



RPDRI, YRCC

第五届黄河国际论坛
the 5th International Yellow River Forum

黄河下游枯水调度

Regulation of Low flow for
the Lower Reaches of Yellow River

Li Fusheng



黄河勘测规划设计有限公司

Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd.



汇报主要内容(Outline)

1

背景介绍

Background

2

总体研究思路

Overall research framework

3

规律和方法研究

Research on rules & methods

4

系统功能及开发

System functions & development

5

应用与效果

Applications & effects



第一部分 背景介绍

Section1 Background



背景介绍 (Background)

- 黄河水资源贫乏，且年内分布不均，枯水期长；年际变化大，特别是连续枯水年持续时间长。有长达十几年的枯水段。
- 随着流域国民经济用水的快速增长，用水矛盾日益突出。从1972年到1998年，黄河下游频繁断流。为缓解水资源供需矛盾，遏制下游断流形势，1998年国务院授权黄委对黄河干流水量进行统一调度。
- 从1999年开始，通过精心组织和调度，一举扭转了黄河下游频繁断流的局面。确保黄河不断流成为维持黄河健康生命的重要标志。



背景介绍(Background)

➤ 由于黄河枯水期流量小、可调节水量有限，而农业灌溉等用水量巨大，使得国民经济用水和河道生态环境用水的矛盾突出。枯水调度成为黄河水调的重点和难点，尤其是下游枯水调度成为黄河水调的核心工作之一。





第二部分 总体研究思路

Section2 Overall Research Framework



研究和开发目标(Research Objectives)

提出和建立适合于复杂河道长距离短历时枯水流量的演进方法和方程

基于控制论和临界调控理论，提出水资源实时调控的方法及方式

根据下游枯水调度工作的实际需要，结合下游不同季节来水和用水的特点

枯水调度模型系统

以利津防断流为控制，考虑下游河段用水、加水、损失等因素，提出月、旬、日水库调度预案，提出水文断面控制流量和各河段配水意见，指导水库调度和河道配水，实现枯水期黄河下游水资源科学调度与合理分配，确保河道不断流和供水、防凌安全。



主要研究内容(**Key Research Aspects**)

分析研究黄河下游河段枯水流量传播时间和河道损失

研究下游枯水流量演进规律，开发下游枯水流量演进模型

基于水资源实时多维临界调控方法，开发月、旬、日水库调度及河段配水模型

研制开发枯水调度数据库、数据库管理系统以及基于GIS的空间分析系统

开发不同季节下游枯水调度模型系统控制流程界面



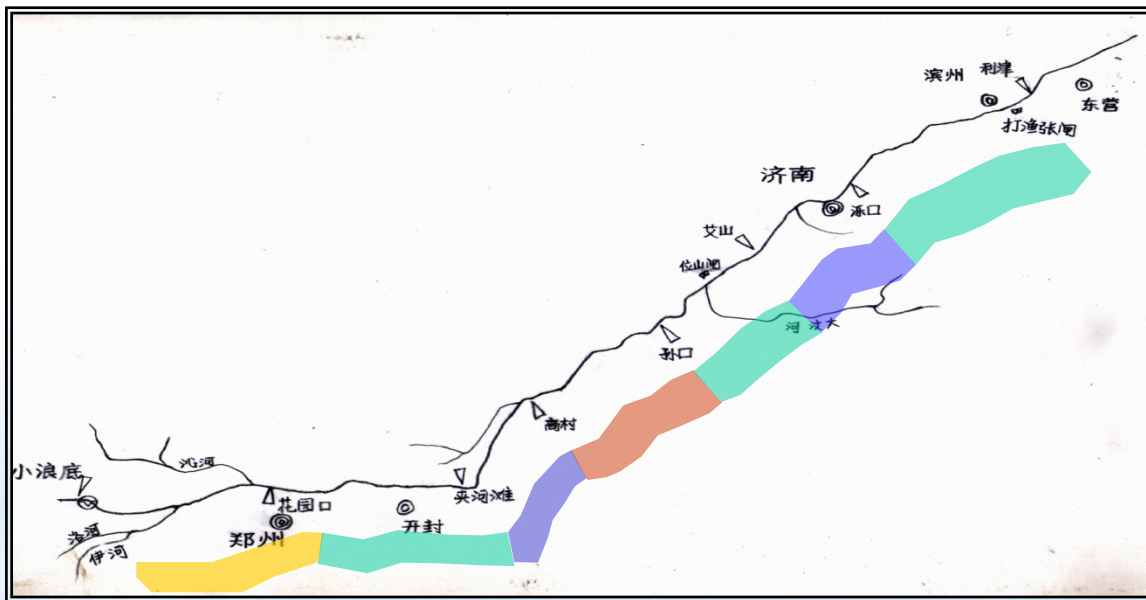
第三部分 规律和方法研究

Section3 Research on Rules and Methods

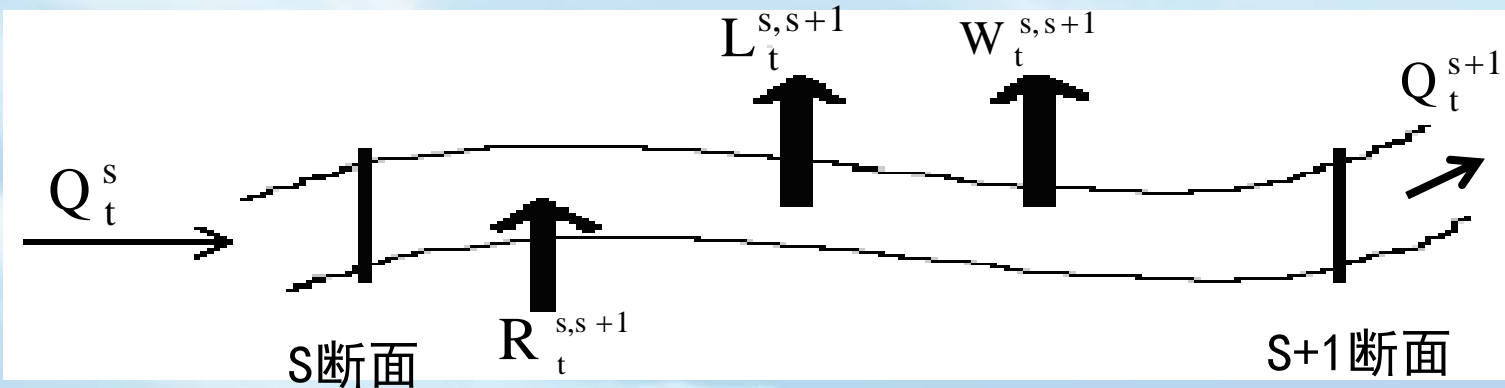


1、小浪底以下河段划分和概化

1. Segmentation and Conceptualization of Reaches below Xiaolangdi



黄河下游设有花园口、夹河滩、高村、孙口、艾山、冻口和利津7个水文站，将下游河段以水文站为节点划分为7个河段，每个河段的水量调度信息概化为上、下断面流量、区间加水、引水及损失等五项。





