

设施农业

土壤特性与改良

张乃明 常晓冰 秦太峰 编著



化学工业出版社

- 云南省“十五”科技攻关项目（2001NG35）
- 云南省自然科学基金重点项目（2003C0006Z） 资助出版
- 教育部重点项目和教育部“春晖计划”项目

设施农业土壤特性与改良

张乃明 常晓冰 秦太峰 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

设施农业土壤特性与改良/张乃明, 常晓冰, 秦矾峰
编著. —北京: 化学工业出版社, 2008. 5
ISBN 978-7-122-02550-0

I. 设… II. ①张…②常…③秦… III. ①保护地栽
培-土壤-特性②保护地栽培-土壤改良 IV. S62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 051267 号

设施农业土壤特性与改良

张乃明 常晓冰 秦矾峰

责任编辑: 刘兴春
责任校对: 凌亚男

文字编辑: 林 丹
装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张 13¼ 字数 315 千字 2008 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

前 言

代表现代农业发展方向的设施农业在我国得到迅猛发展,全国设施栽培面积已突破 $200 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 成为世界上设施栽培的第一大国。但是,随着设施农业的快速发展,无论是北方的温室还是南方的塑料棚都普遍出现土壤质量退化、连作障碍严重等一系列问题,并已成为设施农业持续发展的瓶颈。

解决设施农业土壤的质量退化与连作障碍是土壤科学工作者责无旁贷的任务。云南农业大学资源与环境学院是国内较早开展设施农业相关问题研究的学术研究机构之一,先后主持承担了云南省“十五”科技攻关项目“设施条件下关键栽培技术研究”、云南省自然科学基金重点项目“设施农业土壤环境质量演变机理研究”、教育部重点项目“设施土壤盐分累积与控制技术研究”、教育部“春晖计划”项目“设施花卉栽培土壤连作障碍控制技术研究”等多项科研项目。呈现在读者面前的《设施农业土壤特性与改良》一书,全面、系统地介绍设施土壤温度、水分、有机质、酸化、养分、重金属累积、微生物区系等特性的变化特征与调控措施,特别对设施土壤酸化防治、盐化改良和重金属污染修复提出实用防治技术。在本书的编写过程中重视了基础理论与生产实际的有机结合,首次提出设施土壤学的概念、研究内容和研究方法,可以说这本书既是我们多年从事相关研究工作的总结,也是国内第一部论述设施农业土壤问题的专著,希望该书的出版对我国设施土壤科学研究和设施农业健康与持续发展起到积极的推动作用。

全书共分十章,第一章由张乃明编著,第二、第三章由常晓冰编著,第四、第五、第八章由常晓冰、张乃明编著,第六、第七章由邓玉龙、秦太峰编著,第九、第十章由常晓冰、苏友波、秦太峰编著。

本书在编著过程中参阅了国内外相关领域许多专家、学者发表的文献和研究成果,化学工业出版社给予了大力鼓励和帮助,邓玉龙、文波龙、王涛、任国、曹娜、程文娟、孟丽霞、于秀芳、侯焱焱等同志承担了大量的资料查阅与文字输入工作,在此一并表示衷心的感谢!

限于时间与水平,书中不足之处在所难免,敬请读者提出修改建议。

编著者

2008年2月于春城

目 录

第一章 绪论.....	1
第一节 设施农业与设施土壤	1
一、设施农业发展概况	1
二、设施土壤与设施农业	4
第二节 设施土壤研究进展	5
一、设施土壤物理性状的研究	5
二、设施土壤有机质	6
三、设施土壤盐分和电导率	6
四、设施土壤酶活性	8
五、设施土壤质量及评价	9
第二章 设施土壤温度变化	10
第一节 温室大棚设施环境温度.....	10
一、温室大棚设施内的气温.....	10
二、温室大棚设施土壤温度.....	12
第二节 大棚土壤温度变化对栽培	
作物的影响.....	12
一、主要设施栽培作物对温度	
适应的生态类型.....	12
二、温度对设施栽培作物生长	
发育的影响.....	13
三、高温及低温障碍.....	15
四、常见设施栽培作物对温度	
的要求.....	16
第三节 设施温度对作物产量和	
品质的影响.....	20
一、温度对蔬菜产量和品质的	
影响.....	20
二、温度对花卉产量和品质的	
影响.....	23
第四节 设施环境温度的调节.....	28
一、温室大棚保温的原理与措施.....	28
二、温室大棚加温的原理与措施.....	30
三、温室大棚降温的原理与措施.....	32
四、温室大棚变温的原理与措施.....	33
第三章 设施土壤水分运动与管理.....	35
第一节 大棚土壤水分运动的	
基本特征.....	35
一、大棚土壤水分运动特性.....	35
二、大棚土壤水分蒸发.....	39
三、大棚土壤水分运动对土壤	
理化性质的影响.....	41
第二节 设施土壤水分运动的	
生态意义.....	47
一、大棚土壤水分运动与	
农业生产.....	47
二、大棚土壤水分运动对地表水	
影响.....	57
三、大棚土壤水分运动对棚内	
CO ₂ 循环的影响	59
第三节 设施土壤水分管理.....	61
一、大棚土壤水分测定方法.....	61
二、大棚土壤水分管理.....	63
第四章 设施土壤有机质及其变化.....	69
第一节 土壤有机质概述.....	69
一、土壤有机质的组成.....	69
二、土壤有机质的转化.....	69
三、土壤腐殖质的基本特性.....	70
第二节 大棚土壤有机质.....	70
一、大棚土壤有机质研究进展.....	70
二、大棚土壤有机质变化特征.....	71
第三节 大棚土壤有机肥的施用.....	72
一、秸秆类.....	73
二、粪尿类和厩肥.....	73

