

# 基于排放轨迹模型的电力行业 CO<sub>2</sub> 减排模式分析

陈启鑫<sup>1</sup>, 康重庆<sup>1</sup>, 葛俊<sup>2</sup>, 夏清<sup>1</sup>

- (1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;
2. 国家电网公司, 北京市 西城区 100031)

## Analysis on Reduction Mode of CO<sub>2</sub> Emission in Power Sector Based on Emission Trajectory Model

CHEN Qi-xin<sup>1</sup>, KANG Chong-qing<sup>1</sup>, GE Jun<sup>2</sup>, XIA Qing<sup>1</sup>

- (1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments  
(Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;
2. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China)

**ABSTRACT:** Setting compulsive reduction targets is one of the most effective methods in restricting emissions of greenhouse gas. In this paper, the prospect of CO<sub>2</sub> emission in China's power sector is assessed. A standard emission trajectory model based on total emission constraint is proposed, with which several typical potential CO<sub>2</sub> emission reduction modes are presented by adjusting key control parameters of the model. Subsequently, the model is utilized for scenario analysis on China's power CO<sub>2</sub> emission reduction. Adaptability of different scenarios are compared. The result of this paper could be helpful to set the roadmap of CO<sub>2</sub> emission reduction in China's power sector.

**KEY WORDS:** low carbon electricity; emission trajectory model; CO<sub>2</sub> emission reduction mode; roadmap of CO<sub>2</sub> emission reduction; adaptability analysis

**摘要:** 以 CO<sub>2</sub> 减排目标为强制约束是控制温室气体排放最直接、最有效的手段。在深入探讨我国电力行业的 CO<sub>2</sub> 减排场景的基础上,提出了基于排放总额度约束的标准排放轨迹模型。根据该模型特征,总结了我国电力行业潜在的几种 CO<sub>2</sub> 减排模式,进一步分析了在不同模式下通过调控模型中的关键参数实现减排目标的控制手段。结合我国电力行业的实际情况,运用标准排放轨迹模型量化地计算和比较了各种减排模式,并对我国未来电力 CO<sub>2</sub> 的减排场景进行了适应性分析。研究表明,排放轨迹模型可实现对 CO<sub>2</sub> 排放更有效、精确地控制,具有广泛的应用前景。

**关键词:** 低碳电力; 排放轨迹模型; CO<sub>2</sub> 减排模式; 碳减排路线图; 适应性分析

**基金项目:** 国家电网公司科技项目; 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(教外司留[2009]1001号)。

## 0 引言

全球气候变暖对地球生态系统与人类社会造成了巨大的影响,触及到生态安全、水资源安全和粮食安全等各个层面,在带来巨大经济损失的同时,也提高了极端气候灾害发生的风险,从而严重威胁到人类的生存环境<sup>[1-2]</sup>。

为了规避由于气候变暖所引起的巨大损失与风险,在 1997 年的缔约方大会上签订了《联合国气候变化框架公约》,通过了《京都议定书》<sup>[3]</sup>,确定了各缔约国的温室气体减排承诺。在此基础上,世界各国政府也相继通过立法与写进政府工作报告等方式,制定了本国的中远期减排目标,承担量化的减排承诺。其中,尤以欧盟最为积极,计划到 2020 年,温室气体排放在 1990 年的基础上降低 20%,而英国更是将 2050 年的目标定为减排 80%<sup>[1-5]</sup>。

全球气候变暖对我国社会经济可持续发展的威胁越来越严重。我国非常关注和重视全球气候变化的影响,提出了减排温室气体的方案,于 2007 年发布了《中国应对气候变化国家方案》<sup>[6]</sup>,并在《国家“十一五”规划纲要》<sup>[7]</sup>中提出了 2010 年 CO<sub>2</sub> 减排 10% 的目标,而在《国家环境保护“十一五”规划》<sup>[8]</sup>中,更是把温室气体减排放在了相当重要的位置。

随着温室气体减排观念的深入人心,减排工作也日益细化,逐渐从国家整体层面上的减排目标发展到对国民经济各个重要经济部门排放目标的制定与减排额度分解,而这种细化的分解也是开展

