

# 水回用指南 再生水中药品和个人护理 品类微量污染物去除技术

## 编制说明

《水回用指南 再生水中药品和个人护理品类微量污染物去除技术》  
标准编制组

二零二一年一月

项目名称：2020 年中国环境科学学会标准（第二批）

承担单位：清华大学

项目联系人：高 强 010-62246242

编制组负责人：文 湘 华 010-62772837

编制组联系人：徐 睿 010-62797265

# 目次

1 工作简况.....	1
1.1 任务来源.....	1
1.2 标准编制目的.....	1
1.3 标准工作过程.....	2
2 标准编制依据和原则.....	4
3 标准主要条文.....	4
3.1 标准适用范围.....	4
3.2 标准文本主要章节.....	4
3.3 再生水中药品和个人护理品类微量污染物去除技术分类.....	5
3.3.1 活性炭吸附技术.....	5
3.3.2 臭氧氧化技术.....	6
3.3.3 膜处理技术.....	7
3.4 再生水中药品和个人护理品类微量污染物去除技术选择原则.....	9
3.4.1 适用性.....	9
3.4.2 经济性.....	10
3.4.3 长效性.....	10
4 主要试验、验证及试行结果.....	10
5 与相关标准的关系分析.....	10
6 采用国际标准的程度及水平说明.....	10
7 重大分歧或重难点的处理经过和依据.....	11
8 贯彻措施及预期效果.....	12
9 其他应说明的事项.....	12
参考文献.....	12

# 1 工作简况

## 1.1 任务来源

本标准由中国环境科学学会提出并归口，2020 年申请立项，被列入中国环境科学学会 2020 年第二批标准编制计划（中环学办字[2020]166 号）正式批准立项，由清华大学、北控水务（中国）投资有限公司、中国环境科学学会起草。

## 1.2 标准编制目的

中国面临着严重的水资源不足问题。我国的淡水资源总量位居世界第六，但人均水资源量约为 2300 立方米，仅为世界水平的 1/4，是全球人均水资源最贫乏的国家之一。此外，中国水资源分布南北差异较大，大多数北方地区的水资源总量严重不足。以北京市为例，2019 年北京市的总用水量为 41.7 亿立方米，而水资源总量仅为 24.56 亿立方米，水资源严重短缺。另一方面，中国也面临着严重的水污染问题。2019 年《中国生态环境公报》显示，全国地表水监测的 1931 个水质断面（点位）中，IV 类和劣 V 类水质断面比例为 25.1%；全国 10168 个国家级地下水水质监测点中，IV 类和劣 V 类水质比例分别为 66.9%和 18.8%。

为解决水资源短缺问题，许多国家和地区正在着重开发雨水、海水和再生水等非传统水源。与其他非传统水源相比，再生水具有成本低和水质水量稳定的特点，已成为国际公认的“城市第二水源”。以北京市为例，全市再生水用量从 2006 年的 3.6 亿立方米快速增长至 2019 年的 11.5 亿立方米。在北京市整体供水结构中，再生水供水所占比例由 2006 年的 10%增长至 2019 年的 27.6%，逐渐成为仅次于地下水的稳定供水水源。据统计，2018 年，全国废污水排放总量为 750 亿立方米，这为再生水回用提供了充足的水源。

再生水回用一方面可为城镇提供充足的水资源，有效缓解目前水资源日益短缺的严峻形势；另一方面降低了污水的排放量，可减缓天然水体的污染，有效改善生态环境，促进城市经济社会可持续发展和生态文明建设。但是，再生水在利用过程中会面临一定的景观生态风险和人体接触健康风险。引起这些风险的物质

主要包括生物风险物质（如导致水华的藻类和病原微生物等）以及化学风险物质（如重金属和微量有机物等）。近年来，随着检测水平的不断提升，一些微量有机物在国内外各类水体中被频繁检出。

