殷丽婷, 郑伟, 高猛, 等. 庙岛群岛北五岛生态系统净初级生产力与景观格局时空分布异质性研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(6): 110–118, doi:10.3969/j.issn.0253−4193.2020.06.013

Yin Liting, Zheng Wei, Gao Meng, et al. Spatial and temporal heterogeneity of net primary productivity and landscape patterns on five northern islands of Miaodao Archipelago[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(6): 110–118, doi:10.3969/j.issn.0253−4193.2020.06.013

庙岛群岛北五岛生态系统净初级生产力与景观格局时空分布异质性研究

殷丽婷[1,4], 郑伟[2,3*], 高猛[1], 路景钫[2,3]

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所 海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266237; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用 ArcGIS10.2、ENVI5.1、SPSS26 等软件, 本文基于经典 CASA 模型估算了 2005 年、2010 年、2017 年庙岛群岛北五岛的净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP), 从季节、岛屿、景观类型、地形梯度等多种角度分析了 NPP 的时空分布异质性; 进而分析了 2005 年、2010 年、2017 年北五岛的景观格局时空分布异质性; 探讨了 NPP 与景观格局时空变化之间的关系及其原因。结果表明: 庙岛群岛北五岛平均全年 NPP 总量为 7 520.54 t/a(以碳计), 平均密度为 406.07 g/(m²·a) (以碳计); NPP 分布呈明显的时空分异性; 各景观类型平均面积由大到小依次为: 针叶林、阔叶林、建设用地、草地、耕地; 其 NPP 平均密度由大到小依次为: 阔叶林、针叶林、耕地、草地、建设用地; 各景观 NPP 平均密度随坡度和高差的增大先上升后出现平缓下降态势; 坡向对林地 NPP 影响较大, 半阴坡林地 NPP 平均密度最大; 不同地形梯度的 NPP 年平均密度随时间推移总体呈下降态势; NPP 高值出现在山林区域, 低值主要在建设用地区域; 由于自然地理条件、植物自身生长条件和人类活动强度等原因, NPP 时空异质性分布受季节差异、景观格局时空异质性和地形因子影响显著。

关键词: 庙岛群岛北五岛; 净初级生产力; 时空异质性; 景观分析

中图分类号: P714⁺.5; K921/927 **文献标志码**: A **文章编号**: 0253−4193(2020)06−0110−09

1 引言

净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指生物在单位时间内利用光合作用所产生的碳减去生物因自身呼吸所消耗的部分[1], NPP 是地表碳循环的重要组成部分[2]。由 Potter 等[3]提出的 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型是基于数学模型对 NPP 进行定量化估算最具代表性的模型之一[3−4], 利用 CASA 模型, 一些学者在滨海湿地、高原草地、河流流域等区域开展了 NPP 估算和驱动因素的分析[5−7], 但上述研究区域范围较大, 考虑的影响因素较为单一, 特别是对海岛 NPP 的时空异质性及驱动因素研究尚不多见。

海岛生态环境兼具海洋与陆地双重属性, 是典型的脆弱生态系统[8], 对人为和自然干扰敏感, 是开展生态学研究的天然实验场[9], 其景观格局时空分异性日趋复杂[10]。海岛净初级生产力在开展海岛生态系统服务功能评估、生态健康评估、资源环境承载力评估

收稿日期: 2019−10−16; **修订日期**: 2020−03−03。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779048, 31570423); 山东省专项海洋科技资金重大科技创新工程(2018SDKJ0503)。

作者简介: 殷丽婷(1994—), 女, 河北省石家庄市人, 主要从事地理信息系统及生态评估研究。E-mail: ylt0515@foxmail.com

*** 通信作者**: 郑伟, 副研究员, 主要从事海洋生态评估与管理研究。E-mail: zhengwei@fio.org.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

等方面都是重要的基础数据。已有研究[11]利用 CASA 模型估算了庙岛群岛南五岛生态系统净初级生产力空间分布, 并通过相关分析方法评估了其影响因子, 认为归一化植被指数和土地利用类型是 NPP 最主要的影响因子, 但归一化植被指数和土地利用类型本身就是 CASA 模型中计算 NPP 的主要参数, 与 NPP 具有较高相关性。

利用 ArcGIS10.2、ENVI5.1、SPSS26 等软件, 本文基于经典 CASA 模型估算了 2005 年、2010 年、2017 年庙岛群岛北五岛的 NPP, 从季节、岛屿、景观类型、地形梯度等多种角度分析了 NPP 的时空分布异质性; 进而分析了 2005 年、2010 年、2017 年北五岛的景观格局时空分布异质性; 探讨了 NPP 与景观格局时空变化之间的关系及其原因, 以期为研究区生态脆弱性评估和保护提供科学依据。

2　材料与方法

2.1　数据源

2.1.1　遥感影像

庙岛群岛位于黄、渤海交界处, 属暖温带大陆性季风气候, 夏季气温高、雨水多, 冬季风大、易受寒潮影响。庙岛群岛主要陆地部分为 10 个有居民岛, 本文研究的庙岛群岛北五岛包括大钦岛、小钦岛、砣矶岛、南隍城岛、北隍城岛, 总面积大约 18.51 km^2。