三、饼肥·····	74	演变特征·····	76
四、泥炭·····	75	一、不同年限设施土壤有机质含量的变化特征·····	76
五、生活垃圾·····	75	二、不同年限设施土壤有机质组分的变化特征·····	77
六、污水污泥·····	75		
第四节 不同年限大棚土壤有机质			
第五章 设施土壤酸化与防治 ·····	78		
第一节 设施土壤 pH 值与酸化·····	78	变化特征·····	84
一、土壤酸碱性·····	78	三、大棚土壤 pH 值不同层次剖面变化特征·····	84
二、设施土壤酸化的成因及危害·····	78	四、大棚土壤 pH 值分级特征·····	85
第二节 北方日光温室土壤 pH 值变化·····	79	五、不同轮作条件下大棚土壤 pH 值的变化特征·····	86
一、不同区域日光温室土壤 pH 值变化特征·····	79	第四节 影响设施土壤酸化的因素与形成机理·····	87
二、不同栽培年限日光温室土壤 pH 值变化特征·····	80	一、影响设施土壤酸化的因素·····	87
三、不同层次温室土壤 pH 值变化特征·····	82	二、设施土壤酸性的形成机理·····	88
第三节 南方塑料大棚土壤 pH 值变化·····	83	第五节 设施土壤酸化的防治·····	90
一、大棚土壤 pH 值不同区域的变化特征·····	83	一、施入碱性物质改良·····	90
二、大棚土壤 pH 值不同年限		二、增施有机肥·····	90
		三、配方施肥·····	91
		四、培育和选择耐酸作物品种·····	91
第六章 设施土壤盐分累积与改良 ·····	92		
第一节 大棚土壤盐化特征·····	92	效应·····	100
一、大棚耕层土壤盐分累积和电导率特征·····	92	一、大棚土壤积盐后的表现·····	100
二、大棚耕层土壤盐分离子的组成特点·····	93	二、大棚土壤硝酸盐对土壤肥力的影响·····	100
第二节 大棚土壤盐分剖面累积规律·····	94	三、土壤硝酸盐与地表水的 N 污染及水体富营养化·····	101
一、不同年限大棚土壤全盐累积特征·····	94	四、土壤中硝态氮的淋洗与地下水污染·····	102
二、不同区域大棚土壤八大离子的组成特征·····	96	第四节 设施土壤盐渍化改良与调控·····	105
三、大棚土壤盐害的形成原因及累积特征·····	98	一、设施土壤次生盐渍化的预防·····	106
第三节 大棚土壤盐分累积的环境		二、设施土壤次生盐渍化治理·····	109
第七章 设施土壤养分状况与肥力评价 ·····	110		
第一节 设施土壤氮素含量与分级·····	110	与分级·····	110
一、南方大棚土壤氮素含量		二、北方日光温室土壤氮素变化特征·····	113

第二节 设施土壤磷素含量	与分级	131
一、南方大棚土壤磷素含量	与分级	132
二、北方日光温室土壤磷素含量	与分级	134
第三节 设施土壤钾素含量	与分级	126
一、南方设施土壤钾素		126
二、北方日光温室土壤钾素含量	与分级	129
第四节 设施土壤有机质含量		
第五节 设施土壤质量评价		139
一、大棚土壤 N、P、K 的动态变化		139
二、单因子指数法评价		140
三、内梅罗综合指数法评价		141
四、设施土壤建议标准制定		142
第八章 设施土壤重金属污染与修复		143
第一节 设施土壤重金属污染来源		143
一、化肥、农药的大量使用		143
二、塑料薄膜的使用		143
三、利用污水灌溉		144
四、生活垃圾堆肥的施用		144
第二节 设施土壤重金属污染危害		145
一、土壤汞 (Hg) 污染的危害		145
二、土壤镉 (Cd) 污染的危害		146
三、土壤铅 (Pb) 污染的危害		147
四、土壤铬 (Cr) 污染的危害		147
五、土壤砷 (As) 污染的危害		148
第三节 设施土壤重金属累积状况		149
第四节 设施土壤水分运动对重金属累积的影响		151
一、重金属在土柱中的分布		151
二、淋滤液中重金属浓度的变化及对浅层地下水的污染风险		152
第五节 设施土壤重金属污染的预防与修复		154
一、预防设施土壤重金属污染		154
二、重金属污染设施土壤的治理与修复		154
第九章 设施土壤微生物区系与酶活性		157
第一节 土壤微生物的种类		157
一、细菌		157
二、真菌		157
三、放线菌		157
四、藻类		158
五、原生动物		158
第二节 设施土壤环境条件对微生物的影响		158
一、温度		158
二、湿度		158
三、pH 值		158
四、通气状况		159
第三节 温室大棚设施土壤微生物区系特征		159
一、设施土壤微生物区系的区域变化		159
二、设施栽培年限对土壤微生物区系的影响		159
三、施肥对大棚土壤微生物区系的影响		160
第四节 土壤中的酶与设施土壤酶活性		161
一、土壤中酶的种类、来源、存在状态		161
二、土壤酶的分布		162
三、与土壤质量高度相关的酶的筛选及其活性的测定		163

