

王文睿, 王婷, 刘彬, 等. 基于改进破产理论的省级用水总量控制指标分解[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 780-789.
WANG W R, WANG T, LIU B, et al. Index decomposition of provincial total water consumption control based on improved bankruptcy theory[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 780-789. (in Chinese)

基于改进破产理论的省级用水总量控制指标分解

王文睿^{1,2,3}, 王婷³, 刘彬^{1,2}, 游进军³, 贺华翔³

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038;
3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:以吉林省为例, 借鉴马斯洛需求理论开展各地级市分层次用水需求识别, 构建“省-市”两级用水总量控制指标初始分配指标体系, 基于充分保障区域用水的刚性需求, 引入刚性需水量对传统破产理论准则进行改进。选取人口-用水总量基尼系数、GDP-用水总量基尼系数、人均综合用水量、万元 GDP 用水量 4 个指标评价用水总量控制指标分解方案的社会经济稳定性。研究表明, 改进破产理论方法在省级用水总量控制指标分解中具有较高适用性, 分解结果符合各地级市未来发展用水趋势, 且均能满足各地区发展的刚性用水需求, 有效提升了地区用水公平性与稳定性。具体体现在: 与 2020 年实际分解方案相比, 吉林省人口与用水总量匹配程度稳定性、GDP 与用水总量匹配程度稳定性分别提升了 11.03%、9.97%; 大部分地级市用水水平与用水效率较现状年均有明显提升。与采用传统破产理论分解方案相比, 吉林省人口与用水总量匹配程度稳定性、GDP 与用水总量匹配程度稳定性分别提高了 33.77%、18.32%; 各地级市用水水平与用水效率变化更为合理。本研究可为各级水行政主管部门开展精细化用水管理提供参考借鉴, 同时对于健全最严格水资源管理制度体系具有一定的技术价值。

关键词:用水总量控制指标分解; 破产理论; 同损失准则; 分层次需水; 社会经济稳定性

中图分类号: TV212.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0076

用水总量控制指标作为最严格水资源管理制度中“三条红线”之一, 是水资源开发管控和优化调配的基本依据之一。《国家发展改革委关于印发“十四五”用水总量和强度双控目标的通知》(水节约[2022]113号)中明确了全国以及各省级行政区用水总量控制指标, 但考虑到各省区不同水情, 并未将该指标细化分解到各地级市、县区行政单元。自最严格水资源管理制度实施以来, 国内关于用水总量控制指标量化分解研究渐多。在理论层面: 王浩等^[1]提出“自然-社会”二元水循环理论是实现以“三条红线”为核心的最严格水资源管理制度的重要理论基础; 汪党献等^[2]讨论了用水总量控制制度及指标制定的必要性, 并对未来分解方向的科学性进行了探讨; 王小军等^[3]在宏观层面提出了落实用水总量总控制管理的六大抓手, 并对实际管理过程中需注意的问题进行了总结; 何艳梅^[4]指出《水法》应与水资源开发利用控制红线相结合, 建立覆盖流域和省、

市、县三级行政区域的取用水总量控制指标体系; 陈思源等^[5]结合文献信息可视化工具总结出用水总量控制制度是落实最严格水资源管理制度的一体两翼, 是影响我国水资源研究轨迹产生变化的突变点。在方法层面: 刘淋淋等^[6]结合狭义、广义及严格意义地表(地下)水资源可利用量的概念, 提出确定用水总量控制指标的方法体系; 吕良华等^[7]从控制用水强度、提高水资源利用效率两方面出发, 利用比拟借鉴方法构建了雄安新区不同时期分行业、分区域的用水强度指标体系; 胡智丹等^[8]在河西走廊黑河流域和石羊河流域, 通过建立用水总量控制及流域治理效果评估指标体系, 对用水总量控制指标分解方案进行评估; 何亚闻等^[9]引入基尼系数概念对广西北部湾各市 2015 年的用水总量控制指标分解结果做出评价; 尚煜廷等^[10]选取与用水总量与用水效率相关指标对长江流域 19 个省区的用水总量与用水效率落实情况进行评估。总结发现, 国内

收稿日期: 2023-05-12 修回日期: 2023-07-20 网络出版时间: 2023-07-24

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230721.1802.004>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52209042); 河北省重点研发计划项目(21374201D)

作者简介: 王文睿(1998—), 男, 河北沧州人, 主要从事水文与水资源研究。E-mail: 1335681912@qq.com

通信作者: 王婷(1990—), 女, 江苏南京人, 高级工程师, 博士, 主要从事复杂水资源系统模拟与调控研究。E-mail: wangt90@iwhr.com

关于用水总量控制研究大多是在优化用水总量控制模式、完善制度建设等方面,在实际操作中多以“下级申报、上级审批”的行政管理模式为主,存在上报需水量主观性过强、分配方法不合理等问题。很多方法由于理论本身的理解难度或实际操作的成本问题,在实际使用中遇到许多困难。

破产理论由于其合作博弈的性质和操作简单的特点^[11],在用水总量控制分解中有着不错的应用前景。该方法最初于2012年被用于研究伊朗跨省流域水量分配^[12]中,2015年中国学者首次引用此方法用于研究漳河108 km河段4灌区水量分配^[13],之后陆续在东江流域^[14-15]、黄河流域^[16]和澜沧江-湄公河流域^[17-18]等水量分配中得到应用。总结发现,在应用各种破产准则时,并不能很好地对各类用水进行分层分水。随着水资源供需矛盾的加剧,需水精细化管理成为社会发展的必然,若能针对不同用户群体的用水需求进行分层识别和分类管理,就可以更好地保障人们生活所需的用水资源,并提高水资源利用效率。

