

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.008

地下水资源对新疆经济社会支撑作用的定量评价

凌敏华^{1,2,3}, 陈万贺¹

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学水科学研究中心, 河南 郑州 450001;
3. 郑州市水资源与水环境重点实验室, 河南 郑州 450001)

摘要:为探究地下水资源在新疆各地、市、州经济社会发展过程中发挥支撑作用的情况,构建了涵盖地下水依存度、综合用水效率和地下水开发潜力 3 方面的指标体系,运用 SMI-P 方法对 2004—2016 年新疆各地、市、州地下水资源对经济社会的支撑作用进行了定量评价与分析。结果表明:随着经济的发展、人口和耕地的增加,新疆一些地区地下水资源对经济社会的支撑作用明显增强,如伊犁州、巴州、塔城地区等;地下水资源对新疆各地、市、州经济社会发展的支撑作用空间差异较大,地下水资源对东疆和北疆地区经济社会的支撑作用强于南疆地区;东疆和北疆大部分地区经济相对发达,对地下水的依存程度和综合用水效率都处于较高水平,地下水开发潜力较小,开发空间不足,而南疆地区地下水开发潜力较大,地下水可为其未来经济社会的发展提供进一步支撑。

关键词:地下水资源;用水效率;定量评价;和谐论;新疆

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)02-0049-06

Quantitative evaluation of groundwater resources supporting economy and society in Xinjiang // LING Minhua^{1,2,3}, CHEN Wanhe¹ (1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Center for Water Science Research, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Zhengzhou Key Laboratory of Water Resource and Environment, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To explore the supporting role of groundwater resources in the process of economic and social development of cities in Xinjiang, an index system covering three aspects of groundwater dependency, comprehensive water efficiency and groundwater exploitation potential was constructed, and the SMI-P method was used to quantitatively evaluate and analyze the supporting role of groundwater resources in the economy and society of Xinjiang from 2004 to 2016. The results show that, with the development of economy and the increase of population and cultivated land, the supporting role of groundwater resources to the economy and society in some cities of Xinjiang has been significantly enhanced, such as Ili Kazak Autonomous Prefecture, Bayingol Mongolian Autonomous Prefecture, Tarbagatay Prefecture, etc. The supporting role of groundwater resources in the economic and social development of each city is quite different, and the supporting role of groundwater resources in the eastern and northern Xinjiang is stronger than that in the southern Xinjiang; Most of eastern Xinjiang and northern Xinjiang have relatively developed economies, and their dependence on groundwater and comprehensive water utilization efficiency are both at a high level, with less potential for groundwater exploitation and insufficient development space. Southern Xinjiang has a great potential for groundwater exploitation, which can provide further support for its economic and social development in the future.

Key words: groundwater resources; water utilization efficiency; quantitative evaluation; harmony theory; Xinjiang

与地表水资源相比,地下水资源具有分布广、水质优良、供水稳定和多年调节等特点,可以有效缓解因水资源时空分布不均给区域生产生活带来的影响,是维持地表水资源短缺地区经济社会发

展的基础性和战略性资源。新疆地处我国西北干旱区,地表水资源相对短缺,随着经济社会的快速发展,水资源供需矛盾日益突出,水资源已成为制约新疆一些地区经济社会可持续发展的重要因

素^[1,2]。地下水资源在新疆经济社会发展中发挥着十分重要的作用,但因新疆各地、市、州自然条件、经济社会发展水平等存在差异,地下水资源支撑各地、市、州经济社会发展的作用也不尽相同。如何衡量地下水资源对新疆经济社会的支撑作用,掌握新疆各地、市、州地下水资源支撑经济社会发展情况,对于保障新疆各地、市、州经济社会健康稳定发展具有重要意义。

