我国发展面临能源与环境的双重约束分析及对策思考

武强^{1,2*}, 涂坤^{1,2*}

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

2. 国家煤矿水害防治工程技术研究中心, 北京 100083

* 联系人, E-mail: wuq@cumt.edu.cn; tukun2014@163.com

改革开放 40 年来,我国经济和社会发展取得了举世瞩目的成就,但经济社会高速发展与能源资源供给和生态环境的矛盾日益突出。随着能源生产与消费革命的推进,需要根据中国自身能源禀赋特征精准制定符合国情的能源战略,确保国家制定的宏伟发展目标所需求能源的有效供给和安全,保障经济社会可持续发展,满足人民日益增长的美好生活需要。中国是世界上能源消费大国和碳排放大国,面临着能源安全、环境污染、生态损伤、气候变化等诸多挑战。但中国在能源结构优化、能源供给与消费侧精准配置、能效提升、节能减排、能源技术创新等方面有着巨大的发展空间和潜力,这将是解决中国未来宏伟发展目标与能源支撑不足的尖锐矛盾和问题的关键。

1 一次性主要能源供给侧分析

1.1 原油

近年来,随着我国经济的高速持续发展,人民生活水平不断提高,汽车保有量快速增加,交通运输业等发展加速,推动了中国原油需求的快速增长。但是,中国原油生产远远不能满足消费需求(图1),中国原油消费总量持续增加,而原油产量在 2016 年和 2017 年连续两年下降。由于国内原油产量下降,炼油能力较快增长等原因,2017 年原油进口量继续较快增长,全年净进口量首次突破 4 亿吨,达到 4.2 亿吨,同比增长 10.7%;原油对外依赖度达到 68.6%,较 2016 年提高了 2.9 个百分点^[1]。因此,预计未来中国的原油消费与生产的差距将继续扩大,供需缺口将进一步增加,供需矛盾将异常尖锐,原油安全形势极为严峻。

1.2 天然气

天然气作为一种清洁高效的优质能源,在构建清洁低碳的能源体系中发挥特殊作用,在一次能源结构中的地位也将不断提升,具有巨大发展空间(图2)。我国天然气消费总量从 2009 年开始快速增长,尽管天然气产量在持续增长,但其增速滞后于消费总量,导致供需缺口越来越大。2017 年,中国天然气消费总量 2373 亿 m³,较 2016 年增长 15.3%;全年中国天然气产量 1487 亿 m³,同比增长 8.54%;

武强 水文地质环境地质学家,中国工程院院士。现任中国矿业大学(北京)教授,国家煤矿水害防治工程技术研究中心主任,国际矿山水协会(IMWA)副主席,国际矿山水协会(IMWA)中国国家委员会主席等职。长期从事矿山水防治与资源化利用教学和科研工作。在我国煤矿顶底板两大主要突水灾害预测预

报方法与防控技术和矿井水防治、利用、生态环保三位一体优化组合模式以及矿井充水条件三维可视虚拟化分析系统研发等方面,取得了多项重要成果。

天然气进口量 920 亿 m³,较 2016 年增加了 27.6%,天然气对外依赖度为 38.2%^[1]。近年来实施“煤改气”工程,在 2017 年供暖季,中国部分地区出现了“气荒”情况,一定程度上限制了天然气消费总量的增长。因此,天然气的消费

图1 2000~2017 年中国原油消费和生产总量。数据来源: 国家统计局

Figure 1 The total crude oil consumption and production of China from 2000 to 2017. Data sources: National Bureau of Statistics

图2 (网络版彩色)2000~2017年中国天然气消费和生产总量. 数据来源: 国家统计局

Figure 2 (Color online) The total natural gas consumption and production in China from 2000 to 2017. Data sources: National Bureau of Statistics

总量将继续保持强劲增长趋势,但中国天然气资源并不丰富,将导致供需缺口不断扩大,供需矛盾越来越凸显,对外依赖度将持续增加,形势也不容乐观.

1.3 水电

由于青藏高原隆起,中国水电资源丰富,理论蕴藏量约 6.76 亿 kW,但经济合理可开发的约 3.79 亿 kW(<http://www.ocn.com.cn/chanye/201607/dwft18120304.shtml>).截至 2017 年,我国水电装机容量已达 3.32 亿 kW(图 3).作为当前最成熟和最重要的可再生能源,2013~2017 年我国水电装机增速出现明显回落,增速由 2013 年的 12.4% 降至 2017 年的 2.7%.由于我国河流中下游以及地理位置相对便利的水电资源区域的开发已接近饱和状态,目前开发重点开始转向资源相对集中且未大规模开发的西南地区河流的中上游区域.但是,这些地区存在地形切割严重、地质地貌条件复杂、生态环境脆弱、输电距离远、国际区域争端等问题,导致工程建设成本高、经济效益下降和开发难度大等.因此,中国水电的发展已相对达到上限,未来不会有太大的增长空间.

