

科技部補助專題研究計畫報告

台灣菸草(美濃地區)與土壤背景放射性物質 ^{238}U ， ^{232}Th 與 ^{226}Ra 之初探

報告類別：成果報告
計畫類別：個別型計畫
計畫編號：MOST 109-2623-E-020-002-NU
執行期間：109年01月01日至109年12月31日
執行單位：國立屏東科技大學土木工程系

計畫主持人：葉一隆
共同主持人：林聖淇

計畫參與人員：碩士級-專任助理：黃韋翔
大專生-兼任助理：戴伯宇
大專生-兼任助理：徐智泓
博士班研究生-兼任助理：劉詠瑜

本研究具有政策應用參考價值：☒否 ☐是，建議提供機關
(勾選「是」者，請列舉建議可提供施政參考之業務主管機關)
本研究具影響公共利益之重大發現：☐否 ☐是

中 華 民 國 110 年 03 月 06 日

中文摘要：菸草煙霧中的放射性問題在科學出版社中越受到關注，並且受到醫學媒體的關注。煙草含有微量的 ^{210}Pb 、 ^{210}Po 和 ^{226}Ra 同位素，這些同位素來自鈾和釷衰變系列，具有放射性和致癌性。其相關產品經吸菸，因內部攝入造成體內輻射劑量。通過吸煙吸入一些天然存在的放射性核種被認為是導致肺癌的重要原因之一。本研究將菸草植體前處理後，進行放射性核種的檢測分析作業。本計畫的研究目標是根據台灣地區菸草品種之植體樣本(含莖、葉、根)，與所對應之土壤，探討不同品種菸草、土壤樣本之 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 和 ^{40}K 的關係，了解放射性 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 和 ^{40}K 等元素在環境-植體間的流佈。本計畫結果發現台灣菸草土壤中放射性核種 ^{40}K 、 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 的活度範圍分別為589-762、32-43和49-59 Bq/kg。對於 ^{40}K 、 ^{226}Ra 和 ^{232}Th ，根部的平均活度分別為446.5、5.41和5.69 Bq/kg·乾重；莖中的平均活度分別為699.8、9.64和7.61 Bq/kg·乾重；菸葉中的平均活度分別為792.5、6.79和6.15 Bq/kg·乾重。對於 ^{40}K 、 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 其傳輸因子(TF)分別為0.42-1.42、0.10-0.49和0.06-0.23。莖和葉的 ^{40}K 核種其TF值明顯高於根的TF值。 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 核種其TF值在根、莖和葉之間無顯著差異。經相關性分析，菸草植株(根、莖和葉)對於 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 和 ^{40}K 等核種對於土壤中的 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 和 ^{40}K 經相關性分析，僅莖與葉之 ^{40}K 與土壤活度有相關性。經分析除菸草莖 ^{40}K 和 ^{232}Th 的和 ^{226}Ra 的葉片外，煙草的TF值與土壤活度無關。估計吸煙引起的輻射劑量時，成年人(吸煙者)因吸入而產生的每年對肺的有效劑量總計平均為0.645至1.623 mSv/y(平均為1.194 mSv/y)。由於吸入1.26 mSv/y，可以將有效劑量與全世界平均暴露於自然輻射源的劑量進行比較。吸煙引起的終生癌症風險平均為 4.82×10^{-3} 。

中文關鍵詞：體內輻射劑量、放射性核種、傳輸因子、終生癌症風險。

英文摘要：The issue of radioactivity in tobacco smoke has attracted more and more attention in scientific publishing houses, and it has also attracted the attention of medical media. Tobacco contains trace amounts of ^{210}Pb , ^{210}Po and ^{226}Ra isotopes, which come from the decay series of uranium and thorium, which are radioactive and carcinogenic. The related products have been ingested internally to cause radiation doses in the body after smoking. Inhalation of some naturally occurring radionuclides through smoking is considered to be one of the important causes of lung cancer. In this study, after pre-treatment of tobacco plant, radionuclide detection and analysis were carried out. The research goal of this project is to explore the relationship between ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K of different tobacco varieties and soil samples based on plant samples (including stems, leaves and roots) of tobacco varieties in Taiwan and the corresponding soil, and to understand the radioactivity of ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K and other elements spread between the environment and the implant. The activity concentrations of naturally occurring

radioactive nuclides, ^{40}K , ^{226}Ra , and ^{232}Th , in tobacco compartments (root, stalk, and leaf) and the corresponding soil were measured collected from southern Taiwan. The soil-to-plant transfer factors (TFs) were determined for the detected radioactive nuclides. The activity concentration ranges were 589 – 762, 32 – 43, and 49 – 59 Bq/kg for ^{40}K , ^{226}Ra , and ^{232}Th in soils, respectively. The average activity concentrations in roots were 446.5, 5.41, and 5.69 Bq/kg, in stalks were 699.8, 9.64, and 7.61 Bq/kg, and in leaves were 792.5, 6.79, and 6.15 Bq/kg for ^{40}K , ^{226}Ra , and ^{232}Th , respectively. The transfer factors (TF) were 0.42–1.42, 0.10 – 0.49, and 0.06 – 0.23, for ^{40}K , ^{226}Ra , and ^{232}Th , respectively. The ^{40}K TFs for stalk and leaf were significantly higher than TFs for root. The TFs of ^{226}Ra and ^{232}Th were insignificantly different among root, stalk, and leaf. The activity concentrations of tobacco compartments were independent on soil activity (except stalk and leaf for ^{40}K). The TFs of tobacco compartments were independent on soil activity concentrations except stalk for ^{40}K and ^{232}Th and leaf for ^{226}Ra . In estimating the radiation dose induced from smoking, the annual effective dose to lungs due to inhalation for adults (smokers) total averaged 0.645 to 1.623 mSv y⁻¹ (average 1.194 mSv y⁻¹). The effective dose can be compared with the average world-wide exposure to natural radiation sources due to inhalation of 1.26 mSv y⁻¹. Excess lifetime cancer risk due to smoking was also averaged to the value 4.82×10^{-3} .

英文關鍵詞： radiation dose in the body, radionuclide, transfer factor, lifetime cancer risk.

科技部補助專題研究計畫成果報告

(☐期中進度報告/☒期末報告)

台灣菸草(美濃地區)與土壤背景放射性物質 ^{238}U 、 ^{232}Th 與

^{226}Ra 之初探

Preliminary study on ^{238}U , ^{232}Th and ^{226}Ra of tobacco and soil background radioactive materials in Mino, Taiwan.

計畫類別：☒個別型計畫 ☐整合型計畫

計畫編號：MOST 109-2623-E-020-002-NU

執行期間：109 年 01 月 01 日至 109 年 12 月 31 日

執行機構及系所：國立屏東科技大學土木工程系

計畫主持人：葉一隆 教授

共同主持人：林聖淇 助理教授

計畫參與人員：黃韋翔、劉詠瑜、戴伯宇、徐智泓

本計畫除繳交成果報告外，另含下列出國報告，共 0 份：

☐執行國際合作與移地研究心得報告

☐出席國際學術會議心得報告

☐出國參訪及考察心得報告

本研究具有政策應用參考價值：☒否 ☐是，建議提供機關_____

(勾選「是」者，請列舉建議可提供施政參考之業務主管機關)

本研究具影響公共利益之重大發現：☒否 ☐是

中 華 民 國 109 年 03 月 03 日

目錄

中文摘要:	I
英文摘要:	II
一、前言	1
二、實驗方法與材料	3
三、結果與討論	5
四、結論	11 2
五、參考文獻	11 3

中文摘要:

菸草煙霧中的放射性問題在科學出版社中越受到關注，並且受到醫學媒體的關注。煙草含有微量的 ^{210}Pb ， ^{210}Po 和 ^{226}Ra 同位素，這些同位素來自鈾和釷衰變系列，具有放射性和致癌性。其相關產品經吸菸，因內部攝入造成體內輻射劑量。通過吸煙吸入一些天然存在的放射性核種被認為是導致肺癌的重要原因之一。本研究將菸草植體前處理後，進行放射性核種的檢測分析作業。本計畫的研究目標是根據台灣地區菸草品種之植體樣本(含莖、葉、根)，與所對應之土壤，探討不同品種菸草、土壤樣本之 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 和 ^{40}K 的關係，了解放射性 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 和 ^{40}K 等元素在環境-植體間的流佈。

