

能源消费和工业过程碳足迹动态变化研究

—基于贵州省 1990 — 2014 年的分析

胡剑波^{1,2} 桂姗姗¹任亚运¹

(1 . 贵州财经大学经济学院, 贵州贵阳 550025 ;

2 . 贵州社会科学院博士后科研工作站, 贵州贵阳 550002)

【摘要】利用 IPCC 分析法, 测算了贵州省 1990 — 2014 年能源消费和工业过程的总体碳足迹、人均碳足迹、单位 GDP 碳足迹及单位土地面积碳足迹。结果显示: (1) 贵州省总体 CO₂ 排放呈现逐年递增态势, 从 5380.80 万吨上升到 28901.73 万吨, 年均增长率达 7.26%; (2) 贵州省人均碳足迹从 1.66 吨/人飚升到 6.68 吨/人, 增长了 3 倍; (3) 因 GDP 增速远高于碳足迹增速, 贵州省单位 GDP 碳足迹呈现下降趋势, 从 20.68 吨/万元下降到 3.12 吨/万元, 年均降幅为 20%; (4) 贵州省单位土地面积碳足迹从 305.38 吨/平方公里升至 1640.28 吨/平方公里, 增长幅度高达 437.13%。

【关键词】贵州; 化石能源; 工业过程; 碳足迹

【中图分类号】F062.2 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1671—4407(2016)12—039—04

1 引言

贵州地处中国西南, 资源能源储量位居全国前列。据 2015 年《贵州统计年鉴》及贵州煤田地质局预测数据, 贵州煤炭保有资源储量为 573.54 亿吨, 位居全国第 5 位; 2000 米以浅的煤层气资源储藏量达到 3.15 万亿立方米, 位列全国第 2 位, 占全国比例的 22%。凭借其资源优势, 贵州 2015 年 GDP 首次突破到万亿元以上, 达 10502.56 亿元, 较 2014 年同比增长 10.7%, 全国占比提高到 1.55%。但同时, 伴随着贵州经济在全国经济放缓的新常态下继续保持高的增长态势, 其背后是大量的能源资源消耗以及由此带来的碳足迹^①的高速增长。碳排放问题已经成为贵州能否有效坚守发展与生态“两条底线”、能否实现生态文明先行示范区建设、能否坚守“绿水青山就是金山银山”理念的关键一环。基于此, 本文利

¹**基金项目:** 国家社会科学基金青年项目(14CJL032); 中国博士后科学基金资助项目(2015M570798) 贵州省教育厅人文社会科学研究项目(2015QN23); 商务部国际贸易经济合作研究院与贵州财经大学联合研究基金项目(2016SWBZD05)

作者简介: 胡剑波(1982—), 男, 四川泸州人, 博士, 教授, 硕士生导师, 贵州社会科学院博士后科研工作站博士后, 研究方向为贸易与气候变化、低碳经济; 桂姗姗(1992—), 女, 河南驻马店人, 硕士生, 研究方向为贸易与气候变化; 任亚运(1990—), 男, 河南新乡人, 硕士生, 研究方向为贸易与气候变化。

用 IPCC 分析法,测度贵州 1990—2014 年能源消费和工业过程的总体碳足迹、人均碳足迹、单位 GDP 碳足迹以及单位土地面积碳足迹,以期为贵州节能减排、发展低碳经济等方面提供实证数据。

2 文献综述

针对碳足迹问题国内外相关学者都做了诸多研究。Wiedmann & Minx^[1]探讨了公共和学术使用的术语“碳足迹”之间的明显差异,并提出了一个科学的定义即:“碳足迹是测量一个产品整个生命周期内直接或间接造成的 CO₂排放量总累计量。”Hertwich & Peters 从全球贸易链的视角出发,选取 73 个国家和 14 个地区作为研究对象,对其货物和服务的最终消费量碳足迹进行了分析^[2]。郭运功等借助碳足迹相关理论、方法,对 1995—2006 年上海市能源碳足迹、碳足迹的产值和生态压力值进行了实证分析^[3]。Pandey 等认为温室气体浓度增加是造成环境问题的元凶,对主流碳足迹方法进行梳理,并提出相关问题^[4]。彭俊铭和吴仁海结合 IPCC 碳排放因子,对 1998—2009 年珠江三角洲能源碳足迹进行了计算^[5]。赵涛和郑丹基于能源碳足迹及其相关理论研究,选取 1996—2010 年数据,对能源碳足迹生态压力以及人均 GDP 进行脱钩分析^[6]。Mancini 等通过回顾梳理碳足迹相关理论,将碳足迹进一步深化为生态足迹的理念^[7]。综上所述,我们可知国内外学者对碳足迹的内涵界定、计量模型运用等方面做了诸多研究,取得了较为丰硕的成果,但存在以下不足:一是研究过于宏观和微观,对于中观领域的研究,尤其是我国西部生态脆弱地区的研究鲜有涉及;二是测度的碳足迹仅限于能源消费而很少考虑工业过程中产生的碳足迹;三是人均碳足迹、单位 GDP 碳足迹、单位面积碳足迹等方面研究涉及较少。基于此,本文以地处我国西部地区的贵州为例,利用 IPCC 分析法,测算贵州 1990—2014 年化石能源消耗和工业生产过程中的碳足迹,并在此基础上深入剖析贵州人均、单位 GDP 和单位面积的碳足迹,进而提出政策含义。

