

## 低碳经济下城市能源需求与碳排放情景分析 ——以河南省济源市为例

### Scenario analysis of urban energy demand and carbon emission in the context of low-carbon economy: the case of Jiyuan in Henan province

朱 婧<sup>1</sup> 刘学敏<sup>2</sup> (1. 东北大学秦皇岛分校经贸学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

**摘 要** 以低碳经济为背景, 探讨城市在能源和碳排放约束条件下未来的可能发展路径, 将河南省济源市作为研究开展的案例城市, 基于情景分析法和“脱钩”概念, 展示了济源市的低碳发展图景。认为: 第一, 济源市的能源需求若保持现有高速增长趋势是不可取的, 低碳情景下和强化低碳情景下能源需求总量和增速有明显改善; 第二, 尽管在最严格的情景下, 济源市的人均能耗预测值仍然高于国际国内其他城市的预测, 但由于其资源禀赋特征等问题, 还是存在着一定挑战; 第三, 济源市的经济增长依靠工业生产拉动, 对于工业占比为绝对主导的这类城市而言, 发展低碳经济的着力点和潜力释放应在传统产业格局的升级改造上。

**关键词** 低碳经济; IPAT 模型; 脱钩理论; 情景分析

**免责声明** 本文仅代表作者个人观点, 与中国 21 世纪议程管理中心、中国可持续发展研究会及联合国均无关。

*Disclaimer: This brief was submitted through the Administrative Centre for China's Agenda 21 (ACCA21), Ministry of Science and Technology, China, and the Chinese Society for Sustainable Development (CSSD). The views and opinions expressed are those of the author(s) and do not necessarily represent the views of, and should not be attributed to, the Secretariat of the United Nations, the ACCA21 or the CSSD. Online publication or dissemination does not imply endorsement by the United Nations. For further information, please contact Mr. Sun Xinzhang (sunxzh@acca21.org.cn)*

中国实现了几十年来经济的连续高速增长, 已经出现了资源供需紧张和环境负荷严重的现实问题, 同时仍处于工业化和城镇化进程当中, 加上“富煤贫油少气”的资源禀赋特征和能源利用结构, 低碳的发展道路成为必然。城市承载了各项生产和生活活动, 造成对化石燃料的大量消耗和 CO<sub>2</sub> 等温室气体的主要排放, 理应成为发展低碳经济的重要平台和关键区域, 城市未来的发展面临着能源需求的巨大压力和碳排放的严格限制, 因此, 必须要有一个适当的规划引导并能够实时对照检查<sup>[1]</sup>。在对城市未来能源需求和碳排放的相关研究中, 情景分析法是一种常用的分析方法, 认为构建不同的发展目标, 经过严格推理, 未来情形和向未来发展的过程是可以预测的。作为一种对发展不确定性的预测假设方法, 情景

分析法的最大优势在于使管理者预见到发展的多种可能, 为政策制定者和实施者提供建议和决策依据<sup>[2-4]</sup>。

## 1 情景分析的方法学介绍

### 1.1 基本框架

本文在预测低碳城市未来发展的能源需求和碳排放时, 采用情景分析和计量分析相结合的方法, 基于 IPAT 模型构建适用于研究对象的中长期预测框架。情景分析法有效结合了定量分析和定性分析的特点, 在对未来经济社会发展大形势进行预判的基础上, 量化分析城市可能的能源需求和碳排放, 计量分析则主要采用了回归分析和时间序列趋势外推等方法。

