

前 言

水是生命之源、生态之基、生产之要，水环境质量直接关系到人类健康、生态安全与社会经济的可持续发展。随着工业化、城市化进程的加速以及农业面源污染的加剧，氮、磷、重金属、难降解有机物等污染物排放，导致水体富营养化、黑臭化等问题日益突出，严重威胁生态系统平衡与水资源安全。传统污水处理技术虽能实现污染物的高效去除，但普遍存在能耗高、碳排放高、投资运维成本高以及对新兴污染物处理能力不足等瓶颈，难以满足新形势下水环境治理“生态化、低成本、可持续”的核心需求。

作为一种典型的基于自然的解决方案，人工湿地模拟自然湿地的结构与功能，通过填料、植物、微生物三者的协同作用，实现对各类污染物的高效净化，同时兼具涵养水源、保护生物多样性、调节微气候、碳汇减排等多重生态服务功能，具有投资低、能耗小、运维简便、生态友好等显著优势，已成为全球水环境治理的主流技术之一，被广泛应用于生活污水、污水处理厂尾水、微污染河水、农村黑臭水体等各类污染水体的净化处理中。联合国《2018 年世界水资源开发报告》明确强调，应将此类基于自然的解决方案作为改善水质的重要手段，助力实现《变革我们的世界：2030 年可持续发展议程》设定的相关目标。

人工湿地技术自 1903 年英国建成全球首个有记载的系统以来，历经百余年发展，已从最初的试验探索阶段逐步走向规模化、多元化应用。1953 年德国科学家 Seidel 发现芦苇的水质净化功能，构建了人工湿地雏形；20 世纪 60 年代末，Seidel 与 Kickuth 合作并由 Kickuth 于 1972 年提出了“根区法”理论，标志着人工湿地正式成为新型污水生态处理技术；20 世纪 80 年代后期，该技术进入大规模工程应用阶段；21 世纪以来，复合人工湿地系统快速普及，技术应用场景不断拓展。我国人工湿地技术起步于 20 世纪 90 年代初期，虽起步较晚，但发展迅猛，在山东、河南、云南、上海等多地的实践中取得了良好的环境效益、生态效益和社会效益，部分地区已将相关实践上升为地方标准。

随着生态文明建设被提升到前所未有的战略高度，我国“十四五”规划及多项政策文件均将人工湿地作为改善河湖生态环境、推进污水资源化利用的重要措施。然而，人工湿地技术在实际应用中仍面临诸多挑战：不同类型湿地的适配性不足、污染物去除机理的精细化研究不够深入、填料与植物的优化筛选缺乏系统性、微生物的协同作用机制尚未完全明晰、低温等极端环境下处理性能波动较大、运行过程中易出现堵塞等问题。

这些问题严重制约了人工湿地技术的进一步推广与效能提升，亟需通过系统的理论研究与实践总结，形成一套全面、系统、实用的技术体系，为行业发展提供支撑。

基于此，我们结合多年来在人工湿地领域的科研积累与工程实践，查阅了国内外大量相关文献资料，系统梳理了人工湿地技术的发展历程、研究现状与应用成果，编写了本书。本书严格遵循“基础—机理—核心组分—工艺—运维—展望”的逻辑脉络，全面覆盖人工湿地水质净化的核心内容，旨在为从事人工湿地研究、设计、施工、运维及管理的科研人员、工程技术人员、高校师生及相关管理者提供一部兼具理论性、实用性与指导性的参考著作。

全书共 8 章，各章内容紧密衔接、各有侧重：第 1 章系统介绍人工湿地的概况，包括技术简介、发展历程、类型划分及国内外应用现状，为后续研究奠定基础；第 2 章深入剖析人工湿地对氮、磷、悬浮固体、有机物、重金属、病原微生物等不同污染物的去除机理，揭示填料、植物、微生物在净化过程中的协同作用规律；第 3~第 5 章分别聚焦人工湿地的三大核心组分，详细阐述填料、植物、微生物的类别、作用机制、选用原则及分布特征，为核心组分的优化配置提供理论依据；第 6 章全面梳理各类人工湿地处理工艺，涵盖生活污水、农村黑臭水体、海绵城市配套等多种应用场景的工艺简介、流程及实用效果，并介绍了强化湿地处理性能的关键技术；第 7 章重点探讨人工湿地运行维护与管理的核心要点，包括堵塞风险预防、植物收割与管理等，为湿地长期稳定运行提供技术支撑；第 8 章展望人工湿地技术的研究与应用方向，围绕组分优化、机理深化、技术强化等方面提出未来发展重点，为行业创新发展提供思路。

在本书编写过程中，我们始终坚持理论与实践相结合、国内外研究相结合的原则，既注重吸纳人工湿地领域的前沿研究成果，也注重总结我国在人工湿地应用中的本土实践，力求内容全面、数据准确、逻辑严谨、实用性强。同时，我们也清醒地认识到，人工湿地技术正处于快速发展阶段，相关研究仍在不断深入，加之作者学识有限，书中难免存在疏漏与不足之处，恳请各位同行、专家学者批评指正。

最后，衷心感谢在本书编写过程中给予支持与帮助的各位专家、同仁，感谢所有相关文献的作者，也感谢为人工湿地技术研究与推广付出努力的每一位从业者。希望本书的出版能够为我国人工湿地水质净化技术的发展与应用贡献一份力量，助力水环境质量持续改善，推动生态文明建设迈向新台阶。

