

“十一五”国家重点图书

生态农业与农业生态丛书

污水处理 的人工湿地构建技术

WUSHUI CHULI DE RENGONG SHIDI GOUJIAN JISHU

崔理华 卢少勇 编著



化学工业出版社

“十一五”国家重点图书

生态农业与农业生态丛书

污水处理 的人工湿地构建技术

WUSHUI CHULI DE RENGONG SHIDI GOUJIAN JISHU

崔理华 卢少勇 编著



化学工业出版社

·北京·

本书主要论述了污水自然处理系统,湿地生态系统以及表面流人工湿地、水平潜流人工湿地、垂直流人工湿地和复合人工湿地系统四种工艺类型人工湿地的概念、设计、结构、建造、处理效率,人工湿地的净化机理,人工湿地的运行与维护管理以及人工湿地在污水处理中的应用实例等内容,具有较强的系统性、知识性、工程性和实践性。

本书可供人工湿地的设计者和管理者参考,也可供从事环境科学与工程等相关领域工作的人员借鉴,还可供高等院校相关专业师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

污水处理的人工湿地构建技术/崔理华,卢少勇编著.
北京:化学工业出版社,2009.4

(生态农业与农业生态丛书)

ISBN 978-7-122-03882-1

I.污… II.①崔…②卢… III.沼泽化地-污水处理
IV.P941.78 X703

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第163588号

责任编辑:刘兴春

文字编辑:张林爽

责任校对:洪雅姝

装帧设计:周遥

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)

印装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张18 字数470千字 2009年6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:48.00元

版权所有 违者必究

《污水处理的人工湿地构建技术》编委会

主 任：崔理华

副 主 任：卢少勇 朱夕珍

编写人员（按姓氏拼音排序）：

蔡珉敏	崔理华	邓佩文	高煦纳	郭建宁
贺 凯	刘 佳	刘 壮	卢少勇	司 静
谭晓辉	汤仲恩	杨蔚芝	游艳萍	余志敏
赵 斌	郑苗壮	朱文玲	朱夕珍	

序

目前我国的水环境污染形势日趋严峻，绝大多数江河湖海的污染负荷日益增加，许多水体的自净能力已经丧失或者逐渐在丧失。多年积累的内部污染负荷以及外部污染负荷是非常重要的原因。这些外部污染负荷来自面源污染和点源污染，内部污染负荷主要来自沉积物。对于点源污染负荷，由于现有城市污水处理厂达到排放标准的水质仍显著高于受纳水体的环境质量标准值，需要重点考虑现有污水处理厂出水的深度处理；对于面源污染源分散，多数在不发达或欠发达地区，收集成本高，多数以汇入渠道的形式进入江河湖海，涉及面广，因此不宜采用传统的污水处理工艺。现有多数污水处理厂难以长期有效运行的主要原因是管理复杂、运行费用过高，因此探索低成本的点源及面源污染负荷的控制技术以及水体富营养化控制技术是我国环境保护领域当前乃至未来数十年内的重要研究方向。

湿地处理系统具有投资与运行费用低、维护管理简便、氮磷去除效果好、耐冲击负荷能力强、生态景观改善效果明显等优点，在欧美的点源与面源污染负荷的削减方面以及水体富营养化的控制方面得到了非常广泛而成功的应用。在我国自从“七五”科技攻关起，湿地处理技术在全国大部分地区，如云南、江苏、山东、广东、湖南、湖北、山西、辽宁、福建、新疆等省区得到了一些工程应用，不少取得了良好的运行效果。

但是目前在国内尚缺乏用于污水处理人工湿地构建技术的总结，一些湿地在设计参数的选取、运行管理条件制定等方面存在盲目性。

编者查阅了大量国内外的相关文献，结合自身多年的研究与工程经验，从污水自然处理系统、湿地生态系统、表面流人工湿地、水平潜流人工湿地、垂直流人工湿地、复合人工湿地、人工湿地的净化机理、人工湿地的建设与运行管理以及人工湿地污水处理应用实例九个方面进行了总结凝练。本书具有较大的出版价值，可以供从事人工湿地等污水处理与生态修复系统工作的管理者、设计者、研究人员和高等院校相关专业师生参考。

中国工程院院士

金鉴明

2009年1月

前 言

人工湿地技术的研究起始于 20 世纪 50 年代, 70 年代在德国建设了首座人工湿地示范工程。湿地技术早期在欧洲多个国家和美国等得到了非常广泛的应用, 后来湿地技术的研究与应用遍及全球。

我国的湿地工程应用起源于 20 世纪 80 年代末 90 年代初在天津市、北京市和深圳市的湿地工程建设。在“八五”、“九五”期间湿地技术的研究和应用获得一些进展, 自“十五”期间“滇池流域面源污染控制”课题起, 我国的人工湿地技术的应用发展势头迅猛, 在云南省、江苏省和广东省等地得到了较多的应用, 在山东省、辽宁省和山西省等地也有一些应用。进入 21 世纪以来, 随着湿地技术及其优点广为国人所知, 湿地技术将会在我国各地有非常广阔的应用前景。