3 研究方法 with 数据来源

3.1 贵州省碳足迹模型构建

3.1.1 贵州碳足迹的测算方法

一个国家或地区的碳足迹主要包括能源消耗和工业生产过程中的碳排放两个方面。能源消耗碳足迹主要指的是产品在生产过程中,由于直接的能源消耗所带来的 CO₂ 排放;工业生产过程中的碳足迹是指工业生产中能源活动碳排放之外的其他化学反应过程或物理变化过程的碳排放,也就是指生产产品本身发生的化学或物理变化而产生的 CO₂,而不考虑生产过程中能源消耗产生的 CO₂。贵州碳足迹的测算公式为:

$$C_{CF}=C_E+C_{CE} \tag{1}$$

其中: C_{CF} 是贵州能源消费和工业生产过程中的 CO₂ 排放总量,单位:吨; C_E 是指贵州能源消耗所产生的 CO₂ 排放量,单位:吨; C_{CE} 是指贵州工业生成过程中的 CO₂ 排放量,单位:吨。

3.1.2 贵州能源消耗碳足迹的测算方法

通常情况,能源部门是温室气体排放清单中最重要的部门,在发达国家,其排放总量占据了全部排放量 75 % 的比例,其中的 CO₂ 排放量更是占据了全部 CO₂ 总排放量的 90 % 以上。在能源部门温室气体排放中,除去小部分 CH₄ 和 N₂O 以外,CO₂ 一般占比达到 95 %,同时,固定源燃烧又占据了能源部门 70 % 的温室气体排放,而这些排放中的半数又与能源工业中发电厂以及炼油厂的燃烧有关^[8]。本文在借鉴世界

上多数学者在测算 CO₂ 排放量时主要通过化石能源资源消费量来推算的基础上,根据 2006 年 IPCC 为 UNFCCC 以及《京都议定书》所制定的参考方法,也称之为排放系数法^[9] (碳排放量=活动数据*排放因子)来构建贵州能源消费的碳足迹模型。所谓排放系数法,是指在正常技术经济和管理条件下,生产单位产品所排放的气体数量的统计平均值,排放系数法亦称排放因子。

(1) 能源消费碳足迹的测算公式为:

$$C_E = \sum_{i=1}^n E_i \times EF_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

其中: C_E 是指区域能源消费的 CO₂ 排放量; E_i 是指区域第 i 种能源的消费量; EF_i 是指区域第 i 种能源的 CO₂ 排放系数。一般而言,能源消费主要是指能够直接取得或者通过加工、转换而取得有用的各种资源的消费,包括煤炭、原油等一次能源,电力、热力、成品油等二次能源以及其他新能源和可再生能源的消费。能源消费对应的各种能源碳排放量是根据各种能源的消费量和其对应的碳排放系数测算而得的,每种能源的碳排放系数不同,进而致使同量的不同能源消费对应的碳排放量有差异。根据贵州实际消耗化石能源及燃料情况以及《贵州统计年鉴》中有关能源消费的构成,我们发现其统计中仅仅涉及各种能源转化为标准煤的统计数据,并没有各种能源消费的详细数据,鉴于此,我们调整上述模型来测度贵州的能源消费 CO₂ 排放量。

(2) 贵州能源消费碳足迹的测算公式为:

$$C_E = E \times EF \quad (3)$$

其中: C_E 是指贵州能源消费的 CO₂ 排放量; E 是指贵州各种直接能源、热力和电力等消耗转化成标准煤的消费量,单位:吨标准煤; EF 是指标准煤的 CO₂ 排放系数,单位:吨/吨标准煤。根据《中国能源统计年鉴》提供的能源折算标准煤参考系数,并结合国家发改委能源研究所推荐的参考系数取 EF=2.4567。