20世纪90年代,资源稀缺理论被引入水资源研究领域,水资源支撑能力研究便是其具体运用之一^[3]。近年来,国内关于水资源支撑作用研究的成果丰富。汪党献等^[4]提出了水资源支撑能力指标体系和计算方法,分析了我国各区域水资源支撑能力;李九一等^[5]构建了水资源支撑指数(water supporting index, WSPI),定量描述了不同水资源条件对区域经济社会发展的支撑能力;左其亭等^[6]定量分析了“一带一路”倡议实施前后水资源对区域发展的支撑能力;杨建锋等^[7]初步构建了地下水资源支撑度评价指标体系。国外学者对地下水问题探究的方向多集中于地下水可持续性评价方面。Chanapathi等^[8]提出了地下水可持续性指数(fuzzy-based groundwater sustainability index, FGSI),并采用不同模糊化方法来评估某些亚洲城市的地下水可持续性;Bui等^[9]就河内地下水资源当前面临的问题,引入了可持续性指标函数(sustainability index function, SIF),对河内地下水数量、质量和管理方面的可持续性分别进行了评估。以上研究为量化地下水资源支撑作用提供了基础,但相关研究^[7,10]较少考虑综合用水效率因素对地下水资源在经济社会发展过程中提供支撑作用的影响。本文根据新疆各地、市、州经济社会发展、水资源及其开发利用等实际情况,在借鉴有关研究成果的基础上,分析影响地下水资源支撑经济社会作用的主要因素,构建地下水资源对经济社会支撑作用评价指标体系,基于和谐论^[11]中“单指标量化-多指标综合-多准则集成”评价(SMI-P)方法对2004—2016年新疆各地、市、州地下水资源对经济社会的支撑作用进行定量评价,以期新疆地下水资源可持续利用对策制定提供参考。

1 研究区域概况及数据来源

1.1 研究区域概况

新疆地处亚欧大陆腹地($34^{\circ}25'N \sim 48^{\circ}10'N$, $73^{\circ}40'E \sim 96^{\circ}18'E$),远离海洋,受温带大陆性干旱气候影响显著,降水稀少,多年平均降水量仅150 mm左右。区域地貌类型多样,地形复杂,北邻

阿尔泰山脉,南至昆仑山系,中部则为天山山脉,天山以北为准噶尔盆地,以南为塔里木盆地,形成了“三山夹两盆”的特殊地理格局。新疆总面积166万 km^2 ,下辖4个地级市、5个地区、5个自治州共14个地级行政区,是我国重要的粮食、棉花等生产基地。2016年,新疆总人口2398万人,其中城镇人口1159万人,占总人口的48%;全年地区生产总值9617亿元,年均增长率7.6%;农作物播种面积约623.2万 hm^2 。

2004—2016年,新疆多年平均地表水资源量为860亿 m^3 ,地下水资源量为538亿 m^3 ,扣除地表水资源与地下水资源之间重复计算量,水资源总量为908亿 m^3 。2016年,新疆总供水量565.38亿 m^3 ,其中地表水源供水量445.91亿 m^3 ,地下水源供水量118.57亿 m^3 ,中水回用量0.89亿 m^3 ,分别占总供水量的78.9%、21%和0.1%。按用水行业分,2016年,农业地下水开采量102.88亿 m^3 ,工业地下水开采量7.67亿 m^3 ,生活地下水开采量5.86亿 m^3 ,人工生态环境地下水开采量2.16亿 m^3 ,分别占地下水开采总量的86.8%、6.5%、4.9%和1.8%。从地下水开发利用多年变化趋势看,2004—2010年,新疆地下水开采量增长较快,从57.52亿 m^3 增长到96.81亿 m^3 ,年均增速10.6%;2011—2016年新疆地下水开采量增速减缓,从97.75亿 m^3 增长到118.57亿 m^3 ,年均增速为5%;2014年新疆地下水开采量达到2004—2016年的最大值,为131.36亿 m^3 ,2015、2016年地下水开采量又略有下降。

1.2 数据来源

为探究地下水资源对新疆各地、市、州经济社会支撑作用的时空变化规律,本文在综合考察数据的完整性、时效性以及可获取性的基础上,选取2004—2016年全疆14个地级行政单位的地下水资源量、供用水结构、地区生产总值、年末总人口等数据作为基础数据。其中,相关水资源数据来源于2004—2016年《全国水资源公报》及2004—2016年《新疆水资源公报》,相关社会经济数据来源于2004—2016年《新疆统计年鉴》及2004—2016年《新疆国民经济和社会发展公报》。另外,由于新疆个别地级行政单位名称过长,如昌吉回族自治州、博尔塔拉蒙古自治州、巴音郭楞蒙古自治州、克孜勒苏柯尔克孜自治州、伊犁哈萨克自治州等,以下分别简称为昌吉州、博州、巴州、克州、伊犁州。

