

西北内陆干旱区水资源可利用量计算方法研究

曲 炜¹ ,陆海曙¹ ,田 盛¹ ,卞冬珍²

(1. 河海大学商学院 ,江苏 南京 210098 ; 2. 青岛市崂山区民政局 ,山东 青岛 266000)

摘要 对西北内陆干旱区水资源形成和消散过程进行分析 ,结合生态、生产、生活用水的要求 ,将水资源复合系统划分为既相互独立又相互作用的社会经济系统和生态环境系统 .以多年平均水资源总量为限制条件 ,利用大系统、多目标优化方法对两大系统进行优化研究 ,建立协调模型 .通过引进向量 ,把多目标问题转化为单目标问题 .分别给出图解法和库恩-塔克条件法两种模型求解方法 ,计算出社会经济需水量(包含河道外生态环境耗水量)即水资源可利用量的大小 .

关键词 西北内陆干旱区 ;水资源 ;社会经济系统 ;生态环境系统

中图分类号 :TV211.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2005)02-0148-05

随着人口的增长、经济的发展 ,西北内陆干旱区(以下简称干旱区)水资源供需矛盾日益突出 ,社会经济用水挤占生态环境用水现象十分普遍 ,造成原本脆弱的干旱区生态系统遭受更大的破坏 .在干旱区 ,水资源如何同时满足社会经济需水和生态环境耗水的要求 ,如何在保护生态环境的前提下促进社会经济的发展 ,已成为当前迫切需要研究的课题之一 .

1 研究的总体思路

1.1 系统划分

根据干旱区水资源形成特点和消散过程(图 1)^[1,2] ,将人类赖以生存的水资源大系统划分为以人为主体的社会经济系统和以生态为主体的生态环境系统 ,见图 2 .根据系统划分 ,并结合生态、生活、生产(简称“ 三生 ”)用水的要求 ,把社会经济系统再划分为社会子系统和经济子系统 ,把生态环境系统划分为河道外生态环境子系统和河道内生态环境子系统 .在干旱区 ,由于河道外生态环境是指绿洲周围的人工防护林、城市绿地

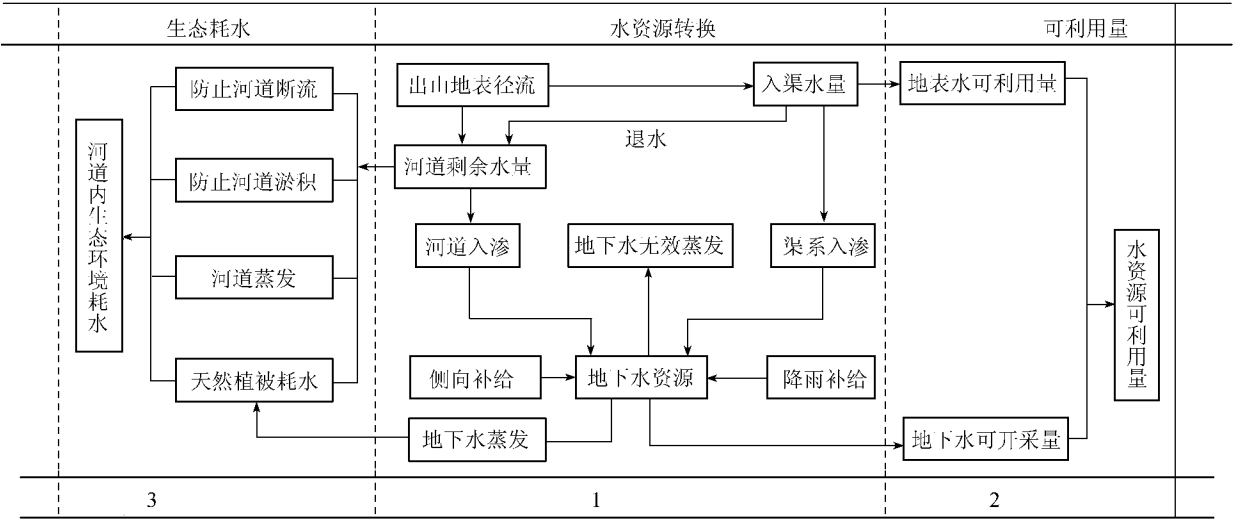


图 1 干旱区水资源形成和消散过程及可利用量研究

Fig. 1 Block diagram for the formation and dissipation of water resources of arid areas and their available volume

收稿日期 2004-11-17

基金项目 水利部科技创新资助项目(SCX2001-02)

作者简介 曲炜(1968—) ,女 ,山东莱州人 ,高级工程师 ,博士研究生 ,主要从事水资源规划与管理研究 .

