

滨海缺水城市海水淡化全成本分析

——以华能威海电厂为例

张玲玲¹, 何梦婷¹, 王宗志², 刘克琳², 叶爱玲²

(1. 河海大学公共管理学院, 江苏 南京 211100;

2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:随着滨海城市的快速发展, 常规的地表水、地下水已远远不能满足社会经济的发展。以华能威海电厂为例, 基于全成本理论, 构建海水淡化全成本分析模型, 分别从资源成本、工程成本、外部性成本展开核算, 从有用性价值和稀缺性价值考虑资源成本, 工程费用和前期投入费用计入工程成本, 运用污染物当量法测算海水淡化对生态影响, 计算得出威海市华能电厂海水淡化水全成本为 7.166 元/m³, 其中资源成本为 0.123 元/m³, 工程成本为 6.597 元/m³, 外部性成本为 0.446 元/m³。对比目前自来水水价和外调水水价, 淡化水不存在明显的价格优势。但因为其水量稳定、水质安全等特性, 未来在城市供水系统中仍存在一定的应用潜力。最后为提升淡化水在纳入滨海缺水城市供水系统方面的竞争力, 提出了相关政策建议。

关键词:海水淡化; 滨海缺水城市; 水价; 全成本; 政策建议

中图分类号: F407.9

文献标志码: A

文章编号: 1003-9511(2021)01-0031-05

沿海城市是我国对外开放的窗口, 但淡水资源短缺已成为沿海城市发展的瓶颈^[1-2]。典型滨海城市威海目前供水来源有 3 个——地表水、地下水和外调水。但由于威海市降水量少, 地表水供给不足, 未来不能满足人们正常生活所需。地下水不宜大规模开采, 供水份额不高。同时威海市在受水区最末端, 上游水源受污风险大、水量波动大, 所以滨海城市供水并不能过分依赖客水。威海市三面环海, 具有海水利用的天然优势。目前已建成两期产水能力分别为 2 500 m³/d 和 7 200 m³/d 的华能威海电厂, 每年可节约自来水水量超过 300 万 m³。海水淡化为解决沿海城市水资源短缺提供新思路, 以全成本分析模型为基础核算海水淡化能为水价政策制定提供数据支撑, 进一步提升滨海城市多水源利用效率, 推动滨海城市可持续发展。

全成本理论是一种可以广泛应用于成本计算的经济模型, 国外学者 Gaddis 等^[3]运用全成本模型分析美国沿海灾害以提前做好灾害预警和准备计划, 国内学者张一清^[4]以全成本理论为研究基础测算了能源价格。

关于全成本理论在水价核算方面的研究, 国外学者 Ortega 等^[5]认为, 完全成本水价是目前国际统一认证能凸显水资源商品属性的核算方式。Bhojwani 等^[6]对水资源进行全成本评估, 包括资本成本比较(直接资本和间接资本)、运营成本比较(能源需求、劳动力成本、化学品使用、保养和维修成本、膜替代成本和单位产品成本)和环境成本(精矿处理和碳足迹)。国内学者从多个视角研究水资源全成本核算模型, 如刘婷婷^[7]从经济学视角衡量水资源全成本; 也有学者从边际成本角度出发, 如张洪雷^[8]提出水资源全成本由 3 部分边际成本组成。在研究水资源价值成本方面, 陈易等^[9]采用马尔萨斯模型将水资源的使用价值和价格建立数学关系, 马改艳等^[10]将地租理论应用到核算水本身资源价值上。

关于全成本理论在淡化水成本核算方面的研究, 李晓琼^[11]指出, 海水淡化全成本应该将淡化水从生产到使用全程产生的费用纳入计算。在海水本身资源价值研究方面, 王天琪等^[12]认为由于当时未出台征收海水利用费用的相关政策, 遂把海水本身资源价值忽略不计。高波等^[13]专注于研究海水淡

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0408005); 国家自然科学基金(72074068, 51579064); 中央高校基本科研业务费项目(2018B25014)。

作者简介: 张玲玲(1979—), 女, 教授, 博士, 主要从事水资源经济管理和资源环境政策分析研究。E-mail: llzhang007@163.com。

化的外部性成本,主要包括能源消耗成本、浓盐水排放对环境的影响以及使用海水的转化价值,最终得出 1.42 元/m³。目前海水淡化相关外部性研究主要定性阐述了海水淡化对生态环境的影响,如王侯^[14]提出海水淡化会影响海洋生物活动、危害人类健康、影响捕捞产业发展等,根据文献综述和主观判断并不能明确直接地突出海水淡化产业对生态的破坏。Gude^[15]指出,可持续发展海水淡化中环境因素包括碳排放、化学物质投放、水质富营养化。Elim-elech 等^[16]也在评估海水淡化能源效率中指出,热能导致空气污染和温室气体的排放。

