arXiv:2301.00440v1 [stat.AP] 1 Jan 2023

洛杉矶机动车空气污染产生与暴露方面的地方性相对不平等*

Geoff Boeing、Yougeng Lu 和 Clemens Pilgram†

南加州大学

摘要

机动车空气污染已造成持续的空气质量与公共卫生危机。尽管人们对污染暴露水平中的种族不公已有越来越多的认识，但对于此类污染的产生与暴露之间的关系，了解仍然有限。本研究通过检验地方居民的机动车空气污染暴露是否与其驾车量成正比，评估污染负担。我们以加利福尼亚州洛杉矶为案例，考察这种关系与种族、族裔和社会经济地位的关联，以及这些关系在该区域内如何变化。我们发现，在其他条件相同的情况下，居民驾车较少的普查区反而暴露于更多空气污染；白人人口占比较低的普查区也是如此。与相反情况相比，来自白人占多数普查区的通勤者更常驾车穿行于非白人普查区。数十年来出于种族动机的高速公路基础设施规划和居住隔离，塑造了当今机动车空气污染产生者与暴露者之间的差异；不过，城市规划和交通政策仍有机会缓解这种不公。

1. 引言

20世纪的规划师设计并修建了庞大的快速公路网，让不断发展的美国大都市向驾车者敞开大门。大片已有的

*引文信息：Boeing, G.、Y. Lu 和 C. Pilgram。2023。《洛杉矶机动车空气污染相对产生与暴露的地方不平等》。《城市研究》，在线先于印刷版发表。doi:10.1177/00420980221145403

†通讯作者邮箱：boeing@usc.edu

城市社区被夷为平地，为郊区居民开辟新的道路，方便他们驾车前往就业中心。然而，一些老社区相对完好地留存了下来。例如，在洛杉矶，当地居民组织起来抗议，最终成功取消了将2号州道延伸至比佛利山庄富裕社区和洛杉矶西区的计划（Perez，2017）。相比之下，洛杉矶东区的类似基层行动未能奏效，数条主要高速公路在当地较不富裕、白人比例较低的社区中开辟出道路，将其切割得支离破碎（Estrada，2005）。种族、财富和政治权力塑造了基础设施规划，而这种规划至今仍决定着区域可达性、出行行为和污染暴露。

汽车排放的空气污染，尤其是直径不超过2.5微米的颗粒物（$PM_{2.5}$），会直接危害人体健康（Habre et al., 2021; Thompson, 2018; Sarzynski, 2012）。围绕空气污染的环境正义文献，大多强调污染暴露方面的社区差异，重点关注居住地与有毒物质排放场所、炼油厂、道路基础设施等的邻近程度（Mikati et al., 2018; Schweitzer and Valenzuela, 2004; Reichmuth, 2019; Liévanos, 2019）。识别固定排放源（例如炼油厂）时，这类正义诉求显而易见：炼油厂通过空间扩散过程，使附近居民暴露于有害污染物之中。大多数实证研究通过测量居住地与此类固定污染源的邻近程度来评估环境风险，并假设邻近程度可以作为污染暴露的替代指标（Pastor et al., 2001; Yuan, 2018）。

然而，测量汽车等移动源排放造成的污染暴露则不那么简单。交通方式和交通密度，以及局部地形和气象条件，都会影响空气污染物扩散的程度、方向和距离（Lu et al., 2021; Houston et al., 2004）。有关交通基础设施布局的政治与规划决策，至今仍通过机动车空气污染影响环境正义（Giles-Corti et al., 2022）。重要的是，产生污染的车辆可能由社会人口特征不同于其所穿行并污染的社区的人驾驶。尽管我们对污染暴露不公的认识不断加深（Mikati et al., 2018; Liévanos, 2019; Schindler and Caruso, 2021），但对于机动车空气污染的产生者与暴露者之间的关系，我们仍知之甚少。暴露于最多污染的人，或许也正是自身产生污染最多的人。更有力的环境正义衡量方式应当提出这样的问题：相对于你的驾车量，你暴露于多少机动车空气污染?

本研究以洛杉矶县的种族、阶级和驾驶为背景，探讨这一问题。我们的数据和方法并非洛杉矶独有，也可应用于美国其他地区。我们聚焦于驾驶，因为该县约五分之四的通勤者独自驾车上班，另有十分之一拼车通勤（洛杉矶县开放数据，2019年）。我们将机动车空气污染的本地暴露建模为车辆行驶公里数（VKT）的函数，并考虑种族、收入及其他

协变量的作用，以更好地理解基础设施利用情况及其影响的差异。通过使用普通最小二乘法（OLS）和地理加权回归（GWR），我们发现，在其他条件相同的情况下，产生更多机动车出行的普查区往往暴露于较少的机动车空气污染，而非白人和贫困社区承受过量污染的负担尤为沉重。尤其是，我们的地理加权回归模型能够解释的这种差异，远多于环境正义文献中常用的普通最小二乘法模型。为展示机动车空气污染差异在空间上的分布，我们模拟汽车通勤，并构建了一种新颖的不平等指数，用于衡量经过某一普查区的通勤行程，在多大程度上由特定种族或族裔的驾驶者不成比例地承担。我们发现，与相反方向的情况相比，居住在白人占多数普查区的通勤者更常驾车经过非白人普查区。最后，我们超越基础设施最初的布局，探讨车辆行驶里程税、通行费、排放标准和电气化等可能的干预措施。

2. 背景

城市机动车运输会产生可能危害人体健康的空气污染。这种关系受到交通基础设施的历史布局以及驾驶者当前使用方式的影响。

2.1. 驾驶、排放与健康

许多研究指出，城市交通——尤其是机动车——会造成环境外部性，包括温室气体排放以及空气、水和噪声污染。Delucchi（2000）估算了机动车造成的环境外部性，并发现，与其他环境危害相比，空气污染造成的成本最高，尤其是对人体健康的影响。

研究人员已确认，汽车和卡车是城市空气污染最重要的来源（Karner et al., 2010；Rowangould, 2015；Pan et al., 2013），近期也有多项研究量化了高速公路附近的空气污染梯度（Brugge et al., 2007；Seagram et al., 2019；Zhu et al., 2002）。美国环境保护署（EPA）指出，交通运输占$PM_{2.5}$排放的很大一部分（US EPA, 2021）。例如，在南加利福尼亚，机动车排放单独就产生了该区域约三分之一的$PM_{2.5}$（Habre et al., 2021；Hasheminassab et al., 2014）；交通运输产生的温室气体排放占加利福尼亚州总量的37%，超过该州任何其他部门（加利福尼亚州空气资源委员会，2020）。

