

Wind power generation

严慧敏 袁 越 梁志鹏 编著

江苏风力发电 发展研究 2008

河海大学出版社



严慧敏 袁 越 梁志鹏 编著

江苏风力发电 发展研究 2008

河海大学出版社

Wind power generation



图书在版编目(CIP)数据

江苏风力发电发展研究/严慧敏,袁越,梁志鹏编著.
南京:河海大学出版社,2008.12
ISBN 978-7-5630-2588-6

I. 江… II. ①严… ②袁… ③梁… III. 风力
发电—电力工业—研究—江苏省 IV. F426.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 033682 号

书 名	江苏风力发电发展研究
书 号	ISBN 978-7-5630-2588-6/F·273
责任编辑	周 勤 潘仲华
装帧设计	杭永鸿
出版发行	河海大学出版社
地 址	南京市西康路 1 号(邮编:210098)
电 话	(025)83737852(行政部) (025)83722833(发行部)
经 销	江苏省新华发行集团有限公司
排 版	南京理工大学印刷厂
印 刷	南京捷迅印务有限公司
开 本	787 毫米×1 092 毫米 1/16
印 张	10.75 彩插 8 页
字 数	205 千字
版 次	2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷
定 价	30.00 元

前言

发展可再生能源和提高能源利用效率已成为全球无可争议的可持续发展能源的两个重要部分。风电作为技术较成熟、具有规模化开发和商业化发展前景的可再生能源在世界范围内得到迅速发展。近年来,装机规模以年均 30% 的速度增加,2007 年全球风电新增装机 1 970 万千瓦,总装机容量达到 9 385 万千瓦,其中装机容量最大的德国已达到 2 225 万千瓦。

随着能源安全、环境保护等方面受到日益重视,特别是《中华人民共和国可再生能源法》的贯彻实施,我国风电建设出现了迅猛发展的态势。截至 2007 年底,我国(除台湾省外)风电场增加到 158 个,累计装机容量 590.6 万千瓦,2007 年我国(除台湾省外)新增装机容量 330.7 万千瓦。与 2006 年累计装机 259.9 万千瓦相比,2007 年累计装机增长率为 127.2%,2007 年风电上网电量约 52 亿度。

江苏省是全国经济大省,每年创造的国内生产总值占全国的近 10%。随着经济的快速发展,能源需求量日益增长,但省内常规能源资源煤炭、石油、天然气及水力资源比较匮乏,是典型的能源输入型地区。江苏省海岸线较长,风能资源较丰富,发展风电是调整能源结构、增加能源供应、减少环境污染的战略举措。江苏风电随着国家第一批风电特许权项目于 2003 年正式启动,近年来发展速度较快。2007 年底,江苏省风电装机容量达到 29.6 万千瓦,占全国的 5%,其中 2007 年新增 18.8 万千瓦,占全国的 5.6%。江苏风电经过 4~5 年的发展已初见成效,且势头强劲,但也存在一些问题,如风电发展和港口、经济开发区的布局存在部分冲突;风电成本较高,但上网电价水平较低;风电并网对电力系统的电压及潮流分布产生影响,影响电网的稳定性;风电的随机性给电网调度带来困难等等。因此对江苏风力发电发展进行深入研究就显得非常重要。

为了寻求江苏风电发展的良好氛围,促进江苏风电快速、和谐地发展,在美国能源基金会(EF)、中国政府/世界银行/全球环境基金(GOC/WB/GEF)的资助下,河海大学开展了江苏风力发电发展研究,包括风电项目的跟踪与评估、风电规划、风电政策、风电并网、经济分析等诸多方面。本书在调研国内外风电发展现状、政策和对江苏省风电项目广泛深入调研的基础上,总结了江苏风电发展过程中出现的具体问题,分析了江苏省风电项目的建设成本、发电成本等,研究了江苏省风电电价问题,从建设成本、税收、收益率等方面进行电价的敏感性分析,提出了江苏省

