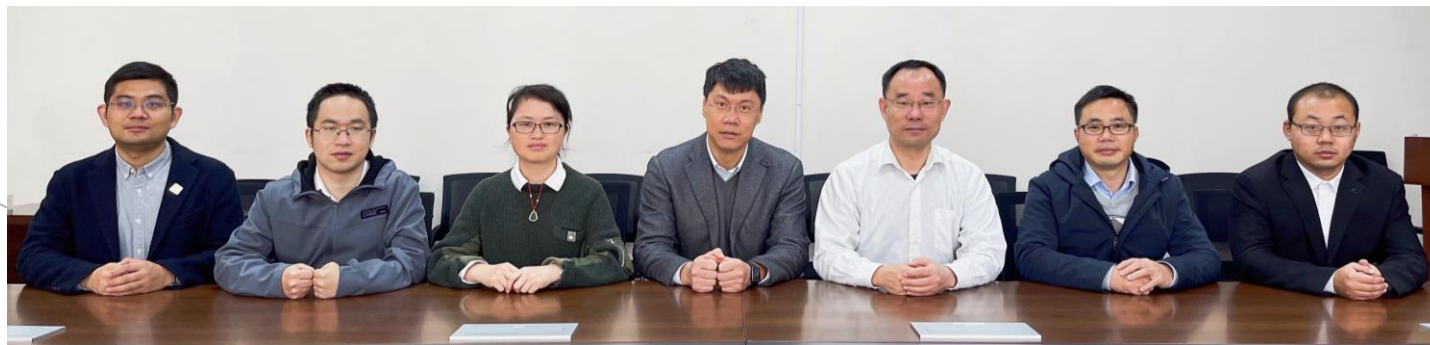


An aerial photograph of a river and dam system, overlaid with a semi-transparent digital grid and data visualization, representing a digital twin of the irrigation area.

# 数字孪生灌区关键技术研究

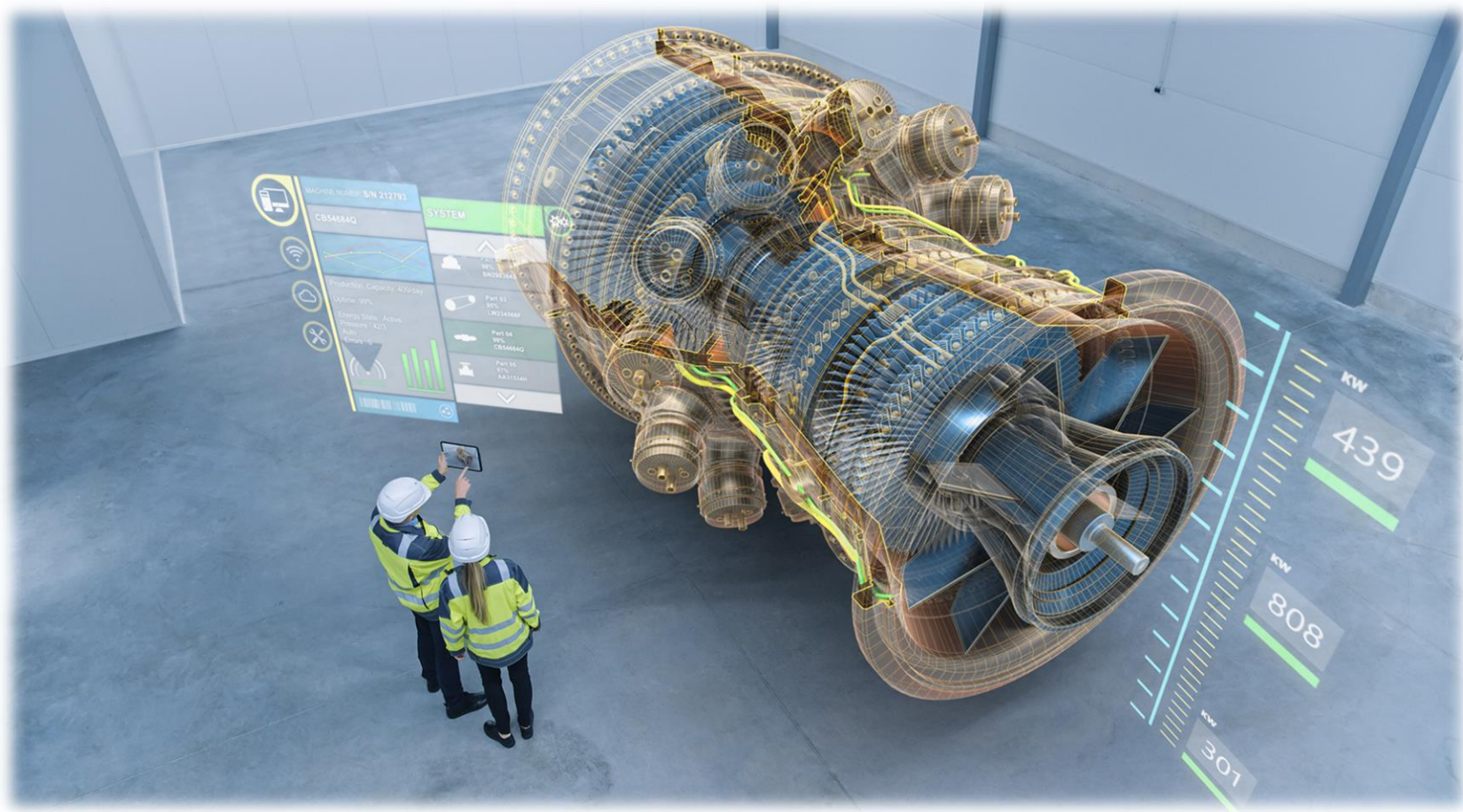
史良胜 张洪艳 管光华 查元源 胡小龙

武汉大学



# 1

## 数字孪生——概念



- 物理空间的实体产品
- 虚拟空间的虚拟产品
- 物理和虚拟空间之间数据和信息交互接口  
(Michael Grieves, 2011)

