

垃圾焚化爐底灰對垃圾滲出液有機物吸附特性之研究

羅煌木⁽¹⁾ 顏正平⁽²⁾

摘要

目前焚化爐底灰之處理除了少部分作為土木水利建築或其他材料外，大部分仍作為覆土掩埋、共同掩埋或單體掩埋。惟其底灰於共同掩埋或單體掩埋中除了造成可能之離子釋出外，如重金屬、鹼性離子、硫酸鹽、磷酸鹽和氯鹽等，其亦有吸附有機物或其他離子之能力。底灰中離子的釋出可能造成厭氧程序之抑制或刺激作用，而底灰對有機物之吸附可提供一微生物良好馴養場所以有利有機物之去除，可減少滲出液之濃度及排放量，即可減少其對水土資源之污染程度。因此，溶出和吸附之動態平衡將影響底灰傾置於垃圾掩埋場時之垃圾生物分解程序之穩定。離子之釋出可能造成之影響已於其他論文提出(Lo, 2000)，本文旨在探討底灰於不同大小的粒徑、濃度、溫度、及 pH 時掩埋場可能發生之外在環境條件下，其對有機物之吸附能力含量進行測試，以了解底灰於掩埋場掩埋時之生物反應穩定及後續滲出液之處理系統評估依據。粒徑大小之測試選擇為 <0.3, 0.6-1.18, 和 2-5mm (底灰粒徑濃度 10 g l^{-1})，粒徑測試濃度為 12.5g/l、25g/l 和 50g/l，pH 為 pH2、pH6 和 pH10 (2-5mm)，溫度為 10 °C、35 °C 和 60 °C (2-5mm)。測試之有機物體積為 100ml，測試吸附之錐形瓶為 250ml，濃度範圍則為 40, 80, 120, 160, 200, 240, 300, 及 360mg/l。由批次 Freundlich isotherms 等溫吸附模式結果顯示，等溫吸附模式常數 K_F 和吸附含量隨四個參數值之增加而減少，等溫吸附模式常數 $1/n$ 值和吸附含量隨四個參數值之增加而增加。等溫吸附模式常數 K_F 和 $1/n$ 值可由最小平方方法求得。

(關鍵字：焚化爐底灰，吸附，Freundlich 等溫吸附模式，吸附含量，吸附強度)

Adsorption capacity of total organic carbon of MSW leachate by MSWI bottom ash

Huang-Mu Lo

Assistant Professor, Department of Environmental Engineering,
Lan-Yang Institute of Technology, I-Lan, Taiwan 261, R.O.C.

Cheng-Ping Yen

Assistant Professor, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan 402, R.O.C.

(1) 蘭陽技術學院環境工程系助理教授

(2) 中興大學水土保持學系兼教授

ABSTRACT

The potentially beneficial effects of municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash on anaerobic co-disposal digestion process with refuse have been demonstrated by Lo (2000) through the increase of pH, alkalinity, gas production and decrease of total organic carbon (TOC) of leachate. This was thought to be mainly due to the release of alkali ions from bottom ash, thus increasing the alkalinity and maintaining the pH to a neutral band. However, the likely mechanism of adsorption contrast to that of dissolution by bottom ash is still not yet fully understood. This study focused on the interest of investigating the likely adsorption capacity of TOC of leachate by bottom ash within anaerobic digester. A batch regime of adsorption experiment was developed and the Freundlich adsorption isotherm model was used to calculate the adsorption isotherm constant. Four possible environmental parameters were chosen to be tested including pH, particle size, temperature, and ash concentration. The pH selected was at three values of pH2, pH6, and pH10 (2-5mm) and the particle size was <0.3mm, 0.6-1.18mm, and 2-5mm (10 gl⁻¹) respectively. The temperature was 10, 35, and 60°C (2-5mm) and the ash concentration was 12.5, 25, and 50 gl⁻¹. From the results, it showed that the adsorption capacity and K_F increased as the values of four parameters decreased, and $1/n$ increased as the values of four parameters increased. K_F and $1/n$ are Freundlich adsorption isotherm constants and were calculated using the least square method. (**Keywords:** MSWI bottom ash, adsorption, Freundlich adsorption isotherm, adsorption capacity, adsorption intensity)