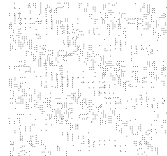
风电合理的电价水平,分析了特许权体系与固定电价体系在江苏省风电开发中的适用性,分析了风电并网对江苏电网产生的影响及江苏电网的应对措施,对江苏风电发展进行了初步规划,提出了实现规划目标的政策建议。

感谢美国能源基金会(EF),感谢中国政府/世界银行/全球环境基金(GOC/WB/GEF),感谢河海大学出版社,感谢所有给予我们的研究提供支持帮助的专家与领导。

本书第7章由袁越编著,第3章、第4章由严慧敏、袁越共同编著,第5章由梁志鹏、严慧敏共同编著,第9章由严慧敏、金宇清共同编著,其余部分由严慧敏编著。由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请大家批评指正。

作者

2008年12月



目录 Contents

1. 风能资源及分布 / 001

- 1.1 我国风能资源情况 / 001
- 1.2 我国风能资源分布 / 003
- 1.3 我国风能资源储量 / 004
- 1.4 江苏风能资源情况 / 005
- 1.5 江苏风能资源储量 / 007
- 1.6 江苏风能资源分析 / 008
- 1.7 江苏风能资源总体评价 / 009

2. 世界风电发展现状 / 010

- 2.1 概况 / 010
- 2.2 世界风电市场介绍 / 012
- 2.3 世界风电产业情况 / 017
- 2.4 世界风电发展趋势 / 024

3. 我国风电发展现状 / 026

- 3.1 我国风电的特点 / 026
- 3.2 我国并网风电场发展现状 / 026
- 3.3 我国离网型风电发展现状 / 030
- 3.4 我国风电产业情况 / 031
- 3.5 我国风电发展规划目标 / 037

4. 江苏风电发展现状 / 038

- 4.1 江苏发展风电的必要性 / 038
- 4.2 江苏风电建设现状 / 039
- 4.3 江苏各风电场概况 / 040
- 4.4 江苏风电产业现状 / 042
- 4.5 江苏发展风电的独特优势 / 046
- 4.6 江苏风电发展存在的主要问题 / 047
- 4.7 江苏风电发展规划目标 / 048

5. 江苏风电特许权项目介绍 / 051

- 5.1 如东第一风电特许权项目 / 052
- 5.2 如东第二风电特许权项目 / 057
- 5.3 江苏省其他风电特许权项目 / 061
- 5.4 风电特许权项目对江苏风电发展的影响分析 / 061

6. 风电电价分析 / 063

- 6.1 风电场建设成本分析 / 063
- 6.2 江苏风电场技术经济参数 / 064
- 6.3 江苏风电的电价计算 / 065
- 6.4 风电电价的敏感性分析 / 065
- 6.5 江苏风电场赢利情况分析 / 069
- 6.6 风电定价机制的国际经验 / 070
- 6.7 对江苏风电电价的政策建议 / 073

7. 风电并网运行研究 / 075

- 7.1 风电场并网方式 / 075
- 7.2 风电并网带来的主要挑战及对策 / 078
- 7.3 风电并网的相关标准 / 086
- 7.4 江苏沿海风电场并网概况 / 093

8. 风电与环境 / 097

- 8.1 风电的环境效益 / 097
- 8.2 风电对环境的影响 / 098

9. 风电经济性分析 / 101

- 9.1 分析方法 / 101
- 9.2 火力发电的供应成本 / 101
- 9.3 火力发电的外部经济成本 / 103
- 9.4 风力发电供应曲线的计算 / 105
- 9.5 风力发电的经济性分析 / 107

10. 风电发展政策研究 / 109

- 10.1 世界风电强国的风力发电政策 / 109

- 10.2 我国风电发展的相关政策 / 114
- 10.3 国内外可再生能源政策比较分析 / 117
- 10.4 江苏风电发展政策措施 / 119

彩色附图 / 121

附录 / 129

- 附录一 2007 年我国风电场当年装机 / 129
- 附录二 2007 年我国风电场累计装机 / 137
- 附录三 全国风机整机厂基本情况 / 155
- 附录四 风力发电装置国家和国际标准 / 160
- 附录五 江苏省风力发电装备发展规划纲要 / 162
- 附录六 江苏省风力发电成套机组及关键配套件重点项目 / 168

