

# 我国核电战略性新兴产业“十二五”培育与中长期发展展望

郭晴, 苏罡

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

**摘要:** 核电技术产业是我国战略性新兴产业中新能源产业的重要组成部分, 发展核电符合我国绿色低碳能源战略。按照科技突破引领产品升级, 带动产能提升和产业发展的思路, 本文系统地分析“十二五”期间核电技术产业培育和发展成果, 重点介绍福岛事故后我国核电产业发展态势和“华龙一号”等先进核电技术的安全和经济特性, 提出“十三五”乃至更长时期的发展趋势和方向, 包括发展基于快堆的核燃料闭式循环体系, 聚变技术发展实现“三步走”战略。通过小型模块化反应堆技术探索核能多用途利用等, 实现核电技术产业的规模化、可持续发展, 在推动我国经济平稳、持续增长, 能源结构和工业结构优化升级方面发挥更大作用。

**关键词:** 核电技术产业; 战略性新兴产业; 华龙一号; 核燃料闭式循环; “三步走”战略

中图分类号: TM613 文献标识码: A

## China's Nuclear Power Strategic Emerging Industries "12<sup>th</sup> Five-Year" Foster Outcomes and Long-Term Development Prospects

Guo Qing, Su Gang

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

**Abstract:** Nuclear power technology industry is an important component of the new energy industry, which is one of the China's strategic emerging industries, and the development of nuclear power meets with our strategy of green low-carbon energy. According to the route that the scientific and technological breakthroughs leading to product upgrades, increasing the production capacity and industrial development, the article systematically analysis the nuclear technology foster and development outcomes during the "12<sup>th</sup> Five-Year", focusing on the development trend of China's nuclear power industry after the Fukushima accident, and the significant feature of HPR1000, the advanced nuclear power technology; put forward the development trends during "13<sup>th</sup> Five-Year" and even longer term, including the development of fuel closed-cycle system based on the fast reactor, the development of fusion technology to achieve "three-step" strategy, to explore the multipurpose utilization of nuclear energy through small module reactor technology, to achieve the goal of large-scale, sustainable nuclear power industry development, and play a greater role in promoting China's economic stability, sustainable growth, energy & industrial structure optimization and upgrading.

**Key words:** nuclear power technology industry; strategic emerging industries; HPR1000; fuel closed-cycle system; "three-step" strategy

收稿日期: 2016-05-28; 修回日期: 2016-06-30

作者简介: 郭晴, 中国核电工程有限公司, 高级工程师, 主要从事核电站工艺系统的研发和设计工作; E-mail: guo\_tsing@126.com

基金项目: 中国工程院重大咨询项目“‘十三五’战略性新兴产业培育与发展规划研究”(2014-ZD-7)

本刊网址: www.engingsci.cn

## 一、前言

核科学技术是人类 20 世纪最伟大的科技成就之一，以核电为主要标志的和平利用核能，在保障能源供应、促进经济发展、应对气候变化、造福国计民生等方面发挥了不可替代的作用。

核电技术产业是我国战略性新兴产业中新能源产业的重要组成部分，在《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》中提出加快发展技术成熟、市场竞争力强的核电等新能源，明确了产业重点发展方向和主要任务<sup>[1]</sup>。核电技术产业应涵盖核电站全生命周期，包括建造、运行和退役，并涉及核电全产业链和相关方，着眼于建立可持续发展的核燃料循环体系。

全面梳理“十二五”期间核电技术产业培育发展的主要领域，重点总结在各领域通过战略性新兴产业培育所取得的科技、产业发展成果，包括运行核电站、自主三代核电技术、具备四代核电特征的先进核电技术、核燃料前段和乏燃料后处理等后段；对于“十三五”乃至更长一段时间的产业发展方向做出展望，以期核电技术实现规模化、可持续发展，为核电技术产业发展提供参考。

