



全球变化与地下水

关键信息

- 含水层系统中储存的地下水，在气候变化条件下可作为地表水供给的重要补充。
- 人类活动引发的全球变暖对地下水的影响仍然存在不确定性。但鉴于其变化速度远快于自然气候波动，地下水的未来前景令人担忧。
- 古环境记录表明，在过去的1万 - 50万年间，地下水系统曾因自然气候变化发生过重大改变。而在最近50 - 100年间，地下水的补给速率和盐度已经出现明显的波动。
- 人类改变土地利用方式的活动已经对地下水造成了巨大影响。其中，由全球人口增长和粮食需求驱动的农业扩张，是影响地下水的主要因素。
- 自20世纪50年代以来，主要由于农业灌溉机井的大量抽水，地下水资源持续枯竭。这间接导致了水体从陆地向海洋的净转移，从而推动了海平面上升。

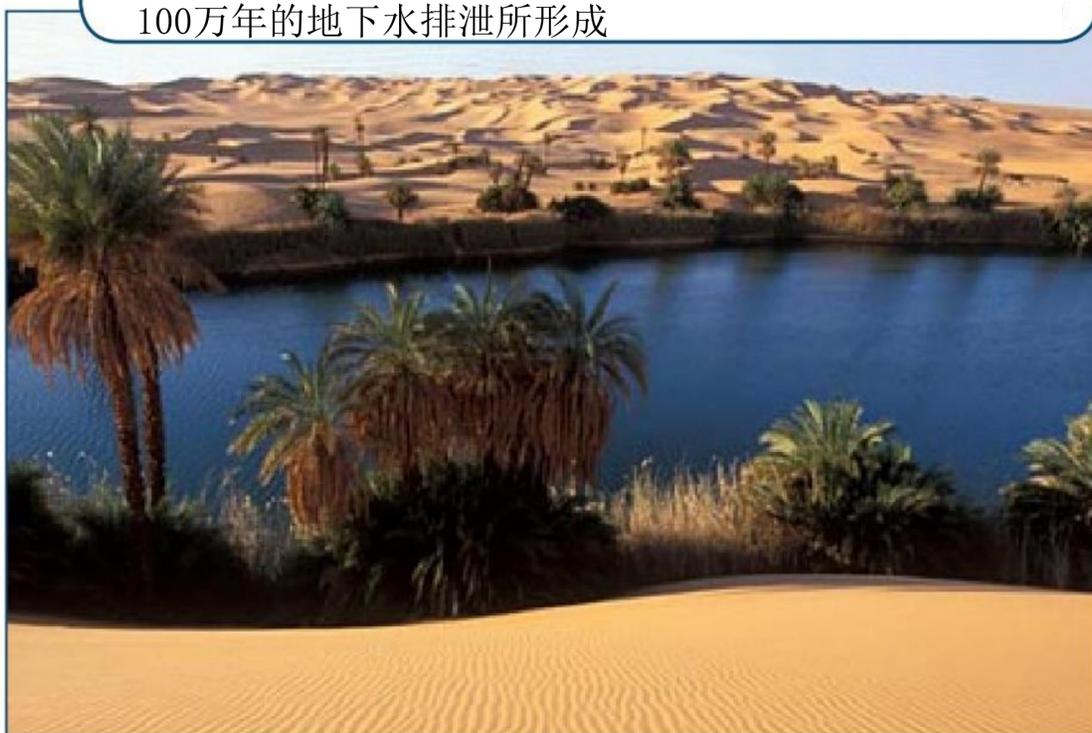
气候与土地利用的全球变化如何影响地下水？

地下水（赋存于沉积物和岩石中）构成了地球上最主要的淡水储备，其储存时间通常可长达数十年至数百年，甚至数千年。因此，地下水资源凭借在含水层系统中普遍较大且分布广泛的储量，为应对气候变化对地表水供给的影响提供了极佳的缓冲作用。然而，问题在于：地下水储备本身在多大程度上能够自然抵御全球变化？我们是否已采取足够的措施来保护和维持它们？

