

沙漠戈壁光伏电厂的生态学意义

刘世增, 常兆丰, 朱淑娟, 韩福贵, 仲生年, 段小峰

(甘肃省治沙研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 光伏发电作为一种新兴的能源产业发展很快, 近些年来在我国西北沙漠、戈壁地区也建立了一批光伏发电厂。那么, 在沙漠、戈壁上建造光伏电厂有无生态学意义, 有何生态学意义呢? 文章运用河西走廊的气象资料和民勤沙区的光照观测资料以及植被观测资料, 对此作了探索性分析。结果表明, 1 m^2 的光伏电池板转换的太阳能相当于民勤沙区 260.75 m^2 沙漠植被利用的太阳能。我国沙漠、戈壁面积广大, 沙尘暴和风沙流发生频繁。沙漠、戈壁地区光照资源丰富, 在沙漠、戈壁上发展光伏产业, 不仅具有可观的经济效益, 而且具有显著的生态学意义: 一方面能有效调节地表的热力平衡, 防止和减少沙尘暴和风沙流, 光伏发电与防沙治沙相得益彰, 是一种经济产出和生态防护双赢的产业; 另一方面, 无需占用耕地和其他可用土地资源, 有利于保护国家的耕地“红线”。沙漠、戈壁地区也是多风的地区, 光伏发电厂辅之以风力发电均有利于转化、消耗沙漠、戈壁地区沙尘暴和风沙流的动力源, 由此减少沙尘暴和风沙流的发生。

关键词: 沙漠; 戈壁; 光伏电厂; 生态学意义; 河西走廊

中图分类号: X382; F062.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4407(2016)02-177-05

Ecological Significance of Photovoltaic Power Plants in the Desert and Gobi

LIU Shizeng, CHANG Zhaofeng, ZHU Shujuan, HAN Fugui, ZHONG Shengnian, DUAN Xiaofeng
(Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou Gansu 733000, China)

Abstract: Photovoltaic as an emerging energy industry has developed rapidly. A number of photovoltaic power plants in recent years in the desert and gobi area of northwest China's were established. So, the PV power plant in the desert and gobi construction whether the ecological significance of what ecological significance? This article made this exploratory analysis of the use of meteorological data of Hexi Corridor and light observations and vegetation observations Minqin desert area. The results showed that, the two are equal that the solar energy is converted by 1 m^2 of PV panels and the solar energy is utilized by 260.75 m^2 of desert plants, in Desert Area. Vast area of desert and gobi and dust storms and sand flow occurs frequently in China. Where the rich resources of light in the desert and gobi regions. Development of photovoltaic industry not only has considerable economic benefits, but also has significant ecological significance in the desert and gobi region. First, PV can regulate thermodynamic equilibrium on the surface. Prevent and reduce the sandstorm and sand flow. PV and sand prevention and control complement each other, and it is an industry of a win-win with economic output and ecological protection. On the other hand, without taking up arable land and other available resources, help protect the country's arable land "red line". Desert and gobi region is also windy areas. It is advantageous for the transformation and consumption of power sources of sandstorm and sand flow in the desert and gobi region and Thereby reducing the occurrence of sandstorm and sand flow by Photovoltaic power plants complemented by wind power.

Key words: desert; gobi; photovoltaic power plants; ecological significance; Hexi Corridor

光伏发电是根据光生伏特效应原理, 利用太阳能电池将太阳光能直接转化为电能的一种技术。1969年世界上第一座太阳能发电站在法国建成, 太阳能光伏发电技术和产业在全球迅速发展。

欧盟是世界上光伏发电量最大的地区。2008年欧盟光伏发电占到了全球光伏发电量的80%。而德国和西班牙的光伏发电总量占欧盟的84%。欧盟预计在2020年太阳能光伏发电占欧盟总发电量的12%。日本也是太阳能发电强国, 政府补贴支持家庭购买家用光伏发电装置, 家庭通过光伏发电装置产生的剩余电量可以卖给政府或电力公

司, 从而使得日本的光伏发电量不断提高^[1]。美国奥巴马政府出台了一系列鼓励发展新能源的政策, 扶持光伏发电产业, 不少州也出台了《可再生能源配额标准》, 以美国加州为例, 凡在住屋、商业建筑或公用建筑屋顶上安装太阳能设备的家庭或企业, 都可获得州政府的多项补助。

