

基于双层模型的常熟市水资源配置研究

饶汉霖^{1,2}, 石亚东¹, 徐慧², 宦臣臣^{1,2}

(1. 太湖流域管理局水资源监测中心, 江苏 无锡 214024; 2. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 基于水资源优化配置原则, 开发出以经济效益为上层目标、以环境效益为下层目标的双层优化模型。通过 lingo 软件和模糊满意度算法将多目标问题转化为单目标问题求解, 对常熟市水资源进行配置。结果表明: 2020、2030 年区域水资源配置系统经济效益预期分别为 24.84×10^8 、 27.89×10^8 元, COD 排放量分别为 8 342、9 450 t, 配水量将分别达到 $86\,228 \times 10^4$ 、 $93\,809 \times 10^4$ m³; 其中, 长江取水占配水总量 73%, 并且趋势逐渐升高。对比双层优化结果与两个单目标优化结果, 可以对决策者提供不同情景下的优化方案。

关键词: 水资源配置; 双层模型; 模糊满意度函数; 单目标优化; 常熟市

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)04-0110-05

Study on water resources allocation in Changshu City based on bi-level model

RAO Hanlin^{1,2}, SHI Yadong¹, XU Hui², HUAN Chenchen^{1,2}

(1. Basin Hydrology & Water Resources Monitoring Center, Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources, Wuxi 214024, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the principle of optimal allocation of water resources, a bi-level optimization model was developed, which take the economic benefit as the upper-level objective and the environmental benefits as the lower-level objective. Using the lingo software and fuzzy satisfaction approach, the multi-objective problem was transformed into a single-objective problem, and the water resources of Changshu city were configured. The results show that the economic benefits of the regional water resources allocation system would amount to 24.84×10^8 and 27.89×10^8 yuan, the total water resources distribution would achieve $86\,228 \times 10^4$ and $93\,809 \times 10^4$ m³, and COD emissions would reach 8342 and 9450 t in 2020 and 2030, respectively. Moreover, the Yangtze River water intake accounted for 73% of the total water distribution, and the trend gradually increased. Comparing the bi-level optimization results with the two main objective optimization results can provide the decision-making plans under different scenarios.

Key words: water resources allocation; bi-level model; fuzzy possibilistic function; single-objective optimization; Changshu City

1 研究背景

水是基础性的自然资源,也是战略性的经济资源,随着人口的不断增加和经济的高速发展,资源性缺水、工程性缺水以及水质性缺水等水资源短缺问题逐渐成为社会经济发展的重大阻碍^[1-2]。常熟市位于江苏省东南部,太湖下游。市域处 $120^\circ 33' \sim 121^\circ 03' \text{E}$, $31^\circ 31' \sim 31^\circ 50' \text{N}$, 东邻太仓,南接昆山、湘城,西连无锡、江阴,西北与张家港接壤,北濒长江,

与南通隔江相望。由于地表水年际变化大,地下水开采受限,水资源量匮乏,水质性和工程性缺水成为了常熟市面临的主要水资源问题。2015 年常熟市环境质量公报指出,全市地表水水质总体仍属于轻度污染级别,60 个地表水监测断面中,达到或优于Ⅲ类水质的断面比例依然不高,主要污染物为有机污染物。因此,协调社会效益与改善水环境的矛盾成为了该地区水资源配置的重中之重。

水资源的有限性决定了其往往无法同时满足社

收稿日期: 2018-01-03; 修回日期: 2018-03-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401502); 江苏省水利科技项目(2017045)

作者简介: 饶汉霖(1995-),男,江西九江人,硕士研究生,研究方向为水文及水资源。

通讯作者: 徐慧(1969-),女,江苏大丰人,博士,副教授,研究方向为区域水资源综合规划。

会经济发展、生态与环境保护的要求,水资源配置就是考虑各类规范性要求,在自然条件、工程条件、用户需求特性等各类限制性约束条件下,寻求社会经济和生态环境因素在内的综合效益最大的水量分配方案^[3]。全面认识经济社会等各个系统之间的作用关系,理清其中的层次性、多样性、复杂性对水资源配置有重要的指导意义。近年来,不少学者通过考虑社会、经济以及环境等因素,通过多目标模型来解决这类问题^[4]。2008 年赵琳等^[5]以经济、社会、生态环境综合效益为目标,建立了基于可持续发展理念的区域水资源优化配置模型。2013 年李翠梅等^[6]构建了经济效益和社会效益测算模型,并以两者耦合的综合效益为目标函数,建立了应急水资源配置模型。2016 年何国华等^[7]以西安各市县为研究对象,建立了基于熵权的水资源配置和谐性模糊综合评价模型。虽然多目标优化方法能够考虑水资源配置的综合效益,但是其忽略了社会、经济、环境间的相互联系和相互制约的层次关系^[8]。沈国浩等^[9]通过双层模型在北京市大兴区取得了较好的结果。首先上层决策者制定决策,然后下层决策者根据上层制定的决策在有限的违规空间内制定最有利于自己的决策,同时反馈给上层决策者,上层决策者再根据反馈制定全局最佳方案。丰水地区还没有相关研究,基于以上分析,本文从经济效益为主,兼顾环境效益,以期常熟市水资源部门提供一种有效的解决方案。