主要参考文献 / 171

根据世界气象组织(WMO)和中国气象局气象科学研究院分析,地球上可利用的风能资源约 200 亿千瓦,是地球上可利用水能的 20 倍,大约是世界总能耗的 3 倍。风能在时间和空间分布上有很强的地域性,风电技术属于资源依赖型技术,选择风资源较好区域建设风电场对其经济性具有至关重要的作用。

1.1 我国风能资源情况

1.1.1 我国风资源概况

我国幅员辽阔,陆疆总长 2 万多 km,海岸线约为 18 000 km,风能资源丰富。我国现有风电场场址的年平均风速均达到 6 m/s 以上。一般认为,可将风电场风况分为三类:年平均风速 6 m/s 以上为较好;7 m/s 以上为好;8 m/s 以上为很好。我国年平均风速 6 m/s 以上的地区大约占全国总面积的 1/100(就内陆而言),主要分布在长江到南澳岛之间的东南沿海及其岛屿,包括山东、辽东半岛、黄海之滨,南澳岛以西的南海沿海、海南岛和南海诸岛,内蒙古从阴山山脉以北到大兴安岭以北,新疆达坂城,阿拉山口,河西走廊,松花江下游,张家口北部等地区以及分布各地的高山山口和山顶。

1.1.2 风能资源储量估算方法

风功率密度蕴含风速、风速频率分布和空气密度的影响,是风电场风能资源的综合指标。风功率密度是指气流在单位时间内垂直流过单位面积的能量,与风速的立方和空气密度成正比。由于一年是地球气候变化的一个周期,因此采用年平均风功率密度衡量风能资源储量。

根据《全国风能资源评价技术规定》和其他有关规定,分别求出风功率密度 $w < 50 \text{ W/m}^2$ 、 $50 \sim 100 \text{ W/m}^2$ 、 $100 \sim 150 \text{ W/m}^2$ 、 $150 \sim 200 \text{ W/m}^2$ 、 $> 200 \text{ W/m}^2$ 各区域的面积,则其风能资源总储量为:

$$\text{风能资源总储量} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n S_i P_i,$$

其中： n ——风功率密度等级数；

S_i ——年平均风功率密度分布图中各风功率密度等值线间面积；

P_i ——各风功率密度等值线间区域的风功率代表值(取中值)。

根据《全国风能资源评价技术规定》和其他有关规定,风能资源的实际可开发量是总储量的 $1/10$,并考虑风机叶片面积系数 0.785 得到。风能资源技术开发量为年平均风功率密度在 150 W/m^2 及以上的区域风能资源储量值 $\times 0.785$ 。

1.1.3 风能资源分区标准

根据年平均风功率密度可将风能资源划分为风能资源极丰富区、风能资源丰富区、风能资源较丰富区、风能资源一般区、风能资源贫乏区。年平均风功率密度 $>200\text{ W/m}^2$ 为风能资源极丰富区;年平均风功率密度在 $150\sim 200\text{ W/m}^2$ 为风能资源丰富区;年平均风功率密度在 $100\sim 150\text{ W/m}^2$ 为风能资源较丰富区;年平均风功率密度在 $50\sim 100\text{ W/m}^2$ 为风能资源一般区;年平均风功率密度 $<50\text{ W/m}^2$ 为风能资源贫乏区。全国风能资源分布图如图 1-1、图 1-2 所示。

