

序

当今世界，农业正经历一场由技术驱动的深刻变革。全球人口持续增长、耕地资源日趋紧张、气候变化影响加剧，传统农业生产模式已难以满足粮食安全与可持续发展的双重需求。在此背景下，智慧农业应运而生，成为推动农业现代化、提升生产效能与韧性的关键路径。而在智慧农业的技术体系中，遥感技术犹如“天眼”，以其宏观、快速、客观和动态的观测能力，为农业全链条的精准感知、智能决策与精细管理提供了不可替代的数据支撑。

纵观该书内容，系统梳理了遥感技术与智慧农业融合发展的理论体系、方法框架与实践路径。全书从智慧农业的兴起背景与核心内涵出发，深入剖析了天空地一体化感知、农业大数据与人工智能、智能农机与机器人等关键技术如何共同构成智慧农业的“感知-决策-执行”闭环。书中不仅对遥感在作物长势监测、产量预估、水资源管理等核心场景中的应用进行了细致阐述，还重点介绍了当前主流的机器学习与深度学习算法在农情信息提取与建模中的前沿进展，体现了“数据驱动、AI 赋能”的现代农业发展新范式。

作者团队长期致力于农林生态系统结构与功能的观测和遥感反演研究，积累了丰富的理论成果与实践经验。这些扎实的研究基础，为该书系统阐述遥感赋能智慧农业的原理、方法与实践提供了深厚的技术支撑与案例来源。值得一提的是，该书并未止步于理论探讨与方法介绍，还通过多个典型案例展现了遥感技术赋能智慧农业监管的完整流程，既有助于科研人员把握技术脉络，也能为农业经营管理者及相关专业学生提供可借鉴、可操作的实践指南。

我国正处于从农业大国向农业强国转型的关键时期。发展农业新质生产力，推动农业信息化、智能化、绿色化，离不开遥感这样的前沿技术与农业生产的深度融合。该书的出版，恰逢其时，它不仅凝聚了作者团队在农业遥感领域的深厚积累，也为相关领域的学者、工程师和管理者提供了一本体系完整、内容扎实、指向明确的参考著作。

相信该书能为推动我国智慧农业的发展、助力乡村振兴与粮食安全战略实施贡献一份重要的学术力量。谨以此为序，并向作者团队及所有为农业现代化不懈努力的同行者致以诚挚敬意！

中国科学院地理科学与资源研究所 吴朝阳研究员



2026 年 1 月

前 言

进入 21 世纪以来,以物联网、大数据、人工智能和遥感技术为代表的新一轮科技革命,正在深刻重塑农业的生产方式与管理模式。传统农业依赖经验、粗放经营的发展模式,已难以应对资源约束趋紧、气候变化加剧、劳动力结构性短缺等多重挑战。发展智慧农业,推动农业向数字化、网络化、智能化转型,成为保障国家粮食安全、实现农业可持续发展的必然选择。

在智慧农业的技术体系中,遥感技术凭借其宏观、快速、客观、无损的监测能力,发挥着不可或缺的“天眼”作用。它能够跨越时空限制,动态感知农作物生长环境、识别田间胁迫、评估产量形势,为从“靠天吃饭”到“知天而作”的农业新范式提供了关键的数据基石。然而,如何将海量的遥感观测数据转化为可理解、可操作、可决策的农情信息,并最终服务于田间的精准作业,是横亘在技术与应用之间的一道鸿沟。本书的写作初衷,正是为了系统梳理“遥感”赋能“智慧农业”的全链条逻辑,架起一座连接理论、方法与具体实践的桥梁。

本书内容共分为 10 章,围绕“原理-方法-实践”的逻辑框架展开,旨在系统构建遥感赋能智慧农业的知识体系。

第一部分为原理篇,着重阐述智慧农业与遥感技术的基础理论,共包含两章内容:第 1 章全景式介绍了智慧农业的兴起背景、核心内涵、发展历程及其关键技术,由汤旭光编写;第 2 章系统讲解农业遥感的观测原理、主流遥感观测平台及常用遥感数据源,为读者建立整体的认知框架,由方美红编写。

第二部分为方法篇,聚焦农业信息获取与分析的核心方法,共包含两章内容:第 3 章详细阐述叶面积指数、叶绿素含量、地上生物量、碳水通量、作物物候等 10 余项关键农情参数的地面测量与遥感反演方法,构成了一套完整的方法论工具箱,由汤旭光编写;第 4 章聚焦于当前智慧农业的“智能中枢”——人工智能算法,系统解读从经典机器学习到深度学习的模型原理及其在农业遥感中的典型应用场景,由汤旭光、郭芬芬编写。

第三部分为实践篇,通过系列典型案例,展示理论方法在真实农业场景中的综合应用,共包含第 5~10 章。本部分围绕作物长势、水稻分蘖数、产量预测、干旱胁迫、水分利用效率、种植制度等主题,系统呈现从数据到信息再到决策的完整闭环。其中第 7 章由中国农业科学院作物科学研究所金秀良团队撰写;其余章节由汤旭光及其研究生陈亚楠、苏超、陈林涛、李轩等共同完成。

