

地下水學

全一冊

譯者：徐萬椿

徐氏基金會出版

序

在世界科學文明已進步到太空時代的今天，任何一個人都了解發展科學的重要性，談發展科學，必須提高大家研究科學的興趣，才能按步就班地求發展。

本基金會對於海內外中國人士從事發展科學研究的情況，向來都寄予深切的關心，過去六年，本會曾資助大學理工科畢業學生前往國外深造，贈送一部份學校科學儀器設備，同時選譯世界著名科學技術書籍出版供給在校學生及社會大眾閱讀，其目的都在幫助促進科學發展。

我們深深希望自由中國的科學家和工程師們了解本基金會的用意，主動的重視科學技術書籍為發展科學的基本工具，從事寫作和翻譯，並且熱誠盼望與我們聯繫合作，我們願意運用基金從事各種出版工作，共同為我們邁進工業化的途徑而努力。

徐氏基金會

1968年1月

譯 者 自 序

地下水學一書，其原名爲 Ground Water Hydrology，爲陶德博士 (David Keith Todd, Ph. D.) 所著，當今美國加州大學土木工程系教授，地下水之專家。

所謂地下水，通俗言之即是井水，我國古代早知鑿井取水，屯兵扎營，如無河流湖泊，統以鑿井開塘取水，即在民間，亦復如此，但對個中奧秘，則鮮有研究。尤其中文闡述之地下水書籍，更屬鳳毛麟角。據譯者所知，坊間除宋希尚先生所著鑿井工程與地下水外，鮮有問世者。

譯者忝任臺灣糖業公司農業工程處處長有年，對於深井工程略涉一二，而對陶德博士新著，倍感興趣，是乃利用公餘，予以譯出，以減讀者在文字上之困惑，並增進讀書之效率，庶對地下水之研究有所裨益。

本書計分十四章，諸凡地下水之存在，地下水之流動，水井構造與建鑿，水位變化與測定，水質之要求，地下水開發與調查之方法，地下水之人工補注，沿海地區海水入侵與防止，以及水權概論與模型研究，無不詳爲闡述俾讀者對於地下水有一清晰之概念。本書係以通俗平易之筆法譯述，力求與原意吻合，並不拘泥於一字一句之推敲。其所有專門名詞，悉依國立編譯館所譯經教育部審定公佈者，及經濟部所編水文名詞爲準，務求統一與恰當。書後並附有漢英及英漢名字對照表，讀者查對，極爲方便。

譯者習機械，曾譯有農用曳引機及農業機械原理兩書，分別由教育部及臺糖公司出版，對於地下水學之翻譯，乃係興趣所至，是一種嚐試

，謬誤之處，尚祈先進賢達賜予指正。

本書譯稿，承關昌揚先生謄正，黃烈雄先生校閱，併此致謝。

徐 萬 椿 謹序

中華民國五十六年六月六日

原 序 節 譯

水爲人類生活之必需品，而最大之淡水源則藏於地下。由於需水量日益增加，因而鼓勵開發地下水源之供應。無可避免者，當進步日益滋長，而新問題亦爲之增加，尤需更大之毅力以解決此等新問題，此對地下水之開發而言尤爲貼切。調查地下水之存在與流動，其方法已有甚多之改進，其開發之工具已有傑出之發展，地下水保存之原則也業經確定，而各種研究更促使對此主題有更多之瞭解，此種研究結果，始將地下水水文學之知識揭開其謎底，而近幾十年來其發展更屬迅速。預料由於地下水之應用增加，對於地下水未來知識之增長，當更無可限量也。

本人寫此書之目的，係將地下水水文學之基本知識以平易之筆法供諸地下水知識之愛好者。甚少人士對地下水水文學具有專門之學識，惟地下水爲一大宗之天然資源，對各專門學科之學生與職業人士而論，均極重要，主要職業人士當多屬土木工程師（包括水力，水文，衛生工程師，土壤力學及水源工程人員），農業工程師及灌溉工程師。主管城市及工業給水之人員，對於地下水亦具有極大之興趣。而與地下水有間接關係之部門，則有鑛冶，石油，森林，公共衛生，法律及其他。雖然本書不可能提出一個主題而適應廣泛之需要，惟大眾需要者厥爲基本原則與方法之瞭解，及實地所遭遇之問題，因之，本書旨在對地下水文作一統盤之導報也。

