

# 多态不确定条件下的城市供水调度模型研究

罗伟伟<sup>1,2</sup>, 邵东国<sup>2</sup>, 张建国<sup>1</sup>, 何思聪<sup>2</sup>

(1. 军事经济学院基础部, 湖北 武汉 430035; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**针对城市多水源供水调度系统中存在的不确定性和复杂性问题,将基于可信性理论的模糊规划与区间规划融入两阶段随机规划框架中,构建了基于可信性约束的区间两阶段随机规划的城市供水调度优化模型。该模型用区间数、随机变量和模糊参数等形式,有效表征了系统目标函数和约束中存在的多态不确定性,模拟了不确定条件下的城市供水调度过程,并对随机过程产生的风险进行了追索。通过模型运算,得到不同可信度水平下的稳定区间解,可为城市供水管理者提供不同情景下的决策方案,帮助其规避供水缺水风险。

**关键词:**区间两阶段随机方法;可信性理论;模糊规划;城市供水调度模型

中图法分类号:TV211

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.03.017

## 1 研究背景

随着水源地的不断缩减和水源污染日趋严重,多水源供水成为解决城市用水问题的必要手段。近年来,国内外学者对城市多水源供水系统进行了大量研究,主要采用以供水成本最小或经济效益最大为目标函数建立数学模型,并用相应算法求解得出最优配置<sup>[1-2]</sup>,这些成果为求解含有确定性参数的优化问题提供了行之有效的方法,并可在一定程度上为水资源管理者提供决策依据。然而,实际的城市多水源联合供水存在多种形态的不确定性,例如,各个水源补给表现出的随机性和模糊性,经济收益参数表现出灰色特性等。各参数通过交互作用,进一步混合<sup>[3]</sup>,使整个系统更加复合化,传统的确定性优化模型求解方法不再适用,因此,普遍采用区间规划(IP)、模糊规划(FP)、随机规划(SP)等不确定优化技术来解决多水源城市供水调度问题。但是,单一优化方法存在部分缺陷,例如处理的不确定性变量形式有限,需要引入中间

参数等,一些综合的不确定性优化方法开始被广泛应用于环境、管理等方面的研究。例如,G. H. Huang<sup>[4]</sup>等人使用区间模糊规划模型来处理固体废弃物管理问题,该模型获得的解稳定性明显提高,并为后来开发的混合不确定优化方法奠定了基础;X. S. Qin<sup>[5]</sup>等使用区间模糊非线性规划模型来反映水质管理系统中的各种不确定性问题,并以湘江长沙段的水质管理规划问题为例,最终生成区间形式决策变量和目标解;X. H. Nie<sup>[6]</sup>等使用不确定性条件下的模糊鲁棒规划处理农业系统中的水质管理问题,不仅可以确保水质符合相关法规,同时可最大程度确保农业系统的经济发展要求。笔者认为,上述研究存在以下不足:文献[4]提出的方法在现实中存在一定的局限性;文献[6]计算成本较高,应用受到限制。

本文在上述研究的基础上,运用传统区间规划(IP)与两阶段随机规划(TSP)方法,耦合近几年提出的基于可信性理论(CCP)的模糊规划方法,综合构建基于可信性约束的区间两阶段随机规划(ITSCCP)的

收稿日期:2014-11-10

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07205005);国家自然科学基金项目(51379150)

作者简介:罗伟伟,女,博士研究生,研究方向为水资源规划与水环境。E-mail:weiweiluo0727@163.com

通讯作者:邵东国,男,教授,博士生导师,研究方向为水资源高效利用及水环境。E-mail:dgshao@whu.edu.cn

城市供水调度模型。该模型充分考虑城市供水调度过程中系统区间、模糊和随机等多种形态的不确定性,同时可对随机事件发生后应预设目标进行追索,以期在城市供水部门和水资源管理者提供更科学合理的管理策略。

## 2 模型及求解方法

### 2.1 城市供水调度模型

城市供水管理者的决策目标是确定合理的各水源供应量,以满足城市用水需求并使系统供水成本最小。实际的决策过程分两阶段完成。

第一阶段,管理者根据城市综合需水量以及各水源供水能力,对未来规划期内各水源向城市的供给水量做出预先判断,给出每个水源的预调水量,即为第一阶段的决策变量,但由于未来的不确定事件,这种预先决策存在风险。

