

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.027

基于RSBM-DEA模型的舟山市水生态产品供给效率及影响因素

贺义雄^{1,2}, 张怡卉¹, 李春林¹

(1. 浙江海洋大学经济与管理学院, 浙江 舟山 316022; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000)

摘要:在构建舟山市水生态产品供给效率评价指标体系的基础上,采用基于时间序列数据的RSBM-DEA模型研究了2000—2017年舟山市水生态产品供给效率的演化特征,并对其影响因素进行了分析。结果表明:舟山市水生态服务价值以地表水调蓄与文化服务为主,呈现波动上升的态势,水生态系统对舟山市经济社会可持续发展的支撑作用不断增强;舟山市水生态产品供给效率维持在较高水平并波动发展,其中纯技术效率是关键要素,并在2003年和2013年经历了两个“低谷期”,主要是由纯技术效率影响导致;不同因素对舟山市水生态产品供给效率的影响方向和影响程度不同,其中科技水平、水利设施建设情况、产业结构、经济发展水平有十分显著的正向影响,而年均温度与地面硬化率呈负向影响,且地面硬化率影响程度较低。

关键词:水生态产品;供给效率;RSBM-DEA模型;Tobit回归分析;舟山市

中图分类号: F205 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2022)04-0195-09

Supply efficiency of water ecological products and its influencing factors in Zhoushan City based on RSBM-DEA model // HE Yixiong^{1,2}, ZHANG Yihui¹, LI Chunlin¹ (1. School of Economics and Management, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China)

Abstract: Based on the construction of the evaluation index system for the supply efficiency of water ecological products in Zhoushan City, the evolutionary characteristics of the supply efficiency of water ecological products in Zhoushan City from 2000 to 2017 were analyzed by using the RSBM-DEA model based on time series data, and the influencing factors were analyzed. The results show that the value of water ecological services in Zhoushan City is mainly reflected in surface water storage and cultural services, showing a fluctuating upward trend. The supporting effect of water ecosystem on the sustainable development of Zhoushan's economy and society has been continuously enhanced. The supply efficiency of aquatic ecological products in Zhoushan City has maintained a fluctuating development trend at a high level, of which pure technical efficiency is the key factor. In 2003 and 2013, it experienced two "trough periods", mainly caused by the impact of pure technical efficiency. Different factors have different influence directions and degrees on the supply efficiency of water ecological products in Zhoushan City. Among them, the level of science and technology, the construction of water conservancy facilities, industrial structure and the level of economic development have a very significant positive impact, while the annual average temperature and ground hardening rate have a negative impact on the ground hardening rate, and the ground hardening rate has a low impact.

Key words: water ecological product; supply efficiency; RSBM-DEA model; Tobit regression analysis; Zhoushan City

生态产品是生态系统提供给人类社会使用和消费的产品和服务^[1-2]。当前,生态产品的短缺已经成为制约我国经济社会发展的主要瓶颈之一。水资源

是支撑地球生命系统的基础,水生态系统作为主要的生态系统类型,不仅为人类提供了赖以生存和发展的物质基础与自然条件,还具有维持生态系统

基金项目:浙江省高校重大人文社科攻关计划(2018QN045);国家级大学生创新创业训练计划(202010340048);浙江省省属高校基本科研业务费项目(2019J00060)

作者简介:贺义雄(1981—),男,副教授,博士,主要从事海洋资源价值评估与核算研究。E-mail:heyixiong@mail@163.com

结构、生态过程与区域生态环境的功能。因此,作为生态产品的重要组成部分,水生态产品是保护水生态系统、增进公众水生态福祉的重要基础,对水生态产品供给进行研究,在生态文明建设大背景下具有十分重要的现实意义。目前,我国水生态产品的研究主要集中在内涵界定、价值实现路径^[3]、价值评估与核算^[4-5]等方面,而对于效率分析这一影响其供给成效的重要因素^[6]的研究较少。另一方面,对水资源利用效率的研究数量众多,主要围绕效率测度^[7-9]、效率影响因素^[10-11]、不同区域的效率研究与分析^[12-13]、水资源的生态系统和社会与经济系统的协同发展^[14-15]等展开,从城市用水^[9,16]、工农业用水^[17-18]等角度对水资源利用进行划分,并通过将污染物作为非期望产出纳入评价体系中^[10,19-20],进一步开展绿色生态效率的研究^[13,21],从而为人水和谐等水生态文明建设目标的实现提供支撑^[22]。但总体看研究区域大多都以省级行政区为单位,同时对资源禀赋情况等地区差异考虑不足^[23],因此研究成果对于地级市及以下层面的指导性有待提升。

鉴于此,考虑舟山市作为海岛城市,水资源紧缺^[24],对其进行研究有代表性意义。本文使用效率研究中广泛应用的数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法^[25],基于时间序列数据分析,并考虑非期望产出因素,对舟山市水生态产品供给效率进行研究,以期缓解海岛型城市水资源紧张,促进水资源高效可持续开发利用及经济社会高质量发展提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