本书的特色在于力求原理清晰、方法实用、案例鲜活。在撰写过程中,我们不仅注重对基础概念和经典理论的阐述,也着重介绍了当前主流的技术方法与前沿进展,并融入了作者团队在相关领域长期科研实践中的一些体会与思考。我们希望本书既能作为农业遥感、智慧

农业、农业信息技术等相关专业高年级本科生与研究生的教学参考书，也能为从事农业科研、技术推广、产业应用的广大工作者提供帮助。

在此特别感谢国家重点研发计划“战略性科技创新合作”项目“基于无人机遥感的水稻长势智慧感知与系统研发”（2026YFE0212200）、高分辨率对地观测系统国家重大专项课题“野外观测数据获取技术与星-机-地综合观测方法研究”（21-Y20B01-9001-19/22）、浙江省自然科学基金联合基金重点项目（LGEZ26F020004）及杭州师范大学的大力支持。本书的成稿，得益于国内外众多同行卓越研究成果的启发，在此谨致诚挚谢意。本书涉及的研究依托大量无人机航测与野外试验工作，团队凌在盈老师、张立钢老师，以及徐秋怡、张辛佳、赵雪诗怡、胡相燕、张鑫妮、卢钰钰、秦兴祥、崔文举等同学在数据采集与处理中付出了辛勤努力，在此一并致谢。

由于智慧农业与遥感技术本身处于快速演进之中，加之编者水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请各位读者和专家不吝指正，以期未来不断完善。我们衷心希望，本书能为推动遥感技术与农业的深度融合、为加速我国智慧农业的发展和农业新质生产力的形成，贡献一份绵薄之力。

汤旭光等

2026年1月于余杭塘河畔

目 录

序

前言

第 1 章 智慧农业概述	1
1.1 智慧农业的定义与特征	1
1.2 智慧农业的内涵及其与相关概念的辨析	2
1.3 智慧农业的发展历程、现状与趋势	4
1.4 智慧农业的关键技术	8
1.5 遥感技术在智慧农业中的应用与挑战	13
1.6 本章小结	16
参考文献	17
第 2 章 农业遥感技术基础	20
2.1 农业遥感的物理基础与光谱机制	20
2.2 农业典型地物的光谱响应特征	22
2.3 农业遥感观测平台与尺度响应特性	25
2.4 农业遥感传感器类型与信息维度	29
2.5 本章小结	32
参考文献	32
第 3 章 主要农情信息监测方法	34
3.1 引言	34
3.2 叶面积指数	35
3.3 分蘖数	38
3.4 叶绿素含量	39
3.5 叶片含水量	42
3.6 地上生物量	43
3.7 作物产量	45
3.8 日光诱导叶绿素荧光	47

3.9 作物物候	49
3.10 作物种植结构	51
3.11 碳水通量	52
3.12 土壤水分	55
3.13 本章小结	58
参考文献	58
第4章 常用的人工智能算法	62
4.1 引言	62
4.2 机器学习算法	63
4.3 深度学习算法	77
4.4 本章小结	99
参考文献	99
第5章 基于无人机多光谱的水稻关键生育期长势遥感监测	102
5.1 引言	102
5.2 试验设计与数据处理	104
5.3 主要结果分析	110
5.4 讨论	115
5.5 本章小结	116
参考文献	116
第6章 基于可解释性机器学习的水稻分蘖数无人机遥感监测	118
6.1 引言	118
6.2 试验设计与数据处理	119
6.3 主要结果分析	125
6.4 讨论	129
6.5 本章小结	130
参考文献	131
第7章 基于无人机多源遥感数据和机器学习的棉花估产	133
7.1 引言	133
7.2 试验设计与数据处理	134
7.3 主要结果分析	140
7.4 讨论	145
7.5 本章小结	146

参考文献	146
第 8 章 基于多生态指标的农田干旱胁迫遥感监测	150
8.1 引言	150
8.2 试验设计与数据处理	151
8.3 主要结果分析	155
8.4 讨论	161
8.5 本章小结	163
参考文献	163
第 9 章 全球尺度农田生态系统水分利用效率时空动态	167
9.1 引言	167
9.2 试验设计与数据处理	168
9.3 主要结果分析	171
9.4 讨论	186
9.5 本章小结	195
参考文献	195
第 10 章 基于 Sentinel-1/2 影像与机器学习的稻作模式识别方法	198
10.1 引言	198
10.2 试验设计与数据处理	200
10.3 主要结果分析	205
10.4 讨论	210
10.5 本章小结	211
参考文献	211

