

# 煤电能源供应链风险控制研究综述

谭忠富<sup>1</sup>, 张会娟<sup>1</sup>, 刘文彦<sup>1</sup>, 王舒祥<sup>2</sup>, 张金良<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学能源经济与环境研究所, 北京 102206; 2. 国网四川省电力公司, 四川成都 610041)

## Reviews on Risk Management of Coal and Electricity Energy Supply Chain

TAN Zhongfu<sup>1</sup>, ZHANG Huijuan<sup>1</sup>, LIU Wenyan<sup>1</sup>, WANG Shuxiang<sup>2</sup>, ZHANG Jinliang<sup>1</sup>

(1. Institute of Energy Economics and Environment, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

**摘 要:** 煤炭生产、煤炭运输、发电、输电到用电的煤电能源供应链各个环节之间需要协调发展, 煤炭价格、购售电价、电源布局、环境约束等多种风险源均可通过供应链进行风险传递与扩展, 造成风险损失扩大。针对上述风险源, 基于一般供应链的风险管理理论, 从煤电能源供应链的价格传导风险控制、产能规模匹配与协调风险控制和节能减排环境下的风险控制 3 个方面对国内外相关研究进行了综述。结果表明针对煤电能源供应链中各单一环节风险控制的研究较多, 但缺乏煤电能源供应链整体风险传递机制、扩展路径及协调控制的研究, 因此, 提出煤电能源供应链全面风险控制的研究思路, 为煤电能源供应链的风险管理提供参考。

**关键词:** 煤炭; 电力; 能源供应链; 全面风险控制; 价格风险; 协调风险

**Abstract:** The coal and electricity energy supply chain consists of coal production, coal transportation, power generation, power transmission, and power utilization, and the coordinated development of all above links is required. The risk sources, such as coal production and transportation prices, electricity purchase and sales prices, power generation distribution and construction, environmental constraints, can be transferred and expanded through the supply chain, which will enlarge the risk loss. Based on risk management theory of general supply chain and the analysis of risk sources, the risk management research of coal-electricity energy supply chain at home and abroad is reviewed from three risks control aspects, the price transmission, matching and coordination between production and capacity scales, and coal-electricity energy supply chain under energy saving and emission reduction. The review results show that there are more researches on risk control of each coal-electricity energy supply chain, but there is short of researches on risk

transmission mechanism, expanding path and coordinated control of whole coal-electricity energy supply chain. In the end, the research ideas on overall risks control of coal-electricity energy supply chain is presented, which will provide reference for the risk management of the energy supply chain.

**Keywords:** coal; electric power; energy supply chain; overall risk management; price risks; coordination risks

## 0 引 言

煤电能源供应链形式可以描述为: 煤炭生产(耗电)—煤炭运输(耗油、耗电)—电力生产(耗电)—电力传输(损失电能)—用户(耗电)。煤电能源供应链为包括煤炭生产商、煤炭运输商、发电集团、电网公司、电力用户组成的多环节、多主体、多阶段、多区域的复杂系统, 链条中各环节之间相互依赖, 任何一个环节出现风险都可能波及上下游其他环节, 甚至使链条风险被传递、延展最后导致整个链条断裂。煤电能源供应链外生风险因素的出现、内部主体投入产出的变化(煤炭产量波动、煤炭价格波动、发电调价、售电调价等)都会形成风险, 风险递展一旦超出供应链弹性临界就会威胁到能源系统的运行效率。

2008 年春节前夕我国南方出现了“煤电运”能源供应链各环节的风险递展: 雪灾导致变电站和输电线路的供电中断; 断电带来煤矿生产和铁路运输的中断; 煤炭生产与煤炭运输的中断导致电厂储煤的短缺; 柴油机替代发电、燃煤机组压负荷和启停耗费大量燃油, 导致油的大量消耗; 铁路运输中断带来航空、公路运输紧张, 进一步带来油的短缺。透过这次能源供应链断链的背后, 可以看出,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71273090; 71201056)

我国煤电能源供应链各个环节(煤炭生产、煤炭运输、发电、输电)均进行各自的规划,缺少一个统一的全局规划。实际上,煤炭生产规划与煤炭运输规划、火电发展要和煤炭发展、输电规划与电源规划、发电集团之间的规划都需要互相协调,对“煤电运”能源供应链展开全面的风险控制与规划协调,从而缓解煤炭运输瓶颈、煤炭供应的短缺或过剩、发电短缺或过剩等问题,将“煤电运”各环节的损失降至最低。

煤电能源供应链风险控制包括煤电供应链供求关系风险控制、煤电供应链价格风险控制、煤电供应链规模匹配风险控制、煤电供应链环境污染风险控制等多个方面,国内外学者基于一般供应链风险控制理论对煤电能源供应链各个环节的风险控制展开了广泛的研究,主要可归纳为 3 个方面:一是煤电能源供应链价格传导风险研究;二是煤电能源供应链产能(产量)规模匹配与协调风险研究,包括煤电供应链供求关系风险控制、规模匹配风险控制等方面;三是节能减排环境下的煤电能源供应链风险研究。