1.4 核电

核电属优质高效清洁能源,相比于水电、太阳能和风电等清洁能源具有无间歇性、运行稳定和受自然条件约束少等优点.中国核电装机容量在 2008~2013 年增速缓慢(图 4);随后 2013~2017 年,中国核电装机容量由约 0.2 亿 kW 增加至约 0.35 亿 kW,增速明显.但是,核电发展所需要的铀资源在我国禀赋不佳,国内产量难以满足需求,主要依赖于进口,对外依赖度逐渐攀升,目前已高达 90% 左右,

图3 (网络版彩色)2000~2017年中国水电装机容量. 数据来源: 国家统计局和中国电力企业联合会

Figure 3 (Color online) The hydropower installed capacity in China from 2000 to 2017. Data sources: National Bureau of Statistics, China Electric Power Enterprise Federation

图4 (网络版彩色)2008~2017年中国核电装机容量. 数据来源: 国家统计局和中国电力企业联合会

Figure 4 (Color online) The nuclear power installed capacity in China from 2008 to 2017. Data sources: National Bureau of Statistics, China Electric Power Enterprise Federation

远超原油和常规天然气.此外,铀矿属国家战略资源,易受地缘政治等影响,供应安全问题得不到有效保障;同时,受福岛核事故影响,核安全及可靠性也是被关心的热点问题.因此,核电在中国的大规模发展将面临诸多挑战和限制因素.

1.5 可再生能源

随着国家实施“节能减排”战略上升为国家行动,可再生能源在近几年的发展取得了不错的势头,尤其以风能和太阳能为代表.2017 年我国风能和太阳能发电装机容量分别为

1.64和1.3 亿 kW(图 5), 同比分别增长 10.5%和 68.7%^[2]. 可再生能源发电装机约占全部电力装机的 36.6%, 同比上升 2.1 个百分点, 可再生能源的替代作用日益明显. 但风能和太阳能的弃风率和弃光率现象比较严重, 2017 年分别为 12%和 6%.

1.6 煤炭

煤炭是中国的主体能源和重要的工业原料. 作为主体能源的煤炭为中国经济腾飞、社会进步和人民生活水平提高等提供了最基础的能源保障, 发挥了巨大作用(图 6). 2017 年我国煤炭产量为 25.14 亿吨标准煤, 占一次性能源供给比例高达 70%. 尽管随着国家供给侧结构不断推进,

图 5 (网络版彩色)2009~2017 年中国风电和太阳能装机容量. 数据来源: 国家统计局

Figure 5 (Color online) The wind power and solar installed capacity in China from 2009 to 2017. Data sources: National Bureau of Statistics

图 6 (网络版彩色)2017 年中国一次性能源生产结构. 数据来源: 国家统计局

Figure 6 (Color online) The one-time energy production structure of China in the year of 2017. Data sources: National Bureau of Statistics

能源结构不断调整, 预计至 2050 年煤炭在一次性能源结构中的比例仍然会占 50%左右^[3]. 因此, 煤炭作为我国主体能源的地位将长期保持不变, 这是我国能源资源禀赋特点所决定的.

2 国家发展面临能源及环境的双重约束

能源是实现十九大报告提出的在 21 世纪中叶全面建成社会主义现代化强国宏伟目标的重要基础保障. 随着工业化及城镇化的推进、“乡村振兴”战略的实施, 能源需求及消费总量将持续增加. 在世界能源消费大国中, 我国人均能源消费量与世界主要发达国家相比仍存在较大差距. 以 2017 年为例, 我国人均能源消费量为 3.2 吨标准煤, 虽然已达到世界平均水平, 但仅高 0.6 吨标准煤(图 7), 与北美发达国家的人均能源消费量相比, 分别仅为加拿大和美国的 23.5%和 32.7%. 如果当 2050 年中国实现社会主义现代化强国的目标时, 中国人均能源消费量在目前的基础上翻一番, 即为 6.4 吨标准煤, 那么中国的能源消费总量将由 2017 年的 44.9 亿吨标准煤^[4]增加到 89.8 亿吨标准煤. 即便在这样的情景下, 中国在 2050 年的人均能源消费量也仅为美国 2017 年的 65.3%. 如果我国要达到美国那样的经济发展水平和人民生活水平, 就意味着全世界的能源绝大部分都由中国消耗, 在我国“缺油、少气、贫铀、相对富煤”的资源禀赋国情下, 要保障如此巨大的能源需求显然是不可能的.

