

农村非点源生活污水

垂直流人工湿地处理系统CH₄排放驱动及控制研究

Driven Mechanism and Emission Control on Methane Greenhouse Emission during
Rural Sewage Non-point Source Pollution Treatment by Vertical-Flow Constructed Wetlands

罗鸿兵 刘晓玲 张可等◇著



科学出版社

农村非点源生活污水垂直流人工 湿地处理系统 CH_4 排放驱动及 控制研究

Driven Mechanism and Emission Control on Methane Greenhouse
Emission during Rural Sewage Non-point Source Pollution
Treatment by Vertical-Flow Constructed Wetlands

罗鸿兵 刘晓玲 张可 等著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书总结了本研究团队近年来从事非点源污染与控制、农村非点源污染治理、人工湿地温室气体排放等相关研究时所应用的基本理论与常用方法,以农村非点源生活污水人工湿地处理系统的甲烷驱动与排放研究为重点,以处理农村非点源生活污水人工湿地甲烷排放监测为评估手段。本书共分为12章,主要包括五个方面的内容:一是垂直流复合人工湿地的水力学优化与设计;二是垂直流复合人工湿地甲烷排放的驱动;三是农村非点源生活污水垂直流复合人工湿地处理系统的甲烷排放控制;四是农村非点源生活污水垂直流复合人工湿地处理系统的甲烷排放监测与评估;五是甲烷排放数据库和甲烷驱动因子数据库系统的开发与集成。

本书可供从事环境科学与工程、给排水工程、生态、水文、农业、气象等专业的研究生、科研人员、管理人员以及大专院校师生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

农村非点源生活污水垂直流人工湿地处理系统 CH_4 排放驱动及控制研究 / 罗鸿兵等著. —北京: 科学出版社, 2015.10

ISBN 978-7-03-045590-1

I. ①农… II. ①罗… III. ①农村-生活污水-垂流运动-人工湿地系统-废水处理-研究 IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 210196 号

责任编辑: 杨 岭 孟 锐 / 封面设计: 墨创文化

责任校对: 王 翔 / 责任印制: 余少力

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年11月第 一 版 开本: 787*1092 1/16

2015年11月第一次印刷 印张: 26.5

字数: 590千字

定价: 89.00元

Preface

The modeling, comprehension, design and use of constructed treatment wetlands has seen an significant evolution over the past 20 years, and these plant-based, passive treatment systems are now commonly applied for the treatment of domestic and industrial wastewaters, stormwater runoff, agricultural diffuse pollution and many other contaminated flows. The kinds of systems employed for treatment has also seen an important evolution, from simple but ineffective free water surface(FWS) flow systems, to more sophisticated subsurface flow(SSF) systems in either horizontal or vertical(upflow and/or downflow)modes. This allows for the biological/bacteriological treatment of many contaminants by providing the correct environmental conditions for the required metabolic functions(aerobic, anoxic and/or anaerobic). The understanding of the mixed microbial communities developing within these planted reactors has also advanced substantially, using and adapting characterization tools like community level physiological profiling (CLPP)and denaturing gradient gel electrophoresis(DGGE). Finally, by integrating these systems to allow for various metabolisms in a single treatment train, we are seeing treatment efficiencies for many contaminants that rival those from traditional mechanical treatment facilities, without incurring the traditional costs for power, chemicals, etc.

For all of these advances, however, certain unintended or unexpected emissions from constructed wetlands still need to be characterized and addressed. These come either from incomplete metabolic conversion of parent compounds in the influent flows(e. g. nitrous oxide from incomplete conversion of nitrogen compounds)or, as is the subject of this monograph, from the unintended creation of metabolic conditions that generate gaseous end products like methane. Methane will be generated in certain anaerobic conditions which are created either intentionally(to allow denitification to occur)or inadvertently (through use of poorly oxygenated SSF horizontal flow wetland systems). Given the importance of methane as a greenhouse gas which can contribute to global climate change, it is very important for wetland owners/operators to understand the mechanisms of methane generation, and to take steps in wetland operation that will reduce or eliminate this greenhouse gas generation, while at the same time allowing the systems to function optimally in their primary role as passive treatment systems for contaminated flows.

This monograph summarizes a number of studies on this subject, and is among the first of its kind to focus on wetland methane generation. Important pilot- and field-scale studies have identified the controlling physical and operational conditions that lead to methane generation and, equally important, the operating conditions within the wetland

that will limit this generation. This monograph should be an important reference for all wetland owners/operators, as we continue to evaluate constructed treatment wetlands for their environmental benefits while at the same time we work to limit or eliminate their unintended but nonetheless detrimental impacts on the natural environment.



