



国际水文地质学家协会

## 战略概述系列

# 气候变化适应与地下水

### 关键信息

- 据预测，气候变化将对水资源产生重大影响，导致地表水资源干旱事件更频繁发生、强降雨事件增多。为避免未来出现供水危机，适应性举措需包括更好地利用水资源储备。
- 地下水向来展现出卓越的抗旱韧性，而含水层的存在（凭借其庞大的储水量）为气候变化适应性举措提供了一种“天然解决方案”。
- 地下水管理普遍需要“战略性反思”，以保障气候变化适应性举措中的资源可靠性，为此需加大对联合调度利用、供需双侧管理及水质保护的投入力度。
- 决定含水层在气候变化适应中潜在作用的关键标准是储水量可用性、供水生产力、天然水质和污染脆弱性。
- 关于气候变化对不同地区地下水补给的长期影响仍然存在不确定性，但全球变暖可能导致地下水补给减少，从而影响低储量浅层含水层的水源储备。

### 为什么地下水系统与含水层储水对气候变化适应具有重要意义？

全球变暖加剧主要源于对“化石燃料”的过度依赖，这一问题已然成为当今时代最受关注的环境议题。即便能迅速遏制这一趋势，科学界仍普遍预测，气候变化将对水资源产生重大影响——导致地表水资源干旱事件更频繁发生、湖泊、水库及湿地蒸发量上升，强降雨事件增多并引发陆地洪涝与“暴涨型”径流。这些影响的地理分布尚存在较大不确定性，但在半干旱气候区可能更为严重。

在大力推动“净碳排放量”削减的同时，我们还需聚焦气候变化适应性举措。这将普遍要求更好地利用（并进一步开发）各类形式的水资源储备。



受多年干旱影响的地表水水库——2018年南非开普敦的锡瓦特斯库夫水库

本系列旨在将有关信息告知与地下水资源和水文地质学有主要关联的其他部门专业人员，并指导国际水文地质学家协会成员与相关部门的外联工作。



历史上，地下水系统（含水层及其储水能力）因具备“天然缓冲”干旱影响的特性，一直为供水安全提供着有力保障。值得深思的是，在长期干旱时期，获取地下水（通过泉源）是众多早期人类聚落得以存续的关键因素，这一点在地中海周边及中东地区尤为显著。

地下水系统的分布具有独特优势，能够提供可持续、分散式且成本效益显著的解决方案，助力提升供水系统的抗旱韧性，以适配气候变化应对需求。与地表水储备不同，在长期干旱导致入流量减少、全球变暖引发蒸发量增加的情况下，地下水系统所受影响要小得多。地下水系统的滞留时间从“数十年到数百年乃至数千年”不等，即便是“现代浅层地下水循环”，其滞留时间通常也可达数百年（岩溶灰岩含水层除外，这一点尤为值得注意）。此外，深层含水层储水受污染的风险更低。

原则上，含水层的存在通过提供“天然缓冲”以应对河川径流变异性，显著提升了供水安全性——这得益于其储存的庞大地下水量。这一客观事实必须作为实体水资源安全的核心指标予以充分考量，无论其应用场景是特定城市还是河流子流域尺度。

若要在适应气候变化的同时应对供水安全保障挑战，关键在于将地下水系统及其依赖的生态系统与地表水资源统筹考量。然而，迄今为止，鲜有国家在实际运营层面全面践行联合调度利用与水资源综合管理（IWRM）的原则，近期已出现多个城市供水危机案例（如开普敦、圣保罗），便是这一问题导致的后果。联合调度利用的较好范例是美国加利福尼亚州中央谷地——丰水期约 70% 的用水依赖地表水，而枯水期这一比例反转，70% 的用水来自地下水，但该区域仍需面对含水层长期严重枯竭的问题。

