

DOI: 10.20103/j.stxb.202212153598

周姝含, 曹永强, 么嘉棋, 王菲, 常志冬. 东北三省碳源/汇和碳盈亏时空分布与影响因素. 生态学报, 2023, 43(22): 9266-9280.

Zhou S H, Cao Y Q, Yao J Q, Wang F, Chang Z D. Spatio-temporal distribution and influencing factors of carbon source/sink, carbon surplus and deficit in three northeast provinces. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9266-9280.

## 东北三省碳源/汇和碳盈亏时空分布与影响因素

周姝含<sup>1</sup>, 曹永强<sup>2,\*</sup>, 么嘉棋<sup>2</sup>, 王 菲<sup>1</sup>, 常志冬<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029

<sup>2</sup> 天津师范大学京津冀生态文明发展研究院, 天津 300387

**摘要:** 碳循环是影响气候变化的关键环节。利用改进的 CASA 模型对东北三省 2000—2020 年间自然碳源/汇进行了估算; 通过增加真实碳排放量对估算过程的约束, 改进了夜间灯光数据和碳排放拟合方法, 探究了区域碳源碳汇和碳盈亏的时空分布和影响因素。结果显示: (1) 净生态系统生产力在时间上呈现波动上升趋势, 空间上黑龙江省自然碳汇总量最高 (164.61 Tg C/a), 约占东北三省的 60%; (2) 能源消费碳排放总量呈现先上升, 再下降, 近年趋于稳定的时间变化趋势, 空间上以辽宁省年均碳排放量增速最快, 增速约为 6.95 Tg C/a; (3) 2005 年为东北三省整体从碳盈余转变为碳亏损的转折点, 近年来亏损速率有所下降; (4) 东北三省碳盈亏与自然因素呈正相关, 与人口规模、地区生产总值、碳排放强度、产业结构呈现负相关关系。辽宁省能源消费总量的攀升使能源结构的下降未能扭转其碳亏损的局面, 并使其碳盈亏与能源结构呈现正相关关系; 黑龙江省和吉林省农业人口流失较快一定程度上导致了城市化水平与碳盈亏呈现正相关关系。(5) 东北三省均应降低碳排放强度, 黑龙江省和吉林省应调整能源结构, 辽宁省应调整产业结构。研究结果可为东北三省“双碳目标”的实现提供理论依据。

**关键词:** 净生态系统生产力; 能源消费; 夜间灯光数据; 碳盈亏; 东北地区

## Spatio-temporal distribution and influencing factors of carbon source/sink, carbon surplus and deficit in three northeast provinces

ZHOU Shuhan<sup>1</sup>, CAO Yongqiang<sup>2,\*</sup>, YAO Jiaqi<sup>2</sup>, WANG Fei<sup>1</sup>, CHANG Zhidong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

<sup>2</sup> Academy of Eco-civilization Development for Jing-Jin-Ji Megalopolis, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

**Abstract:** Carbon cycle is a key link affecting climate change. In this paper, the improved CASA model is used to estimate the natural carbon sources and sinks in Northeast China during 2000—2020. By adding the constraints of real carbon emissions in the estimation process, we improved the estimated methods of the energy consumption carbon emission. The spatial and temporal distribution and influencing factors of regional carbon sources, carbon sinks, and carbon sequestration were investigated. The results show that: (1) in terms of time, the net ecosystem productivity fluctuated and increased. In terms of space, Heilongjiang Province had the highest total natural carbon sink (164.61 Tg C/a), accounting for 60% of the Northeast China. (2) The total carbon emissions from energy consumption rose firstly, then declined, and tended to be stable in recent years. Liaoning Province had the fastest annual growth rate of carbon emissions, which was about 6.95 Tg C/a. (3) 2005 was the turning point for the three Northeast provinces from carbon surplus to carbon deficit, and the rate of carbon deficit decreased in recent years. (4) The carbon surplus and deficit of Northeast China showed positively correlated with natural factors, which presented negative correlation with the total population, gross regional product, carbon emission intensity, and industrial structure. The increase of total energy consumption in Liaoning Province made the decline of energy structure fail to reverse the situation of carbon deficit, and made the carbon deficit and energy structure to present a positive

**基金项目:** 辽宁省重点研发计划 (2020JH2/10200043); 辽宁省兴辽英才项目资助 (XLYC2008033, XLYC2007111); 国家自然科学基金 (52079060)

**收稿日期:** 2022-12-15; **采用日期:** 2023-03-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

correlation. The rapid loss of agricultural population in Heilongjiang Province and Jilin Province resulted in a positive correlation between urbanization level and carbon deficit. (5) The Northeast China should all reduce carbon emission intensity, Heilongjiang and Jilin should adjust their energy structure, while Liaoning should adjust its industrial structure. The rapid loss of agricultural population in Heilongjiang Province and Jilin Province resulted in a positive correlation between urbanization level and carbon surplus and deficit. The research results can provide a theoretical basis for the realization of the carbon peaking and carbon neutrality goals in the three northeastern provinces.

**Key Words:** net ecosystem productivity; energy consumption; nightlight data; carbon surplus and deficit; Northeast China

气候变暖是自然生态演化与人类社会发展的博弈结果,碳流通在该过程中扮演着重要角色。植被作为生物圈中的要素,通过植被的光合作用、呼吸作用和蒸腾作用等生态过程,促进了陆地生态系统中以碳为主体的物质-能量流通转化过程。而人类活动作为改造地球下垫面过程中最活跃的要素,在组织自身文化和社会发展中,通过改变土地利用方式和能源消费等手段调整了物质循环和能量交换的速率。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第四次和第六次报告均提及降低二氧化碳排放的迫切性<sup>[1-2]</sup>,对此,中国表示将积极参与全球碳减排行动;宣布“力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”。因此,在全球气候剧烈变化的背景下,更好地了解陆地生态系统的碳循环过程十分重要。

研究陆地生态系统碳源/汇、社会能源消费碳排放以及碳盈亏动态变化,是剖析人地关系-碳博弈过程的切入点。国外学者在研究中发现,土地利用方式的改变是影响区域碳源、碳汇的主要原因<sup>[3-4]</sup>。国内部分学者以自然碳源/汇为出发点,从自然植被演化的角度对研究区固碳能力进行研究<sup>[5-11]</sup>;另一部分学者以碳排放为出发点,探讨人类社会过程中对碳排放的加速作用,二者逐渐向人地关系博弈下的碳盈亏靠拢<sup>[12]</sup>。前者常以改进的 CASA 模型(Carnegie-Ames-Stanford Approach, CASA)计算区域植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP),该方法更强调外部环境对植被的影响,如气温、降水和太阳辐射;再通过气象数据模拟土壤微生物呼吸量,最终得到区域自然状态下碳源/汇分布状态。该类研究揭示了区域自然生态系统碳源汇分布特征和机理,但未能体现人类社会发展与自然界生态演化之间的动态关系。由于化石能源碳排放是社会主要碳源,约占全部碳源的 90% 以上<sup>[13]</sup>,所以后一类学者用能源碳排放衡量地区碳压力。近年来,研究学者发现夜间灯光数据与能源消费的碳排放<sup>[14]</sup>、城市扩张<sup>[15-16]</sup>、社会经济体量<sup>[17]</sup>具有较高的相关关系,通过该方法,国内已有一众学者提高了城市群<sup>[18]</sup>、自然流域<sup>[19]</sup>、地级市和县域<sup>[20]</sup>能源消费碳排放的研究精度。但在提升空间精度时,真实年碳排放量对估算过程约束的减弱一定程度上增加了误差。在此基础上,学者们逐渐意识到研究人为碳排放与生态系统碳汇之间的碳平衡对了解区域碳压力至关重要。并在国家<sup>[21]</sup>、地区<sup>[22]</sup>、省级<sup>[23]</sup>和城市<sup>[24]</sup>等多个层面进行了碳平衡的分析。但其中碳汇部分大多是从土地利用的角度出发,对于影响自然碳汇的自然气象要素涉及有限。

东北三省有我国重要的森林储备库——东北防护林,该地区的植被结构和长势状态对中国气候变化和自然碳源/汇具有显著影响。而新中国成立以来,东北三省长期扮演着社会发展压舱石的重要角色,在建设重工业基地、能源基地以及商品粮基地的过程中,使东北地区在面临“双碳”目标时有较大的压力。因此,本文将东北三省为研究对象,首先借助气象数据和遥感数据,利用改进的 CASA 光能利用率等模型,对区域净生态生产力进行模拟;然后通过增加真实碳排放量对估算过程的约束,改进了夜间灯光数据和碳排放拟合的方法,提升了地级市碳排放量估算精度;最后以碳盈亏作为区域人地关系角度下碳循环效率的衡量标准,对东北三省自然碳源/汇、碳排放估算和碳盈亏进行分析,并从社会因素和自然因素两方面探究了碳盈亏的影响因素,研究结果对帮助东北三省实现“双碳”目标具有重要意义。

