

文章编号: 2096-1618(2024)05-0636-08

基于 DPSIR 模型的成都市水环境承载力评价

李沁芮, 刘伟, 李逢港, 汪嘉杨, 潘琳燕, 杜孟

(成都信息工程大学资源环境学院, 四川 成都 610225)

摘要:为综合评价成都市水环境承载力,采用 DPSIR 模型构建水环境承载力指标体系,引入变异系数法对各指标进行权重赋值,运用模糊综合评价法计算 2011–2020 年成都市水环境承载力并确定评价等级,最后根据障碍度模型诊断分析影响成都市水环境承载力的障碍因子。结果表明:成都市水环境承载力综合评价值由 2011 年的 0.434 增至 2020 年的 0.645,评价等级从Ⅳ级(差)升至Ⅲ级(中),提升较明显;障碍度模型分析显示,状态子系统障碍度最大(30.06%),驱动力子系统障碍度最小(13.07%)。县级及以上城市集中式饮用水水源水质达标率、水网密度指数、水资源开发利用效率 3 项指标是影响成都市水环境承载力的主要障碍指标。最后,根据评价与分析结果提出提升成都市水环境承载力的对策建议。

关键词: DPSIR 模型;模糊综合评价;水环境承载力;障碍度模型;成都市

中图分类号: X52

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2024.05.017

0 引言

水环境承载力(water environment carrying capacity, WECC)是指某一时间、地区在一定的环境状态下,水环境对该地区人类活动支持能力的阈值^[1],其大小是决定社会经济可持续发展的重要因素。随着社会经济的快速发展,不少地区都面临水污染严重、水资源短缺等水环境问题^[2–4],从而导致水环境承载力下降^[5]。因此,科学评价水环境承载力对优化水资源配置,改善城市水生态环境,协调社会经济发展与水资源、水环境的关系,实现可持续发展具有重要意义^[6–7]。

目前,国外对水环境承载力的研究主要集中在水环境可持续发展方面^[8–11],暂未形成完善的统一概念和理论体系^[12]。中国对水环境承载力的研究相对较多,就评价指标体系构建模型而言,比较常见的有活力压力组织状态响应模型^[13–14]、压力状态响应模型(pressure state response, PSR)^[15],强调社会经济发展和人类行为对水环境的影响,而驱动力压力状态影响响应模型(driving pressure state impact response, DPSIR)兼具驱动力状态响应模型(driving state response, DSR)和 PSR 模型的特点,增加了水环境状态对社会的反馈,能够较全面地反映人类与水生态环境之间互相作用的关系,该模型常用于流域生态安全评价^[16–17]等方面,在水环境承载力研究上较少应用^[18–19]。此外,选择科学的评价方法对获得客观准确的评价结果

非常重要,常用的评价方法有主成分分析法^[20]、系统动力学法^[21]、层次分析法^[22]、模糊综合评价法^[23]等,这些方法主要采用主观或客观的方法量化评价指标,计算水环境承载力。主成分分析法、层次分析法等在权重计算过程中存在主观性^[24–25];系统动力学法对数据资料要求高,计算繁杂,应用范围较小^[26];模糊综合评价法在评价水环境承载力时,具有较高的准确性,因其通过定性与定量相结合,综合考虑了概念的模糊性和指标的不确定性^[27],近年来,不少学者运用模糊综合评价法与层次分析法^[28]、AHP–熵权法^[29]、PSR 模型^[30]、系统动力学模型^[31],分别对东辽河流域、粤港澳大湾区、浑河流域、威远县的水环境承载力进行了评估,但目前尚缺少将模糊综合评价法与 DPSIR 模型相结合应用于水环境承载力的相关研究。

成都市位于中国西南地区、四川盆地西部,总面积 14605 km²。2020 年常住人口 2093 万人,城镇化率 78.8%,远高于全国城镇化率(63.89%),国内生产总值(GDP)4208 亿元,人均 GDP 85679 元,水资源总量 120 亿 m³,人均水资源量 574 m³,不足全国人均的 1/4, COD、氨氮排放量分别为 309710 吨、34157 吨,约占四川省排放总量的 1/5、1/3^[32–34]。粗放型经济增长模式在推动成都快速发展的同时,也导致水资源短缺、污染物排放强度大和水污染严重等问题,从而使水环境承载力压力倍增。因此,本文选取成都市作为研究对象,基于 DPSIR 模型框架构建水环境承载力评价指标体系,采用模糊综合评价法对水环境承载力进行综合评价。同时利用障碍度模型识别影响水环境承载力的主要因素,分析成都市水环境承载力的变化特征,以期为

收稿日期: 2023-03-13

基金项目: 四川省科技厅资助项目(2021JDR0131);四川省科技厅 2017 年环境污染防治重点研发资助项目(2017SZ0174)

