

第一章、緒論

第一節、研究議題之形成

壹、研究動機

一地的經濟發展、農業生產與民生用水皆與區域內水資源的供需平衡息息相關。根據歷年統計資料顯示，台灣地區的年平均降雨量約 2,467mm（自民國 38 年至 93 年）（水利署，2004），是全球平均雨量（約 1,000mm/yr）的 2.5 倍，部份地區每年下雨超過 200 日，是屬多雨的地方（楊萬全，1985：7）。然而台灣面積狹小、河流短促，降雨往往不容易儲存即迅速流入海，再加上降雨時空分配不均，洪枯流量懸殊¹，無法讓水資源的利用達到最有效的方式，若再加上人為過度開發，水源遭受破壞與污染，使得用水供應情形更加惡化。

新竹地區主要的水資源來自於頭前溪，1980 年新竹科學工業園區（以下簡稱園區）尚未建立之前，區域內水源供給尚稱足夠。然而隨著新竹人口的增加以及園區高科技產業逐年漸增的用水需求，在再突顯出新竹地區水資源用水吃緊以及供需失衡的問題。民國 85 年台灣省政府同意以每度 10 元的水價，移用農業用水供台塑六輕使用，所得水費將作為農田休耕補貼。這是國內大規模移用農業用水供工業部門使用之首例（張海琳，1996/01/30）。國內長期以來，農業用水即享有優先權，但生產效益較低。工業用水效益雖高，但近年來飽受缺水之苦，使得轉移農業用水供工業用水，而工業用水戶合理補貼農業的作法被認為是「工業拿到便宜用水，農民利益又能確保」的雙贏效益（張海琳，1996/01/30）。

新竹地區挪用農業用水最明顯的案例發生在民國 85 年、91 年、92 年與 95 年。民國 85 年 2 月份受到全台枯水期影響，園區每天用水量約 4 萬噸，主要供水源寶山水庫蓄水量僅夠一個月使用，在這期間如果天不降甘霖，則投資數千億元的半導體產業將面臨無水可供生產運轉的困境，為解救此次斷水危機，政府將竹東圳水源全部導入寶山水庫供民生和工業用水（李珣瑛，1996/03/11）。民國 91 年的乾旱，水利署考量園區用水因素，宣佈春耕時期頭前溪灌區停灌，休耕面積為 4,339 公頃（林家琛，2002/12/12）。民國 92 年為近四十年來大乾旱，頭前溪約 5,100 公頃一期稻作全面休耕（黎慧琳，2003/12/31），停灌範圍依據行政院農委會公告，為新竹農田水利會頭前溪舊港圳以下灌區²。民國 93 年因旱象，經濟部配合桃竹苗地區用水需求，先是宣布桃園、新竹頭前溪灌溉區一期稻作，合計約 41,000 公頃農田全面休耕，除加強限水外，另取得頭前溪十口抗旱井水權，每日供水

¹頭前溪主流之竹林大橋水文站（A=441.38 平方公里）年計流量約 7.19 億立方公尺，枯水期（10 月至翌年 3 月）約 1.78 億立方公尺，佔年計流量之 25%，豐枯季流量相差懸殊（吳約西，2002：11）。

²經水字第○九二○二六○一五五○號、農林字第○九二○○三○○七○號，中華民國九十二年一月三十日。

10,000 噸供園區使用³。民國 95 年頭前溪乾旱，經濟部決定沿線灌溉的 5,065 公頃農田全部休耕，移用灌溉水源供應大新竹民生用水，這已是近 5 年來頭前溪灌溉區第 4 次休耕停灌，支援民生與工業用水（黃宏璣，2006/02/18）。可見政府在乾旱時期挪用農業用水的作法越來越普遍。然而，園區缺水警訊固然可藉農田休耕移用灌溉水以共度旱災，但是「休耕時機」以及「移用補償金額」之決定，在缺乏健全水市場機能下，往往衍生出「休耕時機拿捏不定」、「補償金額太高」或農民與政府爭奪用水等問題（？，2002：29）。如民國 85 年挪用竹東圳農業用水以供工業用水的事件，一度引發農民的不滿，認為這是強迫停耕而非自願休耕，最後政府以允諾提高移用水源補貼金才平息爭議（李珣瑛，1996/03/11），往往政府宣告休耕時期不定，使得以幫人代耕為業的農民因休耕而失業，損失慘重。

為了解決用水問題，政府單位興建寶山第一水庫以及寶山第二水庫（以下簡稱寶一、寶二水庫）來供應園區以及民生用水，並增加攔河堰等構造物以提高用水量。然而新建之寶二水庫雖可年增加供水 $103 \times 10^6 \text{ m}^3$ （北區水資源局，2004：12），未來竹科三期加上已編定中的新竹生物醫學園區、遠東紡織汽電共生擴建等計畫只會讓未來用水需求增加。與台灣其他大型水庫相比，現有水庫所能調節水量有限。在無大型水庫、埤塘及蓄水池儲水的情況下，雖有攔河堰的設施，但構造物低矮，且以提高水位便於引水為目的，調節水量有限，興建大型水庫儲存降雨雖為調節水資源的方式，其利雖多，但興建經費龐大且會完全改變水系生態環境與水文環境（楊萬全，1996：17），尚需要審慎評估。因此研究區為潛在的缺水區，在最大水資源量固定的前提下，了解現有的水資源情況以作最有效的利用，成為管理水資源之基礎課題。

新竹地區用水問題之相關研究，國內雖有頭前溪水資源調配問題的相關研究，然數量有限，一般而言非探討水質即水量，且研究主題多與增加水源的開發、農業用水調撥以及休耕補償機制有關，缺乏一個基礎且整體的水資源狀況分析。水量與水質，實際上是不可分開討論的。就水量而言，新竹地區屬於地下水補注相對快速的地區（韋煙灶，2003），可開發的程度與調配使用的方式尚有許多可調整的空間。就質來說，新竹地區從上游油羅溪與上坪溪到頭前溪主支流眾多，若上游地區水質不佳則會影響下游的可用水量，如山區豪大雨影響河水濁度，使得自來水公司淨水處理困難而無法正常供水（林全洲，2006/06/10）。水量與水質事實上也相互影響，如民國 93 年 2 月份，因久旱不雨，使得大部分頭前溪水源支援園區供水，新竹縣竹北豆仔埔溪因缺乏水源挹注，水中溶氧量減，造成上千尾魚死亡，讓水域周遭傳出惡臭，影響生活品質（羅綰綸，2004/02/02）。

依環保署的標準，不同用水標的水質標準不同，地面水與地下水、上游與下游空間差異往往影響水質的好壞。因此在水資源之管理前提之下，水資源的基礎調查就顯得相當重要。了解各標的用水之使用量以及不同空間的水質狀況等基礎調查與數據的提供成為本研究之重要目的。

³經濟部農委會經水字第○九二○四六一五三○號農林字第○九二○○三一八八八號中華民國九十三年一月七日。

貳、研究主題的選擇

水資源的規劃與利用與人的活動息息相關，牽扯到政治、經濟和水利工程的層面，基於研究動機，本研究主要的目的是從水資源本身基礎特性出發，著眼於水量的計算與水質的分析，以提供基礎數據為主。

就空間性而言，分為地面水與地下水兩方面探討。就主題而言，分為水量與水質兩部份，水量又可區分為最大水資源量、農業用水量、工業用水量、生活用水量（簡稱為三大標的用水量）；水質分為河川水質分析、水圳水質分析以及淺層地下水（自由含水層）質分析。本文更進一步時、空間觀點來統攝歸納水資源的整體狀況，最後整合水質與水量資料，以永續經營的概念作為水資源管理的最終目標。

參、研究區的選定

新竹地區為一都會區，85%的人口集中在新竹、竹南兩平原及竹東丘陵的台地區，區域內較大的河川有鳳山溪、頭前溪、客雅溪與中港溪。本研究選擇以頭前溪流域作為研究區，主要是基於下列四點原因：

