

Intelligent Water Resources Management Strategy under Urbanization

Fi-John Chang, Wen-Ping Tsai, Chung-Lien Cheng

Department of Bio-Environmental Systems Engineering, National Taiwan University, Taipei Taiwan
Email: changfj@ntu.edu.tw

Received: Jul. 23rd, 2016; accepted: Aug. 4th, 2016; published: Aug. 16th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Along with the changes over time, the urbanization of Taoyuan in Taiwan has progressed rapidly while the population growth and industrial development has led to a significant increase in the water demands in this area. Therefore, the water regulation of the Shimen Reservoir in Taoyuan is a critical issue, especially for drought periods. In response to increasing water demands and hydrological uncertainties, this study aims to build an intelligent water allocation system in order to suitably make water regulation with a flexible transfer of water from irrigation sectors to industrial and municipal sectors for reducing the water pressure in public sectors during drought periods. According to the analysis on the historical data collected from agricultural and industrial sectors as well as population statistics in Taoyuan during 2005 and 2014, this study first simulates the future water demands for the period of 2015 and 2030 in Taoyuan. We next design nine water supply scenarios in response to the possible drought periods in the future based on the ten-day inflow data collected from the Shimen Reservoir in three drought years and three initial storage capacities of the reservoir for these drought years. According to the simulation results of future water demand and supply, we analyze the water shortage conditions during 2015 and 2030 by using M-5 rule curves and the non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II). In search of the minimal modified shortage index (MSI) and the maximal ratio of effective reservoir storage capacity (RRS), the results indicate that the largest improvement rates of the MSI and the averaged effective reservoir storage capacity ratio for ten-day periods can reach as high as 31.3% and 9.8%, respectively. We hope that the proposed intelligent water allocation system will pave the way to future research for sustaining water resources management.

Keywords

Water Resources Management, Urbanization, Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II), System Dynamics, Multi-Objective Reservoir Operation

作者简介: 张斐章(1957-), 台湾大学特聘教授, 台湾水文信息学会的创始会长, Journal of Hydrology 副主编。

文章引用: 张斐章, 蔡文柄, 郑仲廉. 因应都市化之智能型水资源管理策略[J]. 水资源研究, 2016, 5(4): 314-325.
<http://dx.doi.org/10.12677/jwrr.2016.54038>

因应都市化之智能型水资源管理策略

张斐章, 蔡文柄, 郑仲廉

台湾大学, 生物环境系统工程学系, 台湾 台北

Email: changfj@ntu.edu.tw

收稿日期: 2016年7月23日; 录用日期: 2016年8月4日; 发布日期: 2016年8月16日

摘要

随着时代的变迁, 台湾的桃园地区都市化发展迅速, 由于人口膨胀、工商业发展蓬勃等因素, 民生、工业用水需求日益增加。因此, 在干旱发生的情形下, 桃园地区的石门水库用水调度将是1个重大课题。面对日益增加的用水需求以及水文不确定性, 本研究拟建置智能型水资源管理系统, 期能于干旱时期透过灌溉用水弹性调度民生、工业用水方式, 降低公共用水压力。本研究搜集2005~2014年桃园地区农业、工业以及人口发展等数据, 透过系统动力模式推衍未来2015~2030年桃园地区需水情势, 并参考1977、1984、2002年等干旱年之石门水库旬入流量及水库初始有效库容50%、40%、30%等情境, 总共设定九种未来干旱供水可能状况, 运用石门水库操作规则(M-5操作规线)模拟未来缺水严重程度, 并透过非支配排序遗传算-II (NSGA-II) 搜寻最大的平均有效蓄水率(RRS)及最小的修正缺水指标(MSI)等两个目标; 透过NSGA-II的搜寻, 修正缺水指标(MSI)于各水文情境的表现最高达31.3%的改善率, 各旬有效蓄水率最高达9.8%的改善率。我们期望所提出之智能型水资源管理系统能对未来永续水资源管理研究有所帮助。

关键词

水资源管理, 都市化, 非支配排序遗传算法-II (NSGA-II), 系统动力模式, 多目标水库操作

1. 引言

随着时代的变迁, 人口膨胀、工商业发展蓬勃, 民生、工业用水需求日益增加, 学者们针对水资源管理等等的供需相关议题进行大量的探讨与研究; 其中, 系统动力学即为1有效的分析工具, 以现实世界的存在为前提, 从整体出发寻求改善水资源系统行为的机会与途径, 由美国麻省理工史隆管理学院的 Jay W. Forrester 于 1950 年代综合了系统理论(System Theory)、控制理论(Cybernetics)、信息论(Information Theory)、决策理论(Decision Theory)以及计算机仿真(Computer Simulation)所发展出来[1]。然而, 系统动力模型虽然反应出水资源需求之变化, 但涉及的参数众多以及连动机制复杂, 如何满足各需水目标之平衡, 对于模式而言即是很大的挑战。而采用多目标优化方法, 如非支配排序遗传算法-II (NSGA-II), 可弥补系统动力模型之不足, NSGAII 透过达尔文的遗传选择及自然淘汰的进化理论为基础, 搜寻满足各用水目标之平衡解, 探究水资源间的供需平衡关系。

台湾的年平均雨量约 2510 mm, 为世界平均值的 2.6 倍, 属于雨量充沛的地区, 然而, 由于降雨时空间分布不均、地形山高坡陡, 加上水库淤积问题日益严重等问题, 导致水资源使用效率偏低。在于新水源开发不易的现在, 在于现有水资源管理上的弹性与灵活性, 将是未来因应干旱时期关键的策略之 1; 又桃园地区都市化发展迅速, 各目标用水需求日益增加, 因此在干旱发生的情形下, 石门水库用水调度将是 1 个重大课题, 本研究采用 2005~2014 年间的土地利用、人口成长等数据, 透过系统动力模式的运作, 推衍未来 2015~2030 年桃园地区需水情境, 再以非支配排序遗传算法-II 运用灌溉用水的调度弹性支持非灌溉用水目标, 期能有效率地使用