Professor Bruce C. Anderson
Department of Civil Engineering
Queen's University(Canada)

序

农业非点源(面源)污染具有面广、点多、源杂、分散隐蔽、不易监测、难以量化等特点,其控制不仅成为水环境保护的重点和难点,也逐步成为现代农业和社会可持续发展的重大课题。农业非点源一般可以分为农田非点源、农村非点源、畜禽养殖非点源三类,其中农村非点源来源于村落废水(生活污水和地表径流)和农村固体废弃物(生活垃圾和农业生产废弃物)。

我国有 60 多万个行政村、250 多万个自然村、2 亿多农户,我国农村每年产生生活污水 80 亿~90 亿吨,而 95% 以上的村庄没有排水管网和污水处理系统,农村生活污水随意排放。我国农村生活污水面广、分散、来源多、增长快、水质水量波动大、处理率低。自 20 世纪 80 年代开始,我国借鉴国外成功经验,结合我国农村实际情况,开展了农村生活污水分散处理技术的开发和研制工作,取得了一定的成果。

人工湿地具有投资少、运行费用小、除污染效率较高、管理简单方便、维护容易、抗冲击力强、出水水质稳定等优点,成为处理农村生活污水的主要技术,将在我国农村非点源污染控制中起重要作用。但人工湿地被看成是一个重要的潜在甲烷排放源,将对全球气候变化产生一定影响。显然,自然湿地系统的温室气体排放是全球气候变暖的重要驱动力,已有很多研究成果,但是对人工湿地的甲烷排放,特别是中国广大农村生活污水处理及温室气体排放问题,缺乏基础研究,很多情况下仅考虑水质改善问题而忽略温室气体排放。

该书由四川农业大学土木工程学院市政工程系罗鸿兵等编写完成,是作者近年来在此方面的最新研究成果,作者在考虑垂直流复合人工湿地水质改善的同时,关注到该过程中的甲烷排放情况,力图获取水质改善和温室气体减排的双重效益。该书有三个突出特点:一是从多学科角度,以农村生活污水的垂直流人工湿地处理系统为研究对象,较为系统地研究垂直流人工湿地处理农村生活污水过程中甲烷排放问题;二是对垂直流人工湿地甲烷产生的驱动源(碳源和氮源)进行宏观分析,提出以曝气为基本手段控制甲烷的排放;三是对实际运行的农村生活污水垂直流人工湿地处理系统开展甲烷排放监测与评估,积累了较多的第一手监测资料。

非常赞赏年轻学者扎实深入的工作,也非常高兴能为该书作序。希望该书的出版能为我国农业非点源污染控制、人工湿地温室气体排放及控制提供有益的参考。

北京师范大学教授、博士生导师
国家杰出青年基金获得者
长江学者特聘教授



2015 年 6 月于北京

前 言

在全球环境变暖和人类活动对环境影响日益显著的背景下,环境污染控制与温室气体排放成为研究的热点。农业非点源污染机理和控制也是当今环境领域研究的热点。

通过 50 多年的研究和应用,人工湿地被认为是一种可靠的废水处理技术,具有投资少、运行费用少、除污染效率高、管理简单方便、维护容易、抗冲击力强、出水水质稳定等优点,成为处理非点源污染的主要技术,将在我国农业非点源污染控制中起重要作用。

但人工湿地被看成是一个具有巨大潜力的甲烷(CH_4)排放源,尽管人工湿地 CH_4 排放量相对自然湿地 CH_4 排放源较小,但是人工湿地技术在全球快速、广泛的应用已经使人工湿地成为重要的潜在 CH_4 排放源。

人工湿地 CH_4 排放是人工湿地系统中 CH_4 产生、氧化和传输的净效应,是人工湿地碳循环的重要组成部分。人工湿地中 CH_4 从湿地介质-水-植物这一体系向大气传输的过程,其传输途径有从水到大气、植物到大气以及湿地介质到大气这三种。 CH_4 传输主要由不饱和沉积物中未被氧化的 CH_4 气体通过分子扩散作用释放入大气,以及由部分间隙水中 CH_4 气体的压力大于沉积物中 CH_4 的压力时的气泡扩散过程构成。研究表明,人工湿地具有较高的 N_2O 和 CH_4 排放量,最新研究揭示了利用污水处理厂污泥作为土壤介质的人工湿地所产生 CH_4 排放量也较高。垂直流人工湿地和水平流人工湿地温室气体排放的变化规律也存在较大差异,其人工湿地温室气体排放范围变化较大,与季节和其他环境条件相关,垂直流人工湿地的温室气体排放总体高于水平流人工湿地,温室气体排放与温度、基质补给(N、P 的入流浓度)和人工湿地的氧化程度有关。

