

# Analysis of Regional Floodwater Utilization Potential Capacities Assessment and Rational Allocation Model\*

Jiaojiao Wang, Hongyuan Fang<sup>#</sup>, Chaoxin Li, Tongda Ge

Hydraulic Science and Engineering College, Yangzhou University, Yangzhou  
Email: wangjiaojiaox@126.com, <sup>#</sup>hyfang4936@yahoo.com.cn

Received: Feb. 21<sup>st</sup>, 2013; revised: Mar. 7<sup>th</sup>, 2013; accepted: Mar. 19<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Jiaojiao Wang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** The regional utilizable floodwater quantity is analyzed according to flood forming mechanism and impacts upon the social, economic and ecological systems evolvement. The floodwater utilization potential capacities are described as floodwater incremental storage obtained from some floodwater utilization measures, and defined as the difference between utilizable floodwater quantity and practical floodwater development quantity. The two-stage fuzzy programming model and computation procedures are proposed for analysis on regional floodwater rational allocation policy, according to objective and principle of floodwater utilization and distribution. The case study demonstrates application of proposed floodwater rational allocation model under condition that the conventional water resources allocation policy has been established for researched region. The research result shows that there are 19.2% and 20.7% of average water-shortage rate, and 1.8% and 1.9% of decline on average water-shortage rate, corresponding to two planning years, and the water-shortage amount and water-shortage rate have been improved visibly by water resources allocation policy with region floodwater utilization measures.

**Keywords:** Region Floodwater; Utilizable Floodwater Quantity; Potential Capacities; Rational Allocation; Fuzzy Programming Model

## 区域洪水资源利用潜力合理配置模型分析\*

王娇娇, 方红远<sup>#</sup>, 李超新, 葛通达

扬州大学水利科学与工程学院, 扬州  
Email: wangjiaojiaox@126.com, <sup>#</sup>hyfang4936@yahoo.com.cn

收稿日期: 2013年2月21日; 修回日期: 2013年3月7日; 录用日期: 2013年3月19日

**摘要:** 本文依据洪水形成特征及其在地表径流中的特殊表现形态, 以及洪水对社会经济系统发展和生态环境系统演变的作用等阐述了区域洪水资源可利用量概念, 提出用于洪水资源合理配置分析的洪水资源利用潜力应当是一定洪水资源利用措施水平时的洪水增蓄量, 且其计算值为在一定洪水资源利用措施水平下的洪水资源可利用量与现状洪水资源实际利用量之差。根据区域洪水资源合理配置的内涵及其相关原则, 构建了区域洪水资源利用潜力配置分析的两阶段模糊数学规划模型及其计算方法。以实例分析演示了在已有常规水资源合理配置策略条件下, 运用所建立的模型求解区域洪水资源利用潜力合理分配方案的步骤; 并得出相应于二个水平年时的区域平均缺水深度分别为 19.2% 和 20.7%, 平均缺水深度分别下降 1.8% 以及 1.9%, 表明基于洪水资源利用的水资源合理配置策略可使研究区域

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(51179165), 江苏省水利科技重点项目(2010010)。

<sup>#</sup>通讯作者。

作者简介: 王娇娇(1988-), 女, 主要从事水资源规划与管理研究。

不同水平年的缺水量和缺水深度得到一定改善。

**关键词:** 区域洪水资源; 可利用量; 潜力; 合理配置; 模糊规划模型

## 1. 引言

天然水资源短缺以及时空分布不均,加之水资源利用量与污水排放量不断增加,致使我国区域性水资源供需矛盾和生态环境系统退化日益加剧。如何有效提高水资源利用效率以缓解供需矛盾,乃至消除区域社会经济可持续发展的主要制约因素,是一项迫切的现实任务,流域雨洪资源利用及其关键技术研究等项目正是在这样的背景下开展的。洪水固然会导致人民生命财产损失,但对河流、湿地以及洪泛区而言,它在提供人类可持续发展所必须的水土资源、生态环境资源和生物多样性环境等方面所具有的作用是不言而喻的<sup>[1-3]</sup>。洪水资源利用在于综合地运用工程性和非工程性措施,将原来传统地泛滥于陆地而后排泄入海的洪水,在安全、经济可行和社会公平的条件下转化为可以利用的常规水资源<sup>[4,5]</sup>。因此,天然洪水如何调控与区域洪水资源潜力如何界定,以及区域在洪水资源利用措施实施后所获得的增蓄水资源量,如何在社会经济与生态环境系统之间进行分配,以达到社会经济和生态环境最大综合效益,都必须依靠合理配置理论方法和技术手段加以研究<sup>[5,6]</sup>。

本文通过对洪水形成特征及其在地表径流中的特殊表现形态,以及洪水对社会经济系统发展和生态环境系统演变的作用等分析,着重阐述区域洪水资源可利用量概念;并从一定洪水资源利用措施水平下的洪水资源可利用量与现状洪水资源实际利用量之差的角度,提出用于洪水资源合理配置分析的洪水资源利用潜力计算方法。同时依据区域洪水资源合理配置的内涵及其相关原则,以及区域水力联系、防洪和生态需水要求和约束条件等,研究区域洪水资源利用潜力配置分析的数学规划模型及其求解技术。

