

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.20180028

唐瑜, 宋献方, 马英, 等. 基于优化配置的南水北调受水区水资源价值研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 189-194.  
TANG Y, SONG X F, MA Y, et al. Study on water resources value in the intake area of the South to North Water Diversion Project based on water resources optimization[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 189-194. (in Chinese)

# 基于优化配置的南水北调受水区水资源价值研究

唐瑜<sup>1,2</sup>, 宋献方<sup>1,3</sup>, 马英<sup>1</sup>, 张应华<sup>1</sup>, 杨丽虎<sup>1</sup>, 韩冬梅<sup>1,3</sup>, 卜红梅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学 中丹学院, 北京 100049; 3. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100190)

**摘要:** 水资源价值的定量分析对于创建科学合理的水价体系和缓解缺水地区的水资源供需矛盾有着重要意义。通过效益分摊系数法计算了南水北调中线和东线受水区工业和农业单位用水的净效益, 建立了以区域用水净效益最大为目标函数、以供需水量限制及调水水渠流量限制为约束条件的水资源优化配置模型。应用线性规划求解得到南水北调东线受水区黄河以南、山东半岛和黄河以北 3 个子区的水资源影子价格分别为 1.00 元/m<sup>3</sup>、4.31 元/m<sup>3</sup> 和 3.89 元/m<sup>3</sup>, 南水北调中线受水区河南、河北、北京和天津 4 个子区的水资源影子价格分别为 3.67 元/m<sup>3</sup>、4.41 元/m<sup>3</sup>、2.20 元/m<sup>3</sup> 和 2.19 元/m<sup>3</sup>。该结果即为水资源理论价值, 可为南水北调受水区制定科学合理的水价标准和改善水价体系提供科学依据。

**关键词:** 水资源优化配置; 影子价格; 效益分摊系数; 南水北调受水区

**中图分类号:** TV 213    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0189-06

## Study on water resources value in the intake area of the South to North Water Diversion Project based on water resources optimization

TANG Yu<sup>1,2</sup>, SONG Xianfang<sup>1,3</sup>, MA Ying<sup>1</sup>, ZHANG Yinghua<sup>1</sup>, YANG Lihu<sup>1</sup>, HAN Dongmei<sup>1,3</sup>, BU Hongmei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Quantitative analysis on water resources value is of great significance to establishing a scientific and reasonable water price system and to alleviating the contradiction between supply and demand of water resources. We used the benefit sharing coefficient method to calculate the net benefit of industrial and agricultural unit water use in the intake area of the South to North Water Diversion Project (SNWDP). Taking maximization of net benefit as the objective function, we established an optimal allocation model for water resources with water supply and demand as well as water diversion canal capacities as constraints. Linear programming method was applied in optimizing the model and calculating the shadow prices of local water resources in the sub-areas of the intake area of the SNWDP. For the intake area of the eastern route of the SNWDP, the shadow prices of water resources in the South of Yellow River, Shandong Peninsula, and North of Yellow River were 1.00 Yuan/m<sup>3</sup>, 4.31 Yuan/m<sup>3</sup> and 3.89 Yuan/m<sup>3</sup>, respectively. For the intake area of the middle route of the SNWDP, the shadow prices of water resources in Henan, Hebei, Beijing, and Tianjin were 3.67 Yuan/m<sup>3</sup>, 4.41 Yuan/m<sup>3</sup>, 2.20 Yuan/m<sup>3</sup> and 2.19 Yuan/m<sup>3</sup>, respectively. The results were the theoretical values of water resources, and could provide scientific support for establishing water price standards and improving water price system in the intake area of the SNWDP.

