

基于 AHP-熵值法组合赋权的甘肃省城市生态用水安全综合评价及影响因素分析

赵宾华^{1,2}, 黄金华¹, 李占斌¹, 李婧³, 周超艳³

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,
陕西 西安 710048; 2.旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室,
陕西 西安 710048; 3.中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: [目的] 综合评价甘肃省城市生态用水安全的关键影响因素, 为协调地区生态、生产和生活的关系提供借鉴。[方法] 基于社会、经济、生态以及水资源开发利用, 构建生态用水评价体系; 综合层次分析法和熵值法得出权重, 进行生态用水安全水平划分, 并辨析生态用水安全主要影响因素。[结果] ①2020 年嘉峪关、兰州和甘肃省整体生态用水安全指数值大于 0.5, 处于基本安全水平, 其他 12 座城市均处于较不安全水平。②2011—2020 年核心区的生态用水安全水平较低, 主要受生态效益子系统影响。③绿化覆盖面积、生态环境用水比例、人均公园绿地面积和城市化水平是影响生态用水安全水平的主要障碍因子, 其贡献度在 45% 以上。[结论] 甘肃省各市区生态用水安全不容乐观, 需提高生态效益来改善甘肃省各市区生态用水安全。

关键词: 生态用水; 层次分析法; 熵值法; 评价指标; 安全评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0167-07

中图分类号: TV213.4

文献参数: 赵宾华, 黄金华, 李占斌, 等. 基于 AHP-熵值法组合赋权的甘肃省城市生态用水安全综合评价及影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 167-173. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.01.020; Zhao Binhua, Huang Jinhua, Li Zhanbin, et al. Comprehensive evaluation and influencing factor analysis of urban ecological water security in Gansu Province based on AHP-entropy method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 167-173.

Comprehensive Evaluation and Influencing Factor Analysis of Urban Ecological Water Security in Gansu Province Based on AHP-Entropy Method

Zhao Binhua^{1,2}, Huang Jinhua¹, Li Zhanbin¹, Li Jing³, Zhou Chaoyan³

(1. Xi'an University of Technology, State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Key Laboratory National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: [Objective] The key influencing factors of urban ecological water security in Gansu Province were comprehensively evaluated in order to provide a reference for coordinating the relationship between regional ecology, production and life. [Methods] Based on social, economic, ecological, and water resource and development factors, an ecological water use evaluation system was constructed. The weights for each factor were obtained by a combination of analytic hierarchy process (AHP) and the entropy method. The level of ecological water security was categorized, and the main influencing factors of ecological water security were determined. [Results] ① In 2020, the overall ecological water security index values for Jiayuguan, Lanzhou,

收稿日期: 2022-05-10

修回日期: 2022-07-21

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于侵蚀能量过程的集程式流域水土流失预报模型”(U2040208); 国家自然科学基金项目“黄土区生态建设治理格局对流域水文—水动力过程的作用机理研究”(42007070); 陕西省教育厅重点实验室项目(20JS100); 清洁能源与生态水利工程研究中心科技项目(QNZX-2019~03)

第一作者: 赵宾华(1990—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 博士, 讲师, 主要从事流域生态水文水动力过程与水土保持研究。Email: zbh20080810@126.com。

通讯作者: 黄金华(1998—), 男(汉族), 江西省景德镇市人, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源与水土保持。Email: 3399746288@qq.com。

and Gansu Province were more than 0.5 (the basic safety level), while the values for 12 of the cities were at relatively unsafe levels. ② The level of ecological water security in the core area from 2011 to 2020 was low, mainly affected by the ecological benefits subsystem. ③ The coverage area of green space, proportion of ecological environment water, per capita green space area of parks, and urbanization level were the main obstacles affecting the level of ecological water security, contributing more than 45%. [Conclusion] The ecological water security of each urban area in Gansu Province does not appear to be optimistic, and it will be necessary to improve ecological benefits in order to improve the ecological water security of each urban area in Gansu Province.

Keywords: ecological water use; AHP; entropy method; evaluation index; water safety evaluation

甘肃省位于黄河上中游,下辖 12 个地级市和 2 个自治州^[1],面积 $4.26 \times 10^5 \text{ km}^2$,GDP 占全国的百分之一,有着巨大的发展潜力。甘肃省坚持“守底线、优格局、提质量、保安全”的总体思路,建立以“三线一单”为核心覆盖全省的生态分区管控体系。2020 年底,甘肃省人民政府常务会议通过《关于实施“三线一单”生态环境分区管控的意见》,而水资源在其中占有举足轻重的地位。长期以来,甘肃省由于水资源相对贫乏、时空分布不均且受制于经济发展和工程技术的限制,所以整体水生态安全不容乐观。因此,定量了解甘肃的水资源状况就是当前最迫切的需求。

近年来水资源评价主要集中在水资源承载力^[2]、水安全^[3]、河流健康等^[4]方面,由于学者看待水资源的角度不同,研究的重点也不同。学者对水安全评价大多基于某个省或某个市。如李奕霖^[5]基于 DPSIR 选取相应指标评价 2013—2017 年广东省水安全;姚望等^[6]基于 PSR 选取相应指标评价 2001—2015 年贵州省的水资源安全;陈冬冬^[7]基于 AHP-熵权综合评价法对郑州市水资源安全问题进行研究;王繁玮等^[8]从治污、防洪、排涝、供水、节水和社会经济 6 个方面选择指标,采取层次分析法评判临海市水资源状况。还有的学者从城市群或流域角度评价,如唐家凯等^[9]研究黄河流域沿线青海、四川等 9 个省的水资源状况,杨静等^[10]基于熵权法建立京津冀城市群水资源循环经济评价体系。目前前人多关注于城市群和整个省的水资源状况,忽视了组成省和城市群的各个城市的水资源现状,因此本研究对甘肃省内各市水资源利用及配置研究具有一定意义。

