

土壤有機質分解聚積之模擬

林正鈔¹ 林欣華² 劉慧甄²

摘要：土壤有機質之分解與聚積為一動態過程，其轉化機制之解析及穩定趨向之掌握，實為其他各種研究土壤有機質效應問題之基礎。但由於動態過程的解析不易於一般性的說明使用，本報告即針對有機質在土壤環境中分解的過程及腐植質的聚集，就其間可能存在的轉化機制進行穩定與平衡之分析與模擬，使動態模式轉為線性化代數式，以便於一般性解析應用。首先選擇一代表性動態模式分析其系統參數影響分解過程之靈敏性，作為土壤施加有機質之管理參考。其次利用模式矩陣分析其線性轉化特徵，由特徵值研判有機質穩定分解趨向。所得結果顯示：由宏觀尺度分析土壤有機質的聚集，可藉特徵值與特徵向量來預測其平穩特性。動態模擬亦有相同之效果，可為特徵值分析之驗證，也作為其他非線性模式需採動態模擬之佐證。根據研究結果，本研究進一步就有機質施加量與穩定後土壤有機質含量之關係，將動態系統組轉為平衡線性代數式，解析提示用以估計農地聚集有機質的合理模式，並應用幾個本土實驗數據說明其間之關係，以為各種以提升有機質含量為目的之參考依據。

關鍵字：有機質，轉化，模擬

前 言

有機質在土壤中的分解轉化過程，長久以來一直是土壤研究者的工作重點。近幾年再加上有關氣候變遷、有機農業、永續農業、土壤劣化等眾所關注的課題，使得土壤有機質的研究益加受到重視。如何使土體中存留大量的有機態碳，特別是以腐熟的有機質視為高品質有機質，作為提高土壤有機質含量的目標，也就成為前述課題下土壤環境工作者所追求的一個目標。

然而有關有機質分解轉化機制的整體性研究，在國內並不多見，倒是小規模經驗式的處理試驗報告常有所聞。一般而言大都是在特定的時空環境條件下，或以不同方式或以不同數量添加有機質進入表土中，來觀察其對特定土壤性質或特定作物生長的效應，所得結果大致和文獻的傳統記載相仿，提供巨觀上對土壤有機質效用的確認，但也常因環境條件的不同，以致各種試驗結果時有差異，而不易進行定量推演歸納以建立普遍性的田間作業規範。

另一個方向的研究方法是針對有機質分解的最終產物，即腐植質，進行微觀認知上的探索。從分離鑑定腐植性物質，到利用低有機分子的聚合作用來演譯腐植質的產生，這方面的研究有明確的微觀條件的界定，對腐植質的生成機制提供了定性上部份的解釋，結論明確，但對於所定義之腐植性物質與其前置物，或與所填加的新鮮有機質之間的轉化關係，則仍未能完整的描述。

¹ 國立中興大學土壤學研究所教授

² 國立中興大學土壤學研究所研究生

無論是巨觀或微觀；分子或個體，這兩端的工作方式，在基本尺度差異的情形下固有不同，但從有機質的分解聚積本為無可分割的連續過程看來，要有效掌握有機質投入土壤的效應，以及腐植質聚積的速率，必須將這兩端的工作範疇做進一步的結合，從整個有機質的分解過程，加上其間所受到的影响因素逐步加以分析，或能對於現階段各種與土壤有機質有關的問題理出一個頭緒，並進一步指出影响土壤有機質行為的關鍵所在。

整合土壤有機質分解過程的模式中，較具代表性的工作有Jenkinson and Rayner(1977) ,Hunt (1977), van Veen and Paul(1981)等研究。Lin et al.(1987)曾就這三個模式加以分析比較。並就系統分析方法取長補短，針對有機質分解轉化的過程重新組一個新模組。其後有劉(1987)、林等(1990)分別在土壤及廢水處理體系中進一步予以驗證。惟此新模式尚未受到注意，其非線性特性亦較複雜，因此本研究即以Jenkinson and Rayner(1977)這一個較具代表性且較為簡單的模式為例，解析其原理以進行系統模式參數對有機質聚積與分解之靈敏度分析，並說明土壤有機質穩定趨向模擬之意義，以做為管理土壤有機質的參考，也作為後續解析Lin, Liu and Hu(1987)之模式研究之依據。

