



风力发电

系统设计、安装与运维

都志杰 贾彦 主编





风力发电

系统设计、安装与运维

都志杰 贾彦 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书在介绍离网型风力发电技术的同时，主要介绍了分布式风力并网发电技术及其应用。

本书除绪论外共 20 章，包括风力发电系统相关的资源评估、微观选址、系统主要部件原理及应用、系统设计、安装运维、标准、检测、标识与认证、项目验收、运营管理、安全和政策等环节，本书给出的设计实例详细、真实。

本书还特别介绍了风力发电系统的成本和经济性，包括风力发电系统成本的基本构成、分布式并网与离网发电的经济实例和对比分析等。

本书可作为分布式并网及离网风力发电项目的工程技术人员、管理人员、电站维护人员以及大专院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

风力发电系统设计、安装与运维/都志杰，贾彦主编. —北京：化学工业出版社，2019.7

ISBN 978-7-122-34198-3

I. ①风… II. ①都…②贾… III. ①风力发电系统-系统设计②风力发电系统-安装③风力发电系统-运行 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 057557 号

责任编辑：戴燕红
责任校对：张雨彤

文字编辑：向东
装帧设计：刘丽华

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）
印 装：高教社（天津）印务有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 26 字数 643 千字 2019 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888 售后服务：010-64518899
网 址：<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：138.00 元

版权所有 违者必究



前言

10年前我曾经编写了《风力发电》一书，近10年的时间中，中国的可再生能源技术得到飞速发展，中国已经成为世界上风力发电机制造和风能应用的第一大国，大型风力发电的装机容量在2017年末已达到188.2GW，居全球首位；同时，在2015年末全面解决了无电人口的用电问题，而分布式发电将成为风力发电发展的一个新的方向和重要机遇。

我从2012年起参加国际能源署风能技术合作计划 [IEA Wind Technology Collaboration Programme's (TCP)] 中的Task27研究课题，该课题汇集了来自世界小型风电主要应用国家的专家，包括中国、美国、西班牙、日本、韩国、爱尔兰、奥地利等，专注研究强湍流环境对中小型风力发电机运行的影响以及在强湍流环境下中小型风力发电机的微观选择。在历时7年的研究中，我从各国专家那里了解了世界领先的中小型风力发电机运行的研究成果和实践指南，并征得爱尔兰邓多克技术大学 (Dundalk Institute of Technology) Raymond Byrne 博士的同意，在本书中引用了他们团队的研究成果；在国内，则征得内蒙古工业大学汪建文教授的同意，在本书中引用了他们团队在湍流影响方面的CFD研究和实验研究的结果；同时，我还与自己的导师，美国西得克萨斯农工大学 (West Texas A&M University) 前研究生院院长、替代能源研究所 (Alternative Energy Institute, AEI) 所长 Vaughn Nelson 博士有着长期的交流合作，并从他那里获得了很多有益的知识。美国威斯康星州 Sagrillo Power & Light 公司的 Mick Sagrillo，从事小型风电技术应用33年，积累了从项目策划、安装、服务、维修到教育、课程开发、咨询等诸方面的实用经验和教训，征得他们的同意，我在本书中引用了他们的很多实践经验。

目前中国的风力发电在经历了快速发展的强劲阶段后，进入了一个新的稳定发展时期。在继续发展风电场和农村电力建设的同时，需要：a. 发展和推广风能分布式应用；b. 通过“一带一路”走向国门，开拓国际市场，既包括发达国家的并网分布式，也包括发展中国家的无电地区电力建设。因此本书在编写过程中，着重强调：

① 发展可再生能源的必要性；

② 针对产业对分布式风力发电知识的需求，在内容上兼顾并网分布式应用和离网应用，尤其是湍流概念和微观选址；

③ 根据产业国际化的需求，加入“中小型风力发电系统的相关标准、检测、标识与认证”一章，以便读者了解国际和国内的相关标准、检测和认证，这对于要走向国际市场的企业尤为重要。

感谢内蒙古工业大学能源与动力工程学院的贾彦副教授参与了本书的编写工作。贾彦副教授2008年获得日本国立三重大学系统工学博士学位，从事可再生能源离网和分布式供电系统的相关研究十余年，主攻风力机气动特性分析、复合储能系统功率平稳化及功率品质优化和风光互补供电系统配置等，她在本书的编写中参与绪论、第1~8章、第13章的编写以

