

WATER CYCLE

EARTH AND ITS INHABITANTS

部編大學用書

SUN'S RAYS
(EARTH)

應用水文學

CLOUD FORMATION
(CONDENSATION)

ADVANCING
AIR MASS

下 冊

WATER VAPOR

PORATION FROM

RIVERS PONDS ANIMALS SOIL PLANTS OCEAN
STREAMS LAKES (RESPIRATION) ANSPIRATION)
SWAMPS MARSHES (RESPIRATION)

王 如 意 著
易 任 著

GROUND SURFACE

WATER TABLE



國立編譯館出版
茂昌圖書有限公司發行

SATURATION
(WATER)

部編大學用書

應 用 水 文 學

下 冊

王 如 意 著
易 任

國 立 編 譯 館 出 版
茂 昌 圖 書 有 限 公 司 發 行

版權所有 翻印必究

應用水文學（下冊）

定價：新台幣 350 元

作者：王如意 易 任

主編：國立編譯館

出版：國立編譯館

發行：茂昌圖書有限公司

地址：臺北市新生南路三段 84-4 號

電話：321-5311 321-0698

郵政劃撥儲金第 0106171-3 號

本公司登記字號：

新聞局局版臺業字第 0958 號

印刷：中大打字印刷公司

電話：985-4497

中華民國 71 年 10 月初版

中華民國 75 年 2 月五版

編號：I—165

編 後 語

水為萬物生存所需，從事對水之防禦、控制、分配、利用、保育及管理，以求適應所處之水環境為人類自古以來一直努力之目標。水文學即為研究水在大氣中、地面上及地表下之存在、分布及活動之一基本學科，具有多方面之應用。

近年來科技發展日新月異，水文學研究亦因之一日千里；配合資訊工具之普遍應用，水文理論由早先之描敘、觀測、歸納及統計方式突飛猛進而發展至現今水文模式建立及自動測報系統採用，以合成、模擬並預測未來最可能發生之水文情況，俾作為水資源規劃設計之依據。

編著本書之構想乃將水文學之理論演繹及分析方法作系統連貫且深入淺出之介紹及剖析，祈能對有關水利、土木、農工、環境及水土保持科系之大學部及研究所學生研習及在職人士參考之用。全書共有十七章，含蓋水文學基本學理及其廣泛應用範疇，足供一學年學程之採用。如大學科系選用為一學期水文學教科書，亦可斟酌選擇有關章節擇要講授。

本書因資料蒐集較多，篇幅內容充實，乃分上下兩冊，先後付梓出版。全書費時六載，係參照筆者留學美歐所收集之水文學文獻為藍本，並配合吾國特殊水文地文環境編輯完成。為使學者易於瞭解水文學理，文中提出若干實用例題，以收舉一反三之效；每章亦附有習題，可供模仿研習之用。

又本書編寫期間，承蒙國立編譯館黃編審振中先生之贊助及關注，考試委員周 恆先生給予諸多寶貴之評註及修正，國立台灣大學農業工程學系湯松義先生協助繪圖，以及甚多同事友好不時之鼓勵及鞭策，使本書終於得以完成，謹致萬分之謝忱。

筆者利用教學研究之餘而編著此書，掛一漏萬謬誤不當之處勢所難免。敬祈 海內外先進賢達及學者專家，多賜斧正，俾為日後改進之南針，實為筆者所至盼。

國立台灣大學農業工程學系 教授 王如意 謹識
教授 易 任

民國 71 年 10 月 10 日國慶日於台北市

應用水文學

下冊 目次

編後語

第十章 泥沙問題	1
10-1 概 述	1
10-2 冲蝕過程	2
10-3 泥沙種類	4
10-4 沉降速度及輸沙基本方程式	6
10-5 浮懸質之運行	8
10-6 推移質之運行	13
10-7 泥沙測定方法	18
10-8 集水區之泥沙產出量	26
10-9 水庫泥沙及壽命	28
10-10 臺灣河道之泥沙問題	33
參考文獻	38
習題	39
第十一章 逕流歷線	41
11-1 概述	41
11-2 逕流現象	42
11-3 歷線特性	48
11-4 單位歷線	56
11-5 不同延時單位歷線之換算—S 歷線	61
11-6 由複合暴雨推求單位歷線	65

