



- 高等学校水利学科教学指导委员会
- 中国水利教育协会
- 中国水利水电出版社

共同组织编审

普通高等教育“十二五”规划教材
全国水利行业规划教材

水文气象学

主 编 郭纯青 方荣杰 代俊峰



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



- 高等学校水利学科教学指导委员会
- 中国水利教育协会
- 中国水利水电出版社

共同组织编审

普通高等教育“十二五”规划教材
全国水利行业规划教材

水文气象学

主 编 郭纯青 方荣杰 代俊峰
参 编 张志强 田西昭 唐芳芳
于映华 郑梦琪 王文君
黄翠秋 江忠荣



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书全面阐述了水文气象学的基本概念、基础知识及应用前景，主要内容包括绪论、降水、暴雨、温度、大气水分、气压和风、水文气象观测方法和站网、天气及灾害性天气、水文气象基础理论、气候学与水文气候学，水文气象应用。

本书是为高等院校水利类工科学生开设的水文气象学课程而编写的教材，也可供其他相关专业人员参考使用。

图书在版编目 (C I P) 数据

水文气象学 / 郭纯青等主编. — 北京 : 中国水利
水电出版社, 2012. 10
普通高等教育“十二五”规划教材 全国水利行业规
划教材
ISBN 978-7-5170-0253-6

I. ①水… II. ①郭… III. ①水文气象学—高等学校
—教材 IV. ①P339

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第242325号

审图号: GS (2012) 747 号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 全国水利行业规划教材 水文气象学
作 者	主编 郭纯青 方荣杰 代俊峰
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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.5印张 226千字
版 次	2012年10月第1版 2012年10月第1次印刷
印 数	0001—2500册
定 价	20.00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

前 言

水文气象学是应用气象学的原理和方法研究水文循环和水分平衡中与降水、蒸发等现象相关的问题的一门学科。它是气象学与水文学之间的交叉学科，即是应用气象学的分支，又是水文学的重要组成部分，主要用于河道和水库的防洪兴利、水资源开发利用与水利水电工程规划设计、水情预报和水患风害评估等方面。

本书在编写过程中，注意吸收近年来相关学科的部分新成果，资料丰富，图文并茂，力求做到概念明确、论述清楚、深入浅出，具系统性和实用性的显著特点。

本书编写过程中，参阅并引证了国内外发表的相关文献资料，在此向被引证著作的作者表示衷心的感谢！本书由桂林理工大学的方荣杰（第四至第七章）、代俊峰（第二、第三、第八、第九、第十一章），河北省环境地质勘查院唐山勘查院的张志强和田西昭（第十章），桂林理工大学的硕士研究生唐芳芳和郑梦琪（第一章）编写；桂林理工大学硕士研究生于映华、王文君、黄翠秋和江忠荣负责录入与绘图工作，桂林理工大学的郭纯青对全书进行了修订与统稿。

由于编者水平有限，加之书中内容涉及领域广泛，难免存在错误和不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2012年6月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 水文气象学学科概述	1
第二节 全球气候变化及其影响	2
第三节 中国水文气象学发展现状	5
第四节 国际水文气象学的近期进展	6
复习题	7
第二章 降水	8
第一节 降水量	8
第二节 降水要素和表示方法	13
第三节 降水量观测	16
复习题	17
参考文献	17
第三章 暴雨	18
第一节 暴雨的基本知识	18
第二节 暴雨的预报	21
复习题	27
参考文献	27
第四章 温度	29
第一节 大气温度	29
第二节 气温和气温的分布	35
第三节 土壤温度	37
复习题	40
参考文献	40
第五章 大气水分	41
第一节 大气湿度	41
第二节 蒸发与蒸散发	43
第三节 水汽凝结与大气降水	48

复习题	50
参考文献	50
第六章 气压和风	51
第一节 气压和气压场	51
第二节 空气的水平运动	54
第三节 大气环流	57
复习题	60
参考文献	60
第七章 水文气象观测方法和站网	61
第一节 水文气象观测方法	61
第二节 站网建设	72
复习题	73
参考文献	73
第八章 天气及灾害性天气	74
第一节 气团和锋	74
第二节 天气预报业务系统与服务	80
第三节 灾害性天气与水文气象灾害	81
复习题	82
参考文献	82
第九章 水文气象基础理论	83
第一节 水文气象统计与计算的基础理论	83
第二节 水文气象与生态环境	90
第三节 水文气象遥感、GIS 及其应用技术	93
复习题	98
参考文献	98
第十章 气候学与水文气候学	100
第一节 气候学与气候系统	100
第二节 气候系统与气候变化	103
第三节 水文气候学	112
参考文献	136
第十一章 水文气象应用	138
第一节 水文气象在生产上的应用	138
第二节 水文气象预警与山洪防治	139
第三节 城市水文气象灾害管理	140
第四节 洪水预报中水文模型与气象模型的耦合	141
复习题	143
参考文献	143

第一章 绪 论

本章概要	学习目标
水文气象	1. 大气、大气科学的概念
大气科学	2. 水文气象学的概念
天气	3. 天气、气候的概念及其区别
气候	4. 了解气候变化的原因及影响
气候变暖	5. 了解国内外水文气象学的发展
气象学发展	

