扎边, 池源, 龚照辉, 等. 近 30 年来江苏海岸带 NPP 和 LST 的时空变化及影响因素[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(12): 64-78. ZHA Bian, CHI Yuan, GONG Zhaohui, et al. Temporal and spatial changes in net primary productivity and land surface temperature and their influencing factors in Jiangsu coastal zone in recent 30 years[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(12): 64-78.

# 近 30 年来江苏海岸带 NPP 和 LST 的 时空变化及影响因素

扎边<sup>1</sup>, 池源<sup>2\*</sup>, 龚照辉<sup>1</sup>, 元冰瑜<sup>1</sup>, 高建华<sup>1,3</sup> (1南京大学地理与海洋科学学院, 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210023; 2自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061; 3自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210024)

摘 要:近30年来,复杂的气候变化与剧烈的人类活动造成江苏省海岸带生态演变剧烈,且 呈现显著的空间异质性。植被净初级生产力(NPP)和地表温度(LST)是生态系统的2个 关键参数,通过将1990-2020年Landsat遥感影像与CASA计算模型和相关性分析等方法结 合,分析了江苏海岸带NPP和LST的时空变化及影响因素,结果表明:①由于人类对沿海滩 涂资源的利用以及养殖业的发展等,江苏海岸带范围随岸线不断变化,岸线逐步向海推进,且 南部向海推进范围大于北部。②近30年来,江苏海岸带 NPP和LST呈现出显著的时空异 质性特征。时间上1990、2000、2010、2020年代的 NPP月均值分别为102.88、88.23、156.62、 98.90gC·m<sup>-2</sup>,呈现下降-上升-下降趋势,而LST月均值分别为32.6、31.7、28.3、37.6℃,呈 现先下降后上升的趋势。空间上,NPP与LST在江苏海岸带南北分布呈现出一定差异性。 ③地表覆盖类型是影响江苏海岸带 NPP和LST时空异质性的主要因素。林地的 NPP最高, 养殖池塘 NPP最低;人工建筑的LST值最高,湿地、水域与养殖池塘的LST值相对较低。此 外,随着气温升高,NPP和LST有逐渐上升的趋势,而植被覆盖度的升高则导致 NPP上升和 LST下降。

关键词:江苏海岸带; 植被净初级生产力; 地表温度; 气候变化; 地表覆盖; 人类活动 中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.278

### 0 引言

海岸带是陆地与海洋的连接纽带<sup>[1]</sup>,海岸带城 市更是人类活动的密集地带<sup>[2]</sup>,因而海岸带生态系 统往往受气候变化、人类活动和社会发展等多种因 素影响。作为地球系统的关键带,海岸带环境研究 变得日益重要。随着沿海开发战略的实施,人类对

收稿日期: 2022-10-08

海岸带环境资源的开发利用强度不断加剧<sup>[3]</sup>。同时, 海洋水动力条件随着海岸带围垦填海活动等产生 了变化,加之流域入海沉积物供给减少,对海岸线 的演化也造成了很大的影响<sup>[4]</sup>。海岸线的时空变化 不仅能反映海岸带的景观变化,亦能够体现出海岸 带生态环境保护成效与经济发展水平<sup>[5]</sup>。此外,海 岸带滩涂围垦、填海造陆等人类活动亦会对海岸带 生态环境产生重要影响<sup>[6]</sup>,使海岸带生态系统遭到 破坏<sup>[7-8]</sup>,因此研究海岸线的时空变化对于探讨海 岸带生态环境具有重要意义。植被作为海岸带的 生态资源之一,能够反映出海岸带的气候以及环境 变化,前人多用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、植被净初级生产力 (Net Primary Production, NPP)、土壤水分指数、植 被多样性、地表温度(Land Surface Temperature,

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(42071116);中央级公益性科研 院所基本科研业务费专项资金(2021802)

作者简介:扎边(1999-),女,在读硕士,主要从事海岸带生态方面的研究 工作.E-mail:15089092652@163.com

<sup>\*</sup>通讯作者:池源(1988-),男,博士,副研究员,主要从事海岛生态地理、 海岸带空间评估等方面的研究工作. E-mail; chiyuan@fio.org.cn

LST)等植被参数描述区域的生态现状。对于以上 植被要素已有许多学者对其进行探讨<sup>[9-14]</sup>,但由于 研究方法的差异,不同学者对 LST 与植被覆盖度关 系的结论仍存在差异<sup>[14-16]</sup>,因此本文选择更能代表 植被生态状况的参数 NPP 与 LST 进行探讨。

植被净初级生产力(NPP)是表征植被吸收净二 氧化碳能力的参数,即植被光合作用所吸收的二氧 化碳与呼吸作用产生的二氧化碳之差<sup>[13]</sup>,是地表碳 循环的重要组成部分,作为生态系统碳源/汇的重要 指标,在全球碳平衡中发挥着不可替代的作用。同 时,NPP还是反映生态系统固碳能力和调节生态过 程的关键指标<sup>[17-18]</sup>,能够在一定程度上反映气候以 及人类活动对某一地域的生态环境状况的作用[19-20]。 已有诸多研究表明, NPP 不仅与土地覆盖、气候变 化[21-23] 等有关,还会随着人类活动的影响发生变 化<sup>[11]</sup>。在气候方面, NPP 对降水有着较高的敏感 性<sup>[24]</sup>, 与温度降水呈现正相关关系<sup>[11,25]</sup>, 而在某些 区域人类活动则是 NPP 变化的主导要素。地表温 度(LST)是指地球覆盖表面与空气交接处的温度,代表 了人类活动引起的地表热能的物理量的变化,是研 究气候变化、水文、生态等的主要参数,其与土地表 面的生物物理特征关系较为密切<sup>[26-28]</sup>。遥感技术 的出现为计算 LST 提供了更为科学的方法,当前主 要研究方法是利用 MODIS 影像获得地表温度值, 或者利用 Landsat 影像通过单窗或劈窗算法反演地 表温度。前人多利用 LST 进行区域内城市热岛效 应的分析<sup>[29-31]</sup>或分析不同地表覆盖类型对地表温 度的影响。针对 LST 的影响因素,已有许多研究表 明,LST 与地表覆盖类型<sup>[14]</sup>、植被特征<sup>[15]</sup>、土壤性 质以及地形<sup>[16]</sup>等有关。

