




奪命空氣： 化石燃料的代價

**TOXIC AIR:
THE PRICE OF FOSSIL FUELS**

February 2020

GREENPEACE



作者群:

Aidan Farrow, Kathryn A Miller 和
Lauri Myllyvirta

協力者:

Erin Newport 和 Minwoo Son

特別感謝:

能源與潔淨空氣研究中心
(Centre for Research on Energy
and Clean Air, CREA)

設計:

Lauren Austin

出版:

綠色和平東南亞辦公室
(綠色和平臺北辦公室翻譯)

文獻引用建議:

Farrow, A., Miller, K.A. & Myllyvirta, L.
Toxic air: The price of fossil fuels.
Seoul: Greenpeace Southeast Asia.
44 pp. February 2020.

Cover image: Air Pollution Protest
in Bangkok ©Wason Wanichakorn/Greenpeace

印尼加帕拉 (Jebara) 的牧羊人望著一旁的燃煤電廠。
©Kemal Jufri/Greenpeace

目錄

執行摘要	04
1.0 緒論	05
1.1 空氣污染：概要總覽	05
1.1.1 關鍵空氣污染物有哪些？	05
1.1.2 空氣污染來源有哪些？	07
1.2 燃燒化石燃料而來的空氣污染	07
1.3 空氣污染、健康與成本	08
1.4 空氣污染與氣候	08
2.0 燃燒化石燃料的空氣污染之經濟成本	09
2.1 緒論	09
2.2 健康影響與成本	11
2.2.1 健康	11
2.2.2 經濟成本	13
2.3 空氣污染成本的區域案例	15
2.3.1 健康	15
2.3.2 經濟成本	21
3.0 針對人為空氣污染，可以做些什麼？	24
3.1 案例一：永續交通轉型	24
3.2 案例二：再生能源發電取代化石燃料	26
4.0 結論	
4.1 成本	28
4.2 交通	28
4.3 能源	28
詞彙表	29
附錄1：研究方法	31
附錄2：成本與死亡數據之摘要	34



香港「我要乾淨空氣」行動。
©Patrick Cho/Greenpeace



印尼萬丹的蘇拉雅煤電廠 (Suralaya coal power plant)
©Ulet Ifansasti/Greenpeace

執行摘要

本報告揭露來自化石燃料所造成的空氣污染之成本，並著重探討足以保護民眾健康與保障社區利益的解決方案。報告指出，因為燃燒化石燃料而導致的空氣污染，每年在全球造成約450萬起的過早死亡（premature death）案例。空氣污染增加慢性疾病與急性疾病的發病機率，並且造成每年數以百萬計人次就醫，以及數十億的工作缺勤，也對全球的經濟與環境帶來傷害。

史無前例地，綠色和平東南亞分部以及「能源與潔淨空氣研究中心」（Center for Research on Energy and Clean Air, CREA）將來自全球化石燃料的空氣污染之成本予以量化，發現此數字已經達到約每天80億美元的程度，約等於全球GDP的3.3%。燃煤、燃油以及汽車企業持續推廣過時科技，人們的健康與社會正付出代價。

空氣污染的經濟成本反映污染濃度和規模、人口數量，以及健康照顧的普及度與成本。研究發現，中國大陸、美國以及印度承擔全球最高的化石燃料空氣污染成本，分別高達約每年9000億、6000億與1500億美元。

根據估算，每年有770萬起與氣喘症狀相關的急診病例，乃是歸因於暴露在來自化石燃料的懸浮微粒（PM2.5）以及臭氧之下。僅僅是由化石燃料所製造的PM2.5，估計每年造成18億天的因病缺勤。

空氣污染對兒童是重大健康威脅，尤其在低收入國家之中更是如此。本研究發現，全世界約有4萬名孩童因為暴露於化石燃料的PM2.5污染之下，而不幸在他們的五歲生日前失去性命。與化石燃料相關的PM2.5空氣污染，每年約導致200萬起的胎兒早產。

雖然致命的空氣污染是全球性威脅，解決方案已日漸增加且越來越可負擔。除此之外，許多針對化石燃料空氣污染的解決方案，同時也是氣候變遷危機的解決方案。潔淨交通以及再生能源不僅顯著地減少如PM2.5、氮氧化物以及臭氧等有毒空氣污染物，同時也有助於將導致氣候變遷的溫室氣體排除在大氣層之外。

既存的燃煤、燃油以及燃氣設施等化石燃料的退場，不僅僅對於避免全球氣候變遷的嚴重衝擊而言是不可或缺的，同時也可以減少空氣污染，帶來巨大的健康效益。研究顯示，關閉燃煤火力發電廠帶來的健康效益，遠遠超過燃煤電廠生產電力的價值¹。根據一份發表於《美國國家科學院院刊》的研究指出，化石燃料的全面退場以及對潔淨能源的投資，將可以減少全世界將近三分之二的空氣污染相關過早死亡案例²。

此外，轉型為可負擔的以及碳中和（carbon neutral）的交通系統，對於確保城市健康是至關重要的。有效率的大眾交通系統，以及優良的人行道與自行車道建設則確保機動性、減少空氣污染與溫室氣體排放，並且也與心血管疾病、癌症、肥胖、糖尿病、精神疾病與呼吸道疾病等疾患的發病機率之下降有相關性³。

對政府而言，要催生可永續發展的交通系統，最重要的方式便是訂定出柴油車以及汽油車的退場時間，並且引入易於理解且可負擔的大眾運輸，同時包含安全的人行道與自行車道建設。我們必須不再將私人汽車作為主要的交通形式，藉由如倡議行動「無車日」（car-free day）的實踐，民眾將得以想像：城市若沒有了壅塞交通以及污染，將會是什麼樣的樣貌？

不論是為了避免氣候變遷不可挽回的災難，或是為了保護民眾的健康，轉型使用再生能源都是相當重要的關鍵。在化石燃料產業持續推廣過時科技的同時，人們的社區正在付出代價。朝向再生能源的「公正轉型」（just transition）是可能的，然而環境已經承受不起一再地拖延了。

1.0 緒論

這份《奪命空氣：化石燃料的代價》報告，評估持續燃燒化石燃料如煤、石油與天然氣而來的空氣污染對於全球健康的衝擊以及其經濟成本。本報告評估全球於2018年時來自化石燃料的空氣污染產生之健康衝擊，利用2019年所公布的數據，包括史上第一份針對化石燃料對全球空氣污染與健康之影響的報告⁴，同時也首次提供了相關經濟成本的估算。與交通及電力生產相關的案例研究指出，減少空氣污染是具有可行性、目標可達性以及經濟效益的。

本報告利用最新的污染程度、健康影響以及人口學上的證據與資料，用以量化空氣污染在全球與區域尺度上的影響。此處的分析包括針對施加在全球經濟上的健康負擔的財務成本之估算。運用這些案例研究，本報告探討化石燃料的退場將能如何同時有助於減緩氣候變遷以及改善全球當前最迫切的健康問題⁵。

1.1 空氣污染：概要總覽

《奪命空氣：化石燃料的代價》主要聚焦在燃燒化石燃料而來的空氣污染對於人體健康的衝擊影響以及其相關經濟成本。本份研究的研究範疇限縮於燃燒化石燃料所排放的空氣污染物，包括懸浮微粒（PM2.5）、臭氧（O₃）。

1.1.1 關鍵空氣污染物有哪些？

本報告僅考慮化石燃料相關的空氣污染影響，並且只討論在其污染物濃度變化與健康影響之間存在明確關係的污染物。

- **氮氧化物 (Nitrogen oxides)**：當化石燃料在空氣中燃燒時，燃燒中的空氣與燃料內的氮分子會製造出氮氧化物（一氧化氮以及二氧化氮NO₂合稱為氮氧化物NO_x）。氮氧化物污染，以及同樣由化石燃料燃燒生成的二氧化硫，會與水份作用並形成酸性的雨水、雪與霧，也會與其他

物質作用並形成懸浮微粒與霧霾。暴露在氮氧化物之下的健康衝擊包括心血管疾病、氣喘症狀加劇、慢性阻塞型肺病，以及其他呼吸道疾病^{6,7}。大量氮氧化物也會形成酸雨，對植被以及動物造成傷害。

- **臭氧 (Ozone)**：臭氧可以在地球的其中一個保護性大氣層—平流層中發現。平流層的臭氧可以幫地球表面阻隔太陽釋出的紫外線輻射，然而臭氧同時也會在近地表高度形成，並成為導致霧霾的空氣污染物。地表臭氧會在氮氧化物污染物與揮發性有機化合物 (volatile organic compound) 起作用時形成。臭氧污染會導致嚴重的人體健康問題，包括胸痛、喉嚨與呼吸道發炎。臭氧也會對肺部功能造成損害，並增加支氣管炎、肺氣腫與氣喘的症狀⁸。臭氧對於植被與作物也有負面的影響。
- **懸浮微粒 (Particulate matter)**：懸浮微粒（又稱為微粒污染或PM）描述空氣中極為細小的粒子以及液態微珠，世界衛生組織 (World Health Organization, WHO) 表示：「目前仍沒有證據指出存在一個無損健康的安全暴露範圍或門檻⁹」。這些微粒可能會是多種不同化學物質的結合，並且根據微粒的大小被分類為PM10、PM2.5以及超細懸浮微粒（見圖1）。
 - a. **超細懸浮微粒 (Ultrafine)**：超細懸浮微粒微粒並沒有正式定義，但一般的共識是，超細懸浮微粒是空氣動力學直徑小於等於0.1微米 (Qm) 的粒子。超細懸浮微粒是可被吸入的，換言之，它們小到足以抵達肺部中氣體交換的區域。
 - b. **PM2.5**：PM2.5指的是任何空氣力學直徑小於等於2.5微米的微粒，包括超細懸浮微粒。如同超細懸浮微粒，PM2.5的粒子也是可吸入的，換言之它們也小到足以抵達肺部中氣體交換的區域¹⁰。
 - c. **PM10**：PM10是直徑小於10微米的粒子¹¹。這些粒子是不可吸入的，會停留在呼吸道裡¹²。

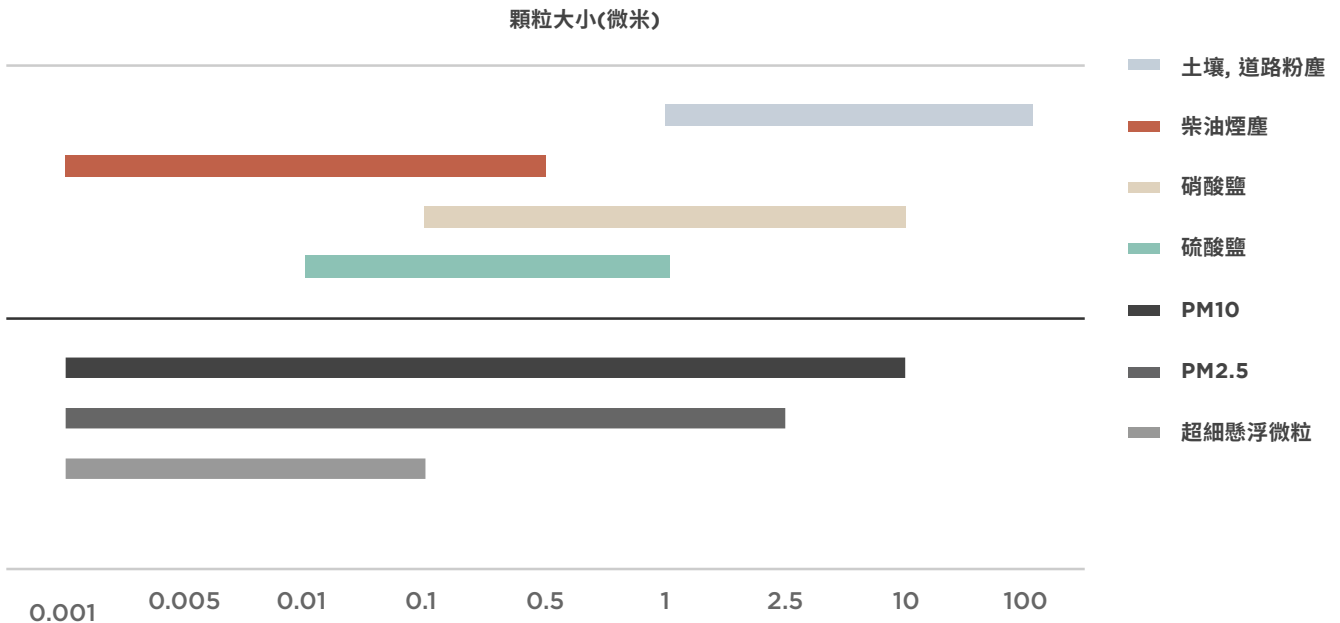


圖1：不同空氣污染物的粒子大小¹³

1.1.2 空氣污染來源有哪些？

自然生成

懸浮微粒在環境中會自然地產生，例如大氣粉塵、硫酸鹽、火山噴發，以及由植被所釋放的有機物等，都是懸浮微粒的自然來源¹⁴。氮氧化物會自土壤中的微生物過程、閃電以及森林大火等自然來源中被釋放進入環境之中¹⁵。上述許多過程都會被人類引發的全球暖化以及環境變遷所進一步惡化。

人為製造

人類的活動產生了極為大量的懸浮微粒，這些活動包括了道路與非道路的交通運輸（如船運與空運）、化石燃料發電廠的公共能源生產、商業與住宅區的燃燒源（如烹飪及暖氣）、工業活動、生質材料燃燒（如森林、灌木、雜草與農業廢棄物等）以及農業。在都市區域，交通車潮以及焚燒行為是主要的PM2.5來源¹⁶。

任何一種燃燒反應的過程都會釋出氮氧化物，尤其是在高溫的狀況下。氮氧化物的主要人為來源包括了交通工具、非道路交通工具（例如工程機具）、發電廠、渦輪、工業鍋爐等工業源；水泥窯、船隻以及建築物的暖氣¹⁷。

