

基于偏最小二乘通径分析方法的科技创新对用水效率边际效应的测度与分析

张乐勤¹, 陈素平²

(1. 池州学院资源环境学院, 安徽 池州 247000; 2. 池州学院商学院, 安徽 池州 247000)

摘要:以安徽省为例,构建了科技创新与用水效率综合评价体系,运用熵值赋权法,对其指数进行了测算;借助 SPSS19.0 软件,采用典型相关分析、偏最小二乘回归分析方法,测算了科技创新对用水效率边际贡献;运用通径分析方法,考察了科技创新对用水效率的直接与间接效应,结果表明:安徽省科技创新指数由 2005 年的 0.0129 跃升至 2014 年的 0.974 2,而用水效率指数由 2005 年的 0.461 6 攀升至 2014 年的 0.855 8,两者呈同向演化规律;科技创新对用水效率边际总弹性系数为 0.097 99,其中,直接弹性系数为 0.065 253,间接弹性系数为 0.032 737;经济增长、规制政策、产业结构的间接弹性系数分别为 0.025 83、0.007 54、0.000 27。基于研究结果,提出了有利于提高用水效率的政策建议。

关键词:科技创新;用水效率;边际效应;偏最小二乘回归;通径分析

中图分类号:F062.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)01-0055-08

Measurements and analysis of marginal effect of water use efficiency by scientific and technological innovation based on PLS-PATH method//ZHANG Leqin¹, CHEN Suping²(1. Resource Environment College, Chizhou University, Chizhou 247000, China; 2. Business School, Chizhou University, Chizhou 247000, China)

Abstract: Based on the entropy weighting method, a comprehensive assessment system for the relationship between scientific and technological innovation and water use efficiency was constructed. The indexes of innovation and water use efficiency were calculated for Anhui Province as an example. By use of SPSS19.0, the marginal contribution of scientific and technological innovation to water use efficiency were calculated based on the canonical correlation analysis and partial least-squares regression analysis method. The path analysis method was adopted to investigate the direct and indirect effects of scientific and technological innovation on water use efficiency. The results show that the scientific and technological innovation index of Anhui Province jumped from 0.0129 in 2005 to 0.974 2 in 2014, while the water use efficiency index rose from 0.461 6 in 2005 to 0.855 8 in 2014, indicating a synthetic evolution. The total elasticity coefficient of scientific and technological innovation to the marginal effect of water use efficiency is 0.097 99, among which, the direct elasticity coefficient is 0.065 253 and the indirect elasticity coefficient is 0.032 737. The indirect elasticity coefficients of economic growth, regulation policy and industrial structure are 0.025 83, 0.007 54 and 0.000 27 respectively. Based on the research results, the policy suggestions are proposed to improve water use efficiency.

Key words: scientific and technological innovation; water use efficiency; marginal effect; PLS regression; path analysis

提高水资源利用效率是落实最严格水资源管理制度及建设水生态文明重要内容^[1],科技创新有利于节水科技创新与推广、有利于促进生产方式转变、有利于改变并促进符合水生态文明的消费模式和生活方式^[2],故而,科技创新是促进水资源利用效率提升的重要途径,探索科技创新对用水效率的驱动程度,对指导水资源可持续利用政策制定及生态文明建设具有重要启示意义。

国外学者针对用水效率的研究多集中于用水效率影响因素^[3]、用水效率评价^[4-5]等层面。国内学者对此也进行过深入探索:马海良等^[6]基于投入导向 DEA 模型,实证探索中国 2003—2009 年水资源利用效率影响因素,结果显示技术进步有利于改善水资源利用效率;佟金萍等^[7]运用 Malmquist 指数法对中国农业技术进步对农业用水效率的影响进行研究,表明技术进步有助于提高农业用水效率;姜蓓

蕾等^[8]以中国 31 个省级行政区 1997—2010 年数据为基础,采用主成分分析方法,对工业用水效率驱动因素进行考察,表明技术进步对提高工业用水效率具有正向作用,而水资源条件和高耗水行业比重则呈现负相关;赵良仕等^[9]研究表明,考虑非期望产出情况下,中国教育经费投入对水资源利用效率具有正向影响;李昌彦等^[10]以江西省为例,运用 CGE 模型实证模拟了技术进步对用水效率的影响,结果表明技术进步都能促进用水效率提高;雷玉桃等^[11]运用中国 31 个省 2002—2013 年的面板数据,采用回归分析方法对中国工业用水效率影响因素进行研究,表明中部地区研发(R&D)经费投入强度与工业用水效率之间存在正向关系;任俊霖等^[1]基于 Tobit 模型对长江经济带省会城市群的研究表明,较低的技术效率变化和纯技术效率是制约水资源利用效率的关键因素。

综合看,前人运用 DEA、CGE、Tobit 等多种模型,采用回归分析或主成分分析方法,在国家尺度、流域尺度及省域尺度,就科技创新对用水效率影响进行过深入探索,所得结果均验证了科技创新对用水效率具有显著的正向效应。然而,前人研究多以研发投入或专利授权数作为表征科技创新指标,以单位 GDP 水耗作为用水效率考察指标,而科技创新是将科学发现和技术发明应用到生产体系,创造新价值的过程^[12],用水效率包括农业、工业、生活等方面,仅以单一指标来度量科技创新与用水效率,难以全面、客观反映科技创新与用水效率内涵与外延;同时,既有研究仅考察了科技创新对用水效率直接影响,而就科技创新通过影响其他因素进而影响用水效率的间接影响未曾涉足。鉴于此,本文拟以综合指数作为表征科技创新、用水效率的指标,采用通径回归分析方法,研究科技创新对用水效率的直接与间接效应。

