

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

# 设施农业土壤环境质量 演变规律、环境风险与管理对策

Variability of Soil Environmental Quality, Environmental Risk and  
Management Strategies in Greenhouse Vegetable Production System

◎ 黄标 胡文友 等著



科学出版社

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

# 设施农业土壤环境质量演变规律、 环境风险与管理对策

黄 标 胡文友 等 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书是作者 10 多年来开展我国设施农业土壤环境质量演变规律、环境风险与管理对策研究工作的全面总结。针对我国设施农业生产中农药、肥料、农膜等农用投入品长期、高强度使用的特点,系统介绍设施农业土壤中农药、氮磷养分、农膜、酞酸酯、重金属、抗生素等积累对土壤环境质量的影响及其演变规律,分析设施农业土壤中污染物的来源与污染清单,评价不同污染物的生态效应和环境风险。在此基础上,建立我国设施农业土壤环境管理框架体系。这些研究成果对认识我国设施农业土壤环境质量演变、环境风险以及制定设施农业土壤污染防控和环境管理对策等,具有重要的学术价值和参考意义。

本书可作为设施农业土壤污染防控与修复、设施农业安全生产与环境管理、农业环境保护、农田土地利用规划、国土资源利用等专业和领域的管理者、科研工作者、研究生等的参考书,也可作为高等院校、科研院所土壤学、环境科学、生态学、环境工程、农学等相关学科的研究生教学参考教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

设施农业土壤环境质量演变规律、环境风险与管理对策 / 黄标等著. —北京: 科学出版社, 2018.11

(环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书)

ISBN 978-7-03-058684-1

I. ①设… II. ①黄… III. ①设施农业-土壤环境-环境质量-研究 IV. ①S62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 202491 号

责任编辑: 周 丹 沈 旭 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 张克忠 / 封面设计: 许 瑞

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>

河北鹏润印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2018 年 11 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张: 19 3/4

字数: 466 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

## 编著委员会

顾 问：黄润秋

组 长：邹首民

副组长：王开宇

成 员：禹 军 陈 胜 刘海波

《设施农业土壤环境质量演变规律、  
环境风险与管理对策》著者名单

主要著者：

黄 标 胡文友 虞云龙 沈根祥 滕 应  
何 跃

著者成员（按姓氏笔画顺序）：

方 华 华小梅 何 跃 冷 欣 汪 军  
沈根祥 张艳霞 胡文友 钱小雍 高新昊  
黄 标 曹云者 章海波 虞云龙 滕 应

## 序 言

目前，全球性和区域性环境问题不断加剧，已经成为限制各国经济社会发展的主要因素，解决环境问题的需求十分迫切。环境问题也是我国经济社会发展面临的困难之一，特别是在我国快速工业化、城镇化进程中，这个问题变得更加突出。党中央、国务院高度重视环境保护工作，积极推动我国生态文明建设进程。党的十八大以来，按照“五位一体”总体布局、“四个全面”战略布局以及“五大发展”理念，党中央、国务院把生态文明建设和环境保护摆在更加重要的战略地位，先后出台了《环境保护法》、《关于加快推进生态文明建设的意见》、《生态文明体制改革总体方案》、《大气污染防治行动计划》、《水污染防治行动计划》、《土壤污染防治行动计划》等一批法律法规和政策文件，我国环境治理力度前所未有，环境保护工作和生态文明建设的进程明显加快，环境质量有所改善。

在党中央、国务院的坚强领导下，环境问题全社会共治的局面正在逐步形成，环境管理正在走向系统化、科学化、法治化、精细化和信息化。科技是解决环境问题的利器，科技创新和科技进步是提升环境管理系统化、科学化、法治化、精细化和信息化的基础，必须加快建立持续改善环境质量的科技支撑体系，加快建立科学有效防控人群健康和环境风险的科技基础体系，建立开拓进取、充满活力的环保科技创新体系。

