



“十二五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

风电场 规划与设计

FENGDIANCHANG
GUIHUA YU SHEJI

许昌 钟淋涓 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



014037529

TM62
22

“十二五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

风电场 规划与设计

许昌 钟淋涓 等 编著



中国水利水电出版社



北航

C1725677

TM62
22

内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一,系统而全面地介绍风电场规划与设计相关的基础知识,内容包括风资源、风电场和风力发电概况,风电场的宏观选址,风能资源测量与评估,风力发电技术与设备选型,风电场的微观选址,大气动力学与风电场选址,风电场的电气设计,风电场的运行方式,风电场的经济计算与评价,风电场的环境评价及水土保持,风电场预可行性研究报告和可行性研究报告等。

本书适合作为高等院校相关专业的教学参考用书,也适合从事风电场规划与设计的工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

风电场规划与设计 / 许昌, 钟淋涓编著. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2014.1
(风力发电工程技术丛书)
ISBN 978-7-5170-1563-5

I. ①风… II. ①许… ②钟… III. ①风力发电—发
电厂—规划②风力发电—发电厂—设计 IV. ①TM62

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第311488号

审图号: GS (2013) 151 号

书 名	风力发电工程技术丛书 风电场规划与设计
作 者	许昌 钟淋涓 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 (发行部)
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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 18.5印张 438千字
版 次	2014年1月第1版 2014年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	56.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《风力发电工程技术丛书》

编 委 会

顾 问 陆佑楣 张基尧 李菊根 晏志勇 周厚贵 施鹏飞

主 任 徐 辉 毕亚雄

副 主 任 汤鑫华 陈星莺 李 靖 陆忠民 吴关叶 李富红

委 员 (按姓氏笔画排序)

王丰绪 王永虎 尹廷伟 申宽育 冯树荣 刘 丰

刘 玮 刘志明 刘作辉 齐志诚 孙志禹 李 炜

李 莉 李同春 李承志 李健英 杨建设 吴敬凯

汪明元 张云杰 张燎军 陈 刚 陈党慧 林毅峰

易跃春 周建平 郑 源 赵生校 赵显忠 胡立伟

胡昌支 俞华锋 施 蓓 洪树蒙 祝立群 袁 越

黄春芳 崔新维 彭丹霖 董德兰 游赞培 蔡 新

糜又晚

丛书主编 郑 源 张燎军

主要参编单位 (排名不分先后)

河海大学

中国长江三峡集团公司

中国水利水电出版社

水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心

华北电力大学

水电水利规划设计总院

水利部水利水电规划设计总院

上海勘测设计研究院

中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团西北勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团中南勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团北京勘测设计研究院有限公司

中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院有限公司

长江勘测规划设计研究院有限公司

中水珠江规划勘测设计有限公司

内蒙古电力勘测设计院

新疆金风科技股份有限公司

华锐风电科技股份有限公司

中国水利水电第七工程局有限公司

丛书总策划 李 莉

编委会办公室

主 任 胡昌支

副 主 任 王春学 李 莉

成 员 殷海军 丁 琪 高丽霄 王 梅 单 芳

白 杨 汤何美子

本书编委会

主 编 许 昌 钟淋涓

副 主 编 刘德有 Wenzhong Shen 张明明 杨建设 赵生校
李健英 董德兰 张云杰 郭雁珩 胡立伟 刘 丰
刘海辉

参编人员 彭天魁 马江涛 李睿元 王 涛 杨永辉 刘 玮
吉超盈 张 箭 肖毅雄 郑爱玲 彭怀午 塔 拉
于 洋 严 彦 田菁菁 李辰奇 杨建川 王 欣



前言

风力发电是目前最接近市场化操作的可再生能源利用形式，风能也是最有希望的一种常规能源替代能源。我国的风力发电经过早期示范阶段（1986—1993 年）、产业化探索阶段（1994—2003 年）、产业化发展阶段（2004—2007 年）以及大规模发展阶段（2008 年至今）的发展，截至 2013 年底，全国拥有建成和在建风电场超过 1000 个，稳步保持全球风电装机容量第一的地位。

