食用臺灣糙米飯攝入重金屬之健康風險評估

連耿汶 *

摘要

糙米為臺灣民眾的重要食物來源之一，在提供豐富營養的同時，其重金屬汙染問題也引起了廣泛關注。本研究目的為評估臺灣民眾食用糙米而攝入重金屬對人體健康之潛在風險。利用衛生福利部食品藥物管理署之食米中重金屬含量監測檢驗結果資料集與國家攝食資料庫等資料進行風險評估。結果顯示，糙米中鎘和砷之檢出率最高，分別為77%與98%，62件樣本鎘之平均檢出濃度為0.07±0.07 mg/kg，砷之平均檢出濃度為0.12±0.05 mg/kg。經過蒙地卡羅模擬分析法評估健康風險後，研究結果顯示，不論重金屬鎘或砷對於人體健康而言，均介於安全範圍之內，即使在第95百分位的情況下，食用糙米所暴露之重金屬鎘與砷，也未超過每日可接受之參考劑量（Reference Dose）。顯示在目前政府的監管措施下，臺灣民眾食用糙米而暴露於重金屬鎘與砷之健康風險是可接受的。

關鍵字：重金屬、糙米、食品安全風險評估

連耿汶(通訊作者)，國立臺東大學食品生物技術應用二年制在職學位學程助理教授，E-mail: kwlien@nttu.edu.tw

Health Risk Assessment of Consuming Taiwanese Brown Rice Contaminated with Heavy Metals

Keng-Wen Lien *

Abstract

Brown rice as an important food source for the Taiwanese population, provides abundant nutrition. However, its heavy metal contamination has also raised widespread concern. The main purpose of this research is to assess the potential health risks associated with Taiwanese people consuming brown rice and ingesting heavy metals. This study utilized data from the Food and Drug Administration's monitoring and inspection results on heavy metal content in rice as well as the National Food Consumption Database to conduct risk assessment. The results indicate that the detection rates of cadmium (Cd) and arsenic (As) are the highest in brown rice, at 77% and 98%, respectively. Among the 62 samples, the average detected concentration of Cd is 0.07±0.07 mg/kg, and the average detected concentration of As is 0.12±0.05 mg/kg. After evaluating health risks using the Monte Carlo simulation analysis method, the study findings reveal that both Cd and As levels in brown rice fall within the safe range for human health. Even under the 95th percentile scenario, the exposure to Cd and As from consuming brown rice does not exceed the Reference Dose considered acceptable on a daily basis. This suggests that, under the current government regulatory measures, the health risk associated with Taiwanese people consuming brown rice and being exposed to Cd and As is acceptable.

Keywords: Heavy metals, Brown rice, Food safety risk assessment.

Keng-Wen Lien (Corresponding Author), Assistant Professor, Continuing Education Program of Food Biotechnology Applications, National Taitung University. E-mail: kwlien@nttu.edu.tw

壹、前言

米飯(*Oryza sativa L.*)是臺灣人的主食，提供豐富的能量與營養，支撐著臺灣人的日常生活。隨著年長族群及年輕族群生活型態的改變，臺灣人對稻米的需求也由一開始追求產量的吃飽，到追求更美味的吃巧，再到追求健康的吃營養(陳榮五，2008)。糙米相較於白米，其營養價值顯著較高，除了含有豐富的醣類、脂肪、蛋白質、纖維、維生素B群外，亦含有維生素K、人體必需胺基酸、六磷酸肌醇、γ-胺基丁酸、植酸鈣鎂鹽等營養素，其中米糠醇等成分，具降低血脂、血糖及增強抗氧化酵素等功能，因此糙米長久以來被追求健康的群體當作機能性食品食用(鄧值庸，2010；陳裕星與李誠紘，2023)。

但糙米也可能因含微量潛在性有毒元素(Qian et al., 2010)，而影響人體健康安全，最著名的案例是日本富山縣神通川流域發生的鎘中毒之「痛痛病(Itai-Itai disease)」，起因為礦山排出之廢水中含鎘，流入河川再累積於食米中，民眾食入這些被污染的食品而造成中毒(Woodwell, 1967)，其中毒機制為長期攝食微量之鎘，引起尿細管之損害而妨礙鈣的再吸收，導致骨中鈣質之流失，症狀為骨質軟化(Osteomalacia)及腎功能不正常導致蛋白尿症(Proteinuria)，進而全身多處骨折疼痛不已，最後死亡(Nishijo et al., 2017)。

為避免臺灣人民因食用糙米而攝入過多有毒金屬元素，目前食品藥物管理署對於糙米之衛生規範訂有「食品中污染物質及毒素衛生標準」(砷0.35ppm、鉛0.2ppm、鎘0.4ppm及汞0.05ppm)(衛生福利部，2018)，且自民國91年度迄今持續監控臺灣產食米中重金屬是否符合衛生標準情形(施如佳，2011)。

鑑於公眾對健康意識的提高，為瞭解臺灣人民食用糙米而攝入重金屬之健康風險，本研究目標為評估目前因健康因素選擇食用糙米之人口群體，其重金屬暴露量是否可能對人體造成潛在危害。

