



CWCF  
中国节水论坛

# 第三届中国节水论坛



## 李红

江苏大学副校长



教授，博士生导师，中国农业机械学会副理事长，“中国农业工程学会农业水土工程专业委员会”副主任委员，“中国农业节水和农村供水技术协会农业节水设备分会”副理事长、秘书长。全国三八红旗手，入选国家百千万人才工程。





CWCF  
中国节水论坛

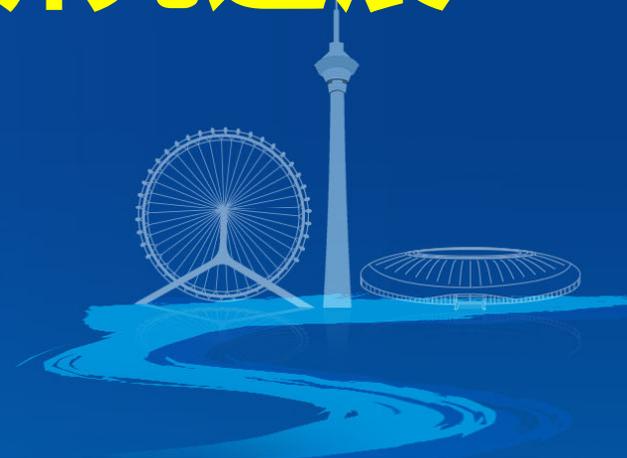
第三届中国节水论坛



# 农业智能灌溉技术与装备研究进展

主讲人：李红

2023年9月

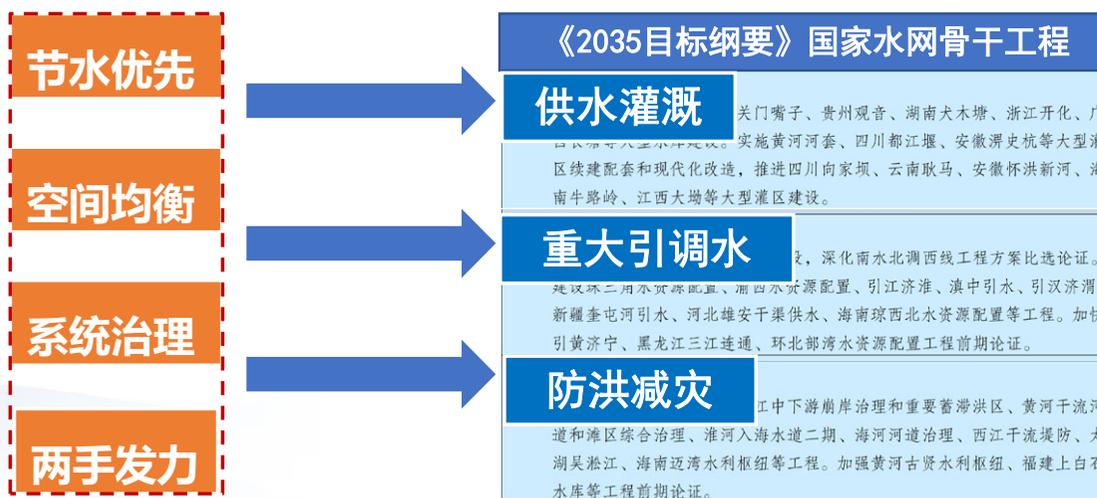


# 目录

- 一、引言
- 二、研究现状
- 三、发展思考



- 农业是用水大户，占全国用水总量**62.1%**。
- 我国耕地面积约**20.2**亿亩，农田有效灌溉面积**10.2**亿亩，节水灌溉面积达到**5.67**亿亩，高效节水灌溉面积达到**3.5**亿亩，农田灌溉水有效利用系数达**0.565**。
- 习近平总书记提出十六字治水方针和农业要节水化的新思想。
- 《2035年远景目标纲要》提出：**坚持节水优先，完善水资源配置体系。**



## ■ 2023中央一号文件

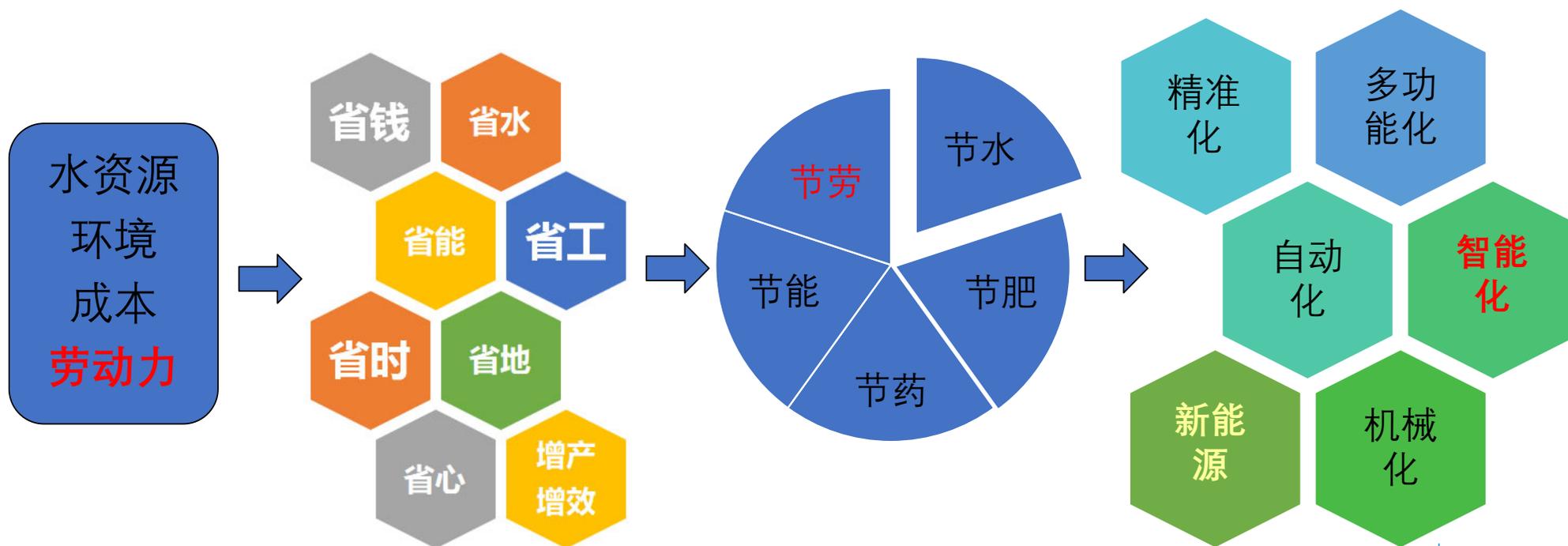
- 加强高标准农田建设。重点补上土壤改良、农田灌排设施等短板，统筹推进高效节水灌溉；
- 加强水利基础设施建设。加快大中型灌区建设和现代化改造。加强田间地头渠系与灌区骨干工程连接等农田水利设施建设；
- 推进农业绿色发展。推进水肥一体化，建立健全畜禽粪污等农业废弃物收集利用处理体系；
- 推进大中型灌区节水配套和现代化改造。加强田间水利工程与灌排骨干工程的配套衔接，形成从水源到田间的完整灌排体系。特别是要解决好灌溉最后一公里的突出问题。

## ■ 国务院关于确保国家粮食安全工作情况的报告

- 到2022年底，累计建成10亿亩高标准农田；全国耕地灌溉面积超过10亿亩，**农业科技进步贡献率、主要农作物良种覆盖率、农作物耕种收综合机械化率**分别从2017年的52.5%、95%、67.2%提升到2022年的62.4%、96%、73%。
- 强化农田水利建设方面：完善农田水利工程体系，进一步发展灌溉面积，做好水旱灾害防御。



■ 农业节水潜力巨大，迫切需要研发和推广适用的高效农业节水灌溉装备与技术。



■ 随着我国人口的增长，能源、水资源危机的加剧，农业生产集约化程度的快速提高，节水灌溉装备正向**智能化、节能化、多功能化**方向发展。

# 一、引言

## ➤ 高性能

- 水力性能良好；灌溉系统、灌溉装备匹配运行良好
- 喷灌水肥一体化应用

## ➤ 低能耗

- LEPA，移动拖管式灌溉、移动滴灌
- 清洁能源、多工况高效运行

## ➤ 智能化

- 精准灌溉；变量灌溉
- 物联网、人工智能等用于灌溉系统；
- 喷灌机将集信息感知、智能决策、精准作业和智慧化管理于一体。



智慧灌溉系统



移动滴灌

## 二、研究现状

2.1 智能灌溉技术与装备

2.2 节能灌溉技术与装备

2.3 水肥一体化技术与装备



## 二、研究现状

### 2.1 智能灌溉技术与装备

#### 国外

- ◆ 发展早，设备多样且性能稳定，技术较成熟。
- ◆ 正朝**多元信息感知**和**智能灌溉决策**的方向发展。

#### 国内

- ◆ 智能灌溉技术组成架构已掌握，组成设备基本**国产化**。
- ◆ 基于作物水肥需求信息的农田灌排智能管控系统，实现了作物**全生长周期**的**智能水肥灌施**。