因此,本文在传统破产理论规则中考虑到各地区刚性用水需求和分水优先序,对传统破产理论的同损失准则进行改进,尝试将其应用在区域用水总量控制分解研究中,并选取相关社会、经济评价指标,对分解方案进行社会经济稳定性评价,以期为“省-市”以及“市-县”两级用水总量控制指标分解研究提供一定的技术参考,助力区域最严格水资源管理的“最后一公里”制度建设。

1 研究区概况与数据来源

吉林省位于我国东北地区中部,是全国9个边境省区之一,全省现辖8个地级市、1个自治州(延边朝鲜族自治州,以下简称延边州)。吉林省多年平均降雨量为400~600 mm,区内水系发达但水资源时空分布不均,水资源呈东多西少、南丰北欠的格局,人均水资源量低于全国平均水平,水资源短缺已成为制约吉林省经济发展和社会进步的重要因素。文件《关于印发“十四五”用水总量和强度双控目标的通知》明确了吉林省到2025年的用水总量控制指标为137.3亿m³。然而,由于吉林省各地区水资源的自然条件和人口经济水平等存在差异,仅仅给出一个统一的用水总量控制指标不利于各地合理分配、管理和实施节水措施。

本文研究对象为吉林省8个地级市及1个自治

州,以水利部下达的2025年吉林省“十四五”用水总量目标值137.3亿m³作为分解目标。各项指标数据来源于《吉林省水资源公报》(2016—2020年)、《吉林省统计年鉴》(2016—2020年)、《吉林省2010年第六次全国人口普查主要数据公报》、《吉林省2020年第七次全国人口普查主要数据公报》以及吉林省水利厅统计的吉林省2010—2020年各地级市供用水情况数据,个别缺失指标值采用插补法进行了补充。

2 研究方法

2.1 改进破产理论

破产问题是指在资产不足以满足所有债权人的索赔情况下,在债权人(利益相关者)之间重新分配可用资产^[19]。对于省级用水总量控制分解研究来说,当省级用水总量控制红线指标小于各地级市需水量之和时,即出现水资源破产问题。国内外学者^[20-21]建立了多种破产准则,总结发现,每种破产规则都有自己的适应性群体。在现有的破产准则中,同损失准则(CEL)是一种常见的公平原则,但其缺乏灵活性和差异对待使其无法适应不同需求情况,由于各用水单元需平等承担缺水量,最后需水量较大的单元满意度偏高,即分解的指标与自提需水量之间的差距偏小,小用水单元满意度偏低,即分解的指标与自提需水量之间的差距偏大,基于此,本文对传统CEL规则进行改进。

2.1.1 传统CEL准则

在省级用水总量控制指标分解研究中,传统CEL准则原理是等量减少各地级市用水单元的需水量至省级用水总量控制指标;若小用水单元减至0后,继续等量减少其他用水单元水量至省级用水总量控制指标。CEL准则表达式为

$$x_i = \max(0, D_i - \gamma) \quad (1)$$

$$\text{其中: } \gamma = (D - E)/n \quad (2)$$

式中: i 为用水单元; x_i 为用水单元 i 最终分解指标, m³; D_i 为用水单元 i 需水量, m³; D 为用水单元需水量之和, m³; E 为省级用水总量控制指标, m³; n 为总用水单元数,当第 k 个用水单元 $D_k - \gamma < 0$ 时, $x_k = 0$, 剩余各用水单元需要重新计算 γ , m³; $\gamma = (D - E - D_k)/(n - 1)$, $x(i \neq k) = \max(0, D_i - \gamma)$, 如此反复计算 γ 。

可以发现当 γ 较大、 D 较小时,小用水单元分解指标有可能为0或者分解指标不足以满足该用水单元基本的生产生活需水量。

2.1.2 基于刚性用水需求保障的 CEL 准则改进

针对传统 CEL 准则中小用水单元可能会出现分配水量不足以满足自身基本发展这一缺陷, 引用马斯洛需求理论, 将需水量划分为刚性需水量与非刚性需水量, 并把刚性需水量作为各单元最低用水保障量, 由于全省的用水总量控制指标是结合全省各类水源供给能力以及近几年全省实际用水情况制定的, 一般情况下大于各地级市刚性需水之和。如各地级市的刚性需水量之和大于全省用水总量控制指标, 应复核各地级市刚性需水量计算是否有误, 主要复核刚性用水规模是否超过相关规划、用

水效率是否还有提升空间等。

考虑到不同地级市水资源条件和社会经济发展状况特点, 在对省级用水总量控制指标分解时分水比例应有所不同, 结合该地区的水资源与社会经济的特点选取相关原则与指标, 并采用基于赋权的 TOPSIS 法^[22] 得到各用水单元初始分水权重。建立的改进 CEL 准则表达式见式(3), “省-市” 两级用水总量控制指标分解技术框架见图 1。