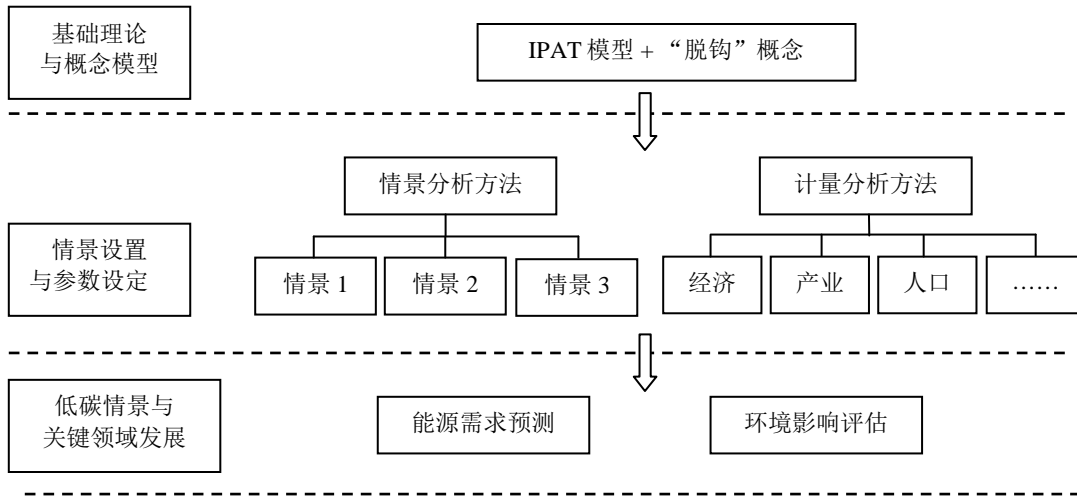


图1 情景分析基本框架

## 1.2 模型结构

### 1.2.1 IPAT 理论模型

20世纪70年代美国生态学家埃里奇 (Ehrlich) 提出了表征经济发展对环境影响的 IPAT 关系式, 用人口 ( $P$ )、富裕度 ( $A$ ) 和技术水平 ( $T$ ) 3 个因素来反映环境受到的影响, 其关系式用这个 3 个因素表达为<sup>[1]</sup>:

$$I = P \times A \times T \quad (1)$$

若将该关系式 (1) 中  $I$  看作碳排放对环境的影响, 那么整个关系式就是关于碳排放的 IPAT 方程, 在这里碳排放受到人口、经济增长和技术水平的综合作用。本文以碳排放的 IPAT 模型为基础, 引入“脱钩”的概念, 分析经济增长、能源需求和碳排放之间的关系,  $I$  表示碳排放的环境负荷,  $P$  表示人口总量,  $A$  用人均 GDP 来表征,  $T$  为单位 GDP 的碳排放量, 即碳排放强度<sup>[5-7]</sup>。

将关系式 (1) 进行分解, 关于碳排放的 IPAT 模型可以表达为关系式 (2) 的变化形式。式中,  $C_t$  表示  $t$  期城市的碳排放总量,  $P_t$  表示  $t$  期年末总人口数,  $A_t$  表示  $t$  期人均 GDP 水平,  $E$  表示能源消费总量,  $(E/GDP)_t$  表征的是  $t$

期能源强度,  $\sum_{i=1}^n E_i/E$  表示第  $i$  类能源占能源消费总量的比例即能源结构,  $K_i$  是第  $i$  类能源的碳排放系数。

$$C_t = P_t \times A_t \times (E/GDP)_t \times (\sum_{i=1}^n E_i/E) \times K_i \quad (2)$$

将  $t$  期与基期城市的碳排放负荷情况相比, 假设人口年增长率为  $\alpha$ , 人均 GDP 年均增长率为  $\beta$ , 能耗强度下降比率为  $\gamma$ , 代表能源技术进步程度, 用  $\delta$  表征能源结构的变化率。此外, 对于中短期的预测而言, 能源的碳排放系数  $K_i$  是一个相对稳定的常数, 除非有重大技术变革发生, 否则一般不会发生变化。模型的  $t$  期与基期各因素关系如下:

$$P_t = P_0 \times (1 + \alpha) \quad (3)$$

$$A_t = A_0 \times (1 + \beta) \quad (4)$$

$$(E/GDP)_t = (E/GDP)_0 \times (1 - \gamma) \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n E_i/E = \sum_{i=1}^n E_i/E \times (1 - \delta) \quad (6)$$

