

赵春江, 1964年4月生, 男, 博士, 研究员, 博士生导师。现任国家农业信息化工程技术研究中心主任、国家农业智能装备工程技术研究中心首席专家、农业部农业信息技术综合性重点实验室主任、农业物联网技术国家地方联合工程实验室主任, 中国农业工程学会副理事长、中国农机学会副理事长、中国人工智能学会智能农业专业技术委员会主任、农业部农业物联网试区工程专家组长。

长期从事农业信息技术研究, 主要研究方向为农业智能系统与精准农业技术装备。牵头实施了我国863计划智能化农业信息技术应用示范工程、数字农业、精准农业等重大科技项目。先后发表学术论文200多篇, 出版《精准农业研究与实践》《农业智能系统》《信息技术在农业节水中的应用》等著作, 获得50多项国家发明专利、4项国家科技进步二等奖和国家863计划十五周年突出贡献奖、国家973计划先进个人奖等荣誉。

中国水肥一体化装备的分类及发展方向^{*}

赵春江, 郭文忠 (国家农业信息化工程技术研究中心, 国家农业智能装备工程技术研究中心, 农业部都市农业(北方)重点实验室, 北京 100097)

[引用信息] 赵春江, 郭文忠. 中国水肥一体化装备的分类及发展方向[J]. 农业工程技术(温室园艺), 2017, 37(07): 10-15.

【摘要】详细论述了中国水肥一体化装备的特点, 从设备的肥料通道、回液模式、水肥配比方式、控制决策、设备运行方式、肥料形式以及管理规模等方面对水肥一体化装备进行了分类, 并根据中国农业生产特点及现代信息技术发展, 提出了物联网+水肥一体化的未来发展方向和建议。

引言

中国农业生产中过量灌溉施肥导致水肥资源浪费、土壤酸化和水体环境污染问题突出, 对农业可持续发展和粮食安全生产带来严峻的挑战。据统计, 中国用约占世界6%的淡水资源和9%的耕地, 以及30%左右的化肥, 生产出了占世界26%的农产品, 养活了世界近20%的人口^[1]。可见水肥在中国农业生产中的重要作用, 但肥料用量巨大, 缺水比缺地更严峻, 是中国农业发展一个不可回避的现实问题。目前, 中国农业年用水总量

约3600亿 m^3 , 仅灌溉区每年缺水就在300亿 m^3 左右, 而中国农业灌溉用水利用系数只有0.3~0.4, 水分生产率不足 $1\text{ kg}/\text{m}^3$, 仅为美国、以色列等世界发达国家的1/2左右^[2-3]。中国农业化肥年施用量已超过6000万吨, 约占世界总消费量的1/3, 单位面积施肥量是世界平均水平的3倍左右; 为获得高产而盲目大量施肥, 我国肥料的当季有效利用率平均只有30%左右, 比发达国家低20%左右^[4-5]。这种高耗低效的生产方式带来了资源浪费、生态退化和环境污染等系列问题, 已经成为制约中国

农业可持续发展的瓶颈^[1]。水肥一体化是当今世界公认的一项高效节水节肥农业新技术，主要根据土壤特性和作物生长规律，利用灌溉设备同时把水分和养分均匀、准确、定时定量地供应给作物。发达国家农业生产的经验表明，推广水肥一体化技术是实现农业可持续发展的关键。因此，水肥一体化技术是发展高产、优质、高效、生态、安全现代农业的重大技术，是建设资源节约型、环境友好型现代农业的“一号技术”^[6]。多年实践证明，水肥一体化是“控水减肥”的重要途径。然而，我国当前的水肥一体化技术推广仍面临着技术产品不够配套、政策支持不够全面等现实难题^[7]。

自 20 世纪 60 年代，发达国家已大范围推广应用灌溉施肥技术，并借助于控制技术与传感器技术的发展，研发了具有报警功能的 MICRO-WASTER 系列灌溉控制器以及 HYDRA 灌溉管理专家系统等一系列产品。荷兰、以色列和日本等发达国家自 20 世纪 60 年代开始推广应用水肥一体化技术，如今技术已相当成熟。中国的水肥一体化技术自 1974 年由墨西哥引进滴灌设备算起，已有 40 多年的发展历史。中国现代化设施栽培中采用的先进灌溉设备几乎都引自农业发达国家，系统设备成本较高，以作物生长模型为设备的控制策略，不能适应中国作物的种类、品种、栽培模式、区域、季节多样化的复杂生长特点，在实际应用时将控制策略更改为时序控制或环境参数控制。

