

网络出版时间:2014-07-09 11:51

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.08.023

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.08.023.html>

基于蚁群算法的水资源优化配置博弈分析

刘玘玘, 汪 妮, 解建仓, 朱记伟, 姜仁贵

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

[摘 要] **【目的】**运用博弈理论分析流域内水资源开发利用过程中各用水地区的行为和收益问题。**【方法】**提出市场经济与宏观调控相结合的水资源配置模式,建立各用水地区追求自身收益最优的同时,实现全流域水资源合理分配的博弈模型,为实现水资源的协调发展提供支持。将该模型应用于黑河流域,运用蚁群算法实现模型的最优求解,并与线性规划法所得结果进行了比较。**【结果】**利用建立的水资源优化模型,通过水权和水资源费的调节,有效约束了黑河流域内各县(区、旗)的取水量,有利于解决水资源分配过程中的用水冲突,在保证黑河流域公共水权为 1.2 亿 m^3 的基础上,流域总收益达到 0.936 亿元。**【结论】**运用流域水资源优化配置博弈模型进行水资源优化配置,可以有效保证流域的公共水权,激发各地区节水和开发新水源的动力。

[关键词] 水资源;优化配置;博弈分析;蚁群算法;水市场;水权

[中图分类号] TV213.4

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2014)08-0205-07

Game analysis on optimization allocation of water resources based on Ant Colony Algorithm

LIU Hong-hong, WANG Ni, XIE Jian-cang, ZHU Ji-wei, JIANG Ren-gui

(State Key Lab Cultivation Base of Northwest Arid Ecology and Hydraulic Engineering,
Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: **【Objective】** This study used the game theory to analyze the behavior and benefits of different water use areas during the exploitation of water resources. **【Method】** A water resources optimization allocation pattern combined with macro-control and market economy was proposed, and a game theory model allowing each water user to achieve the optimal benefits was built. The model was applied to Heihe River and Ant Colony Algorithm was used for optimal solution. **【Result】** Through the regulation of water rights and water resources, water consumption in each county was effectively restrained. The conflict of interest in water resources allocation was resolved. The total benefits in the basin reached 0.936×10^8 yuan in addition to $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ public water usage in Heihe River Basin. **【Conclusion】** Market economy and macro-control water resources allocation model was successful to solve the conflict of interest in water resources allocation guarantee the public water rights, and stimulate water saving and development of new water sources.

Key words: water resources; optimal allocation; game analysis; Ant Colony Algorithm; water market; water rights

[收稿日期] 2013-12-11

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51209170, 51109175);陕西省科学技术研究发展计划项目(2012JQ5014);西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地自主研究基金项目(2013ZZKT-5)

[作者简介] 刘玘玘(1985—),女,内蒙古呼伦贝尔人,在读博士,主要从事水文与水资源研究。E-mail:624413077@qq.com

[通信作者] 解建仓(1963—)男,陕西眉县人,教授,博士,博士生导师,主要从事水文与水资源研究。E-mail:847828497@qq.com

水资源是国民经济发展不可缺少的重要自然资源。随着我国经济的快速发展和人口的不断增长,许多地方对水资源的开发利用已经超过其所能负荷的程度,对水资源进行合理分配是实现水资源可持续开发和利用的基础。随着水资源相对稀缺程度的加剧,水资源配置过程中各参与者在个体理性的驱动下,为追求自身利益最大化,都想分得更多的水量,致使用水冲突不断升级。与只注重社会整体利益的传统水资源配置相比,利用博弈论研究水资源配置问题,充分考虑所有用水主体的行为影响,承认在水资源配置过程中各用水主体存在不同的利益诉求,可以在所有用水主体追求最大化收益的同时,实现流域水资源的合理配置,使全流域社会总收益达到最优。在水资源配置领域,中国水科院课题组通过构建二元模型,实现了基于流域社会和经济发

水循环与水质调控等多重调控因素下水资源优化配置的量化研究^[1];孔珂等^[2]应用完全信息非合作动态博弈的方法,对初始水权分配和水市场的宏观调控问题进行了研究;李力等^[3]以区域经济发展与环境保护相协调为目标,建立了水资源多目标优化配置模型,并利用大系统分解协调方法进行了水资源优化配置研究。

本文将在前人研究的基础上,充分考虑水资源配置过程中多个参与方的利益冲突及缺乏全局利益分配机制等问题,以流域内社会总收益最优为目标,建立市场经济与宏观调控相结合的双重配置博弈模型,运用蚁群算法推求模型最优解,并将该模型在黑河流域水资源配置中进行实例应用,以期为水资源优化配置理论体系的完善提供支持。

