

中国农村环境解困管理丛书

栾胜基/主编



农业源氨排放 及其控制对策研究

Research on Ammonia Emissions from Agriculture
Sector and Its Control Strategies

徐 鹏 龚巍巍/著

非外借



科学出版社

本书研究获

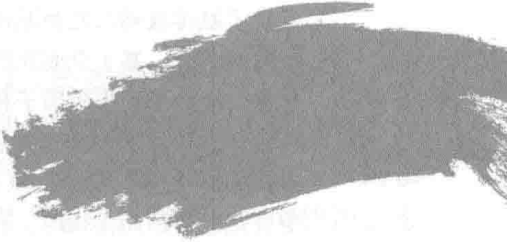
国家自然科学基金重大研究计划重点项目

“西南河流源区供水-发电-环境互馈关系及系统弹性研究” (91647201)

中国科学院A类战略性先导科技专项课题

“祁连山‘山水林田湖草’系统集成预测与优化调配” (XDA20100104)

资助



农业源氨排放 及其控制对策研究

Research on Ammonia Emissions from Agriculture
Sector and Its Control Strategies

徐 鹏 龚巍巍/著

科学出版社
北 京

内 容 简 介

针对以农业源氨排放控制来降低 $\text{PM}_{2.5}$ 污染这一热点研究问题, 本书建立了氨排放动态监测系统, 并以此为基础对种植业氨排放进行了外场模拟监测研究。基于全面农田肥料氨排放源、高分辨率活动数据和时空分异性的本地修正排放因子和参数, 本书编译了高时空分辨率氨排放清单, 全面评估了活动数据、排放因子和参数的不确定性影响, 识别氨排放热点; 探讨了改革开放后 40 多年来我国农业政策的变迁对农业源氨排放历史变化趋势的间接效应, 利用情景分析法预测了我国畜禽生产过程中粪便氨排放及减排潜力; 阐述了农田肥料氨排放对城市空气质量的影响; 提出农业源氨排放控制措施。

本书可供环境科学、大气科学和农村社会经济领域的研究人员、高等院校相关专业的师生, 以及农业环境政策的制定者参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

农业源氨排放及其控制对策研究 / 徐鹏, 龚巍巍著. —北京: 科学出版社, 2019. 10

(中国农村环境解困管理丛书/栾胜基主编)

ISBN 978-7-03-061638-8

I. ①农… II. ①徐… ②龚… III. ①农业-氨-空气污染-污染防治-研究-中国 IV. ①X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 115181 号

责任编辑: 林 剑 / 责任校对: 何艳萍
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 10 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2019 年 10 月第一次印刷 印张: 16 1/4

字数: 320 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

丛 书 序

过去几十年，不断借鉴西方工业化农业生产模式改造传统农业的过程中，我国成功地解决了粮食供给问题，但当前农业转型期表现出的问题也不可忽视。农业供给侧由产量绝对不足的匮乏，逐步转变为品种、品质难以匹配需求升级的相对失衡；农业生态环境质量受损，土壤肥力减退及污染、化肥农药过度使用、畜禽养殖污染严重等问题日益普遍。现阶段，在城市、工业点源污染控制和治理能力迅速提高的前提下，中国农村环境保护形势之严峻、利益之复杂、任务之艰巨更加凸显。同时，我国县级以上农村基层环境管理职权缺失、构建困难，环保基础设施建设严重滞后，农村环境管理业已成为我国环境管理体系中的短板。农村环境状态的优劣不仅关系到能否为国家经济发展提供良好的物质基础和生态服务，也关系到能否为几亿农民的生活质量和身体健康提供基本的保障条件。

中国农村环境问题的根源在哪里？

政治家可溯源于城乡之间二元管理体制的制度原因，社会学家可归因于农村社区公众参与乏力，经济学家认为是公共物品管理的“搭便车”现象，环境学家则更倾向化肥农药过量使用……每一种解释都有其合理性，都能说明某一方面问题的严重程度。我们虽然是环境学的研究者，但不能仅仅停留在从污染物的治理角度认识农村环境问题，而应该有全局的视角和意识，将各环境要素整合到农村社会的大背景中进行思考。

我国正处在传统农业向现代农业的转化过程中，传统农村社会形态与非传统农村社会形态并存且广泛交织，传统农村社会正在以各种方式接受现代化的元素。然而，现代科技、工业化和城市化的高速发展，并没有给中国的农村带来福音，相反“三农”问题日趋严重。尽管现代生产要素已经广泛应用到我国农村生产和生活的各个领域，但并没有实现我国农村的普遍富裕和资源的有效利用。当农户传统的生产方式和生活方式与现代生产和生活要素尚未彼此适应，随之而来的便是各种形式的现代环境问题。因此，农村环境问题的根源在于传统农村生产和生存方式与现代生产和生活方式的冲突，而在这个冲突当中的矛盾主体则是农户。

