

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.02.02

基于 GRA - TOPSIS 法云南省水资源承载力 评价及障碍因子诊断

马继敏, 脱云飞, 王倩, 王飞, 郑阳, 杜文娟
(西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 云南省水资源时空分布不均, 供需矛盾日益突出。定量评价云南省水资源承载力, 诊断障碍因子, 可为云南省合理开发利用水资源提供理论依据。从水资源、生态环境、经济社会 3 个子系统中选取了 21 个指标构建评价指标体系, 运用 GRA - TOPSIS 法和障碍度模型测算云南省 2005 - 2018 年的水资源承载力, 诊断主要障碍因子。结果表明: 2005 - 2018 年云南省水资源承载力呈上升趋势, 综合指数由 0.468 4 增大到 0.612 3, 增幅为 30.72%。不同子系统的趋势变化和增长幅度差异较大, 水资源和生态环境在 2010 - 2011 年出现承载力指数大幅减小的情况; 2005 - 2018 年云南省水资源承载力的主要障碍因子为其他水源供水占比、人口密度、生态用水比例、第三产业占 GDP 的比重、废水排放总量、废水中 COD 排放量、人均水资源量。云南省可通过实施优化产业结构、提高水资源利用率、深入推进生态环境保护等措施提高水资源承载力, 以保障经济社会的可持续发展。

关键词: 水资源承载力; GRA - TOPSIS 法; 障碍因子; 云南省

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)02-0011-07

Evaluation of water resources carrying capacity in Yunnan Province based on GRA - TOPSIS and diagnosis of its obstacle factors

MA Jimin, TUO Yunfei, WANG Qian, WANG Fei, ZHENG Yang, DU Wenjuan

(College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: Water is unevenly distributed in time and space in Yunnan Province and the discrepancy between the demand and supply is becoming more and more prominent with the fast development of economy and society. In order to provide a theoretical basis for the rational utilization of water resources in Yunnan province, the water resources carrying capacity was evaluated and its obstacle factors were diagnosed. 21 indices were selected from three subsystems of water resources, ecology and environment, economy and society to construct an evaluation index system, and then the water resources carrying capacity of Yunnan Province from 2005 - 2018 was estimated based on grey relational analysis and technique for order preference by similarity to an ideal solution (GRA - TOPSIS), its main obstacle factors were diagnosed using obstacle degree model. The results show that the developing trend of water resources carrying capacity in Yunnan province from 2005 to 2018 was on the rise, with the composite index rising from 0.468 4 to 0.612 3, which increased 30.72%. The developing trend and increasing amplitude varied greatly from one subsystem to another; however, the water resources carrying capacity index of the water resources subsystem and ecology and environment subsystem decreased significantly during 2010 - 2011. The proportion of reclaimed water, population density, proportion of ecological water consumption, proportion of tertiary

收稿日期: 2021-08-10; 修回日期: 2022-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979134、51779113); 云南省教育厅科学研究基金项目(2021J0164); 西南林业大学环境污染与食品安全及人体健康省创新团队项目(202005AE160017); 四川省栗子坪国家级自然保护区陆生动物生境调查研究项目(2021ZD0125); 云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室项目(202105AG070002); 云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目; 云南省高校土壤侵蚀与控制重点实验室项目

作者简介: 马继敏(1993-), 女, 云南楚雄人, 硕士研究生, 主要从事农业水资源规划和利用研究。

通讯作者: 脱云飞(1976-), 男, 甘肃泾川人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业水肥高效利用研究。

industry in GDP, total wastewater discharge amount, COD discharge in wastewater and water resources per capita were diagnosed to be the key obstacles for the improvement of water resources carrying capacity in Yunnan Province. It is suggested that measures of industrial structure optimization, improvement of the utilization rate of water resources and further promotion of the protection of ecological environment can be carried out to improve the carrying capacity of water resources and ensure economic and social development of the study area.