第二阶段,根据各水源的实际供应量的变化(本文仅研究供应量不足的情况),对第一阶段的调水量进行调整,即采取追索或纠正行为,减少损失,该阶段的决策变量为第一阶段调水量的调整量。因此,该城市多水源供水调度优化问题可用两阶段随机模型(TSP)描述,具体形式如下

$$\min f = \sum_{i=1}^m B_i W_i + \sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^v P_{ih} C_i S_{ih} \quad (1a)$$

最小调水量约束

$$\sum_{i=1}^m W_i \geq W_{\min} \quad (1b)$$

水源供水能力约束

$$W_i - S_{ih} \leq Q_i + q_{ih} - QS_i \quad (1c)$$

水源最大提水量约束

$$W_i \leq W_{\max} \quad (1d)$$

水源最小蓄水量约束以及水量平衡约束

$$Q_i + q_{ih} - QS_i - W_i + S_{ih} = Q_{Ti} \geq Q_{\min} \quad (1e)$$

非负约束:

$$W_i \geq S_{ih} \geq 0 \quad (1f)$$

式中,  $i(i=1,2,\dots,m)$  表示水源;  $h(h=1,2,\dots,v)$  为不同水源的流量水平,通常划分为高、中、低3种;  $f$  为系统供水成本,元;  $B_i$  为水源  $i$  向城市供水系统调水单位成本,元/万  $m^3$ ;  $W_i$  (第一阶段决策变量) 为水源  $i$  向城市供水系统的预先决策调水量,万  $m^3$ ;  $S_{ih}$  为水源  $i$  实际调水量未达到预先决策调水量所带来的单位惩罚,元/万  $m^3$ ;  $S_{ih}$  (第二阶段决策变量) 为水源  $i$  在净来水量为  $q_{ih}$  的情况下,相对于预先决策调水量  $W_i$  的缺水量,万  $m^3$ ;  $P_{ih}$  为水源  $i$  净来水量为  $q_{ih}$  出现的概

率,且满足  $\sum_{h=1}^v P_h = 1$ ;  $W_{\min}$  表示城市多水源供水系统所需的最小调水量,万  $m^3$ ;  $Q_i$  表示水源  $i$  规划期初期蓄水量,万  $m^3$ ;  $QS_i$  为水源  $i$  的自然损失量,万  $m^3$ ;  $W_{\max}$  表示水源  $i$  最大可调水量,万  $m^3$ ;  $Q_{\min}$  表示水源  $i$  应保持的最小蓄水量,万  $m^3$ ;  $Q_n$  为水源规划期末水量,万  $m^3$ 。然而,在城市供水调度系统中,季节性流量可以表示成满足一定概率分布函数的随机变量(随机数);而预调水量以及单位调水成本等参数很难定义为某确定值,难以满足概率分布函数的要求。

基于以上考虑,将有上下限但没有分布函数的区间参数(区间数)引入模型。此外,水源初期蓄水量以及净来水量也是不确定的,只能用满足一定隶属度的模糊数表示。

为简化计算,本文中所有的模糊数用三角模糊数表示。

联合应用3种形态的不确定性参数更加贴近真实的供水调度系统,由此构建的多态不确定条件下的可信性约束区间两阶段随机模型(ITSCCP)如下:

$$\min f^{\pm} = \sum_{i=1}^m B_i^{\pm} W_i^{\pm} + \sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^v P_{ih} C_i^{\pm} S_{ih}^{\pm} \quad (2a)$$

$$\sum_{i=1}^m W_i^{\pm} \geq W_{\min} \quad \forall i \quad (2b)$$

$$W_i^{\pm} - S_{ih}^{\pm} \leq Q_i^{\pm} + q_{ih}^{\pm} - Q^2 S_i \quad \forall i, h \quad (2c)$$

$$W_i^{\pm} \leq W_{\max} \quad (2d)$$

$$Q_i^{\pm} + q_{ih}^{\pm} - Q^2 S_i - W_i^{\pm} + S_{ih}^{\pm} \geq Q_{\min} \quad \forall i, h \quad (2e)$$

$$W_i^{\pm} \geq S_{ih}^{\pm} \geq 0 \quad \forall i, h \quad (2f)$$

式中,  $f^{\pm}, B_i^{\pm}, W_i^{\pm}, C_i^{\pm}, S_{ih}^{\pm}, Q_i^{\pm}$  均表示区间参数,  $f^-$  和  $f^+$  分别表示区间的下限和上限,即  $f^{\pm} = [f^-, f^+]$ , 当  $f^- = f^+$  时,  $f^{\pm}$  就成为确定的数;  $Q_i^{\pm}, q_{ih}^{\pm}$  以及  $Q^2 S_i$  用模糊集表示。

