

人工蜂群优化算法驱动的常州河道 水环境管理研究

何晓静¹, 付梁其², 纪海婷¹, 汪 珊¹, 刘和宝¹

(1. 江苏省水文水资源勘测局常州分局, 江苏 常州 213002;

2. 常州市水利规划设计院有限公司, 江苏 常州 213001)

摘要: 研究确定了水质网络监测设计规划目标, 并在地理信息系统框架中设计并实施了基于多目标人工蜂群的优化算法。使用 WorldQual 模型进行污染物参数的估算, 从而将监测站客观分配到没有实际测量的河流。使用该方法在江苏省常州市金坛区的河道水系进行了测试, 发现本研究所提出的网络相对于当前的目标函数值提高了约 33%~48%。此外, 基于多目标人工蜂群优化方法为管理决策提供参考信息。

关键词: 河道水环境; WorldQual 模型; 人工蜂群; 金坛区

中图分类号: TP399 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839(2024)05-0027-0004

Study on Changzhou river water environment management driven by artificial bee colony optimization algorithm

HE Xiaojing¹, FU Liangqi², JI Haiting¹, WANG Shan¹, LIU Hebao¹

(1. Changzhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau,
Changzhou 213002, China;

2. Changzhou Water Resources Planning and Design Institute Co., Ltd, Changzhou 213001, China)

Abstract: The research determined the design and planning objectives for water quality network monitoring, and designed and implemented an optimization algorithm based on multi-objective artificial bee colonies in the geographic information system framework. The WorldQual model was used to estimate pollutant parameters and objectively allocate monitoring stations to rivers without actual measurements. This method was tested in the river system of Jintan District, Changzhou City, Jiangsu Province, and it was found that the network proposed in this study has improved by about 33% to 48% compared to the current objective function value. In addition, the multi-objective artificial bee colony optimization method provides reference information for management decision-making.

Key words: river water environment; WorldQual model; artificial bee colony; Jintan District

水质监测和评估是淡水资源管理的一个重要内容^[1], 而监测站点的分配是水质网络设计的第一步, 也是重要的一步^[2]。WorldQual 是用于模拟流域中污染物参数的水质模型, 当没有真实数据时, 考

虑来自 WorldQual 模型的模拟来估计污染物参数, 如生化需氧量(BOD)、大肠菌群(FC)或总溶解固体(TDS)^[3-6]。在本文中, 提出了一种基于多目标人工蜂群优化方法来分配流域水质监测站, 具体而言,

收稿日期: 2024-01-14

基金项目: 江西省水利科学院开放研究基金项目(2022SKSG03)

作者简介: 何晓静(1991—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事水资源高效利用的研究。E-mail: 1475123193@qq.com

通信作者: 付梁其(1990—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水利规划与设计的研究。E-mail: 870036519@qq.com

站点的数量被最小化,同时低合规区域的检测概率、受影响的人口和河流的相对重要性被最大化考量。WorldQual模型的模拟优势在于,可用在以前没有监测网络且没有实际数据可用的河流中初步分配监测站,使用这种方法可获得流域的总体视野并优先考虑网络的初始分布,这对于流域的环境可持续性评估非常有帮助,而人工蜂群优化方法通过模拟蜜蜂的寻优过程,能够在复杂的优化问题中找到全局最优解。本文将成果成功应用于常州市金坛区河道“畅流活水”研究。

1 概 述

1.1 研究区域

江苏省常州市金坛城区水系以纵贯城区南北的区域性骨干河道老丹金溧漕河为“中轴”,通济河、尧塘河、下塘河等东西向骨干河道与“中轴”相连,组建成融会贯通的河网水系。20世纪末,城区河道自然水体受到一定程度的污染。近年来,金坛区加大对污水、废水收集处理力度,河道水环境问题得到改善,但是部分河道底部还存在污染沉淀物,部分污水管道存在污水跑、漏现象,污水管网覆盖有死角,污水收集以截流为主等客观情况。河道一般情况下水流速度缓慢,部分河道水动力不足,水环境不容乐观。在夏季温度较高时,部分河道水体出现黑臭现象,严重影响着城市形象和人民群众生产生活。

结合《金坛市城市总体规划》等相关规划要求,金坛城区“畅流活水”规划范围为东至薛庄河、尧塘河一线,南至常宁高速公路接金宜路、钱资东河、尧塘河,西以新丹金溧漕河为界,北以新丹金溧漕河转通济河至老丹金溧漕河为界,总面积约120.4 km²。

