



矿山企业与地下水

关键信息

- 采矿是与地下水密切相关的重大经济活动
- 地下水往往会对采矿作业和矿山安全产生不利影响，缓解此类问题需要扎实的水文地质认知
- 矿山供水具有高度区位特性，但在较干旱地区往往严重依赖地下水资源
- 矿井排水可能对地下水流动体制产生重大影响，其影响规模因排水作业类型而异
- 矿山关闭及排水停止后，地下水位恢复的同时伴随着水质的剧烈变化
- 历史上某些采矿实践在水资源方面声誉不佳，这一遗留问题至今仍需解决
- 但如今，随着系统性环境风险评估与管理体的引入，大多数采矿作业已得到显著改善

采矿活动与地下水系统之间存在哪些相互作用？

矿产资源开采会导致地下水涌入矿区或采场，可能显著改变地下水流动与水质动态，进而引发在矿山评估、开发、运营和关闭全周期中需统筹考虑的各类问题。地下水会对采矿经济产生负面影响，既危及生产连续性和矿工安全，也可能造成不良环境影响。

矿山关闭意味着停止地下水排水作业，允许地下水体回灌。对此，最佳管理方式是基于对水位回升、地下水化学变化及环境影响的密切监测，实施渐进式、可控且灵活的淹没管理。缓解此类问题的关键在于对水文地质的深入理解。

本简报涵盖了所有采矿类型（露天开采与地下开采）及采石活动与地下水的相互作用（参见下表）。由于对“水循环”的潜在影响存在差异，有必要区分煤炭/褐煤开采、重金属（含铀）开采、宝石开采、盐矿开采、砂石料开采以及建筑材料采石/采矿。





过程/活动性质	地下水影响与相关问题
采矿过程的地下水供给	干扰既有水井用户并导致含水层永久性枯竭（当干旱地区涉及不可再生或弱补给含水层时）
削减地下水压力以保持边坡稳定	通常发生于低渗透性岩层，主要属于岩土工程问题，对地下水系统影响有限
矿井巷道及工作面掘进而排水	在大型和/或深部矿山/采石场可能形成大范围影响漏斗，对水井用户及依赖地下水的生态系统造成影响
矿井巷道突然涌水	可能危及生命、损坏核心设备并破坏采矿连续性，同时对水力关联的泉眼及生态系统产生影响
矿井关闭，地下水位回升	可能形成新的地下水排泄区，并使劣质地下水活化迁移至区域水流系统
目标矿物的原位浸出	存在强酸性或碱性溶浸液携带所提取矿物污染地下水的风险
采矿作业中因意外或偶然原因导致的地下水污染	矿坑排水与尾矿坝渗滤液激活污染源，可能影响地下水水质（尤其在煤炭/褐煤及重金属开采中）

此外，一种日益重要的新型采矿技术——“原位浸出采矿”（通过溶解提取矿物，而非“移石挖掘”），也需纳入考量范围。（油气开发不在本概述范畴内，该主题已在本系列之前的出版物中探讨）。

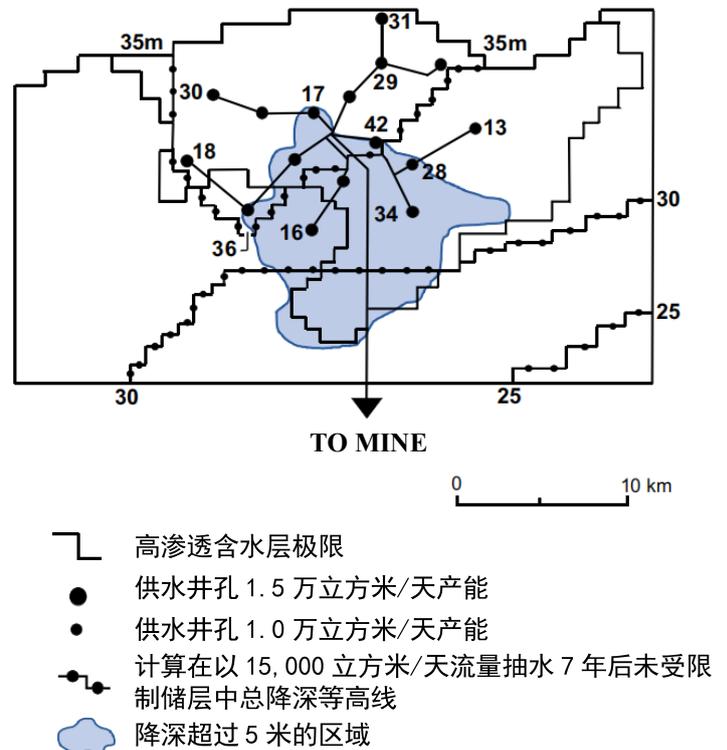
•地下水资源对矿山生产过程有多重要？

采矿与几乎所有其他工业生产类型一样，需要可靠的供水系统，其中包括少量生活用水。而涉及大规模岩石破碎以提取目标矿物（如：金、银、钻石）的采矿生产，将需要异常大量的供水，且只有在水源就近可得的情况下才具备可行性。矿山供水高度依赖区位条件，但在半干旱地区往往依赖地下水。

