探討我國現行二氧化碳室內空氣
品質標準之風險合理性

吳 勇 興\*

摘　要

室內空氣品質攸關民眾健康及工作品質與效率，根據我國環境保護署（以下簡稱環保署）室內空氣品質資訊網所公開的資訊，我國民眾每人每天約有80～90% 的時間處於室內環境中（包含住家、辦公室或其他建築物內），因此室內空氣污染物對人體健康之影響應當受到重視。環保署（2012）公告之「室內空氣品質標準」二氧化碳為1,000 ppm（8小時值），而勞動部（2010）公告之「勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準」中，二氧化碳則為5,000 ppm（8小時值）（煤礦坑內10,000 ppm），二者差異高達5倍。本研究採用健康風險評估方法，比較二項不同法規標準之人體健康風險意涵，以探討國內二氧化碳法規標準之適切性。

藉由人體健康風險評估結果顯示煤礦坑工作環境二氧化碳容許濃度10,000 ppm（8小時值），對於煤礦坑工作者之非致癌風險危害商數（HQ）為1.96，高於可接受值1，建議此工作環境應搭配執行適當之風險管理措施，以避免對工作者產生健康危害。此外，二氧化碳室內空氣品質標準1,000 ppm（8小時值），對於住宅區孩童之非致癌風險危害商數（HQ）為2.38，高於可接受值1，建議應保持孩童居住室內通風良好，讓二氧化碳降低至420 ppm（24小時值）以下，以避免影響住宅區孩童健康。考量環保署現行「室內空氣品質標準」所規範之受體情境相當多元，建議未來可依不同受體情境訂定不同標準，以保障敏感受體之健康。

關鍵字：室內空氣品質標準、勞工作業環境空氣容許濃度、人體健康風險評估

一、前 言

室內空氣品質攸關民眾健康及工作品質與效率，根據我國環境保護署（以下簡稱環保署）室內空氣品質資訊網所公開的資訊，我國民眾每人每天約有80～90% 的時間處於室內環境中（包含住家、辦公室或其他建築物內），因此室內空氣污染物對人體健康之影響應當受到重視（環保署，2013）。

\* 中興工程顧問社環境工程研究中心正研究員

我國環保署於2011年11月23日首次公告「室內空氣品質管理法」，隔年依該法第七條第二項規定訂定公告了9項「室內空氣品質標準」，包含：二氧化碳（CO2）、一氧化碳（CO）、甲醛（HCHO）、總揮發性有機化合物（TVOC）、細菌（Bacteria）、真菌（Fungi）、粒徑小於等於10 µm之懸浮微粒（PM10）、粒徑小於等於2.5 µm之懸浮微粒（PM2.5）及臭氧（O3）（環保署，2011a、2012）。

相對於環保署的室內空氣品質標準，我國勞動部於1995年6月30日，即已依「勞工安全衛生法」第五條規定，訂定公告「勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準」（未成立勞動部之前，更早係由內政部於1974年8月7日首次公告「勞工作業環境中有害物質容許濃度標準」），目前最新（2010年1月26日）公告項目包含「空氣中有害物容許濃度標準」487項及「空氣中粉塵容許濃度」4項（勞動部，2010）。

環保署（2012）公告之「室內空氣品質標準」二氧化碳項目為1,000 ppm，而勞動部（2010）公告之「勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準」中，二氧化碳項目則為5,000 ppm（8小時值）（煤礦坑內10,000 ppm），二者差異高達5倍，值得深入探討此差異之合理性。因此，本研究採用人體健康風險評估方法，比較此二項法規標準之人體健康風險差異，以探討國內二氧化碳相關空氣法規標準之適切性。

