

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.02.005

地表水资源空间配置的权重缺水率法研究

赵 宋¹,伍永刚¹,顾 巍¹,林占东²

(1. 华中科技大学水电与数字化工程学院,湖北 武汉 430074 ;2. 深圳市东深电子技术有限公司,广东 深圳 518000)

摘要 为了在水资源空间配置过程中体现用户公平和避免“平均主义”,结合权重和缺水率 2 项因子提出需水单元权重缺水率的概念,并以各需水单元权重缺水率相等且最小为优化目标分别建立了不考虑回水时的权重缺水率分水模型和考虑回水时的权重缺水率分水模型,使得水资源空间配置更合理。模型中引入需水权重因子,以综合反映需水单元的重要性、需水的迫切性、用水效益以及缺水导致的负面影响,同时,在分水过程中充分利用各上游需水单元排向下游的回水量,大幅度降低了各需水单元的缺水率。

关键词 地表水 水资源空间配置 缺水率 权重

中图分类号 :TV211.1+1 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)02-0016-03

Study on the weight water shortage rate method of space allocation of surface water resources//ZHAO Song¹, WU Yong-gang¹, GU Wei¹, LIN Zhan-dong² (1. College of Hydroelectricity and Digitalization Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China ;2. Dongshen Electronic Technology Company, Shenzhen 518000, China)

Abstract :In order to enhance user fairness and avoid equalitarianism in the process of space allocation of surface water resources, the concept of the weight water-shortage rate of water-demanding units is put forward. It is based on weight and water shortage. By assuming the weight water-shortage rate of each water-demanding unit to be equal and minimizing the optimization goal, the water diversion models of the weight water-shortage rate with or without consideration of the backwater are established, making the space allocation of water resources more reasonable. The water-demanding weight factor is introduced to comprehensively reflect the importance of the water-demanding unit, the water-demanding urgency, the water benefit and the negative influence of water shortage. In the process of water diversion, the backwater of water-demanding units upstream is fully used, which greatly decreases the water shortage rate of each water-demanding unit.

Key words :surface water resources ;space allocation of water resources ;water shortage rate ;weight

随着经济发展、人口增长和人们生活水平的提高,工业、农业和人们生活用水量迅速增长。与此同时,我国的降雨径流时空分布很不均匀,水土流失、水质污染等现象十分严重,“淡水紧张和使用不当,对可持续发展和环境保护构成了严重而又不断增长的威胁”^[1]。水资源的紧缺已成为我国国民经济继续发展的重要制约因素之一^[2]。将流域水资源进行合理的空间配置,不仅有利于缓解水资源供需紧张局面、促进节约用水、保证用水公平,而且可为国民经济发展提供可靠的水资源供给保障。

目前在水资源的空间配置方面,各地学者提出了多种分水方法。文献[3]提出按需比例分配法、效益优序分配法、综合效率分配法等分水方法,并以深圳市 2010 年的水量分配为案例说明了有关方法的应

用。文献[4]提出用同倍比配水法、按权重配水法、用户参与配水法等方法进行黄河下游水资源的空间配置。文献[5]面对缺水,基于“以供定需”分配水量提出了“缺水量分摊系数法”。以上所列方法中,按需比例分配法、同倍比配水法、缺水量分摊系数法均未考虑需水单元间的差异,没有很好地体现用水的公平性;按权重配水法虽用权重对需水单元进行了区别,但在一次分水过程中有可能出现某需水单元配水大于需水的情况,需要将多余的水量继续迭代计算,计算过程略显繁琐,且权重物理概念不是很明晰;其他的方法,如效益优序分配法和综合效率分配法等则由于实现过程过于复杂,导致实用性不强。因此,笔者结合按需比例分配法等方法的优点,提出了基于“以供定需”的一种水资源空间配置的权重缺水率法。该方法

引入需水权重的概念,考虑需水单元的区别,而且在分水过程中可以充分利用各需水单元的回水量,大幅度降低了各需水单元的缺水率,方法概念明晰、简单易行,在优化水资源空间配置方面具有重要意义。

