



欧美风电发展的 经验与启示

Europe and the USA Wind Power
Development Experience and Enlightenment to China

肖创英 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



欧美风电发展的 经验与启示

Europe and the USA Wind Power
Development Experience and Enlightenment to China

ISBN 978-7-5123-0215-0



9 787512 302150 >

定价：45.00元

上架建议：电力工程/新能源发电

Europe and the USA Wind Power
Development Experience and Enlightenment to China

欧美风电发展的 经验与启示

肖创英 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书在全面收集整理欧美风电发展第一手资料的基础上,从发展理念、法律环境、政策措施、并网管理和经济效益等方面分析总结了欧美风电发展的经验,以及欧美在该领域的最新科技进展。基于丰富翔实的资料,本书还系统地介绍了我国第一个千万千瓦级风电基地——甘肃酒泉风电基地的实况,并对我国风电发展提出了相应的思路框架和措施。

本书既可作为能源、电力、风电等相关领域专业人员的研究参考书,也可作为关注可再生能源发展的非专业人士阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

欧美风电发展的经验与启示/肖创英主编. —北京:中国电力出版社,2010.4

ISBN 978-7-5123-0215-0

I. ①欧… II. ①肖… III. ①风力发电—经验—欧洲 ②风力发电—经验—美洲 ③风力发电—研究—中国 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 042358 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 http://www.cepp.com.cn)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010年4月第一版 2010年4月北京第一次印刷

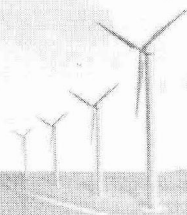
710毫米×980毫米 16开本 20.25印张 345千字

印数 0001—3000册 定价 45.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



联合国哥本哈根气候变化大会所热议的关于能源、环境及全球气候变暖的问题成为世界关注的焦点，加快发展可再生能源成为全世界的共识。能源是关系全球经济发展的关键资源。随着全球化石能源的渐枯，传统能源价格持续高位大幅波动及气候变化使人类的生存压力日益加剧，可再生能源在各国能源战略中逐渐占据重要地位。国际能源署在《世界能源展望 2008》中文版摘要中指出，现代可再生能源发展极为迅速，将于 2010 年后不久超过天然气，成为仅次于煤炭的第二大电力供应源。

除分布的中小型水电的可再生能源外，风电的开发技术最为成熟，且成本较低，最具大规模开发价值。当前，世界风电机组的单机容量已达 5~8MW，发电成本低于生物质能、太阳能等可再生能源。技术水平的提高和风电开发的规模效益将进一步降低风电的发电成本。因此，全世界主要经济体尤其是欧美便不约而同地将风电发展列入国家能源优先发展战略之一。

《欧美风电发展的经验与启示》一书在全面收集整理欧美风电发展第一手资料的基础上，系统地介绍了欧美国家在风电领域的技术、政策及管理方面的发展历史和现状，其中特别介绍了欧美在该领域的最新科技进展。基于丰富翔实的资料，该书从发展理念、法律环境、政策措施、并网管理和经济效益等方面分析总结了欧美风电发展的经验，并系统地介绍了我国第一个千万千瓦级风电基地——甘肃酒泉风电基本的实况，对我国风电发展提出了相应的思路框架和措施，这将有助于国内读者全面了解风电的有关知识和形势。

随着风电开发规模的不断扩大，目前全球风电发展不同程度地遇到了并网难题，本书还重点讨论了风电并网的相关问题，系统地论述了风电并网的现状、技术措施、经济手段和管理制度，强调了风电并网不同于常规能源并网的显著特点，有利于读者全面理解风电并网的相关技术和管理措施。

本书兼具学术性和科普性，既可作为能源、电力、风电等相关领域专业人员的研究参考书，也可作为关注可再生能源发展的非专业人士阅读和参考。它的出

版发行对我国风电的持续健康发展将起到促进作用。

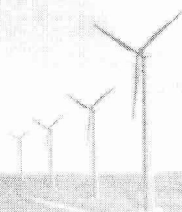
值得一提的是，该书的编者来自我国大型风电发展与研究的前沿“阵地”，具有丰富的实际工作经验和体会，对我国国情、风电发展特点及存在的问题，尤其对于具有中国特色的大规模风电发展问题认识甚为全面和深刻。