我国的光伏工业在20世纪80年代以前尚处于雏形, 太阳能电池的年产量一直徘徊在10 kW以下, 价格也很贵。20世纪80年代以后, 国家开始对光伏工业和光伏市场的发展给以支持, 中央和地方政府在光伏领域投入了一定的资金, 从而使得我国的太阳能电池工业得到了巩固并在许

基金项目: 国家973前期项目“绿洲边缘高大新月形沙丘稳定性研究”(2014CB460611)

作者简介: 刘世增(1963~), 男, 甘肃永昌人, 博士, 研究员, 硕士生导师, 甘肃省治沙研究所所长, 长期从事荒漠生态研究。

多应用领域建立了示范。同时,国内先后从国外引进了多条太阳能电池生产线。到2001年我国太阳能电池的生产能力已经达到6.5 MW。2007年国家发改委发布《可再生能源中长期发展规划》后。具体目标是,到2010年国内太阳能发电装机容量达到300 MW,2020年达到1800 MW。2009年12月30日,位于甘肃敦煌市郊的国投10 MW光伏电站顺利投产发电,标志着中国首批光伏并网发电特许权示范项目取得重要进展。截至2014年年底,河西走廊的武威、金昌、张掖、酒泉、嘉峪关5市已在沙漠、戈壁中建立了12个光伏产业园区,光伏发电装机容量达到了516.8万kW,位居全国第一^[2]。河西走廊由于光能和风能资源丰富,被誉为“陆地三峡”。

我国沙漠、戈壁面积广大,尤其是西北广大地区,沙尘暴频繁,风沙流活跃,防沙治沙的任务相当艰巨,我国每年由风沙危害所造成的经济损失达540亿人民币^[3],2012年11月1~3日一场强沙尘暴给吐鲁番地区造成经济损失5247万元。沙漠地区大面积土地闲置,光照资源丰富。干燥沙面的沙粒比热小,沙漠具有明显的增温效应^[4~5]。近年来,光伏产业重点向沙漠、戈壁地区发展,比如我国第一个光伏发电示范项目——甘肃敦煌10 MW光伏电站(2009年)、古浪县100万kW沙漠生态光伏电站(2013年)、保利协鑫宁夏庆阳100 MW荒漠光伏电站(2013年)、青海格尔木大型(200 MW)荒漠光伏电站、宁夏中卫市1500万kW沙漠光伏产业园等。

与光伏发电厂的生态功能相近的研究报道只有关于发展光伏发电厂有利于减少火电厂,亦即减少火电厂CO₂和粉尘排放的研究^[6]和沙漠地区光伏电站的防风固沙设计^[7]。国外也只有关于光伏电池的研究报道^[8~12]。到目前为止,国内外尚未见到有关光伏电站生态意义的任何研究报道,更没有关于沙漠、戈壁光伏电站生态意义的研究报道。

生物治沙即植物治沙的一个重要功能是植物能够通过光合作用和蒸腾作用吸收和消耗部分太阳辐射,因而能调节沙漠近地面的热力平衡。而光伏产业也能够转换太阳辐射,调节沙漠、戈壁的热力平衡。那么,沙漠、戈壁光伏产业对防沙治沙和防治沙尘暴有无生态学意义?有何生态学意义?本文对此作一初步探讨,以资讨论。

1 研究区域与方法

气象资料采用1961~2014年甘肃河西各地气象站数据和民勤治沙综合试验站地面气象场观测数据,河西走廊各气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网。光照强度和沙面光反射率以及植被调查样区为民勤西沙窝。太阳光照强度和沙面地被物的反射率观测采用SL-86LA照度计完成。

植被的调查方法:在民勤西沙窝设置了10个定位观测样方,其中2个白刺(*Nitraria tangutorum*)样方、2个麻黄(*Ephedra przewalskii*)样方、2个沙蒿(*Artemisia arenaria*)样方、2个梭梭(*Haloxylon ammodendron*)人工林样方、2个白刺+梭梭样方。样方设置年份为2002年,样方调查时间为每年的3、5、7、9、11月下旬,本文分析采用9月下旬的调查数据。荒漠植物比较稀疏,冠幅内空隙度相差很大。本文中盖度以植株冠幅面积占样地面积表示,投影盖度则是在植株冠幅面积内扣除了空隙,空隙度以目测法获得。

