

種植 健康空氣

都市綠樹對付懸浮微粒污染和極端高溫效果的全球分析。

執行摘要

The Nature
Conservancy 

共同研究

C40
CITIES
OPPORTUNITY FOR ALL



到 2050 年

絕大多數的人類會住在城市、
城鎮及其他市區。

種植健康空氣

21 世紀是城市居住的世紀，全球將新增 20 億城市人口。順應人類歷史上空前的快速都市化，到 2050 年，絕大多數的人都會住在城市、城鎮及其他市區。值此「城市大獲全勝」的時刻，世界各地的市區也面臨許多重大挑戰，如為急遽增加的市民提供工作和公用事業、保護市民的安危、保護都市的環境資產。全球都市環境最迫切的挑戰，非空氣品質莫屬。在多數城市，最嚴重的空氣污染是各種來源排放的顆粒物，特別是焚燒農業殘餘、薪材及化石燃料。懸浮微粒（直徑不到 2.5 微克 (μg)，也稱為 $\text{PM}_{2.5}$ ）會深深吸進肺臟，每年估計造成 320 萬人死亡（約佔全球疾病 4%）（圖 E1），主要死因是腦血管疾病（如中風）和缺血性心臟病（如心臟病發作）。暴露在 $\text{PM}_{2.5}$ 中也會引發如氣喘等慢性和急性呼吸道疾病。而且，問題可能日益嚴重：一項研究預測，到 2050 年，懸浮微粒每年可能奪走 620 萬條人命。各城市和中央政府深知 $\text{PM}_{2.5}$ 加諸的威脅，迫切地想找到減量的方法。

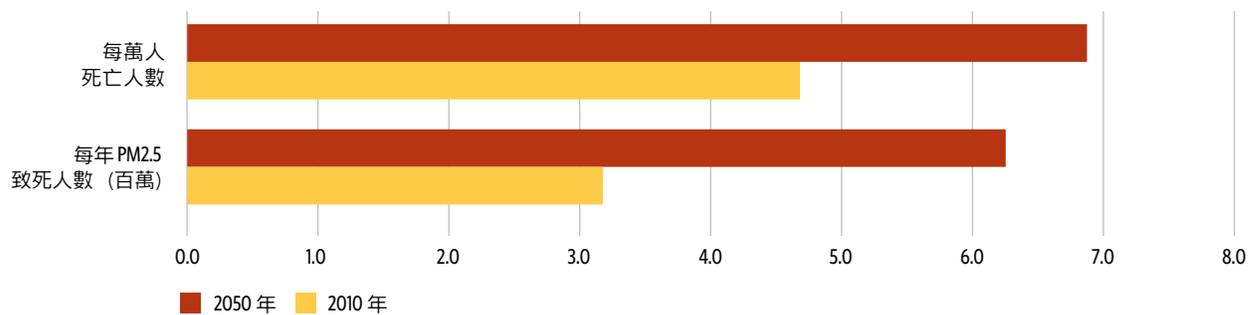


圖 E1. 2050 年相較於 2010 年預測 $\text{PM}_{2.5}$ 全球致死人數，以總死亡人數或每萬人死亡人數為單位。預測的致死人數幾乎加倍（即增加 100%）。部分增幅成因單純是人口成長。不過，預期每萬人死亡人數仍會上升大約 50%，主要是開發中國家的城市 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度上升所致。資料取自 Lelieveld 等人。



城市面臨的另一個迫切問題是夏季的氣溫高到有害人體健康。熱浪已經是全球最致命的天氣相關災害（圖 E2），估計平均一年要奪走 12,000 條人命，而且讓千萬人口的生活水深火熱。氣候變化只會讓城市熱浪的威脅更加嚴重，因為增加的溫室氣體，會積蓄更多太陽能，提高熱浪的頻率和嚴重程度。一份世界衛生組織 (WHO) 的報告預測，若城市未能調適威脅，到了 2050 年，熱浪致死人數每年可能上看 260,000 人。正如機警的城市已著手降低 PM_{2.5} 濃度，面對過熱，數以千計的城市正在尋找更好的辦法來管理並調適。