第 1 章 智慧农业概述

◎ 本章导读

当前，全球农业正面临人口增长、资源趋紧与气候变化的严峻挑战，传统农业生产模式已难以承载保障粮食安全与实现绿色可持续发展的时代重任。智慧农业应运而生，以遥感为“天眼”、物联网为“神经”、大数据与人工智能为“大脑”，把每一寸土地、每一株作物、每一滴水都转化为可感知、可计算、可优化的数字变量，通过全方位的信息感知、科学化的智能决策与精细化的精准作业，深刻改变了农业“靠天吃饭”的被动局面，正重塑着现代农业的底层逻辑与发展范式。在此背景下，我国已将智慧农业作为建设农业强国的战略制高点，2024 年 10 月农业农村部印发《全国智慧农业行动计划（2024—2028 年）》，旨在通过三大行动推动智慧农业发展。2025 年中央一号文件首次提出“发展农业新质生产力”，将智慧农业定位为农业现代化的核心引擎。本书开篇之章，旨在系统梳理智慧农业的兴起背景、核心内涵与发展脉络，剖析其如何汇聚技术、数据与政策之力，为破解农业深层次矛盾、赋能乡村振兴提供全新动能。

1.1 智慧农业的定义与特征

“智慧农业”一词最早可追溯至 20 世纪 90 年代欧美学者提出的“精准农业”（precision agriculture）。随着物联网、人工智能等新一代信息技术的兴起，其内涵逐步从“变量投入、精准作业”扩展为“全要素数字化、全场景智能决策”的现代农业新范式。2010 年，联合国粮食及农业组织（FAO）在海牙召开的“全球农业、粮食安全和气候变化会议”上提出“气候智慧型农业”（climate-smart agriculture, CSA），强调以可持续方式提升生产力、增强韧性并减少温室气体排放，为全球智慧农业奠定了三重目标框架。

1.1.1 智慧农业的定义

智慧农业作为现代农业发展的前沿形态，其概念源于对农业系统深刻认知与前沿信息技术融合的追求。它并非单一技术的应用，而是一个集成了多种技术与理念的复杂系统。至今，学术界尚未对智慧农业作出一个确切的定义，但各权威机构与学者的核心观点高度一致。

FAO 将其定义为“一种应用创新技术和方法，以提高农业生产效率、盈利能力、可持续性和韧性的农业管理模式”。它强调通过信息通信技术（ICT），实现对农业生产、经营、管

理和服务全链条的优化。

美国农业部（USDA）在其报告中指出，智慧农业的核心是“通过传感器、自动化设备和数据分析来管理作物生产和畜牧养殖”，其目标是实现“更精确、更资源高效”的农业。

在国内，学术界普遍接受的定义是：智慧农业是集成物联网、云计算、大数据、人工智能、卫星导航、遥感等现代信息技术，贯穿于农业生产的产前、产中、产后各个环节，实现农业生产环境的智能感知、生产数据的智能分析、生产过程的智能决策与精准作业，是农业信息化发展从数字化到网络化再到智能化的高级阶段^[1]。

综合国内外观点，本书将智慧农业定义为：以数据为关键生产要素，通过天空地一体化传感网络全面感知农业对象与环境，运用大数据分析 with 人工智能技术进行智能决策与诊断，并依托智能装备实现精准作业与自主执行的农业现代化范式。其本质是信息物理系统（CPS）在农业领域的全面应用。

1.1.2 智慧农业的特征

基于智慧农业的概念界定，其核心特征可归结为以数据为驱动、贯穿“感知-决策-执行-管控-服务”全链条的智能化体系^[2]，具体体现在以下五个方面。

一是感知体系“天空地一体化”。借助卫星遥感、无人机、物联网传感器等构成的立体监测网络，实现对农业对象与环境的全维度、高频次信息获取，奠定了农业数据化与透明化的基石，彻底改变了传统农业的“模糊”认知模式。

二是决策核心“模型算法化”。以大数据分析 with 人工智能模型为核心驱动力，对海量农业数据进行深度挖掘与智能诊断，将生产管理决策从依赖经验转化为依靠科学模拟与优化分析，实现从“人脑思维”到“数字智能”的跨越。

三是执行终端“装备智能化”。通过农业机器人、智能灌溉系统等智能农机装备，将优化决策指令转化为精准、高效的田间行动，显著降低对人力的依赖，推动农业生产向无人化、少人化作业范式演进。

四是过程管理“管控精准化”。依托实时数据和智能决策，对水、肥、药、料等生产要素实施按需投入与动态调配，实现从粗放管理到精密管控的转变，在保障产量的同时，最大限度地提高资源利用效率，达成集约化与绿色化的统一。

五是服务体系“平台化与个性化”。基于云计算与大数据平台，汇聚、融通全产业链数据，从而支撑起远程诊断、产销对接、金融保险等在线服务，使农业经营者能够便捷地获取定制化、一站式的解决方案，全面提升农业产业的服务效能与韧性。

1.2 智慧农业的内涵及其与相关概念的辨析

1.2.1 智慧农业的内涵

智慧农业的内涵丰富而深刻，可以从以下四个层面进行解析。

(1) 技术层面：信息技术的系统性集成

智慧农业不是单项技术的简单应用，而是物联网（感知层）、云计算与大数据（平台层）、人工智能与模型（决策层）、机器人技术与自动化（执行层）等新一代信息技术在农业领域的系统性集成与深度融合^[3]。这构成了智慧农业的“感官”、“大脑”和“手脚”，形成一个完整的闭环系统。