模擬方法

有關有機質在不同環境條件下聚集、轉化與分解的過程，以及幾種主要模式之原理，在Lin, Liu and Hu(1987)的文獻中已有詳細解析，在此即不再重述。這裡所要說明的模擬方法，是就系統參數的靈敏度、系統變數穩定的特徵值、以及穩定趨向與輸入的關係來加以闡示，以提供有機質在諸如土壤或堆肥等體系中之轉變的解析工具，並說明相關的應用意義。這些方法同樣適用於前述各種有機質模式的模擬分析。

按Jenkinson and Rayner(1977)所建立的模式，描述如下：

$$\frac{d(DPM)}{dt} = -k_d(DPM) \quad \dots(1)$$

$$\frac{d(RPM)}{dt} = -k_r(RPM) \quad \dots(2)$$

$$\frac{d(BIO)}{dt} = k_d P_b(DPM) + k_r P_b(RPM) - k_b(BIO) + k_b P_b(BIO) + k_b P_b(POM) + k_c P_b(COM) \dots(3) \\ + k_c P_b(COM)$$

$$\frac{d(POM)}{dt} = k_d P_p(DPM) + k_r P_p(RPM) + k_b P_p(BIO) - k_p(POM) + k_p P_p(POM) + k_c P_p(COM) \dots(4)$$

$$\frac{d(COM)}{dt} = k_d P_c(DPM) + k_r P_c(RPM) + k_b P_c(BIO) + k_b P_c(POM) - k_c(COM) + k_c P_c(COM) \dots(5)$$

DPM為易分解態有機質，RPM為抗分解態有機質，BIO為生質量，POM為物理性穩定態有機質，COM為化學性穩定態有機質。 k_d ， k_r ， k_b ， k_p ， k_c 分別為上述各有機質之分解速率常數。 P_b ， P_p ， P_c 則為分解轉化過程中分別轉為生質量、物理性穩定態有機質、及化學性穩定態有機質

之分配比率。

靈敏度分析在於就模擬分析目的，檢視系統各參數對該分析目的之影響程度，以為參數鑑定或簡化系統管理之依據。本研究將採用相對分析法，以有機碳殘留量為分析目標，定義如下：

$$\begin{aligned} \delta \left(\frac{y}{k_i} \right) &= \frac{\sigma y/y}{\sigma k_i/k_i} \\ &= \delta (y/k_i) \times k_i/y \\ &= \frac{y(k_i + \Delta k_i/2) - y(k_i - \Delta k_i/2)}{\Delta k_i} \times k_i/y \end{aligned}$$

y代表模式中之狀態變數，在模式中即為各種形態有機質之總合；k_i為各參數值。δ (y/ k_i)值之大小次序即為各參數值的靈敏度大小次序。模擬時以原有參數為基礎⁽¹⁾，各參數值以增減10%為範圍進行分析。由於y為一動態變數，各參數值的靈敏度大小次序有可能隨分解過程而異，這情形將一併檢查。

有機質分解聚積的動態過程是否會達到一種穩定狀態，可以分析如下：
首先將系統方程式(1)到(5)式以泰勒序列展示為

$$\begin{bmatrix} DPM \\ RPM \\ BIO \\ POM \\ COM \end{bmatrix}^{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} DPM \\ RPM \\ BIO \\ POM \\ COM \end{bmatrix}^t + \Delta t \begin{bmatrix} \frac{d(DPM)}{dt} \\ \frac{d(RPM)}{dt} \\ \frac{d(BIO)}{dt} \\ \frac{d(POM)}{dt} \\ \frac{d(COM)}{dt} \end{bmatrix} + \frac{\Delta t^2}{2!} \begin{bmatrix} \frac{d^2(DPM)}{dt^2} \\ \frac{d^2(RPM)}{dt^2} \\ \frac{d^2(BIO)}{dt^2} \\ \frac{d^2(POM)}{dt^2} \\ \frac{d^2(COM)}{dt^2} \end{bmatrix} + \dots \quad (7)$$

