

# 我国畜禽养殖业产排污系数研究进展

庄犁<sup>1,2</sup>, 周慧平<sup>2</sup>Ⓐ, 张龙江<sup>2</sup> (1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

**摘要:** 畜禽养殖业污染物排放量的核算对于环境形势判断、环境规划和环境决策制定具有重要意义,同时也是畜禽污染治理工程设计的重要基础资料。产排污系数为畜禽养殖业污染物排放量的核算提供了较为客观的方法,是环境领域重要的基础数据。笔者总结了我国近年来畜禽业产排污系数的研究状况,对我国畜禽养殖业产排污系数的发展历程、不同地区采用的测算方法和测算结果进行了系统的梳理和对比,总结了畜禽业产排污系数研究一些典型的应用和改进,并对畜禽养殖业产排污系数的研究进行展望。

**关键词:** 畜禽; 产污系数; 排污系数

**中图分类号:** X32; X50 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2015)05-0633-07

**DOI:** 10.11934/j.issn.1673-4831.2015.05.003

**Advancement in Research on Pollutants Producing and Discharging Coefficients of Livestock and Poultry Breeding Industry in China.** ZHUANG Li<sup>1,2</sup>, ZHOU Hui-ping<sup>2</sup>, ZHANG Long-jiang<sup>2</sup> (1. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** How to calculate discharge of pollutants from the livestock and poultry breeding industry is critical to judgment of environment situation as well as planning and decision-making for the environment, and the calculation is an important basic datum for designing livestock and poultry breeding pollution control projects. Pollutants producing and discharging coefficients are important basic data in the study of environment, and can be used as a fair objective approach to calculation of pollutants discharge from the industry. The recent researches on pollutants producing and discharging coefficients of the livestock and poultry breeding industry in China are reviewed. The development courses, measuring methods and measurements of the coefficients in different regions of the country are collated systematically for comparison. Typical applications and improvements in the researches are summarized, and in the end the progresses in future researches in this field is forecasted.

**Key words:** livestock; pollutant producing coefficient; pollutant discharging coefficient

伴随着我国畜牧业规模化养殖的快速发展,畜禽粪便大量产出及不合理的利用给区域环境造成了一定影响<sup>[1]</sup>。《第一次全国污染源普查公报》表明农业面源污染已经成为我国的主要污染源,畜禽养殖业化学需氧量、总氮和总磷的年排放量分别占全国污染物排放总量的41.87%、21.67%和37.9%,是农业源污染的重要组成部分。当前我国在宏观层面上进行畜禽养殖业污染物产排量核算时主要采取的是产排污系数法。对于同种养殖类型,不同地区在气候条件、养殖方式和污染处理方式等条件上的差异性亦导致其产排污系数的明显不同。若在对不同地区产排污系数进行测算及利用产排污系数进行污染物产排量核算时没有统一标准,不仅会影响产排污系数法的准确性,而且不同地区核算结果也难以进行横向对比,无法为管理政策的制定

提供有效的支撑。笔者对我国现阶段畜禽养殖业产排污系数的测算方法和结果进行系统地总结和梳理,提出存在的问题,展望今后的研究重点,以期为畜禽养殖业产排污系数的改进和应用提供重要参考。

## 1 国内外研究现状

发达国家畜禽养殖的工业化生产较早。在美国,牛和家禽的工业化生产始于20世纪50年代,而猪的工业化生产始于70年代<sup>[2]</sup>。国外针对畜禽养

收稿日期: 2015-02-10

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07101-012-01)

Ⓐ 通信作者 E-mail: zhp@nies.org

殖污染的研究主要集中在畜禽排泄物对环境的污染<sup>[2-3]</sup>、污染物的空间分布<sup>[4]</sup>以及养殖方式的改进对污染的影响<sup>[5]</sup>等方面,而直接针对畜禽业产排污系数的研究并不多。美国农业工程师协会编制出版了动物粪便产生和特性参数标准<sup>[6]</sup>,给出了不同动物的粪尿产生量及粪尿中污染物含量,与我国的产污系数类似。日本为畜禽养殖污染的防治制定了大量法律,在畜禽粪尿特性和产排污系数方面也有大量数据<sup>[7-8]</sup>;丹麦则发布了畜禽粪便产排污系数手册<sup>[9]</sup>,以方便对畜禽养殖的污染物产排污量进行核算。

