

基于 DPSIRM 模型的太原市水资源承载力研究

赵磊, 王立权, 戴长雷, 庚军辉

(黑龙江大学 水利电力学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 基于 DPSIRM 模型, 结合太原市的水资源现状, 构建了包含驱动力、压力、状态、影响、响应、管理 6 个子系统, 选取 15 个评价指标, 运用熵权 TOPSIS 评价模型对 2011–2018 年太原市水资源承载力进行评价。同时, 采用障碍度模型对影响水资源承载力的关键因素进行分析。结果表明: 在研究期间内, 太原市水资源承载力 2011–2012 年为超载状态, 2013–2018 年为临界超载状态; 2015–2018 年太原市水资源承载力快速提升主要是由于状态、管理子系统的提升; 城镇人均生活用水量和地下水超采系数两项指标在未来还有很大的提升空间。

关键词: 水资源承载力; DPSIRM 模型; 熵权; TOPSIS 模型; 障碍度; 太原市

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)02-0109-07

Research on water resources carrying capacity of Taiyuan City based on DPSIRM model

ZHAO Lei, WANG Liquan, DAI Changlei, GENG Junhui

(School of Hydraulic & Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: Based on the DPSIRM model and combined with the *status quo* of Taiyuan's water resources, six subsystems including driving force, pressure, status, impact, response, and management are constructed, from which 15 evaluation indicators are selected, and then the entropy TOPSIS evaluation model is used to evaluate the water resources carrying capacity of Taiyuan City from 2011 to 2018. At the same time, the obstacle degree model is adopted to analyze the key factors affecting the carrying capacity of water resources. The results show that during the study period, the water resources carrying capacity of Taiyuan City was overloaded from 2011 to 2012 and improved to the critical point of overloading from 2013 to 2018. The rapid increase in the water resources carrying capacity of Taiyuan City from 2015 to 2018 was mainly due to the improvement of status and management subsystems. there is still much room for improvement in the two indicators of urban *per capita* domestic water consumption and groundwater overexploitation coefficient in the future.

Key words: water resources carrying capacity; DPSIRM model; entropy weight; TOPSIS model; obstacle degree; Taiyuan City

1 研究背景

水资源是人类赖以生存和发展的物质基础, 是自然资源的重要组成部分, 是经济社会可持续发展的重要保障。近些年来, 随着经济的快速发展和人口的不断增加, 我国很多城市出现了水资源短缺的问题, 这种紧迫的现状导致水资源供需平衡面临严峻的考验^[1-2]。水资源承载力是城市可持续发展的

一项基本指标和前提条件, 对以后的经济发展和城市规划有着深远的影响和重要意义^[3-4]。

近年来水资源承载力综合评价由定性评价转变为定量评价, 由依靠关键指标构建简单评价体系发展到利用多指标构建综合评价体系, 其中对指标体系的构建大致分为 3 类^[5], 第 1 类是对主要影响指标的提取, 如卢泽雨等^[6]基于改进的主成分分析法提取了 10 个与水资源承载力相关的指标, 王鸿翔

收稿日期: 2020-06-09; 修回日期: 2020-11-24

基金项目: 国家科技支撑项目(2014BAD12B01)

作者简介: 赵磊(1996-), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 研究方向为水文及水资源。

通讯作者: 王立权(1968-), 男, 山东临朐人, 博士, 教授, 研究方向为水资源、农业水土高效利用。

等^[7]将影响宁夏水资源承载力的 13 项主要指标归纳为 2 个独立的主成分;第 2 类是以经济、社会和水资源等子系统构建指标体系,如柴乃杰等^[8]构建了社会、经济、生态、水资源子系统对甘肃省水资源承载力进行综合评价研究,叶飞等^[9]建立了水资源-社会-经济-生态系统为基础的多层次评价体系;第 3 类是对指标按照固定的模型进行归类处理,如王建华等^[10]根据水资源承载力的新内涵提出了量质域流的指标体系,周云哲^[11]利用量质域流构建指标体系对黄河流域进行评价,许杨等^[12]基于 DPSIR 模型评价淮安市水资源承载力。