评估特定地下水系统（与当地地表水联合调度利用）在气候变化适应中潜在作用的核心标准，以及其发挥该作用所需的管理水平，主要包括以下四项：储水潜力、供水产能、天然水质及污染易感性。



**银行业务类比：收入 = 充值/流入  
支出 = 放款/支取  
余额 = 初始余额 + 收入 - 支出**

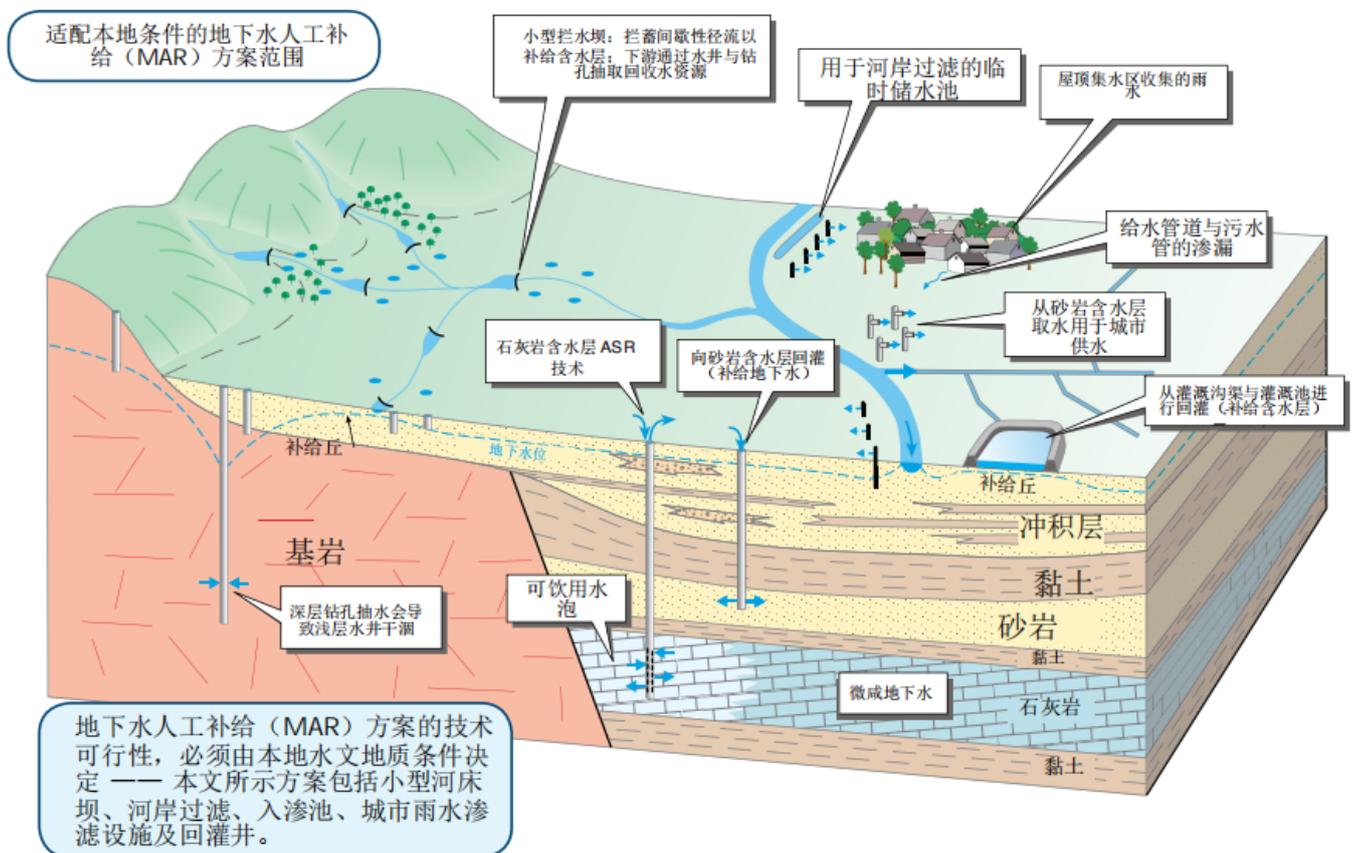
典型地下水流动系统的“含水层银行业务类比”动态

## 在气候变化情景下，需采取哪些管理措施以保障地下水资源的可持续性？

若要让地下水系统在气候变化适应中发挥潜在的关键作用，其（与其他任何“基础设施”一样）需要完善的管理。所需行动必须涵盖以下两个方面：

- 需求侧管理：根据可再生资源平均量的实际评估结果，调整地下水开采量；同时需考量保护环境排泄量、最大限度减少对不可再生地下水依赖的核心需求。
- 供给侧管理：推广一系列适宜的补给强化措施；需充分考虑气候变化可能引发的降雨模式改变，以及保障含水层补给水质达标这一基本要求。

这些措施的细化实施需要开展大量调研并投入相应资金——目前在大多数情况下，分配给“天然基础设施管理”及水资源综合管理（IWRM）实施的资金规模仍完全不足。实际上，城市降雨与暴雨径流的收集利用，可通过含水层进行“储存储备”，以便在干旱时期调取使用。受全球变暖影响，多个纬度地区的强降雨事件发生频率预计将有所增加，这既为“含水层人工补给”（MAR）技术的应用提供了有利条件，也使其成为亟待重点关注的领域。关键在于，所选的含水层人工补给（MAR）技术需与特定区域的水文背景相适配。目前不同含水层人工补给（MAR）技术的性能已有充分文献记载，但这些技术的实际落地应用往往面临诸多挑战。在部分国家，该技术的补给量占地下水开采总量的比例可达10%，但在全球范围内这一比例仅接近1%。





全球变暖情景中预测的那种高强度降雨导致的洪水径流

——以2018年西班牙南部为例

