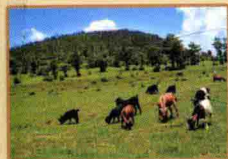


畜禽养殖与废弃物 处理过程模拟

高懋芳 编译

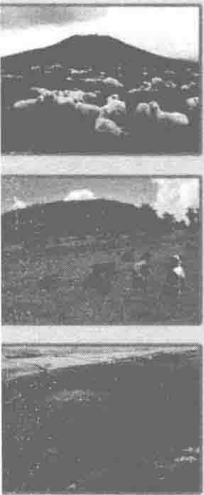


中国农业科学技术出版社

X113
9

畜禽养殖与废弃物 处理过程模拟

高懋芳 编译



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

畜禽养殖与废弃物处理过程模拟 / 高懋芳编译. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2015. 10

ISBN 978 - 7 - 5116 - 2255 - 6

I. ①畜… II. ①高… III. ①畜禽 - 饲养场废物 - 废物处理
IV. ①X713

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 213812 号

责任编辑 史咏竹

责任校对 贾海霞

出版者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010)82105169 (编辑室) (010)82109702 (发行部)
(010)82109709 (读者服务部)

传 真 (010)82106626

网 址 <http://www.castp.cn>

经销者 各地新华书店

印刷者 北京富泰印刷有限责任公司

开 本 880mm × 1 230mm 1/32

印 张 2.5

字 数 32 千字

版 次 2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

定 价 12.80 元

— 版权所有 · 翻印必究 —

前 言

人类活动引起的氮、磷流动是生物地球化学循环的重要组成部分^[1]，作物—畜牧业系统生产是人类改变全球氮、磷循环最重要的原因^[2]，是环境变化的关键驱动力^[3]。虽然全球作物生产是氮、磷循环的主要加速器，但是在过去的几个世纪里，喂养动物需要的农作物及其副产品生产快速增长，目前全球 30% 的耕地直接用来生产动物饲料^[2]。从全球范围来看，畜禽粪便中含有的总氮和总磷已经超过了全球氮、磷肥料使用量^[4]，实际上是全球畜牧业生产驱动整个农业系统的营养物质循环^[5]。

畜牧业生产在农业生态系统中占据重要位置。目前，全球 70% 的农业用地、30% 的陆地表面直接或间接地与畜牧业有关^[6]。畜牧业相关的贡献包括社会、经济、环境等多方面，畜牧业发展对贫穷地区 1.3 亿

人的生计有重要贡献^[7]；畜牧业对全球食物平衡的贡献是 17%，肉蛋奶为人类提供了 13% 的能量和 28% 的蛋白质^[8]；对于很多偏远贫穷的地区，当需要食物、学费或医疗费时，畜禽养殖代表着缓冲力，经常是可以用来换取现金的唯一形式^[9]。

然而，畜牧业生产过程中排放温室气体、同时产生大量固液态废弃物，对生态环境造成了很大的影响。为了减少贫穷、增加食物供应量、保持生态系统功能、促进环境可持续发展，需要规划好农作物与畜牧业生产的布局与增长速度^[10]。目前国际上对畜牧业的研究大多数集中在畜牧系统内部及其对环境的影响，而对社会与经济影响没有足够的重视^[11]，对于如何描述畜牧业在将来全球可持续发展目标中的角色也没有给予足够的重视^[12]。因此，亟须深化畜禽养殖与粪便处理过程的理论基础与模型模拟研究。

全书共分为五章，第一章简要介绍全球畜牧业发展趋势与面临的问题；第二章总结综述国际上公开发表的废弃物处理模型；第三章到第五章以 Manure-DNDC 为例，分别介绍废弃物产生与处理过程、废弃物生物地球化学过程，以及环境影响因子的计量学关系。

本研究是在“973”计划项目“典型流域陆地生态系统—大气碳氮气体交换关键过程、规律与调控原理(2012CB417100)”与国家自然科学基金项目“农田排水沟渠对面源氮素污染物的去除机制研究(41201508)”支持下开展的。

特别感谢美国新罕布什尔大学李长生教授，他几十年如一日，从最基础的生物地球化学原理出发，从第一行模型代码开始，像培养一个孩子一样让 DNDC 模型慢慢长大，并走向全球。当人类意识到畜禽养殖过程营养物质循环的重要性时，他又不畏艰难，潜心钻研，开创性地在农田碳氮水循环模型中加入了畜禽养殖与废弃物处理过程模拟，形成了 Manure - DNDC 模型。我有幸于 2014 年到新罕布什尔大学师从李长生老师从事为期一年的博士后研究，主攻畜禽养殖与废弃物处理部分模拟原理与验证。在此期间，李老师严谨的科研态度、无私的奉献精神、儒雅的学者风范、谦逊的作人风格深深的打动了我。先生虽然年逾七旬，但仍然每天按时来到办公室，不管是中国的新年，还是暴雪刚刚过去，你总能看到他的身影。他的电脑屏幕对着楼道窗户，每次经过他的门前，总能看到他在