江苏海岸带地理位置优越,南部毗邻上海,是 长江三角洲的重要组成部分,北部与环渤海经济圈 相邻。前人针对江苏海岸带的研究多集中在土地 利用变化或海岸线时空变化特征等<sup>[4,32-35]</sup>,对于生态 系统的研究也仅停留在 2010 年左右且研究内容较 少,尤其是对江苏海岸带生态系统大时间和空间尺 度的研究仍存在空白。区域内 NPP 的时空变化不 仅制约着大时间尺度的生态系统变化及碳循环过 程,其变化亦会对大空间区域起决定性作用<sup>[20]</sup>。因 此江苏海岸带作为江苏省重要经济及生态建设区, 研究其 NPP 与 LST 的变化对理解江苏省甚至其他 沿海城市的碳循环有着重要意义。本文以人类活 动强度快速增长的近 30 年为时间尺度,充分收集 这一时间段内的 Landsat 遥感影像以及气象数据, 将 NPP 与 LST 结合, 研究江苏海岸带格网尺度和 县级单元尺度上 NPP 和 LST 的时空变化及影响因 素。本文拟解决以下科学问题:①在大空间尺度下 研究近 30 年来江苏海岸带 NPP 与 LST 时空变化 特征;②探究地表覆盖类型、气候变化和植被生长 状况等因素对 NPP 与 LST 时空格局的影响, 揭示 大空间尺度下地表覆盖特征演变规律, 把握海岸带 生态系统变化特征, 并为基于生态系统的海岸带管 理提供依据。

### 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

江苏海岸带包括江苏省沿海的14个县级城市, 位于 31°64′-35°12′N、118°75′-121°94′E(图 1),海 岸线长约 954 km<sup>[32]</sup>, 陆地面积约 2.4 万 km<sup>2</sup>。江苏 海岸带位于"一带一路"和长江经济带建设两大国 家战略的交汇点,随着国家沿海开发战略的实施, 已经成为江苏发展最快的区域之一。江苏海岸带 属亚热带和暖温带季风气候,光照充足,年平均气 温为 13.7~14.6 ℃。其地形平坦, 87% 的地区为平 原,主要海岸带植被为水稻、小麦及芦苇。海岸以 粉砂淤泥质型为主,沿海滩涂约 5000 km<sup>2</sup>,占全国 沿海滩涂面积的1/4。除滩涂资源外,江苏海岸带 还拥有丰富的海洋、矿产以及植物资源等。由于自 然条件及经济发展程度的不同,江苏海岸带14个 县级市的自然资源存在一定差异,北部的赣榆县、 连云区以及灌云县多林地, 鱼类资源丰富; 中部的 射阳县以及大丰区主打生态建设,拥有世界上最大 的麋鹿自然保护区以及国家级丹顶鹤生态保护区, 其经济发展相对较为缓慢;而南部的如东县、通州 区、海门市以及启东市经济发展较快,其中通州区 是经济最为发达的城市。1984年,连云港和南通 市成为沿海对外开放城市;1995年,"海上苏东"、 "沿海开发"战略实施,但沿海经济发展较为缓慢, 农业占主导地位; 2003年"908"专项正式开展, 2009年《江苏沿海地区发展规划》颁布,沿海经济快 速发展,但区域经济发展不平衡,南通市发展最为 迅速,其人类活动最为明显。

### 1.2 数据来源与处理

本文遥感数据来源于地理空间数据云(http://



www.gscloud.cn/)的 Landsat 系列数据,为减小季节 对分析结果的影响,选取影像成像时间以 5 月份为 主,分别选取 4 个年代(1990、2000、2010 和 2020 年代)研究区范围内无云或少云的遥感影像(表 1)。 气象数据来自中国气象数据网(http://data.cma.cn/), 选取与已选取遥感影像同时期的江苏海岸带气象 站气象数据。土地覆盖类型数据来源于自然资源部 发布的 30 m 空间分辨率地表覆盖数据 GlobeLand30 (http://www.globallandcover.com/)。

Table 1	The dates of remote sensing image			
项目	条带号	日期		
		19910513		
	118/38	20000606		
		20080511		
		19890530		
	119/37	20000613		
Landard C		20090606		
Landsat 5		19920522		
	119/38	20000613		
		20100524		
		19920529		
	120/36	19990618		
		20070507		
	118/38	20180523		
I and at 9	119/37	20170527		
Lanusat 8	119/38	20170527		
	120/36	20180606		

表1 遥感影像选取时间

已选取的遥感影像通过 ENVI 5.1 软件进行辐射定标和波段融合<sup>[36]</sup>等处理,再结合处理后的遥感影像,在 ArcGIS 10.6 软件中手动绘制江苏省不同时期的海岸线(每 10 年 1 幅);同时,以自然资源部发布的 2000-2020 年的土地利用数据为基础,通过目视解译完成 4 个年代(1990、2000、2010 和 2020 年代)的地表覆盖数据。利用 ArcGIS 10.6 软件建立格网,将 4 个时期的地表覆盖数据与研究区格网数据建立空间连接,然后结合气象数据计算 NPP 和 LST,并计算距海岸线的距离。

### 1.3 研究方法

(1) 海岸线分维数计算

海岸线分维数按照网格法<sup>[37]</sup>进行计算,先将 遥感影像比例尺调整为 1:2.5 万后进行海岸线的绘制,选取 300 m×300 m、400 m×400 m、500 m×500 m、 600 m×600 m、700 m×700 m、800 m×800 m、900 m× 900 m、1000 m×1000 m 的网格,然后利用 ArcGIS 10.6 软件计算出网格数目后,制作网格长度与网格 数目的双对数散点图,拟合出公式(1)所示的线状 分形维数关系式。

 $\ln N(r) = -D\ln r + A \tag{1}$ 

式中:A 为待定常数; D 为海岸线分维数; r 为网格长度; N(r)为网格数目。 (2) NPP 计算

NPP 计算是基于 Carnegie-Ames-Stanford Ap-

1

proach(CASA)<sup>[38]</sup> 模型, NPP(x, t) = APAR(x, t)× $\xi(x, t)$  (2) APAR(x, t) = PAR(x, t)×FPAR(x, t) (3)  $\xi(x, t)$  = ft(t)×fw(t)× $\xi_{max}$  (4)

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, MJ·m<sup>-2</sup>·月<sup>-1</sup>;

 $\xi(x,t)为x 点 t 月的实际光能利用率, g C·MJ<sup>-1</sup>;$ PAR(<math>x,t)为x点t月的光合有效辐射,取值为太

阳总辐射的 50%, MJ·m<sup>-2</sup>·月<sup>-1</sup>;

FPAR(*x*,*t*)为 *x* 点 *t* 月光合有效辐射吸收比例,%;

ft(*t*)和fw(*t*)为研究区 *t* 月的气温胁迫因子和水分胁迫因子,%;

$$\xi_{\text{max}}$$
为植被最大光能利用率, g C·MJ<sup>-1</sup>。  
FPAR(*x*,*t*) =  $\frac{\text{FPAR1}(x,t) + \text{FPAR2}(x,t)}{2}$  (5)

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R}$$
(6)

$$SRVI(x,t) = \frac{1 + NDVI(x,t)}{1 - NDVI(x,t)}$$
(7)

$$FPAR1(x,t) = \frac{NDVI(x,t) - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \times (FPAR_{max} - FPAR_{min}) + FPAR_{min}$$
(8)

$$FPAR2(x,t) = \frac{SRVI(x,t) - SRVI_{min}}{SRVI_{max} - SRVI_{min}} \times (FPAR_{max} - FPAR_{min}) + FPAR_{min}$$
(9)