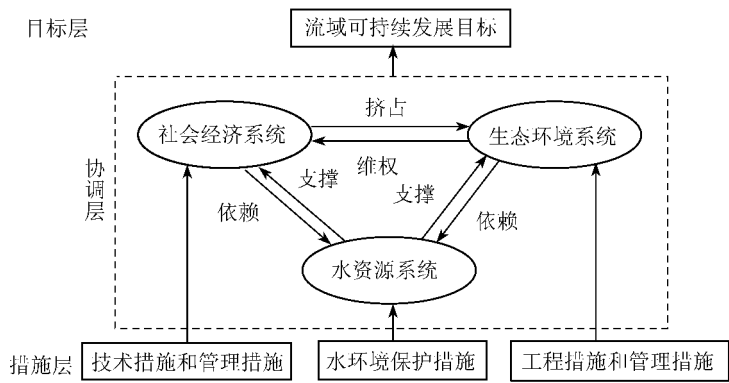


图 2 水资源复合系统结构
Fig.2 Structure of water resources system

环境耗水要求。

从图 2 可以看出,社会经济系统提供了维持人类生存和发展的物质保障,是水资源复合系统可持续发展的内部推动力,而在干旱区,生态环境系统是维持整个系统可持续发展的外部条件,两者相辅相成,缺一不可。社会经济系统的不断发展,使其对水资源系统的依赖性增强,但在多年平均水资源总量限制下,社会经济系统要发展势必要挤占生态环境系统的用水量,当挤占超出生态系统自我修复能力的时候,在人类的干预下,生态环境系统向社会经济系统维权,最终达到两大系统之间的用水平衡,并通过措施层的实施,实现流域的可持续发展目标。

1.2 总体思路

首先,在系统划分的前提下,根据大系统多目标动态规划方法,把多年平均水资源总量在社会经济系统和生态环境系统之间建立两系统协调多目标模型,即式(1)~(4)。然后,引进“序”的概念,建立社会经济和生态环境两系统的权向量集,通过引进向量将一个多目标优化问题转化为单目标优化问题,即式(5)~(8)。利用图解法或库恩-塔克条件法对上述模型求解,得出社会经济系统和生态环境系统需(耗)水量,即 W_{se} 和 W_{ee} ,也就是水资源可利用量和生态环境耗水量。

2 系统协调模型建立与求解

2.1 系统协调模型的建立

假设 $f_{se}(W_{se})$ 和 $f_{ee}(W_{ee})$ 分别表示社会经济系统中需水量与产值和生态环境系统中耗水量与生态保护面积之间的函数关系。由于 f_{se} 与 f_{ee} 单位不同,因此,用普通的优化方法存在度量不可公度的困难。本文采用多目标优化方法(即向量值优化方法)。

目标函数：
$$\max\{f_{se}(W_{se}), f_{ee}(W_{ee})\} \tag{1}$$

约束条件：
$$W_{se} + W_{ee} = W_{fw} \tag{2}$$

$$\underline{W_{se}} \leq W_{se} \leq \overline{W_{se}} \tag{3}$$

$$\underline{W_{ee}} \leq W_{ee} \leq \overline{W_{ee}} \tag{4}$$

式中： W_{se}, W_{ee} ——社会经济系统、生态环境系统需(耗)水量； $\underline{W_{se}}, \overline{W_{se}}$ ——社会经济系统需水量 W_{se} 的上、下限； $\underline{W_{ee}}, \overline{W_{ee}}$ ——生态环境系统耗水量 W_{ee} 的上、下限； W_{fw} ——多年平均水资源总量。

