



能源与环境出版工程

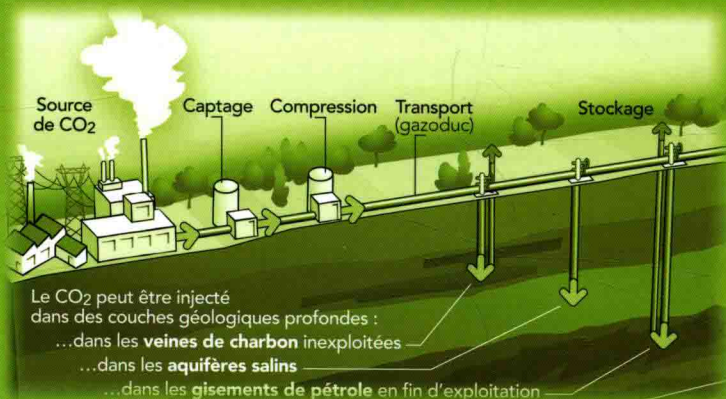
上海交通大学学术出版基金资助

总主编 翁史烈

可再生能源与 二氧化碳地质储存

Renewable Energy and CO₂ Geological Storage

仵彦卿 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

可再生能源与二氧化碳 地质储存

Renewable Energy and CO₂ Geological Storage

仵彦卿 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书以全球气候变暖为导引,从能源生产结构与 CO₂ 排放、生态足迹和生态承载力的角度,分析 CO₂ 排放的气候与环境影响,提出应对全球气候变化的两个方案:可再生能源开发与 CO₂ 地质储存。重点介绍上海海域风能、潮汐能和波浪能的开发潜力及其环境影响;浅层地热能(地源热泵系统)的开发及其环境影响;CO₂ 地质储存数值模拟等。

本书可供环境科学与工程、能源科学与工程等专业研究人员和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

可再生能源与二氧化碳地质储存/许彦卿编著. —上海:上海交通大学出版社,2016

能源与环境出版工程

ISBN 978-7-313-14090-6

I. ①可… II. ①许… III. ①再生能源—研究②二氧化碳—石油天然气地质—研究 IV. ①TK01②P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 272365 号

可再生能源与二氧化碳地质储存

编 著: 许彦卿

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 上海宝山译文印刷厂

开 本: 789mm×1092mm 1/16

字 数: 279 千字

版 次: 2016 年 1 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-14090-6/P

定 价: 68.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 14.75

印 次: 2016 年 1 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-56482128

能源与环境出版工程 丛书学术指导委员会

主 任

杜祥琬(中国工程院原副院长、中国工程院院士)

委 员(以姓氏笔画为序)

苏万华(天津大学教授、中国工程院院士)

岑可法(浙江大学教授、中国工程院院士)

郑 平(上海交通大学教授、中国科学院院士)

饶芳权(上海交通大学教授、中国工程院院士)

闻雪友(中国船舶工业集团公司 703 研究所研究员、中国工程院院士)

秦裕琨(哈尔滨工业大学教授、中国工程院院士)

倪维斗(清华大学原副校长、教授、中国工程院院士)

徐建中(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

陶文铨(西安交通大学教授、中国科学院院士)

蔡睿贤(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

能源与环境出版工程 丛书编委会

总主编

翁史烈(上海交通大学原校长、教授、中国工程院院士)

执行总主编

黄 震(上海交通大学副校长、教授)

编 委(以姓氏笔画为序)

马重芳(北京工业大学环境与能源工程学院院长、教授)

马紫峰(上海交通大学电化学与能源技术研究所教授)

王如竹(上海交通大学制冷与低温工程研究所所长、教授)

王辅臣(华东理工大学资源与环境工程学院教授)

何雅玲(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室主任、教授)

沈文忠(上海交通大学凝聚态物理研究所副所长、教授)

张希良(清华大学能源环境经济研究所所长、教授)

骆仲泐(浙江大学能源工程学系系主任、教授)

顾 璠(东南大学能源与环境学院教授)

贾金平(上海交通大学环境科学与工程学院教授)

徐明厚(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室主任、教授)

盛宏至(中国科学院力学研究所研究员)

章俊良(上海交通大学燃料电池研究所所长、教授)

程 旭(上海交通大学核科学与工程学院院长、教授)

总 序

能源是经济社会发展的基础,同时也是影响经济社会发展的主要因素。为了满足经济社会发展的需要,进入 21 世纪以来,短短十年间(2002—2012 年),全世界一次能源总消费从 96 亿吨油当量增加到 125 亿吨油当量,能源资源供需矛盾和生态环境恶化问题日益突显。

在此期间,改革开放政策的实施极大地解放了我国的社会生产力,我国国内生产总值从 10 万亿元人民币猛增到 52 万亿元人民币,一跃成为仅次于美国的世界第二大经济体,经济社会发展取得了举世瞩目的成绩!