中国农村环境解困的出路在何方？

传统的农村社会必须要接受和容纳现代化的元素，现代化的农村社会难以放弃农村固有的传统，因为这些传统积累了千百年来农村与自然和谐共生的智慧。

要实现现代文明成果与传统生存智慧的完美结合,关键在于如何在传统和现代的碰撞中找到平衡点,或者说融合点。这也是农户环境行为演变的最终目标。正如舒尔茨关于理性小农的论断,改变传统农业的本质,重点在于提供给小农可以合理运用的“现代生产要素”。保护农村环境,需要对农户经济行为进行正确引导,使得他们可以在传统农业向现代农业的转化过程中,真正做到合理运用“现代生产要素”,努力避免农户经济行为对环境的负面影响。同时,也要认识到,传统农户基本特征的逐渐消失同样激化了传统与现代的冲突,农村生产系统中传统的物质循环和污染消纳途径逐步地在现代要素应用中被挤出,这加深了我国农村环境问题的严重性。因此,尊重和引导农户的理性选择是化解传统农村生产和生存方式与现代生产和生活方式冲突的重要途径。

农户作为基本经济组织形式,其生产行为既是经济过程,又是生态过程。相对于城市的居民和企业而言,农户对环境的理解不仅仅是污染物存在的形式,更重要的是其污染和破坏的过程是在剥夺他们自己的生产要素,蚕食他们自己的生活空间。从这种意义上理解,农户具备关心环境的原动力,因为环境就是农户生产与生活的来源与归宿,农户的行为实际上是一种寻求经济和生态共生的过程。但遗憾的是,这种过程在现行制度的缺位和短期经济利益的影响下开始被扭曲,离开既有的轨道,而且渐行渐远。

农户在我国农村“社会-经济-环境”系统中占有的核心地位不言而喻,在这个具有非线性、开放式、动态演化特点的复杂农村环境系统中,研究农户的行为与环境的关系是一件困难且极具挑战的工作。本丛书以农户环境行为为视角,厘清农村环境问题产生的原因,从而提出农村环境管理的途径。丛书中所提出的研究方法既不同于农业生产环境的研究,也不同于村落环境的研究,而是以农户为研究切入点,将农户作为农村环境的主体,研究农户行为与环境的关系,借鉴现行的城市环境管理模式,探寻改进我国农村环境管理政策与实践的突破口。

北京大学农村环境课题组在20世纪末开始致力于农村环境污染及防治的研究,先后得到国家自然科学基金委员会、环境保护部、科学技术部和联合国环境署的多方支持。有数十位研究生在不同时期分赴各地农村地区开展了各类的实地调研和环境监测,完成各类论文和科研报告多份,取得了一系列的研究进展和应用成果,现以丛书形式公开出版,以飨读者。

若本丛书多个方面的讨论,能提供给读者更多迸发思想火花的机会,那么其刊行会更有意义。

栾胜基

2011年12月2日于南国燕园塘琅山下

目 录

丛书序

第 1 章 导论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 内容结构及技术路线	3
第 2 章 研究进展	6
2.1 我国农业政策的变革	6
2.2 氨排放清单研究进展	7
2.3 氨排放对区域空气质量的影响研究进展	12
2.4 农业源氨排放影响因素研究	15
2.5 氨排放测量方法及技术进展	23
2.6 氨排放控制及成效研究进展	32

上篇 实验观测

第 3 章 氨排放动态监测系统的建立	37
3.1 作物模拟系统	37
3.2 气体在线收集系统	40
3.3 样品分析系统	42
3.4 微型自动气象站	42
3.5 系统联用的设计	44
3.6 质量保证与质量控制	48
3.7 本章小结	54
第 4 章 种植业氨排放外场模拟研究	55
4.1 试验设计	55
4.2 氨排放特征	63
4.3 影响因素分析	74
4.4 本章小结	79

