

# 城市的毛细血管： 政治经济学视角下的管道建设和治理转型

沈啸驰

**摘要** 现代城市的经济集聚依赖于一系列基础设施，而地下管网作为“看不见的毛细血管”，其作用却长期被忽视。管道体系通过降低能源、环境与健康等负外部性，成为支撑集聚经济的重要隐性前提。基于对中国城市供水漏损率的系统分析，研究发现：自然禀赋和各类社会经济因素均不足以解释管道质量的显著空间差异。这一经验悖论提示我们，管道建设不足并非简单的技术问题，而根源于更深层次的制度逻辑。从政治经济学视角出发，管道投资长期不足的重重约束机制表现为：（1）政绩不可见性使地方政府更偏好显性的地上工程；（2）基础设施建设的空间偏向导致不同社区在管道质量和安全性上的长期分化；（3）管道的长期物质遗产与官员短期政绩周期之间存在跨期错配，弱化了隐性基础设施的治理激励。这些机制共同塑造了管道建设的结构性失衡。在气候变化的冲击下，管道失灵的风险被显著放大。推动管道更新与智能化转型不仅是韧性城市建设的技术手段，更是突破现有制度约束、改善治理能力的关键路径。

**关键词** 管道体系 集聚经济 政绩偏向 城市更新 气候变化

作者沈啸驰，上海交通大学安泰经济与管理学院博士后（上海 200030）。

中图分类号 F29

文献标识码 A

文章编号 0439-8041(2026)04-0050-12

## 一、引言

现代城市作为经济集聚与创新扩散的核心场所，其高密度运行依赖于能源供给、交通运输、水资源管理与公共卫生等多维度的基础设施支撑。然而，长期以来政策和学术研究更关注于道路、轨道交通、公共建筑等“显性工程”，而供水、排水、燃气与污水管网等地下“隐性基础设施”则常被公众忽视。事实上，中国城市的“隐性基础设施”政策在过去十余年经历了一条逐步深化的演进路径：2012年提出的“海绵城市”理念强调通过自然与人工结合提升雨洪调蓄能力，推动地下水循环与排水系统改造；此后，低碳生态城市与气候适应型城市的建设，将绿色转型与基础设施适应性纳入国家战略视野；近年来，韧性城市的政策探索更加强调城市整体系统在极端气候与突发事件中的承载与恢复能力。在这一系列政策脉络的延伸中，2025年中央城市工作会议将“建设安全可靠的韧性城市”明确列为重点任务，并提出“推进城市基础设施生命线安全工程、加快老旧管线改造升级”，使地下管网治理首次被系统性纳入国家战略的核心议程。这一政策演进表明，地下管道体系正从“被动维护的工程环节”逐渐转变为“现代城市治理的战略支点”，其更新与治理的重要性愈发凸显。

尽管国家层面对韧性城市与管网更新的重要性已有明确部署，但在学术与公共讨论中，管道建设的作用和逻辑仍缺乏系统性的理解。它不仅是城市运行的技术性支撑，更折射出背后的制度逻辑与治理格局。管道作为城市“看不见的毛细血管”，构成了现代城市运作的三重机制：它在经济层面上决定了集聚是否可持续，在空间层面上映射了权力与资源的分配逻辑，在未来政策层面上则关乎城市能否在气候变化冲击下保持韧性。本文正是试图从这三个维度展开探讨：首先，揭示管道如何作为集聚经济的隐性前提，降低城市运行成本并

支撑城市规模扩展；其次，剖析管道建设与分布中的政治经济学逻辑，探讨其背后财政、权力与激励的结构性约束；最后，将管道置于气候风险与城市更新的宏观背景下，思考如何通过制度与技术的创新，推动其从“隐性基础设施”转变为韧性城市的战略支柱。综合来看，本文不仅为理解城市的物质基础提供新的视角，也回应了当下国家战略对生命线工程和韧性城市建设的迫切关切。

## 二、经济集聚的隐性前提：都市拥堵病的“症候消退”

### （一）技术进步与现代城市的形成

城市的形成与发展始终伴随着集聚的双重效应：一方面是规模经济、知识外溢与劳动市场匹配等正向外部性。<sup>①</sup> 另一方面则是污染、疾病与拥堵等负外部性。集聚经济产生的效益在当前的经济学研究中已有充分讨论，并产生了一系列共识。经济的集聚不但会使得制造业企业生产率提高<sup>②</sup>，同时也使得居民的娱乐效用大幅提升、促进现代服务业城市的发展<sup>③</sup>。然而，在前现代时期，负外部性往往压倒正外部性，限制了城市规模的扩展和人口的集中。<sup>④</sup> 历史上典型的案例包括：伦敦 1952 年的大雾事件因燃煤排放导致上万人过早死亡<sup>⑤</sup>；巴黎在 19 世纪屡次暴发霍乱流行，直接源于供水与排污设施的缺失。<sup>⑥</sup> 这些都是经典的都市“拥堵病”。

正是随着技术进步不断削弱这些负外部性，现代城市的高密度集聚才成为可能。如果说前现代城市因环境与卫生约束而难以突破规模瓶颈，那么现代城市的迅速扩展，正是得益于技术进步所带来的边际成本下降。随着能源、公共卫生与交通技术的普及，单个居民因集聚而承受的健康与环境风险显著下降，城市的承载力由此跨越式提升。能源结构从煤炭转向天然气和电力，改善了空气质量并降低了火灾风险；而交通与通信的革新，如铁路、电车和地铁，则显著降低了通勤成本、缓解了拥堵并扩大了城市的可达半径。<sup>⑦</sup> 公共卫生与医疗技术的发展，包括污水处理和疫苗接种，显著降低了传染病在城市环境中的传播<sup>⑧</sup>；自来水系统的普及显著改善了公共健康，使城市人口的死亡率大幅下降<sup>⑨</sup>，从而为大规模集聚创造了环境条件。纽约在 20 世纪初依靠地铁与电梯技术的结合，实现了城市空间的水平与垂直扩展<sup>⑩</sup>，使数百万居民能够集中在有限空间内而维持较高生活质量。可以说，现代大城市的出现，本质上是技术进步不断压低集聚负外部性、扩展集聚边界的直接产物，各类不同的技术和基础设施共同构筑了当代城市形成的不同侧面。

### （二）城市管道如何促进集聚

在各类不同维度的技术和基础设施中，管道体系作为一种隐性的基础设施，对城市的发展起到了不可或缺的作用。管道体系作为“城市的毛细血管”，其最大功能在于将能源与水资源的供给、污水与废弃物的排放转化为日常可负担的公共服务，从而显著降低了集聚的边际成本。燃气管网的建设，使得天然气这一清洁

