

# 再生水回灌对地下水水质影响研究进展\*

陈卫平\*\* 吕斯丹 王美娥 焦文涛

(中国科学院生态环境研究中心/城市与区域国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要** 再生水回灌地下水是一种缓解水资源危机的有效方式. 由于再生水中含有硝酸盐、重金属、新型污染物等污染物质, 因此在再生水地下水回灌利用时存在一定环境风险. 为推动我国再生水人工回灌地下水的发展, 促进我国再生水的安全利用, 本文分析了国内外相关文献及实践经验, 总结了不同回灌方式下再生水回灌对地下水水质的影响. 地表回灌方式下, 地下水中盐分、硝态氮都有增加趋势, 重金属污染风险较小, 新型污染物是目前的研究热点, 且其风险存在很多的不确定性, 病原微生物对地下水的污染风险较小但不能排除一些活性较强的病毒等污染地下水; 井灌方式下, 对沉积含水层中 As 的释放应给予重点关注. 最后, 提出了相关建议以减小我国再生水回灌风险.

**关键词** 再生水回灌 地下水水质 盐分 氮素 重金属 有机污染物 病原微生物

**文章编号** 1001-9332(2013)05-1253-10 **中图分类号** X8 **文献标识码** A

**Effects of reclaimed water recharge on groundwater quality: A review.** CHEN Wei-ping, LÜ Si-dan, WANG Mei-e, JIAO Wen-tao (State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(5): 1253–1262.

**Abstract:** Reclaimed water recharge to groundwater is an effective way to relieve water resource crisis. However, reclaimed water contains some pollutants such as nitrate, heavy metals, and new type contaminants, and thus, there exists definite environmental risk in the reclaimed water recharge to groundwater. To promote the development of reclaimed water recharge to groundwater and the safe use of reclaimed water in China, this paper analyzed the relevant literatures and practical experiences around the world, and summarized the effects of different reclaimed water recharge modes on the groundwater quality. Surface recharge makes the salt and nitrate contents in groundwater increased but the risk of heavy metals pollution be smaller, whereas well recharge can induce the arsenic release from sedimentary aquifers, which needs to be paid more attention to. New type contaminants are the hotspots in current researches, and their real risks are unknown. Pathogens have less pollution risks on groundwater, but some virus with strong activity can have the risks. Some suggestions were put forward to reduce the risks associated with the reclaimed water recharge to groundwater in China.

**Key words:** reclaimed water recharge; groundwater quality; salt; nitrogen; heavy metal; organic contaminant; pathogen.

随着城市的快速发展及城镇污水处理能力、技术的提高,我国城镇污水再生利用规模逐步提高,成为解决水资源短缺的重要战略之一. 依据《“十二五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》<sup>[1]</sup>,我国再生水利用规模将从 2010 年的  $1210 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  增加到 2015 年的  $3885 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,城

市污水再生水利用率从约 5% 增加到 15%. 有学者估算,如果全国有 20% 的城市污水得以再生利用,将可以解决 50% 以上的城市水资源短缺问题<sup>[2]</sup>. 再生水是一种经济弹性水源,可用于城市杂用、工业、景观、农业灌溉、地下水回灌等诸多方面. 地下水回灌是再生水利用的前沿领域,尤其在干旱、半干旱缺水地区,深度处理后的再生水,经土壤含水层处理系统可回灌地下再抽取使用,已成为解决区域水资源短缺的一种有效途径<sup>[3-5]</sup>.

\* 国家自然科学基金项目(41271501)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: wpchen@cees.ac.cn

2012-11-16 收稿,2013-02-24 接受.

美国、以色列、德国、荷兰、奥地利、日本等国在再生水回灌方面开展了大量实践工作,取得了丰富的回灌经验. 美国再生水回灌始于半个世纪以前,其中,加利福尼亚州的再生水回灌工作开展得较早,目前共有 200 多个污水回用厂,2009 年再生水回用量约为  $8.94 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中约 30% 被回灌到地下,再生水回灌地下水将成为污水回用的主要方向之一<sup>[6]</sup>. 欧洲采用地表水(特别是污水)有计划地进行地下回灌已有一个多世纪的历史,其一般不直接使用再生水,而是将再生水通过河道、渗渠、渗水池等回灌地下后再抽取使用;日本的再生水回灌主要通过河道补给地下水等方式进行<sup>[7]</sup>. 我国的上海、天津在 20 世纪 60、80 年代开始利用深井回灌地下水以控制地面沉降问题,石家庄、新乡、聊城等地也先后进行了人工引渗补给浅层地下水的试验工程,以补充调节地下水资源,实现了“冬灌夏用”<sup>[8]</sup>,但大多数是利用地表水进行回灌. 我国再生水回灌地下水的工作还处在初级阶段,据建设部 2008 年统计,我国年再生水回灌量约  $3000 \times 10^4 \text{ t}$ ,只占再生水利用总量的 1.8%<sup>[2]</sup>.

由于城市污水含有各类无机、有机和生物类的污染物,尤其是硝酸盐、重金属、新型污染物及生物类污染物目前仍无法经济有效地去除,因此,再生水用于地下水回灌时,应经过详细的环境风险评估,确定安全后方可进行. 再生水回灌具有扩大地下水存储量、防止海水入侵、减缓地面沉降等多种效益,是再生水利用的前沿方向,但在未对其风险进行系统评估之前,仍需慎重对待. 本文通过对国内外相关文献及利用经验进行总结分析,明确了不同回灌方式下再生水回灌对地下水水质的影响,以期推动我国再生水人工地下水回灌的发展,促进我国再生水的安全利用.

## 1 再生水回灌地下水的优势及存在问题

再生水回灌地下水是一种缓解水资源危机的有效方式,不仅能够增加水资源量,还是污水资源化的重要途径. 目前,人工地下水回灌主要用于以下目的<sup>[9]</sup>: 1) 储存地表水(包括洪水、再生水)以便将来使用. 再生水回灌地下水可以将处理后的二级水回灌至地下含水层,为人们生活、生产储存水资源. 2) 减少或阻止地下水位下降和地面沉降. 大量抽取地下水以满足人们生产、生活需求会造成地面沉降等问题,通过人工补给地下水可以使地下水水位稳定,减少或阻止地面沉降. 3) 形成水力屏障,防止海水

入侵. 沿海地区过量开采地下水,破坏海水和淡水之间的水力平衡,导致海水入侵地下水、污染地下水源;而将再生水回灌至地下可以形成水力屏障,能够有效防止海水入侵地下水,具有良好的经济效益和社会效益.