全球范围内湿地技术的诸多尝试和应用已经涉及了多类污水处理和水环境生态修复, 例如湿地技术的研究和工程已经涵盖了城市与农村生活污水、城市污水、多种工业废水、畜禽与水产养殖污水、垃圾渗滤液、城市与农业径流、高速公路径流、污水处理厂出水的深度处理、污染河水净化以及景观湖水净化等; 其中不乏成功的例子, 也有一些失败的例子。对湿地技术的正确认识、湿地的合理设计及运行管理在一定程度上制约着人工湿地处理系统的成败。

鉴于待处理水中成分的复杂性、实际可用地的地形地势的特殊性, 有时单一类型的人工湿地难以达到预期目标, 借鉴现有的污水处理和生态修复技术, 将湿地技术与这些技术有机结合构建复合型人工湿地是一种发展趋势。

综上所述, 目前国内推广介绍各种具体情形下应用人工湿地工程时亟需合理的设计, 国内缺乏对已经应用的各类的单一人工湿地和复合型人工湿地技术的处理效果的总结与评价。本书主要围绕人工湿地的构建技术展开, 从单一类型的湿地到复合型湿地, 涉及湿地的定义、分类、设计、运行、维护和管理。

本书共分 9 章, 主要论述了污水自然处理系统、湿地生态系统以及表面流人工湿地、水平潜流人工湿地、垂直流人工湿地和复合人工湿地系统四种工艺类型人工湿地的概念、设计、结构、建造、处理效率, 人工湿地的净化机理、人工湿地的运行与维护管理以及人工湿地在污水处理中的应用实例等内容, 具有较强的系统性、知识性、工程性和实践性。可供人工湿地的设计者和管理者参考, 也可供从事环境工程和环境科学相关领域工作的人员借鉴, 还可供高等院校相关专业师生参阅。

本书由华南农业大学和中国环境科学研究院联合编著, 具体编著分工如下: 第 1 章由崔理华、刘佳、刘壮编著; 第 2 章由朱文玲、汤仲恩、崔理华编著; 第 3 章由崔理华、邓佩文编著; 第 4 章由崔理华、杨蔚芝编著; 第 5 章由刘佳、朱夕珍编著; 第 6 章由卢少勇编著; 第 7 章由谭晓辉、高煦纳、崔理华编著; 第 8 章由余志敏、朱夕珍编著; 第 9 章由卢少勇、

游艳萍、司静、贺凯、赵斌、郑苗壮、郭建宁、蔡珉敏编著。全书由崔理华校阅定稿。在本书编著过程中，华南农业大学原校长骆世明教授给予了悉心指导，同时在本书的写作中参考了一些国内外同行的技术资料，并得到了一些专家、学者和同行的支持、帮助和指导，在此表示衷心的感谢！

限于编著者水平和经验，且编著时间比较紧、编著人员较多，难免有疏漏、重复和其他不能令人满意的地方，欢迎广大读者和专家批评指正。

编著者

2009年1月

目 录

1 污水自然处理系统	1
1.1 地上自然处理系统	1
1.2 水生和湿地系统	16
参考文献	30
2 湿地生态系统	32
2.1 湿地概况	32
2.2 湿地生态系统	36
2.3 污水处理型湿地	47
2.4 天然湿地处理系统设计	53
2.5 天然湿地在处理酸性矿山排水中的应用	58
参考文献	61
3 表面流人工湿地	64
3.1 概述	64
3.2 设计	65
3.3 处理效率	91
参考文献	96
4 水平潜流人工湿地	98
4.1 概述	98
4.2 设计	99
4.3 处理效率	128
参考文献	133
5 垂直流人工湿地	136
5.1 概述	136
5.2 设计	137
5.3 处理效率	153
参考文献	159
6 复合人工湿地	163
6.1 概述	163
6.2 复合人工湿地的类型及应用	166
6.3 复合人工湿地系统设计	173
6.4 复合人工湿地系统的构建	176

6.5	复合人工湿地系统的运行与维护管理	178
6.6	复合人工湿地系统的污染物去除效果	183
6.7	复合人工湿地系统的经济性分析	183
	参考文献	186
7	人工湿地的净化机理	189
7.1	耗氧有机物和悬浮物	189
7.2	氮	194
7.3	磷	203
7.4	病原菌	209
7.5	重金属	212
	参考文献	216
8	人工湿地系统的建设与运行管理	219
8.1	人工湿地系统的建设	219
8.2	湿地基质选择与植物配置	223
8.3	人工湿地系统的运行与维护管理	226
8.4	人工湿地堵塞问题及其解决方案	232
	参考文献	235
9	人工湿地污水处理应用实例	237
9.1	人工湿地处理工业废水的实例	238
9.2	人工湿地处理城镇和住宅小区生活污水的实例	245
9.3	人工湿地处理农村污水和畜牧业废水的实例	249
9.4	人工湿地处理污染河流和富营养化湖（库）水的实例	263
9.5	人工湿地处理垃圾渗滤液的实例	273
9.6	人工湿地处理合流制管道溢流和暴雨径流的实例	276
9.7	人工湿地处理二级处理厂出水的实例	276
	参考文献	278

