

AGROMETEOROLOGY

农业气象学

主 编 陈志银

副主编 范兴海

浙江大学出版社

内 容 简 介

本书系统地论述了大气、光、热、水和风的变化特征及与农业的关系,有关天气系统的基本知识,主要气象灾害对农业的影响;简要介绍了气候形成的基本理论,气候变化与对农业的关系及农业气候区域划分的基本原理;简明阐述了小气候形成的基础及改善动、植物生长环境的措施。本书可作高校农学类、农业生态和农业生物环境工程类专业的教材,也可供农、林、农业气象等专业师生、农业科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

农业气象学/陈志银主编. —杭州:浙江大学出版社,
2000.6
ISBN 7-308-02243-9

I. 农... II. 陈... III. 农业科学:气象学
IV. S16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 57530 号

出版发行 浙江大学出版社
(杭州市浙大路 38 号 邮政编码 310027)
(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)
责任编辑 周奕青
经 销 浙江省新华书店
排 版 浙江大学出版社电脑排版中心
印 刷 金华市地质彩印厂
开 本 787 mm×1092 mm 16 开
印 张 12.75
字 数 326 千字
印 数 1001—3000
版 印 次 2000 年 6 月第 1 版 2002 年 6 月第 2 次印刷
书 号 ISBN 7-308-02243-9/S·005
定 价 15.00 元

前 言

人类的各种活动,均与气象有着密切的联系,因而逐步形成和发展了应用气象学,农业气象学是其重要的组成部分。农业气象学是气象学、农业生物学、农学、农业生态学等的边缘学科。

农业气象学课程是应高校农学类、农业生态和农业生物环境工程类专业的需要而开设的,是一门专业基础课。该课程选择与农业生物生长发育和农业生产活动有密切关系的农业气象要素、农业天气、农业气候条件及农业气候资源开发利用为基本内容,介绍它们的物理基础与过程及其变化规律,并适当介绍农业生物生长发育、农业生产活动对这些条件的反应。

本书共分十章。第一章至第五章介绍与农业生物和生产活动有密切关系的大气、光、热、水和风等农业气象要素,阐明它们的形成与变化规律以及农业生物生长发育和农业生产活动对这些条件的反应。这些内容也是讨论农业天气和农业气候的基础。第六章和第七章介绍引起天气变化的主要天气系统的形成与变化规律,灾害性天气发生的规律及其在不同地域上的差异、防御灾害的措施等。第八章至第十章介绍农业气候。在漫长的农业发展历史过程中,一个地区的作物种类、耕作制度和一整套农业技术措施总是在一定的生产水平下与当地农业气候相适应的,为此,首先在第八章中介绍了一般气候的形成与分布,中国气候的特点,气候变迁对农业生产的影响;接着在第九章中介绍了直接影响着农业生物的生育、产量高低、品质优劣和分布范围的农业气候条件的分析方法及农业气候区划的原则、方法和步骤,这些知识为更好地进行作物育种引种,为农业规模经营,充分、合理地利用气候资源和推进农业持续发展提供理论基础;最后在第十章中介绍了农业生物生活小空间的气候形成的物理基础,农业生物生存环境小气候的改善措施及现代人工设施的气象效应。

本书第二、三、七章由范兴海执笔,第四、八章由黄寿波执笔,其余各章节及第八章第四节之三和绪论由陈志银编写并对全书进行总纂定稿。

本书内容得益于国内外有关文献,尤其是易明晖先生和北京农业大学编的农业气象学和农业气候学等教材,谨对上述著者表示衷心的感谢。

书中所附各图由吴金平先生及刘银娟小姐协助制作而成,在此一并致谢。

限于编者的水平、时间和篇幅有限,书中疏浅谬误和阐述不妥之处在所不免,吁请各位学人不吝赐教,编者当感激不尽。

陈志银

1999年10月于杭州华家池

目 录

绪 论	(1)
第一章 大 气	(4)
第一节 大气的成分	(4)
第二节 大气的结构	(6)
第三节 空气的状态方程	(8)
第四节 大气与植物的生长发育	(10)
第二章 辐射能	(13)
第一节 辐射的一般知识	(13)
第二节 大气上界的太阳辐射	(15)
第三节 太阳辐射在大气中的减弱	(19)
第四节 到达地面的太阳辐射	(21)
第五节 地面辐射差额	(25)
第六节 太阳辐射与作物的生长发育	(27)
第三章 温 度	(32)
第一节 土壤温度的变化	(32)
第二节 水温的变化	(38)
第三节 空气温度的变化	(39)
第四节 空气的绝热运动和大气稳定度	(43)
第五节 温度与农业生产的关系	(47)
第四章 大气中的水分	(52)
第一节 空气湿度	(52)
第二节 蒸 发	(55)
第三节 凝结与凝华	(59)
第四节 降 水	(62)
第五节 水分平衡	(65)
第六节 水分与植物的生长发育	(65)
第五章 气压与空气的水平运动	(68)
第一节 气压及其随高度的变化	(68)
第二节 气压系统	(71)
第三节 作用于运动空气的力	(74)
第四节 地转风、梯度风、摩擦风	(77)
第五节 大气环流	(80)

