508残障人士无障碍阅读–本文有HTML支持代码 https://doi.org/10.1289/EHP4869-zh.

空气污染会降低我们的生产效率吗？

Silke Schmidt

https://doi.org/10.1289/EHP4869-zh

对空气污染的管制降低了人们患心脏病和肺病的几率。例如， 1990 年通过的《清洁空气法修正案》（Clean Air Act Amendments）仅在 2010 年就避免了大约 16 万人死亡和 8.6 万人住院。[1] 然而，越来越多的研究表明，受污染的空气也会损害我们的大脑。

长期暴露于与交通有关的污染物可能会增加神经系统疾病的风险。[2] 短期、长期暴露都会导致人力资本下降，包括学童的学习成绩[3] 以及工人终身的生产力。[4] 2018 年哥伦比亚大学的 Matthew Neidell 和加州大学圣地亚哥分校的 Joshua Graff Zivin 写道，“新的经济学关于劳动生产率和人力资本积累的研究揭示，这些不足以致命的影响无处不在 . . .叠加起来的效应可能对全球产生相当大的社会影响。”[4]

室内外空气污染的组成部分

估测空气污染产生的细微影响需要长期的空气质量数据。由于有了《清洁空气法》，通过庞大的网络对选定的户外空气污染物进行检测，[5] 得以向研究人员和公众提供大量的相关信息。如今，这个全国性的网络包含了主要由国家环境机构运营的4千多个监测站。这些机构每小时或每天向美国环境保护署（EPA）的中央数据库发送污染物浓度的测量值。

EPA 划定并监测环境空气中的6种“标准污染物”：颗粒物（PM）、地面臭氧、二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳，以及铅。 PM 包括从车辆、工厂、野火以及其他人为和自然源排放的各种可在空气中传播的细微固体和液滴。来自室外的其他污染物包括甲烷、挥发性有机化合物（VOCs）、花粉、金属以及硫和氮氧化物。

尽管这些化学物质是在室外产生的，但它们可以传播到室内，而人们每天大部分时间都是在室内度过的，比如，美国人平均 90% 的时间都在室内。[6] 室外污染物的浓度在室内低于室外。但是哈佛大学暴露评估科学助理教授 Joseph Allen 指出了室外空气污染的“肮脏秘密”。他解释道：“当我们把呆在建筑物内的时间考虑进去，一个简单的计算即可表明，我们暴露于室外空气污染的程度实际上与在室内的暴露程度相差无几。”污染物的渗透程度取决于建筑结构、通风率、当地气象条件和污染物本身。另一个因素是是否开窗，取决于室外温度。

室内污染源也会产生多种混合污染物。例如， PM 是由烹饪和室内供暖产生的。常见的室内过敏原包括霉菌、粪便、唾液以及尘螨和蟑螂的尸体。而 VOCs 在低温下蒸发，通过建筑材料、油漆和防护涂层、地毯和家具中的粘合剂、清洁剂及其他产品排放。

空气污染同样会逆向传播。研究人员最近估测发现，随着一些污染物的室外源头减少，在城市中，室内使用化学产品产生的 VOCs 在室外有机空气污染物中所占的比例要比过往占更大的比例。[7]

Allen 说，这一发现更改了 VOCs 的相对重要性。“我们不应该只把它们当作室内污染物。”他说，“除了室外空气污染的肮脏秘密外，我们现在还有室内空气污染的肮脏秘密。

根据 2018 年《全球空气质量》（*State of Global Air*）报告[8]，估计世界上有 95% 的人口呼吸不健康的空气，年度细微颗粒物 ($PM_{2.5}$) 浓度仍然高于世界卫生组织 10 $\mu g/m^3$ 的标准。报告发现，室外 $PM_{2.5}$、室内空气污染和臭氧的组合是全球第四大威胁人类健康因素。这3种污染物导致的死亡人数估计占全球死亡人数的 11.2% 。

无处不在的空气污染促使了许多来自不同领域的研究人员不仅研究其对死亡率和发病率的影响，而且还进一步研究其对健康大脑产生的更微妙的影响。

空气污染物对大脑的短期影响

当哥伦比亚大学健康政策和管理的副教授 Matthew Neidell 开始对空气污染和人类生产力进行研究时，他首先从户外工作的人群（加州的水果采摘工人[9]）着手，随后对制造业的室内工人（加州的梨包装工人[10]）和服务业的白领上班族（中国的呼叫中心员工[11]）进行了研究。

