

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.008

# 基于改进粒子群优化算法的区域水量水质联合配置模型

方国华<sup>1</sup>,王雪<sup>2</sup>,方应学<sup>3</sup>,张钰<sup>1</sup>

(1. 河海大学水利水电学院,江苏南京 210098; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司,河南郑州 450003;  
3. 南水北调东线江苏水源有限责任公司,江苏南京 210029)

**摘要:**综合考虑区域水资源水量和水质两个因素,以供水净效益最大、区域总缺水最小、COD排放量最小为目标建立区域水量水质联合配置多目标模型;为提高算法的计算精度和全局寻优能力,对粒子群优化算法进行了改进并用于模型求解。将模型用于江苏省靖江市水资源配置研究,结果表明:基本方案和节水方案下的用水总量和COD排放量均在其限值范围内,节水方案下供水净效益比基本方案低3.0亿元,缺水量和COD排放量分别比基本方案低1290万m<sup>3</sup>、1062.7t,说明得出的配置方案合理可行。在节水方案下进行区域水资源配置,在缓解区域缺水状况的同时,能够有效减少COD排放量,可为解决区域水质型缺水问题提供决策参考。

**关键词:**水资源配置;水量;水质;多目标模型;粒子群优化算法;靖江市

**中图分类号:**TV212.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)03-0058-07

**Regional water quantity and water quality joint allocation model based on improved particle swarm optimization algorithm** // FANG Guohua<sup>1</sup>, WANG Xue<sup>2</sup>, FANG Yingxue<sup>3</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup> (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 3. Jizngsu Water Source Co. Ltd. of the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Considering the water quantity and water quality of regional water resources comprehensively, a multi-objective regional water quantity and water quality joint allocation model was established, with the goals of maximizing the net benefit of water supply and minimizing the total water shortage, and COD emission in the region. To improve the calculation accuracy and global optimization ability, the particle swarm optimization algorithm was improved and used to solve the model. A case study of Jingjiang City in Jiangsu Province shows that the total water consumption and COD emission in both the basic scheme and water-saving scheme are within their limits. The net benefit of water supply in the water-saving scheme is 300 million CNY lower than that in the basic scheme, and the water shortage and COD emission in the water-saving scheme are 12.9 million m<sup>3</sup> and 1062.7 t lower than those in the basic scheme, demonstrating that the joint allocation scheme formulated in this paper is reasonable and feasible. The allocation of regional water resources under the water-saving scheme can alleviate regional water shortage, and also effectively reduce COD emission, which can provide a reference for decision-making in solving the problem of regional water shortage induced by water quality.

**Key words:** water resources allocation; water quantity; water quality; multi-objective model; particle swarm optimization; Jingjiang City

我国水资源时空分布不均、区域供需不平衡、水资源配置不充分等问题亟待解决,有必要对区域内有限的水资源进行合理配置。在进行区域水资源合理配置时,具有一定数量且达到一定水质标准的水

资源才能保证供水发挥预期效益,同时需综合考虑用水过程中污染物排放对水环境的影响。因此,应进行区域水量水质联合配置,以促进区域水资源的高效利用和水环境的持续改善<sup>[1]</sup>。

基金项目:江苏省水利科技项目(2020005)

作者简介:方国华(1964—),女,教授,博士,主要从事水资源规划、利用、配置与调度研究。E-mail:hhufgh@163.com

进入 21 世纪以来,学者们对于区域水资源合理配置的研究从仅考虑水量分配发展到水量水质统筹考虑。王好芳等<sup>[2]</sup>考虑水量和水质两个要素,建立了包含多个子模型的水资源多目标协调配置模型;赵斌等<sup>[3]</sup>基于分质供水思想建立了水资源合理配置的分质供水数学模型;吴泽宁等<sup>[4]</sup>构建了基于生态经济学的水质水量统一优化配置模型体系框架;裴源生等<sup>[5]</sup>以水循环模拟为基础对水量水质进行统一配置;严登华等<sup>[6]</sup>提出面向生态的水资源合理配置与管理模式,通过面向生态的水资源配置确保湿地生态需水;董增川等<sup>[7]</sup>以减少污水排放为目标,构建了包括水质控制约束的区域水量水质联合调度耦合模型;张守平等<sup>[8,9]</sup>基于耗水平衡和规模优化配置的水质模拟系统构建了水量水质联合配置模型,并在湟水干流进行实例研究;谢新民等<sup>[10]</sup>根据生态文明建设需要与地下水资源保护的的特殊性,构建了基于地下水“双控”的水资源配置模型;邹进<sup>[11]</sup>基于二元水循环理论,构建了考虑水资源质、量均衡的城市用水优化配置模型;黄显峰等<sup>[12]</sup>构建了基于碳足迹的区域水资源优化配置模型,并采用多目标规划方法进行求解;金菊良等<sup>[13]</sup>综合考虑水资源-经济社会-生态环境的复合关系,采用联系系数和耦合协调度相结合的方法对区域水资源空间均衡性进行评价。由此可见,现有研究从不同角度出发,对水量水质联合配置模型的构建及求解方法进行了不同程度的研究,但目前关于水量水质联合配置的研究仍处于探索阶段,尚未有成熟的模型可供直接使用。

