

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.037>

Short Survey



地下水可持续发展模式之谜

翟远征, 崔一涵, 朱冠华, 童宝才, 刘宇, 柳林妹

北京师范大学水科学研究院, 北京 100875

地下水可持续发展理念起源于人类可持续发展理论。可持续发展一词最早出现于 1980 年世界自然保护联盟等发布的《世界自然资源保护大纲》: 必须研究自然的、社会的、生态的、经济的以及利用自然资源过程中的基本关系, 以确保全球的可持续发展。1987 年, 世界环境与发展委员会发布的《我们共同的未来》报告中首次给出可持续发展的定义并被广泛接受: 既能满足当代人的需要, 又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展。1994 年, 我国编制了《中国 21 世纪议程—中国 21 世纪人口、资源、环境与发展白皮书》, 首次把可持续发展战略纳入我国经济和社会发展的长远规划。可持续发展是人类对工业文明进程进行反思的结果, 是人类为了克服环境、经济和社会问题, 特别是全球性的环境污染和生态破坏, 以及它们之间关系失衡所做出的理性选择。实施可持续发展战略有利于促进生态效益、经济效益和社会效益的统一, 也有利于促进经济增长方式由粗放型向集约型转变, 使经济发展与人口、资源和环境相协调。可持续发展理念早已深入人心并成为全人类共识。

作为一种重要的社会资源即水资源, 同时又是重要的环境要素和生态因子(图 1), 地下水的可持续发展问题在上述人类社会可持续发展理念被提出后也受到广泛关注和重视, 遂诞生了地下水可持续发展、地下水可持续利用(Kuang *et al.*, 2024)、地下水可持续开采量等概念, 一些传统概念如地下水

可开采量和地下水允许开采量等也逐渐被代替。但是, 我们不得不承认一个事实, 即截至目前, 地下水可持续开采量尚没有一个公认的确切方法或模型。这种局面非常不利于地下水开发和保护工作的开展, 出现的原因可大致归纳为 4 点, 即地下水资源属性复杂且资源量有限, 地下水异位功能和原位功能之间是此消彼长的关系, 开采井与含水层之间即个体与整体之间关系复杂, 以及地下水各水均衡项难以量化。

首先, 地下水资源属性的复杂性和资源量的有限性, 使其难以满足可持续发展理念中“永续利用”的要求。水资源属于可再生资源, 但是属于水资源中一种的地下水的资源属性却无法“一概而论”。地下水既不像河水那样容易再生, 也不像石油那样不易再生, 而是介于两者之间, 而且其再生性受埋藏条件尤其是埋深以及补给条件尤其是补给源等的制约(Grant *et al.*, 2020)。资源属性决定着资源的可持续发展模式, “定性难”导致人们在有限的地下水储量(Zhao *et al.*, 2023)的开发问题上莫衷一是: 有人认为地下水储量不可再生所以不可动用, 因为会开采一点少一点, 总有用完的那一天, 不可能永续利用; 有人认为储量可以再生所以可以动用, 但是如何进行代际和代内分配是个难题(Carlos, 2021)。站在人类发展的角度, 煤、石油和天然气等不可再生资源均是可以开采的, 因此地下水原则上应是可以开采的, 不论其资源属性如何, 何况即便是深层

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2024YFC3713100)。

作者简介: 翟远征(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事环境水文地质学研究。ORCID: 0000-0002-2615-9859。E-mail: zyz@bnu.edu.cn

引用格式: 翟远征, 崔一涵, 朱冠华, 童宝才, 刘宇, 柳林妹, 2025. 地下水可持续发展模式之谜. 地球科学, 50(6): 2457—2460.

Citation: Zhai Yuanzheng, Cui Yihan, Zhu Guanhua, Tong Baocai, Liu Yu, Liu Linmei, 2025. The Mystery of Sustainable Development Mode for Groundwater. *Earth Science*, 50(6): 2457—2460.