**数字孪生**是指充分利用物理模型、传感器、运行历史等数据，集成多学科、多尺度的仿真过程，它作为虚拟空间中对实体产品的镜像，反映了相对应物理实体产品的全生命周期过程 (NASA, 2012)



# 数字孪生灌区的开发准则

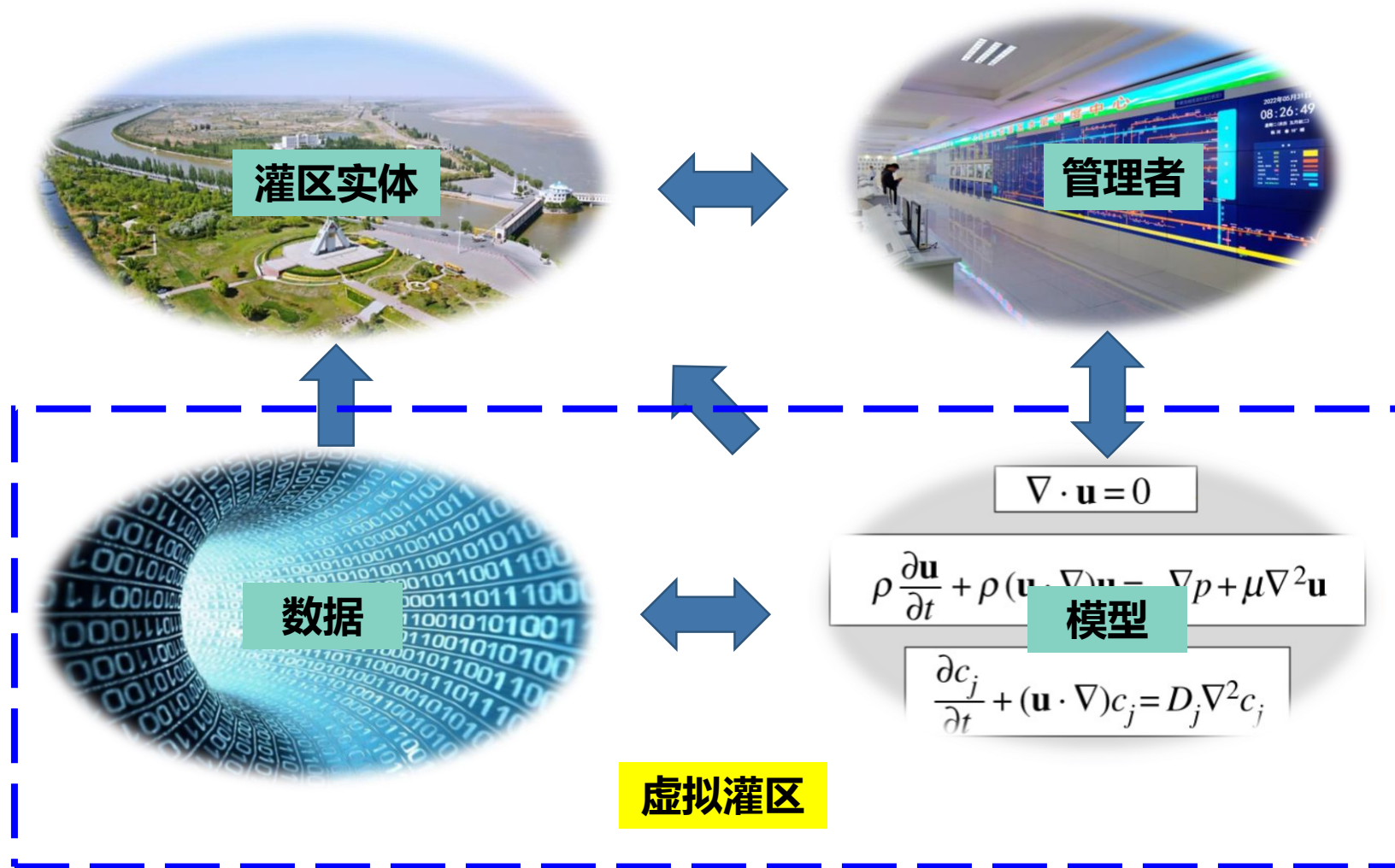
**智慧灌区**：具有智能监测、解译、模拟、预警、决策和调控能力的灌区，全面实时感知灌区水情、墒情、工情、作物长势、生态环境等信息，快速、精准、自主调控水源、输配水及排水系统等工程设施及设备，实现水量、水质和生态等多目标的最优化管理。

- **全面实时观测**灌区不同尺度的要素
- **智能解译**灌区水情、墒情、作物（植被）长势、生态、水质、工情
- **准确模拟**灌区的水分、盐分、养分、污染物迁移转化以及作物生长和生态系统演化
- **自主决策**水资源调度和配置、水旱灾害防治、水环境修复、生物多样性保护

史良胜等，智慧灌区的架构、理论和方法之初探，水利学报，2020

# 1

## 数字孪生灌区的开发准则



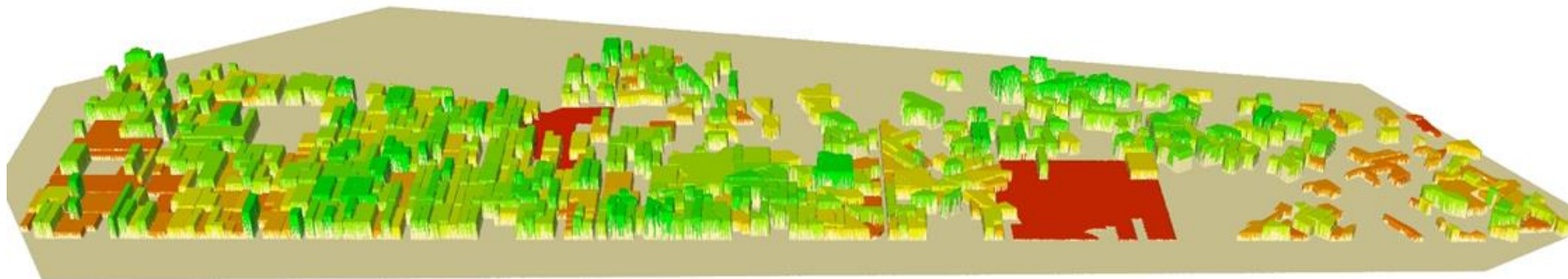
□ 数字化映射

□ 精准化模拟

□ 智慧化决策

# 1

## 数字孪生灌区的开发准则



- “田—农—斗—支—干” 反向演算
- 数据实时融合、地空天联合
- 流程数字化和模型智能化

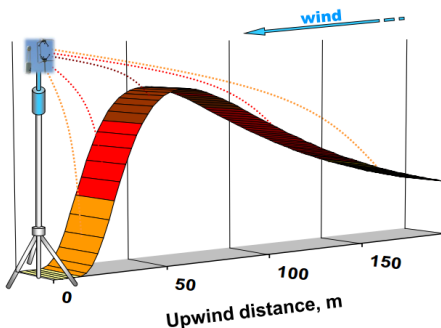
## 2

# 数字孪生灌区——核心技术

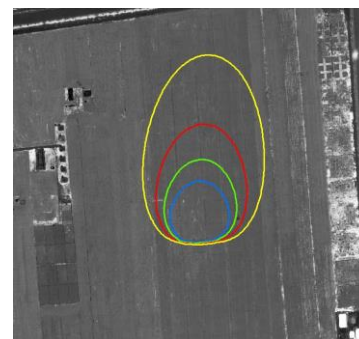
## 1、基于地天空联合数据的灌区ET估算和干旱预报预警

- 将由无人机遥感和地面气象数据优化的ET模型参数迁移至卫星遥感数据
- 多目标优化

精准模拟地面涡度系统的水汽通量足迹贡献区域



融合无人机遥感数据



华北平原试验区(2018-2021)





# 数字孪生灌区——核心技术



Landsat-8  
(30m)



Sentinel-2  
(10m)



Gaofen-2  
(1m)



Pleiades-1  
(0.9m)



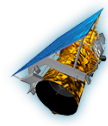
IKONOS  
(0.82m)



QuickBird  
(0.65m)



Pleiades-2  
(0.5m)



GeoEye-1  
(0.41m)



WorldView-4  
(0.31m)



ZY-3  
(2.1m)



GF-2  
(0.8m)

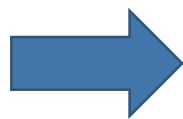


UAV  
(5cm~9cm)

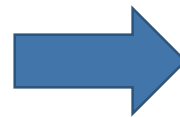
随着遥感技术的不断发展，遥感光学影像的**空间分辨率不断提高**，  
为**灌区遥感分析带来了机遇和巨大挑战**