- 一、就自然環境而言，頭前溪流域範圍最廣且深入山地，從降雨量、逕流係數及總逕流量來看（表1-1-1），未來具有調配水資源效用之流域以頭前溪流域最為優越（韋煙灶，2003），不僅如此，區域內的水庫如寶一水庫以及2005年完工的寶二水庫為下游平原區以及園區用水供應來源，其水源皆來自於頭前溪流域，其優越性為新竹地區其他較大河川無可批敵者。
- 二、就人文環境而言，在園區設立以前，新竹地區水資源雖非十分充裕，但尚可供應而不至於匱乏，因而過去無水資源不足的問題。隨著人口增長以及園區建立之後增加的龐大用水量，使得新竹地區水資源問題日益嚴重，因此探討此區的水資源問題實為有意義的一項研究。

表1-1-1 頭前溪、客雅溪、鳳山溪與中港溪之河川特性與水文特性表

河川	起點	標高 (m)	逕流係數 ^a	流域面積 (km ²)	歷年平均雨量 (mm)	歷年年逕流量	
						逕流水深 mm/yr	逕流量 10 ⁶ m ³ /yr
頭前溪	霍喀羅大山	2233	0.69	565	2305.2	1584.9	893.9
鳳山溪	那結山	1200	0.61	259	2054.0	1261.0	326.6
客雅溪	油山	95	0.49	57	1671.0	826.0	56.6
中港溪	鹿場大山	2616	0.62	451	2139.0	1358.0	634.2

a 逕流係數=（逕流水深）/（降水量）

資料來源：經濟部水利署第二河川局（2006）；水利署，2004；石再添等（1994）；韋煙灶（2003）。

- 三、以地下水研究而言，鳳山溪流域地下水資源雖可自給自足，然而湖口工業區使用地下水情形十分複雜，對於非法抽水的工廠以及抽水量、鑿井資料的蒐集均有研究上的困難；竹東丘陵的地質屬於以頁岩為主的卓蘭層，及以砂、頁岩為主的香山相頭嵙山層，

為地下水可開發量較少的地區，對於新竹地區水資源的供給不具備決定性的影響。新竹平原區屬「頭前溪—客雅溪地下水系」，區域內為新竹地區主要農耕區，水文地質條件佳，淺層地下水層主要為砂、礫石組成，透水性屬優良（ $10^1 \sim 10^3$ m/day），其補注速度快，地下水流動量為 446.00×10^6 m³/yr，為新竹地區地下水資源最為豐富的地區（韋煙灶，2003：148；151），故討論研究區地下水資源供給以頭前溪流域最為可行。

四、新竹市與新竹縣其他地區相比，地位特殊，為工商業繁榮與人口集中區，以新竹平原為研究區，對於頭前溪流域水資源的利用情形來說，具有討論的代表性與意義。

肆、研究範圍

綜合上述四點與研究主題的選擇，可歸納出研究區的詳細範圍如下（圖 1-1-2）：

一、地面水調查區：包括區域「最大水資源量」的估算、農業灌溉水圳水質與頭前溪河川水質調查分析，因此以頭前溪流域為一個單位，面積約 565.97km²，包含頭前溪主流與支流上坪溪、油羅溪。水圳則以頭前溪流域之灌區為主⁴。

二、地下水調查區：本研究選擇以新竹平原為地下水研究區。由於新竹平原為第四紀地質區的沖積層⁵，人口最為集中、地下水使用量多且範圍集中，已具有地下水質樣本的代表性。地下水研究區界的劃分包含地質構造線和地形兩者。本區屬「頭前溪—客雅溪地下水系」（楊萬全，1997a：12），位於新店斷層—竹東斷層（九讚頭）以西部份。由於頭前溪流域與客雅溪流域地下水在進入新竹平原之前，各自向西移動。進入新竹斷層以北和以西的新竹平原後，成為同一個地下水域範圍。因此新竹斷層以北及以西的新竹平原區實際上是匯流了兩流域以及丘陵與台地的地下水，地層變位量大於 100m，能有效分隔斷層兩側的地下水水流形式，可作為水文地質區的分界線（韋煙灶，2003：9）。地下水研究區詳細範圍如下：

頭前溪以北與鳳山溪流域的分水嶺既無構造線通過，且地形平坦，無法以地表起伏作為分水嶺，但可取兩流域中間位置及研判微地形來劃分，因此約略可將竹北市中正西路作為頭前溪與鳳山溪分水嶺，包含下游舊港地區。東側以新竹斷層一小段及標高 25m 作為分界；南以新竹斷層為界。

伍、研究目的

由於頭前溪流域日益嚴重的水資源分配問題，用水需求日增，往往在水量不足的情況下發生用水爭奪的事件。然而，頭前溪流域的水資源使用與開發還有許多可調配的空間，因此掌握基礎的數據可望在未來調配水資源時，能將水資源的效益發揮到最大。本研究所

⁴頭前溪流域水圳調查範圍至下游一帶，範圍雖跨越研究區，但源水來自頭前溪。作者為了更明確了解上下游的空間差異，因此選取樣點納入資料的分析。

⁵台灣地區的水文地質與地下水資源的關係，經長期研究的結果已大致可確知：「地下水資源有開發價值的（指出水量大於 100m³/day）僅限於第四紀的未固結地層，包括全新世的沖積層、堆積層和更新世的台地堆積、紅土台地堆積層、頭料山層火炎山相等。第四紀及其以前的地層，除漸新世的五指山層，以及主要向斜軸兩側附近以外均無地下水開發價值」（楊萬全，1997a：11）。

欲了解的基礎數據是從流域內本身的資源多寡著手，進而探討資源的使用情形。要掌握區域內究竟有多少水可以用？因此掌握區域最大水資源量為本研究之首要目的。然而最大水資源量並不等於降水量，還必須扣掉蒸發散量才等於水資源。水資源的利用方式部分為河川引水或儲存至水庫調節或地下水的開發，三者總和即為總用水量，剩下不能儲存利用的最後流入海。總用水量，可將用水類型劃分為農業、工業與生活用水三個標的（圖1-1-1）。各標的在地面水或地下水的使用量為何，是本研究所欲了解的重要課題。掌握更新與更精確的數據才能進一步對區域水資源的從新分配提出建議。

同為研究目的的另一項重點，是探討水質。水循環過程中，從上游到下游入海，往往會受到自然條件差異與人為因素的影響，而使得水質發生變化。依據環保署的標準，灌溉用水與一般民生用水水質標準不同，地面水與地下水系統差異大，污染的速度與自淨能力不同，加上不同的時間與空間也會造成水質的差異。因此將不同的空間與時間所測得的河川水質、水圳水質及地下水質相互比對分析，不但能夠了解水質的變化以進一步分析影響水質的原因，更能進一步將水質分級，依不同的用水標的對水質標準不同的需求，重新分配水資源的使用優先順序或分配方式（圖1-1-1）。

最後將所得的水質與水量資料綜合比較，以作為新竹其他地區未來用水的參考。以下為本研究所歸納出四點研究目的：

- 一、估算頭前溪流域之最大水資源量；
- 二、估算研究區農業、工業與生活用水量（含地面水與地下水）；
- 三、了解研究區地面水與地下水之水質的時、空間分布特性；
- 四、依據用水量與水質的時、空間關係提出研究區水資源分配原則。