初級與次級污染物

空氣污染若是直接從污染源一例如工廠煙囪或是交通工具的排氣管一排放出來，則會被歸類為「初級」。次級空氣污染則是空氣中初級空氣污染物產生化學反應形成。臭氧便是一個在氮的氧化物與一群被稱為「揮發性有機化合物」起化學反應後產生的次級空氣污染物。某些懸浮微粒屬於次級污染，例如二氧化硫經過氧化過程形成硫酸（sulfuric acid），而硫酸在與氮起化學反應後產生硫酸銨粒子（ammonium sulfate particle）。

1.2 燃燒化石燃料造成的空氣污染

燃燒以煤炭、油與天然氣為主的化石燃料會排放污染物，污染我們所呼吸的空氣，並造成負面的健康影響。導致污染物被排放到大氣之中的主要元兇，包括了電力生產、交通運輸（包括汽油以及柴油車）、住宅能源消費、農業以及工業。

綜觀歷史，來自化石燃料的能源主導了電力的生產（見圖2），然而隨著可再生的電力來源（如風力與太陽能）之建置與維護成本持續下降，這些能源選項如今常常都比化石燃料還要便宜許多。根據國際再生能源總署（International Renewable Energy Agency, IREA）在2018年所公布的研究，考量電力生命週期成本來比較再生能源與化石燃料的發電成本。雖然在世界上大多數的地方，近期規劃建設的再生能源電廠如風力與太陽能，其成本會比使用化石燃料的電包括燃煤、燃油以及燃氣，來得更為便宜或是約略相同¹⁸，然而企業們仍持續使用過期的科技，導致化石燃料持續其主宰地位，儘管乾淨的能源選項已經唾手可得，仍藉由高碳排的能源製造空氣污染。

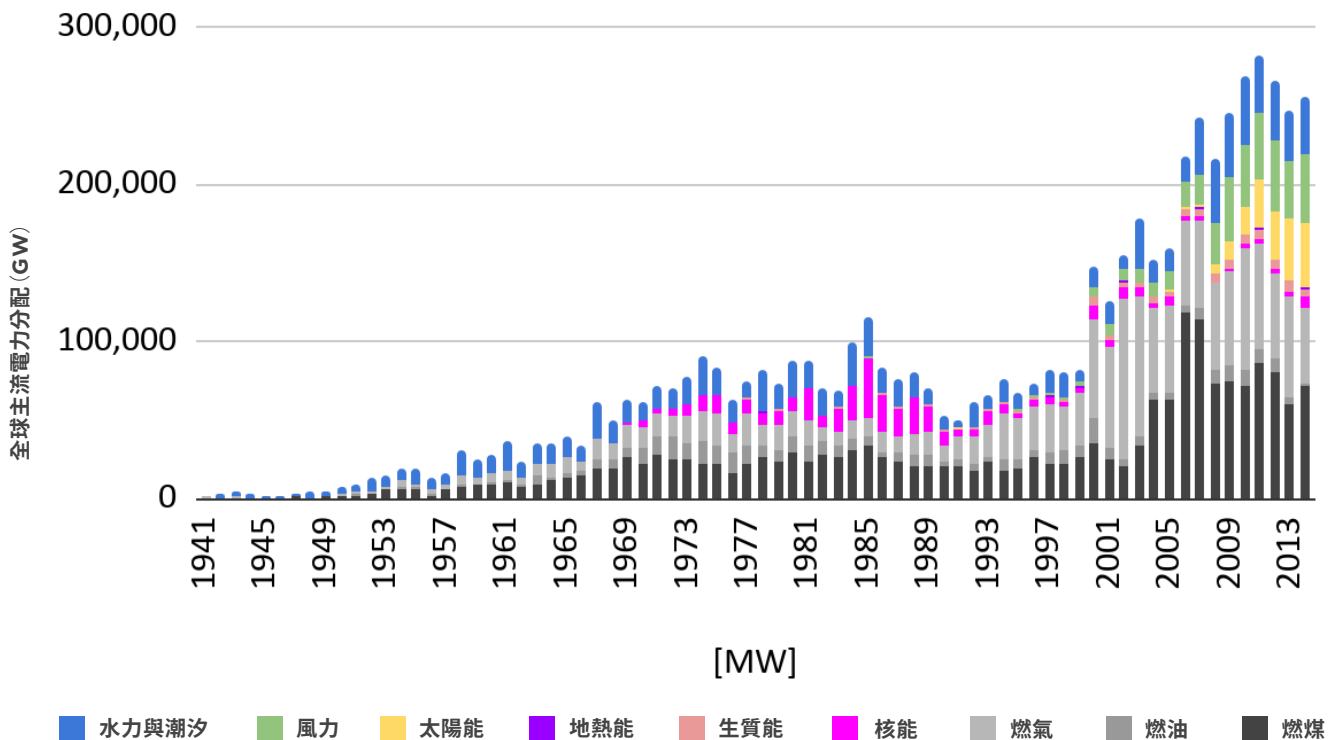


圖2: 截至2014年為止全球現役中發電廠之裝置容量年度增額。長達數十年來，化石燃料的使用主宰了能源供給，然而特別是自從2000年年中以來，再生能源科技的使用也急速擴張¹⁹。

1.3 空氣污染，健康與成本

空氣污染會同時影響生理與心理的健康，因為它會導致急性或慢性疾病，進而降低生活品質。公共衛生研究的證據顯示，接觸到一種或多種空氣污染物如PM2.5、二氧化氮或臭氧，會增加包括缺血性心臟病（Ischaemic Heart Disease，IHD）、慢性阻塞性肺炎（Chronic Obstructive Pulmonary Disease，COPD）、肺癌、下呼吸道感染、早產、第二型糖尿病、中風與氣喘等疾病的發病率^{20,21,22,23}。空氣污染所帶來的健康衝擊產生經濟負擔，增加醫療成本、健康狀況管理以及因病缺勤等。

空氣污染的特性與影響因國家而異，不同的地點會受到不同污染物、污染源以及環境條件的影響。再加上人口與生活型態的差異，空氣污染的健康影響會隨著地理位置的不同而有顯著的變化^{24,25,26}。舉例而言，一份研究²⁷利用電腦模型模擬7個不同部門中PM2.5與臭氧空氣污染源所導致的過早死亡率，這7個部門包括工業、陸上交通、住宅與商業用能源、燃燒生質能、電力生產、農業與自然界。在2010年全球可歸因於空氣污染的過早死亡案例中，幾乎有三分之一的案例歸咎於在戶外暴露於來自住宅與商業用能源的空氣污染²⁸，而這兩者也是印度、中國大陸中空氣污染相關之過早死亡案例的主要來源。全球而言，5%的空氣污染相關早死案例可歸因於陸上交通，14%可歸咎於電力生產。陸上交通排放量特別高的國家包括美國、德國、俄羅斯、土耳其以及日本。歸因於電力生產的早死案例在美國、俄羅斯、土耳其、中國大陸以及日本則特別高²⁹。

世界衛生組織制定一份指南定義出空氣污染的建議標準，若高於此標準將會對健康產生負面影響³⁰。此指南的制定源自於環境空氣污染物健康影響相關研究最新數據，並且定期經受審查³¹。在2019年時，全世界約有91%的人口活在劣於WHO建議空氣污染標準的地區³²。

1.4 空氣污染與氣候

化石燃料的退場以及轉用再生能源，不論對於減少空氣污染或是抑制人類導致的氣候變遷而言都是有益的³³。諸如沙塵暴、野火以及熱浪等可能被氣候變遷影響的事件，將會增加空氣中懸浮微粒的數量，並進一步導致空氣污染的惡化。藉由將燃煤排除於能源產業之外，或是限制交通運輸部門的排放量，既可以降低空氣污染所帶來的健康負擔，也可以減少氣候污染物的排放³⁴。

空氣污染以及氣候危機之間的連結顯而易見。欲替換目前用於電力生產、交通運輸以及家用暖氣的燃煤、燃油以及燃氣必須要謹慎規劃，以確保避免用其他燃燒過程來取代。舉例而言，假如未來的能源生產是透過燃燒生質能來達成，則可能導致PM2.5等有害空氣污染物的排放增加³⁵。為減緩氣候危機，達成溫室氣體減量目標的路徑必須以再生能源科技以及資源效率為主，並避免對空氣品質有負面影響。

2.0 燃燒化石燃料的 空氣污染之經濟成本

2.1 簡介

此部分為全球第一份針對燃燒化石燃料的空氣污染之健康衝擊的經濟負擔評估。由綠色和平東南亞分部所規劃、並由「能源與潔淨空氣研究中心」（Center for Research on Energy and Clean Air, CREA）執行的分析報告，估算化石燃料所造成的空氣污染對全球與國家或地區造成之衝擊。本章節呈現的分析結果與發現。並沒有包含非化石燃料造成的空氣污染（見1.1.2）。

分析結果指出，來自燃燒化石燃料的空氣污染之成本約為全球GDP的3.3%（95%信賴區間，2.4%到4.7%），約等同於每天80億美元（95%信賴區間，55億到110億美元）以及每天1萬2000起過早死亡的案例（95%信賴區間，9,000到17,000起）。

這份評估涵蓋關於化石燃料對全球空氣污染程度貢獻值的最新量化研究，並運用公開全球資料庫取得2018年的PM2.5、臭氧與二氧化氮的地表濃度，以進行健康衝擊評估以及伴隨而來的成本計算。完整的方法論細節可見於附錄1。

分析所包含的健康與經濟衝擊，僅僅考慮化石燃料相關空氣污染，並呈現於圖表1。關於污染物濃度對整體人口的衝擊，此分析僅納入那些有充分且可靠數據支持的影響。因此，這些圖表僅反映整體空氣污染總負擔的一部分。最後，因為並非所有真實世界中來自化石燃料的空氣污染的健康影響都納入分析，本研究僅是保守評估。

本研究分析結合2018年污染物濃度地圖、國別或地區別資料以及健康數據來評估健康衝擊^{36,37}。各個污染物的濃度反應函數（concentration response functions）乃是用來將特定一種污染物濃度連結至該污染物對整體人口的影響或衝擊。附錄1所描述已發布的濃度反應函數，乃是用來計算地圖化（mapped）的化石燃料空氣污染對2018年人口數的衝擊。利用世界衛生組織所執行的「歐洲空氣污染健康風險」（Health risks of air pollution in Europe, HRAPIE）研究計畫³⁸，可以估算因為暴露於PM2.5而造成的工作日損失數，然而其他空氣污染物對於缺勤的衝擊影響則缺乏相關可用數據。濃度反應函數用來計算健康與經濟後果的發生率，如圖表1所示。

過去的研究曾經估算因暴露於空氣污染與化石燃料誘發之空氣污染在全球與區域尺度上所導致的死亡率以及疫病發生率。此份報告所採用的研究方法奠基於最新探討空污暴露之健康風險的科學發現與科學模型之上。2018年一份關於戶外PM2.5污染致死風險的更新模型，發現了遠高於過往研究的風險，因此向上修正了過早死亡的估算數字³⁹。無獨有偶地，一份新的關於臭氧的世代研究（cohort study），最後也大幅增加2017年歸因於臭氧污染的死亡案例⁴⁰。基於上述原因，本研究中的死亡與疾病案例的估算值超過許多過往的研究結果，甚至估算出化石燃料所造成的死亡超過了某些早期研究中因為空氣污染而死的案例總數。

表1：分析報告中所包含的各種衝擊，以污染物區分*

污染物	暴露於該污染物之影響	結果
二氧化氮	氣喘	氣喘盛行
		孩童氣喘新增病例
	非傳染性疾病和下呼吸道感染	過早死亡
		生命年數損失
臭氧	慢性阻塞性肺疾病	過早死亡
		生命年數損失
	氣喘	急診就醫
PM2.5	缺勤	缺勤
	慢性阻塞性肺疾病	過早死亡
	慢性病誘發糖尿病(長年身障)	
	缺血性心臟疾病	
	肺癌	
	下呼吸道感染	
	五歲以下孩童之下呼吸道感染	
	其他非傳染性疾病和下呼吸道感染	
	中風	生命年數損失
	氣喘	
	早產	
	慢性阻塞性肺疾病	
	慢性病誘發糖尿病(長年身障)	
	中風	
	五歲以下孩童之下呼吸道感染	
其他非傳染性疾病和下呼吸道感染		

*雖然許多健康衝擊都與PM2.5、二氧化氮以及臭氧有關，本研究僅納入在污染物濃度變化與發病率之間存在可靠關聯性者。

2.2 健康影響與成本

2.2.1 健康

本研究估算，每年約有300萬例的成人過早死亡案例是因暴露於化石燃料PM2.5空氣污染而罹患的心血管疾病、呼吸道疾病以及肺癌。估計約有50萬起因慢性病而發生的過早死亡可以被歸因於與化石燃料相關的二氧化氮污染，另有每年約100萬起的過早死亡案例要歸因於化石燃料相關的臭氧污染。綜合來看，每年歸因於化石燃料相關空氣污染的過早死亡案例估計達到450萬起。

本研究所計算出的數據估計，全球將會有高達4萬名孩童因為暴露在化石燃料所產生的PM2.5之下，而在五歲之前患病死亡，這些死亡案例主要發生在低收入國家。對於這些受到影響的家庭而言，失去孩子是令人哀痛欲絕的悲劇。從經濟層面來看，孩童死亡會對社會帶來極高的財政成本，因為這些孩童將再也無法在他們成年之後對社會帶來貢獻(見表2)。

全球有數百萬人正承受著氣喘與其他慢性呼吸道疾病的病痛之苦，而暴露在燃燒化石燃料而來的污染之下是主要原因。慢性疾病會導致龐大的健康保險成本，並阻礙人們投入工作。暴露於PM2.5是空氣污染造成健康與經濟衝擊的主要原因，在2018年時，暴露於PM2.5所導致的過早死亡數目甚至高於因暴露於二氧化氮和臭氧而過早死亡的總和(圖3)。



