

太阳能电力满足美国未来能源需求的潜力研究-

太阳能发电和北极国家生态保护区石油产量预测的比较

John Byrne^a, Lado Kurdgelashvili^a, Daniele Poconi^a, Allen Barnett^b

^a Center for Energy and Environmental Policy, University of Delaware, 278 Graham Hall, Newark, DE 19716-7381, USA ^b Astro Power Inc., Newark, DE 19702-7474, USA

摘要 本文比较了太阳能光伏发电满足美国未来能源需求的潜力和北极国家生态保护区石油储量的预测。这种比较的实际意义在于它提出了在新的世纪要做出关键性的能源政策选择问题,也即在全世界最有前景的未开发的石油储备地区之一和一种发展极为迅速的可再生能源之间如何做出选择。

关键词: 太阳能预测; 能源前景分析; 光伏—北极国家生态保护区比较

在美国近期的能源政策辩论中,北极国家生态保护区石油产量和保护区预期的70年开采寿命之间潜在的光伏产量的直接比较未能引起足够的重视。这部分程度上是因为石油被普遍认为是完善的和经济的资源,而光伏被认为是一种“前沿”技术,价格昂贵而难以分担当前社会对能源的需求。我们认为,两种能源解决方案的比较将对能源政策的评价产生积极的影响,因为这种比较使得关于能源未来的讨论不再受到能源现状的局限。分析表明,对两种方案的比较将产生深远的政策含义。

为了分析光伏满足未来能源需求的前景,用 Pearl-Reed 逻辑增长模型分析了光伏发展的历史趋势¹。北极保护区石油生产方案来自于美国地质调查局(USGS, 1998)和美国能源信息管理局(EIA, 2000)出版的预测。得出比较结果之后,与采用美国石油储备满足未来能源需求相比,光伏在更大程度上被认为是与国家未来能源相关的技术。

1. 美国光伏安装量和出货量的观测趋势

从1986年到2001年,美国光伏出货量以20%的年均速率指数增长。近年来市场增长率一直在加快,1998—2001年的年均增长率保持在28%。尽管大部分美国制造的光伏销往海外市场,但光伏安装量保持了强劲的增长也反映出出货量的增长。许多预测表明光伏出货量(包括出口)和安装量还将保持数十年高度的增长率(NCPV, 2001; NREL 2001)。但是,指数增长的模式将最终由于市场的趋于饱和而被较慢的增长所取代。届时增长率将下降到一个恒定的代替率。

2. 美国2000年至2050年光伏累计产量预测

本文采用逻辑模型(见附录)预测了美国从2001年至2050年的光伏安装量。预测中关键的假设包括:(1)美国电力供应由光伏提供的部分在2050年达到最大10%;(2)美国电力供应的增长在2050年达到稳定;(3)在2050年以后的

¹ 附录中描述了用于计算未来光伏安装量的预测模型。值得注意的是模型中采用的 Pearl-Reed 曲线在数学上等同于更广泛采用的 Fisher-Pry 模型(Fisher-Pry 模型参见 Fisher-Pry (1971); 二者全等的证明参见 Mignogna (2001))。

光伏安装量仅为更换的需求²。美国电力供应由光伏提供的部分为 10% 是比较保守的估计量。通常认为,技术上对一种间歇式的能源并网使用的比例限制在 30% (参考 Kelly Weinberg, 1993), 另一位研究者指出,对于光伏这个比例大概在 20% 以上 (参考 Perez 等, 1993)。因此,作为预测研究,10% 的比例是比较低的范围。同样,在 2050 年光伏发电所占的比例达到峰值的假设,以及从 2050 年以后美国光伏市场仅限于更换需求的假设也是偏向于保守的预测。并且,这些假设对光伏技术的市场成熟时期预测的较为缓慢,能源和硅半导体相关工业的增长比所作的假设要快并且需要更长的时期达到峰值 (详见第 3 节)。

基于这些假设,本文探讨了两种方案:在“快速增长”方案中,美国光伏累计量最开始的增长率假定从 30% 开始,到 2050 年,当光伏发电占整个发电量的 10% 的时候,增长率减小到 0³。在“适度增长”方案中,初始增长率设定在 20%,然后逐渐减少,一直到 2050 年光伏发电占整个发电量的 10%。

EIA 预测从 2000 到 2020 年,美国电力需求年增长率大约为 1.8%。我们假定在 2020 年之后,电力需求增长率逐步减少,到 2050 年下降到 0⁴。光伏发电预测量将转换成等价原油桶数以和北极国家生态保护区石油产量的预测相比较⁵。北极生态保护区原油生产潜力由 USGS 折中分析得到,价格为 \$20/桶,油田在 65 年的寿命中预期产量为 32 亿桶。此外,采用了 EIA 关于美国的“乐观分析”:当价格为 \$20/桶时,大约生产 72 亿桶具有经济复原能力 (EIA, 2000)。然后,将 EIA 关于北极生态保护区年产量 (2000) 的预测方案应用到 EIA 和 USGS 的方案中,在 2034 年达到峰值产量,USGS 平均 1.2 亿桶/年;EIA 方案 2.7 亿桶/年。