令 P_{λ} 为到达地面的太阳辐射入射总量, P_{α} 为地被物反射量, P_{β} 为地被物吸收量, P_{τ} 为地被物透射量,根据通量守恒定律,则

$$P_{\lambda} = P_{\alpha} + P_{\beta} + P_{\tau} \quad (1)$$

地被物的反射率 P_r 为

$$P_r = \frac{P_{\alpha}}{P_{\lambda}} \times 100\% \quad (2)$$

再令 η 为太阳能转换效率, V_m 为最大输出工作电压, I_m 为最大输出工作电流, P_m 为入射到太阳能电池的太阳光总功率,则

$$\eta = \frac{V_m \times I_m}{P_m} \quad (3)$$

2 沙漠戈壁发展光伏产业的有利条件

2.1 沙漠戈壁面积广阔



图1 中国北方沙漠、戈壁分布图

我国的沙漠集中分布在西北和内蒙古西部干旱地区(图1),据2009~2011年完成的第四次全国沙漠普查结果,截至2009年年底,我国荒漠化土地面积为 $263.62 \times 10^4 \text{ km}^2$,沙化土地面积为 $173.11 \times 10^4 \text{ km}^2$,分别占国土总面积的27.43%和18.03%^[8]。甘肃河西地区东、北、西三面依次被腾格里、巴丹吉林和库姆塔格三大沙漠包围,2013甘肃省荒漠化土地面积 $19.21 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全省国土总面积的45.12%,沙化土地面积 $11.92 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全省国土总面积的28%。河西走廊荒漠化土地 $3.584 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中流动沙丘 $1.011 \times 10^4 \text{ km}^2$,半流动沙丘 $1.006 \times 10^4 \text{ km}^2$,固定沙丘 $1.191 \times 10^4 \text{ km}^2$,潜在荒漠化土地 $0.376 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[9]。

戈壁也分布在干旱、半干旱地区，绵亘在中亚浩瀚的戈壁大地，跨越蒙古和中国广袤的空间，一般分布在降水量 200 mm 以下，往往与沙漠相伴分布。我国戈壁面积广阔，集中分布于北方温带暖温带区域，生态环境十分脆弱^[10]，主要分布在新疆、内蒙古、甘肃和宁夏等地，戈壁总面积为 $56.95 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全国面积的 13.36%，其中新疆戈壁面积最大，为 $29.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全国戈壁总面积的 51.45%^[11]。甘肃省戈壁面积 $8.55 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全国戈壁面积的 15.01%，主要分布在河西走廊西端^[4]。

2.2 丰富的太阳辐射

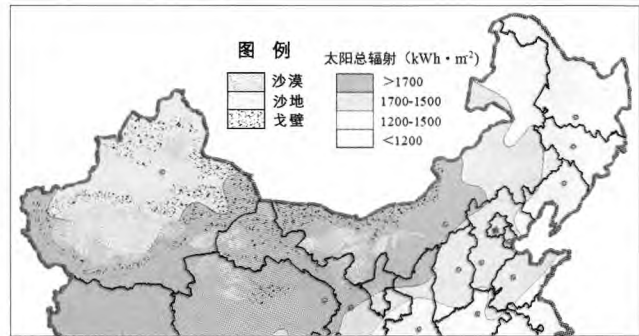


图2 中国北方太阳总辐射等值线图

我国太阳辐射的分布状况是西北高、东南低，新疆的北部和甘肃、青海、西藏、宁夏的大部以及内蒙古中西部地区太阳辐射属全国最高区域，太阳辐射 $> 1700 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ ，亦即我国的沙漠除古尔班通古特沙漠和塔克拉玛干沙漠的部分位于太阳辐射量为 $1500 \sim 1700 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ 的区域之外，其他沙漠均位于太阳辐射 $> 1700 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ 的区域(图 2)。

甘肃是中国太阳能最为丰富的三大区域之一，各地年太阳总辐射值大约为 $4800 \sim 6400 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ，其中河西西部、甘南西南部是中国太阳能资源最丰富的地区，若按现有利用水平测算可开发资源量约折合标准煤为 $520 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[12]。甘肃河西地区日照丰富，河西走廊多年平均日照时数为 $3000.2 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ ，其中走廊中、西部地区的日照时数 $> 3000 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ ，多年平均太阳辐射多在 $1700 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上，走廊西部玉门日照时数高达 $3267.6 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ ，太阳辐射高达