CH_4 是重要的温室气体,是大气中直接受人类活动影响的主要温室气体,对全球变暖的贡献占 20%~39%。 CH_4 温室效应是 CO_2 温室气体的 20~30 倍,到 2005 年,大气中的 CH_4 含量已经是工业革命前的 2.5 倍,到 2011 年, CH_4 在大气中的浓度达到 1.799ppm^①,已经受到全球的关注。人类活动产生的 CH_4 占全球 CH_4 排放量的 54%~72%,人类活动导致的 CH_4 排放已经受到密切关注。

近百年来,全球气候正在发生以变暖为主要特征的显著变化。气候变化是当今世界各国极其关注的重要课题,将是未来几十年当中,国家、政府、商业和公民遇到的最大挑战之一(IPCC, 2013)。全球应统一行动,采取一切可行的措施减少温室气体排放,《京都议定书》引领了全球减排行动。自下而上和自上而下的研究均表明,未来几十年对减缓全球温室气体的排放有着相当大的经济潜力,这一潜力能够抵消预估的全球排放的增长或将排放降至当前水平以下,但是在采取减排措施之前,必须先调查各领域各个国

① ppm 是体积浓度,即每立方米大气中含有 CH_4 的体积数(立方厘米)或用 ml/m^3 表示, $1\text{ppm}=1\text{cm}^3/\text{m}^3=10^{-6}$

家的排放水平。

同时,在全球温室气体研究中, CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的排放还存在着未知的量,本书研究中的农村非点源生活污水人工湿地处理系统所产生 CH_4 是一个温室气体排放源,对它的研究有利于推动和查清人工排放 CH_4 的清单,将为减排提供依据。

减少 CH_4 排放对于降低温室效应至关重要。本书重点对垂直流复合人工湿地处理系统中的 CH_4 驱动及农业非点源生活污水人工湿地处理系统 CH_4 曝气排放控制进行探索,拟指引我国广大农村非点源污染的湿地处理效能,为最优化控制温室气体排放提供科学依据,为我国农村污水处理系统的节能减排提供基础数据。

本书共分为12章。第1章为绪论:主要对研究背景、研究内容、研究技术路线和方法进行介绍,并简要介绍目前国内外有关人工湿地及 CH_4 排放的研究动态和现状。第2章为研究材料与方法:主要针对农村非点源生活污水垂直流人工湿地处理系统的 CH_4 驱动和排放控制的研究材料、试验方案、数据处理等进行阐述。第3章为复合垂直流人工湿地系统水力学实验结果与分析:通过采用氯化钠做水力示踪剂,揭示垂直流人工湿地的水力停留时间及内部水流规律。第4章为复合垂直流人工湿地系统流场模拟及优化设计:对进水口位置、进水口数量、出水池是否增加布水管,以及布水管上是否进行穿孔等进行设计和模拟分析,通过6种不同优化设计方案,选取最优化的一种设计方案,并应用于后续的 CH_4 驱动实验。第5章为葡萄糖驱动条件下 CH_4 排放的宏观碳驱动:通过对 CH_4 排放和对应水质进行监测分析,对5种不同葡萄糖浓度条件下驱动 CH_4 产生的宏观机理进行研究。第6章为乙醇驱动条件下 CH_4 排放的宏观碳驱动:通过对 CH_4 排放和对应水质进行监测分析,对5种不同乙醇浓度条件下驱动 CH_4 产生的宏观机理进行研究,探讨了 CH_4 排放与乙醇驱动条件下各水质指标的关系。第7章为尿素驱动条件下 CH_4 排放的宏观氮驱动:通过对 CH_4 排放和对应水质进行监测分析,对5种不同尿素浓度条件下驱动 CH_4 产生的宏观机理进行研究,探讨了 CH_4 排放与尿素驱动条件下各水质指标的关系。第8章为实验室复合垂直流人工湿地 CH_4 排放的曝气控制:利用正交实验设计,采用来自农村非点源生活污水作为降解对象,通过研究不同曝气强度、曝气时间、曝气间隔时间、底部曝气位置的控制工况,测定不同运行条件下人工湿地处理系统 CH_4 排放通量及对应水质指标,探讨复合垂直流人工湿地 CH_4 排放的曝气控制条件。第9章为野外复合垂直流人工湿地系统 CH_4 排放控制:通过不同水位及曝气条件控制,测定不同运行条件下人工湿地处理系统 CH_4 排放通量及对应水质指标,探讨复合垂直流人工湿地 CH_4 排放的水位控制影响。第10章为农村非点源污水人工湿地处理系统的 CH_4 排放评估:利用人工湿地的生命周期成本评估庭院人工湿地和社区,并对成都市郫县安德镇园田村和安龙村的8个人工湿地进行长期的 CH_4 排放监测,对其 CH_4 排放进行评估。第11章为 CH_4 排放数据库和 CH_4 驱动因子数据库系统的开发与集成:农村非点源污染人工湿地处理系统的 CH_4 排放数据库和 CH_4 驱动数据库在B/S系统(Browser/Server结构,即浏览器和服务器结构)模式下开发,主要反映出人工湿地信息、采样点信息、气象参数信息、水质参数信息、 CH_4 排放通量和浓度信息、 CH_4 驱动物质信息、驱动的 CH_4 排放浓度信息等,为收集四川省乃至整个中国广大农村非点源污水人工湿地处理系统 CH_4 的排放数据和驱动信息搭建一个基础网络平台,为后续其他研究提供收集 CH_4 排放通量和驱动因子的平台。第12章对本书研究内容进行总结分析、提出建议和下一步研究内容。

