

# 基于突变理论和因子分析的黑龙江水资源利用效率评价及驱动因素分析

姜秋香<sup>1</sup>, 孙宇祥<sup>1</sup>, 王子龙<sup>1</sup>, 宋立玲<sup>2</sup>, 吴云星<sup>1</sup>, 郭伟鹏<sup>1</sup>, 陶美匀<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省水文水资源中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 构建了黑龙江水资源利用效率评价指标体系, 根据突变理论和熵权法确定各指标的主次关系, 对 2000—2021 年黑龙江水资源利用效率进行了综合评价; 采用 Mann-Kendall 突变检验法确定黑龙江水资源利用效率的突变年份及变化趋势, 并利用因子分析法识别了驱动因素。结果表明: 2000—2021 年黑龙江水资源利用效率评价值的平均值为 0.883, 在时间上呈波动式上升趋势; 在空间上, 鹤岗和七台河地区的水资源利用效率变化不大, 其他地区的水资源利用效率呈上升的趋势; 黑龙江水资源利用效率驱动因素为人口资源因素、用水效益因素和工业效益因素。

**关键词:** 水资源利用效率; 突变理论; Mann-Kendall 突变检验法; 因子分析法; 黑龙江

**中图分类号:** TV213.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-6933(2025)04-0019-08

**Evaluation of water resources utilization efficiency and analysis of driving factors in Heilongjiang Province based on mutation theory and factor analysis**//JIANG Qiuxiang<sup>1</sup>, SUN Yuxiang<sup>1</sup>, WANG Zilong<sup>1</sup>, SONG Liling<sup>2</sup>, WU Yunxing<sup>1</sup>, GUO Weipeng<sup>1</sup>, TAO Meiyun<sup>1</sup> (1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Hydrology and Water Resources Center of Heilongjiang Province, Harbin 150001, China)

**Abstract:** An evaluation index system for water resources utilization efficiency in Heilongjiang Province was constructed, and the primary and secondary relationships of each index were determined based on mutation theory and entropy weight method. The water resources utilization efficiency in Heilongjiang Province from 2000 to 2021 was evaluated comprehensively. The Mann-Kendall mutation test method was used to determine the mutation year and trend of water resources utilization efficiency in Heilongjiang Province, and factor analysis method was used to identify the driving factors. The results show that the average evaluation value of water resources utilization efficiency in Heilongjiang Province from 2000 to 2021 is 0.883, which shows a fluctuating upward trend over time. In terms of space, the water resource utilization efficiency in Hegang and Qitaihe areas has not changed much, while the water resource utilization efficiency in other areas is showing an upward trend. The driving factors of water resource utilization efficiency in Heilongjiang are population resource factors, water use efficiency factors, and industrial efficiency factors.

**Key words:** water resources utilization efficiency; mutation theory; Mann-Kendall mutation test method; factor analysis method; Heilongjiang Province

随着社会经济的发展,水资源的时空分布不均、污染严重和利用效率低下等问题已经制约了区域社会经济发展,对生态环境也产生一定的影响<sup>[1-3]</sup>。提高水资源利用效率是解决水资源问题的关键,对经济社会的发展和生态环境的保护具有重要意义<sup>[4]</sup>。

目前水资源利用效率研究主要包括效率计算、效率综合评价和驱动因素识别。水资源利用效率计算常采用数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)模型,有径向和非径向两种角度<sup>[5]</sup>。SBM

(slack-based measure)模型是考虑非径向和非角度的 DEA 模型,在衡量决策单元效率时,摆脱了传统 DEA 模型中径向角度下同比例变动投入或产出的限制,同时也突破了从单一投入或产出角度去衡量效率的局限,能够更灵活、更全面、更符合实际情况地去评估决策单元的效率情况<sup>[6]</sup>。Zhao 等<sup>[7]</sup>基于 SBM 模型计算了我国第一阶段的水资源利用效率,并考虑水污染的产生和处置的不良输出条件,计算了第二阶段的水资源利用效率。Wang 等<sup>[8]</sup>在 SBM

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(42071243, 52479006, 52409011)  
**作者简介:** 姜秋香(1982—),女,教授,博士,主要从事水土资源高效利用与管理研究。E-mail:jiangqiuxiang2017@163.com  
**通信作者:** 宋立玲(1982—),女,高级工程师,主要从事水资源利用与评价研究。E-mail:songll1005@163.com

模型的基础上,将假定中的规模回报由恒定变为不恒定,在考虑环境调控基础上计算了水资源利用效率。在水资源利用效率综合评价方面,学者通过构建评价指标体系,采用层次分析法<sup>[9]</sup>、熵权-TOPSIS法<sup>[10]</sup>、模糊综合法<sup>[11]</sup>、突变理论等方法计算水资源利用效率评价值。层次分析法易受主观因素的影响,某一指标层中的指标过多时会导致评价结果可靠性降低<sup>[12]</sup>。熵权-TOPSIS法受样本中极端值的影响较大,易导致结果存在偏差<sup>[13]</sup>。模糊综合法有较强的主观性,当指标数量过多时,无法确定指标之间的隶属度,计算结果可能会产生较大误差<sup>[14]</sup>。突变理论不仅可以减少主观因素和极端值的影响,而且还能减少指标过多对结果的影响;同时,在对水资源利用效率进行综合评价时无需确定指标权重,只需分清评价指标主次,有效避免了其他综合评价方法在权重确定时的主观性<sup>[15]</sup>。水资源利用效率驱动因素的识别方法有地理加权回归<sup>[16]</sup>、空间计量学<sup>[17]</sup>、LMDI (logarithmic mean Divisia index) 模型<sup>[18]</sup>、因子分析法等。地理加权回归模型由于模型过于复杂和空间权重系数的变化等问题会出现数据过度拟合,影响结果的精度<sup>[19]</sup>。空间计量学模型存在模型复杂、数据准确性要求较高和没有统一的标准确定空间权重矩阵的问题<sup>[20]</sup>。LMDI模型对数据的要求较高,分解的影响因素机制需进一步分析与解释<sup>[21]</sup>。因子分析法可以将多种相关性强的指标归结为少数综合指标,利用综合指标确定水资源利用效率的驱动因素<sup>[22]</sup>,避免了模型过于复杂和权重变化影响识别结果的精度。

