

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdk.2022.0065

游进军,蔡露瑶,林鹏飞,等.基于分类效率识别的水资源承载能力三层次评价方法[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(4):631-642. YOU J J, CAI L Y, LIN P F, et al. Improved three-level water resources carrying capacity method based on classification of water use efficiency[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(4): 631-642. (in Chinese)

基于分类效率识别的水资源承载能力三层次评价方法

游进军¹,蔡露瑶¹,林鹏飞¹,王彦兵²,谢纪强¹

(1. 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;
2. 宁夏回族自治区水利调度中心,银川 750010)

摘要:针对现有的水资源承载能力三层次评价方法以万元 GDP 产业用水量表达综合用水效率对农业用水影响考虑不足的问题,提出以二、三产业单位增加值综合用水量分析可承载经济规模,改进计算流程,推导直接计算可承载人口数量的公式,避免原有试算过程,更准确地反映产业结构变化对用水效率的影响,适应“四水四定”(以水定城、以水定地、以水定人、以水定产)新要求,提高评价结果的合理性。以宁夏为例开展应用分析,按照农业用水保持现状不变,在全面小康水平下改进方法计算的可承载人口数量为 903.7 万人,相对现有方法可多承载 140.2 万人,在基本现代化水平下可承载人口数量降低至 681.5 万人,相对现有方法少承载 90 万人。结合宁夏实际情况设定不同情景,分析农业用水量、人均 GDP、产业用水效率三者变化对结果的影响。按“四水四定”目标大幅压减水稻面积使农业用水量降低 22%后,可承载人口提高 118%,表明农业水管控目标对承载能力影响显著。改进方法揭示农业用水量、非农用水效率、发展水平和承载能力的量化关系和作用机制,可为提高区域水资源承载能力决策提供依据。

关键词:水资源承载能力;三层次评价法;用水效率;宁夏

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



承载能力的概念有较长的历史渊源和广泛的研究范围,资源环境承载力是探寻人与自然和谐共处的重要方向,逐步成为区域可持续发展的重要科学判据^[1],针对不同类型资源环境要素从内涵、概念到评价方法均有不同的研究成果^[2]。我国自 1989 年新疆软课题组开展水资源承载能力研究^[3]以来,开展了多类研究,在概念内涵特点研究基础上形成了规模论、容量论和能力论等承载能力的不同表述方式^[4],包含经验公式法、指标体系评价法和系统分析法等几类主要评价方法,水资源主体从水量属性为主扩展到“量、质、域、流”整体属性^[5]。党的十八大以来,随着《生态文明体制改革总体方案》等政策文件出台,资源环境承载能力从研究逐步转向实际应用,一方面是针对承载能力的监测预警研究方法以

及超载状态的描述^[6],如金菊良等^[7]针对水资源特点分析合理预警指标选取和动态评价方法,龙秋波^[8]等针对监测预警开展风险评价;另一方面是从实际应用出发提出具有操作性的评价方法,如丁晶等^[9]提出以满足供水保证率要求的水资源量作为主体反映水资源随机性变化和供水保障目标的实际特征,李云玲等^[10]以水资源规划管理的水量、水质、水生态等控制指标为依据提出“短板法”进行综合评价。

针对不同区域的自然特征和水问题症结,水资源承载能力研究的侧重点和方法也有所差异。西北干旱区水资源本底条件差、生态环境脆弱,经济与生态的用水竞争问题对人类生存和发展有直接影响,是最早开展水资源承载能力研究的区域。20 世纪 90 年代初许有鹏^[11]选择耕地率、水资源利用率、人

收稿日期:2022-01-24 修回日期:2022-05-26 网络出版时间:2022-06-06

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220602.1519.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(52079143);国家重点研发计划项目(2018YFC0407705);河北省重点研发计划项目(21374201D)

作者简介:游进军(1977—),男,四川成都人,教授级高级工程师,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: youjj@iwhr.com

均供水量、生态用水率等影响干旱区供需关系的评判因素并提出分级指标,利用模糊综合评判法构建干旱区水资源承载能力综合评价模型,以新疆和田流域为例进行了评价;1999 年徐中民等^[12]结合政策因素采用多目标方法分析了黑河流域中游张掖地区规划水平年的水资源承载状况。此后,其他一些学者采用经济社会用水消耗水平^[13]、主成分分析^[14-16]、层次分析^[17]、TOPSIS 评价^[18]、短板法^[19]等不同方法对西北地区水资源承载能力开展了研究。华北地区由于经济社会规模扩大、用水持续增长,导致区域用水竞争激烈、生态用水被挤占,水问题日渐突出,也是水资源承载能力研究的重点。2004 年赵建世等^[20]提出以水资源超载度作为水资源承载能力评价标准,分析了海河流域承载能力的演变趋势;2007 年王忠静等^[21]构造水资源承载力双指针模型分析了山西省大同市的水资源承载能力;多目标分析^[22]、熵权法^[23]、集对分析^[24-25]、短板法^[10]等也在华北地区研究中得到应用。由于水环境污染带来的水质性缺水问题突出、分水矛盾增加,水资源承载能力研究在南方丰水地区也得到重视, TOPSIS 评价^[26]、主成分分析^[27]、模糊综合评价^[28-30]、多目标分析^[31-32]、风险矩阵法^[33]等方法得到应用,针对系统协调性的综合评价逐渐增多^[34-35]。中国水利水电科学研究院在全国水资源综合规划专题研究中提出了水资源承载能力三层次评价方法,采用万元 GDP 产业用水量和区域水资源可利用量计算可承载的经济规模和人口数量^[36],方法简单实用,可依托水资源规划数据针对不同区域进行评价^[37-39]。

总体而言,已有的承载能力分析方法通常将水资源与经济社会作为整体,采用指标评价方法开展研究,缺乏区域产业结构对用水效率的量化分析,影响评价结果准确性。以现有的三层次评价方法为例,由于将农业用水纳入万元 GDP 产业用水量计算,综合用水效率随承载水平变化而变化:一是效率变化缺乏依据,与实际的产业结构和发展趋势不一致;二是不符合“以水定域、以水定地、以水定人、以水定产”(简称“四水四定”)等新思路下的水量配置原则,导致承载能力评价结果出现偏差。为了客观体现用水特征对综合用水效率的影响,对现有的三层次评价方法进行改进,扣除农业用水量计算综合用水效率,更准确反映产业结构变化下的承载能力计算结果,并以农业用水占比较高的宁夏回族自治区进行验证。通过方法改进前后的承载结果与各项用水量对比,体现了改进方法在反映真实用水结构和效率上的优势,结合推导的承载人口直接计算公式表明:可承

载人口数量由可以支撑二、三产业和生活的水量与二者的用水效率决定,揭示农业用水量,人均 GDP 以及二、三产业用水效率等 3 项主要影响因素的作用机制。结合宁夏实际情况,通过情景分析得出不同发展模式下的承载力变化状况,探究不同因素的影响,可为提高承载能力的决策调整方向提供量化依据。

