



## 关键信息

- 大多数高质量地下水源于地下介质的自净能力，长期以来一直是人类健康和福祉的重要保障
- 目前全球超过 50% 的人口依赖地下水作为饮用水来源——在大多数情况下，合理选址并科学建造的水井是一种低成本、可靠且安全的水源
- 然而，部分含水层系统与地表连通性较强，更易受到微生物和化学污染物的威胁
- 集约化农业耕作中大量施用养分和农药，这些物质可被淋溶进入土壤，进而对地下水造成大范围污染风险
- 部分人工合成有机化学品在多数地下水系统中极难降解，可造成长期健康风险——其中包括一些所谓的“新兴有机污染物”
- 在某些条件下，岩石矿物溶解过程会导致严重的劣质地下水问题（特别是砷和氟）

## 为什么地下水对人类健康至关重要？水质风险又是如何产生的？

自人类早期历史以来，泉水、浅层水平井和手掘井中获取的天然高质量地下水，一直是人类生存、健康和发展的关键——直至今日依然如此。地下水的纯净特性及其所含的矿物质，使得许多泉水在历史上被赋予了药用价值。

地下水具有优异的天然微生物学质量，主要归因于：

- 表层土壤能够截留并消除渗透补给中的粪源寄生虫、细菌和病毒；
  - 地下水的停留时间通常较长（数十年至数千年），远超过大多数致病微生物在地下环境中的生存时间（通常 <50 天，极少超过 300 天）。
- 但也存在一些例外：
- 某些地质条件下自净能力较弱，使含水层对病原体的污染极为敏感；
  - 含水层中可能出现天然污染：微量元素（如砷、氟）造成健康风险，或铁、锰溶解导致口感和使用上的困扰。

亚洲家庭供水取自受保护的泉口





### 其他问题还可能源于：

- 卫生设施和排水渗井设计不当或使用不当，直接将污染物排入地下水；
- 部分污染物在多数地下水系统中极为持久（如盐分、硝酸盐及部分人为化学物）；
- 污染负荷超过天然自净能力（如过量施用畜禽粪肥或城市污水）；
- 不当的井结构设计，导致浅层污染水与深层地下水交叉连通。

化学污染带来的地下水水质恶化多表现为长期的慢性健康风险，而一旦饮用水源遭受微生物污染，则可能立即引发急性健康问题。

### 如何防止地下水的粪源污染？

水井和泉口必须经过科学设计和施工，以避免人类或动物在取水点及其附近造成粪源污染。若忽视此点，可能导致严重的直接污染，例如 2000 年 5 月在加拿大安大略省沃克顿发生的致命水源性疾病暴发事件。

部分地质构造（如裂隙/断裂，特别是喀斯特灰岩，以及浅埋水位的粗粒冲积层）具有快速连通性，使地下水与地表之间迅速交换。因此，它们更易受到病原体污染（来自粪源细菌/病毒，甚至包括如隐孢子虫和贾第鞭毛虫等原生动物）。

在这类含水层中的饮用水源，若没有适当的防护区和常规消毒作为第二道屏障，就可能对人类健康构成严重威胁。但值得注意的是，一些病原体（如隐孢子虫，常见于幼畜粪便中）难以通过常规消毒去除，

需要采用先进的微滤技术。因此，必须通过精心施工和防护来防止地下水源的粪源污染。这应基于对地下水流动的详细了解，设置足够范围并严格监管的防护区（例如通过围栏阻止牲畜进入落水洞或裸露地带），并采用合理的卫生设施设计及粪污管理。

在所有国家的农村地区以及快速发展的城市中，家庭供水往往依赖水井和泉水。这类数量众多的小规模水源，难以统一设置保护区或集中处理。在这种情况下，改进卫生设施是首要任务，同时必须保证就地卫生设施的底部与水井取水层之间存在足够的垂向和水平间距。

可能通过饮用水传播的病原体

致病菌种	在水中持久性	氯耐受性
<b>原生动物</b>		
微细隐孢球虫	长	高
贾第鞭毛虫	中	高
溶组织内阿米巴	中	高
<b>细菌</b>		
空肠弯曲菌	中	低
大肠埃希氏菌	中	低
钩端螺旋菌属	长	低
伤寒杆菌	中	低
志贺氏菌属	短	低
霍乱弧菌	短-长	低
<b>病毒</b>		
肠道病毒	长	中
Hepatitis A & E	长	中
诺如病毒	长	中
轮状病毒	长	中

