



Munich Personal RePEc Archive

Multicriteria Decision Analysis of Sewage Treatment Plans for Shenzhen Reservoir Basin

Junping Ji and Fangling Wei and Xiaoming Ma

Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University

9. February 2011

Online at <http://mpa.ub.uni-muenchen.de/59744/>

MPRA Paper No. 59744, posted 24. November 2014 03:29 UTC

深圳水库流域污水处理方案多准则决策研究¹

计军平^{1,2}, 韦芳玲², 马晓明^{1,2†}

(1. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055; 2. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

摘要: 利用 ELECTRE II 法对深圳水库流域 2020 年的九个污水处理方案进行了优选。从决策准则、候选方案、决策方法及方案排序四个方面做了分析。1) 建立了决策指标体系并确定了指标权重, 包括对深圳水库水质的影响、对沙湾河水质的影响、总投资、运行费用、实施难度及事故风险等六个指标; 2) 识别了九个候选方案并计算了各方案的指标值; 3) 根据研究问题的特点选择 ELECTRE II 作为决策方法; 4) 计算了各方案的排名并进行了敏感性分析, 提出方案五(全流域污水集中处理)为最优方案且排名稳定。

关键词: 多准则决策, ELECTRE II, 污水处理方案, 深圳水库流域

Multicriteria Decision Analysis of Sewage Treatment Plans for Shenzhen Reservoir Basin

Ji Junping^{1,2} WEI Fangling² MA Xiao-ming^{1,2}

(1. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China; 2. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The selection of a sewage treatment plan from nine plans for Shenzhen Reservoir Basin is addressed using ELECTRE II method. Four aspects are covered, including criteria, alternatives, aggregation method and ranking. 1) We defined and obtained weights for criteria that take into account water quality of Shenzhen Reservoir and Shawan River, total investment, operating cost, difficulty of implementation, and risk. 2) We identified nine alternatives and evaluated them. 3) The ELECTRE II method was adopted according to the characteristics of the problem. 4) Alternatives were ranked and the results revealed that Alternative Five which centralized sewage treatment is ranked first. The sensitivity analysis reinforced that conclusion.

Keywords: multicriteria decision making (MCDM), ELECTRE II, sewage treatment plans, Shenzhen Reservoir Basin

成稿日期: 2011-2-9

作者简介: 计军平, 博士, 主要研究方向为环境规划与管理。Email: jackyji@pku.edu.cn

†通讯作者: 马晓明, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为环境管理及环境信息与环境数学模型。Email: xmma@pku.edu.cn

1 引言

深圳水库是深圳和香港重要的饮用水水源地。由于位于水库上游的沙湾河及其支流水污染严重，为改善河流水质深圳市政府制定了多个水污染治理规划。科学评价深圳水库流域的污水处理方案对确保深港两地的饮用水水源安全具有现实意义。

多个环境保护方案的评价属于多准则决策问题，国内外学者在生态保护、废物管理、水污染治理及水资源管理等方面进行了相关研究，其中水资源管理方面的研究较多。生态保护方面，Huth 等^[1]运用多准则决策中的 PROMETHEE 法对马来西亚雨林砍伐方案进行了评估。废物管理方面，Carlos 等^[2]运用多准则决策支持系统 THOR 评价了巴西的垃圾回收系统。Morrissey 等^[3]探讨了废物管理中各种评价方法的缺点。水污染治理方面，王彬等^[4]应用 ELECTRE 法分析了浑河和太子河流域的水污染治理方案。邵海员等^[5]及颜昌宙等^[6]分别评价了污水处理厂建设方案及湖泊生态工程规划方案。水资源管理方面，国内外学者在流域综合管理^[7,8]、水资源配置^[9,10]、水资源利用^[11-14]及水资源承载力^[15-18]等方面进行了大量研究。总体上，环境领域中的多准则决策研究多集中于多目标决策问题（无限个方案的决策问题），而多属性决策问题（有限个方案的决策问题）相对较少。

本文利用多准则决策方法中的 ELECTRE II 法对深圳水库流域 2020 年的污水处理方案进行优选。决策分析流程见图 1。首先，建立多准则决策指标体系并确定各指标的相对重要性权重；其次，确定候选方案，根据决策准则评价各方案的影响；再次，选择适当的多准则决策方法并确定参数；最后，计算各方案的排名并进行敏感性分析，提出最优方案供决策者参考。