1 计算方法

1.1 现有三层次评价法

水资源承载能力三层次评价方法基于承载主体、客体以及主客体耦合 3 个层次构建,依托水资源量和经济水平评价可承载的经济规模和人口数量,具有概念清晰、便于操作的特点。

第一层次是承载主体分析,即可用于生产的水资源可利用量,由区域水资源可利用量扣除生活与生态需水量得到,其中生活需水量通过预估可承载人口数量计算;第二层次是承载客体分析,即水资源支撑的经济社会系统和生态环境系统,采用经济发展水平和用水水平作为评价指标,由人均 GDP 表征,根据不同承载水平分析综合用水效率,即单位 GDP 产业用水量;第三层次是主客体的耦合,即水资源到用水户的合理分配,由上述两层分析得到的可用于生产的水资源可利用量和单位 GDP 产业用水量推算可承载的经济规模,结合相应承载水平的人均 GDP 标准计算可承载人口。将计算所得的可承载人口与第一层次预估人口校核试算,直到二者大致相等,即得出可承载的人口数量和经济规模。

1.2 现有评价方法的不足

考虑目前水资源管理面临的新形势,现有的水资源承载能力三层次评价方法存在一些不足:由于农业用水量大但行业增加值较低,单位 GDP 产业用水量难以反映产业结构变化对综合用水效率的影响;农业用水量主要与灌溉方式、种植结构和灌溉定额相关,与增加值关系较弱,综合用水效率不能反映实际的农业效率变化,存在挤占或放大农业用水的可能,且其效应难以评估;考虑“以水定地”原则及粮食安全等相关政策,农业用水应有基本保障,同时农业节水后的流转水量可以支撑其他用户需求,综合用水效率不能反映这种动态关系,与实际决策需求不符。此外,可承载人口的试算对计算精度存在一定影响。基于以上原因,尝试对现有方法作改进,突出农业用水保障需求,客观反映产业结构调整带来的用水效率变化,同时建立承载能力结果直接计算公式,避免试算过程从而提高结果准确性。

1.3 改进思路和计算流程

根据上述分析,改进方法的基本思路是扣除农

业用水量不参与单位 GDP 产业用水量计算,相应三层评价法进行调整,技术路线见图 1。

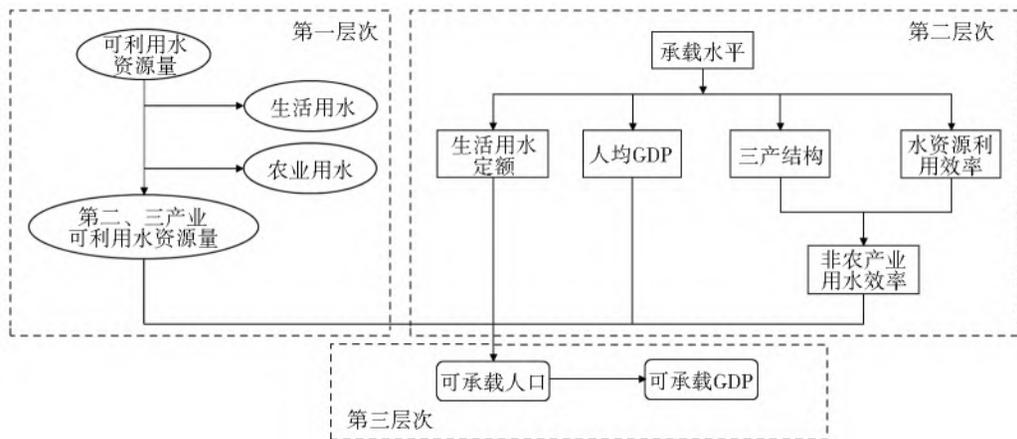


图1 技术路线

Fig. 1 Technology roadmap

第一层次是对于承载主体计算,改进方法增加扣除农业用水量得出可保证二、三产业的可利用水资源量。第二层次根据承载水平确定非农产业综合用水效率。第三层次是在前两层次确定二、三产业可利用水资源量和用水效率的前提下,分析以人口数量表征的承载能力结果,通过人均 GDP 水平计算可承载的经济规模。与现有方法相比,最主要的区别是以二、三产业的综合用水效率计算最终的可承载人口和经济规模。

1.3.1 第一层次的计算

生活需水优先级高,需要优先保障。根据不同承载水平的人口和用水标准得出生活用水量,计算公式为

$$W_{do} = P_{to} E_{do} \times \frac{365}{10^7} \quad (1)$$

式中: W_{do} 为生活用水量,亿 m^3 ; P_{to} 为可承载人口数量,万人; E_{do} 为生活用水定额, $L/(人 \cdot d)$ 。其中 P_{to} 为中间过程变量,可承载人口数量最终根据公式推导直接给出。

农业用水量采用指标定额法计算,定额参考分类作物灌溉定额标准和区域种植结构特征,灌溉面积参考地区农业规划发展,计算公式为

$$W_{at} = \frac{A E_{ar}}{10^8} \quad (2)$$

式中: W_{at} 为农业用水量,亿 m^3 ; A 为灌溉面积, hm^2 ; E_{ar} 为综合灌溉定额, m^3/hm^2 。

可利用水资源量扣减生活需水和农业用水后即可用于二、三产业的水资源量,计算公式为

$$W_{s\&t} = W_v - W_{do} - W_{ar} \quad (3)$$

式中: $W_{s\&t}$ 为可用于二、三产业的水资源量,亿 m^3 ;

W_v 为区域水资源可利用量,亿 m^3 。

1.3.2 第二层次的计算

承载水平反映经济社会发展水平,一般以人均 GDP 为标准。以扣除农业后的单位增加值产业用水量作为二、三产业的综合效率,计算公式为

$$C_u = \frac{\sum A_{v,i} E_i}{\sum A_{v,i}} \quad (4)$$

式中: C_u 为给定承载水平下不含农业的单位增加值产业用水量,即非农产业用水效率, $m^3/万元$; $A_{v,i}$ 为农业以外不同行业的增加值,包括第二和第三产业,亿元; E_i 为各行业的用水定额, $m^3/万元$ 。

不同承载水平下各行业的增加值根据其发展趋势预测或参考相关规划给定。

1.3.3 第三层次的计算

根据上述计算得出二、三产业可利用水资源量和综合用水效率,叠加农业增加值计算可承载的 GDP,具体公式为

$$E_t = \frac{10^4 W_{s\&t}}{C_u} + A_{v,agr} \quad (5)$$

式中: E_t 为可承载的经济规模,即 GDP,亿元; $A_{v,agr}$ 为对应承载水平下的农业增加值,亿元。

可承载的人口数量通过可承载经济规模和人均 GDP 得到,计算公式为

$$P = \frac{E_t}{V_p} \quad (6)$$

式中: P 为可承载人口数量,万人; V_p 为人均 GDP,万元。

按照现有的三层次评价方法,可承载的人口数量需要通过试算校核得出。本次通过分析水量、效率、经济规模(GDP)和生活水平(人均 GDP)之间的

关系,推导可承载人口的直接计算公式,避免试算校核,推导过程如下:

