青岛市植被 NPP 时空变化及驱动力分析*

肖俊泽[1] 文江霞[2] 杨金明[1] 王宏达[1] 王 鹏[3] 李凤仪[1]

1 青岛农业大学园林与林学院 山东青岛 266109

2 中国市政工程华北设计研究总院有限公司重庆分公司 重庆 401120

3 中国林业科学研究院林业科技信息研究所 北京 100091

摘要：植被净初级生产力是评估森林生态环境质量和固碳能力的有效指标。文章基于 MODIS 遥感数据，采用改良的 CASA 模型，结合 MOD13Q1 数据和气象观测资料，利用最小二乘法及地理探测器，揭示青岛市 2000—2020 年的植被 NPP 的时空变化规律及其主要影响因素，为青岛市植被减碳增汇、生态恢复和可持续发展等研究奠定基础。结果表明：时序上，2000—2020 年青岛市植被 NPP 总体上呈现波动上升趋势，年均增长速率为 5.089 gC·m^{-2}·a^{-1}；空间上，青岛市年均 NPP 表现为从西北到东南呈带状间隔分布，胶州湾地区最低的特点；单因子影响力上，土地利用类型为主导因子；双因子的交互作用影响力均大于单因子，人为因子间的交互作用在 NPP 解释中具有显著作用，自然因子和人为因子间的交互作用进一步增强。综上可知：青岛市的 NPP 随着生境质量的提高而增加，生态环境在不断改善；人类活动对 NPP 的影响起主导作用，但自然因子对 NPP 的影响也不可忽视。

关键词：植被净初级生产力；地理探测器；CASA 模型；MOD13Q1 数据

DOI：10.12169/zgcsly.2024.05.12.0001

Spatiotemporal Variation and Driving Factors of Vegetation NPP in Qingdao

Xiao Junze[1] Wen Jiangxia[2] Yang Jinming[1] Wang Hongda[1] Wang Peng[3] Li Fengyi[1]

(1. Faculty of Landscape Architecture and Forestry, Qingdao University of Agriculture, Qingdao 266109, Shandong, China; 2. Chongqing Branch, North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401120, Sichuan, China; 3. Research Institute of Forestry Policy and Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Net primary productivity (NPP) is an effective index to assess the quality of ecological environment and carbon sequestration ability of forests. Based on MODIS remote sensing data, the paper uses the improved CASA model combined with MOD13Q1 and meteorological data, unitary linear regression analysis and geographic detector to reveal the spatial and temporal variations of vegetation NPPs in Qingdao from 2000 to 2020 and their influencing factors, which aims to lay the foundation for the research on vegetation carbon sequestration, emission reduction, ecological restoration and sustainable development in Qingdao. The results indicate that in the time sequence, the vegetation NPPs in Qingdao showed a fluctuating increase from 2000 to 2020, and the average annual growth rate was 5.089 gC·m^{-2}·a^{-1}; in spatial terms, the annual vegetation NPP in Qingdao presented the an interval belt distribution from northwest to southeast, and the lowest point fell in the Jiaozhou Bay region; In terms of single factor, land use type was the dominant factors. The interactive influence of two factors was greater than the

收稿日期：2024-05-12

*基金项目：山东省住房城乡建设科技计划项目（2023-77）；青岛科技惠民计划项目（23-2-8-cspz-10-nsh）

第一作者：肖俊泽（1998-），男，硕士生，主要研究方向为风景园林规划设计。E-mail：2454142069@qq.com

通信作者：李凤仪（1989-），女，博士，副教授，主要研究方向为风景园林规划设计与理论、风景遗产保护与管理。E-mail：201701028@qau.edu.cn

influence of single factor, the interaction between human factors plays a significant role in NPP interpretation, and the interaction between natural factors and human factors is further enhanced. In general, the NPPs in Qingdao increase with the improvement of habitat quality, showing an increasing improvement of ecological environment, and human activities have a predominant impact on NPPs, while the impact of natural factors on NPPs cannot be ignored.