11-7	單位歷線之應用	69
11-8	單位歷線之修正	77
11-9	瞬時單位歷線	90
11-10	逕流歷線之非線性	99
11-11	集水區之水文模式	102
11-12	漫地流歷線	125
11-13	流量延時曲線	135
11-14	流量累積曲線	136
11-15	小集水區設計洪峰流量之推求	138
	參考文獻	142
	習題	144
第十二章 洪水演算		153
12-1	概述	153
12-2	基本概念	154
12-3	河川演算	159
12-4	水庫演算	185
12-5	集水區演算	203
12-6	水力演算	211
12-7	臺灣洪水預報系統簡介	228
	參考文獻	238
	習題	239
第十三章 水文統計		251
13-1	概述	251
13-2	機率定律	252
13-3	基本統計概念	254
13-4	機率分佈函數	262
13-5	抽樣理論	273

13-6	迴歸與相關分析	293
13-7	時間序列分析	309
	參考文獻	323
	習題	324
第十四章 頻率分析		331
14-1	概述	331
14-2	水文頻率之程序	332
14-3	暴雨及洪水頻率分析之方法	339
14-4	乾旱與乾涸頻率分析之方法	369
14-5	設計風險	385
14-6	頻率之可靠性分析	390
14-7	區域分析	393
	參考文獻	408
	習題	410
第十五章 水文模式		415
15-1	概述	415
15-2	水文系統與模式之分類	415
15-3	水文合成	420
15-4	隨機生成	423
15-5	馬可夫鏈模式	436
15-6	零數高仕噪音模式	444
15-7	調和迴歸模式	447
15-8	調和合成模式	448
15-9	自迴歸—積分—移動平均模式	452
15-10	水文模擬	465
15-11	主要水文模式之介紹	475
15-12	模式校驗	484

參考文獻.....	488
習題.....	489
第十六章 水文設計	493
16-1 概述.....	493
16-2 水文設計頻率水準.....	494
16-3 設計暴雨.....	497
16-4 洪峰流量之推估方式.....	516
16-5 區域排水系統之水文設計.....	531
16-6 都市暴雨排水系統之水文設計.....	576
16-7 水筒模式之原理與應用.....	598
16-8 洪水歷線之合理推演方法.....	619
參考文獻.....	632
習題.....	634
第十七章 水文實習.....	637
17-1 概說.....	637
17-2 實習須知.....	638
17-3 實習內容.....	639
實習一 流域地形特性之圖上研究.....	639
實習二 測候儀器之認識及使用.....	643
實習三 雨量資料統計分析.....	646
實習四 水文站之選設.....	650
實習五 水尺設置與水位觀測.....	653
實習六 河道橫斷面之測設.....	654
實習七 流速儀之檢定.....	659
實習八 流速儀法測流量之一~一點法.....	663
實習九 流速儀法測流量之二~二點法及三點法.....	667
實習十 流速儀法測流量之三~多點法及積分法.....	668

實習十一	浮標法測流量.....	672
實習十二	比降面積法測流量.....	675
實習十三	堰口法測流量.....	676
實習十四	流量資料統計及圖解分析.....	679
實習十五	河流泥沙之測驗分析.....	685

索 引.....	689
----------	-----

應用水文學 (下冊)

第十章 泥沙問題

10-1 概 述

泥沙問題為研究地表水之控制與利用之主要問題。水資源工程之設計，必須詳細考慮泥沙之來源、輸送、沉積之歷程以及其影響程度。在各種不同之水工設計，諸如灌溉、排水、輸水及防洪等渠道之改善、水庫之規劃與設計，港口航道之維護，公共給水之淨化，集水區中土壤沖蝕之控制，皆須考慮不同尺度之泥沙問題。同時泥沙問題以受水文、氣象、土壤、地貌、地質諸因子之影響，牽涉學理又極深奧，其中包括流體力學、水文學、河川學、氣象學、亂流水力學、土壤物理、土壤力學、地質學等，十分錯綜複雜。

一般言之，河川攜帶之泥沙或沈滓 (Sediment) 主要來源，有下列九類：

1. 薄層沖蝕 (Sheet erosion)：在農業地帶、森林區或其他荒廢地，由降雨產生之地面逕流所造成之土壤表層之移動，頗均勻而形成一層層片狀沖蝕。
2. 溝狀沖蝕 (Gulying)：河道在土中之割切作用 (Cutting)，及由於集中逕流所造成之非固結性之地質形成作用。
3. 河川槽渠沖蝕 (Stream-channel erosion)：包括河岸之割切與淘刷作用，及已定形河川之退化作用 (Degradation)。
4. 由於重力作用所產生之土壤之大型移動：如山崩、地滑、坍陷頗雪與土石流及土壤之緩移作用 (Soil creep)。
5. 表層土壤之移動，掠行洪水平原之洪流所造成之洪水沖蝕 (Flood erosion)。
6. 道路、鐵路、電力、建築工程、工業計劃等文明進展所造成之沖蝕。
7. 開礦、採取土石、修建道路，其他施工等之棄土石，與工業廢水、

