

DOI: 10.5846/stxb201405040880

池源, 石洪华, 王晓丽, 李捷, 丰爱平. 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. 生态学报, 2015, 35(24): 8094-8106.

Chi Y., Shi H.H., Wang X.L., Li J., Feng A.P. The spatial distribution and impact factors of net primary productivity in the island ecosystem of five southern islands of Miaodao Archipelago. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): 8094-8106.

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

池 源¹, 石洪华^{1,*}, 王晓丽², 李 捷³, 丰爱平¹

1 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061

2 天津理工大学环境科学与安全工程学院, 天津 300384

3 青岛理工大学环境与市政工程学院, 青岛 266033

摘要:净初级生产力(NPP)估算对于海岛碳源/汇研究具有重要意义。以庙岛群岛南五岛为例,结合 CASA 模型和区域特征构建 NPP 估算模型,借助 RS 和 GIS 技术进行 NPP 估算,进而分析南五岛 NPP 空间分布特征及其影响因子。结果表明:南五岛 NPP 总量为 11043.52 t C/a,平均密度为 340.19 g C m⁻² a⁻¹,处于全国平均水平,高于同纬度的西部地区,低于东部沿海大陆地区;夏季 NPP 总量占全年的 80%左右,春季和秋季分别占 11%和 7%,冬季仅占 1.3%;不同海岛的 NPP 平均密度由大到小依次为大黑山岛、北长山岛、庙岛、南长山岛和小黑山岛,各岛 NPP 平均密度与建设用地比例呈明显负相关;不同地表覆盖类型的 NPP 平均密度由大到小依次为阔叶林、针叶林、农田、草地、建设用地和裸地,林地具有较高的 NPP 值,说明南五岛的人工林建设具有重要生态作用;NDVI 和地表覆盖类型是 NPP 最主要的影响参数,地形参数通过影响 NDVI 和地表覆盖类型间接作用于 NPP 结果;NPP 与土壤 pH、有效磷、全磷、全钾呈显著负相关,与全氮、总碳、总有机碳呈显著正相关,与含水量、速效钾和含盐量之间相关关系不明显。

关键词:海岛生态系统;净初级生产力;庙岛群岛南五岛;空间分布;影响因子

The spatial distribution and impact factors of net primary productivity in the island ecosystem of five southern islands of Miaodao Archipelago

CHI Yuan¹, SHI Honghua^{1,*}, WANG Xiaoli², LI Jie³, FENG Aiping¹

1 The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China

2 College of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

3 School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China

Abstract: Island ecosystems are characterized by self-containment and vulnerability due to their limited and isolated areas. They are also important for biodiversity maintenance, freshwater conservation, and other basic ecological functions. Moreover, island ecosystems play important roles in global carbon cycle, which makes the estimation of net primary productivity (NPP) more significant for ecological construction and the study of carbon source and sink on islands. The rapid development of RS and GIS technologies provides a practical method for NPP estimation. In this study, five southern islands of Miaodao Archipelago were examined and an NPP estimation model was established based on the Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) and regional characteristics. To characterize each season, 4 temporal remote sensing images were utilized. The normalized difference vegetation index (NDVI) and land cover types were extracted, and these constituted the data used for the NPP estimation model, along with meteorological and topographical data. The NPP values

基金项目:科技基础性工作专项(2012FY112500);海洋公益性行业科研专项(201305009, 201505012)

收稿日期:2014-05-04; 网络出版日期:2015-05-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shihonghua@fio.org.cn

for different seasons, islands, and land cover types were calculated using GIS methods. The linear correlations between NPP values and various parameters including NDVI, altitude, slope, aspect, and land cover types were obtained to determine the importance of each parameter. Finally, the relationships between 10 soil environment-chemical properties and NPP at 36 sampling sites were analyzed. The total NPP for the five islands was 11043.52 t C/a. The mean density of NPP (MDN) was $340.19 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, which was higher than that of western regions at a similar latitude (e.g., Gansu Province and Qinghai Province) and lower than that of coastal zones in the eastern region (e.g., Guangdong Province, Jiangsu Province, and Panjin City in Liaoning Province). NPP in the summer accounted for approximately 80% of the total yearly NPP, followed by spring (11%), autumn (7%), and winter (1.3%), indicating that NPP in the northern area differed greatly among seasons. The total NPP was highest for Nanchangshan Island, followed by Beichangshan Island, Daheishan Island, Miao Island, and Xiaoheishan Island, and the total NPP was positively correlated with island area. MDN was highest for Daheishan Island, followed by Beichangshan Island, Miao Island, Nanchangshan Island, and Xiaoheishan Island, and was negatively related to the proportion of construction land. The land cover types included broad-leaf forest, coniferous forest, farmland, grassland, construction land, and bare land, in descending order based on MDN. The high NPP for forest land indicated that the plantations on the five southern islands were of great ecological significance. NDVI and land cover types were the most important parameters with respect to the spatial distribution of NPP, and topographical parameters indirectly affected NPP via their effects on NDVI and land cover type. NPP had a significant negative relationship with soil pH ($P < 0.01$), available phosphorus ($P < 0.01$), total phosphorus ($P < 0.01$), and total potassium ($P < 0.05$), and a significant positive relationship with total carbon ($P < 0.01$), total organic carbon ($P < 0.01$) and total nitrogen ($P < 0.05$). No significant relationships with water content, available potassium, or salinity were observed.

Key Words: island ecosystem; net primary productivity (NPP); five southern islands of Miaodao Archipelago; spatial distribution; impact factors

净初级生产力(NPP)是植物光合作用产生有机质总量扣除自养呼吸后的剩余部分,是地表碳循环的重要组成部分^[1]。NPP 不仅能够直接反映植被群落在自然环境条件下的生产能力,表征生态系统的质量状况,而且是判定生态系统碳源/汇和调节生态过程的主要因子^[2]。同时,3S 技术的发展为 NPP 研究提供了新的思路和方法,从遥感影像中获取地表覆盖类型并提取归一化植被指数(NDVI),结合气象、地形等数据对区域 NPP 进行估算,具有较高的准确度和较强的可操作性,在草地、森林、湿地、农田等不同生态系统以及不同时空尺度的 NPP 研究中得到了广泛的应用^[3-7],然而鲜有关于海岛生态系统 NPP 的研究。

海岛兼具陆、海双重特征,是一种特殊的生态系统^[8]。由于海岛位置的特殊性、面积的有限性以及空间的隔离性,海岛生态系统更容易受到风暴潮、干旱等自然灾害的干扰,并且具有明显的独立性和脆弱性^[9]。同时,海岛森林、灌草、土壤等是生物多样性维持、水源涵养、水土保持等生态功能发挥的基本载体^[10]。全球海岛面积约占全球陆地面积的 1/15,在碳循环中扮演着非常重要的角色^[11],海岛 NPP 研究具有重要意义。

本文以庙岛群岛南五岛为例,构建 NPP 估算模型,在现场调查的基础上,采用不同季节遥感影像数据,结合气象资料和地形数据,对南五岛 NPP 的空间分布及其影响因子进行研究,以为南五岛生态系统碳源/汇研究提供依据。