我国畜禽业的工业化生产起步较晚,相关研究进行得也较晚。我国畜禽养殖业污染物排放量核算研究大致可分为2个阶段:2008年以前国内还没有严格的畜禽养殖业产排污系数概念,污染物排放量的计算方法也各不相同<sup>[10-16]</sup>。大多由统计年鉴或实地调查得到养殖数量,参考公开发表的文献得到畜禽粪尿排泄系数和污染物含量<sup>[17-18]</sup>。当时中国的研究水平甚至很难把畜禽养殖排泄的粪尿准确分开,无法得到可靠的排泄系数。有研究表明,不同时间和地区的畜禽粪便的养分含量有较大差异<sup>[19]</sup>,跨地区跨时间套用其他地区甚至国外的排泄系数和粪便污染物含量使得核算结果不准确,没有统一的计算方法也导致研究成果通用性不佳。2008年初我国开展了第1次全国污染源普查,将畜禽养殖业纳入核算体系,并发布了《畜禽养殖业源产排污系数测算实施方案》,规范了畜禽养殖业产排污系数测算的方法。2009年发布了《第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》<sup>[20]</sup>(以下简称污普系数),形成了以6个大区(东北、华北、华东、中南、西南、西北)为单位的畜禽养殖业产排污系数,在大区尺度上具有较高的准确性。与此同时,学者也针对具体的区域、季节、养殖类型等开展了大量研究,除了单纯的测算畜禽业产排污系数外,还对测算方法和结果进行了改进和优化。

## 2 研究方法

### 2.1 研究对象

已有的产排污系数研究主要分布在江苏、浙江、四川、北京、安徽、河南、广西和黑龙江等地。由于我国畜禽种类众多,主要统计资料大多将畜禽简化为生猪、肉牛、奶牛、肉鸡和蛋鸡5类,为了与国家统计资料衔接,产排污系数的研究也主要围绕这5种畜禽开展,其中生猪和奶牛的研究最多,除此5类之外的其他畜禽种类大多根据《畜禽养殖业污染物

排放标准》中相关规定折算为生猪当量<sup>[21-22]</sup>。畜禽在不同饲养阶段和不同养殖方式下会有不同的产排污系数,因而需要对其分别进行讨论。不同种类畜禽有不同的饲养阶段:生猪分为保育猪、育肥猪和妊娠猪3个养殖阶段;奶牛分为育成牛和产奶牛2个养殖阶段;蛋鸡分为育雏鸡和育成鸡2个养殖阶段;肉牛和肉鸡均只有1个养殖阶段,分别为育肥牛和商品肉鸡。养殖方式主要涉及养殖规模、清粪方式和污水处理方式等方面,其中养殖规模有规模化养殖、养殖小区和养殖专业户3类;清粪分为垫料、干清和水冲3种方式;污水处理方式主要有直接排放、厌氧、厌氧+好氧、厌氧+好氧+深度处理等模式。

### 2.2 样品的采集

#### 2.2.1 采样时间和频率

因不同季节的养殖条件不同,学者们普遍采用以1a为周期、每个季节分别采样的方式,每次采样3~5d,上下午各1次,并保证3d有效数据;有学者在样品采集之前进行预饲<sup>[23-24]</sup>,时间为7d,预饲期间采用标准饲料喂养,可以避免饲料成分的不同对产排污系数准确性的影响。虽然普遍采用了每个季节分别采样的方式,但是在各季节采样时段选择上并没有明确的标准,不同研究者的选择也各不相同,学者自行安排的采样时段并不一定能代表该季节畜禽的产排污情况,应综合考虑如温度、气压和气候等各方面因素,选择最有代表性的时段来进行采样。

#### 2.2.2 采样方式

产污系数的测算需要测定畜禽的粪尿特性。一般采用代谢笼或定位栏的方式收集全粪尿,蛋鸡和肉鸡不排泄尿液,只在养殖结束和转棚时对养殖棚冲洗消毒才会产生污水。采样时,随机选择数头(只)不同养殖阶段的畜禽测定粪尿产量,通过正常收集得到的粪便量与全收集粪尿的比值得到粪便采集率。粪便采样方法基本相同,并在采样的同时进行预处理:从混匀的新鲜粪便中取数个样品,每份样品均不少于500g,一部分样品不进行预处理,用来测定粪便含水率;另一部分按每100g新鲜粪便加20mL浓度为4.5mol·L<sup>-1</sup>硫酸的方法进行预处理,使pH值小于2;所有样品均需避光,4℃以下保存,新鲜样品24h内检测,制备样品则要求在7d内检测。尿液的采样方法基本相同,在尿液收集桶中直接测定pH值并取样,每个样品不少于500mL,按每100mL加入2mL浓度为4.5mol·L<sup>-1</sup>的硫酸和4滴甲苯进行预处理,保证送样要求与鲜粪相同。