第一节 水文气象学学科概述

水文气象学是研究水文循环、水量平衡与气象条件相互关系和作用的学科，由水文学科与大气学科交叉、渗透形成。

一、水文气象学的大气科学基础

学习水文气象学要先了解大气与大气学科的基本概念。

大气是包围地球的空气的总称，是地球上一切生命赖以生存的重要物质基础与环境条件。气象是大气各种物理、化学状态和现象的统称。气象学是研究气象变化特征和规律的学科，是水文气象学的基础之一。Meteorology（气象学）一词源自古希腊文，由 meteo-ros（上空的）和 logos（推理）构成。

大气科学（Atmospheric Science）是研究大气各种物理、化学现象及其演变规律，以及如何利用这些规律为人类服务的一门学科。现代大气科学极大扩充了传统气象学的界限，研究对象不仅覆盖整个地球表层和大气圈，还包括大气圈与水圈、岩土圈、生物圈等其他圈层之间的复杂关系与相互作用。现代大气科学大量吸收了雷达、卫星遥感、计算机模拟和数值计算等现代信息技术，在发展国民经济、提高人民生活质量和保护生态环境等方面发挥越来越大的作用。大气科学的主要分支有大气探测学、气候学、天气学、动力气象学、大气物理学、大气化学、应用气象学等。

天气和气候是大气学科的两个基本概念。天气以气象要素值和天气现象表征瞬时或较短时期的大气状况。天气学（Synoptic Meteorology）是研究天气形成和演变规律的一门学科，包括天气系统、天气形势和天气现象形成演变规律及分析预报方法。气候则指一个地区多年的大气状况，包括平均状况和极端状况，常通过各种气象要素的统计量来表示（图 1-1）。气候学（Climatology）是研究气候形成、分布、变化规律及其与人类活动相互关系的一门学科。

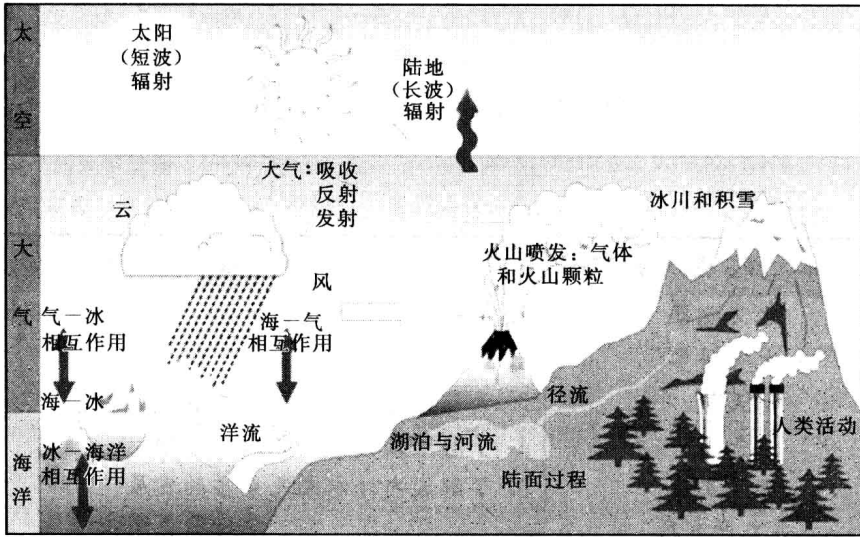


图 1-1 气候系统

小气候指由于下垫面性质以及人类和生物活动的影响而形成的近地层大气的小范围气候，是水文气象学的重要理论基础之一。

天气学、气候学和小气候学都是气象学和大气科学的重要分支领域，是学习和研究水文气象学必须掌握的理论基础知识。

二、水文气象学研究对象与任务

水文气象学是水文学与气象学的交叉学科，是应用气象学的原理和方法研究水文循环和水平衡同降水、蒸发有关问题的一门学科。水文气象学既是气象学的一个分支，又是水文学的重要组成部分，其研究成果主要应用于河道、水库的防洪兴利以及水资源的开发利用和水利水电工程的规划设计等方面。

在水文循环中，降水和蒸发为水文学和气象学共同研究的问题。从水文气象学的角度研究降水和蒸发，主要用途有：与洪水预报相关的降水的监测和预报、可能最大降水量估算、蒸发量估算。

随着气象雷达、气象卫星等探测技术的发展，降水监测的水平有了很大提高，为降水短时预报与洪水预报的结合创造了条件，使水文气象学得到了新的发展。

第二节 全球气候变化及其影响

近百年来，全球的气候正经历着以变暖为主要特征的显著变化，对世界的社会经济和生态系统产生了并将继续产生重大的影响。目前，全球变暖问题已成为各国政府和科学界共同关心的重大问题。

一、全球气候变化

经科学界研究，自 1860 年以来，全球平均温度升高了 $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 。近百年来最暖的

年份均出现在 1983 年以后。20 世纪北半球温度的增幅可能是过去 1000 年中最高的，全球平均地表气温到 2100 年将比 1990 年上升 1.4~5.8℃（图 1-2），这可能是近 10000 年中增温速率最显著的时期。