图 1 描绘了两种光伏和保护区石油方案。基于不同的初始增长率假定,光伏发电量在 2034 年保持在 4.8 亿桶和 11.3 亿桶之间。这样,即使在 20% 的适度的初始增长率下,在北极保护区的峰值产量年份,光伏可以预计提供保护区 1.5-4.0 倍的电能产量。

在适度增长方案下,美国光伏累积发电量在 2070 年达到 443 亿桶,在快速增长方案下,将达到 588 亿桶。在同一时期,北极生态保护区产量累积达到 32-72 亿桶,显著低于光伏发电量。

如果我们考虑到美国所有油田预测的能源产量值并增加北极保护区的生产,将更清楚的显示光伏发电量的前景。预测美国未来的石油产量是一个高风险的事情。可以理解,预测将出现变化范围很大的结果。比如, Laherrere (2000) 采用 Hubbert (1962) 新标准方法,预测出阿拉斯加和本土的 48 个州产量迅速的下降 (图 2)。与之形成对比的是, EIA (2000) 预测出 2001-2020 年石油产量以较慢的速率下降。

EIA 采用 USGS (2000) 报告预测 2001-2020 的石油产量,基于此报告,我们完成了和 Laherrere 同一时期的产量预测 (见图 2) - 得出一个显著差异的结果。

值得注意的是这类预测最终取决于关于美国未来探明储量的假设。

² 光伏技术的竞争者,以及更具竞争性的光伏设计和应用,能够改变长期增长模式。尽管如此,从理论上新技术普及的普遍趋势的来考虑光伏的未来仍然是很有意义的 (参考 Mansfield, 1993; Saad, 2000)。

³ 特别的,在 2021-2050 年间,假定电力供应的增长逐步减少,在 2050 年稳定在全美年电力消耗 6.8GWh。

⁴ 尽管有人认为 2050 年之后零增长率不现实,可以认为传统电力系统的代替品 (包括燃料电池和/或者其他“技术进步”) 在接下来的 50 年内改变能源结构。零增长率的真正目的是为了保证对光伏增长较为保守的估计,因为如果假定 2050 年后电力需求继续增长,10% 的光伏发电比例将导致更高的光伏增长率预测。

⁵ 转换所采用的公式为:假定光伏系统寿命为 30 年,峰值功率 $1W_p$ 的光伏电池年发电量为 1.7kWh (考虑了光伏发电所避免的输送配电损失),峰值功率 $300W_p$ 的光伏电池年发电量为 505kWh,等效于一桶原油。

Laberrere (2000) 较为保守的方法是采用过去美国探明储量的统计数据做出预测，而 EIA 的较为乐观的预测包括了 USGS 世界石油评估 (2000) 里面在技术上可恢复的资源。美国石油产量预测折中的方案可通过对 1985-2001 年生产趋势的数据采用统计折中的方案得到。当我们采用这个方案时，出现了介于 laberrere 和 EIA 之间的指数衰减。我们增加了 USGS 和 EIA 关于北极生态保护区产量的预测值以建立和 Laherrere 以及 EIA 进行比较的预测。

本研究中我们使用折中方案的产量以和光伏产量的预测相比较。图 3 总结了 2010-2070 年北极保护区可以向市场供油期间比较的结果 (参照国家能源政策发展组 National Energy Policy Development Group, 2001)。我们的计算表明：此期间内累积石油产量为 510 亿-550 亿桶，而光伏等效的产量为 440 亿-590 亿桶。这样，光伏在 2010-2070 年发电量与采用石油的发电量大致相当，从而能够显著减少对进口石油的依赖 (如果氢能成为竞争性的交通燃料)。