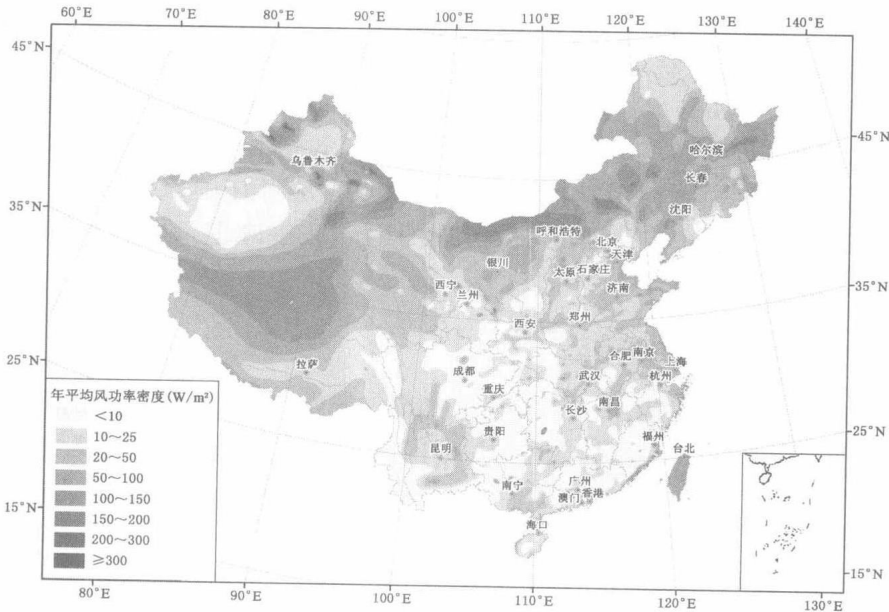


图 1-1 全国年平均风功率密度图(请另见书后彩色附图)

资料来源:中国气象局。

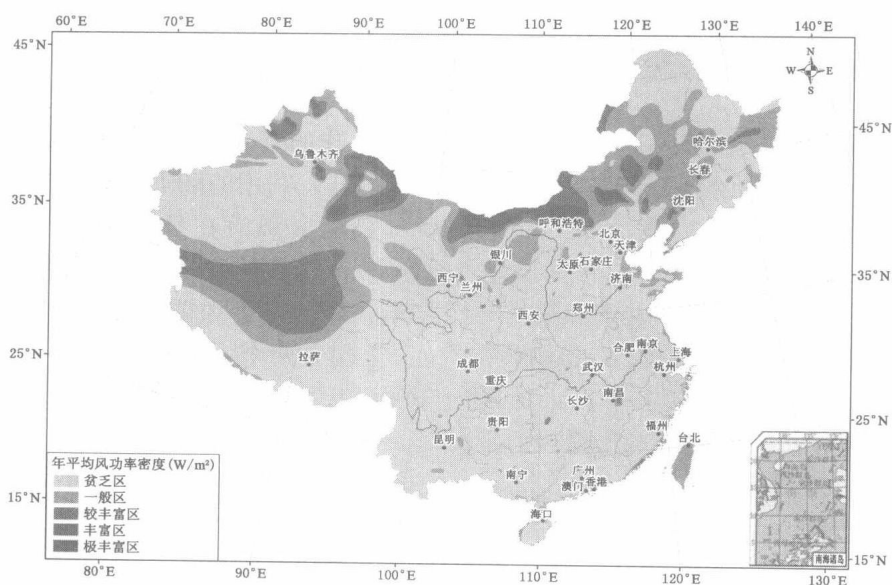


图 1-2 全国年平均风功率密度区域分布图(请另见书后彩色附图)

资料来源: 中国气象局。

1.2 我国风能资源分布

我国风能资源丰富的地区主要分布在东南沿海及附近岛屿,内蒙古、新疆和甘肃河西走廊,北部(东北、华北、西北)地区和青藏高原的部分地区。另外,内陆也有个别风能丰富点,近海风能资源非常丰富。

(1) 沿海及其岛屿地区风能丰富带:沿海及其岛屿地区包括山东、江苏、上海、浙江、福建、广东、广西和海南等省(市)沿海近 10 km 宽的地带,年风功率密度在 200 W/m^2 以上,风功率密度线平行于海岸线。