已有研究表明，虽然微量有机物的检出浓度水平较低，一般为 ng/L ~ μg/L，但因其种类繁多、化学性质稳定和易生物积累的特点，具有潜在的生态风险和健康风险。微量有机物一般包括消毒副产物、内分泌干扰物以及药物和个人护理用品（Pharmaceuticals and personal care products, PPCPs）等物质。其中，PPCPs 泛指任何用于人类或动物医疗或医疗目的的产品。近三十年来，PPCPs 的生态风险与健康风险问题引起了国内外学者越来越多的关注。已有文献证实 PPCPs 可通过多种途径被释放到水环境中，其来源主要包括家庭、医院、工厂、水产业、畜牧业、垃圾填埋场和污水处理厂等，威胁生态安全。因 PPCPs 较难降解，最终又可能通过水循环系统回到人体内，危害人类健康。传统的污水处理厂主要是针对悬浮固体、有机物和营养物质等的去除，以满足排放标准而设计的。因此，传统污水处理厂对 PPCPs 的去除效果有限，处理后的出水中仍含有较高浓度的 PPCPs。在水生环境中，污水处理厂已被确定为 PPCPs 的主要来源。因此，寻求合适的深度处理工艺，对传统的污水处理厂进行升级改造以有效去除 PPCPs 至关重要，已成为国内外的研究热点。

标准是再生水行业健康发展的重要保障，再生水标准的制定、颁布和实施可为行业开展项目规划、设计、管理、评价等工作提供专业指导和规范。目前，以污水再生利用为目标的去除 PPCPs 的实践越来越多，但该领域的标准化工作却远远滞后于实践。污水再生利用中，去除 PPCPs 的相关技术仍然存在重要标准缺失、方法不规范等突出问题。为满足再生水标准化工作需求，有必要结合国内外再生水利用经验，制定针对性强、可操作性强的及突出行业特点的再生水中 PPCPs 去除技术的标准指南，为再生水厂的升级改造提供指导，推动我国再生水行业规范化发展。

### 1.3 标准工作过程

标准起草组经过内部多次研讨和专家论证，形成了目前的送审稿及其编制说明。

### （1）编制启动

清华大学接到标准制定任务后，立刻组织落实标准制定工作。确定由清华大学等为主要起草单位，并由来自高校、科研机构、企业的相关专家组成起草组，形成标准送审稿。

### （2）理论研究

2019年3月～2019年9月：为了准确完成制定工作，标准起草组收集并学习了《北京市城镇污水处理厂水污染物排放标准（DB 11/890）》、《城市污水再生利用 分类（GB/T 18919）》、《城市污水再生利用 景观环境用水水质（GB/T 18921）》、《景观娱乐用水水质标准（GB/T 12941）》、《膜分离技术 术语（GB/T 20103）》和《城镇污水再生利用技术指南（试行）》等相关国家和地方标准。经过资料分析和提炼，理顺了标准制定的方向和思路，形成标准编制大纲。

### （3）企业调研

为了使标准具有科学性和可操作性，标准起草组以资料分析为主，现场调研为辅，分别于2019年10月～2020年1月赴典型企业进行实地考察，与相关技术和管理人员进行了深入探讨。

### （4）标准草稿

2020年1月～2020年6月：标准起草组召开起草工作研讨会，就标准起草过程中存在的问题进行集中研讨，经过若干次课题组内部研讨会和专家咨询会，形成了标准草稿。

### （5）标准立项

2020年6月：标准起草组向中国环境科学学会提交制修订立项申请书。

2020年11月：经中国环境科学学会审议进行立项公示。

2020年12月：经中国环境科学学会审议进行正式立项。

### （6）标准征求意见稿

2020年6月～12月：标准起草组召开工作研讨会，通过多次修改和内部讨论，形成《水回用指南 再生水中药品和个人护理品类微量污染物去除技术》（征求意见稿）。

## 2 标准编制依据和原则

本标准按照《中国环境科学学会标准管理办法（试行）》的要求和规定，确定标准的组成要素。

在标准制定过程中遵循了以下几个原则：

- （1）科学性和规范性；
- （2）先进性和实用性；
- （3）与国际现行的节水政策、产业政策等相结合；
- （4）尽量与相关的标准、法规接轨；
- （5）充分考虑我国污水再生利用技术发展水平、不同再生水利用途径用水特点、再生水行业产业升级和发展方式转变、符合再生水行业规范化发展需求。