## 2. 区域洪水资源利用潜力估算

### 2.1. 洪水资源可利用量

流域或区域洪水资源可利用量可定义为在可预见的时期内,在统筹考虑生产、生活和生态用水的需要,保障流域防洪安全的基础上,通过经济合理、技

术可行的措施能够调控的区域内(河道)最大洪水径流量。同地表水资源可利用量概念相似,根据洪水资源可利用量定义,汛期洪水资源也可划分为“可利用量”和“不可利用量”两个部分。洪水资源可利用量界定了一定时期内流域汛期洪水资源开发利用的极限阈值,为流域洪水资源利用评价提供了宏观的合理性判据。洪水资源可利用量也是一个动态概念,它总是相对于一定的技术水平和工程、经济条件而言的;在不同的条件下,流域洪水资源调控能力是不同的,因而在不同的规划水平年阶段,区域洪水资源可利用量是变化的。

根据上述洪水资源可利用量概念,现记流域洪水资源量为 $W_N^F$ ,洪水资源可利用量为 $W_A^F$ ,不可利用量为 $W_{UA}^F$ 。按照流域或区域洪水资源可利用量概念内涵,考虑可获得的水文基本资料条件、评价估算程序的合理性和计算方法的可操作性等因素,某一(代表)年的洪水资源可利用量可按下述计算原则估算,即由于洪水资源不可利用量主要包括汛期河道内必须满足的最小生态环境和生产用水 $W_E^F$ ,以及汛期流域水利工程难于控制利用的洪水 $W_O^F$ 两部分,即

$W_{UA}^F = W_E^F + W_O^F$ 。所以如果事先根据相关水文资料能估算出洪水资源不可利用量中的 $W_E^F$ 和 $W_O^F$ ,则在流域洪水资源量中扣除 $W_{UA}^F$ ,即可估算出洪水资源可利用量<sup>[5,7]</sup>。

$W_E^F$ 属于维持河道生态环境功能及满足河道内用水要求而不被允许利用的水量; $W_O^F$ 为超过工程最大调蓄能力和供水能力,受经济技术限制而不能被利用的洪水资源量,或者在可预见期内超出最大用水需求的洪水资源量。实际上,在同一计算时段内,河道内的水量是可以满足多种功能需求的,因此上述两部分水量应当综合考虑加以计算,故某年(汛期)第 $i$ 时段的洪水资源不可利用量 $W_{UA}^F(i)$ 可表示为:

$$W_{UA}^F(i) = \max\{W_E^F(i), W_O^F(i)\} \quad (1)$$

同理,由于 $W_E^F$ 通常包含维持河道生态基本功能需水量 $W_{E1}^F$ 、通河湖泊湿地生态环境需水量 $W_{E2}^F$ ,河口生态环境需水量 $W_{E3}^F$ 以及河道内生产需水量(主要

包括航运、景观等用水) $W_{E4}^F$ 等,因此第*i*时段的 $W_E^F$ 可按下式估算:

$$W_E^F(i) = \max\{W_{E1}^F(i), W_{E2}^F(i), W_{E3}^F(i), W_{E4}^F(i), \dots\} \quad (2)$$

则某年(汛期)第*i*时段的流域洪水资源可利用量的计算公式为:

$$\begin{aligned} W_A^F(i) &= W_N^F(i) - W_{UA}^F(i) \\ &= W_N^F(i) - \max\{W_E^F(i), W_O^F(i)\} \end{aligned} \quad (3)$$

设年内汛期总时段数为 $T_F$ ,则年洪水资源可利用量为:

$$W_{AY}^F = \sum_{i=1}^{T_F} W_A^F(i) \quad (4)$$

虽然流域洪水资源量 $W_N^F$ 可以根据汛期流域降雨量、降雨径流规律和洪水过程特征等因素,运用水文计算方法加以计算;汛期河道内必须满足的最小生态环境和生产用水 $W_E^F$ 也能按照一定的原则加以估算确定;但运用上述方法估算洪水资源可利用量的关键在于必须获得不能够被调蓄控制的洪水资源量 $W_O^F$ 。当一个流域或区域在一定的社会经济和技术条件下,并且在实施一定的洪水资源化措施情况下,将其控制站的实测弃水量减去维持河道生态环境功能及满足河道内用水要求的水量 $W_E^F$ ,即可得到所需要的 $W_O^F$ 。

### 2.2. 区域洪水资源利用潜力估算

流域或区域洪水资源利用潜力是指“洪水资源可利用量”在扣除现状实际洪水调控量之后,还能够进一步利用先进技术和手段开发利用的最大洪水径流量。流域洪水资源利用潜力说明了在可预见时期和某种经济技术条件下,相对于实际开发利用规模,最多能够增加多少开发利用量。

显然,区域洪水资源可利用量估算必须以相应的洪水资源利用方式的运行条件为基础,因此,用于洪水资源合理配置分析中的洪水资源利用潜力应当是一定洪水资源利用措施水平时的洪水增蓄量。所以,这里将区域洪水资源利用潜力界定为在一定洪水资源利用措施水平下的洪水资源可利用量与现状洪水资源实际利用量之差。