下篇 模型模拟

第5章 珠三角地区农业氨排放清单开发	83
5.1 清单构建概括	84
5.2 活动水平收集	85
5.3 排放因子的确定	90
5.4 结果与讨论	109
5.5 清单不确定性分析及比较	124
5.6 本章小结	130
第6章 我国农业氨排放清单研究方法	132
6.1 排放清单建立	132
6.2 未来预测减排	142
6.3 模型验证	145
6.4 不确定性分析	147
第7章 农业补贴制度下农田肥料氨排放	150
7.1 氨排放总量、结构和源解析	151
7.2 氨排放的时空分布	153
7.3 与以往清单研究比较	155
7.4 农业补贴制度与氨排放关系	157
7.5 本章小结	158
第8章 农田肥料施用政策变化与农田肥料氨排放关系	159
8.1 县域农田肥料氨排放	160
8.2 农田肥料施用政策变化对氨排放历史趋势的影响	166
8.3 与以往排放清单的不同	169
8.4 氨排放对城市空气质量的影响	171
8.5 农业源氨排放控制措施	172
8.6 本章小结	174
第9章 畜禽养殖农业政策变化下的畜禽粪便氨排放	175
9.1 县域畜禽粪便氨排放和源解析	176
9.2 县域畜禽粪便氨排放时空变化	179
9.3 畜禽养殖农业政策对氨排放历史趋势的影响	180

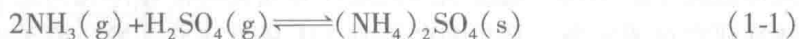
9.4 氨排放历史趋势与其他研究比较	182
9.5 6 种情景下中国未来畜禽粪便氨排放趋势	183
9.6 本章小结	185
第 10 章 结论与展望	186
10.1 主要结论和创新点	186
10.2 展望	195
参考文献	197
附录	220
附录 1 种植业和畜牧业基本情况调研问卷	220
附录 2 各项数据表	222
后记	249

第1章 导 论

1.1 问题的提出

氨 (NH_3) 是大气中重要的微量气体之一, 其典型浓度在 10ppb_v ^① 量级 (霍庆, 2014)。虽然其大气浓度较低, 但能通过参与一系列物理、化学和生物过程, 对环境、动植物和人类等产生影响。在 NH_3 参与全球氮 (N) 的生物地球化学循环过程中, 由于大气层、陆地和海洋等生态系统的复杂关系, 这些影响包含了正向和反向作用 (Gruber and Galloway, 2008; Galloway et al., 1996; Sanhueza, 1982)。因此, 我们对无论全球还是区域范围内的 NH_3 来源、排放、输送及其环境效应都应给予较大关注 (董艳强等, 2009)。

NH_3 作为大气中重要的碱性气体, 具有高反应性和可溶性, 一方面能够与大气中的酸性气体 (硝酸和硫酸) 反应生成铵盐 (硝酸铵、硫酸铵和硫酸氢铵) (Biswas et al., 2008; Battye et al., 2003; Wu et al., 2008), 从而使降水的 pH 升高, 缓解酸雨的危害。此外, NH_3 和 NH_4^+ 又可以通过干湿沉降到土壤和水体 (Aneja et al., 2003; Quan and Zhang, 2008), 导致土壤酸化 (Asman et al., 1998)、水体富营养化 (Hellsten et al., 2008) 和扰乱生物循环 (Bouwman et al., 1997)。另一方面, 反应生成铵盐形成的二次无机气溶胶 (Anderson et al., 2003) 占据大气 $\text{PM}_{2.5}$ ($\text{PM}_{2.5}$, 其空气动力学当量直径小于 $2.5\mu\text{m}$) 的 $7.1\% \sim 57\%$ (Yang et al., 2011; Dan et al., 2004; Huang et al., 2014; Megaritis et al., 2013; Zhang et al., 2014), 化学反应方程如下:



从而对霾的形成有重要影响, 通过光的散射作用会造成能见度降低等问题 (Ye et al., 2011; Walker et al., 2004)。这些细粒子也会对人类健康产生影响, 通过人的呼吸使其沉积在肺部, 甚至进入肺泡和血液, 进而引起一系列病变, 增加发病率 (Pinder et al., 2007; Dockery et al., 1993; Powlson et al., 2008)。此外, 外

① 1ppb_v 等于总体积的十亿分之一。

界颗粒物所导致的全球气候变化也广泛引起关注。虽然化石燃料燃烧对地表增温产生影响,但人为活动形成的气溶胶对气候影响的净效应是使地表趋冷(Charlson et al., 1992; Martin et al., 2004),主要是由于气溶胶粒子通过直接散射、吸收太阳辐射和调节云短波反射属性对辐射效应产生较强的效应。另外, NH_3 通过与对流层中的羟基团发生光化学反应来影响甲烷的氧化,反应过程中所消耗掉的大量羟基团即为去除温室气体甲烷所必需的基团,从而间接加剧温室效应(Sutton et al., 1995)。