Key words: water resources carrying capacity; grey relational analysis and technique for order preference by similarity to an ideal solution (GRA-TOPSIS); obstacle factor; Yunnan Province

1 研究背景

水资源是保障经济社会和生态环境协同发展的最大刚性约束。随着人口增长、城镇化快速推进、工业化发展速度加快以及人民生活水平日渐提高,水资源供需矛盾、水环境污染等全球性问题日益突出。水资源承载力为衡量区域可持续发展的重要参考指标,2020年自然资源部门印发的《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价指南(试行)》中明确指出,确定承载规模时水资源为主要约束之一,缺水地区应重点考虑水资源平衡。水资源承载力作为资源环境承载能力的重要组成部分,对区域未来水资源、经济社会及生态环境之间的协调发展具有重要影响和深远意义。

国外对水资源承载力的研究主要集中在城市水资源管理与评价^[1]以及农业领域^[2]。水资源承载力作为城市可持续发展规划决策的辅助要素,尤其在水资源匮乏国家,考虑水资源需求对减轻供水压力至关重要^[3]。受水体污染、城市化和气候等因素的影响,可利用水量减少,灌溉农业的可持续发展也受到威胁^[4],水资源也成为农业发展的限制性因素,评估区域水资源承载力,合理安排农业结构,才能促进农业可持续发展。国内对水资源承载力的研究最早源于新疆水资源软科学课题组对水资源承载力的定义^[5],此后,水资源承载力的定义可大致归纳为水资源开发利用的最大能力^[6]和水资源最大支撑规模两种类型^[7]。水资源与经济社会、生态环境的协调发展为该领域的研究热点之一^[8-10],目前对水资源承载力的研究已从狭义水资源系统过渡到水-生态-经济社会复合系统^[11-13]。复合生态系统是人与自然和谐共生的一种状态,生态环境为经济社会发展的载体,而经济社会发展水平又会影响水资源的利用效率。因此,水资源承载力的评价需要以水循环系统为基础,通过耦合经济社会及生态环境子系统的用水需求进行度量。

近年来,国内学者针对云南省水资源承载力展

开了定性和定量研究。研究区域主要集中在全省范围^[14-15]、人口密度较大的滇中地区^[16-17]以及具有典型喀斯特地貌的滇东南地区^[18]。学者们积极探索以云南省为研究区域的各种水资源承载力模型的应用,但针对水资源承载力制约因素的研究相对较少^[19-20]。因此,本文基于水-生态-经济社会复合系统理论,采用GRA-TOPSIS(grey relational analysis and technique for order preference by similarity to an ideal solution)法对云南省水资源承载力进行测算,并利用障碍度模型诊断障碍因子。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

云南省位于我国西南边陲,属山地高原地形。境内河网密集,地跨长江、珠江、元江、澜沧江、怒江、大盈江6大水系。云南省水资源总量丰富,占全国总量的1/7。但受地形、海拔、降水量时空分布和经济社会发展等因素的影响,水资源空间分布极不均匀,总趋势为西多东少,南多北少,山区多,河谷平坝少。山区占全省国土面积的94%,水资源总量丰富,但用水需求较小;坝区占全省国土面积的6%,集中了2/3的人口和1/3的耕地,但水资源量仅占全省总量的5%,因而水资源短缺,城镇水资源供需矛盾尤为突出。全省水资源开发利用率仅为6.9%,水资源与经济发展要素不匹配,重要经济区资源性及水质性缺水严重。随着城镇化进程日益加速,更多人口流动到坝区,水资源与经济社会发展之间的矛盾更加突出。同时,云南省干旱频发,有“三年一大旱,一年一小旱”之说。

2.2 数据来源

本文原始数据来源于2005-2018年云南省统计年鉴、水资源公报、环境状况公报以及中国环境统计年鉴。

2.3 研究方法

2.3.1 指标标准化 采用min-max标准化法对原始数据进行线性变换,实现对原始数据无量纲化处理,计算公式如下:

正向指标标准化:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \quad (1)$$

逆向指标标准化:

$$y_{ij} = \frac{\max x_j - x_{ij}}{\max x_j - \min x_j} \quad (2)$$

式中: y_{ij} 为指标标准化值; x_{ij} 为第 i 年第 j 个评价指标原始数据; $\max x_j$ 、 $\min x_j$ 分别为第 j 个评价指标最大值和最小值。

经过指标标准化后,构建决策矩阵 Y 。

$$Y = (y_{ij})_{m \times n} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

2.3.2 指标权重的确定 CRITIC (criteria importance through intercriteria correlation) 法为一种客观赋权法,由 Diakoulaki 于 1995 年提出。该方法以指标间对比强度和冲突性为基础确定客观权重。但单一 CRITIC 法未考虑指标间的离散性,而熵权法则有效弥补了该方法的不足^[21]。因此,本文基于熵权法和 CRITIC 法进行组合赋权。

(1) 熵权法。熵权法为利用熵值来判断某个指标的离散程度,由此确定该指标权重的一种方法。针对指标数据标准化后出现数值为 0 的情况,为避免出现 $\ln 0$,将标准化后的值用 0.000 001 代替。计算步骤如下:

① 计算第 j 个指标下,第 i 年样本值占该指标的比重 p_{ij}

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \quad (4)$$

② 计算第 j 个指标的熵值 e_j

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m (p_{ij} \cdot \ln p_{ij}) \quad (5)$$

式中: $k = \frac{1}{\ln m}$ 。

③ 计算第 j 个指标的权重 w_{ej}

$$w_{ej} = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (6)$$

(2) CRITIC 法。CRITIC 法通过指标间对比强度(变异性)和冲突性来综合衡量各个指标权重。计算步骤如下:

① 计算第 j 个指标的标准差 σ_j

② 计算指标间的相关系数 r_{ij}

$$r_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)(y_j - \bar{y}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2 \sum_{i=1}^m (y_j - \bar{y}_j)^2}} \quad (7)$$

指标间冲突性以指标间的相关系数为基础,用 R_j 表示,其计算式为:

$$R_j = \sum_{i=1}^m (1 - r_{ij}) \quad (8)$$

③ 计算第 j 个指标的权重 w_{cj}

$$w_{cj} = \frac{c_j}{\sum_{j=1}^n c_j} \quad (9)$$

$$c_j = \sigma_j R_j \quad (10)$$

式中: c_j 为第 j 个指标包含的信息量,其值越大,表示指标所包含的信息量越大,则该指标的相对重要性也越大。

(3) 组合赋权。本文采用“乘法”集成法计算综合权重,实现熵权法和 CRITIC 法两种客观赋权法间的优势互补。综合权重 w_j 的计算式如下:

$$w_j = \frac{w_{ej} w_{cj}}{\sum_{j=1}^n w_{ej} w_{cj}} \quad (11)$$

2.3.3 GRA-TOPSIS 模型 TOPSIS 法是基于对评价对象与最优方案接近程度进行排序的多目标决策方法,即对评价对象的相对优劣进行判断。灰色关联法(GRA)的核心是用灰色关联度来描述评价指标之间的强弱、大小和次序。GRA-TOPSIS 法可以更系统、更确切地体现备选方案与理想方案之间的接近程度,为最终决策提供依据^[22]。因此,本文基于 GRA-TOPSIS 法构建云南省水资源承载力评价模型。计算步骤如下^[19]:

(1) 构建加权决策矩阵。根据各指标权重,建立规范加权决策矩阵 Z :

$$Z = (z_{ij})_{m \times n} = (w_{ij} \cdot y_{ij})_{m \times n} \quad (12)$$

(2) 确定各个指标的正理想解和负理想解。

正理想解:

$$z_j^+ = \{ \max z_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m \} \quad (13)$$

负理想解:

$$z_j^- = \{ \min z_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m \} \quad (14)$$

(3) 确定各评价对象到正、负理想解的欧式距离。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^+)^2} \quad (15)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2} \quad (16)$$

(4) 计算灰色关联度。

① 计算第 i 年样本与正理想解关于第 j 个指标的灰色关联系数

$$s_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j \Delta z_{ij} + \rho \max_i \max_j \Delta z_{ij}}{\Delta z_{ij} + \rho \max_i \max_j \Delta z_{ij}} \quad (17)$$

$$\Delta z_{ij} = |z_j^+ - z_{ij}| \quad (18)$$

式中： $\min_i \min_j \Delta z_{ij}$ 为两级最小差； $\max_i \max_j \Delta z_{ij}$ 为两级最大差； ρ 为分辨系数，取值范围为 $[0, 1]$ ，本文取值为0.5。

② 计算第*i*年样本与正理想解的关联度

$$K_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n s_{ij}^+ \quad (19)$$

同理，可计算得到第*i*年样本与负理想解的关联度 K_i^- 。

(5) 计算相对贴近度。

① 对欧式距离和关联度进行无量纲化处理

$$\varphi_i = \frac{\Phi_i}{\max \Phi_i} \quad (20)$$

式中： Φ_i 为欧式距离 D_i^+ 、 D_i^- 和灰色关联度 K_i^+ 、 K_i^- ； φ_i 为无量纲化后的欧式距离 d_i^+ 、 d_i^- 和灰色关联度 k_i^+ 、 k_i^- 。

② 计算相对贴近度 T_i

$$T_i = \frac{e_1 d_i^- + e_2 k_i^+}{(e_1 d_i^- + e_2 k_i^+) + (e_1 d_i^+ + e_2 k_i^-)} \quad (21)$$