**Key words:** water resources optimization; shadow price; benefit sharing coefficient; intake area of the SNWDP

收稿日期: 2017-04-17    修回日期: 2017-11-06    网络出版时间: 2017-12-26  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171226.1006.010.html>  
基金项目: 中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目(KFJEW-ST5-007)

**Fund:** Science and Technology Service Network Program of Chinese Academy of Sciences(STS program)(KFJEW-ST5-007)

**作者简介:** 唐瑜(1991-), 女, 四川南充人, 主要从事流域水循环与水资源管理研究。E-mail: tangy.14s@igsnr.ac.cn

**通讯作者:** 宋献方(1965-), 男, 河北沙河人, 教授, 博士, 主要从事流域水循环与水环境等方面研究。E-mail: songxf@igsnr.ac.cn

水资源价值是指水在经济社会和环境体系循环过程中与评价主体建立起的特殊关系,体现为使用价值、产权价值、劳动价值和补偿价值<sup>[1]</sup>。水资源价值的研究是制定合理水价的理论基础,它对促进水资源合理配置、缓解水资源供需矛盾等有着重要意义<sup>[2-4]</sup>。水资源影子价格是指经过优化配置后单位水资源量对经济社会发展的边际贡献<sup>[5]</sup>,是测算水资源价值的基础。测算影子价格的常用模型有:(1)均衡价格模型<sup>[6]</sup>,水资源影子价格等于供求均衡价格;(2)边际价格模型<sup>[7]</sup>,应用微积分描述水资源影子价格;(3)线性规划模型<sup>[8]</sup>,水资源约束的对偶解为水资源影子价格。对于区域资源优化配置,若除水以外的其他生产要素都得到了充分利用,可通过构建区域水资源优化配置模型求解水资源影子价格,其值等于水资源的理论价值<sup>[9]</sup>。该方法已被多次应用于测算区域水资源价值,例如在黄河流域<sup>[10]</sup>、淮河流域<sup>[11]</sup>以及北京<sup>[12]</sup>等地的应用。

本文以南水北调东线和中线受水区为研究对象,应用影子价格法计算受水区的水资源价值,以期为促进区域水资源持续利用、推动南水北调工程发挥效益以及指导该地区制定合理水价提供理论依据。

## 1 研究区概况

南水北调东线受水区地处黄、淮、海诸河下游,主要水系包括淮河、沂沭泗、海河和滦河等,较大的湖泊有洪泽湖、高邮湖、骆马湖、邵伯湖、南四湖、城东湖和城西湖等,区域多年平均降雨量为500~1000 mm。东线受水区分布有天津、济南、徐州、青岛等特大城市,人口密集,工农业发达。由于长期过度开发本地地表及地下水资源,该地区面临着河流干涸、水质恶化、地面沉降、海水入侵等一系列生态环境问题。为解决受水区城市及工业用水问题,改善淮北地区的农业供水条件,并适当提供生态和农业用水,规划修建了南水北调东线工程,从长江下游干流扬州段引水,利用京杭大运河及与其平行的河道逐级提水北送,主要供水范围是黄淮海平原东部和山东地区,分为黄河以南、山东半岛和黄河以北三片<sup>[13]</sup>(图1)。东线一期工程的规划年调水量为89亿 $m^3$ ,已于2013年11月通水。

南水北调中线受水区跨江、淮、黄、海四大水系,涉及京、津、冀、豫、鄂五省市,总面积约15.5万 $km^2$ ,多年平均降水量658.3 mm。中线受水区分布有北京、天津、石家庄等大城市及上百座中小城市,人口密集,城市化水平高,是我国的政治文化中心、重要的工农业基地和能源生产基地。但该地区也是

我国最缺水的地区之一,人均、亩均水资源量仅为全国平均值的16%和14%,水资源长期短缺产生了水质恶化、平原区河道干涸、地下水严重超采以及农业用水被挤压等问题。为解决华北地区城市缺水问题,缓和城市用水挤占生态用水与农业用水的矛盾,遏制生态环境继续恶化的趋势,规划修建了南水北调中线工程,以丹江口水库为水源地,主要向河南、河北、天津和北京4省市沿线的20余座城市供水<sup>[14]</sup>(图1)。中线一期工程的规划年调水量为95亿 $m^3$ ,已于2014年12月通水。

