



核心信息

- 灌溉农业为世界上许多干旱地区带来了巨大的社会效益，但同时也对地下水资源产生了影响。
- 地表水灌溉方案在很大程度上增加了地下水补给，导致地下水位上升，这有时会引发土壤涝渍和盐碱化，需要采取昂贵的排水措施。
- 不受控制的水井灌溉普遍导致地下水资源过度开采，这通常会给地下水使用者和环境带来一系列负面影响。
- 大多数类型的集约灌溉农业会导致过量的养分和农药渗入地下水，在某些环境中，含水层的逐步盐碱化和/或微塑料污染正成为新出现的问题。
- 很少有政府在水资源管理机构和监测基础设施方面进行足够的配套投资，特别是地下水灌溉的使用往往完全不受监管。
- 在灌溉地下水使用的方法上需要进行范式转变，要更加重视对农民进行可持续利用方面的教育，明确节水激励措施，并制定农业土地利用规划以保护地下水。

灌溉的社会经济背景是什么？

农业灌溉的引入为世界上许多气候较为干旱和/或旱季较长的地区带来了巨大的社会效益。在农民直接控制下，大量灌溉农田创造的财富令人瞩目，并改变了许多此前极为贫困的地区。各国政府已经能够提供资金支持灌溉渠和水井的建设，但很少同时对管理机构和监测基础设施进行投资。因此，灌溉农业的发展带来了巨大的经济效益，但同时也给水资源管理带来了挑战。





灌溉农业对地下水可能产生哪些影响？

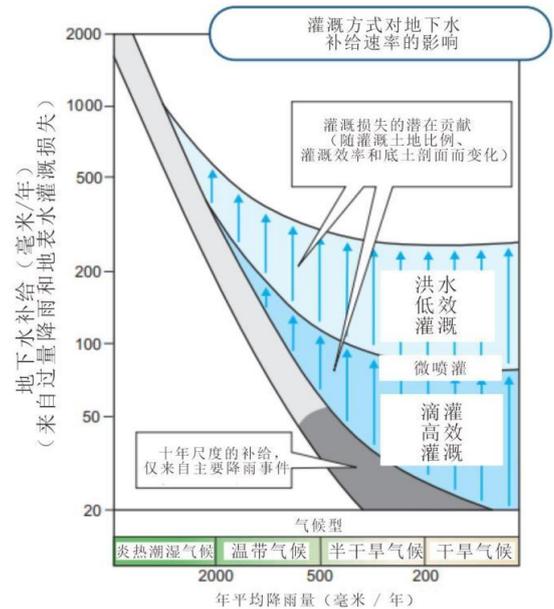
灌溉农业可能会对地下的地下水系统产生一系列潜在的重要影响，其中一些影响被农业部门广泛忽视，在水资源管理中也未得到充分考虑：

- 地表水灌溉总会提高地下水补给率，并可能导致地下水位上升和土地排水问题，这会严重阻碍作物生产，还需要大量的基础设施投资。
- 广泛使用地下水进行灌溉会导致资源过度开采，造成水井出水量下降、抽水能源成本增加对家庭水井造成干扰，在某些情况下还会产生负面的环境副作用。
- 由于灌溉土壤中的盐分浓度和灌溉回渗水流，持续使用地下水灌溉也可能导致含水层逐渐盐碱化。
- 所有类型的灌溉农业都存在养分和农药淋溶的风险，这可能导致严重的面源地下水污染。

为农业灌溉大量使用地下水还可能带来意外的制度性问题，因为这往往会将地下水使用权集中到少数更富裕的土地和水井所有者手中（例如，这些人种植高价值作物供应欧洲出口市场）。这可能会破坏本土农业，并将传统农业社区从他们的土地上排挤出去。

灌溉农业如何增加地下水资源的可利用量？

历史上，灌溉渠道的衬砌水平非常低，地表水在灌溉土地上的应用采用的是周期性土地淹没（甚至是“漫灌”）技术。这一情况意外导致灌溉用水量远超作物实际需求，进而使



垂直箭头表示在不同用水效率情景下地下水补给可能的增加量，假设灌溉损失可自由渗入非承压含水层。

地下水补给率的提高。从长远来看，这往往会导致地下水位上升，在某些情况下还会引发相关的土地排水问题。这可以通过促进地下水与其他水源联合用于灌溉来进行管理。

在其他灌溉方式中，用水量会更少，但农民们往往会在一年中的特定时期故意过度灌溉，以“清洁土壤”。例如，在华北平原，即便渠道衬砌和田间灌溉技术有了现代化改进，目前地表水的平均灌溉效率也仅为60%左右。在巴基斯坦，大型地表水渠沿线的损失积累了大量的淡水透镜体。