1 研究思路与方法

1.1 研究思路

首先,借鉴前人研究成果,构建由若干个评价指标组成的科技创新与用水效率评价体系,采用熵值法对其综合指数进行测算;其次,以用水效率作因变量,科技创新作解释变量之一,采用偏最小二乘回归分析方法,对变量参数进行估算;再次,采用通径分析方法,就科技创新对用水效率边际直接与间接效应进行测算、分析;最后,依据定量研究结果,针对性提出政策建议。

1.2 研究方法

1.2.1 科技创新与用水效率评价指标体系构建

创新为五大发展理念之首,为“十三五”时期我

国区域经济发展的关键驱动因素^[13]。既有研究中,多以专利授权数^[6]、教育经费投入^[9]、R&D 投入^[11]作为表征科技创新的指标。由于科技创新包括从创新资源投入到创新成果产出的过程^[14],仅以单一指标展开研究,难以体现科技创新内涵,为此,本文借鉴前人研究成果^[13-14],本着科学性、综合性与数据可获得性原则,选取 R&D 经费投入、专利授权数、科研活动人员、教育经费投入、万人大学生数、重大科研成果、技术市场成交额、技术成交项、高科技产业产值作为科技创新评价指标。

用水效率是指在一定投入和技术条件下,单位水资源所产生的效益^[15],前人研究中,常以单位水资源产值^[11,16]或万元 GDP 水耗^[7,17]单一指标表征。由于用水效率涉及工业、农业、生活、生态环境多方面,仅以单一指标表征难以客观反映实际境况,为此,本文在借鉴前人研究成果^[18-19]的基础上,从综合用水效率、工业用水效率、农业用水效率、生活用水效率、生态环境用水效率 5 个方面进行评价。其中,以万元 GDP 水耗表征综合用水效率;单位灌溉面积用水量表征农业综合用水效率;单位工业增加值水耗表征工业综合用水效率;人均综合用水量与城镇人均日生活用水量表征生活用水效率;由于影响生态环境用水效率的主要因素为经济发展及居民生活排放的废水,同时,考虑到降水对水污染能起缓解作用,故以万元 GDP 废水排放量及年降水量作为生态环境用水效率评价指标。

科技创的评价指标体系设计参考了既有研究成果,借鉴国家统计局对全国科技进步状况的统计监测指标,而用水效率评价兼顾了经济社会、人民生活及生态环境用水的方方面面,遵循了产业用水与产值对应的内在逻辑,因而,评价指标体系具有科学性。

1.2.2 综合指数测算

采用熵值法对科技创新与用水效率综合指数进行测算。

步骤 1 数据极差标准化处理。正向指标采用式(1),负向指标采用式(2):

$$x'_{ij} = (x_{ij} - \min\{x_j\}) / (\max\{x_j\} - \min\{x_j\}) \quad (1)$$

$$x'_{ij} = (\max\{x_j\} - x_{ij}) / (\max\{x_j\} - \min\{x_j\}) \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为*i*年份*j*指标数值; x'_{ij} 为 x_{ij} 标准化后值。为避免标准化后数值为 0,以 $X_{ij} = x'_{ij} + 1$ 对 x'_{ij} 进行平移^[20]。

步骤 2 计算 *m* 年内 *i* 年份 *j* 指标比重 Q_{ij} :

$$Q_{ij} = X_{ij} / \sum_{i=1}^m X_{ij} \quad (3)$$

步骤3 计算 m 年内 j 指标的熵值 e_j :

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m Q_{ij} \ln Q_{ij} \quad 0 \leq e_j \leq 1 \quad (4)$$

其中: $k = 1/\ln m$

步骤4 计算 n 个指标中的 j 指标权重:

$$w_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j) \quad (5)$$

步骤5 计算综合指数 I_i :

$$I_i = \sum_{j=1}^m w_j X_{ij} \quad (6)$$

由于 I_i 为 x'_{ij} 平移所得,故实际综合指数应减去 1^[20]。

1.2.3 科技创新对用水效率边际效应测算

a. 用水效率驱动因子遴选。影响用水效率因素包括自然条件、经济发展状况、产业结构、科技进步、用水状况等方面^[11],既有研究中,学者们选取经济发展水平^[1,8,11,15-16,21]、水资源禀赋^[1,8,11,15-16,21]、科技进步^[6-8,11,21]、产业结构^[1,8,11,15-16]、水资源开发利用^[11,16]、水价^[8,21]等因素,测算过其对用水效率的影响。借鉴前人研究成果,选取科技进步、经济发展水平、产业结构、水资源禀赋、水资源开发利用、规制政策作为用水效率备选驱动因子,借助 SPSS 软件,采用典型相关分析方法,筛选出关联性较高的因子作为其影响因子。