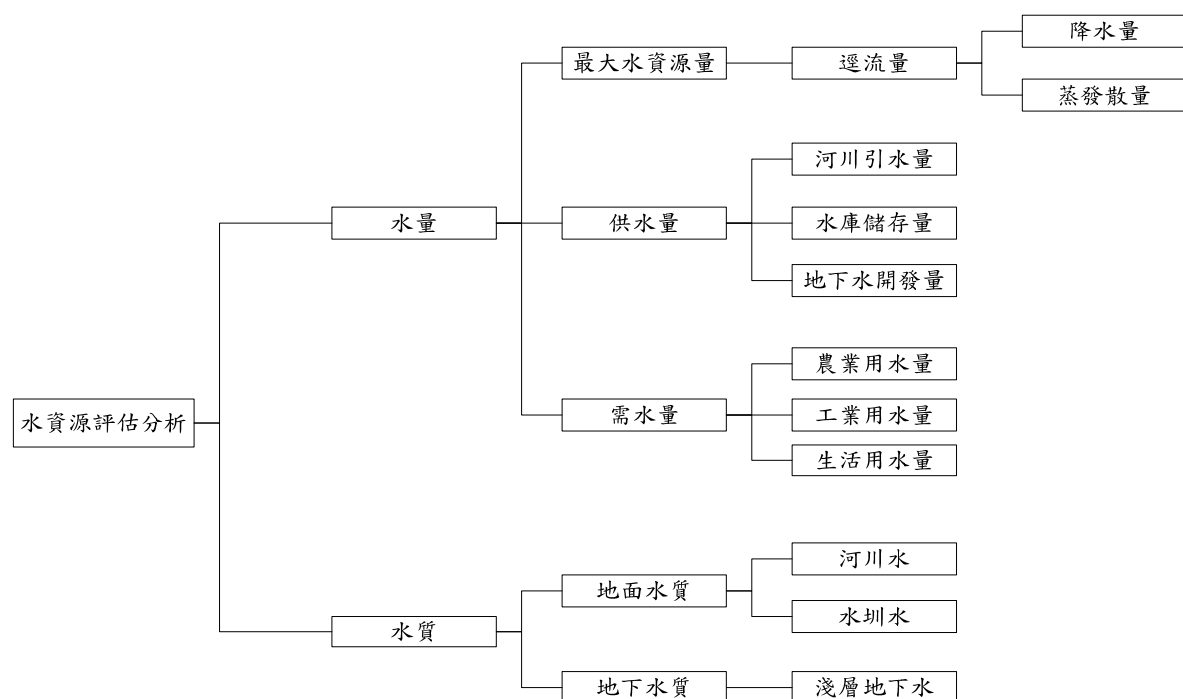


圖1-1-1 研究因子分析圖

陸、研究觀點

本研究是站在水平衡（water balance）的基礎上來進行，水平衡是研究地表上某依區域或地區，在一定期間內，水的流入、流出的均衡狀態（楊萬全，1993：94）。依據長期水平衡的關係式： $P=ET$ （蒸發散量） $+RO$ （逕流量），首先可以了解研究區地面水與地下水的循環狀況。本研究是先以水平衡求得整個頭前溪流域的水量，而後續估算各標的用水量也是使用水平衡的觀點來進行。

本研究所使用的另一個觀點為地理學的空間分析。研究中所討論的空間關係有許多層面，以垂直的空間觀點而言，地面水與地下水即為此空間關係中重要的一環。流域內水資源的空間關係可劃分為供水區與需水區兩者來探討。由於頭前溪流域型態為上游集水區廣且深入山地，而下游為狹小的平原區，空間上相當的不均質。因此回應前文的論述，就水量而言，上游所供應的水量如何使得下游需水區能有足夠且能有效利用的水資源；就水質而言，保護上游地區乾淨的水源以確保下游地區使用而使得可用水資源不至於萎縮，實為重要的課題。

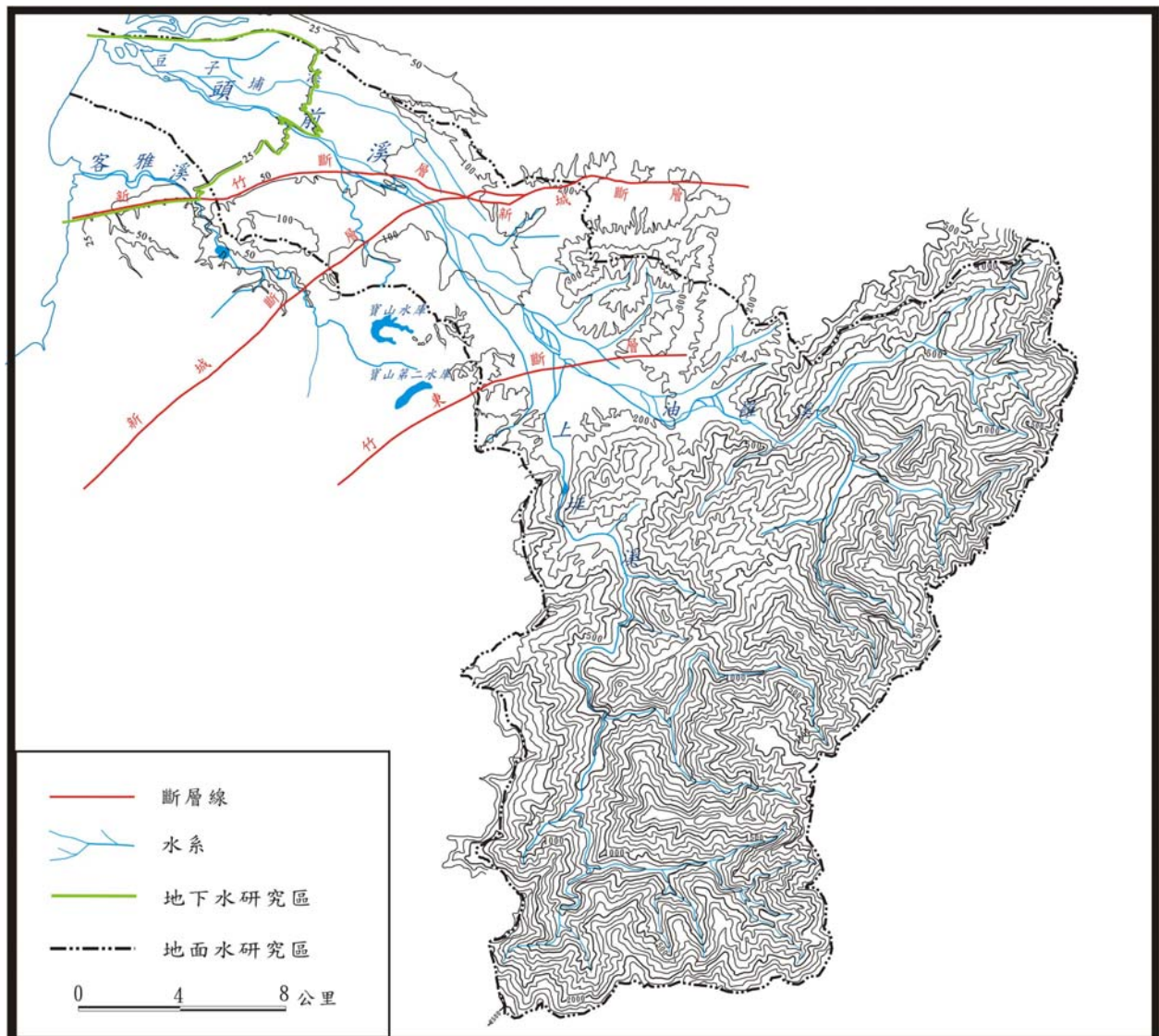


圖 1-1-2 地面水與地下水研究區圖

第二節、文獻回顧

壹、頭前溪流域水資源問題相關研究

新竹地區由於園區的發展，使得用水量大增，變成一個潛在的缺水區。在此之前，區域內無明顯水資源不足的問題，因此研究探討頭前溪水資源的議題是近年來才逐漸展開。

新竹頭前溪流域水資源問題多在國內相關論文或政府出版文獻中提出，目的多針對頭前溪用水問題提出解決方案。如徐元棟（2003）針對此一問題來研究乾旱時期頭前溪水系農業用水移用問題，就農業用水調度移用的經歷實務提出建議，面向著重在探討移用過程之法令規章、調度機制、補償費用等的休耕政策與農業用水釋出等議題。黃炳煌（2001）以竹東圳為個案，認為水資源利用方向可以「水資源開發」（圳路輸水容量加大）及「減少灌溉面積」兩者配合，所增加之「可供自來水量最大」。羅健洲（2001）認為在水資源趨近於飽和的同時，應可考慮興建對環境生態衝擊較小之攔河堰配合既有水庫聯合運用。評估河川下游之部分未控制的流量，而在水庫下游適當地點興建攔河堰及取水口，先引用未控制流量，當未控制流量不足以滿足需水量時（發生於枯水期間），始由水庫放水供應，而水庫放水量須適時及適量，才能達到水資源充分利用之目標。盧慶龍（2003）則透過水市場的經濟學角度以案例分析的方式探討現行農業用水移用與補償方式的潛在問題，並利用農場作物用算分析法推估新竹地區一、二期稻作農業用水的價值。最後再以 2002 年農業用水移用與補償的實例，進一步探討移用農業用水的損失及合理的補償標準。其最終目的也是針對新竹地區水量不足的問題來提出水資源利用的建議。韋煙灶（2003）在探討新竹及竹南地區地下水劃分時，對地下水的可開發量做了一番評估，認為新竹平原淺層地下水的可開發量約為 $446.00 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ ，受壓地下水約為 $1.54 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ ，淺層地下水尚有可開發空間。回顧與頭前溪流域相關文獻，可發現研究區地下水研究文獻甚少。

