

基于终端能源消费的工业部门减排潜力估算

——以云南为例^{*1}

林秀群 童祥轩

(昆明理工大学管理与经济学院, 昆明 650093)

【摘要】工业部门是我国碳排放的主要来源, 同时也是减排潜力最大、耗时最长的部门, 云南省作为低碳试点省份之一, 研究其工业部门减排潜力对于控制云南省碳排放量峰值具有一定的参考意义, 并为其他省份低碳发展提供借鉴经验。基于终端能源消费选取 17 种能源系数(含电力、热力)全面测算 2000—2014 年云南省工业部门碳排放量。结合经济核算法和情景分析法预估 2015—2035 年云南省工业碳排放量及碳减排潜力。结果表明:如果没有相应制度及技术制约, 云南省工业碳排放将在未来持续大幅度增长, 在工业比重调整和节能技术进步的双重作用下, 云南省工业碳排放将在 2030 年达到峰值 15247. 19 万 t, 其中节能技术进步造成的碳强度减排始终占据主导地位。根据本文研究结果, 针对云南省工业部门, 进行合理的讨论与建议。

【关键词】终端能源; 工业碳减排; 结构减排; 强度减排; 排放峰值

2015 年的气候变化巴黎大会上, 中国表示将于 2030 年左右使 CO_2 排放达到峰值, 单位国内生产总值 CO_2 排放较 2005 年降低 60%~65%。云南省作为低碳试点之一, 承担着探索有效的低碳经济发展模式和路径的责任。2014 年, 云南省能源消费产生的 CO_2 排放量为 18952. 04 万 t, 而工业部门碳排放量为 13236. 91 万 t, 约占云南省 CO_2 排放总量的 69. 84%, 可以得出, 工业部门是云南省碳排放量最主要的领域。因此, 研究云南省工业碳减排潜力对于控制云南省碳排放量峰值具有一定的参考意义。

本文响应十三五节能减排规划, 参照发达省份及发达国家工业碳排放变化趋势, 基于云南省省情, 结合经济核算法和情景分析方法预估 2015—2035 年内云南省工业碳排放趋势及减排潜力, 并给出相应的对策及建议, 以期为云南省工业部门低碳发展提供思路拓展, 为我国其他省份开展工业部门节能减排工作提供理论依据和管理支持。

1 研究方法与数据来源

1. 1 国内外减排潜力综述

¹ 基金项目:国家自然科学基金项目——“基于生态文明的少数民族农户低碳行为模式研究:以云南为例”(项目编号:71263030;项目负责人:杨红娟)成果之一;国家自然科学基金项目——“云南少数民族贫困地区生态文明建设的关键因素和有效路径研究”(项目编号:71463034;项目负责人:杨红娟)成果之一;云南省哲学社会科学研究基地课题——“基于碳承载力的云南碳均衡平衡目标实现机制研究”(项目编号:JD2014YB09;项目负责人:林秀群)成果之一;昆明理工大学管理与经济院热点领域科研支撑计划项目——“云南省碳补偿目标实现机制研究(项目编号:QY2015028;项目负责人:林秀群)成果之一。

作者简介:林秀群:昆明理工大学管理与经济学院副教授, 研究方向:可持续发展和市场营销研究;童祥轩:昆明理工大学管理与经济学院硕士研究生, 研究方向:可持续发展和市场营销研究。

近年, 碳排放问题受到的重视日益上升, 尤其是在减排潜力方面, 国内外学者的研究取得了较大进展。Ang 等(1998)针对四种能源和八个工业部门行业, 研究 1985—1990 年中国的减排潜力, 得出结论中国工业部门有着巨大的减排潜力, 工业增加值和行业能源强度对中国工业 CO₂ 排放起最重要作用^[1]。Hu 等(2007)基于 DEA 模型对 1991—2000 年 APEC 经济体的节能目标率进行了分析, 发现中国节能潜力相比之下是最大的^[2]。Cai 等(2008)采用 LEAP 模型, 对中国五个最大碳排放部门的减排潜力进行了测算分析^[3]。Mauricio 等(2010)研究在低碳情景下, 巴西的工业部门运用新能源转化等技术来提高减排潜力, 测算得出 2010 年到 2030 年碳排放量可减少 150 万 t^[4]。