b. 偏最小二乘回归。偏最小二乘回归 (partial least-squares regression, PLS) 是将主成分分析与普通最小二乘 (OLS) 有机结合的多元统计分析方法,因其能有效解决变量间多重共线性,在资源环境领域得到了广泛应用^[22-23]。其机理为:假定有 n 个自变量 $X_i (i=1,2,3,\dots,n)$ 影响因变量 Y ,即 $Y=f(X_i)$,首先,运用主成分分析,对自变量进行分析与筛选,提取能对自变量进行解释的 j 个综合变量 F_j :

$$F_j = \sum_{i=1}^m k_i X_i \quad (7)$$

式中 k_i 为主成分分析得分系数, $j=1,2,3,\dots,m, j < i$;其次,以 Y 作因变量, F_j 作自变量,采用最小二乘法回归分析方法,可得 Y 与 F_j 关系式;最后,将 F_j 与 X_i 线性关系式代入 Y 与 F_j 线性关系式,可得 X_i 与 Y 间关系式。

c. 通径分析。通径分析 (path analysis) 是由 Wright 在 1921 年提出的旨在分析变量间因果关系的一种多元统计分析方法^[24],因其既能测算自变量对因变量直接影响,又能揭示出自变量通过影响其他变量进而影响因变量的间接影响,比简单回归分析更全面、精准^[24],其机理为:假定因变量 Y 受 n 个自变量影响,每个自变量与 Y 的关系是线性的,则自变

量 X_1 对 Y 的通径系数 $P_{X_1,Y}$ 可由直接通径系数 $D_{P_{X_1,Y}}$ 和间接通径系数 $I_{P_{X_1,Y}}$ 构成,公式如下^[25]:

$$D_{P_{X_1,Y}} = r_{X_1,Y} \frac{S_{X_1}}{S_Y} \quad (8)$$

$$I_{P_{X_1,Y}} = \sum_{i=2}^{n-1} r_{X_1,X_i} D_{P_{X_i,Y}} = \sum_{i=2}^{n-1} r_{X_1,X_i} r_{X_i,Y} \frac{S_{X_i}}{S_Y} \quad (9)$$

$$P_{X_1,Y} = D_{P_{X_1,Y}} + \sum_{i=2}^{n-1} I_{P_{X_i,Y}} \quad (10)$$

式中: $r_{X_1,Y}$ 、 $r_{X_i,Y}$ 分别为 X_1 、 X_i 与 Y 的典型相关系数; r_{X_1,X_i} 为 X_1 与 X_i 的简单相关系数; S_{X_1} 、 S_{X_i} 、 S_Y 分别为 X_1 、 X_i 与 Y 的标准差^[25]。

依据通径系数,可测算自变量 X_1 对因变量 Y 的直接弹性系数 a_{1D} 与间接弹性系数 a_{1I} (即自变量 X_1 通过影响其他自变量间接影响因变量 Y 的弹性系数),表达式如下:

$$a_{1D} = \frac{D_{P_{X_1,Y}}}{P_{X_1,Y}} a_1 \quad (11)$$

$$a_{1I} = \left[\left(\sum_{i=2}^{n-1} I_{P_{X_i,Y}} \right) / P_{X_1,Y} \right] a_1 \quad (12)$$

式中: a_1 为自变量 X_1 对因变量 Y 的总弹性系数。

d. 边际效应。边际效应属经济学概念,指每新增(或减少)一个单位商品或服务,对商品或服务获得者所增加(或减少)的效用,因其表征直观,被广泛应用于资源环境领域研究中^[22,25-27],意指自变量(驱动因子)每增加 1%,引起因变量(考察对象)相应百分比的变化。

2 实证研究

2.1 变量说明与数据来源

以安徽省为例展开研究。之所以选择安徽省主要基于两方面考虑:一是安徽省为国家技术创新工程试点省,科技创新为支撑安徽经济社会发展持久动力;二是水资源禀赋不足,其人均水资源不及全国平均水平一半^[28],考察其科技创新对用水效率驱动效应更具代表性与典型性。鉴于国务院于 2005 年发布《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》,故本文研究样本界定为 2005—2014 年。

研究变量包括用水效率、技术进步、水资源禀赋、经济发展水平、产业结构、水资源开发利用、规制政策,其中,用水效率、技术进步以综合指数表征;水资源禀赋以人均水资源量表征;经济发展水平以人均 GDP 表征,为了消除价格因素影响,对 GDP 进行价格平减,将各年 GDP 换算为 2005 年价格水平;针对产业结构变量,已有研究中,多以三次产业比

重^[1,8,11,16]为产业结构表征指标,而随着经济社会发展,产业结构呈由低级向高级演进(即第一产业所占比例趋于减少,第二、三产业比例,特别是第三产业比例逐渐提升),仅以某一产业所占比例作为衡量产业结构指标,难以客观体现产业结构演进内涵,鉴于此,本文借鉴文献[29]方法,以泰尔指数作为度量产业结构合理指标,表达式为

