

文章编号:1000-582X(2011)11-133-08

光伏发电系统的碳值分析

张改景^a, 龙惟定^b, 苑翔^a

(同济大学 a. 机械工程学院, 上海 201804; b. 中德工程学院, 上海 200092)

摘要:基于能值分析理论和碳足迹分析法,提出了碳值的概念,以此为基础建立了可再生能源利用系统的碳值分析方法,并建立相关系统分析模型和评价指标如 CO₂ 回收期、产出投入能值率、CO₂ 减排能值转换率,这些指标可以全面的评价可再生能源利用系统在节能和减排方面的能力,并应用此方法对光伏发电系统的节能减碳能力进行了分析评价,并对中国的太阳能资源光伏利用潜力进行了初步的评价。

关键词:可再生能源;碳值;碳值分析;光伏发电系统

中图分类号:TK01+8

文献标志码:A

Embodied-carbon analysis of renewable energy utilization system

ZHANG Gai-jing^a, LONG Wei-ding^b, YUAN Xiang^a

(a. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China;

b. Sino-German School of Applied Sciences, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: Based on the energy analysis theory and carbon footprint analysis, it presents the concept of embodied-carbon and sets up the relevant systematical analysis method and assessment indexes such as CO₂ payback period, benefit-cost ratio, CO₂ emissions reduction transformity to assess the renewable energy utilization system. These indicators can be a comprehensive evaluation of the utilization of renewable energy in the energy saving and CO₂ emission reduction. It analyzes and evaluates photovoltaic power generation system by using the embodied-carbon analysis method and evaluates the potential of solar energy utilization in China.

Key words: renewable energy; embodied-carbon; embodied-carbon analysis; photovoltaic power generation system

全球气候变化是 21 世纪人类面临的最复杂的挑战之一。减缓气候变化的措施之一是减少温室气体的排放,目前国际上主要有 3 种 CO₂ 减排技术:一是提高能源利用率和转换率,节约用能,如 IGCC、NGCC 等新型发电技术;二是采用燃料替代,大力发展低碳的化石燃料、核能、可再生能源和新能源;三是从化石能源的利用中分离和回收二氧化碳并加以封存^[1]。其中可再生能源作为节能和减排技术受到

越来越多的重视,因为可再生能源的资源潜力大、环境污染小、温室气体排放远低于一般的化石能源,甚至可以实现零排放。可再生能源的利用是通过先消耗能量、资源、货币、劳务等再提供能量的方式来运作的,从而获得额外的能量,这样,其中就会涉及可再生能源利用系统的经济投资回报率、目标系统的 CO₂ 预因为可再生能源的资源潜力大、环境污染小、温室气体排放远低于一般的化石能源,甚至可以实

收稿日期:2011-06-01

基金项目:中国建设部项目“低碳社区建设关键技术集成应用示范研究”(2009BAC62B03)

作者简介:张改景(1981-),女,同济大学博士研究生,主要从事低碳社区建筑能源规划方面的研究。

龙惟定(联系人),男,同济大学教授,博士生导师,(E-mail)weidinglong163@163.com。

现零排放。可再生能源的利用是通过先消耗能量、资源、货币、劳务等再提供能量的方式来运作的,从而获得额外的能量,这样,其中就会涉及可再生能源利用系统的经济投资回报率、目标系统的 CO₂ 预投入与后续减排的问题。并且随着产业规模的快速成长,这些问题是在发展可再生能源产业过程中必须关注的,确保其给人们生活和社会发展提供健康、低碳的能源保障^[2]。可再生能源具有能量密度低和地域分别不平衡性,但人们往往忽视了这些问题,为了寻求政绩、亮点或获得绿色建筑的认证,不顾资源条件,强推某些新技术(如光伏发电和地热热泵),将可再生能源“标签化”^[3],认为采用了某种可再生能源技术就可以实现节能和碳减排了。这种观点是错误的,因为任何技术,节能也好、减碳也好,都是相对的,需要有一种方法来评价某种技术在当地应用是不是合理的。但目前还没有比较全面的评价方法,笔者基于能值分析理论^[4-6]和碳足迹概念^[7,8],提出了一种可再生能源利用系统的碳值分析方法,主要用于评价可再生能源利用系统在节能减排方面的能力,并给出了可再生能源利用系统评价指标如 CO₂ 回收期、产出投入能值、CO₂ 减排能值转换率对其进行定量的评价。

1 碳值分析基本概念与方法

1.1 碳值的定义

碳值(embodied carbon)的定义为:资源、产品或劳务形成过程中直接或间接排放的温室气体,用 CO₂ 当量表示。如可再生能源系统在生产、安装和维护阶段需要投入大量的物质流、货币流、能量流和信息流,这些资源的获取直接或间接的向外排放 CO₂,以碳值为基准,可衡量和比较这些不同类别、不同等级的资源的潜在 CO₂ 含量。其计算方法为

$$G_{CO_2} = \sum_i R_i \times \eta_i, \quad (1)$$

式中: G_{CO_2} 为系统 CO₂ 排放量, g; R_i 为系统投入的第 i 种资源或产品或劳务的量, 单位为 g 或 J 或 \$; η_i 为第 i 种资源或产品或劳务的碳值转化系数, g/单位。

