

“博士后文库” 序言

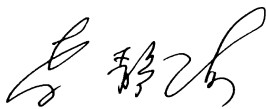
1985 年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。40 年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013 年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入“博士后文库”，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015 年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87 号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

水是生命之源，也是人类社会发展的的重要战略资源，但在全球人口不断增加以及工业化、城市化持续推进的背景下，水资源匮乏与水环境退化问题日趋突出，亟待有效应对。再生水作为“第二水源”，已成为缓解水资源危机、实现可持续发展的关键路径。如何保障再生水的水质安全，突破传统水处理技术的瓶颈，既是科学研究的焦点，也是工程实践的核心挑战。

近年来，磁性树脂技术因其高效吸附、快速分离和可循环再生等特性，在水处理领域展现出独特优势。特别是磁性离子交换树脂（如商业化的磁性树脂 MIEX[®]）及其组合工艺，在去除微量痕量有机污染物、抗生素抗性基因（ARG）和病原微生物等方面表现卓越，为再生水水质安全保障提供了创新解决方案。然而，磁性树脂技术的复杂机理、工艺优化难题以及新型材料的研发需求，仍需深入的理论研究和系统性的实践探索。

在此背景下，本书聚焦磁性树脂技术在再生水处理中的应用、作用机制及前沿发展方向，旨在为科研人员、工程技术人员及政策制定者提供兼具理论深度与实践价值的参考。全书共分为四篇 7 章：

第一篇为绪论，从再生水资源化的政策驱动、国内外回用现状与标准切入，剖析再生水水质安全面临的技术与管理挑战。重点探讨现有深度处理技术（如膜分离、臭氧氧化）的局限性，以及微量痕量有机污染物、ARG 等新污染物的控制难点，为后续磁性树脂技术的探讨奠定背景基础。

第二篇为磁性树脂组合处理工艺的效能表现与作用机制分析，以 MIEX[®] 树脂为核心，系统解析其与臭氧工艺的协同作用机制。阐明组合工艺参数优化对污染物去除效能的影响规律，揭示 pH 调控、吸附-氧化耦合对分子量分布、抗性基因及微生物群落的去除或控制机理。本篇内容可为工程实践中工艺选型与参数调控提供科学依据。

第三篇为新型磁性树脂的制备、效能及吸附机制，针对传统商业化磁性树脂的局限性，重点介绍两类创新材料：含双季铵位点的磁性阴离子树脂与含羧基位点的高容量磁性阳离子树脂，阐明其吸附机制与强化效能，并探索其在复杂水质条件下的应用潜力。本篇内容可为新型树脂的研发与工艺升级提供理论支持。

第四篇为磁性树脂水处理技术的前沿探索与未来展望，聚焦树脂增强电吸附技术（如磁性流动电极电容去离子），探讨电吸附与磁性树脂的协同效应，解析外场作用下的微观机制，展望定制化、低碳化水处理系统的发展方向。本篇内容

旨在为再生水处理技术的智能化与集成化创新提供前瞻性思路。

本书的特色在于：①多学科交叉融合，结合环境工程、材料科学、计算化学等多领域知识，深入解析磁性树脂技术的宏观效能与微观机制。②理论-实践并重，从基础吸附机理到实际工程案例，构建“材料开发-工艺优化-风险控制”的全链条分析体系。③前沿技术探索，系统梳理电容去离子、磁性树脂衍生电极和磁性树脂流动电极等新兴技术，指明未来技术突破的关键路径。

本书已获中国博士后科学基金 2025 年度优秀学术专著出版资助（2025CBZZ12），表示衷心感谢。在清华大学做博士后期间，本人有幸获得博士后创新人才支持计划 A 类项目（BX20230168）和国家自然科学基金青年 C 类项目（52400043）的资助，在此一并致以诚挚感谢。感谢国内外同行在磁性树脂及水处理技术研究领域做出的卓越贡献，为本书的撰写提供了丰富的参考资料。本书的撰写还得益于多家水务企业的支持，同时也凝聚了多年来的研究成果与实践经验。在书稿整理过程中，研究团队的成员给予了大量的支持与帮助。在此，谨向所有为本书提供帮助的同行专家、合作单位及团队成员致以诚挚谢意。衷心感谢清华大学胡洪营教授、巫寅虎副研究员和马丽新助理研究员，哈尔滨工业大学陈志强教授以及海南大学孙铁斐教授提供的宝贵意见和热心指导。由于本书内容涉及环境、材料和化学等多个学科领域，编写过程中难免存在疏漏与不足，诚望广大读者批评指正，以促进再生水回用领域的进一步发展。

