

综合报告

General Reports



B.2

不同能源发电系统环境负荷的全生命周期评价

周杰 周溪峒*

摘要:

生命周期评价法 (LCA) 是定量化、系统化评价产品环境影响的国际标准方法, 已经纳入 ISO14000 环境管理系列标准而成为国际环境管理和产品设计的一个重要支持工具。本文利用 LCA 法对不同能源发电系统所造成的环境负荷进行全生命周期的实证研究, 选取了不同类型的火力发电、可再生能源发电和核电系统的排放、污染和资源消耗三个环境负荷指标进行比较分析, 并以归一化的环境负荷率界定清洁能源发电系统的范围。

关键词:

生命周期评价 清洁能源 发电系统 节能减排 环境负荷

* 周杰, 博士, 国际清洁能源论坛 (澳门) 秘书长, 研究方向为公共政策与制度比较研究; 周溪峒, 哈尔滨工程大学工业设计专业硕士研究生, 研究方向为产品设计理论与方法。



一 目的、范围和分析框架

（一）研究目的

“清洁能源”是人类应对当今能源危机、环境危机、气候危机提出的新概念。但长期以来，人们对“清洁能源”的定义还比较含混，特别是清洁能源发电系统的范围不够清晰，认识边界存在很大的争议。电力是使用最为广泛的二次能源，是从多种一次能源中获得的。由于能源种类和获得方式不同，不同发电系统和不同发电技术的电力生产对环境影响的程度、广度和深度不一。一个比较流行、简明、通用的定义是：清洁能源是指在生产和使用过程中不产生有害物质排放的能源。果真如此吗？

首先，作为常规能源和可再生能源的大水电是否属于清洁能源存在很大的争议。目前，修建大型水利水电工程对生态环境的影响已引起空前的关注。人们注意到大水电在造福人类的同时，还会改变或破坏原有的气候、土壤、水文、地质条件及其生物的多样性。因此，连制定能源政策的中国政府部门也难以统一口径。环保部门认为水电并非清洁能源，在某种程度上可能比火电造成的污染更严重，而能源部门则认为水电是目前中国最现实、潜力最大的清洁能源。

其次，作为新能源和可再生能源的太阳能在使用过程中污染或排放很少，但太阳能电池所需要的晶体硅的提炼会排放大量三氯氢硅、四氯化硅等有毒物质，对环境污染极为严重。甚至生产一块晶硅太阳能电池板所消耗的能源比这块电池板在使用寿命期内转换的电能还要多。同样，尽管风电发电过程中的污染很小，但风电所需要的铅酸蓄电池在生产、使用及报废后的处理都会严重污染环境，风机叶片材料玻璃纤维的生产也是高污染的。因此，风电和光伏发电的污染实质上都是由下游转移到了上游。

再次，作为新能源的电动车可以缓解城市内由汽油或柴油燃烧所造成的污染，但问题是绝大部分的电能全来自燃煤或燃油发电系统。从本质上说，这只不过是将市区内的分散污染源转移成火力发电厂的集中污染而已。也就是说，由石油或煤所造成的污染转嫁到了上游的发电环节。因此，清洁能源不能不问出处，



唯有其动力源自清洁能源发电系统的电能才可以说是名副其实的清洁能源汽车。

最后,作为非可再生能源的核能一直被认为属于清洁能源的范畴。如果我们只考察核能发电环节,核电的确可以说是低污染、低排放的发电系统。但是,核燃料在生产、运输及核废料处理过程中,都伴随着非常严重的放射性污染,尤其是当核电站发生事故出现核泄漏,其污染更是大范围的,甚至是全球性的,且危害要延续几十年、几百年,甚至上万年。三哩岛事故、切尔诺贝利事故的影响都非常巨大,而2011年日本福岛核事故更引发了人们对核电风险的担忧。很多国家为此都采取缓建核电站的政策,有的国家甚至宣布“弃核”。核电站还有可能成为战争或恐怖主义袭击的主要目标。因此,人们有理由对核电是否属于清洁能源提出质疑。

由此可见,世界上没有任何一种能源是完全无污染、零排放的。所谓的清洁能源并非是绝对的清洁,而是相对的,且是有条件的。因为整个能源链的各环节都会产生相应的污染和排放,能源生产和再生产过程中自身还会消耗大量资源和能源。清洁能源并非指能源本身有清洁和不洁之分,而是指能源在利用、生产和消费的全过程的环境负荷是否清洁友好。本文研究目的就是全生命周期考察整个电力能源链的输入和输出,通过对不同发电系统能源生产和使用过程中的排放、污染和资源消耗量的比较,运用归一化的综合指标分析不同发电系统的环境负荷,从而有助于清洁能源标准的评价,以及节能减排目标的设定和应对气候变化政策的制定。

(二) 发电系统的生命周期评价模型

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编与评价。^①实际上,LCA就是从原材料采集和加工,到生产、运输、销售、使用、回收、养护、循环利用和最终处理的全生命周期环境负荷的评价方法。经过40多年的发展,LCA已纳入ISO14000环境管理系列标准而成为国际环境管理和产品设计的一个重要支持工具。目前,基于LCA的产品碳足迹和水足迹也席卷全球市场,能源领域的碳足迹研究也越来越广泛,不同的是碳足迹研究只关注各阶段的温室气体排放而已。而LCA的指标体系则比较全面、客观和综合,不只强调片面的单一指

^① 中华人民共和国国家标准 G/BT 24040 - 2008/ISO14040: 2006。

标，不仅从开采、运输、发电、废弃等建立了一个完整的电力生产和燃料使用的循环链，而且通过识别和量化全能源链上各个环节的能源与材料使用的环境排放数据，来评价不同能源发电系统的环境负荷程度。因此，LCA 对不同能源发电系统环境负荷的比较以及清洁能源标准的评价是一个非常理想和实用的工具。

本文研究范围就是比较和评价各种能源发电系统对环境负荷的影响，包括不同发电系统的比较，如火电、核电和可再生能源发电的对比分析；不同发电技术的比较，如新型发电技术与传统发电技术的对比分析；不同发电规模或等级的比较，如 600W 与 800W 风电的对比分析。实际上，各种能源发电方式的设备材料需求是千差万别的，工程技术及工艺流程也参差不齐。火电发电运行环节需要使用大量燃料能源，而可再生能源基本不需燃料补给，只是设备生产制造和电厂建设阶段需要燃料和原材料的投入。为了方便比较，我们将发电系统能源链的计量范围确定为两个流程和四个环节，并以此作为发电系统的生命周期评价模型（见图 1）。第一个流程是燃料能源的生命周期，包括燃料开采、燃料运输、发电运行、电力使用（含配电送电）四个阶段。第二个流程是建材资源的生命周期，包括资源开采、资源运输、电站建设和电站解体四个阶段。

