

设施园艺半导体照明

Semiconductor Lighting for Protected Horticulture Production

◎ 刘文科 杨其长 编著



设施园艺半导体照明

Semiconductor Lighting for Protected Horticulture Production

◎ 刘文科 杨其长 编著



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

设施园艺半导体照明 / 刘文科, 杨其长编著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2016. 4

ISBN 978 - 7 - 5116 - 2547 - 2

I. ①设… II. ①刘…②杨… III. ①园艺 - 设施农业 - 栽培照明 IV. ①S62
②TU113. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 052711 号

责任编辑 张孝安
责任校对 马广洋

出版者 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081
电 话 (010)82109708(编辑室) (010)82109702(发行部)
(010)82109709(读者服务部)
传 真 (010)82106650
网 址 <http://www.castp.cn>
经 销 者 各地新华书店
印 刷 者 北京富泰印刷有限责任公司
开 本 710mm × 1 000mm 1/16
印 张 25 彩插 16 面
字 数 440 千字
版 次 2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷
定 价 120.00 元

—— 版权所有 · 翻印必究 ——

前 言

根据《Science》杂志和联合国预测，世界人口在 21 世纪将持续增长，2050 年达到 96 亿人，而到 2100 年可达 110 亿人。递增的人口将对食物和粮食、燃料、饲料类农产品需求逐年增加，而农业资源数量减少和质量降低，农田环境日益恶化，气候变化导致的极端天气和自然灾害日趋频繁，农田生态系统生产的稳定性和产能受自然条件的束缚难以持续增长，增产、稳产潜力有限，很难满足人类未来发展对农产品的迫切需求。如何保障国家粮食安全与农产品有效供应已成为 21 世纪世界各国必须解决的重大现实问题。我国农业生产已由传统农业转向现代农业，发展现代农业，提高农业生产的现代化水平和生产效率具有重要的战略意义。2013 年和 2014 年的中共中央、国务院一号文件指出，加快发展现代农业，坚持用现代物质条件装备农业，用现代科学技术改造农业，探索农业现代化之路；要加快推进农业现代化发展，保障粮食安全和农产品有效供给。现代农业作为现代工业、现代科学技术和科学管理方法装备起来的农业，可实现生产全过程各生产因素可控管理，控制设施动植物的生长发育和产量品质，达到按需生产的目标。

设施农业在保障我国粮食安全和农产品有效供给，确保“菜篮子”安全和食品安全方面具有不可或缺的作用，是现代农业的重要组成部分。设施农业作为环境可控，周年生产的高效农业生产系统，越来越受到人们的关注，在动植物和食用菌等农产品生产，尤其是高品质食品供给，解决人类隐性饥饿等方面具有十分重要应用价值。我国设施农业发展迅速，在果蔬、肉蛋奶、食用菌、药用植物、苗木和花卉等农产品供给方面发挥了重要作用，其中设施果蔬、肉蛋奶、食用菌等农产品生产规模及产量稳居世界首位，整个设施农业产值非常可观。譬如，到 2015 年年底我国设施园艺总面积已达 410.9 万 hm^2 ，人工光栽培面积也有 0.5 万 hm^2 以上，年产值超过万亿元，且呈逐年上升趋势。其中，设施蔬菜栽培面积占 95% 以上，设施蔬菜种植面积及总产量高居世界第一。2012 年，我国食用菌生产年产量 2 800 万 t，产值超过 1 500 亿元，占世界总产量的 80% 以上，已成为世界食用菌生产第一大国。设施养殖业发展也异常迅速，到 2011 年，我国仅家禽饲养业有 4 000 多万个养禽农户和企业，年产值已达 6 500 亿元。设施农业可通过环境因子调控来提高农业生产效率，使农业摆脱了自然条件的束缚，设施农业生产系统不同程度地具备了周年