Keywords: NPP; geographical detector; CASA model; MOD13Q1 data

植被净初级生产力（net primary productivity, NPP）指的是植被积累的有机物的量，即绿色植物自身通过光合作用将 CO_2 转变为有机化合物总量，减去植物因为呼吸作用氧化分解的有机物的量的其他部分[1]。植被 NPP 是评估生态系统碳循环和能量流动的重要指标[2]。

当前，植被 NPP 的研究主要分为两个方面。一是运用不同模型估算植被 NPP，分析其时空演变特征[3-4]。其中，根据植被光能利用率原理建立的 CASA 模型被广泛应用于全球碳循环及植被 NPP 的研究[5-6]。植被 NPP 的时空变化特征多结合 MODIS 数据与 CASA 模型，从国家层面[7]，省级层面[8]，市级、区域层面[9]等不同尺度进行研究[10-11]。前人的研究取得了较好的结果，也验证了 CASA 模型与 MODIS 数据的适用性和准确性。二是分析植被 NPP 的驱动机制，可以采用相关分析法、回归分析法和空间分析法相结合的方法，与这些方法相比，地理探测器模型能够定量化评估单因子的影响及其相互关系，被广泛用于研究不同地区植被 NPP 的驱动机制[12-14]。研究表明，在大尺度上，气候变化显著影响植被 NPP。Wang 等[15]分析过去 20 年内气候与 NPP 的关系发现，温度是影响全球植被 NPP 的主要环境因素；朱文泉等[16]对中国地区的植被 NPP 进行了数值模拟发现，不同地区限制植被 NPP 的主要气候因素不同。由于区域尺度的特殊性，植被 NPP 的影响因子各不相同。宋午椰等[17]研究发现，影响黄土高原地区植被 NPP 的主导自然因素是年降水量与干燥度指数；姚遥和梁一萱[18]认为相对于气候因素，陕西省植被 NPP 受人为活动的影响更大；Chang 等[19]发现京津冀城市化中人类活动对植被 NPP 的影响是先降低后缓慢增加。前人的研究表明，对于不同区位尺度的研究场地，影响因子与植被 NPP 的驱动机制并不相同。

以往的研究范围多为城市群或省域级以上，但也有许多学者进行市域级研究[20-22]。青岛市是一个经济快速发展的海滨城市，近现代以来迅猛的城市化进程会对植被 NPP 产生较大影响，但是过去以青岛市为研究对象的文献较少。为此，文章以 2000—2020 年 MODIS 卫星遥感资料为基础，采用改进 CASA 模型，结合 MOD13Q1 数据和气象数据，对青岛市年际间植被 NPP 的时空演化特征进行研究，并结合气温、降水等自然要素，土地利用、总人口数、GDP 等人为要素，利用地理探测器模型对各个驱动因素对植被空间分布的作用进行量化分析，为青岛市的植被减碳增汇、生态恢复和可持续发展等研究奠定基础。

1 研究区概况

青岛市（119° 30′—121° 00′ E，35° 35′—37°09′ N）地处山东半岛南端，共有 7 个市辖区和 3 个县级市，总面积约 11 293 km^2；北临烟台，南接日照，西依潍坊，东临黄海，为我国海岸带上的重要经济中心（图 1）。青岛市是典型的滨海丘陵地区，具有北部和南部地势较高，中部地区地势较低的总体发展态势[23]，丘陵海拔多在200 m左右。地处北温带季风区，属温带季风性气候，具有较强的地域特征。境内大小河流多达 224 条，水资源丰富，自然环境优越，动植物资源丰富。青岛市是“一带一路”经济走廊的主要城市，经济发展迅速，是我国东部典型的快速发展城市[24]。

2 研究方法

2.1 数据来源

研究区 2000—2020 年的 MOD13Q1 植被指数产品由美国 EarthData 网站提供（http://earthdata.nasa.gov），数据格式为 hdf，空间分辨率 250 m。使用 MRT 软件处理数据，NPP 为年合成产品，NDVI 为 16 天合成产品，以改良的 CASA 模型为基础估算植被 NPP。