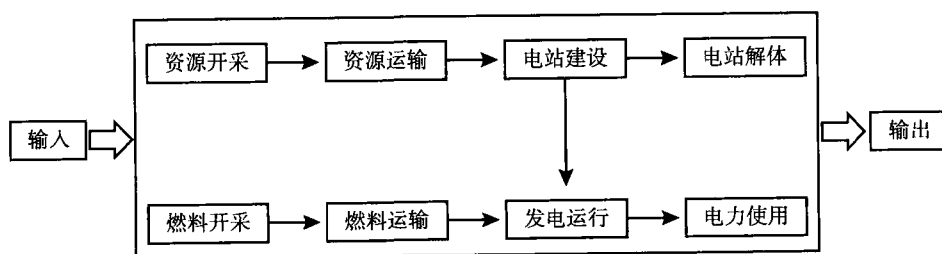


图 1 发电系统生命周期评价模型

资料来源：作者自行绘制。

（三）清单数据与分析框架

按照 ISO14040 系列标准规定的内容，ISO - LCA 方法包括四个步骤：目标与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释。这是一个整体，总称为“全生命周期评价”。生命周期清单是指全生命周期一个过程的输入与输出流数据。众所周知，生命周期评价描述的对象是复杂的能源生产与消费活动，具有大尺度



的时空跨度，各个国家、各个地区、各个时期、各个产业、各个环节的数据都不尽相同和相通，而且由于社会经济和技术发展水平的不同而不断在变动，因而数据难以反复测量和统计分析。LCA 清单结果通常包含上百种不同的环境排放和资源开采参数，计算结果甚至包含上千条清单条目。因此，本文采用 SimaPro 7.2 版 LCA 分析软件，数据均取自瑞士的 Ecoinvent v2.0 数据库，该数据库中含多个国家各种技术的电力生命周期清单，其数量达 600 多个。从生命周期评价个案研究来看，国外许多研究者针对不同国家和地区，对发电系统进行了大量案例研究。本文少量次要数据引用了日本、欧美国家案例研究的二次数据作为补充。需要注意的是发达国家有关数据和参数与中国国内现况尚存较大差距，如果盲目比较有得出相反结论之虞，须理解数据和参数的所设定的条件和分析情景。

本文定义的资源消耗主要是指发电系统全生命周期的全部输入，包括化石能源、矿产资源和土地资源等。资源消耗量的大小直接与环境负荷相关，消耗量越大排放的污染也就越多。如图 2 所示，发电系统全生命周期输出除电能外，排放的污染物多以 GHG（温室气体）、SO₂、NO_x 为主，而水电污染物则以 PM2.5 为主，核电污染物以放射性物质为主，此外还有重金属（As、Pb、Hg、Ni、Cd、Cr、V、Zn 等）、非甲烷挥发性有机物（NMVOC）等污染排放。因此，在比较不同能源发电系统时，需注意从能源本身科学属性评价，不能完全类比。从本质上说，排放与污染本质上并无根本的区别，但本文定义的排放是特指对人类健康影响的环境负荷指标，而本文定义的污染是指对生态系统质量影响的环境负荷指标。

本文采用简式生命周期法 S-LCA（Streamlined LCA），即在不明显影响结果正确性的前提下，可以简化生命周期的步骤或使用二次数据。^① 影响评价方法采取分类、特征化以及归一化或加权综合三个步骤。如表 1 所示，本文以生产 1MW·h 电力为单位计算出 11 项特征化影响类型指标。在确定相关影响类型参数之后，各项清单数据就会被分配到这些影响类型中。例如，CO₂ 和 CH₄ 均被分配到“全球气候变动”影响类型中，而 SO₂ 和 NH₃ 被分配到“酸化”影响类型中。有时污染物会被分配到一种或者多种影响类型，如土地使用影响

① Joel Ann and Mary Ann Curran Streamlined Life - Cycle Assessment: A Final Report from the SETAC North America Streamlined LCA. : Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETA C). 1997.

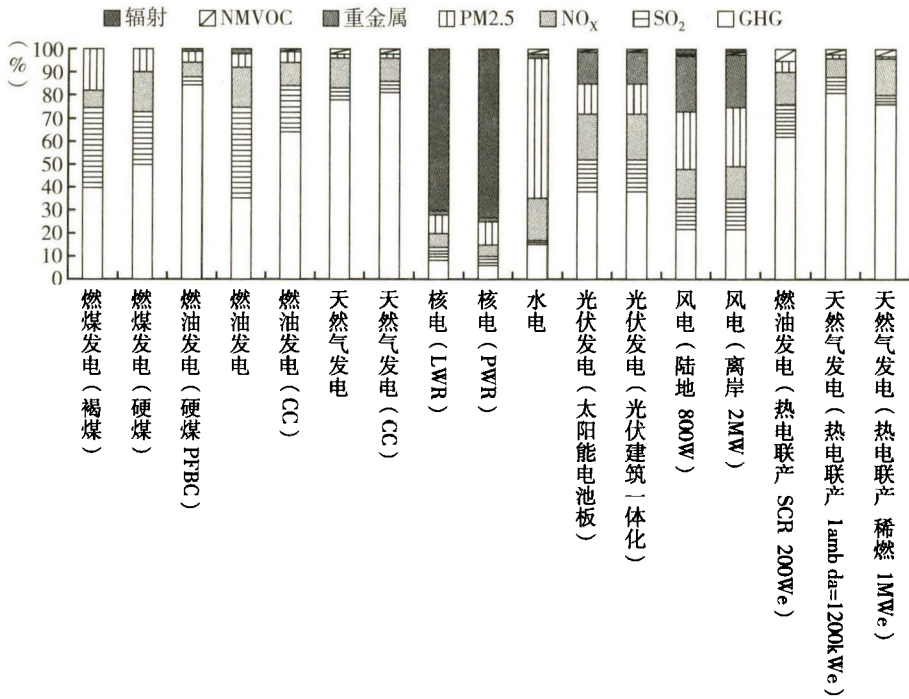


图 2 发电系统排放污染输出清单

资料来源: ExternE - Pol REPORT, *Externalities of Energy: Extension of Accounting Framework and Policy Applications*, Version 2, August 2005。

表 1 基于生命周期法的分析框架

特征化影响类型 (中点指标)	所选等效 指标	单位	评价方法	归一化指标 (末端指标)	加权综合
全球气候变化	CO ₂	kg/MW · h	IPCC GWP 100a	人类健康 (排放)	环境负荷率
臭氧层破坏	CFC - 11	kg/ MW · h	IMPACT 2002 +		
致癌物质	Benzene	kg/ MW · h	TRACI 2		
可吸入无机物	PM2.5	kg/ MW · h	IMPACT 2002 +		
可吸入有机物	C ₂ H ₄	kg/ MW · h	IMPACT 2002 +		
辐射	C - 14	Bq/ MW · h	IMPACT 2002 +	生态质量 (污染)	
酸化/富营养化	SO ₂	kg/ MW · h	CML 2001		
生态毒性	2,4 - DB	kg/ MW · h	TRACI 2		
化石能源消耗	能量	MJ/ MW · h	Eco - indicator 99	资源消耗	
矿产资源消耗	能量	MJ/ MW · h	Eco - indicator 99		
土地资源利用	占地面积	m ² * yr/ MW · h	IMPACT 2002 +		