### 2.1 智能灌溉技术与装备

#### □ 数字孪生灌区管理平台

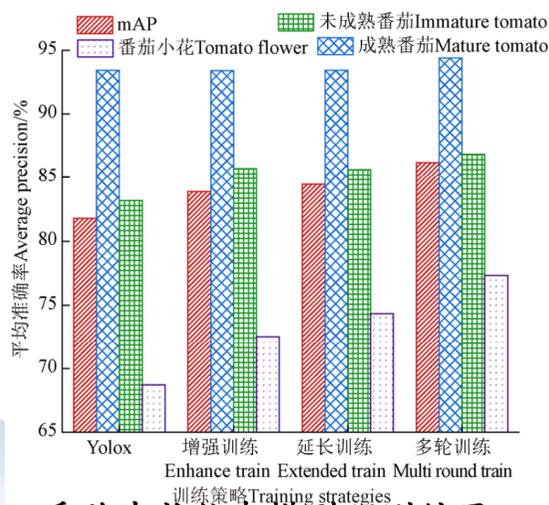
- 以物理灌区为单元、时空数据为底座、数学模型为核心、水利知识为驱动，对物理灌区全要素和建设运行全过程进行数字映射、智能模拟、前瞻预演，与物理灌区同步仿真运行、虚实交互、迭代优化，实现对物理灌区的实时监控、发现问题优化调度的服务平台。



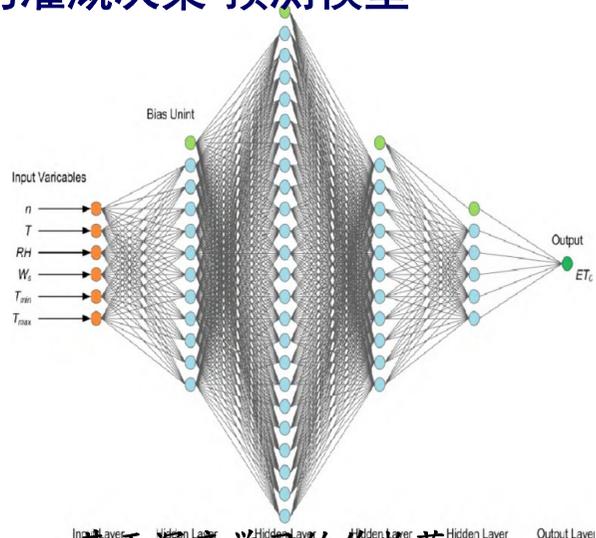
### 2.1 智能灌溉技术与装备

#### 智能灌溉决策模型

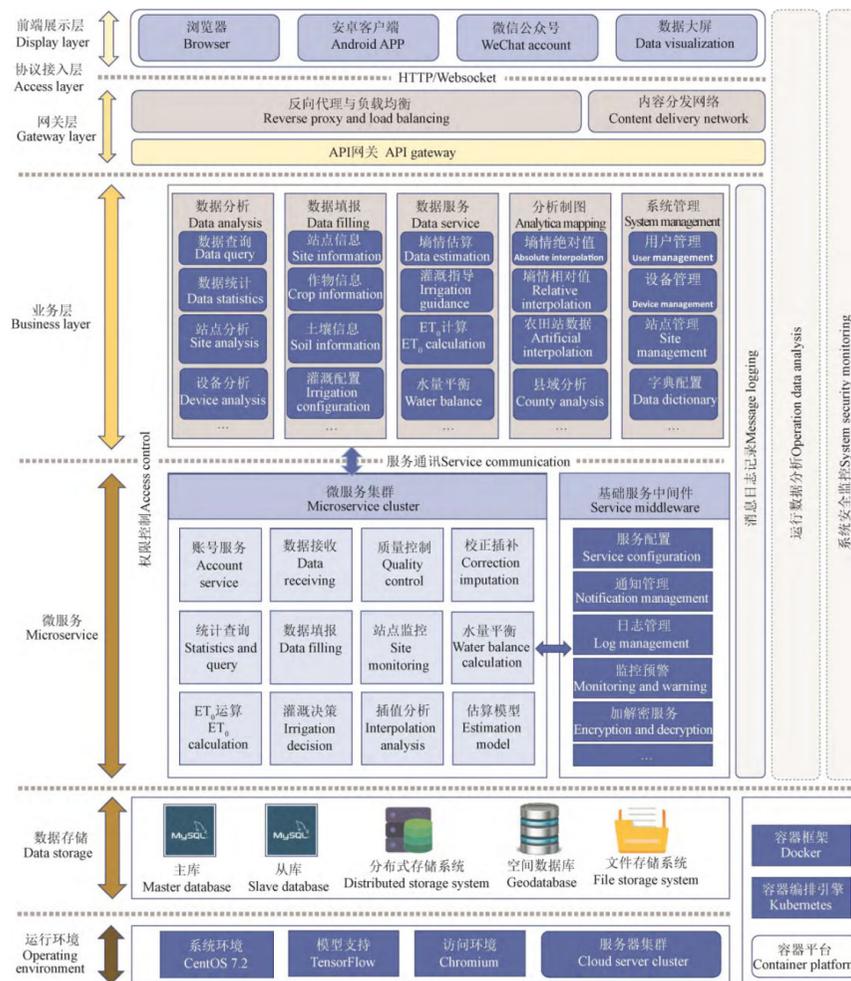
- 建立了基于数据驱动的土壤水分传感器标定模型
- 构建了基于作物的智能灌溉决策模型
- 建立了基于农田环境的灌溉决策-预测模型



番茄生长状态模型预测结果



基于深度学习的作物蒸  
散量预测模型

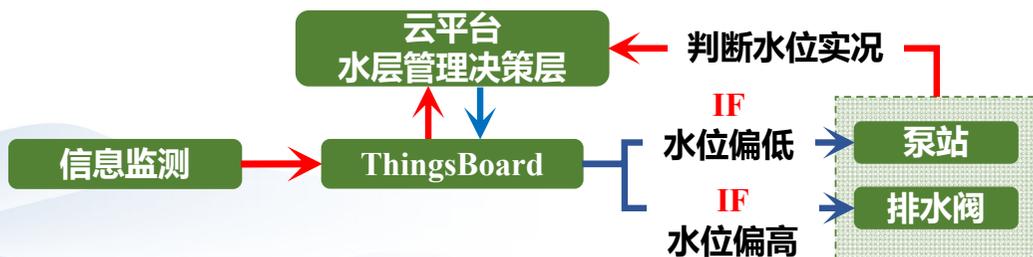


基于云原生技术的土壤墒情监测系统平台

### 2.1 智能灌溉技术与装备

#### □ 灌排智能管控系统构建

- 嵌入了**基于作物生长定量诊断的水肥管理决策模型**，实时监测田间液位信息，进行灌排操作，实现水肥管理决策的精准实施。



水层管理流程图

```

soil1 = client.get_latest_timeseries(EntityId(entity_type="DEVICE", id=id_turang_1), "3")
ticks = int(time.time() * 1000)
if abs(ticks - read_key_ts(soil1, "3")) < 10 * 1000:
    if int(read_key_value(soil1, "3")) < 800:
        magValve1_Flag = 1
        print("it will open the mag valve 01!")
        rpcHandle.update_rpc(7, 6, 0, 15000)
        js_body = json.loads(rpcHandle.request_body)
        res = client.handle_two_way_device_rpc_request(id_jintan_gateway, js_body)
    elif int(read_key_value(soil1, "3")) > 2300:
        magValve1_Flag = 0
        print("it will close the mag valve 01!")
        rpcHandle.update_rpc(7, 6, 0, 4000)
        js_body = json.loads(rpcHandle.request_body)
        res = client.handle_two_way_device_rpc_request(id_jintan_gateway, js_body)
res = client.handle_two_way_device_rpc_request(id_jintan_gateway, js_body)

soil2 = client.get_latest_timeseries(EntityId(entity_type="DEVICE", id=id_turang_2), "3")
ticks = int(time.time() * 1000)
    
```

Python调用API及RPC脚本

### 2.1 智能灌溉技术与装备

#### □ 智能一体化灌溉泵站

- 研发了集水泵、自动反冲过滤、控制系统于一体的智能化灌溉泵站。该泵站的软件平台可实时掌握运行情况，查看监测应用点的各种数据并自动生成台账数据，为以后的工作提供数据支持。



