

天津市水资源配置方案评价

杨丽美

(天津市水利勘测设计院,天津 300204)

摘要 基于水资源配置方案具有多目标性和模糊不相容性的特点,分别根据模糊集理论和人工神经网络原理建立水资源配置方案评价的模糊优选模型和 BP 神经网络模型。以天津市为例,结合实际情况从增加外调水量、节约用水、加大污水回用量、加大海水利用量 4 个方面设置水资源配置方案集,并从社会、经济、资源、效率 4 个方面建立评价指标体系,运用上述 2 种模型进行评价。结果表明 2 种模型结合用于水资源配置方案评价是有效、合理的,并具有可推广性,为水资源配置方案评价提供了一种新的决策方法。

关键词 水资源配置;方案评价;模糊优选;BP 神经网络

中图分类号:TV213.4 文献标识码:A 文章编号:1006-764X(2009)S1-0007-04

水资源是人类生存和社会发展不可或缺的资源,而地球上的可利用水资源量是有限的,因此在水资源利用中存在着一系列的问题和矛盾。从 20 世纪 60 年代国内外就开始了对水资源优化配置的研究,至今已有 40 多年,理论与方法已得到长足的发展,取得了很多有价值的成果^[1-2]。但是对于区域水资源配置系统,其各因素相互影响、相互制约机制极其复杂,配置成果的表现形式多种多样,在建立水资源优化配置模型时,无论从理论上还是技术上一般都难以完整体现,不能充分反映众多不确定因素的影响,也不便直接反映决策者的偏好。为提高水资源优化配置成果的实用价值,有必要探索水资源优化配置方案评价的理论、模型与方法,进而制定相应的与水资源相协调的区域发展战略,指导区域选择符合实际的水资源配置方案,并据此实施区域发展总体规划。

1 模糊优选模型

根据陈守煜的模糊集理论^[3],设系统有 n 个待选方案组成方案集,有 m 个指标组成对方案集进行评判的指标集,则指标特征值矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} = (x_{ij})_{m \times n} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为第 j 个方案对于第 i 个评判因素的特征值($i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$)。

为消除指标特征值量纲不同的影响,需要对矩阵 X 进行标准化处理。一般情况下,水资源优化配置方案评价指标有 3 种类型:效益型(越大越优型)、成本型(越小越优型)和中间型(越中越优型),其标准化方法可分别采用下面的相对隶属度函数式。

效益型指标

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{imax} + x_{imin}} \quad x_{ij} \geq 0 \quad (2)$$

成本型指标

$$r_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{x_{imax} + x_{imin}} \quad x_{ij} \geq 0 \quad (3)$$

中间型指标

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{x_{imid} + x_{imin}} & x_{imin} \leq x_{ij} \leq x_{imid} \\ \frac{x_{imax} + x_{imin} - x_{ij}}{x_{imax} + x_{imid}} & x_{imid} \leq x_{ij} \leq x_{imax} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x_{imax}, x_{imin}, x_{imid}$ 分别为第 i 个指标的最大值、最小值和中间值; r_{ij} 为标准化后的相对优属度值。

标准化后得到优属度矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = (r_{ij})_{n \times m} \quad (5)$$

即

$$r_j = (r_{1j} \ r_{2j} \ \dots \ r_{mj})^T \quad (j = 1 \ 2 \ \dots \ m) \quad (6)$$

若 $g = (g_1 \ g_2 \ \dots \ g_m)^T$,其中 $g_i = \bigvee_{j=1}^n r_{ij} = r_{i1} \vee r_{i2} \vee \dots \vee r_{im} (i = 1 \ 2 \ \dots \ m)$,则称 g 为相对最大优属度 ,也称最优方案。式中 r_{gi} 表示 n 个方案中对第 i 个指标相对优属度的最大值 ;符号 $\vee$ 表示“取大”运算。

若 $b = (b_1 \ b_2 \ \dots \ b_m)^T$,其中 $b_i = \bigwedge_{j=1}^n r_{ij} = r_{i1} \wedge r_{i2} \wedge \dots \wedge r_{im} (i = 1 \ 2 \ \dots \ m)$,则称 b 为相对最小优属度 ,也称最劣方案。式中 b_i 表示 n 个方案中对第 i 个指标相对优属度的最小值 ;符号 $\wedge$ 表示“取小”运算。