随着全球对水环境安全与资源可持续利用的关注不断加深，水资源治理正由“增量扩展”向“提质增效”转变。尤其是在再生水用于电子级超纯水、高端制造与生态补水等场景中，对水质控制精度、污染物深度去除及系统运行稳定性提出了更为严苛的技术标准。希望本书能为再生水水质安全保障技术的创新提供有益参考，助力实现“水尽其用、安全循环”的可持续发展目标。希望本书的出版能为我国再生水处理技术的创新发展提供有益借鉴，并为水环境安全保障提供新的研究思路和实践路径。

唐英才

2025 年 10 月于海南

目 录

“博士后文库” 序言

前言

第一篇 绪 论

第 1 章 再生水水质安全保障的挑战与机遇	3
1.1 再生水资源化的驱动因素与发展背景	3
1.1.1 再生水的利用需求	3
1.1.2 政策推动下的再生水利用战略	5
1.2 再生水回用的全球现状与标准比较	7
1.2.1 国内外回用案例与实践现状	7
1.2.2 各类水质标准与管控体系对比	9
1.2.3 不同应用情境下的水质差异要求	12
1.3 水质安全管控的核心难点	18
1.3.1 再生水深度处理中的关键瓶颈	18
1.3.2 微量有机物、抗生素抗性基因及微生物风险控制挑战	19
1.3.3 指标体系的构建缺失及其对水质监管的限制	19
1.4 再生水水质水征的内涵与分析框架	20
1.4.1 再生水水质水征的内涵	20
1.4.2 分析框架	22
1.5 本章小结	23
参考文献	24
第 2 章 磁性树脂及其组合工艺在水处理领域的应用与研究进展	28
2.1 磁性树脂材料的合成与发展	28
2.1.1 磁性树脂的制备方法	28
2.1.2 典型商品化磁性树脂 MIEX® 的特性评估	32
2.1.3 应用实践及经济效益	34
2.2 离子交换机理与功能性特征	37
2.3 磁性树脂组合工艺的集成现状	39
2.3.1 磁性树脂-臭氧组合工艺	39
2.3.2 磁性树脂-混凝组合工艺	40

2.3.3	磁性树脂-活性炭组合工艺	41
2.3.4	磁性树脂-膜过滤组合工艺	42
2.3.5	混合离子交换工艺	44
2.3.6	其他磁性树脂组合工艺	44
2.3.7	磁性树脂组合工艺的优缺点分析	46
2.4	新型磁性树脂的研究与应用进展	47
2.4.1	新材料设计与应用探索	47
2.4.2	吸附性能对比与技术优势解析	51
2.4.3	树脂基磁性碳材料的制备及其应用	53
2.4.4	生物磁性树脂的研究和应用进展	57
2.5	本章小结	59
	参考文献	60

第二篇 磁性树脂组合处理工艺的效能表现与作用机制分析

第3章	MIEX [®] 与臭氧联用工艺的优化调控及其协同效应机制分析	73
3.1	引言	73
3.2	响应曲面法评估工艺参数影响	75
3.2.1	多项式回归建模	75
3.2.2	各参数的综合影响分析	78
3.3	出水 pH 对处理效能的影响规律	80
3.3.1	紫外吸收与有机碳去除响应	80
3.3.2	荧光组分变化的光谱分析	82
3.3.3	同步荧光二维相关分析	85
3.3.4	分子质量变化的影响	89
3.4	pH 调节对各单元处理效果的影响机制	90
3.4.1	pH 调整对水质特性的影响	91
3.4.2	基于零电荷点的吸附竞争行为	93
3.4.3	活性氧物种在臭氧氧化过程中的形成与演变	93
3.4.4	二级出水 pH 对 M+O 组合工艺影响的作用机制探析	94
3.5	本章小结	95
	参考文献	96
第4章	MIEX [®] 协同臭氧氧化工艺的污染物削减效能	100
4.1	引言	100
4.2	MIEX [®] 与臭氧在常规水质参数上的表现对比	101
4.2.1	对有机碳及营养盐类指标的影响分析	101

4.2.2	荧光物质的去除特性	104
4.2.3	OMP 的削减效能	106
4.2.4	生物毒性变化趋势	109
4.3	对多类型污染物的协同控制效能评估	112
4.3.1	综合水质指标分析	112
4.3.2	OMP 和生物毒性指标的削减效能	112
4.4	MIEX [®] 在再生过程中的解吸行为与性能恢复	114
4.4.1	紫外与可见光谱响应	114
4.4.2	荧光组分解吸行为	115
4.4.3	解吸物中的毒性与 OMP 分布	122
4.4.4	解吸行为与出水水质的相关性	123
4.5	转型树脂吸附与离子转移机制探讨	124
4.5.1	不同类型转型树脂的表现	124
4.5.2	进出水离子变化及转移趋势	128
4.6	转型 MIEX [®] 树脂与臭氧协同处理对污染物的削减效果	130
4.6.1	溶解性有机物与离子浓度变化	130
4.6.2	处理过程中胞内抗性基因与病原菌的削减特征	134
4.6.3	胞外抗性基因的控制效果	136
4.6.4	病原菌与 ARG 再生风险的评估	137
4.6.5	微生物结构演替特征	139
4.6.6	微生物群落再生潜力分析	140
4.7	本章小结	143
	参考文献	143

