



关键信息

- 地下水是全球城市供水的重要来源，而含水层储存则是应对气候变化和长期干旱、保障供水安全的关键水资源
- 在城市中，为实现就地自供而修建的私人水井，往往在公共供水不足时作为一种“应对策略”而迅速增加，但此类水井一旦投入使用，通常会因“降低成本的策略”而持续使用多年
- 城市化显著改变了“地下水循环”，并带来显著影响——既包括含水层水压下降的时期（可能引发地面沉降，造成建筑物和基础设施受损），也包括地下水位上升的时期（可能导致地下水泛滥，带来公共健康隐患和基础设施损害）
- 在发展中国家，就地式卫生设施可能对地下水水质构成重大威胁，因此亟需更加积极和综合的管理措施
- 地下水常常是城市基础设施各个方面之间的“隐形纽带”，它往往影响“所有人”，却常常缺乏明确的责任主体来管理

为什么地下水对城市供水安全至关重要？

城市化是我们这个时代最主要的全球现象，自最初有人定居以来，泉水和井水所提供的地下水一直是城市供水的重要来源。在现代，借助深井和潜水电泵的地下水开采，使得地下水在全球范围内广泛支持了城市发展。影响地下水利用的因素包括：其在市政供水中的资源可靠性、在私人供水中的资源可及性、河流取水因污染而导致的安全性下降，以及相对较低的打井成本。大多数含水层系统拥有巨大的天然储量，这使其在过去的干旱时期成为保障供水安全的关键资源，并将在未来气候变化的适应过程中发挥更加重要的作用。

如今，许多国家（从欧盟和美国到巴西、中国、印度、尼日利亚、巴基斯坦、秘鲁和越南）在城市供水方面高度依赖地下水，尤其是在数量庞大的中小城市中更为显著。那些坐落在高产含水层周围的城市，因供水部门能够逐步扩大水资源开发，往往享有较低的水价和/或更优的服务水平。同样重要的是，需要认识到私人自供地下水的广泛意义（这不仅限于发电厂等工业用途，也包括居民和商业用户）在一些巴西城市，干旱时期私人自供地下水的用水量可占总用水量的20%，而在许多印度城市这一比例甚至更高。

快速的城市发展与不断增加的人口密度





为什么地下水会对城市基础设施的韧性构成潜在威胁？

城市化通过以下方式显著改变了地下水循环：

- 补给量显著增加，这是因为土地硬化导致的渗透减少，被自来水管漏损、废水渗漏、雨水下渗设施以及过量的花园灌溉所弥补甚至超过。
- 来自就地式卫生设施、污水管道泄漏、公共及工业化学品存储和处置不当，以及液体排放物和固体废弃物处置所造成的大量地下污染负荷。
- 由于流入深层集水下水道和基础设施排水系统而导致的大量排泄。

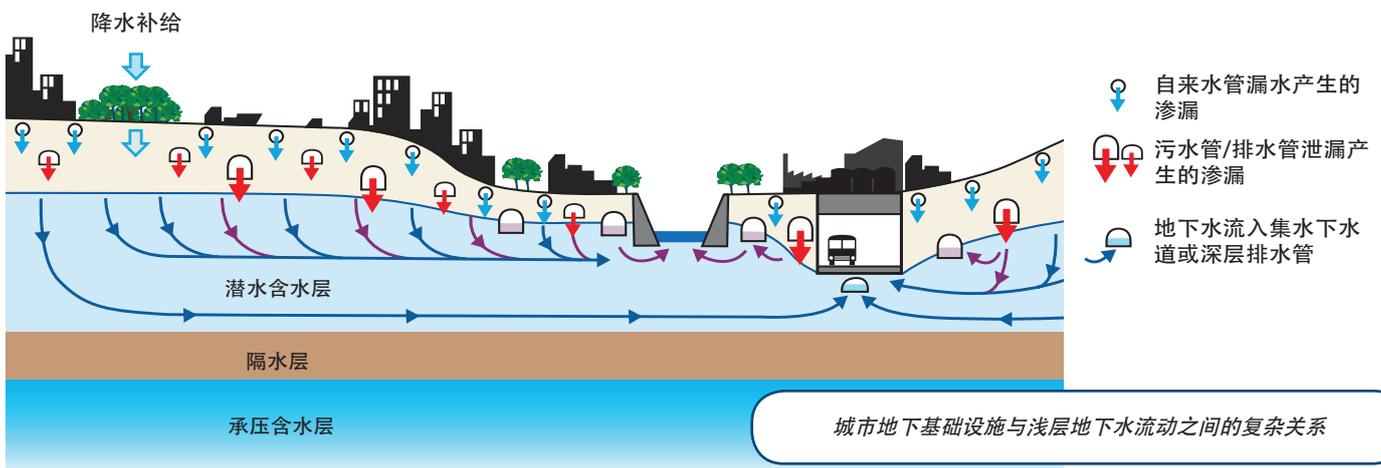
这种变化处于持续演变过程中，从而引发地下水状况的改变，可能会严重削弱城市基础设施的韧性。