## 3 标准主要条文

### 3.1 标准适用范围

本文件规定了再生水中药品和个人护理品类微量污染物去除技术的相关术语和定义、去除技术、技术选择原则等。

本文件适用于城镇集中型污水处理中药品和个人护理品类微量污染物去除技术方案的选择。本文件适用于再生水补给景观环境用水途径、城市杂用（冲厕）、地下水回灌、补给引用水源地等其他可能与人体有密切接触的情形。

### 3.2 标准文本主要章节

本标准规定了水回用指南：再生水中药品和个人护理品类微量污染物去除技术的相关术语和定义、总则、评价指标体系、指标选取和指标计算方法。

- 范围
- 规范性引用文件
- 术语和定义
- 再生水中药品和个人护理品类微量污染物去除技术分类

- 再生水中药品和个人护理品类微量污染物去除技术选择原则

### 3.3 再生水中药品和个人护理品类微量污染物去除技术分类

#### 3.3.1 活性炭吸附技术

利用粉末活性炭或颗粒活性炭通过吸附去除再生水中药品和个人护理品类微量污染物的技术。

a) 适用范围：适用于对药品和个人护理品类微量污染物含量有特殊要求的再生水生产。

b) 作用机理：活性炭可通过物理吸附或化学吸附作用去除再生水中药品和个人护理品类微量污染物。

c) 技术特点：设备简单，投资成本低，活性炭使用寿命长。

颗粒状活性炭技术一般使用固定床吸附反应器，主要工艺流程包括过滤和反冲洗等；粉末活性炭技术一般可将粉末活性炭直接投加在曝气池或二沉池后新增的吸附池中，再通过沉降分离粉末活性炭和污水。

d) 运行参数：活性炭投加量宜为 10 mg/L ~ 30 mg/L，水力停留时间宜为 20 min ~ 30 min。

e) 处理效果：对绝大多数药品和个人护理品类微量污染物的去除率可大于 80%。

活性炭技术运行参数和处理效果主要参照了瑞士和德国已实际运行的污水处理厂及中试试验。目前，相比于颗粒活性炭，粉末活性炭的成本更低，应用更为广泛。典型的活性炭吸附技术应用案例列于表 3.3-1 中。

f) 注意事项：需要注意活性炭的投加方式及吸附饱和情况；控制活性炭吸附反应器的温度、pH 值等运行参数等；活性炭吸附池/罐可参照 JB/T 10193 设计。



表 3.3-1 活性炭吸附技术应用案例概述

污水处理 厂	洛桑水厂 (瑞士)	奥普菲康水厂 (瑞士)	S 水厂 (中试, 德 国)	K 水厂 (中试, 德 国)	黑里绍水厂 (瑞士)
工艺	粉末活性炭 +超滤	吸附絮凝过滤	粉末活性炭 +下向流双 层过滤	粉末活性炭 +絮凝	粉末活性炭 +砂滤
入流量	10 L/h	93.5 m <sup>3</sup> /h	—	15 L/h	612.5 m <sup>3</sup> /h
活性炭投 加量	10~20 mg/L	15 mg/L	10~20 mg/L	10~50 mg/L	20 mg/L
接触时间	30 min	—	—	15 min	30 min
去除效果	>80%	71%	>80%。	>80%	>80

### 3.3.2 臭氧氧化技术

利用含臭氧的空气或臭氧/氧气混合物通过强氧化去除再生水中药品和个人护理品类微量污染物的技术。

a) 适用范围：适用于对药品和个人护理品类微量污染物含量有特殊要求的再生水生产。

b) 作用机理：臭氧可直接与再生水中药品和个人护理品类微量污染物发生有选择性的反应,也可通过产生 HO·与再生水中药品和个人护理品类微量污染物发生无选择性的氧化反应。

c) 技术特点：操作简单，现场制备臭氧，可自动化调控臭氧投加量。

臭氧氧化技术主要包括臭氧发生器、臭氧反应器、控制单元和后续处理工艺。

d) 运行参数：臭氧投加量宜为 0.35 mg/mg DOC ~ 1.50 mg/mg DOC，接触时间宜为 10 min ~ 30 min。

e) 处理效果：对绝大多数药品和个人护理品类微量污染物的去除率可大于 80%。

臭氧氧化技术运行参数和处理效果主要参照了瑞士、德国等国家已实际运行的污水处理厂及中试试验。一般情况下，臭氧浓度越高，微量污染物去除效果越好。典型的臭氧氧化技术应用案例列于表 3.3-2 中。

f) 注意事项：需要控制臭氧投加剂量，同时监测出水中臭氧含量，并采取

防止臭氧从接触反应器中泄露的措施；臭氧具有强氧化性，配套设施应采用耐氧化材料；需要关注臭氧去除目标污染物过程中可能产生的新未知物质；臭氧反应器可参照 YS/T 3016 设计。