包括我自己在内的广大科技工作者和人民群众对这一闻名于世的首个“陆地风电三峡”怀有浓厚的兴趣，该著作的问世，正可满足这方面的要求。我们为世界上第一个千万千瓦级风电基地的建成感到高兴，并祝它在提升我国综合国力和环境保护中发挥其应有的作用。

感谢甘肃省电力公司和本书主编嘱予作序。

清华大学 卢强

2010年3月



随着我国经济高速发展和能源消费快速增长,全世界新增能源需求的 40% 以上来自中国。长期以来,我国的能源消费结构一直以煤炭为主,是世界主要经济体中煤炭消费比重最高的国家。如 2008 年,煤炭在我国能源消费总量的比重高达 70.2%。我国能源需求的快速增长和以煤炭为主的能源结构,决定了污染物排放等主要环保指标居高不下。我国已经成为 CO_2 、 SO_2 、粉尘等污染物排放量最大的国家。近年来,我国综合国力大幅度提升,人均 GDP 已经超过 3000 美元,这意味着国际社会要求我国在环保、全球变暖等方面承担更大的责任。面对污染物排放难以降低与国际社会要求承担更大责任的双重压力,加快发展可再生能源是我国能源战略的必然选择。

除水电外,风电是开发技术最成熟、开发成本最低,也是未来最具有大规模开发价值的可再生能源。随着全世界化石能源价格的上涨,风电成本已经与核电相当,远低于生物质能、太阳能等可再生能源的发电成本。近年来,随着风电设备制造水平的提高,其建设成本大幅度降低。大规模开发的规模效益也进一步降低了风电成本,全世界主要经济体不约而同地将风电发展列入国家能源优先发展战略之一。

世界上第一台用于发电的风力机诞生于 1887 年,受到当时技术、经济等因素的制约,主要解决了风力能否发电的问题;1973 年,世界范围内发生了石油危机,欧美国家为寻找替代化石燃料的能源,不约而同地开始关注风力发电,并投入大量资金研制现代风电机组,并于 20 世纪 80 年代建成示范风电场,风电开始进入补充能源的新阶段;到了 21 世纪 90 年代,为了减少 CO_2 等温室气体排放效应,风电作为比较成熟的可再生能源,呈现快速发展的态势,进入替代能源发展阶段。100 多年来,风电经过起步、补充和替代能源三个发展阶段。截至 2009 年底,世界风电装机容量 15 921.3 万 kW,其中,当年新增装机容量 3831 万 kW。自 1995 年以来,世界风电装机平均年增长率达 28.4%。预计到 2020 年,世界风电装机容量将增加到 19 亿 kW。欧美国家在发展风电的过程中积累了丰富的经验,未来风电将逐步成为主力电源,风力发电将进入新的发展阶段。

自1986年起步以来,我国风电仅仅历经20多年,却是发展速度最快的国家。2000年以来,我国风电装机容量增长了74.6倍、年均增长速度达到61.7%。尤其是《可再生能源法》颁布以来,我国风电装机容量已经连续四年翻番。截至2009年底,我国风电装机总容量已经达到2601万kW,位居世界第二。我国风电用了20多年的时间完成了欧美100多年的发展历程。2009年,国家陆续提出了建设7个千万千瓦级风电基地、几十个百万千瓦级风电基地的宏伟规划,我国的风电将以前所未有的速度快速发展。伴随着我国风电的超常规高速发展,相关政策、制度、规范和管理方面的不适应也逐步显现,有必要借鉴欧美国家风电发展的成功经验。