貳、文獻探討

一、衛生單位對於食米中重金屬含量研究：

劉純妃等人（1992）曾於民國79至80年間抽驗199件糙米，調查結果顯示鎘之平均濃度為0.043 ppm（未檢出-0.220 ppm），汞平均含量為0.004 ppm（未檢出-0.022 ppm）。此外，食品藥物管理署為瞭解臺灣地區生產之食米(含糙米)中重金屬鎘、汞和鉛等含量，歷年調查結果如下：

(一) 民國93年2月至12月間抽樣共159件（邱雅琦等，2005），檢驗結果如下：
1. 鎘含量總平均值為0.04 ppm（未檢出-0.24 ppm）。
2. 汞含量總平均值為0.002 ppm（未檢出-0.008 ppm）。
3. 鉛含量總平均值為0.03 ppm（未檢出-0.11 ppm）。

(二) 民國94年2月至12月間抽樣共149件（邱雅琪等，2006），檢驗結果如下：
1. 鎘含量總平均值為0.05 ppm（未檢出-0.18 ppm）。
2. 汞含量總平均值為0.003 ppm（未檢出-0.011 ppm）。
3. 鉛含量總平均值為0.03 ppm（未檢出-0.10 ppm）。

(三) 民國98年5月至10月間抽樣共161件（許哲綸等，2010），檢驗結果如下：
1. 鎘含量總平均值為0.04 ppm（未檢出-0.37 ppm）。
2. 汞含量總平均值為0.002 ppm（未檢出~0.01 ppm）。
3. 鉛含量總平均值為0.02 ppm（未檢出~0.16 ppm）。

(四) 民國99年4月至10月間抽樣共計161件（施如佳等，2011），檢驗結果如下：
1. 鎘含量總平均值為0.04 ppm（未檢出-0.18 ppm）。
2. 汞含量總平均值為0.004 ppm（未檢出-0.013 ppm）。
3. 鉛含量總平均值為0.02 ppm（未檢出-0.09 ppm）。

(五) 民國100年4月至10月間抽樣共162件（施如佳等，2012），檢驗結果如下：
1. 鎘含量平均值為0.04 ppm（未檢出-0.27 ppm）。
2. 汞含量平均值為0.003 ppm（未檢出-0.012 ppm）。
3. 鉛含量平均值為0.02 ppm（未檢出-0.11 ppm）。

(六) 民國101年4月至10月間共抽樣160件（施如佳等，2013），檢驗結果如下：
1. 鎘含量平均值為0.04 ppm（未檢出-0.17 ppm）。
2. 汞含量平均值為0.003 ppm（未檢出-0.016 ppm）。
3. 鉛含量平均值為0.02 ppm（未檢出-0.10 ppm）。

(七) 民國102年及103年間共抽樣402件（王炯文等，2015），檢驗結果如下：
1. 鎘含量平均值為0.04 ppm（未檢出-0.27 ppm）。
2. 汞含量平均值為0.002 ppm（未檢出-0.031 ppm）。
3. 鉛含量平均值為0.02 ppm（未檢出-0.14 ppm）。

統計91年至103年間臺灣地區生產之食米中重金屬鎘、汞和鉛之含量總平均值分別為0.04 ppm（未檢出-0.38 ppm）、0.003 ppm（未檢出-0.031 ppm）及0.02 ppm（未檢出-0.29 ppm），與民國79至80間抽驗之199件糙米結果，鎘平均含量為0.043 ppm及汞平均含量為0.004 ppm並無太大差異。

二、臺灣其他有關食米中重金屬含量之研究：

食米中除了重金屬鎘、汞、鉛外，亦含有高濃度的砷，甚至高於其他穀類約10倍(賴思齊等，2018)。米粒中主要的砷物種是三價和五價的無機砷，而無機砷又被世界衛生組織（World Health Organization, WHO）列為人類致癌物，因此探討攝食食米引起砷暴露之健康風險是重要的議題。根據隋昱梅(2011)針對台灣地區稻米中砷物種與鎘濃度分析探討之研究，依據臺灣各地區鄉鎮的蓬萊米產量資料，訂定採樣個數，共收集118個稻米樣本，並以感應耦合電漿質譜儀（Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry, ICP-MS）檢測其中的砷及鎘含量，分析檢測結果為：總砷平均含量為0.17±0.04 mg/kg (0.09-0.37 mg/kg)、平均鎘含量為0.06±0.05 mg/kg (0.01-0.40 mg/kg)。另依賴思齊等人之研究(2018)，砷、鎘、鉛、銅等四種金屬在白米與糙米中的濃度比值分別為0.613、0.713、0.440、0.895。學者黃耀輝(2020)則針對桃園、彰化、台中稻米樣本，分析食米中之砷、鎘與鉛，結果顯示砷之平均含量為0.123±0.048 mg/kg (未檢出-0.344 mg/kg)、鎘之平均含量為0.034±0.0615 mg/kg (未檢出-0.498 mg/kg)、鉛之平均含量為0.0033 ± 0.0072 mg/kg (未檢出-0.0745 mg/kg)，米中砷與鎘之平均含量與隋昱梅(2011)之研究結果相比較低，其中鎘之檢出平均濃度低約56%，但鎘之間出平均濃度與91年至103年間衛生單位之監測結果差異不大。