(2) 北部地区风能丰富带:北部地区风能丰富带包括东北三省、河北、内蒙古、甘肃、宁夏和新疆等省(自治区)近 200 km 宽的地带。年风功率密度在 $200 \sim 300 \text{ W/m}^2$ 以上,有的可达 500 W/m^2 以上,如阿拉山口、达坂城、辉腾锡勒、锡林浩特的灰腾梁、承德围场等。

(3) 内陆风能丰富区:在两个风能丰富带之外,年风功率密度一般在 100 W/m^2 以下,但是在一些地区由于湖泊和特殊地形的影响,风能资源也较丰富。

(4) 近海风能丰富区:东部沿海水深 5 m 到 20 m 的海域面积辽阔,按照与陆上风能资源同样的方法估测,10 m 高度可利用的风能资源约是陆上的 3~5 倍,而且距离电力负荷中心很近。

1.3 我国风能资源储量

根据中国气象局第三次全国风能资源评价工作的结果,全国陆上距地 10 m 高度风能资源总储量约 43.5 亿 kW(见表 1-1),可开发利用的陆上风能资源储量有 2.97 亿 kW,技术可开发面积约 20 万 km²,风能资源潜在技术可开发储量约 0.78 亿 kW。理论上 50 m 高度的风能资源是 10 m 高度的 2~3 倍,由此推算我国陆上 50 m 高度蕴藏的风能资源超过 5 亿 kW,占世界陆上风能资源的 1/10(世界陆上风能资源估计 53 亿 kW),居世界首位。全国有两个大的风力带,一个是“新疆—甘肃—宁夏—内蒙古—吉林”的陆上风力带;另一个是“辽东半岛—胶东半岛—东南沿海—海南岛”的沿海风力带。

表 1-1 全国陆上 10 m 高度风能资源储量

省 份	<50 W/m ²	50~ 100 W/m ²	100~ 150 W/m ²	>150 W/m ²		总储量 (万 kW)	技术可 开发量 (万 kW)	潜在技术 可开发量 (万 kW)
				储量 (万 kW)	面积(km ²)			
北 京	433	55	9			498		1
上 海	110	95	44	62	342	310	49	3
天 津	343	121	34			498		3
重 庆	1 099	14	8	16	87	1 137	13	1
黑龙江	7 288	12 926	1 473			21 687		116
吉 林	3 482	5 729	22	77	511	9 310	60	2
辽 宁	2 210	5 659	732	320	2 100	8 921	252	57
内蒙古	11 472	37 740	21 496	19 108	105 283	89 816	15 000	1 687
河 北	4 074	1 561	658	1 107	7 378	7 400	869	52
山 东	4 067	1 910	51	121	619	6 150	95	4
山 西	4 056	661	41	55	369	4 813	43	3
河 南	3 584					3 584		
江 苏	2 805	349	90	226	1 505	3 469	177	7
江 西	2 407	565	424	59	391	3 454	46	33
浙 江	1 660	170	120	170	850	2 120	134	9
福 建	1 385	187	401	418	1 901	2 392	328	32
广 东	2 491	213	171	314	2 024	3 188	246	13
海 南	600	156	72			828		6
广 西	3 924	197	11			4 132		1
云 南	9 459	2 832				12 291		

(续 表)

省 份	<50 W/m ²	50~ 100 W/m ²	100~ 150 W/m ²	>150 W/m ²		总储量 (万 kW)	技术可 开发量 (万 kW)	潜在技术 可开发量 (万 kW)
				储量 (万 kW)	面积(km ²)			
贵 州	2 304	1				2 305		
四 川	7 937	829	70			8 835		5
湖 南	2 938	50	235	37	170	3 259	29	18
湖 北	3 141	53		38	190	3 233	30	
安 徽	3 179	0				3 179		
陕 西	3 649	159				3 808		
西 藏	14 355	23 512	39 413			77 280		3 094
贵 州	2 304	1				2 305		
新 疆	21 681	29 199	22 447	15 294	80 058	88 621	12 006	1 762
宁 夏	1 540	411	59	83	510	2 092	65	5
青 海	11 606	17 313	11 284			40 202		886
甘 肃	7 289	4 857	1 460	355	2 072	13 962	279	115
台 湾						2 235		
合 计					206 361	435 009	29 722	7 915