生产的能力。

光作为环境信号和光合作用能量的唯一来源，是设施动植物、多数食用菌种类生长发育和产量品质形成的必需环境要素。自然界中，太阳光照不仅存在日变化，且随地理纬度、季节和天气状况的不同而发生改变。通常，我国北方地区冬春季节因阴天、雨、雪、雾霾等恶劣天气，以及大气污染和浮尘等因素的影响，温室内光照时间过短，光照强度不足和光质不平衡或缺现象严重，极大地制约了设施园艺作物的生长发育和优质高效生产、稳产。而且在高纬度地区因光照时间短，光周期不足对设施园艺生产潜力和效率的发挥限制较大。因此，温室补光技术装备需求十分迫切。另外，人工光栽培（植物组织培养、植物种苗繁育、蔬菜工厂生产和食用菌工厂等）规模持续大幅增加，已成为设施园艺产业的重要组成部分和生产领域。人工光的适宜性及智能管控水平决定了设施园艺生产效率和能耗的高低。显然，人工光调控在保障设施园艺优质、高产、稳产中具有重要的作用，是一种现代农业发展的必需工程手段，其技术装备研发与产业化需求日益迫切。实际上，根据设施生物的光生物学需求规律，针对性设置人工光环境及管理策略，进行动态智能化生产管控，设施园艺才能彻底摆脱自然光照的束缚，实现按需调控光环境。确切地讲，光照是设施园艺生产中最后一个实现智能调控的环境因子，其决定性推动力量是第4代半导体电光源 LED 照明技术的发展与进步。传统人工光源光谱能量分布固定，光质和光强无法调控，光合有效辐射比例小，无效热辐射较多，光效低，耗能高，无法针对农业生物需求做出适应性调整。LED 可发射出植物生理有效辐射 300 ~ 800nm 范围内的窄谱单色光，光质丰富，光源光谱可组合调制，光环境智能可控，而且 LED 光源具有环保节能、体积小、冷光源、低电压、直流电等光电优势，被业界人士誉为设施农业的理想光源。半导体固态照明的农业应用是必然趋势，将渗透替代传统光源，成为农业照明主流光源。

LED 又名发光二极管，属于一种半导体固态元器件。LED 是继白炽灯、低气压放电灯和高气压放电灯（HID）之后的第4代电光源。LED 照明技术是一种全新的固态半导体照明技术，它是利用半导体芯片作为发光材料，直接将电能转换为光能的发光器件，通过向半导体芯片两端加上正向电压，半导体中的电子和空穴发生复合从而辐射发出光子，进而发出光能。LED 光源在光电特性、结构特点上决定了它是设施园艺人工光源的最理想的替代电光源，可作为唯一光源或补光光源满足设施园艺作物光环境配置需求，最大程度地增加生物光效，实现设施园艺生产的大幅节能，提质增效。基于 LED 的固态照明的应用是过去几十年来设施园艺照明的最大进步之一，其广泛应用具有里程碑式

的意义。农业半导体照明属于现代农业照明范畴，是指采用半导体电光源及其智能化管控装备，按照农业生物的光环境需求规律和农业生产各领域的生产目标要求，利用人工光源创造出适宜的光环境或弥补自然光照的不足，调控农业生物的生长发育和繁殖，以实现现代农业“优质、高产、高效、生态、安全”生产目标的一种农业工程措施。农业半导体照明极大地拓展了设施园艺光环境调控的内涵、应用途径和实践价值，推动了设施园艺智能化控制和工业化进程，在探究设施园艺光质生物学规律方面具有不可替代作用。光环境调控属于现代物理农业工程范畴，安全、环保、节能，具有广阔的应用前景。

在节能减排和设施园艺优质高产目标的推动下，LED光源在现代农业中的应用技术及其光生物学基础研究已成为世界学术界关注的热点。世界范围内，美国、日本、荷兰、中国和韩国等国家已对LED光源农业应用技术开展了广泛的研究工作，取得了重大进展。LED照明技术正在引领设施农业光环境控制进入一个更节能、更环保、更精准可控的时代。农业半导体照明发展目标是研发半导体照明的生物学机理，研发形成用于设施农业各领域照明需求的通用或专门技术装备体系，实施智能、高效、生态、健康为特征的可控按需照明方式。中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所是国内最早从事LED光源设施园艺应用领域研究的，开展了10余年的研究工作。在“十二五”国家863计划项目“智能化植物工厂生产技术研究(2013AA103000)”之课题一“植物工厂LED节能光源及光环境智能控制技术”(2013AA103001)、“十二五”863计划“高效半导体照明关键材料技术研发”重大项目之课题十四“LED非视觉照明技术研究”(2011AA03A114)、“十二五”国家科技支撑项目“现代农业与养殖业专用LED光源开发与示范”(2011BAE01B00)、国家农业科技成果转化项目(71780749-3)、948项目(2011-Z7)等的资助下，在LED设施园艺尤其是植物工厂和温室补光领域应用方面取得了众多成果。2011年，团队成果获得中国农业科学院科学技术成果奖二等奖，2013年获得中华农业科技奖二等奖“植物LED光环境精准调控及节能高效生产关键技术研究与应用(KJ2013-R2-032-06)”。2015年获得中国农业科学院科学技术成果奖“智能植物工厂能效提升与营养品质调控关键技术”。课题组在2012年出版了《LED光源及其设施园艺应用》一书，总结了农用LED光源及其在设施园艺中的应用的国内外研究进展。为了更全面地反映国际上有关设施园艺半导体照明的最新研究成果，并总结和展示课题组近年设施园艺半导体照明研究成果，作者萌生了撰写本书的想法。本书力求能够反映世界和国内设施园艺用LED光源及其应用的最新研究进展，为业界人士提供参考，推动我国LED