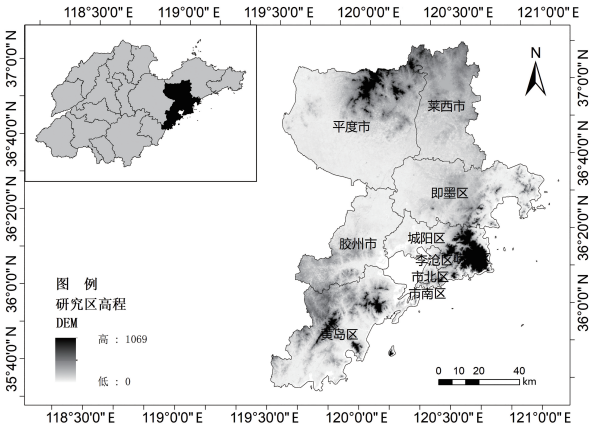


图 1　研究区地理区位

青岛市逐月平均气温、降水量和太阳辐射数据是从国家青藏高原科学数据中心（https://data.tpdc.ac.cn/）中获取，利用 R-4.2.2 对 NC 文件进行处理获得栅格数据。土地覆盖数据来自 PIE-Engine 开放平台（https://engine.piesat.cn/）。GDP 和总人口数资料由中国科学院资源环境科学与技术中心（http://www.resdc.cn）获取。DEM 源自地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/），由 ArcGIS 10.8 软件提取得到坡度、坡向数据。为保证数据的匹配精度，均使用 UTM 投影（通用横轴墨卡托投影），且重采样为 250 m 分辨率。

根据前人研究，驱动因子多分为自然因子和人为因子两大类[12,14]，选取其中部分驱动因子进行研究（表 1）。其中，城市扩张、植树造林、人类耕作都很难定量分析，但可以借助地类面积转换研究人类活动对 NPP 的影响[8-9]，因此，将土地利用类型作为人为因子来研究。

表 1　植被 NPP 驱动因子

自然因子				人为因子	
气温	X1	高程	X3	总人口数	X6
降水	X2	坡度	X4	GDP	X7
		坡向	X5	土地利用类型	X8

2.2　植被 NPP 估算

采用 CASA 模型估算青岛植被 NPP[16]，公式如下：

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

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

式（1）~（2）中：NPP（x，t）是在 t 时刻内的空间 x 处的净初级生产力；$APAR$（x，t）表示光合有效辐射；ε（x，t）是植物在不同环境条件下所能获得的最大光能利用量[25]；常数 0.5 是植被能有效利用太阳辐射和太阳总辐射之比；SOL（x，t）是总的太阳辐射值（MJ · m^{-2}）；$FPAR$（x，t）指的是植物对吸收入射的有效辐射的吸收率。FPAR 和 NDVI 之间具有较好的线性相关性，可用 NDVI 估计。

实际估计时采用朱文泉[26]改良的 CASA 模型，将 NDVI、月降水量、太阳辐射、月平均温度和青岛植被覆盖类型的栅格数据来估计青岛市植被月值 NPP 值，继而得到年际植被 NPP。

2.3　植被 NPP 时空变化趋势分析

该研究通过最小二乘法分析，运用 ArcGIS 10.8 软件中栅格计算器工具对趋势线斜率进行逐像元统计[9]，算法如下：

$$slope = \frac{n \times \sum_{j=1}^{n} j \times NPP_j - \sum_{j=1}^{n} j \sum_{j=1}^{n} NPP_J}{n \times \sum_{j=1}^{n} j^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} j\right)^2} \quad (3)$$

式（3）中：n 为研究时序；j 为年份，NPP_j 为第 j 年的 NPP；$slope$ 为斜率。本研究中 NPP 趋势变化可分为增加（$slope$>-5），无明显变化（-5≤$slope$<5），减少（$slope$<5）。

采用 F 检验法对其进行显著性检验，并通过 P 值进行判断，公式如下：

$$U = \sum_{i=1}^{n} (\tilde{y}_i - \bar{y}) \quad (4)$$

$$Q = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \tilde{y}_i)^2 \quad (5)$$

$$F = U \times \frac{N-2}{Q} \quad (6)$$

式（4）~（6）中：N 为研究时序；U 为误差平方和；Q 为回归平方和；$\tilde{y}_i$ 为拟合回归值；$\bar{y}$ 为 n 年的平均值；y_i 为第 x_i 年的值。NPP 变化趋势显著性可分为极显著水平（P<0.05），显著水平（0.05≤P<0.1），无明显变化（P≥0.1）。

用 F 检验法检验 NPP 的显著性，P 值作为判断标准。P<0.05，表明 NPP 具有极显著变化；0.05≤P<0.1，NPP 为显著变化；P≥0.1，NPP 变化无显著性。

2.4　植被 NPP 与驱动因子相关性分析

地理探测器中的因子探测被用于检测不同驱动因子对于植被 NPP 在空间分布上的解释力[27]，

公式如下：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} \quad (7)$$

式（7）中：N 与 N_h 是全区和 h 个体数；L 是因子或变量的类型；σ^2 与 σh^2 分别是全区和 h 的方差。q 的取值是 0~1，q 越大，空间分异性越显著。