2 研究方法

2.1 评价指标体系

地下水资源对经济社会发展支撑作用的影响因

素众多,借鉴已有研究成果^[7-15],可总结为地下水依存度、综合用水效率和地下水开发潜力 3 方面的影响因素。地下水依存度反映了区域内经济社会各用水行业对地下水供水的依赖程度;综合用水效率反映了区域用水水平;地下水开发潜力反映了区域地下水资源丰富程度及开发状态。受气候变化、经济社会发展以及节水技术进步等因素影响,地下水对区域经济社会发展的支撑作用是动态变化的,区域经济社会各类用水行业对地下水的依赖程度受当地地表水资源丰枯变化影响,综合用水效率随着区域经济社会的发展及节水技术的进步和推广而提高,地下水开发潜力一般随着地下水开发程度增大而减小。在遵循科学性、整体性、动态变化性及可操作性等原则基础上,综合考虑新疆各地、市、州地下水资源利用现状和经济社会发展水平,选取了涵盖地下水依存度、综合用水效率和地下水开发潜力 3 方面共 13 个指标,构建新疆地下水对经济社会支撑作用评价指标体系如图 1 所示。

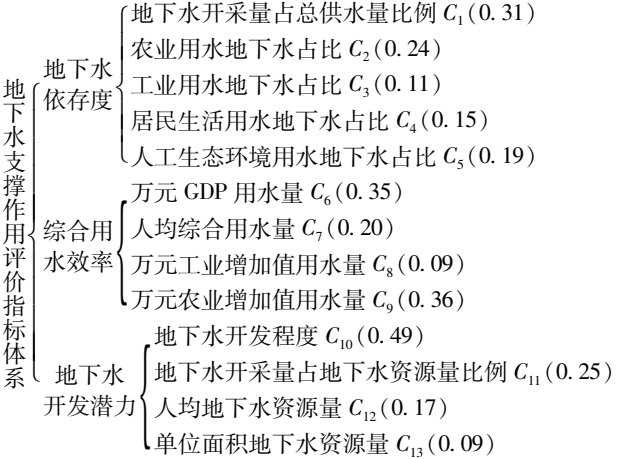


图 1 地下水支撑作用评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of groundwater supporting effect

2.2 SMI-P 方法

SMI-P 方法评价的主要步骤包括单指标量化、多指标综合、多准则集成等。

2.2.1 单指标量化

为消除各指标量纲不同所带来的影响,通过分段线性隶属函数,将各指标统一映射到 $[0,1]$ 上,从而得到各指标的支撑指数。根据已经出台的行业规划指标或标准、国家已有的规划资料、相关研究成果^[16-19]等综合确定指标的特征节点值见表 1。指标分为正向指标、逆向指标,正向指标表示随着指标值增加地下水支撑作用也随之增强;逆向指标则相反。对于指标 k 根据特征节点值按指标类型(正向或负向)采用以下公式计算支撑指数:

$$\mu_k = \begin{cases} 0 & x_k \leq a_k \\ 0.3 \left(\frac{x_k - a_k}{b_k - a_k} \right) & a_k < x_k \leq b_k \\ 0.3 + 0.3 \left(\frac{x_k - b_k}{c_k - b_k} \right) & b_k < x_k \leq c_k \\ 0.6 + 0.2 \left(\frac{x_k - c_k}{d_k - c_k} \right) & c_k < x_k \leq d_k \\ 0.8 + 0.2 \left(\frac{x_k - d_k}{e_k - d_k} \right) & d_k < x_k \leq e_k \\ 1 & e_k < x_k \end{cases} \quad (1)$$
$$\mu_k = \begin{cases} 1 & x_k \leq e_k \\ 0.8 + 0.2 \left(\frac{d_k - x_k}{d_k - e_k} \right) & e_k < x_k \leq d_k \\ 0.6 + 0.2 \left(\frac{c_k - x_k}{c_k - d_k} \right) & d_k < x_k \leq c_k \\ 0.3 + 0.3 \left(\frac{b_k - x_k}{b_k - c_k} \right) & c_k < x_k \leq b_k \\ 0.3 \left(\frac{a_k - x_k}{a_k - b_k} \right) & b_k < x_k \leq a_k \\ 0 & a_k < x_k \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ_k 为指标 k 的支撑指数; x_k 为指标 k 的值; a_k 、 b_k 、 c_k 、 d_k 、 e_k 分别为指标 k 的量化特征节点值。正向指标采用式(1)计算,负向指标采用式(2)计算。

表 1 评价指标特征节点值
Table 1 The characteristic node value of each evaluation index

特征节点值	$C_1/\%$	$C_2/\%$	$C_3/\%$	$C_4/\%$	$C_5/\%$	C_6/m^3	C_7/m^3
最差值(a)	0	0	0	0	0	4 000	5 000
较差值(b)	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	2 000	1 000
及格值(c)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	500	100
较优值(d)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	100	75
最优值(e)	1	1	1	1	1	50	50