若设(年)现状洪水资源实际利用量或无洪水资源利用方式条件下区域汛期地表径流利用量为 $W_{A0}^F$ ,则相应于一定洪水资源利用措施水平下的(子)区域洪水

资源利用潜力 $W_p^F$ 可按下式计算:

$$W_p^F = W_{AY}^F - W_{A0}^F \quad (5)$$

与区域洪水资源可利用量计算方法相似,当所有子区域的洪水资源利用潜力计算过程结束后,也可统计分析出整个区域的洪水资源利用潜力值。计算公式为

$$W_{P,区域}^F = \sum_{l=1}^L W_{P,l}^F \quad (6)$$

式中 $W_{P,区域}^F$ 为整个区域的洪水资源利用潜力, $W_{P,l}^F$ 则为第*l*计算单元的洪水资源利用潜力,*L*为区域内计算子区数量。

## 3. 洪水资源利用潜力合理配置数学模型

### 3.1. 洪水资源利用潜力配置目标

#### 3.1.1. 目标函数

鉴于区域洪水发生规律和洪水资源利用特征,基于洪水资源利用的区域水资源合理配置分析中的计算年时间单元以水文年计。洪水资源利用潜力配置模型考虑的目标有二个,其一是整个区域欠缺水量深度或整个区域的加权欠缺水量和最小,具体可表达为:

$$\text{Min } D = \sum_{l=1}^L w_{Dl} D_l \quad (7)$$

式中 $w_{Dl}$ 为第*l*子区域的欠缺水量权重;若以 $WDS_l$ 表示水资源配置分析中第*l*子区域的总需水量与常规地表可供水量之差,则 $D_l$ 为第*l*子区域相对于 $WDS_l$ 的欠缺水量。目标式(7)中采用加权欠缺水量作为衡量指标,主要是考虑各子区域在使用区域洪水资源利用潜力上应尽可能公平。其二是整个区域洪水资源利用的总效益最大:

$$\text{Max } E = \sum_{l=1}^L w_{xl} (p_{l生} x_{l生} + p_{l工} x_{l工} + p_{l农} x_{l农} + p_{l环} x_{l环}) \quad (8)$$

式中 $p_{l生}$ 、 $p_{l工}$ 、 $p_{l农}$ 、 $p_{l环}$ 分别为第*l*子区域单位生活、工业、农业及环境供水量的效益系数, $x_{l生}$ 、 $x_{l工}$ 、 $x_{l农}$ 、 $x_{l环}$ 分别为洪水资源利用潜力对第*l*子区域生活、工业、农业以及环境方面的供水量, $w_{xl}$ 为第*l*子区域的供水效益权重,该目标式表达了区域洪水资源利用的总效益。一般意义下洪水资源利用的风险显然比常规水资源利用要高,因此,高风险高成本的洪水资源量势必促使其使用要追求较高回报率。目标式(8)体现了在

满足资源使用有效原则前提下, 将较高风险(隐含较高成本)的洪水资源量合理地分配与不同的地区和社会经济部门以获取最佳回报率的原则。

### 3.2. 洪水资源利用潜力配置的模糊规划模型

根据常规水资源合理配置方案成果, 设第  $l$  子区域生活、工业、农业及环境部门在扣除常规地表供水量之后的需供水量分别为  $PX_{l生}$ 、 $PX_{l工}$ 、 $PX_{l农}$  及  $PX_{l环}$ 。在目标函数表达式(7)和(8)中, 均需考虑权重系数;  $w_D$ 、 $w_X$  分别为目标函数中欠缺水量与供水效益的权重系数。从权重  $w_{Dl}$ 、 $w_{Xl}$  的实际内涵及其确定过程看, 其明显存在随机性和不确定性, 将它们表示成区间数而不是一个确定的值可能更符合实际。同样, 洪水资源利用潜力  $W_{Pl}^F$  以及  $WDS_l$ 、 $PX_{l生}$ 、 $PX_{l工}$ 、 $PX_{l农}$  及  $PX_{l环}$  等也可以用区间数来反映其不确定性。因此, 权重  $w_{Dl}$ 、 $w_{Xl}$  可表示为  $w_{Dl}^\pm = (w_{Dl}^-, w_{Dl}^+)$  和  $w_{Xl}^\pm = (w_{Xl}^-, w_{Xl}^+)$ , 这里  $w_l^-$ 、 $w_l^+$  分别表示  $w_l^\pm$  的下限和上限; 其余参数和变量的表达方式同理。由此可以构建下列模糊规划模型<sup>[8-10]</sup>:

$$\text{Max } Z^\pm = w_X \sum_{l=1}^L w_{Xl}^\pm (p_{l生} x_{l生}^\pm + p_{l工} x_{l工}^\pm + p_{l农} x_{l农}^\pm + p_{l环} x_{l环}^\pm) \quad (9)$$

$$+ w_D \sum_{l=1}^L w_{Dl}^\pm (-D_l^\pm) \quad (10)$$

$$\text{st. } x_{lk}^\pm + \sum_k x_{lk}^\pm \leq W_{Pl}^{F\pm}, l=1, 2, \dots, L$$

$$x_{jl}^\pm + \sum_j x_{jl}^\pm + D_l^\pm = WDS_l^\pm, l=1, 2, \dots, L; j \in \{J_l\} \quad (11)$$