若 $x < y \Leftrightarrow x < y$ 且任意的 $1 \leq i_0 \leq n$, 使得 $x_{i_0} < y_{i_0}$, $x^* \in Z$, 如果对一切 $x \in Z$, 有 $x \leq x^*$, 则称 x^* 为 Z 的绝对最优点。绝对最优点是按每个分量都是最大界定的,是很理想的,但一般不存在^[8]。

在具有两个指标的问题中,人们总希望对那些相对重要的指标给予较大的权系数,基于这种现实,构造

等需要通过灌溉来解决用水问题的人工生态环境,与天然生态环境系统非灌溉性不同^[3~7],因此,将河道外生态环境系统耗水量划归到水资源可利用量的范畴,将河道内生态环境系统耗水量划归为生态环境耗水量的范畴,见图 3。

由图 1 可见,水资源自出山口形成地表径流后,图中 2 表示的水资源可利用量部分被人类通过各种工程措施引入渠道,利用于社会经济系统(包括河道外生态环境耗水),图中 3 表示的生态耗水部分,即河道剩余水量经河道输送到尾间湖泊,维持河道内生态

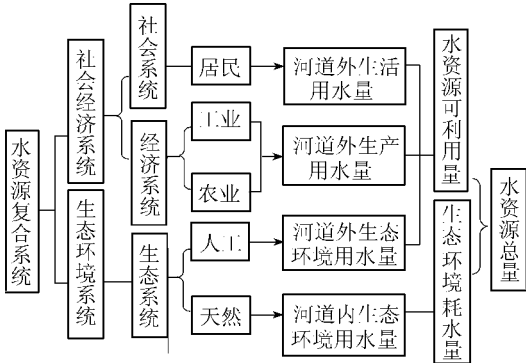


图 3 两系统研究对象划分
Fig.3 Division of objectives studied in two systems

如下的评价函数：

$\lambda^+ = \{(\lambda_1, \lambda_2)^T / \lambda_1, \lambda_2 \geq 0, \lambda_1 + \lambda_2 = 1\}$ $\lambda^{++} = \{(\lambda_1, \lambda_2)^T / \lambda_1, \lambda_2 > 0, \lambda_1 + \lambda_2 = 1\}$

为权向量集.

令
$$\phi(z) = \sum_{i=1}^2 \lambda_i z_i = \lambda^T z \quad \lambda \in \lambda^+ \text{ 或 } \lambda^{++}$$

再求解 $\max_{x \in D^2} \phi(f(W_{se}, W_{ee})) = \max_{x \in D^2} \lambda^T f(W_{se}, W_{ee})$ ($\lambda^T f(W_{se}, W_{ee})$ 是向量之积 $ab = \sum_{i=1}^n a_i b_i$) 将其最优解 (W_{se}^*, W_{ee}^*) 作为在多目标问题下的“最优解”,即满意解.因此,上面多目标优化模型可以转化为单目标非线性优化模型来求解:

目标函数
$$\max \{ \lambda_{se} f_{se}(W_{se}) + \lambda_{ee} f_{ee}(W_{ee}) \} \tag{5}$$

约束条件
$$W_{se} + W_{ee} = W_{fw} \tag{6}$$

$$\underline{W}_{se} \leq W_{se} \leq \overline{W}_{se} \tag{7}$$

$$\underline{W}_{ee} \leq W_{ee} \leq \overline{W}_{ee} \tag{8}$$

式中 λ_{se} ——社会经济系统权重系数; λ_{ee} ——生态环境系统权重系数.

总之,建立模型时通过引进“序”的概念,将一个多目标优化问题即式(1)~(4)转化为单目标优化问题,即式(5)~(8).假设目标函数 $\lambda_{se} f_{se}(W_{se}) + \lambda_{ee} f_{ee}(W_{ee})$ 在可行紧集 $\{(W_{se}, W_{ee}) | W_{se}, W_{ee} \text{ 满足约束条件}\}$ 上是连续的,得出其解的最大值.

2.2 两系统协调模型的求解

像系统协调模型这样的非线性方程的解法有许多种,本文重点用图解法、库恩-塔克(Kuhn-Tueken)条件法对系统协调模型进行求解.