著者假想讀者對數學，微積分及地質已具有基本知識，本人相信過去所學之流體力學及水文學，對研讀本書均有需要，但非屬最重要者。

由於本書只對地下水之基本因素予以闡述，故盡量使本書緊縮至實

際所需之份量，而不致漫無範圍。本書採用之名詞，盡量使之適當，並予澄清使合乎標準，唯沿用已久之解釋亦予提及，以免混淆。應用實地資料之例舉說明，已予盡量減少，蓋在其他書刊均可得到故也。美國地質調查所出版之書刊，為實地調查資料之最豐富者。又各州水資源機構，也均出版當地地下水之報告。如以此書作為教本者，本人建議此等機構所有之資料可作示範教材，並另作習題以補充之。

本書之內容係基於地下水水文廣泛之資料，期能包括地下水水源供應之各種因子。其先前之六章包括地下水之基本向量概念，諸如地下水之用途，存在，流動，水力學，水井及地下水位。第七章則敘述地下水質，其重要性與水量相等，並着重於水質之測量，水質之分析。第八章敘述地下水之貯存，此係以安全出水量表之；此外並提及與地面水聯合應用之最大出水量。地下水之地面勘查與地下勘查則分別於第九第十兩章敘述。地下水水文方面有兩個重要之問題，即人工補注與海水內侵，此等已在第十一及第十二章討論。經濟與法規之考慮，影響地下水之開發至巨，經濟考慮方面已在第八章闡述，第十三章則涉及地下水權，此為美國過去十多年為人注意之題目。最後一章敘述各種型式之實驗模型及數字分析之研究，均已成爲地下水研究極有價值之工具。最後之附錄尚有各種換算因子與常數。本書承甚多友人之協助，併此誌謝。

大衛凱斯·陶德

David Keith Todd

地 下 水 學

目 錄

譯者自序

原序節譯

第一章 導 言..... 1

範圍——歷史背景——地下水之利用——地下水與水文循環——文獻及資料來源。

第二章 地下水之存在.....12

地下水源——地下水之垂直分佈（土壤水層、中間水層、毛細管水層、飽和水層）——水層之地質結構——水層之種類——地下水盆地——美國之地下水。

第三章 地下水之流動.....43

達賽定律——滲透係數——地下水流率——實驗室之滲透度量——實地度量滲透——地下水流之追蹤（分散、追蹤劑、地下水日期之計算）——一般流量公式（穩定流動、不穩定流動、流量公式應用於水層）——地下水流動線（流動網、水流與地下水等高線之關係、水流經過滲透界限）——未飽和水流。

第四章 地下水及水井力學.....75

穩定單向流動（限制水層、非限制水層）——至水井之穩定輻射水流（限制水層、非限制水層）——均勻水流地區之水井——具有均勻補注之穩定水流——流入井內之不穩定輻射水流——爲抽水試驗所用之不平衡公式（達氏解法、習可博解法、周氏解法、特殊情形之解法）——水層界限

附近水井之水流（溪流附近水井之水流、靠近其他界限之水井流量）——羣井系統——部份深入水層之水井——水井性能損失。

第五章 水 井111

試探井及水井記錄——淺井建造法（挖井、鑽井、錘井、沖井）——深井鑽鑿法（索具法、液力迴轉法、逆轉法）——水井完成（濾水管與濾水網、礫石填充）——水井擴充——試驗井出水量——抽水設備——水井衛生保障——水井保養與修理——集水井——滲透坑道。

第六章 地下水位及其變化144

長期變化與季節變化——溪流水位與地下水位——由蒸發所導致之變化——由氣象所導致之變化（大氣壓力之影響、風力）——由於海洋潮水、外來負荷與地震之影響變化——以排水與水井控制水位。