水资源并降低干旱缺水所带来的供水压力及经济损失。

2. 文献回顾

水库除拦蓄上游的河水外，必须肩负调配供水的能力，部分水库更具发电、防洪及游憩的功能。而水库的营运操作中，包含了许多不确定因素，使得水库操作者之经验与智能常成为决策依据。传统的操作方式大多依据水库运用规线作为操作标准，依不同水库用水目标与水文条件之不同而制订。惟水库需水目标改变或特殊水文事件出现时，规线往往无法配合，若能利用优化操作模式来提升水资源利用效果并降低下游缺水风险，对水库运转有较佳结果。

Chang L. C.与 Chang F. J. (2009)利用 NSGA-II 进行石门暨翡翠水库之多目标供水操作，可同时搜寻出同时可降低两水库供水区域缺水率的联合调度操作策略[2]。Kaini P., Artita K.与 Nicklow J. W. (2012)以 SWAT 及 GA 搜寻农业水工构造物之最小建设成本以及降低优养化等目标[3]。Chang Li-Chiu 等人(2010)以生态基流量作为限制条件，透过惩罚函数的设置，运用遗传算法求解水库优化操作问题，搜寻水库最佳放流历线[4]。黄文政及周家庆(2008)建立水库干旱预警决策分析模式，以大汉、新店河流域，透过风险概念探讨休耕、限水政策等议题，改善抗旱防灾管理相关措施[5]。Han Jing-Cheng 等人(2012)透过模糊限制非线性规划，进行生态及水力发电目标之水库优化操作，结果显示，于水文不确定因素下，模式可有效满足供水操作目标[6]。Vedula S.与 Kumar D. N. (1996)结合线性及随机动态规划模式，将水库库容、入流量、降雨量等因子作为输入项，优化水库放水政策[7]。Rani D.与 Moreira M. M. (2010)针对水库操作优化问题，比较多种模式间的差异，其中包括进化演算、模糊理论、类神经网络等，并探讨各项模式应用之结果[8]。Mehta R.与 Jain S. K. (2009)结合模糊理论以及类神经网络，建置雨季及非雨季的水库放流操作模式，有效降低洪水及干旱所带来的灾害[9]。Ghumman A. R.等人(2010)运用 CBIO 及 CanalMan，仿真农业灌溉系统，并发现在作物用水低需求的时期有供水过剩的情况发生[10]。Singh A. (2014)以线性、非线性、动态规划以及遗传算法作为主轴，以农业收益最大化、地下水消耗最小等目标，做各种面向之比较，探讨并比较各模式的灌溉用水管理以及规划策略[11]。

3. 研究区域

石门水库位于大汉溪上游，属淡水河流域，其为一坝高 133.1 公尺之土石坝，水库集水面积 763.4 平方公里，满水标高 245 公尺，呆水位标高 195 公尺，现有有效容量约 2 亿立方公尺，为一多目标水利工程，具有灌溉、发电、公共给水、防洪及观光等效益，对北部地区农业改进、工业发展、人民生活水平的提高、水旱灾的防止等，均有重大贡献。主要的供水区为板新及桃园两大地区，石门水库位于大汉溪上游，水资源系统如图 1 所示，透过石门水库放水操作，经由石门、平镇、龙潭、大湳及板新等净水厂，将水输送至供水区，桃园地区的配水以石门、平镇、龙潭、大湳净水厂为主，板新净水厂水资源支持调配用。

3.1. 石门水库水文情境分析

石门水库历年水文情势如图 2 所示，由图可看出，当初始库容低于最大库容(约两亿立方公尺)的一半时，公共、农业缺水率有相当大的机率上升，故本研究选定初始库容为最大库容之 50%、40%、30% 分别做为 2015~2030 年可能之干旱情境；并进一步由图 2 选定缺水率较高的三个年份，1977、1984、2002 年之旬入流量作为本研究设定 2015~2030 年可能发生之水文情境。