### 2.1 智能灌溉技术与装备

#### 智能排水系统及方法

- **智能排水系统及方法**，基于水分管理决策模型，监测田间水位实时状态，当田间水位高于作物需求时，**智能排水系统**自动排水。

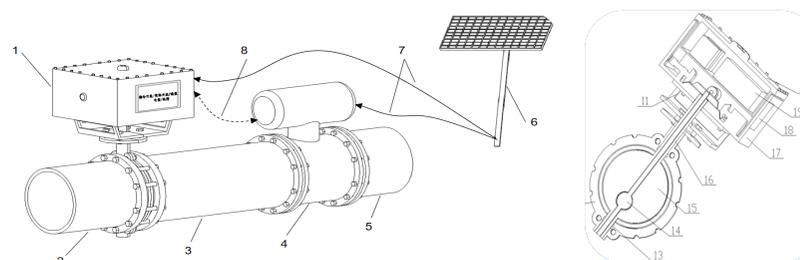


1. 智能插板阀 2. 阀门控制箱 3. 取电设备  
4. 信号采集箱 5. 液位传感器

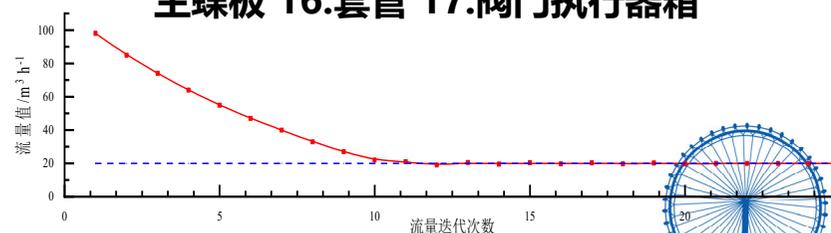
### 2.1 智能灌溉技术与装备

#### □ 流量精准反馈控制蝶阀

- **流量精准反馈控制蝶阀**，在传统蝶阀结构的基础上增加了**微调蝶板机构**，实现了**管道流量**的精细化调节，提高了灌溉**配水精度**。



1. 反馈控制蝶阀 4. 流量计 6. 太阳能板 12. 阀体 15. 主蝶板 16. 套管 17. 阀门执行器箱



流量反馈控制过程

### 2.1 智能灌溉技术与装备

#### □ 喷灌机自动控制构架

##### ✓ 大型喷灌机

###### 喷灌机控制器

控制喷灌机运行及监控控制网络内各采集、控制单元，并与远程服务器进行数据通信

###### 跨监控 / 喷头阵列控制

监控相应跨运行状态、上报运行故障，实施喷头脉冲式启闭

###### 尾枪控制及位置追踪装置

实时监视喷灌机行进位置、实施增压泵及尾枪的自动启闭等

###### 施肥控制器

按需施肥  
自动匹配

###### 泵阀控制器

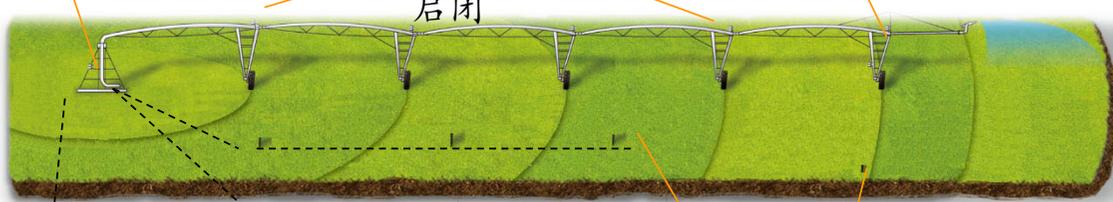
实时监控泵阀工作状态及启闭泵阀

###### 无线采集器

土壤墒情、气象参数等的实时采集

###### 地缘分标识

标杆式或地理式，标识灌溉区域边界及停机、折返位置等



##### ✓ 卷盘式喷灌机

- ✓ 具备监视报警功能、控制功能
  - ✓ 入机流量监测、停机监测
  - ✓ 喷头车回收速度采集、识别行走速度、根据负载等状态变化，准确实时校正速度偏差
  - ✓ 喷头车归位监测
  - ✓ 故障报警



### 2.1 智能灌溉技术与装备

#### □ 智能化喷灌机（灌溉机器人）

实现在多类型场景下的**自动作业规划**，基于导航技术的**完全自主行走**，无人远程监控等，提升自动化、智能化水平。



法国Oscar autonomous irrigation robot



美国360 RAIN System

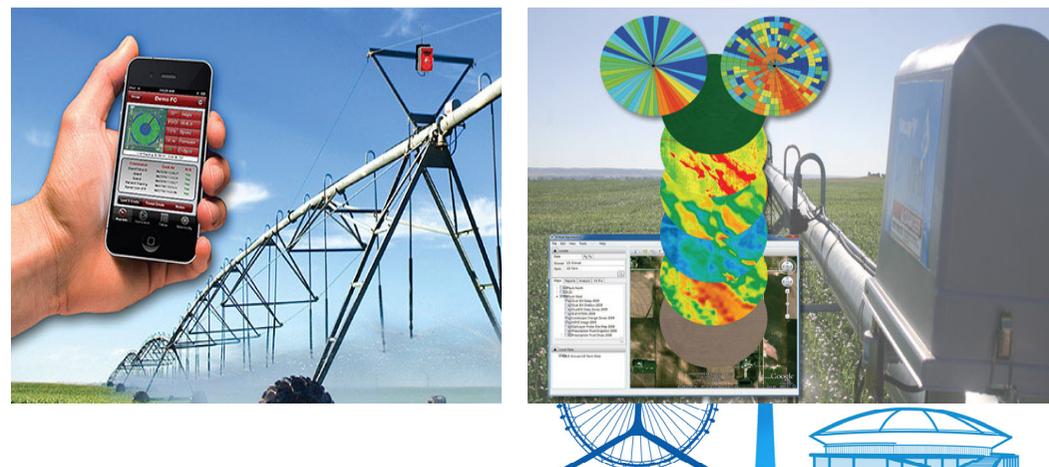
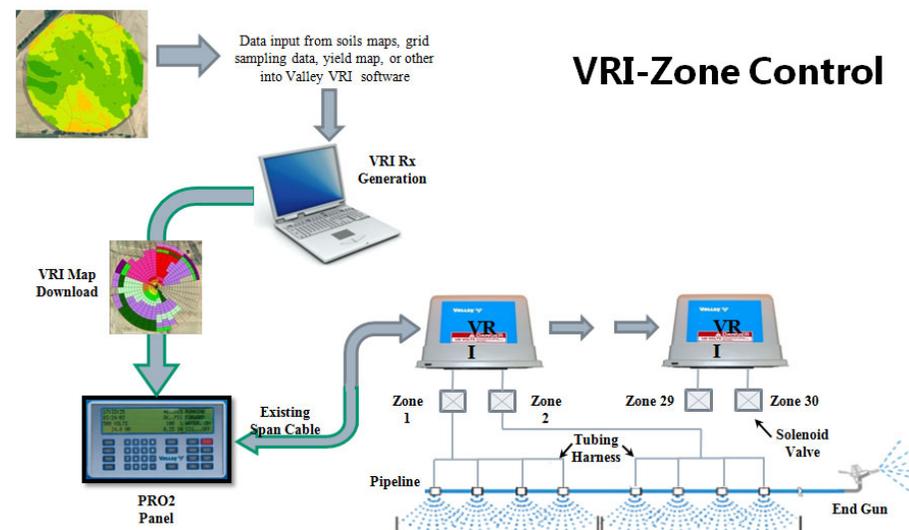


丹麦The Agrometer self-propelled irrigation machine

### 2.1 智能灌溉技术与装备

#### □ 喷灌机变量灌溉技术

- 通过分区管理，借助变量灌溉控制设备、监测网络和决策支持系统，实现定量决策、变量投入和定位实施
- 建立大型喷灌机变量灌溉系统方法、变量灌溉管理分区方法、决策支持系统等。开展大型喷灌机的喷头配置技术研究



### 2.2 节能灌溉技术与装备

水资源  
危机

环境  
安全

能源  
危机

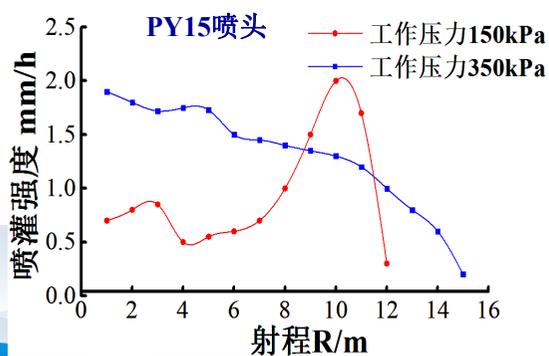
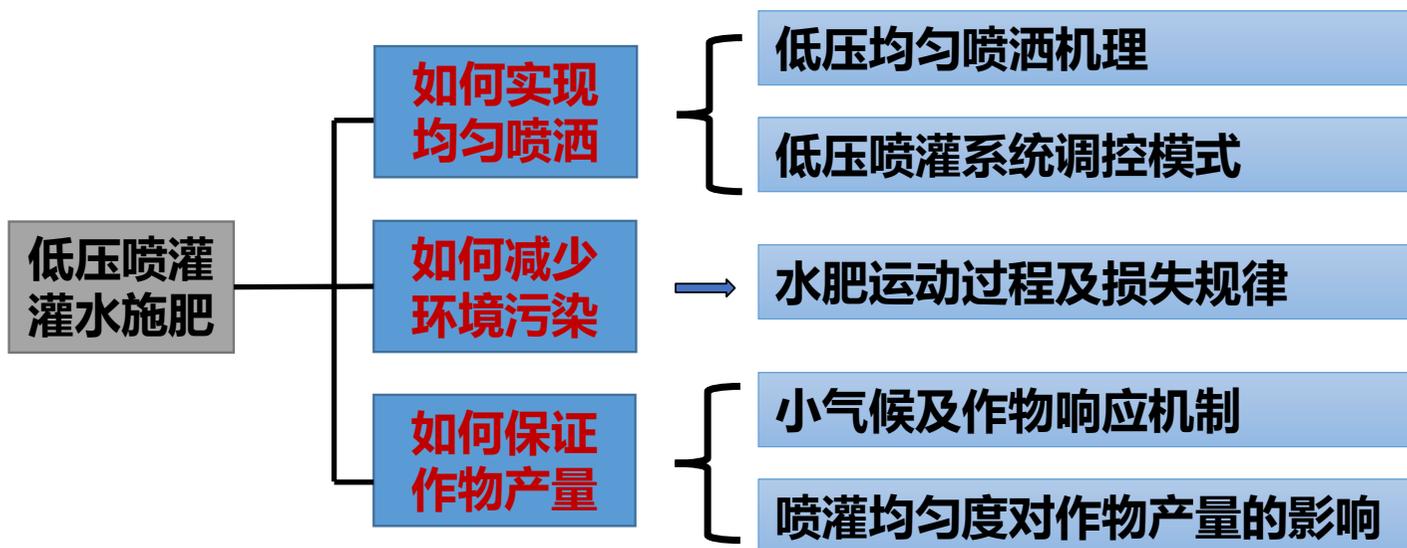