国内方面, 王克等(2006)基于 LEAP 模型设置了三种不同情景, 并测算相应情境下 2000—2030 年中国钢铁行业 CO₂ 排放量及相应的减排潜力^[5]。曹斌等(2010)基于 LEAP 模型, 对厦门市在不同减排政策下的情景进行分析, 并评价其节能减排潜力^[6]。刘晓渝(2012)以大连市为对象, 运用 LMDI 分解模型进行不同发展条件下的情景分析, 预测 2030 年 CO₂ 排放量, 结果表明能源结构的强化调整能够引起大幅度减排效果^[7]。郭玲玲等(2014)选取数据包络分析法, 对 1995—2010 年间中国节能潜力和减排潜力进行测算分析^[8]。吴常艳等(2015)以江苏省为例, 运用投入产出生命周期评价方法对产业的直接及间接碳排放进行测算, 并模拟测算产业结构调整引起的减排潜力^[9]。

1. 2 能源数据和计算方法

尽管国内外学者多年来利用不同的研究方法致力于我国碳排放研究, 但纵观国内外文献发现大多是对我国国家层面的碳排放的研究。近年来, 虽然国内已经有学者开始从省市来研究碳排放, 也大多集中于对江苏省、湖北省、河北省等省市的研究。与云南省相关的文献研究中, 电力、热力在终端能源消费碳排放测算中一直未被列入计算, 这对终端能源消费部门的节能减排有一定影响, 对于碳排放的测算也造成较大误差。目前云南省有关文献均采用三大系数法进行测算分析, 未将二次能源(电力、热力)列入碳排放测算模型, 更缺少对电力、热力的 CO₂ 排放因子的测算及其承担比率的换算。如刘丽萍^[10]、刘树芬^[11]、邱丽丽^[12]等在文章中均采用三大能源系数法测算云南省二氧化碳, 但相同年限的二氧化碳测算结果均有所差异。根据测算比较, 该测算方法并不能准确测算碳排放量。

本文基于降低测算误差的原则, 以 17 种(含电力、热力)能源构建云南省 CO₂ 排放总量模型。研究时间段为 2000—2014 年(因云南省 2001、2002、2009 年能源资料有部分缺失, 故该三年数据不列入计算), 并逐年进行定量分析。所有相关数据均来源于《中国能源统计年鉴》和《云南统计年鉴》, 终端能源数据均为实物量, 本文均折算为标准量, 具体见表 1。基于一次能源消费量的碳排放测算, 采用能源加工转换中的火力发电与供热的 15 种一次能源消耗量来进行间接测算二次能源(电力、热力)的 CO₂ 排放量, 充分考虑区域之间电力调入调出, 计算各部门终端承担比率, 并以 17 种(含电力、热力)终端能源, 分八大部门来构建 2000—2014 年云南省 CO₂ 排放总量测算模型。计算公式表述为:

$$C = 44/12 \times \sum_i B_i \times F_i \times E_i \quad (1)$$

表1 云南省工业碳排放变化趋势

年份	工业碳排放量 (万吨)	工业增加值 (亿元)	生产总值 (亿元)	工业经济比重 (%)	工业碳 强度
2000	3 856.10	531.47	2 011.19	26.43	7.26
2003	6 596.97	719.75	2 556.02	28.16	9.17
2004	4 043.24	881.19	3 081.91	28.59	4.59
2005	7 514.11	1 018.07	3 462.73	29.40	7.38
2006	11 936.21	1 240.36	3 988.14	31.10	9.62
2007	9 229.16	1 494.38	4 772.52	31.31	6.18
2008	12 936.79	1 803.62	5 692.12	31.69	7.17
2010	14 555.17	2 246.91	7 224.18	31.10	6.48
2011	15 268.73	2 753.64	8 893.12	30.96	5.54
2012	15 299.15	3 094.96	10 309.47	30.02	4.94
2013	14 185.88	3 470.66	11 832.31	29.33	4.09
2014	13 236.91	3 545.41	12 814.59	27.67	3.73

2 云南省工业碳减排潜力估算

发达国家的经验显示，工业部门能够在较长阶段发挥减排作用，即使在工业碳排放峰值出现后，仍可继续保持减排作用^[13]。在发达国家里，结构减排和强度减排为工业部门两大减排驱动因素，一直以来，我国的节能技术为工业减排做出了巨大贡献，而结构调整产生的减排效应并不明显^[14]。国内外不少学者常用SDA分解法和IDA分解法对中国碳排放的驱动因素进行分解，大部分研究结果表示，经济规模的增长是中国碳排放增长的决定性因素^[15]，碳强度下降是碳排放降低的重要因素，而产业结构变动和能源消费结构变动所引起的碳排放下降效果并不突出^[16]。这种情况在未来将得到改变。

