

引用格式: 孙才志, 马奇飞, 赵良仕. 基于SBM-Malmquist生产率指数模型的中国水资源绿色效率变动研究[J]. 资源科学, 2018, 40(5): 993-1005. [Sun C Z, Ma Q F, Zhao L S. Green efficiency changes for water resources in China based on SBM-Malmquist model[J]. *Resources Science*, 2018, 40(5): 993-1005.] DOI :10.18402/resci.2018.05.12

基于SBM-Malmquist生产率指数模型的中国水资源绿色效率变动研究

孙才志^{1,2}, 马奇飞², 赵良仕¹

(1. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029;

2. 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029)

摘要:通过对考虑社会发展指数的水资源绿色效率进行研究,可以真实地掌握水资源利用效率的实际变动情况。本文基于考虑非期望产出的SBM模型和Malmquist全要素生产率指数模型,对2000—2014年中国31个省(市、自治区)水资源绿色效率进行了测度,并对其时空演变特征和影响机理进行了分析。研究发现:总体上中国水资源绿色效率呈现出在波动中缓慢下降的特点;现阶段中国水资源绿色效率发展水平仍比较低,还有很大的提升空间;中国水资源绿色效率地区差异显著,且水资源绿色效率的高低和地区经济发展水平没有明显的正相关关系,但社会发展指数对水资源绿色效率的高低具有重大影响;中国水资源绿色效率的技术进步变化指数表现为上升态势,而全要素生产率变化指数、纯技术效率和规模效率变化指数在研究期内均呈现缓慢下降的特点;总体而言,科技进步对中国水资源绿色效率的提高具有显著的促进作用,而少数地区受技术效率和技术变化的共同影响。

关键词:SBM模型;社会发展指数;水资源绿色效率;全要素生产率及其分解指数

DOI :10.18402/resci.2018.05.12

1 引言

中国是一个缺水的国家,人均水资源占有量仅为世界水平的1/4^[1],并伴随着经济和人口的不断增长,水污染和浪费现象愈发严重,从而导致水资源短缺成为中国当前社会发展的限制性因素^[2]。针对这一问题,2011年中央一号文件明确指出,要实行最严格的水资源管理制度,并划定了用水总量、用水效率和水功能区限制纳污“三条红线”^[3-5],其中,提高用水效率是解决水资源供需矛盾的关键。绿色发展作为当今时代发展的主题,强调经济系统、社会系统、生态系统之间的系统性、整体性和协调性^[6],即实现“经济-社会-生态系统”三位一体的协同发展,而水资源作为三大系统中不可或缺的一员,实现其利用效率的不断提高,将有助于促进经济-社会-生态系统的良性运转,因此,对中国水资源

绿色效率进行研究显得紧迫而必要。

针对提高水资源利用效率的研究,国内外已经有了大量的成果。通过对文献进行梳理发现,目前,国际上对水资源利用情况的研究主要集中在以下方面:第一,在研究内容上多集中在工业、农业及城市用水效率等方面^[7-10],随着研究的不断深入,一些学者开始对水资源利用效率的驱动因素和影响机理进行探索^[11-15]。第二,在指标的选取上存在着一定的共性,即一般选取水资源、资本和劳动力三个要素作为投入指标,但在产出指标的选取上却存在一些不同。早期一些学者把GDP作为唯一产出,但这并不符合社会发展的实际生产过程,因此,后来一些学者将污染物作为非期望产出纳入到水资源利用效率评价体系中,使评价系统更加完善合理。第三,在研究方法上主要有主成分分析法^[16]、随

收稿日期:2017-04-06,修订日期:2018-03-04

基金项目:国家社会科学重点基金(编号:16AJY009)。

作者简介:孙才志,男,山东烟台人,教授,博士生导师,主要从事水资源经济与海洋经济研究。E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

机前沿法^[17]和数据包络分析法^[18]等,由于数据包络分析法无需事先确定函数关系,采用非主观赋权的方法从而避免了主观因素的影响,且不用考虑投入产出指标的量纲,就能实现多投入多产出的水资源利用效率测度,很好地克服了主成分分析法和随机前沿法的缺点,深受研究者的青睐。但是上述研究却存在以下不足:第一,在指标的选取上,大多数人选择固定资产投资作为资本投入^[19-21],然而这一指标仅能代表当期的资本投入量,并不能表示研究期间整个社会系统的实际资本投入量,导致测度结果不符合实际。第二,当前学者对水资源效率的研究,仅停留在经济效益和环境效益层面,然而在以“绿色发展”为理念的今天,仅考虑经济、环境效益的水资源利用效率研究已不符合当今社会发展的要求,而“以人为本”的绿色发展理念,要求我们实现“经济-社会-生态系统”的协同发展,因此把社会发展指数纳入到评价体系显得尤为重要。

鉴于此,本文在前人研究的基础上,沿用SBM-DEA模型,把各地区资本存量作为资本投入指标,并通过构建能够反映社会发展状况的指标体系,将其作为期望产出纳入到水资源利用效率测度体系中,对中国2000—2014年的水资源绿色效率进行测度,并运用Malmquist全要素生产率指数模型对水资源绿色效率全要素生产率及其分解指数跨期变动进行分析,以探究水资源绿色效率的驱动机制,实现“经济-社会-生态系统”的可持续发展。

2 相关概念界定

2.1 水资源绿色效率的概念和内涵

水资源效率是水资源等相关生产要素投入和带来的产出的比率。绿色发展的本质是降低资源消耗,减少环境污染,加强生态治理和环境保护,实现经济、社会、生态环境全面协调可持续发展^[22]。依照沈满洪等对水资源效率的界定,根据实际情况,结合绿色发展理念,水资源绿色效率是指水资源等

生产要素投入和带来的经济、社会和生态环境的产出的比率^[2]。水资源绿色效率侧重于水资源服务或者水资源的社会效益,在此基础上实现“经济-社会-生态环境”的三赢。

水资源绿色效率内涵主要包括以下三方面:一是经济内涵,即在一定时期内,一定的生产力水平下,以最小的经济投入实现最大的经济产出或者是用相同或者更少的水资源获得更多经济产出;二是社会内涵,即以人为本,对水资源的利用,是以不断地满足人类发展对物质和精神消费的需求为目的,实现共享、公平分配,提高社会福利水平,增强人类福祉和幸福感,实现社会的包容性发展,这也是人类社会发展的内涵;三是生态环境内涵,即要求水资源的利用要建立在保护与改善自然环境、维护生态平衡的基础上,逐步减少实际生产过程中非期望产出对生态环境的破坏。

2.2 三大效率之间的区别与联系

水资源利用效率的研究在生产生活过程中不断得到发展与完善,由此衍生出不同的水资源利用效率类型。根据其发展历程,本文将其总结为三大类型(表1),其区别主要在于产出的不同。早期的水资源利用效率研究单纯考虑水资源利用所带来的经济效益,即把GDP作为唯一产出,以最少的水资源投入得到最大的经济效益,因此传统的水资源利用效率也叫做水资源经济效率。然而,水资源在生产过程中,除了带来经济效益外,还会带来污水、废气等非期望产出,因此,把非期望产出纳入水资源利用效率的研究范畴,更加符合社会发展的实际生产过程。我们把考虑非期望产出的水资源利用效率研究叫做水资源环境效率。随着“绿色发展”理念的提出,仅考虑经济、环境效益的水资源利用效率研究已不符合当今社会发展的要求,而“以人为本”的绿色发展理念,要求实现经济-社会-环境的协同发展,因此把社会发展指数纳入到评价体系中