黑龙江水资源的时空分布不均导致部分地区水资源匮乏,加剧了这些地区水资源短缺的问题。随着城市化和工业化进程的加快,导致大量的污染物污染了水环境,影响了水资源的可持续利用<sup>[23]</sup>。因此,黑龙江省水资源利用效率偏低,需结合区域特点提出水资源利用效率提升策略,以此实现水资源高效利用及其与经济、社会和自然的和谐发展。鉴于此,本文构建黑龙江水资源利用效率评价指标体系,根据突变理论和熵权法确定各指标的主次关系,对黑龙江水资源利用效率进行综合评价,采用 Mann-Kendall (M-K) 突变检验法确定黑龙江水资源利用效率的突变年份及变化趋势,并利用因子分析法识别驱动因素,以为黑龙江水资源高效利用提供参考。

## 1 研究区概况

黑龙江位于我国东北部,地理位置为 43°26'N~53°33'N、121°11'E~135°05'E,面积为 47.3 万 km<sup>2</sup>,包括 12 个地级市和 1 个地区(图 1)。黑龙江多年平均降水量为 556.82 mm,多年平均水资源总量为

862.05 亿 m<sup>3</sup>,多年平均人均水资源量为 2 354.34 m<sup>3</sup>。2021 年黑龙江粮食总产量为 786.77 亿 kg,连续 11 年位居我国粮食产量第一位。2021 年黑龙江总用水量为 324.37 亿 m<sup>3</sup>,其中农业用水量占比为 89.22%,工业用水量占比为 5.48%,生活和生态总用水量占比为 5.30%。黑龙江农田灌溉水有效利用系数为 61.02%,浪费现象较严重<sup>[24]</sup>。

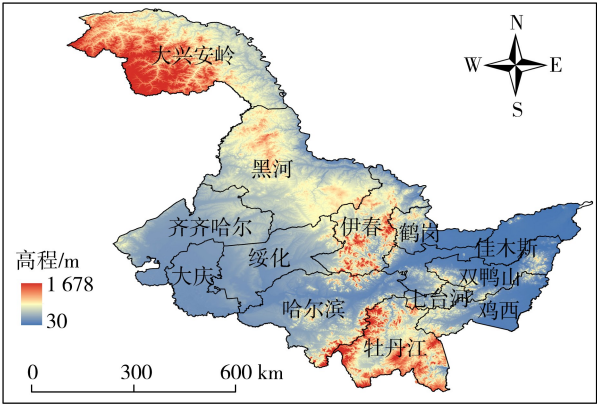


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

## 2 研究方法

### 2.1 评价指标体系构建

参考侯依然等<sup>[25-29]</sup>的研究,以黑龙江水资源利用效率综合评价作为目标层,以水资源禀赋、农业用水效率、经济效益、社会效益和生态效益为准则层,围绕用水指标和结构、社会经济和自然条件选取 18 个指标作为指标层,建立水资源利用效率评价指标体系,如图 2 所示。黑龙江省水资源利用效率评价指标的数据来源于 2000—2022 年《黑龙江统计年鉴》。

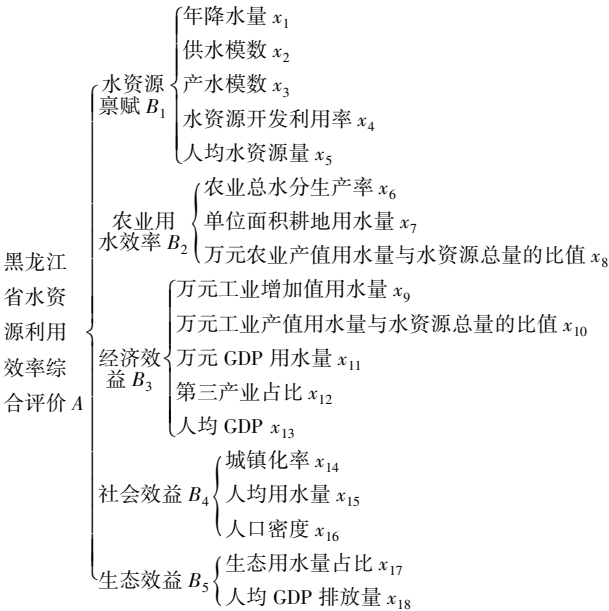


图 2 黑龙江水资源利用效率评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of water resources utilization efficiency in Heilongjiang Province