1 研究区概况

庙岛群岛位于山东半岛北侧,黄、渤海交会处,是我国北方海岛分布的典型区域,也是长岛国家级自然保护区的重要依托,按照地理位置可分为南、中、北 3 个岛群。其中南部岛群的海岛分布最为集中,距离大陆最近,是山东省长岛县的人口、经济和文化中心,其主体为南长山岛、北长山岛、庙岛、大黑山岛和小黑山岛 5 个有居民海岛,合称“南五岛”。该区域属于东亚季风气候区,年均气温 12.0°C ,1 月平均气温 -1.6°C ,7 月平均气温 24.5°C ;年均降水量约 537mm,降水多集中在 6—9 月;日照较为充足,年均日照时数 2612h。南五岛地势

起伏明显,山势大致呈南北走向,最高点海拔约为 189m;土壤主要有棕壤、褐土、潮土三大类,以棕壤土分布面积最大,土层厚度约为 30cm,多砂砾,土质较差^[12]。南五岛现有林木主要为人工林,以黑松和刺槐为主要优势树种,林下分布着紫穗槐、怪柳等灌木和各类草本植物。

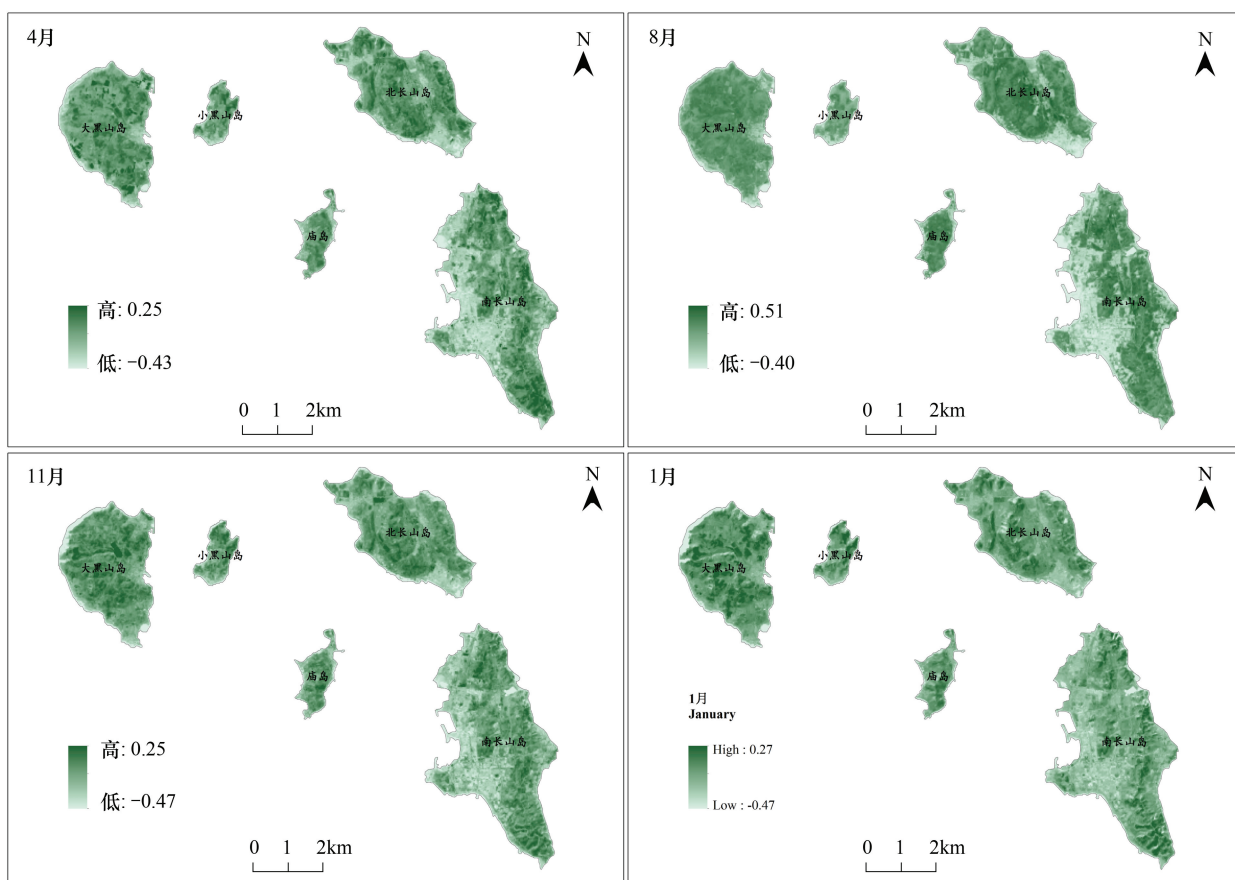
2 材料与方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 遥感影像

采用 LANDSAT8 卫星 2013 年 4 月 21 日、8 月 11 日、11 月 15 日和 2014 年 1 月 2 日(代表不同季节)4 个时相南五岛所在区域 30m 分辨率的无云影像。

利用 ENVI4.7 软件对影像进行裁切、辐射定标、波段运算得到 NDVI 值(图 1)。基于 2013 年 8 月遥感影像,通过 ArcGIS10.0 软件进行人机交互解译,将南五岛地表覆盖分为针叶林、阔叶林、草地、农田、建设用地和裸地 6 类(图 2),结合现场实地调研、Google Earth 和相关的图集资料进行解译精度验证,解译精度为 92.8%,能够满足本次研究的需要。



审图号: GS (2015) 3184号

图 1 不同季节南五岛 NDVI 分布

Fig. 1 NDVI Distribution of five southern islands in different seasons

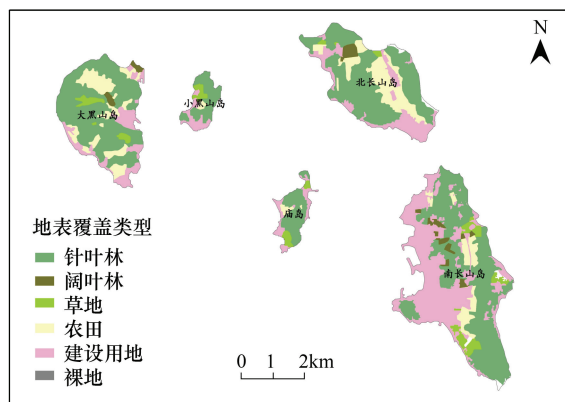
2.1.2 地形

采用 2011 年公布的 Aster GDEM 第二版 DEM 数据,垂直分辨率 20m,水平分辨率 30m;通过 ArcGIS10.0 由 DEM 数据提取出高程、坡度和坡向(图 3)。