改革开放 40 年来, 中国的经济与社会发展取得了举世瞩目的成就, 国内生产总值(GDP)排名从 1978 年的世界第 15 位已跃升为第 2 位. 但是, 经济的快速增长和城市化进程的不断加快给生态环境带来了极大的压力. 在 2017 年, 全国的 338 个地级及以上城市中, 仅 99 个城市的环境空气

图 7 (网络版彩色)2017 年世界及主要国家人均能源消费量. 数据来源: 2018 年 BP 世界能源统计年鉴和世界银行

Figure 7 (Color online) Per capita energy consumption of world and major countries in 2017. Data sources: BP Statistical Review of World Energy 2018, World Bank

质量达标^[5], 占全部城市的 29.3%; 239 个城市的环境空气质量超标, 占 70.7%, 环境空气质量形势极为严峻, 特别是近年来以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的雾霾天气在中国集中爆发, 引起广泛关注, 已成为民生问题的重中之重. 图 8 为 2017 年 338 个城市环境空气质量的分布情况, 338 个城市的平均优良天数比例为 78%, 平均超标天数为 22%, 虽然局部呈现改善, 但总体严峻的形势尚未得到根本解决.

经济快速发展过程中大量的能源消耗直接导致了大量的污染物排放, 例如 $\text{PM}_{2.5}$ (颗粒物粒径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$), PM_{10} (颗粒物粒径 $\leq 10 \mu\text{m}$), SO_2 及 NO_x 等. 以国家环境质量标准中的二级浓度限值为准, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 及 NO_2 的浓度上限值(年平均值)分别为 35, 70, 60 和 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[6]. 从图 9 可以看出, 在全国 338 个地级以上城市中多达 64.2% 的城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 53% 的城市的 PM_{10} 超过国家环境质量标准, SO_2 和 NO_2 两种污染物超过国家环境质量标准的城市占比分别为 0.9% 和 19.8%; 在 2017 年, 338 个地级以上城市发生重度污染 2311 天次, 严重污染 802 天次, 以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的天数占重度及以上污染天数的 74.2%, 以 PM_{10} 为首要污染物的占 20.4%^[5]. 可见, 环境空气质量形势非常严峻, 打好“蓝天保卫战”还有很长的路要走. 虽然近年来我国主动推进生态环境的建设与保护, 也取得了一些积极进展和成效, 但生态环境总体偏差的局势并未得到有效改善; 同时, 中国因用能结构不合理、能源利用效率水平低和产业布局等因素而长期积累的生态环境问题(例如雾霾)在开始集中爆发, 目前已进入环境污染事故高发

期, 这将成为约束我国经济社会可持续发展的重要瓶颈之一.

此外, 中国面临的全球气候变化压力逐渐增大, 2014 年中美双方共同签署《中美气候变化联合声明》, 中国计划 2030 年左右二氧化碳排放达到峰值且将努力早日达峰, 到 2030 年非化石能源占一次能源消费比重提高到 20% 左右. 图 10 为世界主要国家近 10 年来的二氧化碳排放量, 可看出中国的碳排放量长期居于首位, 虽然 2013 年后二氧化碳排放量基本保持不变, 但总量明显高于其他国家且峰值尚未到来; 美国的二氧化碳排放量仅次于中国, 在

图 8 (网络版彩色)2017 年 338 个城市环境空气级别比例. 数据来源: 2017 年中国生态环境公报

Figure 8 (Color online) Proportion of ambient air levels in 338 cities in 2017. Data sources: Bulletin of China Ecological Environment in 2017

图 9 (网络版彩色)2017 年 338 个城市四项污染物不同浓度区间的城市比例. (a) $\text{PM}_{2.5}$; (b) PM_{10} ; (c) SO_2 ; (d) NO_2 . 数据来源: 2017 年中国生态环境公报

Figure 9 (Color online) Proportion of cities with different concentrations of four pollutants in 338 cities in 2017. (a) $\text{PM}_{2.5}$; (b) PM_{10} ; (c) SO_2 ; (d) NO_2 . Data sources: Bulletin of China Ecological Environment in 2017

图 10 (网络版彩色)2007~2017 年世界主要国家二氧化碳排放量对比。数据来源: 2018 年 BP 世界能源统计年鉴

Figure 10 (Color online) Comparison of carbon dioxide emissions for major countries in the world from 2007 to 2017. Data sources: BP Statistical Review of World Energy 2018

2007~2009 年二氧化碳排放量在逐渐下降, 2010 年后总量虽然有波动但是变化并不大; 其他国家例如日本、德国和英国等国家的二氧化碳排放量基本保持平稳。因此, 作为全球第一大二氧化碳排放国, 中国要实现低碳、绿色的可持续发展, 同时兑现气候大会上对世界的承诺及《中美气候变化联合声明》, 面临着巨大的减排压力。

新时代, 在实现国家宏伟发展目标的过程中, 我国面临着能源支撑不足、生态环境保护和全球气候变化压力等多重约束问题。如何针对中国“缺油、少气、贫铀、相对富煤”的能源资源禀赋特征, 在充分考虑生态环境和全球气候变化压力下, 探索具有中国特色的能源可持续发展方案来解决宏伟发展目标与能源短缺和环境气候约束这些矛盾与冲突, 是摆在我们面前亟待解决的重大挑战和课题。

