

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 农业气象学

姜会飞 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是为高等农业院校非农业气象专业开设农业气象学课程而编写的教材。全书由绪论、基础理论篇(第一~七章)和应用篇(第八~十一章)构成,基础理论篇包括大气、辐射、温度、水分、气压和空气运动、天气和气候,应用篇包括农业气候、农业气象信息服务、农业气象与减灾、农业小气候与精准农业。本书全面阐述了农业气象学的基本概念、基础知识及本学科的前沿进展和应用前景等,同时还注意将理论与农业实践紧密结合。

本书被教育部审批为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,除作为高等农业院校非农业气象专业教材外,还可供农业气象、地理、水文及其他相关专业人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

农业气象学/姜会飞主编. —北京:科学出版社,2008  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-03-020516-2

I. 农… II. 姜… III. 农业气象-高等学校-教材 IV. S16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 012068 号

责任编辑:甄文全 丛 楠/责任校对:陈丽珠  
责任印制:张克忠/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2008 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008 年 2 月第一次印刷 印张:15 3/4

印数:1—3 000 字数:400 000

定价:25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

## 《农业气象学》编委会名单

主 编：姜会飞

副 主 编：陈家豪 孙彦坤 王春华 姚渝丽 郑大玮

编写人员（按作者姓氏拼音排序）：

陈家豪（福建农林大学）

段项锁（上海市气象局）

冯颖竹（仲恺农业技术学院）

姜会飞（中国农业大学）

金为民（上海交通大学）

毛军需（河南科技大学）

孙彦坤（东北农业大学）

田志会（北京农学院）

王春华（新疆农业大学）

徐小逊（四川农业大学）

杨健松（贵州大学）

姚渝丽（吉林农业大学）

郑大玮（中国农业大学）

朱雪梅（四川农业大学）

# 前 言

农业气象学是面向高等农业院校农学、园林、植病、植检、园艺、设施、资环、畜牧、林学、农田水利、种子科学和草业等专业开设的专业基础课。

1958年该课程在中国农业大学（原北京农业大学）首次开设，并于20世纪60年代后陆续成为全国各农林院校的必修课。近50年来，教学内容和教学手段受科技发展和时代需求影响发生了显著的变化，特别是在网络信息技术高速发展的21世纪，多媒体教学成为普遍和主要的教学手段，教材内容也需要进行相应的调整和更新，逐步使网络课件和网络信息成为辅助教学的重要工具，使网络交流成为教学互动和学学互动的主要手段，实现有限的校内课堂与无限的校外领域的沟通和融合。

农业气象学作为一门交叉性的应用科学，教材编写以加强基础理论、传授基础知识和增强实用性为原则，强调理论和实践相结合，力求在较全面地阐述基本概念和介绍基础知识的基础上，参考国际上最近几年较通行的农业气象学教材的框架和内容，尽可能在内容上反映国际上该学科的最新研究成果和案例分析，以期使本教材内容达到在基础性、通用性、先进性、参考性和实践性等方面的统一。

本书编写人员都是从事农业气象教学和科研的学术骨干，编写分工基本上结合各人相对专长的研究领域，以保证教材内容能反映相关领域的最新研究进展和把握典型应用案例。全书分基础理论篇7章和应用篇4章，共11章，外加绪论和3个附录。应用篇的内容大多是首次编入农业气象学教材，特别是农业气候相似理论、农业气象减灾和精准农业章节对应用气象学为21世纪中国农业发展和国际农业科技贸易服务具有技术指导作用。附录中列举了国内外部分地区最新的标准气候值和国内外几个重要的与农业气象教学、科研和学术刊物相关的机构及其网址，便于在教学过程中及时把握学科的理论发展和应用前沿，也便于与国内外的相关研究单位和个人进行交流和协作。

本教材主要作为农业院校非农业气象专业的教科书，也可供农业气象、地理、水文等其他有关专业及各级农、林、牧、渔等生产和管理部门的技术和管理人员参考。

在教材编写过程中，全体编委和审稿专家对编写大纲和教材内容进行了广泛交流，同时得到了科学出版社高等教育出版中心和各编委所在单位的支持和帮助，在此一并表示感谢。此外，对教材中所引用的国内外教材、专著及科技期刊的资料和图片的作者表示诚挚的谢意，参考文献中如有遗漏和错误敬请见谅。

尽管我们力求在全面系统地介绍农业气象学的基本概念和基本知识的同时，尽可能反映最新的研究进展，但一方面学科发展日新月异，另一方面编者水平有限，所以在内容上尚难尽人意。此外，文字、图表等方面虽几经核校审定，仍难免会有一些错误，敬请读者见谅。同时，也望读者将对本书的意见和建议反馈给我们，以便在本书重印和再版时予以修改。

编著者

2007年8月

# 目 录

## 前言

## 专用名词及符号

绪论	1
一、农业气象学及其学科地位	1
二、农业生产与气象条件的关系	2
三、农业气象学的研究对象与任务	3
四、农业气象学的产生与发展	4
五、中国农业气象学的进展与成就	5
六、农业气象学的社会需求与发展趋势	6
思考题	7
推荐阅读	8
第一章 大气	9
第一节 大气的组成	9
一、大气形成	9
二、大气的组成	10
三、大气污染	12
第二节 大气状态	15
一、主要气象要素	15
二、气体状态方程	18
第三节 大气的垂直结构	19
一、大气的垂直范围	19
二、大气的垂直结构	20
第四节 大气与农业	23
一、大气成分与农业	23
二、大气状态与农业	23
三、大气污染与农业	24
思考题	25
推荐阅读	25
第二章 辐射	26
第一节 辐射的基本知识	26
一、基本概念	26
二、基本定律	28
第二节 太阳辐射	30
一、天文辐射	30
二、到达下垫面的太阳辐射	32
三、下垫面对太阳辐射选择性吸收、反射和透射	34
第三节 地球辐射与辐射平衡	36
一、地球辐射	36
二、辐射平衡	38
第四节 辐射与农业	41

一、光谱成分与农业生产 .....	41
二、光照时间与植物生长 .....	42
三、光照强度与作物生产 .....	43
思考题 .....	45
推荐阅读 .....	45
<b>第三章 温度</b> .....	46
<b>第一节 热力学基本知识</b> .....	46
一、基本概念和定律 .....	46
二、热量的传递方式 .....	47
三、物体的热特性 .....	48
<b>第二节 温度</b> .....	51
一、大气温度 .....	51
二、土壤温度 .....	56
三、水体温度 .....	60
<b>第三节 温度与农业</b> .....	63
一、主要温度指标 .....	63
二、温周期现象 .....	65
三、积温理论 .....	67
思考题 .....	69
推荐阅读 .....	69
<b>第四章 水分</b> .....	70
<b>第一节 地球上的水</b> .....	70
一、水的分布 .....	70
二、水循环 .....	70
三、水量平衡 .....	71
<b>第二节 大气湿度</b> .....	72
一、空气湿度的表示方法 .....	72
二、空气湿度的时空变化 .....	75
<b>第三节 蒸发与凝结</b> .....	76
一、蒸发与蒸腾 .....	76
二、水汽凝结与大气降水 .....	81
<b>第四节 水分与农业</b> .....	87
一、作物的水分生理 .....	87
二、土壤水对作物的影响 .....	88
三、降水与空气湿度对作物的影响 .....	89
思考题 .....	89
推荐阅读 .....	90
<b>第五章 气压和空气运动</b> .....	91
<b>第一节 气压和气压场</b> .....	91
一、气压 .....	91
二、气压场 .....	93
<b>第二节 空气运动</b> .....	97
一、水平运动 .....	97
二、大气环流运动 .....	104
三、湍流运动 .....	107
<b>第三节 气压、风和农业</b> .....	108

一、气压、风和农业	108
二、风对农业生产的有利影响	108
三、风对农业生产的不利影响	109
思考题	110
推荐阅读	110
<b>第六章 天气</b>	111
第一节 天气与天气系统	111
一、气团和锋	111
二、气旋与反气旋	113
三、高空常见天气系统	115
第二节 灾害性天气	117
一、几种灾害性天气	117
二、气象预警的制作和发布	121
第三节 天气预报	122
一、地面天气预报	122
二、空间天气预报	125
三、天气预报发展前景	127
思考题	127
推荐阅读	128
<b>第七章 气候</b>	129
第一节 气候与气候类型	129
一、基本概念	129
二、描述气候要素的特征数	130
三、气候类型	131
第二节 中国气候	134
一、自然地理特征	134
二、气候基本特征	135
三、气候资源分布	138
第三节 气候变化	143
一、气候变化历程	143
二、气候变化原因	146
三、气候变化对农业的可能影响及适应对策	150
思考题	153
推荐阅读	153
<b>第八章 农业气候</b>	155
第一节 农业气候资源	155
一、基本概念和特征	155
二、主要数量指标	156
三、农业气候生产潜力	156
四、中国农业气候资源和生产潜力的分布	158
第二节 农业气候相似理论	160
一、气候相似理论	160
二、农业气候相似程度判断	161
三、农业气候相似理论的应用领域	163
四、应用中要注意的问题	166
第三节 农业气候区划	167

