

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.023

基于多重检验 EKC 的中国用水与 产业发展关系分析

李一阳¹, 王红瑞¹, 杨默远², 潘兴瑶², 徐晋轩³

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048;
3. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:在考虑人均 GDP 和人均能源消耗量两个关键指标的基础上, 综合分析了 1997—2020 年全国用水总量与工业、农业和第三产业用水量的环境库兹涅茨曲线(EKC), 利用 augmented Dickey-Fuller 检验、 t 检验和 Breusch-Godfrey 检验等多重检验优选 EKC 模型参数, 并进一步对水资源供给端和需求端进行分析。结果表明: 用水总量、工业用水量和农业用水量的 EKC 均呈倒“N”形, 用水总量、工业用水量和农业用水量已进入控制性下降阶段; 第三产业用水量 EKC 呈线性增长趋势, 第三产业用水量还未到达控制性下降阶段, 仍将持续增长; 第三产业用水量是未来用水的主要增长点, 应加强地下水综合减采工作。

关键词:环境库兹涅茨曲线; 工业用水量; 农业用水量; 第三产业用水量; GDP; 能源消耗量

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2023)02-0190-09

Analysis of relationship between water consumption and industrial development in China based on multiple testing Kuznets curve // LI Yiyang¹, WANG Hongrui¹, YANG Moyuan², PAN Xingyao², XU Jinxuan³ (1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resource and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Considering the two key indicators of per capita GDP and per capita energy consumption, this study comprehensively analyzed the environmental Kuznets curve (EKC) of the total water consumption and different industrial water consumptions in China from 1997 to 2020, and the multiple tests, including augmented Dickey-Fuller test, t -test, and Breusch-Godfrey test, were used to optimize the parameters of the EKC model. Then, the supply side and demand side of water resources were further analyzed. Results indicate that EKCs of total water consumption, industrial water consumption, and agricultural water consumption show inverted “N” shape, and the total water consumption, industrial water consumption, and agricultural water consumption exhibit declining trends; EKC of tertiary industrial water consumption exhibits a linear growth trend, and the tertiary industrial water consumption has not reached the declining stage yet; tertiary industrial water consumption is the main growing point of water consumption in future, and reduction of groundwater extraction should be emphasized.

Key words: environmental Kuznets curve; industrial water consumption; agricultural water consumption; tertiary industrial consumption; GDP; energy consumption

受人类活动和气候变化的双重影响, 流域和区域水资源时空分布不均现象愈发突出^[1], 不同行业的用水需求和用水效率因此发生较大变化, 快速增长和社会发展引发了用水量、排污量增加和生

态系统受人工干扰强烈等问题^[2]。全国供用水总量从新中国成立初期的 1 031 亿 m³ 增加到 2020 年的 5 812 亿 m³ (增加近 5 倍), 供给有限而需求扩张导致供需不匹配, 正常年份全国供需缺口超过 500

基金项目:北京市自然科学基金(8222057); 国家自然科学基金(52279005)

作者简介:李一阳(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: ly996422@163.com

通信作者:王红瑞(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源与环境规划研究。E-mail: henrywang@bnu.edu.cn

亿 m^3 ^[3]。为缓解紧张的用水形势,诸多学者在水足迹^[4-6]、水资源利用效率^[7-9]、用水量^[10-12]等方面开展研究,其中识别用水量与产业发展关系是明晰水资源开发利用演变规律的重要内容,能够指导供水结构优化调整,支撑水资源可持续开发利用。张兵兵^[13]运用多目标优化模型,在工业经济增长最大化、水资源利用量最小化与水环境污染最小化的多重目标下,对用水结构进行规划。张鑫等^[14]通过区间模糊双层规划模型对榆林市各产业用水进行优化,结果显示榆林市产业结构应向“三二一”型转变。张玲玲等^[15]构建了总量约束控制下的江苏省区域用水结构调控系统,识别第一产业用水量和第二产业用水量的主导作用。王红瑞等^[16]采用层次分析法与客观赋权法综合赋权,对2019年中国31个省级行政区的水资源集约安全利用进行了评估,结果显示中国水资源集约安全利用总体上处于中等水平。焦士兴等^[17]采用生态位、生态熵模型系统分析了安阳市用水结构和产业结构的生态位动态变化,研究发现安阳市第一、第二产业生态位波动下降,第三产业生态位持续上升。上述成果为探明我国用水效率和水资源承载能力提供了重要参考,但现有成果缺乏从全国尺度分析工业和第三产业用水量的时空演变规律,并识别用水量与经济发展水平、能源消耗间的匹配关系。

库兹涅茨曲线由美国经济学家 Kuznets 提出,用于描述收入分配状况随经济发展动态变化的过程,即在经济增长过程中,贫富差距会经历一个先增大、后减小的过程^[18]。相似的倒“U”形变化规律同样适用于环境污染与经济增长的关系中,为此, Grossman 等^[19]提出了环境库兹涅茨曲线 (environmental Kuznets curve, EKC) 的概念,并被广泛应用于用水量与经济增长关系的研究。自 EKC 提出后,国外诸多学者开展了针对用水量 EKC 的研究。Bhattarai 等^[20]通过分析农业用水量 EKC 发现农业用水量的减少主要归因于灌溉效率的提高; Katz^[21]基于多个样本分别估计了 GDP 与用水总量和各产业用水量之间的关系,但未考虑除人均收入外其他因素与用水量之间的关系。

我国的用水量 EKC 研究开始于 21 世纪初期,贾绍凤等^[22]分析了 25 个发达国家工业用水量与经济增长的 EKC,揭示了普遍存在的倒“U”形现象。李强等^[23]分别对中国人均工业用水量、人均农业用水量、人均生活用水量 EKC 进行了验证,表明人均工业用水量,人均农业用水量与人均 GDP 间 EKC 存在倒“U”形关系,而人均生活用水量 EKC 不存在倒“U”形关系,但上述研究未针对不同产业选取对应人均 GDP 进行细化分析。程亮等^[24]通过多种局

