

上海市规模化畜禽场污染减排模式分析与应用

王振旗, 钱晓雍, 沈根祥*

(上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要:在对上海市畜禽规模养殖分布特征和污染治理现状分析的基础上,分别研究了适于上海市经济社会特点的资源化还田利用和工业化达标治理两大类四种鼓励减排模式,即“沼气工程”模式、“生态还田”模式、“污水纳管”模式和“达标排放”模式,以及各模式的技术要点、工艺流程、设施配套等,并通过投入-产出分析和适用性评价,提出了各郊区县规模化畜禽场适宜采纳模式。结果表明:崇明县、松江区、青浦区单位耕地畜禽承载量为4.7~9.0头标准猪·hm⁻²,适合采用资源化还田利用模式,经济收益可以满足减排工程的稳定运行,尤其适合采用低投入和管理要求低的“生态还田”模式;奉贤区、宝山区和浦东新区因养殖密度高、耕地面积相对少,多数养殖场仅能选择工业化达标治理模式,但“达标排放”模式管理水平要求较高、运行成本高昂,长效稳定运行难度大,因此应作为今后畜禽规模养殖空间布局调整的重点区域。

关键词:规模化畜禽场;污染减排;生态还田;达标治理;畜禽承载力

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)10-2030-06 doi:10.11654/jaes.2014.10.021

Analysis and Application of Pollution Reduction Techniques for Scale Livestock and Poultry Farms in Shanghai

WANG Zhen-qi, QIAN Xiao-yong, SHEN Gen-xiang*

(Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: Livestock and poultry farms have caused the water pollution around them. Here we proposed four techniques for pollution reduction, which included land application (with or without biogas production) and wastewater treatment (centralized or onsite treatment), based on distribution and pollution control status of livestock and poultry farms in Shanghai. The technological process and keys, and facility requirements for each technique were provided, and the preferred technique for specific district/county was suggested according to their cost-effectiveness and adaptability. In Chongming County, Songjiang District and Qingpu District, where animal carrying capacity was 4.7~9.0 heads·hm⁻² (pig equivalent), far below the average in Shanghai, direct land application of wastes, especially without biogas production, was preferable because of its relatively lower cost and management requirements. The economic returns of such land application were sufficient to support system operation. In Fengxian District, Baoshan District and Pudong New Area, wastewater treatment, especially onsite treatment, was more suitable because of higher animal densities and less farmland. However, due to the higher cost and management requirements, operation of an onsite wastewater treatment system was much more challenging financially and technically. Therefore, the districts with higher animal densities would be the targets of future structural readjustment of livestock and poultry farming.

Keywords: livestock and poultry operations; pollution reduction; cropland application; industrial treatment; animal carrying capacity

2014年1月1日,我国开始施行首部国家级农业环境保护类法规——《畜禽规模养殖污染防治条例》(以下简称《条例》)。《条例》不仅强调了畜禽养殖业科学规划布局、环保设施建设、污染治理激励措施等,更明确了养殖场环境违法应承担的法律责任,为

进一步推动我国以污染减排为抓手的畜禽污染治理工作提供了有力的政策保障。

根据上海市第一次污染源普查公报,2010年上海市规模化畜禽场化学需氧量(COD)和氨氮排放量分别为1.53万t和0.17万t,分别占全市农业源排放量的44%和49%,已成为上海市郊区水环境污染的重要来源之一。在此背景下,上海市政府于2011年颁布实施了《上海市主要污染物总量控制“十二五”工作方案》,并于当年正式启动规模化畜禽场污染减排工作。截止2013年底,依据环保部制定的《“十二五”主

收稿日期:2014-03-26

基金项目:上海市环境保护局重大科研项目(沪环科[2012]-02);上海市科技兴农推广项目(沪农科推字[2013]第4-4号)

作者简介:王振旗(1985—),男,硕士,工程师,从事农业生态环境保护研究。E-mail:wangzq@saes.sh.cn

*通信作者:沈根祥 E-mail:shengx@saes.sh.cn

要污染物总量减排核算细则》(以下简称《核算细则》),上海市共完成了50余家规模化畜禽场污染减排工程建设,工程总投资约2.8亿元,实现了0.36万t COD和0.03万t氨氮的削减量。