空气污染与肺癌、哮喘、支气管炎风险升高以及认知发展受损相关（Sunyer 等，2015；Huang 等，2019年；Jagai 等，2017）。大量文献记录了 $PM_{2.5}$ 暴露尤其是其有害影响（Feng 等，2016；Thompson，2018；Polichetti 等，2009）。一些

研究表明，暴露于交通繁忙道路附近的儿童更容易患呼吸系统疾病（Gauderman 等，2005；Janssen 等，2001；Oosterlee 等，1996）。Huang 等（2019年）发现，$PM_{2.5}$ 日均浓度越高，儿童呼吸率也越高。$PM_{2.5}$ 与儿童哮喘住院率上升相关（Lee 等，2006），而接触机动车排放既可能导致哮喘，也可能加重哮喘（Künzli 等，2003）。研究人员还发现，暴露于更多机动车空气污染的儿童认知发展较慢（Sunyer 等，2015）。此外，空气污染暴露与肺癌发病率相关，尤其是在从未吸烟的人群中（Jagai 等，2017）。

2.2. 种族与阶级差异

这些健康影响构成了一个迫切的问题，而且在不同人群中的分布并不均衡。Schweitzer 和 Valenzuela（2004）认为，交通正义的核心在于交通成本与收益的分配。与白人及更富裕的人群相比，非白人和低收入人群受到环境危害的影响更大（Bae 等，2007；Liévanos，2019；Houston 等，2004；Tessum 等，2021）。具体而言，非白人和低收入社区承担着不成比例的交通外部性负担，同时可达性也更差（Schweitzer 和 Valenzuela，2004；Rowangould 等，2016；Yuan，2018；Poorfakhraei 等，2017）。综合来看，这表明这些社区从交通基础设施中获得的收益，与其承担的成本并不相称。

近期研究采用了许多不同方法来衡量空气污染暴露中的种族不平等，包括描述性分析（Brunt 等，2017年；Milojevic 等，2017年）、双变量分析（Rivas 等，2017年；Moreno-Jimenez 等，2016年）和多变量分析（Temam 等，2017年；Padilla 等，2014年；Kim 和 Kwan，2021）。这些研究在空间尺度（如城市、县、州）、所考察的社会经济特征以及研究设计（如横截面数据或面板数据）方面存在显著差异。然而，这些研究有一个一致的发现：与其他群体相比，社会弱势群体往往承受着更严重的空气污染暴露。

交通、健康与种族不公交织的问题，在洛杉矶体现得尤为明显。洛杉矶是汽车依赖、空气污染、种族多样性和财富不平等的典型代表。根据美国人口普查局的数据，2019年，洛杉矶县74%的居民为非白人。拉丁裔[1]（占总人口的49%）是最大的族群，其次是白人（26%）、亚裔（15%）和黑人（9%）。该区域的贫困率一直高于全国平均水平。在洛杉矶，非白人和低收入群体更可能居住在中心城区社区，以便获得更好的可达性；他们承受的当地交通密度是该区域其他地方居民的两倍（Giuliano，2003；Houston 等，2004）。尽管面临这种暴露，他们拥有

汽车的可能性较低，也更可能乘坐公共交通通勤（PolicyLink，2017）。换言之，非白人和低收入群体居住地附近的交通基础设施更多，却从中受益较少。

洛杉矶数十年来的种族主义规划决策，助长了当今交通、健康和环境质量方面的不公。20世纪的交通、住房和土地利用规划迎合了白人外迁和工业发展的需要，代价则由非白人社区承担（Estrada，2005年；Baum-Snow，2007年）。规划师夷平中心城区社区，修建规模庞大的高速公路系统，为新兴的外围郊区及其以白人为主的居民提供区域交通（Pulido，2000年；Boeing，2021年）——他们常常为了“清除贫民窟”或保护商业利益，选择让高速公路穿过非白人社区的线路（Mohl，2004年；DiMento，2009年；Perez，2017年）。高速公路建设割裂社区、迫使当地居民迁离，并使周边社区在此后数十年间持续遭受空气污染（Mohl，2004年）。尽管有些高速公路原计划穿过白人居民更多、较为富裕的社区，但由于这些社区拥有政治影响力，规划往往被取消或改道，例如前文提到的穿过比佛利山庄的2号州道（Perez，2017年）。

3. 方法

文献表明，一些群体从汽车出行中获得了不成比例的利益，而另一些群体则承受了不成比例的外部成本。本研究通过洛杉矶案例研究推进了相关文献，利用邻里尺度的汇总数据，考察机动车空气污染的相对产生量和暴露程度。不同社区承受的机动车空气污染水平，是否与其驾车量成正比？如果不是，在其他条件相同的情况下，种族与这种差异有何关系？这些知识有助于指导公平的规划工作、针对性地实施修复性政策干预，并制定具体的环境正义目标。

3.1. 数据

本研究聚焦于洛杉矶县（图1）。其蔓延式城市结构、居住隔离和交通基础设施，体现了20世纪美国规划留下的空间遗产：如今，该县约有90%的通勤者驾车或拼车出行（洛杉矶县开放数据，2019年）。我们收集了有关空气污染、乘用车出行、货运卡车交通、人口特征和街道网络设计的二手数据。遵循相关文献的做法，我们采用人口普查区级汇总（例如，Tayarani 和 Rowangould，2020年；Lu，2021；Nyhan 等，2016），因为完全细分的污染暴露数据仅针对抽样人群，通常不向公众开放。普查区是一个