光源在设施园艺中应用的基础研究与技术创新，壮大从业队伍和产业规模。

2014年，3位蓝光LED发明人获得诺贝尔物理学奖，2015年是联合国命名为国际光和光基技术年（International Year of Light and Light-based Technologies）两大事件对半导体照明科研与产业界人士产生巨大促动和激励作用。值此之际，《设施园艺半导体照明》撰写完毕并即将付梓，甚是欣慰。本书以光生物学、设施园艺学、蔬菜学、植物生理学、植物营养学、生物环境工程、LED半导体照明和智能控制技术等多学科交叉和有机结合为特点，以课题组研究成果为主线，系统展示了几十年来国内外农业半导体照明发展应用现状，以及设施园艺光质生物学和设施园艺LED光源应用技术与装备的研发全貌，深度阐述了设施园艺半导体照明的应用潜力、存在问题及发展前景。全书共10章。包括设施园艺半导体照明概述；设施园艺半导体照明的生物学基础；设施园艺半导体照明系统与技术装备；植物工厂半导体照明；食用菌工厂半导体照明；温室生产半导体照明；设施育苗半导体照明；设施芽苗菜生产半导体照明；药用植物设施栽培半导体照明和中国农业半导体照明研发与产业发展战略。本书适于大专院校和科研院所的农业生物环境工程、设施园艺科学与工程、植物营养学、园艺设施学、照明工程等专业的本科生、研究生和教师以及广大农业科技工作者、LED企业界人士阅读参考。本书编写过程中收集整理了硕士生邱志平、赵姣姣、余意、傅国海、周晚来等人的研究成果，在此表示感谢。希望本书能够对我国农业半导体照明技术研发与产业化发展起到一定推动作用，激活跨界对接与区域融合，健全LED研发链和产业链。由于著者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者提出意见和建议，以便再版时改进和完善。

最后，感谢“十二五”国家863课题“植物工厂节能LED光源及光环境智能控制技术”（课题编号：2013AA103001）的资助。

刘文科

2015年11月18日于北京

目 录

第 1 章 设施园艺半导体照明概述	(1)
1.1 我国农业发展概述	(3)
1.2 我国设施园艺发展概述	(13)
1.3 设施农业半导体照明概述	(27)
1.4 农业照明光源的光电特征	(40)
1.5 农业半导体照明的优势与复杂性	(53)
1.6 设施园艺光逆境特征	(58)
1.7 设施园艺半导体照明的内容、目标与途径	(59)
1.8 设施园艺半导体照明研发与产业化现状	(60)
第 2 章 设施园艺半导体照明的生物学基础	(65)
2.1 植物光环境需求的生物学基础	(66)
2.2 光环境调控园艺作物生长发育影响因素	(84)
2.3 光合机构及其活性调节	(85)
2.4 植物光质生物学	(92)
2.5 光环境对设施作物叶绿素荧光参数的调控作用	(107)
2.6 设施蔬菜光环境调控生物学目标与品质生理	(108)
2.7 光合作用调增策略	(111)
2.8 紫外光 (UV) 植物光生物学	(112)
2.9 光环境调控的蔬菜种类基础	(119)
2.10 人工光蔬菜生产光环境调控目标与品质生理	(121)
2.11 光环境调控的分子生物学基础	(136)
第 3 章 设施园艺半导体照明系统与技术装备	(138)
3.1 人工光生产系统光环境调控	(141)
3.2 温室补光系统	(145)

