

城市水资源承载力及其实证研究

28

薛小杰¹, 惠洪河², 黄 强¹, 蒋晓辉¹

(1 西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048; 2 西北大学 城市与资源学系, 西安 710069)

[摘 要] 应用系统科学的原理和方法, 介绍了城市水资源承载力的概念, 建立了水资源承载力多目标核心模型和主要约束条件, 提出了多目标模型求解思路和方法, 并应用提出的模型和算法, 对西安市水资源承载力进行了实例研究, 得出了西安市 2000 年、2010 年和 2020 年不同水平年水资源承载力的大小与提高承载力的主要策略。

[关键词] 城市; 水资源承载力; 多目标模型

[中图分类号] TV211.1

[文献标识码] A

国内外水资源承载力的研究目前大都停留在概念的提供或定性分析阶段, 缺乏量化理论和方法。1996 年河海大学左东启等发表《水资源评价指标体系研究》一文, 提出的指标体系使水资源可持续利用具有可衡量性, 仍缺乏可操作性; 国家“九五”攻关计划项目主要对区域水资源承载力理论进行了深入研究。本文针对目前大多数城市存在的缺水以及水环境问题, 探索提高城市水资源承载力的方法与途径。

1 城市水资源承载力的概念体系

城市水资源承载力是指某一城市(含郊区)的水资源在某一具体历史发展阶段下, 以可预见的技术、经济和社会水平为依据, 以可持续发展为原则, 以维护生态环境良性循环发展为条件, 经过合理优化配置, 对该城市社会经济发展的最大支撑能力。水资源是人口、经济、社会发展的物质载体, 它们之间通过人类群体(含个人)行为构成一个回路(如图 1)。

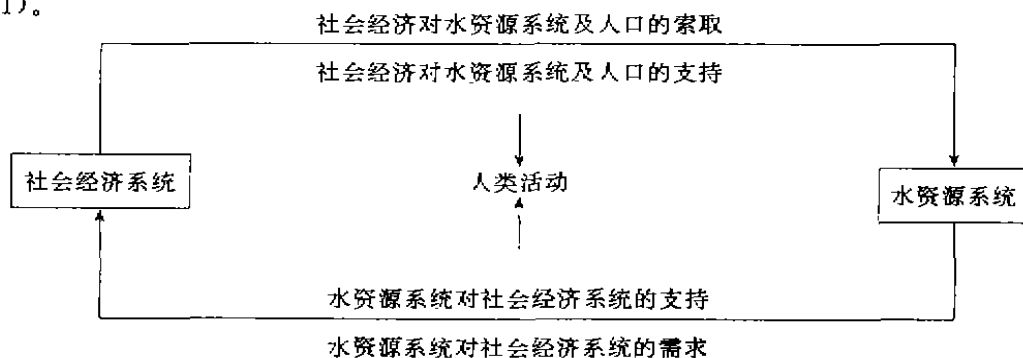


图 1 水资源系统与社会经济系统的关系

[收稿日期] 2000-03-27

[基金项目] 陕西省教委专项科研计划资助项目(99)K136)

[作者简介] 薛小杰(1973—), 男, 西安理工大学水利水电学院博士生。

由图 1 可见,社会经济系统在现有的经济技术条件下对水资源系统的索取和支持(水工程投资、水资源利用和水环境建设),与水资源系统对社会经济系统的支持(水资源供给和水环境纳污)和需求(水污染治理、投资和水资源开发投资)构成的闭合回路^[1]。水资源承载力体现在可以承载一定程度和方式的人类活动的指标,在这些指标所允许的范围内的人类经济发展活动,一是维持水资源可再生性;二是维持水资源系统整体结构水平。因此,水资源承载力具有极限。

2 水资源承载力多目标分析决策核心模型

2.1 目标选取

水资源承载力研究涉及宏观经济、水资源、水环境等系统,所选取的目标不仅反映水资源对经济、社会、环境等的承载力,而且也能反映大系统中分系统的内在联系和依赖关系。模型选取国内生产总值(GDP)、人口(POP)、粮食产量(FOOD)、污染负荷量(BOD)等 4 个目标来表示水资源对经济、环境等的承载能力。由于以上各目标之间关系错综复杂,不可能追求单个目标的优化,只能追求整体的最优^[2]。