表2：2018年依污染物區分的化石燃料相關空氣污染對特定健康與經濟結果的全球性影響估算。表格內所提供之數字是95%信賴區間的上限、下限以及中央估計值*

污染物	影響	總數			總成本 (百萬美元)		
		下限	中央估計值	上限	下限	中央估計值	上限
二氧化氮	過早死亡	300,000	500,000	1,100,000	-	-	-
	生命年數損失	4,900,000	8,900,000	19,400,000	185,000	335,000	732,000
	孩童之新發氣喘病例	1,800,000	4,000,000	5,200,000	-	-	-
	因空氣污染而罹患氣喘之之孩童數量	7,800,000	16,100,000	19,600,000	8,000	16,000	19,000
臭氧	過早死亡	600,000	1,000,000	1,400,000	-	-	-
	生命年數損失	9,700,000	15,400,000	21,800,000	247,000	379,000	523,000
	氣喘 (急診就診)	2,800,000	5,600,000	5,600,000	500	1,000	1,000
PM2.5	過早死亡	2,300,000	3,000,000	3,700,000	-	-	-
	生命年數損失	48,700,000	62,700,000	77,700,000	1,385,000	1,766,000	2,173,000
	氣喘 (急診就診)	1,800,000	2,700,000	3,800,000	200	350	500
	早產	1,000,000	2,000,000	2,100,000	47,000	91,000	96,000
	缺勤	1,503,200,000	1,755,200,000	2,002,200,000	86,000	101,000	115,000
Total	過早死亡	3,200,000	4,500,000	6,200,000	-	-	-
	生命年數損失	63,300,000	87,000,000	118,900,000	1,817,000	2,480,000	3,428,000

*下限、上限與中央估計值用來反映95%信賴區間

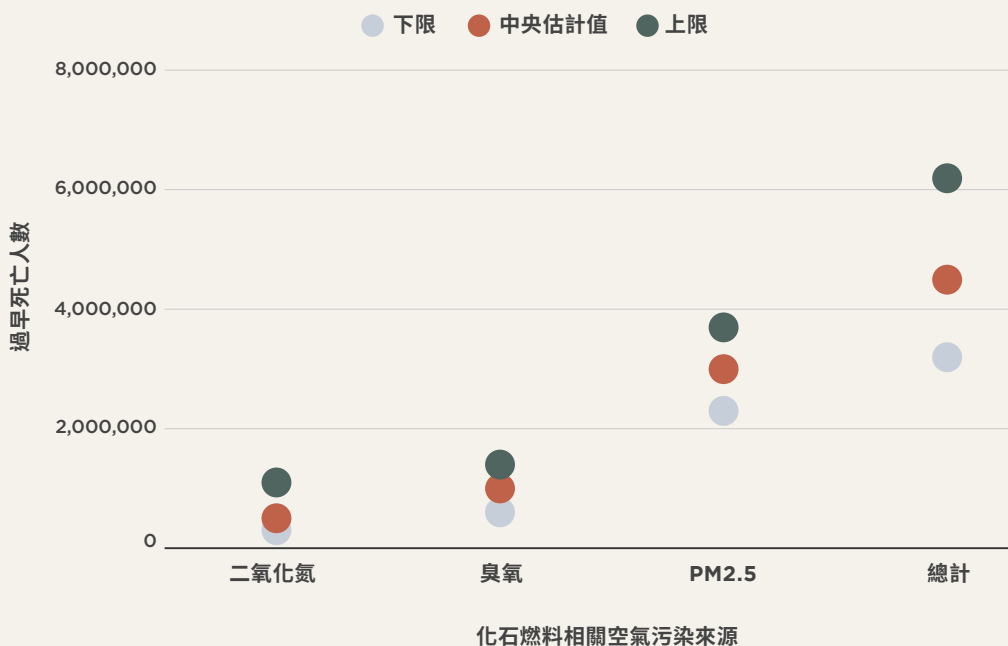


圖3:2018年全球歸因於化石燃料相關空氣污染之過早死亡人數估算值。



2.2.2 經濟成本

本研究指出，化石燃料所產生的空氣污染每年約造成2.9兆美元（中央估計值）的成本，等同於全球GDP的3.3%或每天80億美元（見表3與圖4），這些成本可歸因於因污染程度升高而越來越常見的呼吸道疾病與非傳染性疾病。本報告也含括了一份關於因過早死亡而造成的生命年數損失（years of life lost）之經濟評估。過早死亡的衝擊影響可以透過一種「生命年數損失」的衡量方式進行量化。過早死亡這樣的個人悲劇，由於會造成社會與經濟貢獻值的減損，因此也會同時衝擊經濟成本。這意味著，當過早死亡發生——尤其是在孩童或年輕人身上——時，所影響的經濟成本可能會很大。

由化石燃料所產生的二氧化氮以及臭氧空氣污染，分別造成了3500億美元與3800億美元的成本，相當於全球GDP的0.4%。

在三個污染物之中，PM_{2.5}空氣污染造成最嚴重的健康影響與最巨大的財務成本。來自化石燃料的PM_{2.5}會導致工作缺勤的增加，每年在全世界造成約18億天（中央估計值）的缺勤天數(表3)。

表3：2018年化石燃料相關之空氣污染的年度全球成本估算值*

污染物	影響	下限	中央估計值	上限
二氧化氮	總成本 (十億美元)	192	351	750
	GDP佔比	0.2%	0.4%	0.9%
臭氧	總成本 (十億美元)	248	380	524
	GDP佔比	0.30%	0.40%	0.60%
PM2.5	總成本 (十億美元)	1.6	2.2	2.7
	GDP佔比	1.8%	2.5%	3.1%
	缺勤時數 (天數)	1,503,200,000	1,755,200,000	2,002,200,000
綜合	總成本 (兆美元)	2.09	2.9	4.0
	GDP佔比	2.4%	3.3%	4.7%

*下限、上限與中央估計值用來呈現95%信賴區間

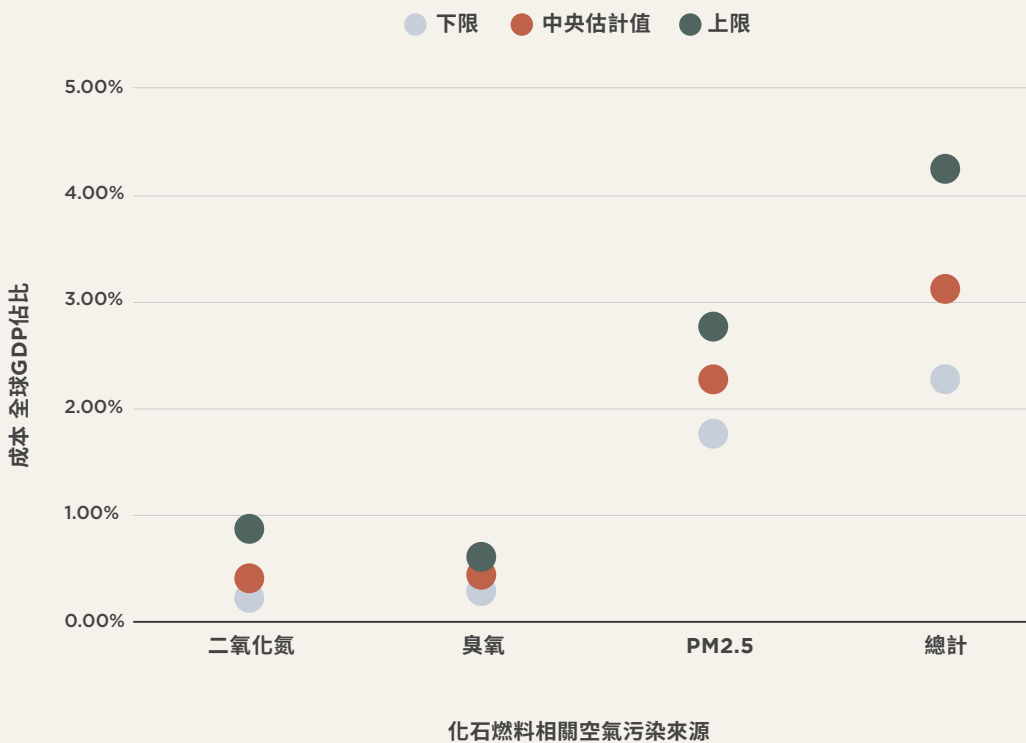


圖4：2018年化石燃料相關之空氣污染的年度全球成本估算值，下限、上限與中央估計值用來呈現95%信賴區間的範圍。

2.3 空氣污染成本的區域案例

2.3.1 健康

化石燃料相關的空氣污染在特定國家或區域中的健康影響，取決於污染源的性質與分布狀況、當地環境、天氣狀況、非關空氣污染疾病之罹病率、人口規模與人口密度等眾多因素。

本研究分析結果，包括可歸因於PM2.5與臭氧的氣喘相關急診就診案例之預估數字。全球而言，估計每年有770萬（信賴區間480萬到1000萬）的氣喘相關急診案例。其中，俄羅斯便有3萬7千起案例（信賴區間2萬4千到4萬7千），南非有6萬2千起（信賴區間3萬7千到8萬3千），美國有19萬6千起（信賴區間12萬5千到24萬8千），印尼有26萬6千起（信賴區間16萬6千到34萬）。附錄2提供個別地區更精細的成本與過早死亡數據。

全球大約有200萬起（1,032,000–2,093,000）的早產案例是歸因於暴露在化石燃料使用而產生的PM2.5之下。其中，中國大陸有35萬起（18萬4千起到36萬7千起）在，南非有1萬4千起（6,700起到1萬4,500起），印度有98萬1千起（51萬7千起到103萬1千起），泰國1萬1千起（6千到1萬2千）。

中風的發病率與PM2.5的暴露有關，本研究估計，暴露於化石燃料產生的PM2.5之下所導致的中風，每年約造成60萬起（268,000-904,000）的死亡。

在歐盟，暴露在化石燃料所造成的空氣污染之下每年約導致40萬起的過早死亡。在這些死亡案例中，其中有四分之三與PM2.5暴露有關，其餘則與二氧化氮與臭氧暴露有關（表4與圖5）。

表4:2018年歐盟化石燃料相關空氣污染所導致之過早死亡案例估算值。
下限、上限與中央估計值用來呈現95%信賴區間的範圍

歐盟	2018年過早死亡案例		
	下限	中央估計值	上限
總數	289,000	398,000	567,000
PM2.5	229,000	295,000	367,000
二氧化氮	38,000	69,000	152,000
臭氧	22,000	34,000	48,000

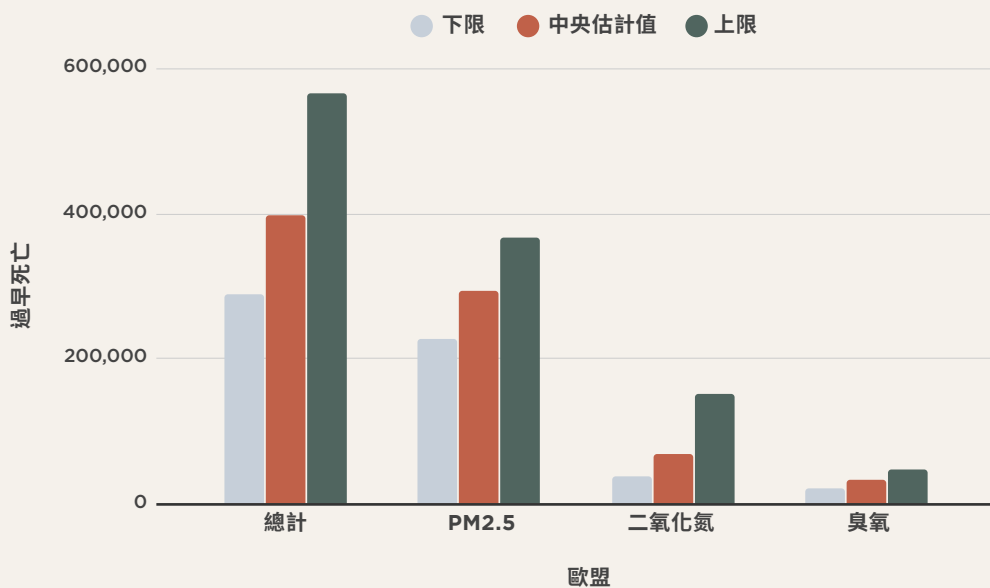


圖5:2018年歐盟化石燃料相關空氣污染所導致之過早死亡案例估算值，依污染物分。下限、上限與中央估計值用來呈現95%信賴區間的範圍。

在東亞，歸因於空氣污染的過早死亡之數字主要發生在中國大陸。雖然PM2.5空氣品質自2015起迅速改善⁴¹，空氣污染仍持續影響該地相當大比例的人口。在中國大陸，估計每年約有180萬起（130萬到250萬）的過早死亡案例。在南韓，與化石燃料之污染排放相關的過早死亡數字，每年約有40萬起（28萬到61萬），**臺灣則有1萬6千起（1萬2千到2萬4千）**，日本有10萬起（7萬5千到15萬）。

在東亞各地，大部分過早死亡案例歸因於PM2.5的暴露（見圖6）。慢性阻塞性肺病（Chronic obstructive pulmonary disorder, COPD）是早死的主要病因。在中國大陸，化石燃料所造成的PM2.5暴露大約造成了58萬2千起（36萬6千到82萬7千）的慢性阻塞性肺病死亡案例，大約佔全球病例的40%。根據推估，南韓有5,000例（3,000-7,000）慢性阻塞性肺病導致的過早死亡，**臺灣則有4,000例（2,000-6,000）**，日本有1萬5千例（9,000-22,000）。