前言

底灰作為掩埋場覆土已行之有年，其可能滲出離子和可能之促進與抑制作用已為 Lo (2000)所初步探討過，但底灰有可能類似活性炭作用吸附有機物並作為微生物馴氧分解之場所，而有關此類研究則甚少學者研究。而活性炭之吸附特性，則有較多學者進行調查研究。Karimi-Jashni 和 Narbaitz (1997) 評估 pH 對活性炭吸附與脫附 2-硝基酚之影響，結果證明吸附含量隨 pH 降低而增加，而脫附速率則隨 pH 增加而增加。而合成廢水之活性炭吸附分解去除顯示出停留時間對其處理效率有一定之影響。相關吸附模式亦有學者提出，如活性炭之多成份吸附平衡模式 (Smith, 1991)，理想吸附溶液理論模式 (Yen and Singer, 1984)，活性炭之固定床吸附對 - 硝基酚模式 (Wolborska, 1989)。而灰燼之吸附特性則是較少學者提

出，Daifullah, El-Reefy 和 Gad (1997, 1998) 利用焚化爐底灰於不同 pH，溫度，時間及灰燼濃度時，對 phenol，m-cresol，p-cresol，4-nitrophenol，2-nitrophenol，p-nitrophenol 及有機物之吸附含量進行研究。而飛灰對 O-xylene 之吸附動力特性研究，則已為 Banerjee et al. (1997) 調查過，其研究吸附行為結果顯示吸附率和粒徑大小平方成反比，且為擴散機制控制。本研究即是針對焚化廠底灰，若作為掩埋覆土而與垃圾共同掩埋後，其可能對垃圾滲出液之吸附能力調查，尤其是於可能存在不同之 pH，溫度，濃度，粒徑外在環境條件下，其可能對有機物之吸附含量，並以 Freundlich isotherm 來表示其吸附行為模式，以了解底灰類似活性炭機能吸附有機物情況，除可作為微生物馴氧分解有機物之可行性研究初步探討外，並可了解其可能減少水土資源污染之程度。

1 材料

本研究之材料底灰取自台中市垃圾焚化廠，其來源主要為焚化爐床及其滲漏而下之灰燼加水冷卻而得。焚化爐爐床燃燒方式為機械混燒式，燃燒溫度為 850-1050°C，底灰經由篩選後選擇合適粒徑作為吸附研究的材料。有機物樣品溶液為垃圾厭氧消化程序所得之滲出水。

2 方法

吸附平衡時間採用批次實驗，以 1.5 克乾燥底灰置於含 100 毫升、濃度 350 mg TOC/l 滲出液（總有機碳，TOC）之錐形瓶中。七樣品雙重複置於震盪器中，以 180rpm 之速度左右搖盪，俟 0，3，5，10，30，70，及 120 分鐘後移除過濾分析其 TOC 濃度，等溫吸附模式以四種參數進行批次吸附實驗測試。測試之有機物濃度為 40，80，120，160，200，240，300，及 360mg/l。底灰濃度參數為 12.5g/l，25g/l，及 50g/l，底灰粒徑參數為 < 0.3mm，0.6-1.18mm，及 2-5mm，pH 測試參數為 pH2，pH6，及 pH10，而溫度之測試參數則為 10°C，35°C，及 60°C。