$$x_i = \min(D_i, \max(G_i, E \times W_i)) \quad (3)$$

式中: G_i 为用水单元 i 的刚性需水量, 通过下文 2.2 节计算; W_i 为用水单元 i 的初始分水权重, 通过下文 2.3 节计算。

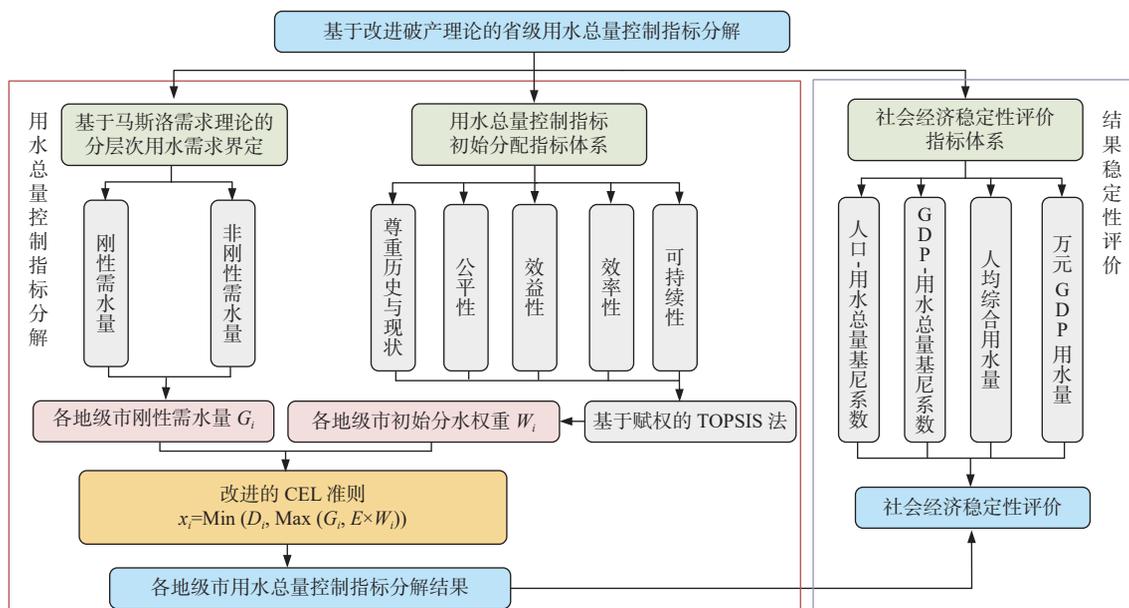


图 1 “省-市” 两级用水总量控制指标分解技术框架

Fig. 1 Technical framework for decomposition of total water consumption control indicators at the “provincial-municipal” level

改进破产理论方法总体计算思路如下:

步骤 1: 根据各个地级市的初始分水权重 W_i 进行初始分水, 得到各地级市初始分水量 $E \times W_i$ 。

步骤 2: 对比各地级市初始分水量与识别的刚性需水量、自提需水量的大小, 对初始分水量超过自提需水量的地级市按照自提需水量对初始分水结果进行修正。

步骤 3: 计算剩余地级市权重与需水量, 将剩余用水总量控制指标按照新权重值进行第三次分水, 比较其与刚性需水量 G_i 的大小, 取两者较大值再与其需水量 D_i 对比, 进一步取两者较小值作为该地级市的最终分水量。

2.2 基于马斯洛需求理论的分层次用水需求识别

马斯洛需求理论是一个广为人知的心理学理论,

其中包含了人类需求的层次结构。基于这个理论的分层次用水需求识别, 可以帮助水资源管理者深入了解各种用水类别所强调的需求类型, 并据此进行合理的用水分配。本文借鉴马斯洛需求理论, 同时考虑社会经济和生态环境对水资源的需求迫切程度, 提出基于马斯洛需求理论的分层次用水需求识别示意图, 见图 2。其中, 马斯洛需求理论中的生理需求和安全需求可以作为刚性用水需求, 社交需求、尊重需求和自我实现需求可以作为非刚性用水需求。

生活用水需求分层。区域生活用水需求以保障民生、提高人们生活水平为基本目标, 是区域最基本用水需求^[23]。因此, 将合理生活用水标准以内的生活用水需求全部作为刚性用水需求, 其他用水作为非刚性用水需求。

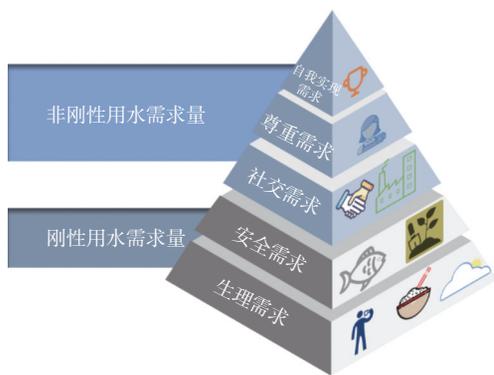


图2 基于马斯洛需求理论的分层次用水需求识别示意图

Fig. 2 Technical framework for decomposition of total water consumption control indicators at the “provincial-municipal” level

工业用水需求分层。工业刚性需水量是指特定区域内符合国家和地区发展目标的工业企业,基于先进用水技术水平要求所需的水资源量。本文通过对各地级市最近5年万元工业增加值用水量的分析,将这一数据的最低值作为各地级市在水资源利用方面最为高效的水平,并以此为基础确定了各地级市的工业用水需求。在此基础上的工业用水需求作为工业刚性需水量,其他用水作为非刚性用水需求。

农业用水需求分层。农业需水主要包括农田灌溉需水和林牧渔畜需水。考虑到吉林省林牧渔畜

需水量较少,所以本文仅考虑吉林省农田灌溉需水量。因此,本文根据各地级市达到2025年人均口粮安全所需对应的农田灌溉面积用水需求作为农业刚性需水量^[24]。其他用水需求则被归类为非刚性用水需求。

生态用水需求分层。生态需水是指为保障生态系统的稳定和健康发展而必需的水资源量,通常将生态需水分为河道内生态需水与河道外生态需水。本文通过对吉林省近十年各地级市生态用水量数据的分析,确定各地级市在最枯水年下需要的生态用水量作为生态刚性需水量,而其他用水需求则被视为非刚性用水需求。

2.3 用水总量控制指标初始分水指标体系构建

省级用水总量控制指标分解属于多目标、多层次的系统决策问题,是省级用水总量控制指标分解的基础,涉及人口、经济、资源和环境等多方面因素^[25]。借鉴前人研究成果^[26-28],选取尊重历史与现状、公平性、效率性、效益性和可持续性5个原则,并结合本文研究目的对指标选取进行了筛选分析,共选择了10项指标用于建立用水总量控制指标的初始分水指标体系,见表1。

表1 用水总量控制指标初始分水指标体系

Tab. 1 Initial water distribution index system of total water consumption control index

