

# 城市污水再生利用安全保障体系与技术需求分析

文 / 胡洪营 吴乾元 黄晶晶 黄璞 赵欣 (清华大学环境科学与工程系 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室 北京 100084)

我国是一个严重缺水的国家,水资源短缺已经成为制约社会与经济可持续发展的重要因素之一。与雨水等其他非常规水资源相比,城市污水水量稳定,基本不受季节、雨旱季等的影响,是一种水质变化幅度小,可稳定供应的非常规水源,其再生利用是解决水资源短缺问题的有效途径。再生水应该与地表水、地下水、雨水等共同纳入水资源综合调配和管理体系,需要采取有效措施,促进再生水的安全、科学、高效利用。但是,我国在污水再生利用方面还面临着许多亟待解决的问题,特别是安全保障问题。目前,我国再生水利用安全保障体系尚不完善,在污水再生利用实践中也出现了一些安全性问题,人们对再生水仍然存在诸多疑虑。

再生水利用面临的安全问题主要有水质安全、水量保障和事故防范(图1),其中水质安全(包括对人体健康的影响、对生态环境的影响和对生产安全的影响)是保障再生水利用安全的关键。事故防范是再生水管网工程施工以及日常管理中需要高度关注的问题。

据《京华时报》2009年1月16日报道,北京市丰台区某居民小区由于住户改管中出现疏漏,造成自来水管和再生水(中水)管错接,导致30多户居民自来水管流出“混浊且有明显腥臭味”的再生水。

从该报道中至少可以得到两点启示:一是再生水管网建设标准有待完善,施工管理和教育有待加强,以便从源头上避免管道错接的问题。如强制性要求必

须利用颜色区别再生水管与自来水管,并对施工人员进行再生水知识与施工教育。二是再生水水质监管力度需要加强。从理论上讲,达到杂用水标准的再生水不会是“混浊且有明显腥臭味”的,显然该小区的再生水水质并没有达到水质标准的要求。其原因可能是由于再生水设施的运行管理问题,也可能是在再生水管网中水质发生了劣化。

总之,建立完善的再生水利用安全保障体系,采取科学、有效的技术手段和监管措施,切实保障再生水水质安全,成为污水再生利用急待解决的重要课题。本文在探讨再生水水质安全保障体系的基础上,分析了污水再生利用技术发展需求。

## 一、与再生水水质相关的安全问题及其控制思路

污水中存在种类繁多、性质及其危害性各异的污染物,除常规的无机盐和有机物污染外,还存在对人体健康和生态系统危害性大的污染物,如病原微生物、氮磷等植物营养物质、有毒有害污染物(如重金属、微量有毒有害有机污染物)等。病原微生物具有健康风险,有毒有害污染物

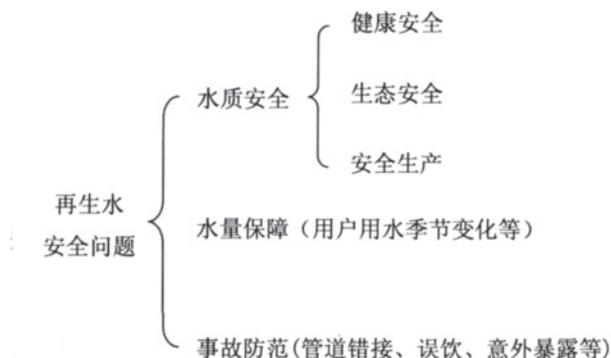


图1 再生水利用面临的安全问题

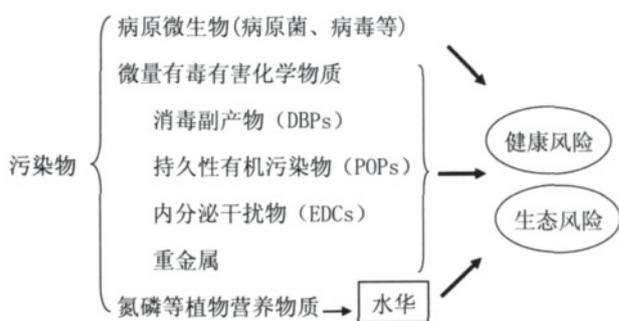


图2 再生水中的有毒有害污染物及其潜在风险

具有健康和生态风险。氮、磷等植物营养物质本身并没有直接的健康风险，但是在再生水景观利用过程中，会引发水华爆发，从而带来潜在的生态和健康风险（图2）。表1列举了与再生水水质相关的安全问题。

