

# 利用放射化学及地球化学方法追踪 德基水库集水区之泥沙来源

庄作权\*

(中兴大学土壤学研究所·台湾台中市)

**摘要** 用土壤中放射性原子落尘 $^{137}\text{Cs}$ 因地表植生,坡度及土层厚度不同而有不同含量以及矿物抗风化及冲蚀程度不同,其所获石英或云母(抗风化)与长石(易风化)矿物含量比,可探测集水区內水库泥沙淤积之来源。就本研究结果, $^{137}\text{Cs}$ 在果园土壤最高,平均为 $302\mu\text{Ci}/\text{kg}$ ,森林土壤次之为 $203\mu\text{Ci}/\text{kg}$ ,而以崩塌地土壤 $147\mu\text{Ci}/\text{kg}$ 最低,显示因地表坡度及植生不同造成表土厚度之差异,徒而影响 $^{137}\text{Cs}$ 原子落尘在土壤中之分布。矿物抗风化及冲蚀作用因种类而异,石英/长石比(Q/F)或云母/长石比(Mi/F)之值愈高,表示抗风化之矿物含量高,矿物安定度大或不易受风化及冲蚀。由分析结果获知森林土壤Q/F值与果园土壤相近,而崩塌地土壤最低,就Q/F值或Mi/F值比较,果园土壤似较森林土壤更为安定,此与果园土壤之坡度较平坦,表土较厚有关。此项结果与放射化学方法所测得之 $^{137}\text{Cs}$ 含量所表示之意义一致。无论以原子落尘或矿物比值测值,均显示不同植生这有其显著差异,用以追踪水库淤沙来源,具有辨异性。惟就方法之设备及分析之难易与时间耗费,笔者建议采用地球化学之矿物测定法,更有应用价值。

**关键词** 原子落尘 矿物含量比 土壤冲蚀

## Radiochemical and Geochemical Studies on Tracing of Soil Erosion Sources of Teh—Chi Reservoir Watershed

Tzo—Chuan Juang

(Research Institute of Soil Sciences, Chung Hsing University, Taichung Taiwan)

**Abstract** Determination of specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  from radioactive fallout and measurement of mineral ratios of Quartz/Feldspar(Mi/F)in soils collected from different location on the Teh—Chi Reservoir upper watershed could differentiate soil whether eroded from forest, orchard or landslide area. All these criteria showed their higher values in orchard soils and forest soils and lower values in soils from landslide area. Based on the findings of this research, it may be suggested that methods of determination of radioactive fallout of  $^{137}\text{Cs}$  and geochemical analysis of mineral ratio can be used in tracing soil erosion sources of reservoir watershed.

**Key words** radioactive fallout mineral ratio soil erosion

## 1 前言

水库泥沙淤积对水资源保育维护、电源输送、防洪功能、农田灌溉与水源供应等有极严重之影响。德基水库为本省大甲溪多目标开发之总枢纽,水库使用年限与集水区经营方式实关系著中部地区经济建设之发展。近20年来由於中部横贯公路通车后,滥伐、滥垦、超限利用、火灾、公路开凿与修建以及果园水土保持工作之欠佳,对环境生态破坏甚巨,加以本集水区内地势陡峻,雨量集中,地质松脆,土壤浅薄,排水及拦砂工程之不甚完善,每遇降雨洪水时即发生冲蚀、淘刷、崩塌、滑落等现象,使泥沙大量流入溪中,从而淤积水库,严重影响水库之使用年限及其预期之功能。

近年来由於德基水库集水区水土保持整体规划工作之大力推行,使得水库泥沙淤积之防治及集水区水土保持工作有了初步之整治效益。为了解该水库所受威胁之确实程度,进而谋求妥善解决方法,则必须对土壤流失的情况及其来源做追踪研究,俾能获得更精确资料,作为拟定集水区经营及水库保护措施之参考。