S = \sum_{i=1}^3 \frac{G_i}{G} \ln(\frac{G_i}{L_i} \frac{L}{G}) \tag{13}

式中:S为产业结构合理化指数;G_i、G分别为i产业产值、GDP总值;L_i、L分别为i产业劳动力人数、劳动力总数。

S 越小表明产业结构越合理;资源开发利用率以水资源利用总量与水资源总量百分比表征;规制政策能改变企业、机关单位及公众用水行为,亦为影响用水效率重要因素,已有研究中,多以能源强度(GDP/Energy)^[30-31]、工业废水排放达标率与工业SO₂去除率^[32]、工业治污总投资与规模以上工业企业主营成本、工业增加值比值^[33]、排污费征收、治理投资^[34]、污染治理投入在产值中比重^[35-37]等来衡量。笔者认为,工业污水治理费用投入能提升工业用水重复率,间接影响着用水效率,为此,借鉴文献[37]的方法,以修正的单位工业产值污染治理成本(单位工业产值的污染治理投资与工业产值占GDP比重之比)作为环境规制表征指标。原始数据来源于2006—2015年安徽统计年鉴、2006—2015年中国高技术产业统计年鉴、2006—2015年中国环境统计年鉴。

2.2 科技创新与用水效率综合指数测算

基于安徽省统计数据,采用熵值法计算得安徽省2005—2014年科技创新与用水效率综合指数,评价指标所得权重如表1所示,结果如图1所示。

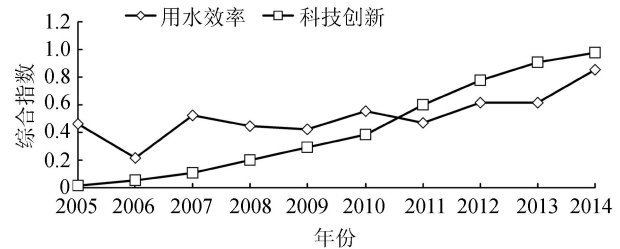


图1 安徽省2005—2014年用水效率与科技创新综合评价指数

图1表明,安徽省科技创新指数由2005年的0.0129跃升至2014年的0.9742,年均升幅61.73%,之所以如此,与安徽省积极推进科技强省战略有关,“十一五”以来,安徽省制定了科技规划纲要,以国家技术创新工程试点省及国家级合芜蚌

表1 科技创新与用水效率评价指标权重

类别	评价指标	指标单位	指标性质	熵值 e _j	权重 w _j
科技创新	R&D 经费投入	亿元	+	0.9875	0.0641
	专利授权数	件	+	0.9822	0.0908
	科研活动人员	万人	+	0.9874	0.0646
	教育经费投入	亿元	+	0.9862	0.0704
	万人大学生数	人	+	0.9905	0.0487
	重大科研究成果	项	+	0.9899	0.0517
	技术市场成交额	亿元	+	0.9882	0.0605
	技术市场成交项	项	+	0.9867	0.0677
	高科技产业产值	亿元	+	0.9058	0.4815
用水效率	单位 GDP 水耗	m ³ /万元	-	0.9891	0.1474
	单位灌溉面积用水量	m ³ /hm ²	-	0.9875	0.1689
	单位工业增加值水耗	m ³ /万元	-	0.9881	0.1617
	人均综合用水量	m ³	-	0.9873	0.1725
	城镇人均日生活用水量	L	-	0.9935	0.0887
	万元废水排放量	t	-	0.9900	0.1356
	年降水量	mm	+	0.9908	0.1252

注:①+表示正向指标,-表示负向指标;②原始数据来源于2006—2015年安徽统计年鉴、2006—2015年中国高技术产业统计年鉴、2006—2015年中国环境统计年鉴。

创新示范区建设为契机,不断加大科技投入与科技创新人才队伍建设,出台了一系列支持科技创新的政策与激励机制,营造了自主创新氛围,培育了一批创新型企业和知名品牌与科技共享服务平台,发展壮大电子信息产业、新能源汽车等一大批战略新兴产业,从而促进了综合科技实力提升。

图1还表明,安徽省用水效率指数由2005年的0.4616升至2014年的0.8558,年均升幅7.1%,究其原因,与安徽省积极推进科技进步,不断优化产业结构,实行最严格用水管理制度有关。2005年以来,安徽省不断深化地方政府用水责任任期考核,大力推进节水农业,淘汰高耗水落后工业设备,推广生活节水器具,强化用水定额,使用水效率得到了迅速提升。

2.3 用水效率驱动因子边际贡献测算

2.3.1 泰尔指数与规制政策指数测算

借鉴文献[29,37]的泰尔指数与规制政策指数测算方法,运用统计数据,可对安徽省2005—2014年泰尔指数及规制政策指数进行测算,结果如表2所示。

表2 安徽省2005—2014年泰尔指数及规制政策指数

年份	泰尔指数	规制政策指数	年份	泰尔指数	规制政策指数
2005	0.2188	0.0523	2010	0.2182	0.0537
2006	0.2224	0.0432	2011	0.2416	0.0593
2007	0.1922	0.0534	2012	0.2225	0.0643
2008	0.1797	0.0698	2013	0.2031	0.0901
2009	0.1880	0.0582	2014	0.1830	0.0728