2、研究的边界条件

2. Boundary Conditions

枯水调度流量

按小浪底水库下泄 $800\text{m}^3/\text{s}$ 以下开始枯水调度

流量分级

$300\text{m}^3/\text{s}$ 以下、 $300\text{m}^3/\text{s} \sim 500\text{m}^3/\text{s}$ 、 $500\text{m}^3/\text{s} \sim 800\text{m}^3/\text{s}$

调度时段

冬季：11月1日~翌年2月末
春季：3月1日~6月30日
夏季：7月1日~9月30日
秋季：10月1日~10月31日

时间步长

月旬日



3、枯水流量传播时间分析

3. Traveling Time of Flow in LWLP

原型观测试验

历史资料分析

水文学方法

当黄河下游河道形态变化不大时，枯水期水流传播时间基本稳定，且流量大小是决定水流传播时间的主要因素。在现有河道条件下，小浪底～利津河段水流传播时间为9天～16天。



4、河道水量损失分析

4. Water Loss in the Channel

原型观测试验

历史资料分析

水量平衡法

小浪底~利津河段日均损失流量

秋、冬季河道流量 $200\text{m}^3/\text{s} \sim 300\text{m}^3/\text{s}$ 时:

流量损失为 $45\text{m}^3/\text{s} \sim 80\text{m}^3/\text{s}$

春季河道流量 $400\text{m}^3/\text{s}$ 时:

流量损失为 $140\text{m}^3/\text{s}$

春夏秋季河道流量 $500\text{m}^3/\text{s} \sim 600\text{m}^3/\text{s}$ 时:

流量损失为 $160\text{m}^3/\text{s} \sim 180\text{m}^3/\text{s}$ 。



5、枯水流量演进方法综合研究

5. Methods for Flow Evolution in LWLP

线性演进方法

基本概念清楚，计算过程简单透明，通过反演优化方法可以获取精度较高的演进方程参数，方法稳定性高，而且便于进行演进计算和反馈控制计算，实际应用表明，对黄河下游枯水演进具有一定的适用性，精度较高。

一维非恒定流法

需要河道、比降、断面等大量信息，对于黄河下游多泥沙河流来说，这些信息获取和更新困难；同时，在进行流量反馈控制时，存在求解稳定性和收敛性问题。按照当前实际情况，应用此方法具有一定的困难。