- 
- ① Duranton, Giles, and Diego Puga, “Micro-Foundations of Urban Agglomeration Economies,” *Handbook of Regional and Urban Economics: Elsevier*, 2004; Glaeser, Edward L., *Triumph of the City*, New York: Penguin Press, 2011.
- ② Greenstone, Michael, Richard Hornbeck, and Enrico Moretti, “Identifying Agglomeration Spillovers: Evidence from Winners and Losers of Large Plant Openings,” *Journal of Political Economy*, 118(3), 2010, pp. 536–598.
- ③ Glaeser, Edward L., Jed Kolko, and Albert Saiz, “Consumer City,” *Journal of Economic Geography*, 1(1), 2001, pp. 27–50; 钟粤俊、陆铭、奚锡灿：《集聚与服务业发展——基于人口空间分布的视角》，《管理世界》2020 年第 11 期；钟粤俊、奚锡灿、陆铭：《城市间要素配置：空间一般均衡下的结构与增长》，《经济研究》2024 年第 2 期。
- ④ Cain, Louis, and Sok Chul Hong, “Survival in 19th Century Cities: The Larger the City, the Smaller Your Chances,” *Explorations in Economic History*, 46(4), 2009, pp. 450–463.
- ⑤ Brimblecombe, Peter, “The big smoke (Routledge Revivals): A history of air pollution in London since medieval times,” *Routledge*, 2012.
- ⑥ Evans, R. J., *Death in Hamburg: Society and Politics in the Cholera Years, 1830–1910*, Oxford University Press, 1987.
- ⑦ Heblich, Stephan, Stephen J. Redding, and Daniel M. Sturm, “The Making of the Modern Metropolis: Evidence from London,” *The Quarterly Journal of Economics*, 135(4), 2020, pp. 2059–2133.
- ⑧ Cutler, David, and Grant Miller, “The Role of Public Health Improvements in Health Advances: The Twentieth-Century United States,” *Demography*, 42(1), 2005, pp. 1–22; Alsan, Marcella, and Claudia Goldin, “Watersheds in Child Mortality: The Role of Effective Water and Sewerage Infrastructure, 1880–1920,” *Journal of Political Economy*, 127(2), 2019, pp. 586–638.
- ⑨ Ferrie, Joseph P., and Werner Troesken, “Water and Chicago’s Mortality Transition, 1850–1925,” *Explorations in Economic History*, 45(1), 2008, pp. 1–16; Keszenbaum, Lionel, and Jean-Laurent Rosenthal, “Sewers’ Diffusion and the Decline of Mortality: The Case of Paris, 1880–1914,” *Journal of Urban Economics*, 98(March), 2017, pp. 174–186.
- ⑩ Ahlfeldt, Gabriel M., and Jason Barr, “The Economics of Skyscrapers: A Synthesis,” *Journal of Urban Economics*, 129(May), 2022, 103419.

能源能够在家庭和工业中普及，取代了高污染的煤炭燃烧，从而改善了空气质量并降低了健康风险。供水管网的普及则为城市人口提供了稳定且安全的饮用水，避免了地下水污染和运输成本过高的困境。排水与污水管道则直接消除了高密度环境下的卫生威胁，使得传染病不再频繁暴发。历史经验表明，美国 20 世纪初的自来水普及显著降低了婴儿死亡率，而 Alsan 和 Goldin (2019) 进一步证明，水和污水系统的建设是解释儿童死亡率下降的关键因素之一。正是这些隐性基础设施的存在，才使城市的负外部性被有效削弱，集聚能够以更低成本得以维持与扩展。除了缓解负外部性，管道体系还通过规模经济和网络效应进一步强化了集聚。如同大多数基础设施一样，管道具备规模经济效应：管道一旦铺设，其边际供给成本极低，每增加一个用户都几乎不需要额外投入，这使得人口与企业越集中，供给效率越高。<sup>①</sup> 这一规模效应与城市的集聚逻辑高度契合：越多的人口和企业接入管道系统，平均成本越低，城市的吸引力越强，进而形成累积正向反馈。

当前的国际研究对管道体系的作用有所认识，但国内研究对城市管道的经济学分析仍然较少。笔者的一系列工作从中国的现实出发，对城市管道基础设施的经济效应进行了实证分析。研究结果显示，管道体系不仅通过健康改善带来长期的人力资本收益，更通过提升环境质量与运行效率塑造了城市的集聚格局。首先，笔者的一项研究以“西气东输”工程为准自然实验，发现该项目将清洁能源管网引入沿线城市后，显著改善了空气质量，减少了可吸入颗粒物浓度，并导致因污染暴露而带来的相关疾病死亡率显著降低。<sup>②</sup> 这一证据表明：通过改善环境健康外部性，燃气管道有效降低了城市的集聚成本。其次，笔者的另一项正在进行的工作则以雨水管道体系为切入点，发现管道网络的引入显著缓解了降水对交通拥堵的冲击。换言之，排水管道在极端天气情境下通过降低通勤时间与运行风险，提升了城市的运行效率。这一机制为理解隐性基础设施与城市韧性之间的关系提供了新的经验证据。总体而言，这两项研究均揭示了管道体系如何促进集聚效应：前者优化了城市的健康与居住条件，后者降低了气候变化带来的天气冲击对城市运行效率的影响。两者共同构成了隐性基础设施促进集聚的中国经验。这些发现提示了——即便“不可见”，管道体系仍在深层次塑造中国城市的经济与社会空间结构。

### 三、看不见的“毛细血管”：管道建设的政治经济学分析

管道体系是现代城市集聚效应产生的基础之一，对经济效率与居民福利具有关键作用，正如人体的“毛细血管”一般。然而，“毛细血管”尽管重要，也极易被忽视，城市的管道体系亦是如此。本部分内容首先探索影响管道质量的自然和经济因素。在此基础上，从政治经济学的视角出发，解释为何在管道如此重要的情况下，现实中却普遍存在供给不足与分布不均。

#### (一) 管道质量的影响因素之谜：经验证据

城市管道作为集聚经济体至关重要的一环，如何解释其不同区域的差异？本部分内容检验管道质量的城市间差异是否能够使用一系列可观测的自然地理或社会经济变量来解释。使用的数据主要来自《中国城市建设统计年鉴》。<sup>③</sup> 本文以供水管道为例，核心被解释变量为供水管道的漏水率。其次，本文涵盖的一系列影响因素包括城市的自然地理和经济特征。变量的描述性统计见表 1。