类型与“生态毒性”和“富营养化”影响类型相结合就会产生重复计算的问题，但不同影响类型评价的角度不同，只是在归一化处理时要注意避免。

在清单列表分类的基础上，LCA 采用特征化因子（当量因子），将清单物质数量汇总为针对主要环境影响类型的特征化指标。特征化指标因处于影响类型环境机制因果链的中间环节，又称为“中点指标”（mid-point），它是指清单物质对环境造成影响的直接后果。特征化因子主要反映一个生命周期清单结果对影响类别的相对贡献。如生命周期发电系统所排放的温室气体除 CO_2 外，还包括 CH_4 、 N_2O 、 O_3 、CFCs 等。当同时存在几种温室气体的排放时，我们需利用国际上通用的全球温室效应 GWP 指数统一到 CO_2 的等效排放量，以使各种发电方式的排放具有可比性。在计算时设定 CO_2 对温室效应的贡献为 1， CH_4 对温室效应的贡献根据 GWP 特征化因子则为 CO_2 的 21 倍。本文所选特征化指标均设有各项等效排放指标和指数，并采用国际上通用的特征化模型进行计算。

影响环境的类型指标不能以指标数值进行简单相加的处理，必须有一个全面反映不同能源发电系统清洁程度的单一的、定量的综合指标。末端指标（end-point）就是归一化指标，它是在影响类型指标基础上进行无量纲化处理后计算得出的，这样就将直接影响进一步转化为对人体健康、生态系统以及资源消耗造成的最终结果。最后，在三项末端指标的基础上又进一步加权计算得出单一的综合评价指标，即环境负荷率。加权是生命周期影响评估中最有争议且最困难的步骤，一般是通过使用主观的权重指数把 LCA 分析所获得的不同指标综合成为一个或者少数的几个指标的过程。本文归一化和加权均采用 Eco-indicator 99 模型的默认权重因子进行标准化计算。

二 清单分析与影响评价

（一）清单分析

生命周期清单分析（LCI）是指在所确定的范围和边界内对利用能源发电生命周期过程的输入和输出进行数据量化和分析。表 2 为利用生命周期评价软件 SimaPro 7.2，基于 Ecoinvent v2.0 数据库，不同能源发电系统每发电 $1\text{MW} \cdot \text{h}$ 的输入输出清单分析结果。



表 2 不同能源发电系统生命周期清单分析

环境影响分类	全球气候变化	臭氧层破坏	致癌物质	可吸入无机物	可吸入有机物	辐射	酸化/富营养化	生态毒性	化石能源消耗	矿产资源消耗	土地资源利用
评价方法	IPCC GWP 100a	IMPACT 2002 +	TRACI 2	IMPACT 2002 +	IMPACT 2002 +	IMPACT 2002 +	CML 2001	TRACI 2	Eco-indicator 99	Eco-indicator 99	IMPACT 2002 +
单位	kg-CO ₂	kg-CFC ₁₁	kg-benzen	kg-PM2.5	kg-C ₂ H ₄	Bq-C ₁₄	kg-SO ₂	kg-2,4-Dif	MJ	MJ	m ² arable
燃煤发电(硬煤)	1.08E+03	5.59E-06	1.22E+00	7.30E-01	5.83E-02	1.83E+03	5.15E+00	2.00E+03	2.10E+02	1.50E+00	4.14E+00
燃煤发电(褐煤)	1.23E+03	1.92E-06	4.35E+00	1.21E+00	1.95E-02	1.28E+03	9.20E+00	9.13E+03	2.57E+01	9.85E-01	1.50E-01
燃油发电(原油)	8.85E+02	1.05E-04	9.55E-01	9.92E-01	2.03E-01	1.76E+03	9.30E+00	2.15E+02	1.64E+03	1.55E+00	8.92E-01
燃油发电(SCR)	4.14E+02	6.16E-05	1.63E-01	1.47E-01	2.73E-01	9.66E+02	1.00E+00	7.73E+01	7.92E+02	2.09E+00	4.92E-01
天然气发电	6.42E+02	9.26E-05	4.19E-02	1.17E-01	1.18E-01	1.63E+02	6.23E-01	2.88E+01	1.50E+03	6.85E-01	1.29E-01
天然气发电(微型燃气轮机)	7.04E+02	1.10E-04	1.37E-01	1.09E-01	1.54E-01	3.04E+02	6.52E-01	5.75E+01	1.58E+03	3.64E+00	1.53E-01
天然气发电(联合循环)	4.25E+02	6.12E-05	3.79E-02	5.87E-02	7.84E-02	1.18E+02	3.39E-01	2.20E+01	9.94E+02	9.05E-01	7.96E-02
天然气发电(小型热电联产)	2.98E+02	4.55E-05	6.24E-02	4.00E-02	7.54E-02	1.54E+02	2.74E-01	2.53E+01	6.57E+02	8.05E-01	6.81E-02
天然气发电(热电联产、稀燃)	3.20E+02	4.79E-05	6.57E-02	6.63E-02	9.18E-02	1.54E+02	3.66E-01	2.61E+01	6.92E+02	1.01E+00	6.63E-02

