农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

养殖业污染防控技术研究态势的文献计量分析

李红娜，姜凯阳，徐海圣，常志州，吴华山，朱昌雄

引用本文:
李红娜, 姜凯阳, 徐海圣, 等. 养殖业污染防控技术研究态势的文献计量分析[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1314-1325.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1378

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于文献计量的小麦玉米重金属污染农田修复治理技术及效果分析
王娟, 苏德纯
农业环境科学学报. 2021, 40(3): 493-500 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0669

兽用抗生素研究的文献计量学分析
李红娜, 阿旺次仁, 李斌绪, 叶婧, 朱昌雄
农业环境科学学报. 2017, 36(11): 2297-2306 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0659

干热河谷农业面源污染及其防治
杨辰, 苏本营, 方广玲, 香宝
农业环境科学学报. 2016, 35(10): 1848-1856 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0323

太湖地区农业源对水体氮污染的贡献--以宜溧河流域为例
罗永霞, 高波, 颜晓元, 姜小三, 逄超普
农业环境科学学报. 2015(12): 2318-2326 https://doi.org/10.11654/jaes.2015.12.010

猪粪-秸秆还田对土壤、作物重金属铜锌积累及环境容量影响研究
王琼瑶, 李森, 周玲, 王贵胤, 张楚儿, 张世熔
农业环境科学学报. 2016, 35(9): 1764-1772 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0336

关注微信公众号，获得更多资讯信息

李红娜, 姜凯阳, 徐海圣, 等. 养殖业污染防控技术研究态势的文献计量分析[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1314-1325.
LI Hong-na, JIANG Kai-yang, XU Hai-sheng, et al. Bibliometric analysis of pollution prevention and control technologies for animal breeding industries[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1314-1325.

开放科学OSID

养殖业污染防控技术研究态势的文献计量分析

李红娜[1], 姜凯阳[1], 徐海圣[2], 常志州[3], 吴华山[3*], 朱昌雄[1*]

(1.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2.浙江大学动物科学学院, 杭州 310058; 3.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014)

摘　要:利用文献计量学的方法,对国内外近20 a养殖业污染防治技术领域相关文献进行了收集与统计分析,从源头减量、过程控制以及末端资源化等角度对不同养殖类型的研究热点及发展方向进行预测,以推动我国农业面源污染治理技术体系的完善。研究结果表明:在养殖业污染防治技术领域,国内研究集中在生猪污染领域,而国外以肉(奶)牛污染防治研究为主,国内外文献对水产养殖污染的关注度均不足;在畜禽养殖污染控制方面,废弃物资源化利用是国内外共同关注的重点,其中国内对堆肥、厌氧发酵等方向的研究热度较高,研究关注点多与土壤污染相关,而国外研究的关注点更为全面,包括废弃物的资源化能源化利用、养殖污水处理以及温室气体等。未来我国可以进一步拓展对废弃物多元化处理的技术模式,关注清洁能源的开发与利用,同时进一步深入研究养殖业造成的水污染及大气污染的致污机理及控制技术,以期完善养殖业污染防治技术体系,全面提高养殖业污染综合防控效果。

关键词:养殖业;污染防治;文献计量;治理技术体系;研究热点
中图分类号:G353.1;X714　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1672-2043(2021)06-1314-12　　doi:10.11654/jaes.2020-1378

Bibliometric analysis of pollution prevention and control technologies for animal breeding industries

LI Hong-na[1], JIANG Kai-yang[1], XU Hai-sheng[2], CHANG Zhi-zhou[3], WU Hua-shan[3*], ZHU Chang-xiong[1*]

(1. Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. College of Animal Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Nanjing 210014, China)

Abstract: The relevant literature published over the last 20 years in the field of pollution prevention and control technologies for breeding industries was analyzed using bibliometric methods. The research hotspots and development directions in the field were predicted by analyzing the relevant technical fields from the perspective of source reduction, process control, and waste recycling. The data from this study will help improve the agricultural non-point source pollution prevention and control system in China. The results showed that, in the field of breeding industries, domestic research focused on swine pollution, while foreign research focused on beef cattle(cow). There was insufficient attention focused on aquaculture pollution, both locally and internationally. In the fields of livestock and poultry pollution control, the recycling of animal manure was the key research topic. Research on composting and anaerobic fermentation was found to be very popular in China, and these investigations were mainly related to soil pollution. The research focus in other countries was more comprehensive and included waste recycling, energy utilization, breeding wastewater treatment, and greenhouse gases. In the next few years, China can further expand technologies to diversify animal manure treatment, based on the utilization of waste resources, paying

收稿日期:2020-11-29　　**录用日期:**2021-02-01
作者简介:李红娜(1986—),女,山西运城人,研究员,从事养殖污染环境归趋及控制机理研究。E-mail:lihongna828@163.com
***通信作者:**吴华山　E-mail:wuhuashan@163.com; 朱昌雄　E-mail:zhuchangxiong@caas.cn
基金项目:国家水体污染控制治理科技重大专项(2017ZX07401002)
Project supported: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China(2017ZX07401002)

special attention to the development and utilization of clean energy. Moreover, theoretical and technological research on water pollution and air pollution due to breeding industries needs to be further expanded. This will improve the pollution-control technologies used by breeding industries and thus, enhance pollution prevention and control.

Keywords: animal breeding; pollution prevention and control; bibliometric analysis; pollution-control technology; research hotspots

在过去50 a中,随着养殖业规模化迅速发展,我国畜牧业总产值占比提高了13.3%[1],至2018年已达到农业总产值的25.27%;水产养殖产量突破5 000万t,占全世界水产养殖产量的67%,占全国水产品总产量的75%[2],目前畜牧业与渔业总产值稳定在3万亿元以上[2-3]。规模养殖业的快速发展也带来严重的环境问题,畜禽养殖每年大约产生38亿t的废弃物,水产养殖向水体中输入的氮、磷也愈加严重,不仅造成了水土环境污染的日益严重,也极大制约了农业的绿色可持续发展。

根据《第二次全国污染源普查公报》[4],来自畜禽养殖业的COD、氨氮、总氮以及总磷等水污染物排放量分别为1 000.53万、11.09万、59.63万t和11.97万t,来自水产养殖业的分别为66.60万、2.23万、9.91万t和1.61万t。可见,粪污处理依然存在巨大压力。目前肥料化还田被认为是处理粪污的最佳方式,但粪肥的施用若超过了土地承载力,就会出现养分降解不完全而发生厌氧腐解的现象,从而引起土壤组成和性质的改变,导致农作物减产甚至受到毒害[5-6]。畜禽饲料重金属的违规添加及饮水污染,导致畜禽体内残留金属元素随粪便排出[7-8],经堆肥资源化还田后又会对土壤造成污染[9]。此外,我国畜禽粪便的温室气体排放量占农业源温室排放总量的比例逐步提高,2014年占比达到17.7%[10-11]。而畜禽舍内产生的含硫化合物、氨和挥发性胺类等恶臭气体不仅危害牲畜和人体健康,也对周边空气、水体、土壤等造成污染[12-14]。由此可见,养殖业污染控制与治理技术的研发无论在水污染、土壤污染还是大气污染领域都具有重要意义。

从20世纪80年代开始,国外学者就开始针对性地研究养殖业污染控制与治理相关技术,并提出了相应的农业面源污染控制政策[15-17]。国内自“十五”后才开始重视养殖业的污染,此前国内畜禽场的宏观环境管理水平普遍偏低,有90%的规模化养殖场未进行环境影响评价,60%的养殖场未掌握基础的干湿分离技术[18]。随着国家政策的大力支持,众多针对养殖污染控制治理的专项研究陆续启动,在技术研发和工程示范方面取得了一定的成效。但与国外相比,国内污染治理技术体系尚不完善,且缺乏对已有污染治理技术的系统梳理和研究,缺少对技术发展方向与趋势的认识,难以对今后的污染治理工作起到指导作用。

