

中国博士后科学基金一等资助 (2017M610598)

前置反硝化 人工快速渗滤系统

处理生活污水试验研究

许文来 潘志成 费功全 李 勇 简 悦 / 著

QIANZHI FANXIAOHUA
RENGONG KUAISU SHENLÜ XITONG
CHULI SHENGHUO WUSHUI SHIYAN YANJIU



四川大学出版社

中国博士后科学基金一等资助 (2017M610598)

前置反硝化 人工快速渗滤系统

处理生活污水试验研究

许文来 潘志成 费功全 李简 悦 / 著



四川大学出版社

责任编辑:唐 飞
责任校对:蒋 玟
封面设计:墨创文化
责任印制:王 炜

图书在版编目(CIP)数据

前置反硝化人工快速渗滤系统处理生活污水试验研究 / 许文来等著. —成都:四川大学出版社, 2018. 7
ISBN 978-7-5690-2016-8

I. ①前… II. ①许… III. ①生活污水—污水处理—
试验研究 IV. ①X703-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 148374 号

书名 前置反硝化人工快速渗滤系统处理生活污水试验研究

著 者	许文来 潘志成 费功全 李 勇 简 悦
出 版	四川大学出版社
地 址	成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行	四川大学出版社
书 号	ISBN 978-7-5690-2016-8
印 刷	成都市新都华兴印务有限公司
成品尺寸	146 mm×208 mm
印 张	3.75
字 数	81 千字
版 次	2018 年 8 月第 1 版
印 次	2018 年 8 月第 1 次印刷
定 价	26.00 元



版权所有◆侵权必究

- ◆读者邮购本书, 请与本社发行科联系。
电话: (028)85408408/(028)85401670/
(028)85408023 邮政编码: 610065
- ◆本社图书如有印装质量问题, 请
寄回出版社调换。
- ◆网址: <http://www.scupress.net>

前 言

人工快速渗滤系统 (Constructed Rapid Infiltration System, 简称 CRI 系统), 近年来由于其具有低成本、低耗能、易操作以及出水水质好等优点而得到广泛研究和应用。相关研究表明, 由于反硝化反应所需的缺氧环境及有机碳源的缺乏, CRI 系统的脱氮效率较低, 因此, 强化人工快速渗滤系统的脱氮能力成为目前的研究重点。本书首先采用实验室构建 A/O 两段式人工快速渗滤系统, 充分借鉴了活性污泥法中 A/O 工艺脱氮原理的设计思路, 将传统 CRI 系统改进为前置反硝化 CRI 系统, 研究了前置反硝化 CRI 系统对生活污水的处理性能, 探讨了 CRI 系统有机物和总氮的去除机理, 并寻求了 CRI 系统的最佳回流比条件。其次, 利用硝态氮在水中具有较大的溶解度对前置反硝化人工快速渗滤系统进行了改进, 研究了改进型前置反硝化人工快速渗滤系统对生活污水的处理性能及其有机物和 TN 的去除机理, 探讨了回流量不变的情况下, 不同回流比条件对改进型前置反硝化人工快速渗滤系统脱氮效率的影响。最后, 探讨了改进型前置反硝化人工快速渗滤系统的 A 段人工快速渗滤系统对硝态氮的去除动力学, 构建了 A 段人工快速渗滤系统去除硝态氮的动力学模型。

在 A/O 两段式前置反硝化人工快速渗滤系统的启动试验中, 系统采用阶段式自然挂膜方式, A 段系统对 TN 的去除率稳定在 35% 左右, O 段系统对氨氮的去除率稳定在 70% 左右, 说明挂膜成功,

整个过程总共历时 34 d。挂膜成功后,继续运行 A/O 两段式前置反硝化人工快速渗滤系统,在水力负荷为 $80 \text{ cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 、回流比为 100% 的条件下,系统对 COD 和 NH_4^+-N 的效果较好,平均去除率分别为 90.2% 和 79.9%。而对 TN 的去除率提高到 40.8%。因为反硝化菌利用原废水中的有机物作为碳源将回流液中的 NO_3^--N 还原为 N_2 ,从而降低了出水的 TN 浓度。回流比对 NH_4^+-N 和 COD 的去除影响较小,而对 TN 的去除影响相对较大。随着回流比从 50% 增加到 200%,TN 的去除率先由 31.4% 上升到 40.1% 再下降为 33.8%。

