

西安市 2010 – 2018 年水生态承载力评价

李云^{1,2}, 张紫瑶^{1,2}, 周维博^{1,2}

(1. 长安大学 水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 为研究西安市在城市建设快速发展过程中水生态系统的健康情况,选取与之相关的 24 项指标构建西安市水生态承载力评价体系,采用主成分分析法(PCA)评价西安市 2010 – 2018 年水生态承载力变化情况。研究结果表明:西安市 2010 – 2018 年水生态承载力总体呈现增强趋势,由 2010 年的Ⅳ级(超载),恢复为 2018 年的Ⅱ级(良好)。又结合西安市水生态文明城市建设背景,选取试点起始年份 2013 年和试点期末 2016 年相关指标数据,对西安市各区(县)水生态承载力进行评价,发现 2016 年各区(县)水生态承载力与 2013 年相比均有所增强。其中灞桥区由Ⅳ级转为Ⅱ级,未央区由Ⅳ级转为Ⅲ级,临潼区由Ⅲ级转为Ⅱ级,其余区(县)虽然水生态承载力等级无变化但也有不同程度的恢复。对西安市及其各区(县)水生态承载力变化规律的综合分析,可为该地区后续水生态系统管理、保护与治理提供参考。

关键词: 城市水生态; 水生态承载力评价; 主成分分析法; 西安市

中图分类号:TV213.4; X826

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)06-0065-06

Assessment on water ecological carrying capacity of Xi'an City from 2010 to 2018

LI Yun^{1,2}, ZHANG Ziyao^{1,2}, ZHOU Weibo^{1,2}

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region (Chang'an University), Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to study the health status of water ecosystem in Xi'an in the context of urban high-speed construction, 24 related indicators were selected to establish a water ecological carrying capacity evaluation system. Then, principal component analysis (PCA) was used to evaluate the change of water ecological carrying capacity in Xi'an City from 2010 to 2018. The results show that the water ecological carrying capacity of Xi'an City showed an overall upward trend from 2010 to 2018, which improved from Grade IV (overloaded) in 2010 to Grade II (good) in 2018. In respond to the Construction of Water Ecological Civilization City in Xi'an, pilot programs were established in the urban districts and counties from 2013 to 2016. So relevant data were selected from 2013 and 2016, the first and final year of the pilot programs, to evaluate the water ecological carrying capacity of each district and county. It was found that the water ecological carrying capacity of the districts and counties all increased to various extents in 2016 compared with that in 2013, among which Baqiao District improved from Grade IV to Grade II, Weiyang District from Grade IV to Grade III, Lintong District from Grade III to Grade II; and the water ecological carrying capacity also improved to various extent within its original grade in other districts and counties. The comprehensive analysis of the water ecological carrying capacity of Xi'an City, its districts and counties can provide some technical support for the decision making of the follow-up water ecosystem management and protection measures in this region.

Key words: urban water ecology; assessment of water ecological carrying capacity; principal component analysis(PCA); Xi'an City

收稿日期:2021-03-01; 修回日期:2021-07-09

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(12120113004800)

作者简介:李云(1997-),男,甘肃白银人,硕士研究生,研究方向为水生态及水环境。

通讯作者:周维博(1956-),男,陕西乾县人,博士,教授,博士生导师,从事水资源与水环境及节水灌溉方面的教学与研究工作。

1 研究背景

作为“一带一路”核心区的西安市,在城市建设规模不断扩大的同时,水资源供需矛盾也日益严重^[1]。近年来,随着“八水绕西安”“引汉济渭”等水利工程的建设,大量的水资源被引入并形成了众多的人工水景观,与此同时引发了一系列水生态、水环境等问题^[2-3]。这些问题极有可能导致城市水生态系统受损,受损的水生态系统又会制约城市的发展。因此,在城市建设快速发展的前提下,开展西安市水生态承载力的研究与评价,揭示其变化规律,探究城市建设如何与水生态系统和谐发展具有重要的现实意义。

以往对于西安市承载力的研究往往都是偏向于水资源^[4]或水环境^[5]的某一方面,而将水环境、水资源、水安全、水生态联系起来,综合分析城市水生态系统健康问题的研究尚少见报道。西安市位于西北内陆,其城市水生态承载力特点不同于流域水生态承载力^[6-7];独特的气候分区也使其与干旱缺水地区^[8]有所不同;复合的水生态系统特征使得对其研究方向不同于水资源充足且水环境污染严重的南方地区^[9]。

