

王梦竹, 赵越, 童银栋, 等. 2006—2016年间我国畜禽养殖业氮元素入水通量估算[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2829–2836.

WANG Meng-zhu, ZHAO Yue, TONG Yin-dong, et al. Estimation of nitrogen loss fluxes from livestock farming into aquatic environments in China during 2006—2016[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(12): 2829–2836.

2006—2016年间我国畜禽养殖业氮元素入水通量估算

王梦竹¹, 赵越², 童银栋¹, 续衍雪^{2*}, 李佳祺¹, 齐森¹, 林岩³

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 环境保护部环境规划院, 北京 100012; 3. 长江大学资源与环境学院, 武汉 430100)

摘要:近年来,我国畜禽养殖业发展迅速,同时规模化养殖水平不断提高,大量畜禽养殖产生的不经有效处理的排泄物也给陆地水环境带来了严重负担,为了评估近十年来我国畜禽养殖氮元素排放通量的变化以及养殖模式转变带来的影响,本研究采用污染物排放因子法,估算了在2006—2016年期间,我国规模化和散养的畜禽养殖向陆地水环境中排放的氮元素通量,重点分析了不同地区(华北、华东、中南、西南和西北)和不同畜禽养殖类型(包括羊、猪、肉牛、奶牛、蛋鸡和肉鸡)氮元素入水通量分布特征。计算结果表明,在2006—2016年期间,全国由畜禽养殖排入水体中的氮元素平均通量为4384 Gg,最大和最小值分别为4832 Gg(2006年)和4010 Gg(2008年),中南和华北地区是我国的畜禽养殖氮元素排放的主要地区,华东和西南次之,西北地区最少,2016年华北、中南、华东、西南和西北地区的畜禽养殖氮元素水体流失通量比例分别为27%、26%、20%、17%、10%。2016年由规模化养殖所带来的氮元素入水通量占该年畜禽养殖业氮元素入水总通量的53%。在所有畜禽中,猪和肉牛是我国畜禽养殖氮元素进入水体的主要排放单元,2016年猪和肉牛养殖的氮元素入水通量占总量的68%。同时,不同畜禽养殖类型之间氮元素排放通量差异显著,在所有畜禽中,羊、肉牛和蛋鸡经散养排放的氮元素通量较大,而猪和肉鸡的氮元素排放则主要来源于规模化养殖。

关键词: 畜禽养殖; 氮元素入水通量; 散养; 规模化养殖; 水环境

中图分类号: X592 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)12-2829-08 doi:10.11654/jaes.2018-0111

Estimation of nitrogen loss fluxes from livestock farming into aquatic environments in China during 2006—2016

WANG Meng-zhu¹, ZHAO Yue², TONG Yin-dong¹, XU Yan-xue^{2*}, LI Jia-qi¹, Qi Miao¹, LIN Yan³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China; 3. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: In recent decades, the growing demand for animal meat has led to quick development of livestock farming in China, especially large-scale farming. Excreta from the animals that could not be effectively treated were discharged into aquatic systems directly. To assess the impact of changes in nitrogen fluxes owing to livestock farming and farming patterns in approximately the last decade, we estimated the nitrogen discharges into aquatic systems from livestock farming (including both scatter-feed farming and large-scale farming) from 2006 to 2016. The differences in nitrogen discharges of five typical regions of China (north, east, south central, southwest, and northwest China) and from different animal species (sheep, pig, beef cattle, dairy cattle, laying hens, and broilers) were analyzed. The results showed that the total average nitrogen flux discharged into water from 2006 to 2016 was 4384 Gg, and the highest and lowest values were 4832 Gg (in 2006) and 4010 Gg (in 2008), respectively. South central China and north China were the major regions with the largest nitrogen discharges, followed by east China and southwest China, with the northwest region discharging the least. In 2016, the proportions of nitrogen discharges from the livestock farming in north China, south central China, east China, southwest China, and northwest China were 27%, 26%, 20%, 17%, and 10%, respectively. In 2016, the proportion of nitrogen discharges from the large-scale livestock farming was 53% of the total. Dif-

收稿日期: 2018-01-19 录用日期: 2018-04-11

作者简介: 王梦竹(1995—), 女, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 主要从事区域水环境管理与规划。E-mail: dreamwang321@163.com

*通信作者: 续衍雪 E-mail: xuyanxue1018@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501517); 天津自然科学基金项目(16JCQNJC08300)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41501517); The Tianjin Natural Science Foundation(16JCQNJC08300)

ferences in nitrogen discharges existed among the different animal species. Pig and beef cattle produced the largest nitrogen discharges, occupying 68% of the total discharges. Regarding the sheep, laying hens, and beef cattle, their nitrogen discharges from the scatter-feed farming were higher than those from the large-scale farming, whereas for the pigs and broilers, the nitrogen discharges from the large-scale farming were larger.