二、研究方法

1972年美國國家工程學院（National Academy of Engineering, NAE）與國家科學院（National Academy of Sciences, NAS）聯合舉行人體健康風險評估研討會，並由共同隸屬之美國國家研究院（National Research Council, NRC）出版了相關系列報告，最後於1983年出版「聯邦政府風險評估之管理程序」（Risk Assessment in Federal Government: Managing the Process）紅皮書，正式提出以危害鑑定（Hazard Identification）、劑量/反應評估（Dose-Response Assessment）、暴露評估（Exposure Assessment）與風險特徵描述（Risk Characterization）四大程序為主軸之風險評估架構（NRC, 1983；環保署，2014）。NRC（1983）為美國聯邦政府建構了一套先以風險評估結果作為科學基礎，再參考社會及經濟等評估，研擬法規標準的風險管理決策程序（如圖1所示），此風險基準搭配社經考量之立法精神成為世界各國爭相效法之典範，為法規標準修訂的理性討論，提供了絕佳的溝通平台。



參考資料：NRC（1983）

圖1 美國聯邦政府法規標準風險管理決策程序

USEPA（1996）曾提出完整的土壤法規標準風險評估方法，研訂全國性土壤篩選基準（Soil Screening Level），此作法採用人體健康風險值作為法規標準之風險管理目標，再據以推估訂定污染物濃度限值，符合前述風險評估紅皮書（NRC, 1983）所述以風險評估作為污染物法規標準科學基礎之精神。

本研究依據前述風險評估四大程序及污染物法規標準訂定精神，探討我國二氧化碳室內空氣品質標準之合理性。

三、風險評估結果與討論

（一）危害鑑定

本研究關切污染物為二氧化碳（Carbon Dioxide, CO2）。二氧化碳是自然界存在的空氣組成之一，在常溫、常壓下為無色、無臭、不助燃、不可燃的氣體，由生物呼吸作用或有機物化學氧化反應所產生。因為二氧化碳比空氣重，所以容易蓄積於低窪處，大氣中二氧化碳的含量一般大約落於0.03～0.04%（300～400 ppm）之間。室內二氧化碳可能因人員密度過高、室內換氣效率不佳或有燃燒排放造成濃度升高，一般辦公室之二氧化碳來源多由室內工作人員呼吸作用所產生。

根據二氧化碳物質安全資料表（Material Safety Data Sheet, MSDS）（CAS NO.：124-38-9）之毒理資料，其中並未記載二氧化碳之半致死濃度（50% Lethal Concentration, LC50）、半致效應濃度（50% Effective Concentration, EC50）及生物濃縮因子（Bio-Concentration Factor, BCF）等生物毒性與生物蓄積性相關危害性資訊。惟該資料顯示吸入急毒性為低濃度（3～5莫耳分率）二氧化碳時可能引起頭痛，當吸入濃度達8～15莫耳百分率尚會引起噁心及嘔吐，若未即時補充新鮮空氣，可能導致意識喪失，而且二氧化碳是很強的腦血管擴張劑，大量吸入高濃度將可能造成循環衰竭而昏迷致死。此外，二氧化碳MSDS中亦標示，懷孕10天之雌鼠，在吸入量6 pph（相當於45.4 g/min）暴露24小時後，出現了胚胎發育不正常效應。不過，在慢毒性方面，該資料記載反覆吸入低濃度二氧化碳，尚無有害的報導（勞動部勞動及職業安全衛生研究所，2009）。

本研究根據我國環保署2011年公告之「健康風險評估技術規範」及2014年公告之「土壤及地下水污染場址健康風險評估方法」對風險評估所需毒理資料庫援引之建議，搜尋美國環保署（USEPA）的綜合風險資訊系統（Integrated Risk Information System, IRIS）、世界衛生組織（WHO）的簡明國際化學評估文件（Concise International Chemical Assessment Document, CICAD）與環境衛生準則（Environmental Health Criteria, EHC）、美國環保署（USEPA）的暫行毒性因子（Provisional Peer Reviewed Toxicity Values, PPRTVs）、美國毒性物質與疾病登錄署（Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR）的最小風險濃度（Minimal Risk Levels, MRLs）、美國環保署（USEPA）的健康效應預警摘要表格（Health Effects Assessment Summary Tables, HEAST）及美國加州環保署（Cal/EPA）環境健康危害辦公室（Office of Environmental Health Hazard Assessment, OEHHA）所建立之毒性規範資料庫（Toxicity Criteria Database），目前尚無二氧化碳之相關人體健康毒性資料（環保署，2011b；環保署，2014）。