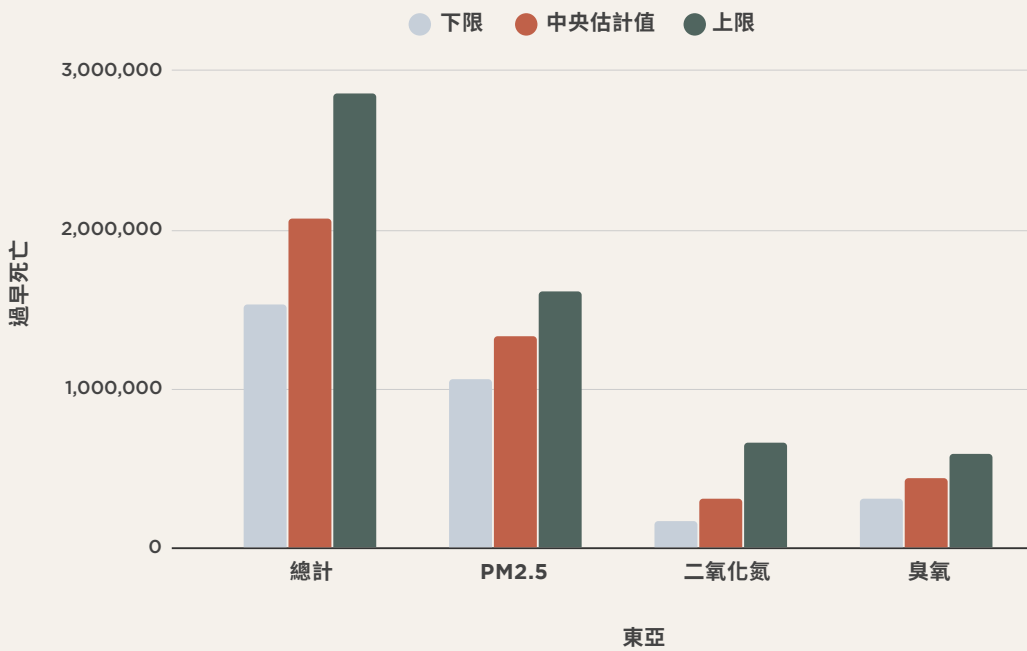


圖6：2018年東亞地區化石燃料相關空氣污染所導致之過早死亡案例估算值，依污染物分。下限、上限與中央估計值用來呈現95%信賴區間的範圍。

表5以及圖7呈現東南亞國家如越南、寮國、泰國、緬甸、新加坡、柬埔寨、馬來西亞、印尼、菲律賓、汶萊以及東帝汶等國家中，因為化石燃料空氣污染而造成的過早死亡案例。經估算，印尼與越南有最多起的過早死亡案例，在該兩個國家中，因為暴露於PM2.5而罹患慢性阻塞性肺病大約分別導致1萬7千人（10,000-25,000）與1萬人（5,000-17,000）死亡。

表5：2018年東南亞地區化石燃料相關空氣污染所導致之過早死亡案例估算值，依污染物區分。下限、上限與中央估計值用來呈現95%信賴區間的範圍。

東南亞	2018年過早死亡案例		
國家／地區	下限	中央估計值	上限
越南	28,000	41,000	58,000
寮國	1,400	2,000	2,900
泰國	17,000	24,000	34,000
緬甸	12,000	18,000	24,000
新加坡	890	1,000	2,000
柬埔寨	1,900	2,800	4,100
馬來西亞	4,300	6,600	10,000
印尼	30,000	44,000	61,000
菲律賓	11,000	17,000	27,000
汶萊	20	30	40
東帝汶	10	20	30

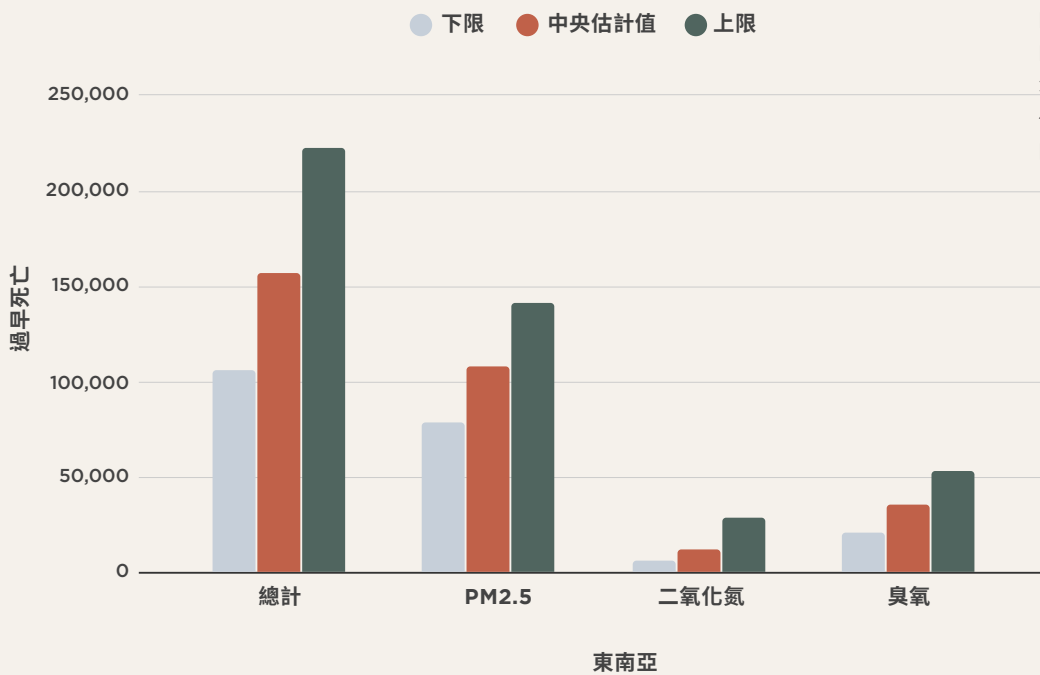


圖7：2018年東南亞地區化石燃料相關空氣污染所導致之過早死亡案例估算值，依污染物分。下限、上限與中央估計值用來呈現95%信賴區間的範圍。

**燃燒化石燃料的
空氣污染之經濟成本**

在中東與北非國家之中，埃及有最多起因化石燃料空氣污染而來的過早死亡估算案例（表6與圖8）。在這些案例之中，有4,600起慢性阻塞性肺病死亡（2,300-7800），4,000起中風死亡（1,500-7,000），另有1萬5千起案例與缺血性心臟病以及燃燒化石燃料造成的PM2.5暴露有關（12,000-18,000）。附錄2提供個別地區更精細的成本與過早死亡數據。

表6:2018年中東與北非地區化石燃料相關空氣污染所導致之過早死亡案例估算值，依污染物分。下界、上界與中央估算值用來呈現95%信賴區間的範圍。

中東與北非	2018年過早死亡案例			
	國家／地區	下限	中央估計值	上限
阿爾及利亞		2,100	3,000	4,300
巴林		200	300	400
埃及		22,000	32,000	51,000
伊拉克		2,500	3,500	4,800
約旦		800	1,200	1,900
科威特		290	410	600
黎巴嫩		1,800	2,700	4,200
利比亞		600	900	1,300
摩洛哥		3,300	5,100	7,500
阿曼		140	210	300
巴勒斯坦		400	500	700
卡達		140	230	410
沙烏地阿拉伯		2,200	3,300	5,000
敘利亞		3,100	4,700	7,100
突尼西亞		1,300	2,100	3,100
阿拉伯聯合大公國		900	1,500	2,400
葉門		1,800	3,100	5,200

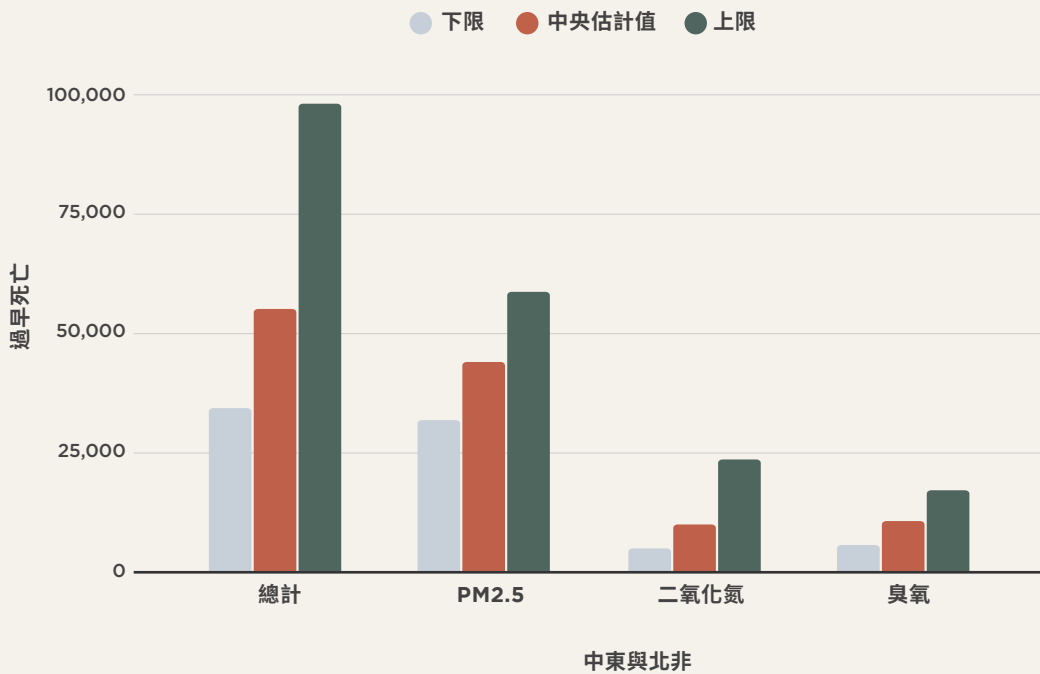


圖8:2018年中東與北非地區化石燃料相關空氣污染所導致之過早死亡案例估算值，依污染物分。下限、上限與中央估計值用來呈現95%信賴區間的範圍。

2.3.2 經濟成本

人口規模是影響一個社會空氣污染絕對成本的主要因素之一。同樣重要的因素還包括：當地是否有健康保險以及健保成本和嬰兒死亡率等。人口眾多的國家所面臨的化石燃料相關空氣污染之絕對成本負擔通常也較大，而且當嚴重空氣污染與高人口密度同時存在時，將加劇其空氣污染影響程度。

化石燃料空氣污染的成本等同於許多國家GDP的一大部分。化石燃料空氣污染之估算成本的GDP佔比在中國大陸最高，約等於其GDP的6.6%（信賴區間4.7%-9.0%）。相較之下，化石燃料空污成本的GDP佔比在南韓為3.4%（2.2-5.1%），在日本為2.5%（1.8-3.7%），臺灣為2.6%（1.8-3.8%）。在保加利亞、匈牙利、烏克蘭、塞爾維亞、白俄羅斯、印度、羅馬尼亞以及孟加拉等國，化石燃料空氣污染的成本大於其GDP的5%。表7與表8呈現了在東南亞、中東與北非國家中化石燃料空氣污染的估算成本。

在東亞各地，化石燃料空氣污染的估算成本相當高，高於東亞各地區GDP的2%。2018年時，化石燃料產生的PM2.5暴露估計約在中國大陸導致7億4800萬個工作日（6億4200萬到8億5300萬）的工作缺勤，造成約390億美元（330億到440億美元）的經濟損失。在南韓、臺灣以及日本，上述工作缺勤的數字則分別是1800萬天（1600萬到2100萬）、500萬天（400萬到600萬）以及2000萬天（1700萬到2300萬）。

在東南亞地區，越南、寮國、泰國以及緬甸等國的化石燃料空氣污染之估算成本佔其GDP的2%以上（中央估計值）。僅有在汶萊與東帝汶，此估算成本在GDP中的佔比低於1%（見表7）。

表7：2018年東南亞各國化石燃料空氣污染之年度估算成本(GDP佔比)。
下限、上限與中央估計值用來呈現95%信賴區間的範圍。

東南亞	總GDP佔比		
	下限	中央估計值	上限
越南	1.8%	2.8%	4.0%
寮國	1.8%	2.9%	4.1%
泰國	1.4%	2.1%	2.9%
緬甸	1.8%	2.7%	3.6%
新加坡	0.7%	1.1%	1.8%
柬埔寨	1.0%	1.5%	2.1%
馬來西亞	0.8%	1.3%	1.9%
印尼	0.8%	1.1%	1.6%
菲律賓	0.8%	1.2%	1.9%
汶萊	0.3%	0.4%	0.6%
東帝汶	0.1%	0.1%	0.2%

在中東與北非國家中，化石燃料空氣污染之估算成本在GDP中的佔比，以埃及、黎巴嫩、巴林與阿拉伯聯合大公國最高（見表8）。因為暴露於化石燃料產生的PM2.5而發生的工作缺勤，於埃及高達1500萬天（1300萬到1700萬），在黎巴嫩則達到130萬天（110萬到150萬），在巴林為46萬天（46萬到53萬），而阿拉伯聯合大公國也有270萬天（230萬到310萬）的工作缺勤。附錄2收錄了本研究所有分析的國家中，化石燃料相關空氣污染的總成本。

表8：2018年中東與北非國家在化石燃料空氣污染上之年度估算成本（GDP佔比）。下限、上限與中央估計值用來呈現95%信賴區間的範圍。

中東與北非 國家／地區	總GDP佔比		
	下限	中央估計值	上限
阿爾及利亞	0.3%	0.5%	0.7%
巴林	0.9%	1.4%	2.1%
埃及	1.8%	2.8%	4.2%
伊拉克	0.5%	0.8%	1.1%
約旦	0.7%	1.1%	1.5%
科威特	0.6%	0.9%	1.2%
黎巴嫩	1.3%	2.0%	3.0%
利比亞	0.6%	0.9%	1.3%
摩洛哥	0.6%	0.9%	1.4%
阿曼	0.3%	0.4%	0.6%
巴勒斯坦	0.5%	0.8%	1.0%
卡達	0.5%	0.8%	1.3%
沙烏地阿拉伯	0.5%	0.7%	1.1%
敘利亞	無資料	無資料	無資料
突尼西亞	0.6%	1.0%	1.5%
阿拉伯聯合大公國	0.8%	1.4%	2.2%
葉門	0.5%	1.0%	1.6%



泰國皇家蘇安醫院屋頂設置太陽能板
©Arnaud Vittet/Greenpeace



菲律賓吉馬拉斯省風力發電機組與鹽田比鄰
© Veejay Villafranca/Greenpeace

3.0 對於人為空氣污染，我們可以做些什麼？

藉由實際可行的化石燃料退場情境，可以同時降低空氣污染與溫室氣體排放⁴²。世界經濟的「去碳」(decarbonising)可以迅速地為社會增進健康，特別是藉由降低對空氣污染物的暴露——尤其是對人們健康影響最大的PM2.5⁴³。