Keywords: livestock farming; nitrogen discharges into water; scatter-feed farming; large-scale farming; aquatic environment

自改革开放以来,随着我国人民生活水平的提高和对动物蛋白摄入的需求加大,居民对肉类的消费量大幅增加,我国畜禽养殖业也因此得到迅速发展^[1-3]。自1991年以来,我国肉、禽、蛋总产量已连续多年保持世界第一^[4],并在2016年达到13 523万t,其中肉、禽和蛋类总产量分别为8540万、1888万、3095万t^[5]。与此同时,未经有效处理的畜禽排泄物进入到环境中带来的水体污染问题也越来越严重^[6-10]。畜禽粪便、尿液中含有大量的氮、磷等营养元素,不恰当的处理方式会导致相当一部分营养元素进入水体,造成水环境污染^[11]。据陈瑶等^[12]统计,在2007年,全国畜禽养殖业粪便和尿液产生量分别达到2.43亿t和1.63亿t,由此带来的化学需氧量、氮元素和磷元素年排放量分别占全国污染物排放总量的42%、22%和38%;Gu等^[13]估算,在2010年,全国由畜禽养殖排放到水体中的氮元素通量达到300万t,是所有农业源排放的重要组成部分;孙良媛等^[9]估算出2011年畜禽养殖的磷元素入水通量约为40万t。由此可以看出,庞大的畜禽养殖已经给我国水环境带来了巨大的压力^[14-15]。

近十年来,我国畜禽养殖在数量上稍有增加,如2006年我国生猪年末出栏量为68 050万头,在2012年增加到69 790万头^[16]。同时,随着农业生产方式的改变,我国畜禽养殖模式也逐步由家庭散养向规模化养殖过渡^[3,17-19]。2010年我国生猪出栏量500头以上的小型养殖户的数量占全国总生猪养殖户的0.4%,而其生猪出栏量却占到了34.5%^[16]。根据畜禽养殖统计数据,在2006—2010年间,全国畜禽养殖中猪、肉牛、奶牛、羊、蛋鸡和肉鸡的规模化养殖数量分别提高了28%、10%、26%、6%、17%和23%,其中猪和肉鸡的规模化养殖比例已经超过了50%。但是需要指出的是,畜禽养殖模式的转变在我国不同区域内的进展程度仍然存在较大差异。比如在2010年,北京和上海地区的蛋鸡规模化养殖比例已经分别达到67%和65%;而西部地区规模化进程则较慢,如内蒙古自治区蛋鸡规模化养殖比例仅为14%^[16]。

当前国内外学术界关于畜禽养殖环境影响问题的研究成果颇丰,国外学者多运用自然环境物理模型

模拟和预测污染物的产生、迁移和危害等^[3,9]。而当前国内对于畜禽养殖污染物排污量计算的方法主要采用排放因子法,现有研究对污染物排放因子多着重于定性描述^[3-5,13],通过选取不同畜禽产排污系数和粪便污染物含量参数,估算不同畜禽类别的污染物产生总量,再通过污染物的水体流失率估算畜禽养殖业的污染物入水通量,从而对畜禽粪便产生的环境效应进行分析。从已有研究来看,对畜禽养殖业氮元素污水通量的计算方法差别不大,但大部分研究只集中于个别年份,对全国各个省份的氮排放通量进行计算^[3-5,13],没有在时间和空间尺度上分析我国畜禽养殖业氮元素入水通量的变化特征,也没有将畜禽规模化养殖和散养排污分别进行分析。因此,为了评估近十年来我国畜禽养殖氮元素排放通量的变化以及养殖模式转变带来的影响,本文利用2006—2016年中国畜牧业统计数据、畜禽粪便含氮量、水体流失率等统计资料或文献数据,以畜禽养殖业中最主要的猪、羊、肉牛、奶牛、蛋鸡和肉鸡为调查对象,估算了分别由散养和规模化养殖向水环境中排放的氮元素通量,着重比较了不同地区的空间分布特征和不同畜禽间的差异。本研究的开展可以为评估畜禽养殖对我国水环境的影响和今后相应环境管理政策制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文涉及的主要数据包括:各类畜禽产排污系数、排泄物水体流失率、2006—2016年间我国31个省份和不同类型畜禽(包括羊、猪、肉牛、奶牛、蛋鸡和肉鸡)出栏量、存栏量、规模化养殖比例等^[3,20-22],养殖规模较小的畜禽不予以考虑。规模化养殖的畜禽粪便和尿液中氮元素水体流失率采用国家环保总局南京环科所测定出的数据,如表1所示,各类规模化养殖畜禽粪便的氮元素水体流失率大约在5%~9%,而尿液氮元素流失率则达到50%,由于现有研究主要集中于规模化畜禽养殖的污染物流失率,散养畜禽排泄物的氮元素流失率统一采用30%^[13,21]。利用《第一次全国污染源普查畜禽养殖业产排污系数与排污系数手

表1 畜禽粪便含氮量以及规模化养殖水体流失率(%)

Table 1 Nitrogen contents in animal manure and loss rate into water(%)

项目	氮含量	规模化养殖氮元素流失率
牛粪	0.437	5.68
牛尿	0.800	50
猪粪	0.588	5.34
猪尿	0.330	50
羊粪	0.750	5.30
羊尿	0.140	50
鸡粪	0.984	8.47

册》,将主要畜禽的产污系数划分为五个区域取值,这五个地区具体包括华北地区(北京、天津、河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江)、华东地区(上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东)、中南地区(河南、湖北、湖南、广东、广西、海南)、西南地区(重庆、四川、贵州、云南、西藏)和西北地区(山西、甘肃、青海、宁夏、新疆)。

1.2 畜禽规模化养殖界定以及氮元素入水通量计算

对于规模化养殖的具体标准,不同统计资料或行业标准间存在一定差异,综合《畜禽养殖业污染治理工程技术规范》《全国农产品成本收益资料汇编》《中国畜牧业统计年鉴》信息^[16,23-24],本文采用的规模化标准如表2所示。

