

# 区域水资源承载能力多目标分析评价模型及应用

方国华<sup>1,2</sup>, 胡玉贵<sup>3</sup>, 徐 瑶<sup>3</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 广西电力工业勘察设计研究院, 广西 南宁 530023)

**摘要** 明确水资源承载能力具有时空、可持续、社会经济和生态 4 个方面的内涵, 指出水资源承载能力具有自然和社会双重属性, 涉及水资源系统、社会经济系统和生态环境系统之间的复杂相互作用关系, 建立了考虑社会经济发展、生态环境保护和水资源合理利用的水资源承载能力的多目标分析评价模型, 利用所建立的模型, 分析评价了江苏省张家港市的水资源承载能力, 包括现状水资源承载能力评价和未来 2010 年水资源承载能力预测, 给出了合理的评价结果。

**关键词** 水资源; 承载能力; 社会经济; 生态环境; 多目标评价模型

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2006)06-0009-05

## Research on the multi-objective evaluation model of regional water resources carrying capacity and its application

FANG Guo-hua<sup>1,2</sup>, HU Yu-gui<sup>2</sup>, XU Yao<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Guangxi Electric Power Industry Investigation, Design and Research Institute, Nanning 530023, China)

**Abstract** Based on the spatial-temporal, sustainable, social and economic, and ecological characters of water resources carrying capacity, it is pointed out that water resources carrying capacity has both natural and social attributes, involving the interactive contacts with water resources system, social economic system, and ecological environment system. Taking the social and economic development, the protection of ecological environment, and rational utilization of water resources into consideration, a multi-objective analysis and evaluation model is established and applied to the analysis and evaluation of water resources carrying capacity of Zhangjiagang City, including the present capacity evaluation and that of 2010. Rational evaluation results are provided.

**Key words** water resources; carrying capacity; society and economy; ecological environment; multi-objective evaluation model

水资源是基础性自然资源, 是生态环境的控制因素之一; 同时又是战略性经济资源, 是一个国家综合国力的有机组成部分。随着社会经济的快速发展, 水资源短缺和水环境恶化问题日益显现出来, 水资源已成为制约我国社会经济和生态环境可持续发展的关键因素之一。建立水资源承载能力分析评价模型、开展水资源承载能力研究具有重要的理论意

义和实用价值。

水资源承载能力是指: 在一定区域内, 在某一具体发展阶段下, 以可预见的技术和社会经济发展水平为依据, 以可持续发展为原则, 经过合理优化配置, 水资源支持社会经济和生态环境发展的能力。

水资源承载能力具有自然和社会双重属性, 其大小受生产力水平、社会经济结构、生态环境状态以

基金项目: 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金资助项目(2005408111)

作者简介: 方国华(1964—), 女, 安徽定远人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源规划及技术经济方面的教学和科研工作。E-mail: ghfang@jlonline.com

及科技水平等众多因素的影响,涉及到水资源系统、社会经济系统和生态环境系统之间的复杂相互作用关系。为此,本文在探讨水资源承载能力概念与内涵的基础上,研究建立了考虑社会经济发展、生态环境保护和水资源合理利用的水资源承载能力多目标分析评价模型。

## 1 水资源承载能力的内涵

水资源承载能力具有以下4个方面的内涵。

a. 时空。空间内涵表现在相同数量的水资源在不同区域上的承载能力是不相同的。时间内涵包括两重意义:①某一具体时段上的承载能力;②“不同的时间尺度”上的承载能力,主要体现在未来不同时段,相同数量的水资源的承载能力是不相同的<sup>[1]</sup>。

b. 可持续。可持续内涵主要体现在两个方面。①水资源承载能力以可持续发展为研究原则,包含了水资源应能满足社会经济和生态环境的可持续发展;②水资源承载能力的增强是可持续的,即随着社会的持续发展,水资源承载能力的增强总是持续的。

c. 社会经济。水资源承载能力的社会经济内涵主要表现在两个方面。①水资源承载能力是“经过合理的水资源优化配置”而得到的,而水资源优化配置是一种社会经济活动行为;②水资源承载能力的最终表现之一为区域社会经济发展规模,体现了水资源承载能力的社会经济内涵<sup>[2]</sup>。