通信作者: 刘伟. E-mail: weling9@163.com

提升成都市水环境承载力提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 指标体系构建与分级方法

1.1.1 指标体系构建方法

本文根据 DPSIR 模型和水环境承载力评价指标体系构建的相关要求,遵循区域性、层次性和相对独立性等原则^[35]。参考《国务院关于印发水污染防治行动计划的通知》(国发〔2015〕17 号)、2016 年 12 月国家发展改革委印发的《绿色发展指标体系》、2019 年 9 月成都市生态环境局公示的《成都市国家生态文明建设示范市规划(2018-2025)》等资料,从驱动力、压力、状态、影响和响应 5 个层面选取 18 个指标,构建成都市水环境承载力综合评价指标体系(表 1)。驱动力指标

(D)反映区域社会经济活动的内在动力及发展趋势,包括人口密度(x1)、人均 GDP(x2)、城镇化率(x3);压力(P)指标反映区域生产活动和需求获取对周边资源、环境的影响,包括单位 GDP 水耗(x4)、单位耕地面积化肥施用量(x5)、万元 GDP 工业废水排放量(x6)、COD 排放强度(x7)、氨氮排放强度(x8);状态(S)指标反映生态环境在驱动力和压力作用下呈现的各种状态,包括地表水质达到或优于Ⅲ类控制断面比例(x9)、县级及以上城市集中式饮用水水源水质达标率(x10)、水网密度指数(x11)、森林覆盖率(x12);影响(I)指标反映水生态系统的各种状态对资源、环境等的反馈结果与影响程度,包括人均水资源量(x13)、水资源开发利用率(x14);响应(R)指标反映为实现水环境可持续发展而采取的有效措施与对策,包括工业废水重复利用率(x15)、城镇污水处理率(x16)、水土流失治理率(x17)、环境保护投资占 GDP 的比重(x18)。

表 1 成都市水环境承载力综合评价指标体系

目标层	准则层	序号	指标层	效应	指标释义	权重
水环境承载力	驱动力 D	x1	人口密度/(人/km ²)	-	常住人口数量/地区面积	0.036
		x2	人均 GDP/元	+	地区生产总值/常住人口数	0.060
		x3	城镇化率/%	+	城镇人口数/常住人口数	0.041
	压力 P	x4	单位 GDP 水耗/m ³	-	用水总量/GDP 总量	0.046
		x5	单位耕地面积化肥施用量/(kg/hm ²)	-	年末实有耕地面积/化肥施用量(折纯)	0.062
		x6	万元 GDP 工业废水排放量/(t/万元)	-	工业废水排放量/第二产业 GDP	0.043
		x7	COD 排放强度/(kg/万元)	-	COD 排放量/国内生产总值	0.046
		x8	氨氮排放强度/(kg/万元)	-	氨氮排放量/国内生产总值	0.044
	状态 S	x9	地表水质达到或优于Ⅲ类控制断面比例/%	+	/	0.079
		x10	县级及以上城市集中式饮用水水源水质达标率/%	+	/	0.057
		x11	水网密度指数	+	/	0.064
		x12	森林覆盖率/%	+	森林面积/土地总面积×100%	0.057
	影响 I	x13	人均水资源量/m ³	+	水资源总量/常住人口数	0.067
		x14	水资源开发利用率/%	-	区域用水量/水资源总量	0.070
	响应 R	x15	工业废水重复利用率/%	+	工业废水重复利用量/工业废水排放总量	0.061
		x16	城镇污水处理率/%	+	污水处理量/污水排放总量	0.050
		x17	水土流失治理率/%	+	治理后的水土流失量/治理前的水土流失量	0.061
		x18	环境保护投资占 GDP 的比重/%	+	环境保护相关支出/国内生产总值	0.056

1.1.2 指标分级方法

成都市水环境承载力综合评价指标分级标准见表 2。指标分级标准的参考依据为:①国家或地方标准中列举的分级标准;②国内外发表的相关文献所使用的分级标准,其中城镇化率(x3)、人均水资源量(x13)、城镇污水处理率(x16)和环境保护投资占 GDP 的比重(x18)指标是在原有分级标准基础上根据成都市实际情况做出适当调整。

1.2 指标权重确定方法

本文选取客观赋权法中的变异系数法确定各指标权重。

标准化处理。正向指标(越大越优型):

$$I_i = \begin{cases} 0 & x_i < x_{im} \\ \frac{x_i - x_{im}}{x_{iM} - x_{im}} & x_{im} \leq x_i \leq x_{iM} \\ 1 & x_i > x_{iM} \end{cases} \quad (1)$$