USEPA於2005年針對有害廢棄物燃燒設備提出人體健康風險評估規範（Human Health Risk Assessment Protocol, HHRAP）指引，根據該指引之建議，當查詢國際上具權威性之主要毒理資料庫未獲得關切污染物之毒性因子時，可進一步查詢美國政府工業衛生學家會議（American Conference of Industrial Hygienists, ACGIH）公告之污染物閾限值（Threshold Limit Value, TLV）作為空氣污染物人體健康風險評估之依據。本研究搜尋ACGIH之相關毒性資料，查得二氧化碳之TLV為5,000 ppm（8小時值），表示當工作場所中，二氧化碳濃度超過此值，對工作者可能產生非致癌毒性效應（CCOHS, 2013）。

（二）劑量/反應評估

根據美國政府工業衛生學家會議（ACGIH）所公告之閾限值（TLV），掌握工作場所8小時平均之可接受二氧化碳濃度限值為5,000 ppm（CCOHS, 2013）。

本研究考量我國本土性暴露參數之差異，根據前述美國工作場所二氧化碳閾限值（TLV）資料，推估二氧化碳之非致癌吸入途徑參考劑量（RfDinh）。

首先針對二氧化碳體積濃度單位閾限值（TLVv）（5,000 ppm）進行單位換算，而得重量濃度單位閾限值（TLVw）（9,000 mg/m3），其詳細計算方式如下：

莫耳體積（v） = R×T / P （1）

 = 24.45 L/mol

其中

氣體常數（R） = 0.082 atm-L/mol/K

溫度（T） = 25 oC（常溫）

 = 298.15 K

壓力（P） = 1 atm（常壓）

閾限值（TLVw） = TLVv×CF×MW / v （2）

 = 9,000 mg/m3

其中

閾限值（TLVv） = 5,000 ppm

單位換算因子（CF） = 1E-03（L/m3）/ppm

分子量（MW） = 44 g/mol

 = 4.4E+04 mg/mol

根據美國工作者暴露情境之暴露參數（USEPA, 2002）及前述美國工作場址二氧化碳閾限值（TLVw），反推獲得二氧化碳吸入毒性參考劑量（RfDinh）為587 mg/kg-d，其詳細推估方式如下：

參考劑量（RfDinh） = （TLVw×IRinh×ED×EF×

 EVd）/（AT×BW） （3）

 = 587 mg/kg-d（以美國工作

 者暴露情境反推）

其中

閾限值（TLVv） = 9,000 mg/m3

呼吸速率（IRinh） = 20 m3/d（以美國工作者為基準）

暴露期間（ED） = 25 yr（以美國工作者為基準）

暴露頻率（EF） = 250 d/yr（以美國工作者為基準）

工作時間（EVd） = 8 hr/d（以美國工作者為基準）

 = 0.33 d/d

平均時間（AT） = ED×365（d/yr）

 = 9,125 d

體重（BW） = 70 kg（以美國工作者為基準）

（三）暴露評估

1. 暴露途徑及受體類型判定

本研究所探討之標的為二氧化碳室內空氣品質標準，其暴露途徑為人體吸入空氣中所含二氧化碳污染物。考量住宅區居民與工商業區工作者之暴露參數差異甚大，而且住宅區內成人與孩童之參數也明顯不同，因此設定可能的受體包含工商業區的工作者，還有住宅區的成人及孩童。

2. 暴露濃度限值推估

為能針對不同受體評估室內空氣中二氧化碳濃度可能產生之健康風險，本研究採用本土化的受體暴露參數（環保署，2014），針對住宅區的成人及孩童以及工商業區內的工作者三種受體，分別推估其所處空氣環境不會產生健康風險之二氧化碳暴露濃度限值（SLair,w）為2,200、750及9,200 ppm。此推估結果係參考USEPA（1996）對於土壤污染篩選值推估之建議作法，將各濃度限值均取2位有效數字，其詳細推估過程及採用之風險評估受體暴露參數如下：

