

江海平原水网综合能力评价及限制因子分析

向 龙^{1,2}, 孙鑫倩¹, 韩雨芯^{1,3}, 金 炜⁴

(1. 河海大学水文水资源学院; 2. 河海大学中国气象局水文气象重点开放实验室; 3. 四川省水利规划研究院;
4. 南通市水利勘测设计研究院有限公司)

摘要:为对江海平原水网的综合能力进行评价,以其典型区域——南通市水网为研究对象,构建涵盖水安全保障、水资源调控、水生态支撑、社会协同发展 4 个方面的评价指标体系,采用主客观协同赋权法确定权重,从结构、功能、效能 3 个维度量化了水网综合能力,并计算了评价指标的障碍度,进而识别了关键限制因子。结果表明:南通市水网综合能力呈现南强北弱的空间分异特征,九吕区最高(0.85),为高等水平,里下河圩区最低(0.36),为较低水平;北部地区的关键限制因子集中在功能与效能层面,里下河圩区关键障碍因子的累计障碍度为 68.76%,南部地区则突出表现为效能压力,九吕区关键障碍因子的累计障碍度为 94.04%。

关键词:水网综合能力;障碍度;江海平原;南通市

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2026)05-0147-08

Comprehensive capacity evaluation and limiting factor analysis of water network in the Jianghai Plain//Xiang Long^{1,2}, Sun Xinqian¹, Han Yuxin^{1,3}, Jin Wei⁴(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 2. China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory, Hohai University; 3. Sichuan Provincial Institute of Water Resources Planning and Research; 4. Nantong Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd.)

Abstract: To evaluate the comprehensive capacity of the water network in the Jianghai Plain, a typical area of Nantong City's water network is taken as the research object, and an evaluation index system covering four aspects: water security guarantee, water resource regulation, water ecological support, and social coordinated development is constructed. The subjective objective collaborative weighting method was used to determine the weights, and the comprehensive capacity of the water network was quantified from three dimensions: structure, function, and efficiency. The obstacle degree of the evaluation indicators was calculated, and the key limiting factors were identified. The results show that the comprehensive capacity of the water network in Nantong City exhibits a spatial differentiation feature of strong in the south and weak in the north. Jiulyu Area has the highest score (0.85), reaching a high level, while Lixiahe Polder Area has the lowest score (0.36), reaching a relatively low level. The key limiting factors in the northern region are concentrated in terms of functionality and efficiency, with a cumulative obstacle degree of 68.76% from key obstacle factors of Lixiahe Polder Area. In the southern region, efficiency pressure is prominent, with a cumulative obstacle level of 94.04% from key obstacle factors of Jiulyu Area.

Key words: comprehensive capacity of water network; obstacle degree; the Jianghai Plain; Nantong City

现代水网建设是提升我国水安全保障能力、推动水利现代化的重要举措,也是国家水网体系建设的重要内容。国家水网以系统联通、统筹调控、综合能力提升为核心目标,强调自然水系与工程体系协同运行^[1]。江海平原河道密布,水动力弱,调蓄空间有限,人工强约束特征显著,其水网体系是在天然河网基础上叠加闸泵控制、围垦工程、调度体系形成的复合网络形态,是现代水网的基础载体。与以系统优化为主导的现代水网相比,江海平原水网在空

间格局上更依赖河网连通性,在运行机制上呈现潮汐作用与工程调控共同影响的特征^[2]。因此,在国家水网建设持续推进的背景下,推动传统平原河网由“工程主控型”向“系统协同型”演进已成为提升区域供水安全水平、防洪排涝能力及生态支撑功能的重要议题。

围绕平原河网的综合评价研究不断深化,已有研究多通过构建评价指标体系,结合多准则决策模型,对区域水系统发展水平及其制约因素开展综合

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3207503)
作者简介:向龙(1982—),男,副教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:xianglong@hhu.edu.cn

分析。在指标体系构建方面,相关研究通常从水系形态特征、水动力条件、水环境质量、社会经济发展等多个维度选取指标,对区域水系统的结构基础、运行状态及综合效益进行刻画^[3-8],进一步结合熵权-逼近理想解排序(TOPSIS)、层次分析(AHP)-CRITIC-TOPSIS法、灰色关联分析以及耦合协调度模型等方法,开展综合评价与障碍诊断^[9-12]。例如:Liu等^[13]提出了面向综合水系统的韧性评估框架,为复杂水系统综合能力评价提供了新的研究视角;侯爱冰等^[14]构建了区域水网发展综合效益评价指标体系,分析了水网发展与经济、粮食、资源及生态系统之间的耦合协调关系。此外,部分研究从空间结构与连通性的角度探讨了河网系统功能特征,例如:张兴源等^[15]基于复杂网络理论分析了河网结构特征及其功能响应机制,为认识河网连通性与系统运行效率之间的关系提供了新的研究视角;安莉娜等^[16]基于耦合协调度模型分析了水资源承载力与城市经济社会发展水平的时空耦合关系,揭示了区域发展差异对水资源配置与城市布局优化的启示。