通过改进运行方式,利用 NO_3^--N 在水中具有较大的溶解性,通过前面流入 O 段系统的污水将其中的 NO_3^--N 淋洗出来进入回流,同时在 O 段系统配水 2 h 后再将消化回流液通入 O 段系统内,利用加强 O 段系统复氧的方式加强 A/O 两段式前置反硝化人工快速渗滤系统的脱氮性能。试验表明:改进后的系统由于污水对 NO_3^--N 的淋洗作用,将 O 段系统转化的大部分 NO_3^--N 回流到 A 段系统进行反硝化,将系统的 TN 去除率提高到了 78%。回流比对于改进型 A/O 两段式前置反硝化人工快速渗滤系统对 COD 和 NH_4^+-N 的去除影响很小,对 TN 的去除影响较大。试验表明:TN 去除效果在水力负荷为 $80 \text{ cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 、回流比为 75% 时最好,去除率为 77.4%。

此外,推导出 A 段系统反硝化一级动力学模型: $\frac{S_e}{S_0} = e^{-\frac{3.4301H}{2.2354}}$ 。经验证,该模型可以较好地反映 A 段系统对 NO_3^--N 的降解规律。

由于作者水平有限,书中错漏之处在所难免,望广大读者指正。

著 者

2018 年 3 月

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 我国水资源现状	(1)
1.2 水体中氮素的来源及危害	(3)
1.2.1 水体中氮素的来源	(3)
1.2.2 水体中氮素的危害	(5)
1.3 人工快速渗滤系统概述	(7)
1.3.1 人工快速渗滤系统典型案例	(9)
1.3.2 人工快速渗滤系统去除污染物的机理	(17)
1.3.3 人工快速渗滤系统处理效能影响因素	(22)
1.3.4 人工快速渗滤系统的脱氮现状	(25)
1.3.5 人工快速渗滤系统强化脱氮性能研究	(28)
1.4 课题研究内容与技术路线	(30)
第 2 章 试验材料与方法	(33)
2.1 试验设计	(33)
2.2 试验装置	(34)
2.2.1 模拟柱构建	(34)
2.2.2 渗滤介质的选取及理化性质分析	(35)
2.3 前置反硝化 CRI 系统运行方式及其改进	(36)
2.3.1 前置反硝化 CRI 系统挂膜及运行方式	(36)
2.3.2 改进型前置反硝化 CRI 系统运行方式	(38)

2.4	试验监测项目	(40)
2.5	试验废水	(40)
第 3 章	前置反硝化 CRI 工艺的挂膜启动	(42)
3.1	试验结果与分析	(43)
3.1.1	第一阶段挂膜分析	(43)
3.1.2	第二阶段挂膜分析	(49)
3.2	本章小结	(53)
第 4 章	前置反硝化 CRI 工艺处理能效的研究	(54)
4.1	前置反硝化 CRI 系统的处理能效	(54)
4.1.1	前置反硝化 CRI 系统对 COD 的去除效果 ...	(55)
4.1.2	前置反硝化 CRI 系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果	(57)
4.1.3	前置反硝化 CRI 系统 TN 的去除效果	(59)
4.1.4	前置反硝化 CRI 系统 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的变化规律	(60)
4.2	回流比对前置反硝化 CRI 系统处理能效的影响	(61)
4.2.1	回流比对前置反硝化 CRI 系统 COD 去除效果 的影响	(62)
4.2.2	回流比对前置反硝化 CRI 系统 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去 除效果的影响	(64)
4.2.3	回流比对前置反硝化 CRI 系统 TN 的去除效果 的影响	(66)
4.2.4	回流比对前置反硝化 CRI 系统出水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的影响	(68)

