



“十二五”国家重点图书出版规划项目

原发电并网技术丛书

*Experiment and Test Technology for
Grid-connected Photovoltaic Power Generation*

张军军 秦筱迪 郑飞 等 编著

光伏发电并网 试验检测技术



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

“十二五”国家重点图书出版规划项目
新能源发电并网技术丛书

张军军 秦筱迪 郑飞 等 编著

光伏发电并网 试验检测技术



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书为《新能源发电并网技术丛书》之一,从我国光伏发电并网的发展需求和并网试验检测的实用技术入手,选择了一些近年来发展迅速且备受广大科研工作者和工程技术人员广泛关注的重要技术,紧密围绕光伏发电并网试验检测,分别介绍了光伏发电发展概况和并网问题、光伏发电并网系统原理、光伏发电并网技术要求和检测方法、光伏发电并网试验检测装备、光伏发电并网试验检测案例和基于仿真的光伏发电并网性能评估。本书不仅阐述技术原理、体现学术价值,还力求突出实用价值,希望本书的出版能够促进我国光伏发电并网试验检测技术的研究和应用,充分发挥并网试验检测在光伏发电并网中的重要作用,保障各类型光伏发电并网安全稳定运行,推动光伏发电产业健康有序发展。

本书对从事新能源领域的研究人员、电力公司技术人员和光伏发电相关从业人员具有一定的参考价值,也可供其他相关领域的工程技术人员借鉴参考。

图书在版编目(CIP)数据

光伏发电并网试验检测技术 / 张军军等编著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2017.7
(新能源发电并网技术丛书)
ISBN 978-7-5170-5634-8

I. ①光… II. ①张… III. ①太阳能光伏发电—试验
IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第173002号

书 名	新能源发电并网技术丛书 光伏发电并网试验检测技术 GUANGFU FADIAN BINGWANG SHIYAN JIANCE JISHU
作 者	张军军 秦筱迪 郑飞 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 14.5印张 318千字
版 次	2017年7月第1版 2017年7月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

丛书编委会

主任 丁杰

副主任 朱凌志 吴福保

委员 (按姓氏拼音排序)

陈宁 崔方 赫卫国 秦筱迪

陶以彬 许晓慧 杨波 叶季蕾

张军军 周海 周邝飞

本书编委会

主 编 张军军

副主编 秦筱迪 郑 飞

参编人员 (按姓氏拼音排序)

包斯嘉 陈志磊 董颖华 黄晶生

李红涛 吴蓓蓓 夏 烈 杨青斌

周荣蓉



随着全球应对气候变化呼声的日益高涨以及能源短缺、能源供应安全形势的日趋严峻，风能、太阳能、生物质能、海洋能等新能源以其清洁、安全、可再生的特点，在各国能源战略中的地位不断提高。其中风能、太阳能相对而言成本较低、技术较成熟、可靠性较高，近年来发展迅猛，并开始能源供应中发挥重要作用。我国于2006年颁布了《中华人民共和国可再生能源法》，政府部门通过特许权招标，制定风电、光伏分区上网电价，出台光伏电价补贴机制等一系列措施，逐步建立了支持新能源开发利用的补贴和政策体系。至此，我国风电进入快速发展阶段，连续5年实现增长率超100%，并于2012年6月装机容量超过美国，成为世界第一风电大国。截至2014年年底，全国光伏发电装机容量达到2805万kW，成为仅次于德国的世界光伏装机第二大国。

根据国家规划，我国风电装机2020年将达到2亿kW。华北、东北、西北等“三北”地区以及江苏、山东沿海地区的风电主要以大规模集中开发为主，装机规模约占全国风电开发规模的70%，将建成9个千万千瓦级风电基地；中部地区则以分散式开发为多。光伏发电装机预计2020年将达到1亿kW。与风电开发不同，我国光伏发电呈现“大规模开发，集中远距离输送”与“分散式开发，就地利用”并举的模式，太阳能资源丰富的西北、华北等地区适宜建设大型地面光伏电站，中东部发达地区则以分布式光伏为主，我国新能源在未来一段时间仍将保持快速发展的态势。

