

歐洲的土壤侵蝕

摘要

土壤侵蝕是一種隨地質時間發生的自然過程，而且它是所有土壤形成首先的基本過程。而土壤退化，多半是與人類活動大幅提升自然侵蝕率的加速侵蝕有關。水造成的土壤侵蝕在整個歐洲是一個普遍的問題。最主要的影響是表土流失，這個現象往往不顯著但可能損害很大。土壤侵蝕的過程中物理因素如氣候、地形特徵扮演著重要角色。地中海地區特別容易受到侵蝕，因為長期乾旱後的侵蝕性陣雨落在有脆弱土壤的陡峭山坡上。歐洲西北地區的情況則相反，該區域土壤侵蝕情況輕微，因為降雨主要在於平緩的山坡而且整年平均分佈，因此受侵蝕影響區域不如南歐嚴重。部分地中海區域的侵蝕已經到了不可逆轉的情況，而且某些地方因為已經沒有剩餘任何土壤，以致實際上侵蝕作用已經停止。土壤形成的速度非常緩慢，因此只要土壤流失量超過每年一公頃一公噸的數量(1t/ha/y)，即被視為在 50 至 100 年內無可挽回的。可能每隔二至三年發生一次的暴風會造成每公頃 20 到 40 公噸的土壤流失量，而在歐洲定期測量到極端氣候事件中的流失量則超過 100t/ha。土壤侵蝕的主因仍是不當的農業作法、伐林、過度放牧和人為的建築工程。辨識易受土壤侵蝕的地區能有助於增進了解區域的受影響程度，最終制定出有效控制方式。

為了量化歐洲地區內的侵蝕程度，歐洲土壤局已採用現代數位科技進行一系列的計畫。這些計畫基本上是以土壤侵蝕過程為主，並利用統一的土壤、地形、氣候和土地覆蓋數據資料。土壤侵蝕過程涉及到物質分離的兩個程序：雨滴撞擊及水流牽引；並透過空氣躍移或陸面水流進行搬運。將分離和運送的過程合併起來，就會造成雨滴濺蝕 (rainsplash)、沖刷 (rain-wash) 和沖蝕 (rillwash) 徑流會直接造成河流的嚴重土壤侵蝕，因此影響徑流的過程在任何分析土壤侵蝕的強度中都是很重要的一環。而有效的水土保持措施就是減少徑流發生的關鍵。土壤侵蝕風險評估可以採用不同的方法-專家法 (expert-based) 和模型法 (model-based)。「環境資訊協調計畫」(CORINE) 是專家法的例子，利用地理資訊系統 (GIS) 的覆蓋土壤、氣候和地形來評估歐洲地中海地區的土壤侵蝕風險。第二種專家法是「荷蘭國家公衛與環境中心的土壤侵蝕模式」(RIVM)。這是一個因素模型 (factor model)，如 CORINE，但卻更加簡化，近似不完善的通用土壤流失公式模型 (USLE)。第三種專家法是「因人類引起的土壤退化全球評估」(GLASOD)。GLASOD 圖以主觀認定侵蝕風險嚴重來辨識地區的情況，而未說明造成此類侵蝕的條件。歐洲環境署 (EEA) 製成的「熱點圖」(Hot Spots map) 則是第四種專家法。有侵蝕風險的地區其空間說明雖對政策制定者要使用時太過籠統，但研究結果卻可以將從歐洲境內許多地點實際泥沙流失的文獻中產生一些數據。近幾年出現的數位化資料已經能改善模型法 (model-based approach) 的使用。「通用土壤流失公式模型」(USLE) 則是簡單的經驗模型，以美國受侵蝕地點的土壤流失率的

迴歸分析為主，用來評估農業區域的長時期的年平均侵蝕率。利用通用土壤流失公式模型製成的歐洲侵蝕風險圖是第一個嘗試量化細溝和細溝間侵蝕造成的整個大陸土壤侵蝕。雖然泥沙流失測量尚未被驗證，但其相對差異卻是被視為是真實的。「泛歐洲土壤侵蝕風險評估計畫」(PESERA) 是要發展及校準一個過程為主和空間分佈的模型，以量化水侵蝕，並評估其對整個歐洲的風險。這個模型比其他以過程為主的模型更直接強調徑流的影響。而「驅動力-壓力-狀態和衝擊-回應架構」(DPSIR) 可以辨識出可能的回應和場外衝擊(off-site impact)與場內衝擊(on-site impact)，因此可用來將脆弱的土地利用制度轉換成侵蝕退化資訊讓決策者易於使用。

在沒有測量數據時，有侵蝕風險的區域可作為是一個狀態指標 (indicator of state)。很明顯的在歐洲許多地方的土壤侵蝕已是不可逆的退化，在歐洲南部更為顯著，在北部地區雖不太明顯，但仍具有破壞性。必須要實施「減輕策略」(mitigation strategies) 作為整個「土壤保護策略」的一部分 (Soil Protection Thematic Strategy)。既有的歐洲土壤資料庫提供了大致辨識最有風險的區域及有適當過程的統一檢驗基礎。但是目前可靠試驗點的實際土壤流失數據及其未來發展趨勢的資料非常缺乏，特別是在歐洲南部的資料。以電腦為基礎的方法如「泛歐洲土壤侵蝕風險評估計畫」(PESERA) 則提供較以前更能精確預測土壤侵蝕的數據。PESERA 法之所以重要是因為它是一種徑流模型，而徑流是泥沙流失很大的影響因素。然而為了精確的環境稽核(environmental auditing)，因此模型的測量必須要在有實際泥沙流失的現場進行驗證，並且將其未來趨勢予以量化，也應增加侵蝕的測量。需要一個遍及整個陸地的土壤監測網路系統以提供這類數據。完善的模型和改良空間數據的解析度及準確度是無法取代真實的測量。

土壤保護措施仍是需要跨領域的解決方案。亦有必要讓大眾和決策者接受，歐洲土壤濫用的現況到了不做任何回應將可能會帶來災難的程度。整頓和改善過去及現在的濫用情況勢必耗費許多金錢，因此在這方面歐洲較富裕的國家必須協助較貧窮的國家。

1. 前言

水引發的土壤侵蝕是整個歐洲普遍的問題。歐洲議會使用修訂過的「因人類引起的土壤退化全球評估」(GLASOD) (Oldeman et al., 1991; Van Lynden, 1995) 簡報了歐洲的土壤退化程度。有些結果如表 1.1，但這些數據僅是受土壤退化影響區域的粗略情況。

表 1.1 在歐洲因人引起的土地退化情況¹ (M ha)

水侵蝕情況	輕度	中度	重度	非常嚴重	總量
表土流失量	18.9	64.7	9.2	-	92.8
地表變形	2.5	16.3	0.6	2.4	21.8
總計	21.4	81.0	9.8	2.4	114.5

					(52.3%)
--	--	--	--	--	---------

1. 包含前蘇維埃聯盟的部分歐洲地區

表 1.1 也表示了再受影響地區，歐洲境內的水侵蝕嚴重性。最主要影響的是表土流失，這種現象往往不顯眼但卻可能有很大的損害。物理因素如氣候、地形、土壤特徵都是土壤侵蝕過程的重要影響因素。部分也解釋了冰島水侵蝕問題和氣候不甚惡劣且土壤較不具可侵蝕性的斯堪地那維亞半島的水侵蝕之間的差異性 (Fournier, 1972)。

地中海地區特別容易受到侵蝕。這是因為它在長乾早期後出現嚴重侵蝕性降雨，並滴在陡峭坡地的脆弱土壤，因而導致嚴重侵蝕。相反地，歐洲西北地區因為降雨主要落在平緩坡地上而且整年降雨平均分佈，所以土壤侵蝕現象會輕微許多。因此，在歐洲北部受侵蝕影響區域的程度會比南歐更有限。

部分地中海地區，侵蝕已經到不可逆的階段，而且在某些地方侵蝕實際上已經停止，因為已經沒有剩下的土壤可侵蝕了。而土壤形成的速度非常緩慢，因此任何超過 1/t/ha/y 的土壤流失都被視為在 50 至 100 年內是不可逆的。在單一暴風情況中，20 至 40t/ha/y 的土壤流失可能每隔二至三年會發生一次，歐洲會定期測量超過 100/t/ha 土壤流失的極端事件(Morgan, 1992)。但這類侵蝕變得更為明顯之前將需要一些時間，特別是在區域內最深的和最肥沃的土壤，或在大量施肥的土地上。也因此讓人更為擔憂，因為影響的情況一旦變得明顯，通常要處理它就有可能為時已晚。

土壤侵蝕的主要成因，多半仍是因為不當的農業作法（圖 1.1 為安達盧西亞密集種植橄欖的影響）、伐林、過度放牧和建築活動(Yassoglou et al., 1998)。讓科學家和決策者瞭解歐洲土壤退化問題的嚴重性是當前迫切的需求。

辨識容易受到土壤侵蝕的地區有助於增進我們對區域受影響程度的瞭解，並進而制定相關措施以控制問題。



圖 1.1 西班牙近塞維利亞的密集耕種橄欖 (樹齡5 至 80 歲)

目前歐洲土壤局已經規劃許多計畫試圖用現代數位科技來量化歐洲境內的侵蝕問題，這些計畫主要是評估大陸範圍內的侵蝕風險。計畫成果將可作為辨識歐洲境內容易受到土壤侵蝕的區域。旨在防止土壤退化的歐盟國家土壤保護措施也會需要這些數據資料。此外，其他形式的土壤侵蝕也很重要，舉例來說如溝蝕(Gully Erosion)、山崩(Landslide)和較輕程度的風蝕，這些侵蝕類型會在後續探討，以呈現出今日歐洲土壤侵蝕現象的完整全貌。

2. 土壤侵蝕的形成

土壤侵蝕被視為是主要且最普遍土壤退化的形式，而且會嚴重限制永續農業的土地利用。土壤侵蝕是指土壤遭受風和水的侵蝕，高速風力會帶走平坦土地或高領土的鬆土；水侵蝕往往是因水的動量落在地上並流過地面所引起的。圖 2.1 是從米蘭到新普朗通(瑞士)的主要公路在 2000 年 10 月 13 至 16 日洪水通過後毀壞的情況。發生在義大利義大利皮埃蒙特區 Domodóssola 的損害則是說明侵蝕不僅只會造成農業問題。

本章主要探討因水而形成的土壤侵蝕，而這被認為是主要引起歐洲土壤侵蝕。各種侵蝕的過程將總結於下及 2.1 節 (Gobin et al. ,2001.)



圖 2.1 義大利皮埃蒙特區從米蘭到新普朗通（瑞士）的主要公路於 2000 年 10 月 13 至 16 日遭受洪水後毀壞的情況。

超過 90% 的非冰川景觀是由土壤覆蓋的山坡、殘存的河道和氾濫平原組成的。雖然土壤覆蓋的表面通常並非最主要的樣貌，但是它們是通過河道會遺留的沈積物質。物質受到風化並被搬運到河流的過程可以讓我們瞭解景觀中山坡地(風化層)風化岩屑如何搬運，以及沈積物如何被搬運到河道。

農業會強烈影響山坡地形成的速度和類型，而且農地管理方式對土壤侵蝕是否維持在可接受程度或是演變為長期和不可逆的土壤退化亦有顯著影響。

山坡沈積物的搬運過程常見有兩種，分別是風化和風化層運輸。每個類型又包含許多單獨的過程，可以依據其特定機制再進行分類（表 2.1），而許多過程可能會同時一起發生。大部分坡地的形成主要受到有助化學反應的水的影響，水讓所有物質更容易滑動，並在流動時攜帶著幫助動植物生長的岩屑。至於風化和搬運過程可以區分為化學性、物理性和生物性(Gobin et al., 2001)。

表 2.1 坡地形成的重要分類

	風化過程	搬運過程	搬運種類 (S/T)
化學性	礦物風化	浸出 離子擴散	S T
物理性	凍融 鹽化風化 熱裂作用	塊體移動 山崩 岩崩 (debris avalanche) 土石流 (debris flow) 土壤潛移(Soil Creep) 冰凍泥流 (gelifluction) 耕作侵蝕 (tillage erosion) 顆粒移動 落石 (rockfall) 經由沖刷 (Through-wash) 雨滴濺蝕 (rainsplash) 雨流 (rainflow) 沖刷 (rainwash)	S S S T T T T S T T T T
生物性	動物消化 根部生長	生物混合(通常包含在土壤潛移內)	T
類型：T 表有限的搬運；S 表供應限制移動			

另一個主要的人為過程就是耕作侵蝕 (Tillage Erosion)，主要是耕作的影響，無論山坡地向上、向下或是沿著等高線耕種。每一次土壤被翻轉，土壤就有相當大的移動。不論上坡或下坡耕種當翻動的土壤重新放置回去，都會造成下坡的成份被搬運，。等高耕種則是根據耕種翻動土壤的方向將物質向上或向下移動。在被翻動的下坡土壤進行等高耕種，移動的物質數量如同土壤潛移數量約有 1000 倍之多。在山坡兩側進行等高耕種 (將上坡土壤翻轉然後再將下坡土壤翻轉)，或是在上坡或下坡耕種都會造成小規模移動，但是整體移動速度仍比自然的土壤潛移快了約 100 倍。

利用現代化的重型機具搬運泥沙則比原始耕犁還要快速許多，但很明顯的，在過去幾個世紀，耕作侵蝕所造成的土壤運動仍比整體全新世期間 (Holocene) 的自然土壤潛移數量更為龐大。累積起來的結果往往都可說是老舊田野領域的土壤形成的過程。