J. Byrne et al. / Energy Policy 32 (2004) 289-297

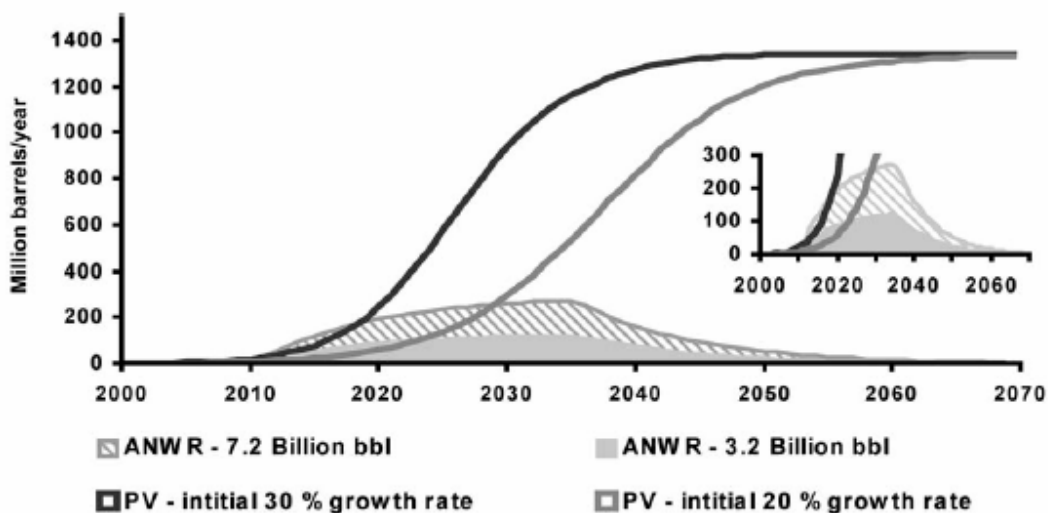
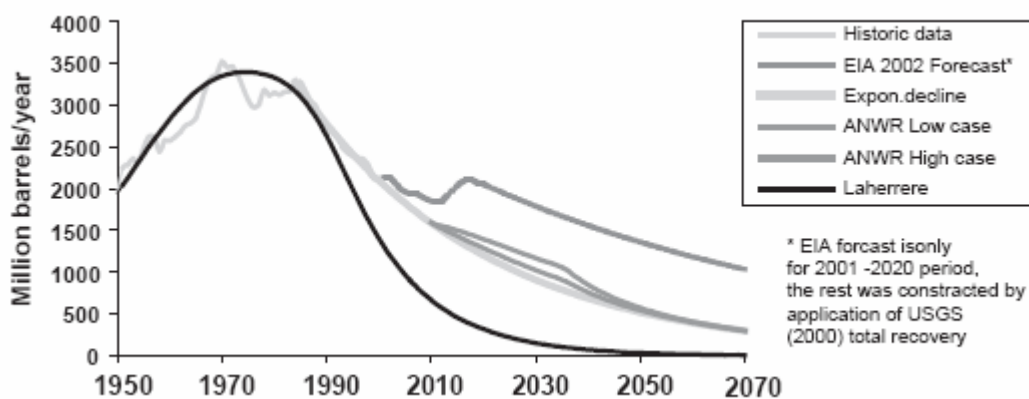


图 1. 美国光伏能源供应潜力和北极生态保护区石油产量比较



数据来源: EIA 2002a, EIA 2001b, EIA 2000, USGS 2000, USGS 1998, Laherrere 2000

图 2 美国国内探明储量石油产量预测比较

3. 其他能源和硅产品的历史趋势

在我们的分析中，美国光伏生产初始增长率假定为每年 20% 和 30%。这些增长率的假定可能过于乐观，不能合理的持续 15 年或我们预测中假定的年份。

为了评估这些增长率是否合理，我们分析了三种能源（石油，天然气，核电）和两种硅半导体产品（个人电脑和手机）市场增长的历史趋势。和石油及天然气的比较基于美国这些资源前 50 年发展的年度数据。核电，手机及个人电脑之间的比较由于仅有 15—20 年的数据而较为欠缺。然而，我们关于光伏容量两位数的增长的预测仅有 20 年（2001—2020），因此，将假定的模式与核电，个人电脑和手机的经验模式相比较对于衡量我们关于光伏预测方法的可信度是有帮助的。

在 1862 年和 1911 年之间，美国石油生产年平均增长率为 25.5%（数据来源：美国统计局，1975）。石油生产从 1859 年开始，但在 1860 年、1861 年由于增长率太高而并未计算在内（1860 年 25,000%；1861 年 322%）。在 1901 年和 1950 年之间，美国天然气生产年平均增长率为 8.57%（美国统计局，1975），低于我们关于光伏增长率的预测。美国核电历史上的增长率接近于石油。1957 年和 1977 年之间，美国核电装机年增长率为 36%（Williams and Terzian, 1993）。

J. Byrne et al. / Energy Policy 32 (2004) 289–297

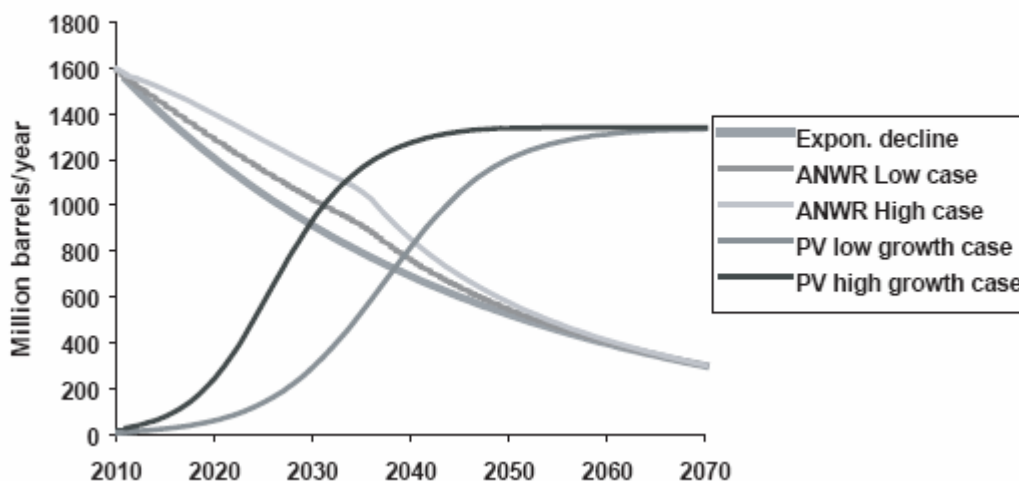


图 3 美国光伏能源供应预测和国内探明储量石油生产比较

个人电脑和手机这两种硅半导体技术为光伏发展重叠的时段内提供了市场增长的经验证据。1982 至 2000 年，美国个人电脑的销售量年增长率为 22%（美国统计局，1991—2000；美国统计局 1994—2001）手机在我们讨论的产品中经历了最高的增长率。从 1986 到 2000 年，美国手机年增长率为 48.6%（美国统计局，1991—2000；美国统计局，1994—2001；移动通讯和网络协会，2002）。