选择合适的场地,是再生水回灌工程成败的关键. 回灌场地选择要考虑的主要因素包括足够的再生水、合适的水文地质条件(即含水层性质)、可用于地表回灌的土地(井灌时可不考虑),以及便于施工输送再生水到达回灌场地的渠道或管道施工条件. 根据回灌场地条件,人工回灌地下水主要分为两种方式:一种是在透水性较好的土层上修建沟渠、塘等蓄水建筑物,利用水的自重进行回灌,即地表回灌,如渗水廊道、渗池、土壤含水层处理(soil aquifer treatment, SAT)等工程系统;另一种方式就是井灌,也就是通过注水井直接将再生水注入含水层,如含水层储存和回采系统、钻井等<sup>[8]</sup>. 前者是人工回灌的最简单形式,在水文地质条件简单的地方采用土壤含水层处理过程来实现地表回灌;后者适用于地表土层透水性较差,或没有大片土地用于蓄水,或回灌承压含水层,或解决寒冷地区冬季回灌越冬问题等情况. 此外,城市绿地、农业灌溉再生水时也会导致再生水通过地表渗漏进入地下水,可以将其归为地表回灌一类.

再生水回灌地下水有以下优点:地表水库中的水易受到蒸发、外界污染、藻类及其他水生生物(易产生异味、臭味)等因素的影响,通过土壤含水层处理,以及将水储存在地下可以避免这些问题,还可以去除或降低再生水中残留的有机污染物、大肠杆菌、氮和磷等的浓度,从而提高水质;可以在水量过剩时存储大量的二级生化出水,起到一定的调蓄作用,也可以为用户提供水质明显优于二级生化出水的再生水;回灌工程可显著减少建造大型水库或大型处理厂的费用,含水层的存在也能减少地下水传输管道及运河的修建.

虽然再生水是经过处理之后达到特定水质指标的水源,但由于经济和技术的原因,再生水中的污染物质并没有被完全去除,仍含有较高的全盐量、多种毒性痕量物质(重金属、有机污染物等)和病原体. 因此,再生水回灌地下含水层的过程中不仅会改变天然水流场,可能还会引起地下水污染问题<sup>[10-13]</sup>. 地表回灌和井灌两种方式地下水水质受到影响的程度及影响机理有所不同,据此国内外展开了一系列的相关研究.

## 2 再生水地表回灌对地下水水质的影响

再生水地表回灌对地下水水质影响的程度与包气带岩性和结构、地下水埋深、灌溉制度、灌区工程布置等因素有关。目前,国内外的相关研究主要针对再生水地表回灌对地下水盐分、氮素、重金属、有机污染物、病菌等指标的影响。

### 2.1 盐分

有研究表明,污水处理后通常具有较高的含盐量,即使再进一步处理,钠等一些可溶性盐分离子仍很难被有效去除<sup>[14]</sup>。因此,再生水在进行地表回灌时,易导致土壤中累积的盐分增多,而增多的盐分可随多余的水渗入至下层土壤,进一步进入地下水中,增加了地下水盐化的风险。但是,由于回灌水质、地理条件等不同,地下水盐化的程度也不同。

Johnson 等<sup>[15]</sup>通过土柱试验发现,反渗透处理水灌溉时,土柱淋溶出的总溶解固体(TDS)从  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  增加到  $240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{K}^+$  的浓度变化很小;微滤处理水灌溉时,  $\text{Mg}^{2+}$  浓度增加 74%,但由于离子交换、沉淀和溶解等反应,TDS 仅增加 5%。Rebhun<sup>[16]</sup>总结了以色列再生水入渗补给地下水时地下水含盐量的变化,发现浅层地下水中的含盐量逐渐增加,  $\text{Cl}^-$  浓度在地下水中的年增长率是  $2.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。Kass 等<sup>[17]</sup>研究以色列沿海含水层的浅层地下水水质,发现污水灌区地下水含盐量明显增加,且离污水灌区越近,地下水的含盐量越高;由于沉淀、溶解、离子交换等作用使地下水中的  $\text{Na}/\text{Cl}$  值高于  $\text{Ca}/\text{Cl}$  值。Chen 等<sup>[18]</sup>研究有 40 年污水灌溉历史的石家庄污水灌区发现,污水灌溉 40 年后,地下水硬度较高(  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  浓度约  $170 \sim 260 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  ),且呈逐年增加趋势。Candela 等<sup>[19]</sup>研究再生水灌溉 2 年的高尔夫球场发现,其地下水的电导率最后达到  $3.9 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\text{Cl}^-$  的增长率约  $400 \text{ mg} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  浓度增加 2 倍,  $\text{Na}^+$  浓度变化不大。吴文勇等<sup>[20]</sup>研究北京再生水灌区调蓄工程附近的地下水水质发现,再生水经包气带渗滤后,渗滤液的  $\text{Cl}^-$  质量浓度增加 1.5% ~ 16.1%、TDS 质量浓度增幅为 21.2% ~ 28%,但  $\text{Cl}^-$ 、TDS 与地下水背景值相接近。Lian 等<sup>[21]</sup>通过土柱模拟试验发现,再生水灌溉下,土柱出水的电导率从  $0.16 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$  增加到  $0.75 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

经过城市污水处理系统后,再生水盐度通常较饮用水高 1.5 ~ 2 倍,如北京市再生水的电导率为  $1.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ,而其饮用水的电导率为  $0.6 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ,

因此,再生水回灌地下水时会存在较高的盐度污染风险。为减少再生水中的盐分,美国加州通过了水软化与预处理装置方案,要求授权的当地机构限制或禁止硬水软化设施的使用,以减少公共污水处理系统盐分的输入<sup>[22]</sup>。同时,当再生水用于地下水回灌时,通常采取反渗透技术处理污水以便去除盐分,减少地下水盐化的风险。总之,再生水回灌地下水时应综合土柱试验、模型模拟等手段进行必要的地下水盐化风险评估。

### 2.2 氮素

当前关于再生水地表回灌对地下水中氮素影响的研究多基于实地监测与土柱模拟试验,主要分析不同地表回灌方式下(包气带厚度、干湿交替)地表入渗过程中回灌水氮浓度的变化,以及不同形态氮之间的迁移转化规律。三氮(  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  )之间的转化与土壤性质、土壤微生物、氧化还原电位等因素有密切关系。土壤质地是影响土壤氮迁移的重要因素,在迁移转化环境条件相同的情况下,随着土壤颗粒中粘粒含量的增加,土层的净化容重增加。其中,土层的反硝化反应速率的增加是硝酸根去除的决定性因素。