综上所述,本文结合西安地区实际情况,以水资源、水生态、水环境、水安全为研究主体^[10-16],与城市水生态系统自身属性紧密相连的 24 项指标为研究客体,构建了水生态承载力评价体系。在评价方法的选取上,常见的评价方法有水生态足迹法、主客观赋权法、系统动力学评价模型、主成分分析法、投影寻踪评价模型、模糊评价法等^[17]。基于西安市水生态系统的基本特征,采用主成分分析法,对西安市 2010-2018 年水生态承载力进行了评价分析,并结合水生态文明城市建设背景,分析 2013 和 2016 年西安市各区(县)水生态承载力变化情况。本次研究旨在探寻西安市水生态系统恢复情况,为后续城市水生态系统治理修复及向健康良好方向的发展提供参考。

2 研究区概况

西安市地处关中地区,位于渭河流域中部,北临黄土高原,南临秦岭。在气候分区上属于暖温带半湿润大陆性季风气候,冬季冷夏季热,降雨多集中在夏、秋两季^[18]。全市境内水系众多,河网密集,共有 11 个市辖区和 2 个县,全市总面积为 10 108 km²。西安市行政区(县)划分见图 1。

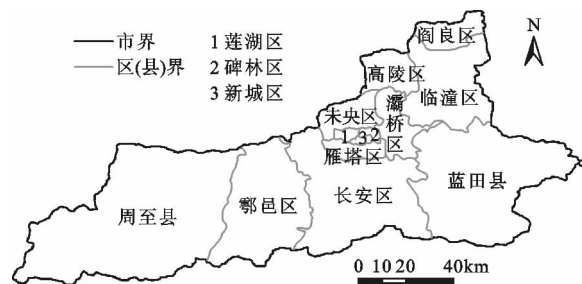


图 1 西安市行政区(县)划分

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源

本研究所采用的 2010-2018 年西安市及其所辖县的人口、水资源量、区域面积等相关资料,均来源于《陕西省水资源公报》《陕西省统计年鉴》《西安市水资源公报》和《西安市统计年鉴》。

3.2 水生态承载力评价方法

3.2.1 评价体系 本文考虑水生态承载力与城市水资源、生态、经济、社会、之间的相互关系,参考国家最严格水资源管理制度的“三条红线”和《水生态文明城市建设评价导则》,同时根据西北地区的地域特性,在综合各种指标框架的优缺点后^[19-22],从系统角度出发,建立了西安市水生态承载力评价体系,如图 2 所示。在能够充分反映水生态系统承载力状态且针对性较强的 24 个指标中, C_1 、 C_2 、 C_8 、 C_9 、 C_{10} 、 C_{16} 、 C_{17} 、 C_{19} 、 C_{20} 、 C_{23} 、 C_{24} 为正向指标,其余均为负向指标。

3.2.2 PCA 模型 本文利用主成分分析法(PCA)进行评价^[23]。具体模型构建步骤如下:

(1) 消除原始数据 X_{ij} 量纲。

$$X_{ij}^* = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p) \quad (1)$$

式中: X_{ij}^* 为原始数据 X_{ij} 标准化处理后的值; $\bar{X}_j$ 、 S_j 分别为第 j 个指标的均值和标准差。

(2) 计算相关系数矩阵及其特征值和对应的特征向量。

$$\mathbf{R} = [r_{ij}]_{p \times p} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{\text{cov}(X_i^*, X_j^*)}{\sqrt{D(X_i^*)} \cdot \sqrt{D(X_j^*)}} \quad (3)$$

$$|\lambda \mathbf{I} - \mathbf{R}| = 0 \quad (4)$$

式中: $\mathbf{R}$ 为处理后数据的相关系数矩阵; r_{ij} 为相关系数; $\text{cov}(X_i^*, X_j^*)$ 为处理后指标数据 X_i^* 、 X_j^* 的协方差; $D(X_i^*)$ 、 $D(X_j^*)$ 为处理后指标数据 X_i^* 、 X_j^* 的