大自然能幫忙對付空氣太髒太熱的雙重問題嗎？街道兩旁、公園或庭院種植的樹木和其他植物能帶給民眾許多好處，如美感美觀、使房地產增值、水土保持、暴雨調節以及降低噪音。樹木也能蓄積碳，有助於緩和氣候變化。公園也能作為都市的遊憩空間，為身心健康帶來真正的好處。樹木看來也能發揮改善空氣品質的重要作用。現今已有數十項研究指出，樹葉能過濾掉大氣的懸浮微粒還有許多其他空氣污染物。同樣地，有許多科學研究指出，樹木的遮陰和進行光合作用時散發的水氣都有助於降低氣溫，也能減少住宅冷氣用電。但有待城市領導人和公共衛生官員解答的問題是：

- 樹木能解決哪部分的空氣品質問題（懸浮微粒和過熱）？
- 對哪些城市和鄰里的幫助最大？
- 從植樹的數目或經費來看，需要多少投資？
- 相較於其他降低 PM 或環境氣溫的策略，樹木有什麼成本效益之處？

樹木已提供巨大效益

大自然保護協會與 C40 城市氣候領導小組聯手，首度從全球城市研究來回答這些問題。我們利用在 245 座城市收集到的森林和土地覆蓋地理空間資訊、PM_{2.5} 污染物濃度和人口密度，以及文獻確立的關係，估計行道樹目前和未來改善都市空氣品質的規模。我們建立三個情境（高效、中效、低效）來描述樹木引起 PM 濃度和氣溫下降的幅度。因科學文獻回顧指出，樹需鄰近人群，PM 或氣溫下降才有意義，故我們集中分析行道樹。研究取樣的 245 座城市，目前人口約 9,100 萬，約當全球都市人口的四分之一。

據我們研究，目前的城市樹木存量，已看得出實質的好處。估計樹木目前平均已為 130 萬人（情境低-高區間：0.0-610 萬）降低至少 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的 PM_{2.5} 濃度、替 1,020 萬人（100-1,540 萬）降低至少 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 濃度，及替 5,210 萬人（2,380-6,310 萬）降低至少 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 濃度。類似的，樹木已為 6,830 萬人將夏季最高氣溫降低約攝氏 0.5-2.0 度（華氏 0.9-3.6）。報告詳細提到，PM 和氣溫收效之大，影響範圍所及，將使健康實質受惠。

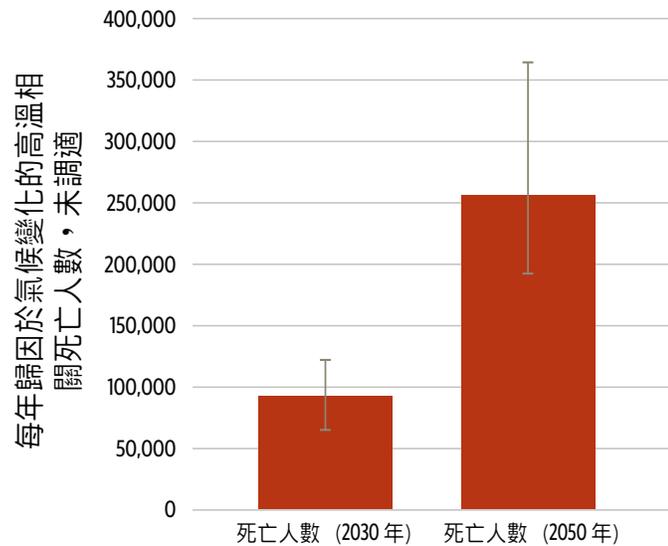
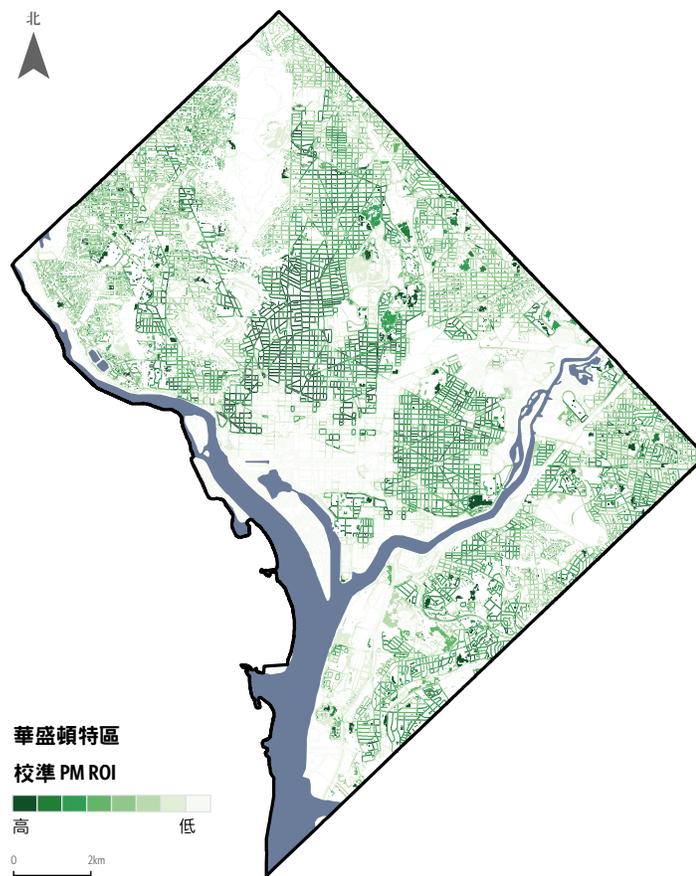