d. 生态。水资源承载能力的生态内涵主要表现在水资源所承载的综合效用具有生态上的极限,水资源的开发利用应以不超过这种极限为前提<sup>[3]</sup>。

## 2 水资源承载能力分析评价模型

### 2.1 模型的结构

水资源承载能力具有自然和社会双重属性,涉及水资源系统、社会经济系统和生态环境系统之间的复杂相互作用关系。对于这样一个复杂的大系统,试图用一个数学模型或用一个目标来描述,并用某一个最优化技术求解,是非常困难的<sup>[4]</sup>,也难以反映水资源的承载能力。为此,本文将整个系统分解为水资源、社会经济和生态环境3个子系统,在每个子系统中分别建立一个分析模型。各子系统模型既可单独运行,又可配合运行,子系统模型之间通过多目标核心模型的协调关联变量相连接。

基于以上分析,可构建上下两层复合模型,底层为社会经济系统、生态环境系统和水资源系统的单一模型,采用单目标优化理论求解;顶层为社会经济系统、生态环境系统和水资源系统三者的多目标复合模型,采用多目标决策理论求解。单一模型为复

合模型提供决策目标,复合模型的分析成果反映区域水资源的承载能力,模型结构框如图1所示。

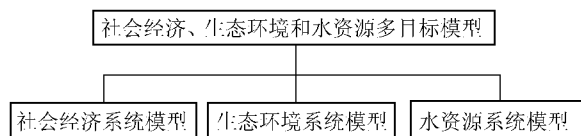


图1 水资源承载能力多目标分析评价模型结构

### 2.2 目标函数及约束条件

模型的分析求解离不开目标函数和约束条件的建立,而建立合理的目标函数和约束条件则能正确、全面地评价水资源承载能力。根据建立的模型结构,第一层每个子模型设定一个目标函数,第二层多目标模型中的目标函数直接取用第一层每个子模型的目标函数。

#### 2.2.1 社会经济系统模型

在社会经济系统模型中,选取人均国内生产总值(GDP)最大为研究目标,其目标函数

$$f_1(x) = \max \frac{\sum_{i=1}^n X_i^{\text{GDP}}}{P_{\text{人口}}} \quad (1)$$

$$x = (X_1, X_2, \dots, X_n)$$

式中: $f_1(x)$ 为社会经济系统模型目标函数; $X_i^{\text{GDP}}$ 为规划水平年第*i*部门GDP; $P_{\text{人口}}$ 为规划水平年的人口数量; $n$ 为规划水平年国民经济部门数量。

模型主要约束条件为社会总产出约束,即:模型必须在满足特定区域规划水平年社会总产出这一总目标的前提下进行优化,其约束方程为<sup>[5]</sup>

$$\sum_{i=1}^n X_i^{\text{GDP}} \geq C \quad (2)$$

#### 2.2.2 生态环境系统模型

由于目前对生态环境的评定还缺乏一个统一的标准,并且也没有综合的定量评价指标,本文拟对生态环境采用定性评价,共分三个层次:较好、一般和较差,本系统的目标就是要使生态环境尽量达到最佳。其目标函数

$$f_2(x) = \max V(x) \quad (3)$$

式中: $f_2(x)$ 为生态环境系统模型目标函数; $V(x)$ 为生态环境状态,可按灰度关联分析法确定。

由于生态环境影响因素众多,其约束条件可能也多种多样,从水资源对生态环境的影响来看,模型的约束条件主要考虑水环境约束<sup>[6]</sup>。在反映水环境的指标中,生化需氧量(BOD)不仅与生产有关,而且与生活有关,普遍适用于描述城市污水排放量与污水治理的关系以及河流的水质情况。据统计数据显示,在城市地区,BOD与化学耗氧量(COD)具有较好的相关关系,在农村地区,BOD与氨氮总量也具有较好的

相关关系<sup>[7]</sup>。因此,一般情况下,以 BOD 作为区域水环境约束的控制指标是合理的。其约束条件为

$$X_{\text{BOD}} \leq \beta_{\text{BOD}} W \quad (4)$$

式中: $X_{\text{BOD}}$ 为 BOD 负荷总量; $\beta_{\text{BOD}}$ 为单位水体 BOD 允许排放量; $W$ 为容纳 BOD 的水资源总量。