本文根据区域水量水质联合配置的内涵,研究建立区域水量水质联合配置多目标模型。考虑到粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 具有收敛速度快、搜索效率高等优点,同时也存在早熟收敛、易陷入局部最优解等问题,对其参数进行改进,应用于多目标模型的求解中,并选择江苏省靖江市进行实例应用研究。

## 1 区域水量水质联合配置模型的建立

### 1.1 目标函数

区域水量水质联合配置的要求是以实现区域经济社会-生态环境综合效益最大为目标。本文遵循易于量化、具有较好代表性且符合水资源合理配置内在要求等原则,选择各类效益的量化指标。

**a. 经济效益目标。**经济效益是指由供水带来的在生活、生产中产生的效益,如经济部门产生的净利润、国内生产总值等。供水净效益能够直观反映水资源利用过程中产生的效益,本文选用区域内供水净效益最大为经济效益目标,即:

$$f_1 = \max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I x_{ijk} b_{ijk} a_{ijk} h_{ijk} \quad (1)$$

其中

$$a_{ijk} = \frac{1 + n_{ik\max} - n_{ik}}{\sum_{i=1}^I (1 + n_{ik\max} - n_{ik})}$$

$$h_{ijk} = \frac{1 + m_{jk\max} - m_{jk}}{\sum_{j=1}^J (1 + m_{jk\max} - m_{jk})}$$

式中:  $x_{ijk}$  为水源  $i$  向  $k$  子区用水户  $j$  供给的水量, 万  $\text{m}^3$ ;  $b_{ijk}$  为水源  $i$  向  $k$  子区用水户  $j$  供水的供水净效益系数, 元/ $\text{m}^3$ , 采用分摊系数法计算;  $a_{ijk}$  为水源  $i$  向  $k$  子区用水户  $j$  供水的供水次序系数;  $h_{ijk}$  为  $k$  子区用水户  $j$  接受水源  $i$  的用水公平系数;  $I, J, K$  分别为水源、用水户和供水子区的数量;  $n_{ik}$  为水源  $i$  向  $k$  子区供水的供水次序序号;  $n_{ik\max}$  为供水次序序号最大值;  $m_{jk}$  为  $k$  子区用水户  $j$  的用水次序序号;  $m_{jk\max}$  为用水次序序号最大值。

**b. 社会效益目标。**社会效益目标要求统筹兼顾各用水户的用水比例和公平性,体现在社会稳定、居民生活质量等方面。区域总缺水量的大小能反映人类生活、生产及生态环境用水的满足程度,故本文选用区域总缺水量最小为社会效益目标,即:

$$f_2 = \min \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (D_{jk} - \sum_{i=1}^I x_{ijk}) \quad (2)$$

式中  $D_{jk}$  为  $k$  子区用水户  $j$  的需水量, 万  $\text{m}^3$ 。

**c. 生态环境效益目标。**区域水资源配置结果对水环境有多方面的影响,不同的配置结果可能促进或阻碍区域生态环境的改善。COD 是废水中对环境造成污染的主要成分,故本文选用区域内 COD 排放量最小为生态环境效益目标,即:

$$f_3 = \min \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I 0.01 x_{ijk} p_{jk} [\rho_{0jk} (1 - r_{1k}) + \rho_{1jk} r_{1k} - \rho_{1jk} r_{2k}] \quad (3)$$

式中:  $p_{jk}$  为  $k$  子区  $j$  用水户的污水排放系数;  $\rho_{0jk}$ 、 $\rho_{1jk}$  分别为  $k$  子区  $j$  用水户在污水处理前、后产生的 COD 质量浓度,  $\text{mg/L}$ , 参考 GB 8978—1996《污水综合排放标准》确定;  $r_{1k}$  为  $k$  子区污水处理率, %;  $r_{2k}$  为  $k$  子区污水处理回用率, %。