$$D_l^\pm \leq WDS_l^\pm, l=1, 2, \dots, L \quad (12)$$

$$D_l^\pm \geq D_{l,\min}, l=1, 2, \dots, L \quad (13)$$

$$x_{lk}^\pm \leq Q_{lk,\max}, l=1, 2, \dots, L; k \in \{K_l\} \quad (14)$$

$$x_{l生}^\pm \leq PX_{l生}^\pm, x_{l工}^\pm \leq PX_{l工}^\pm, x_{l农}^\pm \leq PX_{l农}^\pm, \quad (15)$$

$$x_{l环}^\pm \leq PX_{l环}^\pm, l=1, 2, \dots, L$$

$$x_{l生}^\pm + x_{l工}^\pm + x_{l农}^\pm + x_{l环}^\pm \leq x_{ll}^\pm + \sum_j x_{jl}^\pm, l=1, 2, \dots, L \quad (16)$$

$$D_l^\pm, x_{ll}^\pm, x_{lk}^\pm, x_{l生}^\pm, x_{l工}^\pm, x_{l农}^\pm, x_{l环}^\pm \geq 0 \quad (17)$$

式中,  $D_{l,\min}$  为第  $l$  子区域最小缺水允许值(若无特殊要求可取 0),  $Q_{lk,\max}$  及  $Q_{jl,\max}$  为第  $l$  子区域和第  $j$  子区

域向其它子区域输出洪水资源时其出口或渠道的最大过流能力;  $x_{l生}$ 、 $x_{l工}$ 、 $x_{l农}$ 、 $x_{l环}$  分别为用于第  $l$  子区域生活、工业、农业及环境供水的洪水资源利用潜力;  $\{K_l\}$  为能承接第  $l$  子区洪水资源利用潜力的子区集合,  $\{J_l\}$  为可向第  $l$  子区输出洪水资源利用潜力的子区集合。与权重区间数表达相似, 模型中  $D_l^\pm, x_{ll}^\pm, x_{lk}^\pm, x_{l生}^\pm, x_{l工}^\pm, x_{l农}^\pm, x_{l环}^\pm$  为用区间数表达的决策变量, 即  $x_{ll}^\pm = (x_{ll}^-, x_{ll}^+), x_{lk}^\pm = (x_{lk}^-, x_{lk}^+), \dots$ , 其余变量表达同理。上述模型结构及其求解方法的特征是洪水资源利用潜力子区域分配的模糊数学规划求解与子区域内洪水资源利用潜力各用水户间分配的模拟决策法相结合进行(交互式方法)。建立这种模型结构及其求解方法的思路主要是考虑洪水资源利用潜力在各子区域内用水户间分配量以及供水效益受到原有水资源合理配置方案的制约, 采用分步求解方法可以方便得到最优结果。

模型(9)~(17)中包含了一系列以区间数表达的不确定性变量和参数, 该模糊规划模型可采用两阶段方法求解。分别求解两阶段模型后, 可得各决策变量的最优区间值, 以及目标函数值的最优区间值  $Z_{opt}^\pm = (Z_{opt}^-, Z_{opt}^+)$ 。从决策原理角度看, 这些区间值可以为水资源决策提供许多决策信息, 但仍不便直接用于实际决策中。

现将目标函数值  $Z_{opt}^-$  和  $Z_{opt}^+$  看作目标的“允许下限”和“希望水平”, 运用模糊决策理论来求解满意解。设  $\tilde{G}_1, \tilde{G}_2, \dots, \tilde{G}_m$  和  $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2, \dots, \tilde{C}_n$  是策略空间  $X$  中的  $m$  个模糊目标与  $n$  个模糊约束, 则模糊决策  $\tilde{D}$  也是  $X$  中的一个模糊集合, 且它被定义为  $\tilde{G}$  和  $\tilde{C}$  的交集, 即  $\tilde{D} = \tilde{G}_1 \cap \tilde{G}_2 \cap \dots \cap \tilde{G}_m \cap \tilde{C}_1 \cap \tilde{C}_2 \cap \dots \cap \tilde{C}_n$ , 具有隶属函数

$$\mu_{\tilde{D}}(x) = \min \{ \mu_{\tilde{G}_1}(x), \dots, \mu_{\tilde{G}_m}(x), \mu_{\tilde{C}_1}(x), \dots, \mu_{\tilde{C}_n}(x) \}, \forall x \in X \quad (18)$$

在模糊决策中, 使隶属函数  $\mu_{\tilde{D}}(x)$  取得最大值的策略称为极大化策略, 且具有如式(19)的隶属函数, 而所有极大化策略的集合称为最大决策集合。

$$\mu_{\tilde{D}}(x^*) = \max_{x \in X} \min \{ \mu_{\tilde{G}_1}(x), \dots, \mu_{\tilde{G}_m}(x), \mu_{\tilde{C}_1}(x), \dots, \mu_{\tilde{C}_n}(x) \} \quad (19)$$