畜禽排泄物产生的氮元素入水排放总量计算公式为:

$$Q_{1i} = (N_{i存} + 0.542 \times N_{i出}) \times P_i \times (E_i \times N_{Ei} \times L_{Ei} + U_i \times N_{Ui} \times L_{Ui}) \times 365 \quad (1)$$

$$Q_{2i} = (N_{i存} + 0.542 \times N_{i出}) \times (1 - P_i) \times (E_i \times N_{Ei} + U_i \times N_{Ui}) \times L_N \times 365 \quad (2)$$

$$Q = \sum Q_{1i} + \sum Q_{2i} \quad (3)$$

式中, Q_{1i} 、 Q_{2i} 和 Q 分别为第*i*种畜禽规模化养殖、散养以及所有畜禽总的氮元素入水通量($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$); $N_{i存}$ 、 $N_{i出}$ 为第*i*种畜禽的年存栏量和出栏量; P_i 为规模化养殖比例; E_i 、 N_{Ei} 、 L_{Ei} 分别为畜禽的单位粪便量($\text{kg} \cdot \text{只}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)、粪便含氮量(表1)、粪便水体流失率; U_i 、 N_{Ui} 、 L_{Ui} 分别为畜禽的单位尿液量($\text{kg} \cdot \text{只}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)、尿液含氮量、尿液水体流失率; L_N 为散养的粪便水体流失率。由于2011年以后畜禽规模化养殖数据缺失,本文利用

2006—2010年的统计数据,采用线性回归方法来估算不同畜禽在各地区的规模化养殖比例。为了纠正出栏动物不再产生粪污这一事实,我们用因子0.542校正了一年中被杀死动物的数量,表示出栏动物是年饲养活畜的一部分,以此来估算出栏畜禽年实际排污量^[25-26]。

2 结果与讨论

2.1 2006—2016年全国畜禽养殖业氮元素入水通量

如图1所示,在2006—2016年间,全国由畜禽养殖排入水体中的氮元素平均通量为4384 Gg,这11年中氮元素入水通量的最大和最小值分别为4832 Gg(2006年)和4010 Gg(2008年),而2006至2008年也是畜禽养殖业氮元素入水通量下降最为显著的时期。2016年全国畜禽养殖氮元素排放通量达到4426 Gg,相比于2006年下降了8%,但在2012年以后的氮元素入水通量几乎保持不变。Gu等^[13]和孙良媛等^[3]分别估算出的2010年和2011年畜禽养殖氮元素入水通量为3000 Gg和2140 Gg,本文的估算结果明显高于前两者,由于本文将畜禽规模化养殖和散养的粪便排污量分别进行计算,规模化养殖畜禽粪便的氮元素水体流失率远低于散养畜禽粪便氮元素水体流失率,而在这11年中,我国有相当一部分地区的某些畜禽仍然以散养为主,因此,畜禽散养和规模化的粪便水体流失率差异是造成本文结果明显高于前者计算结果的主要原因,但本文估算结果与《全国规模化畜禽养殖业污染情况调查技术报告》^[5]的估算结果(4071 Gg)相近。总体来看,尽管近十年中我国畜禽规模化养殖比例提升显著,但是入水氮元素通量下降并不显著。分析原因可能有两点:一是随着人口增加以及生活水平提高,国内肉类消费量逐年上升,同时活畜禽和鲜冻肉类的出口量也较大^[16,27],因此畜禽养殖量仍处于较高规模;二是规模化养殖也可能造成污染物的集中排放^[28]。规模化养殖对粪便集中收集处理效率较高,但是对畜禽尿液的处理并不理想^[29]。规模化养殖场的清粪方式主要有三种:水冲清粪、干清粪和垫草垫料清粪,其中水冲清粪的排污系数约为干清粪的3倍^[20],垫草垫料清粪最为清洁,但水冲清粪造价低,操作方便,因此国内很多地方仍采用该方法来清理畜禽粪

表2 本文对养殖动物规模化分类标准

Table 2 The classification criteria on the large-scale farming in this article

动物	羊/只	猪/头	肉牛/头	奶牛/头	蛋鸡/只	肉鸡/只
规模化	出栏量≥100	出栏量≥100	出栏量≥50	存栏量≥50	存栏量≥10 000	出栏量≥10 000

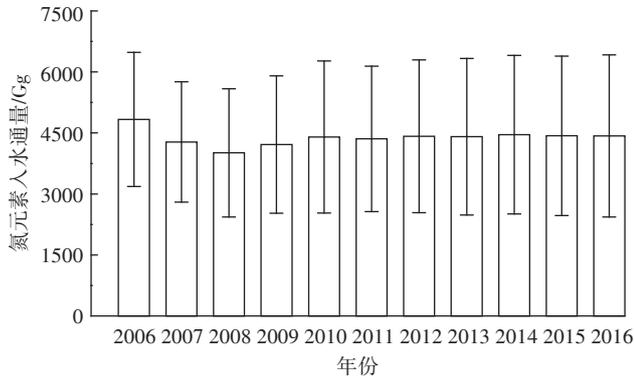


图1 2006—2016年全国畜禽养殖排入水体的氮元素通量
Figure 1 Nitrogen discharge of livestock farming into water in China from 2006 to 2016

