

基于协调发展度的南通市水资源承载状态预警

李琦芸¹,董增川¹,杨光²,张玉洁³,钟加星¹

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098; 2. 南京水利科学研究院水工水力学研究所,江苏南京 210029;
3. 江苏省水土保持生态环境监测总站,江苏南京 210012)

摘要: 为了有效保障南通市水安全,降低经济社会发展进程中的水资源承载风险,基于社会经济系统与水资源系统之间的动态反馈机制,构建了考虑供水与排污约束的南通市水资源-社会经济-生态环境系统动力学模型;选取协调发展度为预警指标,提出了综合考虑预警指标预测值和指标下一年变化趋势的警情确定方法。预警结果显示,南通市目前的发展模式在前期取得了良好的成果,但随着时间的推移,水资源承载状态由Ⅳ级预警上升为Ⅲ级预警,水资源承载状态变差,需及时调整发展方向,未来应进一步提高用水效率并加强对点源污染与面源污染的治理。

关键词: 水资源承载状态;协调发展度;系统动力学;预警;南通市

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1003-9511(2022)03-0065-06

经济社会发展目标与水资源承载力的不匹配将严重影响发展的可持续性^[1]。通过开展水资源承载力的预警研究,预先找出阻碍区域和谐发展的关键因子,能够为区域发展规划及政策的制定提供科学依据,是新形势下保障水安全的有效举措^[2]。

水资源承载力常见的表征形式有两类:区域水资源可支撑最大人口容量和水资源承载力的综合评价成果^[3-4]。水资源承载力的综合评价能够更直观地反映多个系统维度的综合情况^[5]。本文采用水资源承载状态表征综合评价的内涵,指区域水资源承载一定的社会经济规模时,水资源、社会经济和生态环境系统所处状况及其协调程度^[6]。学者们已对水资源承载状态开展了一系列研究^[7-8],但多是水资源承载状态的历史分析,根据区域未来发展趋势而进行的预警研究较少。2018年,金菊良等^[9]提出预警研究应从诊断、预测、评价和调控4个方面展开。学者们基于上述框架对安徽省、南京市等地区的水资源承载状态进行预警^[10-11]。然而,研究中多是逐个预测计算指标的变化趋势,一定程度上割裂了水资源、社会经济、生态环境系统的整体性及其之间的动态联系。为提高水资源承载状态预测的合理性,需从系统论的角度出发,探讨系统内部各组成要素相互作用的过程。

南通市在经历工业化后,高污染、高排放行业不

断增加,部分区域水体污染加剧,水资源系统风险提高。本文构建了南通市水资源承载状态系统动力学仿真模型,预测2019—2040年水资源承载状态的变化趋势,选取协调发展度为预警指标对水资源承载状态进行预警。

1 研究区概况与数据来源

南通市位于江苏省东南部长江入海口北侧,属典型平原水网地区,河网密布。2018年全市水资源总量为40.64亿m³,人均水资源量555.95m³,仅为全国人均水资源量的1/4。常住人口731.00万人,城镇化率67.10%,人均GDP115280.43元。南通市本地水资源无法满足居民生活和生产活动的用水需求,且内河水环境质量不容乐观。

研究数据来源于南通市水资源综合规划、南通市水资源保护规划和《南通市水资源公报》(2009—2018年)、《南通市统计年鉴》(2009—2018年)、《南通市水环境公报》(2009—2018年)等。

2 水资源承载状态预警方法

水资源承载状态预警包括明确警义、研判警情、界定警度、预测警情、排除警患5个步骤^[9],预警模型框架见图1。

基金项目: 江苏省水利科技重点项目(2019003)

作者简介: 李琦芸(1997—),女,硕士研究生,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: qiyunl@hhu.edu.cn

通信作者: 董增川(1963—),男,教授,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail: zedong@hhu.edu.cn