大气中的 NH_3 来源十分广泛,主要分为人为源和自然源(IPCC, 2006)。根据过去的排放清单研究,人为源主要包括:①农田生态系统,主要包括氮肥施用、土壤本底、固氮植物、饼肥施用和秸秆堆肥;②畜禽养殖业,主要包括集约化养殖、散养和放牧三个饲养系统;③生物质燃烧,主要包括秸秆灶膛燃烧、秸秆田间燃烧、薪柴燃烧、草原大火和森林大火等;④人体排放,主要包括汗液和粪便等;⑤化工生产,主要包括合成氨工艺和氮肥生产、石油加工、炼焦、制气等;⑥废弃物处理,主要包括废水处理、固废填埋、固废堆肥、固废焚烧和烟气脱硝等;⑦移动源,主要包括轻型汽油车、重型汽油车、轻型柴油车、重型柴油车及摩托车五大类。自然源主要包括野生动物排泄物释放、海洋蒸发、土壤释放、森林和草原等植物挥发等(尹沙沙, 2011)。目前大部分研究表明(Zhang et al., 2011; Bash et al., 2013; Cooter et al., 2010; Fu et al., 2015; Huang et al., 2012; Paulot et al., 2014; Pleim et al., 2013; Zhu et al., 2015),农田生态系统和畜禽养殖业是 NH_3 排放两大主要排放源。

总之, NH_3 排放对全球气候变化、区域空气污染、生态环境及人类健康等都有直接或间接的影响,对 NH_3 排放机理过程、时空分布特征、减排和控制措施等进行系统深入的研究具有重要的理论和现实意义(Wu et al., 2016; Zheng et al., 2012; Erisman et al., 2013)。由于 NH_3 在气候变化、区域空气质量、生态环境和人体健康上的作用,确定其排放规律和变化特征显得尤为重要。已有的 NH_3 排放特征研究尚不充分,从目前的少量 NH_3 排放研究来看,模拟或现场监测的研究较少;对 NH_3 排放过程研究不够,包括排放因子、排放通量、时浓度和日浓度变化等。 NH_3 排放模拟研究的监测方法不统一,方法之间的精度有较大差距;已有报道的监测手段往往采用离线方法,时间分辨率较低(通常以天计),不利于对 NH_3 排放规律变化的实时跟踪研究。已报道的 NH_3 排放清单,由于采用了不同的排放因子(往往是国外报道的排放因子),其估算结果存在较大差距,存在较大的不确定性且缺少必要的 uncertainty 分析。在时空分布方面,已报道清单的空间和时间分辨率均较低,开发的清单不够精细,不能较好地满足空气质量模式的后续利用,导致模式的研究结果存在较大不确定性。其中,开发和更新主要源的排放

清单是定量排放特征的必要手段。同时,高时空分辨率 NH_3 排放清单是研究 NH_3 环境效应的先决条件,主要是因为其是空气质量模型的基础输入数据,能够减少模型模拟大气中颗粒物的不确定性;另外,还能够识别排放热点和降低 NH_3 排放空间分布的不确定性,进而减少模型模拟大气中颗粒物的不确定性。

另外,目前 NH_3 减排分析也是国内外学科研究的一个热门话题。2013 年国务院印发的《关于印发大气污染防治行动计划的通知》中提出减少种植业和养殖业氨排放来改善全国空气质量,2015 年农业部制定了《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》和 2017 年国务院办公厅《关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》(国办发〔2017〕48 号),这些政策的颁布也会使农业源氨排放减少。不同排放源的 NH_3 排放是一个复杂机制过程,受多种影响因素的共同耦合作用,其中也包括外界宏观农业政策的影响,识别出主要减排技术和制定减排策略对未来 NH_3 排放的控制起到至关重要的作用。

