

# 考虑随机降雨预测的区域水期权交易动态定价机制 ——以广东省为例

徐豪<sup>1</sup>, 刘钢<sup>1,2,3</sup>

(1. 河海大学管理科学研究所, 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 3. 河海大学沿海开发与保护协同创新中心, 南京 210098)

**摘要:** 水期权交易旨在解决水资源时空分布不均的问题, 伴随着全球气候变化, 降雨量已成为影响水资源时空分布不均的重要因素。运用马尔科夫链进行降雨状态的划分和预测, 在降雨量预测的基础上进行水期权交易相关费用的确定; 将降雨量指标的预测结果融入到水期权最终交易价格的确定中, 运用改进的Black-Scholes期权定价模型结合降雨量预测结果, 确定水期权交易的权利金; 最后运用扩展性线性支出模型进行计算结果的合理性检验, 证明模型所确定的交易价格的合理性。以广东省为例进行案例分析, 验证将降雨量指标融入到水期权交易中的必要性, 以及模型所确定的水期权交易相关费用的合理性, 证明波动水价相对于阶梯水价的优越性。考虑降雨量的水期权交易可以充分体现水市场的供需关系, 提高我国水期权交易定价的科学性。

**关键词:** 水期权; 降雨量; 马尔科夫链; Black-Scholes模型; ELES模型

水资源作为人类生存和发展的必要资源, 有着不可替代的地位<sup>[1]</sup>。我国是世界上水资源严重紧缺的国家之一, 且具有时间和空间上分布不均的特点。因此, 解决我国水资源的时空分布不均, 优化水资源的配置, 实现水资源利用价值的最大化, 已逐步成为我国水资源管理的核心问题。近年来, 我国在水权交易方面的研究取得了突破性进展, 并在部分地区开展了水权交易, 极大地缓解我国水资源短缺的压力。关于水权交易方面的研究大多集中在交易制度的设定和交易价格的确定两方面。在水权交易机制方面, 刁俊科等<sup>[2]</sup>以云南省为例用鲸鱼优化算法与投影寻踪耦合的方法进行初始水权的分配, 田贵良等<sup>[3]</sup>为使水权交易更加符合实情, 在构建我国的水权交易机制时, 分析了构成我国水权交易市场的各种因素; 李胚等<sup>[4]</sup>解决水权交易流程设计和交易过程中涉及的关键技术问题, 并在遵循水利部提出的最严格水资源管理制度的基础上构建了多层次水权交易模式。在水权交易价格方面, 国内外学者基于不同的理论模型提出了各具特色的水权交易价格形成机制, 主要集中在博弈理论<sup>[5]</sup>、成本定价<sup>[6]</sup>、影子价格<sup>[7]</sup>等方面。水权交易是指水权在水权市场主体之间的转让, 水权交易概念的提出在极大程度上缓解了我国水资源的空间分布问题, 但却无法解决水资源的时间分布问题, 因此水期权交易的概念应运而生。水期权交易是指水权的所有者在特定时间以一定的价格出售或者购买一定量水资源的权利,

收稿日期: 2019-01-02; 修订日期: 2019-06-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404600); 国家社会科学基金项目(14CGL030)

作者简介: 徐豪(1993-), 男, 河南信阳人, 硕士, 研究方向为水资源供应链与水权交易。E-mail: 1781706657@qq.com

通讯作者: 刘钢(1981-), 男, 山西太原人, 博士, 副教授, 研究方向为生态经济学与新制度经济学。

E-mail: lgghm@msn.com

在解决水资源时间分布不均的问题上具有重要作用。

伴随着全球气候变化,降雨量已成为影响水资源时间分布不均的重要因素,直接影响着水资源管理的各项工作,因此水资源的管理和决策应该将气候特征和季节因素都考虑在内<sup>[8]</sup>。为了更好地解决水资源的时间分布不均问题,美国学者Michelsen等<sup>[9]</sup>最早提出水期权的概念。通过Howitt<sup>[10]</sup>和Watters<sup>[11]</sup>的研究,水期权不仅在理论方面取得了突破性进展,且在实践应用方面也得到推广。Whittlesey等<sup>[12]</sup>提出了“间歇性水权转移”的设想,该研究的实证分析表明水期权的契约可以给人们带来丰厚的社会效益。Rozaklis等<sup>[13]</sup>以美国的五个州为例,从农业用水、市政用水、工业用水之间的水权转移入手,对11类现存的可中断水期权契约进行了研究。Villinski<sup>[14]</sup>在前人研究的基础上定义了多次执行性的水期权,并用动态规划方法结合水价的随机模型对水期权进行定价。Hafi等<sup>[15]</sup>将农民灌溉者和生态环境需水者作为水期权的买卖双方,进行水期权交易,旨在规避生态环境的需水风险,结果证明水期权在生态环境需水风险规避方面具备可行性。随着国内水市场的完善,在水期权方面的研究也取得了显著性成果。国内学者王浩<sup>[16]</sup>在遵循多重功效、总体开发和竞争作用三个原则的情况下,按照经济学口径和会计学口径制定水价;张郁等<sup>[17]</sup>针对南水北调中的水市场建设,将期货市场的一些基本功能应用到水市场领域,来解决企业在水价波动上的风险;王慧等<sup>[18]</sup>根据我国国情和南水北调实际,引入多次执行水期权契约,并提出成本—收益法对该水期权契约进行定价;王慧敏等<sup>[19]</sup>在考虑水资源供需风险规避的基础上对水期权的基本内涵进行研究,并运用动态规划法进行水期权定价;仇蕾等<sup>[20]</sup>在对水期权内涵进行界定的基础上,提出了蒙特卡罗模拟法并对期权价值进行求解;周进梅等<sup>[21]</sup>将美式看跌水期权模式应用于南水北调东线工程,并运用二叉树定价模型对美式看跌期权各个阶段水价的波动以及水期权价值进行分析;石常峰等<sup>[22]</sup>为了规避粮食安全和农业生产的风险,建立了融合金融工程方法与虚拟水贸易的虚拟水期权契约。

水期权方面的传统研究主要聚焦于水期权交易机制的设计和水期权定价两方面,较少考虑降雨量对水期权交易的影响。降雨量主要影响水资源的供给方面,水资源作为一种特殊的商品,其交易价格应具备一般商品的属性,受供需关系的影响。因此建立基于降雨量预测的水期权交易机制,设计考虑降雨量指标的水期权定价模型,对实现水资源的优化配置、解决我国水资源时间分布不均问题具有开拓性意义。

## 1 考虑降雨量的水权期权交易机制设计

在以往的研究中,水期权交易是指水权的所有者在特定时间以一定的价格出售或者购买一定量水资源的权利。买方购买的主要是水资源的使用权,只有水期权契约被执行时才能获得实物的水资源。水期权买方有义务在水期权到期日,按照事先议定价格执行水期权契约,交易价格和权利金主要依赖于双方协商制定。降雨量是水资源的主要供给来源,是影响水资源时空分布不均的重要因素,因此有必要将降雨量指标融入到水期权交易中进行研究。