从需求侧来看，城市供水管道质量可能受到用水压力差异的影响。人口规模与人口密度决定了城市日常生活用水需求的总体规模与峰谷变化，密度越高、人口越集中，供水系统在高峰时段面临的瞬时压力越大，长期运行中更容易造成管网磨损。规模以上工业企业数量同样反映了工业用水的强度与稳定性，对城市供水系统的压力具有直接影响。此外，产业结构也会塑造用水模式：服务业主导的经济体通常呈现更稳定的用水需求，而以工业为主的都市，则往往在特定时段出现更强烈的用水波动，从而增加管道运行风险。从表 1 可以看到，需求侧变量在城市间呈现显著的跨城差异——人口密度最高城市约为最低城市的 4 倍，工业企业数量的对数值从 2.89 到 9.72 不等，而第三产业占比则从不足 10% 到超过 80% 均有分布。按常识推断，如果供水管道

① Arthur, W. B., "Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events," *Economic Journal*, 99(394), 1989, pp. 116-131.

② Lai, Wangyang, Ligu Lin, Xiaochi Shen, and Maigeng Zhou, "Investing in a Transition Fuel: The Remarkable Decline in Mortality from China's Rollout of Natural Gas Infrastructure," *Journal of Environmental Economics and Management*, 130, 2025, 103131.

③ 中华人民共和国住房和城乡建设部编：《中国城市建设统计年鉴》2011 年卷—2012 年卷，北京：中国计划出版社，2012—2013 年。

质量由需求侧压力主导，那么漏水率应当随人口密度、工业规模和产业结构的变化呈现相对清晰的梯度。

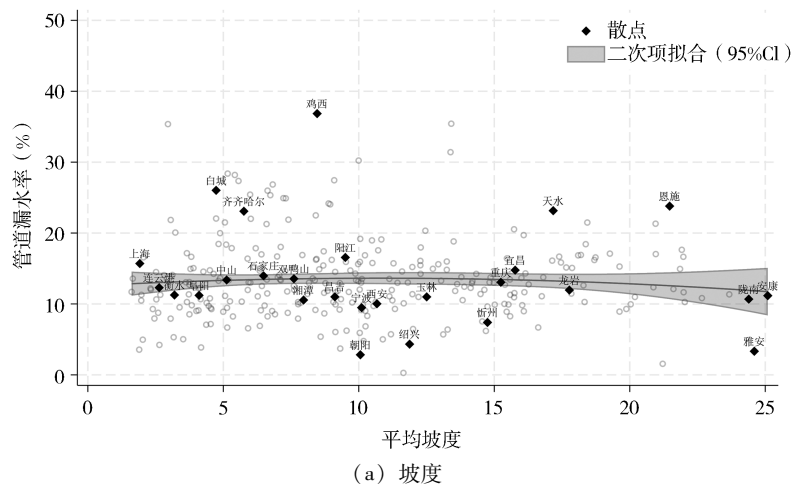
从供给侧来看，城市的财政实力与历史基础设施投资水平可能影响管道的建设质量与后续维护能力。财政预算收入反映城市能够投入公共品建设与维护中的资源能力，财政越充裕的城市，本应越能够保持供水系统的良好运行状态。供水管道密度则可视既有基础设施存量的重要指标，密度越高通常意味着城市过去对供水系统投入更充分，管网更为完善，也具备更好的维护基础。描述性统计显示，城市间财政收入的跨度接近 10 倍，而供水管道密度的对数值也存在超过 5 倍的差异。如果供给侧能力是决定管道质量的主要机制，那么漏水率应在城市之间呈现明显的经济梯度：财政强的地区、历史投资水平较高的地区，其管道质量理论上应当更高、漏水率更低。

表 1 描述性统计

变量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
第一部分：自然地理变量					
降水 (mm)	4691	1139.210	565.213	53.982	3233.842
气温 (°C)	4691	14.830	5.187	-1.572	26.458
坡度	281	9.955	5.417	1.615	25.091
紧凑度	281	1.218	0.130	1.002	1.731
第二部分：社会经济变量					
管道漏水率 (%)	4691	13.166	6.888	0.000	55.165
人均 GDP (对数)	4691	10.54	0.71	7.93	12.46
人口密度 (对数)	4691	8.01	0.72	5.53	9.91
规模以上工业企业数量 (对数)	4691	6.58	1.13	2.89	9.72
供水管道密度 (对数)	4691	2.43	0.51	0.77	4.33
财政预算收入 (对数)	4691	13.70	1.20	9.72	18.17
第三产业占比 (%)	4691	41.05	10.09	8.58	83.52

接下来，本文将逐一检验上述理论机制。首先，从一些截面的自然地理变量来看，管道建设和修缮是在地下进行的，自然地理要素可能起到关键作用。图 1 展示了管道漏水率和城市坡度、形状的相关关系。横轴为城市平均坡度（形状），纵轴为管道漏水率。从图 1 可以看出，城市的坡度、形状很难解释管道质量的变化。从结果可以看出，两者之间并未呈现显著的单调变化关系：在坡度较低的沿海平原城市（如上海、宁波）与坡度较高的内陆丘陵城市（如鸡西、天水）之间，漏水率并未表现出系统性的升降趋势；局部回归曲线整体较为平缓，在 95% 置信区间亦未显示出显著单调关系。这说明，坡度（形状）作为可能影响管道铺设成本、施工难度和运行压力的重要自然因素，并不能解释不同城市之间漏水率的明显差异。

这一结果具有重要含义。首先，它提示我们：供水管道质量与自然地貌特征之间的关系可能远比直觉中更弱。尽管坡度可能影响工程建设难度，但城市在长期基础设施建设过程中往往通过技术手段（如泵站、压力调节系统）消解了地形差异带来的影响。其次，自然禀赋的解释力有限，也意味着管道质量的跨城差异更可能源于经济与制度等“人为变量”而非物理自然条件。换言之，污损与维护状况并不是由地形“决定”的，而可能由不同城市治理能力、财政投入和激励结构所塑造。





系统性压力。换言之，用水需求与管网压力虽然可能影响个别城市的运行状况，但从全国层面看并不足以解释管道质量的显著差异。再次，供给侧经济因素的解释力同样有限。无论是供水管道密度（反映基础设施存量）还是财政收入（反映供给能力），其系数在统计上均不显著。按传统公共品供给逻辑，一个财政更充裕、供水系统更完备的城市，应当更有能力降低漏水率；然而实证结果却显示，供给能力与管道质量之间并不存在清晰的关联度。在所有变量中，只有第三产业占比在主规格中呈现统计显著的负相关，但其经济含义并不指向城市供水系统的技术或物理属性，而更可能反映产业结构对城市治理偏好的间接影响。其方向虽稳健，但并不能成为解释全国管道质量差异的核心机制。