为了构建模糊线性规划模型, 现对模糊目标和模糊约束均采用线性隶属度函数, 并设辅助变量  $\alpha$  表示

决策满意度( $\alpha$ -截集的度量值)。则有下列模糊线性规划模型:

$$\max \alpha^\pm \quad (20)$$

$$st. \quad w_X \sum_{l=1}^L w_{Xl}^\pm (p_{l生} x_{l生}^\pm + p_{l工} x_{l工}^\pm + p_{l农} x_{l农}^\pm + p_{l环} x_{l环}^\pm) + w_D \sum_{l=1}^L w_{Dl}^\pm (-D_l^\pm) \geq Z_{opt}^- + \alpha^\pm (Z_{opt}^+ - Z_{opt}^-) \quad (21)$$

$$x_{ll}^\pm + \sum_k^{\{K_l\}} x_{lk}^\pm \leq W_{Pl}^{F+} - \alpha^\pm (W_{Pl}^{F+} - W_{Pl}^{F-}), l=1,2,\dots,L \quad (22)$$

$$x_{ll}^\pm + \sum_j^{\{J_l\}} x_{jl}^\pm + D_l^\pm \leq WDS_l^+ - \alpha^\pm (WDS_l^+ - WDS_l^-), \quad (23)$$

$$l=1,2,\dots,L; j \in \{J_l\}$$

$$D_l^\pm \leq WDS_l^+, l=1,2,\dots,L \quad (24)$$

$$D_l^\pm \geq D_{l,min}, l=1,2,\dots,L \quad (25)$$

$$x_{lk}^\pm \leq Q_{lk,max}, l=1,2,\dots,L; k \in \{K_l\} \quad (26)$$

$$x_{l生}^\pm \leq PX_{l生}^\pm, x_{l工}^\pm \leq PX_{l工}^\pm, x_{l农}^\pm \leq PX_{l农}^\pm, \quad (27)$$

$$x_{l环}^\pm \leq PX_{l环}^\pm, l=1,2,\dots,L$$

$$x_{l生}^\pm + x_{l工}^\pm + x_{l农}^\pm + x_{l环}^\pm \leq x_{ll}^\pm + \sum_j^{\{J_l\}} x_{jl}^\pm, l=1,2,\dots,L \quad (28)$$

$$D_l^\pm, x_{ll}^\pm, x_{lk}^\pm, x_{l生}^\pm, x_{l工}^\pm, x_{l农}^\pm, x_{l环}^\pm \geq 0 \quad (29)$$

求解上述模糊线性规划模型, 在理论上即可获得各子区域最优缺水值  $D_l^\pm$ , 各子区域自蓄自供和供给相邻子区域的洪水资源利用潜力  $x_{ll}^\pm, x_{lk}^\pm$ , 以及各子区域内生活、工业、农业及环境等用水门类的洪水资源利用潜力分配值  $x_{l生}^\pm, x_{l工}^\pm, x_{l农}^\pm, x_{l环}^\pm$ 。不同计算情景条件下模型的最优解可构成相应的区域洪水资源利用潜力的配置方案, 并为推荐方案的产生提供用于评价的配置方案集。

## 4. 实例研究

### 4.1. 研究区域概况

北三河流域位于海河北系二级区内, 由北运河、潮白河、蓟运河三河组成, 流域面积 35,808 km<sup>2</sup>, 多年平均降水量约 600 mm, 80%~85%的年降水量都集中在汛期。行政区划分属北京、天津、河北三省(市), 人口 1486 万人。近半个多世纪来, 该流域内进行了大规模的水利工程建设, 流域调蓄洪水的主要场所已

由平原转变到山区, 原有的湖泊洼淀部分被划定为蓄滞洪区; 整个流域形成了由水库、堤防、蓄滞洪区、涵闸枢纽以及分洪减河等措施构成的水利工程体系, 不仅对流域的防洪减灾发挥了重要作用, 而且也为流域水资源的开发利用与合理配置奠定了必要的调控基础。因此, 流域洪水资源安全利用成为实现水资源可持续战略的重要措施和现实选择, 充分发挥现有水利工程体系的作用, 进一步开发利用流域内的洪水资源, 对于缓解流域水资源严重短缺的局面, 改善流域生态环境具有非常重要的意义。

基于现有防洪工程体系及水资源开发利用特征, 以及流域洪水资源利用与合理配置研究目标, 在山区平原区分区的基础上, 结合水系特点和行政区划界线, 可以将北三河流域划分成 10 个计算单元, 分别为河北潮白河山区(HB-CBS)、北京潮白河山区(BJ-CBS)、北运河山区(BYS)、北京蓟运河山区(BJ-JYS)、天津蓟运河山区(TJ-JYS)、河北蓟运河山区(HB-JYS)、北京平原区(BJ-BSP)、天津平原区(TJ-BSP)、廊坊平原区(HB-LFP)以及唐山平原区(HB-TSP)。北三河流域计算单元划分如图 1 所示。

## 4.2. 洪水资源利用潜力配置模型计算

### 4.2.1. 模型求解

依据区域需水预测和供水预测特征, 以及区域洪水资源利用策略原则, 可重点考虑 A<sub>0</sub>、A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>



Figure 1. Distributing pattern of computation units for Bei-san-he Basin  
图 1. 北三河流域计算单元划分图