1 污水自然处理系统

1.1 地上自然处理系统

污水自然处理系统可以分为地上自然处理系统以及水生和湿地系统两大类型。其中，地上自然处理系统又可以分为土地处理系统和现场处置两种类型；水生和湿地系统又可以分为氧化塘、浮水生植物系统和挺水生植物系统三种类型。根据处理目标、处理对象的不同，又可以将污水土地处理系统分为：慢速渗滤（SR）、快速渗滤（RI）、地表漫流（OF）、地下渗滤（UG）和湿地系统（WL）五种主要工艺类型。各种工艺对废水处理程度、工艺参数等方面存在着一定的差异，如表 1-1 所列。

表 1-1 污水土地处理系统的工艺类型比较（引自杨文涛等，2007）

项 目	SR	RI	OF	WL	UG
废水投配方式	喷灌、地面投配	地面投配	喷灌、地面投配	地面布水	地下布水
水力负荷/(m/a)	0.5~6	6~125	3~20	3~30	0.4~3
预处理最低程度	一级处理	一级处理	格栅、筛滤	格栅、筛滤	化粪池、一级处理
废水去向	蒸发、渗滤	渗滤	蒸发、渗滤	径流、下渗、蒸发	下渗、蒸发
土壤渗透率/(cm/h)	≥0.15, 中	≥5, 快	≤0.5, 慢	≤0.5, 慢	0.15~5, 中
BOD ₅ 负荷率/[kg/(10 ⁴ m ² ·d)]	50~500	150~1000	40~120	18~140	
是否种植植物	谷物、牧草、林木	均可	牧草	芦苇等	草皮、花卉
占地性质	农、林、牧业	征地	牧业	经济作物	绿化
对地下水质的影响	有一定影响	会有影响	轻微影响		
气候的影响	冬季污水需贮存	终年运行	冬季部分污水需贮存	终年运行	终年运行

与传统的污水二级生化处理相比较，污水土地处理系统的优点如下。

① 基建投资少，运行费用低 污水土地处理系统可充分利用当地地形，选择地价便宜，且不适宜于其他开发的土地作为处理场地，一般来说，其投资只有常规二级生化处理的 1/3~1/2；同时，污水土地处理系统还具有运行操作简单、管理方便，运行费用低廉等优点，土地处理系统的运行维护费用也只有常规二级生化处理的 1/5~1/3。

② 污染物的高去除率 污水土地处理系统往往被看成是高效的污水“活过滤器”，与传统的污水处理方法相比，它对各种污染物都有较高的去除率（见表 1-2），同时还能实现污水的净化与水、肥资源的再生利用。

表 1-2 污水土地处理系统处理率（引自杨文涛等，2007）

单位：%

主要污染物	SR	RI	OF	WL	UG
BOD	>98	85~99	>92	85~95	>95
COD	>80	>50	>80	>80	>80
TP	60~99	60~95	>50	86.3~90.9	>95
N	>85	0~50	70~90	>60	—

注：BOD 指生物化学需氧量；COD 指化学需氧量；TP 指总磷量。

污水土地处理系统存在的主要问题有以下几种。

① 场地条件要求严格 不同的土地处理系统类型要求不同的土壤、地形、水文等场地条件，并且通常存在有场地条件的地方没有污水而有污水的地方没有场地条件的矛盾，从而使其应用受到了场地条件要求的限制。

② 土壤堵塞 土地处理系统主要依靠土壤作为处理介质，在污水处理过程中，由于污水中悬浮物的过滤截留以及有机物的同化合成所产生的细胞物质均可以使土壤的孔隙发生堵塞，从而会降低污水处理量。

③ 适宜的水力负荷 如果水力负荷过高，会引起渗滤速率的降低。

④ 受温度条件限制较大 在污水土地处理系统中，土壤对污水的一个重要的处理机制就是生物降解，微生物在这个过程中发挥着重要的作用。一般情况下，温度低于 5°C 时生化反应就极其缓慢，这就限制了污水土地处理系统在北方，特别是比较寒冷的地方使用，但是采用冬贮夏灌的方法又可以使其在北方地区得到应用。

20 世纪 80 年代以来，国外污水土地处理系统得到快速的发展，在美国、俄罗斯、日本、澳大利亚、以色列和西欧等国家和地区分别得到了广泛的应用。在美国，已有 45 个州发展了污水土地处理系统，占全部污水处理系统的 25% 左右。俄罗斯近几十年来也十分重视污水土地处理系统的研究，把地下土壤渗滤沟工艺作为科技攻关项目，编制了相应的技术规范，在工艺流程、净化方法、构筑设施等方面得到了逐步完善。目前，俄罗斯应用于污水处理的土地面积超过 $1000 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，占世界第一位。日本利用土壤-植物生态系统开发了地下土壤毛管渗滤沟工艺，对污水处理达到三级处理的效果。澳大利亚把多种处理工艺进行结合，开发了污水土地处理复合系统。此外，英国、挪威、瑞典、芬兰、丹麦、荷兰和德国等国家均有营建污水土地处理系统的报道。