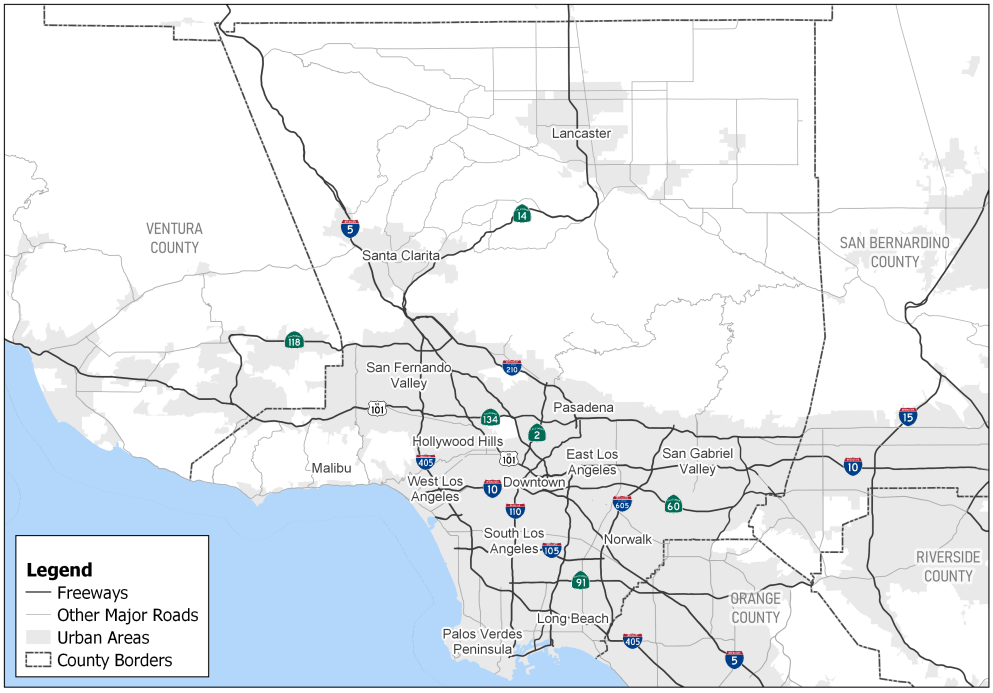


图 1. 洛杉矶县周边地区及高速公路基础设施。

有用的分析单位，因为它们大致对应社区，并遵循现实世界中的物理和社会边界。表1介绍了我们的输入数据。

我们使用忧思科学家联盟（UCS）的 $PM_{2.5}$ 浓度作为主要空气污染暴露指标。该数据集将美国环保署排放清单中的道路交通源排放数据与 InMAP 空气污染生成和传输模型相结合，以估算普查区层面的年均浓度：Reichmuth（2019年）和 Tessum 等人（2017）详细介绍了该模型及这些数据。这使我们能够分析车辆 $PM_{2.5}$的本地暴露。作为稳健性检验，我们另行使用道路运输排放数据库（DARTE）中的道路交通源 CO_2 排放数据，替代 $PM_{2.5}$ 浓度（Gately 等人，2019年）。$PM_{2.5}$ 数据将浓度视为空气污染的“存量”，而 CO_2 数据则以 1 公里分辨率衡量尾气排放，即车辆 CO_2 进入空气的“流量”。考察这一替代性的“流量”指标，可以检验主要“存量”指标所得结果的稳健性；同时，通过纳入污染物扩散方式的信息，还能深入了解累积排放造成的污染暴露。

我们使用美国交通统计局《家庭地方交通特征》（LATCH）中的普查区级居民车辆行驶里程生成量，作为机动车空气污染排放的代理指标。该数据集结合了National Household

表1. 普查区层面变量的描述、单位和来源。来源缩写的定义见正文。

变量	描述	单位	来源
$PM_{2.5}$	年均道路$PM_{2.5}$浓度（2014年）	μ克/米³	UCS
CO_2	道路运输年均CO_2排放（2014年）	公吨	DARTE
VKT	平均每日车辆行程产生的中位数家庭（2017）	公里	LATCH
卡车交通量	每日行驶距离商用卡车通过普查区（2020年）	公里	SCAG
距高速公路距离	普查区质心到最近的高速公路（2019年）	公里	人口普查TIGER/Line
交叉口密度	每个交叉口的数量平方千米的交叉口数量（2020年）	交叉口/km²	OpenStreetMap
平均坡度	街道片段平均坡度（2020年）	n/a	OpenStreetMap
白人人口比例	白人居民比例（2019年）	n/a	ACS
中位数家庭收入	年度中位数家庭收入（2019年）	10,以千计的通胀调整后2018年美元	ACS
独栋住宅比例	住房单元的比例为独立式单户住宅（2019年）	n/a	ACS
每套住房的房间数中位数	每套住房的房间数中位数住房单元（2019年）	房间数	ACS
平均家庭规模	平均居民人数每个住房单元（2019年）	居民	ACS
人口密度	每平方公里居民数（2019年）	千居民/平方千米²	ACS
住房价值中位数	中位数值of自有住房住房单元（2019年）	10,千，经过通胀调整后的2018年美元	ACS

将出行调查的回答与美国社区调查（ACS）的人口统计数据结合起来，对家庭出行行为进行建模，并提供普查区级聚合数据；交通统计局（2018年）提供了完整的方法和验证细节。UCS $PM_{2.5}$ 数据的2014年版本与LATCH VKT数据的2017年版本之间存在一些时间差异。不过，在如此短的时间跨度内，个人出行行为和城市形态变化不大（Ramezani等人，2021）。

我们使用美国人口普查局的纵向雇主—家庭动态（LEHD）起讫地就业统计（LODES）模拟通勤出行（详见第3.3节），以确定不同种族人群穿行于不同普查区的驾车路线。LODES是一种行政枚举，包含私营部门雇员的居住地和工作地人口普查区块，可粗略估算通勤起讫地，但存在一定偏差（Boeing，2018年）。我们将这些起讫地聚合到普查区级别，以便与其余输入数据保持一致。

我们使用南加州政府协会（SCAG）建模的卡车交通量，以控制货运卡车交通（SCAG，2010）。我们利用 OpenStreetMap 数据和 OSMnx 软件测量普查区层面的交叉口密度和街道坡度，以控制当地街道网络结构的差异（Boeing，2017）。我们将交叉口密度作为街道密度的度量，将街道坡度作为起伏度的度量；起伏度会影响发动机性能。我们还从2018年五年期ACS中收集普查区层面的种族与收入数据，以及一组汇总于表1中的其他控制变量。一些普查区在部分变量上缺少观测值。为确保不同模型设定之间分析的一致性，我们仅保留在表1所有变量上均有观测值的普查区（n=2238）。因此，仅有4%的县普查区被排除在外，但我们注意到，与保留的普查区相比，这些普查区拥有更多多户住宅、非白人居民和低收入家庭。

3.2. 回归分析

我们估计了四个回归模型，其中两个采用普通最小二乘法，另外两个采用地理加权回归。使用普通最小二乘法，我们按照方程 1 的设定估计前两个模型：

$$\log \phi = \beta_0 + \beta_1 \log \tau + \beta X + \epsilon \tag{1}$$

其中，$\log \phi$ 是响应变量（log $PM_{2.5}$ 浓度），β_0 是截距，$\log \tau$ 是居民产生的VKT对数，β_1 是待估计的系数，X 是一个矩阵，包含 n 个关于 k 个预测变量的观测值；β 是其待估计的系数向量，而ϵ是误差项。

在模型 1 中，X 纳入了一组有限的控制变量，包括白人人口比例、家庭收入中位数、卡车交通量以及到最近高速公路的距离。我们将“高速公路”定义为州际高速公路、美国国道和州道，并测量普查区质心与最近高速公路之间的欧氏距离。在

模型 2 中，X 纳入了一组完整的控制变量，包括模型 1 中的所有变量，以及交叉口密度、平均街道坡度、独栋住宅比例、每户房间数中位数、平均家庭规模、人口密度和住房价值中位数。我们根据需要对预测变量进行对数变换，以建立线性关系（如表 2 所示），并考虑到异方差，使用稳健标准误估计所有模型。

