

大汶河流域水资源承载能力多目标决策分析

庞清江¹, 齐 剑², 张钰镭¹, 杨元青¹, 纪 玲³

(1. 山东农业大学, 山东 泰安 271018; 2. 莱芜市水资源管理办公室, 山东 莱芜 271100; 3. 泰安高级技工学校, 山东 泰安 271000)

摘要 论述了水资源承载能力的内涵、实质和主要分析方法, 构建了大汶河流域水资源承载能力的研究框架, 建立了相应的多目标决策分析模型, 并利用多年的实地调查和监测数据资料, 对大汶河流域水资源承载能力进行了分析、预测和研究, 其成果可为大汶河流域水资源的可持续利用和社会、经济、资源、生态环境的协调发展提供科学依据。

关键词 大汶河流域; 水资源承载能力; 复合大系统; 循环故障; 多目标决策模型

中图分类号 :TV213 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2007)05-0021-04

Multi-objective decision-making analysis of water resources carrying capacity in Dawenhe River Basin

PANG Qing-jiang¹, QI Jian², ZHANG Yu-lei¹, YANG Yuan-qing¹, JI Ling³

(1. Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. Water Resources Management Office of Laiwu City, Laiwu 271100, China; 3. Tai'an Senior Technical School, Tai'an 271100, China)

Abstract The connotation, essential and analysis methods of water resources carrying capacity were presented, and the research framework for Dawenhe River Basin and its multi-objective decision-making model were established. The water resources carrying capacity of Dawenhe River Basin was analyzed, forecasted and studied by using the field investigation and survey data over years. The achievements would provide scientific basis for sustainable utilization of water resources and harmonious development of society, economy, resources and ecological environment in Dawenhe River Basin.

Key words Dawenhe River Basin; water resources carrying capacity; composite large-scale system; cycle malfunction; multi-objective decision-making model

1 水资源承载能力的主要分析方法

国内外对水资源承载能力的研究, 目前还处于初始阶段, 还没有统一和成熟的方法。已有的研究大多是根据地区社会经济状况, 从水资源的自然和社会属性角度入手, 循着可持续发展的方向, 借助各相关学科和领域的理论和知识, 参考决策者的需要, 应用已有的和创新的方法来解决水资源承载能力的问题。当前关于水资源承载能力的分析方法主要有以下几种^[1-3]。

1.1 常规趋势法

该法主要采用统计分析的方法, 是选择单项和多项指标来反映地区水资源承载能力现状和阈值的一种方法。该法由于较多考虑的是单承载因子的发

展趋势, 而忽略各承载因子之间的相互联系, 很难处理复杂巨系统之间的耦合关系, 但其对某些承载因子的潜力估算的研究方法对复杂巨系统的协调研究仍有借鉴意义。

1.2 系统动力学方法

该法是应用系统动力学原理采用动态系统反馈模拟评价一个地区水资源承载能力的方法。该方法的优点在于, 能定量分析各类复杂系统的结构和功能的内在关系, 能定量分析系统的各种特性, 擅长处理高阶、非线性问题, 比较适应宏观的长期动态趋势研究。缺点是系统动力学模型的建立受建模者对系统行为动态水平认识的影响, 由于参变量不好掌握, 易导致不合理的结论。

1.3 多目标模型分析法

水资源承载能力的研究需要从可持续发展的角度,研究水资源与社会经济发展、生态环境以及其他资源之间的关系,因此水资源承载能力问题是一典型的复合系统问题,这就为采用多目标模型进行承载力分析提供了理论依据。由于多目标模型综合考虑了区域水、土、气候等限制资源及资源相互之间作用的关系,而且决策分析中可考虑人类不同目标和价值取向,融入决策者思想,比较适合处理社会、经济、生态、水资源系统这类复杂多属性多目标群决策问题。