表 3.3-2 臭氧氧化技术应用案例概述

污水厂	某厂 (德国)	某厂 (中试, 瑞士)	Neugut 工厂 (瑞士)	Shafdan 厂 (中试, 以色列)	某厂 (日本)
工艺	臭氧氧化+ 絮凝过滤	膜生物反应器 +臭氧氧化	臭氧氧化+砂 滤	生物过滤+臭氧 氧化	砂滤+臭氧氧化
入流量	4.5~15 m <sup>3</sup> /h	—	190000 m <sup>3</sup> /d	4.3~5 m <sup>3</sup> /h	—
投加量	0.57~0.94 mg/mg DOC	0.64~1.08 mg/mg DOC	0.35~0.97 mg/mg DOC	1.0~1.2 mg/mg DOC	0.81 mg/mg DOC
接触时间	—	12~23 min	—	6~7 min	27 min
去除效果	>80%	>80%	>80%	~100%	>80%

### 3.3.3 膜处理技术

利用膜通过分离去除再生水中药品和个人护理品类微量污染物的技术。根据进水水质条件和再生水出水水质要求，可以分为反渗透技术和纳滤技术。

#### 3.3.3.1 反渗透技术

利用只能透过水而不能透过溶质的反渗透膜通过分离去除再生水中药品和个人护理品类微量污染物的技术。

a) 适用范围：适用于对溶解性无机盐类及药品和个人护理品类微量污染物含量有特殊要求的再生水生产。

b) 作用机理：反渗透膜在压力驱动下，借助于半透膜的选择分离作用去除再生水中药品和个人护理品类微量污染物。

c) 技术特点：出水中无机盐类以及药品和个人护理品类微量污染物含量远低于其他膜处理技术的出水。

d) 运行参数：进水污染指数 (SDI<sub>15</sub>) <3，运行压力 ≤2.0 Mpa。

反渗透技术运行参数参照《城镇污水再生利用技术指南（试行）》中的要求。表 3.3-3 列举了反渗透膜在城镇污水高品质回用中的一些典型应用案例。

e) 处理效果：对绝大多数药品和个人护理品类微量污染物的去除率可大于 90%。

f) 注意事项：反渗透对预处理要求高，一般要求有超滤或微滤预处理装置；运行过程中需要在膜两端人工施加一定的压力差，以保证膜的平稳运行；进水

pH 应控制在 4.0 ~ 7.5 范围内，可根据原水水质，添加一定的化学试剂；根据膜污染状况，应定期进行化学清洗或更换膜组件；反渗透出水 pH 值偏低，应根据水质需求进行调整；需要充分考虑浓水的处理；反渗透装置可参照 GB/T 19249 设计。

表 3.3-3 反渗透膜在城镇污水高品质回用中的典型应用

工程名称	处理规模 (m <sup>3</sup> /d)	核心工艺	反渗透装置 进水压力 (MPa)	反渗透装置 系统回收率
新加坡 NEWater 示范工程	10000	微滤+反渗透	1.3	80~82%
澳大利亚行李点水回收厂	10000	微滤+反渗透	—	—
北京北小河再生水厂	10000	膜生物反应器 +反渗透	1.3	75%
天津开发区污水回用	12000	超滤+反渗透	1.55	75%
淄博中水利用	4800	超滤+反渗透	1.1~1.3	65%
北京经开区东区再生水厂	40000	超滤+反渗透	1.0~1.1	70%
江阴中水利用	10000	超滤+反渗透	1.1~1.2	70%