穩定系統的定義為

$$Y^{t+\Delta t} = \lambda Y^t \quad (8)$$

λ 成爲一系統特徵值(eigenvalue)。將Y設為

$$Y = [DPM \ RPM \ BIO \ POM \ COM]^T$$

捨去(7)式中之非線性項，使成爲一般常見的歐拉法(Euler Method)⁽⁷⁾，再將(8)式代入(7)式且將(1)式至(5)式亦代入(7)式即成爲

(A- λ I).Y^t，其中I為單位矩陣，而

$$A = \begin{bmatrix} 1 - \Delta tk_d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \Delta tk_r & 0 & 0 & 0 \\ \Delta tk_d P_b & \Delta tk_r P_b & 1 - \Delta t(k_b - k_b P_b) & \Delta tk_p P_b & \Delta tk_c P_b \\ \Delta tk_d P_p & \Delta tk_r P_p & \Delta tk_b P_p & 1 - \Delta t(k_p - k_p P_p) & \Delta tk_c P_b \\ \Delta tk_d P_c & \Delta tk_r P_c & \Delta tk_b P_c & \Delta tk_p P_c & 1 - \Delta t(k_c - k_c P_c) \end{bmatrix}$$

在 Y^t 不可為零的條件下，使

$$|A - \lambda I| = 0 \tag{9}$$

即可求得 λ ，並視 λ 值之性質而判別該有機質轉化過程是否具穩定特性。其值大於1，則有穩定增加之特性；小於1代表穩定減少；等於1即為一平衡系統之存在。

在系統中如有添加有機質進入土壤中，則上述求取特徵值的過程將不易以(9)式的形式進行。惟此時可視目的而解析系統特性，例如吾人可設特徵值等於1，以估計平衡關係，則簡化方程式組如下：

$$A \cdot Y^t + \begin{bmatrix} (DPM)_i \\ (RPM)_t \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \tag{10}$$

$(DPM)_i$ 及 $(RPM)_t$ 分別為施加有機質的速率，可設為每年施加量。(10)式和

$$\frac{dY}{dt} = 0 \tag{11}$$

所得結果和意義是相似的，只是出發點不同而已。解(10)式或(11)式的方法亦相同，可直接以代數式計算或以疊代方式求數值解⁽⁷⁾。吾人皆已分別驗證所得結果相同。

最後利用上述方法，以本土化數據⁽⁵⁾為依據，在不同條件下，分別作系統參數鑑定，然後用以推估各種施加有機質的比例下，在穩定平衡時，土壤有機碳可能殘留的百分比。

結果與討論

按(6)式之定義分析(1)式至(5)式中，各系統參數對有機質分解過程的影響程度，其結果(圖一)顯示相對靈敏度值反應各參數在不同階段下，對有機質分解的影響程度有所不同。圖一的橫座標參數由左到右是按原設定值由大到小排列。由長條圖在有機質分解各階段的變化次序，並非完全由高往低排列，可知系統參數的大小不一定代表該參數在系統中的重要性。

圖一的變化次序另外指出幾件值得參考的意義：首先，由 k_d 值居於分解初期最靈敏位置可知，有機質中易分解的部分，其分解速率常數的掌控是管理新鮮有機質轉化的主要因素；然而，由中間幾個參數之靈敏度的增加，特別是後期的變動，顯示前述 k_d 值對後期有機質達穩定平衡時的殘留

量，不會是主要的因素，這點推論在後面有關施加量與平衡量的估算時，可有進一步佐證；其次，由 p_p 與 p_b 的靈敏度值有超出同階段反應速率常數之靈敏度值的情形，可以說明有機質轉化過程中的組成份性質，較之分解速率常數還重要，且中間產物與微生物族群的多寡，是分解中間階段的主控因素。

上面對於參數靈敏度分析，提供有機質轉化過程之系統特性的了解與可能之管理要義。其間尚有許多細節問題，可藉靈敏度分析加以深入探討，例如整個時域之下，各個狀態變數與各個參數之靈敏度關係。這種分析應可提供有機質分解過程中，不同階段之管理依據。

有關有機質分解穩定趨向的分析，從前面第(9)式或第(10)式特徵質的應用，對於像第(1)式至第(5)式這類線性系統模式，應較簡單可行。比起許多採用類似單純一階反應式所延伸的方法(8,9)，而必須容許較大誤差的估算，也較有意義。