我国的风电场规划与设计也和风力发电技术一样，从早期的技术引进与消化吸收到逐渐积累经验和创新，形成了一些在风电场规划与设计方面的理论和技术，相关文献不断推陈出新，但是仍然欠缺一些完整而令人满意的关于风电场规划与设计方面的参考书籍，本书在风电专业理论的基础上，结合我国几个大型风力发电规划设计单位的经验，整理成一本供相关专业人员参考和本科学学生培养的书籍。

全书共分为 11 章。其中第 1 章至第 6 章由河海大学许昌编写；第 7 章至第 11 章由河海大学钟淋涓编写。其中第 1 章由中国水电工程顾问集团有限公司校核；第 2 章和第 10 章由中水东北勘测设计研究有限责任公司校核；第 3 章由上海勘测设计研究院校核；第 4 章由中国水电顾问集团北京勘测设计研究院有限公司校核；第 5 章由中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司校核；第 6 章由中水珠江规划勘测设计有限公司校核；第 7 章和第 8 章由内蒙古电力勘测设计院校核；第 9 章由中国水电顾问集团西北勘测设计研究院有限公司校核；第 11 章由中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院有限公司校核。全书由河海大学刘德有教授、丹麦科技大学 Wenzhong Shen 教

授和中国科学院工程热物理研究所张明明研究员负责总体审阅与校核。

本书编写过程中,还得到了严彦、田嵩嵩、李旻、李辰奇、杨建川、王欣等的帮助,对他们的辛勤劳动表示感谢。

由于编著者水平有限,书中难免有不足之处,希望广大读者批评指正。

编者

2013年11月



目 录

前言

第 1 章 风资源、风电场和风力发电概况	1
1.1 风电场	1
1.2 风力发电的意义及特点	2
1.3 风的形成和分类	3
1.4 我国的风能资源与分布	11
1.5 世界范围的风资源及分布	17
1.6 我国风力发电现状和展望	19
1.7 世界范围风力发电现状和展望	26
1.8 风电场的建设和设计	29
1.9 风电场规划与设计的主要内容	33
第 2 章 风电场的宏观选址	35
2.1 宏观选址的基本原则	35
2.2 宏观选址的技术标准	36
2.3 海上风电场的宏观选址	40
2.4 宏观选址存在的问题与后评估	42
第 3 章 风能资源测量与评估	44
3.1 测风步骤	44
3.2 测风塔	45
3.3 测风系统	48
3.4 测风数据处理	62
3.5 风能资源统计计算	67
3.6 风能资源评价	81
第 4 章 风力发电技术与设备选型	83
4.1 风力发电机组分类	83

4.2	风力发电机组气动与工作原理	84
4.3	典型风力发电机组结构	93
4.4	发电机及风力发电系统	96
4.5	风力发电技术发展趋势	104
4.6	风力发电机组设备选型	107
第5章	风电场的微观选址	121
5.1	微观选址的意义	121
5.2	微观选址的影响因素	122
5.3	风力发电机组尾流	127
5.4	风电场微观布置方法	140
5.5	风电场微观布置的典型软件包	144
5.6	风电场微观布置新方法	147
5.7	风电场单机微观布置容量选择	149
第6章	大气动力学与风电场选址	153
6.1	计算流体力学与风电场选址	153
6.2	大气动力学相关理论	156
6.3	大气的地转运动和非地转运动	158
6.4	大气分层和结构	161
6.5	基于数值模拟的风能资源评价	166
第7章	风电场的电气设计	170
7.1	风电场电气设备构成	170
7.2	电气一次	172
7.3	电气二次	178
7.4	电气主接线	183
7.5	通信系统	187
第8章	风电场的运行方式	188
8.1	电力系统负荷曲线	188
8.2	电力系统中各类电源的运行特性	191
8.3	风电场接入电力系统	196
8.4	风电场在电力系统中的运行方式	198
第9章	风电场的经济计算与评价	211
9.1	风电场经济计算与评价的任务和内容	211
9.2	风电场经济计算指标	212
9.3	风电场经济计算与评价	216
9.4	风电场经济效益和社会效益	234