作 者

2026 年 4 月

目 录

第 1 章 人工湿地概况	1
1.1 人工湿地技术简介	2
1.2 人工湿地的发展历程	3
1.3 人工湿地的类型	8
1.3.1 表面流人工湿地	9
1.3.2 潜流人工湿地	10
1.4 人工湿地的应用现状	14
1.4.1 国外人工湿地的现状	14
1.4.2 国内人工湿地的应用场景	17
参考文献	24
第 2 章 人工湿地对不同污染物的去除机理	31
2.1 氮的去除机理	32
2.2 磷的去除机理	33
2.2.1 生物的除磷作用	35
2.2.2 填料的固磷机制	35
2.3 悬浮固体的去除机理	36
2.4 有机物的去除机理	36
2.4.1 不溶性有机物的去除机理	36
2.4.2 可溶性有机物的去除机理	37
2.4.3 难降解有机物的去除机理	37
2.5 重金属的去除机理	39
2.5.1 基质的作用	39
2.5.2 微生物的作用	40
2.5.3 植物的作用	40
2.6 病原微生物的去除机理	41
参考文献	42
第 3 章 人工湿地填料	45
3.1 人工湿地填料的类别	46

3.1.1	传统填料	47
3.1.2	新型填料	52
3.2	人工湿地填料的作用机制	66
3.2.1	填料对有机物的去除作用	66
3.2.2	填料对氮的去除作用	67
3.2.3	填料对磷的去除作用	69
3.2.4	填料对重金属的去除作用	70
3.3	人工湿地填料的选用原则	71
3.3.1	填料的选用原则	71
3.3.2	填料在不同湿地类型中的应用	72
3.3.3	填料在不同功能区域中的应用	72
	参考文献	73
第4章	人工湿地植物	77
4.1	人工湿地植物的类别	78
4.1.1	挺水植物	78
4.1.2	沉水植物	103
4.1.3	浮叶植物	120
4.1.4	漂浮植物	133
4.2	人工湿地植物的作用机制	140
4.2.1	吸收营养物质	140
4.2.2	为微生物提供栖息地	140
4.2.3	抑制藻类生长	141
4.2.4	维持运行环境	141
4.2.5	生态效应	142
4.2.6	其他作用	142
4.3	植物对不同污染物的净化机制	143
4.3.1	脱氮机理	143
4.3.2	除磷机理	143
4.3.3	对有毒有害物质的作用机理	144
4.4	人工湿地植物的选用原则	145
4.4.1	筛选依据	145
4.4.2	筛选原则	145
	参考文献	148
第5章	人工湿地微生物	154
5.1	人工湿地微生物的类别	155

5.1.1 细菌	155
5.1.2 放线菌	159
5.1.3 真菌	160
5.1.4 藻类	160
5.2 人工湿地微生物的作用机制	161
5.2.1 微生物对有机物的降解	162
5.2.2 微生物对氮的降解	164
5.2.3 微生物对磷的降解	168
5.2.4 微生物对重金属的去除作用	168
5.3 人工湿地微生物的分布	169
5.3.1 微生物在植物根区的分布	169
5.3.2 微生物在湿地基质上的分布	171
5.3.3 不同环境条件下微生物的分布规律	171
参考文献	172
第6章 人工湿地处理工艺	174
6.1 污水生态处理工艺	175
6.1.1 工艺简介	175
6.1.2 工艺流程	177
6.1.3 实用效果	177
6.2 生活污水生态处理工艺	177
6.2.1 工艺简介	178
6.2.2 工艺流程	179
6.2.3 实用效果	179
6.3 农村生活污水处理的生态净化工艺	179
6.3.1 工艺简介	180
6.3.2 工艺流程	180
6.3.3 实用效果	181
6.4 低温季节运行的复合生态水处理工艺	181
6.4.1 工艺简介	182
6.4.2 工艺流程	183
6.4.3 实用效果	183
6.5 新型生态水处理系统工艺	184
6.5.1 工艺简介	184
6.5.2 工艺流程	185
6.5.3 实用效果	185

6.6	城镇污水处理厂三级深度净化的人工湿地系统工艺	186
6.6.1	工艺简介	186
6.6.2	工艺流程	187
6.6.3	实用效果	188
6.7	旁流式砾间接触氧化法河湖净化系统工艺	188
6.7.1	工艺简介	189
6.7.2	工艺流程	189
6.7.3	实用效果	190
6.8	提升河道自净能力的生态系统工艺	190
6.8.1	工艺简介	190
6.8.2	工艺流程	191
6.8.3	实用效果	192
6.9	无动力净化河水的生态处理工艺	192
6.9.1	工艺简介	193
6.9.2	工艺流程	194
6.9.3	实用效果	195
6.10	海绵城市生态水净化系统工艺	195
6.10.1	工艺简介	196
6.10.2	工艺流程	196
6.10.3	实用效果	197
6.11	湿地公园式生态水净化系统工艺	197
6.11.1	工艺简介	198
6.11.2	工艺流程	200
6.11.3	实用效果	200
6.12	治理黑臭水体的生物修复系统工艺	201
6.12.1	工艺简介	201
6.12.2	工艺流程	202
6.12.3	实用效果	202
6.13	表潜一体化的人工湿地系统工艺	203
6.13.1	工艺简介	203
6.13.2	工艺流程	203
6.13.3	实用效果	204
6.14	地下式一体化人工湿地污水净化系统工艺	204
6.14.1	工艺简介	205
6.14.2	工艺流程	205