本計畫結果發現台灣菸草土壤中放射性核種 ^{40}K 、 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 的活度範圍分別為589-762、32-43和49-59 Bq/kg。對於 ^{40}K 、 ^{226}Ra 和 ^{232}Th ，根部的平均活度分別為446.5、5.41和5.69 Bq/kg·乾重；莖中的平均活度分別為699.8、9.64和7.61 Bq/kg·乾重；菸葉中的平均活度分別為792.5、6.79和6.15 Bq/kg·乾重。對於 ^{40}K 、 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 其傳輸因子(TF)分別為0.42-1.42、0.10-0.49和0.06-0.23。莖和葉的 ^{40}K 核種其TF值明顯高於根的TF值。 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 核種其TF值在根、莖和葉之間無顯著差異。經相關性分析，菸草植株(根、莖和葉)對於 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 和 ^{40}K 等核種對於土壤中的 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 和 ^{40}K 經相關性分析，僅莖與葉之 ^{40}K 與土壤活度有相關性。經分析除菸草莖 ^{40}K 和 ^{232}Th 的和 ^{226}Ra 的葉片外，煙草的TF值與土壤活度無關。估計吸煙引起的輻射劑量時，成年人(吸煙者)因吸入而產生的每年對肺的有效劑量總計平均為0.645至1.623 mSv/y(平均為1.194 mSv/y)。由於吸入1.26 mSv/y，可以將有效劑量與全世界平均暴露於自然輻射源的劑量進行比較。吸煙引起的終生癌症風險平均為 4.82×10^{-3} 。

關鍵詞:體內輻射劑量、放射性核種、傳輸因子、終生癌症風險。

英文摘要:

The issue of radioactivity in tobacco smoke has attracted more and more attention in scientific publishing houses, and it has also attracted the attention of medical media. Tobacco contains trace amounts of ^{210}Pb , ^{210}Po and ^{226}Ra isotopes, which come from the decay series of uranium and thorium, which are radioactive and carcinogenic. The related products have been ingested internally to cause radiation doses in the body after smoking. Inhalation of some naturally occurring radionuclides through smoking is considered to be one of the important causes of lung cancer. In this study, after pre-treatment of tobacco plant, radionuclide detection and analysis were carried out. The research goal of this project is to explore the relationship between ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K of different tobacco varieties and soil samples based on plant samples (including stems, leaves and roots) of tobacco varieties in Taiwan and the corresponding soil, and to understand the radioactivity of ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K and other elements spread between the environment and the implant.

The activity concentrations of naturally occurring radioactive nuclides, ^{40}K , ^{226}Ra , and ^{232}Th , in tobacco compartments (root, stalk, and leaf) and the corresponding soil were measured collected from southern Taiwan. The soil-to-plant transfer factors (TFs) were determined for the detected radioactive nuclides. The activity concentration ranges were 589–762, 32–43, and 49–59 Bq/kg for ^{40}K , ^{226}Ra , and ^{232}Th in soils, respectively. The average activity concentrations in roots were 446.5, 5.41, and 5.69 Bq/kg, in stalks were 699.8, 9.64, and 7.61 Bq/kg, and in leaves were 792.5, 6.79, and 6.15 Bq/kg for ^{40}K , ^{226}Ra , and ^{232}Th , respectively. The transfer factors (TF) were 0.42–1.42, 0.10–0.49, and 0.06–0.23, for ^{40}K , ^{226}Ra , and ^{232}Th , respectively. The ^{40}K TFs for stalk and leaf were significantly higher than TFs for root. The TFs of ^{226}Ra and ^{232}Th were insignificantly different among root, stalk, and leaf. The activity concentrations of tobacco compartments were independent on soil activity (except stalk and leaf for ^{40}K). The TFs of tobacco compartments were independent on soil activity concentrations except stalk for ^{40}K and ^{232}Th and leaf for ^{226}Ra . In estimating the radiation dose induced from smoking, the annual effective dose to lungs due to inhalation for adults (smokers) total averaged 0.645 to 1.623 mSv y^{-1} (average 1.194 mSv y^{-1}). The effective dose can be compared with the average world-wide exposure to natural radiation sources due to inhalation of 1.26 mSv y^{-1} . Excess lifetime cancer risk due to smoking was also averaged to the value 4.82×10^{-3} .

Keyword: radiation dose in the body, radionuclide, transfer factor, lifetime cancer risk.

一、前言

眾所周知，天然輻射是全世界人類暴露於輻射的主要來源。由於新鮮菸葉中存在鈾和釷系列天然放射性核種，其含量超過人類常用食品中常見的含量，因此吸煙是輻射暴露的研究的一個方向。菸草植體所含原始放射性核種濃度的主要機制與土壤和磷肥的根系吸收有關，菸葉中的 ^{40}K 是由於土壤或肥料的根吸收。菸草屬於草本植物，比木本植物更容易積聚放射性核種。

無論是天然輻射源還是人造輻射源，無論是小劑量輻射還是大劑量輻射，都會產生一些生物效應。輻射導致原子的電離，這可能影響分子，而這些分子反過來影響細胞。 ^{226}Ra (^{238}U -系列)， ^{228}Ra (^{232}Th -系列)和 ^{40}K 天然存在的原始放射性核種，在土壤和大多數肥料中很豐富(鈾-238 與磷肥有關)。受影響的細胞也會影響組織，從而影響器官，通常會影響整個身體。煙草中放射性核種累積的主要途徑是農民用的肥料，這是一種粘稠的毛狀突起，厚厚地覆蓋菸葉的兩側。雨不會沖走它們，它們在煙草中的存在取決於菸草的來源煙草種植的土壤中使用多少肥料和鈾和釷的天然核種。

銫放射性同位素 ^{137}Cs 和 ^{134}Cs 在車諾比反應爐事故發生四年後仍然留在土壤中，研究證實煙草葉片中的銫放射性同位素 ^{137}Cs 和 ^{134}Cs 是由於根系吸收而不是由於葉片沉積在葉片上。土壤是農作物放射性核種的直接來源，土壤中的放射性核種含量主要與土壤母質、肥料施用，以及人工核污染等有關。與所有的食品相比較，煙葉中的天然 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 和 ^{40}K 等放射性核種含量較高，進而導致對人體的健康產生危害。天然存在的放射性核種存在於所有人類環境中，包括土壤、水、食物和空氣，我們的身體含有天然放射性物質(Aswood et al., 2013)。天然存在的材料通常包含來自 ^{238}U ， ^{232}Th 及其子產物的主要衰變鏈中的放射性核種，以及來自諸如 ^{40}K 等長壽命的放射性核種(IAEA, 2014; UNSCEAR, 2008)。地殼的風化是導致放射性核種釋放到土壤中的基本機制，而放射性核種是自然背景輻射的主要來源。此外，植物硝化過程中使用的肥料(例如磷酸鹽包含 ^{238}U 和 ^{232}Th 和鉀)被認為是造成土壤放射性活度的重要來源(Azeez et al., 2018)。植物可以通過其根或葉獲得這些放射性核種。這些放射性核種直接作為食物從植物中轉移到人體，並在水中消耗或者通過食用動物的肉或奶間接地轉移(Alharbi and El-Taher, 2013)。

土壤放射性核種

台灣大部份為第三世紀地殼沉積岩，次之為變質岩，火成岩最少。其自然背景輻射的劑量率大小隨場所、地質而異而花崗岩地質區較高(表 1 為台灣與美國岩石中放射性核種濃度比較一覽表)，而在美國則是以頁岩地質區較高。各類岩石中所含核種濃度以火成岩最高，其次是變質岩，沉積岩最低。民國 109 年原能會輻射偵測中心針對台灣土壤放射性含量分析結果顯示在加馬射線活度中以鉀 40 佔多數，以北部宜蘭的 859 Bq/kg 最高如表 2。關於台灣土壤試樣放射性含量(以鉀 40、鋁 90 與銫 137 為例)歷年(民國 83 年迄今)的監測資料如圖 1 所示，結果顯示出土壤試樣放射性含量長期以來並無明顯的變動趨勢。

表 1 台灣與美國岩石中放射性核種活度比較一覽表

岩石種類(SiO ₂ 重量%)	鈾 ^{238}U (ppm)	釷 ^{232}Th (ppm)	鉀 ^{40}K (%)
花崗岩(70.18)	5	18	3.8
頁岩(58.10)	2.51(3.7)	12.4(12)	2.70(1.7)
石灰岩(5.19)	1.36(1.3)	1.26(1.1)	0.26(0.2)
沙岩(5.19)	1.53(0.45)	7.48(1.7)	1.75(0.6)
玄武岩(49.06)	1.27(0.5)	4.86(2)	1.35(0.5)
橄欖岩(44.62)	0.07(0.006)	0.15(0.022)	0.05(0.001)

備註:括號內數字為美國調查結果

資料來源:成功大學電子學位論文

表 2 台灣土壤放射性含量分析結果

取樣地點	取樣日期	貝他核種分析			活度		
		銨-90	鉍-7	鉀-40	銫-137	鈾系列	釷系列
臺北	109.02.06	0.708	-	392	-	28	19
臺中	109.01.21	0.328	-	654	-	34	26
高雄	109.01.14	-	-	651	-	41	27
宜蘭	109.02.06	/	-	859	-	60	37
擎天崗	109.02.06	/	214	322	27	23	15
基隆	109.02.06	/	36	701	3	43	27

單位:貝克/仟克·乾重

資料來源:台灣地區放射性落塵與食品調查半年報(2020)

