

# 土壤有機質降解過程之過度分解現象研究

## Studies on the Over Decomposition phenomenon in the simulation process of organic matter decomposition in Soils.

林正錫<sup>1\*</sup> 吳宗澤<sup>1</sup> 林麗惠<sup>1</sup> 陳琦玲<sup>2</sup>  
Chenfang Lin<sup>1</sup> Tsungche Wu<sup>1</sup> Lihui Lin<sup>1</sup> Chiling Chen<sup>2</sup>

### ABSTRACT

An over decomposition phenomenon was discovered in the simulation process of soil organic matter decomposition. The phenomenon happened when there was much easily decomposed matter in the initial condition and the addition of organic matter was lower than the amount of decomposition annually. This paper discussed the relative sensitivity analysis of parameters and initial conditions of state variables on the over decomposition phenomenon, based on the Jenkinson & Rayner model. The results should be helpful for the design of experiments to verify the discovery. The results also showed the equilibrium levels of total organic matter calculated by the equilibrium model were the same as those simulated by the numeric analysis of the dynamic model.

Key words: soil organic matter, over decomposition, sensitivity analysis.

### 摘要

根據雙變數以上之土壤有機質分解模

式之動態模擬結果，土壤有機質總量會出現一種低於起始狀態，而後逐漸增加至最終穩定狀態之過度分解現象，此現象出現於土壤起始之有機質含大量之易分解物質，且每年之添加量不及其分解量時。根據模擬結果，此過度分解現象往往長達十幾年，或甚至幾十年，故不易以用實驗直接加以驗證。本文以動態模式，探討分析各參數及狀態變數起始值對過度分解現象之相對靈敏度，期藉由參數之調整，得以在短時間內觀測過分解現象之變化。根據靈敏度分析結果顯示，可藉由每年有機質添加量之增加，使過度分解現象提早出現，並藉著  $P_p$  與  $K_p$  參數值之調整，可使有機質含量自過度分解現象回復至平衡含量的幅度加大，藉此將可縮短以實驗驗證此現象之觀測時間，且使此現象易於觀測。本文亦藉不同參數之長期模擬結果，驗證以平衡模式計算或以動態模式數值分析方法模擬土壤有機質之穩定趨向，結果是相同的。

關鍵詞：土壤有機質、過度分解、靈敏度分析。

### 前言

1. 國立中興大學土壤環境科學系, Department of Soil and Environmental Sciences National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan

2. 台灣省農業試驗所農化系, Department of Agricultural Chemistry, Taiwan Agricultural Research Institute, Wufeng, Taiwan.

\* Corresponding Author

土壤中的有機質含量是評估地力的重要指標之一，其分解的過程及相關的機制，向來是土壤學界極感興趣的課題。前人曾探討過有機質分解轉化的機制及土壤有機質分解聚積之模擬，有採用單變數一階反應式 (Herman *et al.*, 1977; Russell, 1964)、雙變數一階反應式 (王等, 1987)、多變數一階反應式 (Jenkinson & Rayner, 1977; Hunt, 1977; Van Veen and Paul, 1981) 及多變數非線性反應式 (林等, 1987) 等。根據各模式之模擬結果顯示，在某些參數與起始條件下，雙變數以上之動態模擬，會出現一種土壤有機質總量低於起始狀態，而後逐漸增加至最終穩定狀態之過度分解現象，此現象出現於土壤起始之有機質含大量之易分解物質，且每年之添加量不及其分解量時。此有機質分解過程中的過分解現象往往長達十幾年，或甚至幾十年，故不易以用實驗直接加以驗證。美國密蘇里大學在 1988 年成立 Sanborn 農場的草原處女地，在 1915 年後轉種小麥及梯牧草 (Timothy) 的長期試驗資料 (Balesdent *et al.*, 1988)。亦顯示此種過度分解現象，但作者認為在小麥連作試驗中，土壤有機質有逐漸增加之趨勢，乃因在 1950 年以後每年有機物投入量增為 2 倍之故，而轉種梯牧草試驗，則認為其在 1915 年以後有機碳測定值之變異較大，但一般而言，是趨向平衡狀態，故作者並未對此現象有進一步的說明。但作者在其他有機質存在形態的分離實驗中提出，應由含 2 個不同分解速率的變數之簡單模式來模擬表土有機質的變化。本文以 Jenkinson and Rayner (1977) 動態模式，分析各參數及狀態變數起始值對過度分解現象之相對靈敏度，探討各參數對有機質分解之相對影響程度。期藉由參數之調整，得以在短時間內 (數年) 即能觀測過度分解現象之變化，以作為驗證模式及過