1 模型分析

已知某河段某时段可供水量为 $Q_{供}$,需水单元编号为 i (i 由上游到下游依次为 $1, 2, \dots, n$), 相应的需水权重分别为 $w_1, w_2, \dots, w_n$, 需水量分别为 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$, 求该种情况下的分水方案即确定各需水单元的取水量 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 。

首先提出权重缺水率的概念,即权重缺水率为各需水单元各实际缺水率 $\frac{Q_i - q_i}{Q_i}$ 与各自权重 w_i 之积。公式表示如下:

$$L_{wi} = w_i \left(\frac{Q_i - q_i}{Q_i} \right) \tag{1}$$

式中: L_{wi} 为需水单元 i 的权重缺水率; w_i 为需水单元 i 的权重因子,该因子综合反映需水单元的重要性、需水的迫切性、用水效益以及缺水所导致的负面影响,决策者可以通过综合指数法、特尔斐法、层次分析法、模糊综合评判法等评价方法获得^[6]。

1.1 不考虑回水时的权重缺水率分水模型

该分水模型的基本思想是:为了避免分水过程中出现‘大锅水’和‘平均主义’现象,保证各需水单元的用水公平性,分水模型的目标函数为在可供水量允许条件下使得各需水单元的权重缺水率相等且数值最小,即

$$\min L_w = L_{w1} = \dots = L_{wn} \tag{2}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n q_i \leq Q_{供} \tag{3}$$

1.2 考虑回水时的权重缺水率分水模型

该分水模型的基本思想是:与不考虑回水时的权重缺水率分水模型一样,目标函数都是使得各需水单元的权重缺水率相等且数值最小。但是由于需要考虑上游需水单元用水之后排向下游的回水,各需水单元的可用水量将有所增加,实际缺水率也将随之减小。因此,目标函数仍然为式(2),约束条件将发生变化,即

$$\text{s.t.} \quad q_i \leq A_i \quad (i = 1, \dots, n) \tag{4}$$

式中 A_i 为需水单元 i 的可用水量。

在进行分水的过程中必须针对每一种分水方案计算出河道的水流演进过程,从而得到各需水单元的可用水量 A_i 。目前求解水流演进过程的模型众多,大致可以分为水文模型和水力学模型两大类。为提高模型求解效率并保证计算精度,同时鉴于本

模型当前没有考虑演算时段及时序问题,故笔者只需采用由水量平衡方程得出水流演进的水文学模型。当需要考虑演算的时段、时序问题时则可以使用诸如马斯京根法^[7]等方法进行水流演进计算。由水量平衡方程得出的水流演进公式如下:

$$A_i = A_{i-1} - q_{i-1} + R_{i-1} + W_{\text{区间}i} - W_{\text{损耗}i} + W_{\text{槽蓄}i} \tag{5}$$

式中: A_{i-1} 为上游需水单元 $i-1$ 的可用水量; q_{i-1} 为上游需水单元 $i-1$ 的取水量; R_{i-1} 为上游需水单元 $i-1$ 排向本单元的回水量,各单元用水之后的回水量参照配水量 q_i 并按设定的回水比例 r_i (决策者可通过综合指数法、特尔斐法、层次分析法等评价方法获得 r_i 值)进行计算,即 $R_{i-1} = r_{i-1} q_{i-1}$; $W_{\text{区间}i}$ 为单元 i 与单元 $i-1$ 之间的区间入流; $W_{\text{损耗}i}$ 为单元 i 与单元 $i-1$ 之间的水量损耗; $W_{\text{槽蓄}i}$ 为单元 i 与单元 $i-1$ 之间河道的槽蓄变量。 $W_{\text{损耗}i}$ 和 $W_{\text{槽蓄}i}$ 常常按照经验设定。