2 建立双层规划模型

2.1 模型的建立与求解

双层规划模型形式可表示为:

上层优化决策层

$$\max f_1(x,y) = Ax + By \tag{1}$$

s. t. $g(x,y) \leq 0$ (2)

下层优化决策层

$$\max f_2(x,y) = Cx + Dy \tag{3}$$

s. t. $G(x,y) \leq 0$ (4)

式中: $f_1(x,y)$ 、 $f_2(x,y)$ 分别为上、下层目标函数; x 、 y 分别为上、下层的决策变量; $g(x,y)$ 、 $G(x,y)$ 分

别为上、下层的约束条件。

双层规划模型的求解已由许多学者给出了方法,本文应用模糊满意度函数进行求解^[10-11]。具体求解过程为:假设上层和下层目标函数相互独立,通过 lingo 软件分别单独求解,得出上、下层函数的理想最优结果 F_1^U 、 F_2^U ,通过决策者们的主观判定或分情景讨论协商,给定上层和下层的目标函数值的边界(F_1^B 和 F_2^B),建立关于上、下层满意度函数相应的模糊隶属度函数:

$$\alpha = \frac{F_1^B - F_1}{F_1^B - F_1^U} \tag{5}$$

$$\beta = \frac{F_2^B - F_2}{F_2^B - F_2^U} \tag{6}$$

式中: F_1 为上层目标函数; F_2 为下层目标函数; α 为上层满意度函数; β 为下层满意度函数。

最后,通过全局满意度函数 $\gamma = \min(\alpha,\beta)$,求解 $\max(\gamma)$ 。

2.2 研究区水量供需平衡分析

常熟市水量供需平衡分析主要依据 2011 - 2015 年《苏州统计年鉴》、《江苏省常熟市水资源综合规划(2010 - 2030)》和《常熟市城市总体规划(2010 - 2030)》。

常熟水资源供给来自地表水、地下水、长江以及再生水,需水主要为第一产业、一二产业、第三产业、城市生活以及生态环境。因为部分工业企业和火电企业直接从长江取排水,这部分供需水不计入,将长江供水量分为受闸门开闭影响的长江引水和水厂直取长江的自来水。由于城市经济社会快速发展,常熟市水资源一方面受工程影响,导致部分地区供需水矛盾突出,另一方面由于污水排放量基数大,来源复杂,导致水质呈综合型有机污染,不符合功能水质要求。

根据已有资料以及常熟市近年来供需水现状,对常熟市 2020、2030 年 75% 保证率的可供水量和需水量进行预测,见表 1。从表 1 可知,常熟规划期内水资源供需基本保持平衡,供需比达 99.7%,所以本文暂不考虑社会效益因素,主要考虑经济效益因素和环境因素。

表 1 规划期间常熟供水量与需水量预测表

年份	供水量/ 10^4 m^3					需水量/ 10^4 m^3				
	地表水	地下水	长江引水	长江直取自来水	再生水	第一产业	第二产业	第三产业	城市生活	生态环境
2020	19891	2100	30753	35017	3650	27905	32684	7556	10074	13374
2030	20112	2100	31605	40814	4709	27108	39062	8433	11243	13674

2.3 上层目标函数和约束条件

以水资源配置系统经济效益为上层目标函数公式可表示为:

$$\max E^* = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^2 [(b_{i,j,k} - c_{i,j,k}) \cdot w_{i,j,k} \cdot r_{i,j}] - C_{cost} [\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^2 (w_{i,j,k} \cdot D_{j,k} \cdot r_{i,j})] \quad (7)$$