一、概念与方法 .....	167
二、中国农业气候区划 .....	167
三、小麦气候专题区划 .....	168
思考题 .....	172
推荐阅读 .....	172
<b>第九章 农业气象信息服务 .....</b>	<b>174</b>
<b>第一节 农业气象业务系统 .....</b>	<b>174</b>
一、基本知识 .....	174
二、主要业务产品 .....	176
<b>第二节 农业气象预报 .....</b>	<b>177</b>
一、基本概念和方法 .....	177
二、中国农业气象预报内容 .....	179
<b>第三节 农业气象情报 .....</b>	<b>182</b>
一、内容和效益 .....	182
二、应用实例 .....	184
思考题 .....	190
推荐阅读 .....	190
<b>第十章 农业气象与减灾 .....</b>	<b>191</b>
<b>第一节 农业气象灾害 .....</b>	<b>191</b>
一、农业气象灾害概述 .....	191
二、水分异常引起的气象灾害 .....	192
三、温度异常引起的气象灾害 .....	195
四、气流异常导致的气象灾害 .....	198
五、光照异常引发的气象灾害 .....	200
<b>第二节 农业气象减灾对策 .....</b>	<b>200</b>
一、农业气象灾害的监测、预报和预警 .....	200
二、灾害防御 .....	204
三、抗灾 .....	205
四、灾后救援或补救 .....	205
五、减灾的综合管理 .....	206
<b>第三节 农业气象风险与灾害保险 .....</b>	<b>207</b>
一、农业气象风险 .....	207
二、风险分析与管理 .....	208
三、农业气象灾害的保险 .....	211
思考题 .....	212
推荐阅读 .....	212
<b>第十一章 农业小气候与精准农业 .....</b>	<b>214</b>
<b>第一节 农业小气候 .....</b>	<b>214</b>
一、基本知识 .....	214
二、农(林)地小气候 .....	216
三、温室小气候 .....	217
四、其他类型小气候的气象效应 .....	218
<b>第二节 农业气象模型 .....</b>	<b>220</b>
一、发展过程 .....	220
二、建模思路 .....	221
三、几类主要模型 .....	222



---

第三节 精准农业 .....	223
一、技术体系 .....	223
二、应用实例 .....	226
思考题 .....	228
推荐阅读 .....	228
主要参考文献 .....	229
附录 1-1 世界各地地面气象代表站气温(1961~1990)/ $^{\circ}\text{C}$ .....	230
附录 1-2 世界各地地面气象代表站降水量(1961~1990)/mm .....	232
附录 2 中国年平均气候标准值(1971~2000) .....	234
附录 3 国内外与农业气象相关的几个主要网站 .....	235
中英文名词对照 .....	236
索引 .....	238

## 专用名词及符号

<i>A</i>	土壤温波振幅	amplitude of soil temperature wave
<i>A</i>	地转偏向力	coriolis force
<i>A</i>	有效积温	effective accumulated temperature
<i>a</i>	吸收率	absorptivity
<i>a</i>	膨胀系数	coefficient of expansion
<i>a</i>	大气透明系数	atmospheric transmission coefficient
<i>c</i>	光速	speed of light( $3 \times 10^8$ m/s)
<i>C</i>	热容量	heat capacity
<i>C<sub>p</sub></i>	空气定压热容	heat capacity of air at constant pressure
<i>C<sub>v, a, w, s</sub></i>	空气、水、土壤的定容热容	volume heat capacity of air, water, soil
<i>C<sub>m, a, w, s</sub></i>	空气、水、土壤的质量热容	mass heat capacity of air, water, soil
<i>C</i>	惯性离心力	centrifugal force
<i>D</i>	土壤衰减深度	soil damping depth
<i>D<sub>日</sub></i>	土壤衰减深度	diurnal soil damping depth
<i>D<sub>年</sub></i>	土壤衰减深度	annual soil damping depth
<i>d</i>	饱和差	saturation deficit
<i>d</i>	农业气候相似距离	agroclimatic comparability distance
<i>E</i>	能量通密度	energy flux density
<i>E</i>	水分蒸腾率	transpiration rate
<i>E<sub>i</sub></i>	爱因斯坦值 ( $6.02 \times 10^{23}$ 光子数)	Einstein
<i>ET</i>	水汽蒸散率	evapotranspiration rate
<i>ET<sub>a</sub></i>	实际蒸散率	actual evapotranspiration rate
<i>ET<sub>p</sub></i>	可能蒸散率	potential evapotranspiration rate
<i>e</i>	单个光子能量	quantum energy
<i>e</i>	水汽压	water vapor pressure
<i>e<sub>a</sub></i>	实际水汽压	actual water vapor pressure
<i>e<sub>s</sub></i>	饱和水汽压	saturation water vapor pressure
<i>e<sub>sL</sub></i>	叶温下的饱和水汽压	saturation water vapor pressure of leaf
<i>e<sub>sw</sub></i>	湿球温度饱和水汽压	saturation water vapor pressure of wet bulb
<i>F</i>	力	force
<i>G</i>	土壤热通量密度	soil heat flux density
<i>G</i>	水平气压梯度力	air pressure-gradient force
<i>g</i>	重力加速度	gravitational acceleration
<i>H</i>	感热通量密度	sensible heat flux density
<i>h</i>	普朗克常量	Planck's constant
<i>h</i>	太阳高度角	solar elevation angle
<i>k</i>	波尔兹曼常量	Boltzman constant
<i>K</i>	作物植被消光系数	crop canopy extinction coefficient

$K$	热扩散率	thermal diffusivity
$K$	大陆度	continentality
$K$	干燥度	aridity index
$K_T$	植物蒸腾系数	transpiration coefficient
$k$	摩擦系数	friction coefficient
$L$	叶面积指数	leaf area index
$L$	蒸发(蒸腾)潜热	latent heat of evaporation (transpiration)
$L_s$	升华潜热	latent heat of sublimation
$LE$	潜热能量密度	latent heat flux density
$M$	大气质量	air mass
$M_w$	水汽摩尔质量	molecular weight of water
$m$	大气质量数	air-mass number
$m_s$	土壤热允量	thermal admittance
$P$	气压	atmospheric pressure
$P$	气候频率	climate frequency
$P_0$	海平面气压	sea level atmospheric pressure
$PAR$	光合有效辐射	photosynthetically active radiation
$PI$	降水及(或)灌溉量	precipitation and/or irrigation
$R$	普适气体常数	gas constant
$R$	摩擦力	friction force
$RH$	相对湿度	relative humidity
$R_{L,d}$	大气逆辐射	long-wave radiation(down)
$R_{L,u}$	地面辐射	long-wave radiation(up)
$R_n$	净辐射	net radiation
$RO$	降水径流量	runoff
$R_{b,b}$	太阳直接辐射	direct beam solar radiation
$R_c$	太阳常数	solar constant
$R_{d,d}$	太阳散射辐射	diffuse beam solar radiation
$r$	反射率	reflectivity
$r$	曲率半径	radius of curvature
$r_H$	感热输送阻抗	resistance for heat transfer
$r_i$	水汽输送总阻抗	total resistance for water vapor transfer
	[ $r = r_m + r_s + r_b + r_a$ , 分别代表叶肉(mesophyll)、气孔(stomatal)、 片流边界层(boundary layer)和大气(air)阻抗(resistance)]	
$S$	温度-饱和水汽压曲线斜率	slope of the saturation vapor pressure curve
$S$	面积	superficial extent
$T, t$	温度	temperature (K, °C)
$t$	时间	time
$t$	透射率	transmissivity
$t_a$	空气温度	air temperature
$t_d$	露点温度	dew point temperature
$t_l$	叶面温度	leaf temperature
$t_w$	湿球温度	wet bulb temperature

$u$	水平风速	horizontal wind speed
$V$	速度 (矢量)	velocity
$Y$	活动积温	active accumulated temperature
$Y_3$	农业气候生产潜力	agroclimatic potential productivity
$Z$	高度、深度	vertical distance
$\alpha$	短波反射率 (反照率)	short wave reflectivity(albedo)
$\beta$	鲍恩比	Bowen ratio(H/LE)
$\gamma$	湿度常数	psychrometric constant
$\gamma$	气温直减率	lapse rate of air temperature
$\gamma_d$	干绝热直减率	dry adiabatic lapse rate
$\gamma_m$	湿绝热直减率	moist adiabatic lapse rate
$\delta$	太阳赤纬	solar declination
$\epsilon$	发射率	surface emissivity
$\lambda$	波长	wavelength
$\lambda$	热导率	thermal conductivity
$\nu$	电磁波频率	frequency of electromagnetic radiation
$\rho$	密度	density
$\rho_a$	空气密度	air density
$\rho_s$	土壤容重	soil density
$\rho_w$	绝对湿度 (水汽密度)	water vapor density
$\sigma$	斯蒂芬-波尔兹曼常量	Stefan-Boltzmann constant
$\tau$	振荡周期	period of oscillation
$\varphi$	纬度	latitude
$\omega$	(温波曲线) 频率角度	angular frequency
$\omega$	地转角速度	angular velocity

# 绪 论

## 一、农业气象学及其学科地位

农业气象学 (agrometeorology) 是研究农业生产与环境气象条件相互关系与作用的科学, 由农业科学与大气科学交叉、渗透形成。

### 1. 农业气象学的大气科学基础

学习农业气象学首先需要了解大气与大气科学的基本概念。

大气 (atmosphere) 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的物质与环境条件。

气象是大气各种物理、化学状态和现象的统称。气象学 (meteorology) 是研究气象变化特征和规律的科学, 是农业气象学的基础之一。meteorology 一词源自古希腊文, 由 meteoros (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科学。现代大气科学大大扩充了传统气象学的界限, 研究对象不仅有覆盖整个地球的大气圈, 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着越来越大的作用。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。

天气和气候是大气科学的两个基本概念。天气是以气象要素值和天气现象表征的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, 通过各种气象要素的统计量来表示。气候学 (climatology) 是研究气候的形成、分布、变化规律及其与人类活动的相互关系的一门学科。

小气候指局部环境由于下垫面影响形成的贴地气层和土壤上层的气候, 其特点表现为小气候现象, 小气候学 (microclimatology) 就是研究这种现象的一门科学, 农业小气候学 (agromicroclimatology) 是农业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或大气科学的重要分支领域, 也是学习和研究农业气象学必需掌握的理论基础知识。

### 2. 农业气象学的生物与农业科学基础

作为一门交叉学科, 研究农业气象学还必须了解生物科学与农业科学的基本知识。在生物科学中需要了解基础生物学、植物学、动物学、昆虫学、微生物学、植物生理学、动物生理学和生态学的基本知识, 在农业科学中应了解基础农学、耕作学、农业生物学、农业生态学、园艺学、畜牧学、水产学、林学、农业工程学、动植物保护、农业系统工程学、农业经济学等方面的知识。此外, 还应了解一些农业地质学、农业土壤学、农业水文学等地学知识。

生物气象学 (biometeorology) 是研究生物圈与大气圈两大圈层相互关系的一门交叉学科, 其中研究农业生物 (包括农作物、林木、牲畜、鱼类、农用微生物等) 与大气圈相互关系的农业