針對空氣污染危機的解決方案，如歐洲的排放控制措施，已幫助大幅度地減少對市民的健康影響。減少空氣污染的政策並不一定是昂貴的，即使落實某些治理政策必須新增成本，其效益也大過其成本。舉例而言，美國潔淨空氣法案(Clean Air Act)所帶來的經濟效益顯著地高於其實施成本，在1990年到2020年這段期間內，其效益與成本比甚至超過30:1。換句話說，每投資1美元，美國經濟就至少獲得30美元的回饋⁴⁴。不論城市或是國家的收入程度為何，許多用來控制污染的措施都是經濟實惠⁴⁵。

本節將利用實際案例證明，透過那些可同時減緩人為氣候變遷的措施，能在經濟可行且可負擔的情況下，大幅度地降低化石燃料空氣污染對於健康的重擔。本節聚焦於兩個不同的化石燃料燃燒部門：交通部門的汽油，以及電力部門的燃煤，證明治理空氣污染的策略是務實、可行且經濟實惠。

3.1 案例一：永續交通轉型

若要同時解決空氣污染與氣候危機的雙重挑戰，人們的旅行方式勢必得改變，尤其是在人口高度密集的城市區域^{46,47}。數百萬人每日搭乘私人交通工具去上班、上學或是休閒娛樂，社區街道不僅面臨交通堵塞問題，柴油與汽油引擎更使空氣品質惡化並導致大氣溫室氣體濃度提高。顯而易見地，若要降低懸浮微粒的危害並抑制全球暖化，將需要進行「交通革命」確保能提供所有人潔淨、碳中和與普及的運輸系統。城市需要支持對居民以及地球健康有利的生活型態。

低成本、現行(active)以及碳中和的交通系統是轉型不可或缺的一部分，它具有降低都市污染、溫室氣體排放、心血管疾病、癌症、肥胖、糖尿病、精神疾病以及呼吸道疾病發病率⁴⁸的綜合效益。政府在推動永續交通系統轉型可採取的最重要措施之一，便是訂定出柴油車與汽油車退場日期，同時實施各種城市交通措施，例如禁止汽車進入特定社區或區域之中、在城市邊界之內全面禁止各種車輛行駛，以及提倡無車日等。藉由落實這些倡議行動，居民們將可以想像「城市若沒有壅塞交通以及懸浮微粒污染，將會是什麼樣貌？」，同時也可以鼓勵人們多多從事戶外活動。循此基礎，以下分析各國政府曾施行過的政策措施，探討如何將汽油車與柴油車移出城市街道以改善公眾健康與空氣品質。

許多市政府嘗試帶給城市更潔淨的空氣品質，例如提倡行人與自行車友善的空間、提倡私人汽車交通的替代方案如汽車租賃(car club)或共享汽車(vehicle sharing scheme)、由再生能源供電的大眾運輸系統等。

英國倫敦交通局(Transport for London)在2020年1月時宣布，有4條行經市中心的公車路線已經全面電動化⁴⁹。在中國大陸深圳，所有的柴油公車在2018年時替換成電動車，成為全世界第一個全面電動化的城市公車車隊(fleet)⁵⁰。

對於人為空氣污染， 我們可以做些什麼？

美國紐約市的大都會運輸署（Metropolitan Transportation Authority, MTA）正努力建立一支零碳排放的公車車隊，並且目前正是「全電動公車三年實驗計畫」的最後階段⁵¹。2019年時，挪威首都奧斯陸禁止私人汽車使用市中心街道，並減少市中心的停車位⁵²，讓奧斯陸居民可以享受更乾淨的環境，且鼓勵多行走、騎乘自行車以及搭乘大眾運輸工具。限制私人交通工具使用可以有效地減少使用化石燃料以及改善空氣品質，搭配替代性的大眾運輸系統，使無法行走或騎乘自行車的市民也依舊可以持續使用交通系統⁵³。

雖然目前尚無任何城市達到完全無車化，但在許多城市行之有年的「無車日」依然提供絕佳機會，以檢視此政策為健康以及環境帶來助益的潛力。全球各地許多城市都會舉辦無車活動，通常都是一年一度。但在某些地方例如波哥大與哥倫比亞，每個禮拜都會有封閉道路、禁止車輛使用的時段⁵⁴。這些案例指出，即便偶發性無車日是具有正面意義的第一步，但如果要有效增進人類健康，無車日活動應該要更為頻繁或持續地舉辦，並吸引更多社區居民參與其中。

從無車案例中可以瞭解，確保街道不受塞車之苦具有顯著的健康與財政益處。然而，無車活動的案例，僅是解決城市區域塞車與空氣污染問題的部分政策。在全球，更大的轉型正在發生，用永續且對所有人平等的方式將交通系統自化石燃料之中解放。

超過15個國家已經宣布停止生產新汽油車與柴油車的計畫，在某些案例中，甚至也預計停產油電混合車。這些政策宣示雖然並非完美，卻已對市場傳遞出強而有力的訊息，即「化石燃料交通工具已經沒有未來」。為確保空氣安全且避免最嚴峻的氣候變遷影響，逐步淘汰內燃機（internal combustion engine）以及發展私人汽車（mass car ownership）替代方案，將是非常重要的關鍵⁵⁵。

顯而易見地，隨著科技與社會的變遷，城市可以淘汰掉以化石燃料驅動的交通工具、大幅降低污染並尋找氣候變遷的解決方案。大城市可以引領這項交通變遷，帶領其他城市走向更永續的城市空間，並在創造碳中和交通系統時，將社會平等與社會正義置於其核心。這將重新形塑全國與全球層級關於城市交通未來的辯論⁵⁶，使各國政府有能力去訂定一個具有野心的柴油及汽油車退場日期，並同時投資於大眾運輸與電動車的未來。

騎上你的自行車：波哥大周日街道封閉的好處

1974年首次在哥倫比亞城市波哥大（Bogotá）所舉辦的「Ciclovía活動」是歷史最悠久的城市無車日活動之一。Ciclovía每周日以及公共假日於波哥大市中心舉行，在該活動中，市中心的道路會封閉機動車輛，並讓自行車騎士、滑板使用者以及行人可以享受120公里（約74.6英里）的無車空間。在美洲與加勒比海地區，超過15個國家與地區也舉辦類似的活動。Ciclovía的目標是鼓勵更多人們從事體育活動，而部分人們可能會選擇在Ciclovía舉辦時運動，正是因為該時段交通與空氣污染都較少。Ciclovía所具有全方面、包容性（inclusive）的性質，能夠充分鼓勵孩童運動和避免孩童過胖。

波哥大Ciclovía活動在節省醫療保健成本上的成本效益

在醫療保健成本的節省上，波哥大Ciclovía活動估算成本效益比約為：每投資1美元，便會有3.2到4.3美元的效益。此區間是由於成年參與人數的不確定性，在一份於2005年到2009年期間進行的研究中，估計成年參與人數約為51萬6,600人到120萬5,635人之間。哥倫比亞第二大城Medellín也舉辦類似Ciclovía的活動，針對Medellín進行的成本效益比分析發現：每1美元的投資，就可以省下1.8美元的醫療成本。然而，由於分析研究只納入部分的正面效益因素，因此可能低估Ciclovía活動的整體效益。根據在2005年到2009年研究期間所收集的資料，Ciclovía計畫的成本估計約為人均6美元。研究人員建議這類活動如果要成功，其路線應該通過不同社區、並鼓勵弱勢族裔與年齡群體多加參與，也應該具備穩定財源以確保可長期運作。

3.2 案例二：再生能源發電取代化石燃料

根據研究，全球65%與空氣污染相關的過早死亡可以歸因於化石燃料排放⁵⁷。以再生能源如風力、太陽能取代化石燃料，可以減少溫室氣體與空氣污染物的排放，對氣候和人體健康帶來雙重效益。這個轉型既是可行的，也是可達成的，而且由於技術漸趨成熟以及安裝成本急遽下降，全球已廣泛地使用再生能源系統所生產的電力。

在美國，2007年到2015年之間，風力、太陽能以及分散式太陽光伏能對於國家電網的總貢獻值從約10GW成長到約100GW⁵⁸。藉由風力發電減少發電過程中的污染物排放，預防約2,900到12,200起過早死亡案例的發生，不僅創造良好的空氣品質，也節省約284億到1079億美元的大眾醫療成本以及49億到985億美元的氣候變遷成本。太陽能發電所帶來的效益，包括13億至49億美元的空氣品質與公共醫療效益、4億至83億美元的氣候效益，且避免100至500起過早死亡。

關閉燃煤發電廠減少空氣污染排放所帶來的效益，遠遠超過燃煤電廠本身所產生的電力價值⁵⁹。選擇用再生能源淘汰化石燃料時，優先發展最有潛力減少空氣污染物暴露的基礎建設將可以實現大量的醫療與健康效益。燃煤、燃油與燃氣發電導致空氣污染與氣候危機，淘汰這些發電技術將保障環境與健康效益。化石燃料退場的效益以淘汰較高二氧化硫、氮氧化物以及PM2.5排放的燃煤電廠上最為顯著⁶⁰。美國在2007年到2015年間落實電力業排放標準以及關閉燃煤電廠，致使二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物以及PM2.5排放分別降低20%、72%、50%與46%。

呼吸新鮮空氣：燃煤電廠退場效益

關閉既存的燃煤電廠，不論是對環境還是對人體健康而言都是有益的。空氣品質相關研究指出，關閉燃煤電廠，可以為在附近居住或工作的人們帶來健康效益。

- 一份研究評估燃煤電廠對孩童發展之影響，追蹤兩組居住在中國大陸重慶的銅梁發電廠周遭2.5公里以內無吸菸習慣的懷孕婦女。第一組（樣本數150人）是在2002年入籍（enrolled），並且曾經暴露於發電廠所排放的多環芳香烴（polyaromatic hydrocarbons）之中，而暴露於多環芳香烴，已被證實與胎兒以及幼童的發展障礙有關聯。另外一組（樣本數158人）則是在2005年入籍，且由於該電廠於2004年關閉，故並未曾暴露於同樣污染。這座直到2004年之前都會在12月到5月之間運轉的燃煤電廠，並未使用先進的污染減排技術。該份研究發現，第二組女性較低程度的多環芳香烴暴露，與她們神經發育（neurodevelopment）的正面影響有關，也與增進腦部發育與改善健康相關的分子變化（molecular change）有關。研究人員建議，為了幫助強化神經發育，應減少對有毒污染物的暴露。
- 2011年到2014年之間於美國匹茲堡與賓州進行的監測發現，自從關閉三座燃煤電廠之後，周遭的PM2.5污染程度有下降的趨勢。研究人員利用12個地面監測站以及衛星的PM2.5測量值監控氣膠光學厚度（Aerosol Optical Depth, AOD）的變化，並觀察到數值在研究期間下降。
- 在愛爾蘭的都柏林，一份詳實的案例清楚描繪1990年煙煤（bituminous coal）銷售的禁令，減少冬季70%的黑煙，並且降低15%歸因於呼吸道疾病的死亡案例（約每年116人）。



曼谷的空污抗議行動。
©Wason Wanichakorn/Greenpeace



曼谷街頭的空氣。
©Chanklang Kanthong/Greenpeace

4.0 結論

4.1 成本

本研究估計由化石燃料所導致的空氣污染每年在全世界造成約450萬起過早死亡，造成約18億天的因病缺勤。不僅衝擊經濟，也嚴重傷害人民的健康與福祉。本研究估算，醫療成本與工作缺勤兩者相加，化石燃料空氣污染所造成的經濟成本約為全球年度GDP的3%，一天80億美元。

空氣污染健康危機乃是歸因於燃燒化石燃料，又由於煤炭、天然氣與石油的燃燒會釋放溫室氣體，因此燃燒化石燃料也會導致氣候危機。致力投資再生能源替換化石燃料的政府，可以獲得長期經濟回饋，而且使其市民享受更好的健康與福祉。

擺脫依賴化石燃料是明確且迫切的需求，當使用燃煤、石油與天然氣的成本變得日益昂貴，拯救生命的替代方案已經越來越普及且可負擔。

4.2 交通

各種無車倡議與措施已經證明，交通系統根本性的改革能夠大幅提高體育活動的參與、降低有害空氣污染物與溫室氣體的排放、改善健康。透過這些健康效益而節省下來的金錢，比施行成本還高出好幾倍。化石燃料企業獲得龐大的利益，民眾和整體社會卻因此犧牲，承受著空氣污染的代價。投資永續交通替代方案不僅是合乎效益，對於健康、福祉與地球而言也是正面的。

為確保有效率地使用能源與資源，且運作時不會直接或間接地排放有害污染物，交通系統迫切地需要重組。城市需要更少、更乾淨的交通工具，配合使用更多大眾運輸工具，以及廣泛投資在共享交通、步行與自行車上。要達到這個目標，各國政府必須落實具有野心的柴油與汽油車退場日期，同時投資永續交通形式，使步行或自行車等低碳替代選項得以實現。前瞻的城市與區域可以成為領頭羊，幫助形塑國家與國際層級城市交通未來藍圖。

4.3 能源

淘汰既存的化石燃料發電廠以及終止新的興建計畫，對於將全球升溫控制在比前工業時期高1.5°C之內的目標來說是必要的，同時這也將減少當前遍佈數百公里範圍的空氣污染物之排放。

燃燒煤炭所造成的排放與眾多疾病有關，包括呼吸道疾病所導致的孩童發育問題與過早死亡。在美國某些地區，再生能源技術於電網中的運用已經明確減少對化石燃料的依賴，並且減少污染物的排放。淘汰化石燃料有助於避免過早死亡，而且節省大筆的醫療成本。

關閉燃煤電廠、改善空氣品質所帶來的經濟效益，超過這些電廠所生產的電力之價值。對於避免不可挽回的氣候災難以及保護民眾健康而言，以化石燃料為主的能源生產部門轉型為再生能源為主都是相當重要的一步。朝向再生能源的公正轉型是可行的，我們不能一再地拖延下去，城市、政府以及企業都需要即刻採取行動。