普通最小二乘法估计的是一个在整个研究区域内参数固定的全局模型。然而，此类模型无法揭示空间变化的统计关系。文献指出，空气污染具有空间异质性，但用于研究这一现象的复杂模型在文献中仍不多见。鉴于我们希望揭示局部 $PM_{2.5}$ 浓度与所产生的车辆行驶里程之间可能存在的异质性关系，我们估计了符合方程 2 所示一般形式的地理加权回归模型，以观察系数和拟合优度是否存在此类局部差异：

$$\log \phi_j = \beta_{0j} + \beta_{1j} \log \tau_j + \beta_j X_j + \epsilon_j \tag{2}$$

其中，$\log \phi_j$ 是因变量（各普查区 j 的 log $PM_{2.5}$ 浓度），β_{0j} 是截距，β_{1j} 是待估计的局部系数，$\log \tau_j$ 是 j居民所产生的车辆行驶里程的对数，β_j 是待估计的局部系数向量，X_j 是 j局部邻域内的观测值矩阵，ϵ_j 是局部误差项。在模型 3 中，X_j 包括模型 1 中有限的一组控制变量。在模型 4 中，X_j 包括模型 2 中完整的一组控制变量。

地理加权回归（GWR）会针对研究区域内每个普查区的局部邻域分别估计模型。对于每次局部回归，观测值均根据以 j 为中心的高斯距离衰减函数进行加权。由于洛杉矶县各普查区的面积存在差异，我们采用空间自适应核，根据每个回归区位的数据密度进行调整。该方法会确定一个固定数量的最近邻，并据此调整带宽距离：人口密集地区的普查区带宽较窄，人口稀疏地区的普查区带宽较宽。我们通过迭代优化，依据带小样本修正的赤池信息准则（AICc）确定最近邻的最佳数量。由此，模型 3 和模型 4 的每次局部估计分别采用 53 个和 73 个最近邻。

3.3. 通勤模拟

为考察驾驶模式中的人口统计学差异，我们使用 LODES 中街区级居住和就业地点作为代理，模拟通勤者的上班路线。尽管这是对通勤行程的微观模拟，但我们关注的是总体结果，而非任何特定个人的通勤行程。我们通过 Dijkstra 算法和 OSMnx（Boeing, 2017），以最小化自由流行驶时间为目标，求出从居住街区质心到工作街区质心的路线。我们以居住地普查区为单位，识别所有起点行程经过的其他普查区。根据居住地普查区的白人人口比例，以概率方式将每趟行程归为白人或非白人

，并根据各普查区驾车上班的通勤者所占比例调整行程数量。随后，我们分别汇总白人通勤者和非白人通勤者驾车经过各普查区的模拟总公里数。

最后，为了考察穿过各普查区的通勤出行中种族差异的趋势，我们构建了公式 3 中定义的不平等指数：

$$I_{jg} = \frac{D_{jg}}{D_j} - \frac{C_{jg}}{C_j} \tag{3}$$

其中，指数 I_{jg} 量化了子群体 g（白人或非白人）驾车穿过普查区 j 的通勤者距离分布不均的程度。D_{jg} 是 g穿过 j 的距离，D_j 是所有子群体穿过 j 的总距离。C_{jg} 是居住在 j的 g 通勤者人数，C_j 是居住在 j的通勤者总人数。I_{jg}的正值和负值分别表示子群体g 穿过普查区 j的距离偏高和偏低。

4. 结果

4.1. 普通最小二乘法结果

表 2 报告了模型 1 和模型 2 的普通最小二乘法结果，显示普查区的机动车 $PM_{2.5}$ 浓度与该区居民的车辆行驶里程生成之间存在显著负相关关系。在模型 1 中控制种族、收入、卡车交通和距高速公路距离后，车辆行驶里程生成每增加 1%，当地 $PM_{2.5}$暴露量便减少 1.24%。模型 2 纳入全套控制变量后，这一效应幅度有所减弱，但车辆行驶里程每增加 1%，当地 $PM_{2.5}$ 暴露量仍会减少 0.62%。其他条件不变时，车辆出行更多 的普查区往往更少 暴露于机动车空气污染——这是一个重要的悖论，我们将在下文讨论中深入剖析。

模型 1 和模型 2 均显示，普查区的机动车 $PM_{2.5}$ 浓度与白人人口比例之间存在显著负相关。即使控制收入、房屋价值、卡车交通及其他协变量，白人比例较高的普查区仍往往暴露于较少的机动车空气污染。换言之，无论收入高低，非白人社区暴露于的 $PM_{2.5}$ 都多于其他条件相似的白人社区。这些模型表明，整个洛杉矶县的机动车空气污染负担在种族方面分配不均。

basic GWR), and

.96	t>1.96
32%	57.42%
91%	6.52%
4%	24.98%
6%	7.95%
6%	21.94%
58%	0.09%
21%	11.17%
85%	19.71%
6%	19.84%
21%	7.19%
0%	38.20%
0%	19.57%
9%	23.82%

以道路 CO_2 排放（对数）作为响应变量重新估计这些模型，得出的结论类似。车辆行驶里程生成增加 1%，与局部 CO_2 暴露降低 0.52% 相关；纳入全部控制变量后，降幅为 0.38%。此外，普查区的 CO_2 暴露与其白人人口比例之间也呈现显著的负相关关系。

4.2. 地理加权回归结果

表 2 还汇总了模型 3 和模型 4 的系数分布及拟合优度指标，并报告了相应的地理加权回归结果。由于所研究的关系存在空间异质性，地理加权回归模型的表现远优于普通最小二乘法模型。模型 1 仅能解释响应变量方差的 38%，而使用相同预测变量的模型 3 平均可解释其 67% 的局部方差。同样，模型 2 能解释响应变量方差的 54%，而模型 4 平均可在局部解释 74%。

这些地理加权回归模型揭示了各预测变量与结果之间的关系在整个区域内的空间变异。例如，在模型 1 中，白人人口比例与车辆 $PM_{2.5}$ 暴露呈显著负相关，且这一关系（普遍）一致。然而，模型 3 揭示了更为细致且随空间而异的关系。白人人口比例的系数介于 -1.36 至 0.76 之间，均值为 -0.14（见表 2）。在我们的研究区域内，这些变量之间的关系并非处处相同，但平均而言往往呈负相关——这与模型 1 和模型 2 在总体层面上的结果相似。对这种空间变异的一种可能解释是居住区位选择：人们出于不同原因选择居住地，其中包括对排放暴露的厌恶程度各不相同，以及对其他地点可达性的重视程度存在差异。系数显著性和方向上的这些差异，凸显了在局部和总体层面评估这些关系的重要性。