受到地表回灌方式、土壤性质、农业活动等因素的影响,地下水中总氮浓度变化情况并不一致。Hooda 等<sup>[23]</sup>研究发现,粘土中由于土壤通透性较差,再生水灌溉时反硝化速率显著增加,土壤氮素利用率下降,可以减少氮素渗漏对地下水的威胁。Candela 等<sup>[19]</sup>研究发现,再生水灌溉导致地下水中的氮浓度从  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  增加到  $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,且地下水中氮的增加与无机肥料的施用有很大关系。Katz 等<sup>[24]</sup>在佛罗里达州北部再生水灌溉 30 年的地区监测发现,地下水中氮浓度呈逐年增加的趋势;较深监测井中氮浓度为  $0.38 \sim 0.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,较浅的监测井中氮浓度达到  $1.3 \sim 1.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;施用化肥的灌区地下水中  $^{15}\text{N}-\text{NO}_3$  值较低,而施用人、动物粪便等农家肥的灌区地下水中  $^{15}\text{N}-\text{NO}_3$  值较高。吴文勇等<sup>[20]</sup>发现,5 m 包气带对总氮(TN)的去除率为 35.5% ~ 69.1%,12 和 18 m 包气带对 TN 的去除率分别为 97.3% 和 94.0%,此时已接近地下水背景值。尹世洋等<sup>[25]</sup>基于地统计学理论研究北京市东南郊再生水灌区地下水硝态氮的空间分布规律,发现地下水中硝态氮浓度空间变异性较大,符合对数变换的正态分布;研究区地下水中硝态氮含量随年限增加而增加;地下水中硝态氮含量的变化是包气带、含水层岩性等自身因素与施肥、地下水开采等人为因素共

同作用的结果. Lian 等<sup>[21]</sup>通过土柱模拟试验发现, 土柱出水的氮浓度与进水差别不大.

再生水地表入渗过程中不同形态氮的迁移转化规律存在明显差异. 刘凌和陆桂华<sup>[26]</sup>通过野外试验基地的研究发现, 含氮污水灌溉下  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  基本被 40 cm 以上的表土层吸附、转化, 而地下水中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度的增加较多; 利用 Monte-Carlo 法分析发现, 进入地下水的  $\text{NO}_3^--\text{N}$  最大浓度超过污灌水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度 0.76 倍的可能性为 25%, 超过 0.43 倍的可能性为 75%. Kass 等<sup>[17]</sup>研究以色列浅层地下水水质, 发现清水和污水灌溉下的  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度都较高 ( $>100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 清水灌区  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的来源主要是化肥的淋洗液, 污水灌区由于氮肥使用较少, 氮的来源可能是污水中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的硝化反应. Chen 等<sup>[18]</sup>研究中国石家庄污水灌溉 40 年的灌区地下水发现, 地下水中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的平均浓度是  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  在大多数地下水样品中未被检测到 ( $<1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ); 通过同位素技术发现, 地下水中的硝酸盐可能来自于灌溉水中有机氮的转换. 张沙沙等<sup>[27]</sup>利用室内土柱模拟试验(干湿交替地面回灌)发现, 土柱出水中的  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量明显较高; 包气带对进水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除主要为土壤对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的吸附作用和包气带中微生物的降解作用; 干期越长, 硝化过程越强烈, 回灌输入地下水的硝态氮越多.

大多数研究发现, 再生水地表回灌地下水, 一般会使地下水中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量增加,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量变化不大. 因而, 在再生水回灌地下水时, 应尽量利用土壤的过滤和净化功能, 降低  $\text{NO}_3^--\text{N}$  向地下水迁移. 同时, 经过常规二级处理的再生水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量较高, 通常在  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以上, 依据风险评估的结果, 在必要时需增加脱氮处理(三级处理)工艺方能进行地下水回灌. 为降低相关风险, 美国加州规定再生水用于回灌时必须采用三级处理, 经三级处理后再生水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量可降低至  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下.

### 2.3 重金属

重金属在土壤中的沉淀和溶解反应对重金属向下的迁移具有明显作用. 由于重金属在土壤中移动性差, 再生水灌溉下多数重金属积累于 20 ~ 40 cm 土层<sup>[28]</sup>, 因此关于再生水灌溉下重金属对地下水水质影响的研究不多. 但这些重金属一旦没有吸附于表层土壤, 就有可能从植物根际淋洗到地下水, 造成地下水污染.

Johnson 等<sup>[15]</sup>通过土柱模拟试验发现, 微滤处

理水(MF)灌溉下淋溶出水中 Ba 浓度与灌溉水差别不大, 但反渗透处理水(RO)的灌溉使 Ba 浓度高于灌溉水的 3 倍; As 浓度在 MF 淋溶出水中先增加再减少, 而在 RO 的淋溶出水中一直增加, 最后高于灌溉水浓度 2 ~ 10 倍; 监测到的 B、Cr、Pb 和 Se 量都很小. 杨军等<sup>[29]</sup>通过室内土柱试验发现, 再生水灌溉下 As、Cu、Pb 主要在土壤表层累积, 向下迁移的趋势不明显; Cd 向下层迁移的趋势相对较强, 且随着灌溉时间的增加, 下移趋势增加. Xu 等<sup>[30]</sup>在加利福尼亚州再生水灌溉 8 年灌区的研究发现, 土壤中重金属有明显的积累并在剖面上进行了重新分布; 由于淋洗作用, 重金属下移趋势比较明显, 有可能污染地下水. 杜娟等<sup>[31]</sup>通过土柱模拟再生水灌溉种植小麦、玉米, 发现 As、Cd、Cu 和 Zn 在 0 ~ 10 cm 土层中的增加量分别占其总输入量的 93%、90%、92%、90%, 表层累积现象明显; 植物根系增强了重金属向下迁移的趋势, 且种植玉米条件下重金属向下迁移的趋势比种植小麦更明显. 徐敏等<sup>[32]</sup>在河南郑州回灌试验场监测地下水中重金属含量变化时发现, 7.5 ~ 20.0 m 深度内重金属浓度有较大变化, Fe、Sr 含量有所减小, Mn、Pb、Se、Zn 含量有所增大; 地下水中重金属含量变化与再生水、土壤和地下水中重金属含量有关.

随着工业污水处理能力的加强, 以及工业污水与生活污水的分开处理, 近些年再生水中重金属含量明显降低, 通常与地表水没有明显差异, 同时考虑到土壤的强大吸附能力, 因此再生水回灌造成地下水重金属污染的风险很低. 但再生水含有较高的盐分、溶解性有机物以及其他有利于重金属迁移的物质, 在一些有利条件下, 个别重金属元素可到达地下水并引起污染. 作为影响再生水安全回灌的一个不确定因素, 应针对再生水回灌下典型重金属元素的迁移能力进行科学评估, 确保地下水安全.

