

武汉城市群水资源利用效率测度研究^{*1}

陈威¹ 杜娟¹ 常建军^{1, 2}

(1. 武汉科技大学城市建设学院, 湖北武汉 430065;

2. 中国五环工程有限公司, 湖北武汉 430223)

【摘要】:水资源作为一种重要的经济资源,其利用效率是影响经济社会可持续发展的重要因素。研究武汉城市群 2005~2015 水资源利用效率,为提高该区域水资源利用率提供依据。以水资源、资金和劳动力为投入要素,以经济效益为产出要素,建立全要素生产框架下的水资源利用效率评估模型。采用 DEA-Malmquist 模型研究武汉城市群水资源利用效率、投入冗余率和全要素生产率,并用线性回归模型分析全要素生产率各分解指标对水资源利用效率的影响作用。结果表明:武汉城市群水资源利用效率在研究年限前期呈现下降趋势,2015 年回升;2015 年非 DEA 有效的城市水资源投入冗余率整体偏高;全要素的生产率变化呈现出先增后降的趋势,技术变化和纯技术效率变化对水资源利用效率成正效应,而规模效率变化则表现为负效应,其中技术变化对水资源利用效率的影响最为显著。利用 DEA-Malmquist 模型可判断出研究年限期间武汉城市群水资源利用效率逐步提升,并且提高技术手段可大幅提高城市群水资源利用效率。用该模型可为城市群的水资源利用效率分析提供参考。

【关键词】:DEA 模型; Malmquist 指数; 武汉城市群; 水资源利用效率

【中图分类号】:F062.2 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004-8227(2018)06-1251-08

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201806008

城市群作为新时期经济发展的引擎,同时也是水资源消耗的主体。城市水资源短缺矛盾日益凸显,水资源短缺制约着区域经济的可持续性发展,由此《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》中明确指出提高资源开发利用效率,降低水资源消耗,这必将对城市的可持续发展和资源的再生利用提出更高的要求,而解决水资源供需矛盾的关键点在于提高水资源利用效率。武汉城市群是以武汉为中心,辐射武汉周边 8 个城市形成的城市群,其 2015 年 GDP 产值占湖北省全省的 62.93%,是湖北省乃至中部城市的重要经济支柱。其水资源总量仅占全省总量的 44.41%,但用水量却占湖北省总用水量的 55.7%。因此,积极探索武汉城市群的水资源利用效率及区域差异性,寻找影响水资源利用效率的因素和作用机制,有利于武汉城市群用水规划调整,保障经济的绿色发展。

目前,水资源利用效率评价主要采用比值法、指标体系法及数据包络法(Data Envelopment Analysis,简称 DEA)^[1]。相较于其他两种方法,数据包络法具有评估多项投入与产出效率、不受投入产出量纲影响、综合指标评估效率和权重不受主观影响等优势^[2],而被广泛应用于金融、旅游、农业、工业^[3~9]等诸多领域。在水资源利用效率评价方面,董战锋等^[10]基于 DEA 模型对我国水资源利用效率进行分析研究;沈满洪等^[11]采用 DEA 测算了中国 28 个城市的工业水效率和水污染排放效率;何开为等^[12]

¹ 收稿日期:2017-08-18; 修回日期:2017-09-25

基金项目:湖北省教育厅科学研究计划项目(B2015349);湖北省教育厅科研计划指导性项目(B2016007)

作者简介:陈威(1974~),男,博士研究生,副教授,主要从事城市水资源利用方面研究。E-mail:502467315@qq.com

利用 DEA 模型评价河南省农业水资源承载力；张娜娜等^[13]采用数据包络分析模型分析江苏省农业水资源利用效率；付小雪等^[14]采用改进的数据包络分析方法计算了北京市的水资源利用的相对效率。上述研究表明，当前 DEA 模型在水资源利用效率分析中已取得一些成果，但利用 DEA 方法分析水资源利用效率时，发现单一的 DEA 方法分析只能局限于某一特定年限，缺乏动态性^[15]，而 Malmquist 指数分析方法能够弥补 DEA 方法不能处理长时间序列数据的缺陷。DEA-Malmquist 模型在能源效率^[16]、排污费征管效率^[17]等方面得到有效应用。因此，本研究采用 DEA 方法计算水资源利用效率后并使用 Malmquist 指数分析判定全要素生产率各分解指标对水资源利用效率在量和度上进行更深入的分析。DEA-Malmquist 指数综合测度研究区域水资源利用效率、投入冗余率和全要素生产率，并用线性回归模型分析全要素生产率各分解指标对水资源利用效率的影响，分析武汉城市群水资源利用情况，找出提高水资源利用效率的对策并为其它城市群水资源的利用与改善提供理论参考。