生物气象学 (agro-biometeorology) 构成了农业气象学的又一重要理论基础。

### 3. 农业气象学的学科交叉性质

从农业科学的角度, 农业气象学与农业生物学、农业物理学、农业化学、农业数学等学科一样, 被认为是农业基础学科之一。研究农业生物及生产过程与气象条件的关系, 可以为育种、栽培、饲养、动植物保护、机械作业和其他生产经营活动提供科学的依据。

从大气科学的角度, 农业气象学属应用气象学的分支学科之一, 也是气象为国民经济服务的重点领域。农业应用气象学 (applied-agrometeorology) 是大气科学的理论与方法在农业中的应用, 是农业气象学的主要方法论之一。

## 二、农业生产与气象条件的关系

农业生产过程主要是在自然条件下进行的, 气候和土壤条件是最基本、最重要的自然环境和资源因素。而土壤的形成、水热状况和微生物活动等, 在很大程度上又受气候条件的制约。可以说, 农业是对环境气象条件最为敏感和依赖性最强的产业。不仅气象灾害给农业造成巨大损失, 全球气候变化对未来农业可持续发展也带来巨大的威胁。

### 1. 大气提供了农业生物的重要生存环境和物质、能量基础

农业生产的对象是植物、动物、微生物等生命有机体, 其生长发育和一切生命活动都离不开温度、水分、光照、气体成分、气流等气象要素。特别是绿色植物光合作用的基本原料和能源都主要来自大气环境, 农业动物和农用微生物的物质能量转换过程又都建立在消费和分解绿色植物的基础上。

### 2. 大气提供了可供农业生产利用的气候资源

农业生物顺利完成生长发育或完成预定农事活动都需要一定的物质基础、能量积累或有利环境, 其中有利的气象条件可称为农业气候资源。严重不利的大气环境条件往往形成农业气象灾害, 是导致农业生产波动的最主要原因。

### 3. 气象条件还对农业设施和农业生产活动的全过程产生影响

气象条件还对温室、畜舍、仓库等农业设施的小气候及生产性能产生影响, 对农机作业、化肥和农药等生产资料的使用和效率、农产品加工、运输、贮藏等产后活动有很大影响。

### 4. 大气还影响着农业生产的宏观生态环境和其他自然资源

土壤、植被、水体等其他环境系统的形成演变很大程度上受到大气环境的影响和制约, 土地、水资源、生物等其他自然资源的数量、质量及其与气候资源的相互配置关系到农业生产类型分布和经济效益, 特别是人类活动产生的温室效应导致的全球气候变化及其应对措施直接关系到人类社会、经济的可持续发展。

### 5. 农业生产活动对大气环境的影响

大规模垦荒、植树造林、水利工程等人类活动对局地大气环境产生各种影响, 稻田和饲养反刍动物是仅次于二氧化碳的温室气体——甲烷的主要来源, 但种植业又是吸收多余二氧化碳、减轻温室效应的主要途径之一。局地农业措施也会对周围小气候环境产生一定影响。

总之, 气象条件是影响农业生产最活跃的因素, 农业生产的对象是生命有机体并主要在露天条件下进行, 决定了农业生产是受大气环境条件影响最大的产业部门。同时, 农业生产活动对周

围的大气环境也会产生一定影响。

### 三、农业气象学的研究对象与任务

农业气象学主要研究农业生产系统与大气环境系统的相互关系和相互作用,包括农业生物过程及生产过程与气象条件的关系,受气象条件制约的农业问题及解决途径,农业设施、农业生物群体、农业生产技术措施对周边气象和微气象环境的影响及调控途径等。

农业系统包括农业生物、农业设施、农业生产活动与农业生态环境四个子系统,其中农业生物又包括作物、林草、花卉、畜禽、昆虫、水生生物和微生物等;农业设施包括农田、温室、畜舍、农业机械、水利工程、仓库等;农业生产活动包括栽培、养殖、农机作业、产品加工、运输、贮藏、销售等;农业生态环境包括大气环境、水环境、土壤环境和生物环境。

#### 1. 农业气象学的研究内容与主要任务

##### 1) 农业气象探测

包括仪器研制、站网设置、观测和监测方法等,是农业气象的基础工作。除获取常规气象观测资料外,还要根据农业生产的需要设计土壤水分、温室气体含量、农业物候、农业气象灾害、农田及设施小气候等农业气象观测项目和应用航天、航空遥感探测技术。

##### 2) 农业气候资源的开发、利用与保护

光、热量、水分、风能和二氧化碳等气象要素是重要的农业自然资源,研究其时空变化规律和开发、利用、保护对策与技术,可以为农业各产业、种植制度、作物和品种的合理布局,为土地、水、生物等其他农业自然资源的优化配置和高效利用提供依据。研究地形气候及气候资源的分布规律,对于山区开发和生态环境建设具有特殊重要的意义。

##### 3) 农业小气候利用与调节

研究农田、林地、水域、微地形及温室、畜舍、仓库等人工设施的小气候规律及调控措施,研究风障、林带、薄膜、耕作、灌溉、保墒增温剂等人为措施的小气候效应,可以为农业生物的生长发育和生产活动创造有利的环境条件,兼顾高产、优质、高效、安全和生态。

##### 4) 农业气象减灾与生态环境建设

包括研究旱、涝、风、雹、冷、冻、热等农业气象灾害的发生机制、时空分布规律、危害指标、减灾对策与措施,研究生态脆弱和严重退化地区的灾害特征、气候资源与其他自然资源的配置状况及生态环境建设的途径。

##### 5) 农业气象信息服务

主要包括农业气象预报和农业气象情报两大类,前者包括农用天气预报、农业气象灾害及病虫害发生条件预报、农业生物生长发育状况及物候期预报、农事作业期预报、产量和品质预报等。服务产品包括农业气象旬报、月报、年报、农情专题报、墒情报、灾情报等。目前各地气象部门将地面观测与遥感探测相结合,普遍建立了高效率的农业气象信息服务系统。服务方式除书面形式外,还通过电视、广播、电话、手机、互联网等电信形式传递。

##### 6) 农业气象基础理论研究

包括作物产量形成的农业气象基础、气候生产潜力、土壤-植物-大气连续体(SPAC)水分运动规律和高效利用途径、边界层物质传输与能量转化过程及模式、全球气候变化模式等。

##### 7) 应对气候变化的农业对策

气候变化已成为制约我国和世界社会经济可持续发展的重要因素,农业既是对于气候变化最敏感和最脆弱的产业部门,又是温室气体重要的源和汇。需要研究气候变化对农业生物与生产的影响机理;农业源温室气体的产生机理、分布现状与减排措施;农业生产吸收温室气体的潜力与实现途径;农业生物与农业生产对于气候变化的适应能力与对策等。

## 2. 农业气象学的研究方法

农业气象的研究过程通常分为资料获取、资料处理和资料分析三个阶段。资料获取方法包括调查考察、田间试验、人工模拟农业气象条件等,通常要进行农业生物或设施状况和环境气象要素二者的平行观测。资料处理包括审核、订正和数学加工处理。资料分析包括统计学方法、数值模拟法、系统分析法、模糊聚类法等。在实际研究过程中,特别是重大农业气象问题,还要吸收农学、生物学、生态学及其他相关学科的试验、研究方法综合运用,开展多学科的协同攻关。随着现代科学与高新技术的发展,农业气象学也要不断吸收最新的科技成果来丰富自身的内容和完善研究与服务手段。

## 3. 农业气象学的分支学科

按照研究的理论和技术领域可将农业气象学分为基础农业气象学、农用天气学、农业气候学、农业气象统计、农业气象预报、农业小气候、农业气象探测技术等。按所研究的农业产业部门或农业生物对象可分为作物气象、林业气象、牧业气象、渔业气象、园艺气象、微生物气象等。

# 四、农业气象学的产生与发展

## 1. 古代的农业气象知识

世界古代文明发源地积累了农业生产与气象相互关系的知识和经验。古埃及根据雨季时间安排尼罗河流域作物播种与收获。中国商代甲骨文中已有天气与灾害影响收成的记载,西汉已形成完整的二十四节气并广泛应用于农业生产。公元前1世纪的《汜胜之书》记载了区田法和耕作保墒技术。清代大型农书《授时通考》标志着根据农时与气象安排生产的知识已系统化。

## 2. 近代农业气象学的产生和发展

1854年,L. Blodge在美国政府农业报告中发表一篇农业气象报告,同年俄国Д. Рутевич首次出版《农业气象学》。1872年起美国国家天气局开始发布每周天气与作物公报。1880年在奥地利举行了首次国际农业和森林气象学会议。1881年德国R. Assmann发起成立了农业气象协会。1897年俄国И. И. Броунов组建了农业气象机构和站网。1913年国际气象组织IMO设立了农业气象委员会CagM。随着业务体系的日趋完备和观测资料大量积累,农业气象基础理论研究取得了重大进展。1854年L. Blodge提出农业气候相似理论。1919年美国W. W. Garner和H. A. Alard发现光周期现象并逐步形成光周期理论。1927年德国R. Geiger出版了《近地面气层气候》。1937年苏联Г. Т. Сеянинов出版了《世界农业气候手册》。1939年G. Azzi划分意大利小麦自然地理区,开创了农业气候区划的先河。1945年日本大后美保发表了《日本作物气象的研究》。

19世纪中叶起西方在中国沿海陆续开展气象观测。1912年直隶农事试验总场设立农业测候所。1922年竺可桢发表“气象与农业之关系”一文,我国气象学家陆续发表一批农业气象论文和教材,但长期战乱使中国农业气象事业基本停顿。

## 3. 现代农业气象学的发展

战后随着世界经济的恢复发展,特别是20世纪70年代以来的新科技革命,农业气象科学的理论与技术迅速发展。50年代以后热量平衡与空气动力学方法开始应用于农田水分平衡与灌溉管理,60年代英国J. L. Monteith改进了1948年Penman自由水面蒸发量公式,提出可用于植被