3 对策思考

要圆满解决上述矛盾和冲突, 没有“一招致胜”之策, 也没有“灵丹妙药”方案, 针对中国资源禀赋特点和能源利用现状, 破解中国能源困局的关键在于开源与节流、打造中国主体能源——煤炭工业的升级版。

3.1 开源

3.1.1 加快非常规天然气的开发

非常规天然气主要包括致密砂岩气、煤层气和页岩气等^[7]。近年来, 以致密砂岩气、煤层气和页岩气等为代表的非常规天然气飞速发展, 特别是以美国为首的非常规天然气革命正促使着天然气工业发生巨大的变化, 悄然改变着世界能源格局。中国非常规天然气资源丰富, 开发潜力巨大, 据国土资源部统计资料^[8], 截至 2016 年底, 页岩气埋深 4500 m 以浅地质资源量 122 万亿 m^3 , 可采资源量 22 万

亿 m^3 ; 煤层气埋深 2000 m 以浅地质资源量 30 万亿 m^3 , 可采资源量 12.5 万亿 m^3 。随着非常规天然气开发水平的不断提升, 中国非常规天然气产量快速增加, 2016 年, 致密砂岩气 330 亿 m^3 , 页岩气产量 79 亿 m^3 , 地面煤层气抽采量约 45 亿 m^3 , 井下煤层气抽采量约 128 亿 m^3 , 4 类非常规气合计 582 亿 m^3 , 占 2016 年天然气总产量的 43%。根据国家天然气“十三五”规划, 2020 年, 页岩气产量力争达到 300 亿 m^3 , 煤层气地面抽采产量 100 亿 m^3 。当前是中国非常规天然气发展的良好机遇期, 中国应该坚持常规和非常规天然气同时并重, 共同推进天然气工业的快速发展。

3.1.2 加快可再生能源的利用

加快加大风能、太阳能、地热能、生物质能等可再生能源的开发利用是中国实现能源转型、保护生态环境和应对全球气候变化问题的重要战略举措。可再生能源在推动能源结构调整方面的作用不断增强, 2017 年我国可再生能源利用量为 9.34 亿吨标准煤, 能源消费总量的比重由 2013 年的 15.5% 提高到 2017 年的 20.8%^[4]。此外, 随着“节能减排”上升为国家战略, 中国致力于构建清洁低碳的现代化能源体系, 可再生能源将发挥其重要替代作用。通过能源技术创新与进步, 攻克可再生能源开发与利用中的技术瓶颈, 提升可再生能源转化效率及利用水平, 解决弃风、弃光等制约可再生能源发展的关键问题; 其次, 通过政策导向增加可再生清洁能源在能源消费中的比重, 促进可再生能源布局优化和产业升级, 加速对化石能源的替代, 加快推动我国能源体系向清洁低碳模式转变。

3.1.3 加快战略储备能源的勘探与开发

可燃冰(天然气水合物)和干热岩是未来清洁能源的重要发展方向, 是我国能源未来的重要补充方式, 是国家重要的战略储备能源。我国可燃冰的地质资源量相当于 1000 亿吨石油; 干热岩资源量为 856 万亿吨标准煤, 按 2% 作为可采资源, 全国陆域干热岩可采资源量达 17 万亿吨标准煤^[9], 储量非常丰富。尽管可燃冰和干热岩蕴藏量十分丰富, 对解决我国能源保障看到了曙光, 但其开采难度大、成本高和开采稳定性与安全性等尚需时日验证, 在未来要实现可燃冰与干热岩的产业化和商业利用, 还有很长的路要走。

3.1.4 重视氢能等清洁能源的开发利用

氢能是一种在常规能源危机出现、环境污染严重及开发新能源同时, 人们期待的一种绿色高效清洁能源^[10], 被誉为“未来能源之星”。随着氢能应用技术逐渐成熟, 氢能燃料电池汽车和氢能燃料电池发电等产业将受到越来越多关注, 许多发达国家已将发展氢能提升到国家能源战略高度。但现阶段我国氢能的发展仍然没有摆脱对传统化石能源等的依赖, 且制氢效率低、能耗高, 即便采用太阳能等清洁能源制氢, 但在成本和技术上仍有待改善; 其次, 缺少安全可靠的贮存和运输氢的方法, 与用户之间没有建立起有效的连接, 限制了氢能的推广应用。随着国家对氢