可利用水资源量扣除农业用水之后即为用于第二、三产业和生活的用水之和:

$$W_v - W_{ar} = W_{s\&t} + W_{do} \quad (7)$$

考虑农业增加值占比较低,二、三产业用水近似采用非农产业用水效率与 GDP 的乘积计算,即:

$$W_{s\&t} \approx \frac{V_p PC_u}{10^4} \quad (8)$$

生活用水量为可承载人口数量与生活用水定额的乘积,计算公式同式(1)。

将式(8)、式(1)代入式(7),则:

$$W_v - W_{ar} = P \left(\frac{V_p C_u}{10^4} + E_{do} \times \frac{365}{10^7} \right) \quad (9)$$

$$P = \frac{W_v - W_{ar}}{\frac{V_p C_u}{10^4} + E_{do} \times \frac{365}{10^7}} \quad (10)$$

根据可承载人口数量 P 与人均 GDP 计算得出可承载 GDP,计算公式为

$$E_t = \frac{W_v - W_{ar}}{\frac{C_u}{10^4} + \frac{E_{do}}{V_p} \times \frac{365}{10^7}} \quad (11)$$

计算式(10)中,分子($W_v - W_{ar}$)是二、三产业和生活的可利用水量,分母($\frac{V_p C_u}{10^4} + E_{do} \times \frac{365}{10^7}$)是非农产业用水效率和人均生活用水效率之和,即非农用水量与非农用水效率的商为可承载的人口数量。该计算公式表明,在农业需要单独保障的条件下,区域可承载的人口数量由可以支撑二、三产业和生活的水量与二者的用水效率决定,构成了扣除农业用水

需求的承载能力主体和客体,其思路与现有的水资源承载能力多层次评价方法一致。

2 实例研究

2.1 研究区概况

宁夏回族自治区位于黄河流域上游,总面积 6.64 万 km^2 ,下辖银川、石嘴山等 5 个地级市,地势南高北低。宁夏全区属于温带大陆性气候,多年平均降水 289 mm,多年平均水面蒸发量 1 218 mm,水资源匮乏,生态环境脆弱敏感。降水南多北少、蒸发北高南低,平原区主要集中在北部沿黄河地带,也是主要用水区。宁夏人均当地水资源量不足全国的 1/10,量少质差,开发利用难度大,90% 的用水引自黄河干流,是依黄河而存、唯黄河而兴的区域。全区综合用水效率不高,取水总量已接近红线,资源约束日趋紧张,已有研究表明^[19]全区 5 个地级市中 4 个处于水资源超载状态。因此,水资源承载能力分析对引导区域合理的经济社会发展布局十分重要。

2020 年,宁夏全区常住人口为 720.27 万人(第七次全国人口普查),地区生产总值(GDP)为 3 920.55 亿元(《宁夏统计年鉴 2021》),其中第一产业增加值为 338.01 亿元。根据 2001—2020 年各行业用水量(图 2 数据源自《宁夏水资源公报》),由图 2 可以看出:农业是宁夏取水大户,但用水量和占比均呈下降趋势,用水量由 2001 年的 78.23 亿 m^3 减少到 58.64 亿 m^3 ,用水占比由 93% 下降为 83.5%,仍高于全国平均水平。



图 2 2001—2020 年各行业用水量

Fig. 2 Water consumption by industry from 2001 to 2020

宁夏是西北地区重要的商品粮基地,有“塞上江南”的美誉,确保粮食生产也是宁夏服务于黄河生态保护与高质量发展的责任。由于宁夏降水少,农业生产对灌溉的依赖程度高,农业用水保障十分重要。考虑农业生产在宁夏的重要地位,结合“四水四定”原则,采用改进方法分析评价水资源承载力,为区域发展布局决策提供更有效的参考。

2.2 水资源承载能力的计算

2.2.1 水资源可利用量

根据第三次水资源调查评价成果,宁夏全区1956—2016年多年平均当地地表水资源量为9.056亿 m^3 ,不重复地下水资源量为3.059亿 m^3 ,当地水资源总量为12.115亿 m^3 。由于宁夏自身水资源条件薄弱,主要水源为黄河干流引水。根据最严格水资源管理要求(国办发〔2013〕2号),按取水口径分配给宁夏的总量控制指标为73.27亿 m^3 ,将其作为承载力计算中的水资源可利用量。

2.2.2 水资源承载水平

根据水资源承载水平分级标准和宁夏现状经济水平,以全面小康(人均1万美元)、基本现代化(人

均2万美元)作为承载水平^[40],对应的人均GDP标准分别是68974元、137948元(均为2020年可比价)。由于改进方法中农业增加值不再与计算关联,分析各承载水平下的二、三产产业结构。宁夏的第二产业中工业占比大且重型化明显^[41],正处于传统工业转型升级期,因此未来工业增加值还将增加,但比重随着三产上升而下降,第三产业发展迅速,占比逐年增加^[42]。两个承载水平下的二、三产结构见表1。

表1 二、三产结构预测^[42]

承载水平	%			
	二产占比	三产占比	工业占二产比重	建筑业占二产比重
全面小康	43.8	56.2	81.0	19.0
基本现代化	38.8	61.2	88.0	12.0

2.2.3 用水效率

参考《宁夏回族自治区水安全保障“十四五”规划》等规划成果,得到宁夏各承载水平的用水定额指标,见表2。其中,产业用水定额随着技术进步而下降,居民生活用水定额随着生活水平提高而上升。

表2 用水效率预测

Tab.2 Forecast of water use efficiency

承载水平	工业 /($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	建筑业 /($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	第三产业 /($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	灌溉用水量 /($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	居民生活用水定额 /[$\text{L} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$]
全面小康	32.3	2.5	4.5	8475.0	111
基本现代化	18.1	1.9	4.0	7440.0	153

2.2.4 水资源承载结果

根据二、三产业用水效率、产业比例,可得到不含农业的万元产业增加值用水量 C_0 ,其中,全面小康水平为14.2 $\text{m}^3/\text{万元}$,基本现代化水平为8.7 $\text{m}^3/\text{万元}$ 。宁夏的农业用水包括耕地灌溉(水田、水浇地)、园地灌溉(酿酒葡萄、枸杞、其他园地)、人工草地灌溉和冬灌,结合现状不同灌区灌溉水利用系数、种植结构和灌溉规模,计算出全区农业现状用水量为61.43亿 m^3 。

扣除现状农业用水后得到可用于二、三产业和生活的可利用水量($W_v - W_{ar}$)为11.84亿 m^3 。基于上述内容得到可承载人口计算公式(10)中的所需数据,计算得出全面小康水平可承载人口数量为903.7万人,基本现代化水平为681.5万人。按照现有的三层次评价法得出全面小康水平、基本现代化水平可承载人口分别为763.5万人、771.5万人。两种方法结果对比见表3。