对污水中的所有污染物进行控制或将某一种（或某一类）关键污染物彻底去除，在污水再生利用实践中都是不现实的，也是不可能和没有必要的。基于风险评价和管理理论，将水质关键风险因子控制在一个可接受的风险水平是保障污水再生利用安全的科学、合理的基本思路，也是需要科研人员、政府管理部门、再生水生产者和再生水用户达成共识的一条基本思路。风险评价可用于评价再生水因病原微生物和微量有毒有害化学物质而引发的健康风险，从而为再生水利用方式的优化提供指导，为再生水水质标准的制定提供参考。

基于以上思路，不难理解识别再生水不同利用途径的水质关键风险因子（病原微生物、微量有毒有害化学污染物和氮磷等），明确其控制水平，揭示其在污水再生处理过程以及再生水输配储存过程中的转化机制及高

效控制原理，掌握再生水利用过程中的健康与生态风险产生机制及其控制原理等是污水再生利用需要解决的重要关键科学问题。

## 二、再生水水质安全保障体系

城市污水再生利用主要包括污水再生处理、再生水输配与储存、再生水利用等三个主要环节和过程。从技术路线和策略上看，污水再生利用安全保障与风险控制应坚持“源头控制与过程控制相结合、单元优化与系统优化相结合、化学污染物与病原微生物协调控制”的基本原则。图3给出了再生水水质安全保障体系的基本构成和关键内容。

### 1、再生水水质标准体系

建立完善、系统的再生水水

质标准体系，根据不同的用途，制定科学的水质监控指标和指标限值，对再生水水质提出明确的要求是保障再生水水质安全的首要措施。系统评价和掌握再生水的水质特征，识别再生水暴露规律，评价再生水利用过程的健康和生态风险，是制定再生水水质标准的基础。

### 2、水源水质保障与生物毒性控制体系

水源水质是影响再生水水质的关键因素。为了保障污水处理系统的高效、稳定运行，获得高质量的再生水，进入城市污水收集系统的污水必须达到一定的水质标准，这是保障再生水水质安全的前提。生物处理是目前广泛采用的污水处理关键技术，如果污水厂进水的生物降解性差，或对生物处理系统的微生物活性有抑制作用，则对常规二级生物处理系统造成不良影响，导致深度处理系统负荷升高，难以达到再生水水质要求，会给再生水水质安全造成巨大威胁。

再生水水源应以生活污水为主，尽量减少工业废水所占的比重。但是，目前我国工业废水排

表1 再生水可能产生的污染与安全问题

再生水用途	可能的污染方式与安全问题
城镇杂用水	(1) 管理不善会引起地表水和地下水的污染 (2) 水质，特别是盐分对土壤产生影响 (3) 病原体(细菌、病毒、寄生虫)对公众的健康造成威胁 (4) 管道交叉连接
回补地下水	(1) 水中的有机化学品及其毒性影响 (2) 总溶解性固体、硝酸盐、病原体等
工业用水	(1) 水中的组分会引起结垢、侵蚀、剥落、生物生长等现象 (2) 公众健康，特别是冷却水应用中病原体在气溶胶中的传输
景观娱乐用水	(1) 细菌、病毒影响健康 (2) 接纳水体由于氮、磷引起的富营养化 (3) 对水生生物的毒性

入城市污水收集系统，生活污水和工业废水混合处理的现象很多，特别是在工业园区更为普遍。工业废水种类复杂、难处理组分多，如果不进行预处理或预处理系统运行不稳定，导致难处理成分特别是生物毒性大、对生物处理系统生物活性有明显抑制作用的组分流入污水处理厂，就会给处理系统带来不良影响，从而影响再生水水质。因此需要严格控制作为再生水水源的工业废水的水质，特别是工业废水在排放前必须进行适当处理，达到下水道或污水厂排入标准后才能排放。工业废水排入污水厂的水质标准，除了常规的指标外，还应该对其生物抑制性实施实时监控并进行控制。