1 测度方法与数据来源

1.1 DEA 模型

数据包络分析 (DEA) 1978 年由著名的运筹学家 A. Charnes 等^[18]提出，用于评价部门或决策单元间的相对有效性。DEA 模型假设在每一个时期 t 内，有 n 个决策单元，每个决策单元 (DMU $_j$) 有 m 种投入要素 x_{1j} 、 x_{2j} ， $\dots$ ， x_{mj} 和 s 种产出要素 y_{1j} 、 y_{2j} ， $\dots$ ， y_{sj} ，对于每个 DMU $_j$ 都有相应的效率评价指数 θ ， $\theta \geq 1$ 表示该决策单元 DEA 有效。

根据规模报酬不变和可变，DEA 的经典模型可分为 CCR 和 BCC 两种。在水资源利用的投入产出分析中，水资源相对于经济效益更具有可控性。同时考虑到各城市效率改善的规模报酬一般可变^[19]，故选择投入导向型 BCC 模型对武汉城市群水资源利用效率和投入冗余率进行分析。

BCC 模型的线性规划可表达如下^[20]：

$$\begin{aligned} \min \theta; \quad s. \quad t. \quad & \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} \leq \theta x_{ik}; \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{rj} \leq y_{rk}; \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1; \quad \lambda \geq 0 \\ & i = 1, 2, \dots, m; \quad r = 1, 2, \dots, q; \\ & j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (1)$$

1.2 Malmquist 生产力指数

Fare 等^[21]在 Malmquist 于 1953 年提出的 Malmquist 生产力指数基础上，结合非参数线性规划法与 DEA 模型，构造了从 t 期到 $t+1$ 期间的 Malmquist 生产力指数 $tfpch$ (下文简称 TFP) (x^{t+1} , y^{t+1} , x^t , y^t) = $techch \times pech \times sech$ ，用以衡量技术效率变动、技术变动和全要素变动之间的关系。 $tfpch$ 表示相邻期间的生产率的变化程度；技术变化 ($techch$) 表示相邻期间生产技术的进步程度； $effch$ 表示相邻期间相对效率的改变情况， $pech$ 表示相邻期间管理改善情况， $sech$ 表示相邻期间规模效率的变化。Malmquist 生产力指数分解为技术变化 ($techch$) 和技术效率变化 ($effch$)，技术变化和技术效率变化与生产力指数均呈正相关。其中技术效率变化 ($effch$) 分解为纯技术效率变化 ($pech$) 和规模效率变化 ($sech$) 两部分，纯技术效率变化和规模效率变化与技术效率变化均呈正相关。上述 4 类指数 ($techch$ 、 $effch$ 、 $pech$ 、 $sech$) 数值大于 1，表示在一定时间内该指标朝着相应的前沿面靠近，反之相反。

1.3 用水效率测度

1.3.1 测度设计

水资源作为一种需要借助其他生产要素产生经济效益的经济资源，若直接将水资源利用和经济增长相联系，会导致结果过于简单且缺乏深层次的机制性分析。因此，在测度水资源利用效率时，将水资源、资金、劳动力纳入到统一的投入要素体系，经济效益为产出目标。本文拟采用投入产出函数，构建包含水资源的投入产出分析框架。

$$F(G) = f(K, L, W) \quad (2)$$

式中:G 为经济效益; K 为资金投入; L 为劳动力投入; W 为水资源投入。建立的投入产出指标体系见表 1。

表 1 武汉城市群用水效率投入产出指标体系

类别	指标名称	具体指标
投入指标	水资源	用水总量 (亿 m ³)
	资金	固定资产投资总额 (亿元)
	劳动力	从业人员数 (万人)
产出指标	经济效益	生产总值 (亿元)

投入指标从水资源、资金和劳动力三要素进行考虑，其分别以用水总量、固定资产投资总额和从业人员数进行表示；产出指标中采用生产总值数据表示经济效益。

1.3.2 数据来源与处理

武汉城市群各城市用水总量数据来源于 2005~2015 年《湖北省水资源公报》，从业人员数据、固定资产投资总额及生产总值数据均取自 2005~2015 年《湖北省统计年鉴》和各市历年的《国民经济和社会发展统计公报》。同时为使得指标体系中经济数据具有可比性，统一换算为以 2005 年为基期的不变价。