表1 甘肃河西各地太阳辐射

气象站	武威			金昌		张掖			酒泉				嘉峪关
	古浪	武威	民勤	天生坑	永昌	张掖	临泽	高台	酒泉	玉门	瓜州	敦煌	
日照时数(h)	2628.9	2945.3	3028.4	2933.3	2884.2	3085.1	3051.1	3088.3	3033.4	3267.6	3260.0	3247.1	3000.2
平均太阳辐射(kWh·m ⁻²)	1487.6	1778.2	1634.1	1608.5	1600.4	1746.8	1707.3	1734.0	1718.9	1789.8	1761.9	1752.6	1692.2

表2 甘肃河西各地的风速分布

气象站	武威			金昌		张掖			酒泉				嘉峪关
	古浪	武威	民勤	永昌	张掖	临泽	高台	酒泉	玉门	瓜州	敦煌	嘉峪关	
平均风速(m·s ⁻¹)	3.5	2.0	2.8	3.2	2.2	2.5	2.5	2.4	4.2	3.7	2.2	4.0	
年≥8级风的日数(d)	4.5	15.9	27.8	18.3	14.9	21.7	9.1	17.0	42.0	68.5	15.4	17.0	

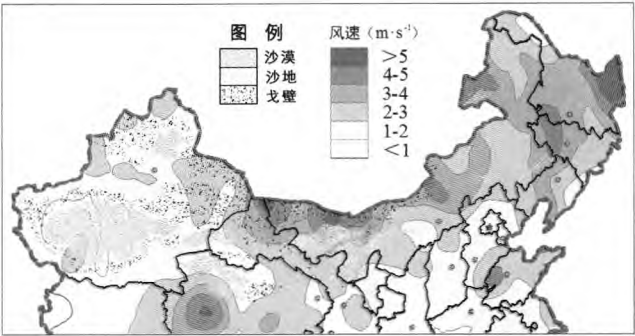


图3 中国北方年平均风速分布图

$1789.8 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ （表 1）。

2.3 风能资源丰富可作为补充

我国的风能资源也十分丰富(图 3)，全国陆上 50 m 高度层年平均风功率密度大于等于 $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的风能资源理论储量约 $73 \times 10^8 \text{ kW}$ ，80 m 高度(风速达到 $6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的风能资源技术开发量 $91 \times 10^8 \text{ kW}$ ，我国陆上 50 m、70 m、100 m 高度层年平均风功率密度 $\geq 300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的风能资源技术开发量分别为 $20 \times 10^8 \text{ kW}$ 、 $26 \times 10^8 \text{ kW}$ 和 $34 \times 10^8 \text{ kW}$ 。我国陆上风能资源丰富区主要分布在东北、内蒙古、华北北部、甘肃酒泉和新疆北部，云贵高原、东南沿海为风能资源较丰富地区^[13]。

甘肃风能资源丰富，总储量为 $2.37 \times 10^8 \text{ kW}$ ，风力资源居全国第 5 位，可利用和季节性可利用区的面积为 $17.66 \times 10^4 \text{ km}^2$ （表 2），主要集中在河西走廊和省内部分山口地区，河西的瓜州素有“世界风库”之称。目前正在建设一个世界上最大的千万 kW 级的超大型风电基地^[13]。

3 沙漠光伏发电的生态作用

3.1 光伏发电有利于调节沙漠地区的热力平衡

民勤沙区的观测结果表明，灌木对太阳辐射的平均反射率为 9.2%，裸露沙面为 13.8%（表 3）。同一时刻、同一地点距离地被物表面同一高度的沙面上空气温明显高于灌木上空，如沙面上方 30 cm 高度较灌木同一高度平均气温高 4.85°C ，50 cm 高度较灌木同一高度平均气温高 3.14°C （表 4）。其原因是沙粒的比热容($0.9 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)很小，仅为水的比热(4.2×10^3

$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)的 1/4.7。我国的沙漠集中分布在西北地区 and 内蒙古中西部，大面积沙面裸露。导致沙尘暴发生的梯度风的原因有许多，但沙面的热力不均衡是其中一个重要原因。每年春季气温回升时，沙面将大量的太阳辐射