蒸散量估算的 Penman-Monteith 公式。60 年代以后各国开展土壤-植被-大气连续体 SPAC 和人工气候室模拟实验研究。70 年代以来,随着现代信息技术的发展和广泛应用,农业气象学在观测方法、实验手段、数据分析和理论模式研究方面都提高到一个新的水平。80 年代以来以荷兰 de Wit 学派的 WOFOST 和美国 CERES 为代表,作物模型研制取得了长足进展并已广泛应用于生产。

世界气象组织(WMO)农业气象委员会 1982 年编辑出版了《农业气象业务指南》,1964 年起《农业气象学》(现《农林气象学》)和《生物气象学》国际期刊开始在荷兰发行。20 世纪 80 年代以来遥感和地理信息系统、全球定位系统等 3S 技术在农业气象业务中广泛应用,普遍建立了基于现代信息技术的农业气象业务系统,农业气候区划已能对复杂地形和群体内部气象环境要素分布和变化规律进行精确描述。人工气候箱(室)等环境要素模拟实验手段不断改进和普及。80 年代以来开展了气候变化对农业影响与适应对策的研究,农业气象减灾研究重点由灾害机理与分布规律研究扩展到风险评估与管理及减灾新技术的研究。

在竺可桢倡导下,1953 年 3 月在华北农业科学研究所成立了农业气象组,1957 年扩大为中国农业科学院农业气象研究室,1990 年改为研究所。1958 年中央气象局成立农业气象研究室,1983 年改为研究所。1953 年起各地相继成立农业气象研究机构,1957 年起在全国建立了一批农业气象试验站。

1953 年北京农业大学招收第一批农业气象研究生,1956 年北京农业大学创办农业气象专业,1960 年南京气象学院成立农业气象系。全国绝大多数农业院校都开设了农业气象课,20 世纪 80 年代以后建立了一批硕士点,21 世纪初中国农业科学院、南京信息工程大学、中国农业大学先后设立以农业气象为主要内容的博士点。

1954 年中央气象局成立农业气象业务管理机构,1963 年发布《农业气象观测暂行规范》,1990 年修订为《农业气象观测方法》。1954 年起组织全国范围的农业气象预报情报等业务工作。1978 年中国气象学会成立农业气象专业委员会,1981 年中国农学会成立农业气象研究会,1992 年改为农业气象分会,20 多年来组织了一系列全国性和国际学术活动。1979 年中国农业科学院创办《农业气象》(现《中国农业气象》)。1986 年出版《中国农业百科全书·农业气象卷》。1999 年出版《中国农业气象学》和《中国农业气候学》。2001 年出版《中国林业气象学》。1991 年中国气象局组织编写出版《中国的气候与农业》中英文版。1979 年中国开始参加世界气象组织农业气象委员会各项活动,国际学术交流日益活跃。

近代中国农业气象学科发展的起点较低。20 世纪 50 年代初期初步建立了比较齐全的农业气象科研、教学与业务体系。60 年代因经济困难和“文化大革命”内乱一度严重萎缩,改革开放以来迅速恢复发展,逐渐融入国际农业学术界的主流。总的来看,中国农业气象学在理论研究和仪器设备方面与发达国家尚有相当差距,但近年来已明显缩小;在农业气象业务系统建设和为农业生产服务的效果方面居世界较先进水平和发展中国家领先水平。

## 五、中国农业气象学的进展与成就

中华人民共和国成立后,特别是改革开放以来,农业气象学科取得了巨大的发展与显著成就。

### 1. 作物光能利用潜力理论在高产稳产栽培和耕作改制中的应用

针对 20 世纪 50 年代生产中一度膨胀的浮夸风,卓越的气象和地理学家竺可桢、黄秉维及植物生理学家汤佩松等率先提出了光能潜力理论,农业气象学家在此基础上进一步提出了作物气候生产潜力理论,并在生产实践中深刻影响了耕作与种植制度的改革,指导了多熟种植、间套复种、合理密植与吨粮田建设,为中低产田改造与作物高产优质做出了重大贡献。

## 2. 广泛开展的农业气候资源考察和农业气候区划

提出了中国农业气候界线和作物生态适应性理论,将生长界限温度和积温理论应用于农业实践,为作物合理布局、农业区划和气候资源利用提供了科学依据。20世纪90年代以来运用遥感、地理信息系统、全球定位系统及计算机模拟技术已能较精细测算绘制山区复杂地形的主要气候要素分布。对不同农业气候区域与全球各地的农业气候相似分析,为作物引种与合理布局及防止有害生物入侵提供了理论依据和时空规避措施。

## 3. 季风气候条件下的气候波动与农业气象灾害防御技术

研究了若干重大气象灾害的发生规律与减灾途径,提出利用气候区划与灾害风险评估成果、地形气候与农业小气候资源及具有中国特色的趋利避害减灾对策与技术,不同程度克服或缓解了农业的灾害障碍,如农田节水保墒技术、水稻防烂壮秧技术、蔬菜、水稻与冬小麦的安全播种期、移栽期和齐穗期、作物种植适宜性区划等。20世纪80年代以来我国首创的黄腐酸在水分调控上具有开源节流的双重功能,居世界领先水平。

## 4. 农田辐射、水分、热量、二氧化碳传输调控理论的应用

20世纪50年代初期开始农田水分动态、水热传输过程试验,以后又关注作物水分胁迫及其机制利用,较早提出了农田水热平衡与作物光能利用模式及水分利用调控途径,建立了水热联系方程,并扩展到广大区域;测量光能与水分利用率在国际上起步较早,颇有建树;为90年代以来在半湿润和半干旱地区发展旱作节水农业和精准农业提供了科学基础。

## 5. 在热带、亚热带区域引种战略物资橡胶和发展多种经济作物

20世纪50年代在季风热带和亚热带南缘利用有利地形和坡地逆温带成功引种橡胶树,突破了国际封锁和 $17^{\circ}\text{N}$ 以北为橡胶种植禁区的传统认识,有力支持了国防建设。90年代亚热带丘陵山区气候资源考察提出山区不同作物种植上限、立体种植模式和行之有效的防寒避冻技术,扩大了柑橘、茶树等多种经济作物的种植区域,取得丰硕成果和重大经济效益。

## 6. 作物产量与灾害监测预报及农业气象信息服务系统建设

20世纪70年代末到80年代中期农业产量气象预测预报研究取得重大进展并迅速在全国推广应用,气象卫星冬小麦长势和遥感监测综合估产研究成果迅速形成了业务能力,精度时效均达国际先进水平。80年代中后期起开展了作物生长模拟和气候变化对农业生态影响的研究,基本达到与国际前沿接轨。遥感技术成熟应用于干旱、洪涝、冻害、寒害等农业气象灾害的监测,国家气象中心建立了干旱监测系统对各地干旱逐日逐月监测,网上可随时查阅。90年代以来已建成世界先进水平的农业气象信息服务系统。

# 六、农业气象学的社会需求与发展趋势

## 1. 农业气象学的发展趋势

进入21世纪,各国都在思考未来科学技术发展趋势及其给人类带来的机遇和挑战。1999年2月,世界气象组织结合农业气象委员会第十二届会议召开了“21世纪的农业气象——需求与前景”国际学术研讨会。

21世纪人类面临经济全球化和新技术革命浪潮,信息技术和生物技术等高新技术产业迅猛发展。另一方面又面临人口增加、资源短缺和环境恶化的严峻形势,以气候变暖为主要特征的全

球变化日益引起人们的关注,极端天气和气候事件对社会可持续发展构成巨大威胁,尤其是占世界人口70%以上的发展中国家。面对巨大的机遇和挑战,国际农业气象学科发展出现以下趋势。

(1) 更加关注全球变化,特别是气候波动与变化对发展中国家农业生产的影响,在农业气象适应对策和技术方面将取得重要的突破。

(2) 更加关注农业系统,尤其是脆弱农业生态系统的保护与恢复,需要加强有关生态恢复与优化的农业气象研究。

(3) 发展中国家农业气象事业将形成比较完整和具有特色的科技体系,总体水平有较大提高,区域性学术交流与技术合作广泛开展。

(4) 现代信息技术在农业气象研究与业务中广泛应用,全球农业气象观测和业务基本实现自动化、信息化和智能化,主要服务对象由政府机构转移到农户并部分实现市场化。农业微气象调控技术在精准农业中发挥重要作用。

(5) 农业气象研究与现代生物技术紧密结合并取得重大突破,动物、昆虫和微生物等薄弱领域的生物气象研究明显加强。农业生物气象指标鉴定和气候区划将为生物技术新物种、新品种快速繁育和合理布局提供可靠的科学依据。

(6) 减轻自然灾害的影响成为最优先的业务领域。建立在现代信息技术基础上的农业气象灾害风险评估形成完整技术体系,并形成系列化的物理、化学和生物调控减灾实用技术。

## 2. 中国 21 世纪对农业气象的需求与发展前景

中国在改革开放以来的 20 多年里,经济有了飞速的发展,但另一方面,我们也要清醒地认识到,我国的经济、社会发展水平与发达国家还有很大差距,特别是长期以来的城乡分割二元经济结构严重阻碍着经济效益的提高和社会的全面发展。我国绝大多数自然资源的人均值远低于世界平均,人口增长与资源、环境的矛盾十分尖锐。我国的农业基础还十分薄弱,尤其是气候变化导致极端天气、气候事件频繁发生,严重制约着社会、经济的可持续发展。

我国农业和农村经济发展进入了一个新的发展阶段:农产品供给由长期短缺变为总量基本平衡,丰年有余;由于市场化程度的提高,农业发展由受资源约束转为资源和需求双重约束;人民生活水平的提高使农业生产由解决温饱需求转向适应小康社会需求;农村人口的城镇化、加入世贸和经济全球化使农村经济与整个国民经济乃至世界经济的关系更加密切,促进了我国农业产业结构的进一步调整与优化。农业产业化将带来农业生产力的新飞跃。在传统农业和计划经济体制下,由于缺乏经营自主权及经营规模狭小,农民对于包括农业气象在内的农业科技缺乏需求动力,这是农业科技成果转化率低的根本原因。农业发展的新阶段将使农民具有完全的经营自主权和市场意识,农业科技事业的黄金时期即将到来。

农业气象工作者必须适应市场需求,调整科研和技术服务的内容。从主要为粮食生产服务转变成为大农业的各个产业全方位地服务;从主要为增产服务转变成首先为优质高效服务;从主要为各级政府服务转变成主要为经营主体服务;从仅研究国内的农业气象问题扩展到研究全球气候变化的影响与应对、世界农业气候资源的开发利用、世界农产品产量预报与贸易策略等。还要探索农、气、科、教相结合的最佳形式和途径,积极培育农业气象的开发手段,提供物化成果,进入市场交换。改造和更新农业气象的研究手段。为适应国家实施西部大开发战略的需要,农业气象还要为进行生态治理、防灾减灾、重建秀美山川和建设新农村开展服务。

## 思 考 题

1. 农业生产与气象条件有什么关系?
2. 为什么说农业气象学是一门交叉学科?
3. 农业气象学主要研究哪些内容?