式中:IR 为近红外波段;

R 为红外波段;

FPAR<sub>max</sub>与FPAR<sub>min</sub>分别取 0.95 和 0.001;

NDVI<sub>max</sub>、NDVI<sub>min</sub>、SRVI<sub>max</sub>和 SRVI<sub>min</sub>分别 取 4 个年代所有值的 95% 和 5% 百分位值。

FPAR1与FPAR2两者得到的光合有效辐射更为 准确。

 $ft(t) = ft1(t) \times ft2(t)$ (10)

$$fw(t) = 0.5 + 0.5 \times E/E_p$$
(11)

式中: E 为蒸散量;

E<sub>P</sub>为潜在蒸散量;

ft1(t)与ft2(t)分别代表极端温度植被光合作用 受到的限制以及气温不在最适温度时光能利用率 受到的影响,其计算方法参考池源等<sup>[17]</sup>的研究。 (3) LST 计算

LST 的计算方法根据遥感影像的来源不同有 单窗算法<sup>[39-41]</sup> 与劈窗算法 2 种, 多基于覃志豪对于 其参数的研究, Landsat 8 劈窗算法:

$$T_s = T_{10} + A(T_{10} - T_{11}) + B, \qquad (12)$$

$$A = \frac{D_{10}}{E_0},$$
 (13)

$$B = E_1 L_{10} - E_2 L_{11}, \qquad (14)$$

$$E_1 = D_{11} \left( 1 - C_{10} - D_{10} \right) / E_0, \qquad (15)$$

$$E_2 = D_{10}(1 - C_{11} - D_{11})/E_0, \qquad (16)$$

$$E_0 = D_{11}C_{10} - D_{10}C_{11}, \qquad (17)$$

$$C_i = \varepsilon_i \tau_i, \tag{18}$$

$$D_{i} = (1 - \tau_{i}) [1 + (1 - \varepsilon_{i})\tau_{i}], \qquad (19)$$

$$L_{i} = \frac{B_{i}(T)}{\left[\frac{\partial B_{i}(T)}{\partial(T)}\right]} = \frac{T_{10/11}^{2}}{K_{2}} - \frac{T_{10/11}^{2}}{K_{2} \times e^{\frac{K_{2}}{T_{10/11}}}}, \quad (20)$$

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{B_\lambda} + 1\right)},\tag{21}$$

式中: A 与 B 为计算参数;

*C*、*D*、*E* 为中间计算参数;
 ε<sub>i</sub>为地表辐射率;
 τ<sub>i</sub>为大气诱射率;

Li为温度参数,K;

*B*<sub>λ</sub>为辐射强度,可根据池源等<sup>[42]</sup>的研究进行 计算。在计算过程中土地利用类型划分如下:将耕 地、草地与林地作为"植被",其余覆盖类型作为 "非植被"。

Landsat 5 单窗算法: LST =  $[a(1-C-D)+(b(1-C-D)+C+D)T_6-D\times T_a]/C$ , (22)

因为本文遥感影像选自夏季,因此 *T<sub>a</sub>*=16.011+ 0.92621*T*<sub>0</sub>,其中 *T*<sub>0</sub>为近地表温度,可取值平均温 度(K),*T*<sub>6</sub>计算参照公式(21)。公式中,*a*取值 -67.355 351,*b*取值 0.458 606;*C*与*D*的计算过程 同(18)、(19)式一致,公式中τ根据水汽含量值得到 其估算方程<sup>[42]</sup>:

$$r = 1.17 - 0.16w, \tag{23}$$

在单窗算法中地表辐射率根据不同土地覆盖 类型具有不同的值<sup>[43]</sup>,  $\varepsilon_{tait}$  = 0.986;  $\varepsilon_{建\mathfrak{R}}$  = 0.970;  $\varepsilon_{itait}$  = 0.972 2;  $\varepsilon_{itait}$  = 0.995。

### 2 结果和分析

### 2.1 海岸线时空变化特征

本文探讨海岸线变化以赣榆县绣针河口至启 东市连兴港河口为主,根据江苏省自然资源厅海岸 线数据以及参考文献数据<sup>[33]</sup>进行误差分析,其参 数变化如表2所示。根据绘制出的海岸线变化 (图2),依据向海推进面积的大小以射阳县和大丰 区为界分为南、北2个区域进行讨论。射阳县以北 (包括射阳县)为江苏海岸带北部,大丰区以南(包 括大丰区)为江苏海岸带南部。1996—2008年,江 苏沿海开发滩涂超过1200 km<sup>2</sup>,在此时间段北部岸 线处于稳定状态,岸线变化不大;南部岸线则因为 围填工程以及围垦养殖活动的增加,导致岸线向海 推进,但南通市至启东市岸线向海推进范围相对较 小。2013年底,东台市沿海东北角条子泥一期匡围 工程基本完成,有效增加了农业、建设、生态用地面积,江苏沿海开发重大工程——百万亩滩涂围垦正 式拉开大幕。在此期间,江苏海岸带北部岸线仍处 于稳定状态,南部岸线则继续向海推进,且岸线趋 于平整。2010-2020年,海岸线变化则趋于稳定, 由于人类活动的影响使得海岸线相对 2010 年较为 曲折。总体来看,江苏海岸线近 30 年来逐步向海 推进,且南部向海推进范围大于北部,向海推进的 原因主要是人类对于滩涂资源的开发以及沿海围 垦养殖活动的发展,且南部滩涂资源的开发利用明 显大于北部<sup>[34]</sup>。

表 2 近 30 年江苏海岸线参数变化

 
 Table 2
 Changes of coastline parameters of Jiangsu Province in the past 30 years

		1 2		
年代	海岸线长度/km	分形维数D	相关系数	相对误差
1990s	838.422	1.045	0.999	0.005
2000s	921.446	1.050	0.999	0.034
2010s	891.406	1.040	0.999	0.038
2020s	920.553	1.058	0.999	0.050



Fig.2 Changes of coastline of Jiangsu in the past 30 years

### 2.2 地表覆盖类型变化特征

根据土地利用现状分类标准(GB/T 21010-2007)及江苏海岸带实际情况,本文将江苏海岸带地表覆盖类型分为耕地、人工建筑、养殖池塘、草地、林地、湿地、水域和裸地。1990-2000年,江苏

