



研究生用书

农业生物环境因素测试技术

NONGYESHENGWUHUANJINGYINSU CESHIJISHU

滕光辉 主编



中国农业大学出版社

中国农业大学研究生用书

农业生物环境 因素测试技术

滕光辉 主编

中国农业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

农业生物环境因素测试技术/滕光辉主编. —北京: 中国农业大学出版社, 2005. 9
ISBN 7-81066-839-0
(中国农业大学研究生用书)

I. 农… II. 滕… III. 环境因素-测试技术 IV. X830

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第002157号

书 名 农业生物环境因素测试技术

主 编 滕光辉

策划编辑	孙 勇	责任编辑	阚 春
封面设计	郑 川	责任校对	王晓凤
出版发行	中国农业大学出版社		
社 址	北京市海淀区圆明园西路2号	邮政编码	100094
电 话	发行部 010-62731190, 2620	读者服务部	010-62732336
	编辑部 010-62732617, 2618	出 版 部	010-62733440
网 址	http://www.cau.edu.cn/caup	E-mail	caup @ public. bta. net. cn
经 销	新华书店		
印 刷	北京时代华都印刷有限公司		
版 次	2005年9月第1版 2005年9月第1次印刷		
规 格	787×980 16开本 16.75印张 307千字		
印 数	1~2 000		
定 价	20.00元		

图书如有质量问题本社发行部负责调换

内 容 提 要

本书共分8章,内容包括绪论、测量误差与测量数据的处理、温度检测、辐射检测、空气湿度与气体成分检测、气体压力、流速和流量测量、数据监测系统、农业生物环境测试技术的新进展等。重点讲述了环境工程中常用参数——温度、湿度、光辐射量、气体成分、气体压力、流速和流量等参量的测量方法及其在农业生物环境工程中的应用。

总 序

我国的研究生教育正处于迅速发展、深化改革时期,要在研究生规模和结构协调发展的同时,加快研究生教育教学改革步伐,以培养高质量的创新人才。为加强和改进研究生培养工作,改革教学内容和教学方法,充实高层次人才培养的基本条件和手段,建设研究生培养质量基准平台,促进研究生教育整体水平的提高,中国农业大学采取立项建设的方式进行了研究生重点课程建设、教材建设以及教学方式方法的改革。通过一系列的改革、建设工作,形成了一批特色鲜明的研究生教材,本书是其中之一。

建设一批研究生教学用书,是我校研究生教育教学改革的一次尝试,这批研究生教学用书,以突出研究生能力培养为出发点,引进和补充了最新的学科前沿进展内容,强化了研究生用书在引导学生扩充知识面、采用研究型学习方式、提高综合素质方面的作用,必将对提高研究生教育教学质量产生积极的促进作用。

中国农业大学研究生院

2005 年 1 月

前 言

目前,“农业生物环境因素测试技术”已成为农业建筑环境与能源工程专业研究生的一门重要的必修课程。尽管有关农业生物环境测试技术的参考书较多,但是尚缺乏能够适应当今研究生教学要求的教材,因此我们编写了《农业生物环境因素测试技术》一书。本书是中国农业大学研究生精品及重点课程建设项目成果。

在农业生产进入工厂化、信息化的今天,从农产品种植到畜产品养殖,都与测试技术分不开。为了满足动植物生长的需要,人们在选择温室、畜禽舍设计方案,解决动植物养殖和(或)种植过程中发现的问题时,往往需要对生产环境和生产工艺进行各种试验,以便获得必要的技术数据,并通过试验研究,取得可靠数据,才能使设计的人工饲养和种植设备及采取的环境手段满足动植物生长的需求。

随着科学技术和生产的发展,对环境因素测量的精度和速度,尤其是对动态量的测量和远距离测量提出了更高的要求,为了满足这些要求,就必须寻求新的测量方法。通常都是把被测的非电量,通过传感器转换成电信号再进行测量。

由于测试目的和要求不同,测试对象又是千变万化的,因此,组成的调试系统、采用的传感器及其工作原理也各不相同,涉及机械、光学、电学、声学、热工、数字技术、控制理论等多学科知识,本书仅就测试技术的基础知识、常用传感器以及非电量电测方面的有关知识加以介绍。通过本课程的学习,使学生对测试系统有一个完整的概念,能正确地选用测试装置,掌握测试所需要的基本知识和技能。

本书可作为农业建筑环境与能源工程专业研究生教材,以及农业工程、环境工程、园艺、畜牧等相关专业参考书,也可供从事设施农业、农业建筑、生物环境控制和能源工程及相关专业的科研、工程技术人员和研究生参考。