3.3	日光温室补光	(149)
3.4	物联网控制系统	(150)
3.5	设施园艺半导体照明技术	(151)
3.6	温室网膜及套袋光环境调控系统	(158)
3.7	强化或节能光环境控制方法	(160)
3.8	农业照明与光伏农业利用	(176)
第4章	植物工厂半导体照明	(179)
4.1	植物工厂概念与特征	(183)
4.2	植物工厂的核心技术与应用范畴	(190)
4.3	植物工厂高产的光环境调控原理	(195)
4.4	人工光在植物工厂中的应用	(205)
4.5	植物工厂光照与农产品品质调控	(209)
4.6	激光光源植物工厂	(213)
4.7	植物工厂技术发展展望	(214)
4.8	光伏农业	(214)
4.9	垂直农业	(215)
4.10	工业农业	(216)
4.11	植物工厂半导体照明发展战略	(218)
第5章	食用菌工厂半导体照明	(219)
5.1	食用菌工厂化栽培现状	(221)
5.2	食用菌营养与环境需求特性	(223)
5.3	食用菌光生物学	(225)
5.4	光质对食用菌生长发育的影响	(228)
5.5	食用菌 UV 光利用	(232)
5.6	食用菌品质的光环境调控	(234)
5.7	食用菌光环境调控 LED 灯与照明技术研发	(234)
5.8	食用菌半导体照明发展战略	(234)

第 6 章 温室生产半导体照明	(237)
6.1 温室 LED 半导体补光的必要性和迫切性	(238)
6.2 LED 温室补光发展史	(239)
6.3 温室光环境日变化和季节变化特征	(241)
6.4 温室温度日变化和季节变化特征	(241)
6.5 温室 CO ₂ 浓度日变化和季节变化特征	(242)
6.6 温室补光类型及其光环境调控目标	(243)
6.7 温室半导体补光优势分析	(246)
6.8 补光智能控制系统	(248)
6.9 温室生产半导体照明发展战略	(249)
第 7 章 设施育苗半导体照明	(252)
7.1 设施育苗必要性和迫切性	(253)
7.2 组培苗培育及其光环境调控	(253)
7.3 种苗繁育及其光环境调控	(261)
7.4 嫁接苗和扦插苗的光环境调控	(264)
7.5 濒危林木育苗光环境调控	(268)
7.6 设施育苗半导体照明发展战略	(269)
第 8 章 设施芽苗菜生产半导体照明	(270)
8.1 设施芽苗菜营养价值	(271)
8.2 设施芽苗菜的光环境需求	(271)
8.3 设施芽苗菜的光质调控	(272)
8.4 光强与光周期调控	(278)
8.5 设施芽苗菜紫外光耐受性与响应	(278)
8.6 环境胁迫调控芽苗菜品质	(279)
8.7 设施芽苗菜半导体照明发展战略	(279)
第 9 章 药用植物设施栽培半导体照明	(281)
9.1 药用植物设施栽培重要性和迫切性	(282)

9.2	药用植物设施栽培发展策略	(284)
9.3	药用植物设施无土栽培技术思路	(285)
9.4	光照对药用植物生长发育、产量品质的调控作用	(286)
9.5	药用植物设施半水培栽培方法	(304)
9.6	温度对药用植物生长与品质调控作用	(307)
9.7	药用植物设施无土栽培半导体照明发展战略	(308)
第10章	中国农业半导体照明研发与产业发展战略	(310)
10.1	中国半导体照明发展现状与问题	(311)
10.2	中国农业半导体照明存在的问题与对策	(315)
10.3	中国农业半导体照明的发展前景	(324)
10.4	中国农业半导体照明产业发展战略	(324)
10.5	中国农业半导体照明研发概述与大事件	(328)
10.6	设施园艺半导体照明研发与产业发展评估	(337)
参考文献	(340)