这些相关的比较表明我们预测中所用的增长率是合理的。对于新能源技术持续增长率的研究同样支持了我们分析中的假设（例如，Payne 等，2001）。

4. 光伏价格 and 市场份额

当前，光伏系统提供给美国电力大部分的价格约为 \$0.25/度。与煤电厂每度 \$0.03—\$0.04 相比（未考虑环境破坏的因素），很难想象光伏在解决发达工业社会能源需求方面能与化石能源相抗衡。

但是这样的分析并未考虑到光伏价格下降的经验证据。例如，光伏电池的售价从 1976 年的 \$55/W_p（2001 美元价格标准）降低到了 2001 年的 \$3.5/W_p（Harmon,

2000; Maycock, 2002)。在我们的分析中，设定光伏在盈亏平衡点的价格为 $\$1.50/W_p$ ，这一价格设定在关于光伏市场价格的研究报告的范围内（例如，Payne 等，2001）。基于目前的价格趋势⁶，到 2012 年光伏的价格可以降为 $\$1.50/W_p$ 。

研究者通常在评估光伏市场的前景时，把它和化石能源发电比较，因为认为光伏的最终目的是和现在的电力系统一样供应大量的电力。光伏发电将要达到和煤，天然气等同样的价格水平。根据一些参考文献中的估计，当光伏价格在 $\$0.50/W_p - \$1.00/W_p$ 之间时，光伏发电达到盈亏平衡（Neij, 1997; IEA, 2000）。

然而，这样的研究忽略了光伏做为一种独立的或共同的发电模式。当允许双向计量（净计量）时，光伏发电的成本应该与电力的零售价而不是与公用事业的发电成本比较。在一些工业化国家（例如德国、意大利）和美国的一些州（比如加州），国内的电力零售价（含税）达到 $\$0.15 \sim 0.25/kWh$ 的水平。当用这些价格为光伏设定竞争性的价格标准时， $\$1.50/W_p$ 可以做为盈亏平衡的光伏价格可靠估计。假定 BOS 的价格占整个系统成本的 50%，光伏系统盈亏平衡点的价格则为 $\$3.00/W_p$ 。

采用 $\$1.50/W_p$ 的盈亏平衡价格，我们估计全球范围将出现 22,000 兆瓦的累计发货量（参见附录 A 和图 4）。在没有重大技术突破的情况下，倘若市场年平均增长率介于 15% 和 30%，在 2011 年到 2019 年之间能够达到这个盈亏平衡的累计发货量。该预测采用了新技术市场渗透经验曲线的标准方法（参见 Williams and Terzian, 1993; Neij, 1997; IEA, 2000; Harmon, 2000）。在我们的盈亏平衡分析中，统计上估计为 80% 的“发展比例（PR）”⁷（详见附录）。

J. Byrne et al. / Energy Policy 32 (2004) 289–297

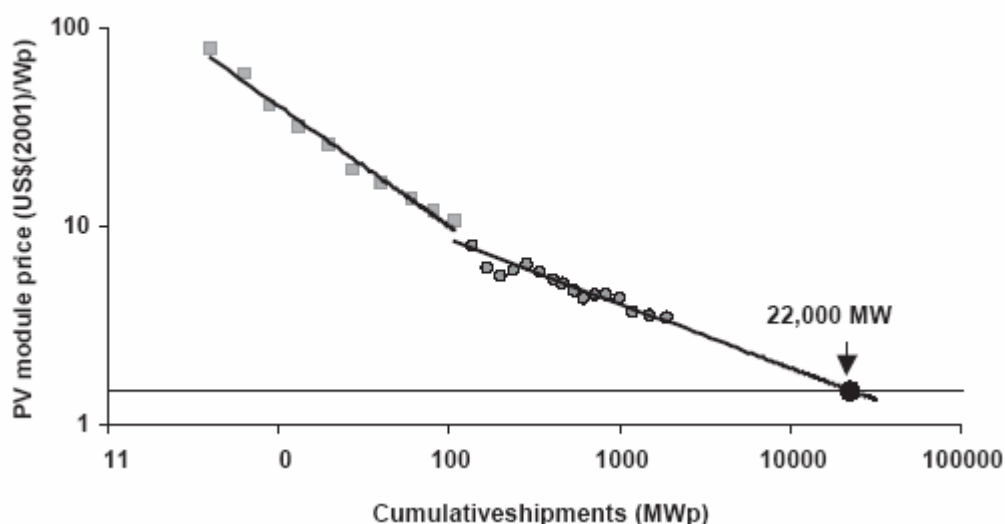


图 4 1976—2001 年光伏经验曲线和到 $\$1.5/W_p$ 盈亏平衡点价格的预测
数据来源：Harmon (2000). Maycock (2002).