本书的编写得到了中国农业大学出版社及许多专家和学者的帮助与支持,特别是中国农业大学出版社的编辑为本书的编写和出版做了大量的工作,付出了辛勤的劳动,在此,请接受我们最诚挚的谢意。

本书作者在编写的过程中,参阅了近年出版的有关测试技术论著和教科书,吸收了其中的某些观点和例证,中国农业大学农业生物环境与能源工程专业的李志忠、刘雁征等博士生,为本书插图绘制做了大量工作,在此一并致谢。

由于时间仓促,加之作者水平有限,书中缺点、错误难免,祈望广大师生及读者对本书提出宝贵意见,给以批评指正。

编 者

2005 年 5 月

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 农业生物环境因素测试的目的和意义	(1)
1.1.1 农业生物与环境	(2)
1.1.2 环境因素测试在现代农业生产中的地位作用	(3)
1.1.3 环境因素测试的基本内容	(7)
1.1.4 环境因素测试的研究方法	(10)
1.2 测试技术发展的概况与特点	(11)
1.2.1 测试与控制系统的组成	(11)
1.2.2 测试技术发展的趋势与特点	(15)
1.3 课程的学习要求	(17)
2 测量误差与测量数据的处理	(18)
2.1 测量误差的基本概念	(18)
2.1.1 误差的定义	(18)
2.1.2 误差分类	(22)
2.1.3 精度	(25)
2.2 测量误差的分析和处理	(27)
2.2.1 系统误差的分析和处理	(27)
2.2.2 随机误差的分析和处理	(27)
2.3 直接测量结果的不确定度估计	(29)
2.3.1 不确定度的概念	(29)
2.3.2 不确定度的简化评定方法	(30)
2.3.3 关于仪器误差限的讨论	(31)
2.3.4 计算举例	(31)
2.3.5 相对不确定度	(33)
2.4 间接测量结果的不确定度合成	(33)
2.5 测量数据处理	(34)
2.5.1 测量数据处理的一般步骤	(34)
2.5.2 非等精度测量与加权平均	(35)

2.5.3	最小二乘原理	(38)
2.5.4	曲线的拟合	(39)
2.5.5	实验数据的有效位数与数字舍入规则	(45)
2.6	数据采集设备的测量误差问题	(50)
3	温度检测	(53)
3.1	温度检测概述	(53)
3.1.1	温度与温标	(53)
3.1.2	国际实用温标及其传递	(54)
3.1.3	温度检测原理及分类	(56)
3.2	接触测温	(59)
3.2.1	热膨胀测温	(59)
3.2.2	热电偶测温	(60)
3.2.3	热电阻测温	(74)
3.2.4	热敏电阻测温	(80)
3.3	非接触测温方法简介	(86)
3.3.1	工作原理	(86)
3.3.2	全辐射温度计	(87)
3.3.3	红外测温技术	(90)
4	辐射检测	(95)
4.1	辐射机理与度量	(95)
4.1.1	辐射机理	(95)
4.1.2	辐射度量	(101)
4.1.3	光通量与辐射通量单位之间的换算	(110)
4.2	分光辐射仪原理与使用方法	(113)
4.2.1	光照与辐射敏感元件	(113)
4.2.2	分光辐射仪工作原理	(116)
4.2.3	LI-1800 分光辐射仪应用简介	(118)
5	空气湿度与气体成分检测	(123)
5.1	空气湿度检测	(123)
5.1.1	潮湿空气的热力学性质	(123)
5.1.2	常用的湿度检测方法	(130)
5.2	气体成分检测	(141)

6 气体压力、流速和流量测量	(146)
6.1 气体压力测量	(146)
6.1.1 压力的基本概念	(146)
6.1.2 管式压力计	(149)
6.1.3 补偿式微压计	(158)
6.1.4 电测压力传感器	(161)
6.2 气体流速测量	(166)
6.2.1 探头选择	(166)
6.2.2 三种国产风速仪介绍	(168)
6.3 流量测量	(171)
6.3.1 节流变压降流量计	(172)
6.3.2 转子流量计	(176)
6.3.3 涡轮流量计	(179)
6.4 热流量测量	(181)
6.4.1 测量原理	(181)
6.4.2 热阻式热流计	(182)
7 数据监测系统	(183)
7.1 计算机进入测试技术领域引起的变革	(183)
7.1.1 信号测试的自动化	(183)
7.1.2 测试仪表的智能化	(185)
7.2 检测信号的测量	(186)
7.3 模拟信号的放大	(190)
7.3.1 反相放大电路	(191)
7.3.2 同相放大电路	(191)
7.3.3 测量放大器	(192)
7.3.4 程控增益放大器	(195)
7.4 采样/保持电路.....	(196)
7.5 多路模拟开关	(198)
7.6 A/D 和 D/A 转换器及其接口	(200)
7.6.1 A/D 转换器	(201)
7.6.2 D/A 转换器	(208)
7.7 数据通讯与接口	(212)
7.7.1 接口系统的基本特性	(213)