2 结果与分析

2.1 水资源效率评价

2005~2015 年武汉城市群各市的水资源利用效率的时空变化如表 2、图 1 所示。

表 2 各市水资源利用效率评价表

城市	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	均值	排名
武汉	1	0.965	0.966	0.988	0.92	0.898	0.971	1	1	1	1	0.977	1
潜江	1	1	0.907	0.97	0.788	0.76	0.858	0.808	0.833	0.781	0.64	0.85	2
仙桃	0.864	0.882	1	0.956	0.728	0.644	0.765	0.704	0.673	0.63	1	0.804	3
黄石	1	0.945	0.781	0.737	0.604	0.556	0.64	0.602	0.57	0.543	0.854	0.761	4
天门	1	0.875	0.783	0.762	0.554	0.531	0.62	0.541	0.5	0.478	0.687	0.666	5
鄂州	0.926	0.834	0.676	0.624	0.591	0.569	0.629	0.627	0.46	0.457	1	0.733	6
孝感	0.589	0.524	0.603	0.647	0.568	0.51	0.49	0.421	0.407	0.401	0.754	0.644	7
黄冈	0.585	0.562	0.514	0.472	0.494	0.455	0.486	0.451	0.415	0.394	0.997	0.563	8
咸宁	0.779	0.722	0.663	0.586	0.506	0.468	0.467	0.444	0.477	0.474	0.399	0.544	9
均值	0.86	0.812	0.766	0.749	0.639	0.599	0.659	0.622	0.593	0.573	0.815	0.727	

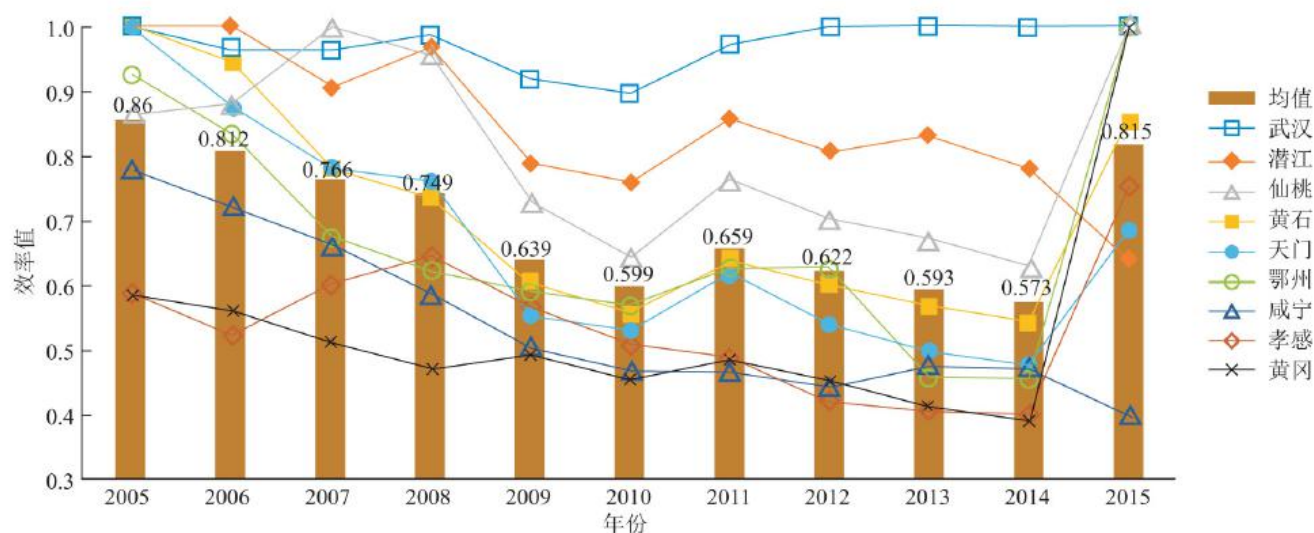


图1 各市水资源利用效率评价图

Fig. 1 Evaluation of regional water use efficiency

从时间演变来看，2005~2014年间，水资源有效利用程度总体呈逐年下降趋势，2014年水资源利用效率平均值降至0.573，2015年武汉城市群总体用水效率值出现增长的转折点，水资源利用效率较上一年大幅增加。究其原因，是由于，2015年是“十三五”第一年，也是水利工作转折年。2015年2月中央政治局常务委员会会议审议通过《水污染防治行动计划》（《水十条》），同年4月出台，提出“控制用水总量，实施最严格水资源管理”、“提高用水效率，把节水目标任务完成情况纳入地方政府绩效考核”、“强化科技支撑”等一系列行动计划。湖北省水利厅深入学习落实十八届物中全会精神，贯彻习近平总书记“节水