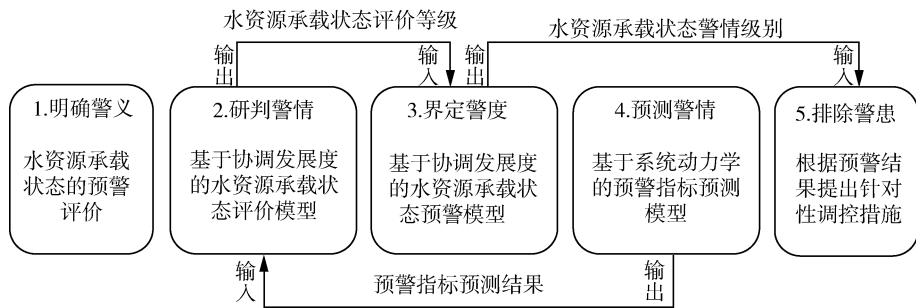


图1 水资源承载状态预警模型框架

2.1 明确警义

如承载主客体的发展程度高,且二者的发展处于相对协调的水平,认为水资源承载状态好,则无须报警。其余情况均应发出警报。

2.2 研判警情

选取协调发展度作为评判水资源承载状态的指标。发展是系统的演变过程,协调是系统间良好循环的基础。协调发展度是可以同时描述系统要素发展程度与协调水平的综合性指标^[12]。

2.2.1 构建评价指标体系

南通市地处长江流域下游,地区用水多依赖于外调长江水,考虑区域可供水量的评价指标无法准确反映其水资源开发利用的程度。因此,本文在考虑最严格水资源管理制度的基础上将“三条红线”纳入评价指标体系,分别从水资源、社会经济和生态环境3个方面选取9个指标如表1所示;结合南通市相关规划和标准确定指标评价等级标准值,见表2。

2.2.2 归一化处理

因所选指标量纲不同需要对数据进行归一化处理。为合理确定区域水资源承载状态的好坏,应将

评价方案中的数据值与指标划分等级标准值一同进行归一化处理。正向指标和逆向指标的归一化公式为

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} & \text{正向指标} \\ \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} & \text{逆向指标} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 、 p_{ij} 分别为第*j*个归一化方案中第*i*个指标的原始值和归一化值; $\max(x_{ij})$ 、 $\min(x_{ij})$ 分别为所有待归一化方案中第*i*个指标的最大值和最小值。

2.2.3 基于博弈论的综合赋权法

采用基于博弈论的综合赋权法分别确定承载主体与承载客体的指标权重^[13],采用层次分析法^[14]计算主观权重,采用熵权法^[15]计算客观权重。具体计算方法详见参考文献。

2.2.4 基于协调发展度的水资源承载状态判别

协调发展度越大则区域水资源承载状态越好^[11]。协调发展度计算公式如下:

$$D = \sqrt{CT} \quad (2)$$

其中 $C = (1 - C_{fg}^2)^k$

表1 南通市水资源承载状态评价指标体系

| 准则层1 | 准则层2 | 指标层 | 计算方法 | 指标涵义 |
|------|---------------|----------------------|---------------------|---------|
| 承载主体 | 水资源子系统 B_1 | 水资源用控比 C_1 | 用水总量/用水总量控制红线 | 水资源开发利用 |
| | | COD 纳污比 C_2 | COD 入河总量/COD 限制排污红线 | 水资源质量 |
| | | 氨氮纳污比 C_3 | 氨氮入河总量/氨氮限制排污红线 | 水资源质量 |
| 承载客体 | 社会经济子系统 B_2 | 万元 GDP 用水量 C_4 | 用水总量/生产总值 | 用水效率 |
| | | 万元 GDP COD 入河量 C_5 | COD 入河总量/生产总值 | 截污限排水平 |
| | | 万元 GDP 氨氮入河量 C_6 | 氨氮入河总量/生产总值 | 截污限排水平 |
| | 生态环境子系统 B_3 | 人均 GDP C_7 | 生产总值/总人口 | 经济发展水平 |
| | | 生态环境用水率 C_8 | 生态用水量/总用水量 | 生态环境发展 |
| | | 人均公共绿地面积 C_9 | 城市绿地面积/总人口 | 生活环境质量 |

