

土後腔環蚓與赤子愛勝蚓對於土壤性質與沖蝕性之影響

林俐玲⁽¹⁾ 林軍豪⁽²⁾ 何國謙⁽³⁾

摘要

本研究選取台灣常見的土後腔環蚓 (*Metaphire posthuma*) 與堆肥常用的養殖品種赤子愛勝蚓 (*Eisenia foetida*) 作為實驗對象，以探討這兩種蚯蚓是否具有改善土壤性質與減少土壤流失的功能。

實驗結果顯示，土後腔環蚓與赤子愛勝蚓皆有降低土壤總體密度與增進土壤團粒構造的能力。但這兩種蚯蚓處理並未改變土壤酸鹼度，並造成土壤有機質含量下降。另外赤子愛勝蚓具有增加土壤滲透率，減少土壤流失量的功能；但土後腔環蚓增加土壤滲透率的效果並不顯著，且因增加土壤初始水分含量而造成土壤流失量增加。

(**關鍵字**：蚯蚓、土壤性質、滲透、土壤沖蝕)

Effect of *Metaphire posthuma* and *Eisenia foetida* on Soil Properties and Erodibility

Li-Ling Lin⁽¹⁾, *Chun-Hao Lin*⁽²⁾, *Kuo-Chien He*⁽³⁾

Professor and Graduate Students respectively,
Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, R.O.C

ABSTRACT

Metaphire posthuma and *Eisenia foetida* were selected as experimental material to study the two earthworm species effect on soil properties and soil erodibility.

Metaphire posthuma and *Eisenia foetida* both can improve soil structure, and soil porosity. However, they have no effect on soil pH and reduce organic matter content. Furthermore, *Eisenia foetida* can increase infiltration, and reduce soil erosion. However, *Metaphire posthuma*'s ability of increasing infiltration are not significant, and increased soil erosion due to higher initial soil moisture.

(**Keywords**: Earthworm, *Metaphire posthuma*, *Eisenia foetida*, Soil properties, Infiltration, Soil erosion)

(1) 國立中興大學水土保持學系教授兼系主任

(2) 國立中興大學水土保持學系碩士班研究生

(3) 國立中興大學水土保持學系碩士

前 言

台灣地勢陡峭，珍貴的水土壤資源需要植物保護以減少流失，故常以植生方法來達到保護水土資源的目的。蚯蚓具有幫助植物生長，改善土壤性質與肥力的功能 (Edwards, 1998)，而國外亦有在現地引進蚯蚓幫助農作物生長與維護草皮的例子 (謝宜敏, 1997)。故如果在植生復育地適當的引入蚯蚓，對植生復育將會有良好的功效。且蚯蚓活動能增加土壤入滲量與團粒的穩定性 (Edwards, 1998)，或許土壤內有蚯蚓活動能減少土壤資源的流失。

Graff(1983)回顧許多十九世紀之前的研究報告，發現前人均認為蚯蚓為有害動物，因為蚯蚓會對生長中的植株造成傷害 (Walton, 1928)。雖然李時珍的《本草綱目》即記載了蚯蚓具有許多的醫藥價值，但直至 1881 年，由著名的生物學家 Charles Darwin 提出：「The formation of vegetable mould, through the action of worms, with observations on their habits.」，人們才開始了解經由蚯蚓的掘穴與排糞活動，對於土壤具有加速風化、增進肥力與促進植物生長的作用。至此蚯蚓與人類的關係才開始受到重視，對於蚯蚓的研究亦愈趨豐富。

蚯蚓在動物的分類學上屬於環節動物門 (Annelida) 寡毛綱 (Oligochaeta)，目前全世界有文獻記載的蚯蚓種類有三千多種，台灣現有紀錄的蚯蚓共有 41 種，其中 23 種為世界廣泛分布種或是外來種，另 18 種為目前僅在台灣地區有發現紀錄 (沈惠萍, 2002)。