1.2 碳值转换系数

碳值转换系数是指每单位的资源、产品或劳务在形成过程中直接或间接排放的 CO₂ 量。其计算方法为

$$\eta_i = \frac{ECUP_i}{PECV} \times EF_{CO_2, PECV}, \quad (2)$$

式中: η_i 为碳值转换系数, g/单位; $ECUP_i$ 为第 i 种资源或产品或劳务的单位产量能耗(ECUP, Energy Consumption for Unit Production), J/单位; 或为第 i 种能源的热值, J/单位; $PECV$ 为一次能源热值(PECV, Primary Energy Calorific Value)(原油或标煤), J/单位; $EF_{CO_2, PECV}$ 为一次能源在完全燃烧下的 CO₂ 排放系数, g/单位。或

$$\eta_i = \frac{C_i}{EI_{CO_2}}, \quad (3)$$

式中: C_i 第 i 种资源或产品或劳务的成本, \$/单位; EI_{CO_2} (CO₂ Emission Intensity) 国家碳排放强度, g/\$。

1.3 碳值分析基本方法

以分析手段和步骤而言,碳值分析包括系统边界划定、数据准备、碳值分析表格制定、碳值指标评价。

1) 划定系统边界。包含目标可再生能源系统在生产、安装和维护阶段所需要投入的各种能量流及相应的承载物质流,以光伏发电系统为例,通过太阳能光伏电池板把太阳光辐射能转换成电能,若对该光伏发电系统进行碳值分析,则应包含光伏发电板原材料生产系统、光伏发电板组装系统和光伏发电系统安装和维护系统,如图 1 所示^[9]。

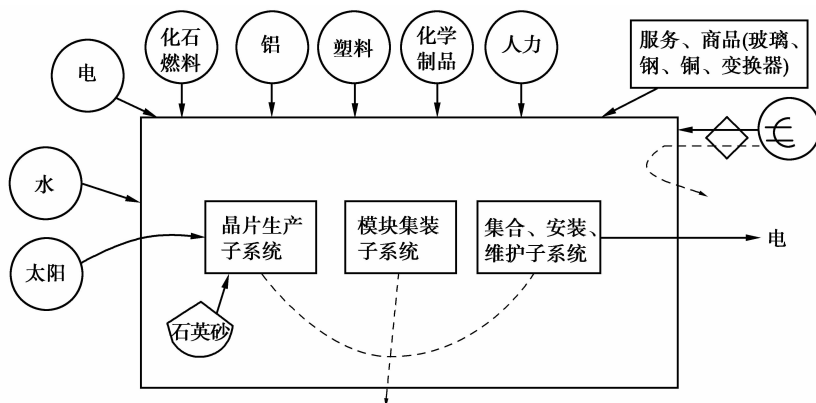


图 1 光伏发电系统的碳值分析

2)数据准备。通过调查可再生能源系统生产资料、相关文献,获得目标可再生能源系统的生产材料、安装方式、运行模式及相关资源、产品、劳务和能耗的技术参数。

3)碳值分析表。根据上述调研结果,编制出目标可再生能源系统的碳值流通系统表,碳值分析评估表一般有多种,但基本包括原始资源数据、碳值转换系数、碳值等题头。

4)碳值指标评价。选用可再生能源系统的 CO_2 回收期、 CO_2 减排能值转换率、产出投入能值等指标对可再生能源系统的减碳能力进行评价。

1.4 碳值分析评价指标的建立

在碳值分析的基础上,笔者提出了可再生能源系统的 4 个评价指标,主要有:系统的年 CO_2 减排量、 CO_2 回收期、 CO_2 减排能值转换率、产出投入能值。图 2 为部分碳值指标图解。

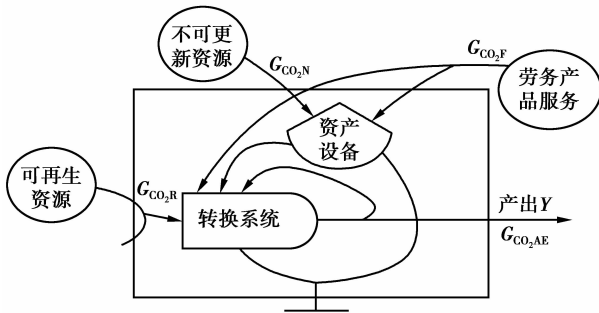


图 2 碳值指标图解

1.4.1 系统的年 CO_2 减排量

$$g_{\text{CO}_2} = \frac{G_{\text{CO}_2, \text{AE}}}{y} = Y \cdot \Delta\rho = Y \cdot (\rho_0 - \rho), \quad (4)$$