“十一五”以来，中央财政加大对环保科技的投入，先后启动实施水体污染控制与治理科技重大专项、清洁空气研究计划、蓝天科技工程专项等专项，同时设立了环保公益性行业科研专项。根据财政部、科技部的总体部署，环保公益性行业科研专项紧密围绕《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》、《国家创新驱动发展战略纲要》、《国家科技创新规划》和《国家环境保护科技发展规划》，立足环境管理中的科技需求，积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”以来，环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目479项，涉及大气、水、生态、土壤、固废、化学品、核与辐射等领域，共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与，逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前，专项取得了重要研究成果，已验收的项目中，共提交各类标准、技术规范1362项，各类政策建议与咨询报告687项，授权专利720项，出版专著492余部，专项研究成果在各级环保部门中得到较好的应用，为解决我国环境问题和提升环境管理水平提供了重要的科技支撑。

为广泛共享环保公益性行业科研专项项目研究成果，及时总结项目组织管理经验，环境保护部科技标准司组织出版环保公益性行业科研专项经费系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果，具有较强的学术性和实用性，可以说是环境领域不可多得资料文献。丛书的组织出版，在科技管理上也是一次很好的尝试，我们希

望通过这一尝试,能够进一步活跃环保科技的学术氛围,促进科技成果的转化与应用,不断提高环境治理能力现代化水平,为持续改善我国环境质量提供强有力的科技支撑。

黄润秋

中华人民共和国生态环境部副部长

# 前 言

20世纪80年代以来,我国设施农业发展极其迅速,设施生产面积从1983年的不足1.5万 $\text{hm}^2$ 增加到2010年的近446.7万 $\text{hm}^2$ ,目前,产值超过8000亿元,创造了近7000万个就业岗位,其中,设施蔬菜种植面积占我国设施栽培面积的95%。这为园艺产品的均衡稳定供给、农民的持续增收、农业现代化水平的持续提升做出了巨大贡献。尤其近二十多年来,设施蔬菜面积更是以每年约10%的速度增长,中国现已成为世界上设施生产面积最大的国家,设施栽培占全世界的85%以上,总面积和总产量均居世界第一位。

然而,设施蔬菜生产复种指数高,农药、化肥、有机肥、农膜等投入量大,设施环境温度高、湿度大、无雨水淋洗等,这些明显不同于露天蔬菜产地的生态环境条件,易造成污染物在土壤和环境中的积累及有效性增加,从而对设施蔬菜产地生态环境及人体健康造成一定的不利影响。因此,迫切需要对设施蔬菜产地土壤环境质量及其原因进行系统分析,并提出环境管理对策,为设施蔬菜生产的可持续发展提供重要决策依据。

本书主要是在环保公益性行业科研专项项目“设施农业土壤环境质量变化规律、环境风险与关键控制技术”(No.201109018)资助下,同时结合了作者们多年积累的资料和研究成果的基础上完成的。全书共分6章,第1章绪论,介绍了设施农业的定义、国内外发展概况及设施农业环境管理的内涵和特征;第2章系统介绍了与设施农业土壤环境质量相关的土壤物理、化学和生物性质等的演变规律,以及农药、酰胺酯、重金属、抗生素等污染物的积累特征;第3章讨论了设施农业土壤中污染物的来源,并列出了各种污染物的污染清单;第4章系统评价了设施农业土壤环境质量演变的生态效应及生态风险;第5章在分析国内外设施农业发展现状和存在问题的基础上,构建了我国设施农业生产土壤环境管理框架体系,并对农用投入品的安全使用与管理对策、土壤环境标准体系的完善和建立、土壤污染综合防控的对策和技术体系构建等方面提出了具体的建议和设想;最后,第6章对今后设施农业土壤环境管理方面的工作提出了一些设想和建议。

本书第1章由黄标、张艳霞编写;第2~4章中有关设施农业土壤性质演变、养分积累、污染清单及生态效应评价方面的内容由沈根祥、钱小雍、高新昊、冷欣、黄标撰写,有关农药累积、污染清单及生态效应评价方面的内容由虞云龙、方华撰写,有关农膜及酰胺酯累积、污染清单及生态效应评价方面的内容由滕应、汪军、曹云者撰写,有关重金属累积、污染清单及生态效应评价方面的内容由胡文友、黄标撰写,有关抗生素累积、污染清单及生态效应评价方面的内容由章海波、方华撰写;第5章内容由黄标、何跃、胡文友、华小梅、虞云龙等撰写;第6章由黄标、胡文友撰写。最