其他文獻中，雖無全面性的針對頭前溪整體水資源作評估，但在文獻章節中，也評估了部分的用水量分析或水質檢測結果。就地面水用水情形而言，一般農業用水與生活用水皆有河川局、自來水公司以及農田水利會的資料統計。工業用水情形較為複雜，對新竹用水影響較大的竹科用水量則在文獻中皆有個別提出探討。如陳柳均（2001）與楊清和（2002）皆分析竹科歷年用水量及用水量的成長趨勢，前者利用報紙及科學工業園區管理局統計資料加以整理，得出 1990 至 2000 十年間，園區實際用水量成長 140% 以上，預計 2004 年園區每日用水量達 16 萬噸。後者以問卷調查及訪談結果，重新推算園區最終用水量。頭前溪流域水質分析中，有錢大陵（1990）調查頭前溪流域舊港圳水質狀況以及韋煙灶（2003）對新竹平原地下水作檢測；水庫部分則有文獻探討寶山水庫水質狀況及污染源的探討（蔡政賢，1993；鄧紹助，2003；王冠蕙，2003）。

貳、水資源研究相關文獻回顧

同為水資源研究範疇的文獻，國內外均針對區域內水資源特性與用水情形來探討。南非 Crocodile 河流域在有限的水資源下，面臨了人口成長壓力與土地利用的改變，因此水質的管理變成水資源管理政策的關鍵議題（Ashton *et al.*, 1995）；同樣位在南非，西部乾旱

臺地上則完全依賴地下水作為生活及農業用水。由於地面水的缺乏與不足，使得南非乾旱地區地下水資源的提供對於農村社區重要性與日遽增，因此研究當地地下水有利於水資源管理（Adams *et al.*, 2001）。國內相關文獻也有針對不同區域水資源概況提出相關數據與研究，如徐達蓉（1984）對台中港特定區水文特性、水質與水量作研究，進而提出區域內水資源可利用的方式；楊萬全對於台灣不同區域水資源的研究有許多相關著述，方法多依水平衡的概念，結合水量與水質兩方面來探究水資源問題。如高屏溪與屏東平原水資源量豐沛，應以減少無效放流、興建水庫貯水為重，並配合適當的地下水價及水利法規以提高地下水的效率（楊萬全，1997b）；高雄地區無水資源開發條件，且自來水水質差，水資源開發最有可能是依靠鄰近的高屏河流域（楊萬全，1998）。翁蕙君（2000）則深入調查台南地區農業用水型態的特色，瞭解用水情形以利於未來水資源調配的參考。劉振宇（2002）論台灣地區農業水質狀況，再提出水質改善方式與農業水資源管理辦法。不同地區，水資源管理方式不同，大多數學者皆是依據區域內資源特性與用水需求來評估資源開發管理的方式。

參、水質、水量研究與調查方法之回顧

國內學者在探討區域內水資源時，會探討最大水資源量的多寡，以收支平衡的概念來處理此問題。桑士偉法（Thorntwaite method）所求的可能蒸發散量來推估逕流量為普遍使用的方式（徐達蓉，1984；張智欽，1986；楊萬全，1997b；韋煙炆，2003）。地下水可開發量的推估多以抽水試驗來進行（張智欽，1986；洪華君，1989；吳素蓮，1994）。

各標的用水量推估可分成實際供水量與估算量兩者。目前各標的用水量已由經濟部水利署統整台灣地區各年度之「蓄水設施營運水量」、「工業用水量」、「農業用水量」、「生活用水量」及「各標的用水量」等統計報告及彙編各年報統計資料於「用水資料庫」中，資料年份是從1999開始至2005年。其推估的方法除了包含自來水供水數據以外，估算值是以單位面積（或單位頭數、產量）與各函數間（人口、面積、營業額等）成積關係來推估可能用水量。相同方式有黃信茗（2003）利用衛星影像資料，以同年四個不同時期的影像配合現場調查經驗，將該區作物分為七個類別，依據分類之後各作物的類別面積配合作物生長型態以及耕作制度等基本資料，輸入製作完成灌溉用水量程式，計算出作物所用水量；羅慶瑞（1995）曾利用問卷調查法，將本省排名前六大行業迴歸出基於三大變數：土地面積（ m^2 ）、員工人數（人）及產值（萬元/年）的個別用水量函數，再依此用水量函數之平均面積權重，配合工業局及水資會的有關土地面積及年度工業用水量資料，建立出本省及四大分區之「年度—區域工業用水量」及「工業面積—區域工業用水量」之函數關係。最後，再依此「土地面積—區域工業用水量」函數推估全省工業區完全開發之總用水量。此法較能符合研究需求，但勢必需要克服的困難在於，以問卷調查訪問工廠回覆情形可能不高或是得不到確切的數據等等。推估地下水抽水量的方法的相關文獻甚少，可以政府單位所有的水權資料為依據來做調查，但以此法推估地下水用水量時，還必須考慮到無水權登記之非法抽取水量。如彰濱工業區地下水抽水情形有水權與非法抽水之比為1：9（劉振宇，1992：62）。

分析水質方法有許多，有以指標性的評估方式如WQI及RPI (Pesce & Wunderlin, 2000；任家宏 等，2004；于淑芬 等，2005)，或是以環境水質標準分述不同水質項目的濃度，目的多為了瞭解水質與環境和公共健康的關係 (Reijnders *et al.*, 1998)。若評估大量且無規律性的化學數據，為了得到一個有意義的結果，許多學者會以多變量分析統計方法來分析 (Ismail & Ramadan, 1995；Güler & Thyne, 2004；McNeil *et al.*, 2005；Shrestha & Kazama, 2007)。其他的水質分析方法，較常見分析項目有SAR及Piper水質菱形圖法。錢大陵 (1990) 研究新竹地區頭前溪舊港圳的灌溉水質，所檢測的項目分為鈣、鉀、銨、磷酸根等對農作物有利的成分以及對農作物生長有害的成分鎂、硼、鐵、鈉、酸性碳酸根、氯根等。其方法是以連續12個月的偵測，最後以鈉吸著率 (SAR)、電導度與美國鹽性研究所所創之灌溉水質圖解法來判斷；劉乃綺 (1988) 以SAR判斷北港地區地下水灌溉水品質。一般國內文獻中大多使用鈉吸著率 (SAR) 來分析，Sarah (2005) 研究地中海型氣候區土壤團塊對於氣候的回應研究中，是以鈉鉀吸著率 (SPAR) 來探討，原因是因為該研究區內鉀離子與其他離子比較起來是相對重要的，此為Sarah結合研究區特性所發展出的特殊表現法。本研究主要目的是探討灌溉水中鈉的含量對農作物的影響，且SAR在灌溉水水質標準中，有明確的限值，故以鈉吸著率 (SAR) 來表現，較適用於本研究之目的。

水質菱形圖表現法最初是出現在Emmons和Harrington (1913) 以及Carreno (1915) 的記述之中，而Hill (1940) 則用兩個三角形以及所夾出的菱形來表示 (山本莊毅，1989：379-380)。Piper使用的圖與Hill、Langelier和Ludwig類似，但也有許多相異之處 (Piper, 1944: 915)，其表現的是稍加修改後的三角圖 (山本莊毅，1989：380)。利用Piper水質菱形圖可幫助了解水中溶解物質的成分、水流經過的地區水中特性的變化以及相關的地球化學問題。此種圖法，現在日本與美國也很常用。不過，在美國，是按照Piper最初所提倡的，用圓的直徑或半徑來表示成份的總量。而在日本，則不用此種表示方法 (樣本一多，圓形重疊在一起就很難辨認)。在日本是用 I、II、III、IV來區分 (圖1-2-1)，不同人會有不同的編號方法。Piper圖用在分析結果的考察上相當優異，不過雖然此種圖形相當強調水質的差異性與類似度，卻不能表示出離子真正濃度 (山本莊毅，1989：380)。

