

# 栽种 健康空气

一项全球分析，旨在分析城市绿化树木在解决颗粒物污染和极端高温方面起到的作用。

执行摘要

The Nature  
Conservancy 

合作方

C40  
CITIES  
OPPORTUNITY FOR ALL





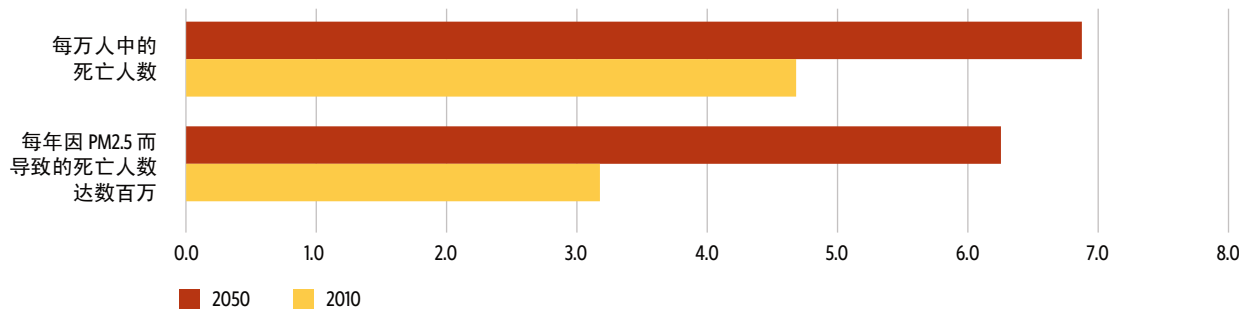
到 2050 年，

绝大部分人将会居住在城市、  
城镇和其他城市地区。



# 栽种健康空气

21 世纪将是城市世纪，因为全球范围内城市地区新增人口将超过 20 亿。这种极速的城市化可谓史无前例，到 2050 年，绝大部分人口将会居住在城市、城镇和其他城市地区。然而在这一“城市获胜”的时刻，全球的城市地区也面临着许多重大挑战，从就业机会、公共设施到市民人口的迅速增长，再到保护居民免遭犯罪和暴力侵害，再到安全保护城市环境资产等等。全球城市环境挑战中最为紧迫的是空气质量问题。在大多数城市中，最具危害性的空气污染物是颗粒物，其释放源有多种，尤其是农业残留物、薪材和化石燃料的燃烧。细颗粒物（直径小于 2.5 微米，也就是常说的  $PM_{2.5}$ ）可以被深深吸入肺中，据估算，一年可造成大约 320 万人死亡（大约占全球疾病负担的 4%）（图 E1），发病原因主要是脑血管疾病（如中风）和局部缺血性心脏病（如心脏病发作）。 $PM_{2.5}$  接触还会导致慢性和急性呼吸道疾病，如哮喘。而且该问题还有雪上加霜的风险：据一份研究预测，到 2050 年，每年将会有 620 万人丧生于细颗粒物。各大城市和国家政府都清楚地认识到  $PM_{2.5}$  的威胁，因此正迫切寻找消减的办法。



**图 E1.** 与 2010 年相比，预计 2050 年  $PM_{2.5}$  所导致的全球死亡率（无论是总死亡人数或者每万人中的死亡人数）。预计死亡人数将接近翻倍（即，增长 100%）。这一数据增长一部分仅仅是由于人口增长。但是每万人中的死亡人数预计还会增长约 50%，主要是由于发展中国家城市中  $PM_{2.5}$  浓度的上升。来自 Lelieveld 等的的数据<sup>4</sup>



城市所面临的另一个严峻问题就是夏季气温变得极高，从而威胁人类健康。酷暑热浪已是造成全球大部分死亡的气候灾难（图 E2），平均每年有大约 12000 人丧生，让数百万人的生活痛苦不堪。气候变化只会使城市热浪的威胁变得更加严重，因为温室气体的增加会导致太阳能量吸收的增长，因此提升热浪的频度和严重性。世界卫生组织的一份报告预测，到 2050 年，除非城市能适应热浪威胁，否则热浪导致的死亡人数将达到每年 26 万。正如很多智慧城市正努力降低 PM<sub>2.5</sub> 浓度，数千城市也在寻求可以更好地管理和适应过热气候的良策。