2.1 水造成的土壤侵蝕

雖然少量物質經過土壤時會被刷洗，但是更重要的侵蝕過程是發生在地表。地表物質可能會經兩種過程分離-雨滴撞擊 (rainsdrop impact) 和水流牽引(flow traction)，並在空氣中躍移或經由陸地水流搬移。這些分離和搬運過程的組合會產生三個主要的過程：雨滴濺蝕 (rainsplash)、沖刷 (Rainwash) 和紋溝沖蝕 (rill erosion)，如表 2.2。

雨滴撞擊分離物質是經由雨滴撞擊土地表面。最大降雨的終端速度是 10ms⁻¹，但這是在它們落下通過空氣中約 10 公尺後才是這樣的速度。如果降下的雨滴被植被截獲，那麼雨滴撞擊地面的速度會更慢，而且影響也會變小。當雨滴撞擊表面時，會形成撞擊波，這個撞擊波會撞擊出土壤顆粒或是小聚集，並且將它們以各種方向反彈到空氣當中。總分離速度會隨降雨強度急速增加。雨滴落到約超過五厘米厚度的地表水層時，雨滴撞擊在土壤表面的影響也會大幅消失。

	運輸過程	模式
分解途徑	藉由空氣	陸地上的風
雨滴撞擊	濺蝕	N/A
陸地水流牽引	雨流	溝蝕 紋溝侵蝕

雨滴撞擊也會將土壤聚集體分解為土壤組成顆粒。這些顆粒會在表面上或靠近表面之間的聚集物再淤積，成為一個會密封表面的土壤結皮 (soil crusts)，並填滿聚集體間的大孔洞而限制滲透率。雖然這些結皮可能會使表面更耐侵蝕，但是其最大影響是在增加暴風雨形成徑流上。雨水落在未受保護的表面，其對水侵蝕的敏感性和土壤結皮產生有極密切的關係，而耕作、凍融和乾燥也會破壞結皮組織。

假使水流有足夠力量，會在土壤上產生足以克服土壤顆粒阻力的力量。阻力來自於摩擦力，並隨土壤顆粒大小和在顆粒之間的黏性而增加，並且也會隨著特定的接觸表面增加，反之亦然。小型非黏性顆粒的阻力最小，特別是低黏土成分的粉砂和細沙大小的顆粒。

至於雨滴濺蝕，顆粒會因雨滴撞擊和跳躍到空氣中而分離。透過空氣中一小段的飛行，就能夠將物質搬運到上坡地和下坡地，但是坡地斜率超過 5% 時會有一個很強烈的下坡阻礙。因此，下坡搬運的淨速率會隨斜率增加，並隨著搬運的顆粒大小而減少。因此雨滴濺蝕的物質運輸速度通常較低。

雨流 (rainflow)，因雨滴撞擊分離的顆粒在流動的薄水層內被攜帶的距離要比雨

濺的還要遠。雨濺和雨流侵蝕在小型水道或小溪間的區域是最為明顯，而且會快速侵蝕表面，通常都一併被稱為「細溝間侵蝕」過程（inter-rill erosion）。

足以直接夾帶土壤顆粒的水流強度，通常就會在表面形成小水道或小水流，而且物質也會受到隨這些水道所集中的細溝水流侵蝕。耕地耕種層的耐侵蝕程度一般都是低的，但是大大增加耕犁範圍或許能提高地層的耐侵蝕性，也可以在未受干擾和更堅固的未耕土壤下方形成一個過渡帶。因此，小溪很少滲入耕作層下方，而且一般也會因後其耕種而掩蓋住，也是農民要避免進一步侵蝕的作法。

劇烈暴風情況下，少部分在局部陡峭斜坡，侵蝕可能會造成更大的切口進而形成沖溝（gullies），甚至可能規模大到無法以一般的耕作掩蓋。沖溝的發展會將農地切割，而且鄰近田野陡峭的斜度亦會讓沖溝群急速擴大，導致不能耕種。而沖溝整治需要激進措施，包括可能重新分級整個景觀。

徑流則是最主要直接驅使嚴重的土壤侵蝕。因此，影響徑流的形成過程在土壤侵蝕強度的分析中是相當重要的一部分，而減少徑流的措施則是有效土壤保護的關鍵。

可能控制徑流最為關鍵的是土壤表面的結皮程度。結皮對滲透率有很大的影響，而且也會影響徑流速度。其次，是土壤表面的微地形以及地下土壤結構，特別是土壤聚集體之間是否有裂紋和/或空隙的大孔隙出現。微地形是由隨機粗糙表面結合特色種植如在山脊耕種和梯田所組成。良好的微地形和結皮每年都會關係到耕種、作物或未開墾植被的生長，在該土地上的收穫或放牧，以及表面殘留物的處置而演變。

土壤侵蝕是隨著地質時間發生的一種自然過程，且多數侵蝕是有關隨人類活動而導致自然速率急速增加的加速侵蝕現象。這些活動包括因耕種干預自然植被，放牧、控制燃燒或野火間接改變土地覆蓋，利用重新分級土地表面和/或土地管理強度改變，舉例來說沒有維護梯田架構。此外機械化耕種的增加使用也會大幅提高耕作侵蝕速度。

侵蝕文獻一般會識別土壤侵蝕的「可容忍」速度，但是這些速度通常都已經超過能平衡從母質風化為新土壤的速度，而且也是只從經濟角度來看才是可以接受的。大多數的生產用地其整體土質流失的程度很明顯的已經越來越不可接受。

3. 評估土壤侵蝕風險

為了評估土壤侵蝕風險，有很多方法可以採用，其中可分為專家法（expert-based

methods)和模型法(model-based methods)。本章將描述這兩個方法的主要屬性，也會提供近來已經實施的土壤侵蝕風險評估法。

3.1 專家法 (expert-based methods)

De Ploey(1989)的歐洲西部土壤侵蝕風險圖是專家法的例子，圖中指出當地專家認為是顯著發生侵蝕過程的地區。這種方法的一個限制是作者並未明確定義劃分有風險區域的標準(Yassoglou et al., 1998)。

因素計分法 (Factorial scoring) 是另一個可用來評估侵蝕風險的方法(Morgan, 1995)。其中一個例子是 CORINE 土壤侵蝕風險評估的地中海地區(CORINE, 1992)。這個分析是以土壤可侵蝕性(四類)、侵蝕能力(三類)斜坡角度(四類)等各項因素計分。將各項分數相乘得到一個綜合的分數來表示潛在的侵蝕風險。為了評估實際的土壤侵蝕風險，潛在侵蝕風險圖也會結合土地覆蓋因素(兩類)。

Montier 等人(1998)發展了一個適用於全法國的專家評估方法。如同 CORINE 的方式，這個方法以配分給有關土表覆蓋(九類)，對表面結皮的土壤敏感性(四類)、坡度(八類)和可侵蝕性(三類)的因素加以計分。這個計分方式有趣的地方在於它考量了發生在種植區域、葡萄園、山區和地中海區域的各種侵蝕類型。如此一來，某個程度上土壤、植被、斜坡和氣候的相互作用也會考量在內。

但多數計分式方法的問題在於該結果可能會受到定義的分數影響，除此之外，將資料來源分類(如坡地分類)可能造成資料遺失，且分析結果可能很多取決於分類限制和所用的分類數量。除非某些用於每項因素內的權重相同，但卻可能就不實際。而且如果決定使用某些權重並選擇權重的實際數值可能也會有困難。結合各項因素到有關侵蝕風險分類的方法(加法、乘法)，可能也會有些問題(Morgan, 1995)。最後，當因素計分法產生了質化的侵蝕類別，這些類別在解讀上也可能會有些困難。

3.2 模型法 (model-based methods)

用來評估土壤侵蝕風險的模型很多。侵蝕模型可以分為數個方式，有的可能依據時間範圍產生子分類模型，如有些模型設計用來預測土壤的長時期年流失量，有些則是預測單一暴風情況下的流失量(事件型)。另外，在預測單一地點侵蝕的集塊式模型(lumped models)和空間分佈模型之間也有明顯的區別。

經驗和物理模型之間也是另一個有用的區分。選擇特定模型多半是取決於目的和既有的數據、時間和金錢。

Jäger (1994)利用經驗模型-通用土壤流失方程式 (Universal Soil Loss Equation, USLE)來評估德國 Baden-Württemberg 的土壤侵蝕風險。De Jong (1994) 利用 Morgan, Morgan and Finney model (Morgan *et al.*, 1984)作為其地中海地區土壤侵蝕模型 (SEMMED) 的基礎。利用標準氣候數據、土壤圖、多時衛星影像 (multi-temporal satellite imagery)、數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)和一些有限的田野數據作為資料輸入的變量。如此，就可以不需要廣大的田野調查即可以評估大範圍、不同空間區域的侵蝕風險。到目前為止 SEMMED 模型已經被用來製造法國南部阿爾代什省地區和 Peyne 集水區的地區性侵蝕風險圖(De Jong, 1994, De Jong *et al.*, 1998)。

Kirkby 和 King (1998)利用模型法來評估全法國的土壤侵蝕風險。他們的模型提供一個簡化呈現單一風暴的侵蝕情況。這個模型包含了土壤可侵蝕性、地形和氣候。所以假設暴風降雨超過了一個臨界值 (該數值取決於土壤性質和土地覆蓋情況) 就會造成徑流，假設發生侵蝕就是徑流的比例，那麼每月和每年的侵蝕估計就能整合暴風雨分佈頻率取得。

在地區規模或較大範圍使用量化模型時會產生一些問題。首先是多數的侵蝕模型都是由一個點或田野規模產生，這表示這些模型是設計用來估測點的土壤流失。因此當這些模型被應用到較大的區域時，所產生的結果必須要謹慎解讀。我們不能指望一個用來預測單一農地的土壤流失模型可以準確估測 50 公尺像素或是更粗的尺度的區域網格。我們也應該知道哪些過程已經實際有模型化了。舉例來說，著名的通用土壤流失方程式 (Universal Soil Loss Equation) 只能用來預測紋溝侵蝕和紋溝間侵蝕。因此，我們不能指望像這樣的模型可以完整呈現主要受到溝壑侵蝕的區域，更不用說土壤大規模移動如山崩和落石。

同樣的，在地區性尺度經常也不可能直接決定田野的模型輸入數據 (如土壤和植被參數)。一般情況下，模型的參數相當於在土壤或植被圖所指定的繪圖單位數值，或是介於如植被覆蓋和一些由衛星取得的頻譜指數之間的回歸方程式。但普遍而言，這樣的參數值遠比實際田野調查還要不準確。

在這種尺度下模型產生的相對土壤流失量一般而言是比絕對值更為可靠。這並不會是個問題，只要有注意模型的結果是提供一個普遍相對差異的情況，而不是提供單獨一點的精確絕對侵蝕率。因為如此，當選擇區域/國家規模的侵蝕模型時，取得輸入數據將可能是最重要的影響因素。假使無法取得足夠的輸入數據，那麼使用一個複雜模型式就沒有什麼意義。在後面的例子中，執行模型法的唯一方法就是假設某些變量和模型參數都是不變的。

但是，這樣所產生的結果可能又會比需要較少輸入數據的簡易模型所獲得的結果

還要不可靠(De Roo, 1993)。此外，模型的輸入數據不確定性會傳到整個模型，因此當輸入數據的品質不好，我們也應小心不要使用到“過多待解參數”模型。

或許侵蝕模型化最大的問題是在難以驗證它所產生的估測。在區域性/較大規模範圍，幾乎沒有可靠的數據能和實際土壤流失進行比較。King 等人(1999)曾試著用土石流的發生和土壤流失的相互關連來驗證法國的侵蝕風險評估。但是有關土石流的其他過程以及像這樣的比較都是無法代替“真正”的測量。

3.3 近代的侵蝕風險評估法

在過去幾年，已有許多方案嘗試要評估全國、歐洲和國際程度的土壤侵蝕風險。下面幾節是描述幾乎可以分為兩類的計畫：專家法和模型式方法。3.3.1 至 3.3.4 則是 Gobin 等人 (2001) 準備的資料。

3.3.1 環境資訊協調法 (CORINE approach)

CORINE 計畫就是一個專家法的案例，該計畫自 1985 年啟動，用來：

1. 幫助指導和執行社區環境政策，並且提供相關優先主題，將環境問題納入到其他政策中。
2. 藉由國際組織、國家政府和地區單位的組織、影響和激勵措施下來確保財政和人力資源的最佳化利用，以獲得環境資訊。
3. 開發一套能和社區程度環境數據相對照的方法論基礎

CORINE 土壤侵蝕風險圖 (圖 3.1) 是地理資訊系統的重疊分析結果，它能夠評估土壤侵蝕風險類別。主要使用的資訊來源是歐洲議會的土壤圖(CEC, 1985)。潛在土壤侵蝕被定是固有侵蝕風險，不論是目前的土地利用或植被覆蓋 (CORINE, 1992)。

因此，潛在侵蝕風險圖 (圖 3.1) 會顯示最壞的可能情況。在這個地區有高侵蝕風險的土地面積總計 229000 平方公里 (或約 10% 的農村土地表面)。最大面積是在西班牙且主要在其南部和西部地區。在葡萄牙，高侵蝕風險區域幾乎涵蓋了三分之一的國家面積。而希臘則有 20% 的土地表面、義大利為 10%，法國是 1% 是易有高侵蝕風險。這些區域和實際侵蝕風險區域 (見圖 3.1) 之間的差異可反映出既有土地覆蓋的保護影響，以及改變土地利用作法的危險性。