### 3、再生处理系统

再生处理系统是污水再生利用的核心环节，处理工艺优化和稳定运行是保障再生水水质安全的关键环节。需要系统掌握水源水的特征，选择、组合、优化处理工艺和运行管理，使出水符合再生水水质标准。根据不同的用途，对再生处理的要求也各不相同，

当有多个用途时，应以满足最高水质要求为设计目标。

### 4、再生水输送与储存安全保障系统

再生水输送和储存是再生水利用过程的必要环节，也是影响用户端再生水水质的重要环节。再生水输送和储存过程中产生的水质劣化、病原菌滋生以及管道腐蚀等问题，应该引起高度重视，但目前在我国有关再生水管网中的水质变化规律及控制技术的研究几乎是空白。

### 5、再生水利用途径优化与暴露控制体系

根据再生水水质以及用水需求，科学、合理规划再生水用途，是保障再生水安全的另一重要措施。比如，同样是灌溉绿地、草场，但对灌溉水的水质要求却有很大差异，主要影响因素包括绿地/草场距离居民区的远近、公众进入的频率、以及灌溉的方式是喷灌、漫灌还是滴灌等。再如，同样是回用作为冷却水，但对冷却塔中循环冷却水的水质要求要高于单程冷却水的水质。因此，一方面可以根据具体

的回用目标，在保障回用安全的条件下选择适当水质的再生水，另一方面，也可以根据再生水厂的出水水质，选择合适的回用目标和回用方式，以保障回用的安全性。

另外，在回用过程中，需要采取有效措施，减少对再生水的暴露。如对于非接触式景观用水，应该采取有效措施，防止游泳、垂钓等接触性利用。

### 6、再生水水质监控体系

建立完善的再生水水质监控系统，实时监控再生水厂出水、管网出水以及用水端的水质，是保障再生水水质安全的必要措施。

## 三、再生水水质安全保障面临的课题与技术需求

### 1、再生水资源统筹管理机制与体制建设

污水再生利用是一项复杂的系统工程，涉及面广、环节多，涉及城市规划、建设、环保、水利等众多单位与部门。目前，许多城市没有统一机构来全面、统筹协调、规划及管理城市的再生水利用，各部门条块分割、责权不明、各自为政，影响了再生水利用事业的统筹、科学发展。因此，建立统一的再生水管理部门势在必行。

### 2、再生水处理与供水模式优化

污水再生处理与供水模式可以分为“集中再生，集中供水”的集中模式和“分别处理、就地回用”的分散模式。集中模式通常以城市污水处理厂出水或符合排入城市下水道水质标准的污水

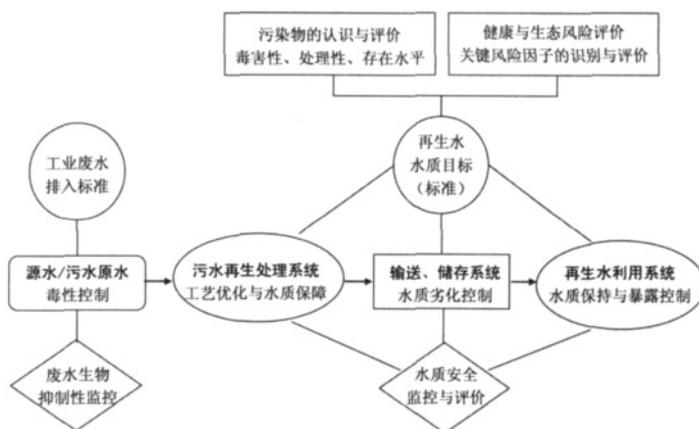


图3 再生水水质安全保障体系基本构成

为水源，进行集中处理，再将再生水通过输配管网输送到不同的用水场所或用户管网。集中模式的优点是具有规模效应，再生处理设施的建设和运行成本较低，水质稳定。但是集中模式存在管网建设费用高、输送距离长、难以实现“分质使用”和优水优用、劣水低用。在同时存在多种用途时，集中模式的水质标准需要按照其中最高要求确定，造成“过度处理”与处理费用升高。