海岸带养殖池塘面积占比增大至 28.4%, 主要分布 在研究区中部的大丰区; 水域面积占比增大至 26.1%, 主要分布在研究区北部的灌南县。2000-2010年, 人工建筑面积占比增大至 25.8%; 湿地面 积占比增大至 32.2%, 主要分布在研究区南部的东 台市和如东县; 随着海岸线的推进, 研究区南部养 殖池塘面积有明显增加,但养殖池塘总面积占比减 少至 26.3%。2010-2020年,养殖池塘面积占比减 少至 19.4%,主要分布在研究区北部沿海区域,人工 建筑面积占比增大至 39%,其中研究区北部的连云 区和研究区南部的通州区、海门市、启东市人工面 积显著增大;林地面积占比增大至 41.1%,主要分布 在研究区南部的东台市。

总体而言,近 30 年来江苏海岸带地表覆盖类 型都以耕地、人工建筑以及养殖池塘为主。草地、 养殖池塘面积明显变小,林地、人工建筑、湿地与水 域面积明显增大,耕地面积变化较小。(图 3、4, 表 3)





### 2.3 NPP 时空变化特征

1990年代,江苏海岸带的 NPP 月均值为 102.88 g C·m<sup>-2</sup>,大部分区域介于 100~150 g C·m<sup>-2</sup>, 北部的 NPP 低于南部(图 5a),尤其是北部近海区 域介于 0~50 g C·m<sup>-2</sup>。2000年代,江苏海岸带的 NPP 月均值为 88.23 g C·m<sup>-2</sup>, 与 1990 年代相比, 南、 北部分布差异进一步增大, 除南部的 NPP 有所上升 外, 其余地区均呈下降趋势(图 5b)。2010 年代, 江 苏海岸带的 NPP 月均值为 156.62 g C·m<sup>-2</sup>, 与 2000 年代相比, 南、北部分布发生转变, 北部的 NPP 明 显高于南部, 而且 NPP 值显著增大且北部增幅远超





Fig.4 Changes in the proportion of land use cover types in Jiangsu coastal zone in recent 30 years

### 表 3 江苏海岸带不同土地覆盖类型的面积变化

 
 Table 3
 Changes in area of each land cover type
 in Jiangsu coastal zone

							km <sup>2</sup>
年代	耕地	林地	养殖池塘	湿地	草地	人工建筑	水域
1990s	18 702.40	100.31	1 577.09	354.17	85.17	1 550.71	159.42
2000s	18 839.10	84.77	1 730.31	400.09	77.75	1 636.19	375.08
2010s	18 486.20	86.29	1 602.23	613.50	51.87	2 331.25	418.26
2020s	18 031.30	189.03	1 177.99	537.71	61.06	3 528.57	482.72

南部(图 5c)。2020年代,江苏海岸带的 NPP 月均 值为 98.90 g C·m<sup>-2</sup>, 南、北部的分布差异已不明显, 大部分区域介于 50~150 g C·m<sup>-2</sup>, 近海区域在 0~ 50 g C·m<sup>-2</sup> 范围内, 与 2010 年代相比, NPP 值明显 降低, NPP 月均值>150 g C·m<sup>-2</sup> 的区域大幅减少, 仅零散分布(图 5d)。





各县级城市的 NPP 月均值变化如图 6 所示, 1990 年代,各县级城市 NPP 的空间分布较为均衡; 2000 年代,NPP 的空间分布差异较大,NPP 高值主 要分布在南部,低值基本集中于北部的射阳县和赣 榆县;2010 年代,北部各县级城市的 NPP 值均大于 南部,仅北部的射阳县和近海区域的 NPP 值略低; 2020 年代,各县级城市 NPP 的空间分布差异较小, 整体波动幅度不大。对于不同地表覆盖类型的 NPP 均值,林地的 NPP 均值远高于其他地表覆盖类型, 其次是湿地与耕地,养殖池塘、水域以及裸地的 NPP 值较低(图 7)。









Fig.7 Changes in mean value of net primary productivity of different land cover types in the past 30 years

总体来看,1990-2000年,研究区 NPP 整体呈现下降趋势,且北部下降较南部更为明显;2000-2010年,研究区 NPP 整体大幅度上升;2010-2020年,研究区 NPP 整体均有较大幅度的下降。

近 30 年间整个江苏海岸带 NPP 均值呈下降趋势。

### 2.4 LST 时空变化特征

1990 年代,江苏海岸带 LST 总体均值为 32.6 ℃, 南、北分布差异较大,北部 LST 分布相对南部较不 均匀,主要集中在 30~35 ℃,均值为 33.74 ℃,而南 部均值为 30.93 ℃(图 8a)。2000 年代,江苏海岸带 LST 均值为 31.7 ℃,南北分布差异依旧存在。与 1990 年代相比,北部 LST 明显下降,均值为 28.66 ℃, 南部则呈上升趋势,均值为 33.93 ℃(图 8b)。2010 年代,江苏海岸带 LST 均值为 28.3 ℃,南北差异 较小,LST 主要分布在 20~30 ℃(图 8c)。2020 年 代,江苏海岸带 LST 均值为 37.6 ℃,分布较为均匀, 南北差异相对其他年代已不明显,相较于 2010 年 代,2020 年代 LST 值有所升高,且升高幅度较大 (图 8d)。

各县级城市的 LST 变化如图 9 所示, 1990 年 代, LST 均值北部的赣榆县最高, 南部的启东市最 低, 其余县级城市分布较为均匀。2000 年代, 南部 各县级城市的 LST 均值均高于北部。2010 年代, 各县级城市均值相差幅度较小, 其中赣榆县均值最 高, 启东市最低。2020 年代, 仅南部部分县级城市 LST 均值较低。对于不同地表覆盖类型, 人工建筑 的 LST 均值最高, 养殖池塘与水域的 LST 值最低 (图 10)。

总体来看, 1990-2000年, 研究区 LST 有微 小幅度的下降, 其中北部下降较为明显; 2000-2010年, 研究区 LST 有较大的下降幅度, 其中南部 下降更为明显; 2010-2020年, 研究区 LST 明显升 高; 因此, 近 30年间整个江苏海岸带 LST 均值上升, 升高约 5.0℃。

### 2.5 NPP 与 LST 相关性分析

NPP与LST年际变化的相关性分析结果如表4 所示,NPP与LST在1990-2000年和2000-2010 年间变化呈显著正相关,而在2010-2020年变化 呈显著负相关。在不同时空尺度下,江苏海岸带 NPP与LST的相关性分析结果如表5所示。在不 同的空间尺度(整个海岸带、各县级城市)和4个年 代(1990、2000、2010、2020年代),江苏海岸带 NPP和LST均呈显著的相关关系(P<0.01)。1990 年代,研究区 NPP与LST呈显著的负相关关系,尤 其是研究区南部的东台市和海安县与北部的响水







图 9 近 30 年江苏海岸带各县级城市地表温度均值

Fig.9 Average land surface temperature of county -level cities in Jiangsu coastal zone in the past 30 years



图 10 近 30 年不同地表覆盖类型地表温度均值变化 Fig.10 Changes in the mean value of land surface temperature of different land cover types in the past 30 years