终，整体书稿由黄标、胡文友编辑整理。

由于作者水平有限，尽管力求完善，但书中的缺点在所难免，恳请读者批评指正。

著 者

2017年12月30日于南京

# 目 录

序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 设施农业内涵及发展概况	1
1.1.1 设施农业的定义	1
1.1.2 设施农业的发展历程	2
1.1.3 设施农业的发展形式	3
1.1.4 国内外设施农业发展现状	4
1.1.5 国内外设施农业发展趋势	7
1.2 设施农业环境管理的内涵和特征	9
1.2.1 设施农业环境管理的概念及产生背景	9
1.2.2 设施农业环境管理研究的理论基础	10
1.2.3 设施农业环境管理与农业和环境可持续发展	12
1.3 设施农业研究区的选择和区域概况	15
1.3.1 我国设施农业生产发展概况	15
1.3.2 我国不同设施农业生产区域概况	18
参考文献	23
第 2 章 设施农业土壤环境质量状况与演变规律	25
2.1 设施农业土壤基本性质演变状况	25
2.1.1 物理性质	25
2.1.2 化学性质	27
2.1.3 土壤养分含量	30
2.1.4 生物指标	33
2.2 设施农业土壤环境质量演变状况	35
2.2.1 土壤可溶性氮的时空演变	35
2.2.2 土壤磷素的时空演变	37
2.2.3 土壤盐分的时空演变	39
2.3 设施农业土壤中农药的消解及其积累特征	39
2.3.1 农药在土壤中的消解特征	39
2.3.2 农药在土壤中的积累特征	47
2.4 设施农业土壤中酞酸酯的积累特征	52
2.4.1 我国土壤中酞酸酯的积累现状	52

2.4.2	典型设施农业区土壤酞酸酯的积累特征 .....	54
2.4.3	农膜使用方式对土壤酞酸酯积累的影响 .....	57
2.5	设施农业土壤中重金属的积累特征 .....	60
2.5.1	全国设施农业土壤重金属累积的空间分布状况 .....	60
2.5.2	南方典型塑料大棚设施土壤重金属积累特征 .....	61
2.5.3	北方典型日光温室设施土壤重金属积累特征 .....	67
2.6	设施农业土壤中抗生素的积累特征 .....	70
2.6.1	我国农田土壤抗生素污染状况 .....	70
2.6.2	设施农业土壤抗生素污染状况调查 .....	71
2.6.3	设施与非设施农业土壤抗生素污染比较 .....	74
2.6.4	不同种植年限下设施土壤抗生素的积累规律 .....	75
	参考文献 .....	77
<b>第3章</b>	<b>设施农业土壤中污染物的来源与污染清单 .....</b>	<b>82</b>
3.1	设施农业重点投入农药清单 .....	82
3.1.1	常用农药环境优先控制品种风险评价原则 .....	82
3.1.2	常用农药环境优先控制品种风险评价标准 .....	82
3.1.3	常用农药环境优先控制品种风险评价计算公式 .....	84
3.1.4	常用农药环境优先控制品种风险评估清单 .....	85
3.2	设施农业土壤中养分的来源与污染清单 .....	87
3.3	设施农业农膜及酞酸酯的来源与污染清单 .....	88
3.4	设施农业土壤中重金属的来源与污染清单 .....	90
3.4.1	设施农业土壤重金属的来源分析 .....	90
3.4.2	设施农业土壤和肥料中重金属的污染清单分析 .....	92
3.5	设施农业土壤中抗生素的来源与污染清单 .....	95
3.5.1	设施农业土壤抗生素的来源分析 .....	95
3.5.2	设施农业土壤抗生素的污染清单 .....	99
3.5.3	设施农业土壤中抗生素的污染负荷 .....	102
	参考文献 .....	105
<b>第4章</b>	<b>设施农业土壤环境质量演变的生态效应与风险评估 .....</b>	<b>108</b>
4.1	设施农业土壤环境质量演变对土壤生态功能的影响 .....	108
4.1.1	设施农业农药重复施用对土壤微生物功能和结构的影响 .....	108
4.1.2	设施农业农药重复施用对土壤遗传毒性的影响 .....	116
4.1.3	设施农业农药在土壤中的环境行为及风险 .....	117
4.1.4	设施农业抗生素污染对土壤功能和结构的影响 .....	119
4.1.5	设施农业土壤抗生素污染的微生物抗性响应 .....	124
4.1.6	设施农业土壤重金属累积趋势预测 .....	127
4.2	设施农业土壤环境质量演变对作物产量和品质的影响 .....	130

