

中華民國第四十六屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 生物及地球科學科

031730

誰說國中生不知地厚？—從板塊運動探討台灣
地區岩石圈的厚度及變化

學校名稱：嘉義市立北興國民中學

作者： 國二 侯廷璋 國二 李宗亮 國二 柯智仁	指導老師： 劉宏二
-----------------------------------	--------------

關鍵詞：板塊運動、岩石圈、浮力

摘要

利用水中的浮體實驗來模擬板塊運動造成岩石圈受擠壓的現象，找出受壓縮岩石圈的長度變化和所造成的厚度延伸量之間的關係式來推估岩石圈厚度；依相關文獻參考實際板塊位移量，推測台灣地區的岩石圈平均厚度約為 170 公里；並依照台灣地區地形來模擬標高不同區域的岩石圈厚度分布。並利用以上模型，證明當山區受到較大的侵蝕作用時，因岩石圈下層受浮力上浮補償了部分的高度，使山區需在較長時間，高度才會變矮。

壹、研究動機

在地球科學課本中提到板塊構造學說及地表作用，得知台灣島會隆起是因為板塊的擠壓，但是侵蝕作用會使台灣島被侵蝕而變低，而侵蝕量和擠壓所產生的抬升量理應遵守質量守恆定律，因此我們想從台灣目前的各種地質作用的數據試著找出台灣地區的岩石圈到底有多厚？若是造山運動已經停止的山，為何經過長年的侵蝕，還是能保持一定的高度？我們想利用實驗模擬來研究。

貳、研究目的

- 一、從台灣的板塊運動位移量、侵蝕率及抬升率，找出台灣地區岩石圈的厚度，並以實驗證明。
- 二、模擬台灣地區的岩石圈厚度分布。
- 三、找出已無造山運動的山，經過數億年的侵蝕，未被夷為平地的原因。

參、研究設備及器材

樹脂土、油土	壓克力水箱（長 50cm 寬 5cm 高 50cm）
量筒（最小刻度 10 ml）	木屑
長尺及測量尺（刻度到 0.2mm）	水缸
磅秤（感度 10 克）	描圖紙及方格紙
保鮮膜	木棍二支
電腦	網際網路
Microsoft office 2000	

肆、研究過程或方法

一、從台灣的板塊運動位移量、侵蝕率及抬升率，找出台灣地區岩石圈的厚度，並以實驗證明：

- (一)、假設板塊體積為不可壓縮，且應符合質量守恆定律，板塊在水平方向的壓縮量(ΔX)應變為垂直向的延伸量(ΔZ)；而延伸量理應為台灣平均的島所測量到隆起量加上平均侵蝕量。
- (二)、利用網路找尋台灣地區平均每年的板塊壓縮量、地殼隆起量及侵蝕量，計算出預期每年的延伸量。我們找到在各文獻中台灣地區的歐亞板塊和菲律賓海板塊相對運動所產生的壓縮量約為每年7-8cm（郭隆晨、余水倍, 民91）；台灣平均侵蝕率約為每年5.2mm，而台灣平均的隆起量約為台灣地區每年約以5-7mm之速率持續上升（Simon J. Dadson et al, 2003）。
- (三)、推估因板塊水平方向擠壓下台灣地區的垂直方向變化公式。從數學方法可得公式。代入上面已知的數值後，可計算出台灣的垂直變形區域約為21Km，即為岩石圈的厚度？
- (四)、目前學術研究的文獻中，估計岩石圈在台灣的隱沒帶可達200Km（饒瑞鈞，民91），且在30-100Km深的位置仍有許多地震的產生。和上面厚度計算結果完成不符，經閱讀資料後發現假設有誤，因岩石圈浮在軟流圈之上，而部分伸長量是向下延伸進入到軟流圈內，而不是完全表現在地表抬升。所以我們重新設計實驗來找出向下的延伸量，重新估計岩石圈的厚度。
- (五)、在目前的板塊構造學說來看，岩石圈浮在軟流圈之上，如果岩石圈浮在軟流圈上達到均衡，則岩石圈本身重量與軟流圈提供的浮力要達成平衡。

(六)、實驗設計

1. 在壓克力水箱中裝半滿的水，並以液面為基準線，而以下的厚度記錄也均以液面為基準點；而以水來模擬軟流圈部分。
2. 將樹脂土、油土及木屑混合，使密度小於1公克/立方公分的樹脂土、油土木屑混合物，用保鮮膜包起來，將樹脂土、油土木屑混合物均勻混合壓密定型後（圖一），以混合物所做的浮體來模擬岩石圈部分。



圖一

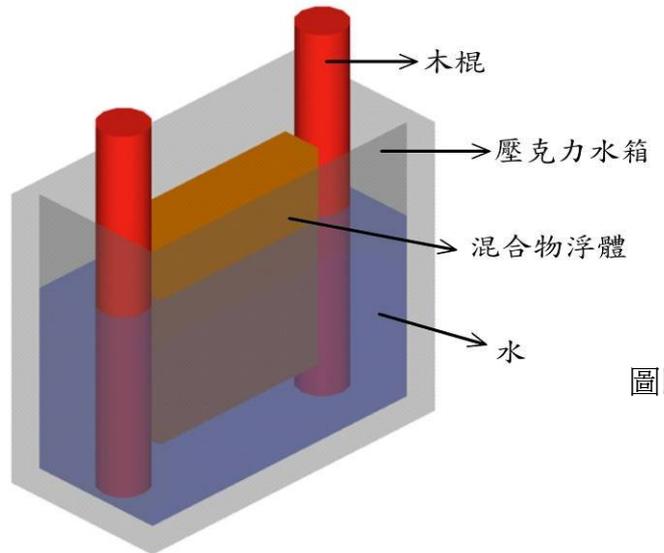
3. 以磅秤來測量混合物浮體的質量（圖二），並將浮體壓入水缸來測量其體積，測量計算此混合物浮體的密度。
4. 將混合物浮體放置在水箱內（圖三），觀察在液面上下的厚度後並記錄。
5. 在混合物浮體兩側放木棍（裝置如圖四），以木棍擠壓混合物浮體，觀察受擠壓的混合物浮體外形變化。而在水面上的向上延伸量即為我們所觀察地面的總抬升量，另外有向軟流圈的向下延伸量；上面二者加起來為總延伸量。
6. 觀察大約每5mm的水平壓縮，垂直方向的變化量，將其平均總延伸量及水面上的延伸量分別記錄；另外觀察是否有抬升變形量較大的區域，並記錄該區域的總延伸量及液面上的延伸量（圖五）。
7. 分別做出不同密度的混合物浮體，重複上列實驗3-6的步驟，紀錄結果。
8. 用Excel來分析並找出浮體密度和浮體在液面上的厚度關係。比較不同密度的浮體，其總延伸量及液面上抬