地面及大气圈内进行核子试爆时,其大量生成之分裂产物进入对流圈及成层圈,这些分裂产物长时间经气流之迁移、下降而蓄积於地表,成为放射性原子落尘而广泛分布於自然界中,同时因地形、坡向、坡度、降雨强度、地表植生覆盖情形,以及土壤之厚度及渗透能力等,使原子落尘降落量及积蓄量有所差异。核爆主要分裂产物 $^{137}\text{Cs}$ 与 $^{90}\text{Sr}$ 为均具有30年左右半衰期之核种,然 $^{137}\text{Cs}$ 由土壤之吸附固定较 $^{90}\text{Sr}$ 为大,在土壤中移动或扩散之速度亦较慢<sup>[1,2]</sup>;其被吸附之能力则依土壤粘粒含量,粘土矿物之种类,pH值及有机质之存在而异<sup>[9]</sup>。再者, $^{90}\text{Sr}$ 之分析方法较 $^{137}\text{Cs}$ 要来得繁琐,故测定 $^{137}\text{Cs}$ 核种之放射性强度,可作为追踪探讨泥沙来源之较佳辨异因子。

矿物的抗风化作用的程度常随化学风化作用之强度,矿物之结晶构造与组成以及风化的环境而有所不同<sup>[7]</sup>。根据 Jackson 与 Sherman (1953)提出之矿物风化序列( Mineral weathering sequence),长石矿物较石英易受风化,而白云母之抗风化作用又较石英为佳。Goldish (1938)提出长石与石英之风化稳定系列( Weathering Stability Series ),其稳定度由低至高分别为钙长石( Anorthite)、钙钠长石( Calc-Alkali Feldspar)、钠长石( Albite)、正长石( Orthoclase)、微斜长石( Microcline)、白云母( Muscovite)及石英<sup>[5]</sup>。土壤中残余矿物( Residual Mineral )之含量,不但依岩石母质及上述之矿物风化及稳定情形而定,且与风化作用地区之气候(包括温度与降雨量)、地形、渗透程度、钳合作用、氧化还原作用及溶液之离子浓度等有密切之关系。Kiely 与 Jackson(1965)亦曾指出利用石英与长石风化程度之差异,可以石英/长石之含量比率作为土壤风化程度之指标( Weathering Index )。

本研究即以低背景盖式计数器测定采集土壤中之放射性落尘之残余量,并利用化学溶解及X光绕射方法测定土壤及砾石之中长石、石英、云母等矿物作为风化作用之指标,配合集水区洪水期之水文资料,利用资料处理之方法,建立其间之相关关系,从而探讨上游集水区之侵蚀程度及泥沙之可能来源。本文先阐明原子落尘及地球化学两种方法应用之依据及方法之步骤。

## 2 研究地区之地质与土壤概况

本研究地区为次高山、桃山、南湖大山、中央尖山、无明山、毕禄山、合欢山所围绕,标高大都在3000m左右;主要之河流计七家湾溪、四季郎溪、伊卡丸溪、南湖溪、耳无溪、毕禄溪、合欢溪及大甲溪本流<sup>[3,4]</sup>。

地区内之岩层属於第三纪早期之始新世 ( Eocene ) 与渐新世 ( Oligocene ) , 主要由粘板岩及粘板岩石英岩互层等低度变质岩所构成。粘板岩岩质呈灰至灰黑色, 具板状构造; 砂质粘板岩抗风化性较强, 泥质粘板岩则较差, 易受侵蚀、崩解, 其与石英岩互层者则易沿层面滑落; 梨山福寿山农场及平岩山、环山、松茂角阶地形区域之土壤即由泥质粘板岩风化而成。主要之地质构造呈东北—西南方向, 广受断层、褶皱之影响。在粘板岩地区解理 ( Cleavage ) 构造则常易与层面相混, 并将岩体分割成片块状 ( Blocky ) 。