表3 承载力计算结果对比

Tab.3 The bearing capacity calculation results of improved and existing methods

承载水平	改进方法				现有方法			
	不含农业的万元 产业增加值 用水量/ m^3	含农业的万元 产业增加值 用水量/ m^3	承载 人口/ 万人	承载 GDP/ 亿元	不含农业的万元 产业增加值 用水量/ m^3	含农业的万元 产业增加值 用水量/ m^3	承载 人口/ 万人	承载 GDP/ 亿元
全面小康	14.2	118.1	903.7	5862.2	14.2	139.0	763.5	5020.3
基本现代化	8.7	74.1	681.5	9322.9	8.7	65.5	771.5	10474.3

从表3可以看出,随着用水效率提升,可承载经济规模增大,但相应生活水平提高,可承载人口能否增加取决于用水效率提升和人均GDP提高的增速

对比。在全面小康水平下,改进方法的万元产业增加值用水量为118.1 m^3 ,小于现有方法的139.0 m^3 ,承载人口903.7万人高于现有方法的763.5万人。基本

现代化水平下改进方法可承载人口数量比现有方法少 90.0 万人。

2.2.5 行业用水量对比与结果差异原因分析

上述结果表明,两种方法计算得出的可承载 GDP 均随承载水平提升而增加,但可承载人口趋势变化不同,改进方法计算所得可承载人口数量减少,

而现有方法的承载人口数量基本不变。其原因在于改进方法计算中设定了农业用水不变化,二、三产业不能挤占农业用水,而现有方法随着综合效率提升,农业用水减少并转移到其他产值更高的行业。根据两种方法计算出的可承载人口数量反算各行业用水量,见表 4。

表 4 两种方法计算出的可承载人口数量反算的各行业用水量

Tab. 4 Water consumption by industry in both methods

单位:亿 m^3

承载水平	改进方法						现有方法					
	生活	农业	工业	建筑业	第三产业	总水量	生活	农业	工业	建筑业	第三产业	总水量
全面小康	4.04	61.43	6.30	0.11	1.39	73.27	3.47	63.21	5.32	0.10	1.17	73.27
基本现代化	4.15	61.43	5.45	0.08	2.16	73.27	4.65	59.91	6.15	0.09	2.44	73.27

现有方法中农业用水量随效率与农业增加值提高而变化,全面小康水平下农业用水量为 63.21 亿 m^3 ,高于现状实际农业用水量 61.43 亿 m^3 。而改进方法农业用水与现状相同,将扣除现状农业用水后的可利用水量作为二、三产业用水,因此综合用水效率更高,可承载的 GDP 与人口数量均高于现有方法得出的结果。在基本现代化水平下,现有方法分配给农业的水量为 59.91 亿 m^3 ,小于现状农业用水量,意味着农业用水转移到了效率更高的二、三产业,因此可承载的 GDP 和人口数量提高。而改进方法仍维持现状农业用水,二、三产业用水效率的提升不足以支撑人均 GDP 的增长,因此可承载人口数量下降。综上所述:现有方法中农业用水效率随着整体经济水平变化,缺少结合机理规律或实际决策条件的支撑,存在农业用水是否可有效保障的问题;而改进方法可分析保障农业用水条件下的水资源承载状况,揭示水资源管控的边界条件对综合用水效率和承载状况的影响。

3 讨论

根据可承载人口计算公式(10),可利用水资源量 W_v 一般为确定值,生活用水定额 E_{do} 也相对稳定,主要影响因素就是农业用水量 W_{ar} 、人均 GDP V_p ,以及二、三产业用水效率 C_u ,本文尝试通过调整此 3 项因素探究其对于水资源承载能力的影响。

3.1 调整农业用水

宁夏实例分析表明,在农业用水固定的条件下,可承载人口会随着承载水平的提高而减少。实际上,在农业规模或生产目标保持不变的条件下,随着用水效率提升农业用水会逐步减少并转移到效率更高的二、三产业,可以提高承载能力。因此,通过分析调整农业用水后的承载能力变化,可为调控决策提供支持。

按照宁夏适水发展的总体思路,严格控制高耗水农业和能源产业发展规模是实现区域高质量发展的必由之路^[43]。根据“四水四定”要求,将宁夏全区水稻种植面积从现状的 6.07 万 hm^2 压缩至 1.33 万 hm^2 ,定额采用《宁夏回族自治区有关行业用水定额(修订)》(宁政办规发[2020]20 号),水稻常规灌溉定额为 15 750 m^3/hm^2 ,灌溉水利用系数取 0.55,计算得出未来宁夏农业用水量将减少 13.6 亿 m^3 。因此,将农业用水由 61.43 亿 m^3 均匀减少至 47.83 亿 m^3 ,各承载水平下的人口数量与 GDP 变化见图 3。可见,可承载人口数量和 GDP 随农业用水量减少均呈直线上升趋势。对于基本现代化水平,若农业用水量由 61.43 亿 m^3 减少至 47.83 亿 m^3 (减少 22.1%),区域可承载人口数量由 681.5 万人增加至 1 488.9 万人(增加 118%),GDP 由 9 322.9 亿元增长至 19 769.5 亿元(增长 112%),人口增幅高于 GDP 增幅。

根据公式(10)和(11),其中的 W_c 、 V_p 、 C_u 、 E_{do} 在各承载水平下均为定值,因此可承载人口与 GDP 和 $(W_v - W_{ar})$ 呈正比关系,减少农业用水量 W_{ar} 意味着生活和二、三产业可利用水量提高,带来可承载人口和 GDP 的线性上升。

3.2 调整人均 GDP

为了探求人均 GDP 变化对区域可承载 GDP、人口数量的影响,将人均 GDP 设置 $\pm 50\%$ 的波动范围,全面小康和基本现代化变化范围分别是 3.3 万元~9.9 万元、6.9 万元~20.7 万元,各承载水平的可承载人口数量与 GDP 随人均 GDP 增减变化见图 4。由图 4 可知,区域可承载人口随人均 GDP 升高呈下降趋势,可承载 GDP 呈上升趋势。对于基本现代化水平,区域可承载人口数量由 1 024.5 万人减少到 510.6 万人,可承载 GDP 由 6 880.3 亿元增加到 10 666.9 亿元。

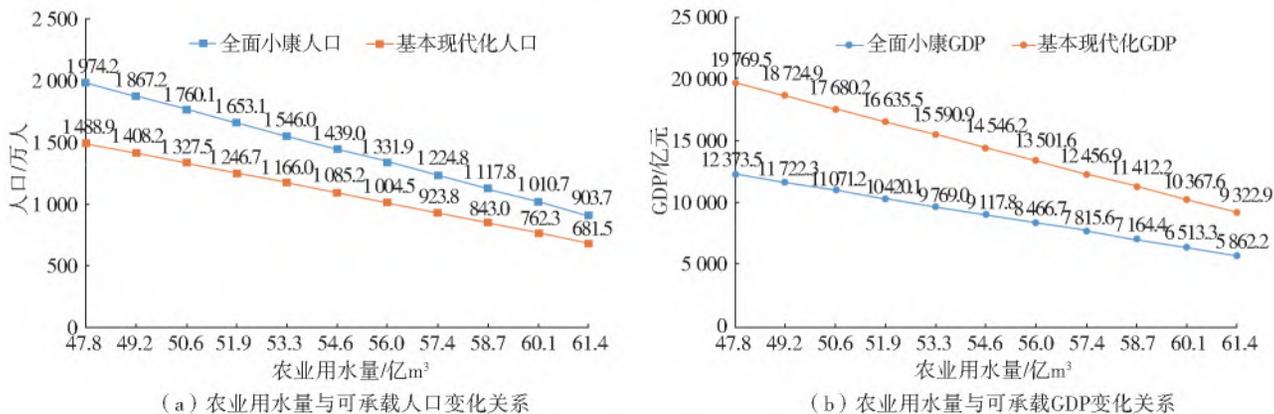


图3 农业用水量与可承载人口、GDP变化关系
Fig. 3 Charts of the relationship between agricultural water use, bearable population and GDP

