

基于 EBM 的水资源失衡风险导致的社会经济损失模型及应用

姜秋香, 王 天, 王子龙^{*}, 付 强, 赵蚰竹, 董玉洁, 周智美

(东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘 要: 水资源系统与区域经济息息相关, 利用经济数值反映水资源系统风险所致损失将更加直观。该文为了通过经济数值定量评价水资源失衡导致的风险, 首先构建水资源失衡导致的社会经济损失风险模型, 应用数据包络分析(epsilon-based measure, EBM)模型计算水资源利用效率, 并结合黑龙江省水价及人均工资确定水资源失衡导致的社会经济损失值; 然后, 在 EBM 的基础上添加二阶段 Tobit 模型进一步分析水资源失衡风险经济损失原因。结果表明, 2000—2020 年黑龙江省由水资源投入不足导致的最小经济损失值为 75.2 亿元(2008 年)、最大值为 425.1 亿元(2013 年); 水资源最小产出经济损失值为 1 119 亿元(2000 年)、最大值为 11 068 亿元(2012 年)。2000—2015 年黑龙江省水资源风险经济损失逐年上升, 水资源产出经济损失均占水资源风险经济损失的 90% 以上, 预计 2020 年水资源风险经济损失为 8 138.7 亿元。在研究时段内黑龙江省水资源风险经济损失较高, 水资源利用效率较低。黑龙江省水资源系统受到产业结构、经济发展水平和水利基础设施投资等驱动因素影响, 需加大第二产业投入和水利基础设施建设投资, 从而降低水资源风险经济损失, 为后续水资源系统风险规避措施的制定提供支持。

关键词: 水资源; 经济分析; 模型; EBM; Tobit; 黑龙江省

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.014

中图分类号: TV213

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-19-0104-10

姜秋香, 王 天, 王子龙, 付 强, 赵蚰竹, 董玉洁, 周智美. 基于 EBM 的水资源失衡风险导致的社会经济损失模型及应用[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 104—113. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.014 <http://www.tcsae.org>
Jiang Qiuxiang, Wang Tian, Wang Zilong, Fu Qiang, Zhao Youzhu, Dong Yujie, Zhou Zhimei. EBM-based social economic loss model of water resources imbalance risk and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 104 — 113. (in Chinese with English abstract) doi : 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.014 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

水资源系统是人类生活和社会发展必不可少的支撑系统之一。随着社会发展和科学技术的不断进步, 水资源系统与社会经济的关系愈发紧密。近年由于水资源利用不当、分配不合理、供需失衡和水环境恶化, 导致水资源系统风险增大, 不仅制约了社会经济的发展, 同时也带来的巨大的经济损失^[1-4]。因此, 研究水资源系统风险对社会经济的影响和制约关系, 成为破解水资源对经济增长禁锢的关键。国内外学者在探索水资源系统与经济耦合关系方面做出了巨大贡献。从宏观研究角度看, 贾玲等^[5]提出基于会计核算和统计核算的负债表核算思路, 前者为核算水资源提供决策方案, 后者反映经济与水资源之间的债权债务关系, 从不同角度精细化水资源管理, 为其提供切实可行的理论依据; 唐晓城^[6]在经济增长理论框架下构建了测度水资源要素对经济增长约束模型, 分析了山东省水资源的阻尼系数, 说明水资源风险越高对

经济的约束越强; Setlhogile 等^[7]通过水环境经济核算体系(SEE-Water)深度讨论了水资源量和经济指标的关系, 阐述了水资源量越低对经济社会的影响越大, 侧面表明水资源系统与经济密不可分。从微观方法角度看, 曹永强等^[8]构建了水资源与经济协调系数模型, 研究表明辽宁省水资源与经济结合不紧密, 仍有提升空间; 成琨等^[9]依据水资源投入产出模型, 分析出黑龙江省随着农业、工业和建筑业等部门水资源利用效率逐步提高, 社会经济进入高速增长时期; 张振龙等^[10]基于水资源利用和经济增长的关联视角, 采用向量自动回归(vector autoregressive, VAR)模型、脉冲响应和方差分解得出了水资源效率与经济增长的动态关系。

无论从宏观或微观角度上分析, 水资源系统与社会经济发展密不可分。从宏观研究角度上, 目前研究仅从侧面角度阐明水资源对经济的重要性, 不能定量衡量水资源对经济的影响程度。本文提出水资源系统风险经济损失模型, 可以将无形的水资源风险转变为定量的经济数值, 从直观数据中展现水资源风险对经济的影响。从微观方法角度上, 上述方法需要给定投入产出指标之间明确的函数关系, 或者通过构建模型中的关联系数解决投入产出指标间无定量函数的问题, 此类研究均需额外增加计算量; 同时, 该函数关系无法完全表达投入产出指标间的定量关系, 缺乏对指标之间的整体考虑。因此, 本文在综合考虑水资源系统特性和社会经济关系的基础上, 尝试应用数据包络分析中的 EBM 模型(epsilon-based measure, EBM)

收稿日期: 2018-05-28 修订日期: 2018-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(51679040); 黑龙江省自然科学基金(面上项目)(E2016004); 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2017022); 黑龙江省博士后资助(LBH-Q17022)

作者简介: 姜秋香, 黑龙江佳木斯人, 博士, 副教授, 主要研究方向为水土资源高效利用和管理。Email: jiangqiuxiang2017@163.com

*通信作者: 王子龙, 山东胶州人, 博士, 副教授, 主要研究方向为寒区水土资源高效利用。Email: wangzilong2017@126.com

解决投入产出指标关系确定过程中存在的计算量大和缺乏整体性的问题。该模型是一种非参数的统计估计方法,在计算多种投入和多种产出指标的效率计算过程中,无需给出指标间的定量关系,而通过比较决策单元偏离有效生产前沿面的程度评价决策单元的有效性^[11]。由于 EBM 模型有着不需要预先估计参数的特点,因此在避免主观因素、简化算法和减少误差等方面有着巨大的优越性^[12]。

本文首先构建水资源失衡风险导致的经济损失函数,通过人工神经网络^[13]预测 2020 年各城市投入与产出指标,而后运用 EBM 模型投影获得投入产出指标的冗余量,在此基础上计算黑龙江省水资源失衡风险经济损失值,以此量化水资源失衡风险对经济的影响程度;其次,应用 Tobit 模型对水资源失衡风险经济损失值进行二阶段分析,得到区域水资源失衡风险经济损失的驱动因素,结合水资源利用效率进一步提出解决黑龙江省水资源配置不合理和降低水资源失衡风险经济损失等问题的方案,为后续降低水资源系统带来的风险提供参考。

1 研究方法

1.1 水资源失衡导致的风险经济损失模型

经济作为定量衡量水资源系统风险损失的重要媒介,其直观性和准确性无可替代^[14]。本文设水资源系统有 I 种投入、 R 种产出和 J 个决策单元,则水资源失衡风险带来的潜在经济损失为:

$$\begin{aligned} U &= \sum_{i=1}^I \left| \bar{P}_i T_i \right| \\ V &= \sum_{r=1}^R \left| \bar{P}_r Q_r \right| \end{aligned} \quad (1)$$