为什么地下水灌溉往往会导致严重的资源过度开采？

地下水灌溉目前约占全球总灌溉面积的40%，其中值得注意的是



北美(59%)、南亚(58%)、西亚(45%)和西欧(41%)的水平较高，不过撒哈拉以南非洲的水平仍很低(5%)，这是多种因素复杂作用的结果，包括农村电气化有限以及缺乏投资资金。地下水开发往往缺乏充分的地下水评估。地下水灌溉区域生产力的显著提升，往往促使农民扩大灌溉种植面积，而不顾地下水的长期可利用性。特别是在园艺灌溉中使用地下水，对相关农民来说利润很高。

在大多数采用地下水灌溉的气候环境中，每年所需的灌溉用水量以及可用于灌溉种植的土地面积，都大大超过了地下水资源的可利用量。这普遍导致了地下水资源的严重过度开采，且往往伴随着河流基流减少、湿地退化、咸水上涌和地面沉降等问题。

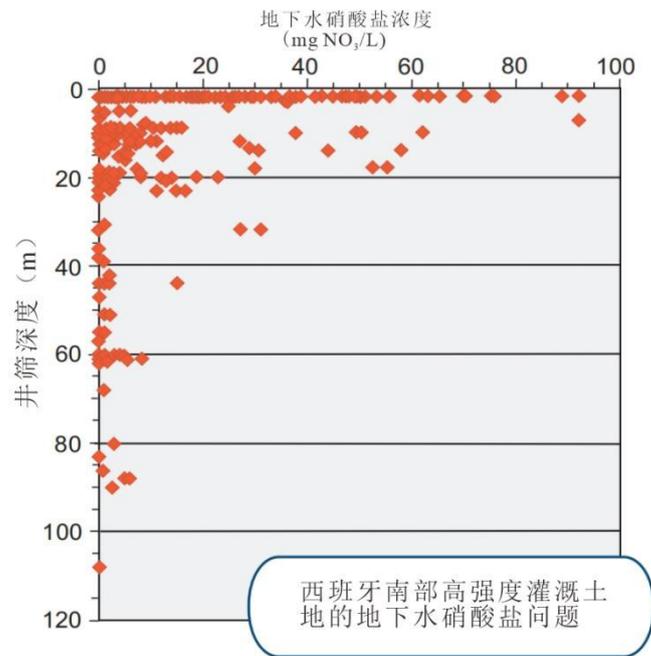
用于灌溉的地下水利用往往完全缺乏监管。在农民直接控制下的水井普遍存在过度抽取的情况，目的是最大限度地提高作物产量，而不管监管机构批准的抽取率如何。此外，目前在地下水监测方面的投资几乎在所有地方都远远不够。要量化抽取的水量，就需要对各个水井进行计量，并且需要对含水层水位进行持续监测，而这往往超出了监管机构的能力范围。

印度估计有2000万口水井，其年度地下水开采量的92%用于灌溉((213billionm³))，这对可持续的地下水管理构成了巨大挑战。

灌溉农业通过哪些方式降低地下水质量？

养分淋滤

为追求更高产量而大规模和/或不合时宜地向农作物施用氮肥，已广泛导致氮肥渗入地下水，这种情况在园艺多作种植区尤为明显。在灌溉农业区，饮用水中相关物质的浓度经常超过世界卫生组织(WHO)50mgNO₃/l的指导标准。例如，最近一项针对华北平原山前地区的研究显示，该地区地下水位平均深度为45米，不饱和带中储存着6600kgN/ha，这些氮正以约0.6米/年的速度缓慢向下迁移至地下水位，将在未来几十年影响地下水质量。在西班牙，由于集约化农业中养分淋溶的输入，马梅诺尔湖(地中海沿岸的一个海滨泻湖)的生态功能发生了根本性改变，已导致三次严重的富营养化事件，造成大量鱼类死亡。