及内容的整理和编排。

感谢爱尔兰邓多克技术大学 Raymond Byrne 博士、美国西得克萨斯农工大学的 Vaughn Nelson 博士和内蒙古工业大学汪建文教授在风能研究和利用领域所做出的贡献和为本书提供的研究成果和信息，他们的贡献极大地丰富了本书的内容；感谢美国 Sagrillo Power & Light 公司的 Mick Sagrillo、中国农业机械工业协会风力机械分会姚修伟高级工程师、上海致远绿色能源股份有限公司、中兴能源有限公司、浙江华鹰风电设备有限公司、宁波锦浪新能源科技股份有限公司、济南德明电源设备有限公司和美国 Bergey Windpower Company（博力风能公司）提供的大量的案例和数据，以及国家发展和改革委员会能源研究所叶东嵘高级工程师提供的太阳能利用方面的信息和资料，使本书内容更加翔实和贴近实际。

都志杰

2018 年 12 月于北京



绪论	
0.1 发展可再生能源的必要性	2
0.1.1 全球变暖	2
0.1.2 化石燃料枯竭	4
0.1.3 环境污染	5
0.1.4 无电与贫困	6
0.2 我国政府应对气候变化的目标和主要可再生能源产业的现状	7
0.2.1 我国政府应对气候变化的目标	7
0.2.2 我国主要可再生能源产业的现状	8
第1章 风能和风能资源的测量评估	
1.1 风能的描述和特点	13
1.1.1 风能的描述	13
1.1.2 风能的特点	22
1.2 风能的测量与评估	24
1.2.1 风速的测量与描述	24
1.2.2 风向的测量与描述	28
1.3 我国的风能资源	30
1.3.1 我国的风能分布	30
1.3.2 影响我国风能资源的因素	31
1.3.3 我国最新四维风能资源大数据	35
1.4 风能资源的测量与评估	35
1.4.1 风能资源评估的重要性	35
1.4.2 风能资源的评估	36
1.4.3 风能资源评估程序	36
1.4.4 测风步骤	37
1.4.5 小规模项目的风能资源评估	38
第2章 风力发电基础和相关理论	
2.1 风力发电基础	42
2.1.1 风力发电	42

2.1.2	风力发电基本原理	43
2.2	风能的基础理论	43
2.2.1	风能公式	43
2.2.2	风频分布与 Weibull 分布特征	45
2.3	风力发电的基础理论	48
2.3.1	贝茨 (Betz) 理论	48
2.3.2	叶素理论	49
2.3.3	动量理论	50
2.3.4	风能利用系数	50
2.3.5	叶尖速比	51
2.3.6	叶片的攻角	51

第3章 风力发电机

3.1	风力发电机及其分类	53
3.2	风力发电机组的构造与特点	60
3.2.1	风力发电机的基本构造	60
3.2.2	小型风力发电机的主要结构特征	61
3.2.3	一般中小型风力发电机组的主要组成部分	65
3.3	风力发电机组的基本特性参数	74
3.3.1	考察风力发电机组性能的最主要技术参数	74
3.3.2	其他技术指标	76
3.3.3	中小型风力发电机组的评价	78

第4章 可再生能源发电技术基础

4.1	可再生能源的定义和特点	90
4.2	可再生能源发电的基本形式	91
4.2.1	一次能源和二次能源	91
4.2.2	可再生能源发电分类	92
4.3	可再生能源并网发电与离网发电	93
4.3.1	并网发电	93
4.3.2	可再生能源离网发电	97
4.4	可再生能源独立供电系统的具体应用和实例	100
4.4.1	可再生能源独立供电系统的具体应用	100
4.4.2	可再生能源发电应用实例	104
4.5	可再生能源发电的环保效益	107
4.6	可再生能源发电的局限性及可行性研究	107