模型目标函数 $\max\{f_1(s,t), f_2(s,t), f_3(s,t), f_4(s,t)\}$, 分解为 4 个子目标: 1) 水资源承载的国内生产总值最大 $f_1(s,t) = X_{GDPst}$; 2) 水资源可承载人口最多 $f_2(s,t) = X_{POPst}$; 3) 水资源承载的粮食产量最大 $f_3(s,t) = X_{FOODst}$; 4) 污水排放负荷量最小 $f_4(s,t) = X_{FBUDst}$ 。

2.2 主要约束条件

2.2.1 宏观经济方面的约束 1) 国内生产总值 GDP

$$X_{GDPst} = \sum_{i=1}^{cf} (C_{Cst} \cdot X_{Cst}), \quad X_{GDPst} \geq A_{GDPst}, \quad (1)$$

式中, C_{Cst} 为附加值率; X_{Cst} 为各经济行业产值; A_{GDPst} 为 GDP 计划值。

2) 扩大再生产

$$X_{Cst} = A_{Cst} \cdot X_{Kst}, \quad (2)$$

式中, A_{Cst} 为资本产出率; X_{Kst} 为 i 行业固定资产存量。

3) 投入产出

$$\sum_{j=1}^{12} (A_{Gj} X_{Cstj} - X_{Ystj}) \quad (t = 1, 2, 3, \dots, 12) \quad A_{Gj} = \begin{cases} -a_{ij} & i = j, \\ 1 - a_{ij} & i \neq j, \end{cases} \quad (3)$$

式中, a_{ij} 为直接消耗系数; X_{Cstj} 为各行业产值; X_{Ystj} 为 j 行业最终需求。

4) 产业结构约束

$$A_{CZ\Phi st} \cdot X_{Cst(t-1)t} \leq X_{Cst} \leq A_{CZ\Phi st} \cdot X_{Cst(t-1)t}, \quad (4)$$

$$A_{CY\Phi st} \cdot X_{Cst} \leq X_{Cst} \leq A_{CZ\Phi st} \cdot X_{Cst}, \quad (5)$$

式中, $A_{CZ\Phi st}$, $A_{CY\Phi st}$ 为行业年增长率上下限; $A_{CY\Phi st}$, $A_{CZ\Phi st}$ 为产业结构系数上下限。

除以上 4 项外, 还有投资需求与分配、积累与消费等方面的约束。

2.2.2 社会、人口及生活标准方面的约束 1) 承载人口约束

$$X_{POPst} \geq X_{POPst(t-1)} \cdot (1 + A_{PC}), \quad (6)$$

式中, X_{POPst} 为 t 年承载人口数; $X_{POPst(t-1)}$ 为 $(t-1)$ 年人口数; A_{PC} 为人口增长率。

2) 人均 GDP 约束

$$X_{GDPst} - X_{POPst} \cdot R_{J_{GDPst}} \geq 0, \quad (7)$$

式中, X_{GDPst} 为国民生产总值; X_{POPst} 为可承载人口; $R_{J_{GDPst}}$ 为人均 GDP。

3) 人均粮食占有量约束

$$X_{FOODst} - X_{POPst} \cdot R_{J_{FOODst}} \geq 0, \quad (8)$$

式中, X_{FOODst} 为粮食总量; $R_{J_{FOODst}}$ 为人均粮食占有量。

2.2.3 水量平衡约束 1) 需水量约束

$$X_{WDst} = X_{WNTst} + X_{WGDst} + X_{WSDst} + X_{WQTst}, \quad (9)$$

式中, X_{WDst} 为总需水量; X_{WNTst} 为农业需水量; X_{WGDst} 为工业需水量; X_{WSDst} 为生活需水量; X_{WQTst} 为生态需水量。

2) 可供水量约束

$$X_{WGSst} = X_{WBSst} + X_{WGSst} + X_{WHst} + X_{WXkst} + X_{WQDst}, \quad (10)$$