Neidell 的研究小组看到了一致的证据，表明室外空气污染水平升高与工人产量下降有关联。他们在呼叫中心员工中也观察到这种关联。“我们发现，在空气污染严重的日子里，他们完成的呼叫次数越来越少，休息时间越来越多。” Neidell 说道。他推测那些员工可能“在不明原因的情况下感到身体有些不舒服，所以比平时离开办公桌去洗手间或饮水机的次数更多。”

这些影响听起来微乎其微，但其潜在的经济影响可能是巨大的。例如，洛杉矶郡在 2014 年有 28 天超过了 EPA 空气质量指数（Air Quality Index） 150（这一数值被认为“对人群健康有害”）。[12] 如果将中国呼叫中心员工例子的估算—空气质量与生产率之间的联系—应用到洛杉矶郡所有服务业的工作者身上，作者预计如果空气污染指数降至 150 以下将使该行业的生产率产生的收益增加逾 3.7 亿美元。[11]

为了探索 $PM_{2.5}$ 是否会影响认知功能， Neidell和他的团队转向纽约证券交易所。[13] 他们分析了近 10 年的标准普

室外产生的污染物可以传播到室内，而美国人平均 90% 的时间都在室内度过。 20 世纪 70 年代引入的一些节能建筑技术导致室内污染物聚集；到 20 世纪 80 年代，“病态建筑综合症”的报告开始出现在医学文献中。[52] 新的建筑评级系统，如能源与环境设计先锋（Leadership in Energy and Environmental Design®，LEED）意识到室内最佳通风设计的重要性。[53] Image: © Pavel L Photo and Video/Shutterstock.

尔 500 指数 (S&P 500) 回报率，将其作为衡量股票经纪人工作绩效的指标，发现纽约市较高的 $PM_{2.5}$ 水平与股票交易回报率下降有关联。在美国其他 43 个主要城市中，并没有发现股市与空气质量之间存在这种关联。

为了解释这一发现， Neidell 指出有研究表明认知能力的降低可能导致了更多的风险规避行为。[14,15]“对于股票经纪人来说，这可能意味着他们的决策转向风险更低的投资，”他推测道。

一项被广泛使用的市场风险规避指标，[16,17]“恐惧指数”，在 Neidell 的研究中也同样与纽约 $PM_{2.5}$ 的水平有关联，从而支持了他的假设。此外，它与标准普尔 500 指数之间的关联也是出人意料地强劲；例如，增加一个标准差的颗粒污染与当天回报率下降 11.9% 有关联。

这一发现具有广泛的影响，因为“股票价格的变化会在整个美国和国际经济释放出投资信号，”作者写道。[13] 据报道，一家拥有 10 多万投资者的德国经纪公司也同样有相似的关联。[18]

为了跟进这些有趣的结论， Neidell 目前正在进行一项校园研究，测试哥伦比亚大学学生的决策能力是否随室外 $PM_{2.5}$ 水平的变化而变化，其数值从接受评估学生所在的大楼中测量而得。

这一方法[19] 与最近 Allen领导的一项室内空气污染物研究的方向一致。与 1970 年的一项交通污染实验研究相类似[20]，该研究将不同的污染物和通风水平随机分配给办公室的参与者，然后要求他们在当天结束时完成一项认知测试。参与者和为其测试打分的分析人员对暴露状态一无所知，而且每个人都有绝对的支配权。

在 VOC 水平较低的室内条件下，测试者的分数明显较高。在二氧化碳水平相对较低时研究人员得出相似的结论，二氧化碳是一种长期以来被认为在典型室内浓度下良性的通风标志。 Allen团队后来的一项研究发现，航空飞行员在高级模拟演练（如在飞行模拟器中只使用一台引擎飞行）时在低浓度二氧化碳的表现比高浓度更好。[21] 这一发现进一步支持了二氧化碳作为一种潜在室内污染物所充当的角色。[22]

在最初对室内工作者的研究中，[19] 他们发现随着通风率的增加，低 VOC /低二氧化碳房间的测试分数甚至更高。Allen 的研究小组估算，在美国的气候范围内，将建筑

政府对车辆和工厂的管制以及减排技术的应用，减少了某些室外空气污染的主要排放源。现在室内使用化学产品产生的 VOCs 在城市地区的室外有机空气污染物比例中占据了更大的份额。[7] Image: © iStockphoto/cgering.