第六节 地方性风	(83)
第七节 风与农业生产	(85)
第六章 天气系统和天气过程	(86)
第一节 气团和锋	(86)
第二节 温带气旋	(95)
第三节 热带气旋	(97)
第四节 反气旋	(102)
第五节 中、高纬度高空主要天气系统	(106)
第六节 中、小尺度天气系统	(107)
第七节 天气预报	(110)
第七章 农业气象灾害及其防御措施	(113)
第一节 低温和霜冻	(113)
第二节 干 旱	(116)
第三节 雨 涝	(120)
第四节 大 风	(122)
第五节 冰 雹	(124)
第六节 其他气象灾害	(125)
第八章 气候通论与中国气候	(129)
第一节 气候的概念	(129)
第二节 气候的形成因子	(129)
第三节 季节与气候带、气候型	(135)
第四节 气候变化	(139)
第五节 中国气候特征	(144)
第六节 中国气候区划	(151)
第九章 农业气候	(156)
第一节 农业气候的概念	(156)
第二节 农业气候分析的任务和原则	(156)
第三节 农业气候资源分析	(158)
第四节 农业气候区划	(166)
第十章 小气候及改善与利用	(170)
第一节 小气候的概念及特点	(170)
第二节 小气候形成的物理基础	(171)
第三节 农田小气候的一般特征	(174)
第四节 地形和水域小气候	(177)
第五节 农田小气候的改善	(181)
第六节 温室小气候及其调控	(184)
第七节 保护地小气候	(189)
参考文献	(195)

绪 论

一、农业气象学的定义与任务

包围着地球的厚厚的空气层称为大气层。气象学就是人们用来了解大气层中各种气象现象的形成原因、变化规律及时间、空间分布的科学。人类的各种活动,无不受到气象条件的影响。人类为了生存和发展,发明了利用栽培作物的方法来获取食物和其他生活必需品。但在农业生产实践中逐步发现:气象条件作为自然资源,为第一性生产和第二性生产直接或间接地提供它们所需要的能量与物质;农业生物的生命过程受到气象条件的有利和不利的影 响;通过气象条件对外界其他因子的作用,又引起对气象条件的反馈而影响农业生产;气象条件中光、热、水、气等因子的不同组合导致农业收成的增减等。人类在认知气象条件对农业生产的重要性的同时逐步形成和发展了专门研究和解决气象条件与农业相互关系及有关规律的一门科学——农业气象学,它是应用气象学的重要分支。

农业气象学一方面研究与农业有关的气象条件,如研究对农业有意义的,受农业生产对象(动植物和微生物等)与过程影响和调节的气象条件的发生、变化和分布的规律;另一方面也研究受气象条件影响和制约的有关农业问题及其解决途径。农业气象学既研究农业气象指标、模式、规律、机制,又研究农业气象措施、仪器、装备、制剂等,而且上述两方面的研究往往需要彼此紧密联系。

农业气象学的任务有:

(1)农业气象观测。利用常规与先进的仪器进行观测以及目测等,及时而准确地掌握农业气象条件的变化规律与特点以及农业生产对象与过程对有关条件的反应,并将有关数据存贮、输送、整理与初步加工。

(2)农业气象预报与情报。包括农业气象灾害的情报、预报和警报,动植物病虫害的有关预报、物候预报、产量与品质的预报,农业措施如播种、灌溉、收获、农作物上市等适宜期与有关量的预报和雨情、墒情、农情等情报。

(3)农业气候分析、区划、规划与展望。据此,可以因地(含大小气候条件)、因时制宜地引用、推广、安排作物与牲畜等种类与品种,合理选用农作制度与措施,并可根据对气候变化趋势的展望,提前研究与建议相应对策。

(4)农业气象措施、手段的研究。如研究各种趋利避害、防灾增产的农业气象措施,研究在不同气候条件下最合理、有效地调控(包括自动调控)农田、园圃、保护地、畜舍、鱼池、运输与贮藏设施等在小气候条件下的手段与规范,并研究各种农业气象仪表与方法。

(5)农业气象指标、规律、机制与模式的研究及气象指标模式等准确性、有效性的鉴定。

二、农业气象学的研究方法

对栽培作物而言,必须在其进行生长发育状况和产量构成观测的同时,同地进行主要气象

要素、农田小气候要素、农业气象灾害的观测和田间管理工作的记载等,称为平行观测法。这是农业气象学研究不同于农业研究和气象研究的主要特点之一。通过对平行观测资料的对照分析,我们就能确定天气气候对栽培作物生长发育和产量质量的影响,就能对栽培作物生长期间的农业气象条件作出正确的评价。

为了缩短观测年限,迅速取得作出结论需要的资料,在平行观测的普遍原则下,农业气象学还常常采用下列方法:

(1)地理播种法。在气候条件不同的若干地点上,选择土壤条件尽可能相同的地段,采用同一种农业技术措施,于各地最适宜的时期播种同一品种作物,并按照统一计划进行平行观测。这样,在一年里便可得到同一品种在若干处不同气候条件下的生长发育资料,达到缩短观测年限的目的。

(2)地理移置法或小气候栽种法。常用来研究植物生长发育与环境气象因子的关系。这种方法是先将我们要研究的作物栽种在条件相同的地段上,待其生长到一定的发育期,再将它们带土移栽到地形、方位及其他条件不同的几个地段上。这样,在所有地段进行平行观测后,能够在比较短的时间内,得出不同强度的气象条件(如低温)对于所研究植物的影响。在确定某些作物越冬性的农业气候指标时,常应用这个方法。