2 大汶河流域水资源承载能力的研究框架

大汶河流域水资源承载能力研究采用多目标模型分析方法。本文将整个系统分解为若干子系统,各子系统模块既可单独运行,又可配合运行,子系统模块之间通过多目标分析模型的协调关联变量相连接。在这些模块之中,多目标分析模型为总控模型,它将各子系统模块中主要关系提炼出来,根据变量之间的相互关系,对整个大系统内的各种关系进行分析和协调。而子系统模块对系统局部状态进行较详细的分析。整个系统模型包括宏观经济、人口、资源、生态环境、水资源模拟开发利用、水利工程投资等子模块。以上各子模块负责对系统局部进行较为详细的模拟和优化,多目标分析模型则从整体角度协调社会经济发展、生态环境、水资源开发利用之间的关系,并进行流域的社会、经济、生态环境的协调,从而选择合适的发展策略,使社会、经济、水资源、生态环境可持续协调发展。大汶河流域水资源承载能力多目标分析模型逻辑关系见图1。

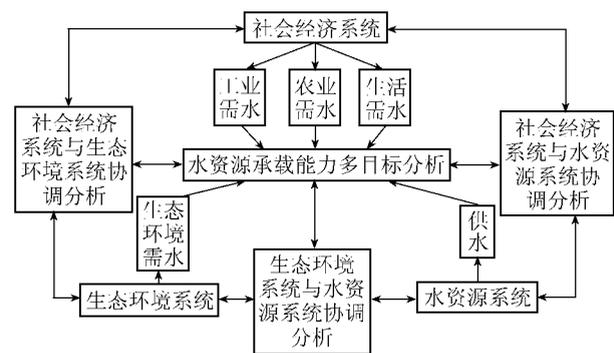


图1 大汶河流域水资源承载能力分析模型逻辑关系

3 构建大汶河流域水资源承载力计算模型

3.1 目标选取

选取目标时,既要反映各因素之间的内在联系和依赖关系,数量又要适宜,为此,模型选取以下目标:①国内生产总值(GDP);②粮食产量(FOOD);③污染物排放负荷量(COD)来反映水资源对社会、

经济、生态环境等的承载能力。影响各目标的主要因素是相通的,且这些目标之间又存在相互依存、相互制约的关系,因此不可能追求单个目标的优化,只能追求整体的最优。需要说明的是本模型不再将人口作为一个目标函数去追求一个最大承载的数量,因为控制人口增长是我国的一项基本国策,必须按照政府规划要求确保实现,所以,本模型将其作为一个严格执行的约束指标。

模型目标函数如下:

$$F = \max\{f_1, f_2, -f_3\}$$

即:

a. 经济目标:水资源承载的国内生产总值(GDP)最大

$$f_1 = X_{GDP} \quad (1)$$

b. 社会目标:水资源承载的粮食产量(FOOD)最大

$$f_2 = X_{FOOD} \quad (2)$$

c. 环境目标:污染物排放负荷量(COD)最小

$$f_3 = X_{COD} \quad (3)$$

3.2 模型系统的主要约束关系

3.2.1 宏观经济约束

a. 国内生产总值 GDP 约束

$$X_{GDP} = \sum_{s=1}^4 B_{ac}(t, s) X(t, s) \quad (4)$$

$$X_{GDP} \geq A_{GDP}$$

式中: X_{GDP} 为流域国内生产总值; $B_{ac}(t, s)$ 为s部门t年的附加值率; $X(t, s)$ 为t年s部门的产值; A_{GDP} 为GDP计划值;s为经济产业部门,根据掌握的统计资料,确定为农业、工业、建筑业、服务业等。

b. 投入产出关系约束

$$X(t, s) = B_{AO}(t, s) X(t, s) + B_{HO}(t, s) X_{HO}(t) + B_{SO}(t, s) X_{SO}(t) + B_{IN}(t, s) X_{IN}(t) + B_{SI}(t, s) X_{SI}(t) + X_{EI}(t, s) - X_{IM}(t, s) \quad (5)$$