第5章 风力发电系统及其互补系统

5.1	风力发电系统	109
-----	--------	-----

5.2	互补发电系统	115
第6章 充电控制器		
6.1	充电控制器及其基本工作原理	123
6.2	各类型充电控制器工作原理	125
6.2.1	充电控制器分类	125
6.2.2	充电控制器对蓄电池充/放电的机理及其数学模型	126
6.2.3	各类型充电控制器具体工作原理	131
6.3	充电控制器的基本参数与选择	135
第7章 储能装置		
7.1	储能在可再生能源发电系统中的必要性	139
7.1.1	储能装置的作用	139
7.1.2	储能装置的重要性	140
7.2	储能装置分类及其特点	140
7.2.1	机械储能	140
7.2.2	化学储能	143
7.2.3	电磁储能	146
7.2.4	氢能储存	147
7.2.5	其他新型储能装置及其前景——特斯拉“家庭电池能量墙”	148
7.2.6	能源存储设备关键技术参数的比较	150
7.3	蓄电池	153
7.3.1	蓄电池分类	153
7.3.2	常用的铅酸蓄电池	154
7.3.3	蓄电池命名	155
7.4	主要蓄电池介绍	156
7.4.1	阀控式密封铅酸蓄电池	156
7.4.2	碱性蓄电池	157
7.4.3	胶体电池	157
7.4.4	硅能蓄电池	158
7.4.5	燃料电池	158
7.5	铅酸蓄电池的基本组成结构及工作原理	159
7.5.1	铅酸蓄电池的基本组成及工作原理	159
7.5.2	阀控式密封铅酸蓄电池的工作原理	160
7.5.3	阀控式密封铅酸蓄电池的分类及特点	161
7.5.4	使用阀控式密封铅酸蓄电池应遵循的原则	162
7.6	可再生能源离网发电系统对蓄电池的基本要求	163
7.7	蓄电池的应用	164
7.7.1	蓄电池的基本技术参数	164

7.7.2	影响蓄电池容量的因素	166
7.7.3	蓄电池失效模式及其影响因素	167
7.7.4	影响免维护蓄电池使用寿命的因素	168
7.8	正确使用蓄电池作为储能装置	169
7.8.1	蓄电池的工作温度	169
7.8.2	蓄电池寿命的评价方法	169
7.8.3	铅酸蓄电池电解液的密度及其检测	170
7.8.4	蓄电池的均衡充电及其工作原理	171
7.8.5	蓄电池的温度补偿	172
7.9	蓄电池组	172
7.9.1	电池组的串联	172
7.9.2	电池组的并联	172
7.9.3	蓄电池组	173
7.9.4	设计合适的蓄电池组	173
7.9.5	合理选择蓄电池组中的单个蓄电池规格	175
7.9.6	使用蓄电池作为储能装置的注意事项	175

第8章 逆变器与并网逆变器

8.1	逆变器、逆变器的组成和工作原理	177
8.1.1	逆变器	177
8.1.2	逆变器的基本组成	177
8.1.3	逆变器基本工作原理	178
8.2	逆变器的分类	179
8.2.1	逆变器的不同分类方式	179
8.2.2	逆变器的主要应用类型	182
8.3	逆变器的主要电路原理	183
8.4	逆变器的基本特性参数	186
8.4.1	逆变器常用的技术参数	186
8.4.2	并网型可再生能源供电系统对逆变器的技术要求	188
8.4.3	离网型可再生能源供电系统对逆变器的技术要求	188
8.5	逆变器的选择与使用	188
8.5.1	选择逆变器的功率	188
8.5.2	考虑系统中的感性负载	190
8.5.3	选择逆变器的类型	190
8.5.4	考虑系统内逆变器的配置	191
8.5.5	考虑海拔高度的影响	191
8.5.6	选择逆变器的一般步骤	192
8.5.7	控制逆变一体机	193
8.5.8	UPS 与逆变器	194

第9章 支撑结构和地基

9.1 支撑结构及其分类	195
9.1.1 塔架	195
9.1.2 塔架基本分类与特点	195
9.1.3 塔架材料	199
9.1.4 塔架的高度	199
9.1.5 塔架的选择与应用	201
9.2 塔架的地基	203
9.2.1 不同塔架类型对地基的要求	203
9.2.2 地基的制作	206
9.3 和建筑物相结合的小型风力发电机安装	207
9.3.1 建筑物屋顶的类型	208
9.3.2 建筑物的组合	209
9.3.3 在建筑物上安装小型风力发电机的注意事项	210
9.3.4 案例	211