因此，城市 t 期与基期碳排放负荷的变化情况就可以表述为：

$$C_t = C_0 \times [(1 + \alpha) \times (1 + \beta) \times (1 - \gamma) \times (1 - \delta)]^t \quad (7)$$

### 1.2.2 “脱钩”概念模型

按照环境库兹涅茨曲线假说（EKC）的理论，经济增长的过程伴随着资源消耗和环境影响负荷，在经济增长的同时，与之相关的资源消耗、环境负荷的发展状态，可以用“脱钩”理论进行测度，即对经济增长和能源消耗、废弃物排放的关系进行一个量化的表达。因此发展的“脱钩”与否，可以作为环境发展和环境政策的重要评估依据，这里采用人均 GDP 增长率和碳排放变化率来表征经济增长和环境负荷之间的依赖程度<sup>[8-10]</sup>：

$$\text{脱钩程度} = \text{CO}_2\text{排放增长率} / \text{人均 GDP 增长率} \quad (8)$$

以脱钩程度的概念模型为基础，可以将经济增长和环境负荷之间的不同关系表征如下：脱钩程度 $>1$ ，说明 $\text{CO}_2$ 增长速度大于经济增长速度， $\text{CO}_2$ 排放量增加显著，经济增长直接依赖于资源能源的消耗，处于发展的未脱钩阶段；脱钩程度 $\leq 1$ ，说明 $\text{CO}_2$ 增长速度小于或与经济增长速度保持一致，经济增长并不是来源于资源消耗的变化，经济增长与能源资源消耗处于脱钩阶段。

### 1.2.3 情景的设置依据

依据关系式（7）中关于城市碳排放变化情况的关系，可以得到以下 3 点结论，作为城市未来低碳发展的情景设置的基本依据：

$(1 + \alpha) \times (1 + \beta) \times (1 - \gamma) \times (1 - \delta) > 1, C_t > C_0$ ：表明未来第 t 年的碳排放总量大于基期，环境负荷增加，人口增长和经济发展导致的碳排放量的增加程度大于能源技术进步和结构调整所带来的碳排放量的下降，按照脱钩理论的思想，该情况下未能实现碳排放的脱钩；

$(1 + \alpha) \times (1 + \beta) \times (1 - \gamma) \times (1 - \delta) = 1, C_t = C_0$ ：表明未来第 t 年的碳排放总量与基期相等，人口增长、经济发展和能源技术进步、结构调整所带来的碳排放的增减量正好抵消，即保障了经济社会增长的同时，没有造成碳排放的增加，实现了碳排放的脱钩；

$(1 + \alpha) \times (1 + \beta) \times (1 - \gamma) \times (1 - \delta) < 1, C_t < C_0$ ：表明未来第 t 年的碳排放总量小于基期，环境负荷减少，人口增长和经济发展虽然导致了碳排放增加，但是与之相比，更为显著的是能源技术进步和结构调整带来的碳排放下降，并且程度大于前者，即经济社会的增长已经不需要依赖能源消耗的增加，真正实现了碳排放的绝对脱钩。

## 2 济源市低碳发展的情景分析

济源市位于河南省西北部，是沟通晋豫两省的重要交通枢纽，煤、铁、铜等矿产资源丰富，受资源禀赋和发展定位等因素的影响，经济增长主要依靠第二产业拉动，终端能源消费中工业部门占了绝对比重，产业发展对资源依赖度较高，产业结构不尽合理，钢铁、铅锌冶炼行业 and 水泥行业是碳排放最多的工业部门。受重化工业发展的影响，生态环境面临较大挑战<sup>[11]</sup>。