续表

环境影响 分类	全球气候 变化	臭氧层 破坏	致癌 物质	可吸入 无机物	可吸入 有机物	辐射	酸化/ 富营养化	生态 毒性	化石能源 消耗	矿产资源 消耗	土地资源 利用
水电	4.44E+00	2.73E-07	1.67E-02	6.17E-03	1.54E-03	1.11E+02	1.39E-02	6.10E+00	3.57E+00	1.25E+00	2.63E-02
水电(径流式)	3.51E+00	2.31E-07	1.38E-02	6.20E-03	1.44E-03	7.75E+01	1.27E-02	5.53E+00	3.15E+00	9.97E-01	2.01E-02
水电(提坝式)	5.23E+00	3.09E-07	1.92E-02	6.14E-03	1.63E-03	1.39E+02	1.50E-02	6.58E+00	3.92E+00	1.46E+00	3.16E-02
风电	1.12E+01	6.82E-07	2.14E-01	1.50E-02	3.74E-03	2.06E+02	5.25E-02	5.75E+01	1.19E+01	1.08E+01	6.63E-01
风电(600kW)	1.72E+01	1.02E-06	3.67E-01	2.58E-02	5.57E-03	3.56E+02	8.37E-02	9.44E+01	1.77E+01	2.08E+01	1.25E+00
风电(800kW)	1.12E+01	6.79E-07	2.14E-01	1.50E-02	3.72E-03	2.05E+02	5.23E-02	5.75E+01	1.19E+01	1.08E+01	6.75E-01
风电(海上)	1.43E+01	8.53E-07	2.20E-01	1.70E-02	4.76E-03	2.40E+02	6.25E-02	6.08E+01	1.43E+01	1.04E+01	7.43E-02
光伏发电(混合)	7.52E+01	1.48E-05	1.28E+00	6.19E-02	5.38E-02	2.39E+03	3.67E-01	4.90E+02	9.32E+01	1.97E+01	5.86E-01
光伏发电(单晶 硅)	6.57E+01	1.33E-05	1.10E+00	5.30E-02	4.77E-02	2.44E+03	3.19E-01	4.18E+02	8.30E+01	1.56E+01	4.92E-01
光伏发电(多晶硅)	5.84E+01	1.37E-05	1.08E+00	4.79E-02	4.93E-02	1.67E+03	2.81E-01	3.82E+02	8.01E+01	1.57E+01	4.95E-01
光伏发电(a-Si)	5.58E+01	2.93E-06	1.06E+00	5.00E-02	1.78E-02	1.49E+03	3.59E-01	4.23E+02	5.64E+01	2.10E+01	3.73E-01
光伏发电(CIS)	6.43E+01	3.84E-06	1.06E+00	4.76E-02	1.60E-02	2.20E+03	2.79E-01	4.64E+02	5.31E+01	1.96E+01	3.84E-01
核电	7.79E+00	1.90E-05	1.80E+00	2.58E-02	3.91E-03	1.27E+05	5.57E-02	4.99E+02	9.21E+00	2.20E+00	8.54E-02
核电(BWR)	7.51E+00	1.95E-05	1.82E+00	2.56E-02	3.86E-03	1.11E+05	5.42E-02	5.03E+02	8.87E+00	2.02E+00	8.98E-02
核电(PWR)	7.82E+00	1.89E-05	1.80E+00	2.59E-02	3.91E-03	1.29E+05	5.59E-02	4.98E+02	9.25E+00	2.22E+00	8.50E-02
生物质发电	4.58E+01	9.50E-11	8.23E-04	1.14E-01	2.40E+01	0.00E+00	7.54E-01	4.86E-01	4.53E+00	0.00E+00	0.00E+00

资料来源:作者自行运算绘制。



(二) 人类健康环境负荷的影响评价

图3是不同发电系统全生命周期对人类健康影响的归一化指标，包括全球气候变化、臭氧层破坏、可吸入有机物、可吸入无机物、致癌物质以及辐射六项影响类型指标。总体而言，可再生能源发电和核电对人类健康的影响大幅低于火力发电。火力发电系统对人类健康影响最为严重，燃煤发电（褐煤）归一化指标达到了49.71，燃煤发电（硬煤）和燃油发电分别为24.31和24.23。但天然气发电归一化指标仅为燃煤发电（褐煤）的1/10左右，甚至低于可再生能源发电系统。在可再生能源发电系统中，光伏发电原材料及设备制造排放严重，生物质发电燃料化学元素危害程度大，这两种发电方式对人类健康影响归一化指标值都偏大，核能归一化指标由于其放射性物质污染排放而高于水电和风电，唯有水电和风电是对人类健康影响最小的发电方式。

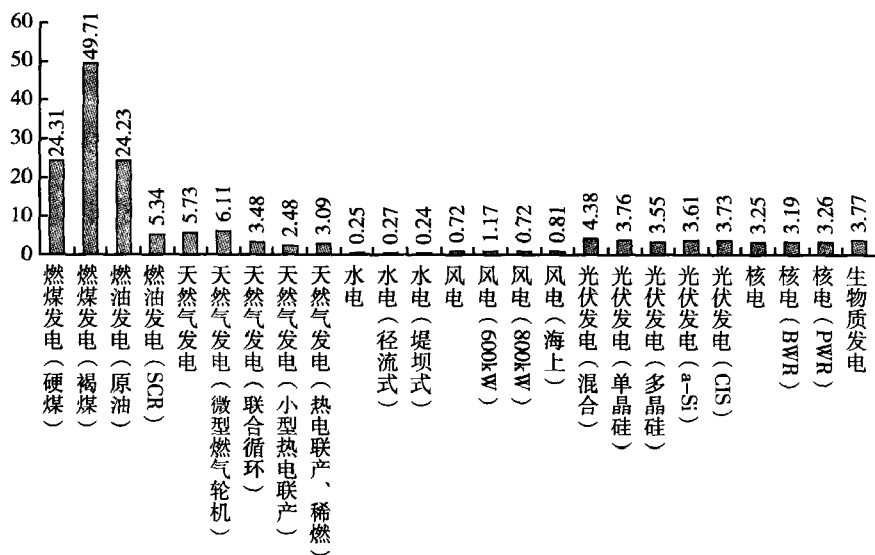


图3 不同能源发电系统全生命周期对人类健康的影响

资料来源：作者自行运算绘制。

从全球气候变暖的温室气体排放来看，如表2清单分析所示，GHG主要来自燃煤、燃油、天然气发电系统的贡献。火力发电的CO₂排放量为其他发

电方式的几十倍甚至上百倍。其中，燃煤发电的 CO_2 排放量超过了 $1000\text{kg} - \text{CO}_2/\text{MW} \cdot \text{h}$ ，对全球气候变化的贡献最大。燃油发电和燃气发电相对较少，分别为 $885.12\text{kg} - \text{CO}_2/\text{MW} \cdot \text{h}$ 和 $642.38\text{kg} - \text{CO}_2/\text{MW} \cdot \text{h}$ 。值得关注的是，采用了 SCR 脱硝技术的燃油发电 CO_2 排放水平降至普通燃油发电的一半以下，而采用了联合循环、热电联产、稀燃技术的燃气发电 CO_2 排放水平也比普通燃气发电有大幅减少。由此可见，技术的进步可以提高火力发电的热效率，从而减少 CO_2 排放量。据日本电力中央研究所的报告，火力发电 CO_2 排放结构主要还是以发电燃料燃烧过程的直接排放为主，在开采、运输和生产建设阶段的间接排放约占 $5\% \sim 20\%$ 。燃煤火电可以通过提高热效率减少排放，如提高涡轮机入口温度不仅提高了发电效率，直接排放量比传统燃煤火电减少了 13% ，间接排放量也减少了 15% 。超超临界燃煤机组（USC）的广泛应用，更是极大地提高了热效率，发电直接排放量比传统的燃煤发电降低了 8% 。此外，LNG 火力发电 1300°C 级的汽轮机比传统的低温汽轮机发电排放量减少了 10% ， 1500°C 级的汽轮机更进一步提升了热效率，排放量减少了 16% 。^① 值得注意的是，据 WEC 研究报告，采用 CO_2 捕捉与封存 CCS 技术后，燃煤发电 CO_2 排放量降至 $187\text{kg} - \text{CO}_2/\text{MW} \cdot \text{h}$ ，天然气发电 CO_2 排放降至 $245\text{kg} - \text{CO}_2/\text{MW} \cdot \text{h}$ ，甚至重油发电 CO_2 排放也降至 $657\text{kg} - \text{CO}_2/\text{MW} \cdot \text{h}$ 。^② 这意味着传统火力发电经过清洁能源技术改造完全可以转化为低碳的清洁能源。