Güler (2004：184)在觀察東南加州Indian Well-Owens河谷區地下水質的變化時，將5個主要水文化學類型點於Piper圖上以觀察沿著地下水所流經的地區，水質的改變情形為先從Ca-Na-HCO₃至Na-Ca-HCO₃接著為Na-HCO₃-Cl到鹽度較輕的Na-Cl水質最後變為濃鹽度的Na-Cl水質。Adams *et al.* (2001) 藉著主要的陰陽離子點於Piper菱形圖上的位置來區分地下水的水質類型以及分類；彭宗仁 (2003：70-79) 將水質數據以Piper菱形圖法作為探討濁水溪沖積扇補注區地下水化學相的分類及演化的依據。

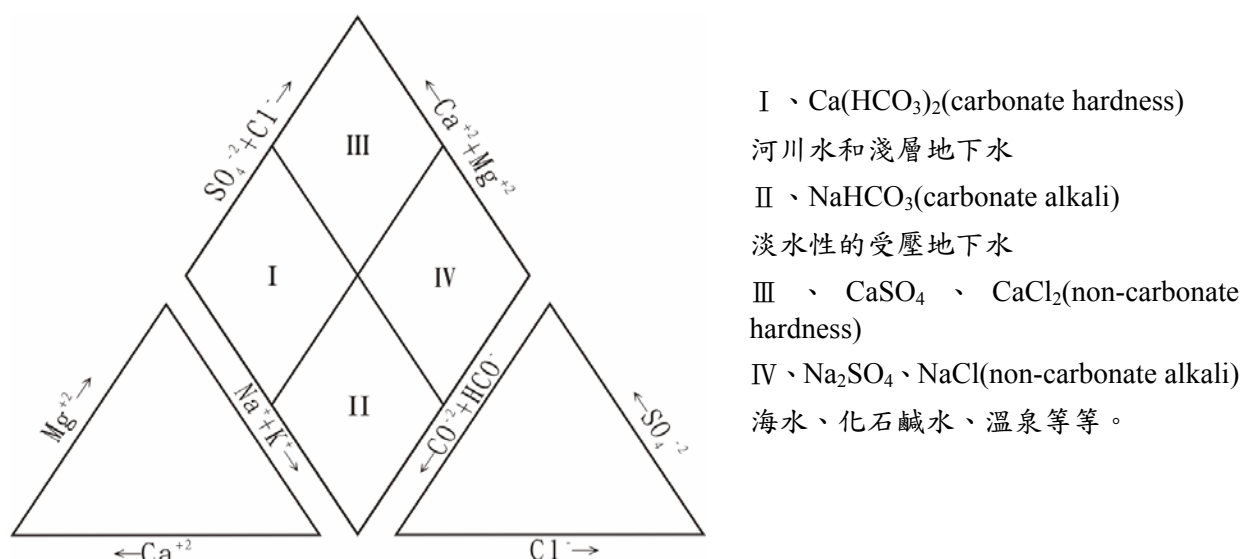


圖1-2-1 日本常用的Piper水質圖分區

研究一區的水資源，最終目的無非是希望能夠達到水資源的永續利用。永續的水資源管理是一個概念，強調考慮現在以及未來長時期的需求（Loucks, 2000：3），事實上就一流域內水資源經營管理角度而言也有許多學者針對其研究區來提出不同的建議，ORR（2006）以氣候與土地利用改變的角度並利用P-Q及Q/P的關係來觀察西北英格蘭倫河集水區降雨和逕流的變化，進而提出河流與集水區經營管理的想法。其發現集水區內逕流增加而儲存量減少的情形，因而提出應減少上游過度放牧所導致的植被稀疏問題並恢復下游區農耕土壤以及溼地，以利地下水的補注量；另外Yair（2002）研究北內戈夫（Negev）沙漠區，提到了在多山的Negev高地沙漠發現了廣大的農耕系統遺址，是從山坡地區集合漫地流而引到平原區，且農耕系統只集中在入滲量甚少的岩石區，因而認為乾燥地區的水資源管理方式應該是以留住地面逕流為主而非增加土壤入滲量，以地下水的方式儲存水分。

第三節、研究架構與研究方法

本研究之架構分為水質與水量及水資源評估三大面向（圖 1-3-1）。水質探討又可區分為地面水質（頭前溪河水、水圳水）以及地下水質；水量探討對象為最大水資源量、供水量與各標的地面水、地下水用水量；水資源評估分析為綜合水質與水量資料所做的討論。河川水質探討的目的，是以生活用水標的面向做考量、水圳水質則以農業用水標的為面向、地下水則以生活用水標的以及農業用水標的為主。研究流程見圖 1-3-2。

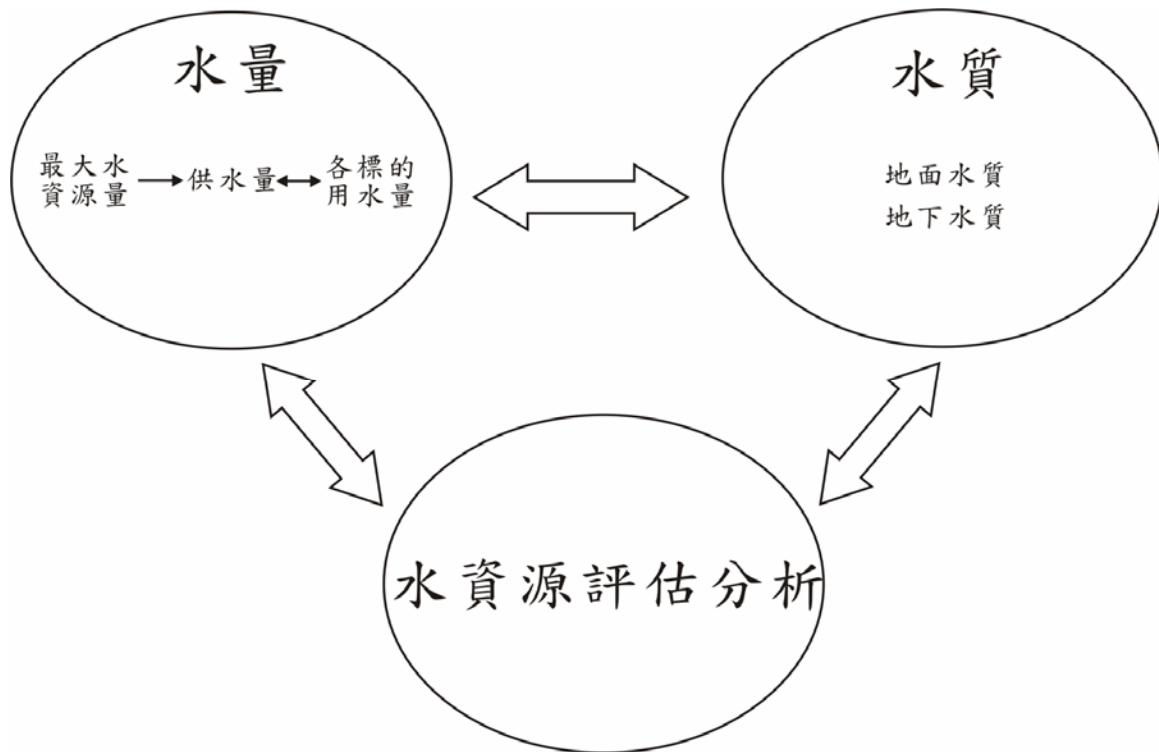


圖1-3-1 研究架構圖

壹、水質調查

一、河川水質

河川水質資料引用行政院環保署所設置之水質測站與監測值，再依國內常見之水質污染指標—河川污染指標（RPI）與河川水質指標（WQI）兩者作為本研究河川水質評估標準。其詳細內容如下：