方差。通过求解公式(4) 得特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ 和对应的特征向量 $a_1, a_2, \dots, a_p$ 。

(3) 通过计算主成分贡献率和累积贡献率确定主成分。

$$p_t = \frac{\lambda_t}{\sum_{j=1}^p \lambda_j} \quad (t = 1, 2, \dots, p)$$

(5)

$$P = \sum_{t=1}^m p_t \quad (t = 1, 2, \dots, p)$$

(6)

式中: p_t 为主成分贡献率; P 为累积贡献率; λ_t 为累计贡献率达 85% 以上时前 m 项主成分对应的特征值。

(4) 计算水生态承载力综合得分值。

$$z_t = \sum_{j=1}^p a_{tj} X_{tj}^* \quad (t = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, p)$$

(7)

$$Z = \sum_{t=1}^m p_t z_t$$

(8)

式中: Z 为水生态承载力综合得分值; z_t 为主成分; a_{tj} 为主成分荷载, 是特征向量 a_j 的第 t 个分量。

根据综合得分值高低来判断城市水生态系统的健康状况, 当综合得分值越高时, 城市水生态系统越健康, 反之, 综合得分值越低, 城市水生态系统状况越差。

3.2.3 评价结果分级标准 评价结果分级标准是衡量评价结果等级的重要内容。本文查阅文献[24]、[25]并结合西安市具体情况, 选定各项指标等级分界值, 将其代入主成分分析模型, 得出分界点综合得分值, 以此将西安市水生态承载力评价结果划分为 5 个等级, 具体情况如表 1。

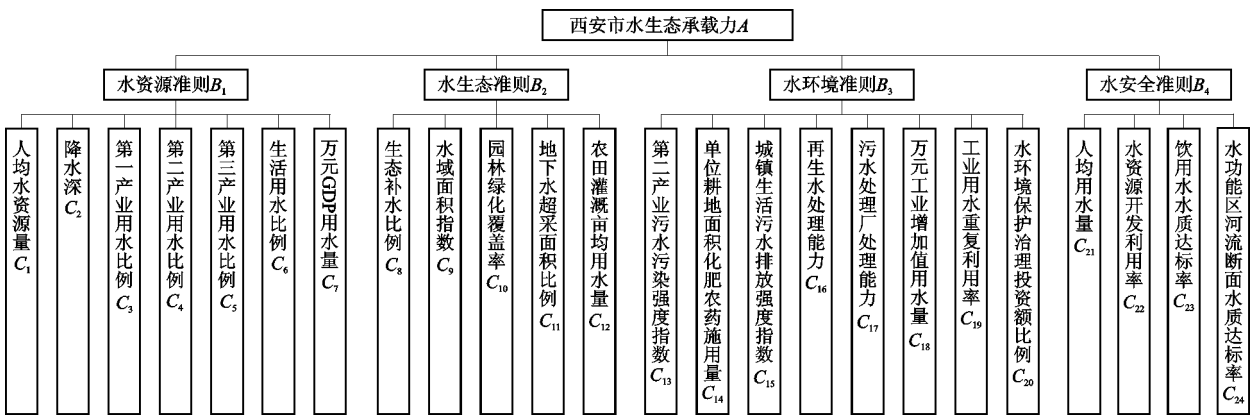


图 2 西安市水生态承载力评价指标体系

表 1 西安市水生态承载力评价结果等级表

等级	I 级(理想)	II 级(良好)	III 级(临界)	IV 级(超载)	V 级(严重超载)
综合得分值	> 27.71	(8.56, 27.71]	(-8.69, 8.56]	(-8.69, -27.58]	≤ -27.58