便^[19,29],如祝其丽等^[29]调查了2011年全国144处不同规模猪场的清粪方式,结果表明小型养猪场(500~2999头)水冲清粪的比例高达87%;刘永丰等^[9]对2014年海南省各地区畜禽规模化养殖场的调查结果显示全省各地区至少有60%的养猪场还在使用水冲清粪工艺。综合各省份畜禽养殖业氮元素入水通量,各省份间排放通量差异显著。2006年畜禽养殖业氮元素入水通量最多和最少的省市分别是河南(516 Gg)和上海(148 Gg),分别占该年氮元素总入水通量的11%和0.3%,到2016年,畜禽养殖业氮元素入水通量最多和最少的仍是河南(435 Gg)和上海(118 Gg),氮元素入水通量与10年前相比均有所下降,各自占比分别为10%和0.3%。除了河南省之外,山东省、四川省对于畜禽养殖业氮元素入水通量的贡献也较大,2016年的氮元素入水通量分别是359 Gg和298 Gg,占比分别为8%和7%。

在2006—2016年间,不同畜禽养殖类型的氮元素入水通量变化不大(图2a):在2006年和2016年,羊、猪、肉牛、奶牛、蛋鸡、肉鸡养殖的氮元素入水通量分别为31、163、177、41、28、42 Gg和22、164、138、59、22、36 Gg;从比例上看(图2b),2006年和2016年上述各种畜禽的氮元素入水通量分别为7%、34%、36%、8%、6%、9%和5%、37%、31%、13%、5%、8%。总体来看,氮元素入水通量按猪>肉牛>奶牛>肉鸡>羊>蛋鸡的顺序依次降低。因此可以看出,我国畜禽养殖业中猪和肉牛是导致氮元素进入水体的主要排放源。有研究表明^[28],在我国当前的畜禽养殖模式下,育肥猪贡献了约有一半的粪便污染物(包括氮元素、磷元素以及COD等);另外,肉牛的单位产污量最大,约为猪肉的2~3倍,鸡肉的5~20倍^[28]。本文的结果也表明,

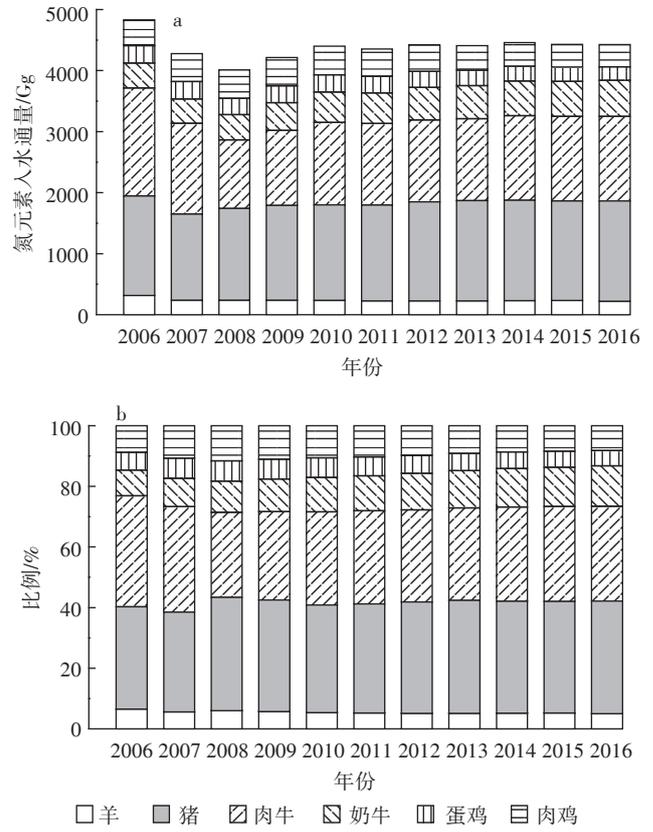


图2 2006—2016年全国不同养殖类型氮元素流失通量(a)及其比例(b)

Figure 2 The nitrogen fluxes(a) of various farmed animals and their proportions(b) in China from 2006 to 2016

若要有效控制我国氮元素入水通量,应密切关注畜禽养殖过程中的氮排放,而在畜禽养殖中猪和牛则是首要的控制因素^[28,30]。

2.2 不同养殖方式的氮元素入水通量变化估算

由图3所示,在2006—2016年间,全国由畜禽规模化养殖排入水中的氮元素通量呈现显著的上升趋势。在2006年,规模化养殖氮元素入水通量的比例占总入水通量的23%,在2016年,该比例上升到53%,而这种增加也可以显著反映我国规模化养殖比例的迅速增加。在我国不同的地理区域,畜禽散养和规模化养殖的氮元素入水通量的分布存在较大差异。如图4所示,我们选择了2006、2010年和2016年为代表,比较了畜禽散养和规模化养殖的氮元素入水通量在我国空间分布上的差异。总体来看,中南和华北地区是我国的畜禽养殖氮元素排放的主要地区,华东和西南次之,西北地区最少。2016年华北、中南、华东、西南和西北地区的畜禽氮元素流失通量比例分别为27%、26%、20%、17%、10%。在所有主要区域中,在