濃度限值（SLair,w）= RfDinh / [（IRinh×ED×EF×

 EVd）/（AT×BW）] （4）

= 2,200 mg/m3（住宅區成人）

= 750 mg/m3（住宅區孩童）

= 9,200 mg/m3（工商業區工作者）

其中

參考劑量（RfDinh）= 587 mg/kg-d

呼吸速率（IRinh）= 17.14 m3/d（住宅區成人）

 = 13.95 m3/d（住宅區孩童）

 = 17.14 m3/d（工商業區工作者）

暴露期間（ED） = 24 yr（住宅區成人）

 = 6 yr（住宅區孩童）

 = 25 yr（工商業區工作者）

暴露頻率（EF） = 350 d/yr（住宅區成人）

 = 350 d/yr（住宅區孩童）

 = 250 d/yr（工商業區工作者）

工作時間（EVd） = 24 hr/d（住宅區成人）

 = 24 hr/d（住宅區孩童）

 = 8 hr/d（工商業區工作者）

 = 1 d/d（住宅區成人）

 = 1 d/d（住宅區孩童）

 = 0.33 d/d（工商業區工作者）

平均時間（AT） = ED×365（d/yr）

 = 8,760 d（住宅區成人）

 = 2,190 d（住宅區孩童）

 = 9,125 d（工商業區工作者）

體重（BW） = 61.67 kg（住宅區成人）

 = 17 kg（住宅區孩童）

 = 61.67 kg（工商業區工作者）

此外，亦可將前述推估之住宅區成人及孩童與工商業區工作者三種不同受體的二氧化碳重量濃度單位濃度限值（SLair,w），透過單位換算轉換為常見的體積百萬分一（ppm）濃度單位，分別為1,200、420及5,100 ppm。此推估結果參考USEPA（1996）推估土壤污染篩選基準之建議作法，各濃度限值均取2位有效數字，其詳細換算過程如下：

濃度限值（SLair,v）= SLair,w×v /（MW×CF） （5）

 = 1,200 ppm（住宅區成人）

 = 420 ppm（住宅區孩童）

 = 5,100 ppm（工商業區工作者）

其中

濃度限值（SLair,w） = 2,200 mg/m3（住宅區成人）

 = 750 mg/m3（住宅區孩童）

 = 9,200 mg/m3（工商業區工作者）

莫耳體積（v） = 24.44 L/mol

分子量（MW） = 4.4E+04 mg/mol

單位換算因子（CF）= 1E-03（L/m3）/ppm

（四）風險特徵描述

1. 勞動部「勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準」

如表1所示，我國勞動部（2010）公告之「勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準」二氧化碳項目為5,000 ppm（8小時值）（煤礦坑內10,000 ppm），該法規所保護之受體為工商業區之工作者。本研究所推估之工商業區工作者二氧化碳風險基準濃度限值為5,100 ppm（8小時值），以此作為標竿（Benchmark）濃度，採用篩選性風險評估（Screening Risk Assessment）的作法，可推估我國勞工作業環境空氣中二氧化碳容許濃度標準之非致癌風險危害商數（HQ）為0.98（煤礦坑內HQ為1.96）。此風險推估結果顯示煤礦坑所處工作環境即使符合現行二氧化碳容許濃度標準，仍對工作者具有顯著健康風險危害，因此煤礦坑內工作環境應搭配適當之風險管理措施（例如：避免長時間處於煤礦坑工作環境，定時變更工作場所，以降低二氧化碳暴露量，並於工作場所內設置空氣呼吸器，作為備用急救器材），以避免對工作者產生健康危害。