为矿山供水而进行的大规模外部水源地开发，必须像任何其他地下水开采一样，接受正常的监管和许可程序。幸运的是，高效用水（及循环利用）已在近年降低了矿山用水需求。博茨瓦纳卡拉哈里的朱瓦能钻石矿（Jwaneng Diamond Mine）是规划和管理大规模采矿用地下水的典型案例。该区域主要分布不可再生的地下水资源，且存在从事粗放型畜牧业的现有小规模用户，而该矿最初要求连续 15 年

（很可能更久）每天至少获得 15,000 立方米的供水量。

朱瓦内金钻石矿—博茨瓦纳最不利情况下的水位下降数值模拟^a



^a Foster et al 1982 Proc Institution of Civil Engineers I: 72 :563-584

• 矿井排水是如何影响地下水流动系统的？

矿山运营期间的排水与疏干作业可能对当地地下水流动产生重大影响，甚至干扰区域地下水均衡，具体表现为对水井的干扰效应、泉眼枯竭以及诱发来自某些河段的新补给流。

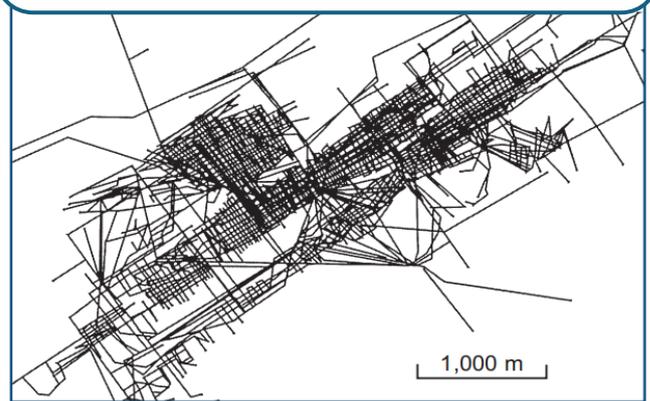
不同排水作业类型的影响规模存在显著差异：

- 从低渗透性地层通过抽水被动排出涌入矿井巷道的地下水；
- 设置孔隙水压力释放点以提高边坡稳定性；
- 通过水平/斜向前钻和大直径井进行主动式大规模疏干，以排通透水地层并降低涌水风险。

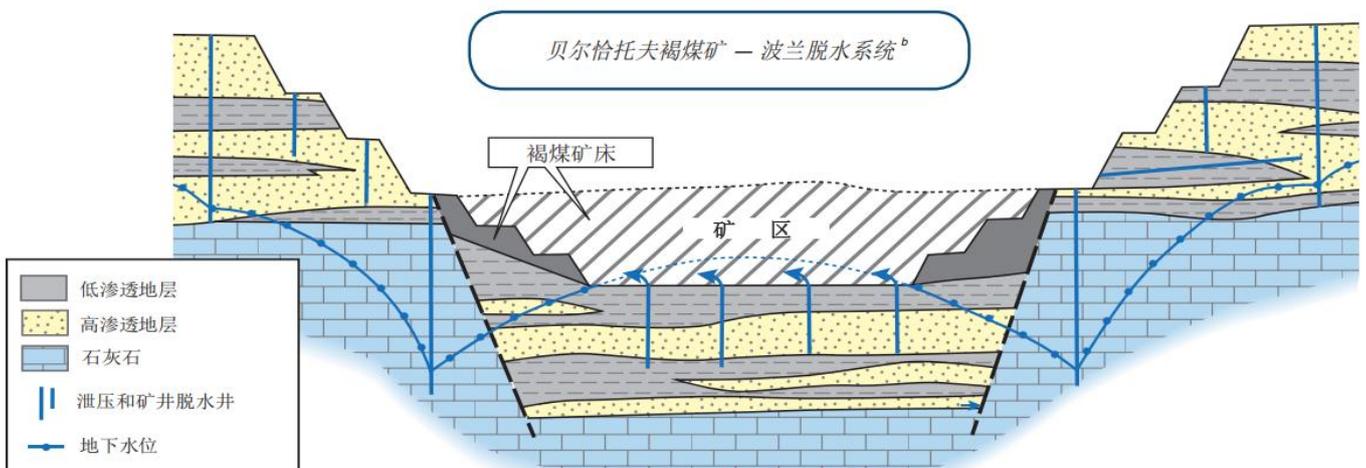
采矿活动的地下水开采潜力可能非常巨大。2017年，波兰贝尔查托夫（Belchatów）和什切尔措夫（Szczercow）的露天褐煤矿开采，需要 500 多口在用排水井，年抽水量约 2 亿立方米（部分水质良好），导致地下水位降深超过 300 米，同时设置了约 1300 口监测井以划定大范围的降落漏斗。2002 年，爱沙尼亚油页岩采矿的抽水量约为 1.8 亿立方米/年，全部排入地表水体，占该国地下水总开采量的 70% 以上^c。