第1章 设施园艺半导体照明概述

摘要：21世纪，世界人口持续膨胀，在农业资源短缺、环境污染、能源紧缺、气候变化导致极端天气灾害频发的地球条件下维持提升大田露地农业生态系统的稳定性和高效生产功能，提高农产品的产量和品质是一个世界性难题，潜力已十分有限。传统农业生产系统产能萎缩与食物需求剧增间的矛盾逐年突出。设施农业是替代传统农业，解决上述问题的有效途径。设施农业可通过精准管控农业资源与能源投入，精确调控环境因素和生产要素，通过工程技术装备大幅度提高生产效率和产量品质。设施园艺已经成为设施农业以及农业中的支柱产业，在蔬菜、花卉、食用菌等生产中占重要地位。设施园艺半导体照明是半导体照明非视觉应用的重要领域，是设施园艺工程学科的新兴研究分支，是农业半导体照明的最重要组成部分。LED的发明与技术进步成就了设施园艺半导体照明以及农业半导体照明，彻底实现了设施农业光环境的智能按需调控，彻底完成了设施农业生产全要素智能按需控制，具有里程碑式的意义。但是，设施园艺生产系统的多样性和生物形态的复杂性使得设施园艺半导体照明体系十分庞杂，其内涵与外延极其丰富，需要深入了解农业生物生理代谢过程的光环境响应特性与生长发育调控机制，有针对性地研制出对应的光环境调控策略及软硬件产品。本章阐述了我国农业及设施园艺产业发展现状，农业半导体照明的需求必要性和迫切性，分析了农业照明电光源的光电特征，以及中国与设施园艺半导体照明发展现状。

俗话说，国以民为本，民以食为天（汉书·郿食其传）。古人云，洪范八政，食政为首。可见，农业在国民经济中的重要地位是不言而喻。根据联合国预测，世界人口在21世纪将持续增长，2050年达到96亿人，而到2100年可达110亿人（Gerland等，2014），而非2001年《Nature》杂志刊文预测的84亿人（Lutz等，2001）。可以明确，递增的人口将对粮食等农产品、燃料、纤维、饲料类农产品及功能化合物需求逐年增加，而土地等农业资源却在不断减少，环境污染日益恶化，农田土壤退化加速，气候变化导致的极端天气和自然灾害日趋频繁，大田露地农业生态系统生产的稳定性降低，产能受自然条件的束缚很难持续增长，已逐渐无法满足人类未来发展的生产和生活材料的迫切需求。如何保障粮食安全与农产品的有效供应已成为21世纪必须解决的重大现实问题。当前，在人口膨胀、资源短缺、环境污染、能源紧缺、气候变化导致灾害频发的地球条件下如何持续提高农产品的产量和品质是一个世界性难题。就我国而

言，传统农业生产系统（大田露地生产系统和简陋设施农业生产系统）因抗自然灾害能力弱，人工调控生产要素的技术装备水平低，产能呈不断下降趋势，而人口增加对食物需求的增加，供给端与消费端间矛盾日益突出。

自 2004 年的促进农民增收到如今的加快农业现代化建设，中共中央、国务院每年的一号文件连续 13 年锁定“三农”主题（2004—2016）。党的十八大提出，坚持走中国特色新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化道路，推动信息化和工业化深度融合、工业化和城镇化良性互动、城镇化和农业现代化相互协调，促进工业化、信息化、城镇化、农业现代化同步发展。中央农村工作会议进一步强调，依靠改革创新推进农业现代化。农业科技是确保国家粮食安全的基础支撑，是突破资源环境约束的必然选择，是加快现代农业建设的决定力量。更加依靠农业科技创新，是农业现代化发展的时代特征。

中共中央、国务院 2013 年《关于加快发展现代农业进一步增强农村发展活力的若干意见》，2014 年《关于全面深化农村改革加快推进农业现代化的若干意见》，提出把饭碗牢牢端在自己手上，是治国理政必须长期坚持的基本方针。2015 年中共中央、国务院一号文件《关于加大改革创新力度加快农业现代化建设的若干意见》发布。发展现代农业，推进农业现代化建设成为主题，核心是按照稳粮增收、提质增效、创新驱动的总要求，继续全面深化农村改革，全面推进农村法治建设，推动新型工业化、信息化、城镇化和农业现代化同步发展，努力在提高粮食生产能力上挖掘新潜力，在优化农业结构上开辟新途径，在转变农业发展方式上寻求新突破。尽快从主要追求产量和依赖资源消耗的粗放经营转到数量质量效益并重、注重提高竞争力、注重农业科技创新、注重可持续发展的集约发展上来，走产出高效、产品安全、资源节约、环境友好的现代农业发展道路。当前，大力发展现代农业，保障粮食安全和农产品的有效供给已成为国家的长期发展战略。2013 年和 2014 年中共中央、国务院一号文件指出，加快发展现代农业，坚持用现代物质条件装备农业，用现代科学技术改造农业，探索农业现代化之路。2015 年 7 月的国务院常务会议上，李克强总理指出，要用工业理念发展农业。要推进多种形式的适度规模经营，培育新型经营主体，引导农民依法有序流转承包地。应大力发展农业产业，要规模效益。2016 年中共中央、国务院一号文件题为《关于落实发展新理念加快农业现代化，实现全面小康的若干意见》。总之，现代农业发展最根本的保障途径是立足科技创新，增加农业生产系统的产能，优质高产、稳产，甚至是周年生产。