地理探测器中的交互作用探测，探究因子 X1 和 X2 协同作用是否改变因变量 NPP 的解释力，即主要比较 q（X）和 q（X1∩X2）之间的关系。

3 结果与分析

3.1 植被 NPP 年际变化特征及空间分布差异

3.1.1 植被 NPP 的年际变化特征

由图 2 可知，2000—2020 年青岛市植被 NPP 呈波动递增趋势，年均增速为 5.089 gC·m^{-2}·a^{-1}。近 21 年来，青岛市年均植被 NPP 变化幅度为 498.53~850.81 gC·m^{-2}·a^{-1}，多年平均 NPP 为 706.99 gC·m^{-2}·a^{-1}。2001—2005 年植被 NPP 呈现较为显著的增加趋势，2001 年是最低值，为 498.53 gC·m^{-2}·a^{-1}，在 2005 年达到最高值，为 850.81 gC·m^{-2}·a^{-1}；2006—2020 年植被 NPP 以多年平均值为中心上下波动，波动范围为 596.99~802.01 gC·m^{-2}·a^{-1}。2001—2004、2009、2012、2016 和 2019 这 8 年的 NPP 值低于多年平均值，其他年份有不同程度的增长。以上说明青岛市植被 NPP 值在 2000、2001、2005、2016 年数据值变化剧烈，导致 R^2 较小，去掉异常值后拟合度将大幅升高，且两种拟合均为增加趋势，可用于趋势分析。

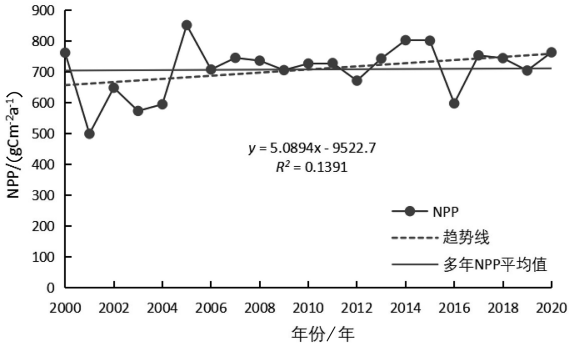


图 2 2000—2020 年青岛市植被 NPP 年际变化

3.1.2 植被 NPP 空间分布差异

如图 3 所示，2000—2020 年青岛市的植被 NPP 均值主要集中在 400~900 gC·m^{-2}·a^{-1}，占比为青岛市全域面积的 89.66%。其中，高值区（>800 gC·m^{-2}·a^{-1}）主要分布在林地，如大泽山、崂山、大珠山等；中值区（500~800 gC·m^{-2}·a^{-1}）主要分布在平度市、莱西市、黄岛区南北侧和即墨区东部；低值区集中分布于城市建成区。根据钞振华等[28]的研究，2001—2010 年青岛市植被 NPP 高值主要集中于林地，低值集中于建成区，本研究的空间分布特点与其相吻合。总体上看，青岛市植被 NPP 在空间上表现为西部和中部较高，胶州湾地区最低。

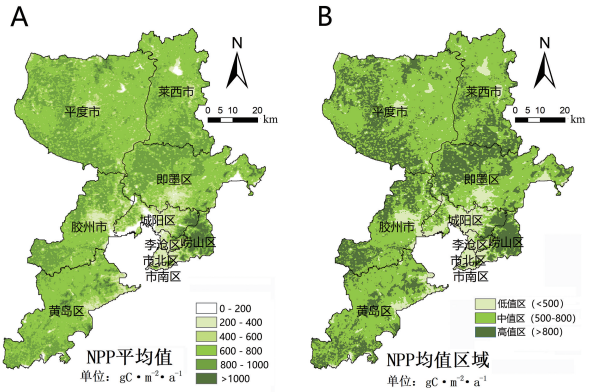


图 3 2000—2020 年青岛市植被 NPP 平均值（A）和等级划分（B）

由图 4 可知，青岛市 2000—2020 年植被 NPP 变化速率能够反映植被 NPP 的演变过程，其结果介于-41.58~41.06 gC·m^{-2}·a^{-1}。其中，*slope*>0 的区域约占 85.31%，说明青岛市大多数地区植被生长状况良好，植被 NPP 不断增加。然而，高增长区域（*slope* > 15 gC·m^{-2}·a^{-1}）较少，仅占 3.5%。从空间分布看，*slope*>15 gC·m^{-2}·a^{-1} 主要分布在山区林地；*slope* 介于 5~15 gC·m^{-2}·a^{-1} 分布最广，占 50.1%，集中分布于青岛市的南北部；*slope*≤5 gC·m^{-2}·a^{-1} 多分布在城区，并以城区为中心向四周扩散，在平度市、城阳区、胶州市、即墨区周边 NPP 下降最明显，说明人为活动是导致植被 NPP 下降的重要原因。