(3)分期播种法。在同一地方,每隔 5d 或 10d 播种同一种作物,根据研究的任务,可能播 5~10 期或更多一些。这样,在一年内就可获得 5~10 种或更多种不同的天气对该种作物某发育期影响的资料,从而可以应用数理统计的方法求出该种作物在各个发育时期对于气象条件要求的数量指标。

(4)地理分期播种法。这是将地理播种和分期播种结合起来的一种试验方法。它兼有地理播种法和分期播种法的优点,弥补了单纯地理播种法很难取得地形、土壤、栽培技术完全一致与分期播种只在一点上进行试验的不足,是一种比较完善的田间试验方法。

(5)人工气候实验法。现在人工气候室或人工气候箱群已能模拟得到近似太阳光谱的人工光源,调控到需要的温度、湿度,并根据研究的需要,增设人工降雨及调节 CO_2 浓度与风速变化等的附属装置。这样,我们就可以模拟各种气象条件,以满足农作物生长发育的需要,得出适合农作物生长要求的定量指标;也可以模拟各种气象条件对作物生长发育和产量质量的影响,研究预防措施的气象效应;还可以探索到在自然情况下得不到的最优气象条件,为未来农业工厂化提供不可缺少的数据资料。

(6)气候分析法。在具有适当的农业资料和气候资料时,可以采用统计学中广泛使用的图解法或分析法来求得作物产量与天气之间的关系。在这里,我们普遍地采用作物逐年产量和天气条件的对比分析以及作物自然分布界限的气候分析法。

三、农业气象学的发展

农业气象学,作为学科,历史不算很长。但人类自古十分重视农业与气象的关系,积累了许多农业生产与气象关系的宝贵经验,掌握了不少重要的农业气象规律。如我国几千年前的《礼记》、《诗经》等书籍已载述了月令、物候,许多史书与地方志等记录了气象灾情,《淮南子》等书籍已确定二十四节气,《逸周书》更采用了七十二候,《齐民要术》详述了防霜之法,《农政全书》倡导引种驯化……在其他文明古国,类似的有关农业与气象关系的记述也不少。

系统而科学的观测对学科的建立是十分重要的。早在 1424 年,中国明朝已开始下令各地向朝廷报告雨量,1750 年瑞典建立了 18 个点的物候站网,1885 年俄国建立了世界上第一个有

12 个点的农业气象站网。

1593 年温度表被发明以后,1753 年法国的德列奥米尔提出了积温的概念;1754 年俄国的 Д. Реутобий 出版了《农业气象学》一书;1901 年俄国出版了农业气象期刊;1920 年美国的加纳尔与阿拉德发现了光周期现象;1926 年法国的德马东提出了干燥系数的指标;1927 年德国的盖格尔出版了《近地面层气候》一书;1930 年前苏联谢良尼诺夫提出了水热系数,并于 1937 年出版了《世界农业气候手册》;1939 年意大利的阿齐进行了小麦自然地理区划;1945 年日本大后美保出版了《日本作物气象的研究》;1948 年美国桑斯韦特以水分平衡为基础,用热量效应和降水的有效性为指标,进行了气候分类。上述这些典型成果,足可以勾画出农业气象学发展的简况。

自 20 世纪 50 年代起,农业气象学在世界范围得到迅速发展。1950 年 3 月世界气象组织(WMO)成立,下设农业气象委员会,协调与指导各国的农业气象工作。我国解放后的农业气象工作的发展,大致可分为四个时期,即:1953~1958 年农业气象学科的初创探索时期;1958~1966 年的发展—调整—稳定发展时期;1966~1976 年的停滞时期;1978 年以后的农业气象工作经过恢复、整顿,已得到扎实、稳定的发展。随着我国农业气象学科队伍的建立与发展及广大农业气象工作者的辛勤工作,已为我国农业生产的稳定发展,作出了重要的贡献。

第一章 大 气

人类的生存和生活,动植物的生长和发育一刻也离不开空气。没有空气,地球上就没有生长的万物,没有空气,地球上就没有变化万千的生物世界。空气无疑是一种资源。

第一节 大气的成分

一、大气各成分的比例

大气是指包围在地球表面的整个空气层,是由多种气体混合组成,也包含有水汽和气溶胶。大气中除去水汽和气溶胶的整个混合气体称为“干洁空气”,它的主要成分是氮、氧和氩,约占干洁空气总体积的 99.9%,还有少量的二氧化碳、臭氧和其他气体等。火箭探测表明,从地面到 90km,干洁空气的成分除二氧化碳和臭氧稍有变动外,其他都是比较稳定的。在 90km 以上,主要由于氮和氧的离解,大气各成分间的比率就开始随高度和时间而变化。大气成分,按容积百分比来说,有如表 1.1。

表 1.1 25km 以下干洁空气的成分

气体	按容积计含量(%)	分子量(u)	气体	按容积计含量(%)	分子量(u)
氮(N ₂)	78.09	28.016	氦(He)	5.24×10^{-4}	4.003
氧(O ₂)	20.95	32.000	氪(Kr)	1.1×10^{-4}	83.700
氩(Ar)	0.93	39.944	氢(H ₂)	5.0×10^{-5}	2.016
二氧化碳(CO ₂)	0.03	44.010	氙(Xe)	8.7×10^{-6}	131.300
氖(Ne)	1.8×10^{-3}	20.183	臭氧(O ₃)	1.0×10^{-6}	48.00