忙碌地工作，不是忙着帮学生改论文，就是对着编译器修改调试模型。虽然先生平时很忙，可总是告诉我们，有问题随时敲门，当我们有疑问时，先生总是不厌其烦地帮我们解答。然而，就在本书即将付梓之际，惊闻先生于美国东部时间 2015 年 10 月 18 日晚 7 点 39 分在美国麻省波士顿过世，一代大师骤然陨落，令学生们万分悲痛，谨以此书献给在国际生物地球化学领域做出突出贡献的恩师李长生老师。先生之风，山高水长。

由于畜禽养殖与废弃物处理过程非常复杂，影响因素繁多，模型方法研究尚处于初级阶段，因此，本书在内容的系统性、完整性、代表性等方面可能不甚完善，望借此抛砖引玉，真诚地希望能与广大学者、专家、基层工作人员在此领域开展交流与合作，同时对本书的缺点与不足提出宝贵意见。

高懋芳

2015 年 10 月于北京

目 录

第一章 畜牧业发展趋势与面临的问题	(1)
一、全球畜牧业发展非常迅速，中国举足轻重	(1)
二、畜禽养殖废弃物排放量大，环境污染风险高	(4)
第二章 废弃物产生与处理模型	(7)
一、国际上公开发表的废弃物处理模型	(8)
二、Manure-DNDC 模型框架	(10)
第三章 废弃物产生与处理过程	(13)
一、废弃物生命周期分析	(13)
二、动物废弃物产生	(14)
三、圈舍设施中的废弃物	(15)

四、废弃物储存/管理	(16)
五、废弃物施入农田	(20)
第四章 废弃物生物地球化学过程	(23)
一、分 解	(23)
二、水 解	(29)
三、氨挥发	(31)
四、硝化作用	(34)
五、反硝化作用	(37)
六、发 酵	(43)
七、动物肠道气体排放	(47)
第五章 环境影响因子及计量学关系	(49)
一、温 度	(50)
二、湿 度	(55)
三、Eh 值	(58)
四、pH 值	(59)
五、营养物质浓度	(60)
参考文献	(62)

第一章 畜牧业发展趋势与 面临的问题

一、全球畜牧业发展非常迅速，中国举足轻重

过去的 50 年里，随着全球经济的发展，人类对肉类产品的需求量持续增加，畜禽养殖业快速增长。联合国粮农组织（FAO）在全球农业发展预测报告中称：“畜牧业是全球农业增长的主要因素，人类食物消费模式由粮食向动物产品的转换推动了全球食物经济的增长，也有人用‘畜禽革命’来形容这一发展趋势”^[13]。到 2050 年，全球畜牧业发展速度将是农

业所有其他领域的两倍，其中大部分增长发生在发展中国家^[6]。

2013 年，全球畜禽存栏量是 1961 年的 4.6 倍，其中禽类养殖量增长最快，年平均增长率达 9%（图 1）。中国的畜禽养殖在全球占据非常重要的地位，2013 年中国的猪、禽类、大牲畜存栏量分别占全球的 49%、28%、8%，肉类产量连续 22 年居世界第一。中国的畜禽存栏量变化趋势与全球基本一致，快速增长的特征更为明显（图 2），尤其是猪与禽类的饲养量，其中家禽年末存栏量由 1961 年的 6.6 亿只增加到 2013 年的 66.3 亿只^[14]。畜牧业的快速发展将会带来两个很大的不确定性，一是畜牧业系统如何发展来满足快速增长的畜牧业产品需求，二是这些变化会对社会和环境造成什么影响^[11]。

