



# 供需水预测与水资源配置模型

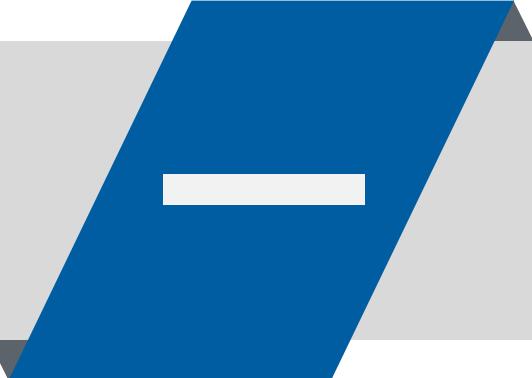
魏 征

中国水利水电科学研究院  
国家节水灌溉北京工程技术中心  
水利部数字孪生流域重点实验室

# 提要



- 一 研究背景**
- 二 业务需求**
- 三 科技问题**
- 四 关键技术**
- 五 典型案例**



# 研究背景

# 1.1 灌区数字化建设要求

需求牵引，问题导向

感知硬件



信息化

自动采集  
工程上图  
信息查询

预报预警  
推演决策  
方法



数字化

方案推演  
决策支持



数字孪生  
“四预”能力



智能/智慧化

自我判断  
自我决策  
自我执行  
无人值班、少人值守

# 1.2 灌区数字化建设技术架构

■ 模型库是数字孪生平台的内核要素，是技术难点，是实现2+N业务“四预”功能的关键



# 业务需求



## 2.1 灌区主要业务—科学数据基础支撑





## 2.2 灌区业务需求—用水调配一体化

### 业务逻辑流程



- 供需水计算主要依靠上报数据
- 配置方案制定主要依靠历史供水经验

- 主观性强，动态调整难
- 人工调算、计算效率低
- 以点带面、代表性不足

- 供需水预测科学化
- 多源精准优化配置智能化
- 实时动态调整便捷化

业务现状

存在问题

建设需求

## 2.3 模型支撑需求—供需匹配技术的业务应用

业务逻辑流程



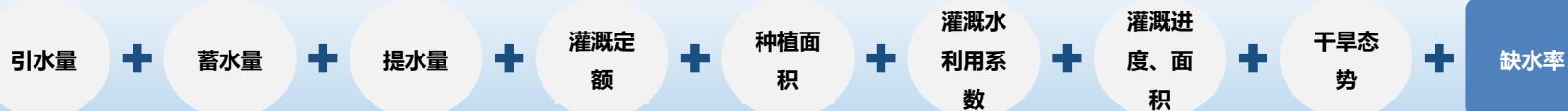


# 科技问题



### 3.1 业务技术指标—技术指标是业务指标的底层

配置  
业务  
指标



研究  
分类

● 水农情计量技术

建筑物, 水位、流速流量监测技术与设备

● 星机地融合技术

光学传感, 蒸渗仪, 涡度, 僻情仪, 试验

● 智能量测装备

地面调查、航拍及摄影、水质/泥沙/矿化度

手段

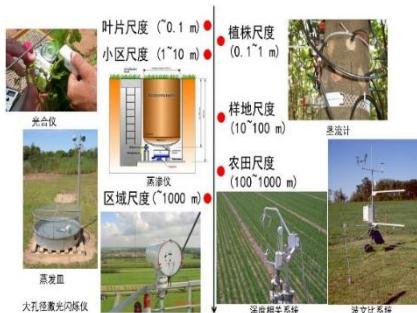
已有多种方法可以实现农业供水、需水  
信息的观测&模拟





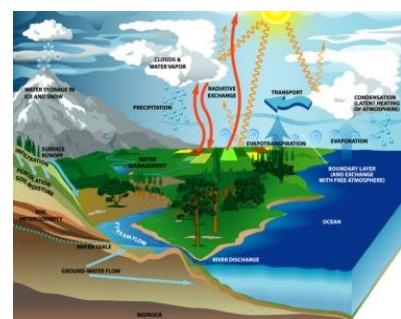
# 3.2 发展趋势一遥感耦合算法是灌区配置业务需要

## ■ 应用发展趋势：多源信息协同监测与数据综合治理



### 地面观测

- ✓ 精度高
- ✓ 连续观测
- ✓ 标准化程度高
- ✗ 尺度小，代表性不足
- ✗ 经济、人工成本高



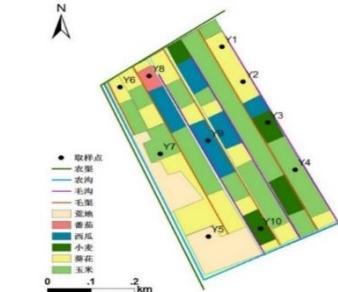
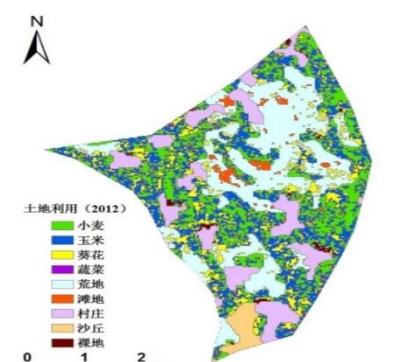
### 模型模拟