1.2 研究方法

1.2.1 基于WorldQual模型的多目标函数

X_{ij} 表示单元(i, j)在河道网格中的二元变量(i 代表行, j 代表列)。如果没有选择单元格来分配站点,则该变量取值0,否则取值1。在金坛区河道中分配的站点为流域中的主要区域,分配问题的解决方案被配置为用 x 表示的二进制数组。尽可能降低监测站点相关成本。最小化目标函数为

$$f_1(x) = \sum_{i,j} X_{ij} \quad (1)$$

除了最小化目标函数,另一个目标与检测环境低合规区域有关。在这种情况下,区域的检测应该最大化。这一目标表明,河道水质监测网络应表现

出最高的潜在能力,以检测与关注一组污染物相关的中度至重度污染区域。具体来说,应该最大化检测到阈值违规的概率。研究使用WorldQual模型,在20年(2000—2020年)间每月估计河道每个网格单元的BOD、FC和TDS浓度。BOD、FC和TDS的量分别用 $U_{ij}^{(t)}, V_{ij}^{(t)}, W_{ij}^{(t)} (t=1, 2, \dots, T)$ 表示;其中 T 是每种污染物在整个期间的模拟测量总数。BOD、FC和TDS的值分别低于4 mg/L、每100 mL 200 cfu(每100 mL的菌落形成单位)和450 mg/L是符合环境承载力的。在整个时间段内,每个网格单元的BOD(U_{ij})、FC(V_{ij})和TDS(W_{ij})的阈值违规检测概率定义为

$$P(U_{ij} > 4) = \frac{\sum_{t=1}^T I[U_{ij}^{(t)} > 4]}{T} \quad (2)$$

$$P(V_{ij} > 200) = \frac{\sum_{t=1}^T I[V_{ij}^{(t)} > 200]}{T} \quad (3)$$

$$P(W_{ij} > 450) = \frac{\sum_{t=1}^T I[W_{ij}^{(t)} > 450]}{T} \quad (4)$$

式中: I 为指标函数。在本研究中,这3个概率被认为具有相同重要性,它们被累积为一个单值,并代表每个单元格。该变量被命名为水污染检测(WPD),并为每个单元定义为 $D_{ij} = P(U_{ij} > 4) + P(V_{ij} > 200) + P(W_{ij} > 450)$ 。另外,应优先选择具有较大 d_{ij} 值的小区来分配站点。因此,最大化目标函数为

$$f_2(x) = \sum_{i,j} X_{ij} D_{ij} \quad (5)$$

第3个目标函数与人口密集地区的保护程度有关,这一目标考虑到了社会层面的指标。人口较多的单元应优先于数量较少的单元。在WorldQual模型中,此信息可用,并且每个单元格的人口数量的变量表示为 C_{ij} 。此时最大化的目标函数为:

$$f_3(x) = \sum_{i,j} X_{ij} C_{ij} \quad (6)$$

第4个目标函数根据水文标准对河段进行分类,即与环境指标有关。具体来说,本研究在算法上下文中使用此分类来定义基于支流层次结构的河流大小。 S_{ij} 表示单元格的Strahler值,Strahler数越大,单元格的重要性越高。此时,最大化的目标函数是:

$$f_4(x) = \sum_{i,j} X_{ij} S_{ij} \quad (7)$$

最后,本研究考虑一个约束条件:

$$m < f_1(x) < M \quad (8)$$

式中,最大数量是必须提前定义的约束。而最小密度为每一万平方公里 1.5~4.0 个水质监测站。因此,河道环境优化的问题被定义为一个多目标优化问题,其中站的数量在一定的取值范围内最小化,同时满足检测到较低的违规区域、该地区的人口数量和水文分类(等式被最大化)。

1.2.2 基于 MOABC 算法的人工蜂群寻优方法

本文采用 MOABC 算法开展多目标人工蜂群优化方法^[7]的河道水质评估,在 WorldQual 模型中的多目标函数优化问题中寻找全局最优解。计算中,最大循环数为 3 000,当一个新的侦察蜂添加到蜂群中为 15,如果尝试 100 次仍未改进,则认为解决方案已用尽。对这些参数中的每一个都测试了其他值,但使用此配置获得了最佳结果。由于 MOABC 算法是随机的,为了保证统计结果的可靠性,每个实验重复了 31 次。本节显示的结果是从每个实验的这 31 次执行中获得的中值结果,这在优化领域通常是为了提供关于算法性能的公平信息,避免使用 31 个中的最佳执行。之后,对之前一些比现在网络更好的解决方案进行了更详细的研究,为决策者提供有用的信息。最后,基于之前的结果,提出了多种共识解决方案。

