

隱沒帶的發展和多樣性受控於地塊的寬度

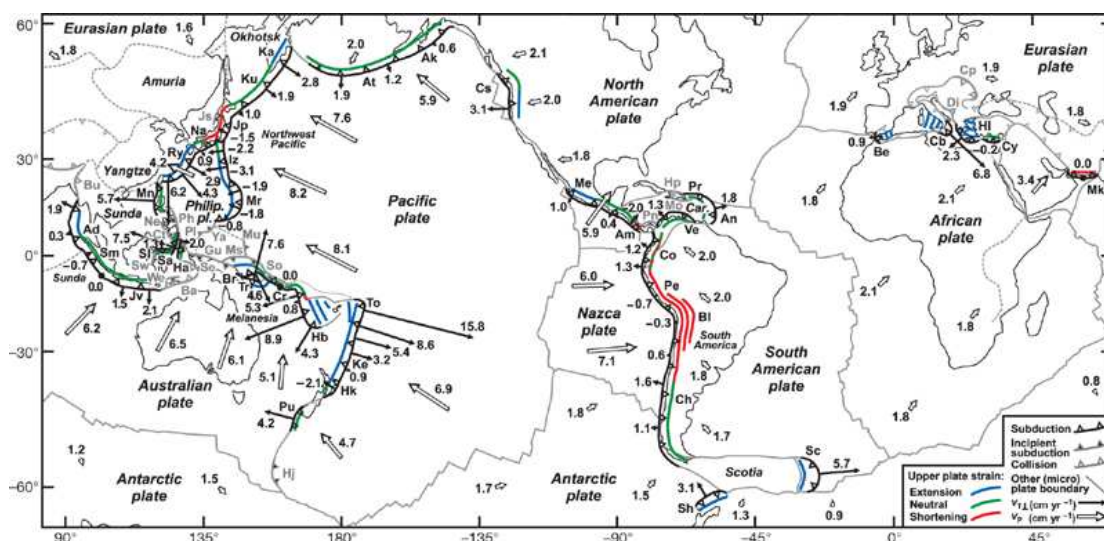
地震學和地球化學的研究推測地函物質會沿著隱沒地塊的側邊流向地函楔(mantle wedge)，這可能因為海溝的後退和地塊 (slab) 的回捲 (rollback) 所造成的回流，可預期的是從地塊側邊回流比起從地塊前端來說容易許多且會促使地塊的後退；實際觀察確實發現自然界最快的海溝移動速度 ($v_{T\perp} = 6-16 \text{ cm yr}^{-1}$) 發生在地塊兩側邊緣 1,200 公里內，而當距離地塊邊緣大於 2,000 公里時，速度則低於 2.0 cm yr^{-1} (圖一、圖二)；針對近 48,800 公里的海溝的研究顯示，板塊隱沒的速率有 27.6% 是起因於海溝的移動所造成 (平均 $v_{T\perp} = 1.51 \text{ cm yr}^{-1}$ ，而平均板塊聚合速率 5.47 cm yr^{-1})，而且此海溝的移動造成上部地函物質沿著移動地塊的側邊產生每年約 539 km^3 體積的流動通量，這個流動通量主要是橫向的水平流動並造成顯著的地函攪動，相較之下縱向的垂直流動每年就只有近 193 km^3 而已。

