

作物根部衍生碳素對土壤有機碳庫之影響  
Effect of crop root-derived carbon on soil  
organic carbon pool

陳昶璋<sup>1</sup>、許明晃<sup>2</sup>、黃文達<sup>3</sup>、楊棋明<sup>4\*</sup>

Chen Chang-Chang, Hsu Ming-Huang, Huang Wen-Dar, Yang Chi-Ming

<sup>1</sup> 國立台灣大學農藝學系碩士班研究生

<sup>2</sup> 中央研究院生物多樣性研究中心博士後研究

<sup>3</sup> 國立台灣大學農藝學系講師

<sup>4</sup> 國立台灣大學農藝學系兼任副教授暨中央研究院生物多樣性  
研究中心副研究員

\* 通訊作者：cmyang@gate.sinica.edu.tw

關鍵字：土壤有機碳庫；根圈沉降；碳同位素

Key words: soil organic carbon pool ; rhizodeposition ; carbon isotope

## 一、前言

土壤有機碳庫(soil organic carbon pool)所代表的是土壤有機碳的含量或儲存量，其變化會直接影響土壤供給氮、磷、鉀及各類養分給作物之能力、微生物活性與團粒穩定性等物理、化學與生物活性(陳等, 1998)，進而影響土壤之生產力，對於作物生長與發育而言是相當重要的部份，而對陸地生態系而言，更是不能忽略的一環(Studdert *et al.*, 1997)。

一般而言，作物透過光合作用將大氣 CO<sub>2</sub> 固定於植株內，透過呼吸作用會將固定下來的碳再度轉化成 CO<sub>2</sub> 回歸到大氣；而植物自身的代謝與分配，配合生長所需，會將光合作用所固定的碳送到各個組織與器官，做進一步代謝或儲存。在這當中部分代謝物(大多為二次代謝物)會透過揮發、淋洗等作用，釋出、回歸至生長環境，也會透過根部將代謝物釋入土壤，這樣的過程稱為根圈沉降(rhizodeposition)，而收穫後之殘株也會殘留在土壤。其中作物之光合作用與生長對土壤之直接影響，主要透過(1)根圈沉降之釋入碳素 (Li *et al.*, 2004)，(2)收穫後由土壤中作物殘株分解之碳素(Li *et al.*, 2003)，以上兩者合稱為根部衍生碳素。由於不同作物生長特性不同，對於土壤碳庫之影響也有不同反應。

而作物因應外在因素的變化：例如不同耕作制度，如輪作、連作等(Studdert *et al.*, 1997)；與栽培管理，如肥料用量與肥料種類等(陳等, 1998)，對於土壤碳庫亦有不同影響。此外，近數十年來隨著科技的進步，全球工業迅速發展，大氣 CO<sub>2</sub> 濃度逐年增加，對於作物生長之光合作用與生物量累積等都具有一定的影響，而土壤碳庫對此也做出相對的改變(Billès *et al.*, 1993; Ineson *et al.*, 1996; Li *et al.*, 2004)。

因此如何去量化上述各種因素對於土壤碳庫之影響在土壤碳庫研究上是一個重要的關鍵。本文整理過去近十年來之文獻，探討在連作與輪作制度、肥料種類與用量、不同大氣 CO<sub>2</sub> 濃度下，以及 CO<sub>2</sub> 濃度與氮用量之交互作用對土壤碳庫之影響。所使用之方式依照量化方式可分為土壤碳庫總量測定(Studdert *et al.*, 1997; Liang *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2004)和碳同位素(carbon isotope)追蹤(Billès *et al.*, 1993; Ineson *et al.*, 1996; Liang *et al.*, 2002)。

## 二、土壤有機碳庫測定

土壤碳庫總量可透過測量土壤有機物質(soil organic matter, SOM)、土壤有機碳(soil organic carbon, SOC)，可溶性(輕)有機碳：輕層碳(light fraction C, LFC)、水溶性有機碳(water soluble organic carbon, WSOC)與溶解性有機碳(dissolved organic carbon, DOC)，微生物碳(microbial biomass carbon, MBC)以及團粒穩定指數(aggregate stability index, ASI)等指標進行量化。