**低压喷灌（LEPA）及其水肥一体化是喷灌发展趋势，已成为国内外的研究热点**

低压精准灌溉（Low energy precision application）：降低喷头运行压力，使喷灌系统压力显著降低，实现节能降耗的目标。



## 二、研究现状



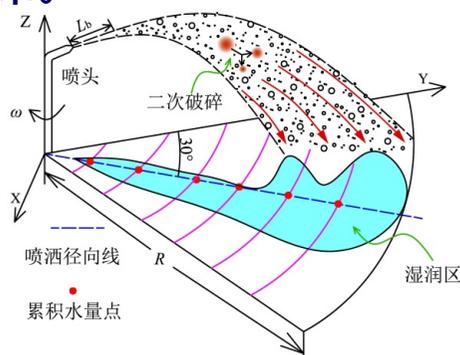
扰动分散装置



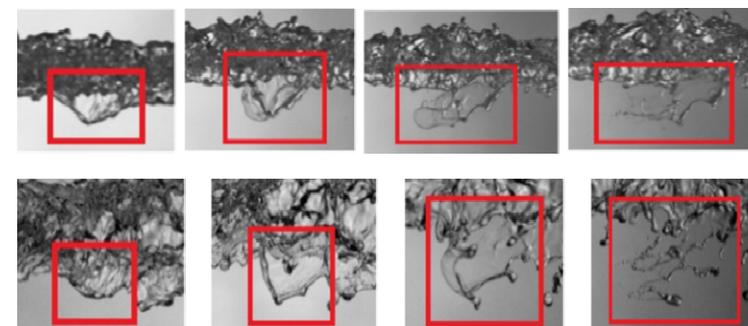
### □ 低压均匀喷洒理论

#### ✓ 低压喷灌喷头水肥喷洒水力特性研究

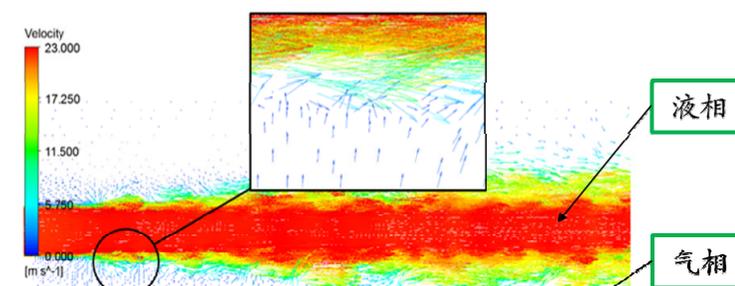
- 揭示了喷头水射流失稳液滴破碎的过程；探明了水射流边界对空气的卷吸掺混现象；发现了异形喷嘴射流内部轴扭转现象。
- 建立了散水针对主射流的撞击分散模拟方法；探明了撞击射流压力、涡量及射流速度变化规律。
- 构建了喷洒水滴运动轨迹预测模型；优化了喷洒水滴运动轨迹预测模型



旋转喷洒的喷灌强度计算模型原理



圆形、正三角形喷嘴射流初始段表面结构



水射流边界对空气的卷吸掺混



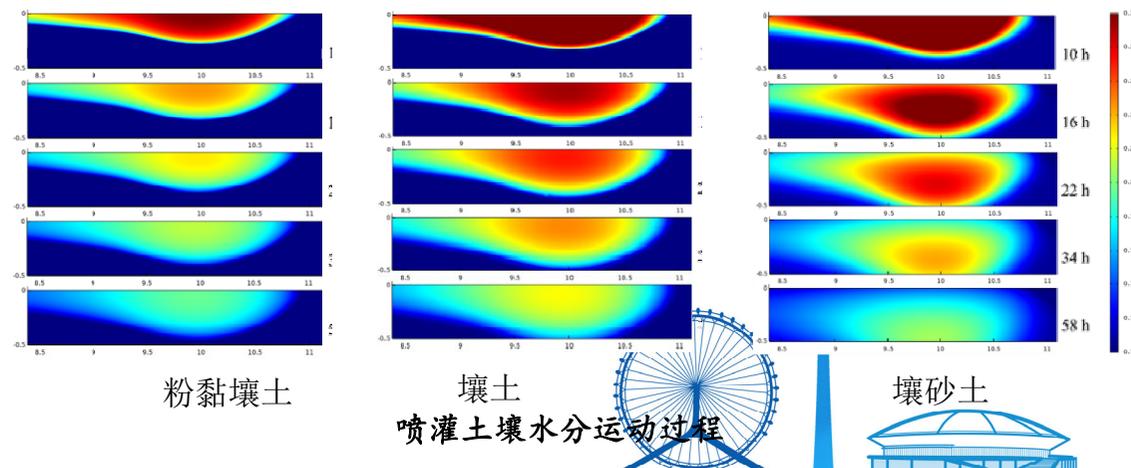
### □ 低压均匀喷洒理论

#### ✓ 低压喷灌水肥多过程运动规律

- 得到了不同气象条件下水肥分布与蒸发漂移损失规律
- 明确了小麦冠层对截留、茎流、穿透水量和均匀度的影响，建立了小麦“冠层上-冠层下-土壤”分布均匀度间的关系
- 建立了喷灌均匀度与土壤含水率均匀度之间的关系。
- 探明了玉米冠层对土壤径流侵蚀的影响；阐明了喷灌强度和土壤质地对土壤水分转移的影响。



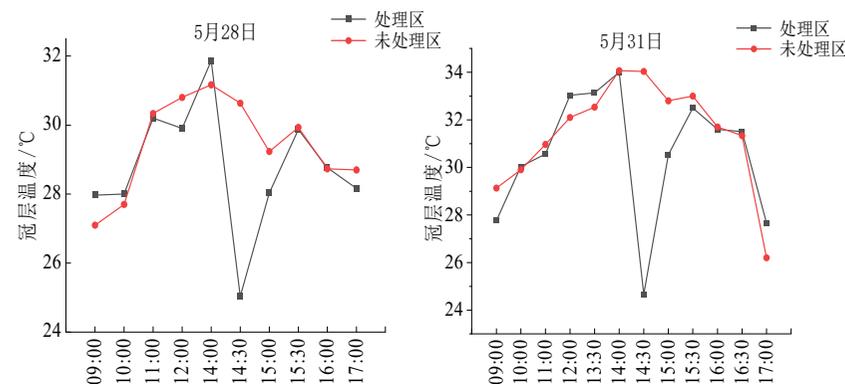
田间蒸发漂移试验



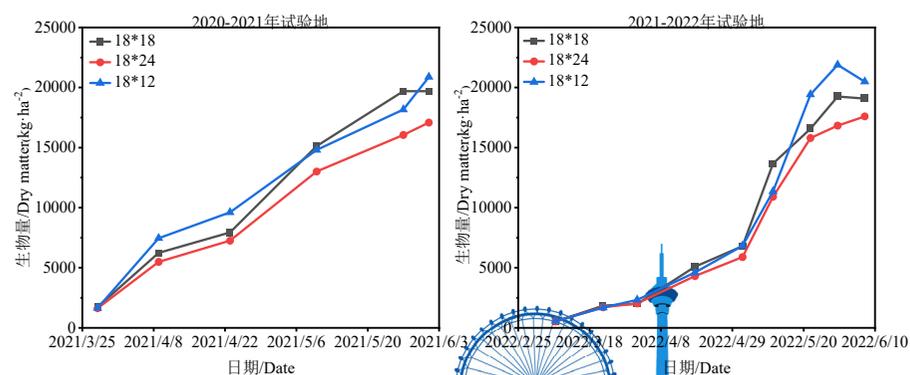
### □ 低压均匀喷洒理论

#### ✓ 低压喷灌小气候与作物响应机理

- 揭示了喷灌对农田温湿度、饱和水气压差等小气候要素的影响特征；构建了喷灌后农田小气候变化量模型。
- 揭示了干热风条件下微量喷灌后空气温湿度和冠层温度的变化规律；揭示了喷灌调控干热风效果及作物响应机制。
- 探明了均匀度与灌水量对小麦生长和产量的影响（河北、江苏）。