为着重说明考虑回水时的权重缺水率分水模型中权重与回水对分水方案的影响,暂不考虑河道损失、槽蓄变量以及区间来流引起的径流变化。即演进公式如下:

$$A_i = A_{i-1} - q_{i-1} + r_{i-1} q_{i-1} \tag{6}$$

实质上当 r_i 均为零时,该分水模型即变为不考虑回水的权重缺水率分水模型,但由于不考虑回水时可以直接使用式(3)作为约束条件进行判断且更为简便,故不需要进行河道的水流演进计算。

2 模型实现

为着重说明权重和回水对分水方案的影响,暂以考虑回水时的权重缺水率分水模型为例,介绍该分水模型的算法实现过程。

算法实现的基本思想是:通过一维搜索法对权重缺水率进行给定,由式(1)推算出各需水单元的取水量,进而利用径流演进公式推算出该权重缺水率下各需水单元的可用水量,然后通过可用水量与取水量之间的关系对分水方案可行性进行判断。若 $A_i < q_i$ 则表示该方案不可行;反之则可行。在方案可行的前提下使得权重缺水率最小化。

考虑回水时的权重缺水率分水模型计算流程如图1所示,实现的步骤如下:①使用一维搜索法给定权重缺水率(笔者采用黄金分割法),利用式(1)推算出各需水单元的取水量 q_i ,获得分水方案。②在已经获得的分水方案下利用式(6)推算出径流演进过程获得各需水单元的可用水量 A_i 。③若 $A_i < q_i$,即该单元可用水量小于取水量,则表示该方案不可行,

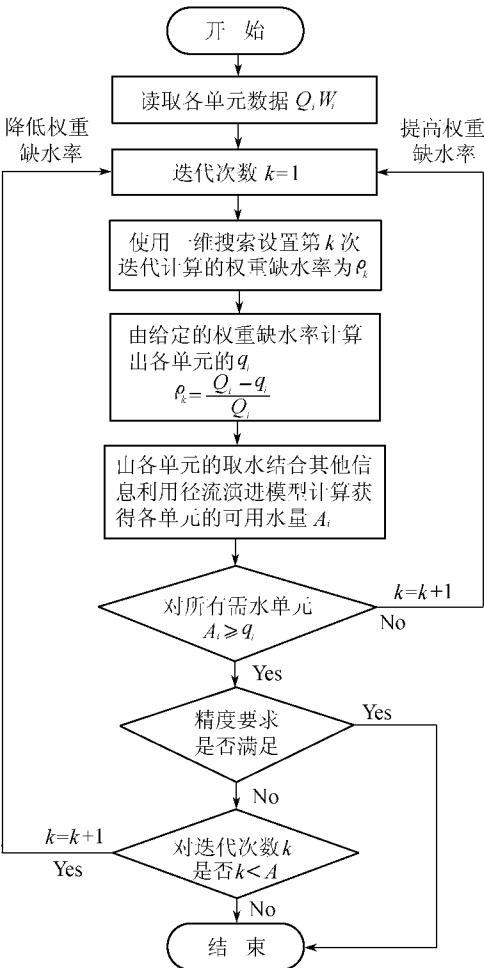


图 1 考虑回水时的权重缺水率分水模型计算流程

转至步骤①,使用一维搜索法提高权重缺水率,获得新的分水方案 若各单元均 $A_i \geq q_i$,则表示该方案可行,转至步骤①,使用一维搜索法降低权重缺水率,获得新的分水方案。④反复迭代规定代数或者满足一定精度要求后退出搜索,完成计算。

3 实例分析

位于珠江流域东江上游的龙川县、东源县、源城区均从东江取水,且位置关系由上游到下游依次为

龙川县、东源县、源城区,根据三者的重要性、需水的迫切性、用水效益以及缺水所导致的负面影响,暂将它们的需水权重分别定为 0.83,0.86 和 0.85,据预测 2010 年 8 月各自的需水量将分别为 $29.96 \text{ m}^3/\text{s}$, $23.04 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $14.24 \text{ m}^3/\text{s}$ 。现使用本文方法计算在考虑回水(暂将回水比例均定为 0.2)时的最优分水方案如表 1 所示,在不考虑回水即各单元回水比例为零时的最优分水方案如表 2 所示。