表2 南通市水资源承载状态评价指标等级标准值

| 等级 | C_1 | C_2 | C_3 | C_4/m^3 | C_5/kg | C_6/kg | $C_7/万元$ | C_8 | C_9/m^2 |
|----|---------|---------|---------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| 好 | <0.9 | <0.9 | <0.9 | <50 | <1 | <0.1 | >18 | >0.05 | >20 |
| 中 | 0.9~1.1 | 0.9~1.1 | 0.9~1.1 | 50~90 | 1~2 | 0.1~0.2 | 80~18 | 0.01~0.05 | 10~20 |
| 差 | >1.1 | >1.1 | >1.1 | >90 | >2 | >0.2 | <8 | <0.01 | <10 |

$$T = \alpha f(p_j) + \beta g(p_j)$$

$$f(p_j) = \sum_{i=1}^{k_1} u_{si} p_{ij}$$

$$g(p_j) = \sum_{i=k_1+1}^k u_{oi} p_{ij}$$

$$C_{fg} = \sqrt{1 - \frac{f(p_j)g(p_j)}{\left(\frac{f(p_j) + g(p_j)}{2}\right)^2}}$$

式中： D 为协调发展度； C 为承载主体间的协调度； T 为系统综合指数； $f(p_j)$ 、 $g(p_j)$ 分别为第 j 个归一化方案中承载主体和承载客体发展度； p_{ij} 为第 j 个归一化方案中第 i 个指标的归一化值；第 $1 \sim k_1$ 个指标为承载主体指标，第 $k_1 + 1 \sim k$ 个指标为承载客体指标； u_{si} 为承载主体第 i 个指标的权重 $i = 1, 2, \dots, k_1$ ； u_{oi} 为承载客体第 i 个指标的权重 $i = k_1 + 1, k_1 + 2, \dots, k$ ； C_{fg} 为离差系数； K 为调节系数，取 $K = 2$ ； α 、 β 为权重系数。

2.3 界定警度

选定协调发展度作为水资源承载状态预警指标，采用不同颜色的信号灯标明警情重要级别。将“好、中、差”3个等级标准(表2)对应的归一化值按式(3)计算协调发展度，以此作为水资源承载状态的评判标准^[11]。协调发展度大于0.893时，水资源承载状态好；协调发展度小于0.618时，水资源承载状态差；协调发展度不大于0.893且不小于0.618时，水资源承载状态为中。

由预警年份水资源承载状态的评价等级和下一年协调发展度的变化共同确定预警年份警情级别，下一年协调发展度增大则水资源承载状态好转，警情级别降低，反之则警情级别升高。预警信号分5级，I级警情最为严重，预警信号判别标准见图2。

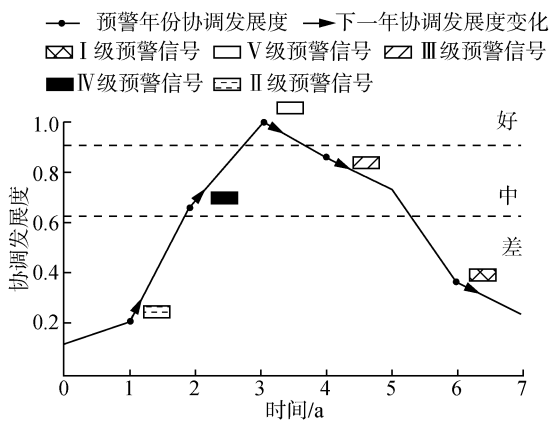


图2 水资源承载状态预警信号判别标准示意图

2.4 预测警情

本文从系统分析的角度出发，采用系统动力学法对水资源承载状态的各项评价指标进行预测。已

有多数成果在构建水资源承载力系统动力学模型时忽略了年际间缺水量以及环境污染对经济社会发展的限制作用，导致对社会经济与水资源相关指标的模拟存在一定误差^[16]。结合已构建的评价指标体系可确定系统动力学模型中需要模拟的主要变量有：人口、GDP、总用水量、COD入河量、氨氮入河量、绿地面积以及生态环境用水量。