地下水在含水层系统中不断流入与流出，这一动态平衡决定了其储存量的增加或减少。该平衡随时间而变化，并受自然条件和人类活动共同控制，包括：

- 补给区的入渗——主要来源于过量降雨和地表水体的自然入渗，以及农业灌溉活动引起的渗透（在局部地区，还包括城市自来水管网泄漏和废水排放的渗漏）。

撒哈拉绿洲——由在大型含水层系统中储存了1万至100万年的地下水排泄所形成





- 流出——包括自然排泄的泉水，以及向河流、湿地和潟湖的排泄，同时也包括机井抽水。

在大规模人为活动之前（最早不早于1850年，许多地区甚至要到1950年以后），人类对地下水系统的影响（如改造、开采和污染）与可利用资源相比微乎其微。大多数含水层系统的补给与排泄保持平衡，自然状态下的地下水水质通常非常优良。然而，随着人口增长、农业集约化、城市化/工业化以及气候变化的加剧，地下水承受的压力不断增加。

本战略报告的重点在于回顾当前关于气候变化和人为土地利用变化对地下水资源在数量和质量方面的大规模影响的认识^[1]。在未来评估人类活动的社会可持续性时，必须认真考虑地下水的枯竭与退化，以及它们对环境承载力的影响。

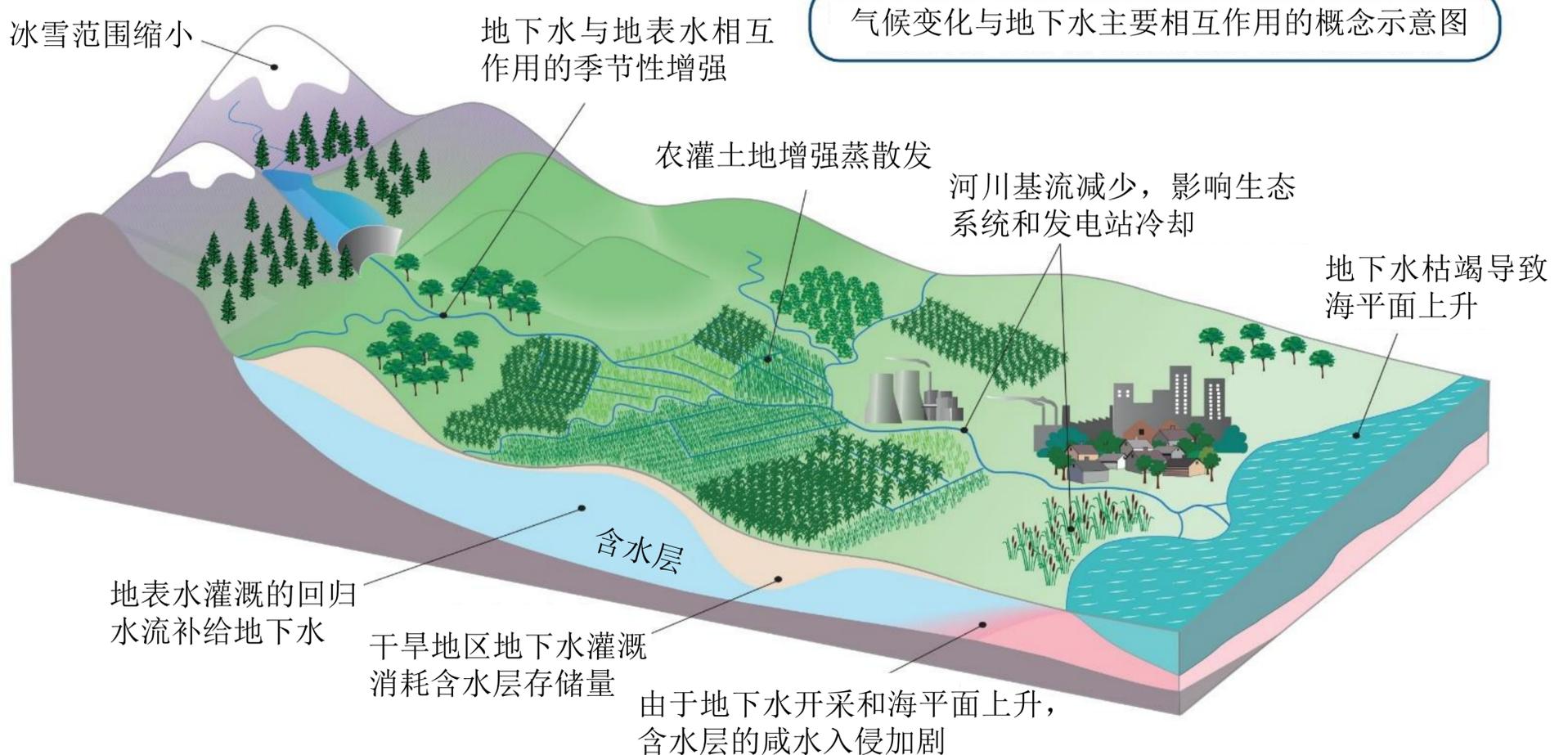
(1) 本系列的其他章节已涉及以下议题：农业生产（《粮食安全与地下水》）、城市化（《韧性城市与地下水》）以及工业污染（《人类健康与地下水》）