本书主要由罗鸿兵、刘晓玲、张可完成，李玫、黄波、张法星、Bruce C. Anderson、范良干、陈凤辉、潘正康、付蜀智参与了部分编写工作。

本书研究工作得到国家自然科学基金面上项目“农村污水非点源污染人工湿地处理系统甲烷排放控制研究(51278318)”、四川省环保厅重点科技项目“农村非点源污染人工湿地系统温室气体 CH_4 排放驱动机理及控制研究(2011HB001)”、四川省科技支撑项目“低碳环保农业果蔬产品碳标签体系及应用研究(2013SZ0103)”的支持，在此一并致以衷心的感谢。

同时，感谢都江堰市环境保护监测站、四川水利职业技术学院等合作单位，感谢为课题提供研究场所的郫县安德镇园田村和安龙村相关单位领导的大力支持，以及当地村民的帮助、理解和支持。感谢参与研究的研究生和本科生，以及所有其他有关人员对本书研究课题的关心、帮助和支持。

本书不仅可以深化人们对农村污水非点源污染处理系统中 CH_4 温室气体排放规律的认识，还能补充我国 CH_4 的排放清单，而且也能指导污水处理系统中温室气体排放控制，对减缓温室效应具有重要理论和实践意义，也必将产生巨大的环境效益和经济效益，是保证城市社会经济可持续发展的重要依据。本书还能指引我国广大农村污水非点源污染处理系统效能和评价，为人工湿地温室气体排放控制提供依据和参考，并为我国污水处理系统的节能和碳减排提供参考数据。

人工湿地 CH_4 产生和排放受诸多因素的影响，本书所涉及的研究内容有限，不可能对影响 CH_4 产生和排放的所有因素进行研究，主要从宏观角度进行探讨，以后应加强微观角度的研究。作者水平有限，疏漏在所难免，欢迎专家同行给予评估指正，以求不断完善和提高，欢迎来信批评讨论(hbluo@sicau.edu.cn)。

著者

2015年4月于都江堰

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 立题背景	2
1.2 国内外研究现状及趋势	5
1.2.1 人工湿地概况	5
1.2.2 人工湿地在农村非点源污染治理中的应用	9
1.2.3 人工湿地水力学特性研究概况	11
1.2.4 湿地及人工湿地 CH_4 排放的研究进展	13
1.3 研究内容、技术路线和研究方法	25
1.3.1 研究内容	26
1.3.2 研究技术路线	27
1.3.3 研究方法	27
第 2 章 研究材料与方法	36
2.1 研究材料	36
2.1.1 实验室设计的复合垂直流人工湿地系统	36
2.1.2 野外实习基地复合垂直流人工湿地的构建	38
2.1.3 选用的人工湿地植物	40
2.1.4 复合人工湿地温室气体收集装置	41
2.2 仪器与主要试剂	43
2.3 试验方案	44
2.3.1 试验地点	44
2.3.2 复合垂直流人工湿地系统内部水流规律试验研究	45
2.3.3 复合垂直流人工湿地系统流场模拟及优化设计试验研究	47
2.3.4 复合垂直流人工湿地处理系统中 CH_4 排放的碳驱动研究	48
2.3.5 实验室复合垂直流人工湿地系统 CH_4 排放控制实验	50
2.3.6 复合垂直流人工湿地系统 CH_4 排放控制实验	52
2.3.7 野外人工湿地 CH_4 排放监测	58
2.4 数据处理分析	61
第 3 章 复合垂直流人工湿地系统水力学实验结果与分析	62
3.1 水力停留时间的确定	62
3.2 复合垂直流人工湿地系统内部水流规律分析	63
3.2.1 系统各基质层横断面各采样点水流规律	63
3.2.2 系统垂直断面各采样点水流规律	69
3.3 复合垂直流人工湿地系统内部污染物质浓度变化分析	75