尽管城市地区的地下水补给率有所增加，但在大城市范围内，地下水资源本身很少能满足全部用水需求。如果不引入新的供水来源，可能会导致局部含水层严重枯竭，并伴随准不可逆的副作用风险（如受污染水体的渗入、地面沉降以及沿海地区的咸水入侵）。在大型城市群的发展过程中，随着中心城区地下水开采的减少，地下水位

可能会出现显著反弹，从而对现有的城市基础设施造成严重影响（例如阿根廷布宜诺斯艾利斯和日本东京的案例）。

从某种意义上说，城市下方的地下水系统可被视为城市污染物的最终汇集地（其中废水中的硝酸盐和某些合成碳氢化合物具有极强的持久性）。然而，实际情况中，地下污染负荷对地下水的影响程度会因相关含水层系统的脆弱性而存在巨大差异。因此，在风险评估和工业遗留土地污染的修复过程中，充分发挥水文地质专业知识的作用，对于最大限度地减少地下水污染至关重要。

不稳定的地下水状况始终可能威胁城市基础设施的部分功能，但其表现形式会因社会经济发展阶段和所涉及的地下水系统类型而显著不同。在中低收入国家，重点往往在于地下水过度开采所带来的副作用；而在高收入国家，人们更关注地下水状况发生重大变化对第三方造成的影响。尤其是地下水位上升和峰值水位过高，可能导致地下室受损与积水、化粪池失效，以及深层集水下水道过量入流。地下水泛滥的风险如今已被保险公司单独识别，并可能对房产价值产生影响。



城市供水部门应如何更好地保护地下水储存?

未来，充分利用大多数含水层的大容量地下水储存，并与地表水源进行协调调配，将对提升供水安全至关重要。目前，在许多发展中国家实施的所谓“联合利用”大多仅是一种零散的应对策略。然而，也存在一些更为优化的案例（如秘鲁利马和泰国曼谷）。为实现更有效的利用，需要广泛采取需求管理措施，以限制不必要的用水并减少无效水耗；同时，还应加强人工含水层回灌（如通过屋顶排水、透水路面渗井，以及利用蓄水池或大口井回灌过量地表水）。要实现这些目标，供水部门亟需培育起一种资源文化，在管理中真正重视和保护地下水资源。

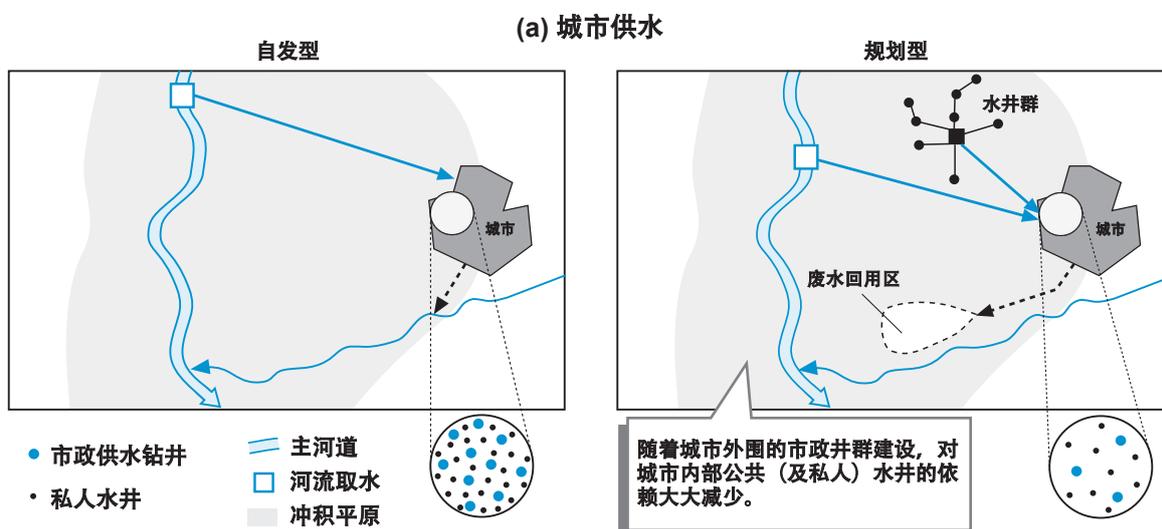
此外，应积极推动在城市外围建立供水部门的水井群，并将其集水区划定为饮用水保护区，这应被视为最佳工程实践。然而，这一措施往往会因大都市区内部不同市政当局之间权力分散而遭遇行政阻碍。为克服这一问题，需要探索更完善的治理机制和经济激励措施。