（一）水質測站與監測值之資料描述

行政院環保署所設置水質監測點以頭前溪主流四個監測點、上游支流上坪溪三個監測點與油羅溪一個監測點為主（表 1-3-1），月監測項目為溶氧、生化需氧量、懸浮固體、氨氮、酸鹼值、大腸桿菌群、電導度、水溫、化學需氧量、氯鹽；季監測項目有總磷、總氮、硝酸鹽氮、亞硝酸鹽氮、總凱氏氮、鎘、鉛、六價鉻、銅、鋅、汞、砷、硒、錳、銀，資料年份從 1983 年至 2006 年。本研究主要是根據河川污染指標（RPI）與河川水質指標

(WQI) 的主要項目來做分析，並探討 2005 年 1 月至 2006 年 8 月不同月份水質的差異，以及上、中、下游水質變異的空間特性。

表 1-3-1 頭前溪流域地面水水質測站

測站名稱	測站地址	河川名稱	經度	緯度
竹林大橋	新竹縣竹東鎮 123 號公路	頭前溪	121° 05'39"	24° 44'53"
中正大橋	新竹縣竹東鎮麻園肚	頭前溪	121° 03'24"	24° 47'00"
頭前溪橋	新竹市東區 1 號公路	頭前溪	121° 00'01"	24° 49'17"
溪洲大橋(滿雅取水口)	新竹市北區滿雅街	頭前溪	120° 58'46"	24° 49'29"
瑞豐大橋	新竹縣竹東鎮上坪	上坪溪	121° 07'11"	24° 40'01"
寶山水庫取水口	新竹縣竹東鎮東峰路	上坪溪	121° 06'12"	24° 41'17"
竹東大橋	新竹縣竹東鎮 3 號公路	上坪溪	121° 06'21"	24° 43'18"
內灣吊橋	新竹橫山鄉內灣村	油羅溪	121° 11'00"	24° 42'07"

資料來源：行政院環保署《行政院環保署環境資料庫》，2006。

(二) 水質評估指標

1. 河川污染指標 (RPI, River Pollution Index)

河川污染指標為環保單位最常使用的河川水質指標。此指標乃早期引自日本的河川污染分類法，它是以溶氧量(DO)、五日生化需氧量(BOD₅)、懸浮固體物(SS)及氨氮(NH₃-N)等四項水質參數加以評定，其點數和積分分類如表 1-3-2 所示：

表 1-3-2 河川污染指標(RPI)等級分類表

污染等級 項目(mg/L)	A:未(稍)受污染	B:輕度污染	C:中度污染	D:嚴重污染
溶氧量(DO)	DO ≥ 6.5	6.5 > DO ≥ 4.6	4.6 > DO ≥ 2.0	DO < 2.0
生化需氧量(BOD ₅)	BOD ₅ ≤ 3.0	3.0 < BOD ₅ ≤ 4.9	4.9 < BOD ₅ ≤ 15	BOD ₅ > 15
懸浮固體(SS)	SS ≤ 20	20 < SS ≤ 49	49 < SS ≤ 100	SS > 100
氨氮 (NH ₃ -N)	NH ₃ -N ≤ 0.5	0.5 < NH ₃ -N ≤ 0.99	0.99 < NH ₃ -N ≤ 3.0	NH ₃ -N > 3.0
點數	1	3	6	10
積分(S)	S ≤ 2.0	2.0 < S ≤ 3.0	3.0 < S ≤ 6.0	S > 6.0

資料來源：行政院環保，2006

說明：1.表內之積分數為 DO、BOD、SS 及 NH₃-N 點數平均值。

2.DO、BOD、SS 及 NH₃-N 均採用平均值。

3.計算公式為 $RPI = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 Si$ (RPI：污染指標值、Si：污染點指數、i 水質項目)

2. 河川水質指數 (WQI, Water Quality Index)

WQI 由成功大學環工所的溫清光教授所發展出來，屬綜合水質指標，以一無因次之數值代表河川水質之優劣。任家宏 等 (2004：146-147) 利用 RPI 外，也採用 WQI 指數來探討高屏河流域的水質變化。

WQI 於 1990 年以 NSF 指標為基礎，採用「修正後之 Delphi 意見調查技巧」，對國內 134 位不同專業背景之專家學者進行問卷調查，借重專家學者之專業知識，以決定所採用水質參數及其權數，同時亦配合國內「地面水體分類及水質標準」為制定水質點數之

依據(表 1-3-3)，並參考其他國家之水質標準將缺項補足，較適合台灣地區河川之特性。2006 年修正的 WQI，包含溶氧(DO)、五日生化需氧量(BOD₅)、pH、氨氮(NH₃-N)、總磷(TP)、總大腸菌數(TC)及懸浮固體物(SS)等七項水質參數。本研究利用這七項水質原始數據，透過溫清光教授所建立的程式計算這七項水質的綜合性指數 WQI，範圍為 0~100 分(溫清光，2006)。根據 WQI 的級分給予不同的水質評語(表 1-3-4)，以瞭解河川水質狀況並進行不同水質採樣點之比較。

WQI 與 RPI 相同，均屬綜合水質指標，RPI 的優點是計算方法簡單易懂，也是環保署在評估台灣河川水質好壞的方法。然而 RPI 僅選取四項參數且 RPI 值介於 1 至 10 之間，範圍較小，無法適切反應水質之變化，再者此法引自日本，未必真正適合台灣地區河川特性。且四項參數等權重，無法反應參數間不同之重要性；而 WQI 優點是針對台灣的水質標準且借重國內學者的專長而制訂，選取 7 項水質參數，考慮較為周延，且各參數之權重不同可反應各參數不同之重要性(環保署，2006)。因此本研究考慮兩指標上的限制與研究上的周延性，將相同的數據以不同的指標分析，最後再將所得結果綜合討論，以利資料得到最適切的說明。

表 1-3-3 WQI 之水質點數計算式

水質參數	權重	單位	點數 (qi)	
溶氧	0.23	mg/L	$0 < x < 0.7$	$-70.707x^3 + 195.96x^2 - 4.5707x$
			$0.7 \leq x < 1.4$	$-416.67x^4 + 2041.7x^3 - 3858.3x^2 + 3243.3x - 910$
生化需氧量	0.19	mg/L	$0 < BOD \leq 5$	$0.6078 \times B^3 - 3.5651 \times B^2 - 9.610 \times B + 100.59$
			$5 < BOD$	$1123.6 / [1 + 99.9 \times \exp(0.2 \times B)]$
pH	0.16	-	$2 < pH \leq 5$	$3.3333 \times pH^2 - 15 \times pH + 16.67$
			$5 < pH \leq 10$	$-12.562 \times pH^2 + 187.78 \times pH - 601.17$
			$pH > 10$	$6.6667 \times pH^2 - 156.67 \times pH + 920$
氨氮	0.14	mg/L(as N)	$0 < N \leq 2$	$-19.335 \times N^3 + 81.327 \times N^2 - 118.85 \times N + 99.75$
			$2 < N \leq 8$	$0.8271 \times N^2 - 14.106 \times N + 59.91$
總磷	0.06	mg/L(as P)	$0 < P < 0.4$	$29.9 + 3.8147 / (P + 0.054)$
			$0.4 \leq P \leq 3$	$6.592 \times P^2 - 36.417 \times P + 49.906$
大腸菌數	0.12	$X = \log(CFU/100ml)$	$1.13011X^4 - 15.26941X^3 + 66.60X^2 - 122.445X + 170.34$	
懸浮固體	0.10	mg/L	$10^{2-0.00263S}$	

資料來源：行政院環保署《環境教育資料》，2006

表 1-3-4 WQI 水體分類與水質用途說明表

指標範圍	水體分類	水體用途說明
86-100	特優	水質優良，適合游泳一級公共用水及以下各類用途
71-85	良好	水質良好，適二級公共用水、一級水產用水及以下各類用途
51-70	普通	水質尚可，適三級公共用水、二級水產用水、一級工業用水及以下各類用途
31-50	中下	水質屬中下等，適灌溉用水、二級工業用水及戊類用途
16-30	不良	水質不良，為環境保育最低標準
0-15	惡劣	水質惡劣，可能發生臭味