综上所述,国内外学者较为普遍地认为水资源全成本包括水参与社会循环全过程所产生的一切成本,也能够计算过程中考虑水资源本身价值和外部性影响^[17]。但国内针对海水淡化的全成本分析还不够完善,主要表现为:①海水本身资源价值成本核算方式不一,缺少对其统一量化标准,很多研究为简化计算而直接将其归为 0。根据文献^[18]可知,海水资源也属于水资源,其共性价值不容忽视。②外部性成本缺少量化计算,大多数学者选择定性分析海水淡化过程产生的环境影响,无法直观了解影响程度。

基于已有研究,笔者选取典型滨海城市威海市为研究对象,运用全成本理论构建海水淡化全成本分析模型。从有用性价值和稀缺性价值考量淡化水资源成本,采用污染物当量法核算海水淡化的外部性成本,以数据结果直观显示海水淡化对生态的影响。通过从多角度量化计算海水淡化水成本,有助于淡化水进入城市供水系统的价格制定,进而为威海市多水源管理提供数据支撑。

1 数据来源

本文数据基于《威海市海水淡化专项规划说明书》《威海市统计年鉴 2018》《威海市水安全保障总体规划(2016—2050 年)》和《2018 年威海市水资源公报》等相关政策文件,同时参与南京市水利科学研究所“关于威海市基于海水淡化利用的城市多水源调配技术与政策保障研究”的课题项目,通过实际调研当地水务局和相关企业获取有效资料。

2 海水淡化全成本模型构建

鉴于此,笔者认为海水淡化全成本应将淡化水从取水、造水、输送到使用循环过程所产生的费用均衡量在内。其中为细化核算资源成本,将资源成本分为有用性价值和稀缺性价值,有用性价值与水质密不可分,水质等级越高有用性价值就相对越高;而

水量对稀缺性价值有着关键影响。其中,工程成本是指海水淡化过程中消耗的人力物力成本^[19],考虑到淡化水在整个供水环节的投入,在此将工程成本分为前期取水费用和后期工程建设费用。由于海水淡化项目规模、工艺、设备不一,工程成本也相应有所差别,其中外部性成本主要表现为海水淡化过程浓盐水排放对环境的影响。

综上,海水淡化全成本为

$$P = R + E + C \quad (1)$$

式中: P 为海水淡化全成本; R 为海水淡化资源成本; E 为海水淡化工程成本; C 为海水淡化外部性成本。

3 海水淡化全成本分析

3.1 资源成本分析

2017 年 12 月 1 起山东省开始对地表水与地下水征收水资源税,目前居民、工业用水的水资源税均为 0.4 元/m³,但未就海水淡化项目征收相应水资源税。淡化水取自海水,具备水资源本身的资源价值,因此本文从淡化水有用性价值和稀缺性价值两方面核算其水资源成本。

3.1.1 有用性价值

参考文献^[20],确定

$$R = \alpha V_1 + \beta V_2 \quad (2)$$

式中: R 为每吨淡化水资源成本,元/m³; V_1 为每吨淡化水的有用性价值,元/m³; V_2 为每吨淡化水的稀缺性价值,元/m³; α, β 为修正性系数,且 $(\alpha, \beta) \geq 0$ 。

引入有用性修正系数

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^n (w_j \alpha_{ij})}{\sum_{j=1}^n \alpha_{ij}} \quad (3)$$

式中: α_i 为第 i 级水的有用性修正系数; w_j 为第 j 种功用的权值; α_{ij} 为第 i 级水用于第 j 类用户的功效系数。根据文献研究^[21],结合威海市数据计算可得淡化水有用性价值为

$$\alpha V_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_4} V_s = 5.3381 V_s = 0.123 \text{ 元/m}^3$$

3.1.2 稀缺性价值

由于目前国内学者普遍认为海水淡化资源总量庞大,未有统一的稀缺性价值测算标准。根据文献^[22-23],假设 $\beta V_2 = \mu \alpha V_1$,其中 μ 表示该区域人均海水占有量与全国人均海水占有量比值,查阅资料可得 μ 值趋近于零。