随着《条例》的宣贯实施,上海市今后将继续加大畜禽养殖污染的治理力度,迫切需要一套适于本市特点的污染减排技术体系,以实现郊区水环境的持续改善和资源有效配置。因此,本文在对上海市畜禽分布特征和污染治理现状分析的基础上,根据国家考核认定标准,筛选并集成了适于上海经济社会发展特点的规模化畜禽场污染减排技术模式,并通过工程效益对比分析和适用性评价,为上海市乃至其他平原河网省区选择适宜的畜禽污染减排模式和长效管理提供借鉴,同时通过各郊区县畜禽承载现状评价为政府部门制定畜禽规模养殖总体治理方案和布局规划调整提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集方法

按照上海市2013年行政区划,以9个郊区县为单元,分类收集耕地面积、规模化畜禽养殖场数量和畜禽养殖总量等原始数据,主要来源于2012年上海市统计年鉴、上海郊区统计年鉴等各类统计数据。考虑到以氮计的农田养分需求所允许的最高畜禽养殖量高于以磷计所允许的最高畜禽养殖量^[1],本研究将纳入污染减排的五类畜禽种类按照上海地区不同畜禽TN产生系数^[2],将其养殖量折算成当量猪,折算系数为1头奶牛折为7.67头当量猪、1头肉牛折为7.22头当量猪、1只蛋鸡折为0.03头当量猪、1只肉鸡折为0.01头当量猪。各模式投入-产出分析基于上海市2011—2013年实施减排工程的34家规模化猪场的实测数据。

1.2 减排模式集成方法

根据上海市畜禽养殖特征和上海市水环境功能区划(2005年)要求,结合《核算细则》和《条例》推荐的污染治理技术,筛选并集成本市规模化畜禽场污染减排模式。主要原则为:

(1)资源利用-能源生产原则。支持畜禽场采用生态还田等资源利用方式处理畜禽粪便和污水,并鼓励通过厌氧产沼补贴设施运行。

(2)技术可行性原则。在鼓励开发创新处理工艺的同时,引导畜禽场尽可能采用现有成熟技术。

(3)经济性原则。在保障处理效果的前提下,鼓励

采用高效节能的工艺和设备,尽可能减少占地面积和降低投资运行费用。

(4)因地制宜原则。采纳模式应与畜禽场发展生产需求、周边土地匹配、管理水平现状等实际条件相符。

1.3 工程效益分析方法

按照能够满足环保要求的常规处理工艺设计和设施设备取价,以出栏10000头的猪场(双列半开放式旧型猪舍)未建设粪污收集与处置设施、采用人工方式干清粪、利用暗渠收集污水为例,分析基于良好管理水平和运行条件下的减排工程投入-产出情况。“沼气工程”模式按照干、湿分开厌氧产沼的工艺设计,一次性投资内容包括固体粪和污水独立厌氧反应器、储气柜、发电机组、沼渣制有机肥设施、堆粪棚、沼液储存及还田设施等;“生态还田”模式按照鲜粪自制有机肥、污水经厌氧处理后就近生态还田的工艺设计,一次性投资包括堆粪棚、有机肥生产设施、污水厌氧池和存储池,污水还田设施等;“污水纳管”模式按照鲜粪自制有机肥、污水经场内预处理后接入污水收集管网设计,纳污管道按3km计,一次性投资包括堆粪棚、有机肥生产设施、污水预处理工程、污水纳管管网等;“达标排放”模式按照鲜粪自制有机肥、污水采用厌氧-好氧工艺设计,达标出水直排环境,一次性投资包括堆粪棚、有机肥生产设施、污水处理设施等。各模式运行费用包括电耗、设施设备维修维护、人工费、药剂材料费等。

1.4 适用性评价方法

目前国内外关于单位农田面积畜禽污染负荷、畜禽粪尿氮磷养分农田需求等方面的报道较多,因不同地区环境保护要求、耕作制度、水文土壤、习惯施肥方式等存在一定的差异,研究结果差别较大^[3-4]。而欧盟等发达地区为使环境管理更具操作性,均在农田所需养分测算的基础上,通过条例法令规定了单位农田载畜量标准,如德国规定在供应水源保护区域,每公顷土地上允许猪的最大饲养量为9~15头^[5]。我国畜禽污染防治法规目前仅在污染治理等方面进行了规定,各省市鲜有细化的单位面积土地畜禽承载力标准,致使部分地区环境容量严重超载。本研究在比较不同减排模式工程效益收支情况和约束性应用条件分析的基础上,通过9个区县单位耕地面积畜禽承载量现状测算,与沈根祥等^[2]对上海地区禽粪便污水还田环境安全面积匹配等国内关于耕地畜禽承载临界值比对,分析各郊区县适宜采纳的减排模式及今后规模化畜禽