CO<sub>2</sub> 排放交易的先决条件。作为我国国民经济最大的 CO<sub>2</sub> 排放部门, 电力行业具有巨大的减排潜力<sup>[9-12]</sup>。实现电力行业的低碳化发展, 具有重要战略意义。

以减排目标作为强制约束是控制温室气体排放最直接有效的手段, 其将对国民经济、工业部门的发展态势产生极大的影响。在确保持续稳定增长的前提下实现 CO<sub>2</sub> 的有效减排, 如何选择与我国电力行业现状与前景相适应的减排模式, 制定切实可行的减排目标和减排路线, 是需要重点研究的关键性问题。本文将深入探讨我国电力行业所面临的严峻的 CO<sub>2</sub> 减排形势, 建立一个基于排放总额度约束的标准排放轨迹模型, 提出“定峰”、“定期”、“定速”与“定年”4种具有典型意义的减排模式, 并对其运用于我国电力 CO<sub>2</sub> 的减排场景进行分析, 分析不同的减排思路的适应性, 揭示我国 CO<sub>2</sub> 减排工作的特点, 并提出相应的应对措施。

## 1 CO<sub>2</sub> 的减排场景

### 1.1 全球 CO<sub>2</sub> 的减排场景

文献[2,13-14]指出, 为有效控制全球气候变暖效应, 应在 21 世纪末将大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度控制在  $5.5 \times 10^{-4}$  以内, 即等效于将全球气温的平均上升幅度控制在 2.3℃ 以内。

讨论全球 CO<sub>2</sub> 排放场景时, 常取 1990 年为计算的基准年与起始年。为达成此目标, 1990—2100 年全球总温室气体(green house gas, GHG)排放量应控制在 3000~3300 Gt 等效 CO<sub>2</sub> 气体的水平上。上述结论为“后京都”时代确定全球各国 CO<sub>2</sub> 的排放额度提供了客观依据, 是未来国际社会分摊减排义务与制定减排目标的关键因素<sup>[9]</sup>。

### 1.2 我国电力行业 CO<sub>2</sub> 排放额度的测算

在以上总排放额度的基础上, 按照当前人口平均分摊的原则分配排放量, 我国在 1990—2100 年可分配到 600~660 Gt 的等效 CO<sub>2</sub> 排放量。由于我国的现代化进程较晚, 历史累积排放总量较低, 据统计, 20 世纪我国 CO<sub>2</sub> 的累计排放约占全球总排放 8% 的份额。因此, 若执行历史累积排放量人均分摊的原则, 我国分得的排放额度可上浮 100~150 Gt。然而, 由于当前国际社会尚未对 CO<sub>2</sub> 排放额度的分配原则达成共识, 以上分析只能从范围上给出我国大致的排放额度区间(等效 CO<sub>2</sub> 的排放量), 即 600~800 Gt, 该排放额度区间的均值为 700 Gt。与此同时, 根据 IEA (international energy agency) 发布

的数据, 在 1990—2005 年, 我国的 GHG 总排放已达 91.6 Gt<sup>[15]</sup>; 而合理的估算结果表明, “十一五”期间我国的 GHG 排放约为 61.9 Gt, 这就意味着从 2011 年到 2100 年, 我国剩余的排放额度约为 550 Gt。

从国际主要 CO<sub>2</sub> 减排国的减排实践与规划情况看, 电力行业对 CO<sub>2</sub> 减排的贡献率基本上与其所占总排放量的比例持平。据此原则, 可折合得到我国电力行业在 2010—2100 年 CO<sub>2</sub> 总的排放额度, 其等效 CO<sub>2</sub> 的排放值约为 110 Gt。

### 1.3 我国电力行业的 CO<sub>2</sub> 减排形势分析

我国 1990—2008 年电力 CO<sub>2</sub> 排放的历史轨迹如图 1 所示<sup>[16]</sup>。

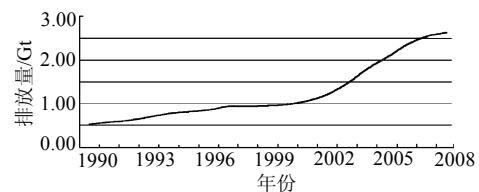


图 1 1990—2008 年我国电力行业的 CO<sub>2</sub> 排放曲线  
Fig. 1 Annual CO<sub>2</sub> emission for Chinese power generation sector from 1990 to 2008

