37~-0.10	3.78
X_{13} (m)	404~912	6.22	1463~2187	8.00	2187~3029	7.00	404~912	7.05	404~912	7.07	2187~3029	6.18	2187~3029	8.00	912~1463	7.25	2187~3029	4.15

注:GPP平均值的单位为g/(m²·a),以C计.

经济区尺度上,就人文因子而言,除北部沿海和大西北综合经济区外,六大经济区的植被 GPP 均值在人口密度范围为 0~893 人/km²,夜间灯光为 0.00~1.29 时最高,由此可知,受人类活动影响程度较

低的区域,植被覆盖程度较好,植被生产力更高.各经济区的土地利用类型林地的植被 GPP 均值达到最大,稳定的森林生态系统,以及退耕还林、还草等工程的实施,使得林地的面积持续扩大,均有利于促进

植被生长.由于八大经济区的地理生态环境存在较大的差异,因此气候因子和地形因子促进植被 GPP 生长的最优范围在各经济区中存在差异.就气候因子而言,在东部沿海、南部沿海、长江中游和大西南综合经济区,当湿度和降水分别在 76.57%~86.26 % 和 1094.51~1335.72mm 时,植被 GPP 均值最大.就地形因子而言,在北部沿海、黄河中游、长江中游和大西北综合经济区,当高程在 2187~3029m 时,植被 GPP 均值最大.从八大经济区的 GPP 均值可知,土地利用类型、气候因子和地形因子中的坡向和高程对八大经济区植被变化的影响程度较大,而人文因子对八大经济区植被变化的影响程度较低.综上所述,八大经济区风险探测的结果与生态探测结果基本相符,说明土地利用类型、气候因子和地形因子是影响八大经济区植被生长的重要因素.

3 讨论

3.1 植被 GPP 时空演变特征

时间尺度上,2000~2020 年中国及八大经济区植被 GPP 均呈波动上升趋势,其中,上升趋势最为显著的是东北、黄河中游和大西南综合经济区,这与已有的研究结果一致^[25-27].空间尺度上,中国植被 GPP 呈上升趋势的面积占比为 84.46%,主要分布在东北、黄河中游、大西南、长江中游和北部沿海综合经济区,得益于天然林保护工程、退耕还林还草工程、三北防护林工程、长江中下游地区重点防护林体系建设工程、京津风沙源治理工程、野生动植物保护及自然保护区建设工程和重点地区以速生丰产用材林为主的林业产业建设工程的实施,以上地区植被覆盖呈显著上升趋势,区域生态环境质量得到明显改善,这与已有研究结果一致^[17-19,25].中国植被 GPP 呈下降趋势的面积占比为 15.54%,主要分布在东部沿海、长江中游、大西北、大西南和南部沿海综合经济区.大西北综合经济区南部和大西南综合经济区西北部属于西北干旱与半干旱区和青藏高原高寒区,区域内生态系统脆弱,一方面,放牧等人类活动使得草场和湿地退化,荒漠化不断扩大,另一方面全球气候变暖背景下气温和降水等气候条件的限制,导致植被覆盖呈下降趋势^[17,28].而快速城市化导致大量林地、草地和耕地转化为建设用地是导致东部沿海(长江三角洲经济区)、长江中游(武汉都市经济圈、长株潭经济圈)和

南部沿海综合经济区东北部(珠江三角洲经济区)植被 GPP 下降的主要原因^[16,27,29].

3.2 植被 GPP 影响因素分析

影响因子探测结果表明,湿度、土地利用类型、日照时数和降水是影响中国植被 GPP 空间分异的关键因素.其中,湿度是影响中国植被 GPP 空间分异的主导因素.湿度是区域水热光条件的综合体现,由于湿度影响植被蒸腾作用中的气孔蒸腾,湿度过大或过小均会导致植物叶片的气孔关闭进而抑制植被生长^[30].土地利用类型对中国植被 GPP 空间分异的影响程度仅次于湿度,土地利用类型的变化,如城市持续扩张导致短时间内大量占用林地、草地和耕地,会导致区域内植被覆盖下降^[16,27,29],而天然林保护工程、退耕还林还草工程和三北防护林工程等林业生态工程的实施,促进了生长,提高了植被覆盖程度^[17-19,25].因此,土地利用类型对中国植被 GPP 空间分异具有较大的影响.