式中： e_1 、 e_2 为评价者的偏好程度，且 $e_1 + e_2 = 1$ ，本文取值为 $e_1 = 0.6$ ， $e_2 = 0.4$ 。

③ 样本排序

T_i 为样本在变化上与正理想解的贴近程度。 T_i 越大，表示样本越贴近正理想解，即表明第*i*年水资源承载力越高。

2.3.4 障碍度模型 障碍度模型通过挖掘阻碍事物发展趋势和发展程度的影响因子，对评价目标的水平或者程度进行病理诊断，确定主要障碍因子。因此，本文运用障碍度模型来测算水资源承载力指标层障碍度，对指导和调整水资源利用方向具有重要意义。障碍度主要涉及3个衡量指标，即因子贡献度、指标偏离度和障碍度^[20]。

① 计算因子贡献度 F_j

$$F_j = w_j \cdot b_{ij} \quad (22)$$

式中： w_j 为第*j*个单项指标的综合权重； b_{ij} 为第*j*个单项指标所属的第*i*个准则层权重。

② 计算指标偏离度 I_j

$$I_j = 1 - y_{ij} \quad (23)$$

③ 计算障碍度 N_j

$$N_j = \frac{F_j \cdot I_j}{\sum_{j=1}^n (F_j \cdot I_j)} \times 100\% \quad (24)$$

式中： N_j 为第*j*个指标对水资源承载力的障碍度，%，其值越大，表示该指标对水资源承载力的制约性越大。

3 结果与分析

3.1 评价指标体系的构建

以水-生态-经济社会复合系统为基础，根据综合性、代表性、层次性、可操作性等指标选取原则，参考现有研究成果^[23-24]，综合考虑云南省水资源特征、生态环境质量和经济社会发展程度，选取21个评价指标构建以云南省水资源承载力为目标层，包括水资源、生态环境和经济社会3个子系统的评价指标体系，如表1所示。

3.2 云南省水资源承载力评价

基于GRA-TOPSIS法构建的云南省水资源承载力评价模型，分析测算了云南省2005-2018年综合水资源承载力及其各子系统承载力，测算结果用相对贴近度来反映，如图1所示。

根据图1对2005-2018年云南省水资源承载力及其各子系统承载力的变化情况分析如下：

(1) 综合水资源承载力变化分析。云南省综合水资源承载力部分年份存在降低现象，但总体呈上升趋势，相对贴近度由2005年的0.4684提高到2018年的0.6123，年均增长率为3.06%。根据相对贴近度的变化趋势，研究时段内可大致分为3个阶段：

第1阶段为2005-2010年，水资源承载力呈波动上升趋势，贴近度由0.4684提高到0.5713，年均增长率为4.27%，其中2005-2006年和2008-2009年较前一时期略有下降。此阶段云南省经济发展的主要依托为本省的资源优势，资源型粗加工业所占比重大，2005年以来，重工业占规模以上工业比重超过了50%，工业产品以初级加工化为主，资源性、原料型工业为重工业的主体；支柱产业结构单一，烟草工业增加值占全省规模以上工业的比重达36%以上。城镇化率稳步提升，从2005年到2010年提升了6.5%，但仍低于全国平均水平，2009年低于全国平均水平的12.6%。该阶段云南省基础设施建设不能满足环境保护的需要，污染控制能力偏弱，污水无序排放，加重了当地水环境污染。但云南省正视该问题，逐步完善措施，促进了生态环境和经济社会的协同发展。通过完善基础设施，云南省城市污水处理率从2005年的59.3%提高到了2010年的93.4%；水土流失治理面积逐年增加，

2005年治理面积为 $398.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$,至 2010 年增加到了 $555.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。同时,云南省着力发展旅游业等第三产业,促产业结构调整,第三产业占 GDP 的比重从 2005 年的 35.2% 增加到了 2010 年的