6.14.3 实用效果	206
6.15 排泥及防堵塞的水平推流人工湿地系统工艺	206
6.15.1 工艺简介	207
6.15.2 工艺流程	208
6.15.3 实用效果	208
6.16 垂直潜流人工湿地的布水及集水系统工艺	209
6.16.1 工艺简介	209
6.16.2 工艺流程	210
6.16.3 实用效果	210
6.17 农村黑臭水体的生态净化系统工艺	210
6.17.1 工艺简介	211
6.17.2 工艺流程	211
6.17.3 实用效果	212
6.18 人工湿地处理性能的强化途径	212
6.18.1 增加氧气供应和输送	212
6.18.2 结合电子供体基质	213
6.18.3 提高低温性能	214
参考文献	215
第 7 章 人工湿地的运维与管理	216
7.1 堵塞风险及预防	217
7.1.1 堵塞机理	217
7.1.2 堵塞成因	217
7.1.3 堵塞防治措施	219
7.2 植物收割	224
7.2.1 植物收割对污染物去除的影响	224
7.2.2 植物收割对湿地微生物群落变化的影响	225
7.2.3 植物收割对植物再生长的影响	225
7.3 植物管理要点	226
7.3.1 植物资源化利用	226
7.3.2 植物特征化配置	226
7.3.3 人工湿地植物生态系统搭建	227
参考文献	227
第 8 章 人工湿地的研究与应用展望	229
8.1 人工湿地系统主要组分优化研究	230
8.1.1 人工湿地填料优化与筛选	230

- 8.1.2 人工湿地植物优化与筛选 230
 - 8.1.3 人工湿地微生物筛选与研发 231
- 8.2 人工湿地净化机理深入研究 231
- 8.3 人工湿地强化技术研究 231
 - 8.3.1 人工湿地与传统处理工艺集成系统 231
 - 8.3.2 新型人工湿地耦合系统 232
 - 8.3.3 不同规模人工湿地耦合 232
- 8.4 人工湿地生命周期设计-应用-管理策略 233
- 8.5 人工湿地的应用及展望 233
- 参考文献 234

第 1 章

人工湿地概况



人工湿地 (constructed wetland, CW) 是 20 世纪 70 年代兴起并发展较快的新型污水生态处理技术, 具有建设运行成本低、操作简单、运行维护方便、能源消耗少、生态景观效果好、对污染负荷变化适应能力强、水质净化效果突出等优点, 且环境效益、社会效益和经济效益显著, 符合绿色低碳经济原则, 适合我国国情 (Matamoros et al., 2007; Schroder et al., 2007)。现已被广泛用于中水回用、河湖流域水生态系统修复、水源保护区水质维护、城镇污水处理厂尾水深度处理、海绵城市建设、农村生活污水及黑臭水体治理、面源污染防控等水体环境质量改善领域, 尤其是在削减有机污染物、氮 (N)、磷 (P) 污染等方面发挥重要作用, 并已形成《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010)、《人工湿地污水处理技术导则》(RISN-TG 006—2009)、《污水处理厂尾水人工湿地工程技术规范》(DB41/T 1947—2020)、《人工湿地污水处理技术规程》(DG/TJ 08—2100—2012) 以及 2021 年 4 月颁布的《人工湿地水质净化技术指南》等多项国家及地方标准与技术文件, 使其在水污染治理和生态修复领域占据了举足轻重的地位 (王庆海等, 2008)。

1.1 人工湿地技术简介

人工湿地是指在一定长宽比及地面坡度的土地上, 由土壤、砂、砾石、陶粒、炉渣、人工填料等混合而成的填料介质床, 并在床体上种植具有水质净化性能好、抗洪水侵袭性强、生长成活率高、美观且具经济价值的水生植物, 如水葱、香蒲、芦苇、鸢尾、菰 (茭白)、慈姑等, 及生存于水中、填料介质中的动物、微生物所组成的人工营造的独特水域生态环境。填料介质、水生植物和微生物是影响人工湿地净化效率的三个重要因素。填料介质不仅为微生物和植物的生长提供稳定的依附载体和营养物质, 而且为人工湿地系统氧气的传输提供了便利条件。植物通过直接吸收污水中 N、P 等营养物质用以自身生长, 其生理活动有利于增加系统溶解氧 (dissolved oxygen, DO), 促进微生物的生长繁殖, 增强湿地系统的脱氮除磷效果。同时填料介质和植物根系还能改善环境体系中的氧化还原条件, 从而强化湿地系统对污染物的净化效能 (Kantawanichkul et al., 1999; Lund et al., 1999)。微生物是自然界中最重要的分解者, 其在人工湿地系统中有着举足轻重的作用 (张巍等, 2010)。当排放的污水流经人工湿地系统时, 填料介质、植物根系、动物及其附载的微生物会与污水直接接触, 通过物理 (如沉淀、吸附、过滤等)、化学 (离子交换、络合作用等) 和生物 (同化、富集等) 的协同作用, 使系统中的污染物质被吸收、分解或转化, 从而实现水质的高效净化 (于君宝等, 2013; Zhang et al., 2010; Reddy, 1983)。此外, 人工湿地也指利用河滩地、绿化用地等, 通过优化布水和集水等强化措施改造的近自然系统, 实现水质净化功能提升和生态提质。