### 2.2.3 水资源系统模型

在水资源系统模型中,选取单方水资源综合效益最大为研究目标,综合效益包括社会效益和生态环境效益。其目标函数

$$f_3(x) = \max \left( \frac{\sum_{i=1}^n X_i^{\text{GDP}}}{\sum_{i=1}^n W_i} + \frac{X_{\text{生态环境}}}{W_{\text{生态环境}}} \right) \quad (5)$$

式中: $f_3(x)$ 为水资源系统模型目标函数; $W_i$ 为规划水平年区域第*i*部门取水量; $X_{\text{生态环境}}$ 为规划水平年区域生态环境效益; $W_{\text{生态环境}}$ 为规划水平年区域生态环境用水量。

本模型的约束条件主要为水资源总量约束<sup>[6,8]</sup>,由于在一定的社会发展阶段和社会科学技术发展水平条件下,区域的水资源总量是一定的,因此,应在水资源总量约束的前提下,合理安排社会经济用水和生态环境用水。该约束也是一个关键约束,其表达式为

$$W_{\text{社会经济}} + W_{\text{生态环境}} + W_{\text{生活}} \leq W_{\text{总}} \quad (6)$$

式中: $W_{\text{社会经济}}$ 为区域社会经济用水,主要为社会经济工农业生产各行业用水; $W_{\text{生态环境}}$ 为区域生态环境用水; $W_{\text{生活}}$ 为城镇、农村居民生活用水以及公共设施用水; $W_{\text{总}}$ 为规划水平年区域水资源总量。

### 2.2.4 多目标复合模型

根据水资源承载能力拟定的模型结构以及各单一模型的目标函数,可确定多目标模型的向量目标函数

$$f(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x)) \quad (7)$$

模型的约束条件为所有单一模型的约束条件,即式(2)(4)(6)。

## 3 实例研究

水资源承载能力研究属于分析评价和预测一体化性质的研究,要求模型既要能对现状进行分析评价,又要能对未来进行预测研究。以江苏省张家港市为例,分析水资源的承载能力。根据张家港市现有的资料情况,选取 2002 年作为水资源承载能力分析的现状年,2010 年作为未来预测分析年。

### 3.1 现状分析评价

水资源承载能力的现状分析评价主要立足于现有的统计资料,通过分析确定水资源是否还存在承载社会经济和生态环境的发展空间,为下一阶段制定经济和环境发展方案提供决策依据。

#### 3.1.1 区域缺水类型分析

由于缺水类型的不同决定了区域提高水资源承载能力的主要措施也不一样,如:对于水质型缺水,应加强水体污染的控制和治理;对于资源型缺水,应加强产业结构的调整;对于工程型缺水,应加强取(供)水工程建设;对于综合型缺水,则应采取多种提高水资源承载能力的措施。因此,评价区域现状以及未来水资源的承载能力应首先确定本区域的缺水类型。区域的缺水类型可根据区域的水资源总量、水质、取(供)水工程规模以及水资源的供需平衡分析等因素确定。通过对张家港市 2002 年的供水现状、用水现状以及供需平衡分析<sup>①</sup>可以得出:在充分利用长江过境水资源量的情况下,张家港市 2002 年缺水类型为水质型和工程型两者的综合。

#### 3.1.2 现状水资源承载指标计算

2002 年,全市实现国内生产总值 365.02 亿元,其中第一产业 10.56 亿元,第二产业 219.44 亿元,第三产业 135.02 亿元,总人口 107.95 万。将数据代入公式(1),可计算得人均 GDP 为 3.38 万元,其中,第一产业人均 GDP 为 0.1 万元,第二产业人均 GDP 为 2.03 万元,第三产业人均 GDP 为 1.25 万元。

张家港市生态环境状态评价指标有植被覆盖率、城市水面率以及反映地表水和地下水水环境状况的各种污染物指标。生态环境状态的评定按灰度关联法分析计算,计算结果是 2002 年张家港市生态环境状态属于较差层次。