最新的研究以三度空間數值實驗針對所有地塊寬度 (300–7,000 km) 做探討：在較寬的地塊 (6,000 km)，一開始當地塊隱沒的傾角逐漸增加時，板塊向海溝移動的速度及海溝後退的速度都是慢的，伴隨地塊回捲、海溝後退造成上部地函的物質沿著板塊側邊回流，板塊移動和海溝後退的速度隨著時間和隱沒地塊長度增加而變快，直到隱沒地塊的前端接觸到地函不連續帶，此時，地塊中心部位在地函不連續帶上堆積，產生了巨大的偃臥褶皺 (recumbent fold, 圖三)，海溝後退速度開始減慢並轉變成階段式的前進和後退 ($-1.5 < v_{T\perp} < 1.0 \text{ cm yr}^{-1}$ ，負值代表前進)，近地塊兩側邊緣，海溝明顯的後退 (高達 6.0 cm yr^{-1}) 並在地函過度帶上產生皺邊的幾何堆積。寬度居中的地塊 (2,000–3,000 公里)，海溝的後退速度適中，在地函過度帶產生褶皺和少量的皺邊。狹小的地塊 (300–1,500 公里) 出現最快速的海溝後退但最慢的板塊移動速度。

數值模擬結果顯示地塊越寬，海溝後退速度越慢 (圖四 a)，當地塊隱沒 400–500 公里時，也就是在地塊前端接觸地函過度帶前會出現最快速度。地塊寬度小於 1,500 公里，海溝以後退為主 ($-0.4 < v_{T\perp} < 10.0 \text{ cm yr}^{-1}$)；地塊寬度大於 2,000 公里，出現階段性的海溝前進。地塊寬度也造成沿著海溝在不同位置產生不同的後退速度，當寬度小於 1,500 公里，在海溝中央出現最大速度，向邊緣速度漸減，因而產生彎曲的海溝，凹向地函楔的一邊 (圖四 b)；寬度在 2,000 到 3,000 公里者沿著海溝的速度相差不大，形成較為直線的海溝 (圖四 c)；寬度大於 4,000 公里的地塊中間速度最小，接近海溝兩側邊緣速度最大，沿著上部地函停滯帶 (stagnation zone，此區域地函楔有最少的物質交換) 彎曲造成一個兩邊凹而中間凸向地函楔的海溝 (圖四 d)。