优先、空间均衡、系统治理、两手发力”重要治水思想，坚持生态优先、绿色发展，科学编制“十三五”水里规划。同时武汉城市群各城市积极响应国家及湖北省的节水政策号召，改善用水结构，提高用水效率水平。2015 年期间，不仅在政策上对节水、用水提出严格要求，湖北省在水资源利用与管理上也取得了一系列重要成绩，例如:完成国家水资源监控能力建设项目(一期)建设任务;积极推进咸宁、鄂州、襄阳、潜江、武汉市等 5 个国家级水生态文明城市建设试点工作;“湖北省节约用水办公室”挂牌等。正是武汉城市群各城市将政策落实到实处，积极参与水生态文明建设等工作，由此提高了水资源利用效率。

从空间分布来看，在研究年限内，武汉城市群各城市的水资源利用效率变化趋势大致相同，说明各城市在用水管理方面的政策响应时间基本一致。武汉市水资源利用效率变化幅度较小，利用效率整体保持较高的水平且达到 DEA 有效的年份有 5 次，居于城市群之首，并且在 2012~2015 年间相对效率均达到最优，表明武汉市水资源利用技术的先进性。潜江市和咸宁市水资源利用效率总体呈下降，研究年间下降率分别达 36%、49%。基于各城市每年的水资源利用效率，可得到研究年限内各城市水资源利用效率均值分布图(图 2)。由图 2 可知，武汉、仙桃、潜江三地近 10a 水资源利用效率较高，均值超过 0.8;孝感、黄冈、咸宁三地水资源利用效率偏低，城市群内水资源利用效率亟待提升。

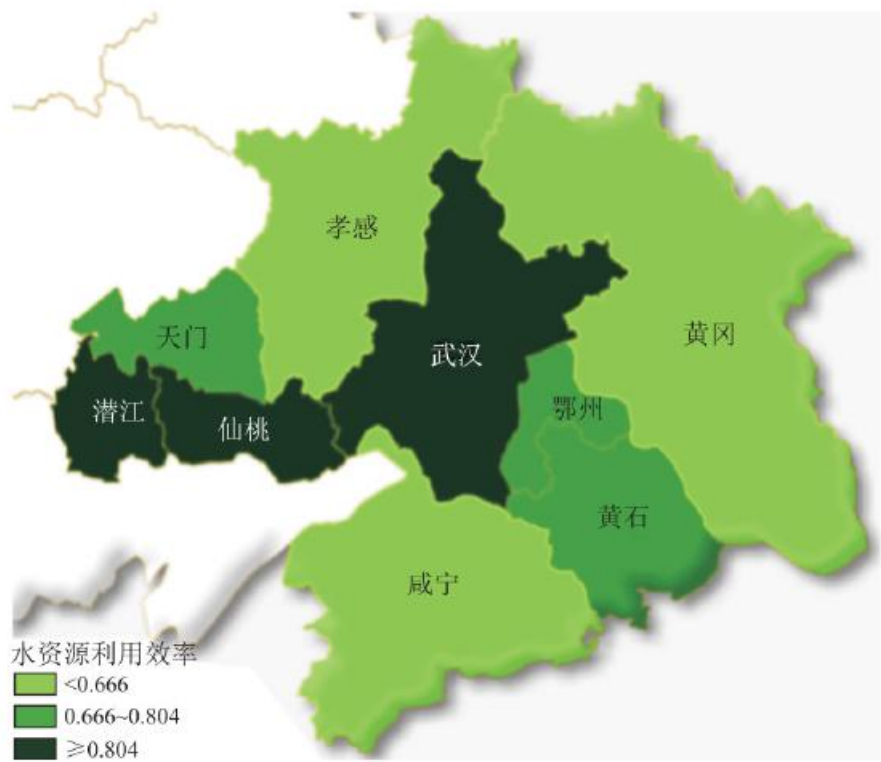


图 2 各城市水资源利用效率均值分布图
Fig. 2 Distribution of mean comprehensive of regional water use efficiency

