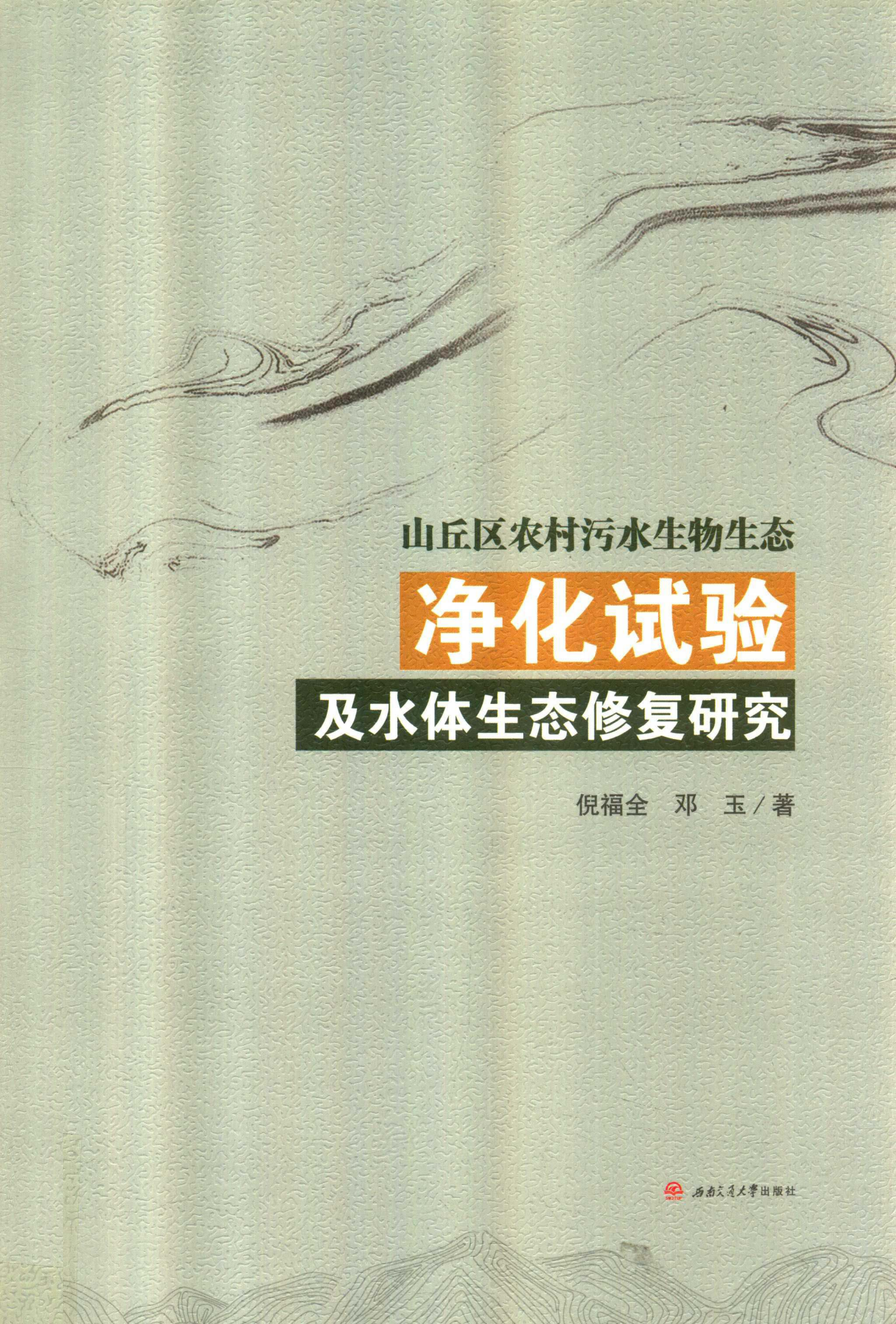




山丘区农村污水生物生态

净化试验

及水体生态修复研究

倪福全 邓 玉 / 著



西南交通大学出版社

山丘区农村污水生物生态
净化试验
及水体生态修复研究

倪福全 邓 玉 / 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·



内容简介

随着经济的发展、人口的增加、人们生活水平的提高,原生环境、人类活动(工业污染、土地利用方式的改变、种植业面源污染、畜禽业养殖污水、水产养殖污水、生活污水等)、地震、全球气候变化等引起的水体污染呈现日益恶化的趋势。水污染等已严重威胁农村饮水安全。

针对变化环境下水质响应过程复杂、随机性强、分布范围广等问题,开展复杂变化环境下农村污水水质处理与水体修复的科学研究,是学科发展的迫切要求,其应用和推广前景广阔,理论和现实意义重大。本书主要是在采用生物慢滤、生态浮床、蚯蚓滤池等生物生态技术及其组合对微污染河流水、畜禽养殖废水和生活污水等水质进行净化试验研究的基础上,对芦山县景观生态沟渠开展优化设计,对瀑布沟水库消落带生态治理、红光水库生态湿地保护与恢复、青衣江雨城区段河流生态修复等提出建议,最后指出山丘区农村水体修复的综合技术,具有较好的社会效益、经济效益和环境效益。

图书在版编目(CIP)数据

山丘区农村污水生物生态净化试验及水体生态修复研究 / 倪福全, 邓玉著. — 成都: 西南交通大学出版社, 2016.6

ISBN 978-7-5643-4743-7

I. ①山… II. ①倪… ②邓… III. ①农村—污水处理—生物处理—研究 IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 143539 号

山丘区农村污水生物生态净化试验及水体生态修复研究

Shanqiuqu Nongcun Wushui Shengwu Shengtai Jinghua Shiyan ji Shuiti Shengtai Xiufu Yanjiu