4. 理论方法

4.1. 非支配排序遗传算法

在于多目标优化的搜寻上，非支配排序遗传算法(NSGA)是一个相当热门、普遍的方法，但有计算复杂性太

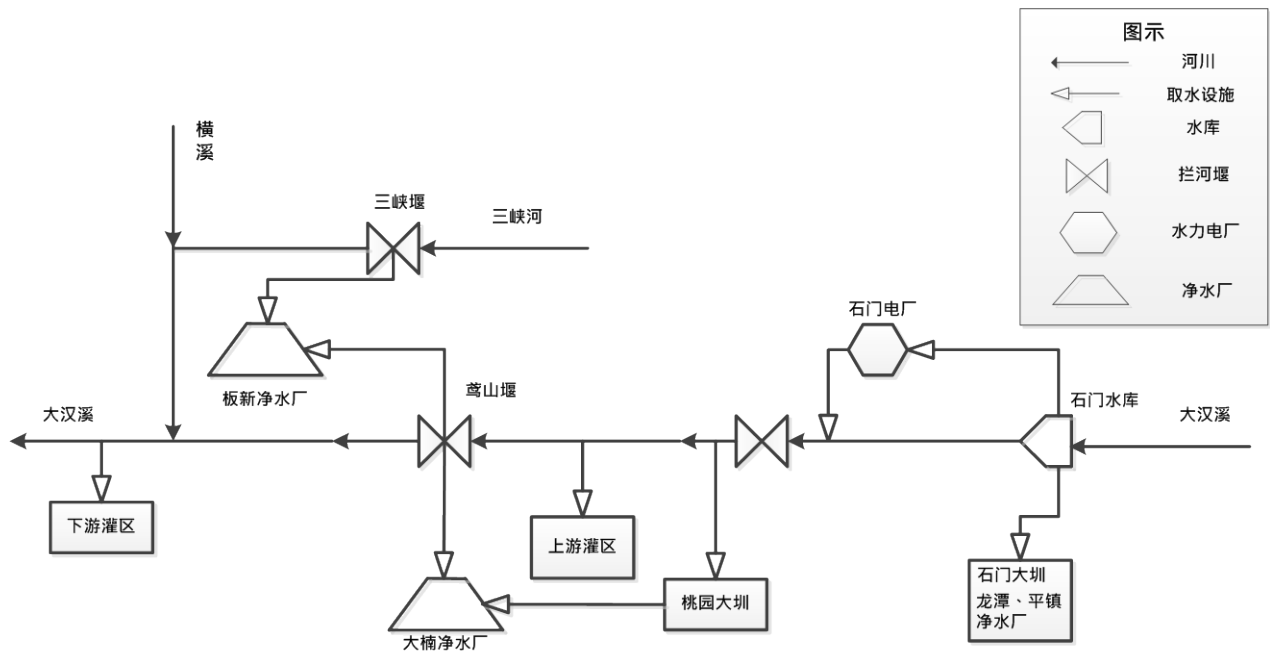


Figure 1. Water allocation system of Dahan River basin
图 1. 大汉河流域水源系统架构图

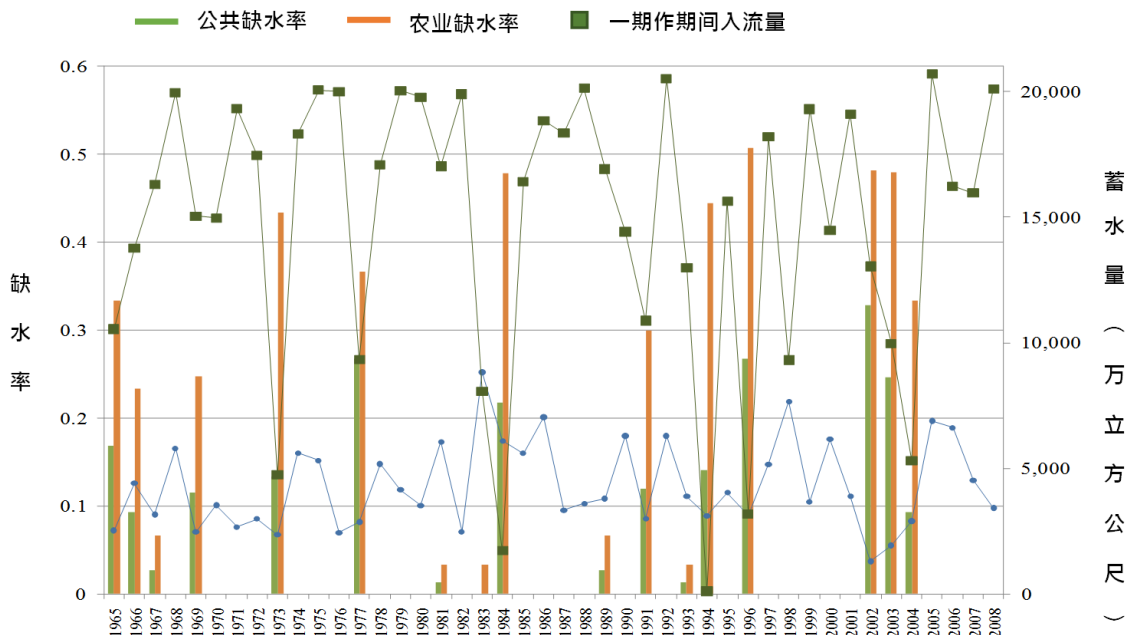


Figure 2. Hydrological circumstance analysis of Shimen Reservoir
图 2. 石门水库历年水文情势分析

高、缺乏精英策略以及需要选择合适的分享参数等缺点，而非支配排序遗传算法-II (NSGA-II)则改善了上述的不便，不需要分享参数的设定，利用排序算法结合精英策略的方式搜寻多目标最佳解。

下述为非支配排序遗传算法-II (NSGA-II)的演算步骤，如图 3 所示：

I) 群体初始化：设定适当的解空间及限制式，产生初始解集合大小为 N 的群体，并进行解集合的目标适合度计算。

II) 将初始解集合视为第一代亲代(Parents), 进行交配、突变等运算后产生解集合大小为 N 的第一代子代(Offsprings)。

III) 将第一代的亲代与子代合并成大小为 2N 的交配池(Mating pool)集合, 并按照适合度进行非支配排序, 将解集合分为多个非支配等级(Non-dominating Level), 位于同一等级的解则进一步计算拥挤距离。

IV) 将进行非支配排序后的交配池集合按照非支配排序的等级以及拥挤距离进行拥挤竞争选择操作(Crowded tournament selection operator)评估交配池集合中任一两个解的优劣, 选择前 N 个较优解为第二代亲代。

V) 若最后操作满足停止条件, 则运算结束, 否则重复步骤 II~IV 直到满足停止条件。

4.2. 系统动力学

受都市化影响之水资源管理相关问题属动态性且复杂的问题, 如土地利用变迁所带动的用水比例改变, 即为一动态问题, 而此类问题时常涉及时间稽延及长短期不同之效应, 而系统动力学正好可适用于此类问题, 延伸相关领域内可探讨之方向。

系统动力模式建构主要组件[12]:

I) 积量(Level): 又称为 Stock, 现实情况里随着时间推移可累积的量, 是由流入的流量与流出的流量差经过一段时间所累计而成。

II) 率量(Rate): 代表单位时间内的流量, 它是直接决定积量大小的控制因子。

III) 辅助变数(auxiliary): 代表特定参数值, 其为率量的一部份。

系统动力简易架构如图 4 所示。

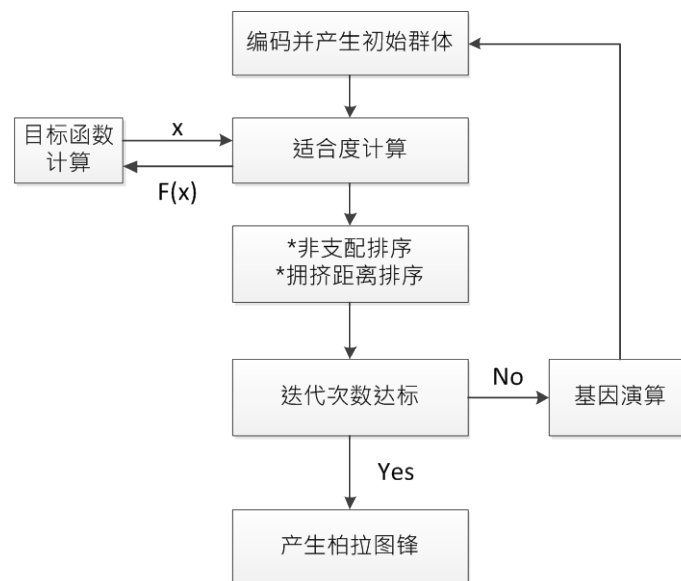


Figure 3. Calculus processes of NSGA-II

图 3. NSGA-II 演算流程



Figure 4. Architecture of system dynamic model

图 4. 系统动力模式架构图

4.3. 水库模拟操作

石门水库操作之 M-5 规线，如图 5 所示，乃利用历年水文纪录作为参考，再依据专家经验分析判定而得。然而根据操作规线运作而得的放水结果，往往不是最佳方案，且于用水策略上不够弹性，故本研究以非支配排序遗传算法-II (NSGA-II)，利用灌溉用水之操作弹性，搜寻水库各旬之灌溉供水打[1]折率，以增加极端干旱时期水资源运用管理之弹性。

模拟水库运转之平衡方程式可表示如下：

$$0 \leq WS_t \leq WS_{\max} \quad (4-1)$$

$$WS_{t+1} = \max(0, (Res_supply_t - Release_t)) \quad (4-2)$$

$$Res_supply_t = \max(0, WS_t + inflow_t - eco_flow) \quad (4-3)$$

$$Release_t = supply_agri_t + supply_pub_t \quad (4-4)$$

式(4-1)表示水库第 t 旬有效蓄水量 WS_t 不得低于 0，且不得高于水库最大有效蓄水量 WS_{\max} (20,969.17 万立方公尺)，并设定多出来之水量皆放流至下游；式(4-2)和(4-3)分别表示水库第 $t+1$ 旬库容 WS_{t+1} 以及水库第 t 旬供水量 Res_supply_t 不得低于零；式(4-4)表示水库第 t 旬放流量 $Release_t$ 为第 t 旬农业供水量 $supply_agri_t$ 以及第 t 旬公共供水量 $supply_pub_t$ 之和。

目标函数、限制式及相关设定如下所述：

1) 目标函数

$$\min(MSI) = \min \left(\frac{100}{N} \sum_{t=1}^N \left(\frac{S_t}{D_t} \right)^2 \right) \quad (4-5)$$

$$\max(RRS) = \max \left(\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left(\frac{WS_t}{WS_{\max}} \right) \right) \quad (4-6)$$

式(4-5)表示目标一为搜寻修正缺水指标(MSI)之最小值， S_t 为第 t 旬总缺水量， D_t 为第 t 旬总需水量， N 为 36 旬；(4-6)表示目标二为搜寻各旬平均有效蓄水率(RRS)之最大值， WS_t 为第 t 旬有效蓄水量， WS_{\max} 代表水库最大有效蓄水量，本研究设定为 20,969.17 万立方公尺。

2) 编码

本研究参考 M5 规线之各旬下限，作为灌溉供水打折标准，当水库有效蓄水量低于规线下限时，则由模式搜寻灌溉供水的打折率，搜寻变量共 36 组，藉此增加水库用水操作弹性。

即当第 t 旬水库有效蓄水量低于 M5 规线下限时，则第 t 旬灌溉供水量 $supply_agri_t$ 由模式优选出的第 t 旬打折率 X_t 做决定，其范围在 0~1 之间，而第 t 旬公共供水量 $supply_pub_t$ 则完全满足该旬公共需水量 $Demand_pub_t$ ，如式(4-7、4-8)所示：

$$supply_agri_t = Demand_agri_t * X_t \quad (4-7)$$

$$supply_pub_t = Demand_pub_t \quad (4-8)$$

若水库第 t 旬有效蓄水量低于 M5 规线严重下限，则灌溉供水量 $supply_agri_t$ 由模式优选出的第 t 旬打折率 X_t 做决定，其范围在 0~1 之间，公共供水量 $supply_pub_t$ 则为原来公共需水量 $Demand_pub_t$ 的八折，如式(4-9、4-10)所示：