### 2.1 情景构建

情景分析的边界为济源市的行政区划边界，主要涉及到城市的能源需求、产业发展、交通、建筑和碳汇等方面，采用的数据来源于历年的《河南省统计年鉴》、《济源市统计年鉴》、济源市能源平衡表和各有关单位部门的基础能源统计等资料<sup>[12-13]</sup>。研究选择 2010 年为基期，2015 年、2020 年、2025 年和 2030 年为目标期，由于在这些时间点上的相关规划资料较为完整，对于情景分析参数设置有指导意义，参考国家能源需求和碳排放发展的背景、前提和要求，同时结合河南省和济源市其本身对于低碳建设发展的相关政策法规、规划实施条

件，以及对未来能源需求和碳排放可能出现的情况做出假设，依据 IPAT 模型设置了城市未来发展的 3 种情景：

### 2.1.1 基准情景 (Business as Usual, BaU)

按照城市近年来惯有的经济增长速度、人口发展规模、城镇化和工业化的进程，以及资源消耗和能源需求的现状，以经济增长作为最主要的驱动因素，不采取任何应对气候变化的对策和措施，保持惯性发展带来的能源需求和碳排放水平的情景。结合城市的未来发展定位和目标，显示该情景下城市的资源能源保障、生态环境影响以及与未来发展的要求。一般说来，基准情景是能源需求和碳排放水平最高的情景。

### 2.1.2 低碳情景 (Low Carbon, LC)

在基准情景的基础上，考虑城市当前的节能减排、针对气候变化的相关政策法规、行动计划及干预措施等，采取能源结构优化和提高能效的技术手段，一方面保证经济社会发展目标的实现，另一方面落实现有的节能减排政策措施并延续下去，其目标在于实现城市经济、社会和环境的可持续发展，是未来非常有可能发生的能源需求与碳排放的情景。通过制定和严格实施当前的应对气候变化的政策，并将其有所延续，促进低碳技术进步，人们的生活方式和消费模式也有一定程度上的改善，这种情景下的未来可能的发展模式定义为低碳情景。

### 2.1.3 强化低碳情景 (Enhanced Low Carbon, ELC)

在低碳情景的基础上，综合考虑国际成熟经验和国内城市的减排愿景，经济增长模式有所改变，人们的消费理念发生变化更加重视低碳生活的自觉行为，低碳技术发展成熟，主要耗能行业减排成本大幅下降，能源结构更加优化，能耗需求控制更严格和稳定，各项政策措施行动计划的规范性和执行力更强，城市公共交通体系

发达。在强化低碳情景下，采用了能源需求控制和能源结构优化的技术手段措施，济源市碳排放总量到 2020 年前基本稳定，并在 2020 年达到峰值，之后实现总量的下降，达到经济增长与碳排放的脱钩状态。

## 2.2 参数设置

以济源市未来经济增长、社会发展和能源需求趋势的预测研究为基础，判断基准情景 (BaU)、低碳情景 (LC) 和强化低碳情景 (ELC) 下人口、人均 GDP、能源强度和能源结构的变化率，分别用  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  和  $\delta$  来表征，未来年份的各因素实际可能变化情况如表 1，表 2。

表 1 低碳城市发展情景基本参数设定

变化率 (%, %)	未来 情景	2011- 2015	2016- 2020	2021- 2025	2026- 2030
$\alpha$ (%)	BaU	15	11	11	11
	LC	15	11	11	11
	ELC	15	11	11	11
$\beta$ (%)	BaU	22.37	2.13	20.55	10.27
	LC	5.00	3.53	2.94	2.64
	ELC	3.01	1.31	1.13	0.96
$\gamma$ (%)	BaU	-0.02	-0.03	-0.06	-0.03
	LC	-0.04	-0.03	-0.04	-0.03
	ELC	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
$\delta$ (%)	BaU	-0.43	-0.75	-0.68	-0.09
	LC	-0.64	-0.63	-0.69	-0.71
	ELC	-0.76	-0.82	-0.83	-0.84

注：按照对基准情景 (BaU)、低碳情景 (LC) 和强化低碳情景 (ELC) 下人口、人均 GDP 和能源强度参数的变化设定，按照脱钩理论为依据设置参数，预测能源结构的发展变化。