7.7.2 GP-IB 接口的应用	(214)
7.8 数据处理	(215)
7.8.1 测试系统的自校准	(215)
7.8.2 测量曲线的平滑处理	(218)
8 农业生物环境测试技术的新进展	(221)
8.1 自动气象站	(221)
8.1.1 农田自动气象站实例	(221)
8.1.2 智能传感器	(225)
8.2 农业生物环境测试仪器与测试系统简介	(230)
8.2.1 LI-250 光照计	(230)
8.2.2 LI-1400 数据采集器	(231)
8.2.3 LI-6400 便携式光合作用测量系统	(231)
8.2.4 LI-820 气体分析仪	(235)
8.2.5 LAI-2000 植物冠层分析仪	(237)
8.3 虚拟仪器系统	(238)
8.3.1 概述	(238)
8.3.2 虚拟仪器的组成	(239)
8.3.3 虚拟仪器开发系统介绍	(243)
8.3.4 虚拟仪器典型单元模块	(244)
8.3.5 虚拟仪器和传统仪器的比较	(245)
8.3.6 虚拟仪器的发展	(246)
习题	(247)
参考文献	(255)

1 绪 论

1.1 农业生物环境因素测试的目的和意义

测试技术是指按照被测对象的特点,采用某种方法和仪器获取被测试数值的全过程,主要研究各种物理量的测量原理和测量信号的分析处理方法。只有通过测试才能获得表征物理或化学现象和过程的定量信息,因此各行各业都有自己的测试技术问题,农业生物环境工程领域也不例外。

测试技术是进行各种科学实验研究和生产过程参数检测等必不可少的手段,它起着类似人的感觉器官的作用,通过测试可以揭示事物的内在联系和发展规律,从而去利用它和改造它,推动科学技术的发展。科学技术的发展促进测试技术的发展,反过来,测试技术的发展又促进科学技术的提高,这种相辅相成的关系推动社会生产力不断前进。现代科学技术和现代测试技术的关系比任何时候更为密切。中国有句古话:“工欲善其事,必先利其器”,用这句话来说明测试设备与科学技术的关系是很恰当的。这里,所谓“事”就是科学技术,而“器”则是测试设备。翻开科学发展史就会看到,许多重大的科学成就几乎都与某种新的实验仪器的诞生息息相关。

国民经济各部门的生产虽然是千差万别,但需要测试的参数可归结为并不太多的若干种类。一般说来,被测参数有长度、时间等空间和时间量,压力、质量等力学量,温度、热量等热学量,电流、电压和磁场强度等电磁量,以及光学量、有害气体和化学成分等等。上述各种参数并无行业、部门的界限,如温度在电力、化工、冶金、农业和医药等部门中都是重要参数。所以,通用性是测试技术的一个特点。由于被测对象的不同和测试条件的差异,尽管是同一种参数,其测试方法、设备和系统也就不能完全一样。如温度参数,就可能属于物体表面温度、火焰温度、高速气流温度等不同的测试对象,有高温、中温、低温等不同的测试范围,还有精密测试和一般测试这样一些不同的精度要求,等等。在测试工作中必须根据不同的情况具体分析,区别对待,这是测试技术的又一个特点。

在农业生物环境工程领域中,与农业生产有关的环境因素(一般有温度、湿度、光照、流量、营养液浓度和气体成分,以及风速、风向、雨量等气象参数等)的测量,

都离不开测试技术。农用设施的结构强度和热维护特性试验常常还要测试流速、热量及应力等。在工程技术中广泛应用的自动控制技术也和测试技术有着密切的关系,测试装置是自动控制系统中的感觉器官和信息来源,对确保自动化系统的正常运行起着重要作用。图 1-1 是现代化温室的部分测试系统示意图。一栋 2 000 m² 左右的连栋温室,其测点有 50~60 个,各种测试和控制设备及传感器多达几十种。从图中可以看出,环境因素测试在控制系统中具有重要地位,其质量的好坏直接影响着自动控制的水平。

