

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.02.017

# 基于碳汇法与 NPP 法的安徽省能源足迹影响因素研究

熊鸿斌, 郑慧娟

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章采用碳汇法和净初级生产力(net primary productivity, NPP)法,以安徽省为例计算能源足迹;将非化石能源消费也纳入能源足迹的计算中,以便更准确测度能源足迹;采用对数平均迪氏指数(logarithmic mean Divisia index, LMDI)分解法分析能源足迹的影响因素,并使用 Pearson 相关系数分析法探索非化石能源足迹对能源足迹总量变化率的影响。结果表明:与碳汇法相比, NPP 法考虑区域综合碳吸收能力和土地利用变化的影响,计算结果更准确;基于 NPP 法计算含非化石能源的能源足迹, 2009—2016 年安徽省能源足迹累计增长  $511.25 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 年均增长率为 5.02%;能源强度在抑制能源足迹增长因素中占 94.35%, 贡献度为 -1.57;经济发展在促进能源足迹增长的因素中占 95.95%, 贡献度为 2.55;以经济发展为主的正效应大于以能源强度为主的负效应,两者比值为 1.74 : 1.00;非化石能源足迹、煤炭足迹的贡献度与总量变化率分别呈 -0.54 负相关和 0.44 正相关。因此,调整能源结构、大力发展非化石能源,能有效降低能源足迹。

**关键词:**净初级生产力(NPP);碳汇法;非化石能源;能源足迹;碳达峰

中图分类号:X24

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2023)02-0254-07

## Study on influence factors of energy footprint in Anhui Province based on carbon sink and NPP methods

XIONG Hongbin, ZHENG Huijuan

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** By using carbon sink and net primary productivity(NPP) methods, this paper calculates the energy footprint in Anhui Province, and includes non-fossil energy consumption in the calculation of energy footprint in order to measure the energy footprint more accurately. The logarithmic mean Divisia index(LMDI) is used to analyze the factors affecting the energy footprint. Pearson correlation coefficient analysis is adopted to explore the effect of non-fossil energy footprint on the total change rate of energy footprint. The results show that compared with the carbon sink method, the NPP method considers the influence of regional comprehensive carbon absorption capacity and land use changes, and the calculation results are more accurate. The energy footprint of Anhui Province including non-fossil energy footprint is calculated by NPP method, and it is shown that the energy footprint of Anhui Province increased by  $511.25 \times 10^4 \text{ hm}^2$  from 2009 to 2016, with an average annual growth rate of 5.02%. Energy intensity accounted for 94.35% of the factors that inhibited the growth of energy footprint, with a contribution of -1.57. Economic development accounted for 95.95% of the factors contributing to the growth of the energy footprint, with a contribution of 2.55. The positive effect dominated by economic development was greater than the negative effect dominated by energy intensity, the ratio of the two was 1.74 : 1.00. The contribution of non-fossil energy footprint was negatively correlated with the total change rate of energy footprint, with a correlation coefficient of -0.54, and that of the coal footprint was positively correlated, with a correlation coefficient of 0.44. Therefore, adjusting the energy structure and developing non-fossil energy can effectively reduce the energy footprint.

**Key words:** net primary productivity(NPP); carbon sink method; non-fossil energy; energy footprint; carbon peak

收稿日期:2021-03-29;修回日期:2021-10-26

作者简介:熊鸿斌(1963—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

随着人类对生态资源及能源开拓利用强度的不断增加,温室效应已成为各国社会经济发展中需重点解决的问题之一。中国政府提出 2030 年碳达峰、2060 年碳中和的战略目标,明确到 2030 年非化石能源消费占一次能源消费总量的 25%<sup>[1]</sup>。

能源可按化石、非化石 2 种方式分类。化石能源是 CO<sub>2</sub> 的主要排放源,非化石能源主要用于发电<sup>[2]</sup>。评估能源消费情况的指标为能源足迹,文献[3]研究表明,目前大部分地区的能源足迹占总生态足迹的 1/2 以上,是造成生态赤字的主要原因。我国对能源足迹的研究始于 2005 年<sup>[4]</sup>,针对化石能源消费,文献[5]搭建了基于净初级生产力(net primary productivity, NPP)的化石能源足迹模型;文献[6]使用碳汇法及 NPP 法 2 种模型计算对比福建省化石能源足迹。针对非化石能源,文献[7]对能源消费结构进行系统动力学模拟,提出若推行更积极的转型政策,则 2050 年中国的非化石能源消费占比将超越化石能源;文献[8]利用向量误差修正模型,发现非化石能源的增加可以降低碳强度;文献[9]提出非化石能源消耗在降低碳强度方面发挥着重要的作用;文献[10]利用双向固定效应纵向模型调研非化石能源与碳排放之间的变化关系。