中南地区,我国畜禽散养氮元素入水通量下降趋势最为明显,由2006年的930 Gg下降至2016年的430 Gg,华北和华东地区次之,下降量分别为437 Gg和426 Gg。对于西南和西北地区,其畜禽散养带来的氮元素入水通量下降趋势并不明显,到2016年仍占相当高的比例,西南地区超过55%,西北地区超过70%。11年来,我国畜禽规模化养殖氮元素入水通量上升趋势都较为明显,中南地区最多,由2006年的340 Gg上升到2016年的744 Gg,华北、华东、西南、西北地区的增量分别为234、326、154、111 Gg,到2016年,华东、中南地区的畜禽养殖业氮元素排放主要由规模化养殖引起,分别占各自地区氮元素入水通量的68%、63%,而华北地区的规模化养殖氮元素入水通量占50%,并有继续上升的趋势(图3b)。出现这种差异的原因可能是我国西南和西北地区地广人稀,传统畜禽散养模式向规模化养殖的转换要远远慢于经济发展快、人口密度大的东南部地区。

2.3 畜禽类型和区域差异对氮元素入水通量的估算

不同畜禽类型(包括羊、猪、肉牛、奶牛、蛋鸡和肉

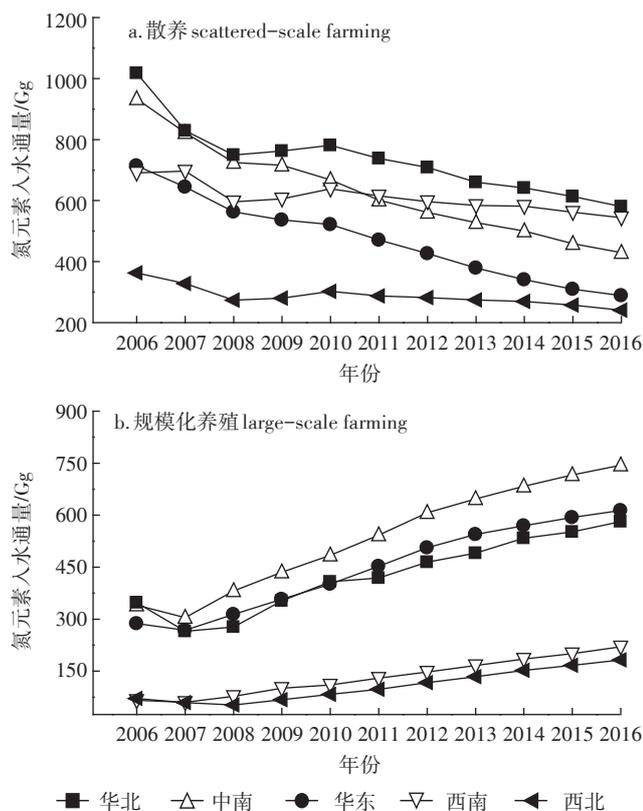


图3 2006—2016年全国各地区畜禽散养和规模化养殖排入水体的氮元素通量

Figure 3 The nitrogen fluxes of livestock farming into water in scattered-scale and large-scale in China from 2006 to 2016

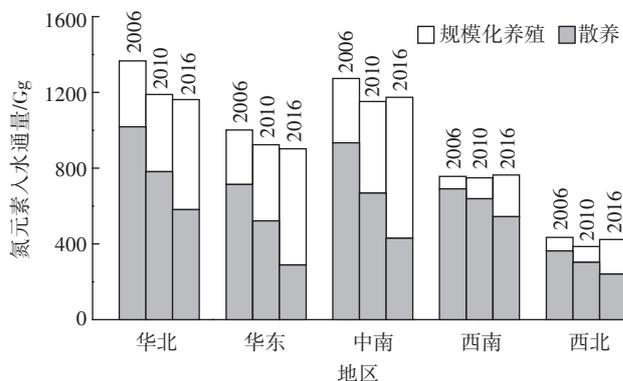


图4 2006、2010年和2016年全国畜禽散养和规模化养殖排入水体的氮元素通量

Figure 4 The nitrogen fluxes of livestock farming into water in scattered-scale and large-scale livestock farming in 2006, 2010 and 2016

鸡)通过散养和规模化养殖的氮元素入水通量变化如图5所示。不同畜禽类型通过散养和规模化养殖带来的氮元素排放通量差异显著。具体来说,羊、肉牛和蛋鸡由散养向水中排放的氮元素量较大,在2006年和2016年的排放量分别为302、1499、270 Gg和201、930、172 Gg。在2016年,其排在总排放中的比例分别高达91%、76%、67%。显著不同的是,猪和肉鸡由散养排放氮元素通量的比例下降明显,猪散养的氮元素入水通量在2006年和2016年分别为1042 Gg和347 Gg,占其总通量的64%和21%;肉鸡散养的氮元素入水通量在2006年和2016年分别为311 Gg和136 Gg,占其总通量的74%和38%。奶牛散养的氮元素入水通量在过去11年内几乎保持不变(均在295~297 Gg范围内),但是该部分的排放比例下降却较为显著,由2006的72%降至2016年的50%。这种差异也体现了不同畜禽养殖类型在规模化养殖比例中的差异。

不同区域的不同畜禽类型通过散养和规模化养殖的氮元素入水通量也有差异,如2016年(图6),华北、华东、中南地区氮素入水量主要由猪规模化养殖排放,2016年猪规模化养殖排放的比例分别为36%、36%、47%,这些区域应该加强规模化猪养殖粪便污染配套设施建设。西南和西北地区氮素入水量主要由肉牛散养排放,2016年两区域的肉牛散养排放比例分别为39%和27%,因此应该加强散养肉牛的粪便污染控制。总体来看,猪规模化养殖和肉牛散养排放的氮元素在各个地区均占有较大比例。另外,由羊散养进入水体中的氮元素在西北地区的比例较其他地区高,该地区也应该加强散养羊的粪便污染控制。