20m



10m

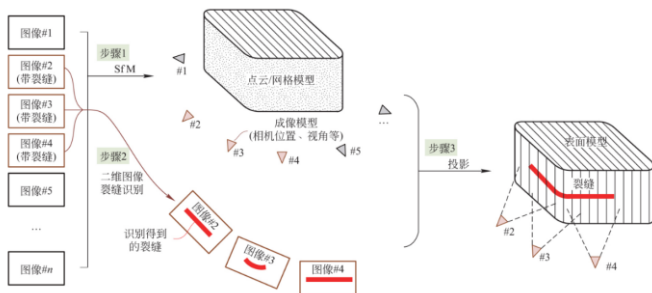
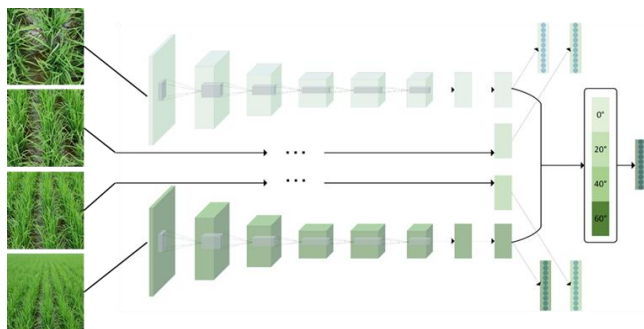


0.6m

## 2

## 数字孪生灌区——核心技术

## 2、灌区机器视觉技术 (DeepField) 在作物机器视觉的基础，进一步加入了水位、流量、水生动植物等灌区要素的机器视觉识别



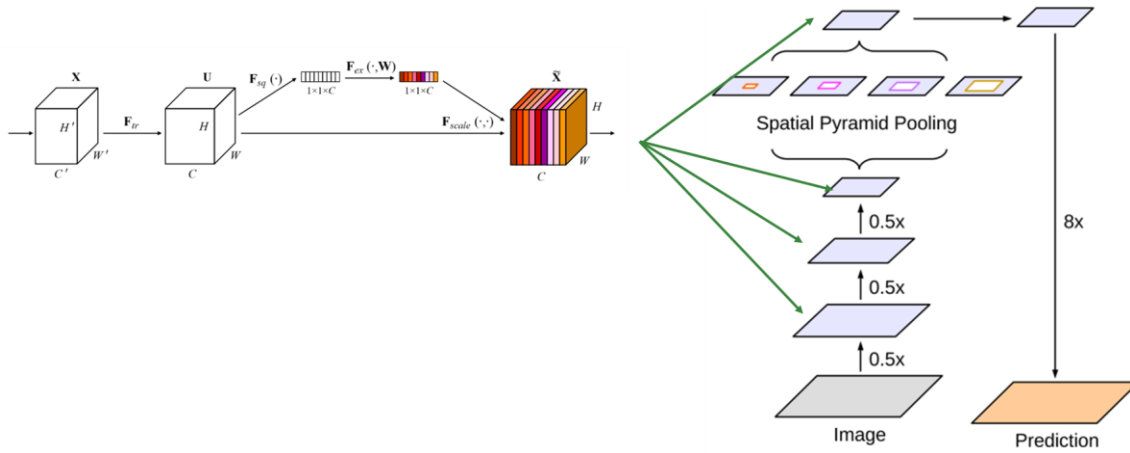
- 通过低成本的视觉数据
- 不再需要对作物叶片进行破坏性观测
- 无标定技术：测距、测速、测高和水工建筑物健康诊断
- 部分功能已嵌入到One之中

## 2

# 数字孪生灌区——核心技术

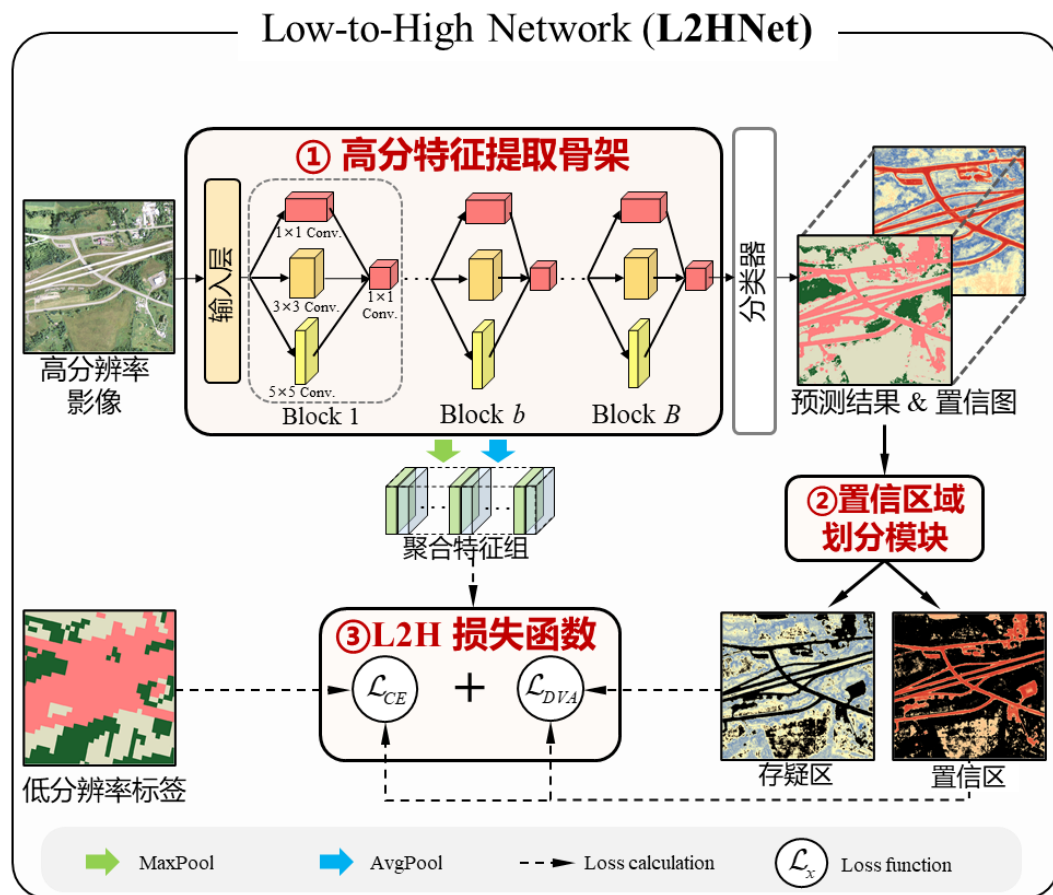
## 3、基于高分二号1米全色影像的灌区数字化技术

- 干支渠
- 水源
- 田块 ( 95% )