### 3.3.3.2 纳滤技术

利用能截留多价离子、部分一价离子和分子量 200 ~ 1000 的有机物的纳滤膜通过分离去除再生水中药品和个人护理品类微量污染物的技术。

a) 适用范围：适用于对溶解性无机盐类及药品和个人护理品类微量污染物含量有特殊要求的再生水生产。

b) 作用机理：纳滤膜可通过道南效应、空间位阻作用、静电作用和吸附作用等去除再生水中药品和个人护理品类微量污染物。

c) 技术特点：能耗低，可选择性的去除目标污染物，出水水质好。

d) 运行参数：进水污染指数 (SDI<sub>15</sub>) < 3，运行压力 ≤ 0.5 Mpa。

纳滤技术运行参数进水污染指数 SDI<sub>15</sub> 参照反渗透技术运行要求，运行压力参照已实际工程应用和中试运行结果。典型的纳滤技术应用案例列于表 3.3-4 中。反渗透和纳滤技术对微量污染物的去除效果列于表 3.3-5 中。反渗透膜对大多数微量污染物的去除率可大于 90%，而纳滤膜对大多数微量污染物也都有较好的去除效果，仅对一小部分有机污染物的去除率较低。由于纳滤膜工作压力比反渗透膜低，运行和维护成本更低，可根据目标污染物去除要求，选择适合的膜技术。

e) 处理效果：对绝大多数药品和个人护理品类微量污染物的去除率可大于80%。

f) 注意事项：纳滤膜对药品和个人护理品类微量污染物的去除率主要取决于目标污染物自身的物理化学特性（如分子半径、分子量、带电荷数和亲疏水性等）、膜本身特性（如膜材料和膜孔径等）及纳滤装置运行操作条件（如压力、通量和温度等）；纳滤运行对预处理要求高，一般要求有超滤或微滤预处理装置；根据膜污染状况，应定期进行化学清洗或更换膜组件；需要充分考虑浓水的处理；纳滤设备应符合 HY/T 114 要求。

表 3.3-4 典型的纳滤技术应用案例

工程名称	处理规模 (m <sup>3</sup> /d)	核心工艺	纳滤装置进水压力 (MPa)	纳滤装置系统 回收率
法国巴黎的 Méry-sur-Oise 净水厂	340000	微滤+纳滤	—	—
纳滤中试装置（江苏）	48	超滤+纳滤	0.5	70%~80%
纳滤中试装置（北京）	50	超滤+纳滤	0.2	60%~80%
法国 Jamy 水厂	3000	微滤+纳滤	—	75%
美国佛罗里达州 Deerfield Beach 水厂	40000	石灰软化工艺/保安过滤+纳滤	<0.6	85%
美国佛罗里达州 Boca Raton 水厂	152000	介质过滤+保安过滤+纳滤	<0.5	—

表 3.3-5 反渗透与纳滤技术对微量污染物去除效果的对比

膜技术	药品类	雌激素类	烷基酚类
反渗透	>90%	>90%	>90%
纳滤	>90%	70~90%	>90%

### 3.4 再生水中药品和个人护理品类微量污染物去除技术选择原则

#### 3.4.1 适用性

需要结合再生水厂已有的处理技术，充分考虑进水水质条件和出水水质目标，有针对性地选择适合的药品和个人护理品类微量污染物去除技术或组合处理技术。

### 3.4.2 经济性

对拟选择的药品和个人护理品类微量污染物去除技术方案进行技术经济比选，确保技术的可行性和合理性。

### 3.4.3 长效性

再生水中药品和个人护理品类微量污染物的残留浓度具有波动性和不确定性，拟选择的去除技术需满足对再生水中药品和个人护理品类微量污染物去除率大于 80% 的目标。用户宜根据应用情况，有针对性地跟踪监测再生水中药品和个人护理品类微量污染物，水样采集与保存可参照 HJ 493、HJ 494 及 HJ 495。

## 4 主要试验、验证及试行结果

无

## 5 与相关标准的关系分析

为了准确完成制定工作，标准起草组收集并学习了《北京市城镇污水处理厂水污染物排放标准（DB 11/890）》、《城市污水再生利用 分类（GB/T 18919）》、《城市污水再生利用 景观环境用水水质（GB/T 18921）》、《景观娱乐用水水质标准（GB/T 12941）》、《膜分离技术 术语（GB/T 20103）》、《工业用水节水 术语（GB/T 21534）》和《城镇污水再生利用技术指南（试行）》等相关国家和地方标准。经过资料分析和提炼，理顺了标准制定的方向和思路，形成标准编制大纲。

