

基于全价值和全成本模型的农业水价方案及其可行性分析

成琨¹ 王子欣² 孙楠²

(1. 东北农业大学理学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对现行农业水价标准过低的问题, 选取粮食主产区——黑龙江省为研究区域, 从农业用水全价值和全成本出发, 利用能值理论分析确定农业用水价值, 采用全成本水价法确定用水成本, 结合现行水价制定不同情境下农业水资源定价方案; 运用双对数模型建立农业用水需求价格函数, 揭示水价提升带来的研究区域节水潜力, 结合指数分析法确定农户可承受能力, 从而判断所制定水价方案的可行性。结果表明: 2020年, 农业水资源全价值为0.594元/m³, 地表水与地下水全成本分别为0.180元/m³和0.355元/m³; 针对设计的3种阶梯水价调整方案, 利用2005、2010、2015、2020年进行实证分析, 过渡期和长期水价方案平均年节水量分别可达 2.72×10^9 、 4.45×10^9 m³, 平均年节水潜力分别为12.74%、19.48%, 且一阶水价均在农户可承受能力范围, 确定为可行方案。本文为研究区农业水价综合改革提供了支持, 可结合实际情况逐步提高农业水价到合理水平。

关键词: 农业水价; 农业水资源全价值模型; 改进的全成本水价模型; 能值理论; 阶梯水价

中图分类号: F323.213 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)05-0356-12

OSID:



Agricultural Water Pricing Programs and Feasibility Analysis Based on Full-value and Full-cost Model

CHENG Kun¹ WANG Zixin² SUN Nan²

(1. College of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Aiming at the problem of low agricultural water price, Heilongjiang Province, the main grain producing area, was selected as the study area. Starting from the full-value and full-cost of agricultural water, the value of agricultural water use was analyzed by using the emergy theory, the cost of water use was determined by using the full-cost water pricing method, and the pricing of agricultural water resources was formulated in different situations by combining with the current price of water. A double logarithmic model was used to establish the price function of agricultural water demand, reveal the potential for water saving in the study area brought about by the increase in water price, and determine the affordability of farmers by combining with the index analysis method, so as to judge the feasibility of the water pricing scheme formulated. The results showed that in 2020, the full-value of agricultural water resources was 0.594 yuan/m³, and the full-costs of surface water and groundwater were 0.180 yuan/m³ and 0.355 yuan/m³, respectively; for the three designed ladder water price adjustment schemes, empirical analyses were carried out by using the years of 2005, 2010, 2015, and 2020, and in the case of the transition period and the long-term water price scheme, the average annual water savings respectively can be up to 2.72×10^9 m³ and 4.45×10^9 m³, the average annual water saving potential was 12.74% and 19.48%, and the first-order water price was in the range of the affordability of farmers, which was determined as a feasible program. The research result can provide support for the comprehensive reform of agricultural water price in the study area, which can be combined with the actual situation to gradually increase the agricultural water price to a reasonable level.

Key words: agricultural water pricing; full-value model of agricultural water resources; improved full-cost water pricing model; emergy theory; laddered water pricing

收稿日期: 2023-09-27 修回日期: 2023-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179007)和黑龙江省自然科学基金项目(LH2022E009)

作者简介: 成琨(1978—), 女, 副教授, 博士, 主要从事农业水资源管理研究, E-mail: chengkun9607@126.com

通信作者: 孙楠(1981—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土环境修复研究, E-mail: sunnaneau@163.com

0 引言

水资源是可持续发展的核心要素,也是农业生产和保障粮食安全的关键资源^[1]。水价作为农业水资源管理的重要经济杠杆^[2-3],若定价过低不利于农户节水,导致水资源利用效率低,引发用水矛盾;若定价过高将加重农户生产成本,不利于正常的农业生产活动,进而影响粮食安全。因此,制定合理的农业水价定价方案,促进农业节水已成为水资源管理的重要研究方向。

目前,国内外学者主要从水资源及农业系统实际数据出发,对农业水资源定价和定价方案可行性分析展开科学研究。在农业水资源定价方面,以回收工程供水成本为出发点,汤井婷等^[4]计算了灌南县农业水价,并因地制宜制定水价方案。随着相关研究不断深入,水资源自身的价值及其对环境的影响得到重视^[5],全成本水价的内涵得到丰富,其组成包括资源成本、工程成本和环境成本^[6-7]。国际上普遍认为全成本水价最能实现水资源可持续利用^[8]。鲜雯娇等^[9]利用完全成本水价模型对甘州区各灌区的水价进行了核算。该方法具有一定的整体性和全面性,然而合理的农业水价不能仅靠单纯的成本核算,还应体现水资源价值^[10]。近年来,从水资源的商品属性出发,根据经济效应和供求规律,利用数学模型确定水资源经济价值得到了广泛应用,主流方法包括能值分析法^[11-13]、模糊数学模型^[14-16]、剩余价值法^[17]、影子价格模型^[18-19]等。如,WANG等^[20]运用能值理论核算了黄河流域农业系统中水资源经济价值,并对其空间分布状况进行分析。刘红艳等^[21]从环境、经济和社会3方面选取指标,利用模糊数学模型对云南某大型灌区的水资源价值进行评价与计算,建议循序渐进改革水价。DE BRITO等^[22]通过剩余价值法计算农业灌溉水的影子价格,从而确定其经济价值。REN等^[23]构建了水资源投入产出表,利用一般均衡模型确定了黑龙江省农业用水的影子价格。

在定价方案可行性分析方面,根据农业水价弹性效应,水价的提升将影响农户用水行为,使其更加谨慎地使用水资源。为避免过度抑制农业用水,学者们对农业水价与用水量之间的定量关系展开了研究,大多利用对数函数模型建立水价与用水量间的关系函数^[24-25],以揭示区域水价改革预计节水量。制定水价时既要以为农业节水为核心,又要保障用水户的合理性需求。学者们对于农户承受能力的研究分为主观上的支付意愿与客观上的支付能力^[26],常用的计算方法分别为条件价值调查问卷法及水费承

受指数分析法^[27-28],其中根据单位面积水费占粮食种植的成本、产值、净收益的比例来计算农户可承受水价的方法受到了广泛应用,且具有一定科学性与合理性^[29]。

综上,相关研究为农业水资源定价估价提供了广阔思路,但上述研究仍存在缺陷和不足:①选用单一角度测算农业水价,无法同时反映水资源稀缺性、回收用水成本以及发挥农业水资源作为商品的经济杠杆作用。②对于农业水资源的价值核算大多基于经济导向,在决策过程中忽视了生态价值和社会价值,容易导致生态系统退化^[30-31],也无法全面体现农业水资源价值。③计价方式单一,定价方案多为单一制水价,甚至未施行计量定价而是按农田面积收取水费,不利于激励农户用水与保障水资源供需平衡。