分析以上曲线, 1990—2008 年我国电力行业的 CO<sub>2</sub> 排放飞速增长, 年平均增长率高达 8%, 2008 年的排放量达到了 2.54 Gt, 约为 1990 年的 4 倍。与此同时, 伴随着国民经济的快速发展, 我国电力行业在未来一段时间内将继续保持高速增长的态势, 如果按现有的速度发展, 2030 年之前将用完本世纪所有的排放额度。如果加以控制, 即使能稳定在当前的排放水平上, 到 2050 年, 排放额度也将被消耗完毕。由此可见, 我国电力行业面临着极其严峻的减排形势。

## 2 基于总额度约束的 CO<sub>2</sub> 排放轨迹模型

### 2.1 排放轨迹模型的提出

强制性的政策减排目标是促进 CO<sub>2</sub> 减排的重要手段。当前运用最多的方式是对特定的目标年施加一定的减排比例, 如 2020 年减排 20%。这种方式简单、易于描述与比较, 但一般来说, 目标年的数量往往较少, 之间的时间间隔也较长, 因此不利于对整个排放期实施过程进行控制。

事实上, 导致全球气候变暖最关键、直接的因素是大气中 GHG 浓度的不断上升。而人类在不同时期的 GHG 排放行为会持续地改变大气中的 GHG 浓度<sup>[13-14]</sup>。由此可知, 2100 年气温的上升幅度不仅与 2100 年 GHG 的排放量相关, 而且由之前历年的排放量共同决定。因此在制定减排目标时, 不仅应

关注最终的减排幅度，还必须对该期间的总排放量和不同年份的排放量做出规定与限制，从而形成特定的排放轨迹。

在满足总额度约束的前提下，引入 CO<sub>2</sub> 排放轨迹模型，将排放量分配到约束期内每一年，要求每年的排放量都不能超过该轨迹。相对于传统的基于目标年减排比例的方式，该模型具有以下优越性：

1) 排放轨迹的制定直接基于总排放额度，把减排模式与 CO<sub>2</sub> 浓度更直接地关联起来，从而提高了减排模式的直接性与透明度。

2) 基于排放轨迹模型的减排模式能够与当前国际上普遍采用的 CO<sub>2</sub> 交易机制更好地结合。以欧盟的 ETS(emission trading system)交易为例，欧盟成员国必须在每年年前公布本国的年度排放额度，并将其分配给不同的行业与企业，交易准入企业在此基础上进行限额交易，这就需要引入逐年的减排目标<sup>[13]</sup>。

3) 明确排放轨迹，等同于将长期的减排计划分解到每一年，这有利于对实际的 CO<sub>2</sub> 排放进行精确控制，减少实际排放与控制目标间的偏离幅度。

## 2.2 标准排放轨迹模型的数学描述

2008 年英国国家气候变化委员会最新发布的专题报告中指出，在有效减排的前提下，世界各国的 CO<sub>2</sub> 排放轨迹大致呈现以下模式：第 1 阶段为常态区，排放量以类似线性的趋势上升；第 2 阶段为减排区，轨迹到达峰值后则进入第 2 阶段，呈现指数下降态势；第 3 阶段为平稳区，此时轨迹将保持在一定的低排放水平上。该排放轨迹大致描述了有效的 CO<sub>2</sub> 减排路线形态，如图 2 所示<sup>[13]</sup>。

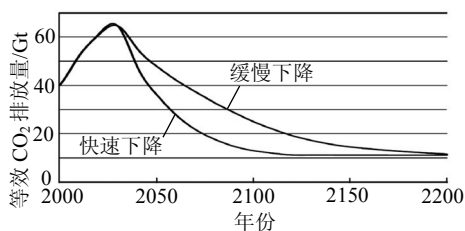


图 2 不同下降趋势下实现有效减排的 CO<sub>2</sub> 排放轨迹

Fig. 2 Effective CO<sub>2</sub> emission trajectories with different reduction rates