### 1.2 约束条件

区域水量水质联合配置模型要求从分质供水的角度,以区域水量供需平衡和污染物排放控制为前提,满足水源可供水量约束、用水户需水量约束、水功能区纳污能力约束等约束条件。

**a. 水源可供水量约束。**子区内各水源供给各用水户的水量之和不超过该水源的可供水量,即:

$$\sum_{j=1}^J x_{ijk} \leq X_{ik} \quad (4)$$

式中  $X_{ik}$  为水源  $i$  在  $k$  子区的可供水量, 万  $\text{m}^3$ 。

**b. 用水户需水量约束。** 分配给每个子区各用水户的总水量应以其最大需水量为上限, 以其最小需水量为下限, 即:

$$D_{jk\min} \leq \sum_{i=1}^I x_{ijk} \leq D_{jk\max} \quad (5)$$

式中  $D_{jk\min}$ 、 $D_{jk\max}$  分别为  $k$  子区  $j$  用水户的最小、最大需水量, 万  $\text{m}^3$ 。

**c. 水功能区纳污能力约束。** 规划时期内严格控制 COD 排放量, 使其不超过区域内总纳污能力, 即:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K 0.01x_{ijk}P_{jk} \cdot [\rho_{0jk}(1-r_{1k}) + \rho_{1jk}r_{1k} - \rho_{1jk}r_{2k}] \leq W_{\text{纳}} \quad (6)$$

式中  $W_{\text{纳}}$  为区域内 COD 纳污能力, t。

**d. 分质供水约束。** 不同水质等级的水源应供给相应水质要求的用水户, 根据 GB 3838—2002《中华人民共和国地表水环境质量标准》等相关规范, I ~ III 类水可供给各行业; IV 类水不能作为饮用水源, 可供给工业、农业、生态环境等用水; V 类水只能用于农业、生态用水等。

**e. 决策变量非负约束。** 该约束满足:

$$x_{ijk} \geq 0 \quad (7)$$

## 2 模型求解

本文所建立的区域水量水质联合配置模型涉及变量较多, 计算复杂, 使用常规方法求解较为困难。PSO 算法是一种新型的群体智能进化算法, 具有收敛速度较快、搜索效率高、迭代过程简单等优点, 在函数优化等领域得到了广泛应用。同时, PSO 算法存在早熟收敛、易陷入局部最优解的问题, 因此, 本文根据粒子群算法迭代特点对其参数进行优化, 用于求解区域水量水质联合配置多目标模型。

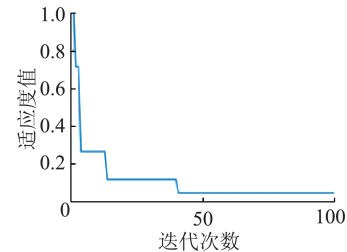
### 2.1 PSO 算法的改进

影响粒子群算法寻找最优解精度和效率的主要参数有个体学习因子  $c_1$ 、社会学习因子  $c_2$  和惯性权重  $w$ , 为避免算法容易早熟和后期容易在全局最优解附近产生震荡的现象, 本文采用  $w$  随迭代次数的增加而线性递减的方式对其进行改进, 使得初始迭代时粒子速度较大, 具有很好的全局搜索能力; 随着迭代次数的累加, 粒子速度变小, 具有很好的局部搜索能力。由于  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $w$  控制着算法寻优的进化方向, 在初步搜索阶段  $c_1$  取较大值,  $c_2$  取较小值, 增强粒子的全局搜索能力; 在搜索的后阶段  $c_1$  取较小值,  $c_2$  取较大值, 增强粒子的局部搜索能力。具体改进公式如下:

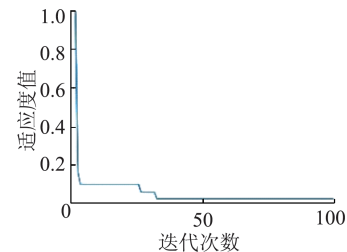
$$\begin{cases} w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min})t/T_{\max} \\ c_1 = R_1 - R_2t/T_{\max} \\ c_2 = R_3 + R_4t/T_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $w_{\max}$ 、 $w_{\min}$  分别为惯性权重的最大和最小值;  $t$ 、 $T_{\max}$  分别为当前迭代次数和最大迭代次数;  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  为初始设置的定值, 用于调节  $c_1$ 、 $c_2$  在搜索过程中的大小。