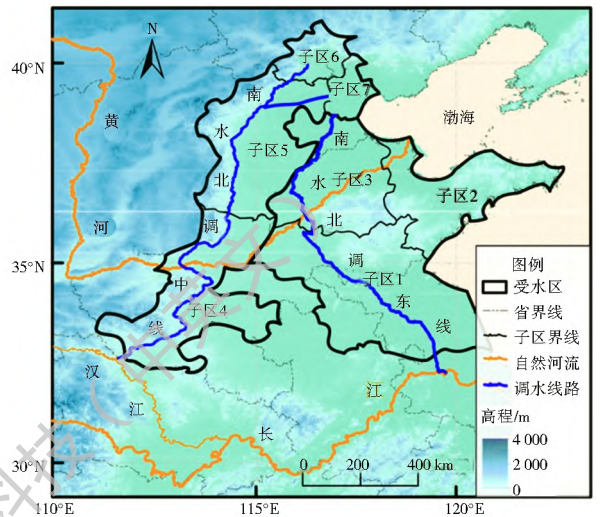


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

## 2 研究方法

### 2.1 水资源优化配置模型

#### 2.1.1 模型建立条件

应用影子价格法计算水资源价值,建立的水资源优化配置模型需要满足以下假设条件:(1)除水资源外,经济活动中其他生产要素已充分利用;(2)水资源规划、评价、开发利用、管理等方面的投入费用是合理的,满足水资源优化配置、高效利用的宏观目标要求;(3)计算水资源在经济活动中产生的净效益时已扣除了所有生产要素的成本及非水要素的效益<sup>[12]</sup>。在上述假设条件下,根据线性规划求解的水资源影子价格等于水资源价值。

#### 2.1.2 子区划分与供水方、用水方组成

南水北调东线受水区可分为黄河以南、山东半岛和黄河以北3个子区<sup>[13]</sup>,子区编号分别记为1、2、3(图1)。南水北调中线受水区可分为河南、河北、北京和天津4个子区<sup>[14]</sup>,子区编号分别记为4、5、6、7(图1)。子区1~7内的本地可利用水资源总量分别被概化为一个供水方。南水北调东线和中线调水

量为两个单独供水方。各子区的用水方由生活、生态、农业和工业四个子用户组成。

### 2.1.3 目标函数和约束条件

采用 Cheng 等<sup>[15]</sup>提出的水流路径模型在 MATLAB 中建立研究区的水资源优化配置模型。在水流路径模型中,水资源配置系统由三个部分组成:供水方、用水方以及所有的水流路径。一条完整的水流路径是指从一个供水方通过物理供水网络以不重复的方式顺着水流的方向到达一个用水方的水流输送路径。

水资源优化配置模型以区域用水净效益最大为目标函数,以各用水方需水量、各供水方可供水量以及南水北调水渠流量限制为约束条件,具体公式可表达如下:

$$\max Z = \sum_d b_d \cdot \sum_{r_{\text{end}}=d} (1-f_r) \cdot l_r - \sum_r (1-f_r) \cdot l_r \cdot w_r \quad (1)$$

$$S.T. \quad I_s \geq \sum_{r_{\text{ini}}=s} l_r \quad \forall s \in N_s \quad (2)$$

$$L_d \leq \sum_{r_{\text{end}}=d} (1-f_r) \cdot l_r \leq U_d \quad \forall d \in N_d \quad (3)$$

$$Q_k \geq \sum_{r,k} v_{r,k} \cdot l_r \quad \forall k \in A \quad (4)$$

$$l_r \geq 0 \quad \forall r \in F \quad (5)$$

式中: $Z$  为目标函数值; $d$  为用水方; $s$  为供水方; $b$  为单位用水的净效益; $w$  为单位供水成本,主要用于表示南水北调的单位调水费用; $r_{\text{ini}}$  和  $r_{\text{end}}$  分别是水流路径  $r$  的供水方和用水方; $l_r$  表示水流路径  $r$  上通过的水量; $f_r$  为水流路径  $r$  上的水量损失率,取值在 0 到 1 之间; $I_s$  为供水方  $s$  的可供水量; $L_d$  和  $U_d$  分别为用水方需水量的下限和上限; $Q_k$  为调水水渠的流量上限; $v_{r,k}$  为二进制变量(0, 1),用来描述水流路径  $r$  是否通过调水水渠  $k$ ;  $N_s$  为供水方  $s$  的集合; $N_d$  为用水方  $d$  的集合; $A$  为调水水渠  $k$  的集合; $F$  为物理供水网络的所有水流路径  $r$  的集合。