舟山市(即舟山群岛)位于浙江省东北部,地处长江、钱塘江、甬江3江的入海口,是中国东部沿海和长江流域走向世界的重要海上门户(图1)。区域总面积2.22万km²,其中海域面积2.08万km²,陆域面积1458.76km²,共有大小岛屿1390个,舟山本岛是我国的第四大岛。全市地势由西南向东北倾斜,南部大岛较多,海拔高,排列密集;北部以小岛为主,地势低,分布稀疏。区域气候为海洋特征明显的亚热带季风气候,多年平均气温17.1℃,历年平均降水量1221.7mm,冬暖夏凉,季风发达,夏秋多台风,易旱易涝。据2017年统计,全市常住人口总数116.8万人,人口密度801人/km²。水资源总量9.9亿m³,用水人口72.09万人,人均水资源量851.63m³。

1.2 指标选取与数据来源

目前,关于生态产品供给效率指标的研究较少,

本文借鉴生态效率测度指标的已有研究成果,结合水生态产品供给和产出过程,从投入、期望产出和非期望产出3方面构建舟山市水生态产品供给效率的具体测度指标。

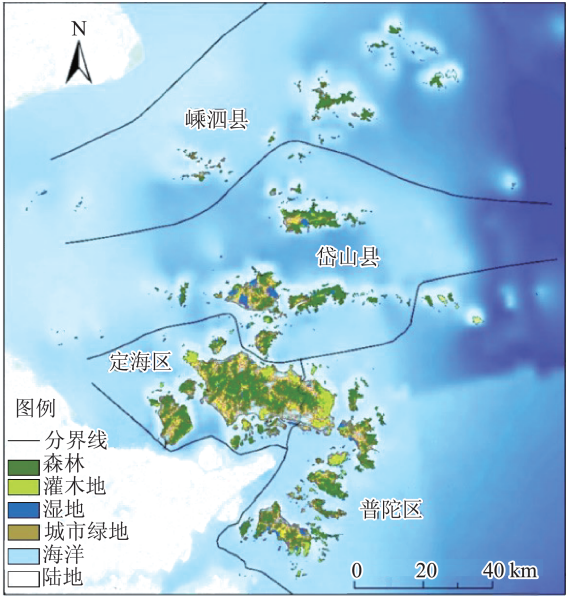


图1 舟山市概况

Fig.1 Overview of Zhoushan City

a. 投入方面,劳动力、资本、土地、能源等是本文纳入考虑的要素。结合数据的可获取性,劳动力投入为水资源相关产业中劳动者的总人数,即水的生产和供应业中劳动者与水利、环境和公共设施管理业中劳动者数量的总和。资本投入方面,由于研究区相关数据信息缺乏,同时考虑处理后的废水排放会带来水生态系统可提供的服务量的增加,因此采用企事业单位治理废水的环保投入替代。考虑不同状况的地面会对地表水调蓄、地下水补给等产生不同影响,进而影响水生态系统服务的供给,采用绿化覆盖面积作为土地投入的指标;同时,考虑水库库容的大小会影响最终保留下来能够提供服务的地表水资源的数量,而且水库的占地也可以看作是土地投入的一部分,所以还选取了水库总库容作为土地投入的一部分;对这两项指标进行标准化处理后加权求和作为土地投入的最终数据。能源投入的指标为水的生产和供应业综合能源消费量。此外,考虑水生态产品的提供离不开天然降水的作用,因此以实际降水量(年降水量减去年蒸发量)表示降水资源的投入。

b. 期望产出方面,鉴于水生态产品的供给最终体现出来的形式是水生态系统服务,本文将水生态系统服务价值作为产出值。基于水生态系统服务的内涵^[26-28],借鉴 Constanza 等^[29]和联合国千年生态

系统评估 (The Millennium Ecosystem Assessment, MA) 对生态系统服务的分类方法,并考虑支持服务是通过其他 3 类服务来具体体现^[30],本文构建了舟山市水生态系统服务价值核算指标体系,将舟山市的水生态系统服务划分为社会经济服务和自然生态服务两大类。考虑到数据的可量化性、可获取性、客观性和舟山市水生态系统的实际特点,进一步将其细化为 6 项指标进行评价,其中社会经济服务包括淡水产品产值、水资源供给价值、文化服务价值,自然生态服务包括地表水调蓄价值、地下水补给价值、气候调节价值。

c. 非期望产出方面,选取了水质净化价值这一指标。考虑在提供水生态产品时,对水中的 COD、NH₃-N 等污染物的净化实质上给水资源状况造成了负面影响,因此其并不是期望的产出,但是这一净化行为在供给水生态产品时又无法避免,所以将其作为非期望产出,并作为投入来处理。由于相关统计数据的缺失,本文以水质净化对应的价值量进行反映,没有采用灰水足迹等指标。具体计算过程可参阅文献[31]。