2.2 突变理论

突变理论主要以拓扑学为工具,以结构稳定性理论为基础,用来描述一系列连续性的量变如何演变成跳跃性的质变的方法<sup>[30]</sup>。突变理论提出了一条判别突变的新原则:在严格的控制下,如果质变中经历的中间过渡态是不稳定的,那么该过程即为突变过程。因此,突变理论特别适用于对系统内部的突变点进行研究<sup>[31]</sup>。在突变理论中,势函数  $V(x)$  是用于描述连续性的量变演变成跳跃性的质变的函数,通常由 1 个状态变量和多个控制变量组成。势函数的形式不同,突变模型的类型也不同<sup>[32-33]</sup>。本文利用突变理论评价水资源利用效率的主要步骤为:

**步骤 1 确定评价指标。**评价指标是否合理直接影响评价结果的优劣。本文遵循科学性、系统性、相对独立性和可操作性原则,选取 18 个水资源利用效率评价指标(图 2)。

**步骤 2 数据标准化处理。**以黑龙江及 12 个地级市和大兴安岭地区为研究对象,研究时段为 2000—2021 年。构建原始指标数据矩阵  $X = (x_{ij})_{m \times n}$ ,  $m$  为评价年数,  $n$  为评价指标数,利用标准化法对原始指标数据矩阵进行无量纲处理。

**步骤 3 选取突变模型。**本文根据评价对象选择状态变量和控制变量,对目标层进行评价时,该目标为状态变量,各准则为控制变量;对准则层进行评价时,该准则为状态变量,其包含的指标为控制变量。根据势函数中控制变量数量选取势函数,进而确定突变模型的类型,包括尖点突变、燕尾突变、蝴蝶突变和 Vigwam 突变等<sup>[34]</sup>。

**步骤 4 确定指标主次关系与归一化处理。**采用熵权法<sup>[35-36]</sup>得到权重集合  $U = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ , 根据各指标权重的大小确定指标之间的主次关系,进而根据突变模型的类型选取归一化公式,得到指标层的突变模糊隶属矩阵  $C = (c_{ij})_{m \times n}$ 。

**步骤 5 综合评价。**根据指标层的突变模糊隶属采用互补准则<sup>[37]</sup>计算水资源利用效率评价价值,计算公式为

$$A_i = \frac{1}{5} \left( \sqrt[3]{\frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 c_{ij}} + \sqrt[6]{\frac{1}{3} \sum_{j=6}^8 c_{ij}} + \sqrt[4]{\frac{1}{5} \sum_{j=9}^{13} c_{ij}} + \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{j=14}^{16} c_{ij}} + \sqrt[5]{\frac{1}{2} \sum_{j=17}^{18} c_{ij}} \right) \quad (1)$$

式中:  $A_i$  为第  $i$  年的水资源利用效率评价价值;  $c_{ij}$  为第  $i$  年第  $j$  个指标的突变模糊隶属。

2.3 M-K 突变检验法

M-K 突变检验法是一种时序检验和预测技术,用于分析系列数据中的突变年份和变化趋势<sup>[38]</sup>。M-K 突变检验是非参数方法,其研究对象不需要样

本遵从一定的分布,也不受极端值的干扰,计算步骤详见文献[39]。

2.4 因子分析法

因子分析法是主成分分析的推广和深化,在自然科学领域中的应用广泛<sup>[40]</sup>。该方法的基本思想是根据相关性把变量分组,使得同组内的变量之间的相关性较高,不同组的变量相关性较低,试图用较少公共因子的线性函数和特定因子之和来表征多个原始变量,以达到合理解释存在于原始变量间的相关性和简化变量维数的目的,计算步骤详见文献[41]。

3 结果与分析

3.1 黑龙江水资源利用效率的时间演变特征

黑龙江水资源利用效率评价指标体系的指标层中各指标权重集合  $U = \{0.036, 0.048, 0.053, 0.056, 0.062, 0.026, 0.029, 0.055, 0.055, 0.018, 0.022, 0.078, 0.062, 0.082, 0.156, 0.051, 0.031, 0.080\}$ 。从而确定准则层及其指标层之间的主次关系。准则层的主次关系为  $B_4 > B_1 > B_3 > B_5 > B_2$ , 各准则层中不同指标的主次关系为  $x_5 > x_4 > x_3 > x_2 > x_1$ ,  $x_8 > x_7 > x_6$ ,  $x_{12} > x_{13} > x_9 > x_{11} > x_{10}$ ,  $x_{15} > x_{14} > x_{16}$ ,  $x_{18} > x_{17}$ 。

图 3 为 2000—2021 年黑龙江水资源利用效率评价价值。由图 3 可见,2000—2021 年黑龙江水资源利用效率呈波动上升趋势,由 2000 年的 0.710 上升至 2021 年的 0.934。2000—2021 年黑龙江水资源利用效率的平均值为 0.883,小于平均值的年份占比为 36.36%,主要集中在 2010 年之前。2000—2005 年评价价值先上升后下降再上升,在 2002 年超过了均值;2006—2010 年和 2011—2013 年的评价价值先下降后上升,在均值线附近波动;2014—2019 年评价价值先上升后下降再上升,并且在 2019 年达到了最大值(0.940);2019—2021 年评价价值呈微弱下降趋势。

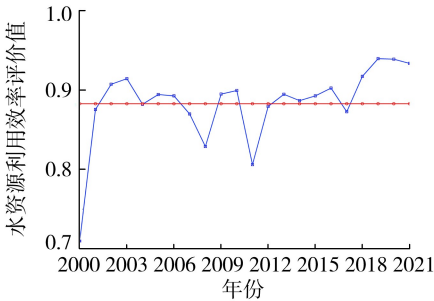


图 3 2000—2021 年黑龙江水资源利用效率评价价值  
Fig. 3 Water resources utilization efficiency evaluation values of Heilongjiang Province from 2000 to 2021