### 2.2 模型求解方法

首先处理模糊约束(2c)和(2e),文献[7]提出的一种具有自对偶性的模糊可信度测度(以下简称  $C_r$ ),使模糊规划更为可行。

约束条件  $AX \leq \tilde{B}$  右端用三角模糊集( $\underline{B}, B, \bar{B}$ )表示,这3个数分别表示该参数的最小可能值、最可能值和最大可能值。根据模糊可信度理论,该模糊约束的可信度定义如下<sup>[7]</sup>:

$$C_r(AX \leq \tilde{B}) = \begin{cases} 1 & AX \leq \underline{B} \\ \frac{2B - \underline{B} - AX}{2(B - \underline{B})} & \underline{B} \leq AX \leq B \\ \frac{\bar{B} - AX}{2(\bar{B} - B)} & B \leq AX \leq \bar{B} \\ 0 & AX \geq \bar{B} \end{cases} \quad (3a)$$

通常情况下,模糊事件的可信度水平  $\lambda$  应大于 0.5,基于以上定义,模糊线性不等式  $AX \leq \tilde{B}$  的确定型等价约束为

$$AX \leq B + (1 - 2\lambda)(B - \underline{B}) \tag{3b}$$

将模型(2)转化成区间两阶段随机规划(ITSP)模型,对于这类模型的求解,可引入决策变量  $Z_i$  [8],并采用交互式算法将其转化为两个分别对应目标函数上界和下界的子模型。由于目标函数是供水成本的最小值,应当先进行下界子模型  $f^-$  的计算(为书写方便,令  $Q_i^+ + q_{ih}^+ - Q^2 S_i = \tilde{B}$ )。

$$\min f^- = \sum_{i=1}^m B_i^-(W_i^- + \Delta W Z_i) + \sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^v P_{ih} C_i^- S_{ih}^- \tag{4a}$$

$$\sum_{i=1}^m (W_i^- + \Delta W Z_i) \geq W_{\min} \quad \forall i \tag{4b}$$

$$(W_i^- + \Delta W Z_i) - S_{ih}^- \leq B + (1 - 2\lambda^-)(B - \underline{B}) \quad \forall i, h \tag{4c}$$

$$(W_i^- + \Delta W Z_i) \leq W_{\max} \quad \forall i \tag{4d}$$

$$(W_i^- + \Delta W Z_i) - S_{ih}^- \leq B + (1 - 2\lambda^-)(B - \underline{B}) - Q_{\min} \quad \forall i, h \tag{4e}$$

$$(W_i^- + \Delta W Z_i) \geq S_{ih}^- \geq 0 \quad \forall i, h \tag{4f}$$

$$0 \leq Z_i \leq 1 \quad \forall i \tag{4g}$$

式中,  $Z_i$  和  $S_{ih}^-$  是决策变量。 $S_{ihopt}^-$ ,  $Z_{iopt}$  和  $f_{opt}^-$  是模型(4)的解,最优调水目标  $W_{ihopt}^+ = W_i^- + \Delta W Z_{iopt}$ , 相应的符合目标函数上限  $f^+$  的子模型如下

$$\min f^+ = \sum_{i=1}^m B_i^+(W_i^- + \Delta W Z_i) + \sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^v P_{ih} C_i^+ S_{ih}^+ \tag{5a}$$

$$S_{ih}^+ \geq S_{ihopt}^- \quad \forall i, h \tag{5b}$$

$$(W_i^- + \Delta W Z_{iopt}) - S_{ih}^+ \leq B + (1 - 2\lambda^+)(B - \underline{B}) \quad \forall i, h \tag{5c}$$