2.2 水资源投入冗余分析

对武汉城市群 2015 年非 DEA 有效的城市的水资源消耗进行投入冗余分析，结果见表 3。

表 3 2015 年武汉城市群水资源投入冗余分析

城市	原始量 (亿 m ³)	投入冗余量 (亿 m ³)	投入冗余率 (%)
黄石	18.48	6.47	35.01
孝感	28.68	16.26	56.69
黄冈	29.59	17.21	58.16
天门	9.17	5.16	56.27
潜江	6.89	1.47	21.34
咸宁	14.77	6.95	47.05

注：投入冗余率为投入冗余量与原始量的比值。

在现有的投入产出情形下，2015 年武汉城市群有 6 个城市均存在不同程度的水资源投入冗余的现象，尚未达到水资源的 DEA 最优效率。由表 3 可知，投入冗余率超过 50%的城市有孝感市、黄冈市、和天门市，说明这些区域的水资源投入过剩，用水缺乏合理规划和管控。黄石市、潜江市和咸宁的投入冗余率分别为 35.01%、21.34%和 47.05%。这些区域的投入冗余率相对较低，但整体形势不容乐观，存在一定的节水潜力，需要对用水进行优化配置。

利用 DEA 方法仅分析出 2015 年武汉城市群水资源利用情况，但分析缺乏动态性，下文将结合 Malmquist 生产力指数分析武汉城市群发展的这 10a 内水资源利用效率情况。

2.3 全要素 TFP 变化分析

利用 Malmquist 生产力指数分析武汉城市群 2005~2015 年水资源利用效率的全要素生产力 TFP，分别得到武汉城市群 9 个城市分年和分城市的全要素生产力指数(表 4、图 3)及其分解的计算结果(表 5、图 4)。

表 4 2005 ~ 2015 年武汉城市群水资源 TFP 指数及分解

年份	effch	techch	pech	sech	tfpch	TFP 增长率 (%)
2006	1.018	0.915	1.019	0.999	0.931	-6.90
2007	0.991	0.961	0.991	0.999	0.952	-4.80
2008	0.965	1.01	0.973	0.992	0.975	-2.50
2009	1.004	0.81	1.017	0.987	0.813	-18.70
2010	0.992	0.922	1	0.993	0.915	-8.50
2011	0.926	1.182	0.959	0.966	1.095	9.50
2012	0.98	0.928	0.964	1.017	0.91	-9.00
2013	0.962	0.922	0.993	0.968	0.887	-11.30
2014	0.956	1.008	0.963	0.993	0.964	-3.60
2015	0.746	1.195	0.833	0.895	0.891	-10.90

平均值	0.954	0.985	0.971	0.981	0.933	-6.67
-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------

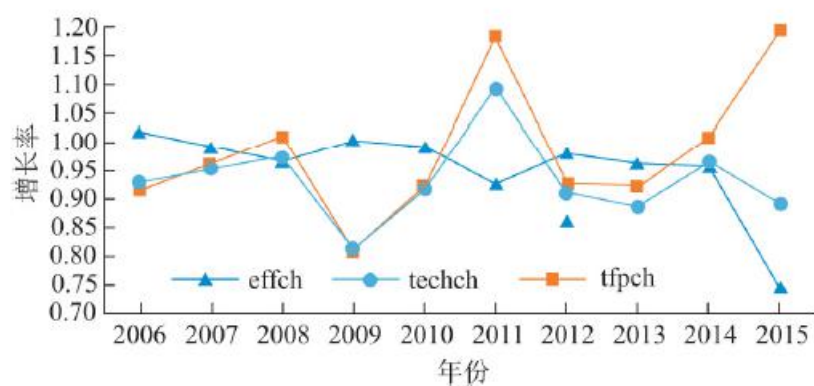


图 3 2005~2015 武汉城市群水资源技术效率
年度均值时间演化

表 5 2005 ~ 2015 年武汉城市群各城市水资源 TFP 指数及分解

省份	effch	techch	pech	sech	tfpch	TFP 增长率 (%)
武汉	1	1	1	1	1	0.00
黄石	0.932	0.972	0.974	0.984	0.906	-9.40
孝感	0.858	0.979	0.881	0.975	0.84	-16.00
黄冈	0.834	0.971	0.942	1.001	0.915	-8.50
鄂州	1.012	0.994	1.007	1.005	1.007	0.70
仙桃	1.023	0.975	1.012	1.011	0.998	-0.20
天门	0.979	0.975	1	0.979	0.954	-4.60
潜江	0.956	0.98	1	0.956	0.937	-6.30
咸宁	0.869	0.965	0.948	0.917	0.838	-16.20
平均值	0.940	0.979	0.974	0.981	0.933	-6.72

