

摘要

早期環境工作者較注重於空氣、水污染等方面，而地下水污染在近幾年才逐漸被重視，但此污染整治卻是一件具高度複雜且不確定的環境問題，在面對資訊不足的情形下，如何整合出有用的資訊給決策者所參考是很重要的研究課題。

不確定下進行決策是本文所探討的重點，傳統的確定型規劃並無法呈現，故本研究嘗試以文獻中常見的隨機規劃及模糊規劃，處理不確定性對地下水整治決策的影響，並加入了整治成本及風險二個衝突的目標，使其更適合環境問題具多目標的特性，在滿足成本及風險最小化的情形下，選擇最適之整治方案，以提供決策者作為參考。

若資訊較充足，可得完整的機率密度函數，則以隨機規劃法處理較優，而在資訊較缺乏的情形下，模糊規劃法是一很好的替代工具。規劃結果顯示，不確定下之權重法結果在成本與風險權重比=0.5:0.5時，隨著百分比比較基準增加，結果由注氣法(b)改變至生物復育法(a)及自然復育法，而不確定下之妥協規劃法的結果是比較一致的；模糊規劃法的結果除 Zimmermann 法結合妥協規劃法無可行解外，其餘皆要為注氣法(b)，滿意度介於 0.4608~0.6433 之間。

關鍵字：多目標規劃法、隨機規劃法、模糊規劃法、不確定性

Abstract

Environmental Engineer paid much attention to air pollution and water pollution in early periods and only until recently did they focus on groundwater pollution. Groundwater pollution is a complex environmental problem with high uncertainty. Under the situation without enough information, it is important for decision makers to obtain guidance on the decision problems.

The main objective of this study is to develop a method of making decisions under uncertainty in a groundwater-contamination context. Since traditional deterministic programming can't deal with uncertainty, this study uses stochastic programming and fuzzy programming to address the influence of uncertainty on groundwater remediation. Furthermore, multiobjective programming considering cost and health risk is incorporated with uncertainty analysis in this study to select optimal alternative with minimal health risk and remediation cost.

If there is enough information on probability density functions, stochastic programming should be the preferred approach; If no enough information is available, fuzzy programming should be used instead. The programming results of weighting method at $W_{cost} : W_{risk} = 0.5 : 0.5$ under uncertainty change from air sparging(b) to bioremediation(a) and then to natural attenuation with adding confidence levels. The results of compromise programming under uncertainty are similar, except that for compromise programming combined with Zimmermann method there is no feasible solution. The result derived from other combinations of fuzzy programming is air sparging(b), with membership degree between 0.4608 to 0.6433.

Keyword : Multiobjective programming, Stochastic programming, fuzzy programming, Uncertainty

一、研究目的

地下水污染整治是一複雜的研究課題，地質特性具非均質性，以及在評估整治方案過程中所考慮的經濟、水文特性等，或由於天生存在著不確定或由於資訊不足產生的不確定，使得整治方案的選擇並不容易，故嘗試以多目標規劃法，結合隨機規劃、模糊規劃等不確定性分析方法，來處理地下水整治決策中不確定的問題，配合地下水傳流模式、風險評估模式的加入，輔助決策者在具不確定性下選擇合適的整治方案，以追求成本及風險最小化的目標下，達到最佳的整治效果。

本階段研究首先需建立決策所需資料庫，包含整治方案、污染物特性，以供地下水傳流模式運算，並以三氯乙烯(TCE)及四氯乙烯(PCE)為所關注的污染物，模擬預測不同整治方案下的 30 年間濃度，以提供計算風險評估所需的資料，風險及成本是本文所考慮的整治目標，本階段研究所包含的整治方案包括抽出及處理法、自然復育法、生物復育法、注氣法等，配合上述資訊，蒐集適合之多目標規劃方法，建立具不確定性之優選模式，所納入之不確定性分析包含文獻上常見的隨機規劃及模糊規劃，最後，將所有模式整合，並比較不同的不確定性下之多目標規劃法其優選的結果為何，以提供決策者參考。

研究目的主要包含以下二點：

- (1) 以多目標規劃法結合隨機規劃法及模糊規劃法來處理地下水整治決策中不確定的問題。
- (2) 輔助決策者在具不確定性下選擇合適的整治方案。

依本階段研究目的，在處理地下水整治決策中的不確定，而分別進行多目標規劃、隨機規劃、模糊規劃及整治方案的文獻回顧，並考

慮風險評估，其後蒐集相關的水文、污染物特性的參數進行地下水傳流的模擬，將此濃度分佈代入優選模式中，分別以多目標規劃及隨機規劃、模糊規劃進行優選，以得到一整治方案的決策建議提供給決策者。研究流程如圖 1-1 所示。

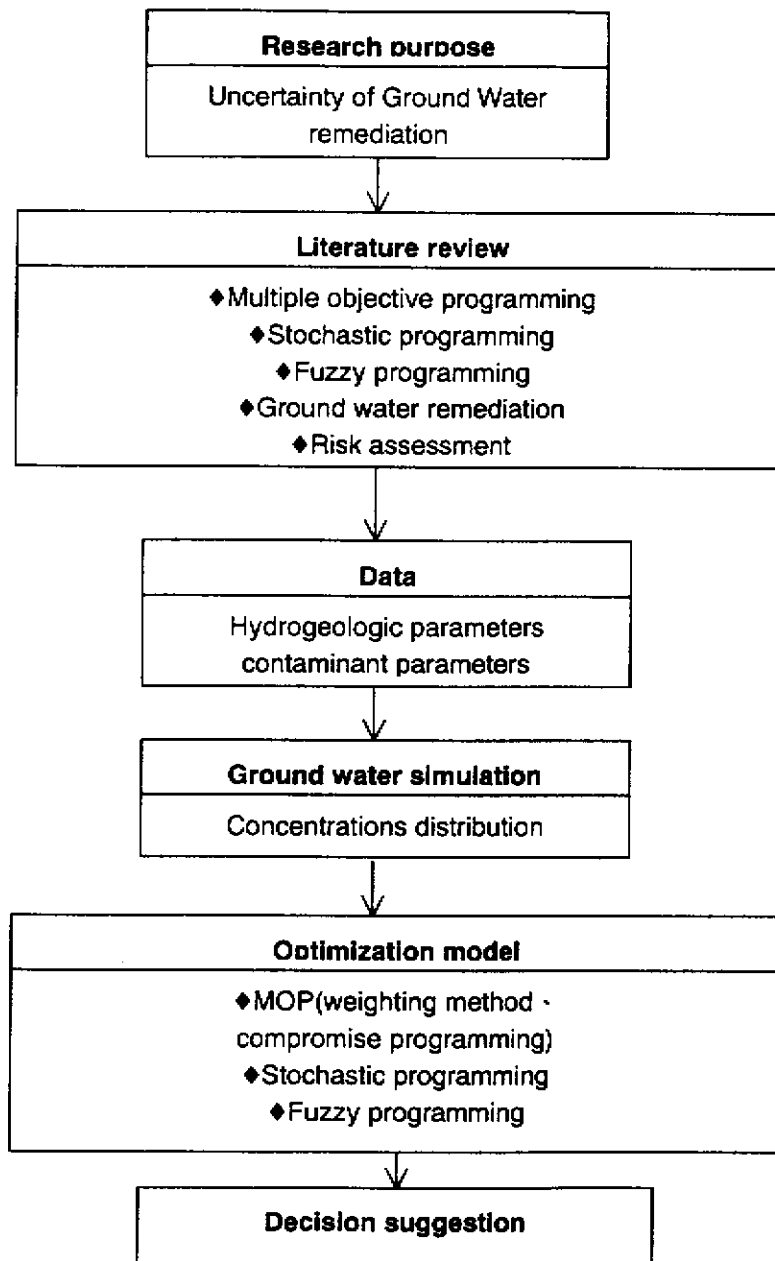


Fig. 1-1 Flow chart of research procedures

二、研究方法

本研究主要著重在多目標規劃與不確定性分析方法的結合，研究方法首先需模擬不同整治方案對污染物濃度的改善結果，並將水文參數的不確定性考慮進來，以所得到的污染物濃度分佈代入風險模式及成本模式，計算比較不同的整治方案其所需的成本及暴露的健康風險的結果為何，在考量成本及風險最小化的情形下，評估何種整治方案是較好的，研究方法分述如下。

2-1 地下水傳流模式模擬

地下水污染傳輸模擬的目的是在預測污染物在特定位置及時間的濃度，用來模擬地下水流及污染物傳輸的模式有很多種，本研究所選用的地下水傳流模式主要為 Bioplume III，此為一二維有限差分模式，主要是 Bioplume II 的再版，用來模擬有機污染物在地下水中移流(advection)、延散(dispersion)、吸收/吸附(sorption)及生物降解(biodegradation)的過程，並假設有機污染物使用氧、硝酸鹽、三價鐵、硫酸鹽及二氧化碳做為好氧或厭氧的電子接受者，由 AFCEE(Air Force Center of Environment Excellence)所研發，(USEPA, 1998)。Bioplume II 曾被用來模擬 AFCEE 的 No. 44 Tucson, Arizona 場址，該場址為國家優先名單(NPL)當中被稱為 Tucson Airport Area Superfund Site，其主要污染物為 TCE 及 DCE，模擬預估經由 pump and treat 處理後 5 年後的情形(Bedient *et al.*, 1999)。

2-2 地下水流模擬

(1)場址描述

本文所研究的對象是台灣美國無線電股份有限公司，簡稱 RCA，位於桃園市西南區，中山高速公路北側，距離台北西南方約 35 公里，

主要的地下水污染物是比水重的非水溶液相(Dense non-aqueous phase liquid, DNAPL)，其特性是為穿過毛細帶而進入地下水位面往下移，開始蓄積並形成一難以清除的 DNAPL 池；此 DNAPL 的特性也是使得 RCA 復育較其他地下水污染事件難整治的原因之一；而土壤部份經開挖曝氣復育處理後，已達整治標準。

在此所選定的關注場址範圍約為 1.2 公里× 1.6 公里，在模式中將其切割為 12 × 16 個網格點，即網格大小為 100 公尺× 100 公尺，且為了簡化，只考慮二維模式及一個含水層。

(2) 水文地質參數

場址的第一含水層約介於 4.6~22.9m bgs (below ground surface)，第二含水層約介於 22.9~50.3m bgs，第三含水層約介於 50.3~93.0m bgs，第一及第二含水層是主要的污染區，地下水流向為北北東。其餘的水文參數選擇主要以參考 RCA 整治計畫書(2000)為主，不足的部份輔以文獻數據，並做合理的假設。其中，水力傳導係數(hydraulic conductivity)是地水下整治時很重要的一個考慮參數(Gavaskar *et al.*, 1998)，而 Liou *et al.*(1997)也提到地下水流速及軸向延散係數 (Longitudinal dispersivity)是地下水重要的二個參數；Wagner *et al.* (1987)並曾以水力傳導係數、孔隙率(porosity)、軸向及橫向延散係數(transverse dispersivity)做為不確定參數的模擬，且由孫(2000)所做的敏感度分析得知，水力傳導係數、孔隙率及半衰期(half-life)是重要的不確定參數，另外，本文更進一步利用 Bioplume III 對軸向延散係數、水力傳導係數、孔隙率、Bulk density 做敏感度分析，加減 10%的參數看其對時間及空間平均濃度改變的程度，參數的原始值則如表 2-3 所示，以下是其分析結果：