式(1)为模型的目标函数,表示为区域用水效益与南水北调调水费用之差的最大值。式(2)至式(5)为优化模型的约束条件。式(2)和式(3)分别为供水方和用水方的水量约束。式(3)中引入水流路径上的水量损失率,主要用于表示南水北调线路上的水量损失。为实现生活和生态用水优先满足原则,将生活和生态用水的下限值设为其用水需求。式(4)用于实现调水水渠的流量限制。式(5)规定了水量输送的非负性。

## 2.2 模型输入参数

### 2.2.1 单位用水净效益和单位调水费用

农业用水净效益主要体现在农产品的灌溉增产上,因此可以用灌溉用水的单位净效益来代替;工业

用水净效益可通过在工业生产净利润中合理分摊出水资源的贡献比例来计算。由于生活和生态用水的净效益难以用货币价值量化<sup>[16]</sup>,根据生活和生态用水应该优先满足的原则,可将其设为约束条件。采用效益分摊系数法计算农业和工业单位用水的净效益,计算公式分别如下:

$$b_a = \sum_k (Y_{a,k} \times \eta_k \times \varepsilon_{a,k}) / Q_a \quad (6)$$

$$b_i = (B_i \times \xi_i + F_w) / Q_i \quad (7)$$

式中: $b_a$  为农业单位用水的净效益; $k$  为主要灌溉作物; $Y_{a,k}$  为主要灌溉作物的净产值; $\eta_k$  为灌溉作物  $k$  的灌溉产值占总产值的比例; $\varepsilon_{a,k}$  为灌溉作物  $k$  的灌溉效益分摊系数; $Q_a$  为农业灌溉用水总量; $b_i$  为工业单位用水的净效益; $B_i$  为工业利税总额; $\xi_i$  为工业用水的效益分摊系数; $F_w$  为水要素成本; $Q_i$  为工业用水总量。

农业灌溉效益分摊系数采用试验参数法确定,通过经验公式求得,取值参考文献<sup>[17-18]</sup>。灌溉产值占总产值的比例可用灌需比代替,通过各省主要农作物的灌溉定额推算。农业净产值(2012年)以及用水量数据可从各省统计年鉴(2012年)中获取。工业用水效益分摊系数采用固定资产净值比例法确定,其计算公式如式(8),相关数据可从中国固定资产投资年鉴(2012年)和中国地区投入产出表(2012年)中获取。工业利税总额(2012年)和用水量数据可以从各省统计年鉴(2012年)中获取。

$$\xi_i = F_w / (F_w + F_{nw}) \quad (8)$$

式中: $\xi_i$  为工业用水效益分摊系数; $F_w$  为水要素成本; $F_{nw}$  为非水要素成本。由此计算得到江苏、安徽、山东、河北、河南、北京和天津的农业和工业单位用水的净效益。以各子区内各省(市)的面积比例进行加权平均,得到子区 1 至 7 农业和工业单位用水的净效益,结果见表 1。

表 1 各子区工业和农业单位用水的净效益

Tab. 1 Net benefit of industrial and agricultural unit water use in each subarea

	元/ m <sup>3</sup>						
用水行业	子区 1	子区 2	子区 3	子区 4	子区 5	子区 6	子区 7
农业	2.67	4.31	3.89	5.18	4.41	2.20	2.19
工业	10.65	21.07	19.55	12.60	13.50	9.37	28.10