- ✓ 提供多种输出产品
- ✓ 有效工具
- ✓ 连续模拟
- ✗ 误差随时间不断累积
- ✗ 不确定性高



### 遥感反演

- ✓ 空间连续动态
- ✓ 多种地表、植被参数
- ✓ 成本低，自动化监测
- ✗ 时间不连续
- ✗ 空间验证较为困难



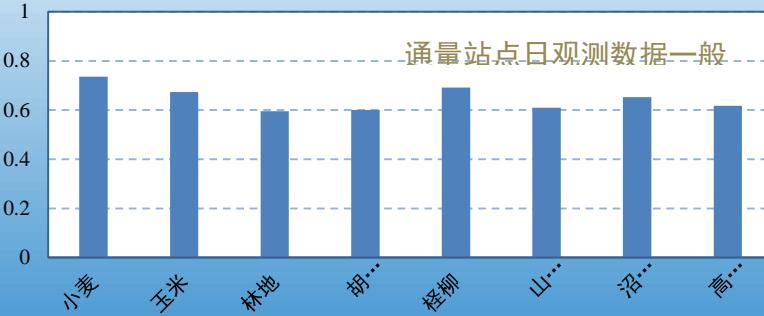
四

## 关键技术

# 4.1 作物耗水—支撑灌溉定额、进度等

■ **解决方案：**基于改进单源能量平衡模型的灌区耗水解译方法，实现作物耗水高精度估算

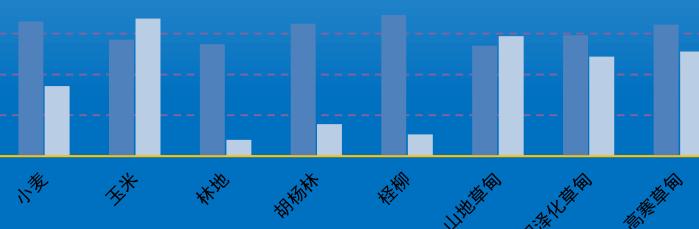
模型估算值与观测值的决定系数



模型估算值和MOD16A2蒸散发产品与观测值的决

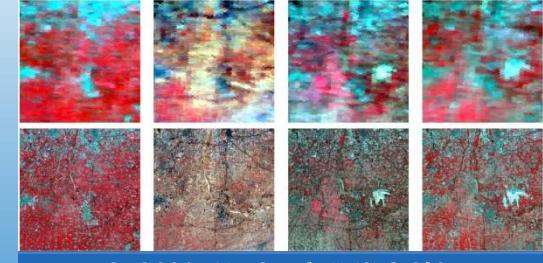
定系数对比

模型估算值



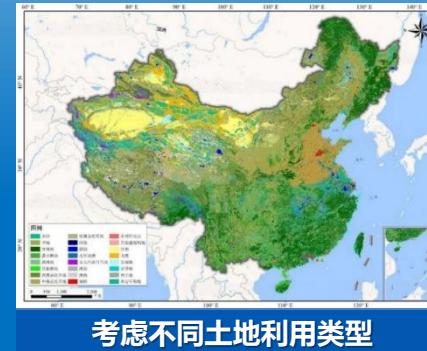
填补缺失数据

时域重建



生成精细的时、空分辨率数据

时空扩展



考虑不同土地利用类型



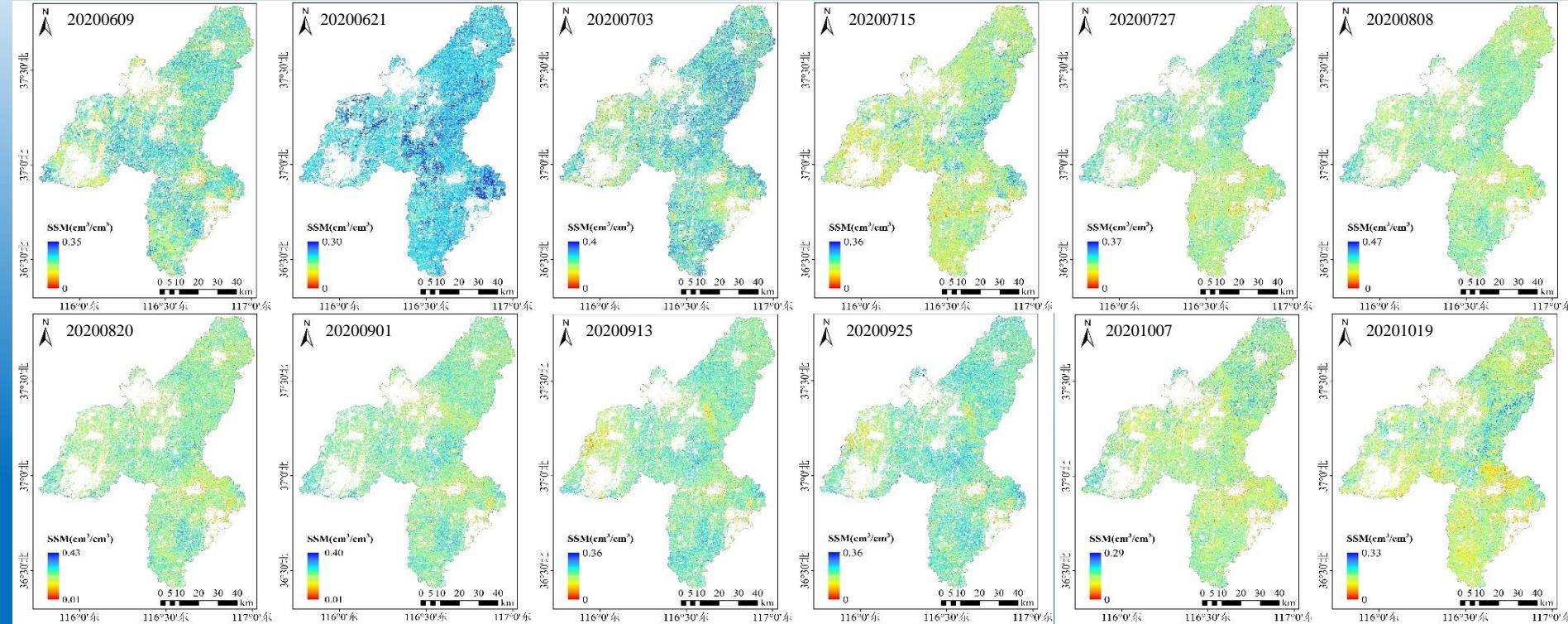
区域耗水监测方法



时间尺度拓展方法

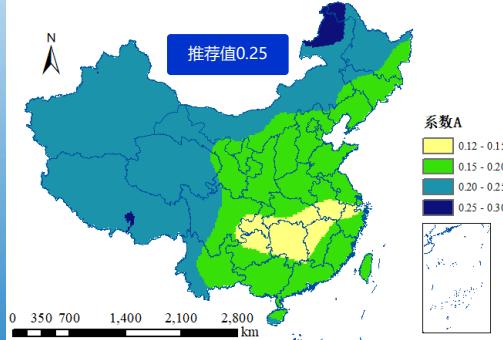
## 4.2 根层土壤墒情—支撑水量、进度、干旱等

■ 解决方案：构建分布式变饱和土壤动力学模型，实现根层土壤水分的模拟，精度达到0.80

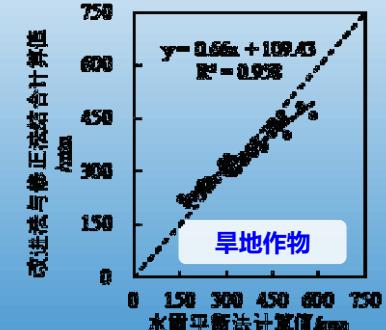
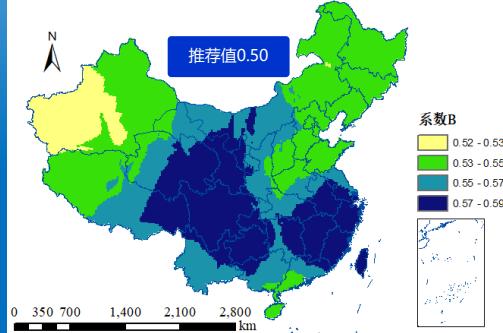
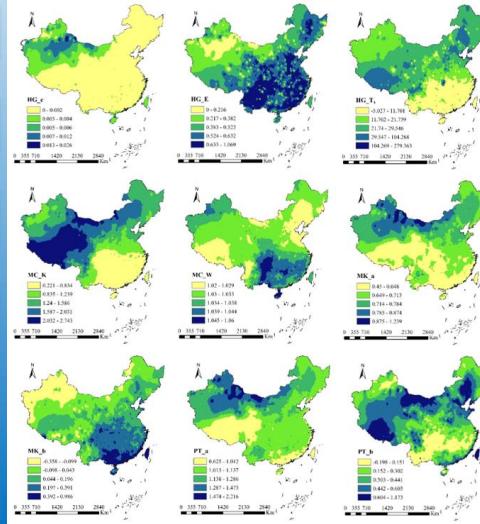
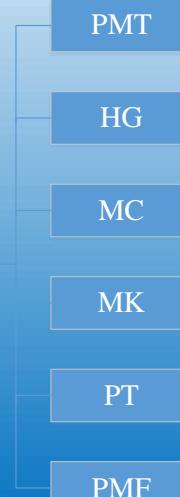


## 4.3 灌溉需水—支撑灌溉定额、作物需水过程等

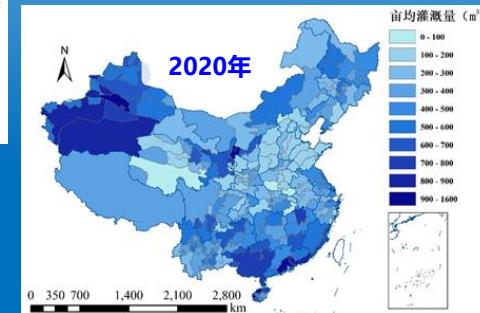
■ 解决方案：提出了参考作物需水量、有效降水量等关键参数标准化方法，实现全国范围内农业灌溉需水量月尺度动态预报



预报模型

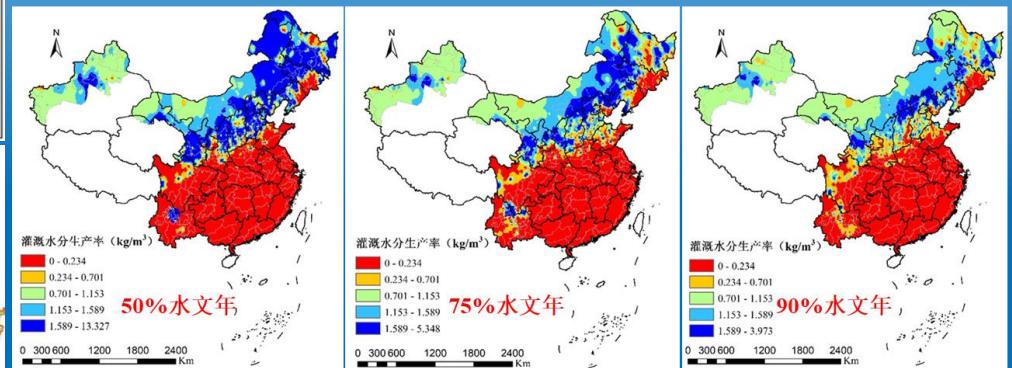
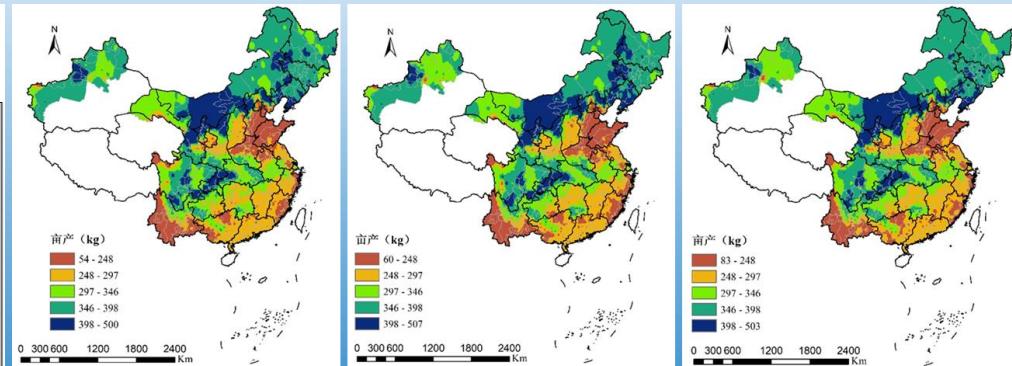
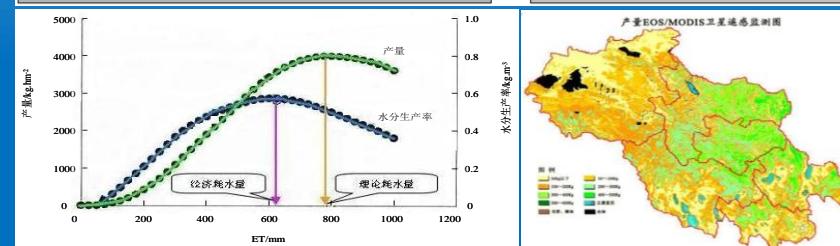
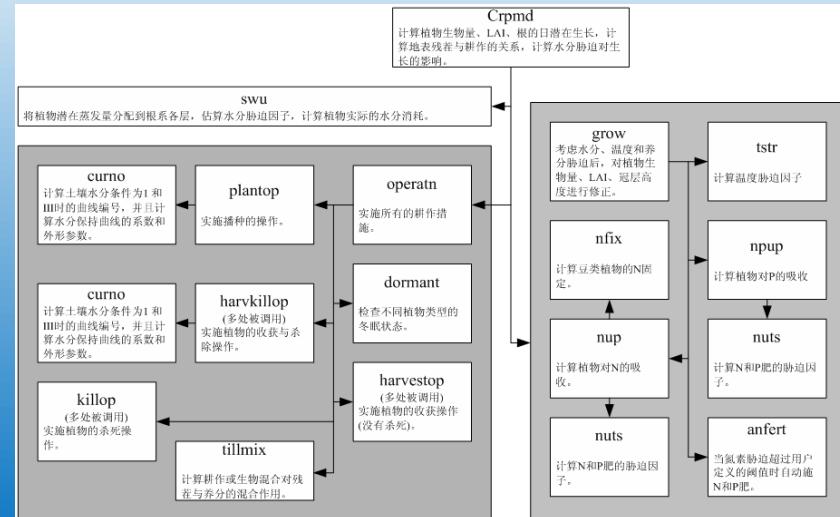


有效降水量计算公式优选



# 4.4 作物产量预估—支撑定额、干旱、保产等

■ 解决方案：兼顾土壤质地、降水量异质条件，考虑作物种植结构，基于作物生长模型估产

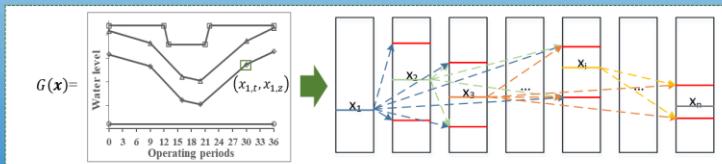


# 4.5 总量协调分解技术—支撑多水源高效分配

■ **解决方案：**构建供水保障、空间均衡等目标的水源优化配置模型，以各类水源供水量和供水能力为约束，进行多目标协同求解，实现灌区供水一体化配置。

**【优化变量】** 随水利工程数量增多，参与优化的变量个数呈几何级数增长；

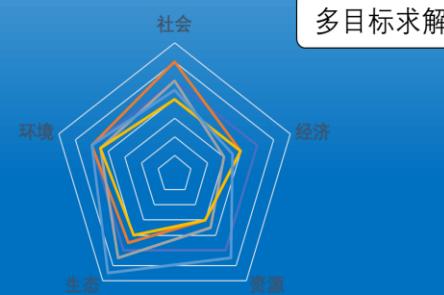
维数灾问题



两大  
难题  
?