蚯蚓活動不僅對植物的生長與土壤肥力有增進的效果，對土壤風化、土壤構造、通氣性、排水性及含水量亦都有正面的助益 (Darwin, 1881)。但不是每種蚯蚓對土壤改良皆有相同的影響效果，而對土壤性質的影響亦非全盤有利。如土壤有機質部分，Shuster et al. (2001) 報告指出蚯蚓能增加土壤表面

與上部的有機質含量，並且使原本在空間均勻分布的有機質變成不均勻的分布。但是陳文良 (1991) 利用臺灣紅蚯蚓 (*Pheretima asiatica*) 施加在乾豬糞土壤中活動，發現蚯蚓降低了土壤有機質的含量。

土壤團粒部分，蚯蚓活動有助於土壤團粒的穩定性 (Hindell et al., 1994)，並且增加土壤團粒化的程度 (Blanchart, 1992)。但並非每種蚯蚓皆有相同的效果，Hamilton and Dindal (1989) 發現 *Lumbricus terrestris* 可以改善泥地增加土壤團粒程度，但 *Eisenia fetida* (赤子愛勝蚓) 卻沒有這種影響效果。

蚯蚓掘穴行為所遺留在土中的孔穴會影響土壤中水分的移動，並對於土壤水分的入滲作用 (infiltration) 和通氣性有很大的助益 (Stinner and House, 1990)。但不同的試驗環境，即使是相同的蚯蚓種亦有不同的試驗結果。Trojan and Linden (1992) 報告指出 *Aporrectodea tuberculata* 具有增加入滲速率和水分在土壤中移動的速度。但是 Ela et al. (1992) 同年以美國北方玉米地帶的土壤為實驗材料，亦置入 *Aporrectodea tuberculata* 這種蚯蚓做盆栽試驗，在人工降雨後發現入滲並無增加。

土壤沖蝕性的部分，由於蚯蚓能增加土壤入滲能力，因而可以減緩地表逕流所造成的土壤流失 (Edwards et al., 1992; Smettem, 1992)。Bayon and Binet (2001) 曾提出蚯蚓會減少沖蝕量的原因有二，(1) 因為蚯蚓糞球會使地表粗糙化，減低漫地流流速，(2) 蚯蚓活動會增加入滲速率減少漫地流流量。由上述文獻顯示蚯蚓能減少因漫地流 (overland flow) 所造成的土壤沖蝕 (sheet or run off erosion)。但不同種類的蚯蚓對土壤有不同的影響效果，且蚯蚓活動或許會造成土壤鬆散而增加沖蝕發生，故赤子愛勝蚓和土後腔環蚓活動能否減少土壤流失尚無一定。

從上述文獻顯示，不僅不同種類的蚯蚓對土壤性質有不同的影響，即使是相同種類

的蚯蚓亦會因土壤情況不同而有不一樣的結果。但大部分有關蚯蚓的研究皆是使用外國的品種，然而並非每種蚯蚓對植物與土壤皆有相同的影響，故本研究選取台灣常見的紅蚯蚓（赤子愛勝蚓）與黑蚯蚓（土後腔環蚓）作為實驗對象，以探討這兩種蚯蚓是否具有改善土壤性質與減少土壤流失的功能。

材料與方法

一、土樣試驗材料

本研究採取南投縣國姓鄉九份二山之土壤作為試驗土樣。所採取的土樣來自於一農地，農地以乾砌石築成平台階段，其中種植檳榔與梅樹。本採樣地點地質為樟湖坑頁岩，土壤顏色為黃棕色。在採土過程中，挖掘到許多蚯蚓，試區之土壤基本性質如表 1 所示。

二、試驗蚯蚓材料

由於取得之方便性，本研究所使用的蚯蚓為一般俗稱的黑蚯蚓與紅蚯蚓，在釣具店皆可購得。黑蚯蚓即土後腔環蚓（照片 1），學名 *Metaphire posthuma*，屬於大頭蚓科（*Megascolecidae*）腔環蚓屬（*Metaphire*），體節上有密生呈環狀排列的剛毛，環帶位在 14~16 節，依生活習性此種蚯蚓應屬於 *Anecic* 型。土後腔環蚓分布於中印度、緬甸、泰國、越南、馬來半島、蘇門答臘、菲律賓、日本等地（廖光正和李明進，2002），在台灣各地亦都有發現的紀錄。本研究所使用的土後腔環蚓，體長 8~15 cm，寬 5~7 mm。