喷灌冠层温度变化

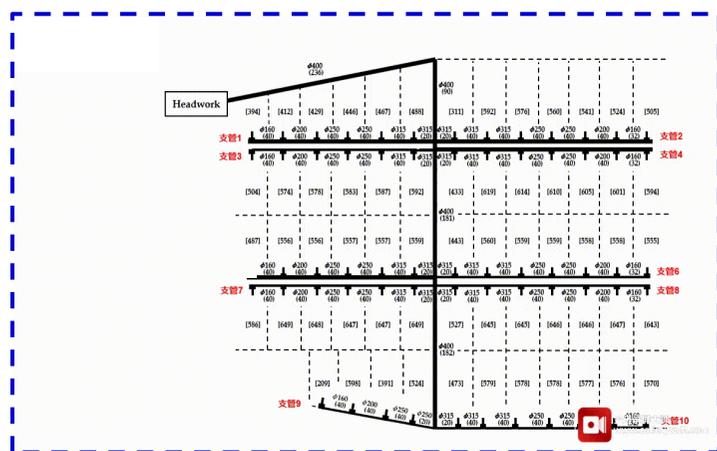


不同均匀度处理下3年冬小麦生物量变化

### 2.2 节能灌溉技术与装备

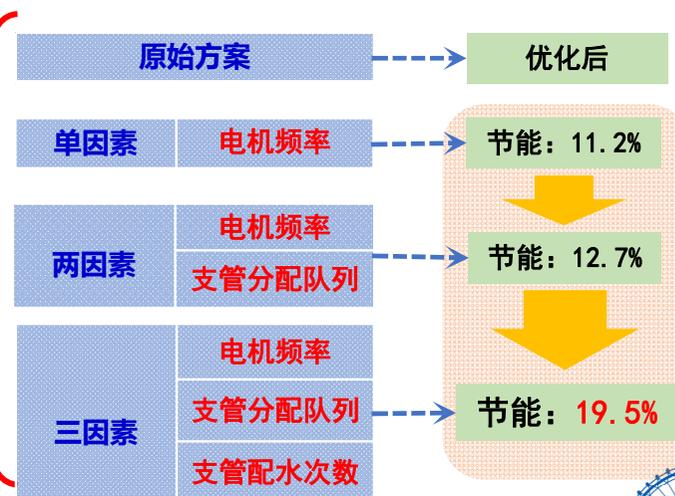
#### □ 低压管灌运行调控技术

- 建立了以出水装置流量为自变量，以灌溉低能耗为目标的泵站管网运行调控模型，并基于此调控模型，开发了**低压管灌运行调控技术**。



配水调度优化示意图

运行调控

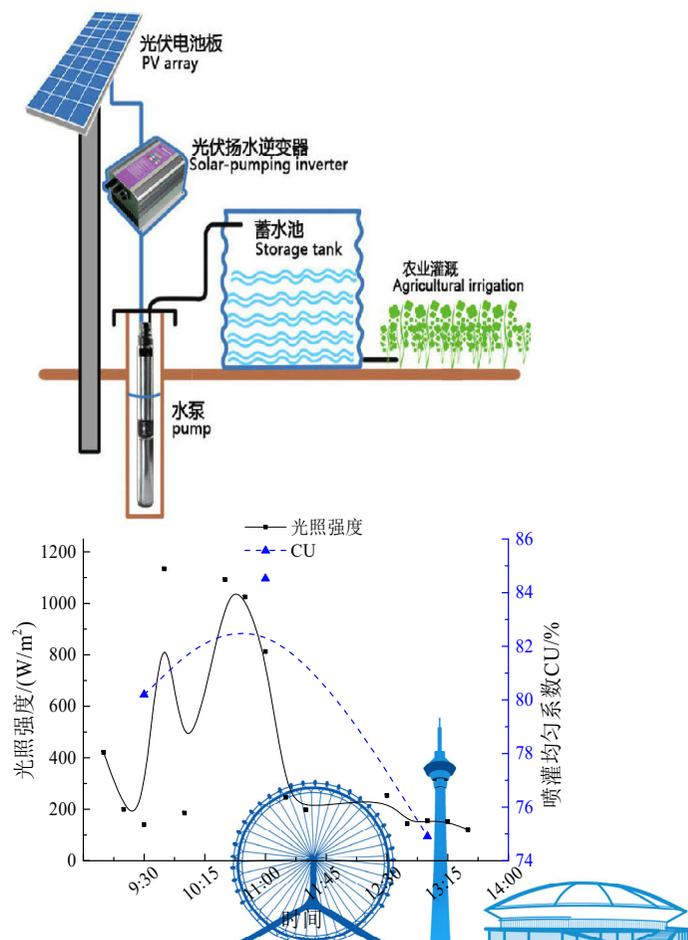


- 应用于低压管灌系统，节能率由传统变频优化的11.2 %提升至19.5%

### 2.2 节能灌溉技术与装备

#### □ 太阳能提水系统

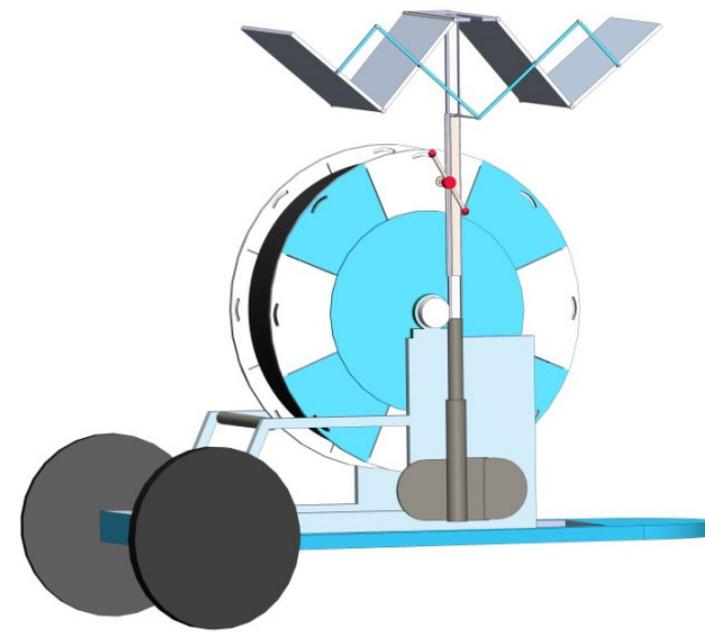
- 创建了超长工作时间高效太阳能灌溉系统。
- 提出太阳能离心泵多工况水力优化方法，水泵在光强和光弱的环境下都能保持高效率运行。
- 建立太阳能离心泵关死点功率预测技术，解决了太阳能离心泵关死点功率的控制问题，有效延长了太阳能离心泵日工作时间。



### 2.2 节能灌溉技术与装备

#### □ 多能源互补驱动精准性喷灌机组节能降耗技术

- **卷盘式喷灌机**，以太阳能供电的电机驱动替代水涡轮驱动，降低了机组整体能耗。
- **太阳能平移式喷灌机组。**



## 2.2 节能灌溉技术与装备

### □ 喷灌机

#### 国外

- ◆ 起步早，喷灌机设备性能稳定、应用技术成熟。
- ◆ 实现灌水、施肥、喷药一体化多功能应用。
- ◆ 变量喷灌得到较多应用。
- ◆ 随着低压喷灌的普遍采用，喷灌拖灌一体化得到较多应用。

#### 国内

- ◆ 基本掌握大型喷灌机关键技术，**整机国产化**。
- ◆ 能实现**脉宽调制**变量喷洒。
- ◆ 卷盘式喷灌机**高效水涡轮**、**喷灌均匀性控制与预测**、**折叠喷洒臂**、**驱动-传动优化匹配**等技术达到先进水平。

## 二、研究现状



卷盘式喷灌机



中心支轴式喷灌机

### 2.2 节能灌溉技术与装备

#### □ 传统卷盘式喷灌机

- 创新了三种动力-减速箱直连结构，传动系统总效率比原来提高**16~30个百分点**。



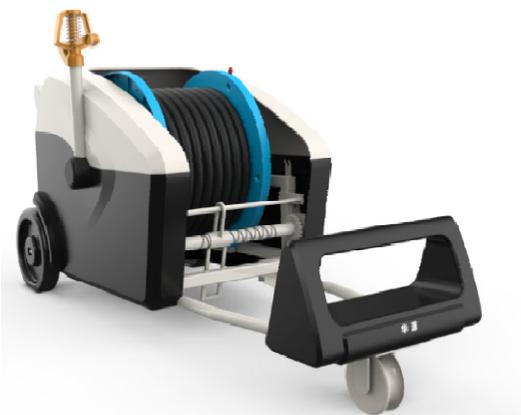
适配三种动力-减速箱直连结构

新旧水涡轮驱动-传动结构对比



### 2.2 节能灌溉技术与装备

#### □ 国内首创——最小卷盘式喷灌机



- 具有**工作压力低、水分布均匀度高、雾化效果好**等优点，采用直流电机驱动、**可遥控操作、可避开障碍物轨道行走**，广泛应用于温室大棚、苗圃园林、绿地庭院花园等较小地块的灌溉。