以上研究主要是针对化石能源足迹的计算和基于国家尺度的非化石能源发展预测分析、非化石能源与碳排放之间关系的分析,而如何更准确测度能源足迹、如何将非化石能源消费也纳入能源足迹的计算中、如何基于省域尺度对非化石能源和化石能源消耗进行对比分析、如何衡量非化石能源消耗与能源足迹间的关联,都是相关领域研究者需要进一步探讨与解决的重点与热点问题。

安徽省煤炭、水资源丰富,可再生资源相对匮乏,并处于工业化高速发展、能源消费增长较快的阶段。安徽省“十三五”规划提出 2020 年安徽省非化石能源消费占比达 5.5%,煤炭消费占比要降低至 75%的约束性目标<sup>[11]</sup>;安徽省“十四五”规划提出将加快推进能源结构调整,提高非化石能源消费比重<sup>[12]</sup>。

本文从能源足迹的角度,以 2009—2016 年安徽省的能源消费为例,通过碳汇法与 NPP 法 2 种不同计算模型对比,并尝试将非化石能源纳入能源足迹的计算中,得出基于 NPP 法模型适用于计算区域能源足迹;采用 NPP 法模型分析能源足迹的影响因素和非化石能源消费对能源足迹的影响,从而更全面地评估能源消耗对生态环境的影

响,为安徽省实现可持续发展提供有效的计算方法及合理建议。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 碳汇法能源足迹计算模型

碳汇法能源足迹的计算基于 2 个基本假设<sup>[13-14]</sup>:① 人类可以确定大部分被消耗的能源和产生的废弃物数量;② 这些能源和废弃物可以被转化为相应的生物生产用地面积。碳汇法是一种传统的能源足迹计算方法,在生态足迹计算模型的基础上发展而来,其能源足迹用吸收能源燃烧排放 CO<sub>2</sub> 所需的林地面积表示<sup>[15-16]</sup>,计算公式为:

$$E_F = \sum_{i=1}^n \frac{29\ 307.6 Q_i}{10^6 p_i} \quad (1)$$

其中: $E_F$  为能源足迹总量; $i$  为能源类型编号; $Q_i$  为第  $i$  类能源的消费量; $p_i$  为第  $i$  类能源的全球平均足迹,也称为能源因子;1 kg 标准煤的燃烧热值约为 29 307.6 kJ。

碳汇法能源因子取值见表 1 所列。在我国现行的统计体系中,为简化统计与计算,通常将水电、核电、风电、太阳能光伏等由非化石能源转化的电力作为一次能源统计。我国约 95% 的非化石能源主要转化为电力,因此本文将非化石能源定义为一次电力及其他能源,在计算非化石能源足迹时,非化石能源的能源因子采用一次电力的数值。

表 1 碳汇法能源因子取值

能源类型	煤炭	石油	天然气	电力
能源因子	55	73	93	1 000

### 1.2 NPP 法能源足迹计算模型

NPP 模型在认同碳汇法能源足迹计算原理的 2 个基本假设前提下,还认可土地的综合碳吸收能力<sup>[17]</sup>。NPP 法将能源足迹定义为用于吸收能源燃烧产生的 CO<sub>2</sub> 的区域性土地面积。该方法的计算分为 3 个步骤。

(1) 计算区域 NPP。计算公式为:

$$N_{PP} = \sum_{j=1}^m \frac{N_{PP_j} A_j}{A} \quad (2)$$

其中: $N_{PP}$  为区域 NPP; $j$  为土地利用类型编号; $N_{PP_j}$  为第  $j$  类土地的 NPP; $A_j$  为第  $j$  类土地面积; $A$  为区域土地总面积。土地利用的变化是带来 NPP 差异的直接因素,由于土地利用的变化始终存在,为便于比较,各类型土地的 NPP 取全球平均值<sup>[18]</sup>,见表 2 所列。

表 2 各类型土地全球平均 NPP 单位: t/(hm<sup>2</sup>·a)