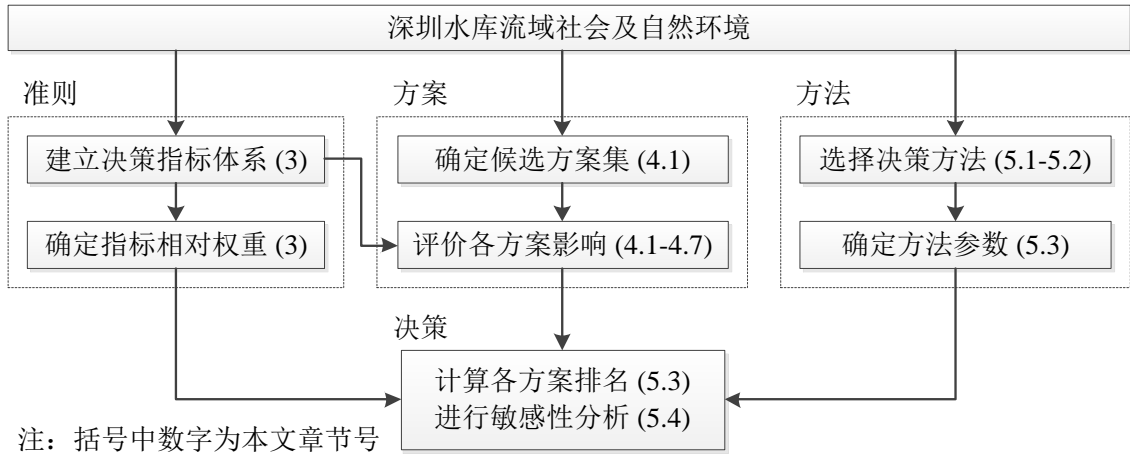


图 1 决策分析流程

Figure 1 The decision analysis process

2 研究区概况

深圳水库流域位于深圳市中部，横跨龙岗区和罗湖区，面积 62.8 km²。2007 年常住人口为 29.09 万人，污水排放总量约为 7.9 万 m³/d。主要河流为沙湾河及其三条支流，河流水质总体上劣于地表水 V 类标准。每年 6~8 月为丰水期，10 月至次年 3 月为枯水期，4 月、5 月及 9 月为平水期。

2003 年 12 月深圳水库污水截排工程启用，该工程最大能截排沙湾河 25 m³/s 的径流至流域外的污水处理厂处理，但每年丰水期仍有一部分暴雨径流排入深圳水库，对水库水质造成不利影响。尽管深圳市的水污染治理规划提出在深圳水库流域建立几个污水处理厂，但由于用地、管网建设及其它诸多原因，污水治理工程的建设进展缓慢，流域内的污水尚不能得到有效处理。

3 多准则决策指标体系

决策者（深圳市东深水源保护办公室，下同）在决策时考虑方案的以下方面：对深圳水库水质的影响、对沙湾河水质的影响、总投资、运行费用、实施难度及事故风险。参考类似研究^[19, 20]建立环境、经济、实施难度及风险四类指标。所有指标均为成本型指标，值越小越好。

环境指标衡量方案对深圳水库和沙湾河水质的影响。由于深圳水库以总磷污染为主，因此以年均总磷入库量 $I_{\text{reservoir}}$ 作为衡量各方案对深圳水库影响的指标。以水质综合污染指数 I_{river} 作为各方案对沙湾河影响的指标，计算公式见式(1)。

$$I_{\text{river}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

其中： n 为污染物种类，包括化学需氧量（ COD_{Cr} ）、五日生化需氧量（ BOD_5 ）、氨氮（ $\text{NH}_3\text{-N}$ ）及总磷（ TP ）； C_i 为方案实施后污染物 i 的浓度； S_i 为 GB3838-2002 中污染物 i 的 V 类标准值。

经济指标衡量方案的成本。以总投资 TI 和运行费用 OC 作为各方案的成本指标。

实施难度指标衡量方案实施的难易程度，由基准值和附加值两部分构成，各方案的基准值定为 1，附加值由扩建难度和拆迁难度组成。计算公式见式(2)。

$$IM = IM_{\text{base}} + IM_{\text{exp}} + IM_{\text{dem}} \quad (2)$$

其中： IM 为方案实施的难以程度； IM_{base} 为基准值； IM_{exp} 为方案中污水处理厂扩建的难度，处理量每增加 1 万 m^3/d ，扩建难度增加 0.1； IM_{dem} 为拆迁难度，若污水处理厂的建设需拆迁居民区，则该方案的拆迁难度为 1，否则为 0。

风险指标衡量方案的事故风险，以 R 表示，包括基准值和附加值两部。基准值代表各污水治理方案均有的风险，赋值为 1。附加值代表某些方案中污水管网泄露导致污水直接流入深圳水库的风险，赋值为 1。

在咨询决策者和有关专家的基础上采用特征向量法^[21]确定各指标的权重。 TI , OC , I_{river} , $I_{\text{reservoir}}$, IM 及 R 的权重分别为 0.098, 0.062, 0.182, 0.329, 0.033 及 0.296。