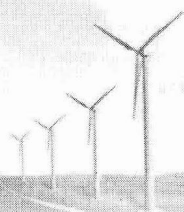
在本书编写过程中,参阅了近400件国内外书籍、论文、法规,积累了丰富的资料,全面收集整理了欧美风电发展的第一手资料和相关研究成果,系统地介绍了欧美在风电领域的发展历程、并网管理和关键技术,特别介绍了欧美在该领域的最新政策法规、管理经验和科技进展。基于丰富翔实的资料,本书从发展观念、法律环境、政策措施、并网管理和经济效益等方面分析总结了欧美风电发展的经验,有利于读者全面了解风电的有关知识和形势。对欧美风电发展的成功经验进行分析的基础上,得出对我国风电发展有借鉴意义的启示;同时结合我国第一个千万千瓦级风电基地——甘肃酒泉风电基地的实践,研究探索有中国特色的资源导向型、超大规模风电基地的有关问题,为未来我国甚至世界大规模风电基地的建设提供借鉴。

本书由甘肃省电力公司编写,肖创英主编,并负责整体策划和组织协调,文博负责编制大纲并统稿,汪宁渤负责具体组织编写。甘肃省电力公司风电技术中心陟晶、马彦宏编写了第一章,丁坤、何世恩编写了第二章,何世恩、王建东编写了第三章,王建东、陟晶编写了第四章,王建东、丁坤编写了第五章,汪宁渤、王建东编写了第六章,汪宁渤、马彦宏编写了第七章,马彦宏编写了附录,夏懿、赵龙等参与了本书部分图稿的绘制和资料收集工作。清华大学李国杰博士对全书进行了审阅和修改,周吉安、范雪峰、杨德州、李晓虎、刘福潮和夏懿等分别审阅并修改了部分章节。

由于时间紧迫,加之编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2010年3月



序
前言

第一章 概述

第一节 风的形成与风能资源的分布	1
第二节 风力发电的发展历史和发展前景	7
第三节 风力发电的基本原理	13
第四节 现代风电机组	15
第五节 并网风电场	23
第六节 海上风电场	27
本章参考文献	34

第二章 欧美风电发展概况

第一节 丹麦风电发展	36
第二节 德国风电发展	50
第三节 美国风电发展	61
第四节 西班牙的风电发展	67
第五节 其他国家的风电发展	73
本章参考文献	82

第三章 欧美风电并网管理

第一节 风电在电网中的角色和对电网的影响	84
第二节 风电并网的技术规定	90
第三节 风电与电网的协调发展	99
第四节 市场化的风电	109
本章参考文献	128

第四章 风电发展的关键技术

第一节 风电机组的关键技术·····	131
第二节 风电场的关键技术·····	146
第三节 电网接纳风电的关键技术·····	155
第四节 适应风电发展的现代储能技术·····	170
第五节 风电预测预报技术·····	181
本章参考文献·····	193

第五章 欧美风电发展的经验

第一节 政府与公众的风电发展理念·····	199
第二节 国家能源战略与可再生能源法律环境·····	206
第三节 风电发展的政策保证措施·····	218
第四节 风电场的并网管理经验·····	225
第五节 风电场经济与社会效益·····	238
本章参考文献·····	245

第六章 欧美风电发展对中国的启示

第一节 突出国家能源战略的引领作用·····	247
第二节 加快风电发展的相关法律、政策体系建设·····	249
第三节 完善风电发展的相关体制、机制·····	253
第四节 建立健全风电发展的技术和管理措施·····	257
第五节 培育全民的社会责任意识·····	261
本章参考文献·····	265

第七章 中国风电发展范例——甘肃酒泉千万千瓦级风电基地

第一节 风电基地简介·····	266
第二节 风电基地风电汇集及接入系统·····	275
第三节 存在的主要问题与挑战·····	277
第四节 应对大规模风电发展挑战的措施·····	281
第五节 酒泉风电基地送出关键技术及重点研究课题·····	284
第六节 经济与社会效益评价分析·····	289
第七节 未来展望——甘肃河西新能源基地规划简介·····	292
本章参考文献·····	299