4.2.1	土壤养分高量施用对蔬菜产量和品质的影响	130
4.2.2	农药高频高量施用对蔬菜品质的影响	140
4.2.3	设施农业农膜和酞酸酯污染的植物生态效应与阈值	146
4.2.4	设施农业土壤重金属积累对农产品安全的影响	162
4.3	设施农业土壤环境质量演变对水环境的影响	167
4.3.1	设施农业肥料高投入对水环境的氮磷污染风险	167
4.3.2	基于水体安全的土壤抗生素污染的评价指标与体系	174
4.4	设施农业土壤环境质量演变对土壤动物和人体健康影响	175
4.4.1	农药施用对土壤动物健康的影响	175
4.4.2	设施农业土壤酞酸酯污染的动物健康影响效应	177
4.4.3	设施农业农膜与酞酸酯污染的人体健康风险评估	187
4.4.4	设施农业重金属积累的人体健康风险评估	190
	参考文献	196
<b>第5章</b>	<b>设施农业土壤环境质量管理对策</b>	<b>199</b>
5.1	发达国家的先进经验	199
5.1.1	大力发展无土栽培	199
5.1.2	强化污染源头控制,促进设施农业环境保护	199
5.1.3	制定农产品质量标准,加强蔬菜产品质量追踪	200
5.2	我国设施农业发展现状及问题分析	201
5.2.1	典型设施农业基地的社会状况	202
5.2.2	典型设施农业基地的经济状况	203
5.2.3	典型设施农业基地的管理现状	204
5.3	我国设施农业农用投入品使用和管理状况	206
5.3.1	设施农业农药使用和管理状况	206
5.3.2	设施农业肥料使用和管理状况	208
5.3.3	设施农业农膜使用和管理状况	213
5.4	我国设施农业土壤环境质量问题的原因	216
5.4.1	设施农业农用投入品高投入成为普遍现象	217
5.4.2	经营粗放、环境保护意识较薄弱、污染控制技术相对落后	218
5.4.3	法律法规缺失、环境质量标准不适应管理需求	219
5.4.4	生产整体规划缺乏、监管监测职责不明、体系机制缺失	221
5.5	我国设施农业土壤环境管理框架体系的建立	222
5.5.1	土壤环境管理要素	222
5.5.2	土壤环境管理措施	223
5.6	设施农业农用投入品安全使用与环境管理对策	227
5.6.1	农药安全使用与土壤环境管理对策	227
5.6.2	肥料安全使用与土壤环境管理对策	230

5.6.3 农膜安全使用与土壤环境管理对策 .....	234
5.7 设施农业土壤环境质量标准体系的建立和完善 .....	236
5.7.1 设施农业土壤环境质量的完善 .....	236
5.7.2 设施农业土壤环境质量评价标准体系框架 .....	247
5.8 设施农业土壤污染综合防控对策和技术体系 .....	254
5.8.1 土壤污染防治技术研究 .....	254
5.8.2 土壤污染防治对策和技术体系的构建 .....	283
参考文献 .....	296
<b>第 6 章 设施农业土壤环境质量演变、风险评估与环境管理研究展望 .....</b>	<b>298</b>
参考文献 .....	300