文献计量学是采用数学、统计学等计量研究方法,研究文献情报的分布结构、数量关系、变化规律和定量管理,进而探讨科学技术的某些结构、特征和规律的一门学科。目前已有学者利用文献计量学的方法对农业面源污染及种植业污染防控技术的研究态势进行了分析,对领域内的相关研究进行系统整理并对技术发展方向进行预测[19-20]。基于此,本研究旨在利用文献计量学的分析方法,对近20 a来国内外在生猪、肉(奶)牛、家禽以及水产养殖污染控制4个领域所开展的污染控制治理研究相关文献进行数据梳理,从污染源头减量、过程控制以及末端资源化利用等多角度对国内外的论文进行分析,理清国内外在该领域的研究现状,分析研究热点及发展趋势,试图系统梳理养殖污染控制治理技术体系,为进一步推动我国养殖业污染治理工作提供参考和依据。

1 数据来源及分析方法

1.1 数据来源

本研究针对养殖业污染控制及治理技术,利用文献计量学方法对相关论文进行检索。文中的中文文献数据来源于中国科学引文数据库(Chinese Science Citation Database,CSCD);英文文献数据来源于Web of Science核心合集的Science Citation Index Expanded(SCI-E)数据库。检索时间跨度为1999—2019年,其中2019年仅检索2019年4月前的文献数据。

1.2 文献检索式及检索词

本文对养殖业污染防治技术的相关文献分析包括生猪、肉(奶)牛、家禽以及水产养殖4种养殖类型。参照农业农村部《畜禽粪污资源化利用行动方案》及现阶段关于粪污处理技术的常规划分,基于养殖污染迁移转化的路径,将畜禽养殖污染控制及治理技术的检索式分为污染源头减量、过程控制以及末端利用(资源化利用)3个部分,水产养殖污染控制检索式分为源头减排技术、达标排放/回用技术两类。对检索得到的论文,开展人工专业筛选,剔除非领域内文献或分类不恰当的文献,之后再进行相关统计。

1.2.1 生猪污染防治技术检索式与检索词

源头减量技术：

TS=(猪 and(粪尿分离 or 固液分离 or 干湿分离 or 三分离 or 雨污分离 or 集污池 or 沉淀池 or 发酵床 or 垫料 or 饲料优化 or 生态饲料 or 饮水器 or 饮水装置 or 干清粪 or 清粪 or 猪舍改造 or 猪圈改造 or 养殖舍改造 or 圈舍设计 or 猪舍升级 or 漏缝地板 or 猪舍排污 or 粪污收集 or 粪便收集 or 猪粪收集 or 生态饲料 or 生态养殖 or 生态饲养 or 生态养猪) or(猪舍 or 猪圈 or 猪 and(养殖 or 饲养 or 养猪) and 环境) and (节水 or 耗水))

过程控制技术：

TS=(猪 and(粪 or 尿 or 排泄物 or 废弃物 or 污水 or 废水) and(水处理 or 污水治理 or 污染负荷 or 无害化 or 净化 or 减排 or 砷 or 铜 or 抗生素 or 序批式反应器 or 钝化 or 脱氮 or 除磷 or 活性污泥 or 生物膜 or 稳定塘 or 生态沟 or 生态湿地 or 生态净化 or 好氧 or 厌氧 or 发酵 or 微生物菌剂 or 重金属 or 激素)) or TS=(猪 and(粪 or 尿 or 排泄物 or 废弃物 or 污水 or 废水)) and TS=("SBR" or "Cu")

末端利用技术：

TS=(猪 and(资源化 or 种养结合 or 循化利用 or 培肥 or 肥料化 or 堆肥 or 堆沤 or 超高温堆肥 or 沼液 or 沼气 or 发酵菌 or 农田利用 or 还田 or 有机肥) or 猪 and(粪 or 排泄物 or 废弃物) and(资源综合利用 or 循环综合利用 or 资源利用 or 循环利用 or 复用 or 回用))

1.2.2 家禽污染防治技术检索式与检索词

源头减量技术：

TS=((禽 or 鸡 or 鸭 or 鹅 or 鸽 or 鹌鹑) and(高架 or 高床 or 高棚 or 网床 or 网上 near/5 养 or 旱养 or 发酵床 or 饲料 near 优化 or 生态饲料 or 生态饲养 or 生态养殖 or 饮水器 or 饮水装置 or(禽粪 or 鸡粪 or 鸭粪 or 鹅粪 or 鸽粪 or 鹌鹑粪) near 收集)) not TI=(猪 or 牛 or 羊)

过程控制技术：

TS=((禽 or 鸡 or 鸭 or 鹅 or 鸽 or 鹌鹑) and(粪 or 尿液 or 排泄物 or 废弃物 or 污水 or 废水) and(水处理 or 污水治理 or 污染负荷 or 无害化 or 净化 or 减排 or 重金属 or 砷 or 抗生素 or 激素 or 钝化 or 养殖池塘 or 生态沟 or 沉淀池 or 污泥床 or 人工湿地 or 生态湿地 or 生物净化 or 好氧 or 厌氧 or 发酵)) not TI=(猪 or 牛 or 羊)

末端利用技术：

TS=((禽 or 鸡 or 鸭 or 鹅 or 鸽 or 鹌鹑) and(资源化 or 种养结合 or 循环利用 or(粪 or 尿 or 排泄物 or 废弃物) and(烘干 or 干燥) or 培肥 or 堆肥 or 堆沤 or 肥料化 or 超高温堆肥 or 发酵菌 or 农田利用 or 还田 or 有机肥) or(禽 or 鸡 or 鸭 or 鹅 or 鸽 or 鹌鹑) and(粪 or 排泄物 or 废弃物) and(资源综合利用 or 循环综合利用 or 资源利用 or 循环利用 or 复用 or 回用)) not TI=(猪 or 牛 or 羊)

1.2.3 肉(奶)牛污染防治技术检索式与检索词

源头减量技术：

TS=(牛 and(粪尿分离 or 固液分离 or 干湿分离 or 三分离 or 雨污分离 or 集污池 or 发酵床 or 垫料 or 饲料 near 优化 or 生态 near 饲料 or 饮水器 or 饮水装置 or 干清粪 or 清粪 or 圈舍改造 or 养殖舍改造 or 畜舍改造 or 圈舍设计 or 圈舍升级 or 牛舍改造 or 牛舍设计 or 牛舍升级 or 粪污收集 or 粪便收集 or 牛粪收集))

过程控制技术：

(TS=(牛 and(牛粪 or 粪污 or 粪便 or 粪尿 or 尿液 or 牛尿 or 排泄物 or 废弃物 or 污水 or 废水) and(水处理 or 污水治理 or 粪污处理 or 污染负荷 or 无害化 or 净化 or 减排 or 砷 or 抗生素 or 钝化 or 脱氮 or 除磷 or 活性污泥 or 沉淀池 or 生物膜 or 稳定塘 or 生态沟 or 生态湿地 or 生态净化 or 生物滤池 or 好氧 or 厌氧 or 发酵 or 微生物菌剂 or 重金属 or 激素)) or TS=(牛 and(粪 or 尿 or 排泄物 or 废弃物 or 污水 or 废水)) and TS="SBR") not TS=(牛顿 or 牛津)

末端利用技术：

TS=(牛 and(资源化 or 种养结合 or 循化利用 or 培肥 or 肥料化 or 堆肥 or 堆沤 or 超高温堆肥 or 沼液 or 沼气 or 发酵菌 or 农田利用 or 还田 or 农田灌溉 or 有机肥) or 牛 and(粪 or 排泄物 or 废弃物) and (资源综合利用 or 循环综合利用 or 资源利用 or 循环利用 or 复用 or 回用))