人工神经网络法

计算精度较高，进行流量演进具有一定的优越性，但是其局限性是难于进行反馈控制计算。

基于多方法比较和分析，提出适合于下游枯水调度的**多因子线性演进方法**。

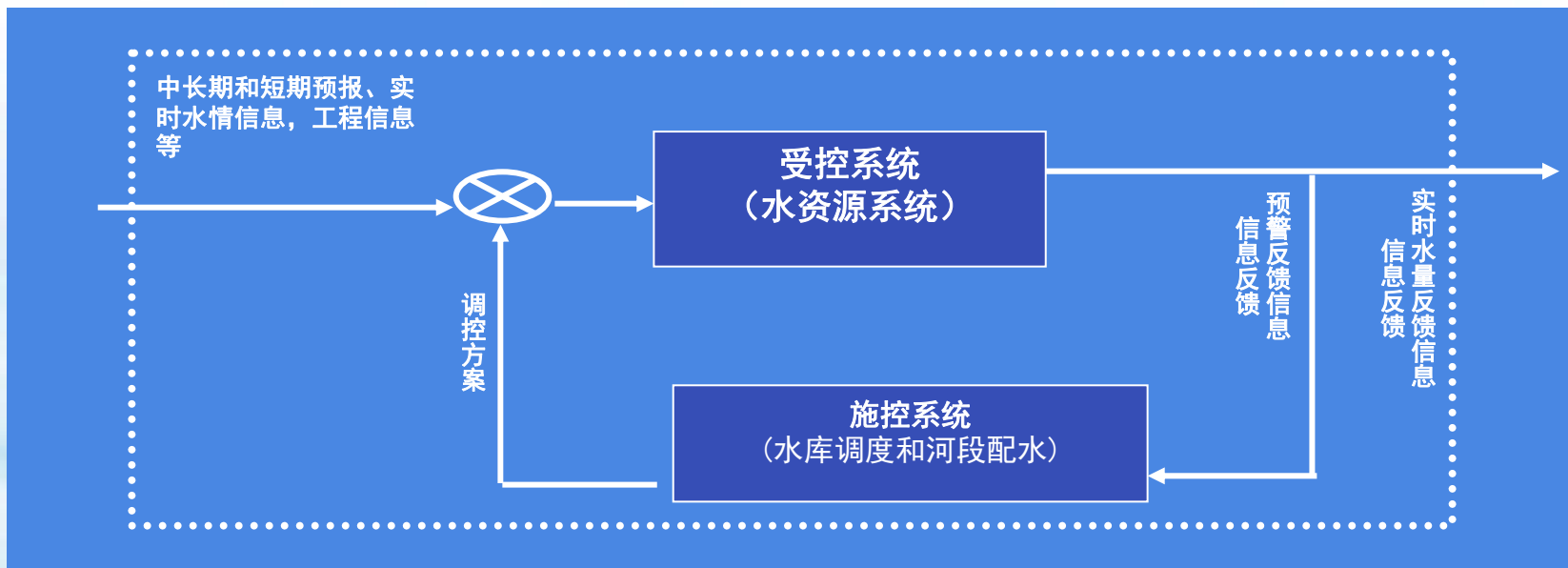


6、水资源实时调控方法研究

6. Methods for Real-time Water Regulation

下游水资源实时调控包括并融和了基于水库调度的水资源时程分配、基于河段配水的水资源空间分配、基于防凌防断流预警和调整的水资源控制等三个重要环节和方面。

控制工程系统



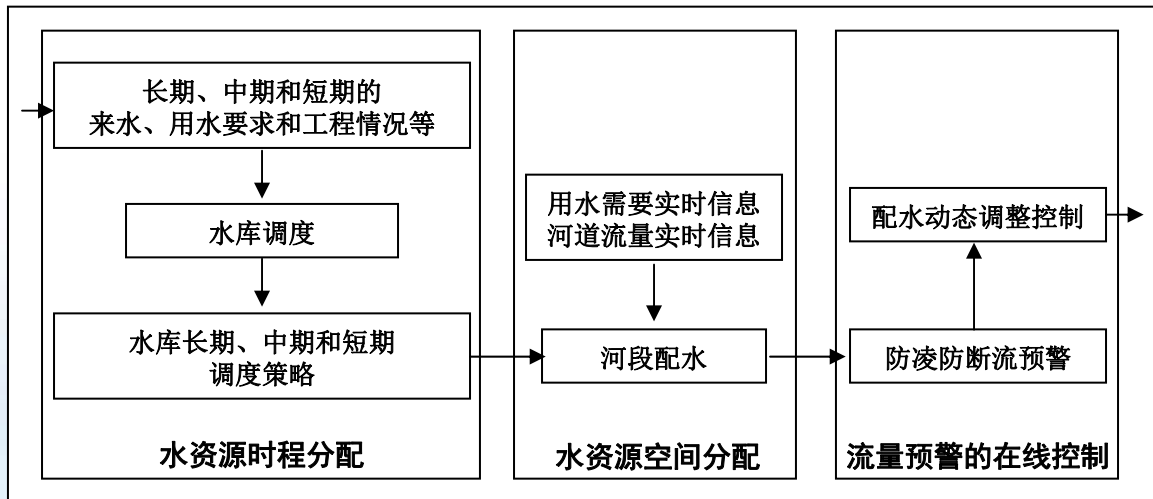
通过水库调度和河段配水等施控系统，改变下游水资源受控状态，使之满足多目标的供水要求；通过实时反馈信息并结合预报，滚动更新调控方案；在线进行防凌和防断流预警并动态调整，如此反复实施水资源的实时调控目标。