2.4.1 因果互馈关系分析

用水量与用水总量控制红线的比值表征水资源压力的大小。因农村和城镇的用水习惯不同，农村生活用水和城镇生活用水应分别计算；生态用水考虑城镇生态用水和人工河湖补水；各产业用水受到产业增加值和产业节水技术水平的影响。人口增长和社会经济发展将持续激增用水需求，水资源压力加大。水资源压力反作用于经济发展，减缓各产业增加值增长速度。

污染物入河总量与限制排污红线的比值表征水环境压力的大小。农村和城镇生活污水处理覆盖面积不一致需分开计算；第一产业污水排放方式为面源排放，以污染物入河系数表征区域截污能力，其余污水为点源排放方式可通过污水处理率计算。水污染负荷增加使水环境压力不断增大。水环境压力反作用于经济发展，三次产业增加值增长速度降低，进而减轻水环境压力。水资源压力、水环境压力各影响因素的因果互馈关系如图3所示，蓝色箭头表示指向变量随源发变量的增加而增加，红色箭头意义相反。

2.4.2 基于动态反馈的水资源承载力SD预测模型

为更清晰地表现模型内各变量间的因果互馈关系，本文将南通市水资源承载状态SD仿真预测模型流图划分为两个部分，第一部分对水资源供给关系进行模拟，第二部分对污染物排放入河过程进行模拟，两个部分之间通过水量建立联系，模型流图见图4。

模型中共包含两个反馈回路：①三次产业用水增加→水资源用控比比值增大→三次产业增加值增长率减小→三次产业用水增加量减少→用水压力的增加速率放缓；②污染物入河量增加→污染物限排比增大→三次产业增加值增长率减小→三次产业入河污染物增加量减少→水环境压力的增加速率放缓。通过这些因素间的互馈关系链将水资源、水环境、社会经济系统关联起来，年际间用水压力和环境压力都对经济社会发展产生限制作用，模型模拟结果更贴近经济社会发展实况。