## 二、核电是绿色低碳能源，具备战略新兴产业特性

核安全是国家安全体系的重要组成部分，核科技工业是国防建设的重要基石。核电作为能源，具有清洁、低碳、稳定、高能量密度的特点，在非化石能源中核电是增加能源供给的重要支柱之一，也是治理雾霾、满足需求的重要手段。铀资源能量密度高、体积小、燃料费用所占发电成本比重低，可以成为破解我国能源供需逆向分布矛盾的战略选择，在保障能源安全中具有特殊的战略优势；核能全生命周期碳排放量与风电相当，在我国低碳转型中具有重要作用，是应对气候变化的重要手段；核电生产过程不会向大气释放有害气体和其他污染物，是建设生态文明建设的重要举措。核电是高技术密集产业，是能源科技的重要支撑，是国家科技实力的重要标志；发展核电对提高材料、冶金、化工、机械、电子、仪器制造等几十个行业的工艺、材料和加工水平具有重要的拉动作用，有助于推动从劳动密集型产业向

技术密集型产业转型；同时未来核能作为优质的一次能源，不仅可以用于大规模发电，还可以用来制氢、海水淡化、供热制冷，对于满足城镇化的能源需求，乃至开发燃料电池汽车都具有重要战略意义。据估计，2020 年核电在运装机将达到  $5.8 \times 10^7$  kW，在建  $3 \times 10^7$  kW，2020 年核电生产运营产出约为 2 000 亿元，拉动的总产出约为 4 000 亿元<sup>[2]</sup>。

## 三、我国核电技术产业发展现状

60 多年前，党中央做出了发展我国原子能事业的战略决策，我国建立了完整的核科研和核工业体系。通过近 30 多年来的发展，我国核电产业已经初具规模，在运核电机组 26 台，总装机容量 24.42 GW，世界排名第五；在建机组 24 台，总装机容量 26.25 GW，占世界在建总装机容量的 36%，居世界第一。

2015 年全国累计发电量为  $5.618 \times 10^{12}$  kW·h，核电累计发电量为  $1.689 \times 10^{11}$  kW·h，约占全国累计发电量的 3.01%。与燃煤发电相比，核能发电相当于减少燃烧标准煤  $5.373 \times 10^7$  t，减少排放二氧化碳  $1.407 \times 10^8$  t，减少排放二氧化硫  $4.568 \times 10^5$  t，减少排放氮氧化物  $3.977 \times 10^5$  t。各运行核电厂严格控制机组的运行风险，继续保持安全、稳定运行，未发生国际核事件分级（INES）表中 2 级及以上的运行事件。按照国家环境保护法规和环境辐射监测标准，各运行核电厂、核燃料循环设施排放量均远低于国家标准限值。核设施运行对运行人员、公众和环境未造成影响<sup>[3]</sup>。

核工业不断转型升级，走出了“引进消化吸收”到“再创新”的成功路线，“十二五”期间，研制出具有自主知识产权的三代百万千瓦核电技术“华龙一号”，实现出口并积极参与国际竞争，实现了核电“走出去”战略。具有四代特征的中国实验快堆实现满功率运行，高温气冷堆开工建设，这些成果标志着我国进入了世界先进核电水平的第一阵营。航天核动力取得阶段性成果，航海核动力创新升级，核医学、核农学等领域应用也不断丰富和扩展。

## 四、核电技术产业“十二五”培育和发展情况

### （一）日本福岛核事故后产业进入理性发展阶段

2011 年 3 月 11 日，日本福岛发生核事故，根

本原因是极端外部自然灾害, 超强地震和随即引起的大海啸叠加造成, 导致核电厂(沸水堆堆型)失去全部厂用电源, 反应堆余热无法导出, 致使堆芯熔化、氢爆, 大量放射性物质释放。事故发生后, 国务院决定暂停审批包括已开展前期工作的核电项目, 并对在役和在建的核电站开展安全大检查。检查结果表明, 我国核设施风险可控, 安全有保证<sup>[4]</sup>。我国核电采用压水堆技术路线, 无论从堆型还是自然灾害发生条件和安全保障方面来看, 切尔诺贝利和福岛核事故序列在我国不可能发生。

国家核安全局发布了《福岛核事故后核电厂改进行动通用技术要求》<sup>[5]</sup>, 对核电厂防洪能力、应急补水与相关设备、移动电源设置、外部极端自然灾害应对等方面提出改进要求, 这与国际核能界在总结福岛核事故教训后提出的安全要求和行动计划是一致的, 也体现了国际原子能机构(IAEA)最新版设计安全标准的要求。这些措施已在我国所有运行与在建核电厂全面实施。