干洁空气中各种气体的临界温度都很低,例如氮为 -147.2°C ,氧为 -118.9°C ,氩为 -122.0°C ,在大气的实际情况下,不能达到这样的低温,也就是说,这些气体永远不会液化,所以空气的主要成分总是保持气态。

二、几种空气成分在气象学上的作用

(一)二氧化碳(CO₂)

二氧化碳(CO₂)是由各种有机化合物氧化而产生的,当有机物燃烧和腐化时,以及生物呼吸时都要排出 CO₂,也有从矿泉中、地壳裂缝中及火山喷发时释放出来的。所以空气中 CO₂ 的含量是随时间和地区而有变化,在白天、晴天、夏季时,植物同化 CO₂ 的作用比较强,CO₂ 的浓度也就比夜晚、阴天、冬季为低。在人口稠密的工业城市中 CO₂ 的浓度较高,体积含量可以达到 0.05%,甚至更大,但在农村比较清洁的空气中 CO₂ 就显著减少。同样,CO₂ 在大陆上要比海洋上多。CO₂ 具有相当强的吸收长波辐射的能力,地球辐射是属于长波的,所以 CO₂ 的含量

的增减能影响地面和大气温度的变化,含量增多时温度会增高,含量减少时温度会降低。人类活动使大气中 CO_2 含量在增加,1957 年以来的观测说明, CO_2 体积含量平均每年约增加 $0.7 \times 10^{-3} \text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$,由于温室效应,使气温升高,这成为引起各国政府极为重视的环境问题之一。

(二)臭氧(O_3)

一般是氧分子在太阳紫外线辐射的作用下分解成氧原子,然后又和氧分子碰撞而成,主要分布在 $10 \sim 50 \text{km}$ 的气层里,以 $20 \sim 25 \text{km}$ 高度上比较集中,形成臭氧层。大气中的 O_3 含量虽然很少,但却是一种具有重要意义的气体,因为它对太阳紫外线辐射的吸收能力很强,单是该层最上面的一部分 O_3 就可以吸收掉投射在它上面的紫外线辐射的全部能量的 90% 以上,因此,波长小于 $0.29 \mu\text{m}$ 的太阳紫外线辐射几乎全部被高层大气所吸收而达不到地面。这一事实具有两个意义:一是使得在 $40 \sim 55 \text{km}$ 高度上的气温显著增高;二是对地面生物起着保护作用,因为紫外射线具有杀死很多种细菌的能力,如果强度太大时就可能对生物细胞产生破坏作用,阻碍生物的生长发育,对人类的健康也是有影响的。近年来,由于某些化学工业的发展,引起大气中 O_3 含量的变化,全世界对此甚为关注。

(三)水汽

水汽在空气中是经常存在的,它由陆地上的水体、植物、湿土和海水蒸发而来。水汽在含量上和大气中主要气体相比是很少的,多时其含量可达 4%,少时接近于零,其含量虽少,但对大气中各种现象和过程的影响却是很大。大气中的各种凝结物如云、雾、雨、雪等都是由于有水汽存在而发生的。水汽又具有很强的吸收长波辐射的能力,它与 CO_2 共同对保持地面温度起着重要作用。同时,大气中的水汽时刻都在变更它的含量和形态,也就是气态的水汽、液态的水滴和固态的冰晶不断在互相转换。在转换过程中,伴随着潜热的吸收和释放,不仅引起大气中的湿度的改变,也引起大气中热量的转化。

(四)气溶胶

大气中有相当数量的气溶胶。其中有机的数量较少,大多为植物花粉、微生物和细菌等。无机的数量较多,主要来源有:岩石或土壤风化后的尘粒、地面燃烧的烟灰、海洋中浪花飞溅的盐粒、流星燃烧后的灰烬、火山爆发时的火山尘、飞机的尾气以及风吹的沙尘等。这些悬浮微粒对于大气中的各种物理现象和过程也有重要影响,例如,使透过大气层的太阳光减少,减低大气透明度,在大气中形成各种光学现象等。气溶胶对于云雾和降水的形成也有重要关系,因为在饱和湿空气中要发生水汽凝结,必须依赖凝结核才能促进水滴或冰晶的形成,尤其是吸湿性的微粒(例如盐粒),更是良好的凝结核。在气溶胶中,大颗粒能很快沉降到地面,小微粒可在高空浮游很长时期。

由于大气中经常存在着铅直混合作用,即使在较高的高空,空气成分仍主要由氮和氧组成。可以认为 90km 以下空气的成分是保持均匀的,在这个高度内的混合效应起主导作用。在 90km 以上,氮稍有减少,氧稍有增多,氧原子数增加,氧分子数减少,氩和二氧化碳则明显减少。根据火箭探测,在 95km 高度上,氮占大气体积的 77%,氧占 21.5%,氩占 0.76%。

