

水資源領域因應氣候變遷不確定性之決策機制研究

Study on Water Resources Decision-Making Mechanism under Climate Change Uncertainty

主管單位：經濟部水利署水利規劃試驗所

童慶斌¹

李明旭²

Tung, Ching-pin¹

Li, Ming-Hsu²

¹ 國立臺灣大學生物環境系統工程學系

² 國立中央大學水文與海洋科學研究所

摘要

氣候變遷會導致水文氣象環境之極端化，進而影響水資源系統之供水能力與需求負荷，為確保在氣候變遷影響下，仍能維持水資源供需平衡，必須評估水資源系統之缺水風險，並探討必要之強化措施。近年來，水利署已分別針對北、中、南、東等水資源分區進行研究，分析現況與未來氣候下水資源系統之風險，並評估已規劃水利措施之效用與可能之供水缺口，然後進一步探討可以採用之措施以強化調適能力。為落實氣候變遷調適措施之推動，並確保採取措施之有效性，必須針對氣候變遷研究之不確定性進行分析，並予以量化，最終並將其納入決策之機制。本研究目的在瞭解評估流程之不確定性來源，並提供氣候變遷不確定性對供需影響之量化分析方法，最後提出考量不確定性之決策分析方法。

本計畫主要工作項目包括：(1) 收集與分析氣候變遷不確定性與納入決策之文獻；(2) 探討不確定性來源；(3) 建立氣候變遷不確定性量化分析方法；(4) 評估氣候變遷不確定性對供水能力與調適措施之影響；(5) 發展納入氣候變遷不確定性之決策機制。不確定性來源將探討未來氣候資料的推估、氣象合成資料、水文歷程方程式與參數、水資源系統與管理制度、與經濟社會情境等；不確定性的量化描述方式可能包括區間數、模糊數、或機率函數，將在研究過程建議適當描述方法，並探討供水能力與調適措施受氣候變遷不確定性之影響；本研究最後將探討水資源供需缺口與已規劃之水資源措施在氣候變遷下之不確定性，且探討調適措施對氣候變遷之容忍度，提出考量氣候變遷不確定性之決策與修正機制。

研究成果顯示在氣候變遷衝擊評估時，主要不確定性來源有氣候變遷推估資料來源，包括 GCMs 與 SRES 情境、空間與時間降尺度、水文模式、水資源供水系統動力模式與管理制度以及因社會經濟發展對需水量推估之不確定性。經由氣候變遷不確定性評估流程量化分析不確定性，而後運用計畫評核術(PERT)發展決策機制，確保選定調適方案於目標年達成，滿足第 95 百分位之供需缺口，並評估方案完成時間、檢查方案間順序限制、建立先行式網路圖、找出要徑，及計算路徑完成之機率。

關鍵詞：氣候變遷、不確定性、供水能力、調適能力、水資源管理、決策機制

Abstract

Climate change may result in extreme hydrologic and weather events, which could further influence the ability of water supply and the loadings of water demand. To meet water balance especially under climate change, it is crucial to evaluate the possible risk of a water supply system and its necessary strengthening measures. In recent year, Water Resources Agency has funded several projects to evaluate the risk of water supply systems, the gaps between supply and demands, and their possible strengthening measures under current and future climatic conditions for northern, central, southern, and eastern regions, respectively.

The research of climate change impact, adaptation, and vulnerability assessment has been changed from fundamental science study to application study. To implement adaptive measures and to make sure their effectiveness, it is necessary to study uncertainty and to develop quantification methods. Besides, a decision making process to take the uncertainty into account is also very important. The purpose of this study is to identify the key sources of uncertainty in the above procedure and to develop the quantification methods to describe the uncertainty. At last, this study aims to propose a decision making method to take the uncertainty into account.

The major tasks of this study include: (1) reviewing research papers on climate change uncertainty and decision making process, (2) identifying key sources of uncertainty, (3) developing uncertainty quantification method for climate change study, (4) evaluating the influence of climate change uncertainty on water supply ability and adaptive measures, (5) developing decision making process to take uncertainty into account. The uncertainty of climate change resulting from projections of future climate, weather generation, equations and parameters to describe hydrological processes, water resources systems and management, and economic and social scenarios will be examined in this study. Interval number, fuzzy number and probability distribution are often used to describe uncertainty. This study will suggest the proper method for climate change study and apply to evaluate the influence of uncertainty on water supply ability and adaptive measures. This study will follow the procedure of risk analysis for water supply systems to evaluate the uncertainty of gaps between water supply and demands and to discuss the tolerant level of uncertainty of adaptive measures. At last, a decision making and revising process to take the uncertainty and the tolerant levels into account will be proposed.

Keywords : climate change, uncertainty, water supply ability, adaptive capacity, water resources management, decision-making mechanism.

一、前言

氣候變遷衝擊、脆弱度、與調適評估必須從科學研究的範疇，進化到解決問題或預防問題之應用研究。近年來極端天氣帶來之嚴重衝擊，使大家逐漸體認到要面對未來氣候變遷可能帶來更大之影響，必須實質推動調適方案，若要擬定調適方案之執行計畫就必須合理掌握可能之變因與不確定性。國內外政府單位與學術界均已積極評估氣候變遷之衝擊，並探討可能採取之調適行動方案，然在擬定調適行動方案之推動計畫時，氣候變遷研究本身所具有高不確定性之本質卻限制調適行動方案之推動與落實。氣候變遷衝擊與調適研究可以根據研究成果探討其影響程度與發生之可能性，並採取適當行動。