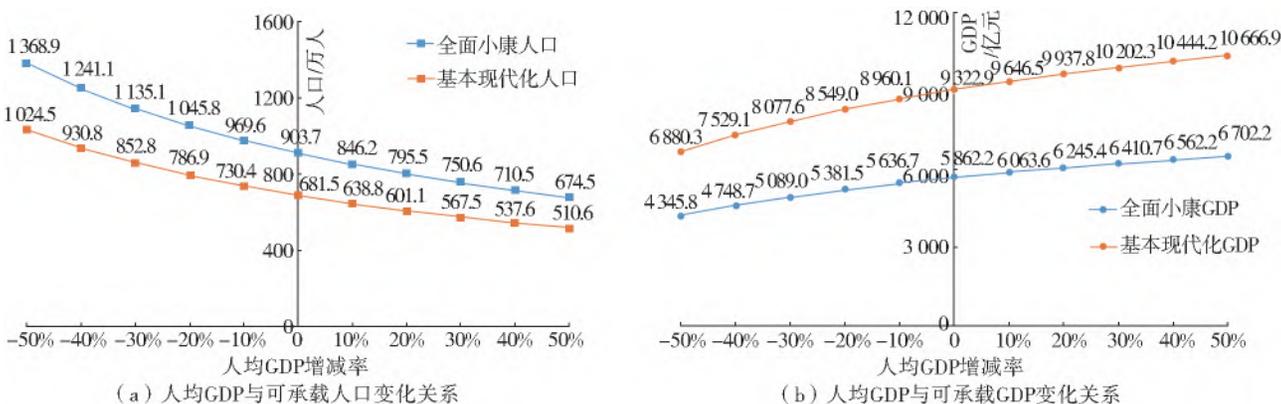


图4 人均GDP与可承载人口、GDP变化关系
Fig. 4 Charts of the relationship between per capita GDP and bearable population and GDP

根据公式(10),在 W_v 、 W_{ar} 、 C_u 、 E_{do} 保持不变条件下,可承载人口 P 与人均GDP水平 V_p 呈反比关系,生活水平提高导致可承载的人口数量减少。公式(12)表明 V_p 增大带来可承载GDP增加,即在农业用水量不变的情况下,人均GDP水平提高使得可承载人口数量减少,但用于生产的水量相应增加,因此可承载GDP略有增长。

3.3 调整二、三产业用水效率

根据公式(10)、(11),二、三产业用水效率与承

载规模呈反比关系,用水效率提高(数值降低),可承载人口数量与GDP增加。将二、三产业用水效率设置±50%的波动范围,可承载人口数量与GDP随用水效率增减变化见图5。对于基本现代化水平,当二、三产业用水效率从 $13.1 \text{ m}^3/\text{万元}$ 提高到 $4.4 \text{ m}^3/\text{万元}$ 时,区域可承载人口数量由510.6万人增加到1024.5万人,可承载GDP由7111.2亿元增长到13760.6亿元。

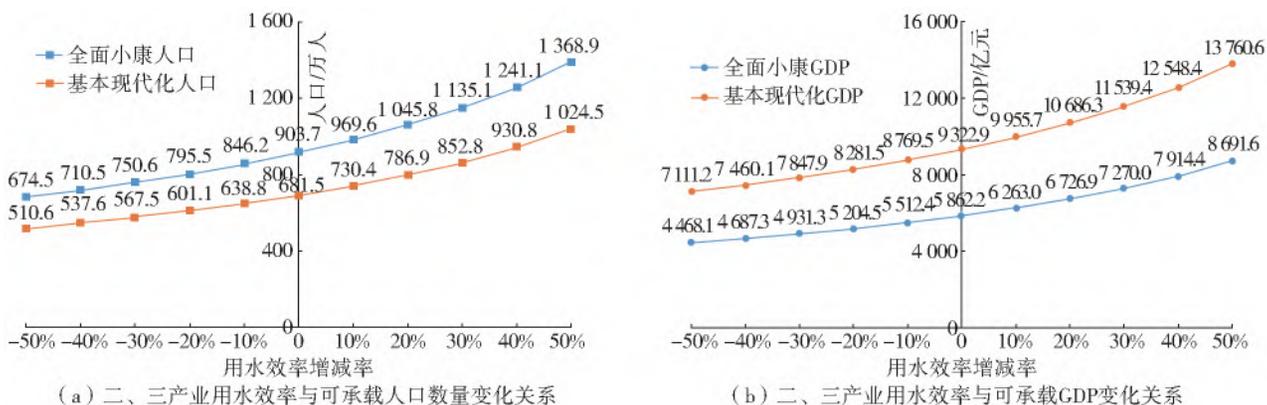


图5 二、三产业用水效率与可承载人口数量、GDP变化关系
Fig. 5 Charts of the relationship between water use efficiency and bearable population and GDP

从公式(10)和(11)可以看出,在 W_v 、 W_{ar} 、 V_p 、 E_{do} 保持不变条件下, C_u 与可承载人口 P 和 GDP 呈反比关系,用水效率提升可提高水资源承载能力。

上述讨论表明,在区域水资源约束确定的情况下,农业用水控制目标,二、三产业用水效率和生活水平是影响水资源承载能力的主要因素,改进方法计算公式可以直接分析不同因素变化对承载结果的影响作用。几种因素中,农业用水对于区域水资源承载能力影响最为显著。上述因素自身也存在相互影响关系,且同步变化。因此,需要综合评价区域产业发展空间、生活水平提升需求、用水效率提升空间等多类因素,提出水资源承载能力提升的有效途径。

4 结 论

通过改进现有的水资源承载能力多层次评价方法并进行验证研究,结果表明:改进方法可以解决万元 GDP 产业用水量受农业影响大导致计算结果不够准确的问题,更准确反映农业保障目标下的水资源承载能力结果,适应“四水四定”要求下的水资源承载能力分析评价;通过推导得出可承载人口数的直接计算公式,避免试算校核提高计算效率与准确性,同时通过公式可以量化反映不同影响因素对承载能力结果的作用机制,适应不同情景分析需求;宁夏实例验证表明,以现状合理农业用水作为农业保障目标,现有方法在全面小康和基本现代化两个承载水平下比改进方法可承载人口数量分别偏低 140.2 万人和偏高 90.0 万人。进一步分析表明:现有方法农业用水分配量由综合用水效率确定,在两个承载水平下农业用水量分别为 63.21 亿 m^3 和 59.91 亿 m^3 ,与现状农业用水量 61.43 亿 m^3 存在差异,随着承载水平提升农业用水被转移到了效率更高的二、三产业,不能体现农业用水的合理保障,改进方法给出明确的农业保障目标下的承载结果,更能反映实际决策需求;通过情景分析反映农业用水量,人均 GDP,二、三产业用水效率 3 个关键指标变化对可承载人口数量与 GDP 的影响,结果显示农业用水量影响最大。

