

设施农业人工环境

S H E S H I N O N G Y E R E N G O N G H U A N J I N G

◎ 丁力行 邓玉艳 编著



中国建筑工业出版社

设施农业人工环境

丁力行 邓玉艳 编著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

设施农业人工环境/丁力行, 邓玉艳编著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2017. 5
ISBN 978-7-112-20483-0

I. ①设… II. ①丁… ②邓… III. ①设施农业-
环境工程-研究 IV. ①S62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 039002 号

责任编辑: 张文胜 姚荣华

责任设计: 李志立

责任校对: 李美娜 张 颖

设施农业人工环境

丁力行 邓玉艳 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京君升印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13 $\frac{3}{4}$ 字数: 332 千字

2017 年 7 月第一版 2017 年 7 月第一次印刷

定价: 39.00 元

ISBN 978-7-112-20483-0

(29959)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

设施农业作为当前实现由传统农业向现代化集约型农业转变的有效方式，是走向现代工厂化农业和环境安全型农业生产的必由之路，同时已在世界范围成为高投入、高产出，资金、技术、劳动力密集型的高新技术产业。而农业人工环境工程是覆盖设施农业的主要技术手段和重要科技内涵，是集生物工程、农业工程、环境工程为一体的多部门、多学科的系统工程。设施农业及其人工环境相关产业与技术的迅速发展导致相关领域各类从业人员急剧增加，专业人才培养与继续教育任务加重，各类专业教材与参考书籍的需求显著增长。

本书共分7章，从设施农业对人工环境的整体需求出发，在集中分析以热湿性能为代表的各类人工环境空气参数的基础上，系统讨论了农业设施的调湿与降温、通风、供暖和输配系统设计与运行调节。本书可作为设施农业人工环境相关技术领域与学科专业研究生与本科生教材，并可作为设施农业人工环境设计、制造、安装与检测等各类从业人员的参考书。

本书第1、2、3、7章由丁力行执笔，第4、5、6章由邓玉艳执笔，丁力行负责全书统稿。由于编者水平所限，本书在内容选择、体系安排和文字叙述上存在的缺点和错误，敬请读者不吝指正。

编者

2016年12月

目 录

第1章 概述	1
1.1 设施农业	1
1.2 设施农业与环境控制技术的关系	1
1.3 设施农业环境控制技术的发展状况	3
第2章 设施农业的人工环境	6
2.1 作物与环境	6
2.1.1 作物生长的自然环境	6
2.1.2 作物生产与环境的关系	7
2.1.3 温室作物环境	8
2.1.4 光照环境及调控	9
2.1.5 温度环境及调控	16
2.1.6 湿度环境及调控	19
2.1.7 空气环境及调控	22
2.1.8 土壤环境及调控	25
2.2 动物生长环境	27
2.2.1 畜禽环境因素及其影响	28
2.2.2 各类畜禽舍的环境调控要求	31
第3章 人工环境空气参数	34
3.1 空气的组成和状态参数	34
3.1.1 空气的组成	34
3.1.2 空气的状态参数	34
3.2 焓湿图及其应用	39
3.2.1 焓湿图	39
3.2.2 湿球温度与露点温度	40
3.2.3 焓湿图的应用	44
3.3 空气计算参数	46
3.3.1 室外空气计算参数	46
3.3.2 室内空气设计参数	49
第4章 农业设施的调湿与降温	53
4.1 概述	53

4.2 空气热湿处理原理	53
4.2.1 直接接触式热湿处理原理	53
4.2.2 间接接触式（表面式）热湿处理原理	54
4.3 空气的热湿处理过程	55
4.3.1 喷水室的处理过程	55
4.3.2 表面式换热器的处理过程	58
4.3.3 空气加湿器的处理过程	59
4.3.4 吸湿剂的处理过程	59
4.3.5 空气蒸发冷却器的处理过程	60
4.3.6 空气处理的各种途径	61
4.4 空气处理设备	63
4.4.1 喷水室	63
4.4.2 表面式换热器	65
4.4.3 空气加湿器	67
4.4.4 除湿机	71
4.5 蒸发降温技术	74
4.5.1 概述	74
4.5.2 蒸发降温原理	75
4.5.3 蒸发降温系统	78
第5章 农业设施的通风	91
5.1 概述	91
5.1.1 通风换气的目的	91
5.1.2 通风换气设计的基本要求	92
5.1.3 通风的基本原理与形式	92
5.2 自然通风	93
5.2.1 热压作用下的自然通风	93
5.2.2 风压作用下的自然通风	97
5.2.3 热压和风压同时作用的自然通风	100
5.2.4 自然通风设计	100
5.3 机械通风	101
5.3.1 机械通风的基本形式	101
5.3.2 风机的类型和选择	104
5.4 通风量设计	107
5.4.1 温室通风量设计	107
5.4.2 畜禽舍通风量设计	111
5.5 气流组织	115
5.5.1 送风射流的流动规律	115
5.5.2 排风口空气流动规律	119
5.5.3 送风口与排风口的类型	119
5.6 空气的净化	123