水资源系统是一个庞大的复杂系统,上述指标体系的构建,为进一步研究水资源承载力奠定了良好的基础,但也存在一些不足,如忽视了政府管理对水资源承载力的影响。为了更加准确地表征水资源承载力,基于 DPSIR 模型,引入“管理(M)”子系统,形成驱动力-压力-状态-影响-响应-管理系统,即 DPSIRM(driving force-pressure-status-impact-response-management)模型^[13],不仅能够兼顾社会、经济、生态环境等因素,同时考虑到政府对

于水资源的管理和调控,能够更全面地反映城市的水资源承载力^[14]。近些年来 DPSIRM 模型已经应用于社区人居环境安全^[15]、河长制综合评价^[16]、生态脆弱性^[17]、草原生态安全^[18]等多个方面。基于此,为了全面客观地进行水资源承载力评价,构建基于 DPSIRM 框架下的水资源承载力评价体系,采用熵权 TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution)模型和障碍度模型^[19-20]对太原市的水资源承载力进行评价和主要障碍因子识别,并结合相关政府文件进行分析,为太原市水资源承载力的发展提供科学依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况

太原市地处山西省的中北部、太原盆地北部,位于东经 111°30'~113°09'、北纬 37°27'~38°25'。全市总面积 6 878 km²,属于温带半干旱季风气候,人均水资源拥有量为全国人均水资源拥有量的 1/16,按照国际公认的标准,太原市属于极度缺水地区,水资源先天不足,时空分布不均。研究区域水系分布见图 1。



图 1 研究区域水系分布

2.2 数据来源

研究涉及到的数据主要来源于 2011-2018 年《山西省水资源公报》^[21]、2012-2019 年《太原市统计年鉴》^[22]等资料。

2.3 水资源承载力评价指标体系构建

以 DPSIRM 框架为基础,遵循代表性、独立性、系统性、可量化性的原则,选取 15 个指标构建太原

市水资源承载力综合评价体系,评价指标及其相应的分级标准如表 1 所示。驱动力(D)子系统包括人均 GDP(X_1)、人口密度(X_2)和第三产业占比(X_3),分别反映了经济、人口和产业结构对水资源承载力的驱动;压力(P)子系统表示城市发展所带来的用水压力,从用水量的角度出发,选取了万元 GDP 用水量(X_4)、城镇人均生活用水量(X_5)和农

田灌溉用水量(X_6)3 项指标;状态(S)子系统表示所评价地区自身水资源禀赋和水资源现状,其指标人均水资源量(X_7)反映地区自身水资源禀赋,降水量(X_8)直观体现了太原市的水资源现状;影响(I)子系统表示上述 3 个子系统给水资源承载力带来的影响,从水资源和水环境的角度分别选取了水资源开发利用率(X_9)和万元产值废污水排放量(X_{10});响应(R)子系统包括污水处理率(X_{11})和生态环境用水率(X_{12}),其中生态环境用水率代表对水污染和水生态的响应;管理(M)子系统表示政府部门出台相关政策和管理办法以加强对水资源的调控,其指标选取森林覆盖率(X_{13})、地下水超采系数(X_{14})和水利、环境和公共管理占固定投资的比例(X_{15})。

表 1 太原市水资源承载力评价体系及评价指标分级标准

目标层	准则层	指标层	性质	评价指标分级标准				
				I (严重超载)	II (超载)	III (临界超载)	IV (弱可载)	V (可承载)
水资源承载力	驱动力(D)	X_1 /元	+	< 6624	6624 ~ 12696	12696 ~ 18768	18768 ~ 24840	> 24840
		X_2 /(人 · km ⁻²)	-	> 500	400 ~ 500	300 ~ 400	200 ~ 300	< 200
		X_3 /%	+	< 55	55 ~ 60	60 ~ 65	65 ~ 70	> 70
	压力(P)	X_4 /m ³	-	> 220	140 ~ 220	60 ~ 140	24 ~ 60	< 24
		X_5 /(L · d ⁻¹)	-	> 140	120 ~ 140	100 ~ 120	85 ~ 100	< 85
		X_6 /(m ³ · hm ⁻²)	-	> 5000	4000 ~ 5000	3000 ~ 4000	2000 ~ 3000	< 2000
	状态(S)	X_7 /m ³	+	< 500	500 ~ 1000	1000 ~ 1700	1700 ~ 2200	> 2200
		X_8 /mm	+	< 200	200 ~ 500	500 ~ 800	800 ~ 1000	> 1000
	影响(I)	X_9 /%	-	> 70	60 ~ 70	50 ~ 60	40 ~ 50	< 40
		X_{10} /m ³	-	> 20	15 ~ 20	10 ~ 15	5 ~ 10	< 5
	响应(R)	X_{11} /%	+	< 80	80 ~ 85	85 ~ 90	90 ~ 95	> 95
		X_{12} /%	+	> 1.0	0.8 ~ 1.0	0.6 ~ 0.8	0.4 ~ 0.6	< 0.4
	管理(M)	X_{13} /%	+	< 15	15 ~ 25	25 ~ 30	30 ~ 40	> 40
		X_{14} /%	-	< 5	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	> 20
		X_{15} /%	+	< 5	5 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	> 20