3.1.3 贵州工业生产过程中碳足迹的测算方法^②

据美国橡树岭国家实验室 CO₂ 信息分析中心(CDIAC)数据显示,水泥生产过程 CO₂ 排放仅次于化石能源,其排放的温室气体 99% 以上为 CO₂。根据《贵州统计年鉴》中主要工业产品产量的统计数据,在此仅仅测算水泥生产过程中的 CO₂ 排放量。贵州水泥生产过程中碳足迹的测算公式为:

$$C_{CE} = E_{ce} \times EF_{ce} \quad (4)$$

其中: C_{CE} 是指贵州水泥生产过程中的 CO₂ 排放量,单位:吨; E_{ce} 是指贵州水泥的生产总量,单位:吨; EF_{ce} 是指水泥生产过程中的平均 CO₂ 排放因子。根据 1990 年《IPCC 清单指南》推荐的方法和 2011 年我国《省级温室气体清单编制指南(试行)》中推荐的缺省值,并结合张继义等^[10]等学者的研究成果,我们取 EF_{ce}=0.538。

3.2 贵州省人均、单位 GDP、单位面积的碳足迹模型构建

(1) 贵州人均碳足迹的测算公式为：

$$P_E = C_{CF} / P_t \quad (5)$$

其中 P_E 是指贵州人口平均碳足迹，单位：吨/人； P_t 指贵州年末人口总数，单位：人。

(2) 贵州单位 GDP 碳足迹的测算公式为：

$$G_E = C_{CF} / G_t \quad (6)$$

其中： G_E 是指贵州单位 GDP 的碳足迹，单位：吨 / 万元； G_t 是指贵州年末 GDP 总额，单位：万元。

(3) 贵州单位面积碳足迹的测算公式为：

$$A_E = C_{CF} / A_t \quad (7)$$

其中： A_E ：是指贵州单位面积的碳足迹，单位：吨 / 平方公里； A_t 才是指贵州年末总面积，单位：平方公里。

3.3 数据来源及处理

本文研究涉及的基础数据，包括能源消费量、水泥产量、年末人口总数、GDP、国土面积等数据均来源于 1990—2015 年《贵州统计年鉴》和《中国统计年鉴》，并根据文中研究所需对此数据进行了初步处理。

4 实证结果与讨论分析

4.1 贵州省总体碳足迹分析

根据前文公式 (1) — (4) 以及贵州相应的能源消费、工业生产等基础数据和确定的相关参数，我们可以得到 1990—2014 年化石能源消耗和工业生产过程产生的 CO_2 排放量，具体结果及分析如下：(1) 贵州作为典型的生态脆弱地区之一，不仅是能源储量大省，也是能源消耗和 CO_2 排放大省。贵州化石能源消耗从 1990 年的 2129.31 万吨标准煤上升到 2014 年的 9708.79 万吨标准煤，增长了近 4 倍。同时，因化

石能源消费产生的 CO₂排放量也从 1990 年的 5231.08 万吨攀升到 2014 年的 23851.58 万吨，年均增长率高达 6.52 %。（2）贵州水泥产量从 1990 年的 278.29 万吨一路飘升至 2014 年的 9386.89 万吨，增长了 32.73 倍；水泥生产产生的 CO₂排放量从 1990 年的 149.72 万吨攀升到 2014 年的 5050.15 万吨，年均增长率高达 15.79 %。（3）由于贵州能源消费碳排放总量、水泥生产碳排放总量的推动作用，贵州总体 CO₂排放量从 1990 年的 5380 . 80 万吨上升到 28901.73 万吨，年均增长率高达 7.26 %（表 1）。

表1 1990~2014年贵州总体CO₂排放量

时间 / 年	能源消费总量 / 万吨标准煤	能源消费 CO ₂ 排放量 / 万吨	水泥产量 / 万吨	水泥生产 CO ₂ 排放量 / 万吨	贵州总体碳足迹 / 万吨
1990	2129.31	5231.08	278.29	149.72	5380.80
1991	2313.1	5682.59	308.13	165.77	5848.37
1992	2518.8	6187.94	370.44	199.30	6387.23
1993	2545.5	6253.53	406.68	218.79	6472.32
1994	2719.66	6681.39	463.1	249.15	6930.54
1995	3156.25	7753.96	468.34	251.97	8005.93
1996	3398.91	8350.10	522	280.84	8630.94
1997	3696.08	9080.16	632	340.02	9420.18
1998	4024.32	9886.55	559.42	300.97	10 187.51
1999	3805.35	9348.60	710.29	382.14	9730.74
2000	3959.34	9726.91	783.88	421.73	10 148.64
2001	4437.86	10 902.49	920.01	494.97	11 397.46
2002	4469.86	10 981.11	1121.11	603.16	11 584.26
2003	5534.52	13 596.66	1324.66	712.67	14 309.32
2004	6011.01	14 767.25	1428.8	768.69	15 535.94
2005	5641.25	13 858.86	1557.97	838.19	14 697.05
2006	6172.45	15 163.86	1799.4	968.08	16 131.94
2007	6799.72	16 704.87	1943.1	1045.39	17 750.26
2008	7083.99	17 403.24	2048.94	1102.33	18 505.57
2009	7566.34	18 588.23	2664.78	1433.65	20 021.88
2010	8175.43	20 084.58	3694.84	1987.82	22 072.40
2011	9067.85	22 276.99	5250.89	2824.98	25 101.97
2012	9878.38	24 268.22	6100.45	3282.04	27 550.26
2013	9298.55	22 843.75	8352.95	4493.89	27 337.63
2014	9708.79	23 851.58	9386.89	5050.15	28 901.73