## 1 数据与材料

### 1.1 研究区概况

东北三省位于我国东北部,包括黑龙江省、吉林省和辽宁省,共有地级市 36 个,总面积 80.95 万 km<sup>2</sup>。地

理位置为 118°53'E—135°06'E、38°43'N—53°34'N;主体位于温带北缘,南北跨度较大,包含有暖温带—中温带—寒温带等多个温度带;东部眺望太平洋,西部背靠亚欧大陆,是我国湿润—半湿润—半干旱地区的过渡地带。气候为大陆性季风气候,是温带季风气候向温带大陆性气候的过渡地区。东北地区的植被类型以落叶阔叶林和针叶林为主,森林面积居全国之首,是研究我国生态变化的重要样本(图 1)。

2020 年 GDP 总量 51 万亿元,占全国的 5.07%,区域内能源消费量达 5.8 亿吨标准煤,占全国能源消费总量的 11.65%;碳排放强度 1980kg/万元,高于全国平均碳排放强度 71.87%,是中国能源消费碳排放的重点地区<sup>[25—26]</sup>。

1.2 数据来源

本文所需气温、降水等逐日气象数据来自国家气象科学数据中心 (<https://data.cma.cn/>),选取 2000—2020 年研究区内 73 个气象站点,采用已广泛应用的克里金插值方法<sup>[27—28]</sup>对站点气象数据进行空间插值;辐射数据来源于 MERRA-2 (The second Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2) 中的 tavg1\_2d\_rad\_Nx 数据集;土地与植被分类数据采用欧洲航天局 (ESA) 所提供的 2000—2020 年全球范围的土地覆盖数据集 (climate change initiative-land cover, CCI-LC) (<https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer>),借鉴相关方法<sup>[29—30]</sup>对以上数据插值或重采样到 250m,使其与 NDVI 数据的空间分辨率匹配。夜间灯光数据来自国家地球物理数据中心 (National Geophysical Data Center, NGDC) 提供的 DMSP-OLS (2000—2013 年) 数据和 NPP-VIIRS (2013—2020 年) 数据,并进行降噪、饱和、连续性等一系列校正<sup>[31—32]</sup>。能源统计数据来自《中国能源统计年鉴》<sup>[26]</sup> (2001—2021 年);各省市人口、GDP、城市化率指标来源于 2001—2021 年《黑龙江统计年鉴》<sup>[33]</sup>、《吉林省统计年鉴》<sup>[34]</sup>和《辽宁统计年鉴》<sup>[35]</sup>。

为对研究区碳盈亏的影响因素进行分析,选取了 6 个社会指标和 2 个自然因素指标,对不同时期和不同地区的碳盈亏与影响因子相关关系进行讨论。社会指标主要分为人口指标、经济指标和技术指标,具体分类见表 1。

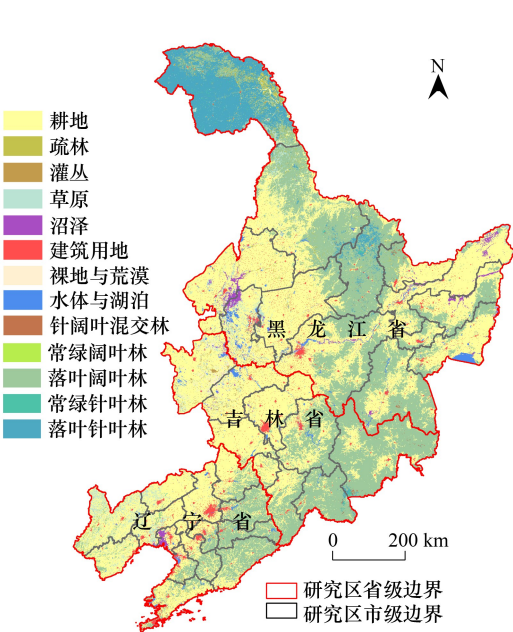


图 1 研究区概况图  
Fig.1 Schematic diagram of the study area

表 1 碳盈亏影响因素的选取  
Table 1 Influencing factors of carbon surplus and deficit

| 一级指标<br>First grade index | 二级指标<br>Second grade index | 指标<br>Index | 指标描述<br>Description of Indicators | 单位<br>Units |
|---------------------------|----------------------------|-------------|-----------------------------------|-------------|
| 社会因素<br>Social factor     | 人口要素                       | 人口规模        | 地区年末人口总量                          | 万人          |
|                           |                            | 城市化水平       | 城镇人口占年末总人口的百分比                    | %           |
|                           | 经济要素                       | 地区生产总值      | 地区年末创造的经济总量                       | 亿元          |
|                           |                            | 产业结构        | 第二产业产值占生产总值的百分比                   | %           |
|                           | 技术要素                       | 碳排放强度       | 创造单位 GDP 的碳排放量                    | t/万元        |
| 能源结构                      |                            |             | 煤炭在能源消费量中的占比                      | %           |
| 归一化植被指数                   |                            |             | 评价植被长势的指标                         | —           |
| 自然因素<br>Natural factor    | 植被生态                       | 植被覆盖度       | 植被在地面垂直投影面积                       | —           |

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 自然碳源/汇估算方法

本文以净生态系统生产力(Net Ecosystem Productivity, NEP)表示自然碳源/汇的分布。净生态系统生产力是指净初级生产力(NPP)中减去土壤中异养微生物呼吸量(Heterotrophic respiration,  $R_h$ )之后的部分<sup>[36]</sup>,即植被在生长过程中动态的固碳量。其公式为:

$$\text{NEP}(x, t) = \text{NPP}(x, t) - R_h \quad (1)$$

式中,  $\text{NEP}(x, t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月的净生态系统生产力( $\text{g C m}^{-2}$ ),  $\text{NPP}(x, t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月的植被净初级生产力( $\text{g C m}^{-2}$ ),  $R_h(x, t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月的土壤微生物呼吸量( $\text{g C m}^{-2}$ )。当  $\text{NEP} > 0$  时, 被固定的碳量多于异养呼吸消耗的碳量, 此时处于 NEP 盈余状态; 当  $\text{NEP} < 0$  时, 表示植被固定的碳量少于异养呼吸消耗的碳量, 此时处于 NEP 赤字状态, NEP 汇算见图 2。本文采用改进后的 CASA 光能利用率模型估算研究区内的净初级生产力。其主要参数是植被所能吸收的有效光合辐射 APAR (Absorbed Photosynthetically Active Radiation) 和实际光能利用率( $\varepsilon$ ), 具体计算公式为:

$$\text{NPP}(x, t) = \text{APAR}(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (2)$$

式中,  $\text{NPP}(x, t)$  为像元  $x$  内的植被在时间段  $t$  月内累计 NPP ( $\text{g C m}^{-2} \text{月}^{-1}$ ) 的值;  $\text{APAR}(x, t)$  为像元  $x$  内的植被在时间段  $t$  月内吸收的光合有效辐射 ( $\text{g C m}^{-2} \text{月}^{-1}$ ),  $\varepsilon(x, t)$  为像元  $x$  内的植被在时间段  $t$  月内的实际光能利用率 ( $\text{g C/MJ}$ )。对 APAR 和光能利用率的计算和取值可以参考相关文献<sup>[38-40]</sup>。

本文采用裴志永等<sup>[41]</sup>基于实测数据建立的土壤微生物呼吸量计算模型, 该模型基于温度和降水对土壤微生物呼吸的碳排放量进行估算, 已在东北地区<sup>[5]</sup>、西北地区<sup>[10]</sup>、黄河流域<sup>[36]</sup>等地区取得了较为理想的模拟效果。模型公式如下:

$$R_h(x, t) = 0.22 \times (\exp(0.0912T(x, t) + \ln(0.3145P(x, t) + 1) \times 30 \times 46.5\% \quad (3)$$

式中,  $R_h(x, t)$  示像元  $x$  在  $t$  月释放的土壤微生物呼吸释放碳 ( $\text{g C m}^{-2} \text{月}^{-1}$ ),  $T(x, t)$  为像元  $x$  在  $t$  月的平均气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $P(x, t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月的月降水量 ( $\text{mm}$ )。

#### 1.3.2 能源消费碳排放量(省级)核算方法

根据《IPCC 国家温室气体清单指南》提供的计算方法, 选取了 8 种主要能源, 利用《能源统计年鉴》中各省各类能源的消费量, 对各省碳排放量进行计算:

$$C = \sum_{i=1}^8 C_i = \sum_{i=1}^8 E_i \times r_i \quad (4)$$

式中,  $C$  为能源消费碳排放量;  $C_i$  为第  $i$  类能源的碳排放量;  $E_i$  为第  $i$  种能源的消费量, 按标准煤计算;  $r_i$  为第  $i$  种能源的碳排放系数, 各类能源汇算系数可以参考相关文献<sup>[18, 42]</sup>。

#### 1.3.3 能源消费碳排放量(市级)估算方法

为提高对地区碳盈亏的研究精度, 本文引入夜间灯光数据对地级市能源消费碳排放量进行辅助估算。本文在借鉴了前人<sup>[43-44]</sup>估算经验的基础上, 增加了地区真实碳排放量对估算过程的约束, 在提升研究精度的同时, 降低估算过程中产生的误差。该方法首先建立省级能源消费碳排放总量和省级夜间灯光总值之间的拟合关系:

$$\text{SDN}_j = \sum_{i=1}^i \text{SDN}_k \quad (5)$$

$$C_j = a \text{SDN}_j + b \quad (6)$$

式中,  $\text{SDN}$  为区域夜间灯光总值, 省级夜间灯光总值由市一级夜间灯光总值汇算得到, 即  $k$  为  $j$  省的地级市行政区。  $C_j$  为  $j$  省的年能源消费碳排放总量, 对夜间灯光数据与能源碳排放数据进拟合,  $a$  和  $b$  为拟合系数。