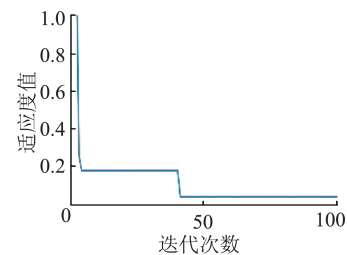
为验证算法改进后的有效性, 选择函数  $y = x_1^2 + x_2^2 - x_1x_2 - 10x_1 - 4x_2 + 52$  进行算法测试, 该函数在  $x_1 = 4$ ,  $x_2 = 12$  时取得理论极小值 0。设置算法基本参数为粒子个数  $n = 100$ 、 $T_{\max} = 100$ , 计算不同情况下的函数极值, 算法在①  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $w$  均不改进; ②  $c_1$ 、 $c_2$  不改进,  $w$  改进; ③  $c_1$ 、 $c_2$  改进,  $w$  不改进; ④  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $w$  均改进 4 种情况下计算出的适应度最优值分别为 0.049、0.020、0.038、0.008。4 种情况下迭代过程见图 1, 各情况下收敛速度相差不大, 但在参数  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $w$  均改进时, 算法精度最高, 寻优性能最好, 在一定程度上能够避免算法陷入局部最优解, 提高了算法的计算精度。



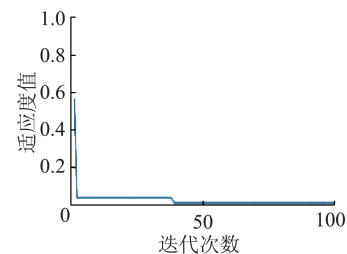
(a)  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $w$  均不改进



(b)  $c_1$ 、 $c_2$  不改进,  $w$  改进



(c)  $c_1$ 、 $c_2$  改进,  $w$  不改进



(d)  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $w$  均改进

图 1 不同参数改进方案下算法迭代过程

Fig. 1 Algorithm iteration process under different parameter improvement schemes

## 2.2 求解思路及步骤

区域水量水质联合配置以实现经济-社会-生态环境综合效益最大为目标,在满足各类约束条件的情况下生成水资源合理配置方案。由于多目标模型中各目标函数表示的各类指标量纲和优化标准存在差别,本文采用标准值法<sup>[14]</sup>构造各个目标的适应度函数。为方便模型求解,运用线性加权法将多目标问题转化为单目标问题,即区域综合效益目标为

$$f' = \sum_{m=1}^3 \lambda_m f'_m \quad (9)$$

式中:  $\lambda_m$  为第  $m$  个目标的权重系数,运用序关系分析法<sup>[15]</sup>确定;  $f'_m$  为第  $m$  个标准化后的目标函数。

针对模型中的众多约束条件,采用罚函数法<sup>[16]</sup>对其进行处理。具体求解步骤为:①选择配置方案,读取模型计算所需数据;②确定初始化迭代参数,包括粒子个数、最大迭代次数等;③在变量取值范围内随机生成  $n$  个初始粒子并计算其适应度,记录初始解中的个体极值和全局极值;④运用式(8)更新各粒子的速度和位置,计算更新后粒子的适应度并与其经过的最好位置比较,得到迭代后的个体极值和全局极值;⑤若满足收敛条件或达到最大迭代次数  $T_{\max}$ ,则输出结果,否则转到步骤④,继续进行迭代。

## 3 实例研究

### 3.1 研究区概况

靖江市位于江苏省中部,隶属泰州市,总面积 655.58 km<sup>2</sup>,拥有长江岸线 52.3 km,是长江三角洲经济区的重要组成部分。2018 年,靖江市总供水量 31 161.0 万 m<sup>3</sup>,其中地表水源供水量 31 140.4 万 m<sup>3</sup>,由本地地表水、过境水及再生水组成;地下水供水量 20.6 万 m<sup>3</sup>,全部为深层地下水。按用水户来看,农业用水量 24 551 万 m<sup>3</sup>,工业用水量 2 726 万 m<sup>3</sup>,生活用水量 3 644 万 m<sup>3</sup>,生态环境补水量 240 万 m<sup>3</sup>。靖江市本地地表水资源量相对有限,多年平均地表水资源量仅 1.65 亿 m<sup>3</sup>,远不能满足当地经济社会发展的需要。2018 年,靖江市 12 个水功能区水质达标率为 87.4%,水环境质量总体呈向好趋势,但与水功能区水质全面达标尚有一定距离。因此,针对靖江市本地水资源不足、水环境质量需进一步改善等特点和需求,有必要对其水资源进行水量水质联合配置。