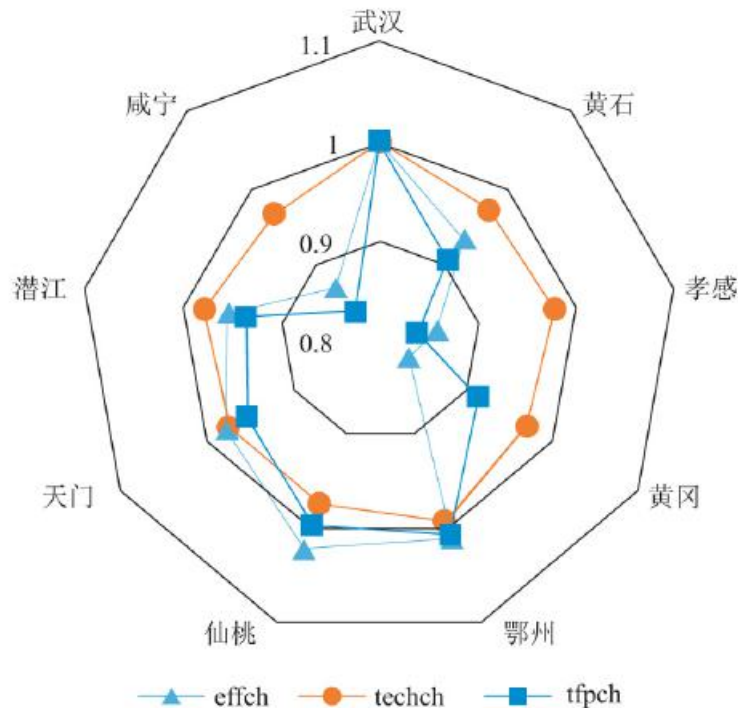


图 4 2005~2015 年武汉城市群各市水资源 TFP 指数及分解

Fig. 4 TFP index summary of Wuhan metropolitan area (2005–2015)

从总体水平来看, 2005~2015 年间, 全要素的生产率变化呈现出先增后降的趋势, 在 2011 年达到最大值, 随后呈现下降趋势, TFP 指数平均为 0.93。在研究期间, TFP 的年均增长率为-6.67%, 其中只有 2011 年出现 9.5% 的增长, 其余均为衰减态势。说明这十年间武汉城市群水资源利用效率普遍偏低。

从技术效率变化 (effch) 的变化来看, 2006 年和 2009 年出现正增长, 其他年份均为负增长。在对技术效率内部分解中发现, 纯技术效率 (pech) 呈现 “W” 型变化, 说明研究区域节水管理及政策实施不够稳定; 而规模效率 (sech) 整体呈现负增长态势, 对技术效率变化的促进作用不够显著。因此生产规模不可盲目扩大, 过大的规模会造成资源浪费, 应努力调整产业结构, 是使经济的增长方式从粗放型向集约型转变。

从技术变化 (techch) 的角度看, 技术变化的增长变化与 TFP 的变化趋势一致, 表明 TFP 增加变化的主要来源于技术变化, 技术变化成为影响水资源利用效率的主导因素, 节水技术的进步将会提高武汉城市群水资源利用效率。这意味着, 要想提高水资源利用效率, 需加大技术进步和技术效率改善力度, 投入规模做到循序渐进, 规避盲目的规模扩大带来的消极作用, 逐步建立科学有效的水资源利用体系。

从表 5 各城市仅有鄂州市 TFP>1, 得益于鄂州市的技术效率与技术变化均保持增长, 武汉市 TFP=1, 结合本文前面分析结果 (近四年武汉市水资源利用效率达 DEA 有效) 说明武汉市各资源之间组合达到了最优。其他 7 个城市 TFP 值均小于 1, 这 7 个城市还需进一步优化产业结构, 其中技术效率的变化是全要素生产率增加的主要原因。其中咸宁市的增长率最慢, 为-9.6%, 这是其水资源利用率逐年下降主要原因。从技术效率 (effch) 层面看, 2005~2015 年鄂州、仙桃市表现为增长, 武汉市持平, 其余

城市呈衰退趋势。从技术变化(techch)角度看,除武汉市外,其余呈衰退趋势。图4可见全要素生产率变化趋势与技术效率变化趋势基本吻合,主要原因是各城市技术变化值基本接近1,各城市水资源利用技术未有明显提升。

