

植物工厂的可持续性与设计

太阳光利用型 植物工厂

TAIYANGGUANG LIYONGXING

ZHIWU GONGCHANG

(日) 古在丰树 编著
张成波 尚庆茂 译

 中国农业出版社

太阳光利用型植物工厂

——植物工厂的可持续性与设计

(日) 古在丰树 编著

张成波 尚庆茂 译

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

太阳光利用型植物工厂：植物工厂的可持续性与设计/（日）古在丰树编著；张成波，尚庆茂译．—北京：中国农业出版社，2010.7
ISBN 978-7-109-13705-9

I. ①太… II. ①古…②张…③尚… III. ①农业技术：高技术—研究 IV. ①S-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 129024 号

中国农业出版社出版
（北京市朝阳区农展馆北路 2 号）
（邮政编码 100125）

策划编辑 舒 薇
文字编辑 廖 宁

北京通州皇家印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行
2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月北京第 1 次印刷

开本：787mm×1092mm 1/16 印张：8.75
字数：183 千字 印数：1~3 000 册
定价：30.00 元

（凡本版图书出现印刷、装订错误，请向出版社发行部调换）

太陽光型植物工場 先進的植物工場のサステナブル・デザイン

Original Japanese edition

Taiyoukougata Shokubutsu Koujyou

by Toyoki Kozai

Copyright © 2009 by Toyoki Kozai

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese Language edition published by China Agriculture Press

Copyright © 2010

All rights reserved.

本书中文版由古在豊樹与株式会社オーム社授权中国农业出版社独家出版发行。本书内容的任何部分，事先未经出版者书面许可，不得以任何方式或手段刊载。

著作权合同登记号：图字 01—2010—3129 号

前言

本书主要论述的是：为什么说植物工厂必须以节省资源、环境保护、安全、放心、健康为出发点，在生产上要做到稳产、高产，体现出可持续性且被社会广泛认可？围绕这个目的，怎样去设计好、利用好植物工厂？

从最近食品、环境和资源方面的情况来看，人们对植物工厂的关注度不断在增强。人们所关注的社会现状包括：①消费者希望果蔬产品做到安全、放心、不使用农药。②市场希望得到稳定的食品供给。③出现了气候变暖、消减CO₂排放量、气候异常以及石油价格上涨等全球性课题。④地产地销、食物里程 (food mileage)*、环境保护、节省资源、LCA (Life Cycle Assessment/Analysis) 即生命周期评估/分析、GAP (Good Agricultural Practice) 即食品安全保障等。

面对这些情况，2009年6月，日本农林水产省开始实施了“标准化温室植物工厂实证、展示和研讨”课题。与此同时，经济产业省也开始实施了“先进植物工厂设施装备项目”。开展这些项目的依据是植物工厂具有如下优势：使气象灾害、病虫害减少到最低程度；维持植物生长所需的最佳环境；生产的稳定性高；还可以提供安全、放心的工作场所、产品以及服务等。此外还有：①节能、节电、利用太阳能。②智能化控制。③热力泵。④LED (发光二极管)。⑤机器手。⑥通过计算机和网络进行分散协调统一。⑦可以做到物质循环与再生。⑧高绝热技术。⑨广义的生物技术等。这些产业技术的进步都将为植物工厂走向实用化提供支持。本书就是基于上述实际情况，从全球、国家、地区的立场出发，开始重新思考，对植物工厂今后的发展方向提出了设想。

植物工厂是在节能环保的理念、目标和方法指导下进行设计、构筑和实证的，它的前提条件是，植物工厂的普及必须有其存在的社会价值和意义。

* 食物里程，指的是消费者饮食消费与食物原产地之间的距离。食物里程高，表示食物经过漫长的运送过程，则所代表的将是用于食物包装与保存的材料、一路上交通工具所消耗的汽油以及随之而产生的废气，将增加环境的负担。而且对于果蔬和肉类来说，食物里程越高则表示该食品越不新鲜。译者注。