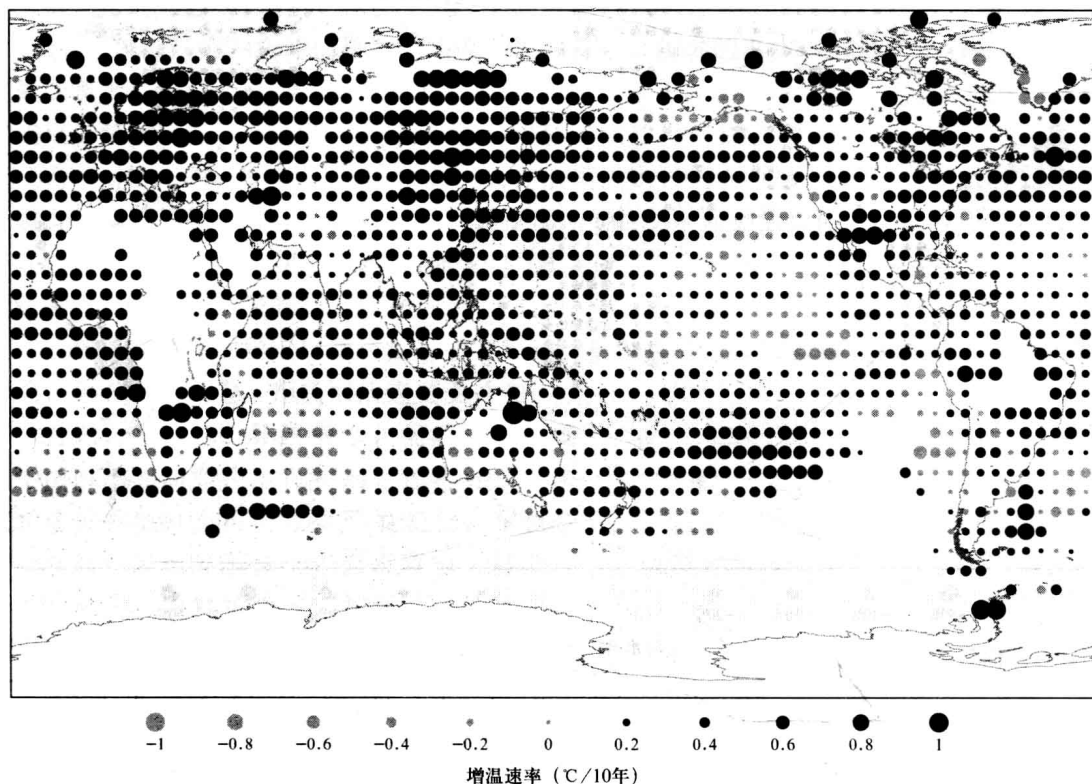


图 1-2 1976~2000 年全球冬季温度变化趋势图

近百年来，降水分布也发生了变化。大陆地区尤其是中高纬度地区降水增加，非洲等一些地区降水减小（图 1-3）。有些地区极端天气气候事件（厄尔尼诺、干旱、洪涝、雷暴、冰雹、风暴、高温天气和沙尘暴等）的出现频率与强度增加。21 世纪全球平均降水增加，但大部分年平均降水增加的区域很可能同时出现大的年际变化；未来北半球雪盖和海冰范围将进一步缩小；一些极端事件（如高温天气、强降水、热带气旋强风等）发生的频率也会增加。全球的平均海平面到 2100 年时将比 1990 年上升 0.09~0.88m，各个区域的上升值将有很大差异。

近 100 年是过去 1000 年中气候最暖的时期，而近 20 年又是过去 100 年中最暖的。现有研究表明，温度的升高与 CO₂ 浓度的增加是同步的，最近 50 年全球变暖主要由人类活动造成。而且，全球升温不均匀，陆地比海洋明显，高纬度比低纬度明显。研究还发现，冬季出现全球性的明显增温，全球降水在中高纬度地区有所增加，非洲则出现长期干旱。