底灰四參數進行試驗接觸滲出液之時間與由平衡測試時間而定約 60 分鐘，每一雙重複樣品經 60 分鐘後過濾加以分析其總有機物濃度(TOC)。所有實驗之樣品體積皆為 100ml 而於 250ml 之錐形瓶中完成。TOC 濃度以 Dohrmaann-190 TOC/TON 分析儀加以分析。所得 TOC 數據以下列之 Freundlich 等溫吸附模式表示：

$$Y=K_F C^{1/n} \tag{1}$$

$$\ln Y = \ln K_F + (1/n) \ln C \tag{2}$$

$$Y = (C_{ini} - C_{eq}) * V * 10^{-3} / W \tag{3}$$

其中 C：平衡濃度

Y：單位重量吸附劑所吸附之重量

K_F ， $1/n$ ：Freundlich isotherm 常數

C_{ini} ：接觸溶質起始濃度 (mg/l)

C_{eq} ：接觸溶質之平衡濃度 (mg/l)

V：接觸溶液體積 (ml)

W：底灰接觸重量

K_F 與 $1/n$ 可用最小平方法加以求得。 K_F 為截距，而 $1/n$ 則為斜率。

3 研究流程

本研究之吸附模式採批次式，其研究步驟及研究流程如下圖 1

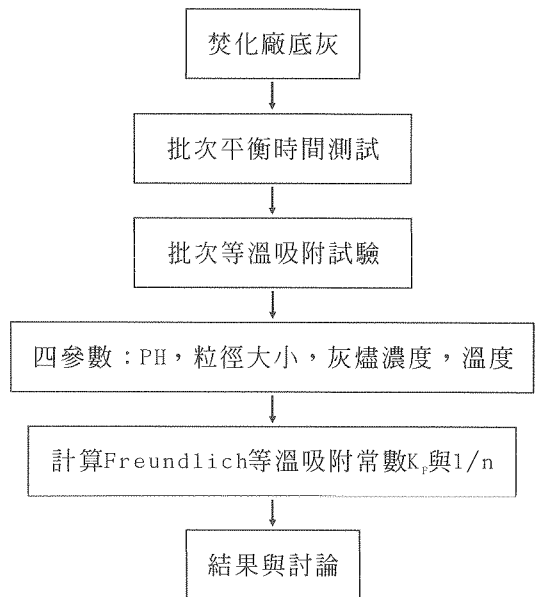


圖 1 底灰吸附滲出液研究流程圖

結果與討論

1 平衡時間

為了解參數批次測試時間之基準，首先以底灰來量測吸附有機物之平衡時間，由七個樣品之雙重複測試結果得知 1 小時左右即可達到平衡狀況。而於平衡試驗十分鐘內則幾乎可達百分之八十之平衡。請參見圖 2。

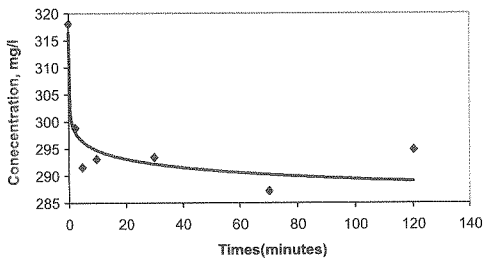


圖 2 以 1.5g 乾燥底灰置於一定體積初始濃度 TOC 318.2 mg/l⁻¹ (1.5g/100ml/2-1.18mm/pH7/20⁰C) 之平衡時間測試

Fig.2 The determination of equilibrium time by exposing 1.5 g dried bottom ash to a volume of different flasks with initial leachate TOC 318.2 mg/l⁻¹ (1.5g/100ml/2-1.18mm/pH7/20⁰C)

2 底灰濃度測試

由三種不同底灰濃度 12.5g/l, 25g/l, 和 50g/l 對 40~360mg/l 之 TOC 濃度作批次等溫吸附模式測試，結果如圖 3。吸附量隨底灰濃度之減少而增加，此現象可解釋為底灰之

靜電作用，降低了曝漏表面積，因此減少了可能可連結之位置 (Young and Banks, 1998; Daifullah, 1997)。但 Banerjee et al. (1997) 研究飛灰吸附 *o*-xylene 之結果卻顯示吸附速率隨初始濃度增加而增加，此可解釋為溶質濃度的增加可減少吸附的阻力，主要是因吸附速率隨驅動力之增加而增加