20 世纪 80 年代初，我国对污水土地处理系统开始进行研究，随后在“七五”、“八五”期间得到迅速的发展。首先开发了传统的土地处理系统，这些系统虽然对污染物质具有较好的处理效果，但仍然存在着水力负荷低、占地面积大、受场地和气候条件限制等缺点。针对这些缺点，中国农业大学和华南农业大学研究了以人工土壤作为过滤介质的人工土壤快速渗滤系统 (ASRI)，使其不受场地的限制，而且明显地增大了其水力负荷，减少了占地面积 (崔理华等，2000a, b)。随后中国地质大学研究开发出人工快速渗滤系统研究 (CRI)。中科院沈阳应用生态所在“八五”、“九五”期间论证了地下土壤渗滤法在我国北方寒冷地区处理生活污水的可行性，并研究了其处理出水作为中水回用的可行性。2000 年清华大学在滇池农村地区推广应用地下土壤渗滤系统，取得了良好的效果。

1.1.1 慢速渗滤

慢速渗滤系统 (slow rate systems, SR) 是将污水有控制地投配到种有植物的土壤表面，污水在流经土壤表面以及在土壤-植物系统内部垂直渗滤时得到净化的土地处理工艺。在该处理系统中，投配的污水一部分被植物吸收，一部分被蒸发，还有一部分在渗入底土的过程中，污水中的污染物或被土壤介质截获，或被植物根系吸收、利用、固定，或被土壤中的微生物转化或降解为无毒、低毒的成分。污水在系统中的迁移如图 1-1 所示。慢速渗滤系统对污水中污染物的去除率高，出水水质好，是土地处理技术中经济效益最大、对水和营养成分利用率最高的一种类型，但是其污水的投配负荷一般较低，渗滤速率较慢。

在实际工程应用中，慢速渗滤系统可以设计为处理型和利用型两种类型。处理型是以污水处理为目标的系统。它的特点是尽可能提高水力负荷，即在较少的土地面积上处理尽可能多的污水。选择的植物一般为耐湿、生长季长和管理方便的植物；场地的土壤条件要求土壤渗透性好，气候条件为蒸发量小，湿润的地区。利用型也称为最适宜的灌溉系统，这种类型

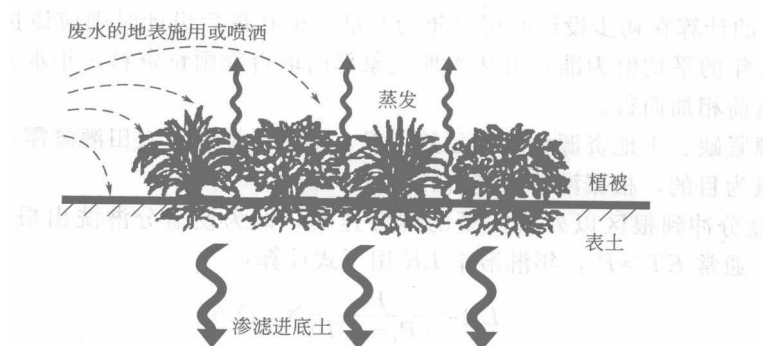


图 1-1 慢速渗滤处理系统及水流过程 (引自孙铁珩等, 2002)

强调以利用为目的。它的特点是用较少的水灌溉到尽可能多的土地面积上。该系统适用于干旱、半干旱的地区, 它紧紧与节水农业联系在一起, 注重经济效益。常选择的作物有玉米、小麦和水稻, 其他经济作物也可以考虑。

慢速渗滤系统的工艺设计如下。

在慢速渗滤系统的工程设计中, 可参考的重要的工艺参数有: 土壤渗透系数 K 为 $0.036 \sim 0.360 \text{ m/d}$; 年水力负荷为 $0.6 \sim 6.0 \text{ m/a}$, 每周水力负荷为 $1 \sim 10 \text{ cm/周}$, 年有机负荷为 $2.0 \times 10^3 \text{ kg BOD}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。除此之外, 还需考虑场地工艺参数, 参考值为: 地面坡度 $< 30\%$, 表层土壤包气带厚度 $0.6 \sim 1.0 \text{ m}$, 地下水埋藏深度 $> 1.0 \text{ m}$ 。

① 土地面积需要量的确定 慢速渗滤系统所需要的土地面积可分为两部分: (a) 实际承受投配污水的占地, 为灌溉田, 其中又可分主运行系统和调节系统, 主运行系统是主体部分, 调节系统在主系统不能运作时承担贮存或者处理污水的功能, 通常调节系统占地面积为主运行系统的 $8\% \sim 10\%$; (b) 辅助、缓冲区的占地, 为非灌溉田, 主要有预处理设备、管理和维护建筑物、道路缓冲带、隔离沟和贮水塘等。

灌溉田的面积依据设计的水力负荷, 可用下式计算 (Reed 等, 1995):

$$A = \frac{(365Q + \Delta V_s)F}{DL_w} \quad (1-1)$$

式中, A 为主系统灌溉田占地面积, hm^2 ; Q 为设计污水流量, m^3/d ; ΔV_s 为在预处理系统 (包括贮存池) 中由于降雨、蒸发和渗漏而净损失或净增加的水量, m^3 ; F 为转换系数 $= 0.1 \text{ hm}^2 \cdot \text{mm}/\text{m}^3$; D 为每年实际运行天数; L_w 为废水的水力负荷率, mm/d 。式(1-1)中采用的 365 是针对一年运行条件而言的, 如在寒冷地区不能实现终年运行的情况, 则应该为实际可能运行的天数。