中国生态用水问题是从河流生态环境最小需水量研究开始的,分为河道内用水和河道外用水,生态用水包括与生态本身用水和有关物理环境用水^[11-13]。随着生态问题日益严重,生活、生产和生态用水观念日益被人们所理解,而生态用水在水资源分配中常被生产和生活用水挤压,忽视了生态用水的重要性。本文主要研究河道外生态用水,定量分析甘肃省的生态用水状况,对甘肃省城市生态用水安全的关键影响因

素进行综合评价,以期协调地区生态、生产和生活的关系提供借鉴。

1 材料方法

1.1 研究区概况

甘肃地处中国内陆腹地,远离海洋,气候干燥,雨量稀少,是全国最干旱和水土流失最严重的省份之一,年均降水量 300 mm 左右,降水各季分配不均,主要集中于 6—9 月,且自东南向西北减少。甘肃省各地区海拔大多在 1 000 m 以上,山脉纵横交错,海拔相差较大,四周为群山峻岭所环抱。造成甘肃省各市区水资源量空间分布不均和水资源开发利用程度不一致,制约着当地社会经济发展。因此需进一步分析各市区生态用水安全水平,确定制约因素。为方便分析城市生态用水变化状况,将甘肃省省会城市兰州和周边的白银、临夏回族自治州和武威划分为核心区,并以此为轴,将嘉峪关、酒泉、张掖和金昌划分为甘西地区,庆阳和平凉市为甘东地区,甘南藏族自治州、定西、陇南天水划分为甘南地区(图 1)。

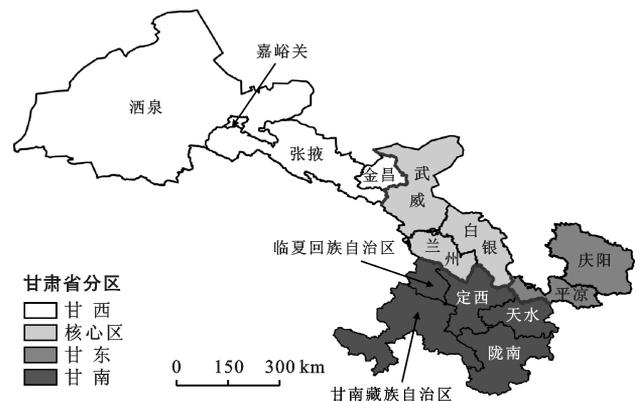


图 1 甘肃省分区

Fig.1 Zoning of Gansu Province

1.2 数据来源

城区发展数据(人口密度、人均日生活用水量、污水处理率、绿地覆盖面积和人均公园绿地面积)来源于城市建设统计年鉴(2011—2020 年)。水资源数

据(地表水资源量、地下水资源量、水资源总量、工业用水量、生活用水量、生态环境用水量、总用水量和万元 GDP 用水量)来源于甘肃省水资源公报(2011—2020 年)。基础数据(工业产值、工业增加值、人口数和人口自然增长率)来源于甘肃统计年鉴(2011—2021 年)。

1.3 研究方法

1.3.1 评价指标体系建立 生态用水安全评价需要

从不同角度、不同层面反映水资源均衡调配带来的效益。可以将效益划分为社会、经济和生态 3 个方面。水资源开发利用状况是反映水资源调配方案是否合理可行的主要依据,所以选取的准则层为生态效益、经济效益、社会效益和水资源开发利用。参考已有的研究^[14-16],从上述 4 个方面共选取了 15 个评价指标,构建甘肃省城市生态用水安全评价体系,具体内容详见图 2。