大自然能否帮助人们解决空气过脏和过热这一双重问题呢？种植在城市街道或生长在公园或住宅庭院里的树木或其他植被，使人类受益良多，包括增加美观性、提升房产价值、防止侵蚀、雨洪管理以及消音减噪等等。树木还有固碳作用，帮助减缓气候变化。公园也可为市民提供娱乐休闲空间，带来切切实实的身心健康好处。树木似乎在净化大气方面也扮演着关键角色。如今大量研究显示，树叶可过滤掉大气中的颗粒物，以及其他多种空气污染物。同样，很多科学研究也显示，树木所投下的树荫以及它们光合作用所产生的水汽蒸腾都有助于降低空气温度，同时还可减少住宅降温所需耗费的电力。但对于城市领导和公共卫生官员而言，还有以下问题悬而未决：

- 树木可解决多少比例的空气质量问题（颗粒物和过热）？
- 哪些城市和哪些社区可获得最大程度的改善？
- 需要进行多少投资（需种植多少棵树木或者花费多少资金）？
- 与降低 PM 或周围空气温度的其他策略相比，植树造林对于哪些地区而言是一种更具成本效益的投资？

## 树木已为人类带来大量好处

美国大自然保护协会与 C40 城市气候领导联盟合作开展了首次全球城市研究——以寻求这些问题的答案。我们收集 245 个城市的有关森林和地理覆盖、PM<sub>2.5</sub> 污染物浓度以及人口密度的地理信息，然后利用文献中的既定关系，预估当前和未来行道树净化城市空气的作用范围。我们建立了三个情境（高、中和低），以描述树木所显示的降低 PM 浓度和温度的作用范围。我们重点分析行道树，因为我们查阅科学文献时发现需确保树木和人的临近性以实现有意义的 PM 消减或温度降低。我们目前所研究的 245 个城市大约容纳了 9.1 亿人口，大约是全球城市人口的四分之一。

我们所研究城市当前已种植的行道树为人们带来了切实利益。我们预计当前树木平均可为 130（低情境——高情境范围：0.0-610）万人提供至少 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  的 PM<sub>2.5</sub> 消减效益，为 1020（100-1540）万人提供至少 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  的 PM<sub>2.5</sub> 消减效益，为 5210（2380-6310）万人提供至少 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  的 PM<sub>2.5</sub> 消减效益。同样，树木可为 6830 万人降低夏季最高气温大约 0.5-2.0° C（0.9-3.6° F）。正如本报告中所详细讨论的，对于 PM 和温度的这种影响幅度可以为相关人群带来实实在在的健康益处。