儘管臺灣衛生主管機關自民國79年以來陸續針對食米(包括糙米)中重金屬鎘、汞、鉛等含量進行調查，近期也有黃耀輝等學者(2020)針對食米進行研究調查，但在食用糙米部分，尚未透過健康風險評估的方法確認臺灣民眾因食用糙米而暴露於重金屬之健康風險。因此，本研究利用食品藥物管理署在臺灣各地實地取樣的糙米樣本所得之糙米中之重金屬濃度資料，結合不同人口群體與膳食特性資料，進行經由攝食糙米暴露於砷、鎘、鉛、汞等重金屬之健康風險評估。我們希望藉此瞭解攝食糙米中重金屬導致健康危害的潛在風險，並且相關研究結果可作為政府管理糙米中重金屬暴露風險的政策參考依據。

參、研究方法

一、糙米重金屬檢測數據

本研究糙米中重金屬檢測數據收集自食品藥物管理署開放數據的「食米中重金屬含量監測檢驗結果資料集」，涵蓋108至112年間之臺灣產糙米的重金屬檢測數據共62筆，檢測項目包括鎘、汞、鉛與砷(衛生福利部食品藥物管理署，2023)，其重金屬分析方法參考衛生福利部食品藥物管理署公告之穀類中重金屬檢驗方法(MOHWH0032.00)進行。

二、臺灣民眾體重與糙米攝取量數據

臺灣民眾體重與米食攝取量資料皆來自於衛生福利部之國家攝食資料庫(衛生福利部食品藥物管理署，2017)。本研究使用該資料庫2017-2020年國民營養調查飲食資料中12至16歲、16至18歲、19至65歲與65歲以上四個群體之糙米攝食量，以及該資料中之四個群體之平均體重，用於後續健康風險評估。

三、健康風險評估：

(一)估計經由攝食糙米途徑暴露重金屬之劑量：根據糙米中重金屬分析濃度與國家攝食資料庫中之攝食量，以公式1 (Ling et al., 2015)，計算各暴露群體經由攝食糙米中重金屬之每日估計攝入量(Estimated Daily Intake, EDI)。

$$EDI_{ij} = \sum_{j=1}^{n} \frac{C_i \times CR_{ij}}{BW_j} \qquad \text{（公式1）}$$

其中，EDI_{ij}為估計暴露族群j每日由食品i攝入化學物質之攝入量(mg/kg bw/day)，C_i (Concentration)為食品i中分析物濃度(mg/kg)，CR_{ij} (Consumption Rate)為暴露族群j攝食食品i之攝食量(g/day)，BW_j (Body Weight)為暴露族群j之體重(kg)。

(二)危害商數(Hazard Quotient, HQ)：對於攝入食品中化學物質所造成非致癌性之健康風險評估，是以危害商數表示，即每日估計攝入量與每日可接受之參考劑量(Reference Dose, RfD)之比值。整合暴露分析與危害特性化步驟中所得結果，以公式2 (Ling et al., 2015)，計算暴露族群攝食糙米中重金屬之非致癌風險。

$$HQ = \sum_{i=1}^{n} \%RfD_{ij} = \sum_{i=1}^{n} \frac{EDI_{ij}}{RfD_p} \times 100\%$$

（公式2）

其中，RfD_p為食品中重金屬之每日可接受參考劑量(mg/kg bw/day)；HQ為EDI與RfD之比值。當HQ大於1時，表示長期暴露該化學物質可能造成暴露族群之健康風險；當HQ小於1時，表示長期暴露該化學物質，對於暴露族群終其一生不會有明顯之不良健康影響。非致癌性風險之參考劑量鎘為0.83 μg /kg body weight per day (Joint Expert Committee on Food Additives (JECFA), 2021)；砷為2.14 μg /kg body weight per day (JECFA, 2011；Lioe et al., 2021)。

（三）機率分析(Probabilistic Analysis)：利用機率分析評估經由攝取糙米途徑暴露於重金屬之健康風險，針對所欲探討群體之體重、糙米攝食量、糙米中金屬濃度等影響因素給定平均值、標準差、最大值和最小值等參數，利用蒙地卡羅模擬法(Monte Carlo Simulation Method)亂數隨機抽樣方法進行100,000次疊代運算，以確保數據具有收斂性與穩定性，應用套裝軟體Crystal Ball® (Version 5.2.2, Decidinerring, Inc, Denver, CO, USA)內建之蒙地卡羅模擬法對數據進行模擬，建立糙米攝食群體暴露重金屬之風險分佈狀況。