式中: g_{CO_2} 为系统的年 CO_2 减排量, g/a ; $G_{\text{CO}_2, \text{AE}}$ 为避免碳排放量, g ; y 为系统使用寿命周期; Y 为目标系统的平均年产值; $\Delta\rho$ 为目标系统的单位产值 CO_2 减排强度, g/单位 ; ρ_0 为具有相同终端产出的对比系统的单位产值 CO_2 排放强度, g/单位 ; ρ 为目标系统的单位产值 CO_2 排放强度, g/单位 , 其计算公式为:

$$\rho = \frac{G_{\text{CO}_2, \text{F}} + G_{\text{CO}_2, \text{N}} + G_{\text{CO}_2, \text{R}}}{Y}.$$

1.4.2 系统的年 CO_2 回收期

$$T_{\text{CO}_2} = \frac{G_{\text{CO}_2}}{g_{\text{CO}_2}} = \frac{G_{\text{CO}_2, \text{F}} + G_{\text{CO}_2, \text{N}} + G_{\text{CO}_2, \text{R}}}{g_{\text{CO}_2}}, \quad (5)$$

式中: T_{CO_2} 为系统的 CO_2 回收期, a ; G_{CO_2} 为系统总碳值, g , 指可再生能源利用系统在生产、安装、维护过程中人们消耗的资源、产品和劳务所引起的 CO_2 排放量, 即系统本身固有的 CO_2 排放量; $G_{\text{CO}_2, \text{F}}$ 为经济系统的反馈碳值; $G_{\text{CO}_2, \text{N}}$ 为不可更新资源的碳值;

$G_{\text{CO}_2, \text{R}}$ 为可再生资源的碳值, 如水资源本来可认为是可再生的资源, 但很多时候是需要经过处理后才可应用, 此时它就具有了碳值。该指标可以定量评价目标系统的 CO_2 减排能力及其合理性, 如果目标系统的 CO_2 回收期小于部门规定的标准回收期, 则该目标系统可以接受用作 CO_2 减排措施, 否则认为该目标系统用于 CO_2 减排是不可取的。

1.4.3 系统的 CO_2 减排能值转换率

$$Tr_{\text{CO}_2} = \frac{E_m}{L_c \cdot g_{\text{CO}_2}}, \quad (6)$$

式中: Tr_{CO_2} 为 CO_2 减排能值转换率, sej/g ; E_m 为系统的投入能值, sej , 该值可以衡量包括人类劳动在内的, 来自于自然和经济领域的所有资源的价值; L_c 为系统的寿命周期, a 。该指标衡量系统减少单位 CO_2 量而需要的能值投入, 该值越大表明系统用于 CO_2 减排投入的能值越大, 给生态环境和人类经济活动带来很大的压力。

1.4.4 系统的产出投入能值率

$$\text{IOER} = \frac{\text{OE}}{\text{IE}}, \quad (7)$$

式中:IOER(Input-Output Emery Ratio)为系统的产出投入能值率;IE 为系统的投入能值;OE 为系统的产出能值, 也即主要收益, 主要包括 2 部分:直接受益(产热或产电)和由 CO_2 减排而带来的间接收益(可以按碳交易价格计算), 其计算公式为 $\text{OE} = \text{系统收益货币价值} \times (\text{能值/货币比率})$ 。该指标从能值的角度综合考虑了系统的投入产出情况, 通过比较投入产出能值率, 可以更好地了解某一系统是否具有竞争力及其经济效益。同时可以比较不同系统的优劣性, 如果某系统的产出投入能值率远低于其他能源, 开发利用这样系统的所消耗的能量和资金都高, 那么这种系统便尚无开发利用的竞争力, 没有利用的必要。

2 光伏发电系统的碳值分析

2.1 光伏发电系统的基本参数

利用参考文献[9]中给出的数据来进行案例分析, 该光伏发电系统的基本信息如下。

1)PV 板的主要特性。集热板型号为 BP solar BP585F;集热器材料为单晶硅;标称峰值功率 P_{max} 为 85 W; P_{max} 保证功率 80 W;最大功率下的电压 18 V;最大功率下的电流 4.72 A;开路输出电压 22.30 V;开路输出电流 5 A;晶体电池数 36;尺寸长 \times 宽 \times 高为 1 188.0 mm \times 530.0 mm \times 43.5 mm;质量 7.5 kg;帧面积 0.63 m^2 ;光敏感表面 0.52 m^2 ;寿命周期 20 a。

2)系统特性。组件数 215;总的覆盖面积为 136.5 m²;太阳辐射量 1 440 (kW·h)/(m²·a);斜坡和角度 30°,朝南;标称功率为在标准测试工况下的功率为 18.3 kW_p;太阳能光伏发电系统的综合效

