

城镇和农村 污水处理适用新技术 及工程应用



周岳溪 等编著

Noval Technologies and
Engineering Application for Urban
and Rural Wastewater Treatment



化学工业出版社

城镇和农村 污水处理适用新技术 及工程应用



周岳溪 等编著

Noval Technologies and
Engineering Application for Urban
and Rural Wastewater Treatment



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

城镇和农村污水处理适用新技术及工程应用/周岳溪
等编著. —北京: 化学工业出版社, 2015.1

ISBN 978-7-122-22220-6

I. ①城… II. ①周… III. ①农村-污水处理-研究
IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 252992 号

责任编辑: 刘兴春 左晨燕
责任校对: 王素芹

装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16½ 字数 408 千字 2015 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 85.00 元

版权所有 违者必究



前言

城镇化、新农村建设，我国经济发展新引擎，如火如荼。随之而来，水环境保护面临新挑战，水污染防治急需适宜工艺技术的研发与推广应用。为此，“十一五”国家科技支撑计划设立了“城乡统筹农村生活污水处理控制技术与示范”课题（课题编号：2009BAD2B01），开展城镇及农村污水的专项研究。

此课题承担单位为中国环境科学研究院。课题主要参加单位有中国环境科学研究院、北京师范大学、环境保护部华南环境科学研究所、江苏省环境科学研究院、辽宁省环境科学研究院、哈尔滨工业大学、东北农业大学、长安大学、长沙县农村环境建设投资有限公司等。课题负责人为周岳溪。子课题负责人为王金生、王海燕、霍守亮、向连成。

本书属于此课题的研究成果，参考近年来国内外相关技术文献资料，结合我国新农村污水处理工程技术的实践编著。主要内容为城镇污水处理技术、丘陵地区分散式生活污水处理技术、平原缺水地区农村生活污水处理资源化技术、寒冷地区农村污水处理技术，以及其工程应用案例。

本书内容全面，实用性强，可供从事水污染防治的工程技术人员和行业管理人员阅读，也可作为给水排水工程和环境工程专业的科研、设计及高等学校高年级本科生及研究生的参考书。

本书主要编著人员如下：第1章，周岳溪、王海燕、苑泉、赵华、杨金刚、魏继苗、赵萌；第2章，王金生、王惠忠、王建军、戴宁、李剑；第3章，王海燕、杨利伟、宋玉栋、周岳溪、王建军、苑泉、赵华、杨金刚、焦金亮、万风；第4章，霍守亮、黄荣新、夏训峰、张靖天、曾凤、张众磊、张列宇、魏东洋；第5章，向连成、张颖、高大文、李晓东。全书最后由王海燕、周岳溪统稿、校稿。

本书的编著得到了国家科学技术部农村司、国家环境保护部科技标准司、中国环境科学研究院领导和同仁的大力支持。在课题执行过程中，席北斗研究员、祝超伟研究

员、席宏波副研究员、吴昌永副研究员、沈志强博士、于茵博士等给予了帮助。化学工业出版社在本书的出版过程中给予了大力支持。在此谨呈谢意。

本书由“城乡统筹农村生活污水污染控制技术与示范”课题资助出版。

限于编著者的水平和编著时间，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请读者不吝指教。

周岳溪
2014 年 12 月



第 1 章 绪论	1
1.1 城镇和农村污水污染现状	1
1.2 城镇和农村污水处理技术国内外研究及应用	2
1.2.1 农村生活污水分散处理技术国内外研究及应用	2
1.2.2 城镇污水处理技术国内外研究及应用	14
参考文献	32
第 2 章 城镇污水处理技术及应用实例	38
2.1 城镇污水处理技术国内外研究及应用	38
2.2 城镇污水水质水量特点	40
2.3 SBR (DAT-IAT) 技术	43
2.3.1 技术原理	45
2.3.2 运行效能	46
2.3.3 应用实例	49
2.4 CAST 和 CASBT 技术	50
2.4.1 技术原理	50
2.4.2 运行效能	51
2.4.3 应用实例	59
2.5 MBBR 技术	60
2.5.1 技术原理和生物载体	60
2.5.2 运行效能	62
2.5.3 应用实例	63
2.6 城镇污水处理其他技术	65
2.6.1 其他技术种类及特点	65

2.6.2 应用实例	70
参考文献	74
第3章 南方丘陵地区分散式生活污水处理技术及应用实例	76
3.1 南方丘陵地区分散式生活污水处理技术国内外研究及应用	76
3.1.1 净化沼气池技术	78
3.1.2 人工湿地技术	78
3.2 南方丘陵地区分散式生活污水水质水量特点	81
3.2.1 水质水量特点	81
3.2.2 水量案例解析	82
3.2.3 水质案例解析	90
3.3 南方丘陵地区分散式生活污水生物生态耦合处理技术	97
3.3.1 技术原理	98
3.3.2 生活黑水处理运行效能	99
3.3.3 生活灰水处理运行效能	118
3.3.4 应用实例	127
3.4 南方丘陵地区分散式生活污水处理其他技术	133
3.4.1 技术种类及特点	133
3.4.2 应用实例	135
参考文献	142
第4章 华北缺水农村生活污水处理资源化技术及应用实例	146
4.1 华北缺水农村生活污水处理资源化技术研究及应用	146
4.2 华北缺水农村生活污水水质水量特点	148
4.2.1 水量特点	148
4.2.2 水质特点	149
4.3 华北缺水农村生活污水厌氧发酵产沼预处理技术	149
4.3.1 技术原理	149
4.3.2 运行效能	154
4.3.3 应用实例	169
4.4 厌氧发酵-水解-微曝气接触氧化—潜流/垂直流湿地处理技术	171
4.4.1 技术原理	171
4.4.2 运行效能	173
4.4.3 应用实例	184
4.5 太阳能循环塔式生物滤池—潜流湿地处理技术	191
4.5.1 技术原理	191
4.5.2 运行效能	192
4.5.3 应用实例	192
4.6 华北缺水农村生活污水处理其他技术及资源化应用实例	195
4.6.1 其他技术及资源化种类及特点	195
4.6.2 应用实例	198
参考文献	201