由表2可知,考察样本期,安徽省产业结构合理指数呈变小态势,但变化幅度不大,表明安徽省第二产业占主导地位的结构不合理状况尚未得到根本改

变,环境规制指数呈上升态势,显示出安徽省环境治理力度在提升,生态文明建设在稳步推进。

2.3.2 驱动因子遴选

以用水效率综合指数作因变量(Y),备选驱动因子人均 GDP(X_1)、产业结构合理化指数(X_2)、科技创新综合指数(X_3)、人均水资源(X_4)、水资源开发利用效率(X_5)、规制政策指数(X_6)作自变量,借助 SPSS19.0 软件,采用简单相关分析方法,可得 Y 与上述自变量之间的典型相关系数分别为 0.786、-0.318、0.783、0.408、-0.119、0.628。水资源开发率与用水效率相关系数为-0.119,呈弱负相关,这是因为:水资源开发率高,意味着水资源开发程度高,丰沛的水资源可能导致节水意识的下降,进而引致用水效率的下降,由于相关性较低,故可以剔除。人均 GDP、产业结构、科技创新、人均水资源、规制政策与用水效率典型相关系数均在 0.3 以上,具有中等程度的相关性,均可作为用水效率驱动因子。

2.3.3 偏最小二乘分析

将影响用水效率驱动因子的原始数据取自然对数后输入 SPSS19.0 中进行主成分分析,结果显示,可提取 2 个主成分(即综合变量,以 F_1 、 F_2 表示),2 个综合变量可解释原变量的 98.212%,综合变量与原变量间关系如下式:

$$F_1 = 0.416\ln X_1 - 0.011\ln X_2 + 0.41\ln X_3 - 0.103\ln X_4 + 0.241\ln X_6 \tag{14}$$

$$F_2 = -1.132\ln X_1 + 0.034\ln X_2 + 1.886\ln X_3 + 0.387\ln X_4 - 0.843\ln X_6 \tag{15}$$

以 $\ln Y$ 为被解释变量,以综合变量 F_1 、 F_2 的时序数据为解释变量,将其输入 SPSS19.0 软件进行两阶最小二乘分析,回归结果如表 3 所示。

表 3 用水效率与综合变量回归分析结果

变量	回归系数	标准误差	t	Sig 值
常数	-0.711	0.095	-7.481	0.000
F_1	0.239	0.1	2.385	0.049
F_2	-0.026	0.1	-0.259	0.803

由表 3 可知,常数项 t 检验 Sig 值为 0.000,在 0.01 水平上能通过显著性检验;综合变量 F_1 的 Sig 值为 0.049,在 0.05 水平上能通过显著性检验;而综合变量 F_2 的 Sig 值为 0.803,未能通过显著性检验,由此可得如下回归模型:

$$\ln Y = -0.711 + 0.239F_1 \tag{16}$$

将(14)式代入(16)式变化可得:

$$Y = 0.491153X_1^{0.099424} X_2^{-0.00239} X_3^{0.09799} X_4^{-0.024617} X_6^{0.057599} \tag{17}$$

由式(17)可知,经济增长、产业结构、科技创新、水资源禀赋、规制政策 5 因素的弹性系数分别为

0.099424、-0.00239、0.09799、-0.024617、0.057599,表明经济增长、科技创新、规制政策 3 因素对用水效率具有正向驱动效应,当经济增长、科技创新、规制政策每增加 1% 时,分别导致用水效率指数提升 0.099424%、0.09799%、0.057599%。之所以如此,可解释如下:经济增长一方面可以拿出更多资金支持生产、生活设备节水改造,也可促进节水技术及节水管理经验的提升,另一方面,经济增长意味着对水资源需求的增加,加剧了水资源稀缺性,因而能提升公众节水意识;科技创新一方面能推动灌溉节水农业技术的推广,淘汰落后高耗水工业设备,提升工业用水重复率,又能提供符合节水要求的生活器具,另一方面,还能促进发展方式转变,从而提高了用水效率;规制政策通过政策引导、财政信贷税收经济杠杆、奖惩与考核问责机制等举措,可以促进机关、团体、企业、事业单位节约用水,进而相应地提高了用水效率。产业结构与用水效率则呈现为负向关系,这与安徽省产业结构特点有关,考察样本期,安徽省产业结构变化主要表现为第二产业比例升高(第二产业由 2005 年的 41.98% 升至 2014 年 53.14%,升幅达 11.16 个百分点),第三产业变化不大,而第一产业用水效率最低,第二产业次之,第三产业最高^[16],第二产业比例升高的产业特征必然阻碍了用水效率提升。水资源禀赋与用水效率也呈现为负向关系,这主要因为水资源禀赋越丰富,公众节水意识越淡薄,从而影响了用水效率的提升。

2.3.4 科技创新对用水效率影响的通径分析

a. 通径系数计算。运用通径系数计算式(8)(9),可测算驱动因子的直接与间接通径系数,结果见表 4。

表 4 用水效率通径分析结果

驱动因子	直接通径系数	间接通径系数				
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_6
X_1	1.0071		0.0013	2.3305	0.0299	0.3019
X_2	-0.0842	-0.0151		-0.2947	-0.0451	-0.1651
X_3	2.4352	0.9638	0.0102		-0.0337	0.2814
X_4	0.1995	0.1511	0.0190	0.4115		-0.0279
X_6	0.4096	0.7422	0.0339	1.6730	-0.0136	