$\alpha$  表征人口年增长率， $\beta$  表征人均 GDP 年均增长率， $\gamma$  表征能耗强度下降比率， $\delta$  表征能源结构的变化率。

**表 2 低碳城市发展情景预测**

参数	未来情景	2005	2010	2011	2012	2015	2020	2025	2030
人口 (万人)	BaU	67	68	69	70	76	84	90	98
	LC	67	68	69	70	76	84	90	98
	ELC	67	68	69	70	76	84	90	98
人均 GDP (元)	BaU	20746	50441	60429	62358	94737	119048	220000	357143
	LC	20746	50441	60429	62358	72172	97645	128480	166343
	ELC	20746	50441	60429	62358	66592	78744	91587	104818
能源强度 (tce/万元)	BaU	2.64	2.03	1.95	1.88	1.84	1.61	1.20	1.04
	LC	2.64	2.03	1.95	1.88	1.69	1.42	1.17	1.003
	ELC	2.64	2.03	1.95	1.88	1.66	1.36	1.11	0.90
碳排放强度 (t/万元)	BaU	7.90	6.08	4.78	4.61	4.52	3.95	2.93	2.55
	LC	7.90	6.08	4.78	4.61	4.14	3.48	2.87	2.46
	ELC	7.9	6.08	4.78	4.61	4.08	3.32	2.71	2.21

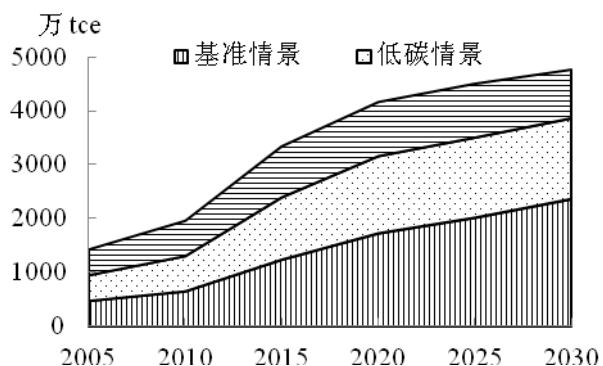
注：现状（2005、2010、2011、2012 年）数据来源于济源市历年统计年鉴等资料，预测期内（2015、2020、2025、2030 年）数据则依照表 1 中对参数变化率计算得到。

### 3 结果分析

#### 3.1 能源需求与碳排放预测

##### 3.1.1 能源需求总量

基准情景下，能源需求量将继续保持高速增长趋势，且增长速度变化不大；低碳情景下，能源需求量仍保持增长的趋势，但其总量和增长幅度都要小于基准情景，且增速逐渐放缓；强化低碳情景下，由于实施了更为严格的低碳发展措施手段，能源需求总量和增速较低碳情景更小。



**图 2 能源需求总量情景预测**

##### 3.1.2 人均能耗

基准情景下，济源市人均能耗仍保持上升的趋势，但在 2015 年后增速略小于前面几年的增速，较为稳定；低碳情景下，人均能耗在未来几年仍保持增长，到 2020 年出现拐点开始下降；强化低碳情景较低碳情景下人均能耗量下降的更多且速度也更快。尽管在强化低碳情景下，济源市人均能源消耗仍高于国际国内一些城市对于