中国最近十几年连续出现全国性暖冬（图 1-4），气候变暖最明显的地区在西北、华北、东北地区。而且，西北变暖幅度高于全国平均水平，华北等地区出现干旱化趋势。

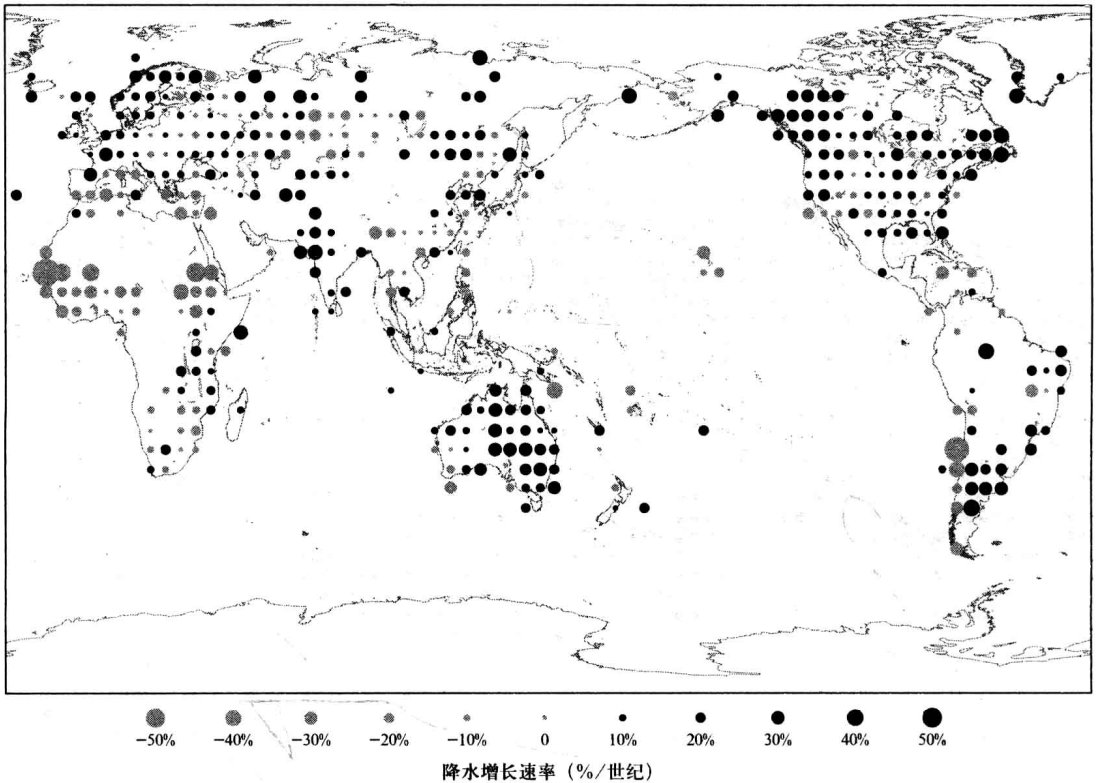


图 1-3 1900~1999 年全球年降水变化趋势图

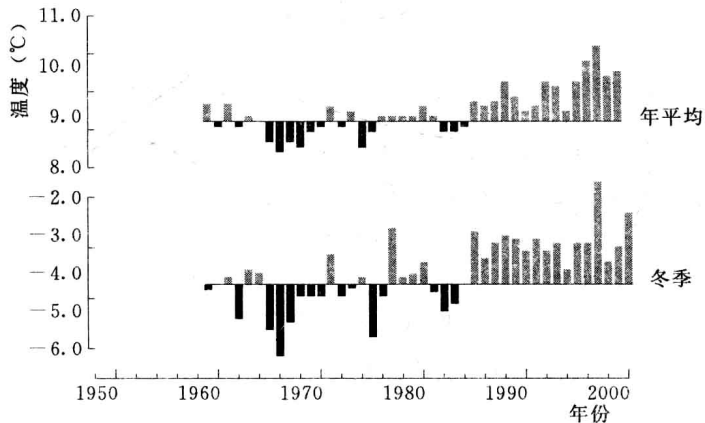


图 1-4 近 50 年中国年平均气温变化示意图

二、气候变化原因

影响气候变化的主要因素是自然的气候波动与人类活动的影响。前者包括太阳辐射的变化、火山爆发等；后者包括温室气体的增加造成的温室效应、陆面覆盖变化和土地利用变化、硫化物气溶胶的作用等。地球的气候一直是呈波动式的变化，冷暖交替出现。近 1 万年来，波动的幅度在 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ ，共经历了 3 次暖期，即全新世大暖期、12 世纪暖期、15

世纪暖期，后两者统称中世纪温暖期；19 世纪中后期是长达近 300 年的小冰河期结束后的暖期，目前正处于这个暖期。在这个暖期中气候也是波动的。到 20 世纪 40 年代温度一直上升，60~70 年代下降，以后又上升，20 世纪 90 年代是近百年来最暖的时期。

根据联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第三次评估报告的结论，现在有越来越多的事实与信息证明：近 50 年的气候变暖大部分是由人类活动引起的。大气中的温室气体（二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、对流层臭氧等）以及硫化物气溶胶的浓度明显增加，尤其是二氧化碳可能已达到了过去 42 万年以来的最高值。科学家用数值模式方法模拟了过去 100 多年的气候变化，发现只考虑自然变化不能很好地模拟过去的气候变化，如再加上人类活动的温室效应作用，可比较好地模拟出 1860~2000 年的气候演变，尤其是近 50 年的变化。

三、气候变化的影响

全球变暖造成的影响广泛、复杂而又深远，是全方位、多尺度和多层次的，既有正面影响，也有负面效应，但负面效应更受关注。

首先，气候变暖导致草原和荒漠分布范围向中国西部和高海拔地区扩展，这将导致未来主要植被类型分布可能发生明显变化；寒温带针叶林面积可能显著减少，温带草原可能北移且面积减少，温带荒漠向东扩展；山地冰川普遍退缩（图 1-5）。