$$supply_agri_t = Demand_agri_t * X_t \quad (4-9)$$

$$supply_pub_t = Demand_pub_t * 0.8 \quad (4-10)$$

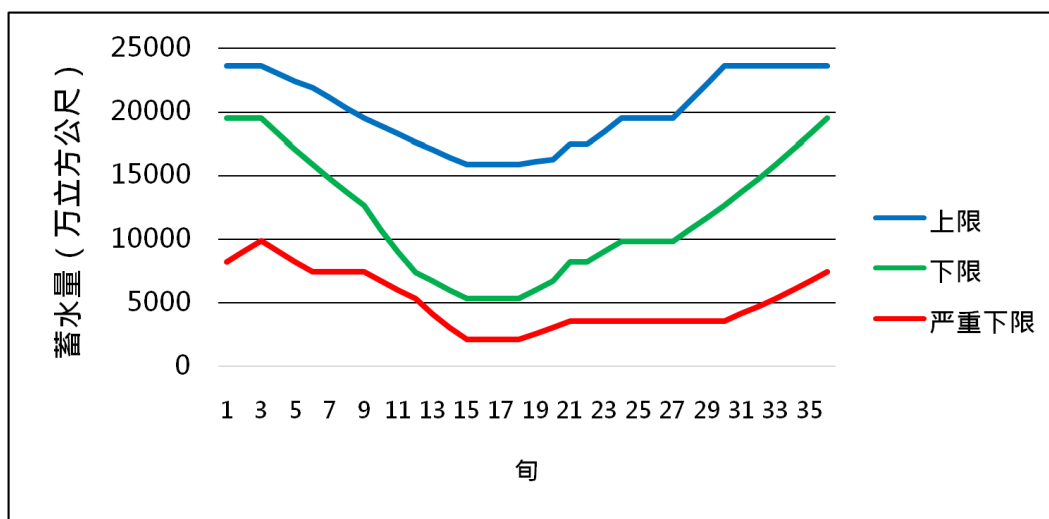


Figure 5. M-5 operation rule curves
图 5. M-5 操作规线

4.4. 桃园地区 2015~2030 年需水情境模拟

4.4.1. 桃园地区 2015~2030 年农业需水情境模拟

本研究参考经济部水利署订定之水权登记审查作业要点第四点附件修正规定中的农业用水推估公式作为农业需水动态模式之架构，推估公式如(4-11)式所示：

$$\text{每日引用水量} Q = \frac{\text{灌溉面积(公顷)}}{\text{灌溉率}} \times \frac{24(\text{小时})}{\text{每日用水时间}} \times \frac{100}{100 - \text{输水损失率}} \quad (4-11)$$

(公顷/秒·立方公尺) (小时) (%)

利用式(4-11)，建立之农业需水动态模式如图 6 所示。

4.4.2. 桃园地区 2015~2030 年民生既工业需水情境模拟

在工业需水动态模式中，本研究参考经济部水利署订定之工业用水推估公式作为模式之输入因子，如式(4-12)所示：

$$\text{工业年用水量} = \text{单位面积日用水量} \times \text{工业面积} \times \text{年工作日数} \quad (4-12)$$

在民生需水动态模式中，本研究参考水利署水资源永续发展政策规划报告，用水推估公式如式(4-13)所示：

$$\text{生活用水量} = \text{人口数} \times \text{普及率} \times \text{每人每日用水量/抄见率} \quad (4-13)$$

本研究考虑都市化所造成的影响，利用工业面积的增加代表其所造成之人口吸力，并透过式(4-12、4-13)建立民生暨工业需水动态模式，如图 7 所示。在需水动态模式中，本研究各项设定参数如表 1 所示。

5. 结果和讨论

5.1. 桃园地区 2015~2030 年各项需水模拟结果

根据石门水库 2009~2013 年计划配水资料统计结果，农业用水每年约需 4 亿 9 千万立方公尺，工业暨民生用水每年约需 4 亿立方公尺，总计全年配水量每年约 8 亿 9 千万立方公尺；根据本研究动态模式输出结果，2015~2030 年农业需水推估约 4 亿 4 千万立方公尺，如图 8 所示，2015~2030 年工业暨民生需水推估约 4 亿 8 千 6 百万立方公尺，如图 9 所示，总计共约 9 亿 2 千 6 百万立方公尺。