(2) 数据层面：数据驱动的核心范式

数据是智慧农业的“新农资”和核心驱动力。依靠数据决策，是智慧农业区别于传统农业依靠经验的根本特征。它强调对海量、多源的农业数据进行采集、管理、分析与挖掘，将数据转化为可执行的洞察力，从而实现从“种得好”到“管得好”的转变。

(3) 过程层面：全产业链的优化重塑

智慧农业的内涵超越了单一的田间生产，覆盖了从育种、耕种、管护、收获、加工到储运、销售的全产业链。它通过对各个环节的数字化、网络化和智能化改造，打破信息孤岛，实现全链条的信息互通与协同优化，最终提升整个农业产业体系的运行效率与价值^[4]。

(4) 目标层面：多目标的协同统一

智慧农业的最终目标是实现经济、社会与环境效益的协同统一。在经济效益上，追求降本增效与提质增收；在社会效益上，保障国家粮食安全与农产品质量安全，缓解劳动力结构性短缺问题；在环境效益上，追求资源（水、肥、药、土地）的集约化与高效利用，推动农业的绿色、低碳与可持续发展，这与我国“发展农业新质生产力”的战略要求高度契合。

总体而言，智慧农业是一个动态发展的概念，其技术体系在演进，应用场景在拓展。但其核心内涵始终围绕着以数据为驱动、以智能技术为手段、以全流程优化为路径、以实现农业高质量与可持续发展为终极目标这一主线。

1.2.2 智慧农业与相关概念的辨析

在学术探讨与产业实践中，“智慧农业”常与“精准农业”、“数字农业”和“智能农业”等概念交织出现。这些术语虽紧密相关，但其内涵与外延各有侧重。厘清它们之间的关系，是准确把握智慧农业本质特征的关键。

(1) 概念界定

精准农业：其核心是基于空间变异的精细管理^[5]。它以“3S”技术——地理信息系统（GIS）、全球定位系统（GPS）和遥感（RS）技术为技术支撑，通过获取田间作物和环境的时空差异信息，实现农事操作的定量决策、变量投入和定位实施，以期达到资源节约、环境友好和效益提升的目标。

数字农业：其核心是农业过程的数字化表达^[6]。它将农业全要素、全系统、全过程转化为数字世界的可计算数据，以数据资源为关键生产要素，通过物联网、大数据、云计算等数字技术，实现农业的数字化表征、数字化设计和数字化管理，是农业数字化转型的高级形态。

智能农业：其核心是机器装备的智能化替代^[7]。它侧重于将电子技术、控制技术和人工智能集成于农业机械与装备，赋予其信息感知、智能控制和自主作业的能力，以实现农业生

产环节的自动化、无人化和工厂化，显著降低对人力的依赖。

智慧农业：其核心是人类智慧的系统化赋能。它强调综合运用物联网、大数据、人工智能、机器人等现代信息技术，构建一个“感知-决策-执行-管控-服务”全链条的智能化体系，旨在全面提升人类对复杂农业系统的综合认知、智能决策与精准管控能力，是农业信息化发展的集大成阶段。

(2) 内在联系

上述四个概念并非相互割裂，而是存在着层层递进、相辅相成的紧密联系。

从演进视角看，它们代表了现代农业在不同技术发展阶段所呈现的工程科技特征。数字农业是数字化转型的基石，为精准农业和智能农业提供了数据支撑；精准农业与智能农业则是在数字化的基础上，分别在生产管理精细化和装备执行自动化两个方向上的深化应用。

从系统视角看，数字农业是智慧农业的基础，它构建了贯穿全产业链的“数字神经网络”；精准农业是智慧农业在田间生产管理层面的核心应用场景，体现了其精细化的管理思想；智能农业是智慧农业在装备执行层面的关键技术支撑，构成了其强大的“四肢”。最终，这三者在更高层次上融合，共同构成了智慧农业这一能够模拟、延伸和增强人类综合管理能力的复杂系统。

(3) 核心区别

尽管联系紧密，但四者在核心目标、技术体系与应用侧重点上存在明显差异（表 1-1）。

表 1-1 智慧农业与相关概念的核心区别

概念名称	核心目标与侧重点	关键技术支持	表现形式
精准农业	因“地”制宜，实现生产要素（水、肥、药）的变量按需投入，强调管理的“精准”	“3S”技术、变量作业装备	处方图、变量施肥播种、精准灌溉
数字农业	万物皆数，实现农业对象与过程的数字化建模与表达，强调要素的“数字孪生”	物联网、大数据、云计算	农业数据平台、数字模型、数字化流程
智能农业	机器代人，实现农业生产环节的自动化与无人化操作，强调装备的“智能”	智能传感器、控制算法、农业机器人、自动驾驶	无人农场、植物工厂、自动驾驶拖拉机
智慧农业	系统化赋能，实现农业全链条的科学决策与协同优化，强调系统的“智慧”	综合以上所有技术，并突出模型算法与智慧平台的核心作用	全产业链智能决策支持系统、自适应生产管理系统