城市污水也可用于含水层人工补给（MAR），但需严格关注其化学与生物水质，以及为此目的所需的处理达标水平。然而，目前在大多数国家，各类模式下的污水回用率仍低得令人失望。

必须充分考量气候变化引发的水资源可利用量与水质变化。若含水层人工补给（MAR）具备经济性，其模式有望推广复制，但该技术不应在地表水资源已过度分配的汇水区部署，且始终需要完善的地下水治理与管理体体系作为配套——确保开采配额与资源可利用量的动态变化相匹配。

环境温度升高将不可避免地导致农业灌溉与人类生活对地下水的需求增加，而水井开采量的潜在上升可能会加速含水层储量的枯竭速度。通过密集开采水井导致资源严重枯竭的现象，在全球范围内仍是相对较新的问题，但这一问题已深度嵌入国际粮食贸易体系中。尽管地下水有效治理条款与管理体体系的建设仍处于起步阶段，但要保障这些资源能为气候变化适应提供支撑，建立切实有效的管理机制必须成为优先事项。

核心要素包括：组建独立的地方水资源机构及社区地下水管理组织；动员各类利益相关方参与，避免水资源冲突；基于消耗性用水总量管控发放开采许可证；控制污染排放；为土地所有者提供明确激励措施以促进地下水补给；建立清晰的“地下水银行”制度框架；完善监测网络，为适应性可持续管理提供必要的详细反馈数据。

### 在气候变化适应带来的压力下，需采取哪些措施保护地下水水质？

若要让地下水资源充分发挥其在气候变化适应中的潜在作用，就必须更有效地保护其免受渐进式污染与盐渍化影响——需注意的是，在诸多气候变化情景下，当前一些威胁地下水水质的人为压力可能会进一步加剧。

在地方层面，需通过更好地整合经济发展与环境管理来应对以下主要挑战：

- 管控农业种植方式与种植面积，减少养分和农药向地下水的过量淋溶（需认识到，随着降雨强度增加，地下水的污染易感性将会上升）；
- 在快速城市化与工业化区域，就污水收集与处理作出更有效的决策，避免地下环境累积过量污染物负荷；
- 在采矿活动影响区域，严格执行完善的地下水保护措施。