第10章 燃油发电机和带燃油发电机的可再生能源发电系统

10.1 可再生能源离网供电系统中引入燃油发电机	213
10.1.1 源自原有柴油发电系统的需求	213
10.1.2 源自新兴可再生能源发电系统的需求	213
10.2 燃油发电系统	214
10.2.1 燃油发电系统基础	214
10.2.2 燃油发电系统的效率及优化运行	214
10.3 柴油发电机简介	216
10.3.1 柴油发电机的组成	216
10.3.2 柴油发电机主要技术参数与选型	216
10.3.3 柴油发电机工作原理	217
10.3.4 柴油发电充电机	217
10.3.5 选择柴油发电机充电控制器的基本参数	218
10.3.6 柴油发电机基本功能特点	218
10.3.7 选择柴油发电机燃料、润滑油或冷却水	219
10.3.8 使用柴油发电机的基本条件	220
10.4 互补系统中的柴油发电机	220
10.4.1 可再生能源供电系统中柴油发电机的工作方式	220
10.4.2 在直流母线型系统中的柴油发电机的运行	220
10.4.3 在交流母线型系统中的柴油发电机的运行	221
10.5 风/光/柴独立发电系统实例	222

第 11 章 局域电网和控制房

11.1 局域电网	223
11.1.1 离网可再生能源电站的主要电力设备	223
11.1.2 局域电网	224
11.1.3 控制房	225
11.1.4 微电网	225
11.1.5 独立风力发电供电系统的局域电网	226
11.2 局域电网的设计	226
11.2.1 设计局域电网的一般步骤	226
11.2.2 低压配电柜	226
11.2.3 低压配电柜的形式和结构	228
11.2.4 配电盘	229
11.2.5 低压配电柜的容量及元件的选择	230
11.2.6 离网可再生能源供电系统对低压配电柜的基本要求	230
11.2.7 高海拔对低压电器的影响	232
11.3 局域电网基本要求和设计	234
11.3.1 低压线路的分类和技术要求	234
11.3.2 低压配电线路的组成	235
11.3.3 室内配电的组成	235
11.3.4 电网电缆线的选择	235
11.3.5 电杆	237
11.3.6 可再生能源局域电网的传输半径	238
11.4 控制房	238
11.4.1 可再生能源独立电站的基本土建设施	238
11.4.2 土建设施的基本要求	240
11.4.3 标识和安全警示	241

第 12 章 风力发电系统及其互补系统的集成设计

12.1 概述	242
12.2 可再生能源供电系统设计	245
12.2.1 独立可再生能源集中供电系统设计的基本步骤	245
12.2.2 辅助设计工具	265
12.2.3 独立风/光互补集中供电系统设计案例	267
12.3 其他与风能有关的离网系统的设计	277
12.4 并网型风力发电系统设计	279
12.4.1 全额上网型	279
12.4.2 自发自用余电上网型	280
12.4.3 完全自发自用型	280

第 13 章 湍流与风力发电机安装微选址

13.1 湍流	282
13.1.1 湍流的概念及成因	282
13.1.2 国际能源署风能技术合作计划对强湍流环境下风能利用的研究	283
13.1.3 我国对湍流及其对微选址影响的研究及发现	283
13.1.4 国际上对湍流的研究	291
13.2 风力发电机的安装选址	295
13.2.1 风力发电机选址的原则——宏观选址	296
13.2.2 微观选址	297
13.3 多台风力发电机组布局	306

第 14 章 风力发电系统安装

14.1 系统运输与风力发电机安装	308
14.1.1 运输	308
14.1.2 风力发电系统的现场布局	309
14.1.3 风力发电机安装	310
14.2 系统中其他部件的安装	318
14.2.1 蓄电池	318
14.2.2 系统其他部件和控制房内的安装	319

第 15 章 中小型风力发电系统的相关标准、检测、标识与认证

15.1 中小风电的相关标准	322
15.1.1 国际标准	322
15.1.2 中国国家标准	329
15.2 风力发电机的认证	331
15.2.1 认证的过程	331
15.2.2 认证机构	332
15.2.3 认证的标识	333
15.3 风力发电机的标识	334
15.3.1 IEA 标识	335
15.3.2 其他标识	336
15.4 风力发电机的检测	337
15.4.1 中国鉴衡认证中心的检测	337
15.4.2 丹麦的测试	338

第 16 章 风力发电系统项目的验收

16.1 项目验收的目的	339
16.2 项目验收的依据	339
16.3 风力发电系统的预测试	340

16.4	项目验收的程序	340
16.4.1	成立验收委员会	340
16.4.2	验收过程	341
16.5	项目验收的具体内容	343
16.5.1	一般检查与检测内容	343
16.5.2	风/光互补系统的验收和注意点	344
16.5.3	验收表格	344
16.5.4	风/光互补系统验收的要求	347
16.6	验收协议	348
16.7	验收报告	348