### 3.2 水资源供需分析

选取 2018 年为现状水平年,2025 年为规划水平年,对 75% 保证率下的水资源配置情况进行研

究。根据靖江市自然地理、水资源现状,考虑行政区域的完整性,将全市划分为 6 个子区,见图 2。

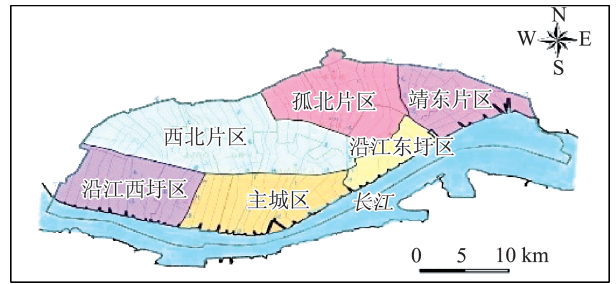


图 2 靖江市水资源分区

Fig. 2 Water resources zoning in Jingjiang City

靖江市供水水源包括本地地表水、地下水、过境水和再生水。根据分质供水原则,将本地地表水分为 I ~ III 类水和 IV ~ V 类水,采用径流系数法计算其可供水量;规划水平年确保地下水开采量不超过其限制指标 45 万 m<sup>3</sup>;过境水包括引提水和公共自来水,根据取水口径流量、设计能力等计算引提水可供水量,靖江市雅桥港水源厂取水规模为 25 万 m<sup>3</sup>/d,根据《靖江城市总体规划》,规划新建水源厂 1 座,并扩大江防净水厂规模,规划水平年供水规模扩大至 30 万 m<sup>3</sup>/d;靖江市现有 8 座污水处理厂,规划污水处理规模共 22.1 万 m<sup>3</sup>/d,规划水平年计划提高再生水回用率至 23%。规划水平年靖江市可供水量见表 1。

表 1 靖江市规划水平年可供水量 单位:万 m<sup>3</sup>

Table 1 Water supply of Jingjiang City in

planning level year unit: 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>

水资源分区	本地地表水		过境水		地下水	再生水	合计
	I ~ III 类	IV ~ V 类	自来水	引提水			
主城区	704	369	2 770	5 230	30	1 051	10 154
西北片区	650	340	2 617	4 044	1	39	7 691
孤北片区	448	231	1 774	2 075	2	171	4 701
靖东片区	346	176	1 314	2 747	10	329	4 922
沿江东圩区	213	104	756	1 497	1	230	2 801
沿江西圩区	447	231	1 708	2 985	0	39	5 410
合计	2 808	1 451	10 939	18 578	44	1 859	35 679

考虑不同节水水平对需水量的影响,本文设置基本方案和节水方案进行需水量预测,以定额法为主、结合人口增长率法计算规划水平年生活、工业、农业及生态需水量,计算结果见表 2。

### 3.3 模型求解

#### 3.3.1 参数确定

a. 目标权重系数。采用序关系分析法计算出经济效益目标、社会效益目标、生态环境效益目标的权重系数值分别为 0.31、0.28 和 0.41。

表2 靖江市规划水平年各方案需水量

单位:万 m<sup>3</sup>Table 2 Water requirement of Jingjiang City in each scheme in planning level year unit: 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>

方案	水资源分区	生活需水	农业需水	工业需水	生态需水	需水总量
基本方案	主城区	1863	5255	1762	715	9595
	西北片区	498	5775	542	164	6979
	孤北片区	461	3814	678	181	5134
	靖东片区	443	3101	759	152	4455
	沿江东圩区	286	1772	230	107	2395
	沿江西圩区	423	3828	1114	149	5514
	合计	3974	23545	5085	1468	34072
节水方案	主城区	1736	4412	1702	664	8514
	西北片区	469	4909	524	153	6055
	孤北片区	435	3236	655	168	4494
	靖东片区	415	2650	733	141	3939
	沿江东圩区	268	1512	223	99	2102
	沿江西圩区	398	3258	1076	138	4870
	合计	3721	19977	4913	1363	29974

b. 供水净效益系数。采用分摊系数法计算出工业、农业供水净效益系数分别为 175.4 元/m<sup>3</sup>、11.2 元/m<sup>3</sup>;生活、生态供水净效益难以定量计算,考虑二者相对于工业、农业用水的重要性程度,生活、生态供水净效益系数分别取 300 元/m<sup>3</sup>和 220 元/m<sup>3</sup>。

c. 供水次序系数及用水公平系数。以各子区中的生活用水为例,有 I ~ III类地表水和自来水两种水源,其供水顺序依次为自来水、I ~ III类地表水,供水次序系数分别为 0.67 和 0.33。同理计算出其他水源对不同用水户的供水次序系数及用水公平系数,见表 3。

d. 废水中 COD 质量浓度及污水排放系数。靖

表3 供水次序系数及用水公平系数取值

Table 3 Values of water supply order coefficient and water consumption equity coefficient