图4为2000—2021年黑龙江水资源利用效率评价值的M-K突变检验结果。由图4可见,M-K突变检验统计值UF与UB的交点在2001年、2002年之间,且2001年评价值低于均值,选择2001年为突变年份。同理,选择2004年和2017年为突变年份。2008年、2011年、2012年的UF值小于0,说明在这3个年份水资源利用效率评价值呈不显著下降趋势,其余年份的UF值大于0,其评价值呈不显著增加趋势。另外,2007年、2008年、2011年、2012年、2017年水资源利用效率评价值低于平均值。因此,选择2001年、2004年、2008年、2011年、2017年、

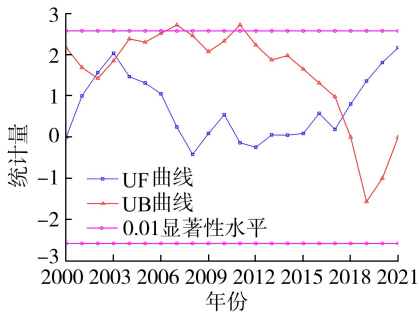


图4 2000—2021年黑龙江水资源利用效率评价值的M-K突变检验结果

Fig.4 M-K mutation test results of water resources utilization efficiency evaluation in Heilongjiang Province

2021年为代表年。

3.2 黑龙江水资源利用效率的空间分布特征

利用 ArcGIS 绘制代表年黑龙江水资源利用效率评价值的空间分布,如图5所示。由图5可见,黑龙江水资源利用效率在空间上整体呈上升趋势。2001年七台河的水资源利用效率评价值超过0.9,其他地区的评价值为 $>0.8\sim 0.9$ ;2004年黑河、伊春和大庆的评价值高于0.9,其他地区的评价值为 $>0.8\sim 0.9$ ;2008年大兴安岭、黑河和大庆的评价值高于0.9,其他地区的评价值为 $>0.8\sim 0.9$ ;2011年大兴安岭、黑河、伊春和鹤岗的评价值高于0.9,哈尔滨的评价值为 $0.7\sim 0.8$ ,其他地区的评价值为 $>0.8\sim 0.9$ ;2017年齐齐哈尔、大庆、绥化、鹤岗、佳木斯、七台河和鸡西的评价值为 $>0.8\sim 0.9$ ,其他地区的评价值均高于0.9;2021年仅鹤岗和七台河的评价值为 $>0.8\sim 0.9$ ,其他地区的评价值均超过了0.9。

黑龙江水资源利用效率评价值在北部地区呈上升趋势,中部地区呈先上升后下降再上升的趋势,南部地区呈先下降后上升的趋势。2001年南部地区评价值高于中部和北部地区;2004年北部和中部地区评价值增加,南部地区评价值降低;2008年北部地区评价值增加,中部地区评价值降低,南部地区评价值保持不变;2011—2021年北部地区评价值始终