综上,可得出海水淡化资源成本 $R = \alpha V_1 + \beta V_2 = 0.123 \text{ 元/m}^3$ 。

3.2 工程成本分析

根据上文分析,确定

$$E = e_1 + e_2 \quad (4)$$

式中： E 为海水淡化工程成本，元/ m^3 ； e_1 为海水淡化项目后期工程建设费用，元/ m^3 ； e_2 为海水淡化项目前期投入费用，元/ m^3 。

3.2.1 主要造水成本费用

根据实地调研数据整理可得表 1、表 2，威海市华能威海电厂目前淡化规模为 10 万 m^3/d ，低温多效与反渗透工艺投资各占一半，年平均设备利用率在 80% 左右，所以海水淡化后期工程建设费用为。

$$e_2 = \frac{5.87 \text{ 元}/m^3 + 7.03 \text{ 元}/m^3}{2} = 6.45 \text{ 元}/m^3$$

表 1 10 万 m^3/d 反渗透工艺不同设备利用率海水淡化成本 元/ m^3

项目	不同设备利用率海水淡化成本					备注
	90%	80%	60%	40%	20%	
化学品消耗	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	
材料更换费	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	
蒸汽消耗	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
电力消耗	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22	吨水电耗 4kW·h， 电价 0.555 元/kW·h
工资及福利	0.12	0.13	0.21	0.27	0.53	年人均 10 万元
修理费	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	费率 1%
其他费用	0.31	0.31	0.32	0.32	0.34	
折旧费用	1.18	1.33	1.78	2.66	5.33	20 年，残值 5%
利息费用	0.31	0.35	0.47	0.70	1.40	现行利率， 还款期 14 年
单位经营成本	4.17	4.18	4.23	4.33	4.62	不含折旧和利息
单位造水成本	5.66	5.87	6.48	7.69	11.35	

注：数据来源于《威海市海水淡化专项规划书》。

单位经营成本 = 化学品消耗 + 材料更换费 + 蒸汽消耗 + 动力消耗 + 工资及福利 + 修理费 + 其他费用；单位造水成本 = 单位经营成本 + 折旧费用 + 利息费用。下同。

表 2 10 万 m^3/d 低温多效工艺不同设备利用率海水淡化成本 元/ m^3

项目	不同设备利用率海水淡化成本					备注
	90%	80%	60%	40%	20%	
化学药品消耗	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43	
材料更换费	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
蒸汽消耗	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	余热蒸汽 30 元/ m^3 计
电力消耗	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	电价 0.555 元/kW·h
工资及福利	0.12	0.13	0.21	0.27	0.53	年人均 10 万元
修理费	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	费率 1%
其他费用	0.37	0.37	0.38	0.39	0.41	
折旧费用	1.39	1.57	2.51	3.13	6.26	20 年，残值 5%
利息费用	0.36	0.40	0.54	0.81	1.61	现行利率， 还款期 14 年
单位经营成本	5.05	5.06	5.11	5.20	5.49	不含折旧和利息
单位造水成本	6.80	7.03	7.73	9.14	13.37	

3.2.2 海水淡化项目前期投入费用

海水淡化项目必然需要前期大量费用投入，根据《威海市海水淡化专项计划说明书》，管网及配套工程投资分为近期、后期、展望期，选取 10 万 m^3/d

规模，按照 30 年折旧，近期、远期、展望期费用分别为 0.17 元/ m^3 、0.13 元/ m^3 、0.14 元/ m^3 ，取平均数 e_2 则为 0.147 元/ m^3 。

综上，海水淡化工程成本 $E = e_1 + e_2 = 6.45 \text{ 元}/m^3 + 0.147 \text{ 元}/m^3 = 6.597 \text{ 元}/m^3$ 。