场布局调整方向。

2 结果与讨论

2.1 畜禽规模养殖特征及污染治理现状分析

上海市各区县耕地情况、畜禽养殖情况及比例见表1所示。五类畜禽折算为当量猪养殖量共251.9万头,其中规模化畜禽场共506家,养殖量约占总量的52%。综合考虑畜禽散养情况,全市郊区县畜禽平均养殖密度为417头当量猪·km⁻²,尽管远低于河南省1687.2头当量猪·km⁻²、山东省1525.1头当量猪·km⁻²等养殖大省的养殖密度^[6],但各区县畜禽场普遍存在成立时间早、地理分布不均等特点,且污染负荷高的猪场和奶牛场^[7]占有较大比重。

上海市各区县规模化畜禽养殖场地理分布见图1所示。崇明县、浦东新区、奉贤区和金山区四个远郊区县畜禽规模养殖量占总规模养殖量的80.9%,面临减排形势严峻、种养平衡失调、环保监察力度不足等问题,属上海市“十二五”污染减排重点区域;属近郊地区的嘉定区、宝山区和闵行区城镇化较高,畜禽场分布相对较少;位于黄浦江上游的青浦区和松江区通过上海市前几轮环保三年行动计划的推进实施,大部分畜禽场进行了关停或搬迁,畜禽规模养殖在农村环境污染中的贡献较小。

上海市从1991年开始重视畜禽养殖污染治理工作,经历了简易处理(1991—1998年)、达标治理(1999—2001年)、综合利用(2002—2010年)、污染减排(2011至今)四个主要阶段,目前全市70%以上的规模化畜禽场完成了雨污分流、干湿分开、污水储存、粪便储存等设施的建设工作,并建设了一批污水达标治理工程

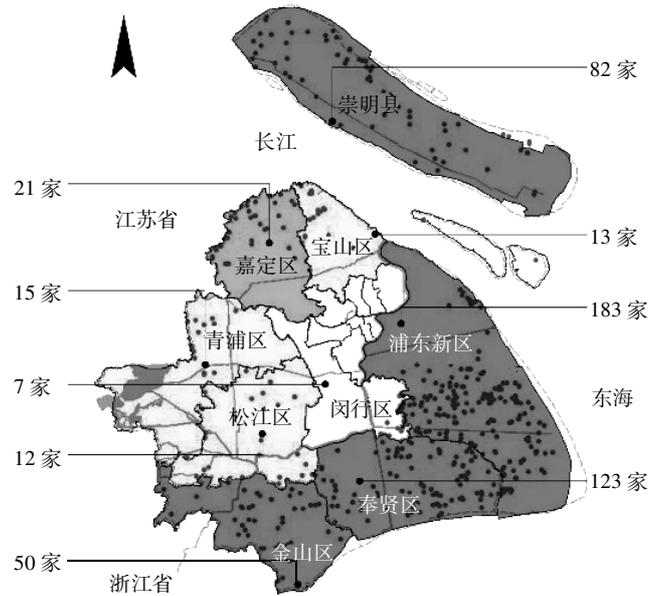


图1 上海市规模化畜禽养殖场区县分布图

Figure 1 Layout of scale livestock and poultry farms in Shanghai

和沼气工程^[8]。通过2011—2013年各郊区县典型畜禽场摸底核查可知,全市仍普遍存在粪尿资源化利用率低、治理设施管理水平有限、综合运行成本偏大等问题,已建成的设施运行远达不到处理目的,甚至出现达标工程废弃、沼气产气率低等不良运行情况,总体需要进一步提升和完善。

2.2 减排模式集成与工艺设施要求

基于上海市畜禽分布特征和治理水平,按照模式集成原则,在总结本市“十二五”规模化畜禽场污染减排工程实施和应用效果的基础上,将以污水为核心处理对象的资源化还田利用模式和工业化达标治理模式作为本市鼓励模式。在资源化还田利用环节中,可

表1 上海市规模化畜禽场区县分布情况

Table 1 Distribution of scale livestock and poultry farms of Shanghai by district and county