式中 U 为由水资源投入不足导致的经济损失,亿元; V 为水资源产出经济损失,亿元; \bar{P}_i 为第 i 个投入指标的单价:在本文中,水资源价格的单位为元/ m^3 ,就业人数工资的单位为万元/人; \bar{P}_r 为第 r 个产出指标的单价,亿元; T_i 为第 i 个投入指标冗余量,亿 m^3 ; Q_r 为第 r 个产出指标冗余量,亿元。本文中产出经济损失值冗余量为经济数值,因此直接可以代表产出经济损失。

水资源作为支撑社会的重要基石,是不可或缺的战略资源。导致水资源失衡的影响因素很多,本文在借鉴文献[15-18]的基础上采用 HHM-RFRM 方法^[19]对水资源系统的投入产出指标进行筛选,以保证选择的指标具有代表性和全面性。最终确定农业用水量、工业用水量和就业人数作为水资源风险经济损失模型的投入指标,第一产业 GDP、第二产业 GDP、第三产业 GDP 和地区 GDP 作为产出指标。

1.2 EBM 模型

本文选取数据包络分析(data envelopment analysis, DEA) 计算水资源失衡风险导致的经济损失模型中投入产出指标的冗余量。在 DEA 方法中 EBM 模型可以通过比较决策单元偏离有效生产前沿面的程度评价决策单元的有效性。在此基础上,通过决策单元对生产前沿面的投影确定各投入产出指标的冗余量^[20-24]。目前,EBM 模型在管理科学、系统工程和决策分析、技术评价等领域

已有大量成功的应用案例^[25-27]。

为了获得水资源系统投入产出指标的冗余量,需对水资源利用效率值进行投影^[28]。本文构建水资源利用效率 EBM 模型如下:

$$\begin{cases} r^* = \min \left(\theta - \varepsilon \sum_{i=1}^I \frac{w_i^- s_i^-}{x_{i0}} \right) \\ \text{s.t.} \sum_j \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \theta x_{i0} \quad (i=1, 2, \dots, I) \\ \sum_{j=1}^J \lambda_j y_{rj} \geq y_{r0} \quad (r=1, 2, \dots, R) \\ \lambda_j \geq 0, s_i^- \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \varepsilon = \begin{cases} \frac{I-\tau}{I-1} & (I > 1) \\ 0 & (I = 1) \end{cases} \\ w_i^- = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^I w_i} \end{cases} \quad (3)$$

式中 r^* 为不考虑非期望产出的水资源利用效率值,满足 $0 \leq r^* \leq 1$; λ_j 为第 j 个决策单元的权重向量; θ 为径向模型计算的水资源利用效率值; s_i^- 为投入要素的非径向松弛向量; ε 为结合径向 θ 和非径向松弛的关键参数,通过相关文献[29]求出关联矩阵 S 的最大特征值 τ 以及对应的特征向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_I)$, 并代入公式 (3) 得到 ε 和 $\bar{w} = (w_1^-, w_2^-, \dots, w_I^-)$; w_i^- 为第 i 个投入的权重,

$\sum_{i=1}^I w_i^- = 1 (w_i^- \geq 0)$ 。 x_{ij} 、 x_{i0} 分别为第 j 个决策单元的第 i 个投入和被评价决策单元的第 i 个投入; y_{rj} 、 y_{r0} 分别为第 j 个决策单元的第 r 个产出和被评价决策单元的第 r 个产出。 w_i 为第 i 个投入指标的归一化权重。

1.3 Tobit 模型

水资源利用效率受到水资源禀赋、社会经济发展、水利工程投资、产业结构和节水技术等多因素影响。为了明确水资源利用效率的主导影响因素,制定科学合理的、符合区域特点的水资源高效利用的政策,本文选取 Tobit 模型进行水资源利用效率驱动因素分析。

由于水资源利用效率值为(0,1]区间内的连续数据,符合 Tobit 模型中的极大似然数方法^[30]。因此,本文构建基于极大似然数 Tobit 的水资源利用效率驱动因素分析模型如下^[30]:

$$r^* = \beta_0 + \beta_j X_{i,r} + u + \rho_{i,r} \quad (4)$$

式中 β_0 、 β_j 为待评估系数向量; $X_{i,r}$ 为投入与产出指标组成的向量; $\rho_{i,r}$ 为决策单元的随机误差向量; u 为水资源利用效率与驱动因素的回归方程的截距项。

2 研究区域及数据来源

2.1 研究区域概况

黑龙江省位于中国东北部,多年平均水资源总量为

810 亿 m³, 但人均水资源量仅有 2 047 m³[31], 远低于世界公认的平均水平(9 200 m³) [32]。第一产业作为黑龙江省主导产业, 其拥有的水资源量高达 60% 以上, 然而第一产业 GDP 仅占黑龙江省地区 GDP 的 1/3, 导致单方水产生的经济效益(2.76 元/m³)低于全国平均水平(4.45 元/m³)。尽管黑龙江省在近些年进行经济转型, 但粗放型经济增长方式尚未得到根本转变, 黑龙江省第二、三产业仍不发达, 在一定程度上加剧了水资源的浪费。由于区域位置、资源禀赋、产业结构等问题的存在, 导致黑龙江省水资源系统存在时空分配不均、供需不平衡、水资源过度浪费和水资源利用效率低等风险, 限制了区域的社会经济发展, 使水资源系统风险成为黑龙江省目前亟待解决的问题。

尽管黑龙江省近年经济增长逐年回升, 但经济下行压力仍然较大[33], 相对于其他发展大省和直辖市, 黑龙江省总体经济仍然相对落后。因此, 应依据黑龙江省经济发展状态提出解决水资源配置不合理和降低水资源风险经济损失等问题的方案, 实现区域水资源系统持续健康发展。

2.2 数据来源

本文以黑龙江省水资源失衡风险导致的经济损失入手, 开展水资源失衡风险评价相关研究。黑龙江省三大产业 GDP 值、就业人数、人均工资和水价等数据均来源于《黑龙江统计年鉴》[34], 农业、工业和生活用水量等数据来源于《黑龙江省水资源公报》[35]。

3 结果与分析

3.1 水资源系统投入产出指标预测

为了进一步对未来黑龙江省水资源失衡风险进行探究, 本文采用人工神经网络(artificial neural network, ANN)中的误差反向传播网络(BP 网络)[36]预测 2020 年黑龙江省以及各城市的水资源系统投入产出指标。为

保证预测结果准确, 利用 1952—2015 年的历史数据和预测数据进行精度检验(见表 1)。通过相关文献可知, 预测精度达到 80% 以上即为符合精度要求[37]。由表 1 可知, BP 网络对投入产出指标预测精度符合要求, 因此可以利用 2020 年投入产出指标预测数据进行水资源失衡风险导致的经济损失计算。