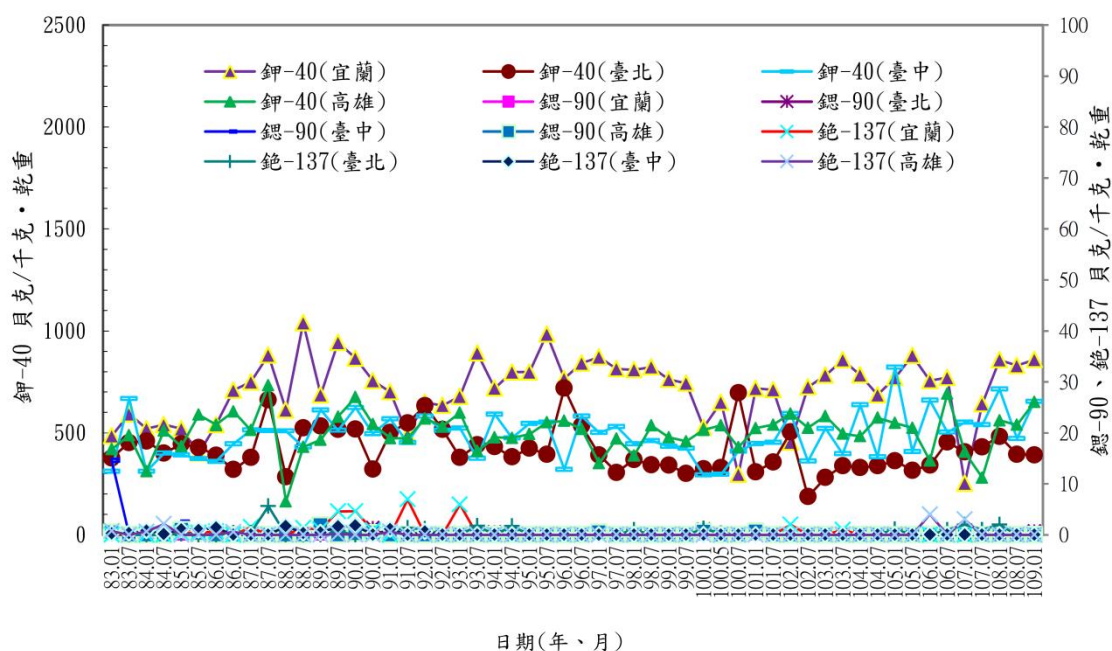


圖 1 台灣土壤式樣放射性含量變動圖

放射性核種傳輸

核子試爆和核設施產生的放射性核種有可能釋放到大氣中。這些放射性核種是沉積物的一部分，沉積在地面上並通過食物鏈到達人體(Eisenbud, 1973; Wang et al., 1998)。通過根部從土壤中吸收放射性核種是植物的重要途徑(Russell, 1965; Eisenbud, 1973; Wang et al., 1998)。有兩種長壽命放射性核種， ^{90}Sr 的半衰期為 28.8 年， ^{137}Cs 的半衰期為 30 年。由於類似的化學性質如 Ca 和 K，它們是人體中的兩個重要元素， ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 是體內劑量的兩個重要貢獻者(Wang et al., 1998)。植物生長和繁殖的 16 個基本要素(Linsalata, 1994)外，其他一些天然放射性元素如鈾，鈾等宇宙生成放射性核種和 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr 等人工放射性核種也是以不同濃度存在於植物中。

植物成分累積和分佈的放射性核種活度受許多因素的影響，例如土壤核種活度、土壤理化性質、植物類型和成分以及農田的工作條件。植物攝取放射性核種的能力表示為轉移因子(TF)，這是評估食用食物或吸入含放射性核種(例如香煙)的植物時人體攝入和吸入核種活性濃度的重要參數。

放射性核種傳輸到植物通過以下方式將存在於環境中的放射性核種傳輸到植物中：(i)通過根吸收土壤，和(ii)通過植物的地上部分直接吸收。前者取決於土壤中的放射性核種活度濃度，後者取決於大氣中放射性核種的沉積速率(Karunakara et al., 2013)。

因此，傳輸因子(植物活性與土壤活性的比例，方程式-1)是評估土壤放射性核種傳輸至植物體的比例。

$$TF = \frac{C_i^p(Bq\ kg^{-1}, dry\ weight)}{C_i^s(Bq\ kg^{-1}, dry\ weight)} \quad (1)$$

Ra 在環境中天然存在，但其濃度極低並且在自然條件下獲得的 TF 數據有限(Li et al., 2006; Narayana et al., 1995; Radhakrishna et al., 1996; Sasaki et al., 2002; Uchida and Tagami, 2007b; Yunoki et al., 1993)。

為了保護公眾健康，估計放射性向環境的釋放非常重要，特別是如果釋放的放射性進入食物鏈時(El-Taher and Al-Turki, 2014)。

傳輸因子(TF)是放射學評估的重要因素。植物對土壤中放射性核種的吸收通常用 TF 來描述，TF 是植物和土壤中放射性核種活度的相對比率(Bq/kg 乾重植物對 Bq/kg 乾重土壤)。通常，TFs 取決於各種因素，包括土壤性質(例如有機物含量、pH、Ca、K 和粘土礦物)、植物種類以及其他環境條件，差異很大(Gaffar et al., 2014)。

一些研究評估吸煙者其吸煙的放射性危害。有研究進行田間菸葉的放射性核種危害，但缺乏土壤和煙草植物成分的 TF 吸收的放射性核種。本研究調查了田間煙草植物成分(根、莖和葉)和相對應土壤中的天然放射性核種 ^{40}K 、 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 。計算每種成分的轉移因子，並檢查活性成分和煙草成分的 TFs 與土壤活度的關係。此外，評估乾燥菸葉其放射性危害。

研究目的

本研究探討菸葉中的放射性核種含量與種植地區的土壤天然背景輻射濃度的相關性。使用加馬射線能譜分析法測定從美濃地區不同地點採集的土壤樣品中 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 和 ^{40}K 的活度濃度。除此之外，還對所研究的土壤進行了 ^{226}Ra 當量活動，吸收加馬劑量率，有效劑量率和外部危害指數的估算。因為土壤中的放射性核種通過土壤-植物系統進入食物鏈，最終進入人體。

二、實驗方法與材料

1. 樣品來源

本研究選定台灣南部屏東地區(麟洛鄉六堆文化園區、高樹鄉東興村與泰山村)菸草農田進行樣本採集。採樣項目包括農地土壤及菸草植株，而菸草植株再進行根部、莖部、葉部等三個部位，取三重複。

2. 樣品前處理

土壤樣本:採集後風乾，待乾燥後以 2 mm 篩網過篩並裝袋，待做後續試驗。

菸草樣本:採集後將植株分為根部、莖部、葉部等三個部位，剪碎後放入 105°C 的烘箱烘乾至少一天以上，待做後續試驗。

3. 試驗處理後樣品分析項目

本研究分析項目如下

土壤樣本

土壤 pH 值測定:

秤取樣本 10 g 置於玻璃瓶內。加入 10 mL 的二次水於瓶子內(土水比 1:1)，與樣本混合並均勻攪拌後靜置 60 分鐘。待靜置完畢之後，使用 pH 計測定 pH 值，使用前需校正(校正液是使用 pH=7 和 pH=4

的標準液)(環檢所，2009，NIEA S410.62C)。

土壤導電度測定:

秤取樣本 10 g 置於玻璃瓶內。加入 10 mL 的二次水於瓶子內(土水比 1:1)，與樣本混合並均勻攪拌後靜置 60 分鐘。待靜置完畢之後，使用導電度計測定導電度值，使用前需校正(農試所，TARI S101.1B)。

固體有機質(OM)測定:

取樣本約 3 g 放入坩堝，將裝有樣本之坩堝放置於灰化爐中，調整溫度至 550 °C 持續燒 3 小時，冷卻後將坩堝取出秤重。(加熱前烘乾底泥重+坩堝重)-(加熱後底泥重+坩堝重)=加熱損失重=有機質重。有機質%=(有機質重/烘乾土重)*100 %。

土壤質地:

秤取 12 g 的土壤於 250 mL 之燒杯，加入少量蒸餾水潤溼後，再加入約 10 mL 之 30% 雙氧水(hydrogen peroxide, H_2O_2)，並以 70 -80 °C 加熱板加熱，反覆此步驟至土壤溶液中沒有氣泡產生，烘乾以去掉多餘的 H_2O_2 。加入 200 mL 之 0.3 M 檸檬酸鈉溶液(sodium citrate, $Na_3C_6H_5O_7$)，25 mL 之 1M 碳酸氫鈉(sodium bicarbonate, $NaHCO_3$)及 3 g 的連二亞硫酸鈉(sodium dithionite, $Na_2S_2O_4$)(三種藥劑和稱 DCB 溶液)於土壤中，置於 80°C 水域中加熱，並時而攪拌，約 15 分鐘後，土壤溶液成灰白色時取用，若未成灰白色，則重複此步驟。傾倒以除去上層澄清液，並將土壤溶液倒入 80 mL 之離心瓶中，以 3000 rpm 之轉速離心 10 分鐘，將上層液去除，再加入 100 mL 之蒸餾水再以 3000 rpm 之轉速再離心 10 分鐘(以完全除去 DCB 殘餘液體)，將土壤以蒸餾水洗至燒杯中，將燒杯中土壤至 105 °C 烘箱烘乾即可。將烘乾之土壤秤重完之後(約 10 g)，放入攪拌杯中，加入蒸餾水，再加入分散劑 5 %之 10 mL 偏磷酸鈉，攪拌 10 分鐘後取出，使土壤混合液通過 320 -325 mesh 之篩網(<0.47 μm)進行濕篩，將粉粒和黏粒洗入 1000 mL 的沉降筒中，留在篩上無通過者為砂粒部分，經洗出、烘乾，再由乾篩法細分極粗砂(2 -1 mm)、粗砂(1-0.5 mm)、中砂(0.5 -0.25 mm)、細砂(0.25 -0.1 mm)、極細砂(0.1 mm -0.47 μm)。通過篩網的溶液洗入沉降筒的溶液加水定量至 1000 mL，攪拌充分後，依 Stock law 計算沉降 10 cm 時所需時間，以 25 mL 之移液管於十公分處，吸取 25 mL 的黏粒懸浮溶液(<2 μm)，烘乾後秤重，其值乘以 40，可得粘粒含量。以總重量減去砂粒與黏粒含量，即為粉粒含量；質地分級則依美國農部土壤調查手冊質地三角圖求得。

計算：

砂粒百分率=砂粒重／總重量

粘粒百分率=25 mL之粘粒重*40／總重量

粉粒百分率=(總重量—砂粒重—粘粒重)／總重量

4. 放射性核種分析

本研究使用高純度半導體純鍺偵檢器進行放射性核種的分析，該偵檢器(型號為 GEM40P4-79-SMP，ORTEC，Inc)在 Co-60 的 1.33MeV 電壓下相對效率為 40 %及 1.9%的能量分辨率。該系統可以區分放射性核種加馬射線的能量。偵檢器被圓柱形鉛屏蔽罩包圍(厚度、內徑、長度分別為 10、28、40 公分)。加馬能譜分析為 ORTEC 提供的 Gamma Vision 軟體。本實驗室使用國際原子能總署的加馬射線標準射源(Cd-109、Co-57、Hg-203、Cr-51、Sn-113、Sr-85、Cs-137、Co-60 和 Y-88)對偵檢器進行能量校正。而本研究的目標核種為 Ra-226(609、1160 及 1764 KeV)、Th-232(583 KeV)、K-40(1460 KeV)及 Cs-137(661 KeV)。

土壤樣本:

前處理完的土壤裝至 4.5 公分高的塑膠計測皿中並秤重，本研究分析放射性核種之儀器是半導體純鍺

偵檢器 HPGe，使樣品通過加馬能譜測定樣品中的放射性核種。並透過 Gamma Vision 軟體進行光能譜分析。

菸草樣本:

前處理完的煙草樣本填充至 4.5 公分高的塑膠計測皿中並秤重，本研究分析放射性核種之儀器是半導體純鉍偵檢器 HPGe，使樣品通過加馬能譜測定樣品中的放射性核種。並透過 Gamma Vision 軟體進行加馬能譜分析。

放射性核種活度計算

$$A = \frac{(G-B)-(G_b-B_b)}{60 \times T \times E_{ff} \times V \times K_c \times K_w \times Y} \quad (2)$$

此處 A:目標加馬核種活度(Bq/Kg 或 Bq/L)。

$G - B$:環境試樣中目標加馬核種在特定能量範圍內之淨計數(counts)。

$G_b - B_b$:空白式樣中目標加馬核種在特定能量範圍內之淨計數(counts)。

T :環境試樣執行加馬能譜分析實設定之計測時間(min)。

E_{ff} :目標加馬核種之計測效率。

V :試樣分析量(kg 或 L)

K_c :目標加馬核種在家測時間內的蛻變修正因子。

K_w :目標加馬核種在取樣時刻至計測時刻之間的蛻變修正因子

Y :目標加馬核種的豐度(yield)。

其中 $K_w = e^{-\frac{0.693 \times t_w}{t_{1/2} \times 60}}$

$$K_c = \frac{t_{1/2} \times 60}{0.693 \times t_c} \times (1 - K_w) \quad (3)$$

而 t_w :環境試樣中目標加馬核種在取樣時刻之計測時刻之間差(min)。

t_c :計測時間(min)。

三、結果與討論

土壤基本性質

表 3 為土壤基本性質，pH 值的部分高樹鄉屬於弱酸性，pH 值介於 6.03 至 6.35。導電度範圍介於 451 至 640 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，平均為 $548 \pm 78 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。有機質含量範圍介於 2.11 至 3.73 %，平均為 $3.08 \pm 0.70 \%$ 。三場址之質地不同，砂粒百分比 29-63%，粉粒百分比 29-57%，黏粒百分比 8-17%，分別分類為壤土、粉質壤土、與砂質壤土。

表3 土壤種植前基本性質

地點	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	OM (%)	砂粒 (%)	粉粒 (%)	黏粒 (%)	質地
六堆文化園區	7.91 $\pm$ 0.01	550 $\pm$ 8	3.73 $\pm$ 0.05	35.47	47.16	17.37	壤土
高樹東興村	6.03 $\pm$ 0.02	640 $\pm$ 12	3.39 $\pm$ 0.06	28.99	56.97	14.04	粉質壤土
高樹泰山村	6.35 $\pm$ 0.04	451 $\pm$ 6	2.11 $\pm$ 0.09	62.67	29.21	8.12	砂質壤土
平均 $\pm$ sd	6.76 $\pm$ 0.82	548 $\pm$ 78	3.08 $\pm$ 0.70	-	-	-	-

備註:pH 為酸鹼值；EC 為導電度；OM 為有機質

土壤放射性核種活度

表 4 為土壤種放射性核種分析，可以發現放射性核種 ^{40}K 的活度範圍介於 625 至 753 Bq/kg 之間，平均為 702 ± 58 Bq/kg，一般核種 ^{40}K 是屬於天然核種，且 ^{40}K 的活度會隨著鉀元素總量而變化； ^{232}Th 與 ^{226}Ra 核種活度範圍分別為 50.6 至 58.5 Bq/kg 及 33.8 至 39.7 Bq/kg，平均活度為 55.1 ± 4.0 及 36.3 ± 3.1 Bq/kg。土壤中 ^{40}K 和 ^{232}Th 的活度分別高於全球平均值的活度 400 和 30 Bq/kg。 ^{226}Ra 的活度濃度接近全球平均水平 35 Bq/kg (UNSCEAR, 2000)。各地土壤中天然存在的放射性核種的活度變化取決於該地區的地質和地理條件，以及施用於農田的肥料的量及種類。

表4 土壤放射性核種分析

地點	^{40}K (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{226}Ra (Bq/kg)
六堆文化園區	625 ± 30	50.6 ± 1.8	33.8 ± 1.3
高樹東興村	729 ± 6	58.5 ± 1.3	39.7 ± 2.7
高樹泰山村	753 ± 7	56.3 ± 3.1	35.4 ± 1.5
平均 $\pm$ sd	702 ± 58	55.1 ± 4.0	36.3 ± 3.1

植體放射性核種活度

表 5 為菸草植體放射性核種活度分析，菸草各部位中 ^{40}K 、 ^{232}Th 和 ^{226}Ra 的活度分別為 317-1066、3.4-11.7 和 3.6-16.7 Bq/kg。地點和植體各部位的 ^{40}K 活度顯著不同， ^{232}Th 活度在植體各部位之間無顯著差異。莖部 ^{226}Ra 活度顯著大於根部活度($=0.02$)。但在各採樣點之間卻有顯著差異。菸草的各部位和採樣點中天然存在的放射性核種的活度變化，主要是由於成分和土壤類型不同以及環境條件所致。

土壤和菸草各部位的 ^{40}K 活度均顯著高於 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 。土壤中 ^{232}Th 的活度顯著高於 ^{226}Ra ($p < 0.001$)。但是， ^{232}Th 和 ^{226}Ra 的活度對於菸草各部位均無顯著差異。這些發現可以解釋如下：

1. 土壤中 ^{40}K 的活度遠高於土壤中 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 的活度。
2. ^{40}K 是輕元素，而 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 是重元素，因此 ^{40}K 具有比 ^{226}Ra 高的遷移率，而 ^{226}Ra 具有比 ^{232}Th 高的遷移率(Hafsi et al., 2014; IAEA, 2014; Kumar et al., 2008; Zeng and Brown, 2000)。
3. ^{40}K 在水中的溶解度高於 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 在水中的溶解度。 ^{232}Th 在天然水中溶解度很低，並且強烈吸附在礦物表面上(FAO, 2006; IAEA, 2014; Zeng and Brown, 2000; Azeeze et al., 2019)。