模型仿真时间为2009—2040年，时间步长为1年，其中2009—2018年为基准数据年。模型中输入

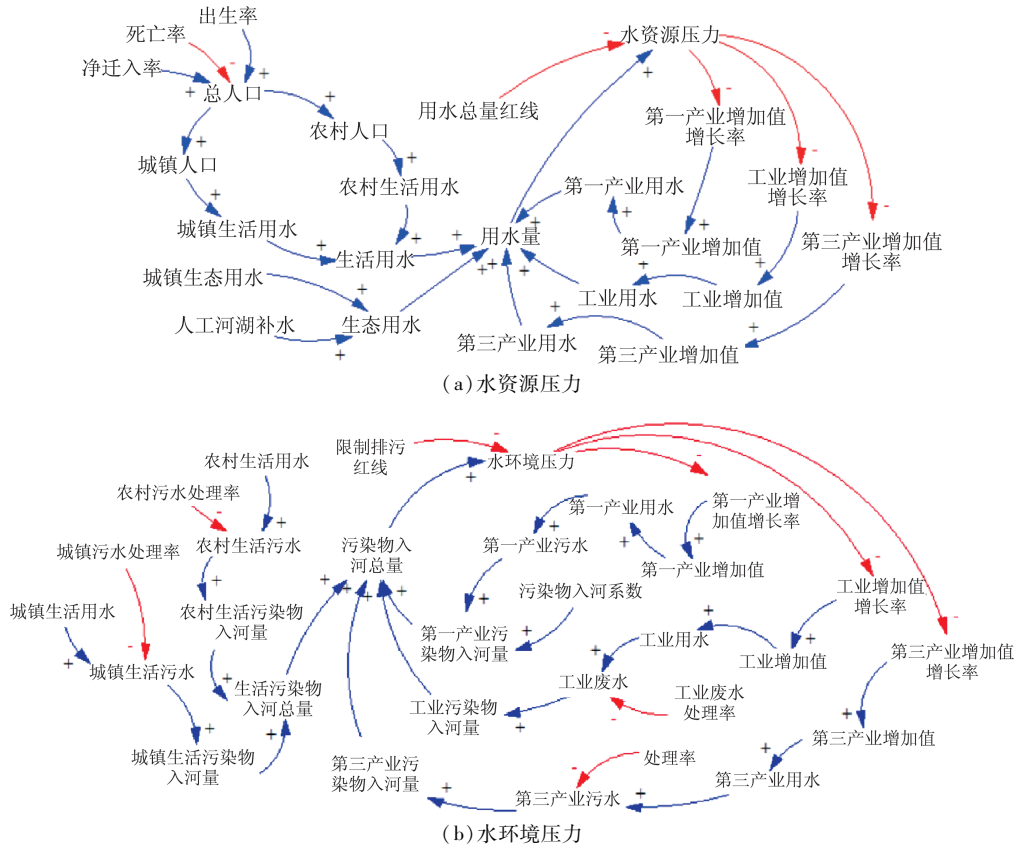


图3 水资源压力、水环境压力因果关系



图4 南通市水资源承载状态SD模型流图

的初始参数从南通市相关规划政策及水资源、水环境公报中获取,其余中间变量通过对基础数据年份进行模拟、校正获取。利用系统动力学模型对未来年份进行预测时,则通过综合考虑相关规划及政策对模型控制参数做合理的趋势外延,如三次产业增加值增长率、污水处理回归利用率等。

2.5 排除警患

对出现警情的年份,通过比较各项预警指标的预测值与等级“好”的标准值(表2)之间的差距大小,找出区域发展进程中存在的问题,并提出相应的调控措施。

3 结果与分析

3.1 指标权重

采用综合赋权法分别计算承载主体和承载客体的指标权重,计算结果见表3。

3.2 模型有效性检验

利用模型进行仿真预测前应对模型进行有效性检验。因模型涉及变量较多,结合模型结构考虑选取具代表性的指标进行检验,人口、GDP、用水量可作为有效性检验的主要指标。2009—2018年模拟误差结果见图5,各项指标误差均在15%的范围内^[1],表明模型结构正确。

3.3 南通市水资源承载状态历史分析

依据南通市2009—2018年的历史数据计算其承载主客体的协调发展度,确定各年份水资源承载状态评价等级,水资源承载状态历史变化情况如图6所示。

2009—2013年水资源承载状态为差,自2014年起由差转变为中。协调发展度整体呈上升趋势表明水资源承载状态趋好。据各评价指标的原始数据进行分析。用水总量变化不大,水体污染负荷不断减少,水资源子系统状态逐渐好转。产业结构调整升级,人均GDP逐渐上升,用水效率与污水处理率提高,生态环境保护得到重视,绿地面积逐年增加,承载客体发展程度提高。