第二节 大气的结构

一、大气的上界

根据观测所得,大气按其物理性质来说是不均匀的,特别是在铅直方向上各气象要素的变化是很急剧的。随着气象观测技术的发展,从根据最初使用简陋的手段对大气层的曙暮光、无线电波、极光等的间接观测,到根据使用探空气球、飞机、火箭、卫星等现代先进的仪器和手段对大气层的直接测定,人们积累了大量的有关高层大气结构的资料。由于在很高的高度上空气是很稀薄的,气体分子之间的距离很大,可以认为,大气上界的空气是逐渐向星际空间过渡的,很难找到一个明显的边界。在理论上是当大气气压为零或接近于零的高度上,便是渐渐到达星际空间,而那里也找不到完全没有空气分子存在的地方。为了有一个基本数量的概念,气象学家根据气象卫星探测的资料分析指出,大气上界在 2 000~3 000km,但在实用上一般把大气上界取为 1 000~1 200km。

二、大气的分层

不同高度范围的大气层各有其不同的特点,这些特点是由在某高度上取得支配地位的大气的主要性质所确定的。在铅直方向上,按照大气温度、成分、电离等不同性质可以分为对流层、平流层、中间层、电离层和外层(散逸层)等五层(图 1.1)。

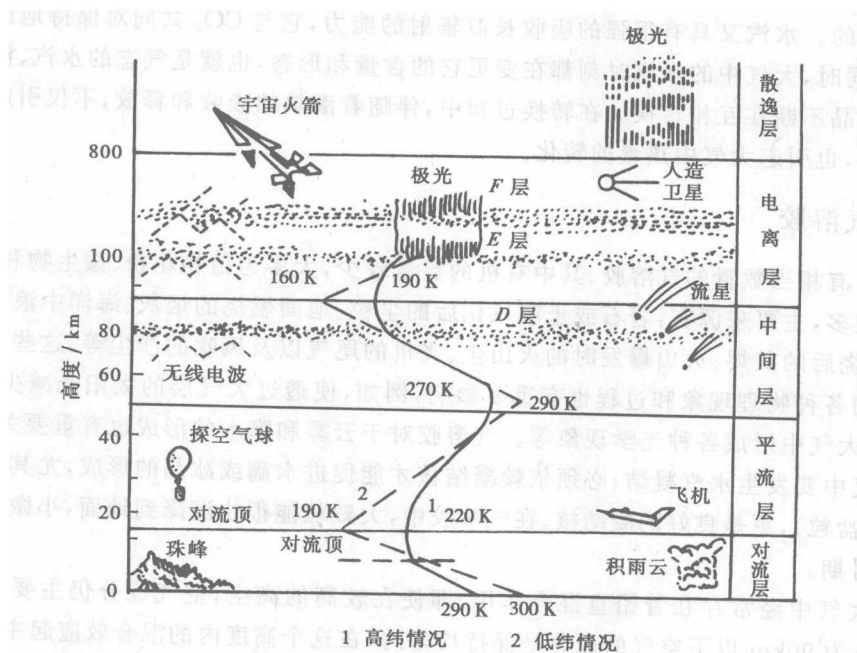


图 1.1 大气的垂直分层

(一) 对流层

对流层是指紧接地面的大气最低层,平均高度为 11km,随纬度有所变化,在热带地区高

度为 15~18km,赤道附近高度为 17~18km,在中纬度地区高度为 10~12km,两极附近高度为 8~9km。对流层的厚度和整个大气总厚度相比是很薄的一层,但却集中了整个大气质量的四分之三,并且几乎包含了整个大气中的水汽,对于各种气象过程的发展是极其重要的。许多天气现象如云、雨、雷、电等都发生在这一层,是气象学研究的重点层,特别是对天气分析和预报方面更具有重要意义。

对流层的主要特性有三:第一是温度随高度的增加而降低。降低的数值(气温直减率)在不同的地区、季节、高度是不一致的,就平均情况来说,高度每升高 100m,气温下降 0.65℃。第二是空气具有强烈的对流运动,这是由于地面不均匀加热所引起。通过这种对流运动,使高层和低层的空气进行交换,近地面层的热量、水汽和其他微粒能向高层输送。第三是温度和湿度等在水平方向上的不均匀性也最为显著,这是由于地面的海、陆地形等的不均匀性对大气的影响所致。

按照气流和天气现象的特点,还可以把对流层细分为下层、中层、上层和对流层顶等四层。下层自地面至 1~2km 高度,为摩擦层,在 2km 高度上的平均温度为 5℃。下层气流受地面摩擦作用很大,有强烈的湍流交换作用,有各种雾和低云的形成,各气象要素出现的日变化很明显。下层本身也不均匀,在地面至约 30~50m 高的一层,称为近地面层,而 2m 以下贴近地面的一薄层称为贴地层,是小气候研究的主要对象。中层为 2~6km 高度,在 6km 高度上的平均温度为 -13.5℃。中层有中云和直展云出现,也有较高的低云,由云滴增大成雨滴的过程多在此层进行,因而是形成降水的重要气层。上层自 6km 至对流层顶,平均温度在 11km 高度上为 -48.5℃,在 17km 高度上为 -75℃。上层水汽很少,有高云、浓积云和积雨云的顶部。对流层顶为对流层向平流层的过渡层,厚度由几百米至 1~2km。这里的温度随高度变化很小,甚至成为等温状态,为逆温层。对流层顶对铅直气流有很大的阻挡作用,上升气流携带的水汽和尘埃等多聚集在它下面,使能见度变坏,并且还使对流层能保持自身的特性。

(二)平流层

自对流层顶向上到 55km 高度左右为平流层。在平流层下层,气温随高度变化或微有上升,到 25~30km 以上,气温很快升高,到平流层顶气温可升至 -10℃左右。平流层这种温度分布特征,与它受地面影响极小,并且存在大量 O₃ 能够直接吸收太阳辐射有关。