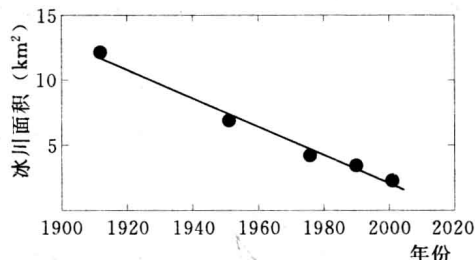


图 1-5 乞力马扎罗山冰川面积变化图

同时，全球变暖引起海平面上升。海平面上升将影响河口湾生态系统和海岸带经济，河口湾生态系统和海洋生物资源将受到严重影响。

其次，全球变暖可能会导致极端天气气候事件增多。全球变暖已明显影响自然生态系统，表现在冰川的退缩、植被分布范围向高海拔地区延伸、海平面升高等；一些自然生态系统（如珊瑚礁、红树林、高山和海岸带等）对气候变化表现出了脆弱（脆弱是指系统适应不利影响的能力低）的特征，它们可能遭受严重的甚至不可恢复的破坏；由于自然生态系统对气候变化存在不同时间尺度的滞后效应，未来脆弱系统的数目可能会增加，遭受破坏的地理范围也可能增大。

第三节 中国水文气象学发展现状

同发达国家相比，中国在大气循环、降水和气候方面的理论研究和技术应用等方面还存在相当大的差距，远远不能满足生产和建设发展的需要。大气循环、降水和人工影响作为气象的主要组成部分，尤其与人类趋利避害、开发水资源和气象科技转化为现实生产力紧密相关，应增加投入，大力发展。

目前，大气降水和人工影响气候方面的研究和业务工作正在进行，在中国气象局的指导下，走上了比较健康发展的轨道。经过多年的发展、研究、探索和业务作业，在科研和服务两方面都取得了很大成绩，为进一步提高科技水平奠定了基础。

当前国家级的科研比较薄弱，资金、设备及科技人员投入不足。对此，气象部门、中国科学院相关的研究所，有关高等院校应集中力量共同制定国家级科研计划，筹建国家级外场试验研究基地，增加投入，适当引进国外先进的探测仪器设备并共同协助配置成套，组织攻关，开展针对中国实际的降水云系发生发展的自然过程和催化潜力、催化技术方法和效果检验等方面的应用基础理论和业务作业技术研究。可以先进行专题研究，然后规划大型综合性试验，逐步深入和发展。大气、降水和气象工作的开展，应依托国家气象事业现代化主干系统的建设，在条件适合的地区，外场试验基地应与中小尺度基地的建设相结合，互相补充，共同促进，以充分发挥效益。

大气降水是中国水资源的主要来源，而蒸发又是水资源损失的主要途径之一。因此，作为气候基本构成要素和气候变化重要内容的大气降水和潜在蒸发变化成为中国天然水资源空间分布和时间演变的决定性因素。中国的降水量时空分布极不均匀，常出现极端现象（如干旱、洪涝），给流域水资源开发利用和管理带来了很大困难。中国水资源系统对气候变化的影响是十分脆弱的，一些河流的径流对降水量变化非常敏感，很多流域很小的降水变化就可以引起很大的河川径流量和水资源供应量变化。更重要的是，中国人口众多，经济发展迅速，水消耗不断增加，许多地方面临着水资源短缺问题，在干旱和半干旱、半湿润地区尤其突出。此外，社会对气候变化及变异的适应能力还比较弱，在经济欠发达的中西部地区尤其如此。这些都是气候变化往往引起重大洪旱灾害损失的重要因素。未来的气候将继续变化，自然的年际、年代际气候波动永无停息，人类活动引起的气候变化也必须加以考虑（IPCC, 2001）。伴随气候平均态的变化，极端天气气候事件（如强降水和干旱）频率也可能发生变化，降水的频率可能改变。未来的气候变化可能加剧中国的水资源供给压力，改变大气降水的空间分布和时间变异特性、水资源空间配置状态，直接影响到水资源稀缺的华北等地区的可持续发展和人民的生活质量。

显著的气候变化及其大气水资源变化已引起国内外水文、水利学者和有关部门的高度重视。针对水资源的可持续利用问题，国家已制定了许多战略和行之有效的措施。在第二次水资源综合规划工作中，对气候变化及其影响给予了一定考虑。随着更多有关气候和大气水资源演化科学事实的揭示，以及对气候变化机理和影响认识的深入，人们对这个问题重要性的认识将进一步提高。

第四节 国际水文气象学的近期进展

人类活动对环境和气候的影响促使天气情况急剧变化。人为因素带来的全球气候变化日益成为国际社会关注的重大问题。气候变化将可能带来不可逆的全球尺度的气候系统的变化，引起降水、气温等一系列非规律性的水文气象的变化，给人类的生存环境带来难以估量的变化。绝大多数科学家认为，气候变化将主要给人类和地球带来巨大的灾难。为防患于未然，保护现有适宜的生存环境和气候系统，国际科学界先后发起了气候变化的研究计划（国际地圈——生物圈计划和全球环境变化的人类因素国际计划）。这些计划主要针对气候变化的科学问题，特别是10~100年尺度气候变化的物理、化学和生物学过程及其可预测性，以及气候变化的影响与适应性对策。