Table 2-1 PCE's sensitivity analysis

Parameter	The change of the concentration (parameter +10%,ppm)	Relative sensitivity	The change of the concentration (parameter -10%,ppm)	Relative sensitivity
Longitudinal dispersivity	$4.44 \times 10^{-7} \rightarrow 5.14 \times 10^{-7}$	+1.57%	$4.44 \times 10^{-7} \rightarrow 3.8 \times 10^{-7}$	-1.44%
Hydraulic conductivity	$4.44 \times 10^{-7} \rightarrow 4.79 \times 10^{-7}$	+0.79%	$4.44 \times 10^{-7} \rightarrow 4.43 \times 10^{-7}$	-0.27%
Effective porosity	$4.44 \times 10^{-7} \rightarrow 4.78 \times 10^{-7}$	+0.77%	$4.44 \times 10^{-7} \rightarrow 4.29 \times 10^{-7}$	-0.34%
Bulk Density	$4.44 \times 10^{-7} \rightarrow 4.44 \times 10^{-7}$	0%	$4.44 \times 10^{-7} \rightarrow 4.44 \times 10^{-7}$	0%

Table 2-2 TCE's sensitivity analysis

Parameter	The change of the concentration (parameter +10%,ppm)	Relative sensitivity	The change of the concentration (parameter -10%,ppm)	Relative sensitivity
Longitudinal dispersivity	$3.63 \times 10^{-7} \rightarrow 4.2 \times 10^{-7}$	+1.57%	$3.63 \times 10^{-7} \rightarrow 3.10 \times 10^{-7}$	-1.46%
Hydraulic conductivity	$3.63 \times 10^{-7} \rightarrow 3.58 \times 10^{-7}$	-0.14%	$3.63 \times 10^{-7} \rightarrow 3.54 \times 10^{-7}$	-0.25%
Effective porosity	$3.63 \times 10^{-7} \rightarrow 2.84 \times 10^{-7}$	-2.18%	$3.63 \times 10^{-7} \rightarrow 3.54 \times 10^{-7}$	-0.25%
Bulk Density	$3.63 \times 10^{-7} \rightarrow 3.63 \times 10^{-7}$	0%	$3.63 \times 10^{-7} \rightarrow 3.63 \times 10^{-7}$	0%

由表 2-1 及 2-2 可看出軸向延散係數、水力傳導係數、孔隙率的敏感度是較大的，故挑選其為本文所關注的三個不確定參數，其中，Liou (1997)及 Copty (2000)等人提到水力傳導係數通常以對數常態分佈表示，其餘我們可以常態分佈來表示；利用蒙地卡羅模擬，給定參數的平均值及標準差，以隨機挑選出可能的值，模擬以上三個參數的不確定性，代入 Bioplume III 模式中，並假設初始不確定參數位於網格中的 5 個可能位置(以卡式座標而言即位於點(0,16)、(12,16)、(7,3)、(1,1)、(12,1))，利用 Bioplume III 中的克利金(kriging)分佈產生十個可能的隨機分佈場，使其亦符合地理特性，由於 Bioplume III 輸入隨機參數的方式較為不便，無法採用一次匯入的方式，故在此僅模擬十個不確定的場，水文參數整理如表 2-3 所示；而模擬所需的高程及水頭資料則取用 RCA 計畫書(2000)資料一一輸入。

0.236	0.25	0.247	0.252	0.258	0.255	0.259	0.259	0.261	0.264	0.265	0.267
0.238	0.25	0.247	0.25	0.258	0.257	0.257	0.259	0.261	0.264	0.264	0.267
0.241	0.25	0.248	0.252	0.257	0.259	0.259	0.26	0.261	0.263	0.263	0.267
0.242	0.25	0.249	0.253	0.256	0.259	0.261	0.261	0.261	0.263	0.264	0.267
0.244	0.25	0.249	0.253	0.256	0.258	0.262	0.261	0.26	0.262	0.265	0.266
0.245	0.251	0.247	0.254	0.258	0.259	0.263	0.26	0.261	0.261	0.265	0.266
0.248	0.251	0.247	0.254	0.259	0.261	0.262	0.261	0.261	0.262	0.265	0.265
0.249	0.252	0.246	0.255	0.259	0.261	0.261	0.262	0.262	0.262	0.264	0.264
0.249	0.251	0.245	0.255	0.259	0.262	0.262	0.264	0.262	0.263	0.265	0.265
0.247	0.25	0.244	0.255	0.26	0.264	0.264	0.267	0.263	0.264	0.266	0.266
0.248	0.248	0.243	0.255	0.26	0.266	0.265	0.269	0.263	0.265	0.267	0.266
0.244	0.246	0.242	0.255	0.262	0.268	0.268	0.271	0.265	0.266	0.268	0.268
0.242	0.243	0.241	0.255	0.263	0.27	0.273	0.274	0.266	0.266	0.269	0.269
0.236	0.238	0.24	0.255	0.262	0.274	0.286	0.278	0.269	0.266	0.271	0.272
0.225	0.233	0.237	0.255	0.262	0.272	0.279	0.277	0.272	0.265	0.272	0.273
0.205	0.238	0.235	0.254	0.261	0.269	0.274	0.274	0.269	0.265	0.273	0.276

Table2-3 Possible effective porosity's distribution

本研究對象，RCA 場址相關的水文參數及不確定參數的平均值由整治計畫報告書中得知，而三氯乙烯及四氯乙烯的相關物化特性則整理如表 2-4 所示。

Table 2-4 Hydrogeologic parameters

Hydrogeologic parameters	Mean	Stand deviation	Distribution
Hydraulic conductivity(K) , ft/s ²	4.631x 10 ⁻⁴	4.631x 10 ⁻⁵	Log-normal
Hydraulic gradient m/m	0.005-0.008	-	-
Effective porosity(Θ)	0.25	0.025	Normal
Storage coefficient	0.2	-	-
Longitudinal dispersivity(Dx) , ft	9.84	0.984	Normal
Transverse dispersivity , ft	2.95	-	-
Bulk density , g/cm ³	1.7	-	-
f _{oc}	0.01		

Table 2-5 Properties of PCE、TCE(Bennett *et al.*,1991)

Properties	PCE	TCE
Molecular weight (g/mol)	165.83	131.4
Diffusion coef. In water(m ² /s)(D _{water})	8.834× 10 ⁻¹⁰	9.71× 10 ⁻¹⁰
Diffusion coef. In air (m ² /s)(D _{air})	7× 10 ⁻⁶	7.78× 10 ⁻⁶
Koc(g/cm ³)	263	94
SF (ingestion)(mg/kg-d) ⁻¹	2× 10 ⁻³	6× 10 ⁻³
SF (inhalation)(mg/kg-d) ⁻¹	5.2× 10 ⁻²	1.1× 10 ⁻²

2-3 污染物傳輸模擬

本研究所考慮污染源的方法是假設污染源在疑似的熱點(hot spot)上，參考計畫書(2000)中所繪製的 PCE 及 TCE 的平均等濃度線為依據，並假設污染源為污染濃度值最大點，以本研究所設立的網格而言，即於(7,3)處，PCE 濃度約為 5ppm，TCE 濃度約為 1.6ppm，持續污染 30 年。

2-4 復育方案模擬

以上述的水文地質等參數為基礎，進行下列復育方案的設立，使用 Bioplume III：

(1)自然復育

主要考慮的污染物因地下水的移流(advection)、延散(dispersion)、吸收吸附(sorption)過程造成污染物的衰減，分成(a)移流+延散，(b)移

流+延散+吸收/吸附二部份來討論。

(a)移流+延散：

移流是污染物沿著地下水流在孔隙裡的滲流速度造成的移動，而延散則是分子從高濃度擴散至低濃度的傳輸過程，我們以下二圖來表示：



Fig 2-1 Advection and dispersion



Fig 2-2 Advection only (Bedient *et al.*, 1994)

(b) 移流+延散+吸收/吸附：

污染物受吸附/吸收效應會造成污染物的延滯現象，因此延散的距離就會相對的縮短，在 Bioplume III 中考慮的吸收/吸附機制有 Linear Isotherm、Freundlich Isotherm、Langmuir Isotherm 三種，在此將吸收/吸附機制假設為最常用的 Linear Equilibrium Isotherm，且

$$K_d = f_{oc} \times k_{oc}$$

(2)生物復育

與自然復育不同的是，主要考慮的是在比較在加入 Fe^{3+} ，對污染物降解的效果。另外，由於以零價金屬為反應牆來處理降解地下水中的含氯有機物的技術近來已漸被廣泛應用(O'Hannesin *et al.*,

1998)，故在此採用本研究群董(2001)之實驗 PCE 在底泥添加及 Fe^{3+} 與 PCE 在元素鐵及底泥添加環境中之轉換數據，而 TCE 的數據則由文獻上(Yeh *et al*，1991)的實驗數據，其 TCE 在底泥環境中反應約較 PCE 快 1.25 倍，故依此作為假設依據；並將 PCE 與 TCE 與零價金屬的反應視為生物性反應，模擬其對污染物去除的效果。

(3)抽出處理

主要考慮抽水井及注水井的位置及抽水率，比較不同的配置對污染物減少的效果。而一旦抽出地表之上的廢水，假設以活性碳吸附技術來處理，再將處理完之乾淨的水注回地下含水層中。為了簡化，將抽水井的位置固定於 A+、B+、C+ 三處，回注井固定於 A-、B-、C- 三處，假設一為抽水井及一為注入井，其配置如圖 2-3 所示，由 RCA 整治報告中得應用抽出處理整治法的井有 EX-1~EX-15 個井，平均值為 $26.49 \text{ m}^3/\text{day}$ ，故取此值為所考慮的抽水及回注率，單位換算結果即 $0.0095979 \text{ ft}^3/\text{s}$ ，比較不同配置位置對污染物處理的效果為何。