负向指标(越小越优型):

$$I_i = \begin{cases} 1 & x_i < x_{im} \\ 1 - \frac{x_i - x_{im}}{x_{iM} - x_{im}} & x_{im} \leq x_i \leq x_{iM} \\ 0 & x_i > x_{iM} \end{cases} \quad (2)$$

式中, x_i 为第*i*项指标的实际值, x_{im} 和 x_{iM} 分别为指标*i*的极小值和极大值。

表 2 成都市水环境承载力综合评价指标分级标准

序号	指标	等级					参考依据
		I 级(优)	II 级(良)	III 级(中)	IV 级(差)	V 级(极差)	
x1	人口密度/(人/km ²)	80	313.5	619	924.5	1230	文献[36]
x2	人均 GDP/元	115053	93751	72450	51148	29847	文献[37]
x3	城镇化率/%	80	75	70	65	60	文献[2]
x4	单位 GDP 水耗/m ³	43	54	65	77	88	文献[38]
x5	单位耕地面积化肥施用量/(kg/hm ²)	50	100	250	400	500	文献[37]
x6	万元 GDP 工业废水排放量/(t/万元)	1.42	2.84	4.27	5.69	7.11	文献[37]
x7	COD 排放强度/(kg/万元)	0.80	1.00	1.40	2.00	2.80	依据①
x8	氨氮排放强度/(kg/万元)	0.08	0.10	0.18	0.24	0.32	依据①
x9	地表水质量达到或优于Ⅲ类控制断面比例/%	100	80	60	40	0	文献[39]
x10	县级及以上城市集中式饮用水水源水质达标率/%	100	80	60	40	0	文献[39]
x11	水网密度指数	75	60	45	30	20	依据①
x12	森林覆盖率/%	40	30	20	10	5	文献[36]
x13	人均水资源量/m ³	1000	750	500	250	150	文献[40]
x14	水资源开发利用率/%	10	20	40	60	80	依据①
x15	工业废水重复利用率/%	90	80	75	50	30	文献[41]
x16	城镇污水处理率/%	100	95	90	85	80	文献[39]
x17	水土流失治理率/%	55.00	49.10	43.31	37.47	31.63	文献[42]
x18	环境保护投资占 GDP 的比重/%	1.50	1.00	0.50	0.25	0.00	文献[40]

采用变异系数法对各指标权重进行赋值,各指标的变异系数和权重计算公式如下:

$$V_i = \frac{\sigma_i}{\bar{x}_i} \tag{3}$$

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \tag{4}$$

式中, σ_i 为第 i 项指标的标准差, \bar{x}_i 为第 i 项指标的平均值, V_i 为第 i 项指标的变异系数。

1.3 模糊综合评价法

根据各评价指标对应的 5 类等级确定隶属函数,隶属函数的形式有多种,如降半梯形分布函数、矩形分布函数、正态分布函数^[43]。本文采用降半梯形分布函数,其计算公式如下。

第 1 级(首级),当 $j=1$ 时,隶属函数表达式:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i < S_{ij} \\ \frac{S_{i,j+1}-x_i}{S_{i,j+1}-S_i} & S_{ij} \leq x_i \leq S_{i,j+1} \\ 0 & x_i > S_{i,j+1} \end{cases} \tag{5}$$

第 $m-1$ 级(中间级),当 $j=2,3,\cdots,m-1$ 时,隶属函数表达式:

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_i < S_{i,j-1}, x_i > S_{ij} \\ \frac{x_i-S_{i,j-1}}{S_{i,j}-S_{i,j-1}} & S_{i,j-1} \leq x_i \leq S_{ij} \\ \frac{S_{i,j+1}-x_i}{S_{i,j+1}-S_{ij}} & S_{ij} \leq x_i \leq S_{i,j+1} \end{cases} \tag{6}$$

第 m 级(末级),当 $j=m$ 时,隶属函数表达式:

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_i < S_{i,j-1} \\ \frac{x_i-S_{i,j-1}}{S_{i,j}-S_{i,j-1}} & S_{i,j-1} \leq x_i \leq S_{i,j} \\ 1 & x_i > S_{i,j} \end{cases} \tag{7}$$

式中, $S_{i,j-1}$ 、 $S_{i,j}$ 、 $S_{i,j+1}$ 分别表示第 i 项指标对应的第 $j-1$ 、 j 、 $j+1$ 级标准值。对于负向评价指标,需将式(5)~(7)右端 x_i 区间号“ \leq ”改为“ \geq ”将“ $<$ ”改为“ $>$ ”后采用相同的计算公式处理。根据上式,计算评价指标 i 隶属于评价等级 j 的隶属度 R_{ij} ,生成隶属函数矩阵。

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{j1} & r_{j2} & \cdots & r_{j5} \end{bmatrix} \tag{8}$$