3.3.1.1 優點和限制

CORINE 土壤侵蝕評估最大的優點是它很簡單，而且在客觀的基礎上可以提供一個研究區域整體的清楚預測。CORINE 方法至少以一個原則為基礎-通用土壤流失公式 (USLE)，這是一個現在北美洲且各地廣為使用的完善方法，以一個 1km x 1km 網格的元素法為基礎，再加上使用 GIS 技術隔離區域內的地區的解析度。

一般而言，這個方法可以正確辨識出地中海地區有最高風險侵蝕的區域。這個方法出現當時被認為是毫無缺點的，而且能夠根據目前更詳細的土地覆蓋分類而加以改善。

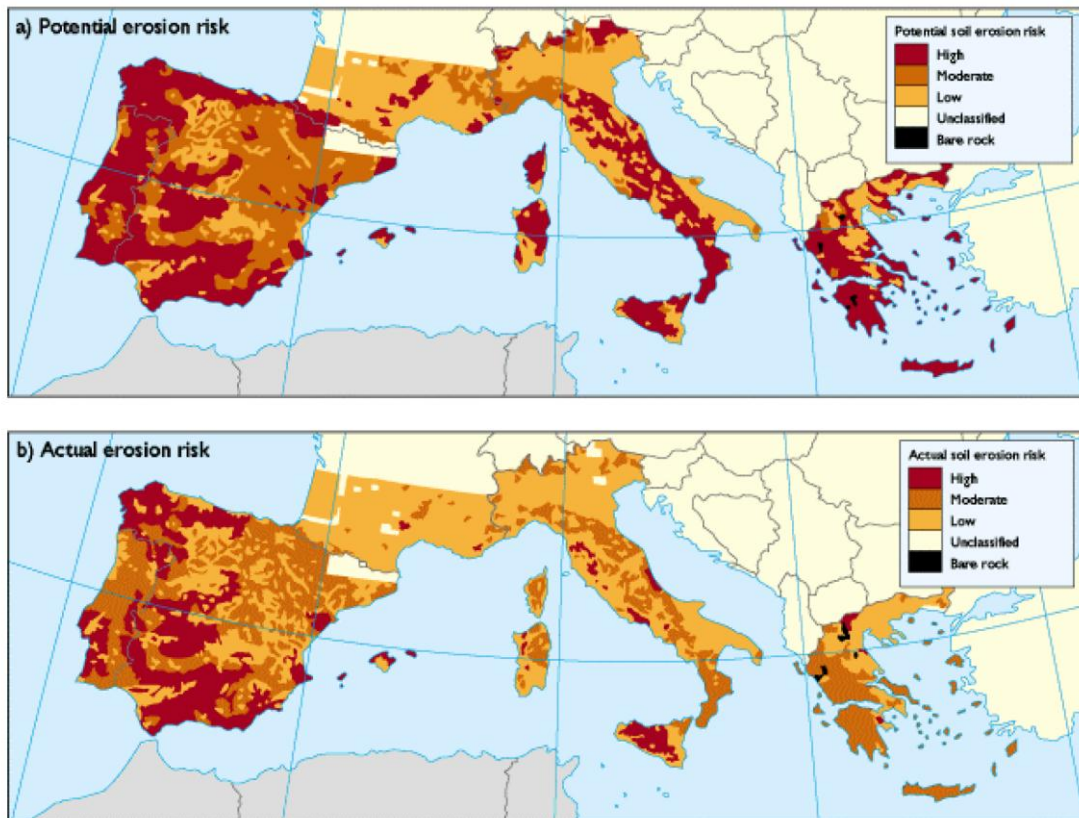


表 3.1 以 CORINE 方法估測的潛在和實際侵蝕風險

CORINE 簡報中也承認「未來這項工作的發展將使大家可以用更複雜的土壤侵蝕模型...特別是在改善程序內所用的因素，尤其在計算侵蝕力和土壤可侵蝕性，以及在土地覆蓋的分類上」。在質化基礎上，歐洲南部的侵蝕圖對照似乎顯示過於依賴氣候因素來決定侵蝕風險，而可侵蝕性和土地覆蓋的重要因素其權重相對較小。因此 CORINE 方法的限制是它只限於歐洲南部，而當前是需要能適用於整歐洲地區的侵蝕數據。

然而，這個產生的結果只涵蓋歐洲地中海地區，並顯示和其他評估法所得的風險有明顯不同。

3.3.2 荷蘭國家公共衛生及環境研究院的方法 (RIVM)

作為歐洲環境策略主要的一部分 (RIVM, 1992)，水侵蝕的基準評估已於 1990 年準備完成。目前風險的評估 (圖 3.2) 和氣候和經濟預測結合在 IMAGE2 模型框架內，進而產生 2010 年和 2050 年的情景預測。這個方法也是專家法模型，具有明確的情景預測，這是其他方法所沒有的特色，但現階段這個方法僅能取得

50km 的解析度，以致不容易以州和省的尺規呈現。

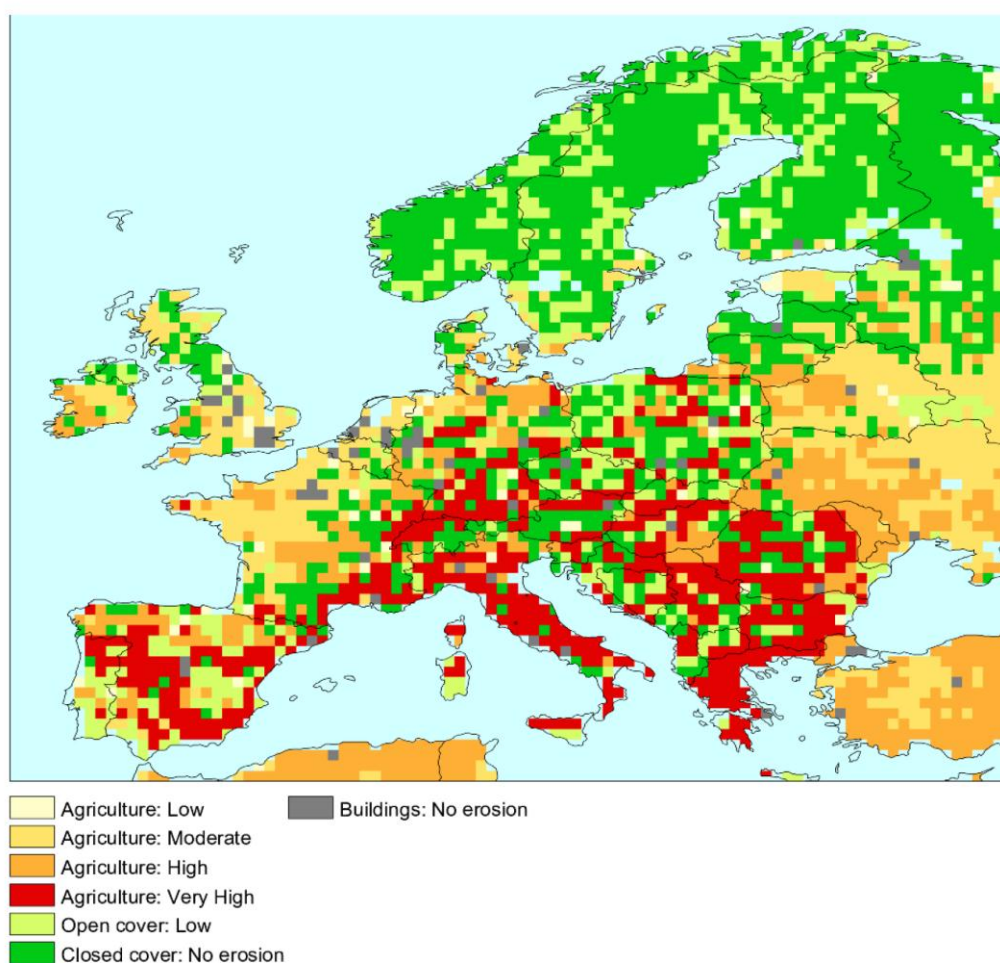


表 3.2 根據 RIVM 的基準情境，2050 年水侵蝕的易損性 (RIVM, 1992)

這個方法的優點是在單一架構中結合物理和經濟因素，但這種整合得到的數值必須取決於這邊談到的土壤侵蝕的所有成因的可靠性。

3.3.2.1 優點及限制

RIVM 主要的優點是它是在一個結合物理和經濟環境的綜合模式內能整合其他的環境因素，而且這裡並不評估 IMAGE 模型。除非底層模型模組本身是一個可接受的標準，否則就無法充分展現其優點。

RIVM 土壤侵蝕模型屬於因素模型，如 CORINE，但雖然開始執行 6-8 年，但在許多方面它都是一個更簡化的近似於不完善的 USLE 模型。或許是土壤可侵蝕性採用了類似 CORINE 或 USLE 的形式，有土壤類型成分，和一個簡化的斜率和指數。但降雨侵蝕力的部分被視為代表性不足，因為它既沒有 USLE 強調的理論基礎，也沒有 CORINE 的合理經驗方式。只有土地利用情況可以改善 CORINE，這是因為能獲得比早期 CORINE 計畫更好的土地覆蓋數據。RIVM 方法是利用固

有的物理基礎或因素基礎的評估，並藉由兩種動態要件-每月總降雨量（影響侵蝕力）以及土地覆蓋（影響估測的實際侵蝕）來開發提供情境分析的能力。

因此可以看出，RIVM 是兼具所有利用分佈數據來源的所有方法的優點，提供一個跨歐洲地區的客觀評估。但不是 50km 解析度和發現造成侵蝕的因素所以被認為是一個國家的最先進評估。簡單來說，對於要用來支持當前的決策，它也太過粗糙了。

3.3.3 全球土壤退化評估計畫（GLASOD approach）

「全球土壤退化評估計畫」（GLASOD project）主要的目標是讓政策制定者注意到因不當的土地和土壤管理方式引起全球人類的風險。1988 年「國際土壤參考資訊中心（ISRIC）受聯合國環境計畫（UNEP）委託進行一項全球研究。聯合許多土壤科學家，ISRIC 制定一個有科學可信度的人類在短時間內引發土壤退化狀態的全球評估。這份全球評估必須以不甚完整的知識為基礎嘗試評估，但卻很值得。這項任務被分撥給 21 個地區做相關的準備，並結合土壤科學家合作及使用區域土壤退化狀態圖，以便進一步整合相關資料以產生土壤退化的全球土壤退化評估圖。

但要先瞭解該計畫目的有限，並且觀察 GLASOD 是目前唯一可以適用於全球範圍的方法。它是根據將調查問卷結果送回給世界公認的專家的回饋成果（Oldeman *et al*, 1991）。這份資料也可以和經專家判斷集合成的熱點法（Hot Spot）共用，但其缺點是不太能管理或客觀比較不同區域的各個專家所採用的標準。

土壤侵蝕的數據資料和 Dobris 評估內的物理退化（EEA, 1995）是依照更新版的歐洲部分 GLASOD 圖。這個更新版本(van Lynden, 1994)，將問卷意見送回每一個歐洲城市的科學家小組，並補充至原來的 GLASOD 評估，但並非所有的國家都會完成並交回問卷，而且回收的問卷填寫詳盡度也有很大程度的不同。因此必須要注意地圖比例尺（1:10,000,000）相當於 10km 的最小解析度，是限制了可以顯示的細節資訊。

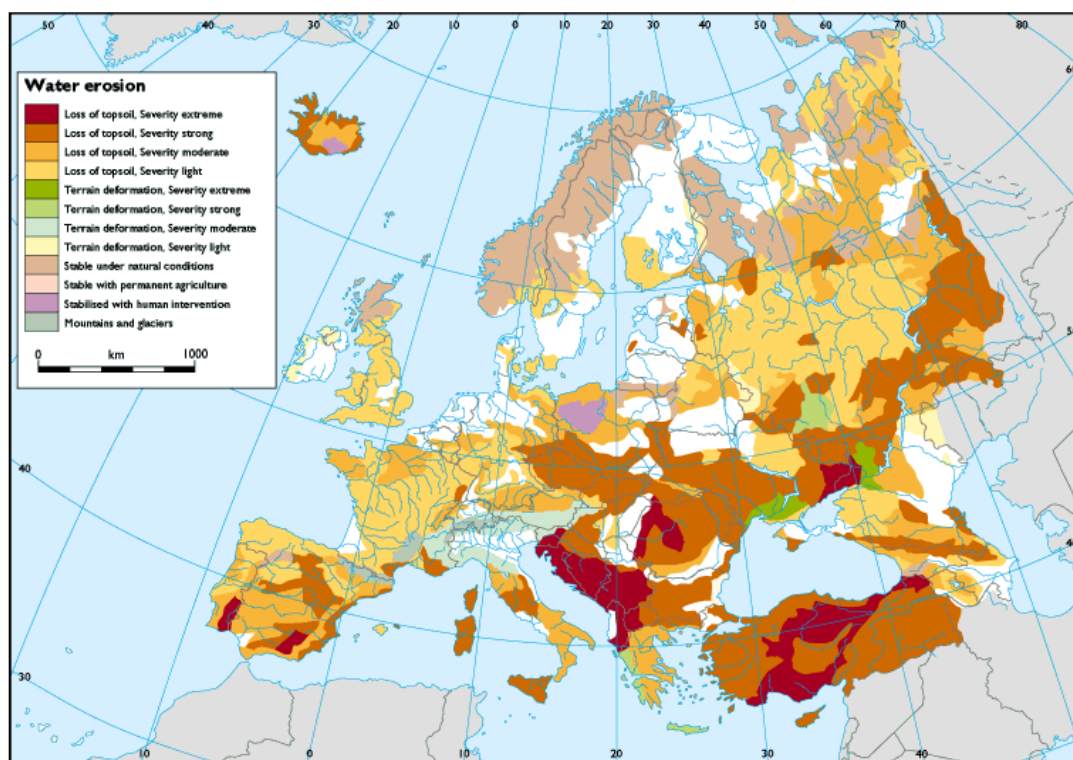


圖 3.3 GLASOD 法所呈現的歐洲境內土壤水侵蝕的情況 (Van Lynden, 1994)