廢物之注入河川中而漸漸淤積於渠底。

8. 指狀沖蝕 (Finger erosion) 又名枝狀沖蝕 (Branch-type erosion), 係指層狀沖蝕後, 地表遺留之粗硬心土, 產生高低不平現象, 超滲水即由膜狀流 (Film flow) 成為有流勢之逕流, 向低處集中, 使地表發生如樹枝狀分佈之小溝, 其深寬均在 30 公分以下。

9. 風蝕土沙 (Wind-eroded soil) : 為乾旱地區受風時氣流吹送之土粒 (Particles), 以飄揚與跳躍隨風前進, 有壓埋村舍、道路、溝渠、小溪之危害, 中國華北、西北等地頗多。

綜觀之, 土壤沖蝕乃泥沙之最主要來源, 而泥沙之淤積作用常使河流發生若干困難問題, 如河床之漸次淤高, 則洪水位上升, 災害增加; 水庫淤積大量泥沙後, 其有效容量減少, 維護運轉費益增, 而水庫之經濟壽命及利用價值大受影響。泥沙淤積可使河流產生彎曲現象, 導致水流改道, 致萬頃良田, 夷為澤國; 又灌溉渠道中, 因淤積而減少渠道斷面, 降低灌溉效率。凡此種種, 悉為泥沙所造成, 防患之道端賴有效防止土壤之加速沖蝕, 以降低泥沙之數量。

目前, 泥沙之控制, 泰半有賴經驗公式或試誤法, 且泥沙問題受地區性之影響頗鉅, 所以至今尚未能建立一套完整之處理方式, 而在吾人已知曉之為數不多之理論與其實際應用間, 存在有相當大之歧異。本章僅就基本學理, 作概念性之介紹。

10-2 沖蝕過程

土壤沖蝕乃指土粒脫離原有已平衡之地表面, 而移動至河槽內之過程。薄層沖蝕 (Sheet erosion) 乃指表層土壤之移動, 隨地表逕流在地面漫流, 但未造成溝槽。地表之漫流泰半係流速緩慢, 故只能搬走結構較鬆軟、顆粒較細之土粒。然在坡度較陡峻之地區, 地表逕流受重力之影響, 使薄層沖蝕漸次劇烈, 逕流匯集成指狀沖蝕溝, 再變成溝壑, 溝壑則演變成野溪沖蝕 (Wild-stream erosion), 進而形成山溪沖蝕 (Mountain-stream erosion)。

野溪與山溪沖蝕為亂流 (Turbulent flow) 之局部拖拉力將土粒由河底或

岸邊沖走。往往因縱斷面坡度愈陡峻，沖蝕程度愈嚴重，而造成之溝槽亦更加深或加寬。

由圖 10-1 為雨滴落地造成水質點四濺及土壤沖刷之照片所示，雨滴之直徑通常由 0.5 至 6mm，其終極速度 (Terminal velocity) 為 2 至 9 m/sec，雨