1.2 内容结构及技术路线

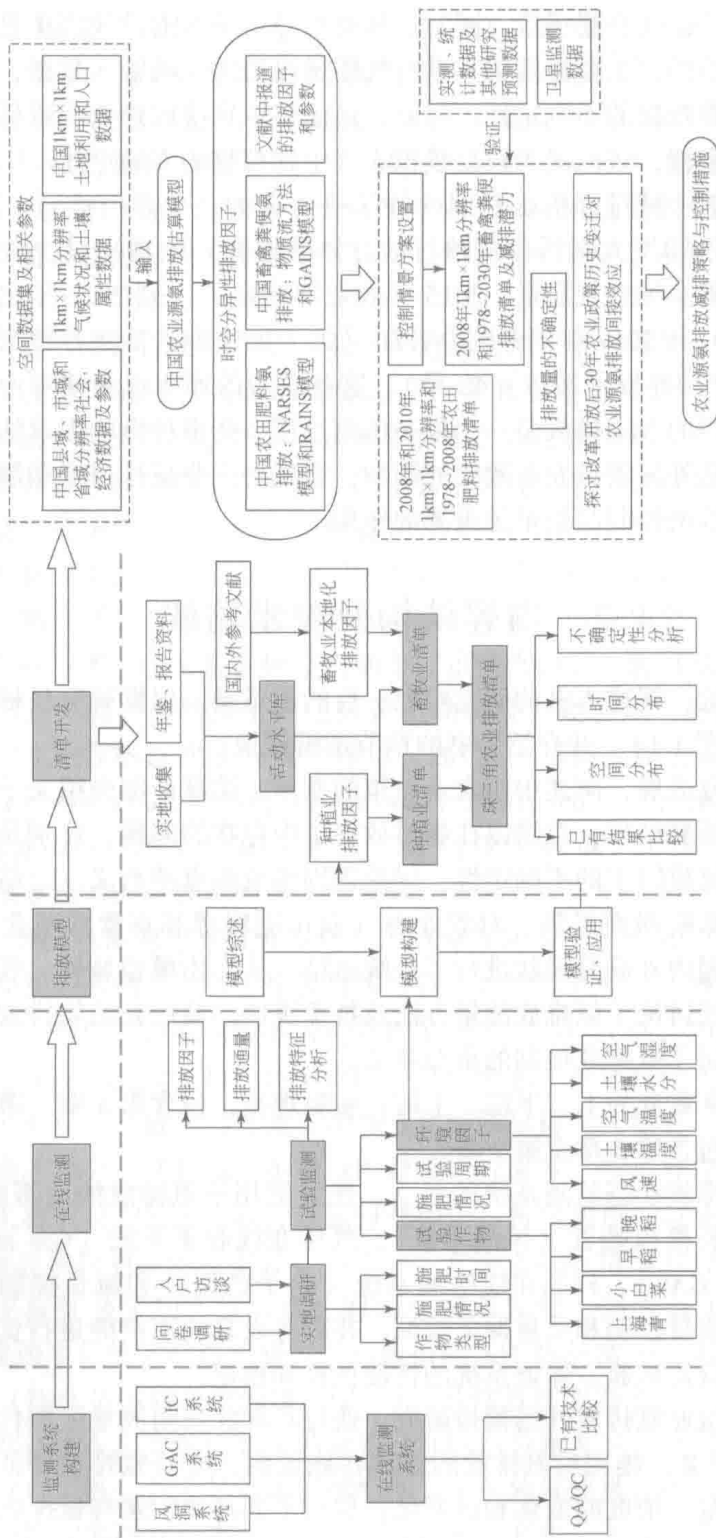
第 1 章为导论,阐述本书的研究对象、目的和意义。根据研究目标,设定本书的技术路线(图 1-1),并介绍全书的章节逻辑框架。

第 2 章为研究进展,阐述中国农业政策的变革。该章详细介绍关于氨排放清单的研究历史及最新结果,总结以往氨排放清单中存在的问题,特别是农业排放源、活动数据和排放因子的不确定性,讨论识别排放热点的意义。总结氨排放对区域空气质量的影响研究进展。对农业源(农田肥料源和畜禽养殖业源)氨排放的影响因素的国内外研究现状进行了系统总结。从作物模拟装置、气体收集系统和样品分析系统讨论了氨排放测量方法及技术进展。最后介绍氨排放控制及成效研究进展,探讨了氨排放控制的重要意义。

第 3 章至第 9 章分为上、下篇。上篇:实验观测,包含第 3 章、第 4 章;下篇:模型模拟,包含第 5 章至第 9 章。

第 3 章:氨排放动态监测系统的建立。建立适用于氨排放的动态监测系统,主要包括作物生长模拟装置(风洞系统)、气体在线收集系统(Gas and Aerosol Collector System, GAC)、样品在线检测系统(离子色谱)和流量控制系统,并对每个系统进行质量控制和质量保证验证,并对各设备联用性能进行优化,对整套监测系统进行验证试验,保证系统的性能优良和稳定。

第 4 章:种植业氨排放外场模拟研究。通过对珠江三角洲地区的代表性作物(早稻、晚稻和蔬菜)施肥后氨排放的连续在线监测,分析氨排放特征,包括排放因子、排放通量、浓度时变化和日变化;探讨不同环境因素与氨排放之间的定



量关系。

第5章：珠三角地区农业氨排放清单开发。利用微型气象站同步提取的空气温度、土壤温度、土壤水分、空气湿度和风速等环境因子数据，定量分析氨排放通量与相应的环境因子的相关关系。以此为基础，修正和建立本地化的种植业氨释放模型，其中修正和确定了最大排放因子、氮肥施用率、空气温度、土壤温度和其他环境因子的子模块模型和参数。基于修正的氨释放模型，计算出不同地区、不同月份和不同氮肥类型的氨排放因子；同时，通过实地调研和收集公开出版的统计数据（统计年鉴、材料、公报等）相结合的方法获得较为精确的氨排放活动水平数据；据此开发出2011年度珠江三角洲地区高时空分辨率的氨排放清单，并分析不同排放源状况，研究清单的时空分布，也对清单不确定性进行定量研究。