5.6.1 除尘式空气净化方法	123
5.6.2 除气式空气净化方法	127
第6章 农业设施的供暖	128
6.1 农业设施供暖系统设计热负荷	128
6.1.1 温室供暖系统设计热负荷	128
6.1.2 畜禽舍供暖系统设计热负荷	134
6.2 农业设施的供暖方式	138
6.3 热水供暖系统	140
6.3.1 锅炉设备	141
6.3.2 散热器	142
6.3.3 热水供暖系统的管道与附属设施	145
6.3.4 温室热水供暖系统的安装	150
6.4 热风供暖系统	150
6.4.1 热风供暖系统的形式	150
6.4.2 送风温度和送风量	152
6.4.3 空气加热器的选择	153
6.4.4 热风供暖系统的安装	154
6.5 热地板	155
6.6 局部供暖设备	155
6.6.1 温室用局部供暖设备	155
6.6.2 畜禽舍用的局部供暖设备	159
第7章 输配系统设计与运行调节	162
7.1 空气输配系统	162
7.1.1 通风管道系统的形式与装置	162
7.1.2 通风管内空气流动阻力	165
7.1.3 风管内的压力分布	168
7.1.4 风管的水力计算	170
7.1.5 均匀送风管道设计计算	175
7.2 空调水系统	180
7.2.1 自然循环热水供暖系统	180
7.2.2 机械循环水系统	183
7.2.3 水系统的定压	189
7.2.4 空调冷却水系统	192
7.2.5 水系统的水力计算	197
7.2.6 空调冷凝水系统	205
7.2.7 水系统的调节	206
参考文献	212

第 1 章 概 述

1.1 设施农业

设施农业亦称环境控制农业或工厂化农业,是利用工程技术手段和工业化生产方式改善或创造局部环境,为动植物生产提供相对可控制的最适宜的温度、湿度、光照等生长环境条件,充分利用土壤、气候和生物潜能,在一定程度上摆脱对自然环境的依赖而进行的有效生产的农业。设施农业是依靠科技进步而形成的高新技术产业,是实现由传统农业向现代化集约型农业转变,在有限的土地上使用较少的劳力,充分利用土壤、气候和生物潜能,生产出更多的农产品的有效方式。

设施农业属于高投入、高产出,资金、技术、劳动力密集型的产业。它是利用人工建造的设施,使传统农业逐步摆脱自然的束缚,走向现代工厂化农业、环境安全型农业生产、无毒农业的必由之路;同时也是农产品打破传统农业的季节性,实现农产品的反季节上市,进一步满足多元化、多层次消费需求的有效方法。

设施农业按主体不同可分为设施园艺和设施养殖两大部分。设施园艺的主要设施有温室、塑料棚和人工气候室及其配套设备等。设施养殖主要包括有水产养殖和畜牧养殖。设施养殖的主要设施有保温、遮阳棚舍、现代集约化饲养畜舍及配套设备等。

1.2 设施农业与环境控制技术的关系

设施农业是在人为可控环境保护设施下的农业生产,是集生物工程、农业工程、环境工程为一体的多部门、多学科的系统工程,涉及园艺学、环境调节学、机械和建筑学等学科,是以工程控制气候环境和种养技术相结合为特点的农业生产体系。

设施农业区别于传统农业的根本不同之处在于能够利用各种有效调控环境的设施进行农业产品的生产。因此,农业生物环境工程是设施农业的主要技术手段,是设施农业的重要科技内涵。设施农业中采用农业生物环境工程技术的程度与技术的先进性,决定了设施农业水平的高低。

设施农业中采用的环境设施大体上可分为三类:

(1) 各类农业建筑。即用于农业的各种生产性建筑物或构筑物,如畜禽舍、温室和塑料大棚、水果蔬菜贮藏库和水产养殖的构筑物等。其作用是利用具有一定保温隔热效果、限制水、气自由移动的围护结构,为农业动植物生长发育提供一个与外界自然环境相对隔离的空间,以有效减弱外界不利环境条件对动植物的直接作用。

(2) 能够对环境因子进行调控的各种设备。如供暖设备、通风与降温设备、光照设备、温室中的 CO_2 和果蔬贮藏库中的气体成分调节设备、水产养殖中的增氧机等。

(3) 环境自动监测与控制系统。为了对农业建筑与环境调控设备进行有效管理和运行，必须在外界条件不断变化的情况下，根据动植物在不同生育阶段、不同时间对环境条件的要求，利用环境自动监控系统对设施内环境进行实时监测，通过控制各种环境设备的运行进行及时调控。