第5章 东北寒冷地区农村污水处理技术及应用实例	204
5.1 东北寒冷地区农村污水处理技术国内外研究及应用	204
5.1.1 生活污水处理技术	204
5.1.2 畜禽养殖废水处理技术	205
5.2 东北寒冷地区农村污水水质水量特点	209
5.2.1 生活污水水质水量特点	209
5.2.2 畜禽养殖废水水质水量特点	209
5.3 东北寒冷地区农村生活污水生物接触氧化—温室人工湿地处理技术	210
5.3.1 技术原理	210
5.3.2 运行效能	210
5.3.3 人工湿地单元运行效能	218
5.3.4 应用实例	229
5.4 东北寒冷地区农村生活污水 A/O—人工湿地处理技术	232
5.4.1 技术原理	232
5.4.2 A/O 预处理效能	232
5.4.3 A/O—人工湿地运行效能	236
5.4.4 应用实例	240
5.5 东北寒冷地区畜禽养殖废水处理 UASB-SBR 技术	243
5.5.1 技术原理	243
5.5.2 运行效能	244
5.5.3 应用实例	246
5.6 东北寒冷地区畜禽粪便资源化回收技术	247
5.6.1 技术原理	247
5.6.2 运行效能	248
5.6.3 应用实例	249
参考文献	252



第1章

绪论

1.1 城镇和农村污水污染现状

城镇和农村污水主要包括城乡结合部或乡镇的生活污水和农村污水两部分（李岳云等，2004）。

农村污水是指农村地区居民在生活和生产过程中形成的污水，包括生活污水和生产污水，其中生产污水包括分散畜禽养殖业等排放的高浓度污水（郑海军等，2012）。

据测算，我国农村每年产生生活污水 90 多亿吨，人粪尿年产生量为 2.6 亿吨（周律等，2008）。农村污水已成为我国非点源污染的重要组成部分，长期以来，由于治理资金短缺和对农村水环境保护意识的淡薄，96% 的村庄都没有排水渠道和污水处理系统，大量未经有效处理的生活污水直接排入水体，给当地的饮用水安全造成了潜在威胁（白晓龙等，2011；Liang W 等，2010），全国尚有 2.5 亿农村居民喝不上干净水，农村因为环境污染和生态破坏引发的投诉和群体性事件呈上升趋势（丁一等，2011）。

我国农村水体污染呈现出污水排放分散、N、P 等营养成分含量高、污水水量和有机负荷波动大，可生化性好，重金属、有毒有害物质较少的特点（李海明，2009；杨利伟等，2011）。农村生活污水分为灰水和黑水。灰水主要由来自厨房与卫生间的洗涤、洗浴水组成；黑水指尿液、粪便（含手纸）和用厕冲洗水（Gajurel 等，2003）。其中灰水产生量大，所含的污染物浓度低，处理后可作为回用水（李海明，2009）；灰水中的洗浴水包括洗涤污水和洗澡水。而洗涤污水中由于洗涤用品的使用含有大量化学成分；灰水中的厨房污水，由洗碗涮锅水、淘米水和洗菜水组成，淘米水和洗菜水中富含有机物，洗碗涮锅水含有大量脂肪，随着农村生活水平的提高，农村肉类和油类食用量上升，生活污水中油类成分增加，使生活污水朝着不利于净化的方向发展（曹群，2009）。黑水的特点是有机物浓度高，悬浮固体多，含有大量的病原微生物，处理难度大、费用高（郑永菊等，2008）。生活污水中约 51% 的 COD、91% 的氮、78% 的磷和大部分病原微生物（包括细菌、病毒、寄生虫等）来自于黑

水（李子夫等，2001；Luostarinen 等，2006）。因此，黑水是农村生活污水中污染物最主要的来源之一。在经济较为发达的农村，居民大多使用水冲厕所，从而产生大量的冲厕黑水（侯京卫等，2012）。

随着我国城镇化的发展，涌现了大量的城镇，自 20 世纪 80 年代以来，城市扩张在中小城镇所引起的生态环境效应受到了越来越多的关注（黄宝荣等，2012），目前大部分地区的中小城镇环保基础设施建设处于相对落后状态，与城市污水相比，中小城镇污水所含的生活污水比例大，污水量小，污染物浓度变化大，同时也有一定比例未达标排放的工业废水汇入，因此水质具有复杂性和波动性的特点，缺乏适宜性的系列化污水处理技术。虽然有一些中小城镇建设了污水处理设施，但多数照搬大城市污水处理厂工艺，存在处理工艺在经济性和适应性方面难于适合中小城镇污水的特点，尤其小城镇污水处理率较低，只有 3% 左右（赵旭雯等，2012）。