考虑主体、客体和主客体关系多层次涉及因素多,未来还需深化研究,进一步识别各层次影响因素及其关系,使方法更科学合理并便于应用。一是承载主体方面,随着非常规水利用提升、外调水增加,可利用水源增加,有必要进一步探讨其提高承载能力的作用机制和效果,包括结合水文随机性和供水条件影响下的可利用水量识别分析;二是承载客体方面,应进一步精准分析综合用水效率,目前用水效

率只进行了二、三产业的划分,还较为粗略,可借助大数据分析等手段挖掘细分的行业用水效率,更真实反映产业结构调整对综合用水效率的影响;三是在主客体关系上,可进一步研究承载水平的表达方式,避免单一的人均 GDP 作为衡量依据对承载水平反映不够全面。此外,本研究选择了农业用水占比大的宁夏作为典型研究区域,针对其他类型的地区应评价方法适应性,分析改进办法。

参考文献(References):

- [1] 封志明,李鹏.承载力概念的源起与发展:基于资源环境视角的讨论[J].自然资源学报,2018,33(9):1475-1489. (FENG Z M, LI P. The genesis and evolution of the concept of carrying capacity: A view of natural resources and environment[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9): 1475-1489. (in Chinese)) DOI: CNKI; ZRZX. 0. 2018-09-001.
- [2] 蓝盛新,李美芳,王平,等.资源环境承载力研究进展与方法述评[J].中南林业科技大学学报(社会科学版),2022,16(1):10. (LAN S X, LI M F, WANG P, et al. Review on research progress and methods of resources and environment carrying capacity[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology(Social Science Edition), 2022, 16(1):10. (in Chinese)) DOI: 10.14067/j.cnki.1673-9272.2022.01.004.
- [3] 新疆水资源软科学课题研究组.新疆水资源及其承载能力和开发战略对策[J].水利水电技术,1989(6):2-9. (Xinjiang Water Resources Soft Science Research Group. Development strategy of water resources and its carrying capacity in Xinjiang [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1989 (6):2-9. (in Chinese)) DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.1989.06.001.
- [4] 龙腾锐,姜文超.水资源(环境)承载力的研究进展[J].水科学进展,2003(2):249-253. (LONG T R, JIANG W C. Advances in water resources and water environmental carrying capacity[J]. Advances in Water Science, 2003(2):249-253. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1001-6791.2003.02.024.
- [5] 王建华,姜大川,肖伟华,等.水资源承载力理论基础探析:定义内涵与科学问题[J].水利学报,2017,48(12):1399-1409. (WANG J H, JIANG D C, XIAO W H, et al. Study on theoretical analysis of water resources carrying capacity: Definition and scientific topics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12):1399-1409. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20170651.
- [6] 樊杰,周侃,王亚飞.全国资源环境承载能力预警(2016版)的基点和技术方法进展[J].地理科学进展,2017,

- 36(3):266-276. (FAN J,ZHOU K,WANG Y F. Early warning of China's resources and Environment Carrying Capacity (2016 edition):Basic points and technical methods progress [J]. Progress in geography,2017,36(3): 266-276. (in Chinese)) DOI: 10. 18306/dlkxjz. 2017. 03. 001.
- [7] 金菊良,陈梦璐,酈建强,等. 水资源承载力预警研究进展[J]. 水科学进展,2018,29(4): 583-596. (JIN J L, CHEN M L,LI J Q,et al. Advance in early warning of water resources carrying capacity[J]. Advances in Water Science,2018,29(4): 583-596. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2018. 04. 015.
- [8] 龙秋波,朱文彬,吕爱锋. 水资源承载风险监测预警理论与方法探析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021,19(6):1147-1156. (LONG Q B,ZHU W B,LYU A F. Theory and methodology for water resources development carrying capacity risk monitoring and early warning system [J]. South-to-north Water Transfers and Water Science & Technology, 201, 19(6): 1147-1156. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbqdk. 2021. 0117.
- [9] 丁晶,覃光华,李红霞. 水资源设计承载力的探讨[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(4):1-6. (DING J,QIN G H,LI H X. Study on design capacity of water resources[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2016, 37(4): 1-6. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1002-5634. 2016. 04. 001.
- [10] 李云玲,郭旭宁,郭东阳,等. 水资源承载力评价方法研究及应用[J]. 地理科学进展,2017,36(3): 342-349. (LI Y L,GUO X N,GUO D Y,et al. An evaluation method of water resources carrying capacity and application[J]. Progress in Geography, 2017, 36(3): 342-349. (in Chinese)) DOI: 10. 18306/dlkxjz. 2017. 03. 010.
- [11] 许有鹏. 干旱区水资源承载力综合评价研究:以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报,1993(3):229-237. (XU Y P. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in arid area:A case study of Hoten River basin in Xinjiang[J]. Journal of Natural Resources,1993(3):229-237. (in Chinese)) DOI:10. 3321/j. issn:1000-3037. 1993. 03. 005.
- [12] 徐中民,程国栋. 运用多目标决策分析技术研究黑河流域中游水资源承载力[J]. 兰州大学学报,2000(2): 122-132. (XU Z M,CHENG G D. A study on the water resources carrying capacity by using the method of multiobjective optimization model: Taking the Heihe River as an example[J]. Journal of Lanzhou University, 2000(2):122-132. (in Chinese)) DOI: 10. 13885 / j. i. ISSN. 0455-2059. 2000. 02. 022.
- [13] 王海锋,游进军,邵天一,等. 石羊河流域水资源承载力研究[J]. 水利水电技术,2011,42(10):1-4,11. (WANG H F, YOU J J, SHAO T Y, et al. Study on water resources bearing capacity of Shiyang River basin[J]. Water Resources And Hydropower Engineering,2011(10):1-4,11. (in Chinese)) DOI:10. 13928 / j. carol carroll nki wrahe. 2011. 10. 007.
- [14] 吴琼. 基于因子分析的青海省水资源承载力综合评价[J]. 水资源保护,2013,29(1): 22-26. (WU Q. Comprehensive evaluation of carrying capacity of water resources of Qinghai Province based on factor analysis [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(1): 22-26. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 10046933. 2013. 01. 006.
- [15] 于钊,尚煜廷,姚梅,等. 水足迹与主成分分析法耦合的新疆水资源承载力评价[J]. 水文,2021,41(1): 49-54,34. (YU P, SHANG Q T, YAO M, et al. Water resources carrying capacity evaluation based on water footprint and principal component analysis in Xinjiang [J]. Journal of China Hydrology, 2021, 9(1): 49-54, 34. (in Chinese)) DOI: 10. 19797 / j. carol carroll nki. 1000-0852. 20190440.
- [16] 王鸿翔,陈秋米,张海涛,等. 基于主成分分析的宁夏水资源承载力研究[J]. 中国农村水利水电,2018(11):30-34. (ANG H X, CHEN Q M, ZHANG H T, et al. Research on the water source bearing capacity in Ninxia based on principle component analyses [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(11): 30-34. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2018. 11. 007.
- [17] 宋桢桢,顾银鲁. 基于 AHP 法对宁夏水资源承载力的评价[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报,2015,31(1):60-62. (SONG Z Z, GU Y L. To evaluate water resources carrying capacity in all districts of Ningxia based on AHP[J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2015, 31(1): 60-62. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-5617. 2015. 01. 019.
- [18] 史紫薇,冯文文,钱会. 基于流域尺度的甘肃省水资源承载力评价[J]. 生态科学,2021,40(3): 51-57. (SHI Z W, FENG W W, QIAN H. Evaluation of water resources carrying capacity in Gansu Province based on watershed[J]. Ecological Science, 2021, 40(3): 51-57. (in Chinese)) DOI: 10. 14108/j. cnki. 1008-8873. 2021. 03. 007.
- [19] 马军,杨彦忠,杨雪. 宁夏水资源承载力现状分析与评价[J]. 宁夏工程技术,2019,18(2):179-182. (MA J, YANG Y Z, YANG X. Status analysis and evaluation of water resources carrying capacity in ningxia