第 17 章 风力发电系统运行管理

17.1	离网风能电站的运行和管理	351
17.1.1	研究离网电站管理模式的意义	351
17.1.2	离网电站的管理模式	351
17.1.3	离网电站的电价或服务费	359
17.1.4	收取电费的时间	364
17.1.5	离网电站管理人员的一般职责	365
17.2	并网型分布式风力发电系统的运行和管理	365
17.2.1	全额上网型	366
17.2.2	自发自用余电上网型	366
17.2.3	完全自发自用型	367

第 18 章 风力发电系统的维护保养

18.1	风力发电机维护保养	369
18.1.1	风力发电机组维护保养的基本原则和要求	369
18.1.2	风力发电机组的维护检查规定和注意事项	369
18.1.3	风力发电机的例行巡视和检查	370
18.1.4	风力发电机组的定期维护与检修	370
18.1.5	风力发电机组的定期维护与检修主要检查项目	371
18.1.6	风力发电机组的常见故障	372
18.1.7	运行环境对风力发电机组的影响	375
18.2	蓄电池维护保养	376
18.2.1	蓄电池的一般维护	376
18.2.2	常见故障	377
18.3	光伏阵列的维护保养	379
18.3.1	对光伏阵列的维护保养	379
18.3.2	光伏组件的巡检周期	380
18.4	充电控制器和逆变器	380

18.5	防雷与接地	381
18.6	柴油发电机的维护保养	381
18.7	DAS 的维护保养	382

第 19 章 风力发电系统的安全

19.1	概述	384
19.2	人身安全	384
19.3	设备安全	386
19.4	系统安全	388
19.5	安全标识和警示	389

第 20 章 可再生能源发电的成本与经济性

20.1	可再生能源发电成本的基本构成	391
20.2	分布式并网发电经济分析	393
20.2.1	国外风能并网分布式项目实例分析	393
20.2.2	国内风能并网分布式项目实例分析	396
20.3	分布式离网发电经济分析	397
20.3.1	风/光互补独立集中供电系统经济分析案例	397
20.3.2	各种无电地区通电方案的简单分析比较	400

参考文献



绪论



人类的发展历史是一部能源利用方式改变的历史。历史上的两次工业革命都是基于应用技术推动能源开发利用方式的变化，进而在能源变革过程中引发新的产业，从而改变人们的生产生活方式，即能源革命推动了工业革命。在已发生的两次世界工业革命中，能源更替是其主要的诱导因素。

第一次工业革命（又称产业革命）是基于蒸汽机的发明，发生在18世纪60年代~19世纪中期。在第一次工业革命前，制造业依靠的动力主要来源于大型动物、奴隶和底层劳动力，蒸汽机的诞生使动力来源由最初的动物或者人变成了蒸汽机和煤炭。蒸汽机的发明和使用不仅实现了煤炭大规模利用，还促进了煤炭开发，从而促进了纺织等传统工业升级，并使铁路、机械制造等新兴产业的诞生。英国在这次工业革命中首先发明了蒸汽机，其纺织业、铁路业、机械制造业迅速发展起来，率先形成了现代工业体系。

第二次工业革命发生在19世纪下半叶~20世纪初，其标志是电力的广泛使用以及内燃机的出现。发电机、电动机等发明实现了电能和机械能之间的转化，且让动力变得可控。更重要的是电力可以远距离传输，让千里之外的电动设备运转起来，从而使电能被广泛地应用到各个工业领域。而内燃机的出现解决了蒸汽机的各种弊端，让世界进入电气化时代，汽车也由于内燃机的出现而诞生。电力的出现，改变了人类原来的生活和生产方式，使生产效率极大地提高，人类跨入了电气时代。在这一过程中，美国首先发现并应用了电力，奠定了其在全球科学发明领域的主导地位。

关于第三次工业革命，说法不一。人们对第三次工业革命的理解仍存在着巨大的分歧，这种分歧与2012年在中国出现的有关第三次工业革命定义的两个流行版本密切相关：一个是英国《经济学人》杂志编辑麦基里在2012年4月发表的《制造和创新：第三次工业革命》“特别报告”中提出的以机器人、3D打印机和新材料为核心的“第三次工业革命”，是第三次工业革命的“制造业数字化革命的版本”；另一个则是美国学者杰里米·里夫金在《第三次工业革命》一书中提出的由互联网技术与可再生能源革命相结合所产生的“能源互联网”为标志的工业革命，这大致上可以称之为第三次工业革命的“可再生能源革命的版本”。但是，不论哪个版本，怎么定义，用可再生能源逐步替代传统的化石能源必将引起能源利用方式的改变，进而推动产业革命。