附录 A 中国有关风电的法律、法规及政策..... 300

附录 B 国内外风电统计资料..... 301

附录 C 国内外风电发展规划..... 308

附录 D 国外风电并网技术标准..... 313

附录 E 中国已颁布风电场并网技术标准..... 314

第一章

概 述

社会的发展和生产力的进步使人类对化石能源的依赖越来越大,环境污染、全球气候变暖等问题随之出现。随着化石能源的大量开采,人类还面临着能源危机的挑战,为了保护环境、遏制全球气候变暖、保障能源安全、维护人类社会的可持续发展,世界各国越来越重视对可再生能源的开发利用。作为一种储量巨大的可再生能源,风能开发利用历史长远,技术比较成熟,与其他形式的可再生能源相比,技术经济性较高,具备大规模开发的条件,得到了广泛的应用。

本章对风力发电的原理及其发展历史和现状进行了介绍,内容主要包括风能资源的分布、风力发电的历史、风力发电的原理、现代风电机组、并网风电场、海上风电场及风电发展的趋势等。

第一节 风的形成与风能资源的分布

地球上任何地方都在吸收太阳的热量,但地面每个部位受热的不均匀性造成了空气冷暖程度的不同,因此暖空气膨胀后变轻上升,冷空气收缩后变重下降,这种冷暖空气的流动形成了风。风是相对于地表面的空气运动,通常是指它的水平分量,以风向、风速或风力表示。

风向指气流的来向,常用 16 个方位表示,风向 16 方位图如图 1-1 所示。静风则记为 C。

风速是空气在单位时间内移动的水平距离,以 m/s 为单位。大气中的水平风速一般为 $1\sim 10\text{m/s}$,台风、龙卷风则会达到 102m/s 。风力则是根据风的强弱对风进行分级,通常分为 18 级。风力等级是根据风对地面或海面物体影响而引起的各种现象来估计风力的大小,通常采用蒲福风级(蒲福风级是英国人 Francis Beaufort 于 1805 年根据风对地面物体或海面的影响程度而定出的)。风力按

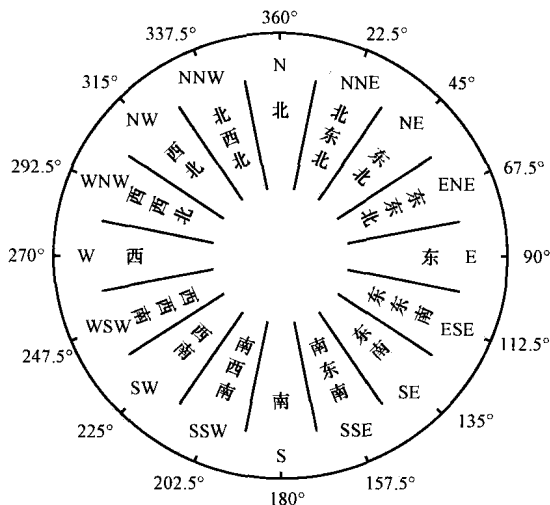
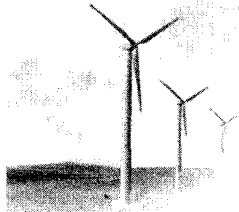


图 1-1 风向 16 方位图

强弱可划分为“0”至“12”共 13 个等级，即目前世界气象组织所建议的分级。20 世纪 50 年代，随着人类测风仪器技术的进步，量度到的自然界的风实际上大大超出了最大级 12 级，于是就把风级扩展到 17 级，即共 18 个等级。

一、风的形成

气压在水平方向分布的不均匀是风形成的直接原因。气压指作用在物体表面单位面积上大气压力，即作用在单位面积上空气柱的重力。风是不同气压带之间气压梯度力作用的结果：在赤道和低纬度地区，太阳高度角大，日照时间长，太阳辐射强度较强，地面和大气所接受的热量较多，空气温度较高，在高纬度地区则相反。这种高低纬度之间的温度差异，形成了南北之间的气压梯度，便形成了风，风沿着气压梯度方向，从高压向低压吹。

大气运动除了受气压梯度力的作用外，还受到地转偏向力的影响。地球自转运动而形成的地转偏向力，会使空气的水平运动方向发生偏移。在北半球，气流向右偏转，在南半球，气流向左偏转，地转偏向力在赤道处为零。随着纬度的增高，地转偏向力不断增大，并在极地达到最大。