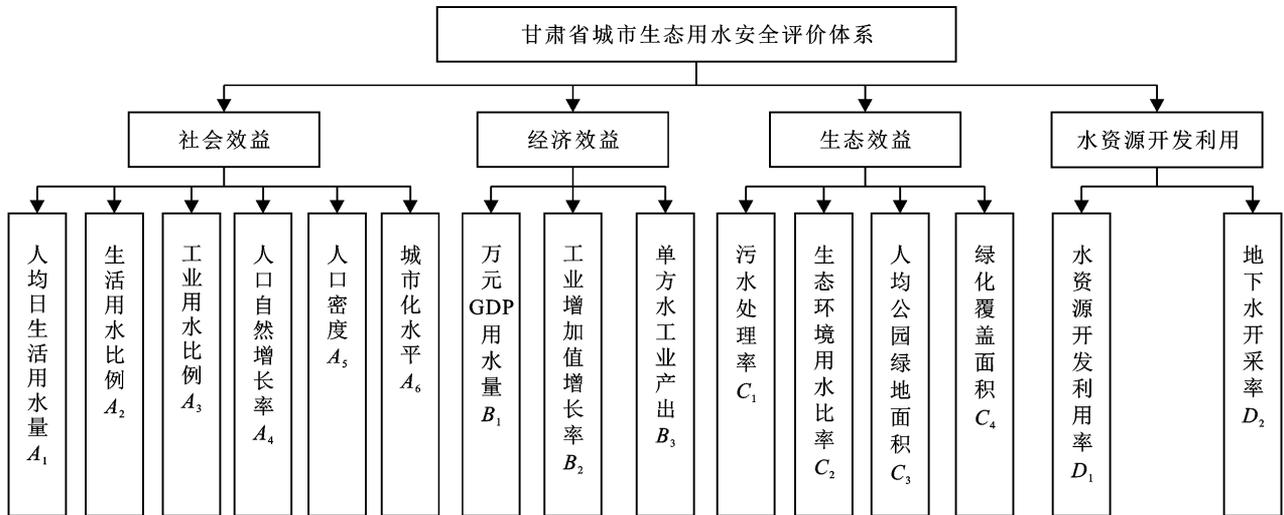


图 2 甘肃省城市生态用水安全评价体系

Fig.2 Urban ecological water security evaluation system of Gansu Province

1.3.2 指标标准化 如果数据的量纲不同,一般需要进行无量纲化处理。本文采用极差变化法进行数据的无量纲化处理,具体见公式(1)和(2)。

正向指标标准化公式:

$$y_i = (x_i - \min x_i) / (\max x_i - \min x_i) \quad (1)$$

负向指标标准化公式:

$$y_i = (\max x_i - x_i) / (\max x_i - \min x_i) \quad (2)$$

式中: y_i 为标准化后的指标值; x_i 为各指标的原始值; $\max x_i, \min x_i$ 分别为所选数据序列中的最大值与最小值。

1.3.3 主客观组合赋权法 本研究采用主客观方法相结合的赋权方法对评价指标进行赋权,将层次分析法(AHP)与熵值法进行组合,弱化单独使用主观或客观方法可能带来的影响,从而计算甘肃省各城区水安全评价指标的指标权重。层次分析法和熵值法的具体过程参见文献[17-19]。

本研究认为层次分析法和熵值法计算出的权重具有同样的价值,所以将层次分析法和熵值法权重计算结果按照 50% 加权求和,得到各评价指标最终结果。综合权重可以避免这两种方法的不足,寻求更为科学的权重结果。

1.3.4 障碍度函数计算 为了进一步掌握影响生态用水安全的主要指标,引入障碍度函数。其主要包含贡献度、指标偏离障碍度 3 个衡量因子。贡献度 F_i 和指标偏离度 I_i 计算公式分别为:

$$F_i = w_i q_i \quad (3)$$

$$I_i = 1 - x_{ij} \quad (4)$$

第 i 个指标对生态用水的障碍度 P_i 为:

$$P_i = \frac{F_i I_i}{\sum_{i=1}^n F_i I_i} \quad (5)$$

式中: w_i 为指标层权重; q_i 为准则层权重。

1.3.5 评价标准等级划分 借鉴水安全指数计算公式,计算生态用水安全指数的公式为:

$$WSD = WSH \times w_1 + WJJ \times w_2 + WST \times w_3 + WSZ \times w_4 \quad (6)$$

式中: w_1, w_2, w_3, w_4 为各准则层的权重值; WSH 为社会效益指数; WJJ 为经济效益指数; WST 为生态效益指数; WSZ 为水资源开发利用指数。

由于计算出来的生态用水安全指数无法直接体现一个城市的生态用水安全,需将其转化为等效值,以便更加方便地反映水生态现状。借鉴文献[20]

关于水安全评价标准,将综合指数以及评价标准列于表 1 中。

表 1 生态用水安全评判等级划分

Table 1 Classification of ecological water security evaluation levels

综合指数	评价等级	生态用水安全指数
0.83~1	I	安全
0.67~0.83	II	较安全
0.5~0.67	III	基本安全
0.33~0.5	IV	较不安全
0.17~0.33	V	不安全
0~0.17	VI	严重不安全

2 结果与分析

2.1 甘肃省生态用水安全评价体系权重确定

根据层次分析法和熵值法对 2011—2020 年甘肃

省各城区数据进行处理,其权重详细结果见表 2。根据熵值法计算的结果表现为:社会效益>生态效益>经济效益>水资源开发利用。而层次分析法的结果为:生态效益>水资源开发利用>社会效益>经济效益。综合权重的结果为:生态效益>社会效益>水资源开发利用>经济效益。熵值法中权重越大则表明指标间的相差越大,水资源开发利用的权重值仅为 0.06,表明 2011—2020 年水资源开发利用无较大转变。而社会效益权重值最大是符合甘肃省发展实际的,原因是从 2011—2020 年甘肃省各市区工业、人口、生活均有较大的提升。层次分析法和熵值法计算权重值结果相差较大,这是主客观之间的差距,专家们认为生态用水安全应以生态效益为主,而客观结果以社会效益为主。所以本文选取主客观相结合的方法,能有效避免单一方法带来的误差,使结果与实际更相符。