2.4 熵权 TOPSIS 评价模型

熵权法是根据各指标的变异程度,利用信息熵计算指标权重的客观赋权方法,相比于主观赋权法,熵权法能够客观反映指标数据中的隐含信息,提高指标的分辨率,避免指标差异过小而导致的选择偏差。TOPSIS 法,又名逼近理想解排序法,是多目标决策分析中一种非常有效的方法。通过归一化后的数据规范化矩阵,检测评价对象与最优目标和最劣目标的距离来排序,若评价对象离最优目标最近同时也是远离最劣目标,则为最好^[23]。各指标分级标准阈值按照等级分为 4 个虚拟年,加入 TOPSIS 法的计算,可以得到适合太原市水资源评价体系的贴近度临界值。

(1)数据标准化。采用极值法对数据进行标准化处理,计算公式如下:

正向指标:
$$v_{ij} = \frac{r_{ij} - \min(r_{ij})}{\max(r_{ij}) - \min(r_{ij})} \tag{1}$$

负向指标:
$$v_{ij} = \frac{\min(r_{ij}) - r_{ij}}{\max(r_{ij}) - \min(r_{ij})} \tag{2}$$

式中: r_{ij} 为第 i 个指标第 j 年的初始值; v_{ij} 为第 i 个指标第 j 年的标准化值; $i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n$ 。

(2) 确定权重。权重计算公式如下:

$$w_i = \frac{1 - E_i}{m - \sum_{j=1}^m E_i} \tag{3}$$

$$E_i = -k \sum_{j=1}^m (p_{ij} \ln p_{ij}) \tag{4}$$

$$p_{ij} = \frac{v_{ij}}{\sum_{j=1}^m v_{ij}} \tag{5}$$

$$k = \frac{1}{\ln n} \quad (6)$$

式中: w_i 为第 i 个指标的权重; k 为玻尔兹曼常量; E_i 为第 i 个指标的信息熵; p_{ij} 为第 i 个指标第 j 年的特征比重; m 为评价指标数目; n 为年份数。

(3) 正负理想解距离计算。计算公式如下:

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_{ij} - y_i^+)^2} \quad (7)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_{ij} - y_i^-)^2} \quad (8)$$

$$y_i^+ = \max \{y_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m\} \quad (9)$$

$$y_i^- = \min \{y_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m\} \quad (10)$$

$$y_{ij} = w_i \cdot v_{ij} \quad (11)$$

式中: D_j^+ 为第 j 个年份与 y_i^+ 的距离; D_j^- 为第 j 个年份与 y_i^- 的距离; y_{ij} 为经标准化后的数值与权重相乘得到的加权数值; y_i^+ 为第 i 个指标的正理想解; y_i^- 为第 i 个指标的负理想解。

(4) 贴近度计算。计算公式如下:

$$C_j = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-} \quad (12)$$

式中: C_j 为第 j 年的评价数据与最优方案的贴近度, 贴近度 C_j 为介于 $[0, 1]$ 的数值, C_j 越大则第 j 年的水资源承载力越接近最优水平。

计算出的水资源承载力各评价等级的贴近度临界值如表 2 所示。

表 2 水资源承载力各评价等级的贴近度临界值

贴近度 C_j	等级	承载状态
$C_j \leq 0.0097$	I	严重超载
$0.0097 \leq C_j \leq 0.064$	II	超载
$0.064 \leq C_j \leq 0.267$	III	临界超载
$0.267 \leq C_j \leq 0.712$	IV	弱可载
$0.712 \leq C_j \leq 1$	V	可承载