度分解現象之實驗設計參考。

## 原理與方法

### 一、土壤有機質分解模式

本文所分析的是 Jenkinson and Rayner (1977) 所建立的模式，描述如下：

$$\frac{d(\text{DPM})}{dt} = -K_d(\text{DPM}) + P_d \times A$$

$$\frac{d(\text{RPM})}{dt} = -K_r(\text{RPM}) + P_r \times A$$

$$\begin{aligned} \frac{d(\text{COM})}{dt} = & K_d P_c (\text{DPM}) + K_r P_c (\text{RPM}) \\ & + K_d P_c (\text{BIO}) + K_r P_c (\text{POM}) \\ & - K_c (\text{COM}) + K_c P_c (\text{COM}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d(\text{POM})}{dt} = & K_d P_b (\text{DPM}) + K_r P_b (\text{RPM}) \\ & + K_d P_c (\text{BIO}) - K_p (\text{POM}) \\ & + K_p P_p (\text{POM}) + K_c P_p (\text{COM}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d(\text{BIO})}{dt} = & K_d P_b (\text{DPM}) + K_r P_b (\text{RPM}) \\ & - K_b (\text{BIO}) + K_b P_b (\text{BIO}) \\ & + K_p P_b (\text{POM}) + K_c P_b (\text{POM}) \end{aligned}$$

模式中 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，OM 為化學性穩定態有機質。K<sub>d</sub>、K<sub>r</sub>、K<sub>b</sub>、K<sub>p</sub>、K<sub>c</sub> 分別為上述各有機質之分解速率常數。P<sub>b</sub>、P<sub>p</sub>、P<sub>c</sub> 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。A 為每年有機質的添加量，P<sub>d</sub>、P<sub>r</sub> 為添加量中易分解與抗分解有機質所佔的比例。模擬分析採用 Euler 法，共模擬 500 年，時間間隔採用 0.1 年。以 MicroMath<sup>®</sup> Scientist<sup>®</sup> for Windows<sup>®</sup>，為數值模擬之工具，由於此軟體僅能處理單純的微分方程式，不能處理每年有添加

量之模擬過程，故以下列方程式來解決此一問題：

$$\text{sig}=0.001$$

$$F=(\arctan(\tan(\pi*(t-.05)+\pi/2)) + \pi/2)*12.0/\pi-6.0$$

$$z=10.0*\exp(-(F/\text{sig})^2)$$

$$A=1.0e02*\text{ifgtzero}(z-0.1,\text{amount},0)$$

$$\text{DPM}' = -K_d*\text{DPM} + A*\text{Pd}$$

$$\text{RPM}' = -K_r*\text{RPM} + A*\text{Pr}$$

$$\begin{aligned} \text{BIO}' = & K_d*\text{Pb}*\text{DPM} + K_r*\text{Pb}*\text{RPM} - K_b*\text{BIO} \\ & + K_b*\text{Pb}*\text{BIO} + K_p*\text{Pb}*\text{POM} \\ & + K_c*\text{Pb}*\text{COM} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{POM}' = & K_d*\text{Pp}*\text{DPM} + K_r*\text{Pp}*\text{RPM} \\ & + K_b*\text{Pp}*\text{BIO} - K_p*\text{POM} \\ & + K_p*\text{Pp}*\text{POM} + K_c*\text{Pp}*\text{COM} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{COM}' = & K_d*\text{Pc}*\text{DPM} + K_r*\text{Pc}*\text{RPM} \\ & + K_b*\text{Pc}*\text{BIO} + K_p*\text{Pc}*\text{POM} \\ & - K_c*\text{COM} + K_c*\text{Pc}*\text{COM} \end{aligned}$$