表1 水资源利用效率类型界定

Table 1 Type definition of utilization efficiency of water resources

类型	投入指标	产出指标	定义
类型一	水足迹、劳动力、资本存量	GDP	水资源经济效率
类型二	水足迹、劳动力、资本存量	GDP、灰水足迹	水资源环境效率
类型三	水足迹、劳动力、资本存量	GDP、社会发展指数(SDI)、灰水足迹	水资源绿色效率

2018年5月

显得尤为重要,这也是水资源绿色效率的核心思想。

水资源经济效率、水资源环境效率和水资源绿色效率三者之间既有区别又有联系,水资源经济效率、水资源环境效率是水资源绿色效率的发展根源和基础,水资源绿色效率则是经济效率和环境效率的丰富与完善,三者一脉相承,层层递进,使水资源利用效率评价系统不断趋于完善。

3 研究方法与数据来源

3.1 SBM-DEA模型

数据包络分析法^[23](DEA)是由美国运筹学家Charles等于1978年根据Farrell的非参数分析理论提出的一种系统分析方法,由于DEA在处理多指标投入和多指标产出方面具有不可替代的优势,因此自提出以来,DEA方法已广泛应用于不同的行业与部门。它的原理主要是在保持决策单元(DMU)的输入或输出不变的情况下,借助数学规划将决策单元(DMU)投影到前沿面上,然后通过比较DMU距离前沿面的远近程度来评价他们的相对有效性。

传统的DEA方法在测度水效率时仅考虑经济效益,即不考虑非期望产出所带来的影响,这与实际的生产过程不相符合,而且忽视了投入与产出的松弛性问题,从而使测度值与实际的水资源利用效率之间产生偏误。为解决这一问题,Tone提出了非径向、非角度基于松弛变量的SBM模型,该模型通过将各投入产出的松弛变量直接纳入到目标函数中,解决了松弛变量对测度值的影响,使水资源利用效率测度值更加准确^[24]。公式如下:

$$\begin{aligned} \theta = \min & \frac{1 - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_n^x / x_{kn}'}{1 + \frac{1}{M+I} \left(\sum_{m=1}^M s_m^y / y_{km}' + \sum_{i=1}^I s_i^b / b_{ki}' \right)} \\ \text{s.t.} & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \lambda_k^t x_{kn}^t + s_n^x = x_{kn}', \quad n=1, \dots, N \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \lambda_k^t y_{km}^t - s_m^y = y_{km}', \quad m=1, \dots, M \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \lambda_k^t b_{ki}^t + s_i^b = b_{ki}', \quad i=1, \dots, I \\ & \lambda_k^t \geq 0, s_n^x \geq 0, s_m^y \geq 0, s_i^b \geq 0, k=1, \dots, K \end{aligned} \quad (1)$$

式中 θ, N, M, I 分别为要计算的水资源效率值、投入类型个数、期望产出类型个数和非期望产出类型个数; x, y, b 分别表示投入、期望产出和非期望产出的

向量; s_n^x, s_i^b 分别为投入及非期望产出的冗余; s_m^y 为期望产出的不足; $(x_{kn}', y_{km}', b_{ki}')$ 是第 k 个生产单元的 t 时期的投入产出值; λ_k^t 为决策单元的权重。目标函数 θ 关于 s_n^x, s_m^y, s_i^b 严格单调递减,且 $0 < \theta \leq 1$;当 $\theta=1$ 时,则 $s_n^x = s_m^y = s_i^b = 0$,说明被评价的决策单元是有效的,不存在投入产出的冗余和不足;当 $\theta < 1$ 时,则表示被评价的决策单元存在效率损失,即DEA无效,需要通过优化投入产出量来改善水资源利用效率。

3.2 Malmquist全要素生产率指数模型

Malmquist全要素生产率指数是由Malmquist于1953年提出的,Fare等将其与数据包络分析法(DEA)理论相结合,构造了跨期变动的Malmquist生产率变化指数 TFP_t^{t+1} ,用以客观衡量技术效率变化(TEC)、技术变化(TC)和全要素生产率指数(TFP)之间的关系^[25]。

$$TFP_t^{t+1} = \left[\frac{D'(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{D'(x^t, y^t, b^t)} \times \frac{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{D^{t+1}(x^t, y^t, b^t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

TFP指数可以分解为技术效率变化(TEC)和技术变化(TC),如若在SBM模型中引入约束条件 $\sum_{k=1}^K \lambda_k = 1$,则公式(1)转变为规模报酬可变(VRS)的SBM模型,该模型可将技术效率变化(TEC)进一步分解为纯技术效率变化(PEC)和规模效率变化(SEC)。因此公式(2)又可以变化为:

$$\begin{aligned} TFP_t^{t+1} = & \frac{P'(x^t, y^t, b^t)}{P'(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \times \frac{S'(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{S'(x^t, y^t, b^t)} \\ & \times \left[\frac{D'(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \times \frac{D'(x^t, y^t, b^t)}{D^{t+1}(x^t, y^t, b^t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3) \end{aligned}$$

式中 TFP_t^{t+1} 为决策单元的全要素生产率变化指数,表示水资源绿色效率的跨期动态变化情况; P', S', D' 分别为纯技术效率变化、规模效率变化和技术变化。上述全要素生产率及其分解指数大于1,表示相应的全要素生产率及其分解呈现上升趋势,反之,若小于1,则表示相应效率恶化。

3.3 指标选取与数据来源及处理

3.3.1 指标选取

具体选取指标说明如下:

(1)水足迹。水足迹体现的是人类对水资源消

费的真实占有,也反映了经济-社会-生态环境系统生产投入的真实的水资源量。

(2)劳动力。用三大产业从业人员衡量生产过程中实际投入的劳动量。

(3)资本投入。以1997年为基期的资本存量作为资本投入。

(4)GDP。以1990年为基期的国内生产总值作为期望产出。

(5)社会发展指数(Society Development Index, 简称SDI):本文参考文献[26],建立指标体系如表2所示,本文将作为期望产出。

表2 社会维度的指标体系

Table 2 Index system of social dimension

目标层	一级指标	二级指标	指标类型
社会发展指数	人口控制	65岁以上人口比重	成本型
		人口自然增长率	成本型
	城市化水平	非农业人口比例	效益型
		建成区面积	效益型
		城镇居民可支配收入	效益型
	政府对科教 的重视程度	科教事业费占财政 支出比例	效益型
		万人医生数	效益型
	医疗水平	万人医生数	效益型
		医院床位数	效益型
	知识水平	文盲率	成本型
		万人本专科以上学历 人数	效益型
	生活水平	人均GDP	效益型
		城镇居民恩格尔系数	成本型
		农村居民恩格尔系数	成本型
	健康水平	预期寿命	效益型

(6)灰水足迹。灰水足迹是指为了稀释社会经济系统排放的污染物以达到相关水质标准的水资源需求量,本文将作为非期望产出。具体说明请参阅文献[27,28]。

3.3.2 数据来源及处理

本文使用了2000—2014年中国31个省市(不含香港、澳门、台湾)的水资源投入与产出数据,所有数据均来源于《中国统计年鉴》^[29]和《中国环境年鉴》^[30](2001—2015年)以及《中国水资源公报》^[31](2000—2014年)和《新中国六十年统计资料汇编》^[32]。个别指标的处理方法如下:

(1)水足迹。本文从生产角度运用自上而下的方法计算水足迹,具体计算过程请参阅相关文献[33,34]。

(2)资本存量。本文运用永续盘存法计算资本存量,计算过程参照单豪杰^[35]的算法,采用10.96%的折旧率,对于西藏缺失的固定资产投资价格指数数据,把靠近西藏且与西藏经济发展水平相似的新疆和青海的固定资产投资价格指数的算术平均值作为替代指标。

(3)社会发展指数。其计算公式如下:

$$P_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \times R_{ij} \quad (4)$$

式中 n 为指标的数量; ω_j 为各指标的权重; R_{ij} 为各指标标准化后的比重; P_i 为某年区域系统社会发展状态的指数值, P_i 值越大,社会发展能力就越强,反之越弱。

上述指标采用极值法对其进行标准化处理,而后用熵值法^[36]确定各指标的权重,为避免出现0和1的边界问题,本文在对指标做归一化处理之前分别将每个指标的最大值提升10%,最小值降低10%,对于不同类型的指标,其归一化分别采用如下方法进行处理:

$$\text{效益型指标: } x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min_j}{\max_j - \min_j} \quad (5)$$

$$\text{成本型指标: } x_{ij}^* = \frac{\max_j - x_{ij}}{\max_j - \min_j} \quad (6)$$

式中 x_{ij} 为第 i 项指标的第 j 年原始数值; x_{ij}^* 为 x_{ij} 的归一化值; \max_j 、 \min_j 分别为第 i 项指标在研究期间所有数据的最大值和最小值。

缺失的数据由已有年鉴数据综合处理所得;需要特别说明的是,中国反映人体健康水平的指标预期寿命,以10年为一个统计周期,通过比较发现10年期间预期寿命变化不大,因此2001—2009年均采用2000年的数据,2011—2014年均采用2010年的数据。

4 结果分析

4.1 水资源绿色效率时空分布

本文基于2000—2014年中国水资源利用情况的面板数据,利用DEA-SBM模型测算了中国31个省(市、自治区)的水资源绿色效率,绘制了中国水资源绿色效率时间趋势图(图1)和各地区均值图(图2),并参考文献[37]将各地区水资源绿色效率划分到五个区间(表3),限于版面,本文只给出了2000年、2007年和2014年的划分结果,用以说明近15年

2018年5月

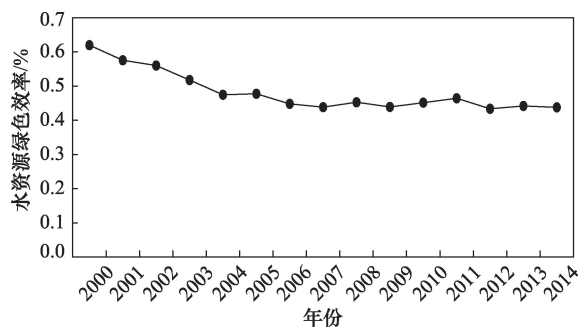


图1 中国水资源绿色效率时间变化趋势

Figure 1 Time trend of green efficiency of water resources in China

来水资源绿色效率的时空格局变化特征。

4.1.1 水资源绿色效率时间演化特征

(1)从整体上看(图1),2000—2014年中国水资源绿色效率呈现出在波动中缓慢下降的趋势,2000—2007年水资源绿色效率在波动中下降,2007年之后有些许上升,之所以会出现这种情况,可能是因为2006年“十一五”规划的制定,政府对环境保

护、医疗卫生、教育、税收等各方面实施了一系列的利好政策,促使水资源绿色效率开始往好的方向发展,扭转了之前水资源绿色效率持续下降的局面。

(2)从局部来看(表3),2000年全国31个地区中,水资源绿色效率为1的地区有13个,分别是北京、天津、内蒙古、辽宁、上海、浙江、广东、海南、四川、甘肃、青海、宁夏和西藏,福建、重庆处在0.601~0.999区间,山西、江苏、贵州处于0.401~0.600区间,其余地区均处在0.001~0.200和0.201~0.400区间内;到了2007年,效率值为1地区下降到6个,分别是北京、上海、广东、海南、四川和西藏,处于0.601~0.999区间的仅剩天津,而处于其他区间的省区均有所上升,这相对于2000年的绿色效率有明显的下降;2014年底,绿色效率达到1的地区上升到了8个,分别是北京、天津、上海、广东、海南、四川、西藏和宁夏,这说明15年来,中国水资源绿色效率表现为先下降后上升的特点。

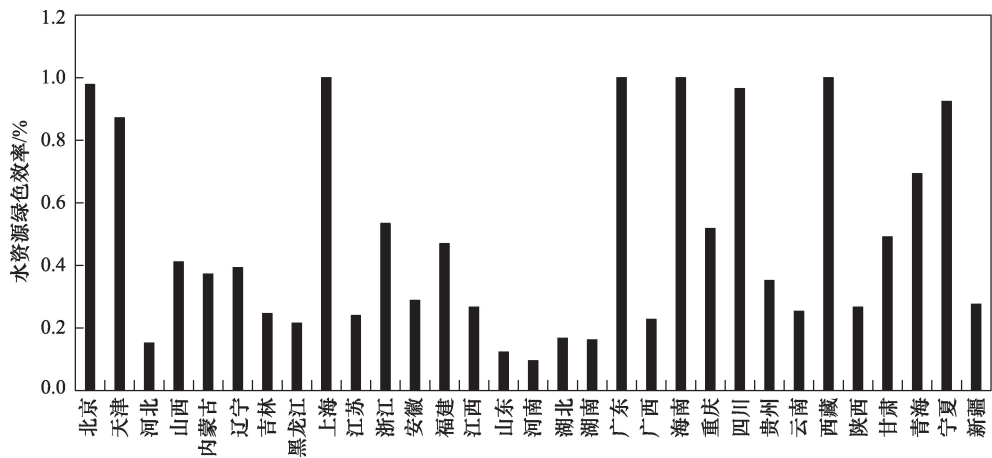


图2 中国31个地区水资源绿色效率

Figure 2 Green efficiency of water resources in 31 regions of China

表3 中国水资源绿色效率区间划分

Table 3 Classification of water resources green efficiency in China

分级标准	2000年	2007年	2014年
0.001~0.200	河北、山东、河南、湖北	河北、江苏、山东、河南、湖北、湖南	河北、内蒙古、辽宁、江苏、山东、河南、湖北、湖南、广西、云南
0.201~0.400	吉林、黑龙江、安徽、江西、湖南、广西、云南、陕西、新疆	内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、浙江、安徽、江西、广西、贵州、云南、陕西、新疆	山西、吉林、黑龙江、浙江、安徽、福建、江西、贵州、陕西、甘肃、新疆
0.401~0.600	山西、江苏、贵州	山西、福建、重庆、甘肃、青海、宁夏	重庆
0.601~0.999	福建、重庆	天津	青海
1.000	北京、天津、内蒙古、辽宁、上海、浙江、广东、海南、四川、西藏、甘肃、青海、宁夏	北京、上海、广东、海南、四川、西藏	北京、天津、上海、广东、海南、四川、西藏、宁夏

(3) 15年间,中国水资源绿色效率平均值为0.474,说明中国水资源绿色效率整体上仍处于较低水平,要实现经济、社会和环境协同发展的目标,任重而道远。

4.1.2 水资源绿色效率空间格局特征

(1) 由图2可知,全国范围内仅上海、广东、海南和西藏4个地区的水资源绿色效率平均值为1,而其余地区均为水资源绿色效率非有效区,这说明目前中国水资源绿色效率整体水平低下,需要改变投入产出配比来改善水资源绿色效率,使之达到有效状态。