肆、結果與討論

一、糙米重金屬檢驗結果

糙米之重金屬檢測數據皆蒐集自食品藥物管理署開放數據「食米中重金屬含量監測檢驗結果資料集」，分析62筆108至112年間之臺灣生產糙米中重金屬檢驗數據，北部區域共有25件樣本，重金屬檢測結果為鎘0.09±0.07 mg/kg、汞皆未檢出、鉛0.0008±0.004 mg/kg及砷0.14±0.05 mg/kg，其檢出率分別為84%、0%、4%與100%。中部區域共14件樣本，重金屬檢測結果為鎘0.05±0.03 mg/kg、汞與鉛皆未檢出、砷0.10±0.06 mg/kg，其檢出率分別為86%、0%、0%與93%。南部區域與東部區域分別為16件與7件樣本，結果詳如**表1**。62件抽驗糙米樣本中，檢驗結果皆未超出臺灣對於糙米訂定之衛生規範「食品中污染物質及毒素衛生標準」(砷0.35 ppm、鉛0.2 ppm、鎘0.4 ppm及汞0.05 ppm)，其中汞皆未檢出、鉛僅檢出1件、鎘則檢出48件、砷檢出61件，鎘與砷之檢出頻率高，爰列為本研究優先關注探討之重金屬。

檢視62件樣本鎘之平均檢出濃度為0.07±0.07 mg/kg (未檢出-0.25 mg/kg)，與民國79至80間抽驗之199件糙米結果，鎘平均濃度為0.043 ppm (劉純妃等，1992)、以及91年至103年間臺灣地區生產之食米中重金屬鎘之平均濃度0.04 ppm (王炯文等，2015)兩者相比，本研究鎘之平均檢出之濃度略高約1.75倍。但鎘與砷之檢驗結果與隋昱梅(2011)之研究結果相近，該研究結果之總砷平均濃度為0.17±0.04 mg/kg (0.09-0.37 mg/kg)、平均鎘濃度為0.06±0.05 mg/kg (0.01-0.40 mg/kg)。若與學者黃耀輝等人(2020)針對桃園、彰化與台中地區食米中重金屬濃度分析結果比較，其鎘濃度為0.034±0.0615 mg/kg，砷濃度則為0.123±0.048 mg/kg，較本研究之結果低。會有不同之檢驗結果差異，與米食中重金屬的分佈與濃度會因米的品種或種植地區有所差異，導致在食米中金屬濃度分佈上並不一定有明顯趨勢(Booth et al., 2008; Meharg et al., 2009)。

二、臺灣民眾米食攝取量與體重分佈

臺灣民眾體重與米食攝取量資料皆來自於衛生福利部之國家攝食資料庫。該調查資料庫具有不同年齡層群體之飲食狀況，其所得之原始數據，經整理為性別、年齡別之不同大小細項類別食物的攝取量資料。本研究使用該資料庫2017-2020年國民營養調查飲食資料中12至16歲、16至18歲、19至65歲與65歲以上四個群體之糙米攝食量，以及該資料中之四個群體之平均體重，呈現如**表2**。以19-65歲群體來看（僅攝食者），平均體重為66.30公斤，平均每日攝食糙米重量（生重）為47.81±50.05公克，攝食量範圍為每日1.13 至 230.10公克。

表1.臺灣產糙米各區檢驗件數、重金屬檢出率與檢出值

區域[1]	檢驗件數	平均檢出值(mg/kg)(檢出率)[2]			
		鎘	汞	鉛	砷
北	25	0.09±0.07(84%)	未檢出(0%)	0.00±0.00(4%)	0.14±0.05(100%)
中	14	0.05±0.03(86%)	未檢出 (0%)	未檢出(0%)	0.10±0.06(93%)
南	16	0.05±0.06(75%)	未檢出(0%)	未檢出(0%)	0.12±0.04(100%)
東	7	0.05±0.09(43%)	未檢出(0%)	未檢出(0%)	0.11±0.09(100%)
合計	62	0.07±0.07(77%)	未檢出(0%)	0.00±0.00(2%)	0.12±0.05(98%)

[1]北部區域：包括臺北市、新北市、基隆市、新竹市、桃園市、新竹縣及宜蘭縣；中部區域：包括臺中市、苗栗縣、彰化縣、南投縣及雲林縣；南部區域：包括高雄市、臺南市、嘉義市、嘉義縣、屏東縣及澎湖縣；東部區域：包括花蓮縣及臺東縣。

[2]檢出率=檢驗項目檢出數/區域檢驗件數。

表2.臺灣不同年齡群體之每日糙米攝食量

年齡層	僅攝食者		
	每日攝食量(g/day)	攝食量範圍(g/day)	體重(kg)
12-16 歲	LN[1] (116.48, 105.20)	2.05-522.00	57.63
16-18 歲	LN (46.58, 44.88)	9.34-178.68	62.66
19-65 歲	LN (47.81, 50.05)	1.13-267.99	66.30
65 歲以上	LN (51.50, 44.03)	0.98-230.10	62.43

[1] LN=log-normal distribution, data are presented as mean±standard deviation.

