

## 开卷知新

## 太阳能光伏——

## 向阳而生 “洁”尽所能

杨德仁



习近平总书记在主持中共中央政治局第十二次集体学习时强调：“我国风电、光伏等资源丰富，发展新能源潜力巨大。经过持续攻关和积累，我国多项新能源技术和装备制造水平已全球领先，建成了世界上最大的清洁电力供应体系，新能源汽车、锂电池和光伏产品还在国际市场上形成了强大的竞争力，新能源发展已经具备了良好基础，我国成为世界能源发展转型和应对气候变化的重要推动者。”据中国光伏行业协会统计，2023年，我国光伏产业规模持续扩大，多晶硅、硅片、硅电池、组件等主要制造环节产量同比增长超过64%，行业总产值超过1.75万亿元。光伏产业在推动我国新能源高质量发展、助力共建清洁美丽的世界等方面作出重要贡献。

## 追寻光的能量，发展绿色清洁能源

太阳能储存量大，没有环境污染，是重要的可再生能源。当阳光从1.5亿公里外照耀地球时，除了在大气层中的反射、吸收和散射，大约50%的能量可以照射到地球表面，其地面辐射的平均强度是每平方米1366瓦。因此，从理论上讲，只需将照射在地面的太阳光能量利用万分之一，就可以满足人类现在的能源需求。

我们平时所说的太阳能，一般指太阳能光热和太阳能光伏，其分别利用了阳光的光热效应和光伏（光电）效应。光热效应是指将太阳的能量聚集起来，再转换成热能。如在我国城乡广泛应用的太阳能热水器、太阳能灶等，也包括将太阳能转换成热能后，再利用热能发电这一形式。而光伏效应则是将太阳能通过太阳能电池，直接转换成电能。这种光电转换主要借助半导体器件的“光生伏特”效应进行，不仅可以用于空间站、卫星供电，还可以用于家庭、工厂屋顶电站以及大型太阳能光伏电站，实现大规模并网发电。

太阳能光伏研究的历史不到200年，实际应用70多年，大规模应用则集中于近20年。1839年，法国实验室首先观察到光伏现象，发现光照在盐酸液体上可以产生电流。1876年，科学家在硒材料上观察到光照使固体产生电流的现象。几年后，科学家利用硒薄膜制备了第一个太阳能电池，在阳光下产生电流。直到1905年，爱因斯坦揭示光电原理以后，人们才真正理解太阳能光电转换的奥秘。1954年，借助硅半导体技术，贝尔实验室发明了现代意义上的太阳能电池，光电转换效率达到6%，从此开启了现代太阳能光伏技术和产业发展的时代。

太阳能电池最早应用于卫星。1958年，人们在卫星上首次使用太阳能电池。十几年后，我国制造的第二颗人造卫星也使用了太阳能电池。太阳能电池的研究成功，为卫星、空间站等现代航天系统提供能源动力，促进人类航天事业发展。鉴于当时的技术和产业基础，太阳能电池成本非常高，很难大规模生产应用。因此，很多国家开始加大对太阳能光伏的研究力度，以提升电池的光电转换效率，降低成本。

我国自上世纪50年代研制出太阳能电池后，持续深耕光伏产业。上世纪90年代，为解决西部偏远地区的电力供应问题，独立光伏用户和小型光伏电站逐渐开始建设，特别是2002年前后我国实施的“光明工程”“送电到乡”等工程，为解决偏远地区人们用电难起到重要作用。2005年，我国制定了可再生能源法，大力推进太阳能、风能等可再生能源开发利用，为我国太阳能光伏产业飞速发展和相关技术世界领先奠定坚实基础。

## 从跟跑到领跑，技术创新提升光电转换效率

自1954年用硅材料制备的太阳能电池问世以来，人们尝试开发多种材料制备太阳能电池，都可以实现太阳能的光电转换。不过，以硅材料为基础的太阳能光伏技术不断发展，凭借其成本低、寿命长、可靠性高、技术成熟等优点，成为太阳能光伏技术的主流。所以，光伏产业如今仍以硅光伏为主，产业链涉及金属（冶金）硅、高纯多晶硅、硅片、硅电池、硅组件和太阳电站等产业，还涉及光伏玻璃、聚乙烯醇薄膜、铝合金支架、逆变器等众多原辅料产业。相关产业始终以“提高效率、降低成本”为目标，通过技术革新实现度电成本的最低化。