率 8%(考虑了模块效率损失、逆变器转换损失、运行和维护损失);年发电量 1.56E+04 (kW·h)/a。该光伏发电系统的能值分析过程可以参考文献[9],该发电场的碳值分析如表 1 所示。

表 1 光伏发电系统的碳值分析

序号	项目	A	B	C	D	E	F	G
		单位光伏板的质量	单位	CO ₂ 转换系数 (g·单位 ⁻¹)	参考公式 ^①	CO ₂ 排量/g	单位光伏电板年 CO ₂ 排量/(g·a ⁻¹)	太阳光伏电站的年 CO ₂ 排量/(g·a ⁻¹)
0R	太阳能	6.58E+10	J	0		0	0	0
1N	硅砂	2.84E+03	g	2.77	[a]	7.86E+03	3.93E+02	8.45E+04
2F	焦炭	3.90E+02	g	2.19	[b]	8.54E+02	4.27E+01	9.18E+03
3F	木炭	7.20E+02	g	2.58	[c]	1.86E+03	9.29E+01	2.00E+04
4F	石墨	1.30E+02	g	1.61	[d]	2.09E+02	1.05E+01	2.25E+03
5(0.72R+0.28F)	木材 ^①	1.32E+03	g	4.39E-04	[e]	5.79E-01	2.90E-02	6.23E+00
6F	聚乙烯	6.36E-01	g	2.17	[f]	1.38E+00	6.90E-02	1.48E+01
7F	HCL	5.99E+02	g	0.16	[g]	9.58E+01	4.79E+00	1.03E+03
8F	NaOH	5.80E+00	g	2.62	[g]	1.52E+01	7.60E-01	1.63E+02
9F	H ₂ SO ₄	4.30E+00	g	0.19	[g]	8.00E-01	4.00E-02	8.60E+00
10F	POCL ₃	6.00E-02	g	2.81	[g]	1.69E-01	8.43E-03	1.81E+00
11F	HF	1.10E+00	g	2.48	[g]	2.73E+00	1.36E-01	2.93E+01
12F	四氟甲烷	7.00E-02	g	3.72	[g]	2.60E-01	1.30E-02	2.80E+00
13F	银/铝粉	6.00E-01	g	2.43	[h]	1.46E+00	7.29E-02	1.57E+01
14F	天然气	1.22E+08	J	5.66E-05	[i]	6.91E+03	3.45E+02	7.42E+04
15F	煤电	7.49E+08	J	3.08E-04	[j]	2.31E+05	1.15E+04	2.48E+06
小计 C ₁								2.67E+06
16F	铝	2.01E+03	g	4.48	[f]	9.00E+03	4.50E+02	9.68E+04
17F	玻璃	4.05E+03	g	0.055	[f]	2.23E+02	1.11E+01	2.39E+03
18F	EVA	5.38E+02	g	2.34	[k]	1.26E+03	6.29E+01	1.35E+04
19F	tedlar 薄膜	6.14E+01	g	2.05	[l]	1.26E+02	6.29E+00	1.35E+03
20F	钢	1.57E+04	g	1.85	[f]	2.90E+04	1.45E+03	3.12E+05
21F	铜	2.52E+01	g	1.94	[f]	4.89E+01	2.44E+00	5.26E+02
22F	塑料	2.52E+01	g	2.22	[f]	5.59E+01	2.80E+00	6.01E+02
23(0.6R+0.4F)	人力 ^②	1.36E+06	J	0.00E+00		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
小计 C ₂								4.27E+05
24F	燃料(柴油)	6.80E+06	J	7.16E-05	[m]	4.87E+02	2.43E+01	5.23E+03
25F	逆变器	4.77E+02	RMB	414.28	[n]	1.98E+05	9.88E+03	2.12E+06
26F	维护成本	4.18E+02	RMB	414.28	[n]	1.73E+05	8.66E+03	1.86E+06
27(0.6R+0.4F)	人力 ^②	5.40E+05	J	0.00E+00		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
28F	可行性研究	1.08E+01	RMB	414.28	[n]	4.47E+03	2.24E+02	4.81E+04
小计 C ₃								4.04E+06
总计 C ₁ +C ₂ +C ₃								7.14E+06

说明:R 为可再生资源,N 为自然投入,F 为人类经济社会反馈的不可更新资源;A 列给出了生产、组装和安装一个太阳能光伏板所需要的材料和能源;E 列数据等于 A 列乘以 C 列(E=A×C);F 列数据为生产、组装和安装一个太阳能光伏板每年所排放的 CO₂ 量(F=E/20);G 列数据为生产、组装和安装整个光伏发电场每年所排放的 CO₂ 量(G=F×215)。①认为木材是由 72%的可再生资源加 28%人工投入组成的;②人力其实也有碳值,其中 60%认为是可再生的,40%为不可再生资源,但很难界定一个人工在生产过程中产生多少碳排放,所以在此不予考虑。③具体计算方法见表 2。