第 10 章 风电场的环境评价及水土保持	237
10.1 风电场环境评价	237
10.2 风电场水土保持	244
第 11 章 风电场预可行性研究报告和可行性研究报告	249
11.1 风电场预可行性研究报告的作用和特点	249
11.2 风电场预可行性研究报告的编制和报批	250
11.3 风电场可行性研究的意义、作用和程序	254
11.4 风电场可行性研究报告的编制和报批	257
附录	259
参考文献	273

第 1 章 风资源、风电场和风力发电概况

1.1 风 电 场

以风能为动力的发电设备，称为风力发电机组。装有两台或多台并网型风力发电机组的发电站称为风力发电场，通常称风电场。风电场的风力发电机组产生的电能，通过电缆经箱式变电站将其电压由 0.4kV 或 0.69kV 升至 10kV 后，再经架空线路或电缆输送到风电场的变电站，在变电站将电压升高至 35kV、110kV 或更高电压等级后，经高压架空线路输入公共电网，风电场构成见图 1-1。

风电场（风力发电场）通常是在风能资源较好且范围较大区域，将多台大容量风力发电机组按照一定的阵列布局方式，构成规模从几十兆瓦到几百兆瓦甚至更大容量，并向电网供电的风力发电系统。风电场是大规模风能利用的有效形式。

风电场按照地理位置通常可分为陆上风电场、海上风电场（又包括近海和远海风电场）和潮间带风电场，分别如图 1-2~图 1-4 所示。

相对于陆上风电场，海上风电场的主要优点有：风场风况优于陆地，这是由于风流过粗糙的地表或障碍物时，风速的大小和方向都会变化，而海面粗糙度小，离岸 10km 的海上风速

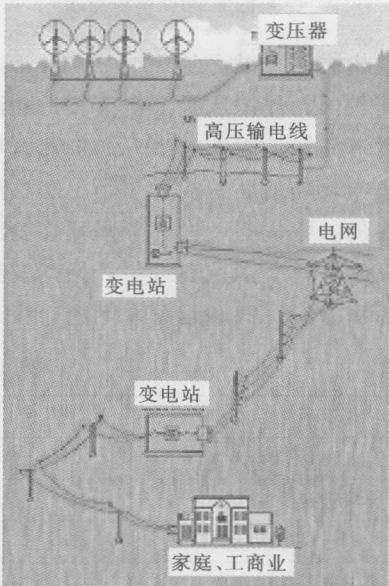


图 1-1 风电场



图 1-2 陆上风电场



图 1-3 近海风电场



图 1-4 潮间带风电场

通常比沿岸陆上高约 25%；海上风湍流强度小，具有稳定的主导风向，机组承受的疲劳负荷较低，使得风机寿命更长；在海上开发利用风能，受噪声、景观影响、鸟类、电磁波干扰等问题的限制较少；海上风电场不占陆上用地，不涉及土地征用等问题，对于人口比较集中，陆地面积相对较小、濒临海洋的国家或地区较适合发展海上风电。基于海上风力发电的独特优势，世界各国正在纷纷发展海上风电产业。目前海上风力发电的开发主要集中在欧洲，我国也在近年开始开发和利用近海风能资源，特别是江苏、山东、浙江和福建等沿海省份。我国近海风电场的特点如表 1-1 所示。

表 1-1 我国近海风电场特点

项 目	海 上 风 电 场 特 点
发电指标	海面平坦，利用时数高，大部分达到 7000~8000h
装机容量指标	适用大型机组，3MW 以上机组
土地指标	不占用土地资源，海滩、海涂面积为 1.27 万 km ²
电网指标	接近用电负荷中心，东部 12 个省市用电量约占 55%
成本指标	基础施工、设备安装等成本高
技术障碍	台风、盐雾、海浪、潮流等自然因素