在确定能源消费碳排放量与区域夜间灯光数据之间存在相关关系后, 传统降尺度的估算方法会利用拟合公式, 将夜间灯光分布影像图转化为能源消费碳排放估算分布图, 估算思路如下:

$$C'_k = \sum_{x=1}^x C_x \quad (7)$$

$$C_x = aDN_x + b \quad (8)$$

$$C'_j = \sum_{k=1}^k C'_j \quad (9)$$

式中,  $C'_k$  为地级市  $k$  的能源消费碳排放估算值, 由  $C_x$  为像元  $x$  上的碳排放估算值通过分区统计得到; 而  $C_x$  由  $DN_x$  为像元  $x$  上的夜间灯光值通过拟合方程转化得到。此时对  $j$  省内所有地级市碳排放  $C_k$  求和, 得到的结果为估算的省级碳排放量  $C'_j$ , 而非真实的省级能源消费碳排放量  $C_j$ , 即市级碳排放估算值未能直接受到真实省级碳排放量的约束。

本文在确定了能源消费碳排放量与区域夜间灯光数据之间存在相关关系后, 计算各地级市灯光值在当年各省级灯光总值中的占比, 再将各省年真实碳排放量按各市灯光比例分给各市。

$$C_k = C_j \times \frac{SDN_k}{SDN_j} \quad (10)$$

式中,  $C_k$  为  $k$  市的碳排放量。该方法既借鉴传统估算思路, 将碳排放量与灯光总值建立联系, 同时又将真实碳排放值作为约束, 提升市一级碳排放量估算精度。

#### 1.3.4 自然碳源/汇与碳盈亏核算方法

本文以净生态系统生产力 (NEP) 为自然碳源/汇, 其内涵为区域内自然碳收入总量 (NPP) 与自然碳支出总量 ( $R_h$ ) 之差。当 NPP 与  $R_h$  相等时, 处于自然碳源/汇平衡状态, 如图 2 中“自然碳源/汇平衡点”。当 NPP 或  $R_h$  中一方超出另一方时, 将产生自然碳汇或自然碳源, 两者都出现在“自然碳源/汇临界线”之上的部分, 而该线以下表示 NPP 与  $R_h$  相互抵消的部分。当 NPP 高于  $R_h$  时  $NEP \geq 0$ , 即自然碳汇, 此时 NPP 扣除  $R_h$  后的部分为 NEP 盈余, 对应如图 2 中“自然碳源/汇平衡点”以左的部分; 当 NPP 低于  $R_h$  时  $NEP < 0$ , 即自然碳源, 此时  $R_h$  扣除 NPP 后的部分为 NEP 赤字, 对应图 2 中“自然碳源/汇平衡点”以右的部分。

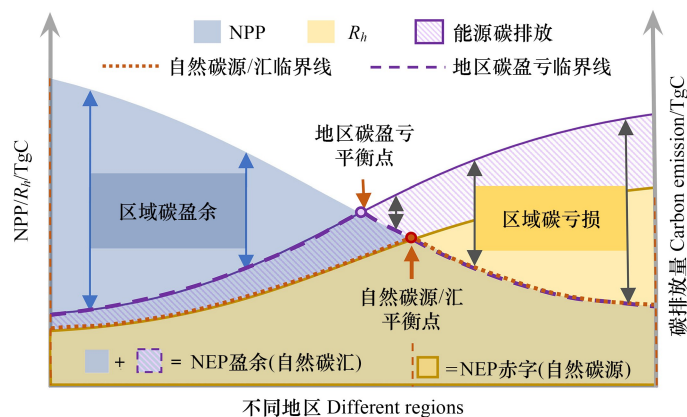


图 2 自然碳源/汇与地区碳盈亏状态示意图

Fig.2 Diagrammatic drawing of carbon source, carbon sink and carbon surplus and deficit

NPP: 植被净初级生产力 Net Primary Productivity;  $R_h$ : 土壤异养微生物呼吸量 Heterotrophic respiration; NEP: 净生态系统生产力 Net Ecosystem Productivity

地区碳盈亏量的本质是自然碳源/汇 (NEP) 与能源消费碳排放 ( $C_k$ ) 之差。地区碳盈余是指区域内自然碳汇总值高于能源消费碳排放量的状态, 地区碳亏损状态是指区域内自然碳汇总量不足以抵消能源碳排放总量 (图 2)。

$$NEP_k = NPP_k - R_{h_k} \quad (11)$$

$$I_k = NEP_k - C_k \quad (12)$$

式中,  $I_k$  表示地级市  $k$  的碳盈亏;  $NEP_k$  表示  $k$  市的净生态系统碳汇量, 由  $k$  市植被净初级生产力  $NPP_k$  和土壤微生物呼吸总量  $R_{hk}$  求差得到;  $C_k$  表示  $k$  市的能源消费碳排放量。由于  $C_k \geq 0$  恒成立, 所以地区碳盈亏状态共有以下四种情况, 如表 2:

表 2 地区碳盈亏组合结果

Table 2 Regional carbon profit and deficit combination results

|                      | NEP 状态<br>Condition of NEP | $C_k$ 状态<br>Condition of $C_k$ | NEP 与 $C_k$ 的关系<br>Relationship between<br>NEP and $C_k$ | $I_k$ 结果<br>Result of $I_k$ |
|----------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 碳盈亏平衡 Balance point  | $NEP \geq 0$               | $C_k \geq 0$                   | $ NEP  = C_k$                                            | $I_k = 0$                   |
| 地区碳盈余 Carbon surplus | $NEP > 0$                  |                                | $ NEP  > C_k$                                            | $I_k > 0$                   |
| 地区碳亏损 Carbon deficit | $NEP < 0$                  |                                | $ NEP  < C_k$                                            | $I_k < 0$                   |

NEP: 净生态系统生产力 Net ecosystem productivity;  $C_k$ :  $k$  市碳排放量 Carbon emission of  $k$  city;  $I_k$ :  $k$  市碳盈亏结果 Carbon surplus and deficit of  $k$  city.

### 1.3.5 Pearson 相关分析

为明确碳盈亏和自然因素与社会因素之间的影响关系, 利用 Pearson 相关系数对东北三省各省碳盈亏和选取的 8 种影响因素进行统计分析<sup>[35]</sup>。计算相关系数并进项显著性检验, 公式如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (13)$$

式中,  $r$  代表碳盈亏与对应地区的自然因素或社会因素的相关系数,  $N=21$  代表共有 21 年数据,  $i$  表示第  $i$  年,  $X_i$  表示地区第  $i$  年碳盈亏值,  $Y$  表示地区第  $i$  年的自然因素或社会因素值,  $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$  分别表示碳盈亏和各因素的均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 东北三省 NPP 与 $R_h$ 时空分布特征分析

#### 2.1.1 NPP 估算精度验证

为验证 CASA 模型精度, 本文选取 MOD17A3 估算的净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 与本文估算结果进行对比。对研究区进行随机取点 1500 个对 2020 年和 2000—2020 年 NPP 年均值为样本, 以随机点为标准分别提取对应年份的 CASA 模型和 MODIS 产品的 NPP 值, 结果发现通过 CASA 模型估算的 NPP 值与 MOD17A3 NPP 产品拟合优度<sup>[36—37]</sup> 分别为 0.71 和 0.74, 模拟效果较好 (图 3)。因此, 认为经改进后 CASA 模型在该研究区具有良好的适用性。

#### 2.1.2 NPP 与 $R_h$ 时空分布

对东北三省年均 NPP 和年均  $R_h$  时空分布进行探究, 并对各省 NPP 和  $R_h$  年均值进行统计, 如图 4。东北三省年均 NPP 为  $518.21 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 年均 NPP 总量为  $419.32 \text{ TgC}$ 。东北三省 NPP 空间分布整体呈现东部高一西部低, 山地高一平原低的同心环状空间分布特征, 年均 NPP 值最高的省份为吉林省。在小兴安岭和长白山脉等森林广布的地区, 集中分布着成片的 NPP 高值区, 另有辽西北丘陵地区存在局部高值地区; 在黑龙江西南部和吉林西北部地区为东北三省 NPP 低值区, 该地区在地形单元上处于松嫩平原, 森林乔木等固碳能力较强的植被分布少, 碳汇能力较低。东北三省年均  $R_h$  空间分布呈现南高北低的特征, 辽宁省为年均  $R_h$  值最高的省份, 高值区主要集中在以沈阳为核心东北三省南部地区, 而地理位置靠北的黑龙江省  $R_h$  值较低。由于土壤微生物呼吸量主要由气温和降水两个因素影响, 黑龙江省年均温较低的气候条件一定程度上抑制了土壤微生物分解有机质的活力, 而地处南部的辽宁省降水充沛, 气温高, 土壤微生物分解有机质的效率更高。

