



生态系统保护与地下水

关键信息

- 地下水依赖型生态系统（GDEs）是生态系统中一个复杂的子集，在生物多样性保护中具有重大意义——其中包括受《拉姆萨尔公约》保护的诸多重要区域，以及许多尚未受到保护的其他区域
- GDEs在鱼类和植物生产、水储存和净化方面对人类具有直接价值，同时在景观和/或栖息地方面具有间接价值
- 需要确定水生、陆生、地下这三种主要类型的GDEs，并进一步了解它们与地下水物理化学状态的关系
- 含水层地下水流动状态的改变以及地下水的盐碱化或污染，都可能造成GDEs的恶化
- 需要评估和管理用于农业灌溉或城市供水的地下水抽取对GDEs功能的潜在负面影响
- 地下水盐度和/或污染（含营养物和杀虫剂）的些许增加会严重影响生态系统结构，并导致关键物种灭绝

什么是地下水依赖型生态系统，为什么它们很重要？

地下水依赖型生态系统（GDE）是一个由微生物、动植物及其相关基质组成的生态群落，其功能依赖于地下水的存在及/或其向地表的涌出过程。部分GDEs完全由地下水维系，其余则兼受其它水源补给，但地下水的贡献不可替代——它不仅通过特定水化学成分为某些物种提供营养，还可维持水温稳定并保持水体无沉积物负荷。

GDEs主要呈现以下地表形态：

- 水生生态系统——包括泉源，以及接受地下水排泄的湿地、溪流、河流和湖泊（此为关注重点）
- 陆生生态系统——潜水植物群落，有的在冲积环境（如一些低地森林和草甸）浅根生长，有的则在地下水位较深的干旱地区深根生长。

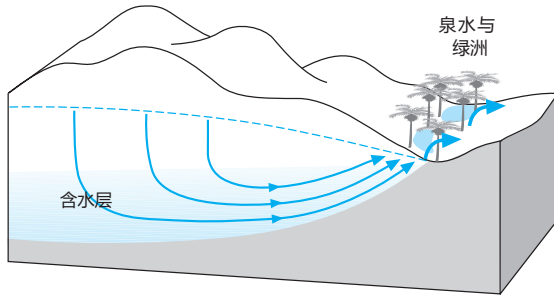
但它们同样可能存在于地下——尤其常见于石灰岩构成的喀斯特洞穴和裂缝，这类地下空间栖息着小型无脊椎动物和某些特化的脊椎动物物种。