四个洪水资源利用方案, 其中方案  $A_0$ 、 $A_1$  表示水库以现行汛限水位控制方案运行调度为主,  $A_0$  为洪水资源利用措施无主动联合调度运用, 且独立进行,  $A_1$  为洪水资源利用措施联合调度运用, 联合运行;  $A_2$ 、 $A_3$  表示水库汛限水位分期控制运用, 洪水资源利用措施联合调度运用,  $A_2$  为洪水资源利用保持现状且独立进行,  $A_3$  为联合调度运行。相应于这些方案的区域及各分区的洪水资源利用潜力可根据本文第2部分相关计算方法求得。

从洪水资源配置方案生成以及计算单元洪水资源利用潜力计算过程可以看出, 北三河流域各计算单元洪水资源利用潜力  $W_{Pi}^F (i=1,2,\dots,10)$  是在充分发挥计算单元内各项洪水资源利用工程和非工程措施的有效调节作用, 并综合考虑流域上、下游区域在洪水资源利用上的互动关系的基础上所得到的, 这在根本上已体现了区域洪水资源合理配置的内涵。但在系统分析法所建立的洪水资源可利用量估算模型中, 其目

标函数是以计算单元的总弃水量和总缺水量最小为衡量标准的, 并没有以追求洪水资源利用效率最大化为目标, 真正考虑各计算单元的洪水资源利用潜力在全流域上的合理调配。为了将计算所得的各计算单元洪水资源利用潜力在整个区域上进行重新合理分配, 需要根据洪水资源利用潜力分配模糊规划模型特征, 采用线性隶属度函数来表达模糊目标约束, 并设辅助变量  $\alpha$  (即  $\alpha$ -截集度量值) 表示决策满意度, 如式(20)~(29)所示模型结构。图2和图3分别显示由优化模型求得的北三河流域相应于方案  $A_3$  时各分区的洪水资源利用潜力分配最优解及相应的各分区缺水量最优分布值, 图中的  $X_{11}$ 、 $X_{22}$ 、 $X_{33}$ 、 $X_{44}$ 、 $X_{55}$ 、 $\dots$ 、 $X_{77}$ 、 $X_{88}$ 、 $X_{99}$ 、 $X_{1010}$  分别为依据北三河流域各分区地理位置、水力联系及洪水资源利用关系特征而确定的洪水资源利用潜力分配决策变量(共19个),  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $\dots$ 、 $D_9$ 、 $D_{10}$  分别为各分区的缺水量分布决策变量(共10个)。

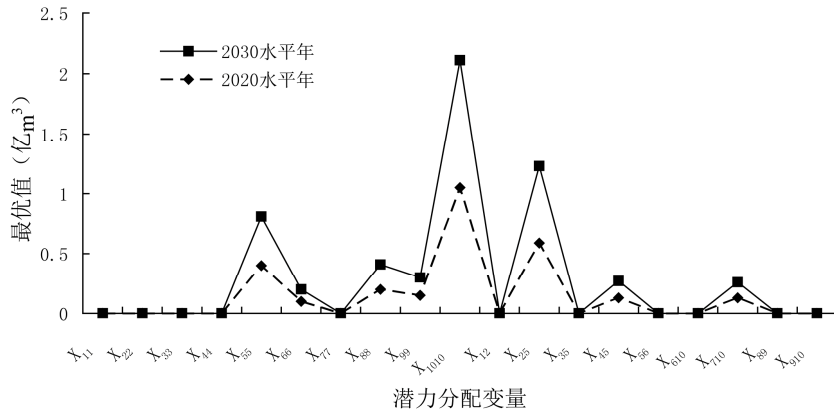


Figure 2. Optimum flood-water utilization potential allocation of various subareas  
图2. 各分区洪水资源利用潜力最优分配

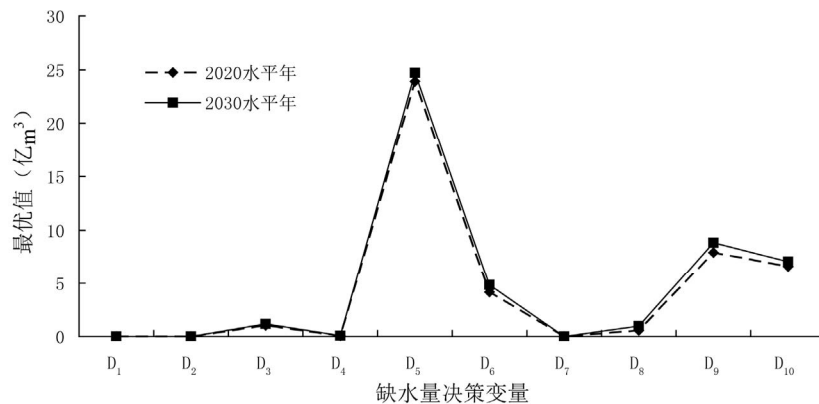


Figure 3. Optimum water-shortage distribution of various subareas  
图3. 各分区缺水量最优分布