## 6 采用国际标准的程度及水平说明

国际上，目前只有瑞士针对微量污染物制定了新的水保护法，其以选定的指示物的去除率作为标准，要求污水处理厂对微量污染物的去除率 $\geq 80\%$ 。德国和法国还没有制定法律，但其已对本国的污水处理厂开始进行升级改造，并陆续投入运行，逐渐进入“四级处理阶段”。此外，美国国内相关水法中，还没有一套直接针对污水再生利用的全国性法规，只有《污水回用指南》作为一份指导性文件，各州在此基础上制定相关法规，设计建设污水再生水厂。欧盟在 2000 年时意识

到再生水对于水资源可持续利用的重要性，在整合了零散水法的基础上，出台了统一的《水框架指令》。但《指令》也只是一部软性的法律文件，提供了一个“综合性法律框架”，规定了一些原则性问题，具体方法细则等依然缺失，一定程度上制约了当地再生水行业的发展。澳大利亚的《污水处理系统指南》在 2000 年才将再生水使用这一章纳入其中。本标准在编制过程中，主要参照瑞士的新水保护法，规定不同技术去除再生水中药品和个人护理品类微量污染物去除率可大于 80%。

## 7 重大分歧或重难点的处理经过和依据

据文献调研，目前研究最多的再生水中药品和个人护理品类微量污染物的去除技术主要包括生物法、吸附法、化学氧化法、膜技术和高级氧化法等。目前，德国和瑞士已走在世界的前列，进入“四级处理阶段”，截止到 2016 年 10 月，德国已有 16 座升级改造后的污水厂投入运行，其中采用粉末活性炭吸附工艺的工厂有 11 座，采用颗粒活性炭吸附的工厂有 3 座，采用臭氧氧化工艺的工厂有 2 座，另有 6 座在建，11 座在规划中。截止 2019 年 1 月，瑞士已完成 8 座工厂的升级，其中 3 座采用粉末活性炭工艺，1 座采用颗粒活性炭工艺，4 座采用臭氧氧化工艺，另有 24 座工厂在建或规划中。此外，法国已完成 4 座工厂的升级，均采用了臭氧氧化工艺，另有 14 座在建。另外，膜技术具有无相变，工艺流程简单，操作方便，出水水质稳定等特点，已得到越来越多业内学者的关注和研究。目前，美国加州奥兰治县、比利时和新加坡等地已有污水处理厂使用了膜处理工艺。

结合国外的实际工程经验，活性炭吸附法、臭氧氧化法和膜处理工艺是目前实际应用较多的再生水中药品和个人护理品类微量污染物去除技术。研究表明，这三种技术能够高效、稳定地去除再生水中大多数药品和个人护理品类微量污染物，去除率可达到 80%以上。

## 8 贯彻措施及预期效果

标准实施应遵循标准实施原则，推荐相关企业采用该标准。结合再生水厂实际情况采用该标准。

## 9 其他应说明的事项

本标准为首次制订，随着污水再生利用行业的快速崛起和相关新技术的快速发展，本标准中的药品和个人护理品去除技术可能会随之发生变化。因此，建议在本标准实施过程中，继续广泛听取和收集各方面的意见与建议，并根据实际应用情况，对本标准进行不断地修订与完善，使其实用性和可操作性与时俱进，为规范开展再生水系统升级改造工作提供依据和指导。

## 参考文献

- [1] 文湘华, 申博. 新兴污染物水环境保护标准及其实用去除技术. 环境科学学报, 2018, 38(03):847-857.
- [2] F.W. Günthert. Bewertung vorhandener Technologien für die Elimination anthropogener Spurenstoffe auf kommunalen Kläranlagen. Universität der Bundeswehr München[R], Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, 2013, 1-146.
- [3] Hanspeter Zöllig. Erste Grosstechnik Umsetzungen einer PAK-Stufe in der Schwebstoff-Entfernung nach einem Jahr [J]. Aqua & Gas, 2017, (1):14-23.
- [4] Martin Jekel. Integration der Spurenstoffentfernung in Technologieansätze der 4. Reinigungsstufe bei Klärwerken[R]. Universitätsverlag der TU Berlin, 2016, 1-189.
- [5] Steffen Metzger. Betriebserfahrungen mit Aktivkohleanlagen. Fachbeiträge, 2018, 2715-2718.
- [6] Huber, M., Canonica, S., Park, G., von Gunten, U., 2003. Oxidation of