反过来说，如果实证得不到成功，尽管植物工厂可以按照稳定的计划生产出优质的产品，但是，所采用的植物生产方法却具有资源浪费和污染环境性质，这样的植物工厂，即使能够在经济上赚取到一些利润也不该让其得到普及发展。

如果植物工厂能够建在一些丘陵山坡地带、大中小都市圈的空地、大型建筑物的屋顶、海湾垃圾填埋场和荒滩地等处，生产出蔬菜、花卉并供应给附近街区，就可以既节省运输成本、运输时间，减少包装程序，实现地产地销。还可以将植物工厂建在与全国各地国际机场比邻的地方，在那里生产出用于植树、沙漠绿化、食品、生物能源等方面的优质种苗，从机场直接出口到世界各地，这也是对国际社会作出的贡献。如果从单位重量价值排序来看其所具有的商业价值的话，它可以和半导体、药用植物以及包括其他机能性植物在内的具有高附加值的植物相提并论。

另一方面，许多居住在密集小区或中小城镇的人，都希望从事一种类似半日制的轻型工作，如果能把植物工厂建在这样的地方，就可以使这些人在愉快的工作中感受到生活的价值，还可以增加自身的经济收入。在不同的地区栽培不同的植物、根据不同的人群采用不同的模式进行生产，把这些推广到更大范围的各类市民之中，使他们能够在日常生活中得到参观、体验和作业的机会，这样做，有利于增进市民对农业的理解，也有助于开展食品与环境方面的教育。在“心灵、生命、环境共生时代”的 21 世纪中，植物工厂被称为我们身边的“地球号宇宙飞船”模型。通过对它的体验，人们可以感受到地球的有限性和生命的尊严，达成对提高地球可持续性发展的共识。

植物工厂的建立，可以增加植物生产方式的多样性，以农业为基础，全面振兴环境健康产业，提供安全、舒适、轻型的作业，还可以为包括老年人和残疾者在内的许多人提供就业机会。本书基于这个考虑，从技术、工程和经营三个层面展开论述。

本书由 8 章构成。第 1 章，首先概要地分析了日本农业存在的问题和一次能源（石油等）、农药、水的消费量，论述了这些问题与环境污染之间的关系。接着指出，农业生产必须摆脱对石油的依赖，开发出可持续发展的农业生产系统。然后是 2009 年 4 月公开发表的《植物工厂项目工作委员会报告书》内容

摘要。最后提出, 植物工厂技术应该对解决日本以及世界食品、环境和资源问题作出贡献。第2章, 将植物生产系统分为开放型、闭锁型和半闭锁型三种类型, 并分别论述了各自特征。还就半闭锁型即自然光利用型植物工厂的特征与投入资源利用率之间的关系展开了论述。第3章, 论述的是作为植物工厂骨干技术之一的综合环境控制的思考与方法。第4章, 就热泵原理及其诸多利用方法展开论述。指出, 从加温时 CO_2 的排放量来看, 采用电热泵比采用重油制暖机要减少一半。而且, 还可以节省加温成本。第5章, 论述的是夏季昼间自然光利用型植物工厂内换气窗全部打开、零浓度差 CO_2 的施用以及顶端喷雾降温的设想。第6章, 指出在对植物工厂信息收集、分析、利用进行分散协调时, 必须建立“普适环境控制系统”。第7章, 首先提出了人工光利用型植物工厂中闭锁型系统的概念并论述了它的特征。接着, 采用问答的方式, 回答了人工光利用型植物工厂方面经常遇到的疑问。第8章, 就植物工厂研究领域的诸多方面展开论述, 强调指出, 在开展尖端技术研究的时候, 重要的是必须重新思考, 而不能采用便捷的、流行的方式。最后, 谈了一下关于普适植物工厂的想法。

需要提出的是, 第6章“普适环境控制系统”的论述, 是由东海大学的星岳彦教授执笔完成的。他是这个系统的倡导者, 同时也是这个技术研究、开发与推广的第一人, 他的学术活动很积极。第6章的内容给本书增添了很高的价值。