部回归方法分析了山东省工业用水量 EKC,并测算出了用水效率和产业结构,表明山东省工业用水量 EKC 呈“N”形。张兵兵等^[25]等对全国东、中、西部地区的工业用水量 EKC 进行研究,表明东部地区 EKC 呈倒“U”形,中部地区呈“N”形,全国及西部地区用水量单调递增,然而该研究在时间选取上存在局限性,2000—2014 年的数据序列未能完整地反映工业用水量 EKC 变化趋势。针对农业用水量 EKC,叶友皓等^[26]分别研究了南、北方不同省份农业用水量与粮食产量之间的关系,发现北方省份农业用水量与粮食产量 EKC 之间呈“N”形关系,南方省份农业用水量与粮食产量之间呈倒“U”形关系,然而并未考虑用水拐点的具体数值,影响了结论的准确性。国内大多数学者着重研究工业、农业用水量 EKC,而忽视对第三产业用水量 EKC 和用水总量 EKC 的研究。同时,缺乏对不同行业用水量 EKC 的横向对比分析。

模型结构、参数检验和指标的选取是影响用水量 EKC 拟合精度和科学性的主要因素。在模型结构优选方面,对数形式具有减少数据波动、消除异方差、减少变量极端值等特性^[27]。在参数检验方面,主要包括 Levin-Lin-Chu 检验^[28]、Breitung 检验^[29]、Durbin-Watson 检验^[30]、IPS (Im-Pesaran-Shin) 检验^[31]以及 ADF (augmented Dickey-Fuller) 检验^[32],其中 ADF 检验相比其他检验方法具有精确性更高的特点。在指标选取方面,现有用水量 EKC 研究主要关注人均 GDP,更多考虑的是经济发展的影响,缺乏对能源消耗^[33]、人口密度^[34]、农业产出^[35]、用水效率^[36]等衡量产业发展水平指标的关注。能源和水资源作为人类生存的重要资源,正变得日益稀缺,水资源短缺和能源过度使用所造成的生态环境问题与社会需求相矛盾,可能会成为阻碍未来社会发展的瓶颈^[37]。因此,深入理解水资源和能源之间的关系具有重要意义。

本文以 1997—2020 年全国用水总量与分行业用水量为分析对象,考虑人均 GDP 和人均能源消耗量两个衡量产业发展的关键指标,在分析拟合精度的基础上,综合运用 ADF 检验、Breusch-Godfrey 检验^[38]、残差检验和 t 检验等方法,合理确定全国分行业用水量与产业发展的关系,以期揭示分行业用水量随产业发展的阶段性变化规律。

1 基于多重检验的 EKC 模型构建

1.1 EKC 模型

本文采用的 EKC 模型包括一次、二次和三次模型和对数一次、二次和三次模型,其通式分别为

$$y = \alpha + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + z + \varepsilon \quad (1)$$

$$\ln y = \alpha + \beta_1 \ln x + \beta_2 (\ln x)^2 + \beta_3 (\ln x)^3 + \varepsilon \quad (2)$$

式中: y 为环境因素, 即分行业用水量; x 为社会经济发展因素, 选择人均分行业 GDP 和能源消耗量两类指标; α 为常数项; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为模型系数; z 为其他因子对分行业用水量的影响; ε 为误差项。本文分别利用上述两类模型对用水量与人均 GDP 和人均能源消耗量数据进行拟合分析, 为进一步分析拟合结果的合理性和可靠性, 通过确定性系数 (R^2) 进行拟合效果分析, 并利用 ADF 检验^[32]、 t 检验、Breusch-Godfrey 检验^[38] 对拟合结果进行参数检验, 优选合理的 EKC 模型。

利用拟合得到的系数, 根据以下原则判定用水量-人均 GDP 和用水量-人均能源消耗量 EKC 形态: 当 $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0, \beta_3 = 0$ 时, 为“U”形曲线; 当 $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0, \beta_3 = 0$ 时, 为倒“U”形曲线; 当 $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0, \beta_3 > 0$ 时, 为“N”形曲线; 当 $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0, \beta_3 < 0$ 时, 为倒“N”形曲线。

1.2 数据来源

本文采用的全国水资源开发利用和社会经济发展的相关数据主要分为 3 类, 其来源分别为: ①1997—2020 年全国用水量数据取自《中国水资源公报》, 包括用水总量以及农业、工业、第三产业分行业用水量; ②1997—2020 年全国人均 GDP 以及工业、农业、第三产业人均 GDP 取自国家统计局发布的《国民经济核算统计报表》; ③2000—2019 年全国人均能源消耗量(以标准煤为能源计量单位) 以及工业、农业、第三产业人均能源消耗量(以标准煤为能源计量单位) 取自国家统计局发布的《能源统计报表》。为了消除通货膨胀的影响, 以 1997 年的人均 GDP 为基准值, 通过递乘每年的 GDP 增长指数, 核算得到每年的实际人均 GDP, 计算公式为

$$G_t = gG_{t-1} \tag{3}$$

式中: G_t 为当年实际人均 GDP; G_{t-1} 为上一年实际人均 GDP; g 为当前 GDP 增长指数。

1.3 研究技术路线

为分析中国用水量与各产业发展间关系, 选取人均 GDP 和人均能源消耗量作为衡量产业经济发展的指标, 通过确定性系数初步筛选出拟合模型, 再依次应用 ADF 检验、 t 检验、Breusch-Godfrey 检验对各产业模型进一步筛选, 最后采用 Matlab 曲线拟合分析各产业用水量-人均能源消耗量和各产业用水量-人均 GDP 的 EKC 特征。用水量与产业发展关系研究技术路线如图 1 所示。