目前，国际水文气象变化对全球的影响将是全方位、多层次和多尺度的，既存在正面影响，也存在负面效应。种种负面效应给人类带来难以估量的损失，适应这种变化将付出相当高的代价，如：海平面上升将危及经济发达的沿海城市的发展；大部分热带、亚热带区和多数中纬度地区普遍存在作物减产的可能；在水资源紧缺的地区，将面临更加严重的水资源短缺问题；受到传染性疾病影响的人口数量增加；大暴雨事件和海平面升高引起的洪涝将危及许多低洼和沿海居住区。

目前，已有减缓全球温室气体排放的途径。这一技术的开发和转让对在世界范围内减缓气候变化具有重要的作用。

复 习 题

1. 什么是水文气象学，什么是天气和气候，天气和气候有什么区别？
2. 请简述气候变暖的原因及其影响。
3. 请结合实例说明怎样以自身行动减缓气候变暖的趋势。

第二章 降 水

本 章 概 要	学 习 目 标
降水	1. 降水的含义及其主要特征
降水量	2. 降水的形成过程
降水历时	3. 中国降雨量的分布特征
降水强度	4. 降水特征的表示方法
降水特征表示方法	5. 理解面降雨量的各种求法
降水量观测	6. 观测降雨量的各种方法

降水是指液态或固态的水汽凝结物从云中降落到地面的现象，如雨、雪、霰、雹、露、霜等，其中以雨、雪为主。降水是水文循环中最活跃的因子，即是一种水文要素，也是一种气象要素，因此，降水现象是水文学和气象学共同研究的对象。中国大部分地区一年内的降水以雨水为主，降雪等较少。

第一节 降 水 量

描述降水特征的物理量包括降水量、降水历时、降水强度、降水面积及暴雨中心等。降水量指一定时段内降落在某一点或某一面积上的总水量，用深度表示，以 mm 计。降水量一般分为 7 级，见表 2-1。日降水量达到 50mm 的降水称为暴雨。暴雨又分为暴雨、大暴雨和特大暴雨三个等级。

表 2-1 降 水 量 等 级 表

24h 雨量 (mm)	<0.1	0.1~10	10~25	25~50	50~100	100~200	>200
等级	微量	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨	特大暴雨

一、降水的形成

自海洋、河湖、水库、潮湿土壤及植物叶面等蒸发出来的水汽进入大气后，由于分子本身的扩散和气流的传输作用分散于大气中。大气中的水汽含量有一定的限度，在一定温度下大气中最大的水汽含量称为饱和湿度。如果大气中的水汽量达到了饱和或过饱和，多余的水汽就要发生凝结。如果地面有团湿热且未饱和的空气，在某种外力作用下上升，上升高度越高，气压越低。在上升过程中，这团空气的体积就要膨胀，在与外界没有发生热量交换，即绝热条件下，体积膨胀的结果必然导致气团温度下降，这种现象称为动力冷却。当气团上升到一定高度，温度降到其露点温度时，这团空气就达到了饱和状态，再上升就会过饱和而发生凝结形成云滴。云滴在上升过程中不断凝聚，相互碰撞，合并增大。

一旦云滴不能被上升气流所顶托时，就会在重力作用下降落到地面成为降水（图 2-1）。

由上述可知，水汽、上升运动和冷却凝结是形成降水的 3 个因素。在水汽条件具备的情况下，只有空气冷却，水汽才能凝结形成降水，而促使水汽冷却凝结的主要条件是空气的垂直上升运动。当湿空气在某种外力作用下被抬升后就会促使空气冷却，导致降水。

（一）云滴增长的物理过程

1. 云滴凝结增长

凝结（或凝华）增长过程是指云滴依靠水汽分子在其表面上凝聚而增长的过程。在云的形成和发展阶段，由于云体不断上升，绝热冷却，或云外不断有水汽输入云中，使云内空气中的水汽压大于云滴的饱和水汽压，因此云滴能够由水汽凝结（或凝华）而增长。但是，一旦云滴表面产生凝结（或凝华），水汽从空气中析出，空气湿度减小，云滴周围便不能维持过饱和状态，而使凝结（或凝华）停止。因此，一般情况下，云滴的凝结（或凝华）增长有一定的限度。

要使云滴凝结（或凝华）增长过程不断地进行，还必须要有水汽的扩散转移过程，即当云层内部存在着冰水云滴共存、冷暖云滴共存或大小云滴共存的任一种条件时，产生水汽从一种云滴转化至另一种云滴上的扩散转移过程。例如，在冰晶和过冷却水滴共存的混合云中，在温度相同的条件下，由于冰面饱和水汽压小于水面饱和水汽压，空气中的现有水汽压介于两者之间时，过冷却水滴就会蒸发，水汽就转移凝华到冰晶上去，使冰晶不断增大，相应过冷却水滴则不断减小。

上述几种条件中，对形成大云滴来说，冰水云滴共存的作用更为重要。著名的贝吉龙（Bergeron）理论强调了冰晶对降水的作用。

值得指出的是，不论是凝结增长过程，还是凝华增长过程，都很难使云滴迅速增长到雨滴的尺度，而且它们的作用都将随云滴的增大而减弱。要使云滴增长成为雨滴，还需要经历其他过程，这就是冲并增长过程。