南水北调中线和东线的各用水方需要支付的单位调水费用,参考国家发展和改革委员会颁布的《关于南水北调中(东)线一期工程运行初期供水价格政策的通知》,见表 2。

### 2.2.2 供需水量参数

各子区生活、生态、工业和农业的用水需求以及

表2 南水北调至各子区的单位调水费用

	子区1	子区2	子区3	子区4	子区5	子区6	子区7
单位调水费用	0.89	1.65	2.24	0.58	0.97	2.33	2.16

本地水资源可利用量根据水利部制定的《南水北调工程总体规划》、水利部淮河水利委员会与水利部海河水利委员会编制的《南水北调东线工程规划》、水利部长江水利委员会编制的《南水北调中线工程规划》、中国水利水电科学研究院编写的《黄淮海流域水资源合理配置研究》、水利部海河水利委员会编制的《海河流域水资源规划》以及河北、河南、北京、天津水资源规划部门分别编制的各省市《南水北调城市水资源规划报告》等资料综合确定。供需水量数据均以2010年为水平年,计算结果参考张平的研究成果<sup>[19]</sup>(表3)。南水北调中线和东线一年的调水量分别为95亿 $m^3$ 和90亿 $m^3$ 。

表3 各子区供需水量数据

	子区1	子区2	子区3	子区4	子区5	子区6	子区7	
本地可利用水资源量	188.42	114.57	104.62	137.11	115.40	48.80	30.69	
需水量	生活	29.30	22.16	20.03	29.58	20.69	14.41	10.77
	生态	2.35	4.43	2.21	7.97	28.36	10.60	2.10
	工业	55.67	26.24	18.99	35.42	27.30	8.41	9.24
	农业	141.38	87.09	108.54	109.29	109.20	15.76	21.02
	合计	228.70	139.92	149.77	182.26	185.55	49.18	43.13

### 2.2.3 南水北调工程参数

南水北调一期工程调水水渠的流量约束参数可从《南水北调工程(东)线工程规划》中获取(如表4)。涉及的调水水渠有:中线总干渠、中线豫冀界干渠、中线至北京段、中线至天津段,东线总干渠、东线至山东半岛段、东线穿黄工程以及东线至天津段。南水北调东线和中线至各子区的水量损失率分别从胡周汉等<sup>[20]</sup>和黄会勇<sup>[21]</sup>的研究成果中整理得到(表5)。

### 2.3 影子价格

影子价格通常指对资源利用问题线性规划对偶模型决策变量的经济解释,反映了单位资源在最优决策下的边际价值<sup>[22]</sup>。根据影子价格的数学定义,上述水资源优化配置模型的对偶问题中与式(2)对应的对偶变量最优解就是水资源的影子价格,可表达为式(9)。

表4 南水北调一期工程情景下调水水渠的流量约束

调水水渠	设计流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
东线总干渠	500
东线至山东半岛段	50
东线穿黄工程	50
中线总干渠	350
中线豫冀界干渠	235
中线至北京段	60
中线至天津段	60

表5 南水北调至各子区的水量损失率

子区编号	子区1	子区2	子区3	子区4	子区5	子区6	子区7
水量损失率(%)	10.9	13.5	13.9	4.0	9.3	10.6	10.6

$$y_s^* = \partial Z / \partial I_s \quad (9)$$

式中: $y_s^*$ 为供水方 $s$ 的水资源影子价格; $Z$ 为用水净效益; $I_s$ 为供水方 $s$ 的可供水量。水资源影子价格的经济意义是:在其它条件不变的情况下,单位水资源变化所引起目标函数最优值的改变量<sup>[22]</sup>。其理论基础是边际效用价值论,能够反映出水资源的稀缺程度和优化配置情况<sup>[11]</sup>。