2.4 多元线性回归分析

马海良等^[15]研究表明全要素能源效率和生产率增长存在相关性。为进一步分析 techch、pech 和 sech 对全要素水资源利用效率影响,以 techch、pech 和 sech 为自变量,全要素水资源利用效率为因变量,建立多元线性回归模型,具体如下:

$$wech_i=a+b*tecch_i+c*pech_i+d*sech_i+e_i \quad (3)$$

式中:wechi 表示武汉城市群第 i 年水资源利用效率变化,故 wech_i 为武汉城市群第 i 年的水资源利用效率值与第 i-1 年的比值;techch_i、pech_i 和 sech_i 分别为武汉城市群第 i 年的技术变化、纯技术效率变化和规模效率变化;a 为模型的截距项;b、c、d 分别为各自量相应的系数;e_i 为扰动项。

采用 SPSS19.0 软件进行多元线性回归分析,结果如表 6 所示。

表 6 多元线性回归结果

变量	回归系数	Sig	显著性水平
techch	0.968	0.000	**
pech	0.777	0.604	
sech	-0.144	0.366	

注:**为 5%的显著性水平.

由表 6 可知,样本的回归效果良好,线性回归的相关系数 R=0.987>0.75,自变量与因变量之间存在很强的线性关系。从回归系数来看,若技术改变和技术效率分别增长 1%,将带来用水效率增长 0.968%和 0.777%的效果;而规模效率变化则表现为负向效应,当规模效率增长 1%将导致用水效率降低 0.144%。3 个自变量的回归系数中,techch 的系数绝对最大,对水资源利用效率的影响最为显著,同时该变量的回归系数通过 5%水平的显著性检验,进一步表明技术变化对用水效率有显著影响。

3 结论

本文将水资源、资金、劳动力、经济效益 4 个要素纳入统一的投入产出分析框架,利用 DEA-Malmquist 模型分析武汉城市群 2005~2015 年水资源利用效率、水资源投入冗余率和全要素指数变化,并用多元线性回归分析测度技术变化、纯技术效率变化和规模效率变化对用水效率的影响。

(1)2005~2014 年期间,武汉城市群总体用水效率成下滑趋势,在 2015 年各城市水资源效率均有大幅提升,但整体水平偏低。

(2)在对 2014 年用水效率非 DEA 有效分析中,3 个城市水资源投入冗余率超过 50%,表明部分城市存在严重的水资源浪费情况,有很大的节水潜力。

(3)研究区域的全要素的生产率变化呈现出先增后降的趋势,其变化与技术变化趋势一致。技术改变是生产率变动的主导因素,也将成为改善水资源利用效率的关键因素。技术进步和技术效率增加对于用水效率起到促进作用,而规模效率表现为反向效应。

(4)本文选取用水量、固定资产投资总额、从业人数、生产总值这四个影响因素分析水资源利用效率,具有一定的参考价值。DEA-Malmquist 模型分析得出水资源利用效率与技术先进程度关系最为密切。

针对水资源利用现状及模型分析,武汉城市群需开展以下工作:一是区域间加强合作交流,发挥中心城市的辐射带动作用,符合十三五期间城市群的发展战略规划;二是用水主管部门做好需求规划,合理限制用水总量;三是政府加大科研力度,提高节水水平,实现技术的快速进步同时优化产业结构,加强水资源内部管理,提高技术效率。

参考文献:

[1] 张浩文. 兰州市水资源利用效率研究 [D]. 兰州:西北师范大学,2012.

ZHANG H W. Research on efficiency of utilization of water resources in Lanzhou City [D]. Lanzhou: Northwest normal university, 2012.

[2] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6) : 429—444.

[3] 陈威,艾婵. 基于多元线性回归模型的武汉市水资源承载力研究 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2017, 36(1) : 75—79.

CHEN W, AI C. Research on water resources bearing capacity of Wuhan based on multivariate linear regression model [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2017, 36(1) : 075—079.

[4] 胡晓燕,程希骏,马利军. 考虑非期望产出的两阶段 DEA 模型及其在银行效率评价中的应用 [J]. 中国科学院大学学报, 2013, 04: 462—471.

HU X Y, CHENG X J, MA L J. Efficiency evaluation of commercial banks based on two-stage DEA model considering undesirable outputs [J]. Journal of university of Chinese Academy of Sciences, 2013, 30(4) : 462—471.