经济区尺度上,影响植被 GPP 空间分异的主导因素存在明显的地域差异.例如,影响东北、黄河中游和大西北综合经济区的植被 GPP 空间分异的主要因素是湿度和日照时数.黄河中游和大西北综合经济区为干旱半干旱区,气候干燥,蒸发量大并且地表水较少^[23,31-32],而东北综合经济区属于温带大陆性气候,冬冷夏热,年温差大,年降雨量较少^[33-34].因此,以上经济区植被 GPP 变化对湿度和日照时数极为敏感.影响北部沿海和东部沿海综合经济区植被 GPP 空间分异的主导因素是土地利用类型.人类活动会间接影响经济区土地利用类型的变化,北部沿海综合经济区的京津冀经济圈和东部沿海综合经济区的长江三角洲地区城市化水平高,人口密度大,由此带来的城市扩张和城市基础设施建设导致植被覆盖呈下降趋势.而部分地区为维护生态环境,实施京津风沙源治理工程和退耕还林等工程,使得植被覆盖得到提高^[27,29,35].因此,以上经济区植被 GPP 空间分异对土地利用类型变化响应敏感.

交互作用探测结果表明,植被 GPP 空间分异对影响因子协同作用的响应存在明显地域差异.除黄河中游和大西南综合经济区外,其他经济区植被 GPP 空间分异主要受土地利用类型和其他因子的交互作用.例如,影响东部沿海综合经济区植被空间分异的主要因素是土地利用类型和人文因子的共

同作用.东部沿海综合经济区的经济发展速度快,城市向外围扩张,占用耕地和林地,导致植被覆盖度高的区域向植被覆盖度低变化^[16,36].东北、北部沿海和大西北综合经济区的植被变化主要受土地利用类型与气候因子的协同影响.大西北综合经济区的土地利用类型以草地为主,东北和北部沿海综合经济区的土地利用类型以耕地和林地为主.而草地、林地和耕地的变化与区域气候条件紧密相关^[18-19,37-38].南部沿海和长江中游综合经济区的植被空间分异主要受土地利用类型与地形因子的协同影响.这两大经济区的土地利用类型以耕地为主,地形以平原、丘陵和山地为主.在海拔低、坡度小的区域中土地利用类型易受人类活动的干扰,城区扩张和农业生产的发展会占用较多的林地导致植被覆盖降低.随着高程和坡度的增加,林地的面积在不断扩大,适宜的湿热的气候条件有利于植被生长.因此,以上两个经济区主要受土地利用类型和地形因素的协同影响^[16,25].

4 结论

4.1 2000~2020 年中国植被 GPP 整体呈波动上升趋势,其上升斜率为 $3.84\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$.八大经济区植被 GPP 均呈上升趋势,其中,上升趋势最为显著的为东北综合经济区和黄河中游综合经济区,上升斜率分别为 $5.68\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和 $5.58\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$.

4.2 2000~2020 年中国植被 GPP 分布存在明显空间异质性,整体呈现东南高、西北低的分布规律,植被 GPP 变化斜率整体呈中部高,两翼低的空间分布格局.2000~2020 年中国植被 GPP 改善趋势显著,呈上升趋势的面积占比为 84.47%,远高于呈下降趋势的面积.其中,东北综合经济区的植被改善面积占比为 90.45%,远高于其他经济区.

4.3 影响因子探测结果表明,湿度是影响中国植被 GPP 空间分异的主导因子,经济区尺度上,气候因子是影响东北、黄河中游、大西南和大西北综合经济区植被 GPP 空间分异的主导因子,而人文因子对东部和南部沿海综合经济区植被空间分异影响较大.影响因子交互作用结果表明,中国植被 GPP 空间分异受土地利用类型 \cap 湿度的交互作用影响最大,其 q 值为 0.75.经济区尺度上,北部、东部和南部沿海综合经济区植被 GPP 空间分异受夜间灯光 \cap 其他因

子协同影响大于其他经济区.

参考文献:

- [1] Jian J, Bailey V, Dorheim K, et al. Historically inconsistent productivity and respiration fluxes in the global terrestrial carbon cycle [J]. *Nature communications*, 2022,13(1):1-9.
- [2] Tang R, He B, Chen H W, et al. Increasing terrestrial ecosystem carbon release in response to autumn cooling and warming [J]. *Nature Climate Change*, 2022,12(4):380-385.
- [3] Wang X, Chen J M, Ju W. Photochemical reflectance index (PRI) can be used to improve the relationship between gross primary productivity (GPP) and sun-induced chlorophyll fluorescence (SIF) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020,24:111888.
- [4] Chen S, Huang Y, Gao S, et al. Impact of physiological and phenological change on carbon uptake on the Tibetan Plateau revealed through GPP estimation based on spaceborne solar-induced fluorescence [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,663:45-59.
- [5] He P, Ma X, Sun Z. Interannual variability in summer climate change controls GPP long-term changes [J]. *Environmental Research*, 2022, 212:113409.
- [6] Cheng L, Zhang L, Wang Y P, et al. Recent increases in terrestrial carbon uptake at little cost to the water cycle [J]. *Nature Communications*, 2017,8(1):1-10.
- [7] Gampe D, Zscheischler J, Reichstein M, et al. Increasing impact of warm droughts on northern ecosystem productivity over recent decades [J]. *Nature Climate Change*, 2021,11(9):772-779.
- [8] Chen H, Bai X, Li Y, et al. Soil drying weakens the positive effect of climate factors on global gross primary production [J]. *Ecological Indicators*, 2021,129:107953.
- [9] 周艳莲,居为民,柳艺博.1981~2019 年全球陆地生态系统碳通量变化特征及其驱动因子 [J]. *大气科学学报*, 2022,45(3):332-344.
Zhou Y L, Ju W M, Liu Y B. Characteristics and driving factors of global terrestrial ecosystem carbon fluxes from 1981 to 2019 [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2022,45(3):332-344.
- [10] Tang X, Xiao J, Ma M, et al. Satellite evidence for China's leading role in restoring vegetation productivity over global karst ecosystems [J]. *Forest Ecology and Management*, 2022,507:120000.
- [11] 王军邦,杨屹涵,左 婵,等.气候变化和人类活动对中国陆地生态系统总初级生产力的影响厘定研究 [J]. *生态学报*, 2021,41(18): 7085-7099.
Wang J B, Yang Y H, Zuo C, et al. Impacts of human activities and climate change on gross primary productivity of the terrestrial ecosystems in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(18):7085-7099.
- [12] 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.
Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(1):116-134.
- [13] Li J, Wang J, Zhang J, et al. Growing-season vegetation coverage patterns and driving factors in the China-Myanmar Economic Corridor based on Google Earth Engine and geographic detector [J]. *Ecological Indicators*, 2022,136:108620.
- [14] Gao S, Dong G, Jiang X, et al. Quantification of natural and anthropogenic driving forces of vegetation changes in the Three-River Headwater Region during 1982~2015 based on geographical detector model [J]. *Remote Sensing*, 2021,13(20):4175.
- [15] 孟 琪,武志涛,杜自强,等.基于地理探测器的区域植被覆盖度的定量影响——以京津风沙源区为例 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(2): 826-836.