上述土壤有機碳庫之測定方法皆為總量之測定，所得到之結果也僅是總量的變化，如果更進一步探討土壤碳庫中有多少有機碳來自於作物之貢獻，則必須透過同位素追蹤。碳同位素追蹤則可分為放射性碳同位素與穩定性碳同位素，透過同位素追蹤便能夠進行量化作物根部衍生碳含量。

### (一) SOM、SOC 與 ASI

SOC 與 SOM 之測定皆可透過 Walkley-Black 法分析定量，兩者之間可用特

定比例換算(陳等, 1998; Studdert *et al.*, 1997)。ASI 以 De Boodt *et al.*(1961)所提出的方法測定(Studdert *et al.*, 1997)。

## (二) 土壤可溶性(輕)有機碳與 MBC

MBC 主要透過燻蒸萃取法：土壤樣品加入有機溶劑氯仿萃取後分成兩批，一批經燻蒸，另一批則無，而後再加入蒸餾水進行震盪萃取，分別測定萃取液中的碳含量，最後將燻蒸與未燻蒸樣品的碳含量相減再以固定系數進行計算(Li *et al.*方法為乘以 2.22; Liang *et al.*方法為除以 0.35)便可求得 MBC 含量(Liang *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2004)。其中未經過燻蒸處理之萃取液中便可推算新鮮土壤中可溶性有機碳，稱 WSOC；而 DOC 是測量土壤水溶液中碳含量(Li *et al.*, 2004)，LFC 則是由 Richter *et al.*(1975)所提出的比重分離法進行測量(Studdert *et al.*, 1997)。

## (三) 測定根部衍生碳素在土壤碳庫之動態

放射性碳同位素追蹤主要是透過放射性之 0.5 M Na<sup>14</sup>CO<sub>3</sub> 經 9M 濃硫酸催化而釋放出放射性 <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>。植物光合作用將 <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> 固定後，經過代謝與分配之結果會送到所需器官或組織，當然，也會透過根部釋放到土壤。作物在添加 <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> 環境下生長一段時間後，便可透過測定植株與土壤之放射線強度進行植物與根部衍生碳含量推算(Billès *et al.*, 1993)。因此利用 <sup>14</sup>C 追蹤法能夠很精確偵測根部衍生碳之含量與動態；然而其最大的缺點則在於放射線對於人體的危害與環境污染，因此在操作上必須非常小心(Balesdent and Balabane, 1992)。

## (四) 測定土壤碳庫根部衍生碳素之相對貢獻

穩定性碳同位素 <sup>13</sup>C 追蹤主要是透過測定重同位素豐度(δ)，其表示方式通常以相對於國際標準 PDB 之千分比：

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = [(R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}}] \times 10^3 \dots\dots [1]$$

R 代表樣品或標準氣體之質量比 45/44 (<sup>13</sup>CO<sub>2</sub> / <sup>12</sup>CO<sub>2</sub>) (Liang *et al.*, 2002)。

而計算在 a+b 混合樣品中源自於 b 有機碳之百分比，則透過下列算式：

$$\delta_{a+b} = (1 - f) \delta_a + f \delta_b \dots\dots [2]$$

δ<sub>a</sub> 與 δ<sub>b</sub> 分別代表 a 和 b 之 δ<sup>13</sup>C, f 為源自 b 有機碳之百分比(Balesdent and Balabane, 1992)。而在測定土壤根部衍生碳之流程上，a+b 就是試驗後之土壤樣品，a 就是試驗前或空白試驗之土壤樣品，而 b 就是植物衍生碳(通常以作物根部替代之)。 <sup>13</sup>C 追蹤在操作上沒有放射線污染之考量，能夠進行原位(*in situ*)標定；然而相較於 <sup>14</sup>C 追蹤法而言，<sup>13</sup>C 追蹤法沒有那樣高解析能力，也就是 δ<sup>13</sup>C<sub>a+b</sub> 與 δ<sup>13</sup>C<sub>b</sub> 之間差異必須達 5%顯著水準(Balesdent and Balabane, 1992)。在這樣的限制條件下，所採取策略有(1)將 C<sub>3</sub> 植物種在 C<sub>4</sub> 土壤或 C<sub>4</sub> 植物種在 C<sub>3</sub> 土壤，主要在於 C<sub>3</sub> 植物根部 δ<sup>13</sup>C 約落在-12‰左右，而 C<sub>4</sub> 植物根部 δ<sup>13</sup>C 約在-27‰ (Balesdent and Balabane, 1992; Ineson *et al.*, 1996)；(2)外加工業製 CO<sub>2</sub>，因為一般 CO<sub>2</sub> 之 δ<sup>13</sup>C 約 -7‰，而工業製 CO<sub>2</sub> 之 δ<sup>13</sup>C 約分布在-30 至-50‰(Ineson *et al.*, 1996)。