1.2 城镇和农村污水处理技术国内外研究及应用

1.2.1 农村生活污水分散处理技术国内外研究及应用

我国从 20 世纪 80 年代开始开展生活污水分散处理技术的开发和应用，多种无动力或微动力的低能耗一体化污水处理装置得到应用。适宜于农村的分散污水处理技术要求是一种低投资、低能耗、低操作管理要求且具有稳定高效污染物去除效能的污水处理技术（杨利伟等，2011）。近年来，随着地方经济实力增强，部分发达省份逐步认识到农村生活污水处理的重要性，开始采用一些实用、合理、低能耗和低运行费用的技术来处理农村分散生活污水。据美国环保局（USEPA）研究成果，分散式废水处理系统（传统的化粪池、高级原位及集成处理或土地处理系统）适合于不同地理条件的低密度社区，比集中式系统成本效益更好（US EPA，2000；Massoud，2009）。发展中国家应用较多的是化粪池系统，尽管现存有针对地方特色的 70 多种处理系统（Ho，2005），但也不是特有针对性发展中国家的（Grau，1996），例如湿地在发展和发达国家均有较多应用。目前国内外研究和应用较多的有人工湿地、土壤渗滤、介质滤池（间歇砂滤和再循环砂滤）、稳定塘（厌氧塘、兼性塘和好氧塘）、好氧悬浮生长系统、SBR、附着生长系统和净化沼气池等生物生态技术（Massoud 等，2009），部分设施的处理效能如表 1-1 所列。

表 1-1 部分分散处理系统及其去除率

项 目		BOD 去除率/% [出水 BOD 浓度/(mg/L)]	TSS 去除率/% [出水浓度 /(mg/L)]	氮去除率/% [出水浓度 /(mg/L)]	磷去除率/% [出水浓度 /(mg/L)]	FC 去除率/% [出水浓度 /(counts/100mL)]
介质滤池	ISF	[3-30]	[5-40]	18~50	受限	99~99.99
	RSF	85~95[≥10]	85~95[≥10]	50~80	NA	NA
氧化塘	FL	75~95	90	高达 60	高达 50	[2-3]
	AoL	NA	NA	NA	NA	有效
	AL	75~95[35]	90[20-60]	10~20[30]	15~20	[1-2]
	AnL	50~80	NA	NA	NA	有效
好氧处理	SG	70~90[20-50]	70~90[7-22]	NA	<25	变化幅度大
	AG	[5-40]	[5-40]	0~35	10~15	[1-2]
人工湿地		高达 98[5-10]	高达 98[10-20]	高达 98	高达 98	NA

续表

项 目		BOD 去除率/% [出水 BOD 浓度/(mg/L)]	TSS 去除率/% [出水浓度 /(mg/L)]	氮去除率/% [出水浓度 /(mg/L)]	磷去除率/% [出水浓度 /(mg/L)]	FC 去除率/% [出水浓度 /(counts/100mL)]
地下渗透系统		高	高	有限	去除	高
土地利用 ^①	SRS	90~99[1]	90~99[1]	50~90[3]	80~99	99.99
	RIS	[5]	[1]	[10]	[2]	90~99
	OFS	[5]	[5]	[3]	[5]	90~100

① OFS——地表漫流系统；RIS——快速渗滤系统；SRS——慢速系统。

注：NA 表示没有数据。

欧洲和美国有 20%~30% 的人口使用污水分散处理设施；日本有 31% 的人口使用净化槽处理生活污水（Hellstrom 等，2003；Chen，2004），澳大利亚有 12% 的人使用化粪池系统（Ahmed 等，2005），希腊有 14% 的农村人口使用分散污水处理系统（Tsagarakis 等，2001），土耳其市政系统中有 28% 采用化粪池系统（Engin and Demir，2006），也有一些国家鼓励污水回用，如塞浦路斯采用优惠政策鼓励居民安装灰水再利用系统（Bakir，2001）。

近 20 年，在小型及分散式污水处理系统的设备方面，较为显著的变化是新技术和硬件的发展和采用新设备后传统技术的再利用，主要涉及人工湿地、土地处理系统、改良的化粪池系统、高负荷厌氧技术、可供选择的污水收集技术和水体处理系统等（郝晓地等，2008）。

1.2.1.1 化粪池

化粪池可用于有机物的部分厌氧消化，多用于生活污水的初级处理，应用广泛；Imhoff 池是另一种形式的初级处理，比化粪池的流速更高，但二者对氮、磷和病原微生物的去除均无效，因此多用于前处理阶段。也有将化粪池进行改造，后续安装过滤装置或内部安装生物附着填料（USEPA，2002）。300L 中试装置的升流式化粪池用于分散生活水处理 HRT 24h 时 BOD₅、COD 和 TSS 去除率可达 85%、77% 和 86%，产甲烷活性较高（15.2mLCH₄/(gVSS·d)）（Moussavi 等，2010）。在埃及农村，升流式化粪池—厌氧折流板反应器连接能稳定去除 BOD、COD 和 TSS，去除率分别为 81%、84% 和 89%，并且具有较好的抗负荷冲击性（Sabry，2010）。