**【优化求解】**

- 半结构化优化问题；
- 不同目标竞争协同，通过多目标求解可找到相对最优的一组或多组可行解；
- 目标越多、目标间竞争关系更明确，寻优难度越大，效率越低。



多目标求解

**【总量控制协调分解方法】**

1) 水量供需平衡

$$\sum_{i=1}^{12} W_{is} = \sum_{i=1}^{12} Q_{is}$$

$$W_{is} = Q_{is}$$

式中： $W_{is}$ 为水源第*i*个月供水量 (万m<sup>3</sup>)， $Q_{is}$ 为单元第*i*个月供水量 (万m<sup>3</sup>)

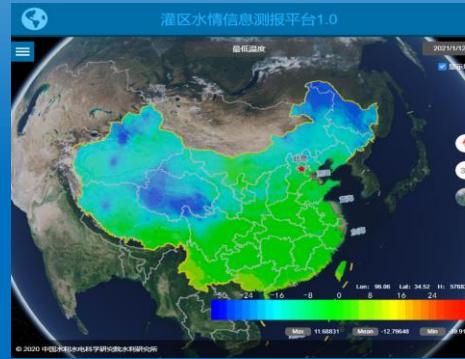
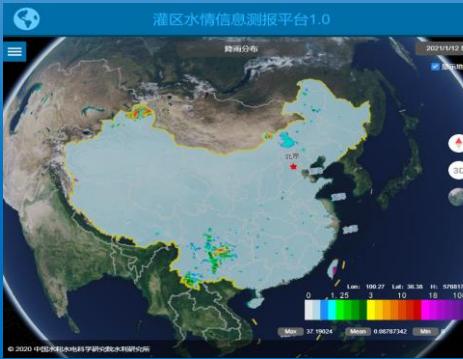
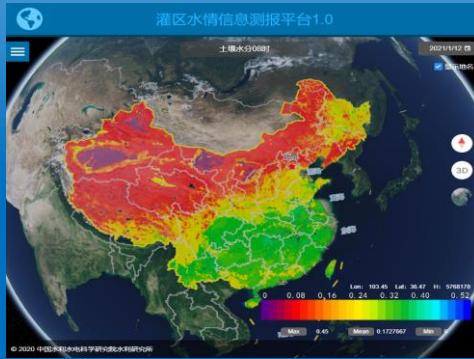
2) 水源约束

$$\sum_{i=1}^{12} W_{is} \leq W_{ts}$$

式中： $W_{is}$ 为水源第*i*个月供水量 (万m<sup>3</sup>)， $W_{ts}$ 为水源的年供水指标 (万m<sup>3</sup>)

# 4.6 整装成套技术—灌区用水信息测报平台

■ **解决方案：**拥有全国2279个县逐时气象、逐日土壤墒情数据，及2343种修正作物系数等特色数据，提供全国范围标准化数据。



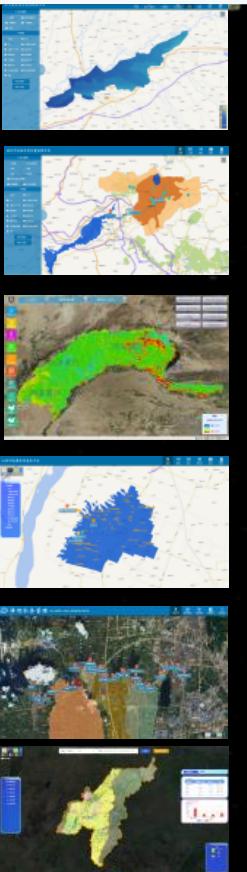
- 全国参考作物蒸发蒸腾量  
监测值
- 全国逐日\逐时气象数据  
监测及预报数据
- 全国土壤墒情数据
- 全国能量平衡 $a_s$ 和 $b_s$ 分散  
系数集
- 全国参考作物蒸发蒸腾量  
未来30天分布式预报值

## 4.6 整装成套技术—灌区用水信息测报平台



种植结构  
作物长势  
作物耗水  
作物需水  
农业旱情  
土壤水分  
灌溉预报  
灌溉面积  
作物估产

□ 在淠史杭灌区、河套灌区、潘庄灌区、漳河灌区、和平灌区和回龙灌区得到了应用



# 4.7 整装成套技术—水资源通用配置与模拟模型

- **解决方案：**以多年配置理论方法、模型研发和实践应用为依托，基于专业化、通用化为目的，开发形成完全具有知识产权的水资源通用配置与模拟软件。
- **解决目标：**能够较快速和全面地评价研究区水资源状况

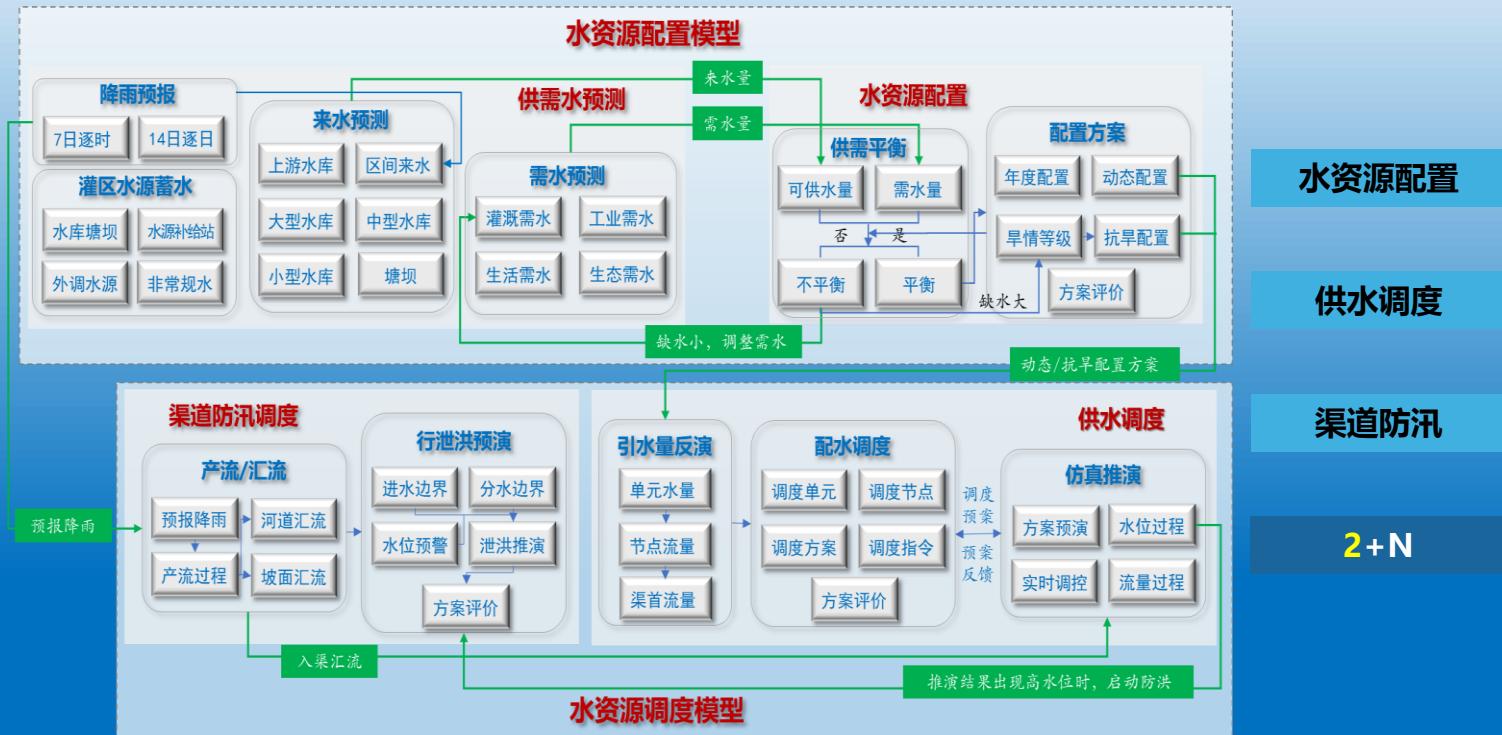


五

## 典型案例

# 5.1 模型总体设计—调配模型的一体化衔接

■ **设计思路：**搭建供需水预测和水资源配置模型，实现灌区水资源优化配置“四预”功能



# 5.2 供需水预测与水资源配置模型总体设计

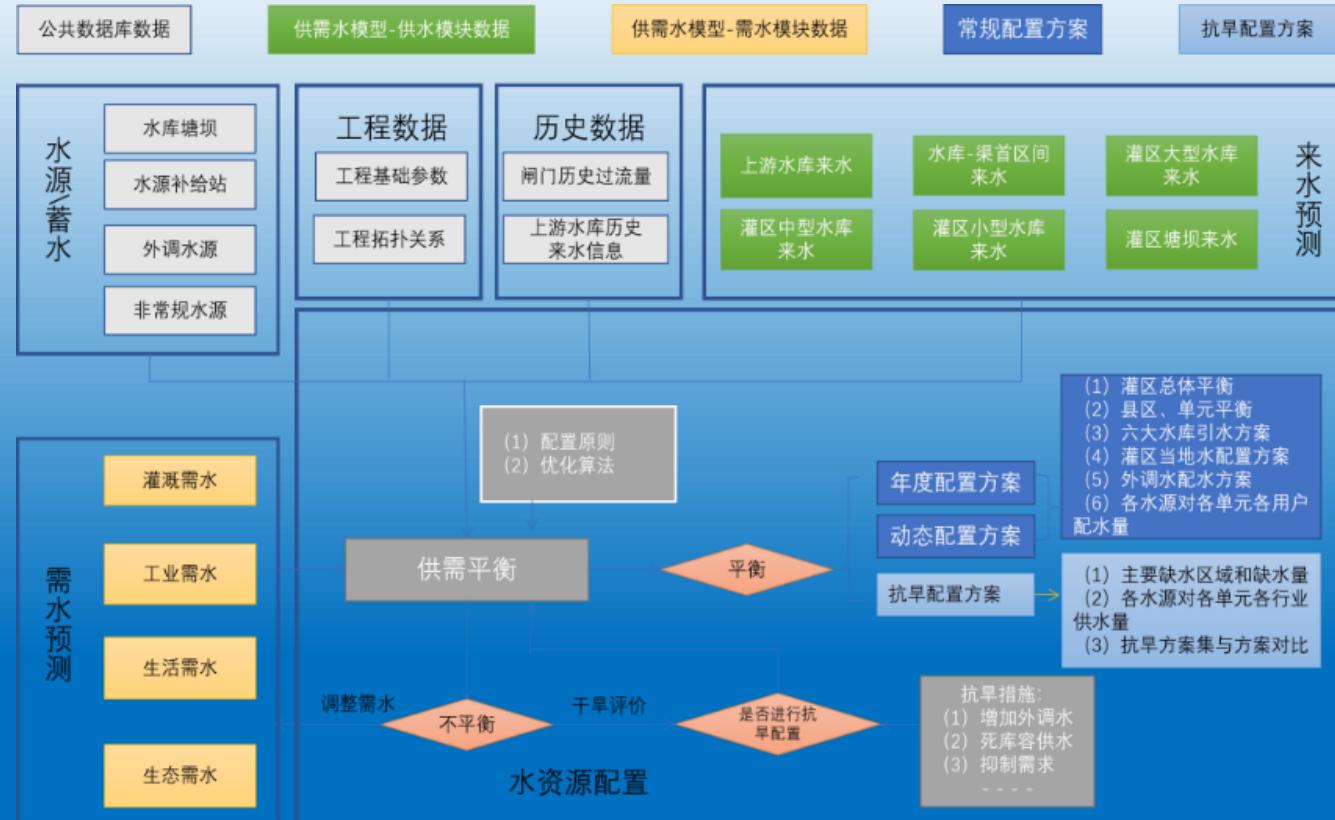
## ■ 供需水预测与配置

### ➤ 供需水预测

- 水源蓄水监测模块
- 来水预测模块
- 需水预测模块

### ➤ 水资源配置

- 供需平衡分析模块
- 年度配置方案模块
- 动态配置方案模块
- 抗旱配置方案模块



# 5.3 供需水预测子模型

- **应用主线**: 灌区供、需、耗、用水过程逐旬预测预报
- **供水预测**: 大中小水库、塘坝蓄水及来水、尾部提水
- **需水预测**: 生产生活生态用水, 重点是预测农业需水

- **水库**: 8座大型, 21座中型, 1215座小型
- **塘坝**: 26万座
- **面积**: 1000万亩
- **用户**: 农业灌溉、合肥供水、河流生态