然而,现有研究多聚焦于单一功能维度或特定工程类型的评价,针对融合河网自然属性与区域经济社会发展需求的复杂水网的综合能力评价与限制因子诊断研究仍有待深化。江海平原作为我国东部沿海典型的水网密集区,受潮汐作用显著,水网系统既承担着防洪排涝、水资源供给等基础功能,又与区域农业生产、城乡建设、生态保护等紧密关联,受闸泵调控、潮汐顶托及网络连通性影响显著。本文以江海平原水网的典型区域——南通市水网为研究对象,构建基于分区差异的水网综合能力评价指标体系,依托TOPSIS开展综合评价,并对限制因子进行识别与分析,以期为平原水网综合功能优化提供可量化、可归因、可对标的科学决策依据。

1 研究区概况与数据来源

南通市地处长江入海口北岸的江海平原,总面积约8777.47 km²,河网密布,水系发达,水网结构呈多源来水、闸站控制与潮汐顶托共同作用的复杂格局。南通市域以通扬运河(海安-如皋-丁堰段)、如泰运河(丁堰-掘港-东安闸段)构成的复合水脊为界,以南为长江流域,以北为淮河流域,形成了“五横五纵”的骨干河网和7个水网分区:长江流域的九吕区、通启区、高沙土区、沿江圩区、诸岛区和淮河流域的里下河圩区、斗南垦区(图1)。研究区属湿润气候区,多年平均降水量为1050 mm,多年平均气温为15.1℃,降水年内分配不均,主要集中在汛期,叠加低洼地形与潮位影响,使研究区面临洪涝风险、

资源保障、生态连通、社会需求等多目标约束并存的场景:汛期需依托骨干通道与闸站群保障行洪排涝与通道稳定,夯实水安全底板;非汛期及枯水期需兼顾引调水配置、河网调蓄冗余与供水可靠性,提升水资源调控能力;密集河网与多闸控制削弱了水动力交换与生态连通性;叠加人口承载、城镇供水、农业生产与产业发展等社会经济用水需求,使不同分区呈现“优势与短板并存、约束链条差异”的特征。

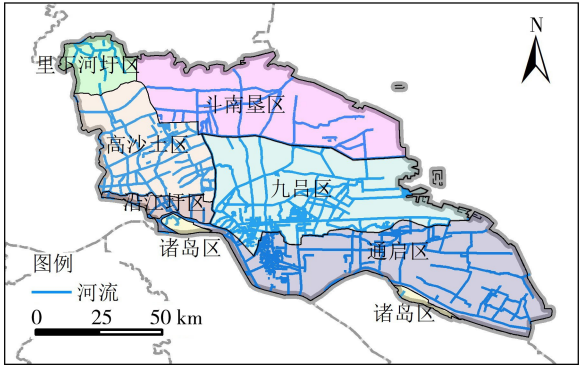


图1 南通市水网及分区

Fig.1 Water network and region division of Nantong City

本文使用数据主要包括水资源开发利用、水利基础设施、防洪排涝体系、水生态环境状况及经济社会发展等统计资料,来源于《南通市水资源公报》《南通市水资源综合规划(2018—2030年)》《南通市“十四五”水资源保护规划》《南通市“十四五”水利发展规划》《南通市生态河湖行动专项规划(2020—2030年)》《南通市区域治水总体方案》等公布的数据和南通水网调度模拟数据集。为保证评价数据的完整性和子系统协同的一致性,本文以2024年为基准年,对各类数据进行整理与标准化处理。相关指标数据以各水网分区为统计单元,通过整理统计年报、规划成果及相关专题数据进行归纳计算,形成水网综合能力评价指标数据集。

2 研究方法

2.1 评价指标体系构建

江海平原水网是由天然水系、工程设施及调度管理共同构成的复合系统,其综合能力既取决于水网的空间结构与工程基础,也体现在防洪、供水、调蓄、生态保障等运行功能及其经济社会支撑成效。遵循系统性、代表性、可获取性、可比性原则,构建“目标-准则-指标”纵向层级与“结构-功能-效能”横向属性相结合的水网综合能力评价指标体系,如图2所示。

由图2可见,在目标层,以江海平原水网综合能力水平作为总体评价目标,记为 W_{SRED} ,反映区域水

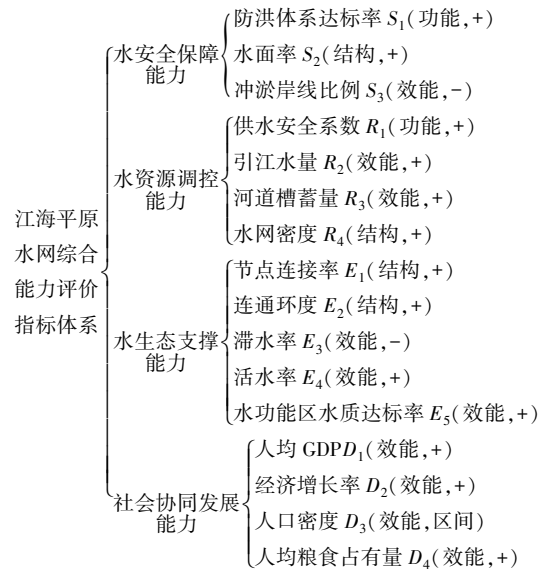


图2 江海平原水网综合能力评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of water network comprehensive capacity of the Jianghai Plain