通过显著性检验，将青岛植被 NPP 年际变化趋势分为 7 个等级：轻微增加（0<*slope*<5，0.05≤*P*≤0.1）、显著增加（*slope*>5，0.05≤*P*≤0.1）、极显著增加（*slope*>5，*P*<0.05）、极显著减少（*slope*<-5，*P*<0.05）、显著减少（*slope*<-5，0.05≤*P*≤0.1）、轻微减少（-5<*slope*<0，0.05≤*P*≤0.1）、不显著变化（-5<*slope*<5，*P*≥0.1），

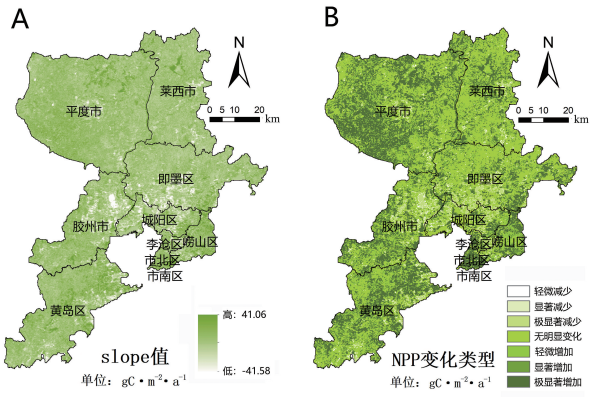


图 4　2000—2020 年青岛市 NPP 变化速率（A）和变化类型（B）

并统计各等级的面积及占比（表 2）。

表 2　NPP 变化类型的面积及占比

NPP 变化类型	面积/km²	面积占比/%
轻微减少	247. 0	1
显著减少	133. 8	1
极显著减少	512. 3	3
无明显变化	6 792. 5	41
轻微增加	2 568. 6	16
显著增加	1 707. 5	10
极显著增加	4 596. 9	28

由表 2 和图 4 可知，青岛市植被 NPP 在 21 年间表现出显著的增长，28%的区域呈现极显著增加趋势，10%的区域呈现显著增加趋势，而 16%的区域呈现轻微增加趋势，呈现减少趋势的面积占比仅为 5%。另外，有 41%的区域没有出现明显变化，主要分布在青岛各市区人为干扰较少的区域。

3.2　因子影响力探测分析

如图 5 所示，土地利用类型的影响力先增后减，总体影响力增大，为 NPP 的主导因素，且总人口数、GDP 的影响力呈持续升高态势，表明人为因子对 NPP 的影响力逐渐增强。DEM、坡度的影响力呈波动下降趋势，影响力降低，但仍为 NPP 的次要主导因素；气温、降水、坡向的影响力波动较小，且温度影响力持续降低，降水的影响力持续上升，坡向影响力最弱。这表明自然因子对 NPP 的影响力相对减弱。

总体来说，在 2000—2020 年，NPP 受多种环境因素的影响，其中土地利用类型为主导因子，DEM 和坡度为次要主导因子，其他因子影响相对较弱，人类活动对 NPP 的影响日渐增强。

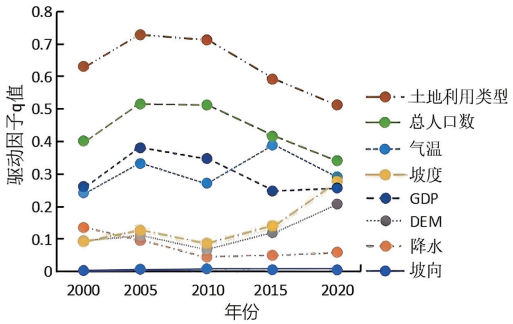


图 5　各驱动因子对植被 NPP 的影响程度

3.3　因子交互作用探测分析

双因子交互作用对植被 NPP 在空间分布上的效应要高于单因子。由图 6 可以看出，5 期因子中两个因子的 q 值高于单个因子的 q 值，并且在人为因子与自然因子共同作用下对植被 NPP 的影响更大。由表 3 可知，土地利用类型、GDP、气温和坡度之间的交互作用对 NPP 的空间差异有显著影响。此外，土地利用类型与其他因子交互效应最大，这一结果再次证明土地利用类型是影响 NPP 的主导因素，与其他因子呈协同促进作用，且自然和人为因子之间的交互影响进一步加强。