其次,建立模糊综合评价矩阵。

$$B = W \times R_{ij} = [b_1 \quad b_2 \quad b_3] \tag{9}$$

式中,综合权重矩阵 $W = [w_1 \quad w_2 \cdots w_n]$

用 1 分制对评判等级进行量化,则 $V = [0.95 \quad 0.75 \quad 0.5 \quad 0.3 \quad 0.1]$,综合评价值 A :

$$A = B \times V^T \tag{10}$$

1.4 障碍度模型

引入指标偏离度和障碍度进行分析,指标偏离度表示指标评价值和真实值的差距,障碍度表示评价指标对水环境承载力水平的影响。计算公式如下:

$$v_i = 1 - u'_{ij} \tag{11}$$

$$P_i = \frac{v_i w_i}{\sum_{i=1}^m v_i w_i} \tag{12}$$

$$P = \sum P_i \tag{13}$$

式中: w_i 为指标权重; v_i 为第 i 项指标的指标偏离度; P_i 和 P 分别表示单项指标和子系统的障碍度。

1.5 数据来源

水资源总量、生态用水量等数据来源于 2011 - 2020 年《成都市水资源公报》《成都市生态环境质量公报》,人口、社会经济、污染物排放等数据来源于 2012-2021 年《中国统计年鉴》《四川统计年鉴》《成都统计年鉴》。

2 结果与讨论

2.1 评价指标权重确定

根据变异系数法得到各指标权重见表 1。由表 1 可知,对成都市水环境承载力影响程度最大的 3 项指标依次为:地表水质量达到或优于Ⅲ类控制断面比例(x9)、水资源开发利用(x14)、人均水资源量(x13)。就子系统而言:状态子系统对水环境承载力评价结果的贡献作用最为显著(25.87%),其次是压力子系统(23.95%)、响应子系统(22.82%)、驱动力子系统(13.70%),最后是影响子系统(13.66%)。

2.2 隶属度函数分析

2011-2020 年成都市水环境承载力状况对比见图 1,按最大隶属度原则,2011 年水环境承载力优和良的隶属度之和为 0.266,2020 年优和良的隶属度之和为 0.535,在 10 年间得到较大提升。2020 年成都市各指标水环境承载力状况对比见图 2,其中单位 GDP 水耗(x4)、县级及以上城市集中式饮用水水源水质达标率(x10)、森林覆盖率(x12)和水土流失治理率(x17)这 4 项指标均处于优标准;人口密度(x1)和环境保护投资占 GDP 的比重(x18)处于极差标准。

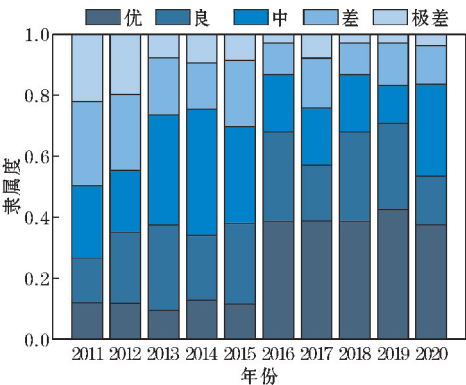


图 1 2011-2020 年成都市水环境承载力状况对比

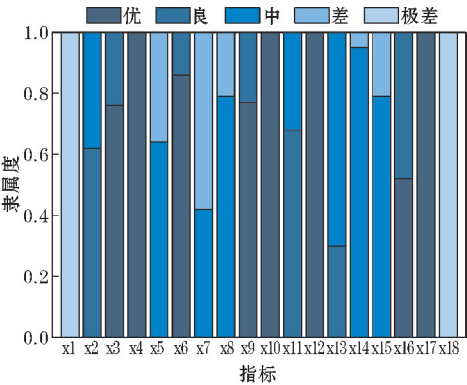


图 2 2020 年成都市各指标水环境承载力状况对比

2.3 水环境承载力评价

2.3.1 水环境承载力评价指数分析

利用模糊综合评价法计算成都市水环境承载力,得到 2011-2020 年成都市水环境承载力综合评价结果(图 3)。由图 3 可知,成都市水环境承载力总体呈上升趋势,综合评分值由 2011 年的 0.434 增至 2020 年的 0.645,增加了 48.62%,评价等级从Ⅳ级(差)升为Ⅲ级(中)。其中 2017 年增幅最大,增加了 20.50%,主要原因是单位 GDP 水耗(x4)明显下降,工业废水重复利用率(x15)增长显著。最高值出现在 2019 年,为 0.695,2020 年由于 COD、氨氮排放量增加,人口密度增大,导致评分值略有下降。