- [J]. Ningxia Engineering Technology, 2019, 18(2): 179-182. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-7244. 2019. 02. 019.
- [20] 赵建世,王忠静,秦韬,等. 海河流域水资源承载能力演变分析[J]. 水利学报, 2008(6): 647-651, 658. (ZHAO J S, WANG Z J, QIN T, et al. Analysis on evolution of water resources carrying capacity of Haihe River basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008(6): 647-651, 658. (in Chinese) DOI: 10. 3321/j. issn: 0559-9350. 2008. 06. 002.
- [21] 王忠静,廖四辉,武晓峰,等. 大同市水资源承载能力分析[J]. 南水北调与水利科技, 2007(3): 47-50. (WANG Z J, LIAO S H, WU X F, et al. Water resources carrying capacity in Datong City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007(3): 47-50. (in Chinese) DOI: 10. 13476 / j. carol carroll nki NSBDQK. 2007. 03. 017.
- [22] 庞清江,亓剑,张钰镭,等. 大汶河流域水资源承载力多目标决策分析[J]. 水资源保护, 2007(5): 21-24. (PANG Q J, QI J, ZHANG Y L, et al. Multi-objective decision-making analysis of water resources carrying capacity in Dawenhe River basin[J]. Water Resources Protection, 2007(5): 21-24. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-6933. 2007. 05. 006.
- [23] 邵磊,周孝德,杨方廷,等. 基于主成分分析和熵权法的水资源承载力及其演变趋势评价方法[J]. 西安理工大学学报, 2010, 26(2): 170-176. (SHAO L, ZHOU X D, YANG F T, et al. Research on water resources carrying capacity and evaluation method of evolution tendency based on principal components analysis and entropy weight method[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2010, 26(2): 170-176. (in Chinese) DOI: 10. 19322 / j. carol carroll nki. Issn 1006-4710. 2010. 02. 009.
- [24] 胡启玲,董增川,杨雁飞,等. 基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 425-432. (HU Q L, DONG Z C, YANG Y F, et al. Advances in theoretical and applied research on set pair analysis method for water resources system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5): 425-432. (in Chinese) DOI: 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2019. 05. 005.
- [25] 金菊良,沈时兴,潘争伟,等. 水资源集对分析理论与应用研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 54-66. (JIN J L, SHEN S X, PAN Z W, et al. Research progress in theory and application of water resource set pair analysis [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017, 38(4): 54-66. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-5634. 2017. 04. 008.
- [26] 何刚,夏业领,秦勇,等. 长江经济带水资源承载力评价及时空动态变化[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 287-292, 300. (HE G, XIA Y L, QIN Y, et al. Evaluation and Spatial-Temporal dynamic change of water resources carrying capacity in the Yangtze River economic belt[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 287-292, 300. (in Chinese) DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2019. 01. 042.
- [27] 傅湘,纪昌明. 区域水资源承载力综合评价: 主成分分析法的应用[J]. 长江流域资源与环境, 1999(2): 168-173. (FU X, Ji C M. A comprehensive evaluation of regional water resources carrying capacity: Application of main component analysis method [J]. Resources and Environment in the Yangtze basin, 1999(2): 168-173. (in Chinese) DOI: 10. 1016/B978-008043005-8/50007-X.
- [28] 戴明宏,王腊春,汤淦. 基于多层次模糊综合评价模型的喀斯特地区水资源承载力研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 151-156. (DAI M H, WANG L C, TANG H. Research on water resources carrying capacity in karst areas based on Multilevel Fuzzy Comprehensive Evaluation model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 4(1): 151-156. (in Chinese) DOI: 10. 13961 / j. carol carroll nki STBCTB. 2016. 01. 026.
- [29] 袁艳梅,沙晓军,刘煜晴,等. 改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 52-56. (YUAN Y M, SHA X J, LIU Y Q, et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method to water resources carrying capacity evaluation[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 52-56. (in Chinese) DOI: 10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2017. 01. 011.
- [30] 甘富万,金彩平,倪倩,等. 基于多层次模糊综合评判法的南宁市水资源承载力现状评价[J]. 水利水电技术, 2018, 49(9): 56-63. (GAN F W, JIN C P, NI Q, et al. Multi-hierarchy fuzzy comprehensive evaluation method-based evaluation on status of water resources carrying capacity in Nanning[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(9): 56-63. (in Chinese) DOI: 10. 13928 / j. carol carroll nki wrahe. 2018. 09. 008.
- [31] 杜发兴,曹广晶,梁川,等. 水资源承载力综合评价的熵权属性识别模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(11): 243-245, 249. (DU X F, CAO G J, LIANG C, et al. Attribute recognition model on entropy to comprehensively evaluate water resources bearing capacity