2.1.3 气象和土壤

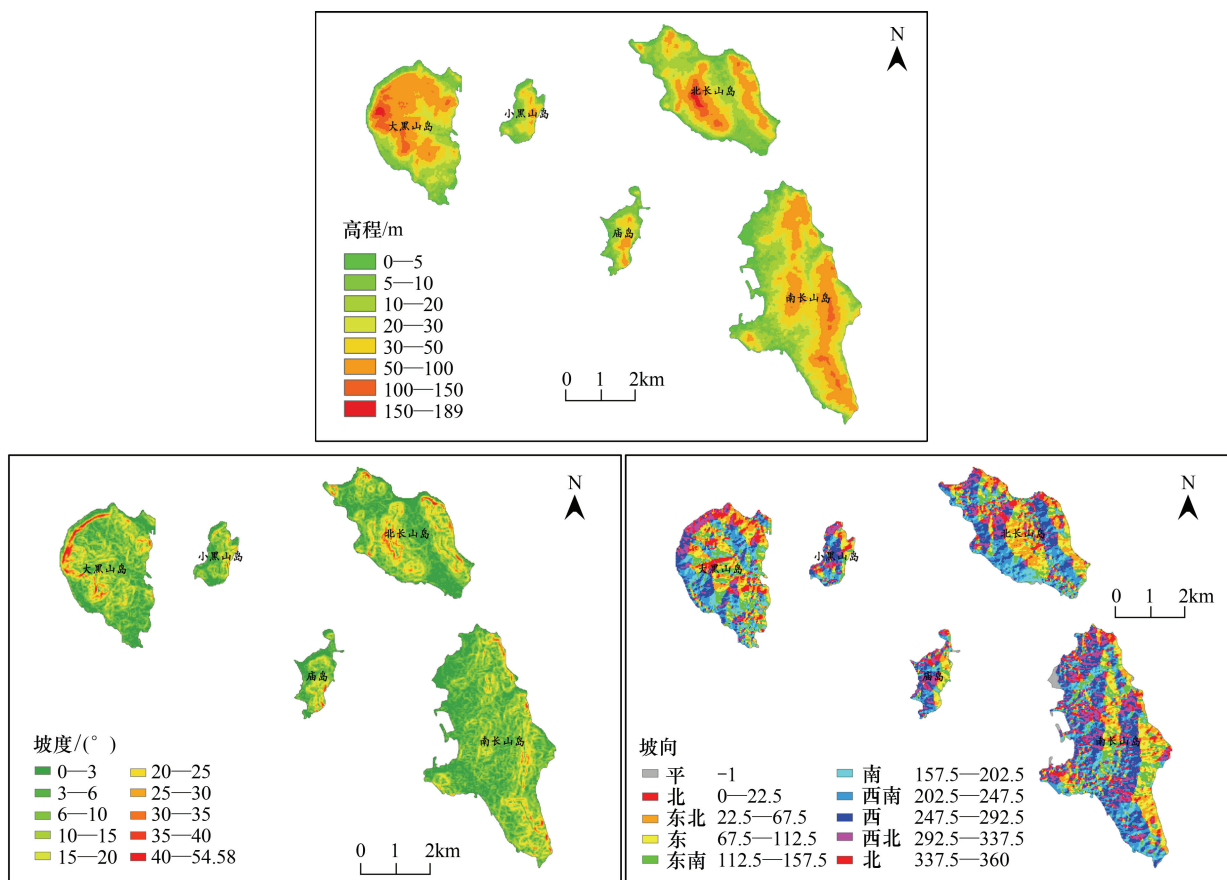
降雨量、气温、日照时数、相对湿度来自长岛县气象站监测数据;太阳总辐射来自烟台福山气象站监测的多年平均数据。

2012 年夏季进行土壤现场采样并检测,获得南五岛 36 个样方的土壤理化性质数据(图 4)。采用多点混合取土样方法,在每个样方内分别选取 3 个取样点,采用标准环刀(100cm^3)进行取样,将 3 个取样点的土壤均匀混合,作为该样方的土壤样品。样品采集后,带回实验室,除去其中草根、大石砾等杂质,过 2mm 钢筛并磨细,在 105°C 高温下烘至恒重,称量并计算土壤含水率;pH 值采用电位法进行测定,有效磷采用盐酸-氟化铵法进行测定,速效钾采用乙酸铵提取法进行测定,全磷采用碳酸钠熔融法进行测定,全钾采用氢氧化钠熔融法进行测定,含盐量采用电导法进行测定,全氮采用开氏法进行测定,总碳采用高温灼烧法进行测定,总有机碳采用重铬酸钾容量法进行测定。



审图号: GS (2015) 3184号

图 2 南五岛地表覆盖类型
Fig. 2 Land cover types of five southern islands



审图号: GS (2015) 3184号

图 3 南五岛高程、坡度和坡向

Fig. 3 Altitude, slope and aspect of five southern islands

2.2 NPP 模型构建与计算

根据 CASA 模型^[13],构建本次 NPP 遥感估算总模型如下:

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

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

$$\xi(x, t) = ft(t) \times fw(t) \times \xi_{\max} \quad (3)$$

式中, $NPP(x, t)$ 为 x 点 t 月净初级生产力; $APAR(x, t)$ 为 x 点 t 月吸收的光合有效辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{月}^{-1}$); $\xi(x, t)$ 为 x 点 t 月的实际光能利用率 (g C/MJ); $PAR(x, t)$ 为 x 点 t 月的光合有效辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{月}^{-1}$); $FPAR(x, t)$ 为 x 点 t 月光合有效辐射吸收比例 (%); $ft(t)$ 和 $fw(t)$ 分别为研究区 t 月的气温胁迫因子和水分胁迫因子 (%); $\xi_{\max}$ 为植被最大光能利用率 (g C/MJ)。

2.2.1 PAR 计算

考虑到南五岛高程起伏明显, 地形遮蔽对于不同位置能够接受到的太阳辐射量有着直接影响^[14], 将地形作为 PAR 计算的重要因子, 构建公式如下:

$$PAR(x, t) = SOL(t) \times 50\% \times [0.4 + 0.6 \times d(x, t)] \quad (4)$$

式中, $SOL(t)$ 为 t 月太阳总辐射量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{月}^{-1}$); 50% 表示植被能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例, 由文献^[5]得出; 0.4 和 0.6 分别为区域太阳散射辐射和直接辐射占太阳总辐射的多年平均比例, 由文献^[15-16]得出; $d(x, t)$ 为 x 点 t 月的太阳辐射地形影响因子, 由下式计算得出:

$$d(x, t) = \frac{1}{\cos(\frac{\pi}{2} - \theta(t)) \times \frac{\text{Hillshade}(x, t) - \text{Hillshade}(\min, t)}{\text{Hillshade}(\max, t) - \text{Hillshade}(\min, t)}} \quad (5)$$

式中, $\theta(t)$ 为 t 月遥感影像获得当天南五岛所在纬度的正午太阳高度角, $\text{Hillshade}(x, t)$ 为 x 点 t 月的遮蔽度, 无量纲, $\text{Hillshade}(\max, t)$ 和 $\text{Hillshade}(\min, t)$ 分别为 t 月遮蔽度的最大值和最小值。 $\text{Hillshade}(x, t)$ 由下式求得^[17]:

$$\text{Hillshade}(x, t) = [\cos(\frac{\pi}{2} - \theta(t)) \times \cos(\text{Slope}(x))] + [\sin(\frac{\pi}{2} - \theta(t)) \times \sin(\text{Slope}(x)) \times \cos(\text{Azimuth} - \text{Aspect}(x))] \quad (6)$$

其中, $\text{Slope}(x)$ 为点 x 的坡度, Azimuth 为太阳方位角, 这里均取 180° , $\text{Aspect}(x)$ 为 x 点的坡向。

2.2.2 FPAR 计算

FPAR 与 NDVI 存在明显的线性关系^[18], 可由下式得出:

$$\text{FPAR}(x, t)1 = (\text{NDVI}(x, t) - \text{NDVI}_{\min}) / (\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}) \times (\text{FPAR}_{\max} - \text{FPAR}_{\min}) + \text{FPAR}_{\min} \quad (7)$$

式中: $\text{NDVI}(x, t)$ 为 x 点 t 月的 NDVI 值; 为了剔除异常值, 削弱极值的影响, $\text{NDVI}_{\max}$ 和 $\text{NDVI}_{\min}$ 分别取全部月份 NDVI 值的 95% 和 5% 百分位值, $\text{FPAR}_{\max}$ 和 $\text{FPAR}_{\min}$ 分别取 0.95 和 0.001^[13]。