(2) 水资源绿色效率排名前十位的地区分别是上海、广东、海南、西藏、四川、北京、宁夏、天津、青海和重庆,这些地区水资源绿色效率值处于全国平均水平之上,为水资源绿色效率相对高效区,从空间分布上看,水资源绿色效率高的地区主要分布在东部和西部,这是因为东部个别省份水资源短缺且污染严重,而西部相对较轻,生态环境优于东部,从而使水资源绿色效率高于东部。这也说明水资源绿色效率与经济发展水平之间没有明显的正相关关系,西部欠发达地区同样可以通过保护环境、优化资源配置等手段提高地区水资源绿色效率。

(3) 由表3可知,15年来内蒙古、甘肃和辽宁等地水资源绿色效率不断降低,从水资源绿色效率有效区变为非有效区,而原因却有所不同。内蒙古、甘肃两地是因为一味追求经济效益,过度放牧、过度开垦,造成水土流失、环境破坏,致使水资源绿色效率迅速下降;而经济发达的辽宁地区主要是因为产业结构不合理加上人口流失严重,使得资源配置失衡,从而导致水资源绿色效率降低。

(4) 15年间,河北、河南、山东、湖北等地区,水资源绿色效率始终处于0.001~0.200区间内,这是因为自21世纪以来,这些地区的经济状况有了很大改善,人民生活水平得到了显著提高,但是这些改善是以牺牲环境为代价的,致使个别地区的社会发展指数不升反降,因此造成水资源绿色效率偏低的现状,这也从侧面说明了,部分地区盲目追求经济效益,忽视环境和社会效益的发展造成水资源利用效率出现“泡沫”形式的提高。因此,在实际生产过程中应警惕这种“泡沫”的发生,只有合理布局资源配置,努力实现产业结构的优化转型,减少污染的输出和

环境的破坏,才能真正实现水资源的绿色发展。

4.2 社会发展指数对水资源利用效率的影响

为了说明社会发展指数对水资源利用效率的具体影响,本文同时测度了不考虑社会发展指数的水资源环境效率以作对比分析。根据SBM模型,当水资源利用效率值小于1时,松弛量 s_n^x, s_m^y, s_i^b 的大小可以反映水资源利用效率损失的原因^[38]。本文将2000—2014年中国31个省(市、自治区)水资源利用效率各投入变量松弛量 s_n^x 除以对应的投入指标值得到投入冗余率;将灰色水足迹松弛量 s_i^b 除以对应的灰水足迹值得到非期望产出冗余率;将期望产出松弛量 s_m^y 除以相应的产出值得到期望产出不足率,并绘制了水资源利用效率投入产出优化表(表4),具体分析如下:

(1) 通过对水资源绿色效率和环境效率进行比较发现,15年间中国水资源绿色效率平均值为0.482,环境效率平均值为0.479,比环境效率上升了0.63%,社会发展指数对中国整体水资源利用效率的提高促进作用不大,表明中国当前的社会发展还很落后,民生问题依然严重,这与中国当前处于社会主义初级阶段的基本国情相符。

(2) 考虑社会发展指数影响的水资源绿色效率各投入产出的冗余率和不足率与不考虑社会发展指数影响的水资源环境效率各投入产出的冗余率和不足率有较大差别,社会发展指数的加入有效降低了其他各投入产出指标的冗余率和不足率。需要说明的是社会发展指数对GDP这一期望产出几乎没有影响,除了宁夏GDP产出略有不足外,其他地区的GDP不足率均为零。这是因为2008年全国遭遇罕见雪灾,宁夏尤为严重,加之全球经济危机的影响,使得经济水平本就落后且自然条件恶劣的宁夏地区出现GDP产出略显不足的情况。因此,本文对GDP的不足率不做过多分析。

(3) 从整体上看,社会发展指数加入后,对各投入产出指标的冗余率和不足率产生了不同程度的影响,其中对非期望产出(即灰水足迹)冗余率影响最为显著,下降了98.71%,投入指标中水足迹的冗余率下降了46.44%,劳动力冗余率下降了38.38%,资本存量冗余率下降了39.52%。然而,水资源绿色效率中社会发展指数的不足率却很高,远远超过了

2018年5月

表4 水资源利用效率投入和产出的优化结果

Table 4 Input and output optimization of Water resources utilization efficiency

省份	投入冗余率/ 绿色% / 环境%			非期望产出冗余率/ 绿色% / 环境%		期望产出不足率/ 绿色% / 环境%		水资源效率/ 绿色/环境
	水足迹	劳动力	资本存量	灰水足迹	GDP	SDI		
北京	-0.43/-22.53	-2.47/-9.38	-1.36/-5.88	0.00/-3.54	0.00/0.00	3.40/-	0.978/0.929	
天津	-3.20/-13.44	-10.45/-23.01	-0.52/-5.11	-2.81/-45.91	0.00/0.00	30.21/-	0.872/0.707	
河北	-57.32/-84.83	-36.22/-59.49	-6.23/-4.03	0.00/-79.76	0.00/0.00	1026.12/-	0.151/0.374	
山西	-34.79/-75.24	-44.41/-58.98	-7.71/-8.95	0.00/-74.64	0.00/0.00	212.91/-	0.411/0.416	
内蒙古	-60.79/-69.79	-16.44/-37.08	-11.79/-14.18	0.00/-73.91	0.00/0.00	409.13/-	0.373/0.455	
辽宁	-38.40/-53.48	-11.45/-24.41	-2.99/-3.96	0.00/-56.63	0.00/0.00	589.77/-	0.393/0.598	
吉林	-59.95/-80.65	-27.64/-50.70	-12.02/-14.49	0.00/-84.53	0.00/0.00	514.06/-	0.246/0.367	
黑龙江	-59.79/-81.63	-13.00/-48.24	-3.55/-2.62	0.00/-80.87	0.00/0.00	739.56/-	0.215/0.395	
上海	0.00/0.00	0.00/0.00	0.00/0.00	0.00/0.00	0.00/0.00	0.00/-	1.000/1.000	
江苏	-28.51/-47.56	-16.74/-30.01	-0.73/-1.12	0.00/-44.54	0.00/0.00	939.32/-	0.239/0.615	
浙江	-5.49/-38.68	-29.90/-33.69	-1.13/-1.45	0.00/-37.71	0.00/0.00	294.52/-	0.534/0.713	
安徽	-53.59/-85.36	-52.31/-64.46	0.00/-1.58	0.00/-66.77	0.00/0.00	389.31/-	0.288/0.404	
福建	-28.84/-61.30	-28.14/-40.69	-0.36/-0.81	0.00/-51.21	0.00/0.00	237.22/-	0.469/0.561	
江西	-63.60/-90.94	-61.00/-73.42	-7.23/-13.95	0.00/-83.72	0.00/0.00	333.78/-	0.267/0.307	
山东	-31.75/-64.73	-25.55/-42.30	-0.66/-1.14	0.00/-60.07	0.00/0.00	1688.26/-	0.123/0.511	
河南	-60.32/-91.75	-58.22/-71.78	-11.93/-18.90	0.00/-84.00	0.00/0.00	1505.42/-	0.095/0.302	
湖北	-36.09/-80.52	-38.90/-63.26	-3.43/-1.21	0.00/-78.00	0.00/0.00	1027.81/-	0.167/0.390	
湖南	-53.28/-87.27	-51.87/-67.57	-2.50/-9.25	0.00/-81.69	0.00/0.00	900.89/-	0.162/0.345	
广东	0.00/0.00	0.00/0.00	0.00/0.00	0.00/0.00	0.00/0.00	0.00/-	1.000/1.000	
广西	-58.49/-82.45	-53.41/-65.05	-4.17/-10.61	-1.40/-84.47	0.00/0.00	519.17/-	0.228/0.351	
海南	0.00/-76.09	0.00/-47.30	0.00/-1.98	0.00/-76.43	0.00/0.00	0.00/-	1.000/0.447	
重庆	-39.19/-67.99	-33.87/-50.23	0.00/0.00	0.00/-64.80	0.00/0.00	142.55/-	0.517/0.472	
四川	-4.03/-12.47	-2.73/-8.44	0.00/0.00	-4.04/-14.23	0.00/0.00	3.81/-	0.965/0.896	
贵州	-64.90/-97.33	-71.07/-79.57	-24.84/-30.77	-5.98/-88.68	0.00/0.00	93.97/-	0.352/0.248	
云南	-60.13/-93.51	-65.58/-76.12	-11.60/-23.23	0.00/-87.45	0.00/0.00	358.32/-	0.253/0.278	
西藏	0.00/-80.74	0.00/-57.83	0.00/-23.93	0.00/-84.11	0.00/0.00	0.00/-	1.000/0.376	
陕西	-54.67/-82.25	-57.70/-72.67	-17.37/-14.13	0.00/-86.73	0.00/0.00	337.55/-	0.266/0.314	
甘肃	-54.55/-85.10	-60.67/-72.11	-2.23/-8.82	-3.42/-79.21	0.00/0.00	80.57/-	0.491/0.358	
青海	-21.59/-92.59	-36.33/-76.62	-28.83/-31.60	-8.49/-96.19	0.00/0.00	0.00/-	0.693/0.249	
宁夏	-6.81/-93.05	-5.63/-79.26	-7.26/-43.44	0.00/-94.31	4.14/0.00	0.00/-	0.924/0.201	
新疆	-75.65/-90.68	-45.18/-69.17	-26.77/-28.94	0.00/-93.01	0.00/0.00	258.44/-	0.276/0.254	