排污系数的测算要求在产污系数的基础上考虑污水的处理效率。污水的产生量和排放量由在污水处理设备的入水口和出水口设置的量水槽测得,污水的处理效率则由污水处理设备出入水口取样分析得到,污水样品从量水槽入口处采集,混匀后测定 pH 值,取样和预处理方式与尿液相同。栾冬梅等<sup>[23]</sup>认为在特定条件下污水产生量和排放量基本相等,可以视为不变。

### 2.3 测定指标与方法

粪便的主要检测指标为:含水率、有机质、总氮、总磷、铜、锌;污水和尿液的主要检测指标包括:COD、总磷、总氮(凯氏氮)、铜、锌。测定方法均为国家或行业标准方法<sup>[25]</sup>。近年来畜禽排泄物中抗生素和类固醇激素对环境的潜在污染风险得到广泛关注,已有学者对其进行了相关测定和研究<sup>[26-31]</sup>,这也是今后畜禽业产排污系数测定指标需要考虑和拓展的方向。各学者在测算过程中根据实际情况增加或减少指标<sup>[32-33]</sup>,在一些研究中增加氨氮含量的测定<sup>[22,33-34]</sup>,蒋志国等<sup>[32]</sup>增加了铅、铬、镉含量的测定;

### 2.4 产排污系数的计算

畜禽养殖业产污系数是指在典型的正常生产和管理条件下,一定时间内单个畜禽所产生的原始污染物质,包括粪尿量以及粪尿中各种污染物产生量<sup>[34]</sup>。畜禽动物的排泄由粪便和尿液 2 个部分组成,一般以 d 为单位,计算单个(头、只)动物不同饲养阶段的产污系数。现有研究中产污系数的计算均采用式(1)。

$$F_{i,j,k} = Q_{i,j} \times C_{i,j,k} + P_{i,j} \times U_{i,j,k} \quad (1)$$

式(1)中, $i, j, k$  分别为动物种类、生产阶段、污染物种类; $F_{i,j,k}$  为单位动物产污系数,  $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $Q_{i,j}$  为单位动物粪产量,  $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $C_{i,j,k}$  为粪便中污染物浓度,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $P_{i,j}$  为单位动物尿液产量,  $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $U_{i,j,k}$  为尿液中污染物浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

畜禽污染物排放系数是指在典型的正常生产和管理条件下,单个畜禽每天产生的原始污染物经处理设施消减后或未经处理利用而直接排放到环境中的污染物质。相对于产污系数,排污系数的影响因素更为多样,计算方法也有所区别,但思路大体相同:把畜禽污染排放分为粪便和污水 2 个部分,粪便和污水分别经过收集、处理、利用后进入环境形成污染。谢飞等<sup>[21]</sup>采用产污系数与流失率相乘的方法得到排污系数,流失率参考相关研究结果。王国利等<sup>[35-36]</sup>采用式(2),考虑了粪便收集率和污水处理效率,把尿液作为污水污染物的唯一来源。

$$D_{i,j,k} = (Q_{i,j} \times C_{i,j,k}) \times (1 - \eta_U) + (P_{i,j} \times U_{i,j,k}) \times (1 - \eta_{T,k}) \quad (2)$$

式(2)中, $D_{i,j,k}$  为单位动物排污系数,  $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $\eta_U$  为粪便利用率, %;  $\eta_{T,k}$  为第  $k$  种污染物处理效率, %。

何志平等<sup>[33,37]</sup>用式(3)计算畜禽业排污系数,相对于式(2)增加污水利用率和粪便收集率 2 项。在大部分的研究中以式(4)作为排污系数的计算公式,此公式全面考虑了粪便收集率、利用率、尿液与未收集粪便共同形成的污水及污水的利用率和处理效率,相对于式(2),式(4)更为准确。

$$D_{i,j,k} = P_{i,j} \times U_{i,j,k} \times (1 - \eta_{T,k}) \times \left(1 - \frac{W_U}{W_P}\right) + Q_{i,j} \times C_{i,j,k} \times \eta_F \times (1 - \eta_U) \quad (3)$$

$$D_{i,j,k} = [Q_{i,j} \times C_{i,j,k} \times (1 - \eta_F) + P_{i,j} \times U_{i,j,k}] \times (1 - \eta_{T,k}) \times \left(1 - \frac{W_U}{W_P}\right) + Q_{i,j} \times C_{i,j,k} \times \eta_F \times (1 - \eta_U) \quad (4)$$

式(3)~(4)中, $\eta_F$  为粪便收集率, %;  $W_U$  为污水利用量,  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $W_P$  为污水产生量,  $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