2.2.1 图解法

在求解最优解之前,首先要通过国民经济需水量和生态环境耗水量与国民经济效益和生态保护面积的变化规律得到 $\lambda_{se}, \lambda_{ee}, f_{se}, f_{ee}$ 的具体表达式,同时要知道 $\overline{W}_{se}, \underline{W}_{se}, \overline{W}_{ee}, \underline{W}_{ee}$ 的具体数值.在解决现实问题时, $\overline{W}_{se}, \underline{W}_{se}$ 根据不同计算水平年社会经济系统发展规模确定, $\overline{W}_{ee}, \underline{W}_{ee}$ 根据干旱区现状保护原则及适当扩大保护面积的要求确定.在此基础上,可以利用坐标找出可行域的范围,如图4中ABCDE所包围的面积,其解的取值在A点到B点之间.

再令 $\lambda_{se} f_{se}(W_{se}) + \lambda_{ee} f_{ee}(W_{ee}) = c$, 随着 c 值的变化,可以在平面上画出一系列的等值线族,如图4中的 $c_1, c_2, \dots, c_n$, 这里 $c_1 < c_2 < \dots < c_m < \dots < c_n$. 对于具体问题而言, $\lambda_{se} f_{se}(W_{se}) + \lambda_{ee} f_{ee}(W_{ee})$ 是有具体形状的,姑且假定其图像如图4所示.由图4不难看出,等值线族 $\lambda_{se} f_{se}(W_{se}) + \lambda_{ee} f_{ee}(W_{ee}) = c$ 在可行域最上面的切点处取得最大值,即图中F点.

2.2.2 库恩-塔克条件法

根据库恩-塔克条件,将式(5)~(8)转化为下述标准形式:

目标函数
$$\min \{ -\lambda_{se} f_{se}(W_{se}) - \lambda_{ee} f_{ee}(W_{ee}) \} \tag{9}$$

约束条件
$$- \overline{W}_{se} + W_{se} \leq 0 \tag{10}$$

$$- W_{se} + \underline{W}_{se} \leq 0 \tag{11}$$

$$- \overline{W}_{ee} + W_{ee} \leq 0 \tag{12}$$

$$- W_{ee} + \underline{W}_{ee} \leq 0 \tag{13}$$

$$W_{se} + W_{ee} - W_{fw} = 0 \tag{14}$$

设上述问题的拉格朗日函数为

$$L(W_{se}, W_{ee}, \lambda, \mu) = -\lambda_{se} f_{se}(W_{se}) - \lambda_{ee} f_{ee}(W_{ee}) + \lambda_3 (W_{se} - \overline{W}_{se}) + \lambda_4 (\underline{W}_{se} - W_{se}) +$$

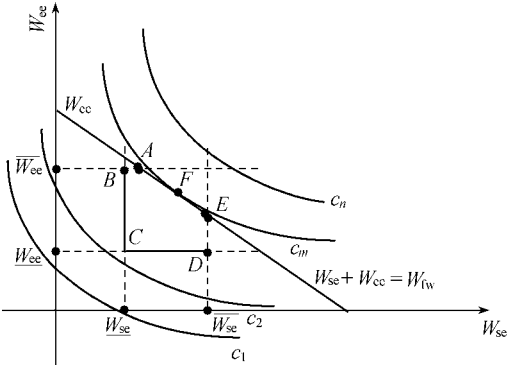


图4 图解法求解系统协调模型

Fig.4 Graphic method for solution of system coordination model

$$\lambda_5(W_{ee} - \overline{W_{ee}}) + \lambda_6(\underline{W_{ee}} - W_{ee}) + \mu(W_{se} + W_{ee} - W_{fw}) \tag{15}$$

式中 λ_{se} 、 λ_{ee} 和 W_{fw} 为已知量。

对式 (15) 求偏导, 可得

$$\frac{\partial L}{\partial W_{se}} = \frac{-\lambda_{se}\partial f_{se}(W_{se})}{\partial W_{se}} + \lambda_3 - \lambda_4 + \mu \qquad \frac{\partial L}{\partial W_{ee}} = \frac{-\lambda_{ee}\partial f_{ee}(W_{ee})}{\partial W_{ee}} + \lambda_5 - \lambda_6 + \mu \tag{16}$$