- Meng Q, Wu Z T, Du Z Q, et al. Quantitative influence of regional fractional vegetation cover based on geodetector model—Take the Beijing-Tianjin san source region as an example [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(2):826-836.
- [16] 徐 勇,郑志威,郭振东,等.2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测 [J]. *环境科学*, 2022,43(7):3730-3740.
- Xu Y, Zheng Z W, Guo Z D, et al. Dynamic variation of vegetation cover and its influencing factor detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022,43(7):3730-3740.
- [17] Wang N, Du Y, Liang F, et al. The spatiotemporal response of China's vegetation greenness to human socio-economic activities [J]. *Journal of environmental management*, 2022,305:114304.
- [18] 耿庆玲,陈晓青,赫晓慧,等.中国不同植被类型 NDVI 对气候变化和人类活动的响应 [J]. *生态学报*, 2022,42(9):3557-3568.
- Geng Q L, Chen X Q, HE X H, et al. Vegetation dynamics and its responses to climate change and human activities in based on different vegetation types in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(9):3557-3568.
- [19] 李 超,李雪梅.2000~2018 年中国植被生态质量时空变化特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2021,30(9):2154-2165.
- Li Chao, Li X M, Characteristics of spatio-temporal variation of ecological quality for vegetation in China from 2000~2018 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021,30(9):2154-2165.
- [20] 徐 勇,黄雯婷,窦世卿,等. 2000~2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征 [J]. *环境科学*, 2022,43(6):3230-3240.
- Xu Y, Huang W T, Dou S, et al. Responding mechanism of vegetation cover to climate change and human activities in Southwest China from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(6):3230-3240.
- [21] 彭文甫,张冬梅,罗艳玫,等.自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测 [J]. *地理学报*, 2019,74(9):1758-1776.
- Peng W F, Zhang D M, Luo Y G, et al. Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan Province [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019,74(9):1758-1776.
- [22] Huo H, Sun C. Spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation dynamics based on Geodetector: A case study of the northwestern Yunnan Plateau, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 130:108005.
- [23] Ren Z, Tian Z, Wei H, et al. Spatiotemporal evolution and driving mechanisms of vegetation in the Yellow River Basin, China during 2000~2020 [J]. *Ecological Indicators*, 2022,138:108832.
- [24] 徐 勇,戴强玉,黄雯婷,等.2000~2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究 [J]. *环境科学*, 2023,44(1),doi:10.13227/j.hjkk.202203154.
- Xu Y, Dai Q Y, Huang W, et al. Spatio-temporal variation of vegetation cover and its driving mechanisms exploration in Southwest China from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2023,44(1),doi:10.13227/j.hjkk.202203154.
- [25] Jiang P, Ding W, Yuan Y, et al. Interannual variability of vegetation sensitivity to climate in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,301:113768.
- [26] 田智慧,任祖光,魏海涛.2000~2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制 [J]. *环境科学*, 2022,43(2):743-751.
- Tian Z H, Ren Z G, Wei H T. Driving mechanism of the spatiotemporal evolution of vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022,43(2):743-751.
- [27] 赵倩倩,张京朋,赵天保,等.2000 年以来中国区域植被变化及其对气候变化的响应 [J]. *高原气象*, 2021,40(2):292-301.
- Zhao Q Q, Zhang J P, Zhao T B, et al. Vegetation changes and its response to climate change in China Since 2000 [J]. *Plateau Meteorology*, 2000,40(2):292-301.
- [28] 张心竹,王鹤松,延 昊,等.2001~2018 年中国总初级生产力时空变化的遥感研究 [J]. *生态学报*, 2021,41(16):6351-6362.
- Zhang X Z, Wang H S, Yan H, et al. Analysis of spatio-temporal changes of gross primary productivity in China from 2001 to 2018 based on Remote Sensing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(16):6351-6362.
- [29] 王 思,张路路,林伟彪,等.基于 MODIS 归一化植被指数的广东省植被覆盖与土地利用变化研究 [J]. *生态学报*, 2022,42(6):2149-2163.
- Wang S, Zhang L L, Lin W B, et al. Study on vegetation cover and landuse change of Guangdong Province based on MODIS-NDVI [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(6):2149-2163.
- [30] 格日乐,乌仁陶德,张 力,等.几种沙漠植物蒸腾作用特性及其环境响应机制的研究 [J]. *水土保持研究*, 2007,14(1):184-186,189.
- Ge R L, Wu R T D, Zhang L, et al. The study on transpiration of several desert plants and environment responding mechanism [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007,14(1):184-186,189.
- [31] Cao S, He Y, Zhang L, et al. Spatiotemporal characteristics of drought and its impact on vegetation in the vegetation region of Northwest China [J]. *Ecological Indicators*, 2021,133:108420.
- [32] Yang L, Feng Q, Zhu M, et al. Variation in actual evapotranspiration and its ties to climate change and vegetation dynamics in Northwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2022,607:127533.
- [33] 王 华,周玉科,王笑影,等.东北植被生长峰值特征的变化及对气候和物候的响应 [J]. *遥感技术与应用*, 2021,36(2):441-452.
- Wang H, Zhou Y K, Wang X Y, et al. Spatiotemporal changes in vegetation growth peak and the response to climate and phenology over Northeast China [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2021,36(2):441-452.
- [34] 周玉科.中国东北地区植被生产力控制因素分析 [J]. *地理学报*, 2020,75(1):53-67.
- Zhou W K. Analysis of controlling factors for vegetation productivity in Northeast China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020,75(1):53-67.
- [35] Guo L, Liu R, Shoaib M, et al. Impacts of landscape change on net primary productivity by integrating remote sensing data and ecosystem model in a rapidly urbanizing region in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,325:129314.
- [36] Hou Y, Zhang K, Zhu Y, et al. Spatial and temporal differentiation and influencing factors of environmental governance performance in the Yangtze River Delta, China [J]. *Science of The Total Environment*, 2021,801:149699.
- [37] 李伟霄,徐 军,姚雅倩,等.全球变暖背景下青藏高原三江源地区植被指数(NDVI)时空变化特征探讨 [J]. *山地学报*, 2021,39(4):473-482.
- Li W X, Xu J, Yao Y Q, et al. Temporal and spatial change characteristics of vegetation cover (NDVI) in the Three-River Headwater Region on Tibetan Plateau under global warming [J]. *Mountain Research*, 2021,39(4):473-482.
- [38] 肖云飞,陈文业,王斌杰,等.祁连山国家级自然保护区土地利用时空变化及与气候因子关系研究 [J]. *草地学报*, 2021,29(9):2049-2057.
- Xiao Y F, Chen W Y, Wang B J, et al. Study on temporal and spatial change of land use and its relationship with climate factors in Qilian Mountain National Nature Reserve [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(9):2049-2057.

作者简介: 徐 勇(1988-),男,湖南益阳人,副教授,博士,主要研究方向为气候变化和植被覆盖反演.发表论文 30 余篇.