1.2.4 水产(淡水)养殖污染防治技术检索式与检索词

源头减排技术：

TS=(((水产 or 鱼 or 虾 or 蟹 or 渔业 and 养殖) and(环保型饲料 or 环保饲料 or 环保型水产饲料 or 精准投喂 or 底排污 or 生态浮床 or 微生态制剂 or 生物膜 or 生物絮团 or 生物絮凝 or 鱼菜共生 or 多营养级 or 多营养层次 or 综合养殖 or 复合养殖 or 生态养殖 or 循环水养殖 or 循环流水养殖 or 集装箱养殖 or 耦合养殖)) not 海 or(水产 or 鱼 or 虾 or 蟹 or 渔业

and 养殖) and(稻渔综合种养 or 稻田综合种养 or 水稻综合种养)) or TS=((鳖 or 甲鱼 or 蛙 or 鳅 or 鳝 or (淡水 or 池塘) and 养殖) and(环保型饲料 or 环保饲料 or 环保型水产饲料 or 精准投喂 or 底排污 or 生态浮床 or 微生态制剂 or 生物膜 or 生物絮团 or 生物絮凝 or 鱼菜共生 or 多营养级 or 多营养层次 or 综合养殖 or 复合养殖 or 生态养殖 or 循环水养殖 or 循环流水养殖 or 集装箱养殖 or 稻渔综合种养 or 稻田综合种养 or 水稻综合种养 or 耦合养殖) or(稻鱼 or 稻蟹 or 稻虾 or 稻蛙 or 稻鳅) and(共生 or 连作 or 共作 or 轮作 or 综合种养))

达标排放/回用技术:

TS=((水产 or 鱼 or 虾 or 蟹 or 鳖 or 蛙 or 鳅 or 鳝 or(渔业 or 淡水 or 池塘) and 养殖) and((养殖 and (水处理 or 污水治理 or 水 and(净化 or 原位修复 or 资源化 or 脱氮 or 除磷))) or 稳定塘 or 生态沟 or 人工湿地 or 生态湿地 or 生态滤床 or 沉淀池 or 曝气滤池 or 生物滤池 or(底栖动物 or 螺 or 蚌) and 净化 or 过滤坝))

1.3 信息分析方法

1.3.1 文献计量学方法

(1)文献调研法:在广泛收集、深入阅读并分析相关文献的基础上,把握当前研究的主题、理论和方法,从CSCD、SCI-E数据库中查阅以"生猪污染""家禽污染""肉(奶)牛污染""水产污染"为主题的研究论文。

(2)社会网络分析法:社会网络分析法主要是运用网络具有相关性的联系分析网络的属性结构,研究数据之间的关系,从而反映和测量个人、团体、组织以及其他信息或知识处理实体之间的关系和交互行为[21],其特征之一是对分析进行可视化的补充。

(3)聚类分析法:聚类分析是物以类聚的一种统计分析方法,根据一批样品的多个观测指标,具体找出一些能够度量样品或指标之间相似程度的统计量,以这些统计量为划分类型的依据,将相似程度较大的样品(指标)分别进行聚合,直到把所有的样品(指标)聚合完毕[22]。

1.3.2 分析可视化方法

本文利用社会网络分析工具Gephi 0.9.2开展聚类分析,采用高频关键词通过共现分析聚类的方法描述领域研究热点情况。将1999—2019年划分为1999—2003、2004—2008、2009—2013、2014至今4个年度发展阶段,通过各技术应用方向文献包含的高频关键词出现的频次,分析各个阶段研究关注度及其演变过程。

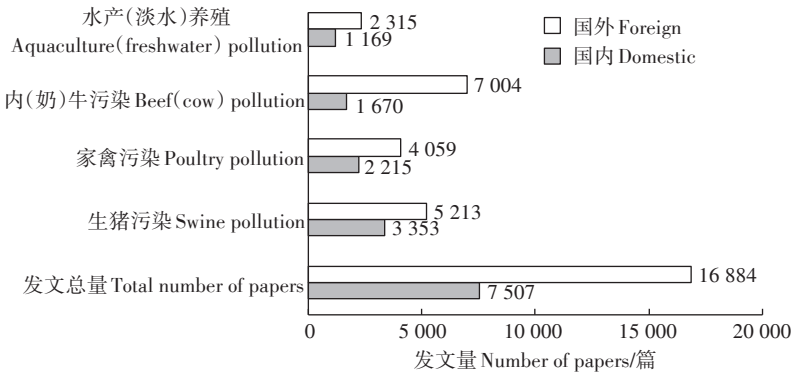
2 检索数据分析

2.1 论文数量分析

2.1.1 国内外论文分布情况

国内文献包括CSCD文献和第一单位为中国机构的SCI-E文献,国外文献指SCI-E文献中第一单位为非中国机构的文献。由图1可知,养殖业污染控制与治理技术国内外近20 a共发表文献24 391篇,其中国内文献共有7 507篇,国外文献共有16 884篇,国内发文量占发文总量的30.78%。

从4种养殖类型看,生猪污染防治技术国内发文量最高,为3 353篇,占该类型国内文献总量的44.66%;而肉(奶)牛污染防治技术国外发文量最高,为7 004篇,占该类型国外文献总量的41.48%;水产



由于各类型文献内容有重叠,故检索得到的各类型发文量之和大于发文总量

The sum of four types of literatures is greater than the total number published due to the overlapping of the contents of various types of literatures

图1 养殖业污染控制与治理技术近20 a国内外文献分布情况

Figure 1 Distribution of domestic and foreign literatures on pollution control and control technology in aquaculture industry in recent 20 years

(淡水)养殖污染防治技术国内、国外文献量均为4种类型中最少,国内外文献量占比均不足1/5。对比4种养殖类型国内外发文数量,生猪、家禽、水产(淡水)3种养殖污染控制技术的国外文献量为国内文献量的1.5~2倍,差异相对较小;而肉(奶)牛污染防治技术则是国外文献量远高于国内,国外文献量为国内文献量的4.19倍。

2.1.2 各类型发文数量及趋势

国外在20世纪70—80年代便已开始通过制定法律法规解决养殖污染的问题,相关领域的研究起步较早,技术体系也更加完善[23-24]。在1999年,国外总文献量已超过300篇,在2002年以前,文献量都呈缓慢增长趋势,于2004年达到第一个发文峰值;之后随着各国对养殖业污染关注度的逐渐增加,发文量也在加快增长,其中关于肉(奶)牛发文量最多,发文增速也较快,水产(淡水)的增速排名第二,而生猪污染防治技术、家禽污染防治技术的发文增速相对较慢,至2016年总发文量达到高峰,超过1 500篇;但2016年后,关于4种养殖类型的文献量整体下降,可能是受全球经济危机及禽流感疫情影响,养殖行业市场低迷,使养殖污染领域关注度降低;2017年后,各养殖类型发文量又有所回升(图2)。

国内发文在2001年之前增长较为缓慢;随着"十五"计划国家提出控制规模化养殖业污染的政策,各养殖类型发文量都有显著提高,但总体发文量远低于国外,其主要原因是国内在该领域研究刚起步,国家缺乏相应的政策支持和技术方向指导;2006年国家在《全国生态保护"十一五"规划》中明确我国需进一步制定、完善畜禽养殖和水产养殖环境保护相关标准和技术规范,加快推进规模化畜禽养殖场的技术改进与污染治理,随后,生态环境部启动集约化畜禽养殖污染防治专项资金申报;随着国家政策的倾斜和众多专项的启动,2007年后该领域文献量增长逐渐加快,其中针对生猪的发文量增速最快,并于2014年达到一个高峰,之后随着治理技术的成熟,加之养殖行业低迷,各领域发文量有所下降,尤其是关于水产和生猪的发文量下降显著,这一点与国际趋势基本相同;国家在"十二五"期间又先后出台了《大气污染防治行动计划》和《水污染防治行动计划》,社会对环境污染问题的关注度也在持续上升,故2016年之后,发文量又呈逐渐增多的趋势,其中针对生猪发文量的增长最为明显,与其他3种养殖类型发文量之间的差距也呈逐渐增大的趋势。