为了支持经济社会的高速发展,我国能源生产和消费也有惊人的进步和变化,此期间全世界一次能源的消费增量 28.8 亿吨油当量竟有 57.7% 发生在中国! 经济发展面临着能源供应和环境保护的双重巨大压力。

目前,为了人类社会的可持续发展,世界能源发展已进入新一轮战略调整期,发达国家和新兴国家纷纷制定能源发展战略。战略重点在于:提高化石能源开采和利用率;大力开发可再生能源;最大限度地减少有害物质和温室气体排放,从而实现能源生产和消费的高效、低碳、清洁发展。对高速发展中的我国而言,能源问题的求解直接关系到现代化建设进程,能源已成为中国可持续发展的关键! 因此,我们更有必要以加快转变能源发展方式为主线,以增强自主创新能力为着力点,规划能源新技术的研发和应用。

在国家重视和政策激励之下,我国能源领域的新概念、新技术、新成果不断涌现;上海交通大学出版社出版的江泽民学长著作《中国能源问题研究》(2008 年)更是从战略的高度为我国指出了能源可持续发展的健康发展之路。为了“对接国家能源可持续发展战略,构建适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台”,我们策划、组织编写了这套“能源与环境出版工程”丛书,其目的在于:

一是系统总结几十年来机械动力中能源利用和环境保护的新技术新成果；

二是引进、翻译一些关于“能源与环境”研究领域前沿的书籍，为我国能源与环境领域的技术攻关提供智力参考；

三是优化能源与环境专业教材，为高水平技术人员的培养提供一套系统、全面的教科书或教学参考书，满足人才培养对教材的迫切需求；

四是构建一个适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台。

该学术丛书以能源和环境的关系为主线，重点围绕机械过程中的能源转换和利用过程以及这些过程中产生的环境污染治理问题，主要涵盖能源与动力、生物质能、燃料电池、太阳能、风能、智能电网、能源材料、大气污染与气候变化等专业方向，汇集能源与环境领域的关键性技术和成果，注重理论与实践的结合，注重经典性与前瞻性的结合。图书分为译著、专著、教材和工具书等几个模块，其内容包括能源与环境领域内专家们最先进的理论方法和技术成果，也包括能源与环境工程一线的理论 and 实践。如钟芳源等撰写的《燃气轮机设计》是经典性与前瞻性相统一的工程力作；黄震等撰写的《机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染》和王如竹等撰写的《绿色建筑能源系统》是依托国家重大科研项目的新成果新技术。

为确保这套“能源与环境”丛书具有高品质和重大的社会价值，出版社邀请了杜祥琬院士、黄震教授、王如竹教授等专家，组建了学术指导委员会和编委会，并召开了多次编撰研讨会，商谈丛书框架，精选书目，落实作者。

该学术丛书在策划之初，就受到了国际科技出版集团 Springer 和国际学术出版集团 John Wiley & Sons 的关注，与我们签订了合作出版框架协议。经过严格的同行评审，Springer 首批购买了《低铂燃料电池技术》(*Low Platinum Fuel Cell Technologies*)、《生物质水热氧化法生产高附加值化工产品》(*Hydrothermal Conversion of Biomass into Chemicals*)和《燃煤烟气汞排放控制》(*Coal Fired Flue Gas Mercury Emission Controls*)三本书的英文版权，John Wiley & Sons 购买了《除湿剂超声波再生技术》(*Ultrasonic Technology for Desiccant Regeneration*)的英文版权。这些著作的成功输出体现了图书较高的学术水平和良好的品质。

希望这套书的出版能够有益于能源与环境领域里人才的培养,有益于能源与环境领域的技术创新,为我国能源与环境的科研成果提供一个展示的平台,引领国内外前沿学术交流和创新并推动平台的国际化发展!