### 世界卫生组织饮用水标准指南——部分化学污染物限值 (a)

天然存在的污染物	
砷	10
钡	700
硼	2400
氟化物	1500 (b)
硒	40
铀	30
农业污染物	
硝酸盐	50,000 (c)
亚硝酸盐	3,000 (c)
甲草胺	20
涕灭威	10 (d)
莠去津	100 (e)
克百威	7
氯丹	0.2
绿麦隆	30
2,4-二氯苯氧乙酸	30
2,4-滴丙酸	100
乐果	6
滴滴涕	1 (f)
2,4,5-涕丙酸	9
异丙隆	9
γ-六氯环己烷	2
二甲四氯	2
二甲四氯丙酸	10
甲氧滴滴涕	20
异丙甲草胺	10
西玛津	2
工业和社区污染物	
镉	3
铬	50 (g)
汞	6 (h)
苯	10
四氯化碳	4
二氯甲烷	20
乙苯	300
五氯酚	9
四氯乙烯	40
甲苯	700
三氯乙烯	20
混二甲苯	500

(a)以 $\mu\text{g/l}$  (ppb)表示, 某些国家对某些污染物的值更低或更高  
 (b)考虑所有的摄入量  
 (c)也可能源于废水  
 (d)亚砷和砷  
 (e)2-羟基莠去津 $200 \mu\text{g/l}$   
 (f)现在主要用于非农业用途  
 (g)总铬  
 (h)无机汞

目前对于地下病原体的存活情况仍知之甚少, 但分子生物学的新方法 (如 qPCR 技术) 正在推动相关研究。同时, 耐抗生素病原菌株的出现也引发了新的担忧。

## 地下水化学污染的主要威胁有哪些?

### (A) 农业用地

过去 30–60 年间, 依赖大量无机肥料、有机肥料和植物保护剂的农业生产快速发展, 其中灌溉用地上施用最为集中。施肥往往超过作物需求 (未考虑土壤硝酸盐的生成以及灌溉水中已有的硝酸盐), 或施用时机不当。在渗透性强的土壤剖面中, 这会导致大量硝酸盐随地下水补给进入含水层, 其浓度远超  $50 \text{ mg/L}$ 。

植物保护剂亦存在类似问题。农药的设计目标是杀灭杂草、昆虫和啮齿类动物, 目前全球有超过 1700 种有效成分, 涉及 45,000 多个商品品牌。加之厂商保密, 使得准确的施用数据难以获得。大量农药 (或其部分分解产物, 称为代谢物) 已在局部地下水中检出, 浓度超过世界卫生组织饮用水指南。

农药在渗透性土壤中的施用





尽管现代农药越来越多地被设计为在土壤中半衰期较短（理论上不会进入地下水），但在深部地下环境中，由于降解微生物数量远少于土壤，其持久性可能延长数倍至数十倍；同时，溶解度较高的化合物极易随补给水淋溶进入地下水。

保护饮用地下水的措施包括：

- 将部分集约化农业用地排除在水源保护区之外；
- 禁止销售在地下水中最持久的农药化合物；
- 改进农业耕作、畜牧和灌溉方式，避免过量施用农业化学品（如实行轮作、采用覆盖作物避免休耕、直接播种以减少土壤通气、避免在灌溉水硝酸盐浓度较高时施肥）。