② 水力负荷的计算 水力负荷是指一个以上的负荷周期内单位土地面积上投配的污水量, 一般以 cm/a 表示。一般地说, 在允许的水力负荷范围内, 随着水力负荷率的提高, 慢速渗滤系统对污染物的去除率无明显变化。但是, 一旦水力负荷超出规定的极限值后, 其去除效果会有显著的下降。

对于高水力负荷, 小土地面积的类型, 土地处理系统主要以处理污水为目的。慢速渗滤系统的水力负荷可采用下式求得 (张忠祥和钱易, 2004):

$$L_w = ET - P_r + P_w \quad (1-2)$$

式中, L_w 为最大允许污水水力负荷, cm/a ; ET 为土壤水分净蒸发损失率, cm/a , 可从地方有关农业气象部门获得; P_r 为降水量, cm/a ; P_w 为最大允许渗滤速率, cm/a , 其数值可取清水土壤渗透系数的 $4\% \sim 10\%$ 。

式(1-2)的计算在初步设计时可以年为基础,但在最后设计时则应该按月进行。每月降雨量通常以5年的平均值为准,可从当地气象部门取得降雨量资料。年水力负荷由实际运行的每月水力负荷相加而得。

在水资源紧缺、土地资源相对充足的干旱、半干旱地区,农田灌溉需水迫切,土地处理系统应以灌溉为目的,根据淋溶限制进行设计。

P_w 指使盐分冲到根区以外所需要的淋溶速率,即使使盐分淋洗出根层所需要的水量。在干旱季节,通常 $ET > P_r$, 年淋溶率 LR 用下式计算:

$$LR = \frac{P_w}{(P_r - ET)} \times 100\% \quad (1-3)$$

LR 取决于作物生长所允许的盐分浓度。根据作物的不同和投配污水中的含盐量不同,其范围一般为2%~30%。

此时污水的渗滤速率为:

$$P_w = LR \frac{(ET - P_r)}{100} \quad (1-4)$$

将上式的 P_w 代入式(1-2), 得:

$$L_w = (ET - P_r) \left(1 + \frac{LR}{100} \right) \quad (1-5)$$

考虑到在输送和投配过程中的污水水量损失, 灌溉系统最终的水量平衡式可表示为:

$$L_w = (ET - P_r) \left(1 + \frac{LR}{100} \right) \frac{100}{E_s} \quad (1-6)$$

式中, E_s 为灌溉水有效利用率, 地表布水为0.65~0.85, 喷灌为0.7~0.8。

当污水中氮含量为限制因素时, 处理场地氮的物料平衡关系可表示如下:

$$L_N = U + fL_N + AC_P P_w \quad (1-7)$$

式中, L_N 为投配污水中氮的质量负荷, $\text{kg}/(10^4 \text{m}^2 \cdot \text{a})$; U 为作物对氮的利用量, $\text{kg}/(10^4 \text{m}^2 \cdot \text{a})$; f 为投配污水中氮素的损失系数, 它取决于污水性质和投配方式, 投配水为一级处理出水时 f 约为0.8, 二级处理出水时 f 约为0.1~0.2; A 为转换因子, 0.1 (SI单位), 2.7 (美国单位); C_P 为渗滤水中氮的浓度, mg/L ; P_w 为渗滤速率, cm/a , 通常取饱和渗滤系数 K 的4%~10%。

以氮为限制因素时水力负荷 L_w (N) 可表示为:

$$L_w(N) = 0.1 C_N L_{wN} \quad (1-8)$$

式中, 0.1 为转换因子 (美国单位为2.7); C_N 为投配污水中氮的浓度, mg/L ; L_{wN} 为氮作为限制设计因子的水力负荷率, cm/a 。

代入式(1-2)中, 整理得下式:

$$L_{wN} = \frac{C_P(P_r - ET) + 4.4U}{(1-f)(C_w) - C_P} \quad (1-9)$$

【例 1-1】 慢速渗滤系统的土地面积。计算慢速渗滤系统处理一个1000人口社区的土地面积需求。这个社区位于中等温暖气候, 设计污水流量为65000gal^①/d。一个部分混合好氧塘产生的出水 BOD_5 浓度为50mg/L, TN (总氮) 为30mg/L。慢速渗滤场地的限制渗滤速率 K 为0.2 in/h (1in=0.0254m, 下同)。选择的叶草一年将吸收的氮量为300lb/ac^②。蒸发与降雨之间的水量平衡显示净蒸发量为18 in/a。

① 1gal=4.546L。

② 300lb/(ac²·a) 是指一年每英亩 BOD 的限制性负荷 lb (limiting loading of Bod) 为300, 1ac=4046.86m²。

(1) 利用公式 $P(\text{日})=K \times (0.04 \sim 0.10) \times (24\text{h}/\text{d})$ 计算年设计渗滤速率:

$$P(\text{年})=K \times (0.07) \times (24\text{h}/\text{d}) \times (365\text{d}/\text{a})=613K=613(0.2)=123\text{in}/\text{a}$$