第七章 地下水之水質168

鹽分來源——地下水取樣——水質之度量——化學分析（重量濃度、化學當量、以電導法測驗總溶解固體、總硬度、圖表法）——物理分析——細菌分析——水質標準（飲用水標準、工業用水標準、灌溉用水標準）——鹽基交換——地下水質之變壞——溫度。

第八章 流域性之地下水開發192

安全出水量與過量抽吸——控制安全出水量之因子（水量供應、經濟效益、水質）——水文平衡公式——流域調查資料之搜集（表面進水與出水、引入水與引出水、雨量、消耗用水量、表面存量之變化、地下水存量之變化、地下進水與出水）——安全出水量計算之方法（哈爾法、哈定法、基於地下水位淨變化為零之方法、辛蒲生法、基於達賽定律之方法、基於單位出量與平均水位之上升法）——

安全出水量之變化——地面水庫與地下水庫之聯合應用（
聯合應用方式之正經濟因子及負經濟因子）。

第九章 地下水之地面勘測212

地層物理探勘——電阻法——地震折射法——重力法與磁
性法——地質法——空中照像之判斷——卜棒探法。

第十章 地下水之地下勘測225

試鑿——阻力記錄——電位記錄——溫度記錄——卡鉗記
錄——其他地下探測法。

第十一章 地下水之人工補注240

美國地下水之人工補注——水之分佈（泛濫法、水坑法、
水溝法、天然溝渠法、灌溉法）——水量分佈之研究——
污水補注——經由水塘及開孔補注——水井補注——曼哈
頓灘補注計劃——紐約長島之補注井——補注井作為暴雨
排水——誘導補注——歐洲補注法。

第十二章 海水內侵沿海水層263

海水內侵之存在——習鵬與赫士伯淡水與海水之關係——
淡水與鹽水交接面之形狀——海水侵入楔之長度——淡水
與鹽水交接面之結構——海水內侵之防範與控制（抽水方
式之改變、人工補注、抽水溝、壓力脊、地下擋水）——
加州曼哈頓灘海水內侵控制之實地試驗——海島上淡水與
鹽水之關係——地下水中含有海水之承認。

第十三章 地下水之法規281

地下水所有權系統（土地所有權準則、居先專有權）——
地下水法律之解釋——美國地下水法——超抽地區之水
權——補注地下水之法令控制——普通法令應用於地下
水。

第十四章 地下水之模型研究與數字分析290

沙模——電導模型（固體導體、液體導體、膠狀導體、顏色追蹤劑）——膠稠液體模型——薄膜模型——數字分析。

附 錄：

漢英、英漢名詞對照表

人名英漢對照表

地名英漢對照表

單位換算表

地 下 水 學

第一章 導 言

1.1 範圍 (Scope)

地下水學係研究水在地表面以下之存在，分配與流動之科學。地質水文學 (Geohydrology) 與水文地質學 (Hydrogeology) 意義完全相同，惟後者偏重於地質耳。

地下水如無特別指明，認為係積存於地層空隙內之水量。飽和水層與未飽和水層，則有區別，未飽和水層則具有空氣與水量。在飽和水層中之水則為水利工程，地質研究，水源開發之主要對象，因之，飽和水層中所含之水量，將在本書中強調者。未飽和水層，通常在飽和水層之上，並延伸至地面。因為此種未飽和水包括根系附近之土壤水分，在農業，植物及土壤科學中佔相當之重要性。此兩種水層，並無一定之分界線，蓋均具有互相依靠之界線，水份可以任何方向對流故也。關於飽和水層與未飽和水層之相互關係，將在第二章詳為討論。

若干地球科學，包括地質學，水文學，氣象學，海洋學，而均與地球之水發生密切關係，但是地下水學則為地質學、水文學與流體力學混合之一種特別科學。地質學主地下水之存在與分佈，水文學則決定地下水之供應，流體力學則解釋地下水之流動。

