

成渝城市群水资源承载力动态评价及障碍因子诊断识别

魏妍琪¹, 杨江婷¹, 张睿¹, 范铃芝¹, 李海潮², 刘晓辉¹

(1. 西华大学 能源与动力工程学院, 四川 成都 610039; 2. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要:【目的】水资源承载力是衡量区域资源环境承压状态与发展协调能力的重要依据。针对成渝城市群水资源供需矛盾突出、区域差异显著等问题, 系统性地评估其水资源承载状态, 为区域水安全保障与差异化管理提供科学参考。【方法】构建包含支撑力、压力和调控力三大子系统的区域水资源承载力评价指标体系, 采用模糊层次分析法(FAHP)确定指标权重, 并利用基于动态差异度系数的集对分析方法(SPA)进行水资源承载状态评估, 进而诊断各城市的障碍因子。【结果】①2013—2022年间, 成渝城市群水资源承载力水平整体呈上升趋势, 联系数均值由-0.06提升至0.04。②区域西部城市联系数均值(0.16)显著高于中部(-0.22)和东部(-0.04), 呈现明显空间差异。③典型城市障碍因子识别结果表明, 内江市受限于资源总量与生态支撑不足(障碍因子包括人均水资源量、产水模数、生态用水率等), 长期处于超载状态; 重庆市虽在调控与效率方面改善显著, 但仍受到人口增长带来的水资源短缺压力(障碍因子包括人均水资源量、产水模数、城市化率)。【结论】成渝城市群水资源承载力总体改善, 但内部差异与局部超载问题依然突出。应加强资源支撑与调控能力建设, 实施分区分类管理, 优化水资源配置, 以提升区域整体水安全保障水平。

关键词: 水资源承载力; 障碍因子; 动态差异度系数; 成渝城市群

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

水资源是人类社会生存与发展的基础性自然资源, 也是生态环境的重要组成部分^[1]。随着全球社会经济快速发展和人口增长, 用水需求持续增加, 与此同时, 水资源时空分布不均、水质污染及过度开采等问题导致水资源短缺日益严峻, 全球超过15亿人面临缺水问题^[2]。中国作为全球第二大经济体, 人均水资源仅为世界平均水平的1/4, 超过400个城市面临水资源短缺, 水资源已成为制约我国经济发展的重要因素之一^[3]。水资源的合理规划对社会经济协调发展和国家水安全保障具有重要战略意义^[4]。

水资源承载力(Water Resources Carrying Capacity, WRCC)起源于联合国教科文组织(UNESCO)在1985年提出的有关资源承载力的概念^[5]。水资源承载力作为可持续发展水安全战略研究的基础课题, 引起了国内外学者的广泛关注, 但受区域自然条件、社会经济结构和评价目的差异等因素影响, 其理论体系和评估方法体系尚未统一。

关于定义, 第一类观点认为水资源承载力指的是区域内水资源的可利用总量, 如FENG L H等^[6]利用区域内可用水资源能够承载的最大种群来量化义乌市的水资源承载力; 第二类观点认为水资源承载力是区域内水资源对人口、经济的约束能力, 如ZHOU X Y等^[7]建立了区域工业经济总量与水环境承载力的关联模型, 并预估最大工业规模; 第三类观点则更关注社会发展的可持续性, 如左其亭等^[8]强调水资源承载力是指水资源系统维持生态系统良性循环的最大规模。国外研究更多强调生态环境与资源利用平衡, 国内则较多结合人口、经济等社会约束要素开展综合分析。这种概念差异不仅导致指标体系构建的侧重点不同, 也影响了方法选择与评价结果的可比性。

在方法方面, 国内外学者围绕水资源承载力的评价方法开展了大量研究, 提出了包括趋势分析法^[9]、综合指标评价法^[10]、多目标综合分析法^[11]和系统动力学模型法^[12]等多种评价分析方法。其中趋势

收稿日期/Received: 2025-04-22

修回日期/Revised: 2025-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52409017); 四川省自然科学基金项目(2025ZNSFSC1369); 北京市自然科学基金项目(8254057)。

第一作者: 魏妍琪(1992—), 女, 讲师, 博士, 从事水旱灾害风险评估方面的研究。E-mail: weiyanki@mail.xhu.edu.cn。

通信作者: 李海潮(1993—), 男, 助理研究员, 博士, 从事水文学方面的研究。E-mail: lihaichao@mail.tsinghua.edu.cn。

集对分析作为一种针对系统不确定性的典型分析方法,其核心思想是通过评价样本与等级集对间的联系数同异反结构刻画系统内部的不确定性特征^[18],能够综合考虑水资源承载力的动态变化和多维影响因素,提高评价结果的稳定性和合理性。差异度系数的确定是量化系统集对不确定性的关键内容,常用的取值方法包括专家估测法^[19]、三角模糊数^[20]、全偏联系数^[21]和减法集对势等^[22],目前在江淮地区^[23-25]和引黄灌区等地区有较好应用^[26-27]。然而,传统的差异度系数取值方法忽略了实际样本包含的评价信息,只能获得近似结果或范围,限制了评估结果的可靠性^[18]。基于实际样本序列的动态差异度系数,可以根据区域样本值计算得到完整的联系数值,目前在安徽省各市有一定的实证研究^[28-29],但在更大尺度或不同类型区域的应用仍较少,其适用性和推广潜力亟需在复杂的区域水资源系统中加以验证。

域,城市群的水资源流动过程更复杂,跨区域水利工程和极端气候事件的综合作用更加显著^[31-32]。因此,城市群尺度的水资源承载力研究不仅有助于揭示多城市间承载差异与协同关系,还为跨行政区水资源优化配置和区域协调发展提供了理论支持。

1 区域概况

Fig.1 Location of the Chengdu-Chongqing

2 研究方法

2.1 水资源承载力评价方法

2.1.1 指标权重计算

本文采用模糊层次分析法（FAHP），计算水资源承载力系统各指标的权重。FAHP 方法是在传统 AHP 方法的基础上引入模糊一致矩阵，相较于仅根据样本数据特征赋权的熵权法和投影寻踪法，FAHP 方法能够降低专家主观影响，优化专家集成意见^[38-39]。主要计算步骤包括^[40]：①结合区域调研和文献统计，构建层次结构模型；②基于专家打分结果，建立各层次指标的模糊判断矩阵；③计算各