1.2 风力发电的意义及特点

随着现代工业的飞速发展，人类对能源的需求明显增加，而地球上可利用的常规能源日趋匮乏。据专家预测，煤炭大约还可开采 220 年、石油大约 40 年、天然气只能用 60 年。实现能源持续发展的唯一出路就是有计划地利用常规能源、节约能源、开发和利用新能源和可再生能源。目前电能产生主要靠火力发电，但火力发电产生大量的污染物。为减少对大气的污染，实现能源的持续发展，开发和利用以风能为代表的可再生能源成为必经的途径之一。国际风能理事会于 2009 年 12 月 14 日在哥本哈根气候变化大会上曾表示，发达国家当前承诺减排的相当大一部分单靠风能发电就能够实现。据该理事会测算，到 2020 年全球风力发电规模将达到 2600TWh，相当于减排 15 亿 t 二氧化碳，风能单一行业



的减排就相当于发达国家承诺总体减排量的 42%~65%。因此,作为主要绿色能源之一的风能,其巨大潜力越来越受到世界各国的重视。

风力发电是利用风能来发电的,与其他常规能源发电相比,风力发电的特点如下:

(1) 风力发电是可再生的洁净能源。风力发电是一种可再生的洁净能源,不消耗资源,不污染环境,这是其他常规能源(如煤电、油电)与核电所无法比拟的优点。

(2) 建设周期短。风力发电场建设工期短,单台机组安装仅需几周,从土建、安装到投产,1万千瓦级的风电场建设期只需 0.5~1 年时间,是煤电、核电无可比拟的。

(3) 装机规模灵活。投资规模灵活,可根据资金情况,决定一次装机规模,有了一台资金就可加装一台,投产一台。

(4) 可靠性高。把现代高科技应用于风力发电机组,使风力发电可靠性大大提高,目前机组可靠性已达 98%,机组寿命可达 20 年。

(5) 造价低。与常规能源发电相比风力发电具有竞争力,中型风力发电单位装机容量造价和单位发电量的电价已接近火力发电,低于油电与核电,若计及煤电的环境保护与交通运输的间接投资,则风电经济性将优于煤电。

(6) 运行维护简单。风力发电机组自动化水平很高,完全可以无人值守,维修维护方便、简单。

(7) 实际占地面积小。监控、变电等建筑仅占整个风力发电场范围 1% 的土地,其余场地仍可以供农、牧、渔业使用。

(8) 发电方式多样化。风力发电既可并网运行,也可与其他能源(如柴油发电、太阳能发电、水力发电)组成互补系统,还可独立运行,如建在孤岛、海滩或边远沙漠等荒凉地带,对于解决远离电网的老、少、边地区用电发挥重大作用。

1.3 风的形成和分类

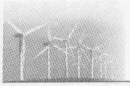
1.3.1 风的形成

空气流动现象称为风,一般指空气相对地面的水平运动。尽管大气运动很复杂,但始终遵循大气动力学和热力学变化的规律。

1.3.1.1 大气环流

风的形成是空气流动的结果,空气流动的原因是地球绕太阳运转,由于日地距离和方位不同,地球上各纬度所接受的太阳辐射强度也就各异。在赤道和低纬地区比极地和高纬地区太阳辐射强度强,地面和大气接受的热量多,因而温度高。这种温差形成了南北间的气压梯度,在北半球等压面向北倾斜,空气向北流动。

地球自转形成的地转偏向力叫做科里奥利力,简称偏向力或科氏力。在此力的作用下,在北半球使气流向右偏转,在南半球使气流向左偏转。所以,地球大气的运动,除受到气压梯度力的作用外,还受地转偏向力的影响。地转偏向力在赤道为零,随着纬度的增高而增大,在极地达到最大。当空气由赤道两侧上升向极地流动时,开始因地转偏向力很小,空气基本受气压梯度力影响,在北半球,由南向北流动,随着纬度的增加,地转偏向