倪福全 邓玉 著

责任编辑

张秋霞

封面设计

墨创文化

出版发行

西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼)

发行部电话

028-87600564 028-87600533

邮政编码

610031

网址

<http://www.xnjdcbs.com>

印刷

成都蓉军广告印务有限责任公司

成品尺寸

185 mm × 260 mm

印张

11.75

字数

294 千

版次

2016 年 6 月第 1 版

印次

2016 年 6 月第 1 次

书号

ISBN 978-7-5643-4743-7

定价

35.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序

随着经济的发展、人口的增加、人们生活水平的提高,原生环境、人类活动(工业污染、土地利用方式的改变、种植业面源污染、畜禽业养殖污水、水产养殖污水、生活污水等)、地震、全球气候变化等引起的水体污染呈现日益恶化的趋势。

截至 2014 年年底,我国有 4 万多个建制镇,60 多万个行政村,300 多万个自然村,2 亿多农户,农村人口数量为 6.186 6 亿人,占全国总人口数量的 45.23%,其中绝大部分地区没有生活污水处理设施。农村水环境质量差,水资源保障能力脆弱,水生态受损严重,水环境隐患多,区域性、复合型、压缩型水污染日益凸显,已经成为影响我国水安全最突出的因素。

农村污水处理不能简单照搬城镇污水处理的经验,必须因地制宜,选择投资运行费用低,操作管理简单,又具有良好处理效果,能够适合农村特点的水质净化工艺和处理方式。

如何将生物方法与生态工程有机耦合,做到既节省成本和运行费用,又能达到稳定的农村水体修复效果,是当前水科学领域研究的热点和难点,具有十分重要的科学价值与现实意义。

在长江上游水与资源管理的可持续利用联合研究(2012DFG91520)、四川新农村建设技术集成研究与示范(2010NZ0105)、四川省农业生产用水管理模式研究(2012CPTZ0010)、四川盆地西缘典型区农村饮水水质健康风险评估(09ZA063)等项目的资助下,四川农业大学倪福全教授及其团队成员,围绕四川省雅安市山丘区农村水质安全,通过 10 多年的刻苦钻研、积极思考、努力实践、认真总结,取得了丰硕的科研成果:

一是对农村水环境、农村水质、农村水贫困、农村水生态文明建设等开展了理论研究;

二是在大量调研、取样、化验检测的基础上,对区域水质进行了健康风险评估;

三是针对农村水质改善和水体修复中的关键问题,开展了河流微污染水、农村畜禽养殖废水和生活污水等的水质净化试验研究,找到了适合于农村不同类型不良水体水质改善的水质处理生物生态措施与技术;

四是将有关研究成果分别应用到雅安市各区县农村饮水安全工程水质净化建设与管理、名山区饮用水水厂水质净化处理、雅安市芦山县排洪沟渠设计及地表水体修复、四川省彭州市青白江河道生态治理、雅安市雨城区畜禽养殖废水和生活污水水质处理等工程实践中,取得了很好的社会效益、经济效益和环境效益。

这些科研成果,部分以学术论文的形式发表在国内外核心期刊上,有的已经在国际或国

内会议上开展过交流。该书系统总结了有关研究成果，可作为农村水环境、农村水污染、农村水体水质改良等相关领域科研和技术人员的参考用书。

该书的研究成果和研究思路、方法可为我国相关领域的研究工作提供借鉴，对于保障农村饮水安全无疑具有很强的理论和现实意义。期待今后有更多的科研人员参与到农村水质改良工作中，期待有更多的相关科研作品问世！

宫辉力

首都师范大学校长

2016年3月

前 言

水资源是三农的命脉。

为解决农民生存、生活问题，确保农业生产的正常开展，促进农村水生态文明建设，消灭农村水贫困，人们不断地从河流、塘库等地表水体以及多孔介质中的地下水体中索取饮用水、农业灌溉水、农业养殖水、乡镇企业用水、生态用水等。

由于我国不同地区的地形、地貌、地质、水文、水资源条件等原生环境千差万别，加之地震、气候变化等自然灾害的影响，特别是随着我国经济的不断发展、人口的不断增加，农村地表水体、地下水水质呈现不同的特点和不断恶化的趋势。

农村水质与农民生存及生活、农业生产、农村生态文明建设、农村经济、农村人群健康、农村水贫困等密切相关。现阶段，对农村区域水环境污染的研究尚处于起步阶段，针对我国农村区域水环境污染问题的研究，大多集中在污染源、污染特征与控制以及治理措施、法律法规等方面。由于我国农村生产设备和技术仍不够完备、污水处理设施建设滞后，使得农村畜禽养殖废水、农村水产品养殖废水、农业生产种植退水、农村生活污水和微污染所产生的污水排放随意性较大，农村水环境污染日渐严重。这又使得农村水质存在安全隐患，水源地环境污染严重，饮用水水质健康风险隐患加重，农产品品质日益恶化，粮食安全形势每况愈下。

积极探索农村畜禽养殖废水、农村水产品养殖废水、农作物种植退水、农村生活污水和微污染河流水等的水质改善生物生态处理技术，寻找农村不同类型不良水体因地制宜的水质处理措施与技术，并加以广泛地推广应用，切实解决农村饮水安全问题，是特别重要、特别迫切的。