肖史烈

2013年8月

前 言

全球气候变暖、大气污染、能源不安全、水资源短缺是当今世界面临的最重要的四大问题,这四大全球性问题相互影响。能源资源开发和生产消费过程消耗大量水资源,引起水资源短缺;能源资源开发过程破坏生态系统;能源生产过程燃烧化石燃料如煤炭、石油和天然气,排放二氧化碳(CO_2)、二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)以及颗粒物($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}),造成大气污染;排放到大气中的 CO_2 导致全球变暖和全球气候变化。因此,全球变暖问题的解决,必须改变传统的能源利用方式和能源结构,推广开发使用可再生能源和清洁能源,利用生命全周期(life cycle assessment, LCA)方法,科学地评估可再生能源和清洁能源开发利用过程的环境影响,即评价生态足迹、碳足迹、水足迹等;在比较长的时期,化石燃料仍然是能源生产的主体, CO_2 的排放继续增加,为应对全球变暖,需要减少 CO_2 排放到大气,进行 CO_2 的捕集与储存(CO_2 capture and storage, CCS)。本书以应对全球气候变暖为动机,研究 CO_2 地质储存(CO_2 geological storage, CGS)方案,运用数值模拟技术,结合地质条件分析 CO_2 的最佳储存沉积盆地、 CO_2 的注入方式、 CO_2 注入容量以及潜在逃逸通道等问题;同时,研究上海海域风能、潮汐能和波浪能的开发潜力及其环境影响,研究浅层地热能(地源热泵系统)开发过程热场变化对地质环境的影响等。

本书的主要内容基于作者及其团队近五年来在能源与环境方面的研究成果,并参考前人的研究成果,分8章介绍。第1章主要介绍 CO_2 与气候变化,包括二氧化碳与全球变暖,全球生态足迹与碳足迹以及全球气候变化对中国水资源的影响;第2章主要介绍能源生产与 CO_2 排放,包括全世界和中国的能源生产与结构,能源生产与二氧化碳排放,上海市能源生产、消费与结构以及全球变暖的解决方案;第3章主要介绍二氧化碳的地质储存,包括

二氧化碳地质储存的概念,二氧化碳在深层咸水含水层地质储存的原理,二氧化碳地质储存研究进展,二氧化碳地质储存数值模拟原理,二氧化碳地质储存有限元数值求解,二氧化碳最佳地质储存场地的选择,二氧化碳储存容量与含水层孔隙率和渗透率的关系,二氧化碳最佳注入方式的选择以及二氧化碳逃逸途径分析;第4章主要介绍上海海域风能开发潜力及其环境影响,包括研究范围,上海沿海风力特征分析,上海沿海风能资源特征值分析,风能资源开发利用,风能利用潜力,风力发电站建设以及风能综合效应评价;第5章主要介绍上海海域潮汐能的开发潜力及其环境影响,包括上海沿海潮汐特征,潮汐能开发利用,潮汐能利用潜力,潮汐能发电站建设以及潮汐能开发综合评价;第6章主要介绍上海海域波浪能的开发潜力及其环境影响,包括上海海域波浪能调查与分析,上海海域波浪特征,上海海域波浪能,上海海域各波向能量分布,波浪能平均功率,波浪能开发利用以及波浪能开发综合评价;第7章主要介绍上海海域能源岛建设构想,包括国内外能源岛的发展现状,构建上海市能源岛,以及能源岛综合效益评价;第8章主要介绍上海地源热泵系统开发对地质环境的影响,包括上海地区自然背景,名人苑地源热泵工程,地源热泵系统长期运行条件下地温场趋势预测,小型地源热泵工程换热区地温场模拟预测,中、大型地源热泵工程换热区地温场模拟预测以及地源热泵系统应用对地质环境热影响的防治措施与建议。

书中海洋可再生能源部分是作者主持的海洋908项目的成果,感谢东海海洋预报中心的合作并提供资料,作者的学生申雅琪、许增光、于飞、陈慧敏等参与了海洋908项目报告部分内容的编写工作,孙承兴博士也参与了部分工作,本科生李博潇在作者的指导下研究了二氧化碳地质储存数值模拟;地源热泵工程研究中,上海地矿工程公司高世轩高级工程师提供了地质和工程资料,魏静工程师参与了数值计算工作,对此谨致谢意。