需要说明的是,水生态产品的投入和产出虽然大多发生在当年,但两者均具有一定的滞后性,而本文对这一特性不加以探讨,认为当年全部产出只来源于当年所有投入。按照研究期限内不同年份的投入-产出系统,将研究区划分为 18 个决策单元 (decision making unit, DMU),符合其数量为投入与产出指标总数两倍以上检验法则。数据来源于 2001—2018 年《舟山统计年鉴》《舟山市国民经济和社会发展统计公报》《浙江自然资源与环境统计年鉴》《浙江省水资源公报》、浙江省统计局等公开渠道,对个别年份水库总库容的缺失数据采用插值法补齐。

2 研究方法

2.1 水生态系统服务价值核算方法

2.1.1 社会经济服务价值

淡水产品产值、水资源供给价值、文化服务价值的计算公式为

$$V_1 = q_t p_t \quad (1)$$

$$V_2 = \sum_{i=1}^4 W_i p_i \quad (2)$$

$$V_3 = r V_1 \quad (3)$$

式中: V_1 、 V_2 、 V_3 分别为淡水产品产值、水资源供给价值、文化服务价值,亿元; q_t 为淡水产品产量; p_t 为单位淡水产品平均价格,取 15.36 元/kg^[4]; W_i 为农业、工业、生活和生态环境等各行业用水量,亿 m³; p_i 为

各类用水价格,其中,农业和生态环境用水单价是 0.5 元/m³,工业用水单价是 3.68 元/m³,生活用水单价是 1.9 元/m³; r 为旅游收入中水景观所占比例,取 12.3%^[32]; V_t 为旅游总收入,亿元。

2.1.2 自然生态服务价值

地表水调蓄价值、地下水补给价值、气候调节价值的计算公式为

$$V_4 = q_s p_s \quad (4)$$

$$V_5 = q_n p_n \quad (5)$$

$$V_6 = \frac{\gamma q_h p_h}{3600\alpha} + \beta q_h p_h \quad (6)$$

其中

$$q_h = ET \cdot S \times 10^{-5}$$

式中: V_4 、 V_5 、 V_6 分别为地表水调蓄价值、地下水补给价值、气候调节价值,亿元; q_s 为地表水资源量,亿 m³; p_s 为水库单位库容造价,为 6.11 元/m³; q_n 为地下水资源量,亿 m³; p_n 为生活用水单价,取 1.9 元/m³; q_h 为年蒸发损失量,亿 m³; γ 为一个标准大气压下的汽化热,取 2.26 MJ/kg; α 为空调能效比,取 3; β 为将 1 m³ 水转化为蒸汽的耗电量,为 125 kW·h; p_h 为舟山市标准电价,取 0.515 元/(kW·h); ET 为年蒸发量,mm; S 为湿地面积,km²。

2.2 RSBM-DEA 模型

作为一种非参数估计方法,DEA 是用于测评一组具有同类型多投入和多产出的生产或非生产部门决策单元的绩效和相对效率的方法,其可以规避参数方法的多种限制^[33]。但传统 DEA 模型在测算效率时多侧重期望产出,采用径向或角度的 CCR 模型与 BCC 模型,并未充分考虑到投入、产出的冗余以及松弛情况^[25]。为了解决这一问题,日本学者 Tone^[34] 提出基于松弛测度 (slack-based measure) 的 DEA 模型,文献中通常将此称为 SBM-DEA 模型,但其未充分考虑期望产出与非期望产出之间的弱处置关系。虽然方向距离函数的引入可以一定程度上解决此问题,但由于方向向量的主观特性,使得成效难以保证。因此, Song 等^[35] 在 SBM-DEA 的基础上提出射线松弛测度数据包络分析 (ray slack-based measure data envelopment analysis, RSBM-DEM) 模型,对其进行改进并取得较好效果。本文运用 RSBM-DEM 模型,对舟山市水生态产品的供给效率进行评价。模型基本表达式为

$$\rho = \min \left[\frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{x_{0i}}}{1 + \frac{1}{s+1} \left(\sum_{r=1}^s \frac{S_r^+}{y_{0r}} + \frac{S_w^-}{\|z_0\|} \right)} \right] \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + S_i^- = x_{0i} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - S_r^+ = y_{0r} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j w + S_w^- = \|z_0\| \\ \lambda_j \geq 0 \\ S_i^-, S_r^+, S_w^- \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: ρ 为水生态产品供给效率值, $\rho < 1$ 时 DMU 未达到有效状态,存在着投入或产出上改进的必要性, $\rho \geq 1$ 时则达到有效状态; λ 为权重向量值; m, s 分别为投入、期望产出因素个数; n 为 DMU 个数; x_0, y_0, z_0 分别为投入、期望产出和非期望产出的向量值; w 为非期望产出的极半径; S_i^-, S_r^+, S_w^- 分别为投入、期望产出和非期望产出的松弛量。