(2) 利用方程式(1-2) 计算污水负荷率 L_w :

$$L_w=(ET-P_r)+P=(\text{净 } ET)+P=18+P=18+123=141 \text{ in}/\text{a}$$

(3) 根据土壤渗滤速率限制利用方程式(1-1) 计算场地面积:

$$Q=\frac{65000\text{gal}}{\text{d}} \times \frac{365\text{d}}{\text{a}} \times \frac{1\text{Mgal}}{10^6\text{gal}}=\frac{23.7\text{Mgal}}{\text{a}}$$
$$A=\frac{Q}{0.027L}=\frac{23.7\text{Mgal}/\text{a}}{0.027 \times 141 \text{ in}/\text{a}}=6.2\text{hm}^2$$

(4) 硝酸盐氮限制值 $10\text{mg}/\text{L}$, 反硝化作用率为 25% , 利用式(1-9) 计算由氮限制的水力负荷率:

$$L_{wN}=\frac{C_p(P_r-ET)+4.4U}{(1-f)C_w-C_p}=\frac{10 \times (-18)+4.4 \times 300}{(1-0.25) \times 30-10}=91.2\text{in}/\text{a}$$

(5) 根据氮限制利用方程式(1-1) 计算场地面积:

$$A=\frac{Q}{0.027 \times L_{wN}}=\frac{23.7\text{Mgal}/\text{a}}{0.027 \times 91.2\text{in}/\text{a}}=9.6\text{hm}^2$$

(6) 假设根据氮限制 9.6ac 是要求的场地面积, 计算有机负荷率:

$$\text{污水中 BOD}=\frac{0.065\text{Mgal}}{\text{d}} \times \frac{500\text{mg}}{\text{L}} \times 8.34=27.1 \text{ lb}/\text{d}$$
$$\text{BOD 负荷}=\frac{27.1 \text{ lb}/\text{d}}{9.6\text{hm}^2}=2.8 \text{ lb}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$$

因此, 这个 BOD 负荷不受限制, 因为它比 $450 \text{ lb}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 要小得多。

(7) 确定场地面积需要:

因为氮限制面积 (9.6hm^2) 大于土壤渗滤速率的面积需求 (6.2hm^2), 因此需要的场地面积为 9.6hm^2 。

1.1.2 快速渗滤

快速渗滤系统 (rapid infiltration system, RI 系统) 是将污水有控制地投配到具有良好渗滤性能的土壤表面, 污水在向下渗透过程中通过生物氧化、硝化、反硝化、过滤、沉淀、氧化和还原等一系列作用从而得到净化的一种土地处理工艺类型。RI 系统包括包气带 (非饱和带) 和非包气带 (饱和带), 所以也称为土壤含水层处理系统 (soil-aquifer treatment system, SAT 系统)。这种观点认为在净化过程中, 污水中的污染物除了经过非饱和带中的物理、化学、生物作用以外, 还要受到土壤含水层的分散、稀释等作用。

快速渗滤系统是一种高效、低耗、经济的污水处理与再生方法, 主要用于补给地下水和废水回收利用。但是它需要较大的渗滤速率和硝化速率, 所以通常要求对进入此系统的污水进行适当的预处理。

快速渗滤系统通常采用淹水、干化交替的运行方式, 以便使渗滤池表面在干化期间得到恢复与再生, 也有利于水的下渗、排除和累积污染物质的分解。其处理系统见图 1-2。

快速渗滤系统对氨氮、有机物、悬浮物等都具有很高的去除率; 基建投资省, 运行成本低, 一般为常规二级污水处理基建投资的 $30\% \sim 60\%$; 处理能耗低, 为常规二级污水处理的 $1/4$; 操作简单, 管理方便, 土地面积需求量较少, 可常年运行; 处理出水可以回用或回灌以补充地下水。然而, 快速渗滤系统场地的水文地质条件的要求较其他土地处理工艺类型更为严格, 场地和土壤条件决定了快速渗滤系统的适用性; 对总氮的去除率不高, 处理出水

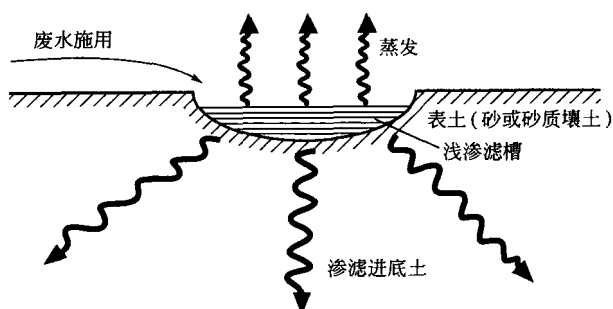


图 1-2 快速渗滤处理系统及水流过程 (引自孙铁珩等, 2002)

中的硝态氮可能会导致地下水污染。

快速渗滤系统工艺目标主要包括: (a) 地下水回灌; (b) 回收渗滤水重新利用或排入其他水体; (c) 渗滤水自然补给地下水; (d) 渗滤水季节性地贮存于具有回收系统场地之下的含水层中, 在作物生长季节用于农业灌溉。

快速渗滤系统的工艺设计如下。

对于快速渗滤系统来说, 选择最佳的运行参数是达到理想处理效果的关键。影响系统运行的因素有很多, 但主要表现在三个方面: (a) 渗透系数; (b) 水力负荷; (c) 运行周期 (湿干比)。三者的共同作用决定了快速渗滤系统的运行方式。