2007 年美国约有 20%（2600 万个）的住宅使用化粪池系统（1985 年以来增加了 154 万个），80% 使用集中式污水处理系统；化粪池系统包括去除悬浮物的地理式化粪池、排水布水系统和土壤吸附区（进一步通过吸附、扩散和生物降解进行处理）（EPA，2007）。美国 EPA 同时针对 20 人以上的小社区或农村污水处理，推荐使用大容量化粪池系统。

2007 年美国不超过 4 年房龄的住宅有 22% 使用化粪池系统。使用化粪池系统的住宅房 50% 坐落在农村，47% 坐落在郊区；从地理位置来看，46% 分布在美国南部，22% 分布在中西部，19% 在东北部，13% 在西部（EPA，2007）。

1.2.1.2 人工湿地

人工湿地处理技术是 20 世纪 70 年代末发展起来的一种污水处理技术，源于对自然湿地的模拟，它利用自然生态系统中的物理、化学和生物的协同作用，实现对污水的净化。人工湿地种植的植物与水中、填料中生存的微生物等形成一个独特的生态环境。污水流经床体表面和填料缝隙时通过过滤、吸附、沉淀、离子交换、植物吸收和微生物分解等，实现对污水的高效净化处理（USEPA，2000；刘峰等，2010）。

相对常规的污水处理系统而言,人工湿地处理技术具有高效率、低投资、低运转费、低维护技术和低能耗等优点(张毅敏等,1998;刘霞、陈洪斌,2003),比较适宜于我国农村地区污水的处理。欧美国家广泛采用人工湿地系统处理村镇生活污水,取得了显著成效(Ran等,2004;Huang等,2000;Steer等,2002;Hench等,2003)。

人工湿地具有较好的污水净化能力,COD、BOD₅、TN和TP的去除率分别可达80%、85%~95%、40%~50%和80%~85%(Shi,2004)。硝化反硝化作用是人工湿地脱氮的主要途径,占到TN去除量的40%以上,而由植物吸收形成的TN去除率不高(付融冰等,2006)。介质吸附和沉淀作用则是其除磷的主要途径(Xu等,2006)。人工湿地按照工程设计和水流方式的不同,主要分为表面流人工湿地(surface flow wetland, SFW或horizontal surface flow wetland, HSFW)、水平潜流人工湿地(subsurface flow wetland, SSFW)及垂直流人工湿地(vertical flow wetland, VFW)(Stottmeister等,2003;吴晓磊,1994),其水力负荷分别为2.4~5.8cm/d、3.3~8.2cm/d和3.4~6.7cm/d(HJ 574—2010)。

(1) 表面流人工湿地(SFW)

污水在湿地表层流动,水位较浅,一般为0.1~0.6m,主要依靠水面下植物根茎的拦截作用及根茎上生物膜的降解作用去除污染物。该湿地具有运行费用低、投资少、操作简单等优点,但水力负荷小、占地面积大、净化能力有限、受季节影响较大,卫生条件不好,夏季易滋生蚊蝇(沈耀良等,1991),目前已较少采用。表面流人工湿地系统在进水COD、TN、TP为200mg/L、40mg/L和5mg/L时去除率可分别达75%、75%和73%(何蓉等,2004)。HSFW多用于化粪池出水的处理,出水排入土地利用,多为大型植物碎石床,出水TSS小于30mg/L,BOD小于20mg/L,氮去除30%~50%,大肠菌群下降2个数量级,由于无动力主要依靠自然作用,HRT较长(4~6d),适合分散污水处理,但容易堵塞,每个人需要4~8m²,5口之家就需要20~40m²(Tanner等,2012);HSFW中氧的供给是有限的,呈缺氧状态,适合于已经硝化污水的反硝化处理;将HSFW与装有木头碎片和椰子壳的生物反硝化反应器连接,出水NH₄⁺-N浓度为0.05~0.2mg/L(去除率98%~99.8%),TN去除率为58%~95%,TP去除率为36%~65%(Tanner等,2012)。

(2) 水平潜流人工湿地(SSFW)

污水在基质层表面以下水平流动,可充分利用基质的吸附、过滤作用以及基质表面和植物根系上生物膜的净化功能;利用植物根系的输氧作用,对有机物和重金属等去除效果好;由于基质层的保温作用,处理效果受气候影响小、卫生条件良好。湿地进水需进行有效预处理,否则湿地易堵塞,处理效果随之下降。潜流湿地构造复杂,对基质材料要求高,因此投资比表面流人工湿地要高(诸惠昌等,1992)。建造人工复合生态床处理低浓度农村污水,以碎石、炉渣和土壤为填料,在0.3m³/(m²·d)水力负荷下,栽种1/3芦苇和栽种2/3茭白时除污效果最好(刘超翔等,2002)。对SSFW间隙供给氧气,可以明显提高硝化菌的生物量和氮的去除,有机物、氨氮和总氮的去除可达29.3g/(m²·d)、3.5g/(m²·d)和3.3g/(m²·d)(Fan等,2013)。

(3) 垂直流人工湿地(VFW)