## 三、耕作制度以及肥培管理措施之影響

Studdert *et al.*(1997)從 1976 到 1993 年間於阿根廷進行研究，分別以連作，

75%作物 - 25%牧草輪作，與 50%作物 - 50%牧草輪作等進行處理，每年定期取樣測定 SOC。觀察 1981 到 1993 年間三種不同處理方式後，結果顯示連作之處理下土壤 SOC 有逐年下降趨勢；而 50%作物 - 50%牧草輪作處理下，在栽培牧草後，SOC 能恢復到約  $38 \text{ g kg}^{-1}$  左右，但作物栽培時 SOC 又開始下降。再進一步將作物與牧草栽培的情形分開來看，確實可以看到作物栽培時 SOC 會逐漸下降，而牧草栽培時有助於 SOC 恢復(圖 2)。進一步分析 LFC，發現在作物與牧草兩種不同栽培環境下碳的含量也具有與 SOC 相同的趨勢，且變化比起 SOC 更為劇烈。再細部分析土壤物理性質 - ASI 與 SOC 含量間的關係，在牧草栽培的情形下，ASI 會隨著 SOC 增加而有上升；相反的，作物栽培下，隨著 SOC 含量增加，ASI 上升趨勢並不明顯。由 Studdert 試驗結果得知，作物根部對於土壤碳庫與團粒穩定而言相當不利，必須透過牧草輪作方式加以改善。

陳等(1998)透過蒐集整理過去所研究之資料後，發現長年不施肥的農地土壤，其 SOM 會逐年下降，合理的化學氮肥用量則可以維持 SOM 含量水準(約  $90 \text{ ton ha}^{-1}$ )，而有機堆肥的施用( $20 \text{ ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ )對於 SOM 的恢復效果非常良好(圖 1)，進一步分析，有機堆肥添加之平衡時間約需 20 至 40 年。

Liang *et al* (2002)透過玉米盆栽試驗，在一般栽培制度下於不同生長階段進行植株與土壤取樣，測定土壤中 SOC、WSOC、MBC 含量。其試驗數據顯示出 SOC 與 WSOC 雖然會隨著植株碳含量的累積而增加，然而其趨勢與根部碳含量之累積曲線並不一致；而 MBC 含量則與根部碳含量之累積曲線相當類似。利用穩定性碳同位素追蹤的方式，透過測定  $\delta^{13}\text{C}$  後推算根部衍生碳之相對貢獻，發現植物衍生碳在 SOC、WSOC、MBC 中百分比之變化趨勢都與根部碳含量累積曲線非常類似；然而從量的變化上，SOC 最高 12.3%、WSOC 最高 30.7%、MBC 最高則有 52%(表 1)。這樣的結果再配合 SOC、WSOC、MBC 含量變化趨勢，推論作物根部衍生碳對土壤碳庫影響而言，主要是土壤 MBC 含量。