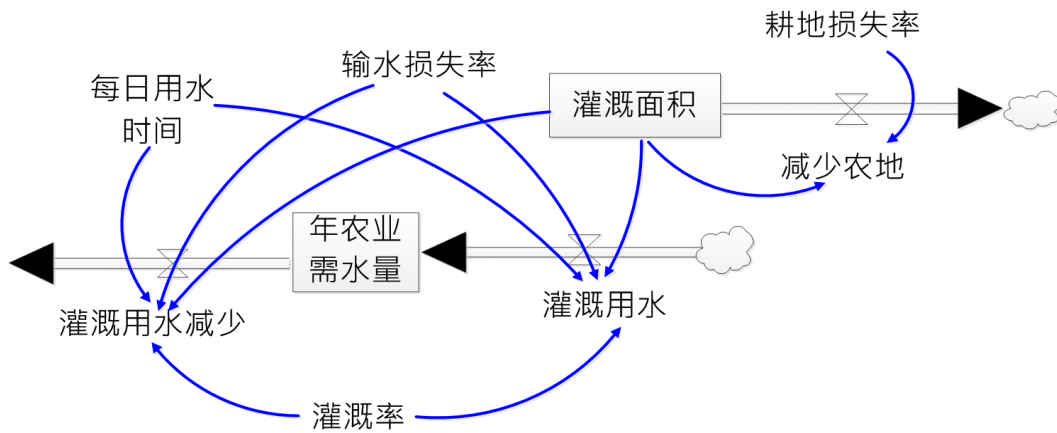


Figure 6. Dynamic model of agricultural water demand in Taoyuan

图 6. 桃园地区农业需水动态模式

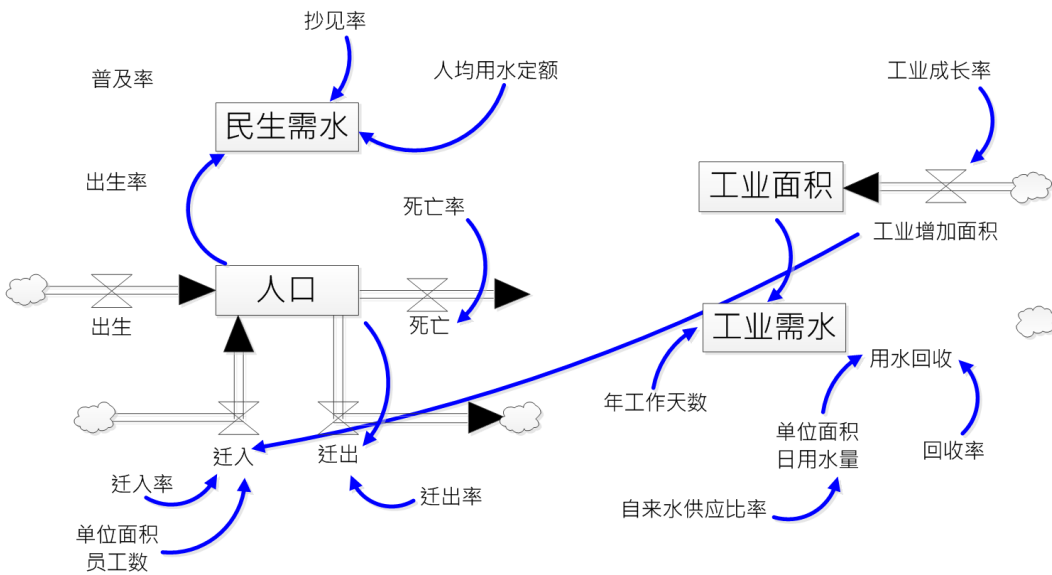


Figure 7. Dynamic model of industrial and residential water demand in Taoyuan

图 7. 桃园地区工业暨民生需水动态模式

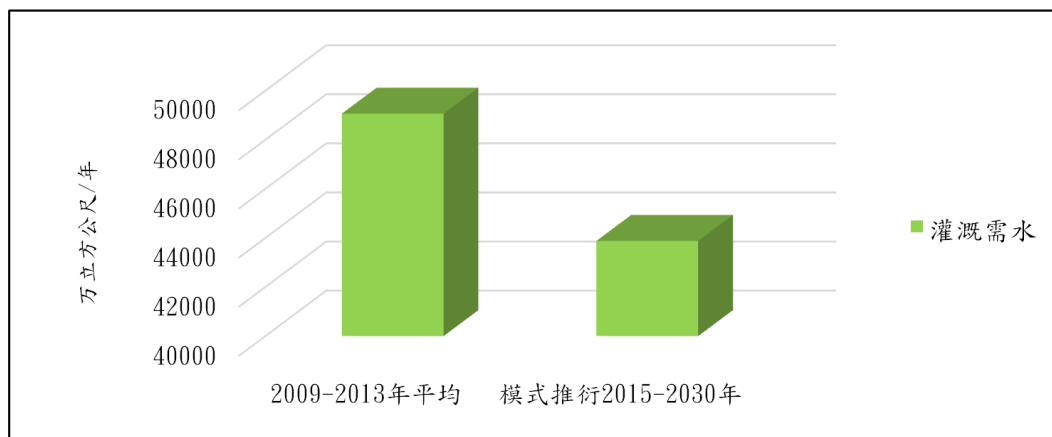


Figure 8. Comparison of mean (2009-2013) & output (2015-2030) of agricultural water demand

图 8. 历年(2009~2013)和模式推行(2015~2030)灌溉需水量比较图

5.2. 水库操作结果比较

本研究应用 M5 规线及非支配排序遗传算法-II (NSGA-II)分别建立两种模式，利用历年干旱年(1977, 1984, 2002)之水库旬入流量以及不同比例(30%、40%、50%)之初始库容作为设定情境进行模拟，并藉由两模式的输出结果进行相互比较，如表 2 所示。

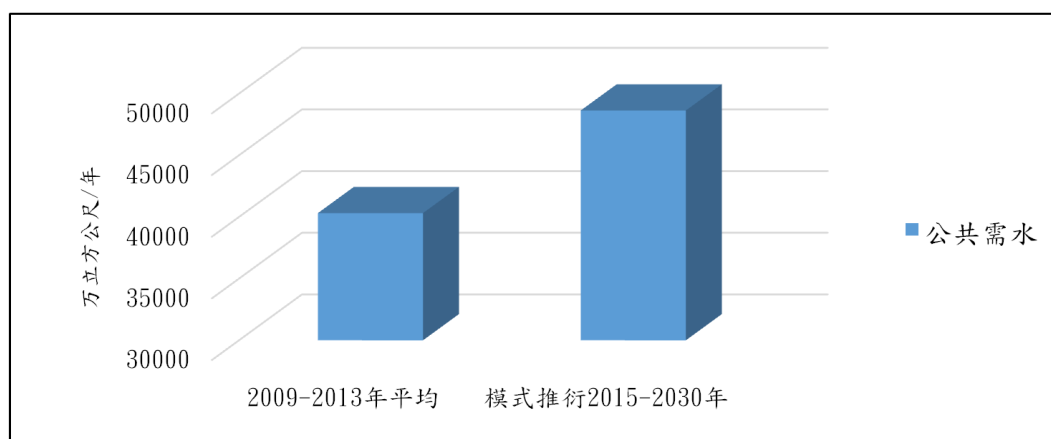


Figure 9. Comparison of mean (2009-2013) & output (2015-2030) of industrial and residential water demand
图 9. 历年(2009~2013)&模式推行(2015~2030)工业暨民生需水量比较图

Table 1. Parameters of dynamic model in Taoyuan
表 1. 桃园地区需水动态模式参数列表

项目	参数值	项目	参数值
初始灌溉面积	32,498 公顷	初始工业面积	3786 公顷
灌溉率	1450 (公顷/立方米/秒)	年工作天数	276 天
每日用水时间	20 小时	单位面积日用水量	0.02234 万立方米/公顷
输水损失率	15%	工业面积成长率	0.6%
耕地面积减少率	0.55%	单位面积工业人口	122 人/公顷
初始人口数	210 万	每人每日用水量	260 公升/日
普及率	94.8%	抄见率	70.7%