# 第1章 绪 论

## 1.1 设施农业内涵及发展概况

### 1.1.1 设施农业的定义

广义的设施农业 (greenhouse agriculture) 包括设施种植和设施养殖, 指利用农业工程手段, 通过现代设施实现部分人工控制环境的种植业和养殖业。狭义的设施农业指设施种植, 通常也称为设施园艺 (greenhouse horticulture) 或设施栽培 (greenhouse cultivation), 这也是本书论述的范围。设施农业是集生物工程、农业工程、环境工程为一体的跨部门、多学科的系统工程, 指借助一定的硬件设施对作物生长的全部或部分阶段所需的环境条件 (如光、温、水、肥、气等) 进行调节、控制或者创造, 使植物地上部和根部环境得以改善, 提高作物光能利用率, 进而增加作物产量、改善作物品质、延长作物生长季节, 并使作物在露地不能生长的季节和环境能正常生长。这在一定程度上可以使作物摆脱对自然环境的高度依赖, 是一种高效的农业生产 (Jensen and Malter, 1995; 张乃明, 2006; 李廷轩和张锡洲, 2011)。以高技术、高投入、高产出为特征的设施农业不仅代表现代农业的发展方向, 而且设施农业发展的程度已经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。

理想的设施农业旨在缓解或解决作物与其生长环境、人与自然资源及社会需求与供给等方面可能存在的矛盾, 具有鲜明的地域特征, 并与社会经济、文化发展关系密切。现代设施农业具备以下特点:

(1) 具有经济效益、社会效益、生态效益三重性。设施农业系统是典型的生态经济系统, 具有经济、社会和生态综合效益: 第一, 设施农业通过对环境条件的控制, 使农业生产摆脱自然环境的束缚, 实现周年性、全天候和反季节的规模生产, 产品产量高、品质好、生产周期短, 从而提高经济效益; 第二, 设施农业可为人们提供新鲜、奇特、健康、安全的农副产品, 满足城乡居民对农产品的市场需求, 从而取得一定的社会效益; 第三, 设施农业可使农业资源得到优化配置和高效利用, 并改善农业环境, 从而取得生态效益。

(2) 抵御风险的能力强。设施农业对农业生产的各个方面及环节, 都可以进行人为的干预和控制, 使农业生产及农产品的储藏不再受到自然条件的限制, 从而增强了抵御风险的能力。

(3) 物质和能量的投入大。设施农业是科技含量及集约化程度非常高的现代农业生产方式, 要求有大量物质和能量的投入。

(4) 知识与技术高度密集。设施农业是先进的生物技术、工程技术、信息技术、通信技术和管理技术的高度集成, 涵盖了建筑、材料、机械、通信、自动控制、环

境、栽培、管理与经营等学科领域的系统工程。通过可调控的技术手段对农业资源进行合理配置、综合调控、高效利用并使之良性循环，在环境友好的基础上达到高产、高效、优质。

(5) 地域差异性显著。设施农业生态系统具有显著的地域差异性。

### 1.1.2 设施农业的发展历程

设施农业发展历史悠久。公元前 4 世纪已有植物被种在保护地上生长的相关记载。公元初期，罗马人已利用透明的云母片覆盖黄瓜，使之提早成熟，被视为设施栽培的起源；15~16 世纪，英国、荷兰、法国和日本等国家就开始利用简易温室栽培时令蔬菜或小水果；17~18 世纪，法国、英国、荷兰等国家开始发展玻璃温室，并用火炉和热气加热玻璃温室；19 世纪初，英国学者开始研究温室屋面的坡度对进光量的影响以及温室加温设备的研发，并据此开发研制了具有双屋面的玻璃温室，主要用于黄瓜、葡萄、甜橙、柑橘、甜瓜、凤梨等的栽培；19 世纪后期，温室栽培技术从欧洲传入世界各地，其中日本、中国等国家纷纷开始研制单屋面的温室；20 世纪 60 年代，美国成功研制无土栽培技术，并成为温室栽培技术大变革的重要标志；20 世纪 70 年代初，美国已有 400hm<sup>2</sup> 无土栽培温室用于生产黄瓜、番茄等蔬菜；20 世纪 80 年代，全世界用于蔬菜生产的温室面积达 16.5 万 hm<sup>2</sup>，总产值达 300 亿美元/a；用于花卉生产的温室 5.5 万 hm<sup>2</sup>，总产值达 160 亿美元/a。这个时期，亚洲和地中海地区温室数量迅速增加。欧洲南部的温室主要生产蔬菜，而北欧的温室则主要生产附加值高的鲜花和观赏植物。