資料來源：行政院環保署，2003

二、水圳水質與地下水質

水圳與地下水水樣皆由筆者自野外調查選取樣點，再帶至實驗室化驗，由於採樣季節與實驗操作方法上大致相同，因此此部份可合併論述。水圳與地下水在理論上是兩個不同的空間系統，實驗操作方法相同但在樣點的選取上互異：

（一）採樣季節

水圳與地下水水樣皆由筆者自野外調查選取樣點，再帶至實驗室化驗，採樣時間參考國內許多文獻之做法，以冬、夏兩梯次取樣分析（劉乃綺，1988；劉振宇，1992）。其中大致分為夏半年（5~10月）及冬半年（11~4月）兩季各選一次作為採樣時期。本研究以8月份為夏半年採樣季節；乾季地下水以1月為採樣季節，水圳則為了配合研究區耕作時期農田水利會放水期間的水質狀況為準，因此設定3月份為採樣時間點。化驗的項目現場量測的有電導度、pH、溶氧量（地下水不檢測）以及帶至實驗室化驗的鈉離子（ Na^+ ）、鉀離子（ K^+ ）、鈣離子（ Ca^{2+} ）、鎂離子（ Mg^{2+} ）、硫酸根離子（ SO_4^{2-} ）、碳酸根離子（ CO_3^{2-} ）、碳酸氫根離子（ HCO_3^- ）、氯離子（ Cl^- ）、氨氮（ $\text{NH}_3\text{-N}$ ）、硝酸鹽氮（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）及懸浮固體物（SS）（地下水不檢測）。

水圳之採樣，夏半年選取27個點作詳細水質化驗、4個點作電導度與溶氧量的測量、4個排水溝的資料作為比對。冬半年則選取23個點作詳細水質化驗、12個點作電導度與溶氧量的測量、4個排水溝作為比對資料。

在研究區內，自由地下水的可開發量在水資源的調配才具有決定性的影響，相對的受壓水就顯得無足輕重。故本研究的調查以自由水地下水（本文均以淺層地下水稱之）為主⁶，受壓地下水為輔，夏天選取68個樣點、冬天60個樣點⁷，受壓地下水則選取7個樣點作比對。

（二）採樣點的選擇

採樣點以1:5000 像片基本圖、新竹農田水利會灌溉事業圖、1:25000 經建版地形圖、新竹斷層地質圖與新城斷層地質圖配合實際調查來確立採樣點的位置，水圳與地下水之採樣點詳述如下：

1. 水圳

(1) 頭前溪流域之重要水圳分類如下所述：

- A. 上游上坪溪沿線取水口：有上坪堰之竹東圳導水路、街頭圳取水口、樹杞林圳取水口。
- B. 上游油羅溪沿線取水口：油羅圳取水口、大肚圳取水口、橫山二崁圳取水口、山豬湖圳取水口含石壁潭新圳。
- C. 頭前溪本流沿線取水口：芎林圳取水口、下山圳取水口、下山坎圳取水口、上下員山

⁶本研究之淺層地下水（自由水）依據韋煙灶(2003a:83)在新竹平原區地下地質的研究成果，以井深在30m作為判定含水層歸屬的依據，井深在30m以內的水井，其所抽取的地下水均屬自由水。

⁷根據第一次採樣結果判斷，將位置相臨不到一公里內且水質相近之水井，於第二次採樣時刪除。

圳取水口、舊港圳導水路含東興圳及舊港圳、隆恩堰導水路含隆恩圳、汀甫圳、九甲埔、冷水坑圳、白沙屯圳、五座屋圳、雷公圳、湧北湖圳、後湖圳、自立圳、客雅溪南北圳以及烏瓦窯圳取水口。(徐元棟, 2003: 26)

(2)樣點選取原則

樣點選取,係根據研究區內水圳的空間分布與系統配置。考慮要點包括了空間上的均質性、不同水源的交匯前後或相同水源交匯前後之水質差異、水源上、中、下游之水質差異並考慮流經地區之土地利用不同(如農業區、都市、沿海一帶)所造成的差異性。

2.地下水

地下水取樣點實行較為困難。由於頭前溪以北的研究區自來水尚未普及,因此居民大多使用地下水,而頭前溪以南的市區,大多為已都市化地區,因此使用地下水情形普遍較少,由初步田調所觀察發現:高於標高 50m 以上的台地、丘陵區使用地下水情形普遍減少。

本研究以約每 2km² 一個採樣點的密度來進行,位置的選擇以住家、農地、廟宇、學校、花圃、公園、加油站等,含水層以淺層地下水為主。依據韋煙灶(2003)的研究,研究區之地下水研究區約地表下 30m 以內為淺層地下水。本研究確立所選取之水井為淺層地下水層之方法為實際詢問、現地量測或依水井種類判斷(寬口井或傳統手壓式水井則為淺井)。由於新竹空軍基地佔地約 481.7164 甲,但卻無法取得地下水資料,因此以機場周圍的點來彌補這項闕漏。

(三)水質檢測步驟與實驗方法

1.野外採樣與實驗前處理

野外採樣的水量皆為1,000ml,以500ml塑膠採樣瓶裝,其中一瓶水樣以陽離子檢測為主,因此在野外滴硝酸待pH降至1~2以下以做為保存方法。野外採樣時即現地測量pH、溶氧、水溫和電導度,各以pH計、溶氧量計以及電導度計測量。各樣品皆以0.45μm矽質濾紙過濾並放置4°C之恆溫恆濕箱保存。

2.實驗方法

實驗步驟儘量符合行政院環保署所公告之標準,以下說明每個化性分析之測量方式,每個離子測量的分法如表1-3-5所示。

(四)分析指標與方法

本研究的數值分析除了利用地理學所擅長的作圖空間分析的方式外,依照將檢測之數值換算成當量濃度,依據各種分析方法的原理原則,來分析研究區的水質以及影響水質好壞可能的因素。本研究所採用的分析方法包括:

1.地下水水質數據的描述與時空變化的分析,包含地下水質的數據描述、統計量範圍的描述、電導度的分布與季節變化、鈉吸著率分析(SAR)、殘餘碳酸鈉(RSC)及灌溉水品質圖解、氯/碳酸比、氨氮、硝酸鹽氮等的分析。

2.繪製各數據之等值線圖。

表1-3-5 樣品保存方法及期限

檢測項目	保存方法	保存期限	檢測方法	備註
水溫	無特殊規定，現場測定	立刻分析	電導度計	當場測定
pH	無特殊規定，現場測定	立刻分析	電極法	當場測定
溶氧	無特殊規定，現場測定	立刻分析	溶氧量計	當場測定
電導度	暗處，4°C 冷藏	48小時	比電導度計法	當場測定
鈣(Ca ²⁺)	加硝酸使水樣之pH<2	6 個月	火焰燃燒加熱法	原子吸光分光光度計
鎂(Mg ²⁺)	加硝酸使水樣之pH<2	6 個月	火焰燃燒加熱法	原子吸光分光光度計
鈉(Na ⁺)	加硝酸使水樣之pH<2	6 個月	火焰燃燒加熱法	原子吸光分光光度計
鉀(K ⁺)	加硝酸使水樣之pH<2	6 個月	火焰燃燒加熱法	原子吸光分光光度計
硫酸鹽(SO ₄ ²⁻)	暗處，4°C 冷藏	7天	濁度法	分光光度計
氯鹽(Cl ⁻)	無特殊規定。	5天	硝酸銀滴定法	滴定法
鹼度	暗處	3天	鹼度測定比色法	比色法
硝酸根離子(NO ₃ ⁻)	暗處	7天	紫外線分光篩選法	分光光度計
銨根離子(NH ₄ ⁺)	暗處，4°C 冷藏	7天	紫外線分光篩選法	分光光度計

