

# 中国东、中、西三大地区水资源绿色效率时空演变特征与收敛性分析

孙才志<sup>1,2</sup>, 马奇飞<sup>2</sup>, 赵良仕<sup>1</sup>

(1. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 辽宁 大连 116029;

2. 辽宁师范大学城市与环境学院, 辽宁 大连 116029)

**摘要:**本文基于SBM模型,通过构建共同前沿和群组前沿函数,分析了中国东、中、西部三大地区水资源绿色效率的时空差异及空间重心转移规律,并对群组前沿下水资源绿色效率TFP进行了收敛性检验。研究结论为:①东部地区技术落差比率高达1,而中西部地区仅为0.404和0.551,表明了中国东部地区水资源利用技术更接近共同前沿,而中西部地区水资源利用技术还有很大的提升空间,同时也证实了对水资源绿色效率进行划区研究的必要性;②群组前沿下水资源绿色效率更具合理性,更能真实地反应水资源绿色效率的变化情况;③从水资源绿色效率的空间重心转移路径可以看出,研究前期东部地区水资源绿色效率不断提升,而中西部地区则有所下降,研究后期在东西和南北2个方向上逐渐趋于失衡;④全国整体及中、西部地区水资源绿色效率TFP存在着 $\sigma$ 收敛,且全国及东、中、西部地区均存在显著的绝对 $\beta$ 收敛和条件 $\beta$ 收敛,说明各地区水资源绿色效率的TFP差异会随着时间的推移收敛到各自的稳定状态。

**关键词:**SBM模型;群组前沿;水资源绿色效率;重心—标准差椭圆;收敛性;中国

## 1 引言

水是地球上各种生物赖以生存的物质基础,是人类生产和生活不可或缺的重要自然资源和战略资源。相关研究表明,中国是一个缺水的国家,人均水资源量仅为世界平均水平的1/4(陈家琦等, 2013),并且随着经济和社会的加速发展,水资源浪费以及污染问题日益突出(鲍超等, 2017),水资源短缺与用水效率低下的双重压力已成为制约中国社会发展的的重要因素之一。为解决这一问题,改革开放以来国家制定了一系列有关节水、用水、治水的政策及法律法规(龚洪波, 2015),国务院更在2012年发布了《关于实行最严格水资源管理制度的意见》。《意见》划定了用水总量、用水效率和水功能区限制纳污“三条红线”(左其亭等, 2014),其中,提高

用水效率是从根本上解决水资源供需矛盾的关键所在。

水效率研究是全球各国密切关注的焦点问题,国内外专家学者运用不同的方法,从不同角度对水资源在工业、农业、城市生活等各个方面的利用情况进行了深入研究,并对其驱动因素作了相关探索(邱林等, 2005; 孙爱军等, 2007; 李世祥等, 2008; 廖虎昌等, 2011; 买亚宗等, 2014; 佟金萍等, 2014)。通过对文献进行梳理发现,早期一些学者(李志敏等, 2012)在对水资源利用效率进行研究时,将GDP作为唯一产出,这显然不符合社会发展的实际过程。因此,后来一些学者(孙才志, 刘玉玉, 2009; 马海良等, 2012, 2017; 孙才志, 赵良仕等, 2014)在水资源利用效率评价系统中纳入污染物作为非期望产出,得到广大学者的一致认同。上述研究丰富了

收稿日期:2017-11-11;修订日期:2018-01-04。

基金项目:国家社会科学重点基金项目(16AJY009) [Foundation: Key Project of National Social Science Foundation of China, No.16AJY009]。

作者简介:孙才志(1970-),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地理等方面研究,E-mail:sun-caizhi@lnnu.edu.cn。

引用格式:孙才志, 马奇飞, 赵良仕. 2018. 中国东、中、西三大地区水资源绿色效率时空演变特征与收敛性分析[J]. 地理科学进展, 37(7): 901-911. [Sun C Z, Ma Q F, Zhao L S. 2018. Temporal and spatial evolution of green efficiency of water resources in China and its convergence analysis[J]. Progress in Geography, 37(7): 901-911.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.07.004

水资源利用评价体系,为水资源的高效利用提供了重要的理论支撑,也为政府制定相关政策提供了合理依据,但依然存在以下不足:①将中国31个地区作为整体研究对象,忽视了区域差异对水资源利用效率的影响,水资源、劳动力、资本要素禀赋的不同可能导致各地区具有不同的生产技术前沿(范斐, 2012)。因此,采用总体样本会对水资源利用效率测度造成误差。②水资源利用效率研究的最终目的是提高人类福祉,增加人民幸福感,这也是绿色发展理念的根本要求,而上述研究大多没有考虑水资源利用所带来的社会效益。因此,把社会发展指数纳入评价系统以体现“经济—社会—环境”系统协调发展非常必要。

鉴于此,本文在前人研究的基础上,通过构建共同前沿和群组前沿函数,并通过构建能反映社会发展状况的指标体系,将其作为期望产出融入到水资源利用效率测度体系中,对中国水资源绿色效率的时空差异及空间重心转移规律进行研究,并对群组前沿下水资源绿色效率TFP指数变化进行收敛性检验,以便摸清各地区水资源绿色效率的时空变化特征,从而更加真实地反映各地区水资源的利用情况。

## 2 相关概念界定

### 2.1 水资源绿色效率的概念和内涵

孙才志等(2017)在沈满洪对水资源利用效率定义的基础上,结合绿色发展理念,将水资源绿色效率定义为水资源等生产要素投入和带来的经济、社会、生态环境产出的比率,其内涵主要包括经济内涵、社会内涵和生态环境内涵3个方面,体现了绿色发展是“经济—社会—环境”系统协调发展的本质(胡鞍钢, 2014)。

### 2.2 三大效率之间的区别与联系

在全要素水资源利用效率测度方法下,本文根据产出的不同,将水资源利用效率分为3类,分别是水资源经济效率、水资源环境效率和水资源绿色效

率(表1)。由表1可知,在投入不变的情况下,只考虑GDP产出的为水资源经济效率;在此基础上,将灰水足迹作为非期望产出以体现环境约束,从而发展为水资源环境效率;在水资源环境效率评价框架下,将社会发展指数作为期望产出纳入评价系统,以体现人文关怀,我们将之称为水资源绿色效率。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 方法与数据