表 2 供水管道质量的影响因素

变量	管道漏水率		
	(1)	(2)	(3)
降水	0.001 ** (0.00)	0.001 ** (0.00)	0.001 ** (0.00)
气温	0.004 (0.25)	0.044 (0.26)	0.042 (0.26)
人口密度 (对数)		0.379 (0.41)	0.359 (0.42)
规模工企数量 (对数)		0.337 (-0.84)	0.207 (0.82)
供水管道密度 (对数)			0.777 (0.54)
财政收入 (对数)			-0.675 (0.81)
第三产业占比			-0.081 ** (0.04)
样本量	4691	4691	4691
城市固定效应	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes

注：本表格汇报了回归方程 (1) 的结果，标准误聚类到城市层面。\*\*\*  $p < 0.01$ ，\*\*  $p < 0.05$ ，\*  $p < 0.1$ 。

总体而言，表 2 的结果说明：无论从需求侧还是供给侧，常规经济因素均无法解释中国城市之间管道质量的巨大差异。管道质量的跨城差异似乎并不遵循自然禀赋或经济发展的理论影响路径，而更可能源于制度性、激励性与治理方式的差异。从城市角度来看，管道建设的空间异质性背后，存在一套独特的逻辑：与道路、地铁等地上地下“可见性工程”不同，管道作为地下“看不见的城市毛细血管”，往往缺乏直观和透明的度量，其建设和维护更多受到财政激励、权力配置以及政绩周期的制约。谁来出资、谁来决策，不仅决定了管道的初始布局，也影响了其更新与扩展的节奏；地方政府对“可见性工程”的偏好，使得管道在资源分配中长期处于边缘；而管道寿命远超政治任期，则使得历史投资的遗产效应深刻锁定了当下的城市格局。正是在这种政绩不可见性、空间不平等效应和遗产作用的交织中，管道形成了有别于其他公共品的建设逻辑。理解这种逻辑，既有助于解释管道分布的空间不均衡，也为认识现代城市治理中的“隐性不平等”提供了新的视角。下文将从理论出发，具体分析管道建设的空间政治经济学逻辑。

## (二) 财政与激励约束：隐性基础设施的激励困境

在现代城市治理中，公共品的供给始终是财政与权力互动的核心领域。<sup>①</sup> 大量研究指出，官员的基础设施投资选择往往受到政治激励的推动，其目标函数并非社会福利最大化，而是政绩考核与晋升概率的函数。<sup>②</sup> 在这一框架下，可见性强、产出可度量、对选民与上级信号明确的项目更容易进入官员的最优决策集合。道路、铁路与地铁等“显性基础设施”恰好具备这些特征：其建设进度、通车里程与客运量可直接转化为绩效指标，居民和企业也能迅速感知其便利性，从而在短期内产生显著的政治回报。<sup>③</sup> 这种“可见

① 傅勇：《财政分权、政府治理与非经济性公共物品供给》，《经济研究》2010年第8期；王世磊、张军：《中国地方官员为什么要改善基础设施？——一个关于官员激励机制的模型》，《经济学（季刊）》2008年第2期；张军、高远、傅勇等：《中国为什么拥有了良好的基础设施？》，《经济研究》2007年第3期。

② Besley, Timothy, and Anne Case, “Does Electoral Accountability Affect Economic Policy Choices? Evidence from Gubernatorial Term Limits,” *The Quarterly Journal of Economics*, 110(3), 1995; Li, Hongbin, and Li-An Zhou, “Political Turnover and Economic Performance: The Incentive Role of Personnel Control in China,” *Journal of Public Economics*, 89(9–10), 2005, pp. 1743–1762.

③ Lei, Zhenhuan, and Junlong Aaron Zhou, “Private Returns to Public Investment: Political Career Incentives and Infrastructure Investment in China,” *The Journal of Politics*, 84(1), 2022, pp. 455–469; Huet-Vaughn, Emiliano, “Stimulating the Vote: ARRA Road Spending and Vote Share,” *American Economic Journal: Economic Policy*, 11(1), 2019, pp. 292–316.

性红利”意味着，即便显性项目的社会边际回报未必高于隐性项目，它们仍可能获得更优先的财政资源配置。换言之，官员的投资组合存在系统性偏向，即在预算约束下，选择能够快速显现成果的基础设施来最大化自身效用。

与此形成鲜明对比的是，供水、排水与燃气等“隐性基础设施”缺乏上述政治回报。一方面，这一类基础设施的“产出”主要表现为风险降低与故障避免，属于“负面外部性消除”的绩效，不容易在短期被可视化和量化；另一方面，居民对其改善的感知高度间接——没有爆管、没有积水并不等于“官员有功”，因而在上级政府的政绩考核中也难以成为加分项。<sup>①</sup>从信息经济学角度看，这亦是一种“信号缺失”：隐性管道的绩效无法有效传递给监督者与被服务者，导致其边际政治回报显著低于显性工程。结果是，即便隐性基础设施可能在社会福利层面具有较高的边际产出，官员在激励机制下仍理性地选择低估其重要性。由此，政绩不可见性成为解释管道类投资长期不足的核心经济学机制。

政绩不可见性导致的基础设施建设差别亦体现在不同层级的政府行为中。与地方政府相比，中央政府更接近“社会最优规划者”。中央政府更倾向于投资具有战略意义与均衡效应的基础设施，而地方政府则常常优先考虑能够带来直接经济回报与形象提升的项目。一方面，以“西气东输”为代表的跨区域能源管道工程，由中央主导并集中财政资源，体现了国家战略目标与区域均衡的考量。<sup>②</sup>与之相反，在城市层面，燃气和供水管网的建设多由地方财政或开发商主导，其建设决策通常会偏离社会最优水平。例如，在中国，地铁和高架道路的建设往往成为地方政府“形象工程”的核心，而供水和排水管网的改造则常常被延迟。<sup>③</sup>类似现象也出现在发展中国家：在拉美和印度，市政部门优先投入交通与公共空间，而贫民区的排水与污水系统缺乏维护，直接导致公共卫生危机。<sup>④</sup>因此，政绩不可见性扭曲了地方政府的投资决策，城市的“毛细血管”——管道体系——往往在政策排序中被边缘化，成为基础设施供给的盲区。