紅蚯蚓，是多種體色呈紅色蚯蚓的通稱，常使用在廚餘處理與堆肥製作上，常見的有 *Perionyx excavatus*（掘穴環爪蚓、Indian blue）、*Eisenia foetida*（赤子愛勝蚓、Tiger worm）、*Lumbricus rubellus*（Red worm）等。在台灣野外，*Perionyx excavatus* 有發現紀錄，其常生活於潮濕富含有機質的地方，而

Eisenia foetida 屬於溫帶種，僅飼養在養殖場繁殖，在野外尚無發現。本研究所使用的紅蚯蚓，經鑑定為 *Eisenia foetida*（照片 2），其環帶位於 20 節以後，體長 7~12 cm，寬 2~4 mm，依生活習性此種蚯蚓應屬於 *Epigeic* 型。

三、研究方法

本研究之研究流程如圖 1 所示，試驗分為土後腔環蚓處理組（以下簡稱黑蚯蚓組）、赤子愛勝蚓處理組（以下簡稱紅蚯蚓組）與空白對照組。

首先將風乾後土樣過孔徑 2.54 cm 之篩網，將土壤填入長 40cm × 寬 25cm × 深 20cm，體積為 20000 cm³ 之壓克力箱共 9 箱，其中黑蚯蚓組、紅蚯蚓組與空白組各 3 箱，各組的其中 1 箱作為土壤性質分析用，另外 2 箱作為人工降雨沖蝕試驗用。每箱填入 26000 g 的土壤，初始之總體密度為 1.3 g/cm³。而在每個壓克力箱底下皆打有排水孔，避免因排水不良影響蚯蚓的生活，亦可防止土壤出現浸水缺氧的狀態。

蚯蚓處理組各放置 30 隻蚯蚓，從蚯蚓放置日期開始為飼養日期第 1 天，本試驗飼養天數共歷時 64 天，並於每星期添加 100 ml 的水分，以保持土壤濕潤，避免因土壤乾燥而影響蚯蚓的生活，另外空白組亦每星期皆有澆水處理，以減少空白組和蚯蚓處理組的變因。

飼養結束後，用以分析土壤性質之飼養箱，首先以定水頭單環入滲量測各處理組土壤之滲透率（以隨機取樣採三重複試驗），再以金屬鋼環（內徑 5 cm，長 5.6 cm，容積 109.9 cm³）打入土中，於取出後烘乾以求得土壤之總體密度。再將飼養箱之土壤挖出，以觀察蚯蚓活動情形與蚯蚓孔道與糞球分佈情形。最後將土壤風乾，以 5 mm 和 2 mm 網徑之篩網過篩，進行土壤性質分析，實驗項目包括水分係數、土壤構造、顆粒密度、土壤

質地、團粒穩定濕篩分析、有機質含量、酸鹼度等土壤物理性質。

進行人工降雨沖蝕試驗之飼養箱，以日本 Daiki 公司 DIK-6000 型降雨器，選定降雨強度為 76 mm/hr，進行人工降雨沖蝕試驗。選定此降雨強度是根據土壤流失估算手冊（吳嘉俊等，1996）指出，雖然降雨強度

越大，降雨動能亦越大，但當降雨強度超過 76 mm/hr 之後，降雨動能為一常數，故本試驗模擬之降雨強度訂為 76 mm/hr。降雨沖蝕過程為一小時，每十分鐘以袋子收集泥沙懸浮液，降雨沖蝕過程結束後，將泥沙懸浮液烘乾以求得各組之土壤流失量。



照片 1. 土後腔環蚓及其糞球
 Pic. 1. *Metaphire posthuma* and it's cast.



照片 2. 赤子愛勝蚓及其糞球
 Pic.2. *Eisenia foetida* and it's cast.

表 1. 試區之土壤基本性質
 Table 1. The soil properties of experiment area.