网系统在安全保障、资源调控、生态支撑、社会发展等方面的综合表现。在准则层,基于现代水网多功能协同发展的内涵,从水网系统服务区域高质量发展的核心功能出发,将水网综合能力划分为4个准则维度:水安全保障能力、水资源调控能力、水生态支撑能力、社会协同发展能力,记为 W_{Saf} 、 W_{Res} 、 W_{Eco} 、 W_{Dev} ,分别从防洪安全与供水保障、水资源配置与调控能力、水生态系统健康与稳定性、水网建设对区域经济社会发展的支撑作用等方面对水网综合能力进行刻画。在指标层,围绕各准则层内涵,选取能够表征水网系统结构特征、运行状态及综合效应的16项具体指标。

根据指标对评价目标的作用方向,将16项指标划分为正向、负向和区间指标,其中区间指标存在适宜取值范围,指标值偏离该范围会对水网综合能力产生不利影响。为揭示水网综合能力的形成机制,进一步将各项指标划分为结构性、功能性、效能性3类。结构性指标反映水网的空间格局、工程基础与连通形态,是综合能力形成的物质基础;功能性指标反映水网在防洪、供水、调蓄和水体流动等过程中的实际运行能力;效能性指标反映水网运行产生的生态、资源利用及经济社会支撑成效。“结构-功能-效能”分类不改变原有“目标-准则-指标”层级,而是从能力形成机制出发对指标进行横向归类,形成纵向以“目标-准则-指标”为主线、横向以“结构-功能-效能”为补充的双层指标体系。

a. 水安全保障能力。水安全保障能力主要反映区域抵御洪涝风险及维持河网稳定运行的基础水平,包括防洪体系达标率(S_1)、水面率(S_2)和冲淤

岸线比例(S_3)3个指标。防洪体系达标率用于衡量达到规划防洪标准的工程比例,直接反映防洪工程体系对设计洪水的防御能力;水面率反映河流、湖泊等水域在区域总面积中的占比,水面率越高,通常表明区域可利用的天然调蓄空间越大;冲淤岸线比例表征河网通道稳定性,比例越大说明冲淤失衡风险越高。计算公式为:

$$S_1 = \frac{A_{fs}}{A_w} \times 100\% \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{a}{A} \times 100\% \quad (2)$$

$$S_3 = \frac{L_c + L_y}{L_{tol}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: A_{fs} 为防洪工程达标的面积; A_w 为防洪工程总面积; a 为水域面积; A 为研究区面积; L_c 为受冲刷影响的岸线长度; L_y 为受淤积影响的岸线长度; L_{tol} 为研究区岸线总长度。

b. 水资源调控能力。水资源调控能力主要体现区域供水保障水平、外源补给能力、内部蓄滞冗余及水系发育程度,包括供水安全系数(R_1)、引江水量(R_2)、河道槽蓄量(R_3)和水网密度(R_4)4个指标。供水安全系数用于衡量供水能力对用水需求的保障程度;引江水量反映外源补水及水动力改善能力,从统计资料获得;河道槽蓄量表征内部蓄水潜力,是调控弹性的结构基础;水网密度表征水系发育程度与空间结构复杂性。计算公式为:

$$R_1 = W_N / W_A \quad (4)$$

$$R_3 = \frac{1}{2} \sum_{i,j} L_{ij} (A_i + A_j) \quad (5)$$

$$R_4 = L / A \quad (6)$$

式中: W_N 为单位时间内供水系统的最大供水量; W_A 为单位时间内实际需水量; A_i 、 A_j 为断面*i*、*j*的面积; L_{ij} 为断面*i*、*j*间的距离; L 为研究区水系总长度。

c. 水生态支撑能力。水生态支撑能力主要反映河网拓扑连通、水体流动更新和水环境质量状况,包括节点连接率(E_1)、连通环度(E_2)、滞水率(E_3)、活水率(E_4)和水功能区水质达标率(E_5)5个指标。节点连接率反映河网水系中每个节点连接水系的能力;连通环度用于衡量水网拓扑连通程度,数值越大则物质与能量交换能力越强;滞水率反映低流速滞流河段比例,值越大生态风险越高;活水率反映满足生态自净流速条件的河段比例;水功能区水质达标率是指在一定时间段内,水功能区内水质达到国家或地方规定的水质标准的比例,综合反映区域水环境质量水平。计算公式为:

$$E_1 = n / v \quad (7)$$

$$E_2 = (n - v + 1)/(2v - 5) \tag{8}$$

$$E_3 = L'_s/L \tag{9}$$

$$E_4 = L'_g/L \tag{10}$$

$$E_5 = N_d/N \tag{11}$$

式中: n 为河链数量; v 为河网节点数; L'_s 为水体流速小于 0.02 m/s 的水系长度; L'_g 为水体流速大于 0.10 m/s 的水系长度; N_d 为水质达标的水功能区数量; N 为水功能区总数量。

d. 社会协同发展能力。社会协同发展能力主要衡量水网系统对区域经济与人口承载力的支撑水平,包括人均 GDP (D_1)、经济增长率(D_2)、人口密度(D_3)和人均粮食占有量(D_4)4 个指标,均从统计资料中获得。人均 GDP 表征经济发展水平;经济增长率反映区域一定时期经济发展程度;人口密度反映水网规划的合理性与经济社会的可持续发展性,过高或过低均不利于协调发展;人均粮食占有量既可以反映粮食总量的稳定程度,又可以反映随着人口增长粮食的供给能力。