40.0%。其次,以云南省九大高原湖泊为主的水污染防治和重点流域重金属污染防治也在积极推进。因此该阶段云南省综合水资源承载力呈上升趋势,且仍有较大的提升空间。

表 1 云南省水资源承载力评价指标体系

目标层	准则层	指标层	单位	指标选取意义	效应	权重		
						熵权法	CRITIC 法	综合权重
水资源子系统 M_1		产水模数 X_1	m^3/m^2	反映区域单位面积产水能力	正向	0.0430	0.0451	0.0403
		人均水资源量 X_2	m^3	反映人均可利用水资源量	正向	0.0421	0.0474	0.0414
		水资源开发利用率 X_3	%	反映区域水资源开发利用状况	正向	0.0351	0.0316	0.0230
		综合耗水率 X_4	%	反映水资源利用效率	正向	0.0332	0.0293	0.0202
		年平均降雨量 X_5	mm	反映区域自然降水补给程度	正向	0.0369	0.0414	0.0318
		年末蓄水总量 X_6	10^8 m^3	反映区域蓄洪补枯状况	正向	0.0285	0.0395	0.0234
		其他水源供水占比 X_7	%	反映水资源再利用程度	正向	0.0690	0.0505	0.0724
		水功能区水质总体达标率 X_8	%	反映水功能区水质的总体状况	正向	0.0413	0.0473	0.0406
水资源承载力子系统 M_2	生态环境	森林覆盖率 X_9	%	可持续地反映水资源更新的基础	正向	0.0703	0.0409	0.0598
		废水排放总量 X_{10}	10^4 t	反映区域内需要治理的废水总量	逆向	0.0348	0.0750	0.0542
		废水中 COD 排放量 X_{11}	10^4 t	反映废水的污染程度	逆向	0.0655	0.0834	0.1135
		城市污水处理率 X_{12}	%	反映城镇对污水的处理效率	正向	0.0338	0.0549	0.0386
		水土流失治理面积 X_{13}	10^3 hm^2	反映区域生态环境治理状况	正向	0.0610	0.0396	0.0502
		生态用水比例 X_{14}	%	反映生态系统对水资源的需求	正向	0.0750	0.0474	0.0739
		人均公园绿地面积 X_{15}	m^2	反映人居生态环境状况	正向	0.0339	0.0410	0.0289
		人均 GDP X_{16}	元	反映区域整体经济状况	正向	0.0578	0.0379	0.0456
经济社会子系统 M_3		城镇化率 X_{17}	%	反映城镇化程度	正向	0.0527	0.0380	0.0417
		人口密度 X_{18}	人/ km^2	反映单位国土面积人口压力	逆向	0.0452	0.0962	0.0904
		第三产业占 GDP 的比重 X_{19}	%	反映地区经济结构优化程度	正向	0.0682	0.0387	0.0548
		灌溉覆盖率 X_{20}	%	反映区域农业灌溉发展水平	正向	0.0436	0.0327	0.0296
		万元 GDP 用水量 X_{21}	m^3	反映水资源的经济效益	逆向	0.0292	0.0422	0.0256

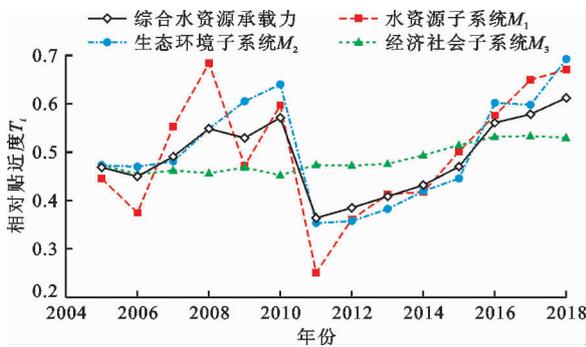


图 1 2005 - 2018 年云南省综合水资源承载力及其各子系统承载力评价结果

第 2 阶段为 2010 - 2011 年,综合水资源承载力大幅降低,相对贴适度由 0.571 4 减小至 0.363 8,降幅达 36.32%。2010 年云南省遭遇百年一遇全省性特大旱灾,2011 年为特枯水年,降雨量仅为 985.2 mm,比常年偏少 23%。全省河道平均来水量较历

史平均水平偏少 33.8%,2011 年年末蓄水量仅为 $47.39 \times 10^8 \text{ m}^3$,为 1994 年以来同期最少蓄水量。同时,经济社会加速发展,2011 年 GDP 比上年增长 13.7%,而生态用水占比仅为 0.75%,废水中 COD (chemical oxygen demand) 排放量翻一番,生态环境受到了极大挑战。在水资源、经济社会、生态环境共同压力下综合水资源承载力在 2011 年降至最低。

第 3 阶段为 2011 - 2018 年,综合水资源承载力连年稳步提高,相对贴适度由 0.363 8 提高到了 0.612 3,年增长率达 7.83%。十二五期间云南省加快转变经济发展方式,产业结构逐步调整为“三二一”,第三产业占 GDP 的比重达到了 41.8%。在“一带一路”倡议的背景下云南省抓住发展机遇,不断优化产业结构,在一定程度上减弱了自然资源对经济社会发展的约束。云南省深入贯彻绿色经济强省政策,将生态环境保护摆在突出位置,至 2018 年,