设施农业的核心是对设施内环境能够有效地调控，营造适于生物生长发育的最佳环境条件。环境调节控制技术包括室内供暖、降温、通风、灌水、配电、照明、二氧化碳气调等技术以及环境监视、信息传递设备，光、温、湿、气的监测仪器和自动控制等配套使用技术（见表 1-1）。

现代化温室可以自动控制室内的温度、湿度、灌溉、通风、二氧化碳浓度和光照，温室的计算机智能化调控装置采用不同功能的传感器探测头，准确采集设施内环境参数和作物生育状况等参数，通过数字电路转换后传回计算机，并对数据进行统计分析和智能化处理。

设施内环境控制内容		表 1-1
设施内环境因素	控制技术	
土壤与空气温度	供暖、降温、可再生能源利用	
空气湿度	通风、降温	
CO ₂	通风、CO ₂ 施肥	
光照	光照调控	
根圈环境(水分、养分)	灌溉、施肥	

设施农业是在人们生活需要不断增长的同时发展起来的，目前已由简易塑料大棚、温室发展到具有人工环境控制设施的自动化、机械化程度极高的现代化大型温室和植物工厂。

现代化温室的工厂化农业一般包括加热系统、降温系统、通风系统、遮阳系统、滴灌系统和中心控制系统。农业生产工厂化的关键技术是无土栽培和环境的自动控制。当代发达的设施农业以及植物工厂就是用人造的方式创造人工气候，消除一些对植物生长不利的环境因素。

植物工厂是继温室栽培之后发展起来的一种高度自动化、现代化的设施农业，是在全封闭的设施内周年生产作物的高度自动化控制的生产体系。植物工厂能免受外界不良环境影响，实现高技术密集型省力化作业，与温室生产的不同点在于它完全摆脱了大田生产条件下自然条件和气候的制约，应用现代先进设备，完全由人工控制环境条件，全年均衡供应农产品。植物工厂以采用营养液栽培和自动化综合环境调控为重要标志，为使栽培环境达到高度自动化调控，设备的建造及运转费用均很高。

将自动控制技术应用于设施栽培使农作物生产，实现了温室环境自动控制，脱离了自然条件的束缚，有效利用了资源，大大提高了生产效率。将自动控制技术应用于设施养殖中，同样可以摆脱传统农业生产条件下的自然气候、季节的制约，提高农牧产品的产量和质量，使设施养殖实现大规模、集约化、工厂化生产。

工厂化养畜禽就是为畜禽舍提供最适宜的卫生环境和气候环境，以自动化装置和设备代替手工劳动，以先进的畜牧业技术改善生产流程，提高劳动生产率，节约资源，取得最

大的经济效益。现在已发展到工厂化养鸡、养猪、养肉羊和养奶牛等生产领域。其中以工厂化养鸡规模最大、效益最高。

近年来,在发达国家已经形成设施制造、环境调控、生产资料为一体的多功能体系。大力发展集约化的温室产业,温室内的温度、湿度、光照、肥料、二氧化碳均通过计算机调控。从品种选择、栽培管理到采收包装形成一整套规范化的技术体系。自动测量、环境条件自动控制,计算机技术自 20 世纪 80 年代以来已在各国设施农业领域中得到广泛应用,从而促进了设施农业高新技术的兴起和发展。塑料大棚、玻璃温室、人工气候室环境的自动监控和管理,植物工厂的自动化等设施农业高新技术的发展,都是以自动测量、计算机和通信技术的发展为前提。设施农业的大规模化、机械化和自动化是其今后的发展趋势。

1.3 设施农业环境控制技术的发展状况

设施农业的发展在欧洲已经有 100 多年的历史了。荷兰农民从 19 世纪末就开始把玻璃盆覆盖在植物上用于透光和保温,但大规模的现代型设施农业是近年来随着农业环境工程技术的突破而迅速发展起来的一种集约化程度很高的农业生产技术。随着现代工业向农业的渗透和微电子技术的应用,集约型设施农业在美国、荷兰、日本等一些发达国家得到迅速发展,并形成了一个强大的支柱产业。

由于设施农业摆脱了传统农业生产条件下的自然气候、季节的制约,不仅使单位面积产量及畜禽个体生产量大幅度增长,而且保证了农牧产品,尤其是蔬菜、瓜果和肉、蛋、奶的全年均衡供应。近年来,世界各国发展设施农业的环境控制技术主要包括以下内容:

1. 设施园艺方面

(1) 地膜覆盖

目前世界大多数国家大田所用的塑料薄膜一般为厚 0.2~0.3mm 的聚乙烯透明薄膜(只用 1 季)。用地膜覆盖农田,可以提高地温,保持土壤水分,促进有机质的分解,提高作物产量。应用地膜覆盖可使喜温作物向北推移 2~4 个纬度,即延长无霜期 10~15 天,提高旱地水分利用率 30%~50%,在中、轻盐碱地上,配合营养钵育苗移栽,使棉花、玉米保苗率达 80%~90%。现在已研制出吸光、抑制杂草滋生的塑料地膜,同时用生物技术正在研制可降解、无公害的生物地膜。