表 4 表明,科技创新对用水效率直接通径系数为 2.4352,间接通径系数为 1.2217,总通径系数为 3.6569,间接通径系数占总通径系数的 33.41%,说明科技创新对用水效率间接影响不可小觑。间接通径系数中,经济增长、规制政策较大,产业结构较小,水资源禀赋为负,表明科技创新对用水效率间接影响主要依靠经济增长、规制政策实现,而产业结构的间接影响较小。

b. 科技创新直接与间接弹性系数测算。依据

表4 中科技创新通径系数,运用公式(11)(12),可测算出科技创新对用水效率的直接与间接弹性系数,结果表明,科技创新通过节水技术的推广与节水设备的普及使用等,对用水效率的直接弹性系数为0.065 253,占总弹性系数的66.59%;通过增强经济增长动力、提升环境规制政策影响效应、促进产业结构优化升级等,对用水效率的间接弹性系数为0.032 737,占总弹性系数的33.41%,当科技进步指数每升高1%时,用水效率将直接提升0.065 253%,通过影响经济增长、规制政策、产业结构,分别间接提升用水效率0.025 83%、0.007 545%、0.000 27%。

3 结论与政策启示

以安徽省为例,运用熵值赋权法,对科技创新与用水效率进行了综合评价,得出如下主要结论:

- a. 安徽省科技创新与用水效率指数均呈持续攀升态势,比较而言,科技创新指数升幅明显高于用水效率指数;
- b. 科技创新、经济增长用规制政策对用水效率具有显著的正向驱动效应,而产业结构、水资源禀赋呈现为负向作用;
- c. 科技创新对用水效率影响包括直接与间接两方面,直接效应占总效应的2/3,间接效应占总效应的1/3。间接效应中,以经济增长的间接效应最显著,规制政策次之,产业结构较弱。

上述结论表明,产业结构对用水效率具有抑制作用,为制约用水效率提升重要因素。因此,要高度关注产业结构对用水效率的负面效应,大力提高用水效率高的以现代服务业及战略新兴产业为代表的第三产业比例,通过淘汰高耗水落后的工业设备,改进生产工艺,发展节水型建筑,积极发展现代节水农业,提升第二、第一产业节水效率。上述结论还表明,科技创新与用水效率呈正向关系,其不仅能直接提高用水效率,而且能通过影响经济增长、规制政策、产业结构间接驱动用水效率提升。为此,应以系统推进全面改革创新试点省、合(肥)芜(湖)蚌(埠)国家自主创新示范区建设为契机,厚植大众创业,万众创新氛围,加大科技创新资金投入与政策支持,激发全社会科技创新活力与潜能,促进科技创新整体水平跃升,以此促进用水效率提升;同时,也要关注科技创新通过影响经济增长、规制政策及产业结构对用水效率所起的间接作用,依靠科技创新,转变发展方式,促进产业结构优化,推动经济增长,以此驱动用水效率间接提升。

本文以安徽省为例,实证探索了科技创新对用水效率影响效应,所得结果与马海良等^[6]、佟金萍

等^[7]、姜蓓蕾等^[8]、赵良仕等^[9]、李昌彦等^[10]、雷玉桃等^[11]研究结果一致。本文以综合指数表征科技创新,既全面、客观反映了科技创新本质与内涵,也更体现当下科技创新的实际,同时,本文采用PLS-PATH方法,既考察了科技创新对用水效率影响的直接效应,又揭示了科技创新通过影响其他因子,进而影响用水效率的间接效应,使研究结果更为精准。受理论基础薄弱影响,本文未能就科技创新如何影响用水效率(即两者间作用机理)进行分析,这是笔者今后展开更深入研究的方向。

参考文献:

[1] 任俊霖,李浩,伍新木,等.长江经济带省会城市用水效率分析[J].中国人口·资源与环境,2016,26(5):101-107. (REN Junlin, LI Hao, WU Xinmu, et al. Analysis of water efficiency of capital cities in Yangtze River Economic Belt in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(5): 101-107. (in Chinese))

[2] 吴兆丹,王张琪,赵敏.科技创新支撑水生态文明建设的作用机制研究[J].水利经济,2015,33(6):40-44. (WU Zhaodan, WANG Zhangqi, ZHAO min. Support mechanism of scientific and technological innovation for construction of water ecological civilization[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2015, 33(6): 40-44. (in Chinese))

[3] KANEKO S, TANAKA K, TOYOTA T, et al. 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): 231-251.

[4] SAAL D S, DAVID P, TOM W. Determining the contribution of technical change, efficiency change and scale change to productivity growth in the privatized English and Welsh water and sewerage industry: 1985—2000[J]. Journal of Productivity Analysis, 2007, 28(1): 127-139.

[5] BYRNES J, CRASE L, DOLLERY B, et al. The relative economic efficiency of urban water utilities in regional New South Wales and Victoria. [J]. Resource and Energy Economics, 2010, 32(3): 439-455.

[6] 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 Hailiang, HUANG Dechun, ZHANG Jiguo, 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. (in Chinese))