三、健康風險評估結果

根據糙米中重金屬鎘與砷之濃度分佈，結合臺灣民眾糙米攝食量和體重分佈，應用機率分析(Probabilistic Analysis)方法，透過蒙地卡羅模擬分析法進行10萬次重複抽樣計算，描述臺灣民眾經由攝食糙米食暴露重金屬鎘與砷之分佈情形，計算推估出重金屬鎘與砷之非致癌風險值如**表3**及**表4**，其中鎘之非致癌性風險參考劑量參考JECFA (2021)為0.83 μg /kg body weight per day；砷之非致癌性風險參考劑量則為2.14 μg /kg body weight per day (JECFA, 2011；Lioe et al., 2021)。鎘之非致癌暴露風險，以19-65歲群體為例，第50與第90百分位分別為0.0711與0.1476 (**表3**)。砷之鎘之非致癌暴露風險，以19-65歲群體為例，第50與第90百分位分別為0.0436與0.1145 (**表4**)。綜觀12-16歲、16-18歲、19-65歲與65歲以上四個年齡群體，既使在第90百分位，其危害商數值仍小於1，根據本研究結果，攝食糙米之僅攝食者族群，暴露於重金屬鎘與砷之非致癌風險皆為可接受。

以19-65歲群體為例，攝食糙米暴露於重金屬鎘與砷之非致癌風險分布，如圖1與圖2所示。不論重金屬鎘或砷對於人體健康而言，均介於安全範圍，既使在第95百分位，糙米中重金屬鎘之每日估計攝入量結果僅為17.22%之參考劑量(**圖1**)；重金屬砷第95百分位之每日估計攝入量結果則為14.11%之參考劑量(**圖2**)。參考劑量是參考評估用的安全係數，專門規範有毒物質的可接受或可忍受的量，藉由計算從糙米中所攝取之重金屬砷與鎘之每日估計攝入量和危害商數來進行潛在人體健康風險評估(Potential Human Health Risk Assessment)，如果危害商數數值小於或等於1，即顯示對人體健康沒有危害。

表3.臺灣不同年齡群體攝食糙米之重金屬鎘之危害商數

年齡層	僅攝食者之危害商數				
	P10[1]	P30	P50	P70	P90
12-16 歲	0.0491	0.1217	0.1870	0.2594	0.3755
16-18 歲	0.0180	0.0458	0.0709	0.0990	0.1437
19-65 歲	0.0174	0.0453	0.0711	0.1003	0.1476
65 歲以上	0.0205	0.0497	0.0753	0.1038	0.1489

[1]P=percentile, P10, 10th percentile.

表4.臺灣不同年齡群體攝食糙米之重金屬砷之危害商數

年齡層	僅攝食者之危害商數				
	P10[1]	P30	P50	P70	P90
12-16 歲	0.0232	0.0678	0.1158	0.1781	0.2937
16-18 歲	0.0085	0.0253	0.0437	0.0677	0.1122
19-65 歲	0.0084	0.0250	0.0436	0.0682	0.1145
65 歲以上	0.0096	0.0276	0.0467	0.0712	0.1167

[1]P=percentile, P10, 10th percentile.