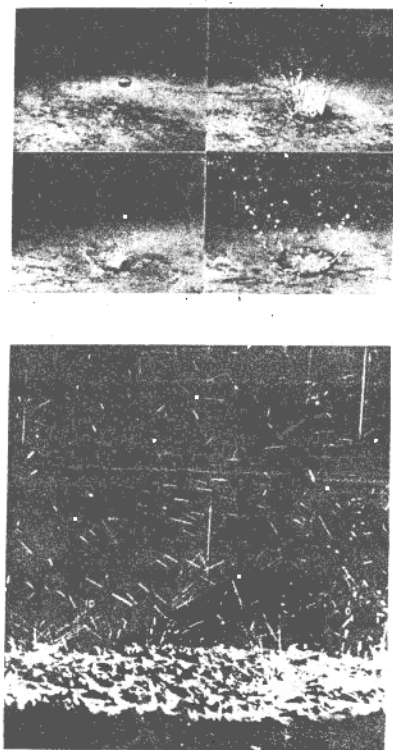


圖 10-1 雨滴落地之連續照片

上圖：單一雨滴沖擊之過程。

下圖：暴雨時土壤沖刷之情形。

點降下之動能為侵蝕之主要原因，因動能與雨滴直徑 d 及雨點至地面距離 r 成 $d^3 r^2$ 正比關係，故降雨之沖蝕能量將隨雨點之大小與強度而異。強度高且雨點大降雨之沖蝕能量約大於濛濛細雨之數千倍。因為雨點之激打為沖蝕之重要因子，所以有覆蓋之地面，可避免雨點之直接激打，減少土壤被沖刷之程度。又據夏普曼氏 (Chapman) 指出，由樹枝落下之雨滴，其打擊土壤之力量較自然之微雨為大。

土壤侵蝕能力視地表坡度、地表長度、降雨強度、土壤固結能力及地面覆蓋情形而定。穆斯葛夫氏 (Musgrave) 經由山區試驗結果指出土壤損失 E_s 如下：

$$E_s = k s^m L^{n-1} p^t \quad (10-1)$$

$$m = 1.91 + 0.61 \left\{ \arctan \left(\frac{L - 250}{100} \right) \right\}$$

$$n - 1 = 0.35 \sim 0.53, \text{ 平均 } n - 1 \text{ 取 } 0.37$$

$$t = 1.75$$

$$\text{常用者為 } E_s = k s^{1.4} L^{0.37} p^{1.75}$$

上式， E_s ：土壤損失，畝·吋。

s ：地表坡度，%。

L ：地表長度（呎）。

p ：延時為 30 分鐘之最大年雨量。

k ：隨土壤固結能力、地面覆蓋而定之係數。

實際上，自然流域之侵蝕，視整個流域之佈置、流況、土地使用情形而定。

10-3 泥沙種類

天然河川中，各處可見不同大小組成之泥沙物，往往見到泥土、粘土一類微小之顆粒在水中懸浮飄流，致使含沙量較高河川中，往往混濁不能見底。較細之砂粒則在河川亂流中跳躍漂動；而粗大卵石均沿貼河床隨水流滾移並進。然由於水流之情形變化無常，在某一水流條件下，有其特定之移動狀態，而各形態間更缺乏明顯之區別。同一大小之顆粒，在某一水流條件下可

成浮懸情形，而在另一水流條件下則或屬於跳躍或滾進。

一般為方便起見，將泥沙載 (Sediment load) 概略分為河床載或推移質 (Bed load) 與浮懸載或浮懸質 (Suspended load) 兩類。河床載係指泥沙顆粒運動於大抵距河床約為土粒兩倍直徑厚之河床帶 (Bed layer) 內或其附近；浮懸載乃指在此河床帶以上浮懸而不與河底接觸者。河床載大抵又可分為沿貼於河床上滾動者之接觸載 (Contact load) 及在河床上滾動移進之卵石或

表 10-1 泥沙物粒徑分級表

大小 (公厘) (millimeter)	百萬分之一公尺 microns	英 吋 inches	每 英 吋 篩 孔 口 數		等 級
			泰 勒 Tayler	美 國 標 準 U.S. Standard	
4000 - 2000		160 - 80			極大石
2000 - 1000		80 - 40			大石
1000 - 500		40 - 20			中石
500 - 250		20 - 10			小石
250 - 130		10 - 5			大卵石
130 - 64		5 - 2.5			小卵石
64 - 32		2.5 - 1.3			極粗碎石
32 - 16		1.3 - 0.6			粗碎石
16 - 8		0.6 - 0.3			中碎石
8 - 4		0.3 - 0.16	5	5	細碎石
4 - 2		0.16 - 0.08	9	10	極細碎石
2 - 1	2000 - 1000		16	8	極粗砂
1 - 1/2	1000 - 500		32	35	粗砂
1/2 - 1/4	500 - 250		60	60	中砂
1/4 - 1/8	250 - 125		115	120	細砂
1/8 - 1/16	125 - 62		250	230	極細砂
1/16 - 1/32	62 - 31				粗粉土
1/32 - 1/64	31 - 16				中粉土
1/64 - 1/128	16 - 8				細粉土
1/128 - 1/256	8 - 4				極細粉土
1/256 - 1/512	4 - 2				粗粘土
1/512 - 1/1024	2 - 1				中粘土
1/1024 - 1/2048	1 - 0.5				細粘土
1/2048 - 1/4096	0.5 - 0.24				極細粘土