## 3 国内产排污系数比较

### 3.1 产污系数

将现有各研究中的产污系数与污染普查中的产污系数进行分类比较(表 1)。从研究对象上看,5 大区均有涉及且研究数量相差不大,养殖类型为生猪、奶牛、肉牛 3 类,养殖规模均为规模化养殖。从个别研究和污普系数之间的关系看,污普系数代表了大区上的平均水平,而各研究是针对某一地区特定条件下的养殖场,两者存在一定差异,如谢飞等<sup>[21]</sup>的研究中,生猪妊娠、育肥、保育阶段 COD 产污系数分别为 119.26、54.08 和 33.22  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ ,而相应的污普系数为 472.34、337.90 和 164.89  $\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 。从地区上看,在其他养殖条件相同的情况下,不同地区的产污系数仍然存在差异,如华东地区生猪总氮的产污系数<sup>[22]</sup>明显高于西南地区<sup>[33]</sup>,说明气候、环境等因素对畜禽的产污情况有较大影响。从养殖阶段上看,同种动物在不同养殖阶段个体大小存在差异,具有不同的生理特征,饲养方式不同也势必造成产污量的不同。就奶牛的粪便排放量而言,在王会群等<sup>[24]</sup>的研究中育成期和泌乳期粪便排放量分别为 16.27 和 31.15  $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在同一地区不同研究中,因养殖阶段形成的产污系数的差异也有区别,如谢飞等<sup>[21]</sup>的研究中保育阶段生猪 COD 和总氮的产污系数高于汪开英等<sup>[22]</sup>相应的研究结果,而育肥阶段 COD 和总氮的产污系数却相对较低,可

能与用来代表各养殖阶段生猪的选择有关。

表1 规模化畜产养殖产污系数汇总

Table 1 Summary of pollutants producing coefficients of large scale livestock breeding farms

养殖地区	养殖类型	生产阶段	产污系数									文献来源		
			粪便/ (kg·d <sup>-1</sup> )	粪便含水 率 w/%	尿液/ (L·d <sup>-1</sup> )	COD/ (g·d <sup>-1</sup> )	TN/ (g·d <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> -N/ (g·d <sup>-1</sup> )	TP/ (g·d <sup>-1</sup> )	Cu/ (mg·d <sup>-1</sup> )	Zn/ (mg·d <sup>-1</sup> )		有机质/ (g·d <sup>-1</sup> )	
华东	猪	妊娠	1.93		5.60	119.26	32.48		24.64			327.13	谢飞等 <sup>[21]</sup>	
		育肥	1.28		2.43	54.08	20.04		15.25			223.40		
		保育	0.88		1.45	33.22	15.09		7.91			153.67		
		妊娠	妊娠	2.10		5.86 <sup>1)</sup>	107.69	49.61	10.65	20.93	100	490	384.13	汪开英等 <sup>[22]</sup>
			育肥	1.47		3.18 <sup>1)</sup>	66.49	30.44	5.38	10.40	190	380	256.78	
			保育	0.54		1.20 <sup>1)</sup>	24.49	11.20	1.47	4.66	130	150	101.30	
		妊娠	妊娠	4.76										蒋治国等 <sup>[32]</sup>
			育肥	3.59										
			保育	2.71										
		妊娠	妊娠	1.58		5.06	472.34	39.60		5.11	155.49	405.82	污普系数 <sup>[20]</sup>	
			育肥	1.12		2.55	337.90	25.40		3.21	190.55	281.60		
			保育	0.54		1.02	164.89	11.35		1.44	161.11	154.19		
西南	猪	妊娠	1.01	62.13	5.60 <sup>1)</sup>	274.96	16.03	5.80		55.82	348.47	何志平等 <sup>[33]</sup>		
		育肥	0.79	65.53	3.47 <sup>1)</sup>	206.65	11.65	2.90		294.56	267.71			
		保育	0.45	68.16	1.65 <sup>1)</sup>	105.91	7.02	1.21		149.05	169.36			
		妊娠	妊娠	1.41		4.48	446.41	22.02		6.55	89.17	312.50	污普系数 <sup>[20]</sup>	
			育肥	1.34		3.08	403.67	19.74		4.84	236.47	275.55		
			保育	0.47		1.36	142.02	10.97		1.94	102.64	131.67		
中南	肉牛	育肥	12.52	81.73	9.25	169.62	64.49		11.58	39.27	161.37	1404.51	王国利等 <sup>[35]</sup>	
		奶牛	育成	16.27	78.00	6.95 <sup>1)</sup>		126.02						王会群等 <sup>[24]</sup>
			泌乳	31.15	78.54	13.19 <sup>1)</sup>		279.13						
	肉牛	育肥	13.87		9.15	2411.40	65.93		10.52	68.57	276.19		污普系数 <sup>[20]</sup>	
		奶牛	育成	16.61		11.02	3324.53	139.76		25.99	158.39	731.67		污普系数 <sup>[20]</sup>
			泌乳	33.01		17.98	6793.31	353.41		62.46	307.44	1631.21		
东北	奶牛	育成	15.77		7.23	2132.49	112.82		50.28	96.00	461.89	栾冬梅等 <sup>[23]</sup>		
		泌乳	33.47		16.34	4265.58	270.88		182.99	196.34	979.09			
		育成	15.67		7.23	3166.11	110.95		24.06	95.20	441.29		污普系数 <sup>[20]</sup>	
泌乳	33.47		15.02	6185.11	257.70		54.55	195.63	972.85					
华北	猪	妊娠	1.63		4.68	493.40	43.70		9.93	49.30	279.00	董红敏等 <sup>[34]</sup>		
		育肥	1.73		2.83	479.60	33.20		6.06	136.40	281.70			
		保育	0.91		1.66	252.80	20.40		3.48	220.00	285.30			
		妊娠	妊娠	2.04		3.58	482.17	43.66		9.93	153.48	278.96	污普系数 <sup>[20]</sup>	
			育肥	1.81		2.14	419.56	33.23		6.06	169.13	281.70		
			保育	1.04		1.23	236.76	20.40		3.48	180.26	238.44		