目标层	准则层	指标层	指标获取方法	表征含义	属性		
各地级市初始分水权重	尊重历史与现状	本地水资源量/亿m ³	吉林省水资源公报	区域水资源的可利用程度	+		
		现状用水量/亿m ³	吉林省供用水统计表	现状用水水平	+		
		规划年需水量/亿m ³	定额法计算	未来用水需求状况	+		
	公平性		人口/万人	吉林省统计年鉴	人口对水资源的需求	+	
			人均用水量/m ³	用水量/人口数量	综合用水效率	-	
	效率性		灌溉水利用系数	吉林省水资源公报	农业用水效率	+	
			人均GDP/元	GDP/人口数量	用水产生的经济效益	+	
	效益性		单位面积GDP/(万元·km ²)	GDP/面积	用水产生的经济效益	+	
			可持续性	再生水利用率/%	吉林省供用水统计表	非常规水源供给情况	+
				生态用水占比/%	吉林省供用水统计表	对水生态系统的重视程度	+

注: 指标属性“+”,为正向指标; 指标属性“-”,为负向指标。

为减少赋权的主观随意性,采取主客观赋权的TOPSIS法进行赋权。主观赋权选用层次分析法、客观赋权选用熵权法,据此分别确定准则层对目标层的权重以及指标层对准则层的权重。层次分析

法是根据专家经验进行赋权,而专家经验有所不同,结果可能会随着调研专家的不同而有所不同;熵权法是通过分析数据本身的信息熵,消除了主观因素对权重判断的影响,指标的权重更加客观和可靠,

使用权重乘法计算各指标对目标层的综合权重 $W = (w_1, w_2, \dots, w_{10})$, 并采用 TOPSIS 法计算最优方案集合、最劣方案集合以及各地级市与最优、最劣方案间的距离, 确定各地级市的初始分水权重。

2.4 社会经济稳定性评价

判断用水总量控制指标分解结果是否满足吉林省及各地级市的社会经济发展需要、是否公平、是否稳定, 成为验证该方法合理性的关键。从吉林省和 9 个地级市两个层面出发, 将 2020 年各地级市实际分解结果(方案 A)、2025 年传统破产理论方法分解结果(方案 B)分别与本文得到的 2025 年改进破产理论的用水总量指标分解结果(方案 C)进行对比分析, 从而对比验证本文提出方法的合理性。

在吉林省全省的社会经济稳定性评价方面, 引入人口-用水总量基尼系数、GDP-用水总量基尼系数两项指标, 以全面评估水资源对社会发展的支撑作用以及水资源对经济发展的支撑作用; 在各地级市的社会经济稳定性评价方面, 引入反映用水水平与用水效率的人均综合用水量、万元 GDP 用水量两项指标, 对用水总量控制指标分解结果的社会经济稳定性进行细化分析。总体上, 这些指标的引入兼顾了水资源的基础性和经济性特征, 能够全面反映用水对于区域社会和经济发展的支撑和促进作用, 为水资源管理提供了科学评价依据。

2.4.1 基于基尼系数的吉林省稳定性评价

基尼系数(或称洛伦兹系数)由意大利经济学家基尼(Gini)于 1922 年根据洛伦兹曲线提出, 用以评价国民收入分配之间的差异性^[29]。

人口-用水总量基尼系数是用来衡量一个地区人口数量与用水总量之间不平等程度的指标。该指标采用梯形面积法计算^[30], 见公式(4)。首先按用水总量升序排列, 然后计算累计用水总量占总用水总量的百分比和累计人口占总人口数量的百分比, 最后以其拐点为基准线, 计算下凸曲线下方面积和总面积的比值, 该比值就是人口-用水总量基尼系数。该指标的值越接近 1, 表示该地区人口与分解指标的匹配程度越差。

$$G_u = 1 - \sum_{u=1}^m (X_u - X_{u-1})(Y_u - Y_{u-1}) \quad (4)$$

式中: G_u 为基尼系数; u 为评价对象; m 为评价对象总数; X_u 为人口累计百分比; Y_u 为收入累计百分比。不同基尼系数值反映不同水量分配匹配程度: 基尼系数 < 0.2 , 表示收入高度匹配; $\geq 0.2 \sim < 0.3$ 表示收入比较匹配; $\geq 0.3 \sim < 0.4$ 表示收入相对匹配; $\geq 0.4 \sim$

< 0.5 表示收入不匹配; ≥ 0.5 表示极不匹配。

GDP-用水总量基尼系数是用来衡量一个地区经济发展和用水总量之间不平等程度的指标。该指标的计算方法类似于人口-用水总量基尼系数, 先按照 GDP 升序排列, 然后计算累计 GDP 占总 GDP 的百分比和累计用水总量占总用水总量的百分比, 最后以其拐点为基准线, 计算下凸曲线下方面积和总面积的比值, 该比值就是 GDP-用水总量基尼系数。该指标的值越接近 1, 表示该地区 GDP 与分解指标的匹配程度越差。

2.4.2 考虑用水水平与效率的各地级市稳定性评价

在水资源配置过程中, 考虑用水主体的满意度可以有效提高水资源配置方案的可行性^[31]。选取人均综合用水量作为反映社会用水满意度的指标, 其值越高在一定程度上可以表明该地区人民生活水平、用水满意度越高。水资源可持续利用是我国经济社会发展的关键问题, 其核心在于提高水资源利用效率。选取万元 GDP 用水量作为反映综合用水效率的指标, 体现了在单位经济产出的背景下所消耗的水资源量, 能够准确反映出用水资源利用效率的高低。该指标值越低, 则标志着单位经济增长所需用水资源更少, 能更有效地实现水资源的节约和集约化利用。综合运用该指标, 有利于提升水资源利用效率, 促进经济与水资源保护协调发展, 从而实现水资源的可持续利用。