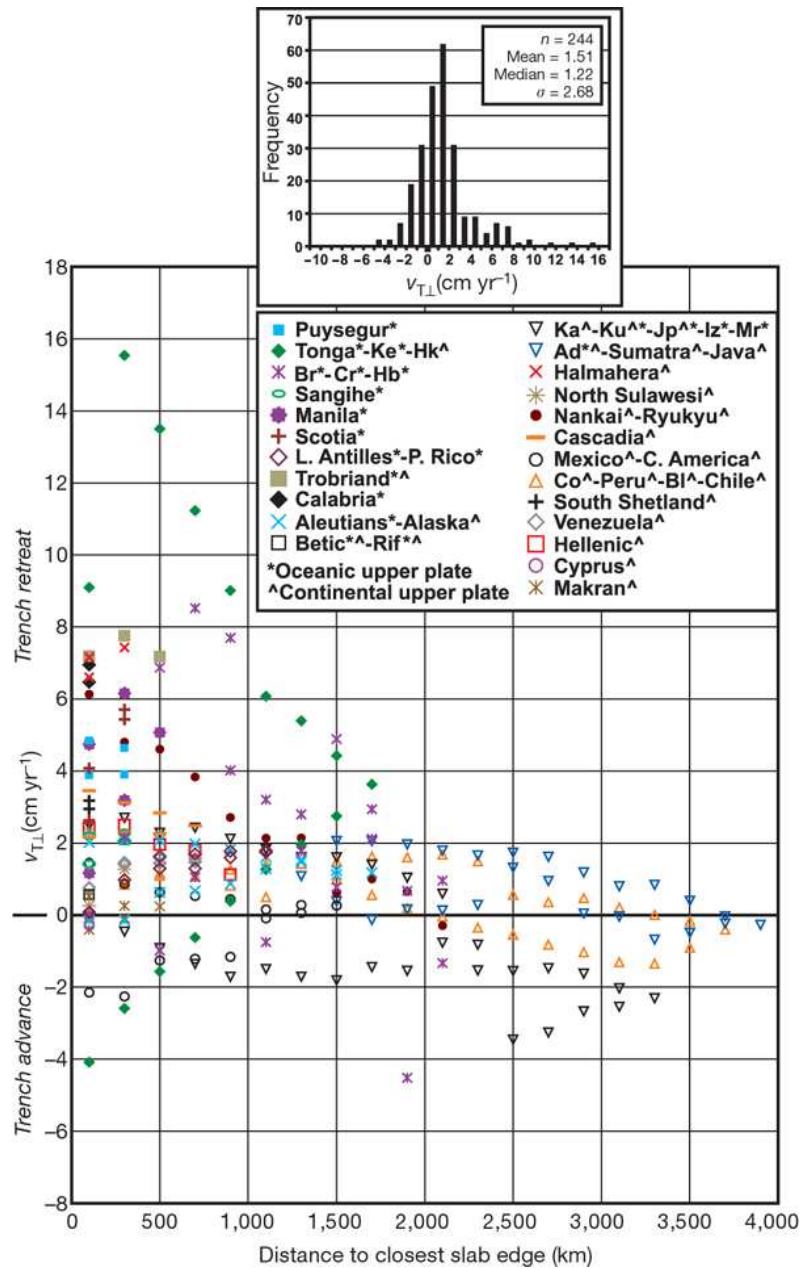
模擬顯示地塊回捲引起的回流會在地塊邊緣 800 公里內產生凹型的海溝，此和實際在地塊邊緣後退的海溝在幾何型態上是一致的（圖一），在全球小於 1,600 公里寬的地塊，14 處就有 13 處出現凹型的海溝；1,700–3,550 公里寬的地塊，6 處有 4 處接近直線；而 4,400–7,850 公里寬者，4 處有 3 處是凸型的。另外海溝的形狀也與窄（圖五 a, b）和寬（圖五 c, d）的隱沒帶長時間的運動相符合，並可解釋為何全球四個最寬的隱沒帶（South America, Sunda, Northwest Pacific and Melanesia）幾乎不動或在中間區域向前移動。Melanesia 隱沒帶的發展整體來看是邊緣凹、中間凸的幾何形狀（圖五 c），中間的 San Cristobal (Cr) 是幾乎不動的，而 New Britain (Br) 和 New Hebrides (Hb) 的海溝則是後退的情況（圖一）。凸出的 Northwest Pacific 隱沒帶縮短，處於中間位置（日本，Jp）的海溝則前進，而兩側邊緣都是凹的（Mariana, Mr 和 Central Kamchatka, Ka）（圖一）。Sunda 隱沒帶沒有凸出，但在中間位置（Sumatra, Sm）幾乎不動且在西北（Andaman, Ad）和東邊（Java, Jv）的邊緣是後退的（圖一）。

安底斯山脈（Andes mountains）和波利維亞造山帶彎曲（Bolivian orocline）係位處隱沒帶而非大陸碰撞帶，因此其成因至今仍是個謎。重建 South America 隱沒帶顯示它是邊緣凹中間凸的幾何形狀，而 Bolivian orocline 在過去的兩千五百萬年維持幾乎不動（圖五 d），造山帶彎曲（orocline）是擠壓、造山和上覆板塊縮短所產生的特徵，針對 South America 地塊下地函剪力波的研究，推測平行海溝的地函物質流動只出現在北方和南方，而在 orocline 下方則沒有發現明顯的地函物質流動，這與在寬地塊凸形中間部位的下方所觀察到的地函停滯帶相符合（圖四 d），此停滯帶能夠承受向海溝移動的板塊運動所造成的巨大擠壓應力。South America 板塊受到幾個力的作用確實向西移動（圖一），包括 Nazca 地塊的吸力、Scotia 和 Lesser Antilles 地塊的拉力以及大西洋中洋脊的推力。因此，在寬地塊中心停滯帶的發展和間歇的海溝前進可以解釋 Central Andes（安底斯山脈中段）謎樣的特徵，例如：在隱沒帶上的造山運動、Bolivian orocline 下出現大地水準面高（geoid high）和古海拔快速的增加。