引入一个标准的排放轨迹模型，以精确描述图 2 的曲线形态。该模型以满足约束期内总排放额度  $E$  为约束，主要的控制参数包括：排放峰值年  $Y_m$  与峰值年排放量  $e_m$ ；平稳排放的起始年  $Y_s$  与平稳年排放量  $e_s$ ；减排期的年均递减率  $r$ 。

在标准模型中，以线性函数描述第 2 阶段的上升趋势，以指数函数描述第 2 阶段的下降趋势，设第  $y_i$  年的排放量为  $e_i$ ，则

$$e_i = \begin{cases} e_0 + \frac{e_m - e_0}{Y_m - Y_0}(y_i - Y_0), & y_i \in (Y_0, Y_m) \\ (1-r)^{y_i - Y_m} e_m, & y_i \in [Y_m, Y_s] \\ e_s, & y_i \in (Y_s, Y_Z) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $Y_0$  为约束期起始前的基准年(不包括在约束期内)； $Y_Z$  为约束期终止年(包括在约束期内)； $e_0$  为  $Y_0$  年的排放基数。第  $s$  年的排放量为

$$e_s = (1-r)^{Y_s - Y_m} e_m \quad (2)$$

对式(1)在区间  $(Y_0 \sim Y_Z)$  求和，根据总排放额度，模型参数需满足以下等式约束：

$$E = \frac{(e_m + e_0)(Y_m - Y_0 - 1)}{2} + e_m \frac{1 - (1-r)^{Y_s - Y_m + 1}}{r} + e_s (Y_Z - Y_s) \quad (3)$$

## 3 基于标准排放轨迹模型的减排模式分析

综上所述可得，以上标准模型共有 5 个控制变量与 2 个等式约束，因此模型的自由度为 3。在实际的减排工作中，往往会给出一定的减排目标或期望，这就相当于明确了模型的一些控制参数，本文称其为目标参数。选择不同的目标参数反映不同的减排模式，而目标参数的不同取值水平则体现了不同的减排思路。讨论如下：

1) 给定  $Y_m$  与  $e_m$ 。这种模式给定了排放峰值年及其排放量，在明确了常态区排放轨迹的同时，也确定了减排区的排放基数，该模式称为定峰减排模式。

从当前的国际减排形势看，由于各种低碳技术大多存在着成熟度不够或成本太高等局限性，未能满足大规模运用的需求，因而减排形势较严峻。为防止未来一段时间内的过度排放，需要明确引入一个短期的排放控制目标，以对排放总量进行严格控制。定峰减排模式正好能够满足上述要求，因而在现阶段得到了广泛运用。

在定峰减排模式下，不同的减排实体可以通过调整  $r$ 、 $Y_s$ 、 $e_s$  选择符合自身减排特性的标准排放轨迹。由于已经给定了 2 个目标参数，模型还剩下 1 个自由度，因而只能再对一个参数进行设置。不同的参数设置体现了不同的减排思路，当采取较高的  $r$  时， $Y_s$  提前；而当调低对于  $r$  的预期时， $Y_s$  推

后。  $r$  与  $Y_s$  的关系如图 3 所示。

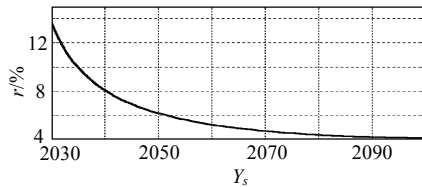


图 3 定峰减排模式下减排速度与排放平稳年的关系  
Fig. 3 Relation between reduction rate and first-year of stable emission in fixed-peak scenario

2) 给定  $Y_m$  与  $Y_s$ 。这种模式给定了排放的峰值年与平稳年，从而明确了减排区间，称为定期减排模式。该模式适用于对减排要素具有明确时间表的情况，尤其适用于对各类减排技术的开发、投产与运用具有明确预期的行业或环节。

同理，此时模型还剩下 1 个自由度。当排放峰值  $e_m$  较宽裕时，对于  $r$  的要求就相应提高；而在严格控制  $e_m$  的情况下，对  $r$  的要求会相对降低。 $e_m$  与  $r$  大致呈现正比例关系，如图 4 所示。