Table 2. Result of the scenarios simulated by NSGA-II & M-5
表 2. NSGA-II 与 M5 模拟操作之各情境输出结果

年分	初始库容	水库平均有效蓄水率(RRS, %)			修正缺水指标(MSI)		
		M5	NSGA-II	改善率(%)	M5	NSGA-II	改善率(%)
1977	50%	47	50	6.4	9	7	22.2
	40%	45	48	6.7	12	9	25.0
	30%	44	46	4.5	13	11	15.4
1984	50%	58	59	1.7	6	5	16.7
	40%	55	55	0.0	6	6	0.0
	30%	53	53	0.0	7	6	14.3
2002	50%	41	45	9.8	16	11	31.3
	40%	40	43	7.5	17	13	23.5
	30%	38	39	2.6	19	15	21.1

分析结果显示, NSGA-II 搜寻的两个目标, 水库平均有效蓄水率(RRS)以及修正缺水指标(MSI)部份, 于 1977 年的水文情境下, NSGA-II 优选模式与 M5 模拟结果相比, 分别有约 5%~7% 以及 15%~25% 的改善率。1984 年的水文情境, 水库平均有效蓄水率(RRS)与 M5 模拟结果近似, 修正缺水指标(MSI)改善率最高可达 17%。2002 年的水文情境, 水库平均有效蓄水率(RRS)以及修正缺水指标(MSI)分别有约 3%~10% 以及 21%~30% 的改善率; 就整体而言, 若初始库容越低, 则改善幅度越低。

以 1977 年旬入流量以及初始库容 50% 设定为例, NSGA-II 之供水策略操作效果, 如图 10 及图 11 所示, NSGA-II 所搜寻的策略透过前 13 旬灌溉用水之蓄存, 使水库整体蓄水量得到提升, 前 13 旬的水库蓄水量, 由原本 M-5 规则仿真的各旬平均 5220 万立方公尺提升至 7141 万立方公尺, 如图 12 所示。使得原本应于第 12、13 旬增加的公共缺水率得到有效缓解, 公共缺水率由原本的 0.82 (第 12 旬) 及 0.79 (第 13 旬) 分别下降至 0.28。本研究之模式可透过灌溉用水之弹性调度预先蓄存水量, 有效缓解公共缺水率, 增加干旱时期水资源系统的供水承载力。

6. 结论

本研究根据系统动力仿真之 2015~2030 年桃园地区需水情境, 探讨未来可能干旱情形, 以 1977 年旬入流量 & 初始库容 50% 设定情境为例, 透过 M-5 操作规线模拟显示, 约于二月到六月期间, 由于枯水期的缘故, 水库蓄水量难以得到补注, 易发生严重干旱情况, 约于第 5~15 旬间, 石门水库有效蓄水量即呈现快速下降的情况。

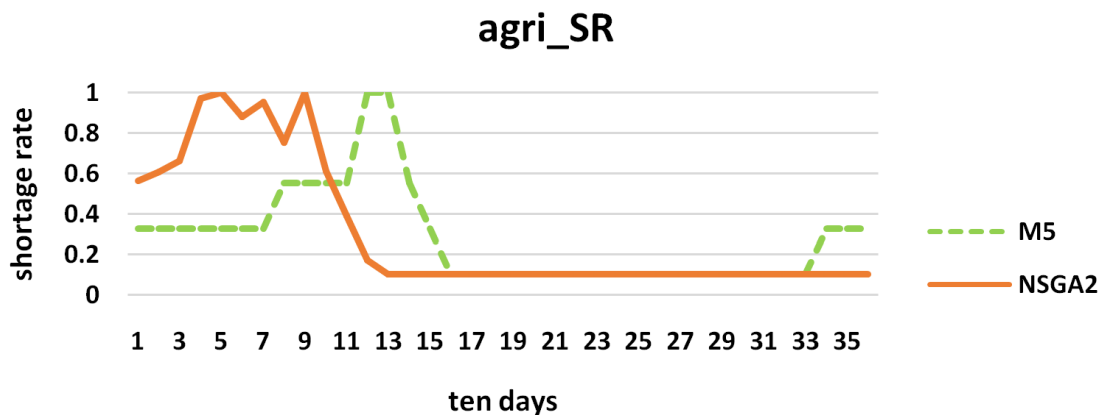


Figure 10. Comparison of irrigation water shortage between NSGA-II and M-5

图 10. M-5 与 NSGA-II 之灌溉缺水率模拟结果

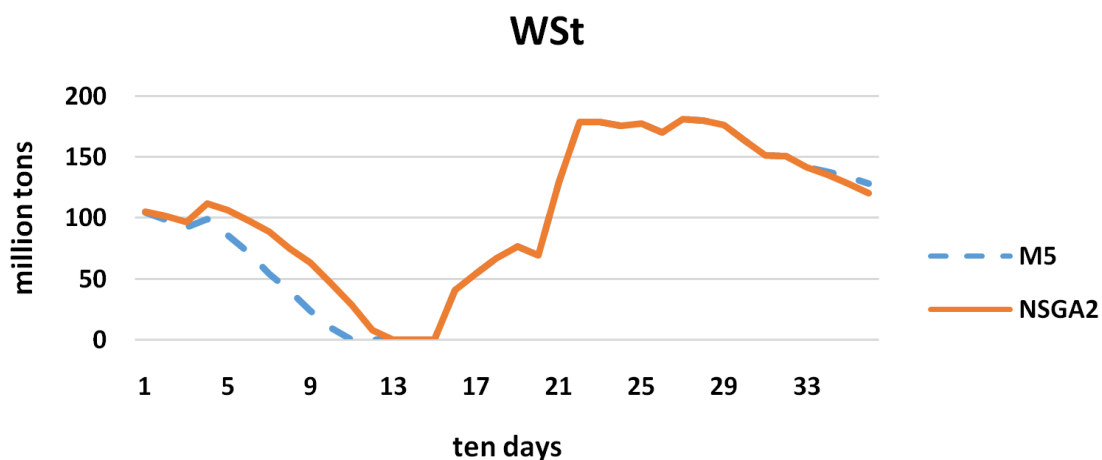


Figure 11. Comparison of water storage of Shimen reservoir between NSGA-II and M-5