資料來源：行政院環保署，2004

貳、水量調查

一、最大水資源量的推估

本研究在水量的推估方面，首先必須要先了解頭前溪流域有多少水量（逕流量）可供管理，以長期無外來水源「降水量=蒸發散量+逕流量」的概念著手，以桑士偉法求得各測站的可能蒸發散量，再用 surfer8.0 軟體繪製年平均等雨量線與年平均等可能蒸發散量（ETp）線，套疊在流域圖上，用等雨量線法計算平均面積雨量與蒸發散量。本研究最後算出的蒸發散量為真正蒸發散量(ETr)， $ETr = ETp \times 0.7$ ，⁸最後再以降水量減去真正蒸發散量以作為本研究區之最大水資源量。

（一）氣溫資料的處理

本研究以中央氣象局所出版的氣候年報（地面部分）為主，所使用的測站與編號如附錄(一)所示。資料處理年份最高至 2005 年，所建檔的資料若有缺失值則捨棄不用，共得 31 個測站。

由於以桑士偉法計算區域內水平衡必須要用到的是各測站之長期月均溫資料。本研究只有五個測站有氣溫資料，為使得觀測密度更高以求繪製等值線時更加準確，於鄰近地區另外加上四個測站氣溫資料（測站 28、29、30、31）總共九個測站作「標高與逐月氣溫」的簡單相關與直線迴歸，各顯著性達 $p < 0.01$ （表 1-3-6）。再將所建立的「標高與逐月氣溫」迴歸方程式帶入各雨量站的標高資料作月、年平均溫度之標高修正，求出各雨量站之月、

⁸ 此關係式為依據楊萬全的觀點而得（楊萬全，1994：24）

年均溫。

表 1-3-6 各測站氣候觀測所建立的「標高(x)與逐月均溫(y)」關係式

月份	迴歸	判定係數 R^2	顯著性
1	$y=14.990-0.00431x$	0.962	$P<0.01$
2	$y=15.149-0.00406x$	0.936	$P<0.01$
3	$y=17.397-0.00309x$	0.862	$P<0.01$
4	$y=21.255-0.00432x$	0.919	$P<0.01$
5	$y=24.951-0.00538x$	0.944	$P<0.01$
6	$y=27.657-0.00605x$	0.963	$P<0.01$
7	$y=29.231-0.00607x$	0.966	$P<0.01$
8	$y=29.016-0.00606x$	0.976	$P<0.01$
9	$y=27.402-0.00627x$	0.971	$P<0.01$
10	$y=24.372-0.00522x$	0.940	$P<0.01$
11	$y=20.833-0.00508x$	0.941	$P<0.01$
12	$y=16.701-0.00436x$	0.912	$P<0.01$

(二) 可能蒸發散量的推估

依桑士偉法的相關式，本研究以 7 月份作為水文年的起點，其所用的相關參數及關係式與步驟為：

步驟一：

$$\text{月熱能指數：} i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

$$\text{年熱能指數：} I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad a = (0.675I^3 - 77.1I^2 + 17920I + 492390) \times 10^{-6}$$

$$\text{可能蒸發散量：} ET_p = 16 \left(\frac{10Ti}{I} \right)^a \text{ mm/month}$$

($i=1.....12$)

步驟二：

依各緯度（本研究區用 25°N）日照時間的長短查表找出各月修正係數，修正係數乘以月蒸發散量即為已修正可能蒸發散量，月均溫超過 26.5°C 時，用查表法並以內插法直接求得 ET_p ，最後繪製等可能蒸發散量線圖。

步驟三：

計算土壤水分變化量，月平均雨量與已修正 ET_p 比較，並以土壤水分 100mm 作為最高有效土壤水分量，計算水分變化和土壤有效水分等。

步驟四：

計算合理蒸發散量 (ET_a)， ET_a 考慮該月可能蒸發散量 (ET_p)、降雨量和前一個月的土壤有效水分，當可能蒸發散量大於降水量而前一個月的土壤有效水分為零時， ET_a 最多只等於降水量，以最後不足和過剩水量探討水平衡（楊萬全，1993：58-62）。

二、供水量與各標的用水量推估

供水量係參考經濟部水利署、新竹農田水利會、台灣省自來水公司第三管理處資料；各標的用水量係參考經濟部水利署的用水資料庫及《九十四年蓄水設施水量營運統計報告》、《九十四年農業用水量統計報告》、《九十四年工業用水統計報告》、《九十四年生活用水統計報告》。竹科用水量則依據科學工業管理局所提供的年用水量為主。

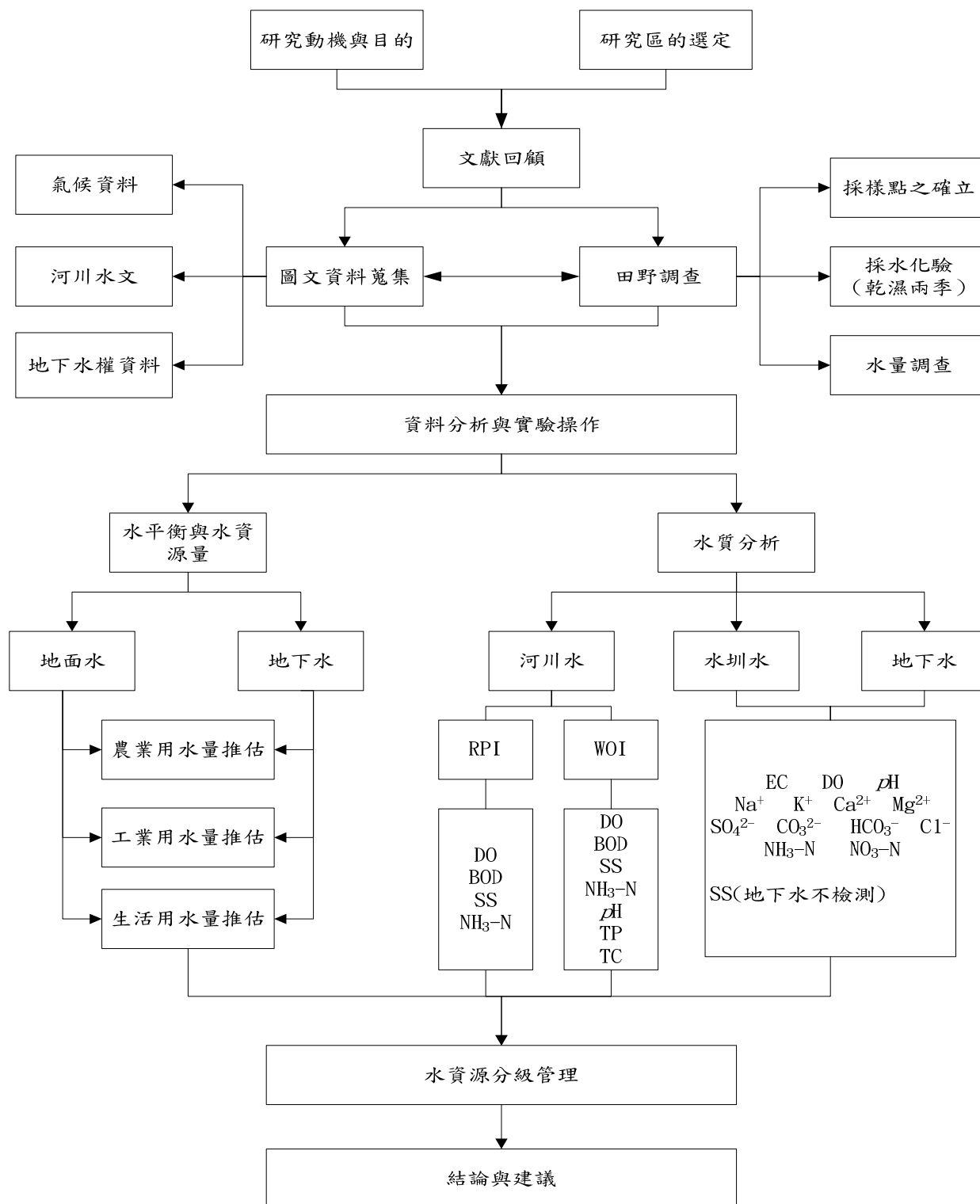


圖 1-3-2 研究流程圖