### 1.1 考虑降雨量的水权期权交易框架设计

考虑降雨量的水期权交易是在对特定区域未来降雨量进行预测的基础上水权在水权市场主体(水权用户)之间的转让(买卖),双方借助降雨量的预测信息进行水期权交易价格和权利金等相关费用的确定。水期权交易的顺利开展依赖于交易价格和权利金的合

理性,依据降雨量的预测信息进行水期权交易价格与权利金的确定,极大地提高了水期权交易过程中相关费用制定的科学性。在水期权到期日,水期权交易买方可以选择买入相应的水权,水期权交易卖方则有义务按照约定进行水期权交易;水期权交易买方也可以放弃买入相应的水权,向水期权卖方支付事先协定的权利金,这是水期权买方支付给水期权卖方一定数额的货币,即购买水期权交易的违约价格。考虑降雨量的水期权交易过程涉及对象及相关关系如图1所示。

考虑降雨量的水权期权交易是涉及多主体—多情境—多要素的复杂交易系统,有必要梳理其交易主客体、交易条件、典型降雨情境的特征。

交易主客体:水期权交易主体主要是大型用水户或者用水单位。大型农业用水户和灌区用水单位是水期权交易主体的重要组成部分,这种类型的交易主体存在从事劳动类型的转换和种植结构的调整,从而导致有结余的水权或需要更多的水指标,通过水期权交易来缓解用水压力或者实现资金回收。交易客体主要是用水户或者用水单位的结余水权。与传统金融行业的标不同,水期权交易标产生的条件需要有结余的水权,此外特定区域的降雨量预测限制了标的物的交易范围。

交易条件:(1)具有明晰的初始水权。开展水期权交易的前提是有明晰初始水权,根据我国法律法规和水资源管理实际,该类型水资源交易主要需要具备明晰的取水权证。(2)有相应的水期权交易平台。现代化的水期权交易平台是水期权交易顺利开展的支撑,水期权交易平台的运用能够快速便捷地实现水权出售或购买的挂牌、应牌以及在线支付。(3)有相对规范化的水期权交易规则体系。规范化的水期权交易管理体系是水期权有效开展的保障。(4)有效计量监测系统。计量监测系统是各用水单位或区域进行水资源测算的重要工具,将为水期权交易费用的测算提供依据。(5)水期权交易期限不超过一年的,不需审批,由转让方与受让方平等协商,自主开展;交易期限超过一年的,事前报灌区管理单位或者县级以上地方人民政府水行政主管部门备案。

典型降雨情景:降雨量预测将为农业、水利、防汛等工作提供前瞻性指导,有科学的降雨预测分析是计划工作的前提条件,能够使管理具有预见性。典型的降雨情景是指区域的降雨状态,即依据区域降雨量进行丰水年、平水年或是枯水年的状态划分。降雨量的预测是水期权交易的核心,直接影响着交易价格和权利金等相关费用的确定。降雨情景的划分及相关概率的计算如表1所示。

### 1.2 考虑降雨量的水权期权交易流程

基于中国水权交易所水权交易流程,考虑降雨量对水期权交易的作用机制,在水期权交易过程中增加了降雨量预测环节,在拥有降雨量预测信息的基础上确定水权期权交易的相关费用,使交易流程更加合理,交易相关费用的制定更加科学。为进一步规范交易流程与定价机制,根据降雨量预测信息,增加了水期权交易权利金的测算环节,针对性地改进了传统水权期权交易流程。期权理论下的水权交易流程图如图2所示。

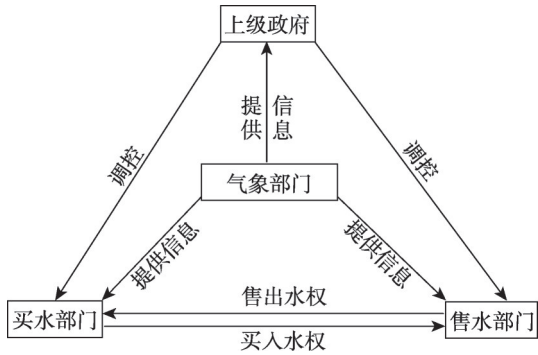


图1 交易对象关系结构图

Fig. 1 Structure diagram of transaction object relations

表1 典型降雨情景划分表

Table 1 Classification of typical rainfall scenarios

序号	级别	降雨量区间/mm	状态预测结果	最终结果
1 (干旱)	枯水年	$X < X_{min}$	$P_1 = X_1$	$P_k = X_1 + X_2$
2 (偏旱)		$X_{min} < X < X_{min} + S$	$P_2 = X_2$	
3 (正常)	平水年	$X_{min} + S < X < X_{min} + 2S$	$P_3 = X_3$	$P_f = X_3$
4 (偏涝)	丰水年	$X_{min} + 2S < X < X_{min} + 3S$	$P_4 = X_4$	$P_f = X_4 + X_5$
5 (洪涝)		$X > X_{max}$	$P_5 = X_5$	

水期权交易流程主要包括用户(买方与卖方)申请、降雨量预测、公告、协议签订、取水权变更、双方交易等基本流程,具体如下:(1)水期权出让方和受让方提出购买或出让水权的申请。(2)依据《水期权交易申请书》提供的信息在网站和相关平台进行公告,信息公告(挂牌)包括挂牌方、买卖双方、所在地区、挂牌水量等。(3)依据受让方和出让方的意向进行配对,产生匹配的交易对象或由交易双方自身达成交易意向。(4)只产生一个符合条件的交易对象的,采取协议定价方式;产生两个及以上符合条件的交易对象的,采取单向竞价方式,使得双方调整意向价格达成一致。(5)水期权出让方与受让方在中国水权交易中心指导下就交易期限和价格等方面进行协商,最终签订水期权交易买进选择权三方协议。(6)到达交易时间后由受让方决定是否买入水权,如若买入水权,将三方协议上报地方水务部门备案,对配水指标进行变更并组织实施水期权交易;如若放弃买入水权,则出让方将获得一定的权利金。

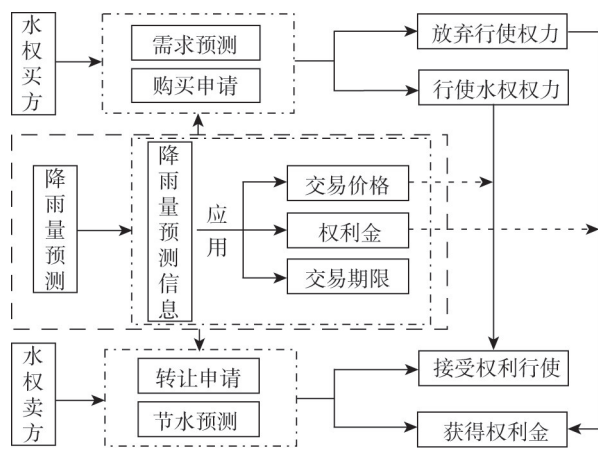


图2 期权理论下的水权交易流程图

Fig. 2 Flow diagram of water rights transaction based on option theory

在协议定价和单项竞价过程中,气象部门进行降雨量的预测,并及时公开降雨量预测的相关信息。假设人们在进行水期权交易时是理性的,交易双方在保证收益的同时将风险控制有效范围内,为确保交易双方在交易价格和权利金的制定方面有据可依,制定出合理的交易价格和权利金,将参考降雨量预测信息融入到水期权交易价格和权利金的制定过程。