總體 密度 (g/cm ³)	顆粒 密度 (g/cm ³)	有機質 含量(%)	pH 值	砂粒 (%)	粉粒 (%)	粘粒 (%)	質地
1.38	2.27	2.70	5.95	45.75	40.08	14.17	壤土

表 2. 各處理之土壤性質
Table 2. Soil properties of each treatment.

處理	水分係數	顆粒密度 (g/cm ³)	總體密度 (g/cm ³)	濕篩之 D50 (mm)	有機質含量 (%)	pH	砂粒 (%)	坩粒 (%)	黏粒 (%)	土壤質地
黑蚯蚓組	1.03	2.27	1.23	0.72	2.87	5.26	46.58	39.25	14.17	壤土
紅蚯蚓組	1.03	2.25	1.23	0.52	2.37	5.31	46.03	39.8	14.17	壤土
空白組	1.02	2.27	1.32	2.5	3.26	5.29	44.83	40.17	15	壤土

表 3. 各處理之團粒粒徑百分比
Table 3. Percent aggregate size of each treatment.

處理	<2mm	2-5mm	>5mm
黑蚯蚓組	31.83%	34.84%	33.33%
紅蚯蚓組	31.52%	36.33%	32.15%
空白組	41.95%	25.22%	32.83%

表 4. 各處理之滲透率
Table 4. Infiltration rate of each treatment.

處理	滲透率 (mm/hr)			平均
黑蚯蚓組	29.59	150.44	179.93	119.99
紅蚯蚓組	40.42	159.29	601.76	267.16
空白組	102	110.5	130.5	114.34

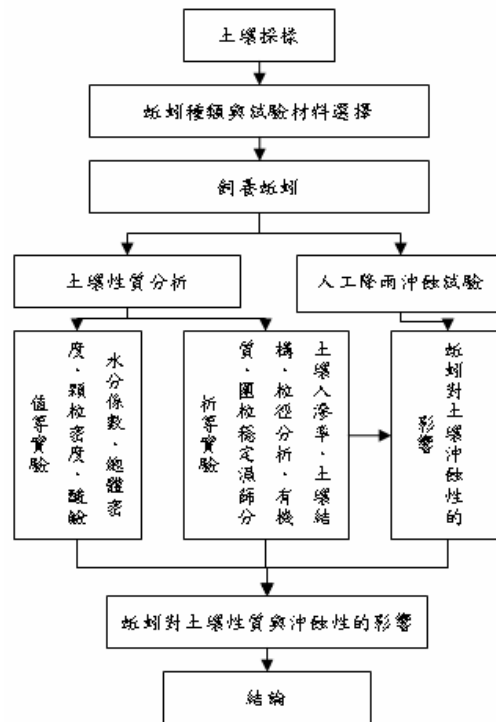


圖 1. 研究流程圖
Fig. 1. The flow chart of research.

結果與討論

一、蚯蚓對土壤性質的影響

不同種類的蚯蚓對改善土壤的能力皆不相同，各處理之土壤性質如表 2 所示，土壤構造如表 3 所示，滲透率如表 4 所示。

顆粒密度是基於土壤母質，故各處理並無差異，而雖然蚯蚓有加速風化，使粗顆粒變為細顆粒的能力，但短時間內並無變化。總體密度部分，從表 2 可以看出，土後腔環蚓與赤子愛勝蚓皆有降低土壤總體密度的能力，但蚯蚓處理對土壤酸鹼度的改善並無影響（以 t-test，未達 0.1 顯著水準）。黃俊仁（2001）以 *Pheretima asiatica* 為實驗對象，原本 pH 6.0 的土樣經蚯蚓作用後降低至 pH 5.1~5.6 之間；Edwards and Lofty（1977）亦指出在酸性土壤中，蚯蚓糞便比周圍沒糞便的土壤 pH 值提高 0.3 至 0.6 個單位，但當土壤 pH 值接近中性時，含有蚯蚓糞便的土壤其酸鹼值則較周圍低。所以由實驗結果與前人的研究證實，並非每種蚯蚓都具有使土壤酸鹼值趨於中性的效果。