圖 E2. 氣候變化影響所及的高溫肇因死亡預測，以 2030 年和 2050 年的每年死亡人數表示。世界衛生組織的研究探討多種致死的氣候情境（標示誤差線）。資料取自世界衛生組織 (WHO) (2014 年)。

這些數字僅適用於目前行道樹存量。報告指出，許多城市難以維持目前的行道樹存量，我們的發現結果突顯出投資目前存量的重要性。不過在許多城市也存在大量擴大樹木覆蓋，進一步緩和空氣污染和夏季高溫的新契機。研究有評估此項大規模但可行的樹木覆蓋擴增，以每元支出衡量為帶給民眾 $PM_{2.5}$ 減量或氣溫緩和的投資回報率 (ROI)。

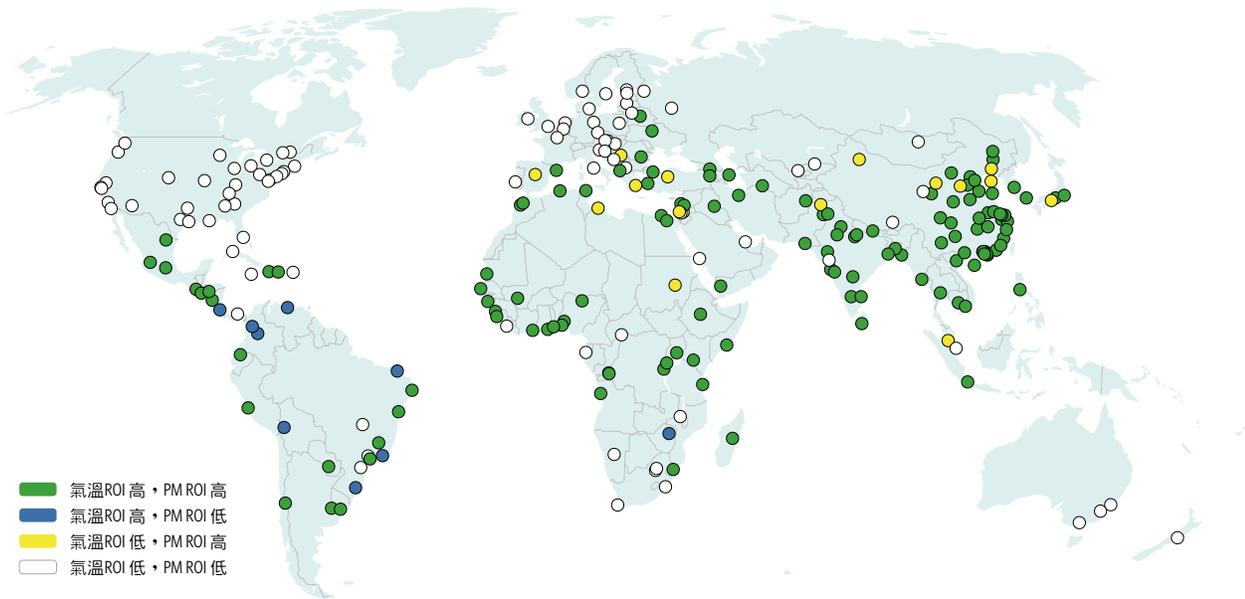
定位的重要性

文獻回顧指出，樹木提供顯著但局部的 PM 和氣溫下降，多數的緩和效果見於植樹處的 300 公尺以內。標定緩和和作用最大的街道變成關鍵因素 (地圖 E1)。我們的結果顯示，城市內的變異極大，最佳的行道樹種植街道投資回報率 (ROI) 往往比不當選址高出 100 倍。一般而言，這類街道的特徵是高人口密度，所以有更多人受惠於更清潔的空氣，樹木可清除的 $PM_{2.5}$ 濃度亦較高。報告討論選擇高 PM 清除能力樹種的種植方針以及適當的種植間距，重點是避免妨礙人群所在處微粒來源 (如快速道路) 的氣流流動。人口密度和 PM 濃度也引發城市間的 ROI 變異 (地圖 E2)。植樹成本是額外的城市間變異因素；其他條件不變下，植樹和養護成本低的城市，ROI 較高。從全球來看，開發程度低的國家植樹與養護成本較低。不過國內的城市間有顯著的變異，原因是可用種植存量、勞力成本，與都市林業計劃規模有所差異。