### 2.4 有机污染物

城市污水经过污水处理厂二级处理和深度处理后仍含有一部分溶解性有机质(DOM), 溶解性有机质随着再生水地表回灌, 有可能进入地下水而污染地下水. 因此, DOM 一直是人工地下水回灌研究的热点和重点. 这些有机污染物在土壤、非饱和带、含水层中的迁移转化过程主要包括有机质、粘土矿物的吸附作用、离子交换反应、微生物降解等. 污染物性质、经过非饱和带的时间、地下水滞留时间、氧化还原条件、污染物总负荷等因素对有机污染物迁移转化过程起着决定性作用, 影响有机污染物在地下

水中的浓度变化。

Westerhoff 和 Pinney<sup>[33]</sup>通过实验室模拟土壤含水层处理系统(SAT),发现 0~1 m 土层中回灌水溶解性有机碳(DOC)浓度能很快减少;当土壤有机质含量降低时,回灌水 DOC 的去除率从 39% 增加到 70%,可能是由于当土壤有机质含量较高时土壤有机质的淋溶较强;低分子质量的 DOC 能被大量去除,系统出水中芳香烃、高分子质量及类似于腐殖质的有机物含量较高。Quanru 等<sup>[34]</sup>研究美国亚利桑那州 Tucson 的 SAT 系统发现,DOC 的去除主要发生在渗滤池底部以下 3 m 范围内,去除的 DOC 组分为亲水性强、易生物降解的溶解有机物。Rauch-Williams 和 Drewes<sup>[35]</sup>通过试验模拟发现,SAT 系统对于可生物降解有机碳(BOC)的去除主要发生在 30 cm 土壤深度范围内(土壤生物膜含量最高的土层),可见生物降解是 DOM 的主要去除机制。赵庆良等<sup>[36]</sup>通过土柱模拟再生水回灌试验发现,土柱对总有机碳(TOC)的去除率达到 38%~51%,且随着系统运行时间的增加,TOC 去除率逐渐升高,这是因为随着时间的增加,土柱中微生物活性逐渐增强;TOC 的去除主要发生在 0~0.5 m 土壤中,土柱出水中的有机物主要是难降解的有机物。刘巍等<sup>[37]</sup>通过土柱模拟再生水回灌,发现系统稳定时溶解性有机碳平均去除率为 37.2%,0~0.5 m 土层对 DOC 的去除最大;系统能降低再生水回灌地下水的有机物污染风险,但未被去除的 DOM 具有更高的氯反应活性。Hübner 等<sup>[38]</sup>通过室内模拟试验发现,再生水未经臭氧处理时,回灌后回灌水中 DOC 浓度从 7.2 mg·L<sup>-1</sup>减少到 4.7 mg·L<sup>-1</sup>,但当再生水先经过臭氧处理,回灌后回灌水中 DOC 浓度为 3.7 mg·L<sup>-1</sup>;温度越低,DOC 去除效果越差。

针对再生水回灌溶解性有机质对地下水的的影响,最近几年,阻燃剂、塑化剂、医药品、个人护理产品(内分泌干扰物)等新型有机污染物的影响颇受关注。

Haruta 等<sup>[39]</sup>通过 Hydrus-1D 模型模拟不同灌溉措施和土壤性质下二甲基亚硝胺(NDMA)的淋溶潜力,发现常规条件下由于微生物降解及挥发作用再生水灌溉 NDMA 对地下水的污染风险较小,但当土壤的水力传导度较高、吸附常数较低,灌溉强度较高时,NDMA 对地下水的污染风险将会增加。Katz 等<sup>[24]</sup>在佛罗里达州再生水灌区的地下水中监测到多种多环芳烃类有机污染物,其中,四氯乙烯浓度为 0.2 μg·L<sup>-1</sup>、三氯乙烯浓度为 0.01 μg·L<sup>-1</sup>、氯仿

浓度为 0.2 μg·L<sup>-1</sup>;地下水中还监测到药品类有机污染物,其中,立痛定浓度为 0.0015~0.002 μg·L<sup>-1</sup>,苯海拉明浓度为 0.004 μg·L<sup>-1</sup>,咖啡因浓度为 0.013 μg·L<sup>-1</sup>。Mahjoub 等<sup>[40]</sup>研究发现,再生水中含有的雌激素受体、芳香烃受体、孕烷 X 受体等内分泌干扰物在再生水回灌过程中并不能被有效去除。Laws 等<sup>[41]</sup>监测再生水回灌区的地下水发现,17 种新型污染物在地下水中能被监测出来,污染物浓度都低于灌溉水,且灌溉 60 d 后有 11 种目标污染物被降解了 80%,可见土壤含水层处理系统对再生水中的 TOC 和新型有机污染物有较好的去除作用,但像磺胺甲基异恶唑、氨甲丙二酯等物质仍然较难被去除(去除率 15%~20%)。Estévez 等<sup>[42]</sup>研究再生水灌溉 30 多年的高尔夫球场发现,在其地下水中能监测到 84 种医药品、杀虫剂、阻燃剂等新型污染物及优先物质;再生水中的污染物种类明显多于地下水,由于农业活动使地下水中的杀虫剂种类多于再生水;地下水中所有物质的浓度都小于 50 ng·L<sup>-1</sup>。Hoppe-Jones 等<sup>[43]</sup>通过土柱模拟再生水回灌地下水系统,发现再生水中可溶解性有机物含量较低时,微生物适应前,痕量有机物的降解率只有 15%,适应之后降解率可多于 80%,当再生水中可溶解性有机物含量较高时,痕量有机物降解率为 25%~83%;一般再生水中可溶解性有机物在 1.2~2.5 mg·L<sup>-1</sup>时,可促进痕量有机污染物的降解。

再生水回灌地下水时,新型污染物对地下水的污染风险与其土壤中吸附-解吸过程、降解过程、挥发过程等环境行为密不可分,并且受再生水水质、土壤质地和回灌方式的影响。尽管已有不少有关地下水中新型污染物的报道,但浓度都较低,同时由于缺乏毒性效应相关数据,其真实风险还难以评估。考虑到这些污染物具有干扰内分泌、致癌等效应,以及通常的污水处理不能有效去除这些污染物,美国加州在进行再生水回灌时,要求增加臭氧氧化等高级氧化工艺,以有效降低相关风险。

## 2.5 微生物

除盐分、氮素、重金属、有机污染物外,再生水中的病原微生物是否会污染到地下含水层也是一些学者所关心的问题。地表回灌时,再生水以开放形式蓄积在河道、沟渠或坑塘中,即便在污水处理过程中进行了消毒处理,也很容易导致病原微生物的再度滋生,因此仍有可能污染地下含水层。为防止这一问题出现,很多国家明确规定了回灌水在含水层中的停

留时间. 如我国采用地表回灌的方式进行回灌, 回灌水在被抽取利用前, 应在地下停留 6 个月以上. 美国加利福尼亚州早期再生水地下回灌水质标准规定, 采用地表回灌方式回用前须在地下停留 6 个月以上, 抽水点与注入点间的水平距离至少为 150 m<sup>[44]</sup>.