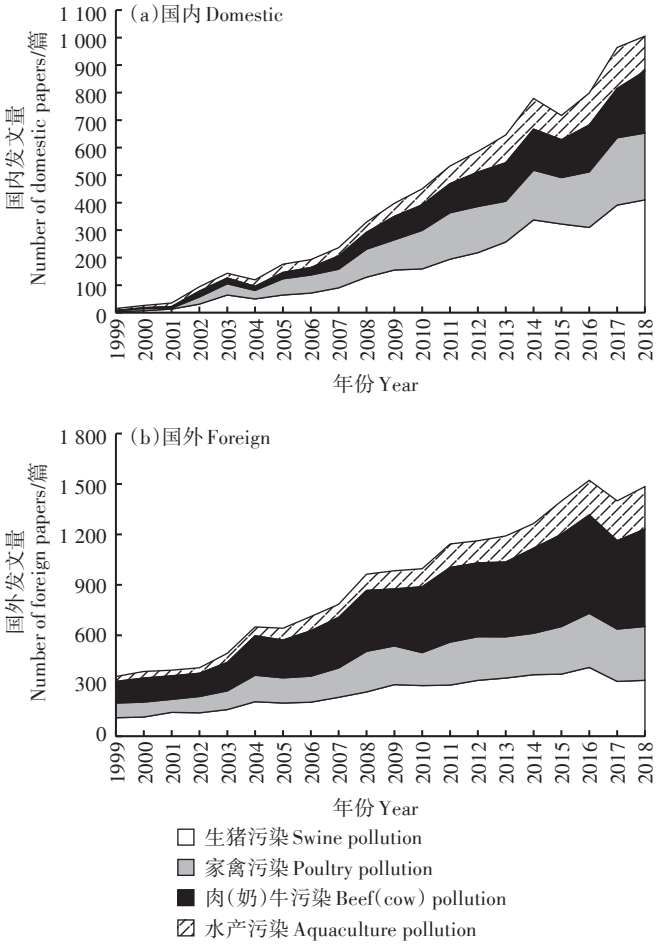


图2 近20 a各养殖类型的发文数量

Figure 2 The trend of papers published in various fields at home and abroad in the past 20 years

2.1.3 各养殖类型发文占比情况

图3是近20 a 4种养殖类型污染控制与处理技术研究的国内外文献发文占比的演变情况。在1999年,国内文献中水产(淡水)贡献最高,达46.67%,可能是由于国内在"十五"前未曾明确提出农业面源污染的问题,仅有对海洋环境及国内重点流域污染控制的相关政策;"十五"期间,国家明确提出"推广畜禽养殖业粪便综合利用和处理技术,鼓励建设养殖业和种植业紧密结合的生态工程"的政策,猪、牛、禽3个领域的发文占比显著提升,其中关于生猪的文献量在2001年后一直保持贡献度的第1位。水产(淡水)养殖污染防治技术在2001年后的发文占比呈现下降趋势,直至2007年达到相对稳定,但发文量一直处于所有养殖类型中的最末位。

国外关于4种养殖类型的发文比例整体变化较小,除了在2001年时生猪以36.13%的贡献度曾短暂反超

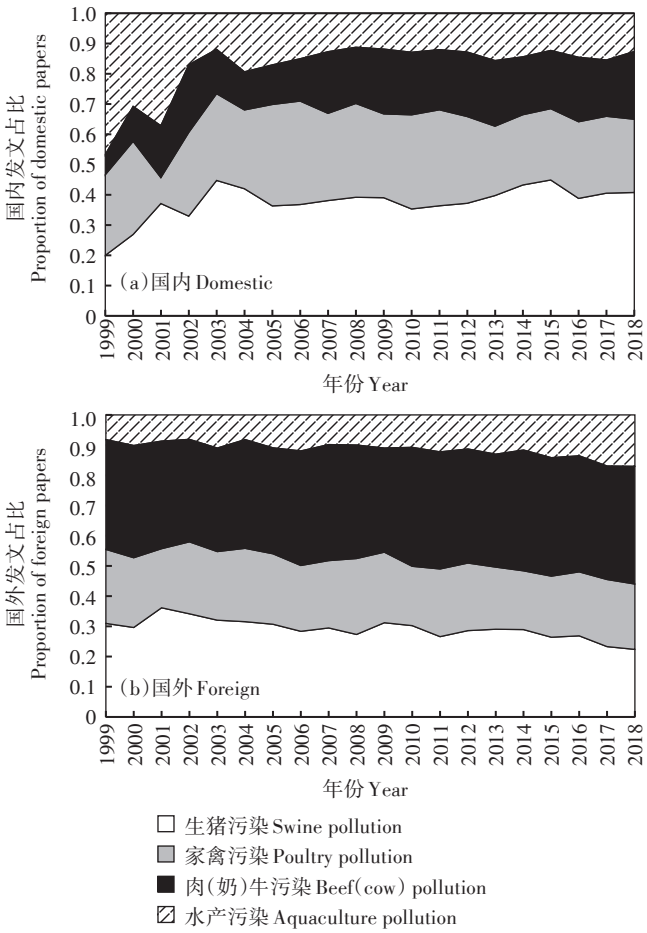


图3 近20 a各养殖类型的发文占比

Figure 3 Proportion of papers published in various fields at home and abroad in recent 20 years

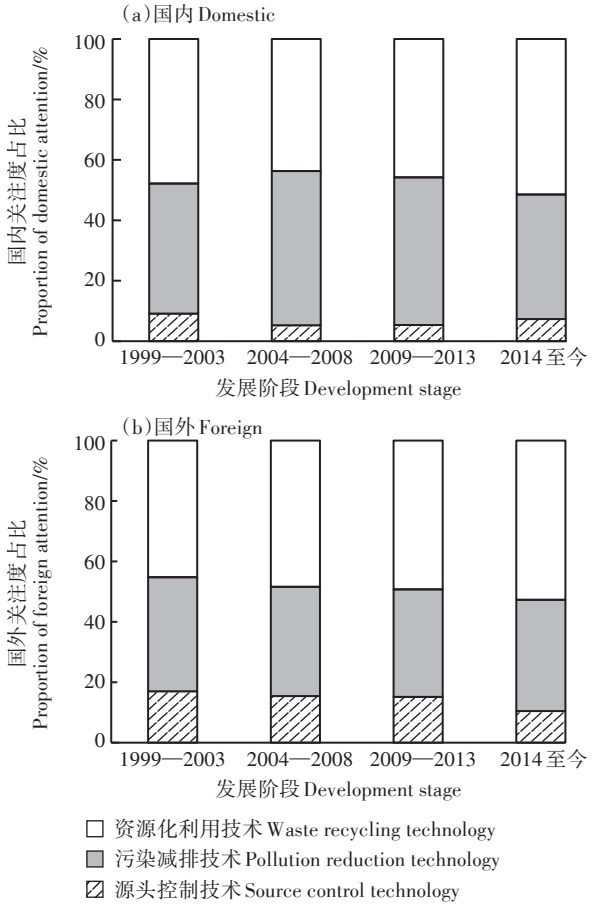


图4 生猪污染防治技术研究关注度演变

Figure 4 Evolution of research attention of pig pollution control technology at home and abroad

肉(奶)牛35.62%的贡献度外,近20 a来一直以肉(奶)牛污染防治技术贡献度最大,生猪、家禽和水产(淡水)养殖污染防治技术的顺序依此减少。从整体趋势看,近20 a生猪的发文比例在逐年缓慢降低,而水产(淡水)的发文比例呈现出逐年缓慢增加的趋势。

2.2 养殖污染防治技术发展历程分析

2.2.1 养殖污染防治技术国内外研究关注度演变

(1)生猪

图4为生猪污染防治技术国内外研究关注度演变情况。从整体看,国内外关于污染源头减量技术得到的研究关注度均为最低,国内研究的各年段占比均不足10%,国外研究的各年段占比均不足20%。过程控制技术和废弃物资源化利用技术得到的研究关注度相对较高,国内外研究的各年段占比均在50%左右。