(2) 温室栽培

近代园艺作物温室栽培主要包括塑料大棚温室栽培和现代化玻璃温室栽培两类。目前世界上塑料大棚最多的国家是中国、意大利、西班牙、法国、日本。现代化玻璃温室主要以荷兰、日本、英国、法国、德国为最多。由于这种温室可以自动控制室内的温度、湿度、灌溉、通风、二氧化碳浓度和光照,每平方米温室一年可产番茄 30~50kg,黄瓜 40kg,或产月季花 180 枚,相当于露地栽培产量的 10 倍以上。当前,现代化温室发展的主要问题是能源消耗大、成本高,因此近年来一些发达国家大力研究节能措施。可如室内采用保温帘、双层玻璃、多层覆盖和利用太阳能等技术措施,可节省能源 50%左右。另外,有些国家,如美国、日本、意大利开始把温室建在适于喜温作物生长的温暖地区,也减少了能源消耗。

(3) 植物工厂

植物工厂是继温室栽培之后发展的一种高度专业化、现代化的设施农业。它与温室生产的不同点在于,完全摆脱了大田生产条件下自然条件和气候的制约,应用先进设备,完全由人工控制环境条件,全年均衡供应农产品。目前,高效益的植物工厂在某些发达国家发展迅速,初步实现了工厂化生产蔬菜、食用菌和名贵花木。

美国正在研究利用“植物工厂”种植小麦、水稻以及进行植物组织培养和快繁、脱毒。这种植物工厂的作物生产环境不受外界气候等条件影响,蔬菜(如生菜)种苗移栽2周后,即可收获,全年收获产品20茬以上,蔬菜年产量是露地栽培的数十倍,是温室栽培的10倍以上。此外,在植物工厂可实现无土栽培,不用农药,能生产无污染的蔬菜等。植物工厂由于设备投资大,耗电多(占生产成本一半以上),因此如何降低成本是植物工厂今后研究的主要课题。

2. 设施养殖方面

(1) 工厂化养殖

工厂化养畜禽是为畜禽舍创造最适宜的卫生环境和小气候,以机械、电器代替手工劳动,以先进的畜牧业技术(包括饲料配合、现代饲养管理方式及先进的繁殖技术)改善生产流程,从而取得高的劳动生产率,良好的饲养效率,最大的经济效益,达到高产、高效、优质、低耗的目标。

工厂化养畜禽自20世纪70年代兴起,现在已发展到工厂化养鸡、养猪、养肉羊和养奶牛诸生产领域。其中以工厂化养鸡规模最大、效益最高,现被广泛采用。

(2) 塑料暖棚养殖

在寒冷地区,冬季用塑料棚养畜禽,因成本低廉,近年也较多应用,一般用厚度300 μ m的两层薄膜,中间用聚苯乙烯填充保温,内壁膜通常用白色或银色以反射光和热,外层多用黑色塑料膜以增加热量吸入,目前主要用于养殖鸡、猪、羊等畜禽。

(3) 草地围栏及供水系统

太阳能、电围栏以及放牧场防冻供水系统是现代化草地建设最基本的措施,美国、澳大利亚等国已普遍采用。

与发达国家相比,我国设施农业起步较晚。在两千多年前,我国有利用暖房栽培葱、韭菜供皇室御用的记载,称得上是最早的设施农业。然而受当时设施条件和技术手段的限制,很难形成规模。20世纪70年代末开始在一些大城市郊区进行以地膜覆盖、塑料拱棚和日光温室为主的保护地栽培。现在的设施农业早已超越早先的瓜菜花卉等园艺植物,设施类型也从简单的地膜覆盖和小拱棚发展到能自动控制光、温的大型现代化连栋温室。

塑料大、中棚及日光温室为我国主要的保护设施结构类型。其中能充分利用太阳光热资源、节约燃煤、减少环境污染的日光温室为我国所特有。

采用单层薄膜、PC(聚碳酸酯)板、玻璃为覆盖材料的大型现代化连栋温室以其土地利用率高、环境控制自动化程度高和便于机械化操作,自1995年以来发展迅速,到2008年全国共有大型温室面积已达19.6万亩(见表1-2)。

作为温室和大棚的保温、遮阳、防虫的覆盖材料也相应发展。塑料薄膜年耗用量为55万吨左右,其生产工艺和技术水平不断提高,新型多功能棚膜的研制、试验工作亦在不断进行中。现已研制开发出高保温、高透光、流滴、防雾、转光等功能性棚膜及多功能