詞彙表

空氣污染物	以固體顆粒、液態滴粒或氣體存在於空氣之中的有害物質。此類物質可能會對人體健康或環境有害。
ALRI	急性下呼吸道疾病。
AOD	氣膠光學厚度(Aerosol optical depth)。氣膠(Aerosols)是存在於大氣中大小不一的固體顆粒，且可能源於自然環境或人為製造。根據其組成元素與地理位置的不同，氣膠可能會有不同的影響。藉由檢視有多少光線可以穿透氣膠來測量「氣膠光學厚度」，可以辨明氣懸膠體的數量。
中央估計值	參見：信賴區間。
CEV	腦血管疾病。
信賴區間	運用電腦模型的科學研究並無法給出一個絕對確定的結果，而毋寧是提供一個範圍(即「區間(interval)」)。所謂的「信賴區間」便是最有可能包含真實數值的區間範圍。95%信賴區間的意思是：真實數值存在於此信賴區間之中的可能性為95%，而其有5%的機率坐落在信賴區間之外(高於或低於區間之數字範圍)。最有可能是真實數值的數值被稱為中央估計值，且位於信賴區間之內某處。信賴區間的邊界則被稱為估計值上限和估計值下限。
COPD	慢性阻塞性肺病。
DEFRA	英國政府環境、農業和農村事務部。
粉塵	固態氣懸微粒，PM2.5下的次分類。
GDP	國內生產毛額。
GNI	國民所得毛額。
信賴區間上限	參見：信賴區間。
IHD	缺血性心臟疾病。
信賴區間下限	參見：信賴區間。
MODIS	中解析度成像分光輻射計。
NO2	二氧化氮。
NOx	氮氧化物，一氧化氮與二氧化氮的總稱，是對於人體健康有害的微量氣體。
O3	臭氧。

PM2.5	細懸浮微粒。
ppb	十億分之一，每十億個總質量單位數中，污染物質量的單位數。
PPP	購買力平價，是用來決定特定國際貨幣價格的一種貨幣兌換率，其在該國之國民所得毛額上，與1美元在美國的購買力相同。
SO2	二氧化硫。
WHO	世界衛生組織。
µg/m³	微克/立方米，1立方公尺的氣體中所含有的物質質量，以微克為單位。

附錄1: 研究方法

本報告首次針對由化石燃料空氣污染所造成的全球經濟負擔進行評估。利用全球PM2.5、臭氧與二氧化氮之地表濃度資料，來評估其健康影響與相關成本。健康影響取決於污染物濃度地圖與人口數據的結合、國家或區域層級的健康數據，以及2018年的污染暴露反應函數。完整的研究方法呈現如下：

化石燃料空氣污染暴露情形

已有研究估算2015年燃燒化石燃料排放的PM2.5與臭氧之年度全球濃度⁶⁸，且2011年時的二氧化氮污染濃度也以高解析度繪製成地圖⁶⁹。由於氮氧化物的排放源主要來自化石燃料的燃燒，本研究假設，高於表A1所劃定的門檻值之二氧化氮濃度代表來自燃燒化石燃料產生的二氧化氮。舉例而言，與二氧化氮暴露有關的死亡案例，將這些死亡連結到化石燃料的濃度門檻為20微米/立方公尺。由於全球氮氧化物的排放主要來自於化石燃料，特別是在那些大量暴露在有害污染物的城市之中，因此這樣的假設可以說是稍嫌保守的。

接著，地表PM2.5與二氧化氮的數據被進行比例換算（scale）以呈現2018年的濃度。此一比例換算的完成，乃是利用MODIS與OMI（臭氧層觀測儀）所產出的數據，觀察特定年度的衛星觀測數值。國際太空總署（National Aeronautics and Space Administration, NASA）的中解析度成像分光輻射計（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS）是一套地球觀測工具，裝載在Terra跟Aqua兩座NASA衛星之上。MODIS監測大氣中的氣膠，並且每隔一到兩天就對地球進行一次掃描⁷⁰。臭氧監測儀（Ozone Monitoring Instrument, OMI）則從NASA的Aura衛星上監控包括二氧化氮在內的污染物。這些建立在衛星觀測上的數值，可以將各個污染物的的大氣總量（total atmospheric amount）予以量化，而非表面濃度，用來校正表面濃度水平地圖（surface level maps）。自從2015年以來臭氧的表面濃度水平並未進行校正。

臭氧數據以及校正過後的2018年PM2.5與二氧化氮數據，和最新的人口與健康資料庫（2017年到2018年）相結合^{71,72,73,74}用以計算污染物暴露程度。

健康影響與成本

運用校正後的2018年PM2.5、臭氧與二氧化氮數據以及濃度反應函數（concentration-response function），來測定對於特定人口群體的健康衝擊發生機率⁷⁵。濃度反應函數將「污染物濃度」與「該污染物對特定人口群體的反應或衝擊」相連結。歸因於PM2.5暴露的死亡、生命年數減損以及殘疾年數，乃是利用Burnett等人⁷⁶以及全球疾病負擔研究（Global Burden of Disease）所開發的非線性、按年齡區分之風險值來進行計算。風險值代表不同健康衝擊在污染物濃度的作用下，相較於乾淨空氣情境的風險增加程度。其他的健康衝擊則是利用對數線性風險函數（log-linear risk function）進行預測，並呈現每10微米/立方公尺（或10ppb）污染物濃度增幅之下的相對風險增幅，同時也假設了零風險門檻，這通常是建立在研究資料庫之中健康風險可被監測到的最低污染物濃度值之上。本研究考量下列健康衝擊：

下呼吸道感染造成幼童死亡

此類健康衝擊評估，乃是利用由Lelieveld等人(2019)以及全球疾病負擔研究所開發的下呼吸道疾病風險函數而得來的PM2.5濃度所進行⁷⁷。

來自這些空氣污染相關死亡的經濟損失，乃是由其所導致的預期壽命減少來評估。按照歐洲經濟區（European Economic Area, EEA）的成本效益方法⁷⁸，並根據不同國家或區域的國民所得毛額與購買力平價（Purchasing power parity, PPP）進行調整，再加上OECD所建議的0.9彈性係數⁷⁹，在歐盟1年的生命年數減損等同於5萬6千歐元的經濟損失。

糖尿病、氣喘與其他慢性呼吸道疾病，以及中風導致的殘疾

全球疾病負擔研究計畫⁸⁰將肇因於各種疾病的殘疾等級量化為「殘疾權重 (disability weight)」，用以比較不同疾病的成本。

因糖尿病與慢性支氣管炎 (chronic bronchitis) 而來的殘疾與生活品質降低所造成的經濟成本，便是根據這些殘疾權重來評估，該成本評估也結合了英國環境監控單位「環境、農業和農村事務部」(The Department for Environment, Farming and Rural Affairs, DEFRA) 所做出的殘疾經濟評估⁸¹。上述的成本評估也根據不同國家的國民所得毛額與購買力平價數值做相對應的調整。舉例而言，並有併發症症狀的第二類糖尿病的殘疾權重為4.9%，這意味著罹患糖尿病一年的成本，約等同於不幸殘障一年之成本的4.9%，在英國約等於4,000元美元，在世界平均收入下約等於1,600美元。

至於與化石燃料污染相關的氣喘，其經濟成本的評估乃是建立在兩個指標上：可連結至二氧化氮暴露的氣喘新增病例，以及與PM2.5和臭氧暴露相關的急診就診案例。一份針對幼兒氣喘的每年直接或間接成本（包括醫療成本以及幼兒照顧者的收入損失）的評估發現，在美國加州的兩個不同社區內其成本分別為3,800美元與4,000美元⁸²。這兩個成本評估值的中間值，即被用來作為氣喘經濟成本的估算值，先以加州區域生產毛額之於美國國家平均生產毛額的比值對其進行校正，再根據不同國家的國民所得毛額與購買力平價數值進行校正。急診室就診的成本也同樣取自該份研究。

與PM2.5暴露有關的全球氣喘新增病例，很有可能比來自二氧化氮暴露的新增病例還來得多，但此估算值之中有相當大的不確定性⁸³，因此這個影響並未被納入考量。取而代之地，本研究考量歸因於PM2.5與臭氧暴露的氣喘急診之經濟成本，而此成本僅是PM2.5導致的氣喘之整體成本負擔的一小部分而已。

早產

孕婦暴露於PM2.5之下會增加其早產以及嬰兒體重不足的機率，並會進一步增加嬰兒未來人生中許多健康與發育上的風險。根據CREA利用Trasande等人(2019)所提出的濃度後果以及由Trasande等人所建立的濃度-反應關係⁸⁴所做出的分析，每年大約有200萬起的早產案例可以歸因於孕婦暴露於化石燃料PM2.5污染之下。同樣的研究也估算早產的經濟成本，在美國約為每一起早產案例30萬美元，主要表現為經濟生產力下降以及健康醫療保險成本增加。該濃度-反應函數以及成本預估也同樣地運用於本分析之中，其估算值也利用區域的國民所得毛額與購買力平價數值進行校正。

工作缺勤

暴露於化石燃料所造成的PM2.5空氣污染，將增加因病缺勤日數。本研究利用世界衛生組織建議的濃度-反應函數來估算工作缺勤的發生率⁸⁵。根據歐洲經濟區的建議⁸⁶，並依不同國家的國民所得毛額與購買力平價數值進行校正後，這些因病缺勤的經濟成本在歐盟國家中經估算約為每天130歐元。

表A1: 濃度反應函數*

濃度反應函數							
健康影響	暴露物	風險比率	濃度變化	零風險門檻值	單位	參考研究	發病率數據
氣喘急診-孩童	PM2.5	1.025 (1.013, 1.037)	10	6	µg/m ³	Zheng 2015	Anenberg 等人 2018
氣喘急診-孩童	臭氧	1.018 (1.01, 1.024)	10	2	ppb	Zheng 2015	Anenberg 等人 2018
氣喘急診-成人	PM2.5	1.023 (1.015, 1.031)	10	6	µg/m ³	Zheng 2015	Anenberg 等人 2018
氣喘急診-成人	臭氧	1.018 (1.012, 1.022)	10	2	ppb	Zheng 2015	Anenberg 等人 2018
早產	PM2.5	1.15 (1.07, 1.16)	10	8.8	µg/m ³	Trasande等人2016	Chawanpaiboon 等人2019
死亡,慢性阻塞性肺病	臭氧	1.12 (1.08, 1.16)	10	35	ppb	Malley等人 2017	GBD 2017
死亡,非傳染性疾病與下呼吸道感染-成人	二氧化氮	1.037 (1.021, 1.080)	10	20	µg/m ³	WHO HRAPIE 2013	GBD 2017
生命年數損失,非傳染性疾病與下呼吸道感染-成人	二氧化氮	1.037 (1.021, 1.080)	10	20	µg/m ³	WHO HRAPIE 2013	GBD 2017
工作缺勤日數	PM2.5	1.046 (1.039, 1.053)	10	0	µg/m ³	WHO HRAPIE 2013	EEA 2014
孩童氣喘新增病例	二氧化氮	1.26 (1.10, 1.37)	10	2	ppb	Achakulwisut 等人 2019	GBD 2017

*表格參考資料 87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97

附錄2: 成本與死亡數據

化石燃料相關空氣污染之影響:按國家/地區分						
國家/地區	總成本估算 (百萬美元)			過早死亡總數估算(2018)		
	下限	中央估計值	上限	下限	中央估計值	上限
阿富汗	170	270	380	2,600	3,900	5,900
阿爾巴尼亞	260	400	590	1,000	1,500	2,200
阿爾及利亞	530	840	1,100	2,100	3,000	4,300
美屬薩摩亞	無資料	無資料	無資料	0	0	1
安道爾	無資料	無資料	無資料	20	30	50
安哥拉	98	170	270	250	410	700
安地卡及巴布達	3	5	7	4	6	7
阿根廷	2,600	4,400	7,900	5,300	8,600	15,000
亞美尼亞	270	370	480	1,300	1,700	2,200
澳大利亞	3,900	6,100	8,900	2,000	2,900	4,200
奧地利	11,000	15,000	21,000	5,800	7,900	11,000
亞塞拜然	460	680	960	1,600	2,200	3,200
巴哈馬	86	130	170	40	60	80
巴林	330	510	750	200	300	400
孟加拉	9,100	14,000	18,000	67,000	96,000	130,000
巴貝多	12	18	25	10	20	30
白俄羅斯	2,400	3,200	4,400	7,800	10,000	14,000
比利時	8,500	12,000	18,000	5,000	6,800	9,500
貝里斯	7	11	15	20	30	40
貝南	24	39	55	220	350	520
百慕達	29	44	59	9	10	20
不丹	31	54	79	150	240	350
波利維亞	28	59	100	130	250	450
波士尼亞與赫塞哥維納	680	950	1,200	2,300	3,100	3,900
波札那	57	91	140	100	150	200
巴西	9,800	14,000	22,000	20,000	28,000	43,000

附錄2：
成本與死亡數據

化石燃料相關空氣污染之影響:按國家/地區分						
國家/地區	總成本估算 (百萬美元)			過早死亡總數估算(2018)		
	下限	中央估計值	上限	下限	中央估計值	上限
汶萊	35	53	76	20	30	40
保加利亞	2,900	3,900	5,200	6,800	9,000	12,000
布吉納法索	59	95	130	600	900	1,300
蒲隆地	7	11	17	200	320	500
維德角	6	9	13	30	40	50
柬埔寨	240	360	520	1,900	2,800	4,100
喀麥隆	99	160	230	570	900	1,000
加拿大	25,000	38,000	57,000	15,000	21,000	30,000
中非共和國	11	18	27	160	260	400
查德	61	99	140	550	850	1,000
智利	1,600	2,600	4,500	2,300	3,800	6,600
中國大陸	650,000	900,000	1,200,000	1,300,000	1,800,000	2,500,000
哥倫比亞	1,500	2,400	3,600	4,800	6,900	9,800
葛摩	1	2	3	9	10	19
剛果民主共和國	79	130	210	1,100	2,000	3,300
剛果	9	15	22	44	70	100
哥斯大黎加	230	340	450	380	530	710
象牙海岸	16	38	66	90	200	400
克羅埃西亞	2,000	2,800	3,700	3,300	4,400	5,700
古巴	無資料	無資料	無資料	2,000	2,800	3,800
賽普勒斯	380	570	790	310	440	630
捷克	7,700	11,000	15,000	8,000	11,000	14,000
丹麥	4,600	6,700	9,500	2,000	2,800	3,800
吉布地	無資料	無資料	無資料	40	80	100
多米尼克	2	3	4	5	7	9
多明尼加	310	490	700	600	1,000	1,400
厄瓜多	670	1,000	1,500	2,000	2,700	3,700
埃及	4,400	6,900	10,000	22,000	32,000	51,000
薩爾瓦多	160	260	370	697	1,100	1,500
赤道幾內亞	3	7	12	4	9	20
厄利垂亞	39	66	98	390	640	970
愛沙尼亞	430	650	900	460	630	2,700
史瓦帝尼王國	41	66	97	120	180	55,000
伊索比亞	240	370	480	2,600	3,900	20
斐濟	8	12	17	20	20	150