目前, 大多数研究集中在对地下水中大肠杆菌的监测, 结果发现, 地下水受到大肠杆菌污染的风险较小. Sheikh 等<sup>[45]</sup>研究发现, 两次灌溉之间土壤表面变干时, 大肠杆菌会很快死亡, 超过 90% 的大肠杆菌会保留在 0 ~ 2.5 cm 土层之内, 不会渗透到 30 cm 以下深度. Yanko 等<sup>[46]</sup>在再生水回灌区的地下水中监测到大肠杆菌噬菌体的种类随季节而发生一定规律的变化, 但这种时间变化与再生水回灌系统没有明显关系, 表明当地地下水还受到其他污染源的影响. Candela 等<sup>[19]</sup>发现, 再生水灌溉高尔夫球场后, 土壤中微生物数量的变化不大, 在土壤剖面上的分布也没多大变化, 大肠杆菌只是偶尔在 5 ~ 10 cm 土层中被检测到, 在更深层的土壤中并未检测出大肠杆菌. Katz 等<sup>[24]</sup>在佛罗里达州再生水灌区监测地下水中的微生物, 发现水中微生物的总量较小, 且未发现肠道菌. Lian 等<sup>[21]</sup>通过土柱模拟试验发现, 再生水灌溉下土柱出水中并未监测到大肠杆菌, 大肠杆菌浓度在土层中的分布随土壤深度的增加而减少.

再生水中含有多种病原微生物(包括细菌、原生动物类、寄生虫和病毒等), 其中, 有些病原微生物的存活能力较强, 在土壤层中并不能完全去除, 能够随着再生水回灌进入地下水, 进而影响地下水水质. 有研究发现, 再生水中的病原微生物对地下水水质的影响与再生水中微生物浓度、土壤温度、土壤类型、微生物种类等有关. Pang 等<sup>[47]</sup>通过 HYDRUS-1D 模型模拟大肠杆菌和沙门氏菌噬菌体在不同类型土壤中的迁移规律, 发现水铝英石土壤中的微生物能被 100% 去除, 浮石土中可去除 16 ~ 18 log · m<sup>-1</sup> (log 指土柱出水中细菌浓度的最大值与灌溉水中细菌浓度两者比值的 log<sub>10</sub> 值), 去除率最低的是在粘土中 (0.1 ~ 2 log · m<sup>-1</sup>), 大多数土壤中的去除率为 2 ~ 3 log · m<sup>-1</sup>, 细沙壤土中的大肠杆菌去除率为 9 ~ 10 log · m<sup>-1</sup>. Gargiulo 等<sup>[48]</sup>通过土柱模拟试验研究了疏水性 (*Rhodococcus rhodochrous*) 和亲水性 (*Deinococcus radiodurans*) 细菌在不同水饱和度和土壤中的迁移规律, 发现随着水饱和度的增加, 土柱出水中的细菌含量逐渐增加, 并且在同一水饱和度下, 出水中亲水细菌的浓度始终高于疏水细菌.

Levantesi 等<sup>[49]</sup>监测了欧洲再生水灌区下的地下水, 发现在所有样品中的贾地鞭毛虫和隐孢子虫出现频率分别为 43.2%、36.7%, 沙门菌、蠕虫卵出现频率较低 (16.3%、12.5%), 空肠弯曲菌细胞只有 2%; 病原体检测到的数量都较小, 回灌系统中土壤在一定程度上能改善再生水水质. Page 等<sup>[50]</sup>评估了墨西哥、澳大利亚、南非、比利时 4 个再生水回灌地下水处理工程对病原微生物的去除效果, 发现再生水中病原微生物数量以及回灌水在含水层中的停留时间是影响病原微生物污染地下水的主要因素.

虽然再生水回灌地下水时大肠杆菌基本能在土层中被去除, 对地下水的污染风险较小, 但仍需对一些存活能力和迁移能力强的病原微生物给予重点关注. 在回灌地下水时应严格限制回灌水中病原微生物含量, 此外还需根据具体的回灌水质、回灌区土壤性质等条件进行病原微生物的风险评估.

### 3 再生水井灌补给地下水对地下水水质的影响

地表回灌对再生水回灌前处理要求较低, 常用的技术有混凝、吸附、高级氧化、深度脱氮等; 井灌是利用注水井直接将再生水注入地下含水层, 对预处理要求较高, 常用的预处理技术有反渗透、纳滤与高级氧化或活性炭的联用等. 由于发展中国家的经济水平与发达国家存在相当的距离, 很难满足井灌对再生水深度处理的要求, 因此在发展中国家大多利用低技术要求、低花费的地表回灌方式进行再生水回灌地下水. 关于再生水井灌补给地下水对地下水水质的影响研究主要集中在发达国家, 且由于井灌回灌水的本身水质要求较高, 因此对地下水水质影响的相关研究不是很多.

目前, 使用较普遍的直接注入含水层的系统为含水层储存与回采系统 (aquifer storage and recovery, ASR), 在丰水季节将水通过注水井储存到合适的含水层中, 当需要的时候, 再通过该井将水抽取出来以供使用. 该系统通过对含水层进行周期性的采补, 有效实现了水资源的地下调蓄功能, 这是 ASR 技术的一个本质特征.

Pavelic 等<sup>[51]</sup>调查澳大利亚南部的 ASR 系统发现, 含水层中三卤甲烷 (THMs) 的半衰期从 <1 d 到 65 d, 其中, 三氯甲烷持续的时间最长, 三溴甲烷持续的时间最短; 卤乙酸 (HAAs) 的降解一般较快 (<1 d); THMs 的衰减与氧化还原条件有很大关系. Vanderzalm 等<sup>[52]</sup>使用有机碳含量为 10 ~ 20 mg · L<sup>-1</sup> 的再生水注入含水层 (ASR 系统), 发现

注入水中 20% ~ 24% 的溶解性有机碳被水中的  $O_2$  和  $NO_3$  氧化, DOC 去除率最大的区域在注水井的 0 ~ 4 m; 由于最后注入水中仍有 DOC 残留, 使地下水中 DOC 浓度有所增加; 调节注水井中的氧化还原条件可以改善回灌水质. Li 等<sup>[53]</sup> 根据相关资料, 在佩思(澳大利亚)设计了再生水深层及浅层 ASR 系统, 发现三氯乙烯(TCE)污染区域在深层注水井中 5 年之后大约迁移 90 ~ 135 m, 在浅层注水井中 2 年能迁移 320 m; 通过含水层介质去除的大肠杆菌数量比 TCE 多, 大肠杆菌在深层注水井中 2 年后迁移 14 ~ 15 m, 在浅层注水井中 2 年后迁移 35 m. Pavelic 等<sup>[54]</sup> 通过研究 ASR 系统发现, 到达地下水的注入水浊度低于初始值, 且到达地下水时 TOC 和 DOC 被去除 3 ~ 4  $mg \cdot L^{-1}$ , 方解石的溶解作用导致  $Ca^{2+}$  浓度高于初始值 30  $mg \cdot L^{-1}$ ; 注水井在一定程度上的堵塞对注入水水质有改良作用.