设 m 个指标的权向量为 $w = (w_1 \ w_2 \ \dots \ w_m)^T$,其中 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。求解第 j 个方案从属于优等方案的隶属度最优值 u_{1j} 的计算公式为

$$u_{1j} = \frac{1}{1 + \left\{ \frac{\sum_{k=1}^m [w_k (r_{kj} - g_k)]^p}{\sum_{k=1}^m [w_k (r_{kj} - b_k)]^p} \right\}^{2/p}} \quad (7)$$

式中 p 为距离参数 ,本文取 $p = 2$,即欧式距离。

求出 n 个待选方案从属于优等方案的隶属度的最优值 ,根据最大隶属度原则 ,依据 u_{1j} 由大到小得出相应的 n 个方案的优劣顺序。

2 BP 神经网络模型

人工神经网络是模拟人脑神经的复杂网络系统 ,它的结构和工作机理是以人脑的组织结构 (大脑神经网络)和活动规律为背景的 ,反映了人脑的某些基本特征 ,然而 ,它不是人脑的真实再现 ,而是对其进行了某种抽象、简化和模仿。由于人工神经网络具有强大的映射能力 ,可以实现任何复杂的因果关系分析 ,具有高度的不确定性和非线性特性 ,因而在很多领域得到了广泛的应用^[4-5]。

BP 神经网络的输入样本从输入层传入 ,经过各隐层逐层处理后传向输出层。若输入层的实际输出与期望输出 (教师信号)不符 ,则将输出误差以某种形式通过隐层向输入层逐层反传 ,并将误差分摊给各层的所有单元 ,从而获得各层单元的误差信号 ,此误差信号即作为修正各单元权值的依据。信号的正向传播和误差的反向传播周而复始地进行 ,使各层权值调整也反复进行。在这个过程中网络不断学习训练 ,一直到误差减小到可以接受的程度或者进行到预先设定的学习次数为止。3 层 BP 神经网络模型如图 1 所示。

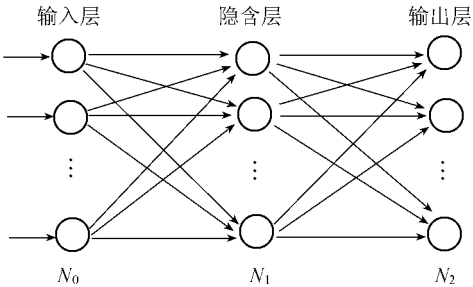


图 1 三层 BP 神经网络模型

3 实例分析

3.1 区域概况

天津市位于海河流域下游 ,地处华北平原东北部 ,北依燕山 ,东临渤海 ,是环渤海地区经济中心 ,全市辖 18 个区、县 ,20 个乡 ,120 个镇。境内河流众多 ,素有“九河下梢”之称 ,过境行洪河道 19 条 ,河道总长 1 095.1 km。气候属暖温带半湿润大陆性季风型气候 ,降水量年内分配不均 ,60% ~ 80% 集中在汛期 ,且年际变化大 ,多年平均降水量由南向北递增 ,在 560 ~ 720 mm 之间。天津市人均水资源量为 183 m³/a ,仅为全国人均水资源量的 1/15 ,是全国人均水资源量最少的城市 ,地表水开发利用率高 达 76% ,远远超过了 40% 的临界值 ,用水高度紧张 ,生态环境不断恶化 ,水资源已成为严重制约当地经济发展的重要因素。对水资源进行合理配置是解决该地区水资源供需矛盾的一项重要举措。

3.2 水资源配置方案

区域水资源配置措施主要包括需水和供水 2 个方面。在需水方面 ,主要配置措施为调整产业结构和生产力布局 ,发展节水型经济和建设节水型社会 ,约束需水量的增长。在供水方面 ,主要配置措施为通过水利工程措施改变水资源的天然时空分布以适应社会生产的需水要求。结合天津市实际情况 ,从增加外调水量、节约用水、加大污水回用量和加大海水利用量 4 个方面设置了水资源配置措施 ,组成 8 个代表性好、可行性强的方案^[6] ,如表 1 所示。