4 候选方案影响评价

4.1 污水处理方案

流域内已有的污水处理规划^[22-28]涉及六个污水处理设施（见图 2）。各规划的总体思路一致，即到 2020 年：（1）污水系统由四条主干管、一座污水泵站和两座（或一座）污水处理厂组成；（2）现状建成的合流制管道系统逐渐改为分流制；（3）已有的污水处理设施在近期仍发挥作用，以利于合流制与分流制时间上的衔接。根据这一思路识别出九个污水处理候选方案，见表 1。

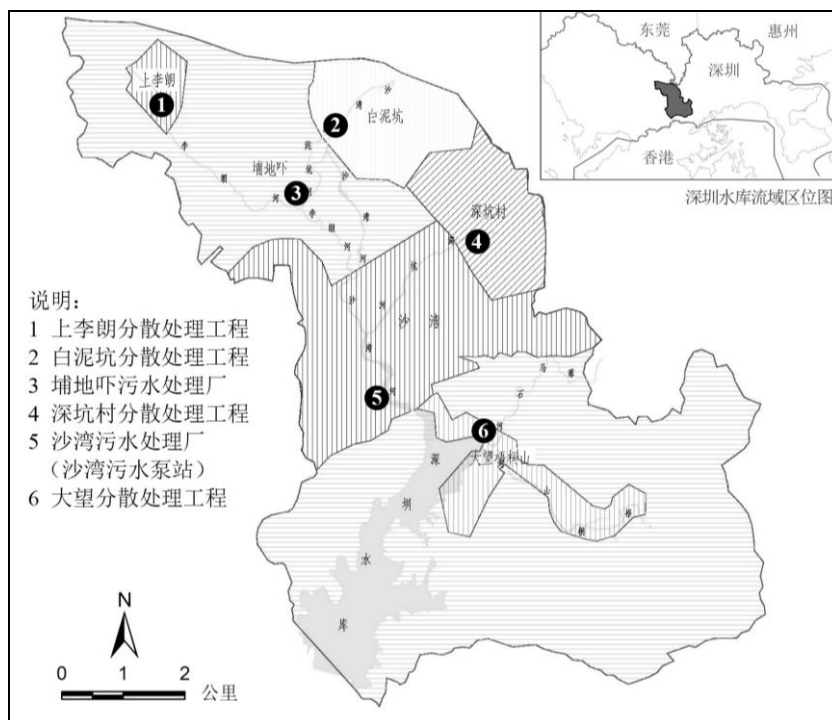


图 2 现有规划涉及的污水处理设施及服务范围

Figure 2 Sewage treatment facilities and service extent proposed in plannings

表 1 污水处理候选方案

Table 1 Sewage treatment alternatives

方案号	说明
一	上李朗、白泥坑、埔地吓、沙湾片区污水进入埔地吓污水厂，深坑村污水进入深坑分散处理工程，大望梧桐山污水进入大望分散处理工程。
二	上李朗、白泥坑、埔地吓、深坑村、沙湾片区污水进入埔地吓污水厂，大望梧桐山污水进入大望分散处理工程。
三	埔地吓、沙湾片区污水进入埔地吓污水厂，上李朗污水进入上李朗分散处理工程，白泥坑污水进入白泥坑分散处理工程，深坑村污水进入深坑分散处理工程，大望梧桐山污水进入大望分散处理工程。
四	上李朗、白泥坑、埔地吓、大望梧桐山、沙湾片区污水进入埔地吓污水厂，深坑村污水进入深坑分散处理工程。
五	上李朗、白泥坑、埔地吓、深坑村、大望梧桐山、沙湾片区污水进入埔地吓污水厂。
六	埔地吓、大望梧桐山、沙湾片区污水进入埔地吓污水厂，上李朗污水进入上李朗分散处理工程，白泥坑污水进入白泥坑分散处理工程，深坑村污水进入深坑分散处理工程。
七	上李朗、白泥坑、埔地吓片区污水进入埔地吓污水厂，深坑村污水进入深坑分散处理工程，大望梧桐山、沙湾片区污水进入沙湾污水厂。
八	上李朗、白泥坑、埔地吓片区污水进入埔地吓污水厂，深坑村、沙湾片区、大望梧桐山片区污水进入沙湾污水厂。
九	埔地吓片区污水进入埔地吓污水厂，上李朗污水进入上李朗分散处理工程，白泥坑污水进入白泥坑分散处理工程，深坑村污水进入深坑分散处理工程，沙湾片区、大望梧桐山片区污水进入沙湾污水厂。