能产业布局及统筹规划,氢能将在交通、工业、建筑等领域得到广泛应用,这对丰富我国能源构成、减少环境污染等具有重要的作用。

3.2 节流

节流的主要方式是对能源供给侧与消费侧进行优化精准配置,即对不同品位、不同时间、不同空间分布的不同能源供给,采用科学高效的方式,与不同消费需求实施优化精准匹配和合理精确供应。这对提高我国能源利用效率水平、缓解高品位能源短缺和减少二氧化碳排放等均具有重要意义。

3.2.1 降低能耗强度

能源消耗强度是一个国家或地区能源消费总量与国内生产总值的比值,反映了能源使用的经济效率^[11]。随着产业结构调整、能源消费结构优化、能源技术水平提高等的推进,近几年来我国能耗强度呈现下降趋势(图11)。工业能耗是反映一个国家能源利用效率水平的重要指标。在中国,工业能耗占社会总能耗的70%,与之相比的美国工业能耗占社会总能耗的33%。虽然中国和美国的工业GDP相差不大,但工业整体GDP附加值中国比美国低一半,工业能耗差距相当大。而且从世界范围来看,我国单位工业增加值能耗是日本的5.3倍、英国的7.7倍及德国的8倍(图12)。由此可看出,我国的工业能耗与发达国家相比仍然严重偏高,反映出我国工业的发展方式仍然比较粗放,能源利用效率水平偏低。因此,我国降低能耗仍有很大空间和潜力,如果通过淘汰落后产能、降低工业生产能耗、不断优化升级产业结构、提升节能技术及健全节能标准和评估制度等措施,把我国能耗强度降低到与发达国家相当水平,这将对控制能源消费总量、抑制工业化、城镇化快速发展对能源消耗大幅度增加的势头、保证能源安全及减轻对资源环境的约束、提高经济发展质量等具有重要现实意义。

3.2.2 能源供给与消费优化精准配置

(1) 浅层地热能与建筑物供暖制冷。我国能源消费中存在大量的“大马拉小车”现象。目前建筑能耗与交通能耗、工业能耗并列,成为我国能源消耗的三大“能耗大户”之一,约占社会总能耗的33%;其中建筑能耗中,建筑物供暖与制冷约占建筑能耗的60%^[12];也就是说,建筑物供暖与制冷能耗约占我国能源总消耗的18%。长期以来解决我国建筑物供暖的主要能源形式就是燃烧煤炭或天然气等高位能源。这样不仅导致了高发热量的高品位能源严重浪费,同时也排放了大量二氧化碳和氮氧化物等废气,污染大气环境。为什么我们要用燃烧温度可达800℃乃至上千摄氏度的煤炭或天然气等高位能源,解决仅需50~60℃水循环即可满足建筑物供暖的低品位需求呢?这就是能源供给与消费配置的不合理,能源品位匹配不精准所致。其实,利用节能且环保的地源热泵技术^[13]开发量大、面广、

图11 2010~2017年单位GDP能耗变化。注:GDP按照2010年不变价格计算。数据来源:国家统计局

Figure 11 Changes in energy consumption per unit of GDP from 2010 to 2017. Note: GDP is calculated at constant prices in 2010. Data sources: National Bureau of Statistics

图12 (网络版彩色)单位工业增加值能耗国际比较

Figure 12 (Color online) International comparison of energy consumption per unit of industrial added value

随处均分布的低品位浅层地热能或其他热源,即可解决每年约消耗中国能源18%的建筑物供暖与制冷问题。

(2) 光伏建筑一体化。光伏建筑一体化是一种将太阳能发电(光伏)产品集成到建筑上的技术,可分为光伏方阵与建筑的结合和集成两大类。前者是将光伏方阵依附于建筑物上,把建筑物作为光伏方阵载体;后者则是将光伏组件作为建筑物的屋顶、外墙和窗户等建筑材料,既做建材也可发电。

光伏建筑一体化的应用是能源利用观念的重要转变,我国拥有数量庞大的建筑物,每年利用大量的煤、天然气等高位能源来调节建筑物室温,不仅消耗了大量宝贵的高品位能源,也带来了严重的环境污染。但光伏建筑一体化巧妙地将光伏器件、光伏系统融入建筑物中,完全改变

了建筑物只能耗费能源的传统认识,真正打造出了低碳、节能、环保的绿色建筑,实现了能源精准配置和合理利用。尽管目前面临着造价成本高和发电不稳定等问题,但这些问题随着科学技术水平不断提升将会逐步得以解决,具有无限广阔的应用前景。