土地类型	耕地	园地	林地	草地
NPP	4.243 0	5.415 0	6.583 0	4.835 0

(2) 计算能源消费碳排放量。计算公式为:

$$C = \sum_{i=1}^m E_i c_i \quad (3)$$

其中:  $C$  为碳排放总量;  $E_i$  为第  $i$  类能源的消费量;  $c_i$  为第  $i$  类能源的碳排放系数。3 种能源碳排放系数见表 3 所列。

表 3 3 种能源消费碳排放系数 单位: t/tce

能源类型	煤炭	石油	天然气
碳排放系数	0.746 4	0.582 5	0.443 5

根据 1 kW·h 电力能源量等于 0.122 9 kg 标准煤能源量, 1 kg 煤炭能源量等于 0.747 6 kg 标准煤能源量, 得到 1 kW·h 电力能源量等于 0.164 4 kg 煤炭能源量, 按此比例关系先计算煤炭足迹, 再折算为非化石能源足迹。

(3) 计算能源足迹。计算公式为:

$$E_F = C/N_{PP} \quad (4)$$

人均能源足迹由能源足迹总量  $E_F$  和人口数据相除得出。

### 1.3 因素分解模型

因素分解法是把某个综合性指标拆分为若干个因素的和差、乘积等形式, 通过分析各因素变动对指标的影响, 针对性提出应对策略的方法<sup>[19]</sup>, 在理论性、实用性、可操作性及结果表达性等方面具有显著的优势。对数平均迪氏指数 (logarithmic mean Divisia index, LMDI) 分解法是一种无残差的因子分解方法<sup>[20-21]</sup>, 常被用于能源消费分析。本文采用 LMDI 分解法, 结合安徽省特点选择碳排放因子、能源结构、能源强度、经济发展、人口规模、土地固碳能力 6 个因素为影响因子。根据能源足迹的计算公式, 采用扩展 Kaya 恒等式将能源足迹与各个因素间的关系进行分解, 计算公式为:

$$E_F = \frac{1}{N_{PP}} \sum_i C_i = \sum_i (F_i S_i I R P M) \quad (5)$$

$$F_i = C_i/E_i, \quad S_i = E_i/E, \quad I = E/G_{DP},$$

$$R = G_{DP}/P, \quad M = 1/N_{PP}。$$

其中:  $C_i$  为第  $i$  类能源碳排放量;  $P$  为人口规模;  $F_i$  为第  $i$  类能源的碳排放因子;  $S_i$  为第  $i$  类能源的结构因子;  $E$  为能源消费总量;  $I$  为单位 GDP 能源消费量, 即能源强度;  $G_{DP}$  为国内生产总值 (Gross Domestic Product, GDP);  $R$  为人均

GDP, 即经济发展;  $M$  为土地固碳能力。

用  $E_t^F$ 、 $E_0^F$  分别表示第  $t$  期和基期的能源足迹。第  $t$  期相对于基期的各因素变化对能源足迹的贡献值 ( $\Delta E_F$ ) 表达式为:

$$\begin{aligned} \Delta E_F &= E_t^F - E_0^F = \\ &= \sum_i F_i^t S_i^t I^t P^t R^t M^t - \sum_i F_i^0 S_i^0 I^0 P^0 R^0 M^0 = \\ &= \Delta E_{FF} + \Delta E_{FS} + \Delta E_{FI} + \\ &= \Delta E_{FP} + \Delta E_{FR} + \Delta E_{FM} + \Delta E_{Frsd} \quad (6) \end{aligned}$$

其中,  $\Delta E_{Frsd}$  为分解余量。由于 LMDI 分解法中没有分解残差,  $\Delta E_{Frsd} = 0$ 。

采用 LMDI 分解法, 对 (6) 式进行分解, 结果如下:

$$\Delta E_{FF} = \sum_i W_i' \ln(F_i^t/F_i^0) \quad (7)$$

$$\Delta E_{FS} = \sum_i W_i' \ln(S_i^t/S_i^0) \quad (8)$$

$$\Delta E_{FI} = \sum_i W_i' \ln(I_i^t/I_i^0) \quad (9)$$

$$\Delta E_{FP} = \sum_i W_i' \ln(P_i^t/P_i^0) \quad (10)$$

$$\Delta E_{FR} = \sum_i W_i' \ln(R_i^t/R_i^0) \quad (11)$$

$$\Delta E_{FM} = \sum_i W_i' \ln(M_i^t/M_i^0) \quad (12)$$

$$W_i' = \frac{E_{Fi}^t - E_{Fi}^0}{\ln(E_{Fi}^t/E_{Fi}^0)} \quad (13)$$

为更清晰地展现各因素对能源足迹的贡献程度, 定义各影响因素的贡献度计算公式为:

$$\begin{aligned} \eta_F &= \Delta E_{FF}/\Delta E_F, \quad \eta_S = \Delta E_{FS}/\Delta E_F, \\ \eta_I &= \Delta E_{FI}/\Delta E_F, \quad \eta_P = \Delta E_{FP}/\Delta E_F, \\ \eta_R &= \Delta E_{FR}/\Delta E_F, \quad \eta_M = \Delta E_{FM}/\Delta E_F \quad (14) \end{aligned}$$

其中,  $\eta_F$ 、 $\eta_S$ 、 $\eta_I$ 、 $\eta_P$ 、 $\eta_R$ 、 $\eta_M$  分别为碳排放因子贡献度、能源结构贡献度、能源强度贡献度、人口规模贡献度、经济发展贡献度、土地固碳能力贡献度。

### 1.4 数据来源

安徽省历年人口规模、GDP、能源消费总量、能源消费总量结构等数据来源于《安徽省统计年鉴》(2010—2017 年)<sup>[22]</sup>, 各类能源碳排放系数来源于 2006 年联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 国家温室气体清单指南<sup>[23]</sup>, 各类型土地利用数据来源于中华人民共和国自然资源部土地调查成果共享应用服务平台 (<https://gtdc.mnr.gov.cn/shareportal/#/>)。

## 2 结果与分析

### 2.1 安徽省能源足迹计算

#### 2.1.1 2 种模型计算结果

基于碳汇法和 NPP 法的能源足迹总量见

表4所列。2010—2016年安徽省能源足迹变化率曲线如图1所示。

表4 基于碳汇法和NPP法的能源足迹总量 单位:  $10^4 \text{ hm}^2$

年份	碳汇法	NPP法
2009	4 563.35	1 257.68
2010	4 813.72	1 329.88
2011	5 233.03	1 444.54
2012	5 520.21	1 553.14
2013	5 826.05	1 641.73
2014	5 978.23	1 667.48
2015	6 112.13	1 713.93
2016	6 243.88	1 768.93

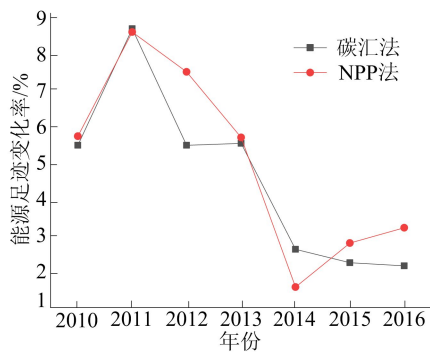


图1 2010—2016年安徽省能源足迹变化率曲线

基于碳汇法的能源足迹总量处于上升趋势,从2009年的  $4\,563.35 \times 10^4 \text{ hm}^2$  增至2016年的  $6\,243.88 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 8 a 累计增长 36.83%, 年均增长 4.60%; 人均能源足迹从  $0.67 \text{ hm}^2$  增至  $0.89 \text{ hm}^2$ 。由图1可知, 2014—2016年碳汇法能源足迹平均增长率为 2.34%, 处于大幅下降阶段, 比第1阶段低 2.26%。这是由于2013年在国家全力推进环境改善政策要求下, 安徽省政府建立了省级环境保护目标责任考核联席会议制度和考核制度, 能源消费结构有显著改善。

基于NPP法的能源足迹总量从2009年的  $1\,257.68 \times 10^4 \text{ hm}^2$  增至2016年的  $1\,768.93 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 累计增长 40.65%, 年均增长 5.02%; 人均能源足迹从  $0.19 \text{ hm}^2$  增至  $0.25 \text{ hm}^2$ 。从图1可以看出, NPP法的能源足迹变化率曲线也呈下降趋势, 其原因是除能源消费情况外, NPP法计算的能源足迹还受区域土地碳吸收能力和土地利用结构的制约。由(2)式可得安徽省区域NPP变化。2009—2016年安徽省土地利用结构变化较小, 各项土地利用面积均有轻微的下降; 耕地占安徽省用地面积的 58%以上, 林地占 37%。

区域NPP在8 a内呈下降趋势, 累计降低  $0.001\,5 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 导致基于NPP法的能源足迹也逐年下降。