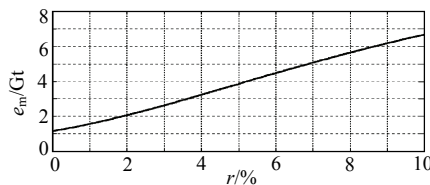


图 4 定期减排模式下排放峰值与减排速率之间的关系  
Fig. 4 Relation between peak emission and reduction rate in fixed-period scenario

3) 给定  $r$  与  $e_s$ 。这种模式给定了排放的减排速率与最终的排放量，从而明确了减排区的轨迹形态与最终的排放水平，称为定速减排模式。该模式主要适用于对未来(稳定期)的排放形势较为明朗或已经对未来的排放预期达成共识的情况。

此时主要的调整参数为  $Y_m$  与  $e_m$ 。提前  $Y_m$  将使  $e_m$  变宽裕，而推迟  $Y_m$  将压缩  $e_m$  的空间，对  $Y_m$  的选择体现了减排工作的迫切程度。 $Y_m$  与  $e_m$  的对应关系如图 5 所示。

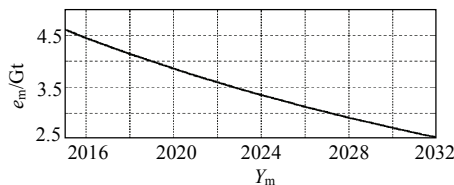


图 5 定速减排模式下峰值年与排放峰值的关系  
Fig. 5 Relation between peak emission and peak emission year in fixed-rate scenario

4) 与目标年减排比例的方式相结合。标准排放轨迹模型也可以与传统的基于目标年减排比例的方式相结合，称为定年减排模式。该模式对于目

标参数的选择简单直观，可以很好地运用于国家、行业层面的宏观调控之中。通常给定的目标年多为中长期的整数年份，如 2050 年。给定特定年份  $y_i$  的排放控制目标  $e_i$ ，即相当于为标准排放轨迹模型增加了约束条件，即

$$e_i = (1 - r)^{y_i - Y_m} e_m \quad (4)$$

在此基础上，再赋予标准模型其它的目标参数，即可以明确排放轨迹的曲线形态。

## 4 我国电力行业 CO<sub>2</sub> 的减排场景分析

### 4.1 不同减排模式的选择

结合上述 4 种减排模式，在短期减排压力大且前景不甚明朗的情况下，对于减排的关注将更多集中在前期，因而定峰减排模式具有更强的适应性。与此同时，考虑我国宏观调控的特点，因定年减排模式在参数选择方面较简单直观，其在应用上具有优势。

事实上，减排模式的选择与制定往往呈现滚动更新的特点。随着全球气候变暖的预期与低碳技术发展前景的逐渐明朗，对于未来的排放形势的关注会逐渐增强，排放额度也会分配到更细的环节中，因而定期减排模式与定速减排模式将会得到更多的运用。在下文的分析中，主要结合当前我国电力行业 CO<sub>2</sub> 排放的实际情况，在定峰减排模式与定年减排模式下展开分析。

### 4.2 定峰减排模式的分析

我国电力行业 2010—2100 年 CO<sub>2</sub> 的总排放额度  $E$  约为 110 Gt， $Y_0$  为 2010 年，预计 2010 年的电力 CO<sub>2</sub> 排放量  $e_0$  约为 2.76 Gt。分别取  $Y_m$  为 2015、2020、2025 与 2030，将  $e_m$  在  $e_0$  的基础上以 10% 为单位上浮至 50%。根据已发表各类气候变化评估报告，对未来的排放量  $e_s$  进行估计，大致在  $e_0$  的基础上削减 75%~90%，不妨取 80%。因此得到了在不同  $Y_m$  与  $e_m$  组合下，对减排速度  $r$  与排放平稳年  $Y_s$  的要求，如表 1 所示。