## 水资源配置业务

## 水资源调度业务

### 业务逻辑流程



### 供需水预测子业务

### 模型应用流程



### 供需水预测子模型



## 5.4 降雨预测

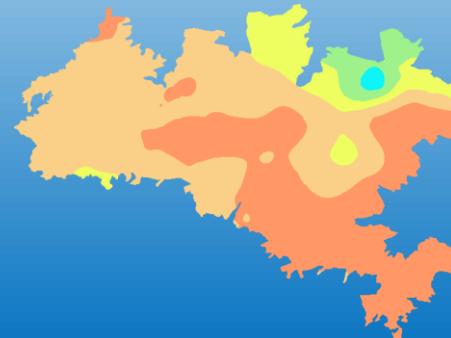
模型  
应用  
流程



■ 降雨距平、连续无雨日、标准降雨指标 (SPI) , 按旬进行输出, 亦可根据降雨预报时间进行选择 (1h、2h、3h、6h、12h、24h、36h) 。



降雨预报  
72小时



降雨距平



连续无雨日



错误示例

降雨空间数据

2022年10月下旬



# 5.6 来水预测

## 模型应用流程



### ■ 逐旬来水预测：大中型按座，小型及塘坝按单元归并

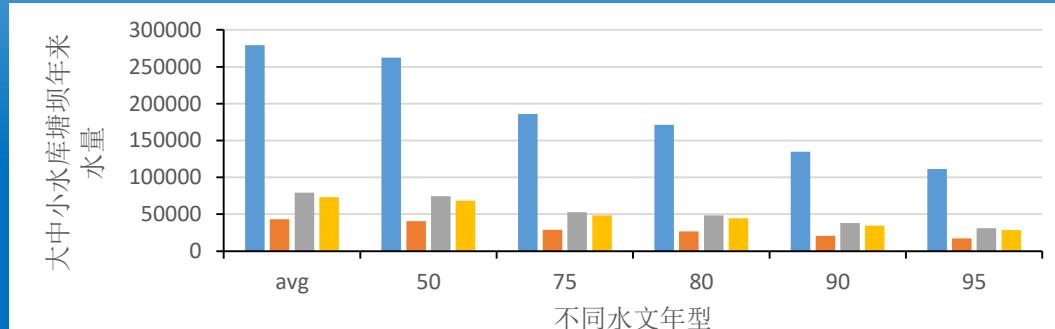
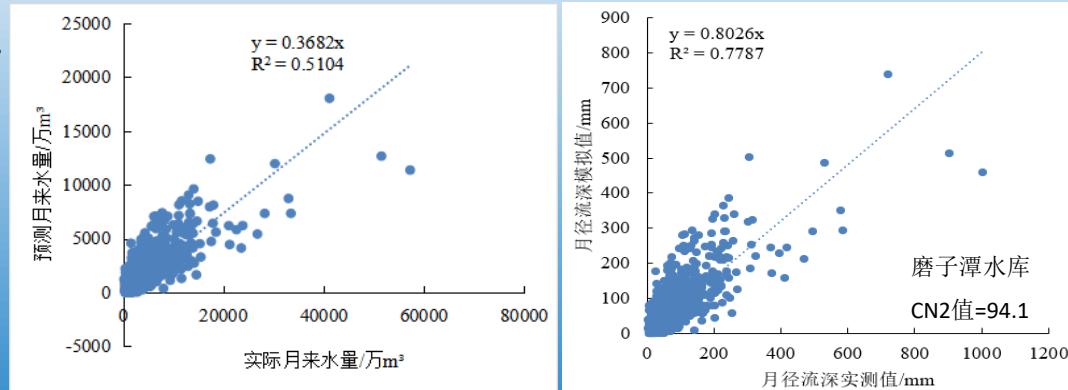
$$R = \begin{cases} \frac{(P - \lambda S)^2}{P + (1 - \lambda)S} & P \geq \lambda S \\ 0 & P < \lambda S \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 \times (100 - CN_2)}{100 - CN_2 + \exp[2.533 - 0.0636(100 - CN_2)]} \quad (3)$$

$$CN_3 = CN_2 \times \exp[0.00673(100 - CN_2)] \quad (4)$$

SCS-CN径流曲线模型



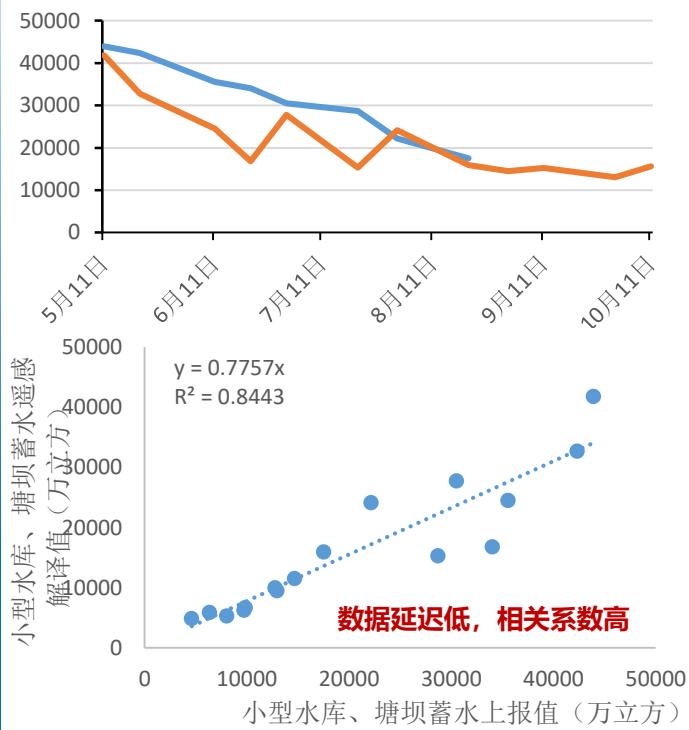
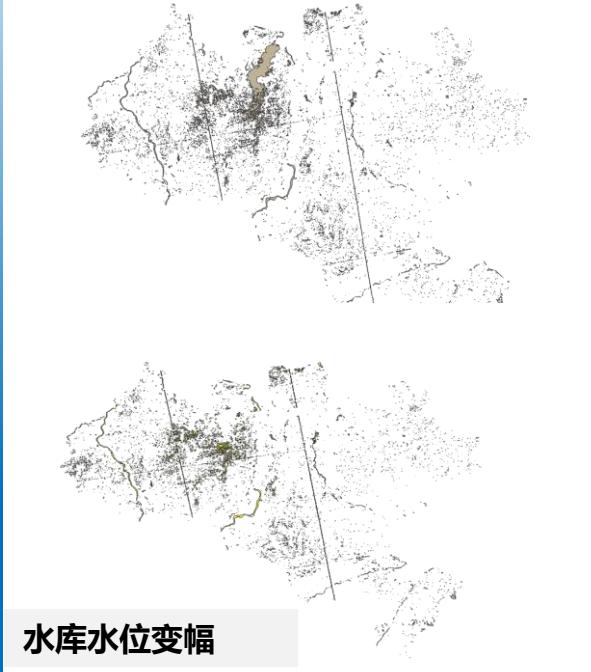
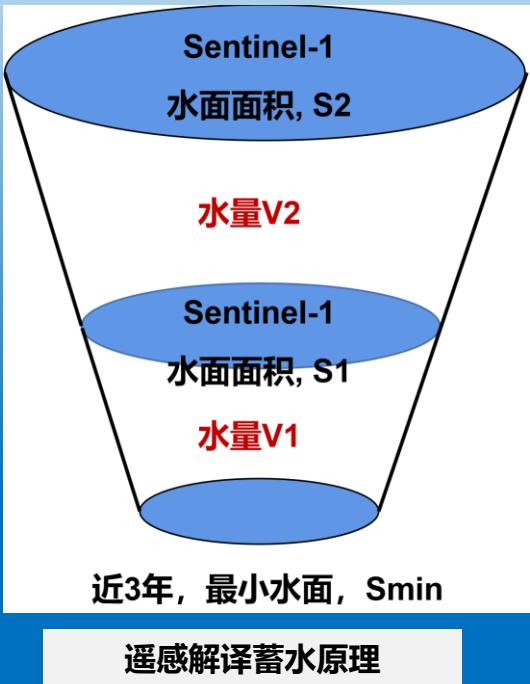


## 5.5 蓄水监测

模型  
应用  
流程



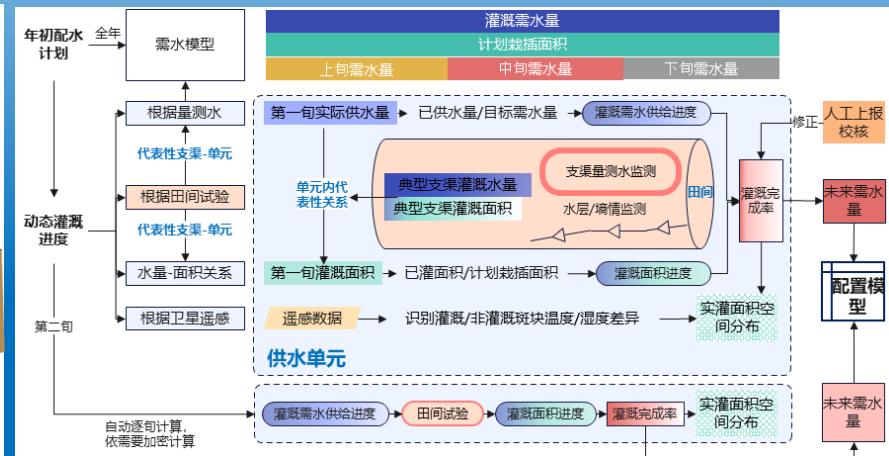
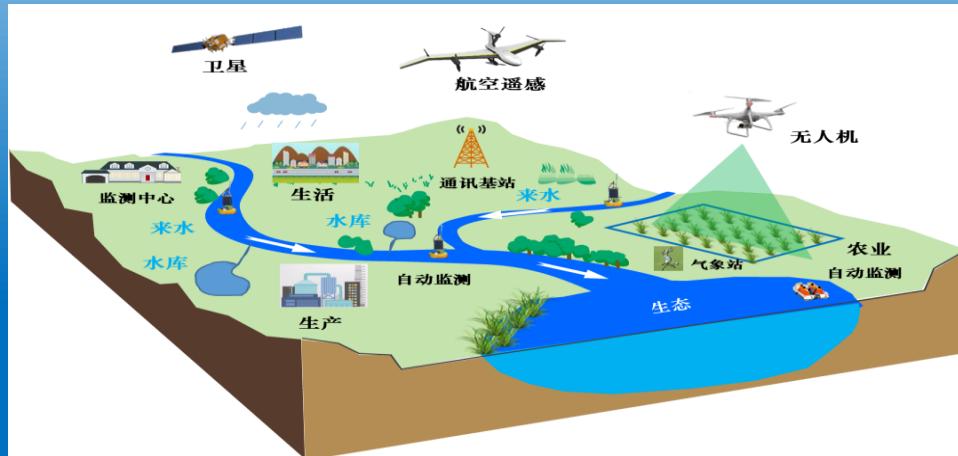
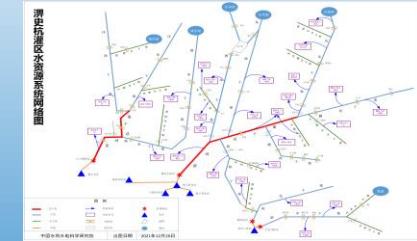
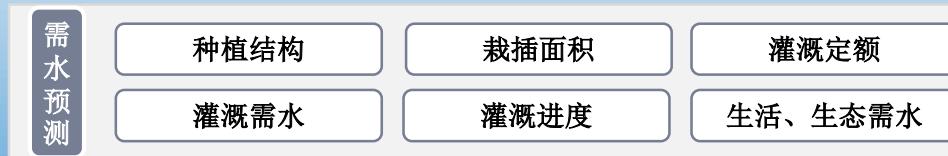
■ 逐旬蓄水监测：实现小型水库、26万座塘坝整体监测