### （三）空间偏向性：差异化供给与城市不平等

城市管道体系在空间上并非均等分布，其建设与更新往往伴随着明显的选择性。管道的空间分布直接决定了城市内部不同区域能否进入“现代集聚网络”。地方政府在财政有限与政绩压力的约束下，通常优先将高质量管网配置在新城区、重点开发区与产业集聚区，以服务招商引资和形象工程；而对于城中村、老旧小区或非正规居住区，则缺乏足够的更新动机。燃气和水作为生活必需品，管道的不均等分布意味着生活质量供给的空间不均。首先，它强化了经济机会的不均衡：缺乏燃气与排水系统的地区更难吸引企业与中高收入居民，从而陷入“基础设施缺失—经济活力不足”的循环。其次，它加剧了环境与健康风险：在许多发展中国家的城市，贫民窟居民因缺乏污水管网而长期暴露于疾病与污染环境。<sup>⑤</sup>再次，这种不平等往往与社会身份叠加，表现为阶层与群体差异的空间化。

因此，这种差异导致同一城市内部形成了双轨制的基础设施格局：核心区域享有更稳定、更高效的供排水与燃气系统，而边缘区域居民则要承担更高的用水风险与环境健康成本。这不仅造成公共服务的供给鸿沟，也通过企业选址、房价分布等渠道加剧了城市空间的不均衡发展。<sup>⑥</sup>随着时间推移，这种差异会被进一步固化，形成空间意义上的“二元城市”。北京和上海在城市扩展过程中，新区的燃气管网普及速度显著快于老城区的改造进度<sup>⑦</sup>；在印度和巴西等发展中国家，正规城区与贫民窟在管道覆盖上的巨大差异，更直接反映了财政—权力逻辑对基础设施分布的塑造。<sup>⑧</sup>

相比起其他基础设施，管道体系独特的“政绩不可见性”在这里起到放大器的作用。与道路、轨道交通等“可见性工程”不同，管道的分布差异缺乏公众感知与媒介监督，使得这种不平等往往在沉默中被固化。居民在日常生活中或许能体会停水与爆管的不便，但很难将之直接归因于政府在投资上的差异化选择，更难

①④⑤⑧ UN-Habitat, “World Cities Report 2016: Urbanization and Development,” Nairobi, 2016.

② Xu, J., “Governing China’s Mega-projects: State Capitalism and Policy-driven Infrastructure Expansion,” Routledge, 2020.

③⑦ World Bank, “Urban China: Toward Efficient, Inclusive, and Sustainable Urbanization,” Washington, DC: World Bank, 2015.

⑥ Coury, Michael, Toru Kitagawa, Allison Shertzer, and Matthew A. Turner, “The Value of Piped Water and Sewers: Evidence from 19th Century Chicago,” *Review of Economics and Statistics*, August 22, 2024, pp. 1–47; McCulloch, Sean E, Matthew P Schaelling, Matthew Turner, and Toru Kitagawa, “Sewers and Urbanization in the Developing World,” *NBER Working Paper*, April, 2025.

形成舆论压力或问责机制。因此，政府在项目排序中可以理性地忽视那些缺乏政治回报的边缘区域，导致“空间分化—公共感知缺位—政策激励不足”的恶性循环。换言之，管道的隐性属性不仅削弱了其在财政资源分配中的竞争力，也使得城市内部的空间不平等在制度层面更难被纠正。

#### （四）跨期矛盾：遗产效应与政绩周期

与其他大型基础设施类似，管道体系一旦建成，其使用寿命往往长达数十年甚至上百年，因而在时间维度上形成了典型的“基础设施遗产效应”。早期的投资决策不仅决定了管网的布局、质量与容量，也深刻影响了当代城市的空间格局与公共风险分布。<sup>①</sup> 纽约 19 世纪末铺设的供水与排污系统至今仍是主要运行框架，但老旧设施频繁爆管与泄漏，成为历史遗产的沉重负担。伦敦和巴黎部分下水道系统运行逾百年，在面对极端降雨时屡屡溢流；中国不少老城区因早期设计标准偏低、更新滞后，逐渐成为内涝与环境污染的高风险区域。这些案例说明，基础设施遗产不仅体现为技术与维护的负担，更在长期内固化了空间不平等与环境风险。

然而，管道的这种长期效应与地方官员的短期政治激励之间存在显著错配。管道体系的另一突出特征是其寿命远超政治任期，地方官员的任期通常只有数年，其晋升与考核机制高度依赖于短期、可量化、可见的政绩信号<sup>②</sup>，地方官员的决策因此通常带有短期化的特征<sup>③</sup>。在这种制度安排下，那些需要长期才能显现效果的隐性基础设施往往被系统性低估。更重要的是，管道的不可见性使得其建设或更新难以形成公众与上级政府的即时反馈，进一步降低了其在官员投资组合中的优先级。结果是，即便管道的社会边际回报在长期内可能高于显性工程，地方政府仍会出于理性考量而推迟或弱化相关投资。这种长期效应与短期政绩周期的矛盾，解释了管道治理中的“时间困境”：它们一方面以物质遗产的形式深刻塑造城市的长期格局，另一方面却在短期激励机制下被持续忽视，从而形成一种难以逆转的结构性弊病。

这种长期效益与短期政绩周期之间的制度性错配，构成了城市管道治理的“跨期矛盾”：一方面，管网作为城市的“物质遗产”在数十年尺度上决定着健康、安全与宜居性；另一方面，短期政治激励使得这种关键性基础设施在建设与维护中持续被忽视，从而导致城市在物理层面和制度层面双重滞后。

这些由于政绩不可见性、空间偏向与跨期矛盾所导致的管道建设问题，并不仅仅是效率损失或公平困境。在气候变化日益加剧的今天，它们更可能演化为公共安全与系统性风险。当极端降雨、热浪和海平面上升冲击到这些长期被忽视的隐性基础设施时，城市将面临全面失灵的危险。

