



山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

低碳建造——从施工现场到产业生态

叶堃晖 著

中国建筑工业出版社

山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

低碳建造——从施工现场到产业生态

叶堃晖 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

低碳建造——从施工现场到产业生态/叶堃晖著.
北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 6

(山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列)

ISBN 978-7-112-20646-9

I. ①低… II. ①叶… III. ①建筑设计—节能设计—
研究 IV. ①TU201.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 072635 号

本书作者对于低碳建造开展了多年的研究, 最终完成该书的写作。其主要内容包括: 低碳建造论、施工活动低碳化、施工现场管理低碳化、低碳建造与企业管理融合、打造低碳建造产业生态等。

本书原创性高, 并具有很强的系统性、高度的指导性, 适合工程管理及相关专业师生的阅读, 也可供建筑施工企业的管理人员参考。

责任编辑: 张伯熙 杨 允

责任设计: 李志立

责任校对: 李欣慰 李美娜

山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

低碳建造——从施工现场到产业生态

叶堃晖 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

唐山龙达图文制作有限公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12 $\frac{3}{4}$ 字数: 220 千字

2017 年 11 月第一版 2017 年 11 月第一次印刷

定价: 52.00 元

ISBN 978-7-112-20646-9

(30300)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

编委会名单

主 任：周绪红

副主任：张四平 毛志兵 文安邦 王清勤 刘汉龙

委 员：（按姓氏笔画排序）

卢 峰 申立银 任 宏 刘贵文 杜春兰

李正良 李百战 李英民 李和平 吴艳宏

何 强 陈宁生 单彩杰 胡学斌 高文生

黄世敏 蒋立红

总 序

中国是一个多山国家，山地面积约为 666 万 km^2 ，占陆地国土面积的 69%，山地县级行政机构数量约占全国的 2/3，蓄积的人口与耕地分别占全国的 1/3 和 2/5。山地区域是自然、文化资源的巨大宝库，蕴含着丰富的水力、矿产、森林、生物、旅游等自然资源，也因多民族数千年的聚居繁衍而积淀了灿烂多姿的历史遗迹与文化遗产。

然而，受制于山地地形复杂、灾害频发、生态脆弱的地理环境特点，山地城镇建设挑战多、难度大、成本高，导致山地区域城镇化水平低，经济社会发展滞后，存在资源低效开发、人口流失严重、生态环境恶化、文化遗产衰落等众多经济社会问题。截至 2014 年，我国云南、贵州、西藏、甘肃、新疆等山地省区城镇化率不足 40%，距离《国家新型城镇化规划（2014～2020）》提出的常住人口城镇化率达到 60% 的发展目标仍有很大差距。因此，采用“开发与保护”并重的方式推进山地城镇建设，促进山地城镇可持续发展，对于推动我国经济结构顺利转型、促进经济社会和谐发展、支撑国家“一带一路”发展战略具有不可替代的重要意义。

为解决山地区域城镇化建设的重大需求，2012 年 3 月重庆大学联合中国建筑股份有限公司、中国建筑科学研究院、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所共同成立了“山地城镇建设协同创新中心”，针对山地城镇建设面临的安全与防灾关键问题开展人才培养、科技研发、学科建设等创新工作。经过三年的建设，中心围绕“规划—设计—建造—管理”的建筑产业链，大力整合政府、企业、高校、科研院所的优势资源，在山地城镇建设安全与防灾领域汇聚了一流科研团队，建设了高水平综合性示范基地，取得了有重大影响的科研理论与技术成果。迄今为止，中心已在山地城镇生态规划、山地城镇防灾减灾、山地城镇环境安全、山地城镇绿色建造、山地城镇建设管理等五大方向取得了一系列重大科研成果，培养和造就了一批高素质建设人才，有力地支撑了山地城镇的重大工程建设，并着力营造出城镇建设主动依靠科技创新、科技创新更加贴近城镇发展需求

的良好氛围。

《山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列》集中展示了山地城镇建设协同创新中心在山地城镇生态规划与文化遗产保护、山地灾害形成理论与减灾关键技术、山地环境安全理论与可再生能源利用、山地城镇建设管理与可持续发展等领域的最新科研成果，是山地城镇建设领域科技工作者智慧与汗水的结晶。本套丛书的出版，力图服务于山地城镇建设领域科学交流与技术转化，促进该领域高层次的学术传播、科技交流、技术推广与人才培养，努力营造出政产学研高效整合的协同创新氛围，为山地城镇的全面、协调与可持续发展做出新的重大贡献。