区县	总面积/ km ²	耕地面积/ hm ²	养殖场/ 个	规模养殖当量猪					散养当量猪/ 万头	合计/ 万头	所占比例	
				猪/万头	奶牛/万头	肉牛/万头	蛋鸡/万羽	肉鸡/万羽				当量猪/万头
闵行	371	5709	7	3.5	0.04		1.0	35.0	2.3	1.5	3.8	1.5%
宝山	271	4557	13	0.9	0.35				3.1	3.8	7.0	2.8%
嘉定	464	10 869	21	13.5	0.08		7.0	9.0	8.1	3.1	11.1	4.4%
浦东	1210	43 319	183	49.9	1.13		77.3	361.0	38.8	28.0	66.7	26.5%
金山	586	26 084	50	12.8	0.73		9.0	33.0	12.8	22.1	34.8	13.8%
松江	606	17 193	12	9.6	0.05		7.1		5.7	7.6	13.2	5.3%
青浦	670	27 028	15	8.1	0.21				5.9	6.8	12.7	5.0%
奉贤	670	25 795	123	43.2	1.03	0.02	47.9	157.0	33.0	24.2	57.2	22.7%
崇明	1186	50 308	82	16.2	1.64		15.9	2.0	21.7	23.6	45.3	18.0%
合计	6034	210 862	506	157.6	5.30	0.02	165.2	597.1	131.3	120.6	251.9	100.0%

注:猪、肉牛和肉鸡以出栏量计,平均饲养周期分别为188、365、120 d;奶牛、蛋鸡以存栏量计。市郊农场畜禽养殖量归入各畜禽场所在区县。

将沼气工程作为污水厌氧处理的优化方式,达到能源回收和资源利用的双重目的,沼液/污水通过专用管网就近还田利用。工业化达标治理模式主要针对一些无法满足污水就近还田条件的畜禽场,须经达标处理后进入环境;特殊情况下,在距城镇污水收集管网较近并经当地水务部门许可的情况下,畜禽场可将污水预处理后接入污水处理厂进一步处理,从而降低环境污染风险。另外,鼓励个别畜禽场根据自身条件采用其他环境友好、经济适用的粪尿综合处置方式。

资源化还田利用模式工艺流程见图2所示。畜禽场应做到雨污分流,粪便和污水分别单独收集,固体粪可通过干式发酵后(①)或直接(②)生产有机肥,污水经厌氧处理后就近还田利用,根据该工艺是否强化沼气生产利用环节,具体区分为“沼气工程”模式和“生态还田”模式。对于采用“沼气工程”模式的畜禽场,固体粪和污水应分别单独产沼,防止因污染物迁移转化而增加后续处理成本^[9]。该类模式主要构筑物应包括沼气(厌氧)池、沼液(污水)储存池、沼气提纯及利用系统、固液分离设施、有机肥生产设施、沼液(污水)还田利用设施等,还田利用部分设计和施工要求及农田匹配根据《上海市畜禽粪尿还田污染防治技术规范(试行)》执行^[10]。

工业化达标治理模式工艺流程见图3所示,畜禽场必须做到雨污分流,粪便和污水分别单独收集,固体粪生产有机肥,污水处理至相关标准^[11]后排放或回用,亦可预处理后纳入污水处理厂进一步处理^[12-13]。按

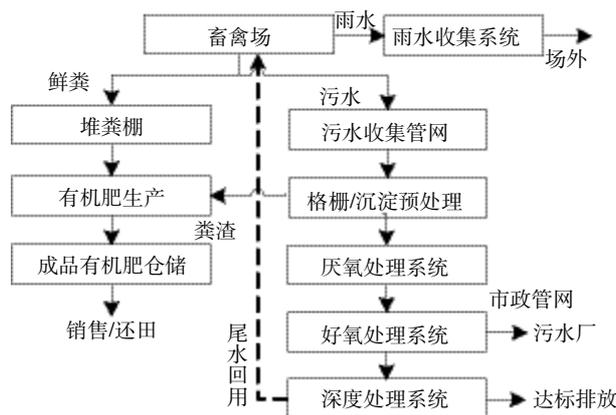


图3 规模化畜禽场工业化达标治理模式工艺流程

Figure 3 Technological process for industrial treatment of livestock and poultry waste for pollution reduction

照污水是否经污水处理厂处理,具体区分为“污水纳管”模式和“达标排放”模式。该类模式主要构筑物应包括沉淀预处理体系、厌氧处理设施、好氧处理设施、深度处理设施(因地制宜选择)、污水纳管设施、堆粪棚、有机肥生产设施等,相关构筑物设计与施工执行国家或地方相关标准^[14]。