1 博弈论与博弈分析

1.1 博弈理论

博弈论又称对策论,是研究不同决策主体在相互依存的情况下发生直接相互作用时的决策以及谋求这种决策均衡问题的方法论^[4]。其研究的典型问题是若干个利益冲突者在同一环境中进行决策以求自己的利益最大。博弈的构成要素包括:参与人、策略集合和支付函数,其一般表达式为: $\Gamma=(I,S,P)$;其中,参与人集合 $I=\{1,2,\cdots,n\}$,每个参与人的策略集合 $S=(S_1,S_2,\cdots,S_n)$, P 为参与人联合作用结果的支付集合。在博弈论中纳什均衡是最重要的一种均衡概念,当达到纳什均衡时,对每一个参与人及该参与人的每一个策略而言,都满足其最大化期望支付条件,参与人不存在任何动机去改变自身的策

略。

1.2 博弈论与水资源配置的关系

水资源配置离不开各级政府与不同用水主体的共同参与。在用水过程中,各用水主体的目标与政府的目标并非完全一致,不可避免地存在着个体理性与集体理性的冲突。因此,在水资源配置理论研究过程中,不能忽略个体理性,或加强政府干预使个体理性表面上服从集体理性,而是必须设计一种机制,以期在满足个体理性的前提下达到集体理性^[5]。与传统的利用经济学方法研究水资源配置相比,博弈论在解释个体理性与集体理性的冲突与合作方面更为有效。博弈论将参与者之间的相互作用作为研究合作与冲突问题的重点,强调个体效用函数不仅依赖于自身的选择,而且更依赖于他人的选择,为水资源配置过程中解决用水冲突提供了理论基础。

2 市场经济与宏观调控相结合的水资源配置博弈模型

2.1 市场经济宏观调控的博弈模型分析

伴随水危机的不断加剧,对我国目前的水资源配置体制进行改革已势在必行,刻不容缓。在市场经济日益繁荣的大背景下,对水权和水市场的研究已经逐步发展起来。市场配置模式虽提高了效率却忽视了公平,因此必须将宏观调控和市场机制二者结合起来对水资源进行分配,政府应通过分配初始水权和征收水资源费对水市场进行宏观调控。为此,本研究建立了市场经济与宏观调控相结合的水资源配置博弈模型,在此配置模型中,流域管理机构和流域内各用水主体构成博弈的参与人集合^[6]。水资源分配过程分为 2 个阶段:第 1 个阶段是流域管理机构分配初始水权和征收水资源费的过程;第 2 个阶段是流域内各用水者进行水权交易的过程。用水者以自身用水收益最大为目标,对直接取水量以及交易量等问题进行决策。管理机构在保证流域基本的和公共生态用水的基础上,确定合理的供水保证量,通过对水资源费和水权的调整实现对水资源分配的调控,促使各地区从非合作走向部分合作或完全合作,以实现全流域水资源的合理分配,使流域内社会总收益最大^[7]。

2.2 模型建立

假设流域供水管理机构能够分配的总水量为一定值 Q ,公共水权为 s ,该流域上有 n 个地区,分别用 S_i 表示($i=1,2\cdots n$),水资源费率为 t ,第 i 个地区分

得的初始水权为 r_i , 则 $Q = \sum_{i=1}^n r_i + s$ 。对于地区 S_i , 假设其实际耗水量为 d_i , 直接取水量为 q_i , 开发新水源可供水量为 q'_i , 节水量为 q''_i 。当 $d_i > q_i$ 时, 对 $(d_i - q_i)$ 这一部分, S_i 就要通过节水、开发新水源以及提高用水效率等方式来解决; 当 $q_i > r_i$ 时, S_i 多引的水量 $(q_i - r_i)$ 需从水权交易市场上购买; 当 $q_i < r_i$ 时, S_i 可以将手中多余的水权 $(r_i - q_i)$ 拿到市场上出售以获取收益。对于实际取水量小于初始分配水权的地区, 其实际取水量的多少取决于自己的节水成本以及市场上的水权交易价格, 各地区通过博弈选择, 可以达到一个均衡点, 使得各自的用水收益达到最大^[8]。水权的交易价格均与其在水市场上交易量的大小有关。利用博弈的库诺特模型, 水市场的价格函数可以表示为:

$$P(x) = a - bx, (a, b > 0)。(1)$$

式中: x 为市场供需的差值, $x = \sum_{i=1}^n (r_i - q_i)$; $P(x)$ 为水市场价格; a, b 为常数。

设供水成本函数为 $c_i(q_i)$, 新水源开发成本函数为 $c'_i(q'_i)$, 节水成本函数为 $c''_i(q''_i)$, 用水收益函数为 $B_i(q_i + q'_i + q''_i)$, 则具体收益函数可表示为:

$$F_i = B_i(q_i + q'_i + q''_i) - c_i(q_i) - c'_i(q'_i) - c''_i(q''_i) - tq_i - (q_i - r_i)[a - b \sum_{i=1}^n (r_i - q_i)]。(2)$$