中国工程院院士
重庆大学校长

周绪红

前 言

辩证唯物主义认为，任何事物都是矛盾统一体，现实世界就是人类社会和自然的矛盾统一。一方面，人与自然相互依存，互为补充。另一方面，人类认识自然、改造自然的能力发生了前所未有的变化，原有的自然容貌处处留下人类的足迹。这种“人化自然”的现象表明了人与自然客观上已形成依存链、关联链和渗透链，要求人类在认识自然、改造自然、发展自我的同时，应遵照社会发展规律，自觉按规律办事，实现人、自然、社会三者的和谐统一。

自18世纪中叶工业革命发生以来，人与自然的关系在许多方面逐渐失衡。工业革命推动经济增长和人类生活水平提高，但也留下严重的环境问题。人口爆炸、能（资）源短缺、环境污染成为全球共同的危机，纯物质的文明形态已表现出隐含的病态特征，如此下去必然会束缚人类的发展步伐。尤其是大量使用煤炭、石油等化石燃料，排放有害气体及温室气体。煤和石油不完全燃烧产生一氧化碳、二氧化硫等有害气体和固体颗粒物，对人类健康及生存环境造成严重的危害。二氧化碳等温室气体排放到大气中，加剧全球变暖，海平面上升，许多滨海地区面临被淹没的可能。此外，空气污染日益严重，氧气层稀薄，酸雨频发，淡水资源变少，地球物种锐减，也呼唤人们正确面对不断恶化的发展环境。

人类扰乱自然之状态，自然反过来否定人类之行为，似乎存在一种“洪荒之力”总要回归到原有的状态。人与自然这种否定与反否定的关系实际就是矛盾统一关系。这种关系如果处理不当，人类社会出现灾难就为时不远。所幸的是，人们逐渐认识到发展经济与保护环境同等重要，不能将发展建立在环境破坏之上。

当前，我国正在实施新型城镇化建设，任重而道远。其中，不乏使用高能耗建造模式。建筑生产过程排放碳，释放残留物，对环境造成许多负面影响。减少建筑生产碳排放是一项系统工程，要求工程建设参与主体转变观念，积极变革，采取切实有效的应对措施。

低碳化在建筑业的应用与发展可统称为“低碳建造”。如果建筑业能朝着低碳建造的方向发展，实现清洁生产、绿色人居、生态有机，对我国人居环境、社

会经济建设和可持续发展无疑将作出实质贡献。

本书立足全球经济社会发展和环境危机的大背景，论述低碳建造的相关概念、理论和方法，可供高等院校、企事业工作人员参考。由于作者水平有限，望读者给予批评和指正为荷。

本书在撰写过程中得到中央高校基本科研业务费 No. 106112016 CDJSK 03 XK 08 资助，张倩、叶萌、张芮蓓、袁欣、刘颖、闫莉、庞政跃、朱文辉、齐乐乐等人积极参与其中，提供了宝贵的支持与帮助，在此深表谢意！

目 录

1 绪论	1
1.1 由环境现状说起	1
1.2 产业部门低碳发展之势	10
1.3 我国建筑业碳排放问题	12
1.4 建筑业低碳化的原动力	15
1.5 建筑业低碳化的动力机制	18
2 低碳建造论	24
2.1 何为低碳	24
2.2 低碳建造的提出	31
2.3 建造过程碳排放：关键的 10%	37
2.4 建设全过程碳管理	41
2.5 低碳建造的外部性	58
3 施工活动低碳化	67
3.1 低碳施工的边界与特性	67
3.2 机械设备选择与管理	68
3.3 材料选择与使用	72
3.4 低碳建造中的运输管理	92
3.5 低碳建筑技术	98
3.6 低碳施工信息管理	101
3.7 低碳施工绩效评价	109
4 施工现场管理低碳化	114
4.1 从零和博弈到实现共赢	114

4.2 低碳现场目标管理	117
4.3 低碳现场协调管理	125
5 低碳建造与企业管理融合	138
5.1 用低碳文化强化企业软实力	138
5.2 低碳竞争力与低碳战略	144
5.3 低碳技术研发	151
5.4 低碳营销	155
5.5 碳资产——财务管理新变革	158
5.6 建筑业低碳供应链管理	168
6 打造低碳建造产业生态	175
6.1 低碳建造产业链共生	175
6.2 低碳建造产业链中的政府监管	181
6.3 低碳建造产业链运行机制	186
作者简介	194