2.3 减排模式工程效益分析

上海市已实施污染减排工程的34家规模化猪场采用“沼气工程”模式的15家、“生态还田”模式的10家、“污水纳管”模式的5家、“达标排放”模式的4家。对该34家畜禽场基于季节性波动的污染物排放情况分析得出,干清粪条件下年出栏10000头的自繁自育猪场污水和固体粪产生量分别为 $35\sim 50\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $16\sim 20\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 。污染物指标见表2所示,四种模式投入-产出情况见表3所示。

由表3可知,两种资源循环利用模式均可产生良好的经济效益,尤其“沼气工程”模式收益达 $15.7\sim 19.5\text{ 元}\cdot\text{头猪}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,可为减排工程长效稳定运行提供资金保障,尤其“生态还田”模式一次性投资和日常运行费用均显著低于其他三种模式;“污水纳管”模式应用具有一定的局限性,但可彻底解决污水出路问题,有利于当地水环境的改善,且有机肥销售收益基本能够补贴污水预处理费用;“达标排放”模式每年需投入一定资金维护设施日常运行,费用为“生态还田”模式

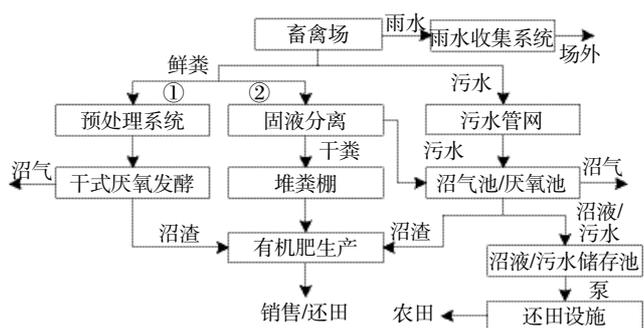


图2 规模化畜禽场资源化还田利用模式工艺流程

Figure 2 Technological process for cropland application of livestock and poultry waste for pollution reduction

表2 干清粪条件下年出栏10000头猪场污染物产生情况

Table 2 Generation of pollutants from pig farms (based on 10 000 heads) under dry collection

指标	污水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$					固体粪		
	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	SS	TN	TP	含水率/%	$\text{N}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干基	$\text{P}_2\text{O}_5/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干基
含量	2500-6700	355-800	100-400	450-1000	34.7-52.4	86-95	2.25-2.30	3.95-4.00

表3 规模化畜禽场四种污染减排模式投入-产出对比分析

Table 3 Cost-effectiveness analysis of four techniques for pollution reduction for a pig farm

主要参数	“沼气工程”	“生态还田”	“污水纳管”	“达标排放”
一次性投资/万元	455~650	140~175	220~450	320~600
日运行费用/元·d ⁻¹	186~288	68~99	200~268	310~359
污水处理费/元·t ⁻¹ ·d ⁻¹	3.0~4.6	0.7~1.0	3.1~4.7	13~17
年运行费用/万元·a ⁻¹	6.8~10.5	2.5~3.6	7.3~9.8	11.3~13.1
折合能源产出/万元·a ⁻¹ *	14.5~20.0	0	0	0
折合肥料收益/万元·a ⁻¹ **	8.0~10.0	10.0~13.0	6.0~8.0	6.0~8.0
折合效益/元·头猪 ⁻¹ ·a ⁻¹	15.7~19.5	7.5~9.4	-1.3~-1.8	-5.3~-5.1

注:* 沼气产出按照 18~25 万 m³·a⁻¹ 计,可用于燃气(1.5 元·m⁻³)或发电(0.6~0.8 m³·kWh⁻¹);** 肥料收益按照固体粪/沼渣全部生产有机肥(上海市市场价 400 元·t⁻¹),化肥购买和施用等节省费用由沼液/污水还田替代计算(1.6~1.9 万元·a⁻¹)。

的 3.6~4.5 倍,长效稳定运行难度大。从管理角度分析,“沼气工程”模式和两种工业化达标治理模式均需专业运行公司或专业技术人员进行操作管理,适于管理水平高的畜禽场;而“生态还田”模式配套设施操作管理相对简单,较适于当前畜禽场管理水平,应作为鼓励方向指导畜禽场布局调整。