塊石之跳躍載 (Saltation load)。

以上所論及之河床載與浮懸載均為構成河床本身之物質 (Bed material load) 所組成者，另外有河川上游兩岸表土冲刷所造成與河床本身之物質相異之沖洗載 (Wash load)，惟沖洗載與浮懸載、河床載間之差異難有明確之界限。

一般常以粒徑區分泥沙物之等級，依美國地質聯合會 (American Geological Union) 之泥沙質專有名詞委員會訂定之標準如表 10-1 所示。

粒徑為泥沙質運動之主要因素，且顆粒之形狀、比重等亦隨粒徑而變異，故一般概以粒徑區分泥沙物之等級。

10-4 沉降速度及輸沙基本方程式

泥沙顆粒與周遭流體在沖蝕、輸送及沈澱等不同情況下之相關運動，受顆粒因自重而產生之沉降速度 (Falling velocity) 之影響甚鉅。任何物體之終極沉降速度 (Terminal velocity of fall) 主要之控制因子為該物體之大小、形狀、比重及流體黏度。對於一個直徑 d 之完整球體，其沉降速度 v 在低雷諾數 (Reynolds number) 即 $R = vd/\nu < 0.1$ 以下，可由史托克定律 (Stoke's law) 導得。

由史托克定理知：一半徑為 r 之球體在 U_∞ 之均速流體中所受之托曳引力 (Drag force) $D = 2\pi r\mu U_\infty + 4\pi r\mu U_\infty = 6\pi r\mu U_\infty$ 其中， $\frac{1}{2}$ 源自垂直壓力， $\frac{1}{2}$ 源自摩擦力。

依力之平衡概念可知：

$$\left(\frac{1}{8} \times \frac{4}{3} \pi d^3\right) \gamma (S_s - S_f) = 6\pi r \mu U$$

$$\text{或 } \frac{1}{6} \gamma d^2 (S_s - S_f) = 3\mu v$$

故沉降速度為：

$$v = \frac{\gamma d^2}{18\mu} (S_s - S_f) = \frac{2}{9} \frac{(\rho_s - \rho_f) g r^2}{\mu} \quad (10-2)$$

上式， γ ：流體之單位容重。

μ : 流體之動力粘滯性 (Dynamic viscosity)。

$S_s - S_f$: 固體與流體之比重差。

ρ_s, ρ_f : 固體及液體之密度。

r : 固體顆粒之半徑。

式 (10-2) 為在下列諸條件下導得者：(1) 粘滯性為唯一抵抗泥沙下沉之力，(2) 泥沙顆粒為均勻光滑之球形固體，(3) 各泥沙顆粒間，彼此互不干擾，(4) 史托克定理適用於史托克範圍 (Stoke's range) 內及雷諾數 $R < 0.1$ 以下。

然而天然河川多以亂流流動，故河川中之沈澱問題十分錯綜複雜，難以求得一合理之解答。由於河床如水面一般不斷在改變，所以具有程度極高之變量 (Unsteady) 與非等速 (Non-uniform) 性，其變化因素甚多。就日前之研究所及，僅能就最重要之因素加以考慮，簡化其影響因子，求得其近似解。

簡言之，泥沙質輸送之主要現象有二：(1) 泥沙輸送之主要參數為流體之特性流速與泥沙顆粒沈降速度之比，由於後者在某一特定泥沙變化範圍相當大，所以必須考慮其平均值與標準偏差。(2) 某一地區如其瞬間之輸送能力超越其實際荷載，將有更多之物質介入，如果其輸送能力小於其實際荷載，即有部份荷載發生沈澱。

輸沙水流所根據之基本方程式有二：其一為運動方程式，另一為連續方程式。運動方程式係根據牛頓力學定律，可表示如：

$$r_{md}(S_s + S_o) = \tau + f_u S_o + (f_s + f_a) S_o \quad (10-3)$$

式中， r_m : 輸沙水流之單位重量。

d_s : 與水流方向正交之水深。

S_s : 加速度坡降， $S_s = -\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}$ ， v 為河川流速。

S_o : 能量坡降， $S_o = -\frac{\partial H}{\partial x}$ ， $H = h + \frac{v^2}{2g}$ ， h 為水面高度。

S_o : 河床坡降， $S_o = -\frac{\partial z}{\partial x}$ 。