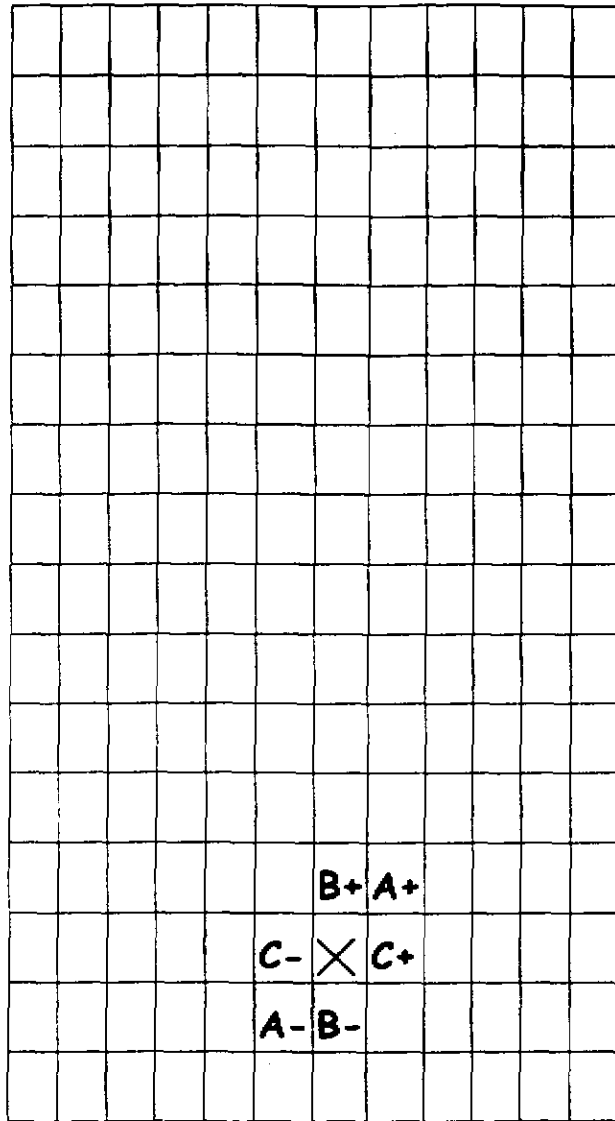


Fig 2-3 Location of source and wells(× source , + pump , -inject)

(4)注氣法

在此我們主要考慮將氧注入地下水中，促進微生物生長，使污染物得以經由生物分解，將注入井設於圖 2-3 的 A-及 C-位置，並假設以 $0.0095979 \text{ ft}^3/\text{s}$ 的注入率將濃度為 10mg/L 的氧氣持續注入地下水中，比較不同位置的注氣法對污染物濃度改善的結果。

整個地下水傳流模擬的過程可表示如圖 2-4。首先利用蒙地卡羅法挑選出 K 、 Θ 、 Dx 之隨機值，利用 Bioplume III 中的克利金(kriging)分佈將具地理特性之不確定參數考慮進模式中，同時將相關的水文參

數輸入模式，進行上述之整治方案設立及模擬，以預估 30 年間 TCE 與 PCE 可能之濃度分佈。

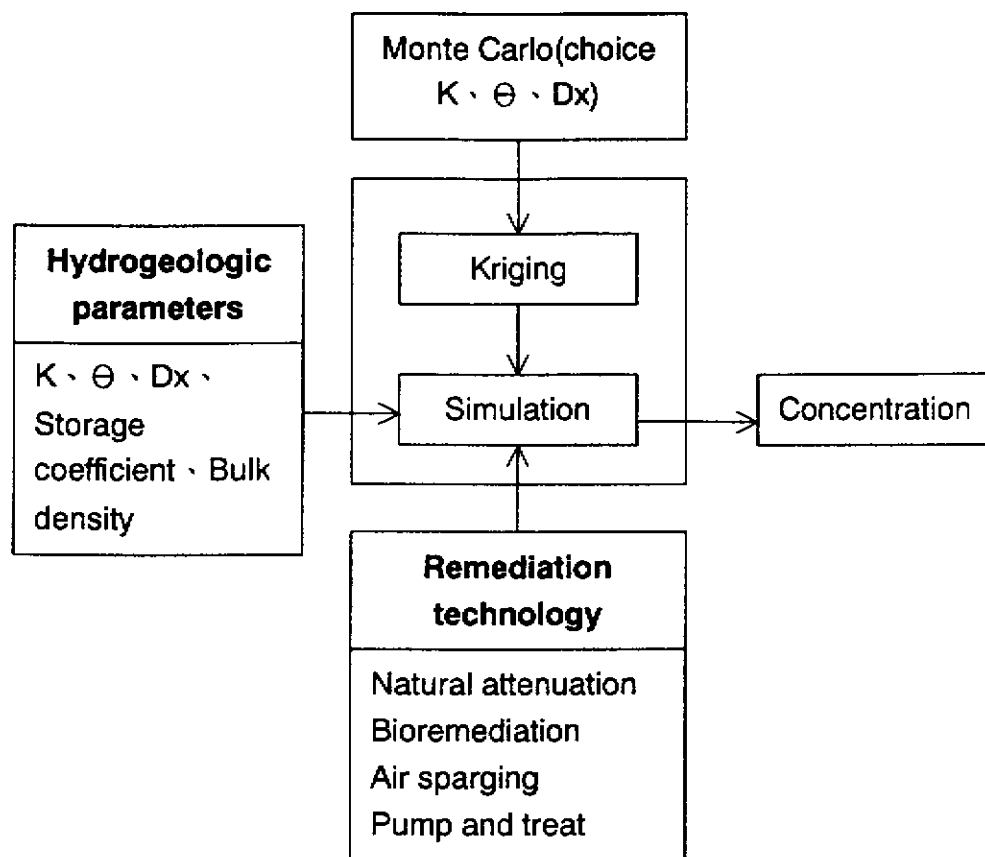


Fig 2-4 Flow chart for groundwater contamination transport and remediation simulation.

2-5 優選模式

將上述經由地下水模式模擬得到的濃度，代入模式中計算風險，以下就本研究所考慮的成本及風險二目標進行整理探討。

(1) 成本

在考慮整治技術的成本時，主要分成資本(capital cost)及操作維

護成本(operation & maintenance cost)(Brown , 1996 ; Gavaskar *et al* , 1998) ; 即為固定成本及變動成本 , 而由 Superfund 已知的資料顯示 , 清除 NPL(國家優先名單)場址所需的總成本約為 3 仟萬美金至 1 億 2 仟萬美金 (Lawrence *et al* , 1997) , 配合文獻上所搜集到的成本資訊 , 整理如表 2-3 所示。

Table 2-6 The cost of treatment technology

Treatment technology	Cost elements	Cost(dollar)	Site characteristics/comm ents
In-situ Bioremediation ^[1]	Total treatment cost	2,000,000 (4/gal.)	TCE , DCE , VC
Funnel and Gate ^[1]	Installation cost	400,000	TCE : 100 to 400ppb
Pump and Treat ^[1]	Capital cost O&M	8,034,454 0.12/1000gal.	TCE, PCE , DCE , DCA , TCA
Pump and Treat ^[1]	Capital O&M	4,103,000 0.75/1000gal.	TCE 25,000ppb PCE12,000 ppb, DNAPLs
GAC ^[2]	O&M	500,000	
Monitoring ^[2]	O&M	250,000	
Pumping cost ^[3]	O&M	9.387 per L/s	
GAC ^{[5]a}	Capital O&M	100,000~800,000 25,000~250,000	
GAC ^{[5]b}	O&M	0.45~2.52/1000gal	Contaminant >1mg/L

		0.22~0.54/1000gal	Contaminant <1mg/L
Biorestation ^[5]	O&M	0.0165/gal	
Pump cost ^[5]	1MGD(0.04 39m ³ /s)	26,000	
MNA ^[6]	O&M	22,800	
Air sparging ^[7]	Capital O&M	156,950 62,750	
Groundwater ^[2] Sparging	Capital	70,000 to 100,000	

* O&M : Operation and maintenance cost

GAC : Granular activated carbon adsorption

MNA : Monitored natural attenuation

[1]Brown , 1996

[2]Sharefkin , 1984

[3]Lefkoff , 1986

[4]Gavaskar *et. al.* , 1998

[5]Noonan *et. al.*,1990

[6]AFFCE , 1999

[7]Federal Remediation Technology Roundtable(FRTR) , 2001 .

由於要決定不同復育技術的成本十分不易，不同的場址大小、復育技術、污染物種類等都會影響復育的成本，使得成本間的差異很大，但大抵而言，復育成本不外乎分為固定成本及變動成本，是故，將成本簡單設立如下：

(A)自然復育：

(a)固定成本：監測井，假設為 50,000 美金。

(b)變動成本：操作與維護。自然復育需做監測的工作，故以 AFFCE(1999)的假設，每年約 22,800 美金。

(B)生物復育

(a)固定成本：整治井，需注入營養鹽、微生物等所需，假設為 70,000 美金。

(b)變動成本：操作與維護。採用 Noonan *et.al.*(1990)的假設（表 3-5 中 a），處理每加侖需 0.0165 美金，假設其處理量與抽出處理相同，故每 m^3/day 每年約需 $365 \times 4.3588 = 1,591$ 美金，抽水量平均值為 $26.49 \text{ m}^3/\text{day}$ ，故成本為 $1,591 \times 26.49 = 42,146$ 美金。

(C)抽出處理

(a)固定成本：整治井，需用來抽出受污染的水及回注乾淨的水所需，假設為 $70,000 \times 2$ 美金，另外，活性碳吸附的固定成本採用 Noonan *et.al.*(1990)（表 3-5 中 a）的假設，為 800,000 美金，故全部之固定成本為 $70,000 \times 2 + 800,000 = 940,000$ 。

(b)變動成本：活性碳吸附成本+抽水/注入成本，採用 Noonan *et.al.*(1990)（表 3-5 中 a）的活性碳吸附成本，為 250,000 元，而抽水/注入成本則採用 Noonan *et.al.*(1990)（表 3-5 中 a）的假設，每 $0.0439 \text{ m}^3/\text{s}$ 約 26,000 元，單位換算為抽出與注入每 m^3/day 每年約 $365 \times 6.8548 = 2,502$ 美金，由 4-1.3 節的機制設定，故其成本為 $250,000 + 2,502 \times 26.49 = 316,278$ 美金。

(D)注氣法

(a)固定成本：主要包含一注入空氣或氧氣的注入井及相關設備，由於 Sharefkin(1984)及 FRTR(2001)之資料差異不大，故取其平均值：108,983 美金。

(b)變動成本：操作與維護的成本，以 FRTR(2001)的數值，為 62,750 美金。

將上述資訊整理如表 2-7，標準差皆假設為原始值之 25%。

Table 2-7 Remediation technology cost

Remediation technology	Fixed costs (dollar)	Variable costs (dollar)
Natural attenuation	50,000	22,800
Pump and treat a)	940,000	316,278
Pump and treat b)	940,000	316,278
Pump and treat c)	940,000	316,278
Bioremediation a)	70,000	42,146
Bioremediation b)	70,000	42,146
Air sparging a)	108,983	62,750
Air sparging b)	108,983	62,750

大致而言，抽出處理的成本會比其他整治方法來得高，而自然復育是成本最低的。

(2)風險

將前一節所得到的不同整治方案後的濃度，由於水文參數不確定會造成的濃度分佈不確定，故計算 10 個隨機場的 192(格點數)× 10(隨

機場)=1920 筆數據的平均值及標準差，在其對數-常態分佈下考慮 30 年間平均暴露的濃度，將此濃度分佈代入模式計算暴露 30 年間所產生的風險，考慮暴露途徑有空氣(呼吸室外、室內空氣)、水(喝水、皮膚接觸)、土壤(皮膚接觸土壤、誤食土壤)及食物鏈(吃稻米、魚)所產生的風險，暴露受體則考慮一般成人。(湯，2000)