大气运动是气压梯度力和地转偏向力综合作用的结果。实际上，地表附近的风不仅受这两个力的支配，而且在很大程度上还受海洋和地形的影响：山隘和海峡不但能改变风运动的方向，而且还能使风速增大；而丘陵、山地的摩擦力较大

从而使风速减小。

(一) 大气环流

大气的运动是有规律的，世界规模内大范围的大气运动称为大气环流。大气环流如图 1-2 所示。

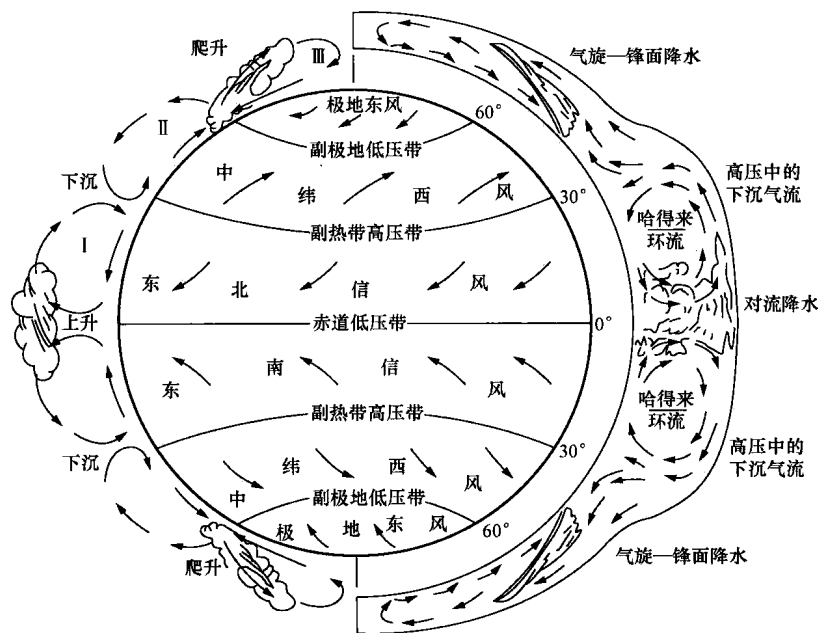


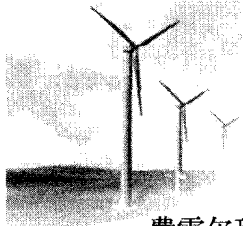
图 1-2 大气环流

大气环流通常包含纬向环流、水平环流和径圈环流三个部分。

纬向环流指大气盛行的以极地为中心并绕其旋转的纬向气流，这是大气环流的最基本状态。在对流层里，其基本的特征是：大气沿纬度圈方向绕地球运行，在低纬地区常盛行东风，称为东风带，又称为信风带；中纬度地区则盛行西风，称为西风带；在极地附近，存在较弱的东风，称为极地东风带。

水平环流指在中高纬度的水平面上盛行的叠加在纬向环流上的波状气流。通常北半球冬季为三个波，夏季为四个波，三波与四波之间的转换表征季节变化。

径圈环流指在南北和垂直方向的剖面上，由大气水平运动和垂直运动所构成的运动状态。对流层的径圈环流存在三个圈：低纬度地区气流在赤道上升，在中低纬下沉，高层气流向北运动，底层气流向南运动，又称为哈得来环流；中纬度地区气流下沉，在中高纬上升，高层气流向南运动，底层气流向北运动，又称为



费雷尔环流；极地地区气流在极地下沉，在高纬上升，高层气流向北运动，底层气流向南运动。

由纬向环流、水平环流和径圈环流的共同作用，地球上形成了三个按纬度划分的复杂的环流圈，分别为低纬度环流、极地环流和中纬度环流。

（二）季风环流

由于陆地和海洋受热、冷却程度的不同，陆地和海洋之间形成了大范围、风向随季节有规律改变的风，这种风称为季风。

夏季，陆地增热比海洋剧烈，因此在地表附近，海洋上形成高压，陆地形成低压，底层空气从海洋流向陆地，而在高空，气流方向相反，形成夏季的季风环流。冬季，陆地迅速冷却，而海洋上温度降低较慢，因此在陆地上形成高压，海洋上形成低压，底层空气由陆地流向海洋，高层气流方向则相反，形成冬季的季风环流。