国家核安全局还发布了《核安全与放射性污染防治“十二五”规划及2020年远景目标》<sup>[6]</sup>, 要求“‘十三五’期间新建核电站要在设计上实现消除大规模放射性物质释放的风险”。国家核安全局还对福岛核事故之前就已经启动的核安全立法工作高度重视, 《核安全法》将在未来经全国人大常委会会议审议通过后发布。

## (二) 自主创新实现产业科技全面突破

### 1. 推出具有自主知识产权的先进压水堆核电技术

我国自主开发的以“华龙一号”和“CAP1400”为代表的系列压水堆机型, 采用先进的第三代核电技术, 有完善的严重事故预防和缓解措施, 全面贯彻纵深防御原则, 设置多道实体安全屏障, 实现放射性物质包容。特别是“华龙一号”以“177组燃料组件堆芯”、“多重冗余的安全系统”和“能动与非能动相结合的安全措施”为主要技术特征, 采用世界最高安全要求和最新技术标准, 满足国际原子能机构的安全要求, 满足美国、欧洲三代技术标准, 充分利用我国近30年来核电站设计、建设、运营所积累的宝贵经验、技术和人才优势; 充分借鉴了包括美国西屋电气公司非能动压水堆(AP1000)、法国阿海珐公司欧洲压水堆(EPR)在

内的先进核电技术; 充分考虑了福岛核事故后国内外的经验反馈, 全面落实了核安全监管要求; 充分依托业已成熟的我国核电装备制造业体系和能力, 采用经验证的成熟技术, 实现了集成创新。特别是针对关键的自主创新技术如非能动系统、堆芯和主设备开展了大规模的试验验证。这些试验活动历时多年, 包括以下与非能动系统设计、堆芯和主设备相关的关键试验: 堆腔注水冷却系统(CIS)验证试验、二次侧非能动余热导出系统(PRS)验证试验、非能动安全壳热量排出系统(PCS)验证试验、反应堆水力学综合试验、反应堆旁流试验、反应堆下空腔交混试验、控制棒驱动线(CRDL)抗震试验、流致振动试验、蒸汽发生器验证试验等。

#### (1) 总体技术特征

177组12英尺燃料组件的反应堆: 采用先进燃料组件, 将堆芯燃料组件数量从157组增加到177组, 在提高堆芯额定功率的同时降低平均线功率密度, 堆芯热工裕量 $\geq 15\%$ , 既增加了核电厂的发电能力又提高了核电运行的安全裕量。通过实施中核集团“压水堆燃料元件设计制造技术”专项, 三年实现三种类型辐照考验组件入堆, 实现“华龙一号”的“中国芯”。

冗余设置的安全系统: 全面平衡地贯彻了核安全纵深防御设计原则和设计可靠性原则, 创新性地采用“能动与非能动相结合的安全设计理念”, 能动与非能动相结合的安全措施。能动安全系统是高效的, 经过工程验证的; 非能动安全系统可有效应对动力源丧失, 以非能动安全系统作为能动安全系统的补充, 可在保证技术成熟性的同时, 大幅提高安全性。针对基于概率论与确定论方法确定的严重事故序列采取了完善的严重事故预防与缓解措施, 设计中强调了安全壳完整性的保持, 达到概率安全目标: 堆芯损坏概率(CDF) $<1.0 \times 10^{-6}$ /堆·年, 大量放射性释放概率(LRF) $<1.0 \times 10^{-7}$ /堆·年, 能够实现“在设计上实际消除大规模放射性物质释放的风险”的目标。

厂址抵御地震灾害有足够的裕量: “华龙一号”设计基准地震加速度峰值达到0.3g, 地震安全有充分保障。其采用双层安全壳设计, 外层安全壳采用钢筋预应力混凝土设计, 使包容其内的核燃料、关键设备能够有效抵御商用大飞机的撞击和其他可能的外部飞射物和爆炸。在设计中还针对超过