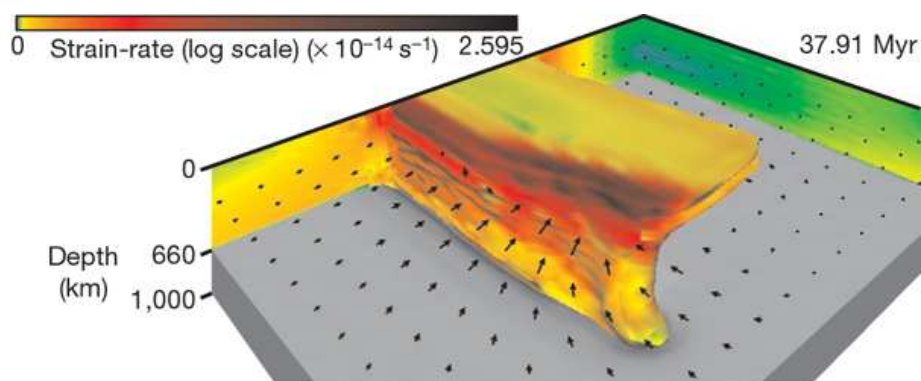


圖一、全球主要隱沒帶垂直海溝方向的海溝移動速度圖。黑色箭頭代表速度向量，空心箭頭代表 11 個主要板塊的移動速度向量。隱沒帶：Andaman (An)、Alaska (Ak)、Central America (Am)、Lesser Antilles (An)、Aleutian (At)、Betic Rif (Be)、Bolivia (Bl)、New Britain (Br)、Calabria (Cb)、Chile (Ch)、Colombia (Co)、San Cristobal (Cr)、Cascadia (Cs)、Cyprus (Cy)、Halmahera (Ha)、New Hebrides (Hb)、Hikurangi (Hk)、Hellenic (HI)、Izu-Bonin (Iz)、Japan (Jp)、Java (Jv)、Kamchatka (Ka)、Kermadec (Ke)、Kuril (Ku)、Mexico (Me)、Makran (Mk)、Manila (Mn)、Mariana (Mr)、Nankai (Na)、Peru (Pe)、Puerto Rico (Pr)、Puysegur (Pu)、Ryukyu (Ry)、Sangihe (Sa)、Scotia (Sc)、South Shetland (Sh)、North Sulawesi (Sl)、Sumatra (Sm)、Tonga (To)、Trobriand (Tr)、Venezuela (Ve)。碰撞帶：Banda (Ba)、Burma (Bu)、Carpathian (Cp)、Dinaride (Di)、Hispaniola (Hp)、Seram (Se)、Solomon (So)。初始隱沒帶：Cotobato (Ct)、New Guinea (Gu)、Hjort (Hj)、Japan Sea (Js)、Muertos (Mo)、Manus (Ms)、Mussau (Mu)、Negros (Ne)、Philippine (Ph)、Palau (Pl)、Panama (Pn)、West Sulawesi (Sw)、Wetar (We)、Yap (Ya)。初始隱沒帶為年輕 (≤ 5 Myr) 且較短的地塊 (≤ 150 km) 排除在海溝移動速度的計算之內。(本圖出自 Schellart et al., 2007,

http://www.nature.com/nature/journal/v446/n7133/fig_tab/nature05615_F1.html)