4. 农业现代化和经济全球化对我国农业气象学科发展提出了哪些新的要求?

推 荐 阅 读

- 梅旭荣, 郑大玮, 孙忠富等. 2007. 农业气象学专题研究报告, 见: 中国科学技术协会等. 农业科学学科发展报告 (基础农学) 2006—2007. 北京: 中国科学技术出版社
- 秦大河. 2005. 中国气象事业发展战略研究. 北京: 气象出版社
- 中国农业科学院. 1999. 中国农业气象学. 北京: 中国农业出版社
- Mavi H S. 2004. Agrometeorology. New York: Food Product Press
- Ibarra H, Skees J. 2007. Innovation in risk transfer for natural hazards impacting agriculture. Environmental Hazards, Available online 4 September; 1~8
- Kapetsky J M. 2000. Present applications and future needs of meteorological and climatological data in inland fisheries and aquaculture. Agricultural and Forest Meteorology, 103(1-2);109~117
- Salinger J M. 2007. Agriculture's influence on climate during the Holocene. Agricultural and Forest Meteorology, 142(2-4);96~102
- Strand J F. 2000. Some agrometeorological aspects of pest and disease management for the 21st century. Agricultural and Forest Meteorology, 103(1-2);73~82
- Sivakumar M V K, Gommers R, Baier W. 2000. Agrometeorology and sustainable agriculture. Agricultural and Forest Meteorology, 103(1-2);11~26

# 第一章 大 气

## 第一节 大气的组成

### 一、大气形成

地球表层是由大气圈、水圈、土壤圈、生物圈及岩石圈组成。大气是指包围在地球表面的空气层，整个空气圈层称为大气圈。地球大气是随着地球的形成而逐步演变的，经过几十亿年的不断更新，才变为今天的状态。一般认为今天的地球大气是经过原生大气、次生大气和现代大气三个阶段演变而成的。

#### 1. 原生大气

在地球凝聚诞生的早期，地球表面形成以氢、氦、氖为主要成分的氢气云团，这种没有层次的云团就是早期的原生大气层。原生大气寿命很短，在地球形成后不久就消失了，这是因为被强烈的太阳辐射向外不断散射的粒子流形成的太阳风吹得无影无踪了；再一个原因是地球刚形成时，质量还不大，引力较小，加上内部放射性物质衰变和物质熔化引起能量转换和增温，使分子热运动加剧，氢、氦等低分子质量的气体便逃逸到宇宙空间去了。一般认为早期地球上曾有一阶段不存在大气圈。

#### 2. 次生大气

地球刚形成时，温度比较低，并无分层结构。后来由于地球的重力收缩和放射性衰变致热等，才使地球内部温度升高，出现熔融现象，在重力作用下，物质开始分离，地球内部较轻的物质逐渐上升，外部一些较重的物质逐渐下沉，形成一个密度较大的地核。后来地球温度不断下降，地球冷凝成固体。这时内部高温促使火山频频爆发，产生出二氧化碳、甲烷、氮、水汽、硫化氢和氨等具有较大分子质量的气体，在地球引力的作用下逐渐积蓄在地球周围，形成了围绕地球的次生大气。地球的水圈，也正是在这个阶段由水汽凝结降落而形成的。大约在地球形成10亿~15亿年，岩石圈、大气圈和水圈已经演化成形。

#### 3. 现代大气

在地热、太阳能的作用下，简单的无机物和甲烷等化合生成氨基酸、核苷酸等有机物并逐步演化为蛋白质。大约在35亿年前，海洋中形成了简单的原始生物，属于厌氧型生物，并逐渐演化产生叶绿素，进行光合作用，这就是水体中最早出现的自养生物藻类。随着紫外线的光解和光合反应，大量的氧生成了，使地球上开始了生命活动的历程。此时海洋有效地阻挡了致命的紫外线辐射，使原始生命在海洋中繁衍起来。最后高空氧逐渐增多，在光解作用下产生了臭氧层，它使透过大气的紫外线大为减少，促使植物进入海洋上层，又增加了光合反应的机会，更促进植物生命的大大发展。随着这种相互间的协调和增益过程，直到4亿年前，生命终于跨过了漫长的岁月，从海洋登上了陆地。大气也演变成今天的样子。可见，生命也正是在大气的参与和保护下，通过以光合作用为主的复杂的过程而形成的。

## 二、大气的组成

现代大气是由一些永久气体、水汽、雾滴、冰晶和尘埃等混合组成的，这种混合物一般分为三类：干洁大气、水汽和气溶胶粒子。

### 1. 干洁大气

不含水汽和气溶胶粒子的混合空气称为干洁大气。在 80~100km 的低层空气中，干洁大气平均相对分子质量保持在 28.966 左右，其主要成分是  $N_2$ ，约占 78%， $O_2$  约占 21%，Ar 占 0.9%，其他稀有气体氦、氖、氩、氙和甲烷、氮氧化物、硫氧化物、氨、臭氧等共占 0.1%（表 1.1）。这是因为除  $CO_2$ 、 $O_3$  和一些微量气体在时间和空间上有些改变外，低层大气在空气对流、湍流及扩散作用下，各种主要气体混合得相当均匀，因此，干洁大气成分的比例基本上是不变的。干洁大气中对人类活动影响比较大的是  $N_2$ 、 $O_2$ 、 $O_3$  和  $CO_2$ 。

表 1.1 干洁大气的成分

气体名称	平均相对分子质量	含量(占容积的百分比)
氮气( $N_2$ )	28.106	78.084
氧气( $O_2$ )	32.000	20.946
氩气(Ar)	39.944	0.934
二氧化碳( $CO_2$ )	44.010	0.033
氖气(Ne)	20.183	$1.818 \times 10^{-3}$
甲烷( $CH_4$ )	16.042	$2.000 \times 10^{-4}$
氪(Kr)	83.700	$1.140 \times 10^{-4}$
氢( $H_2$ )	2.016	$0.500 \times 10^{-4}$
氙(Xe)	131.300	$0.087 \times 10^{-4}$
臭氧( $O_3$ )	48.000	地表附近( $0 \sim 0.070$ ) $\times 10^{-4}$ 20~30km 高度( $1 \sim 3$ ) $\times 10^{-4}$
氦(Rn)	222.000	$6.000 \times 10^{-18}$
干洁大气	28.966	100

#### 1) $N_2$

$N_2$  是大气中含量最多的气体，是地球上生命体的基本成分，主要以蛋白质的形式存在于有机体中。 $N_2$  是一种不活泼的气体，大气中的氮，不能被植物直接吸收，但可被土壤中的根瘤菌利用，变成能被植物吸收的氮化物。另外，大气中的闪电可将氮、氧结合起来，形成氮氧化物并随着降水进入土壤，被植物吸收利用。

#### 2) $O_2$

$O_2$  对生命活动有重要作用。几乎所有生命体的呼吸、有机质氧化分解、燃烧过程都需要  $O_2$ 。氧参与有机体的氧化分解过程，使细胞和机体释放能量。 $O_2$  化学性质活泼，常温下极易氧化分解有机质，维持和加速物质能量的循环过程。

#### 3) $O_3$

$O_3$  是氧原子与氧分子结合而成。大气中氧原子主要来源于紫外线作用下氧气的光解，其次是有机物氧化和闪电过程。 $O_3$  有强氧化性，可直接氧化细胞组分，使细胞膜磷脂、蛋白质等大

分子物质产生自由基,使脂肪酸氧化形成有毒的过氧化物,从而损害膜的结构和功能,导致组织损伤。 $O_3$ 不能直接呼吸。 $O_3$ 只占大气成分的百万分之一( $1\text{ppm}=10^{-6}$ ),如将大气中的 $O_3$ 全部压缩到一个标准大气压时, $O_3$ 层的总厚度仅约3mm,总质量不过30亿吨左右。 $O_3$ 在大气中的分布是极为不均匀的,近地面空气层中 $O_3$ 的含量很小,5km以上含量逐渐增加,20~25km形成明显的 $O_3$ 层,再往上 $O_3$ 的密度又开始减少,直到55~60km逐渐消失。

$O_3$ 选择性吸收太阳短波紫外线,对紫外线的短波区(UVC,  $0.20\sim 0.28\mu\text{m}$ )全部吸收,中波区(UVB,  $0.28\sim 0.32\mu\text{m}$ )绝大部分吸收,长波区(UVA,  $0.32\sim 0.40\mu\text{m}$ )则完全不吸收。太阳辐射中紫外线的中短波区如果大量到达地面,地球上的一切生物的生存将会受到严重威胁,臭氧不吸收的紫外线长波区恰恰是对生物有益的,具有杀菌、促进人体对钙的吸收、加快植物细胞壁和纤维素的合成等作用。大气臭氧是地球上一切生灵的保护伞,随着“ $O_3$ 空洞”的出现及其在面积、深度及延续时间三维结构中的发展,地面紫外线增多,白内障,皮肤癌患者也增多。