表 1 天津市 2010 年水资源配置方案集

方 案	1	2	3	4	5	6	7	8
引滦入津	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
南水北调中线	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
南水北调东线	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
基本节水	✓	✓	✓	✓				
强化节水					✓	✓	✓	✓
现状污水回用量	✓	✓			✓	✓		
加大污水回用量			✓	✓			✓	✓
现状海水利用量	✓				✓		✓	
加大海水利用量		✓		✓		✓		✓

表 2 天津市 2010 年水资源配置各方案评价指标标准化后的隶属度

评价指标		方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7	方案 8
社会	区域缺水率 R_1	0.1316	0.2319	0.3633	0.4636	0.3483	0.4788	0.6499	0.7806
	工业缺水率 R_2	0.0000	0.6113	0.4366	1.0000	0.2379	0.8906	0.7041	1.0000
	农业缺水率 R_3	0.2854	0.2854	0.4479	0.4479	0.5099	0.5099	0.7146	0.7146
经济	单方水工业产出 R_4	0.5266	0.4999	0.5061	0.4734	0.5480	0.5208	0.5317	0.5054
	工业增加值增长率 R_5	0.3983	0.5410	0.4996	0.6017	0.4514	0.5998	0.5649	0.6017
	水利工程投资 R_6	0.7442	0.5595	0.6296	0.4479	0.5491	0.3674	0.3924	0.2558
资源	污水回用量 R_7	0.3028	0.3028	0.6972	0.6972	0.3028	0.3028	0.6972	0.6972
	工业用水重复利用率 R_8	0.4848	0.4848	0.4848	0.4848	0.5152	0.5152	0.5152	0.5152
效率	农业用水有效利用率 R_9	0.4318	0.4318	0.4318	0.4318	0.5682	0.5682	0.5682	0.5682
	城市供水管网漏失率 R_{10}	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000

3.3 方案评价指标体系

从目前学术界对水资源配置方案评价指标体系的研究成果来看,评价指标体系很全面,照顾到了各个方面,但由于过于详细和复杂,使数据的获取成为一个难题^[7-8]。考虑到资料来源的现实可能性,分别从水资源的社会合理性、经济合理性、资源合理性和效率合理性 4 个方面建立评价指标体系,如表 2 所示。

根据水资源规划大纲要求,以 2000 年为基准年,2010 年作为规划年对天津市进行水资源合理配置研究。根据供需预测计算区域缺水率、工业缺水率、农业缺水率,根据《天津市城市安全供水对策研究》计算缺水经济损失,进而计算单方水工业产出和工业增加值增长率,根据《天津市中长期供水规划》确定水利工程投资,查阅相关资料确定污水回用量、工业用水重复利用率、农业灌溉水有效利用系数和城市供水管网漏失率。标准化后的指标隶属度见表 2。

3.4 基于模糊优选模型的评价

利用模糊优选模型,采用上述建立的水资源配置方案评价指标体系对天津市 2010 年水资源配置方案进行评价^[9-10]。

3.4.1 确定指标权重

采用层次分析法计算指标层权重和准则层权重。在各子系统中,确定各指标之间的相对重要性,两两比较,建立判断矩阵,从而计算出指标层权重;在整体系统中,确定各子系统之间的相对重要性,两两比较,建立判断矩阵,从而计算出准则层权重。同时采用方根法计算判断矩阵的随机一致性比率 C ,当 $C < 1.0$ 时认为判断矩阵具有满意的一致性,即权重分配是合理的,否则就需要调整判断矩阵,直到其具有满意的一致性为止。结果如下:

$$u(R_1, R_2, R_3) = (0.297 \quad 0.540 \quad 0.163)$$
$$C = 0.008 < 1.0$$
$$u(R_4, R_5, R_6) = (0.400 \quad 0.400 \quad 0.200)$$
$$C = 0 < 1.0$$
$$u(R_8, R_9, R_{10}) = (0.540 \quad 0.163 \quad 0.297)$$

$$C = 0.008 < 1.0$$
$$u(w_1, w_2, w_3, w_4) = (0.167 \quad 0.333 \quad 0.167 \quad 0.333)$$
$$C = 0 < 1.0$$