本集水区土壤质地以粘土及粘壤土居多, 土层大都浅薄, 溪流两侧之平坦地带与部份平地、缓坡地、低洼地土壤较深厚, 但缺乏层理, 部份土层下部母岩呈半风化之块状破碎片。由於高温多雨, 土壤多呈灰化作用, 又日照特强而呈红壤土之化育现象。地区土壤可区分为: (1) 红黄准灰壤 ( 又可区分为佳阳轻粘土及佳阳砂质粘壤土两系 ), (2) 高山草原土, (3) 石质土 ( 又可区分为胚胎土及粗骨土两种 ) 。

### 3 测定方法

#### 3.1 $^{137}\text{Cs}$ 放射性活度之测定

本文中采用之方法以美国环境保护局所属辛辛那提环境研究中心试验手册中所列之 $^{137}\text{Cs}$ 分析方法<sup>[11]</sup>为蓝本, 修正其鲜样分解 ( Digestion ) 步骤, 测定核爆分裂主要产物 $^{137}\text{Cs}$ 之 $\beta$ 活度, 作为辨识标准及追踪泥沙来源试验分析资料之一部份。

核种分析方法系将风干土於 $450^{\circ}\text{C}$ 灰化15h后, 称取40g以3N HCl分解之, 并加入Cs载体, 而其土壤抽出液则加入磷钼酸铵使Cs化合物与其共同沉淀, 离心后沉淀物以6N NaOH溶解, 然后再以 $\text{CaCl}_2$ 分离钼酸 ( 生成 $\text{CaMoO}_4$  ), Cs离子则因加入 $\text{H}_2\text{P}_2\text{Cl}_6$ 产生 $\text{Cs}_2\text{P}_2\text{Cl}_6$ 沉淀, 此金黄色沉淀物经过滤收集后以 $\text{H}_2\text{O}$ , 1N HCl及酒精连续洗涤, 干燥至恒重后, 以低背景放射测定仪 ( low background G - M counter, 背景约3cpm ) 测定 $^{137}\text{Cs}$  $\beta$ 计数量, 最后并对仪器计数率, 沉淀化学产率及土壤灰化百分率予以修正, 以求出Cs $\beta$ 比活度 ( $\beta$  Activity ) 。活度修正公式如下:

$$A_{cs} = \frac{N}{2.22 Y EW} \times \frac{W_1}{W_2}$$

$A_{cs}$  = 每千克鲜样重之Cs比活度, ( $\mu\text{Ci}/\text{kg}$ );  $N$  = 计数率, (cpm);  $Y$  = 化学产率分数;  $E$  = 计数效率分数;  $W$  = 分析灰重 (mg);  $W_1$  = 灰化后重量 (mg);  $W_2$  = 鲜样重量 (14 000 mg);

#### 3.2 长石及石英含量之测定

3.2.1 利用焦硫酸钠熔解法 ( Sodium Pyrosulfate Fusion )<sup>(8)</sup>来测定土壤中长石、石英含量  
此法系利用焦硫酸钠溶解时产生之高温硫酸作为去氢剂 ( Dehydroxylating agent ), 并以3N HCl使云母、高岭石、绿泥石溶解, 热0.5N NaOH则溶解其他层状矽酸化合物 ( Layer Silicate ); 上述溶解—HCl—NaOH步骤无法溶解之长石、石英则留於残渣内。最后以 $\text{HF}-\text{HClO}_4-\text{H}_2\text{SO}_4$ <sup>[8]</sup>处理分解常石、石英, 以便测定样品中 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Ca}_2\text{O}$ 之含量, 并以转换因子 ( Conversion factor ) 换算出样品中钾长石 ( Microcline—Orthoclase )、钠长石 ( Albite )、钙长石 ( Anorthite ) 及石英之含量。