## 2 考虑降雨量的水期权交易动态定价机制

水期权交易相关费用的制定融合降雨量的预测分析,将加大费用制定的客观性。在水期权相关费用制定方面,除了降雨量是影响协定交易价格的主要因素,水期权交易的时间长短、供求关系、地区丰枯指数等也是影响水期权交易费用的重要指标,本文主要研究考虑降雨量的水期权交易,因此以降雨量为核心因素进行分析。

进行期权交易的关键在于对未来市场风险的预估,即未来市场获利和亏损的概率。

类似地进行水期权交易的关键在于对未来降雨情况(丰水期或枯水期)的判断,未来不同降雨情景发生的概率就类似于期权市场涨跌的概率,是进行水期权交易的关键所在。因此对于水期权交易,未来降雨量的变化情况将直接影响水权交易的价格与权利金。因此,本文使用未来降雨量的变化概率代替传统金融期权中风险发生的概率,进而确定水期权交易的相关费用。

## 2.1 基于马尔科夫链的降雨量预测模型

我国进行生产和灌溉用水主要来源于地表水,降雨量是地表水的主要来源之一,降雨量的预测关系到区域种植结构和产业发展。随着科学技术的进步,人们能够对降雨量进行预测分析,但仍然存在一定的误差,即预估降雨量的发生与否是个概率事件。因此,越来越多的学者开始进行降雨量预测方面的研究。马尔科夫链是预测方面的经典模型,基于马尔科夫链预测模型,学者们提出了各具特色的降雨量预测方法。仲远见等<sup>[23]</sup>应用马尔可夫链预测模型对昆明市东川区的降雨量进行预测,且结果表明马尔科夫链预测的结果与实际情况一致;钱会等<sup>[24]</sup>将马尔科夫链与移动平均法结合对石嘴山市的年降雨量进行预测;王涛等<sup>[25]</sup>根据马尔可夫链预测方法建立了适用于银川地区年降雨量的加权马尔可夫链预测模型。众多学者的研究表明马尔科夫链在降雨量预测方面具有理论支撑。因此,本文也将基于马尔科夫链开展考虑降雨量影响的水期权交易定价工作,以期建立健全水期权交易价格机制提供支撑。

### (1) 降雨量状态的划分

在用马尔科夫链解决降雨量预测方面的相关实际问题时,首先要确定马尔科夫预测模型的状态空间和参数集合。根据降雨量大小对雨量状态进行划分,假设降雨量分为洪涝、偏涝、正常、偏旱、干旱等多种状态,确定马尔科夫过程的状态空间<sup>[26]</sup>:

$$E = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\} \quad (1)$$

式中: $X_n$ 表示降雨量的 $n$ 种状态。未来的降雨量状态 $X_i$ 是状态空间 $E$ 中的其中一种状态, $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

### (2) 降雨量状态转移概率及概率矩阵的确定

降雨量状态经过一次转换,必然出现 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 中的一种降雨量状态,且每一时刻的状态仅仅取决于紧接在它前面的随机变量的状态,而与这之前的状态无关,其马尔科夫链的状态转移概率可表示为:

$$P(X_{i+1}=x|X_0, X_1, X_2, \dots, X_n) = P(X_{i+1}=x|X_i) \quad (2)$$

式中: $X_{i+1}$ 为时间 $i+1$ 的降雨量状态; $X_i$ 为时间 $i$ 的降雨量状态,且状态 $X_{i+1}$ 的发生仅与状态 $X_i$ 有关。

由降雨量状态转移概率组成的矩阵 $(P_{ij}(n, n))$ ,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ;  $j=1, 2, 3, \dots, n$ ,称为马尔科夫链的降雨量状态转移概率矩阵。

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $P_{ij}$ 表示降雨量从状态 $i$ 转移到状态 $j$ 的概率。

### (3) 最终状态的确定

根据降雨量的初始状态划分,结合降雨量相应的状态转移概率和转移概率矩阵,可

预测出每种降雨量状态下的概率  $P_i$ ,  $i \in (1, 2, 3, \dots, n)$ , 根据降雨量的预测结果将河流水位划分为枯水期、平水期、丰水期三种情况, 并计算出三种情况各自的概率,  $P_k$  为枯期概率,  $P_p$  为平雨期概率,  $P_f$  为丰雨期概率。根据隶属度最大原则, 确定最终的降雨量状态为  $P_z$ :

$$\max\{P_z, z \in (k, p, f)\} \quad (4)$$

式中:  $P_z$  为最终预测结果;  $k$  为枯雨期标识;  $p$  为平雨期标识;  $f$  为丰雨期标识。

## 2.2 考虑降雨量的水期权交易动态定价模型

水期权交易价格是在水期权到期时, 买卖双方之间实际达成的交易价格, 即水期权卖方因向水期权买方出售水资源而收取的水资源费用。进行在水期权交易过程中, 交易价格的确定至关重要, 它决定着最终水期权交易双方的收益情况, 是水期权交易过程中的核心问题。为使交易价格更加科学合理, 突出水期权交易的特点和降雨量在水期权交易中的作用, 将降雨量的预测结果融入到水期权交易价格的测算中, 使之更加符合水期权交易的实际需求。

根据降雨量的状态划分和预测情况, 结合式 (1) ~ (4) 的运算, 判断降雨量的水位状态情况, 通过式 (5) 确定水期权交易价格。

$$S_f = [\alpha \times S_n \times (1 + Q) + (1 - \alpha) \times S_n \times (1 - Q)] \times \left(a - \frac{1}{e^T}\right) (1/\delta) \quad (5)$$

式中:  $S_f$  为水期权交割价格;  $S_n$  为实时水价;  $Q$  为价格调节系数 (枯水期时  $Q=P_k$ , 丰水期时  $Q=P_f$ );  $T$  为水期权交易期限;  $a$  为期限调节力度;  $\delta$  为当地水资源紧张指数<sup>[27]</sup>;  $\alpha$  为雨量状态调节系数 (当水位状态处于枯水期时  $\alpha=1$ , 当水位状态处于平水期时  $\alpha=1/2$ , 当水位状态处于丰水期时  $\alpha=0$ )。

## 2.3 考虑降雨量的水期权交易权利金测算模型

类似于金融产品的权利金, 在水期权交易中, 权利金是水期权买方支付给卖方的费用, 其目的是为获取水期权合约所赋予的权利。对于水期权买方而言, 权利金是水期权到期日的违约金, 对于水期权卖方来说, 权利金是卖出水期权所获得的报酬。在水期权到期日如果水期权买方能够获利, 则按照水期权交易价格行使权力, 如果水期权买方不能够获利, 就会选择放弃权利, 其所付出的最大代价就是权利金 (即违约金)。因此, 水期权交易过程中权利金的测算至关重要。