表 1 BP 网络预测模型的精度检验
Table 1 Accuracy test of BP network prediction model

预测项目 Forecast project	预测精度 Prediction accuracy /%
农业用水量 Agricultural water consumption	91.9
工业用水量 Industrial water consumption	95.2
就业人数 Employed population	92.9
地区 GDP Regional GDP	91.3
第一产业 GDP Primary industry GDP	94.2
第二产业 GDP Secondary industry GDP	97.7
第三产业 GDP Tertiary industry GDP	91.5

3.2 黑龙江省水资源失衡风险导致的经济损失计算

利用式(2)~式(3)可计算 2000—2020 年各城市投入产出指标冗余量, 即真实指标数据相对于理论最佳指标数据的差值。例如, 2015 年齐齐哈尔市农业用水投入为 17.51 亿 m³, 而 EBM 模型计算的理论最佳投入为 13.19 亿 m³, 二者之差的 4.32 亿 m³农业用水量即为冗余量, 同理计算各个城市的各投入产出指标冗余量。在 EBM 模型计算投入指标冗余量的基础上, 结合黑龙江省实际经济状况, 将投入指标单位价格代入式(1)中, 获得由水资源投入不足导致的经济损失。EBM 模型计算的产出指标冗余量为直接定量经济数值, 该值则代表投入充足时产出不足时导致的经济损失。利用水资源风险经济损失模型分别计算 2000—2020 年各城市由水资源投入不足导致的经济损失和水资源产出经济损失值(见表 2 和表 3)。

表 2 2000—2020 年各城市由水资源投入不足导致的经济损失
Table 2 Economic losses caused by insufficient water resources investment in cities from 2000 to 2020 亿元

年份 Year	北部城市 Northern city			南部城市 Southern city		西部城市 Western city				东部城市 Eastern city				黑龙江省 Heilongjiang province	地区 GDP Regional GDP
	大兴安岭 Daxing'anling	黑河 Heihe	伊春 Yichun	鸡西 Jixi	牡丹江 Mudanjiang	绥化 Suihua	齐齐哈尔 Qiqihar	大庆 Daqing	哈尔滨 Harbin	佳木斯 Jiamusi	鹤岗 Hegang	双鸭山 Shuangyashan	七台河 Qitaihe		
2000	74.8	30.7	37.7	6.4	46.7	0	0.9	0	0	0	7.9	0	2.2	207.4	3 151.4
2001	94.6	33.9	28.7	0	58.0	0	1.9	0	0	0	7.9	0	1.4	226.3	3 390.1
2002	45.5	19.5	29.8	7.0	72.0	0	0	0	0	3.9	0	0	6.8	184.5	3 637.2
2003	0	25.7	42.2	0	22.9	32.8	17.4	0	0	4.9	7.6	2.3	0	155.8	4 057.4
2004	0	51.7	33.7	0	38.6	0	0	0	0	4.4	17.3	9.1	0.4	155.3	4 750.6
2005	42.6	53.3	55.1	0	48.3	0	0	0	0	0	16.6	1.4	0	217.3	5 513.7
2006	76.6	55.1	52.5	0	39.1	0	2.2	0	0	0	9.2	5.4	0.2	240.2	6 211.8
2007	49.0	0	39.0	8.5	54.3	0	0	0	0	0	9.6	0	3.0	163.4	7 104.0
2008	43.0	0	0	0	31.2	0	0	0	0	0	0	0	1.0	75.2	8 314.4
2009	100.1	0	66.7	18.2	55.6	29.2	11.1	0	0	22.9	19.0	0	3.5	326.3	8 587.0
2010	78.3	2.4	31.7	0	46.0	0	0	0	0	0	0	0	4.5	163.0	10 368.6
2011	107.9	47.8	61.9	3.1	57.2	0	7.7	0	0	9.3	19.9	0	0.4	315.0	12 582.0
2012	0	62.5	68.0	8.9	47.6	17.0	19.5	0	0	14.7	8.3	0	2.9	249.3	13 691.6
2013	110.7	61.3	88.0	25.3	43.7	29.7	15	0	0	19.8	13.0	16.7	2.0	425.1	14 454.9
2014	0	0	49.6	17.5	56.8	0	16.6	0	0	0	19.6	0	4.9	165.0	15 039.4
2015	0	0	49.8	7.1	48.5	0	9.7	0	0	0	17.0	10.4	3.5	146.1	15 813.52
2020	74.6	0	77.6	11.0	52.0	18.0	13.0	0	0	0	23.6	27.0	3.9	300.7	19 522.27
合计 Total	897.7	443.9	812.0	113.0	818.5	126.7	115.0	0	0	79.9	196.5	72.3	40.6	3 715.9	

表 3 2000—2020 年各城市水资源产出经济损失值
Table 3 Economic losses of water resources output in cities from 2000 to 2020

亿元

年份 Year	北部城市 Northern city			南部城市 Southern city		西部城市 Western city				东部城市 Eastern city				黑龙江省 Heilongjiang province	地区 GDP Regional GDP
	大兴安岭 Daxing'anling	黑河 Heihe	伊春 Yichun	鸡西 Jixi	牡丹江 Mudanjiang	绥化 Suihua	齐齐哈尔 Qiqihar	大庆 Daqing	哈尔滨 Harbin	佳木斯 Jiamusi	鹤岗 Hegang	双鸭山 Shuangyashan	七台河 Qitaihe		
2000	61	97	153	20	467	0	45	0	0	84	5	0	187	1 119	3 151.4
2001	43	123	148	0	535	0	61	0	0	137	4	0	217	1 267	3 390.1
2002	32	116	145	29	503	0	54	0	0	113	0	0	177	1 168	3 637.2
2003	0	151	72	0	547	830	143	0	0	207	1	16	0	1 968	4 057.4
2004	0	162	37	0	387	0	70	0	0	210	63	262	273	1 463	4 750.6
2005	27	253	106	0	517	0	0	0	0	337	100	146	0	1 486	5 513.7
2006	13	118	303	0	585	1 370	167	0	0	173	95	84	285	3 192	6 211.8
2007	6	0	268	0	542	0	0	0	0	0	88	0	332	1 235	7 104.0
2008	161	482	0	370	1 240	1 955	248	0	0	360	308	0	361	5 485	8 314.4
2009	47	0	425	202	489	2 327	245	0	0	201	205	0	183	4 325	8 587.0
2010	797	269	433	0	1 780	0	258	0	0	266	131	0	431	4 365	10 368.6
2011	107	766	1 196	1 241	2 176	0	607	0	0	1 508	512	0	522	8 635	12 582.0
2012	0	740	1 140	1 087	1 997	2 832	648	0	0	1 650	283	0	691	11 068	13 691.6
2013	577	638	1 143	773	1 032	1 231	377	0	0	688	261	100	477	7 296	14 454.9
2014	0	0	1 021	656	1 858	0	580	0	0	0	738	0	663	5 516	15 039.4
2015	0	0	756	502	887	0	396	0	0	0	571	191	448	3 750	15 813.5
2020	370	0	1 792	1 232	1 428	1 039	491	0	0	0	373	156	957	7 838	19 522.3
合计 Total	2 241	3 915	9 138	6 112	16 970	11 584	4 390	0	0	5 934	3 738	955	6 204	71 176	