可以看出,各子系统和整体系统的判断矩阵均具有满意的一致性,说明指标层权重和准则层权重的分配是合理的。

3.4.2 计算指标体系优属度矩阵

利用式(7)计算各子系统中 8 个方案分别从属于该子系统的优等方案隶属度的最优值,用 u_{ij} 表示 i 表示第 i 个子系统, j 表示第 j 个方案,结果如下:

a. 社会子系统:

$${}_1u_{1j} = (0.0000 \quad 0.5933 \quad 0.3572 \quad 0.9647$$
$$0.1029 \quad 0.9517 \quad 0.8650 \quad 0.9933)$$

b. 经济子系统:

$${}_2u_{1j} = (0.5998 \quad 0.7533 \quad 0.7510 \quad 0.6455$$
$$0.4870 \quad 0.5608 \quad 0.5270 \quad 0.4091)$$

c. 资源子系统:

$${}_3u_{1j} = (0.0000 \quad 0.0000 \quad 1.0000 \quad 1.0000$$
$$0.0000 \quad 0.0000 \quad 1.0000 \quad 1.0000)$$

d. 效率子系统:

$${}_4u_{1j} = (0.0000 \quad 0.0000 \quad 0.0000 \quad 0.0000$$
$$1.0000 \quad 1.0000 \quad 1.0000 \quad 1.0000)$$

3.4.3 对系统进行综合评价

构造整体系统的优属度矩阵 U ,矩阵的列表示 1~8 个方案,矩阵的行表示子系统 w_1, w_2, w_3, w_4 。

$$U = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.5933 & 0.3572 & 0.9647 & 0.1029 & 0.9517 & 0.8650 & 0.9933 \\ 0.5998 & 0.7533 & 0.7510 & 0.6455 & 0.4870 & 0.5608 & 0.5270 & 0.4091 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 & 1.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

最大相对优属度

$$G = (G_{1j} \quad G_{2j} \quad \dots \quad G_{mj})^T = (0.9933 \quad 0.7533$$
$$1.0000 \quad 1.0000)^T$$

最小相对优属度

$$B = (B_{1j} \quad B_{2j} \quad \dots \quad B_{mj})^T = (0.0000 \quad 0.4091$$
$$0.0000 \quad 0.0000)^T$$

利用式(7)计算得到整体系统中8个方案分别从属于整体系统的优等方案的隶属度的最优值,用 u_{2j} 表示 j 表示第 j 个方案,结果如下:

$$u_{2j} = \begin{bmatrix} 0.0180 & 0.1223 & 0.2526 & 0.3456 \\ 0.6655 & 0.8172 & 0.9717 & 0.9445 \end{bmatrix}$$

3.5 基于BP神经网络模型的评价

利用BP神经网络模型,采用上述建立的水资源配置方案评价指标体系对天津市2010年水资源配置方案进行评价。

将各指标的最优值组成理想方案,最差值组成最劣方案。考虑到指标优选是相对优选的特点,理想方案对总体目标的实现程度最高,其效用设为0.9,最劣方案对总体目标的实现程度最低,其效用设为0.1;介于理想方案与最劣方案之间为中间方案,其效用设为0.5。这样在指标体系与方案效用中建立了一种效用函数的关系,同时也构成了BP网络的训练样本,经过神经网络的反复迭代训练,至误差收敛稳定后,在指标体系与效用值之间建立了一个隐式的效用函数,将各方案评价指标的隶属度矩阵作为训练后的网络输入,网络的输出即为水资源配置方案的综合评价结果,以其效用值的大小作为依据,效用值大的方案其效果较好,效用值小的方案其效果较差,从而达到优选方案的目的。

BP神经网络模型的模拟结果如表3所示,可以看出,其网络输出与目标输出相对误差不超过0.40%,模拟情况较好,相应的评价精度也会较高,可以用来对2010年水资源配置方案进行评价,方案评价结果列于表4中。