4.2 污水量预测

根据《深圳市城市规划标准与准则》（深府[2004]53号）“13.2 用水量预测”和“14.2 污水量”中的标准预测深圳水库流域的污水量，公式为：

$$f_i = a_i \cdot b_i \cdot c_i \quad (3)$$

其中， i 为规划用地类型或人口， f_i 为污水量， a_i 为用水标准， b_i 为排污系数， c_i 为人口数量或某类用地的规划面积。 a_i 和 b_i 值取自《深圳市城市规划标准与准则》，规划用地面积取自《深圳市中部物流组团分区规划（2005-2020）》。根据《深圳市城市总体规划（2010—2020）》，2020年流域常住人口约为32万人。到2020年深圳水库流域的污水产生总量为 $15.23 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

4.3 对沙湾河水质的影响

由于沙湾河的河道较窄且河床不深，因此采用一维水质解析模型进行分析，见式(4)及式(5)。

$$C_i = C_{0,i} e^{-\frac{kx}{u}} \quad (4)$$

$$C_{0,i} = \frac{Q_{\text{径}} C_{\text{径},i} + Q_{\text{污}} C_{\text{污},i} + Q_{\text{上}} C_{\text{上},i} + Q_{\text{排},j} C_{\text{排},i,j}}{Q_{\text{径}} + Q_{\text{污}} + Q_{\text{上}} + Q_{\text{排},j}} \quad (5)$$

其中， i 为污染物类型， j 为污水处理设施； $Q_{\text{径}}$ 、 $C_{\text{径},i}$ 为断面汇入天然径流量及污染物浓度； $Q_{\text{污}}$ 、 $C_{\text{污},i}$ 为断面汇入污水量及污染物浓度； $Q_{\text{上}}$ 、 $C_{\text{上},i}$ 为断面上游来水量及污染物浓度； $Q_{\text{排},j}$ 、 $C_{\text{排},i,j}$ 为断面接纳污水处理设施出水量及出水水质； $C_{0,i}$ 为断面平均浓度； C_i 为断面下游 x 处断面平均浓度； k 为污染物衰减系数； x 为距离； u 为流速。

各污染物的衰减系数 k 见表2，天然径流及污水水质见表3。90%保证率下沙湾河枯水期日均天然径流量为 $2.77 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，丰水期日均天然径流量为 $27.66 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[29]。2020年各污水处理设施均对污水进行深度处理，规模较大的埔地吓污水处理厂和沙湾污水处理厂出水水质达到IV类标准，其余设施的出水水质达到V类标准。

表 2 污染物衰减系数 $k^{[26]}$

Table 2 Values of pollutant degradation coefficient k

河流	COD _{Cr} (d ⁻¹)	BOD ₅ (d ⁻¹)	NH ₃ -N (d ⁻¹)	TP (d ⁻¹)
沙湾河干流	0.40	0.33	0.16	0.001
李朗河	0.35	0.30	0.25	0.001
深坑河	0.50	0.40	0.22	0.001
白泥坑河	0.40	0.39	0.12	0.001

表 3 天然径流及污水水质

Table 3 Water quality of natural runoff and sewage

水体	COD _{Cr} (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	TP (mg/L)
天然径流 ^[29]	2.0	1.0	0.04	0.05
污水*	150.0	75.0	35.00	4.00

*采用流域内南岭泵站、沙塘布泵站、樟树布泵站及大望泵站等四个污水泵站的多年平均进水浓度。

4.4 对深圳水库水质的影响

当降雨产生的径流超过 25 m³/s 时沙湾河内的污水就可能溢流至深圳水库，对水库水质产生不利影响。因此，对水库产生影响的主要是非点源污染。不过由于发生溢流时生活污水、污水处理厂尾水和一般工业废水等点源污水仍会通过排污口排放，并且它们和非点源污水混合后的一部分溢流至深圳水库，所以各方案会对排入水库的污染物质产生一定影响。

为简化计算，假设点源污水在一天内匀速排放。该假设会影响计算结果的绝对值，但不影响各方案结果的相对关系。点源污水对入库污染物的贡献量通过式(6)计算：

$$F_i = A \cdot B_i \cdot T \quad (6)$$

其中 i 为污染物种类， F_i 为点源污染物入库量， A 为溢流时入库平均径流量占沙湾河总径流量的比重， B_i 为点源污染物单位时间入河量（沙湾河）， T 为全年溢流污水入库历时。 A 、 B_i 和 T 通过式(7)、式(8)和式(9)得到：

$$A = \frac{D_{\text{入库}}}{D_{\text{沙湾河}}} \quad (7)$$

$$B_i = C_{\text{污},i} Q_{\text{污}} + \sum_j C_{\text{排},i,j} Q_{\text{排},j} \quad (8)$$

$$T = \frac{Q_{\text{入库}}}{D_{\text{入库}}} \quad (9)$$

其中 $D_{\text{入库}}$ 为溢流时平均入库径流量, $D_{\text{沙湾河}}$ 为溢流时沙湾河平均径流量, $Q_{\text{入库}}$ 为全年入库污水总量。