全球变暖可能对地下水产生怎样的影响？

在考虑地下水资源的可持续利用性时，估算当前地下水补给速率的以及预测未来的补给具有重要意义。在日益干旱的地区，降雨直接补给的重要性将低于来自地表径流的间接补给以及人类活动产生的偶发补给。

然而，全球变暖对不同地区地下水补给的具体影响仍存在很大不确定性：一方面，更高的气温可能导致降雨事件减少但更为集中，从而出现补给增强（在一定程度上抵消蒸散发的增加）。

在一些裂隙（低储水量）含水层中，水位甚至可能升至历史最高水平，导致财产和农作物损失。另一方面，稀少但更为剧烈的降雨事件可能加剧土壤水分流失，进而导致土壤侵蚀与沟蚀，或造成土壤压实，从而降低入渗能力与地下水补给。



气候变化与地下水主要相互作用的概念示意图

值得注意的是，在过去的40万年间，气候与土地覆盖的自然变化速度，通常低于人类活动引起的变化速度。即使是预测的最小全球变暖速率，也比历史自然变化快大约十倍，这让人们担心地下水补给受到影响，尤其是热带地区依赖低储量含水层的数百万人。不过，由于许多大型含水层储水量大且响应慢，只有持续的气候变化才会开始消耗这些地下水储量。

相比之下，地下水开采增加以及某些重大土地利用变化，能够在几十年内对地下水补给和水质产生重大影响。因此，在展望未来时，必须综合考虑全球变暖、土地利用变化与地下水开采的共同影响。

古环境记录揭示了自然气候变化对地下水的影响机制是什么？

地下水系统对自然气候变化的长期响应（独立于人类活动）可以从古环境证据中识别出来。在自然状态下，大多数地下水系统及其土地覆盖已经适应了过去20万年的主要气候变化周期。对于短期变化而言，在一些半干旱地区（如撒哈拉），含水层上部非饱和带中水的同位素和氯化物数据表明，在过去50–100年间，干旱周期导致地下水补给速率和盐度出现明显波动。

此外，位于当今全球最干旱地区的许多大型含水层系统显示，大部分地下水是在5,000至50万年前（甚至更久的过去）气候较凉爽且降水较多的时期补给的（如撒哈拉的努比亚砂岩含水层）。在这些地区，非饱和带剖面分析表明，随后降雨补给极少（ $<5 \text{ mm/a}$ ）。由于现代补给仅占此类含水层地下水的极小部分，这些资源可视为不可再生的。并且，其供水对当前气候波动而言非常稳定。但从长远来看，这些水资源的使用是有限的，因此需要谨慎规划。