- 需认识到，全球变暖导致的海平面上升、风暴潮风险加剧以及供水需求增长，将要求我们对滨海含水层实施更具针对性的管理，以防止咸水入侵。

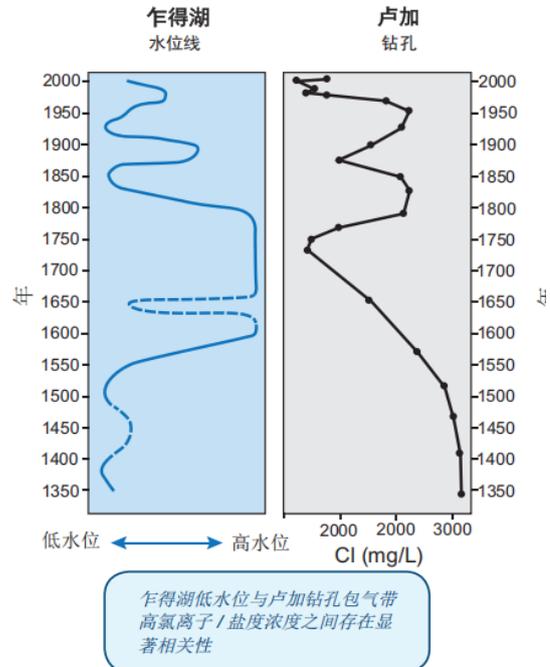
为保护地下水水质，建立、维护并完善监测网络至关重要——因其提供的信息，是对地下水资源政策及土地利用管理做出“适应性调整”的关键依据，最终保障地下水的可持续性。

对于用于公共管道供水的重要饮用水源（水井与泉眼），无论其界定多么不精确，均应设立周边特殊保护区——目的是引导公众认识到土地利用管理对保护可饮用水地下水水质的重要性，毕竟这些水源在保障气候变化适应背景下的供水安全中，将发挥关键作用。

### 气候变化是否可能导致地下水补给与径流机制发生重大变化？

气候变化是否可能导致地下水补给与径流机制发生重大变化？随之而来的必然问题是：我们的地下水资源本身对气候变化的自然韧性究竟如何？讨论这一问题时，需区分地下水系统对短期、年际尺度“气候冲击”的韧性，与对长期、年代际尺度“气候变化”的韧性。同时还需认识到，过去 10 万年乃至更久以来，自然发生的气候（及土地覆盖）变化速率，远低于当前由人类活动影响所引发的变化速率——后者约为前者的 10 倍。

塞内加尔西北部历史气候变率对地下水补给盐度的影响



在部分半干旱地区的古环境证据中（如来自地下水的同位素与氯离子分析、含水层上方包气带水分剖面分析），可清晰识别出地下水系统对自然气候变率的长期响应。这些证据表明，在过去约 500 年的干旱周期中，地下水补给量与盐度存在显著波动；且在过去 5000 年至 50 万年的历史时期内，大部分地下水补给均发生在气候较湿润的阶段。

这引发了人们的担忧：当前全球变暖趋势可能导致补给量减少，并对储水量有限的浅层含水层的地下水资源产生影响。尽管如此，气候变化对不同气候区地下水的长期影响仍存在显著不确定性：

- 一方面，环境温度升高将引发强度更大（但频次更少）的强降雨事件，可能导致地下水补给量增加——这一增量或将抵消地表不可避免的更高蒸散速率，且在部分情况下可能引发所谓的“地下水型洪水”。