然而，在快速发展的同时，我国新能源也遇到了一系列亟待解决的问题，其中新能源的并网问题已经成为了社会各界关注的焦点，如新能源并网接入问题、包含大规模新能源的系统安全稳定问题、新能源的消纳问题以及新能源分布式并网带来的配电网技术和管理问题等。

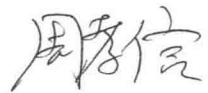
新能源并网技术已经得到了国家、地方、行业、企业以及全社会广泛关注。自“十一五”以来，国家科技部在新能源并网技术方面设立了多个“973”“863”以及科技支撑计划等重大科技项目，行业中诸多企业也在新能

源并网技术方面开展了大量研究和实践，在新能源的并网技术进步方面取得了丰硕的成果，有力地促进了新能源发电产业发展。

中国电力科学研究院作为国家电网公司直属科研单位，在新能源并网等方面主持和参与了多项的国家“973”“863”以及科技支撑计划和国家电网公司科技项目，开展了大量的与生产实践相关的针对性研究，主要涉及新能源并网的建模、仿真、分析、规划等基础理论和方法，新能源并网的实验、检测、评估、验证及装备研制等方面的技术研究和相关标准制定，风力、光伏发电功率预测及资源评估等气象技术研发应用，新能源并网的智能控制和调度运行技术研发应用，分布式电源、微电网以及储能的系统集成及运行控制技术研發应用等。这些研发所形成的科研成果与现场应用，在我国新能源发电产业高速发展中起到了重要的作用。

本次编著的《新能源发电并网技术丛书》内容包括电力系统储能应用技术、风力发电和光伏发电预测技术、光伏发电并网试验检测技术、微电网运行与控制、新能源发电建模与仿真技术等多个方面。该丛书是中国电力科学研究院在新能源发电并网领域的探索、实践和在大量现场应用基础上的总结，是我国首套从多个角度系统化阐述大规模及分布式新能源并网技术研究与实践的著作。希望该丛书的出版，能够吸引更多国内外专家、学者以及有志从事新能源行业的专业人士，进一步深化开展新能源并网技术的研究及应用，为促进我国新能源发电产业的技术进步发挥更大的作用！

中国科学院院士、中国电力科学研究院名誉院长：



2015年12月



并网试验检测在大规模光伏电站和分布式光伏发电系统并网接入电力系统等领域发挥着重要作用，是光伏发电并网运行发展中必不可少的重要环节。对于大规模光伏电站集中接入输电网而言，光伏发电对电网的影响主要集中在调峰调频和安全稳定两个方面；对于分布式光伏发电系统并网接入配电网而言，光伏发电对电网的影响主要集中在安全保护和电能质量两个方面。为保障电网的安全稳定运行，亟需针对光伏发电并网制订相应的并网技术标准，开展测试，通过测试评价其是否符合标准。

目前大部分光伏发电发展较快的国家在授予光伏发电系统并网许可之前，都要求依据相关并网标准对接入电网的光伏发电系统在有功功率和无功功率控制、电能质量、电压和频率调节等方面进行严格、规范的并网性能检测，为光伏产业发展创造良好的市场环境，为我国光伏发电产品质量和光伏发电并网提供有力保障。

本书着眼于目前国内外光伏发电产业的快速发展，结合光伏发电并网及其检测技术领域的应用成果，介绍了光伏发电发展概况和并网问题、光伏发电并网系统原理、光伏发电并网技术要求和检测方法、光伏发电并网试验检测装备、光伏发电并网试验检测案例和基于仿真的光伏发电并网性能评估。

本书共6章，其中第1章由郑飞、秦筱迪编写，第2章由董颖华、夏烈编写，第3章由吴蓓蓓、周荣蓉、陈志磊编写，第4章由吴蓓蓓、李红涛、包斯嘉编写，第5章由吴蓓蓓、周荣蓉、杨青斌编写，第6章由郑飞、黄晶生编写。全书编写过程中得到了曹磊、丁明昌、董玮、郭重阳、侯文昭、林小进、刘美茵、李臻、陆睿、牛晨晖、吴铭洁、徐亮辉、张双庆、张晓琳等人员的大力协助，全书由丁杰指导，张军军统稿完成。