通过考虑回水与不考虑回水时的最优分水方案情况分析可知 ①由于利用了需水单元取水之后排向下游的回水,增加了需水单元的可用水量,提高了水资源的利用率。从各需水单元的情况看,考虑回水时的权重缺水率比不考虑回水时的权重缺水率都有了显著的降低。②对比表 1 中各需水单元的取水量以及缺水率可知,通过权重因子可以很好地对需水单元进行区分,有效避免了“大锅水”和“平均主义”现象。③对比表 1 和表 2 中各需水单元的权重缺水率可以看出,相同分水方案下不同需水单元的权重缺水率始终保持一致,充分体现了各需水单元的用水公平性。

4 小 结

针对水资源空间配置问题提出了一种新的分水模型,即权重缺水率分水模型。模型中引入需水权重因子来综合反映需水单元的重要性、需水的迫切性、用水效益以及缺水所导致的负面影响,同时,在分水过程中充分利用各上游需水单元排向下游的回水量,大幅度降低了各需水单元的缺水率,概念明晰、简单易行。然而,该分水模型仍然存在着一些需要在今后进一步研究的问题,如 ①在考虑回水的权重缺水率分水模型中由于其径流演进公式未考虑水流时滞的影响,所以该分水模型只能适用于忽略时滞影响的中长期调度。若需要将其利用到实时调度中,必须将时滞影响考虑到径流演进公式中。

表 1 考虑回水时的最优分水方案

需水单元	需水权重	回水比例	需水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	可供水量为 $52 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			可供水量为 $57 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
				取水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	缺水率/%	权重缺水率/%	取水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	缺水率/%	权重缺水率/%
龙川县	0.83	0.2	29.96	27.46	8.34	6.92	29.96	0	0
东源县	0.86	0.2	23.04	21.19	8.05	6.92	23.04	0	0
源城区	0.85	0.2	14.24	13.08	8.14	6.92	14.24	0	0

表 2 不考虑回水即各单元回水比例为零时的最优分水方案

需水单元	需水权重	回水比例	需水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	可供水量为 $52 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			可供水量为 $57 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
				取水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	缺水率/%	权重缺水率/%	取水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	缺水率/%	权重缺水率/%
龙川县	0.83	0	29.96	23.05	23.06	19.14	25.32	15.49	12.86
东源县	0.86	0	23.04	17.91	22.25	19.14	19.60	14.95	12.86
源城区	0.85	0	14.24	11.03	22.51	19.14	12.09	15.13	12.86

(下转第 31 页)

分析其原因,可能是因为该断面位于引水斜井中部,由于结构布置的特殊性,内水压力沿斜井深度增加而增加,而内水压力又以渗透体积力的形式作用于衬砌,则必然会沿衬砌的轴向产生拉应力,此拉应力大部分由轴向钢筋承担。同时又因为衬砌内外水压大致平衡,而轴向钢筋是在外侧与环向钢筋正交绑扎焊接,轴向钢筋拉应力产生的拉应变压迫环向钢筋,使环向钢筋产生了小压应力。

i. 从第 h 点还可以推断出,斜井部位存在轴向钢筋受拉现象。因为混凝土衬砌与围岩之间的初始缝隙大,在内水压力作用下,衬砌向围岩传力少,衬砌容易环向和轴向受拉开裂且裂缝较大,内水外渗沿初始缝隙传递渗压,使得衬砌内外水压大致平衡,环向钢筋受力变小。如果斜井部位混凝土浇筑密实性好,衬砌与围岩之间的初始缝隙小,衬砌与围岩联合作用效果好,衬砌不易开裂,衬砌环向变形受力就相对较大,则环向钢筋也会产生拉应力。

j. 表 3 中 3 个实测断面底部的衬砌与围岩间缝隙最小,而且大多呈闭合状态,这说明由于隧洞底部混凝土依靠自重最易浇筑密实,初始缝隙很小,在内水压力作用下,衬砌与围岩联合作用效果好,衬砌不易开裂或裂缝微小,从而衬砌变形受力相对大,衬砌与围岩变形协调性相对好,使衬砌与围岩趋于紧贴。