表 2 D 列参考公式列表

编号	参考公式
[a]	从硅矿石制成冶金级硅的能耗为每克硅砂 36 000 J ^[10] ,每克原油的热值为 41 860 J,每克原油在完全燃烧下的 CO ₂ 排放量为 3.22 g ^[11] ,则硅砂的 CO ₂ 转换系数= $[(36\ 000\ \text{J/g})/(41\ 860\ \text{J/g})]\times 3.22\ \text{g/g}=2.77\ \text{g/g}$;
[b]	焦炭的 CO ₂ 转换系数= $[(\text{焦炭的热值})/(\text{原油热值})]\text{g/J}\times 3.22\ \text{g/g}=2.19\ \text{g/J}$;
[c]	木炭的 CO ₂ 转换系数= $[(\text{木炭的热值})/(\text{原油热值})]\text{g/J}\times 3.22\ \text{g/g}=2.58\ \text{g/J}$;
[d]	根据文献[12]给定的石墨产品可比能耗等级为国家一级,从矿山采剥到高碳石墨生产一吨石墨所需要的能耗为 1 164.85 kg 标准煤,即生产石墨的能耗为 34 070 J/g,结合式(2)计算得出;
[e]	来自文献[13];
[f]	根据文献[14]给出的聚乙烯、铝、钢、铜、玻璃、塑料的单位产量能耗,结合式(2)计算得出;
[g]	HCL、NaOH、H ₂ SO ₄ 、POCL ₃ 、HF、四氟甲烷的 CO ₂ 转换系数= $[\text{产品价格}(\$/\text{g})]\times [2\ 900(\text{g}/\$)]$,2 900 g/\$ 为中国 2004 年 CO ₂ 排放强度 ^[14] ;
[h]	根据文献[14]铝的 CO ₂ 转换系数为 4.48 g/g;1 t 银的能耗为标煤 0.149 5 t,银的 CO ₂ 转换系数为 0.37 g/g,按 2 者 1:1 的比例混合,则银/铝粉的碳值转换率为 2.43 g/g;
[i]	http://www.egas.cn/lwen/ljshu/200904/2420_4.html ;
[j]	此处的电为煤电,其煤电的 CO ₂ 转换系数为 2.77E-04 g/J;
[k]	EVA 胶膜的 CO ₂ 转换系数为 2.34 g/g ^[15] ;
[l]	Tedlar 聚氟乙烯(PVF)的 CO ₂ 转换系数 2.05 g/g ^[15] ;
[m]	柴油的 CO ₂ 转换率为 7.16E-05 g/J;
[n]	采用中国 2004 年单位 GDP 的 CO ₂ 排放强度 ^[14] ;

2.2 结果

2.2.1 光伏发电系统的 CO₂ 回收期和 CO₂ 减排能值转换率

由表 1 给出的光伏发电系统的碳值分析和文献[9]的能值分析,可以得到该光伏发电系统的年 CO₂ 减排量、CO₂ 回收期和 CO₂ 减排能值转换率,如表 3 所示。

表 3 基于能值分析的太阳光伏发电系统的碳足迹分析指标

项目	指标	数值
A	年发电量,J/a;或年产热量,J/a	5.62E+10
B	年能值投入,sej/a ^[1]	5.01E+15
C	能值转换率(B/A),sej/J	8.92E+04
D	年 CO ₂ 排放量,g/a	7.14E+06
E	寿命周期内 CO ₂ 排放量,g	1.42E+08
F	单位产能量的 CO ₂ 排放量(D/A),g/J	1.27E-04
G	单位产能的 CO ₂ 减排量(煤电-F ^①),g/J	1.81E-04
H	年 CO ₂ 减排量(G×A),g/a	1.02E+07
I	CO ₂ 回收期(E/H),a	13.3
J	CO ₂ 减排能值转换率(B/H),sej/g	4.91E+08

说明:①比较对象为煤电,其 CO₂ 排放系数为 3.08E-04 g/J^[4]

2.2.2 光伏发电系统的投入产出能值率

光伏发电系统的产出即收益主要由两部分组成,一部分为获得电量的直接收益,一部分为由于光伏发电减少 CO₂ 排放量而获得的间接受益,该案例的收益计算如表 4 所示。系统收益能值计算公式如式(8)所示:

$$\text{系统收益能值} = \text{收益货币价值} \times (\text{能值} / \text{货币率}) \quad (8)$$

该系统的收益为每年 13 281 元,中国的能值/货币率为 3.17E+11 sej/元^[5],则该系统的收益能值为 4.21E+15 sej/a。该系统的投入能值为 5.01E+15 sej/a,则该光伏发电系统的 BCER = (4.21E+15 sej/a)/(5.01E+15 sej/a) = 0.84 < 1,表明该系统在当前的情况下是没有净能值产出的,但总体来看,光伏发电系统可以减缓能源的消耗。