四、设施农业土壤中酶活性的研究	163	五、肥料配合施用对设施土壤酶活性的影响	169
第十章 温室大棚设施栽培作物的营养与施肥	171		
第一节 香石竹的营养与施肥	171	三、番茄需肥规律	182
一、香石竹的生物学特性	171	四、番茄施肥技术	183
二、香石竹对环境条件的要求	171	第六节 黄瓜的营养与施肥	184
三、香石竹的需肥规律	171	一、黄瓜的生物学特性	184
四、香石竹水肥管理	172	二、黄瓜对环境条件的要求	184
第二节 玫瑰的营养与施肥	173	三、黄瓜需肥规律	186
一、玫瑰的生物学特性	174	四、黄瓜施肥技术	186
二、玫瑰对环境条件的要求	174	第七节 西葫芦的营养与施肥	187
三、玫瑰需肥规律	174	一、西葫芦的生物学特性	188
四、玫瑰施肥	175	二、西葫芦对环境条件的要求	188
第三节 百合的营养与施肥	176	三、西葫芦需肥规律	189
一、百合的生物学特性	176	四、西葫芦施肥技术	190
二、百合对环境条件的要求	176	第八节 西芹的营养与施肥	191
三、百合需肥规律	177	一、西芹的生物学特性	191
四、百合施肥	177	二、西芹对环境条件的要求	191
第四节 非洲菊的营养与施肥	178	三、西芹需肥特性	192
一、非洲菊的生物学特性	178	四、西芹施肥技术	193
二、非洲菊对环境条件的要求	179	第九节 生菜的营养与施肥	193
三、非洲菊需肥规律	179	一、生菜的生物学特性	193
四、非洲菊施水肥管理	179	二、生菜对环境条件的要求	194
第五节 番茄的营养与施肥	181	三、生菜需肥特性	194
一、番茄的生物学特性	181	四、生菜施肥技术	194
二、番茄对环境条件的要求	181		
参考文献	196		

第一章 绪 论

第一节 设施农业与设施土壤

一、设施农业发展概况

“设施农业”一词最早来源于国外,就是利用现代技术,通过农业工程手段实现人为控制环境的种植业和养殖业。近年来,发达国家设施农业已向“工厂化农业”过渡。如荷兰的计算机自控连栋大型温室、以色列的半自动连栋塑料大棚以及法国、日本等国家的植物生产工厂。设施农业关键作用,就是能解决农业生产若干必需的气候条件,包括光、温、水、热、气等在区域和季节匹配上的不理想。我国设施农业的特点则在于适合中国国情的简易日光节能温室和塑料大棚的发明和大面积的迅速推广。实际上设施农业是在不适宜生物生长发育的环境条件下,通过建立结构设施,在充分利用自然环境条件的基础上,人为地创造生物生长发育的生境条件,实现高产、高效的现代化农业生产方式。因此,设施农业不仅代表着现代农业的发展方向,而且在一定意义上设施农业的发达程度已成为衡量一个国家或地区农业现代化水平的重要标志之一。

我国农业的发展面临人口不断增加、耕地不断减少、生活水平不断提高三个不可逆转的巨大压力,目前我国人均耕地为 0.11hm^2 ,仅为世界平均数的 $1/3$,到 2010 年,我国的人均耕地占有量将降到国际规定的人均耕地警戒线 0.0533hm^2 以下,要满足人口不断增加对农产品的需求,必须利用有限的土地产出更多的农产品,也就必然要求设施农业在规模和技术上得到更加快速的发展,可以说发展设施农业是缓解我国人多地少矛盾的必然选择。

1. 国际设施农业发展历程

设施农业是科技含量高,高投入、高产出、高效益的集约化生产方式,目前代表设施农业最高水平的“植物工厂”已在日本、美国建成,可实现在智能控制条件下按设计工艺流程周年均衡生产。荷兰已研制出对设施光、温、水、气等环境进行综合调控的模拟模型软件,可根据作物对环境的不同需求,由计算机对设施内的环境因子进行自动监测与调控,使设施土壤连作障碍不成为影响作物生长的限制因子。以色列在设施灌溉技术方面处于世界领先地位,其高效、节水灌溉系统可把设施土壤的盐渍化程度控制在很低水平。

国外设施农业发展的新趋势可概括为以下 4 个方面。

(1) 种苗产业非常发达 种苗的培育和产业化是设施农业得以快速发展的基础。荷兰、日本、以色列、韩国等非常重视温室运用品种选育,能为温室提供专用的耐低温、高温、寡照、高湿,具有多种抗性,优质高产的种苗。如荷兰境内有 130 个种苗专营公司,种质资源有强大优势,在脱毒、快繁等方面有很高的技术水平。荷兰是世界四大种子出口国之一,有 4900 个品种, 1200hm^2 生产面积,种子出口达 100 多个国家。日本、韩国、以色列的蔬菜种子在我国也有较大面积的种植,均有良好的表现。

(2) 单产水平高 工厂化农业是设施农业发展的最高形式,其显著特点就是单产水平高。荷兰温室番茄年产量达到 $40\sim 50\text{kg}/\text{m}^2$,黄瓜年产 $60\text{kg}/\text{m}^2$,商品率高达 90% 以上,86% 的产品销往世界各地。日本、以色列、韩国、西班牙等国单位面积优

质蔬菜产出率亦相当高,因而农户收入水平也相应提高。例如荷兰 420hm² 蔬菜温室,以生产番茄、黄瓜、甜椒为主,产值高达 12 亿~14 亿美元。

(3) 温室日趋大型化 大型温室设施具有投资省、土地利用率高、室内环境相对稳定、节能、便于作业和产业化生产等优点。如荷兰在 1975~1995 年间,经营 0.01~0.5hm² 温室面积的农户由 5900 户降至 1660 户;而经营大于 2hm² 的农户由 101 户增至 442 户;经营总户数 9770 户下降至 4690 户;平均每户经营面积由 0.48hm² 增至 0.9hm²。表现出经营农户减少,面积增加,设施日趋大型化、规模化、连片产业化生产的趋势。

(4) 计算机智能化温室综合环境控制系统开始普及 设施农业的核心是对设施内栽培环境能有效地控制,进行机械化与自动化生产,营造适于作物生长的最佳环境条件,计算机智能化调控装置系采用不同功能的传感器探测头,准确采集设施内室温、叶温、地温、室内湿度、土壤含水量、溶液浓度、CO₂ 浓度、风向、风速以及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后显示出来,根据作物生长所需最佳条件,由计算机智能系统发出指令,使有关系统、装置及设备有规律运作,将室内温、光、水、肥、气等诸因素综合协调到最佳状态,确保一切生产活动科学、有序、规范、持续地进行。计算机有记忆及查询功能、决策功能,为种植者全天候 24h 提供帮助。采用智能化温室综合环境控制系统不仅可使运作节能 15%~50%,而且还能节水、节肥、节省农药,提高设施栽培作物的抗病性。