中国也自主开发了一些自动化灌溉与施肥控制系统。例如，国家节水灌溉北京工程技术研究中心开发的田间闸管灌溉系统，北京农业信息技术研究中心基于 Geen-AM 可编程控制器研发的肥能达施肥装备，中国农业机械化研究院研制的 2000 型温室自动灌溉施肥系统，以及天津市水利科学研究所研制的 FICS-1 和 FICS-2 型滴灌施肥智能化控制系统等均对我国水肥一体化设备开发及推广发挥了积极的作用。但是，目前国内应用的众多灌溉施肥装备由于缺乏水肥的智能决策及配套系统技术，且基于时间控制策略与作物环境相关性不强，水肥决策的智能水平低，普及性并不乐观，尤其针对规模

化生产的水肥管理，尚缺少大型园区或基地水肥综合管理系统。可见，我国在水肥一体化方面急需一套成熟实用、普及广、功能稳定以及配套齐全的科学产品，特别是针对大规模生产基地多作物水肥管理的装备及配套系统需求迫切。为推进水肥一体化技术的发展，国家近年来相继出台了一系列政策：国务院印发了《国家农业节水纲要（2012-2020）》，提出加强水肥一体化的集成应用；农业部下发《关于推进农田节水工作的意见》，将水肥一体化列为主推技术，要求强化技术集成与示范推广；尤其是 2013 年和 2016 年农业部办公厅连续印发了《水肥一体化技术指导意见》和《推进水肥一体化实施方案（2016-2020 年）》，对中国水肥一体化的发展做出了战略部署，着力推进水肥一体化技术的本土化、轻型化和产业化。水肥一体化最近几年受国家政策和经费的大力支持，全国各地得到了广泛的应用。

随着科学技术的发展，水肥一体化的研究也得到了进一步地发展。目前对水肥一体化技术及其配套装备也有不同的认识和分类。

水肥一体化的定义和设备的分类

根据认识来分类

传统水肥一体化技术 将可溶肥料溶解到水里，棍棒或机械搅拌，通过田间放水灌溉或田间管道，更进一步的还通过滴灌或微喷灌等装置均匀的进入田间土壤中，被作物吸收利用的技术。

现代水肥一体化技术 通过实时自动采集作物生长环境参数和作物生育信息参数，通过模型构建耦合作物与环境信息，智能决策作物的水肥需求，通过配套施肥系统，实现水肥一体精准施入，大大提高灌水和肥料的利用效率。

根据设备肥料通道来分类

单通道水肥一体化设备 该种设备主要是针对作物需肥简单，用于单一肥料来源设计开发的小型自动或智能灌溉施肥机，只有一个吸肥通道，结构紧凑、便于拆卸、操作简便、价格低廉、故障率低，可满足单体温室或大田作物的应用，农户易掌握，推广面积大（图 1）。



图 1 单通道水肥一体化设备



图 2 多通道水肥一体化设备

多通道水肥一体化设备 该种设备针对作物在不同生育期需肥不同，能够及时调整肥料成分而开发的大中型灌溉施肥机。由多个吸肥通道，可设定配比比例，启动程序和系统自动配比。肥料来源都是可溶解的，各组分配制溶解液储存在储液桶，通过管道连接对应吸肥通道，进入灌溉施肥机配肥，随水进入到田间。这种设备需要专业技术人员操作，根据不同的控制策略自动或智能运行（图 2）。

根据回液是否处理来分类

开放式水肥一体化设备 该种设备是针对于

溶解肥料或营养液不回收的水肥一体化系统开发的灌溉施肥机。多用于土壤栽培或不做回收系统的基质栽培，无回收系统和过滤消毒净化系统。

封闭式水肥一体化设备 该种设备是针对溶解肥料或营养液可回收的水肥一体化系统开发的灌溉施肥机。多用于水培、雾培或有回收系统的基质栽培，需要做回收系统和过滤消毒净化系统。过滤消毒净化系统由慢砂过滤、紫外消毒、臭氧消毒、加热消毒等功能选配组成，水肥利用率高，是一种可以实现零排放的水肥一体化系统。

根据肥料和水源的配比方式来分类

机械注入式 该方法是指在灌溉时，采用人工、泵、压差式施肥罐或文丘里吸肥等装置将肥料倒入或注入直接灌溉田间的小水渠或水管中，随灌溉水使用肥料的一种措施（图 3）。

自动配肥式 该方法是指在灌溉配肥时，根据作物的灌溉施肥指标或阈值，设定肥料配比程序，通过文丘里或施肥泵，采用工业化控制程序，控制电磁阀，实现肥料的自动配比，是目前常用的自动化配比方式。