通风成本的标准从目前的每人每分钟 20 立方英尺（cfm/p）提高到每人每分钟 40 立方英尺（cfm/p）。他们预计，每年增加的能源成本最多为每人额外增加 40 美元，但由于提高了生产率，公司将从每位员工身上获得 6500 美元的收益。[23]

“显然，健康和人类生产力的提高所带来的[估算]好处大大超过了成本。” Allen说道，“很长时间以来，人们关注的焦点一直在能源效率上，而忽视了健康。其实这两个概念并不是相互排斥的论点。”

其他的研究，尤其是室外污染物，其结论与 Allen 的报告一致，认为短期接触可能损害健康的大脑功能，不仅仅是办公楼和飞机上的工作人群，还有学童。

例如，由西班牙巴塞罗那庞培法布拉大学（Pompeu Fabra University）预防医学和公共卫生教授 Jordi Sunyer 领导的研究发现，日常和交通有关的空气污染水平的上升与小学生注意力持续时间缩短有关联。[24] 在以色列，日常 $PM_{2.5}$ 水平越高，高中生在高难度的巴格鲁特考试 (Bagrut exam) 中的表现就越差，进而会影响到大学录取。[3] 根据 28–30 岁的人群跟踪调查显示，考试当天较高的 $PM_{2.5}$ 水平也与进入年限较短的中专教育和较低的月收入有关联。[3]

空气污染物对大脑的长期影响

其他一些研究也调查了在胎儿期和儿童期长期暴露产生的影响。哥伦比亚大学的 Frederica Perera 的团队在这方面进行了开创性的研究，证明胎儿产前暴露于空气中的多环芳烃与3岁时的认知发育迟缓有关。[25]

其他研究表明，在子宫内或儿童期期间长期暴露于空气污染物会降低学习成绩，[26,27,28] 大大增加患自闭症谱系障碍（autism spectrum disorder，ASDs）的风险，[29,30] 从而影响其成年后的收入水平。[31] 对老年人而言，大部分的研究发现长期暴露与认知能力下降和患神经退行性疾病有关联。[2,32]

最近在中国进行的一项跨年龄段的小组研究引起了科学家和主流媒体的关注。包含近 162 个县、超过 2.5 万名儿童和成人的全国代表性样本中，证实了较高的空气污染指数与认知功能下降有关联，估测长期（不超过 3年）暴露比短期（1 至 7天）暴露的影响更大。[33]

研究人员将两组县级测试（2010 年和 2014 年）的数学和语言成绩与中国城市 402 个空气质量监测站的数据相互对照。总体而言，污染水平高于美国和欧洲，但与发展中国家的其他地区水平相当。

有证据表明，空气污染可能会对员工生产力产生微妙的影响。一个研究团队报告显示，环境 $PM_{2.5}$ 水平升高与股票交易回报率下降之间存在联系，这可能是因为高风险规避行为造成的。Image: © iStockphoto/kasto80.

南加州大学预防医学副教授 Jiu-Chiuan Chen 说，像这样规模大、年龄跨度大、暴露可变度高的大样本量的认知评估，美国在短时间内是不可能完成的。中国的研究表明老年人和受教育程度较低的男性与空气污染之间有更强的关联性，尽管美国城市的空气污染水平较低，这一结论在美国人口中可能也同样适用。

“我们自己的研究也发现了类似的证据，表明在神经毒性方面存在性别和社会经济差异。” Chen 说，“在南加州地区，[28] 高浓度 $PM_{2.5}$ 暴露与青少年和年轻人智力下降有关联，尤其是男性和社会经济地位较低的家庭其智力下降的[关联性]更强。”

在他们的研究中，作者用韦氏智力量表（Wechsler Abbreviated Scale of Intelligence）测量了 IQ 分数。[28] 通过性别或社会阶层对潜在效应的修正是一项新的发现，但 Chen 指出，中国的研究结果有力地证明了15年前由 Lilian Calderón-Garcidueñ 在高污染环境中进行的研究。她目前任教于米苏拉（Missoula）的蒙大拿大学（University of Montana），在本世纪初她是第一个将空气污染和神经退行性联系起来的科学家，她起初在墨西哥城对狗的大脑进行研究，[34] 随后展开对儿童[35] 和成人[36] 研究，后两项研究一直持续到今天。