2-6 多目標規劃

利用多目標規劃結合隨機規劃及模糊規劃建立優選模式，將方程式建於 Excel 中，以 Crystal ball 為優選軟體，此軟體為建立在 Excel 下的軟體，透過工作表來運算，使用簡單，在此我們主要利用 Crystal ball 中的 OptQuest 功能，決定好假設變數、決策變數及要預測的變數，加入所需要的限制式，將目標最小或最大化，而求得最佳解。且因成本與風險的單位不同，是故將其各別除以理想解，即個別計算單目標之最佳值，如表 2-8 所示，使二者的單位無因次化，彼此之間的權衡也較具有意義。

在限制式的選取上，主要考慮風險需小於 10^{-4} ，整治 30 年期間所受的暴露風險值需小於 10^{-4} 。而決策變數即是我們要得到的復育方案。

在求解之前，先計算償付表，以得到理想解。

Table 2-8 Payoff table

objective	cost	risk	Decision var.(Alternative)
min cost	Z1*	Z2'	
min risk	Z1'	Z2*	

Ideal solution(cost, risk)=(Z1*, Z2*)

利用上述所得到的資訊，利用權重法、目標規劃法、妥協規劃法來對多目標進行求解，其求解流程如圖 2-5 所示。在本研究中決策變數為整治技術，考慮暴露風險必需小於 10^{-4} 做為模式之限制式，再決定目標函數，此目標函數計算方法說明如後所述；接下來對目標取最大化或最小化，並利用蒙地卡羅法計算參數之不確定性，規劃完成後模擬優選而得最佳解。

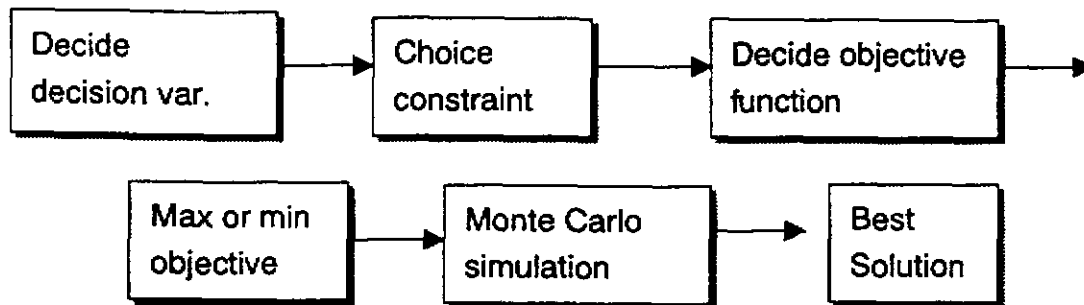


Fig 2-5 Flow chart for optimization

(1) 權重法

本文所建立的數學模式如下：

$$\text{目標：Min } W_{\text{COST}} * Z_{\text{COST}}(X_i) + W_{\text{RISK}} * Z_{\text{RISK}}(X_i)$$

$$\text{限制式：} Z_{\text{RISK}} \leq 1 \times 10^{-4} \quad \sum_{i=1}^8 X_i = 1$$

$$X_i = 0 \text{ or } 1 \quad i=1,2,\dots,8$$

$$W_{\text{COST}} \in [0,1]$$

$$W_{\text{RISK}} \in [0,1]$$

其中：

W_{COST} ：成本權重

W_{RISK} ：風險權重

(本文中採用幾個權重的不同組合，以比較及結果，分別為

$W_{\text{COST}} : W_{\text{RISK}} = 0.8 : 0.2, 0.5 : 0.5, 0.2 : 0.8$)

$$Z_{\text{COST}}(X_i) : \text{成本目標} = \sum_{i=1}^8 (C_{fi} + 30 * C_{vi})$$

$Z_{\text{RISK}}(X_i) : \text{風險目標}$

$X_i : \text{整治方案變數}$

$C_{fi} : \text{整治方案 } i \text{ 之固定成本}$

$C_{vi} : \text{整治方案 } i \text{ 之變動成本}$

$i=1, \dots, 8$ 分別代表的整治方案為：

1：自然復育

2：生物復育(a)

3：生物復育(b)

4：注氣法(a)

5：注氣法(b)

6：抽出處理(a)

7：抽出處理(b)

8：抽出處理(c)

(2) 目標規劃法

本文所建立的數學模式如下：

$$\text{目標} \quad \text{Min } |d_{\text{COST}}| + |d_{\text{RISK}}|$$

$$\text{限制式} \quad Z_{\text{RISK}} \leq 1 \times 10^{-4}$$

$$|d_{\text{COST}}| = Z_{\text{COST}} - Z_{\text{COST}}^*$$

$$|d_{\text{RISK}}| = Z_{\text{RISK}} - Z_{\text{RISK}}^*$$

其中：

$Z_{\text{COST}}^* : \text{成本理想值(由償付表而來)}$

Z_{RISK}^* : 風險理想值(由償付表而來)

$|d_{COST}|$: 與 Z_{COST}^* 的差距值

$|d_{RISK}|$: 與 Z_{RISK}^* 的差距值

(3) 妥協規劃法

本文所建立的數學模式如下：

考慮 $S=\infty$ 時，是數值上最短的距離：

$$\text{Min max } \left\{ \alpha_{\text{cost}} \left[\frac{Z_{\text{cost}'} - Z_{\text{cost}}}{Z_{\text{cost}'} - Z_{\text{cost}}^*} \right] + \alpha_{\text{risk}} \left[\frac{Z_{\text{risk}'} - Z_{\text{risk}}}{Z_{\text{risk}'} - Z_{\text{risk}}^*} \right] \right\}$$

$$\text{s.t } Z_{RISK}(X_i) \leq 1 \times 10^{-4}$$

$$\alpha_{\text{cost}} \in [0, 1]$$

$$\alpha_{\text{risk}} \in [0, 1]$$

其中

α_{cost} = 目標成本的權重

α_{risk} = 目標風險的權重

(本文中採用幾個權重的不同組合，以比較及結果，分別為

$\alpha_{\text{cost}} : \alpha_{\text{risk}} = 0.8 : 0.2, 0.5 : 0.5, 0.2 : 0.8$)

$Z_{\text{cost}'}$ = 目標成本最差值(由償付表而來)

$Z_{\text{risk}'}$ = 目標風險最差值(由償付表而來)

不確定下之數學規劃

(1) 隨機規劃

輸入參數中具不確定的除了前面提到的水文參數外，其計算風險的暴露參數如體重、喝水量、致癌斜率因子、計算成本的固定成本、變動成本、整治效率等參數也具有不確定性，在此，我們利用傳統的機率來處理，即給予一平均值及標準差，配合適合之分佈，以建立其機率密度函數，利用蒙地卡羅法模擬 2000 次隨機挑選數值以代入風險模式及成本模式中計算，所得的結果也是一機率分佈，而分別對 50%、85% 及 95% 等累積機率比較結果。

其數學模式如下：

$$\text{Min } Z(\text{cost}, \text{risk})$$

$$\text{s. t } Z_{\text{RISK}} \leq 1 \times 10^{-5}$$

其中：

$Z(\text{cost}, \text{risk})$ ：利用權重法或妥協規劃法所組合而成的目標

(2) 模糊規劃

(A) Verdegay 法

本文所建立的數學模式如下：

$$\text{Min } Z(\text{cost}, \text{risk})$$

$$\text{s. t } Z_{\text{RISK}} \leq b_i + (1 - \alpha) p_i, \forall i$$

$$\alpha \in [0, 1], \quad x \geq 0$$

假設 $\Theta = 1 - \alpha$ ，改變 Θ 值由 0-1，可得如表 2-4 之參數規劃表，以得到不同 Θ 值下的最佳解。

其中：

b_i ：即 1×10^{-4} 。

p_i ：風險限制式的忍恕值，假設為原來限制式的 50%。

(B) Zimmermann 法

利用 Verdegay 法所作的如表 2-4 之參數規劃表，選取基本期望值及忍恕值，以建立規劃所需的隸屬函數，本文所建立的數學模式如下：

Max λ

s.t $\mu(\text{COST,RISK})=1-[Z(\text{COST,RISK})-b(\text{COST,RISK})]/p(\text{COST,RISK}) \geq \lambda$

$\mu_{\text{RISK}}=1-[Z_{\text{RISK}}-b_{\text{RISK}}]/p_{\text{RISK}} \geq \lambda, \forall i$

$\lambda, \mu(\text{COST,RISK}), \mu_{\text{RISK}} \in [0,1], \forall i$

$x \geq 0$

其中：

λ ：隸屬度

$\mu(\text{COST,RISK})$ ：模糊成本及風險目標之隸屬函數，假設為梯形

μ_{RISK} ：模糊風險目標之隸屬函數，假設為梯形

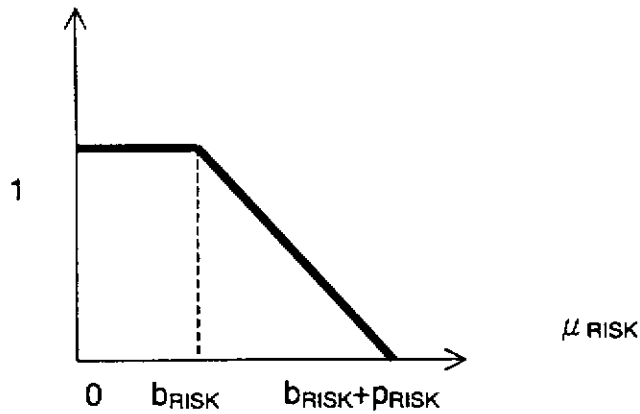
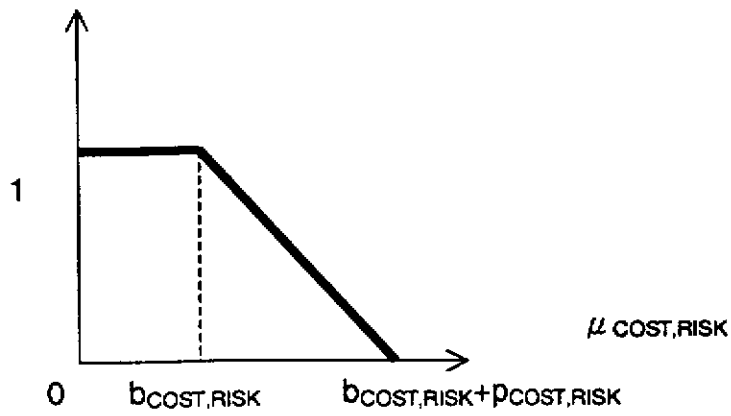
$b(\text{COST,RISK})$ ：成本及風險之原目標值，假設為參數規劃表中之最佳值。

b_{RISK} ：風險之原目標值，假設為參數規劃表中之最佳值。

$p(\text{COST,RISK})$ ：成本及風險之忍恕值，假設為參數規劃表中最大值與最小值之差距。

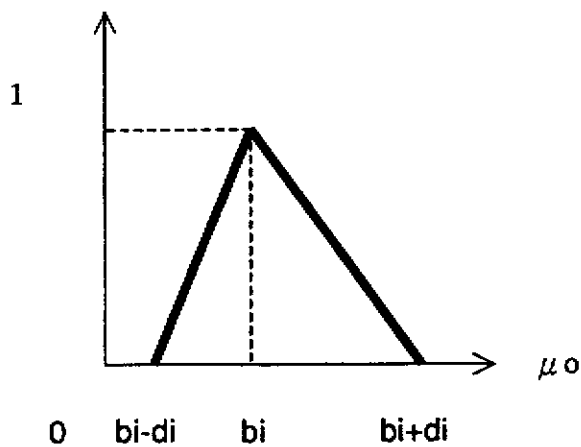
p_{RISK} ：風險之忍恕值，假設為參數規劃表中最大值與最小值之差距。

其成本及風險目標與風險之隸屬函數如下：



(C) Narashiman 法

同 Zimmermann 法，利用 Verdegay 法所做的如表 2-4 之參數規劃表，選取基本期望值及忍恕值，建立目標之隸屬函數，假設為三角隸屬函數($b_i - d_i, b_i, b_i + d_i$)