### 3.2.2 以 X 绕射测定土壤及砾石中矿物之含量

(1)样品准备:样品先以玛瑙研钵粗磨,再用振动粉碎机(Vibration Mill)细磨,使之均匀通过 325 mesh 筛目;后加入 30%~35%  $H_2O_2$ ,在恒温槽加热维持 60℃ 去除有机质,直到不冒泡为止。为避免 X 光绕射时样品之趋向排列(Preferred Orientation),绕射前使用一面加盖玻璃之中空铝制装载器(powdes sample holder)另一面则加入样品轻压平整后,除去加盖之玻璃,以此面测定试样含矿物结晶面之强度<sup>[9]</sup>。

(2)强度测定:X 光绕射条件 CuK $\alpha$  射线,30 KV,28. mA,扫描速度每分钟 2 $\theta$  为 1/4 度,图纸速度每分钟 10mm,计数时间常数 0.5 s。

#### 1. 土壤部份:

由石英(100),斜长石(002),绿泥石(002),伊来石(002)各矿物峰线之面积求取其绕射之强度(Intensity)。面积之计算以基线(base-line)以上峰线强度之最高值(Maximum Peak Height)与半高宽度(Peak Width at Half Maximum Height)之乘积表示。

#### 2. 砾石部份:

表土,表土极易受侵蚀,原子落尘不易存积,故含量最低。本研究分析不同植生地区表土  $^{137}Cs$  平均比活度,如表 1:

表 1 德基水库集水区内不同植生地区表土中  $^{137}Cs$  比活度

植生区	$^{137}Cs$ 活度	说明
草生区(Grass land)	208	
森林区(Forest land)	203	
果园区(Orchard land)	302	变异甚大自 18—828 $\mu Ci/kg$
崩塌地(Land Slide area)	147	
土样 No. 15	40	横断公路与合欢溪交叉处崩塌地
土样 No. 5	73	南湖溪出口处崩塌地
土样 No. 33	8	环山大崩山

自表 1 数据看来,所有崩山地区表土中  $^{137}Cs$  比活度均低于森林、草生及果园区,差异甚为明显。同时同属崩山区之表土  $^{137}Cs$  比活度亦有高低之差别,与崩山之严重程度有关,如环山大崩山区表土中仅含  $^{137}Cs$  比活度 8  $\mu Ci/kg$ ,崩山情形最为严重。

矿物之风化先受岩石之物理崩解,再受化学风化,故矿物之种类及含量受原始岩石种类之影响。土壤更具承受矿物风化之结果,故土壤中矿物残存含量可指示岩石、矿物及土壤之风化程度。Goldich (1938) 提出之粗粒矿物之安定系列(Stability Series)认为石英在矿物中安定度最高,大于白云母及长石类矿物,因此将土壤中石英与长石之含量比(Q/F),或白云母与长石含量比(Mi/F),其大小值即可指出土壤之相对安定度<sup>[5]</sup>。表 2 为土壤与砾石中 Q/F 及 Mi/F 比值,由表 2 结果可知森林地表土平均 Q/F 值为 2.45 与果园区地表土中平均 Q/F 值为 2.57 相近,而比崩塌地表土中 Q/F 值为 1.77 高出甚多,即前二类土壤较崩塌地者为安定。

表 2 土壤与砾石中石英/长石(Q/F)及云母/长石(Mi/F)平均比值

植生区	土壤		砾石	
	Q/F	Mi/F	Q/F	Mi/F
森林地(Forest land)	2.45	1.04	2.12	1.12
果园区(Orchard land)	2.57	1.40	6.99	4.78
崩塌地(Land slide Area)	1.77	—	—	—

由表 2 森林地及果园区地所采砾石中 Q/F 值观之,可进一步看出森林地与果园区地土壤之安定度差异。前曾述及,石英及白云母为较安定之矿物,长石为易受风化而安定度较低之矿物,比值高