3 结果与分析

3.1 吉林省“省-市”两级用水总量控制指标分解结果

表 2 为吉林省各地级市(自治州)2025 年用水总量控制指标分解结果。2025 年分层需水识别成果: 吉林市由于其未来工业规模和农业规模在全省中占比较大, 其 2025 年需水量最高, 为 47.70 亿 m^3 , 对应的刚性需水量也是全省最高, 为 28.34 亿 m^3 ; 相反, 辽源市由于其相对较小的人口规模及工农业规模, 因此其需水量和刚性需水量均为全省最低, 分别为 2.76 亿 m^3 和 1.82 亿 m^3 。吉林省各地级市(自治州)2025 年用水总量控制指标初始分水权重结果显示: 长春市近 5 年人口占比最高、再生水利用水平最高, 该地的分水比例最高, 为 28.50%; 而辽源市则由于近 5 年人口占比最低、本地水资源禀赋条件差、再生水利用水平低, 其分水比例最低, 仅为

4.25%。2025年各地级市用水总量控制指标分解结果显示:长春市2025年分水指标最高,为34.00亿m³;而辽源市则分水指标最低,仅为1.82亿m³。值得注意的是,尽管辽源市分水指标相对较低,但分层次需水成果显示,其仍能保障该地区的刚性用水需求。

表2 吉林省各地级市(自治州)2025年用水总量控制指标分解结果

Tab. 2 Decomposition of total water consumption control indicators by prefecture-level cities in Jilin Province in 2025

地级市(自治州)	刚性需水量/ 亿m ³	需水总量/ 亿m ³	初始分水权重/ %	分水指标/ 亿m ³
长春市	23.39	34.00	28.50	34.00
吉林市	28.34	47.70	14.13	32.95
四平市	1.84	4.80	6.60	4.80
辽源市	1.82	2.76	4.25	1.82
通化市	7.26	11.20	5.73	11.20
白山市	2.46	3.61	6.52	3.61
松原市	13.54	21.56	6.92	16.73
白城市	14.00	23.37	14.92	23.37
延边州	5.97	8.82	12.42	8.82
全省	98.63	157.81	100	137.30

为进一步验证改进破产理论方法的科学性及其有效性,将方案C分别与方案A和方案B进行对比。计算3种方案下各地级市(自治州)分水指标在全省用水总量控制指标上所占的比例,结果见图3。

从图3可以发现,相较于方案A,方案C中吉林市在全省用水总量控制指标中所占比例得到了

显著提升,达到了7.68%。通过对此现象的深入分析,发现吉林市在全省工业和农业发展中所占的重要地位。随着工农业规模的不断扩大,该地区对水资源需求量也与之相应地提升,这一结论与当地未来的发展趋势相符合,具有较为可靠的科学性和合理性。同时,从图4还可以看出,四平市在方案C中的比例下降幅度最大,达到了3.89%,其他各地级市的变化幅度相对较稳定,进一步分析发现,四平市在2010—2020年,城镇人口和农村人口年均下降率分别为5.10%和6.95%,由于人口流失严重,该地未来的用水需求受到了一定的抑制,导致其在方案C中分水指标在全省用水总量控制指标中所占比例下降。

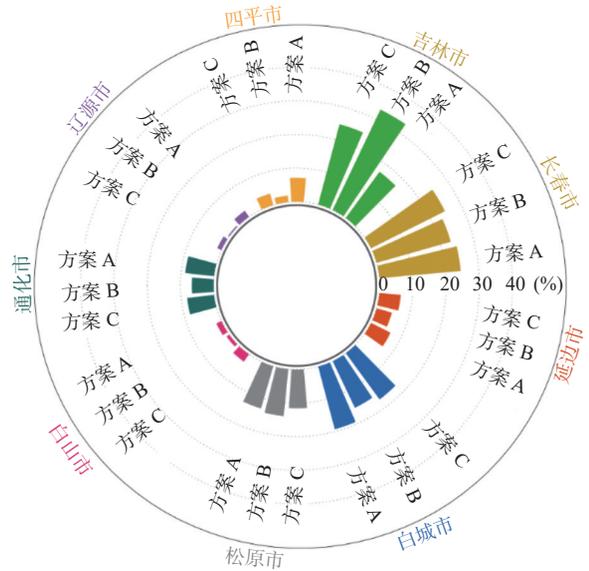


图3 3种方案下吉林省各地级市(自治州)分水指标占比
Fig. 3 Share of water distribution indicators by prefecture-level cities in Jilin Province under three scenarios

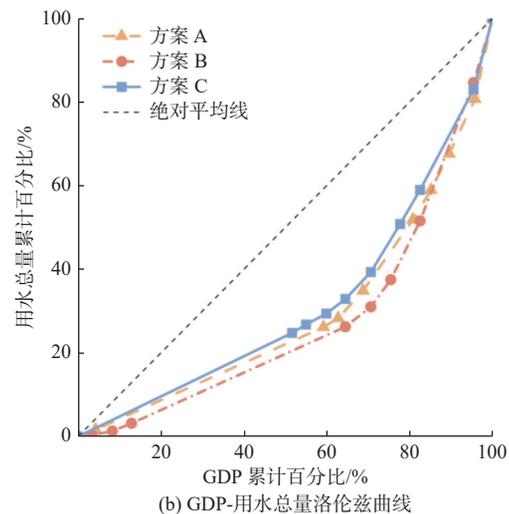
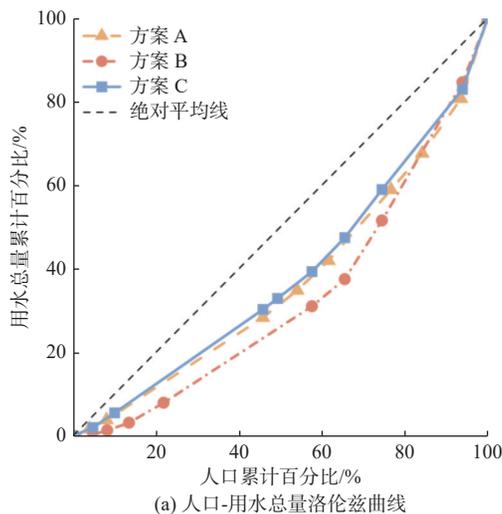