特征节点值	C_8/m^3	C_9/m^3	$C_{10}/\%$	$C_{11}/\%$	C_{12}/m^3	$C_{13}/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$
最差值(a)	600	5 000	1	0.8	100	1 500
较差值(b)	200	3 000	0.8	0.6	500	4 500
及格值(c)	75	2 000	0.5	0.4	1 000	7 500
较优值(d)	25	1 000	0.3	0.2	2 000	15 000
最优值(e)	10	300	0	0	5 000	45 000

2.2.2 多指标综合

各准则层下的指标支撑指数分别集成,综合得到各准则层支撑指数,计算公式为

$$\mu_D = \sum_{i=1}^{n_1} w_i \mu_i \quad (3)$$

$$\mu_E = \sum_{j=1}^{n_2} w_j \mu_j \quad (4)$$

$$\mu_P = \sum_{l=1}^{n_3} w_l \mu_l \quad (5)$$

式中: μ_D 、 μ_E 、 μ_P 分别为地下水依存度、综合用水效率和地下水开发潜力准则层的支撑指数; μ_i 、 μ_j 、 μ_l 分别为地下水依存度、综合用水效率和地下水开发潜力准则层所含各指标的支撑指数; n_1 、 n_2 、 n_3 分别为地下水依存度、综合用水效率、地下水开发潜力准则层所含指标个数; w_i 、 w_j 、 w_l 为地下水依存度、综合用水效率、地下水开发潜力准则层各指标的权重,采用层次分析法和熵权法加权平均确定^[20],如图1所示。

2.2.3 多准则集成

将地下水依存度、综合用水效率和地下水开发潜力准则层的支撑指数集成得到地下水支撑指数 μ_G ,用来表征地下水对经济社会的支撑作用。地下水支撑指数计算公式为

$$\mu_G = \mu_D^\alpha \mu_E^\beta \mu_P^\gamma \quad (6)$$

式中 α 、 β 、 γ 分别为地下水依存度、综合用水效率和地下水开发潜力准则层的权重系数,分别取值0.6、0.3和0.1。

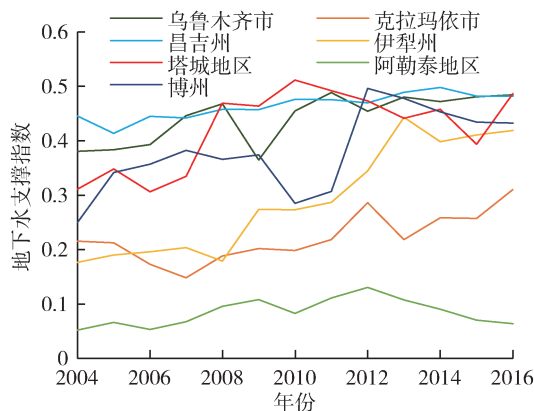
地下水支撑指数反映了地下水资源对区域经济社会支撑作用强弱。地下水支撑指数越大,说明地下水资源对区域经济社会发展的支撑作用越强。参考已有研究成果^[7,10,16,21],结合新疆地区实际,将地下水支撑指数评价标准划分为5个等级,分别为弱支撑($0 \leq \mu_G < 0.2$)、中等支撑($0.2 \leq \mu_G < 0.4$)、强支撑($0.4 \leq \mu_G < 0.6$)、高水平支撑($0.6 \leq \mu_G < 0.8$)、理想支撑($0.8 \leq \mu_G \leq 1.0$)。

3 结果与分析

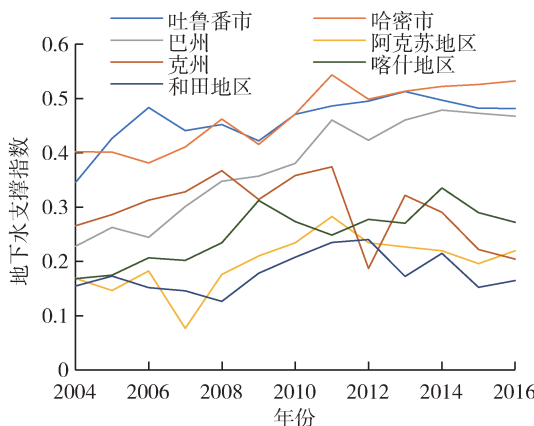
运用SMI-P方法计算得到了2004—2016年新疆各地、市、州地下水支撑指数,并从时间和空间维度分析新疆各地、市、州地下水资源支撑经济社会发展情况。