有機質含量的部分，空白組 > 黑蚯蚓組 > 紅蚯蚓組（以 t-test 檢驗兩兩平均數，皆達 0.1 顯著水準），探究其原因，這應是蚯蚓食性不同的緣故。土後腔環蚓主要是以枯枝落葉為食，而赤子愛勝蚓是以攝食土壤中之有機質為主，故赤子愛勝蚓降低土壤中有機質的現象較明顯。陳文良（1991）利用臺灣紅蚯蚓（*Pheretima asiatica*）施加在乾豬糞土壤中活動，發現蚯蚓降低了土壤有機質的含量。黃世傑（1995）亦利用臺灣紅蚯蚓（*Pheretima asiatica*）分別添加在含牛糞、苜蓿與稻草的土壤中活動，發現蚯蚓降低了牛糞處理組的土壤有機質含量。本研究與上述兩學者皆得到相同的結果，顯示蚯蚓的確是會降低土壤中有機質的含量，且紅蚯蚓尤其明顯。

表 3 顯示，蚯蚓有助於土壤團粒構造的

形成，雖然團粒 > 5mm 的部分，各處理間並無差異，但很明顯可以看出團粒粒徑 2~5 mm 的部分，蚯蚓處理組 > 空白組，顯示經由蚯蚓的作用，可以將 < 2mm 之土壤改善成 2~5 mm 之團粒構造。但 Hamilton and Dindal（1989）指出 *Eisenia fetida*（赤子愛勝蚓）沒有增加土壤團粒程度的效果，與本研究的結果不相同，這顯示生物實驗具有相當大的變異性。表 2 中，團粒穩定濕篩分析中之 D50，空白組之團粒平均粒徑為何大於蚯蚓處理組呢？探究其原因，雖然蚯蚓處理組能增加土壤團粒化的程度，但由於團粒穩定濕篩分析是以粒徑 2~5 mm 部分的土壤樣本做實驗，空白組中的團粒全是天然經由植物與生物經長久時間而形成，穩定性高；而蚯蚓處理組的團粒包含了原本既有的團粒與蚯蚓活動所形成的團粒，但蚯蚓活動所形成的團粒乃短時間所形成，其穩定性並不如原本既有的團粒，故蚯蚓處理組的團粒穩定分析表現並不如預期。

土壤滲透率的部分（表 4），紅蚯蚓處理組大於黑蚯蚓處理組與空白組，而黑蚯蚓處理組雖然優於空白組，但差異情形並不大（以 t-test，未達 0.1 顯著水準）。另外，由表 4 可以看出蚯蚓處理組皆有空間變異性很大的現象，係由於回填土壤經由蚯蚓擾動後土壤孔隙非均勻分布；而紅蚯蚓組最高甚至達 601.76 mm/hr，原因應為水流至蚯蚓孔穴的緣故。實驗過程時觀察得知，赤子愛勝蚓是生活在土壤表層的類型，大部分都在土深 10 cm 內活動，故其對於土壤表面的滲透率影響明顯，而土後腔環蚓生活於較下層的土壤，經觀察發現，雖然土後腔環蚓活動的蹤跡遍及飼養箱，但地表的排泄物較土壤中少，且經觀察發現大部份的土後腔環蚓都生活在土深 10 cm 以下，僅 1、2 隻生活在 5~10 cm 處，上部 5 cm 則都沒有發現。故雖然黑蚯蚓處理組的入滲情形變異性亦很大，但平均而言，其增加土壤滲透率的效果不如紅蚯蚓組。

二、蚯蚓對土壤沖蝕性的影響

降雨沖蝕過程為一小時，每十分鐘收集一次，試驗結果之土壤沖蝕量累計分布圖如圖 2 所示。黑蚯蚓組之平均土壤沖蝕量為 2.865 g；紅蚯蚓組 0.78 g；空白組 1.635 g，以紅蚯蚓組的土壤沖蝕量最低，但黑蚯蚓組的沖蝕量反而比空白組高。