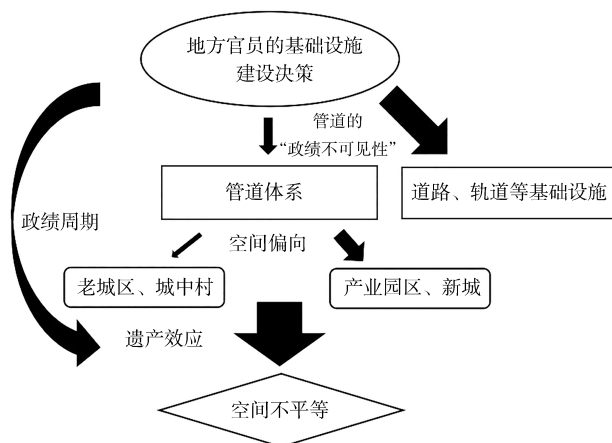


图3 空间政治经济学视角下的管道建设逻辑

## 四、气候变化、管道失灵和城市更新

前文揭示了管道建设背后的政绩不可见性、空间偏向与跨期矛盾逻辑，这些制度性弱点在平稳时期或许尚能被掩盖，但在气候变化的背景下则被急剧放大。极端降雨、热浪和海平面上升等气候事件不断冲击既有管网，使得老旧系统频繁超载、爆管或失灵，进而演化为新的公共安全与社会不平等风险。由此，管道治理已不再是单纯的技术与工程问题，而成为气候适应和城市更新的核心议题。本部分将从三个方面展开：首先，

① Baruah, Neeraj G., J., Vernon Henderson, and Cong Peng, "Colonial Legacies: Shaping African Cities," *Journal of Economic Geography*, 21(1), 2021, pp. 29-65.

② 梅正午、孙玉栋：《公共服务的供给存在政治周期吗？》，《云南财经大学学报》2020年第9期。

③ 余靖雯、肖洁、龚六堂：《政治周期与地方政府土地出让行为》，《经济研究》2015年第2期。

梳理气候变化如何加剧管道失灵的风险，凸显新的治理挑战；其次，结合前文政治经济学的分析框架，探讨如何通过技术机制来设计有效的应对方案；最后，将管道治理置于韧性城市与城市更新的宏观战略中，思考如何将这一“隐性基础设施”纳入未来政策议程。

### （一）气候变化与管道失灵

管道体系本身已经受到政绩不可见性、空间偏向与政绩周期的制约，而气候变化的叠加进一步放大了这些制度性弱点。极端降雨频率和强度的上升，使原本按常规设计暴雨强度建设的排水系统频繁超载，“暴雨即内涝”成为许多城市的常态风险；持续高温与温差波动则加剧了供水和燃气管网的运行压力，爆管与泄漏事故显著增加；海平面上升与地质灾害又对沿海和低洼地区的地下管网构成长期威胁。这些风险不仅增加了管道失灵的频率，更放大了外部性：一次排水系统的失效即可引发交通瘫痪和公共卫生危机，供水或燃气管道的破裂则可能演化为环境污染与安全事故。因此，气候变化不仅是对城市基础设施的自然冲击，更是制度缺陷与环境风险叠加下的系统性挑战。

现实案例进一步印证了这一逻辑。中国多个地区在近年极端天气事件中暴露出类似脆弱性。2021年河南郑州“7·20”暴雨中，小时雨量达到201.9毫米、三日累计超过600毫米，导致多处排水管网完全超负荷，地铁、隧道与道路内涝严重，暴露老旧排水系统在极端降雨下的结构性不足。<sup>①</sup>2020年四川绵阳与遂宁暴雨期间，山洪导致多处供水主管道被冲断，超过20万居民短时停水，凸显内陆丘陵城市在暴雨下供水管网的高暴露度。<sup>②</sup>2023年广东深圳“5·22”暴雨再次检验沿海城市的排水能力，当日多区一小时降雨量突破历史记录，部分排水系统出现倒灌、河涌漫顶与市政管网瞬时失效。上海与宁波等沿海城市在台风“烟花”（2021年）与“杜苏芮”（2023年）期间，出现雨污混接点溢流、排水泵站超负荷运行等问题，体现海平面上升与暴潮背景下沿海管网的脆弱性。

此外，近年来北方、沿海与内陆山地城市的多起事件也进一步揭示了气候变化对管道体系的全方位压力。哈尔滨多次在寒潮期间发生供热主管爆裂，反映出极端冷暖波动对北方老旧热力管网的持续冲击；大连在夏季高温阶段多次出现主供水管道破裂，暴露沿海城市在高温—高湿环境中供水系统的材料疲劳风险；而重庆在山地强降雨期间则频繁出现排水与供水系统的“复合型失效”，说明复杂地形城市在暴雨压力下更容易出现地下管网的位移与破损。更广泛的实证研究也表明，气候变化正在加速城市基础设施的失效周期，并显著推高维护和更新成本。<sup>③</sup>

这些跨区域、跨气候带的案例共同说明：中国城市的管道体系正在被极端天气“多点冲击”。更重要的是，气候风险对现有管道体系所构成的不仅是工程技术难题，更揭示了管道体系在财政激励不足与治理偏差下的高度脆弱性。其脆弱性不仅具有地域普遍性，也与制度性更新不足密切相关。地方政府在更新过程中常偏重一些“可见性工程”，如道路拓宽、地铁延伸或商业综合体建设，而地下管道因缺乏可视化政绩而长期滞后。由此，管道不仅是“隐形基础设施”，更成为城市更新议程中的“盲点”。在气候变化与快速城市化的双重压力下，管网的失灵风险不断累积，成为制约城市安全与发展的隐性瓶颈。

### （二）制度约束与技术突破：管道建设的新路径

前文分析表明，管道体系的建设与维护长期受到政绩不可见性、空间偏向与跨期矛盾的多重困境，导致管网更新滞后、隐患累积。在这一背景下，单纯依赖传统的财政转移支付或政绩考核难以完全扭转地方政府的激励偏差。在经济学中，这也是一个典型的“委托—代理”问题：作为代理人的地方政府与作为委托人的中央（代表全民利益）之间存在目标函数的不一致。而管道体系最显著的特征——“不可见性”，则高度强化了信息不对称，这共同导致了地方政府的最终决策和执行结果偏离社会最优，从而产生巨大的代理成本。

① Li, Pengjun, Luwen Zhuang, Kairong Lin, et al., “New Perspectives on Urban Stormwater Management in China, with a Focus on Extreme Rainfall Events,” *Natural Hazards*, 121(4), 2025, pp. 3745–3774.

② “遂宁暴雨” 新闻来源：[https://snrb.snwx.com/html/2020-09/17/content\\_99153\\_12390162.htm](https://snrb.snwx.com/html/2020-09/17/content_99153_12390162.htm).