GLASOD 圖 (圖 3.3) 辨識了主觀上近似嚴重侵蝕風險的地區，不論產生此類侵蝕的條件為何，這也算是專家法的例子之一。從圖上可以看出水侵蝕情況，表土嚴重流失的區域都聚在一起。雖然西班牙部分地區 Sicily 和 Sardinia 在所有評估內都被指出是高侵蝕風險地區，但跟其他的圖形相較之下，仍可很清楚看到應用於不同區域的客觀標準之間還是有很大的差異。

上圖的結果指出水侵蝕主導了歐洲土壤退化過程，雖然只有少於 10% 的部分被認為劇烈或嚴重退化，但是在特殊地區的退化土地比例會多很多。

3.3.3.1 優點和限制

GLASOD 圖至今仍被廣泛使用或引用述，雖然其作者和評論家都認為還需要一個更詳細和更量化的評估。這個地圖的優點在於它可以快速回應需求，而且從不會企圖作為期中評估。但是卻無法真正客觀的比較地區之間和之內的情況，這主要是因為難以解讀最終的結果。沒有專家會知道在他自己的區域內所有侵蝕地點的相同信賴係數，而且在每一個地區的範圍都是從最好到最差的，並沒有可以客觀比較的絕對範圍。目前部分的這些問題已正透過國際土壤侵蝕參考資訊中心 (ISRIC) 發展的新型評估法加以解決，國際土壤侵蝕參考資訊中心是利用 SOTER 方法定義出的地貌單位，但整體根本上的缺陷仍在於問卷調查方式缺乏詳細知識及無法客觀比較。

現階段已有改良的方法是根據特定問題進行更量化的分析，如土壤侵蝕，但如果仍使用當地侵蝕點的資料還校準更量化的模型的話，這種方法無疑也是無法產生有效的結果。

3.3.4 「熱點」法 (The Hot Spot approach)

歐洲環境署和聯合國環境規劃署 (EEA-UNEP) 土壤聯合資訊內有提到繪製和分析歐洲境內有土壤問題的區域 (EEA, 2000)。這邊也提出了相當多的土壤問題。該研究的目的是為了協助提供泛歐洲土壤政策的需求資訊。泛歐洲土壤政策希望能辨識出歐洲境內土壤退化的「熱點」，並且檢驗環境影響造成特殊土壤功能退化和改變。這項工作會使用歐洲環境署 (EEA) 的分析數據和科學文獻內的數據，而這些數據會被併入地理資訊系統 (GIS) 加以運用及呈現。

圖像是以當地經驗數據為主的早期地圖發展而成 (Favis-Mortlock and Boardman, 1999; de Ploey, 1989)，而不是由 CORINE 或其他被認為不適合大範圍的侵蝕模型所產生 (Turner et al, 2001)。熱點法 (Hot Spot approach) 是以專業知識來識別近似有侵蝕過程的大區域。然後將在每一個地區熱點標示出來，以及文獻中有關的最佳測量，以得到這些熱點區的侵蝕率。目的是以目前的土地利用和氣候條件來辨別當下有侵蝕風險的地區，而不是以過去的侵蝕證據或在某些假設情況下來估測有侵蝕風險可能性。

這些數據利用地圖上測得的 35 處侵蝕率，進一步產生一個跨歐洲 60 個地點或區域的一般或特定的水侵蝕資訊。從侵蝕地點、田野或小型集水區來估測。

然後集合這項數據並分成主要代表不同土地利用的歷史、土壤母質和氣候的東歐、黃土帶和歐洲南部三大區塊 (圖 3.4)。

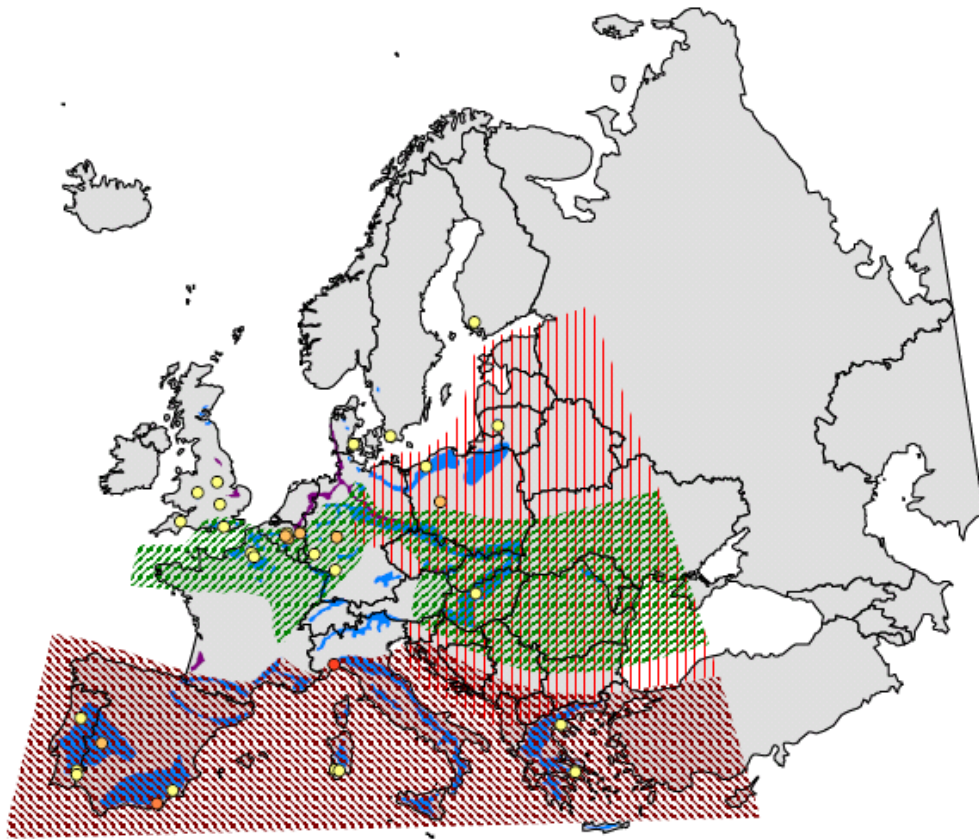


圖 3.4 水蝕和風蝕的熱點 (EEA, 2000 ; EEA, 2001)

3.3.4.1 優點和限制

雖然經測量的經驗數據是相當多且使用內插法 (interpolation) 也具有意義，但零星分佈的土壤侵蝕發生率卻無法以這個方法測得。而且其涵蓋的範圍是由合併文獻和進行中的測量，也從一些作為合理內插法的因素或模型化方法的測量取得。因此，這些圖像呈現也說明相當豐富的彙整經驗，其價值是難以記錄或量化。

在與 CORINE 圖重疊的區域內，承襲了 De Ploey 圖的熱點圖，更以土壤母質 (parent material) 作為定位重大侵蝕的關鍵因素。可以很清楚的看到圖上被辨識為高侵蝕的地點也是絕對重大影響區域，但是這樣的方式並無法推斷當地的結果及辨識其周遭地區。這個方法主要的限制是空間的表示太過粗略以致於決策者在實際利用上有困難。

3.3.5 通用土壤流失公式 (USLE approach)

最著名的方法「通用土壤流失公式」(USLE) (Wischmeier & Smith, 1978) 已被用於許多土壤侵蝕的研究中。通用土壤流失公式是一種簡易的經驗模型，以美國侵蝕範圍內的土壤流失率回歸分析為基礎。這種模型被設計用來估測農業區域的長時期的每年平均侵蝕速率。雖然該方程式亦有很多缺點和侷限，但是由於它相對簡單和穩定，因此仍被廣泛使用 (Desmet & Govers, 1996)。該方程式也代表了

一種標準化的方法。

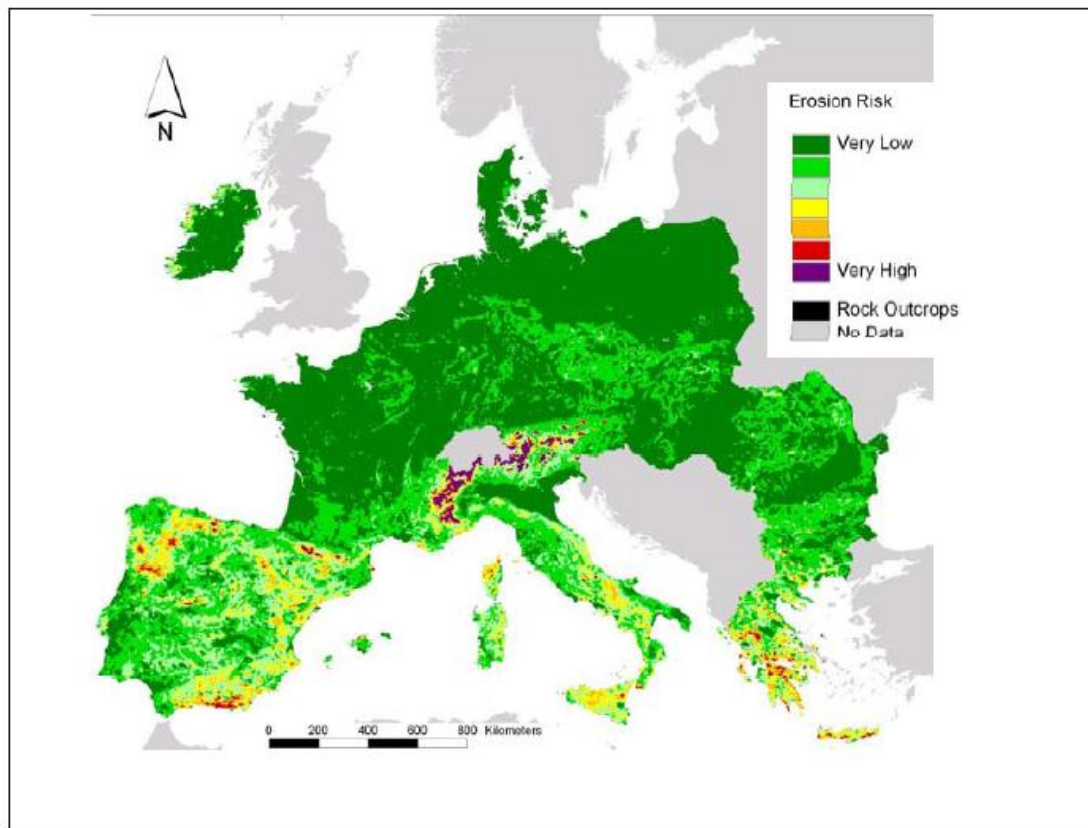


圖 3.5 歐洲的實際土壤侵蝕情況

使用歐洲的通用土壤流失公式 (Van der Knijff *et al.*, 2000)是首次嘗試要量化紋溝和紋溝間土壤侵蝕整個大陸的地圖。多數情況下，雖然泥沙流失的估計並沒有經過驗證，但所顯示出來的相對差異被認為是實際的。該方法也屬於模型為基礎的方法。

圖 3.5 是依據整個歐洲以 1km x 1km 數據為基礎所顯示的歐洲每年土壤侵蝕風險估算。潛在侵蝕風險也透過假設完全沒有植被覆蓋情況下重新運用 USLE 來估算，如圖 3.6 所示。