采用 2005 年 1 月、4 月、8 月、11 月(Landsat5 TM 卫星)、2010 年 1 月、4 月、8 月、11 月(Landsat5 TM 卫星)及 2017 年 1 月、4 月、8 月、11 月(Landsat8 OLI 卫星)12 期北五岛所在区域 30 m 分辨率的无云影像。数据来源于美国地质调查局官网(https://lpdaac.usgs.gov/)和中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn/), 行列号 120/33。借助遥感处理软件对图像进行相关处理; 通过监督分类方法得出 2005 年、2010 年、2017 年庙岛群岛北五岛景观类型分布图, 地表景观分为针叶林、阔叶林、草地、耕地、建设用地 5 类。结合 Google Earth、现场实地调研和相关的图集资料进行解译精度验证, 解译精度约为 87%, 满足本次研究的需要。

为统一标准, 本文用于分析的栅格数据中栅格大小均为 30 m×30 m, 若不符合本文标准也都在后期处理中重采样为 30 m×30 m 的栅格单元进行分析。

2.1.2　地形

利用 2011 年 Aster GDEM 模型第二版数字高程数据(数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)), 水平分辨率 30 m, 垂直分辨率 20 m; 通过 ArcGIS10.2 软件提取出高程、坡度和坡向。

2.1.3　气象数据

本文气温、降雨量数据来自于当地气象站 2005 年、2010 年、2017 年度观测数据; 日照时数、相对湿度来自于中国气象数据网(http://data.cma.cn/)的 2005 年、2010 年、2017 年逐日观测数据; 太阳总辐射数据来自烟台福山气象站的多年监测平均数据。

2.2　NPP 估算

为便于与同类研究区的比较, 采用与文献 [11] 相同的方法, 利用 ArcGIS10.2 软件对研究区域 3 年 4 个不同月份的净初级生产力进行估算, 分别以 4 月、8 月、11 月、1 月代表春、夏、秋、冬四季, 计算北五岛不同季节的净初级生产力, 进而估算区域全年的净初级生产力水平, 之后对各岛的净初级生产力总量、密度、时间、空间分布进行分析。植物对于光能的最大利用效率ξ_{max}取值根据与文献 [11] 相同。

2.3　地形因子分级

已有文献 [11] 利用坡度、坡向对 NPP 开展相关性分析。为更全面表征研究区地形特征, 本文不仅考虑单一地形因子, 还考虑了地形位指数这一复杂地形因子, 来对 NPP 在不同地形梯度上的分布规律进行探索研究。

参考《土地利用更新调查技术规定》[12]及研究区实际情况, 利用 ArcGIS10.2 中的重分类工具对坡向进行重分类, 将坡向分为平坡、阴坡、半阴坡、半阳坡、阳坡。

依据国际地理学联合会地貌调查与地貌制图委员会关于地貌详图应用的坡地分类[13]和研究区实际情况, 本文利用 ArcGIS10.2 中的重分类工具来划分坡度等级: 0°～2°为平地和微斜坡, 2°～5°(不包括 2°) 为缓斜坡, 5°～15°(不包括 5°) 为斜坡, 15°～35°(不包括 15°) 为陡坡, 35°～55°(不包括 35°)为峭坡。

地形位指数综合了坡度和地形起伏度的特征[14], 是个无量纲的数值, 地形位指数越高, 坡度和高差越大, 反之越小。利用 ArcGIS10.2 中的栅格计算器工具将高程和坡度进行栅格计算得到地形位指数。计算公式如下:

$$T = \ln\left[E/\left(\overline{E}+1\right)\times S/\left(\overline{S}+1\right)\right] \quad (1)$$

式中, T 代表地形位指数, 无量纲; E、S 代表某点的高程(单位: m)和坡度(单位: (°)); $\overline{E}$、$\overline{S}$代表区域的平均高程和坡度(各单位同上)。根据相关文献与研究区实际情况, 按自然间断点分级法利用 ArcGIS10.2 中的重分类工具将地形位指数重分类为 5 个级别:

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

−6.44～−2.92, −2.92～−1.51, −1.51～−0.35, −0.35～0.70, 0.70～2.28。

3 结果

3.1 北五岛 NPP 时空异质性

经计算得出, 2017 年庙岛群岛北五岛全年 NPP 总量为 7 395.77 t(以碳计), NPP 密度介于 0～916.20 g/(m²·a)(以碳计)之间, 平均密度为 399.34 g/(m²·a)(以碳计); 2010 年庙岛群岛北五岛全年 NPP 总量为 7 472.26 t(以碳计), NPP 密度介于 0～904.37 g/(m²·a)(以碳计)之间, 平均密度为 403.47 g/(m²·a)(以碳计); 2005 年庙岛群岛北五岛全年 NPP 总量为 7 693.58 t(以碳计), NPP 密度介于 0～966.95 g/(m²·a)(以碳计)之间, 平均密度为 415.42 g/(m²·a)(以碳计)。2005 年、2010 年、2017 年庙岛群岛北五岛的净初级生产力年平均总量为 7 520.54 t(以碳计), 年平均密度为 406.07 g/(m²·a)(以碳计)(图 1)。从计算结果来看, 2017 年庙岛群岛北五岛净初级生产力总量比 2005 年下降了 297.80 t(以碳计), 平均密度下降了 16.08 g/(m²·a)(以碳计)。

据估算结果, 2005 年、2010 年、2017 年春季(4 月)NPP 平均总量为 387.50 t(以碳计), 平均密度为 20.67 g/(m²·月)(以碳计); 夏季(8 月)NPP 平均总量为 1 813.50 t(以碳计), 平均密度为 96.72 g/(m²·月)(以碳计); 秋季(11 月)NPP 平均总量为 216.81 t(以碳计), 平均密度为 11.56 g/(m²·月)(以碳计); 冬季(1 月)NPP 平均总量为 92.25 t(以碳计), 平均密度为 4.92 g/(m²·月)(以碳计)。可以看出北五岛的 NPP 分布呈明显的季节分异性, 夏季平均总量占比达到 72.25%, 春季、秋季 NPP 总量分别占比 15.44% 和 8.64%, 冬季仅占 3.68%。