总之，智慧农业并非一个孤立的概念，而是在数字农业奠定的数据根基上，深度融合了精准农业的精细化管理理念和智能农业的自动化执行能力，最终迈向更高层次的，具有自感知、自学习、自决策、自执行能力的农业发展阶段。它是现代农业信息技术集成应用的综合体现，代表了农业发展的未来方向。

1.3 智慧农业的发展历程、现状与趋势

1.3.1 智慧农业的发展历程

智慧农业并非无源之水，其发展历程是一部人类运用工具、知识与技术，不断突破体能

和脑力极限，以更高效、更精准的方式从土地中获取财富的历史。纵观数千年，这一历程可大致划分为四个承前启后的阶段。

（1）古代农业：经验智慧的积淀与劳动工具的初步解放

在工业革命之前的漫长岁月里，农业的进步是缓慢而坚实的，其核心特征体现为对人力与畜力的直接替代，以及在生产实践中不断积累的经验知识。这一阶段，无论是东方还是西方，人类都在运用自身的智慧，不断探索如何更高效地从土地中获取生活资料。

在中国，这一历程尤为显著。首先，生产工具的革新是推动农业发展最直接的动力。从石器到青铜器，再到铁器的广泛使用，农具的每一次变革都极大地降低了劳动强度，提升了耕作效率。尤为关键的是春秋战国时期铁犁和牛耕技术的推广，它使个体农户能够耕种更多的土地，从根本上解放了生产力，为农业社会的繁荣奠定了基石。其次，一套独特的精耕细作农学体系逐渐形成。古代农学典籍，如《汜胜之书》系统总结出“趣时，和土，务粪、泽”等核心原则，体现了通过观察物候、土壤墒情等环境因素进行农事决策的早期智慧。而代田法、区田法等先进的耕作制度，则是通过优化种植模式来提升单位面积产量的系统性方法。此外，在水力利用方面，筒车、翻车等高效灌溉工具的发明，标志着人类开始成功利用自然动力，将农民从繁重的人力提水灌溉中部分解放出来，实现了生产效能的又一次跃升。

放眼世界其他古代文明，同样闪耀着农业智慧的光芒。在两河流域与古埃及，人们建造了大规模的灌溉系统，展现了通过宏大的工程手段调控水资源、适应自然环境以确保农业生产的宏观管理智慧。在罗马帝国，轮作制的推广与《论农务》等著作的出现，标志着当时的人们对庄园管理进行了系统性的经验总结与知识固化。

总而言之，古代农业阶段主要依赖人力和畜力，其知识体系基于代代相传的直观经验，整体生产效率相对低下。然而，正是这一时期在工具、农艺和管理上的漫长积淀，奠定了此后数千年农业生产的核心原则，为后续的农业革命播下了智慧的种子。

（2）近代农业：机械革命与科学理论的奠基

以蒸汽机和内燃机的发明与应用为标志的工业革命，为农业生产带来了翻天覆地的变化。这一阶段的核心特征，是对传统人力和畜力进行了革命性的动力替代，农业由此迈入了依靠机械与科学的新时代。

这一转型在欧美国家率先展开并引领了潮流。在机械化方面，自19世纪中叶起，蒸汽拖拉机、联合收割机等大型机械开始被广泛应用于田间，实现了在耕、种、收等关键农事环节上对人工的直接替代。这使得农业作业效率成百倍地提升，并促使大量农村劳动力从土地上解放出来，转向其他产业。与此同时，农业的化学化与科学化进程也取得了奠基性突破。德国化学家李比希提出的植物矿质营养学说，直接推动了现代化肥工业的兴起，为作物增产提供了新的物质基础；而孟德尔发现的遗传定律，则为后来的杂交育种技术奠定了坚实的科学原理。至此，农业开始从依赖代代相传的“经验”，转向依靠实验与理论的“科学”，生产要素的投入首次得到了系统性的理论指导。

反观中国，近代农业在复杂的社会环境中艰难地缓慢跟进。直至新中国成立后，国家明确提出“农业机械化”的发展口号，才标志着中国开始系统性地追赶世界步伐，旨在通过普

及机械装备，将农民从繁重的体力劳动中彻底解放出来。

总体而言，近代农业阶段的根本特征在于以机械力大规模替代人力和畜力，并以化学与生物科学指导农业实践。这意味着农业的“体力”得到了前所未有的增强，然而，生产的“脑力”部分，即何时播种、施肥、灌溉等决策行为，仍主要依赖于生产者个人的经验与判断。

（3）现代农业（20 世纪下半叶至今）：信息革命与精准管理

进入 20 世纪下半叶，以计算机、卫星和信息技术为代表的新技术浪潮，推动农业进入一个以信息为核心的全新发展阶段。这一时期的标志性转变，是农业管理的精细化与决策的初步数字化，为后续的智慧化革命奠定了坚实基础。

这一变革由发达国家率先引领。20 世纪八九十年代，随着“3S”技术体系的成熟，美国等国家开创了“精准农业”的新范式^[8,9]。其核心在于，通过技术手段获取并分析田块内部在土壤肥力、墒情、作物长势等方面的空间差异信息，进而实现变量施肥、播种和灌溉。这意味着农业生产从传统粗放的“平均管理”，跨越到了依据客观数据进行“按需管理”的新层次，在显著提升产量的同时，有效减少了资源浪费与面源污染，体现了农业可持续发展的新方向。与此同时，自动化技术开始应用于特定生产环节，带有自动导航系统的拖拉机、挤奶机器人等装备的出现，标志着在机械化基础上，农业正朝着单一环节的自动化方向演进。