力逐渐加大,空气运动也就逐渐地向右偏转,也就是逐渐转向东方,在纬度 30° 附近,偏角到达 90° ,地转偏向力与气压梯度力相当,空气运动方向与纬圈平行,所以在纬度 30° 附近上空,赤道来的气流受到阻塞而聚积,气流下沉,使这一地区地面气压升高,就是所谓的副热带高压。

副热带高压下沉气流分为两支,一支从副热带高压向南流动,指向赤道。在地转偏向力的作用下,北半球吹东北风,南半球吹东南风,风速稳定且不大,约 3~4 级,这是所谓的信风,所以在南北纬 30° 之间的地带称为信风带。这一支气流补充了赤道上空气流,构成了一个闭合的环流圈,称为哈德来 (Hadley) 环流,也叫做正环流圈,此环流圈南面上升,北面下沉。另一支从副热带高压向北流动的气流,在地转偏向力的作用下,北半球吹西风,且风速较大,这就是所谓的西风带。在 60°N 附近处,西风带遇到了由极地向南流来的冷空气,被迫沿冷空气上面爬升,在 60°N 地面出现一个副极地低压带。

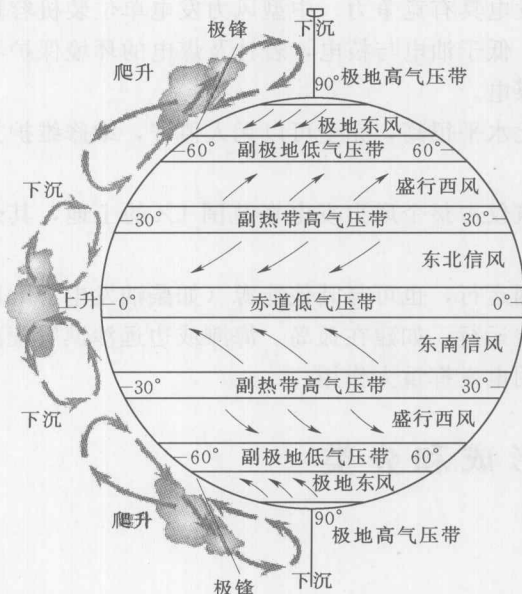


图 1-5 三圈环流

副极地低压带的上升气流,到了高空又分成两股,一股向南,一股向北。向南的气流在副热带地区下沉,构成一个中纬度闭合圈,正好与哈德来环流流向相反,此环流圈北面上升、南面下沉,所以叫反环流圈,也称费雷尔 (Ferrel) 环流圈;向北的气流,从上升到达极地后冷却下沉,形成极地高压带,这股气流补偿了地面流向副极地的气流,而且形成了一个闭合圈,此环流圈南面上升、北面下沉与哈德来环流流向类似,因此也叫正环流。在北半球,此气流由北向南,受地转偏向力的作用,吹偏东风,在 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 之间,形成了极地东风带。

综上,由于地球表面受热不均,引起大气层中空气压力不平衡,因此,形成地面与高空的大气环流。各环流圈伸展的高度,

以热带最高,中纬度次之,极地最低,这主要由于地球表面增热程度随纬度增高而降低的缘故。这种环流在地球自转偏向力的作用下,形成了赤道到纬度 30°N 环流圈 (哈德来环流)、 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 环流圈和纬度 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 极地环流圈,这便是著名的“三圈环流”,如图 1-5 所示。