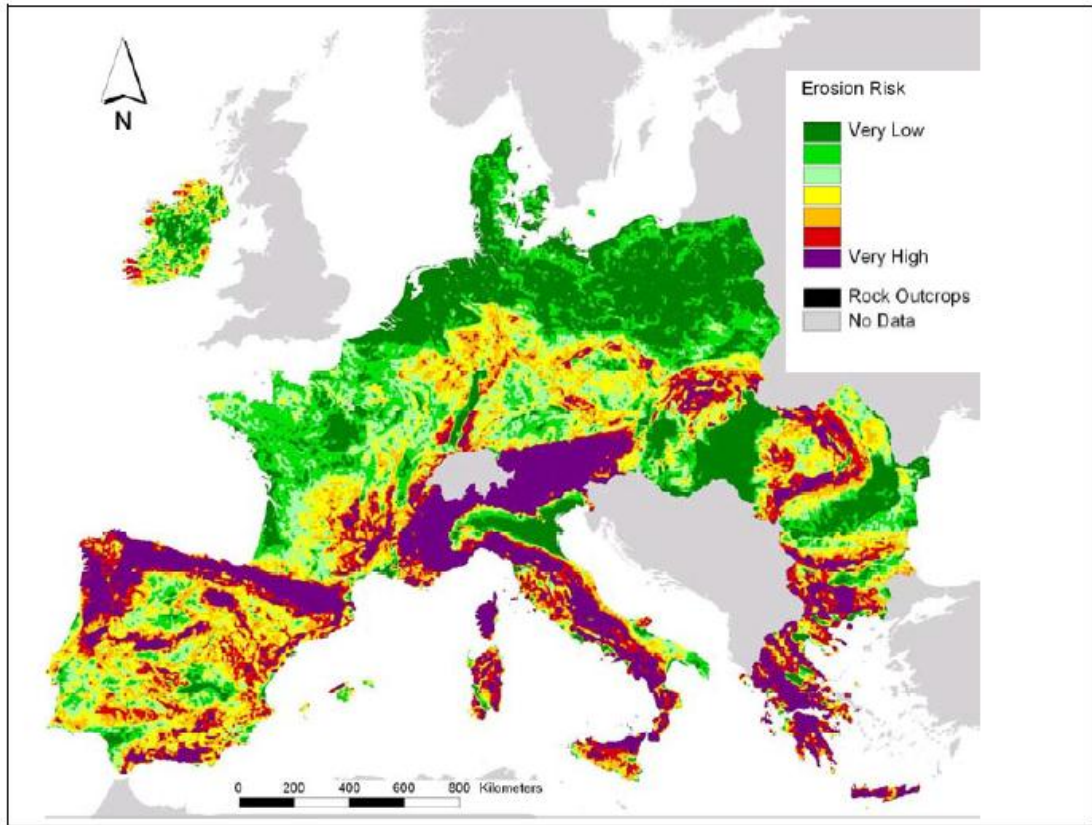


圖 3.6 歐洲境內的潛在土壤侵蝕風險

用來產生歐洲實際土壤侵蝕風險圖（圖 3.5）的方法已經被 Grimm 等人（2002）更新。他們利用新的土壤參數修正了可蝕性因子 K，即土壤形成表面結皮的趨勢。這就是這個方法巧妙的地方，因為表面有結皮斜坡地會產生更多徑流。法國國家農業技術研究院（INRA）所使用的方法是結合了結皮的侵蝕風險評估（Le Bissonnais and Daroussin, 2001），我們在下一節（3.3.6）會有進一步的描述。Van der Knijff 等人（2000）製作的歐洲實際土壤侵蝕風險地圖（圖 3.7）在本質上是一個完善的方法，這個方法單獨使用土壤質地來估計可蝕性因子（K）。

用 Van der Knijff(2000)等人的模型套用於義大利，以 250-m 的解析度代替歐洲所使用尺規 1km 作為評估數據，可得到義大利每年侵蝕風險的分佈如圖 3.7。而 Grimm 等人（2002）發展的修正模型也同樣用來估算出義大利的數據。

3.3.5.1 優點及限制

通用土壤流失公式(USLE)主要優點是它很有名也被廣泛用於不同的土地範圍。和前面的幾個方法相比較，這個方式可能是可以提供最詳實的整個歐洲地區土壤侵蝕風險資訊。事實上，它呈現出的侵蝕估測數值，是一個標準化且統一的整體歐洲數據，而且這個模型也能產生實際流失的量化數據，如每年每公頃流失的公

噸數 (t/ha/year)。

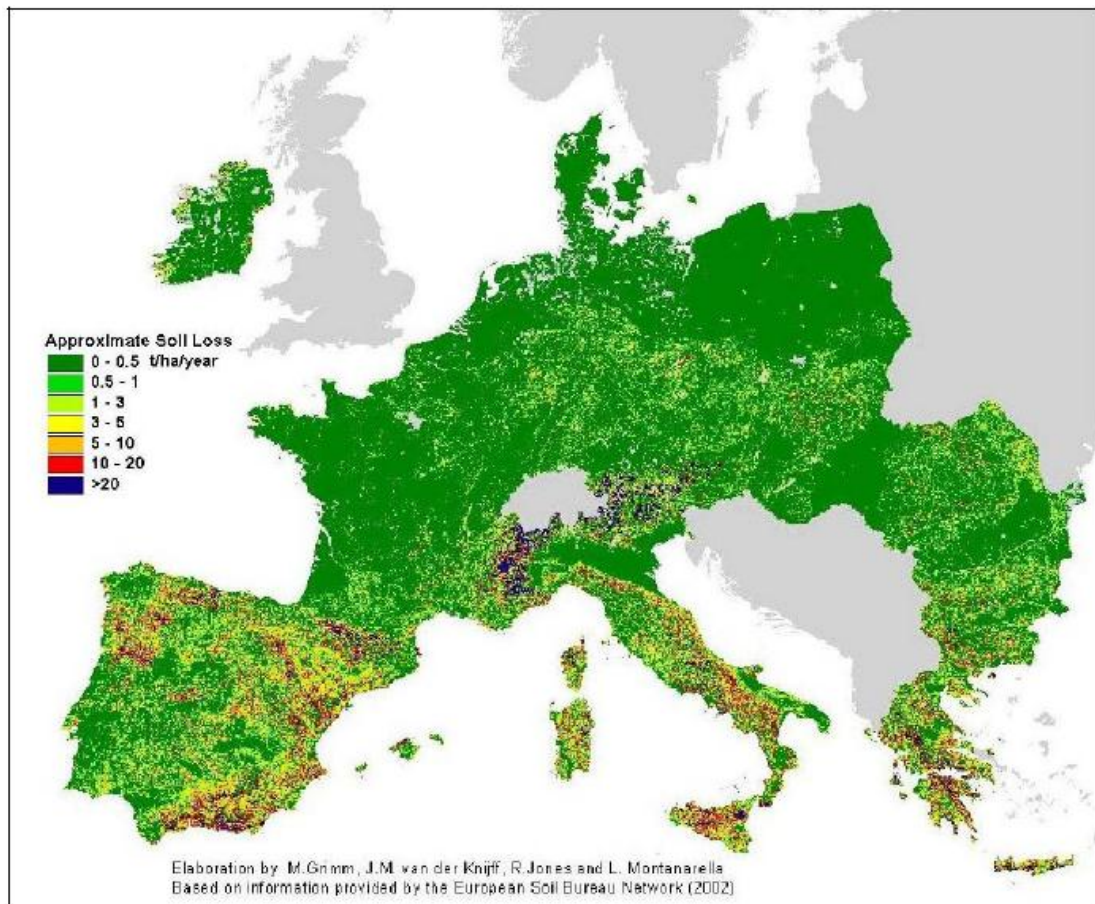


圖 3.7 歐洲有土壤結皮情況的實際土壤侵蝕風險

但是在許多的歐洲的研究裡，以資料品質的角度來看，量化評估可能不見得是適當的。此外，也不適合使用地圖來預測任何單一農業區的土壤流失情況，並且預測任何一年的土壤流失量。這個方法只有考量到水流紋溝和紋溝間的土壤侵蝕，卻不包括淤積的情況。因此，這類的地圖不應用來預測大量的土壤移動現象，如土石流。土壤管理作法的影響也幾乎無法使用這裡的小範圍尺規來衡量。

和其他模型法相較之下，通用土壤流失公式是一個已經發展且需要最少數據的侵蝕模型。但是有關各種數據來源，如植被覆蓋率、降雨侵蝕力、土壤可蝕性和管理作法的影響等（包括等高線、帶狀種植、梯田和地下排水道）有關的估測仍存在一些不確定性(Renard et al., 1997)。幸運的是，在許多案例中，管理作法可能也不是最重要影響侵蝕的因素之一。

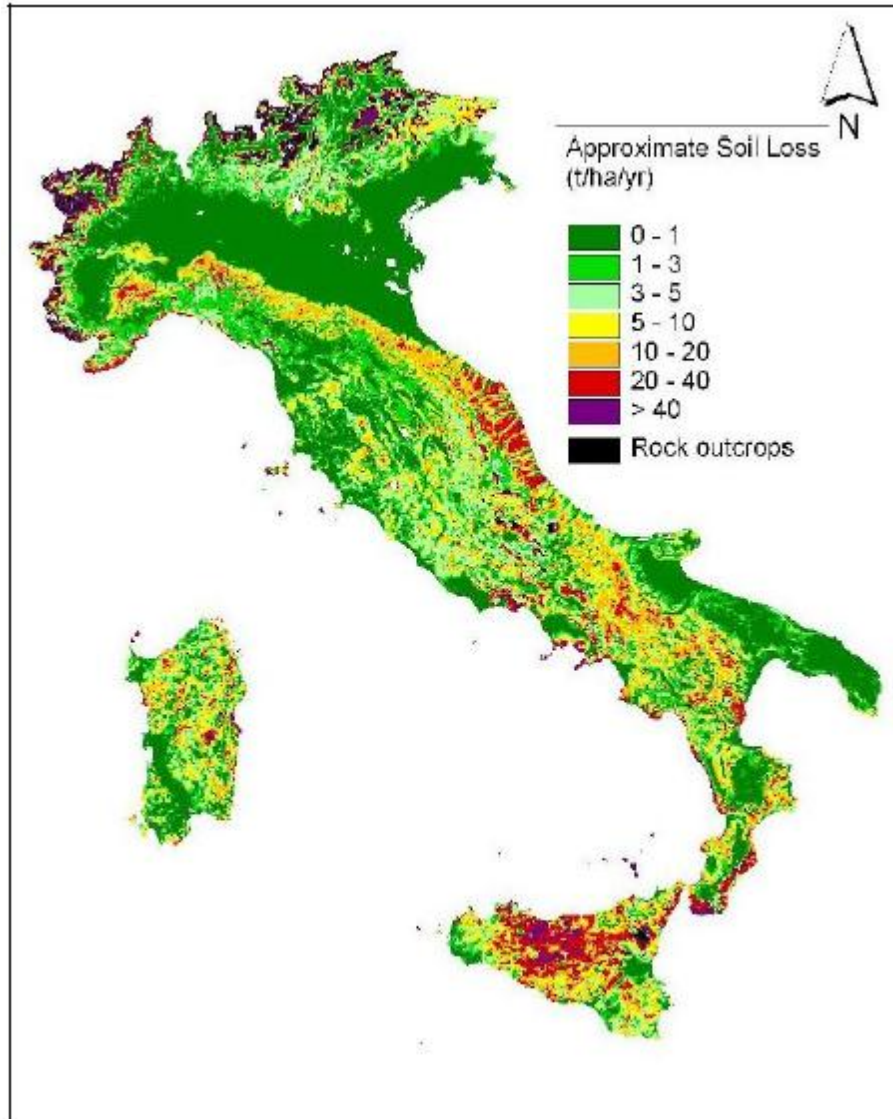


圖 3.8 以通用土壤流失公式模型估測的義大利實際土壤侵蝕風險情況

最後，本研究的結果可以作為進一步的歐洲一致的土壤侵蝕風險圖。使用更精密的數位高程模型，和比目前美國海洋及大氣總署 (NOAA) 衛星的高解析度幅射計所估測的植被覆蓋情況還要更佳的空間和光譜特徵的衛星數據，都可能可以改善現有的數據品質，以便能獲得一個能呈現較佳的降雨侵蝕力的圖像。此外，更詳盡的土壤數據也是不可或缺的（特別是土壤深度、石頭數量和表面紋理）。

3.3.6 法國國家農業技術研究院的方法 (INRA approach)

在「泛歐洲土壤侵蝕風險評估研究」(PESERA 計畫) 開始之前，由法國國家農業技術研究院 (INRA) 所發展的方法，也應視為 Van der Knijff 等人 (2002) 的通用土壤流失公式後，最先進的歐洲地區侵蝕模型。

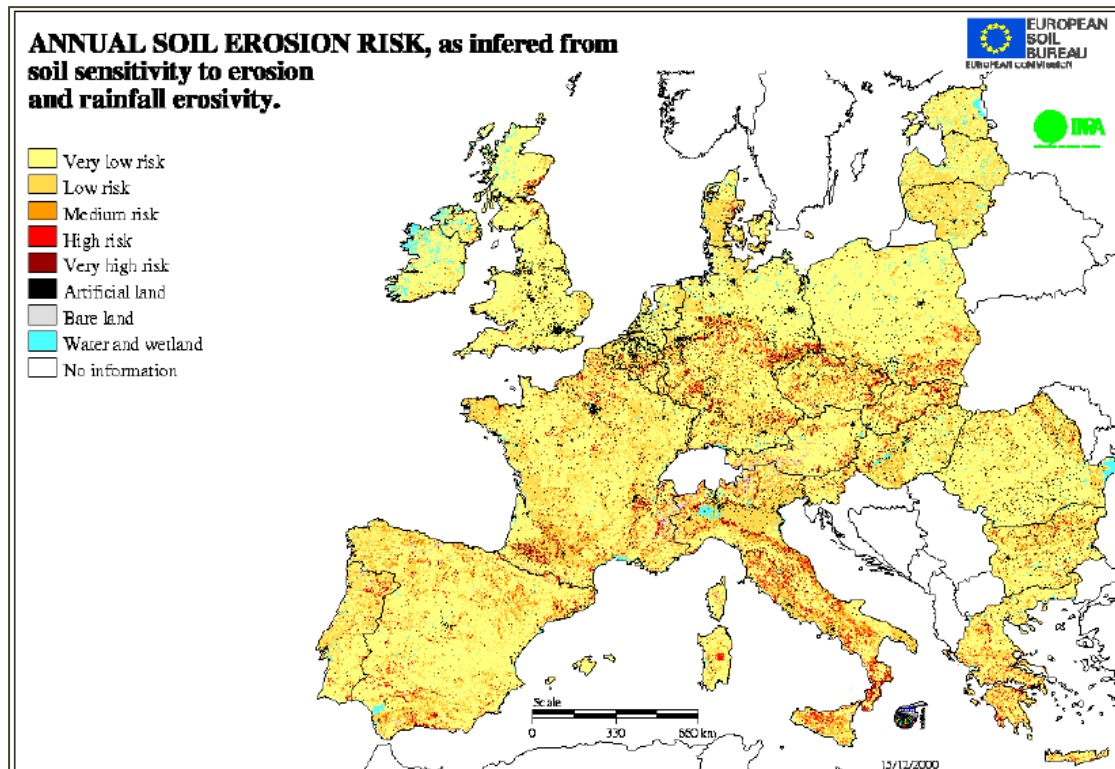


圖 3.9 歐洲的年土壤侵蝕風險

這個模型使用經驗法則，結合土壤利用（以比例尺 1:100000、解析度 250m 呈現的 CORINE 土地覆蓋資料庫）、土壤結皮的敏感性、土壤可蝕性（以比例尺為 1:1000000 的歐洲土壤地理數據資料庫內的土壤轉換法計算）、地勢起伏（1x1m 解析的數位高程模型）和氣象數據（以 50km 解析度、25 年的每日氣象數據）。圖 3.9 則是利用這個方法得到的歐洲年土壤侵蝕風險情況。這個結果所呈現的空間單位能利用行政管理單位（圖 3.10）或是流域集水單位給予定義。