水资源综合效益包括社会效益和生态环境效益。由于张家港市缺乏相关资料,并且当前对水资源生态环境效益的分析计算还没有成熟的理论和方法,因此,在本实例研究中,水资源的综合效益只计算水资源的社会经济效益。2002 年张家港市各项生产用水量之和为 54487.09 万 m<sup>3</sup>,创造国内生产总值 365.02 亿元,将数据代入公式(5)可计算出水资源社会效益为 66.99 元/m<sup>3</sup>。

#### 3.1.3 现状水资源承载能力分析

现状水资源承载能力分析主要在现有技术水平和工程供水能力的条件下,分析各用水行业现状用水水平以及节水潜力,并计算节水量,各行业的节水总量即为现状水资源尚可承载社会经济和生态环境发展的能力。根据张家港市各行业用水水平,节水

① 崔广柏,唐德善,等.张家港市水资源综合规划开发研究报告.南京:河海大学,2003.

主要考虑农业节水、工业节水和生活节水。

通过对张家港市 2002 年各行业节水潜力分析,张家港市可节约水资源量为 3 669.31 万 m<sup>3</sup>。在各行业用水总量中扣除节约的水量,则通过水资源系统模型,可计算出水资源综合效益为 71.83 元/m<sup>3</sup>。3 669.31 万 m<sup>3</sup> 节水量若用于社会经济发展则可增加 GDP 26.36 亿元,但会进一步恶化地表水环境,因为在现状技术水平条件下,GDP 增加,污染负荷也必然增加,若用于生态环境,则可改善水体环境,但现状水体环境较差,与 4.8 亿 m<sup>3</sup>(按照约束条件(4)计算得出)的环境用水量相差较远。因此,2002 年张家港市社会经济发展在一定程度上超出了水资源的承载能力。

### 3.2 未来预测分析

未来预测分析取决于对多目标复合模型求解。在满足模型的约束条件下,多目标模型可能有多种可行解,每种可行解实际上对应着社会经济、生态环境和水资源复合系统的一种发展方案,不同的发展方案所对应的水资源承载能力也不相同,因此,必须确定复合系统各种可行的发展方案,并对方案进行决策分析。最终选定方案所对应的承载能力指标就是未来区域水资源的承载能力指标。

#### 3.2.1 方案的确定及水资源承载能力计算

a. 社会经济发展方案。根据张家港市“十五”规划,在满足模型约束条件(式(2))下,可拟定 3 种社会经济发展方案。具体为:高方案,经济运行环境良好,实行国民经济高速发展战略,GDP 年平均增长速度为 13.0%;中方案,考虑具体的挑战,实现经济高速发展存在一定的困难,采用适度的高速发展战略,GDP 年平均增长速度为 11.0%;低方案,充分考虑制约因素,实施保守战略,实行低速发展,GDP 年平均增长速度为 9.0%。

2002 年张家港市社会经济 GDP 为 365.02 亿元,按照每个方案的年平均增长速度可计算出 2010 年三个方案的 GDP 分别为:高方案,858.75 亿元;中方案,757.84 亿元;低方案,667.27 亿元。

b. 生态环境发展方案。根据张家港市的 社会发展形势,当前仍要以发展经济为主,生态环境维持最低的标准,即只要社会经济的发展不破坏生态环境系统的平衡。其发展策略是改善区域水环境质量,水体环境在规划水平年达到国家Ⅲ类标准,实现水资源的可持续利用和生态环境的良性循环。

c. 水资源系统发展方案。在进行水资源合理配置时,一般要进行多次平衡分析。根据水资源的供需平衡分析,水资源系统发展拟定两种方案。方

案一:零方案(“一次平衡”方案)即保持现有引水工程规模,结合产业结构调整、节水和治污、挖潜等措施,进行水资源一次供需平衡分析;方案二:“二次平衡”方案,在新建引水工程、水系分期整治后,结合产业结构调整、节水和治污、挖潜等措施,进行水资源二次供需平衡分析。供需平衡分析后,如果无法满足模型约束条件(6),则用缺水率反映缺水程度。缺水率小于 10% 为轻微缺水,缺水率 10%~30% 为缺水,缺水率大于 30% 为严重缺水。