国际水文地质学家协会

## 战略概览系列

# 气候变化适应与地下水

- 另一方面，强降雨事件频次减少可能导致土壤干旱、板结，并伴随水土流失与冲沟侵蚀，这将加快地表径流速度，减少向地下水的入渗量。
- 为适应更温暖的气候条件与改变的降雨模式，植被和 / 或农作物类型会发生变化，进而改变蒸散速率，最终影响水资源需求量。
- 在山区流域，降水形式（降雪与降雨）的比例变化以及积雪提前融化，将影响下游冲积平原区的地下水补给。

### 延伸阅读：

- Cuthbert M O et al 2019 Global patterns and dynamics of climate-groundwater interactions. Nature Climate Change 9 : 137-141.
- Dalin C et al 2017 Groundwater depletion embedded in international food trade. Nature 543 : 700 - 704.
- Dillon P et al 2019 Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. Hydrogeology Journal 27 : 1-30.
- FAO-UN 2016 Global Framework for Action to achieve the Vision on Groundwater Governance. FAO-UN (for GEF, IAH, UNESCO & World Bank) Publication (Rome).
- Favreau G et al 2009 Land clearing, climate variability and water-resource increase in semi-arid southwest Niger : a review. Water Resources Research 45 (7) : W00A16
- Foster S et al 2006 Groundwater quality protection—a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies. World Bank Publication (or via www.un-igrac.org ).
- Foster S & MacDonald A 2014 The ‘water security’ dialogue : why it needs to be better informed about groundwater Hydrogeology Journal 22 : 1489-1492.
- Green T R et al 2011 Beneath the surface of global change : impacts of climate change on groundwater. Journal of Hydrology 405 : 532-560.
- Hu B et al 2019 The projected hydrologic cycle under the scenario of 936ppm CO<sub>2</sub> in 2100. Hydrogeology Journal 27 : 31-53.
- Megdal S B et al 2014 Water banks : using managed aquifer recharge to meet water policy objectives. Water 6 : 1500-1514.
- Re V et al 2018 Climate-change research by early-career hydrogeologists. Hydrogeology Journal 26 : 673 – 676
- Scanlon B R et al 2016 Enhancing drought resilience with conjunctive use and managed aquifer recharge in California and Arizona. Environmental Research Letters 11 (3) : 5013
- Taylor R G et al 2013 Groundwater and climate change. Nature Climate Change 3 : 322-329.
- Ward J & Dillon P 2012 Principles to coordinate managed aquifer recharge with natural resource management policies in Australia. Hydrogeology Journal 20 : 943-956.

### 优先事项

- 各水资源主管部门及对应的供水企业，均应制定未来供水规划——规划需充分考虑气候及其他各类变化因素，并为每一处供水水源设定供水可靠性标准。
- 若要让地下水在气候变化适应中发挥关键作用，含水层管理措施、保护策略及监测网络的建设，将需要大幅增加财政投入。
- 地方水资源主管部门及社区组织，必须根据气候变化压力下水资源可利用量的现实变化，规范持证水井的取水量，以保障地下水的长期可持续性。
- 用于增加地下水补给的地下水人工补给（MAR）技术已具备应用条件，但水资源主管部门需选择与当地水文地质条件相适配的技术，并制定雨水集蓄利用指南及示范项目。
- 城市区域应鼓励收集雨洪径流并将再生水回补地下水，同时需实施相应的水质管控措施。
- 鉴于当前缺乏明确的确定性数据，需针对不同气候区开展更多关于气候变化对地下水长期影响的研究。

协调者：Stephen Foster & Gillian Tyson

授权者：Peter Dillon (Australia), Tibor Stigter  
(Netherlands), Richard Taylor (UK),

Bridget Scanlon (USA), Bartolomeo Andreo (Spain),

Seifu Kebede (Ethiopia), Oscar Escolero (Mexico),

Makoto Taniguchi (Japan) & Franziska Wende

翻译者：周兴雯(Xingwen Zhou)

审校者：于爽(Shi Yu)

李亚松 (Yasong Li)

IAH 2019  
www.iah.org