生物机制：城市空气污染引起的神经毒性

Calderón-Garcidueñ 开创性的研究激发了 Michelle Block 对空气污染物损害大脑机制的兴趣。早在 2002 年， Block 的博士后导师就告诫过她，这个课题比研究单一的金属或除草剂“更脏”。简而言之，能够指出城市空气污染中哪些特殊成分对哪种类型细胞有害是一项更大的挑战，因为 $PM_{2.5}$ 和 VOCs 皆是许多不同化学品的高度复杂的混合物。

然而，这个告诫没能打消 Block 的念头，她现在是印第安纳大学的解剖学和细胞生物学副教授。她说，然而许多年后我们仍然不知道到底哪些污染物以哪种生物途径进入大脑。

一些神经毒理学家正致力于研究直接易位途径的假说。超细颗粒可能通过嗅球或穿过血脑屏障到达大脑，[37,38,39] 继而伤害一些高度分化的细胞：约 1000 亿个神经元和几万亿个胶质支持细胞，包括少突胶质细胞（oligodendrocytes）、星形胶质细胞（astrocytes）和小胶质细胞（microglia）。

研究表明，空气污染水平与考试成绩呈负相关。在重大考试和入学考试中表现不佳会对学生日后的收入有长期影响。[3] Image: © Hero Images.

Block 把她的注意力放在了间接易位的途径上。[40,41]“我实验室研究的方向是周围性肺损伤是如何通过循环血清因子影响大脑，这些血清因子对大脑具有生物效应。”她解释说，“我们称之为肺脑轴。”

无论是直接还是间接的途径，至少有一部分损伤似乎是由脑内固有的免疫细胞——小胶质细胞介导的。体内(*in vivo*)和体外（*in vitro*）研究均表明，空气污染物会激活这些细胞并引发炎症。[42] Block 在暴露于柴油机尾气的大鼠脑内发现，小胶质密度最高的大脑区域出现的反应最强烈。[40] 最近的一项研究[43] 与上述观察结果一致，表明小胶质细胞与较肥胖的小鼠认知能力下降有关联。

“我们已经知道很多关于小胶质细胞的不同作用以及它们是如何与周围免疫系统相互作用的。” Block 说道，“既然小胶质细胞可以支持正常的学习和记忆，我们认为空气污染可能通过对小胶质细胞的影响从而改变健康大脑的认知能力，这个推断似乎是合理的，但还没有得到证实。”

作为大脑的“吃豆人”，[44] 小胶质细胞日常作用的一部分是修剪不再需要的突触。突触是神经元用来相互交流的物理结构。 Block 认为，随着长期暴露在空气污染物中，末梢区域接收的信号使得小胶质细胞以某种方式进行自我重写，进而驱动慢性炎症和氧化应激。这种情况可能会对大脑发育和功能产生持续的影响，从而解释了空气污染物是如何增加了神经发育和神经退行性疾病的风险。

Block 强调，这些初步的假设尚未在实验模型中完全验证。华盛顿大学环境和职业健康科学教授 Lucio Costa 对此表示赞同。

“与研究金属和杀虫剂相比，研究空气污染物的神经毒性效应是一门非常年轻的学科。” Costa 说道，“我认为小胶质细胞在影响神经发育和神经退行性疾病方面扮演着核心角色，但对于造成大脑损伤的机制以及外周炎症起到了什么作用仍有许多细节需要补充。”

Costa 和 Block 对未来的研究方向有一些新想法。他们都认为从大的队列研究得出的长期环境暴露的大脑图像以及认知测试数据[45,46,47,48] 为实验工作提供了非常有价值的指导。他们还认为血清样本有助于评估外周损伤的作用。

接下来要做什么？

迄今为止，大多数人类研究已将大气模型应用到 EPA 监测数据中，以估计特定地点个人污染物暴露的程度。由于这项技术的广泛应用使得一些自用监测器的价格降到了

对小鼠的研究表明，具有高密度小胶质的大脑区域可能对来自柴油机尾气的污染物特别敏感。[40] 对于大脑固有的免疫细胞——小胶质细胞的激活可能引发炎症和氧化应激。Image: © Maren Winter/Shutterstock.