分散模式是在相对独立或较为分散的居住小区、开发区、度假区或其他公共设施组团中，以符合排入城市下水道水质标准的污水为水源，就地建立再生水处理设施，实现再生水就近就地利用。分散模式的规模小，在工程建设和运行方面不具有规模效应，存在管理难度大，运行不易稳定等问题。但是分散模式不需要建设大规模的管道以及长距离输送，同时用途一般比较单一，易于根据水质要求进行适度再生。

集中模式和分散模式各有利弊，但并不是非此即彼的关系，科学、合理的方案应该是集中与分散相结合，两者互为补充。因此有必要开展污水再生利用模式规划方法研究，根据不同地区和城市的特点以及现实情况制定系统、长期的科学规划和发展战略。这些规划和战略的制定往往需要建立在再生水资源统筹管理的基础上。

### 3、再生水水质安全监控体系建设

我国的污水再生利用事业

发展迅速，北京市的污水回用率已经达到60%，但是对再生水出厂后到达使用终端的水质缺乏全过程的监管，往往导致再生水达不到使用标准而造成一些负面影响。2000年以来，一些城市在新建小区中逐渐开始建设小区再生水生产系统，但在应用实践中逐步暴露出一些问题，特别是在使用过程中，不同程度地出现了水质不达标、异味难消除、消毒不到位等卫生安全隐患。

因此，需要建立完善的再生水水质安全监控体系，对再生水设施的综合运营状况和再生水水质进行实时监控，以保证再生水设施的稳定运营和再生水水质安全。如委托有资质的监测机构对再生水水质进行监测，确保再生水水质合格，也可利用先进的在线水质监测系统实时监督。

### 4、再生水水质标准体系建设与完善

近年来，国家和许多城市先后制定了一系列再生水设施建设管理的相关政策和再生水利用的相关标准，但目前再生水利用仍存在政策支持力度不够、行业标准有待进一步规范等问题。

自2002年以来，我国制定、颁布了污水再生利用水质系列标准，为促进污水再生利用起到了积极的推动作用，但在实施过程中也遇到了诸多问题，有待进行不断完善。如有些指标值过于宽松而有些又过于严格、再生水指标与地表水指标存在不兼容现象等。

目前我国的再生水标准大部分分为推荐标准，由于再生水利用

涉及公共健康安全和生态安全，建议升格为强制性标准。另外，再生水水质标准制定方法学研究严重滞后，导致水质标准值的科学依据不充分或不清晰，急待加强研究。

### 5、污水再生利用技术需求

#### (1) 再生水安全消毒技术与工艺

消毒是污水再生处理的必要环节，也是保证再生水生物安全的关键环节。但是，在我国污水处理实践中，消毒设施建而不用、用而不管的现象十分普遍。再生水生物学指标应作为强制性指标严格进行监管，以保障再生水使用的健康和公共卫生安全。

再生水常用的消毒方法主要包括氯消毒、二氧化氯消毒、紫外线消毒、臭氧消毒等。这些方法虽能杀灭常见病原微生物，但均存在一定问题。如氯消毒技术对隐孢子虫和贾第鞭毛虫的灭活效果较差；紫外线消毒可有效灭活隐孢子和贾第鞭毛虫，但是被紫外线灭活的细菌（致病菌），在光照或黑暗条件下可以修复紫外线造成的损伤，重新获得活性（称“光复活”和“暗修复”），从而引起二次健康风险。另外，特别值得关注的是，近年来新型病原微生物不断出现，尤其是高风险致病病毒的屡次流行，给再生水利用安全保障提出了更高的要求，现有的单一消毒技术已不能满足高风险病原微生物的控制。因此，再生水安全消毒组合工艺是再生水消毒的发展趋势，值得加强研究。