地圖 E. 街道層級植樹降低懸浮微粒的投資回報率 (ROI) 模式，地點為華盛頓特區。深綠色街道的投資回報率較高。

植樹對氣溫緩和呈現相似的 ROI 模式，街道間的 ROI 相差百倍。理想的高 ROI 街道是高人口密度（或聚集敏感族群），便可讓大量民眾受惠於樹木降溫。我們也討論了氣溫緩和的種植方針，留意極大化氣溫緩和的方針，有異於極大化 PM 清除的方針。人口密度與種植成本，造成城市間出現可觀的氣溫緩和 ROI 變異數（地圖 E2）。不過請注意，乾旱的城市在植樹時可能會面臨取捨：較多的樹會降低最高溫（和 PM 濃度），但要付出佔用一年當中一部分灌溉用水的代價。



地圖 E2. 植樹降低環境氣溫的投資回報率，全球城市觀點





大自然就是成本效益的解決方案

我們的研究也顯示，種植城市行道樹及林冠增殖，是改善空氣品質的成本效益辦法。懸浮微粒的減量成本，以每噸美元來看，各街道間的變異極大，有的街道低於其他可用策略的公告排放控制成本（圖 E3）。不過，植樹減輕 PM 的中位數成本高於納入考慮的六大項策略當中的五個，這表示在很多情況下，其他傳統 PM 減量策略的成本可能更低。降低氣溫的成本（以對 100 m² 大小面積實行的 \$/°C 為單位）在街道間的差異也很顯著，有的地方低於任何可用的傳統策略。除了屋頂冷卻法之外，植樹的中位數成本低於其他每項考慮策略。當然，如果要一併對付 PM 濃度和高溫，樹木覆蓋的比較吸引力仍無人能及，因為傳統「灰色」替代方案無一能兼顧高溫和 PM 問題。再者，樹木提供的其他共同效益（碳蓄積、美感美觀、暴雨調節等）進一步提高樹木覆蓋這項辦法的相對吸引力。