图 2 展示了模型 4 在研究区域内的局部 t 统计量和 R^2 值的空间分布。预测变量与响应变量之间的综合统计关系存在空间差异，该图说明了地理加权回归模型在哪些区域比普通最小二乘法模型拟合得更好。总体而言，在大多数普查区，地理加权回归的 R^2 值优于普通最小二乘法的相应数值。

这些模型结果在不同模型设定下保持一致，增强了我们对其估计结果的信心。在模型 3 中，39% 的普查区显示居民车辆行驶里程生成与车辆 $PM_{2.5}$ 暴露之间存在显著负相关，而只有 8% 的普查区显示显著正相关。在模型 4 中纳入全部控制变量后，34% 的普查区显示居民车辆行驶里程生成与车辆 $PM_{2.5}$ 暴露之间存在显著负相关，而只有 7% 的普查区显示显著正相关。图 2a 展示了这些关系往往呈负相关的区域，包括洛杉矶低收入的拉丁裔东区，以及沿

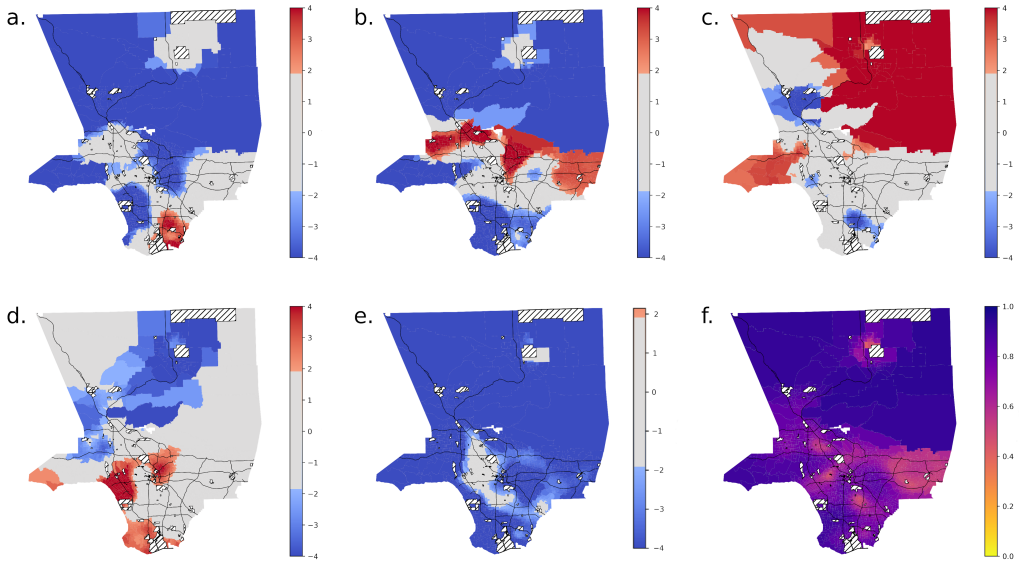


图 2. 模型 4 的地理加权回归局部 t-统计量的空间分布：a) VKT 对数，b) 白人人口比例，c) 家庭收入中位数，d) 卡车交通量对数，e) 距高速公路距离，以及 f) 局部 R^2。

海滨地带的高收入白人社区。这些地区的不公正现象最为严重，因为驾车较多的人接触到的污染较少，反之亦然。

4.3. 通勤模拟

通勤模拟结果揭示了白人通勤者与非白人通勤者在驾驶方面的不平等模式，有助于解释前述暴露差异。图3展示了不平等指数的空间分布。正值表示居住在某普查区的通勤者比驾车经过该普查区的通勤者更少为白人，负值则表示相反情况。该图并未显示驾驶发生的地点：大多数驾驶活动都局限于高速公路走廊（因此也局限于非白人地区）。因此，穿越图中红色普查区的行程比穿越蓝色普查区的行程更多。

在全县范围内，不平等指数的人口加权平均值为0.0153，这表明，与当地种族构成相比，大多数普查区的出行中，白人通勤者所占比例不成比例地更高。在有高速公路的普查区，这一差异（0.0307）是没有高速公路的普查区（0.0147）的两倍多。图3展示了居住隔离和高速公路布局在当今驾驶模式中的作用。主要高速公路尤其突出。毗邻10号州际公路（这条东西向主干线）的普查区，其人口加权平均值为0.0957；而毗邻110号和105号州际公路（贯穿以黑人和拉丁裔为主的南部地区的最大型高速公路）的普查区，其数值为0.1288。

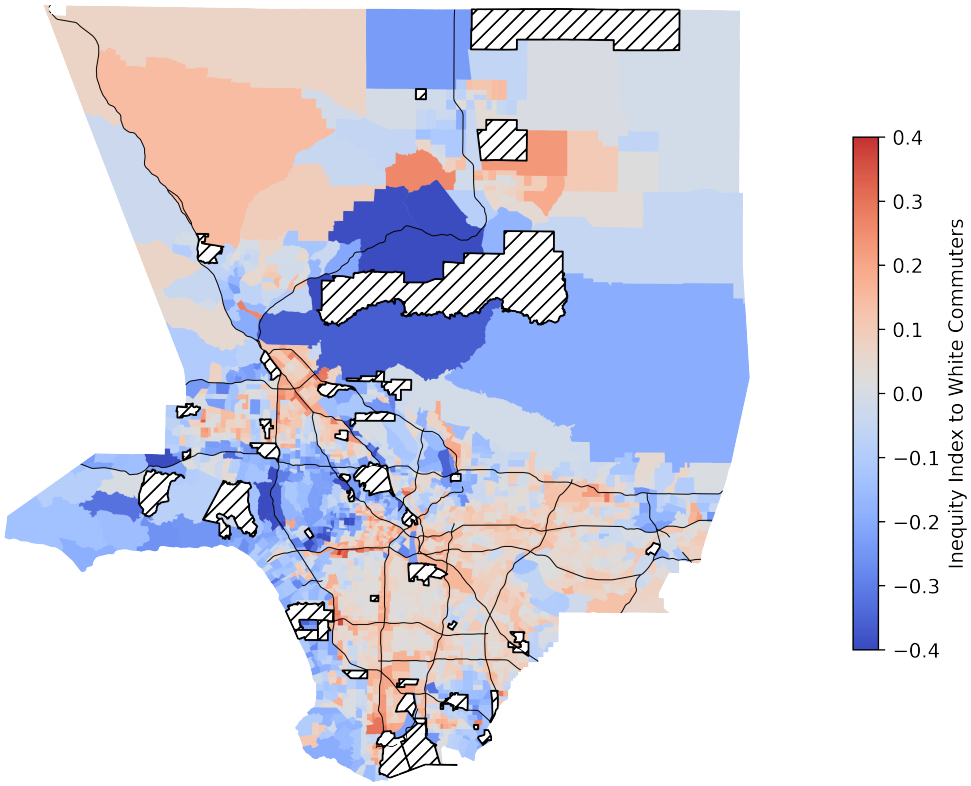


图3. 普查区层级不平等指数：正值表示穿行该普查区的白人通勤者占比高于居住在该普查区的白人居民占比；负值则表示相反。

洛杉矶——在这些普查区驾车通行的通勤者，其白人比例分别比当地居民高出10和13个百分点——尤其值得注意的是，全县人口中白人比例不足三分之一。然而，也有一些主要高速公路，其通勤者的种族构成与当地居民相似，或白人比例低于当地居民。毗邻405号州际公路和101号美国国道的普查区，其不平等指数分别为-0.0012和-0.0999。这两条高速公路都穿越了以白人为主、较为富裕的好莱坞山和圣莫尼卡山脉中的山口；在那里，修建替代路线要么不可能，要么成本过高。