式中: F_i 为收益。

设 $d(s)$ 为公共收益函数, 管理机构收益即为征收的水资源费和公益收益之和, 可表示为:

$$F_0 = \sum_{i=1}^n q_i t + d(s)。(3)$$

式中: F_0 为管理机构收益。

社会总收益可表示为: $F_T = F_0 + \sum_{i=1}^n F_i$, 将式(2)和式(3)代入得:

$$F_T = \sum_{i=1}^n q_i t + d(s) + \sum_{i=1}^n [B_i(q_i + q'_i + q''_i) - c_i(q_i) - c'_i(q'_i) - c''_i(q''_i)] - \sum_{i=1}^n \{a(q_i - r_i) - b(q_i - r_i) \sum_{i=1}^n [(r_i - q_i)]\}。(4)$$

管理机构的目标是使社会总收益最大, 即目标函数为:

$$Z = \max F_T, s, t = \begin{cases} r_i \geq m_i, m_i > 0; \\ s \geq v, v > 0; \\ t > 0; \\ Q = \sum_{i=1}^n r_i + s. \end{cases} (5)$$

式中: m_i 为地区 S_i 的最低供水保证, v 是流域最小

生态需水量。

在上述模型中, 流域管理机构首先根据各地区实际情况及自身可供水量给各区分配合理的初始水权, 同时确定水资源费率, 然后各地区在此基础上进行利于自身的水市场交易。在分配初始水权和征收水资源费时, 流域管理机构需要考虑其调控对各用水地区以后决策的影响, 即能否激励地区间的合作^[8-9]。

首先从第 2 阶段用水地区的选择开始, 对于 S_i , 在确定初始水权和水资源费率的情况下, 作为理性个体, 必然会做出一个使自身收益最大化的取水决策。根据纳什均衡, 最优取水条件为对式(2)所列的收益函数中的直接取水量 q_i 求偏导, 即 $\frac{\partial F_i}{\partial q_i} = 0$, 由此可得:

$$B'_i(q_i + q'_i + q''_i) - c'_i[(q'_i)] - [c''_i(q''_i)]'' - t - a + b[(r_i - q_i) + \sum_{i=1}^n (r_i - q_i)] = 0。(6)$$

解出每个用水地区的决策向量, 即流域供水管理机构能够分配的总水量为 $Q^* = (q_1^*(R, t), q_2^*(R, t), \dots, q_n^*(R, t))^T$ 。其中, q_i^* 为计算得出的最优直接取水量; t 为水资源费率; R 为各地区获得的初始水权, $R = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ 。

然后回到流域管理机构分配初始水权的第 1 阶段, 将决策向量代入式(5), 得:

$$Z = d(s) + \sum_{i=1}^n [B_i(q_i^* + q_i^{*'} + q_i^{*''}) - c_i(q_i^*) - c'_i(q_i^{*'}) - c''_i(q_i^{*''})] - \sum_{i=1}^n \{a(q_i^* - r_i) - b(q_i^* - r_i) \sum_{i=1}^n [(r_i - q_i^*)]\}。$$

同时满足 $\frac{\partial Z}{\partial r_i} = 0, \frac{\partial Z}{\partial t} = 0, \sum_{i=1}^n r_i + s = Q$ 时, 可得 $(r_1^*, r_2^*, \dots, r_n^*), (q_1^*, q_2^*, \dots, q_n^*), (q_1^{*'}, q_2^{*'}, \dots, q_n^{*'}), (q_1^{*''}, q_2^{*''}, \dots, q_n^{*''}), t^*, s^*$ 。其中, $q_i^*, q_i^{*'}, q_i^{*''}$ 和 r_i^* 分别为第 i 个地区的最优直接取水量、开发新水源可供水量、节水量和初始水权; t^* 和 s^* 分别为最优水资源费率和公共水权。

将上述结果代入目标函数式(5)中即可求出全流域水资源利用社会总收益的最大值。

3 基于改进蚁群算法的水资源优化配置

蚁群算法是一种概率型的最优路径搜索算法^[10], 目前已被广泛应用于各种组合优化问题中。然而, 蚁群算法也存在一些不足, 如: ①计算时间较长。相比于其他算法, 蚁群算法的复杂程度反映了

其需要较长的计算时间,在解决大规模问题时计算效率较低。②收敛速度慢、易陷入局部最优。搜索进行到一定程度后,所有个体所发现的解完全相同,无法进一步搜索解空间,不利于发现更优解,易出现停滞现象,影响收敛速度。

3.1 蚁群算法的改进^[11-12]

为克服蚁群算法收敛速度慢且容易陷入局部极值等缺陷,以提高计算效率和优化质量,本研究提出一种对蚁群算法的信息素挥发系数、信息量及转移概率等采取自适应调节的策略,以期在提高收敛速度的同时避免陷入局部极值。