1.1 我国农业发展概述

1.1.1 我国农业发展现状

中国是一个拥有 13 多亿人口的发展中大国, 确保粮食有效供给, 实现自给自足, 保障粮食安全, 战略意义十分重大。中国农业已取得了举世瞩目的成绩, 中国以占世界 6% 的淡水、9% 的耕地养活了占世界 21% 的人口, 而美国却以占世界 21% 的耕地仅养活了占世界 5% 的人口。农业是国民经济的基础, 是第二和第三产业存在和发展的前提。农业农村是保障经济持续健康发展的“压舱石”, 是调节劳动力就业波动的“蓄水池”, 是扩大消费新的增长点。农业是依靠动物、植物和微生物自然生长发育功能和繁育机能来达到规模化生产农产品目的的生物生产方式。农业不仅是人类粮食、果蔬、肉蛋奶、棉花等生存必需品的唯一来源, 也是工业和服务业运行与发展的重要原材料来源。因此, 发展现代农业, 提高农业生产的现代化水平, 实现农业的可持续发展对保障国家粮食安全, 提高农业资源利用效率, 保护生态环境, 促进国家经济平衡发展, 解决好我国“三农”问题, 对维持社会长治久安均起到了不可或缺的作用。

粮食安全事关国家安全。近年来, 一系列中共中央、国务院一号文件把发展现代农业, 保障粮食安全放到突出位置。新形势下, 中央提出国家粮食安全战略, 强调中国人的饭碗任何时候都要牢牢端在自己手上。2014 年 12 月发布公告, 粮食产量实现“十一连增”。全年粮食产量 60 710 万 t, 增产 0.9%, 人均占有量近 450kg。其中, 谷物产量为 55 726.9 万 t。2015 年全国粮食总产量 62 143.5 万 t, 比 2014 年增产 2.4%, 实现 12 年连增。中央农村工作会议 2013 年 12 月在北京举行, 提出要用最严谨的标准、最严格的监管、确保广大人民群众“舌尖上的安全”。还提出要确保粮食安全, 坚守 18 亿亩*耕地红线。然而, 农业内部因种植结构改变导致的土地资源紧张问题日益凸显, 其中, 蔬菜与粮食争地问题已十分严重。种植业生产水平普遍不高, 比如, 设施园艺产业。截至 2014 年年底, 中国设施园艺面积 6 000 万亩以上, 设施蔬菜产量 2.5 亿 t, 单产 6.58kg/m²。其中, 日光温室面积 1 500 万亩, 设施园艺产值超过 1 万亿元, 其中日光温室蔬菜总产量超过 1 亿 t, 单产 10kg/m²。虽然设施农业是提高农产品有效供给的可靠途径, 但我国设施农业远未实现资源和能源投入的精准管控, 环境因素和生产环节的精确调控, 产量品质和生产效率亟待大幅度提高。以产量为例, 荷兰番茄和甜椒平均产量 49.6kg/m² 和 30kg/m²

* 1 亩≈667m², 15 亩=1hm², 全书同

(吴卫华, 2009), 是我国的 3~5 倍。我国设施蔬菜生产的高产量仅仅是通过单纯靠扩大栽培面积实现的, 具有诸多不利之处, 经营粗放, 效率低下。提质增效已迫在眉睫, 必须加以重视。

1.1.2 我国农业发展面临的问题

随着世界人口的持续增长, 人类对食物和粮食、燃料、纤维、饲料类农产品及功能化合物需求逐年增加, 而土地等农业资源不断减少, 环境污染日益恶化, 气候变化和自然变化灾害日趋频繁。传统农田生产系统的稳定性和产能受生产条件的局限增产潜力已接近极限, 无法满足粮食安全与食品有效供应。传统农业的露地农田生产模式存在问题日益突出。同时, 土地抛荒、粗放经营方式效率低下。进口粮入市导致国产粮价高难销, 粮贱伤农问题严重。因此, 追求持续增产和农民收入受损, 是不可持续的农业。总而言之, 主要问题表现在以下几个方面。