$$\text{SUM}' = \text{DPM}' + \text{RPM}' + \text{BIO}' + \text{POM}' + \text{COM}'$$

## 二、由動態模式推導之平衡模式

林等 (1995) 由動態模式推導平衡模式，有機質穩定平衡的殘留量， $y$ ，與每年添加量， $A$  之關係如下：

$$y = \left[ A \frac{P_d}{K_d} + \frac{P_r}{K_r} + \frac{1}{1 - P_b - P_p - P_c} \left( \frac{P_b}{K_b} + \frac{P_p}{K_p} + \frac{P_c}{K_c} \right) \right]$$

各參數值之定義如前所述。由此關係式顯示在模式的參數值鑑定後，即可由上式直接計算土壤有機質的穩定平衡值。為驗證動態模式由數值分析方法模擬所得之平衡值與所推導出平衡模式的平衡數值一致，以林等 (1995) 由 15 °C 玉米桿分解試驗所求得的參數為基礎，分別以各參數及狀態變數起始值之 2 倍及 0.5 倍 (除了  $2 * P_c > 1$ ，不合理，而改為  $1.5 * P_r$ )，所模擬之土壤有機質變化過程中，最後十年 (490

~ 499 年) 之有機質總量的最大值與最小值範圍，檢驗由平衡模式所求得的平衡值是否有介於其間。由動態模式之模擬結果顯示，在所設定的參數變化範圍內，在將近 500 年時，土壤有機質均已趨近穩定平衡狀態。

## 三、靈敏度分析

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。本研究採用相對靈敏度分析法。為了量測各參數及狀態變數起始值對過度分解現象之相對靈敏度，本研究以三種數據作為指標：(1) D1：初始有機質總量與過度分解中最小有機質總量之差；(2) TMIN：產生有機質總量最少之過度分解現象所需時間(年)；(3) D2：分解過程中有機質總量之最小值與平衡值之差。各指標如圖一所示。

相對靈敏度之定義如下：

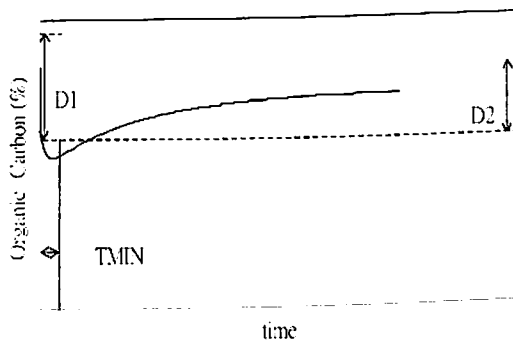


Fig 1. Three indexes used for the sensitivity analysis.

- (1) D1: Difference of total organic carbon in initial condition and the lowest point of curve of over decomposition.
- (2) TMIN: Time which is necessary to meet the lowest level of over decomposition process.
- (3) D2: The difference of total organic matter in the lowest level and equilibrium level

$$\begin{aligned} \delta\left(\frac{y}{K_i}\right) &= \frac{\sigma y/y}{\sigma K_i/K_i} \\ &= \delta\left(\frac{y}{K_i}\right) \times \left(\frac{K_i}{y}\right) \\ &= \frac{y(K_i + \Delta K_i/2) - y(K_i - \Delta K_i/2)}{\Delta K_i} \times \frac{K_i}{y} \\ &= \frac{y(K_i + \Delta K_i) - y(K_i - \Delta K_i/2)}{3/2 \Delta K_i} \times \frac{K_i}{y} \end{aligned}$$