John Byrne 等《能源政策》32 (2004) 289–297

有一个值得注意的概念上的问题。上述盈亏平衡点分析假定光伏最终将大规

⁶ 一些文献表明，价格在 $\$2.00/W_p$ 以上的时候光伏有竞争力。

⁷ 发展比例（PR）指示了每累积产量翻番时价格下降的比率。80%的发展比例意味着当产量翻番时，价格下降 20%。80%的发展比例基于光伏出货量和组件价格历史数据的回归分析。

模替代化石燃料的电力市场。但是许多研究者(包括作者)对这一假定持有争议。首先,能源技术部门正在经历着显著的变化:从得益于规模经济的传统集中供应系统中转变。80年代发电经济性引发大规模电厂建设(例如500—1200兆瓦,参见Messing等,1979),与此不同的是,今天的发电厂典型规模则相对比较适中(通常小于1兆瓦,参见Dunn,2000),并且其经济性基于模块化(Hoff and Herig,1997)而不是规模化。光伏完全符合了这一趋势。这样,在技术更新引起大规模电力市场过时的时候,传统成本比较法可能就不合时宜了(Hunt and Shuttleworth,1996,p2)。

其二,更重要的是,光伏可能会引领新能源市场,其中光伏技术不仅仅提供能源,而且要满足诸如能源管理(例如电力削峰)、应急电源、环境改善(例如减少影响空气质量和森林生长的污染;减缓与气候变化相关的“温室气体”排放)和燃料多样性(参见Awerbuch,1995;Awerbuch等1996)等的要求。当在这种考虑下分析光伏技术时,其经济性就显著提高了(参见,例如Byrne等,1996,1997,2000)。当然,在电力输送受到限制的地区,光伏技术在当前的价格下也具有竞争性(参见Letendre等,1998)。

将这些因素一并考虑在内进行评估,当前光伏发电和化石燃料发电的价格差别就没有那么大了。当光伏创造了石油、天然气和煤炭发电站不具备的优势(例如环境改善和燃料多样性)时,当光伏提供了比化石能源更具吸引力的高价值服务(例如能源管理和应急电源)时,忽略了这些经济方面和社会方面贡献的价格比较在市场发展方面就是误导的。

5. 光伏的过去和未来

对于光伏在美国和全球经济的未来将起主要作用的这一假设仍然存在着疑虑。这部分由于在现实中,相当一部分的政策和制度支持能源现状造成的。这些政策和制度形成了光伏和其他新兴的能源技术发展的潜在障碍。

从过去最近的情况来看,光伏和其他可再生能源在一段时间内注定仍然被界定为“前沿”技术。关于能源供应的描述—过去50年能源构成图(图5)—诠释了这一点。可再生能源对美国能源供应的贡献呈现为笔形的细线增长,这阻碍了对未来10—20年可再生能源的角色将要改变的期望。

然而假定未来是对过去的修订意味着20世纪化石能源的提升是不合理的。例如考虑在19世纪燃料对美国能源的供应(图6),并没有迹象表明未来对石油的依靠。也很难构想出整个20世纪能源使用极为快速的增长率。正如图6并不包含对图5的预测,后者为评估图1的内容所提供的信息也为之甚少。

然而,光伏的未来与其过去大为不同,就这一方面来说,对图1的预测趋于保守(因为其依靠了过去的增长模式和对电力市场10%的渗透尺度)。正如这项研究另外两位作者(Barnett and Byrne)近20年前在美国先进科学协会的一册书中所表明的那样。太阳能的发展转变将与能源现状关系不大,与传统的能源竞争市场份额相比,太阳能的发展更多的将受到政策和环境因素的影响(Rich等,1983)。我们认为这种观点仍然正确。

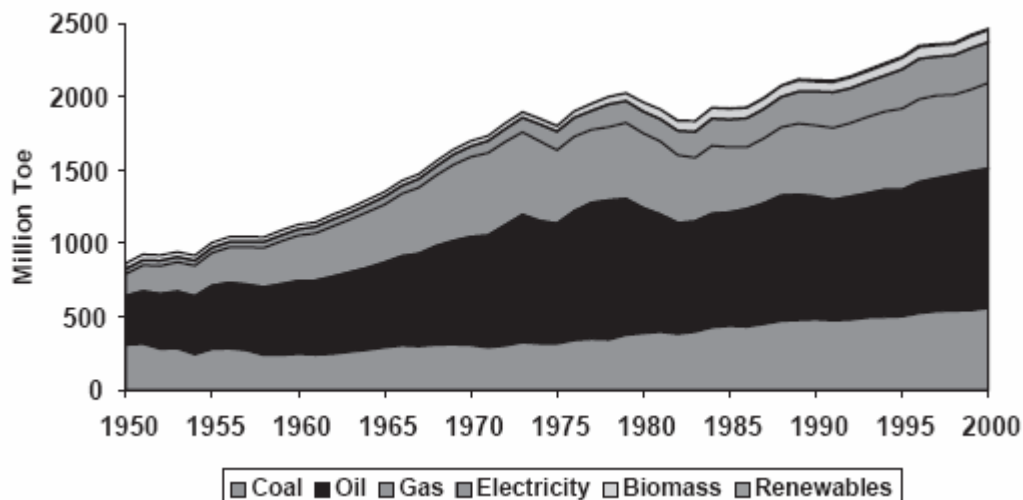


图 5 过去 50 年美国能源构成 数据资料: EIA (2002b)