## 1 一般供应链风险控制方法研究

风险管理包括风险辨识、风险计算、风险度量、风险控制 4 个阶段。如何辨识、计算、度量、控制供应链风险,已经成为供应链研究的重要内容<sup>[1]</sup>。供应链上各环节企业之间环环相扣,彼此依赖,相互影响,任何一个企业出现风险都可能波及其他企业,最后带来整个供应链的风险,使其达不到预期目标甚至导致供应链失败。1997 年 Lee H. L. 对供应链牛鞭效应给出了分析模型<sup>[2]</sup>,随后,有关供应链的研究进入了高潮,主要集中在产品需求预测、生产计划、分销、运输与库存决策等。

### 1.1 供应链风险控制与全面风险控制

文 [3] 把供应链风险理解为供应链的脆弱性,其会降低供应链运行效率,导致供应链的破裂。供应链风险控制就是在辨识和度量供应链风险基础上,协调供应链成员从整体上减少供应链的脆弱性,消除、减轻和控制风险,保障供应链运行安全。

全面风险控制的概念来源于企业管理,文 [4] 认为全面风险控制是指企业围绕总体经营目标,通

过在企业管理的各个环节和经营过程中执行风险控制的基本流程,从而为实现风险控制的总体目标提供合理保证的过程和方法;并将全面风险控制的概念应用于产业价值链中,提出基于价值链的全面风险控制是把企业价值链上的生产经营各环节作为主要控制面,进行企业风险评估、建立风险控制体系,全面防范风险发生。文 [5] 指出全面风险管理提出风险容量的概念,把风险控制在风险容量以内,为企业目标的实现提供保证。全面风险控制的思想可应用于供应链风险管理,把供应链上各环节作为主要风险控制对象,并结合供应链网络特性,将各环节协调风险纳入控制范围,通过风险全面识别、整体风险度量、设置合理的风险控制裕度,达到供应链各环节的规划协调,使得各环节的风险损失最小化。

### 1.2 供应链风险衍生源的识别

文 [6] 按照供应链风险的来源、结果、驱动力和防控策略,把供应链风险衍生源分成:环境风险、网络风险和组织风险。这只是一种框架性的划分,对于具体的煤电能源供应链,需要更加细致、深化和有针对性。有了风险衍生源指标,还需要研究风险源的传递、扩展机理。文 [7] 提出供应链风险传递指系统受到内外部不确定因素的干扰和影响,使得某一节点的风险以各种形式被传递和扩散到关联节点,进而导致供应链目标产生偏离或失败。文 [8] 采用 VAR-MGARCH 模型,将样本本期划分为全部样本期、危机前、危机期间、危机后阶段,研究贸易市场、金融市场的关联货币风险及其风险传递。

### 1.3 供应链风险的度量

对供应链风险进行度量时,首先度量单个风险,计算其发生概率、发生时间及其损失影响,然后再进行综合评价来确定供应链的总体风险水平。由于供应链上的风险形态多样且相互关联、交叉、渗透,会共同作用于某个环节,该环节所面临的集成风险会具有叠加、放大效应。单种风险因子驱动的风险度量法一般都不适用于集成风险度量。文 [9] 通过引入 Copula 函数来度量集成风险,可以刻画单个资产收益率分布的非正态性质即“尖峰厚尾”特征,还可以描述不同投资收益率之间复杂的相互关系。Copula 函数能够把相互关联的多个风险因子“连接”起来,构建由多个风险因子驱动的投资组合收益率的联合分布,再利用 VaR 方法度

量集成风险。该方法可以考虑用来度量煤电能源供应链中的集成风险。

#### 1.4 供应链风险的控制

供应链风险度量不是最终目的,最终目的应该是风险控制。文[10]介绍了风险控制的主要模型,包括典型 Markowitz 投资组合风险控制模型、建立在 Black-Scholes 模型上的衍生工具风险控制模型。文[11]针对分散式供应链结构,分别构建供应商、制造商、装配商、运输商的风险控制优化模型,最后给出了优化模型的求解算法。文[12]将供应链的风险控制分为3阶段,即供应阶段的风险控制:柔性生产、多源供应;过程阶段的风险控制:柔性过程、柔性制造;需求阶段的风险控制:需求延迟、柔性价格、价格响应。针对每个阶段分别给出了相应的模型。文[13]以软件类工程作为研究背景,将可信度风险属性指标进行分解,并把软件工程流程进行分解,风险属性与流程环节之间的风险作用影响采用贝叶斯条件概率矩阵进行表达,以成本投入、开发时间作为变量,风险识别、风险控制、风险管理效果均采用过程模型进行表达,并建立可信度优化模型,由此可以获得各个阶段可信度值域。

上述关于供应链控制的模型与思想对于煤电能源供应链的风险控制具有借鉴作用。

#### 1.5 供应链各环节协调风险控制

供应链各节点企业之间具有亲密的合作伙伴关系,但为了追求自身利润的最大化,必然会保有一些“秘密”信息,而这些信息可能对其它的企业有害(委托人往往比代理人处于一个更不利的位置)。供应链企业间的这种伙伴关系实际上是一种“委托代理”关系,成员企业为个体利益而隐瞒私有信息存在,引发了供应链企业的委托代理风险问题<sup>[14]</sup>。文[15]从信息不对称角度出发,研究了风险投资机构与风险企业之间的利益博弈,核心是研究由于信息不对称对风险投资商产生的代理风险以及风险投资商如何控制代理风险;对投资机构与风险企业之间的委托代理关系进行模型化,利用定量方法解决投资商与风险企业之间的代理问题。文[16]指出供应链结构及链内协调是供应链管理的核心问题,利用超网络方法分析供应链运作过程,利用博弈理论和 Newsvendor 模型协调链内成员的收益共享合约。文[17]提出了基于影响因子的供应链协同预测方法,依据历史数据分层级、分区域