鉴于此,本文以黑龙江省为研究对象,将研究时段定为农业快速发展的2005—2020年,从全成本和全价值模型出发确定农业水资源估价方案。农业水资源全价值模型由能值理论分析法确定,反映农业水资源带来的包括经济价值、社会价值及生态价值在内的全价值;农业水资源全成本模型由全成本水价方法确定,反映农业供水的经济总成本,包括资源成本、工程成本及环境成本;将测算结果与节水奖励定价、超定额累进加价的思想相结合制定黑龙江省阶梯计量农业水价方案;从农户可承受能力与节水潜力出发检验定价方案可行性,为有关部门完善和实施水价改革提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域黑龙江省位于中国东北部,北纬 $43^{\circ}26' \sim 53^{\circ}33'$,东经 $121^{\circ}11' \sim 135^{\circ}05'$ (图1),全省年降水量多集中于400~650 mm之间。区域内土地总面积 $4.73 \times 10^5 \text{ km}^2$,其中耕地面积占比37%,是中国13个粮食主产区之一。研究时段内,黑龙江省粮食产量由2005年的 $3.092 \times 10^7 \text{ t}$ 上升到2020年的 $7.541 \times 10^7 \text{ t}$,农业用水量由2005年的 $1.92 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 增加到2020年的 $2.78 \times 10^{10} \text{ m}^3$,而水费征收标准一直保持在0.024~0.070元/ m^3 范围内,其中有30%左右的灌区仍旧按水田每公顷收费300元的标准征收。随着粮食产量的不断上升,农业水资源取用量也显著上升,导致区域经济社会发展面临严重的用水矛盾。研究时段内,农业、工业和生活平均用水比为0.896:0.055:0.049,对应的水价比例约为0.010:0.588:0.402,而农业、工业和服务业多年平均产值结构为0.195:0.422:0.383。可

见,农业用水所占比重最大,但行业带来的产值最低,农业水价远低于工业和生活水价,现行水资源用水价格不合理。长此以往,将加深社会各部门用水矛盾,不利于价格杠杆在农业节水方面发挥作用。有必要制定合理可行的农业用水定价方案,促进农业高效用水。

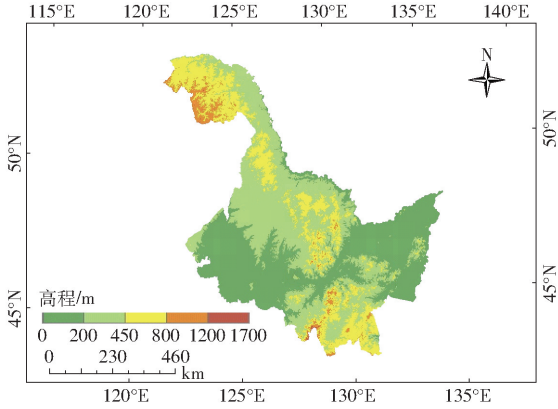


图1 黑龙江省研究区域概况图

Fig. 1 Overview map of study area in Heilongjiang Province

1.2 农业水资源全价值模型

农业水资源作为农业系统综合投入的一部分,和其他农业生产资料共同作用于系统,保障系统运作及价值产出^[32]。农业水资源价值是农业用水在系统运作中所创造出的价值,由于社会和经济价值资料较多,价值之间原始量纲不同,不可直接比较,本文利用 ODUM^[33] 创立的能值理论结合生态系统服务价值建立农业水资源全价值模型,综合考虑农业系统所提供的经济价值、社会价值、生态价值,结合农业水资源对系统的贡献比率及能值货币转换率确定价值角度的农业水价。农业水资源全价值模型解决了水资源价值核算中不全面的问题,达到了经济、社会和生态的有机统一。

其中,经济价值由农产品供给服务确定;社会价值由保障服务与文化服务确定,包括旅游观光、社会保障、科学研究价值;生态价值由调节服务确定,包括气候调节、防止水土流失、固碳释氧、保护生物多样性、净化环境、涵养水源价值。

能值计算式为

$$E = \tau B \quad (1)$$

式中 E ——太阳能值

τ ——太阳能值转换率, J^{-1} 或 g^{-1}

B ——能量或物质的量, J 或 g

农业水资源单方价值为

$$V = \frac{E_{eV} + E_{sV} + E_{ecoV}}{RQ} \quad (2)$$

其中

$$E_{iV} = E_{iSV} k_{aw} \quad (3)$$

$$k_{aw} = \frac{E_{aw}}{E_{in}} \times 100\% \quad (4)$$

式中 V ——农业水资源单方价值, $元/m^3$

E_{eV} ——农业水资源经济价值

E_{sV} ——农业水资源社会价值

E_{ecoV} ——农业水资源生态价值

R ——能值货币比率,为研究区域全年总应用能值与国民生产总值之比^[34], $元^{-1}$

Q ——农业用水量, m^3

E_{iV} ——第 i 种农业水资源价值

E_{iSV} ——第 i 种农业系统价值

k_{aw} ——农业用水贡献比率, %

E_{aw} ——农业用水能值

E_{in} ——农业系统总投入能值

i 分别为 e, s, eco , 表示农业水资源经济、社会、生态价值。

1.2.1 农业系统经济价值核算

农业系统所提供的农产品可作为商品直接在市场上进行等价交换,为人类带来实际的经济价值。本文将各单项供给农产品价值相加得到直接经济价值,即

$$E_{eSV} = \sum_{j=1}^{12} \tau_j B_j \quad (5)$$

式中 j ——供给农产品种类序号,分别表示水稻、玉米、豆类、小麦、谷子、薯类、油料、麻类、甜菜、烟叶、蔬菜、水果

1.2.2 农业系统社会价值核算

农业系统社会价值 E_{sSV} 包括旅游观光价值 E_{tt} 、社会保障价值 E_{ss} 、科学研究价值 E_{sr} 。旅游观光价值体现在农业系统景观可吸引来游客休闲观光,为当地居民带来一定旅游收入,利用成本替代法计算^[35];社会保障价值主要表现在保障农村劳动力就业,维持劳动力市场稳定^[36];科学研究价值体现在研究农业系统带来的知识和教育价值^[37]。计算式为

$$E_{sSV} = E_{tt} + E_{ss} + E_{sr} \quad (6)$$

其中

$$E_{tt} = I\alpha\beta R \quad (7)$$

$$E_{ss} = Nk_u LR \quad (8)$$

$$E_{sr} = M\tau_{sr} \quad (9)$$

式中 I ——研究区域旅游收入, $元$

α ——研究区域内自然风光占旅游资源比例, %

β ——研究区域内田园风光占自然风光比例, %

N ——研究区域农业从业人数, $人$

k_u ——我国农业生产中隐性失业比例, %

L ——研究区域相关部门规定的农村最低保障标准, $元/人$

M ——农业系统提供的科学研究信息量

τ_{sr} ——信息的能值转换率

1.2.3 农业系统生态价值核算

农业系统具有的调节服务为人类生存发展提供不可或缺的非实物价值。这部分“产品”不能作为商品直接交换,但带来的效益十分突出。生态价值 E_{ecoSV} 包括气候调节价值 E_{cr} 、防止水土流失价值 E_{sc} 、固碳释氧价值 E_{co} 、保护生物多样性价值 E_{bp} 、净化环境价值 E_{ep} 、涵养水源价值 E_{cw} 。计算式为

$$E_{ecoSV} = E_{cr} + E_{sc} + E_{co} + E_{bp} + E_{ep} + E_{cw} \quad (10)$$

(1) 气候调节价值

农业系统可以通过农作物蒸腾和棵间蒸发的降温增湿效果进行气候调节,其能值等同于农田蒸散发所需能值^[38]。计算式为

$$EM_{cr} = ETApG\tau_w/1\ 000 \quad (11)$$

其中

$$ET = \frac{1.05eW}{\sqrt{1 + \left(\frac{1.05W}{H}\right)^2}}$$

$$H = 300 + 25T + 0.05T^3$$

式中 ET ——蒸散发估算量,mm

A ——研究区农作物播种面积,km²

ρ ——水密度,kg/m³

G ——水吉布斯自由能,J/kg

τ_w ——大气中水蒸气能值转换率,J⁻¹

e ——农田蒸散发调整系数

W ——研究区降水量,mm

H ——研究区最大蒸散量,mm

T ——研究区平均气温,℃

(2) 防止水土流失价值

农业系统可以通过种植农作物覆盖土壤而减少水土流失与侵蚀,通过确定农业系统避免土壤被风蚀的量,采用代替成本法计算该价值^[39]。计算式为

$$E_{sc} = A(\gamma_p - \gamma_r)\tau_s/1\ 000 \quad (12)$$

式中 γ_p ——研究区域潜在土壤侵蚀模数,t/(km²·a)