我国早在 2000 多年前，《汉书》就有记载使用透明度高的桐油纸作覆盖物进行时令蔬菜的栽培。然而，现代意义上的设施农业发展较晚，20 世纪 70 年代末至 80 年代初，温室生产得到大规模的发展，我国陆续从国外引进温室，在消化和吸收国外先进技术的基础上，以地膜覆盖、塑料拱棚和日光温室为主的保护地栽培得到了长足的发展。我国自身的温室技术和产品也在不断提高，80 年代末，基本形成温室产业的雏形；20 世纪 90 年代初，随着经济的发展和水平的提高，人们对特色菜、优质蔬菜、花卉等消费的不断增长，为满足多方面的需求，我国温室建设进入了一个新的发展阶段；90 年代后期，除了符合我国国情的经济节能型日光温室和塑料大棚外，国外先进的温室生产设施也纷纷引入我国，温室生产逐渐从北方向南方、冬季向夏季、以蔬菜业为主向果树和花卉方向迅速拓展，成为我国农家致富、丰富城乡居民“菜篮子”的有效手段，是我国农业中最富有活力的新产业之一（刘峰和张明宇，2014；张乃明，2006；滕应和骆永明，2014）。到 2013 年底，我国的温室面积已达到 200 万 hm<sup>2</sup>，较 2000 年增加了将近 190%（中国农业年鉴编辑委员会，2011），温室面积居世界第一。节能日光温室的快速发展，使反季节、超时令的设施蔬菜数量充足、品种丰富，蔬菜全年均衡供应水平大大提高。

### 1.1.3 设施农业的发展形式

由于模式选取的基点、背景条件以及目的不同,不同地区设施栽培的发展模式也有所不同。设施栽培的发展模式主要有简易覆盖型(主要以地膜覆盖为典型代表)、简易设施型(主要包括中、小拱棚)、一般设施型(如塑料大棚、加温温室、日光温室以及微滴灌系统等)和工厂化农业(玻璃或PC板连栋温室),其中以日光温室(节能日光温室、普通日光温室)和塑料大棚发展最快。简易覆盖型、简易设施型和一般设施型设施栽培农业技术含量低、粗放经营、经营规模较小;工厂化农业是设施农业的高级发展阶段,在我国尚处于试验阶段,是我国设施农业未来的发展方向。

(1)小拱棚(遮阳棚):优点是制作简单、投资少、作业方便、管理非常省事;缺点是不宜使用各种装备设施的应用,并且劳动强度大、抗灾能力差、增产效果不显著,主要用于种植蔬菜、瓜果和食用菌等。

(2)日光温室:我国科技工作者在一面坡温室的基础上不断完善提高开发出来的一种具有中国特色的温室形式。它是以太阳光为主要能源,夜间采用活动保温被在前屋面保温进行越冬生产的单屋面塑料薄膜温室。该类温室的东、西、北三面墙体和后屋面采用高保温建筑材料,在我国北方地区,正常条件下不用人工加温可保持室内外温差达 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 以上。此类温室现已推广到北纬 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 地区,是北方地区越冬生产园艺产品的主要温室形式。日光温室的优点有采光性和保温性能好、取材方便、造价适中、节能效果明显,适合小型机械作业。

(3)塑料大棚:以塑料薄膜作为透光覆盖材料的单栋拱棚,一般跨度在 $6.0\sim 12.0\text{m}$ ,脊高 $2.4\sim 3.5\text{m}$ ,长度在 $30\sim 100\text{m}$ 以上。塑料大棚内部结构用料不同,分为竹木结构、全竹结构、钢竹混合结构、钢管(焊接)结构、钢管装配结构以及水泥结构等。总体来说,塑料大棚优点是造价比日光温室要低、安装拆卸简便、通风透光效果好、使用年限较长、主要用于果蔬瓜类的栽培和种植;缺点是棚内立柱过多、不宜进行机械化操作、防灾能力弱、北方一般不用它做越冬生产。