1 绪 论

1.1 由环境现状说起

人与自然和谐相处是人类社会实现可持续发展的前提和基础。自工业革命以来,人类向自然索取过度,生产生活排放出大量残留物,致使环境问题日益恶化。与此同时,自然对人类的“抵制”与“惩罚”越来越频繁,世界各国不得不思考如何在“发展快”和“环境美”之间形成微妙的平衡。

1. 我国面临棘手的环境与能源问题

(1) 巨额碳赤字下的环境危机

碳赤字是由于绿色植被面积与碳排放总量间有差距,人类生产生活释放出来的二氧化碳不能完全被吸收而形成的。如果全部二氧化碳能被绿色植被吸收,就是“碳中和”;反之,二氧化碳净增加就会出现“碳赤字”。

研究表明:在2005年以前,G8国家(八国集团)已用完2050年前碳排放配额,累加的碳赤字已超过5.5万亿美元(以每吨二氧化碳价值20美元计算)。即使G8国家实现预先设定的碳排目标,它们在2006~2050年人均排放量还会明显高过发展中国家,还将形成6.3万亿美元的碳赤字。¹巨额碳赤字的背后是人类对大自然的贪婪索取和不理智行为,而导致环境问题不断恶化。

1) 全球变暖

近百年来,全球气温经历了“冷—暖—冷—暖”的波动变化,总体呈上升趋势。从20世纪初开始,地球表面平均温度每年增加0.6℃左右。20世纪全球变暖的速度在过去400~600年间是最快的。

人类大量使用矿物燃料(如煤、石油等),排放出数额巨大的二氧化碳等温室气体,是引起全球变暖的主要原因。温室气体对来自太阳的短波辐射具有高度

¹丁仲礼,段晓男,葛全胜,张志强,2050年大气CO₂浓度控制:各国碳排放权计算[J].中国科学,2009,39(8):1009-1027.

的透过性，又能吸收地球变暖后反射出的长波辐射，使得地球成为一个巨大的温室。进而导致全球气候变暖，危及自然生态系统，威胁人类的食物供应和居住环境。研究表明，地球表面温度升高都会给地球带来程度不一的灾难（表 1.1）。

地球表面温度升高及其结果 表 1.1

地球表面温度	结 果
升温低于 2℃	北极冰帽消失，地球能量平衡急剧变化，北极熊失去赖以生存的冰原
升温 2~3℃	二氧化碳浓度过高造成海水酸化，摧毁剩余的珊瑚礁，多数浮游生物灭绝，破坏海洋食物链，鲑鱼、须鲸等面临绝种危机
升温 3~4℃	高山冰川融化，下游城市与农田无水可用，受干旱、热浪之苦，农作物大面积受损，全球粮食供应出现危机
升温 4~5℃	冻土层融化，释放大量化甲烷，全球变暖加速。亚热带地区因极端热浪与干旱而不适合农作物生长，人类迁徙至极地地区
升温 5~6℃	地球温度已是过去 5000 万年中最高值，北极地区温度高于 20℃，全年无冰。沙漠入侵欧洲中部，甚至接近北极圈
升温 6℃ 更高	海洋生物大半死亡，难民只能待在高原与极地，全球人口锐减，地球上 90% 的物种可能灭绝

2) 酸雨频繁发生

酸雨是指空气中二氧化硫和氮氧化物等酸性污染物引起的 pH 值小于 5.6 的降水。受酸雨危害的地区会出现土壤和湖泊酸化，植被和生态系统受损，建筑材料、金属结构和文物被腐蚀等问题。

酸雨最早出现在 20 世纪五六十年代的北欧及中欧地区，由工业酸性废气迁移所至。20 世纪 70 年代以来，许多工业发达国家采取多种措施防治大气污染，增加工厂烟囱的高度。虽然这一举措改善了周边地区的大气环境质量，但空气污染物却长距离迁移，污染物飘浮到更远的地方，形成跨国酸雨。

3) 生物链断裂

实现人类社会可持续发展要求物种灭绝速度与生成速度保持一致。在全球气候变暖、生物链和食物链屡受破坏的情况下，物种衰亡速度明显高于生成速度。比如，随着大气变化海洋二氧化碳含量逐渐上升，致使海洋微生物因海水酸化而灭绝。海洋温度上升破坏了以珊瑚为中心的生物链，海洋食物链自下而上断裂，甚至蔓延至海洋以外，加速海洋生物和其他生物的灭亡。据《世界自然资源保护大纲》估计，每年有数千种动植物灭绝，危及人类食物供应链。