$$(W_i^- + \Delta W Z_{iopt}) - S_{ih}^+ \leq B + (1 - 2\lambda^+)(B - \underline{B}) - Q_{\min} \quad \forall i, h \tag{5d}$$

$$W_i^- + \Delta W Z_{iopt} \geq S_{ih}^+ \quad \forall i, h \tag{5e}$$

式中,  $S_{ih}^+$  是决策变量,  $S_{ihopt}^+$  和  $f_{opt}^+$  是模型(5)的解。通过求解上述两个子模型,可以得到模型(2)的最终解为

$$f_{jopt}^+ = [f_{jopt}^-, f_{jopt}^+]; S_{ihopt}^+ = [S_{ihopt}^-, S_{ihopt}^+] \tag{6}$$

( $i = 1, 2, \dots, m; h = 1, 2, \dots, v$ )

最优的供水调度计划为

$$A_{ihopt}^+ = W_{ihopt}^+ - S_{ihopt}^+ \quad \forall i, h \tag{7}$$

3 案例分析

3.1 资料概况

本研究基于 3 点假设:① 规划期为干旱期;② 该区域有 3 个水源,分别为地表水、地下水和外调水,其供给城市的总水量至少能保障生活需水,该城市基本需水量  $W_{\min} = 2\,600$  万  $m^3$ ;③ 忽略损失水量  $QS_i^+$ 。由此构建多态不确定条件下的城市供水调度模型,其技术数据和供水成本见表 1,水源补水流量及其概率见表 2。

在模型(2)中,在来水未知的情况下,优先给出第一阶段的决策变量  $W_i^+$ ,在获得来水量信息后,第二阶段的决策变量  $S_{ih}^+$  会反过来修正第一阶段的决策变量  $W_i^+$ 。

3.2 结果分析

表 3 和图 1 为可信度水平  $\lambda$  在  $[0.5, 0.9]$  水平下,利用交互式算法求解模型的结果。

从结果来看,  $z_1 = 1, z_2 = 0.2, z_3 = 0$ , 对应最优的调水目标分别为  $W_{1opt}^+ = 1\,800, W_{2opt}^+ = 600, W_{3opt}^+ = 100$  万  $m^3$ 。

由此可看出,地表水水源调水达到调水目标的上限,而外调水量仅是调水目标的下限。这表明,由于外调水成本高(是地表水与地下水调水成本的 2 倍以上),并且惩罚力度大,管理者对外调水持保守态度。

表 3 显示了不同概率下的缺水量。对于地表水资源来说,相对于 1 800 万  $m^3$  的最优调水目标,在低流量水平(概率为 20%),中流量水平(概率为 60%)和高流量水平(概率为 20%)的情况下,短缺是存在的。对于地下水资源,相对于 600 万  $m^3$  的最优调水目标,在低流量水平、中流量水平,短缺是存在的;而在高流量水平的情况下地下水源的短缺量为 0。在不同来水情景下,外来水源的供水短缺,当来水量处于高水平

表 1 技术数据和供水成本

水源	最大调水量/ 万 $m^3$	水源的最小 蓄水量/万 $m^3$	预调水量/ 万 $m^3$	单位水量的调水 成本/[元 $\cdot$ (万 $m^3$ ) $^{-1}$ ]	未达到预调水量的 单位惩罚/[元 $\cdot$ (万 $m^3$ ) $^{-1}$ ]	规划初期的 水量/万 $m^3$
地表水 ( $i = 1$ )	2000	400	[1500, 1800]	[20, 30]	[60, 70]	(1000, 1150, 1300)
地下水 ( $i = 2$ )	1000	600	[500, 1000]	[45, 60]	[70, 95]	(900, 950, 1000)
外调水 ( $i = 3$ )	500	0	[100, 300]	[100, 110]	[115, 120]	0

注:规划初期水量括号里面的 3 个数分别表示该参数的最小可能值、最可能值和最大可能值。

表 2 各水源地来水流量及其概率

流量水平	地表水 ( $i = 1$ )	地下水 ( $i = 2$ )	外调水 ( $i = 3$ )	概率/ %
低( $h = 1$ )	(50,75,100)	(20,50,80)	(0,20,40)	20
中( $h = 2$ )	(300,450,600)	(100,175,250)	(80,115,150)	60
高( $h = 3$ )	(1000,1100,1200)	(400,500,600)	(300,400,500)	20