表示安定度高,反之安定度低,易受冲蚀。同属砾石样品,森林地者  $Q/F$  及  $Mi/F$ , 平均比值分别为 2.12 及 1.12, 较果园地者平均比值为 6.99 及 4.78, 低了很多。再由森林地及果园地土壤中  $Q/F$  及  $Mi/F$  平均比值对照,前者分别为 2.45 及 1.04, 后者分别为 2.57 及 1.40, 综合比较结果,可知果园土壤尚且安定,此表示森林中表土受到山崩、辟路或自然风化,其冲蚀程度似较果园地土壤为严重。此项结果也与  $^{137}\text{Cs}$  比活度值可相互印证(表1),即果园土壤中  $^{137}\text{Cs}$  比活度值较森林土壤为高,亦显示,森林土壤中表土之冲蚀情形较烈,而表土之厚度将不及果园土壤。

由上列原子落尘及矿物成分分析结果显示,不同植生情形之表土,  $^{137}\text{Cs}$  比活度及  $Q/F$  或  $Mi/F$  比值均有明显差异,表示此两种方法所获结果对不同侵蚀程度之土壤具有辨异性,可用作冲蚀泥沙来源之追踪。

利用地球化学方法或 X 光绕射测定,分析土壤除石英改用(112)外,其他三种矿物与土壤部份相同。强度之计算采用仪器本身之计数器(Scaler)直接换算。公式如下:

$$NP = N_{PB} - \bar{N}_B \cdot t$$

式中  $N_P$ : 峰线之计数强度;  $N_{PB}$ : 由峰线一侧基线之角度扫描至另一侧角度所计之读数;  $\bar{N}_B$ : 峰线两侧基线平均单位时间之计数;  $t$ :  $N_{PB}$  扫描所需之时间。

(3) 质量吸收系数测定<sup>[12]</sup>: 样品对  $\text{CuK}\alpha$  射线之质量吸收系数(Mass Absorption Coefficient)的测定,系使用一特殊装载器,此装载器为铜金属板,表面有长 1.965 cm, 宽 1.79 cm, 深 0.025 cm 之凹槽,槽内装载样品。由 X 光绕射测定凹槽装载试样前后所得铜(111) 2 $\theta$  等于 43.2° 时之绕射强度,并由下列公式求算质量吸收系数。

$$\mu = \frac{S_i \theta_h T_i}{2t\rho I_n T_o} \quad t\rho = \frac{W}{A}$$

$\mu$ : 质量吸收系数;  $\theta_h$ : 铜(111)绕射角度, 21.6°;  $t$ : 样品於凹槽内之厚度;  $\rho$ : 样品密度;  $W$ : 凹槽中样品之重量;  $A$ : 凹槽之面积(1.955 cm × 1.79 cm = 3.57105 cm<sup>2</sup>);  $T_o$ : 凹槽没有装载试样时所得铜(111)之绕射强度;  $T_i$ : 凹槽装载试样后所得铜(111)之绕射强度( $T_o$ 、 $T_i$  均直接由仪器之计数器(Scaler)求得,公式与砾石部份强度公式相同)。

(4) 计算方法<sup>[9]</sup>: 样品中矿物之重量百分比( $X$ )可由下列公式求得:

$$X_j = \frac{I_{ij} \cdot \mu^*}{(I_{ij})_0 \cdot \mu_j^*}$$

$I_{ij}$ : 样品中  $j$  矿物  $i$  面之绕射强度;  $(I_{ij})_0$ : 纯  $j$  矿物  $i$  面之绕射强度。例如纯石英(100)与(112)之绕射强度分别为 280 840 与 82 597;  $\mu^*$ : 样品之质量吸收系数;  $\mu_j^*$ : 纯  $j$  矿物之质量吸收系数。

先以上列公式计算样品之石英重量百分比( $X_Q$ )即

$$X_Q = \frac{I(100)Q \cdot \mu^*}{(I(100)Q)_0 \cdot \mu_Q^*}$$

斜长石( $X_P$ ),绿泥石( $X_C$ )及伊来石( $X_I$ )之重量百分比则由( $X_Q$ )对比而求得。

$$\text{如: } \frac{(X_P)}{(X_Q)} = \frac{\frac{I(00^2)_P \cdot \mu^*}{(I(00^2)_P)_0 \cdot \mu_P^*}}{\frac{I(100)Q \cdot \mu^*}{(I(100)Q)_0 \cdot \mu^*}} = \frac{I(00^2)_P \cdot (I(100)Q)_0 \cdot \mu_Q^*}{I(100)Q \cdot (I(00^2)_P)_0 \cdot \mu_P^*}$$