1973年 Black 等<sup>[28]</sup>提出了 Black-Scholes 期权定价模型后, 该模型被广泛应用到供应链期权约定定价<sup>[29]</sup>、信托保证基金缴费定价<sup>[30]</sup>、环境污染责任保险定价<sup>[31]</sup>、价值评估<sup>[32]</sup>等方面, 说明了该模型在权利金测算方面的有效性。本文基于传统的 Black-Scholes 期权理论构建考虑降雨量的水期权权利金测算模型, 如果将 Black-Scholes 期权定价模型用于水期权交易权利金的确定中, 必须根据水期权交易的特点对模型的相关参数进行重新定义。在金融期权领域  $\sigma$  为金融产品的年度波动率, 年波动率与权利金有正相关性, 在传统金融领域标的资产的波动率越大, 期权卖方承担的价格风险就越大, 因此期权买方需要支付较高的权利金。有别于金融期权的套利动机, 水价的波动较小, 但类似在水期权领域, 未来一段时期为枯雨期的概率  $p$  越大, 水价在未来一段时间上涨的概率越高, 即水期权的卖方承担的风险就越大, 水期权的权利金越高。基于此, 结合式 (1) ~ 式 (5) 的运算, 水期权权利金的改进 Black-Scholes 定价模型如下<sup>[28]</sup>:

$$C = S_n \times N(d_1) - S_f e^{-rt} N(d_2)$$

$$\begin{cases} d_1 = \frac{\ln \frac{S_n}{S_f} + (r + 0.5p^2)T}{p \times \sqrt{T}} \\ d_2 = \frac{\ln \frac{S_n}{S_f} + (r - 0.5p^2)T}{p \times \sqrt{T}} = d_1 - p\sqrt{T} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $C$ 为水期权权利金;  $S_f$ 为水期权交割价格;  $S_n$ 为实时水价;  $T$ 为水期权交易期限;  $r$ 为无风险利率;  $p$ 为水位状态是枯雨期的概率。

#### 2.4 考虑降雨量的水期权交易价格边际敏感性模型

实践是检验模型有效性的重要标准, 价格是否合理取决于消费者是否认同。为验证模型所确定的水期权交易价格的合理性, 运用扩展线性支出系统进行水期权交易价格的合理性检验。扩展线性支出系统 (Extended Linear Expenditure System, ELES), 是由经济学家 Liuch 于 1973 年提出的一种经济意义清楚、具有广泛应用价值的需求函数模型, 通常用于分析消费者的生活消费结构<sup>[33,34]</sup>。文章从支付能力的角度出发, 以居民消费支出结构数据为基础, 根据计量经济学的需求函数理论, 应用扩展线性支出系统 (ELES) 模型, 分析水期权交易价格的合理性。ELES 模型的基本形式为<sup>[35]</sup>:

$$p_i q_i = p_i r_i + \beta_i \left( I - \sum_{j=1}^n p_j r_j \right), \quad i=1, 2, 3 \leq n \quad j=1, 2, 3 \leq n \quad (7)$$

式中:  $p_i$ 为第  $i$  种商品 (或服务) 的价格;  $q_i$ 为消费者对  $i$  种商品 (或服务) 的实际需求量;  $r_i$ 为消费者对  $i$  种商品 (或服务) 的基本需求量 ( $q_i > r_i > 0$ );  $\beta_i$ 为消费者对第  $i$  种商品 (或服务) 的边际消费倾向 ( $0 < \beta_i < 1, \sum \beta_i \leq 1$ );  $I$ 为消费者的收入。

根据我国统计年鉴的分类方法, 食品、衣着、居住、生活用品及服务、交通通讯、教育文化娱乐、医疗保健、其他用品和服务等八大类是我国居民消费支出的组成部分, 在住户调查中水费是作为居住类支出进行统计。因此, 鉴于水资源费用的特殊性, 进行居民水费支付能力分析时需将水费从居住类费用中提取出来, 单独作为消费支出的一项并与其余各项一起进行模型的计算与分析。对于截面数据,  $p_i q_i$ 与  $\sum p_j r_j$ 均为常数, 将水资源作为商品, 则对式 (7) 进行如下数学变换, 则有:

$$\alpha_i = p_i r_i - \beta_i \sum_{j=1}^n p_j r_j, \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad j=1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

$$p_i q_i = \alpha_i + \beta_i I, \quad j=1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

$$p_i q_i = \alpha_i + \beta_i \sum_{i=1}^n \alpha_i / \left( 1 - \sum_{i=1}^n \beta_i \right), \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

通过公式变换可得出用水需求的收入弹性 ( $\eta_i$ ), 即:

$$\eta_i = \frac{\partial q_i}{\partial I} \times \frac{I}{q_i} = \beta_i \frac{I}{p_i q_i}, \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (11)$$

通过计算不同时期的边际消费倾向, 分析人们在满足基本生活需求后, 水费支出占剩余可支配收入的比例, 即按照模型所确定的水价, 当可支配收入每增加一单位将有多少会用于增加水费支出, 进而可以分析居民对模型所确定水价的承受能力。运用 ELES

模型计算水需求的收入弹性,分析人们在水价保持不变时,收入变化所引起的用水需求量变化,即当收入变化1%时引起的用水需求量变化的百分比,进而分析人们用水消费支出受收入提高的影响。

### 3 案例分析

#### 3.1 研究区概况与数据来源

广东省位于我国珠江流域下游,属与热带和亚热带季风气候区域,是全国降水最丰沛的地区之一。根据广东省区域年降水量,全省分为三个多降水中心和四个少降水区域;根据月降水量统计,广东省降雨量主要集中在5-10月,占全年降雨量的70%以上,存在严重的水资源时间分布不均问题,是开展水期权交易的重要区域。

广东省位于南岭以南,靠近我国南海岸线,年平均水资源总量为1830亿 $\text{m}^3$ ,其中地表水资源量最为丰富,达1820亿 $\text{m}^3$ ,地下水资源量占比较低,为450亿 $\text{m}^3$ ,包含了两者的重复计算数。广东省降雨时间和降雨区域上存在严重分布不均匀问题,每年4-10月是广东省汛期,是降雨量的集中时间,大约占全年降水量的70%~85%,各年降雨量相差较大,最大年降雨量可达到最小年降雨量的1.84倍,局部地区甚至可以达到三倍之多。广东省年均降雨量为1774 mm,年均水资源总量为1830亿 $\text{m}^3$ ,人均1663.79  $\text{m}^3$ 。广东省内水资源不仅包括本省内自产的水资源,还包括珠江和汉江上游临近省份流入的水资源(2361  $\text{m}^3$ )。从数据上看,广东省的水资源总量相对于国内其他省份而言,属于相对较为丰富的省份。然而,广东省相对于其他省份而言,水资源供需方面存在着严重的不平衡问题,水资源短缺形势十分严峻。由于广东省独特的地势形态不利于水资源的存储,一次缺水现象尤为突出,其中缺水最严重的地区是粤西雷州半岛。基于此,选取广东省作为本文案例,进行水期权交易案例分析。广东省2005-2017年的降雨量信息[数据来源于广东省气象局气象年鉴(<http://gd.cma.gov.cn/>)和广东省人民政府官方网站(<http://www.gd.gov.cn/>)]如图3所示。