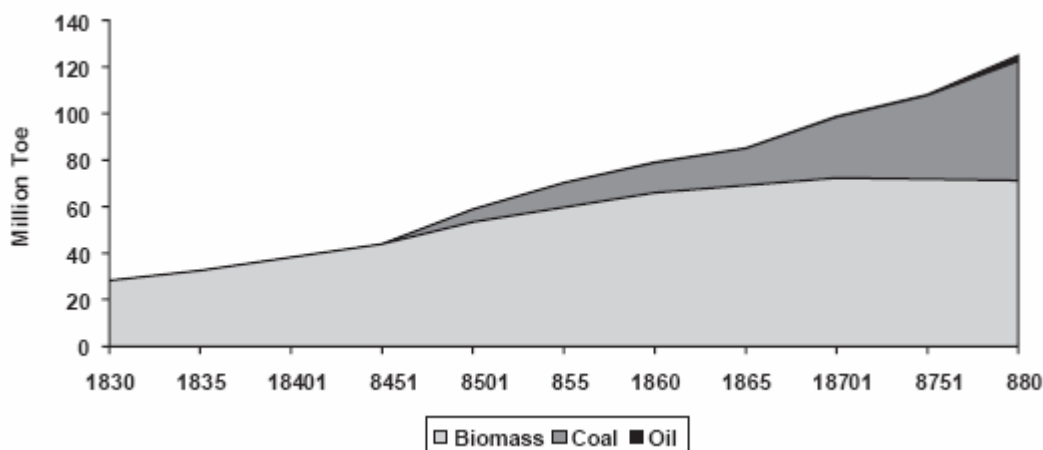


图 6 美国 1830—1880 能源构成 数据资料: EIA (2002b)

6. 能源政策分析—超越现状的考虑

关于能源政策的辩论经常为当前价格、技术、应用和市场所影响。正在进行的关于北极生态保护区是否该进行能源开采的争论表明了这种趋势。然而, 经验表明能源改变的可能常常是突然而巨大的(例如: MacKenzie, 1996; 图 5 和图 6)。而且, 能源方案的选择通常受政策左右。比如核能的开发和推广就是政策推动的结果 (Byrne and Hoffman, 1996)。

如上所述, 为了理解各种风险性政策选择的结果, 比较明智的做法是评价那些忽略现状的替代性能源政策。将太阳能和石油开采进行为期 70 年的比较表明: 光伏的供电潜力大约比北极生态保护区储量多 8—15 倍, 大约与美国国内所探明的储量相当⁸。鉴于此, 当前能源政策辩论中把光伏界定为“前沿”技术是误导性的和不正确的。

不可否认的是, 任何长时期的关于未来能源方案定量的预测都是不准确的。但同样重要的是对于短期可能性的分析则能够较为精确的预测能源未来的量, 唯一难以预测的是技术革命。本文所做的政策分析的意义不在于数值上的预测, 而

⁸ 该发现基于广泛引用的价格预测, EIA 和 USGS 的石油预测和 NCPV 的光伏预测。

在于所做的比较。只有当做长远的分析并比较“非常”的方案⁹时，我们才可能发现令人惊奇的结果。

我们的分析发现了惊人的政策导向—光伏对于美国能源的未来比石油更为重要。光伏在 21 世纪的潜力和美国石油探明储量的比较支持了更有进取心的开发光伏的策略。这也带来了一个有趣的政策问题。

附录 A

A. 1. 光伏计算增长模型方法

为预测光伏对美国电力供应的贡献，对经验数据采用了一种计算增长曲线。计算增长模型被广泛用于描述不同的现象，从人口增长（比利时数学家 Pierre Verhulst 在 1838 年人口研究中首次使用）到石油开发（Hubbert, 1962）。

在我们的研究中，假设光伏对美国电力生产的贡献一直增长到国家电力的 10%（参考 NCPV, 2001）。我们进一步假定 2000—2020 年间美国电力生产的年度增长率为 1.8%（基于 EIA2001b 预测）。同时，假设美国电力消耗在 2050 年趋于稳定，之后保持零增长。这样就假定，从 2020—2050 年，国家电力生产年度增长率逐渐从 2020 年的 1.8% 降到 2050 年的 0%。