化石燃料相關空氣污染之影響:按國家/地區分						
國家/地區	總成本估算 (百萬美元)			過早死亡總數估算(2018)		
	下限	中央估計值	上限	下限	中央估計值	上限
芬蘭	2,800	4,300	5,800	1,600	2,100	2,700
法國	37,000	54,000	79,000	27,000	37,000	55,000
加彭	5	9	13	8	10	20
甘比亞	4	8	11	60	100	150
喬治亞	510	700	890	2,200	2,900	3,600
德國	94,000	140,000	210,000	57,000	81,000	120,000
迦納	38	73	120	200	370	600
希臘	4,200	6,100	8,700	6,000	8,400	12,000
格陵蘭	無資料	無資料	無資料	8	10	20
格瑞那達	3	4	6	6	8	10
關島	無資料	無資料	無資料	10	16	22
瓜地馬拉	390	620	870	1,200	1,700	2,400
幾內亞	27	43	60	270	410	590
幾內亞比索	3	6	8	40	60	90
蓋亞那	6	9	12	20	20	30
海地	61	100	150	772	1,300	1,900
宏都拉斯	100	170	260	600	980	2,000
匈牙利	6,700	9,400	13,000	9,400	13,000	17,000
冰島	76	110	150	30	40	50
印度	100,000	150,000	190,000	715,000	1,000,000	1,300,000
印尼	7,600	11,000	16,000	30,000	44,000	61,000
伊朗	3,800	5,300	7,300	13,000	17,000	24,000
伊拉克	1,400	2,100	2,800	2,500	3,500	4,800
愛爾蘭	2,500	3,800	5,000	900	1,200	1,600
以色列	3,000	4,500	6,200	1,800	2,500	3,600
義大利	41,000	61,000	91,000	39,000	56,000	83,000
牙買加	90	140	200	310	460	640
日本	88,000	130,000	180,000	75,000	100,000	150,000
約旦	300	490	700	800	1,200	1,900
哈薩克	2,000	2,800	3,900	3,500	4,800	6,400
肯亞	190	290	380	1,100	1,600	2,300
吉里巴斯	0	0	0	0	0	0
南韓	無資料	無資料	無資料	24,000	38,000	56,000
北韓	37,000	56,000	85,000	28,000	40,000	61,000
科索沃	180	270	380	800	1,200	1,700

附錄2：
成本與死亡數據

化石燃料相關空氣污染之影響:按國家/地區分						
國家/地區	總成本估算 (百萬美元)			過早死亡總數估算(2018)		
	下限	中央估計值	上限	下限	中央估計值	上限
科威特	840	1,300	1,700	290	410	600
吉爾吉斯	77	110	150	800	1,100	1,600
寮國	320	510	720	1,400	2,000	2,900
拉脫維亞	850	1,200	1,700	1,100	1,500	2,100
黎巴嫩	890	1,400	2,100	1,800	2,700	4,200
賴索托	39	67	100	700	588	870
賴比瑞亞	2	3	4	20	40	60
利比亞	300	470	660	600	900	1,300
立陶宛	1,700	2,300	3,000	2,000	2,600	3,300
盧森堡	1,000	1,500	2,300	250	350	500
馬達加斯加	11	19	29	180	300	450
馬拉威	6	11	16	170	280	410
馬來西亞	2,800	4,500	6,700	4,300	6,600	10,000
馬爾地夫	17	26	38	30	40	60
馬利	58	99	140	500	800	1,300
馬爾他	140	200	260	120	170	220
馬紹爾群島	0	1	1	1	2	3
茅利塔尼亞	11	20	28	100	170	250
模里西斯	23	33	44	30	50	60
墨西哥	20,000	29,000	41,000	37,000	51,000	73,000
密克羅尼西亞	1	2	3	4	6	9
摩爾多瓦	450	600	750	2,300	3,000	3,600
蒙古	130	200	270	410	570	780
蒙特內哥羅	150	210	280	370	480	620
摩洛哥	670	1,100	1,600	3,300	5,100	7,500
莫三比克	12	20	30	200	340	530
緬甸	1,300	1,900	2,500	12,000	18,000	24,000
納米比亞	15	26	39	36	56	84
尼泊爾	580	940	1,400	7,800	12,000	18,000
荷蘭	14,000	21,000	30,000	7,200	9,900	14,000
紐西蘭	190	270	350	110	140	170
尼加拉瓜	38	60	83	300	440	600
尼日	35	60	89	530	880	1,000
奈及利亞	1,300	2,200	3,200	4,600	7,600	13,000

化石燃料相關空氣污染之影響:按國家/地區分						
國家/地區	總成本估算 (百萬美元)			過早死亡總數估算(2018)		
	下限	中央估計值	上限	下限	中央估計值	上限
北馬其頓	390	540	700	1,200	1,600	2,000
北馬利安納群島	無資料	無資料	無資料	3	4	6
挪威	4,300	6,000	8,500	1,500	2,100	2,800
阿曼	200	320	430	140	210	300
巴基斯坦	3,800	6,100	9,200	32,000	50,000	76,000
巴勒斯坦	82	120	160	400	500	700
巴拿馬	170	260	360	230	310	410
巴布亞紐幾內亞	75	120	200	290	430	620
巴拉圭	85	140	210	250	380	540
秘魯	550	970	1,700	1,500	2,500	4,600
菲律賓	2,500	4,000	6,000	11,000	17,000	27,000
波蘭	21,000	29,000	38,000	30,000	39,000	51,000
葡萄牙	2,700	4,100	6,300	3,300	4,800	7,200
波多黎各	470	730	1,000	420	610	860
卡達	1,000	1,600	2,400	140	230	410
羅馬尼亞	9,100	13,000	17,000	17,000	22,000	29,000
俄羅斯	50,000	68,000	97,000	89,000	120,000	160,000
盧安達	18	30	45	240	390	590
薩摩亞	0	0	1	1	1	2
聖多美普林西比	1	1	2	4	7	10
沙烏地阿拉伯	3,800	6,000	8,800	2,200	3,300	5,000
塞內加爾	70	120	160	480	743	1,100
塞爾維亞	2,600	3,700	4,900	8,500	11,000	15,000
塞席爾	6	8	11	6	9	11
獅子山	8	13	18	120	190	280
新加坡	2,500	4,000	6,500	890	1,000	2,000
斯洛伐克	3,700	5,100	6,700	4,100	5,400	7,000
斯洛維尼亞	1,300	1,800	2,500	1,300	1,700	2,300
索羅門群島	2	4	6	10	20	20
索馬利亞	無資料	無資料	無資料	610	1,000	2,000
南非	4,300	6,300	8,200	9,700	13,000	16,000
南蘇丹	53	87	130	290	480	750
西班牙	16,000	24,000	36,000	17,000	25,000	37,000
斯里蘭卡	460	760	1,100	2,100	3,300	4,800

附錄2：
成本與死亡數據

化石燃料相關空氣污染之影響:按國家/地區分						
國家/地區	總成本估算 (百萬美元)			過早死亡總數估算(2018)		
	下限	中央估計值	上限	下限	中央估計值	上限
聖露西亞	5	8	11	10	10	20
聖文森及格瑞那丁	2	3	4	5	7	10
蘇丹	180	320	460	1,900	3,100	4,600
蘇利南	5	8	11	10	20	30
瑞典	5,400	7,800	11,000	3,000	4,000	5,200
瑞士	11,000	16,000	23,000	4,100	5,500	7,600
敘利亞	無資料	無資料	無資料	3,100	4,700	7,100
臺灣	11,000	16,000	23,000	12,000	16,000	24,000
塔吉克	65	96	130	770	1,000	2,000
坦尚尼亞	76	130	180	700	1,000	1,500
泰國	7,000	11,000	15,000	17,000	24,000	34,000
東帝汶	1	3	5	10	20	30
多哥	11	18	26	100	200	300
東加	0	1	1	1	1	2
千里達及托巴哥	41	67	100	40	70	100
突尼西亞	240	400	590	1,300	2,100	3,100
土耳其	14,000	21,000	30,000	28,000	40,000	58,000
土庫曼	240	360	520	500	700	1,000
烏干達	36	57	79	500	700	1,100
烏克蘭	6,000	8,000	10,000	35,000	45,000	57,000
阿拉伯聯合大公國	3,500	5,900	9,400	900	1,500	2,400
英國	46,000	66,000	98,000	30,000	41,000	62,000
美國	430,000	610,000	870,000	170,000	230,000	310,000
烏拉圭	280	450	730	800	630	1,000
烏茲別克	410	590	810	3,400	4,800	6,600
萬那杜	1	2	3	5	7	11
委內瑞拉	1,800	2,800	4,200	1,900	2,900	4,200
越南	4,500	6,800	9,800	28,000	41,000	58,000
美屬維京群島	無資料	無資料	無資料	10	20	20
約旦河西岸地區和加薩走廊	82	120	160	400	500	700
葉門	150	280	450	1,800	3,100	5,200
尚比亞	33	56	80	200	300	500
辛巴威	56	91	130	200	300	500

參考資料

- 1 Strasert, B., Teh, S. C. & Cohan, D. S. Air quality and health benefits from potential coal power plant closures in Texas. *J. Air & Waste Manage.* 69, 333-350 (2019).
- 2 Lelieveld, J., et al. Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *PNAS* 116, 7192-7197 (2019).
- 3 Watts N., et al. Health and climate change: Policy responses to protect public health. *Lancet* 386, 1861-1914. (2015).
- 4 Lelieveld, J., et al. Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *PNAS* 116, 7192-7197 (2019).
- 5 Watts N., et al. Health and climate change: Policy responses to protect public health. *Lancet* 386, 1861-1914 (2015).
- 6 Anderson, H., et al. Quantitative systematic review of short term associations between ambient air pollution (particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, sulphur dioxide and carbon monoxide), and mortality and morbidity. London, Department of Health. Available at: <https://www.gov.uk/government/publications/quantitative-systematic-review-of-short-term-associations-between-ambient-air-pollution-particulate-matter-ozone-nitrogen-dioxide-sulphur-dioxide-and-carbon-monoxide-and-mortality-and-morbidity> (2007). [Accessed January 9, 2020].
- 7 Guarnieri, M. & Balmes, J. Outdoor air pollution and asthma. *Lancet* 383, 1581-1592 (2014).
- 8 United States Environmental Protection Agency. Ground-level Ozone Pollution. Available at: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics> (2020) [Accessed January 9, 2020].
- 9 World Health Organization. Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project Technical Report. WHO: Bonn (2013). Available at: http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf?ua=1 [Accessed January 16, 2020].
- 10 Morakinyo, O., Mokgobu, M., Mukhola, M. & Hunter, R. Health outcomes of exposure to biological and chemical components of inhalable and respirable particulate matter. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 13, 592 (2016). DOI: 10.3390/ijerph13060592.
- 11 Cassee, F.R., Héroux, M.-E., Gerlofs-Nijland, M.E. & Kelly, F.J. Particulate matter beyond mass: recent health evidence on the role of fractions, chemical constituents and sources of emission. *Inhal. Toxicol.* 25, 802-812 (2013). DOI: 10.3109/08958378.2013.850127.
- 12 Morakinyo, O., Mokgobu, M., Mukhola, M. & Hunter, R. Health outcomes of exposure to biological and chemical components of inhalable and respirable particulate matter. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 13, 592 (2016). DOI: 10.3390/ijerph13060592.
- 13 WHO, 2006. World Health Organisation. Air Quality Guidelines Global Update 2005. Available at: http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf?ua=1 [Accessed January 16, 2020].
- 14 Lelieveld, J., Evans, J., Fnais, M., Giannadaki, D. & Pozzer, A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367-371 (2015). DOI: 10.1038/nature15371
- 15 Zyrichidou, I., Koukoulis, M., Balis, D., Markakis, K., Poupkou, A., Katragkou, E., Kioutsioukis, I., Melas, D., Boersma, K., van Roozendaal, M. Identification of surface NO_x emission sources on a regional scale using OMI NO₂. *Atmos. Environ.* 101, 82-93 (2015). DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.11.023
- 16 Squizzato, S., Cazzaro, M., Innocente, E., Visin, F., Hopke, P. & Rampazzo, G. Urban air quality in a mid-size city – PM_{2.5} composition, sources and identification of impact areas: From local to long range contributions. *Atmos. Res.* 186, 51-62 (2017). DOI: 10.1016/J.ATMOSRES.2016.11.011
- 17 <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#What%20is%20NO2>
- 18 IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2018. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi (2019).
- 19 Farfan, J. and Breyer, C. Structural changes of global power generation capacity towards sustainability and the risk of stranded investments supported by a sustainability indicator. *Journal of Cleaner Production* 14, 370-384 (2017).
- 20 Wang, B., Xu, D., Jing, Z., Liu, D., Yan, S. & Wang, Y. Effect of long-term exposure to air pollution on type 2 diabetes mellitus risk: a systemic review and meta-analysis of cohort studies. *Eur. J. Endocrinol.* 171, R173-R182 (2014).
- 21 Cohen, A. J. et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *Lancet* 389, 1907-1918 (2017).
- 22 Han, M.-H., et al. Association between hemorrhagic stroke occurrence and meteorological factors and pollutants. *BMC Neurol.* 16, 59 (2016).
- 23 Sunyer, J. & Davvand, P. Pre-natal brain development as a target for urban air pollution. *Basic Clin. Pharmacol. Toxicol.* 125, Suppl 3, 81-88 (2019).
- 24 Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnai, M., Giannadaki, D. & Pozzer, A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367-371 (2015).
- 25 Park, M. et al. Differential toxicities of fine particulate matters from various sources. *Sci. Rep.* 8, 17007 (2018).
- 26 Li, J. et al. Differing toxicity of ambient particulate matter (PM) in global cities. *Atmos. Environ.* 212, 305-315 (2019).
- 27 Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnai, M., Giannadaki, D. & Pozzer, A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367-371 (2015).
- 28 Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnai, M., Giannadaki, D. & Pozzer, A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367-371 (2015).
- 29 Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnai, M., Giannadaki, D. & Pozzer, A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367-371 (2015).
- 30 World Health Organization, 2006. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: global update 2005: summary of risk assessment (No. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02). Geneva: World Health Organization.
- 31 World Health Organization (WHO). "WHO expert consultation: available evidence for the future update of the WHO global air quality guidelines (AQGs)." *WHO: Geneva, Switzerland* (2016).