#### 四、大氣 $\text{CO}_2$ 濃度與氮肥用量之影響

而在 Li *et al.* (2004)水稻氮肥與  $\text{CO}_2$  濃度試驗，也透過分析不同生長階段的土壤 DOC 含量，發現 DOC 越往生長後期含量越多，其趨勢與 Liang *et al.* 玉米試驗所分析的 WSOC 趨勢相當吻合，且 5-10 cm 土壤之 DOC 含量較表層 5 cm 土壤多，除此之外，高氮肥( $120 \text{ kg ha}^{-1}$ )處理比起中氮肥( $80 \text{ kg ha}^{-1}$ )而言會有較多的 DOC 含量，然而不同濃度之  $\text{CO}_2$  處理之間差異並不明顯。分析土壤 MBC 含量變化，在生育中期時，不論在表層 5 cm、5-10 cm 或 10-16 cm 的土壤，氮肥用量較於不同濃度之  $\text{CO}_2$  處理所造成的差異相非常顯著的；然而到了生育末期，雖然中氮肥( $90 \text{ kg ha}^{-1}$ )施用的土壤 MBC 相較於低氮肥( $30 \text{ kg ha}^{-1}$ )仍舊是比較高，但是處理之間的差異比起生育中期並沒有那麼大。因此，同時比較生育中期與末期各種處理，發現末期之 MBC 含量都比生育中期時低，特別是在中氮肥與高  $\text{CO}_2$  濃度處理下，其下降的幅度最為明顯，由 770 降至 519 ppm。根據結果推論，當土壤中 MBC 含量增加時，會提高土壤中微生物生物量與微生物活性，而會造成 MBC 含量在生育末期下降。在實驗中同時也分析土壤中微生物氮(microbial biomass N, MBN)含量，發現 MBN 與 MBC 之間含量成正比，且計算其碳氮比後，各個處理下其碳氮比都非常穩定，大約在 10 左右波動(表 2)。在同樣的試驗中，測定土壤甲烷排放量，中氮肥( $80 \text{ kg ha}^{-1}$ )施用下，甲烷排放量維持在 6 ppm 以下，

唯有在生育末期 5-10 cm 土壤甲烷釋放稍微超過此水準；然而，高氮肥處理下，越往生育後期，土壤甲烷釋放量越劇烈增加，特別在 CO<sub>2</sub> 濃度提升的情況下，甲烷排放量甚至能高達約 16 ppm，這樣的結果其實可與 MBC 含量降低所做的推論相呼應。

利用 <sup>14</sup>C 追蹤小麥在氮肥與 CO<sub>2</sub> 處理下，測定 28 天生長過程中不同處理之土壤、28 天後植株、土壤與每試驗單位內之氣體放射線強度(Billès *et al.*, 1993)。首先看到 28 天生長過程中不同處理下土壤放射線強度變化，高濃度 CO<sub>2</sub> (700 $\mu$ l L<sup>-1</sup>)處理比起一般濃度 CO<sub>2</sub> (350 $\mu$ l L<sup>-1</sup>)土壤放射線強度高出約 30 KBq，這樣的結果表示高濃度 CO<sub>2</sub> 確實能夠提高土壤碳庫中根部衍生碳之含量，但是兩者之間上升趨勢卻非常一致。唯有在缺氮處理下，生長後期放射線強度開始有明顯下降之趨勢。若以根重作比較，高 CO<sub>2</sub> 濃度處理下根部乾重超過 930 mg，一般 CO<sub>2</sub> 濃度處理則比高 CO<sub>2</sub> 濃度處理低了 180 mg 以上。整理實驗結果與前人研究，推論 CO<sub>2</sub> 濃度會影響光合作用效率與生長，而提升根部長度與乾重；而氮肥施用則主要影響根部活性。而測量 28 天後植株、土壤與每試驗單位內之氣體放射線強度顯示，氣體樣品之放射線強度(562-420 KBq 24 h<sup>-1</sup>)遠遠高於土壤樣品(84-58 KBq 24 h<sup>-1</sup>)，也就是有 85%-90%之土壤根部衍生碳經土壤呼吸(微生物分解)後，再度形成 CO<sub>2</sub> 回歸到大氣中(表 3)。值得注意的是增加 CO<sub>2</sub> 濃度，氣體樣品中放射線強度也會隨之提高，而氮肥施用也有類似的效果。

在不同 CO<sub>2</sub> 濃度處理下，利用穩定性碳同位素追蹤的方式，透過測定  $\delta^{13}\text{C}$  與碳含量(C%)之後推算根部衍生碳含量(Ineson *et al.*, 1996)。樺樹在高濃度 CO<sub>2</sub>(600 $\mu$ l l<sup>-1</sup>)環境生長半年後，能釋出較一般濃度處理下高三倍的根部衍生碳(1.52 g C pot<sup>-1</sup>)。根部乾重在高濃度 CO<sub>2</sub> 處理下也增加了約 50%，這樣的結果其實更可以證明上述推論之正確性。