从研究关注度演变看,国内研究的污染源头减量技术在1999—2003年得到较高的关注,之后热度有所下降,在2014年至今热度有所回升,而国际学者对废弃物资源化利用技术的研究热情逐年段增高,从1999—2003年的45.21%上升到2014至今的52.7%。

(2)家禽

图5为家禽污染防治技术国内外研究关注度演变情况。从整体看,国内外污染源头减量技术得到的研究关注度均最低,其中国内各年段占比在5%左右,而国外占比均不足25%;国内过程控制技术和废弃物资源化利用技术得到的研究关注度相对较高,各年段占比均在50%左右;国外废弃物资源化利用技术得到的研究关注度最高,各年段占比均在50%左右。

从研究关注度演变看,国内污染源头减量技术和废弃物资源化利用技术虽有升有降,但在4个年段受到的关注度整体上呈上升趋势;过程控制技术则相反,在4个年段得到的关注度整体上呈下降趋势。国外污染源头减量技术在1999—2003年得到相对较高

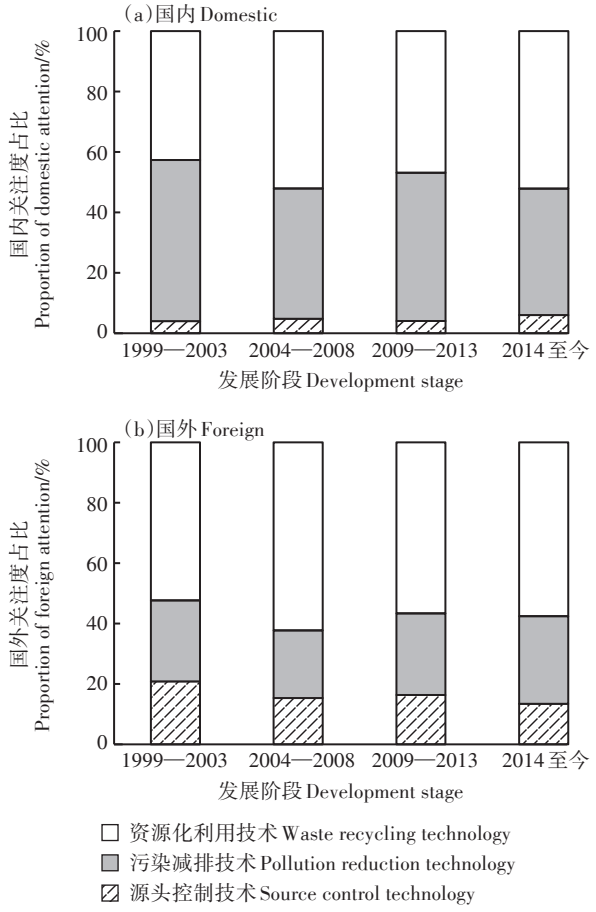


图5 家禽污染防治技术研究关注度演变

Figure 5 Evolution of research attention of poultry pollution control technology at home and abroad

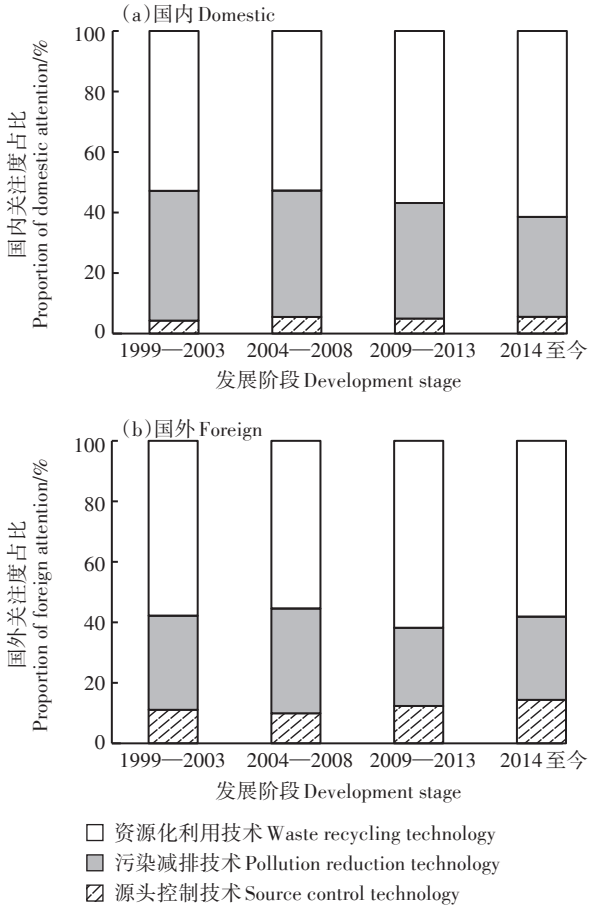


图6 肉(奶)牛污染防治技术研究关注度演变

Figure 6 Evolution of research attention of beef cattle(cow) pollution control technology at home and abroad

的关注,之后整体上呈现逐年段递减的趋势;过程控制技术在2004—2008年得到国外学者的关注度最低,之后呈逐年段递增趋势;废弃物资源化利用技术在2004—2008年得到的关注度最高,之后有所下降。

(3)肉(奶)牛

图6为肉(奶)牛污染防治技术国内外研究关注度演变情况。从整体看,污染源头控制技术的研究关注度最低,国内各年段占比均不足10%,国外各年段占比均在10%~15%之间。国内外废弃物资源化利用技术的研究关注度均为最高,各年段占比均超过50%。过程控制技术的研究关注度介于污染源头减量技术和废弃物资源化利用技术之间。

国内文献污染源头减量技术各年段研究热度较低且波动不明显;过程控制技术整体呈逐年段递减趋势,而废弃物资源化利用技术则呈现逐年段递增趋势。国外源头减量技术的研究热度整体上呈现逐年段上升的趋势;过程控制技术在2004—2008年受到国外学者的关注度最高,之后有所下降;废弃物资源化利用技术在2004—2008年受到的关注度相对较低,在2009—2013年受到的关注度最高。

(4)水产(淡水)养殖

图7为水产(淡水)养殖污染防治技术国内外研究关注度演变情况。从整体看,国内源头减量技术的研究关注度相对较低,各年段占比基本在50%以内;而国外的源头减量技术得到的研究关注度远高于达标排放/回用技术,各年段占比均超过60%。

从研究关注度演变看,国内源头减量技术在2008年之前热度较低,随后热度呈逐年段上升,2014年至今热度反超达标排放/回用技术;国外源头减量技术一直呈逐年段递增趋势,对应地,达标排放/回用技术呈逐年段递减趋势。

2.2.2 养殖污染防治技术高频关键词演变

本部分将1999年至今分为4个时间段,对每个时间段内发表的目标领域文献相应关键词进行清洗、整

理,获取每个时间段目标领域中中英文文献的高频关键词,根据关键词出现频次进行排序,选择4个时间段中出现总频次最高的6个中文关键词和6个英文关键词绘制折线图(图8和图9)。

由图8可看出,中文高频关键词中出现频次最高的分别为堆肥、猪粪、有机物料、畜禽粪便、重金属和沼液。由于国家"十五"至"十三五"期间,始终对畜禽废弃物资源化利用有较高的重视,在前6的高频关键词中,除重金属外都与废弃物的资源化利用有密切关系;其中堆肥和猪粪在4个时间段出现的频次始终保持第一和第二,尤其是堆肥获得了领域内极高的关注度,并在2009—2013年间出现频次高峰,虽然其频次近年来有所下降,但仍然显著高于其他关键词。此外,前6的高频关键词几乎全部与土壤污染及废弃物还田利用相关,也说明国内研究者在养殖业对土壤的污染以及种养结合的可持续农业方面重视程度更高。2014年后,除堆肥外其他关键词频次都呈上升趋势,重金属在2014年至今的频次提升最快,而沼液的出现频次在1999—2008年较低,但在2008年后显著提高,故重金属和沼液可能成为今后被持续关注的研究热点。