同时, 研究发现 FPAR 与比植被系数 (SR) 也具有明显的线性相关^[19], 可由下式得出:

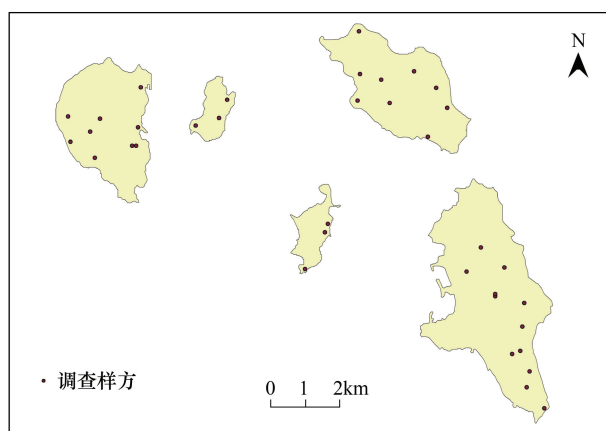
$$\text{FPAR}(x, t)2 = (\text{SR}(x, t) - \text{SR}_{\min}) / (\text{SR}_{\max} - \text{SR}_{\min}) \times (\text{FPAR}_{\max} - \text{FPAR}_{\min}) + \text{FPAR}_{\min} \quad (8)$$

式中, $\text{SR}(x, t)$ 为 x 点 t 月的比植被系数, 由式 9 得出。 $\text{SR}_{\max}$ 和 $\text{SR}_{\min}$ 分别取 SR 值的 95% 和 5% 百分位值。

$$\text{SR}(x, t) = \frac{1 + \text{NDVI}(x, t)}{1 - \text{NDVI}(x, t)} \quad (9)$$

式 7 和式 8 是基于遥感影像像元 NDVI 值的线性公式, 具有跨尺度的特点, 能够运用到本次的研究中^[13]。同时, 由于式 7 的计算值往往比 FPAR 实测值高, 而式 8 计算值比实测值低^[5], 本文同时结合两种方法进行计算:

$$\text{FPAR}(x, t) = [\text{FPAR}(x, t)1 + \text{FPAR}(x, t)2] / 2 \quad (10)$$



审图号: GS (2015) 3184号

图 4 土壤调查样方位置

Fig. 4 Locations of soil sample sites

2.2.3 f_t 和 f_w 计算

f_t 由以下方法得出:

$$f_t(t) = f_t(t)1 \times f_t(t)2 \quad (11)$$

$f_t(t)1$ 反映在不同的最适气温情况下植物内在的生化作用对光合的限制从而带来的对光能利用率的影响,由下式求得^[19]:

$$f_t(t)1 = 0.8 + 0.02 \times T_{\text{opt}} - 0.0005 \times T_{\text{opt}2} \quad (12)$$

式中, T_{opt} 为最适气温,取 NDVI 平均值最高月份的月平均气温。当月平均气温小于或等于 -10°C 时, $f_t(t)1$ 取 0。

$f_t(t)2$ 表示气温与最适气温偏离时光能利用率减小的趋势,由下式求得^[13,19]:

$$f_t(t)2 = \frac{1.184}{1 + \exp[0.2 \times (T_{\text{opt}} - 10 - T)]} \times \frac{1}{1 + \exp[0.3 \times (T - T_{\text{opt}} - 10)]} \quad (13)$$

式中, T 为当月平均气温。当某月平均气温 T 比最适气温 T_{opt} 高 10°C 或低 13°C 时,该月的 $f_t(t)2$ 值等于月平均气温 T 为最适气温 T_{opt} 时 $f_t(t)2$ 值的一半。

f_w 反映了植物所能利用的有效水分条件对光能利用率的影响,由以下公式计算^[20]:

$$f_w(t) = 0.5 + 0.5 \times E/E_p \quad (14)$$

式中, E 为区域实际蒸散量, E_p 为区域潜在蒸散量。

E 根据周广胜和张新时^[21] 建立的区域实际蒸散模型求取:

$$E = \frac{r \times R_n \times (r^2 + R_n^2 + r \times R_n)}{(r + R_n) \times (r^2 + R_n^2)} \quad (15)$$

式中, r 为降水量, R_n 为净辐射量。

R_n 参考《喷灌工程设计手册》^[22], 由下式求得:

$$R_n = R_{n1} - R_{n2} \quad (16)$$

$$R_{n1} = (1 - a)(0.25 + 0.5n/N)R_a \quad (17)$$

$$R_{n2} = \sigma T_{k4} \times (0.34 - 0.044 \sqrt{e_d}) \times (0.1 + 0.9n/N) \quad (18)$$

式中, R_n 为净辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); a 为反射率,取 23%; n 为实际日照实数, N 为该纬度最大日照时数; R_a 为大气顶层的太阳辐射,可查表获得; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,取 $2 \times 10^{-9} \text{mm d}^{-1} \text{K}^{-4}$, T_k 为绝对温度表示的该月平均温度 (K); e_d 为水汽压,可由相对湿度求得。

E_p 由周广胜、张新时^[23] 提出的 E_p - R_n 关系式求得

$$E_p = \left(\sqrt{\frac{R_n}{0.598} + \frac{r \times 0.369^2}{4 \times 0.598^2}} - \frac{\sqrt{r} \times 0.369}{2 \times 0.598} \right)^2 \quad (19)$$

2.2.4 ξ_{max} 的获取

最大光能利用率 (ξ_{max}) 的取值对 NPP 结果有着直接的影响,其具体的取值根据不同植被类型而有所差异。在诸多关于 ξ_{max} 的研究中,Running^[4] 和朱文泉^[5] 的研究成果在国内外 NPP 模拟中得到了广泛的应用。前者以生态生理过程模型模拟了全球 10 种植被类型的 ξ_{max} ,但其对于中国的植被而言偏高^[24];后者基于误差最小原则,采用 NPP 实测数据对中国各类植被 ξ_{max} 进行模拟,但由于分辨率过低、混合像元等问题导致在较小空间尺度研究中具有一定的局限性,主要表现为模拟值较实际值偏小^[6,25]。本次研究的南五岛属于小空间尺度的研究,同时结合 Running 和朱文泉的研究,得到南五岛各类植被的 ξ_{max} 取值(表 1)。此外,由于本文像元大小为 30m,建设用地和裸地中存在的部分绿色植被无法识别出来,因此赋予最低的 ξ_{max} ^[2,13,19]。

表 1 最大光能利用率取值

Table 1 Values of maximum light use efficiency ($\xi_{\max}$)

文献 References	针叶林 Coniferous forest	阔叶林 Broad-leaf forest	草地 Grassland	农地 Farmland	建设用地 Construction land	裸地 Bare land
[4]	1.008	1.044	0.604	0.604	—	—
[25]	0.389	0.692	0.542	0.542	—	—
本文 This study	0.698	0.868	0.573	0.573	0.389	0.389

2.2.5 NPP 计算

分别以 4 月、8 月、11 月、1 月代表春、夏、秋、冬四季,计算南五岛不同季节的 NPP 值,进而得到全年 NPP 估算值。

2.3 影响因子分析

分析南五岛 NPP 与影响因子的关系以探究南五岛 NPP 的空间分布规律,为了减少不必要的数量,同时一定程度地削弱 NPP 极值的影响,将计算结果重采样为大小为 50m×50m 的单元进行分析。