反射到近地面空气中，因而沙漠地区气温回升早。沙漠地区的空气受热膨胀，向上运行，气压降低，与每年春季向四周扩散的西伯利亚高压冷空气形成明显的气压梯度，气压梯度越大，风速就越大。大风掠过干燥裸露的沙面时，吹起沙尘，形成沙尘暴或风沙流^[14]。裸露干燥的沙漠沙粒是沙尘暴和风沙流的物质源，大风是沙尘暴的动力源，而近地层空气的热力不均衡则是风的动力源，亦即沙尘暴和风沙流的动力源。

光伏发电厂是通过接收太阳能并将太阳能转换为电能从而实现光电转换的。目前，实验室的光电转换率 $\eta=24\%$ ，而产业化的 $\eta=15\%$ ^[15]，有资料称，中节能太阳能与应用材料合作实现了18.32%的太阳能电池转换效率^[16]，Innovalight 硅墨太阳能电池转换效率可达19%^[17]，结晶硅型太阳能电池的转换效率可提高至25%以上^[18]。就以产业化的 $\eta=15\%$ 计算，光伏发电对消耗沙漠地区多余的太阳辐射也是显著的。这个转换率远远大于长白山自然保护区春、夏、秋、冬四个季节植被的光能利用率0.551%、2.680%、0.551%和0.047%，是植被年光能利用率1.075%的13.95倍^[19]。

表3 沙面不同地被物的反射率

地被物	日照强度 (10 ³ Lux)	垂直反 射 (10 ³ Lux)	法线反 射 (10 ³ Lux)	平均反 射率 (%)	沙丘部位	重复 数
梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>	130.5	13.3	14.0	10.9	顶部、上 部	4
毛条 <i>Caragana korshinskii</i>	120.8	11.1	13.0	10.6	低平沙地	4
沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i>	141.0	11.3	12.7	8.5	中上部	3
白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	118.0	11.3	12.7	10.9	白刺包	3
花棒 <i>Hedysarum scoparium</i>	124.0	9.7	12.0	9.1	低平沙地	3
怪柳 <i>Tamarix ramosissima</i>	135.0	10.0	11.0	7.8	低平沙地	1
沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	135.0	7.0	8.0	5.6	低平沙地	1
麻黄 <i>Ephedra przewalskii</i>	117.0	11.0	13.0	10.3	低平沙地	1
裸露沙面	130.5	16.1	19.2	13.7	顶部、腰 部	6
小麦	138.0	5.0	5.0	3.6	苗高15cm	1
耕地	78.0	10.0	11.0	13.5	耕作地	1
地膜	138.0	14.0	17.0	11.2	耕作地	1

3.2 光伏发电与荒漠植物光能利用的比较

植物一般是通过光合和蒸腾两种方式来调节气温的。长白山自然保护区森林茂密，投影盖度接近100%，而沙漠地区植被一般都很稀疏，且冠幅内枝条稀疏，如民勤西

表4 同一时刻沙面不同地被物的热效应

地被物	叶面或 沙面温 度(℃)	上空气温(℃)					重复 数
		30 cm	50 cm	100 cm	150 cm	200 cm	
梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>	30.1	31.1	31.8				4
沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i>	32.7	32.0	32.0				4
花棒 <i>Hedysarum scoparium</i>	31.5	33.0	33.8				4
怪柳 <i>Tamarix ramosissima</i>	30.4	35.3	35.7				4
白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	34.4	34.0	34.0				4
裸露沙面	51.0	37.5	36.6	34.6	32.2	31.2	4
麦草沙障	41.7	33.8	33.0				4
干粘土	41.3	40.0	39.2	34.4			4

沙窝绿洲边缘封育区，白刺群落的植被投影盖度6.11%，沙蒿的植被投影盖度5.16%，麻黄的植被投影盖度5.26%，人工梭梭林的植被投影盖度3.96%，人工梭梭+白刺的植被投影盖度6.30%，植被平均盖度为13.69%，而平均投影盖度仅为5.36%（图4）。由此计算得1m²的光伏电池板所转换的太阳能相当于260.75m²荒漠植被的太阳能利用量。

沙漠地区降水稀少，0~5cm一般是干沙层（含水率不足0.5%），0~30cm的沙层含水率在1%左右（一般<2%），这是其一。其二，沙漠、戈壁上生长的植物自身还有许多适应干旱的特征，如沙拐枣（*Calligonum mongolicum*），水平根系可达株高的60倍以上；怪柳（*Tamarix ramosissima*）、红砂（*Reaumuria songarica*）等的叶片退化为鳞片状，梭梭、麻黄的叶片退化为短枝状；毛条（*Caragana korshinskii*）、白刺等叶面被有绒毛或蜡质层等；还有一些植物到了夏季午后高温时常常关闭气孔，以减少蒸发，适应干旱。因而植物的蒸腾耗水量很小^[14]。