在平流层中,空气的垂直运动比对流层弱,水汽和尘埃含量也很少,因此气流平稳,天气晴好,万里无云,适于飞行。

(三)中间层

从平流层顶向上至 85km 高度左右为中间层。这层的特点是气温随高度增高而迅速降低,顶部气温可降至 -83~-113℃。这层内气流有相当强烈的垂直运动。在顶部靠近电离层处的逆温,有利于水汽聚集,夏夜高纬度处有时会出现银白色光芒的夜光云。

(四)电离层

从中间层以上至 800km 为电离层(又称热层或暖层)。电离层内空气稀薄,空气分子在太阳紫外线辐射和宇宙辐射的作用下变为离子和自由电子,空气处于高度离子状态。短波无线电通讯所以能够进行,电离层对无线电波的反射是一个重要的原因。在电离层内,气温随高度增高而迅速增高。据人造卫星探测,在 300km 高度上气温可达 1 000℃,在 500km 高度上气温可

高于1 200℃,再往上温度变化不大。电离层受太阳黑子的活动影响很大,太阳黑子的活动强时,电离层中的离子、自由电子的活动也随之加强。

在电离层内有时可出现异常壮观的极光现象。

(五)外层

外层又称散逸层,在电离层上面,空气更加稀薄,大部分处于电离状态。这层的大气物质具有向星际空间散逸的特性,成为整个大气和星际空间的过渡地带。在这层内,由于气体受地球引力的作用很小,运动较快的气体分子常可挣脱地球重力场而扩散到太空去,另一方面又有自宇宙空间进入地球大气的气体分子,两者在某一高度上达到动力平衡,当然,这种平衡的高度是不断变化的。这层的热状况取决于许多因素,例如,太阳紫外线辐射和微粒流、行星际气体与地球大气的碰撞等,其中以太阳微粒流起着主导作用。

第三节 空气的状态方程

一、干空气的状态方程

空气由一个状态转变成另一个状态,代表这些状态变化特征的气温 T 、气压 p 、密度 ρ 等是互相联系着的,联系这些特征量的关系的方程就是空气的状态方程。

在热力学中证明了摩尔理想气体的气压 p 、摩尔体积 V 和热力学温度 T 之间的关系为 $pV/T = \text{常数}$ 。用 R 表示这个常数,于是

$$pV = RT \quad (1.1)$$

上式就是气体的状态方程, R 为摩尔气体常数。

在通常情况下,可以认为大气和理想气体相近似,用(1.1)式转变为干空气的状态方程。在标准情况下, $p_0 = 101\,325\text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, $V_0 = 22.413\,83 \times 10^{-3}\text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$, $T_0 = 273.15\text{ K}$,于是

$$\begin{aligned} R &= \frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{101\,325 \times 22.41383 \times 10^{-3}}{273.15} \\ &= 8.314\,41 \quad (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \end{aligned}$$

根据热力学理论,对于一种摩尔质量为 M 的单位质量的理想气体,其状态方程为:

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (1.2)$$

因为干空气是一种混合气体,其平均摩尔质量为

$$M_d = \sum m_i / M_i = 28.966 \quad (\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$$

其中 m_i 和 M_i 分别为组成干空气的各种气体的相对分子质量和摩尔质量。对于一个摩尔的干空气,它的气体常数以 $R_d = R/M_d$, 则

$$\begin{aligned} R_d &= 8.314\,41 / 28.966 \quad (\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \\ &= 287.04 \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \end{aligned}$$

因此,干空气的状态方程可以写成

$$p_d = \rho_d R_d T \text{ 或 } \rho_d = p_d / R_d T \quad (1.3)$$

这里 ρ_d , p_d , T 分别为干空气的密度、气压和热力学温度。

由此可知,空气密度是随气压和气温而变化的。当气压一定时,气温增高则密度减小,气温降低则密度增大。当气温一定时,气压增大密度也增大,气压减小密度也减小。当密度保持不变时,则气压随气温增高而增大,随气温降低而减小。在大气实际情况下,当气温有变化时,密度也必将有变化,气温增高使密度减小,气压也就减小。所以一般夏季气压较低,冬季气压较高,就是这个缘故。

由(1.3)式可求得在标准情况下的干空气密度,即

$$\rho_d = \frac{p_d}{R_d T_0} = \frac{101\,325}{287 \times 273} = 1.293 \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$$

二、水汽的状态方程

大气中的水汽量会随时间和地区有很大变化,但是在没有相应变化时,也就是保持气态的情况下,可以认为水汽也是和理想气体近似的。因此,和(1.3)式相类似,水汽的状态方程可以写成:

$$e = \rho_w R_w T \text{ 或 } \rho_w = \frac{e}{R_w T} \quad (1.4)$$

其中 e 为水汽压强(简称水汽压), ρ_w 为水汽密度, R_w 为水汽的气体常数, T 为热力学温度。而 $R_w = R/M_w$, 这里 $M_w = 18.016 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 为水汽的摩尔质量,则

$$R_w = \frac{8.314\,41 \times 10^3}{18.016} = 461.50 \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$$