鉴于城市含水层中地下水利用的持续演变，以及在精确预测其行为方面存在一定水文地质不确定性，因而有必要对城市地下水资源采取适应性管理方法。这种方法应以地下水水位和水质的持续监测为基础，并由定期更新的数值含水层模型提供指导。

如何在城市卫生规划中纳入地下水因素?

地下水与城市卫生的关联在发展中国家尤为突出，因为广泛存在的就地式卫生设施对地下水水质构成了重大威胁。在大多数情况下（浅层和脆弱含水层除外），土层具备足够的削减能力，可以去除渗透废水中的粪便病原体。但随着水井建设不足和/或污水处理不善，这种危险显著增加，这在快速扩张、缺乏秩序的城市中十分常见。然而，氮化合物和溶解性有机碳的问题在不同人口密度的就地式卫生覆盖区会以不同程度出现。对于市政供水而言，常见的应对方式是通过混合稀释来降低污染物浓度，但这需要有安全可靠的高质量水源，而且存在根本性的局限，因为某些废水中含有多种药物和激素残留。

城市水资源联合利用——自发发展与规划发展模式的对比





为了降低成本并提升城市水利基础设施的安全性，需要在城市供水、管网排污以及土地利用之间采取更为综合的协同方式。有许多切实可行的措施可以用来提升地下水利用的可持续性，其中包括：

- 将新近城市化地区的污水管网覆盖建设列为优先事项，以保护其高质量地下水免于逐步退化
- 在位置优越、可利用公园绿地条件的供水井周围设立地下水保护区
- 对工业废水和固体废弃物的处理与处置实施更严格的管控，以降低含水层污染风险

通过严格的粪污管理计划，推广干式（生态卫生）设施，其中尿液与粪便分离并分别回收利用，可以减少地下水污染。后一种设施特别推荐用于分布在浅层含水层上的新建城区，但它并非地下水污染的普遍解决方案，因为在既有住宅中大规模改造安装的成本过高。

一个重要的推论是，应更好地利用因污水管网覆盖率提升而产生的日益增长的废水资源。这些废水可以经过空间规划和适当管控后，用于景观和农业灌溉，从而最大限度地减少公共健康风险，包括避免对可饮用地下水造成的附带污染。

如何让城市地下水的私人就地使用更安全？

在快速城市化阶段和/或公共供水不足时期，私人资本对地下水就地开采以实现城市自供往往迅速增长。这本质上是多户住宅、商业及工业企业的一种应对策略。用水者通常会根据可获得性和相对成本从多种来源获取供水，而价格高昂的运水车供水则是最后的选择。

当公共供水条件改善后，许多用户仍可能将地下水自供作为一种降低成本的策略而长期延续。

私人地下水利用在许多城市中占“用户实际获得供水量”的重要比例，对市政供水基础设施投资规划具有重大影响（如巴西圣保罗和福塔莱萨、尼泊尔加德满都、印度班加罗尔和奥兰加巴德等地）。尽管这种供水方式的“规模经济效益”可能较差，但其供水成本往往低于新建市政地表水供水工程在完全成本回收条件下所需的水价。私人住宅地下水使用是否会对用户构成严重威胁，取决于存在的污染类型（人为污染或天然污染）以及具体的用水类型。