2.2.3 光伏发电系统 CO₂ 减排综合货币成本

光伏发电系统的 CO₂ 减排综合货币成本的计算公式为

$$\text{系统 CO}_2 \text{ 减排货币综合成本} = \frac{\text{系统的投入综合价值}}{\text{系统 CO}_2 \text{ 减排量}} \quad (9)$$

表 4 该光伏发电系统的收益计算

项目	计算公式	参数值	结果/(元·a ⁻¹)
直接收益	发电量(kW·h)× 电价(元/kW·h)	年发电量为 15 600(kW·h)/a 取电价为 0.8 元/(kW·h)	12 480
间接受益	CO ₂ 减排量(t)×CO ₂ 交易价格(元/t)	年 CO ₂ 减排量为 10.5 t CO ₂ 交易价格为 76.3 元/t ^[2]	801
总收益 B			13 281

系统投入的综合价值=系统投入能值/(能值/货币率),该系统的投入综合价值为 1.58E+04 元/a,系统的 CO₂ 减排量为 10.2 t/a,则该系统的 CO₂ 减排货币综合成本为 1 549 元/t。

在 CO₂ 减排交易价格不变的情况下,该光伏发电系统的发电的电价若定为 0.8 元/(kW·h)时,系统的投入产出能值率小于 1,但若光伏发电的电价定为 1 元/(kW·h)时,该系统的投入产出能值率为 1,可以满足收支平衡。这也说明在当前技术下,光伏发电技术是需要政府的资助和鼓励的。

3 中国太阳能资源光伏发电利用系统的碳值分析

中国太阳能资源丰富区或较丰富的地区,面积较大,约占全面面积的 2/3 以上,具有利用太阳能的良好条件^[16],但由于纬度的不同、气候条件的差异造成了太阳能辐射的不均匀,且由于光伏发电系统自身的技术条件限制,使光伏发电系统的综合效率

比较低,因此在利用光伏发电系统发电和 CO₂ 减排时,要对当地的太阳能资源的可用性和光伏发电系统的 CO₂ 减排性能进行评价,因此结合中国太阳能资源分布区和可预见的几种系统综合效率,对本案例中给出的光伏发电系统进行碳值分析,其分析结果如表 5 和图 3-6 所示。

由表 5 可以看出:

1)当系统效率为 8%,且当地的太阳能辐照量位于 III₁ 和 III₂ 区域时,该系统的产出投入能值率小于 1;同时当系统效率为 10%,且当地太阳能辐照量位于 III₂ 区域时,该系统的产出投入能值率也小于 1;这表明投入生产的能值大于产出能值,得不偿失。

2)当系统效率为 8%,当地太阳能辐照量为 4 200 MJ/(m²·a),该系统的 CO₂ 回收期为 20.4 a,大于该光伏发电系统的寿命周期,因此,此时该光伏发电系统是不具有 CO₂ 减排效应的。

表 5 太阳能光伏发电系统的 CO₂ 减排指标

系统效率	水平面上年太阳辐照量/(MJ·m ⁻² ·a ⁻¹)	CO ₂ 减排能值转换率/(sej·g ⁻¹)	CO ₂ 减排综合货币成本/(元·g ⁻¹)	产出投入能值率	CO ₂ 回收期/a
8%	I	2.37E+08	7.48E-04	1.39	6.8
	II	3.25E+08	1.03E-03	1.10	9.3
	III ₁	4.55E+08	1.43E-03	0.88	12.9
	III ₂	5.18E+08	1.63E-03	0.81	14.7
	III ₂	7.17E+08	2.26E-03	0.68	20.4
10%	I	1.78E+08	5.61E-04	1.75	5.1
	II	2.38E+08	7.51E-04	1.39	6.8
	III ₁	3.22E+08	1.01E-03	1.11	9.2
	III ₁	3.61E+08	1.14E-03	1.03	10.3
	III ₂	4.76E+08	1.50E-03	0.86	13.6

续表

系统效率	水平面上年太阳辐射量/(MJ·m ⁻² ·a ⁻¹)	CO ₂ 减排能值转换率/(sej·g ⁻¹)	CO ₂ 减排综合货币成本/(元·g ⁻¹)	产出投入能值率	CO ₂ 回收期/a	
12%	I	8 400	1.41E+08	4.45E-04	2.11	4.0
	II	6 700	1.88E+08	5.93E-04	1.67	5.4
	III ₁	5 400	2.49E+08	7.86E-04	1.34	7.1
	III ₂	5 000	2.77E+08	8.74E-04	1.24	7.9
	III ₂	4 200	3.57E+08	1.12E-03	1.04	10.2
14%	I	8 400	1.18E+08	3.71E-04	2.46	3.4
	II	6 700	1.55E+08	4.89E-04	1.96	4.4
	III ₁	5 400	2.03E+08	6.41E-04	1.57	5.8
	III ₂	5 000	2.25E+08	7.09E-04	1.45	6.4
	III ₂	4 200	2.85E+08	8.99E-04	1.21	8.1
16%	I	8 400	1.01E+08	3.18E-04	2.82	2.9
	II	6 700	1.32E+08	4.17E-04	2.24	3.8
	III ₁	5 400	1.72E+08	5.41E-04	1.80	4.9
	III ₂	5 000	1.89E+08	5.96E-04	1.66	5.4
	III ₂	4 200	2.37E+08	7.48E-04	1.39	6.8