基于DeepLab v3+ ( 谷歌, 2018 ) 的田块识别模型

## 4、基于低分训练标签进行大规模高分土地制图的语义分割网络。实现大规模高分（1米）语义分割并产出相应土地覆盖产品



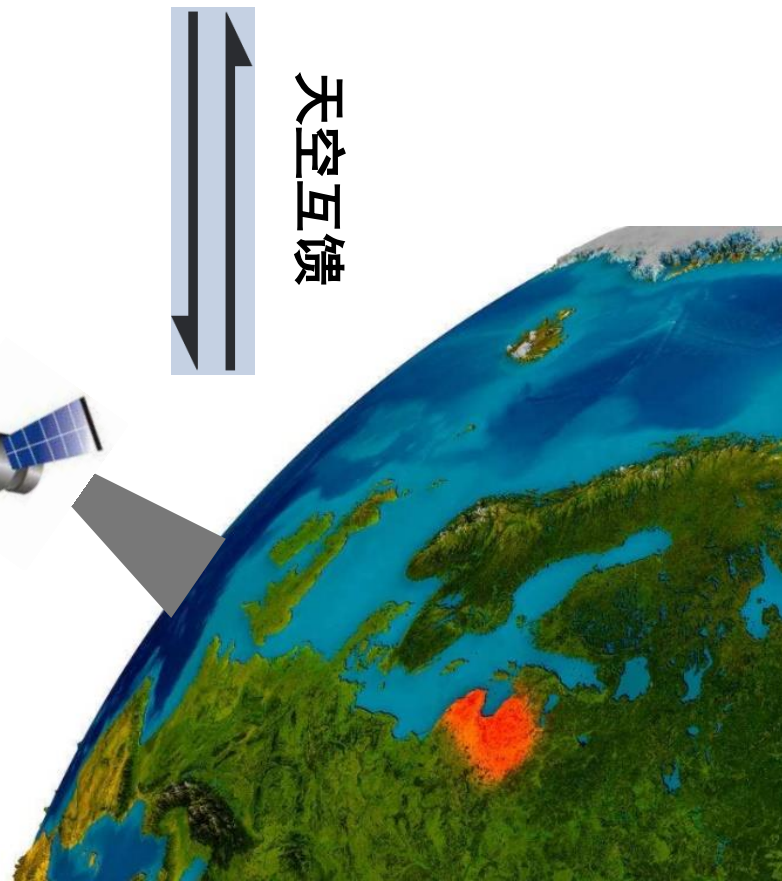
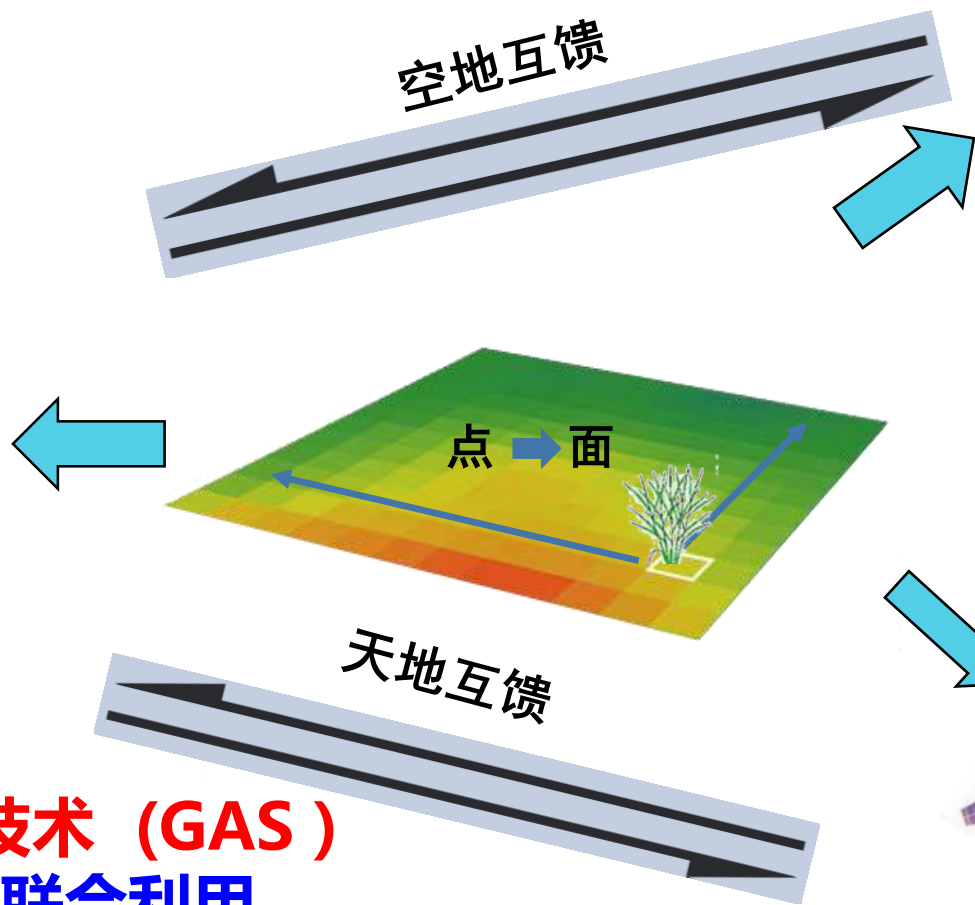
### 主要组成模块：

- **高分特征提取骨架**：利用多尺度并行卷积构建轻量级特征提取器，维持提取特征分辨率并防止细节损失。
- **置信区域划分模块**：对结果进行划分，筛选出置信区与存疑区，为后续损失函数计算提供依据。
- **L2H损失函数**：置信区与标签计算交叉熵损失，以规避标签噪声。同时置信区与存疑区计算特征类内方差损失，以自监督策略进而优化网络训练。



## 2

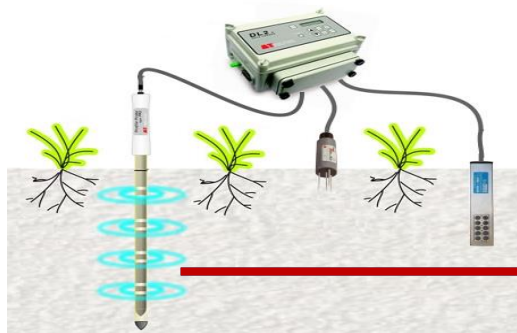
# 数字孪生灌区——核心技术



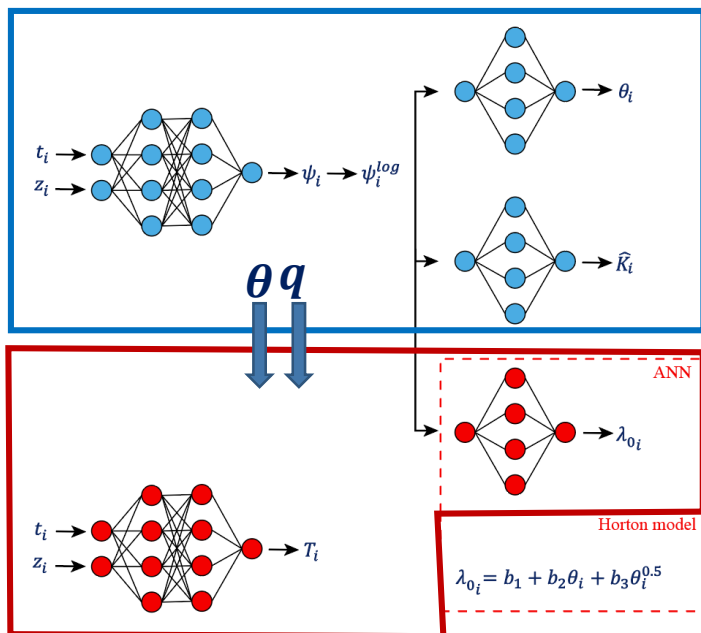
## 5、灌区地天空智能交换技术 (GAS)