## 3 结果与讨论

通过将线性规划模型转化为对偶形式求解,可得各子区本地水资源的影子价格,即水资源的理论价值<sup>[23]</sup>(表6)。从表6的结果可以看出,南水北调东线受水区黄河以南(子区1)、山东半岛(子区2)和黄河以北(子区3)的水资源影子价格分别为1.00元/ $m^3$ 、4.31元/ $m^3$ 和3.89元/ $m^3$ ,南水北调中线受水区河南(子区4)、河北(子区5)、北京(子区6)和天津(子区7)的水资源影子价格分别为3.67元/ $m^3$ 、4.41元/ $m^3$ 、2.20元/ $m^3$ 和2.19元/ $m^3$ 。由于影子价格大于零,表示资源稀缺,且稀缺程度越大,影子价格越大<sup>[24]</sup>;各子区内的本地水资源的影子价格均大于零,说明南水北调受水区内水资源普遍稀缺。从影子价格的大小可以看出,河北子区和黄河以北子区内本地水资源更为稀缺,水资源供需矛盾突出,而黄河以南子区内的水资源供需矛盾较为缓和。

表6 南水北调受水区各子区本地水资源影子价格

子区编号	子区1	子区2	子区3	子区4	子区5	子区6	子区7
水资源影子价格	1.00	4.31	3.89	3.67	4.41	2.20	2.19

上述计算结果反映了水资源与总体经济效益之间的关系,可为水资源的合理配置及有效利用提供价格信号和计量尺度。但是该结果也有一定的局限性,主要表现为:(1)理论上应该采用农作物及工业产品的影子价格计算工业和农业单位用水的净效益<sup>[10]</sup>,但由于相关的影子价格数据难以收集,且考虑到国内工农业产品的市场机制较为成熟,因此以其市场价格代替其影子价格进行计算;(2)水资源价值受自然因素(水资源的丰度和品质、水资源的开发条件和特性等)、经济因素(产业结构、规模、用水效率、国民生产总值等)和社会因素(技术、人口、政策、文化历史背景等)的影响<sup>[25]</sup>,而上述结果是基于当年的水资源供需状况、水利工程现状、价格水平和行业用水结构得到的,具有一定的时效性。

## 4 结论

本文从南水北调受水区水资源优化配置的角度出发,以区域水资源合理利用条件下的净效益最大为目标,应用线性规划求解了南水北调受水区本地水资源的影子价格,即水资源的理论价值。东线受水区黄河以南、山东半岛和黄河以北3个子区的水资源影子价格分别为1.00元/m<sup>3</sup>、4.31元/m<sup>3</sup>和3.89元/m<sup>3</sup>,中线受水区河南、河北、北京和天津4个子区的水资源影子价格分别为3.67元/m<sup>3</sup>、4.41元/m<sup>3</sup>、2.20元/m<sup>3</sup>和2.19元/m<sup>3</sup>。该结果反映了有限水资源在最优分配下对经济社会发展的边际贡献,可为南水北调受水区制定科学合理的水价标准和完善水价体系提供技术支撑。应用影子价格法探讨水资源价值,还具有一定的局限性,相关的方法和理论还有待进一步的研究。

致谢:谨此对丹麦科技大学 Bauer-Gottwein Peter 教授以及 Davidsen Claus 博士在水资源优化配置模型方面的指导表示深深的感谢!