本书以长江上游四川省雅安市山丘区农村污水水质处理与水体修复为例，因地制宜地在采用生物慢滤、生态浮床、蚯蚓滤池等生物生态技术及其组合对河流微污染水、农村畜禽养殖废水和生活污水等水质进行净化试验研究的基础上，对芦山县景观生态沟渠开展了优化设计，对瀑布沟水库消落带生态治理、红光水库生态湿地保护与恢复、青衣江雨城区段河流生态修复、山丘区农村面源污染防治等提出了建议，取得了很好的社会效益、经济效益和环境效益。

本书的主要创新如下：

一是提出了农村微污染地表水体、农业生产种植退水、畜禽养殖废水、农村生活污水等的生物生态净化试验与模拟技术；

二是将农村水安全涉及的农村水资源、农村用水、农村供水、农村水风险评估、水质改良、农村水体修复等作为一个系统进行集成研究，挖掘了相关数据，建立了相关数据库；

三是基于试验研究，提出了山丘区水体生态修复技术措施。

本书共分 11 章。第 1 章综述了研究背景、目标及意义,国内外研究概况、主要问题及趋势,确定了研究内容、方法及技术路线,提出了拟解决的关键问题;第 2 章介绍了研究区概况;第 3 章对滇江微污染河流水开展了生物慢滤净化试验研究;第 4 章对滇江微污染河流水开展了生态浮床净化试验研究;第 5 章对畜禽废水以及园区生活废水开展了蚯蚓滤池净化试验研究;第 6 章应用生态浮床与生物慢滤组合技术对四川农业大学雅安校区教学科研园区畜禽废水以及园区生活废水开展了净化试验研究;第 7 章对芦山县景观生态沟渠开展了试验与优化设计研究;第 8 章对瀑布沟水库消落带开展了生态治理试验与规划研究;第 9 章对红光水库生态湿地保护与恢复开展了研究;第 10 章对青衣江雨城区段减/脱水河段生态修复规划提出了建议;第 11 章研究了山丘区农村水体生态修复综合技术。

本书在撰写过程中,得到了雅安市水务局及各区县水务局、雅安市名山区林业调查规划设计队、雅安市水利水电勘测设计研究院、四川农业大学等单位领导和专家的大力支持,在此深表谢意!感谢国际科技合作计划项目(2012DFG91520)、四川省科技支撑计划项目(2010NZ0105)、四川省科技支撑计划项目(2012CPTZ0010)、四川省教育厅重点科研项目(09ZA063)的经费资助。

历届研究生、本科生张莹、刘小容、向璐、王威、蒲荣菲、杨凯钧、罗凯、杨昌、杨洋、彭珺洁、杨瑶、尹宏业、刘清园、唐大华、刘杰、陈果、蔡睿堃、王滔、胡颀、兰惠娟、郑凯源、刘登禹、杨欣伟、徐国城、屈扬、陈明涛、邱桢毅、赵益平、张曼雪等在野外调研、水质检测、数据分析与处理中作出了贡献,特此致谢!

由于作者知识与经验有限,书中难免存在一些问题和不足,衷心希望广大读者批评指正,以便在今后的研究中进一步完善和提高。

著 者
2016 年 3 月

目 录

1 绪 论	1
1.1 研究背景、目标及意义	1
1.2 国内外研究概况、主要问题及趋势分析	6
1.3 研究内容、方法及技术路线	17
1.4 拟解决的关键问题、主要特色与创新	19
2 研究区概况	28
2.1 自然条件	28
2.2 社会经济状况	30
2.3 水系特征、水资源概况及特点	31
2.4 水资源开发利用状况	35
2.5 水质状况、主要问题及水污染成因分析	36
3 生物慢滤净化试验研究	42
3.1 概述	42
3.2 材料与方法	43
3.3 结果与讨论	46
3.4 结论	54
4 生态浮床净化试验研究	56
4.1 概述	56
4.2 材料与方法	56
4.3 结果与讨论	61
4.4 结论	67
5 蚯蚓滤池净化试验研究	70
5.1 概述	70
5.2 材料与方法	71
5.3 结果与讨论	73
5.4 结论	76
6 生物生态净化试验研究	78
6.1 概述	78
6.2 材料与方法	79
6.3 结果与讨论	82

6.4	结论	86
7	景观生态沟渠试验与优化设计	88
7.1	概述	88
7.2	蛙跳试验	91
7.3	景观生态沟渠设计示范	97
8	消落带生态治理试验与建议	118
8.1	概述	118
8.2	消落带水环境影响研究	121
8.3	水库消落带植物生长适宜性研究	144
8.4	消落带生态治理建议	153
9	库塘生态湿地保护与恢复规划	162
9.1	概述	162
9.2	水源和水质保护规划	163
9.3	水岸保护规划	164
9.4	水体修复规划	165
10	减/脱水河段生态修复	167
10.1	概述	167
10.2	岸线时空利用规划	168
10.3	主要技术	169
11	山丘区农村水体生态修复综合技术	175
11.1	概述	175
11.2	水土流失生态治理技术	175
11.3	农村面源污染生态治理技术	177
11.4	点源污染生态治理	178

1 绪 论

1.1 研究背景、目标及意义

1.1.1 研究背景

由于不同地区的地质、地形、地貌、水文、水资源条件等原生环境千差万别，加之气候变化、地震等自然灾害的影响，特别是随着我国经济的不断发展、人口数量的不断增加，生活污水、固体废弃物、农业面源污染、乡镇企业排放污染、集约化养殖场和畜禽养殖、农村水处理设施短缺等导致农村地表水体、地下水水质呈现不同的特点和不断恶化的趋势。