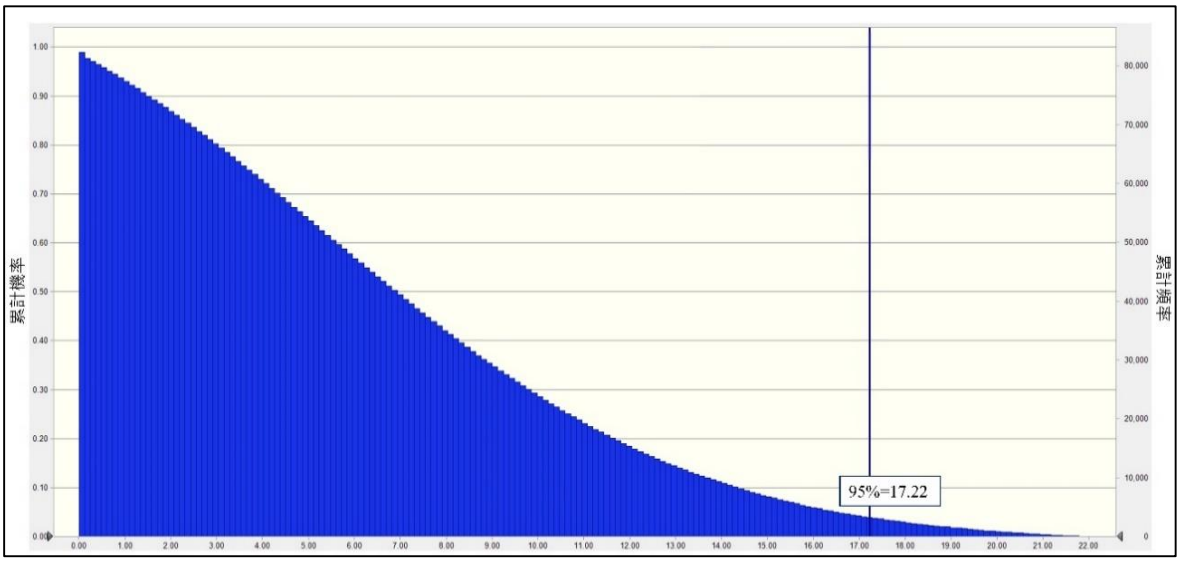

圖1.19-65歲群體攝食糙米暴露於重金屬鎘之非致癌風險分布圖

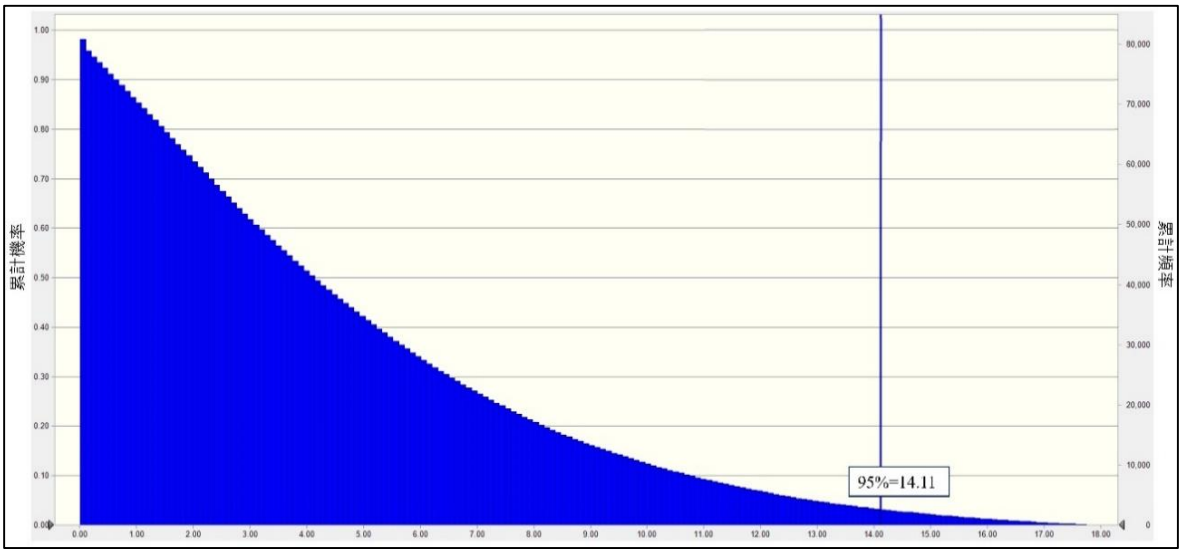

圖2.19-65歲群體攝食糙米暴露於重金屬砷之非致癌風險分布圖

鎘是一種具有廣泛毒性和致癌性的重金屬，也是一種非氧化還原金屬，因此本身無法參與反應，但會透過產生活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS)引起氧化壓力(Garnier et al., 2006)。ROS與脂質、蛋白質、核酸和色素發生反應，導致脂質過氧化、膜損傷和酵素失活，導致毒性作用。即使長期暴露低濃度的鎘也會導致疾病，包括腎功能障礙。此外，在低水平的環境暴露下，鎘也是骨質疏鬆症的一個可能的危險因子(Gallagher et al., 2008)。過去也曾發生過痛痛病(Itai-Itai disease)，導致日本民眾食入這些被污染的食米而造成中毒(Woodwell, 1967)，鎘會引起尿細管之損害而妨礙鈣的再吸收，導致骨中鈣質之流失，症狀為骨質軟化(Osteomalacia)及腎功能不正常導致蛋白尿症(Proteinuria)，進而全身多處骨折疼痛不已，最後死亡(Nishijo et al., 2017)。

Lien等人(2021)曾針對共1,581個臺灣產之食米樣本(包括白米、黑米與糙米等)進行鎘之風險評估，透過蒙特卡羅模擬估計了鎘濃度的分佈、終生平均每日劑量(Life time Average Daily Dose, LADD)和危害指數(Hazard Index, HI)。結果顯示，在一般群體中，19-65歲男性經由食米暴露之鎘，在第50個百分位LADD為0.06 μg/kg body weight per day，在第50、90和95個百分位危害指數(HI)分別為0.16、0.69和1.54。一般群體之鎘危害風險小於1，但在第95百分位之消費者，每日從食米攝取之鎘高於參考劑量(0.36 μg/kg body weight per day)，長期食用受鎘污染的米會對臺灣民眾，特別是敏感族群(即孕婦、兒童、老年人和患者)可能構成潛在的健康風險，建議持續監測米中的鎘污染水平並採取預防措施。但在本研究中，19-65歲群體為例，攝食糙米暴露於重金屬鎘，第95百分位鎘之每日估計攝入量僅為17.22%之參考劑量，即使是高端暴露(High-end exposure)群體，仍介於安全範圍內(**圖1**)。

食米含有高濃度的砷，而無機砷又被世界衛生組織列為人類致癌物，因此探討攝食食米引起砷暴露之健康風險是重要的議題，美國食品藥物管理局(U.S. Food and Drug Administration)曾針對人民攝取米食中無機砷暴露進行健康風險報告，結合美國國民米食攝食量、體重資料，以及攝食米食之生物利用率等資料，推估美國國民終生每日攝食白米中無機砷引起的膀胱癌與肺癌風險值為3.90×10^{-5}。賴思齊(2018)對於食米中砷之研究結果顯示，大部分國家攝食食米的健康風險值超出1×10^{-4}可接受健康

