

向世界传播的日本农业革命

Plant Factory with
Artificial Light

人工光型 植物工厂

〔日〕古在丰树 著

贺冬仙 钮根花 马承伟 译



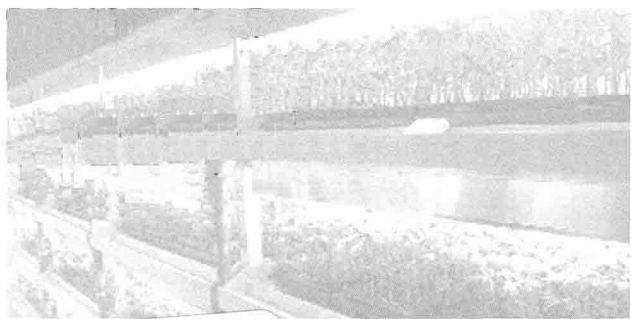
 中国农业出版社
China Agriculture Press

向世界传播的日本农业革命

人工光型植物工厂

〔日〕古在丰树 著

贺冬仙 钮根花 马承伟 译



中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

人工光型植物工厂：向世界传播的日本农业革命 /
(日) 古在丰树著；贺冬仙，钮根花，马承伟译. —北
京：中国农业出版社，2014. 11
ISBN 978-7-109-19693-3

I. ①人… II. ①古… ②贺… ③钮… ④马… III.
①人工光照明-应用-蔬菜园艺-研究 IV. ①S63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 242284 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)

(邮政编码 100125)

责任编辑 孟令洋 舒薇 郭科

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月北京第 1 次印刷

开本：880mm×1230mm 1/32 印张：7.625

字数：300 千字

定价：40.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误，请向出版社发行部调换)

中文版序

《人工光型植物工厂》即将由中国农业大学的贺冬仙和马承伟教授、美国得克萨斯州农工大学的钮根花教授翻译出版，作为原著者，我感到非常高兴。

人工光型植物工厂（以下简称植物工厂）是针对受气候影响较大的植物生产系统的一次革命性的技术变革。植物工厂中植物的生长发育几乎不受外界环境条件的影响，其环境调控和植物生长调控都能根据科学依据而进行。叶菜类植物在植物工厂的单位土地面积的年产量是露地栽培的 100 倍，而依据这种模式在日本取得经营收益的植物工厂也越来越多。

今后，随着 LED 光源照明、节电型空调、视觉识别、植物环境生理、海量数据解析等最新科技成果的应用，植物工厂实现高附加值植物的低成本化生产将成为可能。本书介绍了植物工厂领域的最新科研成果。

尽管还存在很多问题，但植物工厂必将有助于解决 21 世纪的环境、粮食和能源问题。这三大全球性问题，解决其中一个领域的问题可能带来另外两个领域问题的恶化。因此，有必要探索能够同时解决这三大问题的方法和技术。植物工厂尽管不能解决所有问题，但却是解决这三大问题的核心技术之一。

在 21 世纪构建都市和农村资源循环系统乃至地域生态系统中，植物工厂是构成农业都市或都市农业的重要组成。在农村和城市建立节能环保和资源循环的可持续发展社会时，合理利

用植物工厂能够体现其真正的价值。社区居民充分理解植物工厂的特征和作用有助于推动植物工厂的社区应用。因此，向全社会宣传和推广植物工厂是很重要的。

现代社会中人类粮食、环境、能源/资源的不均衡（不足、分布不均及过量使用），带来了一系列的问题。随着出入城市的各种车辆和人群数量的快速增长，结果必将带来大量的排热、大气污染物质、污染水、垃圾及其他废弃物。

为了大幅度减少流入城市的资源和大量的污染物质，在都市中导入植物工厂很有必要。人类呼吸、畜牧养殖和菌类栽培需要氧气而排放 CO_2 ，然而都市中的植物工厂、屋顶菜园等设施园艺能够吸收 CO_2 、释放出氧气。都市污水和雨水经净化后可作为灌溉水再次利用，排放的热量可作为设施园艺和养殖的热源使用。综合上述系统的应用就能衍生出都市农业或农业都市。复合型生态系统的构建有助于地域生态的可持续发展和社区生活品质的改善。农村地区利用植物工厂也能达到同样的效果。

本书的翻译马承伟、贺冬仙、钮根花是笔者 20 多年来的朋友和同行，在日常交往中深感他们的热情与学识。这次非常感谢他们从百忙中割舍宝贵的时间翻译本书。希望本书的中文版能在中国或中文读者中发挥更大的作用。

