综合研究

浙江省碳安全评价及其影响因素研究

黄忠华，周思超

（浙江工业大学 经贸管理学院，浙江 杭州 310023）

摘　要：[目的] 研究浙江省碳足迹、碳承载力的测度及结构，分析其碳安全程度及影响因素，为发展低碳经济提供参考和依据。[方法] 测度 2000—2015 年浙江省碳足迹和碳承载力，构建碳压力指数、碳足迹指数评价体系评价其碳安全程度；采用 STIRPAT 模型和岭回归方法对浙江省碳足迹的影响因素进行实证分析。[结果] 浙江省碳足迹经历了先增加后稳定并略微下降的过程，碳承载力基本稳定；能源利用效率逐年提高，经济发展对能源的依赖程度降低；浙江省碳压力指数在 1.35～4.19，碳足迹指数在 0.21～0.59，碳足迹总体处中等以上水平；回归结果表明，人口、城镇化率、GDP、第二产业占比、原煤碳足迹占比是浙江省碳足迹的主要驱动因素。[结论] 浙江省碳足迹较大，碳安全程度总体较低。为实现低碳经济目标，应通过控制人口数量，提高城镇化质量，发展低碳产业，促进高碳产业低碳化，推广使用清洁能源等措施减少碳足迹，同时增加城市绿化面积，保护森林以增加碳承载力。

关键词：碳足迹；碳承载力；碳安全；影响因素；浙江省

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2018)04-0234-07　　**中图分类号**：F062.2，X22，X24

文献参数：黄忠华，周思超. 浙江省碳安全评价及其影响因素研究[J]. 水土保持通报，2018，38(4)：234-240. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.038. Huang Zhonghua，Zhou Sichao. Carbon security assessment and its influencing factors in Zhejiang Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2018，38(4)：234-240.

Carbon Security Assessment and Its Influencing Factors in Zhejiang Province

HUANG Zhonghua，ZHOU Sichao

(*College of Economic and Management，Zhejiang University of Technology，Hangzhou，Zhejiang* 310023，*China*)

Abstract：[Objective] This paper aimed to study the measurement and structure of carbon footprint and carbon capacity in Zhejiang Province，to evaluate its carbon security and to analyze its influencing factors so as to provide reference and basis for the development of low-carbon economy. [Methods] We calculated the carbon footprint，carbon capacity from 2000 to 2015 in Zhejiang Province，constructed an evaluation system with respect to carbon pressure index and carbon footprint index and used it to evaluate the carbon security in Zhejiang Province. The STIRPAT model and ridge regresion methods were used to analyze the influencing factors of carbon footprint in Zhejiang Province. [Results] The carbon footprint of Zhejiang Province experienced a process of increasing firstly and then decreasing slightly，and its carbon capacity was basically stable. The efficiency of energy utilization increased year by year，and the dependence of economic development on it reduced. The carbon pressure index ranged from 1.35 to 4.19；the carbon footprint index ranged from 0.21 to 0.59，which meant that Zhejiang's carbon footprint was above the average level in the world. Regression results showed that the drivers of carbon footprint in Zhejiang Province included population factors(population，urbanization rate)，wealth factors(GDP)，technical factors(secondary industry share，coal carbon footprint). [Conclusion] The level of carbon security in Zhejiang Province was relatively low. In order to achieve the goal of low-carbon economy，measures like controlling the population，improving the quality of urbanization，developing low-carbon industries，promoting the use of clean energy，protecting forests and increasing urban greening area，should be taken.

Keywords：carbon footprint；carbon capacity；carbon security；influencing factor；Zhejiang Province

收稿日期：2017-12-15　　**修回日期**：2018-01-21

资助项目：国家自然科学基金项目“产业用地供给结构性失衡的形成机理及资源配置效应研究”(71774143)，“土地资源错配的形成机理及其对生产率影响的实证研究”(71373243)；浙江省哲学社会科学规划课题一般项目(15NDJC185YB)；国家社会科学基金一般项目(17BGL130)；浙江省哲学社会科学规划课题重点项目(18NDJC030Z)

第一作者：黄忠华(1981—)，男(汉族)，浙江省绍兴市人，教授，博士生导师，主要从事土地与城市发展研究。E-mail：hzhzjut@163.com。

通讯作者：周思超(1993—)，男(汉族)，浙江省天台县人，硕士研究生，研究方向为环境与经济。E-mail：zhousichao111@126.com。

2009 年哥本哈根全球气候变化大会提出 192 个与会国要依照《京都议定书》的要求开展减排活动,中国大气本底基准观象台最新监测表明,1994—2005 年大气中 CO_2 浓度年均上升 2 mg/kg。全球温室气体排放形势依旧严峻,全球变暖趋势不变,各国减排任务依然艰巨。碳足迹作为一种新的 CO_2 排放测算方法已经成为国内外学者研究的热点之一。碳足迹一词最早源于生态足迹[1],国外对碳足迹的研究起步较早,主要从概念内涵、测度方法以及计算分析三个方面展开[2]。碳足迹目前没有统一的定义,王薇等[3]对 BP,ETAP,POST,Energetics 等国外学者关于碳足迹的定义做了系统的比较,发现 Wiedmann 和 Minx[4]的定义较为全面,他们认为碳足迹一方面是产品、系统完整生命周期的 CO_2 排放总量,另一方面是政府、个人、企业等主体在活动中直接和间接产生的 CO_2 总量。国内学者对碳足迹也做了大量的研究,焦文献等[5]、卢娜等[6]学者对甘肃、江苏省历年碳足迹进行了测算并分析了其影响因素。肖玲等[7]、纪芙蓉等[8]对山东、陕西省的碳足迹和碳承载力进行了测算和分析。国内碳足迹的研究已较多,而对碳承载力和碳安全的研究相对较少。汪燕[9]、李炯等[10]对浙江省碳足迹及其影响因素进行了研究。浙江省的碳足迹研究主要集中在碳足迹变化以及影响因素方面,较少探讨碳承载力和碳安全。浙江省是东部沿海发达省份,GDP 位列全国前 5,从资源禀赋情况看,浙江省的资源相对紧缺,以煤炭为主的能源现状短时间内不会改变,随着经济继续快速发展,浙江省的减排压力依然很大。本研究计算分析浙江省能源碳足迹和碳承载力,通过碳压力指数、碳足迹指数构建的评价体系对浙江省的碳安全现状作出评价,并选用 STIRPAT 模型对浙江省以及其 11 个地级市碳足迹的影响因素做实证分析,比较各因素的影响效应,为浙江省发展低碳经济提供参考。