几百美元，研究人员现在开始使用这些监测器来提高对暴露估计的精度。

“对于 $PM_{2.5}$，市场上的一些消费者级别设备的测量效果与昂贵的实验室仪器显示出的结果不相上下。”约翰·霍普金斯大学环境健康与工程副教授 Kirsten Koehler 说道，“但是 VOCs 由于成分复杂 [比 $PM_{2.5}$] 更难测量，超细颗粒的测量也非常具有挑战性。”

在 Koehler 进行的项目中，研究员在中大西洋地区的公立学校部署了研究级别和消费级别的监测器，研究为改善室内空气质量设立的改造项目的效果。通过前后对比，研究人员将测试室内污染物水平的降低是否与学业成绩的提高有关联。

尽管没有测量到污染物，[49] 但是德克萨斯州 65 所小学的研究报告令人鼓舞，在典型的霉菌清除和通风改善项目之后，学生在数学和阅读测试中得分有所提高。作者认为这种翻新方式“可能是一种提高标准化考试成绩的方法，比减少班级人数更具成本效益。”

这一发现与 Allen得出的较高通风率对人类生产力可以产生积极影响的计算结果一致。向世界各地推广健康建筑设计是他团队的使命之一，他们现在从至少5个国家中招募了数百名办公室工作人员进行纵向研究。该团队使用监测器测量办公楼的空气污染物，他们使用可穿戴设备来收集每个工作人员的健康信息。最新开发的智能手机应用程序可以为参与者提供数据摘要和完成认知调查的提示。

不仅仅是学术界对低成本空气质量监测器感兴趣。在位于墨西哥边境的美国加州的帝王郡（Imperial County）， Paul English 帮助当地居民通过监测网络监控自己的暴露情况，该监测网络是美国最大的社区空气监测网络之一。[50] 约半数的 PM 监测器用于公立学校，监测器与在线警报系统连接起来，当空气质量差时该系统会提醒学生呆在室内、选择不同的路线上学，或者使用空气过滤器。加州公共卫生部（California Department of Public Health）的高级科学顾问English希望这个示范能激发其他社区开展类似项目。

这项措施对美国8万5千所公立学校中的部分学校也许尤为重要，最近对这些学校进行了与空气污染有关的社会经济差异的分析。[51] 研究发现，贫困地区的少数族裔儿童受到的危害最大，对他们未来的学业和收入有着长期影响。

Koehler 对加州的社区监测工作表示赞赏。“在州以及国家层面改善空气质量是政府的职责，我认为改进后的技术为民众提供了降低自我暴露的可操作的方法，这是件好事，”她说。

Allen 指出，将公共卫生调查结果转化为对经济的影响非常重要，因为许多政策的决定背后是由财政因素推动的。“当你把所有这些不同领域放在一起研究时—毒理学、暴露评估、流行病学和健康经济学—就会发现结果都是支持空气污染与人类生产力和学习能力之间呈负相关的结论，”他补充道，“这成为了监管行动的强大驱动力。”

