

战略概论系列

卫生与地下水

关键信息

- 所有卫生技术都与地下水密切相关,但这种关系往往不明显
- 现场卫生系统总会影响地下水水资源的数量和质量,经常造成浅层含水层的污染
- 在乡村,卫生单元的密度低得多,这意味着可以通过制定合理的卫生单元与水井之间的间距标准来处理地下水相互作用问题
- 集中式污水系统(下水道系统)与地下水的相互作用因城市地形差异而显著不同
- 在地势较高的城市地区,下水道的点渗漏和线路渗漏可能成为地下水污染的重要来源
- 在低洼城市区域,污水干管维护不足常常导致地下水渗入,进而造成污水处理量显著增加,而针对这部分增量处理费用却未能收取相应收益
- 将未经充分处理的废水用于灌溉可能导致严重的地下水污染,特别是在较干旱的地区

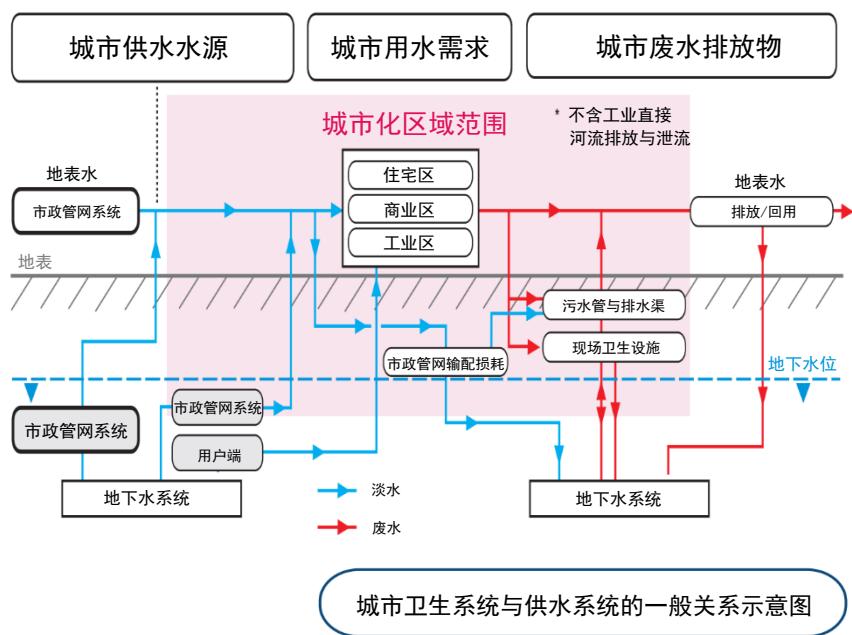
正在考虑的卫生设施方案有哪些?

城市污水的排放、处置及再利用通常通过两种基本类型不同的技术之一来实现的:现场卫生设备或(成本高得多的)主下污水系统(含管网和集中处理设施)。

这两种技术与地下水的相互作用需分别考量,但须以整体性为基础。二者均与地下水存在密切却往往不易察觉的双向作用关系:

- 现场卫生措施在不同程度上影响地下水资源的数量和质量;
- 地下水状况对下水道卫生系统产生影响,并增加其成本。

当前全球仍有超过30亿人口未能获得得到安全管理的卫生设施,这导致了健康与环境问题的广泛蔓延。



如何应对这一卫生设施不足，将对下伏地下水产生重大影响，而地下水往往也是同一人群赖以生存的关键资源。尤其令人担忧的是浅层水井的严重污染问题，因为经济弱势群体通常高度依赖这一资源。

地下水是人类生活的重要资源，占全球饮用水供应量的近 60%，在气候较为干旱的地区，对地下水的依赖程度甚至更高。地下水开发成本相对较低，水质通常较高，仅需简单处理即可，因此它是供应小型分配系统和私人自用水井的极佳来源。例如，在巴西的城市中，超过 80%的抽取地下水用于私人自供。