1　研究方法

1.1　碳足迹

能源消耗是城市碳足迹的主要贡献源,约占 CO_2 排放总量的 90%[11]。本文采用 2001—2016 年《中国能源统计年鉴》中各类能源消费数据来计算浙江省 2000—2015 年的碳足迹。碳足迹的计算主要有投入产出法、生命周期法 、《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》推荐的 IPCC 计算方法等。本文采用 IPCC 所提供的参考方法,计算公式为:

$$CF=\sum C_i \cdot EF_i=N \cdot cfp=S \cdot cfd$$

$$EF_i=e_i \cdot c_i \cdot o_i \frac{44}{12}\times 10^{-6} \quad (1)$$

式中:CF——区域的总碳迹(t);C_i——第 i 种能源的消费量(t);EF_i——第 i 种能源的 CO_2 排放系数;e_i,c_i,o_i——第 i 种能源的平均低位发热值、单位热值碳含量和燃烧碳氧化率;N——总人口数量;cfp——人均碳足迹(t/人);S——浙江省总面积(km^2);cfd——碳足迹密度(t/km^2)。

碳足迹产值(VCF)是 GDP 与碳足迹的比值,表示单位碳足迹所产生的经济价值。VCF 越大表明单位碳足迹产生的 GDP 越大,即能源利用效率越高。通过分析碳足迹产值的变化趋势可以探析区域能源效益态势以及经济增长对能源消费的依赖情况。

1.2　碳承载力

碳承载力指某一区域所有碳汇植被所固定的 CO_2 总量。碳承载力的计算口径目前没有明确的界定,赵先贵等[12]主要考虑森林的固碳能力,卢俊宇等[13]主要考虑森林和草地的固碳能力,韦良焕等[14]、马彩虹[15]在前者基础上,将农作物固碳也纳入计算。浙江省属于亚热带季风气候,森林主要以乔木林、竹林为主;主要农作物包括水稻、玉米、小麦、油菜和茶叶等。结合浙江省地理特点,本研究将碳承载力的计算范围确定为森林(以乔木为主)、竹林、城市绿地、园地、牧草地、农田以及沿海藻类水产作物,碳承载力计算公式为:　　$CC=CS+CG+CP=N \cdot ccp$　　(2)

式中:CC——碳承载力总量(t);CS——林地(森林、竹林)的 CO_2 固定量(t);CG——其他绿地(城市绿地、牧草地、园地)的 CO_2 固定量(t);CP——各类农作物的 CO_2 固定量(t);ccp——人均碳承载力(t/人)。CS,CG 的计算公式为:

$$CS=\sum S_{fi} \cdot NEP_{fi} \times \frac{44}{12}$$

$$CG=\sum S_{gi} \cdot NEP_{gi} \times \frac{44}{12} \quad (3)$$

式中:S_{fi}——第 i 类林地的面积(hm^2);NEP_{fi}——第 i 类林地的净生态系统生产力〔t/(hm^2 · a)〕,即 1 hm^2 该类林地 1 a 时间所能够固定的碳总量。参考吴庆标[16]的研究,本文取浙江省森林的 NEP_{fi} = 2.84 t/(hm^2 · a),竹林的固碳能力是同等立地杉木的 1.6 倍[17],竹林 NEP_{fi} = 4.99 t/(hm^2 · a)[18]。S_{gi}——第 i 类绿地的面积(hm^2);NEP_{gi}——第 i 类绿地的净生态系统生产力〔t/(hm^2 · a)〕,参考以往

学者的研究，各类绿地的净生态系统生产力分别取城市绿地 NEP_{gi} = 0.62 t/(hm² · a)[19]；牧草地 NEP_{gi} =0.36 t/(hm² · a)；园地 NEP_{gi} =0.95 t/(hm² · a)。

农作物碳承载力的计算公式为：

$$CP=(\sum S_{pi} \cdot NEP_{pi}+\sum Q_i \cdot K_i)\times\frac{44}{12} \quad (4)$$