### 4.2.2. 洪水资源利用潜力分配的效益计算

一般情况下, 各计算单元所分配到的洪水资源利用潜力, 主要用于替换原配置方案中供给生产(工农业)和生态环境部门的非常规地表水资源量(地下水、微咸水以及海水淡化等); 并且, 从提高洪水资源利用潜力使用效益的角度分析, 应着重评价分析城市工业供水和生态环境补水两方面的效益。经对华北地区生态环境建设相关统计资料分析, 可得该地区每减少超采  $1 \text{ m}^3$  地下水所减少的相应损失值, 因此根据效益替代原则, 生态环境供水单位收益  $p_{I \text{ 环}}$  可近似据此计算; 城市工业供水单位收益  $p_{I \text{ 工}}$  主要考虑供水区水平年工业万元产值取水量  $q(\text{m}^3/\text{万元})$  和供水效益分摊系数  $\beta$  二个因素<sup>[11,12]</sup>, 即  $p_{I \text{ 工}} = \beta/q$ , 其中供水效益分摊系数  $\beta$  取 1.66%。工业万元产值取水量依据不同地区不同水平年的用水定额指标及用水效率预测成果等进行估算。

根据计算获得的洪水资源利用潜力分配值, 以及

城市工业供水和生态环境补水两方面的单方效益系数, 可估算洪水资源利用的综合效益(相应于  $A_3$  方案), 如图 4 及图 5 所示。

### 4.3. 洪水资源利用潜力配置方案成果分析

根据海河流域水资源综合规划相关成果, 实现恢复海河流域水生态环境战略目标的重要途径是提高流域的水资源承载力和实行水污染综合防治措施, 而提高水资源承载力主要包括开源、节流与水资源的优化配置等。相比之下, 区域性洪水资源化是更加现实的途径, 也具有较好的可操作性; 洪水资源化主要是挖掘现有的工程潜力, 具有相对投资小、相关措施易操作、效果显著等特点, 在可预期的科技水平条件下, 它无疑是流域内部开源的一个主要途径。与常规地表水资源的开发利用相比, 洪水资源利用的成本显然要高些, 这是因为洪水资源利用成本估算涉及洪水资源利用措施的风险评价、直接和间接损失计算、工程措

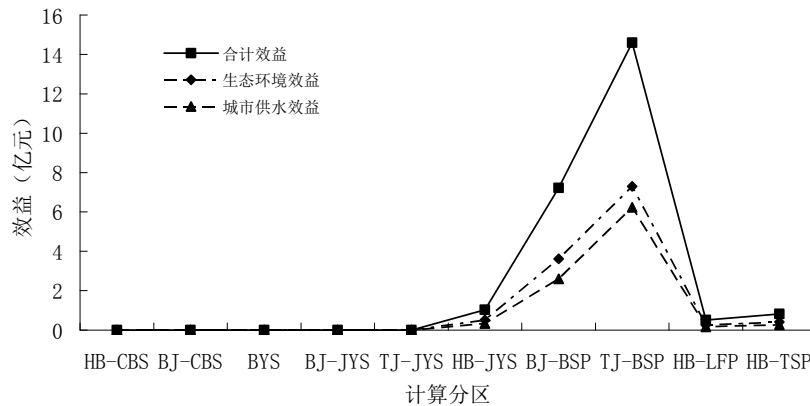


Figure 4. The benefit of flood-water resources utilization in planning year 2020  
图 4. 2020 水平年洪水资源利用效益

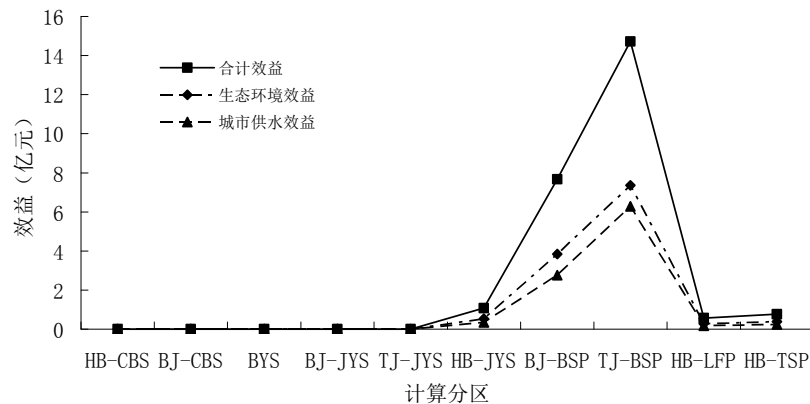


Figure 5. The benefit of flood-water resources utilization in planning year 2030  
图 5. 2030 水平年洪水资源利用效益

施和非工程措施的费用评估等多方面因素; 但有理由相信, 对比地下水超采、海水淡化利用以及跨流域调水、废污水处理回用等供水措施, 洪水资源利用在边际供水成本、供水水质保证、促进区域水资源利用率提高等方面具有明显优势。

对比常规水资源配置方案和洪水资源利用配置方案条件下的计算成果可知, 虽然北三河流域各计算单元在 50% 来水频率情况下的缺水状态相似, 但各计算单元的缺水量及缺水深度可表明这种缺水状态的程度已有明显改善。经统计分析,  $P = 50\%$  情况下, 在常规水资源配置中, 2020 及 2030 等水平年的全流域缺水量分别为 27.82 亿  $m^3$  和 29.53 亿  $m^3$ ; 在洪水资源利用配置中, 两个水平年的全流域缺水量(相应于  $A_3$  方案)分别为 25.27 亿  $m^3$  和 26.90 亿  $m^3$ , 缺水量分别减少 2.55 亿  $m^3$  和 2.63 亿  $m^3$ ; 其相应下降率分别为 9.2% 及 8.9%。常规水资源配置两个水平年的全流域平均缺水深度分别为 21.1% 和 22.6%, 洪水资源利用配置两个水平年的全流域平均缺水深度分别为 19.2% 和 20.7%; 流域平均缺水深度分别下降 1.8% 以及 1.9%。从以上分析过程可以看出, 基于洪水资源利用的水资源合理配置策略可使北三河流域不同水平年的缺水量和缺水深度得到一定改善, 这说明洪水资源利用策略对该区域水资源进一步开发利用以提高当地水资源利用率和缓解区域性水资源供需平衡矛盾, 实际意义较大, 且效果也较明显。