回灌水如地表水、雨水、再生水等中的氧气随着注水井进入深层含水层, 通过对含水层介质的氧化能导致痕量元素的释放, 如 As 等. 目前, 许多研究结果表明, 沉积含水层能释放 As, 这是一个普遍存在的饮用水安全问题<sup>[55-56]</sup>, 因此, 再生水通过井灌回灌地下水时, 含水层中 As 的释放是需要重点注意的问题. Price 和 Pichler<sup>[57]</sup> 研究佛罗里达州的萨旺尼灰岩含水层介质发现, 含水层介质中 As 浓度 (100 ~ 11200  $mg \cdot kg^{-1}$ ) 较低且主要集中在黄铁矿中; 但通过 ASR 系统地下水中的 As 浓度还是有所增加, ASR 系统出水中 As 浓度增加到 130  $\mu g \cdot L^{-1}$ . Jones 和 Pichler<sup>[58]</sup> 发现, 在 ASR 系统中通过改变含水层的氧化还原条件能改变黄铁石的稳定性, 当黄铁石的稳定性增加后, ASR 系统出水中 As 浓度不超过 0.036  $\mu g \cdot L^{-1}$ . Vanderzalm 等<sup>[59]</sup> 研究再生水通过井灌回灌地下水发现, 达到地下水的回灌水中 As 浓度比初始值多 14 ~ 25  $\mu g \cdot L^{-1}$ , 说明再生水回灌地下水时上层含水层中的 As 能够被释放进入回灌水.

目前, 国外针对井灌的研究主要集中在 3 方面: 对地下水水质的影响, 注水井的堵塞问题, 土层变形的风险问题. 在我国, 随着水资源开发利用程度的提高, 为了解决中深层含水层的可持续利用、提高水资源利用率、深井回灌等方面的问题, 结合国外已有研究加强井灌对地下水水质影响的相关研究具有重要意义.

#### 4 研究展望

随着经济、社会的迅速发展, 工业、农业、生活用

水的大量增加, 再生水回灌地下水作为一种储存与保护水资源的有效途径, 在世界各地得到了广泛应用. 但是, 由于再生水中盐分、氮素、重金属、有机物、微生物等的残留, 需要对再生水回灌地下水水质的变化进行相关研究.

通过地表回灌方式进行地下水回灌时, 可导致地下水盐分和硝态氮增加, 增加的程度依赖于灌溉水质及地理环境等因素. 再生水回灌下重金属主要集中在土壤表层, 污染地下水的风险较小, 但不同重金属的风险大小不一样. 再生水中溶解性有机污染物对地下水的影响是当前的研究热点, 土壤层对溶解性有机污染物有一定的去除效果, 但其效果受到污染物种类、土壤微生物、温度等因素的影响, 如何利用土壤层去除更多的溶解性有机污染物是今后的研究热点. 对地下水中几种新型污染物的监测研究发现, 大多数灌区地下水中能监测出这些新型污染物, 但一般浓度较小. 针对于有机物的研究, 主要集中在再生水地表回灌微量有机污染物经过土壤、非饱和带能迁移的范围, 评价通过淋洗有机污染物进入地下水的潜力. 地下水中大肠杆菌一般很少被监测到, 监测到的其他病原微生物的数量也很小, 通常在再生水地表回灌地下水条件下, 再生水中的病原微生物对地下水水质的影响不大; 但是, 通过土柱试验发现, 有些病原微生物仍可能迁移进入地下水, 因此, 再生水回灌时除了常规大肠杆菌监测外, 有必要加强对活性较强的病原微生物进行监测.

通过井灌方式进行地下水回灌时, 对回灌水水质要求较高且需经过特定的风险评估, 因而对地下水水质的影响有限, 但对井灌时沉积含水层 As 的释放应予以关注, 其可能会影响地下水水质.

为保障再生水安全利用、减小再生水回灌风险, 今后需加强以下几方面的研究:

1) 增强对地表入渗过程中污染物迁移转化规律的研究. 地表回灌对于再生水水质改善有明显效果, 起作用的关键部位通常位于地表入渗到含水层之间几米到几十米的范围, 尤其是接近地表的堵塞层或淤积层. 再生水一旦进入含水层, 通过含水层净化去除污染组分的贡献相对较小. 目前国内的相关研究还缺乏系统性, 应耦合实验室模拟、野外调查研究、模型模拟研究、同位素示踪技术等, 揭示再生水回灌下典型污染物的迁移转化规律及其影响因素(水质、土壤性质、包气带厚度等), 为再生水安全回灌提供科学支撑.

2) 加强定位跟踪研究. 以往的研究多基于实验

室土柱研究以及再生水灌溉对地下水水质的影响,与再生水回灌地下水项目有一定差距,同时,一些污染物形成风险需要较长的时期才能表现出来。因而,需要选取特定回灌项目开展长期定位跟踪研究,为再生水安全回灌提供基础数据。此外,在项目缺乏时,也可以开展仿真模型和模型评价研究,以弥补相关数据的不足。

3)完善相关标准。再生水回灌地下水是再生水利用的前沿方向,也是我国华北和沿海地区防止地面沉降和海水入侵的重要途径。我国于2005年颁布了《城市污水再生利用-地下水回灌水质标准》(GB/T19772—2005)<sup>[60]</sup>,对促进再生水地下水安全回灌具有重要的指导作用。随着科学研究的进展以及检测技术的发展(新污染物的发现),该标准仍有进一步完善的空间。同时,参照美国加州的相关经验,针对再生水处理技术而非水质颁布相关标准,可更有效地保障再生水回用安全。