本計畫針對氣候變遷風險評估之不確定性進行探討，依據前期計畫(三)「強化北部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究計畫」(水規所，民國101年)之研究架構，從氣候變遷情境資料、氣象資料合成模式、水文模式、農業灌溉用水評估模式、系統動力模式、各標的用水空間差異分析、各標的用水缺水風險度推求到水資源調適方案挑選與檢核機制，探討不確定性分析，計畫主要目標包括

- (一) 鑑別氣候變遷風險評估流程中不確定性之主要來源
- (二) 評估不確定性對供水系統承载力與調適方案之影響
- (三) 建立氣候變遷不確定性之量化分析方法與評估工具
- (四) 發展考量氣候變遷風險評估不確定性之決策機制。

二、蒐集不確定性分析方法及水資源管理決策機制相關文獻

相關文獻蒐集部分包含3部分，分別為蒐集與彙整國際面對氣候變遷之不確定性來源探討、蒐集與彙整國際面對氣候變遷之不確定性量化分析方法，以及蒐集與彙整國際面對氣候變遷之水資源管理決策機制。各部份歸納收斂文獻蒐集分析成果，彙總成表呈現文獻蒐集情形，並藉以檢視本計畫之研究方法，以文獻回顧為基礎，確實鑑別不確定性之主要來源，合理建立量化分析方法與決策機制。

經研讀分析後，本計畫將英國氣候變遷調適計畫UKCIP中所囊括之不確定性來源與本計畫之研究架構進行關聯探討。UKCIP將不確定性來源分為4種，環境不確定性、資料不確定性、未來不確定性以及模式不確定性，可彙整囊括回顧文獻之分類。與本計畫研究架構之關聯如圖1，對應不確定性來源分類為氣候變遷推估資料、空間與時間降尺度、水文模式、水資源供水系統動力模式以及社會經濟發展，以5大因子說明主要不確定性來源。

描述不確定性之方法，綜合區間數、機率分布與模糊理論之隸屬函數，參考IPCC報告常採用之方式，以盒鬚圖(Box Plot) 表示建立可能變動範圍，把介於25%、75%百分位與中位數標示於上，提供較多資料可說明資料分布範圍。

在面臨氣候變遷之不確定性下，各國提出的決策方法與考量不一，惟不同國家雖然使用方法不同，然其精神皆接近，決策過程必須同時考量氣候變遷的不確定性，並納入其他考量準則，包括效用、永續性、無悔性、可行性...等，依照各利害關係者之想法與國情需要，可以決定不同準則之權重。本計畫進行分析與探討，結合氣候知情決策分析

與強健決策方法，以歐盟FP7-CLIMSAVE計畫對於強健性之水資源措施之定義—全面考量各個領域之利益，各種空間與時間之公平的措施為原則，並考量水利署近期推動之相關政策與我國國情之需求，據以評估已完成之氣候變遷調適行動方案，探討面對氣候變遷該如何研提適當之候選調適方案，並以實際案例進行說明。

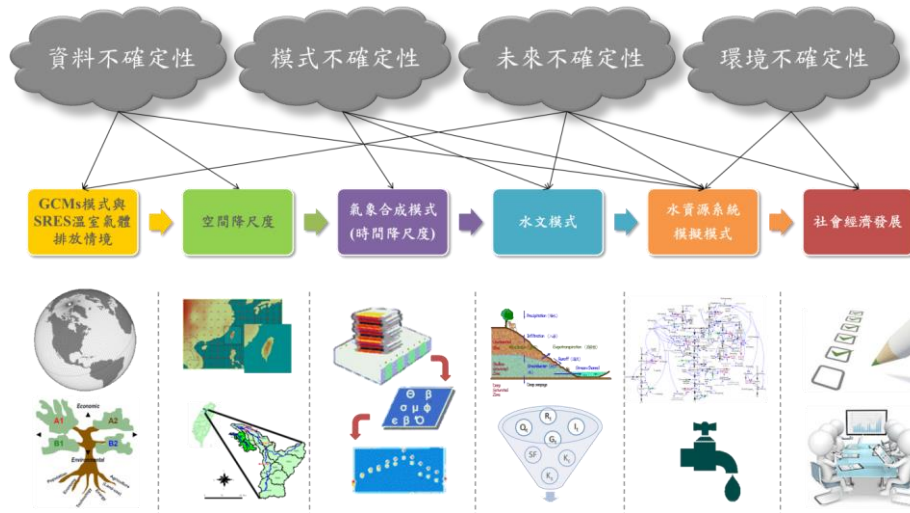


圖1、不確定性來源與本計畫研究架構關聯圖

三、建立不確定性之量化分析工具及評估方法

依據評估步驟、工作項目、研究方法與工具和結果產出進行整理與表列，使整體研究架構更加清楚，並依照不確定性來源探討、不確定性對承载力之影響進行較細部之流程說明。

表1、氣候變遷下水資源風險評估不確定性之流程

評估步驟	工作項目	研究方法與工具	結果產出
(一)風險議題確認與研究範圍界定	1. 蒐集不確定性分析方法及水資源管理決策機制相關文獻	(1) 蒐集國內外相關文獻 (2) 設計表格彙整分析	<ul style="list-style-type: none"> 不確定性之可能來源探討 不確定性之量化分析方法 水資源管理決策機制
	2. 建立不確定性之量化分析工具及評估方法	(3) 建構不確定性量化分析方法與流程	<ul style="list-style-type: none"> 不確定性量化分析方法與流程 不確定性容忍度之評分方法
(二)現況氣候條件風險評估	3. 探討與分析氣候變遷風險評估不確定性來源 4. 評估不確定性對	(1) 釐清不確定性來源： <ol style="list-style-type: none"> 氣候變遷推估資料 空間與時間降尺度 水文模式 水資源系統動力模式 	<ul style="list-style-type: none"> 不確定性之主要來源(敏感因子) 各步驟之不確定性範圍分析 未來供水承载力之不