4.3 本章小结	(70)
第5章 改进型前置反硝化 CRI 工艺处理能效的研究 ..	(71)
5.1 改进型前置反硝化 CRI 系统工艺处理效能	(72)
5.1.1 出水口 5 开关时间及回流硝化液量的确定 ..	(72)
5.1.2 改进型前置反硝化 CRI 系统对 COD 的去除效果	(74)
5.1.3 改进型前置反硝化 CRI 系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果	(75)
5.1.4 改进型前置反硝化 CRI 系统对 TN 的去除效果	(77)
5.1.5 改进型前置反硝化 CRI 改进型前置反硝化 CRI 系统内 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的变化趋势	(78)
5.2 回流比对改进型前置反硝化 CRI 系统处理能效的影响	(80)
5.2.1 回流比对改进型前置反硝化 CRI 系统 COD 去除效果的影响	(80)
5.2.2 回流比对改进型前置反硝化 CRI 系统 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果的影响	(82)
5.2.3 回流比对改进型前置反硝化 CRI 系统 TN 去除效果的影响	(85)
5.2.4 回流比对改进型前置反硝化 CRI 系统 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 去除多余的影响	(88)
5.3 本章小结	(90)
第6章 前置反硝化 CRI 系统反硝化动力学研究	(91)
6.1 反硝化模型的推导	(92)
6.2 反硝化动力学模型的验证	(95)

6.3 本章小结	(97)
第 7 章 结论与建议	(98)
7.1 结论	(98)
7.2 建议	(101)
参考文献	(103)

第 1 章 概论

1.1 我国水资源现状

我国缺水严重，是 13 个贫水国家之一。淡水资源仅占全球水资源的 6%，同时我国人口基数大，人均水资源量不到世界平均水平的 1/4，仅仅只有 $2\ 050\ \text{m}^3$ （王羽婷，2014）。我国可利用的淡水资源则更少，约为 11 000 亿立方米，人均可利用的淡水资源量约为 $900\ \text{m}^3$ 。到 20 世纪末期，已有 400 多个城市存在着供水不足的问题（吕睿，2017）。同时我国淡水资源分布及其不均衡，南多北少，东多西少。长江流域及其以南地区的水资源量占了全国水资源总量的 81%，人均水资源量为全国平均水资源量的 1.6 倍；长江流域以北地区的水资源量仅占全国水资源总量的 19%（苗硕，2010）。

水污染导致的水质性缺水使得水资源短缺更加严重（丁玉洋，2017；周爱萍，2009）。根据 2015 年中国环境状况公报（中

华人民共和国环境保护部，2005）的调查显示，涵盖七大流域、浙闽片河流、西北及西南诸河以及太湖、滇池和巢湖的环湖河流共 423 条河流，62 个重点湖泊（水库），表明Ⅰ类水质断面占 2.8%，Ⅱ类占 31.4%，Ⅲ类占 30.3%，Ⅳ类占 21.1%，Ⅴ类以及劣Ⅴ类占 14.4%。全国 62 个重点湖泊（水库）中，Ⅰ类水质为 5 个湖泊，Ⅱ类水质为 13 个，Ⅲ类为 25 个，Ⅳ类 10 个，Ⅴ类 4 个，劣Ⅴ类为 5 个。进行营养监测的 61 个大型湖泊（水库）中，轻度富营养化的有 12 个，中度富营养化的有 2 个。

地下水方面，国土部门对全国 5 118 个监测井（点）开展地下水水质监测。结果显示，水质较好以上仅有 38.7%，而水质较差和极差的监测点比例分别为 42.5%和 18.8%， “三氮”（亚硝酸盐氮 NO_2^- 、硝酸盐氮 NO_3^- 、氨氮 NH_4^+ ）污染较重，部分地区存在一定的重金属和有毒有机物污染（王冠等，2017）。

与此同时，随着我国的人口不断增加，经济不断的发展，工业化规模不断扩大，废水排放量也在不断加大。从表 1-1 可知，2011 年到 2014 年我国废水排放量逐年递增。

表 1-1 2011—2014 年全国废水排放量统计

项 目 \ 年 份		2011	2012	2013	2014
废水排放量(亿吨)	工业源	230.9	221.6	209.8	205.3
	生活源	427.9	462.7	485.1	510.3

续表1-1

项 目 \ 年 份		2011	2012	2013	2014
	集中式	0.4	0.5	0.5	0.6
	合计	659.2	684.8	695.4	716.2
化学需氧量排放量(万吨)	工业源	354.8	338.5	319.5	311.3
	生活源	938.8	912.8	889.8	864.4
	农业源	1 186.1	1 153.8	1 125.8	1 102.4
	集中式	20.1	18.7	17.7	16.5
	合计	2 499.9	2 423.7	2 352.7	2 294.6
氨氮排放量(万吨)	工业源	28.1	26.4	24.6	23.2
	生活源	147.7	144.6	141.4	138.1
	农业源	82.7	80.6	77.9	75.5
	集中式	2.0	1.9	1.8	1.7
	合计	260.4	253.6	245.7	238.5