县和灌南县(表 5)。2000、2010 与 2020 年代 NPP 与 LST 呈显著的正相关关系,且相关性系数表现 为 2000 年代>2020 年代>2010 年代。

表 4 近 30 年地表温度与植被净初级生产力变化值相关性 Table 4 Correlation between net primary productivity and land surface temperature changes in the past 30 years

iand surface temperature changes in the past 50 years						
项目	2000-1990年	2010-2000年	2020-2010年			
	NPP	NPP	NPP			
LST对应变化	0.276**	0.272**	-0.178**			

注:\*\*在0.01水平(双侧)显著相关,\*在0.05水平(双侧)显著相关。

#### 表 5 近 30 年各个县级城市植被净初级生产力 与地表温度的相关性

Table 5 Correlation between net primary productivity and land surface temperature in various county-level cities

in the past 50 years					
项目	1990s	2000s	2010s	2020s	
海岸带	-0.020**	0.185**	0.062**	0.184**	
赣榆县	0.044**	0.345**	-0.126**	-0.126**	
连云区	0.036**	0.006	-0.009	-0.053**	
灌云县	-0.071**	0.262**	-0.161**	0.383**	
灌南县	-0.329**	-0.256**	-0.117**	0.039**	
响水县	0.333**	0.443**	0.362**	0.605**	
滨海县	-0.043**	0.136**	0.205**	0.228**	
射阳县	0.159**	0.071**	0.237**	0.383**	
大丰区	-0.213**	0.084**	0.224**	0.377**	
东台市	-0.402**	-0.153**	0.379**	0.102**	
海安县	-0.298**	-0.095**	0.403**	-0.070**	
如东县	-0.062**	-0.017**	0.164**	0.103**	
通州区	-0.203**	-0.022**	-0.406**	-0.123**	
海门市	-0.054**	-0.169**	-0.409**	-0.118**	
启东市	-0.063**	0.068**	-0.304**	0.172**	

注:\*\*在0.01水平(双侧)显著相关,\*在0.05水平(双侧)显著相关。

### 3 讨论

### 3.1 NPP 和 LST 计算的可靠性分析

本研究计算 NPP 使用的 CASA 模型以及计算 LST 采用的单窗算法与劈窗算法都具有成熟的方 法体系和广泛的实践应用<sup>[17-18, 42-43]</sup>, 决定本研究模 拟结果的关键因子是区域地表覆盖分类数据的精 度。本研究地表覆盖数据主要来自于自然资源部 公开的 2000-2020 年代数据, 根据江苏海岸带实 际情况确定为 8 种地表覆盖类型, 同时根据 2000 年代地表覆盖数据与遥感影像目视解译出 1990 年

代地表覆盖数据。经前人研究,该数据精度 >80%<sup>[44-45]</sup>,满足研究需要。在 NPP 计算过程中, 相关参数取值的确定是讨论的关键。最适温度的 取值根据池源等[17]的研究,以8月平均温度作为 最适温度。最大光能率 $\xi_{max}$ 的取值参考相关研究, 朱文泉等<sup>[46]</sup> 模拟出中国不同植被的 *E*max 为 0.389~ 0.985 g C·MJ<sup>-1</sup>, 耕地为 0.573 g C·MJ<sup>-1</sup>, 非植被区 域理论上为0。因此,根据前人研究以及江苏海岸 带实际情况,草地与耕地<sup>[12]</sup> ξ<sub>max</sub>为 0.573 g C·MJ<sup>-1</sup>。 江苏海岸带湿地植被多以芦苇为主,因此湿地[17] 选取 1.257 g C·MJ<sup>-1</sup>, 林地<sup>[12]</sup> 则选取 0.783 g C·MJ<sup>-1</sup>。 本文遥感影像分辨率为 30 m, 在解译过程及混合像 元中存在一定的误差,因此人工建筑、裸地、水域及 养殖池塘选取最小值 0.389 g C·MJ<sup>-1</sup> 作为 $\xi_{max}$ 。上 述参数已在多地的实证研究中被应用,并取得了较 好的模拟效果<sup>[17,47]</sup>。其余数值的选取均参考池源 等<sup>[17]</sup>、朱文泉等<sup>[48]</sup>的相关研究。LST 计算参数设 定已有许多学者对估算模型进行了研究,本文计算 方法主要参考 QIN等<sup>[49]</sup> 提出的劈窗算法,其适用 范围较大,满足本文的研究目标。有关地表辐射率 的计算中,在对遥感影像进行像元划分时,由于植 被地类与非植被地类可能存在互相夹杂,因此混合 像元植被覆盖度选取植被类型的上 10% 百分位数 和非植被类型的下10%百分位数进行计算,再进一 步计算地表辐射率, 而对于 Landsat5 地表辐射率的 计算则参考 CHI等<sup>[43]</sup> 的研究。

本文研究重点为反映大空间尺度和长时间序 列的江苏海岸带时空变化规律,更加关注研究区内 部的时空异质性,所选参数也能够反映研究区内部 的时空特征。因本文所采取的经验系数难免具有 一定的主观性,在下一步的工作中应结合现场实测 数据对其进行验证完善。

### 3.2 NPP 和 LST 的影响因素分析

### 3.2.1 地表覆盖类型

地表覆盖类型是影响 NPP 时空格局<sup>[11]</sup> 与 LST 的主要因素<sup>[50]</sup>。结合地表覆盖的变化,在 1990— 2000 年和 2000—2010 年区间,水域的增加带来了 NPP 与 LST 的降低,造成了二者变化的正相关;在 2010—2020 年,林地面积迅速增加,其 NPP 为各类 地表覆盖类型的最高值,但 LST 相对不高,因而造 成了二者变化较弱的负相关(表 4)。在 1990 年代 NPP 与 LST 呈现负相关,耕地、人工建筑对 NPP 与 LST 的影响占主导地位。2000年代, 耕地对 NPP 与 LST 的影响占主导地位。2010年代, 耕地与人 工建筑以及养殖池塘的作用导致 NPP 与 LST 呈正 相关, 但相关性较弱(表 6)。2020年代, 草地、湿地、 水域以及养殖池塘为 NPP 和 LST 变化的原因。当 耕地的 NPP 值升高, LST 下降时, 此时植被光合作 用较强即生态状况良好。因此, 近 30 年江苏海岸 带生态系统状况 1990年代最好, 2010年代次之, 2020年代最差<sup>[51]</sup>。