注:期望产出不足率中的环境效率没有SDI指标,故此项无数据。

其他投入产出指标的冗余率,这也是造成中国水资源绿色效率不升反降的原因。究其根源,主要是因为改革开放以来,中国的经济发展速度始终保持着高速增长,经济水平有了很大提升,人民生活也有了很大改善。然而,伴随着经济的增长,教育、医疗、卫生、环境等一系列的社会矛盾和环境问题也日益显露,社会发展速度与经济增速不匹配,造成民生问题与经济增长严重脱节,从而致使社会发展

指数对中国当前水资源绿色效率的促进作用不强。

(4)从局部来看,社会发展指数加入后,水资源绿色效率上升的地区有北京、天津、海南、重庆、四川、贵州、西藏、甘肃、青海、宁夏和新疆,这些地区的社会发展指数不足率远远小于其他地区,从而使其水资源绿色效率高于环境效率。从空间分布看,这些地区大都处于西部经济欠发达地区,尤其是宁夏、青海和西藏,经济水平落后,但水资源绿色效率

远高于其他发达地区,这说明经济发展水平不是影响水资源绿色效率高低的决定性因素,相反,社会发展成果能否在区域之间合理分配,广大劳动人民是否能够切实享受到社会主义发展的果实,对水资源绿色效率有重大影响。这也表明中国的社会发展不应只考虑经济的发展,还要重视社会发展指数的提高,从而实现经济-社会-环境的协调发展,这也是可持续发展战略的基本要求。

4.3 水资源绿色效率全要素生产率及其分解的动态演变分析

为了进一步探究水资源绿色效率的驱动机制,本文基于Malmquist生产率指数模型测度了中国水资源绿色效率的全要素生产率及其分解指数,得到了全国31个地区分年和分省的全要素生产率及其分解指数的计算结果,并绘制了中国水资源绿色效率全要素生产率变化及其分解指数的分年、分省均值图(图3、图4),具体分析如下。

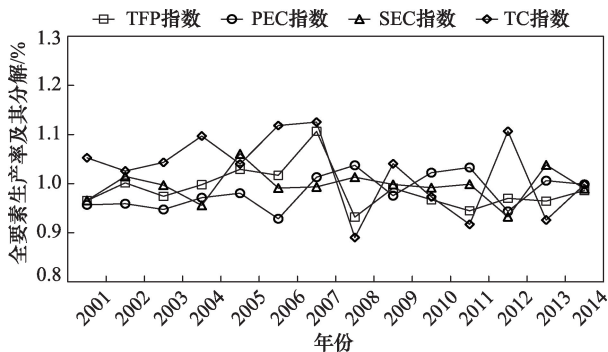


图3 水资源绿色效率TFP及其分解指数变化趋势

Figure 3 Green water efficiency TFP and decomposition index change trend

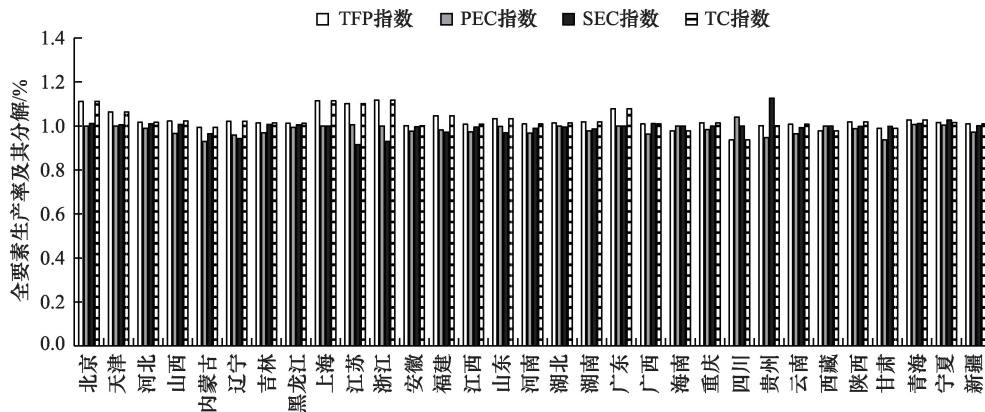


图4 水资源绿色效率TFP及其分解指数均值

Figure 4 Green efficiency of water resources TFP and decomposition index mean

4.3.1 全要素生产率及其分解的总体特征分析

(1)就全要素生产率变化指数而言,研究期内其平均值为0.989,增幅为-1.1%,跨期动态变化差异较小,表明中国水资源绿色效率整体呈下降趋势,且年际间表现为明显的波动状态。以2008年为界限,2008年以前表现为波动下降,2008年之后表现为波动上升,说明自2000年以来,中国水资源绿色效率低下的现状并未得到明显改善。

(2)就纯技术效率和规模效率变化指数而言,2000—2014年纯技术效率变化指数平均值为0.984,增幅为-1.6%,规模效率变化指数平均值为0.996,增幅为-0.4%,表明纯技术效率、规模效率在研究期内略有倒退,这成为制约中国水资源绿色效率提升的主导因素。