故上述问题的库恩-塔克条件为

$$\frac{-\lambda_{se}\partial f_{se}(W_{se})}{\partial W_{se}} + \lambda_3 - \lambda_4 + \mu = 0 \qquad \frac{-\lambda_{ee}\partial f_{ee}(W_{ee})}{\partial W_{ee}} + \lambda_5 - \lambda_6 + \mu = 0 \tag{17}$$

$$\lambda_3(W_{se} - \overline{W_{se}}) = 0 \tag{18}$$

$$\lambda_4(\underline{W_{se}} - W_{se}) = 0 \tag{19}$$

$$\lambda_5(W_{ee} - \overline{W_{ee}}) = 0 \tag{20}$$

$$\lambda_6(\underline{W_{ee}} - W_{ee}) = 0 \tag{21}$$

$$\lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6 \geq 0$$

一般情况下已知 $f_{se}(W_{se})$ 、 $f_{ee}(W_{ee})$ 的具体表达式, 可以求出 $\frac{\partial f_{se}(W_{se})}{\partial W_{se}}$ 和 $\frac{\partial f_{ee}(W_{ee})}{\partial W_{ee}}$ 。

作为库恩-塔克点, 除满足以上条件外, 还要求满足可行性条件, 即式 (6)~(8) 的要求。

库恩-塔克点满足上述所有限制条件一般是不容易的, 为易于求解, 从“互补松紧”入手进行讨论。

a. 当 $\lambda_3 = 0$, $\underline{W_{se}} - W_{se} \neq 0$, $W_{ee} - \overline{W_{ee}} \neq 0$, $\underline{W_{ee}} - W_{ee} \neq 0$ 根据式 (19)~(21), $\lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = 0$, 则由式 (17) 可得

$$\frac{-\lambda_{se}\partial f_{se}(W_{se})}{\partial W_{se}} + \mu = 0 \qquad \frac{-\lambda_{ee}\partial f_{ee}(W_{ee})}{\partial W_{ee}} + \mu = 0 \tag{22}$$

考虑其中的一个可行性条件

$$W_{se} + W_{ee} - W_{fw} = 0 \tag{23}$$

联立求解式 (22)、式 (23), 可求得 W_{se} 、 W_{ee} 、 μ , 再验证求得的 W_{se} 、 W_{ee} 是否满足 $\underline{W_{se}} \leq W_{se} \leq \overline{W_{se}}$ 和 $\underline{W_{ee}} \leq W_{ee} \leq \overline{W_{ee}}$, 如不满足, 则重设; 如满足, 则为解, 一般情况下不满足。

b. 当 $\lambda_3 \neq 0$ 时, 由互补松紧条件知, 必有 $W_{se} = \overline{W_{se}}$, 再由另一个可行性条件中的方程 $W_{se} + W_{ee} - W_{fw} = 0$ 可知, $W_{ee} = W_{fw} - \overline{W_{se}}$, 则 $\lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = 0$, 将其代入式 (17) 可得

$$\frac{-\lambda_{se}\partial f_{se}(W_{se})}{\partial W_{se}} + \lambda_3 + \mu = 0 \qquad \frac{-\lambda_{ee}\partial f_{ee}(W_{ee})}{\partial W_{ee}} + \mu = 0 \tag{24}$$

由式 (24) 可求出 λ_3 和 μ 值的大小。检验 $W^* = (\overline{W_{se}}, W - \overline{W_{se}})$, λ_3^* 和 μ^* 的取值是否满足库恩-塔克条件和可行性条件, 如满足则可知, $W^* = (\overline{W_{se}}, W - \overline{W_{se}})$ 为其库恩-塔克点, 但该点是否是全局最优点?