3 结果与分析

3.1 水生态系统服务价值

表 1 为 2000—2007 年舟山市水生态系统服务价值。由表 1 可知,2000—2007 年舟山市水生态服务价值量均值为 100.15 亿元,呈现出波动上升的态势,其值从 2000 年的 71.38 亿元上升至 2017 年 184.17 亿元,年均增长率达 5.73%。其中,水生态系统的社会经济服务价值呈现逐年递增趋势,从 2000 年的 6.82 亿元上升到 2017 年的 104.64 亿元,年均增长率达 17.42%,可见水生态系统对舟山市

社会经济持续发展的支撑作用不断增强。具体来看,舟山市水生态系统服务总价值以地表水调蓄与文化服务为主,两者历年平均价值量分别为 45.39 亿元和 28.86 亿元,占全市水生态系统服务总价值的 45.32% 与 28.82%;后者价值上升趋势显著且升幅最大,其占比从 2000 年的 3.89% 上升至 2017 年的 53.86%。而淡水产品供给、水资源供给与地下水补给 3 类水生态系统服务的价值量占总价值的比例较小,均不超过 5%,这与海岛的地理条件等直接相关。

3.2 供给效率变动及比较分析

3.2.1 皮尔逊相关系数

DEA 模型应用的一个重要前提条件是投入和产出变量之间存在正相关关系,即当投入增加或减少的时候,产出也应该相应增加或减少。皮尔逊相关系数检验可用来衡量变量间的线性关系^[36],因此本文先通过皮尔逊相关系数的检验以保证指标选取的合理性,结果见表 2。由表 2 可见,6 个投入指标均与水生态系统服务价值呈显著的正相关关系,其中与产出相关程度最大的为水的生产和供应业综合能源消费量,二者的相关关系高达 0.926,相关程度最小的为土地投入,二者的相关系数为 0.217。可见指标选取的较为合理,可以用 RSBM-DEA 模型进行效率测算。

3.2.2 水生态产品供给效率

参考已有文献[37-38],将规模报酬不变条件下

表 1 2000—2017 年舟山市水生态系统服务价值
Table 1 Water ecosystem service value in Zhoushan City from 2000 to 2017

单位:亿元

unit:10⁸ Yuan

年份	社会经济服务价值			自然生态服务价值			总价值
	淡水产品产值	水资源供给价值	文化服务价值	地表水调蓄价值	地下水补给价值	气候调节价值	
2000	0.67	3.37	2.78	44.36	2.77	17.42	71.38
2001	0.91	3.43	3.61	36.18	2.77	17.38	64.28
2002	1.06	3.55	4.35	36.18	2.77	17.07	64.98
2003	1.15	3.31	4.38	10.33	1.65	19.50	40.32
2004	1.23	3.43	6.30	35.81	2.76	20.94	70.46
2005	1.30	3.16	7.55	49.07	3.08	19.90	84.05
2006	1.37	2.97	11.26	31.65	2.51	19.92	69.68
2007	1.38	3.10	13.31	32.57	2.66	20.78	73.79
2008	1.33	2.60	16.22	49.37	3.12	18.86	91.50
2009	1.29	2.70	19.05	43.45	2.96	19.82	89.27
2010	1.37	2.95	24.75	46.01	3.00	18.86	96.95
2011	1.33	3.17	28.96	26.03	2.43	20.27	82.20
2012	1.56	3.34	32.81	79.74	4.01	19.41	140.88
2013	1.37	3.43	36.91	34.77	2.60	23.48	102.57
2014	1.20	3.43	58.70	48.52	3.15	13.68	128.67
2015	1.21	3.46	67.92	71.98	3.74	13.83	162.15
2016	1.31	3.54	81.38	80.42	4.28	14.51	185.43
2017	1.84	3.60	99.20	60.50	3.71	15.33	184.17
平均	1.27	3.25	28.86	45.39	2.90	18.39	100.15

表 2 投入与产出指标间的皮尔逊相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient between input and output indexes

指标	资本	实际降水量	土地	劳动力	水的生产和供应业 综合能源消费量	水质净化 价值	水生态系统 服务价值
资本	1						
实际降水量	0.547 **	1					
土地	0.128 ***	0.307	1				
劳动力	0.019 *	0.427 *	0.217 **	1			
水的生产和供应业 综合能源消费量	0.483 **	0.748 ***	0.503 ***	0.657 ***	1		
水质净化价值	0.754 ***	0.449 *	0.048 *	0.862 ***	0.685 ***	1	
水生态系统服务价值	0.508 **	0.771 ***	0.217 ***	0.768 ***	0.926 ***	0.483 **	1

注:***、**、* 分别表示达到 1%、5%、10% 的显著性水平。

计算得到的效率称为总技术效率,将规模报酬可变条件下计算得到的效率称为纯技术效率,将总技术效率与纯技术效率之比称为规模效率,具体测算结果见表 3。

表 3 舟山市水生态产品供给效率测算结果

Table 3 Calculation results of supply efficiency of water ecological products in Zhoushan City