由表 2 可知，在研究时段内，鸡西市、绥化市、齐齐哈尔市、哈尔滨市、大庆市、佳木斯市、双鸭山市、七台河市和鹤岗市的由水资源投入不足导致的经济损失较低，占同期地区 GDP 的 1.04% 以下，说明该区域水资源分配合理，水资源利用效率较高，可以保证水资源高效利用。大兴安岭地区、牡丹江市和伊春市在 2000—2020 年的水资源投入总经济损失值均在 800 亿元左右，该区域水资源投入经济损失值之和占黑龙江省总投入经济损失值的 68.0%。因此，该区域需要重点关注水资源高效利用的问题，通过合理分配水资源，加强居民的节水意识，将有限的水资源合理投入优势产业，从而降低由水资源投入不足导致的经济损失。2000—2020 年黑河市由水资源投入不足导致的总经济损失仅占黑龙江省总投入损失值的 11.9%，表明该区域水资源利用状态尚可，仅需适当优化水资源配置，加大水利建设投资，实现水资源的高效利用。

水资源产出经济损失是指通过 EBM 模型计算的理论地区 GDP 与实际地区 GDP 的差值。由表 3 可知，研究时段内伊春市、牡丹江市和绥化市水资源产出经济损失较高，说明政府需要重点关注该区域的水资源利用问题，需要通过改善用水分配制度，同时降低水资源的浪费，才能降低水资源产出经济损失。大庆市、哈尔滨市和双鸭山市水资源产出经济损失值较小，表征该区域产业结构合理，水资源产出经济效益较高。大兴安岭地区、黑河市、鸡西市、齐齐哈尔市、佳木斯市、鹤岗市和七台河市的水资源产出经济损失值处于中等状态，由于该区域产业结构存在一定问题，同时浪费了一部分水资源，

导致其地区 GDP 与理论地区 GDP 有一定差距。

为了进一步分析黑龙江省水资源失衡风险对经济的影响程度，将由水资源投入不足导致的经济损失和产出经济损失相加，获得水资源失衡风险导致的经济损失值，并与地区 GDP 进行比较，得到水资源失衡风险导致的经济损失及其占地区 GDP 的比例（见图 1）。

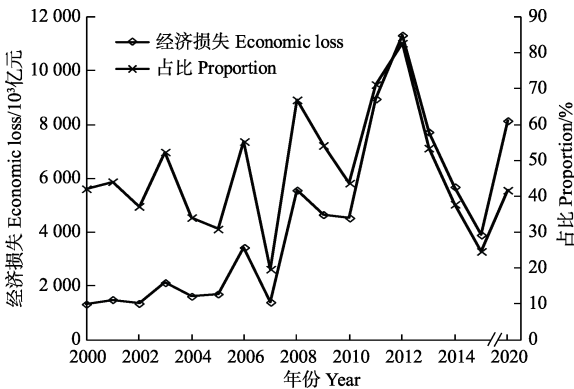


图 1 2000—2020 年黑龙江省水资源失衡风险导致的经济损失及其占地区 GDP 比例

Fig.1 Economic losses caused by the imbalance of water resources in Heilongjiang Province from 2000 to 2020 and its proportion of regional GDP

通过图 1 可知，虽然黑龙江省 2000—2015 年水资源失衡风险导致的经济损失不断上升，但水资源失衡风险导致的经济损失占地区 GDP 的比例呈现波动降低的趋势，说明此时段黑龙江省经济处于高速发展的阶段，同

时水资源系统正向好的方向发展。按照目前水资源利用趋势,在 2020 年黑龙江省水资源风险经济损失值占地区 GDP 的比例达到 41.7%,与 2015 年相比有大幅提升,说明由于水资源的不合理投入,导致水资源风险经济损失加大,需针对黑龙江省的产业结构和水利建设投入等方面进行政策调整,有效降低水资源失衡风险导致的经济损失。

在研究时段内,2008 年黑龙江省水资源失衡风险导致的经济损失及其占地区 GDP 比例的增长率均最大。结合表 2 和表 3 可知,2008 年黑龙江省由水资源投入不足导致的经济损失值较 2007 年降低了 54% (88.2 亿元),而水资源产出经济损失值却增加了 344% (4250 亿元),同时,地区 GDP 仅增加 17%,由此导致 2008 年黑龙江省水资源风险经济损失及其 GDP 的比例增长率最大。究其原因,主要是受制于全球经济危机,导致产品滞销或低价出售,使黑龙江省地区 GDP 增幅较小、水资源失衡风险导致的经济损失占比增加。

在研究时段内,2012 年黑龙江省水资源失衡风险导致的经济损失及其占地区 GDP 比例均达到最大值。结合

表 3 可知,2012 年黑龙江省水资源产出经济损失值最高 (11 068 亿元),同期水资源投入经济损失值为 249.3 亿元,水资源风险经济损失占地区 GDP 的比例为 82.6%,说明 2012 年黑龙江省水资源的不合理利用导致的经济损失较大。2008 年黑龙江省由水资源投入不足导致经济损失值最小 (75.2 亿元)、2013 年由水资源投入不足导致的经济损失最大 (425.1 亿元); 2000 年水资源产出经济损失值最小 (1 119 亿元)、2012 年产出经济损失最大 (1 1 068 亿元)。2000—2015 年黑龙江省水资源失衡风险导致的经济损失逐年上升,水资源产出经济损失均占水资源风险经济损失的 90% 以上,预计 2020 年水资源失衡风险导致的经济损失为 8 138.7 亿元

3.3 水资源利用效率及驱动因素分析

3.3.1 水资源利用效率分析

通过 EBM 模型计算水资源投入产出指标冗余量时,不仅可以计算水资源利用效率,同时利用水资源利用效率可间接反映水资源风险与经济之间的关系:水资源系统风险越大,水资源利用效率越低,水资源失衡风险导致的经济损失越高 (见表 4)。

表 4 黑龙江省各城市水资源利用效率

Table 4 Water use efficiency of cities in Heilongjiang province

城市 Cities	2000 年	2003 年	2005 年	2008 年	2010 年	2012 年	2015 年	2020 年
大兴安岭 Daxing'anling	0.38	1	0.64	0.16	0.7	1	1	0.88
黑河 Heihe	0.38	0.37	0.62	0.68	0.74	0.85	1	1
伊春 Yichun	0.35	0.58	0.51	1	0.37	0.27	0.24	0.12
鸡西 Jixi	0.85	1	1	0.62	1	0.52	0.58	0.61
牡丹江 Mudanjiang	0.34	0.42	0.59	0.40	0.7	0.47	0.79	0.52
绥化 Suihua	1	0.89	1	0.73	1	0.65	1	0.82
齐齐哈尔 Qiqihar	0.51	0.274	1	0.35	0.65	0.26	0.78	0.73
大庆 Daqing	1	1	1	1	1	1	1	1
哈尔滨 Harbin	1	1	1	1	1	1	1	1
佳木斯 Jiamusi	0.34	0.56	0.41	0.6	0.35	0.38	0.6	0.79
鹤岗 Hegang	0.81	0.87	0.56	0.51	0.77	0.58	0.36	0.41
双鸭山 Shuangyashan	1	0.88	0.67	0.93	0.62	1	0.71	0.68
七台河 Qitaihe	0.32	0.36	1	0.57	0.45	0.36	0.3	0.12
黑龙江省 Heilongjiang	0.38	0.49	0.61	0.8	0.87	1	0.93	1

注: 由于篇幅限制,仅展示部分水资源利用效率。

Note: Due to space limitations, only part of water use efficiency is shown.