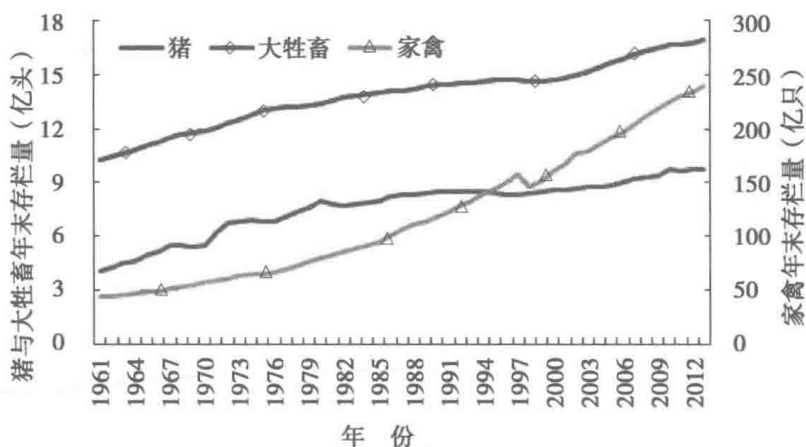


图1 全球畜禽年末存栏量

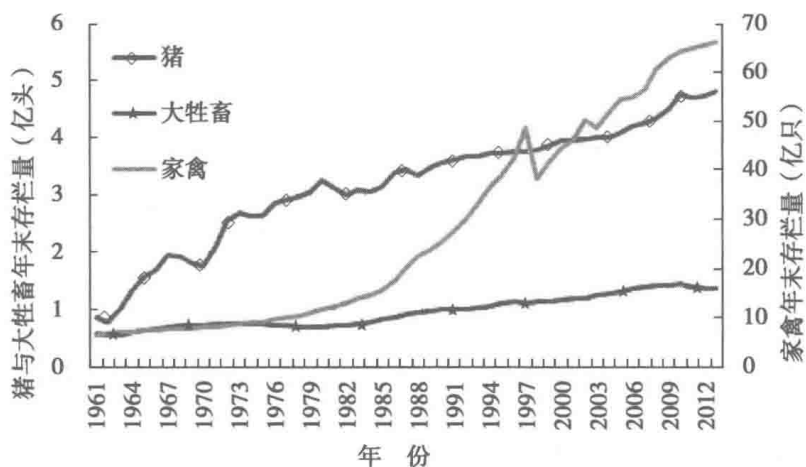


图2 中国畜禽年末存栏量

二、畜禽养殖废弃物排放量大，环境污染风险高

畜牧业快速发展将会引起温室气体排放、土地退化、水体污染等，成为环境问题的 3 个关键来源之一^[15]。20 世纪初期，营养物质收支基本平衡或者盈余量很小；1900—1950 年，全球土壤氮盈余量几乎翻倍，达到 3 600 万吨每年；1950—2000 年，全球氮盈余增长到 1.38 亿吨；预计到 2050 年，这一数值将增长为 1.7 亿吨^[2]。1996 年，全球畜禽排出的粪便中含有 9 400 万吨氮、2 100 万吨磷，其中牛贡献了约 60%，排出的粪便中，作为有机肥施用的有 3 400 万吨氮、880 万吨磷，有机肥氮、磷分别占土壤肥料总投入的 14%、25%^[16]。

畜牧业排放的全球 18% 的温室气体，比交通运输业还要高^[17]；排放的 N_2O 占人类活动排放的 68%，

其中大部分来源于粪便；氨排放占人为排放的 64%，是造成酸雨和大气污染的重要原因^[15]；甲烷排放占全球的 35% ~ 40%^[6]。由于全球人类饮食结构中动物蛋白所占比例增加，粪便管理将是减少人为 N_2O 排放源的重要组成部分^[18]。我国畜禽年平均排放甲烷总量 1 002.7 万吨，氧化亚氮总量 57.7 万吨^[19]。污染问题并没有因为规模化养殖的发展而减轻，近些年来，工厂化畜牧业生产的增速是传统农牧混合生产方式的两倍，联合国报告指出，人类对畜牧业发展的这一重要趋势和随之带来的环境问题没有给予足够的重视^[6]。

中国畜禽粪便产生量 1980 年超过了 14 亿吨^[20]，2010 年为 19 亿吨，形成污染的畜禽粪便量为 2.27 亿吨^[21]，全国单位面积农地氮、磷平均负荷为 43.73 千克/公顷、9.16 千克/公顷，北京等 6 省市农地氮磷负荷超标^[22]。第一次全国污染源普查公报显示，2007 年畜禽养殖业总氮排放占农业源的 38%，化学

需氧排放量占总排放量的 41.9%^[23]。到 2010 年，畜禽养殖业的化学需氧量、氨氮排放量分别达到 1 148 万吨、65 万吨，占全国排放总量的比例分别为 45%、25%，占农业源的比例分别为 95%、79%（全国畜禽养殖污染防治“十二五”规划），畜禽养殖业已成为我国农业污染源之首^[24]，并威胁到农业可持续发展^[21]。

第二章 废弃物产生与处理模型

在过去的几十年里，主要是通过现场观测来定量化描述养殖场温室气体排放与氨挥发，实地观测为进一步研究打下了很好的基础，但是由于成本较高，并没有大规模展开。于是，在很长一段时间内，都是用排放系数法来估算畜禽养殖过程中产生的废弃物。然而，排放系数法无法定量评价不同管理措施条件下畜禽圈舍、粪便储存，以及有机肥施用到农田过程中的氮素流失。畜禽养殖系统氮素迁移转化以及与农田的相互关系非常复杂，废弃物排放的数量与质量变化幅度也很大，影响这一过程的环境因素繁多，机理模型

模拟是主要的研究方法。

一、国际上公开发表的废弃物处理模型

目前国际上可以同时模拟农田与畜禽养殖系统氮素迁移转化的模型主要有 Manure-DNDC、IFSM、LIVSIM、DairyMod、CORPEN, 各模型的特点如表 1 所示。Manure-DNDC 模型可以模拟农场动物生产系统、粪便等废弃物的处理过程, 以及畜禽粪便施入农田后的氮素循环与流失, 可以通过建立地理信息系统数据库进行区域尺度模拟^[25-28]。IFSM 模型主要用于模拟美国奶牛场温室气体排放、氨挥发、氮淋溶等^[29]。LIVSIM 和 DairyMod 模型主要用来模拟奶牛场氮素流失过程与流失风险, CORPEN 模型可以评价养猪场氮流失。国内基于模型的农牧业生产系统氮素流失模拟研究相对较少, 大多基于养分平衡原理进行评价^[30]。