地下水，在石油工程方面佔相當重要的一環，雙流系統，包括油與水；三流系統，包括氣，油及水，在開發石油時，可經常遇到者。雖然流體力學之定律均能應用於此種流體系統與地下水，水在石油礦藏中之

特性，則與其他地下水有異，其主要不同之點則爲其水質，存在之深度，開發與利用之方法。凡此種種，促使在意義上與應用上，具有分道揚鑣。爲此，在石油礦藏中之地下水，將不在本書中討論。不過，地下水學由於石油工業之研究，則得益匪淺。

1.2. 歷史背景 (Historical Background)

地下水之開發，遠在上古。舊約聖經中即提到甚多之地下水，噴泉，水井。杜曼 (Tolman) 曾指出公元前八百年在波斯 (Persia) 及埃及 (Egypt) 就有地下水道之存在。

由於地下水之應用，逐漸對地下水之來源，存在與流動具有瞭解。希臘與羅馬之哲學家著文解釋地下水與噴泉，其理論若干雖近乎幻想，若干也合乎道理。到十七世紀，一般均假想噴泉出水不可能係得自雨水，彼時相信雨水不可能透至地面以下，而且水量也屬不足者。爲此，古時希臘哲學家如荷馬 (Homer)，泰爾 (Thales) 與柏拉圖 (Plato) 假設，噴泉係由海水經山脈地道所引入，經過清淨之後而升入地面者。亞力士多德 (Aristotle) 則認爲空氣進入山脈冷黑之山谷凝結爲水而輸入噴泉者。

羅馬哲學家包括薩尼加 (Seneca) 及泊林納 (Pliny) 繼希臘之意見，再予補充。羅馬一位建築家佛得魯夫斯 (Vitruvius) 有一重要進步之解釋，亦即今日之滲透原理，彼認爲山脈接受大量雨水，滲入岩石地層和基地，而形成地下水流。

希臘之理論，持續過中世紀，並無進展，直至文藝復興時期爲止，即中世紀至近世的過渡時期。一位法國陶器工人與哲學家柏納德派立薩者 (Bernard Palissy 1510-1589)，於一八五〇年重申滲透之理論，惟彼之申述並未引起重視。一位德國天文學家約南卡布其 (Johan Kepler

1571-1630) 係一幻想力極強之人，彼譬喻地球為一極大之動物，能飲下海洋之水，經消化與同化後，而產生地下水與泉水。希臘之海水理論，又經法國哲學家藍納迭斯卡茲 (Rene Descartes 1596-1650) 補充說明，在地球之內又有蒸發與凝結之作用存在。

至十七世紀末葉，關於水文循環得到一個更進一層之瞭解。根據觀察和向量資料，第一次提出理論之三位歐洲人對此極有貢獻，惟其中一人只是補充與支持而已。比雷比魯特 (Pierre Perrault 1608-1680) 經三年之測定雨量，估計賽因河上流排水盆地之逕流。彼並於一六七四年提出報告，降於盆地之雨量約為河流排量之六倍，指出先前假定雨量不足之錯誤。法國物理學家埃頓馬立德 (Edme Mariotte 1620-1684) 對巴黎賽因河作過測量，證實比魯特之工作準確。其論文於一六八六年發表，其時馬立德已去世，其中恰有實際之資料以支持滲透理論。孟茲 (Meinzer) 曾云：『馬立德……可能比任何人值得接受地下水學發明者榮譽，他可說所有水文學之發明者。』第三位貢獻者，則為英國天文學蒙愛德蒙哈萊 (Edmund Halley 1656-1742)，彼於一六九三年提出蒸發測量之報告，證明海水蒸發，足供所有噴泉河流之需。

十八世紀，地質學之基本理論已經建立，作為地下水之存在與流動之基本認識。十九世紀上期，在法國鑿有若干自流井，因之提高對地下水之興趣。法國一位水力工程師名亨利達賽者 (Henry Darcy 1803-1858) 曾研究水在沙中之流動，其一八五六年之論文，決定沖積地層與沉積地層水流之關係，即為衆所週知之達賽定律。其後於十九世紀間，歐洲人之貢獻，也均着重於地下水開發之流體力學。鮑新斯基 (J. Boussinesq)，道勃理 (G. A. Daubree)，杜布脫 (J. Dupuit)，福熙哈謀 (P. Forchheimer) 及埃·賽姆 (A. Thiem) 等，均有卓