2 结果与分析

2.1 模型拟合与优选

2.1.1 模型平稳性分析

针对用水量、人均 GDP、人均能源消耗量 3 项

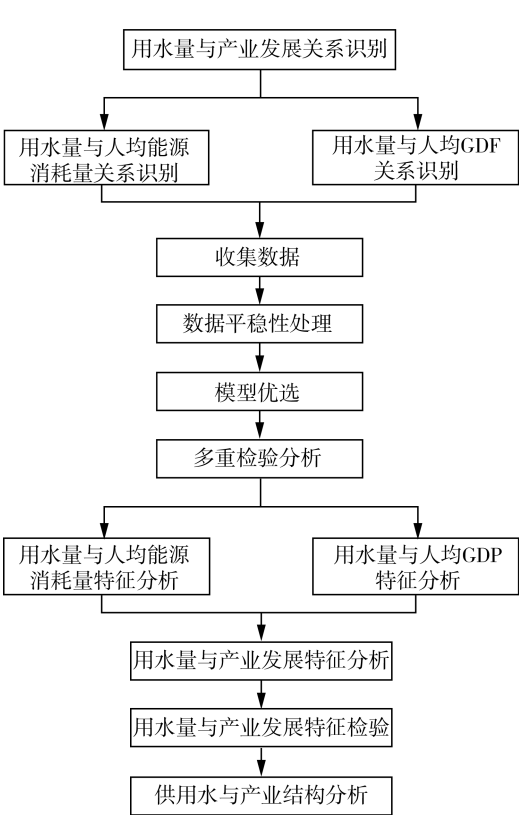


图 1 用水量与产业发展关系研究技术路线

Fig. 1 Technical route of research of relationship between water consumption and industrial development

12 组数据, 分别利用 ADF 检验进行数据平稳性分析, 为保证拟合模型平稳性, 选取用水量-人均 GDP、用水量-人均能源消耗量关系方程中最大滞后阶数作为模型滞后阶数, 滞后阶数选取结果见表 1。

2.1.2 拟合效果分析

针对用水总量以及农业、工业、第三产业用水量, 根据平稳性分析结果, 分别利用 6 种 EKC 模型拟合用水量-人均 GDP 和用水量-人均能源消耗量平稳状态下的关系, 拟合结果的 R^2 见表 2。除农业用水量与农业人均 GDP 和农业人均能源消耗量关系外, 总体拟合结果良好, R^2 普遍高于 0.7。随着曲线模型幂级数由一次增加至三次, 拟合精度有较为明显的提升。其中, 用水量-人均能源消耗量的三次曲线模型拟合精度最高, 4 类用水分析对象 R^2 的均值为 0.85, 略高于对数三次曲线模型拟合精度 (R^2 均值为 0.83); 对数三次曲线模型对用水量-人均 GDP 的拟合精度最高, 4 类用水分析对象 R^2 的均值为 0.86, 高于三次曲线模型拟合精度 (R^2 均值为 0.83)。而农业用水量与农业人均 GDP 和农业人均能源消耗量关系拟合结果的 R^2 较小, 反映出农业用水量与经济和能源之间关联性不强。综合判定, 初步选择三次曲线和对数三次曲线作为进一步开展参数检验的模型。

表 1 滞后阶数选取结果
Table 1 Selection result of lag order

模型结构	用水量-人均能源消耗量方程滞后阶数				用水量-人均 GDP 方程滞后阶数			
	用水总量	农业用水量	工业用水量	第三产业用水量	用水总量	农业用水量	工业用水量	第三产业用水量
一次曲线	1	0	1	1	2	2	2	2
二次曲线	1	1	2	1	1	1	2	2
三次曲线	1	1	1	2	1	不平稳	1	1
对数一次曲线	1	0	2	2	2	0	2	2
对数二次曲线	1	0	2	2	2	0	2	2
对数三次曲线	1	0	2	1	2	0	2	2

注:不平稳时间序列表示没有呈现出具有规律性的长期趋势,下同。

表 2 拟合结果确定性系数
Table 2 Coefficient of determination of fitting results

模型结构	用水量-人均能源消耗量模型拟合结果 R^2				用水量-人均 GDP 模型拟合结果 R^2			
	用水总量	农业用水量	工业用水量	第三产业用水量	用水总量	农业用水量	工业用水量	第三产业用水量
一次曲线	0.82	0.04	0.37	0.94	0.60	-0.02	0.01	0.90
二次曲线	0.83	0.13	0.74	0.94	0.88	-0.06	0.89	0.94
三次曲线	0.95	0.60	0.87	0.96	0.89	0.57	0.89	0.97
对数一次曲线	0.83	0.02	0.48	0.95	0.70	-0.04	0.72	0.96
对数二次曲线	0.84	0.23	0.67	0.95	0.75	-0.07	0.74	0.97
对数三次曲线	0.95	0.59	0.84	0.95	0.92	0.64	0.93	0.98

2.1.3 检验结果分析

针对三次曲线和对数三次曲线模型分别开展 t 检验和 Breusch-Godfrey 检验,结果表明,除用水总量-人均总 GDP 和工业用水量-工业人均 GDP 的三次曲线模型以及第三产业用水量-第三产业人均能源消耗量的对数三次曲线模型外,其他模型均通过 t 检验,且所有模型皆通过 Breusch-Godfrey 检验。综合拟合优度及 t 检验和 Breusch-Godfrey 检验结果,选用三次曲线模型作为用水量-人均能源消耗量的拟合模型;选取对数三次曲线模型作为用水量-人均 GDP 的拟合模型。根据 ADF 检验结果,模型数据时间段选取结果见表 3。