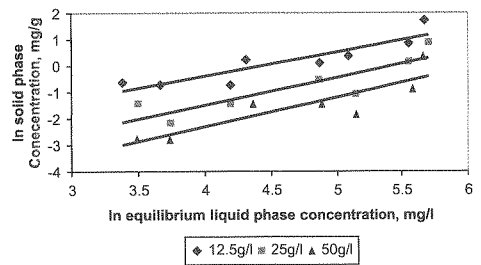


圖 3 三種不同底灰濃度之 TOC 吸附情形

Fig. 3 The adsorption of leachate TOC with three different bottom ash concentrations. (pH7 /20⁰C /1hr /180rpm /mixed ash)

3 底灰粒徑之影響

粒徑測試選擇三種範圍為 < 0.3mm, 0.6~1.18mm, 及 2~5mm。其粒徑之選擇可由篩分析獲得(Lo, 2000)。其吸附 TOC 之濃度結果如圖 4 所示知道，底灰單位之吸附量隨粒徑之減小而增加。此種現象可解釋為較小粒徑於同一重量下有較高之比表面積，因而增加了較多可聯結位置 (Banerjee et al, 1997)。如 $k'=(\pi^2 D_e)/r^2$ 所表示， k' 表吸附速率， r 表底灰粒徑， D_e 表擴散係數。

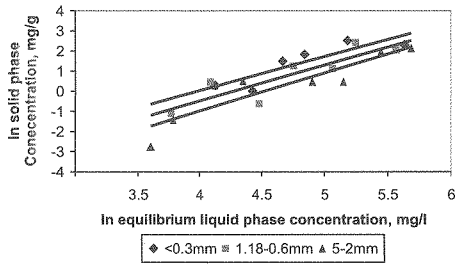


圖 4 三種不同底灰粒徑對 TOC 之 Freundlich 等溫吸附情形

Fig. 4 The Freundlich isotherms with three different particle sizes of bottom ash (1g/100ml/30-350mg/l⁻¹ leachate TOC/pH7/20⁰C/1hr/180rpm)

4 pH 值對吸附之影響

pH 值之測試目前以 pH 2, 6, 及 10 三種基準, 主要作法為調整有機物溶液以 NaOH 或 HNO₃ 使其達到所欲測試之 pH 值, 測試結果請參考圖 5, 其結果顯示較低之 pH 值有較高吸附量, 此現象解釋為較低 pH 值有較多之氫離子, 此可作為橋鍵而增加吸附位置 (Young & Banks, 1998; Karimi-Jashni & Narbaitz, 1997), 但有些學者 (Daifullah, 1997) 調查底灰對 p-nitrophenol 之吸附速率結果卻顯示, 較低 pH 值會降低底灰之負電荷, 因此抑制了對 p-nitrophenol 之吸附含量。

5 溫度對吸附之影響

溫度測試值選為 10⁰C, 35⁰C, 及 60⁰C 三種, 由測試結果如圖 6 可知, 吸附量隨溫

度增

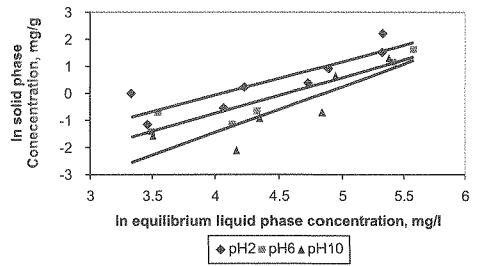


圖 5 三種不同 pHs 對 TOC 之 Freundlich 等溫吸附情形

Fig. 5 The Freundlich isotherms of bottom ash with three different pH values (1.5g/5-2mm/100ml/30-350mg/l leaching TOC/20⁰C/1hr/180rpm)