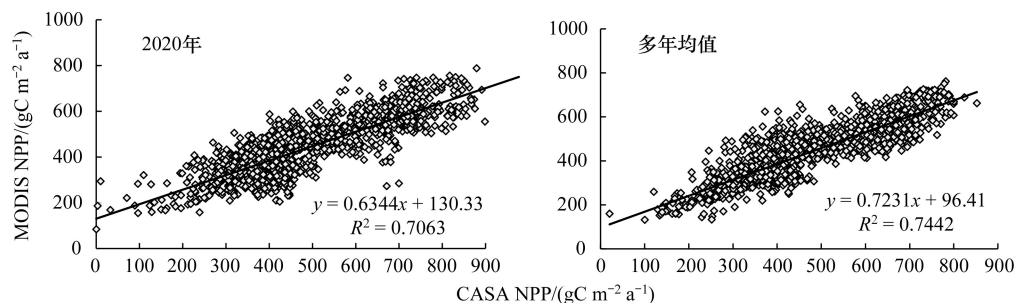


图3 本文估算的 NPP 与 MODIS 数据对比检验结果

Fig.3 Mean NPP in the study area respectively using two methods from 2000 to 2020

MODIS NPP: 来源于 MOD17A3 估算的 NPP 数据; CASA NPP: 本文运用 CASA 模型估算的 NPP 数据

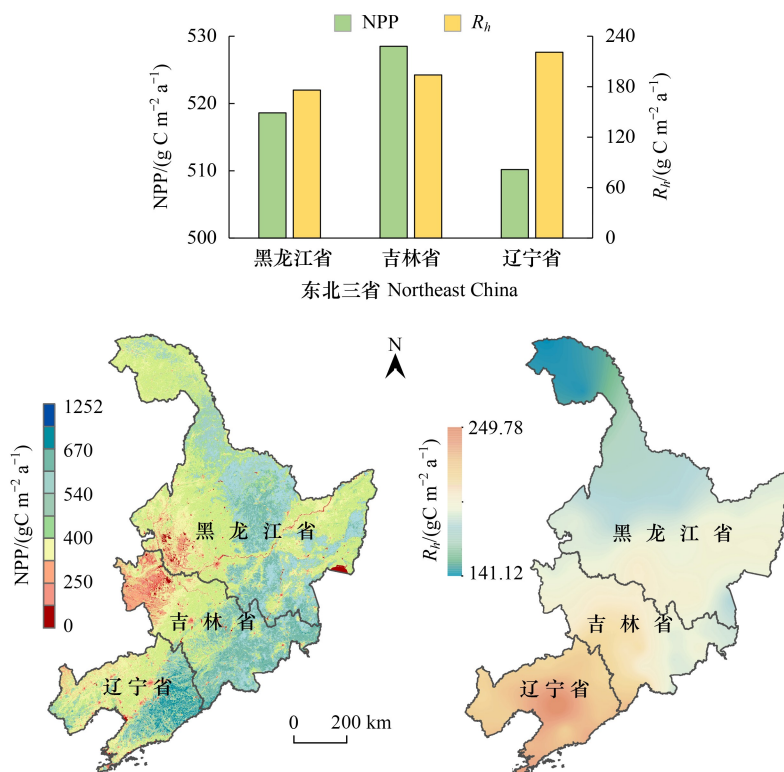


图4 东北三省 NPP 和  $R_h$  多年均值空间分布

Fig.4 Spatial distribution of average annual NPP and  $R_h$  in Northeast China

## 2.2 东北三省自然碳源/汇时空分布特征分析

### 2.2.1 自然碳源/汇时空分布特征

对东北三省近 21 年 NEP 变化规律进行统计,得到 NEP 历年变化趋势图和各月 NEP 均值图,如图 5。从年际变化看,东北三省 NEP 整体呈波动上升趋势,上升速率为  $2.96 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,NEP 多年均值为  $329.77 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,在 2016 年达到区域 NEP 最高值  $380.07 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,最低值出现在 2010 年前后,约为  $281.38 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。2000—2009 年期间,东北三省 NEP 年均值基本处于稳定状态,而在 2010—2016 年上升趋势最为显著,近年来有所降低。从月际变化分析,NEP 月均值呈现单峰变化趋势,呈现先升高后降低的单峰变化规律,7 月达到最大值  $106.56 \text{ g C m}^{-2} \text{ 月}^{-1}$ ,10 月—次年 2 月多为负值,即此时植被固碳量小于土壤微生物呼吸量,呈现

“NEP 赤字”的自然碳源状态。

对东北三省年均 NEP 空间分布进行分析,如图 6。东北三省 NEP 主要呈现由东北和东南两个方向朝中西部递减的空间变化规律,小兴安岭和长白山地等山地地区的 NEP 值较高,松嫩平原、三江平原和辽河平原的 NEP 值偏低,空间分布状态与 NPP 分布相似。

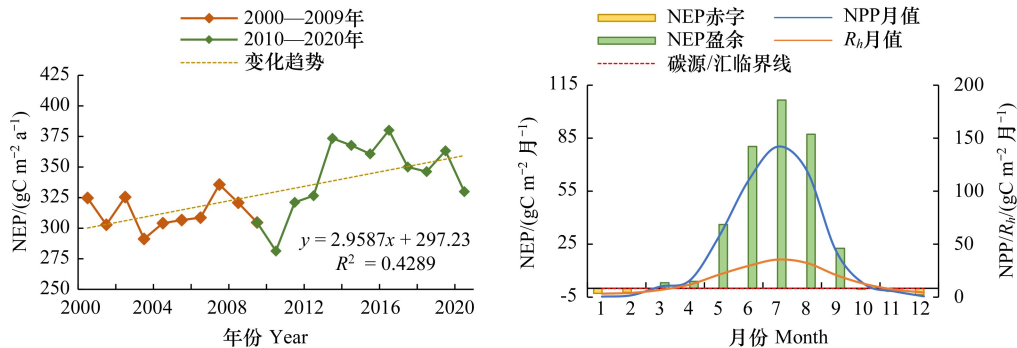


图 5 2000—2020 年东北地区年平均、月平均 NEP 变化趋势

Fig.5 Trend of average annual and monthly NEP in Northeast China from 2000 to 2020

### 2.2.2 自然碳源/汇总量时空分布特征

对研究区各地级市的碳汇总量进行统计,如图 7。东北三省地级市碳汇总量呈现从东北向西南逐渐减小的趋势,碳汇量较大的地级市主要集中在黑龙江省南北贯通的中部地区和吉林省的东部,吉林省西部和辽宁省大部分地区碳汇总量较小。东北三省近 21 年来碳汇总量呈现波动上升的趋势(图 8),黑龙江省碳汇总量最高,在东北三省中占有绝对优势,平均碳汇总量达到  $164.61 \text{ Tg C/a}$ ,占研究区内碳汇总量的约 57.93%—64.41%,且碳汇增长速率最快 ( $20.03 \text{ Tg C } 10\text{a}^{-1}$ );超过全省均值的有大兴安岭地区、黑河市、哈尔滨市、牡丹江市和伊春市等 5 个地级市;贯通南北的黑龙江省中部地区聚集了主要的高碳汇地区,该区域以小兴安岭山脉为主,植被生态状态较好;而东部和西部的平原地区碳汇总量稍低,这是由于地形导致的水热条件差异引起的,中高纬度的平原地区水热条件较同纬度山地地区的气温更高,热量更丰富。良好的水热条件一方面为平原地区的工农业发展提供良好条件,使此处有了集中建设的城镇和广泛分布的大型机械化农场,受到更多人类活动的扰动,另一方面,平原地区的土壤微生物呼吸量稍高于山地地区,使碳汇量有所下降。吉林省碳汇总量稍低,整体呈现从东向西碳汇总量逐步下降的规律,有延边朝鲜族自治州、吉林市和通化市 3 个地级市超过省内平均水平 ( $61.99 \text{ Tg C/a}$ ),约占研究区内碳汇总量的 20.09%—24.84%;辽宁省碳汇总量最少,平均碳汇总量为  $42.40 \text{ Tg C/a}$ ,约占研究区内碳汇总量的 13.63%—17.37%,且碳汇增速较低,增速约为  $6.46 \text{ Tg C } 10\text{a}^{-1}$ ;其中丹东市、抚顺市、本溪市、铁岭市和朝阳市等 5 个地级市超过省内平均水平,高值区集中在辽东山地和辽西北丘陵区。

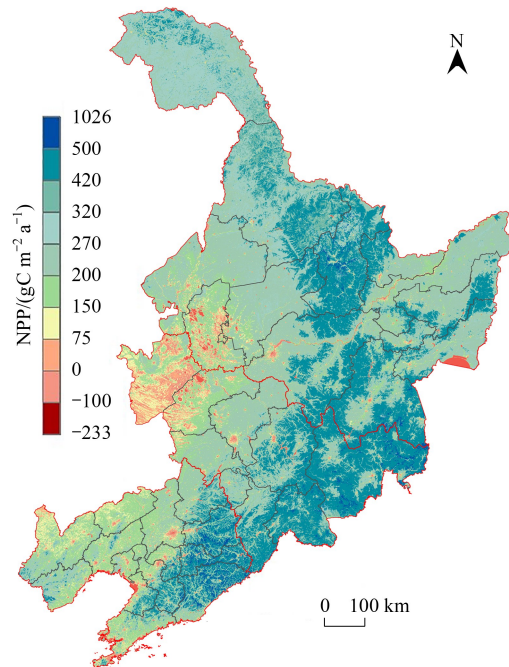


图 6 东北三省 NEP 多年均值空间分布

Fig.6 Spatial distribution of average annual NEP in Northeast China

## 2.3 东北三省能源碳排放时空分布特征

### 2.3.1 省级能源碳排放总量与夜间灯光数据的拟合

东北三省近 21 年碳排放量呈现“上升—下降—上升”的波动发展状态(图 9), 2000—2012 年为急速上升状态, 2012 年前后出现一处峰值, 2012—2016 年各省发生不同程度的能源消费量碳排放下降, 2017—2020 年期间, 辽宁省有较强的碳排放量回升的迹象, 碳排放量一度超越 2012 年的峰值, 并逐步上升; 吉林省和黑龙江省碳排放量基本稳定, 21 年间最大值出现在 2012 年前后, 黑龙江省碳排放量稍有增加, 吉林省碳排放量稍有降低。三省中辽宁省碳排放量最高, 上升速率最快, 上升趋势最为显著。