3.1 时间维度分析

图2为2004—2016年新疆各地、市、州地下水支撑指数变化趋势。从各地、市、州支撑指数变化来看,大体上可分为两类地区,一类是具有明显上升趋势的地区,如乌鲁木齐市、昌吉州、克拉玛依市、伊犁州、哈密市、博州等;另一类是呈先升后降趋势的地区,如阿勒泰地区、克州、阿克苏地区等。从地下水支撑指数年均增长速率来看,伊犁州、巴州增长迅速,伊犁州地下水支撑指数从2004年的0.18上升到2016年的0.42,年均增速8.16%,巴州地下水支撑指数从2004年的0.22上升到2016年的0.47,年均增速6.76%;博州、吐鲁番市、克拉玛依市、喀什地区、塔城地区等年均增速为3%~5%,其他地、市、州年均增速则相对较小。



(a) 北疆



(b) 东疆及南疆

图2 2004—2016年新疆地下水支撑指数变化
Fig.2 Variation of groundwater support index in Xinjiang from 2004 to 2016

新疆地处欧亚大陆中心,与8个国家接壤,对外口岸多,资源雄厚,是我国向西开放的重要窗口。西部大开发战略、“一带一路”倡议的相继实施,使得新疆可以充分发挥自身地理优势,积极发展对外贸易。新疆地区生产总值从2004年的2200亿元上升到2016年的9617亿元,人口从2004年的1963万人增长到2016年的2398万人,2004—2016年耕地面积增长近240万 hm^2 ^[22],经济的快速发展、人口和耕地面积的增长,使得经济社会对水资源需求大幅增加,但新疆大部分地区降水稀少,地表水资源短缺,只有依赖开采地下水资源才能满足经济社会发展用水需求,地下水开采量基本呈逐年增加趋势,并且随着经济社会发展以及工农业节水技术推广,综合用水效率不断提高,一些地区地下水支撑指数上升明显。

3.2 空间维度分析

为进一步分析新疆地下水资源对经济社会支撑作用的空间差异性,表2给出了2016年新疆各地、市、州地下水支撑指数计算结果。从表2可以得出,新疆地下水资源对经济社会支撑作用地、市、州差异较大,乌鲁木齐市、哈密市、昌吉州、吐鲁番市地下水

依存度大、综合用水效率高,地下水资源对经济社会的支撑作用均处于较强水平,但这些地区的地下水开发潜力已处于较低水平,说明未来地下水对这些地区经济社会发展可进一步提供的支撑作用相对较小;伊犁州、巴州、博州、塔城地区地下水资源对经济社会的支撑作用也处于强支撑水平,但地下水开发潜力处于较高水平,地下水资源仍有很大的开发空间;克拉玛依市、克州、喀什地区、阿克苏地区地下水对经济社会的支撑作用均处于中等支撑水平,克拉玛依市地下水依存度较大、综合用水效率较高,但地下水开发潜力较低,喀什地区、阿克苏地区则正好相反;阿勒泰地区和和田地区地下水对经济社会的支撑作用较小,主要原因是阿勒泰地区地表水资源丰富,可以满足经济社会用水需求,和田地区经济社会发展规模相对较小,水资源需求不大,地表水资源基本能满足经济社会用水需求。总体上,地下水资源对东疆和北疆地区经济社会的支撑作用更大,南疆地区地下水资源对经济社会的支撑作用普遍处于较低水平。

表 2 2016 年新疆地下水支撑指数计算结果

Table 2 Groundwater support index calculation results in Xinjiang in 2016					
行政区	地下水依存度支撑指数	综合用水效率支撑指数	地下水开发潜力支撑指数	地下水支撑指数	评价等级
乌鲁木齐市	0.47	0.74	0.16	0.48	强支撑
克拉玛依市	0.34	0.39	0.09	0.31	中等支撑
吐鲁番市	0.59	0.43	0.19	0.48	强支撑
哈密市	0.60	0.48	0.33	0.53	强支撑
昌吉州	0.56	0.49	0.18	0.48	强支撑
伊犁州	0.35	0.49	0.82	0.42	强支撑
塔城地区	0.56	0.40	0.39	0.49	强支撑
阿勒泰地区	0.03	0.13	0.98	0.06	弱支撑
博州	0.46	0.41	0.34	0.43	强支撑
巴州	0.53	0.37	0.45	0.47	强支撑
阿克苏地区	0.20	0.17	0.85	0.22	中等支撑
克州	0.15	0.22	0.94	0.20	中等支撑
喀什地区	0.28	0.21	0.53	0.27	中等支撑
和田地区	0.13	0.17	0.75	0.16	弱支撑