目前最依赖此类资源的国家包括利比亚、沙特阿拉伯和阿尔及利亚，同时在澳大利亚、中国、伊朗、埃及、突尼斯、博茨瓦纳、毛里塔尼亚、秘鲁和美国也有较大的使用量。

地下水利用如何推动全球变化？

地下水在整个人类历史中一直是重要的生活用水和农业灌溉水源。但自20世纪50年代起，随着地质知识、机井钻探、泵技术和农村电气化的进步，地下水的大规模抽取开始兴起。全球地下水开采量仍在增长，2010年已达近 $900 \text{ km}^3/\text{a}$ ，为约36%的生活饮用水、42%的灌溉用水和24%的工业直接用水提供保障。

中国、印度、巴基斯坦和伊朗的大部分地区，以及孟加拉国、墨西哥、美国、欧盟、北非和中东部分地区地下水开采强度最大。2000–2008年间，估计地下水的永久储量每年减少 $100\text{--}145 \text{ km}^3$ [2]。

伴随地下水资源枯竭而来的是，水从长期陆地储存转移至地表水循环，间接导致全球海平面上升（对沿海地区具有严重影响）。由于含水层长期水量平衡、枯竭含水层的单位储水能力，以及抽取地下水在局部气候中的保留比例等评估不够精确，这一过程仍存在不确定性。

近期估计显示，地下水枯竭导致的海平面上升可高达 0.6 mm/a ，其中在2000–2008年期间最可能的值为 0.3 mm/a （相当于每年 $1 \times 10^6 \text{ km}^3$ 的水向海洋转移，占当前海平面上升的18%） [3]。

(2) Doell et al. (2012), Wada et al. (2016)

(3) Konikow (2011), Wada et al. (2016)



哪些土地利用变化对地下水资源产生重大影响？

每一种土地利用实践及其变化都会对水资源留下印记。对于地下水而言，这一点尤为重要，因为某些土地利用变化可能带来长期影响，而其治理成本极高。对地下水影响最显著的土地利用变化包括：清除天然植被和森林、将牧场改为耕地、拓大灌溉农业边界、加强旱地和灌溉农业的集约化、发展生物燃料作物、商业林业的再造林/造林，以及城市化等。这些土地利用方式会对地下水产生不同的影响，包括：

- 补给水质方面——在某些情况下，无论气候条件如何，都可能导致地下水的弥散性污染。
- 补给量和盐度方面——在干旱环境中尤为显著。

在过去250年里，全球超过一半的无冰陆地已被人类活动所改造，主要表现为原生森林转为耕地（70%）和牧场（30%）^[4]。到1950年，土地转化速度超过人口增长，并主要发生在亚洲、欧洲和北美。