本文所建立的數學模式如下：

$$\begin{aligned}
& \text{Max } \alpha \\
& \text{s.t} \\
& [Z_i - (b_i - d_i)] / d_i \geq \alpha \text{ for some } i \\
& b_i - d_i \leq Z_i \leq b_i \\
& [(b_i + d_i) - Z_i] / d_i \geq \alpha \text{ for other } i \\
& b_i \leq Z_i \leq b_i + d_i \\
& \alpha \in [0, 1] \text{ and } x \geq 0
\end{aligned}$$

其中：

α ：隸屬度

b_i ：成本及風險目標之原目標值，假設為參數規劃表中之最佳值

d_i ：成本及風險目標之最大可接受離差，假設為參數規劃表中
差與最佳值之差距。

三、結果與討論

3-1 地下水傳流模擬結果

由於水力傳導係數、孔隙率及軸向擴散係數…等參數之不確定性，造成地下水傳流空間上分佈的不確定。因此，本研究利用蒙地卡羅及克利金分佈所產生的十個隨機場，模擬產生濃度分佈之不確定，隨後將十個隨機分佈場共 1920 (192 × 10) 筆的濃度值及整治 30 年期間每年暴露的濃度值，並計算其空間及時間的平均值與標準差，以其對數常態分佈 (log-normal distribution) 輸入優選模式中，以蒙地卡羅法處理此參數之不確定，其結果如表 3-1 及表 3-2 所示，其中各整治方案為本研究所選取比較之對象，分述如下：

(1) Natural attenuation

考慮污染物因移流、延散及吸收吸附(本研究假設為線性吸附)的過程造成污染物的衰減效應。

(2) Pump and treat (a)、(b)、(c)

考慮抽水率及回注率為 $26.49\text{m}^3/\text{day}$ ，a、b、c 三者抽水井及注入井的配置位置如圖 2-3。

(3) Bioremediation (a)、(b)

a 為以三價鐵來降解污染物，而 b 則以零價金屬鐵來處理污染物。

(4) Air sparging (a)、(b)

利用注氣井將 10mg/L 濃度的氧氣持續以 $26.49\text{m}^3/\text{day}$ 的速率注入地下含水層中，以促進污染物被微生物分解，a 與 b 的位置如圖 2-3 的 A-及 C-的位置。

Table 3-1 PCE concentration distribution

Remediation technology	Mean concentration (ppm)	Concentration Std. (ppm)
Natural attenuation	0.026483	0.329497473
Bioremediation a)	0.016499576	0.155766
Bioremediation b)	0.01870893	0.168588
Air sparging a)	0.011023354	0.130770387
Air sparging b)	0.01031488	0.129325501
Pump and treat a)	0.015097	0.127626
Pump and treat b)	0.012717	0.1166
Pump and treat c)	0.013118	0.110805

Table 3-1 為 PCE 於各整治技術中分佈情況，其結果顯示自然復育法的平均濃度值最高 (0.0265mg/L)，生物復育法次之 (0.0165~0.0187mg/L)，其次為抽出處理法 (0.0127~0.0151mg/L)，而注氣法的平均濃度值為最低 (0.0103~0.0110mg/L)。

Table 3-2 TCE concentration distribution

Remediation technology	Mean concentration (ppm)	Concentration Std. (ppm)
Natural attenuation	0.008591	0.10442179
Bioremediation a)	0.00557	0.05176598
Bioremediation b)	0.00557032	0.051766
Air sparging a)	0.00315355	0.03932631
Air sparging b)	0.00179629	0.02683929
Pump and treat a)	0.004911	0.043189
Pump and treat b)	0.004694	0.057822
Pump and treat c)	0.004079	0.034653

表 3-2 為 TCE 於各整治技術中分佈情況，其結果和 PCE 相似，平均濃度最高為自然復育法 (0.00859mg/L)，生物復育法次之 (0.00557mg/L)，其次為抽出處理法 (0.0041~0.0049mg/L)，而注氣法的平均濃度值為最低 (0.00180~0.00315mg/L)。此外，就相同的整治技術而言，生物復育法中以三價鐵的效果比零價鐵的效果來得好，抽出處理中 A 的位置處理效果是較差的，注氣法也顯示 A 的位置效果較不好，在其他條件皆相同的情形下，可說明該位置的捕捉效果不如其他位置。

兩污染物平均濃度最高皆為自然復育法，探討其原因不難發現，自然復育法屬於被動式的復育法，在濃度去除的效率上自然不如其他復育方法，但若曝露時間內其濃度標準(或風險值)能達到安全的標準，自然復育法仍是可以選擇的復育技術。

將所得濃度分佈(表 3-1 及表 3-2) 代入風險模式計算，可得四氯乙烯及三氯乙烯合成之風險分佈結果，如表 3-3 所示。

Table 3-3 Risk distribution

Remediation technology	Mean risk	10% percentile risk	90% percentile risk
Natural attenuation	1.70×10^{-5}	1.92×10^{-7}	2.75×10^{-5}
Bioremediation a)	1.38×10^{-5}	1.49×10^{-7}	1.95×10^{-5}
Bioremediation b)	2.05×10^{-5}	1.70×10^{-7}	2.26×10^{-5}
Air sparging a)	7.40×10^{-6}	8.29×10^{-8}	1.16×10^{-5}
Air sparging b)	7.39×10^{-6}	5.40×10^{-8}	1.12×10^{-5}
Pump and treat a)	1.05×10^{-5}	1.79×10^{-7}	1.72×10^{-5}
Pump and treat b)	8.45×10^{-6}	1.37×10^{-7}	1.45×10^{-5}
Pump and treat c)	8.59×10^{-6}	1.86×10^{-7}	1.61×10^{-5}

平均風險值最高為生物復育法(b) (2.05×10^{-5})，自然復育法次之 (1.38×10^{-5})，其次為生物復育法(a) (1.38×10^{-5})，再其次為抽出處理法(a) ($1.05 \times 10^{-5} \sim 8.59 \times 10^{-6}$)，而注氣法最低 ($7.39 \times 10^{-6} \sim 7.40 \times 10^{-6}$)。整體而言，風險分佈大致都落於 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ 之間，其區間可達 2 至 3 個等級。

3-2 優選模擬結果

對於一多目標規劃法將其描寫如下：

$$\begin{aligned} & \text{Min } Cx \\ & \text{s.t. } Ax \leq b \end{aligned} \quad (3-1)$$

在本研究中，是以蒙地卡羅來計算 A 的參數不確定性，而以模糊規劃法來處理決策上(C、b)的不確定性，故我們可以分別討論如下：

3-2.1 不確定下之多目標規劃

在考量不確定情形下，以隨機規劃與模糊規劃等方法進行多目標優選。首先計算其償付表求得理想解，結果如表 3-4~表 3-6 所示。

Table 3-4 Payoff table (stochastic, 50% percentile)

	Cost	Risk	Decision var. (alternative)
Min Cost	738,256	2.201×10^{-6}	Natural attenuation
Min Risk	1,983,672	6.506×10^{-7}	Air sparging (b)

$$(Z1^*, Z2^*) = (738,256, 6.506 \times 10^{-7})$$

Table 3-5 Payoff table (stochastic, 85% percentile)

	Cost	Risk	Decision var. (alternative)
Min Cost	920,544	1.666×10^{-5}	Natural attenuation
Min Risk	2,469,450	6.274×10^{-6}	Air sparging (b)

$$(Z1^*, Z2^*) = (920,544, 6.274 \times 10^{-6})$$

Table 3-6 Payoff table (stochastic , 95% percentile)

	Cost	Risk	Decision var. (alternative)
Min Cost	1,021,840	6.072×10^{-5}	Natural attenuation
Min Risk	2,802,285	2.721×10^{-5}	Air sparging (a)

$$(Z1^*, Z2^*) = (1,021,840, 2.721 \times 10^{-5})$$

在獲得償付表後，再進行以下的隨機規劃，其結果如下。

(1) 僅考慮 A 之不確定性

本研究隨機規劃係利用傳統的機率來處理不確定性，即給予一平均值及標準差，產生適合之分佈，以建立其機率密度函數，利用蒙地卡羅法，模擬 2000 次隨機挑選數值以代入風險模式及成本模式中計算，其所得的結果也是一機率分佈。對於此分佈再分別以權重法及妥協規劃法等多目標規劃進行規劃，其詳細之分佈圖及統計值可以參閱附錄 A 及 B，此即是考量不確定性下之多目標優選方法；分別取 50% percentile、85% percentile、95% percentile 為比較基準，其結果分別如表 3-7~表 3-12 所示。

Table 3-7 The result of weighting method under stochastic programming
(50% percentile)

Wcost : Wrisk	0.2 : 0.8	0.5 : 0.5	0.8 : 0.2
Objective	1.337	1.843	1.477
Cost(50%)	1,983,672	1,983,672	738,256
Risk(50%)	6.506×10^{-7}	6.506×10^{-7}	2.201×10^{-5}
Alternative	Air sparging (b)	Air sparging (b)	Natural attenuation

由表 3-7 可看出，隨著對某目標重視程度的增加，其目標值有明顯改善的結果。如增加對風險值的關心程度，其整治方案會偏向選擇風險較小的注氣法(b) ($\text{risk}=6.506 \times 10^{-7} < 2.201 \times 10^{-5}$)，而增加對成本的關心程度時，優選結果為成本較低的自然復育法 ($\text{cost}=738,256 < 1,983,672$)，但權重比值在 0.2 : 0.8 與 0.5 : 0.5 時其結果沒有差異，當權重比值增加到 0.8 : 0.2 時，對於結果才有改變。

Table 3-8 The result of compromise programming under stochastic programming (50% percentile)

α cost : α risk	0.2 : 0.8	0.5 : 0.5	0.8 : 0.2
Objective	0.2	0.337	0.2
Cost(50%)	1,983,672	1,329,350	738,256
Risk(50%)	6.506×10^{-7}	1.696×10^{-5}	2.201×10^{-5}
Alternative	Air sparging (b)	Bioremediation(a)	Natural attenuation