城市现场卫生设施如何影响底层地下水系统，这些相互作用能否得到管理？

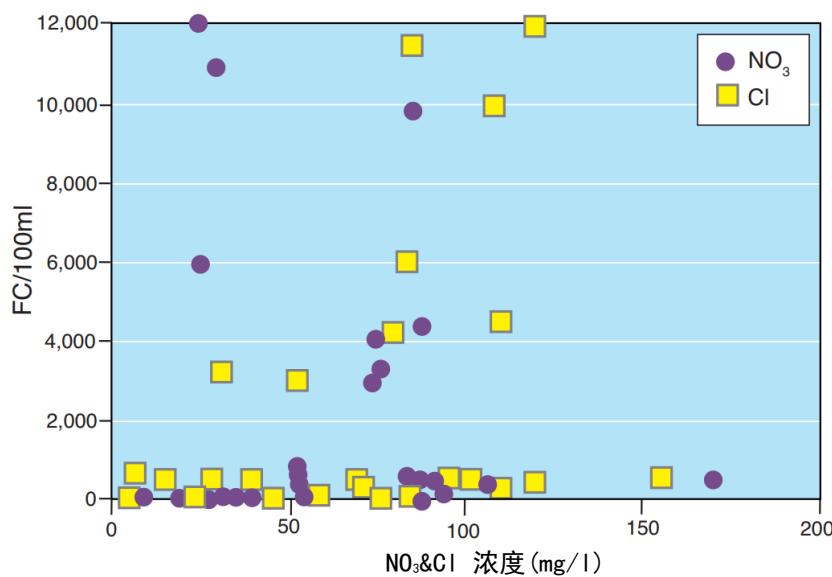
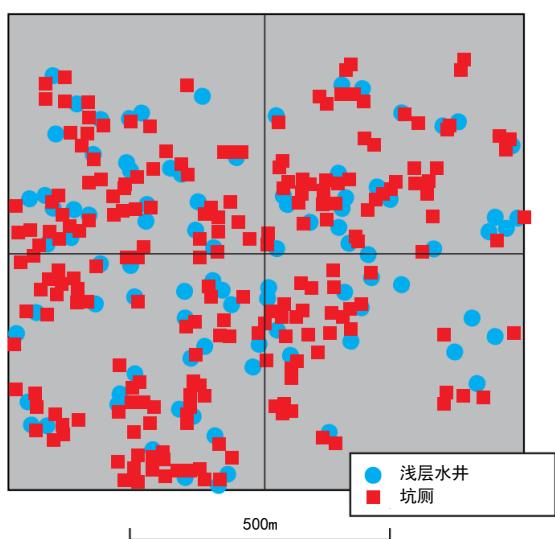
在城市地区，使用现场卫生设施可补充地下水资源（通过将供水返灌至地下），但也可能是浅层地下水污染的主要来源。

这一事实早已为人所知，但如何控制和管理相关风险的有效例子却迟迟没有出现。私人自备水井极易受到城市密集使用现场卫生设施所产生的污染，尤其当水井深度非常浅时更为明显。

污染程度取决于地下含水层的相对脆弱性，同时也取决于现场卫生设备本身的设计、操作和维护（特别是粪便污泥处理的做法）。在条件适宜、施工规范明确且粪便污泥清运服务可靠的情况下，此类污染可以得到有效控制。但在条件不利的情况下，其影响可能极为严重：包括高浓度硝酸盐、溶解性有机碳化合物、微量污染物及病原体进入地下水层。这种情况在将浅层含水层作为饮用水源的情况下会构成重大威胁。赞比亚卢萨卡市下方的岩溶白云质含水层数据清晰揭示了这一问题。

卢萨卡地区浅层水井相对于现场卫生设施的位置

及其水质状况（数据来源：Sorensen 等，2015）



卫生工程师面临的主要挑战在于：如何实现现场卫生设施中人类尿液（及粪便污泥）的回收利用，从而减轻对地下水质量的影响。

在乡村环境中，卫生系统与地下水的相互作用有何不同？

乡村地区现场卫生单元密度显著降低，污水产生量较少，通常可通过包气带渗滤进行处理。需在现场卫生单元与饮用水井之间采用合理的间距标准，以最大限度降低污染风险，同时必须坚决、持续地抵制为使用便利而缩小物理隔离距离的短视行为。

城市下水道是如何与地下水相互作用并影响其运行的？

水务公司在管理和扩展城市污水干管系统过程中面临诸多挑战：既要应对人口增长与能源成本上升的双重压力，还需处理潜在的管道溢流、污水/地表水混合排放系统问题，以及降雨强度增加和气候不确定性管理等复杂状况。