表 3 计算结果

水源	最优调水目标 $W_i^*/\text{万 m}^3$	不同概率下的缺水量 $S_{ih}^+/\text{万 m}^3$			不同概率下的实际调水量/ $\text{万 m}^3$		
		低( $h = 1$ )	中( $h = 2$ )	高( $h = 3$ )	低( $h = 1$ )	中( $h = 2$ )	高( $h = 3$ )
地表水源	1800	[975,1105]	[550,830]	[0,140]	[695,825]	[970,1250]	[1660,1800]
地下水源	600	[200,264]	[75,175]	0	[336,400]	[425,525]	600
外来水源	100	[80,96]	[0,13]	0	[4,20]	[87,100]	100
概率/%		20	60	20	20	60	20

注:最小系统成本  $f_{jopt}^*$  为 [112 290,171 521] 元。

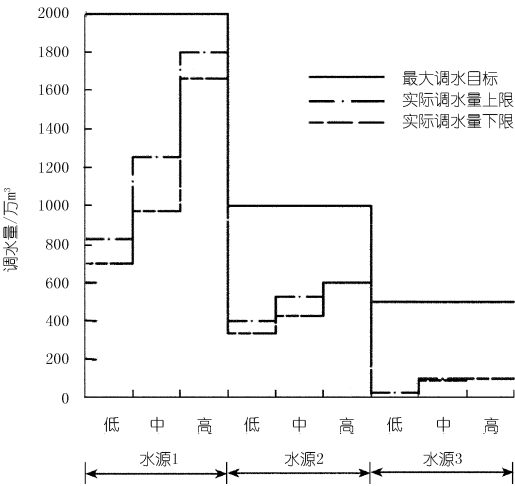


图 1 水源地在不同补水流量概率下的最优调水量

时,短缺为 0,而在低水平下,外调水的短缺率依然存在,这主要是因为外调水的高供水成本以及惩罚系数。

可信度水平  $\lambda$  在  $[0.5, 0.9]$  时,得到城市供水系统的最小调水成本  $f_{jopt}^* = [112\ 290, 171\ 521]$  元,该成本以区间值表示给决策者更多的决策空间。在城市供水调度模型中,模糊约束  $AX \leq \tilde{B}$ ,  $\tilde{B}$  表示可用水量,  $AX$  表示实际供水量,当  $\lambda$  取区间值的下限 0.5 时,表明约束的可信度大于 0.5。因此,对应于违背调水约束的风险最大为 50%,其确定型转换式  $AX \leq B + (1 - 2\lambda)(B - \underline{B}) = B$ ,可用水量达到高水平,水量的短缺量  $S_{ih}^+$  取下限  $S_{ih}^-$ ,则对应于最小成本的下限  $f_{jopt}^* = 112\ 290$  元。相反,当  $\lambda$  取区间值的上限 0.9 时,约束的可信度水平大于 0.9,对应的违背风险小于 10%,可用水量 ( $AX \leq \underline{B}$ ) 达到低水平,因此水量的短缺量  $S_{ih}^+$  取下限  $S_{ih}^+$ ,则对应于最小成本的上限  $f_{jopt}^* = 171\ 521$  元。

从以上分析可以看出,在来水情况好的情形下,低

成本规划水资源短缺量较低;而在来水情况差的条件下,高成本规划更能预防水资源短缺,这样高成本规划与低风险相关联,而低成本的期望与高风险相关联<sup>[9]</sup>。因此,决策者需要在风险与成本间寻求平衡。

4 结语

(1) 本研究构建了基于可信度约束的区间两阶段随机规划(ITSCCP)方法。该方法融合区间数学规划,模糊数学规划以及两阶段随机规划 3 种不确定优化技术,并将其优点集于一体。因此,ITSCCP 方法不但可以有效反映多种不确定性,例如区间、随机、模糊以及它们之间交互的不确定性,而且可以提供随机事件发生后应对预设目标的追索行为,在实现系统成本最小的同时,为管理者提供不同情景下的决策方案,帮助决策者规避供水缺水风险。