以 R_d 和 R_w 相比较,即

$$\frac{R_d}{R_w} = 0.622 \text{ 或 } \frac{R_w}{R_d} = 1.608$$

气体常数的物理意义是指在等压情况下,1g 干空气或水汽的温度增高 1°C 时膨胀(容积增大)所作的功。显然,因水汽相对分子质量比干空气为小,如果两者质量相同,水汽所做的功必大于干空气。在实际大气中,水汽和干空气混合在一起,这表示有水汽的湿空气比干空气做功要大。

三、湿空气的状态方程

按混合气体的总压力等于各种气体分压力之和的道尔顿(Dalton)分压定律,湿空气包含干空气和水汽,也就是干空气和水汽共存于同一容积和同一温度的统一体内。以 p 表示湿空气的压强,则 $p = p_d + e$, 以 ρ_a 表示湿空气的密度,则 $\rho_a = \rho_d + \rho_w$ 。根据(1.3)式和(1.4)式,即可得:

$$\begin{aligned} \rho_a &= \frac{p_d}{R_d T} + \frac{e}{R_w T} = \frac{p - e}{R_d T} + \frac{e}{R_w T} \\ &= \frac{p}{R_d T} - \frac{e}{R_d T} + \frac{e}{1.608 R_d T} = \frac{p}{R_d T} \left(1 - \frac{e}{p} + \frac{0.622e}{p} \right) \end{aligned}$$

$$\text{所以} \quad \rho_a = \frac{p}{R_d T} \left(1 - 0.378 \frac{e}{p} \right) \quad (1.5)$$

上式就是湿空气的状态方程。由于 e/p 值通常是很小的, $0.378e/p$ 值就更小,因此可以计为 $1 - 0.378 \frac{e}{p} \approx \frac{1}{1 + 0.378e/p}$, 这样就可以把(1.5)式写成与(1.3)式相似的形式,即

$$\rho_a = \frac{p}{R_d T (1 + 0.378e/p)} \quad (1.6)$$

这里可以引用一个物理量： $T_v = T(1 + 0.378e/p)$ ，这个 T_v 称为虚温，于是(1.6)式就成为：

$$\rho_a = p/R_d T_v \quad (1.7)$$

(1.6)式和(1.7)式都是湿空气状态方程的另一种形式。

将(1.3)式和(1.6)式相比较可知，如果干、湿空气的温度相同时，湿空气的气压就有所减小；如果干、湿空气的气压相同时，湿空气的温度就要有所增高。两者都说明湿空气的密度比干空气的密度为小，用(1.3)式求湿空气密度必须增加一个水汽订正数。虚温 T_v 的物理意义是：在相同的气压条件下，假定干空气密度和湿空气密度相等时（即 $\rho_d = \rho_a$ ），干空气应具有的温度。显然， T_v 总是高于 T 的，两者的差值在低温时较小，在高温时较大。例如在气压为 1 000hPa 时，两者差值在 0℃ 时为 0.6℃，在 20℃ 时为 2.6℃。可见，在气压相同条件下，干、湿空气密度的差值在低温时较小，在高温时较大。

在气象学中不进行密度的测量，它是根据气压和气温值计算的。在气象理论计算中，所遇到的空气密度问题，一般都是利用状态方程转变为气压和温度来加以计算和分析的。所以空气的状态方程，被广泛应用在气象理论的研究中。

第四节 大气与植物的生长发育

地球大气圈的存在不仅吸收了太阳辐射中的短紫外线，保护了地球上生物的正常生长发育，使之代代相传，而且起到了温室效应，使动、植物的生存有了温度保证。同时大气中的某些成分也是动、植物维持生命活动所必需的。

一、二氧化碳与植物

生物界是由含有碳化合物的复杂有机物组成，这些有机物直接或间接都是由绿色植物经光合作用制造出来的。据计算，地球上陆生植物（主要是森林）每年大约能从空气中固定 200～300 亿吨的碳，是由 CO_2 的形式转化为木材的。因此，光合作用对林木的生长发育有着极重要的作用。

大气中的 CO_2 含量随地点而异，也随时间而有日变化和年变化。在有植被覆盖的地区，当太阳升起，光合作用开始，空气中的 CO_2 浓度即迅速下降。中午前后，在植物顶层， CO_2 浓度达日最低值，比日平均低 $(10\sim15)\times10^{-3}\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 。然后，随着空气温度升高，湿度下降，光合作用逐渐减弱，呼吸作用相应增强，使 CO_2 消耗减少，于是空气中 CO_2 累积量相应增加。到日落时，光合作用停止，而呼吸作用仍在继续进行，使近地面层的 CO_2 浓度逐步积累。在日出前 CO_2 浓度可超过 $400\times10^{-3}\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 CO_2 的年变化也很明显，在北半球，每年 4～9 月的植物生长季节，大气中的 CO_2 浓度明显下降，北纬 30° 地区大气中 CO_2 含量大致减少 3%（相当于 40 亿吨净碳）。到冬季， CO_2 浓度上升。

在过去几十年中，通过向土壤中增施氮、磷、钾和微量元素以及灌溉，曾使农作物产量得到大幅度的增长。目前，在高产农田中，通过施用矿质肥料与灌溉以求进一步增产，却遇到了很大的困难，其原因是多方面的。障碍之一是供给农作物所需的各种元素不平衡，主要是碳的供应不足。因此，近年来提出了所谓空气施肥，即在农田中增施 CO_2 。碳素是碳水化合物的主要组成成分，而有机物的组成中有 90%～95% 是碳水化合物。由此可见，供给农作物以碳素营养，从