(1)信息素的局部更新。设蚂蚁数量为 m , τ_{ij} 表示节点 i 到节点 j 的信息素浓度,初始时刻 $\tau_{ij}(0) = R$ (R 为常数)。由于从节点 i 到节点 j 的路径与最小路径的关系与信息素的更新有关,因此每次迭代的最小路径有可能不同,最小路径越短,从节点 i 到节点 j 的信息素减少量越大,由下式可得:

$$\tau_{ij}(t) = \tau_{ij}(t) \times (1 - d_{ij}/ml_{\min})。 \quad (7)$$

式中: d_{ij} 为 l_{ij} 的欧氏距离, $l_{\min}$ 为节点 i 到节点 j 的最小路径。

(2)信息素的全局更新。进行全局信息素更新时,对当前循环为止所找到的最优路径进行信息素全局更新,使蚂蚁的搜索能很快集中到最优路径附近,以提高算法搜索效率,由下式表示:

$$\tau_{ij}(t) = \begin{cases} \tau_{ij}(t) \times (1 + l_{\min}^{\text{new}}/l_{\min}), & l_{\min}^{\text{new}} < l_{\min}; \\ \tau_{ij}(t), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $l_{\min}$ 为节点 i 到节点 j 的最小路径, $l_{\min}^{\text{new}}$ 是本次迭代的最小路径。

(3)状态转移概率。传统的蚁群算法,每次迭代均需要重新计算状态转移概率,浪费了大量时间。为提高算法效率,对信息素进行全局和局部更新后,可将信息素直接作为状态转移概率函数,由下式计算:

$$p_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}(t)}{\sum_{i=1}^m \tau_{ij}(t)}, & j \in \text{allowed}_i; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

$$j = \begin{cases} \arg \max_{a \in \text{allowed}_i} \{\tau_{ij}(t)\}, & q \leq q_0; \\ S, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (10)$$

式中: q 是均匀分布在区间 $[0, 1]$ 上的随机数, q_0 ($q_0 \in [0, 1]$) 是一个阈值参数, S 为蚂蚁 k ($k = 1, 2, \dots, m$) 依从随机比例的状态转移规则。

(4)自适应调整信息素挥发系数。为提高蚁群算法的全局搜索能力和搜索速度,每次循环结束后求出最优解并将其保留。同时,自适应地调整信息

素挥发系数 ρ , ρ 的初始值 $\rho(t_0) = 1$, 当求得的最优值在 N 次循环内无明显改进时,按下式自适应调整 ρ 。

$$\rho(t) = \begin{cases} 0.78\rho(t-1), & \text{若 } 0.78\rho(t-1) \geq \rho_{\min}; \\ \rho_{\min}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\rho_{\min}$ 是 ρ 的最小值,其作用是避免 ρ 过小而影响收敛速度。

3.2 基于改进蚁群算法的模型求解

为实现流域内水资源的优化配置,需将流域内各用水地区和流域管理机构离散为若干点,在动态因素的影响下,要实现全流域水资源利用收益最大化,对于各用水地区而言,可以不断地改变水资源优化配置策略,进而形成自身收益最大化策略,通过不断地搜索,最终实现流域内总收益和各用水地区收益在纳什均衡条件下的最优化。将各时段各用水地区的水量分配方案组合作为蚂蚁走过的路径,这样蚂蚁走过的每条路径就是水资源优化配置问题的一个解。具体求解步骤如下^[13]:

(1)设定最大循环次数,取带罚函数的取水量为决策变量,其维数为用水地区数目与时段数目的乘积,随机初始化各蚂蚁的位置。第 k 只蚂蚁的状态向量 $X_k = X_{k1}, X_{k2}, \dots, X_{kT}$ 。设蚂蚁数量为 m , 则初始蚁群为 $X = X_1, X_2, \dots, X_m$ 的取值范围在 0 到全流域总可利用水量之间。

(2)结合水资源优化配置的目标函数,将模型的目标函数式(5)作为蚁群的适应度函数。对蚂蚁进行约束条件计算,若所有约束条件同时满足,则分别计算每只蚂蚁的适应度函数值,否则适应度为 0。适应度函数值即为蚂蚁 k 相应的个体极值,寻找 m 只蚂蚁中极值最大的一个作为全局极值。

(3)确定蚁群的个体极值和全局极值。按步骤(2)计算每只蚂蚁的适应度函数值,若优于蚂蚁当前的适应度函数值,则用新蚂蚁替代原蚂蚁。如果最好的个体极值优于当前的全局极值,则对全局极值进行更新。

(4)应用改进的蚁群算法进行进化,将各时段各用水地区的取水量组合作为蚂蚁走过的路径,直至满足迭代终止条件,则停止并记录每只蚂蚁生成的取水量,否则返回步骤(2)重新计算。