式中: $B_{AO}(t, s)$ 为t年s部门的直接消耗系数; $X_{HO}(t)$ 、 $X_{SO}(t)$ 、 $X_{IN}(t)$ 、 $X_{SI}(t)$ 分别为t年居民消费、社会消费、固定资产形成、库存增加; $B_{HO}(t, s)$ 、 $B_{SO}(t, s)$ 、 $B_{IN}(t, s)$ 、 $B_{SI}(t, s)$ 分别为t年s部门相应变量的分配系数; $X_{EI}(t, s)$ 、 $X_{IM}(t, s)$ 分别为t年s部门的进、出口变量;其余符号同上。

c. 扩大再生产约束

$$X(t, s) = B_{CA}(t, s) X_{FN}(t) \quad (6)$$

式中: $B_{CA}(t, s)$ 为t年s部门的资本产出率; $X_{FN}(t, s)$ 为t年s部门的固定资产存量。

d. 产业结构约束

$$B_{IA}(t, s) \sum_{s=1}^4 B_{ac}(t, s) X(t, s) = X_{GDP}(t, s) \quad (7)$$

式中： $B_{IA}(t, s)$ 为 t 年 s 部门规划的产业结构系数； $X_{CDF}(t, s)$ 为第一产业或第二产业或第三产业在 t 年的增加值；其余符号同上。

3.2.2 人口约束

总人口：

$$X_P(t) = X_P(t-1)(1 + B_{PA}) \quad (8)$$

城市人口：

$$X_{CI}(t) = B_{CPA}X_P(t) \quad (9)$$

式中： $X_P(t)$ 为 t 年承载人口数； $X_P(t-1)$ 为 $(t-1)$ 年人口数； B_{PA} 为规划的人口增长率； $X_{CI}(t)$ 为 t 年承载的城市人口数； B_{CPA} 为城市化要求的城市人口比例。

3.2.3 农业生产约束

a. 粮食生产目标约束

$$X_{FOOD}(t) = K_{FO}(t)X_P(t) \quad (10)$$

式中： $X_{FOOD}(t)$ 为 t 年的粮食需求量； $K_{FO}(t)$ 为 t 年人均需求粮食水平；其余符号同上。

b. 粮食产量约束

$$X_{FOOD}(t) = Y_{D1}(t)X_{AR1}(t) + Y_{D2}(t)X_{AR2}(t) \quad (11)$$

式中： $Y_{D1}(t)$ 、 $Y_{D2}(t)$ 分别为 t 年旱地、灌溉地粮食作物单位面积产量； $X_{AR1}(t)$ 、 $X_{AR2}(t)$ 分别为 t 年旱地、灌溉地粮食作物播种面积。

c. 农业总产值约束

$$X_{Ay}(t) = \sum_{i=1}^4 X_{asy}(t, i) \quad (12)$$

式中： $X_{Ay}(t)$ 为 t 年的农业总产值； $X_{asy}(t, i)$ 为 t 年农业 i 部门产值； i 为农业各部门，分为种植业、林业、牧业和渔业。

d. 农业生产结构约束

种植业、林业、牧业和渔业结构约束：

$$X_{asy}(t) \geq B_{AY}X_{Ay}(t) \quad (13)$$

式中： $X_{asy}(t)$ 为 t 年农业各部门产值； B_{AY} 为农业各部门产值比例下限。

e. 农业作物结构约束

$$X_{ARj}(t) \geq B_{AA}X_{TAR}(t) \quad (14)$$

式中： $X_{ARj}(t)$ 为 t 年 j 种作物种植面积，分为粮食、油料、蔬菜等； $X_{TAR}(t)$ 为 t 年农作物总面积； B_{AA} 为各农作物种植比例下限。

f. 灌溉面积约束

$$X_{TAR}(t) = \sum_{j=1}^3 X_{ARj}(t, j) \geq B_I X_{TAR}(t) \quad (15)$$

节水灌溉面积：

$$X_{ARIE}(t) \geq B_{EI}X_{TAR}(t) \quad (16)$$

式中： $X_{TAR}(t)$ 为 t 年灌溉总面积； $X_{ARj}(t, j)$ 为 t 年 j 作物灌溉面积； $X_{ARIE}(t)$ 为 t 年节水灌溉面积； B_{EI} 为节水灌溉面积占灌溉面积的比例下限； B_I 为灌溉