4　讨论

本研究使用 CASA 模型模拟的青岛 2001—2020 年的植被 NPP 多年平均值较前人研究较高[29-30]，

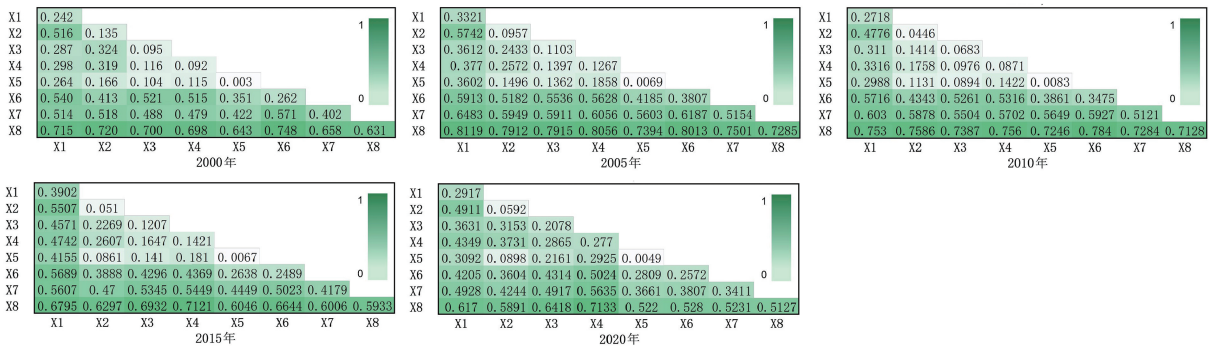


图 6　各因子交互作用影响力

表 3 各年的交互作用影响力排名

年份	交互作用影响力排名（前 5 位因子）
2000	X6∩X8(0.75)>X2∩X8(0.72)>X1∩X8(0.71)>X3∩X8(0.7)>X5∩X8(0.69)
2005	X1∩X8(0.81)>X4∩X8(0.81)>X6∩X8(0.8)>X3∩X8(0.79)>X2∩X8(0.79)
2010	X6∩X8(0.78)>X2∩X8(0.76)>X4∩X8(0.76)>X1∩X8(0.75)>X3∩X8(0.74)
2015	X4∩X8(0.71)>X3∩X8(0.69)>X1∩X8(0.68)>X6∩X8(0.66)>X2∩X8(0.62)
2020	X4∩X8(0.71)>X3∩X8(0.64)>X1∩X8(0.61)>X3∩X8(0.59)>X6∩X8(0.53)

其原因可能在于：在空间尺度下，相较于前人空间分辨率 1 km，本研究采用 MOD13Q1 植被指数产品能够捕获更多植被；栾海军等[31]认为 MOD13Q1 产品存在偏高估计的问题，同时，CASA 模型的参数存在误差，而本研究中对于参数的设置更加合理化，可为青岛市植被 NPP 的研究提供支持。

时间序列上，2000—2020 年青岛市植被 NPP 年际波动较大，整体呈上升趋势，与以往山东省植被 NPP 的总体变化趋势一致，低于威海烟台等地，高于内陆市区[32]。21 年来青岛各市区多年均值 NPP 最高者为崂山区，最低者为市北区；崂山区较于市北区植被覆盖程度高，生境质量高，人为活动相对较少。空间分布上，青岛市植被 NPP 呈现东部与中部高，胶州湾区域最低的分布特点。大泽山、崂山等山体的植物种类丰富，植被 NPP 较高；胶州湾区域以城市建成区为主，NPP 较低。过去 21 年青岛市 NPP 明显下降的地区主要集中于城市建成区，城市周围 NPP 减少的原因可能是随着城市经济的迅猛发展，人工建筑密度的不断攀升[33]，致使有限植被资源覆盖面积锐减。