圖二



圖三



圖四



圖五

升量的關係。

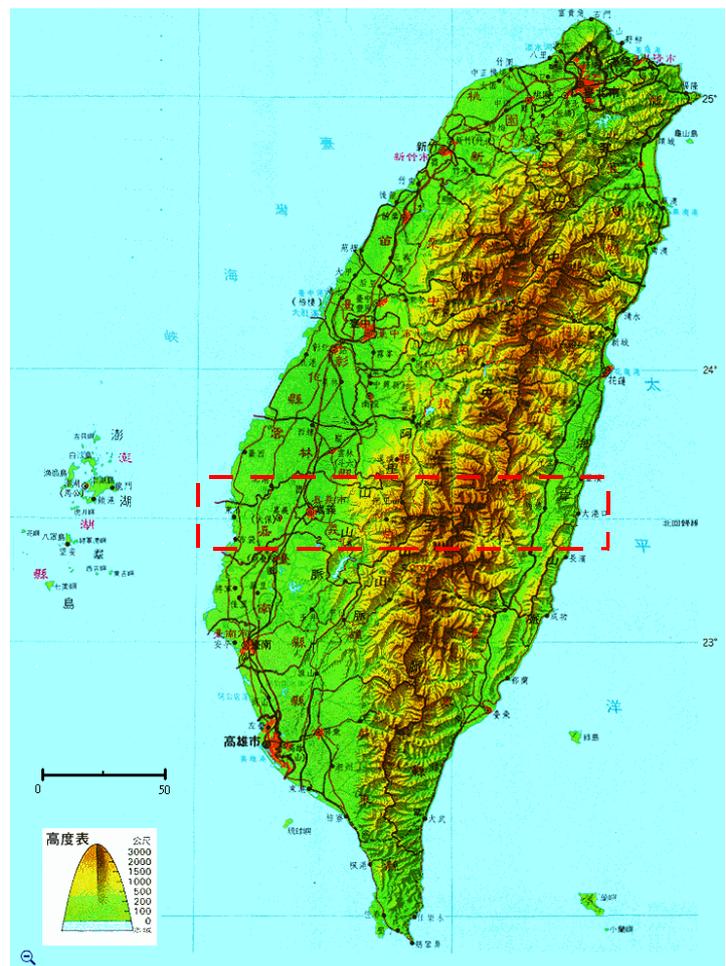
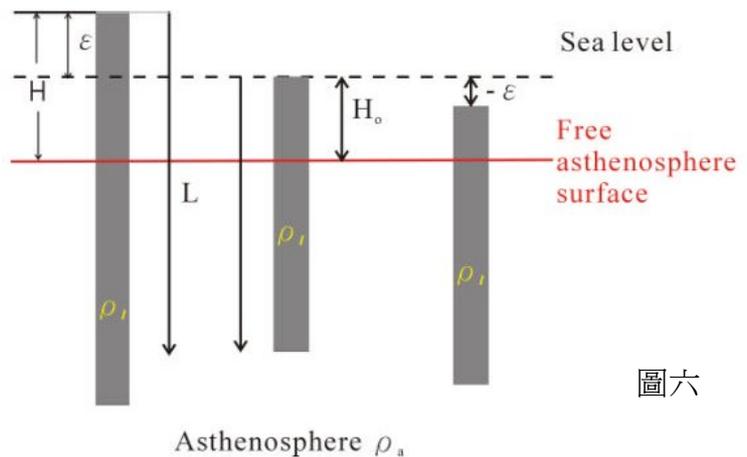
- (七)、將目前在學術上已測得岩石圈的密度 2.8g/cm^3 及軟流圈的密度 3.2g/cm^3 (羅仲良, 民 90), 代入上列實驗中所得關係式, 並以研究中, 已知的抬升量來算出總延伸量, 來得到修正後的岩石圈厚度。

二、模擬台灣地區的岩石圈厚度分布：依據上列實驗的結果及台灣的地形分布來模擬。

- (一)、從實驗可看出, 在相同密度的浮體中, 當厚度不同時, 浮在液面上的高度也不同, 因此可推論

若岩石圈的密度都相同, 而不同厚度岩石圈浮在軟流圈時, 岩石圈在自由軟流圈表面之上的高度不同而造成在地球表面所看到的地形起伏 (圖六)。

- (二)、上列求得台灣地區的岩石圈數值為台灣地區的平均岩石圈厚度, 而台灣地區地形平均高度約在 660 公尺 (以 0.5km 計算)。上列所求得的厚度即為海拔 660 公



圖七

台灣數值地形圖

資料來源：台灣大學地質學系火山研究中心

<http://volcano.gl.ntu.edu.tw/>

尺處的岩石圈厚度；而在模擬時，即為地形上標高 0 到 1000 公尺的區塊做為岩石圈的高度基準。從地形圖中找出台灣地區的地形剖面起伏，已知岩石圈密度為 2.8 g/cm^3 ，軟流圈密度為 3.2 g/cm^3 ，故將紙黏土的密度調整約為 7:8。依照台灣東西向剖面並縮小比例（以 2mm 來模擬 1km 厚），來模擬符合台灣地區的岩石圈剖面。

- (三)、為方便模擬及觀察，我們以地形的高度做數位分割處理，我們以嘉義的緯度（北回歸線）的位置（圖七紅色區塊位置），從西部台灣海峽的海平面到東部海岸，每隔 1000 公尺為單一區域，將台灣地區的岩石圈垂直剖面分割為數個岩石圈剖面，從海拔 0 公尺到 1000 公尺為一塊；1000 公尺到 2000 公尺一塊，…；依此類推。

三、無造山運動的山區在侵蝕作用下，未快速被夷平的原因：

- (一)、已知台灣地區的山區侵蝕率平均約為每年 5mm，可得知侵蝕一公里約花二十萬年的時間；我們利用在做完實驗三的模擬後，用完成的東西繼續模擬實驗四，以每次一公里的尺度（也就是在模型中的 2mm）來侵蝕岩石。
- (二)、在模擬海拔最高的區塊被侵蝕時，將上方的紙黏土慢慢削去，一次削去 2mm，來模擬山區受到侵蝕的情況，並紀錄所削除的厚度，並觀察剩下的紙黏土混合物在液面上的高度及總厚度的變化，紀錄其變化量。
- (三)、將上列的各種記錄加以分析，並解釋成因。

