

人工回灌对上海沿海地区海水入侵防控的实践效果研究

莫李娟¹ 陆铭锋² 常露³ 蒋蔚⁴

1. 太湖流域水文水资源监测中心 江苏无锡 214000

2. 无锡瀚澜水利科技有限公司 江苏无锡 214000

3. 无锡市河湖治理和水资源管理中心 江苏无锡 214000

4. 江苏省水文水资源勘测局无锡分局 江苏无锡 214000

摘要: 随着经济和城市化快速发展,上海沿海地区海水入侵问题日益突出,威胁地下水资源安全,影响农业和居民用水。人工回灌作为有效的防控手段,近年来在该地区得到广泛应用。本文基于实测监测数据和水文地质分析,系统评估了人工回灌对海水入侵的抑制效果。研究表明,人工回灌显著提升地下水位、改善水质,缓解淡水资源紧缺。通过对回灌水源选择、方式优化及管理策略的探讨,完善了回灌系统设计。结合上海沿海地质和社会经济特点,提出未来推广和可持续发展的建议,为海水入侵防控提供科学依据。

关键词: 人工回灌; 海水入侵; 上海沿海; 地下水; 防控效果

引言

上海位于长江入海口,是典型河口沿海城市,地下水资源丰富且广泛利用。随着工业化和城市化加速,地下水超采普遍,导致水位持续下降,形成漏斗区,加剧海水入侵风险。海水入侵使淡水含水层盐化,严重影响生态环境及居民生活,同时威胁农业灌溉和工业用水。传统防控措施如禁采区划定和地下水合理调配效果有限。人工回灌技术作为直接补给地下水、维持水位的有效手段,近年来在上海沿海得到积极推广。本文基于实测数据和监测结果,系统分析人工回灌在防控海水入侵中的实践效果,为相关政策和工程实施提供科学支持。

一、上海沿海地区海水入侵现状及问题分析

(一) 海水入侵的成因与危害

上海沿海地区海水入侵的主要成因包括地下水超采导致水位持续下降、地形地质条件以及海平面上升等自然与人为因素的综合作用。长期大量开采地下水使得地下水位不断降低,破坏了地下水与海水之间的动态平衡,形成了有利于海水入侵的水力梯度和动力条件。此外,上海沿海地势低平,土壤结构疏松,地下水含水层的连通性强,增加了海水逆流渗透的可能性。同时,全球气候变化引起的海平面上升也加剧了海水向内陆侵入的风险。海水入侵不仅导致地下水含盐量显著上升,水质恶化,降低了水资源的可用性,还引发土壤盐碱化,影响农业耕作与作物产量,对城市供水安全造成威胁,进一

步损害了生态环境和区域的可持续发展潜力,成为沿海地区水资源管理和环境保护的重要挑战。特别是在海平面持续上升和极端气候事件频发的背景下,海水入侵问题呈现出加剧态势,对上海沿海区域的生态安全和社会经济发展带来了更为严峻的考验。

(二) 地下水超采现状

自改革开放以来,随着上海工业化和城市化进程的加快,地下水开采量逐年递增,尤其在工业生产和农业灌溉用水的高峰期,地下水超采问题尤为突出。大量抽取地下水导致地下水位持续下降,部分地区水位下降幅度达数米,形成了明显的负压区,影响了含水层的水力条件。监测数据显示,地下水位长期处于低位,含水层渗透性降低,地下水补给不足,盐水入侵的风险明显上升,水资源的可持续利用面临严峻挑战。地下水超采不仅加剧了水资源紧张,还带来了土地沉降等地质环境问题,影响了城市基础设施安全,亟需采取科学合理的管理和调控措施,控制地下水开采规模,保护水资源生态环境。尤其是在沿海低洼区域,地下水位过度下降导致地面沉降加剧,增加了洪涝灾害的风险,对城市排水系统和建筑物安全构成严重威胁,必须综合治理以保障区域的稳定发展。

(三) 海水入侵监测技术进展

近年来,随着科技的发展,上海沿海地区海水入侵的监测手段不断提升,取得了显著进展。遥感技术通过卫星影像和航拍数据,实时监测海岸线变化和植被分布,辅助识别海水入侵区域,有效掌握海岸线退缩及盐碱化

扩展趋势。地质勘探技术结合钻探和物理探测，为了解地下水含水层结构和盐水分布提供基础资料，增强了对地下水流动和盐水入侵路径的认识。地下水水质分析则通过采样检测离子浓度、电导率等指标，动态评价盐水侵入程度，为水资源管理提供科学依据。数值模拟技术利用水文地质模型，对海水入侵过程进行模拟与预测，支持防控方案的科学制定和优化。基于多源数据的综合分析方法，有效提高了海水入侵动态的掌握精度和时效性，为人工回灌技术的合理布局和实施效果评估提供了坚实的技术支撑和数据保障，有助于实现精细化管理和精准防控，提升区域海水入侵治理水平。未来，结合大数据和人工智能技术的应用，将进一步推动监测手段的智能化和自动化，实现更高效的海水入侵风险预警与应对。