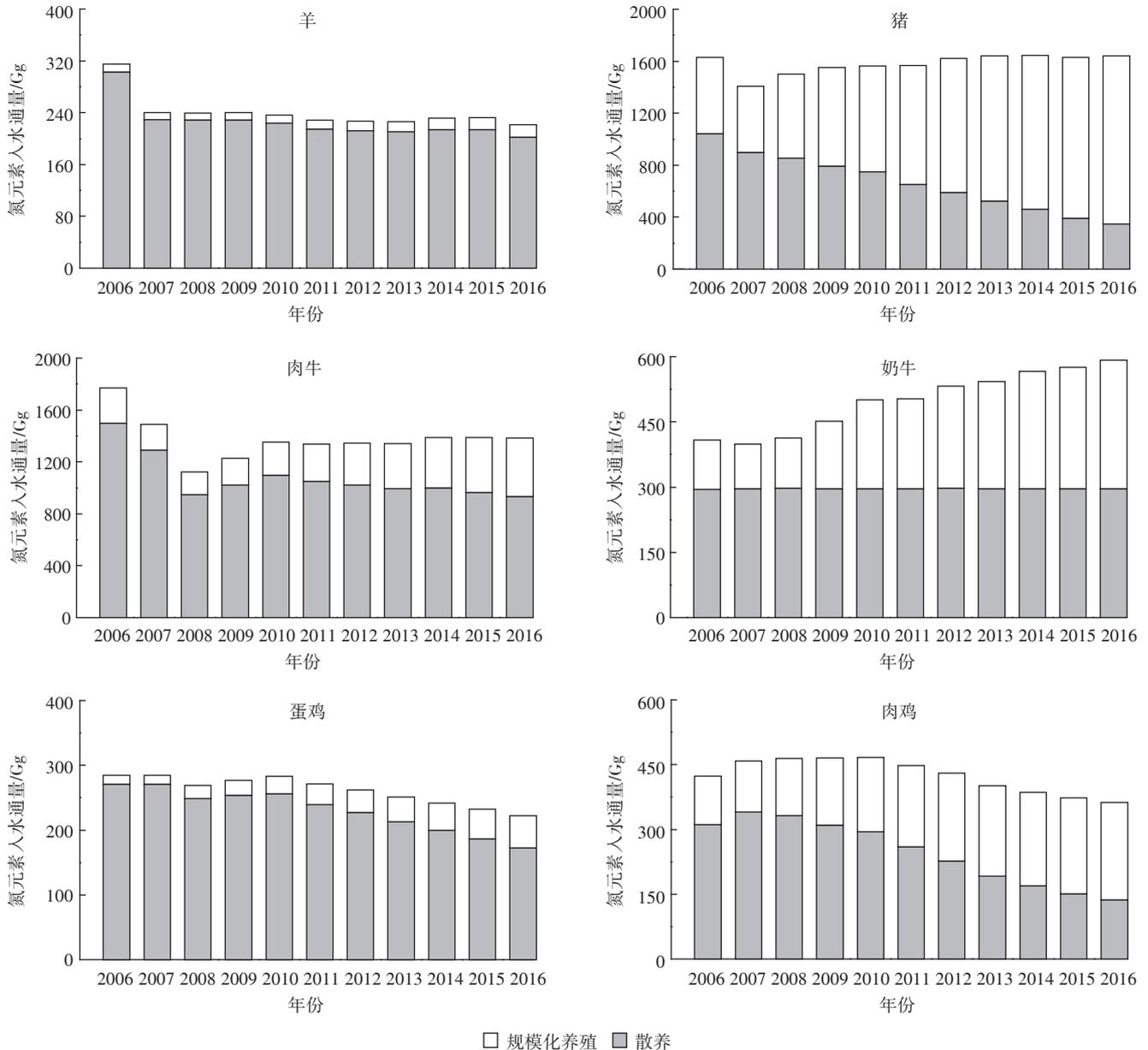


图5 2006—2016年不同动物散养和规模化养殖氮元素入水通量

Figure 5 The nitrogen fluxes of all kinds of animals in scattered-scale and large-scale livestock farming from 2006 to 2016

3 结论

(1) 2006—2016年,全国由畜禽养殖排入水体中的氮元素平均通量为4384 Gg,相比于2006年,2016年氮元素入水通量略有下降。规模化养殖氮元素入水通量所占的比例由2006年的23%上升到2016年的53%,因此,规模化养殖带来的污染物排放在未来水环境管理中需要优先考虑。

(2) 过去11年内,我国中南、华北、华东、西南、西北地区规模化畜禽养殖的氮元素入水通量分别增长

了404、234、326、154、111 Gg;在2016年,羊、肉牛、蛋鸡、奶牛、肉鸡和猪散养的氮元素入水通量分别占比91%、76%、67%、50%、38%、21%。

(3) 对于不同畜禽养殖类型,氮元素入水通量按猪>肉牛>奶牛>肉鸡>羊>蛋鸡的顺序依次降低。2016年,华北、华东、中南地区氮素入水量主要由猪规模化养殖排放,排放比例分别为36%、36%、47%,西南和西北地区氮素入水量主要由肉牛散养排放,排放比例分别为39%和27%,总体来看,肉牛和猪成为我国畜禽养殖氮元素入水通量的主要排放源。