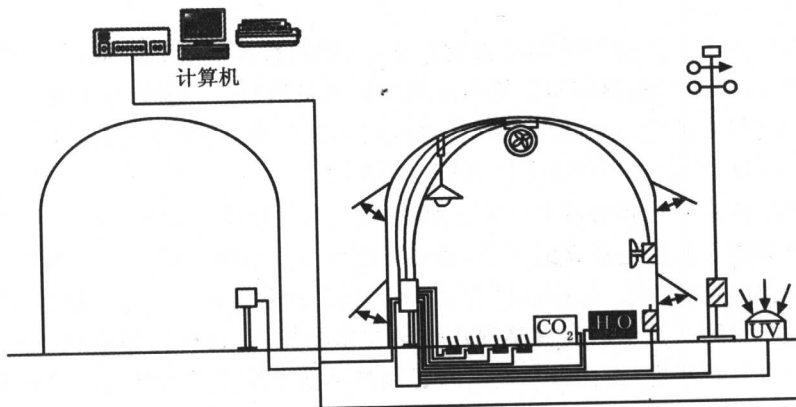


图 1-1 温室环境测控系统示意图

环境因素测试系统在设计和安装时,应正确地选择测点和仪器,以达到系统合理、投资少、便于维护的要求。运行中应保证整个测试系统经常处于投入状态,能正确而及时地反映环境调控设备的运行情况,并改善管理人员的劳动条件。因此,从事环境因素测试工作的技术人员必须充分熟悉仪器和测试系统,掌握测试方法,对设施农业装备(即被测对象)的结构和性能要有一定的了解。

根据上述要求,本书的内容是讲述农业生物环境因素测试的基本理论与方法、传感器的原理和性能、仪器的选用和测点的选择原则、测试系统的组成与误差分析等。这些内容涉及面很广,显然,书中只能介绍典型的测试方法和仪器,希望读者能举一反三,这样,在各种实际的测试任务中,尽管对象特性不同,仪器品种繁多和不断更新,也能运用基础理论和专业知识来分析和解决测试问题。

1.1.1 农业生物与环境

农业生物机体的各种性状,是其遗传潜力(因子)及其所处环境两者交互作用

的结果。我们知道,千百年来,自然界的动植物一直遵循着“适者生存、优胜劣汰”的残酷法则生存着、进化着,为了适应自然环境变化的节律性和随机性,农业生物的生长习性也相应的呈现出与之对应的节律性,并通过遗传特性代代相传。食物、光、水、热及其他环境因素,构成某一特定的遗传潜力(内在因素)能否表现的客观条件。遗传潜力究竟能在多大程度上表现出来,则主要取决于它所处的外界环境。外界环境可分为:

1)物理环境,如温度、光照、湿度、水分、土壤等,其中温度、湿度、辐射、气流等因素合在一起称为热环境,是环境控制的重点。

2)化学环境,如有害气体。

3)生物环境,如致病微生物、寄生虫、土壤微生物等。生物彼此之间也构成生物环境,这种生物环境称之为群体环境。

农业生物环境主要指与植物和动物生长、发育、繁殖直接有关的温度、光照、湿度、水分、土壤、气体等外界因素。现有的技术水平可控制的环境只限于局部空间。通过控制、改善和创造适合农业生物生活和生产的环境条件,可以实现农业生产的优质、低耗、速生和高产。具体地说,影响植物生产的环境因子有光(光质、光量)、温度、湿度、空气成分(CO_2 、乙烯等)、风速、水分、土壤等。影响动物反应的环境因子主要有辐射、光、温度、湿度、空气成分(O_2 、 CO_2 、 NH_3 、粉尘等)、风速、水质等。

1.1.2 环境因素测试在现代农业生产中的地位作用

随着现代农业生产节奏的加快以及人们对农产品质量的高要求,环境因素测试技术在现代农业生产中的作用日益突出。

例如,在工厂化农业生产的过程控制中,农业设施的光环境、温湿度场、通风量等控制参数的检测,营养液配比量的检测等,对生产工艺的优化控制、农产品质量监控、安全生产都具有非常重要的意义。又如,近年来出现的“植物工厂”,通过检测植物栽培作业流水线生产中各种工艺参数(营养液浓度配比、营养液温度调控等)和植物生长环境条件所发生的变化(温室温度、光照、湿度、 CO_2 浓度等)信号进行反馈控制,自动调节这些参数在最佳状态下工作。这一切都需要借助于环境测试技术来完成。