近年来，全球土地利用改变的速度有所放缓，大部分森林砍伐现主要发生在热带美洲和亚洲。这些变化虽与人口增长和粮食需求增加有关，但二者之间并非简单的线性关系。

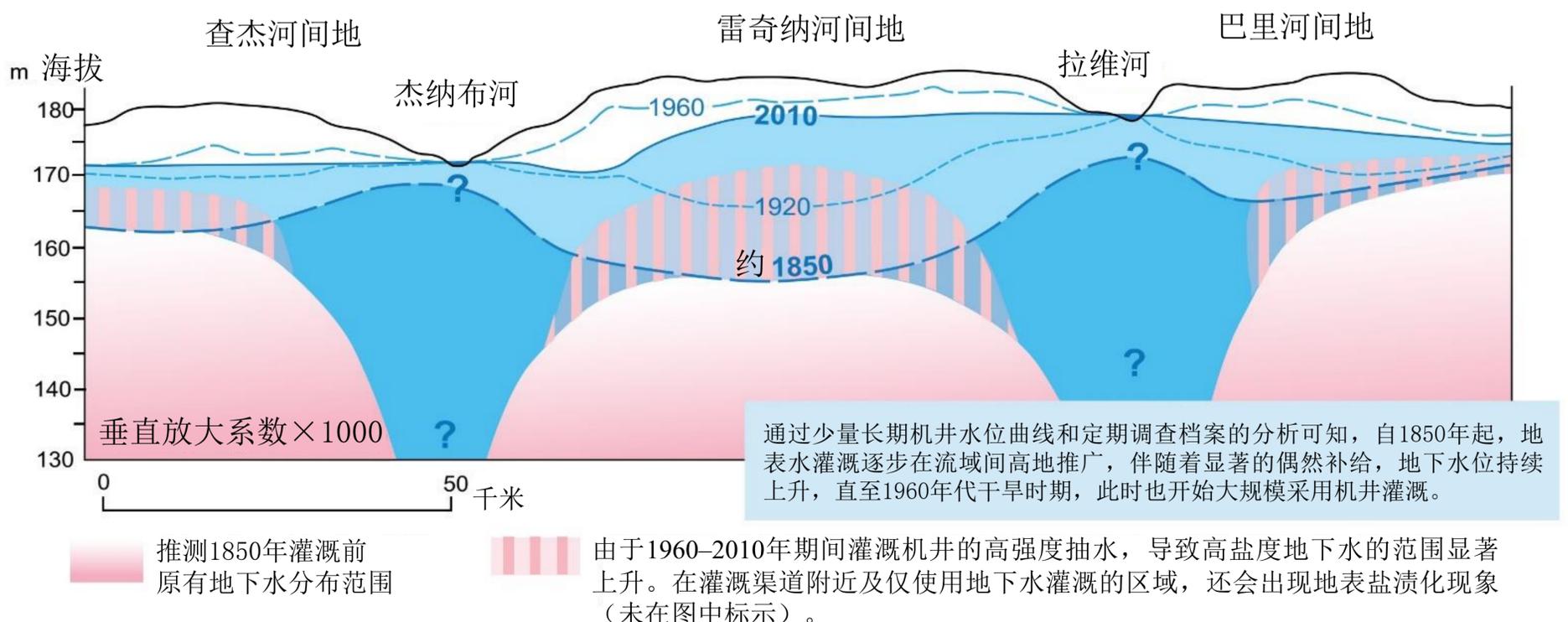
自1960年以来，全球人口增长超过两倍，但粮食消费增加了三倍，而农业用地仅扩张了约10%（因为产量提升主要依赖于农业集约化和作物单产提高）。