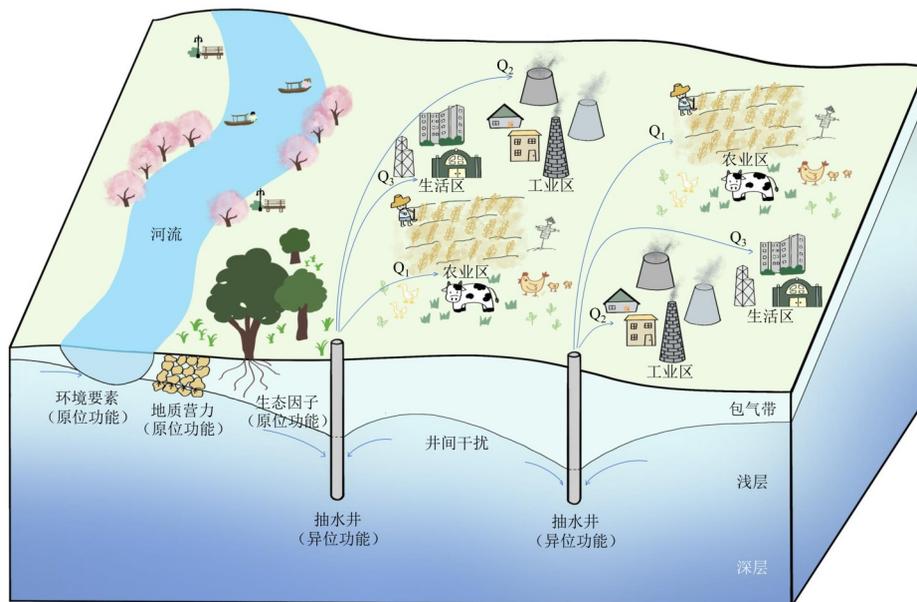


图 1 地下水各功能间的关系示意

Fig.1 Schematic diagram of the relationship between various functions of groundwater

地下水,也并非真正意义上的不可再生(Melissa *et al.*, 2022).

其次,地下水异位功能和原位功能之间此消彼长的关系,使地下水开采实践常常“顾此失彼”,难以甚至无法兼顾.在自然界很难再找到一种物质像地下水那样兼具多种重要的原位功能,包括环境要素、生态因子、地质营力.因此,即便不考虑上述资源属性和储量问题,地下水的这些原位功能也对其异位功能的发挥形成了刚性约束(Tom *et al.*, 2020):对地下水的开采必须“有度”,以免其原位功能受到不可接受的损害(程中双, 2023).然而,受气候、地理、地质和土地利用等的影响,地下水与环境、生态和地层形变等之间的关系极其复杂,加上“不可接受的危害”较难度量且具有较大弹性,导致人们对地下水开采的“度”极难把握,尤其是短期利益和长远利益存在冲突时.另外,地下水原位功能的正常发挥需要适宜的地下水位阈值(杜新强等, 2024),但这几种功能对应的阈值又并不一致.因此,与河湖库相比,地下水可持续开采量确定的难度要大得多,因为要兼顾考虑更多的原位功能以及相应的地下水位阈值.

再次,开采井与含水层之间即个体与整体之间

复杂的关系,使围绕开采井确定可持续开采量的难度很大.为了开展开采井资源量的评价,学术界模仿裘布依圆岛模型创造了“影响半径”这一参数.圆岛的半径与开采井的影响半径并不同(焦赳赳等, 2023),因为前者是刻画含水层几何形状的参数,后者则取决于流场.流场是水均衡状态和时间的函数,且受含水层结构、水理性质和边界条件等多因素的影响,因此影响半径实际上是个变量,且量化带有一定主观性(Jacek *et al.*, 2022; Daouda *et al.*, 2023).后来为了计算方便,甚至还创造了影响半径的所谓经验值,即认为影响半径仅取决于含水介质的水理性质,而与含水层的结构和边界条件(包括开采)等无关.由质量守恒定律和水流连续性原理可知,如果不考虑垂向补给,影响半径所确定的圆柱状影响范围之外的含水层才是圆柱状含水层和开采井的补给源,而且影响半径会随着开采强度的增加逐渐变大(所以是变量而不是参数).这就要求在评价开采井的可开采量时,必须将其置于区域或含水层中予以整体考虑,并且还要考虑这个整体内的其他开采井.换言之,地下水可持续开采量对应的应该是区域或含水层而不是单个水源地或者开采井,但实践时往往“一井障目,不见含水层”“各井

自扫门前雪,莫管他井瓦上霜”,这也是造成区域性地下水位降落漏斗的主要原因(Zhai *et al.*, 2021)。另外,水质问题也逐渐被纳入可持续发展范畴。开采井补给源的这种空间分布上的广泛性及其时间变化,不但给评估水源地供水量的稳定性和可持续性带来困难,还给水源地水中污染物的源解析带来巨大挑战(Ahmadi *et al.*, 2023)。

最后,地下水各水均衡项难以准确量化,使以“补排平衡”“量入为出”等为原则的可持续开采量评估充满挑战。可持续开采量评估尚没有公认的方法,但必须遵循质量守恒定律却早已是共识,在此原则之下也有人简单地将补给量作为可持续开采量,即“量入为出”。然而,受埋藏条件(看不见,摸不着,难以感知)和三维流等的影响,地下水均衡方程中的大气降水入渗补给量、地表水入渗补给量、农田灌溉水回渗补给量、侧向补给量、越流补给量、蒸发量、侧向排泄量、向河排泄量、越流排泄量等几乎所有水均衡项的准确量化都极其困难。不仅如此,影响这些补排量计算的参数和变量还会受开采的影响,从而使开采状态下即加上时间变量后的量化更加困难(Scott and Debra, 2021)。由此可见,与经济方面的“可持续支出额”(兼顾考虑收入和存款)的确定相比,地下水可持续开采量的确定要难得多,因为与前者相关的各项收入、支出以及存款的量化要容易得多。鉴于此,有人将对地下水的精细刻画和准确量化称为“麻袋上绣花”,即在粗糙的底子上进行小心翼翼的精雕细琢,基本属于“徒劳”。