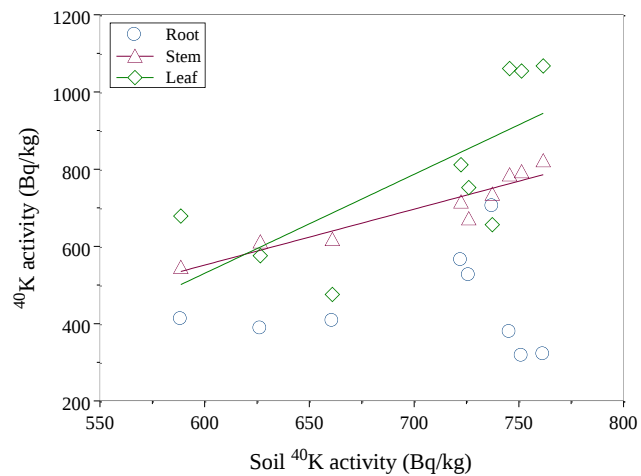
圖 2a-2c 為菸草植體與土壤 ^{40}K 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 活度間的相關性，除了莖和葉 ^{40}K 活度與土壤活度顯著正相關($p < 0.05$)。大多數菸草植體組成與對應土壤 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 的活度弱線性相關性($p > 0.05$)。相關性顯示菸草各植體部位 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 的活度不受土壤活度的影響。因為放射性核種 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 從土壤到菸草的吸收轉移受到土壤物理及化學特性(例如鉀含量，陽離子交換能力、鈣和有機質含量)及其受到植物種類(例如草本與木本)以及核種可被植物的吸收性影響以及植物物種的代謝特徵(Aswood et al., 2013; Guillen et al., 2017)。

土壤 ^{40}K 活度與莖、葉 ^{40}K 活度呈正相關，說明菸草地上部 ^{40}K 的吸收具有線性關係。菸草植體各部位 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 活度與土壤活度無顯著相關性。另外整合菸草植體各部位(根、莖、葉)的活度， ^{40}K 活度與 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 活度顯示弱相關性($r = 0.15$, ^{226}Ra ; $r = 0.16$, ^{232}Th)。然而 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 活度顯著正相關($r = 0.85$, $p < 0.001$)，此說明菸草吸收 ^{40}K 與吸附收 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 的機制不同，如之前的解釋。

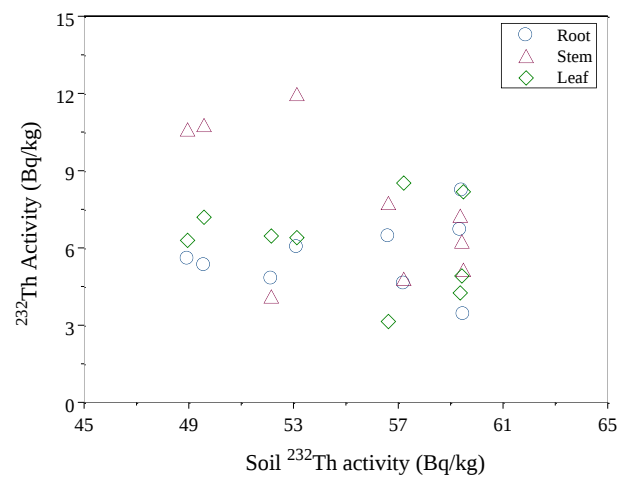
表 6 為國外文獻菸草天然放射性核種活度，本研究菸草天然核種 ^{40}K 、 ^{232}Th 與 ^{226}Ra 之活度與國外文獻進行比較顯示，本研究的活度在全世界其他地區檢測到的活度範圍內。

表 5 菸草植體放射性核種分析

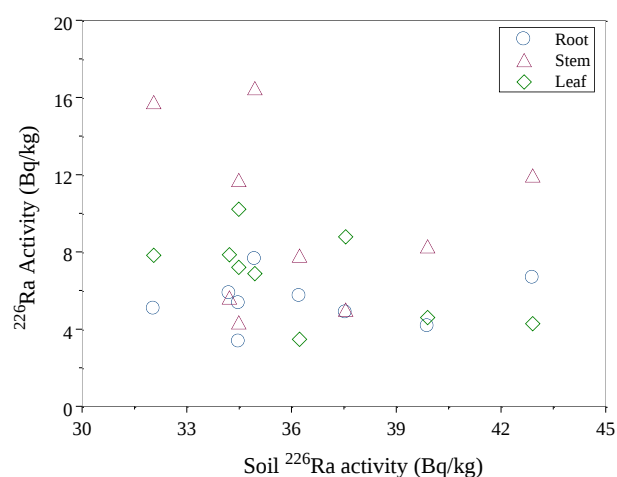
地點	^{40}K			^{232}Th			^{226}Ra		
	根	莖	葉	根	莖	葉	根	莖	葉
六堆文化園區	402±10	592±33	577±83	5.7±0.3	11.1±0.6	6.6±0.4	6.0±1.2	14.6±2.1	7.3±0.4
高樹東興村	598±77	707±27	740±64	7.1±0.8	7.1±0.6	4.1±0.7	5.5±1.0	9.3±1.9	4.1±0.5
高樹泰山村	339±28	800±16	1061±5	4.3±0.6	4.7±0.4	7.7±0.9	4.7±1.0	5.0±0.5	9.0±1.0
平均±sd	446±120	700±89	793±210	5.7±1.3	7.6±2.7	6.2±1.7	5.4±1.2	9.6±4.3	6.8±2.1



(a)



(b)



(c)

圖 2 菸草植體活度與土壤活度的關係圖

表 6 國外文獻菸草天然放射性核種活度

樣本數	^{40}K	^{232}Th	^{226}Ra	文獻
N=9	475-1067 (793)	3.47-10.21 (6.79)	3.14-8.52 (6.15)	本研究
N=4	556-1236 (908)	4.30-11.9 (8.17)	4.42-12.4 (6.08)	Boumala et al., 2019
N=14	517-2401 (1360)	2.6-8.9 (5.4)	1.9-9.5 (4.5)	Shousha and Ahmad, 2016
N=31	801-1567 (1051)	3.75-30.9 (14.86) ^a	1.59-41.5 (10.84)	Ridha and Hasan, 2016
N=17	273-2080 (823)	1.80 – 7.57 (3.38)	1.10 -6.52 (3.83) ^b	Papastefanou, 2009
N=7	78-95 (85)	29.8-41.0 (35.3) ^a	2.32-3.40 (2.97)	Shafik et al., 2019
N=24	569-1043 (685)	3.6-10.1 (6.98)	5.41-13.24 (8.76) ^c	EI-Aziz et al., 2005

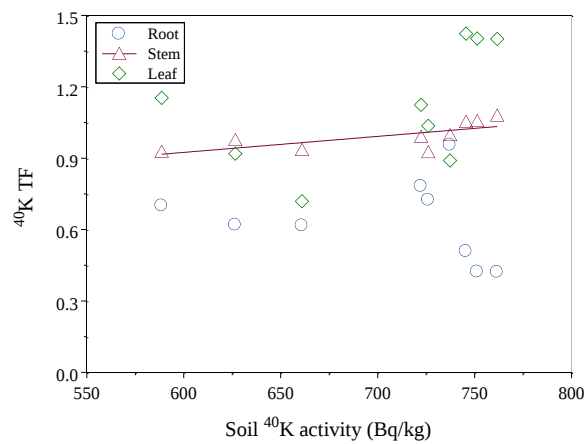
放射性核種TF傳輸因子

表 7 為土壤與植體放射性核種 TF 傳輸因子，傳輸因子值越高表示土壤中的放射性核種易藉由植物生長所需營養元素而從土壤中攝取並傳輸至植體各部位， ^{40}K 、 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 的土壤到植物 TF 的範圍分別為 0.421-1.423、0.096-0.491 和 0.056-0.225。從土壤到菸草各部位的 TF 值，這主要歸因於不同的土壤特性和煙草各部位的活度。土壤中放射性核種與菸草各部位之間的相互作用非常複雜，取決於土壤特性、植物類型和氣候條件。由於 ^{40}K 在土壤中的高轉移率及其在水中的溶解度， ^{40}K 的土壤-菸草各部位 TF 值明顯高於 ^{226}Ra 和 ^{232}Th (FAO, 2016; IAEA, 2014; Kumar et al., 2008; Zeng and Brown, 2000)。Azeeze et al. (2019) 解釋說植物對 ^{40}K 的生物需求很高，如果存在足夠量的植物，則吸收的可溶性鉀比需要的更多。土壤對菸草的核種 ^{40}K 其 TF 值以莖和葉為最高；土壤對菸草的根、莖及葉之核種 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 其 TF 值差異不顯著。TF 值的結果與在土壤到植物中研究的 TF 值相反，在 TF 中，根係作物的 TF 值高於穀物作物和非葉植物，因為作物的根部保留了更多的元素，特別是重元素如 ^{226}Ra 和 ^{232}Th ，其根與土壤中的放射性核種緊密接觸，因此它們直接從土壤中吸收了最大量的放射性核種。菸草是草本植物，對土壤到草本植物成分的研究表明，核種從土壤轉移到植物葉片和莖的 TF 值比根系高。此外， ^{232}Th 的土壤活度顯著高於 ^{226}Ra ($p < 0.001$)，但菸草中的活度差異不顯著($p = 0.313$)。導致 ^{226}Ra 的 TF 值(0.203 ± 0.102)顯著高於 ^{232}Th 的 TF 值(0.119 ± 0.044)，因為核種在細胞中的吸附由