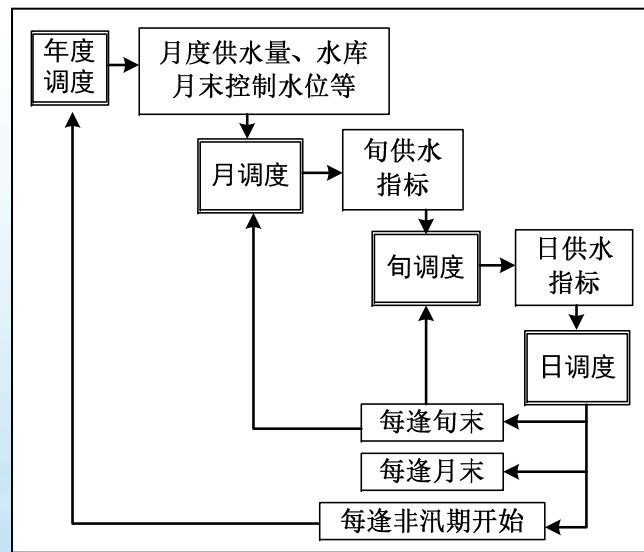
6、水资源实时调控方法研究

6. Methods for Real-time Water Regulation

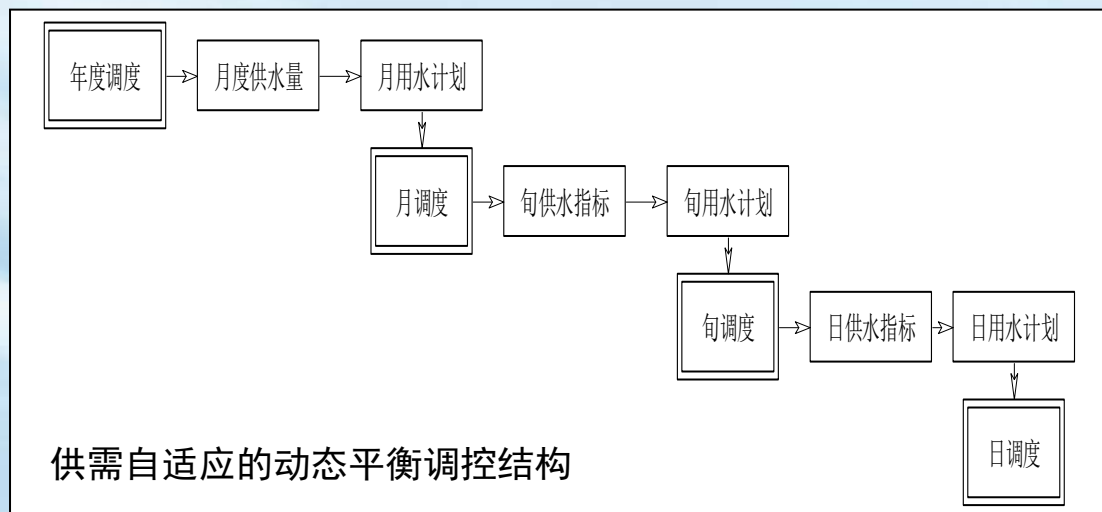
水库调度、河段配水和流量预警控制相结合的三元调控结构



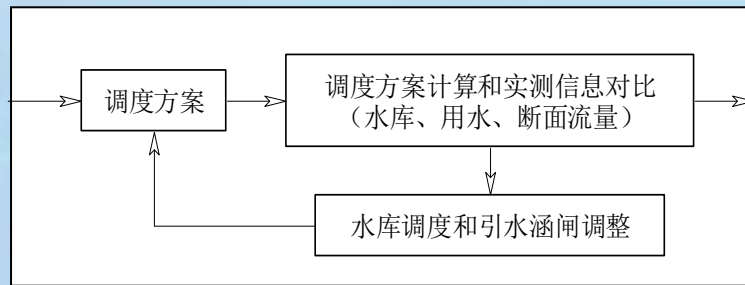
不同时间步长嵌套的时间调控结构



供需自适应的动态平衡调控结构



动态反馈结构





第四部分 系统功能和开发

Section4 System Functions & Development



1、系统主要功能

1. System Functions

A、根据防断流、防凌要求及用水特点，提出水库月、旬、日的调度计划

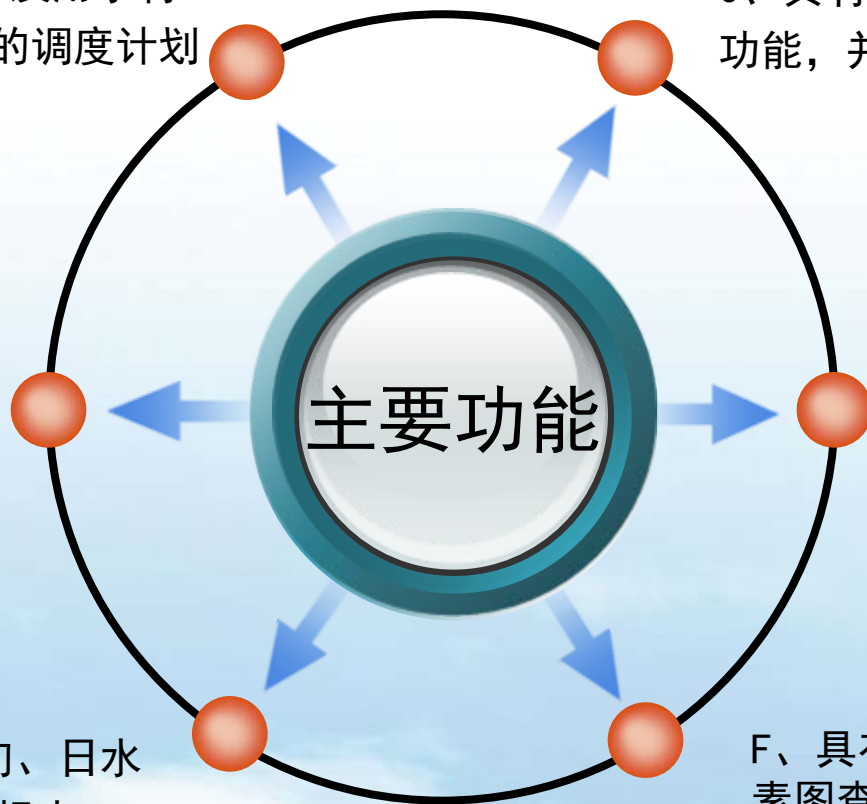
C、具有防断流、防凌安全预警功能，并能够提出用水调控意见

D、具有编制年度水量调度预案的功能

B、提出河段逐日配水及断面流量意见

E、滚动编制未来月、旬、日水库调度及河段配水计划报表

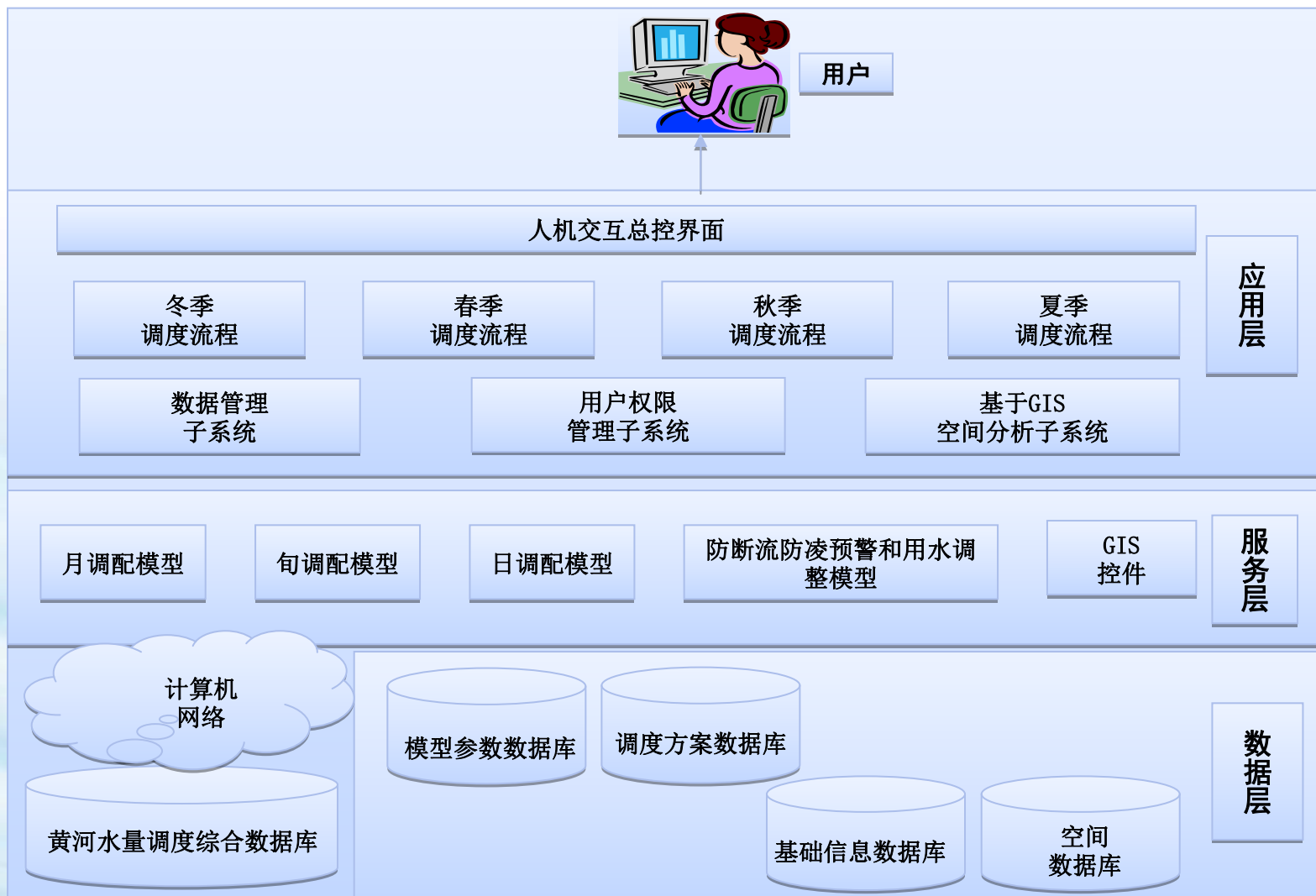
F、具有基于水量调度专题要素图查询方案结果信息的功能





2、系统总体结构

2. System Structure





3、模型研究开发

3. Model Research & Development

月、旬、日水库调度及配水模型

月

月调配模型是为了解决下游水量月分配问题。提出小浪底水库各月下泄水量、月末水库水位控制指标及满足利津防断流要求前提下下游各河段分月配水过程。

旬

旬调配以月调配结果为基础，对月调配模型计算所得的月可配水量进行月内二次分配，并用月末水位进行控制，保证水库各月下旬水位能回到月末控制水位。

日

日调配模型分为日水库调度模型和河段日配水模型。
水库日调度模型反向推求小浪底水库的最小日下泄水量。
河段日配水模型推求下游各断面流量及供水量。

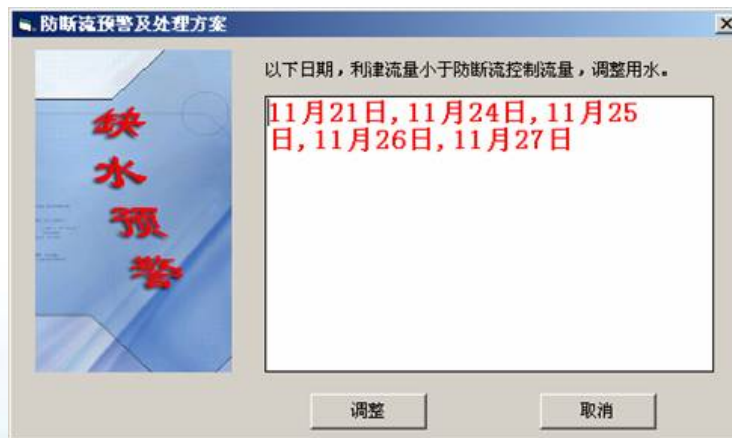


3、模型研究开发