农药淋溶

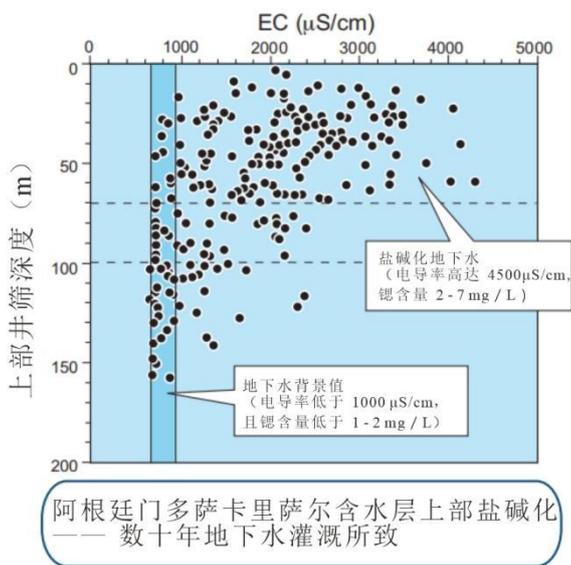
近年来，全球范围内向农作物施用农药的情况一直在迅速增加。



这些化合物中有许多在土壤溶液中移动性较强，容易淋滤到地下水中。虽然它们在肥沃土壤中的半衰期相对较短，但在地下水中却极具持久性。这些化合物及其部分分解产物(代谢物)给地下水作为饮用水源的使用带来了重大难题。例如，在华北平原，地下水中已检测出多种有机磷农药(OPPs)，特别是乐果、敌敌畏和马拉硫磷。

渐进式盐渍化

大量的地下水灌溉存在使土壤层盐分积累的风险，农民通常会额外灌溉一层水，将盐分淋洗到更深的地方，最终进入地下水。这对深度约100米的浅层地下水质量产生了广泛影响，在阿根廷的门多萨和西班牙的阿尔梅里亚已对此进行了详细研究。在沿海地区，农业灌溉中无节制地抽取地下水往往导致地下水位降至海平面以下，进而引发大规模的海水入侵，例如在中国已对此进行了详细监测。此外，在地表水灌溉区域，过量灌溉会导致地下水位上升，并且



潜水蒸发，其结果是土壤盐渍化。

微塑料污染

在集约利用的农田及其周边，土壤中经常发现被微塑料(MPs)污染的情况。这些化合物可能会进入地下水补给系统，尽管人们对其存在情况的了解仍很有限。由于塑料地膜的使用，在耕作土壤中已检测到高浓度的微塑料。

为了减少农业灌溉对地下水资源的高强度开采所带来的影响，可以采取哪些措施？

地下水和地表水资源的综合利用应该能让农民更灵活地满足作物的用水需求，并减轻进一步增加水井取水量的压力。

灌溉用水效率也是一个需要加大力度优化的重要问题，要区分不可恢复的灌溉用水损失和那些只是回补到地下水系统的损失。此外，通过使用抗旱作物品种、改进作物种植方式以及引入低灌溉用水量的作物，还有节水的空间。在某些情况下，可能还需要补贴农民，以减少其灌溉面积，在降雨量少的年份让更多土地休耕；提供土地，以便在降雨过多时进行有管理的含水层补给；在可行的情况下，用经过适当处理的废水替代地下水。

在地下水资源紧张的地区，加强对农民的教育，让他们认识到调整种植模式和改进灌溉用水调度的必要性，是一项重中之重。

在部分地区，地下水资源保护工作已通过以下方式取得进展：

制定更贴合实际的电价政策：农民需承担其能源消耗的全部成本，这一举措成为推动节水的有力激励因素。



承担其能源使用的全部成本，这是节约用水的强大激励措施。

- 在某些情况下，政府为促进农业生产而提供的能源补贴意外地刺激了过度抽水，这种“不当补贴”必须予以取消。
- 通过计量农村电力消耗作为抽水的间接指标，改进水井取水的计量和收费方式，然后将电力消耗和地下水使用合并计费，
- 如果规划得当，引入太阳能水井泵有助于规范地下水开采，前提是要为农民提供有吸引力的激励措施，鼓励他们 将电力回售给农村电网，而非用于过度抽取地下水。

近年来，中国大力开展地下水监测工作，但灌溉用水量的测量并非易事，其数据主要依靠从用电量、灌溉定额和耕地面积中估算得出。在试点范围内，水井灌溉用水已通过限制电力分配来进行管控。

温室种植能显著降低蒸散速率，从而减少灌溉用水需求。此外，鼓励农民在每年的多作物种植周期中放弃种植价值最低的作物，可节省大量地下水。

在农业灌溉中使用本质上不可再生的地下水这一特殊情况(目前在北非和中东部分沙漠地区大规模出现)，需要更为谨慎的管理，包括采取以下额外措施：

- 仅使用地下水种植高价值和/或低需水量作物，避免在夏季进行灌溉种植
- 采用加压灌溉系统(如滴灌或微喷灌)，这类系统效率更高，且能精确控制用水量



西班牙南部温室栽培下的集约化灌溉

哪些技术可以帮助灌溉农业可持续地管理地下水资源？

水务部门应积极推动地表水与地下水资源的联合利用，并在地下水紧张地区对浅层含水层进行人工补给。

农业部门可通过以下方式对地下水资源管理工作提供大力支持：

制定农业土地利用管理计划，将地下水资源的可持续性列为重要议题，并定向投入资金，通过精准灌溉技术降低农业用水需求；

与农民合作推行最佳土地利用管理实践，旨在保护地下水资源并维护地下水质量。

农民使用手机应用程序进行天气预报，能极大地改进灌溉计划并减少淋溶损失。通过这种方式，还能获得其他类型的农业种植实用指导。

卫星图像的应用有助于量化作物需水量并追踪



IRRIGATED AGRICULTURE & GROUNDWATER

acknowledging the collaboration of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) at the corporate and individual member level for the production of this overview