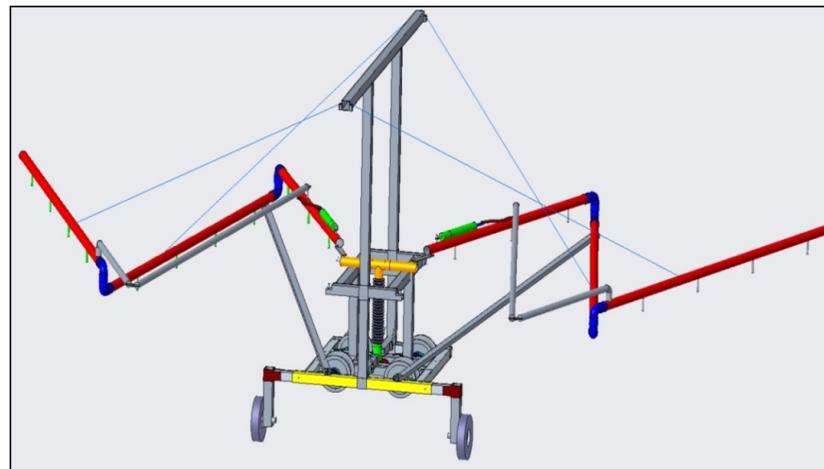
### 2.2 节能灌溉技术与装备

#### □ 新型折叠桁架卷盘喷灌机

- 针对西北黄土高原农区耕地面积少、田块小、不连片，多种作物交叉种植、风大、水资源匮乏特点，研发了自动折叠桁架卷盘喷灌机，喷灌均匀性超过 85%。



新型折叠桁架卷盘喷灌机



自动拉索折叠桁架

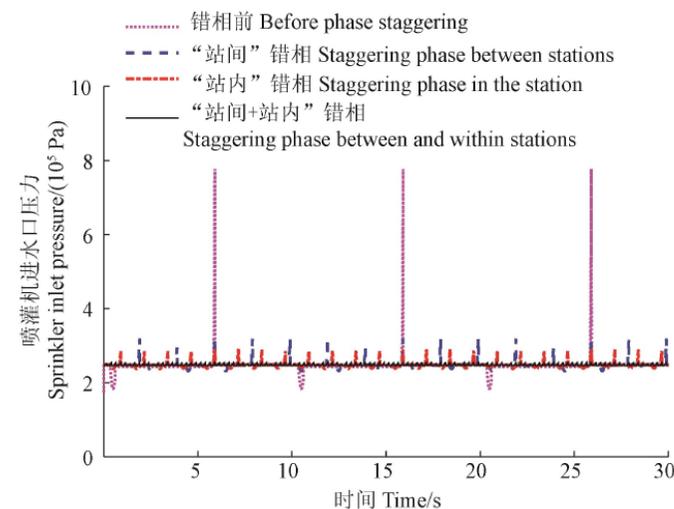
### 2.2 节能灌溉技术与装备

#### □ PWM变量喷灌机

- 针对大型喷灌机多个电磁阀同时周期性的启闭喷头，造成主水管中水流突变，引起机械激振和压力脉动的问题，提出了**脉冲相位错开**启闭的方法，可有效缓减压力脉动和机械激振。



大型PWM变量喷灌机实体系统



喷灌机进水口压力

### 2.2 节能灌溉技术与装备

#### □ 喷头

##### 国外

- ◆ 低压喷头结构类型多。如，低压折射式喷头（移动式喷灌系统）压力低至40 kPa；超低压旋转式喷头（固定式喷灌系统）压力低至150 kPa。
- ◆ 功能多，采用多种喷嘴，方便清洗或更换
- ◆ 精准调控氮、水和微量营养素的施肥速率



超低压喷头  
(150-250 kPa)

##### 国内

- ◆ **常压喷头** (300-500 kPa) 为主。
- ◆ 低压喷头依赖进口

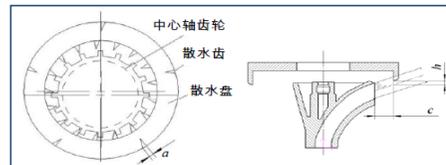


低压旋转式喷头  
(175-350 kPa)

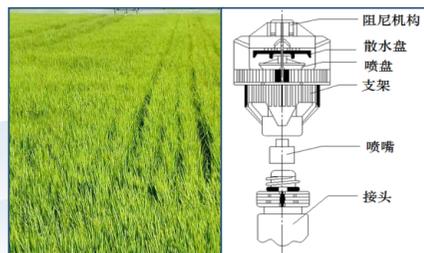
### 2.2 节能灌溉技术与装备

#### □ 低压散水齿喷头

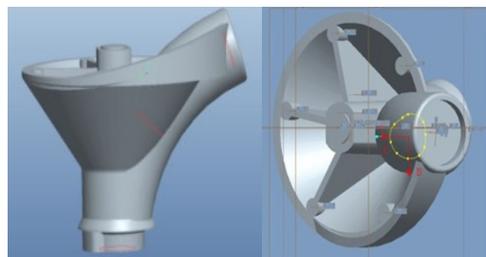
- 为解决普通喷头低压下射程短和均匀性不高的问题，发明了低压散水齿喷头，创新设计了新型间断式散水齿、空间流道结构，出口平均速度增加15.5%，与NelsonR33喷头对比，低压下组合均匀性平均提高27%。



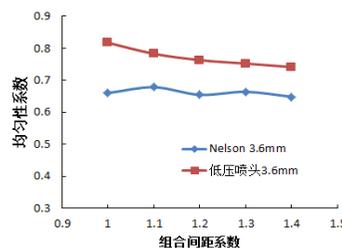
散水齿结构



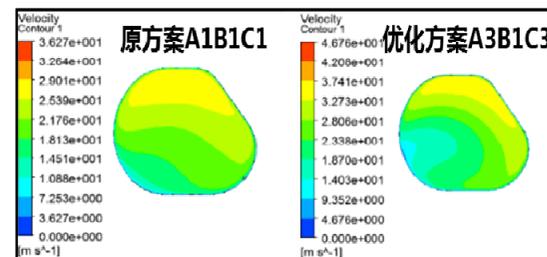
低压散水齿喷头



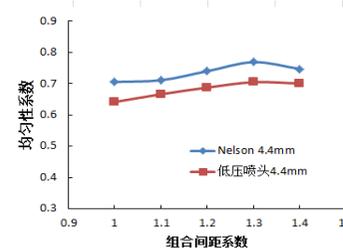
新型空间流道结构三维图



150kPa 喷洒均匀性对比



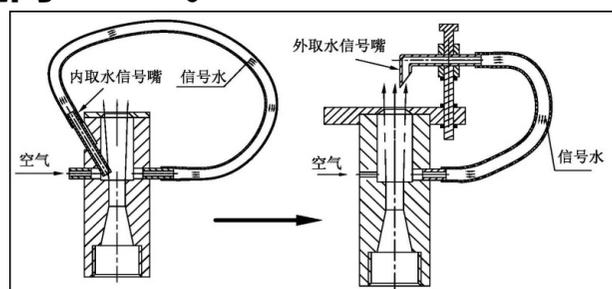
出口流速分布对比



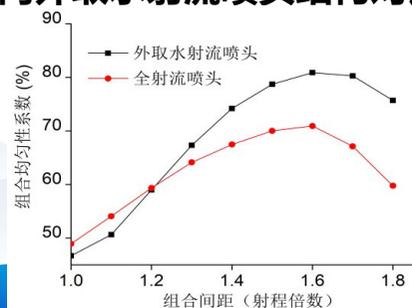
### 2.2 节能灌溉技术与装备

#### □ 外取水射流喷头

- 为解决内取水全射流喷头低压工作可靠性差的难题，**首创了外取水射流喷头**，低压下组合均匀性提高 **4.9%**。



内外取水射流喷头结构对比



内外取水射流喷头组合均匀性对比



外取水射流喷头



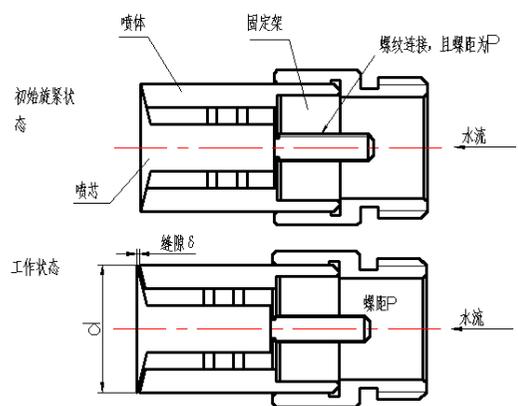
外取水射流喷头在Nelson公司演示



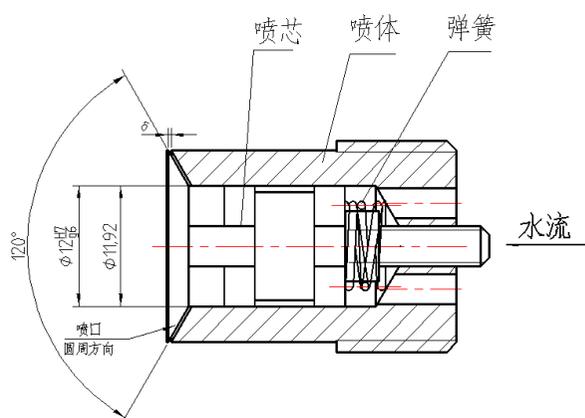
### 2.2 节能灌溉技术与装备

#### □ 低压雾化喷头

- 针对作物高温、干燥喷雾加湿与降温的迫切需求，创新可调缝隙式喷嘴结构，研发了一种新型缝隙式低压雾化喷头，已应用于新疆红枣生产，喷洒均匀性达83.9%。



工作压力: 0.02-0.1MPa;  
流量: 25-40 L/h



喷头结构



低压雾化喷头在南疆应用

### 2.3 水肥一体化技术与装备

国外

- ◆ 设备**精确化**和**自动化**程度高，技术较成熟。
- ◆ 正朝**低能耗**、**低污染**及**智能化**方向发展。



美国 Miracle-Gro Liquafeed  
Universal Feeder



意大利 Mixtron  
proportionale injector pump



以色列 Netafim precision  
irrigation fertilizer applicator



以色列 TEFENT Closed  
Transfer System For Crop Spraying



## 2.3 水肥一体化技术与装备

### 国内

- ◆ 设备朝着**精确化、多样化、精简化、国产化**方向发展。
- ◆ 施肥及混施装备的**均匀性和精确性**达到国际先进水平。
- ◆ 水药两用喷头及系统**精简**传统的灌溉和喷药**两套系统**。