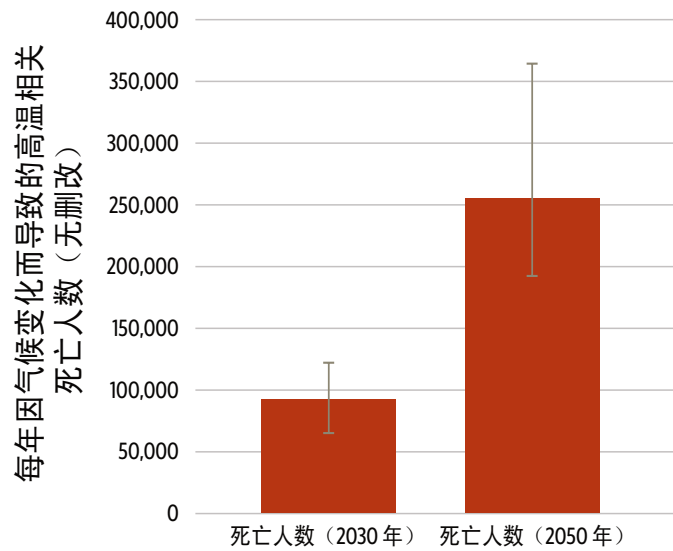
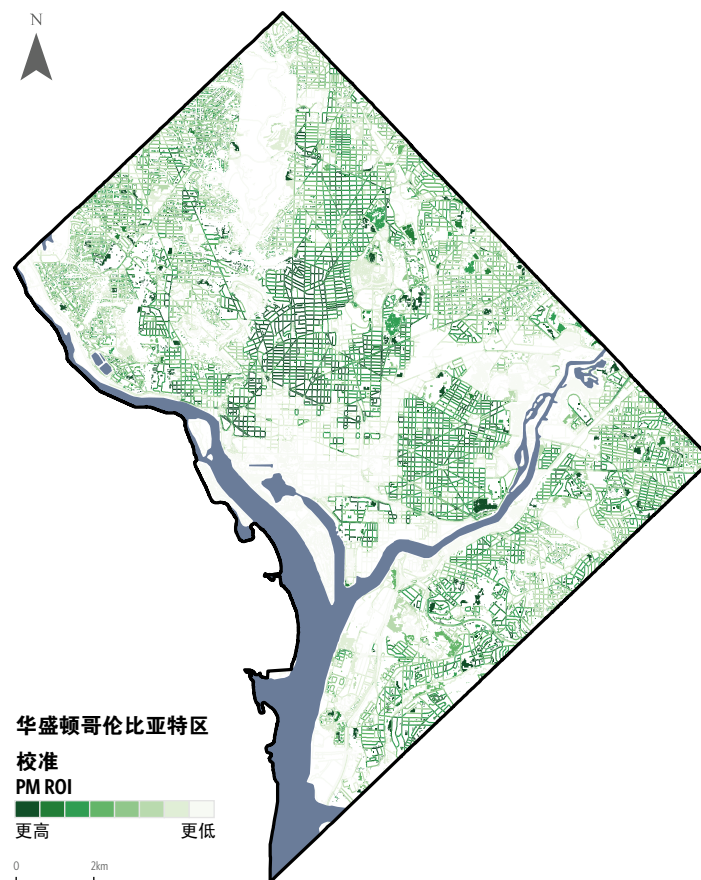


图 E2。气候变化对过热相关死亡率的影响预计，以 2030 年和 2050 年年度死亡数目表示。WHO 研究分析了可造成一系列死亡率的一系列气候情境（以误差条显示）。数据来自 WHO（2014）。

这些数字只仅仅针对目前所种植的行道树而言。正如报告所述，很多城市都在努力维持其目前的行道树数量，我们的研究结果也强调了进行投资以维持行道树的重要性。然而，很多城市也亟需增加树木植被以进一步消减空气污染和降低暑热。在此次研究中，我们评估了此类大规模但切实可行的树木植被增长举措的作用，衡量了它们在帮助人们实现  $PM_{2.5}$  降低或温度下降方面的每美元投资回报率 (ROI)。