評估步驟	工作項目	研究方法與工具	結果產出
(三)未來氣候條件風險評估	水資源系統供水承载力之影響	e. 社會經濟發展 (2) 由敏感度分析評估不確定性之影響範圍 (3) 進行蒙地卡羅模擬產生分析樣本，並以盒鬚圖描述供水承载力與供需缺口之不確定性	確定性範圍分析 • 考量氣候變遷不確定性之供需缺口盒鬚圖
(四)確認、評估與實施調適策略	5. 評估不確定性對調適行動方案決策之影響 6. 發展考量氣候變遷風險評估不確定性之決策機制	(1) 分析供需缺口與可能原因 (2) 研提候選調適方案並進行效用分析 (3) 運用多準則排序評估法，包括：效用、不確定性容忍度、急迫性、可行性、無悔性 (4) 由氣候變遷顯著程度和結果可能性決定行動策略權重 (5) 決定調適方案組合，檢視調適方案是否可以滿足 95 百分位數之缺口 (6) 運用計畫評核術(PERT)進行方案排序 (7) 因應未來水資源變動之調整機制	• 考量氣候變遷不確定性之調適方案分析 • 考量不確定性之空間熱點分析 • 候選調適方案之多準則排序結果與組合 • 考量不確定性之決策路徑與推動時程圖 • 因應未來水資源變動之調整機制
(五)監測與檢核			

本計畫利用盒鬚圖來表示供水承载力與供需缺口之變化範圍，探討不同未來氣候推估資料、氣象資料合成、與不同水文歷程可能帶來之不確定性，如圖2所示。



圖2、以盒鬚圖表示供需缺口

而為了評估調適行動方案對不確定性容忍度之大小，首先需界定會影響調適方案之不確定性來源因子，以0或1表示調適方案與不確定性來源因子之關係，接著以供需缺口範圍最劣為標準，依照各不確定性因子對供需缺口的影響大小決定權重，再計算各調適方案之不確定性容忍度得分，供後續決策機制使用。

另外，針對不確定性分析，TaiWAP新增不確定性分析功能選項，包括不同兩型氣象合成模式之選擇、不同蒸發散機制、地下水基流線性與非線性、改變逕流係數CN值、改變覆蓋係數、改變土壤水分限制係數等不同水文歷程之NTU_WH模式。

四、探討與分析氣候變遷風險評估不確定性來源

4.1 氣候變遷推估資料來源

結果顯示溫度變化之不確定性在低溫之月份其變化量不確定性較高，高溫時之溫度變化量推估結果較為一致。雨量部分枯水期之不確定性比豐水期高一些，且3個情境中

不同GCMs模式雨量變化比模擬之不確定性最高皆落於11月。A2情境下不確定性最高為0.83%，豐、枯水期則各為0.49%及0.47%；A1B情境最高為0.88%，豐、枯水期為0.50%及0.67%；B1情境則依序為0.96%、0.48%及0.59%。雨量與氣溫的不確定性對於後續之水文模式模擬、水資源風險評估與承載力分析影響相當大，而此不確定來自於不同的GCM與不同之SRES氣候變遷情境，因此後續之承載力評估將探討不同的GCM與不同之SRES氣候變遷情境對承載力之影響。

4.2 降尺度方法

在空間降尺度上，探討研究地區所採用之網格點是否與鄰近網格點之氣象資料推估差異性，根據分析結果，其相關係數皆不低於0.98，表示空間降尺度具有較小之不確定性。又，比較空間解析度為25km×25km與5km×5km之氣候情境，由相關性分析可知兩者在各GCMs及SRES中互有高低，並無明顯優劣差異，故採用空間解析度為25km×25km應用於後續氣候變遷衝擊評估中，承載力評估亦不探討空間降尺度之影響。

在時間降尺度上，主要探討不同雨量之機率分布對於降雨合成資料之影響。常被採用之機率分布包括指數分布、雙參數韋伯分布、單參數韋伯分布、與Gamma分布等，評估流程需先進行機率分布檢定，選用最多月份通過檢定之機率分布進行降雨資料合成。應用之新竹地區案例為單參數韋伯分布。

4.3 水文模式

綜合各集水區各案例模擬流量分析結果來看，土壤水分限制條件對於整體流量模擬偏差值及模式效率改變皆不敏感；採用二階退水公式估算基流量對於整體流量模擬偏差值的改變不明顯，但會使模式效率下降；降雨日不考慮蒸發散機制則會使得整體流量模擬偏差值上升；CN值的改變對於整體流量模擬偏差值的改變不敏感；作物覆蓋係數的改變對於整體流量模擬偏差值及模式效率皆會造成影響；入滲優先之水文歷程機制對於整體模式效率的改進較為顯著。不同水文歷程機制在流量模擬上均可提供合理之模擬結果，但其在連續低流量之表現不同，雖然入滲優先計算的NTU_WH模式可得到較合理之低流量模擬，然仍難斷定逕流優先機制的GWLF模式結果可以排除，因此，本計畫建議2個水文歷程機制均納入考量。

4.4 水資源供水系統動力模式與管理制度

由於系統動力模式建構基本上是參考管理規則與水平衡，因此，系統動力模式本身不確定性較低，所以本計畫後續之不確定性分析對於承載力與缺水風險之影響將不探討水資源系統動力模式之不確定性。而公共給水配水原則雖然因為利用優選方式決定空間配水原則，然而在考量社會公平性之原則下，以設定缺水率空間差異不得大於5%，經不確定性分析結果顯示，其不確定性較低且不至於影響風險分析結果，因此後續風險分析將不考慮公共給水配水原則之不確定性。