复合膜和温室专用薄膜,且使用面积逐年扩大。塑料遮阳网和防虫网设施园艺上的覆盖面积达7万公顷。便于机械化卷帘的轻质保温被正逐渐取代沉重的草帘。

全国设施农业种类面积 万亩 表 1-2

年份	小拱棚	大中棚	节能日光温室	普通日光温室	加温温室	连栋温室	合计
1978	5.6	1.9			0.5		8.0
1982	10.6	2.7	0.0	1.6	0.7		15.5
1984	32.5	8.3	0.2	4.7	1.8		47.4
1986	80.9	20.5	0.9	12.7	3.8		118.8
1988	118.1	32.2	3.3	21.4	5.0		180.0
1990	144.9	50.1	11.3	22.9	6.0		235.1
1992	214.9	85.9	33.3	23.6	7.6		365.3
1994	334.6	160.1	94.3	54.5	8.3		651.9
1996	563.5	383.8	188.0	107.4	14.5	0.2	1257.1
1998	819.9	783.9	310.7	130.6	37.8	1.0	2083.0
2000	1036.8	1069.1	425.3	175.2	42.7	1.9	2749.0
2002	1137.2	1236.9	574.7	175.1	35.7	1.6	3159.5
2004	1483.1	1599.7	587.9	161.7	22.1	11.0	3865.5
2006	1614.3	1636.0	680.7	143.2	26.6	11.6	4112.3
2008	1918.2	1953.2	926.5	173.5	29.0	19.6	5020.0

注：引自张真和讲稿。

设施园艺栽培技术不断提高发展,新品种、新技术及农业技术人才的投入提高了设施园艺的科技含量。现已培育出一批适于保护设施栽培的耐低温、弱光、抗逆性强的设施专用品种。工厂化育苗、嫁接育苗、二氧化碳施肥、喷灌、滴灌、无土栽培技术、小型机械、生物技术和微电脑自控及管理的使用,提高了劳动生产率,使栽培作物的产量和质量得以提高。

随着社会的进步和科学的发展,我国设施农业的发展将向着地域化、节能化、专业化发展,由传统的作坊式生产向高科技、自动化、机械化、规模化、产业化的工厂型农业发展,为社会提供更加丰富的无污染、安全、优质的绿色健康食品。

第 2 章 设施农业的人工环境

2.1 作物与环境

2.1.1 作物生长的自然环境

地球上的一切生物都有其生长所需的适宜环境，生物与其自然环境之间是相互联系、相互作用的。生物的自然环境是指生物生存空间的外部自然条件的总和。不仅包括对其有影响的非生物世界，还包括其他生物有机体的影响和作用。在生物所需的环境条件中，地球和太阳是基本环境基础，一切环境特征都由此而产生。

地球表面环绕着厚厚的一层大气层，其中靠近地球表面厚度约 16km 的对流层是与地面交界、对生物活动影响最大的一个层。地球表面的岩石圈和土壤圈蕴藏丰富的化学物质，为植物的生长创造了不同的土壤环境，是形成植被分布的重要因素。水圈是地球表面千变万化的气候特征的构成原因，水中也溶有各种矿质营养，可满足生物体生长需要。对流层、水圈、岩石圈和土壤圈综合作用共同组成地球生物圈环境。

在大气圈、水圈和土壤圈的界面上，适合生物生存的范围统称为生物圈。生物圈的核心是植物，植物在其连续不断的生命活动中获取太阳辐射，吸收大气中的 CO_2 ，释放氧气，吸收土壤中的水分和矿物质，完成有机质的积累，使得生物圈内的物质循环和能量流动成为可能。

作物是与人类日常生活密切相关的植物，包括各种粮食作物、经济作物和园艺作物等。其中园艺作物主要包括果树、蔬菜和花卉。

作物的生长发育除取决于其本身的遗传特性外，还取决于环境因子。作物赖以生存的环境因子包括光照（光照强度、光照时间及光谱成分）、温度（气温与地温）、水分（空气湿度和土壤湿度）、土壤（土壤组成、物理性质及 pH 值等）、大气因子及生物因子。各个环境因子之间不是孤立的，而是相互联系、相互促进和相互制约的，环境中任何一个因子的变化必然会引起其他因子不同程度的变化。比如太阳辐射强度的变化会带来空气和土壤温度和湿度的变化。因此，自然环境对生物的作用是各个环境因子的综合作用。

作物生长的环境因子都是作物直接或间接所必需的，但在一定条件下，只有其中的一个两个起主导作用，称为主导因子。主导因子有时对作物环境变化起主要作用，如冬季日光温室内环境温度往往是对果菜生产起主导作用的生态因子。主导因子有时对作物的生长发育起决定作用，如日照长度对作物花期开花起主导作用。分析作物主导环境因子是调控作物环境、实现优质高产的基础。