4 结果与分析

4.1 水生态承载力及准则评价

根据上文构建的西安市水生态承载力评价体系, 利用主成分分析法得到 2010 - 2018 年西安市水生态承载力综合得分值, 结果如图 3 所示。

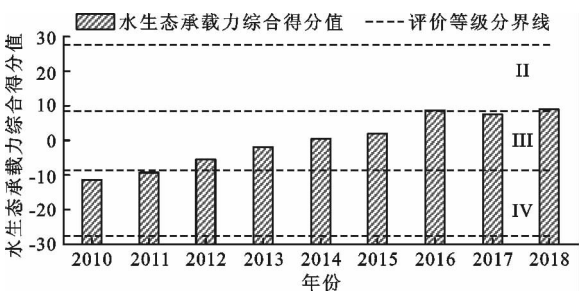


图 3 2010 - 2018 年西安市水生态承载力综合得分值

由图 3 可知, 西安市 2010 - 2018 年水生态承载力总体呈现上升趋势。在 2010 和 2011 年, 西安市水生态承载力不容乐观, 为 IV 级(超载), 但从 2012 年开始有所改善。与 2011 年相比, 2012 年的综合得分值增加了 2.07, 水生态承载力状态由 IV 级变为 III 级(临界); 2013 - 2015 年, 水生态承载力在 2012 年的基础上继续增长, 但其表现状态仍为 III 级; 2016 综合得分值有显著提高, 与 2015 年相比, 增长幅度高达 6.91, 承载力状态也转为 II 级(良好); 2017 年与 2016 年相比得分值有小幅下降, 变为 III 级; 但在 2018 年水生态承载力综合得分值有所恢复, 达到研究时段内最大值 8.96, 水生态承载力状态表现为 II 级(良好)。

历年的水生态承载力综合得分值可以体现出水

生态承载力变化情况。为进一步分析 2010—2018 年西安市水生态承载力变化的影响因素,对图 2 中城市水生态承载力评价体系的 4 项准则($B_1 \sim B_4$)进行主成分分析,结果如图 4 所示。

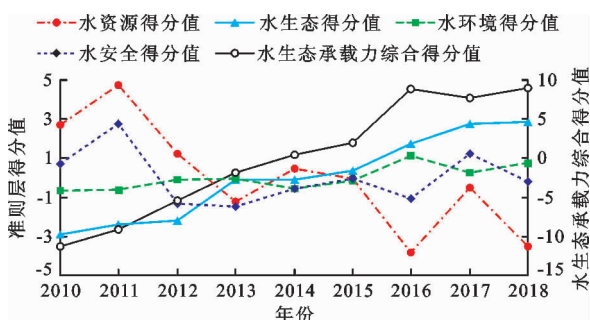


图4 西安市水生态承载力评价体系准则层得分

根据图4可得,水生态、水环境与水安全和水生态承载力的变化趋势相近,整体呈上升状态;而水资源和水生态承载力变化趋势相反,且水资源波动变化最大。对于各项准则变化的具体分析如下:

(1) 由于降水等相关因素的不稳定性,水资源准则中人均水资源量和降水量,并无太大明显变化,但各行业用水比例和万元 GDP 用水量因为人们节水意识的增强以及大量节水、用水新技术的投入使用反而有所降低。在用水总量控制指标下,各行业用水效率有了明显提升,经济增长和社会发展更加迅速。

(2) 与水生态承载力波动相接近的水生态、水安全准则中,生态补水比例、水域面积指数、饮用水水质达标率等各正向指标的提升,使得这两项准则综合得分值呈现出上升趋势,为水生态系统健康的恢复创造了条件。2010 年西安市生态补水比例以及园林绿化覆盖率仅为 3.09% 和 1.20%,而在 2018 年增长为 13.80% 和 3.14%,这两项指标的提高使得水生态系统储水能力增强,在维护水生态系统稳定性的同时,保证了水资源量的增加。同时,水域面积指数和河流断面水功能区水质达标率不断攀升,分别增加了 0.135 和 23.73%,使得用水安全也得到了保证。

(3) 水环境准则作为影响水生态承载力变化的又一重要因素,其负向指标的不断减小以及正向指标的增加,直接反映出人类活动对水生态系统的影响。2010—2018 年间,西安市加大了对水环境保护治理的力度。第二产业污水污染强度指数、城镇生活污水排放强度指数分别下降了 7.59 和 7.74,污水处理厂处理能力、再生水处理能力有了很大的提高,分别增加了 $163 \times 10^4 \text{ t/d}$ 和 $27.84 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,同时,