## 参考文献(References):

- [1] 甘泓,秦长海,汪林,等.水资源定价方法与实践研究Ⅰ:水资源价值内涵浅析[J].水利学报,2012,43(3):289-301.(GAN H, QIN C H, WANG L, et al. Study on water pricing method and practice I. Discussion on the connotation of water resources value[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(3): 289-301. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2012.03.010.
- [2] 沈大军,梁瑞驹,王浩,等.水资源价值[J].水利学报,1998,29(5):54-60.(SHEN D J, LIANG R J, WANG H, et al. The water resources value[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(5): 54-60. (in Chinese))
- [3] 唐立杰,李良县,卢亚卓,等.水资源价值及其模型浅析[J].中国水利水电科学研究院学报,2009,7(1):67-70.(TANG L J, LI L X, LU Y Z, et al. Analysis on water resources values and the relevant research models[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2009, 7(1): 67-70. (in Chinese)) DOI: 10.13244/j.cnki.jjwhr.2009.01.011.
- [4] LIU J, LYU H. Economic value of water resources of the upper reaches of the Xin'an River basin, China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(1): 87-92.
- [5] 汪党献,王浩,尹明万.水资源价值水资源影子价格[J].水科学进展,1999,10(2):195-200.(WANG D X, WANG H, YI M W. Implication of water resources and its value[J]. Advances in Water Science, 1999, 10(2): 195-200. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.1999.02.018.
- [6] 何静,陈锡康.我国水资源影子价格动态可计算均衡模型[J].水利水电科技进展,2005,25(1):12-13.(HE J, CHEN X K. Dynamic computable equilibrium model of shadow price of water resources of China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(1): 12-13. (in Chinese))
- [7] 张志霞,秦昌波,贾仰文,等.缺水地区水资源经济价值的异同辨析——以北京市和陕西省为例[J].中国人口·资源与环境,2012,22(10):19-25.(ZHANG Z X, QIN C B, JIA Y W, et al. Comparative analysis of the economic value of water in water deficient areas with different development levels: case study of Beijing and Shaanxi, China[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(10): 19-25. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2012.10.004.
- [8] 刘秀丽,邹骥.全国及九大流域分类用水影子价格的计算与预测[J].水利水电科技进展,2014,34(4):10-15.(LIU X L, ZOU C. Calculating and forecasting shadow prices of all kinds of water in China and its nine major river basins[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(4): 10-15. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2014.04.003.
- [9] 傅春,胡振鹏.水资源价值及其定量分析[J].资源科学,1998,20(6):1-7.(FU C, HU Z P. The economic value of water resources and its quantitative analysis[J]. Resources Science, 1998, 20(6): 1-7. (in Chinese))
- [10] 袁汝华,朱九龙,陶晓燕,等.影子价格法在水资源价值理论测算中的应用[J].自然资源学报,2002,17(6):757-761.(YUAN R H, ZHU J H, TAO X Y, et al. Application of shadow price method in calculation of water resources theoretical value[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(6): 757-761. (in Chinese))
- [11] 朱九龙,陶晓燕,王世军,等.淮河流域水资源价值测算与分析[J].自然资源学报,2005,20(1):126-131.(ZHU J L, TAO X Y, WANG S J, et al. Calculation and analysis of the value of water resources of Huaihe River[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(1): 126-131. (in Chinese))
- [12] 朱启林,申碧峰,孙静.基于优化配置的北京市水资源影子价格研究[J].人民黄河,2016,38(12):97-98.(ZHU Q L, SHEN B F, SUN J. Study on water resources shadow price of Beijing based on optimal water resources allocation[J]. Yellow River, 2016, 38(12): 97-98. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2016.12.022
- [13] 水利部淮河水利委员会,水利部海河水利委员会.南水北调东线工程规划(2001修订)简介[J].中国水利,2003(1):43-47.