为分析地下水依存度、综合用水效率、地下水开发潜力对各地、市、州地下水支撑作用的影响,选取2004年、2008年、2012年、2016年为代表年,绘制了代表年各地、市、州地下水依存程度、综合用水效率、地下水开发潜力雷达图(图3)。从图3可以看出,2004年仅有昌吉州、哈密市对地下水依存度较高,2008年、2012年各地、市、州对地下水依存程度不断上升,南疆地区的巴州及北疆地区的乌鲁木齐市、克拉玛依市、博州等地区上升较为明显,2016年大部分地区对地下水依存程度都有所下降。2004年、2008年、2012年、2016年新疆各地、市、州综合用水

效率在不同程度上都有所提高,其中乌鲁木齐市作为新疆首府,经济社会发展较快、节水措施实施较好,综合用水效率提升最快;此外,从整体上看,东疆和北疆地区的综合用水效率要明显高于南疆。区域地下水开发潜力与地下水依存度联系密切,随着区域地下水依存度的提高,地下水开发潜力在不断减小,如博州、巴州、塔城地区等。结合新疆各地、市、州地下水支撑指数时空变化趋势,得出以下结论:随着各地、市、州综合用水效率的提升,尽管地下水依

地下水依存度 综合用水效率 地下水开发潜力

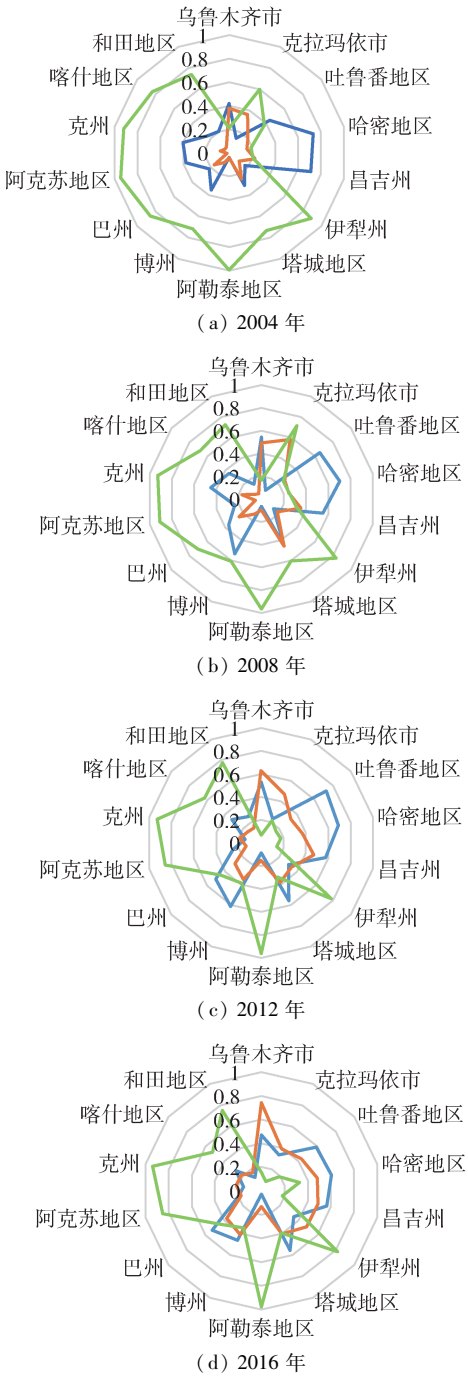


图 3 新疆准则层支撑指数评价结果
Fig. 3 Evaluation results of support index of standard layer in Xinjiang

存度有所下降,但地下水支撑指数仍呈上升趋势,说明综合用水效率提高可增强地下水对经济社会支撑作用,如吐鲁番市、哈密市、昌吉州等;地下水开发潜力越大,并不能说明地下水对经济社会发展的支撑作用也一定越大,如阿勒泰地区、阿克苏地区等地下水具有较大开发潜力,但其地下水支撑指数较小。综上所述,地下水资源对一个地区经济社会发展的支撑作用需要综合考虑地下水依存度、综合用水效率、地下水开发潜力等方面的影响。