2.2 主客观协同赋权

采用 AHP 和熵权法进行组合赋权^[17],兼顾主客观信息,计算综合权重:①在水安全保障、水资源调控、水生态支撑和社会协同发展 4 个准则层,采用 AHP 确定其主观权重;②基于南通市 7 个水网分区的指标标准化数据,采用熵权法计算其客观权重;③为兼顾专家判断与数据之间的差异,将主、客观权重偏好系数均设置为 0.5^[18],通过线性组合得到综合权重。

2.3 水网综合能力评价

采用 TOPSIS 计算评价对象与正理想解和负理想解之间的欧氏距离,得到 7 个水网分区在相应准则层下的综合能力得分,加权计算后得到研究区水

网的综合能力得分,计算公式见文献[19]。综合能力得分取值范围为 0~1,参考杨卓媛等^[20]的研究,按 0.2 间隔进行等级划分:0~0.2、>0.2~0.4、>0.4~0.6、>0.6~0.8、>0.8~1 分别对应低等、较低、中等、中高、高等水平。

2.4 限制因子识别

为识别水网综合能力提升的限制因子,对标准化指标值进行偏离度计算,结合综合权重,确定其障碍度^[21-22],计算公式为:

$$O_{ij} = \frac{w_{z,j}(1 - P_{ij})}{\sum_{j=1}^n w_{z,j}(1 - P_{ij})} \times 100\% \tag{12}$$

式中: O_{ij} 为第 i 个评价对象第 j 个指标的障碍度; $w_{z,j}$ 为第 j 个指标的综合权重; P_{ij} 为第 i 个评价对象第 j 个指标的偏离度。

3 结果与分析

3.1 南通市水网综合能力评价

3.1.1 指标数据特性

基准年南通市水网分区的评价指标值如表 1 所示。经标准化处理后,7 个水网分区的指标值存在显著的空间异质性,指标的变异系数(C_v)呈现“高差异指标主导分区分化、低差异指标相对稳定”的特征,各指标按 C_v 值由高到低依次为: R_2 (0.824)、 R_3 (0.750)、 D_4 (0.436)、 S_3 (0.415)、 E_2 (0.395)、 E_3 (0.340)、 E_4 (0.337)、 D_3 (0.209)、 S_2 (0.183)、 E_1 (0.161)、 D_2 (0.109)、 R_4 (0.106)、 S_1 (0.105)、 D_1 (0.090)、 R_1 (0.086)、 E_5 (0.048)。其中, R_2 的变异系数最大,表明外源引调水量在各水网分区中的差异最显著,是拉开综合能力差距的首要变量。南通市水网分区综合能力差异主要集中在效能性与功能

表 1 基准年南通市水网分区评价指标值

Table 1 Evaluation index values of subarea water network in Nantong City at basic year

水网分区	$S_1/\%$	$S_2/\%$	$S_3/\%$	R_1	$R_2/\text{亿 m}^3$	$R_3/\text{万 m}^3$	$R_4/(\text{km}/\text{km}^2)$	E_1
里下河圩区	66.67	13.25	31.12	1.34	3.18	8.63	0.79	2.00
斗南垦区	85.59	9.67	17.87	1.11	11.58	35.40	0.74	1.57
高沙土区	87.38	13.71	13.5	1.37	8.48	41.81	0.74	1.51
沿江圩区	88.64	10.46	13.83	1.41	1.19	7.42	0.93	1.58
九吕区	89.52	14.34	10.59	1.44	16.97	24.66	0.91	2.17
通启区	89.47	14.77	12.31	1.44	13.34	35.89	0.89	1.52
诸岛区	75.78	9.67	21.85	1.42	0.25	0.25	0.74	1.50
水网分区	E_2	$E_3/\%$	$E_4/\%$	$E_5/\%$	$D_1/\text{万元}$	$D_2/\%$	$D_3/(\text{人}/\text{km}^2)$	D_4/kg
里下河圩区	0.30	18.90	33.00	87.50	15.88	3.11	733	718
斗南垦区	0.29	32.74	32.71	93.75	14.94	3.78	531	929
高沙土区	0.26	29.32	13.95	96.97	12.89	3.72	768	588
沿江圩区	0.31	22.42	32.14	100.00	12.40	3.50	805	504
九吕区	0.59	18.67	34.58	98.04	14.60	2.86	973	369
通启区	0.26	42.55	14.29	100.00	15.38	2.98	1056	246
诸岛区	0.57	20.00	33.58	100.00	13.98	3.50	818	387

性两类指标上,尤其是水资源调度能力与水质保障方面的差异较大,调度优化能力有待提升;结构性指标的差异相对较小,水网基础设施较为均衡。

3.1.2 权重特性

表 2 为评价指标权重。由表 2 可见,各准则层内部权重呈现“关键因子集中”的特征。水安全保障维度以冲淤岸线比例(S_3)为主导,说明通道稳定性是安全底板差异的主要决定因素;水资源调控维度的权重集中于引江水量(R_2)与河道槽蓄量(R_3),表明外源补给能力与内部蓄滞冗余共同决定分区调