2. 環保署「室內空氣品質標準」

如表1所示，環保署（2012）公告之「室內空氣品質標準」二氧化碳項目為1,000 ppm（8小時值），該法規所規範之場所相當廣泛，幾乎包括所有的公共場所、學校及辦公室等場所，雖然其中未包含住家場所，但是考量其涵蓋面甚廣，不易界定敏感受體及其暴露參數，本研究保守判定其受體為住宅區成人及孩童。根據前述人體健康風險推估結果，住宅區成人及孩童二氧化碳風險基準濃度限值分別為1,200及420 ppm（24小時值），以此作為標竿（Benchmark）濃度，採用篩選性風險評估（Screening Risk Assessment）的作法，針對住宅區成人及孩童而言，可推估我國二氧化碳室內空氣品質標準之非致癌風險危害商數（HQ）分別為0.83 及 2.38。此風險推估結果顯示住宅區居家環境即使符合現行二氧化碳室內空氣品質標準，仍對孩童具有顯著健康風險危害，建議應執行適當之風險管理措施（例如：加裝通風設備，保持室內通風良好，以降低二氧化碳暴露量），以避免對住宅區孩童產生健康危害。

3. 不確定性分析

本研究所進行之二氧化碳室內空氣品質健康風險評估結果，其主要不確定性來自於二氧化碳之參考劑量係根據ACGIH所公告之二氧化碳TLV值所推估，而非如一般污染物通常直接引用國際權威毒理資料庫（如USEPA之IRIS）所公告之毒性因子，因此，在使用上仍須密切關注各大國際權威毒理資料庫所公告之最新資訊。

此外，根據表2所彙整之國外二氧化碳相關室內空氣品質標準，以美國冷凍空調學會（American Society of Heating, Refrigerating, and Air Condition Engineers，以下簡稱ASHRAE）所訂定之二氧化碳標準（700 ppm）最低。此世界最低標準值遠高於本研究所推估之住宅區孩童風險基準濃度限值（420 ppm），而且後者僅略高於一般室外二氧化碳背景濃度介於300～400 ppm，顯見仍需針對二氧化碳毒性參數進行深入研究，以提高二氧化碳室內空氣品質風險評估結果之可靠性。

表1 二氧化碳法規標準及風險基準濃度限值推估結果彙整

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| CO2濃度（ppm） | 說 明 | 資料來源 |
| 420（24-hr） | 住宅區孩童風險基準濃度限值 | 本研究 |
| 1,000（8-hr） | 我國室內空氣品質標準 | 環保署（2012） |
| 1,200（24-hr） | 住宅區成人風險基準濃度限值 | 本研究 |
| 5,000（8-hr） | 勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準（一般作業環境） | 勞動部（2010） |
| 5,100（8-hr） | 工商業區工作者風險基準濃度限值 | 本研究 |
| 10,000（8-hr） | 勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準（煤礦坑） | 勞動部（2010） |

表2 國外二氧化碳相關室內空氣品質標準

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 國家 | CO2濃度（ppm）（8小時值） | 標準或資料來源 |
| WHO | 920 | 空氣品質指引 |
| 美國 | 700 | ASHRAE 62R |
| 加拿大 | 3,500 | 住宅室內空氣品質指引 |
| 日本 | 3,500 | HASS 102 |
| 新加坡 | 1,000（8-hr） | 辦公室空氣品質規範 |
| 南韓 | 1,000 | 蘇等人（1999） |
| 瑞典 | 1,000 | 蘇等人（1999） |
| 英國 | 5,000（8-hr） | 蘇等人（1999） |

（資料來源：謝梃蘊，2003）

四、結論與建議

本研究針對我國二氧化碳室內空氣品質標準之合理性進行探討，獲致下列結論與建議：

1. 採用健康風險評估方法探討我國勞動部（2010）公告之「勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準」二氧化碳標準之合理性，結果顯示煤礦坑工作環境二氧化碳容許濃度10,000 ppm（8小時值），對於煤礦坑工作者之非致癌風險危害商數（HQ）為1.96，高於可接受值1，建議此工作環境應搭配執行適當之風險管理措施（例如：避免長時間處於煤礦坑工作環境，定時變更工作場所，以降低二氧化碳暴露量，並於工作場所內設置空氣呼吸器，作為備用急救器材），以避免對工作者產生健康危害。