由第(9)式之A矩陣結構，可看出當系統趨向穩定時，欲使(9)式成立，則特徵值 λ 會趨近於主對角線之上元素值，特別是時間差 Δt 越小越明顯，特徵值也愈趨進於1而小於1。顯示有機質穩定遞減的分解特性，也同時表示以第(9)式的形態方式，可針對有機質轉化進行穩定趨向分析。以原作者⁽¹⁾之參數值為例，計算有機質分解後期達穩定時之特徵值為0.988與0.999，即每日分解量最多約為1.2%，最少為0.1%，依此比例呈穩定遞減。

就(11)式的形式進行系統有機質含量達平衡時之分析，可以歸納出有機質穩定平衡的殘留量，Y，與施加量， DPM_i 與 RPM_i 之關係如下：

$$Y = \frac{DPM_i}{k_d} + \frac{RPM_i}{k_r} + \frac{DPM_i + RPM_i}{1 - P_b - P_p - P_c} \left(\frac{P_b}{k_b} + \frac{P_p}{k_p} + \frac{P_c}{k_c} \right)$$

如進一步將A設為每年施加有機碳量，且 p_d 、 p_r 分別為 DPM_i 、 RPM_i 在A中之比例⁽¹²⁾，則(12)式可進一步寫為：

$$A = Y \left(\frac{P_d}{k_d} + \frac{P_r}{k_r} + \frac{1}{1 - (P_b + P_p + P_c)} \left(\frac{P_b}{k_b} + \frac{P_p}{k_p} + \frac{P_c}{k_c} \right) \right)$$

(13)式可視為一模組，要應用這一式子，首先須做參數鑑定的工作。按過去的實驗結果⁽³⁵⁾，以第(1)式至第(5)式進行檢量分析，所得結果詳如表一所示。比較各有機質在不同條件下之 k_d 值，其大小次序和各有機質之碳氮比大小次序相似，高溫下的數值也比低溫下大，高低溫混合數據的鑑定值，則介於兩者之間。其他參數值就沒有一定的趨向。這也反應了以單一分解速率常數分析有機質分解行為，可能不適用於後期分解與聚集狀況之掌握。

引用表一數據分別以(12)式或(13)式估計維持土壤有機碳平衡水準與每年應添加量關係，即為圖二至圖四之結果。由圖二至圖四各條件直線之變化範圍及斜率關係，可以看出評估土壤有機碳平衡水準與每年應添加量關係，其變數相當多，掌握每一步驟的變異，並且確定模式的準確意義，對估計量的影響很大。

表一、各種有機質及試驗條件之下模式參數值。

Table 1. Model parameters for various organic matter and their experimental conditions.

Temp	O.M.	k _d	k _r	k _b	k _p	k _c	P _d	P _r	P _b	P _p	P _c	R ²
15°C	Com Stalk	4.80	0.261	0.232	0.0140	0.00872	0.392	0.608	0.0644	0.0331	0.00282	0.999
	Compost	3.50	0.279	0.645	0.0352	0.00676	0.541	0.459	0.0854	0.683	0.00747	1.000
	Sludge	3.09	0.346	0.623	0.0300	0.00515	0.633	0.367	0.0755	0.455	0.00779	1.000
30°C	Com Stalk	9.82	0.602	0.179	0.0329	0.0136	0.392	0.608	0.0155	0.0574	0.00562	0.999
	Compost	4.26	0.230	0.179	0.0223	0.00411	0.541	0.459	0.0822	0.466	0.00718	0.998
	Sludge	4.73	0.166	0.168	0.0219	0.0189	0.633	0.367	0.0753	0.297	0.00616	0.999
15°C + 30°C	Com Stalk	7.53	0.646	0.330	0.0266	0.00906	0.392	0.608	0.0707	0.0995	0.00388	0.993
	Compost	4.19	0.293	0.455	0.0255	0.00529	0.541	0.459	0.0827	0.586	0.00623	0.996
	Sludge	4.11	0.287	0.237	0.0199	0.00211	0.633	0.367	0.0778	0.387	0.00675	0.995
Jenkinson & Rayner(1977)		4.20	0.300	0.410	0.014	0.00035	0.837	0.163	0.076	0.125	0.0035	