表 2 评价指标权重

指标	AHP	熵权法	综合权重
S_1	0.4615	0.0375	0.2495
S_2	0.3077	0.0711	0.1894
S_3	0.2308	0.8914	0.5611
R_1	0.3402	0.0053	0.1728
R_2	0.1826	0.5568	0.3697
R_3	0.1826	0.4219	0.3023
R_4	0.2947	0.0161	0.1554
E_1	0.2500	0.0498	0.1408
E_2	0.2500	0.2023	0.2193
E_3	0.1250	0.5853	0.3325
E_4	0.1250	0.1599	0.1469
E_5	0.2500	0.0028	0.1265
D_1	0.2349	0.0115	0.1232
D_2	0.2349	0.0170	0.1260
D_3	0.1565	0.7066	0.4316
D_4	0.3737	0.2649	0.3193

控韧性;水生态支撑维度中滞水率(E_3)权重最高,表明水动力不足引起的滞水过程是生态功能受限的核心瓶颈;社会协同发展维度则由人口密度(D_3)与人均粮食占有量(D_4)共同主导,体现社会经济负荷与粮食保障需求对水网系统形成的外部压力约束。总体来说,指标权重分布呈现“核心要素突出、维度分布均衡”的特征,与指标值变异系数的分布特征一致。

3.1.3 现状评价

图 3 为南通市水网综合能力及水安全保障能力、水资源调控能力、水生态支撑能力、社会协同发展能力各准则层的评价结果。由图 3 可见,南通市 7 个水网分区综合能力存在显著空间差异,呈现“南强北弱”的空间分布格局:九吕区得分最高(0.85),属高等水平,表明其各准则层表现均衡且突出,体现了该分区作为区域水网调度枢纽的功能地位;高沙土区(0.61)与通启区(0.60)为中高水平;斗南垦区、沿江圩区及诸岛区得分为 0.46~0.53,为中等水平;里下河圩区最低(0.36),为较低水平,表明其水网系统存在较为突出的系统性薄弱环节。总体上,综合能力较强的分区多位于沿江地带,具备较好的外源水源条件与工程调控基础;综合能力偏低的分区则受位置与系统条件限制,短板更为集中。

各水网分区在不同功效维度的优势与约束存在差异。在水安全保障能力方面,九吕区得分最高,体现出较强的防洪能力与水网结构稳定性;里下河圩

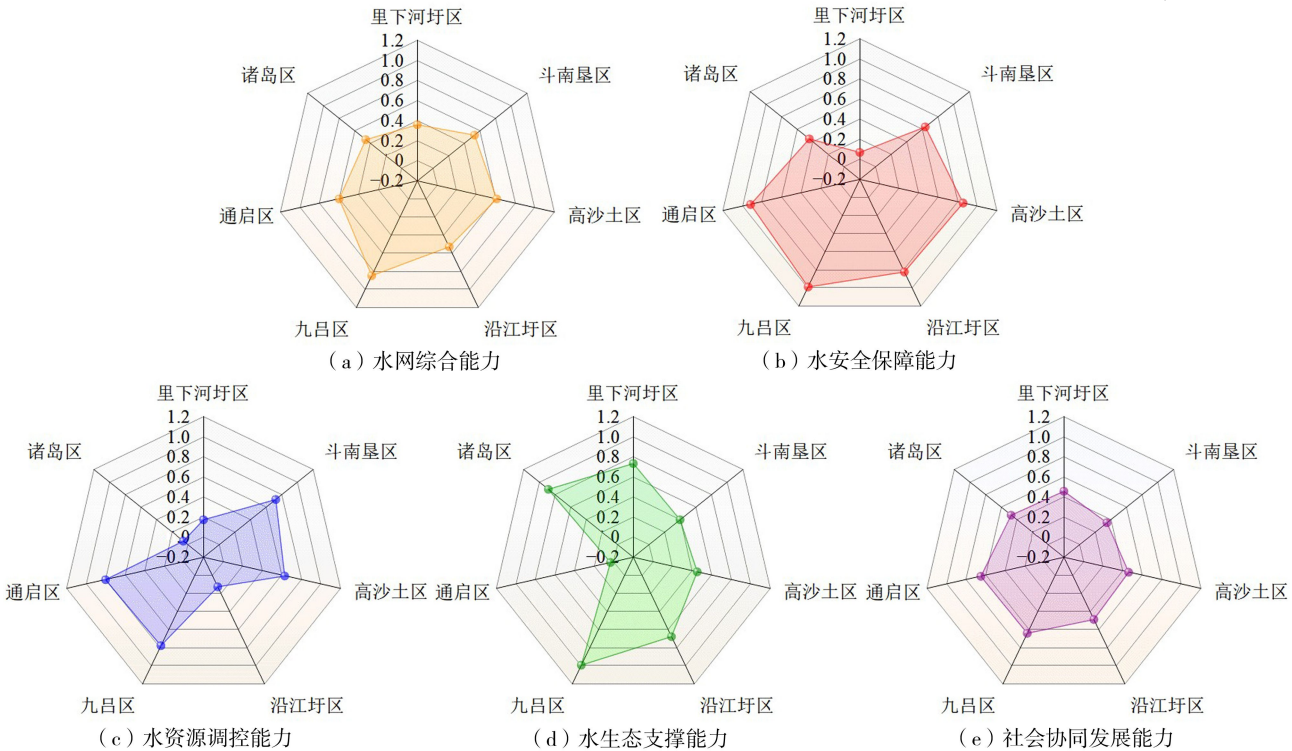


图 3 南通市水网综合能力及各准则层的评价结果

Fig. 3 Evaluation results of each criterion layer and water network comprehensive capacity of Nantong City