这主要与北五岛的气候有关, 庙岛群岛北五岛属于季风性气候, 植被生长主要依赖降雨, 几乎无外部水源和径流; 夏季气温高且雨水充足, 光照充足, 冬季气温低且降雨量小; 故而其 NPP 分布呈明显的季节分异性。建议加强海岛节水蓄水工作, 利用山势将夏季降雨蓄积, 在干旱季节适度浇灌。

5 个海岛 2005 年、2010 年、2017 年的 NPP 年平均密度估算结果见表 1。可以发现, 北五岛 NPP 年平均密度空间差异性显著, 砣矶岛年平均密度最大, 达 500.14 g/(m²·a)(以碳计), 北隍城岛年平均密度最小, 达 327.24 g/(m²·a)(以碳计); 从各岛 NPP 年平均密度来看, 砣矶岛与南隍城岛年平均密度较高, 小钦岛、北隍城岛、大钦岛年平均密度较低。建议重点在 NPP 年平均密度较低的岛屿加强绿化工程建设, 保护当地生态环境。

3.2 北五岛景观格局时空异质性分析

经分析得出, 2005 年、2010 年、2017 年庙岛群岛北五岛景观类型主要以林地为主, 林地年均面积约占北五岛土地总面积的 57.72%, 其中针叶林占比大于阔叶林, 其次为建设用地(图 2)。研究时间内各景观类型平均面积由大到小依次为: 针叶林、阔叶林、建

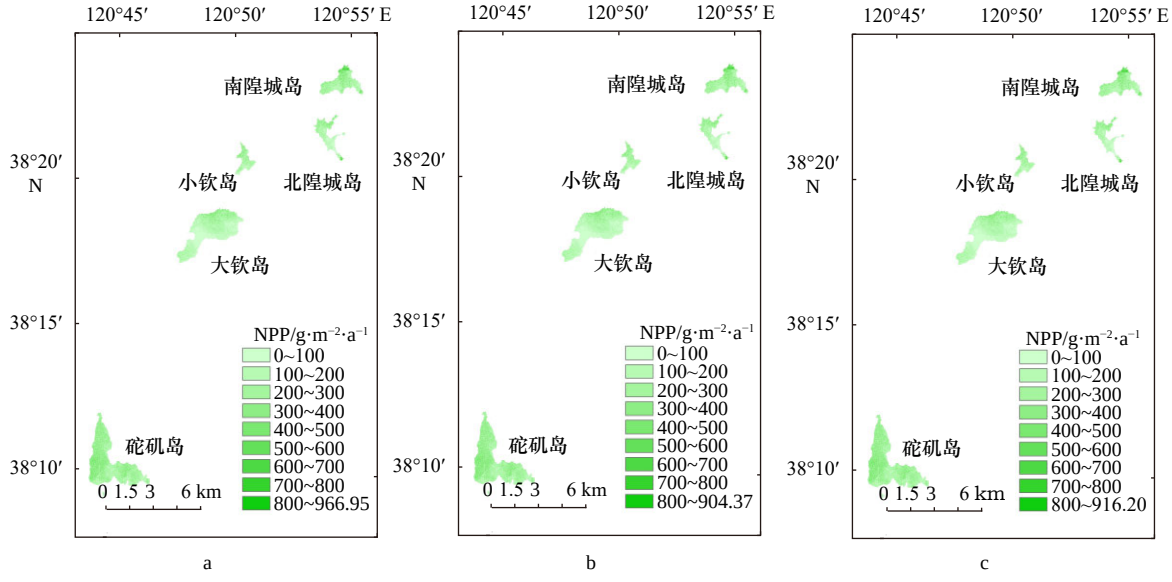

图 1 2005 年、2010 年、2017 年庙岛群岛北五岛 NPP 密度分布

Fig. 1 NPP dencity distribution of northern islands of Mialdao Archipelago in 2005, 2010 and 2017

a. 2005 年; b. 2010 年; c. 2017 年

a. 2005; b. 2010; c. 2017

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　北五岛各岛 NPP 估算结果

Table 1　NPP estimation results of each island

海岛	平均密度/ g·m^{-2}· a^{-1}(以碳计)	范围/g·m^{-2}· a^{-1}(以碳计)	标准差/g·m^{-2}· a^{-1}(以碳计)	总量/ t· a^{-1}(以碳计)	总量占比/%
砣矶岛	500.14	0～899.43	188.28	3 530.99	47.00
大钦岛	332.70	0～869.77	173.29	2 105.99	28.03
小钦岛	343.72	0～709.79	187.34	426.21	5.67
南隍城岛	439.99	0～919.81	194.18	690.78	9.19
北隍城岛	327.24	0～659.33	212.65	759.20	10.10