(3)就技术进步变化指数而言,15年间平均值为1.025,增长幅度(2.5%)高于全要素生产率指数,说明近15年来,中国的科技水平不断得到提高,日益严峻的水资源危机促使全国各地区在水资源利用过程中更加注重先进技术的投入。

(4)综合来看,技术变化的正效应未能掩盖纯技术效率变化和规模效率变化的负效应,从而导致中国水资源绿色效率呈现下降的特点,表明中国水资源绿色效率全要素生产率的提升主要依靠技术变化,而纯技术效率和规模效率的变化在很大程度上制约着中国水资源绿色效率的提升。这说明中国水资源绿色效率的提高得益于科学技术的进步,而政府的调控措施,管理手段以及水资源利用总体规模的扩大则阻碍了水资源绿色效率的提高,有待于优化改善。

2018年5月

4.3.2 全要素生产率及其分解的空间格局分析

由于版面限制,本文仅选取2000—2001年,2006—2007年和2013—2014年3个时间截面的数据(表5),以说明中国水资源绿色效率全要素生产率变化及其分解指数的空间格局变化特征,通过分析可知:

(1)全要素生产率变化指数。表5显示,2000—2001年间全国31个省(市、自治区)有14个地区全要素生产率指数呈上升趋势,其中增幅较大的地区

有天津、上海、海南,增幅在10%以上。四川全要素生产率变化指数不变,其余地区均呈下降趋势;2006—2007年间,除内蒙古、吉林、四川、西藏、青海和宁夏外,其他地区均呈上升趋势,且增长幅度较大;到了研究末期(2013—2014年),北京、天津等12个地区呈上升趋势,上海、福建和湖北保持稳定,其他16个地区则呈下降态势。结合各地区全要素生产率变化指数平均值来看(图4),在2000—2014年间,有9个地区全要素生产率变化指数呈上升趋势,

表5 中国水资源绿色效率全要素生产率变化及其分解指数

Table 5 The TFP change and its decomposition index of water resources green efficiency in China

地区	全要素生产率变化指数/纯技术效率变化指数/规模效率变化指数/技术进步变化指数		
	2000—2001年	2006—2007年	2013—2014年
北京	1.051/1.000/1.000/1.051	1.167/1.000/1.000/1.167	1.064/1.000/1.000/1.064
天津	1.243/1.000/1.000/1.243	1.253/1.000/1.121/1.117	1.063/1.000/1.000/1.063
河北	1.014/0.987/0.908/1.131	1.241/1.050/1.085/1.089	1.028/0.994/1.026/1.009
山西	1.053/1.033/0.982/1.038	1.169/1.069/1.045/1.045	1.037/0.991/1.028/1.018
内蒙古	0.741/1.000/1.000/0.741	0.962/0.963/1.001/0.998	0.983/1.040/0.957/0.988
辽宁	0.475/1.000/1.000/0.475	1.043/1.026/0.842/1.208	1.049/0.995/1.045/1.009
吉林	0.898/0.921/1.008/0.967	0.999/1.022/0.981/0.996	1.057/1.039/1.017/1.000
黑龙江	1.029/1.010/0.921/1.106	1.046/1.038/0.952/1.059	0.980/0.991/0.997/0.992
上海	1.144/1.000/1.000/1.144	1.486/1.000/1.000/1.486	1.000/1.000/1.000/1.000
江苏	0.945/0.788/0.785/1.526	1.132/1.007/0.773/1.455	1.037/1.000/1.018/1.019
浙江	1.033/1.000/1.000/1.033	1.253/1.000/0.929/1.349	0.937/1.000/0.872/1.075
安徽	0.969/1.053/1.000/0.920	1.118/1.043/0.932/1.150	0.900/0.991/0.917/0.990
福建	1.050/1.000/0.963/1.090	1.219/1.090/0.877/1.274	1.000/1.031/0.953/1.018
江西	1.009/0.999/0.960/1.052	1.032/1.009/1.034/0.989	0.991/1.009/0.979/1.003
山东	0.943/0.895/0.851/1.237	1.171/1.008/0.862/1.348	1.065/1.045/1.009/1.010
河南	0.988/0.984/0.929/1.081	1.090/0.961/1.114/1.019	1.016/1.002/0.999/1.015
湖北	1.025/0.989/0.923/1.123	1.104/1.042/0.970/1.093	1.000/1.001/0.968/1.032
湖南	0.956/0.907/0.922/1.143	1.108/1.037/1.067/1.002	0.960/0.980/0.969/1.011
广东	0.924/1.000/1.000/0.924	1.523/1.000/1.000/1.523	0.713/1.000/1.000/0.713
广西	1.008/1.009/1.064/0.938	1.062/1.004/0.970/1.091	0.998/1.012/0.981/1.005
海南	1.174/1.000/1.000/1.174	1.240/1.000/1.000/1.240	0.987/1.000/1.000/0.987
重庆	0.968/0.902/0.976/1.099	1.145/1.067/1.015/1.057	0.931/1.027/0.997/0.909
四川	1.000/1.000/1.000/1.000	0.628/1.000/1.000/0.628	0.974/1.000/1.000/0.974
贵州	0.967/1.000/0.958/1.008	1.141/1.128/1.055/0.959	0.906/0.932/0.979/0.992
云南	1.001/0.974/0.970/1.059	1.076/1.042/1.052/0.981	0.950/0.959/0.992/0.998
西藏	0.983/1.000/1.000/0.983	0.868/1.000/1.000/0.868	1.009/1.000/1.000/1.009
陕西	1.022/1.014/0.947/1.064	1.082/1.044/1.075/0.964	1.036/1.036/0.993/1.007
甘肃	0.522/0.700/0.959/0.776	1.035/1.046/1.006/0.983	0.947/0.961/0.991/0.995
青海	0.937/0.754/0.943/1.318	0.956/0.698/1.471/0.931	0.978/0.949/1.015/1.015
宁夏	0.866/0.797/0.969/1.123	0.916/1.000/0.492/1.861	1.034/1.000/1.000/1.034
新疆	0.990/0.940/0.994/1.059	1.032/1.011/1.070/0.953	0.928/0.968/0.973/0.985

增幅较大的有北京(1.101)、天津(1.062)、上海(1.114)、广东(1.079),这些地区大多处于东南沿海地区,经济发达,高等学府云集,人口素质高,是中国高素质人才的集聚地,这对水资源绿色效率全要素生产率的提高具有极大的促进作用。

(2)纯技术效率变化指数。表5显示,2000—2001年间全国31个省(市、自治区)中,纯技术效率变化指数呈上升趋势的仅有山西、黑龙江、安徽、广西、陕西5个地区,且增幅较小,北京、天津等12个地区保持稳定,其他地区均呈缓慢下降的趋势;2006—2007年间,处于上升趋势的地区达到了19个,仅内蒙古、河南、青海3个地区处于下降态势;2013—2014年间,上升的地区下降到了10个,北京、天津等10个地区为1,反映出这些地区纯技术效率在研究期内并未发生明显变化。就各地区纯技术效率变化指数均值而言(图4),仅江苏(1.006)、四川(1.040)、青海(1.007)、宁夏(1.004)4个地区呈微弱上升趋势,对全要素生产率的促进作用不大。北京、天津、上海、浙江、广东、海南、西藏7地区保持稳定,其余地区则呈现下降的特点。