同时, $O_3$ 吸收太阳短波紫外线使 $O_3$ 层大气升温,向大气、地球发射更多的长波辐射,对地球起保温和增暖作用,因此也有人称之为“温室气体”。

#### 4) $CO_2$

$CO_2$ 是光合作用的原料和呼吸作用的产物。大气中的 $CO_2$ 主要来源于海洋和陆地上动植物的呼吸、有机物的腐烂分解、燃烧、火山喷发等。因此, $CO_2$ 在大气中的分布是不均匀的,占大气成分的万分之三( $300\text{ppm}$ ),分布于20km以下的大气层,主要集中在大气层的底部,一般工业区多于居民区,城市多于乡村,冬季多于夏季。随着工业化进程的加快,大气中 $CO_2$ 的含量越来越多,浓度日趋升高。 $CO_2$ 浓度的变化,对人类的影响比较复杂,一方面,大气中 $CO_2$ 浓度的升高(在一定范围内),绿色植物的光合作用增强,有利于农作物产量的提高;另一方面, $CO_2$ 是温室气体,它能强烈吸收和放射长波辐射,对地表的热量平衡有影响。

## 2. 大气中的水汽

大气中的水汽来自江、河、湖、海及潮湿物体的蒸发,因此,它在大气中的分布极不均匀,主要集中在低层大气中,随着高度的增加水汽密度逐渐减少。水汽集中在100~200m以下的近地面对流层,在1.5~2km处水汽密度约为近地面的50%,5km高度仅为近地面的10%,再往上水汽的含量就很少了。水汽在水平方向上的分布也是不均匀的。在炎热的大沙漠中央区域,空气中的水汽占容积的比例几乎接近于零,在温暖的洋面上空,水汽密度的比例可达到4%左右,在极地平均为0.02%,而在热带平均为2.5%。空气中水汽密度比例随着下垫面水分的多少和空气温度的高低而改变。

大气中水汽含量虽然不多,但由于它在大气温度变化范围内可以进行相变,变为水滴或冰晶,因而它对大气中的物理过程起着重要作用,是天气变化的主角,大气中的雾、云、雨、雪、雹等天气现象都是水汽相变的产物。水汽还是自然界中水分由海洋转移到陆地的使者,它制约着云的形成和雨的降落,通过地面和植被的蒸发、蒸腾作用,调节着大气的湿度并完成热量的转移。

大气中水的三相变化不仅影响天气变化,相变过程中还要吸收或放出潜热,调节着地温和气温的变化。为防果园发生霜冻害,可利用水相变的能量转换,对果园进行喷灌溉水。

空气中水汽的多少对病菌的流行、动植物的生长发育和农业生产有明显的影 响。例如,2007年四川小春作物在“暖干”气候背景下,小麦蚜虫、油菜蚜虫发生严重,而3月3日~7日的降温降雨虽在一定程度上抑制了蚜虫的发生蔓延,却有助于小麦锈病的发展流行。这就是通常所说的“干生虫、湿生病”。

大气中水汽含量的多少,对动植物的生长发育有着重要作用,对农作物的产量有明显的影 响,因为它能影响植物蒸腾和土壤蒸发的速率,并间接制约着植物对 $CO_2$ 的吸收、病菌的萌发和流行。水汽的凝结物露、雾、雨、雪等对农业生产的影响更大。此外,水汽能强烈吸收长波辐

射,参与大气“温室效应”等。

### 3. 气溶胶粒子

悬浮在大气中的固态和液态的颗粒物,粒径为 $10^{-3}\mu\text{m}$ 至几十微米。气溶胶是形成雨的凝结核,对云雾的形成起重要作用。气溶胶按来源分为自然源和人工源两大类,自然源主要包括火山喷发的烟尘、风吹起的土壤微粒、海水飞溅扬入大气后被蒸发的盐粒、细菌、微生物、植物的孢子花粉、流星燃烧产生的细雨小微粒和宇宙尘埃等;人工源主要有燃烧排放的烟尘、原子弹爆炸的烟尘、建筑施工及汽车扬尘尾气等。气溶胶多集中于大气底层,其分布是不均匀的。一般地,城市多于乡村,冬季多于夏季,干旱地区多于湿润地区。

大气中的气溶胶粒子浮游空际,会使大气能见度变低,还能减弱太阳辐射和地面辐射,影响地面空气的温度。当固体颗粒沉降在叶片上时,它可以强烈地吸收太阳辐射,产生高温,灼伤叶片。这些物质还对叶片遮光,堵塞气孔,影响光合作用的正常进行。

有些气溶胶粒子还是大气中的污染物质,如烟中的烟黑是致癌物质,粉尘中有大量的镉、铬、铅等金属,以及许多有机化合物,都对人体有一定的危害。气溶胶粒子还在大气的许多化学过程中起作用,像燃烧排出的一氧化氮、二氧化氮、二氧化硫等气体,在紫外线的照射下会氧化,遇水滴或在高温下生成硝酸、亚硝酸、硫酸及各种盐类,造成严重的污染。

颗粒物按其自身重力作用和自然沉降特性分为降尘和飘尘,粒径 $>10\mu\text{m}$ 称为降尘,粒径 $<10\mu\text{m}$ 的是飘尘。目前常以粒径大小来区分悬浮颗粒物和可吸入颗粒物,悬浮颗粒物是指粒径 $<100\mu\text{m}$ 的液态、固态或液态和固态结合存在并悬浮于空气中的颗粒物;可吸入颗粒物是指粒径 $<10\mu\text{m}$ 的能进入人体呼吸道的颗粒物。粒径小的颗粒在大气中稳定程度高,沉降速度慢,一般 $10\mu\text{m}$ 粒径的颗粒物沉降到地面需要4~9h,而 $1\mu\text{m}$ 的颗粒物需19~98d,  $0.4\mu\text{m}$ 的需120~140d,  $<0.1\mu\text{m}$ 需5~10年,颗粒物在大气中停留时间越长,被吸入人体的概率越高。不同粒径颗粒物可达到肺部无纤毛区的几率:  $10\mu\text{m}$ 为0、 $5\mu\text{m}$ 为25%、 $3.5\mu\text{m}$ 为50%、 $2.5\mu\text{m}$ 为75%、 $\leq 2\mu\text{m}$ 颗粒物90%~100%可达到肺泡区。

## 三、大气污染

大气污染是指人类活动或自然过程,使排放到大气中的物质的数量、浓度及持续时间超过了大气环境的容许量,直接或间接地对人类生产生活产生不良影响的现象。

### 1. 大气污染物

引起大气环境污染的物质主要来自两方面:一是自然界各种自然过程如火山爆发、森林大火、煤田、油田放出的有害气体及腐烂的动植物等自然因素造成的,即自然源;二是人类工农业生产、交通运输和日常生活等过程产生的,即人工源。引起大气污染广泛而严重的主要是人工源,因此人们所指的污染源通常指的是人工源。目前人们注意到的污染物约100多种,通常分为含硫化合物、含氮化合物、碳氧化物、碳氢化合物、含卤素的化合物、光化学氧化剂和颗粒物等七类,也可概括为颗粒状污染物和有害气体两大类。

美国环境保护署(U. S. Environment Protection Agency)把大气污染物按常规污染物( $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 和Pb等7种)和有害污染物(Hg、Mn、Ni、苯、氯乙烯、乙醛等140多种)进行监测。从其网站([www.epa.gov/air/data](http://www.epa.gov/air/data))可以查阅并下载1996~2007年观测数据。美国国家环境质量标准分两级(表1.2)。一级标准是为保护公众健康而留有安全余地的环境要求水平,二级标准为使公共福利免遭已知或可预见的污染物不利影响而应要求的水平,表1.3对此列举了主要污染物在清洁大气和污染空气中的浓度。



表 1.2 美国国家环境空气质量标准

污染物	一级标准	二级标准
SO <sub>2</sub>	24h 均值 0.14ppm(≤1 次/年), 年均值 80μg/m <sup>3</sup> (0.03ppm)	3h 最大 1300μg/m <sup>3</sup> 0.5ppm(≤1 次/年)
颗粒物(PM10)	24h 均值 150μg/m <sup>3</sup> (过去 3 年, ≤1 次/年), 年均值 50μg/m <sup>3</sup>	与一级标准相同
CO	8h 均值 10μg/m <sup>3</sup> (9ppm), 1h 均值 40μg/m <sup>3</sup> (35ppm)	无二级标准
O <sub>3</sub>	1h 均值 35μg/m <sup>3</sup> (0.12ppm), 8h 均值 0.08ppm	与一级标准相同
NO <sub>2</sub>	平均值 100μg/m <sup>3</sup> (0.053ppm)	与一级标准相同
Pb 及其化合物	季均值 1.5μg/m <sup>3</sup>	与一级标准相同

表 1.3 主要污染物在大气中的浓度/(μg/g)

组 分	清洁空气	污染空气	组 分	清洁空气	污染空气
CO	<1	5~200	O <sub>3</sub>	0.001~0.06	0.06~1
SO <sub>2</sub>	0.001~0.01	0.02~2	CO <sub>2</sub>	310~330	350~370
NO <sub>x</sub>	0.001~0.01	0.01~0.5	颗粒物	10~20μg/m <sup>3</sup>	70~700μg/m <sup>3</sup>
碳氢化合物	1×10 <sup>-6</sup>	1~20			

有害空气污染物指的是无环境空气质量标准可适用, 根据 EPA 判断, 引起或预计引起死亡率增长, 或严重的不可逆转疾病增长, 或使可逆转疾病变为不可逆转疾病的情况增长的污染物。有害空气污染物又可分为金属(汞)、无机物(砷)、有机物(苯、氯乙烯)、颗粒物(石棉尘)和放射性物质(氡)五类。

美国的排放标准中污染排放限值指标设计不拘一格, 不同的污染物有不同的表达方式。例如, 汞的排放标准采用 g/d; 氯乙烯的排放标准采用 ppm; 砷的排放标准以一年内的最大排放速率(kg/h)表示; 硫酸工业排放标准以 kg/t 产品表示。

空气污染指数(API)就是将常规监测的几种主要空气污染物浓度简化成单一概念性指数数值形式, 并分级表征空气污染程度和空气质量状况, 适合于表示城市的短期空气质量。