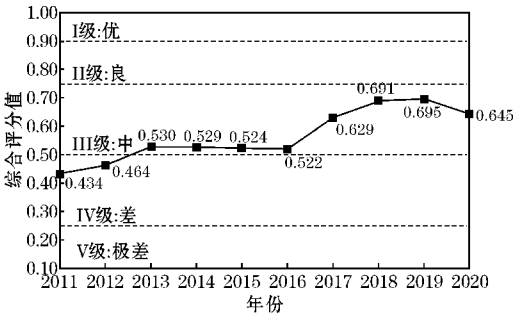


图 3 2011-2020 年成都市水环境承载力综合评价结果

2.3.2 子系统评价

2011-2020 年成都市水环境承载力各子系统评分值见表 3,各评价指标评分值热力图见图 4,具体分析如下:

驱动力子系统。驱动力是推动水环境更新和发展的内在动力,从表 3 可以看出,2011-2020 年该子系统评分值总体呈上升趋势,增加了 114.45%。由图 4 可知,在该子系统的 3 项指标中,城镇化率(x3)从 2011 年的 67% 上升到 2020 年的 78.8%,增加了 17.61%;人均 GDP(x2)由 2011 年的 48556 元增长至 2019 年的 103386 元,增加了 112.92%,2020 年由于疫情、人口密度增加等因素影响,人均 GDP 略有下降。人口密度(x1)作为负向指标,由 954 人/km² 增加到 1461 人/km²,增加了 53.14%。近年来随着成都市城市化进程加快,虽然驱

动力子系统评分值持续增长,但面临人口密度增大等突出问题。

压力子系统。从表3可以看出,2011–2020年压力子系统评分值总体呈上升趋势,并在2019年达到峰值(0.740),虽在2020年出现小幅下降,但仍是增幅最大的子系统,增幅高达220%。由图4可知,单位GDP水耗(x_4)、单位耕地面积化肥施用量(x_5)、万元GDP工业废水排放量(x_6)这3个负向指标呈逐年递减趋势,但COD排放强度(x_7)、氨氮排放强度(x_8)在2020年有小幅上升,成为压力子系统评分值稳步上升的制约因素。

状态子系统。从表3可以看出,2011–2020年状态子系统评分值呈“V”型波动变化。由图4可知,县级及以上城市集中式饮用水水源水质达标率(x_{10})、水网密度指数(x_{11})、森林覆盖率(x_{12})这3项指标总体呈上升趋势。地表水质量达到或优于Ⅲ类控制断面比例(x_9)呈“V”型波动,由2012年的71.1%降至2014年的65.4%,随后从2018年开始持续上升,在2020年达到95.4%,这主要得益于成都市实施水污染防治行动计划,推行“河湖长制”,提高地表水环境质量,遏制驱动力子系统和压力子系统对水环境的影响。

影响子系统。从表3可以看出,2011–2020年影响子系统评分值总体呈波动变化。由图4可知,人均水资源量(x_{13})由2011年的 $899\text{ m}^3/\text{人}$ 降至 $574\text{ m}^3/\text{人}$,减少了36.15%。水资源开发利用率(x_{14})作为负向指标,由2011年的57%降至2020年的41%,水资源的开发利用得到有效控制,在影响子系统中主要制约因素是人均水资源量(x_{13})。

响应子系统。从表3可以看出,2011–2020年响应子系统评分值总体呈上升趋势,增加了69.06%。由图4可知,环境污染治理投资占GDP比重(x_{18})综合评分值一直较低,虽然成都市政府重视生态环境治理,但成都市环境污染治理投资占GDP比重并没有随社会经济发展而正向变化,因此制约响应子系统的整体改善。

表3 成都市水环境承载力各子系统评分值

年份	驱动力	压力	状态	影响	响应
2011	0.289	0.180	0.722	0.591	0.362
2012	0.420	0.255	0.783	0.433	0.408
2013	0.384	0.500	0.743	0.542	0.405
2014	0.422	0.549	0.685	0.374	0.484
2015	0.451	0.535	0.646	0.297	0.562
2016	0.244	0.695	0.676	0.383	0.364
2017	0.508	0.681	0.679	0.405	0.708
2018	0.564	0.733	0.763	0.685	0.630
2019	0.605	0.741	0.810	0.490	0.683
2020	0.620	0.576	0.825	0.536	0.612