在制定农业生产领域的环境质量标准时,往往需要利用环境测试技术进行农作物产品的优化试验、定量分析,通过研究环境工程与自然环境、农业生物间互相作用的规律,建立相应的数学模型,以便为标准的制定提供依据。

同时还要看到,为了适应大自然千百年来优胜劣汰、适者生存的自然法则,农业生物有自己的生长节律性,同时自然环境也有自己的节律性、随机性。在人工种

植的条件下,需监测、研究农业生物的生长节律与自然环境的节律之间的相互作用、相互影响的关系,这些也都离不开环境测试技术。

在智能化温室运行监控和故障诊断中,通过环境测试技术从温室室内生态环境中提取系统参数变化的特征信息,来判断动态数据的性质,监测、预测和诊断植物生理生长过程与系统的状态,以达到为植物生长提供适宜生存环境的目的。

由此可以看出,环境测试理论所研究的内容是农业生物环境工程中的重要基础技术,在农业生物环境工程中的地位和作用是显而易见的。随着农业生物环境工程的不断深入发展,其应用的范围将越来越广泛,所起的作用也会愈来愈大。

在农业生物环境领域中,测试技术得到愈来愈多的应用,起着愈来愈大的作用。对于设施农业中的温室、畜禽舍等农业建筑物,以前只是测试一些静态或稳态下的参数(静态特性),如舍内温湿度、舍内有害气体浓度等,而现在则普遍要求测试它的动态参数(动态特性),如舍内温湿度变化曲线、在工作状态下的舍内通风风速变化率、温室温度场等,以便更好地了解农业设施在运行时的确切情况,找出薄弱环节,改进农业设施的设计和运行状态。从下面几个方面可以看到测试技术在农业生物环境领域中应用的概貌和应用的广泛性。

1.1.2.1 畜舍环境因素测试

即对畜舍内各种环境因素进行测定和计量的工作。通过测试掌握畜舍内环境的实际状况,包括温度、湿度、气流、光照、尘埃及有害气体等,借以评价畜舍环境的优劣,以便采用相应的管理技术和方法,为家畜创造适宜的环境条件,使家畜的生理机能和生产性能得到充分的发挥。

(1)温度测试 温度是畜舍内首要的环境因子,直接影响家畜生产性能和饲料转化。温度的计量在中国普遍采用摄氏温标,常用的仪器有水银温度计、双金属片自记温度计、热敏电阻温度计、热电偶温度计和辐射式温度计等。水银温度计在畜舍中应用最为广泛,在能够就地读数的场合均可采用;双金属片自记温度计主要用来监测畜舍 1 天或 1 周温度的连续变化状况;热敏电阻温度计和热电偶温度计用以测定畜舍围护结构表面、畜床表面和家畜的皮肤温度,并可进行多点同时观察;红外测温仪是利用红外热影像技术测试畜体或物体的温度和温度场,可以在不接触畜体或围护结构的情况下测试其表面温度。

畜舍温度测试主要包括畜舍内空气温度、舍外空气温度、围护结构两侧附近的空气温度、围护结构内表面温度。为了了解畜舍内温度分布的情况,有时还必须测定水平方向和垂直方向的温度分布,测点的选取因研究目的、研究对象的不同而异。畜舍空气温度的测点一般选取畜舍的中央,至少需离开窗门、墙角和采暖设备

1~1.5 m。测温仪安置的高度是,牛舍、马舍为离地面0.5~1.0 m,猪舍、羊舍为离地面0.2~0.5 m,平养鸡舍为离地面0.2 m,笼养鸡舍在中心笼中央。测定畜床或地面的温度,测点距地面5 cm,畜舍围护结构内外两侧附近的空气温度测点一般布置在离表面20~25 cm的地方。舍外空气温度的测点应在建筑物附近的空旷地方,离地面2 m高处设置百叶箱测定,也可在树阴下进行。

(2)湿度测试 湿度是表示空气中水分含量或潮湿程度的物理量,直接影响家畜的饮水和散热。在畜舍中常以相对湿度作为湿度指标,常用仪器有干湿球温度计、通风干湿球温度计、自记毛发湿度计、电阻式湿度计等。干湿球温度计是畜舍中最通用的湿度测试仪器。通风干湿球温度计精度较高。毛发自记湿度计主要用以观测1天或1周空气湿度的连续变化。电阻式湿度计可以进行远距离测试、自动记录和自动控制。湿度的测试和测点布置与温度测试基本一致。