#### 3.2 计算结果分析与交易策略

根据图3中广东省历年降雨量信息进行降雨量的状态和区间划分,并根据马尔科夫链相关理论,运用式(1)~式(4)对广东省进行未来降雨量的预测,预测结果如表2所示。

假设广东省某一用水单位向另一用水单位出售水期权契约,该期权的交易期限为1年,当前的水价为0.63元/ $\text{m}^3$ 。

从气象部门得知降雨量预测结果的基础上进行水权交易,根据式(5)计算水期权交易价格,可以得到广东省2018年进行水权期权交易的价格应定为0.71元/ $\text{m}^3$ ,即在期权到期日,买方在购买实物水资源时需要支付的价格为0.71元/ $\text{m}^3$ 。根据式(6)计算可以得到水权交易的权利金应定在0.078元/ $\text{m}^3$ 比较合适,即若在期权到期日,水期权交易买方放弃购买相应的水资源时需要按照0.078元/ $\text{m}^3$ 的价格支付给水期权交易卖方权利金。按照此种交易流程进行水期权交易,此种方法进

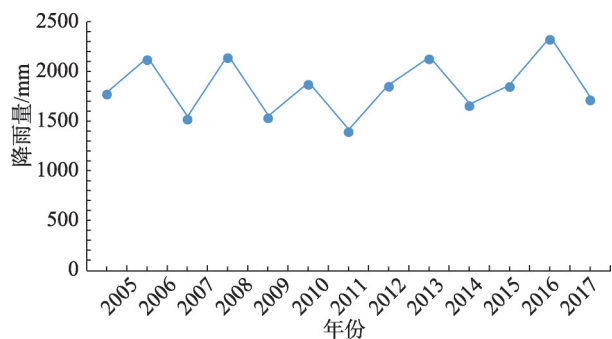


图3 广东省降雨量信息统计图

Fig. 3 Statistical diagram of rainfall information in Guangdong province



表2 降雨状态的划分与预测结果统计表

Table 2 Classification of rainfall state and statistical table of forecast result

序号	级别	降雨量区间/mm	状态预测结果	最终结果
1 (干旱)	枯水年	$X < 1576.6$	$P_1 = 0.2563$	$P_A = 0.4101$
2 (偏旱)		$1576.6 < X < 1762.7$	$P_2 = 0.1538$	
3 (正常)	平水年	$1762.7 < X < 1948.8$	$P_3 = 0.3077$	$P_B = 0.3077$
4 (偏涝)	丰水年	$1948.8 < X < 2134.9$	$P_4 = 0.1027$	$P_C = 0.2822$
5 (洪涝)		$X > 2134.9$	$P_5 = 0.1795$	

行交易价格和权利金的设定,不仅有益于进一步完善我国水期权交易市场,促进水期权交易活动的开展,更为我国水期权交易过程中相关费用的测算提供了科学依据,使水期权交易相关费用的计算有据可依,弥补了以往依靠协商定价存在的不足。

在实时水价 $S_n$ 、无风险利率 $r$ 、交易期限 $T$ 不变的情况下,将年实际降雨量与年均降雨量比较判断丰缺情况。假设模型预测的降雨量低于年均降雨量时 $\alpha=1$ 、 $a=1$ ,模型预测降雨量高于年均降雨量时 $\alpha=0$ 、 $a=3/2$ 。将2005-2018年以来广东省的降雨量信息与年均降雨量相比较,判断广东省历年的丰枯情况,依据丰枯信息进行交易价格和权利金的制定,绘制降雨量、交易价格、权利金三者的关系图,如图4所示。从图中可以看出,降雨量与水期权交易价格成反比,即降雨量较多的年份,水期权交易价格较低,这是由于较高的降雨量调整了水市场的供需关系,使水资源的供给量得到提升,即充分的降雨量缓解了人们的水资源需求;降雨量与权利金成正比,即降雨量较少的年份,水期权交易的交易价格较低,这是由于降雨量越低,进行水期权交易的可能性越大,水期权交易买方违约的可能性越小,权利金越低;交易价格与权利金成反比,即交易价格越高权利金越低,这是因为交易价格越高卖方承担的风险越低,作为应对风险的权利金越低。

假设水期权交易双方都是理性的,交易目的都是最大化收益和最小化损失,水期权交易价格和权利金是促进水期权买卖双方进行期权交易的重要因素,水期权到期日交易策略过程如图5所示。若在水期权到期日出现实时水价高于前期交易价格,水期权交易买方通过水价差值判断是否实施水期权交易,在水价差值高于权利金时,通过水期权交易买方可以获得一定的收益;相反当水价差值低于权利金时,从成本效益最大化的角度分析,则买方有可能放弃交易,卖方获得权利金数额的收益。若在期权到期日出现实时

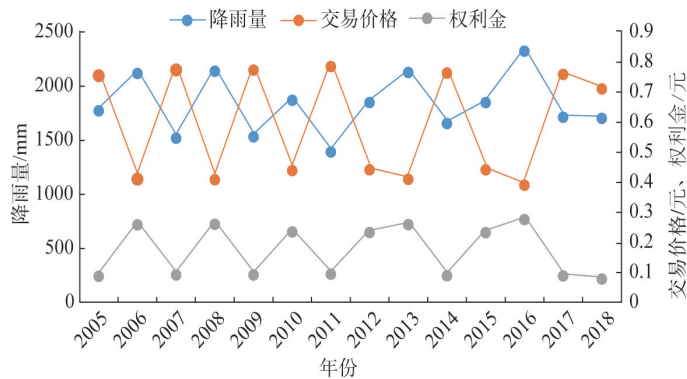


图4 降雨量、交易价格、权利金关系

Fig. 4 Relationship of rainfall, transaction price and royalty

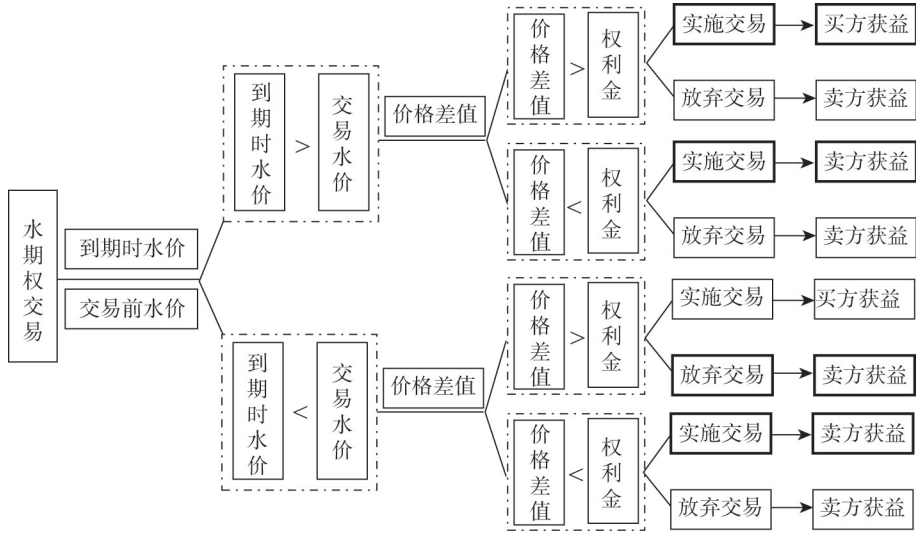


图5 水期权到期日交易策略图

Fig. 5 Strategic diagram of trading on the maturity date of water options

水价低于前期交易价格，水期权交易买方仍通过水价差值判断是否实施水期权交易，在水价差值高于权利金时，从损失最小化的角度分析，水权交易买方有可能放弃实施水权交易，卖方获得权利金数额的收益；相反当价格差值低于权利金时，从损失最小化的角度分析，买方有可能实施水权交易，从而减少损失。