农作物固碳研究主要采用生物量法，根据各类作物的干重碳含量、经济系数、水分占比、根冠比计算作物的含碳量。近来许多学者将农田视为一个生态系统，通过实地抽样，跟踪测算等方法将各类生产活动的碳足迹，土壤固碳等因素综合考虑，测算出了一些农作物的净生态系统生产力(NEP_{pi})。为了更真实地计算碳承载力，本文对已经测算出 NEP_{pi} 的作物，将该作物种植面积 S_{pi}(hm²)与 NEP_{pi} 相乘计算其碳承载力。其他作物根据生物量法，以碳转换系数 K_i 与经济产量 Q_i(t)相乘计算其碳承载力。余玮[20]等测算了中国 6 个典型农作区主要作物的 NEP_{pi}，浙江在其区域划分中属于长江中下游地区，该地区主要作物 NEP_{pi} 分别为：水稻 4.32 t/(hm² · a)＞玉米2.477 t/(hm² · a)＞油菜 2.474 t/(hm² · a)＞小麦 1.136 t/(hm² · a)；宋博等[21]对我国省域设施蔬菜农田生态系统单位净碳汇量进行了核算，其中浙江省为 3.541 t/(hm² · a)；阮建云[22]在茶园生态系统固碳潜力研究中测得浙江绍兴高产茶园地茶树年均固碳量为7.0 t/(hm² · a)；参考谷家川等[23]各类作物生物量计算的指标，计算碳转换系数 K_i。本文纳入计算各类作物的 K_i 及 NEP_{pi}，结果详见表 1。

表 1 各类作物的碳转化系数及净生态系统生产力

作物	K_i	作物	NEP_{pi}
大豆	1.134	水稻	4.320 t/(hm² · a)
棉花	1.615	玉米	2.477 t/(hm² · a)
薯类	0.172	油菜	2.474 t/(hm² · a)
花生	1.530	小麦	1.136 t/(hm² · a)
芝麻	3.307	蔬菜	3.541 t/(hm² · a)
麻类	1.388	茶叶	7.000 t/(hm² · a)
糖类	0.248	海藻	1.030×10^4 t/a
烟草	0.960		

1.3 碳安全评价

衡量一个区域碳安全程度的主要指标包括净碳足迹(NCF)和碳压力指数(CTI)。净碳足迹指某一区域碳足迹和碳承载力的差值，差值为正则该区域表现为碳源，差值为负则该区域表现为碳汇。碳源加剧温室效应，碳汇则遏制温室效应，净碳足迹的计算如公式(5)；碳压力指数是碳足迹与碳承载力的比值，反映一个区域的碳安全程度，其计算如公式(6)。

$$NCF=CF-CC=N \cdot NCF_p \quad (5)$$

$$CTI=CF/CC \quad (6)$$

胡剑波[11]在以往研究的基础上构建了区域能源消耗碳排放指数，并制定了等级划分标准。本文参考其研究结果，将碳排放拓展到碳足迹概念，构建碳足迹指数如公式(7)。

$$CFI=0.7\times\frac{cfp}{CF_p\times CFPI_{max}}+0.3\times\frac{cfd}{CF_d\times CFDI_{max}} \quad (7)$$

式中：CFI——碳足迹指数，碳足迹指数大小反映了研究对象碳足迹水平在世界范围内的位置；CF_p = 2 t/人，是为适应全球气候变化的人均碳足迹目标值；CF_d = 233 t/km³，是为适应全球气候变化的碳足迹密度目标值；CFPI——人均碳足迹指数，为 cfp 和 CF_p 的比值，$CFPI_{max}$ = 15；CFDI 是碳足迹密度指数，为 cfd 和 CFd 的比值，$CFDI_{max}$ = 35；$CFPI_{max}$，$CFDI_{max}$——全球范围内的最大值。

为评价浙江省碳足迹水平和碳安全程度，参考赵先贵等[12]根据生态压力指数等级划分的评价模式，并简化为 5 级评价模式，沿用胡剑波[11]的二级等级划分标准，构建综合评价体系详见表 2。

表 2 碳安全等级划分标准

碳足迹指数等级			碳压力指数等级		
等级	CFI	状态	等级	CTI	状态
I_A		碳汇	Ⅰ	0～0.50	安全
I_B	0～0.06	很低	Ⅱ	0.51～0.80	较安全
I_C	0.07～0.19	较低	Ⅲ	0.81～1.00	稍不安全
II_A	0.20～0.29	中下	Ⅳ	1.01～1.50	较不安全
II_B	0.30～0.39	中等	Ⅴ	≥1.51	不安全
II_C	0.40～0.49	中上			
III_A	0.50～0.59	较高			
III_B	0.60～0.69	很高			
III_C	≥0.70	极高			

1.4 STIRPAT 模型

国内外学者采用 KAYA，IPAT，STIRPAT 及 LARS-Lasso 等模型和算法对碳足迹的影响因素做了大量研究。研究普遍认为碳足迹是人口、经济水平、城镇化进程、科技水平等因素共同影响的结果。本文采用 STIRPAT 模型对浙江省及 11 个地级市层面的碳足迹影响因素进行分析。STIRPAT 模型最早由 York[24]等人提出，模型如式(8)，为计算方便，对 STIRPAT 模型进行对数化处理，得到如公式(9)的模型。

$$I=a \cdot P^b \cdot A^c \cdot T^d \cdot e \quad (8)$$

$$\ln I=\ln a+b\ln P+c\ln A+d\ln T+\ln e \quad (9)$$

式中:I——环境影响;P——人口因素;A——财富因素;T——技术因素;a——模型整体系数;b,c,d——人口、财富、技术的指数;e——随机误差项,当各项指数都为 1 时与 IPAT 模型相同。

1.4.1　指标选取　①环境因素。总量概念,以区域碳足迹来表征。②人口因素。城市人口数量和人口结构的变动直接影响能源的消费量,以总人口(P)和城镇化率(UR)来表征。③财富因素。经济增长离不开能源消费,以区域生产总值(GDP)来表征。④技术因素。技术的发展将影响能源消费从而影响碳足迹,以第二产业比重(SR),原煤碳足迹在总碳足迹中的占比(CR)来表征,模型可调整为公式(10):

$$\ln CF=\ln a+b_1\ln P+b_2\ln UR+c\ln GDP+d_1\ln SR+d_2\ln CR+\ln e \quad (10)$$