隨機規劃下妥協規劃法與隨機規劃下的權重法結果類似，隨著對某目標重視程度增加，其目標值有明顯改善的結果。但其權重比值不同，也有不同的結果，當 α cost : α risk=0.5 : 0.5 時，顯示其優選結果是比較趨於權衡的，因生物復育法的成本小於注氣法 (a)($1,329,350 < 1,983,672$)，而風險小於自然復育法($1.696 \times 10^{-5} < 2.201 \times 10^{-5}$)。

若我們以取 85% percentile 為比較基準，其結果如表 3-9~表 3-10 所示。

Table 3-9 The result of weighting method under stochastic programming (85% percentile)

$W_{\text{COST}} : W_{\text{RISK}}$	0.2 : 0.8	0.5 : 0.5	0.8 : 0.2
Objective	1.337	1.812	1.331
Cost(85%)	2,469,450	1,656,181	920,544
Risk(85%)	6.274×10^{-6}	1.145×10^{-5}	1.666×10^{-5}
Alternative	Air sparging(b)	Bioremediation(a)	Natural attenuation

其結果與考慮 50% percentile 時不同，在權重比=0.5 : 0.5 時其結果即有差異，顯示取不同比較基準，會對決策造成影響。

Table 3-10 The result of compromise programming under stochastic programming (85% percentile)

$\alpha \text{ cost} : \alpha \text{ risk}$	0.2 : 0.8	0.5 : 0.5	0.8 : 0.2
Objective	0.2	0.249	0.2
Cost(85%)	2,469,450	1,656,181	920,544
Risk(85%)	6.274×10^{-6}	1.145×10^{-5}	1.666×10^{-5}
Alternative	Air sparging(b)	Bioremediation(a)	Natural attenuation

妥協規劃法結果顯示，在 $\alpha \text{ cost} : \alpha \text{ risk}=0.5 : 0.5$ 時，為風險與成本彼此權衡(trade off)的結果，故選擇成本小於注氣法(a)(1,656,181 < 2,469,450)，且風險($1.145 \times 10^{-5} < 1.666 \times 10^{-5}$)小於自然復育法的生物復育法(a)。

以下再取 95% percentile 為比較基準，其結果如下：

Table 3-11 The result of weighting method under stochastic programming
(95% percentile)

Wcost : Wrisk	0.2 : 0.8	0.5 : 0.5	0.8 : 0.2
Objective	1.348	1.616	1.246
Cost(95%)	2,758,998	1,021,840	1,021,840
Risk(95%)	$2,749 \times 10^{-5}$	6.072×10^{-5}	6.072×10^{-5}
Alternative	Air sparging(b)	Natural attenuation	Natural attenuation

以不同的比較基準，在 Wcost : Wrisk=0.2 : 0.8 時，其結果並無不同，而在比值改變到 0.5 : 0.5 時，其結果由注氣法(a)改變至生物復育法(a)，再改變至自然復育法，而在 Wcost : Wrisk=0.8 : 0.2 時，其結果也都是相同的，顯示當權重比值在 0.5 : 0.5 時，不同的比較基準會對決策有影響，而當增加百分比時，其結果為選擇降低成本值，但對風險並無改減善的自然復育法。

Table 3-12 The result of compromise programming under stochastic programming (95% percentile)

α cost : α risk	0.2 : 0.8	0.5 : 0.5	0.8 : 0.2
Objective	0.195	0.23	0.2
Cost(95%)	2,758,998	1,842,002	1,021,840
Risk(95%)	2.749×10^{-5}	4.088×10^{-5}	6.072×10^{-5}
Alternative	Air sparging(b)	Bioremediation(a)	Natural attenuation

妥協規劃法結果顯示，在相同的 α cost : α risk 比值下，不同的比較基準其結果並無不同，而 α cost : α risk 之間的改變對結果的影響與權重法相同，整體而言，妥協規劃法的結果是比較一致的。

(2) 以模糊數表達 C 與 b 之不確定性

本研究是以 Verdegay 法的參數規劃表來選取基本期望值及其忍恕值，先考慮模糊的限制式，假設風險的忍恕值為原值(1×10^{-4})的 50%，分別對 $\Theta = 0, 0.1 \dots 1$ 時的不同容忍度的結果，假設容忍度為該表中最大值與最小值的差距，基本期望值為最小值，再利用 Zimmermann 法及 Narasimhan 法，將模糊目標考慮進來，而目標及限制式之基本期望值選取 50% percentile、85% percentile 及 95% percentile 之值。

(A) Verdegay 法(b 之不確定性)

(a) 以權重法處理多目標：

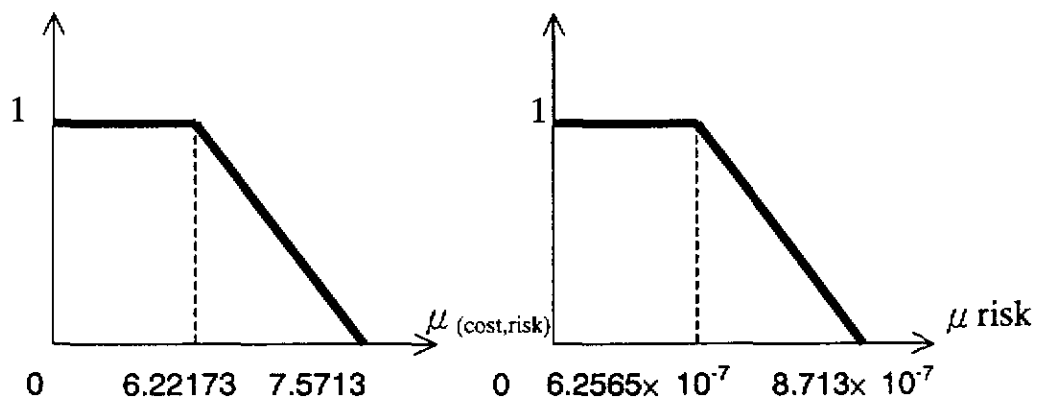
Table 3-13 Parametric programming table
(weighting method, $W_{cost} : W_{risk} = 0.2 : 0.8$)

Θ	Z(cost, risk)	Cost	Risk	Alternative
0	6.97333	1,980,829	8.63×10^{-7}	Air sparging(a)
0.1	6.40108	1,966,400	6.2565 $\times 10^{-7}$	Air sparging(b)
0.2	6.22173	1,960,220	7.7088×10^{-7}	Air sparging(b)
0.3	6.56529	2,011,887	6.4169×10^{-7}	Air sparging(b)
0.4	7.5713	2,000,301	6.7429×10^{-7}	Air sparging(b)
0.5	6.55986	1,971,448	8.7130 $\times 10^{-7}$	Air sparging(a)
0.6	6.91522	1,998,843	6.6666×10^{-7}	Air sparging(b)
0.7	6.34605	2,007,838	7.8154×10^{-7}	Air sparging(b)

θ	Z(cost, risk)	Cost	Risk	Alternative
0.8	6.85858	1,998,045	8.0340×10^{-7}	Air sparging(a)
0.9	6.68317	1,979,924	6.3748×10^{-7}	Air sparging(b)
1	6.64501	2,004,224	7.1963×10^{-7}	Air sparging(b)

Table 3-13 Parametric programming table
(weighting method, $W_{cost} : W_{risk} = 0.2 : 0.8$)

表中，各取目標及風險最小值當做目標及風險隸屬度=1的bi值，並假設忍恕值 p_i 為最大值與最小值之差距，以得目標及風險之隸屬函數。將目標及風險的隸屬函數設立如下：

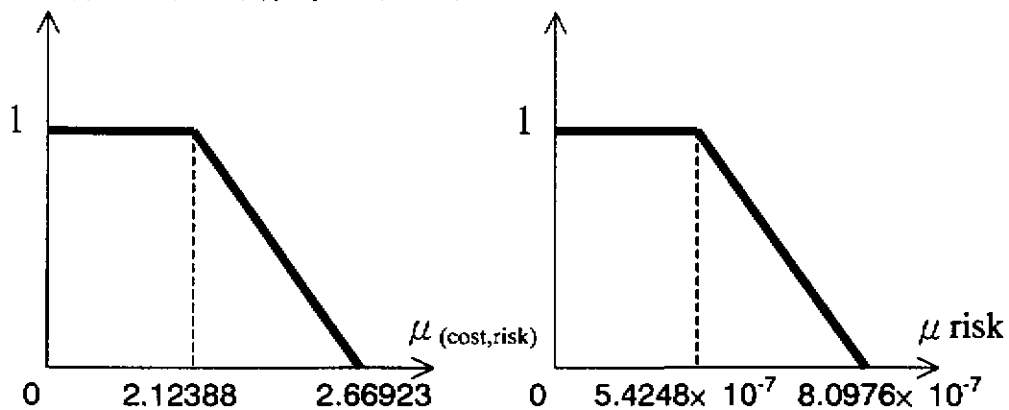


(b) 以妥協規劃法處理多目標：

Table 3-14 Parametric programming table
(compromise programming, α cost : α risk=0.2 : 0.8)

Θ	Z(cost, risk)	Cost	Risk	Alternative
0	2.2838	1,992,943	7.3208×10^{-7}	Air sparging(b)
0.1	2.50761	2,007,761	6.5443×10^{-7}	Air sparging(b)
0.2	2.60546	2,016,871	8.0976×10^{-7}	Air sparging(a)
0.3	2.66923	2,005,336	7.8157×10^{-7}	Air sparging(a)
0.4	2.12388	1,981,756	6.6420×10^{-7}	Air sparging(b)
0.5	2.16581	1,998,191	5.4248×10^{-7}	Air sparging(b)
0.6	2.22695	1,985,592	6.2766×10^{-7}	Air sparging(b)
0.7	2.22948	2,009,032	7.4103×10^{-7}	Air sparging(b)
0.8	2.48396	1,967,142	6.7124×10^{-7}	Air sparging(b)
0.9	2.18077	1,975,107	6.1047×10^{-7}	Air sparging(b)
1	2.49258	1,972,195	7.9358×10^{-7}	Air sparging(a)

目標及風險的隸屬函數如下：



(B) Zimmermann 法(b 及 C 之不確定性)

利用 Verdegay 法所作出的參數規劃表，得不同多目標規劃法下的成本及風險隸屬函數，來計算 Zimmermann 法：

Table 3-15 Use weighting method as expected value

Wcost : Wrisk	0.2 : 0.8
λ	0.4608
Cost	2,020,200
Risk	7.24×10^{-7}
Alternative	Air sparging(b)

結果為注氣法(b)，整治模糊成本為 2,020,200 美金，模糊風險值為 7.24×10^{-7} ，隸屬度(λ)為 0.4608。

Table 3-16 Use compromise programming as expected value

α cost : α risk	0.2 : 0.8
λ	Infeasible
Cost	
Risk	
Alternative	

結果為無可行解，應為目標值之隸屬度無法大於 λ 值，使得無可行解產生。

(C)Narasimhan 法(C之不確定性)

如同 Zimmermann 法，分別以不同多目標規劃法的參數規劃表，選取 b_i 及 d_i 值，其規劃結果如下：

Table 3-17 Use weighting method as expected value

$W_{\text{COST}} : W_{\text{RISK}}$	0.2 : 0.8
α	0.509233
Cost	1,999,458
Risk	6.79×10^{-7}
Alternative	Air sparging(b)