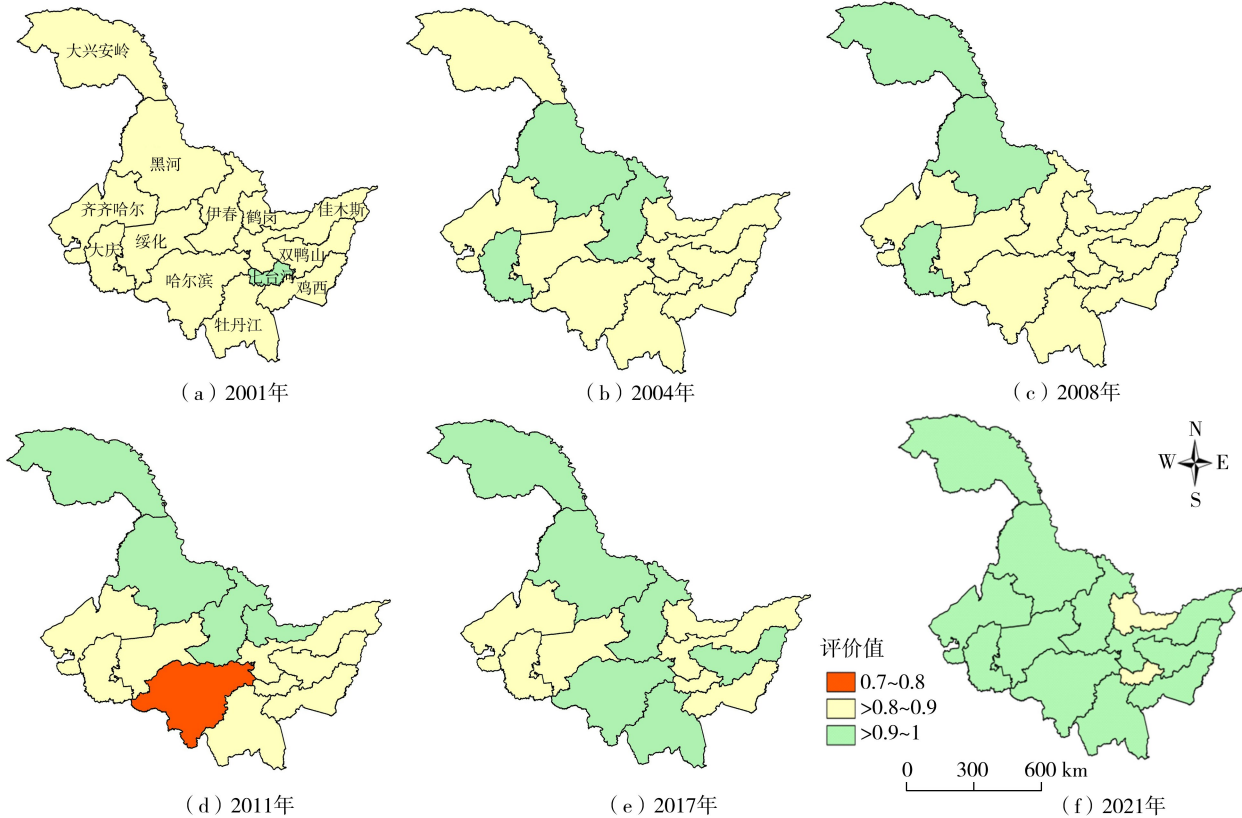


图5 代表年黑龙江水资源利用效率评价值空间分布

Fig.5 Spatial distribution of water resources utilization efficiency evaluation values of present years in Heilongjiang Province

超过 0.9;2011—2017 年中部地区评价值先上升后保持不变,南部地区评价值先下降后上升;2017—2021 年中部和南部地区评价值呈上升趋势,且差异逐渐减小。

3.3 黑龙江水资源利用效率的驱动因素

在进行因子分析之前,需计算 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 取样适切性量数和巴特利特球形度检验的显著性值,验证指标层是否适合做因子分析<sup>[42]</sup>。KMO 取样适切性量数大于 0.6 且巴特利特球形度检验的显著性值小于 0.05 的指标符合做因子分析的标准。黑龙江水资源利用效率评价体系指标层的 KMO 取样适切性量数为 0.722,巴特利特球形度检验的显著性值小于 0.001,说明指标之间具有相关性,可以进行因子分析。表 1 为因子分析结果,可见黑龙江水资源利用效率评价体系指标层影响较大因子有 6 个,根据累积贡献率大于 85%原则确定驱动因素,因此,前 3 个因子为黑龙江水资源利用效率的驱动因素。

表 1 因子分析结果  
Table 1 Factor analysis results

| 因子 | 特征值   | 方差贡献率/% | 累积贡献率/% |
|----|-------|---------|---------|
| 1  | 9.203 | 51.1    | 51.1    |
| 2  | 4.361 | 24.2    | 75.4    |
| 3  | 2.025 | 11.2    | 86.6    |
| 4  | 0.835 | 4.6     | 91.2    |
| 5  | 0.631 | 3.5     | 94.8    |
| 6  | 0.364 | 2.0     | 96.8    |

运用 Kaiser 正态化最大方差法将成分矩阵进行旋转,得到旋转成分矩阵(表 2)。由表 2 可见,因子 1 与年降水量与产水模数、人均水资源量、第三产业占比呈正相关关系,与水资源开发利用、万元农业产值用水量与水资源总量的比值、人口密度、人均 COD 排放量呈负相关关系。因子 1 与水资源和人口的指标高度相关,故将因子 1 称为人口资源因素。因子 2 与供水模数、单位面积耕地用水量、人均 GDP、人均用水量呈正相关关系,与农业总水分生产率呈负相关关系。因子 2 与农业用水、生活用水和经济的指标高度相关,故因子 2 称为用水效益因素。因子 3 与万元工业增加值用水量、万元工业产值用水量与水资源总量的比值、万元 GDP 用水量、城镇化率呈正相关关系,与生态用水量占比呈负相关关系。因子 3 与工业和经济指标高度相关,故因子 3 称为工业效益因素。因此,黑龙江省水资源利用效率的驱动因素分别为人口资源因素、用水效益因素和工业效益因素。

3.4 讨论

黑龙江水资源利用效率驱动因素的排序依次为

表 2 旋转成分矩阵  
Table 2 Rotated component matrix

| 指标       | 因子 1   | 因子 2   | 因子 3   |
|----------|--------|--------|--------|
| $x_1$    | 0.939  | 0.139  | -0.141 |
| $x_2$    | 0.416  | 0.769  | -0.424 |
| $x_3$    | 0.963  | 0.114  | -0.044 |
| $x_4$    | -0.627 | 0.613  | -0.411 |
| $x_5$    | 0.974  | 0.134  | 0.016  |
| $x_6$    | -0.444 | -0.552 | -0.305 |
| $x_7$    | -0.126 | 0.893  | -0.013 |
| $x_8$    | -0.698 | -0.496 | 0.459  |
| $x_9$    | 0.445  | 0.212  | 0.774  |
| $x_{10}$ | -0.355 | -0.164 | 0.879  |
| $x_{11}$ | -0.471 | -0.563 | 0.649  |
| $x_{12}$ | 0.658  | 0.617  | 0.098  |
| $x_{13}$ | 0.524  | 0.752  | -0.371 |
| $x_{14}$ | 0.089  | 0.274  | 0.765  |
| $x_{15}$ | 0.513  | 0.77   | -0.324 |
| $x_{16}$ | -0.68  | -0.301 | -0.458 |
| $x_{17}$ | 0.008  | 0.073  | -0.849 |
| $x_{18}$ | -0.686 | -0.635 | 0.055  |