3.3 打造主体能源——煤炭工业的升级版

2013年以来我国大部分地区频繁遭遇雾霾天气,“蓝天保卫战”由此打响。与此同时,煤炭成为众矢之的,矛头集中指向煤炭。一时间“去煤化”、“谈煤色变”、“革煤炭命”等负面声音层出不穷。诚然,煤炭工业在发展过程中确实存在发展方式粗放、安全事故多发、资源浪费严重、生态环境治理滞后和使用消费过程中高排放等突出问题,但这并不等同于“革煤炭的命”。针对煤炭开发与利用的现状,摒弃传统煤炭发展靠资源不靠科技创新的错误认识,以科技创新为引领,对传统的煤炭开发与利用进行全产业链的革命,从而解决煤炭工业升级版中的绿色化、回采率、生产安全、职业健康、清洁化与低碳化消费利用等六大科学问题与工程难题。这对解决我国21世纪发展目标所面临的能源缺口、能源供应安全、环境污染和全球气候变化等挑战具有重要战略意义和实用价值,对打造具有我国能源资源禀赋特色的煤炭工业升级版,意义也十分重大。

3.3.1 绿色化问题

煤炭绿色化开采是打造煤炭工业升级版的驱动力。坚持“低开采、高利用、低排放”的原则^[14],推动煤矿智能开采,建立科学管理体系,努力实现煤炭开采活动不破坏生态环境或将负面影响降低到最低程度。其主要内容包括:“煤-水”双资源协调开采技术、煤与瓦斯共采技术、“三下”采煤与减沉技术、充填开采技术、煤巷支护与部分矸石井下处理技术及煤炭地下汽化技术等。通过煤炭绿色开采,解决矿区“三废”排放、开采沉陷等地面变形、含水层组结构扰动破坏、水土流失和沙漠化等矿山环境问题,彻底消除矿山占用和物理地与化学地破坏土地资源、损毁水资源的水量和水质、次生地质灾害、地貌形态和地表景观破坏等矿山环境负效应,充分挖掘闭坑矿山的地下空间和各种资源的正效应,为打造中国煤炭主体能源升级版提供有力支撑,为矿区可持续发展奠定坚实基础。

3.3.2 回采率问题

提高煤炭回采率是打造煤炭工业升级版的重要保障。尽管我国煤炭资源相对丰富,但仅占世界煤炭资源总量的12%左右,也仅是美国和俄罗斯煤炭资源量的一半左右。此外,由于煤炭在短期内具有不可再生属性,故如何提高其回采率、减少煤炭资源损失?应该说日益紧迫。目前我国大型矿井煤炭资源回采率均值为30%~40%,中小型矿井回收率最低不足10%^[15],仅以2000~2010年为例,我国煤炭累积产量234.4亿吨,按30%~40%的回采率计算,这

11年间,我国浪费了311~505亿吨不可再生的原煤资源;同时我国薄煤层资源储量丰富,储量为600亿多吨,全国80%以上的矿区均有分布,但为了追求产量和效率,1.2 m以下厚度的煤层几乎被放弃开采;这些“挑肥拣瘦,弃薄采厚”的做法和现象存在于我国煤炭大省及部分煤炭资源相对贫乏地区,造成了煤炭资源的严重浪费。可见,我国煤炭资源回采率存在很大的提升空间。因此,应通过提高采煤机械化程度、改进煤炭开采方法、降低开采成本等技术手段提高其回采率。

3.3.3 安全问题

煤矿生产安全问题制约着煤炭工业升级版的打造。近年来,我国煤矿事故总量、较大事故、百万吨死亡率等指标持续保持下降趋势,但煤矿安全事故绝对数量依然较多、煤矿重特重大事故偶有发生,对社会稳定造成不良影响。一些煤矿企业法律意识淡薄、违法违规生产行为突出、安全基础薄弱、事故隐患较多等影响安全生产的深层次问题尚未得到根本解决,特别是2016年以来煤炭市场需求旺盛、价格持续震荡上扬以及产量增加等情况下,国有大煤矿有超能力、超强度生产冲动,小煤矿复产增产快产甚至越界盗采资源,事故风险在加剧,煤矿安全生产形势依然非常严峻。在打造煤炭工业升级版的过程中,应牢固树立煤矿发展,安全先行的理念,加大力度整治煤矿安全生产违法违规行为和强化事故查处与警示教育,建立健全重大风险管控体系,通过科技创新推进煤矿安全科技进步和煤矿灾害治理,完善煤矿安全基础建设和煤矿安全监管监察执法制度。

3.3.4 职业健康问题

煤矿职业健康问题必须放在打造煤炭工业升级版的重要位置。煤矿职业健康问题严重影响着煤矿从业者的生命安全和身体健康。尽管近年来我国在煤矿职业健康方面较之前取得了长足进步,但由于自身发展意识落后,我国煤矿职业健康状况距离中等发达国家水平还有一定差距。煤矿企业及部分关停煤矿屡屡发生职工尘肺病群发事件,导致煤矿工人投诉、上访等现象,造成了负面的社会影响。因此,在打造煤炭工业升级版的过程中应积极地借鉴国外煤矿职业健康的发展经验,研究建立符合新时代我国国情的煤矿职业健康管理体系与法律制度,更好地保护煤矿劳动者的生命安全与合法权益。