提取因子并进行量化,同时在预测值中进行还原,以影响因子作为纽带实现信息在供应链中的向上传递、向下传递,提高分预测及总预测的精度。

煤电能源供应链风险特征与一般供应链风险特征有很大的区别,该问题的研究是对一般供应链风险理论的细化,而目前关于煤电能源供应链上各环节之间的风险传递、扩展路径与控制模型方面的系统研究的相关文献较少,文献[1-17]的思想可以用于煤电能源供应链的组成分析、风险分析、风险控制,结合能源供应链的具体特征可进行修正性使用。

同时,可将供应链全面风险控制的思想引入煤电能源供应链风险控制,总体协调煤炭生产、煤炭运输、电源布局、电网发展、各发电集团发展等各环节之间的规划,从能源供应链整体角度识别、分析、度量各环节的风险源与风险损失,进行能源供应链风险全面控制。由于煤电能源供应链涉及煤炭企业、运输部门、电网企业、发电集团等多个企业与部门,其全面风险控制的主体需由国家发改委或规划部门等政府机构牵头供应链各利益相关者来共同构成,同时电网企业作为煤电能源供应链联接最终用户与上游节点的核心环节,应作为全面风险控制的重要协调主体,以用户电力能源需求为基础,结合煤炭生产与运输规划,协调电源规划与火电发展规划,最终确定电网规划。

煤电能源供应链全面风险控制的方法可借鉴已有的供应链各环节风险控制的相关研究。

## 2 煤电能源供应链的价格风险研究

目前国内外对煤电能源供应链价格风险整体进行的研究较少,但针对各个单独环节的研究很丰富。

### 2.1 煤炭价格、发电价格与销售电价等价格之间的联动传导研究

2004年我国政府出台的“煤电价格联动”机制,给出了煤电价格的正向联动,但却没有反向联动,当煤炭价格下降时,并没有设计相应电价下调路径。文[18]基于成本变化构建了煤炭价格与发电上网价格的联动平衡关系模型,通过该模型可以建立煤电价格的动态联动,只是没有讨论供电价格如何实现联动。文[19]讨论了电煤基准价格、上网电价与销售电价之间的关系,提出以电价倒推来

确定电煤基准价格并实施区间规制，但缺少成本方面的经济学依据，不容易操作。文 [20] 构建了包含煤炭和电力、涉及 76 个产业的价格传导网络模型，可以模拟价格风险传导。模型分析得出，电力产业价格传导强度大于煤炭产业价格传导强度，当煤炭和电力价格分别上涨相同幅度时，电价上涨导致的 CPI 上涨幅度明显大于煤价上涨产生的效应。

## 2.2 煤价与电价的风险度量与控制优化研究

关于能源价格风险分析与度量。文 [21] 指出，能源交易价值会随着时间、市场条件、价格变化而变化，能源市场竞争带来市场价格的过高波动风险，给出了历史 ARMA 预测模型和基于 GARCH 的协方差模型用以计算风险值 VaR。文 [22] 引入 SGT 分布描述原油市场价格分布，利用 SV 模型度量国际原油价格波动率；基于 Bayesian 原理，建立 Bayesian-SV-SGT 模型对国际原油价格的 VaR 进行估计。实际上，该模型可以用于煤炭价格波动风险特征分析。

关于电价风险度量与控制优化。文 [23] 通过 Monte Carlo 方法模拟了发电商竞争对手的报价行为，将平均-标准方差率作为风险指标，考虑了燃煤机组的非凸运行成本和机组连续启/停时间约束，通过追求风险最小化来构建发电商报价优化模型。文 [24] 给出了长期负荷预测模型和电力价格波动范围预测模型，介绍了长期风险管理物理工具(现货合同、远期合同)与金融衍生工具(期货合同)。根据均方差原理，给出了利润最大化和规避 MCP 价格风险波动的优化模型，目标函数中考虑了风险厌恶因子。文 [25] 基于 Markowitz 理论，寻求发电商在电能市场、备用市场、燃料市场之间不同风险状态下利润的均衡，考虑了燃料获得不确定性、市场清除价格不确定性、排放约束、机组强迫停运率、机组备用启动率、价格预测偏差，建立了利润最大化混合整数非线性优化模型。文 [26] 基于 Markowitz 均-方差法，给出了短期电力市场风险计算模型，考虑发电燃料价格的波动性、交易和物理约束问题后，构建了一个混合整数规划模型。

## 2.3 煤炭运输环节带来的价格风险研究

文 [27] 把影响煤炭铁路运输因素进行分解，细化为铁路建设成本、燃料成本、替代效应、外部经济环境成本。文 [28] 运用线性规划方法建立了一个煤炭运输模型，对跨省间的煤炭运输费用进行了实证分析，分析了煤炭运输成本与发电价格的关