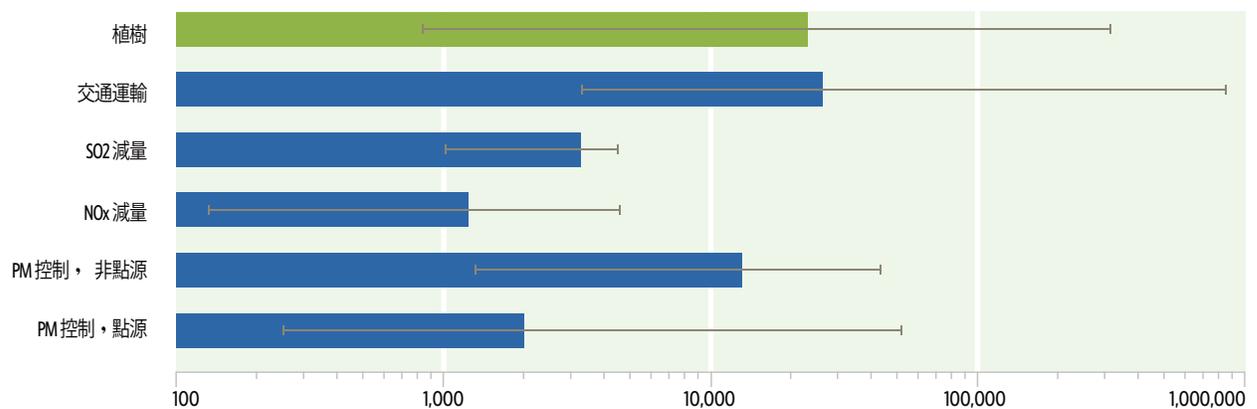


圖 E3. 種植行道樹減少懸浮微粒的成本效益，與一般傳統緩和策略類別比較。綠色線顯示各處種植行道樹的中位數成本效益，誤差線則顯示最低和最高成本效益。成本效益的數值皆對 US2015\$/ton 標準化。請注意，行道樹的每噸 PM 清除成本的中位數，高於許多傳統策略的中位數成本，變異數顯著且多處相較於其他灰色基礎設施策略，植樹具成本競爭力。再者，此處比較有利於傳統策略，原因是成本效益的單位是排放來源免去的 \$/ton 排放量（並非全部轉化為對人的局部濃度減量），但對植樹而言，則代表對人局部減量的實際成本效益。

種在若干街道的行道樹，不只是改善空氣品質的成本效益方式，這些效益也擴及相當比例的市民。降低 PM_{2.5} 污染的全球植樹投資曲線見圖 E4。例如，依中效情境的估計，每年 1 億美元的新增全球樹投資（含種植和養護成本），會讓多 800 萬人的 PM_{2.5} 大幅減量 (> 10 µg/m³)，4,700 萬人中等減量 (> 5 µg/m³)，6,800 萬人有限減量 (> 1 µg/m³)。氣溫的投資曲線形狀雷同（圖 E5）。每年投資 1 億美元，會讓多 7,700 萬人的熱天最高溫降低攝氏 1 度（華氏 1.8 度）（中效影響情境）。

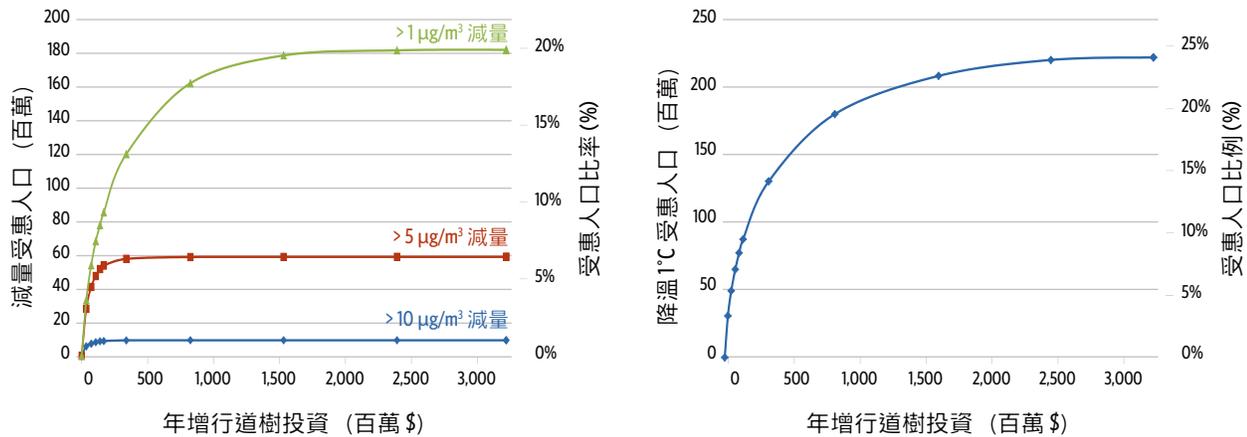


圖 E4 (左)。行道樹對全球都市居民 PM 濃度減量的潛在效益，假設年度植樹與養護投資不同。顯示結果是樹木清除 PM 的中效情境。請注意，5 和 10 µg/m³ 的曲線，在高投資水準時變平坦，原因是很少有城市（主要是污染最嚴重）種植的行道樹能夠清除逾此數量的污染。一旦這些城市充分投資植樹，新增植樹投資將不再增加逾 5 µg/m³ 減量的受惠人數，但會持續增加 1 µg/m³ 有限減量的受惠人數。

圖 E5 (右)。全球都市居民降溫的潛在行道樹效益，假設年度植樹與養護投資不同。顯示的結果是中效情境。高效的情境下，相等人數會降溫攝氏 2 度，低效情境則降溫攝氏 0.5 度。