風險值，各國應重視攝食食米無機砷暴露的議題，並對超出可接受健康風險值的情況應採取相關應對改善措施。本研究並未針對致癌性風險進行評估，但依本研究在非致癌風險之結果顯示，重金屬砷即使在高端暴露之第95百分位(**圖2**)，其每日估計攝入量結果為14.11%每日可接受之參考劑量，數值小於1，顯示對人體健康沒有危害。根據隋昱梅(2011)的研究，從臺灣各地區鄉鎮的蓬萊米產量資料收集了118個稻米樣本，並使用感應耦合電漿質譜儀檢測其中的砷及鎘含量。該研究結果顯示，總砷含量為0.17±0.04 mg/kg (0.09-0.37 mg/kg)。各地區稻米中的砷含量並無明顯差異。透過蒙地卡羅模擬，結果顯示99%的臺灣民眾皆未超出世界衛生組織所建議的無機砷每日最大容許攝入量(Maximum Tolerable Daily Intake, MTDI)。

此外，學者黃耀輝等人(2020)利用桃園、彰化、台中等地的稻米樣本進行健康風險評估。共採集367筆樣本，使用感應耦合電漿質譜儀測定銅、砷、鎘及鉛等金屬含量，並結合蒙地卡羅模擬分析法評估健康風險。該研究結果顯示，臺灣民眾經由米食攝取金屬之非致癌風險值最高為砷暴露，第50百分位之危害商數值為0.518 (5%，95%百分位：0.166和1.663)。這表示高端暴露者(第95百分位)可能產生健康風險。然而，在本研究中即使是高端暴露者(第95百分位)，風險仍為可接受。推測該結果可能受到檢驗結果之極端值影響。為降低極端值對整體暴露評估的影響，若以中位數來看，在學者黃耀輝等人(2020)的研究中，第50百分位之危害商數值為0.518，數值小於1，以中位數來看，對人體健康沒有危害風險。

健康風險評估基本上是利用已知的暴露濃度、暴露量、暴露時間，加上性別或年齡等基本人口學資料等參數分佈情形，再運用選定之風險計算模式與相關之致癌斜率或非致癌參考劑量，經高度重複模擬運算後所得到的穩定風險推估值。本研究雖已考慮糙米食中金屬濃度、臺灣民眾體重、不同年齡層糙米食攝取量等因素，但並未考慮其他可能影響健康風險評估值的因素，例如：米食烹煮方式、各品種稻米中金屬分佈歧異…等，這些因素都可能讓評估結果存在不確定性。

伍、結論

依據食品藥物管理署的檢驗數據顯示，過去對於臺灣地區生產的糙米中重金屬含量的監測未曾超出衛生標準。然而，為了更全面地瞭解食用糙米中重金屬對健康之影響，本研究利用Crystal Ball進行蒙地卡羅分析，重金屬濃度參考衛生福利部食品藥物管理署公布之「食米中重金屬含量監測檢驗結果資料集」，糙米每日攝食量是基於衛生福利部之國家攝食資料庫，而受試者的體重則來自於國家攝食資料庫中之國民營養健康變遷調查數值，這些數據均來自官方。透過機率分析與健康風險評估，大部分臺灣民眾經由食用糙米暴露於鎘與砷之風險在可接受範圍內。因此，建議政府持續維持現行管制標準，以有效管控糙米中重金屬鎘與砷之暴露風險。同時，仍應鼓勵民眾進行多元飲食，以降低從特定食物來源攝取過量重金屬的風險。

致謝

感謝衛生福利部食品藥物管理署開放「食米中重金屬含量監測檢驗結果資料集」與建構「國家攝食資料庫」，使本研究得以順利進行。

引用文獻

一、中文部分

王炯文、翁慧婷、傅淑英、廖小瑤、黃文正、吳明美、黃小文、王德原、馮潤蘭(2015)。102年度及103年度食米重金屬(鎘、汞、鉛)含量調查。食品藥物研究年報，59-66。

邱雅琦、張美華、施如佳、陳石松、高雅敏、周秀冠、鄭守訓、鄭秋真、周薰修(2006)。食米中重金屬(鎘、汞、鉛)含量之調查。藥物食品檢驗局調查研究年報，274-289。

邱雅琦、張美華、施如佳、陳石松、高雅敏、陳泰華、鄭守訓、鄭秋真、周薰修(2005)。食米中重金屬(鎘、汞、鉛)含量之調查。藥物食品檢驗局調查研究年報，198-215。

施如佳、林麗美、許惠美、傅淑英、周秀冠、鄭守訓、徐錦豐、黃明坤、潘志寬(2011)。食米中重金屬(鎘、汞、鉛)含量調查。*食品藥物研究年報*，154-163。DOI:10.6945/ARFDR.201112.0156

施如佳、張相儀、傅淑英、林麗美、許惠美、黃明坤、周秀冠、徐錦豐、潘志寬(2012)。食米中重金屬(鎘、汞、鉛)含量調查。食品藥物研究年報，54-61。

施如佳、張相儀、傅淑英、廖小瑤、黃文正、黃明坤、周秀冠、徐錦豐、潘志寬(2013)。101年度食米中重金屬(鎘、汞、鉛)含量調查。食品藥物研究年報，61-69。

許哲綸、高雅敏、許惠美、蔡永盛、賴麗紅、林國平、周秀冠、鄭守訓、徐錦豐、施養志(2010)。食米中重金屬(鎘、汞、鉛)含量調查。食品藥物研究年報，12-22。

陳裕星、李誠紘(2023)。米食與健康之研究。臺中區農業改良場特刊，第148號，79-94。

陳榮五(2008)。新鮮發芽糙米食譜。臺中區農業改良場特刊，第89號，2-3。

隋昱梅(2011)。台灣地區稻米中砷物種與鎘濃度分析探討(碩士論文)。臺北市：國立臺灣大學。

黃耀輝、范致豪、顏筠庭、周宜蓁、賴思齊(2020)。攝食米食之砷、鎘、鉛、銅暴露健康風險評估－以桃園、彰化、台中稻米樣本為例。台灣公共衛生雜誌，39(2)，170-186。DOI:10.6288/TJPH.202004_39(2).108114.108114)