环境因子对作物的作用是不相等的，但都是不能缺少的，任何一个环境因子都不能被另外一个环境因子代替。不过，在一定情况下，某一环境因子在量上的不足可以由其他因

子量的增加得到调剂。例如，在作物栽培中增加 CO_2 浓度可以补偿由于光照强度不足引起的光合作用强度的降低。

环境因子对作物的影响程度不是一成不变的，是随着生长发育阶段的推移而变化的。例如，种子发芽期作物的适宜温度一般较高，幼苗期则较低，成苗期更低。

2.1.2 作物生产与环境的关系

作物生产旨在为人类提供产品，作物的根、茎、叶、花、果实等均有可能成为产品。作物一生所合成的全部干物质称为其“生物产量”，作物品质则是指产品营养成分、颜色和风味等。作物产量和作物产品的品质都和环境有着密切的关系。

1. 作物产量与环境因子

所有作物产量的 90%~95% 均来自于光合作用，只有 5%~10% 是由其根系吸收矿质元素形成的。因此，作物产量取决于干物质的生产效率。作物干物质的生产效率常用净同化率这个概念来表示。净同化率指单位叶面积在一定时间内由光合作用所形成的干物质重量，它是光合作用同化量除去呼吸作用消耗量之后的剩余量。因此光合作用和呼吸作用是作物最基本的生理活动，一切影响作物光合作用和呼吸作用的环境因素都会影响作物产量。

(1) 作物光合作用及其环境因子

光合作用是植物叶绿素等物质利用光能将 CO_2 和水合成糖和淀粉等碳水化合物的生理过程。光合作用包括光反应和暗反应。

绿色植物在光照作用下其色素分子吸收光能，由色素系统的电子传递功能使水分解，释放氧并放出电子，并使 NADP^+ 还原成 NADPH ，使 ADP 转化为 ATP ，这就是光反应，它是一种光的物理化学反应，是电子的激发与传递过程；而暗反应则是 CO_2 的同化过程，其功能是通过一系列卡尔文循环将 CO_2 还原成碳水化合物，它是一种酶促反应。

影响植物光合作用的主要环境因子有光照强度、 CO_2 浓度、温度及水分等。

光照是光合作用的能量来源，当光照强度低于植物的光饱和点时，植物光合速率随着光照强度的增加而加速。当光照强度达到光饱和点后，光照强度增加，光合速率将不再增加。

CO_2 是植物光合作用的原料，对光合速率影响很大。当光照强度较强时，提高 CO_2 浓度可以显著提高植物光合速率。

植物光合作用中暗反应是由酶催化产生的，而温度直接影响生物酶的活性，因此温度是影响植物光合作用的重要的环境因子。

水分是植物光合作用的原料之一，植物缺水时，其光合速率下降。

(2) 作物呼吸作用及其环境因子

呼吸作用是植物线粒体等物质吸收氧气和分解有机物而排放 CO_2 与释放能量的生理过程。呼吸作用包括有氧呼吸和无氧呼吸两类。有氧呼吸指细胞在有氧条件下将有机物彻底分解，释放 CO_2 和能量的过程。有氧呼吸是高等植物进行呼吸的主要形式。无氧呼吸则是指细胞在无氧条件下将有机物分解为不彻底的氧化产物，同时释放能量的过程。

呼吸作用对植物具有重要的生理意义。首先，呼吸作用释放的能量，一部分以热的形式散失于环境中，另一部分贮存于有机化合物中，输送到植物体各处，供各种生理活动需

要；其次，呼吸作用对植物体内有机物的转变起着枢纽作用。呼吸作用产生一系列的中间产物，这些中间产物很不稳定，是进一步合成植物体内各种化合物的重要原料。

作物呼吸过程需要消耗氧气，因此氧气浓度直接影响作物呼吸作用。作物缺氧，呼吸作用受阻，其能量释放和物质转化均难以继续，进而影响其光合作用。

作物呼吸作用的过程也是酶促反应，因此环境温度直接影响作物呼吸强度，作物呼吸强度随温度的上升而提高。温度高，作物呼吸作用旺盛，养分消耗多，干物质积累减少。

2. 作物品质与环境因子

作物产品品质除取决于其遗传特性外，环境因子也会影响其生长发育、代谢水平和物质合成与积累。

作物色泽与生长时的受光量有关。如西红柿在叶子遮阳部位结果着色好，直接接受直射光着色果实色泽较差。彩叶草在强光下叶黄素合成多，叶子呈现黄色，在弱光下胡萝卜素合成较多，叶子则呈红色。

温度是影响花卉颜色的主要环境因子，温度对花色的影响表现在花青素系统的色素上。温度也影响蔬菜品质，比如菜豆生长在高温下其纤维素的含量要高。

此外，水分、空气等环境因子也影响花卉颜色、蔬菜营养成分结构。

2.1.3 温室作物环境

作物在陆地自然环境中生长，经常会遇到各种气象灾害的危害，如冻害、冰雹、高温高湿、大风等，这些极端天气往往会给作物生长带来严重的危害，给种植业带来不可估量的损失。采用温室则可以避免极端天气的危害，创造作物生长的小气候，保护作物的正常生长。此外，利用温室环境的可调控性，还可以实现作物的反季节栽培以及品种改良等。温室内影响作物生长、可以进行调控的环境因子主要有光照、温度、湿度、气体环境和土壤环境等。