### (B) 工业化学品与碳氢燃料

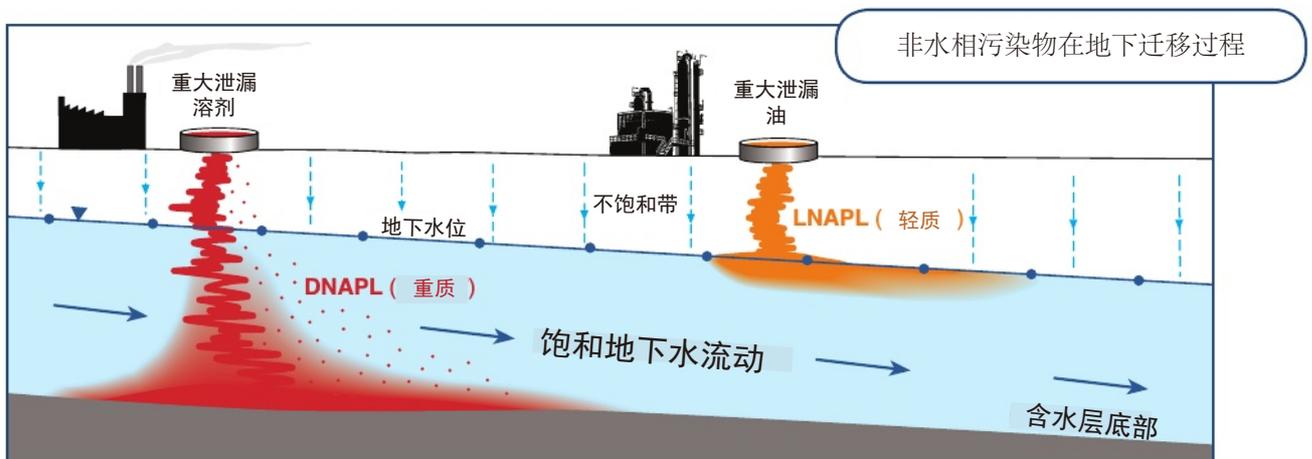
地下水污染也可能由储罐、垃圾填埋场、加油站、干洗店、化工厂及其他多种场所的泄漏或渗漏造成。工业污染物种类繁多，在沉积物和岩石中迁移行为复杂。其中最常见的是人为氯代烃和石油烃类。

主要泄漏可分为两类：

- 轻非水相液体 (LNAPLs, “轻质”，如汽油和柴油)，可通过包气带迁移并在潜水面聚集；
- 重非水相液体 (DNAPLs, “重质”，如三氯乙烯和氯苯等氯代溶剂)，受重力驱动向下迁移，聚集于地下数十至数百米深的的不透水层之上。

由于其水溶性有限，这些物质可在地下存在数十年甚至数百年。然而，它们的溶解相仍能迁移，形成持久的污染羽，长期威胁地下水质量。若掌握羽状体位置，可通过合理布置抽水井防止污染物进入饮用水取水区。同时，某些含水层特性（如氧化还原条件）也可能在其原位降解中发挥重要作用。

虽然这些化合物为疏水性（弱水溶性），但其溶解度仍比饮用水和生态健康指南的标准高几个数量级。常见于地下水中的挥发性有机污染物包括：四氯乙烯、三卤甲烷（如氯仿）以及汽油中的甲苯和甲基叔丁基醚 (MTBE) 等，它们具有广泛的毒性作用。许多



已被认定为致癌物，可通过摄入、吸入或皮肤接触危害人体。近年来，还在地下水中发现了新的工业污染物，包括 1,4-二氧六环、亚硝基二甲胺以及全氟化合物等。

### (C) 废水排放与再利用

在拥有完善市政污水管网的城市及其周边地区，废水排放和再利用实践可能会通过多种途径对地下水造成健康威胁。废水入渗地下水，可能导致氨、硝酸盐、群落和工业化学品污染（尤其是未经保护的水井）。

通过此途径，地下水可能会受到合成有机化学品的微量污染，包括内分泌干扰物和致癌化学物质，这些物质主要来源于药物、塑料和环氧树脂等，被称为“新兴有机污染物”

(EOCs)。与其他人类活动源的污染物相比，EOCs 在地下水中的去向尚未得到广泛研究。潜在的重要 EOCs 包括卡马西平、磺胺甲噁唑、布洛芬和双酚 A，它们通过泄漏的污水管网或原位卫生设施进入地下水。全球已在地下水中检测到多种 EOCs，浓度达到 100 ng/L 以上，因其对环境和人类健康的潜在影响，许多 EOCs 正成为优先监管物质。