第6章：我国农业氨排放清单研究方法。详细介绍清单建立方法，包括排放源、数据源、排放因子的整理分析。阐述未来预测减排方法、情景分析及模型验证。详细介绍清单不确定性分析方法。

第7章：农业补贴制度下农田肥料氨排放。详细介绍中国农田肥料氨排放清单的相关结果，包括排放总量、结构、源解析、时空格局和与其他研究清单的比较等。阐述农业补贴制度与氨排放关系。

第8章：农田肥料施用政策变化与农田肥料氨排放关系。详细介绍中国县域农田肥料氨排放总量、时空分布和不确定性等。阐述中国农田肥料施用政策的历史变迁对农田肥料氨排放历史趋势的间接效应，并与其他研究清单和卫星监测数据进行比较。探讨氨排放对城市空气质量的影响。总结农业源氨排放控制措施。

第9章：畜禽养殖农业政策变化下的畜禽粪便氨排放。详细介绍中国县域畜禽生产过程中粪便氨排放总量、时空分布和不确定性等。阐述影响畜禽生产的畜禽养殖农业政策对中国畜禽生产过程中粪便氨排放历史趋势的影响，并与其他研究清单和卫星监测数据进行比较。评估对未来畜禽数量预测的模拟结果，进而讨论六种情景下的中国未来氨排放变化趋势及减排潜力，识别最合理减排情景和技术。为满足未来肉蛋奶需求的同时减少氨排放，提供简单和高效的减排措施以及政策建议。

第10章：结论与展望。对本书主要的结论和创新点加以总结，以及对未来研究的展望。

第2章 研究进展

2.1 我国农业政策的变革

改革开放 40 多年来,我国农业生产总值以年均 11.8% 的速度迅速发展,农民人均收入从 1978 年的 134 元增加到 2015 年的 10 772 元。伴随着农业发展,政府不断调整和改进旧的农业政策,并出台新的农业政策。1982~1986 年和 2004~2018 年,中共中央、国务院共发布 20 个中央一号文件,文件主题为“三农”(农业、农村、农民),且在我国的社会主义现代化时期“三农”问题依旧处于“重中之重”的地位。然而,我国的农业政策长期以来多关注农民增收和粮食安全,对于环境污染关注较少。由于我国的农业政策导向存在偏差,在快速发展的农业生产过程中所导致的环境问题日益严重(彭建强,2016)。

而对于改革开放后 40 多年我国农业政策演变,罗维燕和徐欣然(2014)指出我国农业政策历史沿革如下:进行粮食流通体制改革(1978~1984 年)、实施合同定购制度(1985~1990 年)、实施粮食保护价收购制度(1991~1993 年)、实施“米袋子”省长负责制(1994~1997 年)和深化粮食流通体制改革(1998~2008 年),并介绍了中国农业直接补贴政策出台背景和实施效果。夏兰(2012)将农业政策演变分为以家庭联产承包责任制为核心的土地政策改革(1978~1984 年)、以乡镇企业发展和农产品流通为核心的农村政策改革(1985~1997 年)、“粮食保护价”的农产品价格支持制度(1998~2001 年)、工业反哺农业阶段(农业税的减免、建设社会主义新农村、发展现代农业、促进农民增收实现城乡统筹发展)(2002 年至当前)。研究表明,农业政策对于调动农民种粮的积极性有重要作用,取消农业税能够直接提高劳动力和农业种植面积,间接影响农业产量和产值增长。孙甜甜(2015)将我国农业政策转变的阶段划分为四个阶段,即家庭联产责任承包阶段(1978~1991 年)、农业市场化阶段(1992~2000 年)、加入 WTO 调整阶段(2001~2006 年)和社会主义新农村建设阶段(2006 年至当前)。陈向科等(2017a)通过解读 1982~2017 年 19 个中央一号文件,预测未来中央一号文件中的农村生态环境相关的政策将会包含农业生态补偿机制构建、绿色农业发展、农村生态文明法制建设和农民生态环境保护意识培育等。

对于中国农业直接补贴制度,李伟毅和赵佳(2012)的研究将农业补贴政策

分为三个阶段,即间接补贴主导阶段(1978~2001年)、直接补贴探索建立阶段(2002~2004年)和直接补贴健全完善阶段(2005年至当前),并提出了中国农业直接补贴政策的演变方向。臧文如(2012)将中国粮食财政补贴政策的制度变迁分为三个阶段,即对粮食消费者补贴阶段(1978~1990年)、对粮食生产者间接补贴及粮食流通部门直接补贴阶段(1991~2003年)和对粮食生产者直接补贴阶段(2004年至当前)。