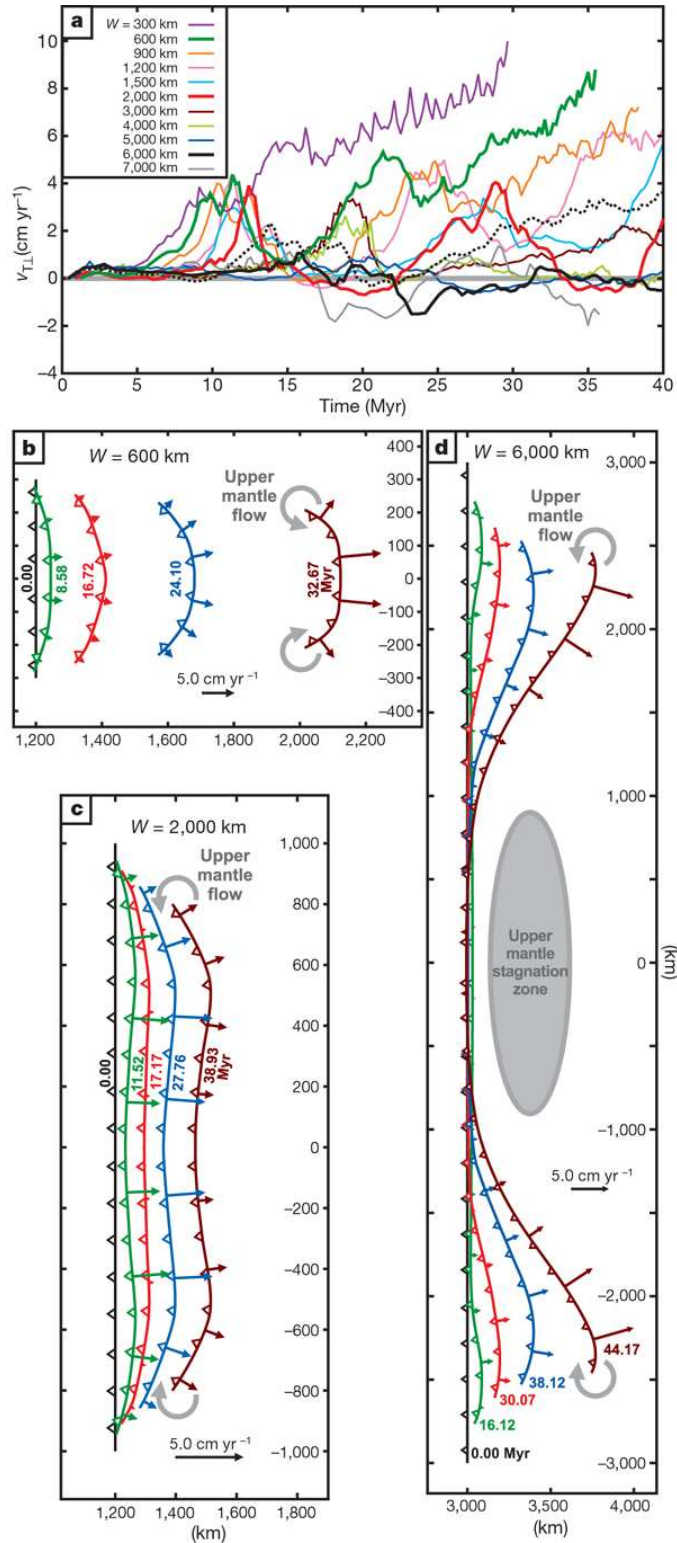


圖二、全球隱沒帶海溝移動速度相對於該點與地塊邊緣距離關係圖。縮寫參考圖一，速度正代表海溝後退，附圖顯示 244 個海溝移動速度的頻度。(本圖出自 Schellart et al., 2007, http://www.nature.com/nature/journal/v446/n7133/fig_tab/nature05615_F2.html)