# 5.6 需水预测

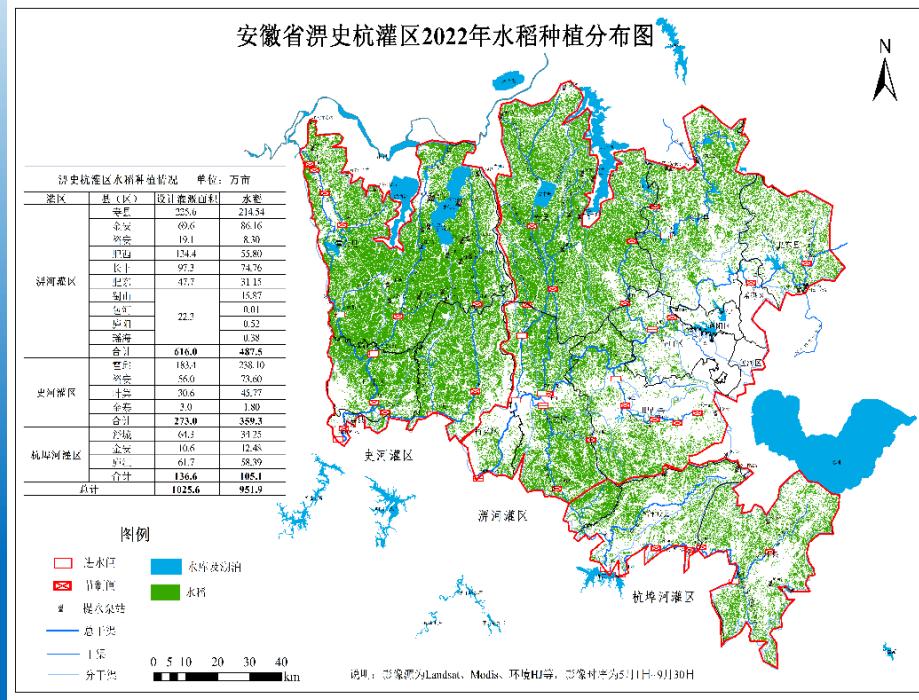
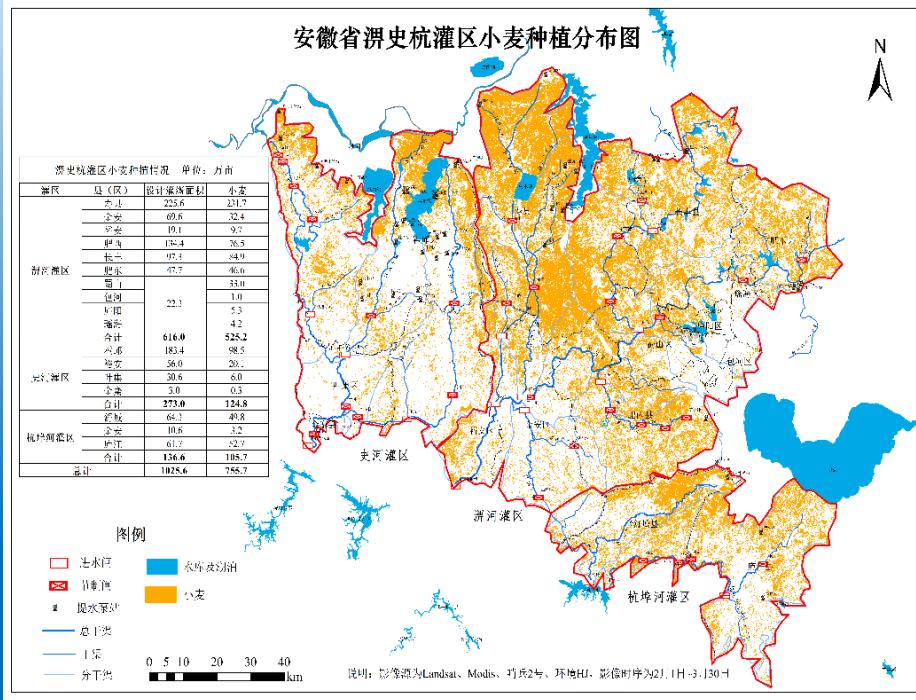
## 模型应用流程





## 5.6 需水预测—种植结构、水稻栽插面积

■ **作物分布**: 采用不同作物光谱特征 (极大似然算法) 解译水稻各品种、旱作物种植分布



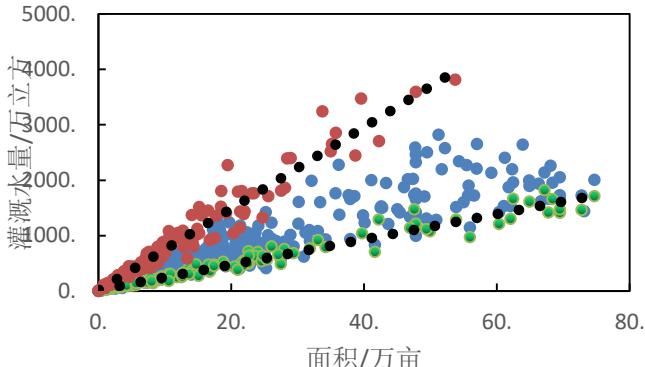
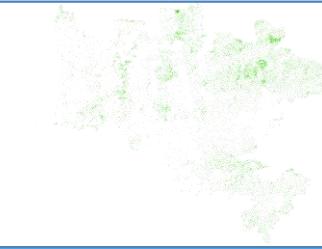


## 5.6 需水预测—灌溉进度

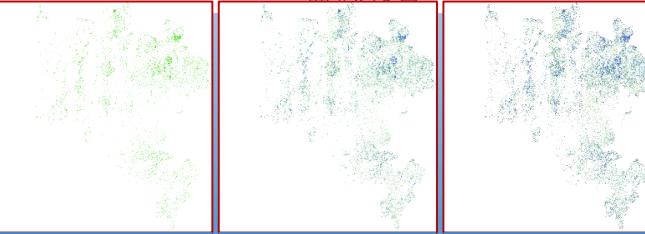
■ 灌溉信息识别：轮次已灌面积、未灌面积、灌水次数等

UNITID	YEAR	MONTH	XUN	IRRITOTAL	IRRIED	IRRIPROGRE
1	2022	7	1	26.000	2.080	8.00
2	2022	7	1	4.000	0.360	9.00
5	2022	7	1	69.000	11.730	17.00
3	2022	7	1	4.000	0.000	0.00
4	2022	7	1	16.000	0.000	0.00
8	2022	7	1	23.000	5.980	26.00
9	2022	7	1	4.000	0.560	14.00
6	2022	7	1	5.000	0.700	14.00
7	2022	7	1	39.000	5.460	14.00
10	2022	7	1	43.000	3.870	9.00
11	2022	7	1	46.000	1.840	4.00
16	2022	7	1	19.000	0.000	0.00
17	2022	7	1	33.000	0.330	1.00
18	2022	7	1	37.000	0.000	0.00
12	2022	7	1	8.000	0.000	0.00
13	2022	7	1	32.000	0.000	0.00

栽插期



面积/万亩

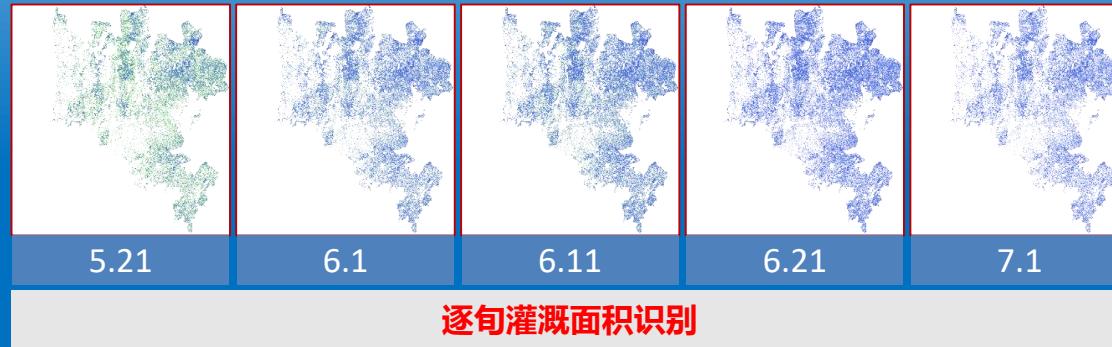
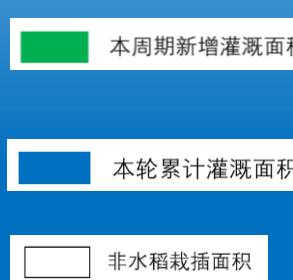