圖二至圖四之結果就定性意義言，和傳統對有機質分解殘留的各種影響因素與趨向之了解，諸如溫度、有機質性質，都頗為符合。惟本研究將各種影響因素之間的關係加以整合，並提出定量的解析過程與結果，以釐清土壤有機碳平衡水準與每年應添加量關係之思考方向。

就圖二至圖四之結果，求取各直線之斜率，可估計要維持每1%之土壤有機碳每年所須施加之有機質的量。估計結果詳如表二所列。以玉米桿為例，在15°C的情況下，每維持1%土壤有機碳則每年所須施加於土壤之玉米桿有機碳量相當於0.175%。由玉米桿之C含量51.7%⁽⁵⁾推算，大約相當於每年所須施加乾重6.78公噸玉米桿。如欲維持2%之土壤有機碳，則每年所須施加於土壤之乾重玉米桿即為2倍之多。

按表二或(13)式估計有機質施加量與殘留量之關係，是以平衡的觀點推演其評估法則，雖較簡單但也有缺點，例如土體中原有之有機質含量未予計入。這是使用表二或(13)式時，必須注意的一點。雖然在計算出施加量與殘留量之關係後，再予計入原有之有機質含量，但如原有之土壤有機質含量仍有不容忽略之分解量，則所得估計質還是有偏差。為精確計算施加量與殘留量之關係，仍以原有動態模式模擬為宜，此為作者及其他有興趣者之後續研究工作。

傳統上一些有機質分解的計算模式，為了方便起見，有以單變數一階反應式作為依據進行各種分析^(8,9,10)。簡化的模式固然方便於了解與應用，但也容易造成明顯的誤差。例如以C為有機碳，A表年施加量，k為分解速率常數，按單變數一階反應式列示為：

$$\frac{dC}{dt} = A - kC \tag{14}$$

以相同之實驗數據鑑定參數k值之後，再用以估算施加玉米桿有機碳平衡後之土壤有機碳含量，並與第(13)式之結果作比較，即如圖五所示，其斜率間有7到10倍的差異，顯示以(14)式會有

大量的高估現象。這原因也明白指出有機質的轉化不會是單純的一個階段的反應，即使在本文用以分析的五個變數的模式，是否要擴大到六個變數的模式^(4,5,6)，應是值得進一步深入探討。

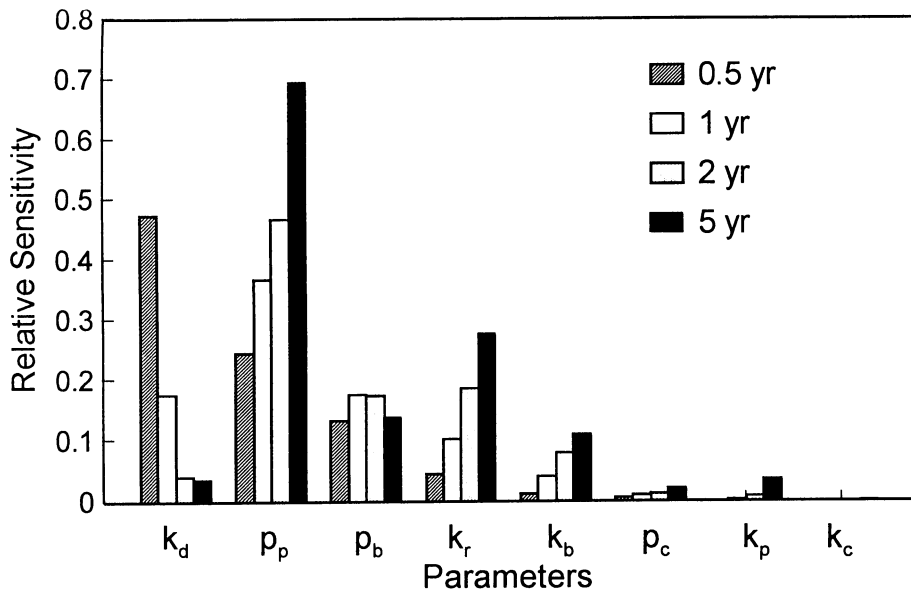
由前述分析可以進一步看出以一階反應式進行分析時必須收集足夠數據，特別是對於穩定平衡狀態的確定至為重要，如果所分析之範圍包括已平衡數據在內，則較不會發生外插性的累積誤差。以本論文集集中（陳與連，1995）資料之分析包含已平衡數值，其估算結果應可避免外插性誤差。

表二、每維持1%土壤有機碳含量每年所需施加之有機質乾重百分比及粗估之每公頃施加噸數。
Table 2. Dry weight percentage and approximately estimated tons per hectare of organic matters needed to apply to soil annually for maintaining every 1% of organic carbon.