2. 国内设施农业发展概况

早在 2000 多年前我国就有利用暖房栽培葱、韭菜供皇室御用的记载,这可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。我国真正意义上的设施农业则在于适合中国国情的简易日光节能温室和塑料大棚的发明和大面积的推广应用,设施类型呈现多样化。

中国温室生产的整体水平与世界上发达国家相比差距较大,无论在设施结构、配套设施、环境调控与栽培管理技术、专用良种的培育等方面均如此。从建筑材料和结构上分类,目前以塑料温室为主,玻璃温室很少。在南方目前以单栋或连栋的简易塑料温室(或塑料大棚)居多,北方则以一面坡式节能型日光温室为主。中国的塑料温室是伴随着国产塑料工业的出现逐步发展起来的。1963 年国产聚氯乙烯膜投入使用,在水稻育秧和蔬菜早熟栽培上广泛应用,到 1965 年塑料小拱棚已在中国大部分省市自治区推广应用。1966 年吉林省长春市建成我国第一个塑料大棚,从此中国进入了塑料温室发展的新时代。

随着塑料薄膜的普及与应用,逐步演变成圆拱一面坡式日光温室。20 世纪 80 年代,经过中国辽南一带广大农民和科学工作者的改良创新,逐步形成了目前的结构形式。该类温室采用了后墙和草苫覆盖作为主要保温措施,在北纬 43°以南地区的冬季与春季,基本不加温就可实现黄瓜和番茄等蔬菜的生产,并可达到较高的产量。冬季不加温的温室生产方式,不仅符合中国能源紧缺的现状,也极大地缓解了中国北方寒冷地区蔬菜淡季供求矛盾,改变了中国(尤其是北方地区)已往冬、春季节蔬菜供应不足且主要以冬贮大白菜、土豆和萝卜作为当家菜的局面,形成了蔬菜淡季不淡、种类齐全、四季常青的良好势头。节能型日光温室的出现是我国园艺发展史上的重大突破,闯出了一条适合中国国情的设施农业发展之路,令世人所瞩目。

温室大棚基本骨架结构从最简单的木(竹)制结构到钢架结构,后墙体从最廉价

的土（坏）堵到砖体或水泥板等。从分布区域来看，主要在华北、东北和黄淮流域地区发展较快，山东占 36.5%，河北占 29%，河南占 15%，辽宁占 12.7%，南方一些地区拥有 5% 左右的遮阳网和塑料大棚，西北地区（主要包括陕西、青海、宁夏、甘肃、新疆和山西等省市自治区）所占的比重相对较少。从总体上来看，西北地区设施农业的发展速度相对较慢，设施栽培面积和技术水平与发达地区差距明显，且普遍存在规模小、技术落后以及产前、产中、产后环节不配套以及产量、品质和经济效益较低等诸多问题。但西北地区发展设施农业所具备的资源优势也是非常明显的，不仅光照条件优越而且冬季也不十分寒冷，对发展日光温室较为有利。另外，山西等地还可利用地理位置和交通条件的优势，其农产品在满足本地区供给的同时，还可向京津等毗邻地区扩大市场，因此将成为发展设施农业的热点地区。

目前，我国设施栽培的主要类型包括中小塑料拱棚、塑料大棚、日光温室和现代大型连栋温室。中小塑料拱棚和塑料大棚主要用于春提前、秋延后的保温栽培，南方地区多用于夏季的遮阴栽培；日光温室用于北方地区的越冬保温栽培；现代大型温室用于各地区周年栽培。设施栽培的作物，主要是各类蔬菜、花卉、瓜果和中草药。