(5)输出最优解,即最优水资源优化配置方案。

4 实例应用

4.1 黑河流域概况

以水事矛盾突出的黑河流域为研究对象,应用

本研究提出的水资源优化配置博弈模型进行实例分析。黑河是我国西北地区第二大内陆河,水资源总量不足,随着流域内人口的增长和经济的发展,导致社会经济活动集中的中下游地区用水矛盾十分突出。由于中游地区大规模的开发活动,已造成下游地区的生态退化,威胁其生态用水,下游的额济纳旗已属于极度缺水地区。为了缓解黑河流域水资源的供需矛盾,遏止生态系统的进一步恶化,必须加强对水资源的规划与管理,搞好水资源优化配置,实现流域水资源的可持续利用。

黑河流域水资源量包括地表水资源量和地下水资源量,多年平均水资源总量为 28.30 亿 m³,其中

地表水资源量为 25.17 亿 m³,地下水资源量为 3.13 亿 m³。扣除当地河道内生态环境需水量和蒸发消耗量 12.59 亿 m³,黑河流域的可利用水资源量仅为 15.71 亿 m³。目前,黑河流域各县(区、旗)的主要用水方向为生活用水、生产用水及生态环境用水等,总耗水量为 17.73 亿 m³,而多年平均水资源可利用量只有 15.71 亿 m³,缺水量达 2.02 亿 m³。可见,黑河流域内各部门的用水已侵占了生态环境用水,需要对水资源进行合理配置,以逐步改善下游地区的生态环境。黑河流域各县(区、旗)水资源量及用水量见表 1。

表 1 黑河流域各县(区、旗)的水资源与耗水量

Table 1 Water resources and water consumption in Heihe river basin		亿 m ³						
地区 Area	县(区、旗) Country	地表水 Surface water	地下水 Ground water	水资源总量 Total water resources	生活耗水量 Domestic water consumption	生产耗水量 Production water consumption	生态耗水量 Ecological water consumption	总耗水量 Total water consumption
黑河上游 Upper reaches of Heihe	祁连 Qilian	9.792	0.013	9.805	0.049	0.088	0.000 3	0.137
	肃南 Sunan	3.538	0.025	3.563	0.040	0.245	0.000 2	0.285
黑河中游 Middle reaches of Heihe	山丹 Shandan	1.185	0.226	1.411	0.032	1.624	0.001 3	1.657
	民乐 Minle	4.439	0.397	4.836	0.038	2.876	0.005 4	2.919
	甘州 Ganzhou	2.949	0.459	3.408	0.086	4.827	0.000 9	4.914
	临泽 Linze	1.936	0.321	2.257	0.025	3.018	0.001 1	3.044
黑河下游 Lower reaches of Heihe	高台 Gaotai	1.333	0.350	1.683	0.027	2.237	0.001 0	2.265
	金塔(鼎新) Jinta	0.023	0.023	0.076	0.571	0.000 3	0.647	
	额济纳 Ejina	1.311	1.311	0.019	1.843	0.000 6	1.863	

4.2 黑河流域水资源配置博弈分析

根据实际情况,将黑河流域分为黑河上游(包括祁连县和肃南县)、黑河中游(包括山丹县、民乐县、甘州区、临泽县、高台县)和黑河下游(包括金塔县和额济纳旗)3 个子区进行分析,同时在流域内设置一个全流域的生态区。由此将参与人集合为流域内的 4 个地区,记为 $I=\{\text{黑河上游地区、黑河中游地区、黑河下游地区、生态区}\}$ 。本研究假设各子区所辖县(区、旗)的用水收益、供水成本、开发新水源的成本以及节水成本函数相同^[14]。

(1)用水收益函数。用水收益随有效供水量的增加而增加,但增速逐渐减小。有效供水量达到该地区需水量时,用水收益达到最大。拟合多年有效供水量与 GDP(B)间的关系可得:

黑河上游地区: $B_1(x_1) = -0.252x_1^2 + 5.356x_1 - 0.964$;

黑河中游地区: $B_2(x_2) = -0.233x_2^2 + 7.653x_2 + 0.789$;

黑河下游地区: $B_3(x_3) = -0.187x_3^2 + 4.974x_3 - 0.686$ 。

式中,各区的有效供水量 $x_i = q_i + q'_i + q''_i$ 。

(2)供水成本函数。供水成本随供水量的增加而增加,但是增幅有限,不会为无穷大。拟合多年供水费用(C)与供水量间的关系可得:

黑河上游地区: $C_1(q_1) = 0.378q_1^2 + 51.122q_1 - 0.964$;

黑河中游地区: $C_2(q_2) = 0.513q_2^2 + 47.512q_2 + 0.877$;