式中, X_{WBSst} 为地表水; X_{WGSst} 为地下水; X_{WHst} 为污水回用; X_{WXkst} 为新开源水量; X_{WQDst} 为外调水。

3) 供需平衡

$$X_{WSst} = X_{WDst}, \quad (11)$$

式中, X_{WSst} 为总供水量。

除以上 3 项外, 还有各部门需水量、供水量约束。

2.2.4 水环境约束 1) 污水排放量约束

$$X_{Wst} = \sum_{i=1}^{12} (X_{Gst} \cdot A_{Wst} \cdot A_{WCst} + X_{CPOPst} \cdot A_{SHst} \cdot A_{SCst}), \quad (12)$$

式中, X_{Gst} 为各工业部门产值; A_{Wst} 为各工业部门取水定额; A_{WCst} 为污水产生系数; X_{CPOPst} 为城市人口数; A_{SHst} 为生活用水定额; A_{SCst} 为生活污水产生系数。

2) BOD 排放量

$$X_{BODst} = A_{BODst} \cdot X_{Wst}; \quad X_{FBODst} = X_{BOD} - X_{BOD} \cdot A_{WCst}, \quad (13)$$

式中, X_{BODst} 为 BOD 最大允许负荷量; A_{BODst} 为 BOD 浓度; A_{WCst} 为污水负荷处理能力; X_{Wst} 为污水排放量。 X_{FBODst} 为污水排放负荷量, X_{BOD} 为 BOD 排放量。

3 承载力模型解法与计算机软件介绍

3.1 模型解法

求解多目标极小化模型 (Vector Mathematical Programming, VMP) $V = \min_{x \in X} f(x)$ 的一个重要和基本的途径, 是根据问题的特点和决策者的意图, 构造一个把 m 个目标转化为一个数值目标的评价函数 $u(f) = u(f_1, \dots, f_m)$ 。通过它对 m 个目标 $f_i (i=1, \dots, m)$ 的评价, 把求解多目标极小化问题归结为求解与之相关的单目标 (数值) 极小化问题, 这种方法称之为评价函数法。但是在实用中, 对于复杂的多目标最优化问题, 要根据它的特点构造出一个恰当的评价函数的表达式却常常是困难的。由此, 产生了另一类方法, 不直接使用评价函数的表达式, 而以分析者的求解和决策者的抉择相结合的人机对话式的求解方法, 即求解多目标最优化问题的交互规划法, 它采用分析阶段和决策阶段反复进行, 求得

决策者对各目标都比较满意的解。因为本模型的决策变量较多,选择交互规划法来求得满意解。具体采用逐步宽容约束法来求解。

3.2 软件介绍

软件系统主菜单中的数据库、方案设计、图形库、输出均为下拉式菜单。数据库二级菜单包括各类数据库表;承载力二级菜单包括承载力计算表以及成果统计表,即不同优选方案下人口规模表、经济总量表、经济发展速率表、各人均指标值表、各水平年水资源供需平衡表、保证率统计表。对各类计算结果均可进行屏幕输出和打印机输出,帮助子系统对用户多种辅助帮助功能。

4 模型的应用实例

4.1 西安市基本情况

西安市人口、面积、社会经济、水资源开发利用(1995 年)等情况^[3]见表 1。

表 1 西安市社会经济、水资源状况表

市(县)	人口/ 万人	国内 生产总值/ 亿元	土地 面积/ km ²	灌溉 面积/ 万 hm ²	水资源 总量/ 亿 m ³	过境 客水量/ 亿 m ³	客水 利用量/ 亿 m ³	渠系有效 利用系数	可供 水量/ 亿 m ³	重复 利用率/ %	水利工 程投资/ 万元	总投资/ 万元
西安市	648.21	330.35	998	23.477	26.66	78.56	1.59	0.54	17.14	44.4	4 250	884 994
市 区	298.27	260.18	1 066	4.770	4.35	7.07	0.14	0.60	3.68	58.3	3 628	810 987
长 安	86.79	11.56	1 583	3.811	4.52	14.61	0.30	0.55	2.16	48.6	426	23 419
户 县	56.44	15.96	1 213	3.649	3.41	10.24	0.21	0.52	2.33	52.7	27	15 847
周 至	60.12	14.89	2 956	3.873	4.71	28.85	0.58	0.54	2.44	35.4	13	10 552
高 陵	22.49	7.04	290	1.889	2.63	5.76	0.12	0.50	1.03	37.1	6	3 511
临 潼	63.59	15.65	898	3.926	2.48	12.03	0.24	0.54	1.70	38.2	150	11 394
蓝 田	60.51	5.05	1 977	1.559	4.56	0	0	0.55	3.80	40.5	0	7 488