#### 4 基于ELES模型的水期权交易动态定价合理性分析

##### 4.1 基础数据

根据广东省统计局《广东省统计年鉴》(2013-2017年)“广东省城镇常住居民收支情况”、广东省人民政府官网和广东省水利厅《广东省水资源公报》(2013-2017年)“供用水量”公布的数据(表3)，按照模型所计算出的水价计算居民在水费方面的支出，水费支出可根据水量乘以水价进行计算。表中总消费支出和人均可支配收入均为直接获取得到的数据，水费支出项为水量乘以水价间接获取得到的数据。

表3 广东省城镇常住居民年收支情况表

Table 3 Annual income and expenditure of the inhabitants in Guangdong province

(元)

项目	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
可支配收入	29537.3	32148.1	34757.2	37684.3	40975.14
生活消费支出	21621.5	23611.7	25673.1	28613.3	30197.92
食品	7254.0	7850.2	8533.4	9421.6	9711.65
衣着	1283.2	1344.7	1453.7	1583.4	1587.10
居住	4939.56	5243.07	5668.3	6361.79	7078.86
生活用品及服务	1235.2	1365.1	1526.3	1721.9	1782.84
交通通信	3139.0	3625.4	3905.0	4198.1	4285.55
教育文化娱乐	2315.6	2468.4	2671.5	3103.4	3284.28
医疗保健	793.6	988.3	1096.4	1304.5	1503.56
其他用品和服务	613.0	678.1	771.4	870.1	915.10
水费支出	45.88	46.39	47.41	48.42	48.78

运用表3中广东省城镇常住居民收支情况统计报中的(2013-2017年)数据,以居民消费的支出结构数据为基础,根据计量经济学的需求函数理论,应用ELES模型,分析计算出的水期权交易价格的合理性。

#### 4.2 参数拟合

运用ELES模型和统计学理论,根据2013-2017年广东省居民人均可支配收入和水费支出数据进行模型参数估计。表4的计算结果表明,回归模型的判断系数 $R^2$ 均在0.92以上,说明ELES模型的各项支出拟合度较高,即可以利用模型进行定量分析。回归方程的 $F$ 值通过检验,且根据显著性检验方法得到的 $P$ 值均小于0.05,表明各项消费支出与可支配收入之间存在一定的函数关系,即样本中变量的关联是总体中各变量关联的可靠指标。因此,广东省水费支出及整体消费结构的定量分析可以利用此模型与数据进行。

表4 ELES模型参数估计结果

Table 4 Parameter estimation results based on ELES model

项目	$\alpha_i$	$\beta_i$	$R^2$	$F$	$P$
生活消费支出			0.993	438.112	0.000
食品	610.372	0.227	0.973	109.543	0.002
衣着	417.267	0.030	0.933	41.675	0.008
居住	-832.607	0.191	0.984	186.861	0.001
生活用品及服务	-251.094	0.051	0.971	99.036	0.002
交通通信	347.558	0.099	0.922	35.662	0.009
教育文化娱乐	-404.733	0.009	0.973	109.670	0.002
医疗保健	-1004.331	-0.061	0.995	640.025	0.000
其他用品和服务	-206.202	0.028	0.979	141.003	0.001
水费支出	37.785	0.000274	0.968	90.456	0.002

由表4可知,按照模型所制定的水价,居民在不同时期用水的边际消费倾向为0.00027,与其他各类消费倾向相比,水费支出的边际消费倾向最低,表明在满足基本生活需求后相对于其他商品而言,水费支出占剩余可支配收入的比例较小,即当居民的可支配收入每增加一单位,仅有0.027%会用于增加水费的支出。因此就平均收入水平而言人们对现行水价具有承受能力,表明运用模型所制定的水价具有一定的合理性。

#### 4.3 水价承受能力分析

从用水的需求收入弹性入手,进行水价的合理性分析,用水需求的收入弹性是指当水价不变的时候,每当收入变化1%时引起的用水需求量变化的百分比。为更准确地分析水价合理性,从消费者对水价的支付能力和承受能力两个方面进行模型水价的合理性分析。

由表5可知,在水费支付能力方面,表中结果显示消费者的水费支出占生活消费支出和可支配收入的百分比均在0.12%~0.22%之间,远小于3%的标准,表明对于消费者而言,与其他消费支出相比水费支出项的金额占总消费支出的比例较小。在水费承受能力方面,消费者的用水需求弹性为缺乏性收入弹性,因为消费者的水费需求收入弹性均小于1%,且在不同时期水费的需求收入弹性变化趋势不显著,说明相对于其他消费支出而言,当消费者的可支配收入增加时,消费者更愿意把增加的收入花在其他的地方,即可支配收入的提高对用水需求消费支出的影响不大,从而说明了模型制定的水价相对而言并不高,消费者在一定区间范围内可以承受水价的上涨。表明按照模型确定的水价在人们的支付能力范围之内,从而证明模型确定交易水价的合理性。

表5 水费支出占生活消费支出和可支配收入的比例

Table 5 Water expenditure as a proportion of living expenditure and disposable income (%)

指标	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
水费支出占生活消费支出的百分比	0.22	0.21	0.18	0.17	0.16
水费支出占可支配收入的百分比	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12
水费的需求收入弹性	0.176	0.190	0.201	0.213	0.230

#### 4.4 水价对比分析

在水市场领域，降雨量是影响水市场供需关系的主要因素，因此水价应随着降雨量的波动而发生变化，而现行水市场多采用阶梯型水价，不能充分体现出水资源市场的供需关系。为进一步说明模型波动水价的合理性，结合降雨量信息，将模型波动水价与现行阶梯水价进行对比分析。首先，根据图3中的降雨量信息和图4中模型计算的水价结合现行阶梯型水价进行对比分析；其次，将降雨量预测信息与模型计算的水价、降雨量预测信息与现行水价进行拟合分析。

由图6交易水价对比分析图可知，通过模型计算所得交易价格随着降雨的变化呈现波动趋势，近年来模型水价的均值  $\bar{x}_1=0.58$ ，方差  $\sigma=0.17$ 。现行交易价格在参考市场水价的基础上进行协商定价，随着经济社会的发展大多呈现出阶梯状，现行水价的均值  $\bar{x}_2=0.60$ ，方差  $\sigma=0.03$ 。两种水价在均值方面相差较小，但是在方差方面相差较大，水资源作为特殊的商品具备一般商品的特性，其价格受到供需平衡的影响，在国家允许的范围内应呈现出一定的波动趋势，不应该呈现水平趋势或保持不变。模型测算的交易价格在降雨量的影响下呈现波动趋势，更能体现出市场供需关系的变化，提高了交易价格的合理性与科学性。