第三篇 新型磁性树脂的制备、效能及吸附机制

第 5 章	含双季铵结构的磁性阴离子树脂性能及其环境应用	151
5.1	引言	151
5.2	含双季铵功能基的磁性阴离子交换树脂的结构与性能表征	152
5.2.1	表面结构、粒径分布及磁响应特性	152
5.2.2	孔隙结构与表面官能团分析	154
5.2.3	晶型结构与元素价态组成	156
5.3	吸附动力学与等温行为分析	160
5.3.1	不同污染物的吸附速率与机制	160
5.3.2	不同污染物的吸附等温特征	163
5.3.3	pH 对吸附行为的调控机制	165

5.4 实际水样中污染物削减能力评价	166
5.4.1 常规水质参数与离子指标控制表现	166
5.4.2 荧光污染物去除效果	168
5.4.3 腐殖酸对铵根离子迁移行为的影响分析	170
5.5 本章小结	173
参考文献	174
第6章 高容量羧基磁性树脂的吸附性能与组合工艺强化分析	176
6.1 引言	176
6.2 含羧基功能基的高容量磁性树脂的制备与性能表征	177
6.2.1 树脂的表面形貌、粒径及磁响应特性分析	177
6.2.2 孔结构特性与表面官能团分析	179
6.2.3 材料的晶体结构与元素价态分析	180
6.3 目标污染物 ATL 的吸附特性分析	182
6.3.1 动力学行为与吸附速率特征	182
6.3.2 等温吸附规律及热力学参数计算	184
6.3.3 溶液化学条件对吸附过程的影响分析	185
6.3.4 MPAP 的可再生性与吸附效能对比	186
6.3.5 吸附前后材料结构变化与官能团响应	188
6.4 基于理论计算的吸附机制解析	190
6.4.1 ESP 与 ALIE 分布揭示吸附活性位点特征	190
6.4.2 结合能计算与相互作用类型探究	193
6.4.3 电子密度差图分析	196
6.5 基于磁性阳离子树脂的强化协同工艺在污染控制的应用效果	197
6.5.1 MPAP 与 MIEX® 耦合用于 ATL 去除的表现	197
6.5.2 不同配比对实际水处理能力的优化分析	198
6.5.3 实际出水水质及风险控制表现评估	199
6.6 磁性树脂-臭氧协同深度处理技术构建及其应用展望	200
6.7 本章小结	202
参考文献	203

第四篇 磁性树脂水处理技术的前沿探索与未来展望

第7章 树脂增强电吸附水处理技术的研究进展	207
7.1 引言	207
7.2 CDI 技术原理	207
7.3 CDI 装置类型	209

7.3.1	传统电极电容去离子 CDI	209
7.3.2	非对称电极电容去离子 HCDI	210
7.3.3	催化电容去离子 CCDI	211
7.3.4	膜电容去离子 MCDI	211
7.3.5	流动电极电容去离子 FCDI	211
7.3.6	磁性流动电极电容去离子 MFCDI	212
7.3.7	其他形式的电容去离子	212
7.4	树脂增强电吸附策略	213
7.4.1	简单集成技术	216
7.4.2	树脂涂层复合电极技术	216
7.4.3	树脂衍生多孔碳电极技术	217
7.4.4	无膜电去离子技术	217
7.4.5	电容去离子和电去离子耦合技术	218
7.4.6	树脂填充强化技术	218
7.5	树脂增强电吸附水处理技术的发展展望	219
7.5.1	树脂与电吸附结合方式的多样化开发	219
7.5.2	外场下各类粒子的受力分析及理论模型建立	221
7.5.3	微观机制解析与外场协同作用的研究	222
7.5.4	针对不同水源的定制化应用	223
7.5.5	在其他领域可能的应用方式	224
7.6	电场和磁场强化的作用机制分析	227
7.7	本章小结	232
	参考文献	233
	总结	242
	附录	244
	编后记	250