从时序角度分析:虽然黑龙江省水资源利用效率呈现上升趋势,但水资源失衡风险导致的经济损失仍然逐年升高,说明黑龙江省水资源系统仍处于高风险状态,需要针对影响黑龙江省水资源利用效率的驱动因素提出有效的措施。

从城市尺度分析:大兴安岭地区水资源利用效率存在波动,而水资源失衡风险导致的经济损失呈现下降的趋势,说明该地区并未寻找到适宜的水资源利用方向,需要通过合理分配水资源、稳定发展趋势。黑河市水资源利用效率呈现平稳上升状态,同时其水资源失衡风险导致的经济损失值稳步降低,需要稳定现有水资源分配规律并相对扩大其优势产业。齐齐哈尔市水资源利用效

率和水资源失衡风险导致的经济损失呈现强烈波动趋势,说明齐齐哈尔市未找到水资源管理方向,需要稳定优势产业,同时明确水资源高效利用的产业,减少水资源失衡风险导致的经济损失,提升水资源利用效率。鹤岗市、七台河市和佳木斯市作为以第一产业为主导的地区,水资源利用效率相对较低,并且波动性较大,同时水资源失衡风险导致的经济损失较高,体现了该区域农业用水效率低,漫灌现象仍然严重,需要政府和农户相互合作提高用水效率。位于西部城市的哈尔滨市、大庆市和绥化市持续保持较高的水资源利用效率,同时水资源失衡风险导致的经济损失值远低于其他城市,说明该区域找到契合自身特点的水资源发展路线。

为了进一步分析黑龙江省各城市未来发展情况，将水资源利用效率划分为高效率、较高效率、中等效率和低效率 4 个等级^[38]，应用 ArcGIS 绘制 2020 年水资源利用效率等级空间分布图（见图 2）。从整体来看，2020 年黑龙江省各城市水资源利用效率不高，绝大部分地区的水资源利用效率处于中等效率。从空间差异性看，水资源利用效率呈现南北方向高，东西方向低的现象，东部地区的水资源利用效率整体低于其他地区。在东部城市中，水资源利用效率由西南向东北方向增长，尽管双鸭山市水资源利用效率相对较高（0.68），但仍处于中度水资源利用效率区间^[39]。西部城市的水资源利用效率由东北向西南方向增加。南部和北部城市水资源利用相对高于其他城市，同时该区域的水资源风险经济损失值也低于其他地区，说明该区域水资源配置较合理，保持现有产业结构和水资源分配制度即可持续稳定发展。

综上所述，由于黑龙江省水资源配置出现问题，以及地理位置、历史发展状况、水资源分配程度等区别，导致各个城市的水资源利用效率两极分化现象越来越严重，需对其进行水资源利用效率驱动因素分析，结合区域特点制定水资源利用效率提高措施。

3.3.2 驱动因素分析

水资源失衡风险导致的经济损失值的降低是水资源系统风险得到解决的最直观表现，需要针对各个城市的

发展现状提出降低水资源失衡风险导致的经济损失的解决方案。水资源利用效率驱动因素指标的选取以科学性、客观反映区域环境、经济和社会发展为原则^[40]，选取第一产业比例、第二产业比例、人均 GDP、人均水资源量、水利投资和水价等指标进行驱动因素分析。本文将水资源利用效率驱动因素指标值和各城市水资源利用效率年平均值代入式（4），分析各驱动因素与水资源利用效率的关联度（见表 5）。

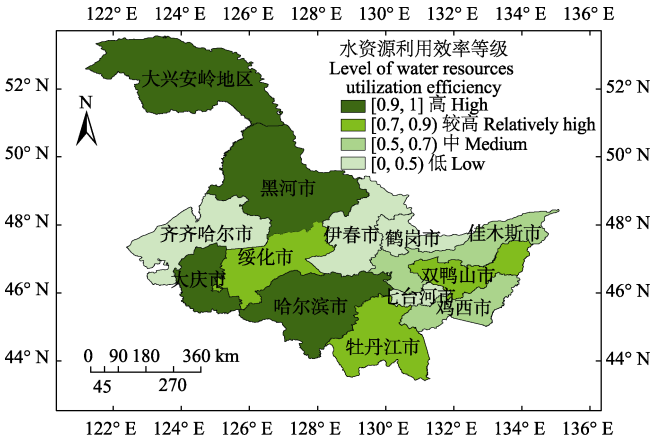


图 2 2020 年黑龙江省水资源利用效率等级空间分布图
Fig.2 Level of average water use efficiency in Heilongjiang Province in 2020

表 5 水资源利用效率与驱动因素的关联度
Table 5 Correlation between water use efficiency and driving factors

城市 Cities	第一产业比例 Proportion of primary industry	第二产业比例 Proportion of second industry	人均 GDP Per capita GDP	人均水资源量 Per capita water resources	水利投资 Water conservancy investment	水价 Water price
大兴安岭 Daxing'anling	-0.028**	-0.003 3***	-0.34**	0.045***	0.2**	0.52***
黑河 Heihe	-0.33**	-0.079	-0.32***	0.088***	0.72**	0.52**
伊春 Yichun	0.011***	0.008 4**	-0.33**	-0.32***	0.067**	4.3
鸡西 Jixi	0.008***	0.008***	0.069***	0.17**	0.018**	1.1
牡丹江 Mudanjiang	0.012***	0.062***	0.025**	0.35***	0.13***	0.59**
绥化 Suihua	0.089***	0.055***	0.092***	0.24**	1.4***	-
齐齐哈尔 Qiqihar	0.40***	-0.011***	-0.13***	-0.2**	0.36***	1.9**
大庆 Daqing	0.47***	0.013***	0.038***	-0.003 7***	0.36***	-
哈尔滨 Harbin	0.009 3***	0.006 8***	0.065***	0.013**	-0.009 5***	-
佳木斯 Jiamusi	0.02***	-0.024***	-0.11***	0.17**	0.032**	-1.2
鹤岗 Hegang	-0.003 7***	0.029***	-0.29***	-0.12**	-0.04**	2.2**
双鸭山 Shuangyashan	0.023***	0.003***	0.54***	0.003*	0.98**	-2.4
七台河 Qitaihe	0.077***	-0.011***	0.57***	0.009*	0.003*	1.4**

注：*、**和***分别代表显著性通过 0.1、0.05 和 0.01 的水平检验。“-”表示该数据与参考数列共线，无参考意义。
Note: *, **, and *** are significance at 0.1, 0.05 and 0.01 levels, respectively. "-" indicates that the data is collinear with the reference sequence and meaningless.