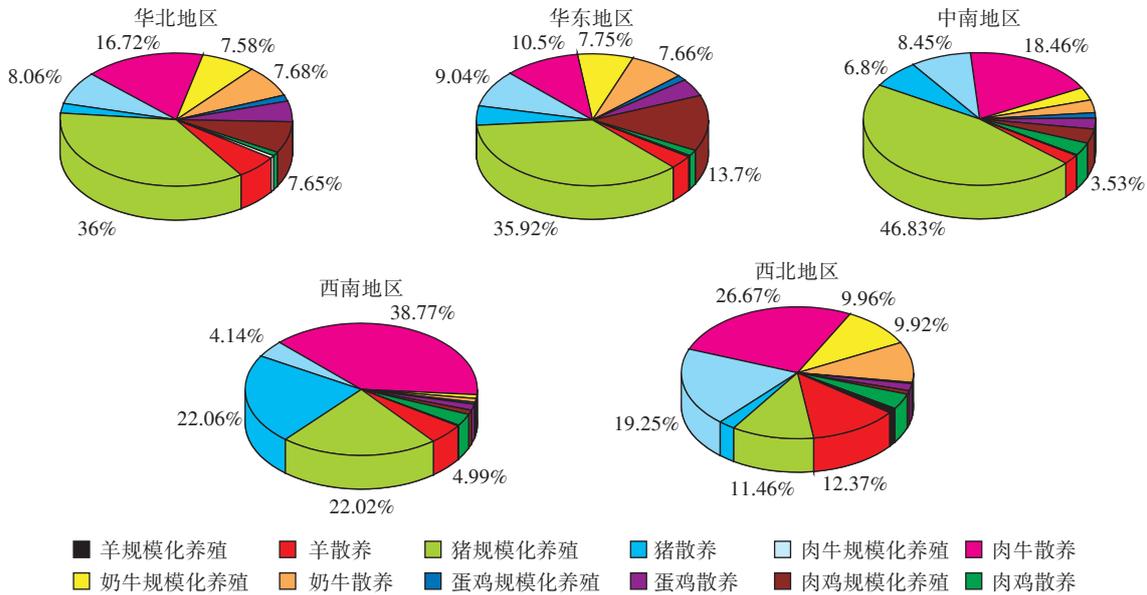


图6 2016年各地区不同养殖类型和方式的氮元素排放比例

Figure 6 Proportional distributions of nitrogen released from different types and methods of livestock farming in different regions in 2016

参考文献:

- [1] 刘家斌, 孙召福, 管坤. 畜禽养殖污染成因分析及治理对策[J]. 农村经济, 2017(11):25-26.
LIU Jia-bin, SUN Zhao-fu, GUAN Kun. Analysis on the cause of pollution of livestock and poultry breeding and its countermeasures[J]. *Rural Economy*, 2017(11):25-26.
- [2] 付强, 诸云强, 孙九林, 等. 中国畜禽养殖的空间格局与重心曲线特征分析[J]. 地理学报, 2012, 67(10):1383-1398.
FU Qiang, ZHU Yun-qiang, SUN Jiu-lin, et al. Spatial patterns and gravity centers curve of livestock and poultry breeding in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(10):1383-1398.
- [3] 孙良媛, 刘涛, 张乐. 中国规模化畜禽养殖的现状及其对生态环境的影响[J]. 华南农业大学学报, 2016, 15(2):23-30.
SUN Liang-yuan, LIU Tiao, ZHANG Le. The pollution of the scale livestock and poultry breeding and its influence on eco-environment[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2016, 15(2):23-30.
- [4] 程鹏. 北京地区典型奶牛场污染物排泄系数的测算[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
CHENG Peng. Estimation of pollutant effluent coefficient of typical dairy farm in Beijing[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [5] 国家统计局. 国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 国家统计局, 2016: 5-20.
National Bureau of Statistics. Statistical communique on national economic and social development[R]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2016:5-20.
- [6] 高定, 陈同斌, 刘斌, 等. 我国畜禽养殖业粪便污染风险与控制策略[J]. 地理研究, 2006, 25(2):311-319.
GAO Ding, CHEN Tong-bin, LIU Bin, et al. Releases of pollutants from poultry manure in China and recommended strategies for the pollution prevention[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(2):311-319.
- [7] 庄犁, 周慧平, 张龙江. 我国畜禽养殖业产排污系数研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(5):633-639.
ZHUANG Li, ZHOU Hui-ping, ZHANG Long-jiang. Advancement in research on pollutants producing and discharging coefficients of livestock and poultry breeding industry in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(5):633-639.
- [8] 中华人民共和国环境保护部. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查技术报告[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2002: 1-10.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Investigation report on national large-scale livestock and poultry industry pollution[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, 2002: 1-10.
- [9] Anthony S, Donigan J R, Wayne C H. Modeling of non-point source water quality in urban and non-urban area[R]. Environmental Research Laboratory Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 1991:34-39.
- [10] Qi J, Zheng B, Li M Y, et al. A high-resolution air pollutants emission inventory in 2013 for the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 170:156-168.
- [11] Hou Y, Chen W P, Liao Y H, et al. Scenario analysis of the impacts of socioeconomic development on phosphorous export and loading from the Dongting Lake watershed, China[J]. *Environment Science Pollution Research*, 2017, 24(34):26706-26723.
- [12] 陈瑶, 王树进. 我国畜禽集约化养殖环境压力及国外环境治理的启示[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6):862-868.
CHEN Yao, WANG Shu-jin. Environmental pressure of intensive breeding in China and the revelation of environmental governance from developed countries[J]. *Resources and Environment in The Yang-*