MOABC 算法的具体代码如图 1 所示。

Algorithm 1 MOABC pseudocode.

```

1:  $NDS\_archive \leftarrow \emptyset$ 
2: #Problem-aware and random generation of the initial colony
3:  $initial()$ 
4: #Main steps of MOABC are repeated during max. cycles or generations
5: for  $cycle = 1$  to  $max\_cycles$  do
6:    $send\_employed\_bees()$ 
7:    $rank\_and\_crowding(colony\_size)$ 
8:    $calculate\_probabilities()$ 
9:    $send\_onlooker\_bees()$ 
10:   $send\_scout\_bees(cycle)$ 
11:   $rank\_and\_crowding(2 * colony\_size)$ 
12:   $export\_colony(NDS\_archive)$ 
13: end for

```

图 1 MOABC 算法的具体代码

2 计算结果与河道水质优化

2.1 多目标人工蜂群优化的计算结果

MOABC 是一种多目标优化算法,因此,它只在一次执行中生成一组非支配解。对于手头的问题,每次执行会获得大约 850 个不同的非支配解决方案。此问题有一个约束条件,即允许的最小和最大

站数。目的是在不增加预算的情况下改善现有网络。由于这个原因,最大站点数被限制为 8。另一方面,常州市金坛区中单个单元的最大 Strahler 数为 4,当前网络的总 Strahler 值为 16。目标是改善当前网络,至少需要 6 个站点,因此最小站数被限制为 6 个。由于同时优化了 4 个目标,解决方案的图形表示涉及 4 个维度,本文将 4D 图分解为 6 个 2D 图,其中包括 4 个目标的所有可能的成对组合,这样可以轻松解释结果。图 2 展示了在中值执行中获得的非支配解。在这个具体案例中,总共获得了 800 多个非支配解。

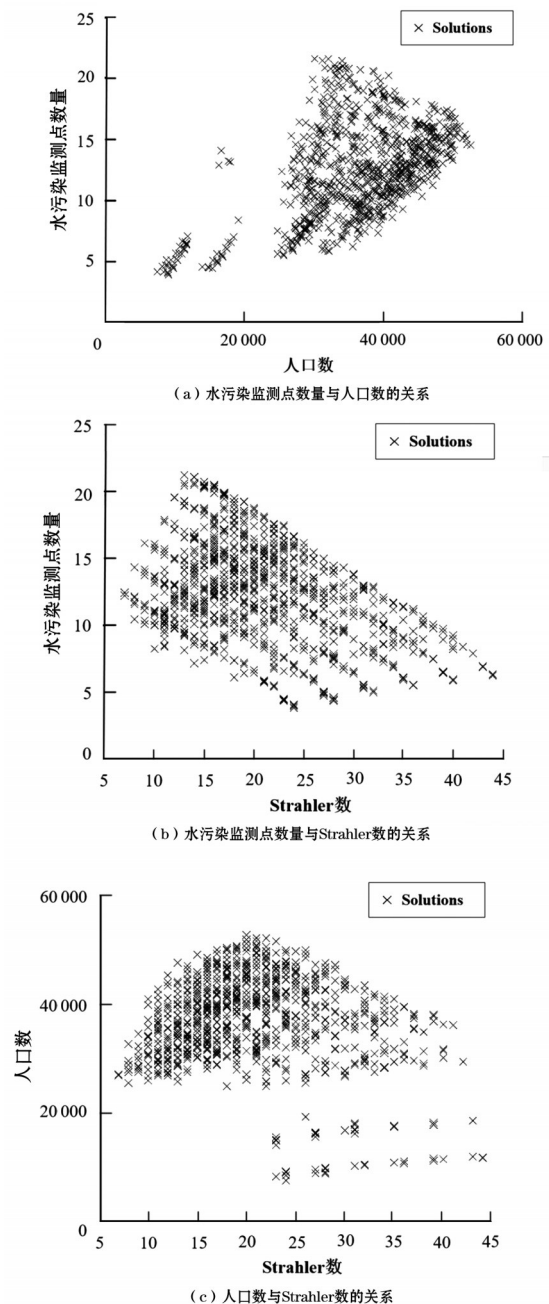


图 2 MOABC 算法在中位数执行中得到的所有非支配解

图2(a):在这种情况下,当人口增加时,水污染监测点需要增加。发生这种情况是因为人口众多的地区可能会产生更多的污染,因此可能存在更多的水污染。

图2(b):这张图表明当 Strahler 值增加时,水污染状况会改善。一方面,Strahler 值与基于其支流的流量大小有关。由于先前支流的数量,较高的 Strahler 值与具有较高流量的流相关联。另一方面,水污染通常以每升水的污染物毫克数来衡量。因此,对于相同数量的污染物,水量越多,污染物浓度越低。重要的是要强调所提出的算法能够检测这种称为稀释能力的自然关系。