1.4.2　方法选取　根据 STIRPAT 模型的相关研究,为消除选取变量间可能存在的共线性影响,本文采用岭回归方法对模型进行拟合。具体操作为:分析各变量的岭迹图($0<K<1$),确定各岭迹趋于稳定并且各变量回归系数通过 T 检验($sig<0.05$)条件下的最小 K 值,代入 K 值最终确定模型各变量的回归系数。岭回归实质上是一种改进的最小二乘估计法,当 $K=0$ 时,岭回归就是最小二乘回归。

2　结果分析

2.1　碳足迹和碳足迹产值计算结果与动态分析

根据 2001—2016 年《中国能源统计年鉴》《浙江统计年鉴》的数据,计算出浙江省 2000—2015 年的碳足迹,碳足迹产值如图 1 所示。由图 1 可知,浙江省能源碳足迹从 2000 年的 1.58×10^8 t 增加到 2015 年的 4.44×10^8 t,增幅 180.65%。历年全省生产总值根据 GDP 指数换算为 2000 年可比价,GDP 从 2000 年的 6.20×10^{11} 元增加到 2015 年的 2.94×10^{12} 元,增幅 378.33%,年均增幅 25.22%。VCF 从 2000 年的 3 900 元/t 增加到 2015 年的 6 600 元/t,增幅 69.23%,表明每吨碳足迹的 GDP 产出增加 2 700 元,这得益于政府节能减排政策的实施和生产水平提高。2000—2005 年 VCF 一直保持在 3 800～4 000 元/t,表明这些年份浙江省 GDP 增加对能源的依赖程度基本不变。浙江省 2005—2015 年 GDP 与 VCF 均逐年递增,表明浙江省这 11 年经济不断增加,同时经济增长对能源的依赖程度逐渐降低。浙江省的碳足迹总体是呈上升趋势,2011 年达到峰值 4.55×10^8 t,在 2012—2015 年呈现较弱的下降趋势,均在 4.40×10^8 t 浮动,表明浙江省的能源消费在 2012 年后达到了一个比较平稳的状态。

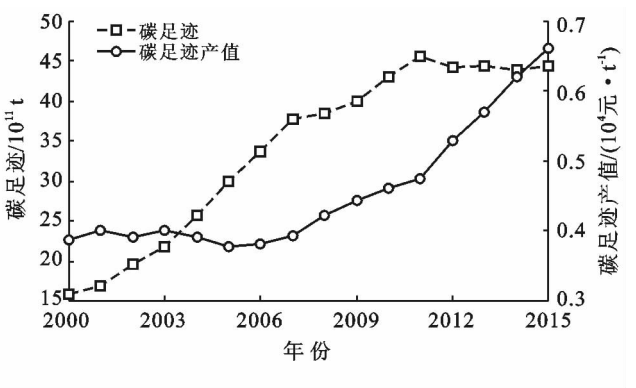


图 1　浙江省 2000－2015 年碳足迹和碳足迹产值

2.2　碳承载力计算结果与动态分析

根据 2001—2016 年《浙江统计年鉴》历年作物种植面积和产量数据、《浙江自然资源与环境统计年鉴》历年土地利用情况数据、浙江林业局和国家林业局公布的历年植被类型面积数据,通过公式(2)—(4)计算得到 2000—2015 各年各类植被类型,土地类型的碳承载力。

浙江省 2000—2015 年碳承载力基本稳定,总体呈下降趋势,从 2000 年的 1.17×10^8 t 下降到 2015 年的 1.09×10^8 t,降幅为 6.96%。浙江省牧草地很少,少于 466.67 hm^2,年均约吸收 500 t 二氧化碳。以乔木为主的森林碳承载力基本保持不变,总体表现为先增后减,2009 年为峰值,历年均在 5 800～5 900 t 间变动。竹林碳承载力逐年递增,从 2000 年的 1.40×10^7 t 增加到 2015 年的 1.70×10^7 t,增幅为 20.35%。农田碳承载力显著逐年递减,这是城市化发展的结果,农田碳承载力从 2000 年的 4.30×10^7 t 下降到 2015 年的 3.10×10^7 t,降幅 28.47%。城市绿地碳承载力显著逐年递增,从 2000 年的 7.50×10^4 t 增加到 2015 年的 3.53×10^5 t,增幅达 370.40%,年均增幅 24.69%,表明浙江省对城市绿化的重视程度很高,但城市绿地的碳承载力占总承载力的份额很小。构成浙江省碳承载力的主要是森林(49.44%～54.35%)、竹林(12.07%～15.61%)、农田(28.17%～36.64%),这三者构成了超过 90%的全省碳承载力。相比较其他碳承载力的研究,浙江省承载力构成中草地贡献很小,竹林和农田占了很大比重。水稻碳承载力下降是农田碳承载力下降的主要原因,水稻碳承载力从 2000 年的 2.50×10^7 t 下降到 2015 年 1.30×10^7 t,降幅 48.53%;油菜碳承载力从 2000 年的 2.70×10^6 t 下降到 2015 年的 1.10×10^6 t,降幅 58.84%;蔬菜碳承载力没有明显的变动趋势,2008 年后基本保持在 8.00×10^6 t 左右;茶叶碳承载力从 2000 年的 3.31×10^6 t 增加到 2015 年的 4.99×10^6 t,