### 3.1 SBM-DEA模型

数据包络分析方法(Data Envelopment Analysis, DEA)是利用线性规划方法将决策单元(DMU)投影到前沿面上的原理,对多项投入、多项产出的具有可比性的决策单元进行相对有效性评价的一种数量分析方法,是全要素水资源利用效率评价的常用方法,能够测度水资源的配置效率,即生产中水资源与其他投入要素一起参与生产的有效程度。相对于Charnes等(1978)提出的传统数据包络分析(DEA)方法而言,Tone(2001)提出的非径向、非角度的SBM模型,在测度多投入、多产出情况下的水资源利用效率方面有独特优势,不仅能够将非期望产出考虑其中,而且能够很好地解决松弛变量对测度值的影响(任宇飞等, 2017),广泛应用于相关研究中。因此,本文采用SBM模型对水资源绿色效率进行测度,计算公式详见孙才志等(2017)。

### 3.2 共同前沿与群组前沿

共同前沿与群组前沿最早由 Battese 等(2004)提出,主要是为了解决由于区域差异性而导致的工业技术效率的偏差问题,经过后人的丰富与发展,其内容在不同领域得到广泛应用。共同前沿是指所有决策单元(DMU)的潜在技术水平,群组前沿指每组决策单元(DMU)的实际技术水平,二者的主要区别在于所参照的技术集合不同(李静等, 2014)。本文根据国家统计局分类标准(周虹辰, 2014),将中国划分为东中西部三大群组,分别计算各地区不同

表1 水资源利用效率类型界定

Tab.1 Definition of utilization efficiency type of water resources

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

前沿下的水资源绿色效率,以期能真实地反映中国水资源绿色效率的变化情况<sup>①</sup>。计算公式参阅李静等(2014)。

3.3 技术落差比率

在本文中,技术落差比率(TGR)指的是共同前沿下水资源绿色效率值相对于群组前沿下水资源绿色效率值的比率(吴凡等, 2016),取值范围[0,1]。TGR越大,表示群组的生产水平距离共同生产技术水平越近;相反,TGR越小,则表示群组的生产水平距离共同技术生产水平越远。另外,TGR可以用于判断区域划分的必要性与合理性,TGR均值越小,越能说明分组的合理性与必要性;反之,TGR均值越大,越说明分组的不科学性。

3.4 指标选取及数据处理

本文使用的所有数据均来源于《中国统计年鉴》(2001-2015),《中国水资源公报》(2000-2014),《中国环境年鉴》(2001-2015)和《新中国六十年统计资料汇编》。限于数据的可得性,研究范围不包括香港、澳门和台湾地区。具体指标说明如下:

(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,具体计算过程参阅相关文献(王新华等, 2005; 黄晶等, 2010)。

(2) 劳动力。生产过程中实际投入的劳动量,本文用三大产业从业人员来衡量。

(3) 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(2008)的算法,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。

(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, SDI)。本文参照有关研究(朱庆芳, 2001),建立指标体系(表2),限于篇幅,其计算方法参阅孙才志等(2017)。

(6) 灰水足迹。本文取灰水足迹总量作为非期望产出。具体算法请参阅相关文献(赵良仕等, 2014; 韩琴等, 2016; 孙才志等, 2016)。

4 中国水资源绿色效率分析

4.1 共同前沿与群组前沿下水资源绿色效率对比分析

本文利用共同前沿方法从时间序列上分别测算了东、中、西部地区共同前沿和群组前沿下的水资源绿色效率(图1、图2),并计算了水资源绿色效率技术落差比率(表3),用于说明中国水资源绿色效率的实际变化情况。具体分析如下:

由图1、表3可知:在共同前沿下,2000-2014年间水资源绿色效率的均值由高到低依次为东部(0.532)、西部(0.364)和中部(0.300)。其中东部地区水资源绿色效率较高,且变化趋势相对平稳;西部地区水资源绿色效率居中,呈现出缓慢下降的变化趋势;中部地区效率值最小,也表现为缓慢下降的特点。表明中、西部地区水资源利用技术距离共同前沿比东部远,存在不同程度的技术改进空间。在群组前沿下(图2),水资源绿色效率平均值由高到低依次为中部(0.743)、西部(0.662)和东部(0.532)。其中东部地区效率值变化甚微,中、西部效率值有不同程度的提高,这是因为东中西部所在的前沿面不同,东部地区由于接近共同前沿面,因此效率值变化不大,中西部在各自新的前沿面下,会由各自组

表2 社会维度的指标体系  
Tab.2 Index system for social development evaluation

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 $x_1$	人口自然增长率	成本型
	城市化水平 $x_2$	非农业人口比例	效益型
	政府对科教的重视程度 $x_3$	科教事业费占财政支出比例	效益型
	高素质人口比例 $x_4$	大专以上文化程度占总人口比例	效益型
	医疗资源占有情况 $x_5$	每万人口医生数	效益型

① 根据国家统计局《中国统计年鉴》分类标准,将我国划分为东、中、西部三大地区,其中东部包括辽宁、北京、天津、河北、山东、江苏、上海、浙江、福建、广东、广西、海南12个地区;中部包括山西、内蒙古、黑龙江、吉林、安徽、河南、江西、湖北、湖南9个地区;西部包括陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、四川、重庆、云南、贵州、西藏10个地区。



内具有最高效率的决策单元构成新的前沿包络面,因此效率值会有所上升。这也说明了对水资源绿色效率分区考察的必要性。

由表3可知:东部地区技术落差比率平均值为1,表明其达到共同前沿水资源利用技术的100%,这主要是因为东部地区是中国改革开放的先行区,经济发展水平高,更加注重资源的合理配置和对环境的保护,更加注重技术的引进与扩散,从而使东部地区用水技术更加接近共同前沿;然而,中、西部技术落差比率平均值分别为0.404和0.551,远低于东部地区,用水技术仅分别达到共同前沿的40.4%和55.1%;共同前沿下,东、中、西部水资源绿色效率分别存在46.8%、70%、35.6%的效率改善空间;而在群组前沿下,东、中、西部的改善空间则分别为46.8%、25.7%和33.8%,水资源绿色效率明显高于共同前沿下水平。