或令  $\Delta K_i = K_i$ ，則

$$= \frac{y(2K_i) - y(K_i/2)}{3/2 K_i} \times \frac{K_i}{y}$$

代表上述三種指標，為靈敏度分析之變數，即各參數值或狀態變數起始值， $\delta(y/K_i)$  值之大小次序即為各變數的靈敏度大小次序。模擬時以林等 (1995) 之 15 °C 玉米桿分解試驗所鑑定之參數值為基礎，各參數及狀態變數之設定值如表一。但由於有些參數在上述變化範圍內，則未有過度分解現象出現，如分別將  $P_p$  設定為  $P_p * 0.5$ ，POM 為  $POM * 2$  及  $A$  為  $A * 0.5$  進行模擬時，均未出現過度分解現象。因此本文採用

$$\delta\left(\frac{y}{K_i}\right) = \frac{y(1.5 K_i) - y(0.8 K_i)}{0.7 K_i} \times \frac{K_i}{y}$$

進行相對靈敏度分析，即以各參數原始鑑定值之 1.5 及 0.8 倍為範圍進行分析比較。

## 結果與討論

### 一、模式動態模擬之平衡值與平衡模式計算之理論平衡值的比較

根據本次靈敏度分析過程所模擬之不同參數與狀態變數起始值的最後十年土壤有機質平衡狀態每年的變化範圍如圖二。由模擬結果顯示土壤有機質之各狀態變數

Table 1. Values of variables of base condition and result of relative sensitivity analysis.

[Values of parameters of corn stalk (15 °C) were identified by Lin *et al.* (1995)]

variable (K <sub>i</sub> ) value	relative sensitivity analysis*			
	$\delta \left[ \frac{TMIN}{K_i} \right]$			
1. parameter				
K <sub>d</sub>	4.8	0.008	0.000	0.004
K <sub>r</sub>	0.261	0.254	-0.500	0.067
K <sub>b</sub>	0.232	0.036	-0.143	0.032
K <sub>p</sub>	0.014	0.056	0.786	-2.234
K <sub>c</sub>	0.00872	0.003	0.000	-0.340
P <sub>d</sub>	0.392	0.178	0.071	-0.070
P <sub>r</sub>	0.608	-0.275	-0.143	0.119
P <sub>b</sub>	0.0644	-0.052	0.000	0.193
P <sub>p</sub>	0.0331	-0.108	-0.500	2.475
P <sub>c</sub>	0.00282	-0.010	0.000	0.368
2. initial condition				
DPM	2.234	0.525	0.071	-0.168
RPM	3.466	0.808	0.357	-0.329
BIO	0.15467	0.036	0.000	-0.018
POM	0.7579	0.045	0.500	-1.404
COM	0.073884	0.003	0.000	-0.154
3. annual addition				
Addition	0.525	-0.404	-0.714	3.193