2.2 用水总量特征识别

通过模型拟合与优选得出,用水总量-人均总 GDP 的拟合曲线模型为

$$\ln y = -49.69 \ln x + 5.16 (\ln x)^2 - 0.17 (\ln x)^3 + 167.5 \quad (4)$$

该模型的 EKC 呈倒“N”形。拟合曲线(图 2(a))表明,1999—2003 年用水总量随人均总 GDP 的增长而减少,并于 2003 年达到谷值(用水总量为 5 320 亿 m^3 、人均总 GDP 为 10 099 元);用水总量在

2004—2013 年随人均总 GDP 增长而快速增长,于 2013 年达到峰值(用水总量为 6 183.25 亿 m^3 、人均总 GDP 为 25 497.13 元)。2004—2013 年的万元 GDP 用水量从 463 m^3 减少到 177 m^3 ,年均下降率为 8.43%,而实际人均总 GDP 年均增长率为 10.21%,用水效率增长速度低于实际人均总 GDP 增长速度,导致 EKC 快速上升。“三条红线”政策的发布有效控制了用水总量的增长趋势,用水总量自此呈现下降趋势。

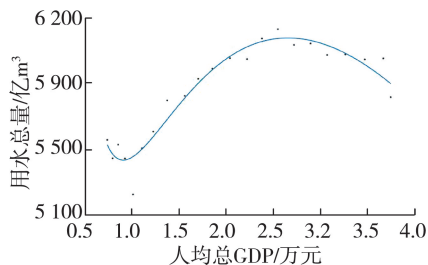
通过模型拟合与优选得出,用水总量-人均能源消耗总量的拟合曲线模型为

$$y = -4.52x + 0.002x^2 - 3.34 \times 10^{-7}x^3 + 8275 \quad (5)$$

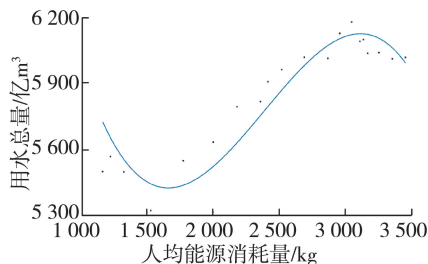
该模型的 EKC 呈倒“N”形。拟合曲线(图 2(b))表明,用水总量-人均总 GDP 和用水总量-人均能源消耗总量的 EKC 变化趋势相似,用水总量于 2003 年达到谷值,于 2013 年达到峰值。随着 2013 年“十二五”规划中能源转型的推广,高耗水能源产业逐渐被清洁能源取代,用水总量在 2013 年后呈现下降趋势。用水总量-人均能源消耗总量的倒“N”形曲线关系反映出我国能源产业从粗放发展向集约

表 3 模型数据时间段选取结果
Table 3 Model data duration selection results

模型结构	用水量-人均能源消耗量模型				用水量-人均 GDP 模型			
	用水总量	农业用水量	工业用水量	第三产业用水量	用水总量	农业用水量	工业用水量	第三产业用水量
三次曲线	2001—2019 年	2001—2019 年	2001—2019 年	2001—2019 年	1998—2020 年	不平稳	1998—2020 年	1998—2020 年
对数三次曲线	2001—2019 年	2000—2019 年	2002—2019 年	2001—2019 年	1999—2020 年	1997—2020 年	1999—2020 年	1999—2020 年



(a) 用水总量-人均总 GDP



(b) 用水总量-人均能源消耗总量

图2 用水总量 EKC

Fig.2 EKC of total water consumption

高效发展的转变,也反映出我国能源与经济之间的紧密关系,GDP 与能源消耗量之间无法脱钩。

2.3 分行业用水特征识别

2.3.1 农业用水量特征识别

根据拟合结果,农业用水量-农业人均 GDP 的拟合曲线模型为

$$\ln y = -511.2 \ln x + 68.68 (\ln x)^2 - 3.07 (\ln x)^3 + 1276 \quad (6)$$

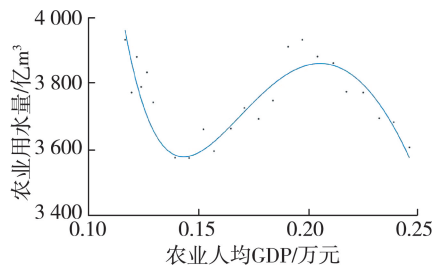
该模型的 EKC 呈倒“N”形。拟合曲线(图 3 (a))表明,农业用水量从 1997 年的 3920 亿 m^3 减少到 2020 年的 3612 亿 m^3 ;1997—2003 年农业用水量随农业人均 GDP 的增长而减少,并于 2003 年达到用水谷值(农业用水量为 3431 亿 m^3 、农业人均 GDP 为 1320 元);2004—2013 年,受人口增长和经济高速增长的影响,农业用水量随农业人均 GDP 增长而跃升,于 2013 年达到峰值;2013 年以后农业用水量随农业人均 GDP 的增长而减少。

根据拟合结果,农业用水量-农业人均能源消耗量的拟合曲线模型为

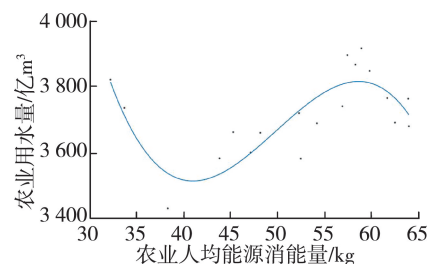
$$y = -805.8x + 16.7x^2 - 0.11x^3 + 16180 \quad (7)$$

该模型的 EKC 呈倒“N”形。拟合曲线(图 3 (b))表明,2001—2003 年农业用水量随农业人均能源消耗量的增长而减少,农业用水量于 2003 年达到谷值(农业用水量为 3431 亿 m^3 、农业人均能源消耗量为 38.34 kg);2004—2013 年农业用水量随农业人均能源消耗量的增长而跃升,于 2013 年达到峰值(农业用水量为 3920 亿 m^3 、农业人均能源消耗量为 58.91 kg)。