伍、研究結果

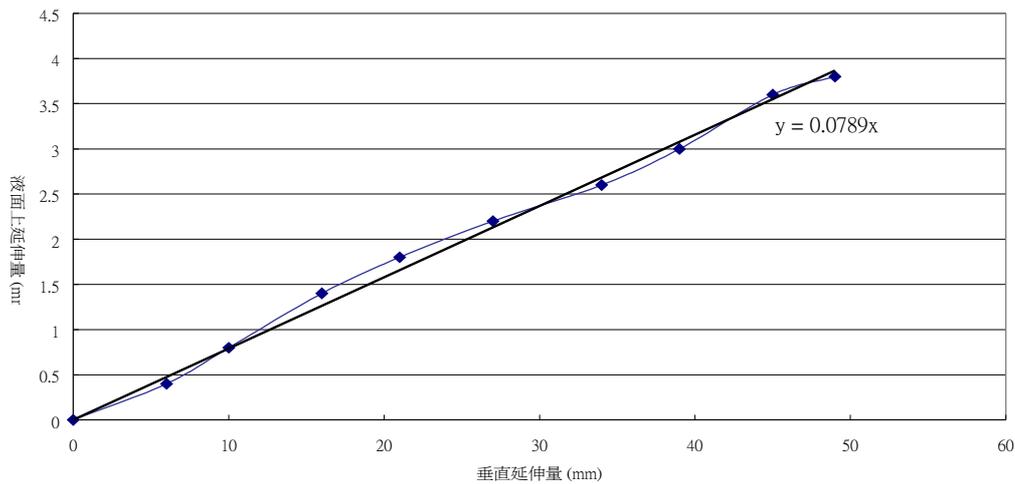
一、從台灣的板塊運動位移量、侵蝕率及抬升率，找出台灣地區岩石圈的厚度，並以實驗證明：

- (一) 我們以兩個不同密度混合物浮體來實驗，而兩者的平均密度、液面上高度及厚度的變化量紀錄及分析。

浮體甲：

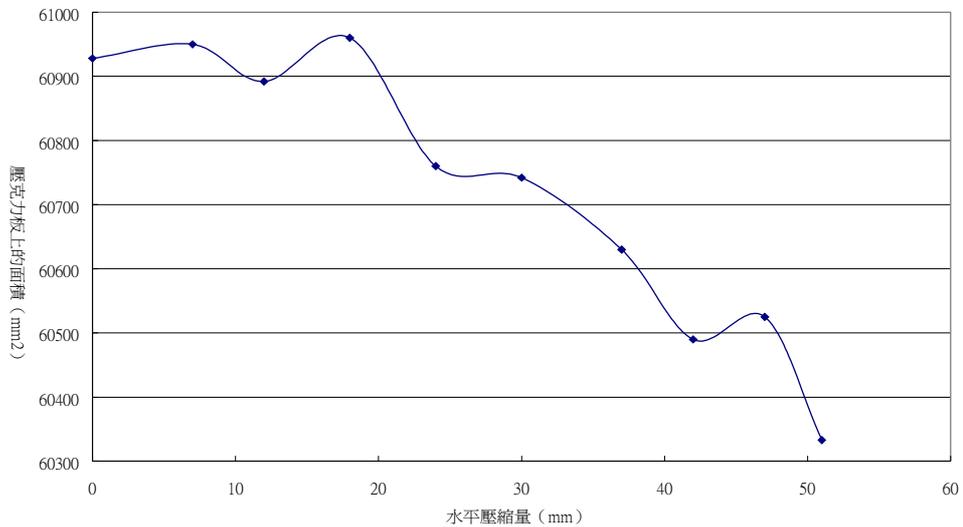
浮體質量 (g)	水平 平均長度 (mm)	水平 壓縮量 (mm)	垂直 平均厚度 (mm)	垂直 厚度延伸量 (mm)	液面上 延伸高度 (mm)	液面下 延伸厚度 (mm)
2780	272.0	0	224.0	0	0	0
	265.0	7.0	230.0	6.0	0.4	5.6
浮體體積 (cm ³)	260.0	12.0	234.2	10.0	0.8	9.2
	254.0	18.0	240.0	16.0	1.4	14.6
3050	248.0	24.0	245.0	21.0	1.8	19.2
	242.0	30.0	251.0	27.0	2.2	24.8
測得密度 (g/ cm ³)	235.0	37.0	258.0	34.0	2.6	31.4
	230.0	42.0	263.0	39.0	3.0	36.0
0.911	225.0	47.0	269.0	45.0	3.6	41.4
	221.0	51.0	273.0	49.0	3.8	45.2