③ Rosenzweig, C., Solecki, W., Hammer, S. A., and Mehrotra, S., *Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network*, Cambridge University Press, 2014; IPCC, *Sixth Assessment Report (AR6): Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

新的技术的引入可以通过降低信息不对称的方式，缓解这一制度性难题。<sup>①</sup> 通过部署传感器、物联网设备和人工智能分析平台，管道运行状态可以实现实时监测与可视化，大幅降低了“不可见性”的治理难度。管道一旦纳入可量化的监测指标，便可以纳入政绩考核体系，进而提高地方政府在投资和维护方面的积极性。因此，新兴技术不仅是一种工程手段，更是一种制度工具，它通过提升信息透明度和可见性，间接纠正了财政与权力结构中的激励扭曲。

具体而言，智能化监测技术正在全球范围内快速推广，并逐步改变管道治理的逻辑。例如，光纤分布式感测（DFOS）能够对长距离管网的温度和振动进行实时监控，提前发现潜在泄漏点<sup>②</sup>；永久性声学传感系统可在供水管网中实时定位漏损，实现“精准修复”；机器人与无人机技术则被广泛用于老旧管网的内部检测与无损修复，显著降低了维护成本。在中国，深圳通过人工智能分析系统将城市供水漏损率降低约 20%，广州和重庆则通过建设智慧排水平台提高了极端降雨下的应急响应能力。<sup>③</sup> 这些实践表明，新兴技术在提升治理透明度和效率的同时，也在重塑管道政治经济学的基本逻辑：过去“看不见的毛细血管”，如今通过智能化手段变得可观测、可治理，因而更容易获得财政与政策支持。面向未来，管道建设亟需走向智能化和系统化，以克服其长期以来的“隐形劣势”。一方面，物联网传感器和光纤分布式感测技术能够实现对流量、水质、压力等指标的实时监测，结合人工智能算法，可在风险发生前完成预测性维护，从而将治理关口前移。另一方面，机器人与无损检测技术的应用，使得天然气管道与老旧供水网络的修复可以在不停运的情况下完成，大幅降低了维护成本。

现实案例亦支持了上述政策的效果。为了进一步观察智慧管网等新技术对供水管道质量的潜在影响，本文选取北京、上海、广州、深圳四个一线城市作为案例，并绘制了其 2006—2022 年间的管道漏水率变化趋势。如图 4 所示，四城在早期阶段（2006—2012 年）漏水率总体呈现相似的波动区间，但在部分城市推行智慧管网系统后，其趋势出现了明显分化。值得注意的是，深圳自 2015 年前后开始系统性推进供水管网智能监测、压力调控与漏损管理技术，在此之后其漏水率呈现出持续而显著的下降趋势，从 2015 年的约 13% 降至 2022 年不足 9%，成为四城中改善最为显著的城市。相比之下，未在相同时间窗口内全面部署智慧管网体系的北京、上海，其漏水率趋势均未出现类似幅度的系统性下降，部分年份甚至出现反弹。

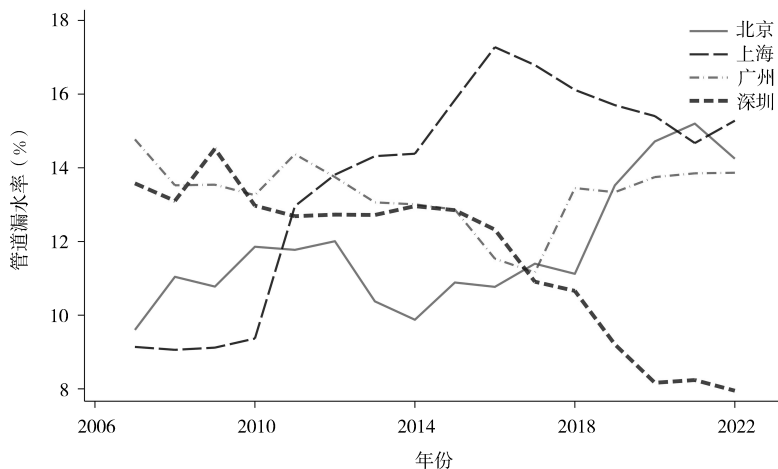


图 4 典型超大城市的供水管道质量变化趋势

数据来源：中华人民共和国住房和城乡建设部编：《中国城市建设统计年鉴》2013 年卷—2019 年卷，北京：中国统计出版社，2014—2020 年。

① Greenstone, Michael, Guojun He, Ruixue Jia, and Tong Liu, “Can Technology Solve the Principal-Agent Problem? Evidence from China’s War on Air Pollution,” *American Economic Review: Insights*, 4(1), 2022, pp. 54–70.

② 关于分布式光纤传感技术在城市燃气管网领域的应用：<https://www.hbnews.net/2025/05-06/GDBZp5Dq.html>。

③ 深圳和广州的智能水网系统简介：[https://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/gqdt/content/post\\_12102631.html](https://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/gqdt/content/post_12102631.html)；[https://www.mohurdic.org.cn/szsj/zszy/art/2025/art\\_8081502513fd494ab0cfe64df3c4d0eb.html](https://www.mohurdic.org.cn/szsj/zszy/art/2025/art_8081502513fd494ab0cfe64df3c4d0eb.html)。

尽管图 4 并非严格意义上的因果识别，漏水率的变化可能同时受到维护投入、城市更新节奏、财政状况等多重因素的共同影响。然而，这种趋势层面的分化仍具有重要启示意义。其一，它为智慧管网的有效性提供了有说服力的案例性支持：在基础设施老化与环境压力加剧的背景下，引入智能监测、风险预警和主动维护机制，确实有望显著改善管道运行表现。其二，这一对比也说明，仅依赖传统维护方式可能难以在复杂制度环境中实现持续改善，而技术手段的介入正在成为突破“隐性基础设施治理困境”的关键入口。

中国城市化正在迈入新的阶段——在城镇化率逼近 70% 的背景下，人口增量正持续向少数超大与特大城市集中；同时，内部人口结构的变化、产业升级与空间再开发正在推动城市运行压力持续上升。在这一过程中，基础设施体系由“增量扩张”逐步转向“存量更新”，隐性基础设施的治理能力将直接关系到城市的承载能力与公共安全。在此宏观趋势下，深圳等城市通过智慧管网体系实现漏损率的持续下降，其意义不仅仅局限于技术层面。深圳作为超大城市，其供水负荷、城市密度与基础设施老化程度本质上与其他特大城市具有高度可比性。正因如此，其在智能监测、数据驱动调度与主动维护方面的实践，为特大城市如何在高密度、高运行压力下提升“隐性基础设施韧性”提供了重要经验。