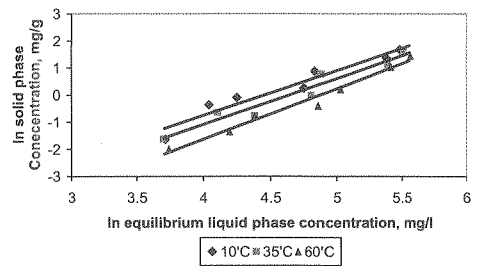


圖 6 三種不同底灰溫度對 TOC 之 Freundlich 等溫吸附情形

Fig. 6 The Freundlich isotherms of bottom ash with three different temperatures (2g/5-2mm/100ml/30-350mg/l/pH7/1hr)

加而減少。此結果和 Daifullah et al. (1997)及

表一底灰濃度、粒徑、pHs、及溫度之滲出液 Freundlich 等溫吸附常數值 K_F 與 $1/n$

Table 1 The K_F and $1/n$ constants of Freundlich isotherms by TOC (as leachate) at different bottom ash concentration, particle diameter, pHs and temperatures

| Parameters | Test values | | |
|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Bottom ash concentration | 12.5g/l | 25g/l | 50g/l |
| K_F | 0.0183 | 0.0035 | 0.0012 |
| $1/n$ | 0.902 | 1.0407 | 1.1015 |
| R^2 | 0.8056 | 0.7716 | 0.765 |
| Particle diameter | <0.3mm | 1.18-0.6mm | 5-2mm |
| K_F | 0.00097 | 0.00041 | 0.00016 |
| $1/n$ | 1.7282 | 1.8175 | 1.9236 |
| R^2 | 0.766 | 0.7615 | 0.8115 |
| PHs | pH2 | pH6 | PH10 |
| K_F | 0.0051 | 0.00175 | 0.00019 |
| $1/n$ | 1.2655 | 1.3591 | 1.7291 |
| R^2 | 0.7688 | 0.8834 | 0.7325 |
| Temperature | 10 ⁰ C | 35 ⁰ C | 60 ⁰ C |
| K_F | 0.00061 | 0.00035 | 0.00011 |
| $1/n$ | 1.6789 | 1.7263 | 1.892 |
| R^2 | 0.9377 | 0.9448 | 0.9778 |

Banerjee et al. (1997) 研究溫度參數於底灰與飛灰吸附 nitrophenol 與 O-xylene 有機物吸附量之結果恰好相反，高溫度具較低吸附量可解釋為具較高自由能，如 Arrhenius 方程式 $k=Ae^{-E/RT}$ 所表示，故降低了 k 值即降低了灰燼之吸附之能力。

6 K_F 與 $1/n$ 值

從表一結果可知， K_F 與吸附量隨四參數之減少而增加。而 $1/n$ 值隨四參數之增加而增加。 K_F 與 $1/n$ 值可由最小平方法求得。 K_F 值表吸附含量而 $1/n$ 表吸附強度(Young and Banks, 1998)。相關係數 R^2 介於 0.73-0.98 顯示此所選擇之外在環境參數具有高相關性

及關聯性。

結論

底灰具類似活性碳之特性，具有吸附有機物之潛勢，且遵循 Freundlich adsorption isotherm 吸附行為。底灰之吸附含量隨 pH 減少，溫度減少，粒徑減小及底灰濃度減少而增加，其測試值除可提供底灰覆土與垃圾共同掩埋時垃圾分解生物穩定度及底灰作為其他覆土用途之參考外，並可了解具可能減少對水土資源之污染程度。