设计基准的小概率外部事件采用了叠加的设防措施,通过以上的厂址选择与评价,保证了核电厂的设计拥有更高的安全裕度和安全性。

### (2) 提高经济性和先进性的措施

应用破前泄漏(LBB)技术、先进的数字化仪控系统技术、三废系统设计优化技术,满足废物最小化、辐射防护设计优化、消防设计优化等要求。“华龙一号”是在现有核电技术基础上的持续改进和继承发展,首堆建设国产化率不低于85%,批量化建造后设备国产化率不低于95%;关键设备供货可以依托现有核电机组已经形成的国产化能力,使“华龙一号”国内示范工程的造价与目前全球在建的三代核电机组相比,具有竞争优势。

## 2. 具备四代特征的先进核电技术发展

### (1) 快堆技术发展现状及趋势

快堆是由快中子引起链式裂变反应所释放出来的热能转换为电能的核电站。快堆在运行中既消耗裂变材料,又生产新裂变材料,而且所产可多于所耗,能实现核裂变材料的增殖。发展快堆能增殖核燃料、提高铀资源利用率,以及嬗变长寿命高放废物,减少核废物。

我国实验快堆工程在中俄技术设计合作和设计咨询基础上,自主完成了我国实验快堆工程初步设计、施工图设计以及50余项设计验证试验。2011年7月,实现40%功率并网发电。实验快堆为钠冷快堆,用液态钠为冷却剂,一回路常压设计安全性好,池式设计为堆芯严重事故时提供了最快的初始热阱;采用非能动的余热排出方式,应对事故能力强;钠的化学性质活泼,事故情况下提供了良好的放射性包容能力。上述钠冷快堆的本征安全特征,有利于达成满足第四代要求,实现堆芯熔化概率低于 $10^{-6}$ /堆·年,任何事故不需要厂外应急的安全目标。

### (2) 高温气冷堆技术发展现状及趋势

高温气冷堆是基于早期的气冷堆、改进型气冷堆发展起来的,有坚实的技术基础。高温气冷堆具有固有安全特性,从技术上消除了发生灾难性核事故的可能性;同时,发展超高温气冷堆是解决未来核能制氢的重要途径之一。我国在实验堆的基础上开始了商业规模模块式高温气冷堆核电站示范工程的科研与工程建设,2012年12月经国务院批准现场浇灌第一罐混凝土,示范工程的燃料元件、关

键系统与设备的科研和工程验证工作取得了一系列重大突破性成果。

## 3. 我国后处理产业发展现状及趋势

乏燃料后处理作为核燃料循环后段的关键环节,可以为快堆提供装料,大幅度提高铀资源的利用率。分离出的次锕系元素和裂变产物在快堆中以焚烧和嬗变等方式消耗,有利于实现核废物的处理和处置,达到废物最小化的目标,保障核能的绿色环保、可持续发展。

为了形成与核电发展相适应的可持续发展的后处理产业,2007年,国家确定将大型乏燃料后处理厂科技研发项目列入国家科技重大专项,将从后处理工艺技术、关键设备和材料、核与辐射安全技术、设计技术等多方面进行科研攻关,并建设一系列的研发平台,全面掌握具有自主知识产权的后处理核心技术,具备自主设计、建造先进商用乏燃料后处理厂的能力。目前已建成国家级核燃料后处理放射性试验设施,并在积极推动后处理工程技术研发中心、核临界实验室等相对集中和完善配套的工程研发设施建设,努力提高自主创新能力。积极实施大型后处理厂相关的先进工艺、关键设备、设计和安全等技术攻关。

## (三) 技术突破带动产品升级和产能提升

自主研发的第三代压水堆核电技术“华龙一号”示范项目成功落地福清5、6号,标志着核电技术实现了从引进消化吸收到自主创新的转变。通过防城港3、4号机组及国外项目开工实现了小批量建设,成为具备规模化发展主力机型之一。特别是“华龙一号”通过了IAEA反应堆通用设计审查(GRSR),认为在设计安全方面是成熟可靠的,满足IAEA关于先进核电技术最新设计的安全要求,其在成熟技术和详细的试验验证基础上进行的创新设计是成熟可靠的,为参与国际竞争取得国际认证。