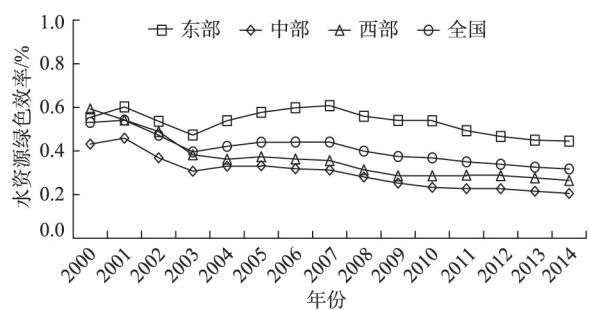


图1 东、中、西部共同前沿下水资源绿色效率  
Fig.1 Green efficiency of water resources in the meta-frontier surface of eastern, central, and western regions

从表3还可以看出,东部地区的北京、天津、上海、广东、海南等地区水资源绿色效率表现较好,2种情况下平均值均大于0.6,为水资源绿色效率相对高效区;东部地区共同前沿与群组前沿下最低的都是河北(0.17),这主要是因为河北在发展过程中过分追求经济效益,而相对忽视了环境和社会效益,致使该地区成为全国环境污染的“重灾区”,从而导致水资源绿色效率低下的现状;中部地区共同前沿和群组前沿下表现最差的都是河南,其绿色效率平均值分别为0.126和0.345,究其原因,不仅是经济发展过程中导致环境破坏,更主要是因为河南是农业大省,人口众多,经济发展水平相对滞后,加之资源配置不尽合理造成较大的浪费,综合多方面因素致使其水资源绿色效率低下;在西部地区,共同前沿和群组前沿下表现最差的都是为云南(0.178),水资源绿色效率分别存在着82.2%和66.8%的改善

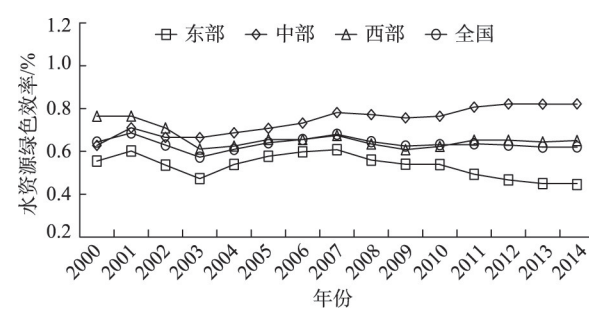


图2 东、中、西部群组前沿下水资源绿色效率  
Fig.2 Green efficiency of water resources in the group-frontier surface of eastern, central, and western regions

表3 中国各省区不同前沿下水资源绿色效率及技术落差比率平均值

Tab. 3 Average values of green efficiency and technology drop ratio of different frontline water resources in provinces of China's mainland

东部	meta	group	TGR	中部	meta	group	TGR	西部	meta	group	TGR
北京	0.955	0.955	1.000	山西	0.426	0.975	0.436	重庆	0.414	0.933	0.444
天津	0.963	0.963	1.000	内蒙古	0.458	0.978	0.468	四川	0.475	0.958	0.496
河北	0.170	0.170	1.000	吉林	0.418	0.942	0.444	贵州	0.244	0.421	0.579
辽宁	0.517	0.517	1.000	黑龙江	0.363	0.875	0.414	云南	0.178	0.332	0.538
上海	0.889	0.889	1.000	安徽	0.245	0.884	0.277	西藏	0.440	0.579	0.760
江苏	0.272	0.272	1.000	江西	0.230	0.515	0.446	陕西	0.320	0.612	0.523
浙江	0.423	0.423	1.000	河南	0.126	0.345	0.365	甘肃	0.424	0.693	0.611
福建	0.416	0.416	1.000	湖北	0.245	0.702	0.348	青海	0.451	0.845	0.534
山东	0.183	0.183	1.000	湖南	0.193	0.466	0.413	宁夏	0.408	0.761	0.537
广东	0.607	0.607	1.000					新疆	0.290	0.483	0.600
广西	0.259	0.260	0.998								
海南	0.730	0.730	1.000								
均值	0.532	0.532	1.000	均值	0.300	0.743	0.404	均值	0.364	0.662	0.551

注:meta、group、TGR分别表示共同前沿下水资源绿色效率、群组前沿下水资源绿色效率和技术落差比率。

空间。

综上所述,东、中、西部地区群组前沿与共同前沿下水资源绿色效率存在较大差异,主要是因为中国31个省(市、自治区)相对于不同生产前沿水资源利用技术存在着较大的技术缺口,从而导致水资源利用技术水平相差较大;总体来看,全国各地区无论是在共同前沿还是在群组前沿下,水资源绿色效率值均小于1,为DEA非有效区,说明中国水资源绿色效率普遍偏低,今后在实现经济—社会—环境系统协同发展的道路上,任重道远。

4.2 群组前沿下中国水资源绿色效率空间分布格局变化特征

水资源绿色效率重心反映了经济—社会—环境系统协调发展程度在空间上的分布中心(方叶林等,2013),其重心的变迁反映了三大系统协调程度在空间分布上中心的转移,这对探索水资源绿色效率的时空演变进程,实现经济—社会—环境系统的协同发展具有重大的意义。基于此,本文根据已获取的群组前沿下水资源绿色效率值,运用ArcGIS10.2软件得到了重心—标准差椭圆相关参数及空间位置转移路径(表4、表5、图3),进而对中国水资源绿色效率时空演变特征进行分析。