垂直流人工湿地的水流在湿地床中由上而下(下行池)或由下而上(上行池)做竖向流动,水流状况集合了表面流人工湿地和潜流人工湿地的优点,其硝化能力高于潜流湿地系统,可用于处理高氨氮污水。此外,垂直流人工湿地能更有效地发挥基质层的吸附和过滤能力,出水水质较好。但其布水集水系统复杂,水流阻力较大,对基建和动力要求较高,造价

和运行费用高（梁祝等，2007）。充足供氧和碳源是保证 VFW 有效脱氮的关键，当 COD/N 为 10 时，COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除率分别达 96%、99% 和 90%（Fan，2013）。

实际运行时，往往是多种形式的湿地联合使用，法国东部的 Evieu 污水厂采用 VFW-SFW 联合芦苇床处理 220 人的社区生活污水，同时将 VFW 分成 25cm 的非饱和层和 55cm 的饱和层，使其发生亚硝化—厌氧氨氧化反应，氮的去除达 54.8%（Dong 等，2007）。北京昌平建立农户 VFW，种植柳树，湿地内填料有自来水厂废弃的脱水铝污泥， BOD_5 、TSS、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 去除率分别为 96.0%、97.0%、88.4% 和 87.8%（Wu，等，2011）。湿地种植植物时，其对微生物的去除要大大优于无植物种植的湿地（Hench 等，2003）。

人工湿地的主要设计参数，宜根据试验资料确定；无试验资料时，可采用经验数据或按表 1-2 的数据取值（苏东辉等，2005）。

表 1-2 人工湿地基本技术参数

人工湿地类型	BOD_5 负荷 /[$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$]	水力负荷 /[$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]	水力停留时间 /d
表面流人工湿地	15~50	<0.1	4~8
水平潜流人工湿地	80~120	<0.5	1~3
垂直潜流人工湿地	80~120	<1.0(建议值:北方 0.2~0.5;南方 0.4~0.8)	1~3

波兰 2 个和德国 1 个 VFW-HFW 湿地研究表明，保持湿地好氧条件有利于去除溶解性有机物（Tuszyńska 等，2008）。丹麦环境部推荐 VFW 用于农村污水处理，可实现 95% 的 BOD 去除和 90% 的硝化，每人需湿地面积 3.2m^2 ，池深 1m（Brix 等，2005）。

化粪池—人工湿地对大肠埃希氏菌（*E. coli*）也具有较好的去除效能， 17°C 时 *E. coli* 的失活一级速率常数为 $0.02\sim0.03\text{d}^{-1}$ ，有 20% 的 *E. coli* 分散在湿地出水中或与 $<5\mu\text{m}$ 的小颗粒结合在一起（Boutilier 等，2009）。

Zhao 等开发了潮汐流湿地（tidal flow constructed wetland, TFCW），采用序批方式，每一个循环都包括充水、接触、排水和闲置期；当采用 1h 前置反硝化期、3 阶段交替闲置/接触时，在氮负荷为 $28\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 条件下，TN 平均去除率达 85%（Zhao，等，2014）。

Ye 等开发了塔式复合湿地处理农村污水，湿地中心呈塔式阶梯状，水从塔心向下跌落保证充氧和硝化反应，COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除率分别为 89%、85%、83% 和 64%（Ye 和 Li，2009）。

采用厌氧折流板-SFW-SSFW 湿地工艺处理农村污水，COD、TN 和 TP 去除率分别超过 81.19%、82.33% 和 67.25%（Ye 等，2012）。

好氧接触氧化—厌氧氨氧化湿地处理生活污水，当好氧接触氧化池 DO $2\sim3\text{mg/L}$ 、HRT 3.5h 和湿地的 HRT 为 3d 时，TN 去除率可达 90%（Wang 等，2011）。

印度模拟自然湿地设立浮水植物池、沉水—挺水植物池和滤食动物池，COD、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和浊度可分别去除 68.06%、22.41% 和 59.81%（Mohan 等，2010）。印度也有改造 HSFWS 湿地的研究，在湿地中填充柱状生物填料，支持芦苇和微生物生长，在优化的 10h HRT 条件下，可达到 75.15% COD、86.59% BOD_5 、27.54% TDS、73.13% TSS、70.22% $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、31.71% $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 92.11% MPN 的去除（Alireza 等，2009）。

1.2.1.3 土地处理系统

土地处理系统利用植物—土壤—水的自然物理、化学和生物过程来去除污染物（Crites

and Tchobanoglous, 1998)。

(1) 土壤渗滤处理技术

土壤渗滤处理技术由前处理化粪池和土壤渗滤两部分耦合而成,将污水投配在土地上,通过土壤—微生物—植物系统的综合净化作用,使水与污染物分离,水被渗滤并通过集水管道收集,污染物通过物化吸附被截留在土壤中。土壤渗滤处理系统具有不影响地面美观、基建及运行管理费用低、氮磷去除能力强、处理出水水质好、可用于污水回用等特点(黄山松, 2008),包括慢速渗滤处理系统和快速渗滤处理系统。

慢速渗滤系统将废水投配到种有作物的土壤表面,废水在流经地表土壤—植物系统时得到充分净化的一种土地废水处理工艺。在该系统中,投配的废水一部分被作物吸收,一部分渗入地下,流出处理场的水量一般为零。该系统污水投配负荷低,污水通过土壤的渗滤速度慢,水质净化效果好;受地表坡度的限制小(贾宏宇等, 2001)。缺点是由于表面种植作物,受季节和植物营养需求的影响大;水力负荷小,土地面积需求量大(成先雄等, 2005)。慢速渗滤系统的周水力负荷约为 $1\sim 10\text{cm}/\text{周}$ 。慢速渗滤技术可将处理水回用到农田灌溉,在植物生长季节利用较好。