区与诸岛区在防洪体系与通道稳定性方面相对薄弱,安全保障能力受限。在水资源调控能力方面,分区差异更为显著,通启区得分最高,表现出较高的外源水利用与调度效率;诸岛区得分最低,反映其调度与保障体系相对不足,水源供给受约束。在水生态支撑能力方面,九吕区得分仍居首位,表明其水网的生态功能较为完善,能够有效支持水生态系统的健康;通启区与斗南垦区得分偏低,主要受水动力不足与滞水率偏高的影响,限制水体自净与生态恢复。在社会协同发展能力方面,各分区得分集中在0.4~0.6,整体差异相对较小,但斗南垦区与高沙土区在人口密度与粮食保障需求等方面承压较大。总体来看,南通市水网分区在水安全保障、水资源调控、水生态支撑、社会协同发展等准则层上表现出差异化的功能优势与结构性短板。其中,沿江地区依托较优的外源水条件与工程调控基础,综合能力较强,而里下河圩区及诸岛区等受位置条件与系统结构制约,在安全保障、水源调度及生态支撑方面仍存在明显薄弱环节。

3.2 限制因子识别与优化策略

3.2.1 限制因子识别

图4为南通市水网分区评价指标障碍度统计结果。将累计障碍度超过50%的指标定义为关键障碍因子,由图4可见,不同分区制约水网综合能力提升的关键障碍因子具有显著的空间异质性,且在“结构-功能-效能”属性维度上呈现出清晰的南北分化特征。

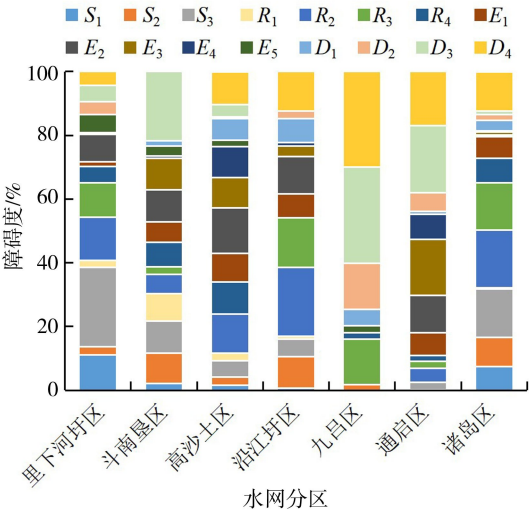


图4 南通市水网分区评价指标障碍度统计结果

Fig. 4 Obstacle degree statistical results of evaluation index of subarea water network in Nantong City

a. 北部及淮河流域分区(里下河圩区、诸岛区)的短板集中于结构性与功能性指标。里下河圩区关键障碍因子的累计障碍度为68.76%,受冲淤岸线比例(24.91%)、引江水量(13.54%)与河道槽蓄量

(10.72%)的限制,表明其核心制约在于通道稳定性不足与内部调蓄及外源补水能力较弱。诸岛区关键障碍因子的累计障碍度为69.69%,其短板同样主要来自引江水量(18.11%)、冲淤岸线比例(15.08%)与河道槽蓄量(14.81%),并伴随人均粮食占有量(12.41%)的压力,体现了资源供给能力有限和工程结构稳定性欠缺的双重约束,同时面临一定的农业生产压力。

b. 南部及沿江发达分区(九吕区、通启区)的短板则显著转向效能性压力,并叠加生态过程的约束。九吕区关键障碍因子的累计障碍度高达94.04%,其中人口密度(30.26%)与人均粮食占有量(29.93%)合计占据超60%,社会经济负荷成为制约其水网综合能力进一步提升的最主要短板。通启区关键障碍因子的累计障碍度为75.11%,虽同样由人口密度(21.07%)和人均粮食占有量(17.01%)主导,但滞水率(17.72%)的障碍度尤为突出,反映出该分区在承受外部发展压力的同时,内部水体流动性不足的生态功能阻滞问题同样严峻。

c. 其他分区(斗南垦区、高沙土区、沿江圩区)短板呈现混合性,结构、功能与效能指标交叠。斗南垦区关键障碍因子的累计障碍度为61.17%,主要受人口密度(21.69%)和连通环度(10.11%)影响;高沙土区关键障碍因子的累计障碍度为56.61%,主要受连通环度(14.27%)和引江水量(12.21%)约束;沿江圩区关键障碍因子的累计障碍度为71.00%,该区域短板集中在引江水量(21.60%)、河道槽蓄量(15.49%)与人均粮食占有量(12.30%)。这些分区短板属性复合,既存在水网连通性、资源调控能力等功能性不足,也面临人口、粮食等社会经济效能压力,需多维度协同治理。