法國國家農業技術研究院主要目的是應用現有知識和歐洲範圍的土壤侵蝕風險評估數據並加以發展。影響侵蝕的因素已經被劃分為現有歐洲不同地域的情況，而且侵蝕機制也已經藉由經驗和專業定義的經驗法則來表示。耕地的土地覆蓋和結皮已被認為是影響徑流和侵蝕風險的關鍵因素。

法國國家農業技術研究院所用的方法和全球土壤退化評估 (GLASOD) 的專家評估方法是不一樣的。前者是以一個利用多層次多因子分級的模型方法為基礎，被設計用來評估區域範圍內的季節性的平均侵蝕風險。此模型是以水無法滲透到土壤，變成徑流且將土壤移動到下坡時，發生土壤侵蝕為前提。此處所指的水無法滲透到土壤，包括不管是在降雨強度超過表面滲透能力（荷頓氏徑流，Hortonian runoff），或是當雨滴落在之前因潮濕或落在一個潛在地下水位上方的飽和表面（飽和徑流，saturation runoff），所導致的土壤無法吸收水分的現象。

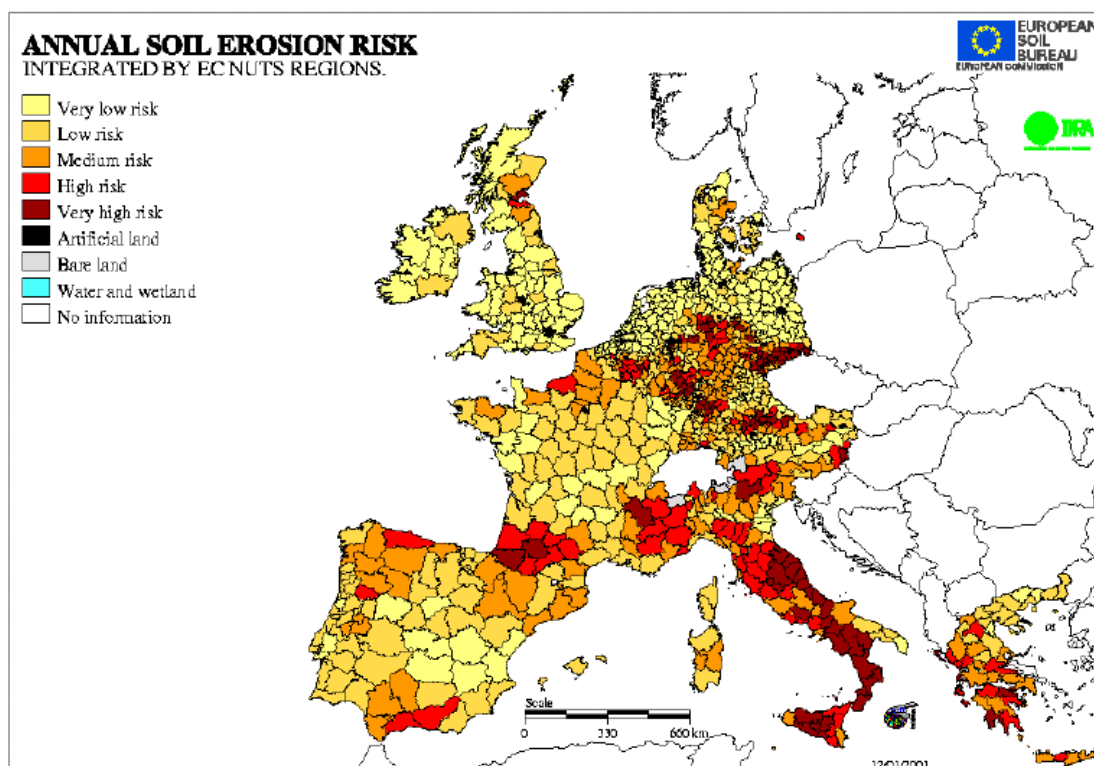


圖 3.10 以行政管理單位呈現的歐洲每年土壤侵蝕風險圖

上述兩種徑流類型一般會出現在不同的環境下：第一種是出現在裸露結皮土壤，第二種則是在潮濕的地方，但它們也可能在某些情況下同時發生。一旦農田內出現徑流，在空間和時間因素下就可能發生各種形式的侵蝕，如片狀邊坡侵蝕、平行線性侵蝕和溝狀沖蝕。

此處的模型是嘗試提供各種上游侵蝕形式的全球性評估。

3.3.6.1 優點及限制

法國國家農業技術研究院所用的方法可以產生一個歐洲範圍的侵蝕風險的一致均勻的地圖，並使其可以和區域之間的侵蝕風險做比較。決策樹模型則可以根據土地利用條件進而考慮到不同的侵蝕種類。所產生的季節性地圖也可以說明季節性對侵蝕影響的重要性。

由於它也可以根據各種空間單位，因此可以滿足不同使用者的需求。此外這個模型很容易修改規則，並且用新數據加以更新。

這個模型法非常簡單和靈活，它可反應不同解析度的數據和品質，且不需要像通用土壤流失公式模型的全國規模參數，也比環境資訊協調侵蝕模型（CORINE）

更加精準。雖然兩種模型都是以決策樹為基礎，但是 CORINE 模型使用單一決策樹並且將兩種土地利用、三種氣候類型和四種斜坡分類，並未將結皮的情況納入考量。

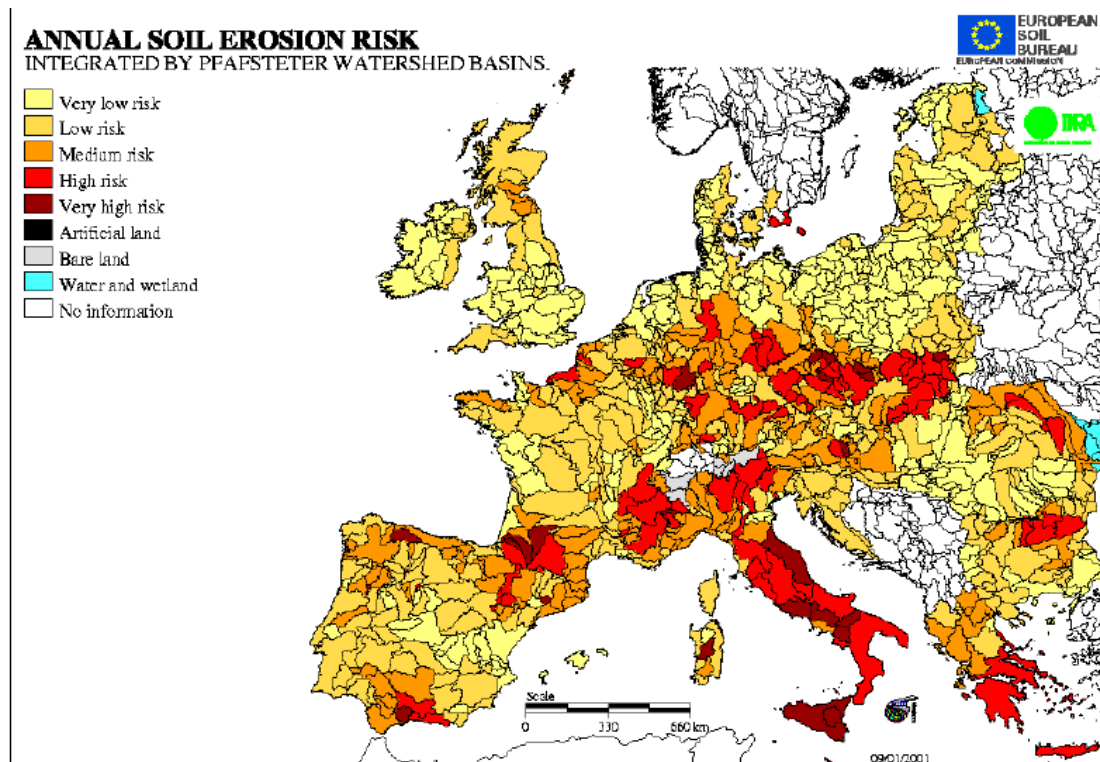


圖 3.11 使用流域集水單位的歐洲每年土壤侵蝕風險

然而，法國國家農業技術研究所用的方法仍存有質性方法的缺點。特別是，最後的侵蝕五種分級資料無法連結到侵蝕的質化數據，也不能進一步評估相關結果的錯誤。

而且，這些結果的錯誤和不確定性很多都來自輸入資料的解析度和品質，而非模型本身，這是因為這個模型是以非常簡易和所有專家接受的全球性假設為主。這個模型內的不確定性主要多來自於土壤資料庫內的參數，舉例來說結皮易感性和可蝕性，再加上空間解析度和這些數據的精確度都很低。其他的限制，像是數字高程模型以 1km x 1km 解析度的網格，無法精準評估緩和的地勢起伏和短山坡區域的斜率。此外，這個模型會使用的 CORINE 土地覆蓋資料庫內的土地覆蓋和農業數據也應經常更新。

3.3.7 「泛歐洲土壤侵蝕風險評估研究」(PESERA approach)

最初提出「泛歐洲土壤侵蝕風險評估研究」(PESERA)的是歐洲土壤侵蝕專家組成的聯合團隊共同進行，主要結果顯示於圖 3.12。較詳盡的計畫說明和預期成果可在下列文獻取得 Technical Annex to the PESERA Project, Contract No. QLKS-CT-1999-01323(see Gobin et al. (1999))。

泛歐洲土壤侵蝕風險評估研究分為三個階段，第一個階段是開發和校準一個基於過程和空間分佈模型，以便量化因水造成的土壤侵蝕和並對整個歐洲地區進行評估。泛歐洲土壤侵蝕風險評估研究模型的概念基礎也被延伸到包括估計耕作和風力侵蝕，雖然還未完成初步的工作，而且這些可能也無法在計畫執行期間完成。泛歐洲土壤侵蝕風險評估研究第一階段具體目標：

1. 發展一個可以應用於區域規模的基於過程和空間分佈的水侵蝕模型。
2. 發展評估方法來驗證模型和侵蝕預測的準確度。這則和建立空間和基於物理模型結構的動態解析度（temporal resolution）有關。
3. 發展連結降雨強度和內插降雨量網格的統計方法。
4. 利用測得的土壤侵蝕數據校準泛歐洲土壤侵蝕風險評估模型。將以歐洲境內測試點測得的土壤侵蝕率彙編數據資料庫。

第二階段主要目標是驗證已發展 PESERA 模型在整個不同農業生態區域的低解析度和高解析度的呈現，並且將 PESERA 模型和其他侵蝕風險評估方法進行比較。由於 PESERA 模型的穩固性和靈活性，因此可檢測其在不同解析度和輸入數據所產生的結果。

此階段的主要目標是：

1. 連結氣候、土壤和地形的輸出數據和不同解析度組成適當模型變數。土壤轉換規則和方程式（Pedo-transfer rules and equations）將可連結土壤參數到有效的土壤資訊。因此可以改善內插法以優化現有侵蝕研究內的氣候和土壤資料庫。
2. 以 SPOT 衛星的植生影像（SPOT VEGETATION）的植被覆蓋資訊來發展有意義的土壤覆蓋網格，以便比較植生影像和常態化差異植生指標(normalized difference vegetation index, NDVI)，而且可能的話也可以使用 SPOT 衛星 HRVIR 影像加以校準。
3. 比較其他高解析模型和 PESERA 模型的集水區輸出資料，這會涉及到整個不同農業生態區內小規模試驗點的選擇。此外也檢驗輸入數據的品質和模型預測準確度的細節。
4. 探討不同農業生態區的低解析度試驗區域模型。PESERA 模型的輸出資料也會被用來和其他評估區域規模的土壤侵蝕模型及專業系統進行比較。
5. 以便由既有資訊和 SPOT 衛星的植生影像植被覆蓋的新資料來編輯影響歐洲侵蝕因素（氣候、土壤、地形、植被和土地利用）的綜合數據資料庫。

為了推估歐洲範圍規模的情況，最先必須要發展一個有效的侵蝕風險評估工具，並且將它作為是探討政策選擇的支援系統之一。PESERA 模型本身結合許多物理參數因而得以產出量化結果，這對決定評估土壤的物理流失影響是很重要的。