#### 参考文献

- [1] General Office of the State Council of the People's Republic of China (中华人民共和国国务院办公厅). Circular of the General Office of the State Council on Printing and Issuing the National Plan for Construction of Facilities for Urban Sewage Treatment and Recycling During the Period of the Twelfth Five-year Plan [EB/OL]. (2012-04-19) [2012-10-09]. [http://www.gov.cn/zw/gk/2012-05/04/content\\_2129670.htm](http://www.gov.cn/zw/gk/2012-05/04/content_2129670.htm) (in Chinese)
- [2] Yi LL, Jiao WT, Chen XN, *et al.* An overview of reclaimed water reuse in China. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**: 1585–1593
- [3] Shelef G, Azov Y. The coming era of intensive wastewater reuse in the mediterranean region. *Water Science and Technology*, 1996, **33**: 115–125
- [4] Kanarek A, Michail M. Groundwater recharge with municipal effluent; Dan region reclamation project, Israel. *Water Science and Technology*, 1996, **34**: 227–233
- [5] Ernst M, Jekel M. Advanced treatment combination for groundwater recharge of municipal wastewater by nanofiltration and ozonation. *Water Science and Technology*, 1999, **40**: 277–284
- [6] Department of Water Resources, State of California. California Water Plan Update 2009 [EB/OL]. (2009-10-12) [2012-10-10]. <http://www.waterplan.water.ca.gov/cwpu2009/index.cfm>
- [7] Guo J (郭 瑾), Wang S-Y (王淑莹). Practical application and development of surface and underground water sources recharged with reclaimed water. *China Water & Wastewater* (中国给水排水), 2007, **26**(6): 10–14 (in Chinese)
- [8] Li H-T (李恒太), Shi P (石 萍), Wu H-X (武海霞). Artificial recharge technology of groundwater. *Natural Resource Economics of China* (中国国土资源经济), 2008(3): 41–42 (in Chinese)
- [9] Asano T, Cotruvo JA. Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: Health and regulatory considerations. *Water Research*, 2004, **38**: 1941–1951
- [10] Huang G-H (黄冠华). The safety use of treated waste water for irrigation in agriculture. *Review of China Agricultural Science and Technology* (中国农业科技导报), 2007, **9**(1): 26–35 (in Chinese)
- [11] He J-T (何江涛), Shen Z-L (沈照理). Trends of reclaimed water infiltration recharge. *Chinese Journal of Nature* (自然杂志), 2010, **32**(6): 348–352 (in Chinese)
- [12] Pei L (裴 亮), Yan M (颜 明), Chen Y-L (陈永莲), *et al.* Research progress on environmental and ecological effects of reclaimed water irrigation. *Journal of Water Resources and Water Engineering* (水资源与水工程学报), 2012, **23**(3): 15–21 (in Chinese)
- [13] Chen W-P (陈卫平), Zhang W-L (张炜铃), Pan N (潘 能), *et al.* Ecological risks of reclaimed water irrigation: A review. *Environmental Science* (环境科学), 2012, **33**(12): 346–356 (in Chinese)
- [14] Toze S. Reuse of effluent water: Benefits and risk. *Agricultural Water Management*, 2006, **80**: 147–159
- [15] Johnson JS, Baker LA, Fox P. Geochemical transformations during artificial groundwater recharge: Soil-water interactions of inorganic constituents. *Water Research*, 1999, **33**: 196–206
- [16] Rebhun M. Desalination of reclaimed wastewater to prevent salinization of soils and groundwater. *Desalination*, 2004, **160**: 143–149
- [17] Kass A, Gavrieli I, Yechieli Y, *et al.* The impact of freshwater and wastewater irrigation on the chemistry of shallow groundwater: A case study from the Israeli Coastal Aquifer. *Journal of Hydrology*, 2005, **300**: 314–331
- [18] Chen JY, Tang CY, Yu JJ. Use of  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  and  $^{15}\text{N}$  to identify nitrate contamination of groundwater in a wastewater irrigated field near the city of Shijiazhuang, China. *Journal of Hydrology*, 2006, **326**: 367–378
- [19] Candela L, Fabregat S, Josa A, *et al.* Assessment of soil and groundwater impacts by treated urban wastewater reuse. A case study: Application in a golf course (Girona, Spain). *Science of the Total Environment*, 2007, **374**: 26–35
- [20] Wu W-Y (吴文勇), Liu H-L (刘洪禄), Chen H-H (陈鸿汉), *et al.* Effect of regulation and storage engineering on groundwater salinity in reclaimed water irrigation district. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2009, **25**(12): 22–25 (in Chinese)
- [21] Lian JJ, Luo ZJ, Jin MG. Transport and fate of bacteria in SAT system recharged with recycling water. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, **76**: 98–101
- [22] Chen W-P (陈卫平). Reclaimed water reuse experi-