本书编写过程中得到了许多人的帮助。出版社的大野彰先生对本书的策划、编辑作出了积极的努力。本书核心部分的构想形成之后, 我就参加了《智能化太阳光利用型植物工厂》工作小组(组长: 野口申; 干事代表: 桥本康)的活动, 该活动是由日本学术会议农学委员会和食品委员会下设的农业信息系统专业分会组织的, 这对思考植物工厂建设的社会意义很有帮助。还有, 千叶大学的同事大山克己副教授、丸尾达副教授、池田英男教授、后藤英司教授等, 都对本书给予了有益的指导。除了上述的各位之外, 还得到了多方面人士的支持。在此, 我对他们都表示深切的谢忱! 书中采用的一部分照片和图表资料, 分别由东海大学的林真纪夫教授、千叶大学的丸尾达副教授、大山克己副教授、美国亚利桑那大学的保田智惠利教授、Merle Jensen 教授、大洋兴业的

冈部胜美先生、吴德先生以及三井不动产、三协公司的各位提供。在此，一并表示深深的感谢！

植物工厂在建设可持续性植物生产系统方面的作用举足轻重，如果本书能够在此方面起到些微作用的话，实在是深感荣幸。

古在丰树

2009 年 11 月

中文版序

我们地球人正面临着三大问题：环境、食品和资源。从一定程度上讲，我们在注重保护环境和节约资源的同时，往往会造成食品产量和品质下降。为了增加安全、健康的食品，就要扩大耕地，增加资源的投入量，这就会导致森林面积减少、环境污染和资源枯竭等问题。

资源枯竭，不仅是指化石燃料资源，还包括水资源。环境污染指的是化肥渗透地下或直接流失到江河湖海之中、大量废弃的塑料制品以及全球变暖气体排放等。不仅是日本和中国，包括亚洲其他各国乃至全世界，一个愈加重要的任务就是通过解决上述三大问题，提高国民的生活质量，持续稳定地发展经济。

为了从上述三大问题的困境中摆脱出来，在保护环境、节约资源和可持续的状态下，生产出安全健康的食品，就必须采用创新手段，开发出新型的植物生产系统。

植物工厂的生产对象是高附加值的植物，包括园艺植物、药用植物、香料植物以及用于植树造林、沙漠绿化和工艺产品方面的植物种苗。谷类和经济林木的植物生长期长，植株体大，产品单位重量的商业价值低，只能在大田和山林之中生产，不适合在植物工厂内生产。

植物工厂采取的是综合环境控制，植物对光能的利用率非常之高，是露地生产的10倍以上。它的植物生产系统完全可以做到最小限度地使用肥料和水，不施用农药，不将污染物排放到植物工厂外部，最终实现持续、周年生产。

植物工厂与我们所追求的“宇宙农场”很相似，就是在狭窄的空间内，使用最少的资源，安全、持续、高效地生产食品。尽管也会有阳光照射进来，但从物质属性来看，它与密闭的空间即地球闭锁系统很相似，具有生态学特性。

本书就是基于上述观点，论述了开发植物工厂所必须具备的社会背景、研究与开发的现状以及今后需要解决的课题等。虽然内容上是以太阳光利用型植物工厂为中心，但也有不少是适合于人工光利用型植物工厂的。希望读者朋友

能够阅读此书，并在此基础上进一步思考，超越我的这些设想，共同为解决地球环境、食品和资源问题作出积极贡献。

为本书翻译的张成波先生是我所尊敬的朋友，他的人品、学识、热情、理念以及行动力都给我留下非常深刻的印象。在我访问中国的活动中，多次受到他的接待，与他交流令我十分愉快。去年，我的自传《幸福的种子一定能够找到》就是由他翻译、出版的，那是我第一部被介绍到中国的书。这次又承蒙他和尚庆茂先生一起翻译、出版此书，对次，我深表感激与谢忱。我希望本书能够在中国以及受中国文化影响的国家和地区得到有效利用。