当然,三圈环流是一种理论的环流模型,由于地球上海陆分布不均匀,实际的环流比上述情况要复杂得多。

1.3.1.2 季风环流

1. 季风定义

在一个大范围地区内,盛行风向或气压系统有明显的季节变化,这种在 1 年内随着季节不同,有规律转变风向的风,称为季风。季风盛行地区的气候又称季风气候。



季风明显的程度可用一个定量的参数来表示,称为季风指数,它是根据地面冬夏盛行风向之间的夹角来表示,当夹角在 $120^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 之间,认为是属季风,然后用 1 月和 7 月盛行风向出现的频率相加除 2,即 $I=(F_1+F_2)/2$ 为季风指数,如图 1-6 所示,当 I 小于 40% 为季风区 (1 区), I 在 40%~60% 范围为较明显季风区 (2 区), I 大于 60% 为明显季风区 (3 区)。由图 1-6 可知,全球明显季风区主要在亚洲的东部和南部,东非索马里和西非几内亚。季风区有澳大利亚的北部和东南部,北美的东南岸和南美的巴西东岸等地。

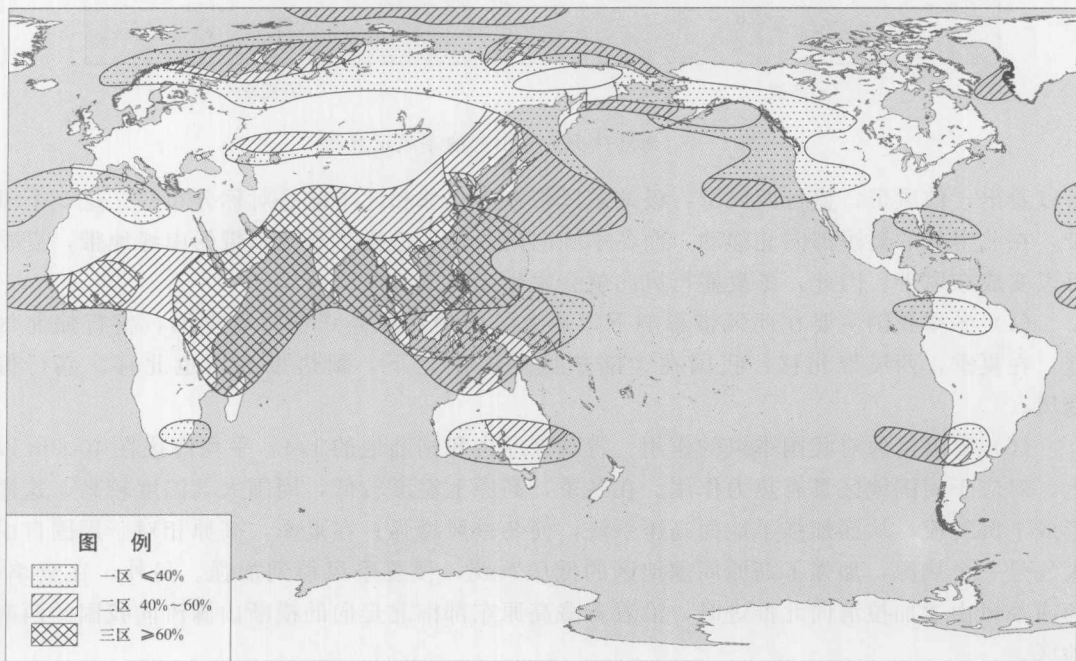


图 1-6 季风的地理分布

亚洲东部的季风主要包括我国的东部,朝鲜、日本等地区;亚洲南部的季风,以印度半岛最为显著,这是世界闻名的印度季风。

2. 我国季风环流的形成

我国位于亚洲的东南部,所以东亚季风和南亚季风对我国天气气候变化都有很大影响。形成我国季风环流的因素很多,主要由于海陆差异,行星风带的季节转换以及地形特征等综合形成的。

(1) 海陆分布对我国季风的作用。海洋的热容量比陆地大得多,在冬季,陆地比海洋冷,大陆气压高于海洋,气压梯度力自大陆指向海洋,风从大陆吹向海洋;夏季则相反,陆地很快变暖,海洋相对较冷,陆地气压低于海洋,气压梯度力由海洋指向大陆,风从海洋吹向大陆,如图 1-7 所示。