表3 BP神经网络模型的模拟结果

方 案	评价结果		相对误差/%
	实际值	计算值	
理想方案	0.9000	0.8991	0.10
中间方案	0.5000	0.5004	0.08
最劣方案	0.1000	0.1004	0.40

表4 天津市2010年水资源配置方案评价结果及排序

方案	模糊优选结果	模糊优选排序	BP神经网络结果	BP神经网络排序
1	0.0180	⑧	0.1998	⑧
2	0.1223	⑦	0.2345	⑦
3	0.2526	⑥	0.3105	⑥
4	0.3456	⑤	0.3282	⑤
5	0.6655	④	0.6828	④
6	0.8172	③	0.7385	③
7	0.9717	①	0.8078	②
8	0.9445	②	0.8179	①

3.6 结果分析

为便于比较评价结果,现将模糊优选模型和BP

神经网络模型的评价结果及优劣排序列于表4中。

可以看出,2种方法的最优和次优方案均集中在方案7和方案8上,且2个方案的评价结果非常接近,只有现状海水利用量和加大海水利用量的不同。一方面加大海水利用量增加了水利工程投资,但工业不缺水,还可以富余一部分作为城市河湖生态用水,同时本文中的评价没有考虑生态环境子系统,而在实际中生态环境对整体系统的影响是不可忽略的。另一方面模糊优选模型中权重的确定受主观因素的影响,在各子系统和整体系统判断矩阵均具有满意的一致性下有多种分配方法,本文选取的权重与真实的权重之间也不可避免地存在一定差异。综合考虑以上2方面因素,将方案8,即“引滦入津工程+南水北调中线工程+南水北调东线工程+强化节水+加大污水回用量+加大海水利用量”作为天津市2010年水资源配置方案的推荐方案。

结合天津市的实际情况进行分析,一方面这些评价结果能够反映出各方案在配置效果上的差异,说明模型是有效的;另一方面这些评价结果与天津市水资源状况和社会经济发展状况相符,说明模型是合理的。可以得出结论:该模型可以用来对天津市2010年水资源配置方案进行评价,评价结果有效、合理。

4 结 语

a. 结合水资源配置系统整体结构复杂、层次众多,在寻优决策过程中具有多指标性、模糊性等特点,笔者采用基于模糊集理论的模糊优选模型和具有模拟复杂因果关系性能的BP神经网络模型来实现对天津市2010年水资源配置方案的评价。

b. 利用2种模型分别对天津市2010年水资源配置方案进行了综合评价,通过计算并结合天津市的具体状况和发展趋势对评价结果进行分析比较得出推荐方案为“引滦入津工程+南水北调中线工程+南水北调东线工程+强化节水+加大污水回用量+加大海水利用量”。评价模型既有科学的理论支持又与实际情况相符,能够为天津市未来水资源配置提供依据,并具有可推广性。

参考文献:

[1] KNMAR, ARUN M, VIJAY K. Fuzzy optimization model for water quality management of a river system[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1999, 125(3): 179-180.

(下转第36页)

在颗粒上的力较小,颗粒大多数情况处于静止状态。有少数颗粒偶尔会发生运动,但运动速度很低,因此只能在床面上滚动,不可能离开床面。

图 6(b)为颗粒在床面上滚动时的运动轨迹。当颗粒在床面跳跃时,能离开床面一定高度,其跳跃高度具有一定的随机性,最大跳跃高度约为 $0.3d \sim 0.5d$ 。颗粒在床面上跳跃的情况主要发生在床面附近平均流速较高但湍流均方根速度较小时。这时,流体作用在颗粒上的水平力较大,颗粒能以较高的速度运动。当颗粒与床面碰撞时,则有可能跳离床面。由于颗粒的密度比水大,颗粒在跳离床面一定高度后,最终又落到床面上。

图 6(c)为颗粒离开床面悬浮在水中时的运动轨迹。在这种情况下颗粒被扬起,扬起的高度比颗粒粒径大得多,颗粒最终离开床面并被水流带走。颗粒被扬起的情况主要发生在床面平均流速大、湍流均方根速度较高的情况。颗粒在高速流的作用下会在床面跳跃。而在湍流均方根速度较高的区域,往往存在较强的漩涡,当颗粒跳离床面时就有可能被强漩涡带到离床面更高的地方,然后被水流带走。