综上,尽管人类可持续发展理念的提出和发展已经有接近半个世纪的历史,提出之后也被及时引入到地下水研究和管理实践中,但时至今日,公认的地下水可持续发展模式尚未建立,尚处于探索阶段。未来的地下水可持续发展研究可集中在这几方面:(1)深层地下水的资源属性及其对开采的响应;(2)地下水的动态与其原位功能之间的关系;(3)区域或含水层与水源地之间的相互作用;(4)地下水各补排项的量化方法。

受国家水体污染控制与治理科技重大专项、国家重点研发计划专项、国家自然科学基金、北京市重大科技专项等的资助,笔者近十几年以北京平原区和松花江流域傍河水源地等为例开展了较深入

的研究工作,探索了区域地下水的资源属性,补给边界附近井的可持续开采量和水质,并建立了傍河水源地供水安全保障关键技术体系。受国家重点研发计划专项的资助,笔者将在2025—2028年以地下水水源地为抓手,继续探索兼顾水质安全的地下水可持续发展模式。

References

- Ahmadi, A., Chitsazan, M., Mirzaee, S. Y., et al., 2023. The Effects of Influence Radius and Drawdown Cone on the Areas Related to the Protection of Water Wells. *Journal of Hydrology*, 617: 129001. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.129001>
- Carlos, A., 2021. Sustainability and Sustainable Development: A Review of Principles and Definitions. *Science of The Total Environment*, 786: 147481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147481>
- Cheng, Z.S., 2023. Using Groundwater Age and Hydrochemistry Discuss Sustainability of Groundwater Exploitation in North China Plain (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Daouda, M., Romain, C., Silvain, R., et al., 2023. Characterizing the Radius of Influence during Pumping Tests Using the Absolute Critical Drawdown Criterion: Cases of Integer Flow Dimensions. *Journal of Hydrology*, 618: 129096. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129096>
- Du, X.Q., Fang, Y.J., Guo, H., et al., 2024. Research Progress on Suitable Groundwater Depth towards Sustainable Development and Utilization of Groundwater Resources. *China Environmental Science*, 44(9): 4987—4998 (in Chinese with English abstract).
- Grant, F., Mark, O., Kevin, B., et al., 2020. Rethinking Groundwater Age. *Nature Geoscience*, 13: 592—594. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0629-7>
- Jacek, M., Kajetan, d' O., 2022. The Radius of Influence of Mine Drainage - Definitions, Methods of Determination, and Practical Issues. *Journal of Hydrology*, 613: 128422. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128422>
- Jiao, J.J., Wan, J.W., Wang, X.S., et al., 2023. Prof. Chongxi Chen's Academic Research Contributions in the Area of Hydrogeology. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(4): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Kuang, X. X., Liu, J. G., Scanlon, B. R., et al., 2024. The

- Changing Nature of Groundwater in the Global Water Cycle. *Science*, 383(6686): eadf0630. <https://doi.org/10.1126/science.adf0630>.
- Melissa, T., Merhawi, G., Jobel, Y., et al., 2022. Modern Groundwater Reaches Deeper Depths in Heavily Pumped Aquifer Systems. *Nature Communications*, 13: 5263. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32954-1>
- Scott, J., Debra, P., 2021. Global Groundwater Wells at Risk of Running Dry. *Science*, 372(6540): 418–421. <https://doi.org/10.1126/science.abc2755>
- Tom, G., Mark, C., Grant, F., et al., 2020. Global Groundwater Sustainability, Resources, and Systems in the Anthropocene. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48:431–463. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251>
- Zhai, Y.Z., Cao, X.Y., Jiang, Y., et al., 2021. Further Discussion on the Influence Radius of a Pumping Well: A Parameter with Little Scientific and Practical Significance That can Easily be Misleading. *Water*, 13(15):2050. <https://doi.org/10.3390/w13152050>
- Zhao, K.Y., Fang, Z.H., Li, J.W., et al., 2023. Spatial-Temporal Variations of Groundwater Storage in China: A Multi-scale Analysis Based on GRACE Data. *Resources, Conservation and Recycling*, 197: 107088. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107088>

中文参考文献

- 程中双, 2023. 基于地下水年龄与水化学论华北平原地下水开采可持续性(博士学位论文). 北京: 中国地质科学院.
- 杜新强, 方永军, 郭辉, 等, 2024. 面向地下水资源可持续开发利用的地下水适宜埋深研究进展. *中国环境科学*, 44(9):4987–4998.
- 焦赳赳, 万军伟, 王旭升, 等, 2023. 陈崇希教授在水文地质领域的学术研究贡献. *地质科技通报*, 42(4):1–14.