由于时间仓促,加之作者水平有限,书中存在的错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

许增光

2015年3月28日

目 录

第 1 章 二氧化碳与气候变化	001
1.1 二氧化碳与全球变暖	001
1.1.1 全球气候变暖证据	001
1.1.2 气候变化的主要原因	004
1.2 全球生态足迹与碳足迹	006
1.3 全球气候变化对中国水资源的影响	013
参考文献	018
第 2 章 能源生产与二氧化碳排放	019
2.1 全世界和中国的能源生产与结构	019
2.2 能源生产与二氧化碳排放	024
2.3 上海市能源生产、消费与结构	028
2.3.1 上海市能源消费总量变化特征	028
2.3.2 上海市产业耗能结构变化特征	030
2.3.3 上海市能源与电力消耗弹性系数变化特征	030
2.3.4 上海市能源消费结构变化特征	032
2.4 全球变暖的解决方案	033
参考文献	034
第 3 章 二氧化碳的地质储存	036
3.1 二氧化碳地质储存的概念	036
3.2 二氧化碳在深层咸水含水层地质储存的原理	037
3.2.1 超临界二氧化碳	037
3.2.2 深层咸水含水层的选择	039
3.2.3 储存原理	042
3.3 二氧化碳地质储存研究进展	043
3.3.1 气-水-盐-岩耦合分析	044

3.3.2 多相流、多界面迁移机理 044

3.3.3 岩体力学多场耦合问题 044

3.3.4 数值模拟 045

3.4 CO₂ 地质储存数值模拟原理 045

3.4.1 数学模型的构建 045

3.4.2 X-Z 坐标下的 CO₂ 迁移模型 047

3.4.3 R-Z 坐标下的 CO₂ 迁移模型 048

3.5 二氧化碳地质储存有限元数值求解 049

3.5.1 求解 X-Z 坐标下的地下水渗流与 CO₂ 迁移的有限元法 049

3.5.2 求解 R-Z 坐标下的地下水渗流与 CO₂ 迁移的数值方法 055

3.6 二氧化碳最佳地质储存场地的选择 055

3.7 二氧化碳储存容量与含水层孔隙率和渗透率的关系 059

3.7.1 含水层渗透率对 CO₂ 储存的影响 059

3.7.2 含水层孔隙率对 CO₂ 储存的影响 060

3.8 二氧化碳最佳注入方式的选择 061

3.9 二氧化碳逃逸途径分析 063

3.10 二氧化碳地质储存研究展望 064

参考文献 065

第 4 章 上海海域风能开发潜力及其环境影响 069

4.1 概述 069

4.2 研究范围 072

4.2.1 资料说明 072

4.2.2 资料预处理 073

4.3 上海沿海风力特征分析 074

4.3.1 风向 074

4.3.2 风速 075

4.4 上海沿海风能资源特征值分析 083

4.4.1 有效风时 083

4.4.2 有效风能 088

4.4.3 有效风能密度 093

4.5 风能资源开发利用 097

4.5.1 风能资源特点 097

4.5.2 风能区划 098

4.6 风能利用潜力 103

4.7 风力发电站建设	104
4.7.1 风力发电场的选址	104
4.7.2 风力发电采用的技术	106
4.7.3 风能资源开发利用业务体系建设方案	106
4.7.4 风力开发管理对策	108
4.8 风能综合效应评价	109
4.8.1 减排效应	109
4.8.2 节能及节水效应	111
4.8.3 社会经济效益	111
4.8.4 推荐区风电开发的环境影响评价	112
4.8.5 经济效益	114
参考文献	115
 第5章 上海海域潮汐能开发潜力及其环境影响	117
5.1 概述	117
5.2 上海沿海潮汐特征	118
5.3 潮汐能	125
5.3.1 纳潮水域划分	126
5.3.2 潮汐参数	127
5.3.3 基于单位面积潮汐能	129
5.4 潮汐能开发利用	130
5.5 潮汐能利用潜力	131
5.6 潮汐能发电站建设	132
5.6.1 潮汐能电站选址	132
5.6.2 潮汐发电的可供采用技术	135
5.6.3 建设上海海域一流的潮汐电站的 implements	136
5.7 潮汐能开发综合评价	137
5.7.1 减排效益	137
5.7.2 社会效益	137
5.7.3 长江口北支潮汐能开发的环境影响评价	138
5.7.4 经济效益	139
参考文献	140
 第6章 上海海域波浪能开发潜力及其环境影响	142
6.1 概述	142