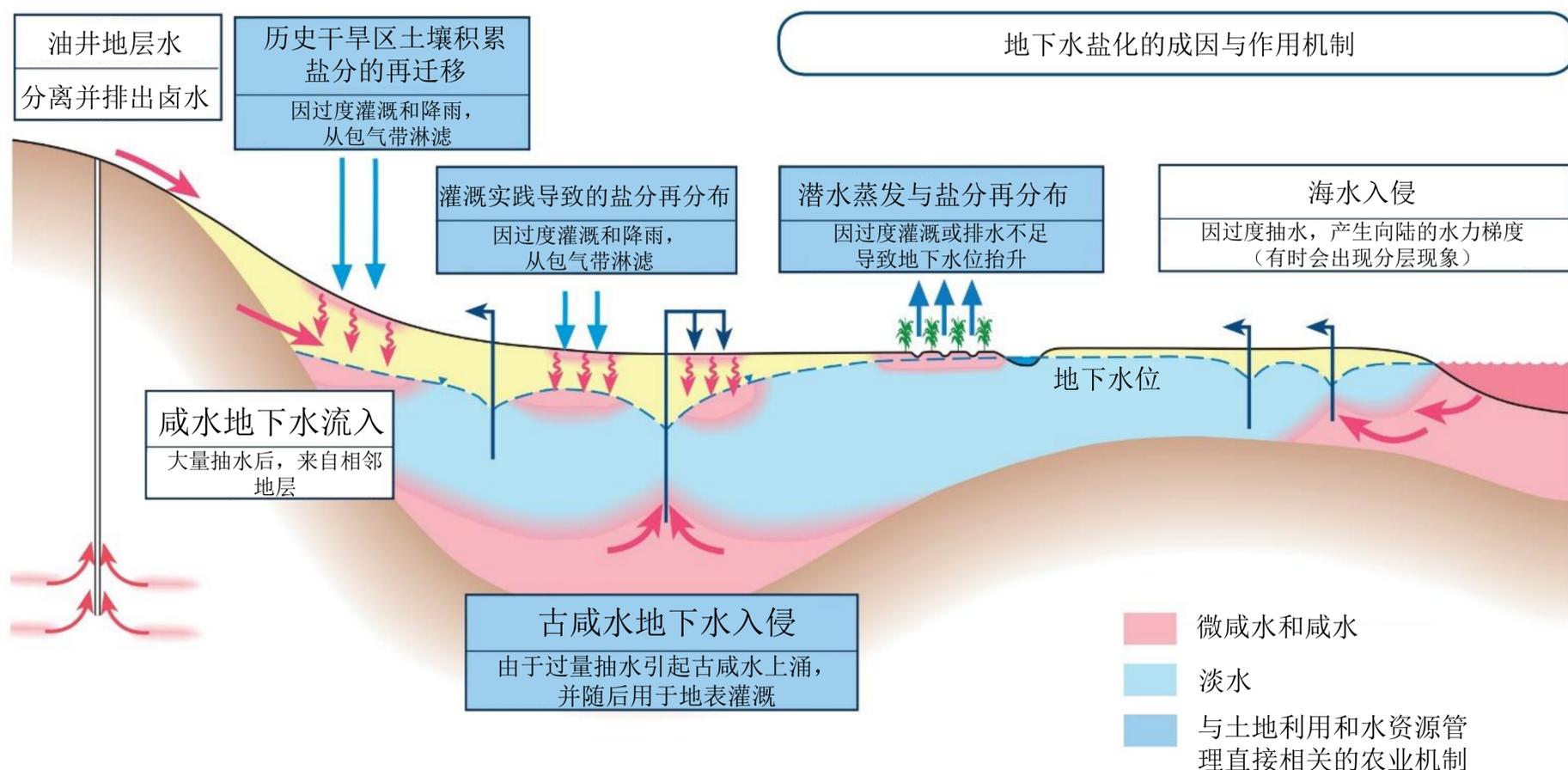
在诸多的土地利用变化中，清除植被和扩大灌溉农业（利用外来地表水灌溉）对地下水的影响最大。其中，扩大灌溉农业会显著增加地下水的补给量并改变水质，因为多余的灌溉水会下渗进入浅层含水层。

然而，若采用精准灌溉（如加压滴灌和微喷灌系统）的方式进行集约化蔬菜和水果种植，则可能显著降低地下水补给速率并提高补给的盐度。

(4) Foster & Cherlet (2016)

旁遮普中部印度河平原地下水系统变化的示意图（1850-2010）





在不同气候类型下，农业土地利用变化对地下水的影响已有大量实例：

- 在一些半干旱地区，引入大规模地表水灌溉，自19世纪中叶起数十年间显著增加了地下水补给，最典型的例子是巴基斯坦和印度旁遮普地区。
- 在地中海欧洲和美国，为了果蔬生产发展集约化园艺活动，造成了严重的地下水污染，包括硝酸盐和持久性杀虫剂污染。
- 在旱地农业中，自20世纪50年代起，西欧将大面积牧场向集约化谷物耕地转化，导致地下水补给水质显著变化，出现硝酸盐和持久性除草剂的弥散性污染。

全球范围内，受盐渍化影响的农业用地面积持续增加（目前约为160万公顷），抵消了其他地区农业生产力的部分增长。土壤盐渍化的产生与地下水密切相关：

- 浅层地下水的直接蒸发，常与利用外来地表水进行低效灌溉及自然排水不足有关。
- 使用矿化地下水灌溉导致土壤盐分积累，并进一步淋溶至浅层含水层。

- 地下水系统深层的天然盐分会重新释放，一方面是由于无序建井和过度抽水，另一方面是天然植被清除后次生盐渍土中的盐分随渗水淋溶进入浅层含水层。

理解农业土地利用与地下水之间的联系，是综合水资源管理的基础。尽管这种联系早已得到认识，但尚未广泛转化为土地管理政策和实践。

当今，大规模因素，尤其是商品市场全球化，已成为土地利用变化的主要驱动力，而某些国家和地方因素可能削弱或增强其影响。这些力量不仅影响数百万小生产者的土地利用选择，也影响大型国际（私人及国有）投资者的决策。