參考文獻

1. Lo, Huang-Mu, 01/01/1997~01/01/2000, PhD thesis, The impact of increasing the incinerator bottom ash content on landfill site biostabilisation. University of Southampton, United Kingdom.
2. Banerjee, K.; Cheremisinoff, P. N. and Cheng, S. L. (1997) Adsorption kinetics of *o*-xylene by fly ash. *Wat. Res.*, 31(2), pp.249-261.
3. Daifullah, A. E. H.; El-Reefy, S. and Gad, H. (1997) Adsorption of *p*-Nitrophenol on Inshas incinerator ash and on the pyrolysis residue of animal bones. *Adsorption Science & Technology*, 15(7), pp.485-496.
4. El-Reefy, S; Daifullah, A. E. H. and Gad, H. (1998) Adsorption of typical organic pollutants from wastewater using Inshas incinerator ash. *Adsorption Science & Technology*, 16(2), pp.87-99.
5. Karimi-Jashni, A. and Narbaitz, R. M. (1997) Impact of pH on the adsorption and desorption kinetics of 2-nitrophenol on activated carbons. *Wat. Res.*, 31(12), pp.3039-3044.
6. Smith, E. H. (1991) Evaluation of multicomponent adsorption equilibria for organic mixtures onto activated carbon. *Wat. Res.*, 25(2), pp.125-134.
7. Young, E. and Banks, C. J. (1998) The removal of lindane from aqueous solution using a fungal biosorbent: the influence of pH, temperature, biomass concentration, and culture age. *Environmental Technology*, 19, pp.619-625.
8. Yen, C. Y. and Singer, P. C. (1984) Competitive adsorption of phenols on activated carbon. *Journal of Environmental Engineering*, 110(5), pp.976-989.
9. Wolborska, A. (1989) Adsorption on activated carbon of *p*-nitrophenol from aqueous solution. *Wat. Res.*, 23(1), pp.85-91.

91年5月26日 收稿

91年6月25日 修正

91年6月30日 接受

Information for Contributors

The Journal of Soil and Water Conservation, an academic journal published quarterly, invites contributions of manuscripts of original research papers on topics related to conservation of soil and water resources. All submitted manuscripts will be sent to experts for review. The manuscripts are evaluated to determine acceptance for publication on basis of merit and originality. The authors are advised to prepare their manuscripts according to the following regulations and instructions:

1. **Language:** Papers should be written in Chinese or in English. The text should not exceed 15,000 words or equivalent (15 A4 format journal pages) including figures and tables. Each paper should have abstracts (not exceeding 500 words) and keywords (two to four words) in both Chinese and English. The keywords are given right after the abstracts.
2. **Typescript:** Manuscripts should be typed, double-spaced, on standard white paper measuring 21 cm x 30cm (A4 format). Once the paper is accepted, the author should promptly supply original copies of all of the illustrations, line drawings drafted in ink on white or drawing paper (or "glossies"), and photographs on glossy papers. The lettering, typed or in engineering type, should be large enough so that, when reduced, it will still be legible.
3. **Title and Author(s):** The title of the paper should be concise, informative and in capital letters. The author's name and affiliation should appear below the title.
4. **Headings:** Headings for sections should be centered on the page with numbering. Headings for subsections which are also numbered should start from the left-hand margin.
5. **Nomenclature:** All symbols and units should be properly defined when they first appear in the text.
6. **References:** References should be listed and numbered in alphabetical order. Examples are
 - (1) Der Kiureghian, A., (1980) "Structural Responses to Stationary Excitation", ASCE, Journal Engineering Mechanics, Vol. 106, No. 6, pp. 1195-1213.
 - (2) Thompson, J.P., (1963) "Fire Resistance of Reinforced Concrete Floors", PCA Report, Chicago, U.S.A., pp. 1-15.
7. When a paper has been accepted for publication and is in its final form, the author should supply the editor with a disk which must be accompanied by a hard copy printout identical to the version on the disk. The authors will also be responsible for proof-reading. Fifty reprints are provided free of charge. For each extra reprint, the author will be charged NT\$ 5 per page.
8. Three copies of manuscripts should be submitted to the Editorial Board: c/o Soil and Water Conservation Department, National Chung Hsing University, 250 Kuo-Kuang Road, Taichung, Taiwan, R.O.C.
9. The accepted papers will be printed according to the sequence of their accepted dates.