2.3.1 对空间分异性参数的依赖性

NPP 模型中的计算参数可分为空间同一性参数和空间分异性参数两类,前者包括气温、水汽压、降雨量、太阳总辐射等气象因子,相同季节内整个研究区均采用同一数值;后者为 NDVI、高程、坡度、坡向、地表覆盖类型,随着点位的不同而具有差异。分析各点位 NPP 与空间分异性参数的相关关系,评价各参数对 NPP 的影响程度大小。

通过 ArcGIS10.0 的 Fishnet 工具建立 50×50m 网格,将研究区域划分为 12094 个网格,提取网格中心点所在像元的 NDVI、高程、坡度、坡向、地表覆盖类型的参数数据和 NPP 数据。

(1) 数据标准化处理

对 NDVI、高程、坡度按照下式进行标准化:

$$CS_{i,x} = \frac{C_{i,x} - C_{\min}}{C_{i,\max} - C_{\min}} \quad (20)$$

式中, $CS_{i,x}$ 为参数 i 在 x 点的标准化数值, $C_{i,x}$ 为参数 i 在 x 点的原始值, $C_{i,\max}$ 为参数 i 最大原始值, $C_{i,\min}$ 为参数 i 最小原始值。

坡向原始值为按 0—360 顺时针增大,0 为正北,180 为正南,以向阳性为原则,按照下式进行标准化:

$$AS_x = \frac{1 + \cos\left(\frac{A_x - 180}{180} \times \pi\right)}{2} \quad (21)$$

式中, AS_x 为 x 点标准化坡向值, A_x 为 x 点原始坡向值。

地表覆盖类型参照 2.2.4 的方法赋值。

(2) 简单相关分析与偏相关分析

运用 SPSS18 软件,对 NPP 与 NDVI、高程、坡度、坡向和地表覆盖类型之间两两的简单相关性进行分析。由于各参数之间也可能存在相互影响,在控制其他参数影响的环境下,分析 NPP 与各参数的偏相关性。

2.3.2 与土壤理化性质的相关性

基于 SPSS18 软件,将 36 个点位的土壤理化性质数据与该点位所在 50m×50m 像元的夏季 NPP 进行相关性分析,土壤理化性质包括 pH、含水率、有效磷、速效钾、全磷、全钾、含盐量、全氮、总碳、总有机碳 10 项因子。

3 结果

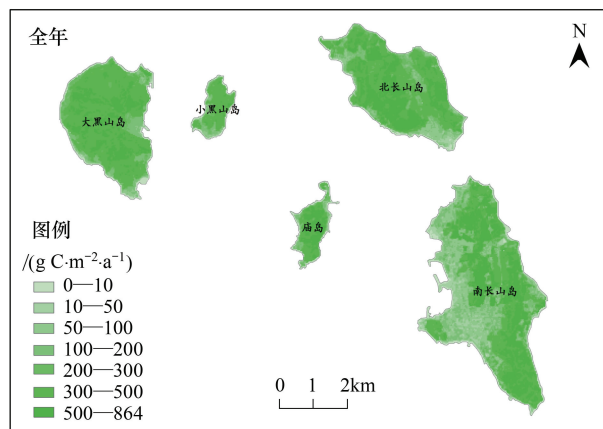
经计算得出,南五岛全年 NPP 总量为 11043.52 t C/a,NPP 密度介于 0—863.20 g C m⁻² a⁻¹之间,平均密度为 340.19 g C m⁻² a⁻¹(图 5)。

3.1 不同季节 NPP 估算结果

夏季 NPP 总量占全年的 80% 左右,月均量为 2964.91tC,平均密度达 91.33 gC m⁻²月⁻¹;春季、秋季 NPP 总量分别占比 11%和 7%,冬季仅占 1.3%;不同季节 NPP 标准差与平均密度呈正比(表 2,图 6)。

3.2 各岛 NPP 分布特征

各岛 NPP 总量与其面积大小呈正比,面积最大的南长山岛 NPP 总量达 4127.8 t C/a,占 37.4%;面积最小的小黑山岛为 371.07 t C/a,仅占 3.4%;各岛 NPP 平均密度存在差异,最大值(大黑山岛)与最小值(小黑山岛)之间差值达 104 g C m⁻² a⁻¹;NPP 最高点出现在大黑山岛;各岛 NPP 标准差存在差异,其与 NPP 平均密度、海岛面积不存在明显的关系(表 3)。



审图号: GS (2015) 3184号

图 5 全年南五岛 NPP 分布特征

Fig. 5 NPP distribution of five southern islands annually

表 2 不同季节南五岛 NPP 估算结果

Table 2 NPP estimation results of five southern islands in different seasons

季节 Seasons	平均密度 Mean density/ (g C m ⁻² 月 ⁻¹)	范围 Range/ (g C m ⁻² 月 ⁻¹)	标准差 S. D./ (g C m ⁻² 月 ⁻¹)	月均量 Monthly value/ (t C/月)	占比 Proportion/%
春 Spring	12.62	0—60.02	7.98	409.70	11.1
夏 Summer	91.33	0—203.36	49.09	2964.91	80.5
秋 Autumn	8.01	0—44.76	5.47	259.93	7.1
冬 Winter	1.44	0—8.02	1.13	46.63	1.3