4.21

5.1

5.11

保收期



逐旬灌溉面积识别

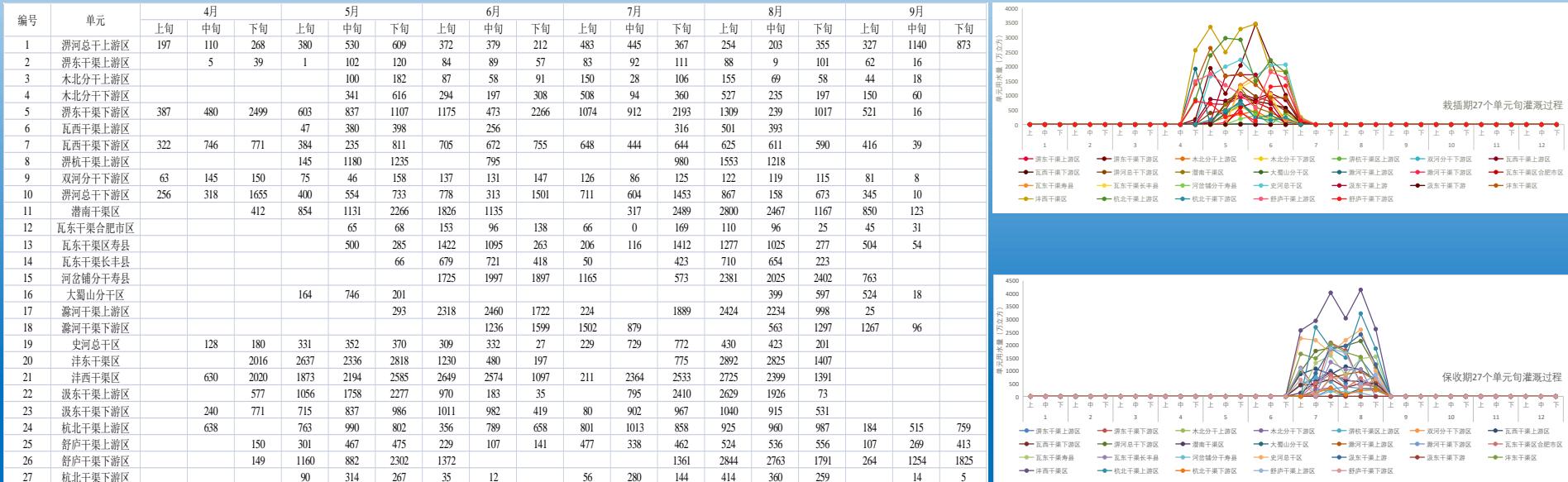


# 5.6 需水预测—灌溉需水

模型  
应用  
流程



■ 灌溉需水：考虑单元轮次、灌溉过程线以及灌溉试验定额，计算不同年型灌溉需水量





## 5.6 需水预测—生活、生态需水

### 模型应用流程



■ **城乡需水**: 依据水厂位置与配水单元和政区的关系, 获取城乡用水数据。

■ **生态需水**: 依据灌区控制断面生态流量结合实际情况进行流量测算, 给出总需水和月需水。

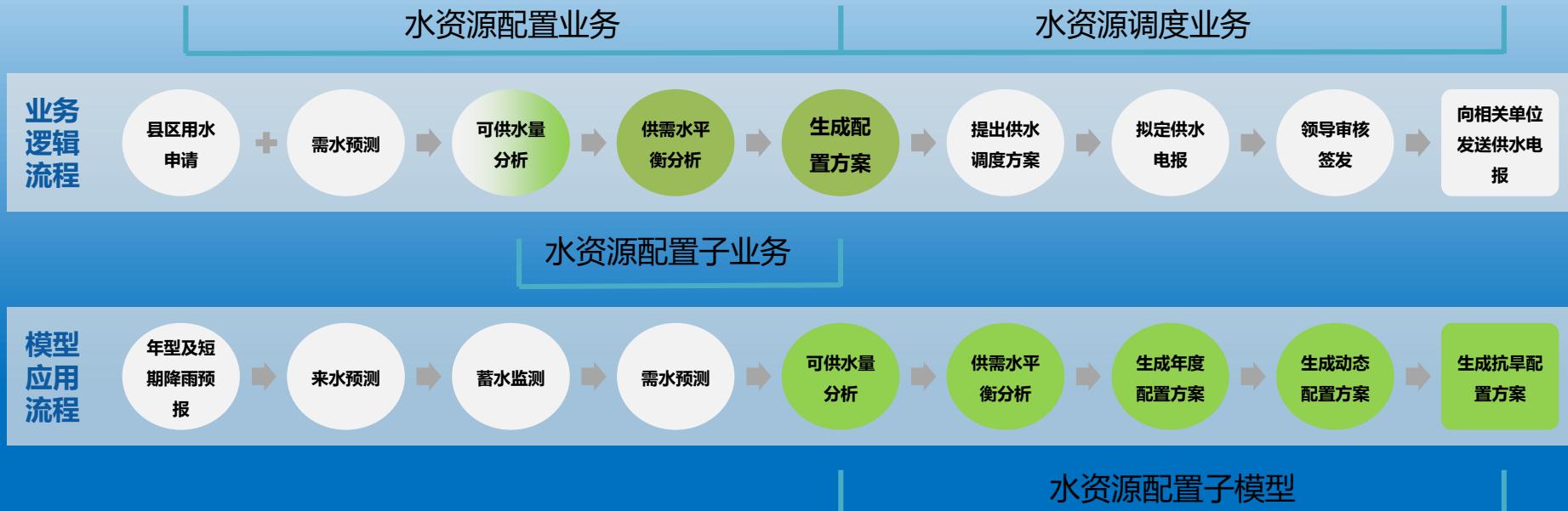
淠史杭灌区2022年城乡生活需水量计算表						单位: 万m <sup>3</sup>
灌区	政区	城乡需水				
		城镇生活	城镇工业	农村安全饮水	总量	
淠河灌区		0	85051	0	85051	
史河灌区		0	509	0	509	
杭埠河灌区		0	0	0	0	
合计		0	85560	0	85560	

淠史杭灌区2022年生态需水量计算表				
灌区名称	控制断面生态流量 (m <sup>3</sup> /s)	测算流量 (m <sup>3</sup> /s)	月需水量 (万m <sup>3</sup> )	总需水量 (万m <sup>3</sup> )
淠河灌区	4.38	5.26	1361	16575
史河灌区	0.6	0.72	189	2271
杭埠河灌区	0.6	0.72	189	2271
合计	5.58	6.7	1760	21117



## 5.7 水资源配置子模型

- **供水计划:** 根据用水需求及多水源供水计划, 形成年、月、旬的水资源配置方案。
- **动态评估:** 按照“年度配置-动态调整-抗旱应急”思路, 形成动态调整水资源配置方案。

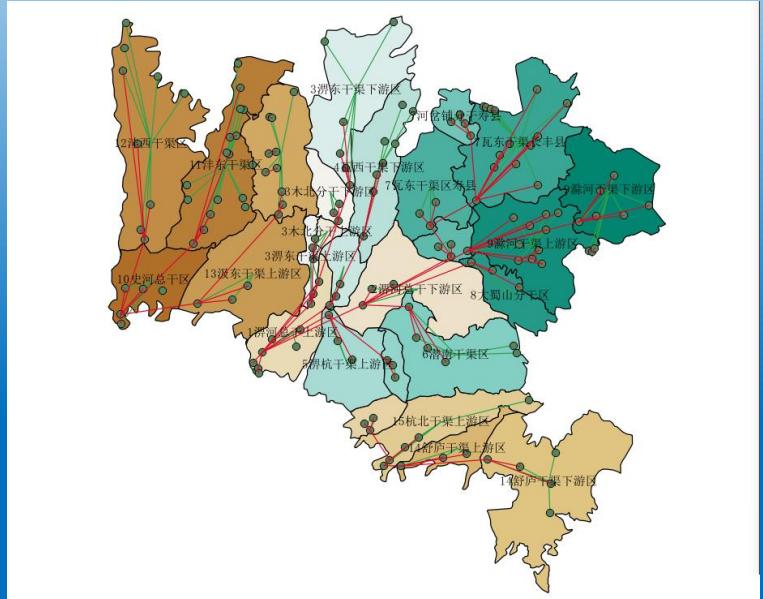
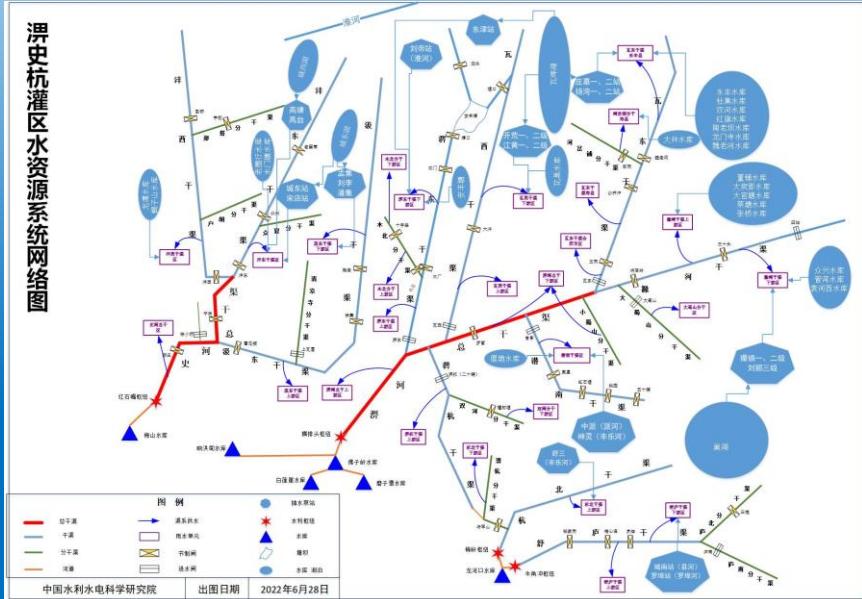




## 5.8 水资源配置—(1)可供水量分析



- **拓扑关系:** 绘制了水源工程-控制工程-用水单元之间的灌区水资源配置网络图
  - **配置顺序:** 先当地水, 再灌区引水, 当蓄水和引水总量或强度不满足需求时, 启用补水站补水





# 5.8 水资源配置一(2)供需水平衡分析

模型  
应用  
流程



■ **供需水管理:** 供需水管理控制平台, 数据树和供需水输入表。以数据表的形式接入业务系统, 概化供水工程156个, 输入供水能力、时段控制水位等特征信息1万多条。

The screenshot shows the water resource management control platform. On the left, a data tree view is displayed with categories like '拓扑关系', '供水关系', '河道信息', '用水单元属性', '供水信息', and '单元行业需水'. The '供水关系' and '供水信息' sections are circled in orange. The main area shows a summary table with data for 2023. The top section includes filters for '年份' (2023), '开始时间' (1月上旬), '结束时间' (12月下旬), and '年型' (80%). The summary table has four main sections: '总可供水' (21.127 亿m³), '六大水库可引水' (15.227 亿m³), '21座中型水库可供水' (1.621 亿m³), and '内部小型水库和塘坝可供水' (4.279 亿m³). Below this is a detailed table with columns for '灌区', '配水单元', '行政区', '设计灌溉面积', '种植面积', '旱作物面积', '水稻面积', and '需水量' (灌溉需水, 城乡需水, 生态需水, 合计). The data is broken down by '灌区' (金安区, 裕安区, 小计) and '行政区' (淠河总干上游区).

灌区	配水单元	行政区	设计灌溉面积	种植面积	旱作物面积	水稻面积	需水量			
							灌溉需水	城乡需水	生态需水	合计
淠河总干上游区	金安区		13.3	12.1	1.1	11.0	0.416	0.412	1.659	2.487
	裕安区		19.1	14.2	0.2	14.0	0.532	0.863		1.394
	小计		32.4	26.3	1.3	25.0	0.948	1.275	1.659	3.882



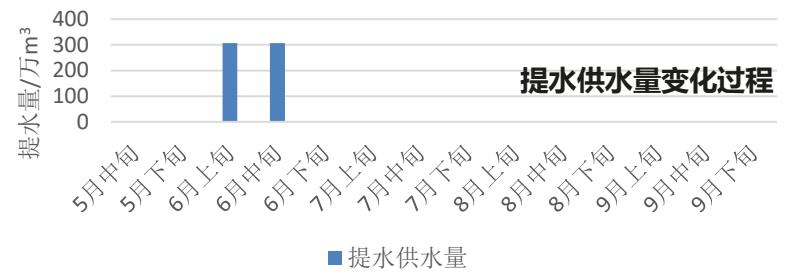
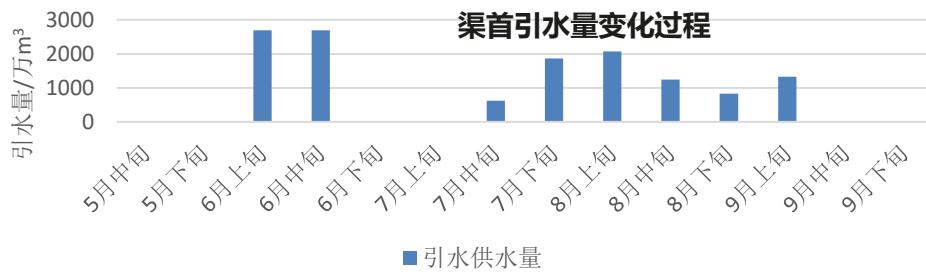
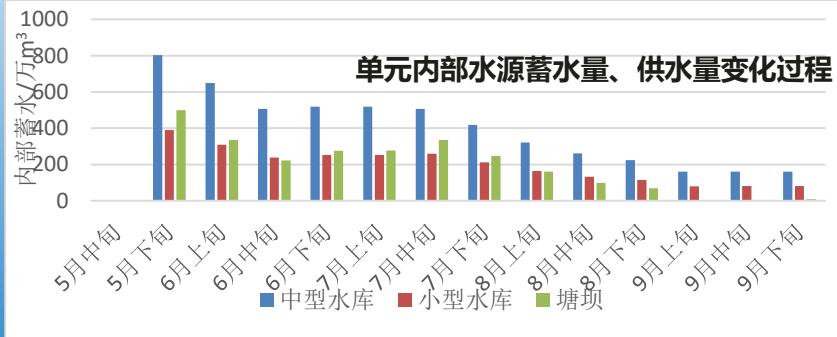
# 5.8 水资源配置—(3)年度配置方案