## 結論

### (一) 作物因應外在因素變化對土壤影響

透過前人的研究成果，可以推論連作會造成土壤碳庫含量降低，必須以適當的輪作才能維持土壤肥力。適當增加肥料(堆肥或化學肥)用量或 CO<sub>2</sub> 濃度上升會促進作物生長，進而使土壤碳庫含量增加；然而，過度施用化學肥，一旦造成土壤 MBC 含量過高，將導致土壤微生物作用過於旺盛，最後反而使土壤總碳量驟減。因此合理化施肥在土壤有機碳庫管理上非常重要，而在不同作物及環境下之用量必須隨之調整，此一部份仍需要以田間試驗訂定出適當用量。而在作物對土壤碳庫之影響的量化指標當中，以 MBC 含量最為足以反應作物之影響。

### (二) 土壤有機碳庫量化指標

如果將土壤有機碳庫比做個人財產的話，那 SOM、SOC 便可視為個人之總財產；而可溶性(輕)有機碳(包含 LFC、WSOC、DOC)、MBC 可視為個人所有的各種動產。透過碳同位素(carbon isotope)追蹤方式，可以了解作物釋出碳素之動態。以放射性碳同位素(<sup>14</sup>C)追蹤法，可以得到作物釋出碳素在土壤中的命運，好比個人財務收入、支出與結餘各佔多少比重；穩定性碳同位素(<sup>13</sup>C)追蹤法能夠得到作物釋出碳素在土壤中之分配情形，如同個人之存款與投資情形。因此，只要了解實驗所要達成目標在哪個層次，便可運用適當之指標或方式進行土壤有機碳庫量化。

## 寄語台灣

近年來在京都議定書規範下，各先進國家無不設法限制溫室氣體排放量，甚至日本與歐盟於 2005 年透過立法，設定碳稅。在這樣趨勢之下，台灣於今年二月也制定「溫室氣體減量法」草案，以規範溫室氣體排放量。值得注意的是，其中訂定所分配之二氧化碳配額可視為有價物交易，不夠用或是有多出來，都可與其他的排放戶進行買賣。簡單的說，無法達到減量之生產單位可向能有效減量之生產單位購買配額。如果能適用到農業生產，未來制定標準化生產過程，在維持固定產量下可達到最大二氧化碳減量目的；另外，也可透過尋找適當物種或透過育種方式開發新品種來達到二氧化碳之減量。透過以上方式除了能達到生產更具優勢之工業或生質能原料以及農業產品，讓農民能有額外收益外，對於環境也能有更多的貢獻。

## 引用文獻

1. 陳尊賢、許正一、蔡呈奇。1998。土壤與環境 1:295-306。
2. Balesdent, J. and M. Balabane. 1992. Soil Biology Biochemistry 24:97-101.
3. Billès, G., H. Rouhier and P. Bottner. 1993. Plant and Soil 157:215-225.
4. Ineson, P., M. F. Cotrufo, R. Bol, D. D. Harkness and H. Blum. 1996. Plant and Soil 187:345-350.
5. Li, Z., K. Yagi, H. Sakai, K. Kobayashi. 2004. Plant and Soil 258:81-90.
6. Liang, B. C., X. L. Wang and B. L. Ma. 2002. Soil Sci. Soc. Am. J. 66:845-847.
7. Studdert, G. A., H. E. Echeverría and E. M. Casanovas. 1997. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:1466-1472.