5. 讨论

现有研究文献探讨了当地机动车空气污染暴露中的种族与阶级差异，却没有考虑当地居民自身对其所受污染的贡献。本研究发现，在其他条件相同的情况下，居民驾驶较少的普查区反而暴露于更多机动车空气污染。此外，无论收入高低，非白人人口比例较高的普查区所承受的空气污染都多于其他方面相似、但白人人口比例更高的普查区。地理加权回归模型的平均结果也呈现出类似趋势。这揭示了污染负担中的一种不公，且具有鲜明的种族维度；这些结果在多种模型设定以及全局和局部估计中均稳健。总体而言，我们的研究结果揭示了一种系统性的环境不公：道路基础设施让白人比例较高的社区受益，却使白人比例较低的社区付出代价。

本研究为未来研究打开了大门。尽管模拟分析提供了证据，表明不平等的驾驶模式可能造成部分已观察到的差异，但它并未排除其他机制的影响，例如普查区层面的风向模式或燃油效率差异。未来研究应继续探讨这些关系。尽管如此，我们的模型始终揭示出同一个大致趋势：白人居民占比较高的普查区，以及居民驾驶较多的普查区，暴露于较少的机动车空气污染。对此，一种自然的解释是，白人占多数社区的居民大多在非白人社区进行“额外”驾驶，因此尽管他们制造的污染更多，在家中所受污染却较少。不过，还有其他潜在机制也可能解释这种关系。例如，白人占多数的社区可能位于盛行风会将污染吹离、推向非白人社区的地区；又或者，白人占多数社区的居民驾驶燃油效率更高的汽车，因此即使驾驶更多，在家中产生和承受的污染也更少。然而，非白人社区内高速公路建设的历史表明，出行发生地点的差异至少部分导致了这些结果。

此外，通勤模拟提供了证据，表明人们驾驶的路线导致了居家环境中机动车空气污染暴露的差异。平均而言，白人通勤者所穿越的普查区，其非白人居民比例远高于大多数白人通勤者居住的普查区。这种差异并不存在于相反方向：平均而言，非白人通勤者不会穿越比其居住普查区白人比例高出很多的普查区。这也说明了高速公路在调节这种差异方面所发挥的作用。当白人通勤者穿越非白人普查区时，他们主要是经过包含高速公路的普查区。换言之，白人通勤者享受了在高速公路上驾驶的好处，但由于这些高速公路主要位于非白人社区，其他种族群体却承担了这种驾驶所产生的外部成本。

这种差异在相反方向上并不常见。平均而言，非白人通勤者不会穿越比其居住普查区白人比例高出很多的普查区；即使他们偶尔会这样做，所经过的也是沿着由地形决定的路线铺设的高速公路路段。例如，规划师通过不 在比佛利山庄修建高速公路，使得原本会选择这条路线的大量通勤者转而经由10号州际公路穿越以非白人为多数的普查区。然而，若要对405号州际公路或101号美国国道进行类似改道，就必须绕行更远的路线，并承担高得多的成本。交通规划在造成这些不平等方面发挥了核心作用——但并非唯一作用：土地利用管制、分区规划和住房政策与交通规划相互作用，共同促成了这些结果。

有几项政策可以帮助缓解这种环境不公。首先，政策制定者可以继续提高新车的燃油效率标准，并鼓励车辆电动化。这两项措施都能减少道路交通排放，而未必需要减少驾驶量。不过，它们无法消除橡胶轮胎和刹车粉尘对$PM_{2.5}$污染造成的重大影响。其次，政策制定者可以征收通行费或采取其他形式的拥堵税，以减少驾驶总量，或将其外部性纳入考量。第三，政策制定者可以通过鼓励更多人居家办公（例如提供税收抵免），从而减少通勤。新冠疫情期间，远程办公大幅增加。疫情结束后延续居家办公趋势，有助于减少机动车出行和空气污染，尤其能减少收入较高、工作安排较灵活的白领劳动者所造成的影响。最后，政策制定者可以通过住房市场着手解决环境不公。在就业机会丰富的社区允许建设更多住宅，可以缩短通勤距离。此外，在污染较少的高档社区将建设更高密度、价格更实惠的住房合法化，可以缩小暴露差异。然而，没有任何单一政策能够消除长期存在的、针对低收入群体和非白人群体的系统性歧视。

6. 结论

本文通过对洛杉矶机动车空气污染的产生和暴露进行空间分析，拓展了交通环境正义方面的定量研究。我们采用四种模型和两种估算技术，评估了根据当地车辆行驶里程（VKT）产生量调整后的机动车空气污染本地暴露。具体而言，我们的地理加权回归分析能够揭示局部差异，从而呈现空间异质性。

我们发现，在其他条件相同的情况下，产生较多机动车出行的普查区往往暴露于较少的机动车空气污染。即使控制一整套相关变量，种族仍能显著预测污染暴露。我们的通勤模拟不平等指数通过展示高速公路和

居住区位选择在通勤模式中的作用，有助于解释这些发现。平均而言，白人通勤者途经的普查区，其非白人人口比例远高于他们居住的普查区；但非白人通勤者途经的普查区，其白人人口比例并不会显著高于他们居住的普查区。要 dismantle 数十年来出于种族动机的交通规划与隔离，需要规划师和政策制定者共同努力，弥补过去造成的伤害，并展望一个更加公平的未来。

致谢

本研究得到美国交通部和太平洋西南区域大学交通中心的资助。作者感谢 Peter Mannino 、 Nicholas Cerdera 和 David Flores Moctezuma 提供研究协助。

注释

[1]本文中，我们用“拉丁裔”简称美国人口普查局对任何种族的西班牙裔或拉丁裔的分类，用“白人”简称美国人口普查局对非西班牙裔或拉丁裔且仅属白人的分类，用“黑人”简称美国人口普查局对非西班牙裔或拉丁裔且仅属黑人或非裔美国人的分类。