表 2 甘肃省生态用水安全指标体系权重值

Table 2 Weight value of ecological water security index system of Gansu Province

目标层	准则层	熵值法	AHP	综合权重值	指标层	熵值法	AHP	综合权重
生态用水安全指标体系	社会效益(w_1)	0.46	0.17	0.32	人均日生活用水量	0.24	0.15	0.19
					生活用水比例	0.18	0.21	0.19
					工业用水比例	0.12	0.23	0.18
					人口自然增长率	0.1	0.07	0.08
	经济效益(w_2)	0.2	0.08	0.14	人口密度	0.19	0.25	0.22
					城市化水平	0.2	0.09	0.15
					万元 GDP 用水量	0.33	0.15	0.24
					工业增加值增长率	0.28	0.21	0.24
	生态效益(w_3)	0.28	0.46	0.37	单方水工业产出	0.39	0.64	0.52
					污水处理率	0.08	0.10	0.09
					生态环境用水比率	0.22	0.30	0.26
					人均公园绿地面积	0.19	0.28	0.23
	水资源开发利用(w_4)	0.06	0.29	0.17	绿化覆盖面积	0.51	0.32	0.42
					水资源开发利用率	0.57	0.45	0.51
					地下水开采率	0.43	0.55	0.49

2.2 甘肃省各城区生态用水安全评价

运用公式(6),计算得到甘肃省各城区的生态用水安全指数值(表 3)。图 3 和表 3 显示了甘肃省和各分区生态用水安全的时空分布特征。整体来看,甘肃省及各分区的生态用水安全在 2011—2020 年呈现不稳定且波动趋势,甘肃省的生态用水安全指数在 0.53~0.6 范围内,属于基本安全水平。变化趋势为先下降,后稳步提升,最终在 2020 年达到最高点(0.60),4 个分区与甘肃省变化趋势相一致,尤其是 2017 年后各个分区的生态用水安全指数均显著提升,除甘东地区外均在 2020 年达到最大值。对比 2011 年和 2020 年 4 个分区的生态用水指数,甘东地区降低 6.7%,而其他 3 个地区的指数均增加。2011—2020 年甘西、

甘南、甘东的生态用水安全指数数值在 0.33~0.5 范围内波动变化,安全等级均为 IV 级。而 2013—2017 年核心区的生态用水安全指数数值低于 0.33(V 级阈值),生态用水安全转变为不安全状态,原因主要是受核心区内的白银、临夏和武威三市影响。期间三市的生态用水安全水平低于 0.3,主要受生态效益子系统的影响,如 2013 年武威、白银和临夏生态效益的指标值分别为 0.08,0.08,0.16,位居甘肃各城区倒数。

2011—2020 年各市区间的差异较大。2011 年甘肃省 14 个城市生态用水安全指数,由大到小排序依次为嘉峪关(0.60)、金昌(0.48)、陇南(0.47)、甘南(0.46)、天水(0.45)、平凉(0.44)、庆阳(0.44)、兰州(0.40)、酒泉(0.40)、定西(0.40)、张掖(0.37)、白银

(0.37)、武威(0.31)和临夏(0.31)。其中,嘉峪关处Ⅲ级,武威和临夏处Ⅴ级水平,其他城市则为Ⅳ级水平。2020年由大到小的排序为兰州(0.55)、嘉峪关(0.54)、甘南(0.49)、酒泉(0.47)、陇南(0.47)、定西(0.45)、庆阳(0.43)、金昌(0.43)、张掖(0.42)、平凉(0.41)、天水(0.40)、临夏(0.39)、武威(0.37)和白银(0.35)。从2011—2020年,兰州生态用水安全等级由较不安全提升为基本安全水平,数值增加了27.3%,原因主要是10a间兰州生态效益和水资源利用开发利用

效率显著提升,生态效益提升了33.3%。生态安全水平较低的地区一直在兰州地区周边(即武威、临夏和白银),但相比于2011年,武威和临夏两市生态用水安全等级提升一级,转为较不安全水平。2020年甘肃各城市中白银的生态用水安全水平最低,接近较不安全与不安全的临界值,水平为Ⅴ级,相比于2011年降低了0.02。主要原因为白银的生态效益全省倒数第一,影响了生态用水安全水平,所以应加强三市生态用水的调度与管控,防止生态安全水平降低。

表 3 甘肃省及各市 2011—2020 生态用水安全指数

Table 3 Ecological water safety index of Gansu Province and its cities from 2011 to 2020

地区	市(区)	生态用水安全指数									
		2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
甘西	酒泉	0.40	0.38	0.34	0.34	0.34	0.35	0.36	0.38	0.38	0.47
	嘉峪关	0.60	0.54	0.44	0.44	0.49	0.52	0.50	0.48	0.48	0.54
	张掖	0.37	0.43	0.40	0.40	0.39	0.40	0.44	0.41	0.41	0.42
	金昌	0.48	0.46	0.30	0.35	0.37	0.36	0.36	0.39	0.44	0.43
核心区	武威	0.31	0.36	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28	0.31	0.33	0.37
	兰州	0.40	0.39	0.36	0.36	0.36	0.36	0.37	0.48	0.53	0.55
	白银	0.37	0.40	0.33	0.33	0.32	0.29	0.27	0.36	0.35	0.35
	临夏	0.31	0.31	0.26	0.27	0.29	0.28	0.28	0.35	0.35	0.39
甘东	平凉	0.44	0.42	0.44	0.39	0.42	0.40	0.40	0.43	0.42	0.41
	庆阳	0.44	0.51	0.45	0.47	0.42	0.39	0.41	0.48	0.40	0.43
甘南	定西	0.40	0.37	0.32	0.31	0.36	0.33	0.34	0.48	0.44	0.45
	天水	0.45	0.46	0.43	0.37	0.37	0.35	0.38	0.41	0.33	0.40
	甘南	0.46	0.44	0.43	0.40	0.39	0.36	0.40	0.41	0.41	0.49
	陇南	0.47	0.42	0.43	0.39	0.39	0.36	0.37	0.38	0.45	0.47
甘肃全省		0.55	0.56	0.54	0.54	0.53	0.53	0.53	0.54	0.57	0.60