- pharmaceuticals during ozonation and advanced oxidation processes. *Environ. Sci. Technol.* 37, 1016-1024
- [7] Lee, Y., von Gunten, U., 2012. Quantitative structure-activity relationships (QSARs) for the transformation of organic micropollutants during oxidative water treatment. *Water Res.* 46, 6177-6195.
- [8] Razavi, B., Song, W., Cooper, W., Greaves, J., Jeong, J., 2009. Free radical induced oxidative and reductive degradation of fibrate pharmaceuticals: kinetic studies and degradation mechanisms. *J. Phys. Chem. A* 113, 1287-1294.
- [9] Lee, Y., Kovalova, L., McArdell, C., von Gunten, U., 2014. Prediction of micropollutant elimination during ozonation of a hospital wastewater effluent. *Water Res.* 64, 134-148
- [10] Abdelmelek, S., Greaves, J., Ishida, K., Cooper, W., Song, W., 2011. Removal of pharmaceutical and personal care products from reverse osmosis retentate using advanced oxidation processes. *Environ. Sci. Technol.* 45, 3665-3671
- [11] Real, F., Benitez, F., Acero, J., Sagasti, J., Casas, F., 2009. Kinetics of the chemical oxidation of the pharmaceuticals primidone, ketoprofen and diatrizoate in ultrapure and natural waters. *Ind. Eng. Chem. Res.* 48, 3380-3388
- [12] Huber, M., Göbel, A., Joss, A., Hermann, N., Löffler, D., McArdell, C., Ried, A., Siegrist, H., Ternes, T., von Gunten, U., 2005. Oxidation of pharmaceuticals during ozonation of municipal wastewater effluents: a pilot study. *Environ. Sci. Technol.* 39, 4290-4299.
- [13] Packer, J., Werner, J., Latch, D., McNeill, K., Arnold, W., 2003. Photochemical fate of pharmaceuticals in the environment: naproxen, diclofenac, clofibric acid, and ibuprofen. *Aquat. Sci.* 65, 342-351
- [14] Rivas, F., Sagasti, J., Encinas, A., Gimeno, O., 2011. Contaminants abatement by ozone in secondary effluents. Evaluation of second-order rate constants. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 86, 1058-1066.
- [15] Acero, J., Stemmler, K., von Gunten, U., 2000. Degradation kinetics of atrazine and its degradation products with ozone and OH radicals: a predictive tool for drinking water treatment. *Environ. Sci. Technol.* 34, 591-597



- [16]Mezyk, S., Neubauer, T., Cooper, W., Peller, J., 2007. Free radical induced oxidative and reductive degradation of sulfa drugs in water: absolute kinetics and efficiencies of hydroxyl radical and hydrated electron reactions. *J. Phys. Chem. A* 111, 9019-9024
- [17]Song, W., Cooper, W., Mezyk, S., Greaves, J., Peake, B., 2008. Free radical destruction of  $\beta$ -blockers in aqueous solution. *Environ. Sci. Technol.* 42, 1256-1261
- [18]Song, W., Cooper, W., Peake, B., Mezyk, S., Nickelsen, M., O'Shea, K., 2009. Freeradical induced oxidative and reductive degradation of N,N'-diethyl-mtoluamide (DEET): Kinetic studies and degradation pathway. *Water Res.* 43,635-642
- [19]Benner, J., Salhi, E., Ternes, T., von Gunten, U., 2008. Ozonation of reverse osmosis concentrate: kinetics and efficiency of beta blocker oxidation. *Water Res.* 42, 3003-3012
- [20]Rivas, F., Sagasti, J., Encinas, A., Gimeno, O., 2011. Contaminants abatement by ozone in secondary effluents. Evaluation of second-order rate constants. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 86, 1058-1066.
- [21]Gerrity, D., Gamage, S., Jones, D., Korshin, G., Lee, Y., Pisarenko, A., Trenholm, R., von Gunten, U., Wert, E., Snyder, A., 2012. Development of surrogate correlation models to predict trace organic contaminants oxidation and microbial inactivation during ozonation. *Water Res.* 46, 6257-6272.
- [22]Deborde, M., Rabouan, S., Duguet, J., Legube, B., 2005. Kinetics of aqueous ozone induced oxidation of some endocrine disruptors. *Environ. Sci. Technol.* 39, 6086-6092
- [23]Martin Jekel. Integration der Spurenstoff ent ernung in Technologieansätze der 4. Reinigungsstufe bei Klärwerken[R]. Universitätsverlag der TU Berlin, 2016, 1-189.
- [24]Kovalova Lubomira, Siegrist Hansruedi,von Gunten Urs,Eugster Jakob,Hagenbuch Martina,Wittmer Anita,Moser Ruedi,McArdell Christa S. Elimination of micropollutants during post-treatment of hospital wastewater with