古在丰树

2013 年 11 月 28 日

序

两年前，中国农业大学农业生物环境与能源工程学科的博士生导师贺冬仙老师对我说起，她准备翻译出版其导师古在先生的《人工光型植物工厂》新著（日本欧姆出版社，2012年版），要我给写个序，情意实在难却，只好谨此献拙！

本书主译贺冬仙女士是古在先生培养的一位勤勉实干的优秀博士研究生，长期随师长在中日两国从事生物环境工程、植物工厂领域的试验研究和应用推广。她是国内把环境控制工程学与农业生物科学密切结合，从事密闭式植物生产系统研究开发的年轻有为的学者，她精通本专业业务与英、日语言，担当翻译此简体中文版任务，确系读者之幸！

本译著出版的时间正值我国人民为实现全面建设小康社会和社会主义现代化国家的新形势下，出现一个引进研发高科技设施园艺尖端技术——植物工厂的小热潮时期。众所周知，改革开放30多年来，我国的设施园艺产业取得了史无前例的发展：全国设施面积从改革开放之初的0.72万 hm^2 猛增到2010年的360余万 hm^2 而成为世界第一。特别是研发和普及了北方以节能型日光温室为主，南方以遮阳网、防虫网、避雨棚和开放型温室为主的低碳节能型设施蔬菜栽培技术，从根本上扭转了长期以来我国北方地区冬季蔬菜供应不足和城市工矿区蔬菜供应存在冬、夏两大淡季及生产总量长期短缺的局面，有效地推动了农民致富并成为许多地区农业经济的支柱产业。我国设

施园艺产业对改善民生和推动世界低碳农业发展的贡献可以说是举世瞩目，但同时也存在生产效率低、产品安全质量堪忧和环境污染严重等问题。为实现全面建设小康社会的中国梦，全国产学研部门正在全力探索我国设施园艺可持续发展的新途径。古在先生新著所介绍的人工光型植物工厂的植物生产系统，就是其中所选考的方向之一。

中日两国的农业生境都是人多地少、以个体农户集约经营为主，在现代化信息化社会下面临着相似的问题。但早在 20 世纪 70 年代，日本就在全球率先实现了超高生产效率而又节能环保的植物工厂的研发与商业化运营。而我国直到 21 世纪之初，才开展了该尖端技术的引进试验。从 2008 年至 2014 年，国内市场上已渐见不少不同类型示范设施的试运行，初显其在国民食品安全保障体系构建、建设美丽中国使命中的巨大潜力，从而引起相关产业部门极大的关注并热情地投入该生产系统的研发。《人工光型植物工厂》简体中文版的出版，恰好为我国正在从事该领域研发的产学研专业人士送来了“及时雨”！

古在先生是当今国际设施园艺工程科学领域的著名权威学者，在其著作中全面系统地介绍了人工光型植物工厂的基本理论、基本知识和基本技术，反映了该科技领域当今的 latest 技术信息，理论联系实际，是目前国内外同类著作中的最新学术专著，也是他在设施园艺工程尖端领域创新性研究成果的总结。

作者从地球（对宇宙）这一密闭式生态系统的可持续发展视角，解析了 21 世纪由于人口增长的压力，全球共同面临环境、资源、食品三大危机的挑战。为防止地球生态失衡、提升人类生活质量，其中对策之一就是要把植物工厂作为一种有效的

理念与技术体系来加以应用，这是他对植物工厂的一个科学恰当的定位。他把增加植物的现存生产量作为解决上述三大矛盾的必要物质基础，进而又从投入的各种资源利用效率及其与节能环保的关系，以及能否可持续发展的视点，科学地分析了开放式（露地）、半密闭式（温室）和密闭式（人工光型植物工厂）三种传统植物生产系统的特征、基本组成结构、性能等，证明密闭式植物生产系统的生产效率远远高于开放式和半密闭式植物生产系统，且能兼顾节能环保，实现周年稳定地提供安全、优质、高附加值的植物产品，是最具可持续运营性的生产系统。这为人工光型植物工厂的研发推广应用提供了理论依据。本书的显著特点是不仅全面系统地阐述了人工光型植物工厂的结构组成、环控设备及其调控技术和高附加值植物的栽培等应用技术，而且还介绍了这些应用技术的理论基础。全书贯穿了古在先生关于环境工程科学、生物生命科学、经济与管理科学相互交差、融会贯通的学术思想。例如，要使植物获得高产优质和高生产效率，以及最少的资源与能源的投入，必须具有植物光合等生理生态机理的基础知识；温、光、CO₂、湿度、气流、营养液等环境因素的高效利用与综合环境自动调控，必须有相应仪表光源、照明、热泵等的工作原理的基础知识，特别是提高人工光源的电能利用率的原理等基础理论知识。这对于运营与研发者进一步创新性地提高人工光型植物工厂的生产效率和节能环保、安全优质、稳产与高效生产，以及进一步大幅降低基础建设成本与运行成本，都具有重要指导意义。