系数	生活用水		农业用水				工业用水			生态用水		
	I ~ III类地表水	自来水	I ~ III类地表水	IV ~ V类地表水	引提水	再生水	自来水	地下水	再生水	IV ~ V类地表水	自来水	再生水
供水次序系数	0.33	0.67	0.20	0.40	0.30	0.10	0.33	0.50	0.17	0.33	0.17	0.50
用水公平系数	0.67	0.40	0.33	0.67	1.00	0.10	0.67	1.00	0.30	0.33	0.20	0.33

表4 基本方案下水资源配置结果

单位:万 m<sup>3</sup>

Table 4 Results of water resource allocation in basic scheme

unit: 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>

水资源分区	生活用水		农业用水				工业用水			生态用水			合计
	I ~ III类地表水	自来水	I ~ III类地表水	IV ~ V类地表水	引提水	再生水	自来水	地下水	再生水	IV ~ V类地表水	自来水	再生水	
主城区	225	1628	477	201	3750	671	1509	25	217	166	412	104	9385
西北片区	180	309	466	190	4407	22	512	1	8	65	76	9	6245
孤北片区	123	338	307	141	2789	68	609	1	39	18	117	23	4573
靖东片区	86	356	212	101	2390	191	666	7	87	22	90	40	4248
沿江东圩区	63	222	129	76	1225	108	152	1	45	11	36	35	2103
沿江西圩区	103	320	278	144	2987	20	1082	0	7	61	79	5	5086
合计	780	3173	1869	853	17548	1080	4530	35	403	343	810	216	31640

江市规划水平年生活、工业污水处理率为 100%,污水排放系数分别为 0.85 和 0.80,处理后污水中 COD 质量浓度为 120 mg/L;根据靖江市农业生产现状,确定农业灌溉回归水中 COD 质量浓度为 80 mg/L,污水排放系数为 0.4,农业灌溉回归水直接入河。

e. 用水户最小需水量。生活、工业、农业及生态用水最小需水量分别取实际需水量的 95%、85%、75% 和 90%。

f. 水功能区纳污能力。靖江市规划水平年 COD 纳污能力为 22960.5 t。

g. 算法参数。设置粒子个数为 1 000,最大迭代次数为 1 000,惯性权重的最大和最小值分别为 0.9 和 0.4,  $R_1 = 2.5, R_2 = 2.0, R_3 = 0.5, R_4 = 2.0$ 。

### 3.3.2 水资源配置结果

运用改进的 PSO 算法对模型求解,基本方案和节水方案下的水资源配置结果分别见表 4 和表 5。

### 3.4 结果分析

靖江市规划水平年基本方案和节水方案下经济效益目标、社会效益目标和生态环境效益目标值见表 6。节水方案下供水净效益比基本方案低 3.0 亿元,但缺水量和 COD 排放量也分别比基本方案低 1290 万 m<sup>3</sup>和 1062.7 t。两种方案下用水总量均不超靖江市 2025 年控制目标 4.0 亿 m<sup>3</sup>,且 COD 排放总量均控制在纳污能力限制范围 22960.5 t 内,表明配置方案合理可行。

各方案下的用水户及子区缺水量分别见表 7 和表 8,节水方案下靖江市总缺水量较小,表明节水水平的提高对缓解靖江市缺水情况产生了积极作用。

表5 节水方案下水资源配置结果

单位:万 m<sup>3</sup>

Table 5 Results of water resource allocation in water-saving scheme

unit: 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>

水资源分区	生活用水		农业用水				工业用水			生态用水			合计
	I~III类地表水	自来水	I~III类地表水	IV~V类地表水	引提水	再生水	自来水	地下水	再生水	IV~V类地表水	自来水	再生水	
主城区	206	1530	449	193	2960	651	1477	24	193	150	397	101	8331
西北片区	167	302	456	176	4054	14	490	1	5	60	75	7	5807
孤北片区	114	320	290	135	2712	40	590	1	35	18	109	21	4385
靖东片区	77	336	208	85	2150	137	634	6	82	20	89	29	3853
沿江东圩区	57	209	116	70	1132	63	155	1	39	10	34	32	1918
沿江西圩区	93	305	268	135	2524	15	1069	0	5	57	67	4	4542
合计	714	3002	1787	794	15532	920	4415	33	359	315	771	194	28836