未来人均能耗的预测，但是考虑到济源市自身的资源禀赋、产业结构以及发展定位等问题，要想实现这个目标仍是有一定挑战的。

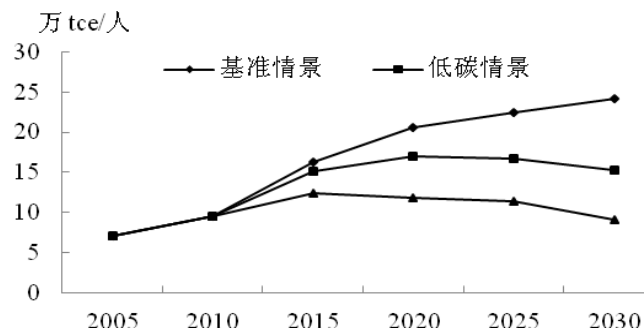


图3 人均能源消费量情景预测

### 3.1.3 碳排放强度

碳排放强度在基准情景、低碳情景和强化低碳情景下均表现为逐年下降的趋势，其中，强化低碳情景下碳排放年均下降率最快，数值最小。按照情景预测的结果，三种情景下2020年的碳强度与2005年相比，分别下降了50%、59%和71%。

表3 碳排放强度情景预测（2005=1）

年份	基准情景	年均下降率 (%)	低碳情景	年均下降率 (%)	强化低碳情景	年均下降率 (%)
2005	1.00	-	1.00	-	1.00	-
2010	0.75	0.06	0.75	0.06	0.75	0.06
2015	0.48	0.09	0.46	0.09	0.38	0.13
2020	0.50	0.01	0.41	0.02	0.29	0.05
2025	0.27	0.12	0.21	0.13	0.15	0.12
2030	0.20	0.06	0.12	0.11	0.07	0.14

### 3.2 减排潜力研究

应用情景分析的方法，对城市在未来规划期内的社会经济、产业结构、全社会能源需求和碳排放情况，以及主要领域的能源需求状况进行情景模拟，量化地给出未来不同情景下的可能发展路径，比较基准情景、低碳情景和强化低碳情景下未来CO<sub>2</sub>排放量，可以明确不同情景下的减排潜力。

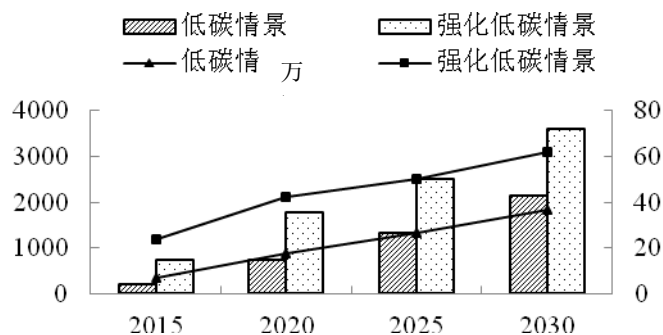


图4 低碳情景、强化低碳情景与基准情景比较的减排潜力

就低碳情景和强化低碳情景下减排状况与基准情景的比较可见，低碳情景和强化低碳情景下碳排放总量减少是比较明显的，在2015、2020、2025和2030年，低碳情景下分别可以减排CO<sub>2</sub>排放为218万t、741万t、1325万t和2147万t，相比基准情景下的排放量分别减少了7.15%、17.44%、26.48%和36.95%；强化低碳情景下由于采取了更加严格的减排措施手段，CO<sub>2</sub>排放总量更大且下降的速度也更快，与基准情景相比，总排放量未来年期分别可以减少729万t、1790万t、2514万t和3599万t，下降率为23.9%、42.14%、50.25%和61.93%。此外，分别对2015、2020、2025和2030年的基准情景、低碳情景和强化低碳情景下，未来不同年份的减排潜力进行了分析。