西班牙南部多尼亚纳国家公园的埃尔罗西奥湿地



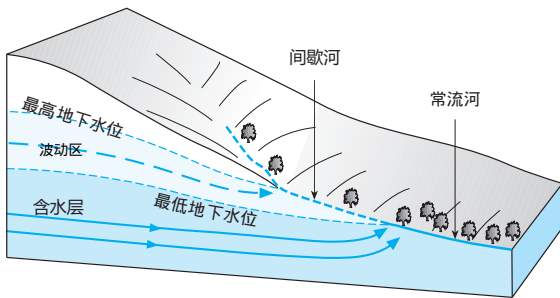
干旱区湿地生态系统

仅有有限的现代地下水补给和古含水层径流量



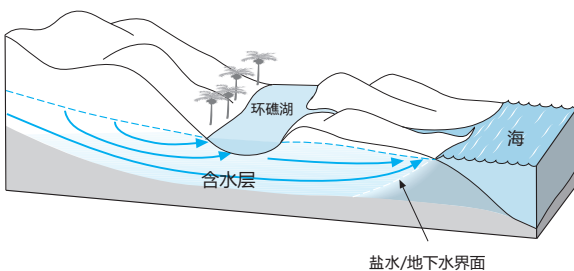
湿润地区水生河床生态系统

由常年性和间歇性地下水排泄补给的河流上游地区



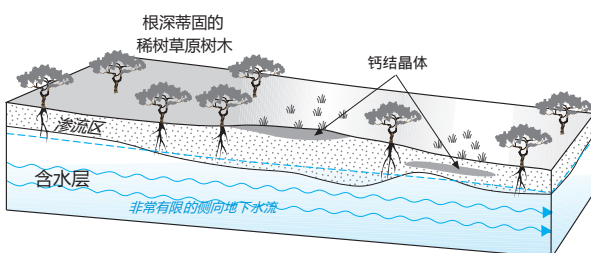
滨海泻湖生态系统

依赖于淡水和有限海水入侵混合产生的微咸水



陆生稀树草原生态系统

依赖于深根系树木和灌木汲取干旱地区地下水



从拉姆萨尔遗址到了解你身边的泉水

《拉姆萨尔公约》（以1971年签署该公约的伊朗城镇命名）是169个国家达成的一项协议，旨在采取行动保护优先湿地（多数属GDEs的水生生态系统），特别致力于保护野生禽类栖息地。目前该协议已覆盖超过2200处湿地，总面积超过21万平方公里。而西班牙安达卢西亚政府推出的“了解你的泉水”网络倡议虽规模不同，却同样在学术团队的协调下，动员公众对这片相对干旱地区的10100处泉水进行了初步普查。这两个案例都是提升政府部门和公众对GDEs认知的典范。

GDEs是生物多样性保护的重要基石——不仅对众多物种的生存至关重要，并在《拉姆萨尔公约》覆盖的区域中占据突出地位。

此外，GDEs可以作为一种可再生的人类营养来源，同时作为泉水和泻湖等标志性景观在当地自然风貌中占据不可替代的地位。

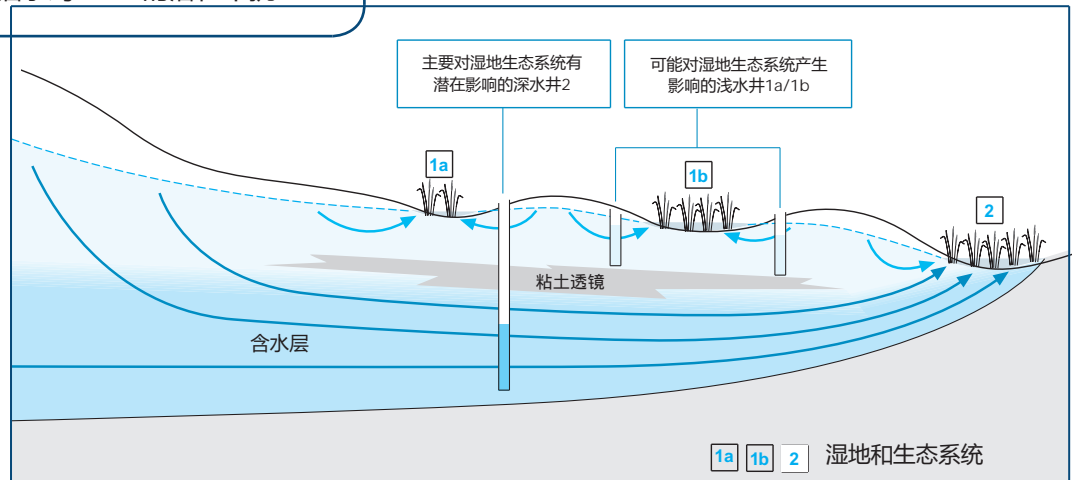
有学者更倾向于使用“含水层依赖型生态系统”这一术语，以强调含水层对生态系统所依赖的地下水流动的关键制约作用。需要特别指出的是，部分水生生态系统分布于含水层补给区，是地下水系统补给的重要来源。

地下水依赖型生态系统是如何退化的？

GDEs的退化源于自然地下水流动模式改变以及地下水盐碱化或污染。

所有的地下水抽取行为都会对地下水位产生一定的影响——但就生态系统的影响而言，主要问题在于大规模的地下水开采（用于农业灌溉或城市供水）所产生的累积效应，这会导致地下水位持续大幅下降。此类情况有时也会出现在没有大量使用地下水的情况下：