人口资源因素、用水效益因素和工业效益因素,评价值在 2001 年、2004 年和 2017 年发生突变。2001—2002 年,人口资源因素中的正相关指标人口密度呈下降趋势,其余正向指标呈上升趋势,负向指标呈下降趋势,因此人口资源因素呈上升趋势;用水效益因素和工业效益因素的正向指标呈上升趋势,负向指标呈下降趋势,两个驱动因素呈上升趋势。2003—2004 年,人口资源因素中正相关指标如年降水量、产水模数和人均水资源量的下降导致人口资源因素呈下降趋势,负相关指标如水资源开发利用呈上升趋势,导致人口资源因素呈下降趋势;工业效益因素中的城镇化率呈下降趋势,导致工业效益因素呈下降趋势。2017—2018 年,人口资源因素中正相关指标呈上升趋势,负相关指标呈下降趋势,因此人口资源因素呈上升趋势;用水效益因素的指标中正相关指标中的供水模数呈下降趋势,其余正相关指标呈上升趋势,负相关指标呈下降趋势,总体来看,用水效益因素呈上升趋势;工业效益因素的指标中万元工业用水量增加值和生态用水占比呈下降趋势,其余指标呈上升趋势,工业效益因素呈上升趋势。2000—2021 年,人口资源因素中的正相关指标总体呈上升趋势,负相关指标呈下降趋势。与用水效益因素呈正相关的供水模数和人均 GDP 呈上升趋势,人均用水量呈下降趋势,单位面积耕地用水量呈波动变化无明显变化;负相关指标农业总水分生产率是呈波动下降趋势。工业效益因素中正相关指标城镇化率呈下降趋势,万元工业增加值用水量呈先上升后下降趋势,万元工业产值用水量与水资源总量的比值和万元 GDP 用水量呈上升趋势,负相关指标

生态用水占比呈先下降后上升趋势。因此,黑龙江水资源利用效率评价值在研究时段内呈波动上升趋势。

黑龙江北部地区水资源利用效率评价值普遍高于南部地区。北部地区的人口资源因素中正相关指标万元农业产值用水量与水资源总量的比值、年降水量和产水模数要高于南部地区,南部地区的第三产业占比要高于北部地区;负相关指标水资源开发利用率在南部地区要高于北部地区。综合来看,北部地区的人口资源因素要高于南部地区。用水效益因素中正相关指标是南方地区高于北方地区,负相关指标是北部地区高于南部地区。因此,南部地区的用水效益因素高于北部地区。工业效益因素中正相关指标万元工业增加值用水量南部地区略高于北部地区,其余正向指标均是北方地区高于南方地区,负向指标南部地区高于北部地区。因此,北部地区的工业效益因素高于南部地区。总的来说,北方地区的人口资源因素和工业效益因素高于南部地区,南方地区的用水效益因素高于北方地区,使北部地区的水资源利用效率评价值高于南部。

综上所述,提升黑龙江水资源利用效率评价值需要提升人口资源因素,减少地下水的开发,按需定水。保证需水的条件下,提升水资源的高效合理使用,提高农业总产值和第三产业生产总值,同时降低COD的排放量。在保证农业用水的前提下加强工程措施,把黑土地建设成高标准农田,减少化肥、农药的使用,采用生物有机肥和秸秆还田提升土壤有机质含量,提高黑土地管理水平,提升农业用水所产生的农产品的产量,从而提升用水效益因素。工业效益因素的提升需要对企业技术改造、数字化改造和绿色化改造,提升工业增加值和工业总产值。

## 4 结 论

a. 时间特征上,2000—2021年黑龙江水资源利用效率评价值在整体上呈波动上升趋势,2014年之前评价值在均值左右波动,2014年之后只有2017年的评价值低于均值,其他年份呈上升趋势。M-K突变检验结果表明,黑龙江水资源利用效率在2001年、2004年和2017年发生突变,2008年、2011年、2012年呈不显著降低趋势,其他年份呈不显著增加趋势。

b. 空间分布上,黑龙江北部地区水资源利用效率评价值呈上升趋势;中部地区呈先上升后下降再上升趋势;南部地区呈先下降后上升趋势,并且差异逐渐减小。2000—2021年,除鹤岗和七台河的水资源利用效率评价值未超过0.9以外,其余地区的评价

价值均超过了0.9。

c. 黑龙江水资源利用效率的驱动因素包括人口资源因素、用水效益因素和工业效益因素。提升黑龙江省水资源利用效率需首先提高人口资源因素的相关指标,其次为用水效益因素和工业效益因素相关指标。

## 参考文献:

[1] JIANG Huaiyin, HE Gang. Analysis of spatial and temporal evolution of regional water resources carrying capacity and influencing factors: Anhui Province as an example[J]. Sustainability, 2023, 15(14): 11255.

[2] 董怡,邹磊,夏军,等. 武汉市人水系统耦合协调发展及障碍因素识别[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 87-94. (DONG Yi, ZOU Lei, XIA Jun, et al. Coupling and coordinated development of human-water system in Wuhan city and identification of obstacle factors [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 87-94. (in Chinese))

[3] LI Yuangang, SUN Maohua, YUAN Guanghui, et al. Evaluation methods of water environment safety and their application to the three northeast provinces of China[J]. Sustainability, 2019, 11(18): 5135.

[4] SONG Malin, TAO Weiliang, SHANG Yuping, et al. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of China's urban water resource utilization efficiency from the perspective of sustainable development[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 338: 130649.

[5] DENG Menghua, ZHANG Tianshu. Spatial-temporal evolution of water resources utilization efficiency in Jiangsu province[J]. Water Supply, 2023, 23(6): 2539-2552.

[6] CHENG Lifan, SONG Song, XIE Yufeng. Evaluation of water resources utilization efficiency in Guangdong province based on the DEA-Malmquist model [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 819693.

[7] ZHAO Liangshi, SUN Caizhi, LIU Fengchao. Interprovincial two-stage water resource utilization efficiency under environmental constraint and spatial spillover effects in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 164: 715-725.