图 11. M-5 与 NSGA-II 之水库有效库容模拟结果

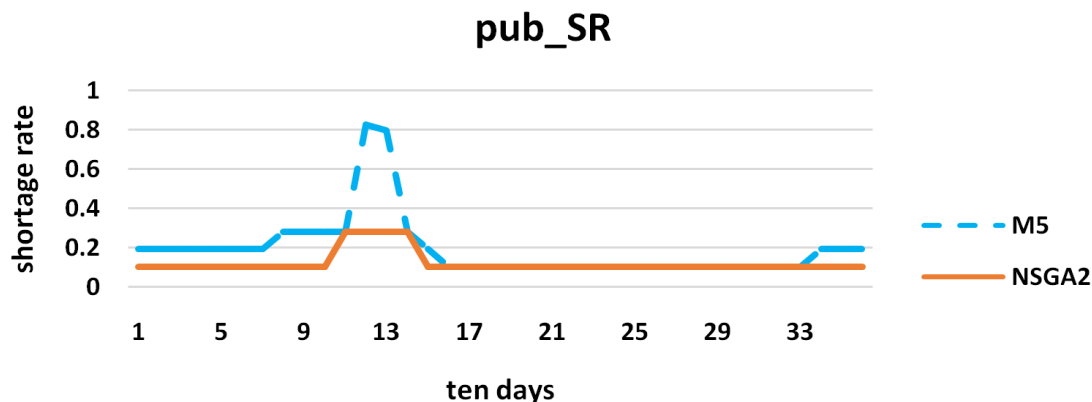


Figure 12. Comparison of public water shortage between NSGA-II and M-5

图 12. M-5 与 NSGA-II 之公共缺水率模拟结果比较

为舒缓干旱时期的公共缺水压力，本研究透过非支配排序遗传算法-II，以灌溉用水调配公共用水的方式优化水库供水操作，以水库平均有效蓄水率以及修正缺水指标做为多目标搜寻之目标，结果显示，有效库容率的改善率最高可达约 10%，修正缺水指标的改善率最高可达 30%，说明本研究所建置之智能型供水系统可于干旱时期进行有效率地供水策略分析，提供未来水库管理人员于决策上参考之依据。

致 谢

本研究承蒙农业委员会委托办理以及承蒙水利署、桃园水利会、石门水利会及桃园市政府提供宝贵数据，使得以顺利进行，仅此致谢。

参考文献 (References)

- [1] FORRESTER, J. W. Industrial dynamics: A major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review*, 1958, 36(4): 37-66.
- [2] CHANG, L. C., CHANG, F. J. Multi-objective evolutionary algorithm for operating parallel reservoir system. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(1): 12-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.061>
- [3] KAINI, P., ARTITA, K. and NICKLOW, J. W. Optimizing structural best management practices using SWAT and genetic algorithm to improve water quality goals. *Water Resources Management*, 2012, 26(7): 1827-1845. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-012-9989-0>
- [4] CHANG, L. C., CHANG, F. J., WANG, K. W. and DAI, S. Y. Constrained genetic algorithms for optimizing multi-use reservoir operation. *Journal of Hydrology*, 2010, 390(1): 66-74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.031>
- [5] 黄文政, 周家庆. 桃园地区农业休耕时机之探讨[J]. *农业工程学报*, 2008, 54(2): 21-34. HUANG Wen-Cheng, CHOU Chia-Ching. Timing of fallow in Taoyuan Area. *Journal of Chinese Agricultural Engineering*, 2008, 54(2): 21-34. (in Chinese)
- [6] HAN, J. C., HUANG, G. H., ZHANG, H., ZHUGE, Y. S. and HE, L. Fuzzy constrained optimization of eco-friendly reservoir operation using self-adaptive genetic algorithm: A case study of a cascade reservoir system in the Yalong River, China. *Ecohydrology*, 2012, 5(6): 768-778. <http://dx.doi.org/10.1002/eco.267>
- [7] VEDULA, S., KUMAR, D. N. An integrated model for optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops. *Water Resources Research*, 1996, 32(4): 1101-1108. <http://dx.doi.org/10.1029/95WR03110>
- [8] RANI, D., MOREIRA, M. M. Simulation-optimization modeling: A survey and potential application in reservoir systems operation. *Water Resources Management*, 2010, 24(6): 1107-1138. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-009-9488-0>
- [9] MEHTA, R., JAIN, S. K. Optimal operation of a multi-purpose reservoir using neuro-fuzzy technique. *Water Resources Management*, 2009, 23(3): 509-529. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-008-9286-0>
- [10] GHUMMAN, A. R., KHAN, M. Z., KHAN, A. H. and MUNIR, S. Assessment of operational strategies for logical and optimal use of irrigation water in a downstream control system. *Irrigation and Drainage*, 2010, 59(2): 117-128.
- [11] SINGH, A. Irrigation planning and management through optimization modelling. *Water Resources Management*, 2014, 28(1): 1-

14. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-013-0469-y>

- [12] 曾雅彩, 屠益民. 生产系统同步化的动态分析与设计[J]. 中山管理评论, 2007, 15(1): 95-116.
TSENG Ya-Tsai, TU Yi-Ming. Dynamic design and analysis for a synchronized production system. Sun Yat-Sen Management Review, 2007, 15(1): 95-116. (in Chinese)