水环境治理投资比例也逐年增加。这些指标的变化,使得排入水体中的污染物有所减少,水环境的污染有所改善。

综上所述,对于受损的水生态系统,西安市在不断加大对其恢复力度。与 2011 年相比,2012 年西安市水域面积、园林覆盖率在积极的治理保护后均有所增加。同时各行业用水比例减少和用水效率均有明显提高,再生水利用量和污水处理厂处理能力也有所提高,排入水环境中的工业污染物、生活污水、农药化肥残留物有所减少。此外,西安加大了生态补水比例和水环境保护治理投资,此举极大地改善了城市水生态系统状况,2012 年西安市水生态承载力由Ⅳ级(超载)转为Ⅲ级(临界)。

2015 年后西安市加大了对节水型社会建设的推进,在农业灌溉和工业生产用水领域注重新技术的应用,对水环境保护的投资额也达到了历年最大。在长期有效的治理建设后,2016 年,西安市水生态承载力由Ⅲ级增长为Ⅱ级(良好),水生态系统状况明显好转。但由于 2016 年对水环境保护力度大,治理力度强,2017 年西安市水生态系统水环境治理方面达到了暂时性的饱和,虽然该年水生态承载力综合得分值相比 2016 年有所下降,但除去水环境治理保护投资额占比,其他各项指标均向有利的方向发展。并且经过 2016 年和 2017 年的治理保护,2018 年水生态承载力达到综合得分值最大值。2010—2018 年以来西安市多管齐下,从节水、用水、污水处理等各方面深化水生态系统的保护和修复工作,并取得了显著成效,使原本受损的水生态系统恢复为支撑城市发展的基石。

4.2 2013 和 2016 年水生态承载力分区评价

西安市于 2013 年开展了水生态文明城市建设工作。根据西安市整体水生态承载力评价结果,以及对试点开始年 2013 年和试点期末年 2016 年西安市各区(县)(西安市行政分区中莲湖区、新城区、碑林区合称城 3 区)水生态承载力进行评价分析,结果如图 5 所示。

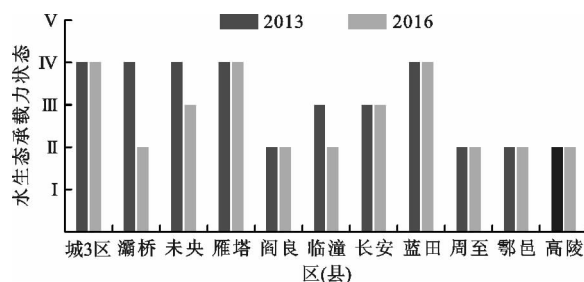


图5 2013 和 2016 西安市各区(县)水生态承载力状态

分析图5可知,2016年各区(县)水生态承载力综合得分较2013年相比均有所好转,其中,灞桥区、雁塔区、临潼区变化最大,出现了明显的等级变化。2013年西安市各区(县)水生态承载力除去阎良区、周至县、鄠邑区、高陵区外,大多处于Ⅲ~Ⅳ级,承载力较低。而2016年,在水生态文明城市建设持续开展下,原本位于Ⅳ级(超载)的灞桥区转为Ⅱ级(良好);未央区则转为Ⅲ级(临界);位于Ⅲ级的临潼区则转为Ⅱ级,其余各区(县)水生态承载力均有所提高,但无明显等级变化。

两年内水生态承载力状态持续位于各区(县)最低(Ⅳ级)的城3区、雁塔区、蓝田县,作为早期成立的区(县),历史悠久,人口密度大,第二、三产业较为集中,各产业用水量、污水排放量明显高于其他区(县)。此外,当地水资源过度开发利用,部分地区地下水超采比例严重,水环境保护治理程度相对于其他区(县)来说也较少,水生态系统状态受损严重。因此,应对上述区(县)现有水资源做出评价,确定开发保护比例,增加水环境保护投入,以促进水生态承载力恢复;同时应进一步调整、优化用水方式,促进节水新技术的发展,减少污水排放量,提高再生水利用率。

灞桥区、未央区、临潼区三区在水生态文明城市建设过程中恢复效果最明显。灞桥区、未央区位于西安市东北部,作为老市区和老工业基地,其第二、三产业发达,产业用水量大。但对比2013年与2016年相关指标数据可得,其万元GDP用水量下降,工业重复用水利用率上升,污水排放量减少,各项指标均朝着对生态系统恢复有利的方向发展;以农业为主导产业的临潼区,作为西安水资源最短缺的区(县)之一,在水生态文明城市建设中促进节水型社会建设,倡导节水农业,在实现农业高产的同时,水生态系统受到了极大的保护。