液面上的延伸量和總量的關係



圖八

水平壓縮量和壓克力板上的面積關係

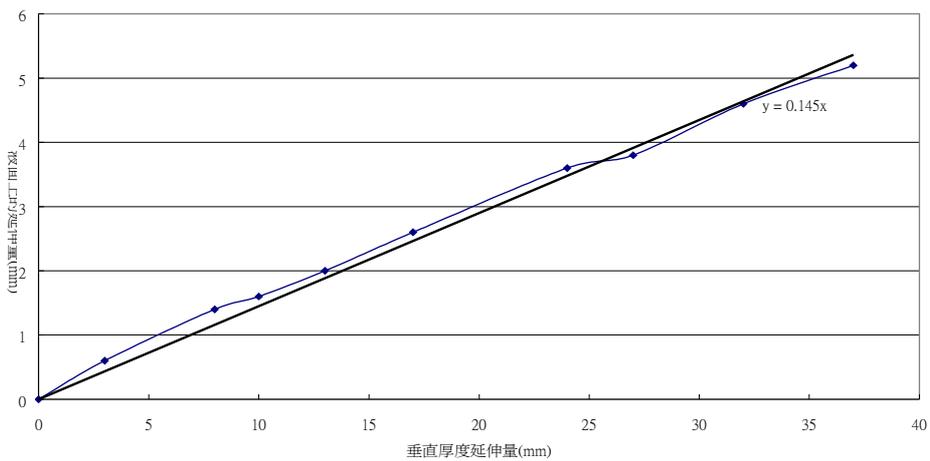


圖九

浮體乙：

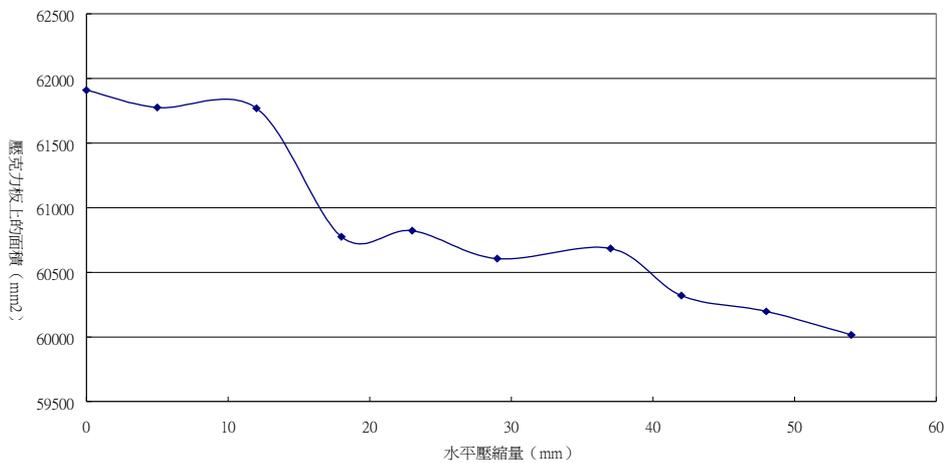
浮體質量 (g)	水平 平均長度 (mm)	水平 壓縮量 (mm)	垂直 平均厚度 (mm)	垂直 厚度延伸量 (mm)	液面上 延伸高度 (mm)	液面下 延伸厚度 (mm)
2580	302.0	0	205.0	0	0	0
	297.0	5.0	208.0	3.0	0.6	2.4
浮體體積 (cm ³)	290.0	12.0	213.0	8.0	1.4	6.6
	284.0	18.0	214.0	10.0	1.6	8.4
3100	279.0	23.0	218.0	13.0	2.0	11.0
	273.0	29.0	222.0	17.0	2.6	14.4
測得密度 (g/cm ³)	265.0	37.0	229.0	24.0	3.6	20.4
	260.0	42.0	232.0	27.0	3.8	23.2
0.832	254.0	48.0	237.0	32.0	4.6	27.4
	248.0	54.0	242.0	37.0	5.2	31.8

液面上的延伸量和總量的關係



圖十

水平壓縮量和壓克力板上的面積關係



圖十一

1. 從二個實驗結果我們大致可以得到，密度 (D) 和浮體在液面上的部分厚度延伸量 (ΔH) 及厚度總延伸量 (ΔL) 的關係為

$$\Delta H = \Delta L \times (1 - D)$$

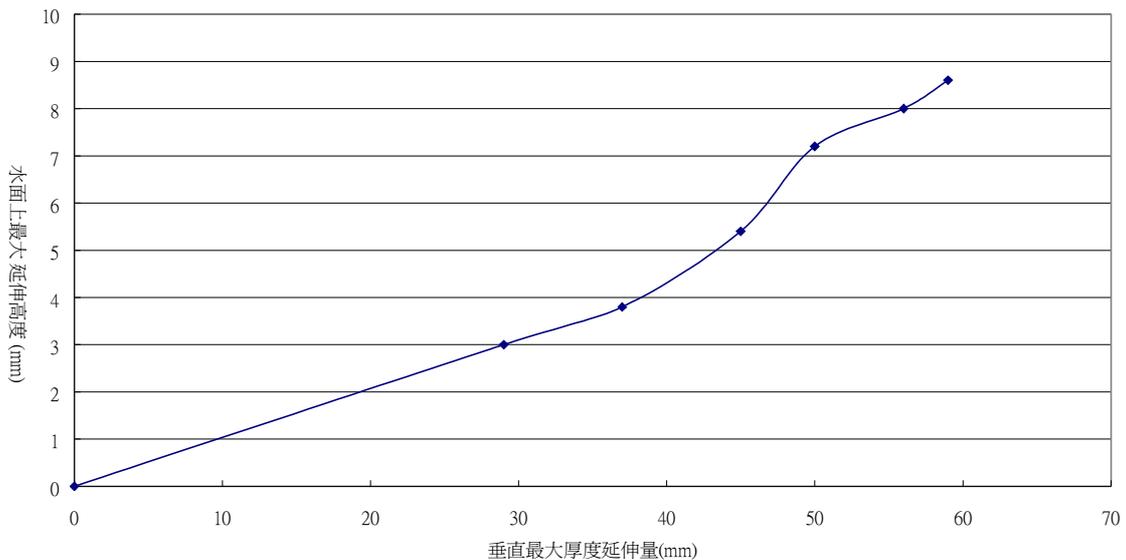
2. 在兩個浮體的第一張分析圖中(圖八、圖十)，浮體的密度因受壓而有變大。
3. 在兩個浮體的第二張分析圖中(圖九、圖十一)，壓克力板上的面積變化受到水平壓縮量的增加而有明顯變小。

(二)、混合物較大抬升區域的密度、水面上高度及總延伸量的實驗紀錄分析。

浮體甲：

測得密度 (g/ cm ³)	水平 平均長度 (mm)	水平 壓縮量 (mm)	垂直最大厚度 處處的厚度 (mm)	垂直最大 厚度延伸量 (mm)	水面上最大 延伸高度 (mm)	水面下最大 延伸厚度 (mm)
0.911	272.0	0	224.0	0	0	0
	248.0	24.0	253.0	29.0	3.0	26.0
出現位置	242.0	30.0	261.0	37.0	3.8	33.2
	235.0	37.0	269.0	45.0	5.4	39.6
距右側木桿 2公分處	230.0	42.0	274.0	50.0	7.2	42.8
	225.0	47.0	280.0	56.0	8.0	48.0
	221.0	51.0	283.0	59.0	8.6	50.4

水面上最大 延伸高度和最大厚度延伸量關係圖

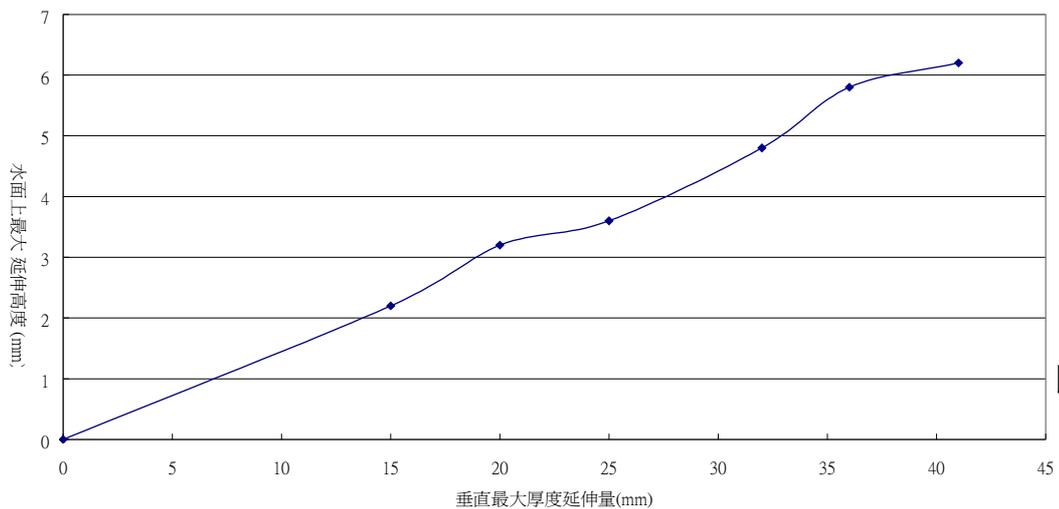


圖十二

浮體乙：

測得密度 (g/ cm ³)	水平 平均長度 (mm)	水平 壓縮量 (mm)	垂直最大厚度 處厚度 (mm)	垂直最大 厚度延伸量 (mm)	水面上最大 延伸高度 (mm)	水面下最大 延伸厚度 (mm)
0.832	272.0	0	224.0	0	0	0
	284.0	18.0	220.0	15.0	2.2	12.8
出現位置	279.0	23.0	225.0	20.0	3.0	12.0
	273.0	29.0	230.0	25.0	3.6	21.4
距右側木樺 3公分處	265.0	37.0	237.0	32.0	4.8	27.2
	260.0	42.0	241.0	36.0	5.6	30.4
	254.0	48.0	246.0	41.0	6.2	34.8