黑河下游地区: $C_3(q_3) = 0.246q_3^2 + 30.785q_3 + 0.123$ 。

(3)开发新水源成本函数。开发新水源的成本随着开发量的增加而增加,增速逐渐增大。拟合开发新水源的投资(C')与增加的水资源利用量间的关系可得:

黑河上游地区: $C'_1(q'_1) = 0.428q'^2_1 + 1.276q'_1 + 0.859$;

黑河中游地区: $C'_2(q'_2) = 0.987q'^2_2 - 5.367q'_2 + 1.356$;

黑河下游地区: $C'_3(q'_3) = 1.325q'^2_3 - 0.759q'_3 + 5.631$ 。

(4)节水成本函数。节水成本随节水量的增加而增加,增幅逐渐增大。拟合多年节水量与节水投

资(C'')间的关系可得:

黑河上游地区: $C''_1(q''_1) = 0.428q''_1{}^2 + 1.226q''_1 + 0.859$;

黑河中游地区: $C''_2(q''_2) = 0.235q''_2{}^2 - 1.875q''_2 + 1.856$;

黑河下游地区: $C''_3(q''_3) = 0.585q''_3{}^2 - 2.356q''_3 + 0.533$ 。

黑河流域各县(区、旗)的水资源可利用总量 Q 为 15.71 亿 m^3 , 设县(区、旗)直接引水量和具体收益函数分别为 q_i 和 $F_i (i=1,2,\cdots,9)$ 。公共用水收益函数 $d(s)=0.48s$, 设公共水权 s 为 1.2 亿 m^3 。水市场的价格函数为 $P(x)=0.8-0.01x$, 水资源费率 t 为 0.17 元/亿 m^3 。将以上各式代入式(5), 可知社会总收益为:

$$Z=\max[0.48s+0.17\times\sum_{i=1}^9q_i+\sum_{i=1}^9F_i],$$

表 2 黑河流域各县(区、旗)水资源优化配置结果

Table 2 Optimal allocation results of water resources in Heihe river basin					亿 m^3
地区 Area	县(区、旗) Country	需水量 Water consumption	水权 Water right	取水量 Quantity of water intake	可转让水权 Transfer water rights
黑河上游 Upper reaches of Heihe	祁连 Qilian	0.086	0.146	0.116	0.030
	肃南 Sunan	0.211	0.277	0.231	0.046
黑河中游 Middle reaches of Heihe	山丹 Shandan	1.596	1.462	1.513	—
	民乐 Minle	2.611	2.361	2.675	—
	甘州 Ganzhou	4.871	3.937	4.352	—
	临泽 Linze	3.000	2.468	2.956	—
黑河下游 Lower reaches of Heihe	高台 Gaotai	2.281	1.827	2.183	—
	金塔(鼎新) Jinta	0.604	0.544	0.356	—
	额济纳 Ejina	1.819	1.548	1.336	—
生态区 Ecological Region			1.2		

表 3 基于不同优化配置方法的黑河流域各县(区、旗)水资源配置结果的比较

Table 3 Comparison of water resources allocation results based on different optimization methods in Heihe river basin					
地区 Area	县(区、旗) Country	缺水率/% Rate of water shortage		社会总收益/亿元 Social benefit	
		蚁群算法 Ant colony algorithm	线性规划法 Linear programming method	蚁群算法 Ant colony algorithm	线性规划法 Linear programming method
黑河上游 Upper reaches of Heihe	祁连 Qilian	0	0	0.936	0.823
	肃南 Sunan	0	0		
黑河中游 Middle reaches of Heihe	山丹 Shandan	5.2	6.1		
	民乐 Minle	0	1.1		
	甘州 Ganzhou	10.7	12.9		
	临泽 Linze	1.5	2.0		
黑河下游 Lower reaches of Heihe	高台 Gaotai	4.3	4.9		
	金塔(鼎新) Jinta	41.1	50.3		
	额济纳 Ejina	26.6	31.8		

在黑河流域可利用水资源总量已经确定的情况下,当各县(区、旗)的初始水权确定后,必然会出现一些供需不平衡的情况,因此需要进一步建立水权交易制度,通过水市场实现水资源的优化配置。建立市场经济与宏观调控相结合的水资源配置博弈模

$$s. t. \begin{cases} \sum_{i=1}^9 r_i + 1.2 = 15.708, q_i > 0 (i=1,2,\cdots,9); \\ r_1 > 0.12, r_2 > 0.14, r_3 > 1.13, r_4 > 1.18, \\ r_5 > 3.25, r_6 > 2.07, r_7 > 1.35, r_8 > 0.35, \\ r_9 > 0.97. \end{cases}$$