3.4 南通市水资源承载状态预警

据现状发展模式下未来南通市水资源承载状态的预测结果,计算南通市2019—2040年承载主体与承载客体之间的协调发展度,南通市水资源承载状态预警结果如图7所示。

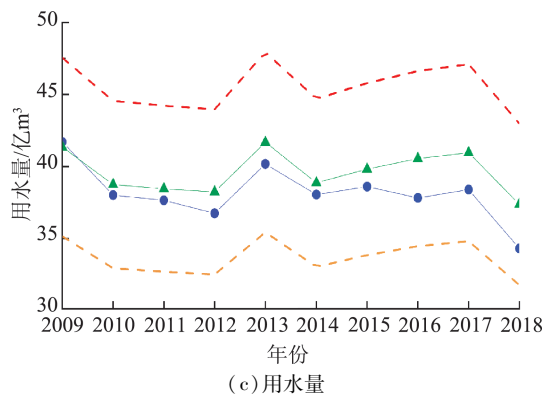
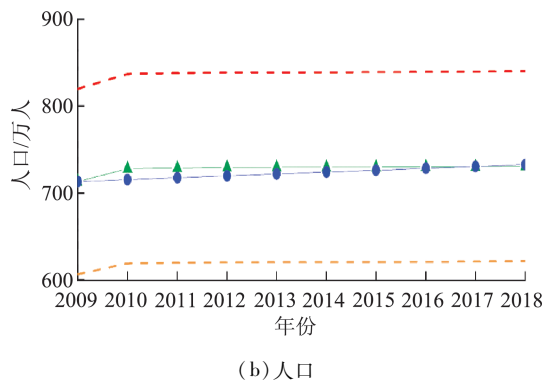
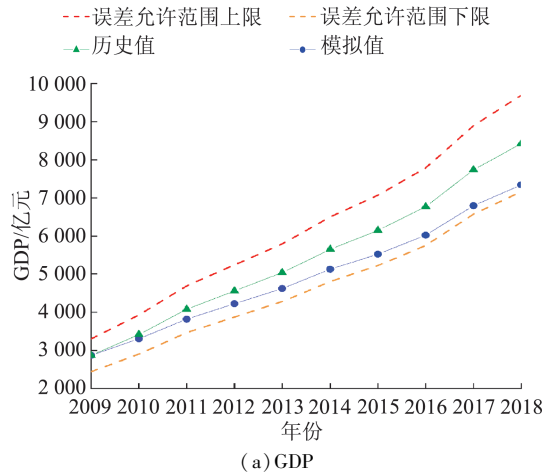


图5 南通市水资源承载状态系统动力学模型模拟误差分析

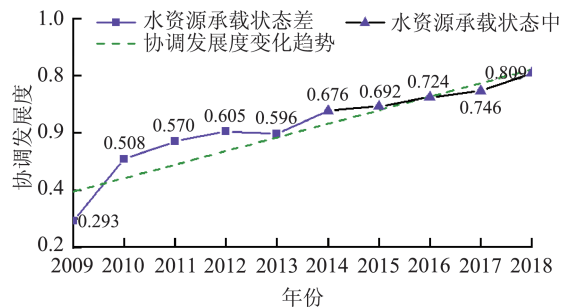


表3 南通市水资源承载状态评价指标权重

| 方法 | C ₁ | C ₂ | C ₃ | C ₄ | C ₅ | C ₆ | C ₇ | C ₈ | C ₉ |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 层次分析法 | 0.191 | 0.402 | 0.407 | 0.161 | 0.166 | 0.158 | 0.166 | 0.200 | 0.150 |
| 熵权法 | 0.500 | 0.250 | 0.250 | 0.224 | 0.111 | 0.111 | 0.224 | 0.165 | 0.165 |
| 综合权重 | 0.356 | 0.321 | 0.324 | 0.217 | 0.117 | 0.116 | 0.218 | 0.169 | 0.163 |

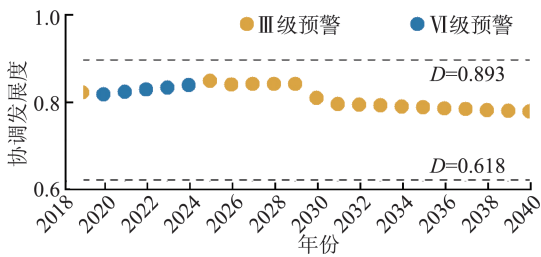


图7 水资源承载状态预警结果

未来南通市水资源承载状态维持在中等,承载主客体间的协调发展度出现小幅增加后呈持续减小趋势。2020—2024年,节水和截污水平不断提高使得承载主体发展较好,承载主客体间的协调发展度持续增加,但仍处于中等水平,预警警度为Ⅳ级。2025—2040年,南通市用水量不断增加,氨氮入河量亦呈增长趋势,水资源子系统状态愈下,水资源的过度开发导致水资源承载主体的支撑力不断减小,不足以支撑社会经济的发展、满足改善生态环境的需求,水资源承载主客体间的发展无法达到相对协调的状态,南通市水资源承载状态趋差,预警警度上升为Ⅲ级。