增幅 50.97%。水稻(47.98%～65.4%)、油菜(4.09%～6.97%)、蔬菜(19.08%～29.55%)、茶叶(8.55%～18.39%)4种作物构成了超过88%的农田碳承载力。

2.3 碳安全分析

根据碳足迹、碳承载力计算结果以及浙江省历年常住人口,通过公式(5)计算出浙江省2000—2015年人均碳足迹,人均碳承载力及人均净碳足迹,计算结果及变动情况如图2所示。由图2可知,浙江省人均碳承载力在2000—2015年整体呈下降趋势,从2000年到2015年减少了0.36 t/人,降幅13.84%。人均碳承载力降幅大于总碳承载力的降幅6.96%,表明人均碳承载力减少是由于总碳承载力减少和人口增加两者共同作用的结果。人均净碳足迹和人均碳足迹基本呈现相似的变化趋势:2000—2011年呈上升趋势,增幅分别为170.45%,680.96%。人均净碳足迹的增幅大于人均碳足迹的原因是2000—2011年人均碳承载力虽然基本保持稳定,但总体还是呈现下降趋势。人均净碳足迹和人均碳足迹在2011年达到峰值后,在接下来的4 a内呈现较弱的下降趋势。2012年碳足迹显著下降的主要原因笔者认为是政府进一步强化重点领域监管,实施节能减耗工程,污染减排工程,启动能源消费总量和单位生产总值能耗双控工作,关闭不达标企业的结果。2015年浙江省人均碳足迹为9.11 t/人,为应对全球气候变暖年人均碳足迹目标值的4.56倍,碳足迹水平较高。

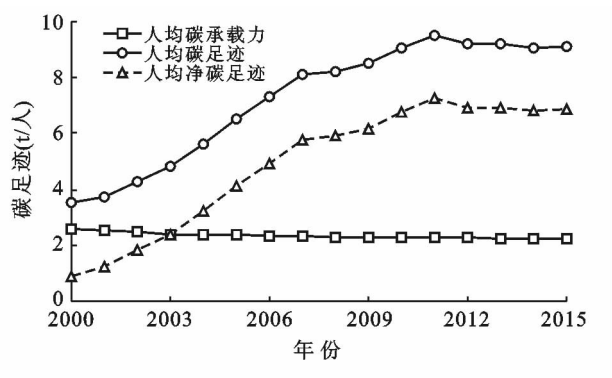


图2 浙江省2000－2015年人均碳足迹,人均碳承载力,人均净碳足迹

浙江省2000—2015年的碳压力指数、碳足迹指数计算结果及等级划分情况如图3所示。由图3可知,浙江省碳压力指数(CTI)与碳足迹指数(CFI)在2000—2015年基本呈现相似变动。CTI,CFI在2000—2011年呈上升趋势,CTI从2000年的1.35增加到2011年的4.19,增幅210.37%;CFI从2000年的0.21增加到2011年的0.59,增幅180.95%。2011年达到峰值后,CTI,CFI开始呈现出下降的趋势,CTI从2011年的4.19下降到2015年的4.08,降幅2.63%;CFI从2011年的0.59下降到2015年的0.58,降幅1.69%,表明浙江省在十二五期间节能减排成效明显。CTI(2000—2001年)在1.01～1.50碳压力指数分级中属于第Ⅳ级:较不安全;CTI(2002—2015年)>1.50,属于第Ⅴ级:不安全。CFI(2000—2015年)在0.21～0.59,属于第Ⅱ_A—Ⅲ_A级,等级呈上升趋势,CFI(2007—2015年)均属于第Ⅲ_A级,表明近几年浙江省的碳足迹在世界范围内属于较高水平。在2000—2015年CTI均大于1,CFI均大于0,说明2000—2015年浙江省都是一个碳源,对加剧温室效应起到促进作用。总体上浙江省近些年均处于一个不安全的能源消费进程中,碳足迹水平较高,碳安全程度较低。

CTI是碳足迹与碳承载力的比值,浙江省碳承载力在2000—2015年基本保持不变,呈现微弱的下降趋势,降幅为6.96%;碳足迹变动较大,从2000—2015年增加了180.65%,CTI变动主要受碳足迹影响。CFI的计算因子是人均碳足迹和地均碳足迹,首先,地均碳足迹是碳足迹和浙江省面积的比值,浙江省面积固定不变,地均碳足迹取决于总碳足迹。其次,人均碳足迹是碳足迹和人口的比值,浙江省人口在2000—2015年增加了8.27%,与碳足迹增幅180.65%相比较小,人均碳足迹变动主要受碳足迹影响。浙江省面积不变,人口增速减缓,根据前文碳承载力计算结果与趋势分析,预测碳承载力在未来较长一段时间内不会有明显变动,所以在未来较长一段时间内,浙江省的碳安全程度主要受其碳足迹的影响。