系。

虽然上述研究均为针对煤电供应链中某一环节或某一方面的研究，煤电供应链价格风险整体控制的研究基于上述研究的成果来开展。煤电供应链价格风险整体的研究重点为煤炭能源、运输环节、电力 3 方面某单一节点的价格风险通过煤电供应链进行风险传递与扩展，从而引发其他节点超出价格范围的风险，因此，可基于文献 [21-28] 中单一节点价格风险的研究，结合文献 [18-20] 的风险传导机制研究，从煤电运能源供应链全局角度对单一节点的价格风险进行全面控制研究。

## 3 煤电能源供应链的各环节协调风险研究

煤电能源供应链的产量(产能)协调包括煤炭产能、煤炭运输产能、发电产能、电网输电能力、用户能源消费能力等各个环节的协调，任何一个环节的产量(产能)不足与过度，或任意几个环节之间的产量(产能)不匹配，都有可能带来整个供应链环节的断裂风险或能源浪费。针对煤电能源供应链各环节协调风险的研究主要可归纳为如下几个方面。

### 3.1 煤炭产能、煤炭运输产能与发电产能匹配风险研究

文 [29] 运用产业组织理论，定性分析了我国煤炭产业的市场结构、市场行为、市场绩效以及市场结构的最优选择。文 [30] 指出我国煤炭企业和电力企业双方在电煤市场上的谈判势力来源于经济依赖性、市场结构和政府规制。文 [31] 对煤炭运输占铁路运输的比重变化及各地区铁路煤运现状作了分析，并预测了主要产煤省份的交通运输建设状况，以及南北运输通路、主要港口运输通路未来运输能力的增长，提出煤炭运输必须要服从资源禀赋特征。文 [32] 研究了发电结构变化对煤运的影响，指出电力结构、电力交易模式、铁路提速、公路建设、电力“厂网分离”、发电节能调度等均对煤运规划产生影响。

上述关于发电产能与煤炭产能、煤炭运输能力的关联研究可作为煤电运能源供应链匹配风险控制研究的基础。

### 3.2 发电环节与电网输电环节协调风险研究

我国能源和负荷分布很不均衡，电源、电网协调发展可以防止发电资源和输电资源的浪费，但电

源、电网为相对独立的市场主体,须研究有效的协调激励机制,电源、输电、分布式发电、配电的协调规划有利于提高发、输、配各环节的安全效益、经济效益以及环保效益。文[33]在发电规划和输电规划博弈分析的基础上,运用古诺模型模拟发电与输电扩展行为,并通过求解混合互补型问题寻求均衡。文[34]建立了适应于电网规划的节能发电调度数学模型,分析了节能发电调度对电网规划的影响。大型风电场往往远离负荷中心,需要进行高电压、长距离输电,但风能的随机性、间歇性和反调峰性使风电功率预测误差较大,风电接入电网时会对接入点附近电能质量、电压稳定性、电网频率和保护装置产生一定的影响,文[35]对风电场接入电网的各种并网方案进行了可靠性和经济性评估。文[36]采用委托代理模型研究了基于碳减排调度的厂网合作竞价机制,可以促进电力市场的稳定供给,增加低碳机组的发电收益,实现电网企业购电成本最小或利润最大化。

电力环节作为煤电能源供应链中主体构成部分,本身即为相对独立的市场主体,其内部发、输、配各环节的协调风险控制对煤电能源供应链整体协调风险的控制具有重要的影响作用,上述文献关于电力环节协调风险的研究也可作为煤电能源供应链全面风险控制的重要节点。

### 3.3 发电运行、电网运行、用户用电对煤炭供需风险影响研究

我国主要以煤电为主,发电耗煤对整个煤炭市场的供需具有重要的影响。发电运行、电网运行和用户能源消费的模式不同将对电耗量和煤耗量产生较大影响,进而影响煤炭的需求和供给,给煤电能源供应链中的煤炭生产、供应环节带来一定风险。以节能为目标,很多学者针对发电、电网和用户用电等环节的运行模式与煤炭消耗的关系展开研究。

发电环节的煤耗主要取决于发电装机容量等级、平均负荷率。在发电装机容量等级一定的前提下可以提高平均负荷率;在平均负荷率一定的情况下,可以优化分配机组之间负荷,提高可再生能源发电比例以减少火电机组燃料消耗,同是火电机组,先调用煤耗低的机组,后调用煤耗高的机组。发电权置换能够促进大火电和小火电之间、大水电和小水电之间、水电(风电)和火电之间、不同流域水电之间的相互补偿和优化配置,能够发挥大火电成本低、污染小、效率高的优势和水电等可再生资

源的经济效益和社会效益,防止水电(风电)较丰富的区域出现“弃水(风)”不发电现象,实现水(风)火互补、调峰错峰、互为备用等。文[37]给出机组之间发电成本差距分析模型,在考虑合同电量基础上给出节能调度优化模型,最后确定需要置换的发电机组,并给出置换机组之间效益分配方式,只是没有给出煤炭需求增减的具体风险计算模型。

电网环节对煤耗的影响体现在电网的线损问题,线损的变动直接表现为输电环节的电量损失,而输电电量损失的变动可直接换算为发电煤耗。线损的降低将意味着满足用户同一电量需求的发电量的减少,从而使得发电煤耗降低,提高能源利用效率。降低线损需要电网选取最佳运行方式,包括调整负荷(峰谷差越小则线损越小)、调整变压器(适时分、并列及转移负荷)、购买发电无功电量、惩罚功率因数(用户功率因数越高则线损越小)等,在传输相同电量的基础上,以达到减少系统损耗。文[38]分析了电网运行对线损率的影响,但是线损电量没有分解到燃煤发电部分上,也就没法确定对发电用煤需要增减形成的风险。