判断矩阵的最大特征值和特征向量，判断一致性；

④归一化处理，得到每个指标的最终权重。

系统分析成渝地区城市规模、水资源开发利用程度、行业用水情况和社会经济状况，结合相关文献成果^[41-42]，本研究构建了由水资源承载支撑力 S（Supporting）、水资源承载压力 P（Pressure）以及水资源承载调控力 R（Regulation）3 个子系统组成的包含 15 个代表性指标的区域水资源承载力评价指标体系。根据《四川省水资源公报》《四川省统计年鉴》《重庆市水资源公报》和《重庆市统计年鉴》在 2013—2022 年间的统计数据，采用专家打分法和模糊层次法对成渝城市群所有城市 3 个子系统的系统权重和 15 项指标的权重进行计算，各指标含义及权重计算结果见表 1。

表1 成渝城市群水资源承载力评价指标体系及权重

Tab.1 Evaluation index system and weights of WRCC of Chengdu-Chongqing urban agglomeration

子系统	子系统类型	子系统权重	指标编号	指标名称	指标单位	指标类型	指标权重
支撑力	+	0.44	S1	人均水资源量	m ³	-	0.14
			S2	产水模数	万 m ³ /km ²	-	0.13
			S3	人均供水量	m ³	-	0.09
			S4	植被覆盖率	%	-	0.08
压力	-	0.24	P1	人均日生活用水量	L	+	0.04
			P2	万元 GDP 用水量	m ³	+	0.05
			P3	万元工业增加值需水量	m ³	+	0.04
			P4	人口密度	人/km ²	+	0.04
			P5	城市化率	%	+	0.03
			P6	单位面积农田灌溉用水量	m ³ /hm ²	+	0.04
调控力	+	0.32	R1	水资源开发利用率	%	+	0.08
			R2	人均 GDP	万元	-	0.06
			R3	城市污水处理率	%	-	0.06
			R4	灌溉指数	%	-	0.07
			R5	生态用水率	%	-	0.05

注：子系统类型表示其在水资源承载力中的整体作用方向，其中“+”为正向系统，“-”为逆向系统；指标类型表示该指标对其所在子系统的作用方向，“+”为正向指标，即对该子系统的功能增强，“-”为反向指标，即对该子系统的不利影响。

2.1.2 水资源承载力评价指标计算

采用集对分析方法，通过构建评价样本与等级标准集对之间的联系系数同异反系统结构来评价样本与标准间的关系^[23]。集对分析中的三元联系数表达形式如下^[24]：

$$u = a + bI + cJ。$$
 (1)

式中： a 、 b 、 c 分别为联系数的同一度、差异度和对立度分量， $a + b + c = 1$ ； I 为差异度系数，取值范围为 $[-1, 1]$ ； J 为对立度系数， $J = -1$ 。

为进一步提高评价结果的可靠性与科学性，本研究采用动态差异度系数方法^[18]，构建随指标

样本值动态变化的差异度系数 I ：

$$I = \begin{cases} 1 - \frac{2(x - s_0)}{3(s_1 - s_0)}, s_0 \leq x \leq s_1 (\text{正向指标}) \\ s_0 \geq x \geq s_1 (\text{反向指标}) \\ -\frac{2\left[x - \frac{(s_1 + s_2)}{2}\right]}{3(s_2 - s_1)}, s_1 \leq x \leq s_2 (\text{正向指标}) \\ s_1 \geq x \geq s_2 (\text{反向指标}) \\ -1 + \frac{2(s_3 - s_1)}{3(s_3 - s_2)}, s_2 \leq x \leq s_3 (\text{正向指标}) \\ s_2 \geq x \geq s_3 (\text{反向指标}) \end{cases} \quad (2)$$

式中： I 为单指标的差异度系数； x 为单指标样本值； s_0 、 s_1 、 s_2 、 s_3 分别为样本的临界值，采用 Fisher 最优分割法将所有样本划分为 3 个等级^[43]，样本值 x 越接近下限 I 越接近 1， x 越接近上限 I 越接近 -1。

结合指标权重 w 和样本差异度系数 I ，成渝城市群水资源承载力评价样本 x 的三元联系数为^[42]：

$$u_i = \sum_{j=1}^n w_j a_{ij} + \sum_{j=1}^n w_j b_{ij} I_i + \sum_{j=1}^n w_j c_{ij} J \quad (3)$$

式中： u_i 为区域水资源承载力评价样本 i 的三元联系数； w_j 为指标 j 的权重； n 为水资源承载力评价系统指标数量； a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 分别为样本 i 中指标 j 的同一度、差异度和对立度分量，计算方式见文献^[18]； I_i 为由公式（2）计算出的样本 i 的动态差异度系数。

基于联系数值 u_i 判定区域水资源承载力等级，按照均分原则将其划分为超载、临界超载和可载 3 种状态，具体划分标准见表 2。

表2 水资源承载力等级划分标准
Tab.2 WRCC classification standards

承载状态	超载	临界超载	可载
u_i	[-1, -0.33)	[-0.33, 0.33]	(0.33, 1]

2.2 障碍因子识别方法

根据各指标联系数值 u_i 识别并分析制约区域水资源承载力提升的障碍因子。基于均分原则，将障碍因子划分为 5 种类别（见表 3），并将强阻碍型与中阻碍型因子视为关键障碍因子。

表3 障碍因子类型及划分标准
Tab.3 Obstacle factor types and classification standards

障碍因子类型	u_i
强阻碍型	[-1, -0.6)
中阻碍型	[-0.6, -0.2)
弱阻碍型	[-0.2, 0.2]
弱提升型	(0.2, 0.6]
强提升型	(0.6, 1]

3 结果与讨论

3.1 成渝城市群水资源承载力时空演变特征

3.1.1 总体变化趋势

2013—2022 年间，成渝城市群 16 个城市水资源承载力联系数变化趋势如图 2 所示。

区域水资源承载力平均值整体呈上升趋势，从 2013 年的 -0.06 上升至 2022 年的 0.04。最大值在大部分时间位于可载区间，2015—2018 年间处于短期临界超载状态。最小值长期处于超载区间，在 2019 年后有所改善。