据2014年全国环境统计公报^[1]和2013年全国环境统计公报^[2]资料显示,从2011年到2014年，因种植业、水产养殖业和畜禽养殖业排放的污染废水中化学需氧量和氨氮的占比分别为47.4%、47.6%、47.9%、48.0%和31.8%、31.8%、31.7%、31.7%（见表1-1）。

表 1-1 2011—2014 年全国废水及其主要污染物排放情况

年份	排放源 排放量	合计	工业源		农业源		城镇生活源		集中式	
			数值	占比/%	数值	占比/%	数值	占比/%	数值	占比/%
2011	废水/亿 t	659.2	230.9	35.0	—	—	427.9	64.9	0.4	0.1
	化学需氧/万 t	2 499.9	354.8	14.2	1 186.1	47.4	938.8	37.5	20.1	0.8
	氨氮/万 t	260.4	28.1	10.8	82.7	31.8	147.7	56.7	2.0	0.8
2012	废水/亿 t	684.8	221.6	32.4	—	0.0	462.7	67.6	0.5	0.1
	化学需氧量/万 t	2 423.7	338.5	14.0	1 153.8	47.6	912.8	37.7	18.7	0.8
	氨氮/万 t	253.6	26.4	10.4	80.6	31.8	144.6	57.0	1.9	0.7
2013	废水/亿 t	695.4	209.8	30.2	—	0.0	485.1	69.8	0.5	0.1
	化学需氧量/万 t	2 352.7	319.5	13.6	1 125.8	47.9	889.8	37.8	17.7	0.8
	氨氮/万 t	245.7	24.6	10.0	77.9	31.7	141.4	57.5	1.8	0.7
2014	废水/亿 t	716.2	205.3	28.7	—	0.0	510.3	71.3	0.6	0.1
	化学需氧量/万 t	2 294.6	311.3	13.6	1 102.4	48.0	864.4	37.7	16.5	0.7
	氨氮/万 t	238.5	23.2	9.7	75.5	31.7	138.1	57.9	1.7	0.7

注：① 农业源包括种植业、水产养殖业和畜禽养殖业排放的污染物；② 集中式污染治理设施排放量指生活垃圾处理厂（场）、危险废物（医疗废物）集中处理（置）厂（场）和垃圾渗滤液/废水及其污染物的排放量。

根据 2014 年中国水资源公报^[3]资料显示情况如下。

(1) 河流水质: 2014 年, 对全国 21.6 万 km^2 的河流水质状况进行了水质评价。全年 I 类水河长占评价河长的 5.9%, II 类水河长占 43.5%, III 类水河长占 23.4%, IV 类水河长占 10.8%, V 类水河长占 4.7%, 劣 V 类水河长占 11.7%, 水质状况总体为中。从水资源分区看, 西南诸河区、西北诸河区水质为优, 珠江区、长江区、东南诸河区水质为良, 松花江区、黄河区、辽河区、淮河区水质为中, 海河区水质为劣。从行政分区看 (不含长江干流、黄河干流), 西部地区河流水质好于中部地区, 中部地区河流水质好于东部地区, 东部地区河流水质相对较差。

(2) 湖泊水质: 2014 年, 对全国开发利用程度较高和面积较大的 121 个主要湖泊共 2.9 万 km^2 水面进行了水质评价。全年总体水质为 I ~ III 类的湖泊有 39 个, IV ~ V 类湖泊有 57 个, 劣 V 类湖泊有 25 个, 分别占评价湖泊总数的 32.2%、47.1% 和 20.7%。对上述湖泊进行营养状态评价, 大部分湖泊处于富营养状态。处于中营养状态的湖泊有 28 个, 占评价湖泊总数的 23.1%; 处于富营养状态的湖泊有 93 个, 占评价湖泊总数的 76.9%。

(3) 水库水质: 2014 年, 对全国 247 座大型水库、393 座中型水库及 21 座小型水库, 共 661 座主要水库进行了水质评价。全年总体水质为 I ~ III 类的水库有 534 座, IV ~ V 类水库有 97 座, 劣 V 类水库有 30 座, 分别占评价水库总数的 80.8%、14.7% 和 4.5%。对 635 座水库的营养状态进行评价, 处于中营养状态的水库有 398 座, 占评价水库总数的 62.7%; 处于富营养状态的水库 237 座, 占评价水库总数的 37.3%。

(4) 水功能区水质达标状况: 2014 年全国评价水功能区有 5 551 个, 满足水域功能目标的有 2 873 个, 占评价水功能区总数的 51.8%。其中, 满足水域功能目标的一级水功能区 (不包括开发利用区) 占 57.5%, 二级水功能区占 47.8%。

评价全国重要江河湖泊水功能区有 3 027 个, 符合水功能区限制纳污红线主要控制指标要求的有 2 056 个, 达标率为 67.9%。其中, 一级水功能区 (不包括开发利用区) 达标率为 72.1%, 二级水功能区达标率为 64.8%。

(5) 省界水体水质: 2014 年, 各流域水资源保护机构对全国 527 个重要省界断面进行了监测评价, I ~ III 类、IV ~ V 类、劣 V 类水质断面比例分别为 64.9%、16.5% 和 18.6%。各水资源一级区中, 西南诸河区、东南诸河区为优, 珠江区、松花江区、长江区为良, 淮河区为中, 辽河区、黄河区为差, 海河区为劣。