阎良区、周至县、鄠邑区、高陵区、长安区2016年水生态承载力等级与2013年相比并未发生变化,阎良区、周至县、鄠邑区、高陵区处于Ⅱ级(良好),长安区处于Ⅲ级(临界),虽然水生态承载力相比于其他区(县)较好,但其用水效率低,工业污水过度排放以及农药化肥大量使用对水生态环境的影响仍然不容忽视。因此,在满足社会经济发展的需求下要更加合理地配置水资源,推广节水新技术的发展,及时解决由于生产生活所带来的水环境问题。

5 讨论

本文结合2013-2016年西安市水生态文明城市

建设背景,选取试点建设前2010年到试点建设后2018年相关指标数据,对西安市总体水生态承载力、水生态承载力评价体系中四项准则及试点起始年份2013年和试点末期2016年西安市各区(县)水生态承载力进行了评价,根据承载力评价结果(图3、4、5),西安市2010-2018年水生态承载力总体呈现上升趋势,水生态系统健康逐渐恢复。根据前人研究,西安市在2005-2012年城市化建设进程中,水资源、水环境、水生态处在滞后阶段,刘姝芳等^[26]提出在试点建设前(2013年),西安市水生态文明综合指数属于中等水平。而2013年以后,西安市加强了城市水生态系统健康恢复工作,在试点期末(2016年)水生态文明综合指数达到优良水平,城市水生态系统健康处于超前阶段^[27-28]。但随着城市化进程的加快,诸如水资源过度开发利用、再生水利用率不高、农药化肥大量使用、水环境保护治理程度低等问题依然制约着西安市的发展。因此,对于水生态系统健康保护恢复工作,需从当下出发,以过往为借鉴,着眼于长期,力求城市建设与水生态系统和谐发展。

6 结论

(1)本文利用PCA模型,根据水资源、水生态、水环境、水安全及24项指标构建的评价指标体系,对西安市2010-2018年水生态承载力进行了评价分析,揭示了城市化进程下,西安市水生态承载力的变化规律。研究结果表明,西安市2010-2018年水生态承载力总体呈现上升趋势,由2010年的Ⅳ级(超载),最终恢复为2018年Ⅱ级(良好)。9年时间里,原本受损的西安市水生态系统明显好转。

(2)结合水生态文明城市建设,对试点成立年2013年和试点期末年2016年西安市水生态承载力进行分区评价。根据评价结果分析可得,2016年西安市各区(县)水生态承载力与2013年相比均有明显提高。其中,原本处于Ⅳ级(超载)的灞桥区转为Ⅱ级(良好);未央区由Ⅳ级转为Ⅲ级(临界);临潼区由Ⅲ级转为Ⅱ级;阎良区、周至县、鄠邑区、高陵区两年内水生态承载力均最高,为Ⅱ级;承载力为Ⅳ级的城3区、雁塔区、蓝田县以及处于Ⅲ级的长安区虽等级无变化,但水生态系统均有所恢复,各区(县)的水生态文明城市建设均取得显著成效。

(3)随着城市化进程的加快,在水生态文明城市建设积极开展下,西安市及其区(县)水生态系统会逐渐恢复,但由城市建设、经济增长等带来的水生态问题还在所难免。因此,必须根据原有的水生态

系统特点,合理调整水资源配置,发展节水、用水新技术,减少污水排放量,加强对再生水的使用,减少对水环境的污染,为西安市的水生态、水安全提供重要保障。

参考文献:

- [1] 杨法暄,郑乐,钱会,等.基于 DPSIR 模型的城市水资源脆弱性评价——以西安市为例[J].水资源与水工程学报,2020,31(1):77-84.
- [2] 唐继张,夏伟,周维博,等.基于关键绩效指标的西安市水循环健康评价[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):39-45+60.
- [3] 马艳,刘振,郑明.浅析西安市水生态文明试点城市建设[J].陕西水利,2017(5):69-70.
- [4] 王启帆.西安市水资源现状分析及保护措施[J].现代化农业,2019(12):29-31.
- [5] 张蓉珍,范华.2000-2011年西安市水环境演变与社会经济发展关系的量化分析[J].水资源保护,2015,31(5):67-71.
- [6] HAIRET T, WANG Weilong, LI Yuan, et al. Assessment of water ecological carrying capacity based on ecological network structure[J]. Journal of Environmental Accounting and Management, 2014, 2(4): 335-345.
- [7] 任晓庆,杨中文,张远,等.滦河流域水生态承载力评估研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(5):72-79.
- [8] 张盛,王铁宇,张红,等.多元驱动下水生态承载力评价方法与应用——以京津冀地区为例[J].生态学报,2017,37(12):4159-4168.
- [9] 黄琨,陈星.台州市椒江区水生态承载力量化与恢复潜力评估[J].水电能源科学,2018,36(4):33-36.
- [10] 许东阳,任永泰,王如意,等.基于 PSO-PPE 模型的黑龙江省水资源生态安全探析[J].中国环境监测,2019,35(4):109-114.
- [11] 雍志勤,张鑫.基于投影寻踪模型的榆林市水资源承载力研究[J].灌溉排水学报,2019,38(1):101-107.
- [12] DESSU S B, MELESSE A M, BHAT M G, et al. Assessment of water resources availability and demand in the Mara River Basin[J]. Catena, 2014, 115: 104-114.
- [13] 焦雯珺,闵庆文,李文华,等.基于 ESEF 的水生态承载力:理论、模型与应用[J].应用生态学报,2015,26(4):1041-1048.
- [14] 陈红,张晓惠,袁雪竹,等.基于 SPSS 的独流减河水生态水环境相关关系研究[J].安全与环境学报,2018,18(3):1203-1208.
- [15] WANG Tianxiang, XU Shiguo. Dynamic successive assessment method of water environment carrying capacity and its application[J]. Ecological Indicators, 2015, 52: 134-146.
- [16] 高宝,傅泽强,杨俊峰.水生态承载力评估技术指南初探[J].生态经济,2017,33(9):146-151.
- [17] 贺磊.基于熵权法-正态云模型的辽宁省水生态承载力评价[J].水资源开发与管理,2020(7):16-22.
- [18] 张黎明,赵岩,王红瑞,等.基于信息熵与灰关联的西安市城市经济与用水结构的耦合度研究[J].南水北调与水利科技,2017,15(4):187-192+202.
- [19] 孙佳乐,王颖,辛晋峰.汉江流域(陕西段)水生态承载力评估[J].水资源与水工程学报,2018,29(3):80-86.
- [20] WANG Shuo, XU Ling, YANG Fenglin, et al. Assessment of water ecological carrying capacity under the two policies in Tieling City on the basis of the integrated system dynamics model[J]. Science of the Total Environment, 2014, 472: 1070-1081.
- [21] 张远,周凯文,杨中文,等.水生态承载力概念辨析与指标体系构建研究[J].西北大学学报(自然科学版),2019,49(1):42-53.
- [22] BU Jiuhe, LI Chunhui, WANG Xuan, et al. Assessment and prediction of the water ecological carrying capacity in Changzhou city, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 123988.
- [23] 郑欣,程艳妹,任彩凤,等.鄂尔多斯市生态弹性力评价研究[J].生态科学,2019,38(5):185-192.
- [24] XU Qunjie, LI Hui, LI Qiaoxia. An improved index system of regional water ecological carrying capacity evaluation: A case study of Tieling City, China[J]. Advanced Materials Research, 2014, 869-870: 627-633.
- [25] DING Lei, CHEN Kunlun, CHENG Shenggao, et al. Water ecological carrying capacity of urban lakes in the context of rapid urbanization: A case study of East Lake in Wuhan[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2015, 89-90: 104-113.
- [26] 刘姝芳,毛豪林,张丹,等.西安市水生态文明城市试点建设成效评价[J].人民黄河,2019,41(5):82-85.
- [27] 陈媛媛,朱记伟,周蓓,等.基于系统动力学的西安市复合生态系统情景分析[J].水资源与水工程学报,2018,29(6):31-40.
- [28] 冯文文,郭梦,钱会,等.西安市城市化与水资源环境耦合关系研究及预测[J].水资源与水工程学报,2019,30(4):113-118+123.