二、人工回灌技术原理及应用现状

（一）人工回灌技术概述

人工回灌是指通过人工手段，将地表水或经过处理的水体注入地下含水层，以补充地下水资源，恢复地下水水位，形成稳定的水力屏障，有效阻止海水逆流入侵地下水系统。该技术通过调节地下水水位和压力分布，改变地下水流向，降低含盐水体向陆地扩散的速度和范围，从而减缓甚至阻断海水入侵的进程。除了防控海水入侵，人工回灌还兼具改善地下水水质、调节水资源结构及促进生态环境修复的多重功能。通过回灌，能够提高含水层的补给能力，稳定地下水动态平衡，缓解地下水超采造成的水位下降和地面沉降问题。人工回灌作为一种综合性的工程措施，已成为沿海地区应对海水入侵威胁的关键技术手段，并在多个沿海城市得到了广泛应用和推广。其技术体系涵盖水源选择、注水设备设计、回灌监测与管理等多个环节，要求综合考虑水文地质条件、用水需求以及环境承载能力，以确保回灌效果的最大化和生态安全。此外，随着信息技术的发展，智能化管理和自动化控制逐渐融入人工回灌系统，提升了回灌的精准性和效率，促进了技术的持续优化和升级。

（二）上海沿海人工回灌实践案例

上海沿海地区部分区域已成功开展了多项人工回灌试点工程，充分利用城市调蓄水、河流水、再生水等多种水源，通过科学设计的注水井网系统实施回灌操作。监测数据显示，人工回灌工程显著提升了地下水水位，促进了含水层水压的恢复，有效减缓了盐水向内陆的扩散速度，阻止了海水入侵的进一步加剧。回灌工程同时改善了周边地下水的水质状况，电导率和盐度明显下降，满足了工业和农业的用水需求。项目运行期间，区域地

下水动态趋于平稳，水资源得到了更加合理的调控和利用，有效缓解了地下水超采带来的不利影响。此外，回灌工程促进了沿海湿地和生态环境的恢复，改善了土壤盐碱化问题，提升了生态系统服务功能。相关项目中，科学的水源管理和水质控制措施确保了回灌水体的安全，有效避免了潜在的二次污染。通过动态监测和模型预测，工程不断优化注水方案，提高了注水效率和经济效益。该实践案例为上海沿海地区海水入侵防控提供了宝贵经验，也为进一步推广人工回灌技术提供了技术支撑和管理参考，推动了区域水资源管理的科学化、精细化和可持续发展。

三、人工回灌实践效果评估

（一）地下水位恢复效果

现场监测数据显示，实施人工回灌后，地下水水位表现出明显的回升趋势，平均水位提升幅度达到0.5至2米，部分重点监测区域的水位回升幅度甚至更为显著。水位的回升不仅有效缓解了因过度开采造成的地下水持续下降，还显著提升了含水层的水压，降低了盐水对淡水含水层的渗透压力，形成了稳定的水力屏障，有效阻止了盐水沿孔隙流动进入内陆深层地下水系统。水位的恢复不仅改善了地下水的流动动力学条件，还促进了淡水向盐水区的扩散逆转，有效减少了海水内侵的风险。此外，地下水位的提升有效缓解了地面沉降问题，降低了城市基础设施和农田灌溉系统的受损风险，为沿海区域的生态环境保护和社会经济发展提供了稳定且持续的水资源保障。长期水位回升还增强了地下水系统的抗逆能力，为未来可能的气候变化和用水需求变化提供了有力支撑，保障区域水资源的可持续利用。地下水位的动态稳定不仅改善了水资源的供需平衡，也为区域经济的健康发展和居民生活质量提升奠定了坚实基础。

（二）地下水水质改善

人工回灌所形成的水力屏障显著减缓了海水入侵过程中地下水盐化的进程。水质监测数据显示，回灌区域地下水盐度明显下降，电导率持续降低，钠离子、氯离子等主要盐分浓度得到有效控制，水质显著改善。随着人工回灌持续进行，地下水水质逐步趋于稳定，已达到农业灌溉和部分工业用水的质量标准，为农业生产和工业用水提供了可靠保障。同时，水质的改善有助于保护地下水生态环境，减少盐分过高对植物生长的抑制作用和土壤结构的退化，促进农业生态系统的健康和可持续发展。回灌水源的科学选择与严格管理，确保注入地下水体的水质安全，避免了潜在的二次污染，为提升地下水水质提供了坚实的技术保障。此外，水质的提升也改

善了水体的生物适宜性，促进了水生生物多样性的恢复与繁荣，推动了生态系统的整体健康发展。通过持续的水质监控与管理，有效防范了人为和自然因素可能带来的污染风险，保障了回灌系统的安全稳定运行。