#### (2) 再生水有毒有害物质控

制技术

现有的再生水处理技术与工艺主要针对悬浮物（SS）、化学需氧量（COD）、色度等常规污染指标的控制，但是，以这些常规指标的去除为目标的再生水处理工艺不能保证再生水的水质安全。近年来，针对内分泌干扰物（EDCs）、持久性污染物（POPs）、药品和个人护理用品（PPCPs）等特定有毒有害物质去除技术的研究开发备受关注，成为国际上的研究热点。但再生水中有毒有害污染物组成十分复杂，仅对特定有毒有害化学物质进行评价和去除，难以有效保障再生水水质安全，以综合生物毒性（生物效应）削减为目标的再生水处理技术研究有待加强。

(3) 再生水氮磷深度去除技术

城市污水经二级生物处理后仍含有较高浓度的氮、磷等植物营养物质。例如，污水处理厂按《城镇污水处理厂污染物排放标准（GB18918-2002）》执行一级A标准时，其总氮和总磷浓度分别不高于15和0.5mg/L，但该浓度水平显著高于水体富营养化状态定义中的氮磷浓度。含有高浓度营养物质的再生水回用于城市环境与景观水体，存在导致水华爆发、影响生态安全的风险。因此，以水华控制为目标，对再生水中氮、磷等营养物质进行深度去除，保障再生水利用，特别是环境、景观利用的生态安全是城市污水再生处理的重要课题。

(4) 再生水储存与输配过程中的水质劣化控制技术

经过深度处理后的再生水中仍含有一定的有机物和微生物（包括病原微生物），在储存、管网输配过程中容易发生水质劣化，威胁再生水的水质安全性。由于再生水中有有机物（包括可同化有机碳）的含量仍明显高于饮用水，这些有机物一方面可以作为微生物生长的营养物质；另一方面还会加快水中余氯的消耗，从而促进再生水储存、输配过程中微生物（包括病原微生物）的生长。仅仅控制再生水厂出水的水质，并不能保障再生水用户端的水质安全，因此需要高度重视再生水储存与输配过程中水质安全保障技术的研发。

(5) 再生水环境与景观利用的水质保持技术

面对我国北方地区严重缺水，城市景观与生态用水得不到保证的严峻现实，综合考虑安全性、经济性和操作性等多种因素，在众多的再生水利用途径中，从需求量来看，景观与生态利用将占重要位置。目前，北京市奥运公园、高碑店湖、昆玉河、南护城河、龙潭湖、陶然亭湖等均以再生水为补水水源。天津、青岛、合肥等城市亦逐步将再生水回用于已干涸的景观河道、湖泊，再生水回用于景观水体的规模正不断扩大。

然而，由于现行再生水景观利用水质标准的局限性，达到再生水景观利用水质标准的再生水中仍含有较高浓度的氮、磷等营养物质以及微量的有毒有害污染物。再生水中的氮、磷等营养物质带来了较高的水华爆发风险；

微量有毒有害污染物的长期积累会产生潜在的生态风险。因此，再生水景观和生态利用的短期和长期风险均需引起高度关注。

准确掌握再生水中有毒有害微量化学污染物的来源、在水体中的积累规律与生态风险，揭示再生水环境与景观利用中的水质变化规律以及有害藻类的生长特性和水华暴发病规律，提出科学、合理、可操作性强的再生水景观利用水质标准，研究开发再生水环境与景观水体维护与水质保障关键技术和组合工艺，是保证再生水环境与景观利用生态安全面临的重要课题。

污水再生利用是解决水资源短缺的有效途径，今后10年将是我国污水再生利用事业的快速发展期，市场需求巨大。污水再生利用的关键是再生水水质安全保障，但是，目前我国的再生水管理机制和体制还远远不能满足保障再生水利用安全的需要，同时在污水再生处理技术方面也面临着许多挑战。建立和健全污水再生利用安全保障体系，不断发展污水再生处理先进技术和水质监控技术，是我国污水再生利用面临的主要课题和任务。

以有毒有害物质去除和生物毒性削减为目标的处理技术、深度脱氮除磷工艺、以高风险病原微生物和消毒副产物“协同控制”为目标的安全消毒技术等是污水再生处理的主要技术需求。再生水在管网输配以及储存和利用过程中的水质劣化规律及控制技术是再生水利用安全保障的重要研究方向。