6.2	上海海域波浪能分析	143
6.2.1	波浪测点地理位置	143
6.2.2	观测波属性	145
6.2.3	波浪能	145
6.3	上海海域波浪特征	146
6.3.1	长江口余山海域波浪特征	146
6.3.2	长江口引水船海域波浪特征	146
6.3.3	南汇嘴东部大戢山海域波浪特征	147
6.3.4	杭州湾北岸海域波浪特征	147
6.4	上海海域波浪能	149
6.4.1	上海沿海海域波浪能	150
6.4.2	长江口余山海域波浪能	150
6.4.3	长江口引水船海域波浪能	151
6.4.4	南汇嘴东部海域波浪能	152
6.4.5	杭州湾北岸海域波浪能	152
6.5	上海海域各波向能量分布	153
6.6	波浪能平均功率	153
6.6.1	代表区段长度确定	155
6.6.2	平均功率	155
6.7	波浪能开发利用	156
6.7.1	波浪能利用潜力	156
6.7.2	波浪能电站的选址	156
6.7.3	波浪能发电可采用的技术	157
6.8	波浪能开发综合评价	158
6.8.1	环境影响评价	158
6.8.2	社会经济效益评价	159
6.8.3	自然环境影响评价	159
	参考文献	160

第7章	上海海域能源岛建设构想	161
7.1	概述	161
7.2	国内外能源岛的发展现状	162
7.3	构建上海市能源岛	163
7.3.1	海上漂浮能源岛	163
7.3.2	建立绿色能源岛——崇明岛示范区	164

7.3.3 建设上海市能源岛网络	168
7.4 能源岛综合效益评价	169
参考文献	170
第8章 上海地源热泵系统开发对地质环境影响	171
8.1 概述	171
8.2 上海地区自然背景	173
8.2.1 气候特点	173
8.2.2 第四纪地层特点	174
8.3 名人苑地源热泵工程	179
8.3.1 地层特征	180
8.3.2 水文地质条件	182
8.3.3 监测系统的设置	182
8.3.4 地源热泵系统运行情况	183
8.4 地源热泵系统长期运行条件下地温场趋势预测	184
8.4.1 土层中的热量传输方程	184
8.4.2 土层中的热量传输数学模型	185
8.4.3 土层中热传输数值模型的建立	185
8.4.4 地层概化及空间离散	186
8.4.5 初始地温	188
8.4.6 参数识别及模型校正	189
8.5 小型地源热泵工程换热区地温场趋势预测	191
8.5.1 工程条件	191
8.5.2 模拟结果分析	193
8.6 大中型地源热泵工程换热区地温场趋势预测	201
8.6.1 工程条件	201
8.6.2 模拟结果分析	202
8.7 地源热泵系统管理与合理布局	207
8.7.1 加强地源热泵工程建设的监督管理	207
8.7.2 充分利用地源热泵的热回收功能	208
8.7.3 大中型工程采用地源热泵复合系统	208
8.7.4 适当增大地埋管间距	209
8.8 地源热泵系统运行对地质环境的影响	210
参考文献	212
索引	214

第 1 章 二氧化碳与气候变化

1.1 二氧化碳与全球变暖

全球气候变暖、大气污染、能源不安全、水资源短缺是当今世界面临的最重要的四大问题。这四大全球性问题,都与能源生产和使用密切相关。当今世界能源资源的开发大多利用不可再生的资源——化石燃料,如煤炭、石油、天然气、页岩气等,能源资源开发过程破坏了生态系统与环境;能源生产过程的燃烧排放出二氧化碳(CO_2)、二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)以及颗粒物($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}),造成大气污染;能源资源开发和能源生产过程消耗大量水资源,造成水资源的短缺;由于能源开发过程中大量使用化石燃料,化石燃料燃烧过程排放大量二氧化碳,二氧化碳作为温室气体,它是导致全球气候变暖的主要因素。

1.1.1 全球气候变暖证据

根据政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次报告的结论:“人类影响气候系统是清楚的,最近人类排放的温室气体是历史上最高的,最近气候变化已经广泛地影响到人和自然系统。”(IPCC, 2014)