利用 GIS 提供的分区统计工具对东北三省夜间灯光影像进行处理, 得到各省历年的夜间灯光总值, 将该值与通过统计年鉴计算得到的不同年份碳排放总量进行拟合。参与拟合的数据共有 63 组, 其结果拟合优度  $R^2$  达到 0.84,  $P \leq 0.001$ , 两者存在较强的相关关系(图 10), 因此, 可以利用夜间灯光数据对东北三省省级碳排放总量进行降尺度分析。

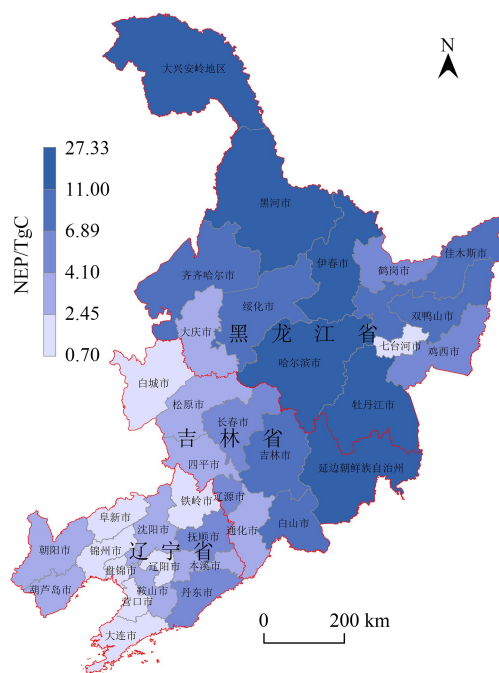


图 7 东北三省地级市年均碳汇总量分布图

Fig.7 Spatial distribution of total carbon sink of prefecture-level cities in Northeast China

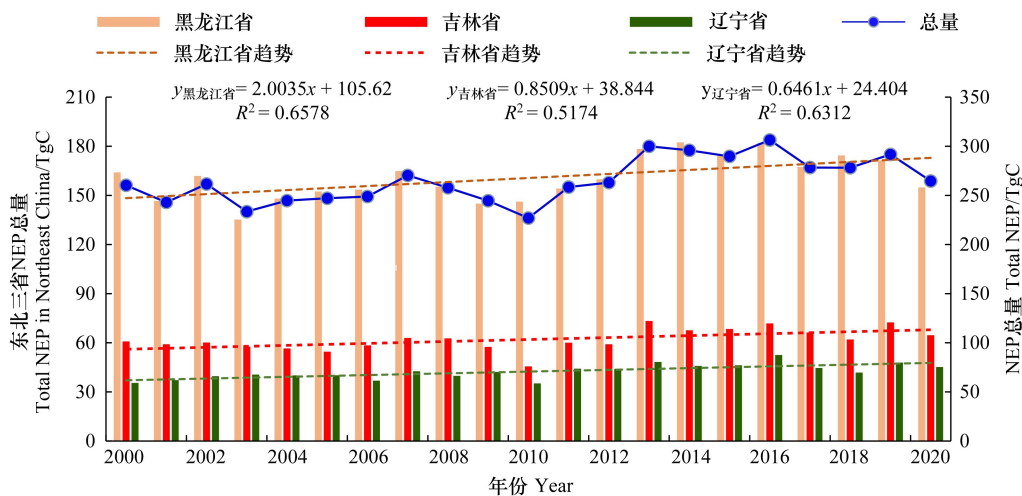


图 8 东北三省 2000—2020 碳汇总量变化趋势图

Fig.8 Trend of total carbon sink in Northeast China from 2000 to 2020

### 2.3.2 市级能源碳排放总量估算

根据夜间灯光数据提供的东北三省各级行政区夜间灯光总值, 以东北三省历年实际碳排放量为约束, 求取各市级行政区多年平均碳排放估算量, 如图 11。按照多年均值计算, 辽宁省各市 ( $12.28 \text{ Tg C/a}$ ) > 吉林省 ( $6.59 \text{ Tg C/a}$ ) > 黑龙江省 ( $6.52 \text{ Tg C/a}$ )。东北三省各市中, 辽宁省的沈阳市 ( $48.75 \text{ Tg C/a}$ ) 和大连市 ( $32.78 \text{ Tg C/a}$ ) 分别占辽宁省碳排放年总量的 28.4% 和 19.1%, 吉林省的长春市 ( $9.64 \text{ Tg C/a}$ ) 占吉林省碳排放年总量的 16.3%、黑龙江省的哈尔滨市 ( $27.80 \text{ Tg C/a}$ ) 和大庆市 ( $22.63 \text{ Tg C/a}$ ) 占黑龙江省碳排放年总量的 32.8% 和 26.7%, 以上 5 市的碳排放能力在东北各市中最为突出, 合计碳排放能力占东北三省碳排放年总量的 44.8%。

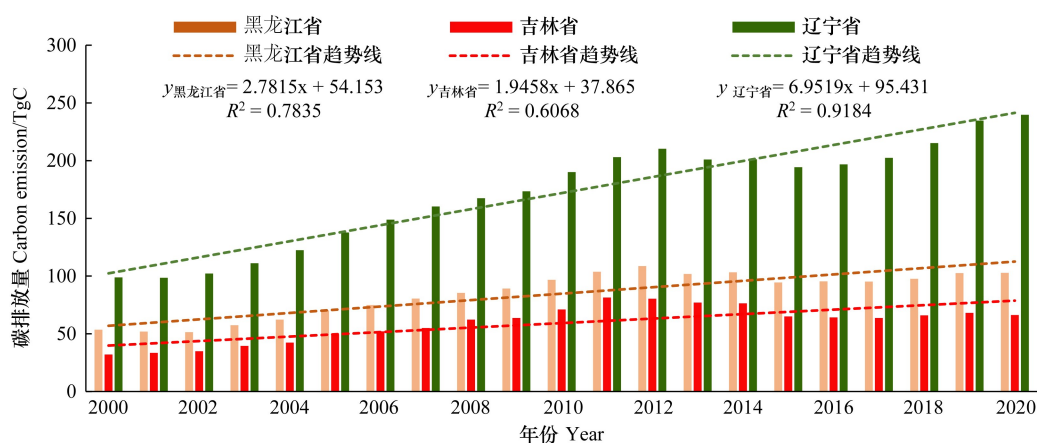


图9 东北三省 2000—2020 年碳排放变化趋势

Fig.9 Trend of carbon emission in Northeast China from 2000 to 2020

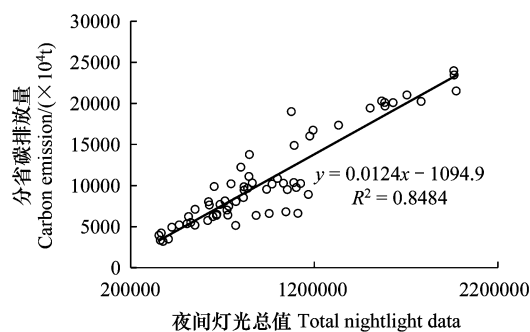


图10 夜间灯光数据与能源消费碳排放拟合关系

Fig.10 Fitting relationship between nightlight data and carbon emission from energy consumption

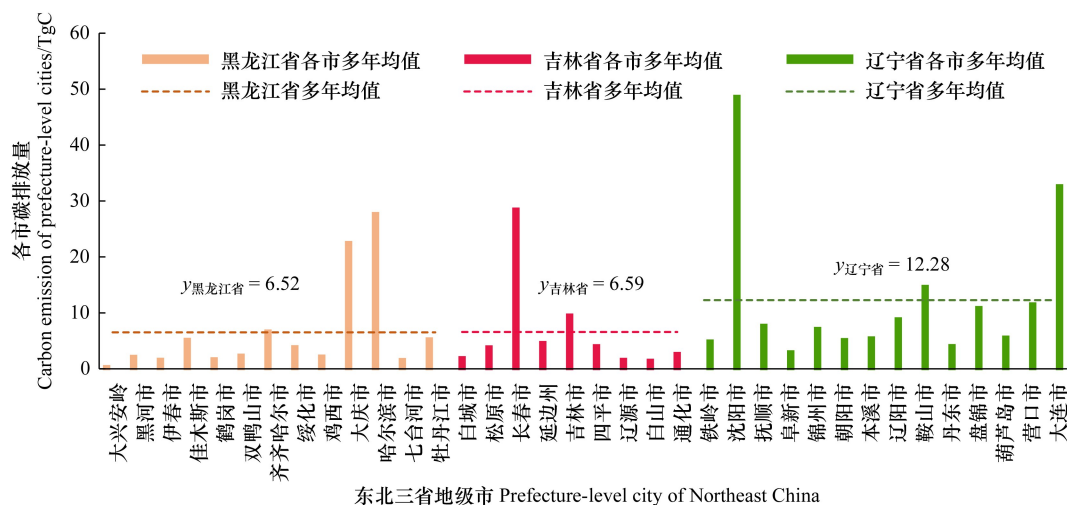


图11 东北三省地级市碳排放估算量

Fig.11 Estimated value of carbon emission of prefecture-level cities in Northeast China