基于蚁群算法对寻优计算问题的优势,采用 C++ 语言编写程序,对黑河流域水资源优化配置博弈模型进行求解,参考蚁群算法参数设置的相关研究成果^[15-16],本研究取:信息启发式因子 $\alpha=1$,期望启发式因子 $\beta=3$, $\rho=0.7$, $m=30$,迭代次数 $N=45$,计算结果见表 2。为了验证蚁群算法的优越性,将运用蚁群算法求解模型所得计算结果与利用传统线性规划法得到的结果进行对比,限于文章篇幅,部分对比结果见表 3。

型,对流域内的 15.71 亿 m^3 可利用水资源量进行分配。通过求解该模型,在保证黑河流域 1.2 亿 m^3 公共水权的基础上,上游的祁连县和肃南县分得的水权大于其取水量,可以向流域内的其他各县(区、旗)出售多余的水权,分别为 0.03 和 0.046 亿 m^3 。

如果水权的价格高于节水成本,那么这 2 个县更乐于提高节水水平以期向下游出售多余的水权来获得更大的收益。中游的山丹县、民乐县、甘州区、临泽县和高台县分得的水权不能满足取水量的要求,一方面可以通过向上游地区购买水权的方式补充不足的水量,另一方面可以通过加大节水潜力和开发新水源等方式弥补其水量的不足。下游的金塔县和额济纳旗分得的水权可以满足取水量的要求。实例研究表明,通过分配初始水权和征收水资源费,激发了黑河流域各县(区、旗)节水、开发新水源的积极性,提高了水资源利用效率,缓解了黑河流域水资源短缺的状况。对中游取水量大的地区收取相应的水资源费用可以补偿下游额济纳旗的生态恢复,遏制其生态的不断恶化。通过水权和水资源费的双重调节加大了对生态环境的投资,保证了水资源的可持续利用,实现了该区经济和生态的和谐发展。

5 结 论

本研究介绍了博弈论的基本理论,针对博弈论在水资源配置领域定量研究较少的现状,通过分析流域内各用水主体的收益,建立市场经济与宏观调控相结合的基于蚁群算法的水资源配置博弈模型,使各地区追求收益最优的同时,实现全流域水资源的合理分配和对生态环境的保护,达到社会总收益最优。通过对模型的分析,能够确定市场经济与宏观调控相结合的水资源配置模式是实现流域水资源优化配置的一种有效途径。将模型应用于黑河流域,通过实例分析了黑河流域各县(区、旗)的用水情况及水权交易博弈。

由于水资源配置涉及的因素较多,流域内各用水主体的用水收益、供水成本、开发新水源的成本以及节水成本也各不相同,运用传统的规划方法难以解决好这类问题,因此本文提出了应用改进蚁群算法求解水资源优化配置的博弈模型,并进行了方法介绍及实例分析,利用改进蚁群算法解决组合优化问题的优势,求得水资源优化配置博弈模型最优解。蚁群算法求解模型易于形成计算机语言,且大量试验表明该算法计算速度快、效率高,收敛性能好,易找到全局最优解。然而在模型建立以及求解过程中参数的选择更多依靠的是试验和经验,计算时容易出现停滞现象。如何改进算法以减少目前在应用中存在的问题,以及增强学科间的交互性,将是今后的研究重点。

[参考文献]

- [1] 王 浩,游进军. 水资源合理配置研究历程与进展 [J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1168-1175.
Wang H, You J J. Advancements and development course of research on water resources deployment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1168-1175. (in Chinese)
- [2] 孔 珂,解建仓,岳新利,等. 水市场的博弈分析 [J]. 水利学报, 2005, 36(4): 491-495.
Kong K, Xie J C, Yue X L, et al. Game analysis of water resources market [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(4): 491-495. (in Chinese)
- [3] 李 力,沈 冰. 太原市水资源合理配置研究 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(2): 199-204.
Li L, Shen B. Study on rational allocation of water resources in Taiyuan City [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2008, 36(2): 199-204. (in Chinese)
- [4] Loaiciga A A. Analytic game-theoretic approach to ground-water extraction [J]. Journal of Hydrology, 2004, 29(7): 22-33.
- [5] 胡晓寒,纪昌明,王丽萍. 基于优化和博弈理论的农业用户间水权交易分析 [J]. 水利学报, 2010, 41(5): 608-612.
Hu X H, Ji C M, Wang L P. Analysis on water right transaction among agricultural water users based on optimization and game theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(5): 608-612. (in Chinese)
- [6] 左其亭,赵春霞. 人水和谐的博弈论研究框架及关键问题讨论 [J]. 自然资源学报, 2009, 24(7): 1315-1324.
Zuo Q T, Zhao C X. Discussion on game theory research framework and key problems of human-water harmony [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(7): 1315-1324. (in Chinese)
- [7] Bielsa J, Rosa D. An economic model for water resources allocation in northeastern Spain [J]. Water Resources Development, 2001, 17(3): 397-410.
- [8] 黄俊铭,解建仓,张建龙. 基于博弈论的水资源保护补偿机制研究 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(5): 196-200.
Huang J M, Xie J C, Zhang J L. Game theory based protection and compensation mechanism for water resources [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat Sci Ed, 2013, 41(5): 196-200. (in Chinese)
- [9] 解建仓,王文博,张 琛,等. 动态水权效益模型及其蚁群算法求解 [J]. 水利学报, 2012, 43(6): 659-666.
Xie J C, Wang W B, Zhang C, et al. A benefit model for dynamic water rights solved by ant colony algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(6): 659-666. (in Chinese)
- [10] Dorigo M, Birattari M, Stützle T. Ant colony optimization: Artificial ants as a computational intelligence technique [J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2006, 11(3): 28-39.