注：①数据摘自2014年环境统计年报；②农业源包括种植业、水产养殖业、畜禽养殖业；③集中式包括生活垃圾处理场和危险废物（医疗废物）集中处理场排放的渗滤液/废水。

由于资源短缺与水资源污染，我国水资源形式严峻，我们在提倡节约用水的同时必须进行废水资源化利用，以期缓和水资源供需差距（Lyu 等，2016；Gharbia 等，2016）。

1.2 水体中氮素的来源及危害

1.2.1 水体中氮素的来源

水体中的氮一般以无机氮和有机氮的形式存在。其中，无机

氮主要有氨氮、硝酸盐氮以及亚硝酸盐氮。有机氮主要包括蛋白质、氨基酸、尿素等含氮有机物（杨兴兴，2016）。水体中氮的来源可分为天然来源和人工排放源两个方面。其中，天然来源为河流、湖泊等水体底泥释放以及大气沉降等（李彦旻，2016）。人工排放源主要有工业源、生活源和农业源等。

1.2.1.1 天然来源

（1）底泥释放：底泥作为河流、湖泊等水体污染物迁移的一个主要归宿，但同时也是水体重要的次生污染源（贾晓珊等，2005）。当人工排放源有效控制后，从底泥中释放的氮将成为水体氮污染的主要来源（陈玉霞，2011；贾晓珊等，2005）。

（2）大气沉降：水体中来源于大气沉降的氮素主要是因为化石燃料的燃烧。首先，在燃烧过程中，高温高压使氮气被氧化为 NO ($\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}$)，继而被氧化为 NO_2 ($2\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2$)；其次，闪电也会将空气中的氮气转化为 NO_2 ，然后通过降雨、降雪等过程进入自然水体中。

1.2.1.2 人工排放源

（1）工业源：化工、造纸、制药、食品加工、印染等废水中的氮含量都比较高。如表 1-1 所示，近年来，工业废水排放量逐年递减，2011 年工业废水排放量为 230.9 亿吨，到了 2014 年有所减少，为 205.3 亿吨。其中，工业源中的氨氮排放量也呈逐年递减的形式，2014 年工业源中的氨氮排放量为 23.2 万吨。

(2) 生活源：人们日常生活中会产生大量的生活污水。如表 1-1 所示，2011 年到 2014 年生活污水排放量由 427.9 亿吨逐年上涨到 510.3 亿吨，其中生活污水中氨氮排放量从 147.7 万吨逐渐下降到 138.1 万吨。虽然氨氮排放量有所下降，但是 138.1 万吨依然是一个不可忽视的数字。同时，生活污水中氨氮排放量远远高于工业废水及农业废水，可见，生活污水已经成为水体中最大的氮素来源。

(3) 农业源：农业从业者为了提高作物产量及减少虫害会大量使用化肥和农药。当化肥和农药施入土壤后，农作物利用率较低导致其大量残存于土壤，再通过地表径流、雨水冲刷等途径进入水体中（王羽婷，2014）。同时，畜牧养殖业排放的污水中也含有大量的氮，会加大水体中的氮含量（张丽娟等，2010）。如表 1-1 所示，农业源中的氨氮排放量已超过工业源成为水体中第二大的氮素来源。

1.2.2 水体中氮素的危害

当水体中的氮素超标就会对环境产生负面影响。

1.2.2.1 水体中氮对人类及生物的影响

水体中硝酸盐氮与水中二级胺、酰胺或类似氮氧化物反应会形成 N-亚硝基化合物。N-亚硝基化合物是一种强致癌物质，可以诱发肝癌、食道癌等癌症。同时，亚硝酸盐氮易造成智力迟

钝（张庆乐等，2008）。氨氮可以影响水生生物与氧的结合能力，严重时会导致死亡。

1.2.2.2 水体中氮含量超标易引起水体富营养化

水体富营养化的危害极大。首先，会引起水体中藻类、浮游生物等大量繁殖，从而引起赤潮或者水华，使得水体透明度下降；同时，溶解氧由于藻类和浮游生物消耗急剧减少，从而导致水体中鱼虾及其他水生生物死亡（Hansen 等，2017；Dai 等，2017）。其次，有的藻类会分泌毒素，进一步毒害水体中的水生生物，并使其死亡。最后，鱼虾及水生生物死亡，微生物分解其尸体时需消耗更多的溶解氧，从而形成恶性循环（Pearce 等，2017）。由图 1-1 可知，我国大多数大型湖泊及水库泊处于贫营养及中营养。其中，轻度富营养化有 12 个；中度富营养化有 2 个，分别为滇池和达贵湖。