图4 3种方案下吉林省社会经济稳定性评价

Fig. 4 Evaluation of social and economic stability in Jilin Province under three schemes

相较于方案 B, 方案 C 中吉林市在全省用水量控制指标中所占比例的下降幅度最为明显, 而其他一些需水量较小的地级市(如四平市、辽源市和白山市)和延边州则占比有所升高。在对这一现象进行深入分析后, 发现传统的破产理论方法在对此问题进行分析时只是考虑需水量这一要素, 导致高需水单元分水满意度较高、低需水单元分水满意度较低。然而, 相比于传统破产理论方法, 方案 C 采用了改进的破产理论方法, 该方法考虑了各需水单元分水权重以及最低用水保障量, 因此分解结果更为合理, 没有出现极端分水情况。这一实证结果为改进破产理论方法的应用提供了更为可靠的数据支持。

3.2 分解结果社会经济稳定性评价

3.2.1 吉林省社会经济稳定性评价

由表 3 和图 4 可以看出, 采用改进破产理论方法的分解方案在吉林省的社会经济发展方面更为公平合理。具体来看: 在人口-用水总量基尼系数方面, 改进破产理论分解结果为 0.234, 属于比较匹配等级, 比方案 A 降低了 11.03%, 比方案 B 降低了 33.77%, 说明人口与用水总量之间的匹配程度相对稳定, 并得到了明显提升; 在 GDP-用水总量基尼系数方面, 改进破产理论分解结果为 0.370, 属于相对匹配等级, 比方案 A 降低了 9.97%, 比方案 B 降低了 18.32%, 在 GDP 与用水总量的匹配程度方面也得到了明显提升。实证分析结果表明: 采用改进破产理论方法得出的分解方案更加符合吉林省经济社会发展对水资源需求的实际情况, 并且在人口和 GDP 与用水总量之间的匹配程度上得到了明显提升。因此, 该方法在水资源分配中的应用具有更高的公平性和合理性。

表 3 3 种方案下吉林省人口-用水总量基尼系数、GDP-用水总量基尼系数

Tab. 3 Gini coefficient of population-total water consumption and GDP-total water consumption in Jilin Province under three schemes

方案名称	人口-用水总量基尼系数	GDP-用水总量基尼系数
方案A	0.263	0.411
方案B	0.338	0.453
方案C	0.234	0.370

3.2.2 各地级市社会经济稳定性评价

图 5 为在 3 种方案下吉林省各地级市(自治州)人均综合用水量、万元 GDP 用水量结果。由图 5(a)可知: 相较于方案 A, 方案 C 中各地人均用水水平仅有四平市降幅最高, 为 31.8%, 进一步分析发现, 这是由于四平市未来发展趋势与人口下降趋势不匹配所导致的, 因此未来分水量偏低, 从而造成人均用水水平下降; 同时, 吉林市和白山市人均用水水平提升均在 30% 以上, 其他 6 市提升幅度在 10% 以内, 说明该方法相较于 2020 年现状用水情况, 能提升大部分地区居民用水满意度。相较于方案 B, 方案 C 中吉林市和松原市两市人均用水水平分别降低了 27.5% 和 18.1%, 原因是传统的破产理论方法仅仅考虑其需水量, 未考虑根据实际社会与水资源情况得到的分水比例, 从而导致其分水量的提升是建立在小用水单元不能正常进行社会活动基础上, 存在一定的不合理性。白山市、辽源市和四平市的人均用水水平提升均在 50% 以上, 而这几个地级市均为小用水单元, 说明本文提出的基于刚性用水需求保障的 CEL 准则改善了传统 CEL 准则中小用水单元分配不合理问题, 提升了吉林省整体用水满意度。

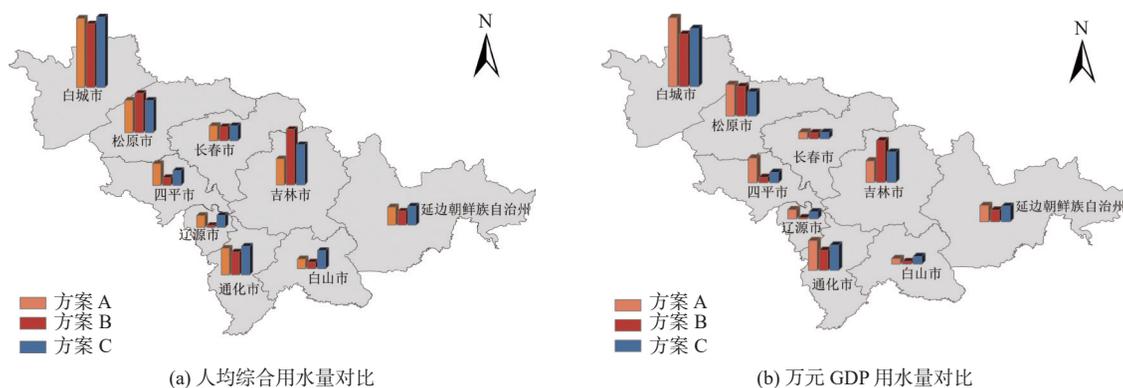


图 5 3 种方案下吉林省各地级市(自治州)社会经济稳定性评价

Fig. 5 Evaluation of social and economic stability of prefecture-level cities in Jilin Province under three schemes