第一篇

绪 论

第 1 章 再生水水质安全保障的挑战与机遇

1.1 再生水资源化的驱动因素与发展背景

1.1.1 再生水的利用需求

当前，全球淡水资源紧张问题日益严峻，已成为制约社会可持续发展的突出挑战。随着人类社会活动的日趋频繁以及经济建设的不断推进，大量未经充分净化的污水直接排入江河湖泊，导致水环境恶化，部分区域出现因水质下降而无法利用水资源的水质性缺水问题。此外，水资源在时空尺度上分布不均，再加上农业、工业等领域用水分配不合理，使得部分地区面临水量性缺水的挑战^[1]。预计到 2050 年，全球约 180 个国家中将有近一半（87 个国家）人均年可再生水资源量低于 1700 m³，达到国际公认的水资源紧张标准，并且大多数区域呈现出人均可再生水资源逐年减少的趋势 [图 1-1 (a)]。我国同样面临严峻的水资源问题，表现为降水时空分布不均、可利用淡水资源匮乏以及水体污染等多重压力交织并存 [图 1-1 (b)]。

尽管我国拥有较为可观的水资源总量，在全球范围内名列前茅，国家统计局数据显示 2023 年，全国水资源总量为 25782.5 亿 m³^[2]。然而，在经济快速增长和社会不断进步的背景下，用水需求持续上升，人均水资源占有量相对不足，仅为 1827.6m³/人，远低于国际水平，反映出人均水资源紧张的现实。我国人均可利用水资源量仅约为全球平均水平的 25%，在国际上处于资源性水紧缺国家行列，同时也是全球再生水利用率较低的国家之一^[3,4]。因此，推动污水的减排与资源化利用，已上升为我国水资源管理的关键战略之一。污水回用被纳入国家水务发展体系，相关部门正加快推进回用流程的系统整合与协同优化，在全国范围内逐步构建高效、集约的再生水利用模式。

近年来，随着国家对生态文明建设的持续推进，我国水污染治理体系逐步完善，污水处理能力显著提升，再生水利用技术也取得了长足进展。根据《2023 年城乡建设统计年鉴》^[5]，截至 2023 年底，全国城市污水处理厂数量已达 2967 座，日处理总能力达到 2.27 亿 m³，为再生水的广泛利用提供了有力支撑。在此基础上，水质达标率的持续提升和出水水量的稳定性进一步夯实了回用应用条件。其中，二级出水（SE）因其来源可控、水量丰富和资源化潜力高，正逐渐

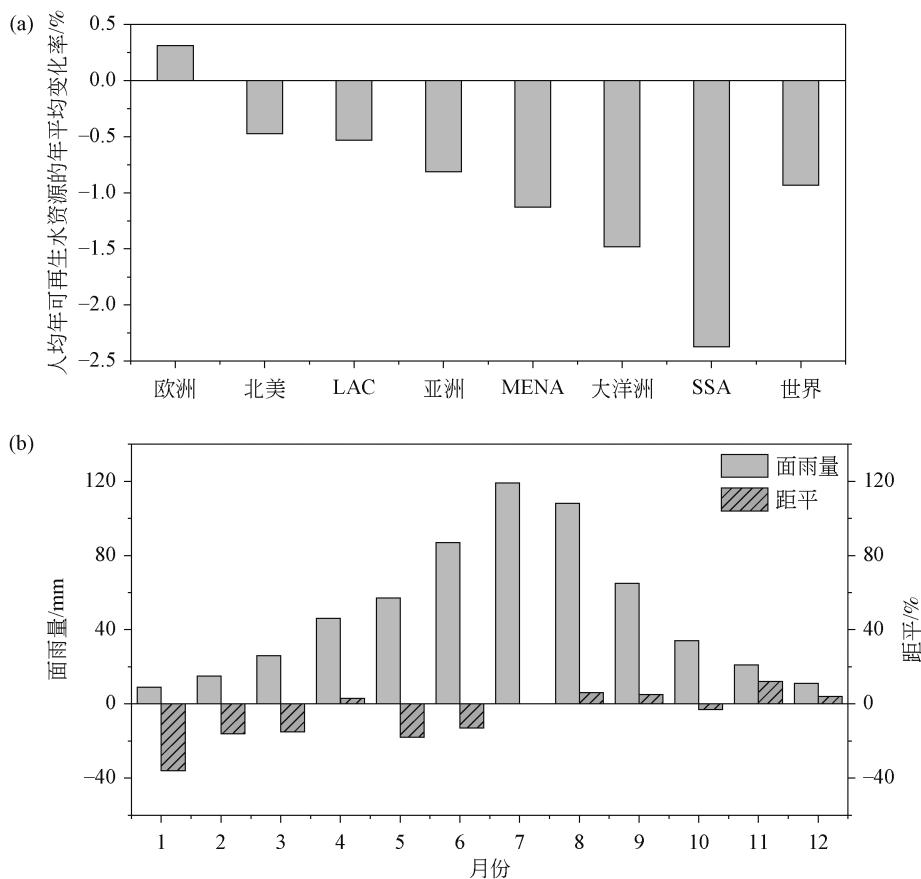


图 1-1 (a) 2015 ~ 2050 年全球各地区人均可再生水资源年均变化趋势^[7] (LAC: 拉丁美洲与加勒比地区; MENA: 中东及北非; SSA: 非洲撒哈拉以南); (b) 2023 年我国各月降水总量及其相对距平分布^[8]