## 模型应用流程



### 实现目标：

- (1) 将总局《XX年水量调度方案及供水计划》的编制数字化，输出对应的制式表格
- (2) 渠首逐旬引水量和各个控制闸门配水量
- (3) 内部水源蓄水量、供水量逐旬变化
- (4) 补水站供水量逐旬变化



# 5.8 水资源配置一(4)水资源动态评估和调整

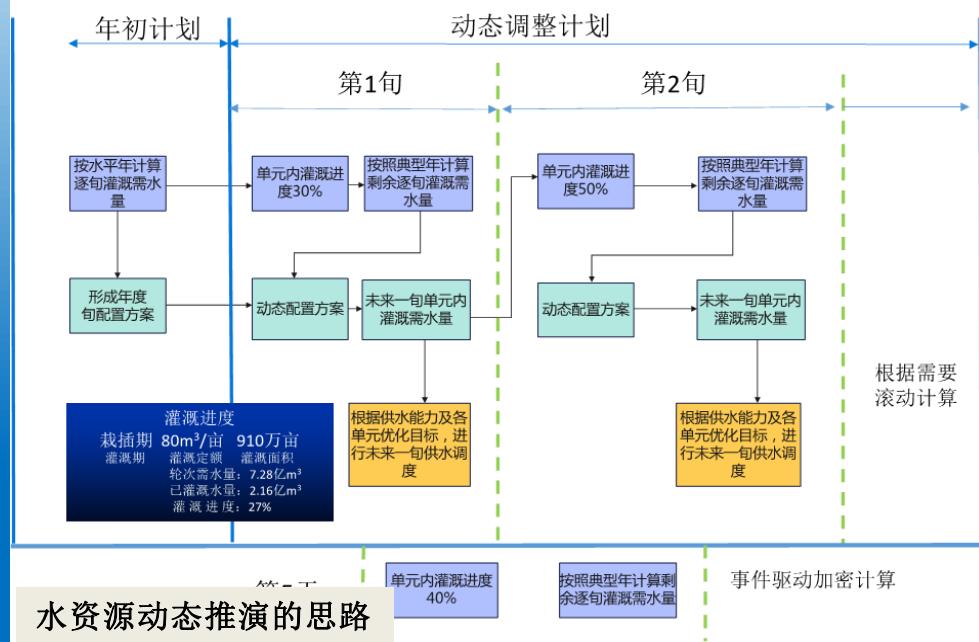
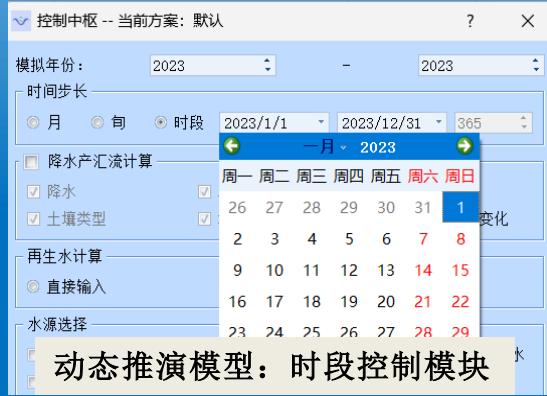
## 模型应用流程



■ **动态配置方案：**依据水源工程当前蓄水量，动态需水量，进行水资源平衡动态推演。

**启动时间：**根据供需情势，由用户选定，可以任意一天开始

**输入数据：**上游和灌区内水源工程当前蓄水量，选定频率来水量，根据灌溉进度动态推演的需水量



# 5.8 水资源配置一(5)抗旱资源配置

模型  
应用  
流程



## 实现目标：

当遇到干旱年份时，水资源总体平衡被打破时，可采用数字化的手段，通过多种抗旱措施的对比，分析不同抗旱措施对缺水率的影响，为制定抗旱方案提供支撑（方案预演，抗旱预案）。

The screenshot shows a software interface for managing drought resistance plans. It includes a 'GIS地图' (GIS Map) with tabs for '混合加提水+时段入库径流量' (Mixed Pumping and Intake Flow by Time Segment) and '默认\*时段入库径流量' (Default\*Time Segment入库径流量). Below the map is a table of reservoir data for years 2022 and 2023, with columns for水库ID (Reservoir ID), 年份 (Year), and months from 1月上 to 6月下. A '方案管理器' (Plan Manager) window is open, showing a list of five plans: '默认' (Default), '江水西调方案' (Jiangxi West Transfer Plan), '减少灌溉水量' (Reduced Irrigation Water Volume), '混合方案' (Mixed Plan), and '混合加提水' (Mixed Pumping). The 'Default' plan is selected as the current plan. The bottom right of the interface features a large '抗旱方案管理器' (Drought Resistance Plan Manager) button.

水库ID	年份	混合加提水+时段入库径流量												默认*时段入库径流量																								
		1月上	1月中	1月下旬	2月上	2月中	2月下旬	3月上	3月中	3月下旬	4月上	4月中	4月下旬	5月上	5月中	5月下旬	6月上	1月上	1月中	1月下旬	2月上	2月中	2月下旬	3月上	3月中	3月下旬	4月上	4月中	4月下旬	5月上	5月中	5月下旬	6月上					
1	2022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
2	2023	942.09	739.5	373.72	842.56	1669.4	1725.06	1366.09	1140.28	814.01	326.16	417.28	1158.92	1619.34	1922.38	2347.12	2483.73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
3		方案管理器												?												0	0	0	0	0	0							
4		方案名												备注												新建	删除	设为当前	0.27	351.91	450.23	1250.41	1747.18	2074.15	2532.42	2679.82		
5		1	默认	基础方案											0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
6		2	江水西调方案	江水西调1.59亿方											0.67	661.39	846.18	2350.08	3283.74	3898.26	4759.56	5036.58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
7		3	减少灌溉水量	推广旱稻种植，控制单元减少20%灌溉水量，影响单...											0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
8		4	混合方案	江水西调+减少灌溉水量											3.76	622.56	796.5	2212.11	3090.95	3669.39	4480.12	4740.88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
9		5	混合加提水	加大尾部提水泵站提水能力											5	8.07	10.33	28.68	40.08	47.58	58.09	61.47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
10				确定												0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
11				取消												0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
12		6	2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
13		7	2022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
14		8	2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
15		9	2022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
16		10	2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
17		11	2023	0.96	0.75	0.38	0.86	1.7	1.76	1.39	1.16	0.83	0.33	0.43	1.18	1.65	1.96	2.39	2.53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18		12	2022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19		13	2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20		14	2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

## 开放接口：

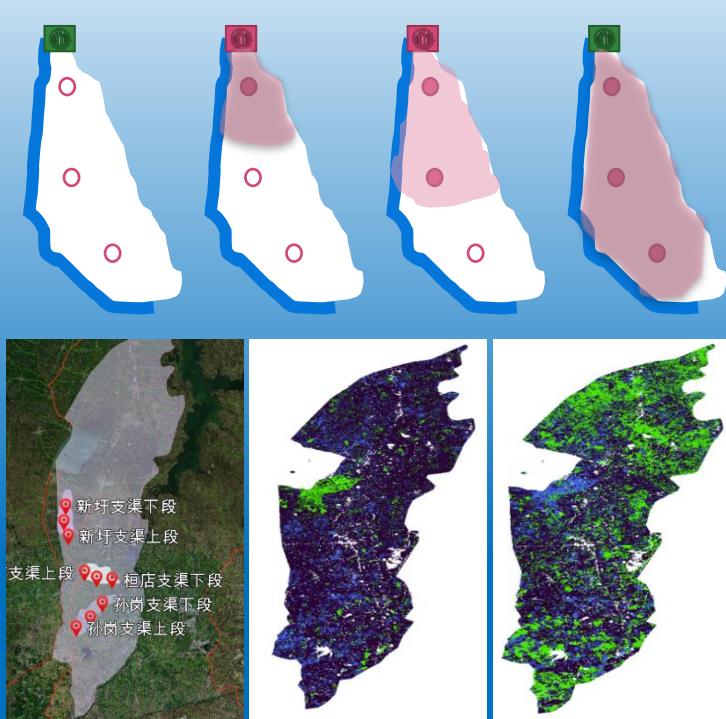
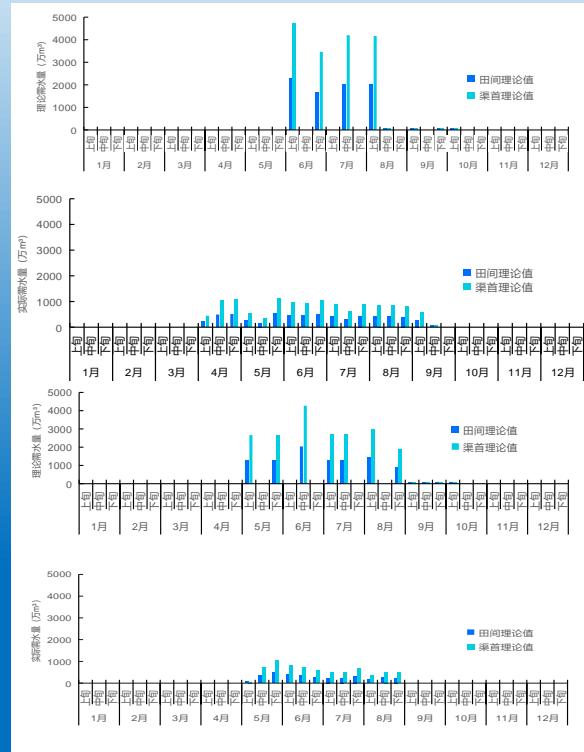
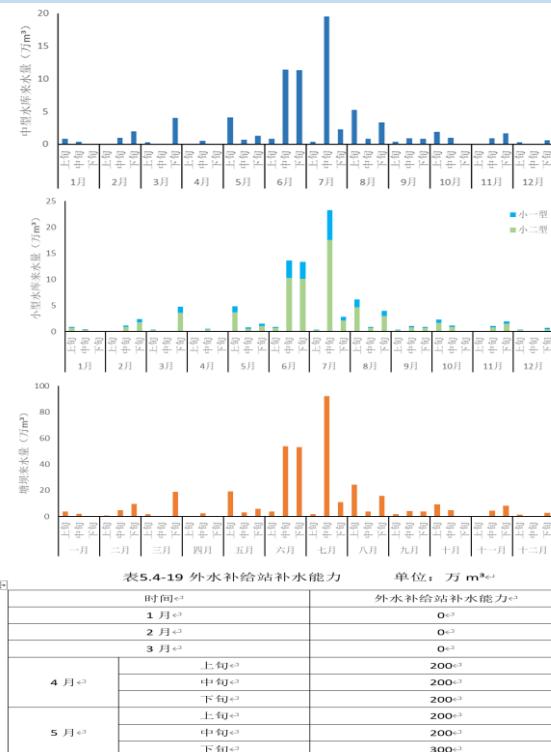
需水调整接口（改变面积或者灌溉定额）；外调水接口（包括江水西调接口和引江济淮接口）；动用死库容接口；优先使用补给站供水接口。