2.5 障碍度模型

在水资源承载力评价的基础上, 分析影响水资源承载力的主要障碍因子。障碍度计算的具体方法是引入因子贡献度 F_i 、指标偏离程度 I_j 、障碍度 K_i 和 k_i 。因子贡献度 F_i 表示单因子对总体的影响; 指标偏离程度 I_j 表示单因子相对于承载力发展目标的差距, 通常用 $(1 - v_{ij})$ 表示, v_{ij} 为单项指标的标准化值; 障碍度 K_i 表示子系统指标对承载力水平的影响; 障碍度 k_i 表示单项指标对承载力水平的影响^[24]。计算公式如下:

$$K_i = \sum k_i \quad (13)$$

$$k_i = \frac{F_i \cdot I_j}{\sum F_j \cdot I_j} \quad (14)$$

3 结果分析与讨论

3.1 水资源承载力权重分析

由公式(1)~(6)计算得到太原市水资源承载力评价系统各指标的权重, 见表 3。通过对熵权的计算, 所有指标的熵权均大于等于 0.03, 符合理论熵权不小于 0.03 的要求^[25]。

表 3 太原市水资源承载力评价系统各指标权重

准则层	指标	指标权重	准则层权重
驱动力(D)	X_1	6.15	18.22
	X_2	4.95	
	X_3	7.12	
压力(P)	X_4	6.25	16.87
	X_5	5.38	
	X_6	5.24	
状态(S)	X_7	6.66	15.13
	X_8	8.47	
影响(I)	X_9	5.53	10.17
	X_{10}	4.64	
响应(R)	X_{11}	11.73	19.64
	X_{12}	7.91	
管理(M)	X_{13}	6.76	19.97
	X_{14}	6.66	
	X_{15}	6.55	

由表 3 可以看出, 指标层权重最大的 4 项分别为污水处理率(X_{11})、降水量(X_8)、生态环境用水率(X_{12})和第三产业占比(X_3), 准则层权重最大 2 项分别为管理(M)和响应(R)子系统。随着城市建设的不断完善, 生态环保意识的增加, 污水处理率和生态环境用水率反映了对于水污染、水生态的响应状况, 成为影响城市水资源承载力的关键因素; 太原市年际降水量分布不均, 降水作为太原市水资源的主要补给来源, 降水量决定了水资源的丰沛程度; 同时, 作为北方的工业重镇之一, 依托煤炭资源进行发展, 产业结构也在一定程度上影响着城市水资源承载力。

3.2 水资源承载力综合评价分析

由公式(7)~(12)计算得到 2011—2018 年太原市水资源承载力的综合贴近度以及各子系统的贴

近度,再根据表2可得出各年份太原市水资源承载

力综合评价等级,见图2。

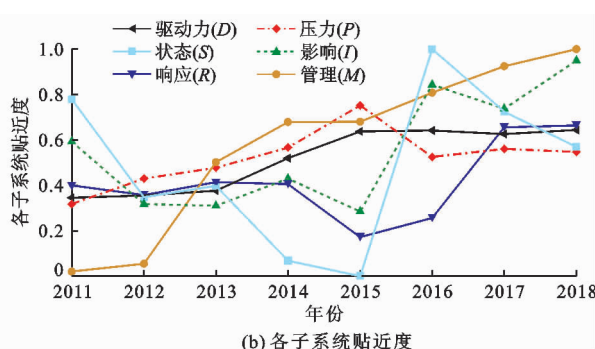
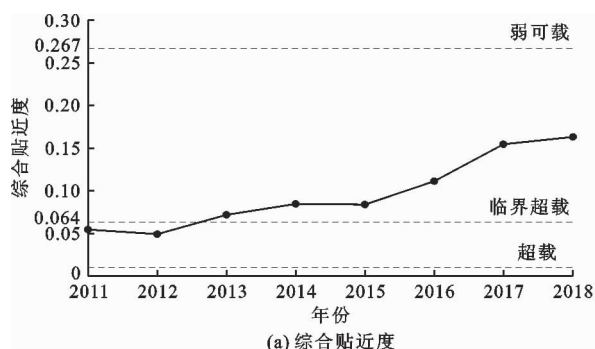


图2 2011-2018年太原市水资源承载力综合贴力度以及各准则层贴力度

由图2(a)可以看出,2011和2012年太原市水资源承载力属于超载状态,2013-2018年属于临界超载状态,2018年的贴力度为0.1631,约为2011年贴力度0.0546的3倍。研究时段内太原市水资源承载力总体发展呈上升趋势,可分为两个阶段:

第1阶段为2011-2015年,该阶段贴力度数值在超载和临界超载的分界线附近波动,发展变化相对平稳。由图2(b)可知,2011-2015年状态(S)子系统的贴力度呈减小趋势,而其余子系统的贴力度均呈增大趋势。究其原因是太原市积极建设“国家节水型城市”,并于2012年顺利通过水利部关于节水型社会试点工作的验收,在此期间万元GDP用水量、农田灌溉亩均用水量均减少了近30%,城镇人均生活用水量均低于《城市居民生活用水量标准》^[26]中140 L/d的要求。然而,由于降水量逐年减少,产水能力减弱,导致人均水资源量下降,该阶段生态环境用水率由10.2%下降至3.33%。作为全国著名的能源、重化工城市,其自身的用水基数较大,2015年属于平水年,降水量较多年平均值467.1 mm(1956-2000年系列平均值)仅减少3.4%,但地表水开发利用率却达到了170%以上,再加上研究区人口不断增长,水资源的需求量和使用量不断攀升,因此该阶段的水资源承载力整体水平相对较低。

第2阶段为2016-2018年,该阶段贴力度数值由2015年的0.0838增大至2018年的0.1631,增长率为95%,为高速发展阶段。其中,2015-2016年水资源承载力的快速发展主要是因为2016年为丰水年,水量相对丰沛,由2(b)可以看出,状态(S)子系统贴力度数值直线上升;2016-2018年水资源承载力快速发展主要是因为管理(M)子系统的大幅提升。其原因是国务院在2013年颁布了《实行最严格水资源管理制度考核办法》^[27],要求对各

地的水资源管理进行考核,太原市于2015年发布了《太原市人民政府关于实行最严格水资源管理制度的实施意见》,严格控制地下水资源开采,加大水资源治理投资力度,不断提高固定投资中水利、环境和公共管理设施所占比例,积极推进大水网工程和配套的小水网工程建设,增强城市污水处理能力。政策的落实和实现需要时间,很多工程在2018年才建成并投入使用,所以该阶段能够在降水量下降的情况下实现快速发展。

从整体上看,太原市为了缓解城市发展和水资源短缺之间的矛盾,实现城市的可持续发展,不断加强对水资源的管理和调度,使当地有限的水资源发挥最大的经济和社会效益,目前已取得了一定的成果。从子系统的角度可以看出,太原市水资源承载力与状态(S)、管理(M)子系统有着密切关系,主要是因为太原市自身产水能力不足,水资源开发利用率较高,并且随着经济社会的不断发展,对水资源的需求日益增大,相应的水环境、水生态问题逐渐增多。对此,太原市应提高中水回用率和工业用水重复利用率,合理利用城市雨水和矿坑排水,减少供水管道漏损率,进一步优化水资源配置,促进水资源的循环利用,弥补自身产水能力不足的短板,弱化状态(S)子系统对水资源承载力的影响,减少水污染事件的发生。

3.3 水资源承载力障碍度分析

在上述评价的基础上,对影响太原市水资源承载力的障碍因子进行诊断,按照各个指标的障碍度大小进行排序,找出主要影响因子,结果见表4。为了便于观察,表4中仅列出障碍度排序在前3位的因子进行障碍度排序分析。

分析表4可知,2011-2012年森林覆盖率(X_{13})为最主要的障碍因子。原因在于太原市为了建设

“国家园林城市”,将城市内部的绿化建设作为投资重点,建成区的绿化覆盖率、绿地率和人均公园绿地面积等指标稳步提升,增加了城市内部涵养水源的能力。2013—2015年,水资源开发利用率(X_9)、降水量(X_8)和人均水资源量(X_7)逐渐取代森林覆盖率(X_{13})成为最主要的障碍因子。原因在于太原市的地表水资源量主要依靠降水补给,地表径流量与降水量的分布规律基本一致,在这一期间降水量逐年下降,导致了地表水资源量的减少^[28];另外,煤矿的开采破坏了地下水的水文地质条件,地表径流通过采煤产生的缝隙大量渗漏至矿井中,河流出现干涸和断流的现象,使得地表水资源量严重减少^[29-30]。为了防止太原市城区地下水漏斗区的范围进一步扩大,实现水资源利用由地下水为主到地表水为主的根本性转变,太原市充分使用地表水,严格控制地下水资源的开采。2016—2018年,连续3年排序前3位的障碍度因子均为人口密度(X_2)、城镇人均生活用水量(X_5)和生态环境用水率(X_{12})这3项指标。原因在于,伴随着人们生活质量的提升,人们日常生活对水的使用量相应增加,而且人口数量不断增多,对水资源的需求量不断攀升。