图2(c):当 Strahler 值增加时,人口也会增加。也就是说,一般来说,人们都定居在靠近重要河流的地区。但是,在这种特殊情况下,出口区域(具有最高的 Strahler 值)并不是人口最多的区域。

2.2 金坛区河道“畅流活水”实施方案

基于人工蜂群优化算法结果,利用现有水利工程,通过闸、泵相结合的调度方式以及结合河道水位、水流方向、活水时间等实际情况,分析、确定河道“畅流活水”路线;布设水质检测点,了解水质类别以及水质随时间的变化情况,以此检验“畅流活水”效果,确定“畅流活水”周期。

(1)城东区

以丹金溧漕河水为水源,利用石桥枢纽、中桥闸、下塘河闸、金花河闸站、金花河东闸、复兴河闸运行相结合的调度方式对下塘河、电胜河、金花河、复兴河进行“活水畅流”,采集下塘河、电胜河、金花河、复兴河水质检测点水样,了解下塘河、电胜河、金花河、复兴河水质变化情况。以城东区为例,治理方案如图3所示。

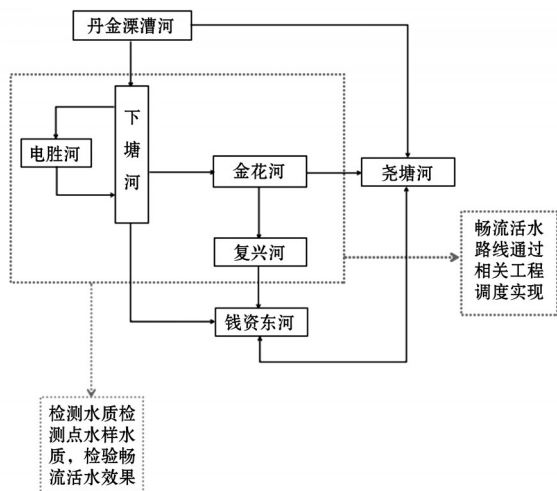


图3 城东区畅流活水路线

(2)中心区河道

以钱资湖水为水源,利用钱资湖北闸站、下塘河东闸站、钱资北河东闸、钱资北河西闸、朱庄闸、钱胜河南闸、下塘河南站、镇广河北闸相结合的调度方式,对中心区河道(下塘河、东社河、新丰河、钱胜河等)进行“活水畅流”。

(3)运粮河、春风公园

以丹金溧漕河水为水源,若丹金溧漕河水位高于4.42 m时,利用春风公园湖东南处引水泵站将丹金溧漕河水引入春风公园湖内,再利用春风公园西处排水泵站将湖水调入进入运粮河、丹金溧漕河;若丹金溧漕河水位低于4.42 m,丹金溧漕河水同样经引水泵站调入春风公园湖,此时排水泵站停用,打开排水泵站闸门使春风公园湖水自流进入运粮河、丹金溧漕河。

由于城西区城西中心河尚未与马干河、木社沟连通;城北区南店河和南店河东闸、南闸、北闸正处于建设实施中;小柘荡河未与尧塘河连通;中心区(滨湖新城南区)丁沟渠尚未与方洛港连通,无配套的水工建筑物,因此城西区、城北区、中心区(滨湖新城南区)尚不具备开展“畅流活水”的条件。因此,应加快推进河道疏浚及配套水工建筑物建设。

考虑城西区、城北区、中心区(滨湖新城南区)河道水位等实际条件,建议城西区河道“活水畅流”以常水位运行;城北区小柘荡河以常水位运行,南店河以控制水位5.10 m运行;中心区(滨湖新城南区)丁沟渠适当抬高水位(建议4.0 m以上)运行。