Silke Schmidt，博士，居住在威斯康辛州麦迪逊市，撰写关于科学、健康和环境的文章。

References

1. U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2011. The Benefits and Costs of the Clean Air Act from 1990 to 2020. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/summaryreport.pdf [accessed 12 March 2019].
2. Kilian J, Kitazawa M. 2018. The emerging risk of exposure to air pollution on cognitive decline and Alzheimer's disease—evidence from epidemiological and animal studies. Biomed J 41(3):141–162, PMID: 30080655, https://doi.org/10.1016/j.bj.2018.06.001.
3. Ebenstein A, Lavy V, Roth S. 2016. The long-run economic consequences of high-stakes examinations: evidence from transitory variation in pollution. Am Econ J Appl Econ 8(4):36–65, https://doi.org/10.1257/app.20150213.
4. Graff Zivin J, Neidell M. 2018. Air pollution's hidden impacts. Science 359(6371):39–40, PMID: 29302005, https://doi.org/10.1126/science.aap7711.
5. U.S. EPA. Outdoor Air Quality Data: Air Data Basic Information. https://www.epa.gov/outdoor-air-quality-data/air-data-basic-information [accessed 18 March 2019].
6. U.S. EPA. 2018. Indoor Air Quality. Report on the Environment. 2018. https://www.epa.gov/report-environment/indoor-air-quality [accessed 11 Dec 2018].
7. McDonald BC, de Gouw JA, Gilman JB, Jathar SH, Akherati A, Cappa CD, et al. 2018. Volatile chemical products emerging as largest petrochemical source of urban organic emissions. Science 359(6377):760–764, PMID: 29449485, https://doi.org/10.1126/science.aaq0524.
8. Health Effects Institute. 2018. State of Global Air 2018. https://www.stateofglobalair.org/ [accessed 11 December 2018].
9. Zivin JG, Neidell M. 2012. The impact of pollution on worker productivity. Am Econ Rev 102(7):3652–3673, PMID: 26401055, https://doi.org/10.1257/aer.102.7.3652.
10. Chang T, Zivin JG, Gross T, Neidell M. 2016. Particulate pollution and the productivity of pear packers. Am Econ J Econ Pol 8(3):141–169, https://doi.org/10.1257/pol.20150085.
11. Chang TY, Zivin JG, Gross T, Neidell M, et al. 2019. The effect of pollution on worker productivity: evidence from call center workers in China. Am Econ J Appl Econ 11(1):151–172, https://doi.org/10.1257/app.20160436.
12. U.S. EPA. Outdoor Air Quality Data: Air Quality Index Daily Values Report. https://www.epa.gov/outdoor-air-quality-data/air-quality-index-daily-values-report [accessed 3 April 2019].
13. Heyes A, Neidell M, Saberian S. 2016. The effect of air pollution on investor behavior: evidence from the S&P 500. NBER working paper no. 22753. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. https://www.nber.org/papers/w22753 [accessed 11 December 2018].
14. Dohmen T, Falk A, Huffman D, Sunde U. 2010. Are risk aversion and impatience related to cognitive ability? Am Econ Rev 100(3):1238–1260, https://doi.org/10.1257/aer.100.3.1238.
15. Rabin M, Weizsäcker G. 2009. Narrow bracketing and dominated choices. Am Econ Rev 99(4):1508–1543, https://doi.org/10.1257/aer.99.4.1508.
16. Coudert V, Gex M. 2008. Does risk aversion drive financial crises? Testing the predictive power of empirical indicators. J Empir Finance 15(2):167–184, https://doi.org/10.1016/j.jempfin.2007.06.001.
17. Whaley RE. 2009. Understanding the VIX. J Portfolio Manage 35(3):98–105, https://doi.org/10.3905/JPM.2009.35.3.098.
18. Meyer S, Pagel M. Fresh air eases work: the effect of air quality on individual investor activity. New York, NY: Columbia University, Columbia University in the City of New York, Columbia Business School Research Archive. https://www8.gsb.columbia.edu/researcharchive/articles/25560 [accessed 11 December 2018].
19. Allen JG, MacNaughton P, Satish U, Santanam S, Vallarino J, Spengler JD. 2016. Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments. Environ Health Perspect 124(6):805–812, PMID: 26502459, https://doi.org/10.1289/ehp.1510037.
20. Lewis J, Baddeley AD, Bonham KG, Lovett D. 1970. Traffic pollution and mental efficiency. Nature 225(5227):95–97, https://doi.org/10.1038/225095a0.
21. Allen JG, MacNaughton P, Cedeno-Laurent JG, Cao X, Flanigan, S, Vallarino J, et al. 2018. Airplane pilot flight performance on 21 maneuvers in a flight simulator under varying carbon dioxide conditions. J Expo Sci Environ Epidemiol, PMID: 30089876, https://doi.org/10.1038/s41370-018-0055-8.