国内温室大棚设施按外形不同可分为单屋面、双屋面、复折屋顶形、圆屋面形等几类，见图 1-1。

目前生产中应用的塑料大棚，按棚顶形状可以分为拱圆形和屋脊形，但我国绝大多数为拱圆形，见图 1-2。

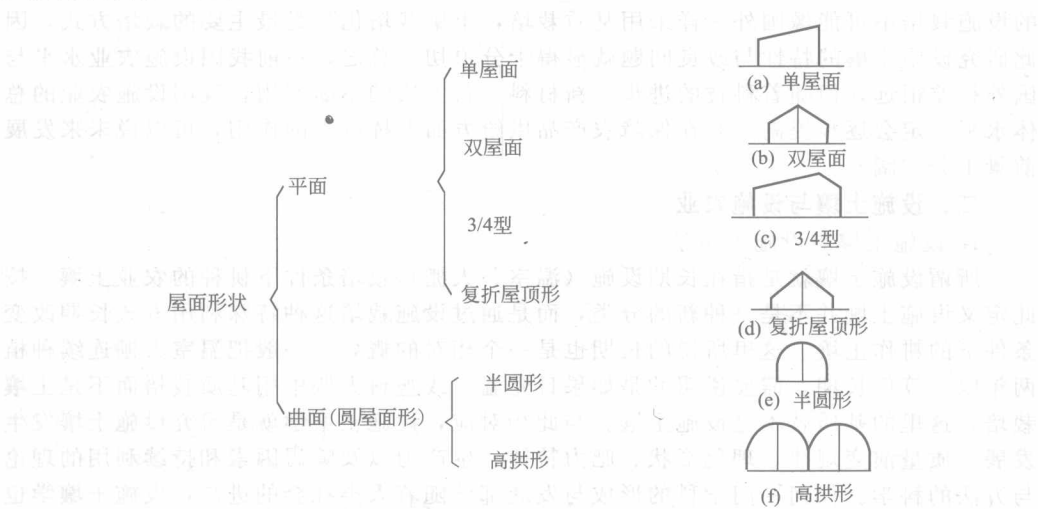


图 1-1 各种温室和大棚的屋面形状简图

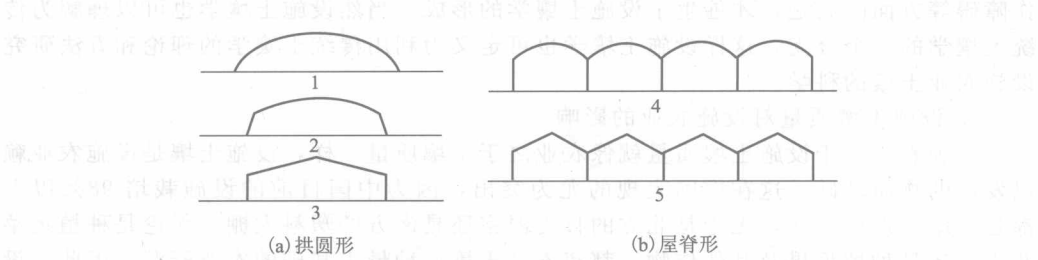


图 1-2 塑料薄膜大棚的类型

3. 未来设施农业发展前景

设施农业是科技含量高、高投入、高产出、高效益的集约化生产方式，国外发展速度很快，世界上比较规范的设施农业面积已达 $80 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。荷兰、日本、以色列、美国、韩国、西班牙、意大利、法国、加拿大等国家设施农业十分发达，其设施设备标准化程度、种苗技术及规范化栽培技术、植物保护及采后加工商品化技术、新型覆盖材料开发与应用技术、设施综合环境调控及农业机械化技术等有较强的水平，居世界领先地位。日本、荷兰、美国等发达国家能为温室提供专用的耐低温、高温、高湿，具有多种抗性、优质高产的种苗，在脱毒、快繁等方面有很高的技术水平。荷兰农产品出口额达 400 亿美元，日本、以色列、韩国、西班牙等国优质蔬菜产出率亦相当高，以色列花卉出口量位居世界第二。计算机智能化温室综合环境控制系统开始普及。利用此系统可准确采集设施内室温、叶温、地温、湿度、土壤含水量、溶液浓度、二氧化碳浓度、风向、风速以及作物生长状况等参数，将室内温、光、水、肥、气等诸多因素综合，直接协调到最佳状态，可节能 15%~50%，并有节水、节肥效果。随着人口增加和耕地的减少，人地矛盾将进一步加剧，在有限的耕地上生产出更多的农产品以满足人类的需要，发展设施农业是必然的选择，因为设施栽培比露地栽培至少可多种 1~2 茬，产出和收入能够成倍增加。

我国的设施农业虽然起步较晚，但发展速度很快，据不完全统计全国各类设施栽培面积已突破 200hm^2 ，并已成为名副其实的设施栽培第一大国。但国情决定了我国的设施栽培不可能像国外一样采用基质栽培，土壤栽培仍将是最主要的栽培方式，因此研究设施土壤的特性与改良问题就显得十分迫切。总之，目前我国设施农业水平与国外相差很远，但随着科技的进步、新材料、新方法的不断应用，我国设施农业的总体水平一定会逐步提高，并在保障农产品供给方面发挥巨大的作用，可以说未来发展前景十分广阔。

二、设施土壤与设施农业

1. 设施土壤与设施土壤学

所谓设施土壤就是指在长期设施（温室、大棚）栽培条件下耕种的农业土壤，按此定义设施土壤并不是一种新的分类，而是通过设施栽培这种特殊利用方式长期改变条件下的耕作土壤。这里所说的长期也是一个相对的概念，一般把温室大棚连续种植两年以上算作长期。需要说明的是如果日光温室或塑料大棚中用基质栽培而不是土壤栽培，这里的基质就不是设施土壤。与此相对应，设施土壤学就是研究设施土壤发生发展、质量演变规律、理化形状、肥力特征、生产力以及障碍因素和持续利用的理论方法的科学。任何一门学科的形成与发展都伴随着人类社会的进步，设施土壤学也不例外，正是近年来设施农业的迅猛发展，设施栽培土壤出现了一系列质量退化与连作障碍等方面的问题，才催生了设施土壤学的形成。当然设施土壤学也可以理解为传统土壤学的一个分支，这样设施土壤学也可定义为利用传统土壤学的理论和方法研究设施农业土壤的科学。

2. 设施土壤质量对设施农业的影响

设施农业之于设施土壤质量就像农业之于土壤质量一样，设施土壤是设施农业赖以发展的物质基础，这在中国表现的尤为突出，因为中国目前的设施栽培 98% 以上都是土培。众所周知，无论是北方的日光温室还是南方的塑料大棚，无论是种植蔬菜花卉，还是种植瓜果及其他作物，都离不开土壤这种最为基础的农业资源。因此，设施土壤质量的优劣直接影响设施栽培作物的产量与品质，更影响到设施农业的可持续

发展。

我国土壤学研究工作在过去几十年主要集中在土壤发生、分类和制图（特别是土壤资源清查）；土壤基本物理、化学和生物学性质（特别是土壤肥力性状）；土壤资源开发利用与改良（特别是土壤培肥，盐渍土和红壤的改良）等方面。这些工作虽然在广义上与土壤环境质量演变科学密切相关，但直接以土壤环境质量演变退化为主题的研究工作主要集中在最近 10 多年，其中又以热带、亚热带土壤质量退化研究工作较为系统和深入。代表现代农业发展方向、以高技术、高投入、高产出为特征的高度集约化的设施农业近年来在我国得到迅猛发展，而针对设施农业土壤质量演变开展的研究工作才刚刚起步。纵观国内外以往土壤环境质量领域的研究工作有以下特点：①研究的空間尺度大，一般为国家级、大的地貌类型或某种主要的土壤类型区，几乎未涉及设施农业土壤这一特殊的土壤类型；②研究内容比较单一，往往偏重于单项指标及单个过程（如干旱、土壤侵蚀、土壤肥力下降）的研究；③土壤环境质量特别是设施农业土壤环境质量综合评价指标体系的研究基本处于空白；④对土壤质量退化演变机制及演变过程的多因素相互作用研究不够；⑤主要农业措施对设施土壤物理、化学、生物学性质的影响以及可持续利用调控模式等方面尚未开展系统研究。