世界上季风明显的地区主要有南亚、东亚、非洲中部、北美东南部、南美巴西东部及澳大利亚北部，其中，以印度和东亚季风最为著名。

（三）海陆风

因海洋和陆地受热不均，在海岸附近形成了以天为周期的风系。白天，风从海上吹向陆地；夜晚，风从陆地吹向海洋。前者称为海风，后者称为陆风，合称为海陆风。

海陆风的水平范围可达几十千米，热带地区的海陆风最强，风速达 7m/s 。

二、世界风能资源及其分布

根据国际气象组织估算：全球风能蕴藏量约为 $3 \times 10^{17}\text{kW}$ ，其中可利用的风能为 $2 \times 10^{10}\text{kW}$ 。而 Palmer Cosslett Putnam 则认为，全球全部风能是 10^{17}kW ，其中可被利用的风能为 10^{13}kW 。

由于风能来源于太阳能，因此，也有人做出如下假定：在太阳能进入地球大气时，每平方米的功率为 1.35kW ，假定约有 60% 的能量留在大气层内，其总能量为 $1.04 \times 10^{14}\text{kW}$ 。如果设想风能是该值的 $1\% \sim 2\%$ ，则风能为 $1.04 \times 10^{12} \sim 2.08 \times 10^{12}\text{kW}$ 。

尽管各种估算数值有所不同，但总的来说，全球具有巨大的风能资源，风能是取之不竭、用之不尽、可再生的清洁能源。

根据美国国家航空和航天局（NASA）2004 年所作的调查，世界 10m 高度层平均风速分布如图 1-3 所示。

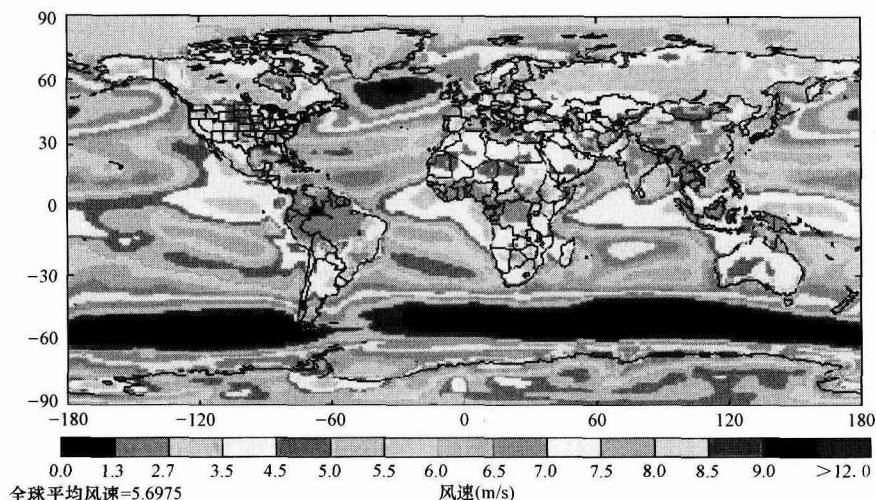


图 1-3 世界 10m 高度层风速分布

三、我国的风能资源及其分布

根据中国气象局第三次全国风能资源普查的结果,我国陆地 10m 高度层风能资源理论可开发储量为 43.5 亿 kW、技术可开发量为 2.97 亿 kW,技术可开发(风能功率密度 $150\text{W}/\text{m}^2$ 以上)的陆地面积约为 $2 \times 10^{11}\text{m}^2$ 。

2006 年,国家气候中心采用数值模拟方法对我国风能资源进行了评价,结论是:在不考虑青藏高原的情况下,全国陆地 10m 高度层风能资源技术可开发量为 25.48 亿 kW,大大超过第三次全国风能资源普查的结果。