- 相互校准、升降尺度、联合利用
- 灌区地物分类、田块、沟渠等数字化精度达97%
- 田块尺度作物长势精度90%
- 蒸散发精度90%

# 数字孪生灌区——精准化模拟



水热耦合动力学系统  
深度学习模型



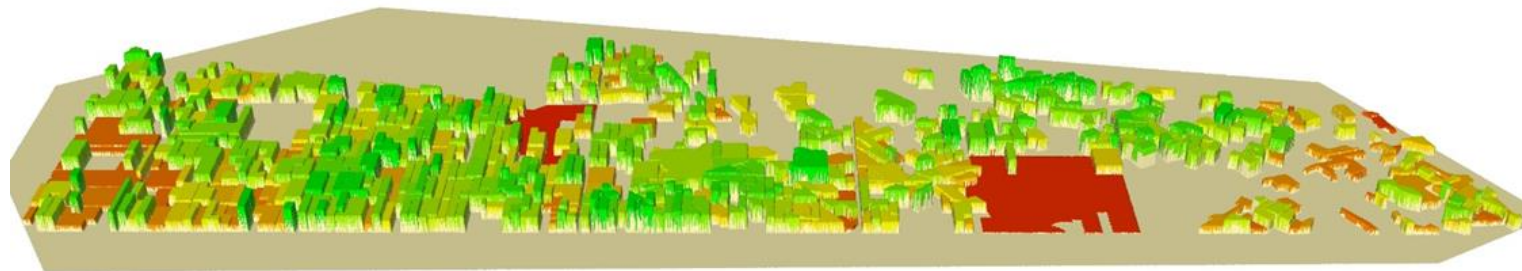
通过三种方式（网络结构设计、子网络设计、损失函数）满足水热耦合系统的主要物理约束

- 水分方程
- 热方程
- 水热耦合
- 水分特征曲线、导热率

- 实现了多源数据对复杂物理过程的多角度表达（互补性表达）
- 数据采集方案灵活，不过度依赖于单一观测

初步研究证明深度学习可以既具有部分机理性，又能高效利用数据，建模简单（无需调参）、精度高（>5%误差）；但实用性仍需经过充分检验

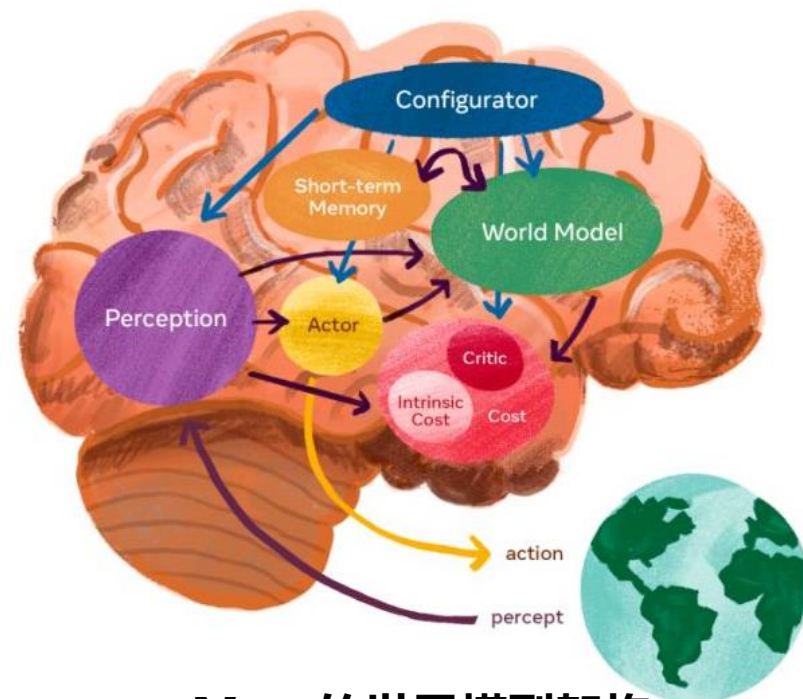
### 5、从新的动力学模拟方法扩展至灌区和流域系统精准模拟是智慧水利亟待攻克的难题（今年刚启动）



灌区和流域系统模拟



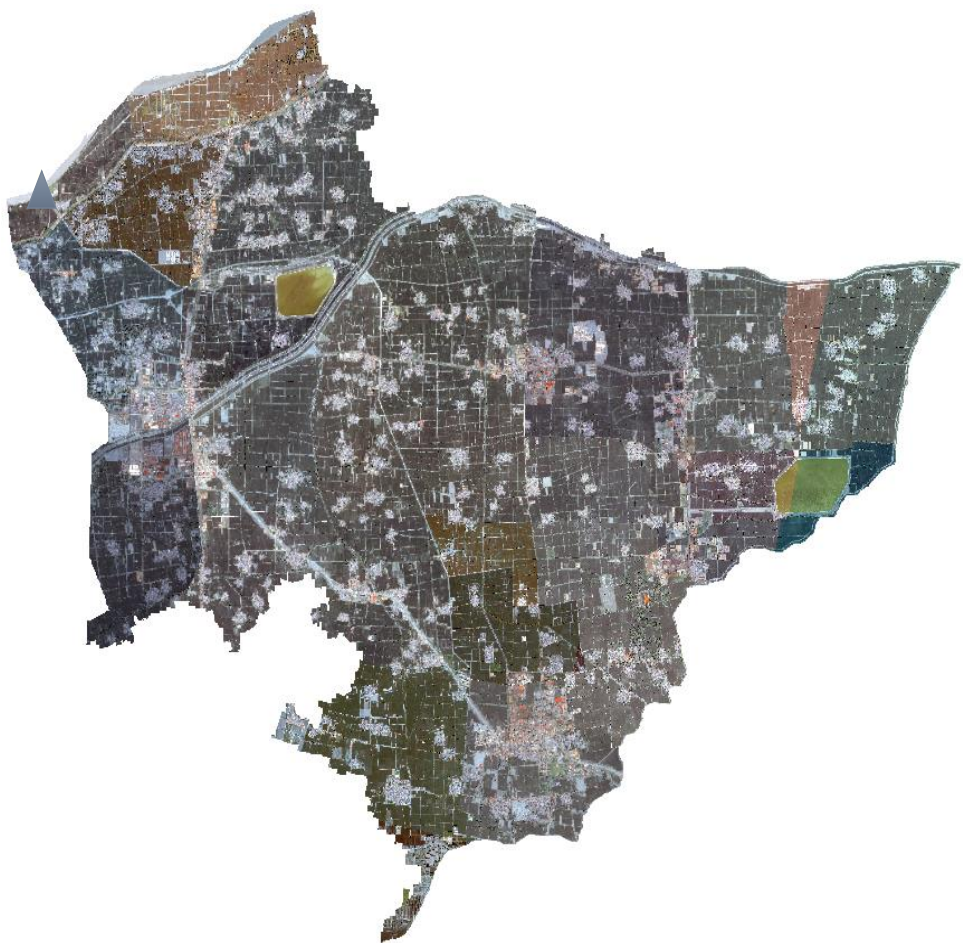
百万乃至千万级管理单元的机理和数据混合驱动  
模型架构、跨尺度知识生成和融合、实验验证



Meta的世界模型架构  
(Yann LeCun, 2022)



# 数字孪生胡楼灌区



山东省邹平县胡楼引黄灌区

- 位于山东省黄河下游右岸，北起黄河，西及西南部与济南市接壤，东及东南部与淄博市相邻，灌区范围涉及邹平县的**10**个镇办
- 总面积 **718.31km<sup>2</sup>**。灌区设计灌溉面积为 **65万亩**，设计引水流量为 **35m<sup>3</sup>/s**，近年来有效灌溉面积 **40** 万亩
- 灌区已进行相关升级改造工作，具有较好的智慧化条件