由图9可看出,英文文献高频关键词中出现频次最高的分别为沼气(Biogas)、厌氧消化(Anaerobic digestion)、粪肥(Manure)、堆肥(Compost)、猪场废水(Swine wastewater)和氨(Ammonia)。出现频次排名前4的沼气、厌氧消化、粪肥、堆肥均与废弃物的资源化利用有关,与前文中废弃物资源化利用领域关注度高度相符;其中前两名的沼气和厌氧消化在1999—2008年频次较低,但2009年后频次迅速提高,2014年后已远高于其他关键词,粪肥在2009年之前一直是出现频次最高的关键词,但近年来提升速度有所下降;此外,沼气和厌氧消化与废弃物的能源化、无害化利用关系更密切,可见近年来国外在养殖业污染领域的关注热点正在向废弃物能源化利用方向转移。在2009年以前氨的出现频次排名第二,但2009年后,其

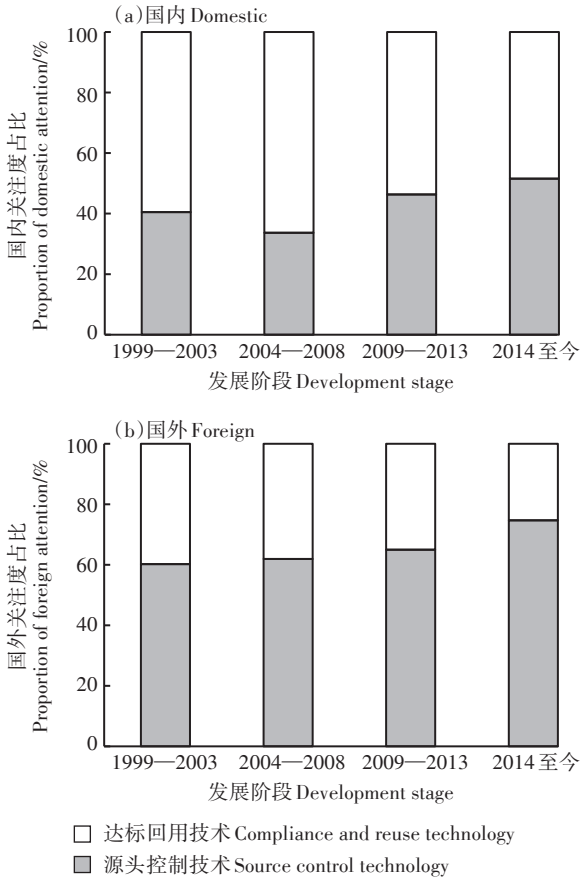


图7 水产(淡水)养殖污染防治技术研究关注度演变

Figure 7 Evolution of research attention of aquaculture (freshwater) pollution control technology at home and abroad

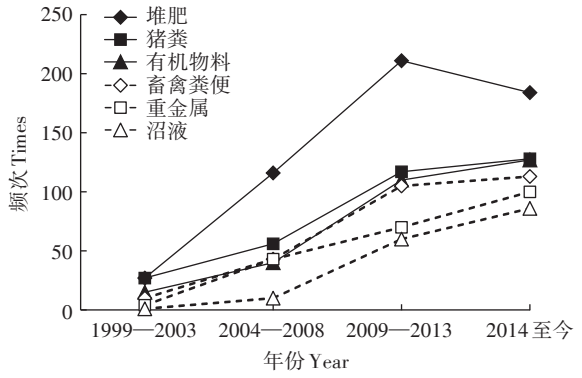


图8 养殖污染防治技术国内文献高频关键词演变

Figure 8 Evolution of Chinese high frequency keywords in aquaculture pollution control technology

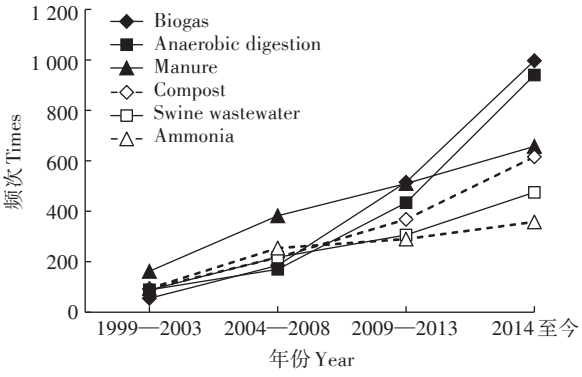


图9 养殖污染防治技术国外文献高频关键词演变

Figure 9 Evolution of English high frequency keywords in aquaculture pollution control technology

出现频次增加不明显，结合前文对关注度的分析，说明与氨相关的水产养殖领域自2009年后在国外的关注度有所下降。

2.2.3 养殖污染防治技术发展历程总结

本部分利用高频关键词通过共现分析聚类的方法描述领域研究热点，并在时间尺度上将聚类产生的热点方向加以分析，以对近20 a国内外养殖污染防治技术的发展历程进行总结。

（1）畜禽养殖污染防治技术发展历程

结合前文对发文量及高频关键词的分析以及相关文献，本文对国内外近20 a主要污染类型及核心问题进行分析，通过分析聚类探讨国内近20 a的研究热点变化。“十一五”之前国内养殖业污染的首要因素为养殖废水和氮磷污染[24-25]，国外除养殖废水、氮磷污染外还关注硝酸盐以及臭气污染[26]，“十一五”之后国内的水质污染、重金属、抗生素以及温室气体的污染问题逐渐凸显[10,27-31]，畜禽粪污资源化利用始终是近20 a来我国面临的核心问题[32]，而养殖臭气的问题为贯穿国外近20 a科学研究的主要问题[33]。

在源头减量环节，以微生物菌剂、发酵床和光合细菌为主；在过程控制领域，21世纪初期国内较为关注畜舍通风，“十一五”后关注点则集中在人工湿地以及生物修复；在废弃物资源化利用领域则始终关注堆肥和厌氧发酵。

国外在近20 a中各领域的研究热点变动较大。在源头减量领域总体对微生物的关注度始终较高，此外在“十一五”期间国外较为关注固液分离、酶活性等，“十一五”以后生物炭成为国外在该领域新的热点；在过程控制领域国外始终较为关注污水处理方面的技术，21世纪初期的人工湿地、序批式活性污泥法等技术是国外研究的热点，“十一五”到“十二五”期间研究热点转移至升流式厌氧污泥床、脱氮、反渗透等技术，近年来微生物降解成为该领域新的研究热点；在废弃物资源化利用领域，国外对有机肥、堆肥、蚯蚓的研究热度一直较高，此外21世纪初期国外的研究热点还包括沼气，在“十一五”到“十二五”期间对活性污泥、水解酸化污水利用技术有较高关注，近年来清洁能源的关注度也有所提升。

结合国内各领域的关注度分布情况以及关键词演变，分析国内外畜禽污染防治技术发展历程。从整体看，近20 a国内外研究重点始终在废弃物资源化利用环节。与之相比，国外关注点相对全面。在21世纪初期，除有机肥外，国外增加了对蚯蚓生物修复和能源化利用的研究，对臭气处理和污水处理领域的研究也有较高关注；“十一五”到“十二五”期间，国外对臭气及温室气体的研究热度依旧保持，国内外对水污染及污水处理方面的研究热度都有所增加，但国内的研究相对落后；在“十三五”期间，国外在废弃物资源化利用领域的研究开始重视清洁能源，而国内对沼液、重金属的研究热度相对上升。

（2）水产（淡水）养殖污染防治技术发展历程

水产养殖污染面临的核心问题在国内外区别较小，主要在养殖水质以及水质对产量的影响、养殖废水的污染以及废水的回用问题。

聚类结果显示，在源头减量环节，国内在21世纪初期较关注综合养殖，在“十一五”到“十二五”期间，研究重点转移到循环水养殖和微生物制剂上，近年鱼菜共生等一类新型的复合耕作体系成为新的研究热点；国外在早期较为关注水培技术，“十一五”到“十二五”期间同样转移关注点开始研究循环水养殖，近年出现的生物絮团技术成为国际较为热门的研究方向。在达标排放/回用技术领域，国内外对人工湿地技术关注度均较高，但国内的研究起步相对较晚；此外生态塘成为国内近年来新的研究热点，而生物过滤则是国外新的研究重点。