3 结 论

- a. 在雷诺数较大的情况下,后台阶下游瞬态流场具有三维性。
- b. 后台阶流中,湍流均方根速度的最高值出现在再附点附近。
- c. 在台阶下游的流场中颗粒运动具有随机性,其运动轨迹可出现滚动、跳跃和悬浮 3 种情况。颗粒在湍流均方根速度较低时,床面颗粒的运动以滚动和跳跃为主。在湍流均方根速度较高时,床面颗粒能被水流扬起,并悬浮在水中。

参考文献:

[1] BEHESHTI A A ,ATAIE-ASHTIANI B. Analysis of threshold and incipient conditions for sediment movement[J]. Coastal Engineering ,2008 ,55 :423-430.

[2] 曹志先.基于湍流猝发的床面泥沙上扬通量[J].水利学报 ,1996(5) :18-21.

[3] KESHAVARZY A ,BALL J E. An application of image processing in the study of sediment motion[J]. Journal of Hydraulic Research ,1999 ,37(4) :559-576.

[4] SECHET P ,GUENNEC B L. The role of near wall turbulent structures on sediment transport[J]. Wat Res ,1999 ,33(17) :3646-3656.

[5] 李桢儒,陈媛儿,赵之.作用于床面球体的推力及上举力试验研究 C]//第二次河流泥沙国际学术讨论会组织委员会.第二次河流泥沙学术讨论会论文集.北京:水利电力出版社,1983 :330-343.

[6] 韩其为.泥沙起动规律及起动流速[M].北京:科学出版社,1999.

[7] CLIFT R ,GRACE J R ,WEBER M E. Bubbles ,drops and particles[M]. New York :Academic Press ,1978.

[8] MEI R. An approximate expression for the shear lift force on a spherical particle at finite Reynolds number[J]. Int J Multiphase flow ,1992 ,18(1) :145-147.

[9] LIU Chun-rong ,HUHE A ,TAO Long-bin. Experiment study on sediment incipience in backward-facing step flow[J]. Journal of Hydrodynamics ,Ser. B ,2007 ,19(2) :173-179.

[10] ARMALY B F ,DURST F ,PEREIRA J C F ,et al. Experimental and theoretical investigation of backward-facing step[J]. J Fluid Mech ,1983 ,127 :473-496.

[11] JOVIC S ,DRIVER D M. Backward-facing step measurement at low Reynolds number , $Re_h = 5000$ [R]. New York :NASA Tech Mem ,1994.

[12] LE H ,MOIN P ,KIM J. Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step[J]. J Fluid Mech ,1997 ,330 :349-374.

(收稿日期 2009-01-13 编辑:高建群)

(上接第 10 页)

[2] 裴源生,李云玲,于福亮.黄河置换水量的水权分配方法探讨[J]. 资源科学 ,2003 ,25(2) :32-37.

[3] 陈守煜.工程模糊集理论与应用[M].北京:国防工业出版社,1998.

[4] 苑希民,李鸿雁,刘树坤,等.神经网络和遗传算法在水科学领域的应用[M].北京:水利水电出版社,2002.

[5] 韩力群.人工神经网络理论、设计及应用[M].北京:化学工业出版社,2002.

[6] 杨丽美.天津市水资源配置方案评价研究[D].天津:天津大学,2007 :52-54.

[7] 曹利军,王华东.可持续发展评价指标体系建立原理与方法研究[J].环境科学学报,1998 ,18(5) :526-532.

[8] CHANG Ni-bin. Optional Management of Environmental and Land Resource in a Reservoir Watershed by Multiobjective Programming[J]. Journal of Environmental Management ,1995 ,44 :145-161.

[9] 李兰秀.天津市水资源安全研究[D].天津:天津大学,2006.

[10] 高学平,郭磊,李兰秀.蓄滞洪区蓄水优化研究[J].干旱区资源与环境,2006 ,20(5) :46-50.

(收稿日期 2009-04-27 编辑:高建群)