年份	总技术效率	纯技术效率	规模效率	规模报酬变化趋势
2000	1.068 1	1.082 0	0.987 2	递减
2001	1.201 6	1.207 9	0.994 8	递减
2002	1.149 1	1.151 9	0.997 6	递减
2003	0.457 6	0.457 6	1.000 0	不变
2004	0.801 5	1.001 3	0.800 5	递减
2005	1.126 2	1.163 0	0.968 4	递减
2006	1.279 1	1.295 1	0.987 7	递减
2007	0.838 3	0.859 6	0.975 2	递减
2008	1.073 3	1.191 9	0.900 5	递减
2009	0.739 8	0.744 9	0.993 2	递减
2010	1.028 3	1.103 0	0.932 3	递减
2011	0.681 1	0.735 6	0.925 9	递减
2012	0.756 7	1.127 4	0.671 2	递减
2013	0.491 4	0.647 4	0.759 0	递减
2014	0.622 2	0.746 8	0.833 2	递减
2015	0.781 3	0.817 1	0.956 2	递减
2016	1.017 4	1.031 7	0.986 1	递减
2017	1.142 1	1.149 3	0.993 7	递减

由表 3 可见,总技术效率方面,2000—2017 年中只有 9 年的总技术效率值大于 1,即实现 DEA 有效,无效年份达 50%,说明舟山市的水生态产品供给还存在大量能源和资源等的投入冗余和排入水中的污染物较多等问题。2000—2017 年,舟山市水生态产品的供给总技术效率在均值 0.9 上下波动,还没有发展到能保持投入-产出高效率的状态。考虑舟山市水资源紧缺的现实情况,因此实行节约与环境友好型发展战略是舟山市提升水生态产品供给效率的必由之路。分解效率方面,纯技术效率表现出来的情况比规模效率更优。2000—2017 年纯技术效率实现 DEA 有效的年份有 11 年,规模效率实现 DEA 有效的年份仅为 1 年。纯技术效率和规模效

率的平均值分别为 0.973、0.926,标准差分别为 0.227、0.094,表明纯技术效率水平较高,但是规模效率相对稳定。因为总技术效率会受规模效率的影响,特别是 2001 年、2004 年、2012 年,纯技术效率大于 1,而总技术效率未达到 DEA 有效,且两者间差距较大,说明舟山市在资源的配置以及高效利用等方面做得较好,但规模效率低,所以要提高总技术效率,可以从改变投入或产出的规模情况入手。此外,研究期内总技术效率整体波动幅度较大,但规模效率保持在一个较为稳定的水平,说明纯技术效率是影响总技术效率的主要原因。规模报酬方面,除 2003 年外规模报酬都为递减。由于海岛生态系统相对独立,不考虑舟山市水生态系统的区际影响问题,表明整体上要素的投入已经超过了消化能力。这说明舟山市未来应审慎使用以简单扩大要素投入规模为手段提升水生态产品供给效率的做法,也进一步表明纯技术效率对舟山市水生态产品供给总技术效率改变的重要意义。

由表 3 还可以看出,舟山市水生态产品供给的总技术效率表现为高位震荡上行的特征,但是在 2003 年和 2013 年有两个明显的“低谷期”,具体是由纯技术效率下降导致;说明在这两年的投入规模下,没有将资源合理、高效地利用,同时 2013 年的水质净化价值较高(达到 3.26 亿元,处于研究期内第三位),因此投入的总体效率不高,进而拉低了总技术效率的水平。另外,2012 年的规模效率为 2000—2017 年中的最低值,此年的非期望产出值(水质净化价值)处于研究期内第二位,虽然实际降水量、土地投入、劳动力投入量、水的生产和供应业综合能源消费量均远高于往年,但不合理的结构致使冗余过多,总产出值处于研究期内第四位,最终规模效率依然十分低下。

4 影响因素分析

选取测算到的总技术效率、纯技术效率、规模效

率作为被解释变量。解释变量方面,参考邓灵稚等^[39]的研究成果,同时考虑数据的可获得性,从自然气候与社会经济角度出发,选取了以下因素:①年均温度。温度会通过蒸发量产生影响从而影响实际水资源量,同时过高或过低的气温还会对水体中的各种生物产生影响,改变水资源的“质”,对水生态系统服务的成效造成影响,从而使得供给效率产生改变。②科技水平。较高的科技水平能够在水生态产品的社会经济服务和自然生态服务方面都起到提高效率的作用,由于科技因素相关的指标较少,所以选取科技人员的数量来表示(国有企事业单位各类专业技术人员、工程技术人员、科学研究人员的数据之和)。③地面硬化率。地面的硬化会影响水资源的吸收、下渗等一系列活动的进行,从而影响最终的水生态系统服务实际发挥情况,本文按照“1 减去建成区绿化覆盖率”对地面硬化率进行计算。④水利设施建设情况。水利设施是提供水生态产品的重要工具,其规模和完好程度都能对水生态系统服务状况产生影响,本文用水利设施建设投入来反映,具体数据通过将舟山市各区县(定海区、普陀区、岱山县、嵊泗县)的水利设施建设投入数据求和得到。⑤产业结构。产业结构的变化会引发水资源环境状况等的改变,从而影响水生态产品供给的最终成效,本文选用第三产业占总产值之比来反映产业结构。⑥经济发展水平。经济发展水平代表地区的发展情况,其变化会使公众对水生态系统的认知、对水资源的需求构成等产生改变,进而导致水生态系统服务价值水平变化,本文选取人均 GDP 进行衡量。各变量的数据主要来自 2001—2018 年《舟山统计年鉴》、浙江省统计局,对个别年份人均 GDP 的缺失数据采用插值法补齐,同时为避免数据量纲不同导致非平稳性问题的出现,对各变量指标进行了取自然对数的标准化处理。