1.1.2.1 耕地资源减少, 耕地污染退化严重, 土壤肥力衰减, 生产力下降

根据第二次全国土地调查显示, 截至 2009 年年底, 全国耕地面积约为 20.31 亿亩, 人均耕地仅有 1.52 亩, 不到世界人均水平的 1/2。根据第二次全国土地调查数据, 中国有 5 000 万亩左右的耕地受到中重度污染。2014 年 4 月, 环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 全国土壤总的点位超标率为 16.1%, 其中, 耕地土壤点位污染物超标率达 19.4%, 污染形势更令人担忧。2014 年 5 月, 国家质检总局、国家标准委批准发布了由国土资源部与农业部牵头制定的《高标准农田建设通则》国家标准 (GB/T 30600—2014)。高标准农田是指土地平整、集中连片、设施完善、农田配套、土壤肥沃、生态良好、抗灾能力强、与现代农业生产和经营方式相适应的旱涝保收、高产稳产, 划定为永久基本农田的耕地。到 2020 年, 建成集中连片、旱涝保收的高标准农田 8 亿亩。到 2020 年, 全国有效灌溉面积达 10 亿亩, 节水灌溉 7 亿亩。据联合国粮农组织 (FAO) 2012 年统计数据, 我国水稻、玉米和大豆的平均单产分别仅为美国的 80.8%、76.9% 和 71.2%, 单产水平不高。加快农业现代化建设, 面临着资源约束不断趋紧、自然灾害影响不断加大、环境污染日益加剧、气候变化影响不断加深、城乡要素流动加速、继续增产难度加大等诸多挑战。

耕地地力后劲不足, 土壤养分失衡, 生态功能变差, 污染日趋加剧, 这是我国耕地质量的整体现状。2014 年, 农业部发布的《关于全国耕地质量等级情况的公报》显示, 全国耕地按质量等级由高到低依次划分为 1~10 等。2012 年底评价为 1~3 等的耕地面积占耕地总面积的 27.3%, 4~6 等的占 44.8%,

7~10等占27.9%。综合来看,中低等耕地占约8成,超1/4的耕地基础地力相对较差,生产障碍因素突出,短时间内较难得到根本改善。目前,我国耕地退化面积占耕地总面积的40%以上,东北黑土层变薄,南方土壤酸化,华北平原耕层变浅。

Guo等(2010)研究发现,我国主要农田土壤pH值20年平均下降了约0.5个单位,相当于土壤酸量(H^+)在原有基础上增加了2.2倍。其中,经济作物体系土壤酸化比粮食作物体系更为严重;即使是过去被认为对酸化不敏感的石灰性土壤,其pH值也同样出现了显著下降的现象。在自然条件下土壤酸化是一个相对缓慢的过程,土壤pH值每下降1个单位通常需要数百年甚至上千年,而我国过去20年来的高投入集约化农业生产大大加速了农田土壤的酸化过程。通过系统的理论分析,作者发现氮肥过量施用是我国农田土壤酸化加速的首要原因。在华北冬小麦-夏玉米轮作、华南水稻-小麦轮作等“一年两熟”种植体系中氮肥大量施用每年所产生的酸量($20\sim 30\text{kmol}/\text{hm}^2$)约占总产酸量的60%;蔬菜大棚等设施农业中过量施氮的年产酸量(约 $200\text{kmol}/\text{hm}^2$)占总产酸量的90%。秸秆移出带走的盐基对土壤酸化的贡献($15\sim 20\text{kmol}/\text{hm}^2$)虽然因农作物种类和生物产量而有所差异,但明显低于氮肥施用的贡献。长期以来被当作土壤酸化主要原因的酸雨在农田土壤酸化中的贡献并不大,仅为 $0.5\sim 2.0\text{kmol}/\text{hm}^2$ 。可见,在保证粮食生产的前提下严格控制氮肥施用量,减少过量施氮,不仅是作物高产高效的需要,而且也是缓解农田土壤酸化的重要途径。目前生产上仍然普遍存在“氮肥越多越高产”的错误观念,过量施氮已成为集约化农业生产体系相当普遍的严重问题。自20世纪80年代,我国氮肥用量迅猛增长,到90年代中期我国已成为世界氮肥生产和消费的第一大国,在占世界7%的耕地上消耗了全球35%的氮肥。统计资料显示:1981—2008年,粮食年产量从3.25亿t增加到5.29亿t,增长了63%,而氮肥消费量却从1118万t增加到3292万t,增长了近2倍。