## 天然劣质地下水的主要关注点

渗透水流与母岩之间的相互作用，有时也会导致水质问题，因为一些天然污染物会在地下水中溶解。氟和砷是最严重的污染物，涉及的区域广泛，影响人口众多，对人类健康的影响也较大——尽管地下水的盐度升高可能影响孕妇健康，溶解铁和锰则可能使水产生异味并污染衣物（常常难以接受）。



坦桑尼亚的氟斑牙症和孟加拉国的砷中毒性角化病

在干旱地区，尤其是花岗岩和火山岩分布的区域，地下水氟污染较为严重，且易引发地方性氟中毒。全球约有 2 亿人饮用氟浓度超过世卫组织指导值 (1.5 mg/L) 的地下水，而氟污染问题在许多水资源匮乏的地区限制了农村供水保障。在南亚和东南亚的大面积地区，以及拉丁美洲的部分地区，浅层地下水砷浓度较高，这一问题经过 20 年的调查后，依然广泛存在。

孟加拉国手动压水井，绿色水龙头表示地下水不含砷（红色水龙头表示井水不宜饮用）





长期饮用高砷水会导致皮肤病和癌症。大尺度河流冲积平原与河流三角洲、内陆盆地是高砷地下水的典型分布区域，其中孟加拉国是受砷污染影响最严重的国家之一。尽管已采取了重大治理措施，但 20 年后，约有 4500 万人仍面临高于世卫组织饮用水标准的砷暴露。

解决地下水中砷和氟污染问题需要采取多种措施：

- 进行详细的水文地质调查，了解污染物的分布与迁移情况，并找到无污染的地下水源；
- 标记有危险的水井，并向用户提示使用限制；
- 提供不同规模的水处理厂，根据水源类型进行处理。

## 参考文献

- Daughton C G 2004 Groundwater recharge and chemical contaminants - challenges in communicating the connections and collisions of two disparate worlds *Ground Water Monitoring & Remediation* 24:127-138
- Edmunds W M & Smedley P L 2013 Fluoride in natural waters. *Essentials of Medical Geology* 311-336. Springer (Berlin).
- Fendorf S et al 2010. Spatial and temporal variations of groundwater arsenic in South and South-East Asia. *Science* 28 : 1123-1127.
- Foster S & Candela L 2008 Diffuse groundwater quality impacts from agricultural land-use: management and policy implications of scientific realities. *RSC Groundwater Science & Policy* 457-474. CRC Publishing (London).
- Morris B L & Foster S S D 2000 *Cryptosporidium* contaminant hazard assessment and risk management for British groundwater sources. *Water Science Technology* 41 : 67-77.
- Poch-Massegú R et al 2014 Irrigation return flow and nitrate leaching under different crops and irrigation methods in western Mediterranean weather conditions. *Agricultural Water Management* 134 : 1-13.
- Pankow J F & Cherry J A 1996 *Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in groundwater*. Waterloo Press (Ontario).
- Sorensen J P R et al 2015 Tracing enteric pathogen contamination in Sub-Saharan African groundwater. *Science of Total Environment* 538 : 888-895.
- WHO 2011 *Guidelines for Drinking-Water Quality—4th Edition*. World Health Organisation (Geneva).
- Zogorski J S et al 2006 Volatile organic compounds in the nation's groundwater and drinking-water supply wells. *US Geological Survey Circular* 1292 (Virginia).

## 优先行动

- 用于饮用的地下水源都需要有完善的卫生防护措施，排除病原体、有机污染物（如碳氢燃料/润滑油）或其他污染物直接进入的可能性；
- 饮用水含水层系统应进行系统调查、监测和评估，评估其潜在污染风险及实际污染危害，并通过设立适当规模和管理严格的水源保护区进行管理；
- 所有用于饮用水供给的地下水源都需要进行水质监测，以识别污染或污染风险——如未经处理的水源已受到严重污染（或已影响），则应标明“仅适用于非饮用用途”；
- 联合国 2030 可持续发展目标要求大幅度提高郊区和农村地区的卫生设施建设水平，否则不合理设计的设施将加剧饮用地下水的污染风险；
- 必须保持并加强对病原体和部分有机化合物在地下水中去向和持久性的研究，以为地下水使用和保护政策提供指导。