消耗性作物用水量，这反过来有助于制定高效的季节性灌溉计划。地球物理技术还有助于确定适合利用永久性作物上的过剩地表水进行有管理的含水层补给的区域。

FURTHER READING

- Custodio E et al 2017 *Groundwater mining : benefits, problems and consequences in Spain. Sustainable Water Resources Management* 3 : 213–226.
- Fernández-Ayuso A et al 2019 *Assessment of the hydrological status of Doñana dune ponds : a natural World Heritage Site under threat. Hydrological Sciences Journal* 63 : 2048–2059.
- Foster S et al 2018 *Impact of irrigated agriculture on groundwater–recharge salinity : a major sustainability concern in semi–arid regions. Hydrogeology Journal* 26 : 2781–2791.
- Foster S & Custodio E 2019 *Groundwater resources and intensive agriculture in Europe – can regulatory agencies cope with the threat to sustainability ? Water Resources Management* 33 : 2139–2151.
- Foster S & Shah T 2012 *Groundwater resources and irrigated agriculture – making a beneficial relation more sustainable. Global Water Partnership Perspectives Paper (Stockholm).*
- Garduño H & Foster S 2010 *Sustainable Groundwater Irrigation : approaches to reconciling demand with resources. GW–MATE Strategic Overview Series 4. World Bank (Washington DC) via www.un–igrac.org.*
- Garrido A et al 2006 *Groundwater Irrigation and its implications for water policy in semi–arid countries. Hydrogeology Journal* 14 : 340–349.
- Han D & Currell M J 2022 *Review of drivers and threats to coastal groundwater quality in China. Science of the Total Environment* 806 : 150913.
- Huang J et al 2021 *Microplastic pollution in soils and groundwater : characteristics, analytical methods and impacts. Chemical Engineering Journal* 425 : 131870.
- IAH 2015 *Food Security & Groundwater. International Association of Hydrogeologists Strategic Overview Series www.iah.org.*
- Jiménez–Martínez J et al 2016 *The role of groundwater in highly human–modified hydrosystems : a review of impacts and mitigation options in the Campo de Cartagena–Mar Menor coastal plain of South–East Spain. Environmental Research* 559 : 302–316.
- Mateos R M et al 2017 *Multiband PSnSAR and long–period monitoring of land subsidence in the strategic detrital aquifer of the Vega de Granada, Southeastern Spain : an approach to support management decisions. Journal of Hydrology* 553 : 71–87.
- Manzano M et al 2005 *Effects of localised intensive aquifer exploitation on the Doñana wetlands of Southwestern Spain. IAH Selected Papers on Hydrogeology* 410 : 209–219.
- Molden D 2007 *A comprehensive assessment of water management in agriculture : water for food, water for life. International Water Management Institute – Earthscan Publication (Colombo).*
- Moratalla A et al 2009 *Nitrate in the water–supply wells of the Mancha Oriental hydro geological system of South–East Spain. Water Resources Management* 23 : 1621–1640.
- Qureshi A S et al 2008 *Managing salinisation and water logging in the Indus Basin of Pakistan. Agricultural Water Management* 95 : 1–10.
- Wang J et al 2022 *Spatiotemporal distribution and risk assessment of organophosphorous pesticides in surface water and groundwater of the North China Plain. Environmental Research* 204 : 112310.
- *World Water Development Report 2022 Groundwater—the invisible resource : Chapter 3 – Groundwater and Agriculture 64–75. UNESCO World Water Assessment Programme Publication (Perugia).*

优先行动

- 需要更加重视水井灌溉区的地下水开采监管，同时改进灌溉技术、测量抽水速率并监测地下水位。
- 地下水和地表水资源的联合利用将为农民提供更大的灵活性，以满足作物的需水量，并减轻进一步抽取水井的压力。
- 农民应承担全部能源使用成本，以此作为节水激励措施。通过计量耗电量作为抽水体积的间接指标，以便向个体农民合并开具耗电量和地下水使用量的账单。
- 为刺激农业生产，政府常常对灌溉水井的资本成本和运营成本提供补贴，而这种不合理的补贴必须逐步取消。
- 引入太阳能水井泵需要同步采取措施，制定有吸引力的电网回购方案，而非将所发电力全部用于抽水
- 采用温室栽培可降低蒸散速率并减少灌溉用水需求，而在年度多作循环中放弃种植低价值夏季作物则能节省大量地下水。