依据表 5 可知，除大兴安岭地区、黑河市外其他城市水资源利用效率与第一产业比例在 0.01 水平上呈现显著相关性，大兴安岭地区和黑河市与第一产业比例在 0.05 水平上呈现相关性。除黑河市和伊春市外其他城市水资源利用效率与第二产业比例在 0.01 水平上呈现显著相关，伊春市水资源利用效率与第二产业比例在 0.05 水平

上呈现相关性。通过 0.05 显著水平检验的城市需提高农业水资源投入，促进第二产业科技进步，保持现有水资源分配模式，提升水资源利用效率，降低水资源失衡风险导致的经济损失，使地区 GDP 稳步提升。
黑河市、鸡西市、绥化市、齐齐哈尔市、大庆市、哈尔滨市、佳木斯市、鹤岗市、双鸭山市和七台河市水

资源利用效率与人均 GDP 在 0.01 水平上呈现显著相关, 大兴安岭地区、伊春市和牡丹江市水资源利用效率与人均 GDP 在 0.05 水平上呈现相关性。说明上述城市有良好的产业凝聚力和优秀的管理水平, 需要加强居民的节水思想意识、提升企业水资源管理水平。

大兴安岭地区、黑河市、伊春市、牡丹江市和大庆市水资源利用效率与人均水资源量在 0.01 水平上呈现显著相关, 鸡西市、绥化市、哈尔滨市、佳木斯市和鹤岗市水资源利用效率与人均水资源量在 0.05 水平上呈现相关性。说明由于地理位置原因, 黑龙江省水资源分布不合理, 需要人为将水资源合理分配到各城市。

水利投资只与牡丹江市、绥化市、齐齐哈尔市、大庆市和哈尔滨市水资源利用效率在 0.01 水平上呈显著相关, 除牡丹江市、绥化市、齐齐哈尔市、大庆市、哈尔滨市和七台河市外其余城市均在 0.05 水平上呈现相关性。说明黑龙江省大部分地区水资源的管理水平和技术水平较高, 七台河市应加大水利投资, 将水资源合理分配到生产生活中。黑龙江省仅有大兴安岭地区与水价在 0.01 水平上呈现显著关系, 说明水价没有起到合理配置水资源的目的。作为政府直接调节水资源利用效率的杠杆, 长期以来, 低水价大大降低了企业的生产成本, 因此获得了超额利润, 同时也造成了严重污染, 更不能促进节水, 造成环境污染和资源退化。

通过驱动因素的分析可知: 黑龙江省各城市水资源失衡风险导致的经济损失主要受产业结构、人均 GDP、人均水资源量和水利投资的驱动, 需要通过提升第一、二产业的生产效率, 减少黑龙江省水资源风险经济损失; 由于地理位置受到限制, 增强人民节水意识也是间接减少水资源风险经济损失的手段; 同时, 政府从宏观上需要增加有关水利方面的投资。但水价驱动因素的影响较低, 不能正确反映黑龙江省各城市的真实情况, 需要政府通过宏观政策进行引导。

4 讨论

EBM 模型研究热点集中在指标选择上, 尽管原理上并没有明确限制投入产出指标的选取, 但在实际操作中投入产出指标不能任意选取。第一, DEA 模型理论对指标数量进行了限制, 根据“拇指法则”规定^[41], 决策单元个数不能少于投入、产出指标个数总和的 2 倍。当评价指标过多时, 易造成有效决策单元偏多, 降低 DEA 模型的区分度^[42]。第二, 指标的选取需要尽可能涵盖希望获得效率的所有方面, 同时投入指标尽可能选取成本型指标。本文在满足上述要求的前提下选用了 HHM 和 RFRM 方法进行指标的筛选。指标选取的方法还有很多, 目前被认可的方法有经验判断法、主成分分析法、因子分析法等, 可以通过其他方法进行确定。

在本文中, EBM 模型中投入产出指标可以用其他指标进行替代, 但需要保证前文所述的具体原则。可以考虑采用粮食总产量替换农业用水量、人口总数替换就业人数、或将农业用水量和工业用水量合并, 添加与水资源系统和社会经济、生态相关的城镇化率、森林覆盖面

积等指标^[43]。

5 结论

本文以经济数值定量衡量水资源失衡风险入手, 构建了水资源失衡风险导致的经济损失模型, 结合 EBM 模型计算水资源失衡风险导致的经济损失和水资源利用效率, 再运用 Tobit 模型进行驱动因素分析, 主要结论如下:

1) 2000—2020 年黑龙江省水资源系统发展状况正向好的方向发展, 但水资源失衡风险导致的经济损失仍然较高, 需要优化产业结构、增加水利投资。水资源投入经济损失主要来自大兴安岭地区、牡丹江市和伊春市, 占总水资源投入经济损失的 68%。

2) 黑龙江省水资源利用效率虽然逐年增加, 但数值不高, 部分地区水资源利用效率逐年降低; 水资源利用效率呈现南北高于东西、东部城市低于其他城市的特点。

3) 影响黑龙江省水资源风险经济损失的驱动因素包括产业结构、人均 GDP、人均水资源量和水利投资。城市之间的驱动因素互不相同, 产业结构与大部分城市的水资源利用效率显著相关, 经济发展水平和人均水资源量也在不同城市呈现显著关系。但水价驱动因素与大多数城市的水资源风险经济损失并未出现显著关系, 说明政府在对水价调控水资源利用效率的问题上是失败的, 政府需要加强通过水价宏观调控水资源利用效率。

[参 考 文 献]

- [1] 杨培岭. 水资源经济[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [2] 关伟. 区域水资源与经济社会耦合系统可持续发展的量化分析[J]. 地理研究, 2007, 26(4): 685—692.
Guan Wei. The data analysis of regional water resources and economic society coupling system sustainable development[J]. Geographical Research, 2007, 26(4): 685—692. (in Chinese with English abstract)
- [3] 陈琨, 姚中杰, 姚光. 我国实施水资源循环经济模式的途径[J]. 中国人口·资源与环境, 2003, 13(5): 120—121.
Chen Wei, Yao Zhongjie, Yao Guang. Approaches to implementing circular economy model of water resources in China[J]. China Population Resources and Environment, 2003, 13(5): 120—121. (in Chinese with English abstract)
- [4] 翁文斌, 蔡喜明, 史慧斌, 等. 宏观经济水资源规划多目标决策分析方法研究及应用[J]. 水利学报, 1995(2): 1—11.
Weng Wenbin, Cai Ximing, Shi Huibin, et al. Devlotment of the macro- economic based water resources multiple objective analysis approach and its applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995(2): 1—11. (in Chinese with English abstract)
- [5] 贾玲, 甘泓, 汪林, 等. 论水资源资产负债表的核算思路[J]. 水利学报, 2017, 48(11): 1324—1333.
Jia Ling, Gan Wei, Wang Lin, et al. Accounting methodology of the balance sheet for water resources [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(11): 1324—1333. (in Chinese with English abstract)
- [6] 唐晓城. 山东省经济增长的资源约束计量分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2016, 40(2): 181—186.
Tang Xiaocheng. Econometric analysis of resource constraint