北半球从 1983 年到 2012 年间是过去 1 400 年来最温暖的 30 年,从全球平均组合陆面和海面温度数据看,呈现线性增长趋势,从 1880 年到 2012 年平均上升 0.85°C ($0.65\sim 1.06^\circ\text{C}$)^[1],如图 1-1 所示。

自 1901 年以来,北半球中纬度地区降水量增加,其他纬度地区降水量有增有减(见图 1-2)。观测到海面盐度的变化也间接地提供了海洋上水循环变化的证据,高盐度的区域是蒸发作用增强引起的,低盐度区域是由于降水量增加引起的^[1],这两个问题均是全球气候变暖的结果。

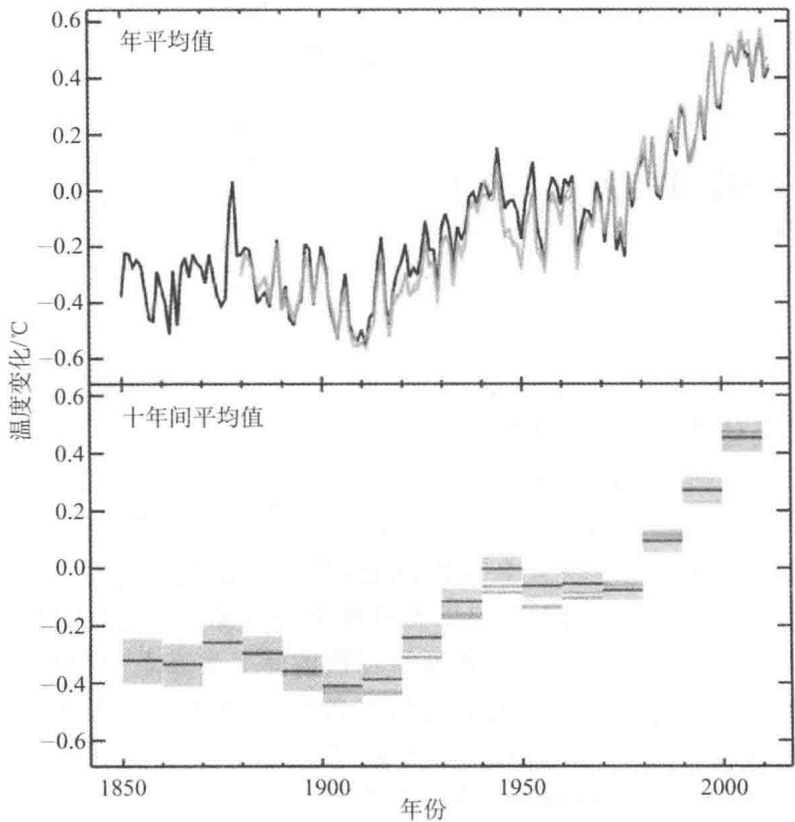


图 1-1 1850—2012 年全球平均组合陆面和海面温度变化

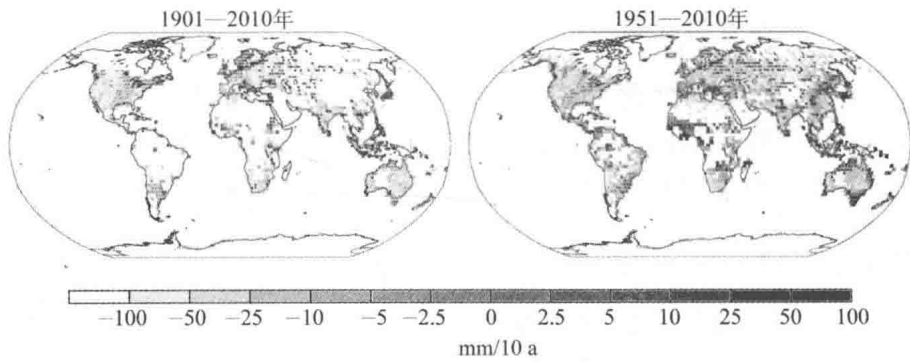


图 1-2 全球陆地年降水量变化

自工业化时代以来,海洋大量吸收了 CO_2 导致海洋酸化,海洋表面水的 pH 值已经减少了 0.1,对应的海洋表面水体酸度增加了 26% (IPCC, 2014),如图 1-3 所示。海洋水体酸化会影响海洋脊椎动物和珊瑚的生长,从而影响海洋生态系统。