Rome, Italy: FAO, 1998.

[11] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 1999.

Wei F Y. Modern technology of statistics, diagnosis and forecast for climate [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999. (in Chinese)

[12] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945, 13: 245-259.

[13] Kendall M G. Rank correlation methods [M]. London: Charles Griffin & Co, 1975.

[14] Wang S J, Yan M, Yan Y X, et al. Contributions of climate change and human activities to the changes in runoff increment in different sections of the Yellow River [J]. *Quaternary International*, 2012, 282: 66-77.

[15] 王 宏, 杨国礼, 王瑞芳, 等. 渭河流域水利水保措施对泥沙、径流影响分析计算 [J]. *水土保持通报*, 1994, 14(5): 48-52.

Wang H, Yang G L, Wang R F, et al. Analysis and calculation for effect of engineering measures on sediment and runoff in Weihe Watershed [J]. *Journal of Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1994, 14(5): 48-52. (in Chinese)

[16] 何 毅, 王 飞, 穆兴民. 渭河流域 60 年来气温变化特征与区域差异 [J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(9): 14-21.

He Y, Wang F, Mu X M. Air temperature variation of Weihe river basin in recent 60 years and its regional differences [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(9): 14-21. (in Chinese)

[17] 和宛琳, 徐宗学. 渭河流域气温与蒸发量时空分布及其变化趋势分析 [J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(1): 102-106.

He W L, Xu Z X. Spatial and temporal characteristics of the long-term trend for temperature and pan evaporation in the Wei River Basin [J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2006, 42(1): 102-106. (in Chinese)

[18] 焦彩强, 王 飞, 穆兴民, 等. 渭河流域气候变化与区域分异特征 [J]. *水土保持通报*, 2010, 30(5): 27-32.

Jiao C Q, Wang F, Mu X M, et al. Climate change of Weihe River Basin and its regional differences [J]. *Journal of Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(5): 27-32. (in Chinese)

[19] 张宏利, 陈 豫, 任广鑫, 等. 近 50 年来渭河流域降水变化特征分析 [J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(4): 236-241.

Zhang H L, Chen Y, Ren G X, et al. The characteristics of precipitation variation of Weihe River Basin in Shaanxi Province during recent 50 years [J]. *Journal of Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(4): 236-241. (in Chinese)

(上接第 211 页)

[11] 赵 伟, 蔡兴盛, 曲慧燕. 一种基于惩罚函数和新信息素更新方式的蚁群算法 [J]. *计算机工程与科学*, 2013, 35(3): 103-107.

Zhao W, Cai X S, Qu H Y. An ant colony algorithm based on penalty function and new pheromone updating [J]. *Computer Engineering & Science*, 2013, 35(3): 103-107. (in Chinese)

[12] Betul Y H, Mehmet M Y. A multi-objective ant colony system algorithm for flow shop scheduling problem [J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(7): 1361-1368.

[13] 曾 艳. 蚁群算法在组合优化中的应用 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.

Zeng Y. The application of ant colony algorithm in combinatorial optimization [D]. Xi'an: Xidian University, 2006. (in Chinese)

[14] 李建勋, 解建仓, 沈 冰, 等. 基于博弈论的区域二次配水方案及其改进遗传算法解 [J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(10): 1914-1920.

Li J X, Xie J C, Shen B, et al. Secondary water distribution based on game analysis and solution by improved genetic algorithm [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(10): 1914-1920. (in Chinese)

[15] Frisvold G B, Caswelk M F. Trans boundary water management game-theoretic lessons for projects on the US-Mexico Border [J]. *Agricultural Economics*, 2000, 55(24): 101-111.

[16] 冯文琦, 纪昌明. 水资源优化配置中的市场交易博弈模型 [J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(11): 83-85.

Feng W Q, Ji C M. Study of market transaction game model in water resources optimal allocation [J]. *J Huazhong Univ of Sci & Tech: Nature Science Edition*, 2006, 34(11): 83-85. (in Chinese)