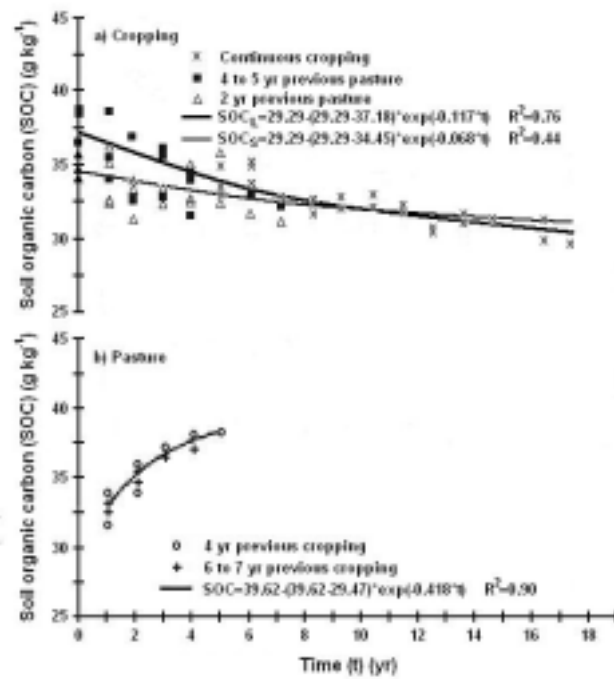
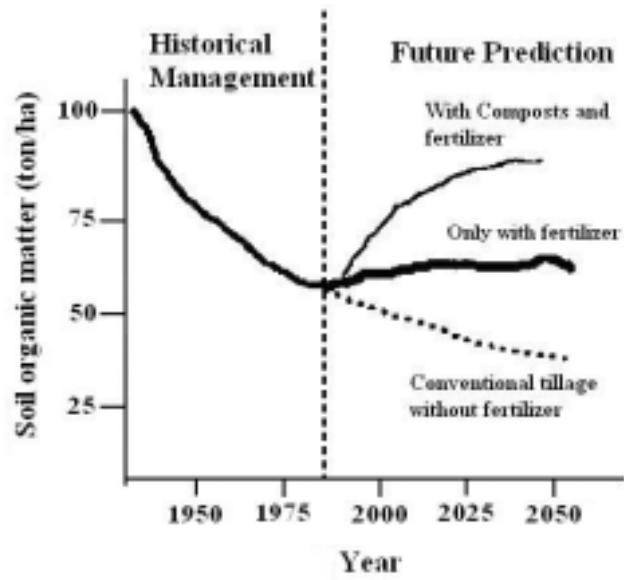


表 1 玉米盆栽試驗中不同生育期之地上部碳含量、根部碳含量、SOC、WSOC 與 MBC 之含量以及同位素成份變化。

| 生長日數       | 地上部碳含量                           | 根部碳含量     | SOC                  |                             |                        | WSOC                  |                              |                         | MBC                   |                             |                        |
|------------|----------------------------------|-----------|----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|
|            |                                  |           | SOC                  | SOC 之 $\delta^{13}\text{C}$ | C <sub>4</sub> -衍生 SOC | WSOC                  | WSOC 之 $\delta^{13}\text{C}$ | C <sub>4</sub> -衍生 WSOC | MBC                   | MBC 之 $\delta^{13}\text{C}$ | C <sub>4</sub> -衍生 MBC |
|            | -----g C pot <sup>-1</sup> ----- |           | g C kg <sup>-1</sup> | ‰                           | %                      | mg C kg <sup>-1</sup> | ‰                            | %                       | mg C kg <sup>-1</sup> | ‰                           | %                      |
| 0          | --                               | --        | 9(0.2)               | -27.2(0.2)                  | --                     | 18.3(1.2)             | -24.2(0.1)                   | --                      | 50(16)                | -24(0.6)                    | --                     |
| 18         | 0.3(0.02) §                      | 1.1(0.1)  | 9.3(1.0)             | -27(0.2)                    | 1.3                    | 18.7(3.3)             | -23.7(0.1)                   | 3.5                     | 103(15)               | -23(0.4)                    | 9                      |
| 28         | 3.0(0.3)                         | 2.6(0.3)  | 9.0(0.5)             | -26.4(0.1)                  | 3                      | 23.9(3.3)             | -23.1(0.8)                   | 8.2                     | 92(11)                | -21(0.9)                    | 25                     |
| 67 (雄穗抽穗期) | 27.1(3.2)                        | 12.9(1.5) | 10.9(1.0)            | -25.6(0.1)                  | 11.8                   | 47.5(5.4)             | -20.4(0.5)                   | 30.3                    | 147(10)               | -19(0.4)                    | 47                     |
| 84 (吐絲期)   | 59.6(4.0)                        | 13.1(1.0) | 10.1(0.3)            | -25.4(0.1)                  | 12.3                   | 41.5(2.9)             | -20.4(1.6)                   | 30.7                    | 130(4)                | -18(0.5)                    | 52                     |
| 110 (成熟期)  | 100.3(7.4)                       | 12.4(0.8) | 12.1(1.0)            | -25.8(0.2)                  | 11.5                   | 62.3(4.0)             | -21.3(0.5)                   | 23.3                    | 100(15)               | -18(0.4)                    | 48                     |