在中国，现代农业技术的探索起步于 21 世纪初。通过引进和示范精准农业技术，中国开启了追赶世界先进水平的步伐^[10]。国家层面的战略规划，如 863 计划、“十三五”国家科技创新规划等，明确将农业信息化、智能化列为重点发展方向，有力推动了相关技术在国内的消化、吸收与再创新，逐步缩小了与国际先进水平的差距。

总体而言，现代农业阶段的根本特征在于延伸了农业的“感官”，使其能够精准感知田间的空间差异；同时，信息技术开始辅助人类的“大脑”，为农事决策提供定量化的科学依据。这是农业从依赖经验的“技艺”走向依靠数据的“科学”的关键一步，为最终迈向全面智慧化的农业新时代铺平了道路。

（4）智慧农业（21 世纪以来）：系统融合与智能赋能

当前，我们正处在以物联网、大数据、人工智能和机器人技术为标志的智慧农业新阶段。这一阶段的核心突破，在于构建了一个具备完整“感知-决策-执行”能力的闭环智能系统，实现了从依赖“人的智慧”到形成“系统智慧”的根本性飞跃。

这一系统首先通过系统化感知实现了农业“感官”的全域化。借助由卫星、无人机和物联网传感器构成的天空地一体化传感网，系统能够对作物、土壤、气候、病虫害等关键信息进行实时、全域、立体化监测，彻底革新了传统农业依赖人工观察的信息获取方式^[11,12]。

在此基础上，智能化决策构成了智慧农业区别于以往所有阶段的根本特征。通过运用大数据分析和人工智能模型（如机器学习、深度学习）^[13,14]，系统能够对感知获取的海量数据进行深度挖掘与智能诊断，实现产量预测、病虫害预警、智能灌溉等精准决策，推动农业管理从传统的“经验驱动”迈向先进的“数据与模型驱动”。

最终，通过自主化执行完成智能决策的落地。无人驾驶拖拉机、农业机器人、智能灌溉系统等先进装备，将优化后的决策指令转化为精准、高效的田间作业行动，推动无人化农场、植物工厂等全新生产模式从概念走向现实^[15]。这标志着农业生产力的解放达到了新的高度——不仅在体力劳动上，更在脑力决策层面实现了对人力的大规模替代。

总体而言，智慧农业阶段的显著特征在于多项技术的系统性集成，数据成为核心生产要素，整个农业生产系统演进为一个能够自感知、自学习、自决策、自执行的“智慧生命体”，展现出前所未有的自主性与智能化水平。

1.3.2 智慧农业的发展现状与趋势

智慧农业作为全球现代农业发展的核心方向，正推动农业生产方式的深刻变革。各国通过积极推进人工智能、大数据、云计算等现代信息技术与农业的深度融合，正在构建资源节约、环境友好、高效智能的新型农业生产体系。

（1）全球战略布局与技术应用

世界主要发达国家与国际组织已将智慧农业纳入国家战略层面。美国推出的“面向2030年食品和农业的科学突破”计划，德国发布的《农业4.0：数字化农业的未来》白皮书，日本制定的“面向下一代的农林渔业技术创新”规划，以及联合国粮食及农业组织倡导的“农业机器人与自动化支持可持续作物生产”项目，共同体现了全球范围内对智慧农业发展的战略重视^[2,16]。这些计划均将大数据分析、人工智能决策、智能装备研发作为重点发展方向，旨在通过技术创新解决提升农业生产效率、资源可持续利用和粮食安全等全球性挑战。

（2）多元化发展模式与特色路径

根据不同国家的资源禀赋和产业特点，全球智慧农业形成了各具特色的发展模式。美国依托其广阔的耕地资源，重点发展以大田作物为核心的精准农业技术体系，实现了大规模农场的智能化管理；德国凭借其强大的工业基础，专注于高端智能农机装备的研发与制造，为全球智慧农业提供了先进的硬件支持；荷兰基于其有限的土地资源，创新性地发展了集约化、智能化的温室生产技术，成为设施农业智慧化的典范；日本则针对其多山地地形和小规模经营的特点，研发了适应性强的小型智能农业装备，为小农经济条件下的智慧农业发展提供了可行路径^[17,18]。这些多元化的发展模式为不同国家和地区的智慧农业建设提供了丰富的实践参考。

（3）中国的发展战略与实践进展

中国将智慧农业定位为农业现代化发展的核心引擎，通过系统的政策体系推动其快速发展。自2018年以来，连续8年的中央一号文件均对智慧农业发展作出重要部署。农业农村部先后出台《农业农村部关于大力发展智慧农业的指导意见》和《全国智慧农业行动计划（2024—2028年）》，从技术创新、场景建设、产业生态等维度进行系统规划。2025年中央一号文件首次提出“发展农业新质生产力”，进一步明确了智慧农业在推动农业现代化转型中