在系统设计时, 需要考虑的关键工艺参数主要有: (a) 土壤渗透系数为 $0.36 \sim 0.6 \text{ m/d}$; (b) 年水力负荷为 $6 \sim 150 \text{ m/a}$, 年有机负荷为 $3.6 \times 10^4 \text{ kgBOD}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。此外, 场地工艺参数的选择也是重要的, 包括土层厚 $> 1.5 \text{ m}$, 地下水位 $> 1.0 \text{ m}$ (孙铁珩, 2004)。

① 渗透系数 土壤的质地和结构影响着快速渗滤系统的渗透系数。对于渗透系数大的土壤, 由于其孔隙比较大, 出水水质往往较差; 反之, 出水水质则较好。水通过具有良好入渗率的土壤时, 遵循达西定律:

$$q = \frac{Q}{A} = K \frac{dH}{dL} \quad (1-10)$$

式中, q 为单位截面积上的水的通量, cm/h ; $\frac{dH}{dL}$ 为水力梯度, m/m ; K 为水力传导率 (渗透系数), cm/h 。

水通过土壤的速率取决于土壤剖面上饱和渗透系数 (K) 的平均值, 对于有多层土壤组成的非均一土壤, K 值随土壤的深度而降低, 其均值可以用每一层 K 值的调和平均数来表示 (郭伟和李培军, 2004):

$$K_m = \frac{D}{\frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \dots + \frac{d_n}{k_n}} \quad (1-11)$$

式中, D 为土壤剖面厚度, cm ; d_n 为第 n 层土壤厚度, cm ; k_n —第 n 层土壤的渗透系数, cm/h ; K_m 为调和平均渗透系数。

在实际工程中, 更令人关心的是稳定入渗速率, 当入渗深度与水头差相等时, 渗透系数才等于入渗速率。有研究表明, 土层的人渗速率随着时间呈指数式递减逐渐达到一个稳定值, 该值为稳定入渗率; 随着细砂、中砂、粗砂的顺序, 渗透系数逐渐增大, 渗透系数与稳定入渗速率的差距越来越小; 当全部为粗砂时, 渗透系数等于稳定入渗率。

② 水力负荷

a. 第一种公式。适当的水力负荷是实现快速渗滤系统的处理目标和正常运行的基本保证。水力负荷过大, 造成投配的污水不能及时渗入土壤, 而产生过长时间的地表面滞水, 使

干化期不能达到设计要求，在高温季节还会带来藻类繁殖的问题。在某些地区，快速渗滤系统由于冬季需要贮存或由于季节性不能运行时，年水力负荷需要减去不运行的时间（张忠祥和钱易，2004）。

水力负荷的确定要以现场和实验室测定的土壤渗滤速率、渗透系数、水力传导系数的结果为依据。但无论采用哪种测定方法，都要对所得结果进行调整，除非是由生产规模的淹水池所得到的渗滤速率可直接用于快速渗滤系统的设计。各种渗滤速率测定方法的修正系数见表 1-3。

表 1-3 各种渗滤速率测定方法的修正系数（引自张忠祥和钱易，2004）

测定方法	设计水力负荷的修正系数
淹水池法	观测的有效渗滤速率的 10%~15%
进气式渗透仪和圆筒渗透仪法	观测的有效渗滤速率的 2%~4%
实验室的水力传导系数	测定的有效水力传导系数或限制性土层的水力传导系数的 4%~10%

如果对处理出水中的氮浓度有要求，那么总氮将成为系统的限制性设计参数。总氮负荷率应该保持在 $60 \text{ lb}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ [$67 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$] 以下，此时应根据慢速渗滤系统一节中氮含量作为限制因素的水力负荷计算方法，确定设计水力负荷。

$$L_N = \frac{L_w C F}{D} \quad (1-12)$$

式中， L_N 为氮负荷率， $\text{lb}/(\text{ac} \cdot \text{d})$ [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$]; L_w 为污水水力负荷率， in/a (m/a); C 为污水氮浓度， mg/L (g/m^3); F 为转换因子， $0.226 \text{ lb} \cdot \text{L}/(\text{mg} \cdot \text{ac} \cdot \text{in})$ [$10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/(\text{g} \cdot \text{hm}^2)$]; D 为每年实际运行的天数。

而以磷为限制性设计参数时，可以利用下式估算出快速渗滤系统的除磷能力，并设计水力负荷：

$$P_x = P_0 \exp(-K_p t) \quad (1-13)$$

$$t = \frac{x W}{G I}$$

式中， P_x 为土壤水运行距离为 x 时的总磷浓度， mg/L ; P_0 为污水中总磷浓度， mg/L ; K_p 为瞬时速率常数 ($\text{pH}=7$, $K_p=0.002/\text{h}$); t 为停留时间， d ; x 为水流迁移距离， m ; W 为土壤容积含水量，饱和含水量可取 0.4; I 为水流方向的土壤运行渗滤速率，即水力负荷， cm/h ; G 为水力梯度， $G=1$ ，垂直水流动; $G=\frac{\Delta H}{\Delta L}$ ，侧渗水流动，其中 ΔH 为渗滤水头， ΔL 为侧渗距离。

b. 第二种公式。根据 U. S. EPA（美国国家环保局）资料，快速渗滤系统的年水力负荷 L 的大小是由场地天然系统的渗滤性能和渗滤池个数决定的（孙铁珩和李宪法，2006）。

$$L = \frac{365 K}{n-1} \quad n = \frac{t_d - t_f}{t_f + 1} \quad (1-14)$$

式中， L 为年水力负荷， m/a ; K 为场地天然系统的平均入渗速率， m/d ; n 为渗滤池的个数; t_d 为落干期， d ; t_f 为淹水期， d 。