著之貢獻。在二十世紀，地下水學各方面均有長足之進展。甚多歐洲人民對於專門性之工作與繁複綜合性之工作，均著有宏文。關於美國之科學家，實在太多，姑提顯著者如下：特切婁 (R. Dachler)，尹伯 (E. Imbeaux)，凱爾哈克 (K. Keilhack)，柯寧 (W. Koehne)，柯善納 (J. Kozeny)，潑林士 (E. Prinz) 及齊賽姆 (G. Thiem) 等。

美國對地下水學提出貢獻則已在十九世紀末，在此短時期內，可說進步神速。早年在理論上有貢獻者為海純 (A. Hazen)，金氏 (C. King) 及施力丘 (C. S. Slichter)。至於詳細實地調查者則始自張伯林 (T. C. Chamberlin)，達頓 (N. H. Darton) 李氏 (W. T. Lee)，曼譚哈爾 (W. C. Mendenhall) 諸氏。本世紀之地下水學之進步，當歸功於孟茲博士 (Dr. O. E. Meinzer)，由於彼對地下水之濃厚興趣，及地下水開發調查之領導才幹，甚多人士對地下水知識之尋求，受其鼓勵良多。

1.3 地下水之利用 (Utilization of Ground Water)

地下水為全世界重要水資源之一，可用於灌溉，工業，城市與鄉村給水。過去二十多年，空氣調節器之冷卻，均用地下水，蓋其溫度均勻故也。在過量抽汲之地下水地區，該特別強調地下水之重要性，並重行估計地下水源，正常開發，調節與保護，使此種主要自然資源永保無缺。

據美國地質調查所麥克清氏 (Mackichan) 曾估計美國一九五五年之用水量為每天240兆 (billion) 介侖，其中每天 46.3 兆介侖，即19%則取自地下水。灌溉用之地下水高達每天30兆介侖，佔地下水水量之65%。又根據麥克清氏報告指出，91%地下水係取自西部十七州之水井，此係地區乾旱而欲加強灌溉水開發所促成者。其他地下水之需量為工

業用者每日9.8兆介侖，公共給水每日4.7兆介侖，農村灌溉以外用水每日1.8兆介侖。工業用水需量按序為煉油工業，造紙工業，鋼鐵金屬工

表1.1 美國1955年地下水用量表（每天百萬介侖為單位）

州 別	公共給水	農村給水	灌溉用水	工業 自給水量	地 下 水 總用水量	地下水佔 總水量之 %
加利福尼亞 (California)	540	89	10,000	460	11,089	36
德克薩斯 (Texas)	550	140	6,500	1,030	8,220	48
亞力桑乃 (Arizona)	110	10	4,700	140	4,960	69
紐墨西哥 (New Mexico)	85	16	1,400	46	1,547	58
埃德荷 (Idaho)	56	15	1,100	120	1,291	8
耐勃拉斯加 (Nebraska)	120	60	850	250	1,280	38
奧哈荷 (Ohio)	250	77	1.1	940	1,268	12
考羅來陀 (Colorado)	28	39	1,000	35	1,102	16
福羅列達 (Florida)	240	27	250	515	1,032	37
密西西比 (Mississippi)	95	24	460	430	1,009	69
勘薩斯 (Kansas)	130	46	610	220	1,006	45
路伊士安那 (Louisiana)	83	22	380	480	965	19
亞根薩斯 (Arkansas)	28	24	790	121	963	64
伊利諾 (Illinois)	160	95	3.2	393	651	7
紐約 (New York)	240	110	22	257	629	7
印第安那 (Indiana)	140	79	5.1	390	614	9
奧利岡 (Oregon)	36	18	490	65	609	8
愛我華 (Iowa)	100	79	3.4	419	601	33
華盛頓 (Washington)	150	28	230	180	588	9
密歇根 (Michigan)	180	73	5.3	315	573	8
賓色凡尼亞 (pennsylvania)	120	60	1.6	340	522	5,
猶太 (Utah)	110	8	270	130	518	11