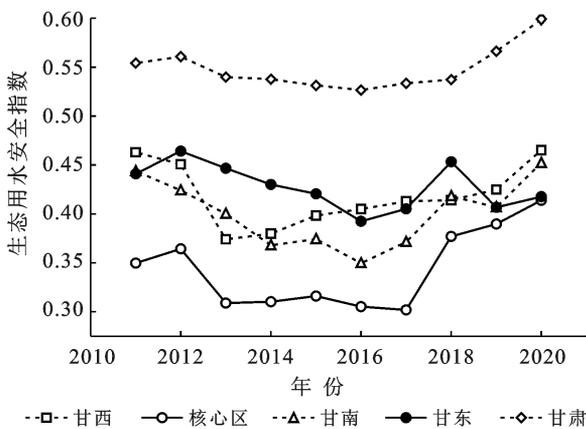


图 3 甘肃省各城区生态用水安全指数

Fig.3 Ecological water security index of each urban area in Gansu Province

2.3 甘肃省各城区生态用水安全指数障碍因素分析

基于上述分析,甘肃省 14 个城区生态用水安全水平均处于较不安全水平。但无法确定控制何种生态用水安全指标可以有效提升安全水平,所以引入障

碍度函数可以为更加精准地制定生态用水安全提升策略提供参考依据。结合公式(5),计算了2011—2020年甘肃各城区生态用水安全指标层的因子障碍度,并选取障碍度排名前4个指标进行统计分析(图4)。研究发现,甘肃省各城区生态用水安全指数主要障碍因素为绿化覆盖面积(19.1%)、生态环境用水比例(10.0%)、人均公园绿地面积(9.2%)和城市化水平(7.3%)。

由图4可知,2020年绿化覆盖面积障碍度最大,为19.3%。人均公园绿地面积的障碍度值则先增大后减小,2013年为最大值,达到9.2%。绿化覆盖面积障碍度增加原因主要为各城市政府积极扩建公园、雨水花园和亲水平台等工程。绿化覆盖面积、生态环境用水比例和人均公园绿地面积障碍度之和达到35%以上。由此可见,加强生态方面水资源利用是提升城市生态用水安全指数行之有效的方式方法。生态环境用水比例和城市化水平的障碍度值呈逐年下降趋势,城市化水平障碍度值从2011年的7.3%降到2020年的7.1%。主要原因为受地区政策、土地利

用、气候多因素影响,城市化水平和生态环境用水比例随着城镇化发展提升速率减缓,造成障碍度因子下降。2011—2020 年 4 大指标的障碍度值均波动变化,但这些指标的变化幅度均不大,变幅均小于 10%,说

明影响生态用水安全指数的限制性因素没有改变。不同市区的生态用水安全水平的提升主要依靠改善影响该区的关键限制性因素,应将限制性因素逐渐转变为该区优化的关键调控因素。