- ences in California and hints to China. *Chinese Journal of Environmental Engineering* (环境工程学报), 2011, **5**(5): 961–966 (in Chinese)
- [23] Hooda AK, Weston CJ, Chen D. Denitrification in effluent-irrigated clay soil under *Eucalyptus globulus* plantation in south-eastern Australia. *Forest Ecology and Management*, 2003, **179**: 547–558
- [24] Katz BG, Griffin DW, Davis JH. Groundwater quality impacts from the land application of treated municipal wastewater in a large karstic spring basin: Chemical and microbiological indicators. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**: 2872–2886
- [25] Yin S-Y (尹世洋), Wu W-Y (吴文勇), Liu H-L (刘洪禄), *et al.* Spatial variability of groundwater nitrate-nitrogen and cause analysis of its pollution for irrigation area with reclaimed water. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2012, **28**(18): 200–208 (in Chinese)
- [26] Liu L (刘 凌), Lu G-H (陆桂华). Nitrogen wastewater irrigation study and its contamination risk analysis. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2002, **13**(3): 313–320 (in Chinese)
- [27] Zhang S-S (张沙沙), Jin M-G (靳孟贵), Sun Q (孙强), *et al.* Experiment on the transformation of nitrogen in variably saturated soil column under alternative leaching and drying conditions. *Earth Science Frontiers* (地学前缘), 2010, **17**(6): 52–58 (in Chinese)
- [28] Li Z-Y (李中阳), Fan X-Y (樊向阳), Qi X-B (齐学斌), *et al.* The impact of renewable wastewater on the distribution of heavy metals in plants, soil and underground water. *China Rural Water and Hydropower* (中国农村水利水电), 2012(7): 5–8 (in Chinese)
- [29] Yang J (杨 军), Zheng Y-M (郑袁明), Chen T-B (陈同斌), *et al.* Leaching of heavy metals in soil column under irrigation reclaimed water: A simulation experiment. *Geographical Research* (地理研究), 2006, **25**(3): 449–456 (in Chinese)
- [30] Xu J, Wu LS, Chang AC, *et al.* Impact of long-term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: A preliminary assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **183**: 780–786
- [31] Du J (杜 娟), Fan Y (范 瑜), Qian X (钱新). Migration of heavy metals in the process of recycled water irrigation. *Environmental Pollution & Control* (环境污染与防治), 2011, **33**(7): 74–77 (in Chinese)
- [32] Xu M (徐 敏), Liang X (梁 杏), Liu S-H (刘绍华). Characteristics of heavy metal pollution in groundwater by reclaimed water recharging. *Yellow River* (人民黄河), 2012, **34**(6): 89–91 (in Chinese)
- [33] Westerhoff P, Pinney M. Dissolved organic carbon transformations during laboratory-scale groundwater recharge using lagoon-treated wastewater. *Waste Management*, 2000, **20**: 75–83
- [34] Quanru DDM, Hafer J, Kappiscak MM, *et al.* Fate of organics during soil aquifer treatment: Sustainability of removals in the field. *Water Research*, 2003, **37**: 3401–3411
- [35] Rauch-Williams T, Drewes JE. Using soil biomass as an indicator for the biological removal of effluent-derived organic carbon during soil infiltration. *Water Research*, 2006, **40**: 961–968
- [36] Zhao Q-L (赵庆良), Wang L-N (王丽娜), Xue S (薛 爽), *et al.* Migration and removal of organic matters in reclaimed wastewater during groundwater recharge. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(7): 1661–1664 (in Chinese)
- [37] Liu W (刘 巍), Liu X (刘 翔), Xin J (辛 佳). Removal of dissolved organic matter during groundwater recharges using reclaimed water. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2009, **28**(11): 2354–2358 (in Chinese)
- [38] Hübner U, Mieke U, Jekel M. Optimized removal of dissolved organic carbon and trace organic contaminants during combined ozonation and artificial groundwater recharge. *Water Research*, 2012, **46**: 6059–6068
- [39] Haruta S, Chen WP, Gan J, *et al.* Leaching risk of N-nitrosodimethylamine (NDMA) in soil receiving reclaimed wastewater. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, **69**: 374–380
- [40] Mahjoub O, Leclercq M, Bachelot M, *et al.* Estrogen, aryl hydrocarbon and pregnane X receptors activities in reclaimed water and irrigated soils in Oued Souhil area (Nabeul, Tunisia). *Desalination*, 2009, **246**: 425–434
- [41] Laws BV, Dickenson ER, Johnson TA, *et al.* Attenuation of contaminants of emerging concern during surface-spreading aquifer recharge. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**: 1087–1094
- [42] Estévez E, Cabrera-Mdel C, Molina-Díaz A, *et al.* Screening of emerging contaminants and priority substances (2008/105/EC) in reclaimed water for irrigation and groundwater in a volcanic aquifer. *Science of the Total Environment*, 2012, **433**: 538–546
- [43] Hoppe-Jones C, Dickenson ER, Drewes JE. The role of microbial adaptation and biodegradable dissolved organic carbon on the attenuation of trace organic chemicals during groundwater recharge. *Science of the Total Environment*, 2012, **437**: 137–144
- [44] He X-H (何星海), Ma S-H (马世豪). Study on the guideline for groundwater recharge with reclaimed water. *Environmental Science* (环境科学), 2004, **25**(5): 61–64 (in Chinese)
- [45] Sheikh B, Cooper RC, Israel KE. Hygienic evaluation of reclaimed water used to irrigate food crops: A case study. *Water Science and Technology*, 1999, **40**: 261–267
- [46] Yanko WA, Jackson JL, Williams FP, *et al.* An unexpected temporal pattern of coliphage isolation in groundwaters sampled from wells at varied distances from reclaimed water recharge sites. *Water Research*, **33**: 53–64
- [47] Pang LP, McLeod M, Aislabie J, *et al.* Modeling transport of microbes in ten undisturbed soils under effluent

- irrigation. *Vadose Zone Journal*, 2008, **7**: 97–111
- [48] Gargiulo G, Bradford SA, Simunek J, *et al.* Bacteria transport and deposition under unsaturated flow conditions: The role of water content and bacteria surface hydrophobicity. *Vadose Zone Journal*, 2008, **7**: 406–419
- [49] Levantesi C, La Mantia R, Masciopinto C, *et al.* Quantification of pathogenic microorganisms and microbial indicators in three wastewater reclamation and managed aquifer recharge facilities in Europe. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**: 4923–4930
- [50] Page D, Dillon P, Toze S, *et al.* Valuing the subsurface pathogen treatment barrier in water recycling via aquifers for drinking supplies. *Water Research*, 2010, **44**: 1841–1852
- [51] Pavelic P, Nicholson BC, Dillon PJ, *et al.* Fate of disinfection by-products in groundwater during aquifer storage and recovery with reclaimed water. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2005, **77**: 351–373
- [52] Vanderzalm JL, La Salle CLG, Dillon PJ. Fate of organic matter during aquifer storage and recovery (ASR) of reclaimed water in a carbonate aquifer. *Applied Geochemistry*, 2006, **21**: 1204–1215
- [53] Li Q, Harris B, Aydogan C, *et al.* Feasibility of recharging reclaimed wastewater to the coastal aquifers of Perth, Western Australia. *Process Safety and Environmental Protection*, 2006, **84**: 237–246
- [54] Pavelic P, Dillon PJ, Barry KE, *et al.* Water quality effects on clogging rates during reclaimed water ASR in a carbonate aquifer. *Journal of Hydrology*, 2007, **334**: 1–16
- [55] Bhattacharya P, Welch AH, Ahmed KM, *et al.* Arsenic in groundwater of sedimentary aquifers. *Applied Geochemistry*, 2004, **19**: 163–167
- [56] Duker AA, Carranza EJM, Hale M. Arsenic geochemistry and health. *Environment International*, 2005, **31**: 631–641
- [57] Price RE, Pichler T. Abundance and mineralogical association of arsenic in the Suwannee Limestone (Florida): Implications for arsenic release during water-rock interaction. *Chemical Geology*, 2006, **228**: 44–56
- [58] Jones GW, Pichler T. Relationship between pyrite stability and arsenic mobility during aquifer storage and recovery in southwest central Florida. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**: 723–730
- [59] Vanderzalm JL, Dillon PJ, Barry KE, *et al.* Arsenic mobility and impact on recovered water quality during aquifer storage and recovery using reclaimed water in a carbonate aquifer. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**: 1946–1955
- [60] Standardization Administration of the People's Republic of China (中国国家标准化管理委员会), General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局). The Reuse of Urban Recycling Water-Water Quality Standard for Groundwater Recharge (GB/T 19772–2005) [EB/OL]. (2005-05-25) [2012-10-15]. <http://www.docin.com/p-573789108.html> (in Chinese)

---

**作者简介** 陈卫平,男,1976年生,研究员,博士,博士生导师。主要从事再生水利用生态环境风险研究。E-mail: wpchen@rcees.ac.cn

**责任编辑** 杨 弘

---