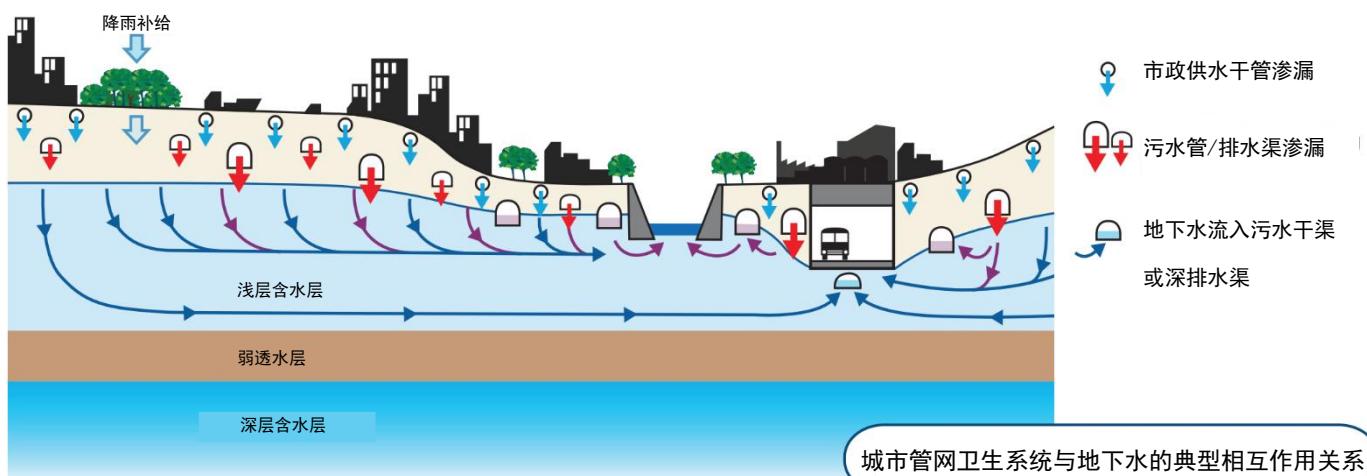
然而，管网式卫生系统的设计、建设与管理同样需要扎实掌握地下水文条件，以避免污水管道承受超负荷压力（超出地质负荷、交通荷载及地震活动所产生的压力），并最大限度减少泄漏以保障地下水质量。

过去，PVC 或水泥被广泛用于下水道管道施工，但近年来，使用玻璃钢（玻璃纤维增强聚酯）和陶土管的非开挖下水道安装普遍成为首选，因为这大大减少了对土壤提取的需求，并减少了下水道泄漏的潜在途径。

需要审慎评估的地下水对集中式卫生系统的潜在影响包括：

- 地下水供水地区污水管渗漏对浅层地下水的污染；
- 由于低洼地区的浅层地下水进入而导致的污水流量异常激增；
- 使用经过部分处理的废水进行农业灌溉所致浅层地下水污染。

在地势较高的城市地区，下水道的点源渗漏和线源渗漏可能成为浅层地下水的重要污染源，



当此类受污染的地下水被用作饮用水源时，此种污染便会构成健康威胁。此类现象需逐个场地进行调查与控制，某些情况下甚至需要关闭受污染的水井。在巴西圣保罗州的某些城市，经测算其污水渗漏量已达到地下水总流量的 10% 以上。