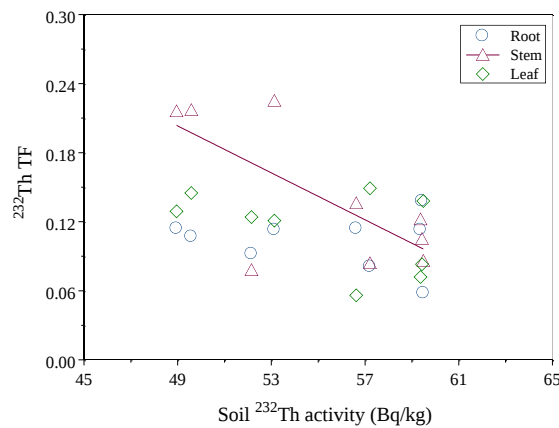
於其被細胞壁吸附而限制了其轉移率，並且 ^{232}Th 在自然水體中也高度不溶(IAEA, 2014)。在核種從土壤轉移到植物中時觀察到 ^{226}Ra 高於 ^{232}Th 的 TF 值。

圖3a-3c為菸草植體 ^{40}K 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 其TF值與土壤活度的相關性，其中莖 ^{40}K 的TF值與土壤活度顯著正線性關係，莖 ^{232}Th 的TF值與土壤活度呈負線性關係，而葉 ^{226}Ra 的TF值與土壤活度顯著負線性關係。假設植物從土壤中吸收核種屬於線性關係，表明在高土壤活度下植物的活度較高。圖2a-2c顯示菸草 ^{232}Th 與 ^{226}Ra 活度隨土壤活度隨機變化，除了 ^{40}K 的莖與葉活度遵循線性假設，代表 ^{40}K 的莖與葉活度隨土壤活度線性增加。假設植體活度與土壤活度遵循線性正相關性，代表在很寬的土壤活度範圍，TF的數值保持恆定或在很小的範圍內變化。因此由變異係數(CV, 標準偏差/平均值x100%)也可以了解菸草各部位與場址TF的變異。根的 ^{40}K 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 其TF值的CV值介於21%-26%。葉的 ^{40}K 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 其TF值的CV值介於21%-35%。莖的 ^{40}K 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 其TF的CV值分別為6%、51%、48%。 ^{40}K 的莖的CV值最小，說明場址TF值變異小。 ^{232}Th 與 ^{226}Ra 的莖的CV值最大說明場址TF值變異大(表7)。

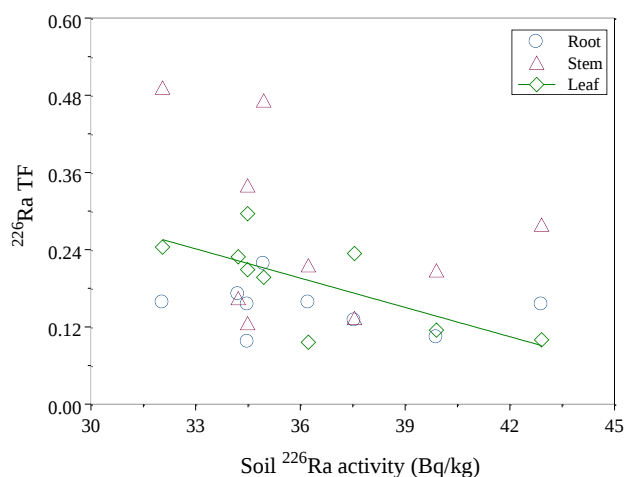
地點	^{40}K			^{232}Th			^{226}Ra		
	根	莖	葉	根	莖	葉	根	莖	葉
六堆文化園區	0.65±0.04	0.95±0.02	0.93±0.18	0.112±0.003	0.219±0.004	0.131±0.010	0.177±0.029	0.434±0.067	0.216±0.020
高樹東興村	0.82±0.10	0.97±0.03	1.02±0.10	0.122±0.012	0.121±0.03	0.070±0.011	0.139±0.025	0.233±0.032	0.104±0.008
高樹泰山村	0.45±0.04	1.06±0.01	1.41±0.01	0.077±0.014	0.083±0.003	0.137±0.010	0.133±0.030	0.141±0.017	0.253±0.030
平均±sd	0.64±0.17	0.99±0.06	1.12±0.24	0.103±0.022	0.141±0.058	0.113±0.032	0.150±0.034	0.269±0.130	0.191±0.067



(a)



(b)



(c)

圖 3 菸草植體與土壤其 ^{40}K 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 其 TF 值間的關係性

放射性危害評估

菸葉中各放射性核種的放射性含量對於通過輻射危害指數評估對人體健康的放射性危害影響很重要。鐳當量活度 (Ra_{eq}) 指數用於比較植體中 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 的活度水平，並考慮了與它們相關的加馬輻射危害。根據公式(2)計算(Stranden, 1976):

$$\text{Ra}_{\text{eq}} = C_{\text{Ra}} + 1.43 \times C_{\text{Th}} + 0.077 \times C_{\text{K}} \quad (2)$$

其中 C_{Ra} 、 C_{Th} 和 C_{K} 分別是放射性核種 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 測得的活度。調查菸葉的 Ra_{eq} 值的計算結果為 52.6 至 101.7 Bq/kg，平均為 76.6 Bq/kg，低於建議的 370 Bq/kg 限值。鐳當量活度的允許最大值應小於 370 Bq/kg，以將 UNSCEAR (1982) 報告的民眾年度有效劑量限制在 1 mSv。

對於年度有效劑量 H_E (Sv/y)，假定成年人抽菸吸入菸草質量 8.985 kg/y (每天 30 支香煙，每支香煙 0.82 克菸草)。捲菸煙霧中所含的放射性核種活度(Bq/kg)的 75% 被部分吸入並沉積在肺組織中，而約 25% 保留在香菸過濾嘴和煙灰中(Khater, 2004)。根據等式計算成年吸菸者吸入的年有效劑量 H_E (Sv/y)。

$$H_E = 0.75 \times M_T \times C_i \times DF \quad (3)$$

其中 M_T (kg/y) 表示每年抽菸吸入菸草的質量； C_i (Bq/kg) 表示放射性核種的活度； DF (Sv/Bq) 表示劑量的轉換係數，放射性核種對於 ^{40}K 、 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 分別等於 4.66×10^{-9} 、 2.90×10^{-6} 和 2.50×10^{-5} (UNSCEAR, 2008; Eckerman et al., 1989)。 ^{40}K 的年有效劑量範圍為 14.9 至 33.5 $\mu\text{Sv/y}$ (平均 24.9 $\mu\text{Sv/y}$)；至 ^{226}Ra 範圍為 67.8 至 199.5 $\mu\text{Sv/y}$ (平均 132.6 $\mu\text{Sv/y}$)； ^{232}Th 的範圍為 529.6 至 1436 $\mu\text{Sv/y}$ (平均 1036 $\mu\text{Sv/y}$)。菸草樣品中 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 的活度產生的總年度有效劑量為 0.65 至 1.62 (平均 1.19) mSv/y，低於全球平均暴露於自然輻射源的總平均劑量 2.4 mSv/y，並低於因吸入 1.26 mSv/y (UNSCEAR, 2008) 所致的部分。

如果一生長時間暴露在引起癌症的物質中，那麼一生中就有過量的癌症風險 (ELCR)。假設劑量

和隨機效應之間存在線性關係，則進行計算。ELCR 因子可以根據下式估算(Taskin et al., 2009):

$$ELCR = H_E \times DL \times RF \quad (4)$$

其中， H_E 是等效的年度有效劑量； DL 是平均預期壽命（假定為 80.7 歲）， RF 是每 Sievert 的致命癌症危險因素，對於公眾而言為 0.05(ICRP, 1990)。菸草樣品的 ELCR 值範圍為 2.60×10^{-3} 至 6.55×10^{-3} （平均值為 4.82×10^{-3} ）。

表 8 為本研究中從菸葉計算出的放射性危害指數，並與參考文獻報導的吸菸香菸放射危害指數的危害指數進行比較。在這項研究中， R_{eq} 、 H_E 和 ELCR 的值可與相同條件下（每天 30 支香煙和相似的預期壽命香煙）消費捲菸的報告值相比。在本研究中評估的平均 ELCR 因子高於兩個樣本的世界平均值 1.16×10^{-3} (Shousha and Ahmad, 2016)。