4.5 社會經濟發展

農業需水在水資源規劃過程當中，皆以低標用水量進行規劃評估，而新竹地區經前期研究結果可知，作物生長期之改變，所造成之年需水量變化並無明顯趨勢，故農業用

水不受社會經濟發展不確定性影響。生活需水由地區之人均GDP檢視其變化趨勢關係，新竹地區之關係不顯著，故該區之生活用水不受社會經濟發展不確定性影響。工業需水則以低成長對應B1情境，工業中成長對應A1B情境，工業高成長對應A2情境，降低其不確定性。另，進一步討論A2、A1B及B1之溫室氣體排放情境對應高、中、低成長之需水情境，共6種不同組合，應用於第陸章之結果可能性量化。

五、評估不確定性對供水承载力及調適行動方案之影響

5.1 評估不確定性對水資源系統供水承载力之影響

根據不確定性來源，以3種Case進行供水承载力分析，探討不同GCM及SRES、不同氣象合成模式、與不同水文模式對承载力所造成之不確定性影響。分析結果顯示不同GCMs及SRES之選擇對於評估結果會造成至少30%的水量差異；不同氣象合成模式之選擇會使整體結果被高估或低估，Case B之承载力分析結果為高估；而不同水文模式對於供水承载力之結果會有平均每日約8萬噸之差異，歸因於NTU_WH模式所推估之河川流量較GWLF模式所推估之河川流量為多。

表2、供水承载力不確定性Case說明

Case	GCMs	SRES	雨量機率分布	水文模式設定
Case A	5	3	單參數韋伯分布	GWLF
Case B	5	3	指數分布	GWLF
Case C	5	3	單參數韋伯分布	NTU_WH

5.2 評估不確定性對水資源供需缺口之影響

不同GCMs評估之供需缺口皆比原先供水承载力之不確定性範圍增加每日4萬噸，此4萬噸之來源為A2情境與B1情境之需水量差。比較有無考量氣候變遷目標年120年之供需缺口變化，列表呈現，顯示各GCMs、SRES情境下供水能力大多小於新竹供水系統之需水量，即新竹地區將面臨水資源供需失衡之情形，故需擬定適當之調適策略。另外，考慮不同因子對供需缺口之不確定性影響時，以A1B情境最劣之供需缺口為14萬噸之MIMR模式為基準，以GCM模式因子和水文模式因子所造成之不確定性影響最大。

5.3 評估不確定性對調適行動方案決策之影響

根據候選調適方案進行個別分析，包括大漢溪水源南調新竹、海水淡化廠、生活節約用水、工業節約用水、寶山淨水場供水能力增加、降低農業輸水損失、雨水貯集系統共7個，以了解不確定性對調適行動方案決策之影響，並供後續決策時使用。影響承载力變化之方案包括大漢溪水源南調新竹、海水淡化廠與寶山淨水場供水能力增加，其中，海水淡化廠之承载力效果提升最為明顯，大漢溪水源南調新竹次之，惟寶山淨水場可能受限於寶山一水庫與寶山第二水庫之水源不足，對於新竹整體供水能力幫助非常有限；而其餘影響需水量變化之方案皆可有效緩解缺水情形，達成其目標設定量。

六、發展考量氣候變遷風險評估不確定性之決策機制

為具體形成可執行調適計畫，首先必須確立水資源風險地圖與鑑識熱點區域，然後

擬定調適措施，透過決策機制建立優先執行順序。確保水資源規劃目標年之供需平衡，建立各項措施之執行時間表與最晚推動時機。

6.1 考量不確定性下之空間熱點鑑別

在模擬結果分析時，以5級之可能性進行分析，分析落在不同之衝擊程度之可能性。配合風險分級可建構如圖3之調適行動推動急迫性分析圖。新竹分析結果顯示，生活用水風險度，具調適行動推動急迫性的有湖口和新埔；工業用水風險度，具調適行動推動急迫性的則為湖口和寶山；農業用水所受到的衝擊皆較小，採取觀察、監控行動即可。綜觀三者，新竹地區的熱點為湖口，建議必須立即採取行動。

表3、模擬分析結果可能性分類

分級	結果可能性
5.非常可能(Very Likely)	>90%
4.可能 (Likely)	66%~90%
3.介於可能與不可能 (About as likely as not)	33%~66%
2.不可能(Unlikely)	10%~33%
1.非常不可能(Very Unlikely)	<10%

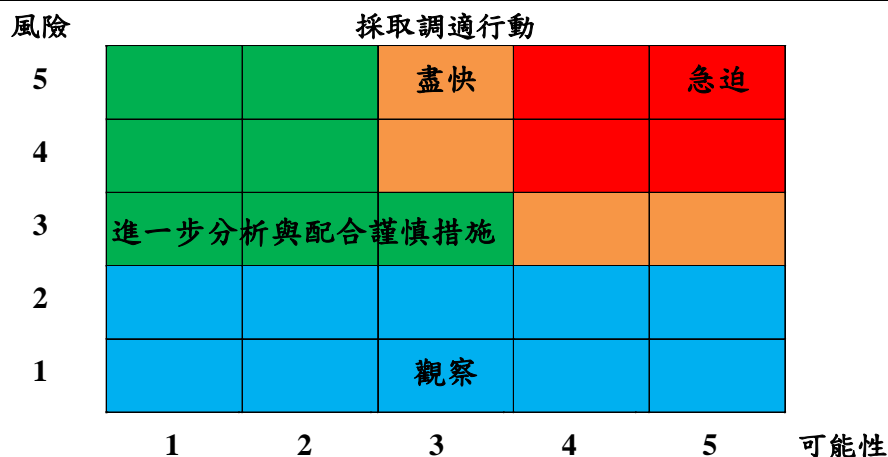


圖3、調適行動推動急迫性分析圖

6.2 考量不確定性下之調適方案排程與修正

依循圖4之決策架構流程，以民國98年為決策機制開始實施之基準年，民國120年為A1B、A2、B1 3種情境下第95百分位的供需缺口須被滿足之目標年，進行供需缺口分析、問卷調查和多準則排序評估。惟本計畫使用計畫評核術計算時間，有既定的目標時間長度22年，與一般計畫評核術不同，但本質上的意義是一樣的，均是尋找最長路徑，故要徑的完成機率仍可用原本的定義和方法計算。