Conditions	15°C			30°C			15°C + 30°C			Jenkinson & Rayner (1977)
	Corn ⁺ Stalk	Compost	Sludge	Corn Stalk	Compost	Sludge	Corn Stalk	Compost	Sludge	
O.C.(%)	0.175	0.0107	0.0266	0.287	0.0185	0.0394	0.159	0.0131	0.0223	0.0404
O.M.(%) (dry)	0.339	0.0379	0.0693	0.555	0.0658	0.103	0.307	0.0465	0.0581	0.0781
Tons* per hectare (dry)	6.78	0.758	1.37	11.1	1.32	2.06	6.14	0.93	1.16	1.56

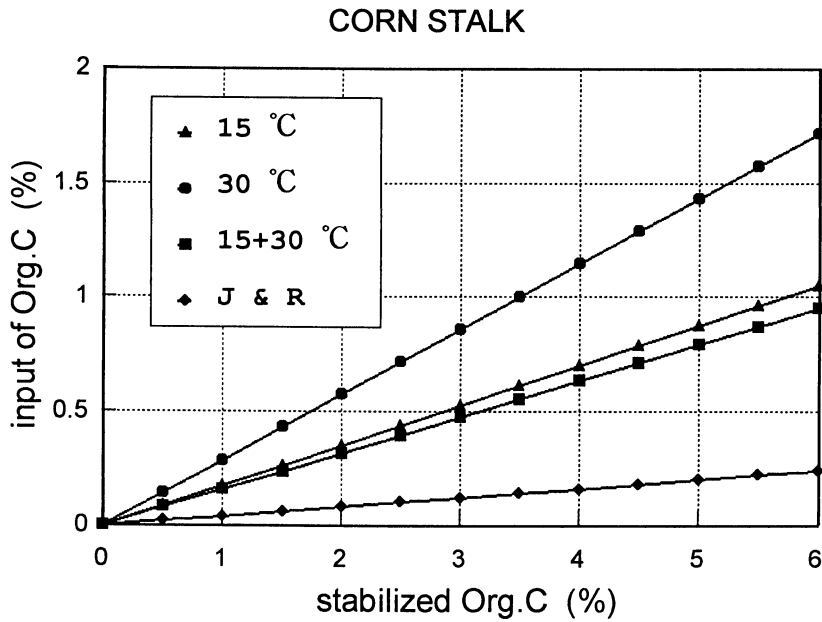
* Estimated by assuming 2,000,000 Kg of soil per hectare.

+ C contents of corn stalk, compost, and sludge are 51.7%, 28.1%, and 38.3% respectively.