参考文献

Bae, C.-H. C.、Sandlin, G.、Bassok, A. 和 Kim, S.（2007）。高速公路空气污染影响区中贫困人口的暴露：西雅图和波特兰区域的案例研究。《环境与规划*B*》，34(1):154–170。Baum-Snow, N.（2007）。高速公路是否导致了郊区化？《经济学季刊》，122(2):775–805。Boeing, G.（2017）。OSMnx：获取、构建、分析和可视化复杂街道网络的新方法。《计算机、环境与城市系统》，65:126–139。Boeing, G.（2018）。基于人口普查和工资单数据估算地方日间人口密度。《区域研究：区域科学》，5:179–182。Boeing, G.（2021）。脱离网格……再回归？美国街道网络规划与设计的近期演变。《美国规划协会杂志》，87(1):123–137。Brugge, D.、Durant, J. L. 和 Rioux, C.（2007）。机动车尾气中的近高速公路污染物：心脏和肺部健康风险流行病学证据综述。《环境健康》，6(1):23。

Brunt, H.、Barnes, J.、Jones, S.、Longhurst, J.、Scally, G. 和 Hayes, E.（2017）。空气污染、贫困与健康：理解其与威尔士（英国）地方空气质量管理政策和实践的关系。《公共卫生杂志》，39(3):485–497。交通统计局（2018）。2017年家庭地方交通特征方法。加利福尼亚州空气资源委员会（2020）。当前加利福尼亚温室气体排放清单数据。洛杉矶县开放数据（2019）。洛杉矶县通勤方式占比（2005—2017年）。Delucchi, M. A.（2000）。美国机动车使用的环境外部性。《运输经济学与政策杂志》，34(2):135–168。DiMento, J. F. C.（2009）。城镇心脏中的支架（还是匕首？）：锡拉丘兹的城市高速公路，1944—1967年。《规划史杂志》，8(2):133–161。Estrada, G.（2005）。如果你建起来，他们就会搬来：洛杉矶高速公路系统与墨西哥裔东洛杉矶的迁移驱逐，1944—1972年。《南加州季刊》，第287–315页。Feng, S.、Gao, D.、Liao, F.、Zhou, F. 和 Wang, X.（2016）。环境空气PM2.5的健康影响及潜在机制。《生态毒理学与环境安全》，128:67–74。Gately, C.、Hutyra, L. 和 Wing, I.（2019）。美国本土1公里网格上的DARTE年度道路CO2排放，V2，1980—2017年。Gauderman, W. J.、Avol, E.、Lurmann, F.、Kuenzli, N.、Gilliland, F.、Peters, J. 和 McConnell, R.（2005）。儿童哮喘与交通和二氧化氮暴露：《流行病学》，16(6):737–743。Giles-Corti, B.、Moudon, A. V.、Lowe, M.、Cerin, E.、Boeing, G.、Frumkin, H.、Salvo, D.、Foster, S.、Kleeman, A.、Bekessy, S.、de Sá, T. H.、Nieuwenhuijsen, M.、Higgs, C.、Hinckson, E.、Adlakha, D.、Arundel, J.、Liu, S.、Oyeyemi, A. L.、Nitvimol, K. 和 Sallis, J. F.（2022）。下一步是什么？拓展我们对城市规划与全球健康的视野，并实施和监测循证政策。《柳叶刀全球健康》，10(6):e919–e926。Giuliano, G.（2003）。出行、区位与种族/族裔。《交通研究*A*辑》，37:351–372。Habre, R.、Girguis, M.、Urman, R.、Fruin, S.、Lurmann, F.、Shafer, M.、Gorski, P.、Franklin, M.、McConnell, R.、Avol, E. 和 Gilliland, F.（2021）。南加利福尼亚尾气和非尾气交通源对准超细、细和粗颗粒物的贡献。《空气与废弃物管理协会期刊》，71(2):209–230。Hasheminassab, S.、Daher, N.、Ostro, B. D. 和 Sioutas, C.（2014）。洛杉矶盆地环境空气细颗粒物（PM 2.5）的长期源解析：

关注机动车来源的排放减排。《环境污染》，193:54–64。Houston, D., Wu, J., Ong, P. 和 Winer, A.（2004）。南加州城市交通的结构性差异：对少数族裔和高贫困社区车辆相关空气污染暴露的影响。《城市事务期刊》，26:565–592。Huang, M., Ivey, C., Hu, Y., Holmes, H. A. 和 Strickland, M. J.（2019）。一次和二次 PM2.5 的源解析：与美国佐治亚州儿童呼吸系统疾病急诊就诊的关联。《国际环境》，133:105167。Jagai, J. S., Messer, L. C., Rappazzo, K. M., Gray, C. L., Grabich, S. C. 和 Lobdell, D. T.（2017）。与癌症发病率相关的县级累积环境质量：环境与癌症发病率。《癌症》，123(15):2901–2908。Janssen, N. A., van Vliet, P. H., Aarts, F., Harssema, H. 和 Brunekreef, B.（2001）。评估就读于高速公路附近学校的儿童所暴露的交通相关空气污染。《大气环境》，35(22):3875–3884。Karner, A. A., Eisinger, D. S. 和 Niemeier, D. A.（2010）。近道路空气质量：综合现实世界数据的研究发现。《环境科学与技术》，44(14):5334—5344。Kim, J. 和 Kwan, M.-P.（2021）。由于社区效应平均化，对环境暴露社会人口学差异的评估可能存在错误：对环境不平等研究的启示。《环境研究》，195:110519。Künzli, N., McConnell, R., Bates, D., Bastain, T., Hricko, A., Lurmann, F., Avol, E., Gilliland, F. 和 Peters, J.（2003）。洛杉矶的喘息困境：寻找清洁空气的艰难历程。《美国公共卫生杂志》，93(9):1494–1499。Lee, S. L., Wong, W. H. S. 和 Lau, Y. L.（2006）。香港儿童空气污染与哮喘住院之间的关联。《临床与实验过敏学》，36(9):1138–1146。Liévanos, R. S.（2019）。种族化结构性脆弱性：加利福尼亚州的社区种族构成、集中劣势与细颗粒物。《国际环境研究与公共卫生杂志》，16(17):3196。Lu, Y.（2021）。超越家庭空气污染：使用基于活动的出行需求模型和低成本空气传感器网络数据评估个人 PM2.5 暴露。《环境研究》，201:111549。Lu, Y., Giuliano, G. 和 Habre, R.（2021）。利用低成本空气传感器网络估算社区尺度的每小时 PM2.5 浓度：洛杉矶案例研究。《环境研究》，195:110653。Mikati, I., Benson, A. F., Luben, T. J., Sacks, J. D. 和 Richmond-Bryant, J.（2018）。按种族和贫困状况划分的颗粒物排放源分布差异。《美国公共卫生杂志》，108(4):480–485。