但是随着设施栽培年限的不断增加，设施农业土壤质量退化日趋严重，普遍出现设施土壤次生盐渍化、有害元素累积、土壤养分失调、微生物区系破坏、土传病害加重、生产力下降等一系列障碍问题。这不仅直接影响设施栽培作物的产量、品质和农民收入，而且严重制约着设施农业的可持续发展。

目前我国设施农业土壤质量问题可以概括为以下几个方面的问题：①过量施肥导致设施土壤板结、盐分累积逐渐增加、次生盐渍化问题严重；②长期单一连种同一种作物导致设施土壤的养分失调问题；③生理酸性肥料和大量未腐熟有机肥的施用使得设施土壤酸化问题逐渐出现；④高温、高湿长期连作导致大棚温室设施土壤的微生物多样性减少、微生物区系破坏和土传病害增加；⑤大棚温室土壤一些有害元素及农药的累积造成设施土壤污染问题也开始出现。

第二节 设施土壤研究进展

一、设施土壤物理性状的研究

设施土壤的物理性质是影响土壤质量的重要方面，土壤水分、空气、温度、质地都属于物理性状。国内外已有研究主要集中在设施土壤水分、温度等方面。许多研究表明，充足的水分是设施作物高产的重要因素，适当的提高地温有利于蔬菜作物的体内物质的积累，增加收益。而有关设施土壤的容重、质地的研究国外报道较少，Moroke 等通过温室盆栽试验研究表明，加入一种土壤调节剂可改变土壤容重；Nadler 也通过调节剂的加入研究其对土壤质地的影响，主要是调节剂对土壤结构的改善作用；国内赵凤艳等的研究发现，设施栽培土壤与露地相比，设施土壤的容重降低了 $0.07 \sim 0.1 \text{ g/cm}^3$ ；谢学东等发现土壤质地也会随着设施栽培的应用而改变，可能与化肥大量施用引起的土壤板结有关。设施土壤容重是自然累积状态下单位容积土体的质量，可以反映设施土壤的孔隙度和储水量；设施土壤的质地可以反映其颗粒组成、保水、保肥能力，两者均是设施土壤重要的物理指标。总体来看，针对设施土壤容重、质地等物理性状的研究目前比较零散，已有的一些结果都是在局部实施的，在研究深度和覆盖面上远远不够多。

二、设施土壤有机质

土壤有机质既是植物矿质营养和有机营养的源泉,又是土壤中异养型微生物的能量物质,也是影响土壤结构的重要因素。它对土壤的保肥性、保水性、缓冲性、耕性和通气性等都有直接的影响,因而是衡量设施土壤质量的一个十分重要的指标。

已有研究表明,大棚土壤有机质含量较20世纪80年代中期的露地土壤有较大幅度提高。汪建飞等和赵凤艳(2000)的研究结果表明,设施土壤有机质含量高于相应的露地土壤,并且随着种植年限的加长而有增加的趋势,且增加速度因区域、母质类型及栽培作物的不同而有所差异。传统观点认为,土壤有机质含量的增加有利于土壤理化性状的改善和提高土壤肥力,但实际上土壤有机质含量的增加有利也有弊。一方面为大棚蔬菜的高产优质生产创造良好的条件;另一方面,当其过量增长时,有机质分解过程中产生的有机酸、热和局部高浓度的铵盐也会影响蔬菜、作物的正常生长。

张锐等的研究表明,有机质含量高的土壤,能减少土壤水分蒸发,抑制盐分积累,并且由于土壤有机胶体对盐离子具有吸附作用,可以降低盐渍土中土壤盐分的活性,有机质对土壤次生盐渍化具有改良作用。李小刚等从土壤物理性质方面说明了秸秆还田后形成的土壤有机质对盐化土壤结构有改良作用。土壤有机质可提高土壤有机碳的含量,就可使其他土壤组分的有机碳含量提高,以促进土壤的团聚,使土壤结构的稳定性增加,在一定程度上解释了秸秆改良盐化土壤结构的机理。综上所述,国内许多学者对设施土壤中有机质的研究主要集中在有机质的含量和增施有机肥对土壤的改良作用方面。

三、设施土壤盐分 and 电导率

1. 设施土壤盐分累积的普遍性

土壤盐分累积造成土壤溶液浓度增加,使土壤的渗透势加大,降低了土壤-植物根系-植物叶片的水势梯度,降低叶片的细胞膨压,引起气孔关闭,导致蒸腾作用、光合作用降低,作物根系的吸水吸肥能力减弱,植物生长发育不良。

设施栽培进行3~5年后,设施土壤就容易出现次生盐渍化问题。据孙松发等报道,上海市1987年以前建造的温室,一般都在使用二三年后出现严重盐害,影响到温室的继续使用。据李文庆对山东泰安、潍坊、济宁、德州等地的日光温室调查结果表明,1年大棚和3年大棚耕层土壤盐分分别是露地的1~3倍和1~6倍。刘德等对哈尔滨市近郊蔬菜大棚的调查结果表明,大棚土壤总盐量是露地的2~13倍,且随着棚龄的延长而增加,8年以上连作大棚土壤盐类浓度已达到危害作物正常生长发育的程度。天津、山东、兰州等地蔬菜保护地盐分浓度明显高于露地。云南是我国鲜切花的主要生产基地,鲜切花产量占全国的50%以上,但呈贡花卉生产基地大棚土壤60%出现了不同程度的次生盐渍化,设施土壤可溶性盐含量过高已成为设施栽培中普遍存在的障碍问题。