中国目前采用的空气污染指数(API)分为五个等级: 一级, API≤50, 空气质量优, 应多参加户外活动, 呼吸清新空气; 二级, 51≤API≤100, 空气质量良好, 可正常进行户外活动; 三级, 101≤API≤150, 为轻微污染; 151≤API≤200, 为轻度污染, 此时心脏病和呼吸系统的患者应适当减少体力消耗和户外活动, 但对健康人无明显影响; 四级, 201≤API≤300, 为中度污染, 此时老年人和心肺病患者应尽量留在室内, 健康人也应适当减少户外活动; 五级, API≥300, 为重污染, 此时除特殊需要, 应尽量避免留在户外。

## 2. 对全球气候的影响

人类每年向大气中排放数亿吨的污染物, 在一定程度上改变了低层大气的结构和性质, 影响了地球表面对太阳辐射的收支状况, 对天气、气候产生影响。

### 1) 酸雨

酸雨是指 pH<5.6 时的降水。空中降水本来是中性的, 而酸雨含酸量一般超过正常含量几十倍, 最低时 pH 可达 1.5。酸雨中含有多种无机酸, 90% 以上是 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 HNO<sub>3</sub>。国外的酸雨一般 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 比 HNO<sub>3</sub> 高一倍, 我国酸雨 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 含量更高, 这种酸雨称为硫酸性酸雨。硫酸、硝酸主要由人为排放的污染物 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 转化而成。硫酸雨主要是由于大量的 SO<sub>2</sub>, 在潮湿而污浊

的空气中，与水膜接触后形成亚硫酸水溶液，进一步被大气中的金属离子催化氧化成硫酸而形成酸雨。

酸雨毒性比  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  大好多倍，被称为“天空中的死神”。酸雨的形成除与大气中酸性物质浓度大小及其转化条件有关，还与气象条件和地形有关。气温高的地区  $\text{SO}_2$  容易转化为硫酸，土壤呈酸性，大气中碱性物质含量较少，有利于酸雨形成。重庆、广州和贵阳属此种情况，酸雨 pH 分别为 4.04、3.69 和 4.07。相反，北京地区，气候干燥，土壤呈碱性，大气颗粒物中碱性物质很多，春冬季风大，扬尘多，虽然大气中  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的浓度也高，但不会形成酸雨。酸雨降落可发生在污染源的发源地境内，也可随风移动降落到几千里以外，造成大范围的公害。1985 年欧洲 15 个国家大约 700 万平方公里的森林，受跨国酸雨损伤，曾因此引起国际纠纷。1982 年中国酸雨面积约占国土面积的 6.8%，酸雨城市主要出现在长江以南。酸雨的危害是多方面的：首先，它使河流、湖泊酸化，挪威南部有 1.3 万平方公里的湖面无鱼，北欧和北美有 2000 个左右湖泊的物种绝迹；其次是危害植物生长，双子叶作物受害大于单子叶作物，尤其是根类作物，pH 2.0~3.0 可引起叶片伤害；第三，降低土壤肥力，使土壤酸化。瑞典一些森林土壤的 pH 降低了 0.3~0.7；第四，严重腐蚀城市建筑物、机器、桥梁和艺术品。

### 2) 温室效应

温室效应是指大气吸收地面长波辐射之后，也同时向宇宙和地面发射辐射，对地面起保暖增温作用。大气中能够强烈吸收地面长波辐射，从而起温室效应的气体称为温室气体，它们主要有二氧化碳、甲烷和水汽等。除水汽以外，温室气体在自然大气中含量都极少，因此，人为释放如不加以限制，便容易引起全球大气变暖。根据对南极和格陵兰冰盖中密封气泡的  $\text{CO}_2$  浓度测定，工业革命以前  $\text{CO}_2$  浓度一直是比较稳定的，大约是  $280 \times 10^{-6}$  左右，如按现在  $\text{CO}_2$  浓度增长速度，大约到 2100 年前后可达到  $560 \times 10^{-6}$ ，即比工业革命前增加一倍。气温也将上升  $1.0 \sim 3.5^\circ\text{C}$ ，升温将主要集中在高纬度地区，南北两极的冰将加快融化。但是，温室效应也并非全是坏事，因为最寒冷的高纬度地区增温最大，因而中纬农业区可以向高纬区大幅度推进。 $\text{CO}_2$  浓度增加也有利于增加作物的光合作用强度，提高有机物产量。

### 3) 臭氧层遭破坏

臭氧主要分布在平流层的 10~50km 的范围内，尤其在 15~30km 高度上臭氧浓度较大。1979 年首次发现南极臭氧空洞，到 1984 年，估计南极上空的臭氧已损失 50%。目前由于人类制造出来的氯氟烃化合物，正在大量破坏臭氧层中的臭氧分子，使两极地区臭氧层明显变薄，南极上空春季甚至出现臭氧空洞（臭氧浓度只有正常值的 1/3 左右），紫外线大量通过大气层，使人患皮肤癌和白内障的概率增加，伤害植物的表皮细胞，抑制植物光合作用的生长速度，使粮食减产，此外，还降低海洋生物的繁殖能力。

目前已知影响臭氧层的化学反应物大约有 10 000 种。对臭氧层破坏严重的是除了广泛用于各种雾化剂、除臭剂和制冷剂的氟利昂 ( $\text{CFCl}_3$  和  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ) 外，还有氮氧化物 ( $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$ ) 也能和臭氧发生反应使臭氧分解。有人测定施用氮肥的 50% 以上并未转化为作物产量，而是进入环境中，增强土壤反硝化作用，产生更多氮氧化物，加速臭氧的分解。

## 3. 大气污染防治

### 1) 工业布局与减排

污染严重的水泥厂、钢铁厂应远离城市，并且要避开城市的上风区。污染较轻的厂矿企业，应远离居民区，城市规划时要把工业区、生活区和商业区分开。对工业应严格执行污染物排放总量控制，削减各项工业污染物排放量。

### 2) 煤烟型污染防治

中国的燃料主要以煤为主，煤含硫高，烟尘大，对大气污染严重，大部分城市目前正在逐步

改进为燃油和天然气。没有条件的地区应改进设备,尽可能地充分燃烧、排硫和脱硫,减少有害物质的排放量。提高优质能源比重,大幅度减少市区燃煤量。冬季采暖是烟尘的主要来源,采取片区集中供暖或发电厂利用余热,统一供暖。减少燃烧点,杜绝非环保型的锅炉供热。既能减少污染,又能节约空间和能源。鼓励使用太阳能、地热、风能等可再生能源。

### 3) 减少交通污染

交通污染一般指汽车、火车和飞机的尾气。特别是城市汽车数量多,减少交通污染要实施公交优先战略,重点发展轨道交通(地铁、轻轨),有效控制道路汽车行驶,同时严格机动车排气污染物排放标准,禁止尾气不合格车辆行驶。

### 4) 合理使用农药和化肥

农业生产过程中尽量使用生物防治方法控制病虫害,减少化学防治,必须施用农药时,除选择高效、低毒、低残留的农药外,还要掌握好施药有效期,提高防治效果,减少用药剂量,隐蔽施药,并尽量避免喷雾。在施用方法上,选择对环境影响小的根外施药或涂茎,避免喷雾和喷粉。此外,使用化肥也须合理,避免施用过多氮肥对大气和土壤造成污染。

### 5) 绿色植被和覆盖

绿色植物在净化大气和防治污染方面有很大作用,主要有:吸碳、制氧、吸尘、吸毒、杀菌和降音等。全球绿色植物每年光合作用可吸收大量  $\text{CO}_2$ , 根据测定  $1\text{hm}^2$  阔叶林,生长期一天可吸收  $1\text{t CO}_2$ , 释放  $730\text{kg O}_2$ , 每年吸尘  $32\sim 64\text{t}$ ;  $1\text{hm}^2$  柳杉林每年可吸收  $\text{SO}_2$   $720\text{kg}$ ; 很多树木能产生杀菌素,起到直接杀菌的作用。因此,应加强绿化造林,种树种草,提高森林覆盖率,建设绿色生态屏障。

有效覆盖控制施工扬尘,城区散装货物运输车辆密闭运输,干燥多风季节裸露农田采取“留茬免耕”或“秸秆还田”等扬尘控制措施。

## 第二节 大气状态

气象学上,大气的物理性状主要以气象要素和空气状态方程来描述。这些表征大气状态(温度、体积和压强)和大气性质(风、云、雾、降水等)的物理量称为气象要素(温、压、风、湿等)。各种气象要素相互联系,相互影响,在不同地点和时间出现不同组合,构成各地的天气和气候。

### 一、主要气象要素

#### 1. 气温

气温通常指地面气象观测场内处于通风防辐射条件下的百叶箱中离地面  $1.5\text{m}$  处的干球温度表读数。单位为  $^{\circ}\text{C}$ , 保留一位小数。中国规定 1 个标准大气压下 ( $p=1013.3\text{hPa}$ ), 纯水冰点为  $t=0^{\circ}\text{C}$ , 沸点为  $t=100^{\circ}\text{C}$ , 将  $100^{\circ}\text{C}$  等分, 每 1 刻度为  $1^{\circ}\text{C}$ 。理论上用绝对温标 (K) 表示温度,  $1\text{K}$  的间隔与  $1^{\circ}\text{C}$  相同, 但其零度称为“绝对零度”  $T=-273.15^{\circ}\text{C}$ , 所以水的冰点  $273.15\text{K}$ , 沸点为  $373.15\text{K}$ 。因此,  $T=t+273.15\approx t+273$ 。

温度是反映分子运动的能量,在一定容积内,一定质量的空气,其温度的高低只与气体分子运动的平均动能有关。标准状态下,气体分子运动速度  $v$  与气压  $p$  和空气密度  $\rho$  的关系为:  $p=\frac{1}{3}\rho v^2$ 。

由上式计算得出,空气分子运动的速度  $v=485\text{m/s}=1746\text{km/h}$ , 可见空气分子运动速度相当大。分子传导输送热量的速度是很快的,炎热的夏日光脚踏在沙滩上感到很烫就因为热量是通