快速渗滤土地处理系统是将污水有控制地投配到具有良好渗透性能的土地表面,污水周期性地向渗滤田灌水和休灌,使表层土壤处于厌氧、好氧交替状态,有利于土壤层截留的有机物、氮和磷的去除。休灌期土壤层脱水干化,有利于下一个灌水周期水的下渗和排除(张增胜等, 2008),其优良性能必须有足够长的干化期作保证,干化期通常比淹水期长。可用于农村生活污水的处理,渗滤池的土质要求通透性能强、活性高、水力负荷大、处理效率高;如无此类土质条件,也可以按照上述要求用砂、草炭及耕作土人工配置成滤料,制成人工滤床。一般在系统运行 $4\sim 5$ 周后就需要对渗滤床耕作,以恢复其渗滤速度(Schudel 等, 1990; 苏东辉等, 2005)。在稳定运行阶段,污水快速渗滤处理系统出水总氮浓度低于 $5\text{mg}/\text{L}$,去除率大于 95% ; COD 值低于 $40\text{mg}/\text{L}$,去除率大于 80% ,水力负荷周期决定着系统对污染物尤其是氮的去除效果及系统最佳水力负荷的发挥(吴永峰, 1996)。快速渗滤系统对氨氮、有机物、悬浮物等污染物质具有很高的去除率;投资省,管理方便,土地面积较慢速渗滤系统小,可常年运行;处理出水可回用或回灌地下水。但对快速渗滤场地的水文地质条件要求严格(砂土或砂壤土);对总氮的去除率不高,处理出水中的硝态氮可能导致地下水污染。快速渗滤技术较适用于植物非生长季节,污水周期性地向渗滤田灌水和休灌,使污水得到净化并可用渗滤池来进行地下水回灌(张家伟等, 2011)。

土壤渗滤处理系统设计参数与要求如下:慢速渗滤系统年水力负荷 $0.5\sim 5\text{m}/\text{a}$,地下水最浅深度大于 1.0m ,土壤渗滤系数宜为 $0.036\sim 0.36\text{m}/\text{d}$;快速渗滤系统年水力负荷 $5\sim 120\text{m}/\text{a}$;地表漫流系统年水力负荷 $3\sim 20\text{m}/\text{a}$ (张自杰, 1996)。

沈阳西部建立了 700hm^2 水稻田为主系统(紫穗槐等为调节系统、预处理池等为辅助系统)的慢速渗滤土地处理系统,SS、 BOD_5 、COD、TN 和 TP 的平均处理率分别达 42.2% 、 97.0% 、 86.9% 、 90.3% 和 96.6% (赵思平等, 2000)。快速渗滤系统净化农村污水时,对 COD、 BOD_5 、SS、 NH_4^+-N 、TN 和 TP 的去除率可分别达到 91.9% 、 95.3% 、 98.0% 、 85.6% 、 83.2% 和 69.0% ,处理效果良好,在农村应用前景看好。北京市昌平区某地采用快速渗滤系统处理农村生活污水,15 个月运行数据(Check 等, 1994)表明,对污水 COD、 BOD_5 、SS、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN 和 TP 的去除率分别达 91.9% 、 95.3% 、 98.0% 、 85.6% 、 54.1% 、 83.2% 和 69.0% 。污水土地处理技术对 COD、 BOD_5 、SS、 NH_4^+-N 、

TN 和 TP 有着较高的去除率, 并且投资省、运行费用低、管理简单、维护方便, 有净化污水、美化绿化环境和节约水资源的综合效果 (Ye 等, 2008; 富立鹏, 2009)。经化粪池预处理后的生活污水经调节池后进入地下渗滤场, 污水中的 COD 去除率可达到 85% 以上, BOD 去除率可达到 80% 左右, NH_4^+-N 去除率可达到 95% 左右, P 去除率可达到 90% 以上 (王勇等, 2010)。

以红壤土作为填充土壤的地下渗滤现场中试系统, 在 2cm/d 的水力负荷下处理农村生活污水, 地下渗滤系统对 COD、 NH_4^+-N 、TP 和 TN 的去除率分别达到 84.7%、70.0%、98.0% 和 77.7%, 出水 COD、 NH_4^+-N 、TP 和总氮的平均浓度分别为 11.7mg/L、4.0mg/L、0.04mg/L 和 4.7mg/L, 达到建设部颁发的《生活杂用水水质标准》(CJ/T 48—1999) (张建等, 2002)。上海宝山区罗店镇远景村、罗泾镇牌楼村、顾村镇沈宅村三套典型土壤渗滤系统实际工程出水 COD、BOD₅、 NH_4^+-N 、TP 出水指标均满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 二级标准; COD 和 TP 满足 (GB 18918—2002) 一级 B 标准 (任翔宇等, 2012)。