的战略地位。在政策引导和现实需求的双重驱动下，中国智慧农业在技术研发、装备制造、场景应用等方面取得显著进展，正成为加快建设农业强国的重要支撑^[19,20]。

（4）未来发展趋势与重点方向

全球智慧农业正朝着更加智能化、精准化、集成化的方向发展。技术层面，人工智能与大数据的深度融合将进一步提升农业生产的预测预警能力和决策智能化水平；应用层面，天空地一体化感知系统、智能化的作业装备、全产业链的数据平台将实现更广泛的应用；产业层面，智慧农业将推动农业生产、经营、管理和服务体系的全面重构。同时，各国在智慧农业发展过程中也更加注重技术的普惠性和适应性，推动先进技术与不同类型农业经营主体的有效对接，确保智慧农业成果能够惠及更广大农户，为全球粮食安全与农业可持续发展提供坚实保障。

1.4 智慧农业的关键技术

智慧农业的关键技术体系是一个集成了“感知-决策-执行-管控-服务”全链条的综合性系统。其核心在于利用现代信息技术，模拟和延伸人类的认知、决策与执行能力，最终实现农业系统的智能化、自动化和精细化运营。该技术体系主要包含以下五大关键技术。

1.4.1 天空地一体化感知技术

天空地一体化感知技术是指通过卫星遥感、航空遥感（含无人机）和地面物联网传感设备，构建一个立体化、全覆盖的农业信息采集网络，实现对农业对象（作物、土壤、水体）与环境（气象、病虫害）的全域、实时、动态感知。该技术是智慧农业的底层基础设施与核心支撑，构成了农业系统的“数字感官”，彻底改变了传统农业依赖人工经验与离散观测的认知模式，为实现农业的精准化、智能化管理奠定了坚实的数据基石。

关键技术构成：①利用卫星遥感（satellite remote sensing）提供大范围的宏观观测数据，用于监测作物种植面积、长势、干旱、洪涝等。例如，利用多光谱、高光谱影像进行植被指数[如NDVI（归一化植被指数）]计算，反演叶面积指数、叶绿素含量等生化参数。②利用航空遥感（含无人机）弥补卫星遥感在时空分辨率上的不足，可灵活获取厘米级高精度影像，用于精准变量施药、病害早期识别、产量预估等。③物联网（IoT）技术，通过部署在田间地头的各类传感器（如叶面积指数、作物物候、日光诱导叶绿素荧光、碳水通量、土壤温湿度、微气象等），实现高频率、近距离的环境数据采集，为精准灌溉、施肥与长势监测提供直接依据。相关内容在第2、3章详细阐述。

需要注意的是单一平台的感知数据存在局限性，未来的核心发展方向在于多源数据融合^[21,22]。如图1-1所示，通过将不同时空和光谱分辨率的天空地数据进行融合与协同分析，可以生成更完整、更精确的农业信息产品。

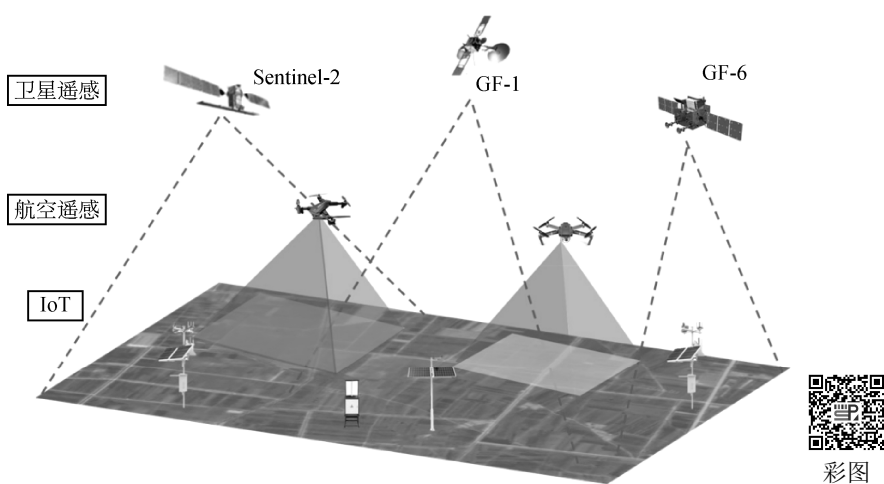


图 1-1 农田天空地一体化监测示意图^[21]

1.4.2 农业大数据与人工智能技术

农业大数据与人工智能技术共同构成了智慧农业的“智能中枢”，是将海量农业数据转化为可执行知识和决策的核心驱动力。这一技术组合标志着农业从“经验驱动”向“数据与模型驱动”的根本性范式转变，为农业生产带来了革命性的变革。