① 光照 温室内光照环境包括室内光照分布均匀性、光照强度、光照周期和光质等方面。温室通常主要靠自然采光，所以温室的覆盖材料一般采用透光性能高的材料，以保证室内获得足够的光照度。有时温室也配置补光系统和遮光设备，调节室内光照强度和光周期，满足作物栽培需要。温室覆盖材料的性质往往影响室内光照的光谱特性，有些情况下需要采用特殊的覆盖材料或补光设备改变室内光质。

② 温度 温室内的温度条件包括空气温度和土壤温度。温室截获太阳辐射后，由于“温室效应”室内能积蓄一定的热量，为作物生长提供基本的温度条件。此外，温室一般还配置降温、加温设备，以保证室内不出现过高或过低的温度。

③ 湿度环境 温室内湿度环境指空气湿度和土壤湿度，通风换气是调节室内空气湿度的常用方法。此外，也可以根据需要设置除湿、加湿设备改善室内空气湿度状况。节水灌溉、地膜覆盖是调节土壤湿度的有效途径。

④ 土壤环境 温室土壤环境包括土壤有机质含量、pH 值及盐分含量等。采用节水灌溉技术、配方施肥、增施有机肥、轮作栽培及土壤消毒技术可以有效改善温室内土壤环境。为克服土壤栽培的诸多缺点，无土栽培技术在温室生产中日益受到重视和推广应用。

⑤ 气体环境 温室气体环境包括 O_2 、 CO_2 及有害气体等，通风换气和 CO_2 施肥技术是目前温室气体环境控制最有效的方法。

2.1.4 光照环境及调控

地球上几乎所有植物都是通过吸收太阳光来生长发育，并通过各器官得到的光刺激来获得周围环境条件的有关信息。植物的光合作用是地球上所有生物赖以生存和发展的基础。光不仅是植物进行光合作用等基本生理活动的能量源，也是花芽分化、开花结果等形态建成和控制生长过程的信息源，因此，光照是园艺设施中极其重要的环境因素。

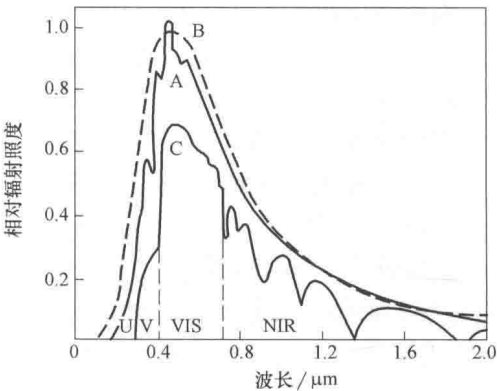
在自然光照下，光照状况随着温室所在的地理位置、季节、时间和气候条件的变化而变化。自然光照环境的某要素不能满足植物生长发育的要求时，就需要进行人工调控。

1. 光照环境与作物

(1) 太阳辐射与光合作用有效辐射

太阳辐射是自然光照的来源，每秒向地球辐射的能量约为 $3.8 \times 10^{26} \text{J}$ 。大气圈外的太阳辐射的光谱能量分布基本上类似于 6000K 黑体的辐射能量分布，是由不同波长的连续光谱组成（见图 2-1），以 475nm 波长的辐射能量最强。太阳辐射穿过大气层到达地面时，经过大气中 O_3 、 H_2O 、 CO_2 和尘埃等吸收和反射，能量衰减至 48% 左右。由于大气层对太阳辐射有选择吸收的特性，其中 O_3 层对紫外辐射、 H_2O 、和 CO_2 对红外辐射有强烈的吸收，故到达地面时其光谱分布发生了很大变化。到达地面的太阳辐射能量的 99% 集中在波长 $0.17 \sim 4.00 \mu\text{m}$ 的辐射范围内。其中，可见光（VIS， $0.38 \sim 0.76 \mu\text{m}$ ）占 52%，近红外光（NIR， $0.76 \sim 2.00 \mu\text{m}$ ）占 43%，紫外光（UV， $0.17 \sim 0.38 \mu\text{m}$ ）和红外光谱（IR， $2.00 \mu\text{m}$ 以上）只占 5%。

经大气分子、云雾及尘埃等吸收和散射后到达地球表面的太阳辐射由两部分组成：以平行光形式到达地面的称为直接辐射。以来自天空四面八方散乱光形式到达地面的称为散射辐射。直接辐射和散射辐射之和称为总辐射。照射到单位面积上的辐射能量称为辐射照度。经过大气和尘埃吸收与散射的结果，到达地表的太阳辐射只有大气圈外的 50% ± 5%，直接辐射和散射辐射约各占一半（见图 2-2），其吸收和散射的大致比例随地理位置、时间和气候的变化而变化。例如，晴天时的散射辐射只有到达地表的太阳辐射的 10%~20%，阴天或雨天时近 100%。投射到物体上的辐射能一部分被吸收，一部分被反射，一部分透过物体。物体吸收、反射和透过的辐射能与到达该物体上的辐射能的百分比分别称之为吸收率、反射率和透过率。