用户能源消费模式的变动,如各类能源(煤、石油、电力等)的消费结构、各类能源(如电力)的内部消费结构(如电力消费时段、电量结构),都将对节能和煤炭消耗产生影响。能源之间具有一定的替代性(如5 000亿 kWh电量可替代0.75亿 t石油),煤炭、石油、电力3种能源的边际替代率为17.27:3.22:1<sup>[39]</sup>。文[40]分析了我国能源强度与电力强度的对比变化,并对煤炭、电力、运输的能源效率、污染物排放进行了对比分析,发现和煤、油相比,电力的能效最高、污染最小。文[41]对比了我国煤、电、油的能源消费强度变化,发现电力消费强度增长最快,对能源消耗的风险影响最大,能源节约从电力入手效果最好;运用Laspeyres分解方法,发现用电结构调整最为关键。但用电结构的调整需要通过电价或者政策来引导,该文对这方面的工作没有涉及。我国石油严重短缺,通过发展电气化(铁路电气化、公交电气化、地铁等),可以适当减弱航空、交通的用油增速,实现节油减排。文[42]实施峰谷分时电价可以改变用户电力负荷时间分布,降低电网负荷峰谷差即削峰填谷,由此可以减少高峰时段高煤耗率机组上网发电的机率,从而节约发电煤炭消耗量。文[43]从用户端的能源服务角度出发,建立了金融

衍生数学模型，以此来保证用户规避燃料价格波动带来的电力价格波动风险，并对服务前后的能源节约进行了对比。

上述关于电力模式对煤炭供需影响的研究可以作为煤电能源供应链协调风险研究的重要基础。

### 3.4 煤电能源供应链各环节的总体协调风险研究

文献 [44 - 47] 以煤炭市场为研究背景，讨论了煤电纵向一体化与长期合约之间的权衡、长期合约设置及其绩效分析；提出由于规制的限制、煤炭供应商市场力以及纵向一体化的不经济性，可能使得长期合约比纵向一体化更适合。文 [48] 分析了煤运电产业链纵向关系，即煤电市场结构、煤电纵向安排、煤运电关系与政府规制等，提出应从战略层面上关注煤运电各子系统的协调关系。煤电能源供应链各环节的总体协调风险研究文献非常少。

煤电能源供应链各环节总体协调风险的研究是煤电供应链全面风险控制最重要的构成部分之一。文献 [29 - 48] 从煤运电产能匹配关联性、电网各环节协调性、电力模式对煤炭供需影响性等方面对煤运电供应链各单一模块的协调风险控制进行了研究，煤运电能源供应链各环节总体协调风险的研究应在融合上述研究的基础上深化煤运电产能匹配规划研究、电力系统协调风险通过能源供应链向煤炭与运输环节的风险传递与扩展路径研究、煤炭供需对电力系统运行风险的反馈作用研究等，并可借鉴系统动力学的思想深化煤电能源供应链系统总体协调风险的研究。

## 4 节能减排环境下的煤电能源供应链风险研究

当前，实现节能减排目标面临的形势十分严峻，政府制定了促进节能减排的一系列政策措施，节能减排已成为我国的一项基本国策和全社会的共识。煤炭和电力部门是实施节能减排措施的重点对象，节能减排环境下煤电能源供应链的风险分析、评价与控制成为煤电能源供应链风险研究的热点与重要构成。节能减排环境下的煤电能源供应链风险研究主要包括两个方面：一是针对可再生能源发电和清洁能源发电的发电侧多源投资风险研究；二是考虑能源与环境约束的煤电能源供应链风险研究。

### 4.1 煤电能源供应链发电侧多源投资风险控制

煤电能源供应链发电侧多源投资风险包括水电

投资风险、风电投资风险、光伏发电投资风险、生物质发电投资风险等多个方面，其风险控制研究包括各类能源发电单一投资风险控制及各类能源发电投资组合风险控制。

文 [49] 指出，水力发电商目标是售电利润最大化，但其必须面对着来水、上网价格的风险不确定性。论文介绍了双边市场下风险规避的物理和金融合同模型、基于 VaR 与 CVaR 下的投资组合模型，并建立了风险约束下发电调度随机优化模型。文 [50] 构建了含有风电的电力市场风险约束下利润最大化随机优化模型，分析了不同风险水平下的期望利润、利润标准方差、期望利润的置信区间。文 [51] 针对土耳其，分析了太阳能光伏发电、太阳能聚热发电、生物质发电、风力发电、小水电、地热发电的成本，并与电力批发价格、电力零售价格进行了区间对比，数据分析结果表明可再生能源发电投资风险最小。文 [52] 给出了非管制电力市场风险管理金融衍生工具，利用 Monte Carlo 方法进行电力投资组合绩效模拟，针对北欧电力市场给出了风险模拟和优化结果。文 [53] 构建了发电组合投资模型，考虑了多种能源发电，目标函数是组合发电成本风险最小化，这种目标的结果是提高可再生能源发电比例。文 [54] 列举 8 种能源供应技术(风电、煤电、水电、生物质能发电、燃气发电、太阳能发电、核电、燃油发电)的比较风险评估(CRA)方法，采用 DEA 模型进行评价，考虑的因素包括二氧化碳排放、土地占用、生命周期内损失、生命周期内收益。文 [55] 指出电力供应风险涉及：燃料供应风险、燃料价格风险、上网价格风险、监管风险、需求风险、运行风险、环境排放允许等。论文评价了各种可再生能源发电与燃气发电的风险合同模式(价格、时间长度、电能成本、容量成本、税收)的不同，论述了二者的风险互补性。文 [56] 针对可再生能源给出了投资风险类型与风险因素，通过计量经济学模型，分析了投资风险系数的概率分布，模拟了投资风险利润的分布特征，分析了可再生能源公司利润与石油价格波动的关系。