雨滴直接打擊土壤表面會造成飛濺沖蝕，並降低土壤表面的滲透率（張仲民，1987），故雖然各組實驗所得之入滲速率皆較降雨量大，但仍會有土壤沖蝕的產生。當降雨量大於土壤入滲量時，即會發生地表逕流，此時土壤沖蝕量將會急速增加。由圖 2 顯示，前 30 分鐘時各組差異尚不明顯，但 30 分鐘後，由於各組發生地表逕流的情形不一，累計的沖蝕量產生明顯的差異。但為何紅蚯蚓組的沖蝕量最低，黑蚯蚓組的沖蝕量最高呢？探究其原因，由於紅蚯蚓組的土壤滲透率最高（表 4），故土壤沖蝕量最小。但黑蚯蚓組與空白組之土壤滲透率差異不大，且由於土後腔環蚓能增加土壤的保水能力，故其初始水分含量較高，另外土後腔環蚓其排泄的糞球經雨水打擊與浸泡後，遭分散並堵塞孔隙，致使黑蚯蚓組反而較空白組早發生地表逕流。Shipitalo and Protz（1988）亦曾研究指出，新鮮的蚓糞事實上是很容易被分散的，並也因此而造成地表結殼和土壤沖蝕的情形發生，只有時間久的蚓糞或乾掉的蚓糞其團粒才較穩定。所以蚯蚓是否具有減少土壤流失量的效果仍具有討論的空間。

本研究試驗結果，土後腔環蚓具有降低總體密度、增加土壤孔隙率與增進土壤構造的功能，但對於土壤酸鹼值的改良並無效果，對於土壤沖蝕量更是有負面的效果。而赤子愛勝蚓具有降低總體密度、增加土壤孔隙率、滲透率、增進土壤構造與減少土壤流失的功能，但對於土壤酸鹼值的改良並無效果，並會因攝食而造成土壤有機質的減少。

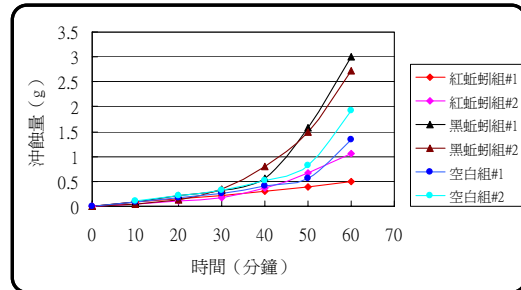


圖 2. 沖蝕試驗結果

Fig. 2. Result of soil erosion experiment.

結論與建議

生物實驗具有相當大的變異性，實驗結果會因蚯蚓的種類、飼養的環境與條件、實驗的方法等變因而有所差異。本研究之實驗結果即與前人研究之結果有所差異。不過在台灣，研究蚯蚓種類對土壤性質與沖蝕性影響的研究還不是很豐富，故本研究或許能提供一些方向與借鏡供後人參考。本研究就實驗結果，做出以下幾點結論：

一、土後腔環蚓與赤子愛勝蚓皆有降低土壤總體密度、增加孔隙率與增進土壤團粒構造的能力。但這兩種蚯蚓處理對土壤酸鹼度的改善皆無效果。

二、有機質含量部分，空白組 > 黑蚯蚓處理組 > 紅蚯蚓處理組，原因為蚯蚓食習性不同的緣故。土後腔環蚓主要是以枯枝落葉為食，而赤子愛勝蚓主要是以攝食土壤中之有機質為主，故赤子愛勝蚓降低土壤中有機質的現象較明顯。

三、土壤滲透率，紅蚯蚓處理組大於黑蚯蚓處理組與空白組，而黑蚯蚓處理組雖然優於空白組，但差異情形並不大。另外，蚯蚓處理組的土壤滲透率皆有空間變異性很大的現象。

四、土壤沖蝕量部分，以紅蚯蚓處理組的土壤沖蝕量最低，但黑蚯蚓處理組的沖蝕量反而比空白組高。由於紅蚯蚓組的土壤滲透率最高，故土壤沖蝕量最小。但黑蚯蚓組與空白組之土壤滲透率差異不大，且由於土後腔環蚓能增加土壤的保水能力，故其初始水分含量較高，另外土後腔環蚓其排泄的糞球經雨水打擊與浸泡後，遭分散並堵塞孔隙，致使黑蚯蚓組之沖蝕量反而較空白組大。