4.2.1 中国水资源绿色效率重心转移路径分析

从水资源绿色效率重心分布(表4、图3)可知:中国水资源绿色效率各特征时点的重心在110.38°

E~111.90°E、34.53°N~35.28°N之间变动,与中国的几何中心(103°50'E, 36°N)相比,研究前期(2000-2008年),偏移量逐渐增大,其中东西方向偏移量从2000年的6.55°增大到2008年的8.07°,南北方向偏移量从0.94°增大到1.47°;随后偏移量开始减小,到2014年东西方向偏移量减小至7.44°,南北方向减小至0.72°。从重心移动路径来看,研究前期中国水资源绿色效率的重心处于山西境内,研究中期转移到了河南西部地区,研究后期又转移到了山西北部,整个移动路径经历了东南(2000-2004年)—东北(2004-2014年)的变化过程。从重心移动距离来看,研究前、中期(2000-2011年),重心移动的距离有逐渐减小的趋势,且南北方向移动距离小于东西方向移动距离;研究后期(2011-2014年),重心移动距离增大,且重心在东西方向移动距离小于南北方向。从重心移动速度来看,整个研究期内,重心在东西方向的移动速度大幅下降,从2004年的30.22 km/a下降至2014年的3.42 km/a,下降了26.80 km/a;在南北方向上,重心移动速度表现为先减小后持续增大的特点;总体来看,重心移动速度呈现出“持续下降—缓慢升高”的变化态势,即2000-2011年持续下降,2011-2014年缓慢回升。究其原因:研究前期(2000-2004年),东部地区经济水平远高于中西部地区,并能运用本身的资本优势,加强环境的保护,缩小经济增速与社会发展速度之间的差距,使水资源

表4 中国水资源绿色效率重心移动方向与距离  
Tab.4 Center of gravity moving direction and distance of China's water resource green efficiency

年份	重心坐标	移动方向	移动距离/km	东西方向 距离/km	南北方向 距离/km	速度/ (km/a)	东西方向 速度/(km/a)	南北方向 速度/(km/a)
2000	110.38°E,35.06°N							
2004	111.45°E,34.53°N	东偏南26.165°	134.66	120.86	59.38	33.67	30.22	14.85
2008	111.90°E,34.69°N	东偏北19.749°	52.53	49.44	17.75	13.13	12.36	4.44
2011	111.62°E,34.89°N	西偏北36.602°	38.00	30.51	22.66	12.67	10.17	7.55
2014	111.72°E,35.28°N	东偏北76.655°	44.46	10.26	43.25	14.82	3.42	14.42

表5 中国水资源绿色效率空间分布格局的标准差椭圆参数  
Tab.5 Standard deviation ellipsometric parameters of spatial distribution pattern of green efficiency of water resources in China

年份	转角θ/°	面积/万 km <sup>2</sup>	沿x轴的标准差/km	沿y轴的标准差/km	形状指数
2000	62.528	419.397	1037.183	1287.192	0.806
2004	51.437	400.363	1041.214	1224.016	0.851
2008	39.828	397.427	1028.129	1230.504	0.836
2011	49.833	384.932	1007.498	1216.224	0.828
2014	54.092	370.060	965.160	1220.526	0.791

注:形状指数为椭圆短半轴与长半轴的比值,介于0~1之间。

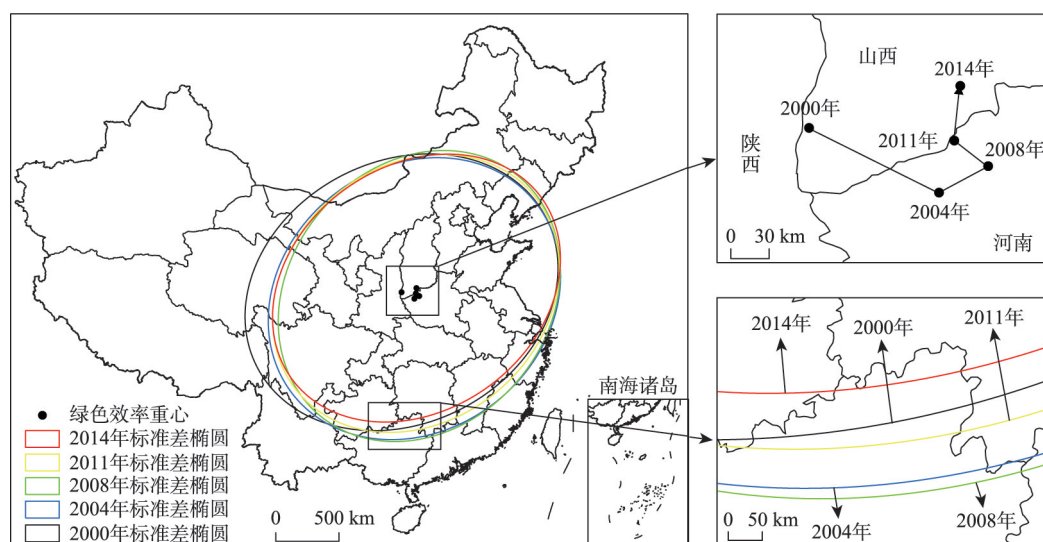


图3 中国水资源绿色效率标准差椭圆及重心转移路径

Fig.3 Standard deviation ellipse and center of gravity transfer path of green efficiency of water resources in China

绿色效率上升,从而造成水资源绿色效率重心快速地向东南方向偏移;研究中、后期(2004-2014年),随着东北老工业基地的振兴,加之2008年受全球经济危机的影响,使东南沿海地区经济增速变缓,而中、西部地区深居内陆,经济发展受国际市场影响较小,且能在“十二五”期间加强环境的修复,进而使水资源绿色效率缓慢上升,导致水资源绿色效率重心在东西方向的移动速度快速减慢,在南北方向上持续增大。

#### 4.2.2 中国水资源绿色效率标准差椭圆分析

由表5可知,研究期内,各特征时点的标准差椭圆范围均呈不断缩小的趋势,表明中国水资源绿色效率的空间分布格局不断趋于集中;从标准差椭圆的形状指数来看,其变化趋势与标准差椭圆面积变化相似,除2004年形状指数有所增大外,其余各特征时点形状指数均不断减小,越来越偏离正圆,表明中国水资源绿色效率在东西和南北2个方向上愈趋失衡。具体来看,研究前期(2000-2004年),长半轴由2000年的1287.192 km缩短至2004年的1224.016 km,而短半轴长度则由2000年的1037.183 km延长至2004年的1041.214 km,这就导致标准差椭圆的形状指数不断增大,越来越趋向于正圆;研究中、后期(2004-2014年),长半轴长度波动幅度较小,基本保持稳定,而短半轴长度却不断减小,是导致形状指数先增大后减小的直接原因。从标准差椭圆转角的变化来看,转角 $\theta$ 的变化范围在