- of economic growth for Shandong Province [J]. Journal of China University of Petroleum, 2016, 40(2):181—186. (in Chinese with English abstract)
- [7] Setlhogile T, Arntzen J, Mabiza C, et al. Economic valuation of selected direct and indirect use values of the Makgadikgadi wetland system, Botswana[J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2010, 36(14): 1071—1077.
- [8] 曹永强, 伊吉美, 邢晓森, 等. 辽宁省水资源利用与社会经济的协调发展量化分析[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 80—84.
Cao Yongqiang, Yi Jimei, Xing Xiaosen, et al. Quantitative analysis of coordinated development of water resources utilization and social economy in liaoning province[J]. Journal of Hydroelectric Engineering 2010, 29(1): 80—84. (in Chinese with English abstract)
- [9] 成琨, 付强, 陈曦, 等. 基于投入产出模型的黑龙江省水资源利用效率分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013(5): 141—145.
Cheng Kun, Fu Qiang, Chen Xi, et al. Analysis of water resources utilization efficiency in Heilongjiang province based on input-output model[J]. South to North Water Transfer and Water Science and Technology, 2013(5): 141—145. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张振龙, 孙慧. 新疆区域水资源对产业生态系统与经济增长的动态关联: 基于 VAR 模型[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5273—5284.
Zhang Zhenlong, Sun Hui. Research on the dynamic relationship between water-intensive industrial ecosystem and economic growth in Xinjiang based on VAR model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5273—5284. (in Chinese with English abstract)
- [11] 邓学平, 王旭, Ada Suk Fung Ng. 我国物流企业生产效率与规模效率[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(4): 34—42.
Deng Xueping, Wang Xu, Ada Suk Fung Ng. Productive efficiencies and scale efficiencies of Chinese logistics companies [J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2009, 29(4): 34—42. (in Chinese with English abstract)
- [12] 马占新, 侯翔. 具有多属性决策单元的有效性分析方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(2): 339—345.
Ma Zhanxin, Hou Xiang. Efficiency analysis method for some multiple attributive decision making units [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(2): 339—345. (in Chinese with English abstract)
- [13] Lee S, Song K Y, Kim Y, et al. Mapeamento do potencial de produtividade regional de águas subterrâneas usando um modelo de rede neural artificial baseado num sistema de informação geográfica (SIG)[J]. Hydrogeology Journal, 2012, 20(8): 1511—1527.
- [14] 邢俊. 基于样本的企业联盟效率综合评价的非参数方法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(11): 2131—2139.
Xing Jun. Non-parametric approach for evaluating alliance efficiency based on sample units [J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2011, 31(11): 2131—2139. (in Chinese with English abstract)
- [15] 秦钟, 王建武, 章家恩, 等. 广东省农业循环经济发展的 DEA 分析与有效性评价[J]. 自然资源学报, 2010, 25(6): 904—913.
Qin Zhong, Wang Jianwu, Zhang Jiaen, et al. Data envelopment analysis and efficiency evaluation on development of agricultural circular economy in guangdong[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(6): 904—913. (in Chinese with English abstract)
- [16] 徐丽君, 杨敏丽. 基于 Malmquist 指数法的水稻生产效率实证分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 169—174.
Xu Lijun, Yang Minli. Analysis on paddy rice production efficiency based on malmquist index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp): 169—174. (in Chinese with English abstract)
- [17] 邵景力, 崔亚莉, 李慈君. 水资源-经济管理模型及其应用[J]. 水文地质工程地质, 1994(3): 1—4.
Shao Jingli, Cui Yali, Li Cijun. Water resources-Economic management model and its application[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1994(3): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [18] 钱龙霞, 张韧, 王红瑞, 等. 基于 MEP 和 DEA 的水资源短缺风险损失模型及其应用[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1199—1206.
Qian Longxia, Zhang Ren, Wang Hongrui, et al. A model for water shortage risk loss based on MEP and DEA and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10): 1199—1206. (in Chinese with English abstract)
- [19] Jiang Qiuxiang, Wang Tian, Wang Zilong, et al. HHM- and RFRM-based water resource system risk identification[J]. Water Resources Management, 2018,12(32): 4045—4061.
- [20] Charnes A, Cooper WW, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making unit[J]. European Journal of Operational Research, 1978(2): 429—444.
- [21] 王莹. 中国省际水资源利用效率及影响因素分析: 基于超效率 DEA 与 Tobit 模型[J]. 中国农村水利水电, 2015(5): 41—44.
Wang Ying. Chinese provincial water resources utility efficiency and its influencing factors based on super-efficiency DEA and Tobit model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(5): 41—44. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘静, 吴普特, 王玉宝, 等. 基于数据包络分析的河套灌区农业生产效率评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 110—118.
Liu Jing, Wu Pute, Wang Yubao, et al. Assessment of agricultural productive efficiency for Hetao Irrigation District based on data envelopment analysis [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(9): 110—118. (in Chinese with English abstract)
- [23] 吕素冰, 许士国, 陈守煜. 水资源效益综合评价的可变模糊决策理论及应用[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(2): 269—273.
Lü Subing, Xu Shiguo, Chen Shouqi. Variable fuzzy decision-making theory and its application to comprehensive benefits evaluation of water resources [J]. Journal of Dalian