4.2 西安市水资源承载力结果分析

西安市水资源承载力运算结果见表 2。由表 2 可知,西安市 2000 年、2010 年、2020 年 3 个水平年可承载的人口规模分别为 699.20,756.89,785.92 万人;可承载的 GDP 分别为 515.9,1 578.1,4 002.9 亿元。计算结果为西安市未来社会经济发展提供了参照系,若该市在不同水平年,水资源承载能力上限与宏观经济社会发展目标不相协调,则需采取各种工程、非工程措施提高本市的水资源承载能力;若该市水资源的最大承载力与宏观经济社会发展目标仍不协调,则说明社会经济发展目标过高,需适当调低,否则,西安市生态环境将受到影响,进而影响西安市社会经济的可持续发展。

表 2 西安市水资源承载力结果表

年份	承载 人口/ 万人	GDP/ 亿元	GDP 增长率/ %	人均 GDP/ 元	三产 比例/ %	粮食 产量/ 万 t	人均粮食 产量/ kg	污水 处理率/ %	BOD 负荷/万 t
2000	699.20	515.9	9.32	7 377.9	10.3/43.0/46.7	201.48	288.16	76.0	5.8
2010	756.89	1 578.1	11.83	20 849.1	5.5/48.4/46.1	257.18	339.79	82.0	7.3
2020	785.92	4 002.9	9.79	50 932.3	3.5/47.7/48.8	282.91	359.97	85.0	26.9

注:GDP 值采用 1995 年现价。

5 提高西安市水资源承载力的主要途径

1)调整产业结构。尽可能鼓励和发展单位产值耗水低的产业部门,抑制单位产值相对

耗水大的产业部门,使经济发展过程中整体的单位产值耗水量大幅下降^[3]。西安市农业用水占总用水的60%,而同期农业产值仅占总产值的10%,通过降低农业用水比重,使农业用水量减少,因此而节约的用水量数目相当可观,可以缓解日益增加的工业和城乡生活用水的需要。

(2)充分挖掘西安市节水潜力。主要指农业和工业节水两大块,农业节水途径包括农业内部用水结构调整,降低单位面积灌溉用水,选用抗旱节水高产品种,实施作物节水、高产、低耗栽培技术等方式;工业节水途径包括工业内部结构调整节水、提高工业用水重复利用率等,使得总体用水效率提高,达到水资源承载能力提高的目的。

(3)加强环境保护与治理、控制地表水污染、减少地下水超采、增大污水回用量,使有效供水量增加,提高城市水资源和水环境承载力。

(4)在通过各项节水措施仍无法满足西安市社会经济发展对水的需求时,必须实施开辟当地新水源和区外调水措施。

[参考文献]

- [1] 崔风军.城市水环境承载力及其实证研究[J].自然资源学报,1998,(1):58—62.
- [2] Wigmosat M S, Vail L W, Lettenmaier D P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(6):1665—1679.
- [3] 薛惠锋、贾 嵘,薛小杰,等.水资源可持续利用的理论与实践[M].西安,西安地图出版社,1998.153—168.

Research on city water resources capacity and its practical example

XUE Xiao-jie¹, HUI Yang-he², HUANG Qiang¹, JIANG Xiao-hui¹

(1 Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2 Northwest University, 710069, China)

Abstract: Based on systems science principle and methods, the conception, essential, trait and content of city water resources capacity are analyzed. This paper establishes multi-objective models of water resources capacity and puts forward a method for solving multi-objective models. Water resources capacity for Xi'an City is computed and analyzed by applying the model and method presented in this paper. The size of water resources capacity of different level years and the main idea of boosting water resources capacity are achieved.

Key words: city; water resources capacity; multi-objective model