可再生能源的发电系统 CO_2 排放均来自发电设备生产和建设阶段，其中发电设备生产制造排放就占了近八成。因此，可再生能源系统因发电技术、原材料使用和装机容量的不同决定了 CO_2 排放量的大小。在现阶段的技术条件下，光伏发电、生物质发电比其余可再生能源发电方式 CO_2 排放量高。光伏发电排放多的主要原因还是太阳能发电设备制造阶段污染较大所致，而水力发电和风力发电是最清洁的可再生能源发电方式。核能发电 CO_2 排放只有 $7.79\text{kg} - \text{CO}_2/\text{MW} \cdot \text{h}$ ，大致与风力发电和水力发电持平。据日本核能发电研究报告，从排放结构

① 今村栄一 長野浩司「日本の発電技術のライフサイクル CO_2 排出量評価 - 2009 年に得られたデータを用いた再推計」電力中央研究所研究報告書 Y09027。

② Comparison of Energy Systems Using Life Cycle Assessment, WEC, 2004.



来看，核燃料浓缩产生的排放量占了整个排放的2/3左右，沸水堆和压水堆的排放相差不大，采用扩散法浓缩铀的排放量稍大一些，而废燃料作为MOX燃料循环利用的情形下，排放量并无增减。^① 如果从排放温室气体这个环境要素单项评价指标来看，核电无疑是低碳的清洁能源。

氟氯碳化物排放对臭氧层有很大的破坏作用，它是衡量清洁能源的一项重要指标。从表2可以看出，天然气发电与燃油发电对臭氧层破坏最为严重，所排放的氟氯碳化物达到了 $0.1\text{g} - \text{CFC}_{11}/\text{MW} \cdot \text{h}$ 。其次，核能发电、光伏发电也对臭氧层破坏有显著影响，排放在 $0.01\text{g} - \text{CFC}_{11}/\text{MW} \cdot \text{h}$ 至 $0.02\text{g} - \text{CFC}_{11}/\text{MW} \cdot \text{h}$ 不等。风电、水电、燃煤发电（褐煤）对臭氧层的破坏较小。值得注意的是，使用了SCR技术的燃油发电方式，氟氯碳化物排放量降至原来的一半左右；采用了联合循环、热电联产、稀燃技术的燃气发电的氟氯碳化物排放量也有大幅减少；CIS和a-Si光伏发电比普通光伏发电所排放的氟氯碳化物减少了2/3。由此可见，清洁发电技术的使用和新型原材料的开发对减少氟氯碳化物排放有至关重要的影响。

近年来，PM_{2.5}对人类呼吸道健康的影响成为公众焦虑的热门话题。燃煤发电和燃油发电会产生大量的无机细颗粒物，达到了 $1\text{kg} - \text{PM}_{2.5}/\text{MW} \cdot \text{h}$ 左右，是所有发电方式中对PM_{2.5}贡献最大的。其次，生物质发电也会产生大量的粉尘和颗粒物，排放量为 $0.114\text{kg} - \text{PM}_{2.5}/\text{MW} \cdot \text{h}$ 。天然气发电因其发电过程排放主要是大量水和二氧化碳，不会产生大量无机颗粒物，因此是火力发电中最为清洁的。核电、风电、水电、光伏发电PM_{2.5}排放量不足 $0.1\text{kg} - \text{PM}_{2.5}/\text{MW} \cdot \text{h}$ ，其中光伏发电稍高，水电和风电依旧是最为清洁的能源。同样可以看到，清洁发电技术的使用和新型原材料的开发对减少PM_{2.5}排放也有很大的作用。可吸入有机物排放主要源自生物质发电，达到了 $24.02\text{kg} - \text{C}_2\text{H}_4/\text{MW} \cdot \text{h}$ 。这是由于生物燃料含有大量的有机物，会在发电过程中释放。而其余发电方式有机物排放不足 $1\text{kg} - \text{C}_2\text{H}_4/\text{MW} \cdot \text{h}$ ，几乎对环境没有影响。在不同能源发电系统的致癌物质排放中，燃煤发电（褐煤）是最严重的，达

^① 本藤祐樹「ライフサイクルCO₂排出量による原子力発電技術の評価」電力中央研究所研究報告書 Y01006。

到了 $4.35 \text{ kg} - \text{Benzen}/\text{MW} \cdot \text{h}$ 。其次是燃煤发电（硬煤）、燃油发电、核电和光伏发电。核电所排放的致癌物质主要来自放射性物质，光伏发电则主要来自光伏电池板原材料的制造过程。风电、水电、天然气发电、生物质发电对致癌物质的排放都在较低水平，比较清洁。

放射性物质污染主要源于核能发电。核电全生命周期所产生的放射性活度高达 $126896.46 \text{ Bq} - \text{C}_{14}/\text{MW} \cdot \text{h}$ ，为火力发电的 100 倍左右，是水力发电的 1000 倍左右。可见，核辐射是核能发电系统最重要的污染源。要减少核辐射污染，核电站从选址、设计、建造到调试、运行以及高放废料处置和退役的各个阶段都要有严密的质量和安全保障。核放射泄漏事故一旦发生就是重大的灾难性事故，核辐射不仅会引发肿瘤症等致命性的疾病，还会造成人类基因和生物物种变异，生态系统也难以在短期内修复。从安全性来讲，我们现在尚难以全面评估核污染所造成的潜在环境负荷。因此，按目前的核电技术水平很难将核电划为完全的清洁能源，我们只能寄希望于新一代核电能彻底消除安全隐患，真正成为清洁能源。对于其他发电方式，火力发电和光伏发电的辐射量较大，达到了 $1000 \sim 2000 \text{ Bq} - \text{C}_{14}/\text{MW} \cdot \text{h}$ 左右。火力发电辐射量大的原因是其发电原料主要为化石燃料等自然资源，自然资源本身存在放射性物质。光伏发电辐射量大的原因是太阳能电池板所用的晶体硅会释放出较强放射性物质。风电、水电等其余发电方式的辐射量可以忽略不计。

（三）生态系统质量环境负荷的影响评价

图 4 是不同能源发电系统全生命周期对生态系统质量影响的归一化指标，包括环境的酸化与富营养化、生态毒性等类型指标。总体而言，燃煤发电和燃油发电对生态系统质量的影响最大，归一化指标最高达到了 5.11，为其余发电方式的 10 倍多。在火力发电中，对人类健康影响较小的发电方式依然是天然气发电，归一化指标为 0.51，基本与可再生能源发电的影响水平持平。在可再生能源发电中，水电是对生态质量影响最小的发电方式，其余发电方式都有不同程度的影响，但都大幅低于燃煤发电和燃油发电。核能发电对生态系统质量也是比较清洁友好的。