本文根据云南省经济发展、工业结构、能源消耗等相关规划，参考国内外工业部门工业增加值和碳排放强度变化趋势，设置了基准情景、低碳情景一、低碳情景二、强化低碳情景。基准情景又称零方案，即在基准年工业状况基础上，云南省未采取任何减排措施和制定减排规划的发展情景；低碳情景一为云南省仅针对工业结构进行调整情况下工业碳排放的情况；低碳情景二为云南省针对节能技术提高导致的碳强度发生变化情况下工业碳排放的情况；强化低碳情景为云南省同时调整工业比重和推进节能技术的情况下，工业碳排放量的预测估算。在三种不同低碳情景下，运用经济核算法估算云南省工业减排潜力，并研究在不同情境下，云南省工业碳排放趋势及达到峰值所需的时间。

2. 1 估算方法及情景假设

2. 1. 1 情景设定

①基准情景：因经济增长的变化是碳排放增长的决定性动因，这种情况下主要考虑经济增长带来的工业碳排放增长。按照云南省未来的经济增长率变化的驱动下，不采取任何应对碳排放量增长的对策及措施，按原有趋势带来的碳排放水平的情景。一般来说，基准情景是碳排放水平最高的情景。

②低碳情景一：基于基准情景，仅考虑目前省份的相关工业比重调整，采取优化工业结构相关政策及措施，一方面保证经济社会发展目标的实现，另一方面积极调整工业比重。通过调整工业比重引起的结构减排，使得原本在经济增长驱动下大幅度增

长的碳排放有所降低，这种情景下的碳排放发展模式定义为低碳情景一。

③低碳情景二：基于基准情景，仅考虑节能技术的推广进步，采取加大节能技术的应用以降低碳排放强度。在保证经济发展的同时，落实现有的节能减排政策措施并延续下去。通过推进节能技术引起的碳强度减排，使得原本在经济增长驱动下飞速增长的碳排放趋势减缓，这种情境下的碳排放发展模式定义为低碳情景二。

④强化低碳情景：假定低碳情景一和低碳情景二共同基础上，综合考虑发达国家成熟经验和国内城市的减排目标，不仅保持经济增长，同时综合加强工业比重的调整和节能技术的进步，低碳发展模式更为稳定。在强度低碳情景下，采取结构减排和强度减排的结合措施，使得原本大幅度增长的碳排放趋于减缓，并在 2030 年达到峰值后，实现碳排放的回落。

2. 1. 2 经济核算法及参数设置

本文所采取的估算方法是经济核算法。设第 $n+1$ 年，经济增长引起的碳排放变化量为 ΔC_{n+1} ；工业比重调整引起的结构减排变化量为 ΔC_{n+1}^1 ；节能技术进步引起的碳强度减排变化量为 ΔC_{n+1}^2 ；第 $n+1$ 年经济增长率、工业比重变化率及碳强度变化率分别为 ΔG_{n+1} 、 Δg_{n+1} 、 ΔR_{n+1} 。

该估算方法过程如下：

$$\Delta C_{n+1} = C_n \times \Delta G_{n+1} \quad (2)$$

$$\Delta C_{n+1}^1 = (C_n + \Delta C_{n+1}) \times \Delta g_{n+1} \quad (3)$$

$$\Delta C_{n+1}^2 = (C_n + \Delta C_{n+1} - C_{n+1}^1) \times \Delta R_{n+1} \quad (4)$$

$$C_{n+1} = C_n + \Delta C_{n+1} - \Delta C_{n+1}^1 + \Delta C_{n+1}^2 \quad (5)$$

①经济发展参数：参考云南省经济增长趋势以及未来经济增长目标，假定 2015—2020 年云南省经济增长率为 7%。根据云南省发展方式转变的需要和发达国家的经验，假定 2021—2025 年、2026—2030 年、2031—2035 年云南省经济增长率分别为 6%、5%、4%。一般情况下，基准情景是能源需求和碳排放水平最高的情景。

②工业比重参数：参考云南省工业比重下降趋势以及发达国家相同发展阶段下产业结构的变动规律，假定 2015—2020 年云南省的工业增加值占生产总值的比重年均下降 1%，这样截至 2020 年，云南省工业经济比重为 22%，类似发达国家 2010 年的经济发展状况。此后，2020—2035 年工业比重进一步下降，但下降速度进一步放缓，设定每年工业比重减少 0.5%。