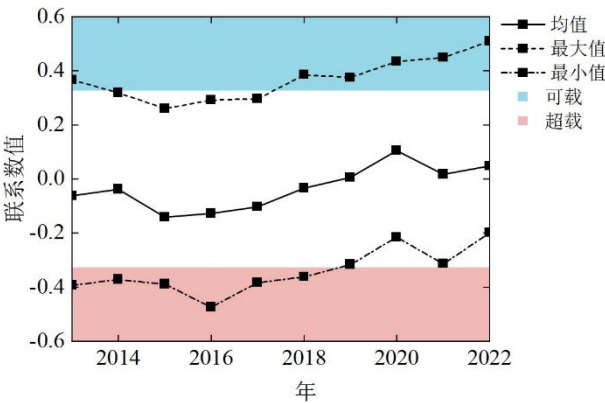


图2 成渝城市群水资源承载力变化趋势

Fig.2 Changing trends in WRCC of the Chengdu-Chongqing urban agglomeration

3.1.2 空间分布差异

各市联系数年平均值见表 4。联系数值排名前三的分别是乐山市、雅安市和眉山市，联系数值分别为 0.32、0.31、0.28；后三位分别是内江市、遂宁市、自贡市，联系数值分别是 -0.33、-0.32、-0.26，平均相差 0.71，说明各城市水资源承载力差异显著。从空间上来看，西部城市、中部城市、东部城市的联系数均值分别为 0.16、-0.22、-0.04，水资源承载空间分布不均衡，中部地区面临更大水资源压力。

成渝城市群 2013 年、2016 年、2019 年与 2022 年的水资源承载力空间分布情况如图 3 所示。结果表明，2016 年为转折年，该时期处于超载状态的城市数目最多（5 个），且多紧邻成都、重庆双核；2016 年后，区域内城市水资源承载力改善明显，无超载状态城市，且可载状态城市增多。如雅安市从 2016 年的临界超载状态（0.29）提升至 2022 年的可载状态（1.60），南充市从 2016 年的超载状态（-0.46）提升至 2022 年的临界超载状态（-0.19）。

其中，西部城市的水资源承载力相对较高，可载城市的数目从 1 个增加到 3 个（雅安市、眉山市、乐山市）；中部城市的水资源承载力相对较低，但呈改善趋势，多个城市由超载状态提升至临界状态。部分城市状态变化不明显，始终处于临界状态，如人口密集且发展程度较高的成都市和重庆市，联系数多年平均值为 -0.11 和 0.05。这种“西多中少”的分布情况，可能与成渝地区地形及人口分布特点有关，西部山地丘陵区森林覆盖率高，降水丰富且

水源涵养能力强；中部平原地区人口集中、工业密集，且部分地表水依赖外部调水补给，导致供需矛盾更为突出，水资源承载力较差。

表4 成渝城市群2013—2022年水资源承载力评价结果均值

Tab.4 Average WRCC evaluation results in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration during 2013-2022

城市		样本联系数分量				联系数值
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>bI</i>	
西部	绵阳市	0.34	0.46	0.20	0.05	0.19
	德阳市	0.26	0.45	0.29	-0.01	-0.03
	成都市	0.26	0.39	0.35	-0.03	-0.11
	眉山市	0.37	0.47	0.16	0.07	0.28
	雅安市	0.43	0.39	0.18	0.06	0.31
	乐山市	0.39	0.45	0.15	0.08	0.32
中部	南充市	0.19	0.43	0.39	-0.06	-0.25
	遂宁市	0.17	0.40	0.42	-0.07	-0.32
	资阳市	0.20	0.42	0.38	-0.06	-0.23
	内江市	0.17	0.39	0.43	-0.06	-0.32
	自贡市	0.19	0.42	0.39	-0.06	-0.26
	宜宾市	0.29	0.45	0.25	0.01	0.06
东部	达州市	0.25	0.45	0.30	-0.02	-0.07
	广安市	0.23	0.44	0.33	-0.04	-0.13
	重庆市	0.31	0.43	0.26	0.01	0.05
	泸州市	0.28	0.46	0.27	0.01	0.01

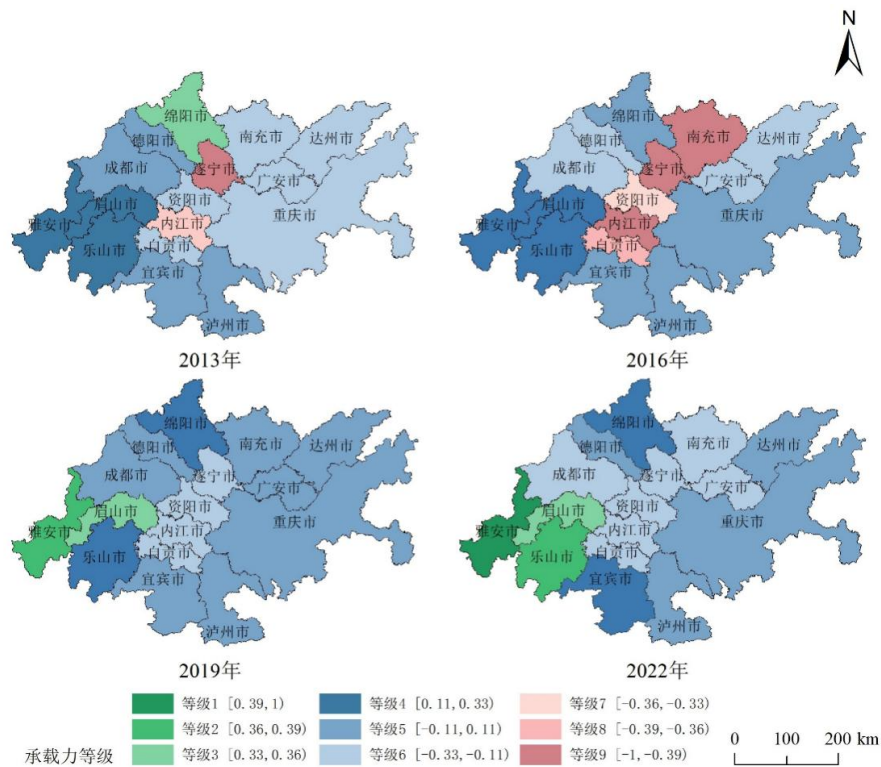


图3 成渝城市群水资源承载力评价等级空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of WRCC evaluation level of Chengdu-Chongqing urban agglomeration