由图 5(b)可知:相较于方案 A,方案 C 中仅有吉林市和白山市的用水效率分别降低 42.0% 和 36.1%,原因是两市近几年 GDP 产值呈下降趋势,导致 2025 年 GDP 预测值偏低,所以在实际中需进一步调整优化产业结构以提升该地区生产总值,其他 7 市用水效率提升均在 10% 以上,证明该方法较现状年提升了该省多数地区的水资源利用效率。相较于方案 B,方案 C 中仅有吉林市和松原市的用水效率提升了 27.1% 和 18.3%,其他地级市用水效率均有所不同程度的下降,原因与用水水平提升类似,传统破产方法仅考虑了两个城市的需水量;而未充分考虑其他因素。

4 结论

在传统的破产理论上引入了地区刚性需水量的概念,并结合马斯洛需求理论,开展各地级市(自治州)分层次用水需求识别,构建了“省-市”两级用水总量控制指标初始分配指标体系,并以吉林省为例,进行了 2025 年用水总量控制指标“省-市”两级分配的研究,得到的主要结论如下:

提出了一种基于改进破产理论的“省-市”两级用水总量控制指标分解方法,该方法充分考虑了各地级市最低用水保障量,并注重尊重历史发展现状,贯彻遵循公平性、效率性、效益性和可持续性原则。通过简单而实用的手段,有效地实现了指标分解,可以为其他区域开展“省-市”“市-县”两级用水总量控制指标分解提供一定的参考和借鉴。

2025 年吉林省用水总量控制指标分解结果显示,分水指标最高的地级市为长春市(34.00 亿 m^3),最低为辽源市(1.82 亿 m^3),分水指标均能满足各地区的基本发展要求所需水量。

社会经济稳定性评价结果显示,2025 年改进破产理论分解结果的人口-用水总量基尼系数为 0.234,GDP-用水总量基尼系数为 0.370。与 2020 年实际用水结果相比,吉林省人口与用水总量匹配程度稳定性、GDP 与用水总量匹配程度稳定性分别提升了 11.03%、9.97%;与采用传统破产理论分解结果相比,分别提高了 33.77%、18.32%。

随着区域内经济社会的不断发展和用水条件的不断变化,未来需开展“省-市”两级用水总量控制指标的动态分解工作,如开展年度用水总量控制指标分解工作。同时,为了提升区域用水效率以及提

升用水效益,各地级市之间还需进一步加强合作,尝试开展用水指标的合作博弈,实现真正意义上的合作共赢。

参考文献:

- [1] 王浩,王建华,胡鹏. 实行最严格水资源管理制度关键技术支撑探析[J]. 中国水利, 2011(6): 28-29,32. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2011.06.015.
- [2] 汪党献,郦建强,刘金华. 用水总量控制指标制定与制度建设[J]. 中国水利, 2012(7): 12-14. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2012.07.005.
- [3] 王小军,高娟,童学卫,等. 关于强化用水总量控制管理的思考[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S3): 221-225.
- [4] 何艳梅. 最严格水资源管理制度的落实与《水法》的修订[J]. 生态经济, 2017, 33(9): 180-183, 236.
- [5] 陈思源,陆丹丹,程海梅. 基于科技文本挖掘的我国水资源研究知识图谱分析[J]. 水文, 2019, 39(2): 61-66. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2019.02.011.
- [6] 刘淋淋,曹升乐,于翠松,等. 用水总量控制指标的确定方法研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5): 159-163. DOI: 10.3724/sp.j.1201.2013.05159.
- [7] 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. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.015.
- [8] 胡智丹,王忠静,郑航. 西北内陆河流域用水总量控制及治理效果评估:以黑河及石羊河为例[J]. 水力发电学报, 2021, 40(6): 41-50. DOI: 10.11660/slfdbx.20210605.
- [9] 何亚闻,褚俊英,户超,等. 广西北部湾经济区用水总量控制指标分解的公平性评价分析[J]. 节水灌溉, 2015(8):100-103. DOI:10.3969/j.issn.1007-4929.2015.08.025.
- [10] 尚曼廷,王小军,刘明朝,等. 长江流域省区用水总量与用水效率控制评估[J]. 人民长江, 2019, 50(1): 84-88. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.01.016.
- [11] 陈艳萍,刘晶婕,吴凤平. 跨境河水量分配方法探讨:破产理论下的评估与改进[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(12): 66-74. DOI: 10.12062/cpre.20200624.