3. Model Research & Development

防断流、防凌预警和用水调整模型

根据日模型计算结果，当判断利津断面流量不满足防凌或者防断流要求时，将进行预警提示，并根据用户指令调整有关河段区间引水计划，以确保利津不断流及河段防凌安全。



缺水预警

用水需求

日期(月,日)	三小区间	小浪底~花园口	花园口~夹河滩	夹河滩~高村	高村~孙口	孙口~艾山	艾山~孙口	孙口~利津	利津流量
20	1	10	19	30	80	46	96	134	30
21	1	9	16	40	77	46	84	135	30
22	1	11	3	69	41	0	74	117	30
23	1	9	3	58	22	0	64	79	30
24	1	9	1	44	12	0	53	55	30
25	1	6	1	53	12	0	53	31	30
26	1	5	1	73	22	0	50	38	30
27	1	5	11	72	22	0	50	48	30
28	1	6	11	64	23	0	51	73	30
29	1	12	10	29	30	0	51	84	30
30	1	11	13	30	30	0	40	85	30
1	1	18	25	47	42	0	40	66	30
2	1	10	16	50	42	0	40	65	30

供水计划

日期(月,日)	三小区间	小浪底~花园口	花园口~夹河滩	夹河滩~高村	高村~孙口	孙口~艾山	艾山~孙口	孙口~利津	利津流量
20	1	10	19	30	80	46	96	64	100
21	1	9	16	40	77	46	84	40	100
22	1	11	3	69	41	0	74	33	100
23	1	9	3	58	22	0	64	23	100
24	1	9	1	44	12	0	53	2	100
25	1	6	1	53	12	0	53	0	88
26	1	5	1	73	22	0	50	17	100
27	1	5	11	72	22	0	50	0	86
28	1	6	11	64	23	0	51	25	100
29	1	12	10	29	30	0	51	1	89
30	1	11	13	30	30	0	40	25	100
1	1	18	25	47	42	0	40	0	97
2	1	10	16	50	42	0	40	33	100