劉純妃、白美娟、林小華、沈孜徽、鄭秋真、李樹其、劉安妮、張發(1992)。糙米中重金屬（鎘、汞）含量之調查。藥物食品檢驗局調查研究年報，47-54。

衛生福利部(2018)。食品中污染物質及毒素衛生標準。107年5月8日衛授食字第1071300778號令。衛生福利部。https://www.mohw.gov.tw/dl-45520-66436ff6-3d0b-46fe-a65a-a889a2305cdb.html

衛生福利部食品藥物管理署(2023)。食品中重金屬含量監測結果。衛生福利部食品藥物管理署。https://www.fda.gov.tw/TC/site.aspx?sid=1825&r=1062100245

衛生福利部食品藥物管理署(2023)。國家攝食資料庫：112年度Consumer-only食物品項攝食量計算結果。衛生福利部食品藥物管理署。https://tnfcds.nhri.edu.tw/index.php?action=news_detail&cid=1&id=17

鄧值庸(2010)。稻米品質與營養。臺中區農業專訊，111，11-17。

賴思齊(2018)。主要食米國家人口食用食米之砷暴露健康風險探討(碩士論文)。臺北市：國立臺灣大學。

二、外文部分

Booth, B. (2008). Arsenic speciation varies with type of rice. *Environmental Science & Technology*, 42, 3484-3485. DOI:10.1021/es087107n

Gallagher, C. M., Kovach, J. S., & Meliker, J. R. (2008). Urinary cadmium and osteoporosis in U.S. women ≥ 50 years of age: NHANES 1988-1994 and 1999-2004. *Environmental Health Perspectives*, 116, 1338-1343. DOI:10.1289/ehp.11452

Garnier, L., Simon-Plas, F., Thuleau, P., Agnel, J. P., Blein, J. P., Ranjeva, R., & Montillet, J. L. (2006). Cadmium affects tobacco cells by a series of three waves of reactive oxygen species that contribute to cytotoxicity. *Plant, Cell & Environment*, 29, 1956-1969. DOI:10.1111/j.1365-3040.2006.01571.x

Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA) Seventy-seventh Meeting World Health Organization, Geneva (2021) https://apps.who.int/food-additives-contaminants-jecfa-database/Home/Chemical/1376

Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA) Seventy-third Meeting World Health Organization, Geneva (2011)

Lien, K. W., Pan, M. H., & Ling, M. P. (2021). Levels of heavy metal cadmium in rice (*Oryza sativa* L.) produced in Taiwan and probabilistic risk assessment for the Taiwanese population. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28(22), 28381-28390. DOI:10.1007/s11356-020-11902-w

Ling, M. P., Lien, K. W., Wu, C. H., Ni, S. P., Huang, H. Y., & Hsieh, D. P. (2015). Dietary exposure estimates for the food preservatives benzoic acid and sorbic acid in the total diet in Taiwan. *Journal of agricultural and food chemistry*, 63(7), 2074-2082.

Lioe, H. N., Giriwono, P. E., & Fardiaz, D. (2021). Total arsenic in complementary food and its exposure assessment for children aged 6-24 months. *Food Control*, 122, 107786.

Meharg, A. A., Williams, P. N., Adomako, E., Lawgali, Y. Y., Deacon, C., Villada, A., Cambell, R.C., Sun, G., Zhu, Y. G., Feldmann, J., Raa, b. A., Zha,o F. J., Islam, R., Hossain, S., Yanai, J. (2009). Geographical variation in total and inorganic arsenic content of polished (white) rice. *Environmental Science & Technology*, 43(5), 1612-1617. DOI:10.1021/es802612a

Nishijo, M., Nakagawa, H., Suwazono, Y., Nogawa, K., & Kido, T. (2017). Causes of death in patients with Itai-itai disease suffering from severe chronic cadmium poisoning: A nested case-control analysis of a follow-up study in Japan. *BMJ Open*, 7(7), e015694.

Qian, Y., Chen, C., Zhang, Q., Li, Y., Chen, Z., & Li, M. (2010). Concentrations of cadmium, lead, mercury, and arsenic in Chinese market milled rice and associated population health risk. *Food Control*, 21, 1757-1763.

U.S. Food and Drug Administration (USFDA). (2016). Arsenic in rice and rice products risk assessment report. Retrieved from https://www.fda.gov/food/science-research-food/cfsan-risk-safety-assessments

Woodwell, G. M. (1967). Toxic substances and ecological cycles. *Scientific American*, 216(3), 24-31.