## 确定目标的重要性

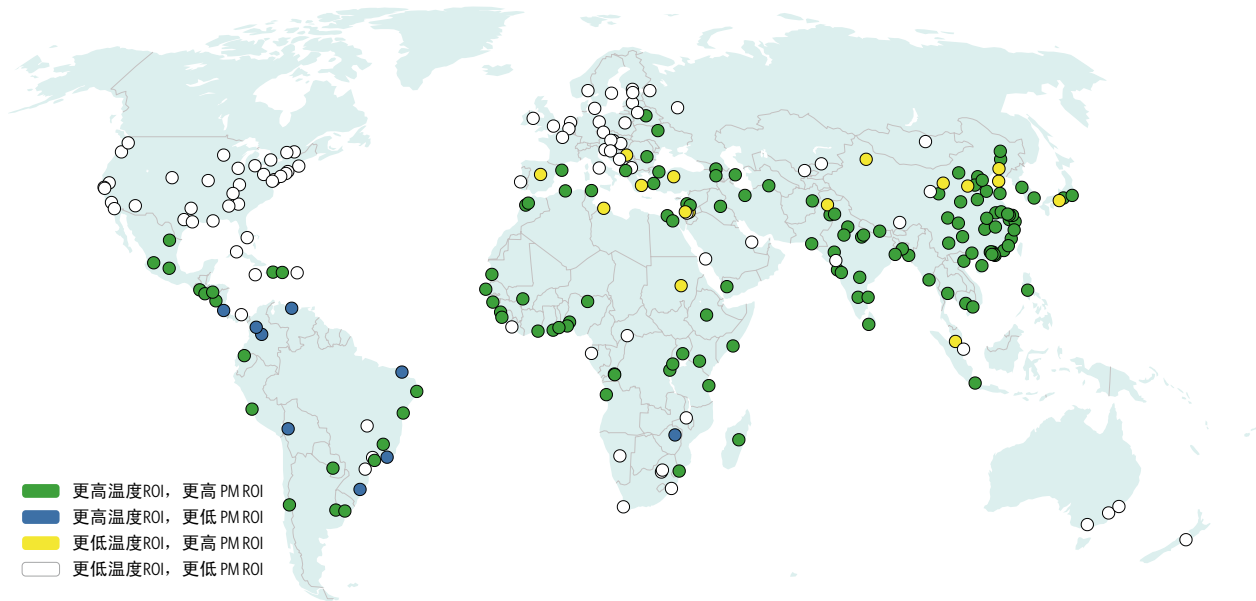
我们查阅文献资料后发现树木可带来非常有意义的 PM 和温度降低作用，但是带有局部性，大部分削减作用通常只限于距离植被方圆 300 米范围内。因此，将消减作用最大的社区设为目标至关重要 (地图 E1)。我们的研究结果显示出城市内的实质变异，行道树种植最佳适用社区往往比最不适用社区的植树造林投资回报率 (ROI) 高一百倍。通常而言，这些社区人口密度更高，因此，树木削减更高浓度的  $PM_{2.5}$  所带来的空气净化优势可使更多人受益。我们在报告中讨论了树木栽培的指导原则，可利用该指导原则选择具有高 PM 消减能力的树种，并确定树木之间的适当间隔，因为要避免颗粒物源 (如高速公路) 侵袭人群所在区域的气流，这点非常重要。人口密度和 PM 浓度也会推动各城市间的 ROI 变化 (地图 E2)。每个城市都会有所不同的另一个因素是植树造林的成本问题；在其他条件都相同的前提下，具有较低树木栽种和维护成本的城市其 ROI 更高。全球范围内，欠发达国家的树木栽种和维护成本往往较低。但是，由于定植苗可得数量、劳动力成本以及城市林业项目规模等方面的差异，国家中各城市间也会存在实质性不同。



地图 E 华盛顿哥伦比亚特区植树造林消减颗粒物的投资回报率 (ROI) 社区层面模式。树木植被覆盖更为浓密的街道往往具有更高的投资回报率。



植树造林降温作用的 ROI 也具有类似模式，各社区间的 ROI 可相差高达 100 倍。理想的高 ROI 社区一般具有高人口密度（或高敏感人群密度），因此可受益于树木降温优势的人口数量也就越多。我们还讨论了针对降温的树木栽种指导原则，其重点强调了与可最大程度推动降温的指导原则存在差异的可最大程度消除 PM 的指导原则。人口密度和栽种成本推动各城市间降温作用 ROI 的差异加剧（地图 E2）。但是请注意，干旱城市在栽种树木前可能需进行一些权衡取舍：虽然树木增长可以降低最高温度（和 PM 浓度），但是它们的生长离不开水，至少在一年中的部分时期需要用水灌溉，而某些地区水资源非常缺乏。