全省森林覆盖率达 55.04%。创新绿色发展路径,减轻资源环境压力,万元国内生产总值用水量逐年减少,从 2011 年的 165 m³ 降至 2018 年的 87 m³。通过多方努力减少水资源过量消耗,提高了水资源承载力。

(2)各子系统承载力变化分析。2005-2018 年云南省水资源子系统承载力可分为两个阶段:第 1 个阶段为 2005-2011 年,水资源子系统承载力有明显大幅度的波动,相对贴进度介于 0.25~0.69 之间,最大变化幅度为 47.47%,最小变化幅度为 15.84%;第 2 个阶段为 2011-2018 年,水资源子系统承载力呈迅速增长趋势,相对贴进度由 0.2509 增大到 0.6709,年均增长率达 15.77%。在研究时段内,早期云南省水资源子系统较不稳定,主要依赖自然降水补给,容易遭受气候条件的干扰。后期水资源总量相对稳定,加上各类节水措施的运用,水资源利用效率增加,系统稳定性增强,逐步减小了气候条件的影响。

生态环境子系统承载力总体呈上升趋势,研究时段大致分为 3 个阶段:第 1 阶段为 2005-2010 年,生态环境子系统承载力呈明显上升趋势,年均增长率达 10.06%;第 2 阶段为 2010-2011 年,生态环境子系统承载力大幅降低,降幅达 44.78%;第 3 阶段为 2011-2018 年,生态环境子系统承载力呈明显上升趋势,年均增长率达 10.06%,其中 2016 年涨幅最大,较上一年度增长了 35.04%。云南省生态环境基础好,环境容量大,但敏感脆弱。经历了 2009-2010 年持续加重的干旱之后,云南省生态环境受损,导致其承载力急剧下降。但生态环境保护为云南省工作重点之一,经长期努力生态环境质量得到了持续改善。

2005-2018 年云南省经济社会子系统承载力总体呈小幅波动上升趋势,但总体增长率和年均增长率较小,相对贴进度在 0.45~0.54 之间。经济社会子系统变化趋势最为平缓,没有大幅度涨落。由此说明,经济社会子系统相对稳定,抗干扰能力较强,但该系统仍有较大的发展空间。

3.3 云南省水资源承载力障碍因子诊断

利用障碍度模型对 2005-2018 年云南省水资源承载力障碍度进行测算,按照障碍度 $N_j \geq 5.0\%$ 的标准进行筛选,并对频率从高到低进行排序,以诊断云南省水资源承载力障碍因子,确定障碍因子主次关系。得出的各主要障碍因子频率如表 2 所示。

由表 2 可知,2005-2018 年云南省水资源承载

力障碍因子出现频率最高为其他水源供水占比 (X_7),出现频率为 92.86%;其次为人口密度 (X_{18})、生态用水比例 (X_{14})、第三产业占 GDP 的比重 (X_{19}),出现频率分别为 78.57%、71.43%、71.43%;再次为废水排放总量 (X_{10})、废水中 COD 排放量 (X_{11})、人均水资源量 (X_2),出现频率均为 57.14%。在研究时段内仅 2009 年出现年平均降雨量 (X_5) 障碍度 $\geq 5.0\%$ 的情况。主要原因为 2009 年为研究时段年平均降雨量最少的一年,年平均降雨量对水资源承载力制约性明显增强。

表 2 云南省水资源承载力主要障碍因子频率表

障碍因子	频次	频率/%
X_7	13	92.86
X_{18}	11	78.57
X_{14}	10	71.43
X_{19}	10	71.43
X_{10}	8	57.14
X_{11}	8	57.14
X_2	8	57.14
X_1	6	42.86
X_9	6	42.86
X_{13}	6	42.86
X_{16}	6	42.86
X_{17}	6	42.86
X_8	3	21.43
X_{20}	3	21.43
X_5	1	7.14

从障碍因子的分类来看,排名前 12 的障碍因子中,属于水资源子系统的有 3 个,属于生态环境子系统的有 5 个,属于经济社会子系统的有 4 个。再次验证水资源承载力是一个水资源与生态环境、经济社会耦合的系统,系统内各因素之间具有相互影响、相互制约的作用。