通过地理探测器进行敏感性分析<sup>[52]</sup>,用q值 进行度量,0≤q≤1,q值越大代表自变量对 NPP 与 LST 的解释力越强。因此, 地表覆盖类型是影响 NPP 值变化的根本原因(表 7)。1990-2000年,人 类活动剧烈,沿海滩涂、养殖池塘、水域面积扩大以 及草地、林地面积的减小导致 NPP 呈小幅度下降 趋势。2000-2010年,江苏海岸带在发展经济建设 的同时意识到生态保护的重要性,在此期间,江苏 沿海开发正式上升为国家战略,江苏省建立多个自 然保护区,生态状况逐渐变好。其 NPP 值显著增高 是人工建筑、林地面积的增加,以及耕地农作物长 势两者共同的作用。2010—2020年,江海联动、陆 海统筹等理念的贯彻实施致使江苏经济发展更为 迅速,人工建筑面积的显著增加与耕地面积的减少 导致 NPP 值呈下降趋势。这与池源等<sup>[17]</sup> 对黄河三 角洲 NPP 变化原因的研究结论一致。

海拔、气温和降水量等是影响 LST 时空变化 的根本因子<sup>[53-54]</sup>。由于江苏海岸带海拔基本无变 化,因此排除海拔对 LST 的影响。由相关性分析与 敏感性分析可知(表 8、9), 1990-2000年, 人工面 积的增大影响了生态面积,同时破坏了植被的生长, 影响地表与空气和热量间的交换<sup>[53]</sup>,因此江苏海岸 带北部 LST 值明显降低, 而南部由于气温的升高导 致 LST 值升高。从整个江苏海岸带来看, LST 均值 基本无变化,原因在于各个地表覆盖类型带来的地 表温度的增高与减小以及气温与降水的影响可相 互抵消。2000-2010年,地表温度有微小幅度的下 降,原因在于耕地、养殖池塘面积的减小,以及降水 量的减少[55]。2010-2020年,人工建筑和林地面 积的扩大导致 LST 值增高, 这与刘宇等<sup>[26]</sup> 的研究 结果大体一致(图 10)。南北经济发展不平衡的现 象导致江苏海岸带南北地表覆盖类型存在差异,进 而影响 NPP 与 LST 南北的分布差异,因此人类活 动对江苏海岸带南北生态环境造成的影响也存在 差异。

#### 表 6 近 30 年不同地表覆盖类型植被净初级生产力与 地表温度的相关性

 Table 6
 Correlation between net primary productivity and land surface temperature of different land cover types

in the past 50 years					
项目	1990s	2000s	2010s	2020s	
草地	0.041	0.360**	0.421**	0.248**	
耕地	-0.112**	0.108**	-0.030**	0.156**	
林地	-0.277**	-0.387**	-0.103**	-0.546**	
人工建筑	-0.117**	-0.503**	-0.462**	0.013	
湿地	-0.237**	0.100**	0.417**	0.344**	
水域	0.592**	0.532**	0.438**	0.716**	
养殖池塘	0.179**	0.328**	0.272**	0.459**	
裸地	—	—	—	-0.609**	

注:\*\*在0.01水平(双侧)显著相关,\*在0.05水平(双侧)显著相关。

表 7 近 30 年植被净初级生产力与地表温度敏感性分析 Table 7 Sensitivity analysis of net primary productivity and land surface temperature in the past 30 years

fund surface temperature in the past 50 years						
项目	地表覆盖	降雨量	气温	日照时数		
1990NPP	0.52	0.12	0.09	0.10		
2000NPP	0.28	0.49	0.11	0.23		
2010NPP	0.32	0.21	0.10	0.22		
2020NPP	0.52	0.05	0.06	0.06		
1990LST	0.04	0.27	0.08	0.14		
2000LST	0.15	0.48	0.39	0.45		
2010LST	0.06	0.06	0.08	0.08		
2020LST	0.13	0.29	0.29	0.22		

表 8 近 30 年植被净初级生产力与地表温度 变化相关性分析

Table 8	Correlation	between	net primary	productivity	/ and
land s	surface tempe	erature ch	anges in the	past 30 year	S

	-		-	
项目	地表覆盖	降雨量	气温	日照时数
2000-1990NPP	0.342	0.750**	-0.480	0.074
2010-2000NPP	-0.145	0.662**	-0.664**	0.219
2020-2010NPP	-0.323	0.160	0.094	-0.253
2000-1990LST	-0.527	0.847**	-0.613*	0.272
2010-2000LST	-0.543	0.939**	0.940**	0.941**
2020-2010LST	0.650	0.179	-0.497	0.172

注:\*\*在0.01水平(双侧)显著相关,\*在0.05水平(双侧)显著相关。

#### 3.2.2 气候变化

前人研究表明, NPP 和 LST 与气候变化等因素 高度相关<sup>[11,17,55]</sup>。1990-2020年, 江苏海岸带的 NPP 和 LST 出现了明显的年代际差异, 通过对各个 年代 NPP 与 LST 的变化值进行相关性分析与敏感 性分析(表 8、9), 可知降雨与气温变化是引起 NPP 和 LST<sup>[11,16]</sup>年代际变化的主要因素。而日照时数 通过影响植被的光合作用直接影响其 NPP 值, 对

### 表 9 近 30 年植被净初级生产力与地表温度 变化敏感性分析

Table 9Sensitivity analysis of net primary productivity and<br/>land surface temperature changes in the past 30 years

项目	地表覆盖	降雨量	气温	日照时数
2000-1990NPP	0.01	0.36	0.14	0.02
2010-2000NPP	0.11	0.34	0.36	0.12
2020-2010NPP	0.08	0.15	0.08	0.23
2000-1990LST	0.07	0.53	0.38	0.02
2010-2000LST	0.06	0.38	0.34	0.13
2020-2010LST	0.09	0.04	0.13	0.10

LST 值的影响则较小<sup>[53]</sup>。近 30 年江苏海岸带各县 级城市气象因子的变化如图 11 所示,从县级单元 角度来看,北部县级城市日照时数明显高于南部;日照时数越高,其 NPP 值越高,植被长势越好其覆 盖度越高,LST 值则越低。江苏海岸带降雨量南北 差异不大,仅 2000 年代南部明显高于北部。降水 的变化导致 2000 年代南部 NPP 值<sup>[23]</sup>高于北部,2010 年代 LST 小于 2000 年代。1990-2020 年,气 温呈上升趋势,各个县级城市气温变化趋势基本一致,其中射阳县、大丰区以及启东市气温低于其他 县级城市,气温的降低导致 NPP 值与 LST 值均有