对于改革开放后40多年来中国畜牧业发展政策的历史变迁,陈海燕(2014)将畜牧业政策分为三个阶段,即改革开放初期的畜牧业飞速发展阶段(1978~1993年)、社会主义市场经济建立初期的调整优化阶段(1994~2006年)和畜牧业发展的转变提升阶段(2007年至当前)。第一阶段畜牧业政策特点包括实现畜产品的自给自足、提高畜产品质量,通过改革畜产品流通体制和放开畜产品价格来全面提升畜牧业生产水平,开始增加畜牧业的财政投入;第二阶段畜牧业政策特点包括促使畜产品由数量增长型转变为质量效益型、优化畜牧业生产结构,明显加大用于农业基础设施建设的财政投入,逐渐降低养殖户的屠宰税、牧业税等税收负担;第三阶段畜牧业政策特点包括趋向多元化,大幅度提高财政补贴总额和支持水平、政策性补贴开始转向生产环节,持续增加农业综合服务支持措施。李顺(2010)将畜牧业政策分为四个阶段,即调整改革阶段(1978~1984年)、快速发展阶段(1985~1995年)、结构调整阶段(1996~2006年)和发展方式转变阶段(2007年至当前)。

2.2 氨排放清单研究进展

由于 NH_3 对区域空气质量以及气候变化有很大的影响,从20世纪的70年代就有大量的研究对大气中 NH_3 的排放进行估算,包括全球尺度(Bouwman et al., 1997; Clarisse et al., 2009; Meng et al., 2017)以及一些区域尺度(王琛等, 2018; Huo et al., 2015; Zhang et al., 2010; Zheng et al., 2012; 冯小琼等, 2017; 沈丽等, 2018; 夏阳等, 2018)的清单,对个别发达国家、发展中国家,也建立了国家排放清单(Kang et al., 2016; Fu et al., 2015; Hellsten et al., 2008; Huang et al., 2012; Misselbrook et al., 2000)。大气中 NH_3 排放的估算方法包括排放因子法和模型法,前者在研究早期使用较多。在研究过程中,这些方法也在不断地进行改进和优化,目前对 NH_3 “自下而上”“自上而下”和“过程机理模型”排放清单的研究已经基本建立了一个系统化的研究方法和体系。

Schlesinger和Hartley(1992)从全球尺度估算了1989年大气中 NH_3 的排放量,考虑了海水蒸发和土壤挥发源,畜牧业和氮肥施用占据排放总量的54.7%;

并且验证了全球 NH_3 排放数据与 NH_4^+ 沉降数据显示出很好的一致性;另外,还说明了每年排放进大气中的 NH_3 能够中和约 32% 的当年自然和人为源所产生的 H^+ 。Dentener 和 Crutzen (1994) 通过利用对流层三维运输模型,估算了全球 NH_3 和 NH_4^+ 的分布,研究结果表明, NH_3 年排放总量为 55Tg,估算的湿沉降 NH_4^+ 和测量值以及气溶胶中测量 NH_4^+ 和模拟值都表现出很好的一致性。在以上结果基础上,Bouwman 等 (1997) 则进一步建立了一个包括主要已知排放源的全球排放清单,估算了全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NH_3 排放清单,该清单的空间分辨率能够用于各种大气传输模型,这个清单是目前全球和地区清单研究的基础 (Streets et al., 2003; Battye et al., 2003; Klimont, 2001; Olivier et al., 1998; 董文煊等, 2010)。

而在区域或者国家水平研究范围内,Buijsman 等 (1987) 对欧洲 NH_3 排放清单的研究过程中,涵盖了畜禽粪便、氮肥和一些工业活动等排放源,并首次将排放结果以空间具体信息显示出来,其中 81% 来自畜禽粪便和 17% 来自氮肥施用。Misselbrook 等 (2000) 建立了英国农业 NH_3 的排放清单,推导出基于英国本身的排放因子,通过对不同畜禽种类、农民耕作习俗和肥料施用到农田等排放进行估算;在有更多可利用的最新信息的地方更新排放因子;农业氨年排放总量为 274kt, 畜禽排放的贡献最大,其次是化肥施用。而在美国的 NH_3 排放清单中,农业源 NH_3 排放约占人为源的 81%, 其中氮肥施用占 26%, 畜禽排放占 55% (USEPA, 2005)。Zhao 和 Wang (1994) 对亚洲人为源的 NH_3 排放进行了估算,其中最大的人为排放源为畜禽养殖和化肥施用,约占 77%。Streets 等 (2003) 建立了亚洲地区 2000 年主要气溶胶气体排放清单,在 NH_3 的排放估算中采用排放因子方法,结果表明,氮肥施用排放约占总排放量的 45%, 畜禽约占 38%, 农业源为最大 NH_3 排放源。EDGAR v4.3.1 (2017) 研究认为,全球自然和人为源氨年排放量约为 53 ~ 55Tg, 2008 ~ 2010 年畜禽粪便贡献平均比例约为 32%。Paulot 等 (2014) 估算的全球无机肥料和畜禽粪便氨年排放分别为 9.4Tg 和 24Tg, 然而相对量因区域的不同而变化。