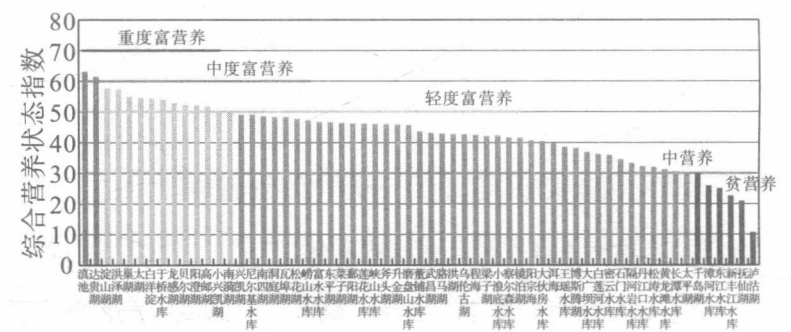


图 1-1 2015 年重点湖泊（水库）综合营养状态指数

1.3 人工快速渗滤系统概述

我国小城镇数量多,分布广,以每年平均排放污水 70 吨计算,全国小城镇年排放污水可达 112 亿吨左右(杨宁,2013)。但是长期以来农村及小城镇污水得不到重视,甚至有一些农村地区直接将废水排入自然水体,污水处理几乎处于空白期(Zhang 等,2015)。因此,迫切需要开发出投资低、效率高以及易于管理维护的污水处理技术(Lutterbeck 等,2017)。

农村生活污水主要有洗浴废水、洗涤和家庭清洁废水、人畜排便及冲洗废水和厨房用水等(黄阔,2015;崔育倩,2013)。其具有分散、水量波动大、污水中几乎不含或含少量重金属物质和有毒有害物质、可生化性较强等特点(侯京卫等,2012)。由于农村及小城镇几乎没有完善的排水管网,且离城市管网较远,若铺设管网收集集中处理,只会增加投资费用(张巍,2013)。因此,结合农村及小城镇污水排放特点,必须以节能、经济和适用为原则,常采用低投资、易管理、易维护、效果好并具有良好抗冲击负荷能力的分散污水处理设施(齐瑶等,2008)。

目前,分散污水处理设施主体处理工艺主要以生物处理为主,分为分离系统和一体化系统。分离系统主要包括人工系统和自然系统两类。其中,人工系统主要包括活性污泥法、氧化沟、

SBR 反应器、生物膜法、曝气生物滤池、膜生物反应器 (MBR) 等, 自然系统主要包括稳定塘、人工湿地、慢速砂滤、地面漫流以及人工快速渗滤系统等。一体化系统主要包括净化槽和沼气净化池 (齐瑶等, 2008)。不管是从建设成本还是运行成本来看, 人工系统的成本都远高于自然系统。此外, 在一体化系统中, 净化槽虽然效果好、占地面积小, 但是技术要求高, 运行费用高。因此, 我国农村和小城镇地区大力发展稳定塘、人工湿地、慢速砂滤、地面漫流、人工快速渗滤系统、沼气净化池等技术, 以降低污水处理成本。

在自然系统中, 人工快速渗滤系统 (Constructed Rapid Infiltration System, 简称 CRI 系统), 近年来由于其具有低成本、低耗能、易操作以及出水水质好等优点而得到广泛研究和应用。CRI 系统是由传统污水快渗系统 (Rapid Infiltration System, 简称 RI 系统) 发展而来的一种新型污水处理系统。RI 系统由中国地质大学钟佐荣教授 (2005) 发明, 一般情况下由格栅池、预沉池和快渗池组成。快渗池内填充人工渗滤介质, 一般由天然河砂、大理石砂或石灰石砂、沸石砂等按一定比例组成, 采用干湿交替运行方式处理污水, 每次布水 15~20 min, 即频繁淹水落干。其原理是利用 CRI 系统中的渗滤介质与微生物之间的相互作用, 通过一系列物理、化学和生物作用使得污水中的污染物质转化或利用, 从而净化污水, 达到污水资源化利用的目的。RI