3.2 成渝城市群水资源承载力障碍因子诊断识别

3.2.1 区域障碍因子

2013—2022 年间成渝城市群各市水资源承载力评价指标联系系数年平均值计算结果如图 4 所示。西部地区障碍因子数最多的城市是成都市(9 个),最少的是绵阳市(0 个)。其中,人均水资源量(S1)、单位面积农田灌溉用水量(P6)是制约西部城市水资源承载力的典型强阻碍型因子,说明水资源总量丰富但人均分配不足,灌溉用水效率低;生态用水率(R5)是该地区的典型中阻碍型因子,出现频率高达 67%,其次是植被覆盖率(S4)、人均生活用水量(P1)、万元 GDP 用水量(P2)和人均 GDP(R2),说明西部地区生态用水保障不足,产业结构有待优化。

中部地区各城市的障碍因子较多(4~8 个)。

其中,人均水资源量(S1)、产水模数(S2)和人均供水量(S3)是典型强阻碍型因子,出现频率约为 83%,均值分别是-0.94、-0.77 和-0.82,植被覆盖率(S4)、生态用水率(R5)、人均 GDP(R2)次之,出现频率是 32%;灌溉指数(R4)和水资源开发利用率(R1)是典型中阻碍型因子,出现频率达到 60%,说明中部城市水资源供给不足,水资源利用效率低下,生态保护不足。

东部地区城市较少,除重庆市外,其余城市经济发展水平较低。人均供水量(S3)是典型强阻碍型因子,均值为-0.79;人均水资源量(S1)、人均 GDP(R2)、灌溉指数(R4)和生态用水率(R5)是典型中阻碍型因子,说明东部地区水资源供需矛盾突出,经济发展水平与水资源管理能力对水资源承载力提升的制约明显。

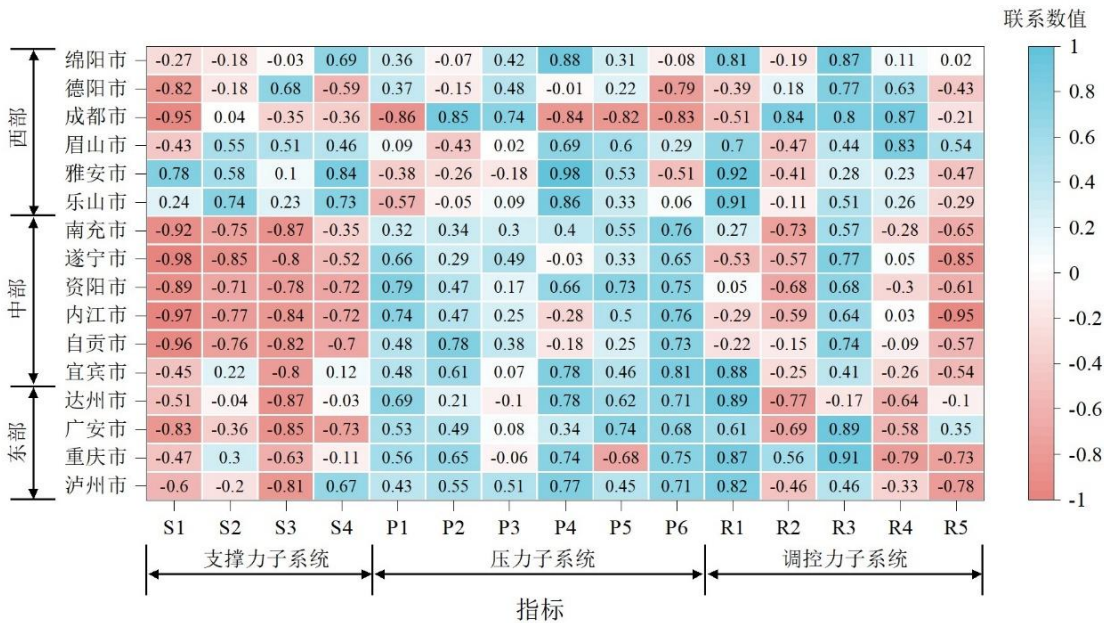


图4 各市水资源承载力评价指标联系系数年平均值

Fig.4 Annual average values of the water resources carrying capacity evaluation indicators of each city

3.2.2 典型城市障碍因子

为进一步探讨成渝城市群水资源承载状态发生变化的原因,分别选取西部、中部和东部地区的典型城市进行分析,3 个地区的代表城市分别为乐山市、内江市和重庆市。3 座城市除地理位置差异之外,其水资源基础条件、产业结构和经济水平也具有一定差异,有助于解析不同条件下区域水资源承载系统的障碍因子影响机制。乐山市、内江市和重庆市在 2013—2022 年间在对应子系统内的水资源承载力评价指标联系数值变化情况如图 5 所示。

乐山市的 S2、S4、P4、R1 指标长期处于强提升型, P2、P3、R2 由强阻碍型向强提升型转变, R3 由弱提升型改善为强提升型, P6 由中阻碍型改进为弱阻碍型。支撑力指标保持稳定,压力因素有效减小,说明近年来乐山市水资源利用效率有所提高,产业结构优化和政策管理成效逐步显现。需要注意的是, P1 由弱阻碍型退化为强阻碍型, P5 由强提升型退化为弱阻碍型,说明随着人口规模和经济活动的增长,居民生活用水保障面临压力,应进一步优化用水结构,提高居民用水保障。