由表 3 可知,总技术效率位于 0.457 6~1.279 1 之间,纯技术效率位于 0.457 6~1.295 1 之间,规模

效率位于 0.671 2~1.000 0 之间,数据具有明显的截断特征,如果直接以超效率值为因变量建立统计模型,用普通最小二乘法对其进行回归分析,则参数估计将有偏不一致^[33]。Tobit 模型属于一种因变量受限的回归模型,能够解决受限或截断因变量的模型构建问题^[40],因此选用 Tobit 模型进行回归分析,结果见表 4。由表 4 可见,年均温度在 10% 的显著性水平下与总技术效率和纯技术效率成负相关关系,对规模效率没有显著影响。说明当舟山市气温升高导致水资源量下降等情况发生时,投入要素难以得到优化配置及高效利用,水资源开发利用的技术水平等还需提升。科技水平对各效率值均有显著正向影响,特别是对总技术效率与纯技术效率有非常显著的影响;科技水平每增加 1%,综合效率、纯技术效率、规模效率分别会提升 0.24%、0.22% 和 0.01%;在研究期内与水资源利用相关的技术人员数量一直保持在均值 2 619 人左右,各年并无大幅变化,这说明要提升舟山市水生态产品的供给效率,就要在未来加大科研领域的人员投入。地面硬化率只在 10% 的显著性水平下与规模效率呈负相关关系,这表明虽然地表的状况会影响舟山市水生态产品供给的实际规模,但其影响并不是十分强烈,这可能与其城区面积相对较小有关。水利设施建设情况对各效率均有正向影响,特别是对规模效率的影响最明显,这说明增加对水利工程设施的投入,提升可使用的水资源量,将促进供给效率的提高,因此,舟山市未来应进一步建设好各水利设施,并完善相关体系。产业结构对各效率均有显著的正向影响,并且影响情况与科技水平的表现十分相像;2000—2017 年,舟山市第三产业产值占总产值的比例从 43.7% 增长至 55.5%,产业结构优化,经济发展不断向更合理、可持续的模式转变,生态环境持续向好,水资源的质量有效提升(舟山市水质达标率从 2000 年的 36.4% 上升到 2017 年的 95%),从而促进了水生态产品供给效率的提高。经济发展水平对

表 4 舟山市水生态产品供给效率 Tobit 回归分析结果

Table 4 Tobit regression analysis results of supply efficiency of water ecological products in Zhoushan City

解释变量	总技术效率	纯技术效率	规模效率
年均温度	-0.057 * (-1.814)	-0.067 * (-1.814)	0.283 (1.024)
科技水平	0.239 * * * (3.726)	0.224 * * * (3.856)	0.014 * (1.837)
地面硬化率	0.009 (0.637)	0.015 (1.372)	-0.079 * (-1.907)
水利设施建设情况	0.148 * * (2.183)	0.095 * (1.859)	0.152 * * * (3.176)
产业结构	0.257 * * * (3.287)	0.237 * * * (2.968)	0.057 * (1.826)
经济发展水平	0.176 * * * (4.083)	0.193 * * * (3.987)	0.028 * * (2.053)
回归截距	-19.274 * (-1.819)	-14.083 (-1.543)	-29.087 (0.862)
R ²	0.384	0.427	0.408
对数似然函数值	17.508	7.856	20.338

注:***、**、* 分别表示达到 1%、5%、10% 的显著性水平;括号内数据为对应系数的 t 值。

各效率也有显著的正向影响,并且回归系数值均较高;经济发展水平的提升一方面能够带来更多的人才、资金、技术等支持,这些都会极大地影响水资源的开发利用及水生态系统的有效循环等方面,从而影响供给效率;另一方面人均 GDP 的提高意味着人均生活水平的提高,人们对更好的环境质量和更高的生活水平的需求也不断上升,对水资源的利用也不断向更多元化的方向发展,促使了水资源环境质量和生态系统服务价值水平的提升。