式中: E^* 为水资源配置系统经济效益, 元; i 为供水来源, $i = 1, 2, 3, 4, 5$ 依次分别为地表水、地下水、长江引水、长江直取自来水、再生水; j 为需水部门, $j = 1, 2, 3, 4, 5$ 依次分别为第一产业、第二产业、第三产业、城市生活、生态环境; k 为规划年, $k = 1, 2$ 依次分别为 2020、2030 年; $b_{i,j,k}$ 为 k 时间 i 水源供给 j 部门的供水效益系数, 元/ m^3 ; $c_{i,j,k}$ 为 k 时间 i 水源供给 j 部门的供水费用系数, 元/ m^3 ; $w_{i,j,k}$ 为 k 时间 i 水源供给 j 部门的水量, m^3 ; $r_{i,j}$ 为 i 水源与 j 部门的供水关系, $r_{i,j} = 0$ 为无供水关系, $r_{i,j} = 1$ 为有供水关系; C_{cost} 为污水处理费用, 元/ m^3 ; $D_{j,k}$ 是 k 时间 j 部门的废水排放系数。

上层目标函数主要从用水结构和污水处理能力来约束:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^5 (w_{i,5,k} \cdot r_{i,5}) \geq \theta \cdot \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 (w_{i,j,k} \cdot r_{i,j}), \forall k \\ \sum_{i=1}^5 (D_{j,k} \cdot w_{i,j,k} \cdot r_{i,j}) \leq T_k, \forall k \end{cases} \quad (8)$$

式中: 用水结构约束为生态环境用水必须占一定比例的总配水量以上, θ 为生态用水占总配水量的比例系数, %; 污水处理能力约束为排放污水量不能超过上限, T_k 为 k 时间研究区域排放污水上限, t。

2.4 下层目标函数和约束条件

以水质污染最小化为下层目标函数可表示为:

$$\min L^* = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^2 [10^{-6} w_{i,j,k} \cdot r_{i,j} \cdot D_{j,k} \cdot (1 - \eta) \cdot P_{j,k}] \quad (9)$$

式中: L^* 为水质污染程度, 是研究区域 COD 排放量, t; η 为 COD 去除率, %; $P_{j,k}$ 为 k 时间 j 部门 COD 的排放水平, mg/L。

下层目标函数主要从供水能力、COD 的纳污能力、各部门需水保障以及供水量非负性 4 个方面进行约束:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^5 (w_{i,j,k} \cdot r_{i,j}) \leq W_{i,k}, \forall i, k \\ \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 [10^{-6} w_{i,j,k} \cdot r_{i,j} \cdot D_{j,k} \cdot (1 - \eta) \cdot P_{j,k}] \leq C_{cod,k}, \forall k \\ H_{j,k} \cdot \rho^- \leq \sum_{i=1}^5 (w_{i,j,k} \cdot r_{i,j}) \leq H_{j,k} \cdot \rho^+, \forall j, k \\ w_{i,j,k} \geq 0, \forall i, j, k \end{cases} \quad (10)$$

式中: $W_{i,k}$ 为 k 时间 i 水源的最大可供水量, m^3 ; $C_{cod,k}$ 为 k 时间区域最大 COD 纳污能力, t; $H_{j,k}$ 是 k 时间 j 部门的需水量, m^3 ; ρ^- 是需水下限系数; ρ^+ 是需水上限系数。

2.5 水资源配置原则及模型参数的确定

根据常熟市水资源配置实际情况, 确定以下配置原则: 地表水与长江引水可以用于所有部门, 地下水主要用于城市生活, 再生水主要用于生态环境, 长江直取自来水主要用于第二产业、第三产业和城市生活。依据参考文献[4, 9, 12], 结合常熟市实际情况, 制定供水效益系数和费用系数, 见表 2。依据参考文献[13], 第一产业、第二产业、第三产业、城市生活和生态环境 COD 排放水平依次分别设为 55、100、115、225、30 mg/L; 废水排放系数根据参考文献[14], 拟定农业、工业、第三产业、城市生活、生态环境分别为 0.1、0.5、0.7、0.7、0.8。考虑现有常熟市生态环境用水占需水的比例达 14%, 规划年内该比例会有所降低, 生态用水占总配水量的比例系数拟定为 0.1; 依据《城镇污水处理厂污染物排放标准》COD 去除率拟定为 0.8; 依据《江苏省常熟市水资源综合规划》规划年常熟市 COD 纳污能力依次拟定为 23427.4、24399.2 t。根据常熟市实际情况需水上限系数设为 1, 生活需水系数下限设为 0.95, 其余需水系数下限设为 0.9。