③ 运行周期 污水快速渗滤系统的运行周期包括投配污水的一段时间，即淹水期，以及随后数天的干化期。由于 RI 系统处理的目的、要求不同，其配水时间和湿干比也就不同。研究结果显示，要维持最大的水力负荷除了必要的渗透系数以外，还必须有足够的干化时间。

不同的快速渗滤系统，其淹水期与干化期之比是不同的，但一般来说，该比值都小于 1。为了获得最大的水力负荷和最大的硝化效果，淹水期与干化期之比一般 ≤ 0.2 ；如果系统

为了获得最大的氮去除率,则该比值应为 0.5~1.0。为使氮去除率最大而采用的投配周期随预处理程度、气候和季节的不同而异。一般投配时间应足够长,以使土壤细菌消耗完土壤中的氧而造成厌氧条件。然而,无论在什么情况下都应当避免土壤的过分堵塞。

对于运行周期的确定,目前一般都是根据特定的处理目标采用经验判断(实际工程调试)或是土柱模拟试验的方法,而缺乏科学准确的、严格数学逻辑的测算方法。吴永锋等(1996)在此方面开展了研究工作,分别用指数方程和对数方程来表达淹水期入渗速率递减曲线和干化期入渗速率恢复曲线,提出了一种以追求最大水力负荷为目标时水力负荷周期的定量设计方法,计算结果与实际运行结果基本相同。此方法虽然测算较为准确,但在实际中存在如何操作的问题,因为在实际工程应用中得到相当精确的运行参数是十分困难的。因此,如何能够根据不同的处理目的,科学准确地给出快速渗滤系统的水力负荷周期的测算方法,对快速渗滤系统的建立与运行有重要的指导意义。

④ 污水投配速率 污水投配速率由年水力负荷和投配周期而定,可由下列方法确定:(a) 淹水期和干化期相加得到投配周期的总天数;(b) 用每年的利用天数(除非设计中有贮存,一般用 365d)除以投配周期的总天数,得每年中的投配周期数;(c) 每年水力负荷除以每年的污水投配周期数,得到每个投配周期的水力负荷;(d) 每个投配周期的水力负荷除以污水投配的天数,得到污水投配速率。

污水投配速率确定后,就可用来计算渗滤池的污水投配流量。

⑤ 渗滤池面积 快速渗滤系统需要的污水投配面积由下式计算(张忠祥和钱易,2004):

$$A = \frac{1.9}{LP} Q \quad (1-15)$$

式中, A 为渗滤池面积, hm^2 ; Q 为设计的日流量, m^3/d ; L 为设计的水力负荷, m/a ; P 为每年运行的周数, 周/年。

如果快速渗滤系统是终年运行的,式(1-15)可以简化为:

$$A = \frac{0.0365}{L} Q \quad (1-16)$$

⑥ 土层的厚度 土层的厚度对系统净化污水也有一定的影响。RI 系统采用湿、干交替的运行方式,从而在系统内部形成了一系列氧化-还原的微环境,而正是系统内的这些微环境影响甚至控制着系统对污染物的净化过程。许多研究结果表明,在快速渗滤系统中,土层 100~120cm 以下仍保持还原状态,在此以上的土层中才会出现好氧与厌氧的过程。因此,在快速渗滤系统的设计中,应保持适当的土层厚度。

【例 1-2】快速渗滤的过程设计。确定一个快速渗滤系统处理 $2000\text{m}^3/\text{d}$ 城市污水的场地面积需求。1d 停留时间的预处理塘把 BOD_5 和 TN 浓度分别减少到 $150\text{mg}/\text{L}$ 和 $40\text{mg}/\text{L}$ 。场地有比较高的渗滤速率,设计的最小渗滤速率(场地灌溉试验)为 $3.0\text{in}/\text{h}$ 。周年运行是可能的,并且地下水硝酸盐态氮的限制是 $10\text{mg}/\text{L}$ 。处理出水排入该场地 50ft (1ft = 0.3048m,下同)深度的地下水中。

(1) 利用设计因子 6% 计算水力负荷率:

$$L_w = 0.06 \times (24\text{h}/\text{d}) \times (365\text{d}/\text{a}) \times (3.0\text{in}/\text{h}) \times (1\text{ft}/12\text{in}) = 131\text{ft}/\text{a}$$

(2) 利用方程式(1-12) 比较水力负荷与可接受的氮负荷率:

$$L_N = \frac{L_w C (F \times 12\text{in}/\text{ft})}{D} = \frac{131 \times 40 \times 2.7}{365} = 38.8\text{lb}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$$

由于氮负荷率为 $39\text{lb}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 是低于 $60\text{lb}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 的限制值,因此氮负荷对于场地面积的确定没有限制。