γ_r ——研究区现实土壤侵蚀率,t/(km²·a)

τ_s ——土壤能值转换率,kg⁻¹

(3) 固碳释氧价值

农业系统中,绿色植物通过光合作用每产生1g干物质就可以固定1.63g CO₂,同时释放1.19g O₂。可以减轻自然环境所面临的压力,缓解温室效应与热岛效应,改善生态环境。核算这部分价值需要计算植物的净初级生产力^[40],结合光合作用方程计算出固定二氧化碳与释放氧气的量。农业系统的固碳释氧价值等同于生产等量 O₂与固定等量 CO₂的成本,计算式为

$$E_{co} = E_{CO_2} + E_{O_2} = 1.63NPPA k_c \tau_{CO_2} + 1.19NPPA \tau_{O_2} \quad (13)$$

式中 E_{CO_2} ——固定二氧化碳能值

E_{O_2} ——释放氧气能值

NPP ——研究区域的年均净初级生产力均值,kg/(km²·a)

τ_{CO_2} ——吸收二氧化碳能值转换率,g⁻¹

τ_{O_2} ——释放氧气能值转换率,g⁻¹

k_c ——CO₂中C含量,取12/44

(4) 保护生物多样性价值

农业系统通过为生物提供栖息地而起到保护基因库与生物多样性的作用,该价值计算理论较为成熟^[41]。计算式为

$$E_{bp} = \frac{KA\tau_{bp}}{A_w} \quad (14)$$

式中 K ——黑龙江省生物物种数量

τ_{bp} ——世界物种平均能值转换率

A_w ——全球面积,km²

(5) 净化环境价值和涵养水源价值

农业系统的净化环境价值体现在其对水体污染及土壤重金属污染都有一定的净化、阻滤、分解作用。由于农业系统可以截留降水、增强土壤下渗,因此也具有涵养水源价值。由于农业系统包括旱田、水田,土地类型复杂,考虑到数据的可获取性与准确性,引入谢高地的当量因子法^[42],对农业系统的净化环境价值、涵养水源价值进行测算,继而转化为能值。计算式为

$$E_{ep} = \sum_{m=1}^2 d_{mep} A_m DR \quad (15)$$

$$E_{cw} = \sum_{m=1}^2 d_{mcw} A_m DR \quad (16)$$

其中

$$D = \sum_{o=1}^3 Y_o P_o / 7 \quad (17)$$

式中 m ——农业系统中土地利用类型,分别表示水田、旱田

d_{mep} ——第 m 种土地利用类型净化环境价值当量因子

d_{mcw} ——第 m 种土地利用类型涵养水源价值当量因子

A_m ——第 m 种土地利用类型面积,km²

D ——1个标准当量因子的农业系统服务价值量,相当于平均粮食市场价值的1/7,元/hm²

Y_o ——第 o 种农产品单位面积产量,kg/hm²

P_o ——第 o 种农产品市场销售价格,元/kg

o ——主要农产品种类序号,分别表示水稻、玉米、豆类

1.3 农业水资源全成本模型

全成本水价是根据水资源在流通中产生的全部

费用所制定的价格,指开发利用水资源所付出的各种成本与合理利润税收的总和。农业作为发展中国家的弱质产业,也是国民经济基础产业,所以农业水价不考虑利润及税收。基于这一理论,本文由资源成本 C_r 、工程成本 C_p 、环境成本 C_e 确定全成本水价 C 。其中,资源成本由能值理论确定,采用成本核算法计算工程成本,利用水环境退化计量模型核算环境成本。计算式为

$$C = C_r + C_p + C_e \quad (18)$$

1.3.1 资源成本

资源成本反映水资源自身具有的价值。传统水资源定价方法难以考虑水资源天然循环、能量转换等自然属性,无法客观科学解释天然水资源的自身价值。本文利用能值比例、地表水与地下水的太阳能值转换率计算天然水资源的货币价值。计算式为

$$\begin{cases} C_{surr} = \frac{\tau_{surr}}{R} \\ C_{gror} = \frac{\tau_{gror}}{R} \end{cases} \quad (19)$$

式中 C_{surr} 、 C_{gror} ——地表水、地下水资源成本,元/ m^3
 τ_{surr} 、 τ_{gror} ——地表水、地下水当年太阳能值转换率,由当年降水能值折算得到^[43]

1.3.2 工程成本

工程成本反映农业供水工程建设投入与日常运行维护投入。根据《水利工程供水定价成本监审办法》(2022年第55号令),利用成本核算方法计算工程成本,包括固定资产折旧费与运行维护费,其中运行维护费由工程设备维修养护费用、供水企业职工薪酬、企业正常运行管理费用构成。计算式为

$$C_p = \frac{F_d + S}{A_r Q_{iw}} \quad (20)$$

其中 $F_d = k_1 k_2 F / n$
 $S = S_c + S_r + S_m$

式中 F_d ——固定资产折旧费,元
 S ——工程运行维护费,元
 Q_{iw} ——灌溉用水定额, m^3/hm^2
 F ——固定资产投入额,元
 k_1 ——固定资产形成率,%
 k_2 ——残值率,% n ——折旧年限,年
 S_c ——工程设备维修养护费用,元
 S_r ——供水企业职工薪酬,元
 S_m ——企业正常运行管理费用,元
 A_r ——垦区有效灌溉面积, hm^2

1.3.3 环境成本

农业生产过程中对水资源的利用和消耗导致水

环境退化,环境成本体现水环境退化后的恢复补偿成本。主要反映使用农业用水所引发的水资源总量短缺、环境质量下降等水环境退化和对环境造成的污染问题。由于农业用水产生面源污染的原因是过度使用化肥农药,与农业用水本身无关,因此本文仅核算水环境退化经济损失,采用计量经济学理论的水环境退化计量模型^[44-45],综合考虑水资源自然属性与系统社会经济特征,确定农业用水环境成本。计算式为

$$C_e = \frac{\sum_{x=1}^6 l P Q_x \gamma_x}{Q_x} \frac{1}{\lambda} \quad (21)$$

其中 $l = 1 / (1 + e^{3-1/C_E})$

$$\lambda = \sqrt{\sum_{t=1}^{12} \left(\frac{k_t - k_3}{k_3} \right)^2} / 12$$

式中 x ——水质类别,根据我国《地表水环境质量标准》,将劣5类水质作为第6类
 l ——农村社会经济发展阶段系数
 P ——当年实际农业水价,元/ m^3
 Q_x ——不同水质水资源量, m^3
 γ_x ——不同水质水环境功能损失率^[46],%
 C_E ——农村地区恩格尔系数
 λ ——当年降水变差系数,其倒数为当年水资源稀缺性指数
 k_3 ——月平均降水量占全年降水量比例,%
 k_t ——第 t 月降水量占全年降水量比例,%

1.4 农业水价调整方案设计

根据黑龙江省经济发展水平及《黑龙江省农业水价形成机制规则(试行)》(黑价规[2017]5号),以农业水资源价值为上限,农业水资源成本为下限,结合用水定额内用水节水奖励,定额外用水累进加价的思想,使用阶梯计量法确定取用地表水和地下水的农业水价。本文制定的超定额累进加价制水价将农业水资源按用水量分为3个阶梯,不同阶梯征收不同水价。其中,向定额内用水收取较低水价作为正向节水激励,确保达到农户的基本灌溉标准,保障低收入用水户的基本用水需求。由于地区水资源匮乏,超额用水将导致农业用水分配不均,影响其他用水户正常取水。对超定额部分采用较高价格收费,以限制超额用水行为,实现对第1阶梯低水价的交叉补贴。超定额30%内用水按农业水资源全成本收取水价,回收用水成本,实现供水单位的成本补偿。超定额30%外用水按农业水资源全价值收取水价,充分体现水资源稀缺状况及其价值。设计的阶梯水价调整方案见表1。