古在先生作为日本千叶大学园艺系生物环境调节工学研究室的教授和千叶大学前校长，在我国设施园艺界中也是一位亲切而很受尊敬的学者。近30年来，他始终致力于中日两国农业

学术与人才交流，我国的一批优秀的生物环境工程学者，像吴毅明、马承伟、贺冬仙、钮根花等都是他直接培养的研究生或访问学者。我于1982—1984年有幸作为改革开放后国家首批派往日本留学的教师，在千叶大学园艺系蔬菜研究室伊东正先生（千叶大学前副校长）指导下，从事白菜营养液膜水培法（NFT）及其氮素营养等的研究，恰与古在先生研究室相邻，期间经常得到古在先生对环境工程方面的指导。回国后的1987年，我又应邀参加了国际园艺学会与日本农业气象学会等主办的高科技时代的设施园艺国际学术研讨会，聆听了古在先生从环境调控工程学的角度，分析了高科技农业生物工程技术中常用问题的报告，与会学者对他的报告给予了高度评价。古在先生不仅在学术研究、论文、专著方面成果累累，而且他不辞辛劳，多次应邀来华讲学、学术交流，足迹遍布包括中国农业大学、南京农业大学、山东省农业科学院等全国各地教学科研单位与农业科技园区，他把自己的学术成果毫无保留地介绍给中国同行，受益人员数以千万计。令人惊喜的是他的上述研发成果都已一一在中国的大地上开花结果。

古在先生不仅给我们提供了一本系统先进实用的好书，同时还让我们见识了他的高瞻远瞩、始终站在设施园艺工程科学领域的国际前沿，以敏锐的目光、活跃的思维，洞察学科前沿事关全局性的关键课题，进行锲而不舍攻关的精神；以及乐于奉献、平易待人的品格，勤奋求实创新、理论联系实际的态度。他以实际行动引领设施园艺工程学科向为提高全人类生活品质、研发更高生产效率而又兼顾环保节能、省资源低成本的可持续生产系统的正确科研方向，均乃后辈楷模！

一幕有趣的回忆令人感慨万千！1983年我在导师伊东先生

特别关照下，考察了他的门下青木先生在京都市的营利性植物工厂，这是一个外部像仓库的占地面积约 200 m² 的密闭式人工光型植物工厂，内设约长 10 m、宽 1 m 共 20 列的移动式水耕栽培床，以高压钠灯和荧光灯作为光源，综合环境要素由电脑全自动进行控制，先育好苗龄为 25 d 的叶用生菜苗，再定植到栽培床上仅培养 10 d，长到 120~150 g/株即可采收包装出售，每袋 2 株，售价为 100 日元。夫妇 2 人管理，年净收入 600 万日元，是普通公务员平均收入的 1 倍。真可谓是几千年来面朝黄土背朝天的农民穿起了“白大褂”，站在明亮舒适的广房里农作；稳稳当当地生产出折合每 667 m² 年产 10 万 kg 的洁净生菜，彻底摆脱靠天吃饭的桎梏！亲身目睹高科技农业如此巨大潜力，惊叹不已！如今转眼过去 30 年，当年所见高不可攀的家伙不觉间已活生生地显现在祖国大地上！贺冬仙博士等主持或参与创建的国产植物工厂所生产出的生菜、铁皮石斛等产品，有幸我都品尝到了！真是 30 年河东，30 年河西！内心无比欢欣！在此，不禁令人难忘古在教授和伊东教授等日本学者对推动我国高科技设施园艺科技的发展所作出的卓越贡献！

李式军

于南京农业大学园艺学院

2014 年 8 月

前 言

本书是2009年11月末出版的《太阳光型植物工厂·先进的植物工厂的可持续性与设计》(欧姆社,古在丰树著)的姊妹篇。《太阳光型植物工厂》的中文版于2010年在中国大陆和台湾出版,韩文版于2012年底在韩国出版。

与太阳光型植物工厂的普及推广相适应,人工光型植物工厂的社会认知度也越来越高。在日产销量达数千株的叶菜类人工光型植物工厂中,在回收投资成本的前提下实现了盈利生产的项目逐渐增多。从2009年起,经济产业省和农林水产省共同资助的植物工厂研发项目和普及事业也开始展现出技术推广的效果,相关大学、学会、研究所等教育研究机构的产学研活动也取得了一定的成果。