### 4.2 环境约束下煤电能源供应链风险分析与评价

文 [57] 将微观仿真与中观能源规划、宏观社会经济均衡有机结合，进而发展出由演化模块(E)、综合优化模块(O)及系统动力学模块(D)构成，以智慧(W)为统领的 WEOD 架构，对能源系统复杂

性进行预测、评价与优化管理。文 [58] 提出了能源结构的双组份模型,由统计检验估计法,对模型中的能源生产与消费的相关系数进行了预测估计。文 [59] 应用全生命周期分析法建立了我国煤电能源链的碳排放计量总模型和各环节的子计量模型。文 [60] 提出从供给和需求双侧管理来考虑满足能源需求问题,将二氧化碳排放作为满足能源需求的一个约束,建立优化模型,得到反映节能和排放约束下的最优能源结构。文 [61] 提出了绿色能源生产链的发展框架模型,包括能源开发、能源交易、能源储存、能源转换的生产过程;投资风险、供应需求预测、全寿命周期情景政策模拟等管理过程;能源供应系统要素、能源运输系统要素、能源储存系统要素之间的相互作用关系图模型;燃煤、燃油、垃圾、水力、太阳能、生物质等组合绿色发电的生产流程。文 [62] 根据土耳其的 29 个电厂所在的城市,基于能源区域分布、运输布局和二氧化碳的排放约束,从经济、技术、环境、社会的角度出发,分析了能源供应链的构建问题。文 [63] 以立陶宛国家为背景,提供了能源安全水平评价技术模型。文 [64] 基于 CGE 模型,从煤炭、原油、汽油、燃气、电力价格多角度出发,分析价格对比率的波动态势,据此建立风险预警指标体系,建立风险预警系统。文 [65] 介绍了风险管理的金融衍生工具,包括 VaR 的拓展模型即极值理论模型 EVT、灾难衍生模拟模型,在此基础上给出了天然气能源安全指数的分析模型。文 [66] 建立了可再生能源投资、可再生能源生产、一次能源进口、化石燃料生产、城市化、单位资本 GDP、人口、工业化、温室气体排放、核电投资各指标的对应比较量化矩阵,由此分析乐观、中观、悲观不同情境下可再生能源、核电投资选择倾向,以及在此基础上的温室气体排放与能源进口。

节能减排约束是煤电能源供应链在当前能源新形势下面临的风险,是煤电能源供应链原有风险基础上的扩展,可借鉴文献 [47-64] 的研究,与煤电能源供应链原有风险相结合进行拓展研究。

## 5 结束语

煤电能源供应链中的煤炭生产、煤炭运输、电源结构与布局、电网结构、用电需求之间彼此作用、相互影响。电源结构需要考虑发电资源类型与

储量、开发投资成本、电网安全、电力平衡、环保等因素,由此研究电源类型的比例分布,目的是节约煤炭;电源布局需要考虑发电资源基地位置(包括周边国家)、负荷节点位置、电煤运输分配结构、电煤运输与油耗关系、输电与输煤经济比较等。燃煤发电发展速度要和煤炭发展速度相协调,否则会出现煤炭供应的短缺或过剩;输电建设要与电源建设相协调,否则会导致发电送不出去,给发电企业、用户均带来损失。由于体制、市场、机制上的多种原因,我国关于煤炭生产、煤炭运输、电力生产、电力运输、产业用电等供应链各个环节的协调风险问题较复杂,国内外研究文献关于这些问题的针对性研究成果非常少,有待于学者们的系统研究。

## 参 考 文 献

- [1] 周艳菊,邱莞华,王宗润. 供应链管理研究进展的综述与分析 [J]. 系统工程, 2006, 24(3): 1-7.
- [2] Lee H L, Padmanabhan V, Whang S. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect [J]. *Management Science*, 1997, 43(4): 546-558.
- [3] Cranfield Management School. Supply chain reliability [R]. Cranfield University, 2002.
- [4] 冯光. 离散型零部件企业基于价值链的全面风险控制 [J]. 浙江工业大学学报, 2011, 10(2): 188-193.
- [5] 陈景辉. 集团公司全面风险评价及其影响效应研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [6] Juttner U, Peck H, Christopher M. Supply Chain Risk Management: Outlining an Agenda for Future Research [J]. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 2003, 6(4): 215-229.
- [7] 邓明然,夏喆. 基于耦合的企业风险传导模型探讨 [J]. 经济与管理研究, 2006(3): 66-68.
- [8] Ahmed M. Khalid, Gulasekaran Rajaguru. Financial Market Contagion or spillovers Evidence from Asian Crisis using Multi-variate GARCH Approach [J]. Seminar Series of the University of New South Wales, 2006 Program. Bond University. 2006, 5.
- [9] 张金清,李徐. 资产组合的集成风险度量及其应用——基于最优拟合 Copula 函数的 VaR 方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2008(9): 14-23.
- [10] 吴军,李建,汪寿阳. 供应链管理中的几个重要问题 [J]. 管理科学学报, 2006, 9(6): 1-12.
- [11] Marco Ghirardi, Giuseppe Menga, Nicola Sacco. An optimisation-oriented model of distributed supply-