第三個階段的具體目標是：

1. 辨識侵蝕風險區域，並且量化目前歐洲範圍和選擇地區或國家試驗區的土壤侵蝕率。
2. 利用情境分析，預測未來氣候變化和歐洲土壤侵蝕風險的土地利用變化可能的影響。
3. 提供決策者具科學基礎的土壤侵蝕指標以量化及監測政策。
4. 發展一個能夠讓多數使用者操作的侵蝕模型網際網路軟體系統。
5. 為兩種不同層次的使用者群組建立模型；分別是積極參與歐洲境內科學研究專業使用者(expert-users)，以及負責執行農業和土地利用政策法規的最終使用者(end-users)。兩個使用者群組的互動被認為是主要的協商過程。
6. 提供歐洲的土壤侵蝕數據給第三方進行相關計畫如全球變化之研究。

第三階段主要的目標就是確保給決策者的相關 PESEA 模型，說這方法採用一個巢狀模式突顯出需要補救措施的環境敏感區域。

計畫主要成果即是開發一個模型，而該模型可以辨識有侵蝕風險的區域、量化侵蝕情況並預測錯誤，更能進一步做情境分析。最終要建立一個全歐洲強大專業和最終使用者的網絡，進而發展 PESERA 模型，以便能在沒有計畫經費挹注時延續進行。

到目前，已經開發出模型基礎，而且也密切連結集水區中土壤流失的空間分佈水文模型。在單一暴風的侵蝕率也能利用沈積物運送方程式（地形、徑流漫地流和土壤可蝕性）來推估。

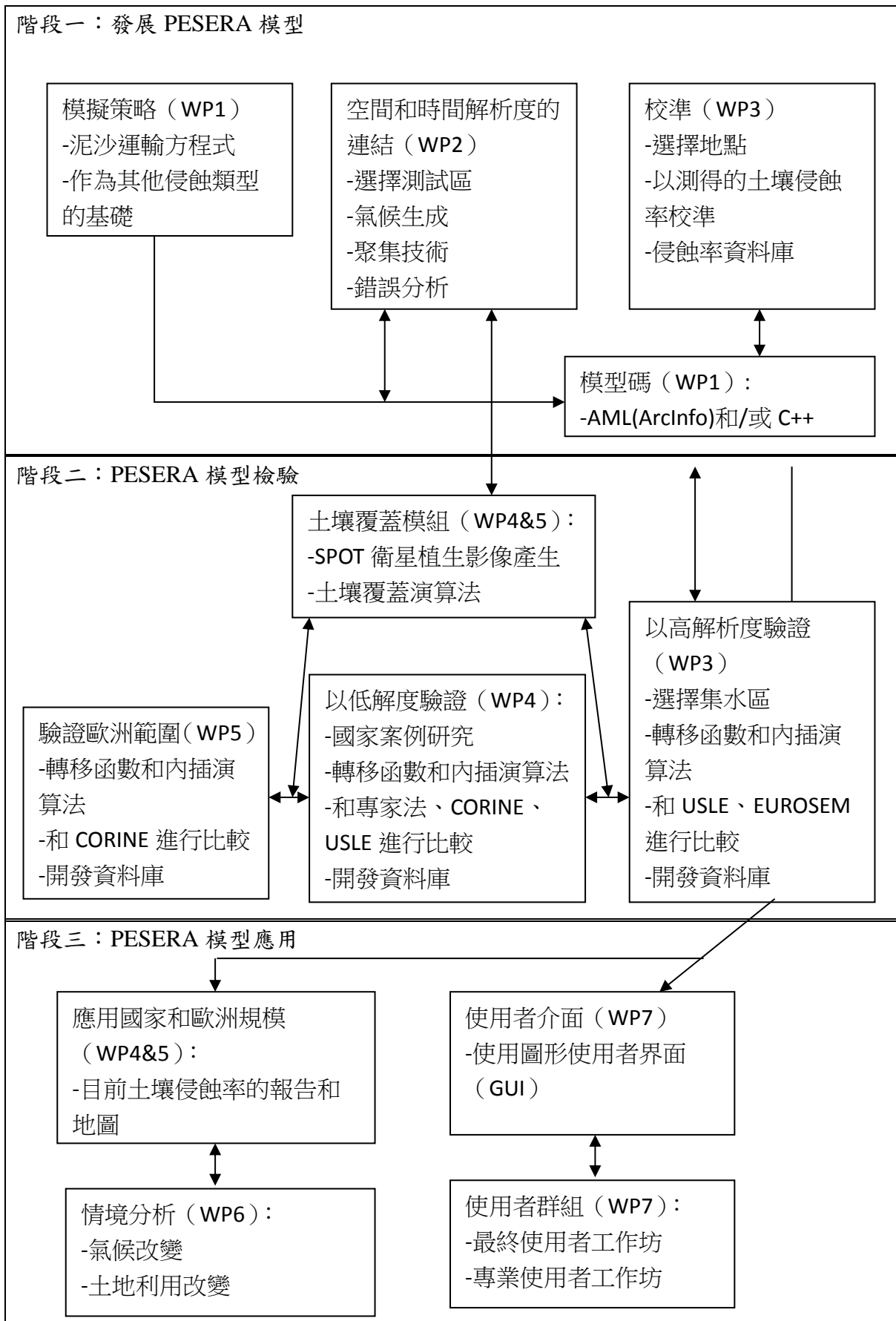


圖 3.12 PESERA 計畫 (Gobin 等人, 1999 年)

其他土壤特徵及土地/土壤覆蓋都可能是形成土壤徑流的一個門檻。流到山坡基底的沈積物流失量可被推估為一個月暴風頻率分佈的總和。而這種模型法也已應用於歐洲試驗點的彙編數據當中。早期 PESERA 模型則已用於法國並已獲得適當數據，而侵蝕風險地圖也說明了這種新方法的可行性（圖 3.13）。

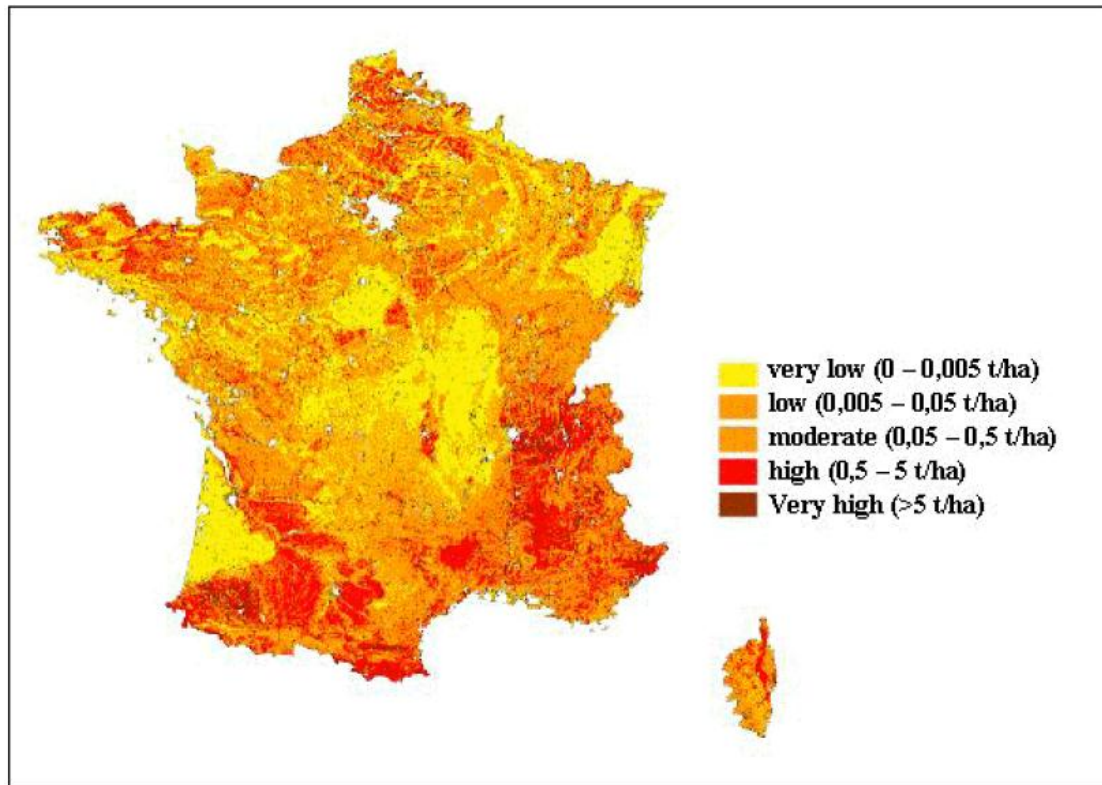


圖 3.13 使用 PESERA 方法所呈現的法國土壤侵蝕風險

3.3.7.1 優點及限制

此一量化模型有許多優點，它得以在泛歐洲區使用，也較專家模型更為容易，能產生一個取代 CORINE 估測的基礎，卻不需要大量數據。因此模型的進一步發展和大量校準及驗證的工作是不可缺少的。

PESERA 模型所產出的結果也會經過評估以確保可靠性，特別是在泛歐洲區的使用上。低解析和高解析度，和跨不同農業生態區的結果也會被加以驗證。該模型的輸出資料也與其他的侵蝕風險評估模型進行比較。

PESERA 模型的穩固性和靈活性將透過以各種解析度和不同輸入數據所呈現的成果來檢驗。但是輸入數據的解析度及品質可能會導致結果的不確定性和錯誤。

此模型也設計用來處理空間和時間數據參數品質和細節，同時也能應用在歐洲範圍和地區性及國家範圍。由一個物理基礎模型發展出來的土壤侵蝕指標不只能提供特定時間的土壤侵蝕狀態，也可以協助瞭解引發侵蝕的各種因素之間的連結關

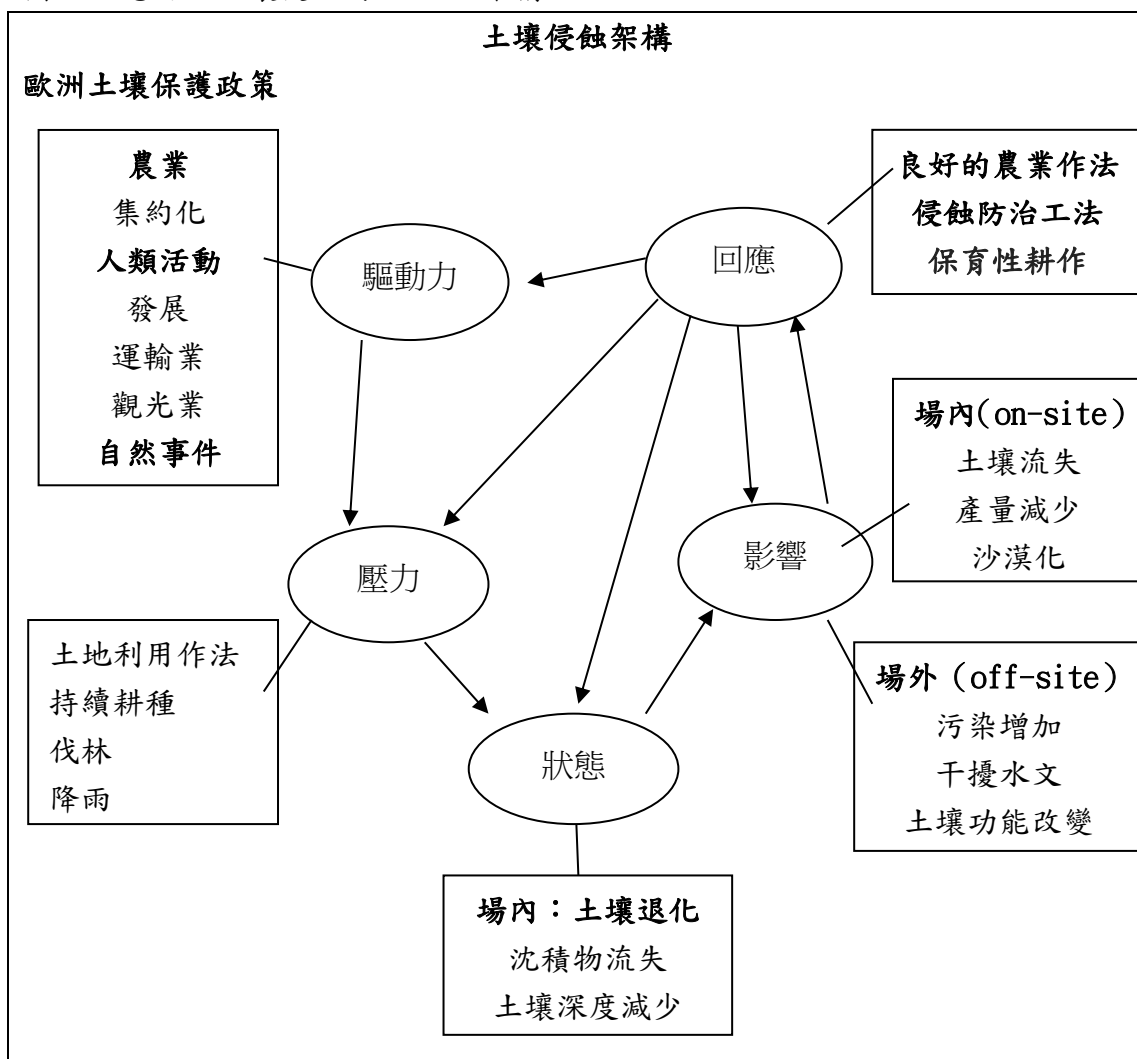
係。PESERA 模型的概念基礎更可以延伸到包括耕種和風蝕的估測上，雖然初期有很多這樣的工作尚未完成。