年发电量 Q 的计算增长方程为

$$Q=U/(1+\exp[-b(t-t_m)]) \quad (\text{A. 1})$$

光伏的最大年生产为 U ，设定为当前美国发电量的 10%。采用 Laherrere (2000)，方程 (A. 1) 的斜率系数 (b) 如下式：

$$b=6/d \text{ (更精确的, } b=5.986/d), \quad (\text{A. 2})$$

这里 d 是从 1% 达到最大生产增加率（或最大生产的一半）所需的时间。如果我们考虑当 $t=t_m-d$ 的时段，也即，当生产水平为最大可能值的 1% 的时刻，那么：

$$Q_1=U/(1+\exp[-(6/d)(-d)])=U/(1+\exp 6). \quad (\text{A. 3})$$

1 年后，

$$\begin{aligned} Q_2 &= U/(1+\exp[-(6/d)(-d+1)]) \\ &= U/(1+\exp(6-b)) \end{aligned} \quad (\text{A. 4})$$

$$\begin{aligned} Q_2/Q_1 &= (1+\exp 6)/(1+\exp(6-b)), \\ \text{令 } K &= Q_2/Q_1 \end{aligned} \quad (\text{A. 5})$$

已知的（经验观察）增长百分比水平为 $p=(K-1) \times 100\%$ ，我们可以得到 K ：

$$K=1+p/100\% \quad (\text{A. 6})$$

将 (5) 式简化，

$$K \exp(6-b)=1-K+\exp 6, \quad (\text{A. 7})$$

$$\exp 6/\exp b=(1-K+\exp 6)/K,$$

⁹ 我们更倾向于“调查中的方案”。

(A. 8)

$$\exp(b) = K \exp(p) (1 - K + \exp(p)),$$

(A. 9)

$$b = \ln[K \exp(p) / (1 - K + \exp(p))].$$

(A. 10)

这样，在指定了光伏当前的增长水平 p 之后， K 就能从方程 (A. 6) 中得到，斜率 b 能从方程 (A. 10) 中得到，方程 (A. 2) 可以算出 d 的值， d 值代表了到达最大增长水平一半所需要的时间。同时，通过当前生产水平可以得到达到最大增加水平 1% 所需的时间。把这个时间加到 d 值上，就得到 t_m 。于是，方程 (A. 1) 中所有的参数都确定了，光伏能源潜力的预测便可以进行了。

A. 2 盈亏平衡年份的确定方法

下式描述了经验曲线：

$$\text{第 } t \text{ 年的价格} = P_0 X^E \quad (\text{A. 11})$$

此处 P_0 是累积装货量的初始价格（第一单元）， X 是在第 t 年份时的累积装货量， E 是经验指数，它决定了经验曲线的倾度。PR 可以从 E 得到（反之亦然），关系为 $PR = 2^E$ 。

经验曲线方程可以用来计算累积装货量的盈亏平衡水平，这个必要的累积装货量使平均销售价格达到与其他能源方案竞争的水平。对作为范例的 1985—2001 时段进行线性—对数回归分析，统计预测的 PR 值为 80%（假设盈亏平衡价格为 \$1.50/W_p）。当 PR 值为 80% 的时候，累积装货量的盈亏平衡水平约为 22,000 兆瓦（见图 4）。

参考文献

- Awerbuch, S., 1995. New economic cost perspective for valuing solar technologies. In: Boer, K.W. (Ed.), *Advances in Solar Energy; Annual Review of Research and Development*, Vol. 10. American Solar Energy Society, Boulder, Colorado.
- Awerbuch, S., Dillard, J., Mouck, T., Preston, A., 1996. Capital budgeting, technological innovation and the emerging competitive environment of the electric power industry. *Energy Policy* 24 (2), 195–202.
- Byrne, J., Hoffman, S.M., 1996. *Governing the Atom* London. Transaction Publishers, London.
- Byrne, J., Letendre, S., Govindarajalu, C., Wang, Y.D., 1996. Evaluating the economics of photovoltaics in a demand-side management role. *Energy Policy* 24 (2), 177–185.
- Byrne, J., Letendre, S., Agbemabiese, L., Redin, D., Nigro, R., 1997. Commercial building integrated photovoltaics: market and policy implications. *Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Anaheim, CA, pp. 1301–1304.
- Byrne, J., Agbemabiese, L., Boo, K.J., Wang, Y.D., Alleng, G., 2000. An international comparison of the economics of building integrated PV in

- different resource, pricing and policy environments: the cases of the US, Japan and South Korea. Proceedings of the American Solar Energy Society Solar 2000 Conference, Madison, Wisconsin, pp. 81–85.
- Cellular Telecommunications & Internet Association, 2002. CTIA's Semi-Annual Wireless Industry Survey Results. CTIA, Washington, DC.
- Dunn, S., 2000. Micropower: the next electrical era. Worldwatch Paper 151. Worldwatch Institute, Washington, DC.
- Energy Information Administration (EIA), 2000. Potential Oil Production from the Coastal Plain of the Arctic National Wildlife Refuge: Updated Assessment. US EIA, Washington, DC.
- Energy Information Administration (EIA), 2001a. Renewable Energy 2000: Issues and Trends. US EIA, Washington, DC.
- Energy Information Administration (EIA), 2001b. Annual Energy Outlook 2001: With Projections to 2020 DOE/EIA-0383. US EIA, Washington, DC.
- Energy Information Administration (EIA), 2002a. Historical petroleum supply/disposition. Data available on the worldwide web at:
<http://www.eia.doe.gov/neic/historic/hpetroleum3.htm>.
- Energy Information Administration (EIA), 2002b. Historical end-use consumption. Data available on the worldwide web at:
<http://www.eia.doe.gov/neic/historic/hconsumption.htm>.
- Fisher, J.C., Pry, R.H., 1971. A simple substitution model of technological change. *Technological Forecasting and Social Change* 3 (1), 75–88.
- Harmon, C., 2000. Experience curves of photovoltaic technology. Interim Report IR-00-014. International Institute for Applied System Analysis, Laxenburg, Austria.
- Hoff, T.E., Herig, C., 1997. Managing risk using renewable energy technologies. In: Awerbuch, S., Preston, A. (Eds.), *The Virtual Utility: Accounting, Technology & Competitive Aspects of the Emerging Industry Norwell*. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts.
- Hubbert, M.K., 1962. Energy Resources: Report to the Committee on Natural Resources' Publication 1000-D. National Academy of Sciences and National Research Council, Washington, DC.
- Hunt, S., Shuttleworth, G., 1996. *Competition and Choice in Electricity*. Wiley, Chichester, England.
- International Energy Agency (IEA), 2000. *Experience Curves for Energy Technology Policy* Paris. IEA Publications, Paris, France.
- Kelly, H., Weinberg, C.J., 1993. Utility strategies for using renewables. In: Johansson,