(3)气流测试 气流是家畜热质传递和调节舍内空气成分的动力因子。为了评价畜舍的通风换气条件,需要测定舍内的气流速度和气流方向(方位角),计量单位分别为m/s、m/min和(°)。气流速度的测试仪器有叶轮风速计、转杯风速计、热电动风速计和卡他温度计等。叶轮风速计和转杯风速计适用于舍外风力较大气流速度的测试;热电动风速计是一种测试微风的仪表,最小可测0.95 m/s的风速,是畜舍内最常用的种气流测试仪器;卡他温度计是一种测试微风的速度计,可测试1 m/s以下的风。

气流测试过程中,首先测定进、排气口的气流速度,以确定畜舍的通风量;其次将畜舍长短轴方向分别均匀地分割成5个断面,确定25个测点,然后再选取3个水平面,测定整个舍内的气流分布。气流方向可用香烟或线香观察,也可用氯化铵烟雾测定。

(4)光照测试 畜舍中常用的光学量是光强、照度和光照时数。光强是单位时间投射与光线垂直的单位面积上的辐射能,单位为 W/cm^2 ;照度是单位面积上所投射的光通量,单位是lx。

光照测试仪器有光度计和照度计。光度计用于测定光源的光强,研究种植业光合作用时常此类仪器。照度计适用于畜舍测试。相对照度计是测试两个环境间光照度比值的仪器。

积光仪是测试一段时间内照度累积值的仪器,其显示器用电流表显示瞬间照度值,计数器记录照度累积值。测试根据感光原理进行。光照首先通过家畜的眼睛刺激脑垂体,控制采食或释放激素,因此测试高度应与家畜的眼睛保持相同的水平,测试范围应在家畜经常活动区,测试内容主要是光照强度和光照时数。

(5)有害气体测试 畜舍内空气中的有害气体,如 CO_2 、 NH_3 、 H_2S 、CO等,对人

和家畜有直接危害,需要经常进行监测和调控。

气体测试方法有物理监测和化学分析等。物理方法时效快,有利于调控,但目前气敏元件缺乏,精确度差,因此主要采用化学方法测试。常用仪器有热导式气体分析仪、红外线气体分析仪、磁氧式气体分析仪和干涉式气体分析仪等。这些仪器结构复杂,精度高,价格昂贵,多用于一些实验室。生产单位多采用检气管,其价格便宜,操作简单,按色层原理、试剂消量和有关公式进行计算后,可求出有害气体的浓度。

(6)尘埃测试 尘埃的计量单位有 mg/m^3 和 $\text{粒}/\text{m}^3$ 。测试仪器有光电脉冲粒子(尘粒)计数器、尘埃浓度测定仪等。

测试方法主要有质量法和密度法。这2种方法都要用滤膜采样装置。含尘空气通过滤膜时,被阻留在滤膜上,质量法是根据流量及采样前后滤膜的质量计算出单位体积空气中的含尘量(mg/m^3);密度法是根据流量及滤膜上积尘数量,计算出单位体积空气中的含尘量($\text{粒}/\text{m}^3$)。测点高度一般取动物的呼吸高度。

1.1.2.2 温室环境监控

与作物生长相关的环境因子众多,主要包括:

1)养分。

2)水分。光合作用需要水分参与,但其量很小,细胞中之水分应已足够。造成植物体水紧迫的主要原因在于气孔关闭。

3)空气湿度。空气中湿度太低会造成气孔的关闭,维持高湿可使叶片舒展,气孔全开。

4)空气温度。温度增加,光合作用、呼吸作用加速,新陈代谢增加,叶温增加,水分蒸散亦增加。

5)土壤温度。低温会影响水分与营养的吸收,水培养液之饱和溶氧量亦随水温之增加而降低。

6) CO_2 含量。已知增施 CO_2 可促进作物生长、增加产量与增进品质。所谓增进品质系指较长且厚的茎干、较大且厚的叶片、花朵或果实;所谓增加产量系指增加花朵或果实数量或干物重。另外,增加 CO_2 的同时应补光,对幼苗需供给充足的水分与肥料。

7)光强度。加光会增加叶面温度,可加速同化作用,气孔会打开,更可加强 CO_2 的吸收。同样因为气孔打开,水分可轻易地蒸腾,所以要注意水分的供应。若空气中湿度太低,或水分来不及补充,则气孔会关闭,补光、增施 CO_2 都无法促进光合作用。