表4 2011—2018年太原市水资源承载力主要障碍因子及其障碍度

年份	项目	指标排序		
		1	2	3
2011	障碍因子	X_{13}	X_3	X_{14}
	障碍度	0.41	0.29	0.27
2012	障碍因素	X_{13}	X_{15}	X_3
	障碍度	0.41	0.27	0.26
2013	障碍因子	X_3	X_{14}	X_9
	障碍度	0.23	0.21	0.20
2014	障碍因子	X_8	X_7	X_9
	障碍度	0.24	0.22	0.21
2015	障碍因子	X_9	X_7	X_8
	障碍度	0.28	0.24	0.24
2016	障碍因子	X_5	X_{12}	X_2
	障碍度	0.25	0.24	0.17
2017	障碍因子	X_2	X_{12}	X_5
	障碍度	0.22	0.19	0.18
2018	障碍因子	X_5	X_2	X_{12}
	障碍度	0.30	0.29	0.19

人口密度、城镇人均生活用水量和地下水超采

系数这3项指标将会是未来一段时间的主要障碍因素。由于太原市人口基数大,城镇人口占总人口的84.88%,城镇人均生活用水量的减少,将有效缓解太原市的水资源压力,并且随着城市污水处理工艺的改善,能够使用的其他水资源量也逐渐增多,同时地下水资源开采逐步减少,所以城镇人均生活用水量和地下水超采系数这两项指标有很大的提升潜力,对此太原市应做好与节水相关的宣传教育工作,合理制定水价,增强人们的节水意识,提高节水器具的使用率,加大其他水资源的使用量,保障水资源充分利用。

4 结 论

本文从DPSIRM模型出发,结合太原市水资源发展情况,选取15项评价指标构建太原市水资源承载力评价体系,能够较为清晰地反映太原市水资源承载力发展状态,引入4个虚拟年加入TOPSIS法计算得到水资源承载力综合评价分级标准。

结果表明,太原市水资源承载力在2011—2018年的发展呈上升趋势,2011—2012年为超载状态,2013—2018年为临界超载状态;状态(S)子系统是2015—2016年水资源承载力增长的主要原因,管理(M)子系统的提升促进了201—2018年水资源承载力的快速发展,可以看出政府管理对水资源承载力发展起到非常重要的作用;人口密度、城镇人均生活用水量和地下水超采系数是太原市水资源承载力未来一段时间的主要障碍因素,太原市可以通过减少城镇生活用水量和地下水水资源开采来提升水资源承载力。

参考文献:

- [1] 范嘉伟,黄锦林,袁明道,等.基于子系统熵权模型的珠三角水资源承载力评价[J].水资源与水工程学报,2019,30(3):100—105.
- [2] 布 瑶.基于模糊综合评价和主成分分析的水资源承载力评价研究[D].西安:西安科技大学,2019.
- [3] 张丽洁.黄河流域水资源承载力评价研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [4] 沈卓夫.基于主成分分析的长沙市水资源承载力评估研究[D].长沙:中南林业科技大学,2019.
- [5] 张宁宁.基于荷载均衡的黄河流域水资源承载力评价[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [6] 卢泽雨,周鹏飞,王丹阳.基于SAS与SPSS的改进主成分分析法在邯郸市水资源承载力中的应用[J].水利科技与经济,2019,25(3):8—14.