(4)连栋温室:将多个单跨的温室通过天沟连接起来的大面积生产温室,是当今世界和我国发展现代化设施农业的趋势和潮流。连栋温室根据结构型式和覆盖材料不同,分为连栋玻璃温室、连栋塑料温室和聚碳酸酯板温室(PC板温室)。其中连栋塑料温室根据覆盖塑料薄膜的层数分为单层塑料薄膜温室和双层充气温室。PC板温室根据聚碳酸酯板材料的不同,分为PC中空板温室和PC浪板温室。温室的屋面形式有拱圆形、锯齿形和人字形等。玻璃或PC板连栋温室具有自动化、智能化、机械化程度高的特点,温室内部具备保温、光照、通风和喷灌设施,属于现代化大型温室;有采光时间长,抗风和抗逆能力强等优点;缺点为建造成本过高。

(5)工厂化农业:设施农业的高级发展阶段,即使用高科技设施材料,运用先进的工程技术手段构建与田间传统农业截然不同的生产环境,如同在工厂中进行农业生产,通常包括加热系统、降温系统、通风系统、遮阳系统、微灌系统和中心控制系统,它属于集约高效型农业。



#### 1.1.4 国内外设施农业发展现状

国外设施农业起步较早,技术较成熟,发展到现阶段,设施农业已是高科技、高投入、高产出、高效益的集约化农业。其中,代表最高水平设施农业生产的国家主要包括荷兰(林金水,2014;黄丹枫和葛体达,2008)、以色列、美国、日本(Ito,1997;van Berkel,1984;张乃明,2006;李廷轩和张锡洲,2011;滕应和骆永明,2014;郭世荣等,2012)等。发达国家设施农业呈现的特点是:不仅重视高水平的设施建设和能源投入,而且非常注重生态环境保护和资源循环利用,配有先进的设施栽培管理技术,实现全天候生产,具有先进的设施环境综合调控方法、农业机械化技术、新型覆盖材料、规范化栽培技术、采收后作物的商品化及营销手段等,并不断向高科技、自动化、智能化、网络化发展。

##### 1. 荷兰

荷兰地势平坦,降雨充足,但光照不足,土地有限,荷兰政府为使有限的土地得到高效的利用,采取了一系列符合国家气候特点和国情的农业发展战略及政策。1983~1992年间,政府实行补贴政策,从事温室生产的农户均可获得50%的政府资助,荷兰的温室农业产值一直呈上升趋势。随后,政府着重致力于农业宏观产业环境的营造,一是通过信贷政策和补贴政策,鼓励重点发展的领域和产业“快步增长”,出口创汇;二是积极参加欧盟事务;三是加强水利工程和环境保护的建设,促进荷兰农业高效、持续发展;四是在有效保护农业知识产权的基础上,加强对农业高新技术和信息网络技术方面的投入;五是帮助企业组织宣传,扩大国际交流合作。

荷兰设施农业的集约化、规模化、专业化的生产水平非常高,是世界上应用玻璃温室最先进的国家。荷兰玻璃温室面积占世界玻璃温室面积的1/4,设施温室技术先进。大多数农业企业采用集约化、规模化的生产方式,有利于设施专业化配置,降低生产成本,提高产品质量和效益。同时专业化生产促进了专业领域的研究,企业发展后劲强劲。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再成为影响作物生长的限制因子,并能全面有效地调控温室温度、光照、水分、肥料等环境条件。高效的温室设施使作物生产摆脱了自然气候的束缚,造就了荷兰发达的生态农业,其商品率高达90%以上。荷兰设施园艺规模大、自动化程度高、生产效率高,设施农业温室内的温、光、水、气、肥等均实现了智能化控制,从品种选择、栽培管理到采收包装形成了一整套完整规范的技术体系,番茄、黄瓜等实现了一年一大茬的长季节无土栽培,平均产量 $600\text{t}/\text{hm}^2$ ,创造了当今世界最高产量和效益水平。

荷兰设施农业具有高度工业化特征。由于摆脱了自然气候的影响,设施园艺完全可以实现按照工业生产方式进行产品的生产和管理。温室种植生产过程中有其特定的生产规则、生产周期、产品包装、产品销售等,因此称为工厂农业。在荷兰,工业化技术植