1.5 数据来源

所涉及的原始数据来源见表2。

表 1 黑龙江省阶梯水价调整方案

Tab. 1 Adjustment program of step water prices in Heilongjiang Province

| 情景方案 | 方案描述 | 计算公式 | 公式解释 |
|------------------|---|---|--|
| 现状延续方案 (方案 1) | 第 1 阶梯水价维持现状水价标准,第 2 阶梯水价回收用水成本,第 3 阶梯水价按农业用水价值征收 | $f_1 = \begin{cases} P & (w \leq 0) \\ C & (0 < w \leq 30\%) \\ V & (30\% < w) \end{cases}$ | f_1 为现状延续方案阶梯水价,元/ m^3 w 为实际用水量超出用水定额的比例, % |
| 30% 节水奖励方案(方案 2) | 第 1 阶梯水价取用水成本的 70%,第 2 阶梯水价回收用水成本,第 3 阶梯水价按农业用水价值征收 | $f_2 = \begin{cases} 0.7C & (w \leq 0) \\ C & (0 < w \leq 30\%) \\ V & (30\% < w) \end{cases}$ | f_2 为 30% 节水奖励方案阶梯水价,元/ m^3 |
| 15% 节水奖励方案(方案 3) | 第 1 阶梯水价取用水成本的 85%,第 2 阶梯水价回收用水成本,第 3 阶梯水价按农业用水价值征收 | $f_3 = \begin{cases} 0.85C & (w \leq 0) \\ C & (0 < w \leq 30\%) \\ V & (30\% < w) \end{cases}$ | f_3 为 15% 节水奖励方案阶梯水价,元/ m^3 |

表 2 原始数据来源

Tab. 2 Original data source

| 类别 | 项目 | 数据来源 |
|-------------|------------|---|
| 全价值模型 | 农业用水量 | 《黑龙江省水资源公报》(2006、2011、2016、2021 年) |
| | 水田用水量 | 《黑龙江省水资源公报》(2006、2011、2016、2021 年) |
| | 国民生产总值 | 《黑龙江统计年鉴》(2006、2011、2016、2021 年) |
| | 农产品产量 | 《黑龙江统计年鉴》(2006、2011、2016、2021 年) |
| | 农业从业人员数 | 《黑龙江统计年鉴》(2006、2011、2016、2021 年) |
| | 农作物播种面积 | 《黑龙江统计年鉴》(2006、2011、2016、2021 年) |
| | 降水量 | 《黑龙江省水资源公报》(2006、2011、2016、2021 年) |
| | 平均气温 | 《黑龙江统计年鉴》(2006、2011、2016、2021 年) |
| | 旅游收入 | 《黑龙江统计年鉴》(2006、2011、2016、2021 年) |
| | 能源使用量 | 《中国能源统计年鉴》(2006、2011、2016、2021 年) |
| 全成本模型 | 科学研究信息量 | 中国知网(https://www.cnki.net/) |
| | 生物物种数量 | 中国生物地图(http://mapespecies.cn/mobpecies.cn) |
| | 粮食作物市场销售价格 | 《全国农产品成本收益资料汇编》(2006、2011、2016、2021 年) |
| | 物质能值转换率 | 文献[33,36,47-48] |
| | 固定资产投入额 | 《黑龙江省垦区统计年鉴》(2006、2011、2016、2021 年) |
| | 职工薪酬 | 《黑龙江省垦区统计年鉴》(2006、2011、2016、2021 年) |
| | 农村地区恩格尔系数 | 《黑龙江统计年鉴》(2006、2011、2016、2021 年) |
| | 地表水环境质量 | 《黑龙江省生态环境状况公报》(2005、2010、2015、2020 年) |
| | 用水定额 | DB23/T 727—2017《黑龙江省地方标准用水定额》 |
| | 方案分析 | 单位面积农作物水费 |
| 单位面积农作物投入成本 | | 《全国农产品成本收益资料汇编》(2006、2011、2016、2021 年) |
| 单位面积农作物产值 | | 《全国农产品成本收益资料汇编》(2006、2011、2016、2021 年) |
| 单位面积农作物成本 | | 《全国农产品成本收益资料汇编》(2006、2011、2016、2021 年) |
| 商品零售价格指数 | | 《黑龙江统计年鉴》(2006、2011、2016、2021 年) |

2 结果与分析

2.1 基于价值视角的农业水价

将黑龙江省实际数据代入式(1)~(17),得到黑龙江省农业水资源能值价值及单方水资源货币价值,结果如表 3 所示。

从构成来看,近 16 年间,单方农业水资源的经济价值远大于社会价值和生态价值,说明农业水资源最大的价值体现在维持农作物生长、供给农业基本生产。但为了避免农业系统退化,决策者在定价时,不可忽视农业水资源经济价值及生态价值(图 2,由于科学研究价值占比相对较小,在图中未能体现)。

从趋势来看,黑龙江省农业水资源价值由 0.350 元/ m^3 增长到 0.594 元/ m^3 ,增长 0.244 元/ m^3 ,呈现波动增长趋势。说明近年来黑龙江省农业发展步伐不断加快,经济水平不断提高,生态环境得到改善,农业用水的价值也得到了一定提高。2020 年农业水资源价值为 0.594 元/ m^3 ,说明每使用 1 m^3 农业水资源带来的区域效益为 0.594 元。农业水资源的贡献率为 5.46%~8.11%,这是由于农业水资源贡献率反映的是水资源对于农业生产的贡献,而农业系统投入具有复杂性,受降雨及其他生产投入资料影响较大,导致水资源贡献率呈波动趋势。

单位农业水资源全价值如图 3 所示。黑龙江省农业水资源价值远高于农业水价 0.024~0.070 元/ m^3 ,说明农业水资源在市场交易中没能实现价格和价值的统一,其商品属性并没有得到充分体现。这是由于黑龙江省为稳定农产品价格,政府从社会福利角度出发采用的是补贴性低水价政策,水价标准的建立没能根据市场供需和物价变化进行及时调整,导致农业水资源没能发挥价格杠杆的调节作用。

2.2 基于成本视角的农业水价

研究时段内,地表水与地下水的全成本水价从 2005 年的 0.098~0.168 元/ m^3 增长到 2020 年的 0.180~0.355 元/ m^3 (图 4)。其中,工程成本增加