1.2 人工湿地的发展历程

人工湿地属于土地处理法的一种，我国早在古代就已经开始应用。人工湿地一词最早出现于1904年澳大利亚 Brian Mackney 的文章中（潘科等，2005）。20世纪50年代，在开展人工湿地研究时，德国学者 K. Seidel（1966，1964）发现污水中的细菌（如肠球菌、大肠杆菌、沙门氏菌等）在流经芦苇床后消失，且芦苇及其他大型植物能从中去除大量重金属、无机物和有机物等。在此基础上 Seidel 与 Kickuth 合作并由 Kickuth 开发了人工湿地“根区法”，于1972年提出了“根区理论”，该理论极大地推动了人工湿地污水处理技术的试验研究，掀起了人工湿地研究与应用的“热潮”（刘衍君，2003）。

尽管人工湿地在污水处理领域还是一门新兴技术，但其在全球范围内得到迅速普及和推广。20世纪60年代，人工湿地以生活污水、城市工业废水、河湖水、地面径流和矿山酸性排水等为处理对象，开始在实验室小规模开展研究，并推广至大规模试验研究及应用。70年代之后，研究人员在应用过程中逐渐发现人工湿地存在着一系列的缺陷，人们开始对人工湿地的建设变得谨慎。在以后的几年中，科研人员逐步解决了大部分技术难点，使湿地技术更加完善与成熟，并有目的地对原有天然湿地进行改造或直接设计建造人工湿地系统。80年代，人工湿地的应用得到迅速发展，仅丹麦就有30多个人工湿地污水处理厂，整个欧洲则建立了5000多个潜流人工湿地污水处理系统。80年代末至90年代初，北美至少有300个人工湿地系统用于处理城市生活污水、工业废水。同时，美国、英国等也开展了这方面的工作，相继召开人工湿地研讨会，总结各国人工湿地污水处理方面的经验，提出了人工湿地的相关机理和部分可供参考的设计规范、数据，美国国家环境保护局（U. S. Environmental Protection Agency, EPA）自1988年陆续出版了与人工湿地相关的技术文件。1996年9月在奥地利维也纳召开的第四届国际研讨会标志着人工湿地系统作为一种独具特色的污水处理技术逐步应用到专业环境科学技术领域（张毅敏和张永春，1998）。目前，欧美建有大量的人工湿地系统用来处理市政、工业和农业废水，但仍有潜流人工湿地容易堵塞的问题（白晓慧和王宝贞，1999）。图1-1展示了人工湿地的诞生、现状、深入研究以及集约发展的路线图。

人工湿地污水处理系统的开发历史虽然仅有短短的几十年，却在较多国家取得长足发展，该系统正在不断地受到全球各地的重视。有些国家甚至采用立法形式支持人工湿地技术的应用。如德国的《联邦矿山法》的有关规定要求矿区业主在矿水抽出后不得将其直接排入河流或湖泊，必须经过人工芦苇湿地生物处理后才允许排放。