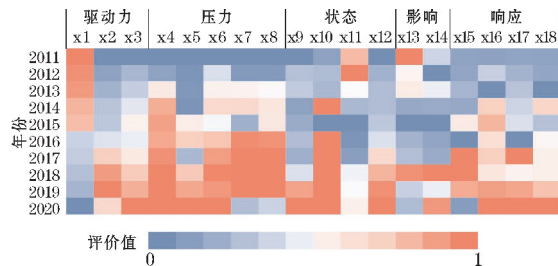


图4 成都市水环境承载力评价指标评分值热力图

2.4 障碍度评价

成都市2011–2020年各评价指标障碍度差异明显,均值在2.15%~11.10%(图5)。地表水质量达到或优于Ⅲ类控制断面比例(x_9)是制约成都市水环境可持续发展的首要障碍指标,均值为11.10%。各子系统障碍度见图6,其中状态子系统障碍度最大,占30.06%,驱动力子系统障碍度最小,占13.07%。因此,提升成都市水环境承载力的重点在状态子系统。

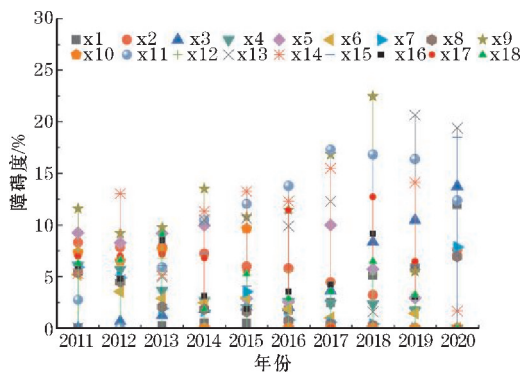


图5 成都市2011–2020年水环境承载力评价指标障碍度

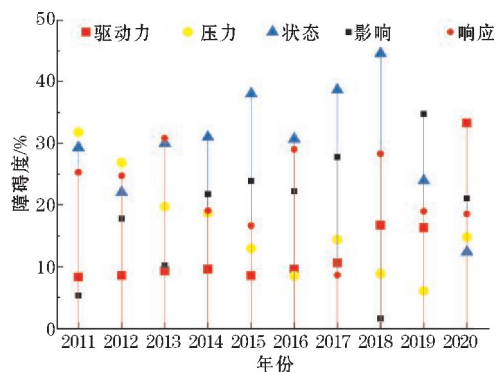


图6 成都市2011–2020年水环境承载力子系统障碍度

为综合分析影响成都市水环境承载力的指标,本文采用障碍度模型计算影响水环境承载力的主要障碍指标,将障碍度 $>5\%$ 的指标作为关键阻碍因素(图7)。对关键阻碍因素频数分析表明:影响成都市水环境承载力的主要障碍指标是县级及以上城市集中式饮用水水源水质达标率(x_9)、水网密度指数(x_{11})、水资源开发利用率(x_{13})。

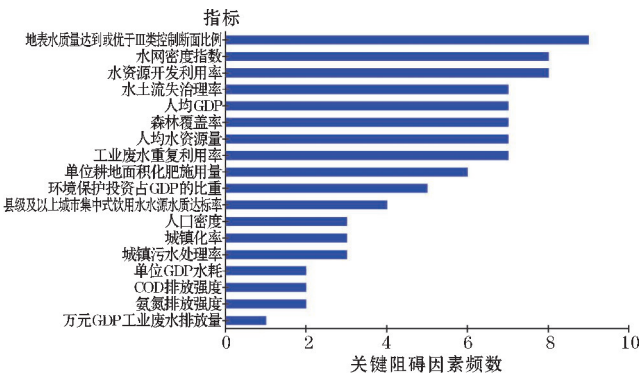


图 7 成都市 2011–2020 年水环境承载力关键障碍因素频数

3 结论与建议

(1)通过隶属度函数的分析,2011 年成都市水环境承载力优和良的隶属度之和为0.266,2020 年优和良的隶属度之和为0.535,10 年间得到较大提升。但人口密度(x1)和环境保护投资占 GDP 的比重(x18)仍处于较低水平。未来成都市应降低人口密度和城区开发强度,加快推进成德眉资同城化发展,增加环境保护资金投入。

(2)2011–2020 年成都市水环境承载力总体呈上升趋势,评分值由0.434增长至0.645。在 5 个子系统中,驱动力、压力、响应 3 个子系统的评分值总体呈上升趋势,压力子系统综合评分由0.180增至0.576,增加了220%,增幅最大。说明在成都市社会经济高速发展的同时,污染物排放得到较好控制,用水效率不断提高。响应子系统增长缓慢,主要是环境保护投资占 GDP 的比重偏低,制约了响应子系统的整体改善;状态、影响子系统呈现波动变化,主要是人均水资源量偏低,COD 排放强度、氨氮排放强度升高。为提升成都市水环境承载力,应进一步强化“三水”统筹管理,优化河流水量调度,推进非常规水资源利用,充分保障水资源供给,增加人均水资源量;同时严格生态环境准入,继续推进水污染物削减和入河排污口排查整治工作,不断降低 COD、氨氮等水污染物排放强度。