3.3.5 清洁化问题

打造煤炭工业升级版的关键在于推进煤炭清洁化消费利用。传统的煤炭消费模式粗放,煤炭直接燃烧、污染物直接排放,缺乏有效且严格的防控措施,污染物排放技术水平不高,导致煤炭资源严重浪费和生态环境污染加剧,制约了煤炭工业的可持续发展。国内外的大量工程实践和技术发展已证明,煤炭完全能做到清洁燃烧高效利用(<http://www.chinacaj.net/i,16,7287,0.html>)。目前我国的煤炭清洁高效利用技术经过快速发展,主要煤炭消费领域燃煤

污染控制可达到燃用天然气的大气污染物排放控制标准,且成本上具有极大的优势.因此,通过推动煤炭清洁化利用,既可充分开发利用我国以煤为主体能源的能源禀赋特征,又能解决煤炭燃烧带来的生态环境问题;对于缓解资源环境压力、保障国家能源安全、实现我国煤炭工业升级版的可持续发展有着重要的意义.

3.3.6 低碳化问题

低碳化是打造煤炭工业升级版的重要发展方向.煤炭的高碳属性使得煤炭的低碳利用一直饱受争议,其实煤炭在开采、洗选、加工和消费利用全过程都存在直接或间接的碳排放^[16].煤炭能源的低碳发展是指在开发与利用过程中减少温室气体排放、提高煤炭资源利用效率,从而实现低能耗、高能效和低碳排放.基于煤炭为我国的主体能源,应改变思路,实现殊途同归的效果,如整体煤气化联合循环技术、煤基多联产能源系统技术、煤制油与新型煤化工技术及煤炭消费利用中的二氧化碳分离、捕获与封存等都是实现低碳化可行的思路.

4 结语

在以煤炭为主的中国一次性能源结构将长期不会发生改变及应对生态环境污染和全球气候变化责任等形势下,新时代我国的能源战略要有新的战略布局思路.开源与节流,加强能源技术创新,多源头开发新能源,提升节能环保技术,倡导合理的用能方式,大幅度降低单位能耗强度,提升能源利用效率水平.未来,可再生能源在我国能源结构中的比例将持续增加,国家对可再生能源发展的政策支持力度将不会改变甚至会继续加大.目前可再生能源中的水电、核电、生物质、潮汐、地热能等由于受增长空间、安全性、资源稳定性、成本、技术等多方面的原因,发展规模可能会受限.综合多种因素,风电和光伏将是未来中国能源实现低碳发展和能源转型的主力军.此外,打造中国煤炭主体能源升级版,让煤炭开发与消费利用走上绿色、安全、健康、高效、清洁和低碳之路.这是中国实现 21 世纪中叶宏伟发展目标所需能源发展的必由之路.

致谢 国家重点研发计划(2016YFC0801801)、国家自然科学基金(41430318, 41572222, 41602262, 41702261)、北京市自然科学基金(8162036)和中央高校基本科研业务费项目(2010YD02)资助.

推荐阅读文献

- 1 Liu C Q, Jiang X F. Domestic and Foreign Oil and Gas Industry Development Report in 2017 (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2018 [刘朝全, 姜学峰. 2017 年国内外油气行业发展报告. 北京: 石油工业出版社, 2018]
- 2 National Energy Administration. National Renewable Energy Power Development Monitoring and Evaluation Report in 2017 (in Chinese). 2017 [国家能源局. 2017 年度全国可再生能源电力发展监测评价报告. 2017]
- 3 Liu Q, Wang Q. China's energy revolution—Reform of supply-side and structural optimization (2017–2050) (in Chinese). Int Petrol Econ, 2017, 25: 1–14 [刘强, 王恰. 中国的能源革命——供给侧改革与结构优化 (2017–2050). 国际石油经济, 2017, 25: 1–14]
- 4 National Bureau of Statistics. Bulletin on National Economic and Social Development of the People's Republic of China in 2017 (in Chinese). 2017 [国家统计局. 中华人民共和国 2017 年国民经济和社会发展统计公报. 2017]
- 5 Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Bulletin of China Ecological Environment in 2017 (in Chinese). 2017 [中华人民共和国生态环境部. 中国生态环境公报. 2017]
- 6 Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision and Quarantine of the People's Republic of China. Ambient Air Quality Standards (GB 3095-2012) (in Chinese). [中华人民共和国生态环境部, 国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准(GB 3095-2012)]
- 7 Qiu Z J, Deng S T. Strategic position of unconventional natural gas in China (in Chinese). Nat Gas Ind, 2012, 32: 1–5 [邱中建, 邓松涛. 中国非常规天然气的战略地位. 天然气工业, 2012, 32: 1–5]
- 8 Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. China Mineral Resources Report in 2017 (in Chinese). 2017 [中华人民共和国国土资源部. 中国矿产资源报告 2017. 2017]
- 9 Li K W. Several scientific knowledge questions about combustible ice and dry hot rock (in Chinese). Geotherm Energy, 2017, (6): 25–27 [李克文. 关于可燃冰与干热岩的几个科学知识问题. 地热能, 2017, (6): 25–27]
- 10 Wu L. Hydrogen, the new energy that saves the world (in Chinese). Cult Geogr, 2014, (2): 299 [吴玲. 氢, 拯救世界的新能源. 环球人文地理, 2014, (2): 299]
- 11 Bai Q, Dai Y D. Energy consumption per unit & energy saving and efficiency (in Chinese). World Environ, 2007, (3): 17–21 [白泉, 戴彦德. 单位 GDP 能耗与节能降耗. 世界环境, 2007, (3): 17–21]