中国东部沿海水深在 2~15 m 之间的浅海海域面积辽阔,风能资源丰富,风速比较稳定。据中国气象科学研究院初步估计,近海风能资源约为陆上的 3~5 倍。若按 3 倍计算,则近海风能资源约为 9 亿 kW,这样,陆上和近海 10 m 高处技术可开发风能资源总量约为 12 亿 kW。

中国气象局最近采用数值模拟方法获得的风能资源结果表明,在 50 m 高条件下,我国陆地风能资源技术可开发储量约为 26.8 亿 kW。虽然采用不同方法对风能资源评价结果相差较大,但不影响“我国风能资源丰富”这一结论。我国风能资源情况正在进一步观测中。

1.4 江苏风能资源情况

根据江苏省气候中心的风能资源评价报告,江苏省年平均风速分布图和年平均风功率密度分布图如图 1-3、图 1-4(由全省 67 个气象观测站的距地 10 m 高度的数据形成)。

1) 年平均风速分布

根据气象站的统计结果,江苏省大部分地区的 10 m 高度年平均风速在 2.0~3.0 m/s 之间。沿海地区风速等值线基本与海岸线平行,风速从沿海到内陆递减。

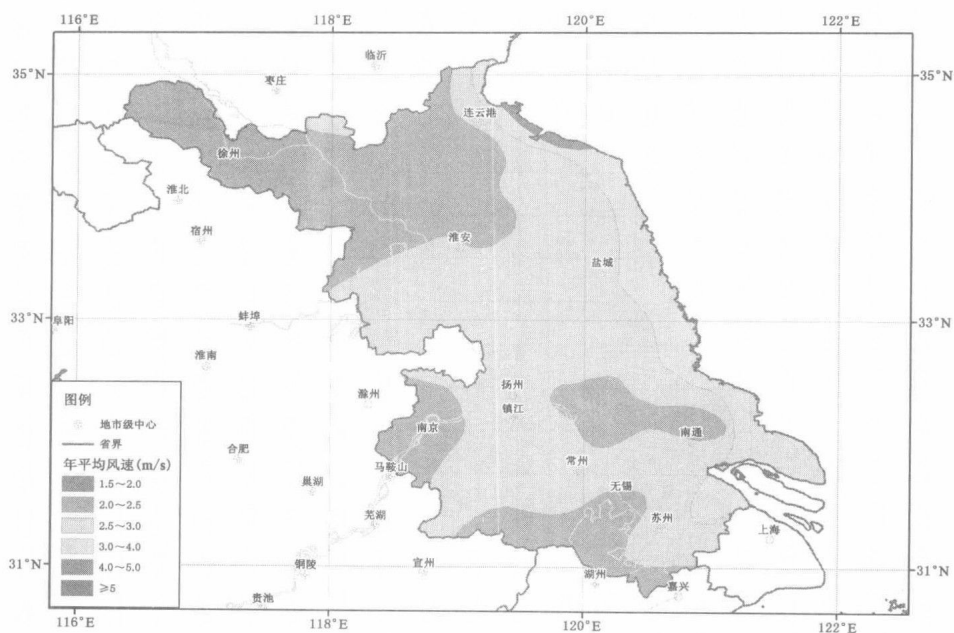


图 1-3 江苏省年平均风速分布图(请另见书后彩色附图)