环境酸化是全球性的环境污染问题之一，它是大气遭受人为污染形成的酸性降水落到地表后所造成的土壤和水体酸化及环境功能衰退的现象。长期以来

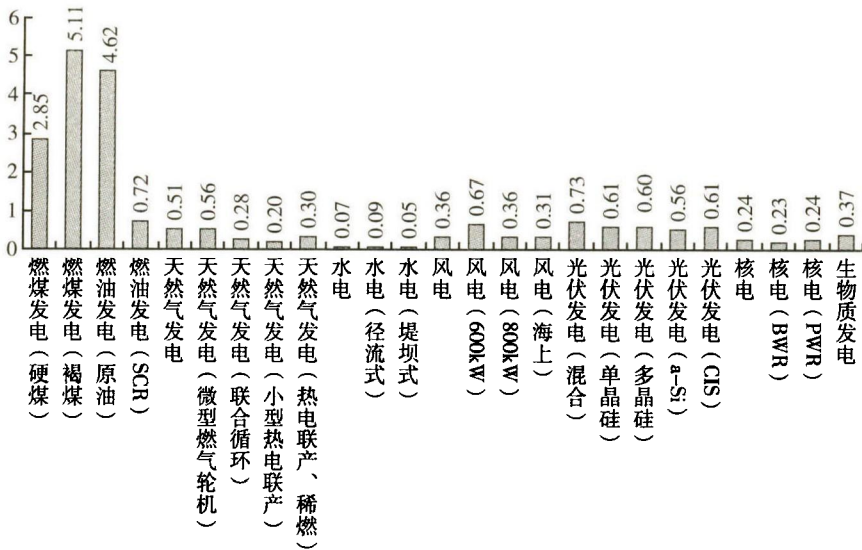


图4 不同能源发电系统全生命周期对生态系统质量的影响

资料来源：作者自行运算绘制。

以火力发电为主的能源系统排放大量的二氧化硫和氮氧化物，成为酸雨形成的主要因素。由表2得知，燃煤和燃油发电系统排放的酸性物质是最高的，其中燃油发电排放量超过了 $9\text{kg} - \text{SO}_2/\text{MW} \cdot \text{h}$ 。尽管现在大多火电厂都采用了除尘、脱硫和脱硝技术，可大幅降低酸性物质排放量，但火力发电排放 SO_2 的总量仍然较多，远远高于其他能源的发电系统。天然气发电的 SO_2 排放量明显低于燃油和燃煤发电，甚至接近可再生能源发电的 SO_2 排放量，排放量为 $0.623\text{kg} - \text{SO}_2/\text{MW} \cdot \text{h}$ 。原因是天然气燃烧发电过程排放的是大量的水和 CO_2 ，硫氧化物或氮氧化物排放较少，对环境酸化的影响很小，这也是人们将天然气视为清洁能源的原因之一。可再生能源发电与核能发电在对环境酸化贡献中保持较低水平。其中，光伏发电排放 SO_2 较多，达到了 $0.3\text{kg} - \text{SO}_2/\text{MW} \cdot \text{h}$ ，原因还是在于光伏电池板生产制造过程中较重的污染。而风电、水电、核电的 SO_2 排放都在 $0.01\text{kg} - \text{SO}_2/\text{MW} \cdot \text{h}$ 以下，影响甚微。值得一提的是，生物质发电对 SO_2 排放大幅高于其他可再生能源发电，甚至高于天然气发电，其原因是生物体中元素种类多，无论是焚烧发电还是沼气发电都会产生复杂的化学反应，释放出硫氧化物和氮氧化物。所以，发电前应对生物质进行分类处理，争取降低酸化物质的排放。

在不同发电系统生态毒性的类型指标中，燃煤发电尤其是褐煤发电生态毒性最大，达到了 9134kg^{-2} ， $4\text{-DB}/\text{MW}\cdot\text{h}$ ，为其余发电方式的几十倍甚至上百倍。其次是光伏发电、燃油发电和核能发电，其余发电方式对生态毒性的贡献较小。

(四) 资源消耗环境负荷的影响评价

图5是不同能源发电系统全生命周期对资源消耗影响的归一化指标，包括化石能源的消耗、矿产资源的消耗以及对土地资源的利用三项影响类型指标。总体而言，火力发电资源消耗最大，其中燃油发电和天然气发电的归一化指标值均超过了35，为燃煤发电的7倍，是其余发电方式的数十倍，其原因主要是火力发电大量开采使用枯竭性的化石燃料所致。但火力发电采用新型发电技术后，大大提高了化石燃料利用的效率，无论是燃油发电还是天然气发电，资源消耗都减少一半。可再生能源发电系统的光伏发电对资源消耗较大，主要原因在于光伏电池板制造消耗的原材料量较大。水电、风电、核电等其他发电方式的资源消耗较小，相对来说还比较节能环保。

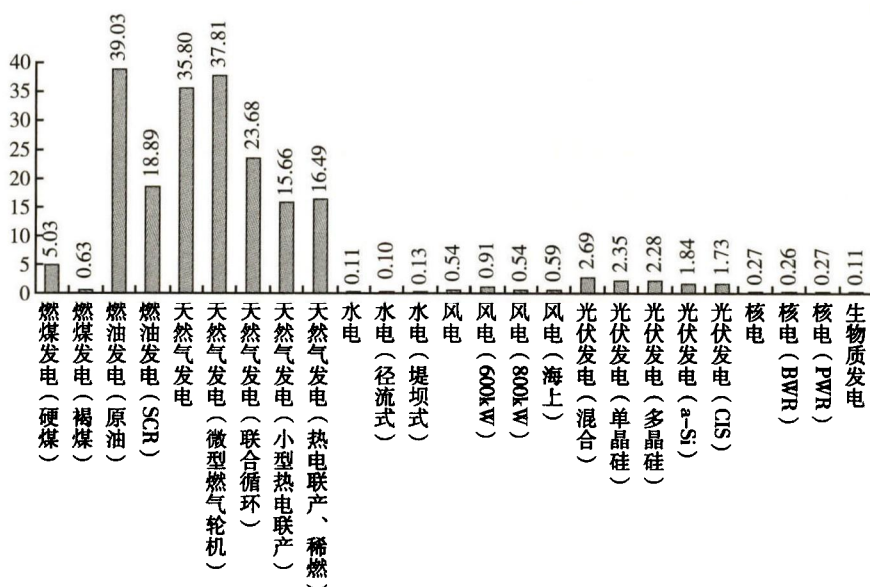


图5 不同能源发电系统全生命周期对资源消耗的影响

资料来源：作者自行运算绘制。



化石燃料是不可再生资源,过度使用会导致资源枯竭,阻碍人类的可持续发展。在不同能源发电系统中,火力发电尤其是燃油和天然气发电对化石燃料的消耗很大,燃油发电达到了 $1638.45\text{MJ}/\text{MW}\cdot\text{h}$,天然气发电达到了 $1503.68\text{MJ}/\text{MW}\cdot\text{h}$ 。但采用 SCR 脱硝技术的燃油发电,化石燃料消耗降至原来的一半以下,仅为 $791.81\text{MJ}/\text{MW}\cdot\text{h}$ 。采用了热电联产、联合循环、稀燃技术的天然气发电也可减少化石燃料消耗近一半。可见,新技术对提高化石燃料使用效率、减少发电系统对化石燃料消耗有至关重要的作用。光伏发电是可再生能源发电中使用化石燃料最多的发电系统,达到了 $93.15\text{MJ}/\text{MW}\cdot\text{h}$,但仍远低于火力发电系统。风电、水电、核电、生物质发电对化石燃料的消耗较低,依旧是最清洁的能源发电方式。