城市私人就地地下水利用——效益与风险概览

效益

- 显著改善部分用户群体的用水可及性并降低成本（但对最贫困群体而言除非水井建设/运行费用得到补贴，否则难以受益）
- 非常适合对水质要求不高的用途（如花园灌溉、洗衣、清洁、制冷系统等）
- 不会导致严重的资源枯竭（承压含水层除外），并可回收大量自来水管网漏损水
- 减轻市政供水系统的压力，特别是在位置偏远或用水需求存在峰值的情况下。

风险

- 与就地式卫生设施的相互作用可能引发健康风险，并使水源性疾病控制更加困难
- 当存在工业污染或地下水严重天然污染时，需要格外谨慎
- 井体完工不规范可能导致污染物从浅层向深层含水层迁移
- 富裕城市居民的大规模自供水可能引发复杂的连锁效应，并严重削减市政供水部门的收费收入

公共管理部门需要对城市水井使用的做法及其影响进行严格评估，以制定平衡合理的政策。

一个新出现的政策问题是：在何种情况下，私人住宅从城市地下水中自供的风险或不便足以证明应当禁止这种做法。许多私人水井在最好的情况下缺乏监管，在最坏的情况下则属非法。从长远来看，这对私人用户和公共管理部门都是适得其反的，但可以通过以下管理干预措施加以规范：

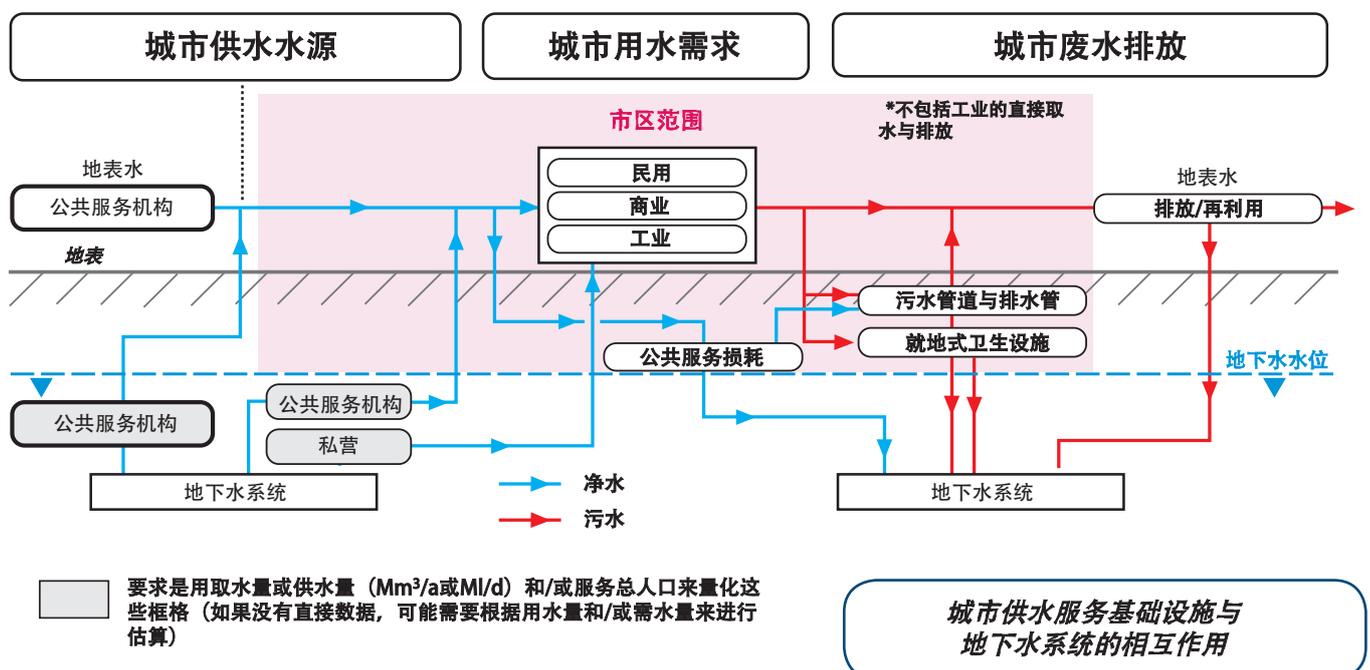
- 利用地理定位与数据采集技术来确定水井位置
- 对商业和工业用户，以及公寓和住宅小区的居民用水进行登记，并根据水井抽水能力或污水排放量计量收费
- 向私人水井使用者发布水质使用建议和健康警示，如污染严重，则将其水源认定为不适合饮用
- 通过有效的参与机制和激励措施，促使社会公众承诺并积极开展“自我监测”

如何弥补城市地下水管理中的"责任真空", 以实现综合管理?