面积占种植面积的比例下限。

3.2.4 水量平衡约束

a. 需水量约束

$$X_{WD}(t) = X_{WND}(t) + X_{WIND}(t) + X_{WSD}(t) + X_{WQI}(t) \quad (17)$$

式中： $X_{WD}(t)$ 为 t 年总需水量； $X_{WND}(t)$ 为 t 年农业需水量； $X_{WIND}(t)$ 为 t 年工业需水量； $X_{WSD}(t)$ 为 t 年生活需水量； $X_{WQI}(t)$ 为 t 年其他需水量，包括服务业、城市公共用水、生态环境等需水量。

b. 可供水量约束

$$X_{WS}(t) = X_{WB}(t) + X_{WC}(t) + X_{WH}(t) + X_{WHI}(t) \quad (18)$$

式中： $X_{WS}(t)$ 为 t 年可供水量； $X_{WB}(t)$ 为 t 年地表水量； $X_{WC}(t)$ 为 t 年地下水水量； $X_{WH}(t)$ 为 t 年污水回用量； $X_{WHI}(t)$ 为 t 年外流域调入水量。

c. 供需平衡约束

$$X_{WS}(t) = X_{WD}(t) \quad (19)$$

3.2.5 水环境约束

$$X_{COI}(t) = [1 - K_{SE}(t)] C_{COD1}(t) B_{W1}(t) X_{WIND}(t) + C_{COD2}(t) B_{W2}(t) X_{WSD}(t) \leq X_{ACOD}(t) \quad (20)$$

式中： $X_{COI}(t)$ 为 t 年 COD 排放量； $K_{SE}(t)$ 为 t 年污水处理能力(处理率)； $B_{W1}(t)$ 、 $B_{W2}(t)$ 分别为 t 年工业用水、城市生活用水污水产生系数； $C_{COD1}(t)$ 、 $C_{COD2}(t)$ 分别为 t 年工业污水、城市生活污水的 COD 浓度； $X_{ACOD}(t)$ 为 t 年 COD 最大允许负荷量；其余符号同上。

3.2.6 水利工程投资约束

a. 调水投资约束

$$X_{BUD1}(t) = S_{CS1}(t)X_M(t) \quad (21)$$

式中： $X_{BUD1}(t)$ 的 t 年调水投资量； $S_{CS1}(t)$ 为 t 年单方调水投资分摊额； $X_M(t)$ 为 t 年计划调入水量。

b. 节水投资约束

$$X_{BUD2}(t) = S_{CS21}(t)X_{AS}(t) + S_{CS22}(t)X_{INS}(t) + S_{CS23}(t)X_{CS}(t) \quad (22)$$

式中： $X_{BUD2}(t)$ 为 t 年节水投资量； $S_{CS21}(t)$ 、 $S_{CS22}(t)$ 、 $S_{CS23}(t)$ 分别为 t 年农业、工业、城市生活单方节水投资分摊额； $X_{AS}(t)$ 、 $X_{INS}(t)$ 、 $X_{CS}(t)$ 分别为 t 年农业、工业、城市生活节水量。

c. 污水处理工程投资约束

$$X_{BUD3}(t) = S_{CS3}(t)X_{POI}(t) \quad (23)$$

式中： $X_{BUD3}(t)$ 为 t 年污水处理投资量； $S_{CS3}(t)$ 为 t 年处理单方污水投资分摊额； $X_{POI}(t)$ 为 t 年污水处理量。

4 模型的求解方法及主要参数的确定

在多目标规划中，分析人员需要依据各种参数或权重系数进行计算。由于这些参数或权重系数的

表 1 大汶河流域水资源承载能力分析计算主要成果

水资源承载的主要目标													
规划水平年	总人口/万人	人口增长率/%	城市人口/万人	农村人口/万人	国内生产总值(GDP)/亿元	GDP增长率/%	人均GDP/元	第一产业/亿元	第二产业/亿元	第三产业/亿元	粮食总产量/万t	人均粮食产量/kg	COD排放量/(万t·a ⁻¹)
2010年	690	0.1	310.5	379.5	1223.096	9.21	17726.029	122.310	587.086	513.700	278.69	403.90	12.56
2020年	695	0	417.0	278.0	2633.247	7.97	37888.446	210.660	1316.624	1105.964	283.76	408.29	14.37
2030年	695	0	486.5	208.5	5769.768	8.16	83018.245	288.488	2884.884	2596.396	297.19	427.61	16.28