2. 盐离子组成及离子浓度变化

设施栽培土壤与大田土壤相比可溶性盐的组成差异显著。云南农业大学张乃明教授领导的课题组经过长期研究表明,设施土壤耕层土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NO_3^- 占全盐的比例高于大田; Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 占全盐的比例低于大田。李明霞的研究表明, Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 7种离子在山东大棚土壤中的含量较大田中的高,而 HCO_3^- 的含量变化却相反,且上述每种离子在大田与山东大棚土壤中的差异达到显著或极显著水平。其中以 K^+ 与 NO_3^- 增加速度最快,大

都为对照的 2.1~21.5 倍,这主要是连年化肥投入与硝化作用加强所致。设施土壤盐分中,阳离子以 Ca^{2+} 为主;阴离子的组成在不同区域、不同土壤中不尽相同,云南花卉基地设施土壤的盐分离子组成中以 NO_3^- 为主,其含量约占阴离子总量的 60% 以上,而且 NO_3^- 的含量随全盐量的增加而增加,也有一些阴离子组成是以 SO_4^{2-} 为主。

3. 设施土壤积盐的原因

过量使用化肥和偏施氮肥是引起土壤次生盐渍化的直接原因。大棚内土壤水分在耕层内的运行方向,除灌水后一天左右的时间外,都是向着地表的方向。灌溉虽创造了水分由上而下移动的条件,但其中大部分甚至全部仍会通过蒸腾和蒸发而逸散,故大棚内水分由下而上移动是主流。设施土壤地面蒸发强烈,土体水分沿着毛细管向上运行,形成这种上升水流。按照“盐随水来”的规律、盐分必然向表土积聚,所以说温室内特殊的水分运行方式是土壤盐分积累的动力。由于棚室覆盖期长达 10~11 个月,缺少降水淋洗,而土壤水分向上运动的程度即土壤蒸发却比露地明显强烈,因而引起盐分在表层土中累积。棚室土壤积温显著高于露地,土壤养分矿化作用明显加剧,土壤矿物分解的离子和人为施入的肥料结合起来而使土壤盐分浓度增加很快。因此,缺少雨水淋洗和土壤高矿化度是引起盐类积聚的另一主要原因。

土壤溶液浓度过高,还会造成元素之间的拮抗作用,进而影响到作物对某些元素的吸收,造成养分吸收不平衡。如氮肥过剩,分解后产生铵离子过多时,影响对 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的吸收,作物生长受到危害。土壤盐类积聚是设施土壤障碍的主要因素之一。

化肥的过量施用是造成设施土壤次生盐渍化的直接原因,但致盐的主导离子种类及其机理的研究不足,本研究从设施土壤中交换性钠离子占 CEC 的百分比以及可溶性钠离子占可溶性总盐的百分比讨论了钠离子在盐基离子中的作用。

4. 设施土壤的电导率

电导率 (EC) 是土壤盐分的一种国际通用表示方法。土壤盐分和土壤含水量是影响土壤电导率的两个最主要的因素。土壤盐分对土壤电导率升高的贡献远高于土壤含水量。土壤电导率与土壤盐分组成和浓度之间有密切关系。其中 Cl^- 、 NO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 与全盐量均有很好的相关性,其中 HCO_3^- 与全盐量均有很好的负相关性,而其他离子与全盐量呈正相关。童有为的研究结果表明,温室土壤 EC 值与全盐量和硝酸根含量均有极显著的相关性,其相关系数分别为 0.9946 和 0.9854。因此,随着设施土壤中全盐量和硝酸根浓度的升高,土壤电导率也随着上升,可根据电导率的变化直接判断土壤硝态氮的含量状况,继而作为施肥的判断标准。

冯永军等 (2001) 研究表明,山东大棚内土壤可溶性盐含量比对照 (露地) 明显增加,一般为对照的 1.34~3.74 倍,同时 0~20cm 土层明显高于 20~40cm 土层。尤以化肥施用量高 (平均 9000kg/hm²) 的几个地区盐分积累较重,土壤表层电导率大都在 1.0μS/cm 左右 (对应含盐量 4.4g/kg 左右),严重影响了作物生长及产量。而且种植年限与土壤积盐关系密切,一般种植 1~2 年的土壤表层电导率平均为 0.565μS/cm,变化范围是 0.21~1.27μS/cm,盐分累积程度较轻;达到 3~5 年,出现积盐高峰,平均电导率 1.21μS/cm,高者达 4.06μS/cm,大部分作物出现盐害。通过有机肥的施用可以降低土壤 EC 值、减轻盐类危害、降低作物硝酸盐含量,电导率与全盐有较好的相关性,是反映土壤盐害程度的重要指标。

四、设施土壤酶活性

土壤酶是一种生物催化剂，它是土壤的本质属性之一。到目前为止，已有方法能测定的土壤酶达到 60 种。这些酶参与了土壤中一切生物化学过程：腐殖质的合成与分解；有机化合物、动植物和微生物残体的水解与转化；以及土壤中有机、无机化合物的各种氧化还原反应等。这些过程与土壤中各营养元素的释放与贮存、土壤中腐殖质的形成与发育，以及土壤的结构和物理状况都是密切相关的。也就是说，土壤酶参与了土壤的发生和发育，以及土壤肥力的形成和演化的全过程。土壤酶的主要功能可归纳为以下几点：①土壤酶在腐殖物质形成中的作用；②土壤酶的碳、氮、磷等元素在生物地球化学循环中的作用；③土壤酶在保持土壤的生物化学稳定中的作用。

大量研究表明，土壤酶不但在土壤养分循环、土壤肥力形成及维持中起着重要的作用，还对农业管理活动、环境变化极其敏感，因此它能够反映土壤肥力和农田管理措施，是土壤的一个综合性生物学指标或参数，能准确快速地反映土壤-生物系统的生物活性。