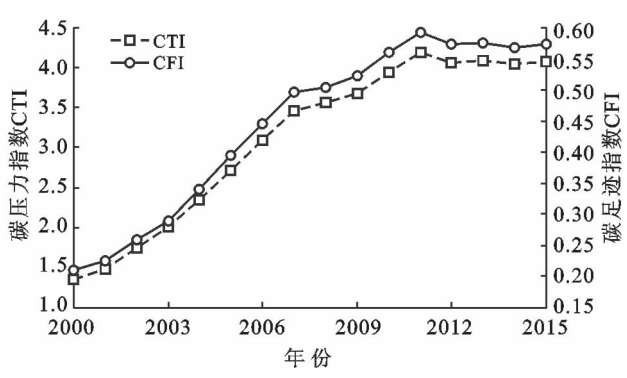


图3 浙江省2000－2015年碳压力指数,碳足迹指数变化

2.4 影响因素分析

根据浙江省能源消费数据、地级市工业主要能源消费数据,计算浙江省、各地级市碳足迹(CF)和原煤

碳足迹占比(CR);以城镇人口占总人口比重表示城镇化率(UR);历年 GDP 根据 GDP 指数调整为 2000 年可比价;第二产业增加值比重(SR);历年年末常住人口(P)。通过 SPSS 20.0 对 2000—2015 年浙江省及各地级市层面的影响因素变量(lnCF,lnGDP,ln$P$,lnUR,lnSR,lnCR)进行岭回归分析。浙江省的岭回归结果如表 3 所示,回归方程如式(11):

$$\ln CF = 3.638\ln P + 1.328\ln UR + 0.291\ln GDP + 1.452\ln SR + 1.248\ln CR - 22.6 \quad (11)$$

分析可知,各影响因素的回归系数均大于零,表明人口、城镇化率、GDP、第二产业占比、原煤碳足迹占比都对碳足迹起到促进作用。影响程度依次为:人口>第二产业占比>城镇化率>原煤碳足迹占比>GDP;其中人口的影响程度最大,当 lnP 增加 1%时,lnCF 相应增增加 3.638%;GDP 的影响程度最小,当 lnGDP 增加 1%时,lnCF 增加 0.291%。

表 3　浙江省岭回归拟合结果(K=0.028)

变量	回归系数	标准误	T 值	P 值
ln$P$	3.638	0.794	4.582	0.001
lnUR	1.328	0.184	7.213	0.000
lnGDP	0.291	0.022	13.036	0.000
lnSR	1.452	0.383	3.796	0.004
lnCR	1.248	0.536	2.328	0.042
ln$a$	−22.599	7.023	−3.218	0.009

注:R^2= 0.991,F 值=216.599,sig. F=0.000。

浙江省各地级市对模型的拟合程度整体较好。除湖州(0.798)、舟山(0.816)外其他各市对模型的拟合程度均达到了 0.88 以上,杭州、宁波、嘉兴、衢州对模型的拟程度达到 0.95 以上。各因素对地级市的平均影响水平与对省级的影响水平基本一致。浙江省和各地级市岭参数 K 值 、因素的回归系数 B(p<0.05)、模型拟合优度 R^2 如表 4 所示。地级市层面,各市的显著影响因素不同,因素的影响水平也有差异,差异大小可以根据回归系数大小进行评价。分因素看,人口对金华(5.040)、台州(5.033)的影响较大,对杭州(2.141)、温州(1.99)的影响较小,对舟山、绍兴和湖州不存在显著影响;城镇化率对温州(3.851)影响最大、对嘉兴(0.508)、衢州(0.315)影响较小,对舟山不存在显著影响;GDP 对 11 个地级市均存在显著影响,对舟山(0.784)的影响最大,对绍兴市(0.149)影响最小;第二产业占比对嘉兴市(5.170)影响最大,对舟山、杭州和温州不存在显著影响;原煤碳足迹占比对舟山市(14.256)、嘉兴市(10.504)的影响较大,对丽水、湖州、绍兴和衢州不存在显著影响。各因素显著影响的城市个数:GDP>城镇化率>人口数=第二产业占比>原煤碳足迹占比。回归系数均值:人口>第二产业比>原煤碳足迹占比>城镇化率>GDP。地级市层面和全省层面人口总数、城镇化率、GDP 对碳足迹的影响效应基本一致,第二产业占比和原煤碳足迹占比对碳足迹的影响,地级市水平高于省级水平。

表 4 浙江省及 11 个地级市 STIRPAT 岭回归结果

B	K	b_1	b_2	c	d_2	d_2	a	R^2
浙江省	0.028	3.638	1.328	0.291	1.452	1.248	−22.600	0.991
杭州市	0.060	2.141	1.492	0.245	—	2.282	−9.361	0.979
宁波市	0.030	4.033	1.227	0.263	2.533	0.471	−17.410	0.985
嘉兴市	0.081	3.672	0.508	0.311	5.170	10.504	−14.988	0.957
湖州市	0.065	—	1.514	0.182	4.484	—	8.962	0.798
金华市	0.067	5.040	2.687	0.295	2.481	2.606	−21.862	0.955
衢州市	0.450	4.355	0.315	0.218	1.341	—	−18.641	0.918
温州市	0.240	1.990	3.851	0.329	—	0.893	−5.232	0.941
舟山市	0.000	—	—	0.784	—	14.256	−4.886	0.816
绍兴市	0.040	—	1.011	0.149	2.999	—	8.032	0.920
丽水市	0.280	3.236	2.320	0.196	1.865	—	−10.694	0.893
台州市	0.260	5.033	1.732	0.355	2.216	4.474	−25.750	0.888
系数个数	11	8	10	11	8	7	11	11
市均值	—	3.688	1.666	0.254	2.886	2.145	—	0.914

注:数据来源:2001—2016 年《中国能源统计年鉴》《浙江统计年鉴》各地级市统计年鉴。衢州市 2000—2003 年,嘉兴市 2004 年,舟山市 2000 年能源消费数据缺失。表中缺省值为变量的参考系数未通过 T 检验。各系数个数及均值计算只考虑 11 个地级市,不考虑舟山市和嘉兴市的 d_2。

整体上看,影响浙江省碳足迹的主要因素是人口因素,次要因素是技术因素,财富因素也促进碳足迹增加,但影响程度不大。具体来看,人口增加和城镇化发展是碳足迹增加的主要原因,近几年浙江省人口