- chain [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2008, 79(4): 937 - 946.
- [12] Christopher Tang, Brian Tomlin. The power of flexibility for mitigating supply chain risks [J]. *Int. J. Production Economics*, 2008, 116(1): 12 - 27.
- [13] Li Jianping, Li Minglu, Wu Dengsheng, etc. An integrated risk measurement and optimization model for trustworthy software process management [J]. *Information Sciences*, 2012, 191(1): 47 - 60.
- [14] 林勇, 马士华. 供应链企业合作机制与委托实现理论 [J]. *南开管理评论*, 2000(2): 49 - 53.
- [15] 徐玖平, 陈书建. 不对称信息下风险投资的委托代理模型研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2004, (1): 19 - 24.
- [16] 徐兵, 朱道立. 竞争供应链的结构和链内协调策略分析 [J]. *运筹与管理*, 2008, 17(5): 51 - 57.
- [17] 舒彤, 陈收, 汪寿阳, 等. 基于影响因子的供应链协同预测方法 [J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(8): 1363 - 1370.
- [18] 谭忠富, 张明文, 王绵斌. 煤炭价格与发电价格联动平衡关系模型 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2009, 21(3): 1 - 5.
- [19] 于立宏, 郁义鸿. 纵向结构特性与电煤价格形成机制 [J]. *中国工业经济*, 2010(3): 65 - 75.
- [20] 杨彤, 聂锐, 刘玥. 基于价格传导复杂网络模型的煤电价格传导效应模拟分析 [J]. *中国矿业*, 2009, 18(9): 31 - 35.
- [21] Mehdi Sadeghi, Saeed Shavvalpour. Energy risk management and value at risk modeling [J]. *Energy Policy*, 2006, 34(18): 3367 - 3373.
- [22] 柴建, 郭菊娥, 龚利, 等. 基于 Bayesian-SV-SGT 模型的原油价格“Value at Risk”估计 [J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(1): 8 - 17.
- [23] Chanwit Boonchuay, Weerakorn Ongsakul. Optimal risky bidding strategy for a generating company by self-organising hierarchical particle swarm optimization [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(2): 1047 - 1053.
- [24] Azevedo F, Valea Z A, Moura Oliveira P B, Khodr H M. A long-term risk management tool for electricity markets using swarm intelligence [J]. *Electric Power Systems Research*, 2010, 80(4): 380 - 389.
- [25] Jalal Kazempour S, Mohsen Parsa Moghaddam. Risk-constrained self-scheduling of a fuel and emission constrained power producer using rolling window procedure [J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2011, 33(2): 359 - 368.
- [26] Yu Zuwei. A spatial mean-variance MIP model for energy market risk analysis [J]. *Energy Economics*, 2003, 25: 255 - 268.
- [27] 雷莲萍, 李华. 铁路主要通路煤炭运输的预测与展望 [J]. *煤炭经济研究*, 2001(4): 68 - 71.
- [28] 郑勇. 煤炭铁路运输将对供需调整产生影响 [J]. *中国煤炭*, 2003, 29(6): 14 - 16.
- [29] 张星星, 孙璐. 我国煤炭产业市场结构的问题研究 [J]. *太原科技*, 2009(8): 47 - 48.
- [30] 曲创, 秦阳洋. 中国煤电谈判势力的来源与比较 [J]. *财经问题研究*, 2009(10): 46 - 51.
- [31] 王庆云, 王溢辉. 我国煤炭运输系统发展展望 [J]. *中国物流与采购*, 2006(11): 16 - 19.
- [32] 雷莲萍, 李华, 石群. 电力结构变化对铁路煤炭运输的影响 [J]. *煤炭经济研究*, 1999(12): 21 - 23.
- [33] 张鲲, 刘宏志, 刘道新, 等. 基于博弈论的发电与输电协调规划 [J]. *华东电力*, 2011, 39(2): 168 - 171.
- [34] 黄良宝, 朱忠烈, 王峥, 等. 节能发电调度对华东电网规划的影响研究 [J]. *华东电力*, 2009, 37(5): 686 - 690.
- [35] 陈远, 任惠, 蒋群. 含风电场的发输电系统并网方案的选择 [J]. *广东电力*, 2011, 24(1): 58 - 61.
- [36] 黄守军, 任玉珑, 孙睿, 等. 基于碳减排调度的激励性厂网合作竞价机制设计 [J]. *中国管理科学*, 2011, 19(5): 138 - 146.
- [37] 张明文, 谭忠富, 于超. 燃煤发电机组之间节能置换及效益分配优化模型 [J]. *华北电力大学学报*, 2009, 36(3): 108 - 111.
- [38] 王绵斌, 谭忠富, 张蓉, 等. 基于“增量法”下的电网投资风险评估模型 [J]. *电工技术学报*, 2009, 21(9): 18 - 24.
- [39] 魏一鸣等. 中国可持续发展战略报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [40] Yang Ming. China's energy efficiency target 2010 [J]. *Energy Policy*, 2008, 36(2): 561 - 570.
- [41] Steenhof P A. Decomposition of electricity demand in China's industrial sector [J]. *Energy Economics*, 2006, 28(3): 370 - 384.
- [42] 谭忠富, 于超, 姜海洋, 等. 用户端峰谷分时电价对发电端节煤影响分析模型 [J]. *系统工程理论与实践*, 2009, 29(10): 94 - 101.
- [43] Masaaki Bannai, Yasushi Tomita. Risk hedging against the fuel price fluctuation in energy service business [J]. *Energy*, 2007, 32(11): 2051 - 2060.
- [44] Joskow P L. Vertical Integration and Long-term Contracts: The Case of Coal-Burning Electric Generating Plants [J]. *Journal of Law, Economics and Organization*, 1985(1): 33 - 80.