## 总体设计构想

**天-空-地一体 联合解译** —— 基础数据的获取、分析、联合运用

**灌区智能解译模型** —— 作物状态评估（田块）、干旱（蒸散发）降雨、渠道水动力学过程（水位流量，渠首-末 动态响应关系）.....

**干旱预报预警、灌区水资源智能调配** —— 水量平衡-非充分灌溉制度、干旱预报预警、水资源调配

灌区数字孪生系统

以节水、灌区水资源优化管理为目标，提高灌区综合效益，建立跨尺度智慧灌区管理系统

# 数字孪生胡楼灌区

## 1. 灌区自动数字化

完成对灌区区域**水系、渠系**（主干渠、干渠、支渠）、**水工建筑物**（闸门、泵站、沉砂池等）及各式**监测站点**（测流桥、雷达监测等）的基本信息整理，并完成**GIS矢量化**；

开展灌区灌溉**田块**的自动数字化工作：即根据灌区卫星地图，自动完成灌区田块的分割划分，以田块为单位整理信息，作为后续灌水决策等基础参照

理清灌区灌水逻辑关系，**渠-河-闸-田**的响应关系

## 2. 天空地一体化地物分类和植被指数

拟开展灌区**天-卫星、空-无人机、地-地面观测**一体化研发，主要涉及天空地联合观测及联合解译，涉及多源数据的采集与联合运用，如地物分类、植被指数、产量评估等联合解译

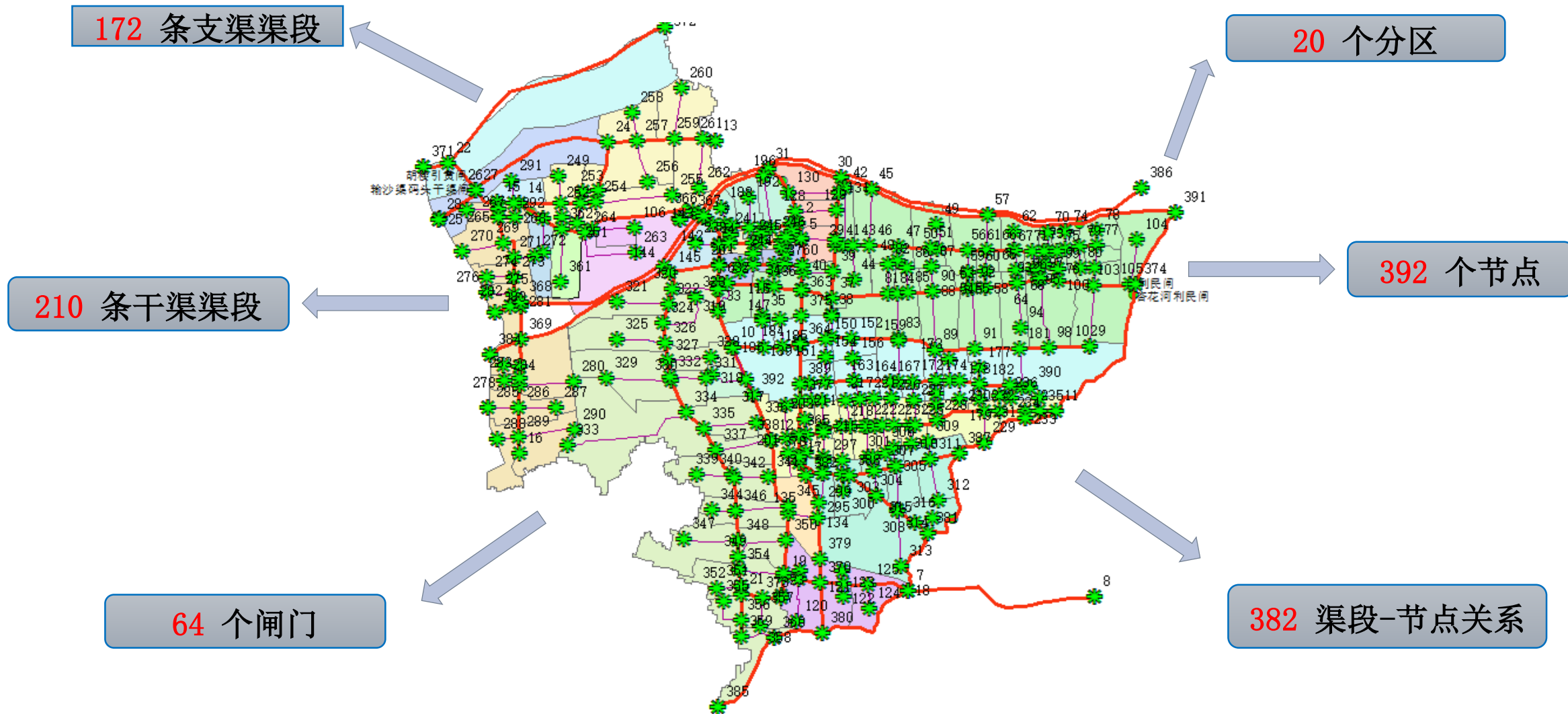
## 3. 灌区精准模拟

干旱评估与预测、蒸散发评估、渠道水动力过程监测（视频测流）等内容

## 4 灌区水资源智能调配

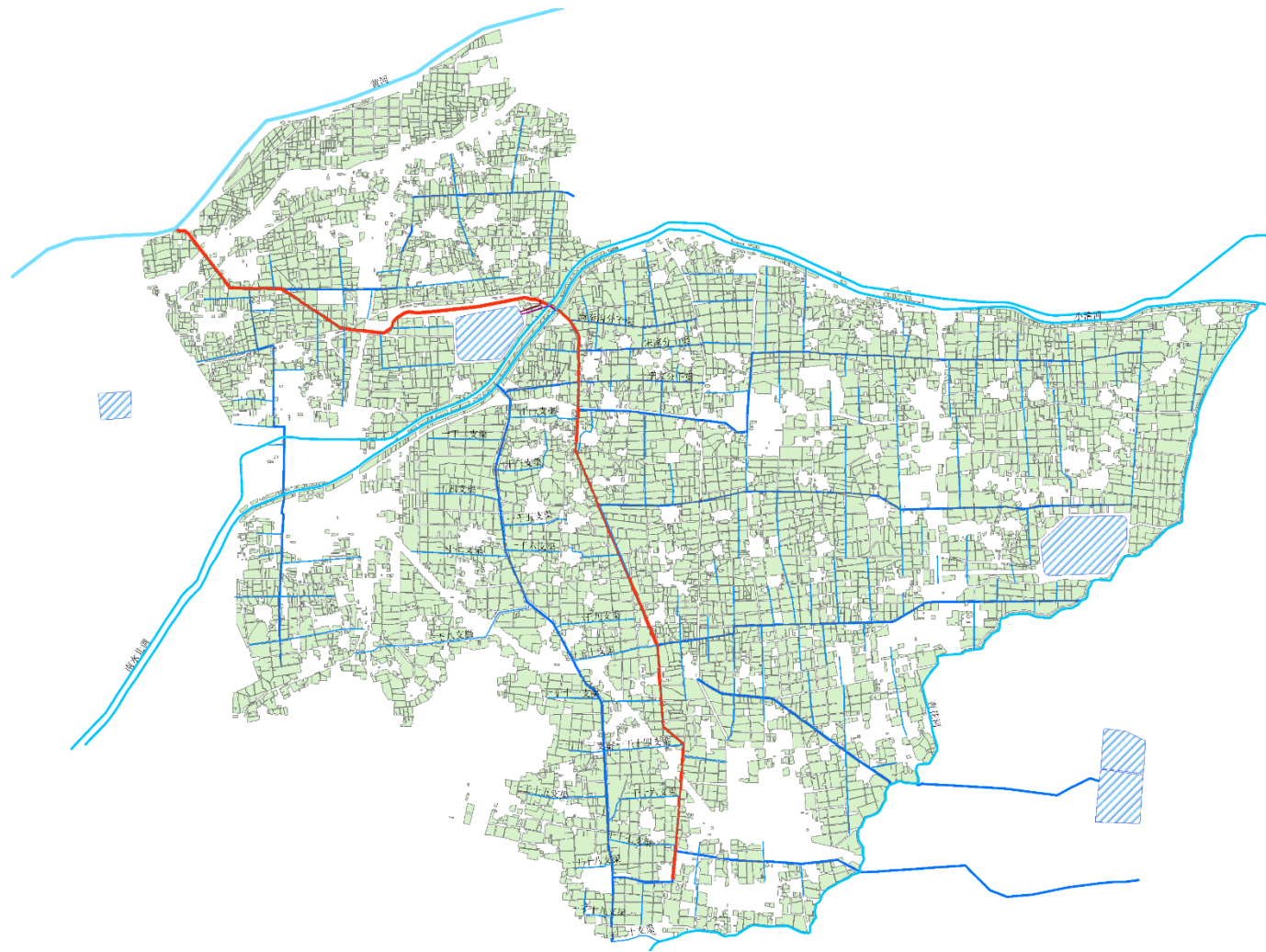
**水量平衡-小田作物非充分灌溉制度**的确定（**水资源配置**），渠道水动力过程模拟及闸门群联合智能调度等（**水工建筑物调度**）