如果将自然界形象比喻为金融系统，那么人类至今已经透支了大量自然

资源, 背负巨额的环境债务。倘若将人与自然界的资源来往当作成一份资产负债表, 那么能源是其中最大的资产项, 而碳排放量就是最大的负债项。要促使这个“金融系统”健康成长, 就应在增加资产的同时偿还债务, 减少碳排放。

(2) 能源发展过程

什么是“能源”?《科学技术百科全书》将其定义为“可从其获得热、光和动力等能量的资源”;《大英百科全书》认为:“能源是一个包括所有燃料、流水、阳光和风的术语, 人类用适当的转换手段便可让它为自己提供所需的能量”。简言之, 能源是自然界中为人类提供能量的物质资源。按形态与应用方式可将能源分为固体燃料、液体燃料、气体燃料、水能、电能、太阳能、生物质能、风能、核能、海洋能和地热能。其中, 前三类统称为化石燃料。

人类的能源利用经历了火与柴草、煤炭与蒸汽机、石油与内燃机等时代, 目前正处于新能源开发利用与可持续发展阶段。在全球能源利用总量持续增长的同时, 能源结构也在发生变化(见图 1.1)。每一次能源变迁, 都伴随着生产力解放, 都在不同程度上推动人类社会经济朝前发展。

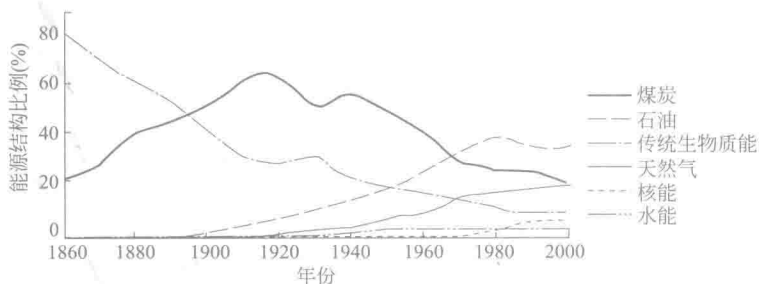


图 1.1 过去 100 多年世界能源结构的变化²

1) 火与柴草时代

火和柴草相结合的能源体系加速了原始社会劳动者、劳动工具和原材料迅速发展。人类对火的掌握和利用无疑增强了自身对自然界资源的利用, 但此时的能源仅限于柴草等传统的生物质能。

²徐蕾, 要文倩, 纪红兵等. 海南省非粮生物柴油能源植物的调查化学组分的测定及筛选研究. 植物科学学报, 2011, 29 (1): 99-108.

2) 煤炭与蒸汽机时代

近代工业文明发源于英国。英国不仅改良蒸汽机，还拥有得天独厚的煤炭资源以及率先进行的“能源革命”，使煤炭逐步取代木材，成为当时的主导能源。英国在 1712 年煤炭年产量约为 300 万 t，1750 年几乎翻了一番，到 18 世纪末达到 1000 万 t，成为名副其实的煤炭王国和全世界第一个现代能源经济国家。煤炭的广泛使用，极大地推动早期资本主义生产力的发展。

3) 石油与内燃机时代

石油与内燃机掀起了人类能源史的第三次变革，石油的应用和内燃机的发明给运输领域带来革命性变化。19 世纪后期，德国人卡尔·本茨成功制造了第一个汽油内燃机驱动汽车。随后，以内燃机为动力的机车、远洋船舶、航空器不断出现。在福特发明汽车生产线之后，人们的出行方式发生巨大的变化。另一方面，内燃机的发明促进石化工业的发展，人们开始提取氢、苯、煤焦油合成染料。通过化学合成的方法，美国人发明了塑料，法国人发明了人造纤维。由于石油、内燃机和电力的应用，人类社会由“蒸汽时代”步入了“电气时代”。

4) 新能源开发与利用时代

当前，世界各国都在寻求新能源以应对环境危机。一般说来，新能源分为可再生能源和可持续能源（见表 1.2）。前者指可循环可转化的能源（如水、风、生物能），后者指可持久供应且较稳定的能源（如太阳能、核能、氢能）。