## 2.4 东北三省碳盈亏状态时空分布

根据东北三省各地区自然碳汇与碳排放量计算结果,对东北三省历年地区碳盈亏量进行计算,如图12所示。就整体而言,东北三省近21年来处于碳亏损状态的时间更长,以2005年为转折点,东北三省整体由碳盈

余状态转变为碳亏损状态,2010—2012 年碳亏损最为严重,2013—2016 年略有好转,但 2017 年后碳亏损状态进一步加重。就各省而言,黑龙江省长期处于碳盈余状态,多年均值为 78.86TgC,整体呈现波动中降低趋势;吉林省 2000—2004 年主要为碳盈余状态,2005—2008 年为临界状态,此后碳盈亏总量持续下降,2009—2014 年持续处于碳亏损状态,以 2010—2012 年碳亏损状态最严重,此后碳盈亏总量稍有回升;2015—2020 年,吉林省基本处于临界状态;辽宁省近 21 年以来一直处于碳亏损状态,多年均值为-129.49TgC。

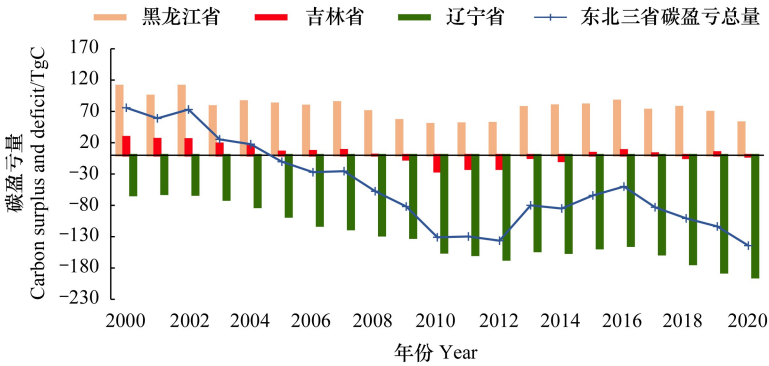


图 12 2000—2020 年东北三省碳盈亏状态变化趋势

Fig.12 Trend of carbon surplus and deficit in Northeast China from 2000 to 2020

将研究年段五年划分一时期,绘制东北三省各地级市碳盈亏空间图,如图 13。可知,东北三省各时段碳盈亏格局整体呈现:西南亏损,东北盈余的空间规律。2000—2015 年期间,空间上呈现“由点—连线—展面”

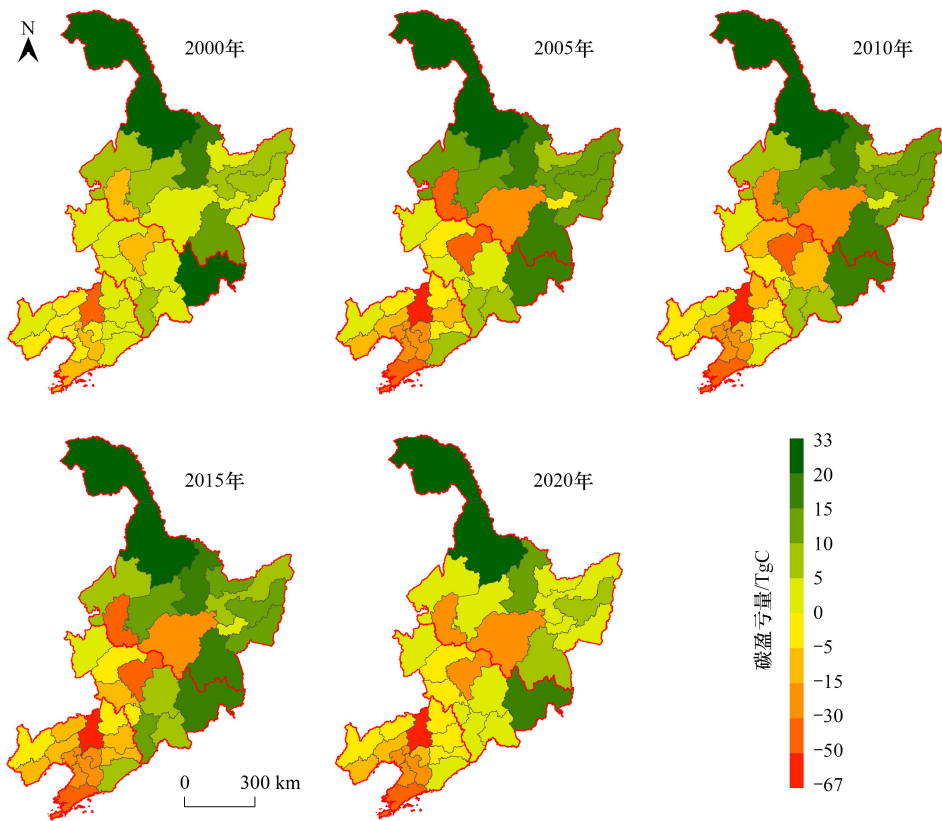


图 13 2000—2020 年碳盈亏状态空间分布图

Fig.13 Spatial distribution of carbon surplus and deficit from 2000 to 2020

的碳亏损加深状态,碳亏损区域从西南逐步向东北地区扩大,局部碳亏损状态也逐步加深。2000 年,辽宁省仅在沈阳市碳亏损较为严重,至 2010 年,逐步形成以沈阳—大连为主的“沿辽河—环渤海”的辽宁碳亏损区域;吉林省和黑龙江省以大庆市—长春市在 2000 年略有碳亏损,到 2005 年逐步形成大庆市—哈尔滨市—长春市的面状碳亏损区域,该区域有逐步扩大的趋势,以三江平原地区的市级行政区为代表,区域内呈现明显的碳盈余能力逐步下降。2015—2020 年阶段,黑龙江省和吉林省碳排放量有下降趋势,两省各市碳亏损状态逐渐减轻,而辽宁省碳排放量仍在增加,故辽宁省各市碳盈亏状态并无明显好转。

## 2.5 碳盈亏影响因素分析

为探究影响地区碳盈亏的因素,进一步对碳盈亏与影响因子相关关系进行讨论,东北三省各影响因子多年均值分布情况如图 14 所示。各省除碳排放强度整体与碳盈亏相关关系较弱外,其他因素均表现出与碳盈亏有一定强度的相关关系(表 3)。一般来说,人口规模对碳排放显著增加或减少的影响能力有限,但大多呈现负相关关系<sup>[45]</sup>。东北三省均表现出碳盈亏与人口规模极强的负相关关系。城市化水平是综合体现城市人口密度、生活方式的人口指标,人均能源消费高于农村地区该指标的 3.5—4 倍<sup>[46]</sup>。吉林省和黑龙江省城市