深圳水库污水截排工程的设计单位根据深圳水库雨量站 36 年的降雨统计资料估算了年均入库污水总量 $Q_{\text{入库}}$ 和溢流时的沙湾河平均径流量 $D_{\text{沙湾河}}$ ^[30], 分别为 1092 万 m^3 和 80 m^3/s 。由于污水截排量为 25 m^3/s , 因此 $D_{\text{入库}}$ 为 55 m^3/s 。上述值和深圳水库截排管理站的多年实际监测值接近。

4.5 投资与费用

根据《沙湾河流域水环境治理工程实施规划》、《埔地吓污水处理厂工程可行性研究报告》、《深圳市近期建设规划（2006-2010 年）》、《深圳市治污保洁工程行动计划》以及《深圳市福永等十座污水处理厂 BOT 特许经营项目招标公告》等报告, 对不同方案下各工程的总投资和运行费用进行估算。

4.6 实施难度与事故风险

方案中各工程的实施难度向工程设计单位咨询后确定, 事故风险向当地环保主管部门咨询后确定。

4.7 决策矩阵

各候选方案的指标值见表 4。该表即为多准则决策矩阵。

表 4 各候选方案的指标值

Table 4 Index values of alternatives

方案	TI (万元)	OC (万元/年)	I_{river}	$I_{\text{reservoir}}$ (吨/每年)	IM	R
一	48194	2896	0.8396	191	1.3	1
二	46694	2805	0.8373	185	1.5	1
三	47344	2803	0.8741	198	1	1
四	47464	2904	0.8327	189	1.4	2
五	45964	2860	0.8293	184	1.6	2
六	47614	2972	0.8648	196	1.2	2
七	59364	2841	0.8363	189	2.1	2
八	60784	2856	0.8335	184	2.3	2
九	59014	2789	0.8671	196	2.1	2

5 决策过程

5.1 决策方法的选择

各类多准则决策方法均有一定的适用范围, 应根据问题的特点选择适当的决

策方法。深圳水库流域污水处理方案的特点为：有限个备选方案、各指标的性质差异大同时需反映决策者的意图和经验。根据上述特点及多准则决策方法的选取原则^[31]，选定 ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalit é)作为决策方法。ELECTRE 法是淘汰选择法的的简称，由 Roy 在二十世纪六十年代提出^[32]。该方法适用的决策问题为^[33]：（1）有限个备选方案；（2）各方案包含五个以上的决策属性；（3）各属性在性质上存在很大差异；（4）决策者不接受属性间的无条件补偿，即需要采用一种非补偿性的或者有条件补偿的集结方式来对方案的全体属性进行集结。因此，利用 ELECTRE 法对深圳水库流域的污水处理方案进行综合评价是合适的。本文选用可对候选方案进行优劣排序的 ELECTRE II 法。

5.2 ELECTRE II 法

强弱级别高于关系是 ELECTRE II 法的核心。首先计算协调指数 $c(i,j)$ 和不协调指数 $d(i,j)$ ，构建协调矩阵 C 和不协调矩阵 D ，其中 $i,j=1,2,\dots,m, i \neq j, m$ 为方案数；其次设定协调界限 p^-, p^0, p^* ($0.5 < p^- < p^0 < p^* < 1$) 和不协调界限 q^0, q^* ($0 < q^0 < q^*$)；再次根据式(10)及式(11)定义强级别高于关系 S^f 及弱级别高于关系 S^r ，绘制对应的强关系图和弱关系图；最后根据强弱关系图计算正向次序，根据反转强弱关系图计算反向次序，对两种次序求均值后即可得到最终次序。详细计算方法见文献^[33-35]。

称方案 i 强级别高于方案 j ，如果以下条件成立：

$$\left\{ \begin{array}{l} c(i, j) \geq p^* \\ d(i, j) \leq q^* \\ W^+(i, j) \geq W^-(i, j) \end{array} \right. \quad \text{或} \quad \left\{ \begin{array}{l} c(i, j) \geq p^0 \\ d(i, j) \leq q^0 \\ W^+(i, j) \geq W^-(i, j) \end{array} \right. \quad (10)$$

其中 $W^+(i,j)$ 表示方案 i 优于方案 j 的各属性其权重之和， $W^-(i,j)$ 表示方案 i 劣于方案 j 的各属性其权重之和。

称方案 i 弱级别高于方案 j ，如果以下条件成立：

$$\left\{ \begin{array}{l} c(i, j) \geq p^- \\ d(i, j) \leq q^* \\ W^+(i, j) \geq W^-(i, j) \end{array} \right. \quad (11)。$$