# 数字孪生胡楼灌区



# 3

## 数字孪生胡楼灌区



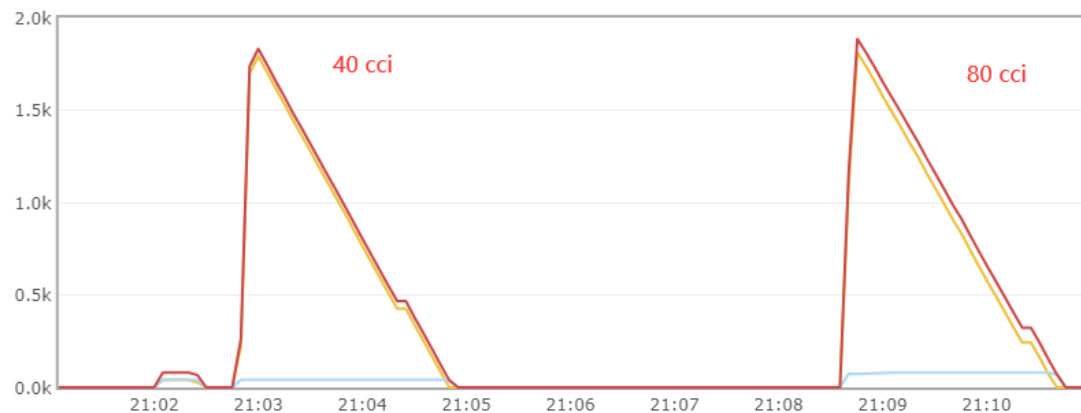
6870 个田块单位及属性

# 数字孪生胡楼灌区——云原生系统



# 数字孪生胡楼灌区——云原生系统

Queued messages last ten minutes ?