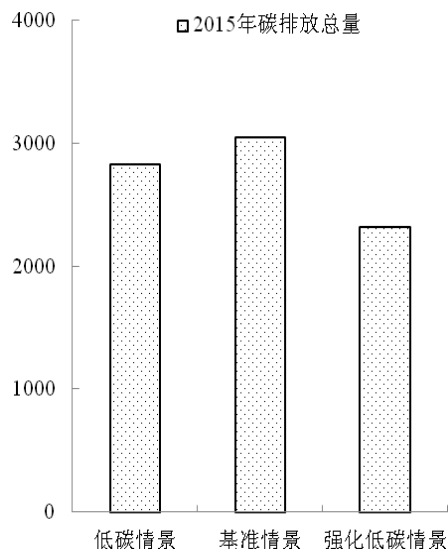
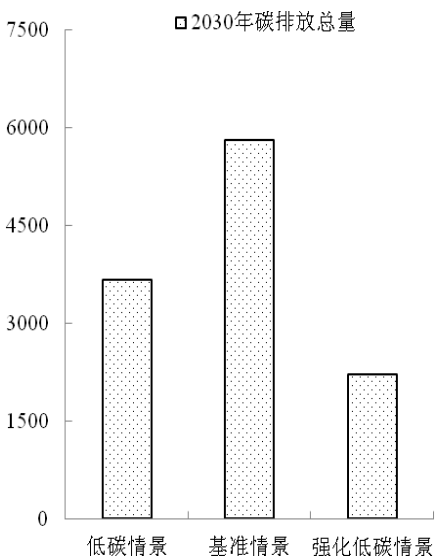
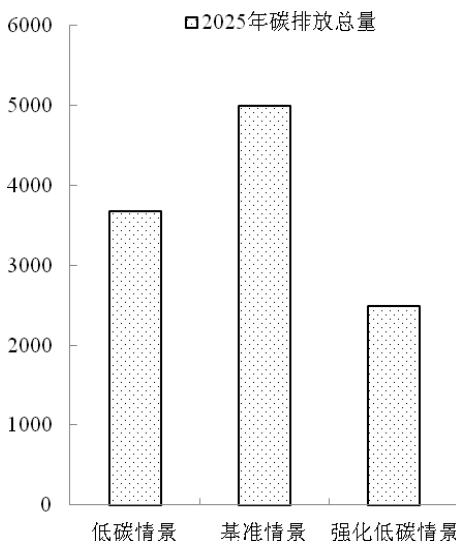
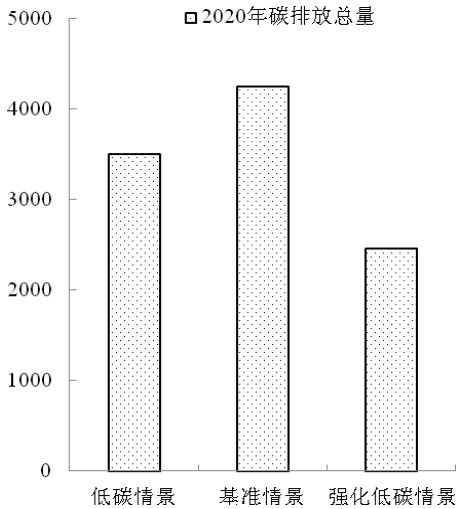


图5 碳排放总量减排潜力（2015、2020、2025、2030年）



#### 4 结论与对策

济源市的发展很大程度上依赖于第二产业的带动，经历了作为产品输出和能源基地的建设发展过程，在长期经济增长累积的背景下，存在资源承载和环境负荷的巨大压力，积累了许多环境保护的矛盾，经济发展依赖资源，产业结构单一，经济效益低下等问题逐渐暴露，加上资源环境和碳排放的条件约束，低碳发展存在着一定的现实困难。工业化和城镇化的快速推进中，城市建设和人口消费的刚性需求造成碳排放的增长，也是无法回避的问题，尽管在低碳技术方面已经有了一定的基础，但是重点工业行业的单位能耗较高的现状仍然存在。在对济源市能源需求和碳排放预测的基础上，最后提出几点对策和建议：

(1) 对于济源市这类以工业行业为主导的城市而言，产业结构调整重点在对传统产业格局的升级改造上，对于高碳排放的传统产业进行转型，引导企业兼并重组，提高产业集中度，形成产业集聚区内的循环产业链。结合国家培育和发展战略性新兴产业的大背景，规划引导和政策支持培育符合城市发展特点的战略新兴产业，形成高效节能环保的装备和产品。特别是鼓励发展高附加值的新兴产业，将知识技术密集型的产业作为新的经济增长点，逐步降低高碳排放产业在国民经济体系中的占比。