- 32 WHO. 'Air pollution: Ambient air pollution - a major threat to health and climate.' World Health Organization, 2020. Available at: <https://www.who.int/airpollution/ambient/en/> [Accessed January 8 2020].
- 33 Shindell, D. & Smith, C.J. Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels. *Nature* 573, 408-411 (2019).
- 34 Watts N., et al. Health and climate change: Policy responses to protect public health. *Lancet* 386, 1861-1914 (2015).
- 35 Williams, M.L., et al. Public health air pollution impacts of pathway options to meet the 2050 UK Climate Change Act target: a modelling study. *Public Health Research* 6.7 (2018).
- 36 Lelieveld, J., et al. Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *PNAS* 116, 7192-7197 (2019).
- 37 Larkin, A., et al. Global land use regression model for nitrogen dioxide air pollution. *Environmental science & technology* 51.12: 6957-6964. (2017)
- 38 World Health Organization. Health risks of air pollution in Europe—HRAPIE project recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. UN City: Copenhagen, Denmark (2013).
- 39 Burnett, R, et al. Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115.38: 9592-9597. (2018).
- 40 Malley CS, Daven K. Henze, Johan C.I. Kuylenstierna, Harry W. Vallack, Yanko Davila, Susan C. Anenberg, Michelle C. Turner, and Mike R. Ashmore 2017: Updated Global Estimates of Respiratory Mortality in Adults ≥30 Years of Age Attributable to Long-Term Ozone Exposure. *Environmental Health Perspectives* 125:8 CID: 087021 <https://doi.org/10.1289/EHP1390>
- 41 Silver, B., et al. "Substantial changes in air pollution across China during 2015-2017." *Environmental Research Letters* 13.11 (2018): 114012.
- 42 Shindell, D. & Smith, C.J. Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels. *Nature* 573, 408-411 (2019).
- 43 Watts, N. et al. Health and climate change: policy responses to protect public health. *The Lancet* 386, 1861-1914 (2015).
- 44 United States Environmental Protection Agency: Office of Air and Radiation. The benefits and costs of the Clean Air Act from 1990 to 2020. Available at: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/fullreport_rev_a.pdf (2011) [Accessed January 9, 2020].
- 45 Landrigan, P. J. et al. The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet* 391, 10119, 462-512 (2018).
- 46 <https://www.greenpeace.org/international/story/24312/the-future-of-transport-is-zero-carbon/>
- 47 Teske, S. et al. the Energy [R]evolution (5th edition). Greenpeace International, Global Wind Energy Council & Solar Power Europe (2015). Available at: https://www.duesseldorf.greenpeace.de/sites/www.duesseldorf.greenpeace.de/files/greenpeace_energy-revolution_erneuerbare_2050_20150921.pdf [Accessed January 8, 2020].
- 48 Watts N., et al. Health and climate change: Policy responses to protect public health. *Lancet* 386, 1861-1914. (2015).
- 49 Keegan, M. 'Shenzhen's silent revolution: world's first fully electric bus fleet quietens Chinese megacity'. *The Guardian* December 12, 2018. Available at: <https://www.london.gov.uk/what-we-do/environment/pollution-and-air-quality/cleaner-buses> [Accessed January 8, 2020].
- 50 Keegan, M. 'Shenzhen's silent revolution: world's first fully electric bus fleet quietens Chinese megacity'. *The Guardian*. December 12, 2018. Available at: <https://www.london.gov.uk/what-we-do/environment/pollution-and-air-quality/cleaner-buses> [Accessed January 8, 2020].
- 51 https://new.mta.info/system_modernization/sustainable-transit
- 52 <https://www.oslo.kommune.no/politics-and-administration/green-oslo/best-practices/car-free-city/#gref>
- 53 Nieuwenhuijsen, M. J. & Khreis, H. Car free cities: Pathway to healthy urban living. *Environ. Int.* 94, 251-262 (2016).
- 54 Masiol, M. Thirteen years of air pollution hourly monitoring in a large city: Potential sources, trends, cycles and effects of car-free days. *Sci. Total Environ.* 494-495, 84-96 (2014).
- 55 https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/gp_cleanairnow_carindustryreport_full_v5_0919_72ppi_0.pdf
- 56 https://storage.googleapis.com/planet4-international-stateless/2018/01/1b96c158-air_pollution-transport_report-2018.pdf
- 57 Montes, F. et al. Do Health Benefits Outweigh the Costs of Mass Recreational Programs? An Economic Analysis of Four Ciclovía Programs. *J. Urban Health* 89, 153-170 (2012).
- 58 Triana, C. A. et al. Active streets for children: The case of the Bogotá Ciclovía. *PLoS One* 14, e0207791 (2019).
- 59 Montes, F. et al. Do Health Benefits Outweigh the Costs of Mass Recreational Programs? An Economic Analysis of Four Ciclovía Programs. *J. Urban Health* 89, 153-170 (2012).
- 60 Engelberg, J. A., et al. Ciclovía Participation and Impacts in San Diego, CA: The First CicloSDias. *Prev Med.* 69, S66-S73 (2014).
- 61 Lelieveld, J., et al. Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *PNAS* 116, 7192-7197 (2019).
- 62 Millstein, D., Wiser, R., Bolinger, M. & Barbose, G. The climate and air-quality benefits of wind and solar power in the United States. *Nature Energy* 2, 17134 (2017).
- 63 Strasert, B., Teh, S. C. & Cohan, D. S. Air quality and health benefits from potential coal power plant closures in Texas. *J. Air & Waste Manage.* 69, 333-350 (2019).
- 64 Millstein, D., Wiser, R., Bolinger, M. & Barbose, G. The climate and air-quality benefits of wind and solar power in the United States. *Nature Energy* 2, 17134 (2017).
- 65 Kalia, V., Perera, F. & Tang, D. Environmental Pollutants and Neurodevelopment: Review of Benefits From Closure of a Coal-Burning Power Plant in Tongliang, China. *Global Pediatric Health* (2017).
- 66 Russell, M. C., Belle, J. H. & Liu, Y. The impact of three recent coal-fired power plant closings on Pittsburgh air quality: A natural experiment. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67, 3-16 (2017).
- 67 Dockery, D.W., et al. Effect of air pollution control on mortality and hospital admissions in Ireland. *Research Report* 176. Health Effects Institute, Boston, MA (2013).
- 68 Strasert, B., Teh, S. C. & Cohan, D. S. Air quality and health benefits from potential coal power plant closures in Texas. *J. Air & Waste Manage.* 69, 333-350 (2019).
- 69 Lelieveld, J., Evans, J., Fnais, M. et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367-371 (2015).
- 70 Larkin, A., et al. Global land use regression model for nitrogen dioxide air pollution. *Environmental science & technology* 51.12: 6957-6964. (2017)
- 71 Levy, R., et al. MODIS Atmosphere L2 Aerosol Product. NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space

- Flight Center, USA: http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD04_L2.006 (2015). f
- 72 GBD 2017 Mortality Collaborators. Global, regional, and national age-sex-specific mortality and life expectancy, 1950–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet*. 392:1684-735. (2018).
- 73 Anenberg, Susan C., et al. Estimates of the Global Burden of Ambient PM_{2.5}, Ozone, and NO₂ on Asthma Incidence and Emergency Room Visits. *Environmental health perspectives* 126.10: 107004. (2018).
- 74 Chawanpaiboon S, Vogel JP, Moller AB, Lumbiganon P, Petzold M, Hogan D, Landoulsi S, Jampathong N, Kongwat-anakul K, Laopaiboon M, Lewis C, Rattanakanokchai S, Teng DN, Thinkhamrop J, Watananirun K, Zhang J, Zhou W, Gülmezoglu AM 2019: Global, regional, and national estimates of levels of preterm birth in 2014: a systematic review and modelling analysis. *Lancet Glob Health* 7(1):e37-e46. doi: 10.1016/S2214-109X(18)30451-0
- 75 World Bank <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/906519-world-bank-country-and-lending-groups>
- 76 Burnett, R, et al. Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115.38: 9592-9597. (2018).
- 77 Burnett R et al 2018: Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences* Sep 2018, 115 (38) 9592-9597; DOI: 10.1073/pnas.1803222115
- 78 Cohen, A. J. et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *Lancet* 389, 1907-1918 (2017).
- 79 European Environment Agency (EEA) 2014: Costs of air pollution from European industrial facilities 2008–2012 — an updated assessment. EEA Technical report No 20/2014. <https://www.eea.europa.eu/publications/costs-of-air-pollution-2008-2012>
- 80 OECD, The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution, OECD Publishing, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264257474-en> (2016)
- 81 Cohen, A. J. et al. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *Lancet* 389, 1907-1918 (2017).
- 82 Birchby D, Stedman J, Whiting S, Vedrenne M: Air Quality damage cost update 2019. Report for Defra. AQ0650. Ricardo Energy & Environment, United Kingdom. (2019)
- 83 Brandt SJ, Perez L, Künzli N, Lurmann F, McConnell R 2012: Costs of childhood asthma due to traffic-related pollution in two California communities. *European Respiratory Journal* Aug 2012, 40 (2) 363-370; DOI: 10.1183/09031936.00157811.
- 84 Anenberg, Susan C., et al. Estimates of the Global Burden of Ambient PM_{2.5}, Ozone, and NO₂ on Asthma Incidence and Emergency Room Visits. *Environmental health perspectives* 126.10: 107004. (2018).
- 85 Trasande L, Malecha P, Attina TM 2016: Particulate Matter Exposure and Preterm Birth: Estimates of U.S. Attributable Burden and Economic Costs. *Environmental Health Perspectives* 124:12. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510810>
- 86 World Health Organization. Health risks of air pollution in Europe—HRAPIE project recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. UN City: Copenhagen, Denmark (2013).
- 87 European Environment Agency (EEA) 2014: Costs of air pollution from European industrial facilities 2008–2012 — an updated assessment. EEA Technical report No 20/2014. <https://www.eea.europa.eu/publications/costs-of-air-pollution-2008-2012>
- 88 Zheng, Xue-yan, et al. “Association between air pollutants and asthma emergency room visits and hospital admissions in time series studies: a systematic review and meta-analysis.” *PloS one* 10.9 (2015).
- 89 Trasande L, Malecha P, Attina TM 2016: Particulate Matter Exposure and Preterm Birth: Estimates of U.S. Attributable Burden and Economic Costs. *Environmental Health Perspectives* 124:12. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510810>
- 90 Dadvand P et al. 2013: Maternal Exposure to Particulate Air Pollution and Term Birth Weight: A Multi-Country Evaluation of Effect and Heterogeneity. *Environmental Health Perspectives*. https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.1205575?url_ver=Z39.88-2003&rfr_id=ori:rid:crossref.org&rfr_dat=cr_pub%3dpubmed
- 91 Malley CS,Daven K. Henze,Johan C.I. Kuylenstierna,Harry W. Vallack,Yanko Davila,Susan C. Anenberg,Michelle C. Turner,and Mike R. Ashmore 2017: Updated Global Estimates of Respiratory Mortality in Adults ≥30Years of Age Attributable to Long-Term Ozone Exposure. *Environmental Health Perspectives* 125:8 CID: 087021 <https://doi.org/10.1289/EHP1390>
- 92 World Health Organization. Health risks of air pollution in Europe—HRAPIE project recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. UN City: Copenhagen, Denmark (2013).
- 93 Achakulwisut, Pattanun, et al. “Global, national, and urban burdens of paediatric asthma incidence attributable to ambient NO₂ pollution: estimates from global datasets.” *The Lancet Planetary Health* 3.4 (2019): e166-e178.
- 94 Anenberg, Susan C., et al. Estimates of the Global Burden of Ambient PM_{2.5}, Ozone, and NO₂ on Asthma Incidence and Emergency Room Visits. *Environmental health perspectives* 126.10: 107004. (2018).
- 95 Chawanpaiboon S, Vogel JP, Moller AB, Lumbiganon P, Petzold M, Hogan D, Landoulsi S, Jampathong N, Kongwat-anakul K, Laopaiboon M, Lewis C, Rattanakanokchai S, Teng DN, Thinkhamrop J, Watananirun K, Zhang J, Zhou W, Gülmezoglu AM 2019: Global, regional, and national estimates of levels of preterm birth in 2014: a systematic review and modelling analysis. *Lancet Glob Health* 7(1):e37-e46. doi: 10.1016/S2214-109X(18)30451-0
- 96 World Bank <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/906519-world-bank-country-and-lending-groups>
- 97 GBD 2017 Mortality Collaborators. Global, regional, and national age-sex-specific mortality and life expectancy, 1950–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet*. 392:1684-735. (2018).
- 98 European Environment Agency (EEA) 2014: Costs of air pollution from European industrial facilities 2008–2012 — an updated assessment. EEA Technical report No 20/2014. <https://www.eea.europa.eu/publications/costs-of-air-pollution-2008-2012>