[8] WANG Qizhen, WANG Shengyuan. The impact of environmental regulation on water resources utilization efficiency[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 1022929.

[9] ZHANG Shanjun, LIU Jia, LI Chuanzhe, et al. Evaluation of water resources utilization efficiency based on DEA and AHP under climate change[J]. Water, 2023, 15(4): 718.

[10] 白芳芳,齐学斌,乔冬梅,等. 黄河流域九省区农业水资源利用效率评价和障碍因子分析[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 146-152. (BAI Fangfang, QI Xuebin, QIAO

- Dongmei, et al. Evaluation of agricultural water resource utilization efficiency and obstacle factor diagnoses in nine provinces of the Yellow River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36 ( 3 ): 146-152. ( in Chinese ) )
- [ 11 ] SONG Peibing, WANG Xiaoying, WANG Chao, et al. Analysis of agricultural water use efficiency based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation in Xinjiang, China[J]. Water, 2020, 12 ( 11 ): 3266.
- [ 12 ] 封志明,郑海霞,刘宝勤. 基于遗传投影寻踪模型的农业水资源利用效率综合评价[J]. 农业工程学报, 2005, 21 ( 3 ): 66-70. ( FENG Zhiming, ZHENG Haixia, LIU Baoqin. Comprehensive evaluation of agricultural water use efficiency based on genetic projection pursuit model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21 ( 3 ): 66-70. ( in Chinese ) )
- [ 13 ] 郭书娟,许亚东,黄进勇. 基于熵权 TOPSIS 模型的农业绿色发展水平评价:以河南省为例[J]. 浙江大学学报 ( 农业与生命科学版 ), 2024, 50 ( 2 ): 221-230. ( GUO Shujuan, XU Yadong, HUANG Jinyong. Evaluation of agricultural green development level based on entropy weighted TOPSIS model: a case study of Henan Province [J]. Journal of Zhejiang University ( Agriculture and Life Sciences ), 2024, 50 ( 2 ): 221-230. ( in Chinese ) )
- [ 14 ] 王腾,李佳,付尧,等. 基于层次分析-熵权法的内蒙古农牧交错带农业用水水平综合评价[J]. 水土保持学报, 2023, 37 ( 5 ): 259-266. ( WANG Teng, LI Jia, FU Yao, et al. Comprehensive evaluation of agricultural water use level in agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia based on analytic hierarchy process and entropy weight method [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37 ( 5 ): 259-266. ( in Chinese ) )
- [ 15 ] 耿婷婷,刘金巍,宋绵,等. 基于突变理论的土地质量地球化学评价方法研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55 ( 8 ): 374-381. ( GENG Tingting, LIU Jinwei, SONG Mian, et al. Land quality geochemical evaluation based on catastrophe theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55 ( 8 ): 374-381. ( in Chinese ) )
- [ 16 ] 孙才志,马奇飞,赵良仕. 基于 GWR 模型的中国水资源绿色效率驱动机理[J]. 地理学报, 2020, 75 ( 5 ): 1022-1035. ( SUN Caizhi, MA Qifei, ZHAO Liangshi. Analysis of driving mechanism based on a GWR model of green efficiency of water resources in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75 ( 5 ): 1022-1035. ( in Chinese ) )
- [ 17 ] SONG Malin, TAO Weiliang, SHANG Yuping, et al. Spatiotemporal characteristics and influencing factors of China's urban water resource utilization efficiency from the perspective of sustainable development[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 338: 130649.
- [ 18 ] TUOKU Lina, MEN Baohui. Evaluation of water resource use efficiency in Beijing-Tianjin-Hebei based on three-dimensional water ecological footprint [J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110884.
- [ 19 ] 杜勇,李建柱,牛凯杰,等. 1982—2015 年永定河山区植被变化及对天然径流的影响[J]. 水利学报, 2021, 52 ( 11 ): 1309-1323. ( DU Yong, LI Jianzhu, NIU Kaijie, et al. Analysis of vegetation change and its impact on natural runoff in the mountain area of the Yongding River Basin from 1982 to 2015[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 ( 11 ): 1309-1323. ( in Chinese ) )
- [ 20 ] 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 ) )
- [ 21 ] 金祺,杨银科,孙建峰,等. 基于 LMDI 和水足迹理论的西安市水资源压力驱动因素分析[J]. 人民黄河, 2024, 46 ( 11 ): 86-92. ( JIN Qi, YANG Yinke, SUN Jianfeng, et al. Analysis of water pressure driving force of water resources in Xi'an based on LMDI method and water footprint theory[J]. Yellow River, 2024, 46 ( 11 ): 86-92. ( in Chinese ) )
- [ 22 ] 曹烨,邹振东,陈文磊,等. 基于因子分析的深圳市水资源与能源安全形势分析[J]. 北京大学学报 ( 自然科学版 ), 2018, 54 ( 6 ): 1346-1350. ( CAO Ye, ZOU Zhendong, CHEN Wenlei, et al. Analysis of water resources and energy security in Shenzhen based on factor analysis method [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018, 54 ( 6 ): 1346-1350. ( in Chinese ) )
- [ 23 ] 姜秋香,王天,王子龙,等. 基于 EBM 的水资源失衡风险导致的社会经济损失模型及应用[J]. 农业工程学报, 2018, 34 ( 19 ): 104-113. ( JIANG Qiuxiang, WANG Tian, WANG Zilong, et al. EBM-based social economic loss model of water resources imbalance risk and its application [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 ( 19 ): 104-113. ( in Chinese ) )
- [ 24 ] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2022.
- [ 25 ] 侯依然,侯泽林,张雪雨. 北京市水资源利用效率评价指标体系构建研究[J]. 吉林水利, 2023, 39 ( 1 ): 1-5. ( HOU Yiran, HOU Zelin, ZHANG Xueyu. Study on the construction of evaluation index system of water resources utilization efficiency in Beijing[J]. Jilin Water Resources, 2023, ( 1 ): 1-5. ( in Chinese ) )
- [ 26 ] 李轶,万芬芬,张文龙. 长三角地区工业园区水资源高效利用的发展趋势与策略[J]. 河海大学学报 ( 自然科