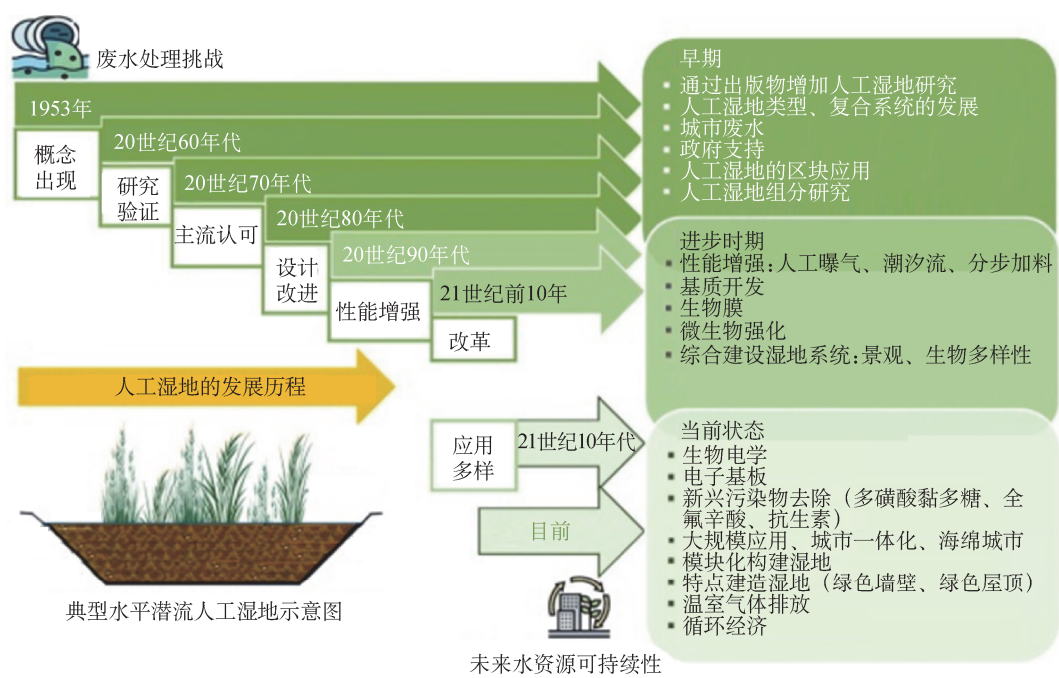


图 1-1 人工湿地的发展历程（Addo-Bankas et al., 2024）

我国对人工湿地污水处理技术的研究起步相对较晚，直到“七五”规划期间才开始展开较大规模的研究。我国的第一个人工湿地系统是天津市生态环境科学研究院在1987年建成的芦苇湿地工程，其处理规模能力为1400m³/d，占地6hm²（赵建，2006）。1988~1990年在北京昌平建成了用于治理生活污水和工业废水的表面流人工湿地，其处理规模能力为500m³/d，占地2hm²，处理效果好于传统的二级处理工艺（赵丽娜，2007）。1990年，国家环境保护局华南环境科学研究所深圳建成了白泥坑人工湿地城镇污水处理系统，它的处理规模能力为3100m³/d，占地面积为8400m²，五日生化需氧量（BOD₅）、用重铬酸钾法测定的化学需氧量（COD_{Cr}）、固体悬浮物（suspended solids, SS）的去除率分别为90%、80.47%、93%，效果良好；并开展了人工湿地的生物降解动力学、水力学等相关净化机理与规律研究，为我国人工湿地建设提供了大量的参考数据（王久贤，1997；国家环境保护局科技标准司，1997；陈韞真和叶纪良，1996）。1996年山东省胶南市湿地工程建成，将其用于处理工业废水和生活废水（两者体积比为1：4），并取得了较好的生态效益。1997年内蒙古赤峰宁城污水处理厂的建成成为人工湿地污水处理技术在我国北方地区的研究和应用提供了依据。同年，深圳市环境科学研究所建成了深圳市洪湖湿地公园，开展了大量的理论研究，并在技术和系统运行管理方面积累了很多宝贵经验；2002年该湿地系统水质净化工程被国家环境保护总局评为12项“国家重点环境保护实用技术示范工程”之一。1998年成都市府河边建成了世界上第一座城市综合性环境教育公园——成都活水公园，占地26000m²，其有一套完整的人工湿地生物

净水系统,演示了被污染的水在自然界由“浊”变“清”、由“死”变“活”的过程。2003年云南省澄江县建立了抚仙湖人工湿地净化技术试验工程,并取得明显成效,显著推动了人工湿地技术在九大高原湖泊的应用。2005年北京市丰台区在水衙沟二期建成了北京南部最大的人工湿地景观(占地 5000m^2)。2006年郑州市郑东新区人工湿地建成,总面积为 40000m^2 ,日处理污水 10000t ,出水水质达到国家地表水Ⅲ类水质标准,已经成为中央商务区一道亮丽的风景。同时郑州市政府规划投资数亿元利用人工湿地技术对其境内贾鲁河进行全面治理。2007年在成都市凤凰河建成了日处理量 20000t 的治污人工湿地。2009年辽宁省铁岭市建成了莲花湖人工湿地系统,工程占地 676667m^2 ,污水日处理量 50000t 。2011年湖南省长沙市建成了日处理污水 40000t 的洋湖人工湿地。另外,上海东滩湿地公园、江西鄱阳湖国家湿地公园、柳州红花谷湿地公园、苏州太湖国家湿地公园、杭州西溪国家湿地公园、安徽太平湖国家湿地公园、江苏常熟沙家浜国家湿地公园等也在近几年建成。除了这些大型的人工湿地建设外,近年来一些小型的人工湿地在农村开始推广应用,并取得初步成效。

我国人工湿地总面积已经超过 67000km^2 (不包括台湾、香港和澳门),主要分布在中国东部(Zhang et al., 2020)。其中,江苏省面积最大(8740km^2),其后依次为湖北省(6808km^2)、山东省(6345km^2)和广东省(5953km^2)。各省份人工湿地的密度分布与其所在区域的社会经济发展水平及人口密度格局基本一致。过去30年间,上述省份快速的社会经济发展带来了较大的水污染压力,促使人工湿地在该区域迅速推广。此外,气候条件也是造成人工湿地应用地区差异的重要因素(Zhang et al., 2012; Li and Jiang, 1995)。这一影响可从“胡焕庸线”得到印证——该线由我国著名地理学家胡焕庸于1935年提出,常作为中国东部(经济发达、人口稠密)与西部(经济发展相对滞后、人口稀疏)地区的地理分界线。