(6) 地下水水质: 2014 年, 对主要分布在北方 17 省 (自治区、直辖市) 平原区的 2 071 眼水质监测井进行了监测评价, 地下水水质总体较差。其中, 水质优良的监测井占评价监测井总数的 0.5%, 水质良好的占 14.7%, 水质较差的占 48.9%, 水质极差的占 35.9%。

当前, 我国城市污水处理的大格局逐步形成, 政策和市场也已经相对规范。

但是, 我国有 4 万多个建制镇, 60 多万个行政村, 320 多万个自然村, 2 亿多农户, 农村人口数量为 6.186 6 亿人 (占全国总人口数量的 45.23%)^[4], 农村用水量占全国每天总用水量的 60% 以上, 每年产生的农村生活污水 90 多亿 t, 绝大多数没有经过处理便直接排放, 占全国水污染物排放量超过 50%, 且处理率普遍较低, 与城镇污水接近 90% 的处理率形成强烈反差。因此, 中国未来污水处理市场格局将发生重大转变, 污水处理重心必将逐渐向农村转移, 农村水务将是水污染防治行动计划的重点方向之一, 行业发展潜力巨大。有人预言, 2016 年村镇污水处理行业可形成 424.7 亿元的产值, 2020 年产值可增至 844 亿元, 2025 年

这一数字可达 1 305.2 亿元,中国村镇污水治理市场空间巨大。

农村污水处理面临的主要问题是面广量大、排放分散、缺乏完善的收集系统。与国外发达国家相比,适合中国广大农村地区的污水处理技术极其缺乏。如何因地制宜,开发出技术上高效可行、经济上合理、后期维护运营简单的水处理工艺和技术,正在成为当前的热点、难点和重点。

中国各级政府高度重视农村水环境问题。

2008 年国务院转发环保部等八部委《关于加强农村环境保护工作的意见》并指出:开展农村环境连片整治,是加快推进农村环境污染治理的重要举措,是生态建设示范区建设的重要内容,也是现阶段建设农村生态文明的有效途径。

2010 年,环境保护部发布《农村生活污染防治技术政策》,旨在推动社会主义新农村建设,保护和改善农村环境,防治农村生活污染。

2015 年年初,农业部印发了《农业部关于打好农业面源污染防治攻坚战的实施意见》,从源头削减、过程控制、末端治理的全过程入手,提出了 7 项重点任务、6 项治理措施,明确了 8 项保障措施。

2015 年 4 月,《国务院关于印发水污染防治行动计划的通知》(即“水十条”)指出,我国水污染严重的状况仍未得到根本性遏制,区域性、复合型、压缩型水污染日益凸显,已经成为影响我国水安全的最突出因素,防治形势十分严峻,主要体现在水环境质量差、水资源保障能力脆弱、水生态受损严重、水环境隐患多。

2016 年中央一号文件提出,要“加快农业环境突出问题治理”。其主要原因在于,中国农村水环境遭受着外源性污染和内源性污染的双重压力,农业可持续发展正遭遇严重的瓶颈。农村人口基数大,农村污染的影响面更大、危害更深远;农村肩负粮食及农副产品供应,农村水污染的影响是全局性的,城市也不能幸免;农村污染十分复杂,污染治理难度更大;农村面积广大、经济发展较落后,污染治理还难以大面积开展。农村污染比城市污染更让人忧心,“先污染后治理”的路子更加难走。

因此,积极探索农村畜禽养殖废水、农村水产品养殖废水、农业生产种植退水、农村生活污水和微污染水体等污水处理技术,寻找农村不同类型不良水体因地制宜的水质处理措施与技术并加以广泛地推广应用,符合国家战略发展,契合了政府、社会、企业的需求,对切实解决农村水安全问题,是特别重要、特别迫切的。

1.1.2 研究目标

保障农村水安全,关系到每个人的日常生活、健康和切身利益。农村水质不安全问题严重影响了居民生存与生活、农业生产、农村生态、农村经济、农村稳定等,是农村水贫困的主要根源之一,是农村水生态文明建设的重要内容,是人们最关心、最迫切需要解决的问题之一。

综合考虑农村水质现状、水环境情况、人口密度、地形地貌特征、社会发展的重要性、农村水工程项目进展情况及前期研究基础条件等因素,选择四川省雅安市六县二区作为研究区域,主要理由如下所示。

(1) 雅安市是长江经济带上游重要的水源涵养区和重要的生态屏障。雅安市地形以山地为主(约占总面积的94%),丘陵平坝极少,人地矛盾日益凸显,属生态环境脆弱的山丘区,资源环境承载能力较弱,灾害风险较大,同时又是四川天府新区的重要水源地。选择该区作为研究地域对切实保护和利用好长江水资源、严格控制和治理长江水污染、妥善处理江河湖泊关系、加强流域环境综合治理、强化沿江生态保护和修复、促进长江岸线有序开发、确保四川天府新区饮用水水源地的科学保护与水资源的合理开发意义重大。

(2) 雅安市地处川西北经济区、成都经济区、攀西经济区等三个经济区结合部。其生态环境敏感区众多,由于水资源不合理的开发利用,造成局部水环境质量降低、水生态系统受损、水土流失加剧、重要湿地萎缩等问题日益凸显;随着城镇化、工业化和农业现代化进程的不断推进,废污水排放负荷加大,农业面源污染日益突出,水污染威胁呈加重趋势;随着境内干支流控制性水库的建设,其与江、河关系发生变化,并互相影响,农村水生态环境日趋恶化。2015年年底,《〈水污染防治行动计划〉四川省工作方案》提出,到2020年,全省水环境质量要得到阶段性改善;到2030年,力争全省水环境质量总体改善,水生态系统功能初步恢复;到21世纪中叶,生态环境质量全面改善,生态系统实现良性循环;对青衣江等水体,将大力实施生态环境保护。选择该区作为研究地域能代表中国西部山丘区主要农村水质情况和类型,能反映当地农村水体修复的发展方向 and 趋势,能代表山丘区原生环境污染,人类活动、水土流失、土地利用方式、人口与经济发展、地震、气候变化等次生环境污染对农村水质的影响,能满足采样时的水样保存时间的要求,能覆盖国家、省级监测点的布局。