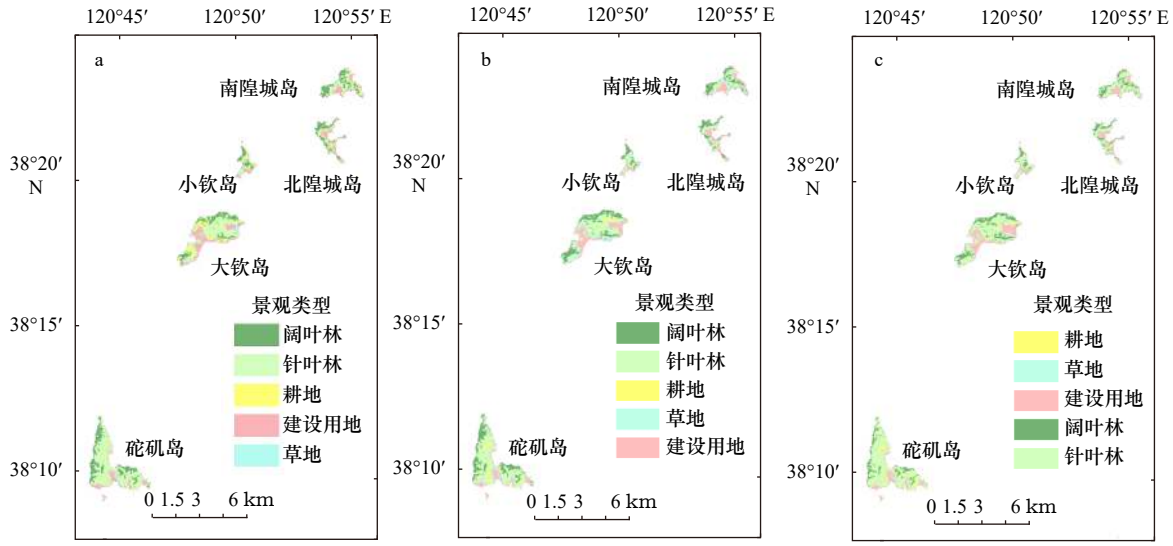

图 2　2005 年、2010 年、2017 年庙岛群岛北五岛景观类型分布

Fig. 2　Landscape type distribution of the northern islands of Miaodao Archipelago in 2005, 2010 and 2017

a. 2005 年; b. 2010 年; c. 2017 年

a. 2005; b. 2010; c. 2017

设用地、草地、耕地, 其中针叶林平均面积最大, 达到 6.31 km^2(图 3)。从各景观类型的变化趋势看, 针叶林与耕地先下降后上升, 针叶林面积 2017 年较 2005 年增加了 1.30 km^2, 而耕地则是减少了 0.90 km^2; 阔叶林、建设用地与草地先上升后下降, 草地与建设用地面积 2017 年较 2005 年各增加了 0.19 km^2 与 0.44 km^2, 而阔叶林则是减少了 1.02 km^2。从各景观类型分布来看, 林地多分布于山地, 耕地多分布在林地之间, 靠近林地, 建设用地分布在山底平原中部, 草地多分布在耕地与建设用地之间。

4　讨论

4.1　NPP 估算结果比较

将本研究计算的庙岛群岛北五岛 NPP 密度结果与采用相同方法的国内其他研究结果进行对比。与庙岛群岛南部岛群相比, 高于池源等[11]估算的 340.19 g/(m^2·a)(以碳计); 与全国大陆生态系统相比, 高于陶波等[15]估算的 342 g/(m^2·a)(以碳计)、朱文泉等[16]的 324 g/(m^2·a)(以碳计), 与顾娟等[17]估算的全国平均水平(393.75 g/(m^2·a)(以碳计))基本相当; 与国内大陆部分地区相比, 高于黄河三角洲[18]、青海[19]等同纬度地区。由此可得, 北五岛 NPP 与全国的平均水平基本相当, 高于同纬度西部地区[19–21]。

4.2　结合地形因子分析不同景观格局 NPP 的分布及原因

结合不同地形因子对 2005 年、2010 年、2017 年庙岛群岛北五岛 NPP 年平均密度估算结果进行分区统计, 结果如图 4。

随着时间的推移, 人类改造自然的能力越来越强, 对自然资源的需求也越来越大, 导致人类对自然生态系统的干扰越来越强, 因此各年份 NPP 平均密度在不同地形梯度下随时间的推移总体呈下降态势。

将地形因子与景观类型结合对 NPP 进行研究, 计

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

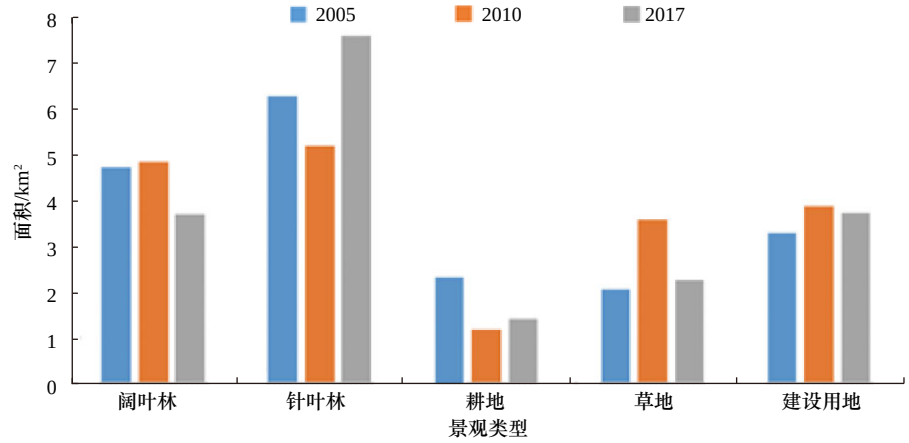

图 3 2005 年、2010 年、2017 年庙岛群岛北五岛各景观类型面积变化

Fig. 3 Changes of landscape types in the northern islands of Miaodao Archipelago in 2005, 2010 and 2017