這些樹木覆蓋可達成的 PM_{2.5} 濃度和氣溫降幅，能帶來有限但顯著的病痛減少。根據戶外 PM_{2.5} 濃度與死亡率的确立關係，我們估計城市最大可能植樹（成本 = 每年 32 億美元）會讓 PM 相關死亡率降低 2.7-8.7%，每年在樣本城市拯救 11,000-36,000 條人命。我們的執行摘要只把重點放在死亡人數上，但對健康當然還有很多影響，如學校或職場的請假天數、住院和早死。研究指出，每有一人死於 PM_{2.5}，代表有許多人因 PM 住院或遭受其他影響，所以我們預期多少受到最大可能植樹受惠的人數，比免於死亡的人數多出好幾倍。

文獻也清楚記載高溫對死亡率的效果。根據高溫與死亡率關聯作用的研究，我們估計城市最大可能植樹會讓高溫相關死亡率降低 2.4-5.6%，每年為研究樣本城市拯救 200-700 條人命。請注意，這數字是指目前的氣候，鑒於氣候變化的潛在趨勢會讓熱死率提高 20 倍，日後這個行道樹救命的數字似乎會大增。

此外，植樹可減少用電並增加碳蓄積。我們估計最大可能行道樹種植情境，每年在 245 座城市減少 0.9-4.8% 的住宅用電（93-480 億 KWhr）。依最大行道樹種植情境，淨碳蓄積會增加 2.7-13 百萬噸 CO₂。合併減少用電的 CO₂ 排放減量，我們估計最大行道樹種植情境的總影響，為每年減少 7.0-35 百萬噸的 CO₂。請注意，這些是 PM 減量和氣溫緩和有益人體健康之外的氣候緩和效益。

大自然將來會更顯重要。

最後，我們的跨時趨勢分析指出，未來樹木供應的生態系統服務的重要性會更高。到 2050 年，死亡率會因 $PM_{2.5}$ 提高 50%，多數應驗在都市區，預測同一期間樣本城市的夏季最高溫會上升攝氏 2-5 度（華氏 4-9 度）。這種雙重威脅對城市造成公共衛生挑戰，即使其他條件不變，也會提高既有樹木的重要性。都市人口也將遽增，因此將有更多人受惠於這項天然服務。最後，種種都市開發或僅僅因為彌補樹木減少的社會投資不足，都可能會減少使都市綠化的量。例如，我們發現在 2000 年至 2010 年這段時間內，有 26% 城市的森林覆蓋減少，同一期間僅有 16% 城市的森林覆蓋增加。

結論

我們即將翻開城市世紀的扉頁。城市的一項重大任務，是要變得生氣勃勃、健康衛生、適宜人居。這份報告僅著眼於其中一小部分，即改善都市空氣的品質。各地城市持續致力於降低懸浮微粒和其他大氣污染物的濃度，並著手因應伴隨氣候變化而來，頻率和強度都有增強的熱浪。我們需要一套完整的方案才能安度空氣污染和高溫的雙重挑戰。大自然保護協會和 C40 城市氣候領導小組在這份報告中，試圖推斷大自然在解決這道雙重難題上能否發揮作用。

答案看來是有保留的「是」。行道樹能列入控制城市懸浮微粒污染與緩和和高溫的成本效益干預清單。樹木固然無法也不應該取代其他改善空氣品質的策略，但能與其他策略併用，幫助清潔與冷卻空氣。再者，樹木除了更清潔健康的空氣之外，還能帶來其他諸多效益。如果選址得宜，樹木能同時改善空氣品質和綠化環境，讓城市更宜居。



誌謝

主筆

Rob McDonald，大自然保護協會

Timm Kroeger，大自然保護協會

Tim Boucher，大自然保護協會

Wang Longzhu，大自然保護協會

Rolla Salem，大自然保護協會

副筆

Jonathan Adams

Steven Bassett，大自然保護協會

Misty Edgecomb，大自然保護協會；

Snigdha Garg，C40 城市氣候變化領導小組



平面設計

Paul Gormont，Apertures, Inc

文字編審

Sonya Hemmings

每年全球投資 32 億美元——
每名居民支出不到 4 美元

——每年就能拯救數以萬計的寶貴生命，
並改善上百萬人的健康狀況。





大自然保護協會 (The Nature Conservancy)

4245 North Fairfax Drive, Suite 100
Arlington, VA 22203-1606

電話：703-841-5300
網站：www.nature.org

www.nature.org/healthyair