- tze Basin*, 2014, 23(6):862-868.
- [13] Gu B, Ju X, Chang S X, et al. Nitrogen use efficiencies in Chinese agricultural systems and implications for food security and environmental protection[J]. *Regional Environmental Change*, 2017, 17(4):1-11.
- [14] 潘瑜春, 孙超, 刘玉, 等. 基于土地消纳粪便能力的畜禽养殖承载力[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4):232-239.
PAN Yu-chun, SUN Chao, LIU Yu, et al. Carrying capacity of livestock and poultry breeding based on feces disposal volume of land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4):232-239.
- [15] 盛瑜, 周虹好, 史伯春, 等. 畜禽养殖污染防治工作存在的问题及对策分析[J]. 中国畜牧杂志, 2016, 25(6):68-70.
SHENG Yu, ZHOU Hong-yu, SHI Bo-chun, et al. Analysis on the problems and countermeasures of the pollution prevention and control work of the livestock and poultry[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2016, 25(6):68-70.
- [16] 中国畜牧业年鉴编辑委员会. 畜牧业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006-2015.
China Animal Husbandry Yearbook Editorial Board. Animal husbandry statistics yearbook[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2006-2015.
- [17] 付强, 诸云强, 杨红新, 等. 2002—2009年中国规模化畜禽养殖量区域差异及政策建议[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18):185-191.
FU Qiang, ZHU Yun-qiang, YANG Hong-xin, et al. Regional differences of livestock and poultry breeding output in scale and policy suggestions during 2002—2009 in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(18):185-191.
- [18] 刘爱民, 强文丽, 王维方, 等. 我国畜禽养殖方式的区域性差异及演变过程研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(4):552-561.
LIU Ai-min, QIANG Wen-li, WANG Wei-fang, et al. Regional differences and evolution of livestock farming patterns in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(4):552-561.
- [19] 刘永丰, 吴根义, 许振成, 等. 海南省规模化畜禽养殖场污染防治现状调查与减排对策研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(3):101-105.
LIU Yong-feng, WU Gen-yi, XU Zhen-cheng, et al. Investigation and countermeasures for pollution of large scaled livestock and poultry breeding farms in Hainan Province[J]. *Environmental Science and Management*, 2014, 39(3):101-105.
- [20] 中国农业科学院. 第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册[M]. 2009:3-14.
Chinese Academy of Agricultural Sciences. The first national source survey of livestock and poultry farming source of sewage coefficient manual[M]. 2009:3-14.
- [21] 国家统计局. 畜禽粪便废水主要污染指标技术报告[R]. 北京: 国家统计局, 2002:1-75.
National Bureau of Statistics. Technical report on the main pollution index of livestock and poultry wastewater[R]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2002:1-75.
- [22] 李庆康, 吴雷, 刘海琴, 等. 我国集约化畜禽养殖场粪便处理利用现状及展望[J]. 农业环境保护, 2000, 19(4):251-254.
LI Qing-kang, WU Lei, LIU Hai-qin, et al. The status and outlook of treatment on excreta from intensive animal farming in China[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(4):251-254.
- [23] 中华人民共和国环境保护部. HJ 497—2009 畜禽养殖业污染治理工程技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. HJ 497—2009 Livestock and poultry breeding pollution control engineering specifications[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009.
- [24] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015:237-336.
National Development and Reform Commission Price Division. National agricultural products cost and benefit compilation[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015:237-336.
- [25] Yan W, Mayorga E, Li X, et al. Increasing anthropogenic nitrogen inputs and riverine DIN exports from the Changjiang River basin under changing human pressures[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(4):1134-1138.
- [26] Tong Y, Zhang W, Wang X, et al. Decline in Chinese lake phosphorus concentration accompanied by shift in sources since 2006[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(7):507-511.
- [27] 李慕菡, 张晓林, 张连众. 中国出口畜禽产品的碳排放研究[J]. 生态经济, 2013(10):87-94.
LI Mu-han, ZHANG Xiao-lin, ZHANG Lian-zhong. The study on carbon emission of livestock products export in China[J]. *Ecological Economy*, 2013(10):87-94.
- [28] Qian Y, Song K, Hu T, et al. Environmental status of livestock and poultry sectors in China under current transformation stage[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 622-623(2018):702-709.
- [29] 祝其丽, 李清, 胡启春, 等. 猪场清粪方式调查与沼气工程适用性分析[J]. 中国沼气, 2011, 29(1):26-29.
ZHU Qi-li, LI Qing, HU Qi-chun, et al. Investigation and analysis of animal manure collection methods on pig farms and their applicability to the anaerobic digestion[J]. *China Biogas*, 2011, 29(1):26-29.
- [30] Liu Y, Ji Y, Shao S, et al. Scale of production, scale of production, agglomeration and agricultural pollutant treatment: Evidence from a survey in China[J]. *Ecological Economics*, 2017, 140:30-45.
- [31] Fiala N. Meeting the demand: An estimation of potential future greenhouse gas emissions from meat production[J]. *Ecological Economics*, 2008, 67(3):412-419.
- [32] Tilman D, Clark M. Global diets link environmental sustainability and human health[J]. *Nature*, 2014, 515(7528):518-522.
- [33] Hu Y, Cheng H, Tao S. Environmental and human health challenges of industrial livestock and poultry farming in China and their mitigation[J]. *Environment International*, 2017, 107(11):111-130.