- [7] 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.
- [8] 柴乃杰,贾鼎元,曾小雪. 水资源承载力的灰色模糊可决策模型及应用[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(1): 70-76.
- [9] 叶飞,方国华,金菊良. 基于灰色聚类集对分析法的水资源承载力评价模型[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(3): 30-36.
- [10] 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.
- [11] 周云哲. 基于“量质域流”的水资源荷载均衡评价[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [12] 许杨,陈菁,夏欢,等. 基于 DPSR-改进 TOPSIS 模型的淮南市水资源承载力评价[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(4): 47-52+62.
- [13] 张凤太,王腊春,苏维词. 基于 DPSIRM 概念框架模型的岩溶区水资源安全评价[J]. 中国环境科学,2015,35(11): 3511-3520.
- [14] WANG Qiang, ZHAN Lina. Assessing the sustainability of the shale gas industry by combining DPSIRM model and RA-GA-PP techniques: An empirical analysis of Sichuan and Chongqing, China[J]. Energy, 2019, 176: 353-364.
- [15] 杨俊,李雪铭,李永化,等. 基于 DPSIRM 模型的社区人居环境安全空间分异[J]. 地理研究,2012,31(1): 135-143.
- [16] 沈晓梅,姜明栋. 基于 DPSIRM 模型的河长制综合评价指标体系研究[J]. 人民黄河,2018,40(8): 78-84+90.
- [17] 张峰. 基于 SD 和 DPSIRM 模型的饮马河流域生态脆弱性评价[D]. 长春:东北师范大学,2019.
- [18] 董振华. 基于 DPSIRM 和 SD 模型的草原生态安全评价研究[D]. 长春:东北师范大学,2017.
- [19] 左其亭,张志卓,吴滨滨. 基于组合权重的 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护,2020,36(2): 1-7.
- [20] 雷勋平,邱广华. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域资源环境承载力评价实证研究[J]. 环境科学学报,2016,36(1): 314-323.
- [21] 山西省水利厅. 山西省水资源公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011-2018.
- [22] 太原市统计局. 太原统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2012-2019.
- [23] 罗浩,周维博,白洁芳,等. 基于 GC-TOPSIS 模型的水资源管理绩效评价及障碍度分析[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(4): 26-31.
- [24] 周磊,黄秋昊. 基于灰色关联 TOPSIS 模型的城市土地效益评价及障碍因子诊断[J]. 水土保持研究,2014,21(4): 39-41.
- [25] 刘爽. 基于熵权法与 TOPSIS 模型的高效图书馆电子资源绩效评价实证研究[D]. 沈阳:辽宁大学,2016.
- [26] 中华人民共和国建设部,国家质量监督检验检疫总局. 城市居民生活用水量标准: GB/T 50331-2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [27] 国务院. 实行最严格水资源管理制度考核办法[EB/OL]. (2013-01-06) [2021-04-02] http://www.gov.cn/zwgk/2013-01/06/content_2305762.htm
- [28] 马强. 环境变化对太原地区水资源的影响研究[J]. 山西水利,2012,28(12): 1-2.
- [29] 李振栓,王晋伟. 采煤队山西地下水水资源的破坏及污染[J]. 中国煤炭地质,2019,31(5): 42-44+59.
- [30] 乔小娟,李国敏,周金龙,等. 采煤对地下水资源与环境的影响分析[J]. 水资源保护,2010,26(1): 49-52.

(上接第 108 页)

- [19] 蔡运龙,傅泽强,戴尔阜. 区域最小人均耕地面积与耕地资源调控[J]. 地理学报,2002,57(2): 127-134.
- [20] 唐华俊,李哲敏. 基于中国居民平衡膳食模式的人均粮食需求量研究[J]. 中国农业科学,2012,45(11): 2315-2327.
- [21] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报,2003,18(2): 189-196.
- [22] 古丽波斯丁·巴图,丁建丽,李艳菊. 干旱区土地利用/覆盖变化与生态环境效应研究——以渭-库绿洲为例[J]. 草地学报,2018,26(1): 53-61.
- [23] 李克红,任勤,侯燕君. 石羊河流域重点区土地利用现状遥感调查与解译分析[J]. 地下水,2017,39(6): 158-159.
- [24] 杨亮洁,杨永春. 石羊河流域土地利用变化对区域碳排放和碳吸收的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2017,53(6): 749-756+763.
- [25] 李森,王涛,张志山,等. 生态输水后民勤盆地绿洲适宜规模及结构变化[J]. 中国沙漠,2020,40(6): 91-97.
- [26] 王志成,蒋军新,方功焕,等. 水资源约束下的阿克苏河流域适宜绿洲规模分析[J]. 冰川冻土,2019,41(4): 986-992.
- [27] 孟阳阳,何志斌,刘冰,等. 干旱区绿洲湿地空间分布及生态系统服务价值变化——以三大典型内陆河流域为例[J]. 资源科学,2020,42(10): 2022-2034.