用水自动调整

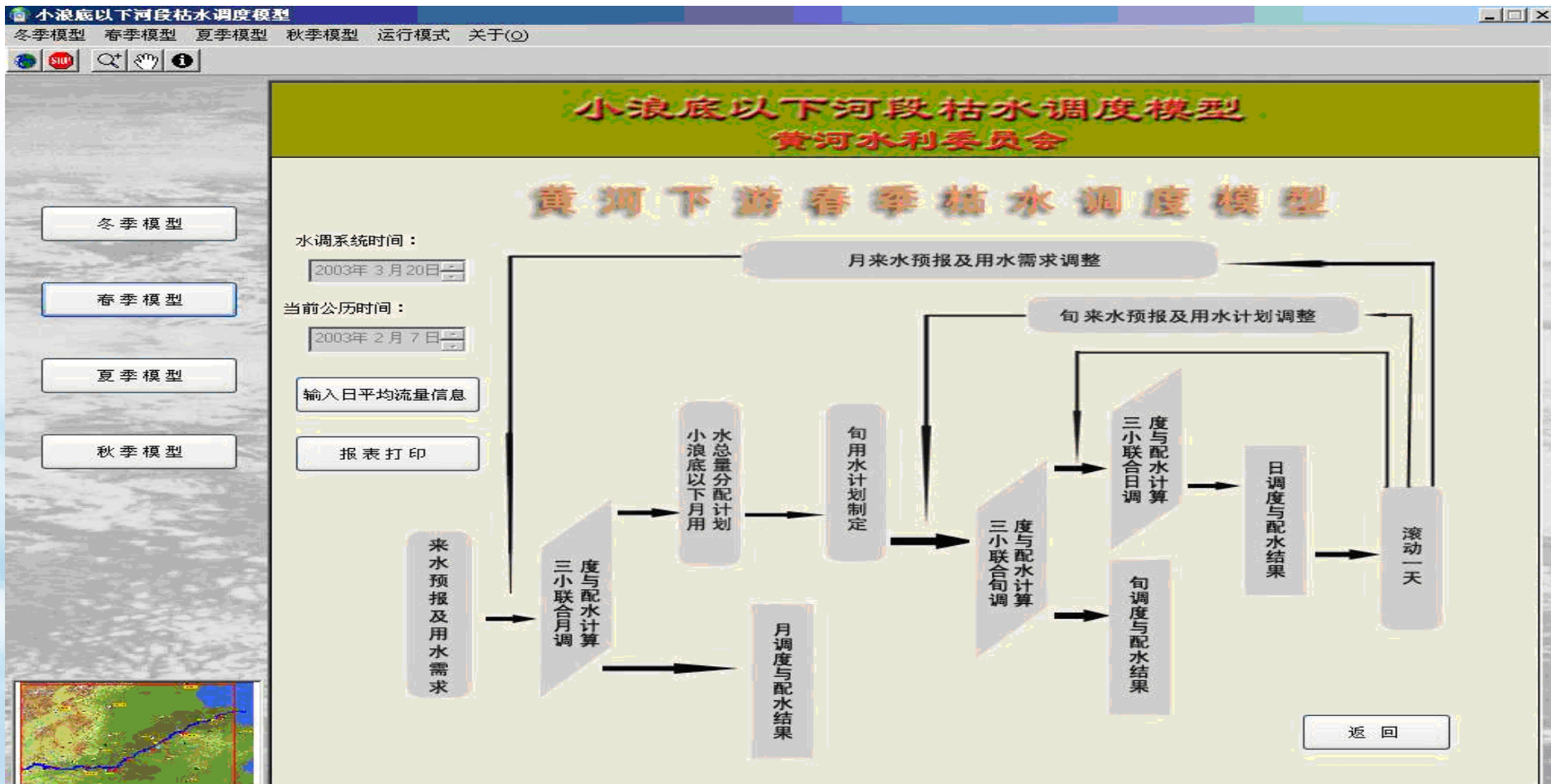


4、枯水调度流程界面及功能模块开发

4. Development for Procedure Interface and Functional Modules

(1) 界面开发 Interface Development

界面开发采用**流程图**方式，清晰的体现了整个调度的全过程。





夏季枯水调度流程界面

Procedure Interface of Water Regulation during Summer LWLP



小浪底以下河段枯水调度模型 黄河水利委员会

冬季模型

春季模型

夏季模型

秋季模型

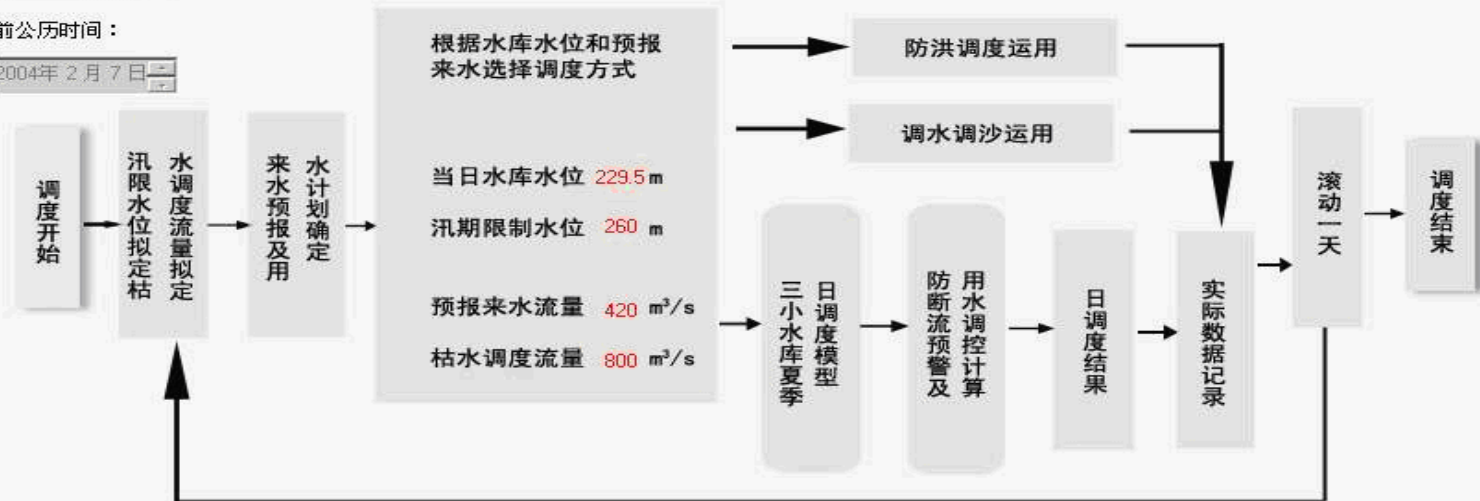
黄河小浪底以下河段夏季枯水调度模型

水调系统时间：

2003年 8月 20日

当前公历时间：

2004年 2月 7日



返回



秋季枯水调度流程界面

Procedure Interface of Water Regulation during Autumn LWLP

小浪底以下河段枯水调度模型

冬季模型 春季模型 夏季模型 秋季模型 运行模式 关于(ⓘ)

小浪底以下河段枯水调度模型
黄河水利委员会

冬季模型

春季模型

夏季模型

秋季模型

水调系统时间: 2003年10月20日

当前公历时间: 2004年2月7日

根据水库水位和预报来水选择调度方式

防洪调度运用

调水调沙运用

当日水库水位 264.1 m

汛期限制水位 260 m

预报来水流量 1360 m³/s

枯水调度流量 800 m³/s

三小水库秋季日调度模型

防断流预警及用水调控计算

日调度结果

实际数据记录

滚动一天

调度结束

逐步抬高水库汛限水位

预案编制

配置方案结果

返回



RPDRI, YRCC

冬季枯水调度流程界面

Procedure Interface of Water Regulation during Winter LWLP

小浪底以下河段枯水调度模型

冬季模型 春季模型 夏季模型 秋季模型 运行模式 关于(O)

冬季模型 春季模型 夏季模型 秋季模型

小浪底以下河段枯水调度模型

黄河水利委员会

黄河小浪底以下河段冬季枯水调度模型

水调系统时间：
2003年12月27日

当前公历时间：
2004年2月7日

```

    graph LR
      Start[调度开始] --> Plan[来水预报及用水计划确定]
      Plan --> Forward[日调度及流量演进模拟计算(正向演进)]
      Plan --> Reverse[日调度及流量演进模拟计算(反向控制)]
      Forward --> Warning[防断流防凌预警及用水调控计算]
      Reverse --> Warning
      Warning --> Results[日调度结果]
      Results --> Record[实际数据记录]
      Record --> Roll[滚动一天]
      Roll --> End[调度结束]
      Roll --> Plan
  
```

调度开始

来水预报及用水计划确定

日调度及流量演进模拟计算(正向演进)

日调度及流量演进模拟计算(反向控制)

防断流防凌预警及用水调控计算

日调度结果

实际数据记录

滚动一天

调度结束

返回



功能模块开发 Development for Functional Modules

(2) 数据编辑模块的开发 Data editing module

系统流程的数据编辑模块为了实现来水预报及用水计划制定功能，其数据管理采用类EXCEL的Grid（网格）方式，可方便的输入来水预报数据，在系统的滚动更新中修正计划用水。