### 2.1.2 2种模型计算结果对比分析

碳汇法和NPP法结果在总体变化趋势上具有一致性, 在数值上碳汇法是NPP法计算结果的 3.58倍, 两者的绝对差值有逐年扩大的趋势, 这主要是由2种模型理论基础不同导致的。碳汇法模型主要存在2点缺陷: ①除了林地外, 未考虑其他类型的土地对碳吸收所做的贡献, 因此无法真实反映区域的综合碳吸收能力; ②未考虑土地利用变化对区域碳吸收能力的影响, 无法真实体现土地利用结构的时空差异特性。

NPP法对以上缺陷进行改进, 除占总面积 37%的林地外, 还增加了耕地、园地和草地的碳吸收能力; 不仅对区域性土地碳吸收能力进行计算, 还考虑土地利用变化的影响。

碳汇法与NPP法能源足迹构成结构如图2所示。

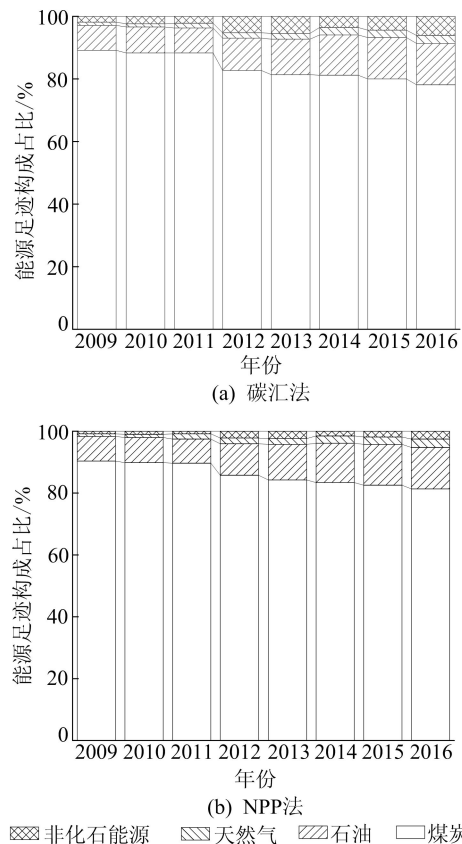


图2 2009—2016年安徽省碳汇法与NPP法能源足迹构成结构

从能源足迹的构成看, 2种模型结果的构成顺序一致, 从大到小依次为煤炭、石油、天然气、非化石能源, 但在具体占比上存在一定差别。

2016 年 NPP 法计算的煤炭足迹占比为 78.07%，比碳汇法低 3.29%，NPP 法计算的非化石能源足迹比碳汇法高 3.50%。这是由于 NPP 法先将电力与其他能源消耗折算成煤炭，再按煤炭足迹的计算方法计算，避免了碳汇法中非化石能源足迹偏低的问题。因此，本文在后续分析中使用基于 NPP 法模型计算的能源足迹结果。

## 2.2 安徽省能源足迹影响因素分析

### 2.2.1 能源足迹影响因素分解

以 2009 年为基准年，根据(7)~(14)式计算的 2010—2016 年安徽省能源足迹变化影响因子分析结果见表 5 所列。

2010—2016 年安徽省能源足迹影响因子变化曲线如图 3 所示。

表 5 2010—2016 年安徽省能源足迹变化影响因子分析结果

单位:  $10^4 \text{ hm}^2$

年份	人口规模	经济发展	能源结构	能源强度	碳排放因子	土地固碳能力	合计
2010	6.08	259.78	-0.85	-192.65	-0.86	-0.16	71.33
2011	9.91	286.03	-3.57	-177.75	-3.59	0.04	111.07
2012	5.64	170.20	1.27	-68.59	0.95	0.08	109.55
2013	6.23	170.74	-7.50	-81.13	-7.49	0.24	81.10
2014	1.67	132.01	-18.07	-89.79	-18.10	-0.06	7.65
2015	3.17	88.12	1.63	-46.71	1.64	0.24	48.09
2016	19.43	140.09	4.36	-109.03	4.35	0.16	59.35
均值	7.45	178.14	-3.25	-109.38	-3.30	0.08	69.73