水面上最大 延伸高度和最大厚度延伸量關係圖



圖十三

1. 在較大變形量區域的測量中發現，水面上及最大厚度的延伸量分析圖大致上和平均值差不多，但誤差較大且較隨機。
2. 我們觀測到較大變形的區域集中在浮體的兩側。
3. 從不同密度的二張關係圖（圖十二、十三）比較，看出較高密度的浮體誤差值比較低密度的還大。

（三）、修正後的岩石圈厚度

在上列公式中所推得的公式： $Z\Delta X + X\Delta Z = 0$ 。

而 ΔZ 即為厚度的總變化量 ΔL ，而總抬升量應為 ΔH

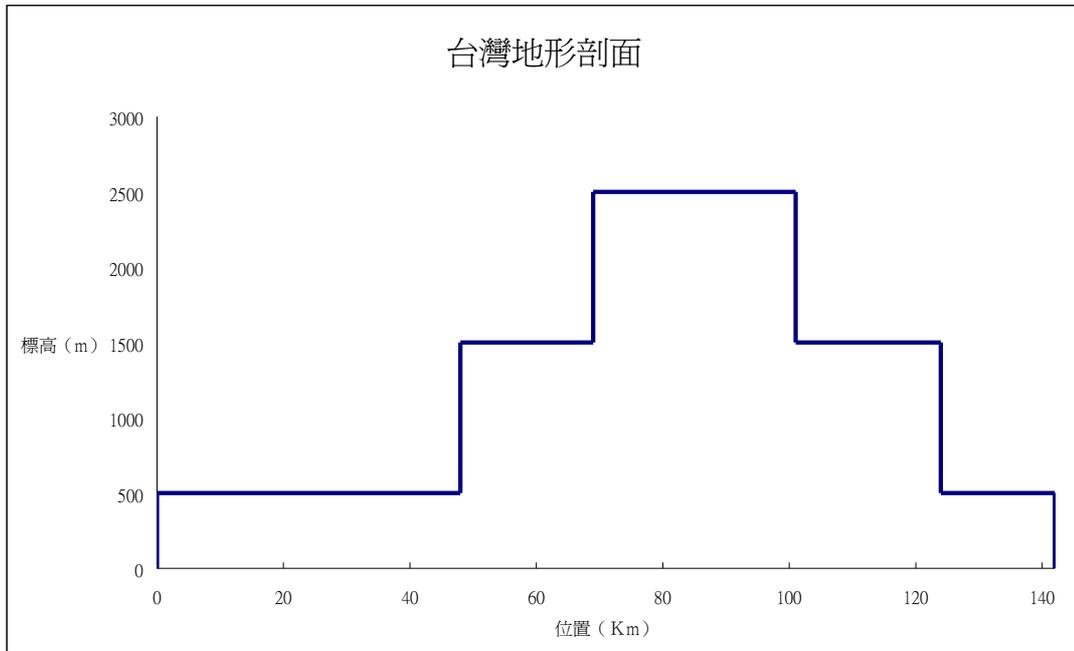
代入上列所得公式 $\Delta H = \Delta L \times (1 - D)$

（其中 D 為岩石圈和軟流圈的密度比值，約為 $7/8$ ）

即可得到 $Z\Delta X + X(\Delta H / (1 - D)) = 0$
 代入上列和數值若以上(數據均以最大值來計算)
 Z 可得約為 168 公里