来水预报及用水计划确定

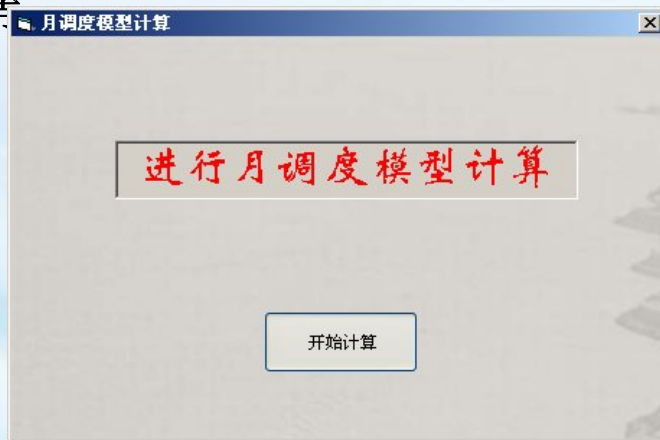
月	日期	三门峡		三小区间			小浪底	小花区间
		入库	用水计划	南岸用水	北岸用水	用水小计	用水计划	加水
7	13	280	2	5	2	7	2	116.52
	14	290	2	5	2	7	2	67.45
	15	298	2	5	2	7	2	58.82
	16	295	0	0	0	0	0	63.9
	17	380	0	0	0	0	0	107.6
	18	545	0	0	0	0	0	271.8
	19	830	0	0	0	0	0	309.8
	20	785	0	0	0	0	0	192.6
	21	615	0	0	0	0	0	131.3
	22	392	0	0	0	0	0	135
	23	325	0	0	0	0	0	130.9
	24	350	0	0	0	0	0	125.6
	25	320	0	0	0	0	0	103.1
	26	568	0	0	0	0	0	94.2
	27	439	0	0	0	0	0	95.3



功能模块开发 Development for Functional Modules

(3) 四季调度模型驱动模块开发 Driver module of water regulation model for four seasons

四季调度模型驱动模块是调度流程控制中的核心，依靠不同的参数选择四季不同的调度模型，并为调度模型提供调用接口、参数传递、出错处理等



调度模块



功能模块开发 Development for Functional Modules

(4) 月用水总量分配计划模块开发 Monthly water allocation module

月用水总量分配功能模块用图形、表单等方式清晰的显示月调度模型的结果，其中包括小浪底水位、库容，以及各月配水总量、小浪底出库、区间加水、滩区用水、计划配水量、调整配水量等。

小浪底以下河段
用水总量分配计划





功能模块开发 Development for Functional Modules

(5) 调度结果输出模块开发 Output module

主要功能是利用表格的形式详细表现调度模型的结果。

面临日调度结果显示

0月20日小浪底以下供水计划

当前系统日期: 2003年08月20日

小浪底水库: 小浪底以下各断面

断面流量 (m³/s)

花园口	414
夹河滩	297
高村	300
孙口	204
艾山	179
岳口	140
利津	214

区间供水计划 (m³/s)

断面	南岸	北岸	合计	损失
小浪底-花园口	8	13	21	3.23
花园口-夹河滩	10	13	23	24.54
夹河滩-高村	0	9	9	-2.77
高村-孙口	0	8	8	25.85
孙口-艾山	0	0	0	9.7
艾山-岳口	9	36.2	45.2	0
岳口-利津	0	0	0	10.4

确定

小浪底以下各断面计算流量

当前系统日期: 2003年08月20日

单位: m³/s

月份	日期	小浪底	花园口	夹河滩	高村	孙口	艾山	岳口	利津
8	20	207	414	297	300	204	178	140	214
	21	195	374	315	343	200	254	160	196
	22	222	316	293	345	290	258	190	184
	23	268	317	253	318	340	257	177	182
	24	200	322	247	274	310	258	186	201
	25	234	372	254	283	320	248	148	164
	26	207	352	325	304	300	282	210	101
	27	228	342	355	370	356	298	270	173
	28	228	329	350	370	370	422	376	223
	29	219	368	310	340	360	402	366	311
	30	219	531	350	335	360	371	366	306
	31	199	672	585	456	390	368	356	285

退出

预报结果

日调度信息查询

历史资料查询

选择起止日期: 2003年2月20日 - 2003年3月18日

月	日期	实际入库	实际出库	日库水位	三门峡	发电水头	拦坝出力	日发电量
3	2	650	583	316.04	2.42	36.3	35	.05
	3	640	380	315.78	2.24	36.93	35	.03
	4	700	621	315.94	2.28	36.78	35	.04
	5	750	527	316.00	2.44	36.73	35	.04
	6	675	634	316.15	2.49	36.87	35	.04
	7	676	510	316.36	2.63	37.03	35	.04
	8	710	532	316.42	2.67	37.3	35	.04
	9	660	615	316.20	2.58	37.12	35	.04
	10	590	477	316.37	2.64	37.17	35	.04
	11	700	503	315.97	2.37	37.17	35	.04
	12	665	669	315.81	2.26	36.63	35	.04
	13	630	644	315.91	2.33	36.44	35	.05
	14	550	540	316.09	2.45	36.72	35	.04
	15	545	305	316.31	2.6	37.39	35	.03
	16	630	552	316.59	2.79	37.63	35	.03
	17	610	430	316.86	2.97	37.72	35	.04
18	605	427	316.96	3.03	38.09	35	.03	
合计		17087	14820	8542.64	75.32	665.88	630	.72

退出

黄河下游供水调度模型成果报表

小浪底以下河段引水及断面流量 15 日报表

日期	小浪底水库	花园口	夹河滩	高村	孙口	艾山	岳口	利津
03-07-27	208	374	297	300	204	178	140	214
03-07-28	208	374	297	300	204	178	140	214
03-07-29	208	374	297	300	204	178	140	214
03-07-30	208	374	297	300	204	178	140	214
03-07-31	208	374	297	300	204	178	140	214
1-1-1	208	374	297	300	204	178	140	214
1-1-2	208	374	297	300	204	178	140	214
1-1-3	208	374	297	300	204	178	140	214
1-1-4	208	374	297	300	204	178	140	214
1-1-5	208	374	297	300	204	178	140	214
1-1-6	208	374	297	300	204	178	140	214