5.3 决策参数及结果

协调矩阵 C 见表 5，不协调矩阵 D 见表 6。设定协调界限为 $p^-=0.600, p^0=0.800,$

$p^*=0.900$ ，不协调界限为 $q^0=0.040$, $q^*=0.400$ 。强弱关系图见图 3。各方案最终排序见表 7，方案五为最优方案，即将全流域的污水集中至埔地吓污水处理厂处理。

表 5 协调矩阵 C

Table 5 Concordance matrix C

方案	一	二	三	四	五	六	七	八	九
一	—	0.329	0.807	0.391	0.329	0.869	0.427	0.427	0.938
二	0.967	—	0.905	0.785	0.391	0.967	0.818	0.489	0.938
三	0.489	0.391	—	0.489	0.391	0.489	0.489	0.489	0.427
四	0.609	0.215	0.511	—	0.329	0.967	0.938	0.609	0.938
五	0.671	0.609	0.609	0.967	—	0.967	0.938	0.938	0.938
六	0.131	0.033	0.511	0.329	0.329	—	0.427	0.427	0.938
七	0.573	0.182	0.511	0.687	0.358	0.869	—	0.489	0.84
八	0.573	0.511	0.511	0.687	0.687	0.869	0.807	—	0.807
九	0.062	0.062	0.573	0.358	0.358	0.687	0.489	0.489	—

表 6 不协调矩阵 D

Table 6 Discordance matrix D

方案	一	二	三	四	五	六	七	八	九
一	—	0.031	0.231	0.015	0.046	0.077	0.019	0.037	0.037
二	0.133	—	0.333	0.067	0.016	0.200	0.001	0.005	0.006
三	0.039	0.066	—	0.047	0.071	0.011	0.045	0.071	0.010
四	0.500	0.500	0.500	—	0.032	0.143	0.022	0.026	0.040
五	0.500	0.500	0.500	0.125	—	0.250	0.007	0.001	0.025
六	0.500	0.500	0.500	0.037	0.061	—	0.044	0.061	0.062
七	0.500	0.500	0.524	0.333	0.238	0.429	—	0.026	0.018
八	0.500	0.500	0.565	0.391	0.304	0.478	0.087	—	0.087
九	0.500	0.500	0.524	0.333	0.238	0.429	0.036	0.061	—

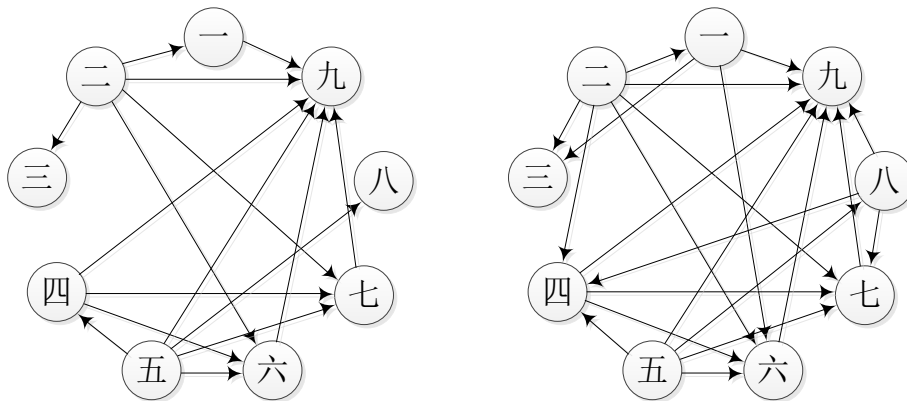


图 3 强关系图（左）及弱关系图（右）

Figure 3 Strong (left) and weak (right) outranking relations

表 7 各方案排序结果

Table 7 Ranking result of alternatives

次序	一	二	三	四	五	六	七	八	九
第一次序 r'	2	1	3	3	1	4	4	2	5
第二次序 r''	3	2	5	3	1	4	4	2	5
平均次序 \bar{r}	2.5	1.5	4	3	1	4	4	2	5
最终次序 r	4	2	6	5	1	6	6	3	7

注：表中数字表示方案排名，越小越优。

5.4 敏感性分析

根据式(10)及式(11)，协调界限 p^- , p^0 , p^* 及不协调界限 q^- , q^* 的取值会直接影响方案间的强弱级别高于关系，进而影响各方案的排名，因此有必要分析上述界限对方案排名的影响程度。因各界限在连续区间上取值，故有无数种界限组合，不过仅有有限种组合会改变方案间的强弱级别高于关系。