經決策流程評估後，適用新竹地區之調適方案組合依序為工業節約用水、生活節約用水和海水淡化廠，海水淡化廠供水量的第95百分位為12.8萬噸，與工業及生活節水累加共得19.8萬噸，高於缺口15.2萬噸，代表不考慮相依性下水資源缺口可以被滿足，因此停止挑選。並考慮方案組合的相依性，模擬調適方案在未來氣候情境下第95百分位的總效用，模擬結果可得19.3萬噸，故可確定此調適組合可以滿足供需缺口。

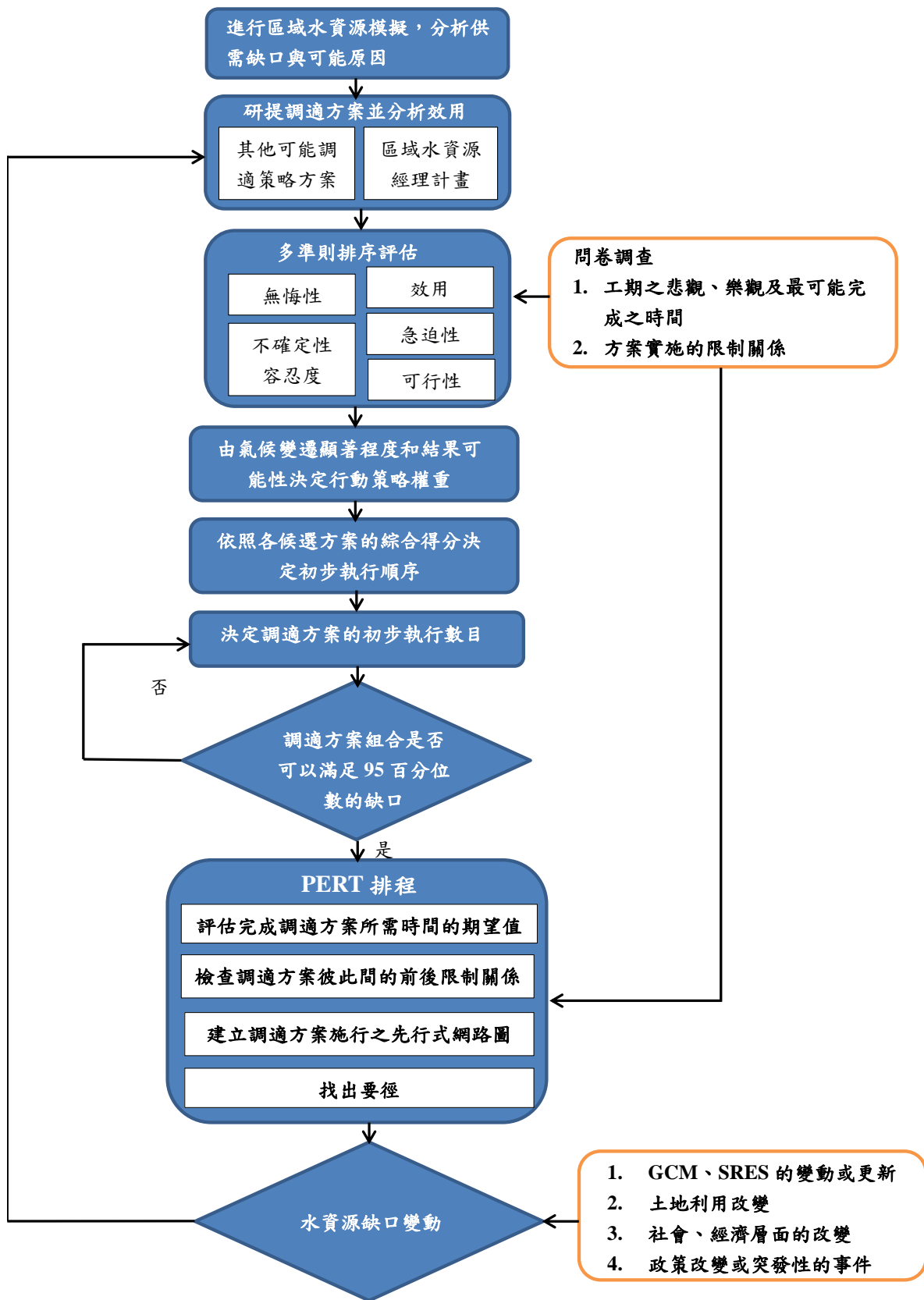


圖4、氣候變遷下水資源風險評估不確定性之決策機制流程圖

在PERT排程中，根據新竹地區調適方案之問卷調查結果，計算調適方案完成之期望時間為32.8年。接著，建立先行式網路圖，因方案的實施網路圖會受到政策考量、經濟、財政、時間等眾多因素影響，本計畫列舉3種可能限制下之排法，如表4所示，並計算各方案所需時間、最晚開始時間與機率。而供需比較圖(圖5)則討論加入永和山水庫支援量，工業節水、生活節水和海水淡化廠同時實行後之供需變化，為使供水量足以滿足需求水量，設定工業與生活節水方案逐年可見成效，並使工業與生活節水方案完成前，永和山水庫每日提供9萬噸水量，在工業與生活節水方案完成後，方降低永和山水庫提供量至4萬噸水量，以鄰近地區之調配滿足供需缺口。