成为再生水利用中最具实际推广价值的水源类型之一。住房和城乡建设部数据显示, 2023 年市政再生水生产能力为 8595.4 万 $\text{m}^3/\text{日}$, 仅占污水处理总量的 37.9%。这说明再生水的利用尚处于起步阶段, 其巨大的潜在价值未被充分挖掘。与远程调水或深层地下水开采等低成本、不可持续的水源开发方式相比, 再生水具有地域性强、可持续性高、成本相对较低等优势, 在城市景观、市政杂用、工业冷却等方面具有广阔的应用前景。然而, 正如 Yi 等^[6]指出的, 我国再生水利用的发展仍面临多方面制约因素, 包括: 公众对水资源现状与再生水价值认知不足, 相关法规体系和政策支持尚不健全, 再生水定价机制缺乏统一标准, 公众接受度低, 财政投入不足, 配套管网设施不完善, 以及缺乏对处理系统长期运行可靠性的监管与系统化的风险评估机制。这些因素在不同程度上限制了我国

污水回用率的提升，亟需通过制度创新、技术突破与公众参与共同推动再生水利用水平的跨越式发展。

我国再生水利用的推进历程为：1985 年以前属于起步探索期，1986 ~ 2000 年为试点示范阶段，2000 ~ 2010 年进入全面推广阶段，而自 2011 年起则步入了持续稳步推进的新阶段^[9]。在政策引导持续强化和相关标准体系逐步健全的背景下，污水资源化利用已逐步被提升为国家战略层面的重点任务。目前，再生水的主要应用方向包括农业、林业、畜牧渔业灌溉，城市杂用（如道路冲洗、绿化灌溉）、工业生产用水、生态环境补水以及补充水源等领域。其中，在环境用水类别中，景观水体补水已成为典型的利用方式之一。我国人工生态环境补水量 2023 年达到了 354.1 亿 m³，占全国总用水量的 6.0%^[10]。尽管景观用途的再生水利用潜力巨大，但其推广仍面临一系列风险因素的制约^[11]，主要体现在以下四个方面：①营养负荷问题：城市景观水体多为水深较浅（通常为 1 ~ 2m）的封闭或半封闭水域，易受外部干扰，加之再生水中氮、磷等营养物质浓度较高，容易引发水体富营养化、蓝藻暴发等问题，影响水体的景观功能和生态稳定性；②水质安全隐患：现行水质标准中对新兴污染物 [如内分泌干扰物（EDC）、药物残留等] 尚未建立系统性限值管理，而这些物质可能引起生物毒性反应，浓度甚至可能超过水体自净能力的极限；③可能携带多种致病微生物、病毒及抗生素抗性基因，其在景观用水中的暴露风险尚未完全明确，对公共卫生构成潜在威胁；④技术适配不足：目前缺乏针对景观水体回用的高效、稳定且可推广的专用处理技术。一些现有处理工艺在水质波动时处理效果不稳定，且缺乏足够的适应性和针对性。

目前，国内外关于再生水景观用途方面的研究主要聚焦于提升水体的观感质量、分析经济可行性、改善透明度、预防水体富营养化，以及调控浮游生物和藻类的生长状况^[12-14]。然而，在高效景观回用工艺的开发、有机与无机污染物在水体中的迁移与转化行为，以及潜在的生态和健康风险评估方面，当前在相关领域的研究仍不充分，尤其是在处理工艺的优化选择与参数调控、微量有机污染物（organic micropollutants, OMPs）、抗生素抗性基因、病原微生物的去除机制与效果，以及残留毒性物质可能带来的健康风险等方面，尚需系统深入的研究支持。因此，为推动再生水景观利用的安全与高效发展，亟需开展针对其稳定处理工艺的研究，结合出水水质风险的全面评估，构建覆盖“处理—输送—应用”全过程的技术保障体系。这不仅有助于提高再生水景观用途的可持续性，也为建立科学的风险管理机制提供理论支撑与实践路径。

1.1.2 政策推动下的再生水利用战略

再生水资源化作为缓解水资源短缺、实现可持续发展的关键路径，近年来受

到国家及地方政府的高度重视。政策驱动是推动再生水技术研发、设施建设和市场应用的核心动力，主要体现在以下四个方面。

1) 国家层面的顶层设计与目标规划

国家通过制定中长期发展规划和量化指标，明确再生水利用的发展方向。例如，《关于推进污水资源化利用的指导意见》（2021 年）提出目标，到 2025 年全国地级及以上缺水城市再生水利用率达到 25% 以上，京津冀地区达到 35% 以上。这项政策明确将再生水利用纳入国家水资源管理框架，并强调其在工业、市政、生态等领域的优先应用。《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》（2021 年）进一步细化目标，要求“十四五”时期，新建、改建和扩建再生水生产能力不少于 1500 万 $\text{m}^3/\text{日}$ 。《关于加强非常规水源配置利用的指导意见》（2023 年）明确将再生水纳入非常规水源统一配置体系，提出到 2035 年形成经济、高效、系统和安全的再生水利用格局。