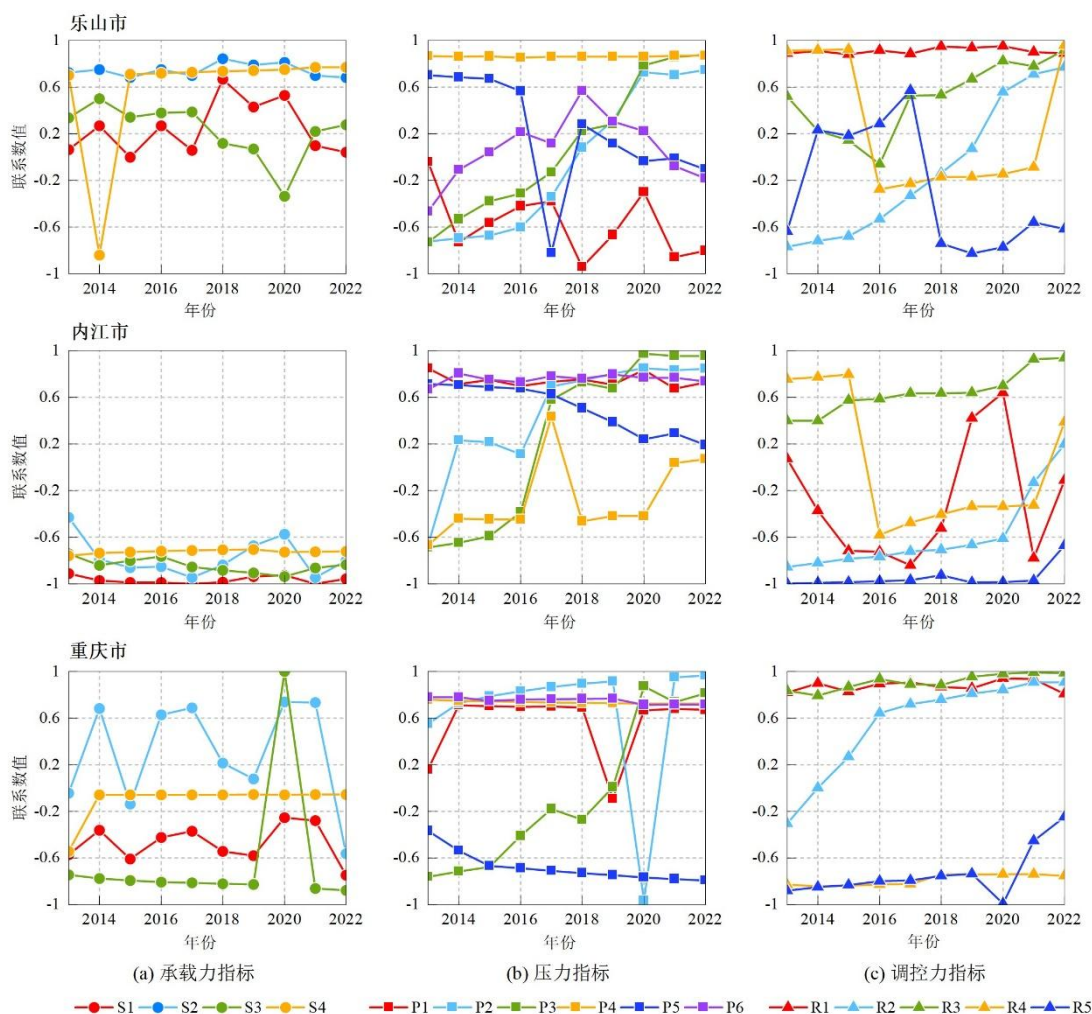


图5 成渝城市群典型城市2013—2022年水资源承载力评价指标联系数值

Fig.5 Linked values of WRCC evaluation indicators for typical cities in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration from 2013 to 2022

对于内江市, $P1$ 、 $P6$ 指标长期处于强提升型, $P2$ 、 $P3$ 由强阻碍型向强提升型转变, $P4$ 、 $R2$ 由强阻碍型提升至弱阻碍型, $R3$ 从弱提升型改善为强提升型。反映出内江市用水效率持续提高, 万元 GDP 用水量与万元工业增加值用水量显著降低, 水污染治理成效显著。然而 $S1$ 、 $S2$ 、 $S3$ 、 $S4$ 和 $R5$ 指标长期处于强阻碍型, $P5$ 与 $R4$ 也由强提升型退化为弱提升型, 说明内江市水资源短缺, 供水能力有限、生态系统脆弱等问题。整体来看, 支撑能力薄弱、压力水平较高, 导致了内江市长期处于超载状态, 应重点加强水资源总量调控, 提升植被覆盖率, 强化生态修复与水资源调配机制。

重庆市的 $P4$ 、 $P6$ 、 $R1$ 和 $R3$ 指标长期处于强提升型, $R5$ 由强阻碍型提升为中阻碍型, $S4$ 由中阻碍型提升至弱阻碍型, $P1$ 由弱阻碍型提升至强提升型, $P2$ 由弱提升型改善至强提升型, $P3$ 由强阻碍型提升至强提升型, $R2$ 由中阻碍型提升至强提升型。多项指标评估结果的改善, 说明重庆市在

用水效率提升、水资源开发、生态环境治理和经济结构优化方面取得积极成效。但是, $S1$ 和 $P5$ 指标由中阻碍型退化为强阻碍型, $S2$ 指标也由弱阻碍型退化为中阻碍型, 说明重庆市水资源总量基础不足, 区域人口压力持续加大, 城市用水紧张状况未能有效缓解。因此, 重庆市在保证经济发展的同时, 应进一步强化水资源总量调控和人口空间布局优化, 推广节水型城市建设与智慧水务系统建设, 以缓解水资源短缺与人口集中带来的系统性压力。

3.3 成渝城市群水资源承载力提升建议

综合评价结果表明, 成渝城市群水资源承载力整体呈改善趋势, 但不同地区的提升速度和改善路径存在差异。

从区域看, 西部地区水资源条件相对优越, 近年来承载力保持较高水平且改善幅度较大, 未来应继续发挥水源涵养和生态保护优势, 重点推进农业节水、提升生态用水比例和优化产业结构, 保持承载力稳定提升。中部地区人口密度高、工业集聚,