古在丰树

2010年5月25日

译者的话

关于本书作者——古在丰树教授的其人其事，已经在先生的自传《幸福的种子一定能够找到》（张成波译，中国农业科技出版社，2009）中做了一些介绍，恕不在此赘述。这本《太阳光利用型植物工厂》，是古在丰树教授在我国翻译出版的第二部著作，就学术著作而言，这还是第一部。

翻译的过程也是学习和收获的过程。纵观全书，体会很多，简而言之有三：

首先是系统性。日本是植物工厂由试验到应用最活跃的国家之一。从概念的提出到一系列的研究与开发已近40年，学术活动非常频繁和活跃，发表的论文、研究报告以及研发并应用于生产实际的产品，可以说是汗牛充栋。仅就植物工厂的布局来说，可以说是遍布日本全国。但是，迄今为止，真正将这些成果系统化整理成专著的只有两部书，都是最近出版的。一部是高辻正基教授的《完全控制型植物工厂》（也可译为《人工光利用型植物工厂》），再一部就是古在教授的这部《太阳光利用型植物工厂》。该书共8章，从植物工厂发展历史、现状到未来市场前景构想，从太阳光利用型植物工厂特征、优势到关键技术与环境控制，思维独特，设计创新，结构严谨，体现出先生一贯的学风。不仅介绍了先生及他的研发团队多年来积累的成熟经验，还结合现实发展的需要，收纳了最新成果，虽然全书不到20万字，但所提供的各类图表就多达近200之众，具有重要指导意义和参考价值。

再就是创新性。古在先生有个习惯，就是喜欢独辟蹊径，独立思考，不断发现问题、提出问题。爱因斯坦说过，提出一个问题往往比解决一个问题更重要，也许，解决问题仅仅是一个教学上或实验上的技能，而提出新的问题、新的可能性、从新的角度去看旧的问题，都需要有创造性的想象力，这标志着科学的真正进步。有时，古在先生都不顾及自己所提出问题是否有了较好的回答和解决方法，但只要是觉得很重很紧迫，就会很快提出来。也许，有的问题并不被多数人马上认知，甚至短时间内也没有引起多大的反响，但随着时间的

推移，人们会渐渐认识到这些问题的提出与解决所具有的重大意义。

比如由他首倡并开发出来的“光独立组织培养技术”和“闭锁型育苗系统”等，就是当今世界设施园艺领域重大技术创新，在理论指导和实用推广方面都具有非常重要的意义。夏季管理是设施园艺技术领域的热点和难点问题。针对植物工厂运行中的这个问题，古在先生根据大量的实践，总结出“CO₂ 零浓度差施用法”和“顶端喷雾降温法”，与以往的做法相比，在不少方面都有所突破、有所创新，在实践上具有很高的推广价值。

第三是前瞻性。从 60 多年前诞生的第一个“人工气候室”到今天的植物工厂，都在引领着农业科学技术特别是设施园艺技术领域发展的方向。古在先生是该领域非常活跃且颇有成就的学者，在植物工厂研究与开发的过程中，他坚持始终关注环境、食品和资源这些具有全球性的战略性问题，提出一些具有前瞻性的观点或设想。本书中提出“普适环境控制”的理念并运用到植物工厂控制系统之中，他认为，未来的发展一定会达到这样一个高度。包括他所构思的未来植物工厂若干理想模式，都在本书之中有了基本的描述，虽然，有些模式初露端倪，有些甚至还只是一种概念和描述，但都具有鲜明的前瞻性，令我们感到兴奋和鼓舞，给我们很多的启发。这应该理解为是一种引领作用吧。