打印设置 日报表: 日报表

报表



功能模块开发 Development for Functional Modules

(6) 调度模型实时滚动模块 Real-time regulation module

调度模型实时滚动模块的主要功能是根据每日实测信息，更新来水预报和日用水计划，调整水调系统时间，实现模型的滚动修正，提高模型计算精度。

实测数据输入

请输入3月19日小浪底以下实测信息

2003年 3月 19日

请输入断面日平均流量以及区间实际用水 (m³ /s)

断面日平均流量		水库水位 (m)	
三门峡入库	580	三门峡	316.77
三门峡出库	438	小浪底	229.26
小浪底出库	479	河南、山东	
花园口	538	夹高区间南岸河南段	8.69
夹河滩	448	夹高区间南岸山东段	8.69
高村	380	区间加水	
孙口	314	小花加水	29
艾山	336	夹高加水	0
砾口	234	孙艾加水	0
利津	27	区间实际用水	

断面	南岸	北岸	合计	不平衡量
小浪底-花园口	9.71	9.71	19.4	-38.41
花园口-夹河滩	10.79	10.79	21.6	23.91
夹河滩-高村	17.38	17.38	34.8	16.18
高村-孙口	35.28	35.28	70.6	-43.65
孙口-艾山	11.6	11.6	23.1	-47.04
艾山-砾口	43.78	43.78	87.6	-16.37
砾口-利津	43.11	43.11	86.2	66.1

输入完毕 退出



功能模块开发 Development for Functional Modules

(7) 年度预案编制模块开发 Annual water allocation scheme module

年度预案编制模块主要由预报来水，分水方案及利津控制、滩区用水、各河段分水参数、方案结果五部分组成。

年度
预案
编制
模块

预案编制

预报来水 | 分水方案及利津控制 | 滩区用水 | 各河段分水参数 | 方案结果

下游各区间用水方案及利津控制流量

年份	月	分水方案				三小水库用水		利津控制
		河南	山东	河北天津	合计	三门峡	小浪底	
2003	11	8	19	95	122	10	9	100
	12	23	37	95	155	10	9	100
2004	1	34	24	75	133	10	9	100
	2	84	73	36	193	10	9	100
	3	141	434	0	575	10	9	100
	4	137	501	0	638	10	9	100
	5	150	395	0	545	10	9	100
	6	205	271	0	476	10	9	100

保存

预案编制 | 预案调整 | 退出



第五部分 应用及效果

Section 5 Applications & Effects



应用与效果 **Applications & Effects**

该模型系统在下游枯水防断流及防凌调度、引黄济津调水和抗旱调度等方面发挥了重要作用，取得了显著的经济效益和社会效益。



应用与效果 Applications & Effects

应用之一 (防断流调度)

在2002年冬季实际调度运用中，面对严峻的枯水形势，根据模型系统的计算结果，多次实时调整小浪底水库的下泄流量，精细调度黄河有限的水资源，节约水量14亿 m^3 ，科学调配抗旱水源，确保黄河下游不断流、缓解了2003年春季黄河严峻旱情。

如在12月25日~1月10日调度中，下游各断面流量过程进行了预报，结果显示若下游河段区间引水维持当时规模，则在2002年12月底左右利津断面流量有可能小于防断流流量 $30m^3/s$ ，必须尽快对下游引水进行控制。据此，及时调整了25日以后下游引水计划，利津断面仅28日1天出现最小流量 $22m^3/s$ ，保证了利津断面流量的稳定。





应用与效果 Applications & Effects

应用之二

(引黄济津水量调度)

2003~2011年历次引黄济津水量调度中，从开闸放水到调水结束，应用模型系统，跟踪预测河道断面水情，逐日提出小浪底水库下泄流量及位山闸配水计划，保证了引黄济津和豫、鲁两省秋播秋种用水要求，最大限度地为春灌储备了水源。





应用与效果 Applications & Effects

CCTV.com 新闻

[an error occurred while processing this directive]

央视国际首页 > 新闻频道 > 新闻联播 > 正文

黄河水利委员会精细调度水量确保沿黄省区春灌生产

央视国际 (2004年04月08日 20:15)

CCTV.com消息(新闻联播):

记者现场:这里是黄河水利委员会水量调度中心,今年刚刚投入使用的黄河下游四季枯水调度模型就在春灌生产中开始发挥作用。

目前正在运用的黄河下游春季枯水调度模型,是将下游灌区种植的小麦、玉米等主要农作物灌溉用水量进行实际测算后,划分出每个灌溉期的用水量,然后按照黄河来水情况,制订出每个月份的供水指标。今年4月份用水高峰到来前,将小浪底水库下泄水量确定在每秒750立方米。在河南柳园口灌区,曲兴村的村民们正在为处在拔节期的冬小麦灌上救命水。

河南省开封市曲兴镇曲兴村村民 王玉玲:用上黄河水一亩能打七、八百斤,最少也能打六百斤。

目前黄河上游的引黄灌区相继开灌,并要逐渐进入春小麦灌溉引水高峰期,下游冬小麦灌溉也进入了第二轮灌溉高峰,小麦拔节和经济作物用水需求非常大,黄河水利委员会在运用四季枯水调度模型的同时,发挥远程监控系统作用,充分调度各个引黄闸口和龙羊峡、小浪底等大中型水利枢纽的供、引水量,在两个月时间内,对调度过程出现的水量不均问题,连续发出近40份调度令和分水通知,不断修正用水量,使沿黄省区春灌生产顺利进行。

责编:陶柯

应用之三 (抗旱调度)

2008年年末和2009年年初黄河中下游旱情极为严峻,小浪底水库可调节水量有限,通过系统制定方案,在确保防凌安全前提下,最大限度地增加抗旱用水,缓解了河南、山东沿黄灌区旱灾。

如2009年1月初,根据最新旱情、凌情、水库蓄水和引水等信息,经本模型系统多次反向控制和正向演算,提出小浪底水库下泄流量应从当前的 $290\text{m}^3/\text{s}$ 增加到 $343\text{m}^3/\text{s}$ 才能满足河南、山东抗旱用水要求,同时也能确保防凌安全。2009年1月6日,黄河流域发布蓝色预警后,小浪底水库泄流由 $290\text{m}^3/\text{s}$ 增大至 $350\text{m}^3/\text{s}$,有力地保证了豫鲁抗旱。



RPDRI, YRCC

A light gray compass rose with cardinal directions labeled N, S, E, and W.

谢谢各位!

A background image of a bright blue sky with wispy white clouds.

Thank you for your attention!