3 研究趋势预测

结合前文国内外各领域发文量、发文趋势、关注度演变、高频关键词以及共现分析聚类得到的领域内研究热点，对国内外养殖污染控制与治理技术未来的研究趋势进行预测，并结合分析内容对当前研究重点提出建议，为养殖污染控制和治理研究提供参考。

近20 a来，在畜禽养殖污染控制与治理领域，国内外都呈现出对废弃物资源化利用研究热度最高、污染源头减量领域研究热度最低的格局。Zerizghi等[32]从生态、社会价值及经济多层面对现阶段畜禽废弃物资源化利用的必要性进行了分析，这也与我国自“十五”以来始终强调畜禽废弃物资源化利用的国家政策相符，因此未来一段时间内在畜禽养殖污染领域，对废弃物资源化利用的研究将始终占据较大的比重。但同一领域内国内外的关注点较为不同，从高频关键词的分析可知，国内文献对堆肥的研究热度远高于其他方向，而国外文献则更关注沼气和厌氧消化技术，这一定程度上代表了国内外的研究热点。2015年我国可收集的畜禽粪便干物质约为1.35亿t，具有510.13亿m^3的沼气开发潜力[34]，在“十一五”之前，我

国的沼气发酵技术尚不完善,而根据陈利洪等[34]的研究,我国现已进入沼气发酵技术相对完善且废弃物处理多元化的阶段,因此我国可以在堆肥、有机肥等废弃物还田利用模式的研究基础上,进一步拓展对包括沼气在内的清洁能源的研究,在更好地完善养殖业污染防治技术体系的同时,也可以为工业、能源等领域的减排分担压力。

国内外对过程控制技术的研究热度基本一致,关注度比例大体维持在30%~40%,这一关注比例在近20 a内基本保持不变。国内外在该领域热度较高的研究大部分围绕污水处理开展,但从中文文献量也能看出,国内研究起步相对较晚,技术成熟度与国外相比也较低。孟祥海[35]的研究表明,至"十二五"之前,我国的水土环境超载已成为各地区畜牧业发展面临的首要制约因素,而根据高频关键词分析结果,我国在水污染治理领域的关注度却远不及土壤污染领域。因此我国在未来一段时间应更加重视污水处理技术的研究,借鉴国外在相关领域的技术积累,进一步完善国内的养殖污水治理体系。此外国内对生物修复的研究、国内外对重金属和抗生素的研究热度也正在提高,在未来这些方向可能会成为领域内新的研究热点。

国内外在污染源头减量环节的关注度一直较少,尤其国内在此领域的关注度比例几乎一直在10%左右,而国外在此技术环节的关注度维持在20%左右。在该环节国内的研究基本围绕微生物发酵展开,国外的研究方向较多,生物炭和生物菌剂的运用在近年的热度较高。此外畜禽养殖的臭气问题及温室气体一直在国外受到较多的关注,而国内随着近年来社会对大气污染问题的关注,畜禽养殖温室气体的关注度也在提高。根据联合国粮农组织在2006年发布的报告,畜牧业温室气体排放量占人类活动温室气体排放总量的18%,畜牧业已成为造成全球气候变化的重要威胁[36]。国内对温室气体的研究虽然热度正在提高,但仍较为冷门,未来一段时间内该方向的研究可能会持续增多,与国际研究方向趋同。

对发文量的分析可知,水产养殖污染控制与治理领域国内外研究都相对较少。国内在2013年之前更注重于源头减量技术的研究,近年来对源头减量技术的研究有所下降;而国外则始终更注重达标排放/回用技术的研究,其中循环水养殖、人工湿地是国内外较为持续关注的方向。此外,由于鱼菜共生技术可以同时解决养殖污染和城市蔬菜种植用地紧缺的问题[37],近年来该方向中文文献逐步增加,说明其正逐渐成为国内新的研究热点。国外在生物絮团方向的研究已有一定突破,该技术可以有效节约养殖资源且减少污染,在国外的一些大型水产养殖场已开始应用[38-39],而在国内的研究还较少,因此也是未来有望发展提高的方向。

4 结论

(1)养殖业污染控制与治理技术国内外近20 a共发表文献24 391篇,其中国内(含发文第一单位为国内机构)发文量占总量的30.78%;根据养殖类型区分,国内关于生猪污染防治技术的发文量最高,占该领域国内文献总量的44.66%;而国外关于肉(奶)牛污染防治技术的发文量最高,占该领域国外文献总量的41.48%;有关水产(淡水)养殖污染控制的国内外文献量占比均不足1/5。总体来看,国外在养殖业污染防治领域的研究起步较早,在2002年以前,文献量都呈缓慢增长趋势,于2004年达到第一个发文峰值;国内发文在2001年之前增长较为缓慢,之后受政策和项目资助的影响各领域发文量都有显著提高,但总体发文量远低于国外,其中生猪污染控制领域发文量增速最为明显。

(2)畜禽养殖污染治理技术方面,国内外对于污染源头减量环节普遍关注度较低,国内研究比例只有国外的一半;国内外研究主要集中在过程控制和末端资源化方面,但近年来源头减量和末端资源化的研究有所增加。在源头减量方面,国内的研究基本围绕微生物发酵展开,而国外对臭气和温室气体始终保持较高的关注度;在过程控制方面,国内外大部分研究围绕养殖污水处理的设备、工艺或工程开展,抗生素和重金属削减技术也逐渐成为新的热点;在废弃物资源化方面,国内外文献研究热度均最高,其中国内对堆肥的关注度较高,国外则更重视沼气和厌氧消化技术。在水产养殖污染治理技术方面,国内外的关注热度均远低于畜禽养殖,其中国内偏重于源头减量的研究,而国外更加注重达标排放/回用的相关技术研究。

(3)根据文献分析结果,我国在保持目前对废弃物资源化利用为主要关注点的基础上,可以进一步加大"源头减量"技术及工艺的研究,拓展废弃物多元化处理的模式,关注对清洁能源的开发与利用。此外,随着社会对大气污染与水污染的逐渐重视,国内对污水处理技术和温室气体减排等方面的研究有待进一步深入,夯实基础性理论突破和致污机制研究,形成更加立体的养殖业污染控制与治理技术体系。

参考文献：

[1] 王明利. 改革开放四十年我国畜牧业发展：成就、经验及未来趋势[J]. 农业经济问题, 2018(8)：60-70. WANG Ming-li. China′s livestock industry development：Achievements, experiences and future trends[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2018(8)：60-70.

[2] 农业农村部渔业渔政管理局. 2019中国渔业统计年鉴[M]. 北京：中国农业出版社, 2019. Bureau of Fisheries of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People′s Republic of China. 2019 China fishery statistical yearbook[M]. Beijing：China Agriculture Press, 2019.

[3] 中国畜牧业年鉴编辑委员会. 2019中国畜牧业年鉴[M]. 北京：中国农业出版社, 2019. Editorial Committee of China Animal Husbandry Yearbook. 2019 China animal husbandry yearbook[M]. Beijing：China Agriculture Press, 2019.

[4] 中华人民共和国国家统计局. 第二次全国污染源普查公报[EB/OL]. (2020.06.16)[2020-08-09]. http://www.mee.gov.cn/home/ztbd/rdzl/wrypc/zlxz/202006/t20200616_784745.html. National Bureau of statistics of the PRC. Bulletin of the second national census of pollution sources[EB/OL]. (2020.06.16)[2020-08-09]. http://www.mee.gov.cn/home/ztbd/rdzl/wrypc/zlxz/202006/t20200616_784745.html.