农业用水量-农业人均能源消耗量曲线比农业



(a) 农业用水量-农业人均 GDP



(b) 农业用水量-农业人均能源消耗量

图3 农业用水量 EKC

Fig.3 EKC of agricultural water consumption

用水量-农业人均 GDP 曲线拟合效果差,多个拟合值与实际数据存在较大偏差。综合拟合优度的结果发现农业人均能源消耗量、农业人均 GDP 与农业用水量间关联性不大。

2.3.2 工业用水量特征识别

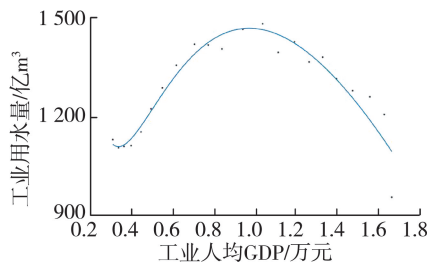
根据拟合结果,工业用水量-工业人均 GDP 的拟合曲线模型为

$$\ln y = -90.64 \ln x + 10.51 (\ln x)^2 - 0.404 (\ln x)^3 + 266.7 \quad (8)$$

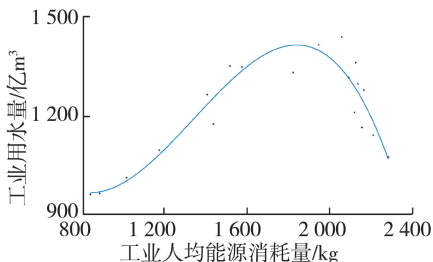
该模型的 EKC 呈倒“N”形。拟合曲线(图 4 (a))表明,工业用水量从 1999 年的 1157 亿 m^3 减少到 2020 年的 1030 亿 m^3 。1999—2011 年工业用水量随工业人均 GDP 增长而跃升,于 2011 年达到峰值(工业用水量为 1461 亿 m^3 、工业人均 GDP 为 10388.77 元);万元工业增加值用水量从 265 m^3 减少到 104 m^3 ,年均下降率为 8.33%,实际工业人均 GDP 增长率为 11.25%,用水效率增长速度低于实际工业人均 GDP 增长速度。2011 年以后,工业用水量随工业人均 GDP 的增长而减少,于 2020 年达到谷值(工业用水量为 1030 亿 m^3 、工业人均 GDP 为 16661.63 元);万元工业增加值用水量从 91 m^3 减少到 43 m^3 ,年均下降率为 9.11%,实际工业人均 GDP 增长率为 5.93%,用水效率增长速度高于实际工业人均 GDP 增长速度。

根据拟合结果,工业用水量-工业人均能源消耗量的拟合曲线模型为

$$y = -2.806x + 0.002x^2 - 6.026 \times 10^{-7}x^3 + 2147 \quad (9)$$



(a) 工业用水量-工业人均 GDP



(b) 工业用水量-工业人均能源消耗量

图 4 工业用水量 EKC

Fig. 4 EKC of industrial water consumption

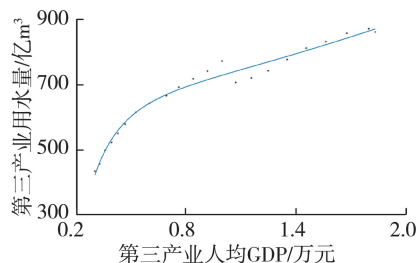
该模型的 EKC 呈倒“N”形。拟合曲线(图 4 (b))表明,2001—2011 年工业用水量随工业人均能源消耗量的增长而跃升,于 2011 年达到峰值(工业用水量为 1 461 亿 m^3 、工业人均能源消耗量为 2 060 kg);实际万元工业增加值用水量年均下降率为 8.11%,工业人均能源消耗量增长率为 10.29%,用水效率增长速度低于能源消耗量增长速度。2012—2019 年工业用水量随工业人均能源消耗量的增长而减少,实际万元工业增加值用水量年均下降率为 8.19%,工业人均能源消耗量年均增长率为 4.1%,用水效率增长速度高于能源消耗量增长速度。工业用水量-工业人均能源消耗量曲线与工业用水量-工业人均 GDP 曲线相似,反映出工业经济与工业能源间的紧密关系。

2.3.3 第三产业用水量特征识别

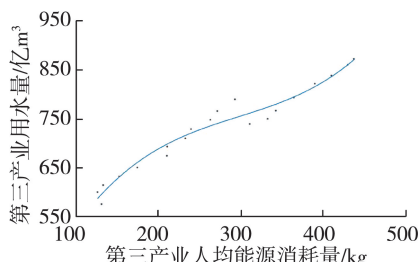
第三产业用水量-第三产业人均 GDP 和第三产业用水量-第三产业人均能源消耗量的拟合结果(图 5)表明,第三产业用水量随第三产业人均 GDP 和第三产业人均能源消耗量的增长基本呈现线性增长趋势,第三产业用水量 EKC 不存在倒“U”形或倒“N”形规律,如何合理控制第三产业用水量是未来管控水资源总量增长的关键点。

2.4 用水量-产业结构特征检验

近年来,我国经济增长迅速,而用水量则增长缓慢,迥异的增长速率容易造成离群值的出现,进而影响拟合精度。为减轻数据异常值对拟合结果的影响和拟合过程中产生的随机波动,分别计算用水量、人均 GDP、人均能源消耗量每 5 a 滑动平均值,并对滑动平均处理后的用水量-人均 GDP、用水量-人均能