表4、新竹調適方案完成時間之期望值和標準差

		所需時間	工業節水之最晚開始時間	生活節水之最晚開始時間	海水淡化廠之最晚開始時間	滿足缺口機率
(一) 工業節水、生活節水和海水淡化廠同時實行		12.7年	民國111年	民國110年	民國107年	1.00
(二) 海水淡化廠在節水方案結束後方可執行	1. 工業或生活節水完成後	23.5年	民國100年	民國98年	民國109年	0.25
	2. 僅工業節水完成即可執行	22.0年	民國98年	民國110年	民國107年	0.50
(三) 海水淡化廠在工業節水之可行性規劃後開始執行		15.0年	民國100年	民國110年	民國107年	0.99

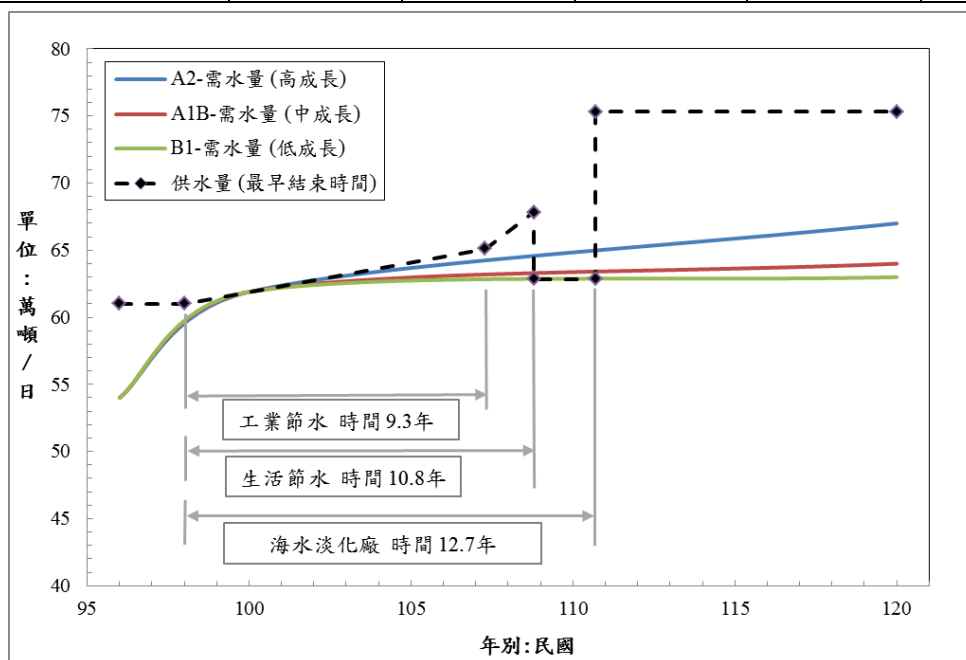


圖5、新竹地區供需比較圖

參考文獻

1. 王天津，2004，非量化評估模糊決策方法之研究，義守大學資訊管理所博士論文。
2. 王如意、黃欣怡、鄭思蘋，2002，模糊分析階層程序法結合灰色系統理論於淹水災損潛勢之解析，臺灣水利，第 50 卷第 4 期。
3. 吳華偉、吳華英，2004，不確定性量化法與不確定性決策，數學的實踐與認識，第 34 卷，第 7 期。
4. 李明旭、童慶斌、張良正，2012，氣候變遷調適科技整合研究計畫—水資源系統脆弱度評估科技發展計畫，國科會。
5. 連宛渝，2000，氣候變遷對台灣水稻灌溉需水量及潛能量之影響，臺灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。
6. 連宛渝，2013，氣象合成與水文模式之發展及因應氣候變遷之供水系統調適能力建構，臺灣大學生物環境系統工程學研究所博士論文。
7. 陳韻如、朱容練、劉俊志、謝佳穎，民國 101 年，「TCCIP 統計降尺度資料應用手冊說明」，國家災害防救科技中心。
8. 童慶斌，2008，氣候變遷對災害防治衝擊調適與因應策略整合研究--子計畫:水庫系統在變遷氣候中之脆弱度評估與支援決策技術發展(I)，國科會。
9. 童慶斌，2009，川流式灌溉系統季節性乾旱應變策略與流程建立，農委會。
10. 楊敏生，1994，模糊理論簡介，數學傳播十八卷一期。
11. 經濟部水利署，民國 98 年，「臺灣地區水資源需求潛勢評估及經理策略檢討」。
12. 經濟部水利署，民國 98 年，「台灣北部區域水資源經理基本計畫」。
13. 經濟部水利署，民國 99 年，「北部旱災潛勢資料繪製示範計畫」。
14. 經濟部水利署，民國 101 年，「水資源開發利用總量管制策略推動規劃」。
15. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 96 年，「強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力(1/2)」。
16. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 97 年，「強化區域水資源永續利用與因應氣候變遷之調適能力(2/2)」。
17. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 98 年，「新竹地區水資源供需檢討」。
18. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 99 年，「強化南部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究計畫(1/2)」。
19. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 100 年，「強化南部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究計畫(2/2)」。
20. 經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 101 年，「強化北部水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力研究計畫」。
21. 臺灣經濟研究院，民國 91 年，台灣地區水資源開發綱領計畫。
22. 廖朝軒，民國 100 年，「雨水貯留收集之水資源利用效益及策略」，財團法人中技社能環智庫叢書 01—氣候變遷下之水資源管理。
23. 盧虎生，民國 101 年，「氣候變遷調適科技整合研究計畫—糧食安全脆弱度評估科技發展計畫」。