紐澤西 (New Jersey)	160	8	22	296	486	12
田納西 (Tennessee)	100	26	3.6	250	380	9
威斯康辛 (Wisconsin)	140	84	2.6	120	347	7
喬治亞 (Georgia)	85	23	12	210	330	15
明尼蘇達 (Minnesota)	50	72	2.2	190	314	17
奧克羅荷馬 (Oklahoma)	45	15	150	102	312	32
密蘇里 (Missouri)	41	56	20	190	307	14
納佛達 (Nevada)	29	3	210	22	264	13
北加羅林納 (North Carolina)	28	52	1.4	170	251	11
蒙田奈 (Montana)	21	13	150	62	246	2
亞拉巴馬 (Alabama)	67	28	2.4	142	239	8
勘泰基 (Kentucky)	45	29	3.9	160	238	7
南達可達 (South Dakota)	46	34	6.8	98	185	76
麻薩諸沙 (Massachusetts)	82	7	0.2	65	154	6
西佛及尼亞 (West Virginia)	18	17	0	110	145	4
佛及尼亞 (Virginia)	10	33	0.4	100	143	7
瑪喇藍 (Maryland)	17	36	0.7	79	133	7
南加羅林內 (South Carolina)	27	30	12	50	119	13
北達可得 (North Dakota)	10	14	1.4	66	91	22
康乃克德 (Connecticut)	10	8	1.3	57	76	4
淮荷明 (Wyoming)	25	9	28	5	67	1
德爾惠 (Delaware)	11	3	0.4	25	39	11
佛蒙德 (Vermont)	11	8	0	12	31	27
梅茵 (Maine)	6	5	0.2	11	22	4
羅德島 (Rhode Island)	10	1	0	11	22	6
紐英姆希 (New Hampshire)	9	3	0	4	16	6
哥倫比亞區 (District of Columbia)	0	0	0	11	11	3
全美國 (United States)	4,700	1,800	30,000	9,850	46,350	19

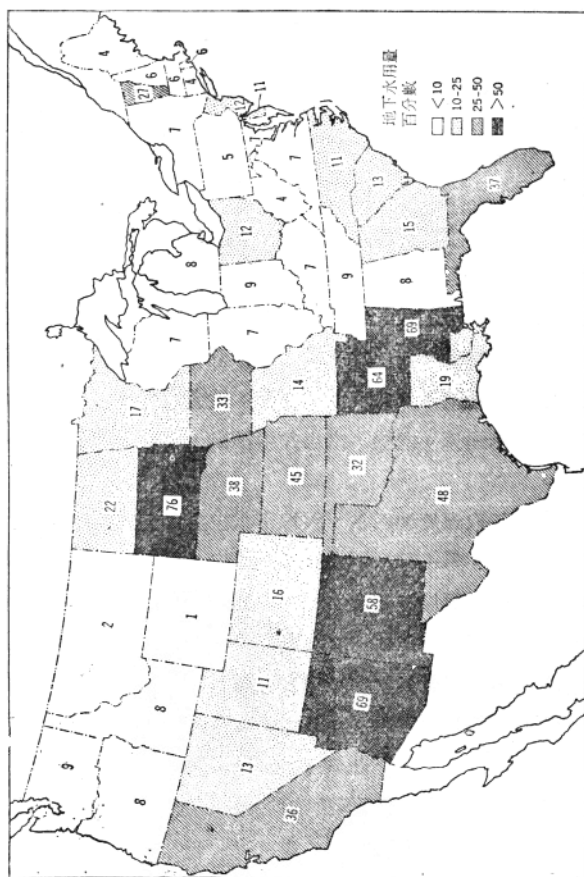


圖1.1 美國地下水用量對總用水量分配圖