说明: I 资源丰富区,水平面上年太阳辐射量 6700~8400 MJ/(m²·a),年日照时数为 3 200~3 300 h; II 资源较丰富区,水平面上年太阳辐射量为 5 400~6 700 MJ/(m²·a),年日照时数为 3 000~3 200 h; III₁ 资源一般区,水平面上年太阳辐射量为 5 000~5 400 MJ/(m²·a),年日照时数为 2 200~3 000 h; III₂ 资源一般区,水平面上年太阳辐射量为 4 200~5 000 MJ/(m²·a),年日照时数为 1 400~2 200。

3)可以通过产出能值率来比较处于不同区域的两个不同效率的太阳能光伏发电系统,例如比较当地太阳辐射量为 8 400 MJ/(m²·a)、系统效率为 12%和当地太阳辐射量为 6 700 MJ/(m²·a)、系统效率为 16% 2 种光伏发电系统方案时,前者的产出能值率为 2.11,后者的产出能值率为 2.24,因此后方案比前方案具有竞争力和经济效益。

由图 3-6 可以得出以下结论:

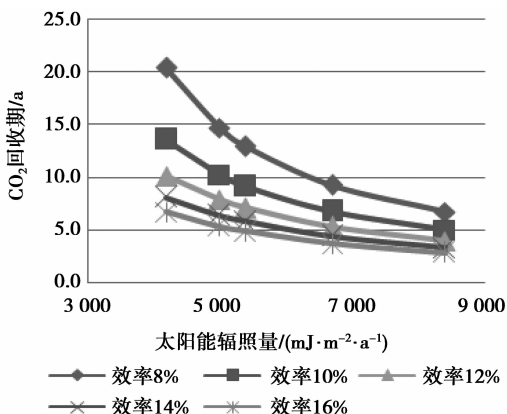


图 3 系统 CO₂ 回收期与太阳辐射量的关系

1)由图 3 可知,对于某一光伏发电系统,当系统综合效率一定的情况下,系统 CO₂ 回收期随着太阳

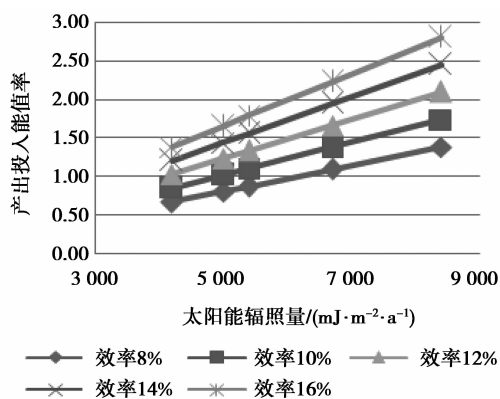


图 4 系统产出投入能值率与太阳辐射量的关系

能辐射量的增加而减少;当太阳辐射量一定的情况下,系统 CO₂ 回收期随着系统综合效率的增加而减少,但回收期的减少量随着系统的增加而减少,可以预知当系统的综合效率增加某一特定值时,系统的 CO₂ 的回收期主要取决于系统的 CO₂ 预投入。

2)由图 4 可知,当系统效率一定时,产出投入能值率随太阳辅助量的增加而增大,当太阳辐射量一定时,系统产出投入能值率随系统效率的增大而增大;当系统效率≥12%时,该方案在中国 4 个太阳能分布区内的投入能值率都大于 1,最大值为 2.82。