## 二、研究现状



固态肥精准混施机



水肥一体化机

### 2.3 水肥一体化技术与装备

#### 智能灌溉施肥系统



现代信息技术融合灌溉技术与灌溉装备，实现不同地区、不同土壤、不同作物、不同气象条件的智能灌溉。

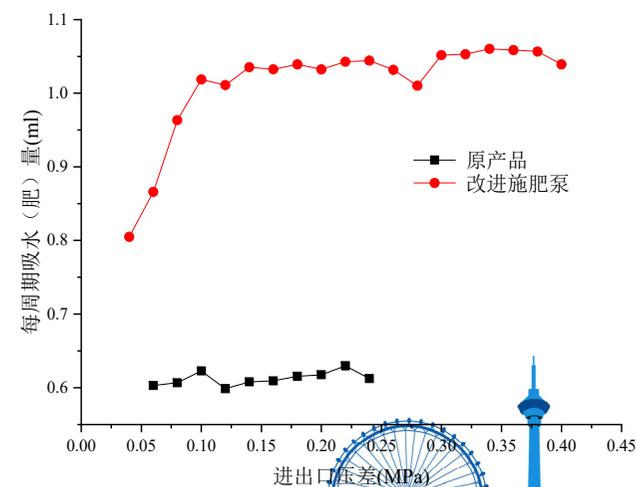
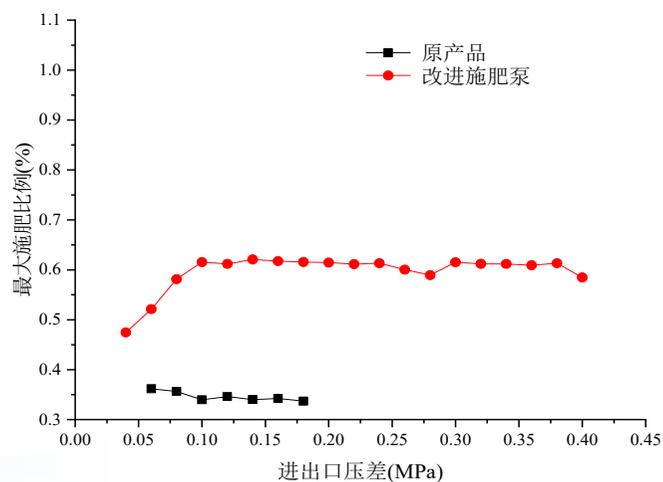
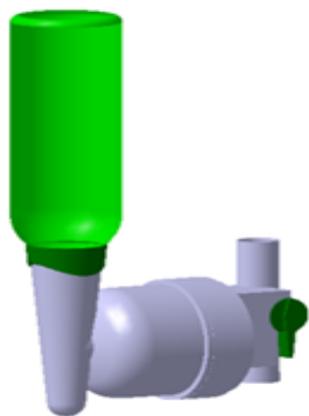
- 数据采集系统：天、空、植物、地面、土壤数据采集
- 决策系统：灌溉施肥制度及数据传递系统
- 执行系统：灌水器、施肥机、过滤系统、阀门、田间管路等。



### 2.3 水肥一体化技术与装备

#### □ 阀门调节式施肥泵

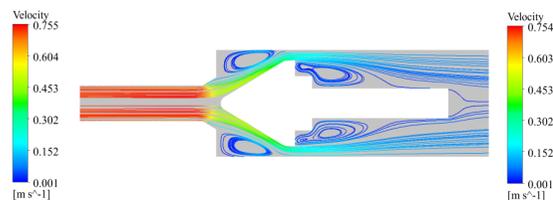
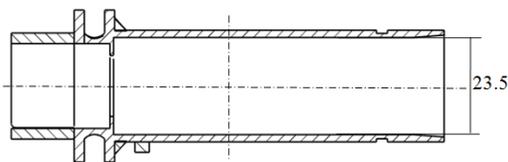
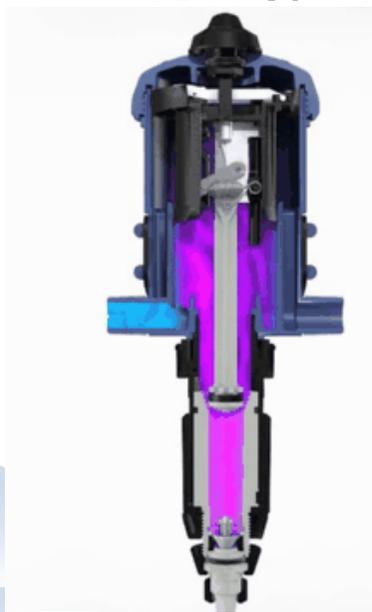
- 针对阀门调节式施肥泵肥料瓶更换频繁、施肥比例调节范围小的问题，改进了混肥腔体结构，减少了更换肥液瓶的次数，拓展了比例调节范围。



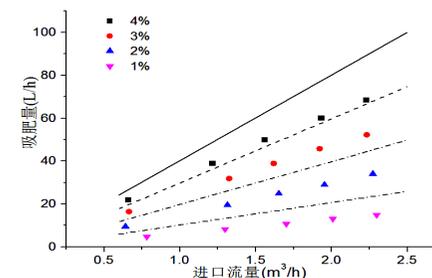
### 2.3 水肥一体化技术与装备

#### 比例施肥泵

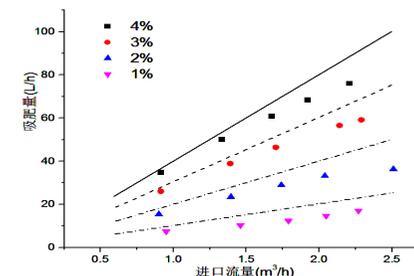
- 针对比例施肥泵能耗高，施肥精度低的问题，对比例施肥泵的吸肥腔结构及单向阀进行优化设计，降低了能耗损失，相较国内产品施肥精度提高了10%。



吸肥腔结构



同类产品

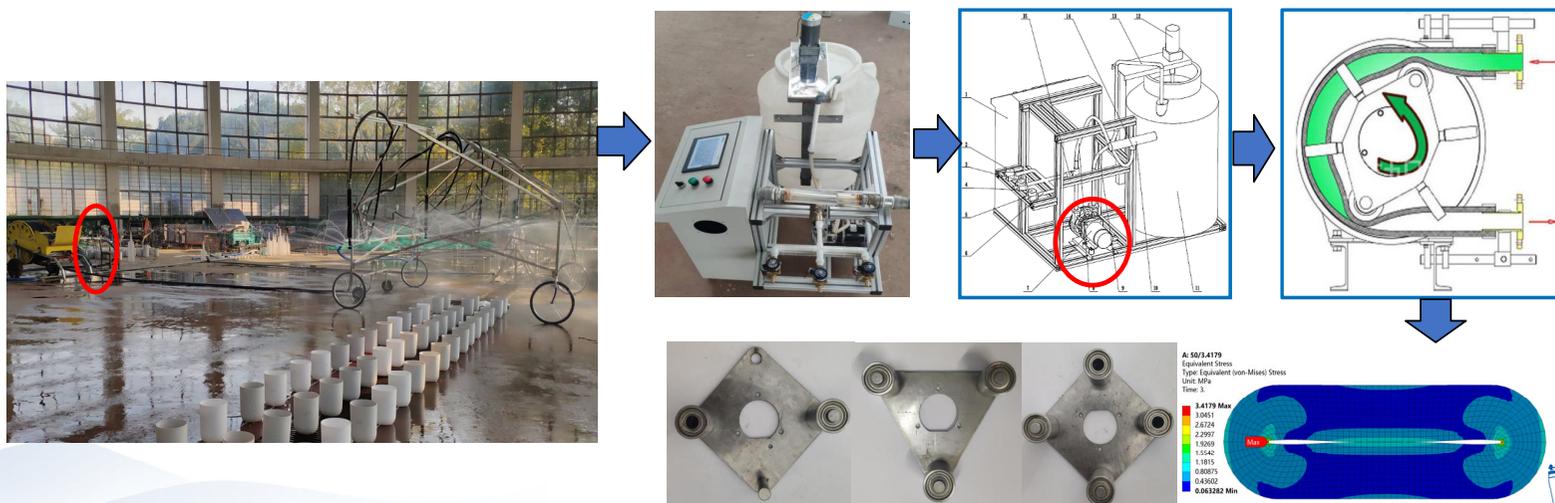


自主设计产品

### 2.3 水肥一体化技术与装备

#### □ 蠕动泵注肥配肥装置

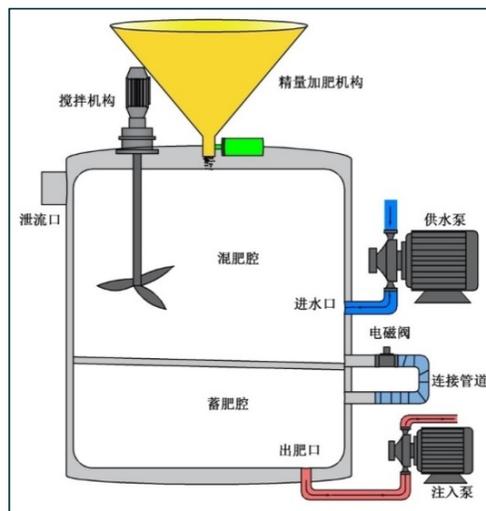
- 研发了一种大流量蠕动泵配肥注肥的智能系统，实现了过流部件无腐蚀、注肥配肥一体化，蠕动泵回流程度降低了8.76%。