多层含水层抽水对GDEs的潜在干扰



- 如果补给区发生重大变化导致消耗性用水量增加（例如：低地造林），或河床改变导致含水层补给减少（例如：河道硬化或改道）
- 隧道施工或采矿作业中的排水严重干扰地下水流动的状况。

由此导致的地下水排泄量减少会引发生态系统功能的改变，继而导致生态系统结构变化，极端情况下甚至会导致整个生态系统完全消亡。在GDE中，单个物种对水文变化的响应以及物种间的相互依存关系常存在不确定性。此外，地下水排泄至地表环境并与之相互作用的方式（主要通过潜流带这一过渡区域），对水生生物而言至关重要（远不止于提供水源）。虽然可能在短时间内发生某些不可逆变化（例如湿地或河床沉积物的氧化），但有些物种已高度适应了极端水文条件。那些天然暴露于地下水动态变化的物种（例如季节性河流中的生物），往往更具抗逆性。地下水盐度的些许增加可导致生态系统结发生剧烈变化，并导致某些物种灭绝。当灌溉井抽取含水层深层（或弱透水层）的含盐

水体时，盐分会在灌溉土壤中进一步浓缩，最终淋滤至浅层地下水。

地下水污染同样可能也会产生类似的影响——其最普遍的污染源是农业耕作中农化品的淋溶。从土壤中渗出的农药和营养物质最终会抵达地下水位，并可能运移至天然排泄区的GDEs中。与地下水流量减少相比，地下水质的恶化——尤其是硝酸盐、铵盐或磷酸盐（即使浓度很低）和/或微量农药污染的增加——对生态系统的影响往往更为严重。硝酸盐和磷酸盐浓度升高会导致生态系统富营养化，造成水体缺氧，从而使鱼类和小型水生动物死亡。

如何保护地下水依赖型生态系统？

保护GDEs需要采取两条主要行动路线，而且在《拉姆萨尔公约》所涵盖的所有地点都得到了大力提倡：

- 深化认知——深入了解其水文地质和生态状况，以及生态系统退化对人类福祉造成的经济后果
- 统筹管理——将其保护工作纳入流域/含水层水资源和土地利用综合管理体系



需要对每个GDE进行系统性评估，以理解其与下伏含水层的演变关系，不仅需评估地下水水质并确定化学基线，还需识别人为压力趋势，并确定生态系统服务的社会经济贡献。最终成果应构建一个GDE功能的概念模型，并运用GIS（地理信息系统）及其他数据管理平台来清晰呈现评估结果。

所有能加强地下水治理与实际管理的措施，经过针对性调整后都可用于GDEs保护——具体而言，需将“维持地下水位”和“保障水质”纳入管理标准，以满足生态系统受体的需求。这意味着相比于常规情况，必须实施更严格的地下水开采量和分布管控，并执行比饮用水保护标准更为严苛的地下水污染物负荷管控。最终需要在改善乡村民生与维护生态系统健康之间寻求精准平衡。

然而，社会发展压力可能阻碍为保护GDEs而对整个含水层系统实施的水位与水质管控，因此需要寻求替代方案，例如：

- 选择性划定保护区：在GDEs周边设立“保护带”，既能保证浅层地下水质，又能减少对地下水位的干扰
- 人工干预补给：通过人工回灌补充地下水流量，在关键区域改善水质以维护GDEs；当含水层水位低于临界值时，甚至可采用抽水补偿流机制进行抽水补偿。