(3)规模效率变化指数。表5显示,研究初期(2000—2001年)全国31个地区中,仅吉林(1.008)、广西(1.064)2省呈上升趋势,北京、天津等11个地区保持不变,其余地区呈不同程度下降的特点;2006—2007年间,规模效率变化指数上升的地区增长到了14个,下降的地区降低到了11个,其余6个地区保持稳定;到了研究末期(2013—2014年),河北、山西、辽宁、吉林、江苏、山东和青海7个地区呈上升态势,北京、天津、上海、广东、海南、四川、西藏和宁夏8地区保持稳定,其余地区则缓慢下降。就各地区规模效率变化指数平均值而言(图4),北京(1.011)、天津(1.006)、河北(1.009)、山西(1.007)、吉林(1.007)、黑龙江(1.005)、广西(1.010)、贵州(1.127)、青海(1.011)、宁夏(1.027)10个地区呈上升态势,但是除了北京、贵州、青海和宁夏对全要素生产率有些许促进作用外,其他地区的规模效率变化速度均小于1%,对TFP的贡献率较小。这些地区主要分布在中西部经济不发达地带,这说明中国东部发达地区水资源利用情况已经处于规模不经济状态,而且规模优势在中西部地区也呈现减弱的趋势。

势。综合来看,纯技术效率变化和规模效率变化趋势基本一致,这也验证了图4的结果。

(4)技术进步变化指数。表5显示,2000—2001年间,内蒙古、辽宁、吉林、安徽、广东、广西、西藏和甘肃8省区呈下降趋势,四川保持稳定,其余地区呈不同程度上升状态;2006—2007年间,四川、西藏等11个地区呈下降态势,其余地区均呈上升态势,尤其是上海、江苏、浙江、山东、广东、宁夏等地区,上升幅度较大,达到30%以上;到了研究末期(2013—2014年),技术进步变化指数增长速度整体放缓,北京、天津等18个地区保持上升,吉林和上海保持不变,其余地区呈下降态势。就各省区技术进步变化指数均值而言(图4),除内蒙古、海南、四川、西藏、甘肃下降外,其他地区技术进步变化指数均呈现上升趋势,其中北京(1.112)、天津(1.063)、上海(1.114)、江苏(1.02)、浙江(1.118)、广东(1.079)增幅较大,这些地区主要分布在东南沿海发达地区,与TFP的分布呈现出极大的协同性,说明中国进入21世纪以来,大多数地区的科学技术水平都有了很大的提高,尤其是东部发达地区,技术变化为水资源绿色效率的增长做出了极大的贡献。

综合来看,全国范围内水资源绿色效率全要素生产率变化指数呈增长态势的有9个地区,而技术进步变化指数增长的地区达26个,这说明个别地区的纯技术效率和规模效率降低致使当地的水资源绿色效率全要素生产率出现负增长现象。就各地区而言,青海和宁夏2个地区的全要素生产率的提高得益于纯技术效率变化、规模效率变化和技术变化的共同作用,四川完全取决于管理水平的提高,贵州主要依赖生产规模的扩大,而中、东部广大地区全要素生产率的提高则主要得益于技术变化因素的驱动。

5 结论与讨论

5.1 结论

通过本文的研究,可以得到以下结论:

(1)在时间序列变化方面,中国水资源绿色效率整体上呈现出在波动中缓慢下降的特点,发展水平依然很低,还有很大的提升空间。在空间格局分布方面,中国水资源绿色效率地区差异显著,在空间分布上没有明显规律,即水资源绿色效率的高低

2018年5月

与地区经济发展水平没有明显的正相关关系。

(2)社会发展指数对水资源绿色效率的高低有重大影响,社会发展指数能够明显降低其他投入产出的冗余率和不足率,但由于社会发展指数本身的不足率过高,从而造成研究期内水资源绿色效率下降。

(3)中国水资源绿色效率技术进步变化指数表现为在波动中上升的趋势,2000—2008年表现为波动下降,2008—2014年表现为波动上升,而全要素生产率、纯技术效率和规模效率变化指数则呈现出在波动中缓慢下降的特点。

(4)总体来看,中国水资源绿色效率的提高得益于科学技术的进步;省际间,西部地区主要依靠管理水平的提高和生产规模的扩大,如青海和宁夏2个地区的全要素生产率的提高得益于三者的共同作用,四川完全取决于管理水平的提高,贵州主要依赖生产规模的扩大,而中东部广大地区则主要依赖于技术变化因素的驱动。

5.2 讨论

本文主要的贡献是将社会维度指标纳入到水资源利用效率评价体系中,从而将传统的水资源经济效率与环境效率评价拓展到水资源绿色效率评价,但应该指出的是,社会维度本身就是一个很复杂的体系,本文所选取的社会维度指标主要侧重于人口控制、城市化水平、科教投入、医疗水平、知识水平、生活水平和健康水平,但对体现政府管理和决策水平的指标涉及较少,这有待于进一步发展和完善。

参考文献(References):