- [12] ZAREZADEH M, MADANI K, MORID S. Resolving transboundary water conflicts: Lessons learned from the Qezelozan-Sefidrood River bankruptcy problem[C]//World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries. 2012: 2406-2412. DOI: [10.1061/9780784412312.243](https://doi.org/10.1061/9780784412312.243)
- [13] 孙冬营, 王慧敏, 褚钰. 破产理论在解决跨行政区河流水资源配置冲突中的应用[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(7): 148-153. DOI: [10.3969/j.issn.1002-2104.2015.07.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2104.2015.07.020).
- [14] 李深林, 陈晓宏, 何艳虎, 等. 破产理论在区域水量分配中的应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(5): 22-28, 75. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.05.004](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.05.004).
- [15] LI S L, HE Y H, CHEN X H, et al. The improved bankruptcy method and its application in regional water resource allocation[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2020, 28(1): 48-56. DOI: [10.1016/j.jher.2018.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jher.2018.07.003).
- [16] 陈琛, 郭甲嘉, 沈大军. 黄河流域水量分配和再分配[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 799-812. DOI: [10.18402/resci.2021.04.14](https://doi.org/10.18402/resci.2021.04.14).
- [17] 袁亮, 沈菊琴, 何伟军, 等. 基于主体不平等的跨国界河流水资源分配的破产博弈研究[J]. *河海大学学报(哲学社会科学版)*, 2018, 20(2): 65-69, 91-92.
- [18] 李芳, 吴凤平, 陈柳鑫, 等. 基于加权破产博弈模型的跨境流域水资源分配研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(4): 728-736. DOI: [10.13249/j.cnki.sgs.2021.04.019](https://doi.org/10.13249/j.cnki.sgs.2021.04.019).
- [19] ASHRAFI S, KHOIE M M M, KERACHIAN R, et al. Managing basin-wide ecosystem services using the bankruptcy theory[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 842: 156845. DOI: [10.1016/J.SCI-TOTENV.2022.156845](https://doi.org/10.1016/J.SCI-TOTENV.2022.156845).
- [20] YAZDIAN M, RAKHSHANDEHROO G, NIKOO M R, et al. Groundwater sustainability: developing a non-cooperative optimal management scenario in shared groundwater resources under water bankruptcy conditions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 292: 112807. DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.112807](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112807).
- [21] ZENG Y, LI J, CAI Y, et al. Equitable and reasonable freshwater allocation based on a multi-criteria decision making approach with hydrologically constrained bankruptcy rules[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 203-213. DOI: [10.1016/j.ecolind.2016.08.049](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.049).
- [22] 王杰, 李占玲. 基于熵权的TOPSIS综合评价法在大气环流模式优选中的应用[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(2): 14-21. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0023](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0023).
- [23] 王婷, 游进军, 杨益. 浅析国土空间规划体系下水资源刚性合理需求[J]. *中国水利*, 2020(21): 23-25. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1123.2020.21.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1123.2020.21.013).
- [24] 武见, 明广辉, 周翔南, 等. 黄河流域需水分层预测[J]. *水资源保护*, 2020, 36(5): 31-37. DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2020.05.005](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2020.05.005).
- [25] 韩宇平, 穆文彬, 张戴炜. 基于江河水量分配方法的黄河“八七”分水方案调整问题探讨[J]. *人民黄河*, 2022, 44(9): 46-50, 70. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2022.09.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2022.09.008).
- [26] 任文辉, 黄晓荣, 崔萌, 等. 基于综合赋权法的岷江水量分配研究[J]. *水电能源科学*, 2023, 41(4): 61-64. DOI: [10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221214](https://doi.org/10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221214).
- [27] 王婷, 方国华, 刘羽, 等. 基于最严格水资源管理制度的初始水权分配研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(11): 1870-1875. DOI: [10.11870/cjlyzyyhj201511009](https://doi.org/10.11870/cjlyzyyhj201511009).
- [28] XU Y, ZHU X, WEN X, et al. Fuzzy best-worst method and its application in initial water rights allocation[J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 101: 107007. DOI: [10.1016/j.asoc.2020.107007](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.107007).
- [29] 王建华, 何国华, 何凡, 等. 中国水土资源开发利用特征及匹配性分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 1-8. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0078](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0078).
- [30] 吴青松, 田进宽, 左其亭, 等. 水资源与经济社会发展时空匹配特征量化分析[J]. *人民黄河*, 2022, 44(2): 71-76, 83. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2022.02.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2022.02.015).
- [31] 褚钰. 考虑用水主体满意度的流域水资源优化配置研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(1): 117-124. DOI: [10.18402/resci.2018.01.11](https://doi.org/10.18402/resci.2018.01.11).

Index decomposition of provincial total water consumption control based on improved bankruptcy theory

WANG Wenrui^{1,2,3}, WANG Ting³, LIU Bin^{1,2}, YOU Jinjun³, HE Huaxiang³

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China; 2. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: It is of great significance to breakthrough the "last mile" system construction in the most stringent water resources management by disaggregating the provincial total water use control index into prefecture-level city administrative units. Taking Jilin Province as an example, the initial allocation system of the total water consumption control index at the "province-city" level was established by combining the level of social and economic development and water resources conditions in various regions. Then, the hierarchical identification of water demand in each prefecture-level city was carried out based on Maslow's demand theory. On this basis, the provincial total water consumption control index was decomposed into prefecture-level cities using the improved bankruptcy theory. Four indexes of population-total water consumption Gini coefficient, GDP-total water consumption Gini coefficient, per capita comprehensive water consumption and water consumption per 10,000 yuan GDP were selected to evaluate the social and economic stability of the provincial and municipal levels.

The results showed that the improved bankruptcy theory method had high applicability in the decomposition of provincial total water consumption control indicators. The decomposition results of total water consumption control indicators were in line with the future development trend of water consumption in various prefecture-level cities, which solved the problem of unreasonable water distribution of small users in the traditional bankruptcy theory method. The decomposition indicators could meet the rigid water demand of regional development and effectively improve the fairness and stability of regional water consumption. Specifically reflected in: ① compared with the actual decomposition scheme in 2020, the stability of the matching degree between population and total water consumption and GDP and total water consumption in Jilin Province increased by 11.03% and 9.97%, respectively. Among the nine prefecture-level cities, the water consumption level of eight prefecture-level cities had improved, and only Siping City had reduced the water consumption level by 31.8% due to the mismatch between the future development trend and the population change trend. The water use efficiency of seven prefecture-level cities increased by more than 10%, and the water consumption efficiency of two prefecture-level cities decreased due to the backwardness of their industrial structure. ② Compared with the traditional bankruptcy theory decomposition scheme, the stability of the matching degree between population and total water consumption and the stability of the matching degree between GDP and total water consumption in Jilin Province increased by 33.77% and 18.32%, respectively. Among the nine prefecture-level cities, the improved bankruptcy theory method considered multiple indicators other than the water demand index in the traditional bankruptcy theory, and the final water consumption level and water consumption efficiency changes of each prefecture-level city were more reasonable.

The problem of unreasonable water distribution of small and medium-sized users in the traditional bankruptcy theory was solved by the improved bankruptcy theory proposed, which provided a reference method for water administrative departments at all levels to carry out refined water management. At the same time, it had certain technical value in improving the strictest water resources management system.

Key words: index decomposition of total water consumption control; bankruptcy theory; constrained equal losses rule; hierarchical water requirement; socioeconomic stability