(2) 将所建 ITSCCP 城市供水调度模型用于模拟不确定条件下的城市供水调度过程。结果表明该混合优化技术是有效的,并能生成不同可信度水平下稳定的区间解,可以为决策者提供更多决策信息和决策空间。区间解不同的取值对应于不同的系统风险水平,因而决策者需要在成本与风险间进行权衡。

本研究所提 ITSCCP 方法在反映城市供水系统多种形态不确定性方面具有较强的适用性,并且该混合优化技术亦能扩展到其他包含政策分析的问题中。为更真实地反映城市供水系统的复杂性,需要进行延续性探索,今后需重点开展多用户多水源供水调度、水量水质联合调度以及多阶段动态供水管理等研究。

参考文献:

[1] 崔建国,王俊岭.城市供水系统的优化调度模型研究[J].太原理工学报,2002,33(3):285-289.

[2] 王立伟,龙剑波,万珊.城市供水系统优化调度模型[J].四川理工学院学报,2007,20(1):107-110.

[3] Maqsood I, Huang G H, Huang Y, et al. ITOM: an interval - parameter two - stage optimization model for stochastic planning of water resources systems[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2005, 19(2): 125-133.

[4] Huang G H, Baetz B W, Patry G G. A grey fuzzy linear programming approach for municipal solid waste management planning under uncertainty[J]. Civil Engineering Systems, 1993, 10(2): 123-146.

[5] Qin X S, Huang G H, Zeng G M, et al. An interval - parameter fuzzy nonlinear optimization model for stream water quality management under uncertainty[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 180(3): 1331-1357.

[6] Nie X H, Huang G H, Wang D, et al. Robust optimization for inexact water quality management under uncertainty[J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2008, 25(2): 167-184.

[7] Liu B. Uncertainty theory[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007.

- [8] Huang G H, Loucks D P. An inexact two - stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty [ J ]. *Civil Engineering Systems*, 2000, 17 (2) : 95 - 118.

- [9] 张静, 黄国和, 刘烨, 等. 不确定条件下的多水源联合供水调度模型 [ J ]. *水利学报*, 2009, (2) : 160 - 165.

(编辑: 李 慧)

## Study of urban water supply dispatch model under polymorphic uncertainty condition

LUO Weiwei<sup>1,2</sup>, SHAO Dongguo<sup>2</sup>, ZHANG Jianguo<sup>1</sup>, HE Sicong<sup>2</sup>

(1. *Department of Basic Science, Military Economics Academy, Wuhan 430035*; 2. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072*)

**Abstract:** Aiming at the uncertainty and complexity existed in urban multi - sources water supply dispatch system, the fuzzy programming and interval programming of credibility theory are integrated in two - stage stochastic programming frame, and the two - stage stochastic programming optimal urban water supply dispatch model is developed based on credibility constraint. The uncertainties in the objective function and constraint can be expressed by interval number, stochastic variables and fuzzy parameters of the model, so as to simulate the urban water supply process under uncertain condition, and the risk in the stochastic process is searched for. The stable interval solutions under different credibility are obtained through model computation, which can provide schemes for decision - makers and avoid the water shortage risk.

**Key words:** two - stage interval - parameter stochastic programming; credibility theory; fuzzy programming; urban water supply dispatch model

(上接第 59 页)

## Planning and implement of water regime measurement and forecast system of Lower Stung Russei Chrum Hydropower Station in Cambodia

LE Jianhua

(*Stung Russei Chrum Department, China Huadian Corporation, Beijing 100031, China*)

**Abstract:** Lower Stung Russei Chrum Hydropower Station in Cambodia is located in the tropical monsoon region where the rainfall and the flood discharge are large, the runoff yield and convergence are fast. It brings a severe influence on the project construction, so the forecast and pre - warning of flood should be focused. The project is in an uninhabited tropical rain forest, no climate forecast service is provided and the traffic condition is poor. It is decided to build an automatic water regime measurement and forecast system by using the Beidou navigation satellite of China. This paper introduces the planning principles, achievements and operation condition of the system adapting to the local condition. In the light of the problems occurred in the operation of the system under high temperature, high humid and poor traffic, the issues to be paid attention in design and planning are pointed out.

**Key words:** severe environment; planning and design; operation analysis; automatic water regime measurement and forecast system; Lower Stung Russei Chrum; Cambodia