3.3 海水淡化外部成本分析

为了水资源的可持续利用，海水淡化过程中必须考虑对环境的影响。浓盐水不但含盐量高，而且含有淡化工艺中掺杂的化学药品。目前国内对浓盐水主要有以下两类处理方式，①邻海淡化厂选择直接排放入海，这样成本低廉、快速方便，但易对周边海域造成生态污染；②内陆淡化厂多选择蒸发、深井注射、排放进污水处理系统，创收一定的经济效益，但前期处理费用较高^[24]。威海市已建成的华能威海电厂处理浓盐水选择排放入海，目前国内已出台排污费征收标准，下文采用污染物当量补偿法计算浓盐水排放对环境影响的外部成本。计算公式如下：

$$C = 0.7Q_b \sum_{j=1}^3 \frac{(w_j - w'_j)}{1000D_j} \quad (5)$$

式中： C 为浓盐水排放的外部性成本，万元； w_j 为浓盐水中第 j 种污染物的浓度， mg/L ； Q_b 为生产单位淡化水所排放浓盐水量； $Q_b = \frac{Q_1}{Q_2}$ ， Q_1 为浓盐水排放总量； Q_2 为总产淡水量； w_j 为原海水中的第 j 种污染物的浓度， mg/L ； D_j 为第 j 种污染物的污染当量值， kg 。

由于威海市核电配套产业园海水淡化项目二期仍在建设，所以本文以采用已建成的华能威海电厂排放浓盐水的理化性质和污染物当量表进行估算。

华能威海电厂年耗海水量约 15 亿 m^3 ，主要用于海水冷却，每天排放的海水约 400 万 m^3 ，日产 10 万 m^3 海水淡化工程，浓盐水量约 20 万 m^3 ，则生产单位淡化水所排放浓盐水量 Q_b 为 2 m^3 。故浓盐水排放的环境成本为

$$C = 0.7Q_b \sum_{j=1}^3 \frac{(w_j - w'_j)}{1000D_j} = 0.7 \times 2.0 \left\{ \frac{0.28 - 0.1}{1000 \times 0.0005} + \frac{0.18 - 0.12}{1000 \times 0.005} + \frac{2.53 - 0.69}{1000 \times 0.025} \right\} = 0.446 \text{ 元}/m^3$$

综上所述，威海市海水淡化预计全成本为

$$P = R + E + C = 0.123 \text{ 元}/m^3 + 6.597 \text{ 元}/m^3 + 0.446 \text{ 元}/m^3 = 7.166 \text{ 元}/m^3$$

4 结论与建议

4.1 结论

本文基于全成本分析法对威海市海水淡化做了

一个全成本核算,得出目前威海市海水淡化水成本价格为7.166元/m³。在3部分成本核算过程中,不难发现其中份额最高的是工程成本,占比高达95%。海水淡化成本和设备利用率直接相关,设备使用率越高,成本越低,当设备利用率低于50%时,低温多效工艺成本高于9元/m³,若设备处于高负荷的90%利用率时,无论是单使用反渗透工艺还是低温多效工艺,其单位造水成本均低于7元/m³。目前国内海水淡化项目向反渗透工艺发展,且随着设备的不断完善,海水淡化设备利用率保持在70%~80%^[25]。当然,海水淡化方法选择的不同对成本影响也不同,其中反渗透工艺主要消耗电力,低温多效工艺中蒸汽消耗费用较高。根据表1可知,吨水电耗4kW·h,电价0.555元/kW·h的情况下反渗透工艺在不同设备利用率下均需要2.22元/m³,由表2可知余热蒸汽30元/m³情况下低温多效工艺在不同设备利用率下均花费3元/m³,由此可见,淡化工艺的提升对工程成本的降低有着重要作用。虽然按照污染物当量法测算的环境成本占比不高,但由于选取方法和指标有限,不能完全代表其负外部性,未来在海水淡化项目实施过程中应本着水资源可持续利用的原则,着重考虑生态环境影响。

4.2 建议

目前威海市地表水已经不能满足市内用水需求,每年仍需南水北调工程与胶东调水工程向全市供水,根据水利局统计,计量水费长江水为4.25元/m³,黄河水2.965元/m³,此费用不含水处理费及管道输送费用。若将此部分费用算上,远程调水成本将达到7~9元/m³,而海水淡化设备在较高负荷运行时成本为6~7元/m³,此时南水北调成本与海水淡化成本相当^[23],从安全性和经济性上来说海水淡化均优于远程调水。华能威海电厂海水淡化全成本分析为滨海缺水城市加快海水淡化进程提供数据支撑,为进一步提升淡化水进入城市供水系统竞争力,滨海缺水城市政府必须出台相关政策完善淡化水价格制定、加快淡化水纳入城市供水统一管理。

4.2.1 积极争取政策和资金支持,打造多元融资渠道

相关政府和企业要积极争取国家部委及省直部门关于海水淡化领域产业、研发、人才等方面的政策及资金支持,加快淡化工艺科学研究,提升设备利用率,降低化学药剂污染源,延长膜和管道的使用寿命。目前海水淡化项目投资以政府为主,也可鼓励第三方资本参与海水淡化产业投资,适用于海水淡化项目的运营模式有多种,如EPC总承包模式、PPP模式、BOT模式等,相关企业和政府可根据实际情况选择合适的投资模式,促使经济综合效益最大化。