5 结论与建议

5.1 结 论

a. 水生态服务价值以地表水调蓄与文化服务为主,呈现出波动上升的态势,水生态系统对舟山市经济社会可持续发展的支撑作用不断增强。

b. 舟山市水生态产品供给效率维持在较高水平,呈波动发展态势,其中纯技术效率是关键要素,同时供给规模中存在的问题也需引起重视。

c. 舟山市水生态产品供给效率在 2003 年和 2013 年经历了两个“低谷期”,主要是由纯技术效率下降导致。

d. 不同因素对舟山市水生态产品供给效率的影响方向和影响程度不同,其中科技水平、水利设施建设情况、产业结构、经济发展水平有显著的正向影响,而年均温度与地面硬化率呈负向影响,且地面硬化率影响程度较低。

5.2 建 议

a. 提升水资源利用的科技水平。可以通过组建产学研用联盟等方式,进行水资源开发利用与保护方面的相关技术突破,如清洁水源技术、水生态监测评价技术等尚需要重点研究的关键技术^[41-42],从而保障资源的利用成效。同时,增加相关科研人力资本的投入,以进一步促进效率的提升。

b. 注重水利相关设施、设备与工程的建设与维护,如《舟山市海岛保护规划(2017—2022 年)》等安排的水库工程、引调水工程、海水淡化工程等,并扩大雨水调蓄,从而更好地提升舟山市水生态产品的供给效率。

c. 进一步优化产业结构,如通过充分利用区域的自然特点,加强建设一批生态健康、环境优美、特色明显的海岛并利用多种途径增大宣传等手段,更好地发展区域的旅游产业,从而进一步促进区域经济社会的可持续发展,提升水生态系统服务的价值水平。

d. 强化污水排放管理制度,提升相关标准规范,并通过加强公共设施与条件的建设(如老城区、

非城镇区域的排水管网系统改造与完善)等措施,减少有害物质的排放,维护好水生态环境。

参考文献:

- [1] 曾贤刚,虞慧怡,谢芳. 生态产品的概念、分类及其市场化供给机制[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(7):12-17. (ZENG Xiangang, YU Huiyi, XIE Fang. Concept, classification and market supply mechanism of ecological products[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(7):12-17. (in Chinese))
- [2] 肖建红,王敏,刘娟,等. 基于生态标签制度的海洋生态产品生态补偿标准区域差异化研究[J]. 自然资源学报,2016,31(3):402-412. (XIAO Jianhong, WANG Min, LIU Juan, et al. Study on the regional difference of eco-compensation standards for the marine ecological products based on marine fisheries' eco-label schemes [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(3):402-412. (in Chinese))
- [3] 王建华,贾玲,刘欢,等. 水生态产品内涵及其价值解析研究[J]. 环境保护,2020,48(14):37-41. (WANG Jianhua, JIA Lin, LIU Huan, et al. Analysis on the connotation and value of water eco-products [J]. Environmental Protection, 2020, 48(14):37-41. (in Chinese))
- [4] 梁鸿,潘晓峰,余欣繁,等. 深圳市水生态系统服务功能价值评估[J]. 自然资源学报,2016,31(9):1474-1487. (LIANG Hong, PAN Xiaofeng, YU Xinfan, et al. Valuation of water ecosystem services in Shenzhen city [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(9):1474-1487. (in Chinese))
- [5] 闫人华,高俊峰,黄琪,等. 太湖流域圩区水生态系统服务功能价值[J]. 生态学报,2015,35(15):5197-5206. (YAN Renhua, GAO Junfeng, HUANG Qi, et al. The assessment of aquatic ecosystem services for polder in Taihu Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15):5197-5206. (in Chinese))
- [6] 华章琳. 生态环境公共产品供给中的政府角色及其模式优化[J]. 甘肃社会科学,2016(2):251-255. (HUA Zhanglin. The government's role and mode optimization in the supply of ecological environment public goods [J]. Gansu Social Sciences, 2016(2):251-255 (in Chinese))
- [7] 任俊霖,李浩,伍新木,等. 长江经济带省会城市用水效率分析[J]. 中国人口·资源与环境,2016,26(5):101-107. (REN Junlin, LI Hao, WU Xinmu, et al. Analysis of water efficiency of capital cities in Yangtze River Economic Belt in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(5):101-107. (in Chinese))
- [8] 邓红兵,刘天星,熊晓波,等. 基于生产函数的中国水资源利用效率探讨[J]. 水利水电科技进展,2010,30(5):16-18. (DENG Hongbing, LIU Tianxing, XIONG