表3 黑龙江省农业水资源全价值

Tab. 3 Full value of agricultural water resources in Heilongjiang Province

| 类别 | 项目 | 2005年 | 2010年 | 2015年 | 2020年 | |
|------------------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 农业水资源能值价值 | 全价值 | 1.42×10^{22} | 2.13×10^{22} | 1.50×10^{22} | 1.70×10^{22} | |
| | 直接产出价值 | 1.06×10^{22} | 1.33×10^{22} | 9.49×10^{21} | 1.18×10^{22} | |
| | 旅游观光价值 | 4.96×10^{20} | 1.72×10^{21} | 1.42×10^{21} | 1.58×10^{21} | |
| | 社会保障价值 | 1.07×10^{21} | 1.17×10^{21} | 6.01×10^{20} | 3.02×10^{20} | |
| | 科学研究价值 | 3.83×10^{18} | 4.86×10^{18} | 3.53×10^{18} | 4.47×10^{18} | |
| | 气候调节价值 | 8.89×10^{19} | 1.66×10^{21} | 1.05×10^{20} | 1.59×10^{20} | |
| | 防止水土流失价值 | 7.10×10^{20} | 1.11×10^{21} | 7.78×10^{20} | 8.59×10^{20} | |
| | 固碳释氧价值 | 3.20×10^{20} | 5.03×10^{20} | 3.51×10^{20} | 3.88×10^{20} | |
| | 保护生物多样性价值 | 2.50×10^{20} | 7.29×10^{20} | 2.83×10^{20} | 2.88×10^{20} | |
| | 涵养水源价值 | 6.00×10^{20} | 2.32×10^{21} | 1.72×10^{21} | 1.37×10^{21} | |
| | 净化环境价值 | 1.01×10^{20} | 3.41×10^{20} | 2.24×10^{20} | 1.75×10^{20} | |
| | $R/\text{元}^{-1}$ | | 2.07×10^{12} | 1.92×10^{12} | 1.32×10^{12} | 1.04×10^{12} |
| | Q/m^3 | | 1.78×10^{10} | 1.79×10^{10} | 3.03×10^{10} | 2.71×10^{10} |
| $k_{aw}/\%$ | | 6.39 | 8.11 | 5.46 | 6.17 | |
| 单方水资源货币价值/(元·m ⁻³) | 经济 | 0.287 | 0.320 | 0.236 | 0.418 | |
| | 社会 | 0.027 | 0.061 | 0.048 | 0.065 | |
| | 生态 | 0.036 | 0.107 | 0.081 | 0.111 | |
| $V/(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$ | | 0.350 | 0.489 | 0.366 | 0.594 | |

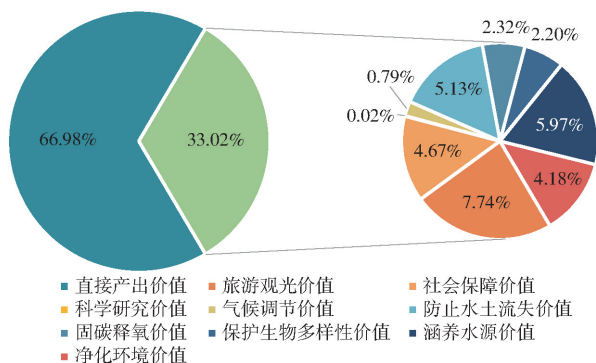


图2 黑龙江省农业水资源价值占比

Fig. 2 Value of agricultural water resources proportion in

Heilongjiang Province

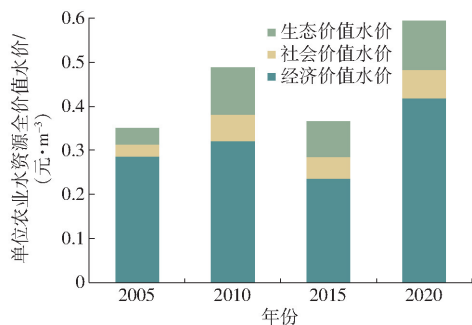


图3 黑龙江省单位农业水资源全价值水价

Fig. 3 Full-value water price of unit agricultural water resources in Heilongjiang Province

0.022 元/m³, 增幅为 207.1%; 环境成本增加 0.035 元/m³, 增幅为 137.9%。这是由于黑龙江省自 2005 年至 2020 年新建大型水库 12 座、中型水库 38 座、乡村办水电站 3 座、水利项目若干, 固定资产投资也从 2005 年的 2.64×10^8 元增加到 2020 年的

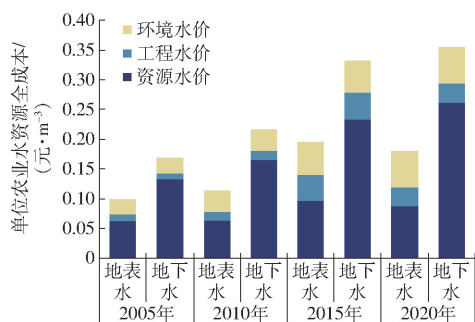


图4 黑龙江省单位农业水资源全成本

Fig. 4 Full-cost per unit of agricultural water resources in Heilongjiang Province

2.37×10^9 元, 导致工程成本水价持续增加。同时, 近年来黑龙江省水生态环境持续改善, 导致水资源退化成本即环境水价增长。地表水资源成本增加 0.025 元/m³, 增幅为 39.7%; 地下水资源成本增加 0.130 元/m³, 增幅为 98.0%。资源成本反映没有人类活动参与的水资源的天然价值, 资源成本的增长, 说明水资源自身价值不断增加。地表水与地下水资源成本增幅差异符合现实情况, 体现地下水资源的珍贵及其更具稀缺性, 这也提醒决策者重视地下水超采严重问题, 应严控地下水开发利用。对比研究区现行农业水价可以发现, 我国农业水费多年来成本倒挂, 至今实际水价水平仍未达到成本核算水平, 现行水价未能回收农业用水全成本。

2.3 农业水价方案实证分析

2.3.1 节水潜力

市场经济条件下, 农业用水作为商品, 符合商品

的供求规律。用水户作为理性人,在水价提高的情况下,会采取一定措施进行节水^[49]。农业用水需求价格函数是描述用水需求与价格之间对应关系的函数,农业水资源的单位面积需水量为被解释变量,影响需水量的水价为解释变量,函数内的弹性系数表示其他条件不变时,价格变动所能引起的农业用水需求量的变动比例,直接反映了节水潜力^[50]。由于水田灌溉用水量占农业用水总量的97%,本文使用黑龙江省水田水价与单位面积用水量探究需求价格函数。其中水田水价由单位面积水费与用水量计算得到,考虑到水价会受到物价和货币膨胀的影响,对实际水价使用商品零售价格指数进行折算。

采用双对数线性模型建立农业用水需求函数,应用EViews软件求得函数及其需求曲线。分别对农业用水量和现状农业水价取对数,得到回归方程及系数估计值。利用拟合出的农业用水需求函数曲线(图5)对不同价格方案下用水量进行计算,与实际水量相比较,揭示相应水价方案下节水量及节水潜力。计算式为

$$\ln Q = 8.39 - 0.204 \ln P \quad (22)$$

农业用水需求函数的弹性系数为-0.204,决定系数 R^2 为0.79,检验标准为 $p < 0.001$,对回归结果进行异方差检验, F 统计量及 R^2 均通过显著性检验。

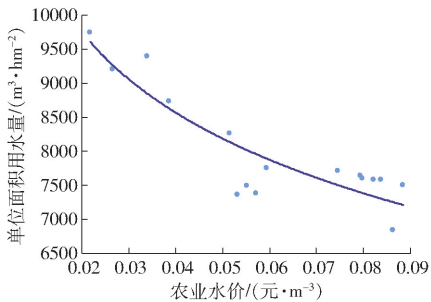


图5 水田灌溉需水价格曲线

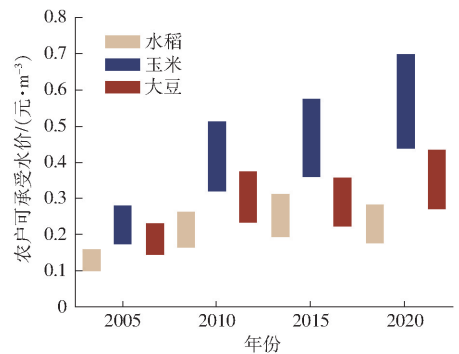
Fig. 5 Price curve of water demand for paddy irrigation