## 5. 结论

区域洪水资源可利用量可根据在区域洪水资源量中扣除不可利用量的计算原则获得, 而依据区域洪水资源可利用量估算必须以相应的洪水资源利用方式的运行条件为基础的原则, 用于洪水资源合理配置分析中的洪水资源利用潜力应当是一定洪水资源利用措施水平时的洪水增蓄量, 且其计算值为在一定洪水资源利用措施水平下的洪水资源可利用量与现状洪水资源实际利用量之差。

在洪水资源利用条件下如何进行水资源合理配置, 研究侧重点应放在探索洪水资源利用潜力与常规水资源量的使用分配原则, 以及配置分析所涉及的数学模型、计算方法等。在已有区域水资源综合规划成果的条件下, 洪水资源合理配置的关键在于针对现有

的水资源合理配置方案, 如何运用恰当的替代策略合理分配洪水资源利用潜力。依据随机规划原理、模糊数学规划和水资源系统分析理论, 可以建立能处理洪水资源利用潜力这类不确定性变量的两阶段模糊数学规划模型, 而区域洪水资源利用潜力与常规水源供给量之间的替代分配决策过程可进一步根据边际成本理论进行。区域洪水资源利用潜力分配是基于洪水资源利用的水资源合理配置分析的关键内容, 本文所提出的区域洪水资源利用潜力估算方法及其合理配置模型与计算方法经实例验证, 可成为区域洪水资源利用规划与管理的技术手段之一。

## 参考文献 (References)

- [1] 王浩, 殷峻暹. 洪水资源利用风险管理研究综述[J]. 水利发展研究, 2004, 4(5): 4-8.  
WANG Hao, YIN Junxian. Research on risk management of flood resources utilization. Water Resources Development Research, 2004, 4(5): 4-8. (in Chinese)
- [2] 向立云, 魏智敏. 洪水资源化——概念、途径与策略[J]. 水利发展研究, 2005, 5(7): 24-29.  
XIANG Liyun, WEI Zhimin. Flood resource—Conception, way and strategy. Water Resources Development Research, 2005, 5(7): 24-29. (in Chinese)
- [3] 张欧阳, 等. 洪水的灾害与资源效应及其转化模式[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 25-30.  
ZHANG Ouyang, et al. Flood hazards and resources effects and their inter-transform mode. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(1): 25-30. (in Chinese)
- [4] 赵飞, 王忠静, 等. 洪水资源化与湿地恢复研究[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(1): 6-19.  
ZHAO Fei, WANG Zhongjing, et al. Study on wetland restoration base on utilization. Advance in Science and Technology, 2006, 26(1): 6-19. (in Chinese)
- [5] 胡庆芳, 王银堂. 海河流域洪水资源利用评价研究[J]. 水文, 2009, 29(5): 6-12.  
HU Qingfang, WANG Yintang. Assessment of flood resources utilization in HaiHe river basin. Journal of China Hydrology, 2009, 29(5): 6-12. (in Chinese)
- [6] 谢新民, 等. 宁夏水资源优化配置与可持续利用战略研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.  
XIE Xinmin, et al., Eds. Ningxia water resources optimization strategy study on sustainable utilization and allocation. Zhengzhou: HuangHe Hydraulic Press, 2002. (in Chinese)
- [7] 方红远, 王银堂, 胡庆芳. 区域洪水资源可利用量评价分析[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 776-781.  
FANG Hongyuan, WANG Yintang and HU Qinfang. Method for estimating utilizable quantity of regional floodwater. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7): 776-781. (in Chinese)
- [8] LEE, H. M., LEE, S.-Y. and LEE, T.-Y. A new algorithm for applying fuzzy set theory to evaluate the rate of aggregative risk in software development. Information Sciences, 2003, 153(1): 177-197.
- [9] CHARNES, A., COOPER, W. W. and SEIFORD, B. Foundations of data envelopment analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions. Journal of Econometrics, 1985, 30(1-2): 81-107.
- [10] HUANG, G. H., LOUCKS, D. P. An inexact two-stage stochastic



- programming model for water resources management under uncertainty. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 2000, 17(2): 95-118.
- [11] 戴庆华. 城市工业供水效益计算方法探讨[J]. 水利学报, 1991, 12: 65-69.  
DAI Qinghua. Discussion on calculation method of city industrial water efficiency. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991, 12: 65-69. (in Chinese)
- [12] 屠晓峰. 城市供水经济效益的计算方法及应用[J]. 水利经济, 1986, 3: 53-57.  
TU Xiaofeng. Calculation method of economic benefit and application of city water supply. *Journal of Economics of Water Resources*, 1986, 3: 53-57. (in Chinese)