\*Relative sensitivity analysis of variables was based on

$$\frac{y(1.5 K_i) - y(0.8 K_i)}{0.7 K_i} \times \frac{K_i}{y}$$

起始狀態與其穩定趨向無關，有機質之最後平衡只取決於各狀態變數之分解速率常數與分配比率及投入量與其性質，此結果

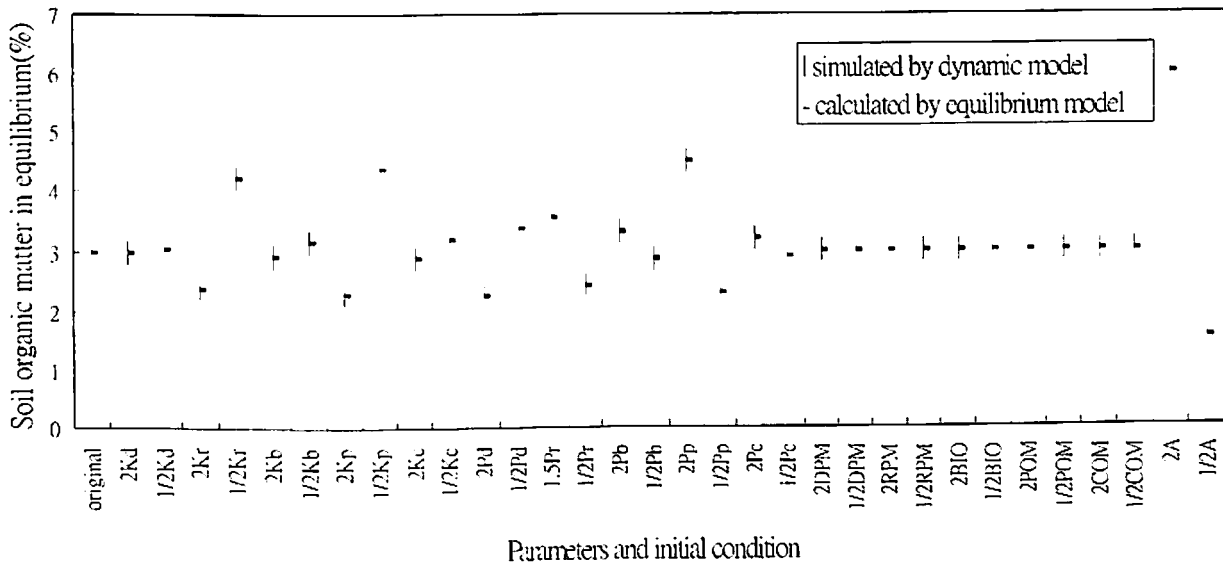


Fig. 2. Comparison on the equilibrium level of soil organic matter simulated by dynamic model and calculated by equilibrium model

與平衡方程式之內容相符。由平衡模式所計算之理論平衡值亦介於動態模擬之最後十年有機質之變化範圍，甚至是落於中間值，也驗證平衡方程式之推導與動態模式之數值分析過程無誤。

由以上之結果顯示，土壤有機質分解之穩定趨向，可在模式參數鑑定後，即可由平衡模式計算得之，不必藉由動態模式之數值分析得之。然而動態變化過程，如過度分解現象，只有藉著動態模擬才被發現及探討。

## 二、各參數及狀態變數起始值之相對靈敏度分析

在靈敏度分析之變數測試範圍，即  $1.5 \cdot K$  至  $0.8 \cdot K$  之間，各參數及狀態變數起始值對過度分解現象之相對靈敏度如表一所示。對 TMIN 而言， $K_p$  最為靈敏，其次是 A，再其次是  $P_p$ 、POM 與  $K_r$ ，除了每年的添加量與  $K_r$  外，均與 POM 此狀態變數直接相關。由靈敏度值，更進一步顯示，每年添加量之增加與  $P_p$  及  $K_r$  值增加大，可

縮短過度分解現象出現之時間，而  $K_p$  與 POM 值之增加，則延長過度分解現象出現之時間。綜合上述結果顯示，若欲使過度分解現象提早出現，可藉由每年添加量的增加，及選擇易轉成 POM 及 POM 分解較慢的有機資材，但起始之有機質 POM 部分較少者。

對 D1 而言，則以 RPM 對其最為靈敏，其次是 DPM，再其次是 A。由於 D1 之定義為起始之有機質總量與過度分解現象中最低之有機質總量的差異，且在基礎條件中，RPM 與 DPM 分別佔起始之有機質總量的 51.8% 與 33.4%，故根據分析結果，起始 RPM 與 DPM 的調整，使起始有機質總量相對改變很多，因而使起始有機質總量與過度分解現象中最低有機質總量之差距增加，因此 DPM 與 RPM 之起始值對 D1 出現較為靈敏之分析結果。而每年有機資材添加量之增加，會使過度分解現象中之最低有機質總量增加，故有機資材添加量之增加，對 D1 為負的效應。