[5] 邓洪波,陆林. 基于 DEA 模型的安徽省城市旅游效率研究 [J]. 自然资源学报, 2014(02) : 313—323.

DENG H B, LU L. The urban tourism efficiencies of cities in Anhui Province Based on DEA Model [J]. Journal of Natural Resources, 2014(02) : 313—323.

[6] 佟金萍,马剑锋,王圣,等. 长江流域农业用水效率研究:基于超效率 DEA 和 Tobit 模型 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(04) : 603—608.

TONG J I, MA J F, WANG S, et al. Research on agricultural water use efficiency in Yangtze River Basin Based on Superefficiency DEA and Tobit Model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 04: 603—608.

-
- [7] 尹怡诚, 刘云国, 许乙青, 等. 基于 DEA 的中国工业污染治理效率 [J]. 环境工程学报, 2015, 06: 3063—3068.
- YIN Y C, LIU Y G, XU Y Q, et al. Industrial pollution abatement efficiency in China Based on DEA Model [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 06: 3063—3068.
- [8] ANDRE F J, HERRERO I, RIESGO L. A modified DEA model to estimate the importance of objectives with an application to agricultural economics [J]. Omega, 2010, 38: 371—382.
- [9] REINHARD S, LOVELL C A K. Environmental efficiency with multiple environmentally detrimental variables: estimated with SFA and DEA [J]. European Journal of Operational Research, 2000(121): 287—303.
- [10] 董战峰, 喻恩源, 裘浪, 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, 2012, 10: 43—47.
- DONG Z F, YU E Y, QIU L, et al. Water efficiency evaluation of the provincial regions in China based on DEA Model [J]. Ecological Economy, 2012, 10: 43—47.
- [11] 沈满洪, 程永毅. 中国工业水资源利用及污染绩效研究——基于 2003 ~ 2012 年地区面板数据 [J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2015, 01: 31—40.
- SHEN M H, CHENG Y Y. China industrial water use and pollutants emission efficiency: a study based on provincial data from 2003 to 2012 [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Science Edition), 2015, 01: 31—40.
- [12] 何开为, 张代青, 侯璿, 等. 基于水足迹理论的云南省农业水资源承载力 DEA 模型评价 [J]. 水资源与水工程学报, 2015, 04: 126—131.
- HE K W, ZHANG D Q, HUO J, et al. Evaluation of DEA model about water resources carrying capacity of agriculture in Yunnan province based on water footprint theory [J]. Journal of Water Resource and Water Engineering, 2015, 04: 126—131.
- [13] ZHANG N N, WANG H T, WU Y C, et al. Evaluation on agricultural water utilization of Jiangsu province based on data envelopment analysis model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 04: 299—303.
- [14] 付小雪, 陈宜金. 北京市水资源利用相对效率的时空差异分析 [J]. 长江科学院院报, 2012, 5: 5—8.
- FU X X, CHEN Y J. Spatial-temporal difference of relative efficiency of water resources utilization in Beijing [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 5: 5—8.
- [15] 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.

[16] 马海良, 黄德春, 姚惠泽. 中国三大经济区域全要素能源效率研究——基于超效率 DEA 模型和 Malmquist 指数 [J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 11: 38—43.

MA H L, HUANG D C, YAO H Z. Total-factor enegry efficiency analysis of three economic regiions in China: based on super-DEA and malmqusit [J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 11: 38—43.

[17] GAO S T, SU W G, YANG Q J. Assessment of the expropriation efficiency of regional pollutants levy system in China Based on DEA-Malmquist Model [J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 02: 23—29.

[18] CHAMES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision-making units [J]. European Journal of Operational Research, 1979, 3(4) : 339.

[19] 胡妍, 李巍. 区域用水环境经济综合效率及其影响因素——基于 DEA 和 Malmquist 指数模型 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(4) : 1275—1280.

HU Y, LI W. A study of water environment-economy integrated efficiency and its driving factors for regional water use based on a combination of DEA and Malmquist index [J]. China Environmental Science, 2016, 36(4) : 1275—1280.

[20] 刘成刚. 数据包络分析方法与 MaxDEA 软件 [M]. 北京:知识产权出版社. 2014.

LIU C G. Data envelopment analysis: methods and MaxDEA software [M]. Beijing: Intellectual Property Press, 2014.

[21] FARE R, GROSSKOPF S. A nonparametric cost approach to scale efficiency [J]. Scandinavian Journal of Economies, 1994, 87(4) : 594—604.