(3) 雅安市是“5·12”汶川特大地震、“4·20”芦山强烈地震的重灾区,农村水体水质风险急剧加大,供用水工程、污水处理工程、水环境修复工程等损毁严重,灾后重建任务十分繁重。在灾后重建过程中,如何结合当地农村实际情况因地制宜,选择各种类型水体水质的净化与修复的生物生态技术与措施,促进农村不良水质改善、农村水环境治理、农村水体修复,是特别重要、特别迫切的。选择该区作为研究区域,从山就水,应形就势,遵从山水格局,尊重岸线原有的形态和植被的原生态,避免河岸的固化和护砌,采取多样化的人工自然型河岸,维护河道与河岸的水文联系,由地带性植物群落、水体、土壤等一定宽度的绿化缓冲区构成生态渗透廊道,打造山—水—田园—城市地域特色,能够突出雅安市自身优良的生态禀赋,明确雅安市遵循国家节能减排、可持续发展的战略,在西部人地关系紧张的四川盆地与青藏高原的过渡地区,打造人与自然和谐共生共长,国际先进、国内领先的山地生态城市样板;能够突出雅安市特殊的地理区位,明确雅安市作为长江上游、成都大都市圈核心区重要生态屏障和基底的区域责任;能够突出雅安市在成都大都市圈增长极中所承担的以低碳经济为主导的经济职能角色。

(4) 研究团队成员自2005年起对雅安市境内典型地区农村饮水安全、水利防灾减灾、农业水资源管理、农村畜禽养殖废水、农村水产品养殖废水、农业生产种植退水、农村生活污水、微污染水、农村水贫困、农村水生态文明建设等做了大量的研究工作,资料丰富,选择四川省作为研究区域有助于进一步实现对本区农村水质的动态监管与深入研究。

本书以雅安市作为研究区域,以农村污水净化试验与水体修复为研究对象,其研究目标如下所示。

(1) 调研雅安市农村水资源、水环境、水污染等的现状、特点、成因,厘清雅安市农村水质与原生环境、次生环境及地震灾害之间的关系,厘清农村水质污染来源和污染水平。

(2) 基于生物生态治理理念,开展微污染水、生活污水、畜禽养殖废水、农业生产种植退水等的生物慢滤、生态浮床、蚯蚓滤池、生态浮床与生物慢滤组合等技术的净化试验研究,探索农村不同类型不良水体因地制宜的水质处理措施与技术。

(3) 应用农村水质生物生态处理技术成果指导灾后重建生态景观沟渠优化设计,对水库消落带生态治理、库塘生态湿地保护与恢复、梯级电站枯水和减水河段生态治理开展科学规划。

(4) 提高公众对农村水质现实与潜在风险的认识与区别,提出雅安市山丘区农村水体生态修复综合技术,构建适合雅安市农村水质生物生态处理、水体修复的理论体系和工作模式,强化农村水质风险管控,为寻找避免和削减农村不良水质的工程措施和非工程措施提供科学支撑,实现对农村水质风险的有效管理。

1.1.3 研究意义

雅安市年均降雨量为 1 445.9 mm,水资源总量为 206.9 亿 m^3 ,其中,地表水资源量为 172.2 亿 m^3 ,地下水资源量为 34.7 亿 m^3 。近年来,水利、水电、“5·12”及“4·20”震后恢复重建工作使水利基础设施建设不断前进。随着国际化区域性生态城市建设步伐的不断加快,人口数量的不断增加和城镇化、工业化进程的不断推进,对水资源的需求越来越大、越来越高,水生态环境保护压力不断增大,水少、水多、水浑、水脏等水问题日益严峻,水资源开发、利用和保护等方面面临诸多问题和挑战。

本书可为确保农村水安全提供重要的科学依据,不仅能保障农村水质安全,还能有效控制介水性疾病的发生和传播,同时对农村水源地的管理、农村污水水质净化处理技术的选择、农村水体修复、促进农村水资源合理保护与安全开发利用、农村水生态环境的改善、消灭水贫困、促进水生态文明建设、实行最严格的水资源管理制度、助推雅安市国际化区域性生态城市建设等十分重要。

本书可为四川省“十三五”期间农村不良水质监测、评估、处置提供科学的示范,切实做到确保水质安全、人群健康、人水和谐,促进幸福美丽新农村的建设,提高农业现代化水平,缩小城乡差距,实现城乡一体化的建设与发展目标。因此,本书的研究、推广和应用十分必要,具有重大的社会效益、经济效益和环境效益,也具有重要的实际价值和科学意义。

首先,本书有利于揭示农村水质的现状、趋势和时空变化规律,从而为有关部门科学决策,及时将可能发生的水质不安全事故消灭在萌芽状态,对消灭水贫困、保障民生、实现人水和谐、促进水生态文明建设、促进社会经济的可持续发展、保护人们身体健康、提高人们的生存及生活质量意义重大。