以硅片制造产业为例，要提高硅电池的转换效率，需要提高硅片原子晶格排列的完整性，减少硅晶体的缺陷和杂质。因此，硅片制备技术从早期低成本的非晶硅、铸造多晶硅，逐步转变为高质量、高纯度的直拉单晶硅，标志硅材料质量的少数载流子寿命不断提高，达到700微秒以上，为太阳能电池效率的提升提供材料基础。

2000年以来，硅晶体生长制造工艺通过多种技术创新不断降低成本。以前，直拉单晶硅直径3—4英寸，现在增加到10英寸以及12英寸。过去在晶体炉中制备直拉单晶硅时，每一只石英坩埚只能生长一根单晶硅，原料多晶硅装填重量只有100多公斤；现在，借助连续添加原材料技术，一只坩埚可以连续不间断地生长8—10根单晶硅，原料多晶硅装填重量超过1000公斤。以前，4英寸直拉单晶硅长度一般小于2米，现在一根直径10英寸的单晶硅长度可以超过6米。上述生长技术的发明和发展，使硅片制造成本大幅降低。

与此同时，单晶硅加工技术的发展也让人眼前一亮。以前是利用金刚砂轮内圆切割技术，之后发展出砂浆线切割技术，现在是在利用金刚线切割技术，硅片切割效率显著提升。同时，用于太阳能电池的硅片厚度从300微米降低到130—150微米，硅片切片损失从200多微米厚度降到35—40微米。这些单晶硅加工技术的创新发展，同样显著降低了生产成本。

另外，太阳能电池技术也在不断创新。在电池工艺方面，从初始的简单结构电池工艺，到背面增加背场、正面增加绒面的基本电池工艺，再到如今的隧穿氧化层钝化接触、异质结电池工艺，新技术使太阳能电池的光电转换效率持续提升，为太阳能光伏产业的快速发展提供了直接驱动力。未来，新材料（如钙钛矿）和硅光伏技术的结合，将为太阳能电池效率进一步提升拓展新的空间。

从全球范围来看，我国光伏产业前景广阔。近年来，用于光伏的单晶硅生长和加工技术创新主要源于中国，太阳能电池效率的多项世界纪录也由中国企业创造。可以说，在整个硅太阳能光伏产业链上，中国走在世界前端。在太阳能光伏的应用（电站）方面，从

2007年的0.02吉瓦到2023年的216.3吉瓦，安装量增加了1万倍以上。中国太阳能光伏年安装量已经连续11年占据世界首位，成为名副其实的太阳能光伏应用大国。太阳能光伏技术和产业成为中国推动科技进步、发展新质生产力的缩影。

从零起步，从跟跑到领跑，我国光伏行业近年来实现跨越式发展，重点环节国产化程度大幅提升，以高科技、高附加值、引领绿色转型成为出口新增长点。能源是国民经济的命脉，是人类生存和发展的物质基础，在构建新发展格局中发挥着举足轻重的作用。太阳能光伏的应用和快速发展，为我国实现“双碳”目标，建设更加环保、更加清洁的家园提供了重要途径，同时也为实现我国能源自主可控提供了重要的解决方案。

（作者为中国科学院院士、浙大宁波理工学院校长）

题为浙江省台州市仙居县山野间的光伏发电设施。

王华斌摄（人民视觉）  
版式设计：沈亦伶

## 推荐读物

《大国光伏：中国王牌制造业的突围与崛起》：中国光伏行业协会、刘家琦·酷玩实验室团队著；电子工业出版社出版。  
《太阳能电池材料（第二版）》：杨德仁编著；化学工业出版社出版。  
《太阳能光伏技术与应用》：沈文志主编；上海交通大学出版社出版。  
《太阳能电池发展现状与性能提升研究》：王启明、褚君浩、郑有焯等编著；科学出版社出版。