Ready 0  
Unacked 0  
Total 0

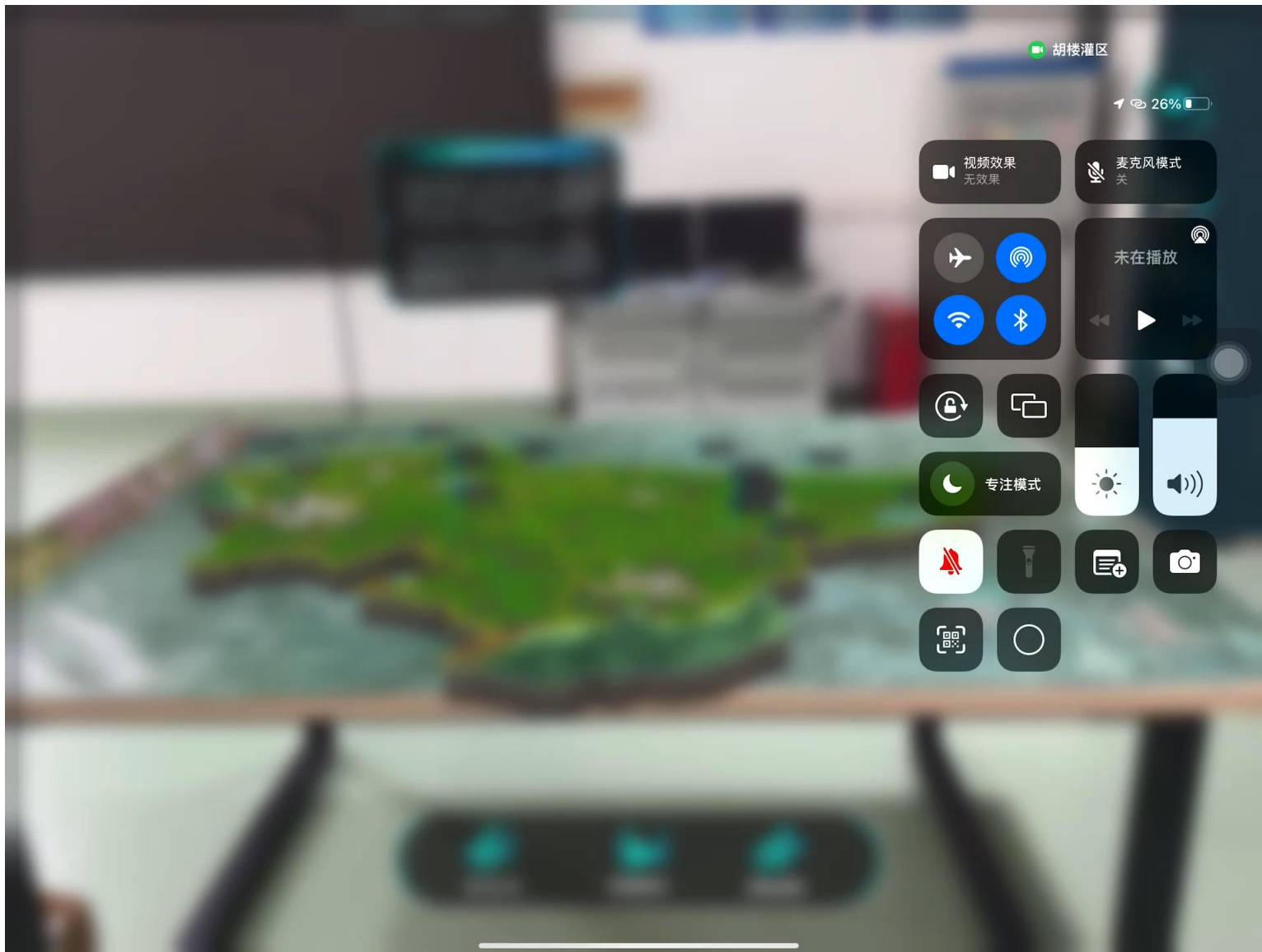


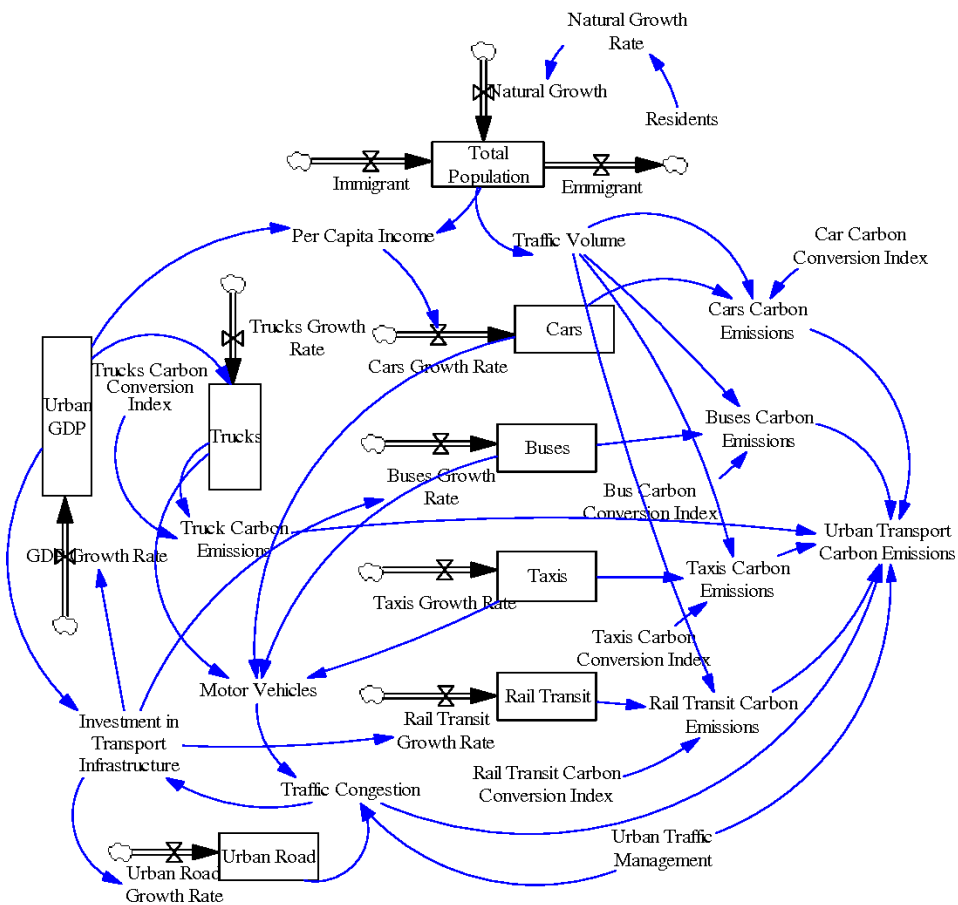
Label	# Samples	Average	Median	90% Line	95% Line	99% Line	Min	Maximum	Error %	Throughput	Received KB/...	Sent KB/sec
Task Generate	2000	1379	940	3090	3328	3803	36	4909	0.00%	259.1/sec	34.15	55.91
Start Consume	2000	54474	55392	99629	105408	110113	95	111191	0.00%	16.8/sec	3.40	0.10
Public Succe...	1999	4619	4577	5677	6092	12242	101	18605	0.00%	16.5/sec	0.40	0.00
WebSocket C...	2000	4	1	2	8	102	0	368	0.00%	16.8/sec	0.44	0.51
事务控制器	2000	60479	61122	107445	113257	117041	1697	117361	0.00%	16.4/sec	6.31	4.13
调试取样器	2000	0	0	0	0	1	0	1	0.00%	16.8/sec	8.06	0.00

测试用例1：单个GPU，40CCI实例测试结果（满足最大峰值800/min）

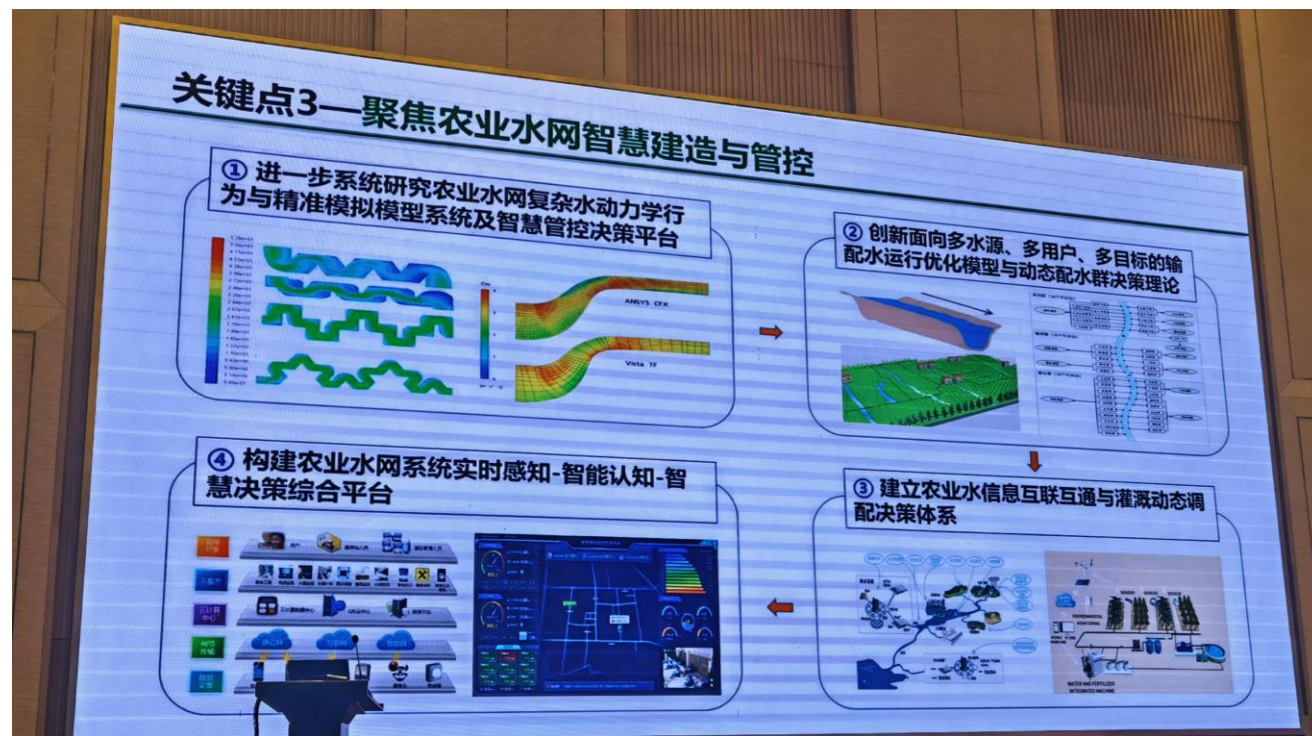
测试用例2：单个GPU，80CCI实例测试结果（满足最大峰值1000/min）

# 数字孪生胡楼灌区





SPAC与系统动力学的结合



康绍忠院士报告, 2022

大型灌区、区域水网调配研究



## 未来计划

- 向水利部汇报，发布灌区数字孪生产品
- 公开所有算法的测试接口，接受国内外其它单位的挑战和合作
- 内部测试、完善和应用，其中水工建筑物的智能调控是重点