受大气环流、季风和海陆风的影响,我国风能资源较丰富的地区,主要分布在北部和沿海及近海岛屿两个带状范围内,青藏高原北部及内陆的一些特殊地形或湖岸地区也有一些风能较丰富的地区,中国年平均风能功率密度分布如图 1-4 所示。

(一) 三北地区(东北、华北、西北)

三北地区风能功率密度在 $200 \sim 300\text{W}/\text{m}^2$ 以上,有的可达 $500\text{W}/\text{m}^2$ 以上。如阿拉山口、达坂城、辉腾锡勒、锡林浩特的灰腾梁等地区,可利用的小时数在 5000h 以上,有的甚至可以达到 7000h 以上。这主要由于三北地区处于中高纬度,受西伯利亚高压控制的冬季季风和副热带高压控制的夏季季风影响较大。

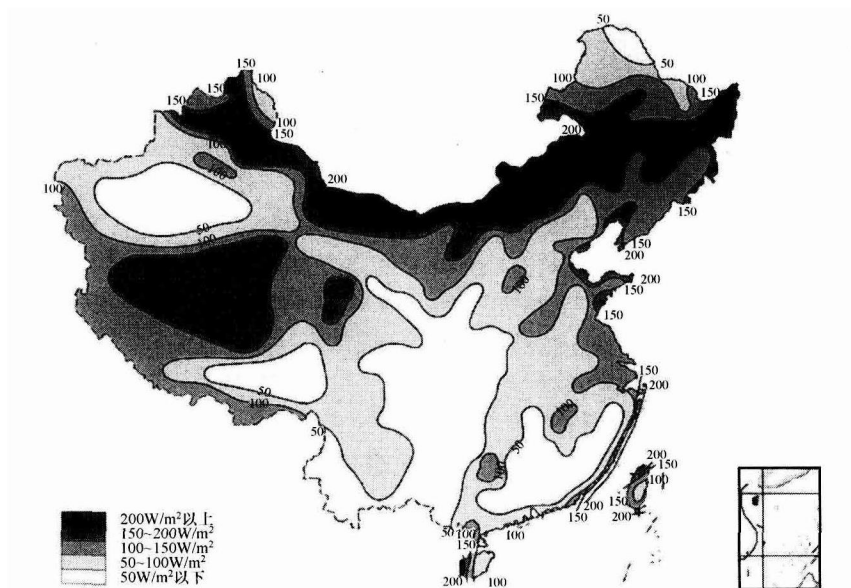
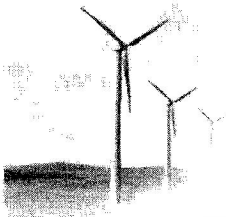


图 1-4 中国年平均风能功率密度分布

(二) 东南沿海地区

东南沿海地区风能功率密度在 $200\text{W}/\text{m}^2$ 以上，风能功率密度线基本平行于海岸线，部分沿海岛屿的风能功率密度达到 $500\text{W}/\text{m}^2$ 以上。如台山、平潭、东山、南鹿、大陈、嵊泗、南澳、马祖、马公、东沙等，可利用小时数达到 $7000\sim 8000\text{h}$ 。

东南沿海地区一方面受东亚季风影响，在冬季和夏季会形成较大的风，另一方面受海陆风影响。由于海洋表面平滑，摩擦力小，这里的风速一般比大陆高 $2\sim 4\text{m}/\text{s}$ 。

(三) 青藏高原北部

青藏高原北部风能密度为 $150\sim 200\text{W}/\text{m}^2$ ，可利用小时数为 $4000\sim 5000\text{h}$ ，全年风速不小于 $6\text{m}/\text{s}$ 的时数为 3000h 。但青藏高原海拔高、空气密度小，有效风能密度也较低。

(四) 内陆风能丰富区

除三北地区、东南沿海地区和青藏高原北部之外，内陆风能功率密度一般在 $100\text{W}/\text{m}^2$ 以下，可利用小时数在 3000h 以下。内陆一些地区由于湖泊和特殊地形的影响，风能也较丰富，如一些湖泊和山口，但是这些地区一般面积不大。