针对表 2 中发生频率大于 50% 的 7 项指标,绘制 2005-2018 年主要障碍因子热点图,如图 2 所示。

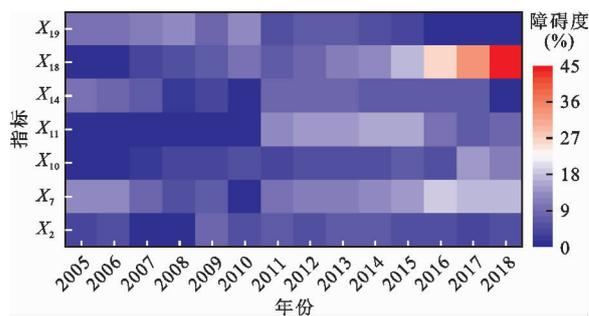


图 2 2005-2018 年云南省水资源承载力主要障碍因子热点图

由图 2 可以看出,其他水源供水占比(X_7)、废水排放总量(X_{10})及人口密度(X_{18})的障碍度有逐年增大的趋势,特别是人口密度(X_{18})障碍度,在 2012 年之后增幅较大,最大增幅达 53.13%。因此,云南省应注重资源环境与经济社会协调发展,多渠道提高水资源利用率,开展水污染防治,保护生态环境,转变经济发展方式,从而提高水资源承载力。

4 讨 论

在已有研究的基础上,以水资源最大支撑规模为理论基础,基于水资源-生态环境-经济社会复合系统构建评价指标体系,运用 GRA-TOPSIS 模型量化云南省水资源承载力,同时运用障碍度模型识别影响水资源承载力的主要因素。根据评价结果,云南省水资源承载力总体上呈上升趋势。但云南省水资源主要依靠自然降水补给,水资源承载力年际变化较大,如遇到枯水年,水资源承载力将大幅降低。随着城镇化进程的加快,水污染、水资源利用率低等问题仍为阻碍云南省经济发展的障碍。因此,长期实行水资源保护政策十分必要,尤其在水资源紧缺地区。

降雨分布不均也为云南省水资源系统的突出特点,其对水资源承载力的影响有待进一步研究,以便针对不同地区提出更加合理的水资源管理措施。

5 结 论

(1)2005-2018 年云南省水资源承载力总体呈上升趋势,综合指数由 2005 年的 0.468 4 提高到了 2018 年的 0.612 3,涨幅为 30.72%,年均增长率为 3.06%。但水资源承载力的稳定性和抗干扰能力不足,且仍有较大的提升空间;水资源、生态环境及经济社会 3 个子系统的承载力总体呈上升趋势,受干旱影响,2010-2011 年水资源和生态环境子系统出现承载力指数大幅降低的情况;经济社会子系统变化趋势较为平缓。

(2)2005-2018 年云南省水资源承载力主要障碍因子为其他水源供水占比、人口密度、生态用水比例、第三产业占 GDP 的比重、废水排放总量、废水中 COD 排放量以及人均水资源量,该几项指标的发生频率均大于 55%。其中,其他水源供水占比、废水排放总量、人口密度障碍度有逐年增大的趋势,人口密度的增大趋势尤为明显。

(3)在环境友好型社会建设的推动下,云南省水资源承载力有所提升,但城镇化和经济增长仍加

剧了水资源的供需矛盾。因此,必须充分考虑区域水资源特点,加强基础设施建设和优化产业布局,合理配置水资源,降耗减排,提高雨水利用率和污水回用率,为云南省经济社会发展提供水资源保障。

参考文献:

- [1] WIDODO B, LUPYANTO R, SULISTIONO B, et al. Analysis of environmental carrying capacity for the development of sustainable settlement in Yogyakarta urban area[J]. Procedia Environmental Sciences, 2015, 28: 519-527.
- [2] DAS B, SINGH A, PANDA S N, et al. Optimal land and water resources allocation policies for sustainable irrigated agriculture[J]. Land Use Policy, 2015, 42: 527-537.
- [3] AIT-AOUDIA M N, BEREZOWSKA-AZZAG E. Water resources carrying capacity assessment: The case of Algeria's capital city[J]. Habitat International, 2016, 58: 51-58.
- [4] SINGH A. Conjunctive use of water resources for sustainable irrigated agriculture[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1688-1697.
- [5] 新疆水资源软科学课题组. 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.
- [6] 许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究——以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报, 1993, 8(3): 229-237.
- [7] 施雅风, 曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [8] 郭利丹, 周海炜, 夏自强, 等. 丝绸之路经济带建设中的水资源安全问题及对策[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 114-121.
- [9] 姜秋香, 王天, 王子龙, 等. 基于 EBM 的水资源失衡风险导致的社会经济损失模型及应用[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 104-113.
- [10] 陈晓, 李景保, 王飞, 等. 近 10 年间南京市生态环境与水资源的耦合关系[J]. 水电能源科学, 2017, 35(7): 65-68.
- [11] 张风太, 苏维词. 贵州省水资源-经济-生态环境-社会系统耦合协调演化特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(6): 44-49.
- [12] 岳启蒙, 文倩, 贺奕, 等. 水生态文明城市建设对城市水生态承载力的影响——以武汉市为例[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5586-5597.
- [13] 杨莹, 侯凯旋, 岳卫峰, 等. 基于复合系统相互作用关系的水资源承载力研究——以巩义市为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 669-676.
- [14] 伍文琪, 罗贤, 黄玮, 等. 云南省水资源承载力评价与时空分布特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(7): 1517-1524.
- [15] 杨鑫, 王莹, 王龙, 等. 基于集对分析理论的云南省水资源承载力评估模型[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 98-102.