2.4 减排模式适用性评价

通过上述两类四种模式工艺特点、工程效益、应用条件分析可知,在满足还田条件的情况下,规模化畜禽场应优先选择资源化还田利用模式,其次可根据周边市政管网铺设情况、归属地污水厂规模和属性、水务部门意向等纳管条件,选择“污水纳管”模式。在上述条件均不具备的情况下,可考虑采用“达标排放”模式,或综合评估是否作为今后畜禽调整规划的对象。

按匹配农田全部为粮食作物、蔬菜瓜果和林木作物计,上海地区基于磷养分需求的耕地畜禽安全承载量上限分别为 34.6、38.6、21.8 头当量猪·hm⁻²[10],经测算目前本市各区县畜禽承载现状均低于畜禽固体粪和污水全部还田的畜禽承载量上限(图 4)。但考虑到

上海地区农田布置,分田到户的耕作现状及农户习惯施肥方式以化学肥料为主的客观状况,全市总体可用于消纳畜禽粪便污水的耕地不足 60%,尤其奉贤区、宝山区和浦东新区畜禽承载量远高于全市 11.9 头标准猪·hm⁻²的平均值,实际上已超出了本区县耕地畜禽承载力[15],且该区域畜禽场布局相对密集、可用耕地面积相对较少,应作为今后畜禽规模养殖空间布局调整的重点区县。该结论与孙国波等[16]关于江苏省目前 14.2 头猪单位·hm⁻²的土地承载畜禽量已接近饱和和状态的结论相符,而陈天宝等[17]对四川省基于氮素循环的耕地畜禽承载能力的研究表明,四川农区耕地畜禽承载能力临界点为 22.5 头当量猪·hm⁻²,略高于以磷素循环为基准的最高耕地畜禽承载力。

崇明县、松江区、青浦区耕地畜禽承载量为 4.7~9.0 头当量猪·hm⁻²,适于采用资源化还田利用模式;闵行区和嘉定区则因城镇化较高,且污水处理系统相对健全,适宜采纳“污水纳管”模式;金山区则可根据规模化畜禽场所在位置和周边土地利用情况选择适宜的污染减排模式。综上所述,上海市各区县应在加强不规范畜禽散养整治和适当加大规模化畜禽养殖比例的基础上,因地制宜地选择适合本区域特征的规模化畜禽场污染减排模式,实现畜禽养殖产业与环境保护的和谐发展。

3 结论

(1)基于上海市畜禽规模养殖分布特征和污染治理现状,集成了适于本市经济、社会及农业生产现状的资源化还田利用和工业化达标治理两大类四种具体污染减排模式,即“沼气工程”模式、“生态还田”模式、“污水纳管”模式和“达标排放”模式,可为我国平原河网发达省区规模化畜禽场选择适合自身的污染治理技术提供借鉴。

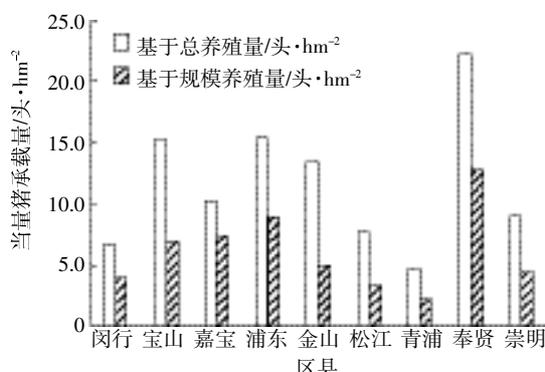


图4 上海市各区县单位耕地畜禽承载量

Figure 4 Animal carrying capacity of cultivated land in each district or county, Shanghai

(2)四种模式经济性和适用性分析表明,“沼气工程”模式经济效益显著,能够补贴工程运行资金;“生态还田”模式投资运行成本低、操作简便,应作为鼓励方向指导畜禽场布局调整;“污水纳管”模式环境效益显著,但应用具有一定的局限性;“达标排放”模式日常运行费用过高,长效稳定运行存在一定风险。

(3)崇明县、松江区和青浦区单位耕地畜禽承载量远低于全市平均水平,适于采用资源化循环利用模式;而奉贤区、宝山区、浦东新区则因养殖密度高、耕地面积相对少,多数场仅能选择工业化达标治理模式。上述区县应作为今后畜禽规模养殖空间布局调整的重点区县。