(3)障碍度分析结果表明,成都市 2011–2020 年间各评价指标障碍度差异明显,其中障碍度最大的指标是地表水质量达到或优于Ⅲ类控制断面比例(x9),其次是水网密度指数(x11)、水资源开发利用率(x14)。各子系统中,状态子系统障碍度最大(30.06%),驱动力子系统障碍度最小(13.07%)。因此,为提高成都市水环境承载力,要着重于状态子系统,同时兼顾驱动力、压力、影响、响应子系统。未来应深化水环境综合治理,严格实施地表水环境质量目标管理,不断提高水环境质量;科学保障河湖(库)生态

流量,落实生态流量目标管理,划定流域生态空间保护界限,加强水量配置与调度管理,扩大水域面积。

参考文献:

[1] Zhang Yujie, Yue Qiang, Wang Tong, et al. Evaluation and early warning of water environment carrying capacity in Liaoning province based on control unit: A case study in Zhaosutai river Tieling city control unit [J]. Ecological Indicators, 2021, 124 (6):107–112.

[2] 徐志青,刘雪瑜,袁鹏,等. 南京市水环境承载力动态变化研究[J]. 环境科学研究,2019,32(4): 557–564.

[3] Zhu Yonghua, Sam Drake, Haishen Lü, et al. Analysis of Temporal and Spatial Differences in Eco-environmental Carrying Capacity Related to Water in the Haihe River Basins, China [J]. Water Resources Management, 2010, 24(6):1089–1105.

[4] Michiel A, Rijsberman, Frans H M, et al. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water systems[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2000, 20 (3):333–345.

[5] Seyyed Ali Noorhosseini, Mohammad Sadegh Allahyari, Christos A Damalas, et al. RETRACTED: Public environmental awareness of water pollution from urban growth: The case of Zarjub and Gohar-rud rivers in Rasht, Iran [J]. Science of the Total Environment, 2017(599/600):2019–2025.

[6] Kang Peng, Xu Linyu. Water Environmental Carrying Capacity Assessment of an Industrial Park [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13(10): 879–890.

[7] 王金南,于雷,万军,等. 长江三角洲地区城市水环境承载力评估[J]. 中国环境科学,2013,33 (6):1147–1151.

[8] Kuylensstierna J L, Bjorklund G, Najlis P. Sustainable water future with global implications: everyone’s responsibility. [J]. Natural Resources Forum, 1997, 21(3):178–212.

[9] Alice L, Clarke. Assessing the Carrying Capacity of the Florida Keys [J]. Population and Environment, 2002, 23(4):405–418.