表6 靖江市规划水平年不同方案下目标值

Table 6 Objective function values for different schemes in planning level year of Jingjiang City

方案	供水净效益/亿元	缺水/万 m <sup>3</sup>	COD 排放量/t
基本方案	55.5	2430.1	14098.5
节水方案	52.5	1140.1	13035.8

表7 不同方案下各用水户缺水量 单位:万 m<sup>3</sup>

Table 7 Water shortage of each user in different schemes

方案	单位: 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>			
	生活用水	农业用水	工业用水	生态用水
基本方案	21.6	2192.4	118.0	98.0
节水方案	4.9	943.3	107.1	84.9

表8 不同方案下各水资源分区缺水量 单位:万 m<sup>3</sup>Table 8 Water shortage in each sub-area in different schemes unit: 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>

方案	主城区	西北片区	孤北片区	靖东片区	沿江东圩区	沿江西圩区
基本方案	209.6	735.6	559.2	207.4	290.9	427.3
节水方案	183.2	249.5	106.0	88.2	184.5	328.8

从用水户来看,两种方案下均为农业缺水最大,这是由于在进行模型构建时,用水公平系数、供水净效益系数等参数的取值限制了各水源的供水次序,优先保证了生活、生态用水的满足程度。从水资源分区来看,西北片区和沿江西圩区由于农业需水较多,缺水状况较为严重;主城区由于人口众多,生活用水需求明显高于其他子区,而在模型构建时生活用水保证程度较高,故缺水程度较轻。

各方案下各子区 COD 排放情况见表9,节水方案下 COD 排放量小于基本方案,主城区由于人口较多、工业发展较为迅速,产生的生活污水和工业废水较多,故 COD 排放量最大。规划期间通过提高节水水平和控制污染物排放,能够有效改善区域水环境。

为促进靖江市经济社会可持续发展,建议在规划水平年实施分质供水,优化产业布局,推进高标准农田建设,大力发展循环经济,提高节水型器具普及率与再生水利用量,增强居民生活节水意识,不断促

进水资源利用效率的提升;同时加强入河排污口整治与面源污染治理,提高中水回用比例,实施河道恢复及活水工程、生态修复工程等,对水环境进行全面治理,保证水资源的可持续利用。

表9 不同方案下各水资源分区 COD 排放量 单位:t

Table 9 COD emission of each sub-area in different schemes

方案	单位: t					
	主城区	西北片区	孤北片区	靖东片区	沿江东圩区	沿江西圩区
基本方案	4555.3	2447.5	1963.7	1908.9	882.5	2340.6
节水方案	4144.2	2287.6	1882.4	154.0	814.5	2153.1

## 4 结论

a. 从分质供水的角度建立了区域水量水质联合配置多目标模型。模型以供水净效益最大、区域总缺水最小、COD 排放量最小为目标,满足水源可供水量约束、用水户需水量约束、水功能区纳污能力约束等约束条件。

b. 对 PSO 算法2个学习因子和惯性权重进行改进,设计了求解区域水量水质联合配置模型的思路和算法流程,算法测试结果表明改进的 PSO 算法参数提高了其寻找最优解的精度。

c. 对靖江市进行规划水平年水资源供需分析,运用 PSO 算法求解其在基本方案和节水方案下的水资源配置方案。两种方案下用水总量、COD 排放量均在其限制范围内,配置结果能促进水资源高效分配和水环境持续改善;节水方案下供水净效益比基本方案低3.0亿元,缺水量和 COD 排放量分别比基本方案低1290万 m<sup>3</sup>、1062.7t,表明节水水平的提升能够在缓解区域缺水状况的同时有效减少 COD 排放量。基于配置结果提出靖江市水资源合理配置建议,可为其他地区水资源配置提供参考。