[7] 佟金萍,马剑锋,王慧敏,等.农业用水效率与技术进步:基于中国农业面板数据的实证研究[J].资源科学,

- 2014, 36(9):1765-1772. (TONG Jinping, MA Jianfeng, LIU Gaofeng. Analysis of variations and factors of water use amount per ten thousand Yuan GDP in China based on a complete decomposition model[J]. Resources Science, 2014, 36(9):1765-1772. (in Chinese))
- [8] 姜蓓蕾,耿雷华,卞锦宇,等. 中国工业用水效率水平驱动因素分析及区划研究[J]. 资源科学,2014,36(11): 2231-2239. (JIANG Beilei, GENG Leihua, BIAN Jinyu, et al. Driving factor analysis and the spatial regionalization on the industrial water use efficiency in China[J]. Resources Science, 2014,36(11):2231-2239. (in Chinese))
- [9] 赵良仕,孙才志,郑德凤. 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,2014,69(1):121-133. (ZHAO Liangshi, SUN Caizhi, ZHENG Defeng. Water resource utilization efficiency and its spatial spillover effects measure in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(1):121-133. (in Chinese))
- [10] 李昌彦,王慧敏,佟金萍,等. 基于 CGE 模型的水资源政策模拟分析:以江西省为例[J]. 资源科学, 2014,36(1): 84-93. (LI Changyan, WANG Huimin, TONG Jinping, et al. Water resource policy simulation and analysis in Jiangxi Province based on CGE Model[J]. Resources Science, 2014,36(1):84-93. (in Chinese))
- [11] 雷玉桃,黄丽萍. 中国工业用水效率及其影响因素的区域差异研究:基于 SFA 的省际面板数据[J]. 中国软科学,2015(5): 155-164. (LEI Yuitao, HUANG Liping. Regional differences in industrial water consumption efficiency and its influencing factors for China's major industrial provinces:a study of provincial panel data based on SFA[J]. China Soft Science, 2015(5):155-164. (in Chinese))
- [12] 张来武. 科技创新驱动经济发展方式转变[J]. 中国软科学,2011(12):1-5. (ZHANG Laiwu. Scientific and technical innovation drives the transition of economic development mode[J]. China Soft Science, 2011(12):1-5. (in Chinese))
- [13] 樊杰,刘汉初. “十三五”时期科技创新驱动对我国区域发展格局变化的影响与适应[J]. 经济地理,2016,36(1):1-9. (FAN Jie, LIU Hanchu. Impacts and adaptation of China's regional development pattern changes influenced by scientific and technological innovation driven during the Thirteenth National Five-Year Plan period[J]. Economic Geography, 2016,36(1):1-9. (in Chinese))
- [14] 庞瑞芝,范玉,李扬. 中国科技创新支撑经济发展了吗? [J]. 数量经济技术经济研究,2014(10):37-52. (PANG Ruizhi, FAN Yu, LI Yang. Has technical innovation supported economics development in China? [J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2014(10):37-52. (in Chinese))
- [15] 孙才志,王妍,李红新. 辽宁省用水效率影响因素分析[J]. 水利经济,2009,27(2):1-5. (SUN Caizhi, WANG Yan, LI Hongxin. Influencing factors of water utilization efficiency in Liaoning Province[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2009,27(2):1-5. (in Chinese))
- [16] 孙才志,谢巍,邹玮. 中国水资源利用效率驱动效应测度及空间驱动类型分析[J]. 地理科学,2011,31(10): 1213-1220. (SUN Caizhi, XIE Wei, ZOU Wei. Contribution ratio measurement of water use efficiency driving effects and spatial driving type in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011,31(10):1213-1220. (in Chinese))
- [17] 洪昌红,黄本胜,邱静,等. 广东省工业用水效率影响因素分析[J]. 广东水利水电,2011(8):27-29. (HONG Changhong, HUANG Musheng, QIU Jing, et al. Analysis of Influencing factors on the utilization efficiency of industrial water in Guangdong Province [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2011(8):27-29. (in Chinese))
- [18] 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):215-228. (LI Shixiang, CHENG Jinhua, WU Qiaosheng. Regional difference of the efficiency of water usage in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2008,18(3):215-228. (in Chinese))
- [19] 盖美,王宇飞,马国栋,等. 辽宁沿海地区用水效率与经济的耦合协调发展评价[J]. 自然资源学报,2013,28(12): 2081-2094. (GAI Mei, WANG Yufei, MA Guodong, et al. Evaluation of the coupling coordination development between water use efficiency and economy in Liaoning coastal economic belt [J]. Journal of Natural Resources, 2013,28(12):2081-2094. (in Chinese))
- [20] 张乐勤,张诗颖. 基于 EKC 模型的安徽省环境质量好转条件下城镇化规模测算[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2015,33(6):8-15. (ZHANG Leqin, ZHANG Shiyong. Urbanization size measurement under the condition of environmental quality improvement in Anhui Province based on EKC Model [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2015,33(6):8-15. (in Chinese))
- [21] 李静,马潇臻. 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,2014,29(6):920-933. (LI Jing, MA Xiaocan. 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, 2014,29(6):920-933. (in Chinese))
- [22] 张乐勤,李荣富,陈素平,等. 安徽省 1995—2009 年能源消费碳排放驱动因子分析及趋势预测:基于 STIRPAT 模型[J]. 资源科学,2012,34(2):316-327. (ZHANG Leqin, LI Rongfu, CHEN Suping, et al. Trend prediction and analysis of driving factors of carbon emissions from energy consumption during the period