- 12 Tang W J. Talking about the current situation of energy consumption in China (in Chinese). *Urban Rural Dev*, 2010, (25): 86 [唐文娟. 浅谈中国建筑能耗现状. 城乡建设, 2010, (25): 86]
- 13 Ni L, Dong J, Yao Y, et al. A review of heat pump systems for heating and cooling of buildings in China in the last decade. *Renew Energy*, 2015, 84: 30–45
- 14 Qian M G. Technology system and green mining concept (in Chinese). *Coal Sci Technol Mag*, 2003, (4): 1–3 [钱鸣高. 绿色开采的概念与技术体系. 煤炭科技, 2003, (4): 1–3]
- 15 Yuan L. *Strategic Studies of High-Efficient and Energy-Effective Coal Extractions in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2017 [袁亮. 我国煤炭资源高效回收及节能战略研究. 北京: 科学出版社, 2017]
- 16 Liu J T. Reflection on low-carbon development of coal energy in China (in Chinese). *J China Univ Mining Technol (Soc Sci)*, 2011, 13: 5–12 [刘炯天. 关于我国煤炭能源低碳发展的思考. 中国矿业大学学报 (社会科学版), 2011, 13: 5–12]

Summary for “我国发展面临能源与环境的双重约束分析及对策思考”

Analysis on the dual constraints of energy and environment to the development of China and countermeasures

Qiang Wu^{1,2*} & Kun Tu^{1,2*}

¹ College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;

² National Engineering Research Center of Coal Mine Water Hazard Control, Beijing 100083, China

* Corresponding authors, E-mail: wuq@cumt.edu.cn; tukun2014@163.com

Energy is an important fundamental guarantee for realizing the overarching goal of building a modernized socialist power in the middle of this century, as proposed in the report of the 19th National Congress. Energy demand and total consumption will continue to increase with advancement of industrialization and urbanization, and implementation of the rural revitalization strategy. In the past 40 years of reform and opening up, although China's economic and social development has yielded remarkable achievements, the contradiction between rapid economic and social development and the supply of energy resources and the ecological environment has become increasingly apparent. China's development therefore faces the dual constraints of energy and environment, which relate to the country's socialist modernization.

In this new era, in the process of realizing the country's ambitious development goals, China faces multiple constraints, such as insufficient energy support, ecological environmental protection, and global climate change pressures. Major challenges and issues much be addressed regarding how to address the energy resource-related characteristics of China's lack of oil, decreased supply of gas, depleted uranium, and relatively rich coal supplies. Under the pressure of ecological environment and global climate change is the issue of exploring energy sustainable development programs possessing Chinese characteristics to address the ambitious development goals along with the contradictions and conflicts, such as energy shortages and environmental climate constraints.

In this work, we analyze the current status and development trends of China's major non-renewable energy sources. The study also elaborates on the sharp contradiction between China's extensive future development goals with a lack of energy supply and with environmental limitations. It points out that energy and environment are important factors that constrain China's future economic and social development, and are also related to realization of the grand goal of socialist modernization. The basic situation and the development trend of primary energy in China are analyzed in terms of production and consumption of primary energy and its influence on the environment and social development. Opportunities and challenges faced by China's energy development in this new era are also discussed.

We propose that in the new era of energy, strategies with Chinese features must be precisely developed based on energy endowment characteristics within the country. The main elements of this include: adhering to open source and throttling; in the future, improving on the proportion of renewable energy in China's energy mix and achieving low carbon emissions and energy transformation through use of wind power and photovoltaics, which will be primary resources for China; and establishing the primary energy in the form of an upgraded version of the coal industry, and striving to create a modernized energy system with high energy efficiency, advanced technology, low pollution, low emissions, low impact on ecological environment, diversified energy structure, and safe and stable supply. In the context of promoting energy production and a consumption revolution in the new era, strategies addressing the dual constraints faced by economic and social development in China, and their countermeasures, are of strategic significance for energy security, ecological security, and economic security for China.

energy and environment, dual constraints, magnificent goal, energy strategies, countermeasures

doi: 10.1360/N972018-01057