3.5 南通市水资源承载状态调控措施

针对上述问题应及时采取调控措施。用水总量控制方面:①应完善循环用水系统、加强对灌区的渠系改造并大力推广节水器具,从工业、农业和生活3个方面提高用水效率;②增加长江引调水,缓解用水紧张。污染控制方面:①监管高污染、高排放企业,全面实施禁磷措施,加强对现有污水处理厂的监督检查,提升截污限排水平;②对南通市施行江河库渠联调联控方案,通过合理的水生态调控可有效提升河道水质,改善水生态环境。

4 结论

a. 提出了基于系统动力学与协调发展度的水资源承载状态预警方法,并对南通市现状发展趋势下未来水资源承载状态的警情进行了分析。南通市水资源承载状态自2025年起长期处于黄灯区,协调发展度一直在减小,该发展模式是不可持续的。

b. 通过构建南通市水资源-社会经济-生态环境系统的系统动力学仿真模型对南通市2019—2040年的水资源承载状态进行预测。南通市的节水技术水平未得到有效提高使得用水量持续增加;治污能力较弱导致区域水环境污染超负荷。

参考文献:

[1] 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.

[2] 龙秋波,朱文彬,吕爱锋.水资源承载风险监测预警理论与方法探析[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1147-1156.

[3] 李冰,董增川,杭庆丰,等.盐城市水资源承载状态量化研究[J].水利经济,2019,37(1):65-69.

[4] 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.

[5] 李豫新,武庆彬.可持续发展视角下基于SD模型的干旱地区水资源承载力研究:以新疆地区为例[J].生态经济,2018,34(4):175-179.

[6] LI Yi, YANG Yanzhao, YAN Huimin, et al. Research methods of water resources carrying capacity: progress and prospects[J]. Journal of Resources and Ecology, 2018, 9(5):455-460.

[7] CUI Yi, FENG Ping, JIN Juliang, et al. Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved the entropy weight method[J]. Entropy, 2018, 20(5):359.

[8] 金菊良,杨通竹,郦建强,等.投影寻踪方法在水资源承载力评价与预测中的应用[J].水利水运工程学报,2020(4):10-16.

[9] 金菊良,陈梦璐,郦建强,等.水资源承载力预警研究进展[J].水科学进展,2018,29(4):583-596.

[10] CHEN Menglu, JIN Juliang, NING Shaowei, et al. Early warning method for regional water resources carrying capacity based on the logical curve and aggregate warning index [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020,17(7):2206.

[11] YANG Guang, DONG Zengchuan, FENG Shengnan, et al. Early warning of water resource carrying status in Nanjing City based on coordinated development index[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 284:124696.

[12] 何兵,高凡,唐小雨,等.基于协调发展度模型的叶尔羌河健康评价[J].干旱区研究,2018,35(6):1262-1270.

[13] SHAN Chengju, YANG Jianghao, DONG Zengchuan, et al. Study on river health assessment weight calculation [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2020, 29(2):1839-1848.

[14] 张乃平,吴雪梅.基于FAHP的PPP水利项目风险评价[J].水利经济,2018,36(2):1-6.

[15] 高慧忠,刘慧,许凤冉,等.基于熵权法的跨省水生态补偿标准测算与资金分配:以东江流域为例[J].水利经济,2021,39(4):72-76.

[16] 徐晨光,黄佳,满洲.基于SD-EF模型的郑州市水资源承载力研究[J].中国农村水利水电,2020(12):9-14.

(收稿日期:2021-11-16 编辑:张志琴)