核燃料产业实现技术升级,铀纯化转化一体化工程建成投产,铀浓缩实现向离心法转变,自主研发的燃料元件具备产业化条件。核燃料各环节产能稳步提升,铀纯化转化、铀浓缩和压水堆燃料组件产能能够全面满足我国核电发展需求。

天然铀采冶理论实现突破,由南方硬岩开采向北方砂岩地浸大基地建设转变。铀资源勘查能力不断提升,新增查明铀资源储量;北方大基地建设初

具规模,在立足国内铀产能的基础上,积极利用、掌控国际市场资源,天然铀保障体系不断完善。

为了满足我国核电大规模发展的需要,必须加快建立相应规模的动力堆乏燃料后处理生产能力。2010年,我国自主建设的第一座核电站乏燃料后处理中间试验工厂成功完成热调试,标志着中国已经掌握了核电站乏燃料后处理技术。

## 五、核能战略性新兴产业中长期发展展望

根据我国《核电中长期发展规划(2011—2020年)》<sup>[7]</sup>,到2020年,核电运行装机容量达到 $5.8 \times 10^7$  kW,在建 $3 \times 10^7$  kW。同时,根据中国发布的应对气候变化联合声明:“到2030年非化石能源消费在一次能源中的比重提升到20%”的目标,预计到2030年核电在运装机规模达到 $1.5 \times 10^8$  kW。

到2020年,我国核电站乏燃料累积存量和每年从核电站卸出的乏燃料将随核电站总装机容量的增加而递增。目前我国乏燃料堆内贮存容量不同程度地接近饱和,随着核电规模快速增长,面临着乏燃料存储和处理日益增加的需求。

### (一) 我国需要发展先进的基于快堆应用的核燃料闭式循环<sup>[8]</sup>

为解决制约我国核电发展的铀资源利用最优化和放射性废物最小化问题,我国已明确了“坚持核燃料闭式循环”的政策,制定了核能发展“压水堆、快堆、聚变堆三步走”战略,并实施“安全高效发展核电”的政策。为实现第二步战略以保证我国核电可持续发展,我国统筹考虑压水堆和快堆及乏燃料后处理工程的匹配发展,开展部署快堆及后处理工程的科研和示范工程建设,以实现裂变核能资源的高效利用。

目前,在我国实验快堆设计、建造和试运行经验的基础上,已进入了第二阶段——设计、建造我国自主示范快堆工程。我国正在自主建设核燃料循环科技示范项目,建成后 will 初步形成工业规模后处理能力。

为了形成与核电发展相适应的可持续发展的后处理产业,我国正在积极实施大型后处理厂相关的先进工艺、关键设备、设计和安全等技术攻关,同时积极推动国际合作建设大型商业后处理厂。鉴于

我国核能发展和后处理能力建设情况,积极完善乏燃料离堆贮存技术体系,开展干法贮存技术研究,形成一定规模的乏燃料离堆贮存能力,确保核电站可持续安全稳定运行。在完成铀钚混合氧化物(MOX)燃料元件生产试验线研发的基础上,继续开展工业规模快堆MOX燃料元件生产线工艺及检测研发设计工作,建立与示范快堆匹配的MOX燃料生产线,实现核燃料的闭式循环,最终实现核能绿色低碳、可持续发展。

### (二) 积极投入聚变研究实现“三步走”战略

基于聚变燃料在地球上的蕴藏量极为丰富,单位质量燃料释放出的能量比化石燃料大千万倍,聚变堆运行更加安全、清洁,聚变能定位为未来能源(2050年往后),被认为是人类能源的终极解决方案。

实现聚变反应原则上有两种途径:磁约束和惯性约束,目前国际上磁约束聚变已经取得重大进展,实验上实现了得失相当。正在建造的国际热核试验反应堆(ITER)将实现功率放大因子大于10和稳态运行,ITER将集成演示聚变能源堆物理和关键工程技术的可行性,但要建造示范堆估计仍需20~40年。激光点火在工程技术上已取得重大进展,但尚未实现单发点火,发展成为聚变能源堆尚需深入的物理理论和实验研究,我国在相关领域的发展势头很好,有可能后来居上。