2) 地方政策的配套实施

在国家政策引导下，各地政府根据区域水资源禀赋和用水结构，制定了差异化的再生水利用政策。例如，北京市出台《北京市“十四五”节水型社会建设规划》，提出建设再生水循环利用体系，全面提升再生水在河湖补水、市政杂用、工业冷却等方面的利用比例；截至 2023 年，北京市再生水利用率已达 38% 以上，位居全国前列。天津市重点推进工业园区再生水配套管网建设，推行“工业污水集中处理—达标回用—中水回供”的闭环系统，实现重点行业和高耗水企业的再生水全覆盖。深圳市、成都市、济南市等城市在园林绿化、道路冲洗、高尔夫球场灌溉等方面积极推广再生水使用，并出台价格激励机制，促进再生水替代地表水和地下水。

3) 法律法规与技术标准体系的完善

国家层面逐步构建起涵盖污水资源化全过程的标准与监管体系：《城市污水再生利用 城市杂用水水质》（GB/T 18920—2020）、《城市污水再生利用 景观环境用水水质》（GB/T 18921—2019）等国家标准，规范了再生水在不同用途下的水质指标，确保使用安全。地方标准如《北京市再生水水质标准》《广东省城镇污水再生利用标准》等，对再生水回用提出更严格的区域性控制指标。生态环境部、水利部等部门积极推进污水资源化统计与监管机制建设，推动各类工程项目纳入绿色评价体系，为政策执行提供数据支持和考核依据。

4) 市场机制与财政支持的双重激励

政府在政策引导的基础上，积极构建以财政投入、税收优惠和价格调节为核心的激励机制：通过专项资金、政府引导基金等方式支持污水资源化项目建设，重点扶持重点流域、缺水城市和生态敏感区域的再生水利用工程。对再生水实行差异化水价政策，多地通过实施“再生水价格低于自来水”的价格政策，提高

企业和用户的使用意愿。引导用水结构优化,鼓励社会资本参与再生水设施投资与运营,探索多元化投融资模式,促进污水资源化市场化运作。

我国再生水资源化已逐步从政策倡导阶段迈入制度支撑与市场驱动并重的发展新阶段。随着国家和地方政策的不断完善与落实,相关法律标准体系的建立,再生水在城市非饮用、工业循环、生态补水等领域的应用前景愈加广阔。

1.2 再生水回用的全球现状与标准比较

1.2.1 国内外回用案例与实践现状

再生水因其水质等级的差异,可根据处理深度和安全标准,被广泛应用于多个非饮用水领域。常见用途包括市政杂用(如道路清洗、园林绿化、建筑施工)、工业用水(如冷却水、冲洗水)、农业灌溉、生态补水(如湿地补水、河湖景观维持)等。在部分高标准处理条件下,再生水还可用于地下水回灌与非常规饮用水源。不同用途对水质的要求差异显著,如园林灌溉主要关注氮磷和微生物指标,工业冷却则更关注水的硬度、腐蚀性与结垢性。因此,为确保安全与可持续利用,必须根据具体用途设定相应的处理目标与水质控制标准,推动再生水的“定向处理”和“分质利用”。

城市景观水体不仅在改善局部气候条件方面发挥积极作用,同时也有助于提升城市整体生态与人居环境。在全球范围内,越来越多的国家和地区选择以再生水替代天然水资源,作为河湖水体及景观系统的主要补水来源。整体来看,发达国家较早开展再生水研究与应用,其回用技术体系也相对成熟。早在20世纪30年代,美国旧金山便开始探索利用污水处理厂出水进行景观水体的补水实践;在佛罗里达州,再生水被用于洗车和住宅绿地灌溉的历史也已超过三十年^[15]。得克萨斯州每日大约有1.5万m³的再生水被用于补充Yellowhouse Canyon Lakes等休闲性湖泊。美国再生水年利用量已达66.32亿m³,其中约62%应用于城市绿化和农业灌溉等领域^[16]。新加坡早在20世纪70年代便启动了NEWater项目的研发,并于2002年实现全国范围内的推广^[17]。日本的水再利用发展历程可划分为三个阶段,最初集中于厕所冲洗和景观灌溉,随后扩展到增强河流基流和娱乐性用途,最终走向多元化应用。由于淡水资源匮乏,日本早在1978年便在部分社区及建筑中部署了回收系统,用于非饮用目的,如景观灌溉和卫生用水^[18]。进入20世纪80年代后,随着城市化进程加快,日本部分城市河流出现流量骤减的情况,引发了对再生水用于补充生态基流的高度关注。东京是日本首个将再生水用于恢复城市河流生态与维持基流的城市,其再生水用途主要集中于河道补水(约占35%)以及景观绿化与灌溉(约21.6%)^[18]。在大阪市,近半数污水处理