大型人工湿地的建设是我国人工湿地应用的重要特色之一。处理能力不低于 $1.0\times 10^5\text{m}^3/\text{d}$ 的大型人工湿地概况见表1-1。这些湿地中,表面流人工湿地系统应用较为广泛,主要用于污水处理厂尾水处理。大型人工湿地的填料以天然材料为主,包括土壤、粗砂和砾石,其对氮、磷等营养盐具有较高的去除率(Yang et al., 2020)。除水质净化功能外,大型人工湿地还应兼顾景观效应,这将是国内人工湿地未来发展的重要方向。在我国南方(如浙江省)饮用水源保护中,大型人工湿地的应用已取得显著成效。以“石臼漾人工湿地”为例,其在2008~2020年间持续稳定运行,为嘉兴市公共水厂提供净化原水。在该项目的示范带动下,过去10年间嘉兴市周边地区陆续建成多座类似规模的人工湿地,总占地面积 638hm^2 ,日处理能力合计达 $1.3\times 10^6\text{t}$ 。浙江省内近300万居民因此受益,获得了更为清洁的日常饮用水。人工湿地除能以较低成本去除氮、磷外,还可去除重金属及部分有机污染物。Zhang等(2012)研究发现,湿地可作为多环芳烃的汇,从

表 1-1 我国处理能力 $\geq 100000\text{m}^3/\text{d}$ 的部分人工湿地

年份	位置	名称	类型	基质	主要植物	处理对象	污染物去除效率	处理能力/ (m^3/d)	参考文献
1994	云南	滇池人工湿地	SFCW	—	芦苇、菹草、浮萍	农田灌溉用水	TP (78.8%)、TN (51.1%)、TDN (51.1%)、TDP (72.1%)、SS (37.3%)、 COD_{Cr} (22.1%)	1.9×10^5	(Liu, 1997; Tang and Shi, 1997)
1998	山东	荣成人工湿地	SFCW	土壤	芦苇	污水处理厂尾水	SS (73.9%)、 BOD_5 (72.5%)、 COD_{Cr} (63.8%)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (45.1%)、TP (30.2%)	2×10^5	(Song et al., 2005)
2000	山东	东营人工湿地	SFCW	土壤	芦苇	污水处理厂尾水	COD (5~10月: 62.5%; 12~3月: 57.0%)、 BOD_5 (5~10月: 84.5%; 12~5月: 57.0%)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (5~10月: 71.2%; 1~5月: 30.2%)、TP (5~10月: 47.1%; 1~5月: 21.5%)	1×10^5	(Li and Lv, 2003)
2009	浙江	十九杨人工湿地	SFCW	土壤	菹蒲、东方香蒲、鸢尾、美人蕉、千屈菜、芦苇、芦竹、菰、黑藻、苦草	饮用水源	COD_{Mn} (6.1%)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (36.7%)、TP (21.3%)、TN (11.7%)、Mn (13.8%)、Fe (36.1%)	2.5×10^5	(Wei, 2014)
2009	山东	五河人工湿地	SFCW	土壤	芦苇、荷花、菰、荇菜、棕叶芦、睡莲、水芹	地表径流水	陷泥河: $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (61.0%)、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (-9.0%)、TN (36.0%)、TP (50%)、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (55%); 南涑河: $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (40.0%)、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (27.0%)、TN (27.0%)、TP (38%)、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (43%)	3×10^5	(Li et al., 2019; Qu et al., 2019; Wang et al., 2014)
2011	广东	东莞公园人工湿地	SSFCW	粗砂、砾石、火山岩、石灰石	芦苇、草麻、芦葦、唐松草、香根草、纸莎草、美人蕉	污水处理厂尾水	COD (61.8%)、 BOD_5 (64.4%)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (82.6%)、TP (75.2%)	1×10^5	(廖波和林武, 2013)
2012	江苏	盐龙湖人工湿地	SFCW	复合弹性材料	芦苇、睡莲	饮用水源	TP (20.8%)、TN (16.0%)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (42.9%)、SS (40.8%)	2×10^5	(脚杰等, 2014)
2016	山西	十字河人工湿地	CSCW	土壤、鹅卵石、细砂	芦苇、水葱、东方香蒲、睡莲、菰	地表径流水	COD (61.7%)、 BOD_5 (84.6%)、TN (80.3%)、TP (81.8%)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (83.6%)	1.98×10^5	(He, 2018)
2016	云南	普底河人工湿地	CSCW	砾石	芦苇、苧麻母草	饮用水源	COD (>25.0%)、 BOD_5 (>25.0%)、TP (>37.5%)、TN (>42.0%)	1×10^5	(周越等, 2016)
2017	广东	坪山河人工湿地	SSFCW	粗砂、沸石、牡蛎壳	苧麻、菹蒲、唐松草、香根草、纸莎草、美人蕉	污水处理厂尾水	COD、 BOD_5 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、SS《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV级标准	旱季: 1.27×10^5 ; 雨季: 1.66×10^5	(高祯等, 2020)

续表

年份	位置	名称	类型	基质	主要植物	处理对象	污染物去除效率	处理能力/ (m³/d)	参考文献
2013~ 2014	辽宁	寇河人工湿地	SFCW	土壤	菖蒲、香蒲、菰、千屈菜、水葱	地表径流水	《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ级标准	4.2×10 ⁵	(艾亮, 2015)
2011	云南	星云湖人工湿地	—	砾石	—	地表湖泊水	TP (68.8%)、TN (50.0%)、BOD ₅ (61.3%)、NH ₄ ⁺ -N (54.1%)	2×10 ⁵	(汪俊三和覃环, 2005)
2013	四川	成都某中水回用工程	SSFCW	砾石、砂子	香蒲、紫叶美人蕉	污水处理厂尾水	COD (20%~50%)、NH ₄ ⁺ -N (70%~90%)	1×10 ⁵	(朱卫, 2018)
2013	广东	肇庆某人工湿地处理污水厂尾水工程	SSFCW	砾石	东方香蒲、美人蕉、菖蒲、千屈菜、灯心草	污水处理厂尾水	COD (20%~50%)、NH ₄ ⁺ -N (70%~90%)	1×10 ⁵	(陈思莉等, 2014)