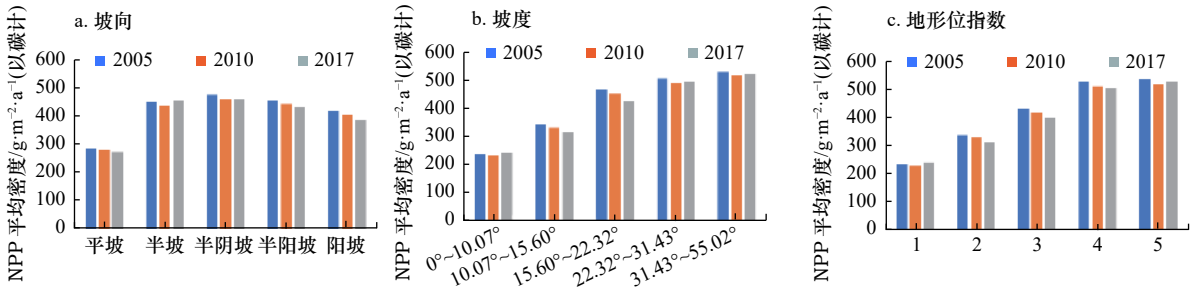

图 4 2005 年、2010 年、2017 年不同地形梯度 NPP 年平均密度

Fig. 4 The mean density of NPP of 2005, 2010 and 2017 on different topographic relief gradients

算不同地形梯度下 2005 年、2010 年、2017 年不同景观类型 NPP 年平均密度估算结果，如图 5。

由图 5 可知，从地形位指数角度分析，第 1 至第 4 梯度上五类景观 NPP 平均密度变化曲线均呈现上升态势，第 4 至第 5 梯度上，各景观变化较为平缓。在坡度上，林地 NPP 平均密度变化曲线基本处于上升态势，其他 3 类景观 NPP 平均密度变化曲线较为一致，先上升后下降。

这是因为在平地区域人类活动频繁，随坡度、高差的上升，人类活动强度减小，各景观 NPP 平均密度基本为上升态势，但随着坡度、高差的上升，植被的生存条件也发生着一定变化，到达一定程度后会抑制植被的生长，因此各景观 NPP 平均密度在上升到一定程度后出现不同程度平缓或下降态势。这与田惠文等[22]的研究结果相同，庙岛群岛北五岛 NPP 高值出现在坡度大、地形位指数高、人类活动较少的山地区域，低值主要在坡度小、地形位指数低、人类活动密集的平地区域。

在坡向上看，除了林地外，其他 3 类景观 NPP 平均密度变化曲线均较为平缓；在平地区域林地 NPP 平均密度较低。

这应该与各坡向区域内人类活动强度不同有关，平坡是有居民海岛人类活动最为密集、强烈的区域，所以 NPP 较低。半阴坡 NPP 林地平均密度最大，总体来看从阴坡到阳坡林地 NPP 分布逐渐减小，这是因为阴坡受太阳照射时间少，水分不易蒸发，因此处于阴坡的植被较为茂密，而在阳坡，太阳照射时间长，水分蒸发快，也更适宜于人类生产生活[23−24]，不利于植被生长；而在半阴坡水分蒸发较阳坡缓慢，受光照影响较强于阴坡，所以半阴坡林地 NPP 平均密度最大。

综上所述，坡向、坡度、地形位指数 3 类地形因子通过影响植物自身生长条件和人类活动间接影响到北五岛 NPP 平均密度；各年份 NPP 平均密度在不同地形梯度下随时间的推移总体呈下降态势。

与池源等[11]分析的结果相比，主要差异如下，池源等认为坡度较小利于植被生长并且坡向越向南，NPP 数值应越高，而本文研究结果认为，随着坡度的上升，人类对自然区域改造的难度越大，因此坡度较大的区域各年份 NPP 平均密度较大；但坡度等地形因素增加到一定程度后，植被的生长条件也会受到限制，因此在坡度最高的区域 NPP 平均密度增长放缓。另外北坡是阴坡，南坡是阳坡，受太阳照射和水分条