- [1] 陈家琦,王浩,杨小柳.水资源学[M].北京:科学出版社,2013. [Chen J Q, Wang H, Yang X L. Water Resources Science [M]. Beijing: Science Press, 2013.]
- [2] 沈满洪,陈庆能.水资源经济学[M].北京:中国环境科学出版社,2008. [Shen M H, Chen Q. Water Resources Economics [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008.]
- [3] 姜蓓蕾,耿雷华,刘恒,等.基于最严格水资源管理制度的水资源计量与统计管理模式浅析[J].中国农村水利水电,2014,(4): 87-89. [Jiang B L, Geng L H, Liu H, et al. Research on the management mode of water resources measurement and statistics in China [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014, (4): 87-89.]
- [4] 左其享,胡德胜,窦明,等.基于人水和谐理念的最严格水资源管理制度研究框架及核心体系[J].资源科学,2014,36(5): 906-912. [Zuo Q T, Hu D S, Dou M, et al. Framework and core system of the most stringent water resource management system based on the concept of human-water harmony [J]. Resources Science, 2014, 36(5): 906-912.]
- [5] 窦明,王艳艳,李胚.最严格水资源管理制度下的水权理论框架探析[J].中国人口·资源与环境,2014,24(12): 132-137. [Dou M, Wang Y Y, Li P. Discussion on theoretical framework of water rights under the most strict water resources management system [J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(12): 132-137.]
- [6] 胡鞍钢,周绍杰.绿色发展:功能界定、机制分析与发展战略[J].中国人口·资源与环境,2014,24(1): 14-20. [Hu A G, Zhou S J. Green development: Functional definition, mechanism analysis and development strategy [J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(1): 14-20.]
- [7] 孙爱军,董增川,王德智.基于时序的工业用水效率测算与耗水量预测[J].中国矿业大学学报,2007,36(4): 547-553. [Sun A J, Dong Z C, Wang D Z. Prediction of technical efficiency and water consumption of industrial water in China based on time series [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(4): 547-553.]
- [8] 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 J P, Ma J F, Wang H M, et al. Agricultural water use efficiency and technical progress in China based on agricultural panel data [J]. Resources Science, 2014, 36(9): 1765-1772.]
- [9] 买亚宗,孙福丽,石磊,等.基于DEA的中国工业水资源利用效率评价研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(1): 42-47. [Mai Y Z, Sun F L, Shi L, et al. Evaluation of China's industrial water efficiency based on DEA model [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(1): 42-47.]
- [10] 邱琳,田景环,段春青,等.数据包络分析在城市供水效率评价中的应用[J].人民黄河,2005,27(7): 33-39. [Qiu L, Tian J H, Duan C Q, et al. Application of data envelopment analysis in urban water supply efficiency evaluation [J]. Yellow River, 2005, 27(7): 33-39.]
- [11] 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 C Z, Liu Y Y. 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.]
- [12] 孙才志,李红新.辽宁省水资源利用相对效率的时空分异[J].资源科学,2008,30(10): 1442-1448. [Sun C Z, Li H X. Spatio-temporal differences in relative efficiency of water resource utilization in Liaoning Province [J]. Resources Science, 2008, 30(10): 1442-1448.]
- [13] 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 C Z, Zhao L S, Zou W. 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.]
- [14] 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 H L, Huang D C, Zhang J G. Water resource utility efficiency and its influencing factors considering undesirable goods[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(10): 35–42.]
- [15] 马海良, 黄德春, 张继国, 等. 中国近年来水资源利用效率的省际差异: 技术进步还是技术效率[J]. 资源科学, 2012, 34(5): 794–801. [Ma H L, Huang D C, Zhang J G, *et al.* The provincial differences of China's water use efficiency in recent years: Technological progress or technical efficiency [J]. *Resources Science*, 2012, 34(5): 794–801.]
- [16] 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 S X, Cheng J H, Wu Q S. Regional difference of water resources utilization efficiency in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2008, 18(3): 215–220.]
- [17] Kaneko S, Tanaka K, Toyota T. Water efficiency of agricultural production in China: regional comparison from 1999 to 2002 [J]. *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology*, 2004, 3(3–4): 213–251.
- [18] 廖虎昌, 董毅明. 基于DEA和Malmquist指数的西部12省水资源利用效率研究[J]. 资源科学, 2011, 33(2): 273–279. [Liao H C, Dong Y M. Utilization efficiency of water resources in 12 western provinces of China based on the DEA and Malmquist TFP index [J]. *Resources Science*, 2011, 33(2): 273–279.]
- [19] 董毅明, 廖虎昌. 基于DEA的西部省会城市水资源利用效率研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4): 134–139. [Dong Y M, Liao H C. Utilization efficiency of water resource in west capital cities based on DEA [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(4): 134–139.]
- [20] 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 C Z, Xie W, Jiang N, *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.]
- [21] 赵晨, 王远, 谷学明, 等. 基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1636–1644. [Zhao C, Wang Y, Gu X M, *et al.* Water use efficiency of Jiangsu Province based on the data envelopment analysis approach [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1636–1644.]
- [22] 马建堂. 2012中国绿色发展指数报告[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2012. [Ma J T. The 2012 China Green Development Index Report [M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2012.]
- [23] Charnes A, Cooper W, Roodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429–444.
- [24] Tone K. Dealing with Undesirable Outputs in DEA: A Slacks-Based Measure (SBM) Approach [R]. GRIPS Research Report Series, 2003–2005.
- [25] Fare R, Grosskopf S, Lindergren B, *et al.* Productivity changes in Swedish Pharmacies 1980–1989: a nonparametric Malmquist approach[J]. *Journal of Productivity Analysis*, 1992, 3(1): 85–101.
- [26] 朱庆芳. 衡量城市经济社会发展的新指标体系[J]. 中国经贸导刊, 2001, (13): 10–10. [Zhu Q F. A new index system for measuring urban economic and social development [J]. *Chinese Economic Herald*, 2001, (13): 10–10.]
- [27] 孙才志, 韩琴, 郑德凤. 中国省际灰水足迹测度及荷载系数的空间关联分析[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 86–97. [Sun C Z, Han Q, Zheng D F. The spatial correlation analysis of grey water footprint and load factor in Chinese provinces [J]. *Journal of Ecology*, 2016, 36(1): 86–97.]
- [28] 韩琴, 孙才志, 邹玮. 1998–2012年中国省际灰水足迹效率测度与驱动模式分析[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1179–1191. [Han Q, Sun C Z, Zou W. Grey water footprint efficiency measure and driving pattern analysis on provincial scale in China from 1998 to 2012 [J]. *Resources Science*, 2016, 38(6): 1179–1191.]
- [29] 中国国家统计局. 中国统计年鉴(2001–2015)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001–2015. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Statistics Yearbook of China [M]. Beijing: China Statistics Publishing House, 2001–2015.]
- [30] 中国国家统计局. 中国环境统计年鉴(2001–2015)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001–2015. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistics Yearbook on Environment [M]. Beijing: China Statistics Publishing House, 2001–2015.]
- [31] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报(2000–2014)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000–2014. [Water Resources Department of the People's Republic of China. China Water Resources Bulletin [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2000–2014.]
- [32] 中国国家统计局. 新中国六十年统计资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010. [National Bureau of Statistics. Compilation of Statistical Data for New China for 60 Years [M]. Beijing: China Statistics Publishing House, 2010.]
- [33] 黄晶, 宋振伟, 陈阜. 北京市水足迹及农业用水结构变化特征[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6546–6554. [Huang J, Song Z W, Chen F. Characteristics of water footprint and agricultural water structure in Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6546–6554.]

- [34] 王新华, 徐忠民, 李应海. 甘肃省 2003 年的水足迹评价[J]. 自然资源学报, 2005, 20(6): 909–915. [Wang X H, Xu Z M, Li Y H. A rough estimate of water footprint of Gansu Province in 2003 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(6): 909–915.]
- [35] 单豪杰. 中国资本存量K的再估算: 1952~2006年[J]. 数量经济技术经济研究, 2008, (10): 17–31. [Shan H J. Reestimating the Capital Stock of China: 1952 to 2006 [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2008, (10): 17–31.]
- [36] 朱喜安, 魏国栋. 熵值法中无量纲化方法优良标准的探讨[J]. 统计与决策, 2015, (2): 11–15. [Zhu X A, Wei G D. Discussion on the standard of non-dimensional method in entropy method [J]. *Statistics & Decision*, 2015, (2): 11–15.]
- [37] 卢丽文, 宋德勇, 李小帆. 长江经济带城市发展绿色效率研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(6): 35–42. [Lu L W, Song D Y, Li X F. Green efficiency of urban development in the Yangtze River Economic Belt [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(6): 35–42.]
- [38] 潘丹, 应瑞瑶. 中国农业生态效率评价方法与实证—基于非期望产出的SBM模型分析[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3837–3845. [Pan D, Ying R Y. Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (12): 3837–3845.]

Green efficiency changes for water resources in China based on SBM–Malmquist model

SUN Caizhi^{1, 2}, MA Qifei², ZHAO Liangshi¹

(1. Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development of Liaoning Normal University, Dalian 116029, China;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: We can learn about practical water efficiency and provide a reference for improving the green efficiency of water resources by studying green efficiency and the effect of indexes for social progress. Here, we measured green efficiency of water resources in 31 provinces including cities and municipalities of China from 2000 to 2014 and analyzed temporal and spatial changes and influences based on SBM modeling with undesirable output and Malmquist index modeling with total factor productivity. In general, the green efficiency of water resources in China is characterized by a slow descend in volatility. The green efficiency in China is still relatively low and there is a lot of room for improvement. There are significant differences in the green efficiency of water resources across China, and the relationship between the green efficiency of water resources and level of regional economic development is weak. However, the social development index has a significant impact on green efficiency of water resources. There is a rising trend for the technology change index, while total factor productivity and technical efficiency declined over the study period. The technological change index has a significant effect on the improvement of the green efficiency of water resources in China, and a few areas are affected by technological efficiency and technological change.

Key words: SBM model; social development index; green efficiency of water utilization; TFP change; Decomposition index