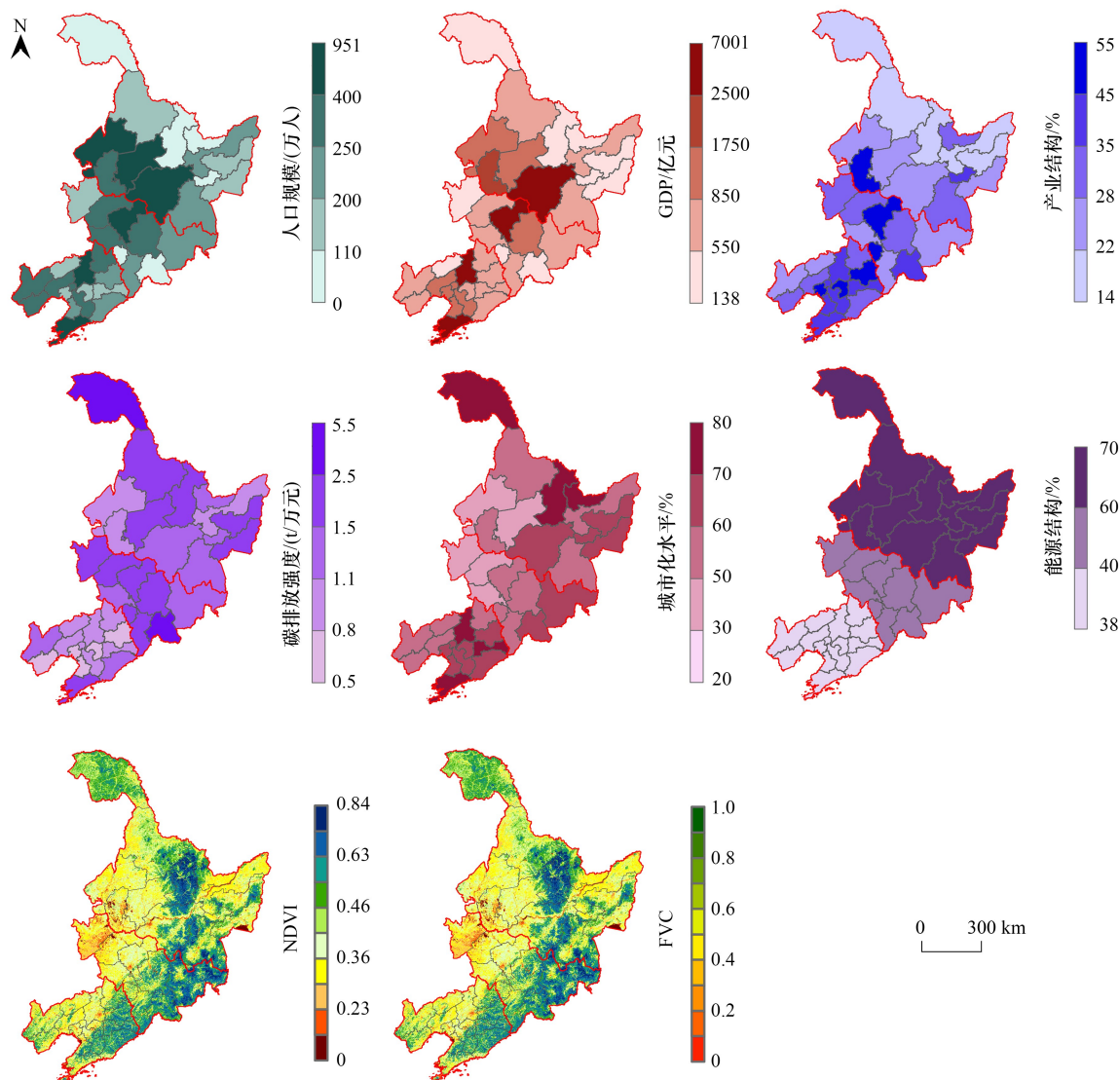


图 14 碳盈亏影响因子空间分布

Fig.14 Spatial distribution of influencing factors for carbon surplus and deficit

NDVI:归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index;FVC:植被覆盖度 Fractional vegetation cover

化水平表现出与碳盈亏较强的正相关关系,该现象与两省城市化特点有关;部分地区农业人口流失更快,反向提升了城市化水平,故呈现出碳盈亏与城市化水平呈正相关关系。辽宁省城市化水平与碳盈亏状态呈现显著的负相关关系,近 21 年来,大连市城市化水平提升 40.36%,碳亏损状态持续加深 33%;朝阳市城市化水平提升 70%,从碳盈余状态转变为碳亏损状态;丹东市城市化水平提升 59.44%,虽保持为碳盈余状态,但碳盈余量下降 44%。

表 3 不同地区碳盈亏与影响因子相关关系结果

Table 3 Result of Correlational relationship between influencing factors and carbon surplus and deficit in Northeast China

|                        | 指标<br>Index | 黑龙江省<br>Heilongjiang Province | 吉林省<br>Jilin province | 辽宁省<br>Liaoning province |
|------------------------|-------------|-------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 社会因素<br>Social factor  | 人口规模        | -0.480 ***                    | -0.563 ***            | -0.849 ***               |
|                        | 城市化水平       | 0.374 **                      | 0.548 ***             | -0.532 ***               |
|                        | 地区生产总值      | -0.677 ***                    | -0.760 ***            | -0.873 ***               |
|                        | 产业结构        | -0.710 ***                    | -0.226 *              | -0.052 *                 |
|                        | 碳排放强度       | -0.024                        | -0.130                | -0.710 *                 |
|                        | 能源结构        | -0.613 **                     | -0.444 **             | 0.787 ***                |
| 自然因素<br>Natural factor | 归一化植被指数     | 0.564 ***                     | 0.539 ***             | 0.374 **                 |
|                        | 植被覆盖度       | 0.554 ***                     | 0.536 ***             | 0.362 **                 |

\*、\*\*、\*\*\* 分别代表显著性通过  $P<0.05$ ,  $P<0.01$ ,  $P<0.001$

经济发展需要能源给予一定的支撑。东北三省碳盈亏与地区生产总值具有极强的负相关关系,碳盈亏与产业结构亦现负相关关系,该指标在解释黑龙江省的碳盈亏值能力更强;以盘锦市、长春市和大庆市等重工业城市为代表。碳盈亏与碳排放强度呈现负相关,东北三省碳盈亏与碳排放强度相关关系稍弱,可能是由于技术的提高总是不能同步影响到各个地区导致的。东北三省碳盈亏与能源结构的相关关系不同,吉林省和黑龙江省碳盈亏与能源结构呈现负相关关系,表示两省可以通过降低煤炭在能源消费中的比重,逐步实现地区碳盈亏向碳盈余状态移动。辽宁省碳盈亏与能源结构呈现较强的正相关关系,通过统计发现,辽宁省通过调整能源结构,抑制了碳排放的增速,但由于替代能源的增加,能源消费总量仍在上升,导致能源结构的调整不足以改变碳排放总量上升的事实。各省碳盈亏量与 NDVI 指数和植被覆盖度指数的相关关系呈现正相关关系,黑龙江省和吉林省碳盈亏量与自然要素呈现出更强的相关关系,辽宁省在该指标上相关关系强度稍弱,侧面表现出辽宁省碳盈亏受人类活动影响更为明显。

为推动东北三省地区碳盈亏向好发展,应从自然和社会两方面着手。就自然碳汇能力而言,黑龙江省和吉林省应当着重保持当前森林、草地和沼泽等固碳能力较强的生态系统,这一举措不仅能促进多种生态系统持续进行碳汇,也保证了各种生态系统中已经固结的碳储量不被释放。尽管辽宁省碳储量较低,但近年来通过辽西北生态屏障计划,其生态正快速恢复,这有利于辽宁省提高自身碳汇能力。

另一方面,人类社会的发展产生的能源碳排放是导致地区碳盈亏向亏损状态演变的重要原因。结合东北三省近年的发展情况,东北三省当前面临着人口流失和经济下行压力,且就地区发展而言,通过限制人口规模 and 经济发展以达到碳减排的目的不符合社会发展规律的。所以东北三省应当主要从碳排放强度、产业结构和能源结构三个角度着手实现碳减排。首先,东北三省均可以通过提升科技水平,以降低碳排放强度的方法进行碳减排。同时,产业结构和能源结构的调整也有利于碳减排,但各省的侧重点应有差异:(1)黑龙江省和吉林省降低碳排放的方式应当主要从调整能源结构入手,两省的能源结构均在 45%以上,黑龙江省能源结构近 21 年甚至呈现上升趋势。两省可以通过扩大清洁能源在能源消费系统中的占比,以调整能源结构的方法抑制碳排放总量的增长速度,甚至实现碳排放的降低。(2)辽宁省能源结构持续降低,但仅起到抑制碳排放增速放缓的作用,而其产业结构较高,超过 62%,故可以通过调整产业结构的方式进行碳减排过程。(3)需要注意的是,黑龙江省产业结构约为 28%,较低的产业结构已经对地区经济发展产生一定的阻力,不宜再通过

降低产业结构的方式进行碳减排。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

(1)东北三省近 21 年 NEP 年际变化呈波动上升趋势;月季变化呈现单峰变化特征,10 月—次年 2 月呈现“NEP 赤字”现象。空间上呈现由东北和东南朝中西部递减的空间变化规律;黑龙江省碳汇能力最强,年均碳汇总量 164.61 Tg C/a,约占东北三省的 60%;碳汇能力最弱的为辽宁省,年均碳汇总量仅占东北三省的 15%。

(2)辽宁省能源消费碳排放量最高且增速最快,增速约为 6.95 Tg C/a;辽宁省的沈阳市和大连市、吉林省的长春市、黑龙江省的哈尔滨市和大庆市属于碳源量较高的地级市,以上 5 市的碳排放能力在东北各市中最为突出,合计碳排放能力占东北三省碳排放年总量的 44.8%。

(3)2000—2020 年期间,东北三省在整体从碳盈余状态转变为碳亏损状态,转折点位于 2005 年前后,但各省之间存在差异,黑龙江省总体处于碳盈余状态,辽宁省则长期处于碳亏损状态,吉林省 2010 年之前处于碳盈余状态,但总量持续降低,直到 2009 年出现碳亏损状态后仍有加重现象,近年来在碳盈亏临界值附近徘徊。

(4)碳盈亏与自然因素表现为稳定的正相关关系,而与各社会因素的相关关系差异较大。碳盈亏与人口规模和地区经济发展水平在各省均呈现极强的负相关关系;与产业结构呈现较强的负相关关系;与碳排放强度呈现较弱的负相关关系。碳盈亏与城市化水平在黑龙江省和吉林省呈较强的正相关关系,而在辽宁省呈现极强负相关关系。碳盈亏与能源结构在黑龙江省和吉林省呈较强的负相关关系,而在辽宁省呈现极强的正相关关系。

(5)为推动东北三省地区碳盈亏向好发展,各省应当保持甚至提升各生态系统的碳汇能力;东北三省均应以提高科技水平,扩大清洁能源在能源消费中的比重,实现降低碳排放强度的方式达到部分碳减排目标。另外黑龙江省和吉林省应主要从调整能源结构的角度进行碳减排,而辽宁省可以通过调整产业结构的方式减少能源消费碳排放。