③碳强度参数：根据中国提出的在 2030 年左右使 CO_2 排放达到峰值，单位国内生产总值 CO_2 排放比 2005 年下降 60%~65% 这一标准，考虑到节能减排的技术进步难度。假定 2015—2020 年、2021—2030 年、2031—2035 年年均单位工业增加值碳排放分别下降 4.5%、4% 和 3.5%。

2. 2 工业碳减排潜力测算与分析

图 1 显示，若没有采取任何措施，云南省工业碳排放量将持续飞速增长，2035 年达到 41279.25 万 t，较 2014 年增长 211.65%。在低碳情景一或低碳情景二中，光靠结构减排或强度减排作用，云南省工业碳排放仍保持一定幅度的增长趋势，其中，低碳情

景二条件下,云南省工业碳排放上升幅度较低。而在强化低碳情景下,结构减排和强度减排共同作用,云南省工业碳排放才出现峰值,2020年云南省工业部门碳排放量为14147.51万t,2030年碳排放量达到峰值15247.19万t,将比2014年的13236.91万t增长15.19%。2030年后,云南省工业部门碳排放将逐渐减少,预计2035年减少到15096.86万t。

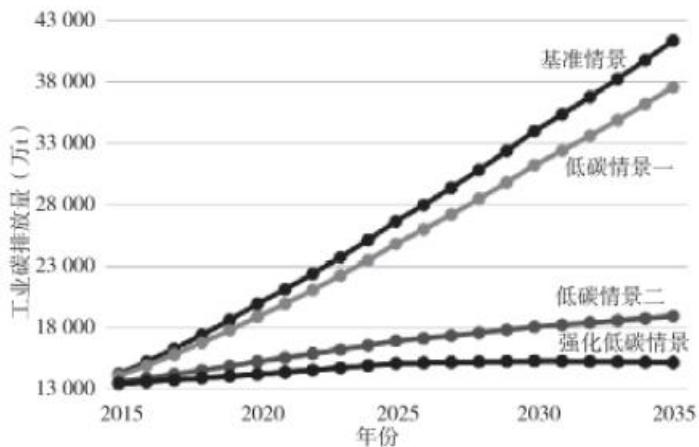


图1 2015—2035年云南省工业碳排放量

表2 云南省工业碳减排潜力

时间区间	结构减排	碳强度减排	合计减排
2016—2020	939.82	4 229.19	5 169.01
2021—2025	885.78	3 543.12	4 428.90
2026—2030	415.21	2 906.47	3 321.68
2031—2035	398.60	2 790.21	2 790.21

表2中,2015—2030年,在工业部门碳排放达到峰值前,因工业比重调整和节能技术进步,共计减排12919.6万t。其中,因工业比重下降而产生的结构减排为2240.81万t,因节能减排技术进步而产生的强度减排为10678.79万t。在工业碳排放达峰后,工业比重的下降和节能技术的进步将继续促使工业碳排放量保持下降趋势。因节能技术进步引起的碳减排量明显高于因工业比重调整引起的结构减排量,可以看出节能技术的进步,是未来工业部门减排的关键因素。

经过以上几种情景的比较,可以看出,云南省工业部门碳减排具有以下几个特征:第一,在基准情境下,没有相关制度及技术制约,云南省工业碳排放量将始终保持大幅度增长;第二,在工业比重调整和节能技术制约下,云南省工业峰值将出现在2030年,峰值量为15247.19万t。第三,工业部门碳减排持续时间较长,短期内效果并不明显。从2015年到2030年,需要16年达到真正的减排效果,使得工业部门碳排放量逐渐呈下降趋势。第四,云南省工业减排应全面加强结构减排和强度减排的共同作用来推动减排,仅靠其中单个因素,达不到理想的减排目标,其中,强度减排始终保持减排最重要地位。强度减排量在各阶段较结构减排量均高得多,突显节能减排技术进步在工业减排中的巨大贡献。

3 讨论与建议

参照发达国家的发展趋势可以得知,要达到持续保持减排作用,最重要的就是工业部门,而结构减排和强度减排是发达国家工业减排的双驱动因素^[17]。云南省制定的减排规划很大程度上取决于工业减排力度。云南省经济增长主要依赖于工业部门的带动,在长期经济增长累积的作用下,环境和经济发展之间的矛盾越发突出。在经济稳定增长的基础上,将低碳经济发展步入

正轨是目前迫切需要重视的问题。尽管目前云南省在低碳发展上有了一定的进展，但仅依靠结构减排和碳强度减排还远远不够，仍需要找出其他提高减排效率的方法。在对云南省能源需求和碳减排预测的基础上，最后提出几点对策和建议：