其次,本书将农村污水净化的生物方法与生态工程有机耦合,并将研究成果应用于农村水体生态修复,涉及水文学、生态学、植物学、环境学、景观学等多学科知识,研究内容属于交叉学科,学科意义重大。

最后,本书对农村污水净化与水体修复的多种生物、生态技术开展集成系统研究,研究成果既节省成本和运行费用,又能达到稳定的农村水质处理效果,其经济效益、环境效益巨大;该研究模式可推广应用于其他农村地区水质净化处理、居住区水环境打造与生态治理、

水体修复、水生态系统保护等工作中，应用前景广阔。

1.2 国内外研究概况、主要问题及趋势分析

水资源是“三农”的命脉，是解决“三农”问题极其重要的基础保障条件、生产要素和环境制约因素。

按赋存的空间形式，可将农村水资源分为大气水、地下水体、地表水体，其中地表水体包括江水、河水、湖水、水库水、池塘水、冰川、积雪、山泉水等。

按农村社会需求，可将农村水分为农村饮用水、农村生活用水、农业种植生产用水、农业养殖用水、乡镇企业用水、生态用水等。

按农村水质状况，可将农村水分为农村微污染水、农村污染水，农村污染水又包括农村生活污水、农业种植退水、畜禽养殖废水、水产品养殖废水、乡镇企业废水等。

为解决农民生存、生活问题，确保农业生产的正常开展，促进农村水生态文明建设，消灭农村水贫困，人们不断地从河流、湖泊、水库等地表水体以及多孔介质中的地下水体中索取饮用水、农业灌溉水、农业养殖水、乡镇企业用水、生态用水等，同时也不断地将农村生活污水、农业种植退水、畜禽养殖废水、水产品养殖废水、乡镇企业废水等向地表水体进行排泄。

农村水质与原生环境、次生环境、土地利用方式、水土流失、地震自然灾害、全球气候变化、极端天气等密切关联，是对复杂变化环境的综合响应。

农村水质的净化处理和农村水体的修复是获得优良水质的关键，对保障城乡居民生存、生活以及促进农业生产、农村水生态文明建设、消灭水贫困、促进经济社会的发展极其重要，因此，迫切需要解决人们所关注的一些农村不良水质改良问题：

农村饮用水应如何净化处理才能更加优质？

农村微污染水应如何净化？

农村生活污水应如何净化？

农村畜禽养殖废水应如何净化？

农村库塘、河流等水体生态系统应如何修复？

经济上合理、技术上可行、运行可靠、维护简便且因地制宜的农村水体水质修复与改良的措施有哪些？

因此，农村微污染水、农村生活污水、农业种植退水、畜禽养殖废水等水质的净化处理和农村水体的修复越来越受到国内外学者、政府管理机构、技术人员和城乡居民的高度重视。

目前，针对农村污水及水体中的氮、磷等营养物和有机污染，国内外采用的净化与修复技术种类繁多，可分为三类：一是物理方法，即通过工程措施进行机械除藻、疏挖底泥、引水稀释等，但往往治标不治本，只能作为对付突发性水体污染的应急措施；二是化学方法，如加入化学试剂杀藻、加入铁盐促进磷的沉淀、加入石灰脱氮等，但价格昂贵，并容易造成二次污染；三是生物生态方法，如微生物强化技术（投菌法）、植物净化技术（生态浮床）、人工湿地技术、稳定塘技术、渗流生物膜净化技术（生物过滤技术）、多自然型水体景观构建技术等，这是当前国内外的研究热点。

1.2.1 国内外研究概况

1. 生态处理技术

生态处理技术是利用多孔介质——植物系统净化污水的功能,其净化机制包括多孔介质的过滤截留、物理和化学吸附、化学分解、植物和微生物摄取、微生物的分解转化、蒸发等作用,以人工湿地、多孔介质处理系统和稳定塘技术等为主。

1) 湿地处理技术

湿地生态系统独特,具有多种功能,不仅可以提供大量食物、原料和资源,而且在维持生态平衡、保持生物多样性、调节气候、涵养水源、蓄洪抗旱、降解污染等方面作用巨大,被称为“自然之肾”。

人工湿地(Constructed Wetland, CW)污水处理系统具有截污能力强、运行管理简单、工程基建和运行成本低、生态环境效益显著等优点。该技术适于资金缺乏、技术人才少的南方村镇,其对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、COD和SS等的去除率高达80%,达到或超过生物处理水平。CW污水处理系统主要由基质、植被、微生物、水体等组成,是指在构筑物内充填有利于微生物附着和植物生长的多孔介质(砾石、沸石、钢渣等),地表种植水生植物,污水沿一定方向流经人工湿地,在微生物、多孔介质和植物的联合作用下得到净化。从工程设计角度而言,按布水方式或污水流动方式的不同,以大型水生植物为主要植物构建的CW污水处理系统可分为自由表面流CW、潜流CW(包括水平流、垂直流)。

1974年德国建成世界上首个CW污水处理系统,并用于处理城市污水,随后,在欧美等国家得到快速发展与应用。我国于1987年建成首个芦苇床湿地工程,占地约为 6 hm^2 ,处理规模为 $1\ 400\text{ m}^3/\text{d}$ 。其后,该技术在我国得到快速发展^[5-8]。CW污水处理系统目前已在世界范围内得到广泛研究与应用,主要涉及城镇及农村的工业废水、医疗废水、农业种植退水、畜禽养殖废水、水产养殖废水、生活污水、地表水体修复、景观用水等方面,在污水管理、水污染控制、水体修复等方面发挥着越来越重要的作用。