39.828°~62.528°之间,变化幅度较小,总体上表现出“先减小后增大”的变化过程。具体来看,2000-2008年期间,水资源绿色效率重心向东南方向偏移,转角由2000年的62.528°下降至2008年的39.828°,表明此时中国水资源绿色效率空间分布格局呈现东北—西南走向,并有向正北—正南空间分布格局演化的倾向;2008-2014年,标准差椭圆的转角缓慢增大,由2008年的39.828°增长至2014年的54.092°,增幅较小,小于研究前期的降幅,此时中国水资源绿色效率空间分布呈现出偏北—偏南的格局,并且其空间分布格局基本保持稳定态势。

#### 4.3 群组前沿下水资源绿色效率收敛性分析

本文对各地区的水资源绿色效率进行了收敛性分析,以考察各地区之间的差异是否会随着时间的推移而缩小,以及探究各地区的收敛模式。由于本文所计算的水资源绿色效率为相对效率而非地区的实际效率,无法直接对水资源绿色效率做绝对收敛检验。因此,本文参照相关研究成果(谢花林等, 2015; 马海良等, 2017),对各地区水资源绿色效率全要素生产率(TFP)的增长率进行了收敛性分析,从而探寻水资源绿色效率的地区差异特征及影响因素。

##### 4.3.1 $\sigma$ 收敛检验

本文选取水资源绿色效率TFP的对数标准差来反映水资源绿色效率的地区差异变化,公式如下:



$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln M_{i,t} - \overline{\ln M_t})^2}{(n-1)}}$$

(1)

由图4可知,除东部地区以外,全国及中、西部地区水资源绿色效率TFP标准差均存在 $\sigma$ 收敛,说明全国及中、西部地区水资源绿色效率TFP差异会随着时间的推移而自动消失,而东部地区的TFP差异将继续存在,且有增大的趋势。此外,对各地区TFP标准差均值进行横向比较发现,西部地区TFP标准差平均值最大(0.1104),东部次之(0.0946),中部最小(0.0707),说明西部地区水资源绿色效率的内部差异比其他地区大。这是由于西部地区内部各省(市、自治区)经济发展水平及环境状况差异大,既有较发达的四川、重庆、陕西等省(市、自治区),也包括欠发达的新疆、青海、西藏等省(市、自治区),尤其是“西部大开发”战略实施以来,这种差异更加明显,从而导致西部地区内部各区域水资源绿色效率TFP标准差差异最大;对于东部而言,各地区经济发展水平参差不齐,尤其是环境状况差异巨大,因此地区间水资源绿色效率差异较大,致使其TFP标准差呈发散趋势;就中部地区而言,地区内各区域社会发展水平相当,尤其是中部6省,经济基础、环境状况及发展战略大致相同,从而使TFP标准差逐渐缩小,表现为 $\sigma$ 收敛。

4.3.2 绝对 $\beta$ 收敛检验

对水资源绿色效率TFP的 $\beta$ 收敛检验运用以下模型进行计算:

$$\frac{1}{T} \ln(M_{i,t+1}/M_{i,t}) = \alpha + \beta \ln(M_{i,t}) + \varepsilon_{i,t}$$

(2)

式中: $M_{i,t+1}$ 和 $M_{i,t}$ 分别为地区*i*某一时段末期和初期的水资源绿色效率TFP指数; $T$ 为研究时段年份数(本文 $T=1$ ); $\ln(M_{i,t+1}/M_{i,t})$ 表示第*i*个区域水资源绿色效率的平均增长水平; $\alpha$ 为常数项; $\varepsilon_{i,t}$ 为随机误差项;若式中 $\beta$ 显著为负,则表明TFP指数的变化存在绝对 $\beta$ 收敛。

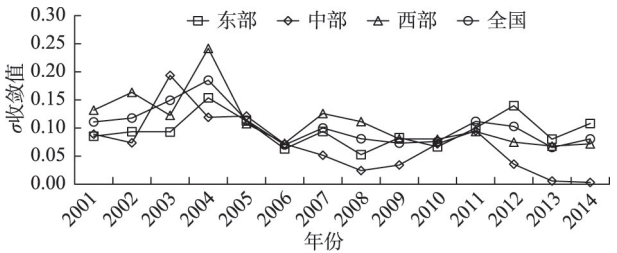


图4 中国及东、中、西部地区 $\sigma$ 收敛演化趋势

Fig.4 Trend of change of  $\sigma$  convergence in China and the eastern, central, and western regions

对面板数据进行处理前,首先进行Hausman检验,从而确定是采用固定效应模型还是采用随机效应模型,然后根据式(2)计算得到全国及各地区水资源绿色效率TFP绝对 $\beta$ 收敛的面板数据估计结果,如表6所示。

从表6可知,中国及东、中、西部地区的 $\beta$ 值都显著为负,表明全国及各地区水资源绿色效率TFP都存在绝对 $\beta$ 收敛,说明对于全国各地区而言,如果假设这些地区的水资源利用条件相同,则全国各地区水资源绿色效率的TFP内部差异会随着时间的推移而自动消失,也说明了全国各地区在水资源绿色效率方面能够保持相对同步增长。由于中、西部地区同时存在 $\sigma$ 收敛,可认为这2个地区存在俱乐部收敛现象。

4.3.3 条件 $\beta$ 收敛检验

本文在绝对 $\beta$ 收敛检验的基础上,进一步对中国水资源绿色效率TFP变化是否存在条件 $\beta$ 收敛进行检验,综合相关文献的研究结论,选用以下7个因素作为控制变量代入模型(式(2)),即可得到条件 $\beta$ 收敛检验模型:

$$\frac{1}{T} \ln(M_{i,t+1}/M_{i,t}) = \alpha + \beta \ln(M_{i,t}) + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \varepsilon_{i,t}$$

(3)