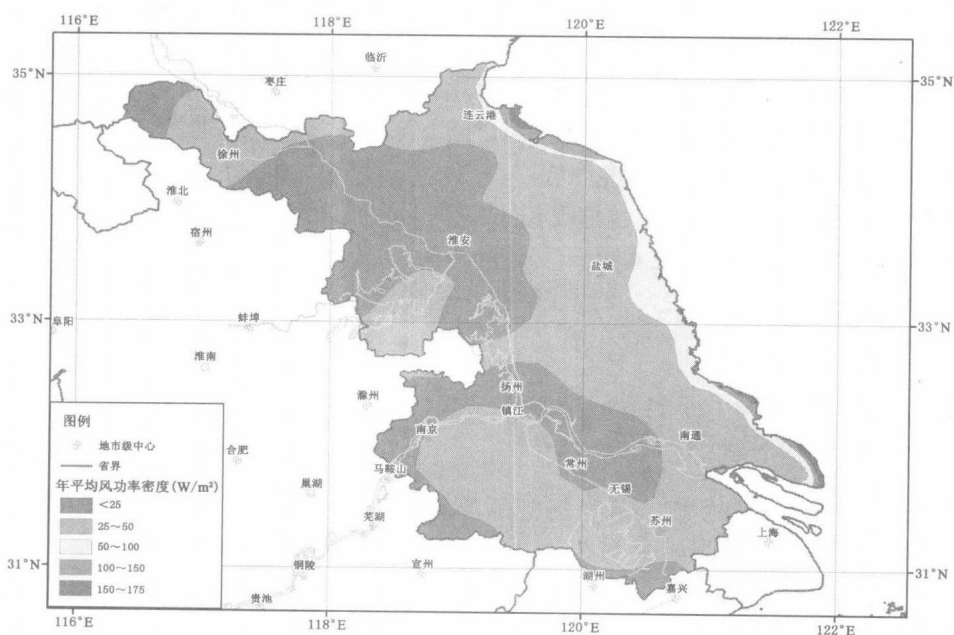


图 1-4 江苏省年平均风功率密度分布图(请另见书后彩色附图)

全省年平均风速高值区主要位于沿海,沿海及太湖地区年平均风速 3.0 m/s 以上,尤其是在苏北连云港沿海地区,年平均风速在 4.0 m/s 以上。年平均风速最大值在海岛上,其中西连岛年平均风速达到 5.2 m/s;最小值在沭阳,年平均风速仅 1.8 m/s。

2) 年平均风功率密度分布

全省大部分地区年平均风功率密度在 25~100 W/m² 之间,沿海及太湖地区风功率密度较大,其中沿海岸地区可达 100 W/m² 以上,尤其是苏北连云港和南通沿海地区年平均风功率密度较大,部分地区可达 150 W/m² 以上。全省年平均风功率密度最高值在海岛上,如西连岛达到 207.7 W/m²。

1.5 江苏风能资源储量

1) 陆上风能资源储量

根据全省各地风功率密度分布状况,对全省距地 10 m 高度上的风能资源储量进行了初步估算如表 1-2。

表 1-2 江苏省风能资源储量表

项 目	面积(万 km ²)	储量(万 kW)
等 级		
<50(W/m ²)	9.504 758	2 804.53
50~100(W/m ²)	0.532 601	348.97
100~150(W/m ²)	0.071 83	89.79
>150(W/m ²)	0.150 5	225.75
总 计	10.259 69	3 469.04

风功率密度在 50W/m² 以下的区域主要位于西部内陆地区,共有 95 047.58 km²,风能资源储量达到 2 804.53 万 kW。风功率密度在 50~100 W/m² 的地区主要在平行海岸线的沿海带状区域、太湖、洪泽湖畔地区以及部分沿江地区,总面积达到 5 326.01 km²,这些地区的风能资源储量达到 348.97 万 kW。风功率密度在 100~150 W/m² 的地区主要位于苏北连云港、盐城以及南通沿海岸地区,面积为 718.3 km²,风能资源储量为 89.79 万 kW。风功率密度在 150 W/m² 以上的区域主要位于海岛以及沿海滩涂地区,总面积达 1 505 km²,风能资源储量达到 225.75 万 kW。江苏省全省风能资源储量合计为 3 469.04 万 kW。