3.2.2 优化策略

a. 结构-功能双弱型区域。①里下河圩区在结构层面应实施侵蚀岸线防护与淤积河道疏浚,提升通道稳定性,推进河湖连通与蓄滞空间恢复,优化调蓄格局;在功能层面需增强外调水保障能力,并建立闸-泵-库多目标联合调度模型,提升水资源调控与防洪排涝灵活性。②诸岛区在结构层面应加固环岛岸线,构建多元互补水源地;在功能层面需建立与独立水系相匹配的精细化水位-流量调控模式,高效利用槽蓄容积,并辅以生态补水激活水体流动性。结构-功能双弱型区域的优化策略核心在于构建稳定可靠的结构基础,以保障基本功能的高效、安全运行。

b. 效能压力-功能阻滞型区域。①九吕区在效能层面应严格实施“四水四定”,通过总量控制、产业转型与节水型社会建设,缓释人口与粮食压力;在

功能层面需融合大数据与模拟技术,开展预见性调度与自适应调控,挖掘系统潜力。②通启区在功能层面需通过优化闸泵运行、建设生态补水通道、实施河道生态化改造等措施,破解滞水率高、活水率低的瓶颈;在结构层面需打通关键断点、清除连通障碍;在效能层面应将水生态承载力纳入国土空间规划,实现经济社会与水生态健康的平衡发展。效能压力-功能阻滞型区域在结构与基础功能相对完善的背景下,短板突出表现为外部效能压力与内部生态功能的矛盾。

c. 混合约束型区域。①斗南垦区在结构层面应实施灌排渠系现代化改造与连通工程;在功能层面应推广节水灌溉以缓解粮食压力,并优化圩区排灌调度降低滞水风险。②高沙土区在结构层面需完善水网布局,增强水系连通性;在功能层面需保障外调水稳定性,并通过水位调度管理抑制滞水。③沿江圩区在功能层面应重点提升引江能力与内部槽蓄能力;在结构层面需配套实施河道拓浚与湿地恢复,增加调蓄空间,并优化农业用水方式以应对粮食压力。混合约束型区域结构、功能、效能短板交织,需要结构优化与功能提升协同推进。

4 结 论

a. 构建了融合“结构-功能-效能” 横向维度与“目标-准则-指标”纵向层级的江海平原水网综合能力评价指标体系,采用主客观协同赋权,利用TOPSIS进行综合评价,实现了南通市水网综合能力量化。

b. 南通市水网综合能力呈现南强北弱的空间分异格局。九吕区综合能力最高(0.85),各维度发展较为均衡;通启区与高沙土区处于中高水平;斗南垦区、沿江圩区及诸岛区处于中等水平;里下河圩区能力最低(0.36),主要受水安全保障与水资源调控能力不足的制约。

c. 不同水网分区的短板属性存在明显差异。北部里下河圩区、诸岛区等主要表现为结构与功能基础薄弱;南部九吕区、通启区则表现为效能压力较高与功能阻滞;过渡区如斗南垦区等的短板属性较为复合。针对不同分区特征实施差异化治理措施,有助于提升区域水网整体协同能力。

参考文献:

[1] 严登华,袁喆,严登明,等. 立体水网理论内涵、功能特征及技术框架[J]. 水科学进展,2026,37(1):1-12. (Yan Denghua, Yuan Zhe, Yan Dengming, et al. Theoretical connotations, functional characteristics, and

technical framework of Three-Dimensional Water Network [J]. Advances in Water Science,2026,37(1):1-12. (in Chinese))

[2] 王思如,顾一成,杨大文,等. 长江下游典型平原城市感潮河网水动力提升分析[J]. 水科学进展,2022,33(1):91-101. (Wang Siru, Gu Yicheng, Yang Dawen, et al. Study on hydrodynamic improvement of urban tidal river for a typical plain cities in the lower reaches of Yangtze River[J]. Advances in Water Science,2022,33(1):91-101. (in Chinese))

[3] 卢仪思,景来红,严登明,等. 南水北调西线一期工程对水源区的综合影响评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(4):10-17. (Lu Yisi, Jing Laihong, Yan Dengming, et al. Comprehensive impact assessment of the Western Route of South-to-North Water Diversion Project (phase I) on water source areas[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025,53(4):10-17. (in Chinese))

[4] 窦明,余佳琦,关键,等. 基于水资源分区的中国水系发育度与连通度相关性[J]. 水科学进展,2023,34(6):877-886. (Dou Ming, Yu Jiaqi, Guan Jian, et al. Study on relationship between water system development and connectivity in China based on water resource zoning[J]. Advances in Water Science, 2023,34(6):877-886. (in Chinese))

[5] 莫祖澜,邵卫云,刘小为. 自然与引水因素对受纳水体自净作用的影响研究[J]. 科技通报,2014,30(9):202-207. (Mo Zulan, Shao Weiyun, Liu Xiaowei. Effects of natural and water diversion factors on self-purification of the receiving waters [J]. Bulletin of Science and Technology,2014,30(9):202-207. (in Chinese))

[6] 张晓峰,石永杰,刘俊,等. 基于 AHP-熵权法的望虞河西岸圩区活水调度方案多目标优选[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):80-87. (Zhang Xiaofeng, Shi Yongjie, Liu Jun, et al. Multi-objective optimization of flowing water dispatch schemes in western polder area of Wangyu River based on AHP-entropy weight method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(3):80-87. (in Chinese))

[7] 季孔阳,李学明,高见,等. 城市暴雨洪涝灾害脆弱性评价[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):13-20. (Ji Kongyang, Li Xueming, Gao Jian, et al. Assessment of urban vulnerability to heavy rain and flood disasters[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(3):13-20. (in Chinese))