由此得到农业水资源需求价格弹性系数为-0.204,即水价上升1%,用水量下降0.204%。现有研究农业用水价格弹性系数绝对值范围为0.10~0.38^[18,51-52],本文研究结果在上述范围内。其绝对值大于0,表明农业用水量与水价表现为弱弹性,说明在其他条件不变时,研究区水价对于农业用水具有一定的抑制作用。

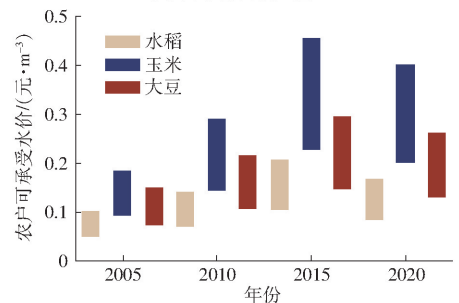
2.3.2 农户可承受能力

对于发展中国家来说,在进行农业水资源定价时需要考虑农户的承受能力。由于研究区粮食定价实行“市场定价,价补分离”的政策,研究区水稻和大豆单位面积净收益分别为-993.9、-2068.8元/hm²,

出现净收益为负值的情况。尽管获取国家相关补贴后农户仍获利,但为避免受政策影响,本文排除净收益,选择以占单位面积产值5%~8%(图6a)、占单位面积生产成本10%~13%(图6b)来确定农户可承受水价范围。



(a) 占单位面积产值5%~8%



(b) 占单位面积生产成本10%~13%

图6 农户可承受水价

Fig. 6 Water price affordability of farmers

两种测算方式所测得的农户可承受水价范围整体基本呈上升趋势,由大到小总体依次为玉米、大豆、水稻,主要由于水稻生育期耗水量高于玉米和大豆。2020年黑龙江省水稻、玉米、大豆农户可承受水价分别为0.176~0.282元/m³、0.436~0.698元/m³、0.271~0.434元/m³。

2.3.3 实例分析

以黑龙江省2005—2020年为例,依据表1所示的水价调整情景可得到各方案的阶梯水价及其可行性检验(表4)。

从水价调整幅度来看,地下水水价平均比地表水高40.6%,这种差异有利于促进地下水采补平衡,改善地下水环境。方案1一、二、三级阶梯水价比例为1:3.3:8.4,方案2比例为1:1.4:3.6,方案3比例为1:1.2:3。相比较而言,方案1的价差最大,这是由于方案1的一阶水价维持现状没有提升,与调整后的二、三阶水价存在较大差异;由于农业阶梯水价无详细标准,参考居民用水阶梯价格制度的指导意见,阶梯间价差不得低于比例标准1:1.5:3,方案2价差最接近标准,方案3价差较小。根据用水量对不同用水户进行收费的水价方案使得节水的农户得到精准补贴,高用水量的农户承担更多的水价。

表4 黑龙江省阶梯水价调整方案及其可行性分析

Tab.4 Adjustment program of step water price in Heilongjiang Province and its feasibility analysis

| 年份 | 情景方案 | 阶梯 | 水价/(元·m ⁻³) | | 水价方案可行性检验 | | | | | |
|------|------|-----|-------------------------|-------|---|------------------------|------------------------|----------------------------|-------|-------|
| | | | 地表水 | 地下水 | 单位面积需水量/(m ³ ·hm ⁻²) | 年节水量/m ³ | 节水潜力/% | 可承受水价/(元·m ⁻³) | | |
| | | | | | | 水稻 | 玉米 | 大豆 | | |
| 2005 | 方案1 | 一阶 | 0.024 | 0.048 | 6 403.7 | 5.18 × 10 ⁹ | 30.43 | | | |
| | | 二阶 | 0.098 | 0.168 | | | | | | |
| | | 三阶 | 0.350 | 0.350 | | | | 0.158 | 0.280 | 0.231 |
| | 方案2 | 一阶 | 0.068 | 0.118 | 6 101.7 | 5.74 × 10 ⁹ | 33.71 | | | |
| | 方案3 | 一阶 | 0.084 | 0.143 | 6 011.3 | 5.91 × 10 ⁹ | 34.69 | | | |
| | 2010 | 方案1 | 一阶 | 0.040 | 0.080 | 6 917.8 | 1.39 × 10 ⁹ | 6.00 | | |
| 二阶 | | | 0.113 | 0.216 | | | | | | |
| 三阶 | | | 0.489 | 0.489 | | | | 0.263 | 0.513 | 0.374 |
| 方案2 | | 一阶 | 0.079 | 0.151 | 6 445.7 | 2.87 × 10 ⁹ | 12.42 | | | |
| 方案3 | | 一阶 | 0.096 | 0.183 | 6 286.5 | 3.37 × 10 ⁹ | 14.58 | | | |
| 2015 | | 方案1 | 一阶 | 0.056 | 0.112 | 6 557.7 | 4.10 × 10 ⁹ | 13.75 | | |
| | 二阶 | | 0.195 | 0.331 | | | | | | |
| | 三阶 | | 0.366 | 0.366 | | | | 0.311 | 0.576 | 0.356 |
| | 方案2 | 一阶 | 0.136 | 0.232 | 6 029.0 | 6.17 × 10 ⁹ | 20.70 | | | |
| | 方案3 | 一阶 | 0.165 | 0.282 | 5 877.6 | 6.76 × 10 ⁹ | 22.70 | | | |
| | 2020 | 方案1 | 一阶 | 0.052 | 0.105 | 6 920.4 | 2.10 × 10 ⁸ | 0.78 | | |
| 二阶 | | | 0.180 | 0.355 | | | | | | |
| 三阶 | | | 0.593 | 0.593 | | | | 0.282 | 0.698 | 0.434 |
| 方案2 | | 一阶 | 0.126 | 0.248 | 6 201.3 | 3.00 × 10 ⁹ | 11.09 | | | |
| 方案3 | | 一阶 | 0.152 | 0.301 | 6 026.2 | 3.67 × 10 ⁹ | 13.60 | | | |

从预计节水成效来看,方案1节水潜力最小,方案3节水潜力最大。当农业水价提升到方案1和方案2时,单位面积预计灌溉用水量仍超出定额 943.7 ~ 1 460.4 m³/hm² 和 569 ~ 985.7 m³/hm²,可见其提升水价抑制的水量仍属于过量使用部分,不会对农业产生明显影响。当农业水价提升到方案3的标准时,单位面积用水量为 5 877.6 ~ 6 286.5 m³/hm²,提高水价抑制用水量导致其接近灌溉定额 5 460 m³/hm²,不利于农业生产。

由于农户对于水价提升具有一定抵触心理,需谨慎考虑水价标准与主要农作物种植户可承受能力范围。本文仅将第1阶梯灌溉定额内用水视为合理用水量,因此只对一阶水价与可承受能力进行比较。可以看出方案1、2均在可承受能力范围内,方案3水价接近可承受能力的上限,甚至2020年地下水水价超过了水稻种植户的可承受能力。

综合考虑黑龙江省农业用水户实际用水情况、节水潜力、农户可承受能力、对水价改革政策的接受程度等因素,本文推荐方案1为过渡期水价改革方案,该方案遵循实际用水情况,可抵消用水户对水价提升的抵触心理,定额内用水价格不变,整体水价提升幅度较小,平均年节水量可达到 2.72 × 10⁹ m³,平均年节水率为 12.74%。推荐方案2为远期水价改革方案,该方案兼顾定额内节水奖励定价与超定额

累进加价,在该方案下,平均年节水量可达 4.45 × 10⁹ m³,平均年节水率为 19.48%,节水效果显著。方案3不作为推荐方案,该方案虽然能达到农业用水全成本回收,但该方案阶梯间价差过小,预计节水效果不利于农业生产,且一阶水价接近甚至超出水稻种植户可承受能力,会加大农户生产资料投入负担。