式中: $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 分别代表经济水平(用人均GDP对数值表示)、城镇化水平(用非农业人口比重表示)、产业结构(用第三产业增加值占比表示)、劳动力禀赋(用劳动力密度表示)、水资源禀赋(用水足迹密度表示)、灰水足迹强度(用万元GDP灰水足迹量表示)及技术进步(用技术市场成交额对数值表示),当 $\beta$ 显著为负时,表明水资源绿色效率TFP

表6 中国水资源绿色效率TFP绝对 $\beta$ 收敛检验

Tab.6 Test of absolute  $\beta$  convergence of green efficiency total factor productivity (TFP) of water resources in China

	东部	中部	西部	全国
常数项	-0.049*** (-2.83)	0.005 (1.43)	-0.041 (-1.48)	-0.027** (-2.41)
系数 $\beta$	-0.988*** (-10.33)	-1.303*** (-12.86)	-1.381*** (-13.87)	-1.137*** (-20.78)
模型设定	固定效应	固定效应	固定效应	固定效应
Ajusted- $R^2$	0.427	0.607	0.618	0.538
收敛性判断	收敛	收敛	收敛	收敛

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示估计系数在1%、5%、10%水平下显著,括号内为*t*值。

指数的变化存在条件 $\beta$ 收敛。

通过 Hausman 检验,确定全国及东、西部地区采用固定效应模型,中部地区采用随机效应模型。具体检验结果如表 7 所示。

由表 7 可知,全国及东、中、西部地区系数 $\beta$ 都显著为负,说明中国整体以及东、中、西部地区水资源绿色效率 TFP 都存在显著的条件收敛特征,表明这些区域的水资源绿色效率 TFP 都在稳步提升,并会随着时间的推移收敛到各自的稳态水平;经济水平和技术进步系数在东部地区显著为正,在其他地区则不显著,表明东部地区可利用资金和技术优势提高水资源绿色效率,经济落后的地区则需通过合理配置资源来改善地区水资源绿色效率水平;城镇化水平系数在全国及东部地区显著为负,在中、西部地区不显著,说明在东部和全国水平下城镇化质量的提高;产业结构系数在全国及西部地区显著为

负,表明全国整体和西部地区第三产业比重太低,不利于水资源绿色效率的提高;劳动力禀赋在东部地区显著为负,而在全国水平上显著为正,说明东部地区存在着劳动力过剩的现象,不利于经济发展模式从劳动力密集型、资源密集型向技术密集型转变,对改善水资源绿色效率产生负面影响;水资源禀赋在全国和西部地区显著为正,表明整体上中国存在水资源短缺现象,尤其是西部地区,水资源量的增加有利于水资源绿色效率的提高;灰水足迹强度在全国和各地区均不显著,但就其系数而言,仅西部地区为正,表明全国整体及东中部环境污染严重,减少灰水足迹量有利于水资源绿色效率的提升。

### 5 结论与讨论

本文的创新之处为:第一,通过构建社会发展指数将社会维度纳入水资源利用效率评价体系,丰富了水资源利用效率评价系统;第二,通过构建群组前沿和共同前沿函数,消除地区差异对水资源利用效率的影响,使测度结果更加接近实际。通过研究得到以下结论:

(1) 群组前沿与共同前沿下中国水资源绿色效率有很大不同。在共同前沿下,研究期内水资源绿色效率平均值由高到低依次是东部、西部和中部;而在群组前沿下则表现为相反的状态,其平均值由高到低依次是中部、西部和东部。技术落差比率显示,东部地区水资源利用技术距离共同前沿较近,达到 100%,而中、西部地区距离共同前沿较远,分别仅为 40.4%和 55.1%,表明群组前沿下水资源绿色效率更加合理,更能真实地反映水资源绿色效率的变化情况,同时也说明了分区分析的必要性合理性。

(2) 研究期内,中国水资源绿色效率空间重心经历了由山西转移到河南再转移到山西的过程,整个移动路径经历了东南—东北的变化过程,表明东部地区水资源绿色效率不断下降,而中西部地区水资源绿色效率则有所提升;从标准差椭圆来看,其形状指数不断减小,表明中国水资源绿色效率在东西和南北 2 个方向上逐渐趋于失衡,到研究末期,其空间分布格局基本保持稳定。

(3) 中国水资源绿色效率 TFP 的收敛性分析表明,全国及中、西部地区存在着 $\sigma$ 收敛,说明全国整体及中、西部地区水资源绿色效率的 TFP 差异在逐

表 7 中国水资源绿色效率 TFP 条件 $\beta$ 收敛检验  
Tab.7 Test of conditional  $\beta$  convergence of green efficiency total factor productivity (TFP) of water resources in China

	东部	中部	西部	全国
常数项	-1.764 (-0.74)	-0.090 (-0.11)	-4.347** (-2.07)	-2.711*** (-2.63)
系数 $\beta$	-0.881*** (-10.89)	-1.091*** (-12.48)	-1.264*** (-14.60)	-1.085*** (-21.84)
$\beta_1$	0.304*** (2.61)	-0.056 (-0.57)	0.055 (0.38)	-0.010 (-0.19)
$\beta_2$	-0.014*** (-3.10)	0.001 (0.46)	-0.013 (-1.55)	-0.008*** (-2.87)
$\beta_3$	-0.004 (-0.01)	0.071 (0.22)	-0.901** (-1.99)	-0.780*** (-3.08)
$\beta_4$	-0.363** (-2.04)	-0.040 (-0.80)	-0.031 (-0.14)	0.217** (2.42)
$\beta_5$	0.118 (0.68)	-0.060 (1.01)	0.413** (2.19)	0.193** (2.28)
$\beta_6$	-0.0001 (0.86)	-0.0001 (-0.76)	8.02e-07 (0.01)	-0.00002 (-0.75)
$\beta_7$	0.014* (-0.61)	0.004 (0.20)	0.030 (1.42)	0.018 (1.57)
模型设定	固定效应	随机效应	固定效应	固定效应
Ajusted- $R^2$	0.485	0.614	0.668	0.576
收敛性判断	收敛	收敛	收敛	收敛

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示估计系数在 1%、5%、10%水平下显著,括号内为  $t$  值。