### （三）韧性城市建设：城市更新的未来

2025 年中央城市工作会议明确指出，以建设创新、宜居、美丽、韧性、文明、智慧的现代化人民城市为目标，并将着力建设安全可靠的韧性城市列入重点任务之一，包括推进城市基础设施生命线安全工程建设，加快老旧管线改造升级。这表现出国家层面对城市韧性提出更高要求：不仅要确保地上环境质量，更要筑牢城市运转的安全底线。管道体系作为地下“毛细血管”，在提供清洁能源、水源保障和排洪排污能力方面的重要性不言而喻。若排水系统在暴雨中崩溃，供水管道在热浪中爆裂，或燃气泄漏成为安全隐患，城市的整体运行将受到巨大冲击。因此，在当前“韧性城市”战略框架中，管道的更新与治理已不仅是基础设施维护，而是保障城市安全与公共服务连续性的核心组成部分，必须被纳入国家治理体系和城市更新战略的议程。

基于上述定位，管道更新应嵌入城市更新政策，通过制度设计形成治理合力。首先，应将地下管网更新纳入“老旧小区改造”和“城市有机更新”标准项目，让其成为必选必做的建设内容；其次，将“海绵城市”建设策略与现有排水系统改造同步，推动灰—绿基础设施结合，以提升雨洪应对能力和城市生态适应性；第三，应引入智能化监测技术——如物联网传感器、数字孪生管理平台、智慧排水系统等——提升管道系统的可感知性，为风险预警提供技术支撑，同时也可使管道治理被纳入绩效考核体系，提升地方政府参与积极性。深圳采取 AI 漏损监测将供水漏损率降约 20%，广州、重庆构建智慧排水平台提升洪涝应急效率，这些实践为政策整合提供了可资借鉴的路径。

面向未来，管道治理的深化应当围绕韧性、公平和可持续性三大战略目标展开。韧性方面，应构建多层级管道体系，具备即时监测与紧急响应能力；公平方面应优先选择高风险、弱势社区作为先行更新区，避免“选择性更新”带来的结构性不平等；可持续方面，则应通过绿色材料选用、智能控制与耗损，将管道升级与碳中和目标对接。这样，管道便从“被动维护”的隐性角色，升级为现代城市治理与韧性战略的关键支柱。只有将地下“毛细血管”转变为可被感知、可被治理、可被考量的构建空间，现代城市才能真正迈入“高质量、安全与可持续”的发展新阶段。

## 五、主要结论和政策建议

本文从经济集聚、政治经济学与气候变化三个维度系统揭示了城市管道基础设施这一“看不见的毛细血管”的重要性及其长期被忽视的深层原因。实证结果表明，无论从自然禀赋、人口与产业结构，还是从财政能力与基础设施存量来看，常规可观测因素都不足以解释中国城市之间显著的管道质量差异。这一经验悖论使得制度层面的解释成为必要：政绩不可见性弱化了地方政府对隐性基础设施的投入意愿；空间偏向性导致管道更新呈现明显的区域不均衡；跨期错配则使得管道的长期社会价值难以在短期政治激励结构中得到体现。与此同时，随着极端降雨、热浪及地质扰动不断增加，气候变化进一步放大了管网老化与维护薄弱带来的风险，使管道体系成为城市安全与运行稳定性的关键短板。

基于前文的理论分析与实证证据，本文认为未来的政策重点应形成清晰的“两步走”路径：先以技术手

段打破信息不透明，再以制度改革将信息转换为有效激励。这不仅能提升管道运行效率，更能重塑地方政府在隐性基础设施上的治理能力。

第一，未来提升城市管道治理能力的关键，在于以技术进步为契机，重构隐性基础设施的可观测性基础。鉴于管网体系长期处于信息不透明状态，导致其运行风险、维护状况和更新需求难以纳入治理体系，推进智能管网建设应成为城市基础设施现代化的重要方向。通过分区计量（DMA）、压力与流量传感、GIS—SCADA一体化监测、数字孪生等技术手段，可实现对管道运行状态的实时监控，将漏损点、爆管风险与老旧程度等信息从“不可见”转化为“可量化”。在极端气候事件频发的背景下，该类技术不仅能够提高管网运行效率，更能够显著提升系统的早期预警和应急响应能力，为韧性城市建设奠定基础。因此，国家层面有必要制定统一的智能管网技术标准，推动重点城市率先开展试点，并通过中央财政引导与地方配套资金相结合的方式，加快地下管网的数字化改造。

第二，在技术支持可观测性的前提下，制度设计应进一步将智能化数据纳入地方政府的激励与评价体系，从而形成隐性基础设施治理的可持续机制。智能管网提供的实时数据，使得漏损率控制、事故发生频率、维护响应速度、重点风险区更新情况等指标具备可比较性，为将管道治理绩效纳入城市管理考核提供了可行条件。通过建立基于过程绩效的考核体系，可在一定程度上缓解隐性基础设施的长期效益与官员任期短期性之间的矛盾。此外，智能化数据的空间精度有助于识别城市内部的基础设施薄弱区，减少投资与维护资源在区域上的偏向性，提升城市更新的公平性与效率。总体而言，技术进步为解决隐性基础设施治理的委托—代理问题提供了可能，而激励结构的制度化嵌入，则是实现治理能力现代化的必要条件。

〔本文受上海交通大学数字化管理决策实验室重点项目的资助〕

（责任编辑：沈敏）

## **Invisible Capillaries of the City: Pipeline Infrastructure, Political Incentives, and the Future of Urban Resilience in China**

SHEN Xiaochi

**Abstract:** Underground pipelines constitute the “invisible capillaries” of modern cities, yet their role in sustaining urban agglomeration has long been underestimated. This study shows that pipeline systems reduce energy, environmental, and health externalities and thus form a critical but overlooked foundation of urban development. Using panel data on water-supply leakage rates in Chinese cities, we find that neither natural conditions nor socio-economic factors—on both the demand and supply sides—can explain the substantial spatial variation in pipeline quality, revealing a key empirical puzzle. To address this puzzle, the paper develops a political economy framework highlighting three structural constraints: the invisibility of pipeline performance, spatial bias in infrastructure provision, and the intertemporal mismatch between long-lived assets and short political cycles. These mechanisms jointly produce chronic underinvestment and uneven pipeline quality. Finally, the paper argues that climate change magnifies existing vulnerabilities, underscoring the urgency of advancing pipeline renewal and smart-pipeline technologies. Strengthening the governance of underground infrastructure is essential for building resilient cities and improving long-term urban governance capacity in China.

**Key words:** pipeline infrastructure, urban agglomeration, political economy, infrastructure quality, climate resilience, smart governance