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

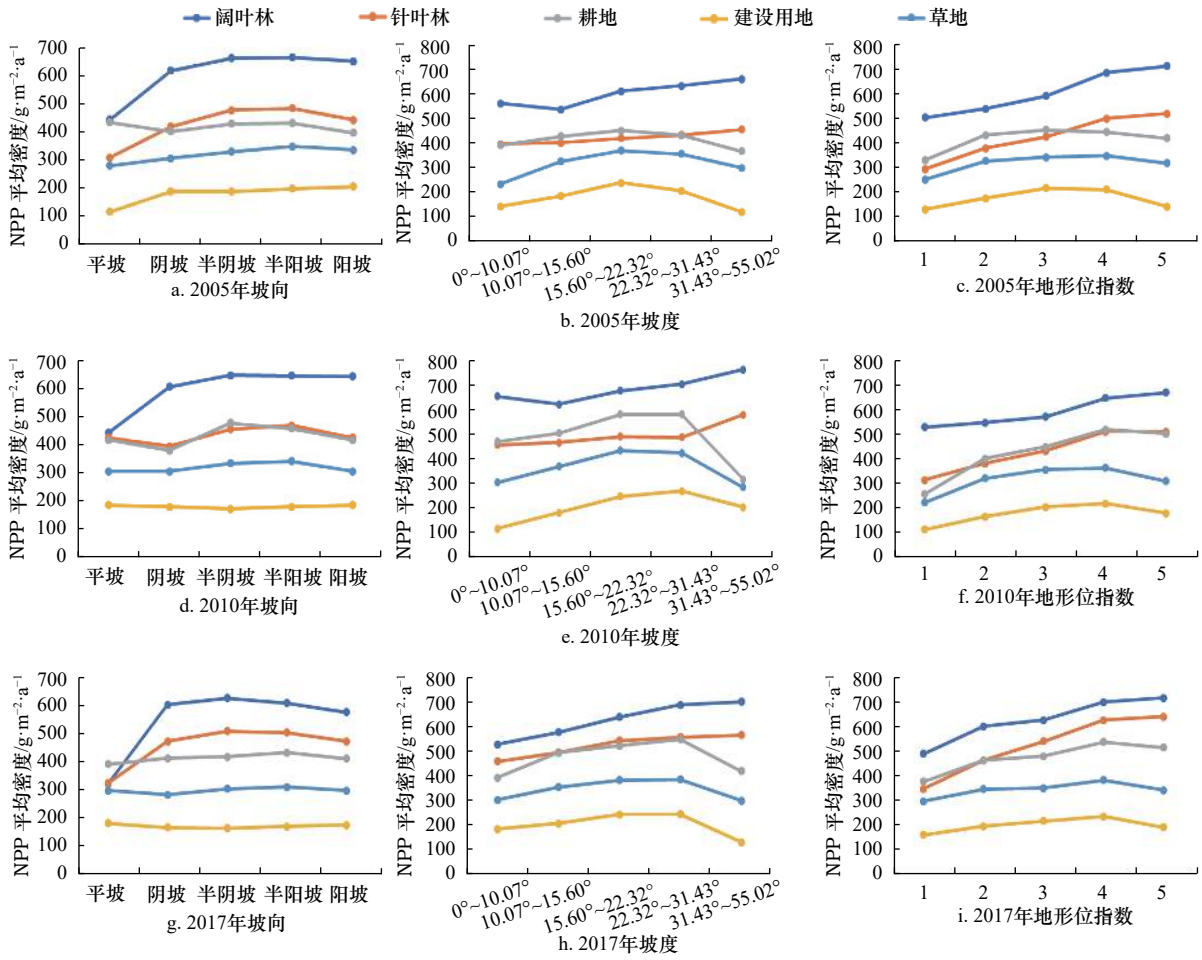

图 5　不同年份不同景观类型 NPP 平均密度随地形梯度变化

Fig. 5　Changes of the mean density of NPP with terrain gradient for different landscape types

件影响, 总体上看从阴坡到阳坡 NPP 分布逐渐减小。

4.3　NPP 与景观格局时空分布异质性之间的关系及原因分析

不同景观格局 NPP 估算结果如表 2, 从表 2 中可以看出不同景观类型中, 阔叶林和针叶林 NPP 平均密度较大; 2005 年以来针叶林、建设用地和草地的面积有所上升, 耕地、阔叶林面积有所下降, 草地和阔叶林 NPP 平均密度有所下降, 针叶林 NPP 平均密度有所上升, 耕地、建设用地 NPP 平均密度基本不变。各景观格局 NPP 平均密度由大到小依次为: 阔叶林、针叶林、耕地、草地、建设用地。

与池源等[10]的研究结果相比, 本文计算的各景观类型 NPP 平均密度均略高于池源等[10]计算的平均密度, 这是因为本文的平均密度是由 2005 年、2010 年和 2017 年的结果进行平均计算而得, 而 2005 年以来除耕地、建设用地 NPP 平均密度基本不变以外, 草地和阔叶林 NPP 平均密度有所下降, 针叶林 NPP 平均密度则是先下降后有所上升。

因为经典 CASA 模型中植物对于光能的最大利用效率取值是根据景观格局分类而划定的[16, 25], 所以景观格局的划分对 NPP 的估算有着重要作用。从空间上分析, 景观格局的空间分布影响着 NPP 的空间分布, 结合前文 4.2 节的分析和各景观类型 NPP 平均密度来看, NPP 高值出现在人类活动较少的山林区域, 低值主要在人类活动密集的建设用地区域; 从时间上分析, 景观格局的时间变化一定程度上影响了 NPP 总量和平均密度的时间变化。2005 年以来建设用地的面积有所上升, 阔叶林面积有所下降, 草地和阔叶林 NPP 平均密度有所下降, 表明人类对自然生态系统的干扰越来越强, 一定程度上加剧了 2005 年以来北五岛 NPP 总量和平均密度下降的态势。

5　结论

利用 ArcGIS10.2、ENVI5.1、SPSS26 等软件, 本文基于经典 CASA 模型估算了 2005 年、2010 年、2017 年庙岛群岛北五岛的 NPP, 从季节、岛屿、景观类型、

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 2005 年、2010 年、2017 年不同景观类型 NPP 估算结果

Table 2 NPP estimation results of different landscape types in 2005, 2010 and 2017

景观类型	2005年		2010年		2017年		3年平均	
	面积/km^2	平均密度/g·m^{-2}· a^{-1}（以碳计）	面积/km^2	平均密度/g·m^{-2}· a^{-1}（以碳计）	面积/km^2	平均密度/g·m^{-2}· a^{-1}（以碳计）	面积/km^2	平均密度/g·m^{-2}· a^{-1}（以碳计）
耕地	2.29	417.85	1.16	429.54	1.40	417.48	1.62	421.62
阔叶林	4.70	607.51	4.80	597.13	3.68	550.24	4.39	584.96
针叶林	6.23	425.20	5.15	434.00	7.53	460.41	6.30	439.87
草地	2.04	319.28	3.55	318.38	2.23	303.66	2.61	313.77
建设用地	3.25	178.13	3.85	179.90	3.69	178.15	3.60	178.73