降雨量是水资源供给方面的重要来源，而供需关系是价格形成的关键，形成能够体现水市场供需关系的水期权交易价格是水期权交易的核心。降雨量与模型水价进行拟合分析得出复相关系数  $R_1=0.869$ ，降雨量与现行水价进行拟合分析得出复相关系数  $R_2=0.028$ 。从计算结果上看，模型水价与降雨量的复相关系数远大于现行水价与降雨量的复相关系数，说明模型水价与降雨量的线性相关程度更加密切，即模型水价更能体现出水市场的供需关系。当降雨量增加时，水市场上水资源供应增加，水期权价格降低，当降雨量减

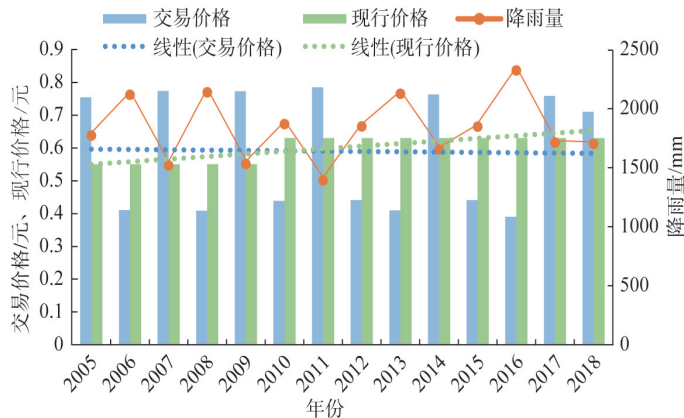


图6 交易水价对比分析图

Fig. 6 Contrastive analysis chart of transaction water price

少时,水市场上水资源供应减少,水期权价格增加,充分体现了水市场的供需平衡,更加符合实际情况。

## 5 结论与讨论

文章立足于水期权交易,将降雨量指标融入到水期权交易过程中,提出了考虑随机降雨预测的水期权交易方法,在原有水期权交易的基础上增加了气象部门,在气象部门对降雨量进行预测的基础上进行水期权交易。首先运用马尔科夫链进行降雨量的预测,构建考虑降雨量指标的水期权交易价格测算模型;然后运用改进Black-Scholes期权定价理论,构建考虑降雨量的水期权交易权利金测算模型;最后运用ELES模型,进行水期权价格的合理性和优越性检验。广东省水期权交易案例分析表明,模型所确定的水期权交易的相关费用较为合理,且交易价格、权利金与降雨量之间具备较强的相关性。降雨量是水资源供给的主要来源,现行的水价为阶梯水价,没有考虑降雨量这一水资源的重要供给,与降雨量之间的复相关系数较低,不能体现水市场的供需关系。模型计算所得水价为波动水价,与降雨量之间存在较高的复相关系数,充分体现了水资源市场的供需关系,交易价格更加合理。

本文提出的考虑降雨量的水期权交易能在一定程度上激发水权交易市场的潜力,增加交易过程中相关费用制定的客观性与合理性,弥补以往人们依靠协商定价的不足。但是,水资源受国家宏观调控的影响,不能像金融产品一样在市场上频繁交易,因此探索适合水资源交易的市场是激发水期权交易的前提。此外,与金融市场不同的是,目前我国水资源市场缺乏相应的法律保障体系,为了更好地开展水期权交易,提高水资源利用效率,还需要进一步完善水资源交易市场的法律法规。

## 参考文献(References):

- [1] 沈大军,张萌.水资源利用发展路径构建及应用.自然资源学报,2016,31(12):2060-2073. [SHEN D J, ZHANG M. Construction and application of water resources utilization development path. Journal of Natural Resources, 2016, 31(12): 2060-2073.]
- [2] 刁俊科,崔东文.基于鲸鱼优化算法与投影寻踪耦合的云南省初始水权分配.自然资源学报,2017,32(11):1954-1967. [DIAL J K, CUI D W. Initial water rights allocation in Yunnan province based on the coupling of whale optimization algorithm and projection pursuit. Journal of Natural Resources, 2017, 32(11): 1954-1967.]
- [3] 田贵良,张甜甜.我国水权交易机制设计研究.价格理论与实践,2015,(8):35-37. [TIAN G L, ZHANG T T. Research on the design of water right trading mechanism in China. Price Theory and Practice, 2015, (8): 35-37.]
- [4] 李胚,窦明,赵培培.最严格水资源管理需求下的水权交易机制.人民黄河,2014,36(8):52-56. [LI P, DOU M, ZHAO P P. Water rights trading mechanism under the strictest water resources management demand. People's Yellow River, 2014, 36(8): 52-56.]
- [5] 刘钢,杨柳,石玉波,等.准市场条件下的水权交易双层动态博弈定价机制实证研究.中国人口·资源与环境,2017,27(4):151-159. [LIU G, YANG L, SHI Y B, et al. An empirical study on the bi-level dynamic game pricing mechanism of water rights trading under quasi-market conditions. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(4): 151-159.]
- [6] REZNIK A, FEINERMAN E, FINKELSHTAIN I, et al. The cost of covering costs: A nationwide model for water pricing. Water Economics and Policy, 2016, 2(4): 1-39.
- [7] SHEN X, LIN B. The shadow prices and demand elasticities of agricultural water in China: A StoNED-based analysis. Resources, Conservation & Recycling, 2017, 127(6): 21-28.
- [8] 贾学秀,严岩,朱春雁,等.区域水资源压力分析评价方法综述.自然资源学报,2016,31(10):1783-1791. [JIA X X, YAN Y, ZHU C Y, et al. Review of regional water resources pressure analysis and evaluation methods. Journal of Natural Resources, 2016, 31(10): 1783-1791.]