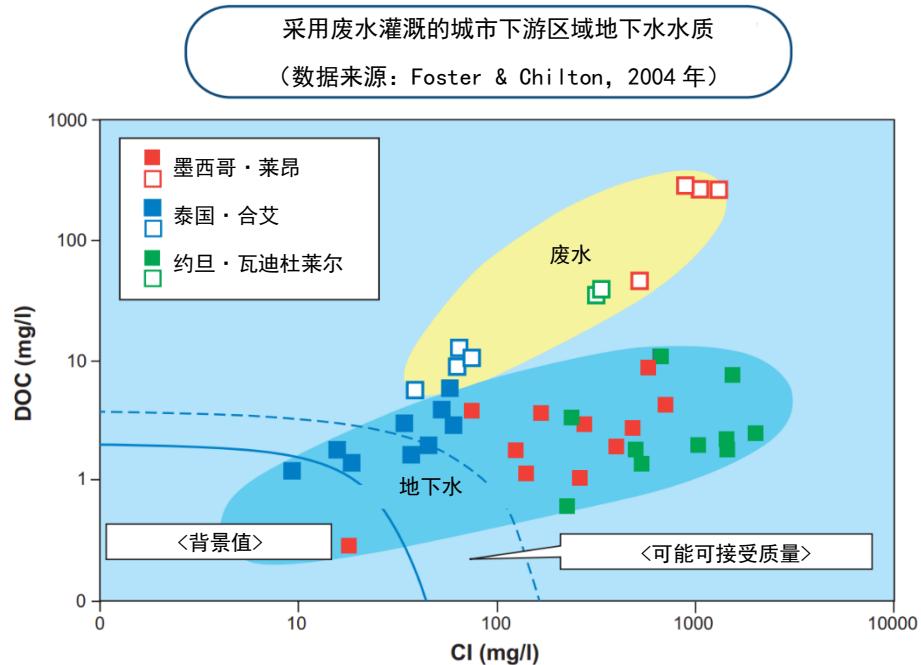
在城市低洼区域，主干污水管道通常持续排泄地下水系统（尽管在较高区域存在前述渗漏损失），但总体水量平衡往往会导致通往主管道的流量出现显著超额。这意味着需要承担大量的额外污水处理负担，而相关费用却从未直接向供水用户收取。

经过充分研究的布加勒斯特（罗马尼亚）案例清晰地说明了这一问题：该市超 20% 的污水系统持续浸没于地下水，且污水管道修复会导致地下水位上升。经实测，地下水净增量已达到约 1 立方米/秒。

若通过更新主干污水管道区段来阻断地下水渗入，通常会导致地下水位显著上升，进而威胁地下结构物的淹没风险，这种情形在荷兰历史悠久的城市中尤为常见。此外，普遍需要通过以下措施改善城市径流管理：

- 逐步减少雨水径流流入污水系统；
- 通过透水路面与渗透沟渠（即可持续排水设施，SuDS）提高地下水入渗率，以应对日益增长的降雨强度；
- 提高绿色基础设施的效率，以减少降雨径流中的污染物浓度；
- 大幅降低城市人均用水量，从而减少需处理的废水量。

此外令人担忧的是，气候变化可能对现有污水系统的运行效能产生不利影响，这源于降雨强度增加与地下水位变化双重作用，但相关潜在影响至今仍缺乏充分认知。





尤其在干旱地区，废水回用于农业与生态景观灌溉、人工含水层补给等多用途的压力日益显著。其中重大威胁在于农业灌溉废水回用对浅层地下水的水质影响，当污水处理不充分或混入高污染工业废水时，该问题尤为严重。墨西哥莱昂市、泰国合艾市及约旦安曼市的地下水水质数据充分印证了这一现象。