2. 針對我國環保署（2012）公告之二氧化碳「室內空氣品質標準」之合理性，本研究採用健康風險評估方法進行探討，結果顯示目前二氧化碳室內空氣品質標準1,000 ppm（8小時值），對於住宅區孩童之非致癌風險危害商數（HQ）為2.38，高於可接受值1，建議應保持孩童居住室內通風良好，讓二氧化碳降低至420 ppm（24小時值）以下，以避免影響孩童健康。

3. 針對環保署（2012）「室內空氣品質標準」合理性之探討，由於涉及受體情境相當多元，本研究採用住宅區成人及孩童情境分別進行評估，二者風險差異將近3倍，建議未來可依不同受體情境訂定「室內空氣品質標準」，以保障敏感受體之健康。

4. 本研究所推估之二氧化碳室內空氣品質健康風險評估結果，其主要不確定性缺乏國際權威毒理資料庫（如USEPA之IRIS）所公告之二氧化碳毒性因子，建議未來仍需針對二氧化碳毒性參數進行深入研究，以提高風險評估結果之可靠性。

參考文獻

行政院勞動部（2010）勞工作業環境空氣中有害物容許濃度標準，2010年1月，取自：http://law.moj.gov.tw/ LawClass/LawAll.aspx?PCode=N0060004

行政院環境保護署（2011a）室內空氣品質管理法，2011年11月，取自：[http://ivy5.epa.gov.tw/epalaw/docfile/ 200010](http://ivy5.epa.gov.tw/epalaw/%20docfile/200010).pdf

行政院環境保護署（2011b）健康風險評估技術規範，2011年7月，取自：[http://ivy5.epa.gov.tw/epalaw/doc file/033310](http://ivy5.epa.gov.tw/epalaw/%20docfile/033310).pdf

行政院環境保護署（2012）室內空氣品質標準，2012年11月，取自：[http://law.moj.gov.tw/LawClass/ LawAll. aspx? PCode](http://law.moj.gov.tw/LawClass/%20LawAll.%20aspx?%20PCode)= O0130005

行政院環境保護署（2013）室內空氣品質資訊網，取自：http://iaq.epa.gov.tw/indoorair/

行政院環境保護署（2014）土壤及地下水污染場址健康風險評估方法，2014年7月，取自：http://w3.epa.gov. tw/epalaw/search/LnameTypeList.aspx?ltype=14&lkind=3

行政院勞動部勞動及職業安全衛生研究所（2009）物質安全資料表，序號193，取自：<http://www.iosh.gov.tw/> wSite/userfiles/file/database/material\_safety/msds0193.pdf

謝梃蘊（2003）考慮健康風險評估之室內空氣品質指標之研擬，碩士論文，國立臺北科技大學

蘇慧貞、江哲銘、李俊璋（2000）空調系統之使用對商業區辦公大樓空氣品質之影響研究，國科會/環保署科技合作研究計畫

CCOHS（2013）Canadian Centre for Occupational Health and Safety（CCOHS）Website – Carbon Dioxide, Available: http://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/chem \_profiles/carbon\_dioxide.html

NRC（1983）Risk Assessment in Federal Government：Managing the Process, National Research Council

USEPA（1996）Soil Screening Guidance: User’s Guide, EPA-540-R-96-018, U.S. Environmental Protection Agency, Available: [http://www.epa.gov/superfund/health/conmedia /soil/pdfs/](http://www.epa.gov/superfund/health/conmedia/soil/pdfs/)ssg496.pdf

USEPA（2002）Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites, OSWER 9355.4-24, U.S. Environmental Protection Agency, Available: [http:// www.epa.gov/superfund/health/conmedia/soil/pdfs/ssg\_main.pdf](http://www.epa.gov/superfund/health/conmedia/soil/pdfs/ssg_main.pdf)

USEPA（2005）Human Health Risk Assessment Protocol（HHRAP）for Hazardous Waste Combustion Facilities, EPA530-R-05-006, U.S. Environmental Protection Agency, Available: [http://www.epa.gov/osw/hazard/tsd/td/combust/](http://www.epa.gov/osw/hazard/%20tsd/td/combust/) risk.htm