4.2.2 加快淡化水纳入城市供水统一管理

为促进水资源可持续利用,必须加快构建动态水价协调机制,特别关注城市供水产生的外部性因素,不断完善水资源全成本核算体系,加快推进多水源价格分类。考虑到居民水价承受力和水质可接受度,政府应发挥其宏观调控职能,促使市场发挥价格杠杆作用。作为缺淡水资源的滨海城市,多水源统筹利用应综合考虑预测缺水量、供水成本等多种因素。近期,不改变外调水以及库水为主的供水水源格局,海水淡化可以作为第二水源和备用水源,为滨海城市的供水安全提供有力保障;未来,随着技术水平的不断提高,海水淡化的制水成本也会不断下降,其大规模应用一直受到严重制约的经济因素将不复存在,海水淡化既可以作为常规水源进入供水系统,更可以作为优质水源分质供水。

参考文献:

- [1] 刘利. 滨海缺水城市水资源优化利用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [2] 周斌, 桑学锋, 秦天玲, 等. 我国京津冀地区良性水资源调控思路及应对策略[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 6-10.
- [3] GADDIS E B, MILES B, MORSE S, et al. Full-cost accounting of coastal disasters in the United States: Implications for planning and preparedness[J]. Ecological Economics, 2007, 63(2-3): 307-318.
- [4] 张一清. 能源优化配置机制的博弈与投入产出分析[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2011.
- [5] ORTEGA J F, de JUAN J A, TARJUELO J M. Improving water management: The irrigation advisory service of Castilla-La Mancha (Spain) [J]. Agricultural Water Management, 2005, 77(1-3): 37-58.
- [6] BHOJWANI S, TOPOLSKI K, MUKHERJEE R, et al. Technology review and data analysis for cost assessment of water treatment systems[J]. The Science of The Total Environment, 2019, 651: 2749-2761.
- [7] 刘婷婷. 基于全成本模型的我国水价问题研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.
- [8] 张洪雷. 城市绿色用水管理方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [9] 陈易, 安子琴, 姜小川, 等. 基于完全成本定价模型的大连市水价研究[J]. 水利经济, 2011, 29(3): 42-45.
- [10] 马改艳, 徐学荣. 基于可持续发展的全成本水价机制研究[J]. 长春理工大学学报(社会科学版), 2013, 26(8): 91-93.
- [11] 李晓琼. 海水淡化全成本分析及其发展前景探讨: 以天津北疆电厂海水淡化项目为例[J]. 再生资源与循环经济, 2012, 5(10): 37-40.
- [12] 王天琪, 杜攀, 刘猛. 海水淡化水价格体系研究[J]. 盐

业与化工,2013,42(9):7-12.

- [13] 高波,郭菊娥,孟庆才. 海水淡化产业外部成本经济性分析及实证研究[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版),2012(4):33-37.
- [14] 王侯. 海水资源利用的生态伦理问题与对策研究[D]. 锦州:渤海大学,2013.
- [15] GUDE V G. Desalination and sustainability: An appraisal and current perspective[J]. Water research: A journal of the international water association, 2016,89(1):87-106.
- [16] ELIMELECH M, PHILLIP W A. The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology, and the Environment [J]. Science, 2011,333(6043):712-717.
- [17] 张仁田,鞠茂森,ZOU Jinzhang. 澳大利亚的水改革、水市场和水权交易[J]. 水利水电科技进展,2001,21(2):65-68.
- [18] 李金昌. 资源价值研究中的一部力作:简评姜文来的《水资源价值论》[J]. 资源科学,1998(5):3.