需水量可根据社会经济发展方案以及约束条件(4)分析确定。经计算,相应于社会经济高、中、低三种发展方案的需水量分别为:14.01 亿 m<sup>3</sup>, 13.40 亿 m<sup>3</sup>, 12.83 亿 m<sup>3</sup>。

通过对方案一的供需平衡分析,在保持现有引水工程规模的条件下,2010 年为平水年(50%)时,总供水量为 9.63 亿 m<sup>3</sup>。总供水量低于高、中、低 3 种经济发展方案的总需水量,缺水量分别为 4.38 亿 m<sup>3</sup>, 3.77 亿 m<sup>3</sup>, 3.2 亿 m<sup>3</sup>, 缺水率分别为 31.26%、28.13%、24.94%。从缺水率可以看出,当经济发展采用高方案时,出现严重缺水,采用中方案时,也接近严重缺水,因此,2010 年以后缺水现象必将更加严重,必须增加引水能力和进行水系调整改造。

通过对方案二的供需平衡分析,实施工程措施后,2010 年供水量总计 11.09 亿 m<sup>3</sup>。在高、中、低三种经济发展方案下,缺水量分别为 2.92 亿 m<sup>3</sup>, 2.31 亿 m<sup>3</sup>, 1.74 亿 m<sup>3</sup>, 缺水率分别为 20.8%、17.24%、13.56%。虽然在三种经济发展方案下均存在缺水,但随着工程措施的逐步完善,工程供水能力逐渐加强,会逐步解决缺水问题。2010 年的缺水问题可通过优化调度,提高引水的循环次数以及节水减污等措施加以解决。

d. 方案组合及承载能力计算。根据以上对社会经济系统、生态环境系统和水资源系统的发展方案分析,可组合成 4 种复合系统的发展方案,见表 1。

表 1 复合系统发展方案

方案	A	B	C	D
社会经济	低方案	高方案	中方案	低方案
水环境	Ⅲ类水质	Ⅲ类水质	Ⅲ类水质	Ⅲ类水质
水资源	零方案	二次平衡方案	二次平衡方案	二次平衡方案

各方案水资源承载能力指标直接由复合模型中的各单一模型分别计算(人口指标通过灰色模型预测,结果为 121.7 万人)。水资源承载能力指标计算成果见表 2。

#### 3.2.2 方案的决策分析

方案的决策采用模糊优选模型进行分析。该方

表 2 水资源承载力指标计算成果

方案	GDP/ (万元·人 <sup>-1</sup> )	生态环境 状态	水资源效益/ (万元·m <sup>-3</sup> )
A	5.48	一般	111.64
B	7.06	一般	127.20
C	6.23	一般	119.44
D	5.48	一般	111.64

法首先分析各个方案属性的权重,然后计算方案的相对优属度,并比较大小,优属度最大的方案即为最优方案。通过分析计算,方案 B 为最优方案,因此,方案 B 所对应的承载力指标即为张家港市 2010 年水资源的承载力。

参考文献:

[1] 王建华, 江东, 顾定法, 等. 水资源承载力的概念与理论 [J]. 甘肃科学学报, 1999, 11(2): 1-3.

[2] 姚冶君, 王建华, 江东, 等. 区域水资源承载力的研究进展及其理论探析 [J]. 水科学进展 2002, 13(1): 111-115.  
 [3] 龙腾锐, 姜文超, 何强. 水资源承载力内涵的新认识 [J]. 水利学报 2004(1) 38-45.  
 [4] 贾嵘, 薛惠峰, 解建仓, 等. 区域水资源承载力研究 [J]. 西安理工大学学报, 1998, 14(4) 382-387.  
 [5] 徐丽娜, 方国华. 江苏省水资源宏观经济模型研究 [J]. 江苏水利 2000(3) 35-38.  
 [6] 贾嵘, 蒋晓辉, 薛惠峰, 等. 缺水地区水资源承载力模型研究 [J]. 兰州大学学报: 自然科学版 2000 36(2): 114-121.  
 [7] 陈家琦, 王浩, 杨小柳. 水资源学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
 [8] 徐中民, 程国栋. 运用多目标决策分析技术研究黑河流域中游水资源承载力 [J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2000 36(2): 122-132.