南方某农村民居生活污水通过三格化粪池、格栅后流入土壤渗滤系统。根据工程工艺设计要求, 其出水 94.9% 可稳定达到二级标准, 69.1% 达到一级 B 标准 (段瑞钟等, 2012), 吨水运行成本 0.34 元 (段瑞钟等, 2012)。渗坑式土壤渗滤也被用于三格化粪池的粪水, 对 *E. coli*、COD_{Cr}、 NH_4^+-N 等指标均有良好的净化效果 (宋伟民等, 1997)。用多级土壤渗滤系统对集中型农村生活污水进行处理, 且在江苏宜兴分水村建立了示范工程, 该系统基建及运行费用低, 处理效果好, 对 COD、 NH_4^+-N 、TN、TP 和 SS 的平均去除率分别为 70%、83%、59%、76% 和 94%; 出水水质可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》的一级 A 标准 (张洪玲等, 2011)。

上海部分农村地区采用改良型化粪池/地下土壤渗滤系统组合工艺处理农村生活污水, 通过对构筑物的改进设计以及参数的合理选取, 取得了较好的处理效果, 出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级 B 标准。系统运行稳定, 处理效果好, 操作简单, 维护成本低, 占地面积小, 对于农村地区生活污水治理具有推广应用价值, 吨水运行费为 0.1~0.2 元/吨 (闫亚男, 2011)。

在国外, 尤其在日本、泰国和印度尼西亚已经研究应用多级土壤渗滤系统处理各种类型的废水。

(2) “FILTER” 污水处理系统

澳大利亚科学和工业研究组织 (CSIRO) 的专家于最近几年提出一种 “FILTER” (filtration and irrigation land treatment and effluent reuse, 过滤、土地处理与暗管排水相结合的污水再利用系统, 见图 1-1) 污水处理新技术 (苏东辉, 2005)。这是一种新开发的可持续全年运行的污水处理技术, 其目的主要是利用污水进行作物灌溉, 通过灌溉土地处理后, 再用地下暗管将其汇集和排出。该系统可以满足作物对水分和养分的要求, 同时降低污水中的氮、磷等元素含量, 使之达到污水排放标准。其特点是过滤后的污水都汇集到地下暗管排水系统中, 并设有水泵, 可以控制排水暗管以上的地下水位以及处理后污水的排出量。

FILTER 主要的目标是要减少出水中的氮、磷含量使其满足 EPA 的限值。FILTER 使用营养丰富的污水种植农作物并结合土壤渗滤, 最终汇集到一个密集的地下排水系统, 如图 1-1 所示。该过滤系统在植物活动较低的时期或者降雨量较大时仍然具有污水处理的能力。排水管位于约 1.2m 深的位置, 间隔为 5~10m。该系统需要设法提供最优条件适合作

物生长和污染物去除，同时保持所需的排水流量。

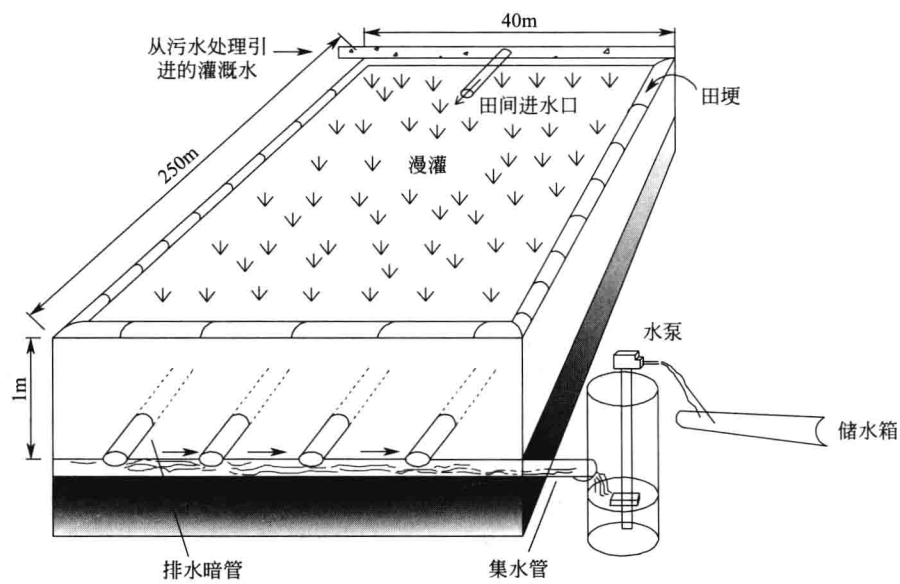


图 1-1 “FILTER” 污水处理系统示意

澳大利亚 CSIRO 与中国水利水电科学研究院和天津市水利科学研究所合作，曾在天津市武清县建立试验区，试验总面积 2hm²，暗管埋深 1.2m，两种处理的暗管间距为 5m 和 10m，引取北京市初级处理后的污水和沿程汇集的乡镇生活污水，灌溉小麦。试验表明，97%~99% 的磷通过土壤及作物的吸收而被除去，总氮的去除率达 83%~86%，BOD₅ 的去除率为 93%，COD 的去除率为 75%~86%。在大同市阳高县也曾进行 FILTER 系统试验研究，在 0~30℃ 运行，对作物产量影响不大，对污水中污染物的处理效果明显（李海军，2006）。