均为单个(头、只)动物的产污系数。1)单位为 kg·d<sup>-1</sup>。

### 3.2 排污系数

排污系数是在产污系数的基础上得来的,相对于产污系数,排污系数还与畜禽粪便的清粪方式和污水处理方式有关(表2)。总体上看,研究区域与研究类型的分布与产污系数相似,针对养殖小区和散养的研究较少。清粪方式分为干清和水冲2种,缺少对垫料清粪方式的研究。虽然垫料是对环境污染较少的粪便收集方式,但是如果使用后的垫料没有妥善处理,仍然会对环境造成影响。从个别研

究与污普系数的对比上看,污普系数研究缺乏对污水处理方式的分类,可能是造成个别研究中排污系数与污普系数相差较大的原因。从研究区域上看,相同生产条件下,华东育肥猪 COD、TN、TP 排污系数分别为 5.36、2.66 和 0.30 g·d<sup>-1</sup><sup>[22]</sup>,而华北育肥猪 COD、TN、TP 排污系数分别为 64.1、20.9 和 1.80 g·d<sup>-1</sup><sup>[32]</sup>,产污系数在地域上的差异是排污系数差异形成的重要原因,但是地域差异对污水处理效率的影响也是一个重要因素,其相对重要性还有待探究。

表2 畜产养殖排污系数汇总

Table 2 Summary of pollutants discharging coefficients of livestock breeding farms