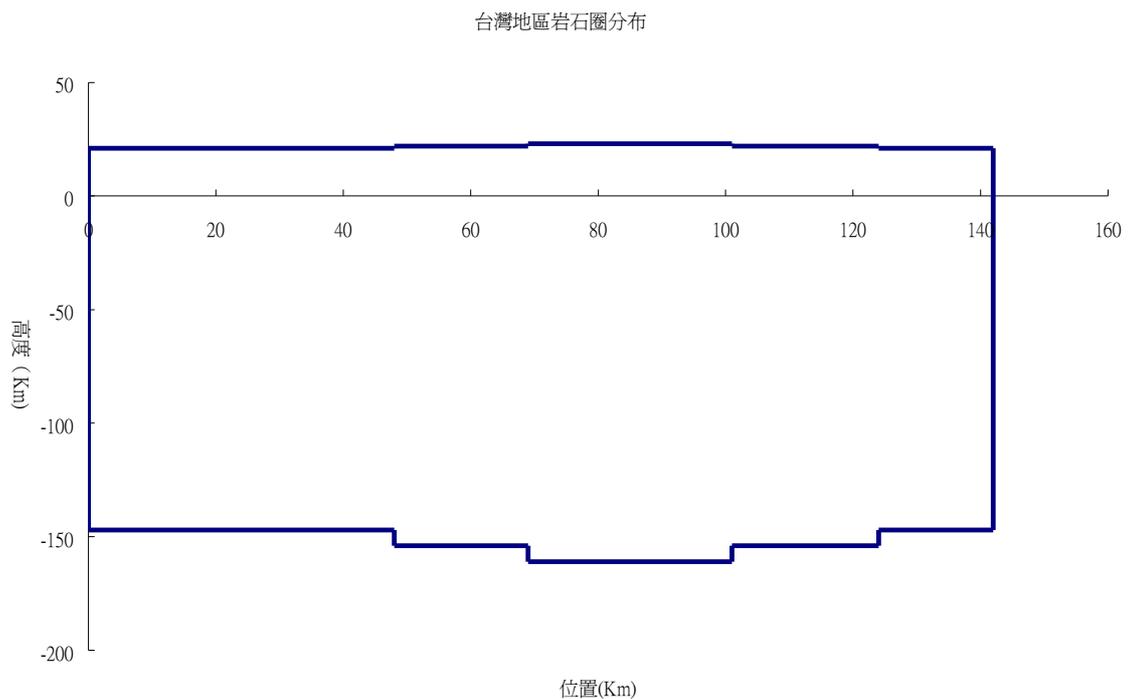
二、模擬台灣地區的岩石圈厚度分布：

(一) 從地形圖畫出剖面圖：測量地形圖後，每隔 1000 公尺的數位剖面圖（如圖十四）。



圖十四

(二) 台灣地區的岩石圈的分布：經由計算可得圖十五。其中高度為從自由軟流圈面為基準線計算。



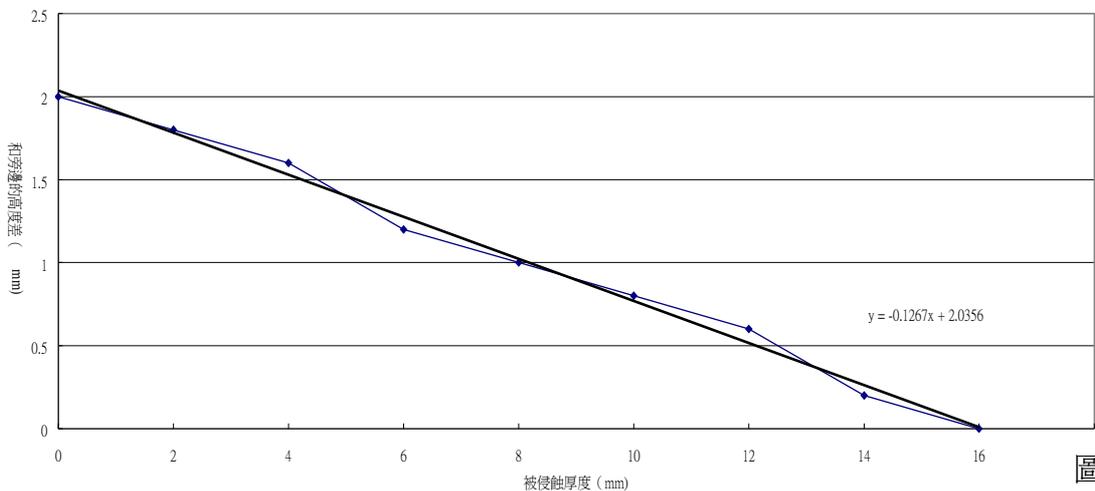
圖十五

三、無造山運動的山區在侵蝕作用下，未快速被夷平的原因：

- (一)、山區被侵蝕削除的厚度及在液面上高度的變化。(圖十六)
- (二) 以台灣的平均侵蝕量來看，一公里約要二十萬年的時間，在實驗中的比例約為2mm，從實驗結果可看出需要八次，也就是一百六十萬年的時間才能使山區的高度下降一公里。

山區岩石圈 總厚度(mm)	液面上的厚度 (mm)	被削除的厚度 (mm)	削除後岩石圈 總厚度(mm)	削除後液面上的 厚度 (mm)	旁邊岩石圈液面 上的厚度(mm)	和旁邊岩石圈的 高度差
368	46	0	368	46.0	44	2.0
		2	366	45.8		1.8
		4	364	45.6		1.6
		6	362	45.2		1.2
		8	360	45.0		1.0
		10	358	44.8		0.8
		12	356	44.4		0.6
		14	354	44.2		0.2
		16	352	44.0		0.0

侵蝕量和被侵蝕山區的高度關係



圖十六

陸、討論

一、從台灣的板塊運動位移量、侵蝕率及抬升率，找出台灣地區岩石圈的厚度，並以實驗證明：

- (一) 若將台灣地區的地質構造簡化為一個長方體(如圖十七)，當此長方體受水平向的壓力而使垂直向伸張，長方體變形區域為X，其水平方向的壓縮量(ΔX)；而長方體垂直變形區域為Z，其

垂直向的延伸量 (ΔZ) 的關係，可以得數學公式：

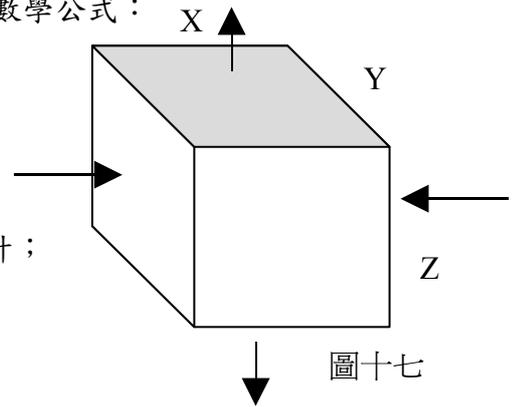
$$XYZ = (X + \Delta X) Y (Z + \Delta Z)$$

(當長度延伸時為正值，壓縮時為負值)

$$X\Delta Z + Z\Delta X + \Delta X\Delta Z = 0$$

其中 $\Delta X\Delta Z$ 因遠小於 X 及 Z ，可乎略不計；

故公式可用 $Z\Delta X + X\Delta Z = 0$ 來表示。

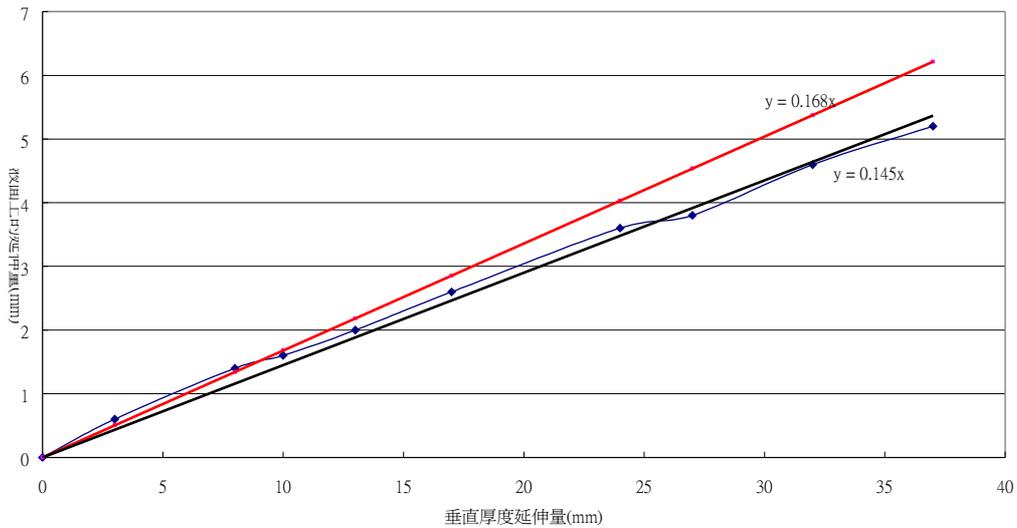


若以台灣地區的寬度約為 140km，代入 X 計算，代入台灣地區的已知數值 (若以上數據均以最大值來計算) 可計算出垂直變形區域 Z 約為 21km，即為岩石圈的厚度。