城市中心周边的地下水资源受一系列复杂的地方发展决策影响，而这些决策很少以综合方式加以审视，其中包括：

- 水井钻探/使用的许可（若有，通常由水资源管理机构负责）
- 供水的生产与分配（主要由供水部门负责）
- 城市基础设施与土地利用规划（由市政政府部门负责）
- 污水管网建设、液体排放物与固体废弃物的处置（由环境主管部门、公共卫生部门及供水部门负责）

虽然许多问题是可以预见的，但实际却很少被提前预测，其原因在于整体责任与问责的缺失。往往“一个群体的解决方案会演变成另一个群体的问题”，在进行基础设施规划和投资决策时，显然需要将地下水因素纳入考虑，但制度责任常常分散在多个机构之间，而这些机构都缺乏主导能力，原因在于：





- 水资源机构/委员会很少具备应对城市发展动态的能力
- 城市供水部门尽管对地下水依赖日益增加，却往往对资源缺乏了解
- 城市土地和环境部门对地下水的认识不足

城市地下水的战略重要性尚未在管理和资源基础保护方面得到足够的投资体现。在这一背景下，地下水专业人士需要提升公众对地下水经济价值的认知，并揭示资源治理政治经济中的关键问题。各级政府（从国家到地方）需要寻求切实可行的政策和有效的制度来应对这一挑战。这不仅需要政治领导力和改进的利益相关方参与，还必须以可靠的水文地质科学为支撑。此外，城市发展动态及其与地下水的关系足以促使建立由所有主要利益相关方和监管部门/机构组成的跨部门城市地下水联盟（或常设委员会）。这一联盟应承担在政治与行政层面传播地下水问题的责任，并获得必要的授权和资金，用以制定和实施优先行动计划；同时，还应依托由相关研究机构和大学专家组成的团队，提供可靠的技术诊断支持。

参考文献选编

- Eberts S M et al 2013 Factors affecting public supply-well vulnerability to contamination – understanding observed water quality and anticipating future water quality. USGS Circular 1385 <The Quality of Our Nation's Waters> (Washington DC).
- Foster S S D & Chilton P J 2004 Downstream of downtown – urban wastewater as ground water recharge. Hydrogeology Journal 12 : 115-120.
- Foster S & Hirata R 2011 Groundwater use for urban development : enhancing benefits and reducing risks. SIWI On-the-Water-Front (2011) 21-29.
- Foster S et al 2010 Urban groundwater use policy – balancing the benefits and risks in developing nations. GW-MATe Strategic Overview Series 3. World Bank (Washington DC). www.worldbank.org/gwmate .
- Howard K W F 2007 Urban groundwater : meeting the challenge. IAH Selected Paper Series 8. Taylor & Francis (Oxford).
- IGES 2007 Sustainable groundwater management in Asian cities. Institute of Global Environmental Strategies (Kyoto).

优先行动

- 更高效、更可持续地利用地下水进行城市供水，使含水层储存能够在供水部门的气候变化适应战略中持续发挥作用
- 将在城市外围建设供水井群并将其集水区划定为饮用水保护区，作为“最佳工程实践”加以推广
- 采用“适应性管理战略”来管理城市地下水资源，认识到含水层处于持续演变之中，且在精确预测其行为方面存在一定水文地质不确定性
- 在城市供水、管网排污与卫生、雨水排放以及土地利用方面采取更综合的方法，以降低成本并增强城市水利基础设施的韧性
- 由公共管理部门广泛评估城市就地取水井的使用情况，从而为制定关于私人地下水自供的平衡政策提供依据
- 建立由所有主要利益相关方和监管机构组成的“跨部门城市地下水联盟”，在充分的地下水系统监测信息支持下，获得授权并制定和实施优先管理行动计划