养殖地区	养殖规模	养殖类型	清粪方式	污水处理	生产阶段	排污系数										文献来源					
						污水量/ (L·d <sup>-1</sup> )	COD/ (g·d <sup>-1</sup> )	TN/ (g·d <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> -N/ (g·d <sup>-1</sup> )	TP/ (g·d <sup>-1</sup> )	Cu/ (mg·d <sup>-1</sup> )	Zn/ (mg·d <sup>-1</sup> )	Pb/ (mg·d <sup>-1</sup> )	Cd/ (mg·d <sup>-1</sup> )	Cr/ (mg·d <sup>-1</sup> )		有机质/ (g·d <sup>-1</sup> )				
华东	规模化	猪	干清	厌氧	妊娠	8.68	4.76	0.96	0.57	2.79	13.35						汪开英等 <sup>[22]</sup>				
					育肥	5.36	2.66	0.49	0.30	5.45	11.59										
					保育	1.98	0.92	0.13	0.12	3.67	4.22										
					妊娠	25.43	17.70	20.07	4.25	8.50	223.97	147.91	3.64	0.54	37.32			蒋治国等 <sup>[32]</sup>			
					育肥	11.73	7.44	17.36	2.19	8.43	514.18	121.42	1.48	0.56	6.16						
					保育	10.08	11.71	12.07	2.89	5.17	288.84	79.05	4.75	0.58	13.01						
		干清			妊娠	67.87	13.19		1.02	25.47	40.96						污普系数 <sup>[20]</sup>				
	育肥				34.93	7.17		0.47	14.81	14.81											
	保育				27.59	3.79		0.32	15.50	18.12											
	西南				规模化	猪	水冲	厌氧	妊娠	161.40	12.10	5.13	6.93	12.36	67.26					何志平等 <sup>[33]</sup>	
									育肥	121.30	8.80	2.56	3.38	65.25	51.67						
									保育	62.17	2.31	1.07	2.06	33.01	32.69						
妊娠		161.40	12.11						6.93	12.36	67.25						何志平等 <sup>[37]</sup>				
育肥		121.30	8.80						3.38	65.25	51.67										
保育		62.17	5.31						2.06	33.01	32.69										
	养殖小区	农户	干清	厌氧好氧	育肥	26.51	2.56		0.22	4.26	3.90										
育肥					73.50	8.07		3.29	29.30	61.14											
规模化					水冲	妊娠	182.40	11.32		0.70	34.72	34.27						污普系数 <sup>[20]</sup>			
						育肥	166.97	10.30		1.28	96.82	150.99									
						保育	53.58	4.08		0.60	39.46	77.83									
					养殖小区	农户	干清	水冲	育肥	98.09	8.59		0.96	38.62	54.30						
育肥	336.36	16.20		3.65					148.84	164.17											
中南	规模化	猪	干清	直接排放	妊娠		2.36		2.40	42.81	81.15					王国利等 <sup>[36]</sup>					
					育肥		2.81		1.54	65.74	64.79										
					保育		1.18		0.60	31.27	69.18										
					肉牛	成年牛	93.29	21.97	1.56	0.45	1.00	3.52			125.6		王国利等 <sup>[35]</sup>				
					猪	妊娠	33.11	18.01		0.30	1.04	5.19						污普系数 <sup>[20]</sup>			
						育肥	39.14	12.40		0.21	2.15	11.99									
	保育	24.79	5.67			0.19	5.37	12.92													
		肉牛	成年牛	215.22	32.15		0.73	2.31	9.01												
	东北	规模化	奶牛	干清	厌氧	育成	540.39	34.34		13.29	18.37	91.06					栾冬梅等 <sup>[23]</sup>				
						泌乳	1 000.58	85.29		59.65	39.64	213.31									
						育成	774.68	58.48		7.27	23.52	90.15						污普系数 <sup>[20]</sup>			
						泌乳	1 154.39	133.54		8.12	32.73	140.28									
华北						规模化	猪	干清	厌氧	妊娠	22.50	36.30		0.40	0.20	4.60					董红敏等 <sup>[34]</sup>
										育肥	64.10	20.90		1.80	10.90	31.40					
	保育	44.90	14.10		1.00					17.00	24.90										
	妊娠	19.47	8.42		0.26					0.19	0						污普系数 <sup>[20]</sup>				
	育肥	30.78	5.34		0.43					6.10	17.51										
	保育	26.88	3.22		0.38					15.19	17.10										

均为单个(头、只)动物的排污系数;污普系数研究未提供污水处理方式分类。

从养殖规模上看,养殖小区通常具有更为完善的生产处理体系,使得污染物排放量更少,西南地区生猪养殖小区采用干清的清粪方式、厌氧+好氧的污水处理方式,COD、TN、TP、Cu和Zn的产污系

数分别为26.51、2.56、0.004和0.004 g·d<sup>-1</sup><sup>[37]</sup>,远低于同地区其他养殖规模的排污系数。从养殖阶段看,排污系数分布规律与产污系数相似,个体与饲养方式的不同是造成差异的重要原因,如泌乳期

奶牛因为体型较大、为了增加产奶量而大量摄入饲料等原因而导致排污系数远高于育成期奶牛和其他种类畜禽的排污系数<sup>[23]</sup>。

### 3.3 应用与改进

在畜禽业产排污系数测算工作开展的同时,学者也以排污系数为理论基础开展了相关研究,不断完善排污系数核算体系。从时间上看,相关研究主要集中在我国将畜禽养殖业纳入污染普查核算体系(2008年)至今。从研究内容上看,主要包括畜禽养殖业产排污系数概念及计算方法的确定、利用产排污系数进行产排污核算以及分析畜禽产排污规律和改进产排污系数计算方法等方面。在畜禽养殖业产排污系数测定工作开展初期,我国学者参考国内外的研究成果,确定了畜禽养殖业产排污系数测算的关键问题和主要内容,根据我国畜禽养殖业的特点提出了畜禽养殖业产排污系数的定义与计算方法,并结合影响畜禽产排污系数的主要因素构建产排污系数核算体系<sup>[34,38]</sup>。对畜禽养殖产排污系数的应用除了对区域畜禽养殖的产排污量进行核算以外,我国学者还利用产排污系数研究畜禽养殖业产排污量在空间上的分布,并讨论不同地区、不同时期和不同养殖条件下畜禽的产排污规律,建立畜禽产排污系数模型<sup>[39-42]</sup>。在产排污系数应用过程中,也有学者针对产排系数计算方法的适用性和产排污核算的准确性对产排污系数及其核算方法进行改进<sup>[43-44]</sup>。

## 4 研究展望

开展畜禽养殖业产排污系数研究对于核算畜禽业污染物排放量、研究畜禽养殖业源污染物排放规律、制定落实减排任务等有着重要意义。目前我国已经在不同地区开展了较多研究,但是还存在一些问题和不足,需要进一步改进和完善。