本书在编写过程中参阅了很多前辈的工作成果，引用了大量光伏逆变器型式试验和现场试验的运行数据，在此对国网青海省电力公司、国网甘肃省电力公司、国网山西省电力公司、国网河南省电力公司、复旦大学、合肥工

业大学、阳光电源股份有限公司、华为技术有限公司等单位表示特别感谢。本书在编写过程中得到中国电力科学研究院吴福保、朱凌志等的高度重视和帮助，在此一并表示衷心感谢！

限于作者的学术水平和实践经历，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正。

作者

2017年4月

本书引用的标准

国内标准

序号	标准名	标准号
1	电磁式电压互感器	GB 1207—2006
2	电流互感器	GB 1208—2006
3	光伏电站施工规范	GB 50794—2012
4	光伏电站设计规范	GB 50797—2012
5	电能质量 供电电压偏差	GB/T 12325—2008
6	电能质量 电压波动和闪变	GB/T 12326—2008
7	电能质量 公用电网谐波	GB/T 14549—1993
8	电能质量 三相电压不平衡	GB/T 15543—2008
9	电磁兼容 试验和测量技术 供电系统及所连设备谐波、谐间波的测量和测量仪器导则	GB/T 17626.7—2008
10	电磁兼容 试验和测量技术 闪烁仪功能和设计规范	GB/T 17626.15—2011
11	电磁兼容 试验和测量技术 电能质量测量方法	GB/T 17626.30—2012
12	光伏电站接入电力系统技术规定	GB/T 19964—2012
13	电能质量 公用电网间谐波	GB/T 24337—2009
14	光伏发电系统接入配电网技术规定	GB/T 29319—2012
15	光伏电站太阳跟踪系统技术要求	GB/T 29320—2012
16	光伏电站无功补偿技术规范	GB/T 29321—2012
17	光伏发电系统接入配电网检测规程	GB/T 30152—2013
18	光伏电站太阳能资源实时监测技术要求	GB/T 30153—2013
19	光伏电站接入电网检测规程	GB/T 31365—2015
20	光伏电站监控系统技术要求	GB/T 31366—2015
21	光伏发电工程施工组织设计规范	GB/T 50795—2012
22	光伏发电工程验收规范	GB/T 50796—2012
23	光伏发电接入配电网设计规范	GB/T 50865—2013
24	光伏电站接入电力系统设计规范	GB/T 50866—2013
25	光伏电站环境影响评价技术规范	NB/T 32001—2012

26	光伏发电并网逆变器技术规范	NB/T 32004—2013
27	光伏电站低电压穿越检测技术规程	NB/T 32005—2013
28	光伏电站电能质量检测技术规程	NB/T 32006—2013
29	光伏电站功率控制能力检测技术规程	NB/T 32007—2013
30	光伏电站逆变器电能质量检测技术规程	NB/T 32008—2013
31	光伏电站逆变器电压与频率响应检测技术规程	NB/T 32009—2013
32	光伏电站逆变器防孤岛效应检测技术规程	NB/T 32010—2013
33	光伏电站功率预测系统技术要求	NB/T 32011—2013
34	光伏电站太阳能资源实时监测技术规范	NB/T 32012—2013
35	光伏电站电压与频率响应检测规程	NB/T 32013—2013
36	光伏电站防孤岛效应检测技术规程	NB/T 32014—2013
37	光伏发电调度技术规范	NB/T 32025—2015
38	光伏电站并网性能测试与评价方法	NB/T 32026—2015
39	电力通信站光伏电源系统技术要求	DL/T 1336—2014
40	光伏电站防雷技术规程	DL/T 1364—2014
41	400V 以下低压并网光伏发电专用逆变器技术要求和试验方法	CGC/GF001: 2009
42	光伏电站接入电网技术规定	Q/GDW 617—2011
43	光伏电站接入电网测试规程	Q/GDW 618—2011
44	光伏电站建模导则	Q/GDW 1994—2013

国外标准

序号	标准名	标准号
1	Photovoltaic (PV) systems - Characteristics of the utility interface	IEC 61727: 2004
2	Utility - interconnected photovoltaic inverters - Test procedure of islanding prevention measures	IEC 62116: 2014
3	Grid connected photovoltaic systems - Minimum requirements for system documentation, commissioning tests and inspection	IEC 62446: 2009
4	Utility - interconnected photovoltaic inverters. Test procedure for low voltage ride - through measurements	IEC TS 62910: 2015
5	IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems	IEEE Std 1547.1™—2005