早在 1926 年，Waksman 与 Dubos 就提出用土壤过氧化氢酶作为土壤肥力的指标；Kawaguchi 的研究表明，脲酶活性与土壤有机碳、全氮显著正相关；Baligar 等对两种暗红色砖红壤及四种黄红色砖红壤的研究结果表明，土壤中的焦磷酸酶、酸性磷酸酶、芳基硫酸酯酶、脲酶及脱氢酶活性与土壤中的粉砂含量呈负相关，与黏粒含量呈正相关，与 pH 值、有机碳、可交换性钾、钙、镁呈正相关。土壤酶活性与土壤性质之间的这种水量关系可以用于指导施肥。现阶段研究较为成熟的酶类为氧化还原酶类和水解酶类。有关土壤酶的研究主要集中在林地土壤以及土壤类型、肥力水平、重金属含量等单一因素对土壤酶活性的影响，而关于设施土壤酶活性的变化研究还很少。

在林地土壤上，如王成秋研究的紫色土柑橘园土壤中转化酶和脲酶的活性随土壤深度的增加显著下降；唐艳研究的银杏园土壤中脲酶、蛋白酶、转化酶活性也随土层加深而递减；赵林森等在杨树刺槐混交林上的试验表明，过氧化氢酶活性随土层加深而升高，而多酚氧化酶随土层加深不表现规律性。土壤肥力与土壤酶活性之间也有密切的联系，李双霖在研究果园土壤时得出，其脲酶活性与有机质、全氮、全钾呈显著正相关；而据孙翠玲等研究表明，在杨树混交林地上磷酸酶活性与土壤中全氮、碱解氮、全钾、速效钾及速效磷的含量呈正相关，与全磷呈负相关。

由于利用方式、环境以及人为扰动等条件的不同，在菜园土上的研究与林地土壤酶活性是不同的。於忠祥等研究表明，合肥郊区菜园土中的蔗糖酶、多酚氧化酶、淀粉酶和磷酸酶的活性与土壤中的有机质、全氮、速效氮、速效磷的相关性达到了显著或极显著水平，而脲酶的活性仅与水解氮呈显著相关，与有机质在负相关水平上达到极显著，几乎所有的酶与全磷和所有形态的钾无关。对于重金属对土壤酶活性的影响，镉、锌对脲酶、过氧化氢酶、转化酶、碱性磷酸酶四种酶活性的影响多表现为抑制作用，而铅对其多表现为激活作用。

山东农业大学贾继文等研究表明，在北方设施土壤中：①土壤的理化性质对土壤酶活性有显著影响；②设施土壤酶活性与土壤有机质关系密切，测定土壤中的过氧化氢酶、脲酶都与有机质含量达到了极显著相关；③土壤速效氮水平与脲酶活性有关，因为脲酶的作用是极为专性的，它仅能水解尿素生成氨；④影响大棚土壤过氧化氢酶活性的主要理化性状因子为有机质和阳离子交换量。实际上，土壤酶活性与土壤管理有一定的相关性，耕作、施肥、浇水、使用农药会影响土壤酶活性，大棚土壤管理状

况的特殊性必然影响着土壤酶活性变化,这种变化有待于进一步深入研究。

五、设施土壤质量及评价

长期以来,科学家对人类活动引起的空气与水环境污染给予了较多的关心。但除了本学科领域的专家外,很少有人关注人为活动对土壤质量的负面影响。直到20世纪70年代后,由于全球土壤质量退化的加剧,以及由土壤质量退化诱发的生态环境破坏和全球变化,人们才开始重视土壤质量在持续生产中的作用及其与植物、动物和人类健康之间的关系。美国土壤学会(1995)把土壤质量定义为:在自然或管理的生态系统边界内,土壤具有动植物生产持续性,保持和提高水、气质量以及支撑人类健康与生活的能力。对于设施土壤质量自然是指在温室大棚设施边界内,设施土壤具有保证保护栽培作物持续优质、高产的能力。与普通土壤相同,设施土壤质量应包括土壤肥力质量、土壤环境质量和土壤动、植物健康。土壤质量是土壤中退化性过程和保持性过程的最终平衡结果,综合了土壤的多重功能。因此,土壤质量评价指标体系应该从土壤系统组分、状态、结构、理化及生物学性质、功能以及时空等方面,加以综合考虑。

1. 选择评价土壤质量参数指标的原则

(1) 代表性(representative) 一个指标能代表或反映土壤质量的全部或至少一个方面的功能,或者一个指标能与多个指标相关联。

(2) 灵敏性(sensitive) 能灵敏地指示土壤与生态系统功能与行为变化,如黏土矿物类型对土壤生态功能与行为的变化不敏感,不宜作为土壤质量指标。

(3) 通用性(universal) 一方面能适用于不同生态系统,另一方面能适用于时间和空间上的变化。

(4) 经济性(economic) 测定或分析花费较少,测定过程简便快速。如 ^{15}N 丰度需要质谱仪进行复杂的分析,因而不宜作为土壤质量指标。

2. 土壤质量评价的指标

目前国内外科学家采用的评价土壤质量的指标体系不尽一致,可根据不同的土壤和不同的评价目的,选择不同的评价指标体系。大致可分为两类,一类是描述性指标,即定性指标,而不是定量化指标,因此被视为“软”数据,如土壤颜色、质地、紧实性、耕性、侵蚀状况、作物长势、保肥性等。农民往往通过这些描述性指标定性认识土壤质量状况,但科学家和技术人员不太重视这些指标。另一类是分析性定量指标,选择土壤的各种属性,进行定量分析,获取分析数据,然后确定数据指标的阈值和最适值。

对于设施土壤而言,高投入、高产出的生产方式决定了设施土壤氮、磷、钾等大量营养元素一般情况下并不缺乏。就肥力质量而言,突出问题是物理性状的恶化和营养元素之间的失调。从环境质量来看,设施土壤也存在各种污染物的累积和污染。设施土壤质量的优劣也可应用评价普通土壤质量的方法进行评价,但评价的指标及其标准却不适于设施土壤。针对设施土壤的实际,尽快研究出与设施农业生产相适应的评价指标体系十分迫切。