3.3 光伏电池板的沙障作用

太阳能电池板安装的倾斜角度和偏转角度在不同地区是不同的，纬度较高地区的倾斜角度较大，偏转角度一般是向南略偏西^[20]。我国西北沙漠地区一般都有明显的主风向，如民勤沙区的主风向为西北风（NW）。显然，光伏电池及其支架在防沙固沙方面还具有一定的沙障的作用。

4 结论与讨论

（1）我国沙漠、戈壁面积广大，且分布在光照资源丰富的西北地区，假如按照2002年以前的低标准（即100kWh⁻¹·m⁻²，年运行1400h）计算，则10×10⁴km²的沙漠折算装机功率为1785.2GW，相当于120多座三峡电站年发电量^[21]，而10×10⁴km²的沙漠仅占全国荒漠化土地面积和沙漠化土地面积的1/26和1/17，仅为甘肃省荒漠化土地面积1/2，尚小于甘肃省的沙漠化土地面积。由此可见，

在沙漠、戈壁上发展光伏产业，不仅可观的经济效益，而且具有显著的生态学意义：一方面能有效调节地表的热力平衡，防止和减少沙尘暴和风沙流，光伏发电与防沙治沙相得益彰，是一种经济产出和生态防护双赢的产业。另一方面，无需占用耕地和其他可用土地资源，有利于保护国家的耕地“红线”，一举多得。

(2)光电转换率低、成本高是光伏产业发展的“瓶颈问题”^[22]。然而，光伏产业正处在成长期，光伏产业近些年来发展迅猛。前述已知，中节能太阳能与应用材料合作实现了18.32%的太阳电池转换效率^[16]，Innovalight 硅墨太阳能电池转换效率可达19%^[17]，结晶硅型太阳能电池的转换效率可提高至25%以上^[18]，德国Fraunhofer研究所太阳能电池转换效率达到了41.1%^[23]，夏普公司太阳能电池片的转换效率达44.4%居世界最高位^[24]。光伏产业保持每年40%~50%的增长，世界光伏市场呈现出10倍速的增长速率^[25]，相信光电转换率低的“瓶颈问题”必将逐步解决。去过半个多世纪以来，我们一直沿用植物治沙和沙障压沙，治沙技术方面难有什么重大创新，而沙漠光伏发电将成为防沙治沙的一条崭新途径。

(3)由于地表热力的不平衡，沙漠、戈壁地区也是多风的地区。光伏发电厂辅之以风力发电，就可以相得益彰，既转化沙漠、戈壁地区光能为电能，又转化沙漠戈壁地区的风能为电能，光伏电厂和风电厂均有利于转化、消耗沙漠、戈壁地区沙尘暴和风沙流的动力源，由此减少沙尘暴和风沙流的发生。同时，光伏电池板可产生小面积径流，集中沙漠、戈壁地区稀少的降水，增加降水入渗深度，据我们调查，光伏发电场的植物多样性增加。除此之外，光

表5 甘肃河西走廊各气象站的降水量

气象站	武威			金昌		张掖			酒泉				嘉峪关
	古浪	武威	民勤	永昌	金川区	张掖	临泽	高台	酒泉	玉门	瓜州	敦煌	
年平均降水(mm)	360.8	158.4	116.5	136.2	70.3	130.5	118.1	104.4	85.3	61.8	40.8	36.8	85.3

伏电池支架还具有类似沙障的挡风阻沙作用。

(4)已有的各种防沙治沙措施中，植物治沙是其中最理想的措施，然而，沙漠地区一般降水稀少，水资源缺乏，如河西走廊沙区年降水量只有几十毫米到一百毫米左右(表5)，不满足造林治沙对水分的需要，换言之，如此低的降水量只能供给很稀疏的植被存活，但如此低盖度的植被对防沙固沙的作用是相当有限的，而在沙漠、戈壁地区发展光伏产业可望成为未来防沙治沙的一条重要的新途径。