- Xiaobo, et al. On utilization efficiency of water resources in China based on production function[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30 (5):16-18. (in Chinese))
- [9] 陈威,杜娟,常建军. 武汉城市群水资源利用效率测度研究[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(6):1251-1258. (CHEN Wei,DU Juan,CHANG Jianjun. Utilization efficiency of water resources in Wuhan urban agglomeration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(6):1251-1258. (in Chinese))
- [10] 马海良,黄德春,张继国. 考虑非合意产出的水资源利用效率及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境,2012,22(10):35-42. (MA Hailiang,HUANG Dechun,ZHANG Jiguo. Water resource utility efficiency and its influencing factors considering undesirable goods[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22 (10):35-42. (in Chinese))
- [11] 任玉芬,苏小婉,贺玉晓,等. 中国生态地理区城市水资源利用效率及影响因素[J]. 生态学报,2020,40(18):6459-6471. (REN Yufen,SU Xiaowan,HE Yuxiao,et al. Urban water resource utilization efficiency and its influencing factors in eco-geographic regions of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (18): 6459-6471. (in Chinese))
- [12] 李世祥,成金华,吴巧生. 中国水资源利用效率区域差异分析[J]. 中国人口·资源与环境,2008,18(3):215-220. (LI Shixiang, CHENG Jinhua, WU Qiaosheng. Regional difference of the efficiency of water usage in China [J]. China Population, Resources and Environment,2008,18(3):215-220. (in Chinese))
- [13] 由沙丘. 我国不同区域城市绿色全要素水资源效率研究[J]. 学术交流,2016(6):173-176. (YOU Shaqiu. Study on green total factor water resource efficiency of cities in different regions of China [J]. Academic Exchange,2016(6):173-176. (in Chinese))
- [14] 孙付华,陈汝佳,张兆方. 基于三阶段 DEA-Malmquist 区域农业水资源利用效率评价[J]. 水利经济,2019,37(2):53-58. (SUN Fuhua, CEHN Rujia, ZHANG Zhaofang. Evaluation of utilization efficiency of regional agricultural water resources based on three-stage DEA-Malmquist model [J]. Journal of Economics of Water Resources,2019,37(2):53-58. (in Chinese))
- [15] 张英.“水生态-社会经济”协同发展效应研究[J]. 浙江水利水电学院学报,2019,31(3):64-70. (ZHANG Ying. On synergy and development effectiveness of WES SEDS[J]. Journal of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College,2019,31(3):64-70. (in Chinese))
- [16] 宋国君,何伟. 中国城市水资源利用效率标杆研究[J]. 资源科学,2014(12):2569-2577. (SONG Guojun, HE Wei. Benchmarking of city water resource utilization efficiency in China[J]. Resources Science,2014(12):2569-2577. (in Chinese))
- [17] 佟金萍,马剑锋,王慧敏,等. 农业用水效率与技术进步:基于中国农业面板数据的实证研究[J]. 资源科学,2014,36(9):1765-1772. (TONG Jinping, MA Jianfeng, WANG Huimin, et al. Agricultural water use efficiency and technical progress in China based on agricultural panel data[J]. Resources Science,2014,36(9):1765-1772. (in Chinese))
- [18] 孙冬营,余靖雯,刘凌燕,等. 长江三角洲城市群工业用水效率评价及时空差异研究[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(9):1901-1908. (SUN Dongying, SHE Jingwen, LIU Lingyan, et al. Efficiency evaluation for industrial water use and analysis of the spatio-temporal differences in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(9):1901-1908. (in Chinese))
- [19] 孙才志,刘玉玉. 基于 DEA-ESDA 的中国水资源利用相对效率的时空格局分析[J]. 资源科学,2009,31(10):1696-1703. (SUN Caizhi, LIU Yuyu. Analysis of the spatial-temporal pattern of water resources utilization relative efficiency based on DEA-ESDA in China [J]. Resources Science, 2009, 31 (10): 1696-1703. (in Chinese))
- [20] 孙才志,赵良仕,邹玮. 中国省际水资源全局环境技术效率测度及其空间效应研究[J]. 自然资源学报,2014,29(4):553-563. (SUN Caizhi, ZHAO Liangshi, ZOU Wei. The interprovincial water resources global environmental technology efficiency measurement in China and its spatial effect[J]. Journal of Natural Resources, 2014,29(4):553-563. (in Chinese))
- [21] 任志安,刘柏阳. 淮河生态经济带农业水资源绿色效率的时空差异与影响因素[J]. 资源开发与市场,2019,35(7):929-934. (REN Zhian, LIU Baiyang. Study on spatial and temporal differences and influencing factors of agricultural green water resources efficiency in Huaihe Ecological Economic Belt [J]. Resource Development & Market, 2019,35(7):929-934. (in Chinese))
- [22] 赵钟楠,张越,黄火键,等. 基于问题导向的水生态文明概念与内涵[J]. 水资源保护,2019,35(3):84-88. (ZHAO Zhongnan,ZHANG Yue,HUANG Huojian,et al. Concept and connotation of aquatic ecological civilization based on problem orientation [J]. Water Resources Protection,2019,35(3):84-88. (in Chinese))
- [23] 生延超,周玉姣. 适宜性人力资本与区域经济协调发展[J]. 地理研究,2018,37(4):797-813. (SHENG Yanchao,ZHOU Yujiao. Appropriate human capital and coordinated development of regional economy [J]. Geographical Research, 2018, 37 (4): 797-813. (in Chinese))
- [24] 陈笋舟,李博. 边远海岛水资源开发利用模式研究[J]. 水资源保护,2017,33(1):57-61. (CHEN Yuzhou,