厂实现了处理水的回用,主要用于提升城市周边休闲水体的水质,其中有5座处理厂专门向景观河道供水^[19]。然而,截至2016年,日本全国污水年产量约为147亿 m^3 ,其中用于厂外再生回用的仅为2.1亿 m^3 ,占比仅1.3%^[18],显示出再生水开发利用水平仍有较大提升空间。在西班牙,马德里所在区域已有24座城市建立了城市再生水系统,主要服务于公共绿地与公园的灌溉^[20]。以色列的再生水利用率位居全球前列,尤其在半干旱地区,部分河流依赖再生水作为主要补水来源,尽管其中约85%的再生水仍用于农业灌溉^[9,21]。葡萄牙的再生水利用尚处于起步阶段,受限於法律体系尚未完善、水务设施薄弱、经济与能源成本等因素,已实施的项目相对有限。代表性项目包括南部阿尔加维地区日处理能力为14500 m^3 的三级处理系统,该系统在旱季可帮助节约约15%的农业灌溉用水^[22]。澳大利亚方面,自1977年起即提出了水资源回用的相关规划建议^[23]。在2014~2015年,该国的再生水应用主要集中于环境生态补水与灌溉用途^[9]。

在发展中国家及最不发达国家,再生水在景观用途上的推广起步相对较晚,整体发展水平也较为滞后。东南亚地区的多数国家再生水资源的利用率仍较低,尚未形成大规模推广应用的体系^[16]。伴随我国经济社会的快速发展与城市化进程的不断加快,居民对城市宜居环境的要求逐步提升,对生态型水景观的需求也呈现显著增长趋势。我国在再生水回用方面逐步形成了以低接触、低风险应用为主的发展路径,其中城市景观和部分工业用途成为主要方向。许多城市通过再生水构建人工湖泊、溪流和河网,并为湿地系统提供生态补水^[24]。目前我国约有50%的再生水被用于城市景观水体的补水用途^[25],其中约13.2%的城市人工湖泊与池塘由再生水作为主要供水来源^[26]。在昆明的翠湖(典型高原城市湖泊)、天津的生态湿地公园(我国首个环保主题公园)、淄博的马踏湖(“美丽河湖”示范项目)以及西安的昆明湖(西北地区最大的人工湖)等典型景观水体中,回用水已被广泛应用并逐渐成为核心的补水方式。在水资源调控与生态景观建设方面,这种“以再生水为核心”的管理模式正在成为趋势。

值得一提的是,北京作为我国最早系统推广再生水利用的城市之一,已有超过50%的再生水被用于城市河道和湖泊的补水,逐步构建起以再生水为核心的城市生态水体维护体系,有效缓解了城市水资源紧张与景观生态需水之间的矛盾^[27]。在2008年奥运会期间,北京率先将再生水应用于奥运核心区景观水体的补水,成为全球首个在国际重大赛事中实现再生水规模化景观利用的城市,开创了国际大型赛事绿色用水的先例。奥运会之后,圆明园也引入再生水系统,年补水量达900万 m^3 ,使其成为典型的“再生水补给型”城市水体代表^[28]。此外,北京环球度假区作为近年来大型城市综合项目的典型案例,其园区内的绿地灌溉和水体补充全部依托于北京排水集团日处理能力1.9万t的再生水深度处理设施,实现了再生水在旅游娱乐、生态景观等多场景的集成应用。

总体来看,当前已有许多国家和地区将再生水用于补充景观水体,以缓解水资源紧张的问题。然而,从全球范围来看,景观用途在再生水整体利用中的占比较低,尚有较大的提升潜力和拓展空间。考虑到再生水供给的稳定性,以及在经济与社会层面的综合效益,未来其在水资源体系中有望扮演更加重要的角色。值得注意的是,为确保景观水体使用再生水的安全性,仍需配套高效的处理工艺与科学的管理措施,以有效防控水华暴发、有毒物质积累等潜在风险。因此,实现再生水在景观领域的全面、安全、可持续利用,仍需在技术研发与运行保障方面持续努力。

1.2.2 各类水质标准与管控体系对比

再生水利用遵循“以用定质、以质定用”的基本原则,即根据具体用途确定所需水质水平,反过来也依据水质状况限制其使用场景。目前,国际上尚未形成统一的再生水利用标准或操作指南,全球各国主要依据本国的水质安全要求、水体美观性、生态环境承载能力以及技术经济条件等因素,分别制定相应的水质标准、处理技术要求及管理指引。因此,各地在景观类用途方面的再生水水质规范表现出显著的差异性。