水资源供需矛盾突出,未来亟需通过多元化水源开发、再生水利用、节水型城市建设和水污染治理等措施,在提升利用效率的同时保障水质安全。东部地区经济基础相对薄弱,除重庆市外多依赖外部水源,未来应加强供水保障能力建设、优化产业布局、减少高耗水行业比重,以提升整体承载能力。

4 结语

本文利用模糊层次分析法与基于动态差异度系数的集对分析法,系统评估了2013—2022年间成渝城市群水资源承载力的时空演变特征,并对障碍因子进行诊断识别,主要结论如下:

1)成渝城市群整体水资源承载力呈改善趋势,但区域差异显著。西部城市受地形与水资源分布优势影响,承载力水平整体较高;中部城市人口密度大,经济活动强,资源开发强度高,水资源供需矛盾突出,整体承载力相对较低;东部城市虽具改善潜力,但部分低发展城市仍面临一定压力。

2)典型城市水资源承载力差异显著,障碍因子类型多样。乐山市水资源丰富,优化产业结构与加强生态管理有效提高了城市承载力;内江市水资源总量不足、生态脆弱,支撑力和调控力长期处于劣势,是典型的超载城市;重庆市虽用水效率与调控能力提升显著,但人口压力持续上升,水资源总量不足仍为主要瓶颈。

综上所述,成渝城市群水资源承载力仍面临较大挑战,需因地制宜地优化区域用水结构、强化生态保护、提升资源调控能力。本研究中构建的基于模糊层次分析和动态差异度系数集对分析的综合评估方法,能够有效应对城市群尺度的水资源承载力动态分析,识别出典型障碍因子,验证了其在更大空间尺度和复杂环境条件下的适用性,为水资源承载力评价方法体系的区域推广提供了实践支撑,同时也为推动区域水资源可持续管理和西南地区可持续发展提供了科学支持与决策依据。但是,本研究基于统计数据构建的评价体系对气候变化、政策干预模拟等情景考虑不足,后续拟加入多种情景模拟技术与高分辨率空间数据,构建动态评估模型,从而推进区域水资源安全管理水平。

参 考 文 献

[1] 刘高峰,徐智礼,李佳静.基于社会-生态系统视角的水价值重构与流域治理框架研究[J].河海大学学报(哲学社会科学版),2024,26(6):80-90.[LIU G F,XU Z L,LI J J.Research on the reconstruction of water values and the framework of

watershed governance from social-ecological system perspective[J].Journal of Hohai University(Philosophy and Social Sciences),2024,26(6):80-90.]

[2] LIU D D,XIE J C,ZHANG X,et al.Joint guarantee rate index assessment of the contribution of agricultural water-saving measures to river ecological flow in water shortage areas[J].Science of The Total Environment,2024,956: 177146.

[3] 李雨欣,薛东前,宋永永.中国水资源承载力时空变化与趋势预警[J].长江流域资源与环境,2021,30(7):1574-1584.[LI Y X,XUE D Q,SONG Y Y.Spatio-temporal Characteristics and trend warnings of water resources carrying capacity in China[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2021,30(7):1574-1584.]

[4] BOLE Y,RINA S,GUGA S,et al.Evaluation of resources, environment, and ecological carrying capacity from the perspective of “production-living-ecology” spaces: a case study of western Jilin Province, China[J].Journal of Cleaner Production,2025,491:144770.

[5] 熊鹰,蒋一心,陈斯玄.长江经济带水资源承载力评价及其耦合协调性分析[J].长江科学院院报,2025,42(7):32-41.[XIONG Y,JIANG Y X,CHEN S X.Assessment of water resources carrying capacity and analysis of its coupling coordination in the Yangtze River economic belt[J].Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2025,42(7): 32-41.]

[6] FENG L H,ZHANG X C,LUO G Y.Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in Yiwu City, China[J].Mathematics and Computers in Simulation,2009,79(3):269-278.

[7] ZHOU X Y,LEI K,MENG W,et al.Industrial structural upgrading and spatial optimization based on water environment carrying capacity[J].Journal of Cleaner Production,2017,165:1462-1472.

[8] 左其亭,张修宇.气候变化下水资源动态承载力研究[J].水利学报,2015,46(4):387-395.[ZUO Q T,ZHANG X Y.Dynamic carrying capacity of water resources under climate change[J].Journal of Hydraulic Engineering,2015,46(4):387-395.]

[9] 张永勇,夏军,王中根.区域水资源承载力理论与方法探讨[J].地理科学进展,2007(2):126-132.[ZHANG Y Y,XIA J,WANG Z G.Research on regional water resources carrying capacity theory and method[J].Progress in Geography,2007(2):126-132.]