此外，必须认识到，长期大规模采矿本身会形成广大的互联地下空区，永久改变周边区域空气与水的循环模式，从而可能显著改变天然地下水流动路径与水质动态。

霍姆斯特克金矿^d — 美国南达科他州 隧道和竖井形成的空隙空间水平投影，深度达2000米



矿山闭矿并停止矿井抽水后，地下水系统会缓慢恢复，地下水位回升，泉水重新流出并汇入地表水体，地表洼地会出现积水。该过程常伴随地下水水质的剧烈变化，尤其在金属矿区和部分煤矿区域，往往会发生酸化现象导致水质显著恶化。



b Kowalczyk et al 2010 Przegląd Geologiczny 58 : 776-788

c Walkersdorfer & Howell 2004 Mine Water & Environment 23 : 162-182
d Murdoch et al 2012 Hydrogeology Journal 20 : 27-43

• 矿井排水能否成为重要供水水源？

随着采矿向更深部发展并进入自然水位线以下，为矿井排水而进行的地下水抽取通常可成为一个有用的供水组成部分，从而减少“外部供水需求”。然而，在某些情况下（例如智利的大型铜矿），并不倾向于将矿井排水作为主要供水来源，而是将其视为较低质量的水源用于特定用途，以减少对其他水源的需求。

近年来，也出现了一些在矿山运营期间和关闭后对地下水和环境进行良好管理的优秀范例，包括在澳大利亚猎人谷（Hunter Valley）将矿井排水直接回用于农业灌溉^e。此外，通过实施将矿井排水人工回灌至地下的方案，可以大幅减少地下水抽取对浅层含水层及相关水生湿地的影响，这一点如今在澳大利亚的一些地区已成功实践^f。

• 采矿活动如何引起地下水质量退化？

毫无疑问，大多数采矿活动在某个环节都会产生大量污染水。欧洲通过 1998 年 4 月西班牙阿兹纳科利亚尔（塞维利亚）和 2000 年 1 月罗马尼亚巴亚马雷（特兰西瓦尼亚）的重大污染事件重新认识到这一点。但这两起“环境灾难”均因尾矿坝溃决导致了大范围的地表水（而非地下水）污染。

然而，地下水系统也受到威胁，尽管它需要更详细的监测才能识别其潜伏的长期影响。地下水污染最常见（但并非唯一）的原因是：

波莫扎尼 — 波兰 地下水流入锌与铅矿床



• 金属矿（硫化物矿石）采矿（有时也包括煤矿采矿）中，强制矿井通风和地下水渗透会导致裂隙岩石中普遍存在的黄铁矿发生氧化溶解

• 沉积地层中深部矿井排放的高矿化度地下水与劣质渗滤液。在波兰，30 年前关闭的淹没铁矿采空区对地下水水质的影响仍在中侏罗纪含水层中显现，铁、锰和硫酸盐浓度分别高达 270、60 和 1100 毫克/升^g。

对于铀矿开采采用强酸性或碱性溶液进行原位浸出（溶浸）而污染下方区域含水层的问题，也存在严重担忧——例如在捷克共和国、美国（亚利桑那州）、中国和哈萨克斯坦^h。

衡量采矿活动对地下水威胁的一个指标来自 20 世纪 90 年代和 2000 年代的国家调查结果。在英国，约有 9000 平方公里的划定地下水体被宣布面临来自煤炭和金属采矿活动导致的铁、锌、铜和铅污染的风险^c。在瑞士，前金矿造成的砷污染已引发当地对地下水安全的严重担忧ⁱ。

e Timms & Holley 2016 *Water International* 41 : 351-370
f Waterhouse et al 2017 *AusIMM Bulletin Feature* Oct 2017
g Razowska 2000 *Biul Panst Inst Geol* 390 : 35-96

h IAEA 2016 *In-Situ Leaching of Uranium : an Overview*. IAEA Nuclear Energy Series NF-T-1
i Wolkersdorfer & Howell 2005 *Mine Water & Environment* 24 : 58-76