过分子运动传导的。

气温表示大气冷暖程度。1922年撒哈拉沙漠出现 58℃ 高温，世界寒极的南极最低气温可达 -89.6℃。美国蒙大拿州在 1916 年 1 月 23~24 日气温从 7℃ 骤降至 -49℃，日较差高达 56℃。季节更替也是气温变化的反映，以候均温稳定通过 10℃、22℃ 的时间划分春夏秋冬四季。即以气温从冬季逐渐升高达到候均温稳定通过 10℃ 为春季开始，以后气温逐渐升高，当候均温稳定通过 22℃ 为夏季来临，气温升至一定高度后又开始下降，当候均温稳定降至 22℃ 时表示进入秋季，再降至 10℃ 则转入冬季。气候带划分也是以气温为指标依据的，最热月气温 10℃ 作为温带和寒带分界线，最冷月气温 18℃ 划为热带和温带。

### 2. 气压

气压是作用在单位面积上的大气压力，即等于单位面积上向上延伸到大气上界的垂直空气柱的重量。气压以百帕 (hPa) 为单位，取一位小数。

人工观测时，定时观测要计算本站气压，编发天气报告的时次还须计算海平面气压。测定气压主要用动槽式和定槽式水银气压表。配有气压计的，应作气压连续记录，并挑选气压的日极值(最高、最低)。自动观测时，测定气压的仪器用电测气压传感器，自动测定本站气压、挑选本站气压的日极值(最高、最低)、计算海平面气压。

标准大气压为 1013.25hPa。地面观测到的气压变化范围为 870~1083.8 hPa，其中最高值、最低值分别是俄罗斯联邦的西伯利亚在 1968 年 12 月 31 日和太平洋关岛以西 1979 年 10 月 12 日观测到的。石家庄曾观测到的地面气压变化范围为 980.7~1039.4 hPa，青岛 100 年平均气压为 1007.9hPa，在 995.8~1017.7hPa 之间变化。地面气压升高表示从下垫面至大气上界的整个空气柱的质量在增加，意味着某高度有周围空气补充进来，则垂直方向上有空气下沉运动，这时气温升高，空气湿度降低，往往表现为晴朗干燥的好天气，所以有“秋高气爽”的说法。地面气压降低往往对应阴雨潮湿的天气，宜减少户外锻炼。

### 3. 风

空气运动产生的气流，称为风。它是由许多在时空上随机变化的小尺度脉动叠加在大尺度规则气流上的一种三维矢量。地面气象观测中测量的风是二维矢量(水平运动)，用风向和风速表示。风速感应器(风杯中心)应安装在牢固的高杆或塔架上，并附设避雷装置。感应器距地高度 10~12m；若安装在平台上，感应器距平台面(平台有围墙者，为距围墙顶) 6~8m，且距地面高度不得低于 10m。

风向是指风的来向，最多风向是指在规定时间内出现频数最多的风向。人工气象观测时风向用 16 方位法，农业常用 9 个方位(东、南、西、北、东北、西北、东南、西南和静风)来描述风向。自动观测时风向以度(°)为单位。正北为 0°，按顺时针方向至正东 90°，正南 180°，正西 270°。风向记录方法如图 1.1 所示。风的来向即上风向，城市规划中居民区和文教区常布局在上风向，下风向多为工业区和商业区。

风速单位为 m/s，观测记录时保留一位有效数字。按风速大小对应分为 12 级(表 1.4)。风向、风速是随时空变化的，气流的湍流性造成风的脉动和阵性(持续时间 < 2min)。在一个地点的风向、风速分布状况常用玫瑰图表示。

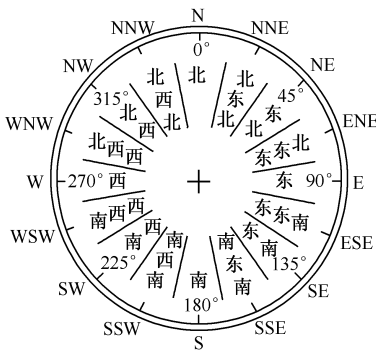


图 1.1 风向表示方法

表 1.4 风速 0~12 等级及其陆上地物征象

等级	名称	陆上地物征象	风速范围/(m/s)	均速/(m/s)
0	无风	静,烟直上	0.0~0.2	0
1	软风	烟能表示风向,树枝略摇	0.3~1.5	1
2	轻风	树叶微响,人面感觉有风	1.6~3.3	2
3	微风	树叶、高草和小枝摇动不息,旗展开	3.4~5.4	4
4	和风	能吹起地面灰尘和纸张,树枝摇动,高草呈波浪起伏	5.5~7.9	7
5	清劲风	有叶小树摇摆,内陆水面有水波	8.0~10.7	9
6	强风	撑伞困难,高草不时倾伏于地	10.8~13.8	12
7	疾风	全树摇,迎风步行感觉不便	13.9~17.1	16
8	大风	可折毁小树枝,人迎风行进困难	17.2~20.7	19
9	烈风	草房被破坏,屋瓦被掀起,大树枝可折断	20.8~24.4	23
10	狂风	树木可被吹倒,一般建筑物严重破坏	24.5~28.4	26
11	暴风	大树可被吹倒,建筑物严重破坏	28.5~32.6	31
12	飓风	陆上少见,其摧毁力极大	>32.6	>33

在强风暴或热带气旋中,地面上个别阵风的风速可达 100m/s。1934 年 4 月 12 日英国南部的汉普郡的华盛顿山山顶风速高达 103.2m/s,这是地表面曾记录到的最大瞬时风速。1010m 处在对流层上部急流中,风速可达 150~200m/s,而垂直方向上风速较小,通常为每秒钟几厘米至 10m。

#### 4. 湿度

湿度是表示大气干湿程度的物理量。常用绝对湿度、相对湿度、比湿、水汽压、饱和差和露点温度等来描述湿度大小。生活中最常用是相对湿度,其变化范围为 0~100%,人体最适宜的是 50%~70%。

某地气候湿润程度也可通过年降水量的多少来反映,通常以年降水量 800mm 划分湿润与半湿润气候,以 400mm 划分干旱与半干旱气候。年降水量>400mm 可植乔木;300~400mm 耐旱乔木,适于灌木;200~300mm 灌木下限;<200mm 植树难以成活。西北干旱区年降水量<200mm,无灌溉便无农业,是天然的放牧畜牧业的集中分布区。

降水是指从天空降落到地面的液态或固态水,包括雨、雪、冰雹等。降水强度表示单位时间内降雨或雪的多少。

高纬度地区冬季降雪多,不仅要测降水量(日降水量 $\leq 2.4$ mm 为小雪,2.5~5.0mm 为中雪,>5.0mm 为大雪),还需测雪深(cm)和雪压( $g/cm^2$ )(当雪深>5cm 时测雪压)。降水量表征某地干湿状态,雪深和雪压反映当地的寒冷程度。南美的热带雨林区每年降水量虽高达 3000mm,但智利北部的阿塔卡马沙漠却曾连续 400 年没下过雨,成为世界上气候最干燥的地区。世界最大的降雪发生在北美,1959 年 2 月 13~19 日加利福尼亚降雪高达 4.8m。美国北部的威斯康星州(Wisconsin)四季分明,冬季漫长寒冷,夏季短促温和,1 月平均气温为 -11.1~-5.6℃,7 月为 20~22℃,年降雪量 2540mm,年降雨量为 762mm。

## 5. 云

云是悬浮在大气中的小水滴、过冷水滴、冰晶或它们的混合物组成的可见聚合体；有时也包含一些较大的雨滴、冰粒和雪晶。其底部不接触地面。常用云量和云状来描述云的状况。

观测云应尽量选择能看到全部天空及地平线的开阔地点或平台进行，应注意它的连续演变。观测时，如阳光较强，须戴黑色（或暗色）眼镜。

云量观测包括总云量、低云量的观测：将天空分为 10 份，其中为云遮蔽的份数称为云量，一般目测，也有用红外辐射计对全天扫描测量是否有云及云量。总云量是指观测时天空被所有的云遮蔽的总成数，低云量是指天空被低云族的云所遮蔽的成数，均记整数。全天无云，总云量记 0；天空完全为云所遮蔽，记 10；天空完全为云所遮蔽，但只要从云隙中可见青天，则记 10<sup>-</sup>；云占全天 1/10，总云量记 1；云占全天 2/10，总云量记 2；其余依此类推；天空有少许云，其量不到天空的 0.5/10 时，总云量记 0。

云状的判定，主要根据天空中云的外形特征、结构、色泽、排列、高度以及伴见的天气现象，并以“云图”作为参照标准，判定云状时还要特别注意云的连续演变过程。云形状不同预示着未来天气变化趋势不同，通过观测云来预测天气的谚语有“鱼鳞天不雨也风颠”、“瓦块云，晒死人”等。

## 二、气体状态方程

通常用气温 ( $T$ )、气压 ( $p$ )、质量 ( $m$ ) 和体积 ( $V$ ) 4 个物理量来表示大气的物理状态。描述大气中这几个量之间的关系式叫大气状态方程。

### 1. 干空气状态方程

在物理学中证明了理想气体的状态方程为：

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{\mu} R^*$$

式中， $\mu$  为气体的摩尔质量； $R^*$  为气体常数 =  $8.31 \times 10^3 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ； $m$  为气体质量。 $\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} = R^*$ ，1 mol 大气的体积为 22.4 L。

通常情况下，可认为地球大气和理想气体相近。

$p_d = \frac{m}{V\mu} \cdot R^* \cdot T = \rho_d \cdot \frac{R^*}{\mu} \cdot T$ ， $\mu$  为干空气的摩尔质量 (28.97)， $R_d$  为干空气的比气体常数 (或称干空气的气体常数)， $R_d = R^* / \mu = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ， $p_d$  为干空气的压强。

由以上公式推导出： $p_d = \rho_d R_d T$ ，从而得出  $\rho_d = \frac{p_d}{R_d T}$

这说明干空气密度随气压和温度的变化而变化。

### 2. 水汽的状态方程

大气中的水汽在没有相变的情况下，可用理想气体状态方程。

对水汽而言，状态方程可表示  $eV = m R_w T$ ，按以上方法推导出  $\rho_w = \frac{e}{R_w T}$

其中， $R_w$  为水汽的比气体常数 =  $461 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；水汽分子质量  $\mu_w = 18 \text{ g}/\text{mol}$ 。

### 3. 湿空气的状态方程

根据道尔顿分压定律，混合气体的总压强等于各气体成分分压强之和，所以湿空气的总压强