參考文獻

1. 沈慧萍，2002，蚯蚓簡介，行政院農業委員會特有生物研究保育中心保育專題。
2. 吳嘉俊，盧光輝和林俐玲，1996，土壤流失估算手冊，行政院農業委員會。
3. 陳文良，1991，蚯蚓活動與施加乾豬糞對土壤物化性態影響之研究，國立台灣大學農業工程（生物環境系統工程）研究所碩士論文。
4. 張仲民，1987，普通土壤學，國立編譯館，台北。
5. 黃世傑，1995，蚯蚓對有機材料養分釋放與植體硝酸根含量之影響，國立中興大學土壤環境科學系研究所碩士論文。
6. 黃俊仁，2001，土壤中鋅和鎘對蚯蚓毒性和生質量的影響，國立中興大學土壤環境科學系研究所碩士論文。
7. 廖光正和李明進，2002，集集大地震後蚯蚓大量爬出現象之解析，特有生物研究，4: 41—51。
8. 謝宜敏，1997，蚯蚓的利用與養殖，五洲出版社，台北。
9. Bayon, R.C.L., and F. Binet. 2001. Earthworm surface casts affect soil erosion by runoff water and phosphorus transfer in a temperate maize crop, *Pedobiologia* 45(5): 430—442.
10. Blanchart, E. 1992. Restoration by earthworms(Megascolecidae) of the macroaggregate structure of a destructured savanna soil under field conditions. *Soil Biology and Biochemistry* 24: 1587—1594.
11. Darwin, C. 1881. The formation of vegetable mould, through the action of worms, with observations on their habits. Murray, London.
12. Edwards, C.A., and J.R. Lofty. 1977. *Biology of Earthworms*. Chapman and Hall, London, England.
13. Edwards, C.A. 1998. *Earthworm Ecology*, Soil and Water Conservation Society, St. Lucie Press, Ankeny, Iowa.
14. Edwards, W.M., M.J. Shipitalo., S.J. Traina., C.A. Edwards, and L.B. Owens. 1992. Role of *Lumbricus terrestris*(L.) burrows on quality of infiltrating water. *Soil Biol. Biochem.* 24: 1555—1561.
15. Ela, S.D., S.C. Gupta, and W.J. Rawls. 1992. Macropore and surface seal interactions affecting water infiltration into soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 714—721.
16. Graff, O. 1983. Darwin on earthworms—the contemporary background and what the critics thought. In J.E. Satchell (ed.). *Earthworm Ecology — From Darwin to Vermiculture*. pp. 5—18. Chapman & Hall, London.
17. Hamilton, W.E., and D.L. Dindal. 1989. Impact of landsread sewage sludge and earthworm introduction on established earthworms and soil structure. *Biol. Fert. Soils* 8: 160—165.
18. Hindell, R.P., B.M. M. Mckenzie., J.M. Tisdall, and M.J. Silvapulle. 1994. Relationships between casts of geophagous earthworms (Lumbricidae, Oligochaeta) and

- matric potential. *Biol. Fertil. Soils*. 18: 127–131.
19. Shipitalo, M.J., and R. Protz. 1988. Factors influencing the dispersibility of clay in worm casts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 764–769.
 20. Shuster, W.D., S. Subler, and E.L. McCoy. 2001. Deep-burrowing earthworm additions changed the distribution of soil organic carbon in a chisel-tilled soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 33: 983–996.
 21. Smettem, K.R.J. 1992. The relation of earthworms to soil hydraulic properties. *Soil Biol. Biochem.* 24: 1539–1543.
 22. Stinner, B.R., and G.J., House. 1990. Anthropod and other invertebrates in conservation-tillage agriculture. *Annu. Rev. Entomol.* 35: 299–318.
 23. Trojan, M.D., and D.R. Linden. 1992. Microrelief and rainfall effects on water and solute movement in earthworm burrows. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 727–733.
 24. Walton, W. R. 1928. Earthworm as Pests and Otherwise. p. 14. In *USDA farmer's Bulletin 1569*. Washington, DC.