(5)国内外的沙漠光伏发电厂一般建造在平坦的沙荒滩地上，如美国亚利桑那州尤马县总装机量1.6 MW光伏电站，美国在智利沙漠建成南美最大的141 MW光伏电站等，一般不会造成大风沙尘暴的危害。对于防尘，国内一般采用定时清洗的办法。目前市场上的光伏支架和电池板边框换均为金属，而金属的比热容较高。建议今后生产并使用塑钢支架和边框。

(6)因沙丘就势设置，就可以不用推平沙丘，一方面可以减少推平沙丘的成本，另一方面防止推沙过程中的扬沙，保护沙漠地貌原状。但这方面还需要进一步探索。^[2]

参考文献:

- [1]刘卫平. 中国光伏产业如何脱困[N]. 华夏时报, 2012-11-02.
- [2]杨世智. 甘肃风电装机容量突破千万千瓦[N]. 甘肃农民报, 2015-01-13.
- [3]岳高伟, 蔺海晓, 常旭. 沙尘暴科学问题研究[M]. 济南: 山东人民出版社, 2009: 1~14.
- [4]常兆丰, 张德魁, 张剑挥, 等. 戈壁的生态效应——以甘肃西走廊为例[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 35.
- [5]张风华, 赖先齐, 潘旭东. 沙漠增温效应特征及绿洲农业热量资源分异规律的研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 751~754.
- [6]程蓓. 发展太阳能行业促进低碳经济[J]. 能源与环境, 2010(5): 26~28.
- [7]刘长春. 光伏电厂防风固沙绿化设计方案[J]. 现代农业科技, 2012(18): 191~192.
- [8]国家林业局. 中国荒漠化和沙化状况公报[N]. 中国绿色时报, 2011-01-05.
- [9]西部商报. 甘肃省土地荒漠化严重 已占全省面积45.12%[EB/OL]. (2013-06-17). <http://gansu.gscn.com.cn/system/2013/06/17/010373103.shtml>.
- [10]申元村, 王秀红, 丛日春, 等. 中国沙漠、戈壁生态地理区划研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 1~13.
- [11]张文静, 聂建江. 甘肃科考人员启程探索戈壁奥秘[EB/OL]. (2011-09/07). <http://news.xinhuanet.com/society/2011-09/07/>

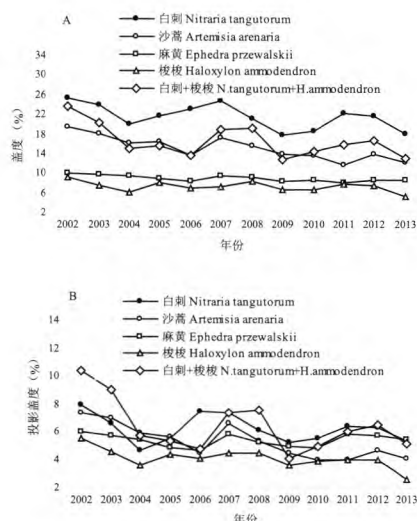


图4 2002~2013年民勤荒漠区5种植物群落的植被盖度的年际动态变化: A冠幅盖度cover; B投影盖度projection cover

(下转185页)

努力达到最大化,较之于分开招标的努力最大化条件放宽了。相应的,采取公私伙伴关系模式的可行空间为

$$(S_1(e_1) + S_2(e_1, e_2)) - (S_1(e_1) + S_2(e_1, e_2)) \geq 0.$$

进一步,考虑到经济收益还可能向公共部门返还一部分,因此需要考虑经济收益分成制的情况。假定私人企业分成比例为 β , $\beta \in [0, 1]$,则公共部门的比例为 $1-\beta$ 。容易验证,在这种情况下,有私人部门的努力程度下降。

3 结论及政策建议

本文研究发现,由于荒漠化防治中私人企业治沙努力存在一定的专用化,因此就治理过程比较复杂的荒漠化防治项目而言,发展公私伙伴关系可以提高工程绩效。如果采用项目收益来补偿私人企业的投入,上述结论依然成立,但是要考率到项目收益的市场风险以及政策风险。进一步,如果采取分成制在公私双方之间分割项目收益,公共部门的努力(如执法、病虫害防治、防治资金兑现等)也会对生态绩效的提高起到积极的作用。就规避政策风险而言,以土地换生态的做法具有一定的可行性。

基于以上分析,本文提出如下政策建议:

第一,在生态位重要、治理难度大、面积较大的荒漠化治理项目中,积极引入公私伙伴关系。要选择具备荒漠化防治资质的私人企业,通过合同关系明确生态治理的目标,约束双方之间的权利义务,形成公私双方之间合作的机制。

第二,建立专项资金,实行生态购买。对既有的荒漠化防治项目,需要利用专项资金按照合同规定来兑现私人企业的治理成果。对新的荒漠化防治项目,在项目设计之

初,就应考虑到财政资金兑现的方案。

第三,继续探讨“以土地换生态”的做法。在财政配套改革难以及时到位的情况下,以土地换生态的做法为荒漠化防治中私人企业的财务可持续提供了保障。但是,需要对项目收益与相应的生态投入进行测算,保证私人企业经营可持续的同时,保证私人企业残次林改造、林木补植、病虫害防治等资金投入的及时到位,实现生态的可持续。■

注:

①笔者倾向于选择里昂惕夫生产函数,将技术、资金、劳动的比例关系作为比较符合现实的选择。

参考文献:

- [1] Mu R, Jong M D, Koppenjan J. The rise and fall of public-private partnerships in China: A path-dependent approach [J]. Journal of Transport Geography, 2011, 19(4): 794-806.
- [2] 樊胜岳, 高新才. 中国荒漠化治理的模式与制度创新[J]. 中国社会科学, 2000 (6): 37~44.
- [3] 谢丽霜. 论西部荒漠化治理中的企业参与——以宁夏为例的分析[J]. 中央民族大学学报(哲学社会科学版), 2002 (6): 47~51.
- [4] 杨立华, 杨爱华. 科技治理: 西北七县荒漠化防治的调查研究[J]. 中国软科学, 2011 (4): 130~136, 117.
- [5] Glasbergen P. Understanding partnerships for sustainable development analytically: The ladder of partnership activity as a methodological tool [J]. Environmental Policy and Governance, 2011, 21(1): 1-13.
- [6] 孙楠, 李洪远, 鞠美庭, 等. 应用PPP模式解决我国荒漠化问题探讨[J]. 中国水土保持, 2007 (4): 11~14.

(责任编辑: 张海艳)

(上接181页)

c_121998513.htm.

- [12] 中华人民共和国中央人民政府官网. 地理和自然状况[EB/OL]. (2012-04/06). http://www.gov.cn/test/2012-04/06/content_2107760.htm
- [13] 中国气象局风能太阳能资源评估中心. 中国风能资源的详查和评估[J]. 风能, 2011 (8): 26~30.
- [14] 常兆丰, 赵明. 民勤荒漠生态研究[M]. 兰州: 甘肃科技出版社, 2006: 50~62.
- [15] 莫伦伟. 双轴式太阳自动跟踪系统的研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2011.
- [16] 关楠, 薛梅. 中节能太阳能与应用材料合作实现18.32%的太阳能电池转换效率[J]. 太阳能, 2014 (2): 56.
- [17] Innovalight硅墨太阳能电池转换效率达19%[J]. 电子设计工程, 2010 (5): 116.
- [18] 结晶硅型太阳能电池的转换效率提高至25%以上[J]. 现代材料动态, 2009 (10): 19.

- [19] 张娜, 于贵瑞, 于振良, 等. 基于3S的自然植被光能利用率的时空分布特征的模拟[J]. 植物生态学报, 2003, 27 (3): 325~336.
- [20] 回双双, 吴亚敏, 王晓, 等. 太阳能电池板的优化安装[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31 (5): 28~30.
- [21] 明杰, 刘志璋, 王平. 大规模沙漠光伏电站介绍[J]. 内蒙古科技与经济, 2010, 211 (9): 44~46.
- [22] 李晓刚, 冯绍瑞. 中国光伏产业发展的技术经济分析[J]. 工业技术经济, 2007, 26 (7): 120~123.
- [23] 德国Fraunhofer研究所太阳能电池转换效率达到41.1%[J]. 机电工程技术, 2009, 38 (2): 8.
- [24] 杨晓娟. 夏普公司太阳能电池片的转换效率达世界最高的44.4%[J]. 现代材料动态, 2014 (2): 6.
- [25] 夏爱民, 李华, 马胜红. 2012年光伏产业将进入脱乳期——全球光伏产业发展趋势展望[J]. 阳光能源, 2008 (4): 45~48.

(责任编辑: 冯胜军)