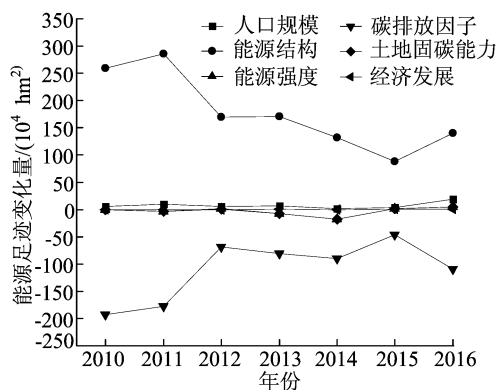


图 3 2010—2016 年安徽省能源足迹影响因子变化曲线

从总体看，人口规模和经济发展对安徽省能源足迹的增长有促进作用，能源强度具有抑制作用，而能源结构、碳排放因子和土地固碳能力对能源足迹的影响则有轻微的正、负波动。

各因素对安徽省能源足迹增长量的贡献度从大到小依次为：经济发展(2.55)、人口规模(0.11)、土地固碳能力(0)、碳排放因子(-0.05)、能源结构(-0.05)、能源强度(-1.57)。在减缓能源足迹增长的因素中，94.35%来自能源强度降低，2.85%来自碳排放减少，2.80%来自能源结构调整；在促进能源足迹增长的因素中，95.95%来自经济产出增加，4.01%来自人口规模扩大，0.04%来自土地固碳能力退化。

经济发展作为能源足迹增长的主要驱动力因素，贡献度为 2.55。2009—2016 年安徽省 GDP

从 10 062.82 亿元增加到 24 117.89 亿元，年均增长率为 13.48%，而人均 GDP 从 1.48 万元增加到 3.40 万元，年均增长 12.93%；经济发展对能源足迹增长的年均增量效应为  $178.14 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，说明安徽省在经济增长的同时消耗了大量能源，产生温室气体排放。人口规模效应为能源足迹的增长起到促进作用，累计贡献  $71.66 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，贡献度为 0.11；土地固碳能力从  $-0.16 \times 10^4 \text{ hm}^2$  增长至  $0.16 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，以耕地和林地为主的土地利用面积下降，使土地固碳能力为能源足迹增长提供轻微的正向作用。

能源强度下降是能源足迹增长的主要抑制因素，反映科学技术进步对能源足迹的影响程度。相比于 2009 年，2010 年安徽省能源强度从 0.88 tce/万元减少到 0.52 tce/万元，年均降低 7.05%；能源强度对安徽省能源足迹增长的总贡献值为  $-765.65 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，年均贡献值为  $-109.38 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。能源结构效应在安徽省能源足迹变化中起轻微抑制作用。2010—2016 年煤炭类能源消费比例从 87.0%降低至 75.1%，石油类能源消费比例略微上升，天然气所占比例从 1.5%增长至 4.1%，非化石能源从 1.4%增长至 4.4%；天然气和非化石能源在安徽省能源消费结构中占比较小，因此未发挥出充分的抑制能力。碳排放量的减少是抑制安徽省能源足迹增长的另一因素，年均增量效应为  $-3.30 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

### 2.2.2 能源足迹影响因素叠加效应分析

能源足迹的变化是多种不同因素相互作用、

叠加后的结果。为分析各因素的叠加效应,将各因素按照年平均贡献值的正负分为正效应和负效应。将经济发展、人口规模、土地固碳能力统称为正效应,将能源强度、碳排放因子、能源结构统称为负效应。

2010—2016 年安徽省能源足迹变化贡献值正、负效应如图 4 所示。2010—2016 年能源足迹正效应在 2011 年达到最大值  $295.98 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 在 2015 年达到最小值  $91.53 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 2011 年的正效应是历年来最大值,这是由于经济发展因素的增长贡献值在 2011 年达到顶峰;负效应从  $-194.26 \times 10^4 \text{ hm}^2$  降低至  $-100.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ;其中以经济发展为主的正效应大于以能源强度为主的负效应,两者比值为  $1.74 : 1.00$ 。2010—2016 年正、负效应比值均超过 1,说明以能源强度为主要驱动因素的负效应不足以抵消以经济发展为主导的正效应;但两者差值在近年来有逐渐缩小的趋势,叠加表现为安徽省能源足迹总量增速放缓。