而使产量提高的潜力是很大的。

大气中 CO_2 的平均浓度约为 0.032%，这一浓度对满足作物光合作用需要是不够的。很多研究指出，当太阳辐射强度是全太阳辐射强度三分之一时，大气中 CO_2 的平均浓度，对植物光合作用强度的继续提高已成限制因素。增加大气中 CO_2 的浓度，可以明显地提高农作物的产量。实验证明，当 CO_2 的体积分数为 3×10^{-4} 时，栽培大豆的光合作用在 21 000lx 时便达到饱和了，最大光合作用强度为 $2\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ；当 CO_2 的体积分数提高到 16×10^{-4} 时，光合作用的光饱和点可以提高到 75 000lx 以上，最大光合作用强度可以达到 $8\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。有人研究认为，改变空气中 CO_2 的浓度，比改善任何其他环境条件更能明显地影响农作物产量。

在大面积农田上采用空气中 CO_2 施肥方法，其效果是肯定的。但在目前技术水平下，要保持住农田上较高的 CO_2 浓度，尚有一定困难。在人工控制环境条件下，如温室和各种塑料棚内，采用 CO_2 施肥法，则是切实可行的，而且显得尤为重要。因为，在温室或塑料棚内，为了保温的目的，经常要阻止室内外的空气交换。这时，室内空气中的 CO_2 被植物光合作用消耗而得不到补充，以至限制了光合作用的正常进行。有人曾测得，在空气密闭的室内，每 100m^2 面积上约有 150g 的 CO_2 ，如果作物的光合作用按 $5\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 计算，空气中的 CO_2 将在 20min 内就被消耗尽了。尽管通过呼吸和其他途径有 CO_2 补充，但其浓度之低仍处于作物所需的补偿点以下。开始通风以后，作物层内的 CO_2 的体积分数可以提高到 25×10^{-5} ，但仍不能满足植物的需求。因此，有关温室内 CO_2 施肥问题，已有许多研究，其成果已付诸实际应用。

二、氧与植物

氧(O_2)是植物呼吸的必需物质。植物呼吸时吸入 O_2 ，放出 CO_2 ，并借 O_2 进行生命的生理过程，没有 O_2 植物就不能生存。

O_2 主要参与植物的分解代谢。在有 O_2 存在的情况下，植物光合产物的分解彻底，形成水和 CO_2 ，并放出较多的能量。所以有氧呼吸可大大提高新陈代谢的效能，有利于植物的迅速生长。在一般情况下，空气中 O_2 的数量，供植物消耗是足够的。

土壤空气中的 O_2 含量，与植物根系的生长有着密切的关系。土壤空气的含 O_2 量在 10% 以上时，植物的根系一般都不表现出伤害。通常排水良好的土层中， O_2 的含量都在 10% 以上，而且越接近土表， O_2 的含量越高。所以陆生植物(包括树木)的根系常集中在上层通气较好的土层中。当土壤空气中 O_2 低于 10% 时，大多数植物根的正常生长机能衰退。当 O_2 的含量下降到 2% 时，这些根就只能维持不死而已。

很多种子的萌发必需 O_2 ，缺 O_2 时种子内部呼吸作用缓慢，休眠期延长。当植物种子埋在深层土壤里时，往往因缺 O_2 使其萌发受阻。可见， O_2 在植物种子萌发、植物根系的生长发育和植物分解代谢等一切生理过程中，都是不可缺少的因素。

三、氮与植物

氮(N_2)是一种惰性气体，不能直接为绝大多数植物所利用，必须依靠固氮生物(固氮菌和蓝绿藻)或工业方法才能固定下来。某些蓝绿藻豆科植物的根瘤及土壤中的固氮菌，能把大气中的 N_2 固定成氨或铵盐。近来，发现有 100 多种非豆科植物，具有固氮根瘤菌，也发现了一些生活在叶面上的细菌和藻类，以及热带森林中潮湿地上的附生植物，也具有固氮能力。估计每年从大气层中固定的氮约为 $1\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ，而从肥沃土壤中固定的氮，则高达 $20\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。自养绿色植物所使用的氮，都是无机态的，它们从土壤中分别以 NO_3^- 和 NH_4^+ 形式被吸入。最重要的氮

来源是 NO_3^- ，通常存在通气良好的土壤里和植物的根系； NO_3^- 要比 NH_4^+ 多得多。植物对 NO_3^- 和 NH_4^+ 的吸收也需要能量。因此，在寒冷或土壤通气不良的生长环境中，植物常会受到缺氮的威胁。

四、大气污染与植物

由于自然界或人类活动的结果，直接或间接地把大气正常成分之外的一些物质和能量输入大气中，其数量和强度超出了大气的净化能力，以致造成伤害生物、影响人类健康的现象，即大气污染。据估计，全世界每年排入大气的污染物多达 6 亿吨以上。引起人们注意的污染物 100 余种。除自然污染源外，这些污染主要来自人类活动。

叶片是植物与周围空气进行气体交换的最活跃部位，也是最敏感的器官。空气污染物主要通过气孔有时也通过水孔进入植物体内，所以植物的受害部位首先是叶片。大气污染由于破坏叶片结构，破坏叶绿素和引起一系列生理生态异常变化，从而使植物的光合作用率显著降低，生长量明显减小，产量降低。