- 6 IEEE Application Guide for IEEE Std 1547™, IEEE Std 1547.2™—2008
IEEE Standard for Interconnecting Distributed
Resources with Electric Power Systems
- 7 IEEE Guide for Monitoring, Information Ex- IEEE Std 1547.3™—2007
change, and Control of Distributed Resources In-
terconnected with Electric Power Systems
- 8 Generating plants connected to the medium - BDEW—2008
voltage network (Guideline for generating
plants' connection to and parallel operation with
the medium - voltage network)
- 9 Power generation systems connected to the low - VDE—AR—N 4105; 2011
voltage distribution network - Technical mini-
mum requirements for the connection to and par-
allel operation with low - voltage distribution net-
works
- 10 Automatic disconnection device between a gener- DIN VDE 0126—1—1
ator and the public low - voltage grid (VDE V 0126—1—1); 2013
- 11 Inverters, Converters, Controllers and Intercon- UL 1741—2010
nection System Equipment for Use with Distu-
ibuted Energy Resources
- 12 Recommendations for the Connection of Small - G83/1—1
scale Embedded Generators (Up to 16A per
Phase) in Parallel with Public Low - Voltage
Distribution Networks
- 13 Overall efficiency of grid connected photovoltaic EN 50530/A1—2013
inverters
- 14 Grid connection of energy systems via inverters - AS 4777. 1
Part 1; Installation requirements
- 15 Grid connection of energy systems via inverters - AS 4777. 2—2005
Part 2; Inverter requirements
- 16 Grid connection of energy systems via inverters - AS 4777. 3—2005
Part 3; Grid protection requirements



序

前言

本书引用的标准

第 1 章 绪论	1
1.1 光伏发电发展概况	1
1.2 光伏发电并网问题	5
1.3 光伏发电并网标准及检测	6
1.4 各章内容安排	7
参考文献	8
第 2 章 光伏发电并网系统原理	9
2.1 系统基本构成	9
2.2 光伏组件和支架	10
2.3 光伏逆变器	15
2.4 无功补偿装置	23
参考文献	27
第 3 章 光伏发电并网技术要求和检测方法	30
3.1 光伏发电常用控制方法	30
3.2 并网性能技术要求	41
3.3 技术要求国内外比对	53
3.4 并网性能检测方法	59
参考文献	93
第 4 章 光伏发电并网试验检测装备	95
4.1 光伏阵列模拟装置	95
4.2 低电压穿越检测装置	104
4.3 电网扰动发生装置	112
4.4 防孤岛检测装置	122

4.5 光伏电站移动检测平台	125
参考文献	134
第5章 光伏发电并网试验检测案例	135
5.1 基于 GB/T 19964—2012 的逆变器试验检测案例	135
5.2 基于 GB/T 29319—2012 的逆变器试验检测案例	151
5.3 分布式光伏发电系统现场试验检测案例	162
5.4 大型光伏电站现场试验检测案例	167
第6章 基于仿真的光伏发电并网性能评估	177
6.1 基于数字物理混合仿真的光伏逆变器并网性能评估	177
6.2 数字物理混合仿真评估案例	181
6.3 基于数字仿真的光伏电站 LVRT 特性评估	196
6.4 数字仿真评估案例	201
参考文献	207
附录	209
附表 1 我国光伏发电部分政策收录	209
附表 2 部分地方光伏项目工作实用政策汇编	211
附表 3 IEC 光伏发电并网主要标准	213
附表 4 欧美光伏发电并网主要标准	213
附表 5 国内已颁布及立项国家标准	214
附表 6 国内已颁布及立项行业标准	216

第1章 绪 论

太阳能是太阳内部连续不断的核聚变反应所产生的能量，每秒钟从太阳辐射到地球大气层上的能量相当于 500 万 t 煤。从根本上来说，地球上的风能、水能、海洋温差能、波浪能和生物质能以及部分潮汐能等都来源于太阳，即使是地球上的化石燃料（如煤、石油、天然气等），也是远古以来存储的太阳能。