地图 E2. 全球城市植树造林以降低环境温度的投资回报率。





## 大自然是一个具有成本效益的解决方案

我们的研究结果还显示，城市行道树栽种和遮蓬的强化也是一个具有成本效益的空气净化方案。对于颗粒物而言，其消减成本（美元/吨）在不同社区都有显著差别，而且在某些社区，该成本显著低于其他可用策略的已发布排放控制成本（图 E3）。然而，针对 PM 消减的植树造林平均成本要高于我们所考虑的六分之五大类策略，这显示出在很多情况下，其他传统 PM 消减策略可能成本更低。各个社区的降温成本（单位：\$/°C，在 100 平米面积区域上执行该措施）也有显著差异，其中某些地区的降温成本低于任何传统策略的成本。植树造林的平均成本低于我们所考虑的其他任何策略的成本，冷屋顶技术除外。当然，在同时饱受 PM 浓度和高温之苦的地区，增加树木植被的相对吸引力会高得多，因为没有哪种传统的“灰色”替代方案可以同时解决高温和 PM 问题。此外，树木可提供的其他协同效应（碳封存、美观性、雨洪消减等等）进一步增强了植树造林这种解决方案的相对吸引力。

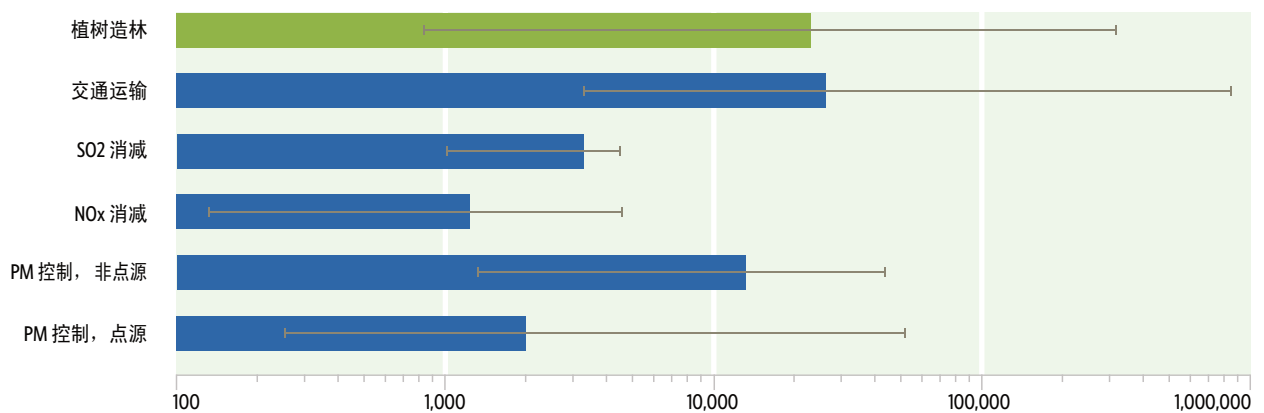
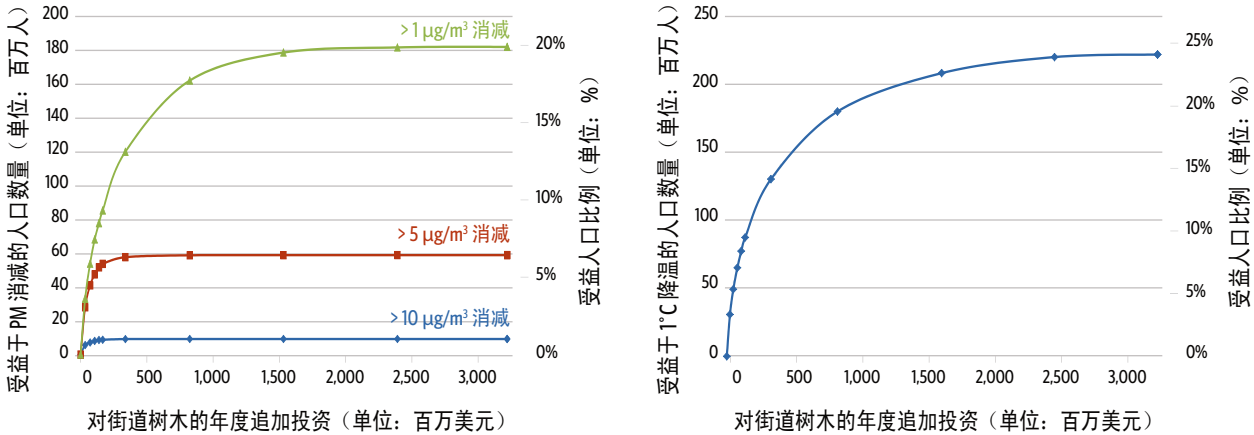