(a) 第三产业用水量-第三产业人均 GDP



(b) 第三产业用水量-第三产业人均能源消耗量

图 5 第三产业用水量 EKC

Fig. 5 EKC of tertiary industrial water consumption

源消耗量进行拟合。

a. 处理后的用水总量-人均总 GDP 和用水总量-人均能源消耗总量的拟合曲线模型分别为

$$\ln y = -41.77 \ln x + 4.36 (\ln x)^2 - 0.15 (\ln x)^3 + 141.7 \quad (10)$$

$$y = -6.49x + 0.002x^2 - 3.93 \times 10^{-7}x^3 + 10\,230 \quad (11)$$

b. 处理后的农业用水量-农业人均 GDP 和农业用水量-农业人均能源消耗量的拟合曲线模型分别为

$$\ln y = -591.4 \ln x + 79.45 (\ln x)^2 - 3.557 (\ln x)^3 + 1475 \quad (12)$$

$$y = -1\,358x + 27x^2 - 0.17x^3 + 25\,980 \quad (13)$$

c. 处理后的工业用水量-工业人均 GDP 和工业用水量-工业人均能源消耗量的拟合曲线模型分别为

$$\ln y = -65.03 \ln x + 7.61 (\ln x)^2 - 0.295 (\ln x)^3 + 191.6 \quad (14)$$

$$y = -3.31x + 0.002x^2 - 6.36 \times 10^{-7}x^3 + 2\,482 \quad (15)$$

d. 处理后的第三产业用水量-第三产业人均 GDP 和第三产业用水量-第三产业人均能源消耗量拟合结果表明,第三产业用水量随第三产业人均 GDP 和第三产业人均能源消耗量的增长呈线性增长趋势。

综上,经滑动平均处理的用水量-人均能源消耗量和用水量-人均 GDP 拟合曲线模型的 EKC 趋势与未经滑动平均处理的模型一致,原模型的精度未受离群值影响。

2.5 供用水及产业结构分析

为识别我国水资源供给侧与需求侧随社会经济发展的变化,通过水源供水量占比^[39]和产业用水量占比两个参数分析我国水资源供需情势。

从需求端来看,全国各产业用水量占比随着产业升级和城镇化建设而发生巨大的变化(表4)。受节水灌溉技术的应用及节水品种培育技术^[40]的影响,农业用水效率大大提高,农业用水量占比呈现下降趋势。我国工业用水量占比同样呈现下降趋势,主要原因是产业结构的调整,低耗水产业增速高于高耗水产业,产生了替代效应,与此同时,各工业领域的用水效率显著提高^[41]。生活用水量和生态用水量占比分别受高速城镇化发展和水生态环境质量要求提升的影响,呈现持续增长趋势。

表4 1997—2020年不同水源供水量及各产业用水量占比
Table 4 Proportions of water supply from different sources and water consumption of different industries from 1997 to 2020

年份	产业用水量占比/%				水源供水量占比/%		
	农业用水量	工业用水量	第三产业用水量	生态用水量	地表供水量	地下水供水量	其他
1997	71	20	9	0	81	18	1
2004	66	22	12	2	81	19	0
2012	64	22	12	2	81	18	1
2020	62	18	15	5	83	15	2

从供给端来看,地表水供水量占比基本维持在80%,而地下水供水量占比有明显下降趋势,非常规水源(雨水,再生水)供水量占比则呈现增长趋势(表4)。虽然全国地下水供水量占比呈现下降趋势,但部分地区地下水超采仍十分严重。北方平原区地下水超采面积达25.8万km²,占平原区总面积的9.71%。其中,河北、山东、河南地下水超采面积分别占总超采面积的27.7%、24.8%和17.6%^[42]。因此,超采区的治理不容忽视,应加强地下水量和水位的双控管理,逐步实现地下水采补平衡和水位恢复。

3 结 论

a. 经多重检验和模型优选后,选择三次曲线模型作为用水量-人均能源消耗量的拟合模型,对数三次曲线模型作为用水量-人均GDP的拟合模型,整体拟合效果良好。

b. 用水量-人均能源消耗量和用水量-人均GDP的拟合曲线趋势相似,进一步验证了EKC存在的客观性,反映出我国经济与能源之间的紧密联系。用水总量、工业用水量和农业用水量的EKC均为倒“N”形,三类用水量均已进入控制性下降阶段;第三产业用水量随第三产业人均GDP和第三产业人均

能源消耗量的增长呈线性增长趋势,不存在倒“U”形或倒“N”形规律。

c. 对需求端和供给端的分析表明,我国未来用水量增长驱动力主要为生活用水,而供给端则应重点关注地下水超采问题,应通过加强非常规水的利用,减少地下水超采。

参考文献:

[1] 慕星,赵勇,刘欢,等. 气候变化和人类活动影响下径流演变研究进展[J]. 人民黄河,2021,43(5):35-41. (MU Xing,ZHAO Yong,LIU Huan,et al. Research advances on impacts of climate change and human activities on streamflow variation[J]. Yellow River,2021,43(5):35-41. (in Chinese))

[2] 侍孝瑞,王远坤,卞锦宇,等. 水资源承载力关键驱动因素识别研究[J]. 南京大学学报(自然科学),2018,54(3):628-636. (SHI Xiaorui,WANG Yuankun,BIAN Jinyu,et al. Identification of key driving factors of water resources carrying capacity [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science),2018,54(3):628-636. (in Chinese))

[3] 赵勇,李海红,刘寒青,等. 增长的规律:中国用水极值预测[J]. 水利学报,2021,52(2):129-141. (ZHAO Yong,LI Haihong,LIU Hanqing,et al. The law of growth: prediction of peak water consumption in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(2): 129-141. (in Chinese))

[4] 徐晋轩,杨默远,潘兴瑶,等. 基于水足迹的北京市水资源开发利用演变特征分析[J]. 水资源保护,2022,38(5):96-104. (XU Jinxuan,YANG Moyuan,PAN Xingyao,et al. Analysis of evolution characteristics of water resources development and utilization in Beijing based on water footprint[J]. Water Resources Protection, 2022,38(5):96-104. (in Chinese))