每一次工业革命都与能源变革密不可分。从整个工业发展史来看，每次工业革命都是由

技术突破引起的。突破的核心在于当时建立在既有能源利用方式基础上的社会生产活动已经难以维持，能源利用和开发方式走到了不得不变革的边缘。

目前，建立在传统化石工业、传统能源利用方式基础上的工业文明已经到了需要变革的阶段。主要原因是：由于大量使用化石能源导致的全球变暖、燃料枯竭、环境污染以及无电地区电力建设的需求。全球还有大量无电人口，而从经济的可行性和有效性来看，很难用传统电网建设的方法来解决全部的无电人口的电力供应问题。

0.1 发展可再生能源的必要性

0.1.1 全球变暖

科学家发现：酸雨、全球气候变暖和温室效应大部分都起因于化石燃料的使用，如煤、石油与天然气等。大量排放二氧化碳是使用化石燃料的主要结果之一。图 0.1 和图 0.2 绘出了公元 1000~2000 年的二氧化碳浓度变化和公元 1000~2100 年地表温度的变化情况。可以看到，两者存在一定的相关性。

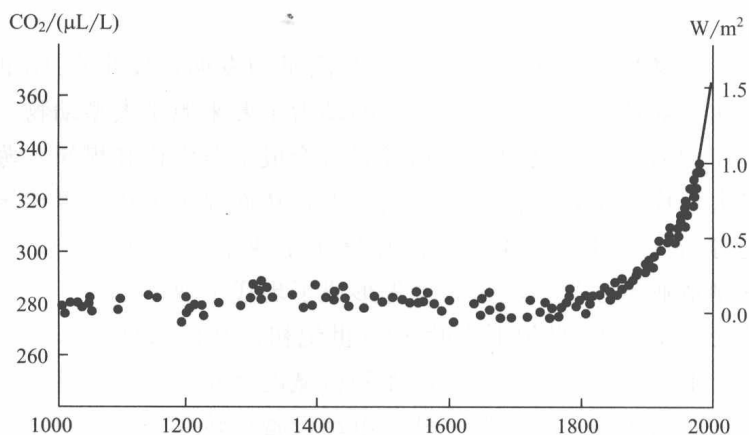


图 0.1 公元 1000~2000 年的二氧化碳浓度变化

全球变暖将带来非常严重的后果，如冰川消退、海平面上升和荒漠化，还给生态系统、农业生产带来严重影响。因此，探求全球变暖的起因成为当前重要的研究课题。人类活动可能是引起大气温室效应增长的主要因素。大气中的二氧化碳浓度增加，阻止地球热量的散失，使地球发生可感觉到的气温升高，这就是“温室效应”。像“温室效应”一样，促使地球气温升高的气体称为“温室气体”。二氧化碳是数量最多的温室气体之一。

世界自然基金会（World Wide Fund for Nature or World Wildlife Fund, WWF）的研究报告指出，到 2005 年，全球平均气温相比 100 年前已经增加了 0.74°C ，而且“在有记录以来最热的 12 个年份当中，过去 12 年里的 11 年（1995~2006 年）都位列其中”。科学家们认为气温升高的主要原因是大气中人类活动释放的二氧化碳和其他温室气体（greenhouse gases, GHG）。IPCC 在“气候变化 2014 综合报告”中指出：自从工业化前时代起，人为温室气体的排放就出现了上升，当前已达到最高水平，这主要是由于经济和人口增