- T.B., Kelly, H., Reddy, A.K.N., Williams, R.H., Burnham, L. (Eds.), Renewable Energy. Island Press, Washington DC.
- Laherrere, J.H., 2000. The Hubbert curve: its strengths and weaknesses. Available on the worldwide web at <http://dieoff.com/page191.htm>.
- Letendre, S., Weinberg, C., Byrne, J., Wang, Y-D., 1998. Commercializing photovoltaics: the importance of capturing distributed benefits. Proceedings of the American Solar Energy Society Solar 98 Conference, Albuquerque, New Mexico, pp. 231–237.
- MacKenzie, J.J., 1996. Oil as a Finite Resource: When is Global Production Likely to Peak. World Resources Institute, Washington, DC.
- Mansfield, E., 1993. Innovation and the diffusion of new techniques. In: Mansfield, E., Mansfield, E. (Eds.), Technical Change and the Rate of Initiation. Brookfield. E Elgar, Vermont, pp. 293–318.
- Maycock, P.D., 2002. The World Photovoltaic Market Warrenton. PV Energy Systems Inc., Virginia.
- Messing, M., Friesema, H.P., Morell, D., 1979. Centralized Power: The Politics of Scale in Electricity Generation. Oelgeschlager, Gunn & Hain, Cambridge, MA.
- Mignogna, R.P., 2001. Introduction to technology trend analysis, part 2. Technology/Engineering Management, Inc. e-Newsletter. Available on the worldwide web at: <http://www.temi.com/Newsletter/Feb01/TechTrends2.html>.
- National Center for Photovoltaics (NCPV), 2001. Solar Electric Power: The US Photovoltaic Industry Development Roadmap. US Department of Energy, National Center for Photovoltaics, Washington, DC.
- National Energy Policy Development Group, 2001. National Energy Policy: Reliable, Affordable and Environmentally Sound Energy for America's Future. Government Printing Office, Washington, DC.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2001. News and information about silicon: silicon-PV future trends. Last updated May 2001. Available on the worldwide web at: <http://www.nrel.gov/silicon/Pages/news.htm>.
- Neij, L., 1997. Use of experience curves to analyse the prospects for diffusion and adoption of renewable energy technology. *Energy Policy* 25 (13), 1099–1107.
- Payne, A., Duke, R., Williams, R.H., 2001. Accelerating residential PV expansion: supply analysis for competitive electricity markets. *Energy Policy* 29 (10), 787–800.
- Perez, R., Seals, R., Stewart, R., 1993. Assigning the load matching capability of photovoltaics for US utilities based upon satellite derived isolation data. Proceedings of the 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1146–1151.

- Rich, D., Veigel, J.M., Barnett, A.M., Byrne, J., 1983. *The Solar Energy Transition; Implementation and Policy Implications AAAS Selected Symposium 74* Boulder. Westview Press, Colorado.
- Saad, M., 2000. *Development Through Technology Transfer—Creating New Organizational and Cultural Understanding* Bristol. Intellect, UK.
- US Census Bureau, 1975. *Historical Statistics of the United States*. US Bureau of the Census, Washington, DC.
- US Census Bureau, 1991–2000. *Statistical Abstract of the United States*. US Bureau of the Census, Washington, DC.
- US Census Bureau, 1994–2001. *Manufacturing Profiles*. US Bureau of the Census, Washington, DC.
- US Geological Survey (USGS), 1998. *Arctic National Wildlife Refuge, 1002 Area, Petroleum Assessment 1998, Including Economic Analysis Fact Sheet 0028-01*. USGS, Washington, DC.
- US Geological Survey (USGS), 2000. *World Petroleum Assessment 2000: Description and Results* USGS Digital Data Series DDS-60 Multi Disc Set Version 1.0. USGS, Washington, DC.
- Williams, R.H., Terzian, G., 1993 *A benefit/cost analysis of accelerated development of photovoltaic technology*. PU/CEES Report No. 281. Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University, Princeton, NJ.