表 2 供水效益系数和费用系数 元/ m^3

水源	供水系数	农业	工业	第三 产业	城市 生活	生态 环境
地表水	效益系数	1.0	6.0	6.0	8.0	5.0
	费用系数	0.3	2.0	2.2	1.6	2.0
地下水	效益系数				8.0	
	费用系数				1.8	
长江引水	效益系数	1.1	6.0	6.0	8.5	5.5
	费用系数	0.3	2.1	2.2	1.6	2.1
长江直取 自来水	效益系数		6.0	6.0	8.5	
	费用系数		2.1	2.2	1.6	
再生水	效益系数					4.5
	费用系数					2.2

3 结果与讨论

3.1 双层优化结果分析

对双层优化模型求解可以得出常熟水资源配置结果, 见表 3。由表 3 可知 2020、2030 年配水量分别

达到 8.6228×10^8 、 $9.3809 \times 10^8 \text{ m}^3$, 缺水量分别为 5395×10^4 、 $5711 \times 10^4 \text{ m}^3$, 农业、第三产业成为了主要缺水对象。缺水的主要原因有:(1)部分水源只能供给特定的部门,如长江直取自来水供给城市生活效益更大,城市生活需水已满足需求,导致只能供给城市生活的地下水供给量为 0;(2)供水能力不能

匹配各部门的需水要求,尤其是城市生活用水迅速发展,需水量增加速度超过了供水能力增长的速度;(3)部分部门对水质要求高,造成水源有水却无法供给。另外,长江成为最重要的水源,两个规划年内从长江取水达到供水总量的 73%,而且随着时间逐渐增加。

表 3 双层优化模型水资源配置结果							10^4 m^3
年份	水源	农业	工业	第三产业	城市生活	生态环境	合计
2020	地表水	2748	17143	0	0	0	19891
	地下水	0	0	0	0	0	0
	长江引水	22366	0	0	0	8387	30753
	长江直取自来水	0	15060	6800	10074	0	31934
	再生水	0	0	0	0	3650	3650
	合计	25114	32203	6800	10074	12037	86228
2030	地表水	391	19721	0	0	0	20112
	地下水	0	0	0	0	0	0
	长江引水	24006	0	0	0	7598	31604
	长江直取自来水	0	18552	7589	11243	0	37384
	再生水	0	0	0	0	4709	4709
	合计	24397	38273	7589	11243	12307	93809

图 1 为全部规划年各需水部门的配水总量。从图 1 中可知,两个规划年中第一产业、第二产业、第三产业、城市生活和生态环境的配水量分别达到 4.95×10^8 、 7.05×10^8 、 1.44×10^8 、 2.13×10^8 、 $2.43 \times 10^8 \text{ m}^3$, 分别占总配水量的 27%、39%、8%、12%、14%。从水资源配置结果来看,第一产业和第二产业占配水量的主体,所以常熟市可以通过优化产业结构、增加工农业用水效率、提升工业用水重复率来有效降低区域用水量。

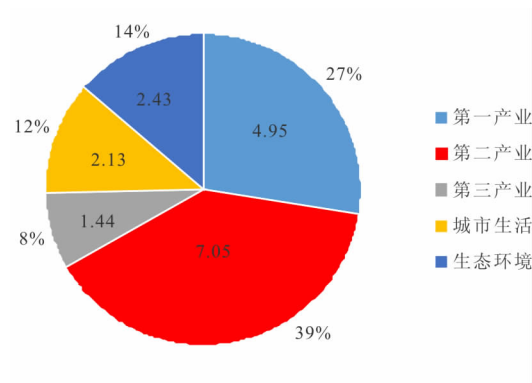


图 1 各需水部门配水量(单位: 10^8 m^3)

表 4 是各规划年需水部门的经济效益和 COD

排放量。2020、2030 年水资源系统经济效益分别是 24.84×10^8 、 27.89×10^8 元, COD 排放量分别为 8 342、9 450 t。从经济效益和 COD 排放源分析,因为大量水资源分配到第二产业,所以其对经济效益和 COD 排放量的贡献都是最大,分别占总体的 46.3%、39.6%;其次,城市生活部门发展十分迅速,对经济效益和 COD 排放量的贡献依次为 26.2% 和 37.7%。从各部门分析结果看,第二产业和城市生活是污染排放的主体,可以通过鼓励企业间串联用水、分质用水、一水多用和循环利用,提高水重复利用系数,推进污水截污纳管,提高生活污水处理率来有效降低污染排放。