2. 云滴的冲并增长

云滴经常处于运动之中，这就可能使它们发生冲并。大小云滴之间发生冲并而合并增大的过程称为冲并增长过程。云内的云滴大小不一样，因此具有不同的运动速度。一般来说，大云滴下降速度比小云滴快，因而大云滴在下降过程中很快追上小云滴，大小云滴相互碰撞而粘附起来，成为更大的云滴；而在有上升气流时，当大小云滴被上升气流向上带时，小云滴因为较轻，也会追上大云滴并与之合并，成为更大的云滴。云滴增大以后，它的横截面积变大，在下降过程中又可合并更多的水云滴。这种在重力场中由于大小云滴速度不同而产生的冲并现象称为重力冲并。

有时在有上升气流的云中，当大小水滴被上升气流挟带而上升时，小水滴也可以赶上大水滴与之合并。水滴重力冲并增长的快慢程度与云中含水量及大小水滴的相对速度成正

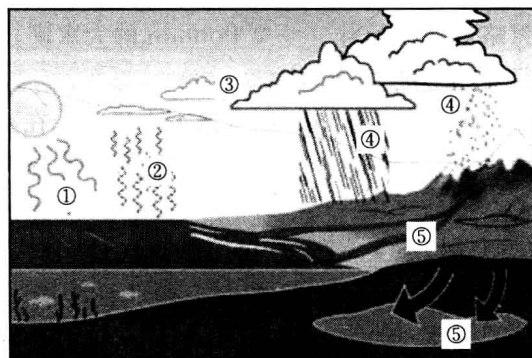


图 2-1 降水的形成

- ①—太阳辐射；②—海面蒸发；③—水汽运移；
④—降水；⑤—地表地下径流

比，云中含水量越大，大小水滴的相对速度越大，则单位时间内冲并的小水滴越多，重力冲并增长越快。有关计算和观测表明，对半径小于 $20\mu\text{m}$ 的云滴，其重力冲并增长作用可忽略不计，但对半径大于 $30\mu\text{m}$ 的大水滴，在很短的时间内就可通过重力冲并增长达到半径为几个毫米的雨滴。

考虑到实际的云中云滴大小不一，在空间的分布也不均匀，一种观点认为，云滴与云滴之间的冲并过程是一种随机过程，在这个观点基础上，提出了随机（或统计性）冲并模式。随机冲并模式认为在每一时间间隔内云滴的增长为概率性的，有的云滴冲并增大，有的则保持不变，在下一时间间隔内，有的云滴能获两次增长机会，有的只获一次，有的还保持不变。这个模式可以解释凝结增长过程的窄滴谱拓宽的机制，也可解释云中为何有少数云滴能因随机冲并而增长得比一般云滴快得多。

（二）雨和雪的形成

1. 雨的形成

由液态水滴（包括过冷却水滴）所组成的云体称为水成云。由冰晶组成的云体称为冰成云，而由水滴（主要是过冷却水滴）和冰晶共同组成的云体称为混合云。

水成云内如果具备了云滴增大为雨滴的条件，并使雨滴具有一定的下降速度，这时降落下来的就是雨或毛毛雨。从冰成云或混合云中降下的冰晶或雪花，下落到 0°C 以上的气层内，融化以后也成为雨滴下落到地面，形成降雨。

在雨的形成过程中，大水滴起着重要的作用。水分子间的引力难以维持半径 $2\sim 3\text{mm}$ 以上的水滴，在降落途中，大水滴很容易受气流的冲击而分裂。通过“连锁反应”，使大水滴下降，而小水滴继续存在，从而形成新的大水滴。这是上升气流较强的水成云和混合云中形成雨的重要原因。

当云中的云滴增大到一定程度时，由于大云滴的体积和重量不断增加，它们在下降过程中不仅能赶上那些速度较慢的小云滴，而且还会“吞并”更多的小云滴而使自己壮大起来。当大云滴越长越大，最后大到空气再也托不住它时，便从云中直落到地面，形成降雨。

冰云由微小的冰晶组成。冰云一般都很高，厚度也不厚，而且水汽又不多，凝华增长很慢，相互碰撞的机会也不多，所以不能增长到很大而形成降水。即使引起了降水，也往往在下降途中被蒸发掉，很少能落到地面。

2. 雪的形成

最有利于云滴增长的是混合云。混合云由小冰晶和过冷却水滴共同组成。当一团空气对于冰晶来说虽已达到饱和，而对于水滴来说可能还没有达到饱和，这时云中的水汽向冰晶表面上凝华，而过冷却水滴却在蒸发，就产生了冰晶从过冷却水滴上“吸附”水汽的现象。在这种情况下，冰晶增长得很快。另外，过冷却水很不稳定，一碰它，就要冻结起来。因此，在混合云里，当过冷却水滴和冰晶相碰撞的时候，就会冻结粘附在冰晶表面上，使它迅速增大。当小冰晶增大到能够克服空气的阻力和浮力时，便落到地面，这就是雪花。