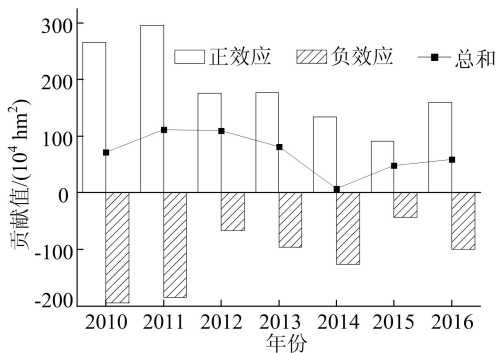


图 4 2010—2016 年安徽省能源足迹变化贡献值正、负效应

综上所述,能源强度是能源足迹降低的主导因素,提供  $-1.57$  的贡献度,但从叠加效应看,仅依赖能源强度的提高难以抑制经济发展引起的能耗增加,而目前安徽省的能源结构和碳排放因子效应仅发挥  $-0.05$  的贡献度,抑制潜力较大。因此,调整能源结构、降低碳排放能有效抑制能源足迹的增长。

### 2.3 非化石能源与能源足迹的相关性分析

为调整能源结构,验证非化石能源消费对能源足迹变化的影响程度,采用 Pearson 相关系数分析法,以安徽省 2010—2016 年煤炭足迹、石油足迹、天然气足迹和非化石能源足迹对能源足迹总量的贡献度为自变量,能源足迹年变化率为因变量,进行相关性分析。由于 2013—2014 年各项数值变化幅度过大,对相关性分析误差有较大影

响,计算时排除 2014 年的数据。

2010—2016 年安徽省各类能源足迹对总量的贡献度见表 6 所列,Pearson 相关系数分析结果见表 7 所列。煤炭足迹的贡献度与能源足迹变化率呈  $0.44$  正相关,非化石能源呈  $-0.54$  显著负相关,石油、天然气的贡献度与能源足迹变化率相关性低于  $0.30$ 。2016 年安徽省非化石能源占一次能源的比例与全国平均值相比低  $8.6\%$ ,说明安徽省非化石能源消费可增长空间较大,若增加非化石能源消费、降低煤炭消费,则能有效减缓能源足迹的增长。

表 6 2010—2016 年安徽省各类能源足迹对总量的贡献度 %

年份	煤炭	石油	天然气	非化石能源
2010	75.10	11.10	4.28	9.52
2011	87.35	5.47	6.51	0.68
2012	9.63	39.98	5.00	45.40
2013	55.58	31.99	4.19	8.23
2014	78.45	98.50	31.30	-108.25
2015	36.08	27.29	2.27	34.36
2016	16.80	17.31	8.11	57.77

表 7 Pearson 相关系数分析结果

能源类型	煤炭	石油	天然气	非化石能源
相关系数	0.44	-0.13	0.20	-0.54

## 3 结 论

(1) 碳汇法只对林地的碳吸收能力进行计算,忽略了区域综合碳吸收能力;NPP 法模型用 NPP 表示土地碳吸收能力,除林地外,加入耕地、园地、草地 3 种土地类型,并考虑在时间序列上土地利用变化的影响。本文在 NPP 法模型中对非化石能源足迹的计算方法进行改进,避免了碳汇法中非化石能源足迹较低的问题。因此,NPP 法模型的计算结果更准确,以安徽省 2009—2016 年能源足迹为例,碳汇法的计算结果是 NPP 法模型的  $3.58$  倍。

(2) 基于 NPP 法模型,计算得出 2016 年安徽省能源足迹为  $1768.93 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 累计增长  $511.25 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 年均增长率为  $5.02\%$ , 人均能源足迹从  $0.19 \text{ hm}^2$  增至  $0.25 \text{ hm}^2$ 。从能源结构看,能源足迹占比从大到小依次为煤炭、石油、天然气、非化石能源。在抑制能源足迹增长的因素中,  $94.35\%$  来自能源强度降低,  $2.85\%$  来自碳排放减少,  $2.80\%$  来自能源结构调整。在促进能源足迹增长的因素中,  $95.95\%$  来自经济产出增加,

4.01%来自人口规模扩大,0.04%来自土地固碳能力退化。从贡献度看,能源强度对能源足迹增长的贡献度为-1.57,经济发展的贡献度为2.55;能源结构和碳排放因子对能源足迹增长的贡献度均为-0.05,抑制力潜力较大。经济发展为主的正效应大于能源强度为主的负效应,两者之比为1.74:1.00,叠加表现为促进能源足迹增长。利用 Pearson 相关系数分析法得出,煤炭足迹的贡献度与能源足迹总量变化率呈 0.44 正相关,非化石能源足迹呈-0.54 显著负相关。