## 让古典诗词中的器物重现光彩

蒋寅

从《诗经名物新证》到《古诗文名物新证》，从《终朝采蓝：古名物寻微》到《诗歌名物百例》（以下简称《百例》），扬之水一部接一部地拿出古典文学中所见名物研究专著，给学界带来一个又一个惊喜。我忝为同事多年，她每有新著问世都蒙惠赠，快读之余，我对她的工作也越来越了解，对她持之以恒的毅力更是越来越敬佩。

名物之学由来甚久，到中古时期已是经学的一个分支，自三国陆机《毛诗草木鸟兽虫鱼疏》到清代许馥田《学诗寡识》等，在《诗经》研究中自成一系。其他各种名物之学，随着谱录类书籍的兴起，到宋代也有很大的发展，既滋学家考古博物之趣，也为诗词注释家所取资。随着近代以来的学科分化，属于自然科学的名物研究与人文学科渐行渐远，以致传统名物之学在当代人文学科内竟成了绝学。多年前就曾听扬之水说过，要写一本考释古典诗词中所见名物的专著，一直未见动静。今年初突然收到《百例》，欣喜之余倒也不觉得意外。作者隽永的文字，让这部基本属于考证之作的专著充满了小品文的清雅趣味。

《百例》考释了古典诗词中出现的166种名物，涉及器物名称360余种，可以说是一部图文并茂的古代器物辞典。这些名物并非随意择取，而是基于三个标准：一是辞书以及诗歌笺注未曾解释者；二是辞书及诗歌笺注虽释而有误者；三是有释而无图，因

书中所配的图片，不禁让人感叹，物质文化的传承实在有着我们不曾料想的深远渊源。许多器物经历漫长的岁月更迭，或异物同名，或同物异称，名实之间都有了歧异。作者一一辨说，配以图证，可为读者解疑释惑，扫清理解的障碍。全书近500幅图片，多为精美的彩照，还有部分拓片和少量的钩摹示意图。为获得这些图片，作者多年来四处寻访、搜集、拍摄，走访了国内外众多博物馆和文物收藏机构。正是这丰富的阅历和大量珍贵资料，支撑起《百例》扎实的论述，同时让久久沉落在古典诗词中的古代器物重现了往昔光彩。

当对古代器物的研究，在学术界和收藏界都不乏其人，以王世襄、孙机等先生为代表的先辈学者和收藏家留下了许多精彩著述。多年来，扬之水的名物研究跨历史和艺术两界，在考古和文学之间穿梭，实现文献考索和实物比勘的沟通。《百例》对于古典诗词阅读欣赏和研究有一定帮助。不过，阅读中也偶见可酌之处。比如第五十四种名物“内家新制”为宫中新式香品的共名，从全书体例来看，没有相似类目，似可调整。

相比通常的诗词研究和注释考证书籍，《百例》以文释图，以图证文，图文相映，还原许多熟悉名词的物质形态，由此赋予诗词文本以鲜活的生命，让那些消逝的历史情境在我们的眼前又活动起来。

（作者为华南师范大学文学院教授）

对老一辈教育家最好的怀念，对教育家精神最好的弘扬，是戮力同心把教育事业向前推进。

大力弘扬教育家精神，需要讲好教育家故事，传播好教育家思想，展现好教育家风貌。今年是中国科学院院士、山东大学原校长潘承洞先生诞辰90周年。山东大学推出《潘承洞影印文集》，以激励更多年轻人在数学研究的无限疆域中不懈探索、矢志创新，鼓舞广大师生在励学教行的浩瀚征途上志存高远、爱国奉献。

潘承洞是中国数论学派的代表人物，山东大学数学学科的开拓者和领路人。《潘承洞影印文集》收录内容包括潘承洞发表在中外权威期刊上的38篇代表性论文、《哥德巴赫猜想》《素数定理的初等证明》等著作的序、绪论、引言和科普文章，数学家王元撰写的《潘承洞——生平与工作简介》，以及潘承洞论述目录。文集按照论文发表时的杂志原样影印结集，保留了论文的原貌，较为直观、系统地展现了潘承洞的学术思想和学术贡献。文集的字里行间，闪耀着一位数学家矢志科研、勇攀高峰的追求，一位教育家心有大我、至诚报国的信念。