[5] 刘梅,许新宜,王红瑞,等. 基于虚拟水理论的河北省水足迹时空差异分析[J]. 自然资源学报,2012,27(6):1022-1034. (LIU Mei,XU Xinyi,WANG Hongrui,et al. Water footprint and spatial-temporal analysis of Hebei Province based on virtual water theory [J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(6): 1022-1034. (in Chinese))

[6] 洪思扬,王红瑞,朱中凡,等. 辽宁省水资源生态足迹与生态承载力分析[J]. 水利经济,2016,34(3):46-52. (HONG Siyang,WANG Hongrui,ZHU Zhongfan,et al. Ecological footprint and carrying capacity of water resources in Liaoning Province[J]. Journal of Economics of Water Resources,2016,34(3):46-52. (in Chinese))

[7] 刘波,汪紫薇,王文鹏,等. 我国城市用水效率关键指标时空格局分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):534-541. (LIU Bo,WANG Ziwei,WANG

- Wenpeng, et al. Spatiotemporal characteristics analysis of major indicators of urban water use efficiencies over mainland China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(6):534-541. (in Chinese))
- [8] 高雄,王红瑞,高媛媛,等. 基于迭代修正的水资源利用效率评价模型及其应用[J]. 水利学报,2013,44(4):478-488. (GAO Xiong, WANG Hongrui, GAO Yuanyuan, et al. A model based on iteration-correction for water resources utilization efficiency evaluation and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4):478-488. (in Chinese))
- [9] 高媛媛,许新宜,王红瑞,等. 中国水资源利用效率评估模型构建及应用[J]. 系统工程理论与实践,2013,33(3):776-784. (GAO Yuanyuan, XU Xinyi, WANG Hongrui, et al. New model for water use efficiency evaluation of China and its application [J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2013, 33 (3) : 776-784. (in Chinese))
- [10] 庄立,王红瑞,张文新. 采用因素分解模型研究京津冀地区用水变化的驱动效应[J]. 环境科学研究,2016,29(2):290-298. (ZHUANG Li, WANG Hongrui, ZHANG Wenxin. Driving effects analysis of water consumption changes in the Beijing-Tianjin-Hebei region using a factor decomposition model [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(2):290-298. (in Chinese))
- [11] 杨中文,许新宜,陈午,等. 用水变化动态结构分解分析模型研究, II : 应用[J]. 水利学报,2015,46(7):802-810. (YANG Zhongwen, XU Xinyi, CHEN Wu, et al. Dynamic structural decomposition analysis model of water use evolution, II : application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(7):802-810. (in Chinese))
- [12] 吕良华,姜蓓蕾,耿雷华,等. 基于用水总量控制的雄安新区用水强度指标体系[J]. 水资源保护,2022,38(5):105-110. (LYU Lianghua, JIANG Beilei, GENG Leihua, et al. Water intensity index system of Xiong'an New Area based on total water consumption control [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (5) : 105-110. (in Chinese))
- [13] 张兵兵. 中国用水结构优化研究 [D]. 杭州:浙江大学,2017.
- [14] 张鑫,雍志勤,葛杰,等. 基于区间模糊双层规划的水资源承载力与产业结构优化研究[J]. 水利学报,2019,50(5):565-577. (ZHANG Xin, YONG Zhiqin, GE Jie, et al. Water resources carrying capacity and industrial structure optimization based on interval fuzzy bi-level programming model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(5):565-577. (in Chinese))
- [15] 张玲玲,王宗志,李晓惠,等. 总量控制约束下区域用水结构调控策略及动态模拟[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(1):90-96. (ZHANG Lingling, WANG Zongzhi, LI Xiaohui, et al. Study on regional water utilization structure controlling strategy and dynamic simulation within the gross volume constraints [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24 (1) : 90-96. (in Chinese))
- [16] 王红瑞,李一阳,杨亚锋,等. 水资源集约安全利用评估模型构建及应用[J]. 水资源保护,2022,38(1):18-25. (WANG Hongrui, LI Yiyang, YANG Yafeng, et al. Construction and application of evaluation model for intensive and safe utilization of water resources [J]. Water Resources Protection, , 2022, 38 (1) : 18-25. (in Chinese))
- [17] 焦士兴,李青云,王安周,等. 基于生态位的安阳市用水结构与产业结构动态演化分析[J]. 水资源保护,2021,37(1):79-85. (JIAO Shixing, LI Qingyun, WANG Anzhou, et al. Dynamic evolution analysis of water consumption structure and industrial structure based on niche in Anyang City [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):79-85. (in Chinese))
- [18] KUZNETS S. Economic growth and income inequality [J]. The American Economic Review, 1955, 45(1):1-28.
- [19] GROSSMAN G M, KRUEGER A B. Economic growth and the environment [J]. The Quarterly Journal of Economics, 1995, 110(2):353-377.
- [20] BHATTARAI M, HAMMIG M. Institutions and the environmental Kuznets curve for deforestation: a cross country analysis for Latin America, Africa and Asia [J]. World Development, 2001, 29(6):995-1010.
- [21] KATZ D. Water use and economic growth: reconsidering the environmental Kuznets curve relationship [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 88:205-213.
- [22] 贾绍凤,张士锋,杨红,等. 工业用水与经济发展的关系:用水库兹涅兹曲线 [J]. 自然资源学报, 2004, 19 (3) : 279-284. (JIA Shaofeng, ZHANG Shifeng, YANG Hong, et al. Relation of industrial water use and economic development: water use Kuznets curve [J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(3):279-284. (in Chinese))
- [23] 李强,王莉芳,贾晓猛. 基于 EKC 的水资源利用与经济增长关系研究 [J]. 科技和产业, 2015, 15 (4) : 133-136. (LI Qiang, WANG Lifang, JIA Xiaomeng. Research on the relationship between water resources utilization and economic growth based on EKC [J]. Science Technology and Industry, 2015, 15(4):133-136. (in Chinese))
- [24] 程亮,胡霞,王宗志,等. 工业用水 N 型环境库兹涅茨曲线及其形成机制:以山东省为例 [J]. 水科学进展, 2019, 30 (5) : 673-681. (CHENG Liang, HU Xia, WANG Zongzhi, et al. The N-shaped industrial water use environmental Kuznets curve and its formation mechanism: a case study from Shandong Province [J]. Advances in Water Science, 2019, 30 (5) : 673-681. (in Chinese))
- [25] 张兵兵,沈满洪. 工业用水库兹涅茨曲线分析 [J]. 资