注：SFCW 代表表面流人工湿地；SSFCW 代表潜流人工湿地；CSCW 代表复合型人工湿地；TDN 代表水体可溶性总氮；TDP 代表水体可溶性总磷（Zhang et al., 2020）；COD_{Mn} 代表采用高锰酸盐法测定的化学需氧量。

而降低饮用水供应的健康风险。人工湿地应用的明显制约因素在于土地资源的可获取性,但对大多数饮用水源保护区而言,可利用未开垦土地进行建设。总体而言,利用大型人工湿地保护饮用水水源具有广阔的应用潜力。

1.3 人工湿地的类型

人工湿地具有与沼泽较为类似的地貌类型,由具有较强耐水性和耐污性的植物、不同渗透率的基质、不同流动方向的水体、好氧和厌氧微生物种群、无脊椎或脊椎动物构成。按照湿地的作用不同,人工湿地可以分为以下4类:①人工水产湿地,主要用于农业生产以及鱼虾等水产的养殖;②人工处理湿地,主要用于净化城市和村镇生活、生产污水;③人工抗洪湿地,主要在洪水发生时发挥削减洪峰和减轻灾害的作用;④人工生境湿地,主要用于维护生态环境平衡,保护物种多样性(王治国和蓝梅,2016)。

按照湿地中主要植物类型不同,人工湿地可以分为以下3类:①挺水植物人工湿地,在该系统中植物生长在湿地水面下或水面上,且具有发达的根系和较高的输氧率,使得系统内分布多个好氧、厌氧及兼性区域,增加了微生物多样性,提供了更多降解污染物的途径;②浮水植物人工湿地,在该系统中植物全部漂浮在湿地水面上,且具有较强的生长能力,同时在根系区域氧浓度较高,可有效提高N、P、重金属等污染物的去除能力及传统稳定塘效率(梁继东等,2003);③沉水植物人工湿地,在该系统中植物全部沉于湿地水面下,主要应用于初级处理和二级处理后的深度处理。目前人工湿地系统中选用较多的是挺水植物系统。

按照填料和水的位置关系,人工处理湿地可以分为以下2类:①表面流人工湿地,以自然泥土和砂石为基质,水面在土壤表面以上,水从进水端流向出水端,通过过滤、沉降等作用净化水体;②潜流人工湿地,以不同粒级的天然矿物质或人工合成填料为基质,水面在土壤表面以下,水从进水端水平或垂流向出水端,污染物通过渗透、吸附和沉积等过程被去除,但其对有机物的去除能力通常弱于表面流人工湿地(Liu et al., 2012; 谢焱, 2012; 潘科等, 2005)。潜流人工湿地按照水流方向,又可分为水平潜流人工湿地、垂直潜流人工湿地和复合潜流人工湿地3种。按水流方向不同,垂直潜流人工湿地又可分为上行垂直潜流人工湿地、下行垂直潜流人工湿地和复合垂直流人工湿地。在众多人工湿地的分类方法(图1-2)中,以填料和水的位置关系作为划分依据最为普遍且基础。

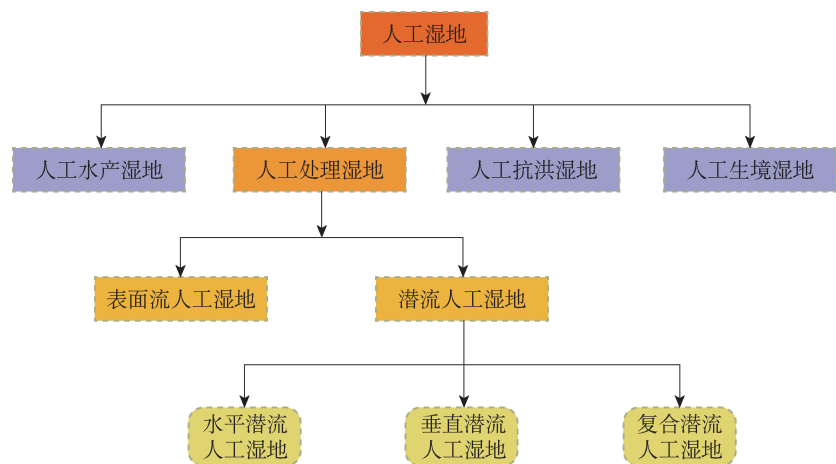


图 1-2 人工湿地类型图

1.3.1 表面流人工湿地

表面流人工湿地最早于 1968 年在匈牙利发展起来，能够处理各种类型的废水，如生活污水、生产废水等，有助于防洪和岸线侵蚀控制。表面流人工湿地在内部构造、生态结构和外观上都十分类似于自然湿地，它由水池或槽沟组成，底部及四周挡土墙铺有防渗材料以防止污水渗透或者污染地下水，表面种有植物（图 1-3）。同时，表面流人工湿地也是经过人为设计与运行管理的人工生态系统。相较于自然湿地，其通过科学的设计、运行与维护，能够实现对水体中污染物及营养物质更为高效的去除。