(2) 我国东临太平洋,南临印度洋,冬夏的海陆温差大,所以季风明显。

(3) 行星风带位置季节转换对我国季风的作用。地球上存在着 5 个风带。从图 1-5

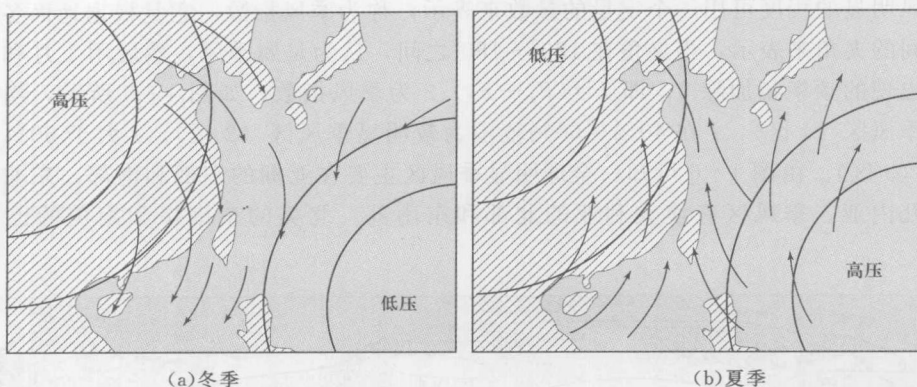


图 1-7 海陆热力差异引起的季风示意图

可以看出,信风带,盛行西风带,极地东风带在南半球和北半球是对称分布的。这 5 个风带,在北半球的夏季都向北移动,而冬季则向南移动。这样冬季西风带的南缘地带,夏季可以变成东风带。因此,冬夏盛行风向就会发生 180° 的变化。

(4) 冬季我国主要在西风带影响下,强大的西伯利亚高压笼罩着全国,盛行偏北气流。在夏季,西风带北移,我国在大陆热低压控制之下,副热带高压也北移,盛行偏南风。

(5) 青藏高原对我国季风的作用。青藏高原占我国陆地的 $1/4$, 平均海拔在 4000m 以上, 对应于周围地区具有热力作用。在冬季, 高原上温度较低, 周围大气温度较高, 这样形成下沉气流, 从而加强了地面高压系统, 使冬季风增强; 在夏季, 高原相对于周围自由大气是一个热源, 加强了高原周围地区的低压系统, 使夏季风得到加强。另外, 在夏季, 西南季风由孟加拉湾向北推进时, 沿着青藏高原东部南北走向的横断山脉流向我国的西南地区。

1.3.1.3 局地环流

1. 海陆风

海陆风的形成与季风相同, 也是大陆与海洋之间温度差异的转变引起的, 不过海陆风的范围小, 以日为周期, 势力也薄弱。

由于海陆物理属性的差异, 造成海陆受热不均, 白天陆上增温较海洋快, 空气上升, 而海洋上空气温度相对较低, 使地面有风自海洋吹向大陆, 补充大陆地区上升气流, 而陆上的上升气流流向海洋上空而下沉, 补充海上吹向大陆气流, 形成一个完整的热力环流; 夜间环流的方向正好相反, 所以风从陆地吹向海洋。将这种白天从海洋吹向大陆的风称海风, 夜间从陆地吹向海洋的风称陆风, 所以将在 1 天中海陆之间的周期性环流总称为海陆风, 如图 1-8 所示。

海陆风的强度在海岸最大, 随着离岸的距离而减弱, 一般影响距离在 $20\sim 50\text{km}$ 。海风的风速比陆风大, 在典型的情况下, 风速可达 $4\sim 7\text{m/s}$, 而陆风一般仅 2m/s 左右。海陆风最强烈的地区, 发生在温度日变化最大及昼夜海陆温度最大的地区。低纬度日射强, 所以海陆风较为明显, 尤以夏季为甚。