日本社会对人工光型植物工厂呈现了极大的关注,这是由于很多人越来越认识到该技术带给人们一种全新的生活方式,并创造了一个新的产业,也会直接影响人们今后的生活方式和文化传播。占地面积仅为 $10\sim 50\text{ m}^2$ 的小型人工光型植物工厂开始出现在餐厅、超市、快餐店等,逐渐走进了我们的生活。面向家庭、展示、教育、设计等用途,占地面积为 1 m^2 以下的小型植物工厂的示范模型由于其优良的性能和联网功能,也开始面向社会销售。目前,这类示范系统已出现在便利店、医院、宾馆、超市等。上述社会现象使植物工厂不仅给用户带来了农耕体验、生命教育、尖端技术等方面的技术宣传,还必将改变

今后人们的生活方式和文化体验，逐渐成为建设环境友好型社会的重要一环。

2009年以来，中国大陆和台湾及韩国对植物工厂的关注也与日本呈现出相同的趋势，2011年以后的流行势头甚至超过日本，以致东南亚诸国也“蠢蠢欲动”。荷兰、美国、俄罗斯及中东等国家和地区也有将人工光型植物工厂技术进行商业化推广的趋势。结合该技术发展的现状与趋势，不仅日本，中国大陆和台湾及韩国也均纷纷举办了关于人工光型植物工厂的国内学术会议和国际学术研讨会。

日本在人工光型植物工厂技术领域的研发水平、商业普及率，以及社会认知度在2012年堪称世界第一，其技术进展也直接影响了世界各国。编著出版的人工光型植物工厂的相关专著也不少，但还较缺乏关于技术研发和科普教育所需的学术性专著或教科书，特别是关于电能利用效率和植物生理生态特性方面的专著还相当短缺。

本书作为研究人员和研究生用的教科书，对从人工光型植物工厂的技术理论到实践应用所涉及的学术基础用语和专业术语都进行了定义和整理。本书的理论基础就是基于学术理论进行系统设计和生产运营，从而在现有条件下大幅度地节省资源和保护环境，以实现植物工厂的优质高产。本书的专业知识涉及光源、照明、空调、检测、控制、植物生理生态、营养液栽培、加工处理等领域。本书针对上述基础理论的论述力求简洁明了，并重点论述了密闭式植物生产系统与节能环保之间的关系，以及目前人们重点关注的人工光型植物工厂的社会背景、日本和世界的研究现状、药用植物的生产应用等内容。

人工光型植物工厂技术今后将延伸到流通、设计、医疗、

护理、食品、医药品、服务业、教育、农林业等相关产业，并以各种形式进行普及推广。该技术普及必将促进街道服务、地域经济、社区建设的可持续发展。因此，本书也期望成为促进各种技术应用和产业扩展的点金石。

本书在撰写过程中得到了千叶大学柏叶校区环境健康领域科学研究中心的植物工厂据点项目组成员的多方协助，同时得到了参与本项目的 60 家企业成员、NPO 植物工厂研究会、柏叶校区每月举办的植物工厂学习会的讲师和参加人员的有益建议。特别得到了主持植物工厂据点项目的丸尾达教授和池田英男教授、中心主任高恒美智子教授的指导，也得到了千叶大学园艺学研究科的后藤英司教授和工学研究科的渡边诚教授、原宽道教授的指教，在此一一深表谢意。

日本学术会议·作物科学委员会·农业信息系统学分会（委员长：野口伸）的各位委员、日本生物环境工学会的会员、受灾地区支援设施栽培专家组的各位成员也对本书提出了诸多批评指正意见，在此表示衷心的感谢。

第 11 章中关于药用植物生产部分的撰写得到了上述研究中心机能性植物生产捐赠研究部门的新藤聪教授、池上文雄教授、渡边均教授、松原纪嘉教授及 AMITA 股份有限公司的内藤弘先生和松本洋俊先生的指导，在此表示感谢。

韩国首尔国立大学的孙禎翼教授和全旭永教授、全北大学的金容显教授，台湾大学的方炜教授，中国农业科学院的杨其长研究员、中环易达公司魏灵玲总经理、中国农业大学的贺冬仙副教授、陈青云教授、马承伟教授、黄之栋教授，美国亚利桑那大学的久保田智惠利教授、得克萨斯州农工大学的钮根花教授也为本书出版提供了多方协助，在此一一表示感谢。