自2000年以来，欠发达国家的大规模农业土地项目涉及至少3600万公顷土地。若这些大规模土地交易在未获得现有当地使用者公开知情同意的情况下进行，则称为“土地掠夺”，而这些土地获取往往还伴随对地下水的优先（但未充分调查的）使用权。



全球变化与地下水

在低收入国家，迫切需要提高玉米、水稻、小麦等主要粮食作物的产量，而这些作物的产量通常仅为农业发达地区的30–50%。增产通常可通过引入灌溉以及改进土壤与水管理措施来实现，但在某些生态环境中可能并不适宜。随着耗水量增加、盐分积累以及养分和农药的淋溶问题，人们日益关注地下水可能受到的影响。

SELECTED BIBLIOGRAPHY

- Basharat M, Hassan D, Bajkani A A & Sultan S J 2014 Surface water and groundwater nexus – groundwater management options for the Indus Basin irrigation system. IWASRI Publication 299. International Waterlogging & Salinity Research Institute (Lahore)
- Doell P et al 2012 Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. *Journal Geodynamics* 59-60 : 143-156
- Doell P et al 2014 Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions : combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites. *Water Resources Research* 50 : 5698-5720
- Edmunds W M & Tyler S W 2002 Unsaturated zones as archives of past climates : towards a new proxy for continental regions. *Hydrogeology Journal* 10 : 216-228
- Foster S S D & Loucks D P 2008 Non-renewable groundwater resources – a guide to socially-sustainable management for water-policy makers. UNESCO-IHP VI Groundwater Series 15 (Paris)
- Foster S & MacDonald A 2014 The ‘water security’ dialogue – why it needs to be better informed about groundwater. *Hydrogeology Journal* 22 : 1489-1492
- Foster S & Cherlet J 2014 The links between land-use and groundwater – governance provisions and management strategies to secure a ‘sustainable harvest’. *Global Water Partnership Perspectives Paper* (Stockholm)
- Konikow L F 2011 Contribution of global groundwater depletion since 1900 to sea-level rise. *Geophysical Research Letters* 38 : L17401
- Margat J & Gun J van der 2013 *Groundwater around the world - a geographical synopsis* Taylor & Francis (London)
- Quereshi A S, Gill M A & Sarwar A 2008 Sustainable groundwater management in Pakistan. *Irrigation & Drainage* 59 : 107-116
- Taylor R G et al 2013 Groundwater and climate change. *Nature Climate Change* 3 : 322-329
- UNESCO - IHP 2015 Groundwater and climate change - mitigating the global groundwater crisis and adapting to climate change. UNESCO - International Hydrological Programme GRAPHIC Project Position Paper (Paris)
- Voss C I & Soliman M 2013 The transboundary non-renewable Nubian Aquifer System of Chad, Egypt, Libya and Sudan : classical groundwater questions and parsimonious hydrogeologic analysis and modelling. *Hydrogeology Journal* 22 : 441-468
- Wada et al 2016 Fate of water pumped from underground and contributions to sea-level rise. *Nature Climate Change* (on-line) DOI: 10.1038/NCLIMATE3001

优先行动

- 需要对地下水系统进行更详细的调查和长期监测，以确定其当前资源状况和水流动态，并确认储量和水质变化的最新趋势。
- 需要系统化地改进适应性水资源管理的操作措施，特别是推广地下水与地表水的联合利用，而不是将二者视为独立水源。
- 需要在不同地形和水文地质条件下，开展详细研究，探讨地下水补给对降雨强度变化、地表温度升高以及土地利用变化的响应，以将地下水认识水平提升至与地表水资源相当的程度。
- 需要开展大时空尺度数值模拟（结合更完善的现场数据），以推动对地下水系统在重大土地利用变化和加速气候变化压力下可能响应的理解。