如何评估地下水依赖型生态系统的价值？

GDE的功能是地下水系统提供的整体环境服务的重要组成部分，对其开展经济价值评估，需要明确定义这些生态系统服务带来的效益，

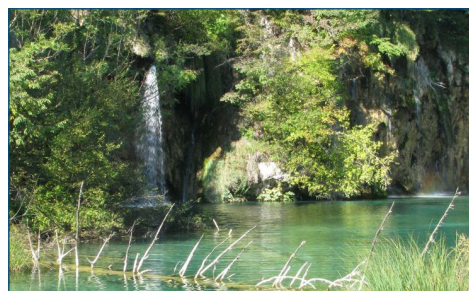
包括：

- 直接价值：为人类人口提供鱼类和植物产出、蓄水及水质净化功能
- 间接价值：基于社会、文化、审美及伦理因素，维系生物多样性、栖息地与景观的衍生价值

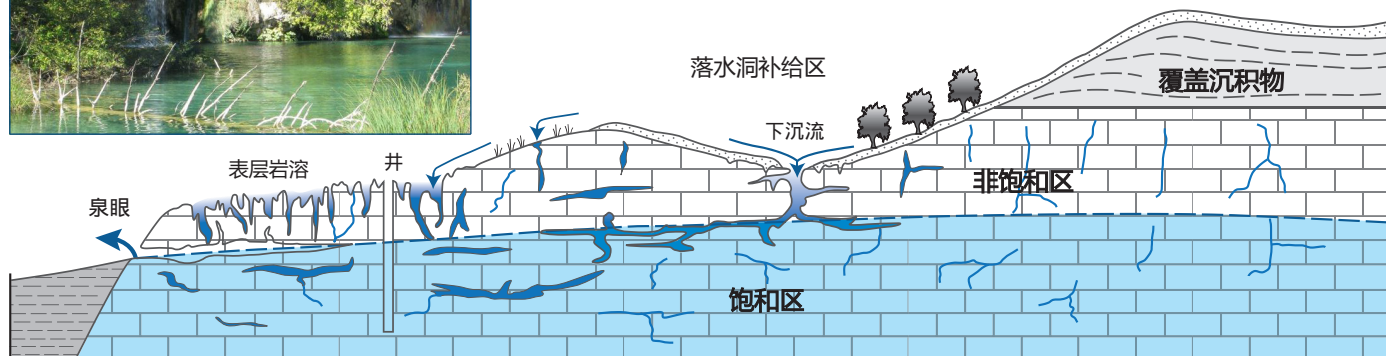
但在发展中国家的背景下，收获的植物和动物以及旅游景观或栖息地的直接使用价值更为重要。若贫困脆弱群体的生计直接依赖于GDE的功能运转，那么其生态系统价值可能会被系统性低估。

在改善乡村民生与维持生态系统健康之间寻求平衡，往往容易引发争议。该决策过程必须建立在可靠的技术经济分析基础之上，因此将经济评估纳入分析体系至关重要。联合国千年生态系统评估项目提出的“生态系统服务方法”，为GDE价值评估及人类福祉与生态系统关系研究提供了实用框架。该理论强调：人类发展始终依赖于自然资源和生态系统功能的支撑。评估工作需采用可靠的历史数据与科学研究成果，同时还应包含评估改变GDE行为的一系列“驱动因素”所产生的影响（既含观测值也含预测值）。





喀斯特地下水生态系统与克罗地亚泉水排泄实例



为此目的的经济分析通常需要对以下方面进行相对评估：

- 保护成本：包括地下水和土地替代用途的丧失，以及实施土地利用与地下水管控产生的行政成本
- 保护效益：涵盖地下水原位价值及地下水相关生态系统服务产生的综合效益

在此背景下，基于边际成本-效益分析法能真实地反映实际情况，同时还需考虑对GDEs实施部分保护（而非完全保护）的情景方案。

哪些制度和法律安排能够促进对地下水环境功能的考量和保护？

需要根据以下原则，通过国家和地方环境机构之间的互动来制定和实施政策：

- GDEs对人类的福祉具有重要且多元的价值
- 地下水利用管理应优先保障GDEs保护需求
- 土地利用规划和发展应尽量最小化对 GDEs 的影响

当前亟须提升公众对众多生态系统的地下水依赖性的认知。因此，对GDEs进行识别定位、特

征描述与系统编录至关重要——这包括划定具有重大生态意义的GDEs（例如《拉姆萨尔公约》所涵盖的湿地）。

评估GDEs面对土地开发与资源开采潜在影响的脆弱性，是保护工作的核心环节。需要建立相应的法律条款与制度安排，才能有效落实GDE保护措施。

在发展中国家，强烈的社会发展需求往往会催生农业与城镇扩张，这可能会直接（通过增加地下水取水量）或间接（通过增加地下污染物负荷）影响GDEs。因此，实施地下水管理的一个重要问题在于：应由何种利益相关方代表特定生态系统的利益。存在以下几种可能性：