22. Satish U, Mendell MJ, Shekhar K, Hotchi T, Sullivan D, Streufert S, et al. 2012. Is CO_2 an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO_2 concentrations on human decision-making performance. Environ Health Perspect 120(12):1671–1677, PMID: 23008272, https://doi.org/10.1289/ehp.1104789.
23. MacNaughton P, Pegues J, Satish U, Santanam S, Spengler J, Allen J. 2015. Economic, environmental and health implications of enhanced ventilation in office buildings. Int J Environ Res Public Health 12(11):14709–14722, PMID: 26593933, https://doi.org/10.3390/ijerph121114709.
24. Sunyer J, Suades-González E, García-Esteban R, Rivas I, Pujol J, Alvarez-Pedrerol M, et al. 2017. Traffic-related air pollution and attention in primary school children: short-term association. Epidemiology 28(2):181–189, PMID: 27922536, https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000603.
25. Perera FP, Rauh V, Whyatt RM, Tsai W-Y, Tang D, Diaz D, et al. 2006. Effect of prenatal exposure to airborne polycyclic aromatic hydrocarbons on neurodevelopment in the first 3 years of life among inner-city children. Environ Health Perspect 114(8):1287–1292, PMID: 16882541, https://doi.org/10.1289/ehp.9084.
26. Marcotte DE. 2017. Something in the air? Air quality and children's educational outcomes. Econ Educ Rev 56:141–151, https://doi.org/10.1016/j.econedurev.2016.12.003.
27. Bharadwaj P, Gibson M, Zivin JG, Neilson C. 2017. Gray matters: fetal pollution exposure and human capital formation. J Assoc Environ Resour Econ 4(2):505–542, https://doi.org/10.1086/691591.
28. Wang P, Tuvblad C, Younan D, Franklin M, Lurmann F, Wu J, et al. 2017. Socioeconomic disparities and sexual dimorphism in neurotoxic effects of ambient fine particles on youth IQ: a longitudinal analysis. PLoS One 12(12): e0188731, PMID: 29206872, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188731.
29. Costa LG, Cole TB, Coburn J, Chang Y-C, Dao K, Roque P, et al. 2014. Neurotoxicants are in the air: convergence of human, animal, and *in vitro* studies on the effects of air pollution on the brain. Biomed Res Int 2014:736385, PMID: 24524086, https://doi.org/10.1155/2014/736385.
30. Flores-Pajot M-C, Ofner M, Do MT, Lavigne E, Villeneuve PJ. 2016. Childhood autism spectrum disorders and exposure to nitrogen dioxide, and particulate matter air pollution: a review and meta-analysis. Environ Res 151:763–776, PMID: 27609410, https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.07.030.
31. Isen A, Rossin-Slater M, Walker WR. 2017. Every breath you take—every dollar you'll make: the long-term consequences of the Clean Air Act of 1970. J Polit Econ 125(3):848–902, https://doi.org/10.1086/691465.
32. Power MC, Adar SD, Yanosky JD, Weuve J. 2016. Exposure to air pollution as a potential contributor to cognitive function, cognitive decline, brain imaging, and dementia: a systematic review of epidemiologic research. Neurotoxicology 56:235–253, PMID: 27328897, https://doi.org/10.1016/j.neuro.2016.06.004.
33. Zhang X, Chen X, Zhang X. 2018. The impact of exposure to air pollution on cognitive performance. Proc Natl Acad Sci USA 115(37):9193–9197, PMID: 30150383, https://doi.org/10.1073/pnas.1809474115.
34. Calderón-Garcidueñas L, Azzarelli B, Acuna H, Garcia R, Gambling TM, Osnaya N, et al. 2002. Air pollution and brain damage. Toxicol Pathol 30(3):373–389, PMID: 12051555, https://doi.org/10.1080/01926230252929954.
35. Calderón-Garcidueñas L, González-Maciel A, Reynoso-Robles R, Kulesza RJ, Mukherjee PS, Torres-Jardón R, et al. 2018. Alzheimer's disease and alpha-synuclein pathology in the olfactory bulbs of infants, children, teens and adults ≤40 years in Metropolitan Mexico City. APOE4 carriers at higher risk of suicide accelerate their olfactory bulb pathology. Environ. Res 166:348–362, PMID: 29935448, https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.027.
36. Calderón-Garcidueñas L, Mukherjee PS, Kulesza RJ, Torres-Jardón R, Hernández-Luna J, Ávila-Cervantes R, et al. 2019. Mild cognitive impairment