表 8 菸葉計算出的放射性危害指數

R_{eq} (Bq/kg)	H_E (μ Sv/y)	ELCR $\times 10^{-3}$	Reference
52.6-101.7 (76.6)	645-1623 (1194) ^{a, *}	2.60 – 6.55 (4.82) (80.7 y)	Present Study
54.2-109.5 (88.3)	440-2290 (1390)*	1.55-8.01 (4.88) (70 y)	Boumala et al., 2019
45.2-204.4 (116.5)	500-2500 (1270)*(2 packs/d)	1.97-9.25 (4.70) (72.7 y)	Shousha and Ahmad, 2016
	2778-4036 (3537)		Shafik et al., 2019
18.50-87.21 (39.51)	16.4-44.7 (24.97) ^c	0.54-130 (76) $\times 10^{-6}$	Ridha and Hasan, 2016
	152-401 (252) ^c		Papastefanou, 2009
21.9-54.9 (38.95)	1671-6057 (3996)	6.0-20.3 (14.1) (70 y)	Akinyose et al., 2017

^a 是平均值，* H_E ：年有效劑量，以 30 支/天為基準，吸煙率為 75%。

四、結論

1. 土壤中 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 的活度範圍分別為 11.94 - 18.24 Bq/kg、8.80 - 12.36 Bq/kg 和 247.65 - 338.26 Bq/kg。植物作物中 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 的活度範圍分別為 3.14 – 8.52 Bq/kg、3.47 – 10.21 Bq/kg 和 475 - 1067 Bq/kg。
2. 作物中 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 的活度不受土壤中活度的影響很大，這表明放射性核種從土壤到作物的轉移主要受土壤理化性質及其影響。植物的可用性以及不同植物物種的代謝特徵。
3. 獲得了廣泛的土壤-植物作物 TF 值，並且 ^{40}K 的土壤-植物作物 TF 值明顯大於 ^{226}Ra 和 ^{232}Th 。 ^{226}Ra 的 TF 大於 ^{232}Th 的 TF 值。
4. 估計吸菸引起的輻射劑量，可以得出結論，成年人(吸煙者)因吸入而每年獲得的肺部有效劑量分別為 ^{40}K 、 ^{226}Ra 和 ^{232}Th ，分別為 0.025、0.13 和 1.04 mSv/y，總共 1.19 mSv/y。可以將 1.19 mSv/y 的有效劑量與由於吸入 1.26 mSv/y 而在世界範圍內對自然輻射源的平均暴露量進行比較。
5. 終生癌症風險也平均為 4.82×10^{-3} 。這項研究可以作為連續測量菸葉和加工後捲菸產品中天然存在的放射性核種的基礎，以保護人們免受吸煙引起的風險。

五、參考文獻

- Abd El-Aziz, N., Khater, A., and Al-Sewaidan, H., "Natural radioactivity contents in tobacco," in *International Congress Series*, 2005, pp. 407-408.
- Akinyose, F., Tchokossa, P., Orosun, M., Oluyide, S., Umakha, M., Ochommadu, K., Olaniyan, T., and

- Ajibade, O., 2018, "Radiological Impacts of Natural Radioactivity in Locally Produced Tobacco Products in Ibadan, Oyo State, Nigeria," *Momona Ethiopian Journal of Science*, Vol. 10, No. 1, pp. 59-75.
- Alharbi, A. and El-Taher, A., 2013, "A study on transfer factors of radionuclides from soil to plant," *Life Science Journal*, Vol. 10, No. 2, pp. 532-539.
- Aswood, M. S., Jaafar, M. S., and Bauk, S., 2013, "Assessment of radionuclide transfer from soil to vegetables in farms from Cameron Highlands and Penang, (Malaysia) using neutron activation analysis," *Applied Physics Research*, Vol. 5, No. 5, p. 85.
- Azeez, H. H., Ahmad, S. T., and Mansour, H. H., 2018, "Assessment of radioactivity levels and radiological-hazard indices in plant fertilizers used in Iraqi Kurdistan Region," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 317, No. 3, pp. 1273-1283.
- Azeez, H. H., Mansour, H. H., and Ahmad, S. T., 2019, "Transfer of natural radioactive nuclides from soil to plant crops," *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 147, No. pp. 152-158.
- Boumala, D., Belafrites, A., Tedjani, A., Mavon, C., and Groetz, J.-E., 2019, "Annual effective dose and excess life time cancer risk assessment from tobacco plants," *Perspectives in Science*, Vol. 12, No. pp. 100394.
- Eckerman, K., Wolbarst, A., and Allan, C., 1989, "Richardson limiting values of radionuclide intake and air concentration and dose conversion factors for inhalation, submersion, and ingestion," Federal Guidance Report.
- Eisenbud, M. and Paschoa, A., 1989, "Environmental radioactivity," *Nuclear instruments and methods in Physics Research Section A: Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*, Vol. 280, No. 2-3, pp. 470-482.
- El-Taher, A. and Al-Turki, A., 2014, "Soil-to-plant transfer factors of naturally occurring radionuclides for selected plants growing in Qassim, Saudi Arabia," *Life Science Journal*, Vol. 11, No. 10, pp. 965-972.
- Gaffar, S., Ferdous, M., Begum, A., and Ullah, S., 2014, "Transfer of natural radionuclides from soil to plants in North Western parts of Dhaka," *Malaysian Journal of Soil Science*, Vol. 18, No. pp. 61-74.
- Guillén, J., Baeza, A., Salas, A., Muñoz-Muñoz, J., and Muñoz-Serrano, A., "Factors influencing the soil to plant transfer of radiocaesium," in *Impact of Cesium on Plants and the Environment*, ed: Springer, 2017, pp. 19-33.
- Hafsi, C., Debez, A., and Abdelly, C., 2014, "Potassium deficiency in plants: effects and signaling cascades," *Acta Physiologiae Plantarum*, Vol. 36, No. 5, pp. 1055-1070.
- IAEA, 1994, "Handbook of parameter values for prediction of radionuclide transfer in temperate environments," International Atomic Energy Agency IAEA, Vienna.
- ICRP, 1990, "1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Vol. 21., pp. 1-3..
- Karunakara, N., Rao, C., Ujwal, P., Yashodhara, I., Kumara, S., and Ravi, P., 2013, "Soil to rice transfer factors for ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{40}K and ^{137}Cs : a study on rice grown in India," *Journal of environmental radioactivity*, Vol. 118, No. pp. 80-92.
- Khater, A. E., 2004, "Polonium-210 budget in cigarettes," *Journal of environmental radioactivity*, Vol. 71, No. 1, pp. 33-41.
- Kumar, A., Singhal, R., Preetha, J., Rupali, K., Narayanan, U., Suresh, S., Mishra, M. K., and Ranade, A., 2008, "Impact of tropical ecosystem on the migrational behavior of K-40, Cs-137, Th-232 U-238 in perennial plants," *Water, air, and soil pollution*, Vol. 192, No. 1-4, pp. 293.
- Li, J., Shang, Z., Yang, J., and Tang, S., 2006, "Radionuclide Transfer Parameter Manual," ed: Atomic Energy Press, Beijing.
- Linsalata, P., 1994, "Uranium and thorium decay series radionuclides in human and animal foodchains—a review," *Journal of Environmental Quality*, Vol. 23, No. 4, pp. 633-642.
- Narayana, Y., Radhakrishna, A., Somashekarappa, H., Karunakara, N., Balakrishna, K., and Siddappa, K., 1995, "Distribution of some natural and artificial radionuclides in the environment of coastal Karnataka of South India," *Journal of environmental radioactivity*, Vol. 28, No. 2, pp. 113-139.
- Papastefanou, C., 2009, "Radioactivity of tobacco leaves and radiation dose induced from smoking,"