聚变裂变混合堆可能在聚变堆获得成功得到发展,Z箍缩打靶可提供聚变中子,可发展成为具有多功能的聚变裂变混合堆。

### (三) 实现模块化小堆技术探索核能多用途利用

目前核能大部分用于发电,只有少于1%应用于非电领域,其他潜在应用市场的开发应用,将在很大程度上影响核能发展。现在国际上开展小批量的核能供热、制冷和海水淡化;探索核能高温利用,开发核电高温工艺供热在稠油热采、煤液化、冶金等领域应用;利用水的高温裂解制氢,以及氢能和燃料电池应用。氢作为二次清洁能源,作为运载工具的能源,有可观的发展前景。

多用途反应堆主要是小型反应堆,除了早期的研究实验堆以及标准核电站外,还建造了数百台小型反应堆用于海上舰船的推进动力系统。近年来工业化国家的发电容量日趋饱和,小型堆能更好地适

应这些国家的电力负荷需求。从厂址适用性来说,用于发电的小型堆可以建造在远离主电网的偏远地区;用于热电联产的小型堆可在内陆厂址和城市附近建造。小型反应堆不仅能为中小电网、极地岛屿和偏远山区供电,还可以为城市供热,为工业园区和石化企业提供热电,为破冰船和海上船舰提供动力等。小型堆的总体造价低,建造周期短,财务风险和管理风险更低。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院. “十二五”国家战略性新兴产业发展规划[R]. 2012.  
State Council of the People's Republic of China. “Twelve Five Year Plan” national strategic emerging industry development plan [R]. 2012.
- [2] 叶奇蓁. 我国核电及核能产业发展进展及前景[J]. 南方能源建设, 2015, 2(4): 18-21.  
Ye Q Z. Development and prospect of China's nuclear power & nuclear energy industry [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(4): 18-21.
- [3] 中国核能行业协会. 2015年1—12月全国核电运行情况[EB/OL]. (2016-01-22) [2016-05-28]. <http://www.china-nea.cn/html/2016-01/35018.html>.  
China Nuclear Energy Association. The National Nuclear Power Operation data in January—December, 2015 [EB/OL]. (2016-01-22) [2016-05-28]. <http://www.china-nea.cn/html/2016-01/35018.html>.
- [4] 中华人民共和国环境保护部(国家核安全局), 国家能源局, 中国地震局. 关于全国民用核设施综合安全检查情况的报告[EB/OL]. (2012-06-15) [2016-05-28]. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201206/t20120615\\_231738.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201206/t20120615_231738.htm).  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, National Energy Administration of the People's Republic of China, Seismological Bureau of the People's Republic of China. The report on national civilian nuclear facilities comprehensive safety inspection [EB/OL]. (2012-06-15) [2016-05-28]. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201206/t20120615\\_231738.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201206/t20120615_231738.htm).
- [5] 中华人民共和国环境保护部(国家核安全局). 福岛核事故后核电厂改进行动通用技术要求[EB/OL]. (2012-06-15) [2016-05-28]. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/haq/201206/t20120615\\_231698.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/haq/201206/t20120615_231698.htm).  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. General technical requirements of improve operations after the Fukushima nuclear power plant [EB/OL]. (2012-06-15) [2016-05-28]. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/haq/201206/t20120615\\_231698.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/haq/201206/t20120615_231698.htm).
- [6] 中华人民共和国环境保护部(国家核安全局). 核安全与放射性污染防治“十二五”规划及2020年远景目标[R]. 2012.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Nuclear safety and radioactive pollution prevention “Twelve Five Year Plan” and 2020 vision [R]. 2012.
- [7] 中华人民共和国国家能源局. 核电中长期发展规划(2011—2020)[R]. 2012.  
National Energy Administration of the People's Republic of China. Medium and long term development plan of China nuclear power (2011—2020) [R]. 2012.
- [8] 中国工程科技发展战略研究院. 中国战略性新兴产业发展研究报告(2015) [M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
Chinese Academy of Engineering Science and Technology Development. China Strategic Emerging Industry Development Report (2015) [M]. Beijing: Science Press, 2014.