但從地震的深度看來，岩石圈的厚度超過 100 公里，以目前地震成因理論的彈力回跳說而言，這是不合理的，因為彈力回跳必需是固體才能有彈力，所以我們懷疑板塊擠壓時的抬升量並不全表現在地上，岩石圈底部也會向軟流圈的方向延伸，所以我們就重新設計實驗。

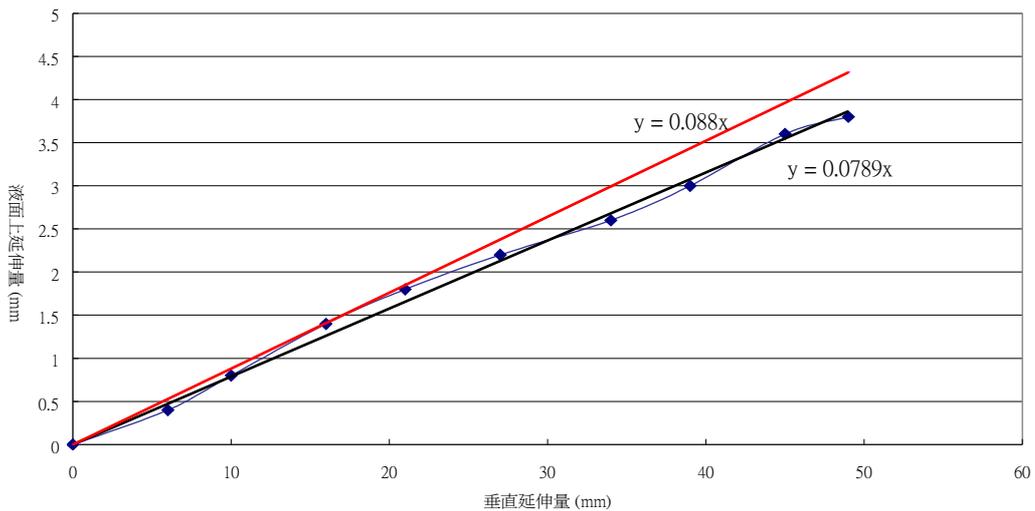
- (二)、在設計的實驗中，所有的厚度測量均以水面當作基準面 (也就是自由軟流圈面)；我們必需是假設軟流圈分布是均勻的，其物質組成是均質的。
- (三)、為簡化實驗，我們把岩石圈均以同一材質來模擬，也就是假設岩石圈的組成及物理特性當成是均勻且均質的討論，和實際情況較不一致，也無法得知在岩石圈中地殼和地函的分布及差異。
- (四)、在上列實驗中，我們不討論其他作用造成的影響 (如：對流時的作用力、岩石圈物質的再熔融..等)；我們假設影響岩石圈抬升的作用，只有因當岩石圈受壓垂直延伸後，岩石圈和軟流圈密度不同所造成的浮力及岩石圈重力兩者的平衡。
- (五)、在壓克力的水槽裝水後，當水的高度超過一半以上時，會因水壓過大而使水槽產生中間部位會在變形的現象；為改善降低對實驗的影響，我們在外圈增加膠帶及壓克力，發現有明顯地改善。
- (六)、在擠壓過程中，浮體受壓時因應力無法均勻傳遞，而造成受壓區每個位置變形量不一，為瞭解浮力和重力的平衡是否出現在此局部區域，特別在實驗二中測量。
- (七)、因浮體變形的不均勻，所以在測量平均高度不易，因此，我們使用描圖紙來畫出浮體邊界位置的分布及水面位置，來估計平均的厚度及延伸量。
- (八)、從兩個浮體的分析圖 (浮體甲：圖十八、浮體乙：圖十九) 中的趨勢線 (黑色) 和原來的密度 (紅色) 來比較，從浮體在液面上及液面下的長度可看出密度有明顯變化，可能因為在浮體內仍有許多空隙或材料本身是可壓縮的，當浮體被壓縮後，密度變高。

液面上的延伸量和總量的關係



圖十八

液面上的延伸量和總量的關係



圖十九

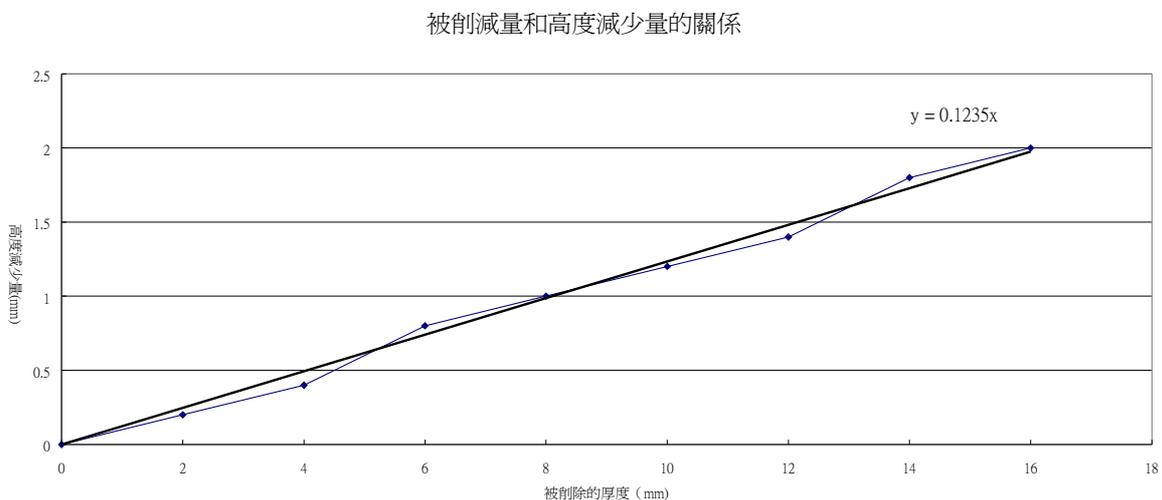
- (九)、我們發現擠壓浮體的過程中所測得的截面積，從關係圖中可看出有明顯的起伏變化，除了是前者浮體所提的密度在過程中因壓縮而體積變小外；也可能是向木棍及壓克力板間的空隙延伸造成高估了截面積，或是壓克力板變形的影響，而低估了截面積。
- (十)、可看出浮體兩側受壓區有明顯的變形量，可能是因為木棍施力的位置在兩側，而應力無法向中間傳遞所造成，或是浮體的結構造成中間不易變形，而使變形較大的位置集中在兩側；這個現象也可以說明板塊在靠近聚合性邊界的會有比較大的變形量形成皺褶山脈。
- (十一)、在變形量較大區域的分析圖中，可看出浮體在水面上及水下的分布位置較不遵守浮力和重力平衡，可能因受到浮體其他位置的支撐力。