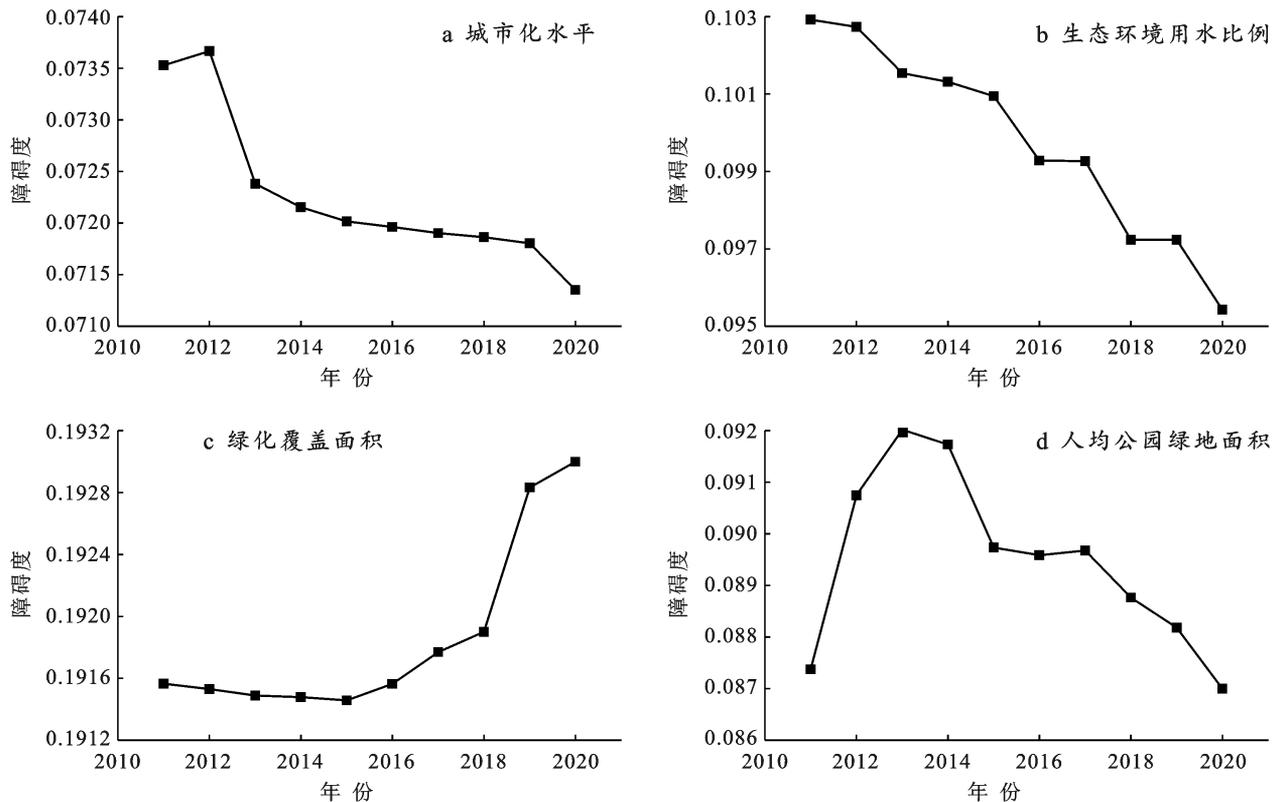


图 4 甘肃各城区生态用水安全主要评价指标障碍度

Fig.4 Obstacle degree of main evaluation indexes of ecological water security in each urban area of Gansu Province

2.4 障碍度因子实证

为证明障碍度函数得出的结果,以甘肃省 2011—2020 年生态用水安全指数变化为例,运用障碍度前 4 个指标值的变化趋势分析归纳甘肃省生态用水安全水平变化原因。本文计算 2020 年甘肃省的生态用水安全水平为 0.60。张洋等^[21]基于 DPSIR 方法确定甘肃省 2018 年的水安全值为 0.45。朱发昇^[22]计算甘肃省 2020 年的水安全度为 0.50。这说明本文选取指标和计算结果具有一定可靠性。

2011—2020 年甘肃省城市化水平、人均公园绿地面积和绿化覆盖面积 3 个指标值的年平均增长率分别为 3.38%, 7.18% 和 6.0%。3 个指标值的增加符合现实状况,甘肃省城市化水平逐年递增的原因是工业化水平的提升,吸引了大批的农村劳动力,但 2019 年城市化水平达到 48% 后,城市化水平增长幅度减缓,可能受国内疫情大背景的影响。为提升城市人居环境,甘肃省修建多处公园景观并大力发展城区绿化建设,甘肃 14 个城市的绿化覆盖面积逐渐增加,从而导致生态环境用水比例增加。图 5 可知,经过

10 a 发展,2020 生态环境用水比例、绿化覆盖面积和人均公园绿地面积分别增长为 10%, 350 km², 15.15 m²。这 3 个指标的值增加,使甘肃省生态效益从 2013 年逐步增加,2020 达到最大值(0.74),使甘肃省生态用水安全达到最大值。从图 6 可知,甘肃省的社会效益逐年降低,与社会效益准则层中的生活用水比例、人均日生活用水量等指标有关,人均日生活用水量从 2011 年的 145 L/(人·d) 降低至 2016 年的 125 L/(人·d),又提升至 2020 年的 140 L/(人·d),引起社会效益先减小后增加。2017 年后甘肃省的水资源开发利用子系统指标值稳步提升是由于水资源开采利用率和地下水利用率存在显著降低,低于水资源开发利用警戒线(40%)。

总体而言,生态效益是造成生态用水安全水平变化的重要影响因素。因此,要提升甘肃省各市区生态用水安全水平,需继续提高人均公园绿地面积,建设人工湿地,调整水资源利用结构,保障人民生活用水安全,逐步提升生态环境用水比例。另外,要合理分水管水,科学确定甘肃省可分配水量,以实现区域高效用水。