[5] 徐伟朴, 陈同斌, 刘俊良, 等. 规模化畜禽养殖对环境的污染及防治策略[J]. 环境科学, 2004, 25(增刊)：105-108. XU Wei-pu, CHEN Tong-bin, LIU Jun-liang, et al. Environmental pollution, comprehensive prevention and control tactics of the scale and intensify poultry farming[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(Suppl)：105-108.

[6] 骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5)：1137-1142. LUO Yong-ming, TENG Ying. Research progresses and prospects on soil pollution and remediation in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5)：1137-1142.

[7] 田晓晓, 王湧, 曹冬梅, 等. 饲料中微量元素减排研究现状及进展[J]. 中国饲料, 2018(3)：10-14. TIAN Xiao-xiao, WANG Yong, CAO Dong-mei, et al. The Research status and progress on emissions reduction of trace elements in feeds[J]. *China Feed*, 2018(3)：10-14.

[8] Guan T X, He H B, Zhang X D, et al. Cu fractions, mobility and bioavailability in soil-wheat system after Cu-enriched livestock manure applications[J]. *Chemosphere*, 2011, 82：215-222.

[9] Wang H, Yilihamu Q, Yuan M, et al. Prediction models of soil heavy metal(loid)s concentration for agricultural land in Dongli：A comparison of regression and random forest[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 119：106801.

[10] 朱志平, 董红敏, 魏莎, 等. 中国畜禽粪便管理变化对温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4)：743-748. ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, WEI Sha, et al. Impact of livestock manure management changes on greenhouse gas emissions in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4)：743-748.

[11] Philip T K. Livestock production：Recent trends, future prospects[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 2010, 365(1554)：2853-2867.

[12] Farmworth E R, Modler H W, Mackie D A. Adding Jerusalem artichoke(*Helianthus tuberosus* L.)to weanling pig diets and the effect on manure composition and characteristics[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1995, 55(1/2)：153-160.

[13] Nimmermark S. Influence of odour concentration and individual odour thresholds on the hedonic tone of odour from animal production[J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 108(3)：211-219.

[14] Wu Y Y, Xi X C, Tang X, et al. Policy distortions, farm size, and the overuse of agricultural chemicals in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(27)：7010-7015.

[15] Griffin R C, Bromley D W. Agricultural runoff as a nonpoint externality：A theoretical development[J]. *American Journal of Agricultural Eco-nomics*, 1982, 64(3)：547-552.

[16] Shortle J S, Dunn J W. The relative efficiency of agricultural source water pollution control policies[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 1986, 64(3)：668-677.

[17] Segerson K. Uncertainty and incentives for nonpoint pollution control[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 1998, 15：87-98.

[18] 李红娜, 吴华山, 耿兵, 等. 我国畜禽养殖污染防治瓶颈问题及对策建议[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(2)：167-172. LI Hong-na, WU Hua-shan, GENG Bing, et al. The bottleneck and countermeasures in the pollution control of livestock and poultry breeding in China[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(2)：167-172.

[19] 高懋芳, 邱建军, 刘三超, 等. 基于文献计量的农业面源污染研究发展态势分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(6)：1140-1150. GAO Mao-fang, QIU Jian-jun, LIU San-chao, et al. Status and trends of agricultural diffuse pollution research based on bibliometrics[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(6)：1140-1150.

[20] 俞映倞, 杨林章, 李红娜, 等. 种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测[J]. 环境科学, 2020, 41(8)：3870-3878. YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, et al. Situation analysis and trend prediction of the prevention and control technologies for planting non-point source pollution[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(8)：3870-3878.

[21] 张宝生, 张思明. 基于关键词共现和社会网络分析法的文化创意产业研究热点分析[J]. 图书情报工作, 2016, 60(增刊1)：121-126, 144. ZHANG Bao-sheng, ZHANG Si-ming. Research hotspot analysis of cultural and creative industries based on keyword co-occurrence and social network analysis[J]. *Library and Information Service*, 2016, 60(Suppl 1)：121-126, 144.

[22] 钟伟金, 李佳, 杨兴菊. 共词分析法研究(三)——共词聚类分析法的原理与特点[J]. 情报杂志, 2008(7)：118-120. ZHONG Wei-jin, LI Jia, YANG Xing-ju. The research of co-word analysis(3)：The principle and characteristics of the co-word cluster analysis[J]. *Journal of Intelligence*, 2008(7)：118-120.

[23] 徐瑾. 国外畜禽养殖污染治理的立法经验及启示[J]. 世界农业, 2018(6)：18-23, 70. XU Jin. Legislation experience and revelation of pollution control in livestock breeding abroad[J]. *World Agriculture*, 2018(6)：18-23, 70.

[24] Xiong X, Zhang L X, Hao Y, et al. Urban dietary changes and linked carbon footprint in China：A case study of Beijing[J]. *Journal of Envi-*

ronmental Management, 2020, 255:109877.

[25] 徐应明. 畜禽养殖行业废水排放标准的研究[J]. 上海环境科学, 1995(2):27-30, 46. XU Ying-ming. Study on wastewater discharge standard of livestock and poultry industry[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 1995(2):27-30, 46.

[26] Singh R P, Singh A, Srivastava V. Environmental Issues Surrounding Human Overpopulation[M]// Sarkar A, Datta S, Singh P. Tropospheric ozone pollution, agriculture, and food security. USA:IGI Global, Information Science Reference, 2016:233-252.

[27] 周启星, 罗义, 王美娥. 抗生素的环境残留、生态毒性及抗性基因污染[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(3):243-251. ZHOU Qi-xing, LUO Yi, WANG Mei-e. Environmental residues and ecotoxicity of antibiotics and their resistance gene pollution: A review[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(3):243-251.

[28] Mazhar S H, Li X, Rashid A, et al. Co-selection of antibiotic resistance genes, and mobile genetic elements in the presence of heavy metals in poultry farm environments[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755:142702.

[29] Wang Y, Chen Z, Wen Q, et al. Variation of heavy metal speciation, antibiotic degradation, and potential horizontal gene transfer during pig manure composting under different chlortetracycline concentration [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 1224-1234.

[30] Arora M, Kiran B, Rani S, et al. Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources[J]. *Food Chemistry*, 2008, 111:811-815.

[31] Boxall A B A, Fogg L A, Blackwell P A, et al. Veterinary medicines in the environment[J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2004, 180:1-91.

[32] Zerizghi T, Yang Y, Wang W, et al. Ecological risk assessment of heavy metal concentrations in sediment and fish of a shallow lake: A case study of Baiyangdian Lake, north China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192:154.

[33] Tang K, Baskaran V, Nemati M. Bacteria of the sulphur cycle: An overview of microbiology, biokinetics and their role in petroleum and mining industries[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2009, 44(1): 73-94.

[34] 陈利洪, 舒帮荣, 李鑫. 基于排泄系数区域差异的中国畜禽粪便沼气潜力及其影响因素评价[J]. 中国沼气, 2019, 37(2):7-11. CHEN Li-hong, SHU Bang-rong, LI Xin. Evaluation of biogas potential of China's livestock and poultry manure and its influencing factors based on regional differences in excretion coefficient[J]. *China Biogas*, 2019, 37(2):7-11.

[35] 孟祥海. 中国畜牧业环境污染防治问题研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2014:118-121. MENG Xiang-hai. Study on prevention problem of China livestock environmental pollution[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014:118-121.

[36] Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, et al. Livestock's long shadow: Environmental issues and options[J]. *Livestock's Long Shadow Environmental Issues & Options*, 2006, 16(1):7.

[37] Naylor R L, Hardy R W, Bureau D P, et al. Feeding aquaculture in an era of finite resources[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(36):15103-15110.

[38] Cao L, Wang W, Yang Y, et al. Environmental impact of aquaculture and countermeasures to aquaculture pollution in China[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2007, 14(7):452-462.

[39] Crab R, Defoirdt T, Bossier P, et al. Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges[J]. *Aquaculture*, 2012, 356(4):351-356.