[10] Wang Yumin, Zhou Xiaode, Bernard Engel. Water

- environment carrying capacity in Bosten Lakebasin[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199: 574–583.
- [11] Song Weiwei, Pang Yong. Research on narrow and generalized water environment carrying capacity, economic benefit of Lake Okeechobee, USA[J]. Ecological Engineering, 2021, 173: 106–117.
- [12] Meriem Naimi Ait-Aoudia, Ewa Berezowska-Azzag. Water resources carrying capacity assessment: The case of Algeria's capital city[J]. Habitat International, 2016, 58: 51–58.
- [13] Robert Costanza. Ecosystem health and ecological engineering[J]. Ecological Engineering, 2012, 45: 24–29.
- [14] Long Xiang, Wu Shaogui, Wang Jiayang, et al. Urban water environment carrying capacity based on VPOSR-coefficient of variation-grey correlation model: A case of Beijing, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108–114.
- [15] 许玲燕, 杜建国, 刘高峰. 基于云模型的太湖流域农村水环境承载力动态变化特征分析——以太湖流域镇江区域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(3): 445–453.
- [16] 李玉照, 刘永, 颜小品. 基于 DPSIR 模型的流域生态安全评价指标体系研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(6): 971–981.
- [17] 徐艺扬, 钱敏蕾, 李响, 等. 基于 DPSIR 的太湖流域(黄山区)生态安全综合评估[J]. 复旦学报(自然科学版), 2015, 54(4): 407–415.
- [18] 张庆合. 基于 DPSIP 模型水环境承载力评价研究[J]. 资源节约与环保, 2018(11): 25.
- [19] 查木哈, 吴琴, 马成功, 等. 基于 DPSIR 模型评价内蒙古水环境承载力[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 65–73.
- [20] 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.
- [21] Naidoo R, Balmford A, Costanza R, et al. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(28): 9495–9500.
- [22] Rabia Shabbir, Sheikh Saeed Ahmad. Water resource vulnerability assessment in Rawalpindi and Islamabad, Pakistan using Analytic Hierarchy Process (AHP)[J]. Journal of King Saud University-Science, 2016, 28(4): 293–299.
- [23] Zhou Zhiyong, Zhang Xiaoju, Dong Wenyi. Fuzzy Comprehensive Evaluation for Safety Guarantee System of Reclaimed Water Quality[J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 18: 227–235.
- [24] Wang Tianxiang, Xu Shiguo. Dynamic successive assessment method of water environment carrying capacity and its application[J]. Ecological Indicators, 2015, 52: 134–146.
- [25] Lei HongJun, Yin Lina, Xi BeiDou. Scenario Analysis on the Water Environment Carrying Capacity of Wuliangsuhai Lake Basin[J]. Advanced Materials Research, 2012(616/618): 1388–1393.
- [26] 张文国, 杨志峰. 基于指标体系的地下水环境承载力评价[J]. 环境科学学报, 2002(4): 541–544.
- [27] 王正选, 王静, 杨婷婷, 等. 基于改进熵权法的水资源承载力评价——以曲陆坝区为例[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4): 82–87.
- [28] 程兵芬, 罗先香, 王刚. 基于层次分析-模糊综合评价模型的东辽河流域水环境承载力评价[J]. 水资源保护, 2012, 28(6): 33–36.
- [29] 王晓艳, 章四龙, 刘磊. 基于 AHP-熵权法的水环境承载力模糊综合评价[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(9): 206–212.
- [30] 孔祥军. 浑河流域沈阳农村地区水环境承载力动态变化特征探析[J]. 地下水, 2019, 41(6): 62–64, 123.
- [31] 张琦. 威远县页岩气开发水环境承载力评价及系统动力学模型研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [32] 成都市统计局. 成都统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [33] 四川省统计局. 四川统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [34] 国家统计局. 中国统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [35] 陈长安, 张丽, 张惠芬. 水环境承载力的研究进展[J]. 水利科技与经济, 2008(5): 389–391, 393.
- [36] 汪嘉杨, 翟庆伟, 郭倩, 等. 太湖流域水环境承载力评价研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1979–1987.
- [37] 张雨婷, 汪嘉杨, 漆定梅, 等. 基于 DCSM 模型的成都市河流水环境承载力综合评价[J]. 环境科学学报, 2021, 41(9): 3825–3833.
- [38] Wei Xiaomei, Wang Jiayang, Wu Shaogui, et al.

- Comprehensive evaluation model for water environment carrying capacity based on VPOSRM framework A case study in Wuhan, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2019(50):1-8.
- [39] 白洁,王欢欢,刘世存,等. 流域水环境承载力评价——以白洋淀流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5):1070-1076.
- [40] 张龙云,曹升乐,杨尚阳. 属性识别理论在水安全评价中的应用研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2006, 36(5):70-72.
- [41] 郭彬,车秀珍,陈晓丹,等. 深圳水环境容量及其承载力评价[J]. 环境科学研究, 2012, 25(8):953-958.
- [42] 李磊,贾磊,赵晓雪,等. 层次分析—熵值定权法在城市水环境承载力评价中的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4):456-460.
- [43] 杨静. 改进的模糊综合评价法在水质评价中的应用[D]. 重庆:重庆大学, 2014.

Evaluation of Water Environmental Carrying Capacity in Chengdu City based on Driving-Pressure-State-Impact-Response Model

LI Qinrui, LIU Wei, LI Fenggang, WANG Jiayang, PAN Linyan, DU Meng

(College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: To comprehensively evaluate the water environment carrying capacity in Chengdu, the DPSIR (driving force-pressure-state-impact-response) model was used to construct the water environment carrying capacity index system, the coefficient of variation method was introduced to assign weights to each index, the fuzzy comprehensive evaluation method was used to calculate the water environment carrying capacity of Chengdu from 2011 to 2020 and determine the evaluation level, finally, the obstacle factors affecting the water environment carrying capacity in Chengdu were diagnosed and analyzed based on the obstacle model. The results showed that the comprehensive evaluation value of the carrying capacity of the water environment in Chengdu increased from 0.434 in 2011 to 0.645 in 2020, and the evaluation level increased from IV. (poor) to III. (medium), which improved significantly, and the obstacle model analysis showed that the state subsystem had the largest obstacle degree (accounting for 30.06%) and the driving force subsystem had the smallest obstacle degree (13.07%). The three indicators of water quality compliance rate, water network density index, and water resources development and utilization rate of centralized drinking water sources in cities at the county level and above are the main obstacles affecting the carrying capacity of Chengdu's water environment. Finally, based on the results of the evaluation and analysis, countermeasures and suggestions on how to improve the water carrying capacity of Chengdu were put forward.

Keywords: DPSIR model; fuzzy comprehensive assessment; water environment carrying capacity; obstacle degree model; Chengdu city