3 结 论

a. 钢筋混凝土衬砌在高内水压力作用下不能有效隔水,内水压力以渗透体积力的形式作用于衬砌和围岩。

b. 水工隧洞混凝土衬砌开裂后,当内水压力以渗透体积力的方式作用在混凝土衬砌与围岩中时,由于结构所受渗透压力与其渗透系数成反比,因此在围岩渗透性较小、衬砌全面开裂完全透水平压的条件下,围岩承受绝大部分渗透压力而变形大,衬砌与围岩之间变形不一致,存在相互分离脱开的趋势。

c. 在高内水压力(大于 100 m 水头)作用下,水

工压力隧洞若采用混凝土衬砌,从承载与防渗的角度出发,围岩是承载主体,衬砌的作用主要是保护围岩表面,避免水流长期冲刷使围岩表层应力状态发生恶化掉块,减少过流糙率、降低水头损失;为隧洞高压固结灌浆提供表面封闭层。因此,在高内水压力作用下,混凝土衬砌无法成为承载内水压力的结构,承载主体是围岩,要加强对围岩的固结灌浆处理,提高围岩承担内水压力的能力,衬砌只需构造配筋即可。

d. 水工隧洞充水运行,衬砌和围岩间初始缝隙是影响二者承载能力的关键。初始缝隙大,衬砌容易开裂,衬砌受力反而变小,内水压力主要由围岩承担,使之受力变形相对大;初始缝隙小,衬砌与围岩联合作用效果相对较好,衬砌不易开裂或裂缝微小,内水压力虽仍主要由围岩承担,但衬砌受力相对较大。为了尽可能发挥隧洞衬砌的承载防渗能力,特别是在低内水压力隧洞中,应减小、减少衬砌开裂缝隙,做好衬砌的浇筑施工和回填灌浆,尽可能减少衬砌和围岩间的初始缝隙。

e. 对于水平段隧洞,应该加强围岩顶部的固结灌浆和回填灌浆。对于斜井或竖井部位的隧洞段,由于内水压力随深度增加呈线性增加,使隧洞衬砌产生较大的纵向应力,纵向钢筋与环向钢筋直径应相互匹配,通过加强纵向钢筋来达到限制竖井或斜井环向裂缝宽度的目的,不能按常规平面应变概念考虑内水压力仅引起环向应力带来的纵向裂缝宽度问题。

参考文献:

- [1] 曹克明,刘世明.高内水压力作用下隧洞钢筋混凝土设计理论探讨[J].华东水电技术,1991,40(3):1-13.
- [2] 杨林德,丁文其.渗水高压引水隧洞衬砌的设计研究[J].岩土力学与工程学报,1997,16(2):112-117.
- [3] 李青麒,何其诚.压力隧洞衬砌计算方法[J].水力发电学报,1998,62(3):24-33.

(收稿日期 2008-05-08 编辑 方宇彤)

(上接第 18 页)

②权重缺水率法使用权重作为杠杆,很好地对需水单元进行了区分,体现了用水的公平性,但各需水单元权重的获得将是一个较为复杂的问题。

参考文献:

- [1] UNCED. Earth Summit '92 [M]. London: The Regene Press Corporation, 1992: 157-172.
- [2] 唐德善.缺水地区水资源优化分配模型研究[J].河海大学学报:自然科学版,1992,20(2):35-43.

- [3] 缪.深圳市供水水量分配方法的初步研究[J].人民珠江,2003(4):40-42.
- [4] 王道席,王煜.黄河下游水资源空间配置模型研究[J].人民黄河,2001,23(12):19-21.
- [5] 曹小武.城市供水水量分配的“水量分摊系数法”[J].中国农村水利水电,2006(3):64-64.
- [6] 王顺久,张欣莉,倪长键,等.水资源优化配置原理及方法[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [7] 许拯民.马斯京根法应用研讨[J].华北水利水电学院学报,2005,26(4):1-3.

(收稿日期 2008-11-06 编辑 高建群)