综上所述,农业源即种植业和畜禽养殖业是 NH_3 排放的主要来源。然而,随着空气质量模型对排放清单的要求提高和排放因子方法研究的逐渐深入,以及农业源 NH_3 排放过程的复杂且影响因素众多,利用单一的排放因子法来估算已然达不到要求,为了模拟农业源 NH_3 排放、迁移和转化等过程,许多国外学者便开发了多种“自下而上”或者“自上而下”的 NH_3 排放估算模型,如英国国家氨减排措施评价体系 (national ammonia reduction strategy evaluation system, NARSES) 模型 (Webb and Misselbrook, 2004; Webb et al., 2006)、区域空气污染信息和模拟模型 (regional air pollution information and simulation model, RAINS Model) (Klimont and Brink, 2004)、美国化肥施用氨排放清单模型 (ammonia emission

inventory for fertilizer application, AEIFA)(Goebes et al., 2003)、EMEP/CORINAIR 排放清单 (atmospheric emission inventory guidebook, AEIG) 模型 (EEA, 2013)、丹麦的 NH_3 排放清单体系参照惯用的模型 (Danmark ammonia emission inventory model, DanAm)(Hutchings et al., 2001)。从模型来源、活动水平、排放因子、时空分布、数据可得性及清单精确度等 6 个方面对上述模型进行对比总结, 具体如表 2-1 所示。

表 2-1 不同模型的适用性特征评估

模型	来源	尺度	活动水平	排放因子	空间分布	时间分布	数据可得性	精确度
NARSES	英国	国家	单一排放源	多因素修正	自下而上	月分布	复杂	较好
RAINS	IIASA	国家/区域	单一排放源	重要因素修正	自下而上	年分布	一般	一般
AEIFA	美国	国家	有改进	单一固定	自上而下	月分布	复杂	一般
AEIG	EEA	国家/区域	较完备	重要因素修正	自上而下、 自下而上	年分布	一般	一般
DanAm	丹麦	国家	较完备	四季修正	自上而下	季节分布	容易	较差

资料来源: 陈辽辽, 2008。

此外, 也有一些学者开发使用了一些过程机理模型, 如 DYNAMO 动态氨模型 (dynamic ammonia model)(Reidy and Menzi, 2007)、DNDC 反硝化-分解模型 (denitrification-decomposition model)(Balasubramanian et al., 2015) 等。近年来, 已经出现卫星观测大气中氨的浓度, 能够提供更多的用来了解大气中氨时空变化的数据集, 这些卫星仪器包括 infrared atmospheric sounding interferometer (IASI)(Clarisse et al., 2009; Clarisse et al., 2010; Van Damme et al., 2015a; Van Damme et al., 2014)、tropospheric emission spectrometer (TES)(Pinder et al., 2011; Shephard et al., 2011)、cross-track infrared sounder (CrIS)(Shephard and Cady-Pereira, 2015; Dammers et al., 2017) 和 atmospheric infrared sounder (AIRS)(Warner et al., 2016; Warner et al., 2017)。除此之外, 利用卫星观测数据与空气质量模型进行耦合, “自上而下”反演推算获得氨排放清单, 如 TES 卫星观测数据与 GEOS-Chem 模型耦合反演 NH_3 排放等 (Zhang et al., 2018; Zhu et al., 2013)。

在中国 NH_3 排放清单的发展进程中, 早期的研究主要是基于排放因子和活动数据。在 20 世纪 90 年代, 中国 NH_3 排放估算主要建立在单一或者国外的排放因子基础上 (孙庆瑞和王美蓉, 1997; Olivier et al., 1998; Streets et al., 2003; Xing and Zhu, 2000; Yan et al., 2003; 彭应登等, 2000; 王文兴等, 1997), 但由于区域环境条件的差异, 导致估算结果的准确性降低。随后研究中, 采用来自于国家或省级统计数据的农村人口、肥料和农作物产量数据来估算 NH_3 排放, 通