規劃結果為注氣法(b)，其模糊成本為 1,999,458 美金，模糊風險值為 6.79×10^{-7} ，隸屬度(α)為 0.590233。

Table 3-18 Use compromise programming as expected value

$\alpha \text{ cost} : \alpha \text{ risk}$	0.2 : 0.8
α	0.643398
Cost	1,994,910
Risk	5.91×10^{-7}
Alternative	Air sparging(b)

規劃結果也是注氣法(b)，但其隸屬度較高，為 0.643398，模糊成本為 1,994,910，模糊風險為 5.91×10^{-7} ，故以不同多目標規劃法來處理目標其結果並無不同。

四、結論與建議

4-1 結論

4-1.1 多目標規劃之比較

地下水整治決策問題具有多目標性，故本研究以多目標規劃法來進行方案之評選，而多目標規劃的精神在於使每個目標在衝突時彼此都能有權衡得失，使所選擇方案能逼近最佳解，不同的求解技巧各有其優缺點，權重規劃法由於歷史悠久，且計算較為簡易，符合目標權衡的精神，故廣為大家所使用，且也有很多依此而發展出的求解方法，但若決策者的經驗不足，則權重的訂定是一困難，而妥協規劃法之求解精神也在求其妥協解，故二者之規劃法都具有其實用性。研究結果顯示，權重法以不同的百分比為比較基準時，會有不同的結果，妥協規劃法的結果則比較一致，而在現實問題中我們常常會面臨資訊不足的情形發生，是故，要如何在不确定下做決策更是令我們所關心的。

4-1.2 隨機規劃與模糊規劃之比較

隨機規劃與模糊規劃最大的差別在於前者對參數需有詳細的機率分佈，而後者僅需知其大約數值即可，而研究顯示隨機規劃的結果以不同的權重及百分比會對決策結果有影響，主要在注氣法(a)、(b)、生物復育法(a)及自然復育法中變動；而模糊規劃法的結果則主要是注氣法(b)，顯示不同的方法其結果都蠻一致的；且隸屬度介於0.4608~0.6433，都是在最大滿意度下產生的結果，應可給予決策者滿意的答案。

4-1.3 整治方案之優選結果

本研究由於利用隨機規劃及模糊規劃處理不同的對象，即以蒙地卡羅處理物理上參數的不確定，配合模糊規劃法處理決策上的不確定，故並無法對其結果做一適合之分析比較，故僅以處理對象不同來做個說明如下：

$$\begin{aligned} \text{由 3-1 式：} \quad & \text{Min } Cx \\ & \text{s.t } Ax \leq b \end{aligned}$$

Case1：僅考慮 A、C 的不確定，b 為確定($b=1 \times 10^{-4}$)

隨機多目標規劃結果，以權重法當權重比為 0.2:0.8 時主要為注氣法(b)，權重比為 0.5:0.5 時當增加百分比比較基準時由注氣法(a)改變至生物復育法(a)再改變至自然復育法，妥協規劃法在不同百分比比較基準結果皆相同，而 $\alpha \text{ cost} : \alpha \text{ risk}=0.2:0.8$ 時為注氣法(b)， $\alpha \text{ cost} : \alpha \text{ risk}=0.5:0.5$ 時為生物復育法(a)， $\alpha \text{ cost} : \alpha \text{ risk}=0.8:0.2$ 時為自然復育法。

Case2：考慮 A、b、C 的不確定

即以 Zimmermann 法的處理，權重法的結果為注氣法(b)，模糊成本為 2,020,200 美金，模糊風險為 7.24×10^{-7} ，隸屬度為 0.4608；妥協規劃法的結果為無可行解。

Case3：考慮 A、C 的不確定，不考慮 b 的不確定

即以 Narasimhan 法的處理，權重法的結果為注氣法(b)，模糊成本為 1,999,458 美金，模糊風險為 6.79×10^{-7} ，隸屬度為 0.509233；妥協規劃法為注氣法(b)，模糊成本為 1,994,910 美金，模糊風險為 5.91×10^{-7} ，隸屬度為 0.643398。

4-2 建議

- (1) 本研究的重心在於建立多目標與不確定性分析結合的方法學，因此對於地下水傳流模擬部份的考量稍嫌精確性不足，在將復育方案套入模式時的考量也無法完全符合該方案之特性，因此對於現實問題的模擬假設，也將是一不確定的來源之一；若能針對復育方法特性，以專屬的模擬軟體來模擬其結果，如以 T2VOC 模式來模擬注氣法，其預估濃度的準確性也會相對的提高。
- (2) 本研究所採用的 8 個整治方案並未包含所有整治方案之可能性，故若能將所有的整治方案納入，會使整個優選模式架構更趨完備、更具實用性。
- (3) 在本研究中，對於隨機場址數量的決定，若以蒙地卡羅的觀點來看，取十個隨機場尚未足夠表達其隨機性；但在地下水問題中，往往需要龐大的電腦運算時間及能力，並不容易達到，是故許多研究也提出許多解決的辦法，如 Hyun(1997)等人以分層 (zoom) 方式考慮水力傳導係數，而在本研究中更加入地理統計的概念，使其具隨機的意義外，更具有地理上的特性。
- (4) 模糊數學在近年來廣泛的發展，本文則利用文獻上所搜集整理獲得的 Verdegay、Zimmerman 及 Narasimhan... 等方法，由於要將所有模糊規劃法技術納進本研究中實屬不易，故本研究並未包含全部的模糊規劃技術；且在此領域中，並沒有特定的演算法來解決此類問題，文獻上多屬簡單的數理問題，在實際問題的解決上，尚有極廣泛的發展空間。未來，建議可朝向其他學

者研究出來的新技術發展，或者其他如基因演算法、模擬退火法，或灰色理論等，都是值得探討且加以嘗試利用的。

- (5) 權重法及妥協規劃法當中的權重給定往往涉及主觀意識，以至於結果會也有些微差距，建議可以透過層級分析法、專家問卷法等來決定。
- (6) 傳統的機率規劃雖然在處理不確定性問題上具有很好的成效，但前題必須是要對該不確定數值也要有詳細的機率分佈函數，然而，現實問題中往往會缺乏資訊，且若欲得到詳細的機率分佈函數，其成本相對的也較高，故模糊方法就是在此情形下為一個很好的替代工具，並具有計算簡單的優點(Inuiguchi *et al.*, 2000)，不似蒙地卡羅法需有強大的電腦運算能力，在實用上較機率規劃具極高的優勢。
- (7) 為提高預測結果的可信度，可使用更複雜而準確的模式，也可由提高計算的精確度度著手。然而越準確的方法相伴隨的往往是更大量的模式間交叉的計算與資料流處理。而如何解決諸多方法與模式間的結合問題與資料的整合，將會是下一個階段研究的重點，這也是決策支援系統所必須解決的問題。
- (8) 環境規劃與管理是一具整合性的科學，牽涉的範圍很廣，故本研究在許多環節上尚有許多待改進之處，但對於在多目標規劃與不確定性分析的結合方法學上，仍可提供未來朝向此方面研究的一個參考。

五、參考文獻

[中文部份]

- 王裕民，石門水庫水資源調配之研究滿意理論與多目標決策之應用，
中興大學資源管理研究所碩士論文，1995。
- 行政院環境保護署，建立地下水水質監測與污染管制資訊系統先期計畫，EPA-89-G102-03-278，2000。
- 林祥緯，孫志鴻，多準則決策技術與地理資訊系統整合之研究，*國立台灣大學地理學系地理學報*第24期，p29-42，1998。
- 林俊宏，區域水資源調配空間決策支援系統建立之研究，*國立台灣大學農業工程研究所碩士論文*，1999。
- 孫蔭華，地下水污染整治決策中不確定性分析方法之比較，*國立台灣大學環境工程學研究所碩士論文*，2000。
- 陳信雄，廖學誠，詹進發，地理資訊系統及遙測於集水區水文模式上之應用，*台大實驗林研究報告*第10卷第4期，P77-93，1996。
- 曾吉永，模糊多目標決策法在河川水質管理之應用，*國立台灣大學環境工程學研究所碩士論文*，1997。
- 湯忠達，地下水污染之暴露與健康風險評估—以桃園RCA場址為例，*國立台灣大學環境工程學研究所碩士論文*，2000。
- 黃文政，吳建民，吳明洋，多目標決策分析在水資源管理上之運用，*第五屆水利工程研討會論文集(一)*，1990。
- 瑞昶科技，RCA原桃園廠址未來地下水污染整治與管理工作計畫書(核定本)，2000。
- 鄭惠丹，空間決策支援系統之研究—土地利用模式建構輔助系統之設計，*國立臺灣大學地理學研究所碩士論文*，1994。
- 顏廷穎，模糊多目標規劃在林地經營上之應用--以八仙山事業區為

例，國立台灣大學森林學研究所資源管理組碩士論文，1995。

[英文部份]

Air Force Center for Environmental Excellence, Natural attenuation of chlorinated solvents performance and cost results from multiple air force demonstration sites, 1999.

Bit, A. K., M.P. Biswal and S.S. Alam, Fuzzy programming approach to multicriteria decision making transportation problem , *Fuzzy sets and systems* Vol. 50,p135-141,1992.

Bedient, P. B., H. S. Rifai, C. J. Newell, Ground water contamination-transport and remediation, Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, 1999.

Boopathy, R., Factors limiting bioremediation technologies, *Bioresource technology* Vol.74 , p63-67,2000.

Brown, S. D., A compendium of cost data for environmental remediation technologies, US. Department of Energy , Office of Science and Technology, LA-UR-96-2205,1996.

Bennett, D. H. James, A. L. McKone, T. E., Oldenburg, C. M., On uncertainty in remediation analysis : variance propagation from subsurface transport to exposure modeling, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 62, p117-129, 1998.

Ballesteros E., Stochastic goal programming : A mean-variance approach, *European Journal of Operational Research*, Vol.131, p471-481, 2001.

Cohon, J. L., *Multiobjective programming and planning*, New York, Academic Press, 1978.

Cross ,V. ,de Cabello ,M. , Fuzzy interactive Multiobjective optimization on borrowing/lending problems ,*Uncertainty modeling and analysis*,

p513-518,1995.