3.4	复合垂直流人工湿地系统内部水力学存在问题	75
3.5	复合垂直流人工湿地系统水力学优化改进	76
3.6	复合垂直流人工湿地系统内部水力学问题的解决方法与思路	79
3.7	本章小结	80
第4章	复合垂直流人工湿地系统流场模拟及优化设计	81
4.1	多孔介质模型参数	81
4.2	几何模型及网格生成	82
4.3	求解设置	83
4.4	流场分布模拟结果	84
4.5	模拟优化设计结果	87
4.5.1	进出水口位置和数量对水流的影响	87
4.5.2	池底布置穿孔管对水流的影响及设计优化结果	91
4.6	本章小结	109
第5章	葡萄糖驱动条件下 CH₄ 排放的宏观碳驱动	110
5.1	同一葡萄糖浓度碳源出水池、进水池各系统 CH ₄ 排放通量	110
5.1.1	0 mmol/L 葡萄糖	110
5.1.2	0.5 mmol/L 葡萄糖	112
5.1.3	1.0 mmol/L 葡萄糖	114
5.1.4	2 mmol/L 葡萄糖	116
5.1.5	4 mmol/L 葡萄糖	118
5.2	不同葡萄糖浓度碳源人工湿地系统 CH ₄ 排放通量	120
5.2.1	(茎+叶)系统	120
5.2.2	(根+水)系统	121
5.2.3	人工湿地 CH ₄ 总排放通量	122
5.3	不同葡萄糖浓度碳源下 CH ₄ 排放通量与水质指标(COD、TC、TOC)分析	126
5.3.1	CH ₄ 排放通量与 COD	126
5.3.2	CH ₄ 排放通量与 TC	128
5.3.3	CH ₄ 排放通量与 TOC	130
5.4	不同葡萄糖浓度碳源下 CH ₄ 排放通量与其他水质指标分析	133
5.4.1	CH ₄ 排放通量与氧化还原电位	133
5.4.2	CH ₄ 排放通量与 pH	135
5.4.3	CH ₄ 排放通量与溶解氧(DO)	137
5.4.4	CH ₄ 排放通量与电导率	139
5.4.5	CH ₄ 排放通量与总溶解性固体	141
5.4.6	CH ₄ 排放通量与盐度	142
5.4.7	CH ₄ 排放通量与水温	144
5.4.8	CH ₄ 排放通量与总氮	147
5.4.9	CH ₄ 排放通量与正磷酸盐	149

5.5	葡萄糖驱动条件下 CH_4 排放实验的结果讨论	151
5.5.1	CH_4 排放通量与外加碳源的关系	151
5.5.2	CH_4 排放通量与环境因子的关系	154
5.5.3	植物不同部位对 CH_4 排放的作用	156
5.6	葡萄糖驱动 CH_4 产生的宏观机理分析	158
5.6.1	葡萄糖驱动条件下 CH_4 排放的碳质量平衡分析	158
5.6.2	CH_4 质量梯度与 TOC、TC 质量梯度	161
5.6.3	CH_4 质量梯度与基本水质质量梯度数据相关性分析	165
5.6.4	CH_4 质量梯度与基本水质质量梯度主成分分析	166
5.6.5	CH_4 浓度梯度与基本水质浓度梯度数据相关性分析	167
5.6.6	CH_4 浓度梯度与水质浓度梯度的主成分分析	168
5.6.7	葡萄糖驱动条件下 CH_4 排放的动力学分析	170
5.7	本章小结	175
第6章	乙醇驱动条件下 CH_4 排放的宏观碳驱动	176
6.1	同一浓度的氮驱动出水池、进水池各系统不同时间 CH_4 排放通量	176
6.1.1	0 mmol/L 乙醇	176
6.1.2	2 mmol/L 乙醇	178
6.1.3	4 mmol/L 乙醇	179
6.1.4	8 mmol/L 乙醇	181
6.1.5	16 mmol/L 乙醇	183
6.1.6	32 mmol/L 乙醇	184
6.2	不同浓度的碳驱动出水池、进水池各系统同一时间 CH_4 排放通量	186
6.2.1	进水池(茎+叶)系统(leaf-down)	186
6.2.2	(茎+叶)系统(leaf-up)	187
6.3	不同浓度下 CH_4 总排放量	188
6.4	乙醇驱动实验讨论	189
6.4.1	植物不同部位的产 CH_4 量分析	189
6.4.2	CH_4 研究的日变化分析	191
6.5	乙醇驱动 CH_4 产生的宏观机理分析	195
6.5.1	乙醇驱动条件下 CH_4 排放的碳质量平衡分析	195
6.5.2	CH_4 质量梯度与 TOC、TC 质量梯度	203
6.5.3	CH_4 质量梯度与基本水质质量梯度数据相关性分析	205
6.5.4	CH_4 质量梯度与基本水质质量梯度主成分分析	206
6.5.5	CH_4 浓度梯度与基本水质浓度梯度数据相关性分析	207
6.5.6	CH_4 浓度梯度与水质浓度梯度的主成分分析	209
6.5.7	乙醇驱动条件下 CH_4 排放的动力学分析	210
6.6	本章小结	215
第7章	尿素驱动条件下 CH_4 排放的宏观碳驱动	217
7.1	同一浓度的氮驱动出水池、进水池各系统不同时间 CH_4 排放通量	217