§ 括弧內數字為標準差。(Liang *et al.*, 2002)



表 2 1998 年水稻生育期土壤微生物碳(MBC)、微生物氮(MBN) ( $\mu\text{g g}^{-1}$  dry soil)以及碳氮比。(Li *et al.*, 2004)

| Treatment               | MBC      |         |          | MBN    |         | C/N ratio |         |
|-------------------------|----------|---------|----------|--------|---------|-----------|---------|
|                         | 0-5 cm   | 5-10 cm | 10-16 cm | 0-5 cm | 5-10 cm | 0-5 cm    | 5-10 cm |
| Middle season (80 DAT)  |          |         |          |        |         |           |         |
| ALN                     | 520(11)  | 570(19) | 456(12)  | 50(5)  | 46(5)   | 10.4      | 11.1    |
| ELN                     | 537(19)  | 504(13) | 458(32)  | 57(2)  | 49(3)   | 9.5       | 10.3    |
| AMN1                    | 697(16)  | 681(35) | 688(14)  | 69(7)  | 59(4)   | 10.2      | 11.6    |
| EMN1                    | 770(14)* | 678(56) | 695(25)  | 77(3)  | 53(2)   | 10        | 12.8    |
| Final harvest (147 DAT) |          |         |          |        |         |           |         |
| ALN                     | 496(16)  | 421(9)  | 403(28)  | 50(8)  | 37(5)   | 9.9       | 11.2    |
| ELN                     | 472(27)  | 390(15) | 392(19)  | 46(7)  | 37(5)   | 10.2      | 10.6    |
| AMN1                    | 483(33)  | 437(12) | 417(13)  | 43(2)  | 38(4)   | 11.2      | 11.4    |
| EMN1                    | 519(18)  | 457(10) | 445(27)  | 48(3)  | 39(2)   | 10.9      | 11.7    |

括弧內數字為標準差；括弧旁之‘\*’代表在同一氮肥水準下相較於一般  $\text{CO}_2$  濃度處理具顯著性差異。A 為一般  $\text{CO}_2$  濃度；E 為提升  $\text{CO}_2$  濃度；LN 為低氮處理( $30 \text{ kg ha}^{-1}$ )；MN1 為中氮處理( $90 \text{ kg ha}^{-1}$ )；DAT 為移植後天數(days after transplanting)。

表 3 小麥植株( $n = 4$ )在  $^{14}\text{CO}_2$  處理下生長 28 天期間,不同濃度  $\text{CO}_2$  與氮肥處理對標定碳素 ( $\text{KBq pot}^{-1}$ )之相對分配量的影響。(Billès *et al.*, 1993)

|                          | Shoot    | Belowground translocated | Root    | Root-derived carbon | Respired $\text{CO}_2$ | Soil  |
|--------------------------|----------|--------------------------|---------|---------------------|------------------------|-------|
|                          | (a)      | (b)                      | (c)     | (d)                 | (e)                    | (f)   |
| $350 \mu\text{l L}^{-1}$ |          |                          |         |                     |                        |       |
| Soil(-N)                 | 814(46)  | 955(54)                  | 465(26) | 491(28)             | 420(24)                | 71(4) |
| Soil(+N)                 | 958(47)  | 1073(53)                 | 518(26) | 556(27)             | 472(23)                | 84(4) |
| $700 \mu\text{l L}^{-1}$ |          |                          |         |                     |                        |       |
| Soil(-N)                 | 1081(48) | 1166(52)                 | 559(25) | 607(27)             | 543(24)                | 64(3) |
| Soil(+N)                 | 1331(53) | 1190(47)                 | 571(23) | 620(25)             | 562(22)                | 58(2) |