4 结 论

a. 时间上,随着经济快速发展、人口和耕地不断增长,新疆大部分地、市、州地下水资源对经济社会的支撑作用呈增强趋势,伊犁州增强迅速,从2004年地下水弱支撑状态转变为2016年强支撑状态,乌鲁木齐市、博州、塔城地区、吐鲁番市、巴州等地、市、州增强较快,均从2004年地下水中等支撑状态转变为2016年强支撑状态,其余地、市、州地下水资源对经济社会支撑作用变化不大,如昌吉州、哈密市等保持在强支撑状态,阿勒泰地区等则保持在弱支撑状态。

b. 空间上,新疆水资源分布不均和各地、市、州经济社会发展水平差异,导致新疆各地、市、州对地下水资源需求不同。东疆和北疆地区经济社会发展规模相对较大,但地表水资源短缺,地下水资源对其经济社会发展的支撑作用相对南疆地区较强,因此,东疆和北疆地区地下水支撑指数普遍较高,南疆地区地下水支撑指数则相对较低。

c. 总体上,东疆和北疆地区经济社会发展对地下水资源的依赖程度较大,随着多年地下水的大量开采,地下水资源对其未来经济社会进一步发展所能提供的支撑能力较小,而南疆地区则相反。

参考文献:

[1] 刘昌明,陈志恺. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001.

[2] 克里木,姜付仁. 新疆水资源禀赋、开发利用现状及其长期战略对策[J]. 水利水电技术,2019,50(12):57-64. (KELI Mu, JIANG Furen. Xinjiang water resources endowment, development and utilization status and its long-term strategic countermeasures[J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2019, 50(12): 57-64. (in Chinese))

[3] 陈思源,陆丹丹,田巍,等. 喀斯特地区水资源支撑能力的图论聚类分析:以广西百色市为例[J]. 安徽农业科学,2018,46(13):75-79. (CHEN Siyuan, LU Dandan, TIAN Wei, et al. A graph theory cluster analysis on water

resources support capacity in karst area: an example of Baise city in Guangxi Province [J]. Anhui Agricultural Science, 2018, 46(13): 75-79. (in Chinese))

- [4] 汪党献,王浩,马静. 中国区域发展的水资源支撑能力[J]. 水利学报,2000(11):21-26. (WANG Dangxian, WANG Hao, MA Jing. Water resources supporting capacity of regional development in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(11): 21-26. (in Chinese))
- [5] 李九一,李丽娟. 中国水资源对区域社会经济发展的支撑能力[J]. 地理学报,2012,67(3):410-419. (LI Jiuyi, LI Lijuan. Supporting capacity of China's water resources to regional social and economic development [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(3): 410-419. (in Chinese))
- [6] 左其亭,韩春辉,马军霞,等. “一带一路”中国大陆区水资源特征及支撑能力研究[J]. 水利学报,2017,48(6):631-639. (ZUO Qiting, HAN Chunhui, MA Junxia, et al. Research on the characteristics and supporting capacity of water resources in the “belt and road” mainland China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 631-639. (in Chinese))
- [7] 杨建锋,万书勤,陈兴华. 中国地下水资源对区域经济社会发展的支撑作用评价[J]. 资源科学,2007(5):97-104. (YANG Jianfeng, WAN Shuqin, CHEN Xinghua. Evaluation of the supporting effect of groundwater resources in China on regional economic and social development [J]. Resources Science, 2007(5): 97-104. (in Chinese))
- [8] CHANAPATHI T, THATIKONDA S, PANDEY V P, et al. Fuzzy-based approach for evaluating groundwater sustainability of Asian cities [J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 44: 321-331.
- [9] BUI N T, KAWAMURA A, AMAGUCHI H, et al. Social sustainability assessment of groundwater resources: a case study of Hanoi, Vietnam [J]. Ecological Indicators, 2018, 93: 1034-1042.
- [10] 王吉杰,张媛媛,李娜. 沧州市深层地下水对区域经济社会发展的支撑作用评价[J]. 中国水利,2013(增刊2):15-17. (WANG Jijie, ZHANG Yuanyuan, LI Na. Evaluation of the supporting effect of deep groundwater in Cangzhou City on regional economic and social development [J]. China Water Resources, 2013(Sup2): 15-17. (in Chinese))
- [11] 左其亭,张云,林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究[J]. 水利学报,2008(4):440-447. (ZUO Qiting, ZHANG Yun, LIN Ping. Research on human-water harmony evaluation index and quantification method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008(4): 440-447. (in Chinese))

(下转第62页)