7.1.1	空白实验(0 mmol/L 尿素)CH ₄ 排放	217
7.1.2	12.1 mmol/L 尿素驱动实验的 CH ₄ 排放	219
7.1.3	30 mmol/L 尿素驱动实验的 CH ₄ 排放	222
7.1.4	45 mmol/L 尿素驱动实验的 CH ₄ 排放	224
7.1.5	61 mmol/L 尿素驱动实验的 CH ₄ 排放	226
7.1.6	80 mmol/L 尿素驱动实验的 CH ₄ 排放	229
7.2	同一时刻不同浓度尿素源出水池、进水池各系统 CH ₄ 排放通量	231
7.2.1	进水池(茎+叶)系统(leaf-down)CH ₄ 排放通量	231
7.2.2	出水池(茎+叶)系统(leaf-up)CH ₄ 排放通量	233
7.2.3	进水池(根+水)系统(root-down)CH ₄ 排放通量	234
7.2.4	出水池(根+水)系统(root-up)CH ₄ 排放通量	236
7.3	不同浓度下 CH ₄ 总排放通量	237
7.4	CH ₄ 排放与总氮(TN)浓度关系分析	239
7.5	试验讨论	243
7.5.1	植物不同部位的产 CH ₄ 量分析	243
7.5.2	CH ₄ 排放日变化分析	244
7.6	尿素驱动 CH ₄ 产生的宏观机理分析	245
7.6.1	尿素驱动条件下 CH ₄ 排放的碳质量平衡分析	245
7.6.2	CH ₄ 质量梯度与 TOC、TC 质量梯度	250
7.6.3	CH ₄ 质量梯度与基本水质质量梯度数据相关性分析	254
7.6.4	CH ₄ 质量梯度与基本水质质量梯度主成分分析	255
7.6.5	CH ₄ 浓度梯度与基本水质浓度梯度数据相关性分析	256
7.6.6	CH ₄ 浓度梯度与水质浓度梯度的主成分分析	257
7.6.7	尿素驱动条件下 CH ₄ 排放的动力学分析	258
7.7	本章小结	263
第 8 章	实验室复合垂直流人工湿地系统 CH ₄ 排放控制	264
8.1	复合垂直流人工湿地系统出水水质变化	264
8.2	各监测点 CH ₄ 的排放通量	265
8.3	曝气对 CH ₄ 排放通量和污水净化效率的影响	267
8.4	曝气时间的影响	269
8.5	曝气位置的影响	270
8.6	开始曝气时间的影响	270
8.7	本章小结	271
第 9 章	野外复合垂直流人工湿地系统 CH ₄ 排放控制	272
9.1	人工湿地 CH ₄ 控制结果分析	272
9.1.1	空白试验 CH ₄ 排放	272
9.1.2	农村非点源生活污水 CH ₄ 排放控制实验的 CH ₄ 排放结果	277
9.2	人工湿地中氧气传递效率的分析	300
9.2.1	人工湿地曝气效果分析	301