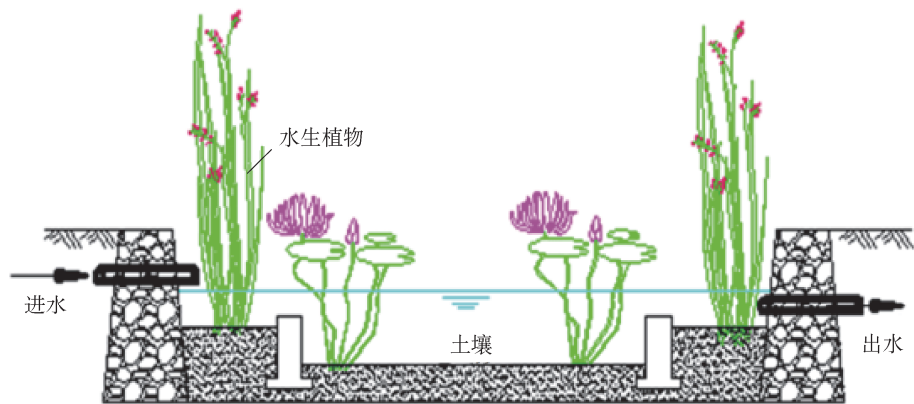


图 1-3 表面流人工湿地示意图

在表面流人工湿地系统中，污水以一定深度缓慢地进入人工湿地后，主要通过高大挺水植物、耐污沉水植物或浮水植物的茎与叶拦截或吸收、土壤吸附过滤和污染物自然沉降达到净化水体的目的。它的基本特征为：水力路径以地表流动为主，呈推流式前进，水面与空气直接接触，流动的污染水体水位比较浅（0.1~0.6m）。由于水深较浅，阳光可直接照射至水体底部，空气中的氧气也易于扩散到达，因此湿地主体处于好氧

状态。溶解氧主要来源于大气复氧、植物根系传输以及光合作用。水体中微生物种类丰富、数量较多,大部分有机物主要依靠水下植物茎秆表面附着的生物膜降解去除。表面流人工湿地尤其适用于处理“氧化塘”出水,其对氧化塘出水中所含藻类等悬浮物具有较佳的去除效果。研究表明,该类湿地较适合处理污染物浓度较低的污水,可通过植物吸收作用大量去除 $\text{NH}_4\text{-N}$,去除率一般稳定在 50% 以上,但除磷效率相对较低。

表面流人工湿地的构筑物及设计较简单,所需投资少,运行成本低,设备利用率高,污水中 DO 含量较高,操作简便且具有良好的景观生态效果,目前较多分布在美国、加拿大、新西兰、瑞典等国。其缺点是污染物负荷和水力负荷较低,去污能力有限,在相同条件下,若要达到与潜流人工湿地相同的处理效果,则需要更大的处理面积。另外,由于表面流人工湿地系统的水面直接暴露于大气中,夏季易滋生蚊蝇,并伴随有臭味,存在传播病菌的危险,且环境卫生不易控制;温度较低时还会引起表面结冰,导致系统处理效果大幅下降。

表面流人工湿地在我国北方地区实际工程中应用较少,常用于南方温暖地区江河湖泊的水质净化及生态修复(刘锐,2012;吴海明,2011;陈进军等,2008;Bachand and Home,1999)。目前已被应用于养殖废水(Knight et al.,2001)、农业废水(Higgins et al.,1993)、矿山废水(Karathanasis and Johnson,2003)、造纸废水(Tettleton et al.,2020)、垃圾渗滤液(Maehlum,1995)以及住宅、高速公路、机场的地表径流等多种污水处理。

1.3.2 潜流人工湿地

潜流人工湿地亦称为渗滤型人工湿地,该系统中污水全程于湿地床体基质内部渗流。常规垂直潜流构型多采用上部布水、竖向渗流的进水模式,污水经均匀布水后贯穿填料层,于床体内部完成净化反应,最终通过底部集排水装置稳定排出。为了减少水流堵塞,维持水体在湿地床体中的流动,潜流人工湿地的基质通常不采用土壤材料,而是选用具有良好空隙、水流易通过的材料,如砾石、炉渣和沸石等,同时为了保证水体在潜流湿地床内的均匀流态,一般需布置合理的床内布水与集水系统。该系统可以充分利用植物根系及表层土、填料的吸附、过滤、沉淀等物理、化学作用及填料、植物根系表面微生物的降解转化等生物作用来达到去除污染物的目的。潜流人工湿地系统前端通常需要设置预处理单元,如格栅、筛网、初沉池等,以降低悬浮固体颗粒进入填料床中堵塞孔隙的程度,保证湿地运行效果和使用寿命。此外,由于水流在湿地床体内流动,未暴露于大气中,因此具有较好的保温性能、较好的处理效果,能够适应寒冷的环境,将蚊虫和臭气带来的环境卫生问题最小化。潜流人工湿地适用于处理悬浮物浓度相对较低的污水,一般常用于处理生活污水中的 BOD_5 。

潜流人工湿地系统虽然工程造价较高,但其充分利用了湿地空间,发挥了系统的协同作用,处理效率较高;此外,污水主要在填料层下渗流,降低了低温对系统的影响,