人类活动是影响青岛植被 NPP 变化的主要原因，这与以往研究结果相符。在自然因子方面，青岛市植被 NPP 与气温因子关系最大，与降水的关系较小（图 5），原因可能是降水量的变化会对植物的生长产生滞后的影响[34]，且青岛市水资源较为丰富，植物生长较少受水分胁迫的影响。相对于单一因子，多因子协同作用显著提高了植被 NPP 空间分异解释能力。在 2015 年前后，人为因子逐渐取代自然因子成为交互作用的主导因子，这表明人为因子为主导时，自然因子对植被 NPP 的解释作用降低，如城市扩张导致森林草地等生态用地减少，植被 NPP 大大减少[35]，而近几年青岛市植树造林、林地保护、兴建公园等措施又有效提升了植被质量和碳汇潜力[36]。

采用不同的研究数据和方法，得到的 NPP 结果也不尽相同。地理探测器虽然可以揭示驱动因子对 NPP 的影响力，但无法完全揭示其作用的正向或负向反馈[37]。由于人类活动的复杂性，仅仅依靠土地利用类型、GDP、总人口数的分析是远远不足的，而且，除以上因素外，植被 NPP 也会受到土壤肥力、植被的群落结构等的影响[38]。本研究旨在更加全面了解多种复杂的环境因子如何相互作用及其对 NPP 变化的影响。未来研究应进一步提高数据质量和研究方法，研究各环境因子和植被 NPP 之间的关系。

5 结论

青岛市植被 NPP 在 2000—2020 年呈波动增加态势，其中，54%的区域呈现增加趋势，主要分布在青岛市北部大泽山、东部崂山以及南部大珠山等山林地区域；呈现减少趋势的面积占比仅为 5%，多分布在人类活动较密集的区域。植被 NPP 表现为从西北到东南呈带状间隔分布、胶州湾最低的分布特点。不同环境因素对植被 NPP 空间分异的解释能力不同，土地利用类型是主导因子，人类活动对植被 NPP 有较大影响，自然因子影响相对较弱。双因子共同作用的影响力均高于单因子，且人为因子与自然因子共同作用下对植被 NPP 空间分布影响比单因子影响更大。此外，相较于自然因子，人为因子对 NPP 空间分布的影响更为显著。

参考文献

[1]崔霞,冯琦胜,梁天刚.基于遥感技术的植被净初级生产力研究进展[J].草业科学,2007,24(10):36-42.

[2]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[J].地球信息科学学报,2014,16(6):915-924.

[3]YUAN X M,GUO B,LU M.The responses of vegetation NPP dynamics to the influences of climate-human factors on Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2020[J].Remote Sensing,2023,15(9):2419.

[4]刘涛,刘晓龙,郭利彪,等.基于 Markov-PLUS 和 InVEST 模型

的锡林郭勒草原碳储量变化预测[J].草原与草坪,2023,43(2):1-12.

[5]XI H Y,FENG Q,CHENG W J,et al.Spatiotemporal variations of Alxa national public welfare forest net primary productivity in Northwest China and the response to climate change[J].Ecohydrology,2022,15(8):e2377.

[6]原一荃,薛力铭,李秀珍.基于 CASA 模型的长江口崇明东滩湿地植被净初级生产力与固碳潜力[J].生态学杂志,2022,41(2):334-342.

[7]石智宇,王雅婷,赵清,等.2001—2020 年中国植被净初级生产力时空变化及其驱动机制分析[J].生态环境学报,2022,31(11):2111-2123.

[8]职露,胡涛,邹滨,等.河南省植被 NPP 时空分异及其驱动因子[J].自然资源遥感,2023,35(4):169-177.

[9]刘文瑞,李晓婷,李彤,等.基于 MODIS 和 CASA 模型的伊春市森林植被 NPP 变化特征及其影响因子分析[J].生态学杂志,2022,41(1):150-158.

[10]SUN Q Y,LIU W W,GAO Y N,et al.Spatiotemporal variation and climate influence factors of vegetation ecological quality in the Sanjiangyuan National Park[J].Sustainability,2020,12(16):6634.

[11]YANG H F,HU D D,XU H,et al.Assessing the spatiotemporal variation of NPP and its response to driving factors in Anhui province,China[J].Environmental Science and Pollution Research International,2020,27(13):14915-14932.