①针对工业部门内部进行结构优化，有可能进一步推动结构减排，目前云南省高能耗行业的能源消费总和占工业部门能源消费的比重高达 94%，这也是造成云南省能源强度较其他省份略高的主要原因。同时高能耗行业是造成云南省碳强度始终较高的重要原因，若能降低这些高耗能产业的工业比重，可使云南省的碳排放峰值提前到来。

②近年云南省煤炭消费比重逐渐减少，截至 2014 年，煤炭消费占能源消费总量的比重减少到 43. 07%，是采用新能源及清洁能源的良好开端。2000—2014 年期间，云南省生产部门能源结构在焦炭及电力能源的调整下，累计减排 103. 41 万 tCO₂ 排放。生活部门的能源结构减排主要依靠原煤消费比例的下降。化石能源使用的减少，是采用新能源及清洁能源的良好开端。针对其他部门，尤其以工业部门为主，需要减少原煤的使用。云南省风能资源极为丰富，在今后开发新能源过程中，应加大风能的开发力度和使用普及性，适当减少煤炭能源的产量，发挥出省内的清洁能源优势，扩大清洁能源的适用范围。

③不论是生产部门还是生活部门，云南省减排第一驱动因素均为能源强度的下降。而与其他省份相比，云南省仍处于能源强度较高的阶段，具有较大的减排潜力。能源强度的下降，主要依赖于科技进步和节能技术开发，体现出科技进步是实现低碳发展的最主要路径。针对生产部门始终为碳排放主要来源这一情况，云南省减排的重点仍在于加快研究节能技术的进度，提高能源的使用率。应加大推动节能技术进步和减排方案实施，用科技促进原始产业的调整及产品生产效率的提升，带领未来能源技术向经济化、绿色化、高效化、清洁化发展。

参考文献：

- [1] ANG B W, ZHANG F Q, CHOI K H. Factorizing Changes in Energy and Environmental Indicators Through Decomposition [J]. Energy, 1998, 23(6) : 489–495.
- [2] HU J L, LAP C H. Efficient Energy-saving Targets for APEC Economics [J]. Energy Policy, 2007, 35(1) : 373–382.
- [3] CAI W J, WANG C, CHEN J N, et al. Comparison of CO₂ Emission Scenarios and Mitigation Opportunities in China's Five Sectors in 2020 [J]. Energy Policy, 2008, 36: 1181–1194.
- [4] HENRIQUES M F, DANTAS F, SCHAEFFER R. Potential for Reduction of CO₂ Emissions and a Low-carbon Scenario for the Brazilian Industrial Sector [J]. Energy Policy, 2010, 38 (4) :1946–1961.
- [5] 王克, 王灿, 吕学都. 基于 LEAP 的中国钢铁行业 CO₂ 减排潜力分析 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46 (12) :1982–1986.
- [6] 曹斌, 林剑艺, 崔胜辉, 等. 基于 LEAP 的厦门市节能与温室气体减排潜力情景分析 [J]. 生态学报, 2010, 30(12):3358–3367.
- [7] 刘晓俞. 大连市工业发展低碳经济途径研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2012.
- [8] 郭玲玲, 武春友. 中国节能减排潜力测度与优化路径 [J]. 技术经济, 2014(11):60–67.
- [9] 吴常艳, 黄贤金, 瑞小伟, 等. 基于 EI0-LCA 的江苏省产业结构调整与碳减排潜力分析 [J]. 中国人口·资源与环

境, 2015, 25(4):43-50.

[10] 刘丽萍. 云南省能源消费级二氧化碳排放分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(3):140-142.

[11] 刘树芬, 马前涛, 孙俊. 云南省碳排放的估算与评价 [J]. 科协论坛, 2012(1):130-131.

[12] 邱丽丽. 云南省碳排放历史变化特征及影响因素分析 [J]. 环境科学导刊, 2015, 34(1):28-33.

[13] 田泽, 董凯丽, 吴凤平. 江苏省终端能源消费 CO₂排放总量测算及驱动因素研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(11):19-27.

[14] 郭朝先, 胡文龙, 刘芳. 发达国家工业部门碳排放情况及对我国的启示 [J]. 中国能源, 2013(10):16-20.

[15] 贺红兵. 我国碳排放影响因素分析 [D]. 武汉, 华中科技大学, 2012.

[16] 黄蕊. 基于 STIRPAT 模型的江苏省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测 [J]. 地理研究, 2016, 35(4):781-789.

[17] 郭朝先. 中国工业碳减排潜力估算 [J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(9):13-20.