图 E3。与常见类型传统消减策略相比，种植行道树以减少颗粒物的成本效益。绿条显示了在各区域种植行道树的平均成本效益，而其误差条则显示了最低和最高成本效益。所有成本效益值都符合美国 2015 年美元/吨标准。注意，虽然与很多传统策略相比，利用行道树消减每吨 PM 的平均成本更高，但是存在显著差异，在很多区域，树木栽种与其他灰色基础设施策略相比更具成本竞争力。此外，这一对比是有益于传统策略的，因为它们的成本效益是按照排放源处所避免的美元/吨排放量计算的（其中并非所有都会转化成对于居民的本地浓度消减量），而树木栽种策略的成本效益代表的是对于居民的本地浓度消减量的实际成本效益。

某些社区的行道树栽种不仅是一个具有成本效益的净化空气良策，而且还可为大量城市居民提供此类益处。全球植树造林降低 PM<sub>2.5</sub> 污染的投资曲线如图 E4 所示。例如，我们估计，在适中影响情境下，每年平均增加 1 亿美元的全球植树造林投资（包括栽种和维护费用），所带来的 PM<sub>2.5</sub> (> 10 μg/m<sup>3</sup>) 显著降低效益可多造福 800 万人，PM<sub>2.5</sub> (> 5 μg/m<sup>3</sup>) 适中降低效益可多造福 4700 万人，PM<sub>2.5</sub> (> 1 μg/m<sup>3</sup>) 轻微降低效益可多造福 6800 万人。温度投资曲线的形状看起来也相似（图 E5）。每年 1 亿美元的投资，可使高温天最高温度降低 1°C (1.8°F)（适中影响情境），可多造福 7700 万人。



**图 E4 (左图)。**在树木栽种和维护不同年投资条件下行道树降低 PM 浓度造福城市居民的全球潜力。所显示结果是针对树木消减 PM 的效力方面的适中影响情境。请注意，5 和 10 μg/m<sup>3</sup> 的曲线在高投资水平时会拉平，因为其行道树栽种消减的污染量会超过这个数值的城市数量相对很少（主要是最重污染城市）。一旦这些城市的行道树栽种投资变得充分起来，其树木栽种的追加投入不会提高受益于超过 5 μg/m<sup>3</sup> 污染物消减的居民的数量，但是还会持续增加受益于 1 μg/m<sup>3</sup> 这一轻微污染物消减的居民的数量。

**图 E5 (右图)。**在树木栽种和维护不同年投资条件下行道树降低温度造福城市居民的全球潜力。所显示结果是针对适中影响情境。在高影响情境下，同等数量的居民将会受益于 2°C 的降温，而在低影响情境下，同等数量的居民将会受益于 0.5°C 的降温。

这些通过树木植被可获得的 PM<sub>2.5</sub> 浓度和温度方面的消减幅度，可提供轻微但十分重要的疾病减少益处。基于室外 PM<sub>2.5</sub> 浓度和死亡率之间广为被人接受的关系，我们预估，在我们城市中栽种尽可能多的树木（成本=每年 32 亿美元）可以每年将 PM 相关死亡率降低 2.7-8.7%，在我们所研究的城市中拯救 11000-36000 条生命。在本执行摘要中，我们重点关注死亡率数据，但是当然有一系列健康影响，从学时或工时损失到入院治疗再到早产死亡等。研究表明，每发生一起 PM<sub>2.5</sub> 相关死亡事件，就有很多人入院治疗或受到 PM 的其他影响，因此我们估计，同样，因最大程度栽种树木而一定程度上受益的人口数量比所避免的死亡人数要多几倍。

高温对死亡率的影响在文献资料中也有颇多记载。基于功能上将死亡率与高温联系起来的研究，我们预估，在我们城市中栽种尽可能多的树木可以每年将高温相关死亡率降低 2.4-5.6%，在我们所研究的城市中拯救 200-700 条生命。注意，这一数字针对当前气候条件。根据可将高温相关死亡率提升超过 20 倍的气候变化潜力，行道树拯救生命的这一数据在未来可能会大大增加。