此项技术符合国际上的小型化和分散化的最新环保趋势,在水污染控制方面正发挥着越来越重要的作用。近年来,人工湿地与其他技术组合工艺得到较快发展^[9-14]。

2) 土地处理系统

土地处理系统是通过灌溉、渗滤、地表漫流等方式,使污水在重力以及在土地多孔介质中的毛细力的作用下进行扩散运动,并利用多孔介质及其中的微生物和植物根系等对污水(废水)进行物理截留、物理化学吸附、化学反应、生物降解、动植物等的作用而净化水质^[15-18],同时又利用其中的水分和肥分促进农作物、牧草或树木生长的工程设施^[19-20]。

该技术建设容易,投资较省($200\text{ 元}/\text{m}^2$),维护管理简便,运行费用低。工程设施一般设置于地下,能够保证冬季稳定运行,不产生臭气,便于污水就地处理和回收利用。土地处理系统的出水水质效率取决于废水负荷、土壤、作物、气候以及运行状况等许多因素^[21-23],对SS、COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP和大肠杆菌的去除率较高,一般可达70%~90%^[24-26]。因此,该技术具有较好的技术经济优势,在国内外已得到广泛应用^[27-33]。日本已建成地下渗滤系统20 000多处,俄罗斯制定了相应的工艺流程和技术规范,澳大利亚发展了“FILTER”高效污水灌溉系统^[34]。土地处理系统的主要缺点是处理效率低、易堵塞、脱氮效果差等^[35]。

3) 稳定塘处理技术

稳定塘又称氧化塘或生物塘,是一种利用天然净化能力对污水进行处理的构筑物的总称。其净化过程与自然水体的自净过程相似。通常是将土地进行适当的人工修整,建成池塘,并设置围堤和防渗层,以太阳能为初始能量,通过在塘中种植水生植物,进行水产和水禽养殖,形成人工生态系统,在以太阳能(日光辐射提供能量)作为初始能量的推动下,通过稳定塘中水生植物、鱼、鸭、鹅多条食物链(分解者为细菌和真菌,生产者为藻类和其他水生植物,消费者为鱼、虾、贝、螺、鸭、鹅、野生水禽等,三者分工协作,对污水中的污染物进行更有效的处理与利用,如果在各营养级之间保持适宜的数量比和能量比,就可建立良好的多生态平衡系统)的物质迁移、转化和能量的逐级传递、转化,将进入塘中的污水中的有机污染物进行降解和转化,最后不仅去除了污染物,而且以水生植物和水产、水禽的形式作为资源回收(其中的有机污染物被细菌和真菌降解净化,而其降解的无机化合物作为碳源、氮源和磷源,以太阳能为初始能量,参与到食物网的新陈代谢过程中,并从低营养级到高营养级逐级迁移转化,最后转变成水生作物、鱼、虾、蚌、鹅、鸭等产物),净化的污水也可作为再生资源予以回收再利用,使污水处理与利用结合起来,实现污水处理资源化和经济化^[36-39]。

稳定塘污水处理系统的优点是:能充分利用地形,结构简单,建设费用低;可实现污水资源化和污水回收再利用,实现水循环,既节省了水资源,又获得了经济收益;处理能耗低,运行维护方便,成本低;美化环境,形成生态景观;污泥产量少;能承受污水量大范围的波动,其适应能力和抗冲击能力强^[40, 41]。

稳定塘污水处理系统的缺点是:占地面积过多;气候对稳定塘的处理效果影响较大;若设计或运行管理不当,则会造成二次污染;易产生臭味和滋生蚊蝇;污泥不易排出和处理利用^[40, 41]。

按照塘内微生物的类型和供氧方式,稳定塘可以分为好氧塘(深度较浅,一般为 0.3 ~ 0.5 m)、兼性塘(有效深度为 1.0 ~ 2.0 m)、厌氧塘(塘水深度一般在 2 m 以上,最深可达 5 m)、曝气塘(塘深大于 2 m,采取人工曝气方式供氧,塘内均处于好氧状态)、深度处理塘(作用是进一步提高二级处理水的出水水质)、水生植物塘(在塘内种植一些纤维管束水生植物,比如芦苇、水花生、水浮莲、水葫芦等,能够有效地去除水中的污染物,尤其是对氮、磷有较好的去除效果)、生态系统塘(在塘内养殖鱼、蚌、螺、鸭、鹅等,这些水产、水禽与原生动物、浮游动物、底栖动物、细菌、藻类之间通过食物链构成复杂的生态系统,既能进一步净化水质,又可以使出水中藻类的含量降低)。由于稳定塘具有很多类型,所以可以组合成多种不同的流程。

美国于 1901 年在得克萨斯州修建了世界上第一个稳定塘,至今美国已有稳定塘 20 000 余座。全世界已经有 50 多个国家在使用稳定塘系统,其中法国有稳定塘 2 000 余座,德国有 3 000 余座,马来西亚工业废水总量的 40%都是利用稳定塘进行处理的。我国于 20 世纪 50 年代末开始研究稳定塘,目前该技术已遍布全国各地。

高效藻类塘(High Rate Algae Pond, HRAP)是美国加州大学伯克利分校的 Oswald 于 20 世纪 50 年代末提出并发展的,是对传统稳定塘的改进,它充分利用菌藻共生关系,对污染物进行处理。与传统的稳定塘相比,HRAP 的优点是:深度控制在 0.3 ~ 0.6 m;采用连续搅拌推进,促进污水与藻类的混合,避免污泥在塘内的淤积;停留时间短(4 ~ 10d);占地面