对卫生和供水部门决策者的主要建议是什么？

建议城市污水干管系统（及其废水灌溉区）与现场卫生系统的规划者需重点关注以下要点：

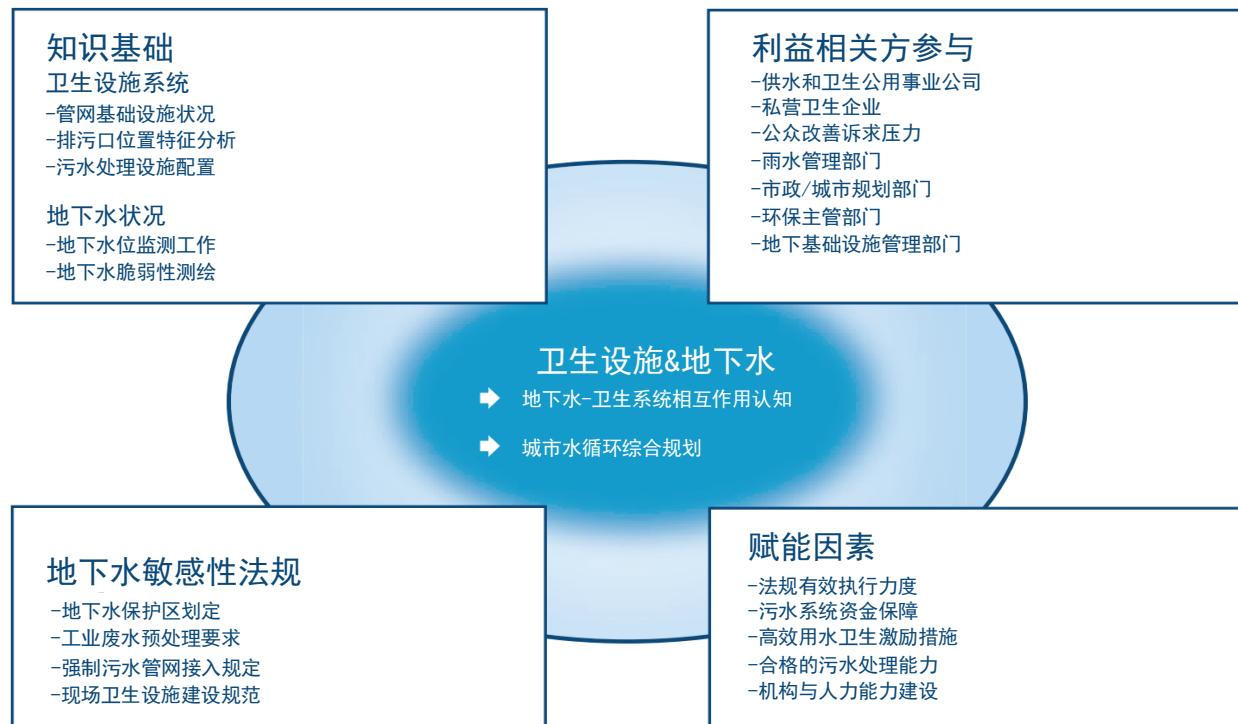
- 饮用水供水井的位置，即使这些水井属私人所有或非正规建造；

- 城市地区的淤泥和粘土沉积物会对地下水提供额外保护；
- 拥有厚层粉砂与黏土沉积物的城区，可为下伏地下水提供额外保护；
- 地下水污染脆弱性高城区（如：岩溶含水层），则几乎无法为其地下水提供保护；
- 卫生系统基地与地下水位之间的距离；
- 有关地下水使用和流动状况的现有数据。