“FILTER” 系统对生活污水的处理效果好，其运行费用低，特别适用于土地资源丰富、可以轮作休耕的地区，或是以种植牧草为主的地区。该系统实质上是以土地处理系统为基础，结合污水灌溉农作物。人们担心长期使用污水灌溉后污水中的病原体进入土壤，污染农作物。但根据大量调查和试验表明，土壤—植物系统可以去除污水中的病原体。为慎重起见，国内外一致认为，处理后的城市污水适宜灌溉大田作物（旱作和水稻）。因为大田作物的生长期长，光照时间长，病原体难以生存；而蔬菜等食用作物，生长期短，有的还供人们生食，则不宜采用污水灌溉（曾令芳，2001）。

（3）美国土地处理分散式污水处理技术

20 世纪 90 年代后期，分散式污水处理设施在美国开始被广泛使用，目前 1.15 亿套住宅中有近 23% 的住户使用了该系统。分散式污水处理设施由简单的户外污水坑、化粪池等逐渐演变到今天较为先进的处理单元，目前大致有 3 类分散污水处理单元可供小型社区选择，分别代表了污水传输、处理或排放的基本方法（郝晓地等，2008）。

① 利用土壤作为处理载体和排放载体的自然系统，包括土地处理、人工湿地和地下渗滤系统。另外，也包括一些污泥和化粪池污泥处理系统，如污泥干化场、摊撒地面和污泥池等。

② 选用埋深较浅的轻质塑料管收集系统，与传统的重力排水管相比，其接头数更少、施工难度更小。这包括压力、真空和小管径重力排水系统。

③ 利用复杂的生物和物理过程的传统处理系统，以各种池体、水泵、鼓风机、旋转机械和其他机械作为一个处理整体，这些处理中包括微生物的悬浮生长、固定生长以及二者的混合形式。这些系统还包括一些可供选择的污泥和化粪池污泥处置系统，如消化池、脱水、压缩和合适的排放方法。

1.2.1.4 稳定塘

稳定塘是经过人工适当修整的土地，设围堤和防渗层的污水池塘，主要依靠自然生物净化功能使污水得到净化的一种污水处理技术（高廷耀等，2007）。按塘内溶解性有机碳（dissolved organic carbon, DOC）含量和优势微生物群体可分为厌氧塘、兼性塘、好氧塘和曝气塘。厌氧塘作为预处理，除去有机负荷改善污水的可生化性，兼性塘主要去除 BOD₅，好氧塘主要是由好氧细菌起净化水体有机物和杀灭病菌的作用，曝气塘利用鼓风曝气或机械曝气使塘内保持好氧状态，不必依靠阳光和风力作用，不同类型稳定塘设计参数见表 1-3。

表 1-3 农村生活污水处理稳定塘设计参数

设计参数	厌氧塘	兼性塘	好氧塘	曝气塘
水深/m	3~5	1~2.5	0.6~1.2	1~4.5
停留时间/d	30~50	7~30	2~6	2~10
BOD ₅ 负荷率/[g/(m ² ·d)]	30~100	2~10	10~20	30~60
BOD ₅ 去除率/%	50~70	75~90	80~95	55~80

传统稳定塘优点是运行、维护费用低，系统基本不耗能；可利用地形，节省投资；无需对污泥进行处理；可实现污水资源化。但其处理效果受天气影响大；有机负荷较低，占地面积大；易于散发臭气、滋生蚊蝇（付融冰等，2006）等。近期也出现了很多新型塘和组合塘工艺，如高效藻类塘、水生植物塘、多级串联塘和高级综合塘等，进一步强化了稳定塘的优势。高效藻类塘是由美国的 Oswald 提出并发展的，它最大限度地利用了藻类产生的氧气，充分利用菌藻共生关系，能高效去除污染物（Oswald，1978；周律等，2008）。目前高效稳定塘在以色列、摩纳哥、法国等国都有研究和应用，可以用大量繁殖菌藻的方式进行污水净化、再生和副产藻类蛋白。试验表明高效藻类塘对 COD 的平均去除率达到 70%，对 NH₄⁺-N 的平均去除率大于 90%，对 TP 和磷酸盐的去除率约为 50%（黄山松，2008）。

李旭东等采用高效稳定塘处理太湖地区农村生活污水，COD、NH₄⁺-N 和 TP 的平均去除率分别达到 70%、93%和 55%（李旭东等，2006）。陈鹏等采用高效稳定塘处理城市生活污水，COD、BOD₅、NH₄⁺-N 和 TP 的平均去除率分别达到 75%、60%、91.6%和 50%。目前，德国和法国分别有各类稳定塘 3000 座和 2000 座，而美国已有各类稳定塘上万座。特别，在我国缺水干旱地区，稳定塘是实施污水资源化利用的有效办法，近年来逐渐成为我国着力推广的一项技术。

1.2.1.5 净化沼气池

生活污水净化沼气池由传统的化粪池演变而来，是一种处理分散生活污水的装置，均采用二级厌氧消化—兼氧滤池等后处理措施的处理模式，可用于农村没有污水收集或管网不健全的农村、民俗旅游村、公共厕所和单独的大型建筑等地。在中国农村生活污水处理的实践中，最通用、节俭、能够体现环境与社会效益结合的生活污水处理方式就是厌氧沼气池，它将污水处理与资源化利用有机结合，实现了污水的资源化（曾令芳，2001）。

净化沼气池设计要点具体如下。