水工程建设指标										
规划水平年	有效灌溉面积/万hm ²	节水灌溉面积/万hm ²	地面水开发增量/万m ³	需增加调水量/万m ³	工业用水重复利用率/%	污水处理率/%	污水回用增量/万m ³	水土流失治理率/%	固定资产投资/亿元	水利投资/亿元
2010年	31.16	16.16	1276.23	0	65	50	367.89	70	316.567	15.326
2020年	33.93	21.37	1132.56	0	72	60	236.12	90	676.365	41.267
2030年	35.82	25.27	0	6196	83	70	256.37	100	1156.813	92.658

规划水平年	需水指标				供水指标			
	农业需水量/亿m ³	工业需水量/亿m ³	城乡生活需水量/亿m ³	其他需水量/亿m ³	需水总量/亿m ³	地表水量/亿m ³	地下水水量/亿m ³	总量/亿m ³
2010年	10.67	6.32	2.76	1.54	21.29	8.363	11.881	20.244
2020年	9.78	7.13	3.27	1.81	21.99	8.976	11.881	20.857
2030年	9.25	7.96	3.67	1.93	22.81	8.976	11.881	20.857

不确定性,致使规划的结果亦含有某种不确定性。这种不确定性在水资源承载能力多目标分析中尤为突出。由于不确定性的存在,分析计算的规划结果不一定能够满足决策者的选择。在这种情况下,可以采用分析计算求解和决策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,通过一个递归过程,即分析阶段和决策阶段反复进行的过程求得一个满意解。具体采用逐步宽容约束法(对话式方法)来求解。该法是一种迭代法。在求解过程中,每进行一步,决策者都要对分析计算结果做出评价,若认为满意了,则迭代停止;否则再根据评价意见进行修改调整有关目标和参数,再进行计算,如此反复直到求得决策者认为满意的各目标相互协调的解为止。

模型系统的主要参数,主要参考国内主要研究成果,大汶河流域历年的统计资料以及国家、省、市的发展规划要求等,利用数理统计分析等数学方法,结合流域实际,综合分析予以初拟。规划水平年选2000年(现状年)、2010年、2020年、2030年;流域水资源可利用量按多年平均考虑,调水、节水、污水处理等的单方水投资分摊额,根据现有工程资料分析确定;水环境约束,根据南水北调工程对水质的要求,大汶河水水质不低于国家地表水Ⅲ类水质标准^[45]。

5 计算的主要成果及综合分析

利用建立的多目标分析模型,通过反复的计算分析抉择和指标参数的调整,最后得出了比较满意的、与期望目标接近的协调结果。大汶河流域水资源承

载能力分析计算的最终主要决策结果列于表1。

从表1中可以看出,农业需水有所下降,而工业需水、城乡生活需水和其他需水(包括服务业、城市公共用水、生态环境等需水)在增加,从本流域的地表水和地下水的供水能力来看不能满足需求。计算结果显示,为了实现流域社会、经济、生态环境的协调发展和可持续发展,除了搞好人口控制、经济结构调整等措施之外,在东平、肥城部分区域保持现有引黄供水的条件下,加强流域水工程建设和采取节水措施是十分重要的前提条件,具体要求见表1中的水工程建设指标。

总之,大汶河流域的水资源并不丰富,而是十分贫乏的,属比较严重的缺水地区。水资源短缺始终是制约大汶河流域社会经济可持续发展的长期问题,必须从战略高度来认识大汶河流域水资源问题的严重性,应加大措施扭转大汶河流域水资源所面临的严重危机状态。

参考文献:

- [1] 阮本青,沈晋.区域水资源适度承载能力计算模型研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,(3):57-61.
- [2] 陈冰,李丽娟,郭怀成,等.柴达木盆地水资源承载能力方案系统分析[J].环境科学,2002,21(3):16-21.
- [3] 姚治君,王建华,江东,等.区域水资源承载能力的研究进展及其理论探析[J].水科学进展,2002,13(1):111-115.
- [4] 庞清江.大汶河水污染控制系统规划研究[J].水资源保护,1996(3):43-47.
- [5] 庞清江,李白英.大汶河水环境承载能力的分析与计算[J].海河水利,2003(2):39-42.

(收稿日期:2006-05-31 编辑:徐娟)