3)由图 5、6 可知,CO₂ 减排能值转换率和 CO₂

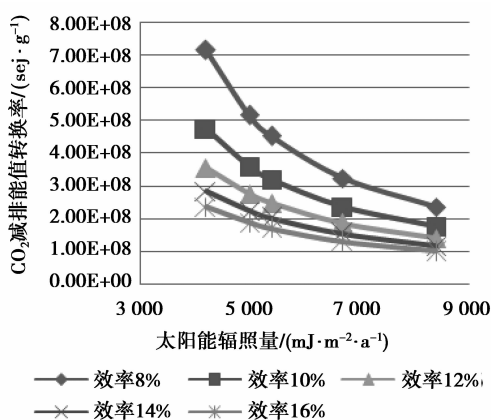


图5 不同系统效率下 CO₂ 减排能值转换率与太阳能辐照量的关系

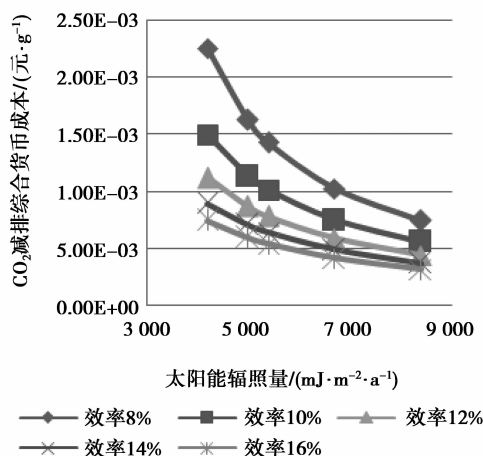


图6 不同系统效率下 CO₂ 减排综合货币价值与太阳能辐照量的关系

减排综合货币成本随着光伏发电系统的效率的提升而降低,随着水平面太阳辐射量的增加而降低,且变化趋势趋于平滑,即当系统效率增加到一定程度时,太阳辐照量成为影响系统 CO₂ 减排能值转换率和 CO₂ 减排综合成本的主要因素,也即随着太阳辐照量的增加系统效率对这 2 个指标的影响作用越小。

4 结 语

提出了碳值的概念,即资源、产品或劳务形成过程中直接或间接排放的温室气体的数量,称为该资源、产品或劳务的碳值。构建了系统的碳值分析法,并给出了可再生能源利用系统的评价指标如 CO₂ 回收期、产出投入能值率、CO₂ 减排能值转换率,这些指标可以定量的评价可再生能源系统节能和减排能力,为因地制宜地发展可再生能源提供决策。同时,以光伏发电系统为案例,详细地介绍了碳值分析的实际应用,利用碳值分析法对中国各个太阳能资源分布区内光伏发电系统进行了评价,给出量化的

计算结果,用于指导光伏发电系统的方案确定。

参考文献:

- [1] 龙惟定,白玮,梁浩,等. 低碳城市的能源系统[J]. 暖通空调, 2009, 39(8):79-84.
LONG WEI-DING, BAI WEI, LIANG HAO, et al. Energy system in low-carbon city[J]. HV&AC, 2009, 39(8):79-84.
- [2] 郑天航. 光伏产业的能耗、投资经济性及其社会效益分析[J]. 上海电力, 2006, 19(4):348-354.
ZHENG TIAN-HAN. Analysis of energy consumption, investment economy and social benefits of photovoltaic industry [J]. Shanghai Electric Power, 2006, 19(4): 348- 354.
- [3] 龙惟定. 试论建筑节能的科学发展观[J]. 建筑科学, 2007, 23(2):15-21.
LONG WEI-DING. On scientific approach to development of building energy efficiency in China[J]. Building Science, 2007, 32(2):15-21.
- [4] ODUM H T. Self-organization, transformity and information [J]. Science, 1988, 242 (4882): 1132-1139.
- [5] ODUM H T. Environmental Accounting: Energy and Environmental Decision Making[M]. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [6] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [7] 维基百科网. 碳足迹[EB/OL]. [2010-09-27]. http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_footprint.
- [8] JOHNSON E, HEINEN R. Carbon footprints of biofuels and petro-fuels[J]. Industrial Biotechnology, 2008, 4(3): 257-261.
- [9] PAOLI C, VASSALLO P, FABIANO M. Solar power: an approach to transformity evaluation [J]. Ecological Engineering, 2008, 34(3):191-206.
- [10] 李仲明. 太阳能光伏发电可能成为未来主体能源. Newton 科学世界 [J/OL]. [2010-09-27]. <http://www.kxsj.com/artshow.asp?id=1077>.
- [11] BROWN M T, ULGIATI S. Energy evaluation and environmental loading of electricity production systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2002, 10(4): 321-334.
- [12] JC 524-1993《石墨产品能耗等级定额》[S]. 北京: 中国标准出版社出版, 国家建筑材料工业局. 1994.
- [13] IEA. Renewable for Heating and Cooling[M/OL]. s. n.: IEA, 2007 [2010-09-27]. http://www.iea.org/Textbase/npsum/Renewables_Heating_Cooling07SUM.pdf.
- [14] 魏一鸣, 刘兰翠, 范英, 等. 中国能源报告(2008): 碳排放研究[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [15] SARK W G J H M VAN, REICH N H, ALSEMA E A, et al. CO₂ emission of PV in the perspective of a renewable energy economy[C] // Proceedings of 22nd European Photovoltaic solar energy conference, September 3-7 september 2007, Milan, Italy. [s. l.]: WIP-Renewable Energies, 2007: 3538-3542.
- [16] 中国新能源网. 我国的太阳能资源[EB/OL]. (2003-08-22) [2010-09-27]. <http://www.newenergy.org.cn/html/0038/2003883.html>.