2) 实际可开发量

根据《全国风能资源评价技术规定》和其他有关规定,风能资源的实际可开发量是总储量的 1/10,并考虑风机叶片面积系数 0.785 得到。江苏省风能资源实际



可开发量为 272.32 万 kW。

3) 技术开发量

风能资源技术开发量为年平均风功率密度在 150 W/m² 及以上的区域风能资源储量值×0.785。全省风能资源技术可开发地区主要位于海岛、沿海岸线及滩涂地区。根据较为保守的估算,该区总面积大约在 1 505 km² 左右。江苏省风能资源技术开发量为 177.21 万 kW。

1.6 江苏风能资源分析

风能资源数值模拟就是运用数值模式再现风能资源分布状况。上述分析是基于江苏省各气象站 10 m 高度的数据形成的,江苏省风电机组的高度一般在 70 m 左右,且沿海岸及滩涂、沿江、沿湖地区的风能资源状况并未完全清楚,故有必要进行风能资源数值模拟。

1) 风能资源评估的标准

根据国家标准 GB/T 18710—2002《风电场风能资源评估方法》,50 m 高度上年平均风功率密度达到或超过 300 W/m² 的 3 级风况的地区才具有开发价值。因此,50 m 高度上年平均风功率密度≥300 W/m² 的区域面积为风能资源技术可开发面积。然后采用美国可再生能源实验室的标准,按每 km² 技术可开发面积装机 5 MW 计算风能资源技术可开发量。

2) 风能资源评估结果见表 1-3、表 1-4。

表 1-3 江苏沿海陆地 50 m 高度上风能资源储量

年风功率密度达到 3 级风况的地区 (年风功率密度≥300 W/m ²)	技术可开发面积 (km ²)	技术可开发量 (万 kW)
盐城市响水县和滨海县沿岸	324	162
盐城市东台县和南通市如东县沿岸	567	284
南通市启东县东南沿岸	122	61
合 计	1 013	507

表 1-4 江苏近海 50 m 高度上风能资源储量

风能资源丰富区 (年风功率密度≥350 W/m ²)	离岸 20 km 的海域		离岸 50 km 的海域	
	技术可开发 面积(km ²)	技术可开发量 (万 kW)	技术可开发 面积(km ²)	技术可开发量 (万 kW)
盐城市滨海县近海	486	243	1 701	851
盐城市东台县和南通市如东县近海	1 539	770	5 265	2 633
合 计	2 025	1 013	6 966	3 484

1.7 江苏风能资源总体评价

(1) 江苏省风能资源丰富,主要集中在沿海海岸与近海海域。距地 10 m 高度的全省陆上风能资源储量达到 3 469.04 万 kW,风能资源实际可开发量达到 272.32 万 kW,技术可开发量达 177.21 万 kW,全省年平均风功率密度大于 150 W/m^2 的地区在 $1\,500 \text{ km}^2$ 以上,主要位于海岛与沿海滩涂地区。沿海滩涂以及沿海岸地区、沿江、沿湖地区和一些特殊地形地区的风能资源储量还在进一步详细调查中。

(2) 据数值模拟结果,距地 50 m 高度,全省陆上技术可开发量 507 万 kW,离岸 20 km 海域范围内技术可开发量 3 807 万 kW,离岸 50 km 海域范围内技术可开发量 9 518 万 kW。近海的风能资源远远大于陆上的风能资源。

(3) 沿海岛屿、滩涂以及沿海岸地区为全省风能资源最为丰富的地区;沿江、太湖、洪泽湖附近区域、平行海岸线的沿海地区风能资源较为丰富;大部分内陆地区为风能资源一般区,这些区域的风能资源也可以开发利用。

(4) 江苏海上风能资源丰富,在不久的将来,海上风电开发必将成为江苏风电开发的主要方式。