不同技术、不同材料、不同功率的发电设备对矿产资源的使用不尽相同。从表 2 可以看出,可再生资源发电系统中的光伏发电、风力发电矿产资源使用较多,而且不同原材料的光伏发电消耗也不尽相同, 600kW 风电及 a-Si 光伏发电矿产资源消耗超过了 $20\text{MJ}/\text{MW}\cdot\text{h}$, 800kW 风力发电比 600kW 风力发电消耗的矿产资源减少了近一半,大约为 $10\text{MJ}/\text{MW}\cdot\text{h}$ 。由此可见,选用消耗较低的新型材料,以及对发电系统最佳功率的优化,都会有助于可再生资源发电系统减少矿产资源的使用,从而改善发电系统的环境负荷。火力发电、水电、核电对矿产资源的消耗较小,均不足 $4\text{MJ}/\text{MW}\cdot\text{h}$ 。生物质发电几乎不使用矿产资源。

不同能源发电系统都会占用土地,尽管土地实际上并不会耗尽,但由于一定面积的土地只能用于有限的用途,因此土地稀缺是一个实际存在的问题。而且,发电系统会造成农业耕地减少、土地退化和破坏生物多样性的后果。土地利用面积的计算不仅包括发电设备占地面积的统计,还包括原材料开采和运输、发电站建设以及发电运行过程所占用的土地面积。土地资源占用的数值一般采用 $\text{PDF}\times\text{m}^2\times\text{a}$,表示一年内占用一平方米土地面积导致生物消失的潜在风险率,但这一指标包含了土地酸化、富营养化以及生物毒性释放对生态系统质量影响的各项因素。为避免重复计算,本文采用发电 $1\text{MW}\cdot\text{h}$ 年占用有机耕地面积 ($\text{organic arable land}\times\text{a}/\text{MW}\cdot\text{h}$) 的指标。从表 2 可以看出,对耕地影响最大的是燃煤发电(硬煤),达到了 $4.14\text{m}^2\times\text{a}/\text{MW}\cdot\text{h}$,其次是燃油发电,为 $0.89\text{m}^2\times\text{a}/\text{MW}\cdot\text{h}$,主要是来自原料开采阶段煤矿和油田所占土地面



积的贡献。使用 SCR 技术、热电联产、稀燃等技术可有效减少占用有机耕地面积, SCR 燃油发电为 $0.49 \text{ m}^2 \times \text{a}/\text{MW} \cdot \text{h}$, 减少了近一半。天然气发电方式依旧是火力发电系统中占用有机耕地面积最小的, 为 $0.13 \text{ m}^2 \times \text{a}/\text{MW} \cdot \text{h}$ 。在可再生能源发电系统中, 风电占用有机耕地面积最大, 其中 600kW 的风电系统超过了燃油发电系统, 为 $1.25 \text{ m}^2 \times \text{a}/\text{MW} \cdot \text{h}$ 。光伏发电系统平均也达到了 $0.5 \text{ m}^2 \times \text{a}/\text{MW} \cdot \text{h}$ 。核电、海上风电以及水电占用有机耕地面积最小, 不足 $0.1 \text{ m}^2 \times \text{a}/\text{MW} \cdot \text{h}$ 。

三 结果解释

能源利用在经济上可以有量化的标准, 但对环境负荷的量化还没有一个比较准确的公认的归一化标准方法。瑞典国家科学院提出了环境负荷指数的概念因受人为主观因素的不确定性影响而并未得到公认。中国有的学者尝试从能源利用技术的清洁度概念, 为环境评价和研究提供一个区分清洁与不清洁的指标。^① 但是, 由于能源系统的复杂性, 很难建立统一的指标体系来评价所有的能源系统。不同的能源系统有不同的科学属性, 即使同一能源系统技术发展的不同阶段所具有的特点也不同, 需要由不同的指标来监测。不同系统、同一系统不同的时间段上要求使用的指标也不一样, 这就使得一致性的指标体系更加难以确定。

本文分析框架尝试将人类健康、生态质量和资源消耗三个指标分别定义为清洁能源的三个基本属性。①低排放。清洁能源是不排放或少排放对人类健康有害物质的能源。②低污染。清洁能源是不污染或少污染生态系统质量的能源。③低消耗。清洁能源是以最少的资源、能源投入获得最大的能效产出, 从而减少环境负荷的能源。在此三项指标基础上, 本文根据 Eco-indicator 99 模型评价方法, 加权综合计算出归一化的环境负荷率指标。计算结果表明, 石油原油发电是环境负荷率最高的发电系统, 因此, 环境负荷率以石油原油发电系统的环境负荷为 100, 相应求出各类能源发电系统的环境负荷率如图 6 所示。