此外，行道树还可降低电力消耗，提升碳封存。我们预估，如果栽种尽可能多的树木，则可以每年将我们 245 个城市的居民电力消耗量降低 0.9-4.8% (93 亿-480 亿千瓦时)。在最大程度栽种行道树的情境下，净碳封存量将增加 270 万-1300 万吨 CO<sub>2</sub>。结合因电力消耗降低所减少的 CO<sub>2</sub> 排放量的预估值，我们预估，最大程度栽种行道树情境的整体影响将是每年减少 700 万-3500 万吨 CO<sub>2</sub> 排放。注意，这些气候消减益处与 PM 降低和温度下降所带来的人类健康好处是并行的。



## 在未来，大自然将扮演着更为重要的角色。

最后，我们的变化趋势分析显示，树木所提供的生态系统服务在未来会变得愈加至关重要。到 2050 年，因 PM<sub>2.5</sub> 而造成的死亡率将会增长 50%，其中大部分发生在城市地区。而到 2050 年，我们所研究的城市中夏季最高温度预计将上升 2-5°C (4-9°F)。虽然这个双重问题对城市居民的健康造成了严峻的威胁，且在其他所有条件相同的情况下，已栽种树木的重要性也会日趋凸显。城市人口数量也会急剧增长，这可以提高可能受益于自然服务的人口数量。最终，所有这些城市发展，或只是简单的对置换损失树木的社会投资不足，都可能会降低城市绿化水平。例如，我们发现 26% 的城市在 2000-2010 年间的森林覆盖率有所下降，而在这期间内仅有 16% 的城市的森林覆盖率有所上升。

## 结论

我们当前位于城市世纪之初。城市的首要任务之一在于保持自身的活力和健康，使自身成为适于居住的魅力城市。本报告只关注了该任务的一个极小部分，即探寻净化城市空气的良策。各大城市持续努力降低颗粒物和其他空气污染物的浓度。而且它们也在开始做出计划和准备，以应对气候变化可能带来的酷暑热浪的更高频率和强度。要成功应对这项双重挑战——空气污染和过热——将需要采取一系列举措。在本报告中，美国大自然保护协会与 C40 城市气候领导联盟已作出相应努力，试图了解在解决这项双重挑战方面大自然是否可以起到一定作用。

答案似乎是合格的“是”。在控制城市颗粒物污染和降低高温的一系列具有成本效益的干预措施中，行道树是一个不可或缺的部分。虽然树木不能也不应该替换其他空气净化策略，但是树木栽种可以与这些其他策略结合起来，帮助实现空气的净化和冷却。此外，树木还可提供空气净化之外的其他大量好处。如果栽种在正确区域，树木可以帮助净化和冷却我们的空气，提高我们城市的绿化和活力。



# 致谢

## 主要撰稿人

Rob McDonald, 美国大自然保护协会

Timm Kroeger, 美国大自然保护协会

Tim Boucher, 美国大自然保护协会

Wang Longzhu, 美国大自然保护协会

Rolla Salem, 美国大自然保护协会

## 特约作者

Jonathan Adams

Steven Bassett, 美国大自然保护协会

Misty Edgecomb, 美国大自然保护协会;

Snigdha Garg, C40 城市气候领导联盟



## 图形设计

Paul Gormont, Apertures 公司

## 文字编辑

Sonya Hemmings

版权所有 © 2016 The Nature Conservancy. 保留所有权利。

本报告作者诚挚感谢咨询委员会和报告审稿人所提供的有益评论和指导意义。本报告的财政支持来自于中国全球保护基金和美国大自然保护协会的“全球和北美城市项目”。



每年全球投资 32 亿美元  
每位居民不到 4 美元

则每年可挽救成千上万条生命，  
并改善成百上千万人口的健康状况。







**The Nature Conservancy** (美国大自然保护协会)

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

电话: 703-841-5300

网站: [www.nature.org](http://www.nature.org)

[www.nature.org/healthyair](http://www.nature.org/healthyair)