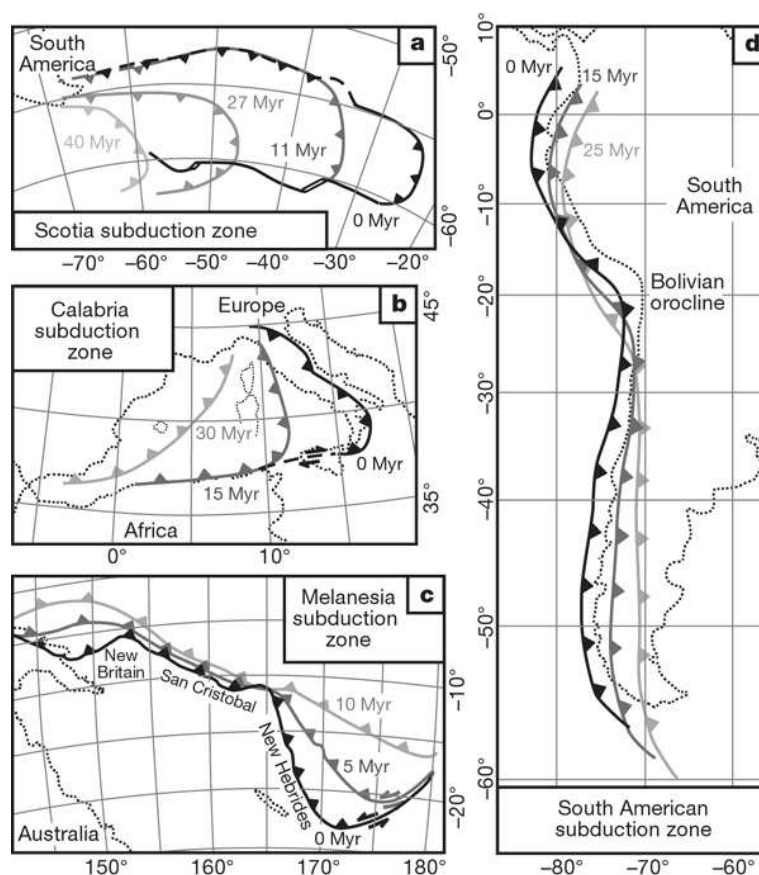
圖三、寬地塊隱沒模擬圖。寬 6,000 公里，因地塊模擬為左右對稱，故僅取地塊右半邊代表。以 100 公里厚高黏滯性的板塊（海洋岩石圈）覆蓋 900 公里較低密度的地函（分成 560 公里低黏滯性上部地函和 340 公里高黏滯性下部地函）以及 187 公里長的地塊、15.5 度傾角進行模擬。黑色箭頭位在 200 公里深度代表地函水平流動的圖譜。（本圖出自 Schellart et al., 2007,

http://www.nature.com/nature/journal/v446/n7133/fig_tab/nature05615_F3.html)



圖四、地塊寬度和海溝移動速度對隱沒帶造成的幾何關係圖。a. 地塊寬度對海溝移動速度的影響，黑色虛線表示地塊寬度 6,000 公里，距邊緣 758 公里處的海溝移動速度。b-d. 三個不同寬度地塊在隱沒帶演變的模擬。b. 600 公里寬、c. 2,000 公里寬、d. 6,000 公里寬。(本圖出自 Schellart et al., 2007,

http://www.nature.com/nature/journal/v446/n7133/fig_tab/nature05615_F4.html)



圖五、四個不同地塊寬度的隱沒帶演變過程圖。a. Scotia 隱沒帶，地塊寬 800 公里；b. Calabrian 隱沒帶，地塊寬 1,200 公里；c. Melanesian 隱沒帶，地塊寬 4,400 公里；d. South America 隱沒帶，地塊寬 7,000 公里。(本圖出自 Schellart et al., 2007, http://www.nature.com/nature/journal/v446/n7133/fig_tab/nature05615_F5.html)

參考資料：

Schellart, W.P., Freeman, J., Stegman, D.R., Moresi, L. and May, D. (2007) Evolution and diversity of subduction zones controlled by slab width. *Nature*, 446, 308-311.

(doi:10.1038/nature05615)

<http://www.nature.com/nature/journal/v446/n7133/full/nature05615.html>

編譯：王奕量