# 5.9 配置模型与业务平台实时交互



# 5.10 典型四预场景—供水预测

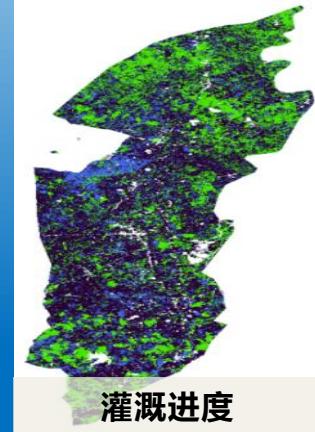
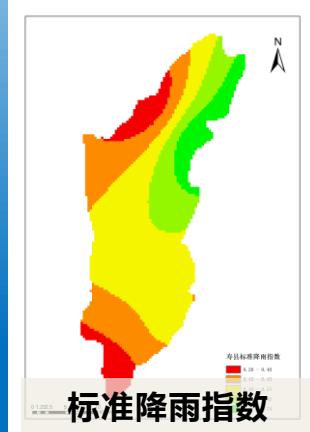
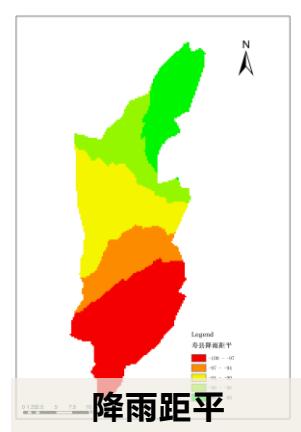
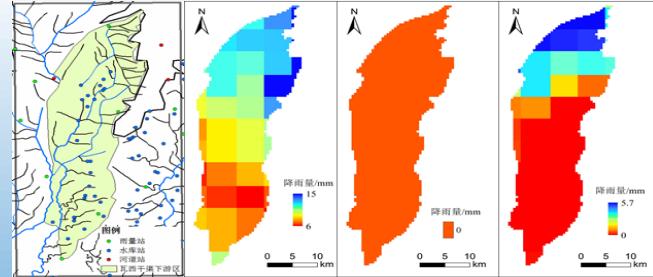
- **供水侧:** 采用地面传感+遥感形式监测7+62个水库, 2700个塘坝蓄水, 以及SCS来水量
- **需水侧:** 采用墒情站 (田间水层) +遥感形式监测50万亩水稻田灌溉进度和动态需水





# 5.10 典型四预场景—干旱态势预警

- 水文年型结合降雨预报研判未来气象干旱
- 基于现状上游水库蓄水状况感知水文干旱
- 基于现状灌溉进度识别判断未来农田干旱



气象干旱

水文干旱

农田干旱

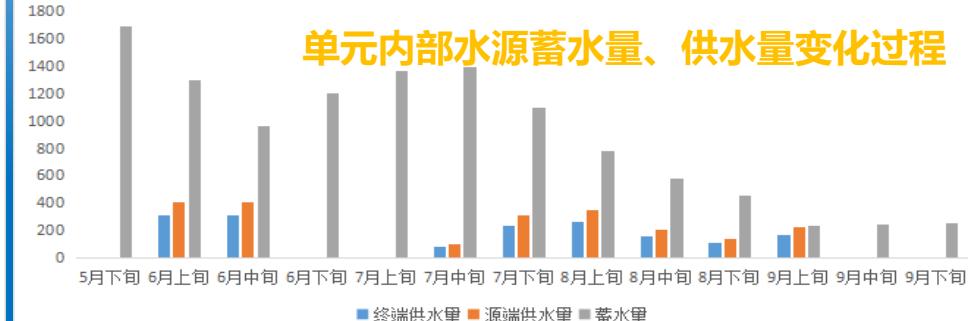
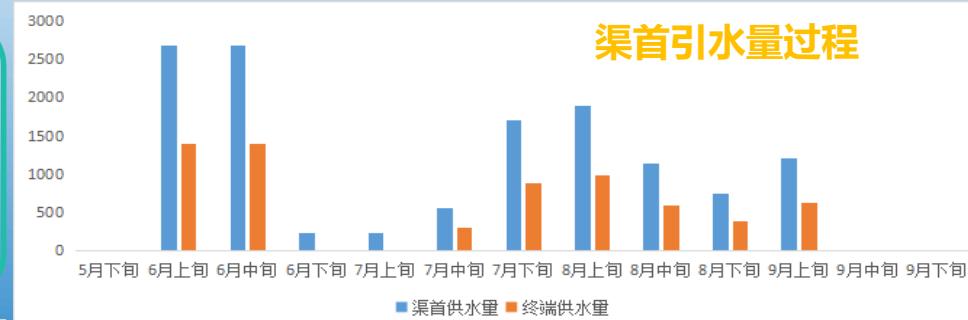


## 5.10 典型四预场景一动态配置预演

- 根据灌溉进度变化，逐旬自动动态更新，及时掌握灌区灌溉需水状态。
- 以事件驱动的方式，动态对灌区水资源进行配置，分析供需平衡状态。

### 实现目标：

- (1) 根据灌溉进度，逐旬自动动态更新
- (2) 当供需水形势发生重大变化，或者推演未来发生干旱等缺水情景下，动态对灌区水资源进行配置，随时掌握灌区水资源的供需平衡状态。





## 5.10 典型四预场景—抗旱配置预案

- 当遇到干旱年份时，判断水资源总体平衡情况和主要缺水单元。
- 设定不同抗旱措施，分析其对缺水率的影响，为制定抗旱方案提供支撑。

### 实现目标：

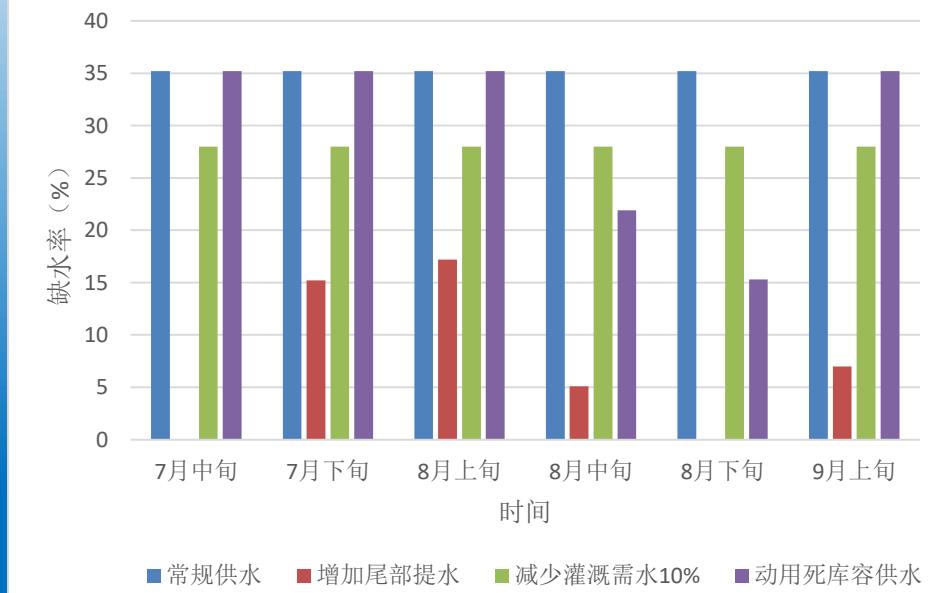
当遇到干旱年份时，水资源总体平衡被打破时，可采用数字化的手段，通过多种抗旱措施的对比，**分析不同抗旱措施对缺水率的影响，为制定抗旱方案提供支撑（方案预演，抗旱预案）。**

### 典型预案：

7月中旬开始，来水频率变为90%。

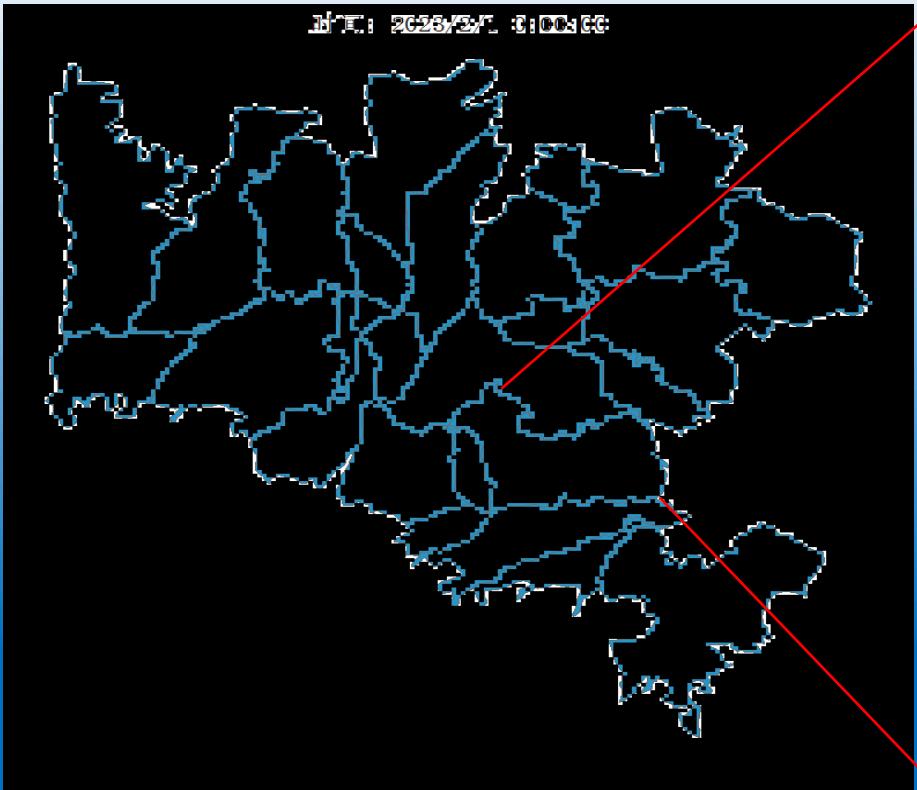
期初中型水库蓄水量为518万m<sup>3</sup>，小型水库蓄水量为252万m<sup>3</sup>，塘坝蓄水量为277万m<sup>3</sup>。

终端需水量从4800万m<sup>3</sup>增加至6384万m<sup>3</sup>。





## 5.10 典型四预场景—抗旱配置预案



An aerial photograph of a large agricultural area. The land is divided into numerous rectangular fields of varying sizes, separated by a network of irrigation canals and small roads. The fields are a vibrant green, suggesting a healthy crop. In the distance, more fields and some buildings are visible under a clear sky.

谢谢  
敬请各位专家批评指正