對 D2 而言，以 A 對其最為靈敏，其次是  $K_p$  和  $P_p$ ，再其次是 POM，除了每年之添加量以外，其餘較靈敏的參數，均是與 POM 狀態變數直接相關，此結果與對 TMIN 之靈敏度相似。由上述結果顯示，可藉由每年添加量之增加，使過度分解現象之最低有機質總量與平衡狀態之有機質總量之差距加大。此幅度之增加，將使過度分解現象易於觀測。另一方面， $K_p$  值減小、 $P_p$  值增加及 POM 起始值之減少亦會使上述幅度增大，對過度分解現象之觀測亦會有正面之效果。

比較對 TMIN 與 D2 之分析結果顯示，最靈敏之前四項之參數靈敏度次序，除了前 2 項之 A 與  $K_p$  之靈敏度次序相反，與  $K_p$  對 TMIN 之靈敏度大小與  $P_p$  及 POM 相同外，其餘均相同。綜觀上述結果，可藉起始之有機質含較多比例之 DPM 與 RPM 等易分解部分，與每年添加量之增加，及在分解過程中維持最多的 POM，將使過度分解現象提早出現，且使其最低點與起始與平衡穩定時之有機質總量之差距加大，而易於觀測。

針對過度分解現象之提早出現問題，雖然根據各參數及狀態變數起始值對 TMIN 之相對靈敏度分析結果顯示，對 TMIN 具有最大的靈敏度為  $K_p$ ，且其值為正數，即  $K_p$  之減小將有助於過度分解現象之提早出現。但由不同  $K_p$  值模擬所得之 TMIN 值顯示，雖然在  $0.8 * K_p$  與  $1.5 * K_p$  範圍內， $K_p$  對 TMIN 值之相對靈敏度大，但小於  $0.8 * K_p$  者，則對 TMIN 值之減小影響不大 (表二)。另外，在實際的情形下，添加之有機資材的  $K_p$  值不至太小，且有機資材之分解特性參數鑑定不易。而每年添加量之靈敏度大小雖列於第二位，但由模擬結果顯示每年添加量之增加，對過度分解現象之提早出現有明顯的影響 (圖三)。以原來玉米桿分解

實驗所鑑定參數進行模擬，如添加量由每年的 0.525% 增為 2 倍，則過度分解之最低點由第 20 年提前至第 11 年，若增為 3 倍，則更提前至第 2 年即可出現 (圖三)。然而，雖然由前幾年的模擬值與起始值，可明顯

Table 2. TMIN values were effected by adjustment of  $K_p$

$K_p$	TMIN
0.014*0.1	15
0.014*0.5	17
0.014*0.8	19
0.014*1.5	30
0.014*2.0	112

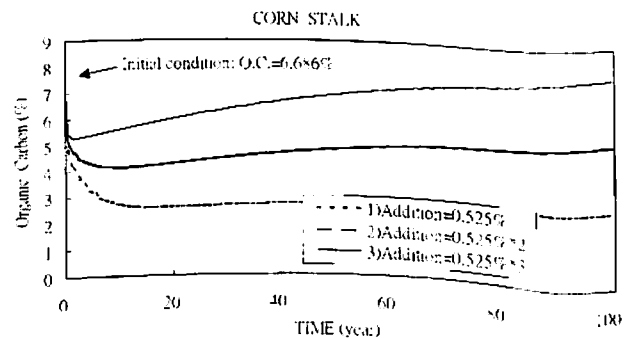


Fig. 3. Comparison on the phenomenons of over decomposition simulated by the different amount of the annual addition