[10] 安强,魏传江,贺华翔,等.基于模糊综合评价法的河南省中

- 原城市群水资源承载力评价研究[J]. 节水灌溉,2019,12:65-71.[AN Q,WEI C J,HE H X,et al.Evaluation of water resources carrying capacity of central plains urban agglomeration in Henan Province based on fuzzy comprehensive evaluation method[J].Water Saving Irrigation,2019,12:65-71.]
- [11] 李家乐,林鹏飞,李彦彬,等.基于水资源配置的空间均衡度评价方法[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2024,22(2):215-227.[LI J L,LIN P F,LI Y B,et al.Evaluation method for spatial balance based on water resource allocation[J].South-to-North Water Transfers and Water Science&Technology,2024,22(2):215-227.]
- [12] 汪倩,袁波,吴剑,等.基于主成分分析法与系统动力学的水资源承载力评价:以庆阳市为例[J]. 长江科学院院报,2025,42(6):51-59.[WANG Q,YUAN B,WU J,et al.Assessment of water resources carrying capacity based on principal component analysis and system dynamics: a case study of Qingyang City[J].Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2025,42(6):51-59.]
- [13] ZHANG Z Y,YIN Z W,CHEN Y Y,et al.Evaluation and prediction of water resources carrying capacity using a multiple linear regression model in Taizhou City, China[J].Human and Ecological Risk Assessment:An International Journal,2023,29(2):553-570.
- [14] 莫崇勋,刘奇忠,唐玲玲,等.基于模糊-博弈-障碍综合评价模型的玉林市水资源承载力评价[J]. 水电能源科学,2024,42(12):50-53,161.[MO C X,LIU Q Z,TANG L L,et al.Evaluation of water resources carrying capacity in Yulin City based on fuzzy-game-obstacle comprehensive evaluation model[J].Water Resources and Power,2024,42(12):50-53,161.]
- [15] 金菊良,周戎星,崔毅,等.结构水资源学概论[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(3):7-19.[JIN J J,ZHOU R X,CUI Y,et al.Introduction to structural water resources science[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2021,42(3):7-19.]
- [16] ZHOU T,LIN T,CHENG R L,et al.An integrated approach for spatio-temporal assessment and attribution of water resources carrying capacity: incorporating AHP, TOPSIS, and lorenz asymmetry coefficient methods[J].Journal of Hydrology,2025,650:132536.
- [17] 张礼兵,胡亚南,金菊良,等.基于系统动力学的巢湖流域水资源承载力动态预测与调控[J]. 湖泊科学,2021,33(1):242-254.[ZHANG L B,HU Y L,JIN J L,et al.Dynamic prediction of water resources carrying capacity of Chaohu basin and system optimization regulation based on system dynamics simulation[J].Journal of Lake Sciences,2021,33(1):242-254.]
- [18] 崔毅,唐慧彦,金菊良,等.基于动态差异度系数的区域水资源承载力评价与诊断[J]. 水资源保护,2023,9(5):152-160,177.[CUI Y,TANG H Y,JIN J L,et al.Evaluation and diagnosis of regional water resources carrying capacity based on dynamic difference degree coefficient[J].Water Resources Protection,2023,39(5):152-160,177.]
- [19] 唐耀平.联系数中差异度系数 i 的专家估测法及应用[J]. 数学的实践与认识,2009,39(5):67-70.[TANG Y P.The Methods to Fetch i in difference degree coefficient of set pair analysis and its applications[J].Mathematics in Practice and Theory,2009,39(5):67-70.]
- [20] 郭放,崔毅,陈梦璐.基于三角模糊数和联系数耦合的区域农业旱灾脆弱性动态评价[J]. 人民珠江,2021,42(6):70-76,84.[GUO F,CUI Y,CHEN M L.Dynamic evaluation of regional agricultural drought vulnerability based on triangular fuzzy number and connection number coupling[J].Pearl River,2021,42(6):70-76,84.]
- [21] 刘凌,陈浩,周戎星,等.基于四元效应全偏联系数的区域水资源承载力评价[J]. 人民黄河,2023,45(5):69-75.[LIU L,CHEN H,ZHOU R X,et al.Evaluation method of regional water resources carrying capacity based on quaternion effect full partial connection number[J].Yellow River,2023,45(5):69-75.]
- [22] 伍露露,宋占智.基于五元减法集对势的黄陂湖湖泊健康评价研究[J]. 水资源开发与管理,2024,10(11):63-68.[WU L L,SONG Z Z.Research on the Health assessment of Huangpi lake based on the five-element subtraction set theory[J].Water Resources Development and Management,2024,10(11):63-68.]
- [23] 金菊良,周亮广,王平,等.基于相对联系数的区域水利高质量发展评价指标体系筛选方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(1):43-51.[JIN J L,ZHOU L G,WANG P,et al.Screening method of evaluation index system for high-quality development of regional water conservancy based on relative connection number[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2024,45(1):43-51.]
- [24] ZHOU R X,JIN J L,ZHOU Y L,et al.Spatial difference analysis and driving factor diagnosis for regional water resources carrying capacity based on set pair

analysis[J].Heliyon,2024,10(10):e38251.

- [25] 袁康,周戎星,崔毅,等.两次半偏减法集对势方法评价水资源承载力[J].水利水运工程学报,2023(6):93-100.[YUAN K,ZHOU R X,CUI Y,et al.Subtraction set pair potential method for evaluating water resources carrying capacity based on double semi-partial connection number [J].Hydro-Science and Engineering,2023(6):93-100.]
- [26] 金菊良,沈时兴,崔毅,等.半偏减法集对势在引黄灌区水资源承载力动态评价中的应用 [J]. 水利学报 ,2021,52(5):507-520.[JIN J L,SHEN S X,CUI Y,et al.Dynamic evaluation of water resources carrying capacity in the Yellow River diversion irrigation district based on semipartial subtraction set pair potential[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(5):507-520.]
- [27] 马睿,李云玲,贾冬冬,等.基于多指标的黄河流域空间均衡状态评价 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文),2021,19(2):217-225,236.[MA R,LI Y L,JIA D D,et al.Evaluation of spatial equilibrium status for the Yellow River basin based on comprehensive multi-index method[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(2):217-225,236.]
- [28] 赵齐雅,金菊良,崔毅,等.区域旱灾风险评估与诊断的动态差异度系数模糊数随机模拟方法 [J]. 灾害学 ,2024,39(1):195-201.[ZHAO Q Y,JIN J L,CUI Y,et al.Stochastic simulation method of fuzzy number of dynamic difference coefficient for regional drought risk assessment and diagnosis[J].Journal of Catastrophology,2024,39(1):195-201.]
- [29] 陈浩,金菊良,崔毅,等.基于半偏联系数和动态差异度系数的区域旱灾风险评估方法[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(2):25-35.[CHEN H,JIN J L,CUI Y,et al.A regional drought risk assessment method based on Semi-partial correlation coefficient and dynamic difference coefficient[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2024,45(2):25-35.]
- [30] 欧阳晓,陈键,魏晓,等.长江中游城市群生态韧性时空分异格局与演化机理[J].地理学报,2025,80(6):1572-1584. [OU Y X,CHEN J,WEI X,et al.Spatiotemporal differentiation and evolutionary mechanism of ecological resilience in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration[J]. Acta Geographica Sinica,2025,80(6):1572-1584.]
- [31] 田培,王瑾钰,花威,等.长江中游城市群水资源承载力时空格局及耦合协调性[J].湖泊科学,2021,33(6):1871-1884. [TIAN P,WANG J Y,HUA W,et al.Temporal-spatial patterns and coupling coordination degree of water resources carrying capacity of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J].Journal of Lake Sciences,2021,33(6):1871-1884.]
- [32] TAN Z W,LI H,SONG Q R,et al.Synergistic optimization and interaction evaluation of water-energy-food-ecology nexus under uncertainty from the perspective of urban agglomeration[J].Sustainable Cities and Society,2025,124:106291.
- [33] 刘福平,杨晨,刘颖.四川省近 60 年降水时空演变规律[J]. 华北水利水电大学学报 (自然科学版),2023,44(2):16-23.[LIU F P,YANG C,LIU Y.Temporal and spatial evolution of precipitation in Sichuan Province in recent 60 years[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2023,44(2):16-23.]
- [34] 孟莹,刘俊国,王子丰,等.气候变化和人类活动对中国陆地水储量变化的影响研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(4):47-57.[MENG Y,LIU J G,WANG Z F,et al.Climate change and human impacts on terrestrial water storage anomalies in China[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,42(4):47-57.]
- [35] WANG Z P,TIAN J C,FENG K P.Optimal allocation of regional water resources based on simulated annealing particle swarm optimization algorithm[J].Energy Reports,2022,8:9119-9126.
- [36] 张艳军,李子辉,官冬杰,等.2000~2020 年成渝双城经济圈植被生态质量变化及其对极端气候因子的响应[J].中国环境科学 ,2023,43(9):4876-4885.[ZHANG Y J,LI Z H,GUAN D J,et al.Changes of vegetation ecological quality in the Chengdu-Chongqing economic circle from 2000 to 2020 and its response to extreme climatic factor[J].China Environmental Science,2023,43(9):4876-4885.]
- [37] 鲍玉海,贺秀斌,尹飞虎,等.西南地区农业水资源利用及水资源高效调控技术路径研究 [J]. 中国工程科学 ,2024,26(6):169-180.[BAO Y H,HE X B,YIN F H,et al.Current situation of agricultural water resource utilization and technology path for the efficient regulation rainwater resources in southwestern China[J].Strategic Study of CAE,2024,26(6):169-180.]
- [38] 伍巧,贺秀斌,鲍玉海,等.四川省水资源承载力时空变化格局及驱动因素 [J]. 水文 ,2024,44(6):85-92.[WU Q,HE X B,BAO Y H,et al.Spatiotemporal variation and driving factors of water resources carrying capacity in Sichuan Province[J].Journal of China Hydrology,2024,44(6):85-92.]