设协调矩阵 C 中所有互不相等的数值为集合 $C_{\text{unique}}=\{c_1, c_2, \dots, c_a\}$ ，且 $c_i < c_{i+1}$, $i=1, 2, \dots, a-1$ ，其中 a 为 C 中互不相等的数值个数。设不协调矩阵 D 中所有互不相等的数值为集合 $D_{\text{unique}}=\{d_1, d_2, \dots, d_b\}$ ，且 $d_i < d_{i+1}$, $i=1, 2, \dots, b-1$ ，其中 b 为 D 中互不相等的数值个数。当其他条件不变时，协调界限 p 在式(12)中的某一固定区间内变动，或不协调界限 q 在式(13)中的某一固定区间内变动，不会改变方案间的强弱级别高于关系：

$$p \leq c_1 \text{ 或 } c_i < p \leq c_{i+1} \text{ 或 } p > c_a \quad (12)$$

$$q < d_1 \text{ 或 } d_i \leq q < d_{i+1} \text{ 或 } q \geq d_b \quad (13)$$

反之当其他条件不变时， p 的取值由 C_{unique} 中一个元素变至另一个元素，或当 q 的取值由 D_{unique} 中一个元素变至另一个元素，会改变方案间的强弱级别高于关系。因此，共有 $C_a^3 \times C_b^2$ 种界限组合会改变方案间的强弱级别高于关系，其中协调界限组合 $C_a^3 = a!/[3!(a-3)!]$ ，不协调界限组合 $C_b^2 = b!/[2!(b-2)!]$ 。

本研究中 $a=13$, $b=26$ ，故共有 92950 种界限组合。计算每种组合下各方案的排名，得到各方案在各排名上出现的频率，见表 8。可见，在各方案中方案五的排名对界限的取值变化最不敏感，88009 种组合为最优方案，占有所有组合的 94.7%，

结果具有较好的稳定性。

表 8 各方案在各排名上出现的频率

Table 8 Frequency of alternatives at each rank

排名	一	二	三	四	五	六	七	八	九
第 1 位	1211	53864	0	11537	88009	99	0	0	0
第 2 位	51698	34256	6881	32430	4941	9867	4976	37221	286
第 3 位	2446	4830	22950	25091	0	22166	24604	35995	1649
第 4 位	28883	0	25590	19292	0	23181	21161	13525	6155
第 5 位	3960	0	154	4600	0	3502	37347	5495	35517
第 6 位	4752	0	28663	0	0	10975	4862	714	11706
第 7 位	0	0	1265	0	0	23160	0	0	13212
第 8 位	0	0	4213	0	0	0	0	0	24425
第 9 位	0	0	3234	0	0	0	0	0	0
合计	92950	92950	92950	92950	92950	92950	92950	92950	92950

注：表中数字表示某方案在某排名上出现的次数。

6 结论与不足

6.1 结论

本文研究了深圳水库流域 2020 年污水处理方案的优选问题。首先，建立了多准则决策指标体系并确定了各指标的权重，包括对深圳水库水质的影响、对沙湾河水质的影响、总投资、运行费用、实施难度及事故风险等六个指标，反映了决策者关心的各方面问题。其次，根据已有的污水处理规划形成九个候选方案，针对指标体系计算了各方案的指标值，形成决策矩阵。最后，针对研究问题的特点选择 ELECTRE II 作为决策方法，结合指标权重和决策矩阵计算了各方案的排名并进行了敏感性分析，提出方案五（即把全流域的污水集中至埔地吓污水处理厂处理）为最优方案且排名稳定。

6.2 不足

由于社会经济发展和水文过程存在不确定性，因此各候选方案的决策指标值存在不确定性。另外，决策者知识结构的局限性会给决策指标权重带来不确定性。对于上述不确定性对各方案排名产生的影响，本文作者将在今后的研究中进行探讨。