地形梯度等多种角度分析了 NPP 的时空分布异质性；分析了 2005 年、2010 年、2017 年北五岛的景观格局时空分布异质性；探讨了 NPP 与景观格局时空变化之间的关系及其原因。主要结论包括：

2005 年、2010 年、2017 年庙岛群岛北五岛的净初级生产力年平均总量为 7 520.54 t/a（以碳计），年平均密度为 406.07 g/（m^2·a）（以碳计），北五岛 NPP 与全国的平均水平基本相当，高于同纬度西部地区。2017 年较 2005 年总量下降了 297.80 t（以碳计），平均密度下降了 16.08 g/（m^2·a）（以碳计）；北五岛 NPP 年平均密度空间差异性较为显著。

2005 年、2010 年、2017 年期间，1 月、4 月、8 月、11 月北五岛 NPP 平均总量各为 92.25 t（以碳计）、387.50 t（以碳计）、1 813.50 t（以碳计）、216.81 t（以碳计），平均密度各为 4.92 g/（m^2·月）（以碳计）、20.67 g/（m^2·月）（以碳计）、96.72 g/（m^2·月）（以碳计）、11.56 g/（m^2·月）（以碳计），表现出明显的季节特征。

各景观类型 NPP 平均密度随坡度和高差的增大先上升后出现平缓下降态势；坡向对林地 NPP 影响较大，半阴坡林地 NPP 平均密度最大；不同地形梯度的 NPP 年平均密度随时间推移大体呈下降态势；坡向、坡度、地形位指数对 NPP 平均密度的影响均较敏感。

庙岛群岛北五岛景观类型主要以林地为主，各景观类型平均面积由大到小依次为：针叶林，阔叶林，建设用地，草地，耕地；不同景观类型中，NPP 平均密度由大到小依次为阔叶林，针叶林，耕地，草地，建设用地；景观格局是 NPP 的重要影响因素之一，NPP 高值出现在人类活动较少的山林区域，低值主要在人类活动密集的建设用地区域；建设用地的扩大一定程度上加剧了 2005 年以来北五岛 NPP 总量和平均密度下降的趋势。

致谢： 本研究过程中得到自然资源部第一海洋研究所石洪华博士的指导和帮助。

参考文献：

[1] Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere[M]. Berlin: Springer, 1975.

[2] Field B C. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components[J]. Science, 1998, 281(5374): 237−240.

[3] 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.

[4] Ricotta C, Avena G, De Palma A. Mapping and monitoring net primary productivity with AVHRR NDVI time-series: statistical equivalence of cumulative vegetation indices[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(5/6): 325−331.

[5] 池源, 石洪华, 孙景宽, 等. 近30年来黄河三角洲植被净初级生产力时空特征及主要影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(8): 2683−2697.
Chi Yuan, Shi Honghua, Sun Jingkuan, et al. Spatio-temporal characteristics and main influencing factors of vegetation net primary productivity in the Yellow River Delta in recent 30 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(8): 2683−2697.

[6] 刘洋洋, 王倩, 杨悦, 等. 黄土高原草地净初级生产力时空动态及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2309−2319.
Liu Yangyang, Wang Qian, Yang Yue, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland NPP and its driving factors in the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(7): 2309−2319.

[7] 田义超, 黄远林, 张强, 等. 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[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 8156−8171.
Tian Yichao, Huang Yuanlin, Zhang Qiang, et al. Spatiotemporal distribution of net primary productivity and its driving factors in the Nanliu River basin in the Beibu Gulf[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 8156−8171.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[8] 石洪华, 郑伟, 王晓丽, 等. 我国北方典型海岛生态系统固碳生物资源调查与承载力评估[M]. 北京: 海洋出版社, 2017.
Shi Honghua, Zheng Wei, Wang Xiaoli, et al. Investigation and Bearing Capacity Assessment of Carbon Sequestration Living Resources of Typical Island Ecosystem in North China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2017.

[9] Losos J B, Ricklefs R E. The Theory of Island Biogeography Revisited[M]. Princeton: Princeton University Press, 2009.

[10] 池源, 石洪华, 王恩康, 等. 庙岛群岛北五岛景观格局特征及其生态效应[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1270−1285.
Chi Yuan, Shi Honghua, Wang Enkang, et al. Landscape pattern characteristics and ecological effects on five northern islands of Miaodao Archipelago[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4): 1270−1285.

[11] 池源, 石洪华, 王晓丽, 等. 庙岛群岛南五岛生态系统净初级生产力空间分布及其影响因子[J]. 生态学报, 2015, 35(24): 8094−8106.
Chi Yuan, Shi Honghua, Wang Xiaoli, et al. The spatial distribution and impact factors of net primary productivity in the island ecosystem of five southern islands of Miaodao Archipelago[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): 8094−8106.

[12] 中华人民共和国国土资源部. 土地利用更新调查技术规定[M]. 北京: 国土资源部, 2004.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Technical Regulations on Land Use Renewal Survey[M]. Beijing: Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2004.

[13] J. 德梅克. 详细地貌制图手册[M]. 陈志明, 尹泽生, 译. 北京: 科学出版社, 1984.
De Meike J. Detailed Geomorphological Mapping Manual[M]. Chen Zhiming, Yin Zesheng, trans. Beijing: Science Press, 1984.