表 4 水资源配置系统经济效益和 COD 排放量				
需水部门	经济效益/ 10^8 元		COD 排放量/t	
	2020 年	2030 年	2020 年	2030 年
第一产业	1.78	1.75	276	268
第二产业	11.12	13.21	3220	3827
第三产业	2.30	2.56	1095	1222
城市生活	6.53	7.29	3173	3542
生态环境	3.11	3.08	578	591
总计	24.84	27.89	8342	9450

3.2 模型对比与决策分析

将所建立的双层优化模型(设为 M3)与以经济效益或环境效益为目标函数的单目标模型 M1、M2 比较,3 种模型的优化结果综合比较见表 5。从表 5 可知,M1 以经济效益为目标函数追求效益最大化,相应的配水总量和 COD 排放量也最高;M2 以环境污染为目标函数追求 COD 排放量的最小化,相应的经济效益和配水总量也最小;M3 良好的顾全了经济效益和环境污染两个方面,选择了以经济效益为主体的有层次的折中方案,达到了两者间的动态平衡。

综上所述,在决策者追求经济快速发展时,宜采用 M1 方案;在决策者决心快速有效控制环境恶化时,M2 是一种合适的方案;当决策者既保证经济快速发展又需进行环境保护,M3 是合适的优化方案。

表 5 模型优化结果对比分析

模型 类别	经济效益/ 10^8 元		COD 排放量/t		配水总量/ 10^4 t	
	2020 年	2030 年	2020 年	2030 年	2020 年	2030 年
M1	25.65	28.84	8598	9751	91411	99339
M2	23.57	26.46	7905	8961	82937	90130
M3	24.84	27.89	8342	9450	86228	93809

4 结 论

(1)对常熟市 2020、2030 年 75% 保证率的可供水量和需水量进行预测,结果表明,常熟市水资源供需基本达到平衡。

(2)从不同决策者角度出发,构建具有层次关系的双层优化模型,将其应用于常熟市水资源管理系统,结果表明该模型在丰水地区有良好的适用性。

(3)结合模糊满意度函数,利用 lingo 软件,对常熟市水资源配置模型进行求解,得到最优的水资源配置方案,结果表明,长江是主要供水水源,供水比例占总配水量 73%,规划期的经济效益依次为 24.84×10^8 、 27.89×10^8 元,COD 排放量分别为 8 342、9 450 t,配水量将达到为 $86\,228 \times 10^4$ 、 $93\,809 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(4)两个单目标优化结果与双层优化结果比较,为决策者提供不同情景下的优化方案,为制定水资源配置方案提供有效参考。

参考文献:

- [1] 魏 婧,梅亚东,杨 娜,等. 现代水资源配置研究现状及发展趋势[J]. 水利水电科技进展,2009,29(4):73-77.
- [2] 王 凯. 苏州市水资源配置研究[D]. 南京:河海大学,2007.
- [3] 王 浩,游进军. 中国水资源配置 30 年[J]. 水利学报,2016,47(3):265-271+282.
- [4] 叶 健,刘洪波,闫静静. 不确定性模糊多目标模型在生态城市水资源配置中的应用[J]. 环境科学学报,2012,32(4):1001-1007.
- [5] 赵 琳,焦红波,王其同. 基于可持续发展理念的水资源优化配置研究[J]. 水科学与工程,2008(5):12-15.
- [6] 李翠梅,吴健荣,王建华,等. 基于多目标规划的城市水资源应急管理模型研究[J]. 资源科学,2013,35(8):1584-1592.
- [7] 何国华,汪 妮,解建仓,等. 基于熵权的水资源配置和谐性模糊综合评价模型的建立及应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(2):214-220.
- [8] ZOU Yun, HUANG Guoh, HE Li, et al. Multi-stage optimal design for groundwater remediation: a hybrid bi-level programming approach [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2009,108 (1-2): 64-76.
- [9] 沈国浩,陆美凝,宗志华. 城市水资源协调配置问题中双层规划模型及应用[J]. 水电能源科学,2017,35(4):32-36.
- [10] 任冲锋. 不确定性条件下石羊河流域水资源承载力优化提升研究[D]. 北京:中国农业大学,2017.
- [11] 张世坤. 大连市水资源优化配置[D]. 大连:大连理工大学,2006.
- [12] 陈义忠,何 理,卢宏伟,等. 丰台区水资源耦合配置模型研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(6):19-25.
- [13] 雷 霄. 基于多目标规划的杨凌示范区水资源优化配置[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(4):96-100+103.
- [14] 陈义忠,卢宏伟,李 晶,等. 基于不确定性的水资源配置双层模型及其实证研究[J]. 环境科学学报,2016,36(6):2252-2261.