为最大限度减少地下水流入污水管道，水务公司需全面掌握其污水管网状况（包括管网结构、施工记录、维修档案与流量数据），并同步监测当地地下水位。

供水部门需改进深水井的建造工艺，通过实施更有效的密封隔离措施阻断与浅层含水层系统的水力联系，从而降低乃至彻底消除其污染风险概率。

卫生与供水部门决策者需考量的主要问题摘要





与可持续卫生设施联盟 (SuSanA) 合作

延伸阅读

- Alam M F & Foster S 2019 *Policy priorities for the boom in urban private wells*. IWA the Source : 16 : 54-57.
- Bain R, Cronk R, Hossain R, Bonjour S, Onda K, Wright J, Yang H, Slaymaker T, Hunter P, Pruss-Ustun A & Bartram J 2014 *Global assessment of faecal contamination through drinking-water based on a systematic review*. Tropical Medicine & international Health 19 : 917-927.
- Banerjee G 2010 *Underground pollution travel from leach pits of on-site sanitation facilities : a case study*. Clean Technologies & Environmental Policy 13 : 489-497.
- Cassivi A, Tilley E, Waygood E O D & Dorea C 2021 *Household practices in accessing drinking water and post collection contamination : a seasonal cohort study in Malawi*. Water Research 189 : 116607.
- Clemens M, Khuralbaatar G, Merz R, Siebert C, Afferden M van & Rodiger T 2020 *Groundwater protection under water scarcity : from regional risk assessment to local wastewater treatment solutions in Jordan*. Science of Total Environment 706 : 136066.
- Do Q T, Otaki M, Otaki Y, Tushara C & Sanjeewa I 2022 *Pharmaceutical contaminants in shallow groundwater and their implication for poor sanitation facilities in low-income countries*. Environmental Toxicology & Chemistry 41 : 266-274.
- Foster S S D & Chilton P J 2004 *Downstream of downtown : urban wastewater as groundwater recharge*. Hydrogeology Journal 12 : 115-120.
- Foster S, Hirata R, Eichholz M & Alam M F 2022 *Urban self-supply from groundwater – an analysis of management aspects and policy needs*. Water 14:575
- Graham J P & Polizzotto M L 2013 *Pit latrines and their impact on groundwater quality : a systematic review*. Environmental Health Perspectives 121 : 521-530.
- Hirata R, Cagnon F, Bernice A, Maldaner C, Galvao P, Marques C, Terada R Vernier C, Ryan C & Bartolo R 2010 *Nitrate contamination in Brazilian urban aquifers : a tenacious problem*. Water 12 : 1-20.
- Krekeler T 2008 *Decentralised sanitation and wastewater treatment*. BGR Brochure (Hannover) 65 pp www.bgr.bund.de
- Lawrence A R, Goody D C, Kanatharana P, Meeslip W & Ramnarong V 2000 *Groundwater evolution beneath Hat Yai, a rapidly developing Thai city*. Hydrogeology Journal 8 : 564-575.
- Lewis W, Farr J & Foster S 1980 *The pollution hazard to village water supplies in eastern Botswana*. Proceedings Institution of Civil Engineers 69 : 281-293.
- Lewis W J, Foster S S D & Drasar B S 1982 *The risk of groundwater pollution by on-site sanitation in developing countries : a literature review*. IRCWD Report 01/82 (Dubendorf).
- Nick A F, Foppen J L, Kulabako R, Lo D, Samwel M, Wagner f & Wolf L 2012 *Sustainable sanitation and groundwater protection*. SuSanA Fact Sheet-Working Group 11 : Sustainable Sanitation Alliance 8pp.
- Rao S M, Sekhar M & Raghuvir-Rao P 2012 *Impact of pit-toilet leachate on groundwater chemistry and vadose zone role in removal of nitrate and E coli pollutants in Kolar, Karnataka, India*. Environmental Earth Sciences 68 : 927-938.
- Ravenscroft P, Mahmud Z H, Islam M S, Hossain A, Zahid A, Saha G C, Zulfiqar-Ali A H M, Islam K, Cairncross S, Clemens J D & Islam M S 2017 *The public health significance of latrines discharging to groundwater used for drinking water*. Water Research 124 : 192-201.
- Siepmann S 2022 *Recognising the connection between groundwater and sanitation*. International Groundwater Resources Assessment Centre Information Note <http://www.un-igrac.org>
- Sorensen J P R, Lapworth D J, Read D S, Nkhuwa D C W, Bell R A, Chibesa M, Chirwa M, Kabika J, Liemisa M & Pedley S 2015 *Tracing enteric pathogen contamination in Sub-Saharan African groundwater*. Science of Total Environment 538: 888-895
- Wolf L, Nick A F & Cronin A 2015 *How to keep your groundwater drinkable : safer siting of sanitation systems*. SuSanA Document : Sustainable Sanitation Alliance 7pp.
- WHO 2017 *Water safety planning – a roadmap to supporting resources*. World Health Organization (Geneva) 4pp www.who.org
- Wright J A, Cronin A, Okotto-Okotto J, Yang H, Pedley S & Gundry S W 2013 *A spatial analysis of pit latrine density and groundwater source contamination*. Environmental Monitoring & Assessment 185 : 4261-4272.

优先行动建议

- 负责规划现场卫生设施与集中式污水系统的城市规划者,需更加重视地下水脆弱性及潜在相互作用,并将这些特性纳入其规划工作
- 亟需系统收集所有与卫生系统/地下水相互作用相关的数据,其中尤为重要的是开展地下水水位/水质/开采量的测绘与监测,并同步收集卫生基础设施的关键参数
- 卫生工程师面临的核心挑战在于:如何实现人类尿液及粪便污泥的回收与再利用,从而最大限度减少对地下水水质的负面影响
- 城市水务公司需全面掌握其污水管网状况及其与下伏地下水之间潜在的“补给或排泄”关系
- 城市供水部门需改进水井建造工艺,确保其选址得当或进行有效密封,以防止浅层受污染地下水渗入
- 卫生系统与地下水相互作用机制需在所有相关利益相关方与各部门间进行更有效的传达沟通