水土保持學報稿約

一、來稿需依規定格式排版，以便直接印刷，格式如下：

1. 文稿以A4尺寸排版。天、地留4.5公分，左、右留3.3公分。
2. 題目之字體為加粗楷書體，大小為16點字，以居中排列為原則。
3. 作者姓名置於題目下方，字體為加粗楷書體，大小為14點字，以居中排列為原則，姓名之間相距兩格。姓名右方之註腳編號為上標字。
4. 中文摘要之『摘要』2字與正文中之大標題同為加粗楷書體，大小為14點字，以居中排列為原則。
5. 中文摘要之內容，字體為細明體10點字，行距為15pt行高。其下之關鍵詞為楷書10點字，『關鍵詞』3字加粗。其下置英文摘要。
6. 英文摘要字體均為Times New Roman，題目為16點加粗字，姓名為12點斜體加粗字，人名註釋分別置於姓名下方，與摘要內容同為10點字，“ABSTRACT”一詞則為加粗14點字。
7. 第一頁註腳置於最下方，並於其上畫一橫線，其位置為距左端3.3公分至距右端3.3公分為止。註腳內容之字體為楷書體10點。
8. 正文分成左右兩欄排版，其欄間距為1公分。每列18個字，每頁30列，中文字體為細明體，英文則為Times New Roman，大小為10點字，行距為1.3倍間距。
9. 圖表宜清晰、簡要，如寬度在7公分以內，則插於本文中，並居中排列。若寬度超過7公分，則跨欄居中排入。圖表依序以阿拉伯數字編號之，如：圖1、；圖2-1、；表4、；表5-3、.....等。
10. 關於參考文獻：(1)於文稿中以人名年代方式記載，如王(1979)；(王，1979)；Bell(1980)；(Bell，1980)；(2)「參考文獻」一章中日文文獻以作者姓氏筆劃為序列於前，西文文獻以作者姓氏之拼音為序列於後；(3)列舉範例：
(I)冷少泉(1981)，「水土保持政策」，中華水土保持學報，第十二卷，第二期，第1~3頁。
(II)種田行男(1955)，「農地保全」，理工圖書，東京。
(III)Stalling, J.H.(1957),Soil Conservation, Prentice-Hall, Inc., N.J.
(IV)Zingg, A.W. and W.S. Chepil(1950), “Aerodynamics of Wind Erosion,” Agr. Eng., Vol. 31, No. 6, pp. 379~382.

二、來稿需含中英文標題、摘要、姓名、服務機關及現職等資料，其中英文姓名需為全名。

三、來稿文長以不超過15000字為原則。圖、表與照片的份量以不超過全文三分之一為原則。

四、來稿請以word5.0或6.0格式編排，磁片繳稿，並列印一份原稿，版面以15±1cm×21±1cm為宜。

五、其他細節請參照傅祖慧著「科學論文的寫作、審查及發文」中華農學會叢書第一號。

水土保持學報

第 34 卷 第 2 期

二 0 0 二 年 六 月 出 版

發行人：陳文福

出版者：國立中興大學水土保持學系
地址：台中市國光路 250 號
電話：(04)22840381-204
傳真：(04)22876851

主 編：鄭皆達

編審委員：李正義 林信輝 林俐玲 林昭遠 段錦浩 梁 昇 陳文福
陳樹群 陳鴻烈 黃俊義 黃隆明 游繁結 鄭皆達 謝平城
林德貴

C.L. Chiu (U.S.A) C. Doke (U.S.A) S. S. Fan (U.S.A)

G. Fiebinger (Austria) Doug Golding (Canada)

Robert Neiman (U.S.A)

本刊於一九六八年創刊

國立中興大學水土保持學系獲有本刊版權

Journal of Soil and Water Conservation

Vol. 34, No. 2, June, 2002.

Published by the Soil and Water Conservation Department,

National Chung-Hsing University.

250 Kuokuang Road, Taichung, Taiwan, R.O.C.

Tel : (04)22840381-204

Fax : (04)22876851

Wen-Fu Chen, Publisher

J. D. Cheng, Editor