参考文献

- [1] Huth A, Drechsler M, Kohler P. Using multicriteria decision analysis and a forest growth model to assess impacts of tree harvesting in Dipterocarp lowland rain forests[J]. *Forest Ecology and Management*. 2005, 207(1-2): 215-232.
- [2] Carlos F, Katia R, Lucia H, et al. Multicriteria decision making applied to waste recycling in Brazil[J]. *The International Journal of Management Science*. 2008, 36(3): 395-404.
- [3] Morrissey A J, Browne J. Waste management models and their application to sustainable waste management[J]. *Waste Management*. 2004, 24(3): 297-308.
- [4] 王彬, 印庭勇, 聂建中. 多目标决策在群水污染治理方案中的应用[J]. *中国给水排水*. 1992, 8(4): 33-37.
- [5] 邵海员, 刘绮, 黎锡流. 污水处理厂规划中AHP方法的应用[J]. *环境科学与技术*. 2006, 29(2): 98-101.
- [6] 颜昌宙, 卓俊玲, 姜霞. 多目标决策分析模型在湖泊生态工程规划中的应用[J]. *环境科学研究*. 2003, 16(4): 58-61.
- [7] Hermans C, Erickson J, Noordewier T, et al. Collaborative environmental planning in river management: An application of multicriteria decision analysis in the White River Watershed in Vermont[J]. *Journal of Environmental Management*. 2007, 84(4): 534-546.
- [8] 蒋洪江, 傅国伟. ELECTRE 及其在环境决策中的应用[J]. *环境污染与防治*. 1992, 14(2): 35-37, 44.
- [9] 王好芳, 董增川. 基于量与质的多目标水资源配置模型[J]. *人民黄河*. 2004, 26(6): 14-15.
- [10] 方创琳. 区域可持续发展与水资源优化配置研究——以西北干旱区柴达木盆地为例[J]. *自然资源学报*. 2001, 16(4): 341-347.
- [11] 何士华, 邹进, 程乖梅. 区域水资源可持续利用的多目标决策模型[J]. *昆明理工大学学报(理工版)*. 2005, 30(3): 56-59.
- [12] 程乖梅, 何士华. 滇池流域水资源可持续利用多目标决策分析[J]. *水力发电*. 2006, 32(12): 12-15.
- [13] 白宪台, 黄云光, 周顺岐. 灌溉水库水资源综合利用的多目标决策模型[J]. *水科学进展*. 1992, 3(3): 207-214.
- [14] Bouchard C, Abi-Zeid I, Beauchamp N, et al. Multicriteria decision analysis for the selection of a small drinking water treatment system[J]. *JOURNAL OF WATER SUPPLY RESEARCH AND TECHNOLOGY-AQUA*. 2010, 59(4): 230-242.
- [15] 刘旭东, 曾现来, 巩如英, 等. 基于多目标决策与主成分分析的水资源承载力评价及预测——以河北省为例[J]. *安徽农业科学*. 2008, 36(2): 751-753.
- [16] 戴洪刚, 梁虹, 张美玲. 基于多目标决策—理想区间模型的喀斯特地区枯水资源承载力评价[J]. *水土保持研究*. 2007, 14(6): 24-27.
- [17] 李淑芹, 董洁, 李恩博. 基于多目标决策的临沂市水资源承载力研究[J]. *人民黄河*. 2008, 30(6): 55-56.
- [18] 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.

- [19] 欧志丹, 程声通, 贾海峰. 情景分析法在赣江流域水污染控制规划中的应用[J]. 上海环境科学. 2003, 22(8): 568-572.
- [20] 杨丽莉. 城市污水处理厂综合评价模型的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.
- [21] 胡运权, 郭耀煌. 运筹学教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [22] 深圳市东深水源保护办公室, 深圳市环境科学研究所. 深圳水库流域环境保护对策研究[R]. 深圳: 深圳市环境科学研究所, 2003.
- [23] 深圳市龙岗区布吉镇人民政府, 深圳市规划与国土资源局布吉管理所, 中国市政工程中南设计研究院. 深圳市龙岗区市政工程详细规划(修编)第九卷 布吉镇[R]. 深圳: 中国市政工程中南设计研究院深圳分院, 2003.
- [24] 深圳市水利规划设计院. 深圳水库污水截排工程规划报告[R]. 深圳: 深圳市水利规划设计院, 2004.
- [25] 深圳市规划与国土资源局, 深圳市市政工程设计院. 深圳市污水系统布局规划(2002-2020)[R]. 深圳: 深圳市市政工程设计院, 2005.
- [26] 深圳市东深水源保护办公室, 深港产学研环境技术中心, 深圳水利规划设计院. 沙湾河流域水环境治理工程实施规划[R]. 深圳: 深港产学研环境技术中心, 深圳水利规划设计院, 2006.
- [27] 深圳市东深水源保护办公室, 北京大学深圳研究生院. 深圳水库流域生态保护与建设规划[R]. 深圳: 北京大学深圳研究生院, 2006.
- [28] 深圳市东深水源保护办公室, 深港产学研环境技术中心. 沙湾河流域近期水污染控制对策研究[R]. 深圳: 深港产学研环境技术中心, 2007.
- [29] 深圳市水污染治理指挥部办公室. 深圳河湾水系水质改善策略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [30] 陈筱云. 深圳水库污水截排工程规模的选择[J]. 中国农村水利水电. 2005(10): 19-22.
- [31] Guitouni A, Martel J M. Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method[J]. European Journal of Operational Research. 1998, 109(2): 501-521.
- [32] Roy B. Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE)[J]. la Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle (RIRO). 1968, 6(8): 57-75.
- [33] Figueira J. ELECTRE methods[M]// Figueira J, Greco S, Ehrgott M, Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. New York, NY:Springer Science+Business Media, Inc., 2005.
- [34] 齐寅峰. 多准则决策(III)—ELECTRE方法[J]. 系统工程. 1987, 5(5): 42-49.
- [35] Bertier R, Bertier P. La méthode ELECTRE II - Une application au média-planning[M]// Ross M, OR'72. Amsterdam:North-Holland Publishing Company, 1973: 291-302.