- [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(11): 243-245, 249. (in Chinese) DOI: 10. 3321/j. issn. 0367-6234. 2009. 11. 057.
- [32] 高宏超,徐一剑,孔彦涛,等. 基于多目标优化方法的钱塘江流域杭州江段水资源承载力分析[J]. 净水技术, 2015, 34(6): 18-24. (GAO H C, XU Y J, KONG Y H, et al. Analysis of carrying capacity of water resource in Hangzhou section of Qiantang River basin based on Multi-Objective Optimization method[J]. Water Purification Technology, 2015, 34(6): 18-24. (in Chinese) DOI: 10. 15890/j. cnki. jsjs. 2015. 06. 004.
- [33] 金菊良,董涛,郦建强,等. 区域水资源承载力评价的风险矩阵方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 46-50. (JIN J L, DONG T, LI J Q, et al. Risk matrix method for evaluating regional water resources carrying capacity[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(2): 46-50. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-5634. 2018. 02. 007.
- [34] 田培,王瑾钰,花威,等. 长江中游城市群水资源承载力时空格局及耦合协调性[J]. 湖泊科学, 2021, 33(6): 1871-1884. (TIAN P, WANG J Y, HUA W, et al. Temporal-spatial patterns and coupling coordination degree of water resources carrying capacity of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(6): 1871-1884. (in Chinese) DOI: 10. 18307/2021. 0621.
- [35] 郑江丽,李兴拼. 基于协调性的区域水资源承载力评估模型[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 30-35. (ZHENG J L, LI X P. Evaluation model of regional water resources carrying capacity based on coordination[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 30-35. (in Chinese) DOI: 10. 3880 /j. issn. 1004 6933. 2021. 05. 005.
- [36] 袁鹰,甘泓,汪林,等. 基于不同承载水平的水资源承载力计算[J]. 中国农村水利水电, 2006(6): 40-43. (YUAN Y, GAN H, WANG L, et al. Calculation of water resources carrying capacity at different carrying levels[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006(6): 40-43. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2006. 06. 015.
- [37] 薛小妮,甘泓,游进军. 海河流域水资源承载力研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(1): 53-58. (XUE X N, GAN H, YOU J J. Study on water resources carrying capacity of Haihe River basin[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012, 10(1): 53-58. (in Chinese) DOI: 10. 13244 / j. carol carroll nki jiwahr. 2012. 01. 003.
- [38] 薛小妮,甘泓,游进军,等. 成都市水资源及水环境承载力分析[J]. 水利水电技术, 2012, 43(4): 14-18. (XUE X N, GAN H, YOU J J. et al. Study on water resources and water environmental carrying capacities of Chengdu[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(4): 14-18. (in Chinese) DOI: 10. 13928 / j. carol carroll nki wrahe. 2012. 04. 006.
- [39] LIN P, YOU J, WANG L, et al. Conception and evaluation methodology of water resources carrying capacity based on three-level analysis[J]. Water Science & Technology Water Supply, 2020, 20(6). DOI: 10. 2166/ws. 2020. 149.
- [40] 杨朝晖,王彦兵,杨贵羽,等. 高质量发展下区域“以水定人”研究:以宁夏回族自治区为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(S2): 164-167. (YANG Z H, WANG Y B, YANG G Y. et al. Study on "basing population on water resource" under high-quality development-a case study of Ningxia Autonomous Region[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(S2): 164-167. (in Chinese) DOI: 10. 13928/ j. cnki. wrahe. 2021. S2. 042.
- [41] 陈晓清,侯保灯,陈立华,等. 宁夏工业用水环境库兹涅茨曲线形成机制及未来发展趋势[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(2): 342-351. (CHEN X Q, HOU B D, CHEN L H, et al. Formation mechanism and future development trend of Kuznets curve for industrial water environment in Ningxia[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(2): 342-351. (in Chinese) DOI: 10. 13476 / j. carol carroll nki NSBDQK. 2021. 0036.
- [42] 黄新蕊,贾玲,陈丹,等. 宁夏水资源与产业发展协调关系分析[J]. 人民黄河, 2021, 43(5): 74-79. (HUANG X R, JIA L, CHEN D. et al. Analysis of coordination between water resources and industrial development in Ningxia[J]. Yellow River, 2021, 43(5): 74-79. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2021. 05. 014.
- [43] 杨贵羽,李烁阳,杨朝晖,等. 宁夏面临的水资源问题及高质量发展对策[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(4): 1-6. (YANG G Y, LI S Y, YANG Z H, et al. Water resources problems faced by Ningxia and Countermeasures for high-quality development[J]. Journal of Water Conservancy and Construction Engineering, 2020, 18(4): 1-6. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1144. 2020. 04. 001.

Improved three-level water resources carrying capacity method based on classification of water use efficiency

YOU Jinjun¹, CAI Luyao¹, LIN Pengfei¹, WANG Yanbing², XIE Jiqiang¹

(1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 2. *Ningxia Hui Autonomous Region Water Conservancy Dispatching Center, Yinchuan 750010, China*)

Abstract: Current three-level water resources carrying capacity analysis method is not accurate enough to calculate the comprehensive water use efficiency, which is greatly affected by agriculture due to its high-proportion of water use and low water use efficiency. It is difficult to truly reflect the water use efficiency changes of other high-efficiency industries. Under such mode of analysis, It is highly possible that water for agriculture is occupied by other industries, which is not in line with the principle of "water dominates land" and relevant policies for food safety. Therefore, in order to guarantee agricultural water demand and more accurately describe the water use efficiency changes in light of the characteristics of regional industries, agricultural water demand is analyzed separately, thus the bearable economic scale is figured out by water consumption per unit added value of secondary and tertiary industries and the available water resources with deduction of agricultural water demand. Further derivation of the calculation formula simplifies the calculation process, eliminates the need for checking and iterative calculation, and improves the accuracy of results. Through the formula and adjustment of parameters, the influence of regional industrial characteristics on carrying capacity can be reflected more accurately.

In the case study of Ningxia Hui Autonomous Region, which has a high proportion of agricultural water consumption, the water use efficiency and industrial proportion were confirmed for calculation of water carrying capacity by two carrying levels of comprehensive well-off society and basic modernization. The population and economic scale that regional water resources can support in different carrying levels were calculated by the original method and improved method respectively. The results showed that the bearable population decreased by the improved method, while basically remained unchanged by the original method. The reason was that the agricultural water demand did not change in the calculation of the improved method, while the original method reduced the agricultural water consumption with the improvement of comprehensive efficiency, transferred it to other industries with higher added value, and improved the carrying economic scale and population. However, it brought about the problem of whether the agricultural water could be effectively guaranteed. The results showed that the agricultural water use efficiency changed with the overall economic levels and lacked of mechanism of decision-making conditions in the original three-level analysis method. The improved method could take the impact of the change of agricultural water use into account, adapt to the analysis and calculation under the rigid constraints of water resources and the principle of "water dominates development". It proved that the impact of agricultural water on bearing capacity was more accurate and the result was more reasonable, through the comparison of different boundary of agricultural water demand.

The formula for directly solving the regional bearable population was deduced to avoid the iteration calculation. Effect of the major factors on water carrying capacity of this method was figured out by adjusting the three variables of agricultural water consumption, GDP per capita and industrial water efficiency. When the agricultural water withholding was gradually reduced, the carrying population and GDP showed a straight increasing trend. When GDP per capita increased gradually, the regional carrying population decreased, while the carrying GDP increased. When the comprehensive water efficiency of the secondary and tertiary industries was gradually improved, the regional carrying population and GDP showed an exponential upward trend. The analysis shows that in order to achieve the planned population target and living standard, it is necessary to reduce agricultural water consumption and improve the water efficiency of secondary and tertiary industries under the condition of rapid growth of per capita GDP. If agricultural water consumption and water efficiency of secondary and tertiary industries are limited, economic development speed should be limited.

Key words: water resources carrying capacity; three-level analysis; water use efficiency; Ningxia