农业大数据是指在农业各环节（生产、经营、管理、服务）产生的，无法用传统数据处理方法在合理时间内进行捕捉、管理和处理的巨量数据集合。其核心价值在于通过分析，揭示隐藏的模式、未知的相关性和趋势，以支持精准决策。其具有典型的“5V”特征^[12]：①数据体量巨大，来源于天空地一体化感知、农机作业、市场流通等多个渠道；②数据类型复杂多样，包括结构化数据、半结构化数据和非结构化数据；③数据产生和更新的速度极快，特别是在物联网环境下；④数据质量存在差异，需要经过严格的清洗和验证；⑤虽然数据密度较低，但通过深度分析可以挖掘出巨大价值。这些数据主要来自生产环境、作物本体、生产管理、市场流通和基因序列等不同领域，构成了智慧农业分析的坚实基础，具体见表 1-2。

表 1-2 农业大数据的主要来源与类型

数据类别	具体来源	数据类型	典型应用
生产环境数据	气象站、土壤传感器、无人机、卫星	数值、时序数据、影像	环境调控、灾害预警
作物本体数据	光谱传感器、相机、无人机	影像、视频	长势监测、病虫害识别
生产管理数据	智能农机、农事记录 APP	作业轨迹、用量记录、文本	作业质量监控、溯源
市场流通数据	电商平台、批发市场、供应链系统	价格、库存、交易记录	市场预测、产销对接
基因序列数据	分子育种、基因测序	基因序列、生物信息	品种选育、性状分析

为了有效处理这些多源异构的农业大数据，需要构建基于云计算或边缘计算的大数据平台。该平台包含完整的技术栈：①数据采集与集成，使用 Flume、Kafka 等工具进行数据实时采集；②数据存储与管理，利用 HDFS、HBase、数据湖等技术存储海量数据；③数据处理与分析，依靠 Spark、Flink 等分布式计算框架进行批量与流式数据处理；④数据可视化，

通过图表、仪表盘和 GIS 地图等方式，直观呈现分析结果。这一完整的技术体系确保了农业大数据的价值能够得到充分挖掘和利用。

人工智能（artificial intelligence, AI）技术作为智慧农业的“决策引擎”，通过机器学习（machine learning, ML）和深度学习（deep learning, DL）等算法，从农业大数据中提取有价值的洞察。关键技术构成与应用包括：①在计算机视觉领域，卷积神经网络（CNN）等深度学习模型被广泛应用于病虫害智能诊断、果实成熟度识别与自动采收、杂草识别等场景，其识别精度往往超过人眼判断^[13]。②在预测模型与时空分析方面，通过回归模型、时间序列分析（如 ARIMA、LSTM）和地理统计方法，能够对作物产量、市场价格和农业灾害进行准确预测^[23]。③知识图谱技术则将农业领域的专业知识以结构化形式组织起来，支持智能问答和决策推理。④而当前最前沿的农业大模型技术，通过在超大规模农业数据上进行预训练，展现出强大的泛化能力，能够实现更自然的交互和更智能的决策支持。

尽管农业大数据与人工智能技术展现出巨大潜力，但在实际应用中仍面临诸多挑战^[24]。数据质量与标注问题成为训练可靠 AI 模型的主要瓶颈，模型的可解释性不足影响了用户对 AI 决策的信任，算力需求与成本限制了技术在广大农村地区的普及，如何有效融合领域知识与数据驱动模型仍需深入探索。展望未来，多模态数据融合、AI 与农业机理模型深度耦合、轻量化与边缘 AI 部署、可信 AI 技术发展等方向将成为重点突破的领域。

农业大数据与人工智能技术的深度融合，正在重塑现代农业的发展模式。随着数据资源的持续积累和 AI 算法的不断突破，这两项技术必将成为引领农业新质生产力发展的核心动能，为全球农业的可持续发展提供强有力的智慧支撑。从数据采集到智能决策的完整技术链条，不仅提升了农业生产的效率和质量，更为应对未来粮食安全挑战提供了创新性的解决方案。

1.4.3 智能农机与机器人技术

智能农机与机器人技术作为智慧农业体系的“四肢”和“手足”，承担着将数字化决策转化为精准物理操作的关键职能。这项技术通过集成先进的导航、感知、控制和执行机构，致力于实现农业生产全过程的自动化与智能化，从根本上改变传统农业依赖人工作业的模式，显著提升作业效率与精度，有效缓解农业劳动力短缺问题。

在自动驾驶与无人驾驶领域，基于全球导航卫星系统（包括北斗、GPS 等）、惯性测量单元和机器视觉技术的多源融合导航系统，使大型农业机械实现了厘米级精度的自主作业。这种技术不仅能够确保拖拉机、收割机等设备沿预定路径精确行驶，还能通过环境感知系统实时避障，大幅提升作业安全性与连续性。特别是在夜间作业和大规模农场管理中，无人驾驶技术展现出显著优势。

农业机器人作为智能农机技术的重要分支，正在向专业化、精细化方向发展^[25,26]。采摘机器人通过多模态视觉系统精准识别果实成熟度，配合柔性末端执行器实现选择性采收，有效解决水果、蔬菜等经济作物采收劳动力密集的难题。除草与施药机器人则基于深度学习算法，能够准确区分作物与杂草，实现机械臂精准拔除或靶向喷雾，减少农药使用量达 50%以