(下转第 26 页)

- 源与环境,2021,30(5):1110-1120.
- [24] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part 1: Model development[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [25] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [26] MOTOVILOV Y G, GOTTSCHALK L, ENGELAND K, et al. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999(98-99): 257-277.
- [27] 刘燕. 南方典型小流域农业非点源污染模拟与分析[D]. 赣州:江西理工大学,2020.
- [28] 张洋,邓玉,倪福全,等. 基于SWAT模型分析岷沱江流域蓝/绿水资源量的时空变化特征[J]. 中国农业气象,2020,41(6):345-356.
- [29] MEENA M. Rainfall statistical trend and variability detection using Mann-Kendall test, Sen's slope and coefficient of variance—A case study of Udaipur District (1957-2016)[J]. Applied Ecology and Environmental Sciences, 2020, 8(1): 34-37.
- [30] 周珍. 基于Mann-Kendall的嘉陵江流域降水量时空分布规律研究[J]. 水资源开发与管理,2021(3):25-28+42.
- [31] 周霄,刘强. 浑河流域沈抚段区域丰平枯年型划分[J]. 科技视界,2016(1):52+91.
- [32] 杨军,张会兰,庞建壮. 嘉陵江流域降水集中度的时空变异与驱动因素研究[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(4):849-860.
- [33] 王琼. 1962-2011年长江流域极端气温和降水事件变化研究[D]. 兰州:西北师范大学,2014.
- [34] 范利杰,穆兴民,赵广举. 近50a嘉陵江流域径流变化特征及影响因素[J]. 水土保持通报,2013,33(1):12-17.
- [35] 陈桂亚,CLARKE D. 气候变化对嘉陵江流域水资源量的影响分析[J]. 长江科学院院报,2007,24(4):14-18.
- [36] 符艳红. 嘉陵江流域近55年气候变化特征[D]. 重庆:西南大学,2019.
- [37] 罗辉,陈忠升. 嘉陵江流域极端气温和降水时空变化特征分析[J]. 淮阴师范学院学报(自然科学版),2021,20(1):42-49.
- [38] 刘扬扬,李斐,许秀贞. 嘉陵江中下游干流水电开发对水文情势的影响[J]. 人民长江,2014,45(5):10-15.

(上接第17页)

- [16] 程超,童绍玉,彭海英,等. 滇中城市群水资源生态承载力的平衡性研究[J]. 资源科学,2016,38(8):1561-1571.
- [17] 杨子江,韩伟超,杨恩秀. 昆明市水资源承载力系统动力学模拟[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(3):594-602.
- [18] 饶均辉. GSA-PP模型在区域水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(6):95-100+107.
- [19] 刘启君,黄旻,宋艺欣,等. 基于灰色关联TOPSIS模型的武汉市环境承载力评价及障碍因子诊断[J]. 生态经济,2016,32(5):191-195.
- [20] 傅春,李雅蓉. 江西省水资源承载力评价及障碍因子诊断[J]. 人民长江,2019,50(8):109-114.
- [21] 吴忠,关娇,何江. 最低工资标准测算实证研究——基于CRITIC-熵权法客观赋权的动态组合测算[J]. 当代经济科学,2019,41(3):103-117.
- [22] 孙国营,陕振沛,孙新杰,等. 基于TOPSIS-灰色关联方法的水资源配置评价模型研究[J]. 节水灌溉,2019(7):68-71+76.
- [23] 王壬,陈莹,陈兴伟. 区域水资源可持续利用评价指标体系构建[J]. 自然资源学报,2014,29(8):1441-1452.
- [24] 卞锦宇,黄昌硕,耿雷华,等. 水资源承载力诊断体系构建及关键诊断因子识别[J]. 节水灌溉,2019(7):56-61+67.