(2) 根据国家发布的产业淘汰目录，制定淘汰落后产能方案，逐步淘汰落后产能、生产设备和工艺，重点在运行效率低、单位耗能高、碳排放强度大、不符合国家产业政策准入标准的工业企业。完善淘汰机制，引导落后产能企业与新兴产业和特色产业接轨。比如说，济源市的行业特点，可以探索“钢铁—深加工—废弃物综合利用”、“铅锌冶炼—精深加工—废物综合利用—再

生铅回收”、“煤炭—焦炭—副产及废弃物综合利用”等循环产业链技术。

(3) 调整优化能源消费结构, 控制能源消费总量, 推进重点领域行业的低碳发展。在生产领域积极推广风能、太阳能、生物质能、地热能、天然气等清洁能源的合理利用, 最大限度地减少煤炭、石油等化石燃料的使用, 推进行业减排加强行业指导、技术进步和监督管理, 比如说水泥、化工、有色金属等行业重点在SO<sub>2</sub>和氮氧化物的治理和低氮燃烧技术改造。

(4) 按照国家建筑节能标准和相关法规, 对主要公共建筑、大型商用建筑、学校建筑、医院建筑进行能效测评, 对既有居住建筑逐步进行节能改造, 优化城市电力结构和燃气管网建设, 推进城市集中供热系统, 提高建筑节能效果。以农业生产领域, 推进生态农业和农产品精深加工等低碳生态农业示范园区建设。发展城市公共交通, 限制和淘汰技术等级低, 能源消耗大的车辆, 禁止排放不达标, 尾气污染严重的车辆从事营运。

## 参考文献

- [1] 中国科学院可持续发展战略研究组. 中国可持续发展战略报告-探索中国特色的低碳道路[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 曾忠禄, 张冬梅. 不确定环境下解读未来的方法: 情景分析法[J]. 情报杂志, 2005, (5): 14-16.
- [3] 于红霞, 钱荣. 解读未来发展不确定性的情景分析法[J]. 未来与发展, 2006, (2): 12-15.
- [4] 宗蓓华. 战略预测中的情景分析法[J]. 预测, 1994, (2): 50-51, 55.
- [5] Sun J W. The nature of CO<sub>2</sub> emission Kuznets curve [J]. Energy Policy, 1999, 27: 691-694.
- [6] Kaika D, Zervas E. The Environmental Kuznets Curve (EKC) theory-PartA: Concept, causes and

the CO<sub>2</sub> emissions case [J]. Energy Policy, 2013, 62: 1392-1402.

- [7] Galeotti M, Lanza A, Pauli F. Reassessing the environmental Kuznets curve for CO<sub>2</sub> emissions: A robustness exercise [J]. Ecological Economics, 2006, 57(1): 152-163.
- [8] Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). Indicators to measure decoupling of environmental pressure and economic growth [R]. OECD, 2002.
- [9] Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). Environmental indicators-Development, measurement and use [R]. Paris: OECD, 2003.
- [10] Enevoldsen M K, Ryelund A V, Andersen M S. Decoupling of industrial energy consumption and CO<sub>2</sub>-emissions in energy intensive industries in Scandinavia [J]. Energy Economics, 2007, 29(4): 665-692.
- [11] 朱婧, 汤争争, 刘学敏等. 基于 DPSIR 模型的低碳城市发展评价-以济源市为例[J]. 城市问题, 2012, (12): 42-47.
- [12] 济源市地方志志办公室. 济源年鉴(2006-2013) [S].
- [13] 济源市住房和城乡建设局. 济源市城乡总体规划(2012-2030) [R]. 2012.

**作者简介:** 朱婧, 讲师, 主要研究方向为资源经济与管理。通讯作者: 刘学敏, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为区域经济学、自然资源与环境经济学。