## 参考文献:

- [1] 魏娜,游进军,解建仓,等.基于水功能区的水量调控模型研究[J].水资源保护,2012,28(6):19-23.(WEI

- Na, YOU Jinjun, XIE Jiancang, et al. A water quantity regulation model based on water function zone[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(6): 19-23. (in Chinese))
- [ 2 ] 王好芳,董增川. 基于量与质的多目标水资源配置模型[J]. 人民黄河, 2004(6): 14-15. (WANG Haofang, DONG Zengchuan. Multi-objective water resources allocation model based on quantity and quality[J]. Yellow River, 2004(6): 14-15. (in Chinese))
- [ 3 ] 赵斌,董增川,徐德龙. 区域水资源合理配置分质供水及模型[J]. 人民长江, 2004(2): 21-22. (ZHAO Bin, DONG Zengchuan, XU Delong. Reasonable allocation of regional water resources and quality water supply and model[J]. Yangtze River, 2004(2): 21-22. (in Chinese))
- [ 4 ] 吴泽宁,樊安新,翟渊军. 基于生态经济学的水质水量统一优化配置模型体系框架[J]. 技术经济, 2007(5): 18-21. (WU Zening, FAN Anxin, ZHAI Yuanjun. Analysis for integrated optimal distribution of water quality and quantity based on ecological economics [J]. Journal of Technology Economics, 2007(5): 18-21. (in Chinese))
- [ 5 ] 裴源生,赵勇,张金萍. 广义水资源合理配置研究(I): 理论[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 1-7. (PEI Yuansheng, ZHAO Yong, ZHANG Jinping. Study on rational deployment of generalized water resources: theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(1): 1-7. (in Chinese))
- [ 6 ] 严登华,王浩,杨舒媛,等. 面向生态的水资源合理配置与湿地优先保护[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1241-1247. (YAN Denghua, WANG Hao, YANG Shuyuan, et al. Ecology-oriented reasonable deployment of water resources and giving priority to protection of wetland[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1241-1247. (in Chinese))
- [ 7 ] 董增川,卞戈亚,王船海,等. 基于数值模拟的区域水量水质联合调度研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 184-189. (DONG Zengchuan, BIAN Geya, WANG Chuanhai, et al. Joint operation of water quantity and quality based on numerical model[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 184-189. (in Chinese))
- [ 8 ] 张守平,魏传江,王浩,等. 流域/区域水量水质联合配置研究:I. 理论方法[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 757-766. (ZHANG Shouping, WEI Chuanjiang, WANG Hao, et al. Basin/region water quantity and quality allocation: I. theory and method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 757-766. (in Chinese))
- [ 9 ] 张守平,魏传江,王浩,等. 流域/区域水量水质联合配置研究:II. 实例应用[J]. 水利学报, 2014, 45(8): 938-949. (ZHANG Shouping, WEI Chuanjiang, WANG Hao, et al. Basin/region water quantity and quality allocation: II. application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(8): 938-949. (in Chinese))
- [ 10 ] 谢新民,李丽琴,周翔南,等. 基于地下水“双控”的水资源配置模型与实例应用[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 6-12. (XIE Xinmin, LI Liqin, ZHOU Xiangnan, et al. Water resources allocation model based on “double control” of groundwater and its application [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 6-12. (in Chinese))
- [ 11 ] 邹进. 基于二元水循环及系统熵理论的城市用水配置[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 16-20. (ZOU Jin. Allocation of urban water resources based on dualistic water cycle theory and system entropy [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 16-20. (in Chinese))
- [ 12 ] 黄显峰,石志康,金国裕,等. 基于碳足迹的区域水资源优化配置模型[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 47-51. (HUANG Xianfeng, SHI Zhikang, JIN Guoyu, et al. Optimal regional water resources allocation model based on carbon footprint[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 47-51. (in Chinese))
- [ 13 ] 金菊良,徐新光,周戎星,等. 基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 1-6. (JIN Juliang, XU Xinguang, ZHOU Rongxing, et al. Water resources spatial balance evaluation method based on connection number and coupling coordination degree[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 1-6. (in Chinese))
- [ 14 ] 吴泽宁. 基于生态经济的区域水质水量统一优化配置研究[D]. 南京:河海大学, 2004.
- [ 15 ] 陈陌,郭亚军,于振明. 改进型序关系分析法及其应用[J]. 系统管理学报, 2011, 20(3): 352-355. (CHEN Mo, GUO Yajun, YU Zhenming. An improved method for rank correlation analysis and its application [J]. Journal of Systems & Management, 2011, 20(3): 352-355. (in Chinese))
- [ 16 ] 谢晓锋,张文俊,阮骏,等. 针对带约束非线性规划问题的遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2002, 21: 64-67. (XIE Xiaofeng, ZHANG Wenjun, RUAN Jun, et al. Genetic algorithm for constrained nonlinear programming problems [J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 21: 64-67. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-07-12 编辑:施业)