从表 1 可以看到，即使在最乐观的模式下，从

表 1 基于定峰减排模式的减排场景分析结果

Tab. 1 Reduction analysis results in fixed-rate scenario

$(e_m/e_0)/\%$	$Y_m=2\ 010$		$Y_m=2\ 015$		$Y_m=2\ 020$		$Y_m=2\ 030$	
	$r/\%$	$Y_s$	$r/\%$	$Y_s$	$r/\%$	$Y_s$	$r/\%$	$Y_s$
100	2.13	2 085	2.59	2 077	3.30	2 068	7.36	2 052
110	2.48	2 078	3.06	2 070	3.98	2 062	10.1	2 047
120	2.84	2 073	3.55	2 065	4.73	2 057	14.0	2 042
130	3.21	2 068	4.06	2 061	5.53	2 053	20.1	2 039
140	3.58	2 064	4.59	2 057	6.41	2 050	30.6	2 036
150	3.95	2 060	5.14	2 054	7.35	2 047	53.5	2 033

2010年开始进入减排期,减排速率仍需达到2.13%,并延续75a。若按照这个减排速率发展,刚好能够满足我国政府当前所制定的减排目标,即一个“五年计划”减排10%。

然而,根据现有的行业规划与负荷增长预测以及各类低碳技术的运用前景,预计在未来5~10a内,我国电力CO<sub>2</sub>排放仍将保持3%~7%的增长速度,这就意味着我国电力行业可能要面临在2020年以130% $e_0$ 开始减排的形势,此时对于减排速率的要求高达5.5%以上。

在最差的形势下,如果需要到2030年开始减排,则要求减排速率达到20%~50%,这很难实现。因此应在现阶段尽量延缓排放增长,并在各类低碳技术成熟后实施快速减排,这也是我国电力行业唯一有效的减排选择。

#### 4.3 定年减排模式的分析

为便于宏观调控,结合国家的减排目标,引入定年减排模式,对电力CO<sub>2</sub>排放制定中长期的减排目标。以2050年为目标年,取其减排目标分别为60%、70%与80%,保持 $e_s$ 为 $e_0$ 的80%,则可得到不同的CO<sub>2</sub>减排路线,如图6所示。

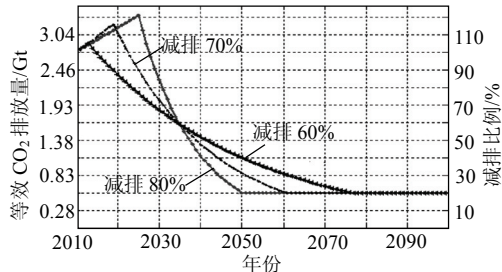


图6 以2050年为减排目标年时的排放轨迹  
Fig. 6 Emission trajectories when reduction target year is 2050

分析图6可知,为满足总排放额度约束,60%几乎已经是2050年的最低减排要求,而对应的排放峰值年为2013年,这就意味着实施有效减排已经迫在眉睫,此时相应的减排速率约为2.57%。

随着减排目标的提升,对于减排速率的要求也逐渐上升,当目标定为80%时,减排速率逼近7%,相应的,排放峰值年也往后推移至2025年左右。

#### 4.4 不同减排思路的适应性分析

不同的目标参数设置体现了不同的减排思路,以定年减排模式为例,当在2050年设置较低的减排目标时,减排压力将集中在前期,在缩短常态区的同时,也拉长了减排区,因而曲线形态呈现出典型的“前紧后松”的特点;相应地,在2050年设

置较高的减排目标时,减排压力会转移到后期,在对常态区持宽容态度的同时,大大挤压了减排区的长度,这样一旦开始实施减排,曲线形态就呈现出典型的“前松后紧”的态势。

相比而言,“前松后紧”着眼未来,将减排寄望于未来对低碳技术的大规模运用;而“前紧后松”着眼现在,通过逐步引入各类低碳技术,实施对排放总量的控制。2种模式各有利弊,适应于不同的减排场景,具体分析如下:1)“前紧后松”对于排放曲线的控制力更好,由于将减排的日程表提前,减排工作面临的不确定性较小,对于峰值的削减更有力,从而有利于缓解与日俱增的减排压力;2)“前松后紧”则将在减排的经济性与持久性上有更好的表现,推迟的减排行为将有利于在未来的新增装机中采用更先进的低碳技术,从而降低成本,并减缓非低碳电力装机的“碳锁定”效应<sup>[1]</sup>。