#### 3.2 讨论

(1)利用模型对地区 NPP 核算结果的精确度在生态评估领域一直被广泛讨论,由于缺少实际数据对模型的辅助,本文 NPP 模拟结果未能与实测数据相验证,但通过与 MOD17A3 数据进行对比,发现拟合结果基本在 0.70 以上,一定程度上证明了估算结果的可靠性。

(2)东北三省作为地理条件相似,发展历史接近的地域单元,在完成“碳中和”、“碳达峰”的过程中,需要发挥地区内协调联动实现减排任务。可以通过碳权交易和差异化减排的方式,形成“碳减排”分工,作为一个整体实现“双碳”目标。通过自然要素与碳盈亏相关关系的分析,可知自然生态的演化整体较为稳定。而东北三省近 21 年碳盈亏量持续降低,表现出与人类社会活跃的生产活动之间存在较强的因果关系,为推动碳盈亏状态持续向碳盈余方向发展,需要东北三省着重从减少碳排放,稳定碳汇的角度进行部署。

(3)本文利用可比较的夜间灯光数据,辅助东北地区地级市碳源核算,相较于其他研究中灯光数据与碳排放相结合的方式,增加了真实碳排放值对估算过程的约束,可更为精准的对区域碳源进行定量分析。但本研究仍存在一些不足之处,即市级碳排放量本质仍为估算数据,如能获取各地级市能源消费的数据,则可以由下而上的进行碳排放量的汇算,直接提升其研究精度。其次本文以能源消费量产生的碳排放作为碳支出,一定程度上对依赖能源参与生产的社会生产过程进行分析,而东北三省作为商品粮基地,其化肥、地膜等物质产生的碳排放并未核算在内,在讨论人地关系—碳博弈方面仍需要进一步细化和挖掘。

#### 参考文献 (References):

- [1] Watson R T. Land use, land-use change, and forestry. Cambridge, UK; New York; Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change [by] Cambridge University Press, 2000.
- [2] 孙颖. 人类活动对气候系统的影响——解读 IPCC 第六次评估报告第一工作组报告第三章. 大气科学学报, 2021, 44(5): 654-657.
- [3] Nirmal Kumar J I, Patel K, Kumar R N, Bhoi R. An assessment of carbon stock for various land use system in Aravally Mountains, Western India. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2010, 15(8): 811-824.

- [4] Gitz V, Ciaia P. Future expansion of agriculture and pasture acts to amplify atmospheric CO<sub>2</sub> levels in response to fossil-fuel and land-use change emissions. *Climatic Change*, 2004, 67(2): 161-184.
- [5] 张璐, 王静, 施润和. 2000—2010 年东北三省碳源汇时空动态遥感研究. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2015(4): 164-173.
- [6] 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.
- [7] 李传华, 朱同斌, 周敏, 殷欢欢, 王玉涛, 孙皓, 曹红娟, 韩海燕. 河西走廊植被净初级生产力时空变化及其影响因子研究. *生态学报*, 2021, 41(5): 1931-1943.
- [8] 陈舒婷, 郭兵, 杨飞, 韩保民, 范业稳, 杨潇, 何田莉, 刘悦, 杨雯娜. 2000—2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应. *自然资源学报*, 2020, 35(10): 2511-2527.
- [9] 王智. 基于 CASA 模型的杭州市森林碳储量时空变化及影响因子研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
- [10] 潘竞虎, 文岩. 中国西北干旱区植被碳汇估算及其时空格局. *生态学报*, 2015, 35(23): 7718-7728.
- [11] 石志华. 基于 CASA 与 GSMSR 模型的陕西省植被碳汇时空模拟及影响因素研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [12] 王喜, 鲁丰先, 秦耀辰, 孙艳芳. 河南省碳源碳汇的时空变化研究. *地理科学进展*, 2016, 35(8): 941-951.
- [13] 郝千婷, 黄明祥, 包刚. 碳排放核算方法概述与比较研究. *中国环境管理*, 2011, 3(4): 51-55.
- [14] Elvidge C D, Imhoff M L, Baugh K E, Hobson V R, Nelson I, Safran J, Dietz J B, Tuttle B T. Night-time lights of the world: 1994—1995. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 56(2): 81-99.
- [15] Liu Z F, He C Y, Zhang Q F, Huang Q X, Yang Y. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 106(1): 62-72.
- [16] 董鹤松, 李仁杰, 李建明, 李帅. 基于 DMSP-OLS 与 NPP-VIIRS 整合数据的中国三大城市群城市空间扩展时空格局. *地球信息科学学报*, 2020, 22(5): 1161-1174.
- [17] Doll C N H, Muller J P, Morley J G. Mapping regional economic activity from night-time light satellite imagery. *Ecological Economics*, 2006, 57(1): 75-92.
- [18] 苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 吴旗韬, 张虹鸥, 黄宁生, 匡耀求. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理. *地理学报*, 2013, 68(11): 1513-1526.
- [19] 杜海波, 魏伟, 张学渊, 纪学朋. 黄河流域能源消费碳排放时空格局演变及影响因素——基于 DMSP/OLS 与 NPP-VIIRS 夜间灯光数据. *地理研究*, 2021, 40(7): 2051-2065.
- [20] 牛亚文, 赵先超, 胡艺觉. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究. *环境科学学报*, 2021, 41(9): 3847-3856.
- [21] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京: 南京大学, 2010.
- [22] 孙伟, 乌日汗. 长三角核心区碳收支平衡及其空间分异. *地理研究*, 2012, 31(12): 2220-2228.
- [23] 赵荣钦, 张帅, 黄贤金, 秦耀辰, 刘英, 丁明磊, 焦士兴. 中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区. *地理学报*, 2014, 69(10): 1425-1437.
- [24] Zhao M, Kong Z H, Escobedo F J, Gao J. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(4): 807-813.
- [25] 国家统计局, 生态环境部. 中国环境统计年鉴—2021. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [26] 国家统计局. 中国统计摘要—2001. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [27] 王艳艳, 杨明川, 潘耀忠, 朱文泉, 龙中华, 刘旭拢, 顾晓鹤. 中国陆地植被生态系统生产有机物质价值遥感估算. *生态环境*, 2005, 14(4): 455-459.
- [28] 范也平. 河西走廊植被碳源/汇时空变化及其对气候变化的响应[D]. 兰州: 西北师范大学, 2018.
- [29] 曹永强, 周姝含, 杨雪婷. 近 20 年辽宁省植被动态特征及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2022, 42(14): 5966-5979.
- [30] 刘静, 温仲明, 刚成诚. 黄土高原不同植被覆被类型 NDVI 对气候变化的响应. *生态学报*, 2020, 40(2): 678-691.
- [31] 曹子阳, 吴志峰, 匡耀求, 黄宁生. DMSP/OLS 夜间灯光影像中国区域的校正及应用. *地球信息科学学报*, 2015, 17(9): 1092-1102.
- [32] 杨任飞. 基于 DMSP/OLS 与 NPP-VIIRS 整合数据的城市群发育过程研究——以长江经济带主要城市群为例[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [33] 黑龙江省统计局. 黑龙江统计年鉴—2001(总第十五期). 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [34] 《吉林市社会经济统计年鉴》编委会. 吉林统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [35] 辽宁省统计局. 辽宁统计年鉴—2001. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [36] 王菲, 曹永强, 周姝含, 范帅邦, 姜雪梅. 黄河流域生态功能区植被碳汇估算及其主要气象要素分析. *生态学报*, 2023(06): 1-14.
- [37] 周林鹏, 刘家福, 王跃, 马帅. 东北黑土区植被净初级生产力时空格局及驱动因素分析——以 2000—2017 年为例. *农业与技术*, 2022, 42(22): 65-70.
- [38] 罗阳. 基于 CASA 模型的珠江流域片植被 NPP 时空变化与影响因子分析[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.
- [39] 汤洁, 姜毅, 李昭阳, 张楠, 胡猛. 基于 CASA 模型的吉林西部植被净初级生产力及植被碳汇量估测. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(4): 1-7.
- [40] 程春晓, 徐宗学, 王志慧, 刘昌明. 2001—2010 年东北三省植被净初级生产力模拟与时空变化分析. *资源科学*, 2014, 36(11): 2401-2412.
- [41] 裴志永, 周才平, 欧阳华, 杨文斌. 青藏高原高寒草原区域碳估测. *地理研究*, 2010, 29(1): 102-110.
- [42] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: volume 2. Japan: the Institute for Global Environmental Strategies, 2008.
- [43] Lv Q, Liu H B, Wang J T, Liu H, Shang Y. Multiscale analysis on spatiotemporal dynamics of energy consumption CO<sub>2</sub> emissions in China: Utilizing the integrated of DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light datasets. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134394.
- [44] 武娜, 沈镭, 钟帅. 基于夜间灯光数据的晋陕蒙能源消费碳排放时空格局. *地球信息科学学报*, 2019, 21(7): 1040-1050.
- [45] 刘亦文, 阳超, 蔡宏宇. 中国碳排放总量与强度的省际差异与因素分解. *湖南工业大学学报*, 2022, 36(1): 1-9.
- [46] 林伯强, 刘希颖. 中国城市化阶段的碳排放: 影响因素和减排策略. *经济研究*, 2010, 45(8): 66-78.