- 代表依赖健康生态系统的当地社区或普遍关注生态保护的非政府组织
- 协调全体土地所有者利益平衡的地方土地管理机构
- 国家或地方层面的环境主管部门

如果没有地下水使用权制度的存在和明确界定的利益相关者群体的参与，GDE可持续性发展的诉



生态系统保护与地下水

求在土地与水资源开发方案的决策过程中将难以充分考量。

鉴于特定水资源和/或土地开发方案对GDEs的具体影响程度存在显著的不确定性，监管机构通常需要采取明确的决策策略。该策略通常须遵循以下原则之一：

- 预防性原则：在生态系统风险未明确界定并制定管控措施前不予批准开发（该原则对多数发展中国家可能过于保守）
- 渐进开发原则：初期务实推进地下水资源开发，并通过精细监测、评估体系，在出现重大影响时及时调整方案
- 生态保障原则：在整体地下水资源管理与规划中预留环境流量或维持水位阈值，以保障关键湿地的生态功能

地下水开采与污染的影响评估具有高度复杂性，这使得很难确定便于测量和依法执行的界限——但立法可通过以下规定实现突破："当利益相关方不认可监管机构的判定时，可自费开展更详尽的专项研究"。

参考文献

- Colvin C et al 2007 Aquifer-dependent ecosystems in key hydrogeologic typesettings of South Africa, Water Research Commission Report WRC-TT-301-07 (Pretoria).
- Klove B et al 2011 Groundwater Dependent Ecosystems - (1) hydrogeological status and trends (2) ecosystem services and management under risk of climate change and land-use intensification. Environmental Science & Policy 14: 770-793.
- Kremer D et al 2015 Groundwater Dependent Ecosystems – science, challenges and policy directions. Nova Science -Groundwater 205-230 (NewYork).
- Mahler B J & Bourgeois R 2013 Dissolved oxygen fluctuations in karst springflow with implications for endemic species : Edwards Aquifer, Texas, USA. J Hydrology 505:291-298
- Manzano M et al 2005 Effects of localised intensive aquifer exploitation on the Doñana wetlands (SW Spain). IAH Selected Papers Hydrogeology 7 : 209-219.
- Murray B et al 2006Valuation of groundwater-dependent ecosystems: a functional methodology incorporating ecosystem services, Australian Journal of Botany 26 : 221-229
- RAMSAR 2010 Managing Groundwater – guidelines for the management of groundwater to maintain wetland ecological character. Ramsar Wetlands Handbook 11. IUCN Ramsar Convention Secretariat (Gland-Switzerland) www.ramsar.org/sites/default/files/documents .
- US-EPA 2012 Identifying and protecting healthy watersheds : concepts, assessments and management approaches US Environmental ProtectionAgency 841-B-11-002 (Washington DC).
- WRI 2005 Millennium Ecosystem Assessment – ecosystems and human well-being – wetlands and water synthesis. World Resources Institute (Washington DC) www.millenniumassessment.org/documents.

优先行动

- 提高全社会对地下水维系可持续生态系统重要性的认知，同时动员 GDEs相关利益方（如非政府保护组织和地方土地管理部门）共同参与保护行动
- 增进对GDEs水文地质与生态条件的科学认知，深入掌握其退化对人类福祉造成的经济后果
- 将GDE保护纳入流域综合管理框架，或至少选择性地将GDE保护带纳入地下水资源利用与土地管控政策体系
- 鉴于预测生态系统影响存在显著不确定性，应采用基于精细监测和评估为依据的适应性管理策略来保护GDEs。
- 若因开采或干旱导致地下水位降至既定临界值以下，应考虑对水生生态系统实施人工地下水补给。