近年来，随着传统化石能源资源消耗速度加快，随之带来的环境污染问题受到全世界越来越广泛的重视，太阳能光伏发电作为太阳能利用的一种重要形式，迎来了大规模发展的良好机遇。世界各国都制定了符合本国国情的光伏发电产业政策来促进太阳能光伏发电的发展。

本章将介绍世界光伏发电状况、我国光伏发电状况和近年来的光伏发电政策；分析光伏发电并网问题；介绍光伏发电并网标准及检测。

1.1 光伏发电发展概况

1.1.1 全球光伏发电状况

世界太阳能资源按照资源丰富区、资源较丰富区、资源可利用区和资源欠缺区四种类型分类，太阳能辐射强度和日照时间较好的区域包括北非，中东地区，美国西南部和墨西哥，南欧，澳大利亚，南非，南美洲东、西海岸和中国西部地区等。2015 年，全球累计装机容量已超过 230GW。2007—2015 年，全球新增光伏装机容量如图 1-1 所

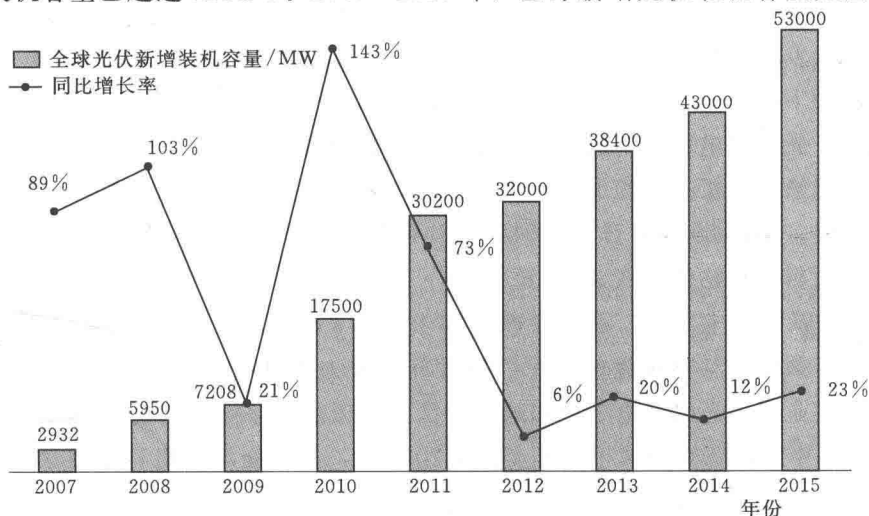


图 1-1 2007—2015 年全球新增光伏装机容量图

示,其中2015年新增装机容量达到53GW,同比增长23.3%,新增装机容量排名前十的国家依次为中国、日本、美国、英国、印度、德国、韩国、澳大利亚、法国和加拿大,见表1-1所示。这10个国家2015年合计新增装机容量43.73GW,占全球新增装机容量的82.5%,累计装机容量约为167.88GW,占全球累计装机容量的73%。

表1-1 2015年全球光伏新增装机容量排名前十国家

序号	国家	新增光伏装机量 /GW	累计光伏装机量 /GW
1	中国	15.13	43.18
2	日本	11.00	33.70
3	美国	7.30	25.60
4	英国	3.50	9.00
5	印度	2.00	5.00
6	德国	1.40	39.10
7	韩国	1.00	4.00
8	澳大利亚	0.90	1.10
9	法国	0.90	5.80
10	加拿大	0.60	1.40
	合计	43.73	167.88

虽然截至2015年年底,欧洲光伏累计装机容量超过104.5GW,约占全球累计装机容量的46.4%。但是受补贴削减的影响,近年来欧洲光伏新增装机容量逐年下降。德国曾多年保持全球累计装机容量排名第一,是欧洲乃至全球太阳能需求量最高的国家,在2015年新增装机容量仅为1.4GW,同比下降26.3%,被中国超越。2015年受补贴政策即将到期带来的抢装热潮影响,英国全年光伏新增装机容量约为3.5GW,成为欧洲地区年度装机容量最大的国家。