还有一点想说明的是，尽管这是一部学术著作，却闪烁着古在先生的人文思想。正如同他在本书的“前言”中所讲的那样：“在‘心灵、生命、环境共生时代’的 21 世纪中，植物工厂被称为我们身边的‘地球号宇宙飞船’模型。通过对它的体验，人们可以感受到地球的有限性和生命的尊严，达成对提高地球可持续发展的共识。”先生不仅把植物工厂与可持续发展问题密切结合，还不忘把植物工厂的成果分享给弱势群体——老人、残障者、孕妇等，希望这些人也能够植物工厂内找到就业的机会，随心所欲地做着自己开心的事情，为福祉社会做出一己贡献。这也应该是人类开展科学技术研究与开发活动目的之一吧。

植物工厂是一门年轻但充满魅力、活力与挑战的学科。我国是农业大国，设施农业是走向现代化的重要手段，而植物工厂代表着未来农业发展的方向之一。令人欣慰的是，我国业界不仅对此逐渐形成了共识，而且，对植物工厂的研究与开发也方兴未艾，有些领域还取得了骄人的业绩。对此，古在先生也多

有感慨和褒奖。我们衷心地希望我国同行们能够抓住机遇，乘势而上，进一步加强国际合作，拓宽视野，研发出适合中国国情、具有自主知识产权的植物工厂，促进我国现代农业的发展，造福于社会和人类。如果本书的翻译和出版能够对此起到点滴作用的话，对于译者来说，这就是最大的满足和鼓励了。

此书从接受翻译委托到出版，一直得到了古在先生的无私帮助与支持，他不仅主动放弃了著作版费，还在百忙之中写了《中文版序》，对我们给予极大的鼓励，令我们不胜感激与感谢！

本书中的图表甚多，编排难度大，中国农业出版社副编审舒薇老师和廖宁编辑对此书的编辑付出了辛苦，借此表示由衷的谢忱。

由于我们的水平有限，不当之处在所难免，敬请各位专家、学者和广大读者朋友不吝赐教。

张成波 尚庆茂

2010年6月1日

目 录

前言

中文版序

译者的话

第 1 章 实现可持续性植物工厂的基础与课题	1
1.1 日本农业与所投入的一次能源* 和环境	1
1.1.1 农业产出额、食品自给率及农业就业人口	1
1.1.2 一次能源消费量	2
1.1.3 CO ₂ 排出量	5
1.1.4 设施园艺加温耗能与 CO ₂ 排放量的减少	6
1.1.5 对环境的影响	7
1.1.6 石油依赖型农业造成的负面影响及其对策	9
1.1.7 农业生产系统的可持续性设计	10
1.1.8 农产品安全保障——GAP	10
1.2 植物工厂课题组工作报告	11
1.2.1 历史	11
1.2.2 与“植物工厂”对应的英语	11
1.2.3 植物工厂课题组工作报告书概要	12
1.3 食品·能源·环境与地球变暖·贫困悬殊问题	15
1.3.1 植物生产·苗生产的重要性	15
1.3.2 第二种科学与市民科学	18
1.3.3 glonacal 视角的必要性	18
第 2 章 植物生产相关要素和植物生产系统种类	20
2.1 植物生产系统的种类、特性及用途	20
2.2 植物工厂系统的特征——多变量非线性复杂化	22
2.3 影响植物生长的主要因素和植物生产系统的闭锁程度	24
2.3.1 影响植物生长的主要因素	24
2.3.2 开放型、半开放型、闭锁型植物生产系统的定义与对应植物	25
2.3.3 植物生产系统闭锁程度对投入资源利用率的影响	26
2.3.4 与人工光相比,采用太阳光也能在植物生产中做到节能和环保吗?	28
2.3.5 植物工厂各方面的利用效率	30