4 . 2 贵州省人均、单位 GDP 、单位面积的碳足迹分析

根据前文公式计算得出的贵州总体 CO₂ 排放量以及从《贵州统计年鉴》获取的历年年末总人口、GDP 和国土面积的数据，利用公式（5）—（7）我们可得贵州人均碳足迹、单位 GDP 碳足迹和单位国土面积碳足迹（表 2），具体分析如下：首先，人均碳足迹方面。贵州人口总数由 1990 年的 3236 . 97 万人上升到 2014 年的 4325 . 49 万人，增长幅度为 33 . 63 %；人均碳足迹由 1990 年的 1 . 66 吨 / 人攀升到 6 . 68 吨 / 人，除 1990 、1999 、2005 、2013 年 4 个年份出现负增长外，其他年份均呈现正的增长态势，年均增长率为 5.97 %。其次，单位 GDP 碳足迹方面。贵州 GDP 由 1990 年的 260.14 亿元一路攀升到 2014 年的 9266.39 亿元，增长近 35 倍，年均增长率高达 16.05 %；单位 GDP 碳足迹由 1990 年的 20.68 吨 / 万元下降到 3.12 吨 / 万元，呈下降趋势，原因在于 GDP 的增长速度远超 CO₂ 排放的增长速度。再次，单位国土面积碳足迹方面。由于总体 CO₂ 排放量的增加，贵州单位国土面积碳足迹从 1990 年的 305.38 吨 / 平方公里急剧上升到 2014 年的 1640.28 吨 / 平方公里，涨幅高达 437.13 %，年均增长率达到 7.26 %。

表2 1990~2014年贵州人均、单位GDP和单位面积的碳足迹

时间	人均碳足迹 / (吨 / 人)	单位 GDP 碳足迹 / (吨 / 万元)	单位面积碳足迹 / (吨 / 平方公里)
1990	1.66	20.68	305.38
1991	1.79	19.76	331.92
1992	1.93	18.79	362.50
1993	1.94	15.50	367.33
1994	2.05	13.21	393.33
1995	2.34	12.58	454.37
1996	2.49	11.93	489.84
1997	2.69	11.69	534.63
1998	2.88	11.87	578.18
1999	2.72	10.38	552.26
2000	2.76	9.85	575.97
2001	3.07	10.06	646.85
2002	3.09	9.32	657.45
2003	3.78	10.03	812.11
2004	4.06	9.26	881.72
2005	3.80	7.33	834.11
2006	4.11	6.90	915.55
2007	4.45	6.15	1007.39
2008	4.58	5.20	1050.26
2009	4.89	5.12	1136.32
2010	5.27	4.80	1252.69
2011	5.92	4.40	1424.63
2012	6.48	4.02	1563.58
2013	6.38	3.38	1551.51
2014	6.68	3.12	1640.28

5 结论与政策含义

本文利用 IPCC 方法对贵州 1990—2014 年能源消耗和工业过程中的总体碳足迹、人均碳足迹、单位 GDP 碳足迹以及单位土地面积碳足迹进行测算，得出如下实证结论：（1）贵州总体 CO₂ 排放呈现逐年递增态势，从 5380.80 万吨上升到 28901.73 万吨，年均增长率高达 7.26 %；（2）贵州人均碳足迹由 1990 年的 1.66 吨 / 人飘升到 6.68 吨 / 人，除 1990、1999、2005、2013 年 4 个年份出现负增长外，其他年份均为正增长，年均增长率 5.97 %；（3）出于贵州 GDP 增速远超碳足迹增速的原因，贵州单位 GDP 碳足迹呈现下降趋势，从 20.68 吨 / 万元下降到 3.12 吨 / 万元，其单位 GDP 碳足迹下降的背后依靠的是巨大的 GDP 涨幅，贵州 GDP 由 1990 年的 260.14 亿元增加到 2014 年的 9266.39 亿元，增长了 35.62 倍，但单位 GDP 碳足迹仅下降了 6.63 倍，相差悬殊，贵州单位 GDP 碳足迹下降仍然难以掩盖其背后的高额碳排放增长量；（4）单位面积碳足迹从 305.38 吨 / 平方公里急剧上升到 1640.28 吨 / 平方公里，涨幅高达 437.13 %，年均增长率高达 7.26 %。