- [19] 王谢勇,谭欣欣,陈易. 构建水价完全成本定价模型的研究[J]. 水电能源科学,2011,29(5):109-112.
- [20] 赵金会. 水资源可持续利用下的水价形成机制及相关问题研究[D]. 天津:天津大学,2005.
- [21] 孟庆才. 青岛市各类水源全成本分析及供水结构优化研究[D]. 青岛:山东科技大学,2011.
- [22] 周芳,马中,郭清斌. 中国水价政策实证研究:以合肥市为例[J]. 资源科学,2014,36(5):885-894.
- [23] 邢淑颖,刘淑静,李磊,等. 海水淡化进入城市供水的定价策略研究[J]. 水利经济,2015,33(5):62-65.
- [24] BECKER N, GREENFELD A, ZEMAH SHAMIR S. Cost-benefit analysis of full and partial river restoration: the Kishon River in Israel [J]. International Journal of Water Resources Development, 2019,35(5):871-890.
- [25] 闫玉莲,吴云奇,吴水波,等. 海水淡化在供水行业成本优势潜力分析[J]. 盐科学与化工,2018,47(9):16-20.
- (收稿日期:2019-12-06 编辑:罗丹)

(上接第30页)

此,本文提出的基于核算账户的自然资源资产干部离任审计方法为未来的审计研究和实践提供了新的思路。随着我国自然资源资产账户编制的数字技术应用和常规化,相应的干部离任审计将最终建立在国民经济账户、自然资源卫星账户和实验账户基础之上。

参考文献:

- [1] 耿建新,牛红军. 关于制定我国政府环境审计准则的建议和设想[J]. 审计研究,2007(4):8-14.
- [2] 李四能. 领导干部自然资源资产离任审计方式研究[J]. 福建论坛(人文社会科学版),2016(12):26-31.
- [3] 刘明辉,孙冀萍. 领导干部自然资源资产离任审计要素研究[J]. 审计与经济研究,2016(4):12-20.
- [4] 伍彬,伍中信. 自然资源资产离任审计研究现状与评述[J]. 财会月刊,2017(24):86-90.
- [5] 钱水祥. 自然资源资产负债表编制与应用探析[J]. 水利经济,2017,35(6):12-18.
- [6] 内蒙古自治区审计学会课题组. 领导干部水资源资产离任审计研究[J]. 审计研究,2017(1):12-22.
- [7] 张宏亮,刘长翠,曹丽娟. 地方领导人自然资源资产离任审计探讨:框架构建及案例运用[J]. 审计研究,2015(2):14-20.
- [8] 房巧玲,李登辉. 基于PSR模型的领导干部资源环境离任审计评价研究:以中国31个省区市的经验数据为例[J]. 南京审计大学学报,2018,15(2):87-99.
- [9] 李博英,尹海涛. 领导干部自然资源资产离任审计方法研究:基于模糊综合评价理论的分析[J]. 审计与经济研究,2016(6):28-34.
- [10] 简富绩,宋晓谕,虞文宝,等. 水资产负债表编制中水资

源资产核算账户的建立与分析:以黑河中游张掖市为例[J]. 中国沙漠,2016,36(3):851-856.

- [11] 芦海燕,魏彦强,杨肃昌,等. 基于资产负债表的领导干部自然资源离任审计方法研究:以甘肃省水资源审计为例[J]. 冰川冻土,2019,41(1):227-235.
- [12] 陈燕丽,王普查. 我国自然资源资产负债表构建与运用研究:以政府官员离任审计为视角[J]. 财经问题研究,2017(2):80-87.
- [13] 唐勇军,李鹏,马文超. 水资源资产负债表编制研究:基于领导干部离任审计视角[J]. 水利经济,2018,36(5):13-20.
- [14] 周申蓓,杜阿敏. 基于供需管理的太湖流域水资源反退化能力研究[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(12):125-131.
- [15] 黄显峰,石志康,金国裕,等. 基于碳足迹的区域水资源优化配置模型[J]. 水资源保护,2020,36(4):47-51.
- [16] 董光华,沈菊琴,孙付华,等. 水资源资产量核算研究综述[J]. 水利经济,2017,35(4):7-11.
- [17] 唐勇军,张鹭鹭. 基于流域管理的水资源资产负债表编制研究:以太湖流域为例[J]. 水利经济,2020,38(1):21-28.
- [18] 龚艳冰,张继国,梁雪春. 基于全排列多边形综合图示法的水质评价[J]. 中国人口·资源与环境,2011,21(9):26-31.
- [19] 罗艳. 基于DEA方法的指标选取和环境效率评价研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2012.
- [20] 陈磊,郑明亮. 新常态下外资经济的转型发展:基于环境效率的视角[J]. 江海学刊,2015(4):80-86.
- [21] 周申蓓,周倩. 新疆地区水资源退化趋势及其产业原因研究:基于灰水足迹和脱钩指数[J]. 资源与产业,2017,19(3):76-81.

(收稿日期:2020-03-09 编辑:胡新宇)