3 结 论

通过考虑多个相互冲突的目标,本文所提出的基于多目标人工蜂群优化方法已被证明有助于找到合适的位置来建立水质监测网络。对于既没有污染测量数据也没有固定网络收集新数据的流域,研究人员可能会考虑使用这种方法来获得其流域的总体视图并优先考虑网络的初始分布。在江苏省常州市金坛区的河道进行了算法测试,发现本文所提网络可找到比当前站点更少的共识解决方案。此外,为确保水质治理目标的顺利实现,建议设立城区河道定期水质检测制度,形成及时、准确的河道水质信息共享制度,指导“畅流活水”方案顺利实施;制定城区河道信息共享制度,及时通报影响城区河道“畅流活水”事项,保障河道“畅流活水”

(下转第36页)

据数据高程模型实时生成断面模型,见图7。



图7 剖面分析

(3)淹没分析

淹没分析是模拟水位上升过程,可设置连接水位监测传感器,在三维场景下实时监测并反映古运河水位变化情况。

(4)填挖方分析

填挖方分析可任意选取古运河开发区域、设置深度并模拟概算填挖土方量。

2.3.7 模型单体化

单体选择又叫模型单体化查询,可在三维空间查询单体模型的属性信息,如建筑属性、功能属性等。

2.3.8 720全景

为了弥补生态廊道建设治理过程中因环境、时间限制而产生的效率低下、问题发现不全、溯源能力较弱等问题,本文探索了720全景巡河新方式,将无人机“天眼”作为生态廊道巡查治理的有益补充,借助无人机、VR设备实现智慧巡河、智慧管河。

(上接第30页)

方案实施;加快控制城市河道水环境污染源,保障河道生态健康运行,加快推进城区雨、污分流管道改造进度,确保城区污水收集、集中处理,达标排放,加强城市周边固体污染源收集、处理力度;加强河道的运行管理及维护工作,加快“畅流活水”方案相关水利工程建设,确保全城区“畅流活水”方案早日实现,形成水清、岸绿、城美的新面貌。

参考文献:

- [1] 王波,黄津辉,郭宏伟,等.基于遥感的内陆水体水质监测研究进展[J].水资源保护,2022,38(3):117-124.
- [2] 陈作山.城市河流生态治理措施研究[J].地下水,2021,43(1):75-76.

3 结论与展望

本文立足于扬州古运河的多源异构数据,采用多种硬软件采集获取古运河水利工程三维场景构建所需底板数据,采用了生态廊道与基础地理信息融合模式,构建了支撑智慧水利运行的“古运河生态廊道数字底板的浏览平台”,为智慧古运河、智慧水利、智慧城市打下了基础。

本文是基于河流生态廊道数据底板构建的可视化表达,是实现智慧水利的基础,提高古运河生态廊道未来的管理和服务水平,为生态廊道建设治理和智能巡检提供快捷服务。未来平台为努力打造绿色水利工程示范区建设和大运河文化带建设,应进一步拓展平台架构,丰富平台定制化功能,为河道管理工作提供基础数据支撑,并将其成果融入运河航道信息化工程、智慧运河建设等工作中,促使古运河生态廊道规划管理及开发利用更具科学性。

参考文献:

- [1] 蔡阳,成建国,曾焱,等.加快构建具有“四预”功能的智慧水利体系[J].中国水利,2021(20):2-5.
- [2] 蔡阳,成建国,曾焱,等.大力推进智慧水利建设[J].水利发展研究,2021,21(9):32-36.
- [3] 崔立军.多波束测深系统在陡河水库库容曲线和淤积测量中的应用[J].农业与技术,2021,41(1):64-67.
- [4] 余芳强,宋天任,陈菁.面向网络化应用的古建筑BIM模型轻量化处理技术[J].建筑施工,2018,40(3):321-323.
- [5] 陈希.生态廊道的构建与滨河生态景观的营造——以金东区生态廊道为例[J].房地产世界,2021(10):115-117.
- [3] 仇保兴.城市黑臭河道治理协同海绵城市建设[J].建筑科技,2016(1):14-17.
- [4] 程庆霖,何岩,黄民生,等.城市黑臭河道治理方法的研究进展[J].上海化工,2011,36(2):25-31.
- [5] 涂华伟,王莉,张潇,等.河湖连通条件下城市湖泊水环境治理研究[J].中国农村水利水电,2020(12):101-105,111.
- [6] 陈俪丹,高成,陈妍清,等.考虑水质及水动力条件的滨江圩区最优活水方案[J].水电能源科学,2021,39(3):16-19,57.
- [7] 朱诚,王昭敏,隆锋,等.基于ABC-BP神经网络的地铁盾构地表沉降预测[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):72-80.