•采取什么措施来减轻采矿对地下水的影响？

水资源监管机构对公众的责任意味着他们必须优先考虑地下水在饮用水供应和维持特定生态系统方面的根本作用。这要求他们独立行动，对采矿企业实施严格管控，但这种管控不应与他们对其他使用地下水及污染地下水的部门的管控不成比例。

历史上，由于采矿活动缺乏充分管控，采矿行业在水资源和水生生态系统方面的形象受到损害——这一遗留问题至今仍需解决。当前采矿作业的情况已大有改善，这得益于引入了系统性环境风险评估与管理、高效用水以及适当的矿坑排水处理。因此，此项评估必须明确区分“加强当前实践”和“处理历史遗留问题”。

•监管与规划考虑

可通过以下方式将地下水管理和保护考虑纳入采矿法规，尤其是在涉及重要饮用水供应和水生生态系统可持续性的情况下：

- 通过“环境责任”条款（或指令及类似文件），将“终生制”法律责任和地下水保护资金保障要求作为采矿许可的条件
- 在批准采矿前要求进行更详细的研究并制定更完善的缓解措施
- 在水文地质高度脆弱的区域，暂停特定类型采矿企业的开发
- 在采矿开始前考虑关闭计划，以明确长期影响减缓的需求

•评估与监测要求

近年来，采矿项目获批前所需的环境影响评估（EIAs）其范围和细节已大为完善。现在，评估矿山开发前当地地下水径流、水质和利用状况的基线条件，以及所有潜在的影响/风险及其管理措施，都变得至关重要。当前的环境影响评估会严格且常规地包含系统的水文地质评估，并利用现代技术，如地下水地球物理勘探、稳定和放射性同位素、示踪剂测试、微量元素分析和数值系统模拟等。



贝尔恰托夫褐煤矿 — 波兰内排水屏障的井



矿山企业与地下水

同样重要的是，要为环境影响评估安排“独立专家评审”，以便在采矿和采矿扩界审批前为政府提供咨询。环境影响评估之后需要改进矿坑水监测与报告，采用能识别“行动触发点”、明确核算框架、激励更好“矿坑水生产率”（通过回收、处理和循环利用）的规程，并建立机制鼓励对已察觉的外部影响进行“公开报告”。

•修复性工程措施

在露天褐煤和煤矿开采工程与冲积含水层之间建造“工程屏障”。在南非的威特沃特斯兰德盆地（Witwatersrand Basin），地下金矿开采已基本停止，但通过抽水并在排放或利用前进行处理，将地下水位维持在“环境临界”水位以下。解决历史采矿活动遗留的矿坑水与尾矿坝问题，在采矿历史悠久的国家（如波兰、德国、中国、美国等）将是一个更大的难题。在排水泵关闭、地下水位回升之前，需要考虑对采矿空区进行惰性材料回填并对尾矿坝进行加固。

延伸阅读

- ICMM 2017 Position statement on water stewardship. International Council on Mining & Metals. 5pp. www.icmm.com.
- ICMM 2017 A practical guide to consistent water reporting. International Council on Mining & Metals. 72pp. www.icmm.com.
- INAP 2014 GARD Guide -the global acid rock drainage guide. International Network for Acid Prevention. 473pp. www.gardguide.com.
- Kowalczyk A, Witkowski A, Rozkowski A, Szczepanski A, Rogoz M, Przybylek J & Stasko S 2010 What Polish mining owes to Polish hydrogeology. *Przeglad Geologiczny* 58 : 776-788.
- Li, P 2018 Mine water problems and solutions in China. *Mine Water & Environment* 37 : 217-221.
- Wolkersdorfer C & Bowell R (ed) 2004/2005/2005 Contemporary reviews of mine water studies in Europe : Parts 1-3 *Mine Water & Environment* 23 : 162-182/24 : 2-37/58-76.

优先行动

- 应将地下水保护与水质保障纳入矿业监管体系，通过实施“终生制”管理模式，明确贯穿项目全程的法律责任与资金保障要求。

- 采矿项目的开发与扩建在获得审批前，应强制开展环境影响评价（EIA）；其中需将采用现代勘查技术开展的系统性水文地质评估，作为环评的常规必含内容。

- 在采矿运营期间，应依据公认规程对矿坑涌水量、地下水位及水质进行监测与报告。

- 各地都需要制定结构化的应急规划，并采取适应性管理应对措施，以处理采矿活动引发的“地下水紧急情况”——这类情况无论是在矿区内部还是外部都可能出现。

- 应努力促进矿业企业、其他环境利益相关方与水资源监管机构之间建立合作关系，以寻求各方都能接受的解决方案，来应对实际存在及潜在的地下水问题。