- International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 6, No. 2, pp. 558-567.
- Radhakrishna, A., Somashekarappa, H., Narayana, Y., and Siddappa, K., 1996, "Distribution of some natural and artificial radionuclides in Mangalore environment of South India," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 30, No. 1, pp. 31-54.
- UNSCEAR, 1982, "Ionizing radiation: sources and biological effects. 1982 report to the general assembly, with annexes.
- Ridha, A. A. and Hasan, H. A., 2016, "Cancer risk due to the natural radioactivity in cigarette tobacco," No.
- Roy, R. N., Finck, A., Blair, G., and Tandon, H., 2006, "Plant nutrition for food security," *A guide for integrated nutrient management. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin*, Vol. 16, No. p. 368.
- Russell, R. S., 1965, "An introductory review. Interception and retention of airborne material on plants," *Health Physics*, Vol. 11, No. 12, pp. 1305-1315.
- Sasaki, T., Tashiro, Y., Fujinaga, H., Ishii, T., and Gunji, Y., 2002, "Determination of transfer factors of uranium, thorium, radium and lead from soil to agricultural product in Japan for estimating internal radiation dose through ingestion," *Japanese Journal of Health Physics*, Vol. 37, No. 3, pp. 208-221.
- Shafik, S. S. and Shafeq, O. S., "The Annual Inhalation Radiation Effective Dose Estimations for Hookah Tobacco Smoking of Baghdad's Publics," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, p. 012044.
- Shousha, H. A. and Ahmad, F., 2016, "Lifetime cancer risk of gamma radioactivity results from smoking," *Cancers Review*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-9.
- Stranden, E., 1976, "Some aspects on radioactivity of building materials," *Phys. Norv*, Vol. 8, No. 3, pp. 163-167.
- Taskin, H., Karavus, M., Ay, P., Topuzoglu, A., Hidiroglu, S., and Karahan, G., 2009, "Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Kizilirmak, Turkey," *Journal of environmental radioactivity*, Vol. 100, No. 1, pp. 49-53.
- Uchida, S., Tagami, K., and Hirai, I., 2007, "Soil-to-plant transfer factors of stable elements and naturally occurring radionuclides (1) upland field crops collected in Japan," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 44, No. 4, pp. 628-640.
- UNSCEAR, 2000, "effects of Ionizing Radiation," *United Nations, New York*, No. pp. 453-487.
- Wang, J.-J., Wang, C.-J., Huang, C.-C., and Lin, Y.-M., 1998, "Transfer factors of ^{90}Sr and ^{137}Cs from paddy soil to the rice plant in Taiwan," *Journal of environmental radioactivity*, Vol. 39, No. 1, pp. 23-34.
- Yunoki, E., Kataoka, T., Michiro, K., Sugiyama, H., Shimizu, M., and Mori, T., 1993, "Activity concentrations of ^{238}U and ^{226}Ra in agricultural samples," *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, Vol. 174, No. 2, pp. 223-228.
- Zeng, Q. and Brown, P. H., 2000, "Soil potassium mobility and uptake by corn under differential soil moisture regimes," *Plant and soil*, Vol. 221, No. 2, pp. 121-134.

A 土壤基本性質

地點	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	OM (%)
六堆-1	7.92	561.2	3.69
六堆-2	7.90	546.1	3.70
六堆-3	7.92	542.8	3.80
高樹-東興-1	6.02	642.7	3.33
高樹-東興-2	6.06	654.8	3.36
高樹-東興-3	6.00	625.3	3.48
高樹-泰山-1	6.40	457.5	2.22
高樹-泰山-2	6.34	453.8	1.99
高樹-泰山-3	6.31	443.2	2.12

B 土壤放射性核種分析

地點	K-40	Th-232	Ra-226
六堆-1	626.55	49.58	34.49
六堆-2	588.62	48.95	32.05
六堆-3	660.98	53.13	34.95
高樹-東興-1	722.39	56.62	39.90
高樹-東興-2	737.31	59.43	36.23
高樹-東興-3	726.06	59.37	42.91
高樹-泰山-1	745.57	57.21	34.22
高樹-泰山-2	761.64	52.15	34.49
高樹-泰山-3	751.34	59.49	37.55

C 植體放射性核種分析

地點	根			莖			葉		
	K-40	Th-232	Ra-226	K-40	Th-232	Ra-226	K-40	Th-232	Ra-226
六堆-1	387.82	5.33	5.34	611.72	10.75	11.70	576.07	7.19	7.20
六堆-2	411.97	5.58	5.06	545.77	70.58	15.73	678.72	6.29	7.82
六堆-3	407.39	6.03	7.63	618.24	11.95	16.45	475.48	6.40	6.87
高樹-東興-1	564.70	6.45	4.15	715.00	7.72	8.26	811.66	3.14	4.60
高樹-東興-2	704.29	8.23	5.72	735.20	6.23	7.78	656.40	4.91	3.47
高樹-東興-3	525.54	6.70	6.66	671.67	7.23	11.93	752.21	4.25	4.28
高樹-泰山-1	378.69	4.62	5.86	785.26	4.78	5.61	1060.60	8.52	7.85
高樹-泰山-2	320.96	4.81	3.36	821.80	4.09	4.32	1067.20	6.46	10.21
高樹-泰山-3	316.76	3.43	4.87	793.43	5.13	4.98	1054.20	8.18	8.78

D 土壤與菸草植體放射性核種傳輸因子(TF)

地點	根			莖			葉		
	K-40	Th-232	Ra-226	K-40	Th-232	Ra-226	K-40	Th-232	Ra-226
六堆-1	0.619	0.107	0.155	0.976	0.217	0.339	0.919	0.145	0.209
六堆-2	0.700	0.114	0.158	0.927	0.216	0.491	1.153	0.129	0.244
六堆-3	0.616	0.113	0.218	0.935	0.225	0.471	0.719	0.121	0.197
高樹-東興-1	0.782	0.114	0.104	0.990	0.136	0.207	1.124	0.056	0.115
高樹-東興-2	0.955	0.138	0.158	0.997	0.105	0.215	0.890	0.083	0.096
高樹-東興-3	0.724	0.113	0.155	0.925	0.122	0.278	1.036	0.072	0.100
高樹-泰山-1	0.508	0.081	0.171	1.053	0.084	0.164	1.423	0.149	0.229
高樹-泰山-2	0.421	0.092	0.097	1.079	0.078	0.125	1.401	0.124	0.296
高樹-泰山-3	0.422	0.058	0.130	1.056	0.086	0.133	1.403	0.138	0.234

科技部補助專題研究計畫成果彙整表

計畫主持人：葉一隆			計畫編號：MOST 109－2623－E－020－002－NU			
計畫名稱：台灣菸草(美濃地區)與土壤背景放射性物質 ^{238}U 、 ^{232}Th 與 ^{226}Ra 之初探						
成果項目			量化	單位	質化 (說明：各成果項目請附佐證資料或細項說明，如期刊名稱、年份、卷期、起訖頁數、證號...等)	
國內	學術性論文	期刊論文		篇	請附期刊資訊。	
		研討會論文			1	
		專書		本	請附專書資訊。	
		專書論文		章	請附專書論文資訊。	
		技術報告		篇		
		其他		篇		
	智慧財產權及成果	專利權	發明專利	申請中	件	請附佐證資料，如申請案號。
				已獲得		請附佐證資料，如獲證案號。
			新型/設計專利			
		商標權				
		營業秘密				
		積體電路電路布局權				
		著作權				
		品種權				
		其他				
		技術移轉	件數			件
	收入		千元	1. 依「科技部科學技術研究發展成果歸屬及運用辦法」第2條規定，研發成果收入係指執行研究發展之單位因管理及運用研發成果所獲得之授權金、權利金、價金、股權或其他權益。 2. 請註明合約金額。		
	國外	學術性論文	期刊論文		篇	請附期刊資訊。
			研討會論文			
			專書		本	請附專書資訊。
			專書論文		章	請附專書論文資訊。
技術報告			篇			
其他			篇			

	智慧財產權 及成果	專利權	發明專利	申請中		件	請附佐證資料，如申請案號。							
				已獲得			請附佐證資料，如獲證案號。							
			新型/設計專利											
		商標權												
		營業秘密												
		積體電路電路布局權												
		著作權												
		品種權												
		其他												
		件數												
	技術移轉	收入				千元	1. 依「科技部科學技術研究發展成果歸屬及運用辦法」第2條規定，研發成果收入係指執行研究發展之單位因管理及運用研發成果所獲得之授權金、權利金、價金、股權或其他權益。 2. 請註明合約金額。							
參與計畫人力	本國籍	大專生				人次								
		碩士生			2									
		博士生			2									
		博士後研究員												
		專任助理												
	非本國籍	大專生												
		碩士生												
		博士生												
		博士後研究員												
		專任助理												
其他成果														
(無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)														

109年度專題研究計畫成果彙整表

計畫主持人：葉一隆			計畫編號：109-2623-E-020-002-NU		
計畫名稱：台灣菸草(美濃地區)與土壤背景放射性物質238U，232Th與226Ra之初探					
成果項目			量化	單位	質化 (說明：各成果項目請附佐證資料或細項說明，如期刊名稱、年份、卷期、起訖頁數、證號...等)
國內	學術性論文	期刊論文	0	篇	
		研討會論文	1		Huang Wei-Shiang, Yi-Lung Yeh, Sheng-Chi Lin, Ting-Chien Chen*, Study on the distribution of radionuclide activity in soil, tobacco component in Taiwan. 2020 International Sustainable Development Conference p. 22, November, 27-28, 2020, Pingtung, Taiwan.
		專書	0	本	
		專書論文	0	章	
		技術報告	0	篇	
		其他	0	篇	
		國外	學術性論文	期刊論文	0
研討會論文	0				
專書	0			本	
專書論文	0			章	
技術報告	0			篇	
其他	0			篇	
參與計畫人力	本國籍			大專生	0
		碩士生	2	主要工作為協助採樣及樣本前處理，學生可以了解採樣及樣本前處理方法。	
		博士生	2	主要工作為協助採樣及分析，學生可以了解輻射儀器操作與結果分析研判。	
		博士級研究人員	0		
		專任人員	0		
	非本國籍	大專生	0		
		碩士生	0		
		博士生	0		
		博士級研究人員	0		
		專任人員	0		
		其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國			

際影響力及其他協助產業技術發展之具體 效益事項等，請以文字敘述填列。）	
--	--