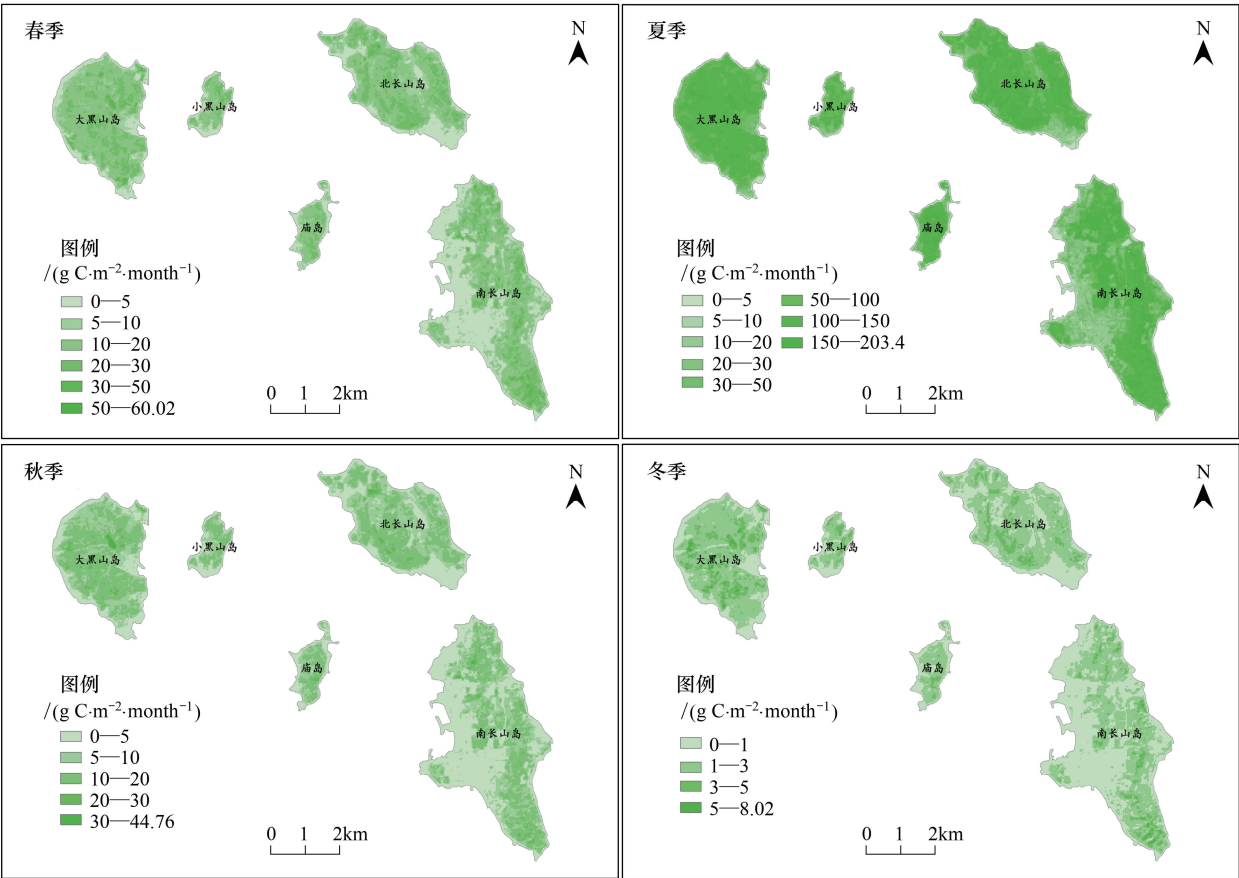
表 3 南五岛各岛 NPP 估算结果

Table 3 NPP estimation results of each island

海岛 Islands	面积 Area/ hm ²	平均密度 Mean densit/ (g C m ⁻² a ⁻¹)	范围 Range/ (g C m ⁻² a ⁻¹)	标准差 S. D./ (g C m ⁻² a ⁻¹)	总量 Total/ (t C/a)	总量占比/% Proportion
南长山岛 Nanchangshan Island	1367.73	301.70	0—814.05	206.41	4127.80	37.4
北长山岛 Beichangshan Island	813.87	374.47	0—780.80	183.80	3045.99	27.6
庙岛 Miao Island	157.95	344.19	0—639.20	206.62	543.03	4.9
大黑山岛 Daheishan Island	774.63	382.13	0—863.20	160.42	2955.64	26.8
小黑山岛 Xiaoheishan Island	133.56	278.02	0—582.85	161.56	371.07	3.4

3.3 不同地表覆盖类型中 NPP 分布特征

不同地表覆盖中,针叶林 NPP 总量最大,占 70%以上,裸地 NPP 总量最小,仅占 0.15%;除了建设用地外,其余地表覆盖类型 NPP 总量与面积大小呈正比。阔叶林的 NPP 平均密度最高,其次为针叶林、农田、草地、建设用地和裸地,这与地表覆盖类型的最大光能利用率有关;NPP 标准差也同平均密度大致呈正相关关系(表 4)。



审图号: GS (2015) 3184号

图 6 不同季节南五岛 NPP 分布特征
Fig. 6 NPP distribution of five southern islands in different seasons

表 4 不同地表覆盖类型 NPP 估算结果

Table 4 Estimation results in different land cover type						
地表覆盖类型 Land cover type	面积 Area/ hm ²	平均密度 Mean density/ (g C m ⁻² a ⁻¹)	范围 Range /(g C m ⁻² a ⁻¹)	标准差 S. D./ (g C m ⁻² a ⁻¹)	总量 Total/ (t C/a)	总量占比/% Proportion
针叶林 Coniferous forest	1742.58	446.90	0—678.49	131.40	7777.48	70.32
阔叶林 Broad-leaf forest	70.2	559.71	0—863.20	191.63	388.89	3.52
草地 Grassland	125.01	340.41	0—698.63	125.55	424.63	3.84
农田 Farmland	407.88	392.56	0—798.67	90.68	1608.62	14.54
建设用地 Construction land	880.74	96.41	0—552.42	71.99	844.55	7.64
裸地 Bare land	19.98	81.31	0—444.09	75.60	16.25	0.15

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 NPP 估算方法探讨

在以往基于遥感的 NPP 估算研究中,多采用 1 个时相的遥感影像提取 NDVI 值,并以此代表全年的情况,这在季节差异性明显的地区显然具有误差。鉴于此,本文采用 4 个时相遥感影像以反映不同季节的实际情况,应用于植被状况随季节变化明显的北方典型海岛地区,能够尽可能地反映地区实际情况。

目前关于 NPP 的研究多为省域、全国等大尺度的研究^[5-6,24,26-29],其光合有效辐射(PAR)基于不同区域太

阳辐射值的差异从而拥有空间分异性,而在现有较小空间尺度的研究中,由于太阳辐射数据较为单一且缺乏空间分异性,PAR 多作为常量来进行计算,这在地形平坦的区域是可行的^[7],但对于南五岛这种具有明显地势起伏的区域而言显然是不科学的。因此,本文尝试探讨地形对于 PAR 的影响,在区分太阳辐射中散射辐射和直接辐射的基础上,借助 GIS 工具计算遮蔽度(Hillshade)。该方法可能具有一定的主观性,但散射辐射和直接辐射的比例以及遮蔽度的计算方法均来源于较为成熟和长期的研究,以此得到地形影响因子作用下具有空间分异性的 PAR 数据,是积极的尝试,符合南五岛的实际情况。遮蔽度的计算结果根据时间的不同而具有差异,本文依据格林尼治天文台观察的每日正午太阳高度资料,得到 4 个时相遥感影像获取当日的南五岛正午太阳高度角,结合坡度和坡向数据计算得出遮蔽度,该遮蔽度实际上是正午的遮蔽度,以此代表全天的状况可能具有一定误差,但鉴于太阳高度数据的可获得性,本文略有遗憾,在接下来的工作中应对此开展进一步的研究。

本文 NPP 模型中的最大光能利用率($\xi_{\max}$)来源于 Running 和朱文泉研究,其对南五岛而言具有可行性,同时也拥有一定的主观性,可能会给计算结果带来误差。在下一步的工作中应结合现场监测和验证,对南五岛植被最大光能利用率的研究进行完善。

4.1.2 NPP 估算结果探讨

将本文计算的南五岛 NPP 结果与采用相同方法的国内其他研究结果进行对比(表 5)。与全国相比,南五岛 NPP 平均密度和陶波^[26]估算的 $342 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 基本一致,略高于朱文泉^[5]的 $324 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,低于顾娟^[27]的 $393.75 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$;与各地区相比,低于广东省、江苏省、盘锦市等沿海地区,高于甘肃、青海、西藏。由此可得,南五岛 NPP 平均密度处于全国平均水平,高于同纬度的西部地区,但低于东部大陆沿海地区。

本文计算结果显示不同季节南五岛 NPP 具有较大的差异,其中夏季的 NPP 总量是冬季的 60 倍以上,因此对于北方地区的 NPP 估算,不同季节的差异性研究尤为关键。南五岛各岛的 NPP 平均密度具有一定差异,结合各岛地表覆盖类型来看,NPP 平均密度与各岛建设用地比例(POC)呈明显的负相关,线性拟合度达

0.468。城镇建设占用土地,使得林地等具有高 NPP 值的覆盖类型面积减少,进而降低整岛的 NPP 平均密度。这也某种程度上说明城镇化进程不可避免地会带来海岛 NPP 的减少。