- Copty, N. K. and A. N. Findikakis, Quantitative estimates of the uncertainty in the evaluation of ground water remediation schemes, *Ground Water*, Vol.38 No.1, p29-37, 2000.
- Chen, J.L., Studies on two remedial systems for groundwater polluted by chlorinated organic chemicals : Taoyuan RCA site, Institute of environmental engineering national chiao tung university, 2000.
- Cullen, A. C., H. C. Frey, Probabilistic techniques in exposure assessment, Plenum Press, New York and London, 1999.
- Clement, T. P., C. D. Johnson, Sun, Y., G. M. Klecka, C. Bartlett, Natural attenuation of chlorinated ethane compounds : model development and field- scale application at the Dover site, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 42, p113-140, 2000.
- Dominique, G., C. Bernard, P. Perrochet, A. Parriaux, Comparing two methods for addressing uncertainty in risk assessments, *Journal of environmental engineering*, Vol.125 No.7 , p660-666, 1999.
- Daniel M., F. Paul , Fuzzy logic ,New York,1993.
- Dettinger, M. D., L. J. Wilson, First order analysis of uncertainty in numerical models of groundwater flow part 1. Mathematical development, *Water Resource Research*, Vol. 17, No.1, p149-161, 1981.
- Eskandari, A., P. Ffolliott, F. Szidarovszky, Uncertainty and method choice in discrete multiojective programming problems, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 69, p335-351, 1995.
- Gavaskar, A. R., N. Gupta, B. M. Sass, R. J. Janosy and Dennis O'Sullivan, Permeable barriers for groundwater remediation : Design, construction and monitoring, Battelle Press, USA,1998.

- Goicoechea, A., D. R. Hansen & L. Duckstein, *Multiobjective decision analysis with engineering and business applications*, Academic Press, N.Y., 1982.
- G.E and Thomson, Groundwater remediation technical practicability evaluation report, Taoyuan site, Taiwan, 1998.
- Hulsurkar, S., M. P. Biswal, S. B. Sinha, Fuzzy programming approach to multi-objective stochastic linear programming problems, *Fuzzy sets and systems*, Vol.88, p173-181, 1997.
- Howard, P. H., R. S. Boethling, W. F. Jarvis, W. M. Meylan, and E. M. Michalenko, Handbook of environmental degradation rates, Lewis. Publishers, Inc. Chelsea, MI.
- Hyun, Y., K. K. Lee, Model identification criteria for inverse estimation of hydraulic parameters, *Ground Water*, Vol.36, No.2, p230-239, 1997.
- Isamara C. A., Y. Akebo, F. Gomide, An approach for fuzzy linear multicommodity transportation problems and its application, *International joint conference on the 4th IEEE International conference on fuzzy system and the 2nd international fuzzy engineering symposium IEEE international conference on fuzzy systems*. Vol. 2, p772-780, 1995.
- Ierapetritou, M. G., J. Acevedo and E. N. Pistikopoulos, An optimization approach for process engineering problems under uncertainty, *Computers & Chemical Engineering* Vol. 20, No. 6/7, p703-709, 1996.
- Inuiguchi, M., J. Ramik, Possibilistic linear programming : a brief review of fuzzy mathematical programming and a comparison with stochastic programming in portfolio selection problem, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 111, p3-28, 2000.
- James, A. L., C. M. Oldenburg, Linear and monte carlo uncertainty analysis for subsurface contaminant transport simulation, *Water resource*

- research*, Vol. 33, No. 11, p2495-2508, 1997.
- Kagan ,N., C. C. B. Oliveira, A fuzzy constrained decision planning tool to model uncertainties in multiobjective configuration problems, *Intelligent systems applications to power systems*,p271-275,1996.
- Kelliher, C. F., L. S. Mahoney, Using monte carlo simulation to improve long-term investment decisions, *Appraisal Journal*, Vol.68, p44-57,2000.
- Kalu, T. Ch. U., Capital budgeting under uncertainty : An extended goal programming approach, *International Journal of Production Economics*, Vol. 58, p235-251, 1999.
- Leon, L. F., D.C. Lam, D.A. Swayne, G.J. Farquhar, E. D. Soulis ,Integration of a nonpoint source pollution model with a decision support system , *Environmental Modeling & Software*, Vol. 15 pp.249-255.
- Lai, Y. J., C.L. Hwang, Interactive fuzzy linear programming, *Fuzzy sets and systems*, Vol. 45.p169-183, 1992.
- Lai, Y.J., C. L. Hwang, IFLP- II : A decision support system, *Fuzzy sets and systems* Vol.54, p47-56,1993.
- Lai, Y. J., C. L. Hwang, Fuzzy Multiple Objective Decision Making: Methods and Applications, Berlin, New York, Springer-Verlag, 1994.
- Lushu, Li, K. K. Lai, A fuzzy approach to the multiobjective transportation problem , *Computers & Operations Research* Vol. 27 , p43-57, 2000.
- Langwaldt, J. H., J. A. Puhakka, On-site biological remediation of contaminated groundwater : a review, *Environmental pollution*, Vol. 107 , p187-197, 2000.
- Liou, T. S., H. D. Yeh, Conditional expectation for evaluation of risk groundwater flow and solute transport : one-dimensional analysis, *Journal of Hydrology*, Vol.199, p378-402, 1997.
- Lo, I. M.-C., W. K.-W. Law and H. M. Shen, Risk assessment using stochastic

- modeling of pollutant transport in landfill clay liners, *Water Science Technology*, Vol. 39, No. 10-11, p337-341,1999.
- Lee, S. I., P. L. Kitanidis, Optimal estimation and scheduling in aquifer remediation with incomplete information, *Water Resources Research* , Vol.27, No.9, p2203-2217, 1991.
- Lefkoff, L. J., S. M. Gorelick, Design and cost analysis of rapid aquifer restoration systems using flow simulation and quadratic programming, *Ground Water*, Vol.24, No.6, p777-790, 1986.
- Martin, V., P. Henk, P. Ivan and W. Herman, Policy analysis for strategic choices in integrated water management ,*Water Science Technology* Vol.34,No 12,pp.17-24,1996.
- Mauricio, M. D., A. H. Karen, Evaluation of waste minimization alternatives under uncertainty: a multiobjective optimization approach ,*Computers & operations research* Vol. 23,p1493-1508,1999.
- McKinney, D. C., M. D. Lin, Pump-and-treat ground-water remediation system optimization, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 122, No.2, p128-136, 1996.
- Marryott, R. A., Optimal ground water remediation design using multiple control technologies, *Ground Water*, Vol.34, No.3, p425-443, 1996.
- Morgan, D. R., J. W. Eheart, and A.J. Valocchi, Aquifer remediation design under uncertainty using a new chance constrained programming technique, *Water Resource Research* Vol.29 No.3, p551-561, 1993.
- Mohammed, W., Chance constrained fuzzy goal programming with right-hand side uniform random variable coefficients, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.109, p107-110, 2000.
- Min, H. , E. Melachrinoudis, Dynamic location and entry mode selection of

- multinational manufacturing facilities under uncertainty : A chance-constrained goal programming approach, *International Trans. Operational Research*, Vol. 3, P65-76, 1996.
- Nielsen, S. S., S. A. Zenios, A stochastic programming model for funding single premium deferred annuities, *Mathematical Programming*, Vol. 75, p177-200, 1996.
- O'Hannesin, S. F., Gillham, R. W., Long-term performance of an in situ "iron wall" for remediation of VOCs, *Ground Water*, Vol.36, No.1, p164-170,1998.
- Palph, H. Sprague, H. J. Watson , *Decision support systems : putting theory into practice*, London, Prentice Hall International, p7-34,1993.
- Petr Ekel , Witold Pedrycz , Roland Schinzingler , Methods of multicriteria decision making in fuzzy environment and their applications, *North American fuzzy information* ,Vol.18,p625-629,1999.
- Rifai, H. S., P. B. Bedient, J. T. Wilson, K. M., Miller, and J. M., Armstong, *Bioplume III Natural attenuation decision support system user's manual version1.0*, U.S. Air Fource Center for Environmental Excellence, San Antonio, TX, Brooks Air Force Base,1998.
- Rizzoli,A. E., W.J. Young, Delivering environmental decision support systems: software tools and techniques, *Environmental Modeling & Software*, Vol. 12, No. 2-3,p237-249,1997.
- Sedivy, R. A., J. M. Shafer, L. C. Bilbrey, Design screening tools for passive funnel and gate systems, *Groundwater Management Research*, p125-133, 1999.
- Starr, R. C., J. A. Cherry, In situ remediation of contaminated ground water. The funnel-and-gate system, *Ground Water*, Vol.32, No.3, p465-476, 1994.
- Sharefkin, M., M. Shechter, A. Kneese, Impacts, Costs, and techniques for mitigation of contaminated groundwater : a review, *Water Resources Research*, Vol.20, No.12,

p1771-1783, 1984.

- Sutardi, C. R. Bector, I. Goulter, Multiobjective water resources investment planning under budgetary uncertainty and fuzzy environment , *European Journal of Operational Research*, Vol.82, p556-591, 1995.
- Tang, J., D. Wang, An interactive approach based on a genetic algorithm for a type of quadratic programming problems with fuzzy objective and resource , *Computers & Operations Research*, Vol 24 ,Issue:5,p413-422,1997.
- USEPA Office of solid waste and emergency response, A citizen's guide to soil vapor extraction and air sparging,1996, April. EPA 542-F-96-008.
- USEPA Office of solid waste and emergency response, A citizen's guide to bioremediation, 1996, April. EPA-542-F-96-007.
- USEPA Office of solid waste and emergency response, A citizen's guide to natural attenuation, 1996, October. EPA-542-F-96-015.
- Vogel, T. M., P. L. McCarty, Biotransformation of tetrachloroethylene to trichloroethylene, dichloroethylene, vinyl chloride, and carbon dioxide under methanogenic conditions, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol.49, No.5, p1080-1083, 1985.
- Werners, B., Interactive multiple objective programming subject to flexible constraints, *European Journal of Operational Research* Vol.31,p342-349,1987.
- Wagner, B. J., Gorelick, S. M., Optimal groundwater quality management under parameter uncertainty, *Water Resources Research*, Vol.23, No. 7, p1162-1174,1987.
- Wagner, B. J., Gorelick, S. M., Reliable aquifer remediation in the presence of spatially variable hydraulic conductivity : from data to design, *Water Resources Research*, Vol.25, No.10, p2211-2225, 1989.

Yeh, H. C., W. E. Kastenberg, Health risk assessment of biodegradable volatile organic chemicals : A case study of PCE, TCE, DCE and VC, *Journal of hazardous materials*, Vol.27, p111-126, 1991.

Zeleny, M., *Multiple criteria decision making*, New York, McGraw-Hill, 1982.

Zimmermann, H. J., Fuzzy sets theory—and its applications, International series in management science/operations research, Boston, Kluwer-Nijhoff Pub. Hingham, MA, USA, 1984.

[網頁部份]

中時奇摩報—即時新聞 RCA 致癌員工自救 將打跨國官司求償

<http://ctnews.kimo.com.tw/2001/04/29/realtime/257048.html> 2001.4.29

行政院環保署 RCA 桃園場址地下水污染整治計劃 a

http://www.epa.gov.tw/waterpollution/RCA_地下水污染整治計畫.doc

行政院環保署--地下水污染防治 b

<http://www.epa.gov.tw/waterpollution/四科/HP1-2.html>

英文環保政策月刊中文版，第二卷第3期 c

<http://www.epa.gov.tw/cooperation/epm/EPM2-3f.html>

行政院環保署—國家環境保護計劃第三篇 d

<http://www.epa.gov.tw/policy/nationproj/37-59.doc>

Federal Remediation Technologies Roundtable, U.S. EPA, Chair, Washington, D. C.

20460, Cost and Performance Catalog of Case Studies,

<http://www.frt.gov/cost,2001>.