### 2.3 水肥一体化技术与装备

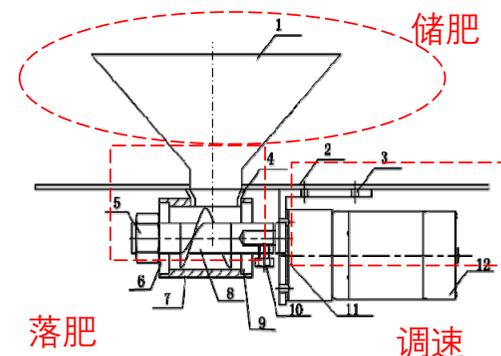
#### □ 精准水肥混施装置

- 针对大田作物灌溉施肥，**研发了基于溶解混施功能的水肥一体化装置**
- **同步进行固体肥添加、肥料溶解和注肥**
- **结合智能控制系统，对装置的工作参数进行实时监测与精确调节，实现施肥浓度的自动调节**

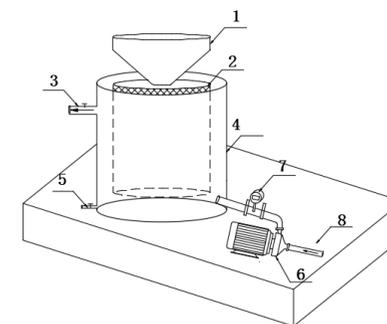


原理图

#### 精量加肥机构



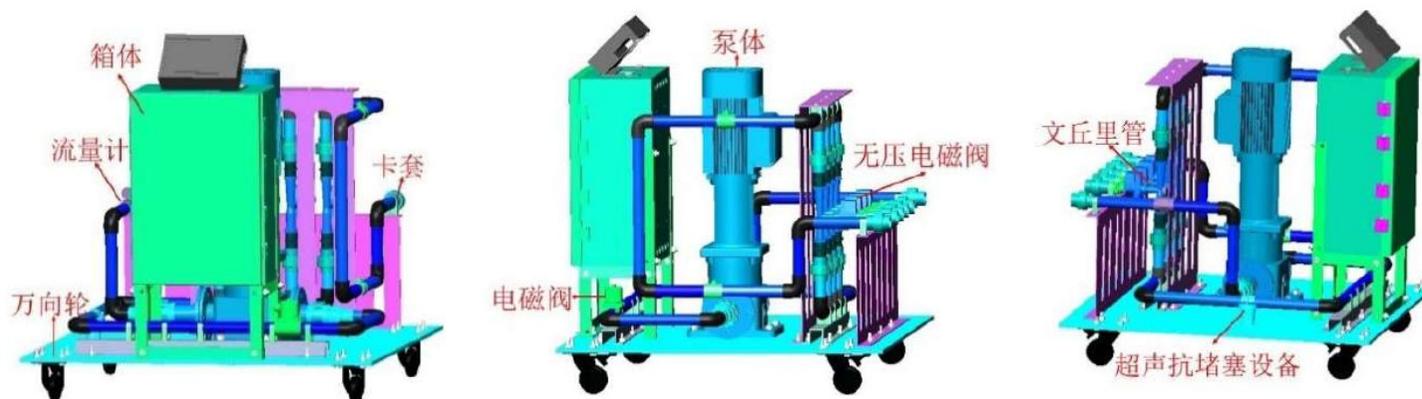
#### 冲施溶解机构



### 2.3 水肥一体化技术与装备

#### □ 声固耦合抗堵水肥一体机

- 针对水肥一体机长时间的使用，管道内存在多种杂质堆积，造成管道堵塞的问题，将**超声**作用于堵塞的水肥机管道上使其振动，从而减少杂质附着，提高设备的抗堵效果。



声固耦合抗堵水肥一体机总装图

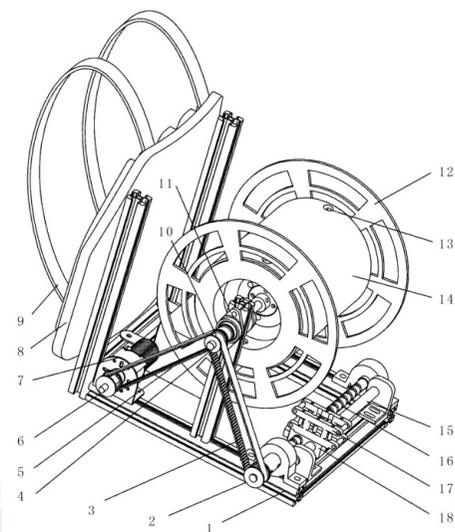


抗堵试验台

### 2.3 水肥一体化技术与装备

#### □ 往复螺杆背负式水肥机

- 针对传统背负式水肥机药箱载荷重、容积有限、工作效率低的问题，西南大学研制了一种背负式的类似于卷盘式喷灌机的卷盘机构，无需人工重装水肥，工作效率高，喷施误差在5%以内。



往复螺杆背负式水肥机结构示意图

10次喷施液量 /mL	每次平均液量 /mL	设定值 /mL	喷施偏差 /%	平均偏差
515	51.5	50	3.00	
568	56.8	55	3.27	
609	61.9	60	3.17	
659	66.9	65	2.92	
721	72.1	70	3.00	
669	76.9	75	2.53	2.55
818	81.8	80	2.25	
871	87.1	85	2.47	
919	91.9	90	2.11	
968	96.8	95	1.68	
1016	101.6	100	1.60	

水肥喷施量测试试验数据

## 二、研究现状-存在问题

- ◆ **缺少喷灌水肥高效利用理论与技术的深入研究。** 缺少喷灌水肥蒸挥发飘移、冠层截留机理、叶片吸收机制等研究，缺乏喷灌施肥对环境影响的评估。缺少水肥一体化无底肥种植、叶面肥喷施的深入研究。
- ◆ **缺少行走式喷灌机精准喷灌模式与应用。** 虽然已建立基于农田环境、土壤信息、作物生长的灌水决策模型，但与喷灌机运行参数的结合还不够紧密，缺少变量、精准、智能运行模型，水肥喷施精准度不高。
- ◆ **缺少低压节能喷灌技术模式与装备的研究。** 随着运行压力的大幅降低，缺少开展移动滴灌与拖灌技术模式、喷滴灌多功能灌水装备的研发。
- ◆ **缺少智能喷灌机装备的研发和应用。** 由于常规喷灌适应性不强、智能化程度不高，造成灌水量不准和速度控制偏差大带来的灌溉性能不高等的难题。



### □ 企业主体地位

- ◆ 企业是科技和经济紧密结合的重要力量，是实现高质量发展的微观基础。强化企业科技创新主体地位，是深化科技体制改革、推动实现科技自立自强的关键举措。
- ◆ 突出不同功能定位，发挥各自优势，发挥骨干科技型企业主体作用，激发中小微企业活力，提高科技成果转化和产业化水平。
- ◆ 推动形成企业为主体，科研院所、高等学校、用户单位、金融及专业服务机构高效协同的创新体系，推动创新链产业链资金链人才链深度融合。



### □ 企业主体作用

- ◆ 发挥担纲领衔作用，强化企业技术创新决策的主体作用
  - 发挥企业家作用，壮大善于创新、勇于担当的企业家群体
  - 支持企业家更多参与国家创新决策
- ◆ 突出产业创新模式，强化企业科研组织的主体地位
  - 支持企业成为科技创新“出题者”、“组织者”
  - 强化市场导向支持企业成为科技成果“阅卷人”
- ◆ 产学研协同发力，强化企业成果转化的主体地位
  - 健全产学研成果对接和产业化机制，增强成果与市场需求的适配性；
  - 支持企业建设中试验证平台；
  - 建立参与方共同获利的成果转化收益分配机制。



### □ 灌溉企业主体作用

#### ◆ 打造和树立优质企业意识，提高自主开发能力和战略决策水平

- 打造和树立自主品牌，提升产品质量。
- 做行业龙头企业，壮大行业发展。
- 企业家勇于创新、承担社会责任、拓展国际视野。
- 提升科学素养和战略决策能力。

#### ◆ 深化产学研合作，加强成果转化与推广应用

- 完善灌溉行业技术应用服务体系，深化产学研合作，加强成果转化与推广应用。
- 加速新产品产业化，加强行业创新平台建设
- 积极推行国际标准，建立适应国情的标准体系，引领并规划灌溉行业发展。





CWCF  
中国节水论坛

# 第三届中国节水论坛



感谢聆听！

敬请批评指正！



江苏大学  
JIANGSU UNIVERSITY

博学求是明德