我国已制定了明确的发展目标,要围绕实现农产品数量安全、农产品质量安全和农业生态安全,提高田间设施水平和耕地基础地力,改善耕地质量环境,确保到2020年建成8亿亩集中连片、旱涝保收的高标准农田;耕地基础地力提高0.5个等级,土壤有机质含量提高0.5个百分点;有机肥资源利用率提高20个百分点,秸秆还田达到80%,实现农药、化肥用量零增长,耕地酸化、盐渍化、污染等问题得到有效控制。在发展路径上,要统筹当前和长远、生产和生态、工程和工艺、农机与农艺,突出“改、培、保、控”四字要领,“改”就是改良土壤,重点改良酸化、盐渍化等障碍土壤,改进栽培方式;

“培”就是培肥地力，重点提高土壤有机质含量和耕地基础地力，“保”就是保水保肥，重点推广测土配方施肥和水肥一体化，推进深耕深松，推行等高种植；“控”就是控污修复，重点控施化肥、农药，阻控重金属和有机物污染，控制农膜残留。2013年6月，世界粮农组织大会通过了将每年的12月5日作为世界土壤日以及确定2015年为国际土壤年的决议，该决议也在2013年12月20日的联合国大会上得到了认可。2014年12月5日是联合国首个“世界土壤日”，2015国际土壤年也在当天正式启动。IYS 2015的正式口号是“健康土壤带来健康生活”（Healthy Soils for a Healthy Life），旨在提高人们对土壤在粮食安全和基本生态系统功能方面重要作用的认识和了解。

1.1.2.2 气候变化负效应及极端气候影响导致农田系统生产稳定性

人类活动所导致的气候变化以温度和 CO_2 浓度升高为主要特征。20世纪50年代以来全球超过50%的地域气候变暖。预计21世纪末，全球大气 CO_2 浓度可达936HL/L，平均地表温度在1986—2005年的基础上升高 $0.3 \sim 4.8^\circ\text{C}$ （IPCC，2013）。据2014年11月6日世界气象组织发布的《2013年WMO温室气体公报》称，2013年全球大气中主要温室气体的浓度再次突破了有观测记录以来的最高点， CO_2 、 CH_4 、 N_2O 的平均浓度分别比1750年工业革命前增加了42%、153%和21%。其中， CO_2 浓度年增幅达 2.9×10^{-6} ，突破了过去30年的最大值。据《2013年中国温室气体公报》显示，2013年青海瓦里关的全球大气本底站大气中的3种主要温室气体 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的年平均浓度分别升至 397.3×10^{-6} 、 $1\ 886 \times 10^{-9}$ 和 326.4×10^{-9} ，高于同期全球平均值（ 396.0×10^{-6} 、 $1\ 824 \times 10^{-9}$ 和 325.9×10^{-9} ），但与北半球中纬度地区平均浓度大体相当，均创下了1990年建站以来的新高。

气候变化主要通过温度、降水、 CO_2 浓度、极端气候事件等因素直接影响农业生产，其在不同的区域和不同的季节对农业生产的影响亦有所不同。通过近20年的研究来看，气候的变化对我国农业的影响既有有利的一面也有有害的一面，但总体来讲，负面影响远大于有利因素。负面影响是造成我国未来粮食生产波动增大的主要原因之一，甚至威胁到我国粮食生产的安全问题。

气候变化对农业发展的有利影响。随着全球气候的变化，气温上升、 CO_2 等温室气体浓度增加、区域热量条件改变等直接影响作物生长的外部环境发生着细微的变化。这些变化直接影响到作物的生长。从作物生长需求的环境条件而言，气候变暖使得低温、冷害等灾害减少、作物春季物候期提前、种植期延长、生长期内的热量充足，这在很大程度上促进了作物的生长，有利于粮食的生产。 CO_2 是作物生长的必要元素之一，其浓度的增加可提高作物的水分利用