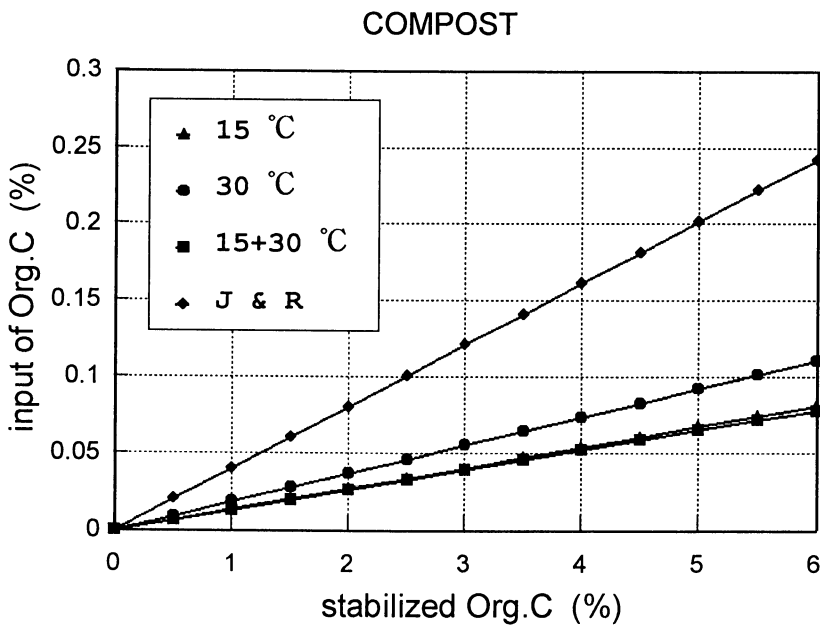


圖一、系統參數在不同階級之靈敏度分析。

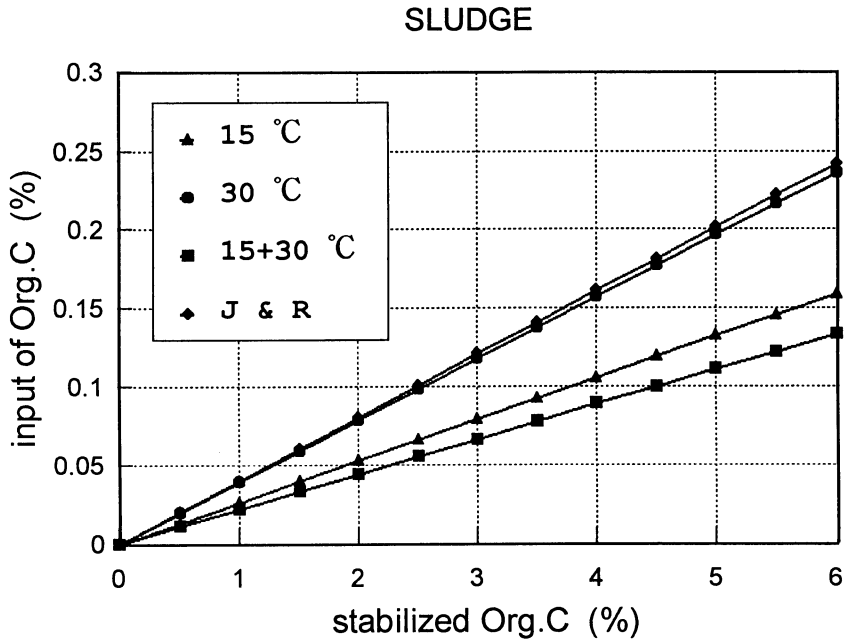
Fig.1 Sensitivity analysis of system parameters at different stages.



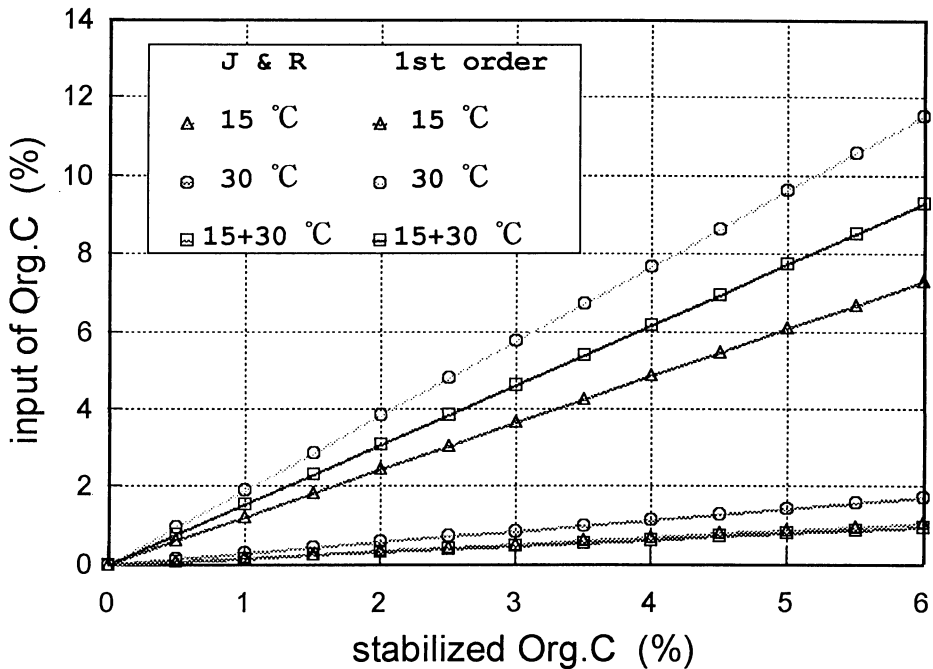
圖二、施加玉米桿有機態碳與穩定平衡後之土壤有機態碳含量關係
Fig.2 Input organic C from corn stalk as related to stablized soil organic C.