Milojevic, A., Niedzwiedz, C. L., Pearce, J., Milner, J., MacKenzie, I. A., Doherty, R. M. 和 Wilkinson, P.（2017）。英格兰空气污染暴露与死亡负担的社会经济及城乡差异。《环境健康》，16(1):1–10。Mohl, R. A.（2004）。拦下公路：美国城市的高速公路抗争。《城市史杂志》，30(5):674–706。Moreno-Jimenez, A., Cañada-Torrecilla, R., Vidal-Domínguez, M. J., Palacios-Garcia, A. 和 Martinez-Suarez, P.（2016）。通过潜在空气污染暴露评估环境正义：西班牙马德里和巴塞罗那的社会空间分析。《地理论坛》，69:117–131。Nyhan, M., Grauwin, S., Britter, R., Misstear, B., McNabola, A., Laden, F., Barrett, S. R. H. 和 Ratti, C.（2016）。“Exposure Track”——移动设备移动模式对量化人群空气污染暴露的影响。《环境科学与技术》，50(17):9671–9681。Oosterlee, A., Drijver, M., Lebret, E. 和 Brunekreef, B.（1996）。生活在交通密度高的街道沿线的儿童和成人的慢性呼吸道症状。《职业与环境医学》，53:241–7。Padilla, C. M., Kihal-Talantikite, W., Vieira, V. M., Rossello, P., Le Nir, G., Zmirou-Navier, D. 和 Deguen, S.（2014）。法国四个大都市区的空气质量与社会剥夺：局部化时空环境不平等分析。《环境研究》，134:315–324。Pan, H., Bartolome, C., Gutierrez, E., Princevac, M., Edwards, R., Boarnet, M. G. 和 Houston, D.（2013）。调查南加利福尼亚州五座城市主要干道周边的路边细颗粒物浓度。《空气与废弃物管理协会期刊》，63(4):482–498。Pastor, M., Sadd, J. 和 Hipp, J.（2001）。究竟孰先孰后？有毒设施、少数族裔迁入与环境正义。《城市事务期刊》，23(1):1–21。Perez, J.（2017）。洛杉矶高速公路与社区迁移史。《托罗历史评论》，3。Polichetti, G., Cocco, S., Spinali, A., Trimarco, V. 和 Nunziata, A.（2009）。颗粒物（PM10、PM2.5 和 PM1）对心血管系统的影响。《毒理学》，261(1-2):1–8。PolicyLink（2017）。《洛杉矶地区公平概况》。Poorfakhraei, A., Tayarani, M. 和 Rowangould, G.（2017）。在长期区域交通规划过程中评估车辆排放暴露对健康结局的影响。《交通与健康期刊》，6:501–515。Pulido, L.（2000）。重新思考环境种族主义：南加州的白人特权与城市发展。《美国地理学家协会年刊》，第30页。

Ramezani, S., Hasanzadeh, K., Rinne, T., Kajosaari, A., 和 Kyttä, M.（2021）。住宅搬迁与出行行为变化：考察建成环境、活动空间分散、自行车与汽车拥有情况以及出行态度变化的影响。《交通研究*A*辑：政策与实践》，147：28–48。Reichmuth, D.（2019）。《加利福尼亚州机动车空气污染暴露不平等情况说明》。技术报告，忧思科学家联盟。Rivas, I., Kumar, P., 和 Hagen-Zanker, A.（2017）。伦敦通勤期间对空气污染物的暴露：不同社会经济群体之间是否存在不平等？《国际环境》，101：143–157。Rowangould, D., Karner, A., 和 London, J.（2016）。确定用于交通分析的环境正义社区。《交通研究*A*辑》，88：151–162。Rowangould, G.（2015）。一种评估机动车颗粒物排放区域暴露的新方法。《交通研究*D*辑》，34：307–317。Sarzynski, A.（2012）。规模越大并非总是越好：城市及其空气污染影响的比较分析。《城市研究》，49(14)：3121–3138。SCAG（2010）。重型卡车模型。技术报告，南加州政府协会。Schindler, M. 和 Caruso, G.（2021）。减少污染暴露、改善空间公平的城市干预措施。《地理分析》，印刷前在线发表。Schweitzer, L. 和 Valenzuela, A.（2004）。环境不公与交通：主张与证据。《规划文献杂志》，18(4)：383–398。Seagram, A. F., Brown, S. G., Huang, S., Landsberg, K., 和 Eisinger, D. S.（2019）。2016年国家近道路空气质量评估：污染物多年趋势及近道路PM2.5增量估算。《交通研究记录》，2673(2)：161–171。Sunyer, J., Esnaola, M., Alvarez-Pedrerol, M., Forns, J., Rivas, I., López-Vicente, M., Suades-González, E., Foraster, M., Garcia-Esteban, R., Basagaña, X., 等（2015）。学校交通相关空气污染与小学生认知发展之间的关联：一项前瞻性队列研究。《公共科学图书馆·医学》，12(3)：e1001792。Tayarani, M. 和 Rowangould, G.（2020）。估算车辆交通细颗粒物排放暴露：广阔蔓延区域中的暴露错分与日常活动模式。《环境研究》，182：108999。Temam, S., Burte, E., Adam, M., Antó, J. M., Basagaña, X., Bousquet, J., Carsin, A.-E., Galobardes, B., Keidel, D., Künzli, N., 等（2017）。西欧社会经济地位与室外二氧化氮（NO2）暴露：一项多城市分析。《国际环境》，101：117–124。Tessum, C. W., Hill, J. D., 和 Marshall, J. D.（2017）。InMAP：一种空气污染干预措施模型。《公共科学图书馆·综合》，12(4)：e0176131。

Tessum, C. W., Paolella, D. A., Chambliss, S. E., Apte, J. S., Hill, J. D., 和 Marshall, J. D.（2021）。PM2.5污染源对美国有色人种群体造成不成比例且系统性的影响。《科学进展》，7(18)。Thompson, J. E.（2018）。《空气颗粒物：人体暴露与健康影响》。《职业与环境医学杂志》，60(5)：392–423。美国环保署（2021）。《简要事实：美国交通部门温室气体排放，1990—2019年》。技术报告，美国环境保护署。Yuan, Q.（2018）。我家后院的巨型货运集散地：仓储选址环境正义的纵向研究。《土地利用政策》，76：130–143。Zhu, Y., Hinds, W. C., Kim, S., 和 Sioutas, C.（2002）。主要高速公路附近超细颗粒物的浓度与粒径分布。《空气与废弃物管理协会期刊》，52(9)：1032—1042。