式中之  $(I(100)Q)_0$ ,  $(I(00^2)_P)_0$ ,  $\mu_Q^*$  及  $\mu_P^*$  均为常数,令

$$K_1 = \frac{(I(100)Q)_0 \cdot \mu_Q^*}{(I(00^2)_P)_0 \cdot \mu_P^*} \quad \text{得} \quad X_P = X_Q \times \frac{I(00^2)_P}{I(100)Q} \times K_1$$

同理可得

$$X_C = X_Q \times \frac{I(00^2)_C}{I(100)Q} \times K_2$$

$$X_I = X_Q \times \frac{I(00_2)I}{I(100)Q} \times K_3$$

以上之计算方式为土壤部份,至于砾石部份则只须将式中  $I(100)Q$  与  $I(110)Q$  改为  $I(112)Q$ ,即可。

## 4 结果与讨论

放射性原子落尘存在于地面因自然植物社会、地形、土壤种类及雨量情况等不同,其残留地面表土之量因之而异。一般而言,森林或繁茂植物地区,坡度小,地形平坦, $^{90}\text{Sr}$  或  $^{137}\text{Cs}$  截留於土壤中较多。一般耕作地区,作物经常改变,坡度与地形并无特殊情形,原子落尘在土壤中之量不及上述情形多,属中等含量。而岩石暴露之表土或崩塌地中长石、石英等矿物成份,以及利用分析化学方法配合低背景放射线测定,均需高度技巧及专业知识,步骤细密复杂,任何疏忽,均可造成相当大之误差,应用时不可不求谨慎。

### 参考文献

- 1 庄作权,张晋华,雷通明。 $^{90}\text{Sr}$  及  $^{137}\text{Cs}$  在土壤中之扩散。糖业研究所研究汇报,1962,27:59~66
- 2 许俊男。放射化学,保健化学第三章。国兴出版社印行,1979,156~190
- 3 达见水库集水区经营第一期工作总报告。达见水库集水区经营专案小组编印,1972
- 4 德基水库集水区水土保持整体规划报告。德基水库集水区水土保持整体规划小组编印,1975
- 5 Goldich, S. S. A Study on Rock Weathering. Jour. Geology. 1938, 46:17~58
- 6 Hutchison, C. S. Laboratory Handbook of Petrographic Techniques. 1st ed., 1974, pp. 145~147, John Wiley & Son. New York
- 7 Jackson, M. L. and G. D. Sherman. (1953) Chemical Weathering of Minerals in Soils, Adv. in Agron. Vol. V. pp. 221~319
- 8 Kiely, P. V. and M. L. Jackson. (1965) Quartz, Feldspar and Mica Determination for Soils by Sodium Pyrosulfate Fusion. Soil Scil Soc. Amer. Proc. 29:159~163
- 9 Klug, H. P. and L. E. Alexander. (1974) X-Ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials. pp. 505-56(2nd ed.), John Wiley & Sons, Inc., New York
- 10 Muller, R. N., Douglas G. Sprugel, and Barbara Kohn. (1978) Erosional Transport and Deposition of Plutonium & Cesium in Two Small Midwestern Watersheds. J. Enviro Qual. 7(2):171~174
- 11 U. S. Environmental Protection Agency (1973). Procedures for Radiochemical Analysis of Nuclear Reactor Aqueous Solutions. Cincinnati, Ohio. (EPAR4-73-014)
- 12 Williams, P. P. (1959) Direct Quantitative diffractometric analysis. Analy. Chem. 31(11):1842~1844