- powdered activated carbon, ozone, and UV. *Environ. Sci. Technol.*, 2013, 47(14).
- [25] Marc Bourgin, Birgit Beck, Marc Boehler, Ewa Borowska, Julian Fleiner, Elisabeth Salhi, Rebekka Teichler, Urs von Gunten, Hansruedi Siegrist, Christa S. McArdell. Evaluation of a full-scale wastewater treatment plant upgraded with ozonation and biological post-treatments: Abatement of micropollutants, formation of transformation products and oxidation by-products. *Water Res.*, 2018, 129.
- [26] Marc Böhler, Julian Fleiner, Christa S. McArdell, Rebekka Teichler und Hansruedi Siegrist. Untersu Chungen Zu V Erfa Hren Fur Die Biolo Gis Che N Achbeh A Ndlung N Ach Ozonung, *Aqua & Gas*, 2017, (5):54-63.
- [27] Al-Rifai Jawad H, Gabelish Candace L, Schäfer Andrea I. Occurrence of pharmaceutically active and non-steroidal estrogenic compounds in three different wastewater recycling schemes in Australia. *Chemosphere*, 2007, 69(5):256-270.
- [28] Andrea J.C. Semião and Andrea I. Schäfer, Chapter 17 Xenobiotics Removal by Membrane Technology: An Overview.
- [29] 朱学武. 超滤/纳滤组合工艺处理钱塘江水系水源水中试研究. 哈尔滨工业大学, 2016.
- [30] Martin Jekel. Integration der Spurenstoffenternung in Technologieansätze der 4. Reinigungsstufe bei Klärwerken. Universitätsverlag der TU Berlin, 2016, 1-189.
- [31] Peinemann K-V, Pereira Nunes S, Membranes for water treatment. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 2010.
- [32] GB/T 18919 《城市污水再生利用 分类》(2002). 国家质量监督检验检疫总局.
- [33] GB/T 18920 《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(2002). 国家质量监督检验检疫总局.
- [34] GB/T 18921 《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(2019). 国家质量监督检验检疫总局.
- [35] GB/T 21534 《工业用水节水 术语》(2008). 国家质量监督检验检疫总局.
- [36] JB/T 10193 《活性炭吸附罐 技术条件》(2010). 中华人民共和国工业和信息化部.

- [37]YS/T 3016 《臭氧氧化工艺用反应器》(2013). 中华人民共和国工业和信息化部.
- [38]GB/T 19249 《反渗透水处理设备》(2017). 国家质量监督检验检疫总局.
- [39]HY/T 114 《纳滤装置》(2008). 国家海洋局.
- [40]城镇污水再生利用技术指南(试行)(2012). 中华人民共和国住房和城乡建设部.
- [41]GB/T 25499 《城市污水再生利用 绿地灌溉水质》(2010). 国家质量监督检验检疫总局.
- [42]HJ 493 《水质采样样品的保存和管理技术规定》(2009). 环境保护部.
- [43]HJ 494 《水质采样技术指导》(2009). 环境保护部.
- [44]HJ 495 《水质采样方案设计技术规定》(2009). 环境保护部.