[8] 贾叶子,李瞳. 黄河流域国家水利风景区综合效益评价[J]. 水利经济,2024,42(2):20-25. (Jia Yezi, Li Tong. Comprehensive benefit evaluation of national water conservancy scenic spots in Yellow River Basin [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024,42(2):20-25. (in Chinese))

- [9] 贺蔚,章雪彤,何文浩,等.基于改进 TOPSIS 的平原河网水动力水质补水方案优选研究[J].水科学进展,2025,36(4):707-716. (He Wei, Zhang Xuotong, He Wenhao, et al. Optimal selection of hydrodynamic-water quality replenishment schemes in plain river networks on the basis of the improved TOPSIS method[J]. Advances in Water Science,2025,36(4):707-716. (in Chinese))
- [10] 孙才志,吴永杰,刘文新.基于熵权 TOPSIS 法的大连市水贫困评价及障碍因子分析[J].水资源保护,2017,33(4):1-8. (Sun Caizhi, Wu Yongjie, Liu Wenxin. Application of TOPSIS method based on entropy weight to water poverty evaluation and obstacle indicator diagnoses for Dalian City[J]. Water Resources Protection,2017,33(4):1-8. (in Chinese))
- [11] 郑景琦,邓涯,马爱兴,等.水库群调度影响下黄河流域水沙-生态-经济协调发展及制约因子研究[J].水资源保护,2025,41(6):85-94. (Zheng Jingqi, Deng Ya, Ma Aixing, et al. Research on water and sediment-ecology-economy coordinated development and limiting factors in the Yellow River Basin under influence of reservoir group operation[J]. Water Resources Protection,2025,41(6):85-94. (in Chinese))
- [12] 刘为锋,郭旭宁,李云玲,等.基于水资源空间均衡评价的“荆楚安澜”现代水网优化布局与组网方案研究[J].水资源保护,2025,41(4):27-32. (Liu Weifeng, Guo Xuning, Li Yunling, et al. Study on optimized layout and networking scheme of “Jingchu Anlan” modern water network based on spatial equilibrium evaluation of water resources[J]. Water Resources Protection,2025,41(4):27-32. (in Chinese))
- [13] Liu Leyang, Mijic A. Performance-based resilience assessment in integrated water systems: challenges and opportunities [J]. Journal of Hydrology, 2025, 662: 134042.
- [14] 侯爱冰,张东,聂龔,等.区域水网发展综合效益评价及其耦合协调机制[J].南水北调与水利科技(中英文),2025,23(2):312-322. (Hou Aibing, Zhang Dong, Nie Yan, et al. Comprehensive benefits evaluation and coupling coordination mechanism of regional water network development [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2025,23(2):312-322. (in Chinese))
- [15] 张兴源,李发文,赵勇.基于小世界网络的海河流域河网结构及功能响应[J].水科学进展,2023,34(4):541-552. (Zhang Xingyuan, Li Fawen, Zhao Yong. Structural characteristics of the river network and its functional responses in the Haihe River Basin based on small-world networks[J]. Advances in Water Science,2023,34(4):541-552. (in Chinese))
- [16] 安莉娜,范国福,吴迪,等.基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):35-41. (An Lina, Fan Guofu, Wu Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):35-41. (in Chinese))
- [17] 王富强,马尚钰,赵衡,等.基于 AHP 和熵权法组合权重的京津冀地区水循环健康模糊综合评价[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(1):67-74. (Wang Fuqiang, Ma Shangyu, Zhao Heng, et al. A fuzzy comprehensive evaluation of water cycle health in Beijing-Tianjin-Hebei region based on combined weights of AHP and entropy method [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 67-74. (in Chinese))
- [18] 舒欢,刘文娜.基于组合赋权-TOPSIS 模型的水利工程建设方案优选决策方法[J].工程管理学报,2013,27(4):83-86. (Shu Huan, Liu Wenna. Hydraulic engineering construction program optimal choice based on empowerment combination TOPSIS model [J]. Journal of Engineering Management, 2013, 27(4): 83-86. (in Chinese))
- [19] 吴明艳,曾晓春,刘兴德,等.基于熵权 TOPSIS 模型的西北五省区水资源承载力评价研究[J].中国农村水利水电,2022(12):78-85. (Wu Mingyan, Zeng Xiaochun, Liu Xingde, et al. Research on the evaluation of water resources carrying capacity in five northwest provinces based on entropy TOPSIS model [J]. China Rural Water and Hydropower,2022(12):78-85. (in Chinese))
- [20] 杨卓媛,黄宇云,夏函,等.水利新质生产力评价方法及应用[J].水资源保护,2025,41(1):92-98. (Yang Zhuoyuan, Huang Yuyun, Xia Han, et al. Evaluation method and application of new quality productive forces of water conservancy[J]. Water Resources Protection,2025,41(1):92-98. (in Chinese))
- [21] 左其亨,张志卓,吴滨滨.基于组合权重 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. (Zuo Qiting, Zhang Zhizhuo, Wu Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2020,36(2):1-7. (in Chinese))
- [22] 刘丁蓉,杨凯,孙仕.珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J].水利经济,2024,42(4):23-29. (Liu Dingrong, Yang Kai, Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(4):23-29. (in Chinese))

(收稿日期:2026-01-26 编辑:王芳)