[14] 牛全福, 冯尊斌, 党星海, 等. 黄土区滑坡研究中地形因子的选取与适宜性分析[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(12): 1584−1592.
Niu Quanfu, Feng Zunbin, Dang Xinghai, et al. Suitability analysis of topographic factors in Loess landslide research[J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(12): 1584−1592.

[15] 陶波, 李克让, 邵雪梅, 等. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟[J]. 地理学报, 2003, 58(3): 372−380.
Tao Bo, Li Kerang, Shao Xuemei, et al. Temporal and spatial pattern of net primary production of terrestrial ecosystems in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(3): 372−380.

[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[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413−424.
Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 413−424.

[17] 顾娟, 李新, 黄春林, 等. 2002-2010年中国陆域植被净初级生产力模拟[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2013, 49(2): 203−213.
Gu Juan, Li Xin, Huang Chunlin, et al. Simulating net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation during 2002-2010[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2013, 49(2): 203−213.

[18] 路广. 近代黄河三角洲净初级生产力时空变化分析[D]. 济南: 山东师范大学, 2018.
Lu Guang. Spatial and temporal variations of net primary productivity in the modern Yellow River Delta[D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2018.

[19] 卫亚星, 王莉雯, 石迎春, 等. 青海省草地资源净初级生产力遥感监测[J]. 地理科学, 2012, 32(5): 621−627.
Wei Yaxing, Wang Liwen, Shi Yingchun, et al. Net primary productivity of grassland resources monitoring based on remote sensing data in Qinghai Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(5): 621−627.

[20] 孔祥意, 滕聪, 杨广普. 鄂尔多斯草原植被净生产力反演研究[J]. 北京测绘, 2019, 33(2): 161−166.
Kong Xiangyi, Teng Cong, Yang Guangpu. Inversion of vegetation net productivity in ordos grassland[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2019, 33(2): 161−166.

[21] 张镱锂, 祁威, 周才平, 等. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1197−1211.
Zhang Yili, Qi Wei, Zhou Caiping, et al. Spatial and temporal variability in the net primary production (NPP) of alpine grassland on Tibetan Plateau from 1982 to 2009[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(9): 1197−1211.

[22] 田惠文, 毕如田, 朱洪芬, 等. 汾河流域植被净初级生产力的驱动因素及梯度效应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(10): 3066−3074.
Tian Huiwen, Bi Rutian, Zhu Hongfen, et al. Driving factors and gradient effect of net primary productivity in Fenhe River Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(10): 3066−3074.

[23] 翟真, 王青. 芦山地震灾区聚落生态位空间分布特征研究[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2015, 40(3): 132−137.
Zhai Zhen, Wang Qing. Study on the spatial distribution characteristics of settlement niche in Lushan earthquake disaster area[J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2015, 40(3): 132−137.

[24] 毕硕本, 计晗, 梁静涛, 等. 基于指数模型的郑州—洛阳地区史前聚落遗址空间分布[J]. 地理科学进展, 2013, 32(10): 1454−1462.
Bi Shuoben, Ji Han, Liang Jingtao, et al. Spatial distribution of prehistoric settlement sites in Zhengzhou-Luoyang region based on index model[J]. Progress in Geography, 2013, 32(10): 1454−1462.

[25] Running S W, Thornton P E, Nemani R, et al. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system[M]//Sala O E, Jackson R B, Mooney H A, et al. Methods in Ecosystem Science. New York: Springer, 2000: 44−57.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Spatial and temporal heterogeneity of net primary productivity and landscape patterns on five northern islands of Miaodao Archipelago

Yin Liting [1,4], Zheng Wei [2,3], Gao Meng [1], Lu Jingfang [2,3]

(1. *Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation*, *Yantai Institute of Coastal Zone Research*, *Chinese Academy of Sciences*, *Yantai* 264003, *China*; 2. *First Institute of Oceanography*, *Ministry of Natural Resources*, *Qingdao* 266061, *China*; 3. *Laboratory for Marine Geology*, *Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao)*, *Qingdao* 266237, *China*; 4. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: In this paper, the net primary productivity (NPP) of the northern islands of Miaodao Archipelago in 2005, 2010 and 2017 was estimated by using ArcGIS10.2, ENVI5.1, SPSS26 and other software based on the classic CASA model, and analyzed the spatial-temporal heterogeneity of NPP from the perspectives of season, individual of island, landscape type, terrain gradient, and then analyzed the spatial-temporal heterogeneity of the landscape pattern of the five northern islands in 2005, 2010 and 2017. The relationships between them and the reasons were discussed. The results showed that: the total NPP for the five northern islands of Miaodao Archipelago was 7 520.54 t/a in terms of carbon; the mean density of NPP was 406.07 g/(m^2·a) in terms of carbon; the distribution of NPP showed a significant spatial-temporal heterogeneity; the order of the average area of each landscape type from largest to smallest was coniferous forest, broad-leaved forest, construction land, grassland, arable land; the mean density of NPP from largest to smallest was broad-leaved forest, coniferous forest, arable land, grassland, construction land; the mean density of NPP of each landscape increased first with the increase of slope and height difference, and then decreased slowly; the aspect had a great influence on the NPP of forest, and the mean density of NPP of half shady slope is the largest; the annual mean density of NPP of different terrain gradients decreased with the time; the high value of NPP appeared in the mountainous area, and the low value of NPP is mainly in the flat area; due to the natural geographical conditions and the plant growth strip, the distribution of NPP was influenced by season, geographical location and landscape type.

Key words: five northern islands of Miaodao Archipelago; net primary productivity (NPP); spatio-temporal heterogeneity; landscape analysis

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net