- 源科学, 2016, 38 (1): 102-109. (ZHANG Bingbing, SHEN Manhong. Analysis of the industrial water Kuznets curve[J]. Resources Science, 2016, 38(1): 102-109. (in Chinese))
- [26] 叶友皓, 袁永生. 基于 EKC 改进下的农业用水与粮食产量的关系论证[J]. 江西农业学报, 2017, 29(9): 147-150. (YE Youhao, YUAN Yongsheng. Argument of relationship between agricultural water and grain yield based on EKC[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2017, 29(9): 147-150. (in Chinese))
- [27] 张月, 潘柏林, 李锦彬, 等. 基于库兹涅茨曲线的中国工业用水与经济增长关系研究[J]. 资源科学, 2017, 39(6): 1117-1126. (ZHANG Yue, PAN Bolin, LI Jinbin, et al. The relationship analysis between Chinese industrial water use and economic growth based on the Kuznets curve[J]. Resources Science, 2017, 39(6): 1117-1126. (in Chinese))
- [28] LEVIN A, LIN C F, CHU C S J. Unit root tests in panel data: asymptotic and finite-sample properties[J]. Journal of Econometrics, 2002, 108(1): 1-24.
- [29] BREITUNG J. The local power of some unit root tests for panel data[M]//BALTAGI B H, FOMBY T B, CARTER HILL R. Nonstationary panels, panel cointegration, and dynamic panels (Advances in Econometrics, Vol. 15). Bingley: Emerald Group Publishing Limited, 2001: 161-177.
- [30] DURBIN J, WATSON G S. Testing for serial correlation in least squares regression[J]. Biometrika, 1950, 37(3/4): 409-428.
- [31] IM K S, PESARAN M H, SHIN Y. Testing for unit roots in heterogeneous panels[J]. Journal of Econometrics, 2003, 115(1): 53-74.
- [32] CHOI I. Unit root tests for panel data[J]. Journal of International Money and Finance, 2001, 20(2): 249-272.
- [33] 洪思扬, 王红瑞, 梁俊芬, 等. 京津冀地区水-能源利用效率与资源压力核算[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 102-111. (HONG Siyang, WANG Hongrui, LIANG Junfen, et al. Calculation of energy-water utilization efficiency and resource pressure in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 102-111. (in Chinese))
- [34] 洪思扬, 王红瑞, 程涛. 我国人口、经济和水足迹的空间关系测度及其脱钩关系分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(11): 136-140. (HONG Siyang, WANG Hongrui, CHENG Tao. Spatial relation measurement and decoupling analysis of population, economy and water footprint in China[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(11): 136-140. (in Chinese))
- [35] JONES J W, RITCHIE J T. Crop growth models [M]//HOFFMAN G J, HOWELL T A, SOLOMON K H. Management of farm irrigation systems. St. Joseph: ASAE, 1990: 63-89.
- [36] 雷玉桃, 黄丽萍, 张恒. 中国工业用水效率的动态演进及驱动因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(2): 159-170. (LEI Yutao, HUANG Liping, ZHANG Heng. Research on the dynamic evolution and the driving factors of industrial water consumption efficiency in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(2): 159-170. (in Chinese))
- [37] 曾萌, 张园园, 王红瑞, 等. 中国水-能源纽带关系双向消耗核算研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 159-165. (ZENG Meng, ZHANG Yuanyuan, WANG Hongrui, et al. Bidirectional consumption accounting of water-energy nexus in China[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 159-165. (in Chinese))
- [38] GODFREY L G. Misspecification tests and their uses in econometrics [J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 1996, 49(2): 241-260.
- [39] 游进军, 林鹏飞, 蒋钟钟, 等. 供水能力相关概念及计算方法辨析[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 72-77. (YOU Jinjun, LIN Pengfei, JIANG Yunzhong, et al. Analysis of concepts and calculation methods related to water supply capacity [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 72-77. (in Chinese))
- [40] 刘静, 余钟波. 江苏省农产品水足迹与虚拟水流动及其环境影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 320-326. (LIU Jing, YU Zhongbo. Water footprints and virtual water flows of agricultural products in Jiangsu and their environmental impacts [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(4): 320-326. (in Chinese))
- [41] 郭丰源, 徐剑锋, 徐敏, 等. 我国工业用水现状、问题与节水对策[J]. 环境保护, 2022, 50(6): 58-63. (GUO Fengyuan, XU Jianfeng, XU Min, et al. Present situation, problems and water-saving countermeasures of industrial water use in China[J]. Environmental Protection, 2022, 50(6): 58-63. (in Chinese))
- [42] 王浩, 王建华, 胡鹏. 水资源保护的新内涵: “量-质-域-流-生”协同保护和修复[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 1-9. (WANG Hao, WANG Jianhua, HU Peng. New connotation of water resources protection: “quantity-quality-domain-connectivity-biology” coordinated protection and restoration [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 1-9. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-01-23 编辑: 施业)