9.2.2	气体传递过程中的能量损失	307
9.2.3	几种不同曝气处理工艺比较	309
9.3	曝气、水位对人工湿地 CH_4 排放通量的影响分析	311
9.4	曝气对人工湿地污染物去除效果分析	313
9.5	水质对人工湿地 CH_4 排放通量影响分析	315
9.5.1	水温	315
9.5.2	溶解氧	318
9.5.3	pH	320
9.5.4	电导率	322
9.5.5	氧化还原电位	323
9.5.6	营养物质(TC、TOC、TN、TP)	325
9.6	农村非点源生活污水人工湿地处理系统 CH_4 排放控制措施	333
9.6.1	农村非点源生活污水人工湿地处理系统 CH_4 排放经济估算	333
9.6.2	农村非点源生活污水人工湿地处理系统 CH_4 排放控制措施	335
9.7	本章小结	336
第 10 章	农村非点源污水人工湿地处理系统的 CH_4 排放评估	339
10.1	农村人工湿地处理农村生活非点源污水的生命周期成本评估概述	339
10.1.1	成都郫县安德镇园田村社区人工湿地生命周期评估	339
10.1.2	成都郫县安德镇庭院人工湿地生命周期评估	340
10.2	成都市郫县园田村农村非点源污水人工湿地处理系统的 CH_4 排放评估	341
10.2.1	园田村社区人工湿地概况	341
10.2.2	园田村社区人工湿地各监测点位 CH_4 月排放量	343
10.2.3	园田村社区人工湿地各监测点位 CH_4 年排放量	348
10.2.4	园田村垂直流庭院人工湿地各监测点位 CH_4 月排放通量	349
10.2.5	园田村垂直流庭院人工湿地各监测点位 CH_4 年排放量	354
10.3	成都市郫县安龙村非点源污水人工湿地处理系统的 CH_4 排放评估	356
10.3.1	安龙村垂直流庭院人工湿地各监测点位 CH_4 月排放量	356
10.3.2	安龙村垂直流庭院人工湿地各监测点位 CH_4 年排放通量	363
10.3.3	安龙村复合庭院人工湿地各监测点位 CH_4 月排放通量	364
10.3.4	安龙村复合庭院人工湿地各监测点位 CH_4 年排放通量	369
10.4	本章小结	370
第 11 章	CH_4 排放数据库和 CH_4 驱动因子数据库系统的开发与集成	372
11.1	开发背景及意义	372
11.2	系统概要设计	372
11.2.1	系统分析	372
11.2.2	系统目标	373
11.2.3	系统模块划分	373
11.2.4	系统功能结构	374
11.2.5	程序运行环境	376

11.2.6 数据库设计	377
11.3 系统实现与成果展示	377
11.3.1 登录模块的设计及主界面设计	377
11.3.2 系统基本功能的实现与展示	378
11.4 系统的功能和技术先进性	384
11.5 数据库系统应用的效益与继续开发	384
11.5.1 系统开发与应用的效益	384
11.5.2 继续开发	385
11.6 数据库系统项目存在的问题	385
11.7 本章小结	385
第 12 章 研究展望	387
12.1 我国非点源污染控制与管理的发展趋势	387
12.2 有关人工湿地 CH ₄ 驱动研究	390
12.3 有关农村非点源生活污水人工湿地处理系统 CH ₄ 排放控制研究	391
主要参考文献	393

第 1 章 绪 论

作为影响水体的重要污染源(Kahl et al., 1996; 鲍全盛等, 1996; Ham et al., 2010), 农村非点源污染的影响因素多, 分布广泛, 形成过程繁杂且形成机理尚没有确定过程, 对周围环境的危害大且影响深远, 潜伏期长, 使得对其的研究和控制难度大(Corwin et al., 1996; 贺缠生等, 1998)。近年来, 欧美一些发达国家水污染控制的实践表明, 在点源控制达到较高水平时, 水域水质将主要受非点源控制。从世界范围来看, 农业非点源污染已成为环境污染的重要方式(刘如云等, 2007), 如何治理农村面源污染, 实施农业可持续发展战略, 是我们面临的一大课题。

占中国国土面积 2/3 的农村生态环境是生存大环境的主要组成部分, 在全国人口中, 乡村人口占总人口的 57.01%(中华人民共和国国家统计局, 2006)。据大量数据资料显示, 农业非点源污染已经成为我国最严重的环境问题之一, 对农产品质量和人体健康构成严重威胁(刘瑞聪, 2012)。由于现代农业生产结构的调整, 过量使用农药化肥形成非点源污染, 农村生活垃圾等固体废弃物和生活污水未处理任意排放, 导致饮用水水源地污染, 畜禽养殖业产生的各种生态环境污染(邓睿等, 2009), 都严重破坏了农村生态环境, 对农民的饮用水安全以及身体健康都存在巨大威胁。随着农村经济的不断发展, 我国乡村的生产和生活水平得到了很大提高。但是值得注意的是, 这些积极的改变却使农村生活污水数量大幅度增加, 预计到 2020 年, 我国农村污水排放量将达到 270 亿 t(张军等, 2009)。目前, 我国农村完善的排污系统和先进的污水处理系统并没有普及, 大部分生活污水被随意排放至室外, 污水渗入土壤和地下水, 部分排入河流, 除了使河流及地下水受到严重污染外, 也影响着农村生态环境。