(3) 实现碳达峰行动方案、践行安徽省绿色低碳发展、减缓能源足迹增长的重点在于调整能源结构、提高非化石能源消费占比。应推进低碳技术创新、开发利用非化石能源,大力建设风电、水电、光伏装机,逐步将能源消费结构以化石能源为主向非化石能源为主转型,构建多元化的能源供应体系。

需要指出的是,本文将非化石能源消费纳入能源足迹计算中,还存在一些不足,如何进一步提高结果的准确度,并清晰指出非化石能源与能源足迹之间的关联,都是需要研究解决的问题。

### 参 考 文 献

- [1] 国务院. 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知 [EB/OL]. (2021-10-24) [2021-10-26]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm).
- [2] 陈俊武,陈香生. 中国中长期碳减排战略目标初探(V):非化石能源的需求与碳排放[J]. 中外能源,2011,16(9):1-14.
- [3] KITZES J, GALLI A, BAGLIANI M, et al. A research agenda for improving national ecological footprint accounts [J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 1991-2007.
- [4] 陈敏,张丽君,王如松,等. 1978 年~2003 年中国生态足迹动态分析[J]. 资源科学,2005,27(6):132-139.
- [5] 方恺,董德明,沈万斌. 基于净初级生产力的能源足迹模型及其与传统模型比较分析[J]. 生态环境学报,2010,19(9):2042-2047.
- [6] 薛若晗. 基于净初级生产力模型的福建省能源足迹研究[J]. 安徽农业科学,2018,46(27):64-67.
- [7] 何则,周彦楠,刘毅. 2050 年中国能源消费结构的系统动力学模拟:基于重点行业的转型情景[J]. 自然资源学报,2020,35(11):2696-2707.
- [8] REN X D, SHAO Q L, ZHONG R Y. Nexus between green finance, non-fossil energy use, and carbon intensity: empirical evidence from China based on a vector error correction model [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 122844.
- [9] CHEN J D, WANG P, CUI L B, et al. Decomposition and decoupling analysis of CO<sub>2</sub> emissions in OECD [J]. *Applied Energy*, 2018, 231: 937-950.
- [10] THOMBS R P. Has the relationship between non-fossil fuel energy sources and CO<sub>2</sub> emissions changed over time? A cross-national study, 2000—2013 [J]. *Climatic Change*, 2018, 148(4): 481-490.
- [11] 安徽省能源局. 安徽省能源局关于 2019 年污染防治攻坚战工作总结和 2020 年工作安排的报告 [EB/OL]. (2020-01-04) [2021-01-05]. <http://fzggw.ah.gov.cn/public/22554241/141163041.html>.
- [12] 安徽省能源局. 安徽省国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [EB/OL]. (2020-02-01) [2021-04-01]. <https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/dffzgh/202104/P020210408558077118783.pdf>.
- [13] WACKERNAGEL M, ONISTO L, BELLO P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept [J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 375-390.
- [14] REES W, WACKERNAGEL M. Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable; and why they are a key to sustainability [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 1996, 16: 223-248.
- [15] 方恺,董德明,沈万斌. 生态足迹理论在能源消费评价中的缺陷与改进探讨 [J]. 自然资源学报, 2010, 25(6): 1013-1021.
- [16] 陈成忠,林振山. 中国能源足迹增长波动的驱动因子分析 [J]. 生态学报, 2009, 29(2): 758-767.
- [17] 方恺,沈万斌,董德明. 能源足迹核算的改进与预测:以吉林省为例 [J]. 地理研究, 2011, 30(10): 1835-1846.
- [18] VENETOULIS J, TALBERTH J. Refining the ecological footprint [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2008, 10(4): 441-469.
- [19] 郭道扬. 会计百科全书 [M]. 沈阳: 辽宁人民出版社, 1989: 1604.
- [20] JIANG S, ZHU Y N, HE G H, et al. Factors influencing China's non-residential power consumption: estimation using the Kaya-LMDI methods [J]. *Energy*, 2020, 201: 117719.
- [21] YANG P G, LIANG X, DROHAN P J. Using Kaya and LMDI models to analyze carbon emissions from the energy consumption in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(21): 26495-26501.
- [22] 安徽省统计局,国家统计局安徽调查总队. 安徽统计年鉴: 2010—2017 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2010—2017.
- [23] 杨宏伟. IPCC 能源清单指南进展及其对中国的影响 [J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(6): 273-276.

(责任编辑 张淑艳)