事实上,实际的电力CO<sub>2</sub>减排路线往往是2者的折中,即着眼现在,又着眼未来,在兼顾工作实施力度与速度的前提下综合考虑减排的有效性与实施效益。

## 5 结论

1) 本文建立了一个基于排放总额度约束的标准排放轨迹模型,提出了“定峰”、“定期”、“定速”与“定年”4种具有典型意义的减排模式,并对其运用于我国电力CO<sub>2</sub>的减排场景进行分析,指出实际的电力CO<sub>2</sub>减排路线应在兼顾工作实施力度与速度的前提下综合考虑减排的有效性与实施效益。

2) 本文的排放轨迹模型能对CO<sub>2</sub>排放实施更加有效、精确的控制,具有广泛的应用前景,对制定我国电力行业的CO<sub>2</sub>减排路线有借鉴意义。

## 参考文献

- [1] 康重庆, 陈启鑫, 夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 1-7  
Kang Chongqing, Chen Qixin, Xia Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 1-7(in Chinese).
- [2] IPCC. Intergovernmental panel for climate change fourth assessment report[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 1-15.
- [3] United nations conference on environment and development. United nations framework convention on climate change: Kyoto protocol [R]. Kyoto, 1997.
- [4] 乌若思, 苏文斌, 郑松. 挑战全球气候变化—二氧化碳捕捉与封存[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [5] 张坤民, 潘家华, 崔大鹏. 低碳经济论[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008: 44-64.

- [6] 国务院发展改革委员会. 中国应对气候变化国家方案[R]. 北京: 国务院发展改革委员会, 2007.
- [7] 国务院. 国家“十一五”规划纲要[R]. 北京: 国务院, 2006.
- [8] 环保总局. 国家环境保护“十一五”规划[R]. 北京: 环保总局, 2007.
- [9] 钟海旺, 康重庆, 陈慧坤, 等. 广东电网节能发电调度潜力分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 7-12.  
Zhong Haiwang, Kang Chongqing, Chen Huikun, et al. Analysis on potential of energy-conservation based dispatch for Guangdong power grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 7-12(in Chinese).
- [10] 尚金成, 张立庆. 电力节能减排与资源优化配置技术的研究与应用[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 58-63.  
Shang Jincheng, Zhang Liqing. Research and application of technologies in energy-saving emission-reducing and optimal resource allocation of electric power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 58-63(in Chinese).
- [11] 张宁, 陈慧坤, 骆晓明, 等. 广东电网节能发电调度计划模型与算法[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 11-15.  
Zhang Ning, Chen Huikun, Luo Xiaoming, et al. Model and algorithm of energy-conservation based generation dispatching for Guangdong power grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 11-15(in Chinese).
- [12] 谭忠富, 陈广娟, 赵建保, 等. 以节能调度为导向的发电侧与售电侧峰谷分时电价联合优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 55-62.  
Tan Zhongfu, Chen Guangjuan, Zhao Jianbao, et al. Optimization model for designing peak-valley time-of-use power price of generation and sale side at the direction of energy conservation dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 55-62(in Chinese).
- [13] Committee on climate change. Building a low-carbon economy—the UK's contribution to tackling climate change[M]. London: The Stationary Office, 2008: 1-70.
- [14] Michael G, Tooraj J, Michael G P. Delivering a low-carbon electricity system[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 29-181.
- [15] 魏一鸣, 刘兰翠, 范英, 等. 中国能源报告(2008): 碳排放研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 21-43.
- [16] Earth system research laboratory. Trends in atmospheric carbon dioxide[EB/OL]. 2008-12-08. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends>.



陈启鑫

收稿日期: 2009-04-20。

作者简介:

陈启鑫(1982—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场、电力系统规划等, E-mail: cqx@mails.tsinghua.edu.cn;

康重庆(1969—), 男, 教授, 研究方向为电力系统规划、电力经济与信息等; E-mail: cqkang@tsinghua.edu.cn;

葛俊(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定;  
夏清(1957—), 男, 教授, 研究方向为电力系统规划、电力经济与信息等。

(责任编辑 杜宁)