南五岛均为基岩海岛,以剥蚀山丘为主要地貌特征,存在水资源匮乏、土层薄等问题,本身植物生长条件较差,20 世纪 50 年代以来进行了广泛的人工林种植,以黑松和刺槐为主要优势种,目前南五岛林地面积占总面积的比例达 55.8%,本文的结果显示针叶林和阔叶林的 NPP 平均密度分别达 $446.9 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $559.71 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,略低于全国的平均数据 $469 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $663 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[5]。考虑到海岛自身较脆弱的生态环境条件,说明黑松和刺槐具有良好的生命力,是南五岛生态建设的理想物种。

4.1.3 NPP 对空间分异性参数的依赖性

NPP 与空间分异性参数相关性分析结果见表 6。简单相关分析显示,NPP 与 NDVI、高程、坡度和地表覆盖类型在 0.01 水平上显著正相关,与坡向不具有显著的相关性,相关系数按由大到小的顺序依次为 NDVI、地表覆盖类型、高程、坡度、坡向。偏相关分析显示,除高程外各参数均与 NPP 在 0.01 水平上显著相关,而高程与 NPP 不具有显著的相关性;除坡向外,各参数的偏相关系数同简单相关系数相比均有不同程度的下降,尤其是高程和坡度下降明显,且坡度由显著正相关变为显著负相关,同时坡向的相关性呈现明显的上升。

表 5 不同地区 NPP 估算结果

Table 5 NPP estimation results in different areas

研究区域 Study areas	NPP/ ($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	数据来源 Data sources
南五岛 Five southern islands	340.19	This paper
全国 Nationwide	342	[26]
	324	[5]
	393.8	[27]
广东	774	[28]
江苏	569.28	[29]
盘锦	553	[7]
甘肃	241.13	[30]
青海	173.28	[31]
青藏高原 Tibetan Plateau	120.8	[24]

表 6 NPP 与模型参数相关分析结果

Table 6 Results of correlation analysis between NPP and model parameters

项目 Items		NDVI	高程 Altitude	坡度 Slope	坡向 Aspect	地表覆盖类型 Land cover type
简单相关	Pearson Correlation	0.913 **	0.527 **	0.334 **	0.008	0.801 **
Simple correlation	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.406	0.000
偏相关	Pearson Correlation	0.822 **	0.016	-0.123 **	0.207 **	0.624 **
Partial correlation	Sig. (2-tailed)	0.000	0.075	0.000	0.000	0.000

** . 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

NDVI 和地表覆盖类型是 NPP 最主要的影响参数,它们各自与 NPP 显著正相关,高程和坡度则通过影响 NDVI 和地表覆盖类型进而作用于 NPP。随着高程和坡度的上升,城镇建设和农田开垦程度减小,林地面积相应增多,从而带来较高的 NPP;但偏相关分析结果显示,在控制其他参数不变的情况下,高程与 NPP 关系不明显,而坡度与 NPP 呈现显著的负相关,这是因为单从坡度因子来看,坡度较小的地方往往拥有更好的植被生长条件。坡向越接近正南,理论上能够获得更多的太阳辐射,从而拥有较高的 NPP 值,但不同坡向的地表覆盖类型往往受到人类的影响而不具有规律性,因此在控制其他参数的环境下坡向与 NPP 具有显著的正相关性,但在简单相关分析中却没有呈现出该特征。

4.1.4 NPP 与土壤理化性质的相关性

NPP 与 10 项土壤因子之间的简单相关性见表 7。结果显示 NPP 与土壤 pH、有效磷、全磷、全钾呈显著负相关关系,其中与前三项在 0.01 水平上显著相关,与全钾在 0.05 水平上显著相关;NPP 与全氮、总碳、总有机碳呈显著正相关关系,与全氮在 0.05 水平上显著相关,与后二项在 0.01 水平上显著相关;NPP 与含水量、速效钾和含盐量之间不存在显著相关性。此外,10 项土壤因子之间也存在着不同水平的相关关系。

表 7 NPP 与土壤理化性质的简单相关分析结果

Table 7 Results of simple correlation analysis between NPP and soil characters

项目 Items	NPP	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
NPP	1	-0.506 **	-0.121	-0.443 **	-0.315	-0.479 **	-0.415 *	-0.152	0.374 *	0.461 **	0.507 **
I	-0.506 **	1	0.422 *	0.467 **	0.207	0.691 **	0.771 **	0.207	-0.538 **	-0.565 **	-0.663 **
II	-0.121	0.422 *	1	0.222	0.125	0.143	0.482 **	0.317	-0.182	-0.215	-0.158
III	-0.443 **	0.467 **	0.222	1	0.538 **	0.497 **	0.536 **	0.299	-0.295	-0.313	-0.350 *
IV	-0.315	0.207	0.125	0.538 **	1	0.286	0.425 **	0.023	-0.026	0.018	0.008
V	-0.479 **	0.691 **	0.143	0.497 **	0.286	1	0.753 **	0.113	-0.115	-0.165	-0.321
VI	-0.415 *	0.771 **	0.482 **	0.536 **	0.425 **	0.753 **	1	0.146	-0.293	-0.375 *	-0.415 *
VII	-0.152	0.207	0.317	0.299	0.023	0.113	0.146	1	-0.282	-0.350 *	-0.321
VIII	0.374 *	-0.538 **	-0.182	-0.295	-0.026	-0.115	-0.293	-0.282	1	0.905 **	0.848 **
IX	0.461 **	-0.565 **	-0.215	-0.313	0.018	-0.165	-0.375 *	-0.350 *	0.905 **	1	0.893 **
X	0.507 **	-0.663 **	-0.158	-0.350 *	0.008	-0.321	-0.415 *	-0.321	0.848 **	0.893 **	1

I : pH; II : 含水量 Moisture content; III : 有效磷 Available phosphorus (AP); IV : 速效钾 Available potassium (AK); V : 全磷 Total phosphorus (TP); VI 全钾: Total potassium (TK); VII: 含盐量 Salinity; VIII: 全氮 Total nitrogen (TN); IX: 总碳 Total carbon (TC); X: 总有机碳 Total organic carbon (TOC)

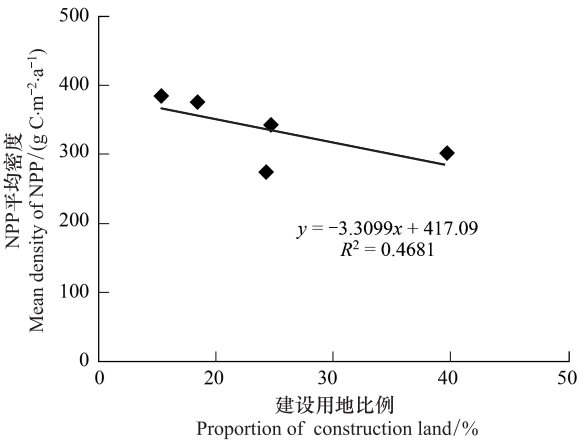


图 7 NPP 平均密度与建设用地比例关系

Fig. 7 Relationship between mean density of NPP and proportion of construction land