- [45] Joskow P L. Contract Duration and Relationship-Specific Investments-Empirical Evidence from Coal Markets [J]. *Journal of Economics*, 1987 (21): 251 - 274.
- [46] Joskow P L. Price Adjustment in Long-term Contracts: The Case of Coal [J]. *Journal of Law and Economics*, 1988(31): 47 - 83.
- [47] Joskow P L. The Performance of Long-Term Contracts-Further Evidence from Coal Markets [J]. *American Economic Review*, 1990(77): 168 - 185.
- [48] 王华清, 宋学锋. 煤运电产业链纵向关系研究现状述评与展望 [J]. *中国矿业*, 2009, 18(9): 116 - 120.
- [49] Liu Hongling, Jiang Chuanwen, Zhang Yan. A review on risk-constrained hydropower scheduling in deregulated power market [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008(12): 1465 - 1475.
- [50] Pousinho H M I, Mendesc V M F, Catalão J P S. A risk-averse optimization model for trading wind energy in a market environment under uncertainty [J]. *Energy*, 2011, 36(8): 4935 - 4942.
- [51] Serhan Oksay, Emre Iseri. A new energy paradigm for Turkey: A political risk-inclusive cost analysis for sustainable energy [J]. *Energy Policy*, 2011, 39 (5): 2386 - 2395.
- [52] Iivo Vehvilainen, Jussi Keppo. Managing electricity market price risk [J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, 145: 136 - 147.
- [53] Huang Yun-Hsun, Wu Jung-Hua. A portfolio risk analysis on electricity supply planning [J]. *Energy Policy*, 2008, 36(2): 627 - 641.
- [54] Ramanathan R. Comparative Risk Assessment of energy supply technologies: a Data Envelopment Analysis approach [J]. *Energy*, 2001 (26): 197 - 203.
- [55] Ryan Wisser, Devra Bachrach, Mark Bolinger. Comparing the risk profiles of renewable and natural gas-fired electricity contracts [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2004, 8(4): 335 - 363.
- [56] Perry Sadorsky. Modeling renewable energy company risk [J]. *Energy Policy*, 2012, 40: 39 - 48.
- [57] 于智为, 胡小军, 张希良, 等. 能源系统复杂性管理建模方法研究 [J]. *管理学报*, 2008, 5(5): 670 - 673.
- [58] 包森, 田立新, 王军帅. 中国能源生产与消费趋势预测和碳排放研究 [J]. *自然资源学报*, 2010, 25 (8): 1248 - 1254.
- [59] 夏德建, 任玉珑, 史乐峰. 中国煤电能源链的生命周期碳排放系数计量 [J]. *统计研究*, 2010, 27 (8): 82 - 89.
- [60] 林伯强, 姚昕, 刘希颖. 节能和碳排放约束下的中国能源结构战略调整 [J]. *中国社会科学*, 2010, (1): 58 - 71.
- [61] Hossam A. Gabbar. Engineering design of green hybrid energy production and supply chains [J]. *Environmental Modeling & Software*, 2009, 24 (3): 423 - 435.
- [62] Ahu Gumrah Dumanli, Ibrahim Gulyurtlu, Yuda Yueruem. Fuel supply chain analysis of Turkey [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11(9): 2058 - 2082.
- [63] Juozas Augutis, Ricardas Krikstolaitis, Linas Martisauskas, Sigita Peculyte. Energy security level assessment technology [J]. *Applied Energy*, 2012, 97: 143 - 149.
- [64] He Yong-xiu, Zhou Ying. Early warning model for risks of energy prices and energy price ratios in China's energy engineering [J]. *Systems Engineering Procedia*, 2012(3): 22 - 29.
- [65] Skouloudis A, Flamos A, Psarras J. Energy Supply Risk Premium: Review and Methodological Framework [J]. *Energy Sources, Part B*, 2012, 7(1): 71 - 80.
- [66] Didem Cinar, Gulgun Kayakutlu. Scenario analysis using Bayesian networks: A case study in energy sector [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2010, 23 (3): 267 - 276.

收稿日期: 2013-03-19

作者简介:

谭忠富 (1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力经济和能源经济, E-mail: tanzhongfu@sina.com;

张会娟 (1986—), 女, 博士研究生, 研究方向为能源经济, E-mail: zhanghuijuan1213@163.com.

(责任编辑: 林海文)