- [9] MICHELSEN A M, YOUNG R A. Optioning agricultural water rights for urban water supplies during drought. *American Journal of Agricultural Economics*, 1993, 75(4): 1010-1020.
- [10] HOWITT R E. Empirical analysis of water market institutions: The 1991 California water market. *Resource and Energy Economics*, 1994, 16(4): 357-371.
- [11] WATTERS P A. Efficient Pricing of Water Transfer Options: Non-structural Solutions for Reliable Water Supplies. California: University of California-Riverside, 1995.
- [12] WHITTLESEY N K, HUFFAKER R G. Water policy issues for the twenty-first century. *American Journal of Agricultural Economics*, 1995, 77(5): 1199-1203.
- [13] ROZAKLIS L R W. Metropolitan water supply investigation: Final report. Colorado: Report to the Colorado Water Conservation board, 1990.
- [14] VILENSKI. Valuing multiple-exercise options contracts: Methodology and application to water markets. Colorado: American Agricultural Economic Association Annual Meeting, 2003, 5: 1178-1199.
- [15] HAFI A, BEARE S, HEANEY A. Water options for environmental flows. *Abare Report*, 2005, 10: 1725-1737.
- [16] 王浩. 可持续发展观念下的水价政策与实施建议. *北京水利*, 1997, (1): 9-12. [WANG H. Water price policy and implementation suggestions under the concept of sustainable development. *Beijing Water Resources*, 1997, (1): 9-12.]
- [17] 张郁, 秦丽杰, 靳英华. 用期货市场思路建立南水北调水市场设想. *中国人口·资源与环境*, 2002, 12(2): 59-62. [ZHANG Y, QIN L J, YAN Y H. Establishing the water market of south-to-north water transfer in the futures market. *China Population, Resources and Environment*, 2002, 12(2): 59-62.]
- [18] 王慧, 王慧敏, 仇蕾, 等. 南水北调东线水期权契约及其定价模型研究. *软科学*, 2008, 22(7): 7-10. [WANG H, WANG H M, QIU L, et al. Research on water option contract and its pricing model for the east route of South-to-North Water Transfer Project. *Soft Science*, 2008, 22(7): 7-10.]
- [19] 王慧敏, 王慧, 仇蕾, 等. 水期权及其定价模型: 以南水北调东线为例. *系统工程*, 2008, 26(7): 45-51. [WANG H M, WANG H, QIU L, et al. Water option and its pricing model: Taking the east route of South-to-North Water Transfer as an example. *Systems Engineering*, 2008, 26(7): 45-51.]
- [20] 仇蕾, 王慧, 王慧敏, 等. 基于蒙特卡罗的水期权定价模型: 以南水北调东线为例. *统计与决策*, 2008, (23): 61-64. [QIU L, WANG H, WANG H M, et al. Water option pricing model based on Monte Carlo: Taking the eastern route of South-to-North Water Transfer as an example. *Statistics and Decision*, 2008, (23): 61-64.]
- [21] 周进梅, 吴风平. 南水北调东线工程水期权交易及其定价模型. *水资源保护*, 2014, 30(5): 91-94. [ZHOU J M, WU F P. Water option trading and pricing model for the east route of South-to-North Water Transfer Project. *Water Resources Protection*, 2014, 30(5): 91-94.]
- [22] 石常峰, 田贵良, 孙兴波, 等. 应对干旱事件的虚拟水期权契约设计研究. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(6): 71-76. [SHI C F, TIAN G L, SUN X B, et al. Research on virtual water option contract design for response to drought events. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(6): 71-76.]
- [23] 仲远见, 李靖, 王龙. 改进马尔可夫链降雨量预测模型的应用. *济南大学学报: 自然科学版*, 2009, 23(4): 402-405. [ZHONG Y J, LI J, WANG L. Application of improved Markov chain rainfall prediction model. *Journal of Jinan University: Natural Science Edition*, 2009, 23(4): 402-405.]
- [24] 钱会, 李培月, 王涛. 基于滑动平均—加权马尔可夫链的宁夏石嘴山市年降雨量预测. *华北水利水电学院学报*, 2010, 31(1): 6-9. [QIAN H, LI P Y, WANG T. Prediction of annual rainfall in Shizuishan city, Ningxia based on Moving Average-weighted Markov chain. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Engineering*, 2010, 31(1): 6-9.]
- [25] 王涛, 钱会, 李培月. 加权马尔可夫链在银川地区降雨量预测中的应用. *南水北调与水利科技*, 2010, 8(1): 78-81. [WANG T, QIAN H, LI P Y. Application of weighted Markov chain in rainfall prediction in Yinchuan region. *South-to-North Water Transfer and Water Science and Technology*, 2010, 8(1): 78-81.]
- [26] MAUROGASPARINI. Markov chain monte carlo in Practice. *Technometrics*, 1997, 39(3): 235-246.
- [27] FALKENMARK M, LUNDQVIST J, WIDSTRAND C. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: Aspects of vulnerability in semi-arid development. *Natural Resources Forum*, 1989, 13(4): 258-267.
- [28] BLACK F, SCHOLES M. The pricing of options and corporate liabilities. *Journal of Political Economy*, 1973, 81(3): 637-654.
- [29] 李璐含. 基于Black-Scholes公式的供应链期权契约的定价研究. *商场现代化*, 2016, (15): 10-11. [LI L H. Pricing of supply chain option contract based on Black-Scholes formula. *Modernization of Shopping*, 2016, (15): 10-11.]
- [30] 陈涵, 涂永式. 我国信托保障基金缴费定价标准的理论探析: 基于Black-Scholes期权定价模型的实证. *价格理论与*

- 实践, 2015, (12): 133-135. [CHEN H, TU Y S. Theoretical analysis of China's trust guarantee fund payment pricing standard: Based on the empirical study of Black-Scholes option pricing model. *Price Theory and Practice*, 2015, (12): 133-135.]
- [31] 李书强. 环境污染责任保险定价实证研究: 基于Black-Scholes模型之视角. 第十届北大赛瑟(CCISSR)论坛, 中国北京, 2013. [LI S Q. Empirical study on the pricing of environmental pollution liability insurance: Based on the perspective of Black-Scholes model. The 10<sup>th</sup> Beijing University of Seychelles (CCISSR) Forum, Beijing, China, 2013.]
- [32] 彭菁菁. Black-Scholes模型与DCF模型在B2B电子商务企业价值评估中的互补应用. *金融经济*, 2014, (16): 97-99. [PENG J J. Complementary application of Black-Scholes model and DCF model in B2B E-commerce enterprise value evaluation. *Financial Economy*, 2014, (16): 97-99.]
- [33] 俞培果, 沈云, 刘群. 扩展线性支出系统预测精度的验证研究. *数理统计与管理*, 2002, 21(5): 37-41. [YU P G, SHEN Y, LIU Q. Validation research on prediction accuracy of extended linear expenditure system. *Journal of Mathematical Statistics and Management*, 2002, 21(5): 37-41.]
- [34] 李子奈. *计量经济学: 方法和应用*. 北京: 清华大学出版社, 2002: 86-98. [LI Z N. *Econometrics: Methods and Applications*. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 86-98.]
- [35] LLUCH C. The extended linear expenditure system. *European Economic Review*, 1973, 4(1): 21-32 .

## Dynamic pricing mechanism of regional water option trading considering random rainfall forecast: A case study of Guangdong province

XU Hao<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Management Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Collaborative Innovation Center for Coastal Development and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Water option trading aims at solving the problem of uneven spatial and temporal distribution of water resources. With the change of global climate, rainfall has become an important factor leading to the uneven spatial and temporal distribution of water resources. In this paper, Markov chain is used to divide and forecast the rainfall scenarios. On the basis of rainfall forecast, the related costs of water option trading are determined. The forecast results of rainfall index are integrated into the determination of the ultimate overprice of water options. The improved Black-Scholes option pricing model is used to determine the rights of water options trading based on the forecast results of rainfall. Finally, the rationality of the calculation results is verified by using the extended linear expenditure model, which proves the rationality of the transaction price determined by the model. Taking Guangdong province as an example, this paper verifies the necessity of incorporating rainfall index into water option trading and the rationality of the related costs of water option trading determined by the model, and proves the superiority of fluctuating water price over stepped water price. Water option trading considering rainfall fully reflects the relationship between supply and demand in water market, and improves the scientificity of water option trading pricing in China.

**Keywords:** water rights option; rainfall; Markov chain; Black-Scholes model; ELES model