二、中国年降水量特点

（一）年降水量地理分布

中国大部分地区受东南和西南季风的影响，形成东南多雨，西北干旱的特点（图 2-2）。全国多年平均年降水量 648mm ，低于全球陆面平均年降水量（ 800mm ），也小于亚洲陆面平均年降水量（ 740mm ）。按年降水量的多少，全国大致可分为 5 个带。

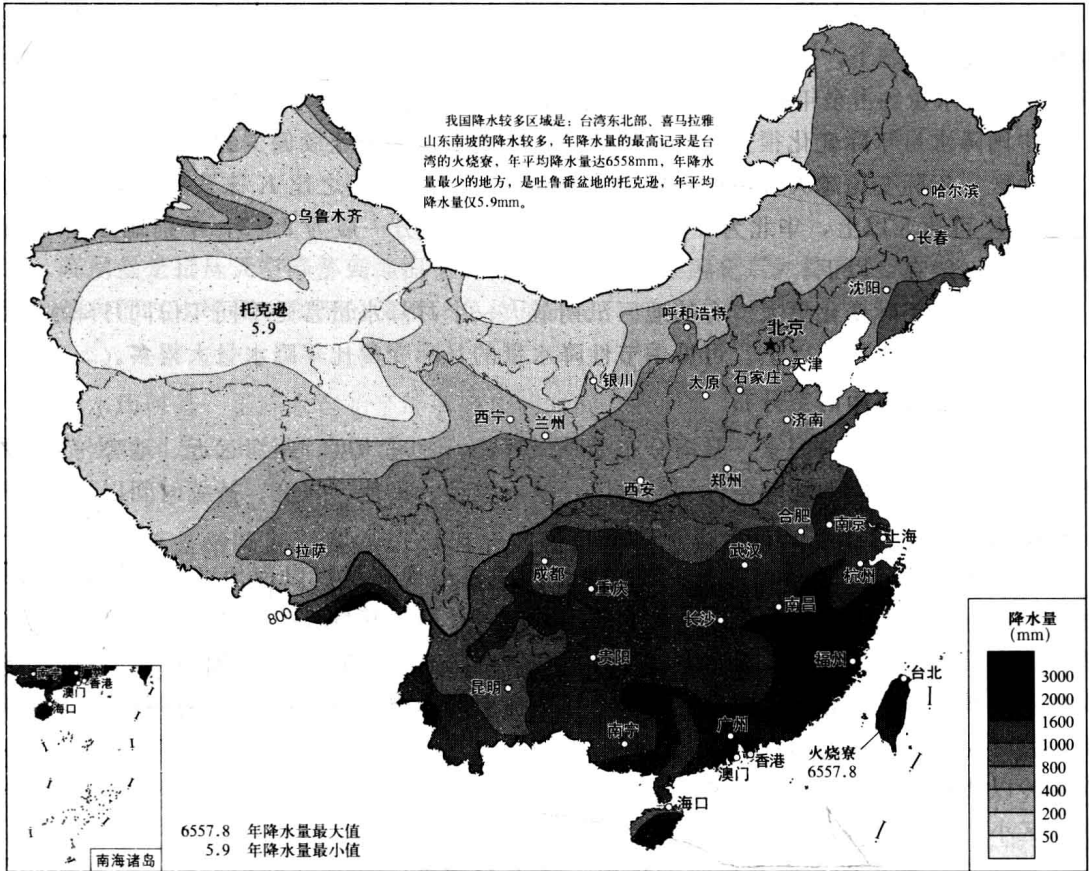


图 2-2 中国年降水量分布图

(1) 十分湿润带。年降水量超过 1600mm，年降水日数平均在 160d 以上，包括广东、海南、福建、台湾、浙江大部、广西东部、云南西南部、西藏东南部、江西和湖南山区、四川西部山区。

(2) 湿润带。年降水量 800~1600mm，年降水日数平均在 120~160d，包括秦岭淮河以南的长江中下游地区、云南、贵州、四川和广西大部分地区。

(3) 半湿润带。年降水量 400~800mm，年降水日数平均在 80~100d，包括华北平原、东北、山西、陕西大部、甘肃、青海东南部、新疆北部、四川西北和西藏东部。

(4) 半干旱带。年降水量 200~400mm，年降水日数平均在 60~80d，包括东北西部、内蒙古、宁夏、甘肃大部、新疆西部。

(5) 干旱带。年降水量少于 200mm，年降水日数低于 60d，包括内蒙古、宁夏、甘肃沙漠区、青海柴达木盆地、新疆塔里木盆地和准噶尔盆地、藏北羌塘地区。

(二) 降水量年内分配和年际变化

中国大部分地区降水的季节分配不均匀，主要集中在春夏季。长江以南地区，雨季较长，为 3~6 月或 4~7 月，雨量约占全年的 50%~60%；华北和东北地区，雨季为 6~9 月，雨量约占全年的 70%~80%，其中华北雨季最短，大部分集中在 7~8 月；西南地区降水，主要受西南季风的影响，旱季雨季分明，一般 5~10 月为雨季，11 月~次年 4 月为旱季。四