根据非点源污染“源一流一汇”逐级控制的理念, 专家们提出了许多污染物源头消减、中途拦截和末端处理的技术(胡梅等, 2007), 人工湿地处理技术得到了广泛认可。目前, 在我国南方乡村, 多水塘景观发挥着重要作用, 它们对农田氮磷和农药的截留效果较好(Yin et al., 1993)。另外, 农户庭院型人工湿地对处理农村生活污水也有较好的处理能力。2012 年, 龙翠芬等(2012)通过在广东省珠海市建立的农村户型水平潜流和垂直流人工湿地系统处理农村生活污水时发现, 两套系统对农村生活污水的各项处理指标均达到了城镇污水处理厂排放标准。然而, 由于人口基数大, 以及快速城市化地区和农村地区的污水处理设施始终不完善, 中国污水处理领域 CH_4 温室气体排放量居全世界第一, 占排放总量的 21%(潘涛, 2011)。人工湿地作为处理农村生活污水的主要处理系统, 是 CH_4 的排放源, 它运行的最理想状况是在最大限度处理污水的同时, 减少 CH_4 的排放量, 以发挥最大的生态效应(程璞等, 2014)。因此, 如何能使人工湿地达到最理想运行状况, 并兼顾水质净化和温室气体排放控制, 是目前我们面临的重要课题之一。

1.1 立题背景

随着点源污染的有效管理和控制，非点源污染已成为当今水环境污染的主要原因，人工湿地作为一种控制水环境非点源污染的有效工具，已被世界上很多国家所认可。在我国，非点源污染主要发生在经济相对落后的农村或郊区，由于人工湿地系统具有投资小、管理简单、运行费用低廉等优点，尤其适用于发展中国家的污水处理。近年来，人工湿地因其高效、低成本和环境友好等优点被广泛应用于处理各种类型的废水，应用日益广泛(Konnerup et al.，2009；Vymazal，2009)。湿地是陆生生态系统和水生生态系统的过渡地带，生态功能非常重要，由于其独特的水文、植被、土壤与生物特征，在维护区域生态平衡等方面有其他系统所不能替代的作用，被誉为“地球之肾”(段洪涛等，2004)，具有强大的污水净化能力。人工湿地系统就是源于对天然湿地结构和功能进行模拟的一种污水处理系统。

人工湿地具有去除 N、P 等污染物能力较强，和其他类型人工湿地相比，占地面积小，易于操作，便于管理，运行及管理费用低，运行稳定，高效节能等诸多优点(李芳，2011)。在人口密度较低、污染排放较少的农村地区，人工湿地生活污水处理设施有很多优点，该处理设施充分利用农户住房周边的地形特点，因地制宜、实施简单，投资少，维护方便，且占地面积小，配合种植水生植物，还可达到美化景观的效果。

湿地生态系统在全球碳循环中起着重要作用(IPCC，2013)。湿地一直被认为是大气 CO₂ 的重要碳汇，这点已得到广泛认可(Le Mer et al.，2001)，为全球最大的碳库(段晓男等，2006)。同时，湿地中由于产甲烷菌和甲烷氧化细菌的相对活性，在厌氧条件下，有机物经过甲烷菌的发酵作用产生 CH₄ 气体，而在有氧条件下，CH₄ 被甲烷氧化菌氧化成 CO₂ 释放到大气中，引起碳汇碳源之间的转化。

近年来，大气中 CH₄ 浓度显著增加，自工业革命以来，全球大气 CH₄ 浓度从工业化前的约 715 ppb^① 增至 20 世纪 90 年代初的 1732 ppb，2005 年增至 1774 ppb(IPCC，2007)，是工业革命前的两倍(Marsh，2003)。根据 IPCC(2007)估测，湿地 CH₄ 的年排放量可达 100 Tg^②，约占 CH₄ 总源的 20%(表 1-1)，是大气 CH₄ 的主要自然来源之一。

表 1-1 大气中甲烷的源(IPCC，2007)

种类	甲烷量/(Tg·a ⁻¹)
地质来源	14
氢氧化物	5
生物量燃烧	50
水稻田	60
天然气及石油开采	60
煤矿开采	46

① ppb 为体积浓度，1ppb=10⁻⁹，即 1ppb=10⁻³cm³/m³，即每立方米大气中含有 CH₄ 的体积数（立方厘米）。
② 1Tg=10⁶t=10⁹kg=10¹²g，Tg·a⁻¹ 为年排放量单位。