根据实证分析结果，并结合贵州实际，我们提出如下建议：（1）优化能源消费结构，着重提高煤炭洗选率。作为能源大省，贵州应着力优化能源消费结构，以煤炭利用为切入点，在煤炭开采利用方面，根据全球气候变化压力与生态环境保护的要求，从源头抓起，从严抓起，全面提高入选率，并通过强制措施，迫使相关企业使用洗选煤，通过内部调整和政策补贴，消化较高的原料成本，为实现高碳能源低碳排放、减少煤炭环境污染、提高综合利用程度，带来巨大整体效益。（2）功口强工业生产技术改进，提升水泥制造工业水平。工业生产过程是另一大碳排放源，尤其是水泥行业，水泥行业 CO₂ 主要来源于钙质原料分解、燃料燃烧和电力消耗，贵州应该积极优化水泥制备工艺，减小单位水泥中熟料的比例，减少煅烧热耗和生产电耗，应用替代燃料，减少燃料燃烧 CO₂ 排放量，推动整体 CO₂ 排放水平下降。（3）立足现有传统能源，积极开发可再生能源。依托贵州传统能源强省地位，在保证经济正常运行的基础上，优先调用可再生能源发电和高能效、低碳排的化石能源发电，总结其他地区新能源的发展经验教训，充分利用贵州地理优势，积极利用贵州高原地区太阳能、地热能源，有效推进光热的发、储、输电力、生物质发电潜力，

通过提升绿色可再生能源的占比，减少碳排放。（4）大力发展公共交通，倡导绿色出行。（5）积极开展交流合作，吸取国内外先进低碳经验。以技术、资金引进和能力建设为重点，建立和加强多渠道、多层次、多种形式的国内外合作，通过共同研发、协同创新、开发清洁发展机制项目等多种途径借鉴和引进国内外先进的低碳管理经验和技术，提升贵州低碳领域的竞争力。

注：

① 碳足迹（carbon footPrint），用以标示一个人或者团体的“碳耗用量”。“碳”耗用得越多，导致地球暖化的元凶CO₂制造得越多，碳足迹就越大；反之，碳足迹就越小。

② 由于能源消耗部分考虑到了地区的生产和生活及相关活动的所有能源消耗量，因此，这里的工业过程不考虑工业生产或运输等消耗的能源，而是只考虑生产某种产品本身发生的化学或物理变化而产生的CO₂。

参考文献：

[1] Wiedmann T, Minx J. A Definition of "Carbon Footprint" [M] // Pertsova CC, Ecological Economics Research Trends. Hauppauge NY, USA : Nova Science Publishers, 2008 : 111.

[2] Hertwich EG, Peters GP. Carbon footprint of nations : A global, trade-linked analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43 (16) : 6414 — 6420.

[3] 郭运功, 汪冬冬, 林逢春. 上海市能源利用碳排放足迹研究 [J]. 中国人口. 资源与环境, 2010 (2) : 103 — 108.

[4] Pandey D, Agrawal M, Pandey J. Carbon footprint : Current methods of estimation [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 178 (1) : 135 — 160.

[5] 彭俊铭, 吴仁海. 基于 LMDI 的珠三角能源碳足迹因素分解 [J]. 中国人口. 资源与环境, 2012 (2) : 69 — 74.

[6] 赵涛, 郑丹. 1996 — 2010 年中国能源碳足迹生态压力研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2014 (8) : 1 — 6.

[7] Mancini MS, Galli A, Niccolucci M et al. Ecological footprint : Refining the carbon footprint calculation [J]. Ecological Indicators, 2016, 61 : 390 — 403.

[8] IPCC. Guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. UN : Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.

[9] Houghton JT, Jenkins GJ, Ephraums JJ. Climate change : The IPCC scientific assessment [R]. Cambridge : Cambridge University Press, 1990.

[10]张继义,姬文强,于涛,等. 水泥二氧化碳排放量预测及监测研究 [J] . 安全与环境学报, 2013 (3) : 58 — 61 .