QP 股份有限公司、未来股份有限公司、丸尾达先生、河本康太郎先生、C. H. C 系统股份公司、三菱树脂股份有限公司、绿色创新等公司，以及笔者的原同事、原研究室成员等均为本书提供了照片，在此特别表示敬意。本书诸多地方引用了与大山克己先生、Zobayed 博士、Afreen 博士、Mosaleeyanon 博士、西村徹郎博士共著的论文。绿橄榄股份有限公司的大野彰先生全面协助了本书的企划、编辑和校正。欧姆社开发部的各位也付出了辛勤的劳动，在此向协助本书出版和提供帮助的各位一一表示感谢。

最近，日本在密闭式人工光型植物生产设施中还进行了转基因草莓、水稻、大豆等植物栽培，以及有用物质生产、农产品的医药成分提取、食用型药用植物等研究开发，可以说日本走在了世界前沿，代表了世界的最高水平。由于笔者未曾涉足这部分研发工作，也缺乏相应的专业知识，故而未在本书中提及。

古在丰树

2012 年 3 月

目 录

中文版序

序

前言

第 1 章 全球性课题与植物工厂	1
1.1 前言	1
1.2 密闭式物质系统的地球	2
1.3 植物在解决三大问题中的作用	3
1.4 植物的特性——光独立（无机）营养生长	4
1.5 植物生产系统	5
1.5.1 植物生产系统	5
1.5.2 可持续发展的必要条件	6
1.5.3 资源利用效率	8
1.5.4 投入资源利用效率与节能环保的关系	8
1.5.5 初期建设资源量与运行资源量	9
1.5.6 生态足迹	9
第 2 章 植物生产系统的特征与种类	11
2.1 前言	11
2.2 植物生产系统的特征与种类	11
2.2.1 特征	11
2.2.2 种类	12
2.2.3 投入资源利用效率的比较	13

2.2.4 栽培技术与对象植物 14

第3章 密闭式植物生产系统 21

3.1 前言 21

3.2 研发历程 21

3.3 基本概念 26

3.4 组成要素 27

3.5 特征 27

 3.5.1 安全、放心 27

 3.5.2 节省资源和环保 28

 3.5.3 高品质与安全生产 29

 3.5.4 高生产性、稳定性、柔软性、进化性 30

 3.5.5 设备的高性能化 32

 3.5.6 舒适的劳动环境 33

 3.5.7 高成本 34

第4章 综合环境调控 35

4.1 前言 35

4.2 投入资源利用效率与节能环保的关系 35

4.3 综合环境调控带来的投入产出比的提高 37

4.4 投入资源利用效率的计算及提高 38

4.5 速率变量的检测与控制 39

 4.5.1 速率变量与状态变量 39

 4.5.2 根据状态变量进行环境调控的问题 40

 4.5.3 速率变量的可视化检测及其在环境控制中的利用 40

4.6 净光合速率(P_n)和施用 CO_2 利用效率(E_c)的计算 41

 4.6.1 P_n 、 E_c 及 CO_2 损失速率 (L_c) 的关系 41

 4.6.2 CO_2 损失速率 (L_c) 的计算 42

 4.6.3 影响 E_c 的换气次数 (N) 和 P_n 43

 4.6.4 CO_2 施用的投入产出比 44

4.6.5 换气次数 (N) 的连续推测	44
4.7 水分利用效率 (E_w)	45
4.8 氮、磷营养元素的利用效率	46
4.9 光能利用效率	47
4.10 电子热泵 (空调) 的能效比	47
第5章 人工光型植物工厂的定义、社会背景及国际 研发状况	49
5.1 前言	49
5.2 定义	49
5.2.1 现有的定义	49
5.2.2 太阳光型植物工厂	50
5.2.3 人工光型植物工厂	53
5.2.4 两者的异同点	54
5.2.5 人工光型植物工厂与太阳光型植物工厂的 组合使用	55
5.2.6 操作自动化与机器人	56
5.2.7 本书关于植物工厂的定义	56
5.2.8 工厂、生产工厂与制造工厂	57
5.3 为何人工光型植物工厂是全球性的?	58
5.3.1 社会背景	58
5.3.2 生产者的优势	61
5.3.3 问题	64
5.3.4 净菜的加工工厂	64
5.4 中国的研究开发状况	65
5.4.1 中国农业科学院	66
5.4.2 京鹏植物工厂·北京市农业机械研究所	69
5.4.3 中国农业大学	69
5.4.4 国家农业智能装备工程技术研究中心	70
5.4.5 其他	71