智能配肥式 这种方法是根据作物生育期不同的施肥需水特征，耦合生产区环境因素构建智能决策模型，经过电脑运行计算，智能判断控制系统执行水肥一体化设备系统完成灌溉施肥。近年来，采用养分原位监测技术采集到的作物土壤的养分水分信息，对决策模型的参数进行适时修正已经成为重要的研究方向，也是将来水肥一体化系统智能化程度的重要评判依据和未来水肥一体化应用的重要方向。



图 3 几种机械式注肥装置（图片来源于互联网）

根据灌溉施肥机的控制决策来分类

经验决策法 该方法完全凭借生产者或管理者在长期工作中积累的经验以及解决问题所形成的惯性思维方式，对具体作物生产过程中水肥施用时间和用量进行决策判断。

时序控制法 该方法一般根据当地的土壤类型、气候及作物的生长状况等实际情况，由管理者或用户对灌溉和施肥的启动及关闭时间进行提前设定，从时间尺度上控制水肥用量。

环境参数法 该方法通过采集环境信息，主要是光照辐射积累量或者土壤含水量，主要依据对作物生长具有重要影响的某一环境参数控制水肥的施用时间及用量，在控制程序中设定阈值，也有将多个关键环境参数进行耦合而实现水肥控制的方法。

模型决策法 该方法根据不同作物的水肥需求特征，构建基于物联网技术的灌溉施肥模型，采集田间作物生长信息和环境信息，经过运算形成水肥管理决策，智能控制灌溉施肥机运行配肥和田间灌溉动作，这是最高级的控制决策方法，也是智能水肥一体化设备的重要体现（图4）。

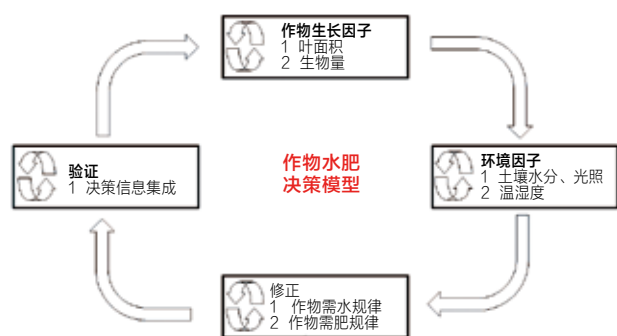


图4 作物水肥决策模型示意图

根据灌溉施肥的运行方式来分类

固定式施肥机 将灌溉施肥机安装在固定的地点，专门建造设备房，配套安装砂石过滤、反冲洗过滤系统，对水质要求高的还可以安装净化水装置，通过管道网进入田间。

移动式施肥机 将灌溉施肥机安装在大型移动喷灌机上，随着喷灌机的移动进行灌溉施肥。也有将灌溉施肥机安装在卡车上，分片区操作，

可减少管道的铺设或减少安装施肥机的数量。陆绍德等^[8]开发的HJYDS-1型移动式水肥药一体化施肥车，主要由轮式拖卡车、水肥箱（高低各1个）、加压设备等组成。该施肥机适合于面积较大的种植作物，一次性可灌溉面积更大，工效更高，可利用的范围更广，实用性更强，具有节约成本的特点，更适用于规模化种植基地。

根据肥料形式来分类

无机水肥一体化系统 该种设备是针对化学合成方法生产的单一型或复合型水溶性肥料的施用设计开发的水肥一体化系统，用于土壤栽培和无土栽培的非有机生产。该系统可配备单一吸肥通道或多个吸肥通道，分别用于复合型无机肥施用，及氮、磷、钾等多种单一型无机肥源的配比混合施用。这种设备有利于提高劳动效率，实现水肥自动化、智能化管理，已在生产中推广应用（图5）。



图5 无机水肥一体化系统



图6 有机水肥一体化系统

中国作物水肥一体化设备的发展方向

由于中国地域广阔，种植的作物种类多、栽培方式多样、栽培季节差异大、田间配套设施条件不同、管理水平高低不同，各地科研工作者或企业相继开发了多种形式的国产灌溉施肥机，对水肥一体化的推广起到了积极的作用。因此，无论从国家政策要求，还是国内实际市场需求，研发适合中国国情的水肥一体化装备及配套系统体系非常必要，这对于大力推进中国现代农业智能化发展具有重要意义。