由常理可知, $\lambda_{se}f_{se}(W_{se})$ 和 $\lambda_{ee}f_{ee}(W_{ee})$ 为凹函数, 则 $-\lambda_{se}f_{se}(W_{se})$ 和 $-\lambda_{ee}f_{ee}(W_{ee})$ 为凸函数, 且 $W_{se} + W_{ee} = W_{fw}$ 为线性函数, 故可知 $W^* = (\overline{W_{se}}, W - \overline{W_{se}})$ 为整体最优解。

3 结论与展望

3.1 结论

水资源可利用量研究是水资源可持续利用的前提。本文综合各学科的研究方法, 从社会经济系统和生态环境系统持续发展目标出发, 运用大系统多目标动态规划理论, 在两系统中分配流域多年平均水资源总量, 实现资源效率的最大化。水资源可利用量的研究从定量的角度明确了社会经济系统与生态环境系统各自可能获得的最大水量。社会经济系统要发展, 则在该水量的约束下, 通过挖掘自身潜力, 提高节水意识, 采取调整产业结构、提高水资源利用率等措施, 实现系统持续发展。

3.2 展望

a. 水资源可利用量研究应在实践中不断完善。多目标分析方法和面向问题的决策支持系统不仅要在模式上不断创新, 更要在实践中不断改进。

b. 应加强生态环境耗水量定量研究。本文在研究中采用了整体研究的方法, 利用多目标优化法在社会

经济系统和生态环境系统之间分配多年平均水资源总量,规避了最小生态环境需水量的问题.但协调求得的生态环境耗水量是以现状生态保护面积为计算基础的,现状生态保护面积是否合理,本文没有深入研究.对该问题,应从时间角度展开,以历史资料和国、内外现有研究成果为基础,以卫星遥感和信息技术为手段,找寻最小生态环境耗水量.

c. 水资源系统研究应统一考虑水量与水质.本文在水资源可利用量研究时,重点考虑水量分配问题,对水质几乎没有考虑.事实上,水质作为水资源的一项重要功能,与水量的供水功能相互依存、不可或缺.

参考文献：

[1] 耿雷华,黄永基,酈建强,等.西北内陆河流域水资源特点初析[J].水科学进展,2002(7):496—501.
[2] 陈敏建,王浩.内陆河平原水分驱动的生态演变机理[A].见:王世江主编.新疆水资源开发利用研究[C].乌鲁木齐:新疆人民出版社,2002.45—52.
[3] 杨志峰,王西琴,刘昌明,等.生态环境需水量理论、方法与实践[M].北京:科学出版社,2002.25—58.
[4] 王西琴,刘昌明,杨志峰.河道最小环境需水量确定方法及其应用研究(Ⅰ)——理论[J].环境科学学报,2001,21(5):543—547.
[5] 王西琴,刘昌明,杨志峰.河道最小环境需水量确定方法及其应用研究(Ⅱ)——应用[J].环境科学学报,2001,21(5):548—552.
[6] 丰华丽,王超,李剑超.河流生态与环境用水研究进展[J].河海大学学报(自然科学版),2002,30(3):19—23.
[7] 夏继红,严忠民.生态河岸带研究进展与发展趋势[J].河海大学学报(自然科学版),2004,32(3):252—255.
[8] 施光燕,董加礼.最优化方法[M].北京:高等教育出版社,1999.1—8.

Method for calculation of available volume of water resources
for northwest inland arid areas

QU Wei¹, LU Hai-shu¹, TIAN Sheng¹, BIAN Dong-zhen²

(1. Business School, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. Civil Administration Bureau of Laoshan District of Qingdao City, Qingdao 266000, China)

Abstract :An analysis was made on the process of water resources formation and dissipation in northwest inland arid areas. From the angle of ecological, producing, and domestic water consumption, the composite water resources system was divided into two separated, but interrelated systems, i. e. the social economic system and ecological environment system. With the perennial average gross volume of water resources taken as the restrictive condition, the large system and multi-objective optimal method was adopted for optimization of the two systems, and a coordination model was developed. By introduction of the vector analysis, the multi-objective problem was converted to the problem of single objective. By solving the model with the graphic method and the Kuhn-Tueken terms law, the social economic water demand, i. e. the available volume of water resources, was derived.

Key words :northwest inland arid area; water resources; social economic system; ecological environment system