- (Huaihe Water Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Haihe River Water Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources. Brief programming introduction of the East Route in the South to North Water Diversion Project (2001) [J]. China Water Resources, 2003 (1): 43-47. (in Chinese))
- [14] 水利部长江水利委员会. 南水北调中线工程规划(2001年修订)简介[J]. 中国水利, 2003(1): 48-55. (Changjiang Water resources Commission of the Ministry of Water Resources. Brief programming introduction of the Middle Route in the South to North Water Diversion Project (2001) [J]. China Water Resources, 2003(1): 48-55. (in Chinese))
- [15] CHENG W C, HSU N S, CHENG W M, et al. A flow path model for regional water distribution optimization[J]. Water Resources Research, 2009, 45(9): 706-715.
- [16] HAROU J J, PULIDO-VELAZQUEZ M, ROSENBERG D E, et al. Hydro economic models: concepts, design, applications, and future prospects[J]. Journal of Hydrology, 2009, 375(3-4): 627-643.
- [17] 李良县, 甘泓, 汪林, 等. 水资源经济价值计算与分析[J]. 自然资源学报, 2008, 23(3): 494-499. (LI L X, GAN H, WANG L, et al. Calculation and analysis of the economic value of water resource[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(3): 494-499. (in Chinese))
- [18] 甘泓, 汪林, 倪红珍, 等. 水经济价值计算方法评价研究[J]. 水利学报, 2008, 39(11): 1160-1166. (GAN H, WANG L, NI H Z, et al. Assessment on methods for calculating economic value of water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(11): 1160-1166. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2008.11.018.
- [19] 张平. 南水北调工程受水区资源优化配置研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (ZHANG P. Water resources optimal allocation of the water imported areas in the South to North Water Transfer Project [D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [20] 胡周汉, 方国华, 马兆龙, 等. 南水北调东线一期输水工程水量损失计算方法及应用[J]. 水电能源科学, 2016, 34(8): 45-49. (HU Z H, FANG G H, MA Z L, et al. Calculation and application of water losses in the first phase in East Route of South to North Water Diversion Project [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(8): 45-49. (in Chinese))
- [21] 黄会勇. 南水北调中线总干渠水量调度模型研究及系统开发[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013. (HUANG H Y. Study of Water supply and control model for Middle Route Main Canal of South to North Water Transfer First Stage Project and software system development [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013. (in Chinese))
- [22] 杨桂元, 宋马林. 影子价格及其在资源配置中的应用研究[J]. 运筹与管理, 2010, 19(5): 39-44. (YANG G Y, SONG M L. Shadow price and its applied research in the allocation of resources [J]. Operations Research and Management Science, 2010, 19(5): 39-44. (in Chinese))
- [23] 毛春梅, 袁汝华. 黄河流域水资源价值的计算与分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2003, 13(3): 25-29. (MAO C M, YUAN R H. Calculation and analysis of the theory value of water resources of Huanghe River [J]. China Population, Resources and Environment, 2003, 13(3): 25-29. (in Chinese))
- [24] 蒋剑勇. 水资源价值模型综述[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(1): 61-63. (JIANG J Y. Comments on models of water resources value [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(1): 61-63. (in Chinese))
- [25] 彭晓明, 王红瑞, 董艳艳, 等. 水资源稀缺条件下的水资源价值评价模型及其应用[J]. 自然资源学报, 2006, 21(4): 670-675. (PENG X M, WANG H R, DONG Y Y, et al. Evaluation model of water resources value under the condition of water shortage and its application [J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(4): 670-675. (in Chinese))
- [26] 张立平, 胡志芳, 秦琳琳, 等. 2050年前南水北调中线工程水源区地表径流的变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2010(6): 391-397. (ZHANG L P, HU Z F, QIN L L, et al. Surface runoff change in the water source area for the middle route project of south to north water transfer before 2050 [J]. Advances in Climate Change Research, 2010(6): 391-397. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2010.06.001.
- [27] SINGH V P, ZHANG L. Bivariate Flood Frequency Analysis Using the Copula Method [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2006, 11(2): 150-164. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:2(150).
- [28] HOSKING J R M. L-Moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1990, 52(1): 105-124.
- [29] GENEST C, RIVEST L P. Statistical Inference Procedures for Bivariate Archimedean Copulas [J]. Journal of the American Statistical Association, 1993, 88(423): 1034-1043. DOI: 10.2307/2290796

(上接第68页)

- [19] XU K, YANG D, YANG H, et al. Spatial temporal variation of drought in China during 1961-2012: A climatic perspective [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526(3): 253-264. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.047.
- [20] HUARD D, VIN G, FAVRE A C. Bayesian copula selection [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2006, 51(51): 809-822. DOI: 10.1016/j.csda.2005.08.010.
- [21] 张岳军, 郝智文, 王雁, 等. 基于 SPEI 和 SPI 指数的太原多尺度干旱特征与气候指数的关系 [J]. 生态环境学报, 2014(9): 1418-1424. (ZHANG Y J, HAO Z W, WANG Y, et al. Multi-scale characteristics of drought based on SPEI and SPI in association with climate index in Taiyuan [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014(9): 1418-1424. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-5906.2014.09.002.
- [22] 张利平, 胡志芳, 秦琳琳, 等. 2050年前南水北调中线工程水源区地表径流的变化趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2010(6):