第3章 综合环境控制	33
3.1 综合环境控制的观点	33
3.1.1 总光合速率和净光合速率模型	34
3.1.2 最佳叶面积指数	35
3.1.3 气流速度和 VPD 控制的重要性	35
3.1.4 综合环境控制期待的效果	36
第4章 热泵应用	38
4.1 热泵结构和特征	38
4.2 热泵的能效比 (COP)	39
4.2.1 加温与降温 COP 的关系	39
4.2.2 COP 逐年提高	39
4.2.3 室内温度高于室外温度时降温的 COP	40
4.2.4 蒸发器吸热和凝缩机放热同时利用时的 COP 值	41
4.2.5 热泵常年能量的消费效率	43
4.2.6 蒸发器结露水的利用	43
4.2.7 室外气温低导致 COP 降低时需要启动防冻机	44
4.2.8 日间余热加温热源的利用和变温管理	44
4.2.9 混合运行	45
4.2.10 夜间降温、除湿运行和送风	46
4.2.11 热泵降温时施用 CO ₂ 的优点	48
4.2.12 CO ₂ 肥源	48
4.2.13 COP 在家用热泵温室中的应用	49
4.2.14 采用热泵加温减少 CO ₂ 排量	50
4.2.15 电热泵运行电费	51
第5章 夏季日间环境控制	55
5.1 太阳光利用型植物工厂夏季零浓度差 CO₂ 施用方法	55
5.1.1 CO ₂ 浓度对作物净光合速率的影响	56
5.1.2 冬季施用 CO ₂ 的问题	57
5.1.3 夏季施用 CO ₂ 的问题与对策	57
5.1.4 零浓度差 CO ₂ 施用法——将室内外 CO ₂ 浓度差接近零	58
5.2 太阳光利用型植物工厂夏季顶端喷雾降温	59
5.2.1 室内温度过高的含义	59
5.2.2 蒸发降温种类与特征	59
5.2.3 自然换气喷雾降温的问题	60
5.2.4 自然换气条件下喷雾降温的问题点及其解决方法——顶端喷雾降温法	62

5.3 净光合速率、暗呼吸速度、蒸腾速度、养分吸收速度在线监测	63
第6章 普适环境控制系统	65
6.1 从温室到植物工厂看环境控制系统的进步	65
6.1.1 传统温室环境控制的局限性	65
6.1.2 导入新型环境控制系统的必要性	67
6.2 普适环境控制系统的机制与优点	67
6.2.1 普适计算	67
6.2.2 普适环境控制系统的概念	68
6.2.3 普适环境控制系统的结构与特征	71
6.3 采用电子化、标准化完善植物工厂信息基础	75
6.3.1 从生物适应机制评价植物生产信息化优势	75
6.3.2 电子化和规格化是信息化的关键	77
6.3.3 具有自上而下型改善效果的信息系统	77
第7章 人工光利用型植物工厂	80
7.1 闭锁型生产系统	80
7.2 闭锁型植物生产系统	80
7.2.1 系统构成	81
7.2.2 闭锁型植物生产系统的特点	84
7.2.3 常见问题及解答	88
7.3 未来的人工光利用型植物工厂	95
7.3.1 光源	95
7.3.2 适宜植物	96
7.3.3 环境控制是为了生产优质植物产品	98
7.3.4 植物工厂相关课题	98
第8章 植物工厂课题与展望	100
8.1 人才培养	100
8.2 机器人	100
8.3 重新思考 (1)	
——荷兰式太阳光利用型植物工厂的屋脊为什么要高?	101
8.3.1 空气的比热与热容量	101
8.3.2 群落的热容量	102
8.3.3 从显热到潜热的变化	102
8.3.4 VPD 的变幅	102
8.3.5 气温的垂直分布	102
8.3.6 增温费用	103

8.4 重新思考 (2)	
——散光性覆盖材料	103
8.4.1 温室外每天太阳辐射量中直射光与散射光的比例	103
8.4.2 散光性材料不同入射角的透光率、散光率及散光角度分布	104
8.4.3 采用散光性覆盖材料温室内群落的光环境.....	104
8.4.4 直射光透过时温室内的阴影和半影	104
8.4.5 群落内的光环境	105
8.5 国外制作的植物工厂环境控制软件	105
8.6 中国及东南亚的设施园艺	106
8.7 普适植物工厂	
——社区、车站、家庭植物工厂	108
8.8 链接手机文化	109
结束语	111
引用文献	112
编著者	122