^① 朱洪波等:《清洁度在风力机生命周期环境评价中的作用》,《广东电力》2004 年第 2 期。

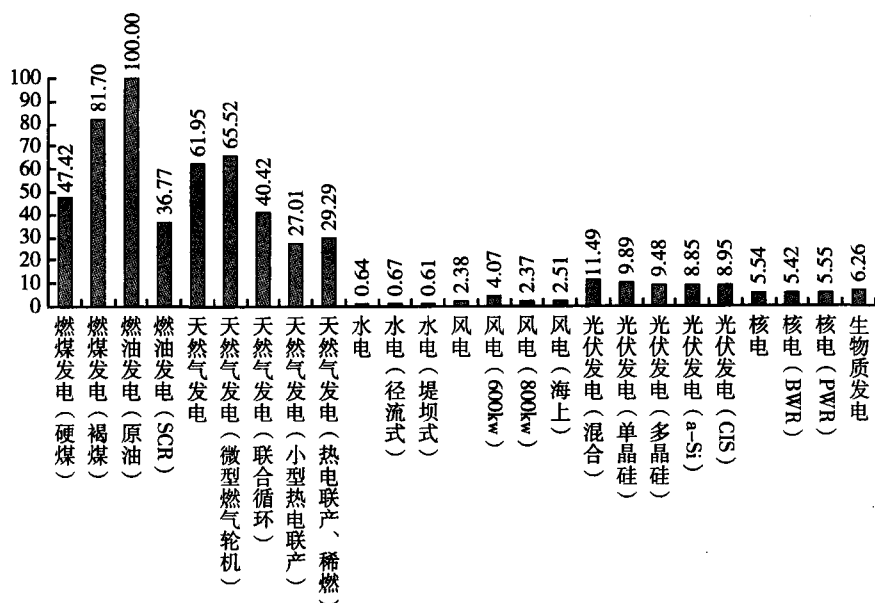


图6 不同能源发电系统全生命周期环境负荷的综合指标

资料来源：作者自行运算绘制。

从不同发电系统的环境负荷率来看，我们至少可以得出以下几点初步的结论。①火电系统的发电方式基本上均为非清洁能源，但是采用 SCR、CHP、CCS 等清洁技术的发电方式尽管污染和排放总量仍高于可再生能源发电系统，但环境负荷率明显大幅降低，已接近不同能源系统的均值 25.34^①，亦纳入相对的清洁能源范畴考虑。因此，未来火力发电系统发展清洁能源的关键就是进一步开发和利用清洁发电技术。②从全生命周期考察，可再生能源发电系统作为清洁能源已不容置疑，但从环境负荷率来看，太阳能和风能发电的环境负荷率仍偏高，这些负荷均来自设备制造和建设安装环节。因此，今后可再生能源作为清洁能源的发展方向就是要与能效技术、智能技术有机结合，重点减少设备制造和原料本身的排放和污染。③核电从环境负荷率来看无疑是清洁的，问题是人们对核电的安全性仍有疑虑和保留，因此，我们不妨将核电定义为不完全的清

① 根据燃煤发电、燃油发电、天然气发电、核电、光伏发电、风电、水电、生物质能发电的环境负荷率均值求出。



洁能源。今后核电的重点方向是进一步客观审慎地评估和加强核电的安全性，并积极开发和利用安全性更高的新一代核电技术。

综上所述，清洁能源的能源形式既可以包括可再生能源，也可以包括不可再生能源和核能，其核心是清洁技术及其安全技术的开发和利用。有的学者为此将清洁能源定义为对能源清洁、高效、系统化应用的技术体系。^①因此，清洁能源的概念不能仅局限于能源的形式，可以泛指一切节能减排和提高能效的清洁技术，一些技术应用会比它的同类传统技术“更少排放、更少污染、更少消耗”的能源系统就应当属于清洁能源技术体系。于是，我们得到一个相对宽泛的清洁能源的定义：清洁能源是以低排放、低污染、低消耗的能源形式为载体，以清洁、节能、高效的能源技术为核心，以实现能源生产、储运、应用与再生的全生命周期智能优化配置制度为生产和生活方式的能源利用体系。这样，清洁能源的概念就不再局限于能源形式，而是能源形式、能源技术和能源制度的结合。

总之，清洁能源是一个开放性的集合概念，清洁能源更多是一种政策目标，更多是倡导一种节能减排和低碳环保的生活方式，以区别于旧式的传统能源利用思维模式。在这一点上，清洁能源与所谓的新能源、绿色能源、低碳能源以及可持续能源的精神实质是相通或共同的，并无本质上的区别。我们有理由相信清洁能源体系和由清洁技术支撑的能源利用方式，以及新的清洁能源利用理念，最终会替代传统的能源利用机制。与此同时，清洁能源也是一个发展的概念。清洁能源的概念是随着社会、经济与科技的发展变化而不断发展变化的。我们会密切关注不同技术在其生命周期的不同阶段对环境的影响，同时致力于清洁能源技术创新，以实现资源节约型、生态友好型、低碳环保型的能源可持续发展，这也是澳门国际清洁能源论坛创设的宗旨和目标。

参考文献

- [1] World Energy Council (WEC), *Comparison of Energy Systems Using Life Cycle*

① 陈凯、史红亮：《清洁能源发展研究》，上海财经大学出版社，2009，第33页。



- Assessment, 2004.
- [2] Comparison of Energy Systems Using Life Cycle Assessment, WEC, 2004.
 - [3] Stefan Hirschberg, Roberto Dones, Thomas Heck, Peter Burgherr, Warren Schenler and Christian Bauer, *Comprehensive Assessment of Energy Systems (GaBE), Sustainability of Electricity Supply Technologies under German Conditions: A Comparative Evaluation*, PSI Bericht Nr. 04 - 15, ISSN 1019 - 0643, 2004.
 - [4] Hirschberg S., Spiekerman G. and Dones R., *Severe Accident in the Energy Sector*, ENERGIE - SPIEGEL, PSI, No. 13, May 2005.
 - [5] ExternE - Pol REPORT, *Externalities of Energy: Extension of Accounting Framework and Policy Applications*, Version 2, August 2005.
 - [6] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), *Risks and Benefits of Nuclear Energy*, OECD Publishing, 2007.
 - [7] European Environment Agency, *Energy and Environment Report*, 2008.
 - [8] John Konrad, *Deadliest Natural Resource-Oil, Coal or Nuclear? Comparing Deaths/TWh for All Energy Sources*, 2011.
 - [9] 今村栄一 長野浩司「日本の発電技術のライフサイクルCO₂ 排出量評価 - 2009 年に得られたデータを用いた再推計」電力中央研究所研究報告書 Y09027。
 - [10] 本藤祐樹「ライフサイクルCO₂ 排出量による原子力発電技術の評価」電力中央研究所研究報告書 Y01006。
 - [11] 本藤祐樹 内山洋司 森泉由恵「ライフサイクルCO₂ 排出量による発電技術の評価 - 最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響」電力中央研究所研究報告書 Y99009。
 - [12] みずほ情報総研株式会社「太陽光発電システムのライフサイクル評価に関する調査研究」, 平成 19 ~ 20 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書 (2009)。
 - [13] 内山洋司「発電システムのライフサイクル分析」電力中央研究所研究報告書 Y94009。

Life Cycle Assessment of the Environmental Impacts of Power Generation from Different Energy Sources

Zhou Jie Zhou Xiqiao

Abstract; The Life Cycle Assessment (LCA) is an international standard



technique to assess the environmental aspects and potential impacts associated with products and services, using quantitative and systematic approaches. It has become an important supporting tool for environmental management and product design on an international level, being included in the series of ISO14000 standards for environmental management. This paper, using the LCA technique, conducts data-based research in the environmental load caused by energy power generation in various ways. It demonstrates comparative analysis with selecting three indexes of emission, pollution and energy consumption from thermal power, renewable energy and nuclear power generation in various ways, and to define the range of the clean energy power generation using normalized environmental load ratio.

Key Words: Life Cycle Assessment; Clean Energy; Power Generation; Energy Saving and Emission Reduction; Environment Load