(1)目前针对畜禽业产排污系数的研究有很多,但对现有研究成果的对比较少,缺乏造成产排污系数差异原因方面的研究。当前开展研究的各地区有着不相同的养殖条件,采用的测算方法也有区别,若不能进行归类分析则难以进行横向比较,不利于进一步完善养殖方法和制定环保政策。应在增加畜禽养殖产排污系数对比研究的同时规范产排污系数测算操作。

(2)在产排污系数测算过程中有众多因素影响测算结果的准确性。现有畜禽业产排污系数测算中主要考虑地区、季节、类型、规模、清粪方式和污水处理方式等几种因素。就地区分类方法而言,现

有的地理大区分类方法并不能完全区分各地区气候条件;在测算时间的选择上,虽然各研究均采用每个季节分别采样的方式来规避季节因素的影响,但采样时段的选择并不统一,甚至差别很大;在粪便收集和污水处理上,影响收集和处理效率的因素过于多样,考虑所有因素并不现实,过于简化又会影响结果的准确性,还需要进一步研究完善。

(3)现有的研究集中于规模化养殖场,相对统一的养殖方式、稳定的养殖量、规范的污水处理设施使得研究便于开展,测算结果也有较好的适用性。但我国仍然存在数量相当的非规模化养殖场,应增加对非规模化养殖场产排污系数的测定研究,并加快规模化养殖的发展,一方面有利于产排污量的核算,另一方面也有利于统一管理和防治。

(4)现阶段畜禽业产排污系数研究中,排放指标涵盖的范围还比较窄,除畜禽排泄的抗生素、激素等热点问题亟需开展研究外,国内研究均未考虑畜禽业气体的排放,国外已有研究显示畜禽业生产过程中会产生大量的氨气、悬浮颗粒物和其他一些温室气体<sup>[45-47]</sup>,对畜禽养殖气态物质排放的测算亟待开展。

### 参考文献:

- [1] 石嫣,程存旺,朱艺,等.中国农业源污染防治的制度创新与组织创新:兼析《第一次全国污染源普查公报》[J].农业经济与管理,2011(2):27-37.
- [2] MALLIN M A, CAHOON L B. Industrialized Animal Production: A Major Source of Nutrient and Microbial Pollution to Aquatic Ecosystems[J]. Population and Environment, 2003, 24(5): 369-385.
- [3] CENTNER T J, FEITSHANS T A. Regulating Manure Application Discharges From Concentrated Animal Feeding Operations in the United States[J]. Environmental Pollution, 2005, 141(3): 571-573.
- [4] COSTANZA J K, MARCINKO S E, GOEWERT A E, et al. Potential Geographic Distribution of Atmospheric Nitrogen Deposition From Intensive Livestock Production in North Carolina, USA [J]. Science of the Total Environment, 2008, 398(1): 76-86.
- [5] CENTNER T J. Regulating Concentrated Animal Feeding Operations to Enhance the Environment[J]. Environmental Science and Policy, 2003, 6(5): 433-440.
- [6] ASAE, Manure Production and Characteristics[S]. ASAE, USA: American Society of Agricultural Engineers, 2003.
- [7] 农文协. 畜产环境对策大事典[M]. 东京, 日本: 东京农山渔村文化协会出版社, 1995: 98-126.
- [8] 坂井弘, 松浩. 公害ハンドブック[M]. 东京, 日本: 东京农山渔村文化协会出版社, 1974: 1-348.
- [9] POULSEN H D, KRISTENSEN V F. Standard Values for Farm Manure: A Reevaluation of the Danish Standard Values Concerning the Nitrogen, Phosphorous and Potassium Content of Manure [R]. USA; DIAS Report. No. 7 Animal Husbandry, 1998: 167.