本文为研究区水价综合改革提供了过渡期与远期农业水资源定价方案,实行相应的水价方案预计可促进农业节水,有效缓解用水矛盾。农业水价改革有利于提高水资源利用效率,但政府同时需加强农业水利基础设施建设,推进灌溉设备的现代化与自动化发展,为农户高效灌溉节水提供技术支持,以促进农业水资源合理优化配置。

3 结论

(1) 现行水价低于成本水价,更远低于价值水价。即没能回收成本,又不能真实地体现农业用水价值。这主要由农业用水的行政事业性收费导致,因此应合理提高农业水价。

(2) 建议政府根据实际情况合理调整水价范围。基于成本与价值双重视角,确定农户取用地表水和地下水水价。以2020年为例,过渡期水价方案下,地表水阶梯水价为 0.052、0.180、0.593 元/m³,

地下水阶梯水价为 0.105、0.355、0.593 元/m³。远期水价方案下,地表水阶梯水价为 0.126、0.180、0.593 元/m³,地下水阶梯水价为 0.248、0.355、0.593 元/m³。

(3)农业水资源估价方案可行性分析表明,研究区水价对于农业用水量具有一定的抑制作用,需

求价格弹性系数为 -0.204,在本文推荐的两种水价方案情景下,平均年节水量分别可达 2.72×10^9 、 4.45×10^9 m³,节水量不影响农业生产,且定价方案均在农户可承受范围内,定价方案具有可行性,可以为类似国家或地区农业水资源定价提供决策参考方案。

参 考 文 献

- [1] SUN Y H, LIU N N, SHANG J X, et al. Sustainable utilization of water resources in China: a system dynamics model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,142:613 - 625.
- [2] 姜文来. 农业水资源管理机制研究[J]. *农业现代化研究*,2001(2):76 - 79.
JIANG Wenlai. Agricultural water management mechanism study[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2001(2):76 - 79. (in Chinese)
- [3] ZHAO J, NI H, PENG X, et al. Impact of water price reform on water conservation and economic growth in China[J]. *Economic Analysis & Policy*, 2016, 51:90 - 103.
- [4] 汤井婷,赵凯,孙松. 灌南县农业水价综合改革实践与探索[J]. *江苏水利*,2019(9):69 - 72.
TANG Jingting,ZHAO Kai,SUN Song. Practice and exploration on the reform of comprehensive reform of agricultural water price in Guannan County[J]. *Jiangsu Water Resources*, 2019(9):69 - 72. (in Chinese)
- [5] 倪红珍,王浩,阮本清,等. 基于环境价值论的商品水定价[J]. *水利学报*,2003,34(10):101 - 107.
NI Hongzhen, WANG Hao, RUAN Benqing, et al. Commodity water pricing based on environmental value theory[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003,34(10):101 - 107. (in Chinese)
- [6] SANABRIA S, JOAQUIN T. Water price: environment sustainability and resource cost[J]. *Water*, 2020, 12(11):3176.
- [7] FRANK A W. Financing irrigation water management and infrastructure: a review[J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2010, 23(6):321 - 349.
- [8] ZHANG C Y, OKI T. Water pricing reform for sustainable water resources management in China's agricultural sector[J]. *Agricultural Water Management*, 2023,275:108045.
- [9] 鲜雯娇,徐中民,邓晓红. 灌区农业完全成本水价研究——以张掖市甘州区灌区为例[J]. *冰川冻土*,2014,36(2):462 - 468.
XIAN Wenjiao,XU Zhongmin,DENG Xiaohong. Agricultural irrigation water price based on full cost recovery: a case study in Ganzhou District of Zhangye Municipality[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014,36(2):462 - 468. (in Chinese)
- [10] 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 - 295,301.
GAN Hong, QIN Changhai, WANG Lin, et al. Research on water pricing methods and practices I: an analysis of the connotation of water resource value[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012,43(3):289 - 295,301. (in Chinese)
- [11] ZHANG W, TAN L, YIN H, et al. Study on the price of water rights trading between agriculture and industry based on emergy theory[J/OL]. *Water Science & Technology Water Supply*, 2019, 19(7). DOI:10.2166/ws.2019.083.
- [12] HUANG Y L, WANG S Y, LI X, et al. Agricultural irrigation water price apportionment and sharing[J]. *Water Policy*, 2023, 25(5): 429 - 445.
- [13] WU Z N, DI D Y, LV C M, et al. Defining and evaluating the social value of regional water resources in terms of emergy[J]. *Water Policy*, 2019, 21(1): 73 - 90.
- [14] ZHANG J D, FU J T, LIU C Y, et al. Evaluating water resource assets based on fuzzy comprehensive evaluation model: a case study of Wuhan City, China[J]. *Sustainability*, 2019,11(17):4627.
- [15] WANG Z Y, SHEN J Q, SUN F H, et al. A pricing model for groundwater rights in Ningxia, China based on the fuzzy mathematical model[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019,16(12):2176.
- [16] 刘维哲,唐溧,王西琴,等. 农业灌溉用水经济价值及其影响因素——基于剩余价值法和陕西关中地区农户调研数据[J]. *自然资源学报*,2019,34(3):553 - 562.
LIU Weizhe, TANG Li, WANG Xiqin. Economic value of agricultural irrigation water use and its influencing factors—based on the surplus value method and the research data of farmers in Guanzhong Area of Shaanxi Province[J]. *Journal of Natural Resources*,2019,34(3):553 - 562. (in Chinese)
- [17] MUCHARA B, ORTMANN G, MUDHARA M, et al. Irrigation water value for potato farmers in the Mooi River Irrigation Scheme of KwaZulu - Natal, South Africa: a residual value approach[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 164:243 - 252.
- [18] SHEN X B, LIN B Q. The shadow prices and demand elasticities of agricultural water in China: a StoNED-based analysis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017,127:21 - 28.
- [19] SHI M J, WANG X J, YANG H, et al. Pricing or quota? A solution to water scarcity in oasis regions in China: a case study