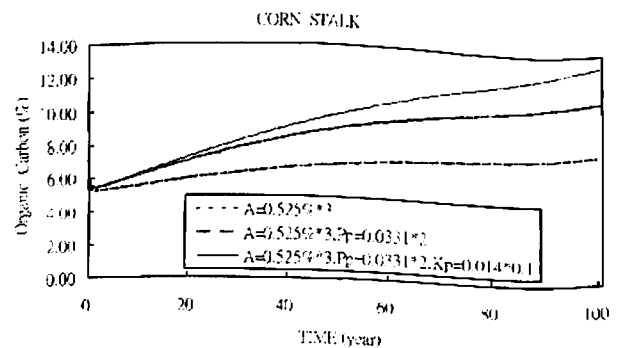


Fig. 4. Change extent of soil organic matter from the minimum level of overdecomposition to the equilibrium level could be increased by the adjustment of  $P_p$  and  $K_p$

的看出過度分解現象之開始，但由於直到第14年，其有機質之變化都在實驗測值之10%的誤差範圍內，即使藉由對D2靈敏之參數 $P_p$ 與 $K_p$ 之調整，以如圖四所示，將 $P_p$ 調整為原來參數值之2倍，可將有機質變化範圍在實驗誤差之10%內的14年，縮短為8年。若再加上 $K_p$ 調整為原來參數值之0.1倍，則可縮短為7年，但觀測時間仍長，且在實際的應用下，參數之調整不易。故若要在較短的時間內清楚的由實驗數據看出過度分解現象，除了藉由每年有機質材添加量之增加外，加強土壤有機質的採樣與分析技術及降低實驗誤差是為關鍵。

## 結 論

由於本文的模擬分析結果顯示，模式中參數之相對靈敏度分析方法，可提供土壤有機質過度分解現象驗證的實驗設計參考。根據本次由15°C玉米桿分解試驗所鑑定之參數的過度分解現象的模擬結果分析，若將添加量增為3倍，則過度分解現象出現之最低點可由原來的第20年，提前第2年出現。而藉著 $P_p$ 與 $K_p$ 參數值之調整，亦可使有機質含量自過度分解現象回復至平衡狀態有機質含量的幅度得以加大。此結果有助於以實驗數據驗證過度分解現象之設計，可於較短的時間內觀測到此現象。唯在此現象中有機質含量的逐年變化差異，都在實驗測值之10%的誤差範圍內，故要在較短的時間內觀測過度分解現象，除了藉由每年有機質材添加量之增加外，加強土壤有機質的採樣與分析技術及降低實驗誤差是為關鍵。

## 參考文獻

王西華、鄭正勇、章莉菁、李勝隆、林碧霞、凌美月。1987。台灣地區有機質肥

- 料與既有堆肥資源調查與研究。行政院科技顧問組委託調查研究計畫報告書。
- 林正鏘、劉滄琴、胡苔莉。1987。污泥有機質在土壤中轉化之模式研究。廢水處理技術研討會論文集。
- 林正鏘、林欣華、劉慧甄。1995。土壤有機質分解聚積之模擬。有機質肥料合理施用技術研討會專刊。
- Balesdent, J., G. H. Wagner, and A. Mariotti. 1988. Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by carbon-13 natural abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 118-124.
- Conte, S. D., and C. de Boer. 1980. Elementary numerical analysis, an algorithmic approach. McGraw-Hill, Inc. N.Y., N.Y.
- Herman, W. A., McGill, W. B., and Dormaar, J. F. 1997. Effects of initial chemical composition on decomposition of roots of three grass species. *Can. J. Soil Sci.* 57: 205-215.
- Hunt, H. W. 1977. A simulation model for decomposition in grasslands. *Ecology.* 58: 469-484.
- 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.
- Russell, J.A. 1964. Mathematical expression of seasonal changes in soil organic matter. *Nature (Lond.)* 204: 161-162.
- Van Veen, J. A., and E. A. Paul. 1981. Organic carbon dynamics in grassland soils. I. Background information and computer simulation. *Can. J. Soil Sci.* 61: 185-201.