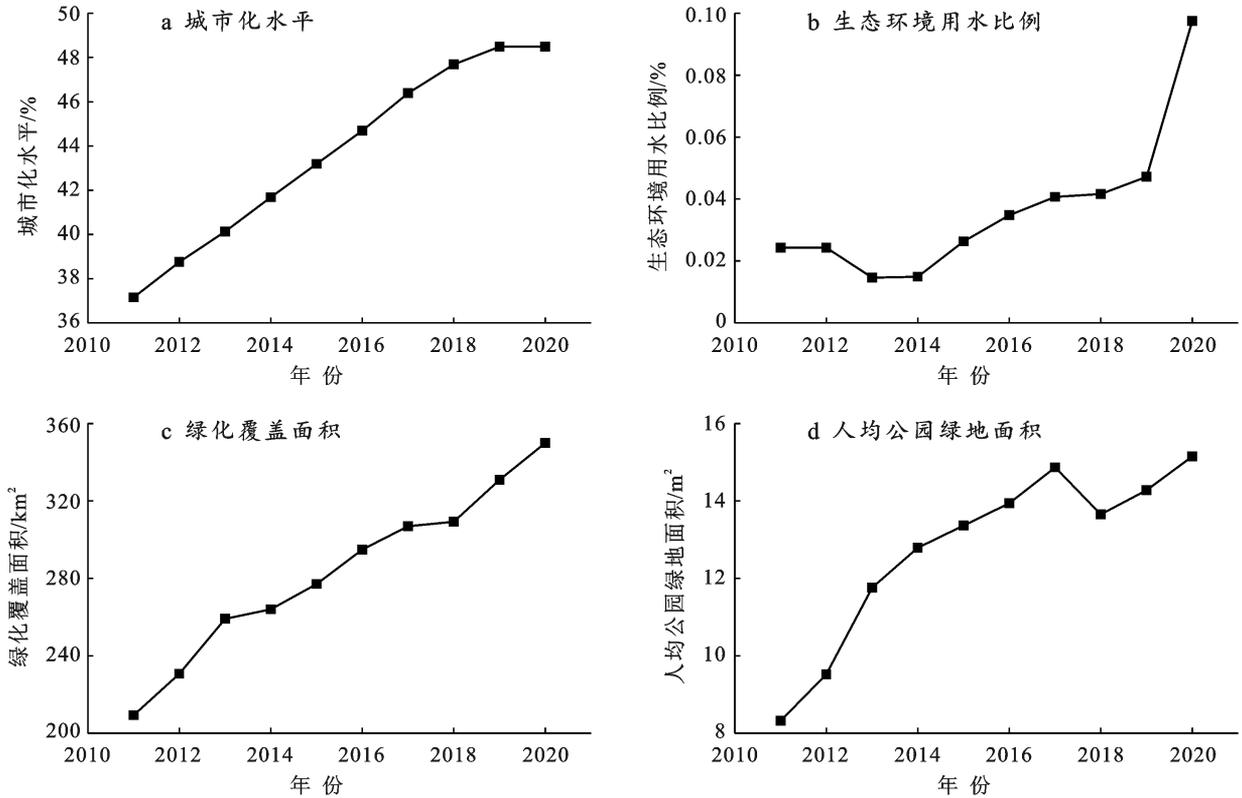


图 5 2011—2020 年甘肃省 4 大评价指标变化

Fig.5 Changes of four evaluation indicators of Gansu Province from 2011 to 2020

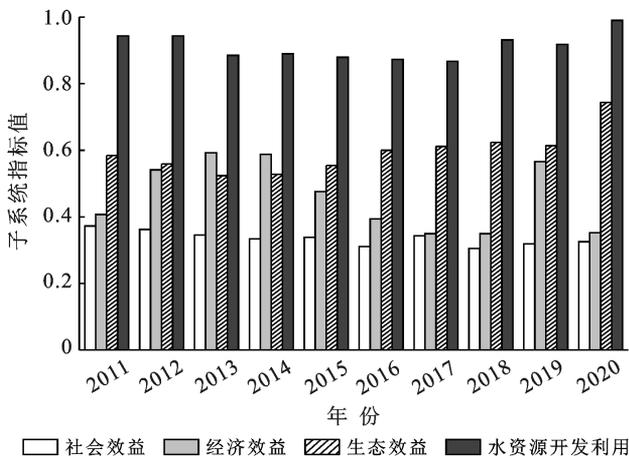


图 6 2011—2020 甘肃省准则层指标变化

Fig.6 Changes of index values of the criterion layer in Gansu Province from 2011 to 2020

3 结论

(1) 2011—2020 年甘肃省生态用水安全水平指标值的平均值为 0.55, 位于 0.53~0.6 范围内, 属于基本安全水平, 水资源开发利用变化趋势不显著, 而生态效益指数稳步提升, 使甘肃省 2020 年生态用水水平达到最大值。

(2) 2020 年嘉峪关和兰州生态用水安全水平处

于Ⅲ级水平, 陇南、金昌、天水、临夏、定西等 12 个城市均处于Ⅳ级水平, 甘肃省内甘南、甘西、甘东和核心区四大分区中, 核心区的生态用水安全水平低, 主要受临夏、武威和白银三市的生态效益指标值影响。

(3) 甘肃省各城区生态用水安全水平主要影响因素主要包括绿化覆盖面积(19.1%)、生态环境用水比例(10.0%)、人均公园绿地面积(9.2%)和城市水平(7.3%)这 4 大障碍因子。

(4) 生态效益变化是造成生态用水安全水平变化的重要影响因素, 提高城区生态效益指标值, 可有效提升甘肃省各市区生态用水安全水平。

[参 考 文 献]

[1] 戴文渊. 基于模糊综合评价的甘肃地区水生态安全评价指标体系研究[D]. 甘肃 兰州: 甘肃农业大学, 2016.

[2] 李静, 王飞东, 李强雷. 中国中东部水资源承载力评价及障碍因子识别[J]. 人民长江, 2021, 52(6): 58-64.

[3] 杨天翼, 赵强, 王奎峰, 等. 基于层次分析法和熵权法综合评价山东省水生态安全[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2021, 35(6): 566-571.

[4] 尚文绣. 基于水文要素的河流健康评价及其生态用水调度研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.

[5] 李奕霖. 广东省水安全评价及保障模式研究[D]. 陕西 西安: 西安理工大学, 2019.