- 1995-2009 in Anhui Province based on the STIRPAT Model[J]. Resources Science, 2012, 34(2): 316-327. (in Chinese))
- [23] 马明德,马学娟,谢应忠,等. 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 682-689. (MA Mingde, MA Xuejuan, XIE Yingzhong, et al. Analysis the relationship between ecological footprint (EF) of ningxia and influencing factors: partial least-squares regression[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(3): 682-689. (in Chinese))
- [24] 徐春华,张华,张兰,等. 基于通径分析的兰州北山三种典型植物光合作用影响因子[J]. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1289-1294. (XU Chunhua, ZHANG Hua, ZHANG Lan, et al. Factors influencing photosynthesis of three typical plant species in Beishan Mountain of Lanzhou based on path analysis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(5): 1289-1294. (in Chinese))
- [25] 张乐勤. 基于 PATH-STIRPAT 模型的城镇化演进边际资源环境胁迫效应测度及趋势预测:以安徽省为例[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2016, 39(5): 455-461. (ZHANG Leqin. Measurement and trend prediction of the marginal resource environment stress effect based on urbanization evolution of STIRPAT PATH Model:take Anhui Province as an example[J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science), 2016, 39(5): 455-461. (in Chinese))
- [26] 张乐勤,陈素平,王文琴,等[J]. 安徽省近 15 年建设用地变化对碳排放效应测度及趋势预测:基于 STIRPAT 模型[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 950-958. (ZHANG Leqin, CHEN Suping, WANG Wenqin, et al. Measurement and trend analysis of carbon emissions from construction land changes in Anhui in the recent 15 years: based on STIRPAT Model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(3): 950-958. (in Chinese))
- [27] 张乐勤,张勇. 安徽省城镇化演进边际生态环境效应的测度与分析[J]. 水土保持通, 2014, 34(4): 208-214. (ZHANG Leqin, ZHANG Yong. Measurement and analysis on marginal eco-environmental effects of urbanization evolution in Anhui Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(4): 208-214. (in Chinese))
- [28] 吴晓勤,高冰松,郑军. 资源环境约束对城镇人口增长预测及空间分布的影响:以安徽省为例[J]. 城市发展研究, 2010, 17(8): 68-74. (WU Xiaoqin, GAO Bingsong, ZHENG Jun. The influence of resources and environment restraint in urban population growth tendency and spatial distribution: a case study of Anhui[J]. Urban Studies, 2010, 17(8): 68-74. (in Chinese))
- [29] 干春晖,郑若谷,余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J]. 经济研究, 2011(5): 4-16. (GAN Chunhui, ZHENG Ruogu, YU Dianfan. An empirical study on the effects of industrial structure on economic growth and fluctuations in China [J]. Economic Research Journal, 2011(5): 4-16. (in Chinese))
- [30] 马海良,黄德春,姚惠泽. 技术创新、产业绩效与环境规制:基于长三角的实证分析[J]. 软科学, 2012, 26(1): 1-5. (MA Hailiang, HUANG Dechun, YAO Huize. Technological innovation industrial performance and environmental regulation: based on empirical test of Yangtze River Delta economic region [J]. Soft Science, 2012, 26(1): 1-5. (in Chinese))
- [31] 何为,刘昌义,刘杰,等. 环境规制、技术进步与大气环境质量:基于天津市面板数据实证分析[J]. 科学学与科学技术管理, 2015, 36(5): 51-61. (HE Wei, LIU Changyi, LIU Jie, et al. Environmental regulation, technology change, and air pollution: a panel study on Tianjin [J]. Science of Science and Management of S. & T., 2015, 36(5): 51-61. (in Chinese))
- [32] 张中元,赵国庆. FDI、环境规制与技术进步[J]. 数量经济技术经济研究, 2012(4): 19-32. (ZHANG Zhongyuan, ZHAO Guoqing. FDI, Environmental regulation and technological progress[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2012(4): 19-32. (in Chinese))
- [33] 张成,陆旸,郭路,等. 环境规制强度和和生产技术进步[J]. 经济研究, 2011(2): 113-124. (ZHANG Cheng, LU Yang, GUO Lu, et al. The intensity of environmental regulation and technological progress of production [J]. Economic Research Journal, 2011(2): 113-124. (in Chinese))
- [34] 何慧爽. 环境质量、环境规制与产业结构优化:基于中国东、中、西部面板数据的实证分析[J]. 地域研究与开发, 2015, 34(1): 105-110. (HE Huishuang. Environmental quality, environmental regulation and industrial structure optimization: based on the panel data empirical analysis of the eastern, central and western areas of China [J]. Areal Research and Development, 2015, 34(1): 105-110. (in Chinese))
- [35] LANOIE P, PATRY M, LAJEUNESSE R. Environmental regulation and productivity: testing the porter hypothesis [J]. Journal of Productivity Analysis, 2008, 30(2): 121-128.
- [36] 沈能,刘凤朝. 高强度的环境规制真能促进技术创新吗? 基于“波特假说”的再检验[J]. 中国软科学, 2012(4): 49-59. (SHEN Neng, LIU Fengchao. Can intensive environmental regulation promote technological innovation? Porter Hypothesis reexamined [J]. China Soft Science, 2012(4): 49-59. (in Chinese))
- [37] 刘传江,胡威,吴晗晗. 环境规制、经济增长与地区碳生产率:基于中国省级数据的实证考察[J]. 财经问题研究, 2015(10): 31-37. (LIU Chuanjiang, HU Wei, WU Hanhan. Environmental regulation, economic growth and regional carbon productivity: an empirical study based on China's provincial data [J]. Research on Financial and Economic Issues, 2015(10): 31-37. (in Chinese))

(收稿日期:2017-02-09 编辑:郑孝宇)