此外，各種土地利用和氣候變化的情境分析也被包含在內，這得以讓我們評估及監測跨歐洲的農業政策和土地利用及氣候變化的影響。以歐洲範圍來說，初期需要一個評估侵蝕風險的有效工具，並將這個工具作為支持決策系統的一部分，進一步選擇適當的政策。PESERA 模型本身結合了許多可以量化的物體參數，這對對決策評估物理土壤流失的影響是很重要的。

4. 土壤侵蝕指標 (Indicators of Soil Erosion)

各種人類的活動（驅動力）會對環境產生了壓力，並且改變的它的品質(狀態)。環境條件的改變則對其他環境層面構成影響。社會則透過環境、一般經濟和各部門政策對這些改變及影響做出回應。這種因果連鎖反應已經被放入驅動力-壓力-狀態-影響-回應架構 (DPSIR)，如圖 4.1 (Gentile, 1999)。相關指標的發展也此用了這個架構。

圖 4.1 應用於土壤侵蝕的 DPSIR 架構



利用環境稽核 (environmental audits)，可以將一種參數或由參數得到的一個數值定義作指標，該數值能可以指向/提供/描述有關現象/環境/區域狀態，並將其意義延伸至直接有關的參數值 (OECD 1993)。

4.1 驅動力和壓力指標 (Indicators of driving forces and pressures)

目前我們對社會經濟驅動力 and 土壤侵蝕的理解仍非常有限。一般的農業是土壤侵蝕很重要的驅動力。舉例來說，地中海區域有些欠發達地區隨著載畜率的補貼增加，會造成過度放牧現象和產生更多侵蝕問題。

根據歐洲環境署 (EEA) 和歐洲土壤主題中心 (The European Topic Centre on Soil, ETCS) (1999, 2000)，會引發區域潛在和實際土壤侵蝕風險的土壤驅動力，主要因為集約化農業。這將是一個複雜的指標，因為它涉及到不同的壓力指標。而相應壓力則是成本效益且不持續的土地利用作法、機械耕種大型田野、過度放牧和其他集約土地利用所用的工具。合併每個區域農場規模的平均田野大小 (以及田野增加面積)，以及肥料使用和放牧動物數量，這些都是集約化農業的指標。

農業集約化不一定和土壤侵蝕有直接關係。在可能具高侵蝕風險區域內，較高密度的農業土地利用，土壤因水和風蝕的流失就會越高，但是農業集約化和水土保持卻不是相互排斥的。例如，一個有水土保持措施的集約化農耕制度，如梯田和作物覆蓋，可能造成的土壤侵蝕較一個沒有保護措施且過度使用的耕作制度的影響還要小。因此密集的土地利用可以結合有效的水土保護措施，例如比利時的黃土地地帶，當農業生產密集時，陡峭山坡上的土地也會採取保護措施。

其中一個主要關鍵是，不應該單獨評估和侵蝕有關的農業密集度。這是因為侵蝕導致的土壤流失是氣候、地形、土壤屬性、土地覆蓋 (包含自然植被) 和土地管理交互作用下的結果。

將集約農業區隔開有可能會誤導評估的結果，因此也建議因集約型農業改變現象的包括人口、土地開發、觀光、交通運輸、自然事件及氣候變化皆應視為土壤侵蝕的驅動力指標。土地覆蓋 (LC) 變化與降雨可作為土壤侵蝕的壓力指標，因為它們會直接影響土壤侵蝕程度。土地覆蓋變化能合併 CORINE 土地覆蓋和植被變化監測技術使用 (AVHRR/VEGETATION) 加以檢測。降雨的數據可以從 CISCO 氣候和/或 MARS 氣象數據資料庫取得。

4.2 狀態指標 (State of Indicators)

站在科學和技術角度，最適當的指標是受侵蝕影響的區域。但由於嚴重缺乏因水和風造成土壤流失的直接測量數據，因此必須要有個替代參數 (surrogate parameter) 或指標。

4.2.1 受土壤侵蝕影響的區域

一般知識瞭解的是受侵蝕實際影響的區域應該直接與有侵蝕風險的區域有關，而且這邊所指的有風險的區域也是經過一個適當土壤侵蝕模型和必要的空間數據確認。量化的田野規模土壤侵蝕和主要問題的侵蝕因素的數位資料通常都太粗略（就空間解析度而言），以致於無法精確估算出範圍內的土壤流失量。

而實際侵蝕的重要替代指標則是侵蝕風險。風險就是指有一些不希望發生卻會發生的事件。風險評估是相關的風險辨識以及暴露在該風險的測量結果。風險評估之後可能會產生風險分類和/或引入相關的風險管理措施。在一些案例裡，風險可能可以簡單為大家接受，但是有一些情況，則會提前採用減緩措施。採用來評估土壤侵蝕風險的各種方法在第三章有詳盡描述。

受侵蝕影響的地區是土壤侵蝕的主要指標，並且可由定期評估來建立土壤侵蝕的趨勢，在許多全國資料庫都可以取得全國性的估測資料。

但這其中有一個主要的缺點，那就是全國數據資料庫並非是每一個歐盟國家可以取用的，而且也不易取得地區內和國家規模實際受土壤侵蝕影響區域的測量。這是因為實際侵蝕的測量相當困難且費用高。通常在大家察覺土壤侵蝕實際程度之前，就長時間暗中發生，因此精確的數據都很少。但歐盟成員國可以用自己國家資料庫中的估測資料來和歐洲數據相互比較（如歐洲土壤資料庫）。

在進行測量會有一些困難，因此應彙編現有數據並集中儲存，以便能與模型測量做比較。而侵蝕模型提供此一功能，可以測量受侵蝕影響的區域，並且也應定義一個適切的模型並且將標準數據統一，以提供有土壤風險的區域一個標準化的測量。如此獲得的結果就可以提供給決策者一個適合的狀態指標，包括時間陣列。而目前正在執行的 PESERA 計畫應可在兩年後產生這類的一個模型。

4.2.2 實際和潛在的土壤流失

土壤侵蝕狀態指標應該要能表達潛在土壤侵蝕風險的程度和嚴重性 (Düwel and Utermann, 1999)，而且潛在風險的計算必須考量到氣候、地形和土壤條件(圖3.6)，而實際風險的計算則應該考量到植被覆蓋和實際土地利用(圖3.5及圖3.7)。狀態指標也應提供在既有土壤管理和控制侵蝕作法下的實際土壤流失速度以及土壤容許流失量 (soil loss tolerance) 資訊。潛在和實際土壤侵蝕風險的比較可以作為因土地利用改變而產生的風險。

以每年每公頃每公噸為單位所測量得到的因水引起的土壤侵蝕總土壤流失程度也可作為指標，另外測量潛在土壤侵蝕風險的 PESERA 方法應該和所選試驗區域

的實際土壤侵蝕定期監測資料合併使用。

4.2.3 泥沙輸送

為了將實際土壤流失予以量化，可以用每年每平方公里每噸的“泥沙輸送比率”來測量所選河流的定義分水嶺的沖蝕總量（gross erosion）。

泥沙輸送數據可被做為有效的實際土壤流失估測（EEA-ETC/S，1999）。但是，泥沙來源仍然很難確定，而且也不太能追溯到周圍的土地、河岸或河道。根據歐盟「聯合研究中心」(Joint Research Center, JRC)發展出來的數位資料庫可用來定義歐洲流域界線（比例尺 1:1000000）。泥沙密度和每年可能的泥沙數量數據應與集水面積有關，但是這些數據現階段可能不易取得。歐洲淡水監測網站（European FreshWater Monitoring Network, EuroWaterNet）可以提供一些河流泥沙數據。

但有一個缺點是，所選河流的泥沙搬運數據可能和實際來源並沒有關係。河流泥沙量只能作為一個發生在大面積區域侵蝕的指標。要做為土壤侵蝕指標，泥沙搬運數據很少會精確到足以成唯一個獨立的指標。事實上，EEA-ETC/S(1999)則是考慮將泥沙搬運量作為一個影響指標。

4.3 影響指標（Indicators of impact）

影響指標可分為場內（on-site）及場外（off-site）衝擊。就土壤肥力損失來說，場內衝擊大部分可以使用先進科技加以補償。場外衝擊則更易測得而且也能用經濟形式表達。

這邊提議的指標和“清除建造區域（交通道路、房舍）淤積泥沙的支出”有關。但這邊的全國性補救措施資料很少，更不用說歐洲方面的資料，不過歐盟也有提供共同農業政策（Common Agricultural Policy, 簡稱 CAP）的補救工程。另外，重大水災後通常會需要補救措施，相關措施也要包含水災預報系統。

4.4 回應指標（Indicators of response）

以不同區域的土壤容許流失量和尚未定義的土壤侵蝕率的相互比較可以推估影響和回應。

4.4.1 保育作法（conesevation practices）

“執行自給型耕種管理制度（包含耕地的終止休耕）在地農業計畫”的支出則是一個重要的回應指標。這些保育作法包括等高耕種、梯田種植、帶狀耕作和地下排水（Renard et al.,1997）。其他作法還有像是設計採用最少耕犁制度、種植覆蓋物（以減少地面裸露時間），並從根本上改變土地利用制度（例如轉換耕地為牧

場形式)。保育作法已被證明能大大減少土壤流失，許多這樣的作法也可以增加植物覆蓋，因此直接減少水流失，其中也有很多是被公認為“良善的農業作法”。但是保育作法的數據資料卻很少被系統化蒐集並集中儲存於歐洲。保育作法對於減少或消除土壤侵蝕相當重要，但一般只在當土壤侵蝕變成是重大問題後才會開始採用。

4.4.2 減輕策略 (Mitigation strategies)

保育作法對減少或消除土壤侵蝕非常重要，但一般只有在土壤侵蝕現象已經被辨識為顯著問題後才會被採用。保育作法的數據資料很少被有系統地蒐集並集中儲存於歐洲。這邊建議的指標是“特殊土壤侵蝕防治方案包括森林火災防治方案的支出”，而相關作法也包含建置防火系統和建造水庫。

5. 結論和建議

為了確定歐洲地區各種有關土壤侵蝕的過程，並要將研究學者估測因侵蝕作用而造成土壤利用系統的脆弱到退化程度轉換成容易讓決策者瞭解的資訊，因此需要一個簡易的呈現方式。而 OECD (1993) 定義的 DPSIR 架構能提供侵蝕作用各個方面的資訊，讓決策者可以辨別一個適當的減緩策略。圖 4.1 企圖凸顯因侵蝕作用所影響/造成退化的壓力和驅動力，並確認可能的回應以及區分場外及場內衝擊來協助識別出未來決策過程的方法。



圖 5.1 西班牙安達魯西亞自治區，坡度 15 度的斜坡上的橄欖樹 (>樹齡少於 100 年)，該處的土壤幾乎已經完全被侵蝕掉。

顯然土壤侵蝕在歐洲許多地方造成不可逆的土壤退化現象，有時在歐洲南部以極端方式發生（圖 5.1, 5.2），而且在歐洲北部雖然情況不太明顯但仍具破壞性。減輕策略必須要作為整體土壤保護方案策略的一部分並加以實施。現在的歐洲土壤資料庫則提供了廣被認為最具風險區域和檢驗合理程序的一個統一的基礎。目前，實際土壤流失及其未來趨勢可靠的試驗點數據相當缺乏，尤其是歐洲南部地區的資料。

未來執行有效的土壤保護措施，除了比當前可用的氣候和土地覆蓋更好的數據資料，也需要土壤類型分佈的精準空間數據。

任何必要確保合於「土壤保護法規」（Soil Protection Directive）的管理介入都會造成重大的經濟後果。如果未來沒有更優於比例尺 1:1000000 歐洲土壤資料庫和 1:250000 的 CORINE 土地覆蓋資料庫，及解析度 50km x 50km 的 MARS 農業氣象資料庫的數據資浪，土壤保護策略也將是不可行的。



圖 5.2 *Côtes du Ventoux* 水蝕造成葡萄藤根部暴露

如 PESERA 的電腦模型，讓大家看到一些希望是以此方式取得的土壤侵蝕預測結果會比過去的估測還要好。PESERA 對歐洲現況的呈現相當重要，因為它屬於一種徑流模型，而徑流就是造成泥沙嚴重流失的因素。但是為了更詳細的環境稽

核，因此模型估測必須要在測得實際泥沙流失的現場加以驗證。此外，為了將未來侵蝕的趨勢予以量化，侵蝕的測量應該被加到整體歐洲需要測量的侵蝕量內，而且必須要一個遍及整個陸地的土壤監測網路來負責提供這類數據。但精鍊模型和改善解析度與空間數據的準確度都無法代替真正的測量。

最後，土壤科學家必須與其他學門的專家更加緊密合作，例如生物學家、地質學家、化學家、數學家、統計學家、生態學家、社會學家和經濟學家，以便解決土壤侵蝕的各種面向問題，也要讓整個社會整體大眾和決策者的都認知到歐洲的土壤環境已經被濫用相當程度，假使再沒有任何回應，未來將可能招致災難。而整頓和改善過去及現在的濫用情況勢必所費不貲，因此在這方面歐洲較富裕的國家將必須協助經濟條件不佳的國家。