进入21世纪，随着网络传输技术、信息感知技术、数据处理技术与现代控制技术急速发展，也使得“物联网”技术逐渐发展起来，它综合了多种现代电子信息技术，并将其综合、完善和发展，它正以前所未有的速度应用于社会、经济和人类生活各个领域，被称为一场新的产业技术革命。物联网技术为现代农业智能化水肥管理提供了一种有效手段。由于美国、以色列、日本、法国、加拿大等一些国家信息技术发展早，基础设施条件较好，而且从事农业的人口少，因此农业现代化与精细化程度较高，在大田粮食作物种植精准作业、设施农业环境监测和灌溉施肥控制、果园生产的信息采集和灌溉控制、畜禽水产精细化养殖监测网络和精细养殖等方面应用广泛。例如：法国在2008年就已建立了较为完备的农业区域监测网络系统，用于指导农业生产中的施肥、施药、收获等过程；荷兰开发的Velos智能化母猪管理系统，已在荷兰及欧美许多国家得到广泛应用，该系统具有自动管理、自动供料、自动报警和传输等

有机水肥一体化系统 该种设备是针对液态有机肥源的制备和施用设计开发的，它（图6）由有机液肥发酵子系统和有机灌溉液肥管理子系统两部分组成，与微灌溉系统结合，在有机农业生产的水肥管理中应用。有机液肥发酵子系统主要包括发酵罐体、循环系统、供氧系统和多级过滤系统等，用于制备有机液肥；有机灌溉液肥管理子系统包括有机灌溉液浓度控制系统和灌溉管理系统，根据灌溉策略可实现有机生产的水肥一体化、精细化和自动化管理^[9]。

根据管理规模来分类

单体或小规模水肥一体化管理系统 这种设备主要是针对单体温室或小面积的作物生产而开发的小规模灌溉施肥管理系统，作物种类单一，需肥简单，可以通过吸肥泵或文丘里自动吸取生产人员在作物不同生育阶段准备的水溶肥料，在自动控制模式下根据作物生长阶段、光照强度和土壤条件等实现实时、适量、自动、智能灌溉施肥。

大规模水肥一体化管理系统 该种设备主要是针对大面积的多种作物生产而开发的大规模灌溉施肥智能管理系统（图7），多用于农业园区和生产基地的水肥管理，需要做配肥站、储肥罐和多个分区监测站。可设定作物种类、启动程序自动实现不同作物的肥料配比、溶解、混匀和输送等。基于不同作物生长规律和环境条件融合的灌溉施肥决策模型，实现整个农业园区或生产基地水肥综合管理。