增速趋缓为管控碳足迹提供了有力条件，碳足迹是城镇化的负效应，政府应着眼于提高城镇化质量以减少碳足迹；落后的产业结构和能源结构是碳足迹增加的重要原因，政府应着手于推进产业结构升级和能源结构优化；GDP 虽然也促进碳足迹增加，但影响不大，省级(0.291)，市级(0.254)，控制碳足迹不会牺牲 GDP 的增长。因此，浙江省应采取控制人口数量、提高城镇化质量、发展低碳产业、促进高碳产业低碳化、推广使用清洁能源等措施以减少碳足迹。

3 讨 论

目前许多碳收支研究采用国家级甚至全球级的研究结论，导致其研究在大尺度上掩盖了地区特征。本文在计算碳足迹时考虑各类能源的燃烧碳氧化率，在计算碳承载力时根据浙江省地理特点确定计算范围，并将最接近浙江省固碳能力的研究成果进行了归纳，使计算结果能最大程度反映浙江省碳收支的真实状况。

在以往研究基础上，本文从碳压力指数和碳足迹指数两个角度对浙江省碳安全现状进行了分析。通过分析两者计算结果的共性，发现浙江省碳安全的主要受其碳足迹影响，研究碳足迹影响因素也就是研究其碳安全状态的影响因素，基于此推论本文采用 STIRPAT 模型对浙江省及其 11 个地级市 2000—2015 年碳足迹影响因素进行了研究，对各影响因素的影响效应进行了分析。最后根据研究结果为浙江省低碳经济发展提出了具有实践价值的建议。

4 结 论

(1) 浙江省 2000—2011 年碳足迹一直增加，2012 有下降波动，在 2012－2015 年基本稳定；浙江省能源利用效率提高、经济增长对能源消耗的依赖程度不断降低；人均净碳足迹与人均碳足迹在研究年份内呈现相似的变动趋势；人均碳承载力基本保持稳定，总体呈下降趋势；浙江省碳承载力在研究年份内基本稳定，总体呈下降趋势，森林、竹林、农田贡献超过 90% 的全省碳承载力；水稻、油菜、蔬菜、茶叶贡献超过 88%的农田碳承载力。

(2) 浙江省在 2002 年后碳压力指数均大于1.50，碳安全等级为第Ⅴ级，碳安全程度较低；碳足迹指数在 0.21～0.59，碳足迹安全等级在 Ⅱ_A—Ⅲ_A 之间，2005 年开始浙江省碳足迹在全球范围内属于中等以上水平，碳足迹水平较高。尽管两个指数在 2011 年后有较小的下降趋势，但碳足迹基数大，碳压力指数较高，浙江省的节能减排压力依然很大；浙江省碳安全程度主要受碳足迹影响。

(3)浙江省及其各地级市碳足迹的驱动因素包括总人口、城镇化率、生产总值、第二产业占比、原煤碳足迹占比；主要因素是人口因素，次要因素是第二产业占比和原煤碳足迹占比；GDP 也促进碳足迹增加，但影响程度不大。地级市层面，各因素的影响效应存在差异，平均水平与省级基本一致。

综合来说，在 2000—2015 年，浙江省碳足迹经历了先增加后稳定并略微下降的过程。能源利用效率提高，经济发展对能源的依赖程度不断降低，但由于碳足迹基数较大，未来几年浙江省减排压力依然较大。浙江省碳承载力基本稳定，碳安全程度主要受碳足迹大小影响。为实现可持续发展目标，控制碳安全水平，浙江省应采取控制人口数量、提高城镇化质量、发展低碳产业、促进高碳产业低碳化、推广使用清洁能源等措施减少碳足迹，同时增加城市绿化面积，保护森林以增加浙江省碳承载力。

[参 考 文 献]

[1] Ester V. Books: Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth[J]. Journal of Industrial Ecology, 2008,3(2/3):185-187.

[2] Pandey D, Agrawal M, Pandey J S. Carbon footprint: current methods of estimation[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010,178(1/4):135-160.

[3] 王微，林剑艺，崔胜辉，吝涛. 碳足迹分析方法研究综述[J]. 环境科学与技术，2010,33(7):71-78.

[4] Wiedmann T, Minx J. A Definition of carbon footprint[J]. SA Research & Consulting, 2007,92(4):193-195.

[5] 焦文献，陈兴鹏，贾卓. 甘肃省能源消费碳足迹变化及影响因素分析[J]. 资源科学，2012,34(3):559-565.

[6] 卢娜，曲福田，冯淑怡，等. 基于 STIRPAT 模型的能源消费碳足迹变化及影响因素：以江苏省苏锡常地区为例[J]. 自然资源学报，2011,26(5):814-824.

[7] 肖玲，赵先贵，许华兴. 山东省碳足迹与碳承载力的动态研究[J]. 生态与农村环境学报，2013,29(2):152-157.

[8] 纪芙蓉. 陕西省能源利用碳足迹与植被碳承载力研究[D]. 陕西 西安：陕西师范大学，2012.

[9] 汪燕. 浙江碳排放驱动因素及减排对策分析[J]. 浙江经济，2016(5):30-32.

[10] 李炯，陈宇光. 浙江区域二氧化碳排放差异、脱钩状态与 EKC 检验：基于 11 市面板数据的分析[J]. 中共浙江省委党校学报，2014,30(2):97-105.

[11] 胡剑波，桂姗姗. 西南民族地区碳安全等级评估[J]. 江苏农业科学，2017,45(6):269-272.