- Analysis of harmony between river-lake water system and socio-economic development in Xiangyang City[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(3): 35-39. (in Chinese))
- [21] 刘平清, 张鹏宁, 宝权. 基于改进 CRITIC-G1 的混合交叉赋权与 TOPSIS 模型的节水灌溉项目优选[J]. 节水灌溉, 2019(12): 106-109. (LIU Pingqing, ZHANG Pengning, BAO Quan. Optimal selection of water saving irrigation project based on hybrid cross-weighting and TOPSIS model under improved CRITIC-G1 method[J]. Water Saving Irrigation, 2019(12): 106-109. (in Chinese))
- [22] 陈海涛, 徐嘉豪. 基于熵权模糊综合评价模型的河南省水资源承载力评价[J]. 人民珠江, 2020, 41(1): 48-53. (CHEN Haitao, XU Jiahao. Evaluation of water resources carrying capacity in Henan Province based on entropy-weight fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Pearl River, 2020, 41(1): 48-53. (in Chinese))
- [23] 胡泉光, 陈方明, 宁光忠. CW-TOPSIS 岩爆评判模型及应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2017, 47(2): 20-25. (HU Quanguang, CHEN Fangming, NING Guangzhong. Rockburst evaluation model and application of CW-TOPSIS[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2017, 47(2): 20-25. (in Chinese))
- [24] 左其亭. 和谐论: 理论·方法·应用[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2012. (收稿日期: 2020-06-27 编辑: 王芳)
-
- (上接第 54 页)
- [12] 王顺久, 杨志峰, 丁晶. 关中平原地下水资源承载力综合评价的投影寻踪方法[J]. 资源科学, 2004(6): 104-110. (WANG Shunjiu, YANG Zhifeng, DING Jing. Projection pursuit method for comprehensive evaluation of groundwater resource carrying capacity in Guanzhong plain[J]. Resources Science, 2004(6): 104-110. (in Chinese))
- [13] 陈守煜, 胡吉敏. 地下水资源承载能力评价模糊可变模型与方法[J]. 水资源保护, 2006(6): 1-5. (CHEN Shouyu, HU Jimin. Fuzzy variable model and method for evaluation of groundwater resources carrying capacity[J]. Water Resources Protection, 2006(6): 1-5. (in Chinese))
- [14] 张志君, 陈伏龙, 龙爱华, 等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 53-58. (ZHANG Zhijun, CHEN Fulong, LONG Aihua, et al. Xinjiang water resources security evaluation based on fuzzy set pair analysis[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 53-58. (in Chinese))
- [15] 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 Qiling, DONG Zengchuan, YANG Yanfei, et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5): 425-432. (in Chinese))
- [16] 张兆方, 沈菊琴, 何伟军, 等. “一带一路”中国区域水资源利用效率评价: 基于超效率 DEA-Malmquist-Tobit 方法[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2018, 20(4): 60-66. (ZHANG Zhaofang, SHEN Juqin, HE Weijun, et al. An analysis of water utilization efficiency of the belt and road initiative's provinces and municipalities in China based on DEA-Malmquist-Tobit model[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2018, 20(4): 60-66. (in Chinese))
- [17] 左其亭, 赵衡, 马军霞. 水资源与经济社会和谐平衡研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 785-792. (ZUO Qiting, ZHAO Heng, MA Junxia. Research on the harmonious balance of water resources and economic society[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 785-792. (in Chinese))
- [18] 谢新民, 李丽琴, 周翔南, 等. 基于地下水“双控”的水资源配置模型与实例应用[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 6-12. (XIE Xinmin, LI Liqin, ZHOU Xiangnan, et al. Water resources allocation model based on “double control” of groundwater and its application[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 6-12. (in Chinese))
- [19] 孙宝林, 魏琳, 杨瑾, 等. 新疆地下水资源量及开采潜力分析[J]. 地下水, 2005(4): 266-267. (SUN Baolin, WEI Lin, YANG Jin, et al. Analysis of groundwater resources and exploitation potential in Xinjiang[J]. Groundwater, 2005(4): 266-267. (in Chinese))
- [20] 吴孝天, 管华. 郑州市经济发展与水资源环境耦合关系研究[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2016, 34(1): 72-75. (WU Xiaotian, GUAN Hua. Study on the coupling relationship between economic development and water resources environment in Zhengzhou[J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2016, 34(1): 72-75. (in Chinese))
- [21] 朱一中, 夏军, 谈戈. 西北地区水资源承载力分析预测与评价[J]. 资源科学, 2003(4): 43-48. (ZHU Yizhong, XIA Jun, TAN Ge. Analysis, forecast and evaluation of water resources carrying capacity in Northwest China[J]. Resources Science, 2003(4): 43-48. (in Chinese))
- [22] 贺可, 吴世新, 杨怡, 等. 近 40 a 新疆土地利用及其绿洲动态变化[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1333-1340. (HE Ke, WU Shixin, YANG Yi, et al. Land use and oasis dynamic changes in Xinjiang in recent 40 years[J]. Geography of Arid Areas, 2018, 41(6): 1333-1340. (in Chinese))
- (收稿日期: 2020-06-27 编辑: 王芳)