- 学版),2023,51(3):1-9. (LI Yi, WAN Fenfen, ZHANG Wenlong. Development trend and strategy of efficient utilization of water resources for industrial parks in Yangtze River Delta Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3):1-9. (in Chinese))
- [27] 张凯,吴凤平,成长春. 三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析[J]. 环境科学, 2021,42(12):5757-5767. (ZHANG Kai, WU Fengping, CHENG Changchun. Dynamic evolution characteristics of water resources utilization efficiency in china under the constraint of triple attribute carrying capacity [J]. Environmental Science, 2021, 42(12):5757-5767. (in Chinese))
- [28] 左其亭,杨振龙,路振广,等. 引江济淮工程河南受水区水资源利用效率及其空间自相关性分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1):39-47. (ZUO Qiting, YANG Zhenlong, LU Zhenguang, et al. Water resource utilization efficiency and spatial autocorrelation analysis of water-receiving area of Yinjiang-Jihuai project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(1):39-47. (in Chinese))
- [29] 王静,刘淑静,陈爱慧,等. 基于层次分析法的我国海水淡化开发利用潜力评价方法研究[J]. 水利经济, 2020, 38(6):12-14. (WANG Jing, LIU Shujing, CHEN Aihui, et al. Evaluation method for development and utilization potential of seawater desalination in China based on AHP [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(6):12-14. (in Chinese))
- [30] WEI Xiaochao, SHE Qiping. Quantitative cusp catastrophe model to explore abrupt changes in collaborative regulation behavior of e-commerce platforms [J]. Information Sciences, 2023, 642:119127.
- [31] NIU Jiamin, WU Jiuhui, LIU Xiaoli, et al. Quantitative analysis of acoustic black hole property by the catastrophe theory[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 259:108621.
- [32] 李继清,彭玲,李安强. 突变理论在水资源管理中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2018.
- [33] 田水承,申章进. 基于熵值法-突变理论的煤矿透水安全评价[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(6):1064-1070. (TIAN Shuicheng, SHEN Zhangjin. Safety evaluation of coal mine flooding based on entropy method and catastrophe theory[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(6):1064-1070. (in Chinese))
- [34] 牛志广,姜巍,陆仁强,等. 基于突变理论的城市配水系统脆弱性评价模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(10):135-138. (NIU Zhiguang, JIANG Wei, LU Renqiang, et al. Research on the vulnerability assessment model of water supply systems based on catastrophe theory [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(10):135-138. (in Chinese))
- [35] SADEGHFAM S, KHATIBI R, DADASHI S, et al. Transforming subsidence vulnerability indexing based on ALPRIFT into risk indexing using a new fuzzy-catastrophe scheme[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2020, 82:106352.
- [36] 贾玉博,杨宏伟,粟晓玲,等. 基于水代谢和水循环理论的石羊河流域水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2024, 40(5):86-94. (JIA Yubo, YANG Hongwei, SU Xiaoling, et al. Water resources carrying capacity evaluation in the Shiyang River Basin based on theories of water metabolism and water cycle [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5):86-94. (in Chinese))
- [37] 周绍江. 突变理论在环境影响评价中的应用[J]. 人民长江, 2003, 34(2):52-54. (ZHOU Shaojiang. Application of catastrophe theory in environment impact evaluation [J]. Yangtze River, 2003, 34(2):52-54. (in Chinese))
- [38] YANG Yunrui, DAI Erfu, YIN Jun, et al. Spatial and temporal evolution patterns of droughts in china over the past 61 years based on the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Water, 2024, 16(7):1012.
- [39] 张姣,胡庆芳,黄璟胜,等. 基于 ITA 法和 Mann-Kendall 法的漓江流域极端降水变化解析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6):15-22. (ZHANG Jiao, HU Qingfang, HUANG Jingsheng, et al. Analysis of extreme precipitation changes in Lijiang River Basin based on ITA and Mann-Kendall methods [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6):15-22. (in Chinese))
- [40] BEAUDUCEL A, HILGER N. Score predictor factor analysis: reproducing observed covariances by means of factor score predictors[J]. Frontiers in Psychology, 2019, 10:1895.
- [41] SHYU G S, CHENG Baiyou, CHIANG C T, et al. Applying factor analysis combined with kriging and information entropy theory for mapping and evaluating the stability of groundwater quality variation in Taiwan[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2011, 8(4):1084-1109.
- [42] 王继顺,王传斌,闫敏伦,等. 基于因子分析法的各地城镇就业情况综合评价模型[J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(19):10-18. (WANG Jishun, WANG Chuanbin, YAN Minlun, et al. Comprehensive evaluation model on occupational situation of cities and towns units in various region based on the factor analysis method [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2013, 43(19):10-18. (in Chinese))

(收稿日期:2024-11-13 编辑:王芳)