(下转第 213 页)

- [8] 朱媛媛,汪紫薇,罗静,等.中国中部重点农区新型城镇化与粮食安全耦合协调发展研究:以河南省为例[J].地理科学,2021,41(11):1947-1958.
- [9] 河南省统计局.河南统计年鉴.2011[M].北京:中国统计出版社,2011.
- [10] 马京奎.中国环境统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2007.
- [11] 李全峰,胡守庚,瞿诗进.1990—2015 年长江中游地区耕地利用转型时空特征[J].地理研究,2017,36(8):1489-1502.
- [12] 邹欣怡,赵伟,蒲海霞.三峡库区重庆段土地利用转型及生态服务功能价值时空分异特征[J].水土保持研究,2021,28(02):267-275.
- [13] 吕晖,郭雪白,赵万东.河南省土地利用变化特征及其空间格局[J].中国农业资源与区划,2017,38(7):142-145.
- [14] 李笑莹,张学雷,任圆圆.河南省土壤及地形与耕地多样性格局的特征[J].土壤,2019,51(4):775-785.
- [15] 唐永,和瑞,刘建文.基于土地利用演变视角的大城市病分析及策略探讨:以郑州中心城区为例[C]//2019 城市发展与规划论文集.河南 郑州,2019:212-217.
- [16] Lambin E F, Meyfroidt P. Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change [J]. Land Use Policy,2010,27(2):108-118.
- [17] 付慧,刘艳军,孙宏日,等.京津冀地区耕地利用转型时空分异及驱动机制[J].地理科学进展,2020,39(12):1985-1998.
- [18] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等.20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J].地理学报,2014,69(1):3-14.
- [19] 闫慧敏,刘纪远,黄河清,等.城市化和退耕还林草对中国耕地生产力的影响[J].地理学报,2012,67(5):579-588.
- [20] 陈永林,谢炳庚,李晓青,等.2003—2013 年长沙市土地利用变化与城市化的关系[J].经济地理,2015,35(1):149-154.
- [21] 袁承程,张定祥,刘黎明,等.近 10 年中国耕地变化的区域特征及演变态势[J].农业工程学报,2021,37(1):267-278.
- [22] 罗芳,潘安,陈忠升,等.四川省宜宾市 1980—2018 年耕地时空格局变化及其驱动因素[J].水土保持通报,2021,41(6):336-344.
- [23] 陈松林,赵翔,刘中秋,等.2009—2018 年湖南省县域耕地时空演变及其驱动力[J].水土保持通报,2022,42(3):274-283.
- [24] 李丹,周嘉,战大庆.黑龙江省耕地时空变化及驱动因素分析[J].地理科学,2021,41(7):1266-1275.
- [25] 李毅,肖腊梅,胡文敏,等.长株潭核心区土地利用变化时空格局及驱动力多维分析[J].经济地理,2021,41(7):173-182.

(上接第 173 页)

- [6] 姚望,周子琴,张凤太.基于 PSR 模型的贵州省水资源安全诊断与影响因素分析[J].人民珠江,2019,40(8):32-38.
- [7] 陈冬冬.基于 AHP-熵权综合评价法的郑州市水资源安全问题研究[D].河南 郑州:华北水利水电大学,2020.
- [8] 王馨玮,陈星,朱琰,等.基于 PSR 的城市水生态安全评价体系研究:以“五水共治”治水模式下的临海市为例[J].水资源保护,2016,32(2):82-86.
- [9] 唐家凯,丁文广,李玮丽,等.黄河流域水资源承载力评价及障碍因素研究[J].人民黄河,2021,43(7):73-77.
- [10] 杨静,荆平,高蝶,等.京津冀城市群水资源循环经济发展的障碍因子分析[J].中国农村水利水电,2020(10):131-136.
- [11] 邓洁.威海市生态用水及水资源合理配置研究[D].北京:北京林业大学,2009.
- [12] 王治国.山西省生态用水态势及其可持续性评价研究[D].北京:北京林业大学,2007.
- [13] Wang Huiliang, Li Hui, Di Danyang, et al. Evaluation and spatial aggregation of ecological water use in each region of the Yellow River Basin [J]. E3S Web of Conferences, 2021,267:01015.
- [14] 陈玲玲.调水工程受水区水资源均衡调配方案评价与优化研究[D].天津:天津大学,2018.
- [15] Huang Ze, Liu Jiahong, Mei Chao, et al. Water security evaluation based on comprehensive index in ‘Jing-Jin-Ji’ district, China [J]. Water Science & Technology Water Supply, 2020,20(6):2698-2714.
- [16] 李少朋,赵衡,王富强,等.基于 AHP-TOPSIS 模型的江苏省水资源承载力评价[J].水资源保护,2021,37(3):20-25.
- [17] 秦莉云,金忠青.淮河流域水资源承载能力的评价分析[J].水文,2001,21(3):14-17.
- [18] 王铖洁,方红远,朱晔,等.基于层次分析法-模糊综合评价的苏北平原河流生态状况评估[J].中国农村水利水电,2021(12):12-18.
- [19] 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.
- [20] 王浩,胡春宏,王建华.我国水安全战略和相关重大政策研究[M].北京:科学出版社,2019.
- [21] 张洋,李鹏,杨志,等.基于 DPSIR 模型的甘肃省 2000—2018 年水安全评价[J].水土保持通报,2021,41(6):127-132.
- [22] 朱发昇,李长春,吴京.黄河流域生态保护和高质量发展背景下对甘肃省水安全保障的思考[J].水利发展研究,2022,22(1):30-35.