所下降,但气温的过度升高也会抑制植被的生长<sup>[23]</sup>,因此 2010-2020 年 NPP 呈现下降趋势,LST 则呈 现上升趋势。

### 3.2.3 植被生长状况

NDVI 是反应植被覆盖状况的重要指标<sup>[9]</sup>,与 地表覆盖类型、土壤性质等息息相关。当 NDVI 值 越高,代表此区域植被覆盖度越高,但在林地与耕 地中 NDVI 存在饱和现象,即 NDVI 达到一定值后, 植被覆盖度不随着 NDVI 的增大而增大。2000-2010年 NDVI 增长幅度较大,同时耕地的 NDVI 值 明显上升,即2010年代植被覆盖度较高,耕地农作 物生长状况良好。因此农作物生长茂盛是 2010 年 代 NPP 值显著增高的主要原因<sup>[11]</sup>。2010-2020 年 植被覆盖度明显降低, 2020年代 NPP 值大幅度下 降,LST 值明显升高。从县级单元角度来看,赣榆 县、连云区多山地, NDVI 值较小; 响水县、射阳县、 大丰区的养殖池塘和湿地面积较大,其 NDVI 值相 对较低,其余县级城市 NDVI 值分布差异较小。因 此,植被长势在赣榆县、连云区、响水县、射阳县以 及大丰区对 NPP 以及 LST 影响较为明显(图 12)。 江苏海岸带耕地与林地具有较高的 NDVI 值, 水域 与养殖池塘的 NDVI 值较低, 因此不同地表覆盖类 型植被覆盖度的不同会进一步影响 NPP 与 LST 的 变化。(图 13)。



Fig.12 Average NDVI (normalized difference vegetation index) of county-level cities in Jiangsu coastal zone in the past 30 years

### 4 结论

(1)近 30 年江苏海岸带在人类活动的影响下, 经济建设加快,沿海滩涂以及养殖池塘面积扩大, 海岸线逐步向海推进。其中,南部由于围垦养殖活



图 13 近 30 年不同地表覆盖类型归一化植被指数均值变化 Fig.13 Changes in the mean value of NDVI (normalized difference vegetation index) of different land cover types in the past 30 years

### 动频繁,向海推进范围明显大于北部。

(2)江苏海岸带 NPP 与 LST 具有显著的时空 异质性特征。近 30 年来 NPP 均值先略微下降后显 著增高再下降, NPP 南北差异逐渐增大后减小,除 2010 年代北部 NPP 均值高于南部外,其余年代北 部 NPP 均值均低于南部。LST 均值先有微小幅度 下降后再增高, LST 均值南北差异先缩小后增大, 除 2000 年代北部均值低于南部外,其余年代北部 均值均高于南部。

(3)江苏海岸带地形平坦, 生态指数变化受自 然因子影响较小, 主要受人类活动影响。地表覆盖 类型是引起江苏海岸带 NPP 与 LST 年际与区域变 化的主要因素。养殖池塘、水域面积的扩大以及降 雨量的增多是 NPP 与 LST 均值 1990-2000 年略 微下降的主要因素, 植被覆盖度的增加和养殖池塘 面积的减小是 2000-2010 年 NPP 均值明显升高以 及 LST 均值下降的主要因素; 气温升高及人工建筑 面积的显著增加是 2010-2020 年 NPP 下降与 LST 升高的主要因素。

#### 参考文献:

- [1] 沙宏杰,张东,施顺杰,等.基于耦合模型和遥感技术的江苏中 部海岸带生态系统健康评价[J].生态学报,2018,38(19):7102-7112.
- [2] 崔昊天,贺桂珍,吕永龙,等.海岸带城市生态承载力综合评价: 以连云港市为例[J].生态学报,2020,40(8):2567-2576.
- [3] 张旭,张继伟,陈凤桂,等.基于GIS的海口海岸带空间功能分区 研究[J].海洋开发与管理,2020,38(5):35-41.
- [4] 戴亚南,彭检贵. 江苏海岸带生态环境脆弱性及其评价体系构 建[J]. 海洋学研究, 2009, 27(1): 78-82.
- [5] 毋亭,侯西勇.海岸线变化研究综述[J].生态学报,2016,36(4):

1170-1182.

- [6] 刘玉斌,李宝泉,王玉珏,等.基于生态系统服务价值的莱州湾-黄河三角洲海岸带区域生态连通性评价[J].生态学报,2019, 39(20):7514-7524.
- [7] HALPERN B S, WALBRIDGE S, SELKOE K A, et al. A global map of human impact on marine ecosystems[J]. Science, 2008, 319(5865): 948-952.
- [8] 孙晓萌, 吕晨璨, 张雪琦, 等. 粤港澳大湾区海岸带生态修复工 程中的景感生态学应用分析[J]. 生态学报, 2020, 40(22): 8044-8052.
- [9] 闫少锋,陆茜,张金池,等.江苏沿海地区NDVI的演变特征及其 对区域气候变化的响应[J].南京林业大学学报(自然科学版), 2012,36(1):43-47.
- [10] 殷国梅,冀超,刘思博,等.毛乌素沙化草地植被群落特征及物种多样性对不同生态修复措施的响应[J].畜牧与饲料科学, 2022,43(1):68-75.
- [11] 朱永华,席小康,马鹏飞,等.植被净初级生产力时空变化及 其影响因素分析[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2021,43(1):21-26.
- [12] 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.
- [13] 张静静,郝海超,郝兴明,等.塔里木河下游生态输水对天然 植被NPP的影响[J].干旱区地理,2020,44(3):708-717.
- [14] 刘宇, 匡耀求, 吴志峰, 等. 不同土地利用类型对城市地表温度的影响: 以广东东莞为例[J]. 地理科学, 2006, 26(5): 5597-5602.
- [15] 吴虹蓉, 施冬. 基于Landsat卫星的植被覆盖度和地表温度关系研究[J]. 科技经济导刊, 2021, 29(12): 120-121.
- [16] 安彬,肖薇薇,张淑兰,等.1960-2017年黄土高原地表温度时 空变化特征[J].干旱区地理,2021,44(3):778-785.
- [17] 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.
- [18] FIELD C B, BEHRENFELD M J, RANDERSON J T, et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components [J]. Science, 1998, 281(5374): 237-240.
- [19] 谷雷,岳彩荣,张国飞,等.基于Google Earth Engine平台的大 湄公河次区域2001-2019年植被NPP时空变化分析[J].西部 林业科学, 2021, 50(2): 132-139.
- [20] 陈峰,李红波,刘亚静. 基于GIS和CASA的滇南山区植被NPP 时空分异及其影响因素: 以云南省元阳县为例[J]. 生态学杂 志, 2018, 37(7): 2148-2158.
- [21] LIU Y Y, YANG Y, WANG Q, et al. Assessing the dynamics of grassland net primary productivity in response to climate change at the global scale[J]. Chinese Geographical Science, 2019, 29(5): 725-740.
- [22] 任晋媛, 佟斯琴, 包玉海, 等. 内蒙古地区极端气候变化及其 对植被净初级生产力的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2410-2420.
- [23] 王金杰,赵安周,张兆江,等.2000-2018年京津冀地区植被净 初级生产力时空演变及其驱动因素[J].生态科学,2021,

40(1): 103-111.