A—大气圈外；B—6000K 的黑体；C—地表面
图 2-1 太阳辐射分光光谱的相对能量分布

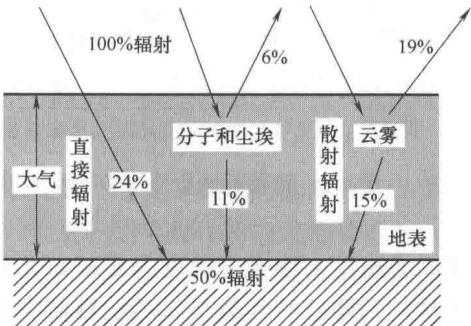


图 2-2 太阳辐射在大气圈的衰减

对于光照强度，过去采用按人的视觉效应评价的光照度进行度量，单位为 lx（勒克斯）。这是在 380~760nm 的可见光范围内，以对人眼视觉效应最强的 555nm 光为基准，按人眼的视觉效应对不同波长光区别计算来进行度量的。但照度用于植物光照强度的评价是不适宜的。对植物生理产生作用的主要是 300~780nm 的辐射，称为生理辐射。参与光合作用的太阳辐射只有 400~720nm 的波段，只占太阳辐射的较小一部分，称为光合作用有效辐射。由于植物对辐射具有选择吸收的特性，不同波长光的光合作用效率与人眼的视觉效应是完全不同的。因此，在园艺界已改用单位时间、单位面积上照射的光合有效辐射能量进行度量，称为光合有效辐射照度（Photosynthetically Active Radiation, PAR），一般在 400~700nm 的光辐射范围进行度量，单位为 W/m²。进一步研究表明，植物光合作用强度与所吸收的光量子数量有关，因此更合理的度量单位为单位时间、单位面积上照射的光合有效辐射范围的光量子数，称为光合有效光量子流密度（Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD 或 PPF），单位为 μmol/(m² · s)。这几种量的大小均与光谱能量分布状况有关，相互间无固定换算比例关系。只有在确定光源的光谱能量分布下才有明确的对应关系（见表 2-1）。

光合有效辐射照度 (W/m²)、光合有效光量子流密度 [μmol/(m² · s)] 及照度 (klx) 之间的换算
表 2-1

换算单位	不同光源				
	太阳辐射	荧光灯	金属卤化灯	高压钠灯	白炽灯
(W/m ²)/klx	3.93	2.73	3.13	2.8	3.96
[μmol/(m ² · s)]/klx	18.1	12.5	14.4	14	19.9
[μmol/(m ² · s)]/(W/m ²)	4.57	4.59	4.59	5	5.02

(2) 光合作用和呼吸作用

光合作用和呼吸作用是植物生长必不可少的生理过程（见图 2-3）。作物的光合作用与呼吸作用之间有一个相互平衡过程，随着生长阶段的不同，其平衡点也不同。实际生产中经常利用控制作物的光合速度和呼吸速度来调节其营养生长和生殖生长的相对平衡，最终达到提高产量或改善产品品质的目的。

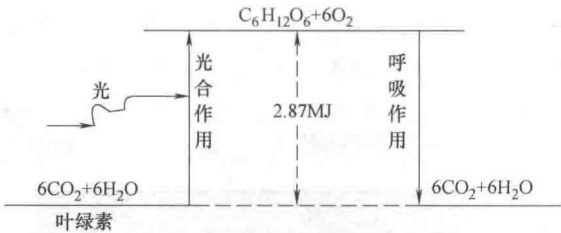


图 2-3 植物的光合作用和呼吸作用

植物的光合作用是 CO₂ 的吸收过程，呼吸作用是 CO₂ 的排放过程，因此两种作用的强度可以用 CO₂ 吸收或排放的速度进行度量，单位为 kg/(m² · s) 或 mol/(m² · s)，表示单位叶面积在单位时间内 CO₂ 的吸收、排放或交换量。由于两种生理活动一般是同时进行的，所以光合器官的叶片内外的 CO₂ 交换速度也就等于光合速度减去呼吸速度，称为净光合速度。

净光合速度为零时，光合速度等于光呼吸速度。进行光合速度测量时，常把植物的个体或叶片放置在透明容器中并导入一定流量的空气，根据该容器的流入与流出空气的 CO₂ 浓度差和流量来计算光合速度。

$$P_n = kV(C_{in} - C_{out}) \quad \mu\text{mol/s} \tag{2-1}$$