- in the Heihe River Basin[J]. *Sustainability*, 2014, 6(11):7601–7620.
- [20] WANG H L, HAUNG S Q, DI D Y, et al. Study on the spatial distribution of water resource value in the agricultural system of the Yellow River Basin[J]. *Water Policy*, 2021, 23(4):1044–1058.
- [21] 刘红艳,张慧颖,黄海燕,等. 模糊数学在农业水价中的应用[J]. *农业工程*, 2018, 8(10):81–85.
LIU Hongyan, ZHANG Huiying, HUANG Haiyan, et al. Application of fuzzy mathematics in agricultural water price[J]. *Agricultural Engineering*, 2018, 8(10):81–85. (in Chinese)
- [22] DE BRITO P L C, DE AZEVEDO J P S. Economic value of water for irrigation in São Francisco River Basin, Brazil[J/OL]. *Applied Water Science*, 2022, 12(7). DOI:10.1007/s13201-022-01678-4.
- [23] REN Y T, WEI S, CHENG K, et al. Valuation and pricing of agricultural irrigation water based on macro and micro scales[J]. *Water*, 2018, 10(8):1044.
- [24] BRUNO E M, JESSOE K. Missing markets: evidence on agricultural groundwater demand from volumetric pricing[J]. *Journal of Public Economics*, 2021, 196(4):104374.
- [25] PATHAK S, ADUSUMILLI N C, WANG H, et al. Irrigation water demand and elasticities: a case study of the High Plains aquifer[J]. *Irrigation Science*, 2022, 40(6):941–954.
- [26] 卓汉文,王卫民,宋实,等. 农民对农业水价承受能力研究[J]. *中国农村水利水电*, 2005(11):1–5.
ZHUO Hanwen, WANG Weimin, SONG Shi, et al. Study on farmer's bearing capacity of agricultural water prices[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2005(11):1–5. (in Chinese)
- [27] WANG L, SIMAYI Z, YANG S, et al. Research on economic bearing capacity of farmers to agricultural irrigation water prices in the Ebinur Lake Basin[J/OL]. *Sustainability*, 2019, 11. DOI:10.3390/su11072155.
- [28] 位帅,张云. 中山市农业供水成本核算及农民水费承受能力分析[J]. *广东水利水电*, 2021(8):98–102.
WEI Shuai, ZHANG Yun. Costing of agricultural water supply in Zhongshan City and analysis of the affordability of farmers' water charges[J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2021(8):98–102. (in Chinese)
- [29] 陈丹,陈菁,陈祥,等. 基于支付能力和支付意愿的农民灌溉水价承受能力研究[J]. *水利学报*, 2009, 40(12):1524–1530.
CHEN Dan, CHEN Jing, CHEN Xiang, et al. Study on farmers' affordability of irrigation water prices based on ability and willingness to pay[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(12):1524–1530. (in Chinese)
- [30] EGOH B N, REYERS B, ROUGET M, et al. Identifying priority areas for ecosystem service management in South African grasslands[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(6):1642–1650.
- [31] ADRIENNE G R, PETER B, BISHOP I D, et al. Linking GIS-based models to value ecosystem services in an Alpine region[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008(3):89.
- [32] 吕翠美,周海生,凌敏华,等. 基于能值理论的水资源对农业生产贡献量化分析[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(4):249–253
LÜ Cuimei, ZHOU Haisheng, LING Minhua, et al. Quantitative analysis of water resources contribution to agricultural production based on energy theory[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(4):249–253. (in Chinese)
- [33] ODUM H T. *Environmental accounting: emergy and decision making*[M]. New York:John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [34] 陆宏芳,沈善瑞,陈洁,等. 生态经济系统的一种综合评价方法:能值理论与分析方法[J]. *生态环境*, 2005(1):121–126.
LU Hongfang, SHEN Shanrui, CHEN Jie, et al. An integrated evaluation method for ecological economic systems: emergy theory and analysis methods[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005(1):121–126. (in Chinese)
- [35] 尹越,陈菁,施红怡,等. 基于能值理论与稻田灌溉多功能性农业水价机制分析[J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 35(11):993–999.
YIN Yue, CHEN Jing, SHI Hongyi, et al. Analysis of agricultural water price mechanism based on energy value theory and multifunctionality of paddy irrigation[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2017, 35(11):993–999. (in Chinese)
- [36] 刘耕源,杨志峰. 能值分析理论与实践:生态经济核算与城市绿色管理[M]. 北京:科学出版社, 2018.
- [37] GUAN X J, FU Y W, YU M, et al. Water ecology emergy analytic system construction and health diagnosis[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 270:11654.
- [38] 张彪,王爽,李庆旭,等. 京津风沙源治理工程区水源涵养功能时空变化分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(19):7530–7541.
ZHANG Biao, WANG Shuang, LI Qingxu, et al. Analysis of spatial and temporal changes of water conservation function in the Beijing–Tianjin wind and sand source management project area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19):7530–7541. (in Chinese)
- [39] 刘洋洋,任涵玉,周荣磊,等. 中国草地生态系统服务价值估算及其动态分析[J]. *草地学报*, 2021, 29(7):1522–1532.
LIU Yangyang, REN Hanyu, ZHOU Ronglei, et al. Estimation of ecosystem service value of grassland in China and its dynamic analysis[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(7):1522–1532. (in Chinese)

- [40] 程春香,于敏,吴门新,等. 2000—2020年黑龙江省陆地植被 NPP 驱动因子分析[J]. 东北农业大学学报,2022,53(6):20-28,75.
CHENG Chunxiang, YU Min, WU Menxin, et al. Analysis of NPP drivers of terrestrial vegetation in Heilongjiang Province from 2000 to 2020[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2022,53(6):20-28,75. (in Chinese)
- [41] 何冰晶,王双银,杨建国,等. 基于能值理论方法的农田灌溉气候调节效益估算[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(6):230-235,242.
HE Bingjing, WANG Shuangyin, YANG Jianguo, et al. Estimation of climate regulation benefits of farmland irrigation based on energy-value theory approach[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2020,31(6):230-235,242. (in Chinese)
- [42] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报,2003,18(2):189-196.
XIE Gaodi, LU Chunxia, LENG Yunfa, et al. Valuing ecological assets on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources,2003,18(2):189-196. (in Chinese)
- [43] 陈丹,陈菁,罗朝晖. 天然水资源价值评估的能值方法及应用[J]. 水利学报,2006,37(10):1188-1192.
CHEN Dan, CHEN Jing, LUO Zhaohui. Emergy method and its application in evaluating the value of natural water resources [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(10):1188-1192. (in Chinese)
- [44] 肖杨,毛显强,袁达,等. 水环境退化经济损失的计量方法及其应用[J]. 环境科学研究,2006(6):127-130.
XIAO Yang, MAO Xianqiang, YUAN Da, et al. An econometric model for water environmental degradation loss and its application[J]. Research of Environmental Sciences,2006(6):127-130. (in Chinese)
- [45] 姜秋香,朱长虹,付强,等. 基于水资源价值成本核算的黑龙江省绿色 GDP 研究[J]. 节水灌溉,2015(11):80-84.
JIANG Qiuxiang, ZHU Changhong, FU Qiang, et al. A study on green GDP of Heilongjiang Province based on cost accounting of water resources value[J]. Water Saving Irrigation, 2015(11):80-84. (in Chinese)
- [46] 甘泓,秦长海,卢琼,等. 水资源耗减成本计算方法[J]. 水利学报,2011,42(1):40-46.
GAN Hong, QIN Changhai, LU Qiong, et al. Calculation method for cost of water resources consumption[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,42(1):40-46. (in Chinese)
- [47] 蓝盛芳,钦佩,陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
- [48] ZHONG S Z, GENG Y, HUANG B B, et al. Quantitative assessment of eco-compensation standard from the perspective of ecosystem services: a case study of Erhai in China [J/OL]. Journal of Cleaner Production. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.121530.
- [49] 姜瑶,颜泽文,黎良辉,等. 灌区用水优化模型参数全局敏感性分析与不确定性优化[J]. 农业机械学报,2023,54(7):372-380.
JIANG Yao, YAN Zewen, LI Lianghui, et al. Global sensitivity analysis of parameters for irrigation water optimization model and uncertainty optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(7):372-380. (in Chinese)
- [50] 秦长海,赵勇,裴源生. 农业水价调整对广义水资源利用效用研究[J]. 水利学报,2010,41(9):1094-1100.
QIN Changhai, ZHAO Yong, PEI Yuansheng. Study on the utility of agricultural water price adjustment on broad water utilization[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,41(9):1094-1100. (in Chinese)
- [51] 周岳鹏,倪红珍,林希晨,等. 联合降水关键影响因子的农业灌溉用水水价弹性研究[J]. 水利水电技术,2022,53(4):108-115.
ZHOU Yuepeng, NI Hongzhen, LIN Xichen, et al. Study on water price elasticity of agricultural irrigation water with joint precipitation key influencing factors [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(4): 108-115. (in Chinese)
- [52] 王钺霏,许朗. 粮食安全视域下农业水价改革空间研究[J]. 节水灌溉,2021(11):65-70.
WANG Yifei, XU Lang. Research on the space of agricultural water price reform under the perspective of food security[J]. Water Saving Irrigation,2021(11):65-70. (in Chinese)