- [39] 苑希民,桑林浩,沈福新,等.基于模糊层次分析法的京津冀
洪灾风险评价[J].水利水电技术,2018,49(10):37-45.[YUAN X M,SANG L H,SHEN F X,
et al. FAHP-based flood risk assessment on
Beijing-Tianjin-Hebei region[J].Water Resources and
Hydropower Engineering,2018,49(10):37-45.]
- [40] 姬金雪,王乐,要威,等.基于 AHP-模糊综合评价法的蓄滞
洪区可持续发展评价[J].南水北调与水利科技(中英文),2024,22(2):299-308.[JI J X,WANG L,YAO W,et
al.Evaluation of sustainable development of flood storage
area based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation
method[J].South-to-North Water Transfers and Water
Science & Technology,2024,22(2):299-308.]
- [41] 周铁军,李征,袁康,等.基于半偏减法集对势三角模糊数随
机模拟方法的水资源承载力评价[J].水资源与水工程学
报,2023,34(2):33-41,51.[ZHOU T J,LI Z,YUAN K,et
al.Water resources carrying capacity evaluation based on
semipartial subtraction set pair potential triangular fuzzy
number stochastic simulation method[J].Journal of Water
Resources and Water Engineering,2023,34(2):33-41,51.]
- [42] CUI Y,ZHOU Y L,JIN J L,et al.Quantitative evaluation and
diagnosis of water resources carrying capacity (WRCC)
based on dynamic difference degree coefficient in the
Yellow River irrigation district[J]. Frontiers in Earth
Science,2022,10:816055.
- [43] WEI Y Q,JIN J L,LI H C,et al.Assessment of agricultural
drought vulnerability based on crop growth stages: a case
study of Huaibei Plain, China[J]. International Journal of
Disaster Risk Science,2023,14:209-222.

Dynamic Assessment of Water Resources Carrying Capacity and Identification of Obstacle Factors in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration

WEI Yanqi¹, YANG Jiangting¹, ZHANG Rui¹, FAN Lingzhi¹, LI Haichao², LIU Xiaohui¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: 【Objective】 Water resources carrying capacity (WRCC) is a critical indicator for assessing regional environmental stress and development. In response to the prominent water supply–demand conflicts and significant regional disparities in the Chengdu–Chongqing urban agglomeration, this study systematically evaluates its water resources carrying status, providing scientific references for regional water security and differentiated management. **【Methods】** An evaluation index system comprising support, pressure, and regulation subsystems was constructed. The fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) was applied to determine indicator weights, and the set pair analysis (SPA) method based on dynamic difference coefficients was employed to assess the WRCC status and diagnose obstacle factors for each city.

【Results】 The results showed that from 2013 to 2022, the overall WRCC in the Chengdu–Chongqing urban agglomeration exhibited an upward trend, with the average connection degree increasing from -0.06 to 0.04. The western cities recorded a significantly higher average value (0.16) than the central (-0.22) and eastern (-0.04) parts, showing obvious spatial differences. Obstacle factor diagnosis revealed that Neijiang remained in an overloaded state due to limited total water resources and weak ecological support (e.g., per capita water resources, water yield modulus, ecological water use rate), while Chongqing, despite notable improvements in regulation and efficiency, still faced increasing water shortage pressure caused by population growth (e.g., per capita water resources, water yield modulus, urbanization rate).

【Conclusion】 The WRCC of the Chengdu–Chongqing urban agglomeration has improved, but internal disparities and local overload problems remain prominent. It is necessary to strengthen resource support and regulation capacity, implement zoned and classified management, and optimize water allocation to enhance the overall level of regional water security.

Keywords: water resources carrying capacity; obstacle factors; dynamic difference coefficient; Chengdu-Chongqing urban agglomeration