[12] 赵先贵，马彩虹，肖玲，等. 陕西省碳足迹时空变化研究[J]. 地理科学，2013,33(12):1537-1542.

(下转第 246 页)

聚集为主，2000—2013年集聚发生变化的区域主要发生在沿海南部的漳浦县至云霄县一带，主要表现为高值聚集区的分布由聚集向分散的演变。低值集聚主要集中在沿海北部的福鼎市、蕉城区及罗源县，高值集聚区主要分布在龙海市、漳浦县及云霄县一带。

[参 考 文 献]

[1] 许妍，高俊峰，郭建科. 太湖流域生态风险评价[J]. 生态学报，2013，33(9)：2896-2906.

[2] 石浩朋. 基于景观结构的城乡结合部区域生态风险分析：以泰安市岱岳区为例[D]. 山东 泰安：山东农业大学，2013.

[3] 张小飞，王如松，李正国，等. 城市综合生态风险评价：以淮北市城区为例[J]. 生态学报，2011，31(20)：6204-6214.

[4] 徐羽，钟业喜，冯兴华，等. 鄱阳湖流域土地利用生态风险格局[J]. 生态学报，2016，36(23)：7850-7857.

[5] Harwell M A, Gentile J H, Bartuska A, et al. A science-based strategy for ecological restoration in South Florida[J]. Urban Ecosystems, 1999, 3(3/4): 201-222.

[6] 颜磊，许学工. 区域生态风险评价研究进展[J]. 地域研究与开发，2010，29(1)：113-118.

[7] Iroumé A, Huber A, Schulz K. Summer flows in experimental catchments with different forest covers, Chile [J]. Journal of Hydrology, 2005, 300(1): 300-313.

[8] 王娟，崔保山，刘杰，等. 云南澜沧江流域土地利用及其变化对景观生态风险的影响[J]. 环境科学学报，2008，28(2)：269-277.

[9] 许妍，高俊峰，郭建科. 太湖流域生态风险评价[J]. 生态学报，2013，33(9)：2896-2906.

[10] 卿凤婷，彭羽. 基于景观结构的北京市顺义区生态风险时空特征[J]. 应用生态学报，2016，27(5)：1585-1593.

[11] 张莹，雷国平，林佳，等. 扎龙自然保护区不同空间尺度景观格局时空变化及其生态风险[J]. 生态学杂志，2012，31(5)：1250-1256.

[12] 吴莉，侯西勇，邸向红. 山东省沿海区域景观生态风险评价[J]. 生态学杂志，2014，33(1)：214-220.

[13] 李景宜. 基于GIS的区域景观生态风险分析：以渭河下游河流沿线区域为例[C]//北京：中国灾害防御协会风险分析专委会年会，2008：899-903.

[14] 蒙晓，任志远，张翀. 咸阳市土地利用变化及生态风险[J]. 干旱区研究，2012，29(1)：137-142.

[15] 高宾，李小玉，李志刚，等. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J]. 生态学报，2011，31(12)：3441-3450.

[16] 王云，周忠学，郭钟哲. 都市农业景观破碎化过程对生态系统服务价值的影响：以西安市为例[J]. 地理研究，2014，33(6)：1097-1105.

[17] 李加林，徐谅慧，杨磊，等. 浙江省海岸带景观生态风险格局演变研究[J]. 水土保持学报，2016，30(1)：293-299.

[18] 张月，张飞，周梅，等. 干旱区内陆艾比湖区域景观生态风险评价及时空分异[J]. 应用生态学报，2016，27(1)：233-242.

[19] 巩杰，谢余初，赵彩霞，等. 甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异[J]. 中国环境科学，2014，34(8)：2153-2160.

[20] 卢远，苏文静，华璀，等. 左江上游流域景观生态风险评价[J]. 热带地理，2010，30(5)：496-502.

(上接第240页)

[13] 卢俊宇，黄贤金，陈逸，等. 基于能源消费的中国省级区域碳足迹时空演变分析[J]. 地理研究，2013，32(2)：326-336.

[14] 韦良焕，林宁，鞠美庭. 基于碳足迹和碳承载力的新疆碳安全评价[J]. 水土保持通报，2017，37(1)：281-285，291.

[15] 马彩虹. 中国能源碳足迹与植被碳承载力的对比分析[J]. 生态经济，2012(6)：53-55.

[16] 吴庆标，王效科，段晓男，等. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力[J]. 生态学报，2008，28(2)：517-524.

[17] 周国模，姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布[J]. 林业科学，2004，40(6)：20-24.

[18] 曹先磊，吴伟光. 不同地区毛竹林经营的经济效益与固碳能力分析：基于福建、浙江与江西的对比[J]. 林业资源管理，2015(1)：64-70.

[19] Min Zhao, Kong Zhenghong, Francisco J, et al. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 91(4): 807-813.

[20] 佘玮，黄璜，官春云，等. 我国典型农作区作物生产碳汇功能研究[J]. 中国工程科学，2016，18(1)：106-113.

[21] 宋博，穆月英. 碳汇功能的设施蔬菜生态补偿机制[J]. 西北农林科技大学学报：社会科学版，2016，16(2)：79-86.

[22] 阮建云. 茶园生态系统固碳潜力及低碳茶叶生产技术[J]. 中国茶叶，2010，32(7)：6-9.

[23] 谷家川，查良松. 皖江城市带农作物碳储量动态变化研究[J]. 长江流域资源与环境，2012，21(12)：1507-1513.

[24] Richard Y, Eugene A R, Thomas D. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. Ecological Economics, 2003, 46(3): 351-365.