24. Alcamo, J., Heinrichs, T., and Rösch, T. (2000). World Water in 2025 - Global Modeling and Scenario Analysis for the 21st Century. Center for Environmental Systems Research.
25. Al-Jayyousi. O. R. (2001). Capacity building for desalination in Jordan: necessary conditions for sustainable water management. *Desalination* 141, 169-179.
26. Anthony P., Richard J.T. Klein, Anne de la Vega-Leinert, C. R., (2005). Taking the uncertainty in climate-change vulnerability assessment seriously., *Geoscience*, 337, 411-424.
27. Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S. and Palutikof, J.P. (eds), (2008). *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC Secretariat
28. Bennett, K.E., Werner, A.T., and Schnorbus, M. (2012). Uncertainties in Hydrologic and Climate Change Impact Analyses in Headwater Basins of British Columbia. *Journal of Climate*. 25(17):5711-5730.
29. Brown, Casey, (2012). Decision-scaling for Robust Planning and Policy under Climate Uncertainty, World Resources Report.
30. California Natural Resources Agency (Eds.) (2009). 2009 California Climate Adaptation Strategy - A Report to the Governor of the State of California in Response to Executive Order S-13-2008.
31. Dessai, S, Hulme M, Lempert R, Pielke R. (2009). Climate prediction: a limit to adaptation, in *Adapting to Climate Change: Thresholds, Values, Governance*. AdgerN, LorenzoniI, O'BrienK (eds). Cambridge University Press: Cambridge, UK.
32. Dessai, S., Wilby R., (2011). How Can Developing Country Decisions Makers Incorporate Uncertainty about Climate Change Risks into Existing Planning and Policymaking Processes, World Resources Report.
33. Diaz-Nieto, J. and R. L. Wilby (2005). A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom. *Climatic Change* 69(2-3): 245-268.
34. Downing, T. E., R. E. Butterfield, B. Edmonds, J. W. Knox, S. Moss, B.S. Piper, and E. K. Weatherhead, (2003). *Climate Change and the Demand for Water*, Research Report, Stockholm Environment Institute, Oxford.
35. Durbach, I. N., and Stewart, T. J. (2012). A comparison of simplified value function approaches for treating uncertainty in multi-criteria decision analysis. *Omega, The International Journal of Management Science*, 40:456-464.
36. Edwards T. L. , X. Fettweis, O. Gagliardini, F. Gillet-Chaulet, H. Goelzer, J. M. Gregory, M. Hoffman, P. Huybrechts, A. J. Payne, M. Perego, S. Price, A. Quiquet, and C. Ritz, (2013). Effect of uncertainty in surface mass balance elevation feedback on projections of the future sea level contribution of the Greenland ice sheet - Part 2: Projections, *The Cryosphere Discuss.*, 7, 675-708

37. Erwan Monier, Xiang Gao, Jeffery Scott, Andrei Sokolov, Adam Schlosser., (2012). A Framework for Modeling Uncertainty in Regional Climate Change. MIT Joint Program On The Science And Policy of Global change.
38. Hall, J. W., Lempert, R. J., Klaus Keller, Andrew Hackbarth, Christophe Mijere, McInerney, D. J., (2012). Robust Climate Policies Under Uncertainty: A Comparison of Robust Decision Making and Info-Gap Methods. *Risk Analysis*. 32(10):1657-1672.
39. Hallegatte S., A. Shah, R. Lempert, C. Brown, S. Gill, (2012). Investment Decision Making Under Deep Uncertainty: Application to Climate Change.
40. Hay, L.E., R.L. Wilby, and G.H. Leavesley (2000). A comparison of delta change in downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 36, 387-397.
41. James V.A., Jr. , Henry D. J., Gordon M. K., (1999). Sequential Climate Decisions Under Uncertainty: An Integrated Framework.
42. Janssen, P.H.M., Petersen, A.C., Van der Sluijs, J.P., Risbey, J., Ravetz, J.R. (2005), A guidance for assessing and communicating uncertainties. *Water science and technology*, 52 (6) 125–131
43. Kay, A. L., Davies H. N., Bell, V. A., and Jones R. G. (2009). Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. *Climatic Change*, 92, 41-63.
44. Kruti Dholakia-Lehenbauer, Euel W. Elliott, (2012). Decisionmaking, Risk, and Uncertainty: An analysis of Climate Change Policy. *Cato Journal*. 32(3):539-556
45. Lettenmaier, D.P., Wood, A.W., Palmer, R.N., Wood, E.F. and Stakhiv, E.Z., (1999). Water resources implications of global warming: a US regional perspective. *Climatic Change* Vol. 43: 537-579.
46. Lobell D.B. (2008). Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030. *Science* 319, 607.
47. Maddalena, R.L.; Mckone, T.E.; Hsieh, D.P.H.; Geng, S. (2001). Influential input classification in probabilistic multimedia models, *Stochastic Environmental Reserch and Risk Assessment*, 15, 1-17.
48. Mckone, T.E., (1994). Uncertainty and variability in human exposures to soil contaminants through home-grown food-A Monte-Carlo assessment. *Risk Analysis*, 14, 449-463.
49. Mearns, L.O. (2010). Quantification of Uncertainties of Future Climate Change: Challenges and Applications. *Philosophy of Science*. 77(5), 998-1011.
50. Meehl, G.A., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J.M., Noda, A., Raper, S.C.B., Watterson, I.G., Weaver, A.J., and Zhao, Z.-C. (2007). Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M.

Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press.

51. Monier, E., Scott, J. R., Sokolov, A. P., Forest, C. E., Schlosser C. A., (2013). An Integrated Assessment Modelling Framework for Uncertainty Studies in Global and Regional Climate Change: the MIT ISDM-CAM (version 1.0). *Geosci. Model Dev. Discuss.* 6: 2213-2248.
52. Morgan M.G., Carnegie Mellon Univ., (2009). Best Practice Approaches for Characterizing, Communicating, and Incorporating Scientific Uncertainty in Climate Decision Making, U.S. Climate Change Science Program Synthesis and Assessment Product 5.2
53. Murphy J.M. , David M. H. Sexton, David N. Barnett, Gareth S. Jones, Mark J. Webb, Matthew Collins and David A. Stainforth, (2004). Quantification of modeling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations, *nature*, vol 430
54. Nkomozepe, T. and Chung, S.O., (2012). Assessing the trends and uncertainty of maize net irrigation water requirement estimated from climate change projections for Zimbabwe. *Agricultural Water Management* vol. 111 August, p. 60-67
55. Park J. (2008), *Assessing Climate Change under Uncertainty: A Monte Carlo Approach*, The Nicholas School of the Environment and Earth Sciences of Duke University.
56. Pizer, W.A., (1999). The optimal choice of climate change policy in the presence of uncertainty. *Resource and Energy Economics* 21. 255-287.
57. Randall A., Capon T., Sanderson T., Merrett D. , Hertzler G., (2012). *Synthesis and Integrative Research Final report: Making decisions under the risks and uncertainties of future climates*, National climate change adaptation research facility.
58. Randall, A, Capon, T, Sanderson, T, Merrett, D, Hertzler, G, (2012). *Choosing a decision-making framework to manage uncertainty in climate adaptation decision-making: a practitioner's handbook*, the National Climate Change Adaptation Research Facility, Griffith University.
59. Refsgaard, J. C., Arnbjerg-Nielsen, K., Drews, M., Halsnæs, K., Jeppesen, E., Madsen H., Markandya, A., Olesen, J. E., Porter, J. R., Christensen, J. H., (2013). The Role of Uncertainty in Climate Change Adaptation Strategies--A Danish Water Management Example. *Mitigation Adaptation Strategies Global Change*. 18:337-359.
60. Robert, L., Nidhi, K., (2011). *Managing Climate Risks in Developing Countries with Robust Decision Making*. World resource report.
61. Sloban P., Simonovic, Nirupama, (2005). A spatial multi-objective decision-making under uncertainty for water resources management., *Journal of Hydroinformatics*, P.117-133.
62. Slobodan P., Simonovic, Rakesh Verma, (2008). A new methodology for water resources multicriteria decision making under uncertainty., *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol33, P.322-329.

63. Southam, C.F., Mills, B.N., Moulton, R.J. and Brown, D.W., (1999). The potential impact of climate change in Ontario's Grand River basin: water supply and demand issues; *Canadian Water Resources Journal*, v. 24, no. 4, p. 307-330.
64. Tung, C. P., Wan-yu Lien, and Wei-Ting Liao, (2012). Producing Daily and Embedded Hourly Rainfall Data by Using a Novel Weather Generator. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*(accepted)
65. Udale-Smith M. (1992). Monte Carlo calculations of electron beam parameters for three Philips linear accelerators. *Phys. Med. Biol.* 37 85–105
66. USGCRP (2009). *Global Climate Change Impacts in the United States*. Thomas R. Karl, Jerry M. Melillo, and Thomas C. Peterson (eds.). United States Global Change Research Program. Cambridge University Press, New York, NY, USA.
67. Valverde, L.A. J., Jr., Jacoby, H., and Kaufman, G., (1998). Sequential climate decisions under uncertainty: An integrated framework. *Environmental Modeling and Assessment*, 4(2-3), 87-101.
68. Van der Keur P., Henriksen, H. J., Refsgaard, J. C., Brugnach, M., Pahl-Wostl, C., Dewulf, A., Buiteveld, H., (2008). Identification of Major Sources of Uncertainty in Current IWRM Practice. Illustrated for the Rhine Basin. *Water Resource Management*. 22:1677-1708.
69. Walker W, Harremoes P, Rotmans J, Van der Sluijs J, Van Asselt M, Janssen P, Kreyer von M. (2003). Defining uncertainty. A conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integrated Assessment* 4 (1), 5-17.
70. Warren, Fiona J., (2004). *Climate Change Impacts and Adaptation: A Canadian Perspective*. Climate Change Impacts and Adaptation Directorate, Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario, 174p
71. Water Utility Climate Change Alliance, (2010). *Decision Support Planning Methods: Incorporating Climate Change Uncertainties into Water Planning*.
72. Webster, M., C. Forest, J. Reilly, M. Babiker, D. Kicklighter, M. Mayer, R. Prinn, M. Sarofim, A. Sokolov, P. Stone, and Wang, C. (2003). Uncertainty Analysis of Climate Change and Policy Response. *Climatic Change*, 62: 295-320.
73. Wilby R.L., and I. Harris, (2006). A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the river Thames, UK, *Water Resources Research*, 42, W04, 419.
74. Wilby, R.L., (2008). *Water, Hydropower and Climate Change*. *Water Management 2008: Climate Change Impacts on Hydroelectric Water Resource Management*, CEATI, Montreal, Canada, October 8-9.
75. Willows R. and Connell R.(eds.), (2003). *Climate adaptation: Risk, uncertainty and decision-making*.