and dementia involving multiple cognitive domains in Mexican urbanites. J Alzheimers Dis 68(3):1113–1123, PMID: 30909241, https://content.iospress.com/articles/journal-of-alzheimers-disease/jad181208.
37. Oberdörster G, Sharp Z, Atudorei V, Elder A, Gelein R, Kreyling W, et al. 2004. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. Inhal Toxicol 16(6–7):437–445, PMID: 15204759, https://doi.org/10.1080/08958370490439597.
38. Block ML, Calderón-Garcidueñas L. 2009. Air pollution: mechanisms of neuroinflammation and CNS disease. Trends Neurosci 32(9):506–516, PMID: 19716187, https://doi.org/10.1016/j.tins.2009.05.009.
39. Maher BA, Ahmed IAM, Karloukovski V, MacLaren DA, Foulds PG, Allsop D, et al. 2016. Magnetite pollution nanoparticles in the human brain. Proc Natl Acad Sci USA 113(39):10797–10801, PMID: 27601646, https://doi.org/10.1073/pnas.1605941113.
40. Levesque S, Taetzsch T, Lull ME, Kodavanti U, Stadler K, Wagner A, et al. 2011. Diesel exhaust activates and primes microglia: air pollution, neuroinflammation, and regulation of dopaminergic neurotoxicity. Environ Health Perspect 119(8):1149–1155, PMID: 21561831, https://doi.org/10.1289/ehp.1002986.
41. Mumaw CL, Levesque S, McGraw C, Robertson S, Lucas S, Stafflinger JE, et al. 2016. Microglial priming through the lung-brain axis: the role of air pollution-induced circulating factors. FASEB J 30(5):1880–1891, PMID: 26864854, https://doi.org/10.1096/fj.201500047.
42. Block ML, Elder A, Auten RL, Bilbo SD, Chen H, Chen J-C, et al. 2012. The outdoor air pollution and brain health workshop. Neurotoxicology 33(5):972–984, PMID: 22981845, https://doi.org/10.1016/j.neuro.2012.08.014.
43. Cope EC, LaMarca EA, Monari PK, Olson LB, Martinez S, Zych AD, et al. 2018. Microglia play an active role in obesity-associated cognitive decline. J Neurosci 38(41):8889–8904, PMID: 30201764, https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0789-18.2018.
44. Stevens B. 2015. Big idea: the brain's best kept secret. Popular Science, Health section, online edition. 22 December 2015. https://www.popsci.com/big-idea-brains-best-kept-secret [accessed 11 December 2018].
45. Chen J-C, Wang X, Wellenius GA, Serre ML, Driscoll I, Casanova R, et al. 2015. Ambient air pollution and neurotoxicity on brain structure: evidence from Women's Health Initiative Memory Study. Ann Neurol 78(3):466–476, PMID: 26075655, https://doi.org/10.1002/ana.24460.
46. Wilker EH, Preis SR, Beiser AS, Wolf PA, Au R, Kloog I, et al. 2015. Long-term exposure to fine particulate matter, residential proximity to major roads and measures of brain structure. Stroke 46(5):1161–1166, PMID: 25908455, https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.114.008348.
47. Wilker EH, Martinez-Ramirez S, Kloog I, Schwartz J, Mostofsky E, Koutrakis P, et al. 2016. Fine particulate matter, residential proximity to major roads, and markers of small vessel disease in a memory study population. J Alzheimers Dis 53(4):1315–1323, PMID: 27372639, https://doi.org/10.3233/JAD-151143.
48. Power MC, Lamichhane AP, Liao D, Xu X, Jack CR, Gottesman RF, et al. 2018. The association of long-term exposure to particulate matter air pollution with brain MRI findings: the ARIC study. Environ Health Perspect 126(2):027009, PMID: 29467108, https://doi.org/10.1289/EHP2152.
49. Tafford TM. 2015. Indoor air quality and academic performance. J Environ Econ Manage 70:34–50, https://doi.org/10.1016/j.jeem.2014.11.002.
50. English PB, Olmedo L, Bejarano E, Lugo H, Murillo E, Seto E, et al. 2017. The Imperial County Community Air Monitoring Network: a model for community-based environmental monitoring for public health action. Environ Health Perspect 125(7):074501, PMID: 28886604, https://doi.org/10.1289/EHP1772.
51. Grineski SE, Collins TW. 2018. Geographic and social disparities in exposure to air neurotoxicants at U.S. public schools. Environ Res 161:580–587, PMID: 29245126, https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.047.
52. Riesenberg DE, Arehart-Treichel J. 1986. "Sick building" syndrome plagues workers, dwellers. JAMA 255(22):3063, PMID: 3702012, https://doi.org/10.1001/jama.1986.03370220021005.
53. USGBC (U.S. Green Building Council). 2014. LEED v4 User Guide. Washington DC: U.S. Green Building Council. http://www.usgbc.org/resources/leed-v4-user-guide [accessed 4 March 2019].