欧盟委员会于2020年正式出台《Regulation (EU) 2020/741》,首次以法规形式确立了再生水的最低使用标准,标志着欧洲在水资源回用领域立法体系建设上取得了重要进展。在亚洲,日本较早认识到再生水利用的战略意义,自20世纪起即开始构建相关政策和制度框架^[29]。例如,福冈市自1980年起开展再生水供应,并于2003年颁布《再生水利用下水道事业条例》,推动回用体系化发展。尽管日本在2005年已制定了基础水质标准,但目前仍未将化学污染物与病毒等关键风险因子纳入规范范围。2009年,日本通过《下水道白皮书》进一步将污水回用提升为国家水资源管理的重要组成部分。

美国在再生水管理方面起步较早,早在1992年便发布了《再生水利用指南》。由于联邦层面未出台统一标准,因此美国各州通常根据再生水的具体用途制定差异化水质要求。加利福尼亚州已率先启动直接饮用用途的再生水立法工作,正在制定相关法规以规范其安全性与管理要求^[30]。相比之下,马来西亚在污水回用方面仍处于初步探索阶段,目前尚未建立完善的政策支持体系与法律框架^[31]。葡萄牙的再生水利用发展也受到一定制约,主要由于相关立法缺失、水处理与输配设施不足,以及高昂的成本与能耗要求^[22]。截至2019年前,该国仅发布了一项非强制性再生水水质标准(NP 4435:2005)。2019年,葡萄牙批准了第119/2019号法令,首次就非饮用水回用设立法律框架,并采纳ISO 20426标准用于再生水健康风险评估。在澳大利亚,墨尔本市于2004年制定并发布了《再生水安全使用指南》,积极倡导将再生水广泛用于城市非饮用领域,如公园

绿地灌溉和景观水体补给等用途，推动回用水在城市环境管理中的规范化应用。总体而言，尽管许多国家已在灌溉、工业用途、地下水回补等方面建立了较为完备的再生水使用标准体系，但用于景观回用的相关标准仍显不足，全球范围内尚未形成统一、系统的景观再生水水质规范。

我国在立法层面首次将再生水纳入规范性文件，是通过《中华人民共和国循环经济促进法》的颁布实现的。随着国家对污水资源化利用的重视程度不断提升，2021 年国家发展和改革委员会印发《关于推进污水资源化利用的指导意见》，标志着我国污水治理工作从“达标排放”向“资源化回用”转型升级进入新阶段。自 2002 年以来，住房和城乡建设部、农业农村部等相关主管部门陆续牵头制定了《城市污水再生利用》系列国家标准，有效填补了我国在再生水利用领域标准体系建设的空白，为再生水应用提供了重要技术支撑与制度保障^[32]。

在国家层面的统一标准体系之外，部分再生水景观回用发展较为成熟的城市如北京、天津、太原^[33]等，也相继发布了具有地方特色的相关规范、技术指南与标准，为区域再生水景观应用提供了制度保障。与此同时，部分科研院所与行业组织（如中国环境科学学会及相关产业技术创新联盟）也从管理评价、效益分析等维度出发，陆续提出了若干推荐性技术指南与评估体系，进一步丰富了再生水回用的标准化体系。在景观用途领域，我国已逐步建立起一批具有代表性的规范性文件和技术标准，相关成果汇总见表 1-1^[9]。总体来看，尽管我国在标准体系建设方面取得了积极进展，但在涉及处理设备技术规范、用水效率评价及新兴污染物控制标准等方面，尚存在明显不足，有待进一步完善与拓展。

表 1-1 我国再生水用于景观回用的主要相关标准与技术文件汇总

发布/制定机构	文件名称	编号或状态
住房和城乡建设部	《城市污水再生利用 分类》	GB/T 18919—2002
住房和城乡建设部	《城市污水再生利用 景观环境用水水质》	GB/T 18921—2019
住房和城乡建设部	《城镇污水再生利用工程设计规范》	GB 50335—2016
住房和城乡建设部	《建筑中水设计标准》	GB 50336—2018
住房和城乡建设部	《城镇污水再生利用技术指南（试行）》	—
水利部	《再生水水质标准》	SL 368—2006
住房和城乡建设部	《城镇再生水厂运行、维护及安全技术规程》	CJJ 252
国家市场监督管理总局和 国家标准化管理委员会	《水回用导则 再生水分级》	GB/T 41018—2021
北京市	《再生水利用指南 第 4 部分：景观环境》	—
天津市	《城镇再生水供水服务管理规范》	DB12/T 470—2020
天津市	《天津市再生水设计标准》	DB/T 29-167-2019