作为潘承洞学术生涯的一个缩影，文集中的每一篇文章都承载了他的心血与智慧。翻阅这部文集，仿佛展开一场跨越时空的对话。

童年时，潘承洞经历了中华民族积贫积弱的年代，养成了坚强不屈之志，涵育了至诚报国之心。1952年，他以优异的成绩考入北京大学数学力学系。《潘承洞影印文集》收录的首篇论文发表于1956年的《北京大学学报（自然科学版）》，是他毕业论文的一部分。攻读研究生期间，他师从闵嗣鹤教授学习解析数论，参加华罗庚先生领导的“哥德巴赫猜想”讨论班，并与陈景润、王元等结识，共同开始摘取“数学皇冠上的明珠”的学术征程。文集收录的《论素数级数中之最小素数》《堆垒素数论的一些新成果》等论文，便发表于他在学术舞台初露峥嵘的这一时期。

1961年，自北京大学研究生毕业后，潘承洞被分配到山东大学数学系工作。短短几年里，他先后证明了命题“1+5”与“1+4”，被国际数学界公认为“实现了关键性的研究突破”，使中国在哥德巴赫猜想的研究中跃居世界领先地位。这是潘承洞学术生涯的一个高峰，文集收录了这一时期发表的数篇高质量论文，见证这位杰出的数学家追求真理、不懈攀登的足迹。

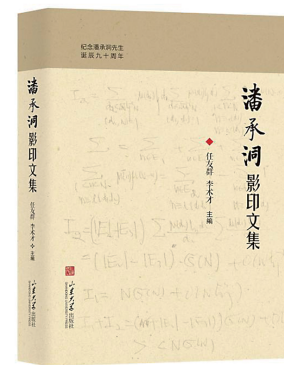
作为一名教育家，潘承洞先生眼光独到、谋划超前。在密码学和解析数论两个领域，王小云和刘建亚成为他的学术传承人。上世纪90年代，他敏锐意识到数论将在信息科学研究中拥有广阔前景，建议博士研究生王小云将主攻方向改为数论在密码学中的应用。后来王小云在密码学领域屡克难关，于2017年当选中国科学院院士。随着国际数学蓬勃发展，中国解析数论亟须现代化。他把学生刘建亚推荐到海外，刘建亚回国后，成为中国解析数论学派新一代的代表。2014年，刘建亚获得国家自然科学二等奖，这是该奖项自1982年以来唯一的解析数论领域获奖项目。

潘承洞主张“加强基础研究，为经济社会发展服务”，认为山东大学不但要注重纯数学的研究，更要大力发展应用数学。他提倡“文理并举”，支持成立的美学研究所、周易研究中心等相继入选教育部人文社会科学重点研究基地，延续了山东大学“文史见长”的优势，晶体材料、量子化学等学科也快速发展，形成新的特色。

潘承洞以最朴实的方式表达对人才的关爱。他在国内较早提出人才强校战略，“新老共进”的主张使一大批青年教师脱颖而出，并逐步在各自领域绽放光彩，成长为学科带头人，为国家现代化建设贡献积极力量。

对老一辈教育家最好的怀念，对教育家精神最好的弘扬，是戮力同心把教育事业向前推进。扎根中国大地办大学，要坚持把服务国家作为最高要求，努力培养更多堪当民族复兴大任的时代新人，为高水平科技自立自强作出贡献。

（作者为中国工程院院士、山东大学校长）



《潘承洞影印文集》：任友群、李木才主编；山东大学出版社出版

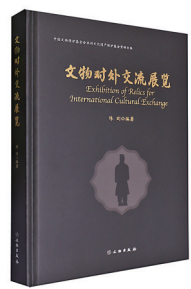
潘承洞

## 新书推荐



《星海求知：天文学的奥秘》：苏宜编著；人民邮电出版社出版。

本书图文并茂地科普天文学知识，带领读者用科学眼光探究奇妙壮丽的日月星辰。



《文物对外交流展览》：陈鸣编著；文物出版社出版。

本书较为全面地回顾了新中国文物对外交流历程，分析了文物在促进文化相融、民心相通上的重要作用。