[12]左丽媛,高江波.基于地理探测器的喀斯特植被 NPP 定量归因[J].生态环境学报,2020,29(4):686-694.

[13]吴雪晴,张乐乐,高黎明,等.青海湖流域 NPP 动态变化及驱动力[J].干旱区研究,2023,40(11):1824-1832.

[14]孙治娟,谢世友.基于地理探测器的云南省净初级生产力时空演变及因子探测[J].生态学杂志,2021,40(12):3836-3848.

[15]WANG Z Q,WANG H,WANG T F,et al.Effects of environmental factors on the changes in MODIS NPP along DEM in global terrestrial ecosystems over the last two decades[J].Remote Sensing,2022,14(3):713.

[16]朱文泉,潘耀忠,阳小琼,等.气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析[J].科学通报,2007,52(21):2535-2541.

[17]宋午椰,许行,林毅雁,等.黄土高原植被净初级生产力时空变化特征及驱动因子分析[J].北京林业大学学报,2023,45(8):29-42.

[18]姚遥,梁一萱.2002—2021 年陕西省 NPP 变化趋势及空间分异特征研究[J].陕西林业科技,2022,50(4):20-28.

[19]CHANG S P,WANG J,ZHANG F F,et al.A study of the impacts of urban expansion on vegetation primary productivity levels in the Jing-Jin-Ji region,based on nighttime light data[J].Journal of Cleaner Production,2020,263:121490.

[20]师静,鲁雪媛,陈旭.昆明市城市化及城市热岛效应对植被净初级生产力的影响[J].草业科学,2022,39(12):2589-2603.

[21]具琳静,欧阳勋志,潘萍,等.2000—2019 年赣南森林净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系[J].东北林业大学学报,2022,50(12):37-44.

[22]黎慧,戴前坤,徐梓萌,等.南京都市圈植被 NPP 变化特征及驱动因素探究[J].阜阳师范大学学报(自然科学版),2023,40(1):97-106.

[23]刘永哲,黄翠艳,姜雯,等.近 52 年青岛市气温变化特征分析[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2014,31(3):199-204.

[24]王欣,韩丽.海洋活力区,青岛“未来之城”[J].走向世界,2019(11):36-39.

[25]李贵才.基于 MODIS 数据和光能利用率模型的中国陆地净初级生产力估算研究[D].北京:中国科学院研究生院(遥感应用研究所),2004.

[26]朱文泉.中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D].北京:北京师范大学,2005.

[27]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.

[28]钞振华,张培栋,王旭峰,等.近 10 年来山东区域 NPP 时空变化分析[J].草业科学,2013,30(6):829-835.

[29]马曦瑶.山东省植被净初级生产力时空分布特征及其影响因子研究[D].北京:北京林业大学,2019.

[30]骆艳,张松林.山东省植被 NPP 时空分布特征及驱动因素分析[J].广西植物,2019,39(5):690-700.

[31]栾海军,牛阳,何原荣,等.融合地物类别信息的 NDVI 尺度转换模型构建及 MOD13 Q1 产品真实性检验[J].测绘科学技术学报,2019,36(1):45-50.

[32]张筠.基于 CASA 模型的山东省植被 NPP 时空格局变化及其驱动因素研究[D].烟台:鲁东大学,2021.

[33]程东亚,李旭东.喀斯特地区植被覆盖度变化及地形与人口效应研究[J].地球信息科学学报,2019,21(8):1227-1239.

[34]TAELMAN S E,SCHAUBROECK T,DE MEESTER S,et al.Accounting for land use in life cycle assessment:the value of NPP as a proxy indicator to assess land use impacts on ecosystems[J].Science of the Total Environment,2016,550:143-156.

[35]张新悦,冯禹昊,曾辉,等.1982—2014 年华北及周边地区生长季 NDVI 变化及其与气候的关系[J].北京大学学报(自然科学版),2021,57(1):153-161.

[36]赵方圆,王琼芳,张华堂,等.基于 InVEST 模型的甘肃省祁连山林区乔木林碳储量时空变化研究[J].西北林学院学报,2023,38(4):233-240.

[37]尹锴,田亦陈,袁超,等.基于 CASA 模型的北京植被 NPP 时空格局及其因子解释[J].国土资源遥感,2015,27(1):133-139.

[38]王馨爽,吴梦月,马红利,等.渭河流域长时间序列 NPP 估算及时空变化特征分析[J].西北林学院学报,2020,35(6):205-211.