二、台灣地區的岩石圈厚度分布：

- (一)、討論台灣地區的岩石圈分布時，在實驗假設中我們只考慮浮體的浮力及重力平衡，為避免因浮體間的作用力造成影響，所以將浮體在不同地形高度時，以個別的小區塊來合併模擬。
- (二)、本實驗的數值和板塊間的聚合運動速率、變形區域寬度、地形抬升量、岩石圈和軟流圈的密度比值均有關，若這些數據測量估計誤差較大時，所累積的誤差就很可觀，所以我們所評估的厚度，可能有很大的誤差值。
- (三)、若只考慮參考文獻在採用數據上下限時所造成的誤差，約在 $\pm 15\%$ 左右；也就是台灣地區岩石圈厚度的上下限約在145公里至195公里左右。
- (四)、在台灣地區，實際的岩石圈分布不只限於浮力和重力平衡；板塊間擠壓所產生的隱沒作用，更是決定岩石圈的分布，而我們只能模擬簡單的狀況，而過於複雜的過程以現階段所學不易探討；所以不列入實驗。

三、無造山運動的山區在侵蝕作用下，未快速被夷平的原因：

- (一)、從實驗中可看出，侵蝕厚度和高度差來看，可看出和密度有關，高度下降量和總侵蝕量的模擬浮體因浮力上浮的量（如圖廿），其比值約為 $1-D$ 。（ D 為浮體的密度）

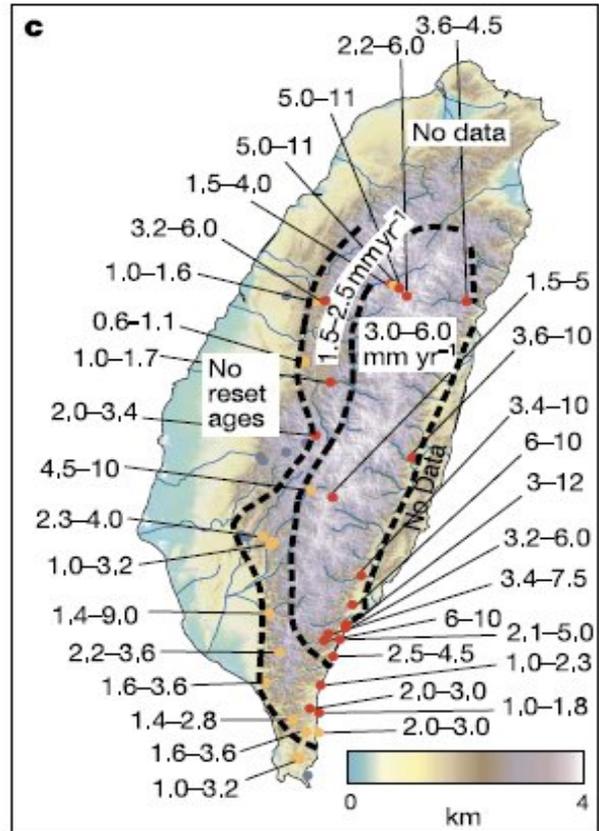


圖廿

- (二)、從上列的結果可知要夷平一公里高度的山，需要一百六十萬年的時間侵蝕，但已知地形愈低的位置，侵蝕速率愈小(如圖廿一)，所花時間可能更久。
- (三)、我們發現當岩石圈表被侵蝕時，下層因受到浮力而抬升補償，而補償量和岩石圈及軟流圈密度比值有關，比值愈接近1時，上浮量愈

大。

- (四)、台灣地區的因氣候條件及地形影響才有如高的侵蝕率，若在大洲內陸海拔 1500 公尺的山區，可能更少；若大約以每年 0.1mm 的侵蝕率來計算，約一億年後，高度才會降到海拔 500 公尺。



台灣地區各地平均每年的侵蝕率。
摘自 Simon J. Dadson et al., 2003

圖廿一

柒、結論

- 一、從板塊構造學說所設計的浮力實驗分析，得知當板塊運動所壓縮的岩石圈長度，所造成的厚度延伸量，只有一小部分反應在向上抬升，而向下延伸量的部分才是主要的延伸區域；

其關係可用 $\Delta H = \Delta L \times (1 - D)$ 來表示

其中

(D) 為密度比值

(ΔH) 為向上抬升量

(ΔL) 為厚度總變形量

- 二、我們利用實驗結果，推測台灣地區的岩石圈平均厚度約為 170 公里，地形隨著厚度變化改變，地形較高時，岩石圈厚度較厚，最大可達 190 公里，在岩石圈底部的深度分布差異較大。

- 三、目前無造山運動的古老山區，受到岩石圈下層受浮力上浮補償了部分的高度，會使受侵蝕的山區不會快速的削減，而需要很長久的時間才會有明顯的降低。
- 四、我們發現只要利用簡單的實驗設計及研究探討，也能夠得到和科學文獻類似的結果。

捌、參考資料及其他

- 一、國中自然與生活科技—地球科學（民94）。改變地表的力量（34-37頁）、板塊構造與運動（45-62頁）。台北市：康軒文教事業。
- 二、鄧屬予（民91）。板塊間看台灣地震。科學發展，350期，12-19。
- 三、饒瑞鈞（民91）。台灣的地震地體構造。台灣之活動斷層與地震災害研討會論文集。30-48。
- 四、郭隆晨、余水倍（民91）。高精度GPS觀測在地球科學上之應用。台灣之活動斷層與地震災害研討會論文集，63-82。
- 五、Simon J. Dadson et al. (2003). Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. NATURE, VOL 426, 648-651.
- 六、羅仲良（民90）。台灣地區岩石圈之浮力與重力位能的探討。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，未出版，中壢市。
- 七、郭建賢。環境科學導論—台灣的自然環境。民95年4月3日取自 <http://www.sinica.edu.tw/~hagkuo/taiwanenv/lecture3.htm>
- 八、國立中央大學應用地質所—工程地質與新科技實驗室。台灣地震資料查詢。民95年4月3日取自 <http://gis.geo.ncu.edu.tw/gis/eq/eq-qry.htm>
- 九、國立台灣大學地質學系—火山研究中心。台灣數值地形圖。民95年4月7日取自 http://volcano.gl.ntu.edu.tw/images/earthmap/taiwan_map_digital_large.gif

評 語

031730 誰說國中生不知地厚？-從板塊運動探討台灣地區

岩石圈的厚度及變化

本作品以均衡觀念(Isostasy)探討台灣地區岩石圈之厚度。

可惜未與已發表之震波資料對比，似尚有改進之空間。