新能源及其分类 表 1.2

新能源分类	能源类型	特 点
可再生能源	海洋能	海洋中的可再生能源,包括潮汐能、波浪引起的机械能和热能。其中,潮汐能是由太阳、月球对地球的引力及地球自转导致海水涨落形成水的势能。潮头落差大于 3 米的潮汐就具有产能利用价值,潮汐能主要用于发电
	风能	地球表面大量空气流动所产生的动能,包括风能动力和风力发电等利用形式。其优点是清洁、节能、环保,不足之处在于不稳定、转换效率低和受地理位置限制
	生物质能	由生命物质代谢和排泄出的有机物质所蕴含的能量,包括森林能源、农作物秸秆、禽畜粪便和生活垃圾等,有直接燃烧、生物质气化、液体生物燃料、沼气、生物制氢、生物质发电等利用形式。其优点是低污染、分布广泛、总量丰富,缺点在于资源分散、成本较高

续表

新能源分类	能源类型	特 点
可持续能源	太阳能	从光热利用、太阳能发电和光化学转换三种形式看。太阳能具有利用普遍、清洁、能量巨大、持久等优点,缺点是分布分散、能量不稳定、转换效率低和成本高
	核能	原子核里核子(中子或质子)重新分配和组合时所释放的能量。核能发电是利用核反应堆中核燃料裂变所释放出的热能,据计算,1kg 铀-235 裂变释放的能量大致相当于 2400t 标准煤燃烧释放的能量
	氢能	氢是宇宙中分布最广泛的物质,可以由水制取,每 1kg 液氢的发热量相当于汽油发热量的 3 倍,燃烧时只生成水,是优质、干净的燃料

(3) 经济发展对能源的依赖越来越明显

改革开放以来,我国能源消耗从 1978 年的 57144 万 t 标准煤,增加到 2012 年的 361732 万 t 标准煤,年均增长率 9.08%。从图 1.2 可以看出,我国能源消费与生产总值的变化趋势基本一致,呈逐年上升的态势。从图 1.3 可知,除了 2003 年和 2004 年,各年 GDP 的增长速度都高于能源消费的速度。随着节能减排政策实施、产业结构调整、低碳技术推广,全国能源消费总量虽然在短期内不会波动太大,但从长期来看增长速度将有所减缓。

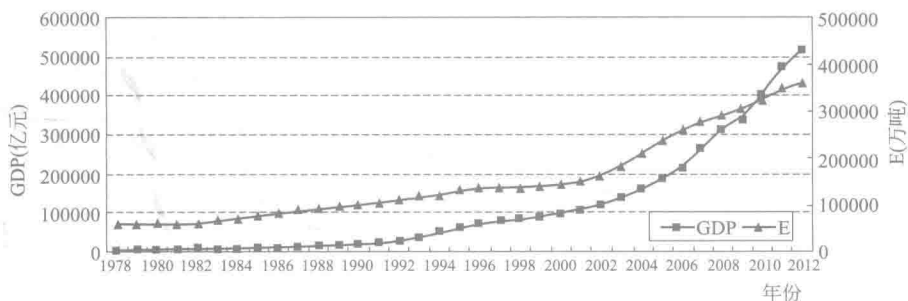


图 1.2 我国 1978 年至 2012 年能源消耗量 (E) 与国内生产总值 (GDP)

我国经济发展对能源提出巨额需求,能源需求量以每年 7.26% 的速度保持递增态势。³由此可见,能源消耗量与经济发展速度成正相关关系,发展经济必然会使用巨额能源。

(4) 我国面临的能源挑战

1) 传统能源日渐枯竭

①煤炭方面。当前,煤炭是我国的主要能源,占能源消费总量的 68%。我

³贺斯琪. 我国经济—能源—环境系统的数量变动关系研究 [D]. 华北电力大学, 2013.