(4)在国家大力推行畜禽废弃物资源循环利用的同时,还应重点在畜禽污染减排累计效益评估、污染减排长效运行机制等方面深入开展相关研究工作,且亟待研究并出台基于环境容量的不同地区畜禽养殖密度和载畜量标准。

参考文献:

- [1] 王 奇, 陈海丹, 王 会. 基于土地氮磷承载力的区域畜禽养殖总量控制研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3): 279-284.
WANG Qi, CHEN Hai-dan, WANG Hui. A study on the total quantity control of regional livestock rising: Based on the N/P capacity of land[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(3): 279-284.
- [2] 沈根祥, 钱晓雍, 梁丹涛, 等. 基于氮磷养分管理的畜禽场粪便匹配农田面积[J]. 农业工程学报, 2007, 22(2): 268-271.
SHEN Gen-xiang, QIAN Xiao-yong, LIANG Dan-tao, et al. Research on suitable area for cropland application of animal manure based on nutrients management of nitrogen and phosphorus[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 22(2): 268-271.
- [3] 李 帷, 李艳霞, 张丰松, 等. 东北三省畜禽养殖时空分布特征及粪便养分环境影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2350-2357.
LI Wei, LI Yan-xia, ZHANG Feng-song, et al. The spatial and temporal distribution features of animal production in three northeast provinces and the impacts of manure nutrients on the local environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6): 2350-2357.
- [4] Zheng N, Fu C. Research on non-point source pollution resulted from livestock breeding in Jiangxi Province[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 356-360: 2344-2348.
- [5] Shortle J S, Abler D G. Environmental Policies for agricultural pollution control[M]. CAB International, 2001.
- [6] 杨 飞, 杨世琦, 诸云强, 等. 中国近 30 年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 1-11.
YANG Fei, YANG Shi-qi, ZHU Yun-qiang, et al. Analysis on livestock and poultry production and nitrogen pollution load of cultivated land during last 30 years in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5): 1-11.
- [7] Sun C, Wu H. Assessment of pollution from livestock and poultry breeding in China[J]. *International Journal of Environmental Studies*, 2013, 70(2): 232-240.
- [8] 姜 宏, 于金莲, 刘美华. 上海畜禽养殖污染及治理现状调查[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2003, 32(3): 87-91.
JIANG Hong, YU Jin-lian, LIU Mei-hua. Investigation on the present situation of animal husbandry in Shanghai[J]. *Journal of Shanghai Normal University(Natural Sciences)*, 2003, 32(3): 87-91.
- [9] Kleinman P J A, Wolf A M, Sharpley A N, et al. Survey of water-extractable phosphorus in livestock manures[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(3): 701-708.
- [10] 上海市畜禽粪尿还田污染防治技术规范(试行)[S].
Shanghai technical standard of preventing pollution for animal manure application in arable lands(For trial implementation)[S].
- [11] GB 18596—2001 畜禽养殖业污染物排放标准[S].
GB 18596—2001 Discharge standard of pollutants for livestock and poultry breeding[S].
- [12] DB 31/445—2009 污水排入城镇下水道水质标准[S].
DB 31/445—2009 Discharge standard for municipal sewerage system[S].
- [13] DB 31/199—2009 污水综合排放标准[S].
DB 31/199—2009 Integrated wastewater discharge standard[S].
- [14] HJ 497—2009 畜禽养殖业污染治理工程技术规范[S].
HJ 497—2009 Technical specifications for pollution treatment projects of livestock and poultry farms[S].
- [15] Shen G X, Qian X Y, Yao Z, et al. Evaluation of livestock and poultry breeding carrying capacity of arable land in Shanghai suburbs[C]// American Society of Agricultural and Biological Engineering(ASABE), International Livestock Environment Symposium. Beijing, 2005.
- [16] 孙国波, 韩大勇, 董 飏. 基于氮磷平衡的江苏省畜禽养殖土地承载力研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(6): 123-130.
SUN Guo-bo, HAN Da-yong, DONG Biao. Livestock supporting capacity of cropland based on nitrogen and phosphorus homeostasis[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2013, 48(6): 123-130.
- [17] 陈天宝, 万昭军, 付茂忠, 等. 基于氮素循环的耕地畜禽承载能力评估模型建立与应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 191-195.
CHEN Tian-bao, WAN Zhao-jun, FU Mao-zhong, et al. Modeling and application of livestock supporting capacity estimation of cropland based on nitrogen cycling in Southwest China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(2): 191-195.