渐缩小;另外,全国各地区同时存在着绝对 $\beta$ 收敛和条件 $\beta$ 收敛,说明全国整体及东、中、西部地区水资源绿色效率的 TFP 差异会随着时间的推移收敛到各自的稳态水平。从其影响因素来看,劳动力和水资源禀赋具有明显的整体性,经济水平、技术进步和城市化水平对东部地区水资源绿色效率的提升影响较大,而西部地区则需要注意产业结构的调整。

## 参考文献(References)

- 鲍超,贺东梅. 2017. 京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示[J]. 地理科学进展, 36(1): 58-67. [Bao C, He D M. 2017. Spatiotemporal characteristics of water resources exploitation and policy implications in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Progress in Geography, 36(1): 58-67.]
- 陈家琦,王浩,杨小柳. 2013. 水资源学[M]. 北京: 科学出版社. [Chen J Q, Wang H, Yang X L. 2013. Water resources science[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 范斐,杜德斌,李恒. 2012. 区域科技资源配置效率及比较优势分析[J]. 科学学研究, 30(8): 1198-1205. [Fan F, Du D B, Li H. 2012. Regional science and technology resource allocation efficiency and comparative advantage analysis [J]. Studies in Science of Science, 30(8): 1198-1205.]
- 方叶林,黄震方,陈文娣,等. 2013. 2001-2010年安徽省县域经济空间演化[J]. 地理科学进展, 32(5): 831-839. [Fang Y L, Huang Z F, Chen W D, et al. 2013. Spatial evolution of county economy in Anhui Province during 2001-2010 [J]. Progress in Geography, 32(5): 831-839.]
- 龚虹波. 2015. “水资源合作伙伴关系”和“最严格水资源管理制度”: 中美水资源管理政策网络的比较分析[J]. 公共管理学报, 12(4): 143-152. [Gong H B. 2015. "Water resource cooperative partnership" and "most strict water resources management system": The comparative analysis of water resources management policy network between China and United States[J]. Journal of Public Management, 12(4): 143-152.]
- 韩琴,孙才志,邹玮. 2016. 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, 38(6): 1179-1191. [Han Q, Sun C Z, Zou W. 2016. Grey water footprint efficiency measure and driving pattern analysis on provincial scale in China from 1998 to 2012[J]. Resources Science, 38(6): 1179-1191.]
- 胡鞍钢,周绍杰. 2014. 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, 24(1): 14-20. [Hu A G, Zhou S J. 2014. Green development: Functional definition, mechanism analysis and development strategy[J]. China Population, Resources and Environment, 24(1): 14-20.]
- 黄晶,宋振伟,陈阜. 2010. 北京市水足迹及农业用水结构变化特征[J]. 生态学报, 30(23): 6546-6554. [Huang J, Song Z W, Chen F. 2010. Characteristics of water footprint and agricultural water structure in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 30(23): 6546-6554.]
- 李静,马潇臻. 2014. 资源与环境双重约束下的工业用水效率: 基于SBM-Undesirable和Meta-frontier模型的实证研究[J]. 自然资源学报, 29(6): 920-933. [Li J, Ma X C. 2014. The utilization efficiency of industrial water under the dual constraints of resource and environment: An empirical study based on SBM-Undesirable and Meta-frontier model[J]. Journal of Natural Resources, 29(6): 920-933.]
- 李世祥,成金华,吴巧生. 2008. 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, 18(3): 215-220. [Li S X, Cheng J H, Wu Q S. 2008. Regional difference of water resources utilization efficiency in China[J]. China Population, Resources and Environment, 18(3): 215-220.]
- 李志敏,廖虎昌. 2012. 中国31省2010年水资源投入产出分析[J]. 资源科学, 34(12): 2274-2281. [Li Z M, Liao H C. 2012. Input and output analysis of water resources across China in 2010[J]. Resources Science, 34(12): 2274-2281.]
- 廖虎昌,董毅明. 2011. 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, 33(2): 273-279. [Liao H C, Dong Y M. 2011. Utilization efficiency of water resources in 12 western provinces of China based on the DEA and Malmquist TFP index[J]. Resources Science, 33(2): 273-279.]
- 马海良,丁元卿,王蕾. 2017. 绿色水资源利用效率的测度和收敛性分析[J]. 自然资源学报, 32(3): 406-417. [Ma H L, Ding Y Q, Wang L. 2017. Measurement and convergence analysis of green water utilization efficiency[J]. Journal of Natural Resources, 32(3): 406-417.]
- 马海良,黄德春,张继国. 2012. 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, 22(10): 35-42. [Ma H L, Huang D C, Zhang J G. 2012. Study on the water resources utilization efficiency and influence factors of the non acceptable output[J]. China Population, Resources and Environment, 22(10): 35-42.]
- 买亚宗,孙福丽,石磊,等. 2014. 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, 28(1): 42-47. [Mai Y Z, Sun F L, Shi L, et al. 2014. Evaluation of China's industrial water efficiency based on DEA model [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 28