与欧洲主要国家近年来不断降低新增装机容量不同的是,以中国、日本和美国为代表的新兴光伏发电市场,其装机容量不断增加。尤其是2013年新兴光伏发电市场,在利好政策驱动下,中国、日本和美国分别实现了12.9GW、6.9GW和4.8GW的新增光伏发电规模,光伏发电设备制造业触底反弹,发电规模稳步增长。

目前排名第二的新兴光伏市场是日本。近年来日本政府推出了一系列政策促进光伏发电产业发展。尽管2014年日本上网电价补贴进一步下调,针对装机容量大于10kW的商用发电项目,补贴费率从36日元/(kW·h)下降至32日元/(kW·h);针对装机容量小于10kW的住宅系统,补贴费率从38日元/(kW·h)下降至37日元/(kW·h),但日本仍是目前全球补贴优厚的国家。高额补贴极大地推动了日本光伏发电产业的发展,日本工商业屋顶光伏发电项目和地面光伏发电项目都保持高速增长态势。

目前排名第三的新兴光伏市场是美国。2015年,美国新增装机容量再创历史新高,达到7.3GW,同比增长17%。美国光伏发电市场的高速发展主要得益于政府经济方面的大力支持和成熟的商业模式,联邦政府制定了支持可再生能源发展的一揽子政策,主要包



括两方面：一是联邦财政激励计划；二是法律法规、标准、约束性指标等。其中，美国联邦财政的主要激励计划见表 1-2。税收优惠与减免是联邦政府促进可再生能源发展最主要的财政激励措施，仅 2014 年，奥巴马政府就为能源部拨发 284 亿美元，比 2013 年增加 8%，清洁能源技术拨款提高了 40%；同时，联邦政府还专门设立基金用于扶持可再生能源发展，促进能效改进。目前主要的扶持基金有美国能源部部落能源基金与美国农村能源基金，提供的贷款担保项目主要有能源部贷款担保与农业部美国农村能源贷款担保。

表 1-2 美国联邦财政主要激励计划

政策类型	联邦财政激励计划	到期日
加速折旧	联邦加速折旧成本回收制度	未定
税收优惠	联邦节能住宅补贴	未定
	光伏投资减免税政策	2016
现金补贴	美国能源部部落能源基金	未定
	美国农村能源基金	未定
贷款优惠	能源部贷款担保	未定
	农村能源贷款担保	未定

1.1.2 我国光伏发电状况

我国太阳能资源按照极丰富带、很丰富带、丰富带和一般带四种类型分类，具体分布情况见表 1-3。全国太阳能年辐射量达 $933 \sim 2330 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ，陆地表面每年接受的太阳辐射能约为 1.47×10^8 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，相当于标准煤 $4.9 \times 10^{12} \text{ t}$ ，约等于上万个三峡工程的年发电量。另外，我国荒漠化土地面积约 264 万 km^2 ，其中干旱区荒漠化土地面积 250 多万 km^2 ，主要分布在光照资源丰富的西北地区，假如按利用我国戈壁和荒漠面积 3% 的比例计算，太阳能发电可利用资源潜力达 27 亿 kW ；我国现有建筑屋顶面积总计约为 400 亿 m^2 ，假如 1% 安装光伏发电系统，可安装光伏发电装机容量 3550 万 \sim 6620 万 kW ，年发电量 287 亿 \sim 543 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。因此，我国具有利用太阳能的良好自然条件，非常适合发展光伏发电产业。

表 1-3 我国太阳能资源分布表

名称	符号	指标/ [$\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]	占国土 面积	地 区
极丰富带	I	≥ 1750	17.40%	西藏大部、新疆南部及青海、甘肃和内蒙古西部
很丰富带	II	1400~1750	42.70%	新疆大部、青海和甘肃东部、宁夏、陕西、山西、河北、山东东北部、内蒙古东部、东北西南部、云南、四川西部
丰富带	III	1050~1400	36.30%	黑龙江、吉林、辽宁、安徽、江西、陕西南部、内蒙古东北部、河南、山东、江苏、浙江、湖北、湖南、福建、广东、广西、海南东部、四川、贵州、西藏东南部、台湾
一般带	IV	< 1050	3.60%	四川中部、贵州北部、湖南西北部