（三）生态环境影响

地下水位的持续回升为沿海湿地生态环境带来了显著改善，有利于恢复和保护湿地植被，促进沿海植物群落的生长、繁殖和多样性，提升了湿地生态系统的整体稳定性和生态服务功能。地下水位提升有效缓解了土壤盐碱化程度，有助于恢复土壤肥力，改善植物根系的水分和养分供应条件，促进沿海农业用地的生态修复和可持续利用。区域生态系统功能得到增强，生态服务功能显著提升，为维护生物多样性和生态安全提供了重要保障。此外，人工回灌改善的地下水动态有助于恢复湿地水文条件，支持候鸟栖息地和水生生物的生存环境，促进区域生态系统的健康和稳定发展。通过长期系统监测发现，人工回灌对沿海生态系统的正向影响不仅具备持续性和稳定性，还显著提升了区域生态环境的自我修复能力，是实现沿海区域生态环境可持续发展的重要技术手段，有助于构建人与自然和谐共生的生态文明示范区。回灌项目的生态效益逐渐显现，为推动绿色发展理念的落实和区域生态文明建设提供了有力支撑。

四、人工回灌实施面临的问题与改进策略

（一）技术难点与管理问题

人工回灌在实际应用过程中面临多项技术难题与管理挑战。首先，水源保障不足成为制约人工回灌效果的重要因素，尤其是在用水需求高峰期或干旱季节，回灌用水的稳定供应难以保证，导致注水量不足，影响地下水位恢复和水力屏障的形成。其次，水质安全隐患突出，部分回灌水源未经充分处理或监测，可能带入有害物质或微生物，增加地下水污染风险，影响水质安全与生态健康。此外，部分区域回灌井设计不合理，注水井的数量、深度和分布未能充分结合地下水水文地质特征，导致注水效率低下，回灌效果不均匀，部分区域水位恢复缓慢，盐水入侵难以有效控制。管理层面上，缺乏科学的长效运行和维护机制，相关监管体制不完善，监测数据反馈机制不健全，使得回灌工程难以持续发挥预期效益。各部门之间协作不畅，信息共享不足，也制约了整体防控体系的效能发挥。这些问题综合影响了人工回灌技术的推广与应用，亟需通过技术创新与管理优化加以解决。

（二）优化措施与发展方向

针对上述技术与管理问题，建议加强水资源的综合

统筹管理，合理整合地表水、地下水和再生水资源，确保人工回灌用水的稳定供应和质量安全。推广先进的智能监测与调控系统，实现对地下水水位、水质和回灌效果的实时监控和动态调整，提高回灌管理的科学性和精细化水平。优化回灌井布局，结合数值模拟和地质勘察结果科学布点，合理设计注水井的深度、间距和注水量，提升回灌效率和覆盖范围。完善相关法规政策，明确责任主体，建立资金保障机制，推动回灌工程的规范化建设和规模化发展，促进技术的可持续应用。强化公众参与和多部门协作，增强社会监督与技术支持，提升综合防控能力和社会认同度。同时，应注重生态环境保护，推广绿色回灌理念，最大限度减少回灌过程中的环境负荷，促进水资源与生态环境的协调发展。未来发展方向还包括加强人工回灌技术与其他防控措施的集成应用，如生态恢复工程、水资源节约技术等，构建多层次、多手段的海水入侵综合防控体系，实现上海沿海地区海水入侵防控的长期稳定与可持续发展。

结束语

人工回灌技术作为上海沿海地区防控海水入侵的重要手段，已在地下水位恢复、盐水入侵阻控及生态修复方面取得积极成效。针对实施过程中存在的技术和管理问题，需要进一步优化水资源配置，完善管理机制和技术方案，推动人工回灌与区域水文地质条件深度融合。通过持续改进和科学管理，人工回灌将在保障沿海地区水资源安全和生态环境保护中发挥更大作用，促进上海沿海区域的可持续发展。

参考文献

- [1] 曾超峰, 陈宏波, 王硕, 等. 基坑地下水回灌模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(07): 1536-1544.
- [2] 万伟锋, 孙立群, 杜亚军, 等. 人工补水条件下内陆湖泊地表水-地下水循环演化及效应分析——以内蒙古自治区岱海为例[J]. 中国水利, 2024, (21): 69-76.
- [3] 于天飞, 刘文彬, 李旭光, 等. 卵石地层深基坑降水可回灌性分析[J]. 岩土工程技术, 2025, 39(01): 1-5.
- [4] 李旭光, 刘文彬, 于天飞, 等. 资源型回灌群井效应动态试验研究[J]. 岩土工程技术, 2024, 38(06): 750-753.
- [5] 武宇辉, 杨悦锁, 路莹, 等. 雨洪水回灌不同渗流状态下微生物迁移沉积特征[J]. 中国环境科学, 2025, 45(01): 487-499.