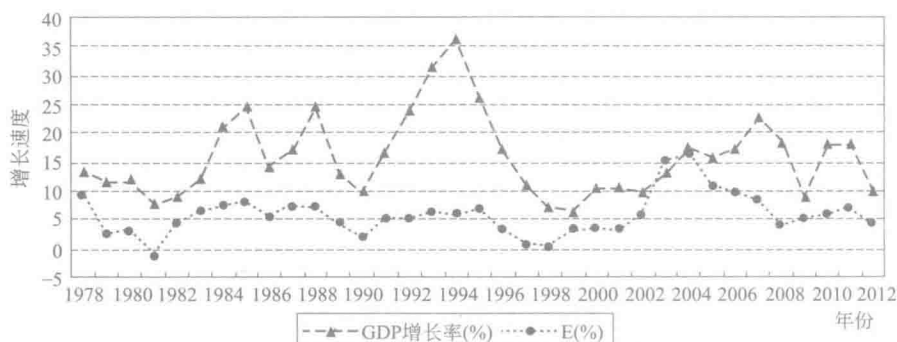


图 1.3 中国 1978~2012 年能源消费增长速度与经济增长速度

备注：GDP 代表国内生产总值，单位亿元人民币；E 代表能源消费总量，单位万吨标准煤

国已探明可利用煤炭储量约为 2000 亿 t，如果维持每年生产 25 亿 t 的速度，还可供应 80 年。我国煤炭资源地理位置分布不均，质量参差不齐，许多地方开采效率较低。此外，还面临着其他一些压力和困境。比如：煤炭储量不足，到 2020 年供给量缺口将达到 1200 多亿 t。生产能力不足，2020 年前还需要新增煤炭生产能力 10 亿 t，需新建百万吨级的大型煤矿 1000 个左右。运输能力不足，我国煤炭消费主要集中在东部地区，煤炭资源主要分布在北部和西部，这种资源分布与需求地理分布的失衡，决定了北煤南运、西煤东运的格局在短期内难以改变。

②电力方面。我国人均用电量仅为世界人均水平的 1/3，每年供电缺口在 800 亿千瓦时左右。在高峰时期，全国电力缺口高达 2500 万千瓦时。尽管水力、火力和核能发电发展迅速，但仍然满足不了大部分地区的需求。

③石油方面。我国已探明可开采石油储量 23 亿 t，14 年之后基本开采完。未来 15 年我国石油需求量和能够得到供应的石油量之间的缺口将越来越大。

总之，我国能源需求总量大，面临着液体燃料短缺、环境污染严重、温室气体排放加剧、城镇化所需能源的供应不足等问题。

2) 能源市场桎梏

传统能源不仅有自身庞大的产业体系，还因其强大的产业关联效应，带动冶金业、制造业、化工业、建筑业和交通运输业的发展。因此，许多国家把能源生产视为现代经济发展的物质基础。然而，能源生产在一定程度上仍然受到限制。比如，我国风能资源非常丰富，但高成本、高价格制约着技术商业化。与同类技

术相比,风能生产成本比化石燃料高得多,风力发电成本是煤电的1.7倍,无疑会削弱风能推广的市场竞争力。我国风电资源集中在“三北地区”(西北、东北、华北),而电力需求主要集中在东部沿海地区,供求在地理位置上不匹配。太阳能符合国家能源开发政策,但光伏发电是煤炭发电成本的6倍,是风力发电的3~4倍。一次性投入大,限制太阳能产品的推广。

3) 新能源技术短板

虽然新能源的好处很多,但从技术层面来看,我国能源利用效率仍然不高。近年来,我国单位产出能耗和资源消耗水平明显高于国际先进水平,火电供煤消耗高达22.5%,吨钢能耗高达21%,水泥综合能耗高达45%。我国单位GDP能源消耗是美国的4.3倍,日本的11.5倍。能源利用率仅为美国的26.9%,日本的11.5%。

可见,我国能源可持续利用之路漫漫,在传统能源日渐枯竭的背景下,面对市场带来的诸多桎梏,需要突破大量的技术瓶颈,方能达到能源的合理使用,走出一条绿色可持续的康庄大道。

2. 我国经济发展与能源利用之“拐点”

由于经济增长方式、管理方式、体制机制等方面的原因,我国环境污染、生态危机在短短20年间就集中出现。与发达国家相比,每单位GDP废水排放量高出4倍,单位工业产值产生的固体废弃物高出10倍以上。这种高投入、高消耗、高排放、低效率的粗放型增长方式早已难以为继,资源环境矛盾十分尖锐。在新形势下,寻找能源利用格局的“拐点”,解决经济发展与能源短缺困局,意义重大。

(1) 我国能源供给与需求现状

1) 能源供给

能源供应有两个渠道——国内生产和国外进口。

2014年年底,我国煤探明储量为15317.0亿t,页岩气首次探明地质储量1068亿m³,石油勘查新增探明地质储量10.6亿t,天然气9438亿m³。45种主要矿产中有36种矿产的查明资源储量增长。我国重要矿产资源查明程度平均为30.3%,矿产潜力巨大。但我国人口众多,人均能源拥有量少,能源分布不均,供给量不足。

由于国内能源需求量大,我国需要不断地从国外进口能源。表1.3给出