圖三、施加堆肥有機態碳與穩定平衡後之土壤有機態碳含量關係
Fig.3 Input organic C from compost as related to stablized soil organic C.



圖四、施加污泥有機態碳與穩定平衡後之土壤有機態碳含量關係
 Fig.4 Input organic C from sludge as related to stabilized soil organic C.



圖五、一階動態模式與Jenkinson & Rayner 模式用於估算施加玉米桿有機態碳與穩定平衡後之土壤有機碳含量之比較
 Fig.5 First order dynamic model in comparism with Jenkinson & Rayner's model for the input organic C from corn stalk as related to stabilized soil organic C.

結 論

土壤有機質分解與聚集之動態過程，在經過參數靈敏度分析後，會顯現各分解階段之主控因素，有助於有機質施用上的管理。有機質分解與聚集之動態模式以線性化處理為代數式後，可分析其穩定趨向之特徵值，以辨別分解過程中之比例關係。對於預估有機質分解量隨時間之變化，提供另一指標。在以平衡為目的之線性化處理下，所整理出來的方程式，用於計算施加量與平衡量的關係較為方便，也比一般常用的單變數一階轉化式準確。

參考文獻

1. Jenkinson, D. S., and J. H. Rayner. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.* 123:298-305.
2. Hunt, H. W. 1977. A simulation model for decomposition in greenlands. *Ecology* 58:469-484.
3. van Veen, J. A., and E. A. Paul. 1981. Organic carbon dynamics in grassland soils. 1. Background information and computer simulation. *Can. J. Soil Sci.* 61: 185-201.
4. Lin, C., T. S. Liu, and T. L. Hu. 1987. Assembling a model for organic residue transformation in soils. *Proc. Natl. Sci. Coun., R.O.C. B.* 11:175-186.
5. 劉滄琴 · 1987 · 有機殘質在土壤中轉化模式之研究 · 國立中興大學土壤研究所碩士論文 · 台中市國立中興大學 ·
6. 林正鏘, 胡苔莉, 江康鈺 · 1990 · 廢水有機質分解轉化模式之研究 · 中華民國環境工程學會第十五屆廢棄物處理技術研討會論文集 · 79年11月, 台中 · pp491-506 ·
7. Conte, S. D., and C. de Boor. 1980. *Elementary numerical analysis, an algorithmic approach.* McGraw-Hill, Inc. N.Y., N.Y.
8. Smith, J. L., R. R. Schnabel., B. L. McNeal., and G. S. Campbell. 1980. Potential errors in the first-order model for estimating soil nitrogen mineralization potentials.
9. Pal, D., and F. H. Broadbent. 1975. Kinetics of rice straw decomposition in soils. *J. Environ. Qual.* 4:256-260.
10. White, R. E. 1979. *Introduction to the principle and practice of soil science.* Black Sci. Pub., Oxford. pp. 34-35.

Simulations for the Decomposition and Accumulation of Organic Matter in Soils

Chenfang Lin, Singhua Lin, Hueijen Liu
Department of Soil Science
National Chung Hsing University

Summary

The decomposition and accumulation of soil organic matter in soil is a dynamic process. To analyze and control the transformational mechanisms is the fundamentals for other researches related to the effects of soil organic matter. This report aims at the analysis of mechanical processes and the transformation of the dynamic model into algebraic equations. Firstly, we chose a representative dynamic model to carry out the sensitivity analysis for every system parameters. The purpose was of showing how to use the method to find some key factors for managing the application of organic matter to soils. Secondly, we transformed the dynamic model into a transitional matrix and defined an eigenvalue to characterize the stability of the matrix. Eigenvalues became an index to show the rate of decomposition after the system being stabilized. Dynamic simulation proved the characteristics of the eigenvalues. Accordingly, the relationship between annual input and stabilized level of soil organic matter was formulated. Several cases were studied as for the references of showing how to improve the level of soil organic contents.

Key words : Organic matter, Transformation, Simulation