- [24] ZHAO F B, WU Y P, SIVAKUMAR B, et al. Climatic and hydrologic controls on net primary production in a semiarid loess watershed [J]. Journal of Hydrology, 2018, 568: 803-815.
- [25] 刘婧,汤峰,张贵军,等. 2000-2015年滦河流域植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因子分析[J].中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(4): 659-671.
- [26] DASH P, GOTTSCHE F M, OLESEN F S, et al. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice-current trends[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(13): 2563-2594.
- [27] LI Z L, BECKER F. Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 43(1): 67-85.
- [28] 王丽平,段四波,张霄羽,等.2003-2018年中国地表温度年最 大值的时空分布及变化特征[J].干旱区地理,2021,44(5): 1299-1308.
- [29] 沈中健,曾坚. 1996-2017年闽三角城市群区域热岛时空格局 演化分析[J].安全与环境学报, 2020, 20(4): 1567-1578.
- [30] 孙凤云,邓灵稚,刘垚燚,等.基于增强回归树与区域增温敏 感性指数的城市升温效应空间分异研究[J].生态学报,2021, 41(15):5929-5939.
- [31] 陆晓君,刘珍环.城市"源-汇"热景观变化及其空间作用强度 特征:以深圳西部地区为例[J].生态学报,2021,41(16):6329-6338.
- [32] 宁立新,周云凯,张启斌,等.近19年江苏海岸带地区土地利 用变化特征[J].水土保持研究,2017,24(4):227-233.
- [33] 胡雪松, 贾济红, 吴凌颖. 1985-2015年江苏省海岸线变迁研 究[J]. 测绘技术装备, 2019, 21(1): 22-25.
- [34] 孙伟红,黄燕,黄博. 江苏省海岸线时空变化特征研究[J]. 现 代测绘, 2018, 41(4): 32-35.
- [35] 许凤娇, 吕晓. 基于土地利用变化的江苏沿海地区生态风险 格局[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7312-7325.
- [36] 邵琦, 王思懿, 杨春熙, 等. Landsat 5 TM、Landsat 7 ETM+及 Landsat 8 OLI交叉定标研究[J]. 产业与科技论坛, 2017, 16(17): 54-57.
- [37] 马小峰, 邹亚荣, 刘善伟. 基于分形维数理论的海岸线遥感分 类与变迁研究[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(1): 30-33.
- [38] 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.
- [39] 覃志豪, LI W J, ZHANG M H, 等. 单窗算法的大气参数估计 方法[J]. 国土资源遥感, 2003(2): 37-43.
- [40] 覃志豪, ZHANG M H, ARNON K, 等. 用陆地卫星TM6数据 演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001, 56(4): 456-

466.

- [41] 覃志豪,李文娟,徐斌,等.陆地卫星TM6波段范围内地表比 辐射率的估计[J].国土资源遥感,2004(3):28-32,36-41,74.
- [42] 池源,石洪华,王晓丽,等.庙岛群岛南五岛地表温度时空特 征及影响因子[J].生态学杂志,2015,34(8):2309-2319.
- [43] CHI Y, SUN J K, SUN Y G, et al. Multi-temporal characterization of land surface temperature and its relationships with normalized difference vegetation index and soil moisture content in the Yellow River Delta, China[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 23: e01092.
- [44] RUJOIU-MARE M R, MIHAI B A. Mapping land cover using remote sensing data and GIS techniques: a case study of Prahova Subcarpathians[J]. Procedia Environmental Sciences, 2016, 32: 244-255.
- [45] CHEN J, CHEN L J, CHEN F, et al. Collaborative validation of GlobeLand30: methodology and practices[J]. Geo-spatial Information Science, 2021, 24(1): 134-144.
- [46] 朱文泉,潘耀忠,何浩,等.中国典型植被最大光利用率模拟[J].科学通报,2006,51(6):700-706.
- [47] CHI Y, SHI H H, WANG X L, 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.
- [48] 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.
- [49] QIN Z H, DALL'OLMO G, KARNIELI A, et al. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA - advanced very high resolution radiometer data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D19): 22655-22670.
- [50] 王敬文,赵微,叶江霞,等.应用Landsat-8数据分析山地地表 温度格局及影响要素[J].东北林业大学学报,2021,49(5):97-104.
- [51] 元冰瑜,高建华,池源,等.1990-2020年江苏省海岸带景观生态状况指数跨尺度时空特征[J].应用生态学报,2022,33(2):
   489-499.
- [52] 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.
- [53] 都彦廷,张冬有.大兴安岭地区2001-2019年地表温度时空分 布及影响因素分析[J].森林工程,2020,36(6):9-18.
- [54] CHI Y, ZHANG Z W, GAO J H, et al. Evaluating landscape ecological sensitivity of an estuarine island based on landscape pattern across temporal and spatial scales [J]. Ecological Indicators, 2019, 101: 221-237.
- [55] 任景全,刘玉汐,王丽伟,等.吉林省地表温度时空变化及影响因素研究[J].中国农学通报,2020,36(5):103-109.

## Temporal and spatial changes in net primary productivity and land surface temperature and their influencing factors in Jiangsu coastal zone in recent 30 years

ZHA Bian<sup>1</sup>, CHI Yuan<sup>2\*</sup>, GONG Zhaohui<sup>1</sup>, YUAN Bingyu<sup>1</sup>, GAO Jianhua<sup>1,3</sup>

(1 Key Laboratory for Coast and Island Development of Ministry of Education, School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2 First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 3 Key Laboratory of Coast Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources, Nanning 210024, China)

Abstract: In the past 30 years, complex climate change and increasingly frequent human activities have caused dramatic ecological evolution and significant spatial heterogeneity in the coastal zone of Jiangsu Province. The Net primary productivity (NPP) and land surface temperature (LST) are two key parameters of ecosystem. By combining the Landsat remote sensing images of the area from 1990 to 2020 with the CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) computational model and correlation analysis, the spatial and temporal changes of NPP and LST in Jiangsu coastal zone and the influencing factors were analyzed. Results show that, ① due to the utilization of coastal beach resources and the development of aquaculture, the coastlines of Jiangsu have been gradually moving toward the sea, and the extent of moving to the sea in the southern part is greater than that in the northern part. (2) The NPP and LST of Jiangsu coastal zone in the past 30 years show significant spatial and temporal heterogeneity. Temporally, the monthly mean values of NPP in 1990s, 2000s, 2010s, and 2020s are 102.88, 88.23, 156.62, and 98.90 g  $C \cdot m^{-2}$ , respectively, showing a decreasing-increasing-decreasing trend, while the mean values of LST are 32.6, 31.7, 28.3, and 37.6 °C, showing a decreasing and then increasing trend. Spatially, the distributions of NPP and LST in the northern and southern parts of Jiangsu coastal zone showed certain differences. ③ NPP was the highest in forest land and the lowest in farming ponds; and LST values were the highest in artificial buildings and relatively low in wetlands, waters, and farming ponds. In addition, NPP and LST tended to increase gradually with increasing temperature and the increase of vegetation coverage led to the increase of NPP and decrease of LST.

**Key words:** Jiangsu coastal zone; net primary production (NPP); land surface temperature (LST); climate change; land cover; human activity