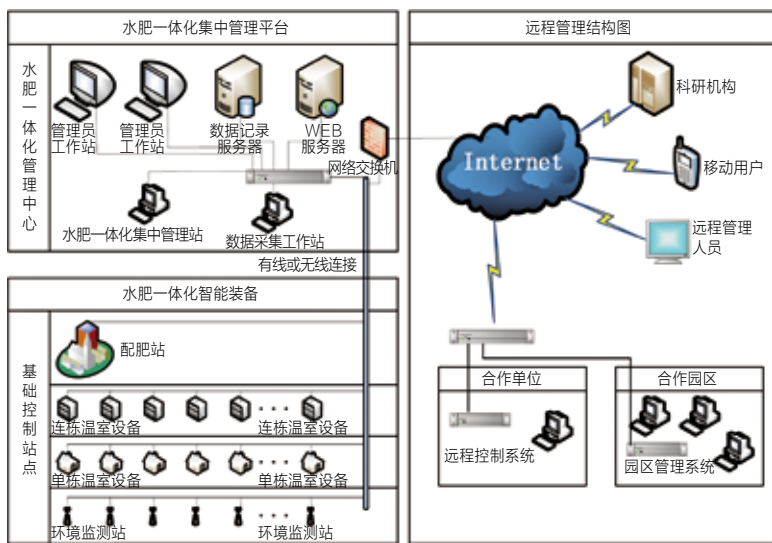


图7 基于“物联网”技术的水肥一体化智能装备架构图

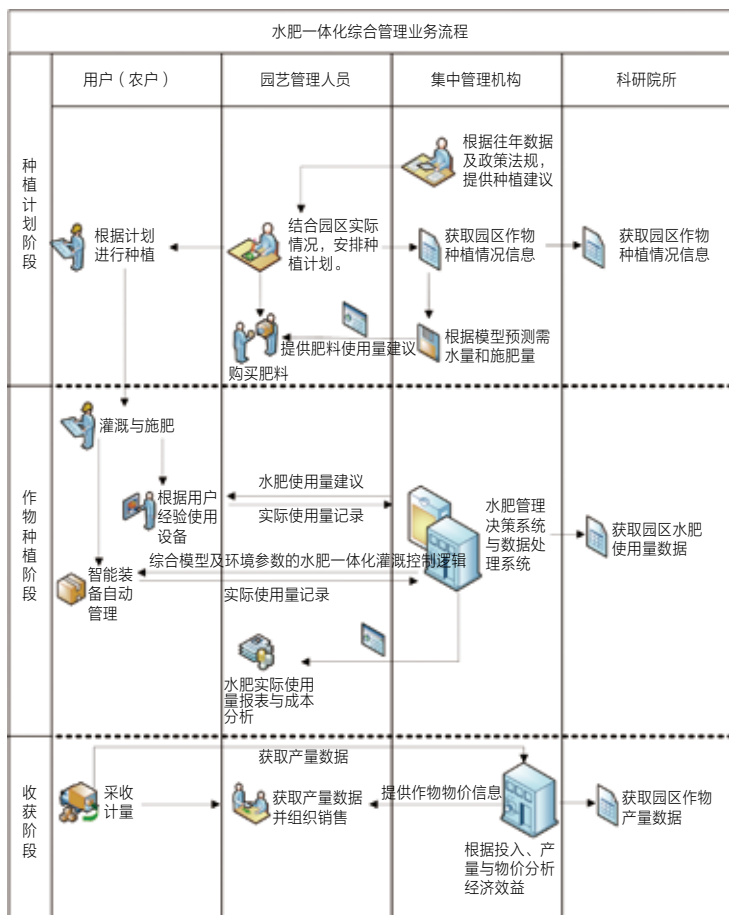


图 8 基于“物联网”技术的水肥一体化综合管理系统示意图

功能特点^[10]。美国 Crossbow 公司在 2007 年就推出了一款称为 eKo 的无线环境监测系统，主要应用在精准农业管理和环境监测等领域，不仅能够实现农业环境的实时监测，而且具有农田智能灌溉、施肥驱虫及霜冻监测等功能^[11]。国家农业智能装备工程技术研究中心在农业应用物联网技术研究开发方面，在田间环境土壤信息获取、变量施肥、联合收获机自动测产、农业机械作业监控、自动导航、作物水肥一体化综合管理系统、农科城建设、云平台建设等方面已经开发成功并推广应用，对我国农业信息化和智能化的发展做出了积极的努力和贡献。因此，在农业生产活动中，通过物联网+水肥综合管理系统（图 8），实时自动采集作物生产区环境参数和作物生育信息参数，并通过指标决策或模型决策控制系统进行智能灌溉施肥，通过对土壤水肥的精确控制实现水肥一体精准施入，大大提高灌水和肥料的利用效率。探索大型园区或基地高效节约低耗的水肥管理模式，具有覆盖生产

示范园区和生产基地的能力，最终实现作物生产基地水肥管理的互联互通，管理所有的“物联网”精准灌溉控制系统，建立区域性或全国性水肥管理网络，实现农业生产基地的少人化管理，降低生产成本，减少肥料投入，节约农业用水，提高作物的产量和品质，提高生产区综合经济效益，促进中国农业的信息化和智能化发展。由此可见，基于物联网技术的作物水肥综合管理在我国农业现代化发展中具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 高祥照, 杜森, 吴勇, 等. 水肥耦合是提高水肥利用效率的战略方向 [J]. 农业技术与装备, 2011(3): 14-15.
- [2] 张利平, 夏军, 胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 116-120.
- [3] 李保国, 黄峰. 1998-2007 年中国农业用水分析 [J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 575-582.
- [4] 赵秉强. 传统化肥增效改性提升产品性能与功能 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 1-7.
- [5] 王艳语, 苗俊艳. 世界及我国化肥施用水平分析 [J]. 磷肥与复肥, 2016, 31(4): 22-23.
- [6] 高祥照, 杜森, 钟永红, 等. 水肥一体化发展现状与展望 [J]. 中国农业信息, 2015(4): 14-19.
- [7] 任璐. “十三五”水肥一体化推广将提速 [N]. 农民日报, 2016-01-18(002).
- [8] 陆绍德, 黄所, 关经伦, 等. HJYDS-1 型移动式水肥药一体化施肥车研制与推广 [J]. 现代农业装备, 2012(9): 48-50.
- [9] 李友丽, 李银坤, 郭文忠, 等. 有机栽培水肥一体化系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 273-279.
- [10] 吕雄杰, 陆文龙, 王艳, 等. 基于物联网技术的日光温室黄瓜智能灌溉控制系统研究 [J]. 天津农业科学, 2014, 20(9): 34-37.
- [11] 周小波. 基于物联网技术的设施农业在线测控系统 [J]. 太原科技大学学报, 2011, 32(3): 182-185.

*项目支持: 国家星火计划 (2015GA600005)。