土壤理化性质与生态系统生产力密切相关^[32]。具有较高生产力的群落凋落物往往较多^[33],而凋落物是土壤有机质的重要来源,有机质中的主要元素为碳、氧、氢、氮,上述分析显示了南五岛 NPP 与土壤全氮、总碳、总有机碳呈明显的正相关关系。南五岛的土壤本身较为贫瘠,磷、钾等营养元素较少,较高的生产力往往表示着群落能够更加充分地吸收土壤中的营养元素而使其减少^[34],这可能是本文 NPP 与有效磷、全磷、全钾显著负相关的原因。大多数土壤养分元素的有效性受土壤 pH 值影响^[35],南五岛的 NPP 与 pH 呈现较高的负相关,说明较低的 pH 值更适宜南五岛植物的生长。土壤水是植被生长发育所需用水的主要来源,但过高的含水量会导致植被根系的腐烂不利于植被的生长;受到海水的作用,海岛土壤的含盐量往往过高,但南五岛并没有表现出该特征,说明南五岛人工林对于过滤海盐具有重要作用^[12]。

4.2 结论

本文依据 CASA 模型,结合区域实际情况构建庙岛群岛南五岛 NPP 估算模型,以 RS 和 GIS 为主要手段,对研究区不同海岛、不同季节、不同地表覆盖类的 NPP 进行估算,进而分析 NPP 与模型计算参数和土壤理化性质的关系。基本结论如下:

(1)南五岛 NPP 总量为 11043.52 t C/a,平均密度为 340.19 g C m⁻² a⁻¹,总体上处于全国平均水平,高于同纬度的西部地区,但低于东部沿海大陆地区。

(2)南五岛夏季 NPP 总量占全年的 80%左右,春季、秋季 NPP 总量分别占比 11%和 7%,冬季仅占 1.3%,说明研究区 NPP 具有明显的季节差异。

(3)南五岛各岛中,NPP 平均密度由大到小依次为大黑山岛、北长山岛、庙岛、南长山岛和小黑山岛,各岛 NPP 平均密度与建设用地比例呈明显的负相关。

(4)不同地表覆盖类型中,NPP 平均密度由大到小依次为阔叶林、针叶林、农田、草地、建设用地和裸地,林地具有较高的 NPP,说明南五岛的人工林建设具有重要的生态作用。

(5)NDVI 和地表覆盖类型是 NPP 最主要的影响参数,高程、坡向通过影响 NDVI 值和地表覆盖类型间接作用于 NPP。

(6)南五岛 NPP 与土壤 pH、有效磷、全磷、全钾呈显著负相关,与全氮、总碳、总有机碳呈显著正相关,与含水量、速效钾和含盐量之间相关关系不明显。

在下一步的研究中,应重点关注地形影响因子的修正完善和植被最大光能利用率的现场验证,以期在南五岛碳源/汇研究提供更加充分的技术支持。

参考文献 (References):

- [1] Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere. New York: Springer-Verlag, 1975.
- [2] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. Science, 1998, 281(5374): 237-240.
- [3] Paruelo J M, Epstein H E, Lauenroth W K, Burke I C. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. Ecology, 1997, 78(3): 953-958.
- [4] Running S W, Thornton P E, Nemani R, Glassy J M. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system // Sala O E, Jackson R B, Mooney H A, Howarth R W. Methods in Ecosystem Science. New York: Springer-Verlag, 2000: 44-57.
- [5] 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. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424.
- [6] 龙慧灵, 李晓兵, 王宏, 魏丹丹, 张程. 内蒙古草原区植被净初级生产力及其与气候的关系. 生态学报, 2010, 30(5): 1367-1378.
- [7] 王莉雯, 卫亚星. 盘锦湿地净初级生产力时空分布特征. 生态学报, 2012, 32(19): 6006-6015.
- [8] 石洪华, 郑伟, 丁德文, 吕吉斌. 典型海岛生态系统服务及价值评估. 海洋环境科学, 2009, 28(6): 743-748.
- [9] 王晓丽, 王媛, 石洪华, 郑伟, 周然. 海岛陆地生态系统固碳估算方法. 生态学报, 2014, 34(1): 88-96.
- [10] 王晓丽, 王媛, 石洪华, 彭士涛, 宫立鹏, 覃雪波. 山东省长岛县南长山岛黑松和刺槐人工林的碳储量. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1263-1268.
- [11] Paulay G. Biodiversity on oceanic islands: its origin and extinction. American Zoology, 1994, 34(1): 134-144.
- [12] 石洪华, 王晓丽, 王媛, 刘振英, 麻德明. 北长山岛森林乔木层碳储量及其影响因子. 生态学报, 2013, 33(19): 6363-6372.

- [13] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [14] 袁淑杰, 缪启龙, 谷晓平, 邱新法. 贵州高原起伏地形下太阳直接辐射的精细分布. *自然资源学报*, 2009, 24(8): 1432-1439.
- [15] 左大康, 弓冉. 中国太阳直接辐射、散射辐射和太阳总辐射间的关系. *地理学报*, 1962, 28(3): 175-186.
- [16] 马金玉, 梁宏, 罗勇, 李世奎. 中国近 50 年太阳直接辐射和散射辐射变化趋势特征. *物理学报*, 2011, 60(6): 069601.
- [17] Burrough P A, McDonell R A. *Principles of Geographical Information Systems*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1998: 190-190.
- [18] Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(D3): 5263-5283.
- [19] Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing Environment*, 1995, 51(1): 74-88.
- [20] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 603-608.
- [21] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探. *植物生态学报*, 1995, 19(3): 193-200.
- [22] 《喷灌工程设计手册》编写组. *喷灌工程设计手册*. 北京: 水利电力出版社, 1989: 348-356.
- [23] 周广胜, 张新时. 全球变化的中国气候——植被分类研究. *植物学报*, 1996, 38(1): 8-17.
- [24] 张懿铨, 祁威, 周才平, 丁明军, 刘林山, 高俊刚, 摆万奇, 王兆锋, 郑度. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异. *地理学报*, 2013, 68(9): 1197-1211.
- [25] 穆少杰, 李建龙, 周伟, 杨红飞, 章超斌, 居为民. 2001-2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系. *生态学报*, 2013, 33(12): 3752-3764.
- [26] 陶波, 李克让, 邵雪梅, 曹明奎. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟. *地理学报*, 2003, 58(3): 372-380.
- [27] 顾娟, 李新, 黄春林, 张喜凤, 金鑫. 2002—2010 年中国陆域植被净初级生产力模拟. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2013, 49(2): 203-213.
- [28] 罗艳, 王春林. 基于 MODIS NDVI 的广东省陆地生态系统净初级生产力估算. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1467-1471.
- [29] 王骊鹂, 刘振波. 江苏省植被净初级生产力时空分布格局研究. *南京信息工程大学学报: 自然科学版*, 2012, 4(4): 321-325.
- [30] 刘春雨, 董晓峰, 刘英英, 潘竞虎, 车彦军. 甘肃省净初级生产力时空变化特征. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(1): 163-170.
- [31] 卫亚星, 王莉雯, 石迎春, 李路子. 青海省草地资源净初级生产力遥感监测. *地理科学*, 2012, 32(5): 621-627.
- [32] 王长庭, 龙瑞军, 王启基, 景增春, 尚占环, 丁路明. 高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系. *草业学报*, 2005, 14(4): 15-20.
- [33] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. *中国森林生态系统的生物量和生产力*. 北京: 科学出版社, 1999.
- [34] Elton C S. *The Ecology of Invasions by Animals and Plants*. Chicago: University of Chicago Press, 2000.
- [35] Khattak R A, Hussain Z. Evaluation of soil fertility status and nutrition of orchards. *Soil & Environment*, 2007, 26(1): 22-32.