(收稿日期 2005-11-09 编辑 舒建)

(上接第 8 页)

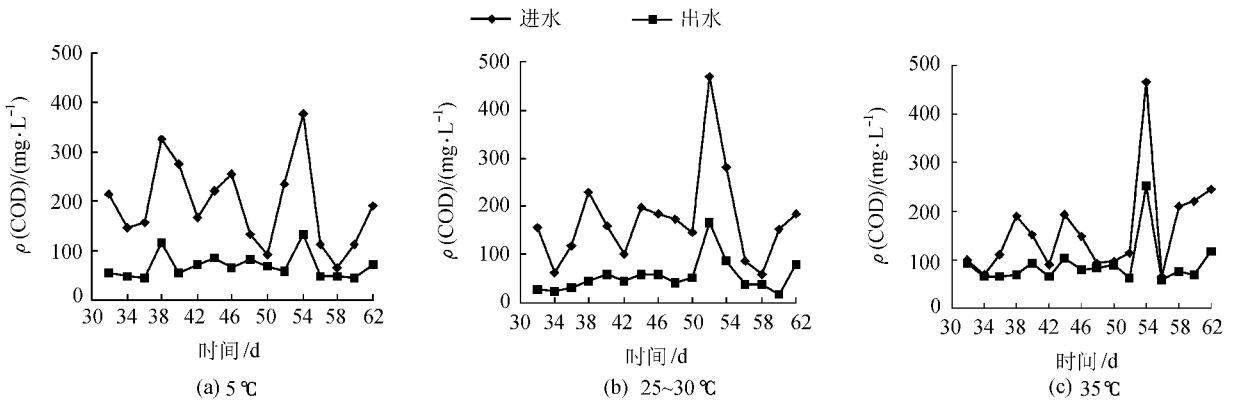


图 4 不同温度下进出水 COD 浓度的变化

由于 ORP 反映了系统的氧化还原环境,而氧化还原环境的变化又直接影响废水有机物的降解速度和程度,因此,ORP 值的变化也很大程度上决定了废水的处理效果。

3 结论

室温 5°C, 25~30°C 和 35°C 环境下, 毛细逆滤渗系统 (RCFS) 处理生活污水的实验表明: ORP 值变化与污染源距离远近、温度、进水浓度以及污水过滤速度都有很大关系。进水期, ORP 值下降, 处于厌氧环境; 落干期, ORP 值回升, 处于好氧环境; 距污染源越近, ORP 变化越明显; 温度、进水浓度及过滤速度越高, ORP 值越低。同时, ORP 值变化对系统的处理效果又有显著影响, 表现为 ORP 值稳定, 出水效果就稳定; ORP 值高, 处理效果就好。

参考文献:

[1] 于颖多, 雷廷武, 林聪, 等. 毛细逆滤渗污水净化反应器

原理研究及室内试验验证 [J]. 农业工程学报, 2004, 2(2): 45-48.  
 [2] 李亚新, 张宏伟, 连瑛秀, 等. 生物膜法 A/O/O 工艺城市污水脱氮处理的挂膜启动 [J]. 城市环境与城市生态, 2004, 17(1): 12-15.  
 [3] CHEN H C, TZENG J H, TIEN Y, et al. Rapid determination of chemical oxygen demand (COD) using focused microwave digestion followed by a titrimetric method [J]. Analytic Sciences 2001, 17: 551-553.  
 [4] 赵夕旦, 张和森, 宋宇然. 氧化还原电位的测定及在水族中的应用 [J]. 北京水产, 2000(6) 44-45.  
 [5] METCALF E. Wastewater engineering: treatment disposal and reuse [M]. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2003.  
 [6] LEW B, BELAVSKI M, ADMON S, et al. Temperature effect on UASB reactor operation for domestic wastewater treatment in temperate climate regions [J]. Water Sci Technol 2003 48(3): 25-30.  
 [7] GAO D, WANG S, PENG Y, et al. Temperature effects on DO and ORP in the wastewater treatment [J]. Environmental Science 2003 24(1) 63-69.

(收稿日期 2005-11-01 编辑 舒建)