- University of Technology, 2011, 51(2): 269—273. (in Chinese with English abstract)
- [24] Tone, Kaoru, Tsutsui, Miki. An epsilon-based measure of efficiency in DEA: A third pole of technical efficiency[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 207(3): 1554—1563.
- [25] 张勇, 古明明. 重新评估我国的增长潜力: 基于全要素生产率 and 数据分析视角的解释[J]. *经济科学*, 2013, 35(2): 5—19.
- Zhang Yong, Gu Mingming. Reassessing China's growth potential: Based on TFP and data analysis [J]. *Economic Science*, 2013, 35(2): 5—19. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李佳宁. 基于非径向超效率 DEA 模型的中国省际生态效率研究[J]. *现代商业*, 2015(4), 138—140.
- Li Jianing. Research on China's interprovincial ecological efficiency based on non-radial super efficiency DEA Model[J]. *Modern Business*, 2015(4): 138—140. (in Chinese with English abstract)
- [27] 徐海成, 王毅, 贾锐宁. 基于三阶段 DEA 与 Tobit 回归模型的收费公路行业运营模式双轨制效率研究[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(9): 125—132.
- Xu Haicheng, Wang Yi, Jia Ruining. Research on dual-track efficiency of toll road industry operation mode based on three-stage DEA and Tobit regression model[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(9): 125—132. (in Chinese with English abstract)
- [28] 黄珂, 张安录, 张雄. 中国城市群农地城市流转效率研究: 基于三阶段 DEA 与 Tobit 模型的实证分析[J]. *经济地理*, 2014, 34(11): 74—80.
- Huang Ke, Zhang Anlu, Zhang Xiong. A study of rural-urban land conversion efficiency of urban agglomerations in China: An empirical analysis based on three-stage DEA model and Tobit model [J]. *Economic Geography*, 2014, 34(11): 74—80. (in Chinese with English abstract)
- [29] Warnke A J. Verzerrung durch selektive Stichproben[M]. *Nonresponse Bias*. Fachmedien Wiesbaden: Springer, 2015: 305—323.
- [30] Kirjavainen T, Loikkanen H A. Efficiency differences of Finnish senior secondary schools: An application of DEA Tobit-analysis[J]. *Heikki Loikkanen*, 1996, 17(4): 377—394.
- [31] 孙才志, 谢巍, 姜楠, 等. 我国水资源利用相对效率的时空分异与影响因素[J]. *经济地理*, 2010, 30(11): 1878—1884.
- Sun Caizhi, Xie Wei, Jiang Nan, et al. The spatial-temporal difference of water resources utilization relative efficiency and influence factors in China [J]. *Economic Geography*, 2010, 30(11): 1878—1884. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王浩. 中国未来水资源情势与管理需求[J]. *世界环境*, 2011(2): 16—17.
- Wang Hao. The future situation of water resources in China and its management requirements[J]. *World Environment*, 2011(2): 16—17. (in Chinese with English abstract)
- [33] 那洪生. 经济金融运行总体平稳向好 但经济下行压力依然较大: 2015 年上半年黑龙江省经济金融形势分析[J]. *黑龙江金融*, 2015(8): 12—13.
- Na Hongsheng. The overall economic and financial operations are steadily improving, but the downward pressure on the economy is still relatively large: An analysis of the economic and financial situation in Heilongjiang Province in the first half of 2015 [J]. *Heilongjiang Finance*, 2015(8): 12—13.
- [34] 黑龙江省统计局. 黑龙江统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [35] 黑龙江省水利厅. 黑龙江省水资源公报[M]. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 2016.
- [36] Shi Bin, Wang Peng, Jiang Jiping, et al. Applying high-frequency surrogate measurements and a wavelet-ANN model to provide early warnings of rapid surface water quality anomalies[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 610/611: 1390—1399.
- [37] Ma Dongliang, Zhou Tao, Chen Jie, et al. Supercritical water heat transfer coefficient prediction analysis based on BP neural network[J]. *Nuclear Engineering & Design*, 2017, 320: 400—408.
- [38] 杨斌. 资源约束下的节约型社会构建研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- Yang Bin. Research on the Construction of Economical Society Under Resource Constraints [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [39] 姜秋香, 周智美, 王子龙, 等. 基于水土资源耦合的水资源短缺风险评价及优化[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(12): 136—143.
- Jiang Qiuxiang, Zhou Zhimei, Wang Zilong, et al. Risk assessment and optimization of water resources shortage based on water and land resources coupling [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(12): 136—143. (in Chinese with English abstract)
- [40] 钱文婧, 贺灿飞. 中国水资源利用效率区域差异及影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(2): 54—60.
- Qian Wenjing, He Canfei. China's Regional Difference of Water Resource Use Efficiency and Influencing Factors [J]. *China Population Resources and Environment*, 2011, 21(2): 54—60. (in Chinese with English abstract)
- [41] 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.
- Luo Yan. Research on Index Selection and Environmental Efficiency Evaluation Based on DEA Method [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [42] 董战峰, 喻恩源, 袁浪, 等. 基于 DEA 模型的中国省级地区水资源效率评价[J]. *生态经济: 中文版*, 2012(10): 43—47.
- Dong Zhanfeng, Yu Enyuan, Qiu Lang, et al. Water efficiency evaluation of the provincial regions in China based on DEA model[J]. *Ecological Economy: Chinese*, 2012(10): 43—47. (in Chinese with English abstract)
- [43] 左其亭, 周可法, 夏军, 等. 干旱区流域可持续水资源管理量化研究方法及应用[J]. *中国科学: 地球科学*, 2006, 36(增刊): 9—14.
- Zuo Qiting, Zhou Kefa, Xia Jun, et al. Quantitative research

method and application of sustainable water resources management in arid basin [J]. Science in China Series D:

Earth Sciences, 2006, 36(Supp): 9—14. (in Chinese with English abstract)

EBM-based social economic loss model of water resources imbalance risk and its application

Jiang Qiuxiang, Wang Tian, Wang Zilong^{*}, Fu Qiang, Zhao Youzhu, Dong Yujie, Zhou Zhimei

(School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The water resources system is closely related to the regional economy. It is more intuitive to use economic value to reflect the losses caused by water system risks such as water resource imbalance and mismatch. In order to evaluate the risk of water resources system through quantitative economic value, this paper firstly constructed the water loss risk economic loss model, and used the EBM model to calculate the water use efficiency, and combined the water price and per capita wage in Heilongjiang Province to determine the water resource risk value. Then, based on the EBM, a two-stage Tobit model was added to analyze the causes of the risk economic loss of the water resources system. The results show that the least economic loss caused by insufficient water resources investment in Heilongjiang Province from 2000 to 2020 is 7.52 billion yuan (2008), the highest is 42.51 billion yuan (2013); the economic loss of minimum output of water resources is 111.9 billion yuan (2000), the highest is 1 106.8 million yuan (2012). From 2000 to 2015, the economic loss of water resources in Heilongjiang Province increased year by year, and the economic loss of water resources output accounted for more than 90% of the economic loss of water resources system. It is estimated that the economic loss of water resources risk in 2020 is 813.87 billion yuan. Jixi, Suihua, Qiqihar, Harbin, Daqing, Jiamusi, Shuangyashan, Qitaihe and Hegang have lower economic losses caused by input and better water resources allocation. The cities with large economic losses caused by output are Yichun, Mudanjiang and Suihua, which require the government to pay more attention to the utilization of water resources in the region. It is necessary to rationally allocate water resources, improve water use efficiency, and reduce the risk economic loss of water resources systems. Hegang, Qitaihe, Jiamusi and other major grain producing areas have greater risk of water resources, greater economic losses and lower water use efficiency. In general, the agricultural water use efficiency in Heilongjiang Province is low, and the phenomenon of flood irrigation is still serious. It is necessary for the government and farmers to cooperate with each other to improve water use efficiency. During the research period, the risk economic loss of water resources system in Heilongjiang Province was large, and the water use efficiency was low. The water use efficiency in most areas was only in the medium range. From the perspective of spatial distribution, water use efficiency is high in the north-south direction and low in the east-west direction. The water use efficiency in the eastern region is lower than that in the other regions. The water resources system of Heilongjiang Province is affected by industrial structure, per capita GDP, per capita water resources and water resources investment. Water price is correlated with water use efficiency in only a few cities, indicating that the government's purpose of regulating water resources through water prices has not been met, and the government needs to introduce relevant policies to change in the future. This article will support the development of risk aversion measures for subsequent water resources systems.

Keywords: water resources; economic analysis; models; EBM; Tobit; Heilongjiang Province