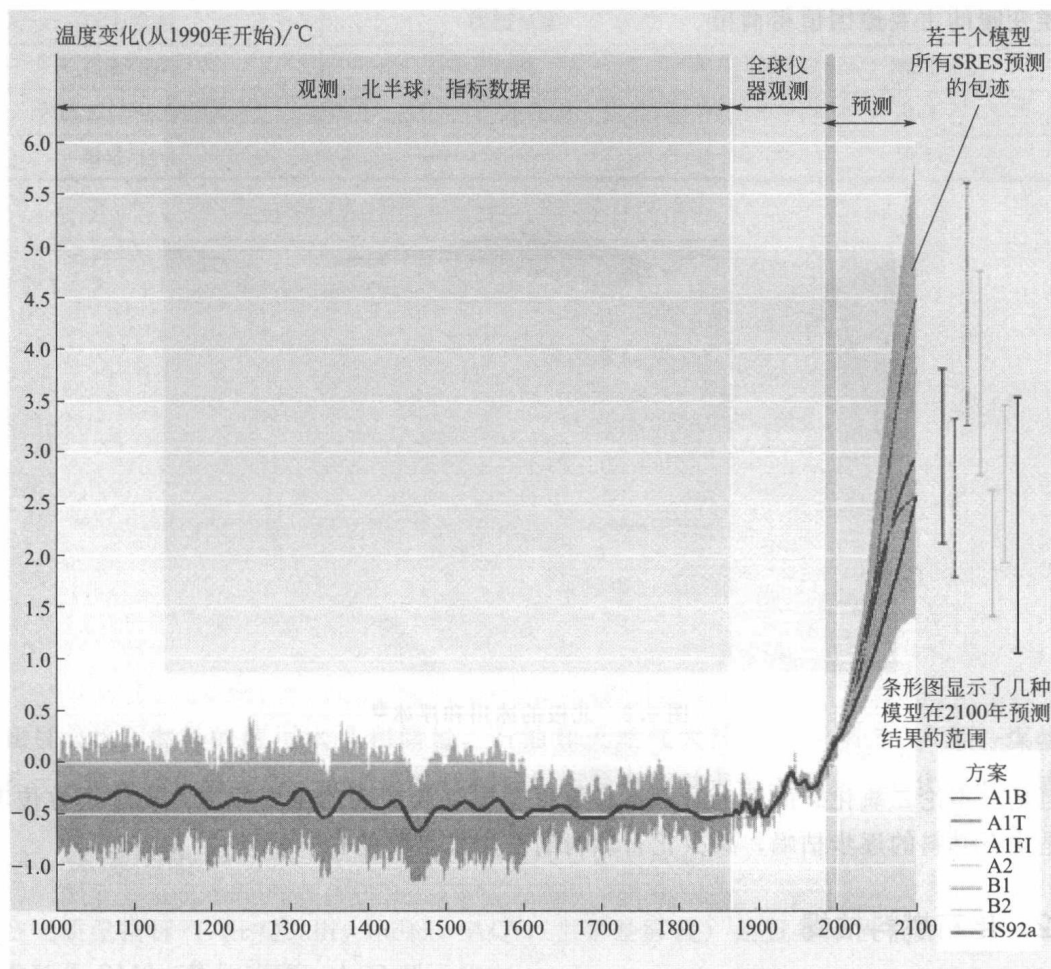


图 0.2 公元 1000~2100 年地表温度的变化

长造成的。其造成的大气二氧化碳、甲烷和一氧化二氮的浓度增加到了至少是过去 80 万年以来前所未有的高度。在整个气候系统中都已经探测到了这类影响以及其他人为驱动因素的影响，而且这些影响极有可能是自 20 世纪中叶以来观测到的全球变暖的主要原因。

世界自然基金会 (WWF) 的研究显示，如果全球平均气温超过前工业革命时期水平 2°C 或更多，预期将会导致以下后果：①水资源短缺；②粮食减产；③影响健康；④造成社会经济损失；⑤对生态系统产生影响。亚洲开发银行和德国波茨坦气候影响研究所 2017 年 7 月 14 日在菲律宾首都马尼拉联合发布报告说，若各国对气候变化问题置之不理，到 21 世纪末亚洲大陆气温将上升 6°C ，这将对亚太地区的人类生活带来严重危害。笔者 2017 年 8 月赴北极的斯瓦尔巴群岛，听老探险队员介绍，他们在几年中多次到访这里，目睹了北极冰川的不断消融 (图 0.3)。

要避免全球平均气温超过前工业革命时期水平的 2°C ，就要减少二氧化碳的排放，这需要通过发展可替代能源，减少化石燃料的使用来实现。

当然，也有学者对人类活动导致二氧化碳浓度上升进而导致全球变暖的观点持不同意见，如中国环境科学研究院的杨新兴，俄罗斯科学院普尔科沃中心天文台宇宙研究部主任哈