- (1): 42-47.]
- 邱林, 田景环, 段春青, 等. 2005. 数据包络分析在城市供水效率评价中的应用[J]. 人民黄河, 27(7): 33-39. [Qiu L, Tian J H, Duan C Q, et al. 2005. Application of data envelopment analysis in urban water supply efficiency evaluation[J]. Yellow River, 27(7): 33-39.]
- 任宇飞, 方创琳. 2017. 京津冀城市群县域尺度生态效率评价及空间格局分析[J]. 地理科学进展, 36(1): 87-98. [Ren Y F, Fang C L. 2017. Spatial pattern and evaluation of eco-efficiency in counties of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Progress in Geography, 36(1): 87-98.]
- 单豪杰. 2008. 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, 25(10): 17-31. [Shan H J. 2008. Reestimating the capital stock of China: 1952 to 2006[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 25 (10): 17-31.]
- 孙爱军, 董增川, 王德智. 2007. 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, 36(4): 547-553. [Sun A J, Dong Z C, Wang D Z. 2007. Prediction of technical efficiency and water consumption of industrial water in China based on time series[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 36(4): 547-553.]
- 孙才志, 韩琴, 郑德凤. 2016. 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, 36(1): 86-97. [Sun C Z, Han Q, Zheng D F. 2016. The spatial correlation analysis of grey water footprint and load factor in Chinese provinces[J]. Journal of Ecology, 36(1): 86-97.]
- 孙才志, 姜坤, 赵良仕. 2017. 中国水资源绿色效率测度及空间格局研究[J]. 自然资源学报, 32(12):1999-2011. [Sun C Z, Jiang K, Zhao L S. 2017. Measurement of green efficiency of water utilization and its spatial pattern in China [J]. Journal of Natural Resources. 32(12):1999-2011.]
- 孙才志, 刘玉玉. 2009. 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, 31(10): 1696-1703. [Sun C Z, Liu Y Y. 2009. Analysis of the spatial-temporal pattern of water resources utilization relative efficiency based on DEA-ESDA in China[J]. Resources Science, 31(10): 1696-1703.]
- 孙才志, 赵良仕, 邹玮. 2014. 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, 29(4): 553-563. [Sun C Z, Zhao L S, Zou W. 2014. The interprovincial water resources global environmental technology efficiency measurement in China and its spatial effect[J]. Journal of Natural Resources, 29(4): 553-563.]
- 佟金萍, 马剑锋, 王慧敏, 等. 2014. 农业用水效率与技术进步: 基于中国农业面板面板数据的实证研究[J]. 资源科学, 36(9): 1765-1772. [Tong J P, Ma J F, Wang H M, et al. 2014. Agricultural water use efficiency and technical progress in China based on agricultural panel Data[J]. Resources Science, 36(9): 1765-1772.]
- 王新华, 徐忠民, 李应海. 2005. 甘肃省2003年的水足迹评价[J]. 自然资源学报, 20(6): 909-915. [Wang X H, Xu Z M, Li Y H. 2005. A rough estimate of water footprint of Gansu Province in 2003[J]. Journal of Natural Resources, 20 (6): 909-915.]
- 吴凡, 刘雪娇, 谢文秀. 2016. 基于共同前沿DEA的中西部地区全要素能源效率研究[J]. 经济问题探索, (11): 33-38. [Wu F, Liu X J, Xie W X. 2016. Study on total factor energy efficiency of midwest region based on meta-frontier DEA [J]. Inquiry into Economic Issues, (11): 33-38.]
- 谢花林, 王伟, 姚冠荣, 等. 2015. 中国主要经济区城市工业用地效率的时空差异和收敛性分析[J]. 地理学报, 70(8): 1327-1338. [Xie H L, Wang W, Yao G R, et al. 2015. Spatial and temporal differences and convergence of China's main economic zones[J]. Journal of Geography, 70(8): 1327-1338.]
- 赵良仕, 孙才志, 郑德凤. 2014. 中国省际水资源利用效率与空间溢出效应测度[J]. 地理学报, 69(1): 121-133. [Zhao L S, Sun C Z, Zheng D F. 2014. The measurement of the efficiency of water resources utilization and spatial spillover effect of China's provincial water resources[J]. Journal of Geography, 69(1): 121-133.]
- 周虹辰. 2014. 对于东、中、西部地区能源效率、碳排放效率和技术差异的研究[D]. 厦门: 厦门大学. [Zhou H C. 2014. Se Energy efficiency, CO<sub>2</sub> emission performance and technology gaps among the eastern, central and western region: A meta-frontier non-radial directional distance function analysis based on the 29 provinces across the country [D]. Xiamen, China: Xiamen University.]
- 朱庆芳. 2001. 衡量城市经济社会发展的新指标体系[J]. 中国经贸导刊, (13): 11. [Zhu Q F. 2001. Hengliang chengshi jingji shehui fazhan de xin zhibiao tixi [J]. Chinese Economic Herald, (13): 11.]
- 左其享, 胡德胜, 窦明, 等. 2014. 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, 36(5): 906-912. [Zuo Q T, Hu D S, Dou M, et al. 2014. Framework and core system of the most stringent water resource management system based on the concept of human-water harmony[J]. Resources Science, 36(5): 906-912.]
- Battese G E, O'Donnell C J, Rao D S P. 2004. A meta-frontier

- frameworks production function for estimation of technical efficiency and technology gap for firms operating under different technology[J]. *Journal of Productivity Analysis*, 21(1): 91-103.
- Charnes A, Cooper W, Roodes . 1978. Emeasuring the efficiency of decision making units [J]. *European Journal of Operational Research*, 2(6): 429-444.
- Tone K. 2001. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 130(3): 498-509.

## Temporal and spatial evolution of green efficiency of water resources in China and its convergence analysis

SUN Caizhi<sup>1,2</sup>, MA Qifei<sup>2</sup>, ZHAO Liangshi<sup>1</sup>

- (1. Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Dalian 116029, Liaoning, China;  
2. College of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

**Abstract:** Using the slacks- based measure (SBM) model, this study analyzed the temporal and spatial differences of green efficiency of water resources and the shift of spatial center of gravity in China by constructing the meta-frontier and group-frontier functions, and convergence tests of the green efficiency total factor productivity (TFP) of the frontier water resources of the group- frontier. The result shows that the technology gap ratio in the eastern region is as high as 1 and only 0.404 and 0.551 in the central and western regions, and verifies that the green efficiency of water resources in the frontier of the group is more reasonable and can reflect the green efficiency of the water resources, and proved the necessity of zoning research on the green efficiency of water resources. The green efficiency of water resources in different regions of China has a large technological gap relative to the different technological frontiers, and the average green efficiency of water resources in many areas is lower than the national average. The green efficiency of water resources in China is generally low and there is still much room for improvement. In the early stage of the study period, the green efficiency of water resources in the eastern part of China increased continuously, while the central and western regions experienced declines. In the later period, imbalance is observed in the east- west and north- south directions. Green efficiency of water resources in the mainland of China as a whole and the central and western regions exhibited TFP  $\sigma$  convergence, indicating that the overall green efficiency of water resources TFP difference will disappear automatically with the passage of time. At the national level and in the eastern, central, and western regions, absolute  $\beta$  convergence and conditional  $\beta$  convergence are significant, indicating that the green efficiency of regional water resources TFP differences will convergence to a steady state with the passage of time.

**Key words:** slacks-based measure (SBM) model; group-frontier; green efficiency of water resources; center of gravity-standard deviation ellipse; convergence; China