- [10] 李帆,鲍先巡,王文军,等.安徽省畜禽养殖业粪便成分调查及排放量估算[J].安徽农业科学,2012,40(12):7359-7361.
- [11] 徐谦,朱桂珍,向俐云.北京市规模化畜禽养殖场污染调查与防治对策研究[J].农村生态环境,2002,18(2):24-28.
- [12] 杨国义,陈俊坚,何嘉文,等.广东省畜禽粪便污染及综合防治对策[J].土壤肥料,2005(2):46-48,52.
- [13] 周凯,雷泽勇,王智芳,等.河南省畜禽养殖粪便年排放量估算[J].中国生态农业学报,2010,18(5):1060-1065.
- [14] 黄沈发,陈长虹,贺军峰,黄浦江上游汇水区畜禽业污染及其防治对策[J].上海环境科学,1994,5(5):4-8,45.
- [15] 王方浩,马文奇,窦争霞,等.中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J].中国环境科学,2006,26(5):614-617.
- [16] 彭里,王定勇.重庆市畜禽粪便年排放量的估算研究[J].农业工程学报,2004,20(1):288-292.
- [17] 国家环境保护总局自然生态保护司.全国规模化畜禽养殖业污染情况调查与防治对策[M].北京:中国环境科学出版社,2002:1-59.
- [18] 全国农业技术推广服务中心.中国有机肥料养分志[M].北京:中国农业出版社,1999:5-60.
- [19] 李书田,刘荣乐,陕红.我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J].农业环境科学学报,2009,28(1):179-184.
- [20] 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所.第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册[EB/OL].(2012-06-14)[2015-07-01].<http://www.doc88.com/p-578889389094.html>.
- [21] 谢飞,曹磊,王震,等.江苏省太湖地区畜禽业产排污测算[J].水土保持通报,2014,34(2):128-133.
- [22] 汪开英,刘健,陈小霞,等.浙江省畜禽业产排污测算与土地承载力分析[J].应用生态学报,2009,20(12):3043-3048.
- [23] 栾冬梅,李士平,马君,等.规模化奶牛场育成牛和泌乳牛产排污系数的测算[J].农业工程学报,2012,28(16):185-189.
- [24] 王会群,高腾云,史鹏飞,等.奶牛集约化生产体系中氮素产污系数的测定[J].江苏农业科学,2010(3):444-446.
- [25] GB/T 25169—2010,畜禽粪便监测技术规范[S].
- [26] 吕津.畜禽滥用抗生素问题亟待解决[J].北方牧业,2007(2):6-7.
- [27] 刘锋,廖德润,李可,等.畜禽养殖基地磺胺类喹诺酮类和大环内酯类抗生素污染特征[J].农业环境科学学报,2013,32(4):847-853.
- [28] 李艳霞,刘姝芳,张雪莲,等.我国直辖市畜禽养殖排放类固醇激素特征及其潜在污染风险[J].环境科学学报,2013,33(8):2314-2323.
- [29] 刘姝芳,李艳霞,张雪莲,等.东北三省畜禽养殖类固醇激素排放及其潜在污染风险[J].环境科学,2013,34(8):3180-3187.
- [30] 陈蕾,王郑,曹世玮.畜禽养殖排放的雌激素对周边水体环境的影响[J].生态环境学报,2014,23(2):359-364.
- [31] 李振,王云建.畜禽养殖中抗生素使用的现状、问题及对策[J].中国动物保健,2009,11(7):55-57.
- [32] 蒋治国,王博超,吴冬梅,等.太湖流域生猪排污系数测算试验研究[J].环境与可持续发展,2010(2):63-65.
- [33] 何志平,曾凯,李正确,等.四川规模猪场产排污系数测定[J].中国沼气,2010,28(4):10-14.
- [34] 董红敏,朱志平,黄宏坤,等.畜禽养殖业产污系数和排污系数计算方法[J].农业工程学报,2011,27(1):303-308.
- [35] 王国利,苏家联,阮燕春,等.广西地区肉牛产排污系数测定的研究[J].中国畜牧杂志,2014,50(11):76-80.
- [36] 王国利,苏家联,阮燕春,等.小规模生猪养殖场排污系数测定的研究[J].当代畜牧,2014(3):50-52.
- [37] 何志平,曾凯,李正确,等.不同养殖模式下生猪排污系数测定[J].西南农业学报,2010,23(3):897-902.
- [38] 王俊能,许振成,吴根义,等.畜禽养殖业产排污系数核算体系构建[J].中国环境监测,2013,29(2):143-147.
- [39] 陈海媛,张宝贵,郭建斌,等.规模化养殖的中国荷斯坦奶牛产污系数模型的确定[J].中国环境科学,2012,32(10):1895-1899.
- [40] 林源,马骥,秦富.中国畜禽粪便资源结构分布及发展展望[J].中国农学通报,2012,28(32):1-5.
- [41] 吴艳娟,罗彬,杨媛媛.规模化畜禽养殖产污系数研究[J].资源开发与市场,2012,28(12):1096-1098,1101.
- [42] 周天墨,付强,诸云强,等.中国分省畜禽产污系数优化及污染物构成时空特征分析[J].地理研究,2014,33(4):762-776.
- [43] 陈海媛,郭建斌,张宝贵,等.畜禽养殖业产污系数核算方法的确定[J].中国沼气,2012,30(3):14-16.
- [44] 杨金升,袁雪竹,张宏伟,等.基于日平均养殖量的畜禽养殖排污系数法的改进[J].城市环境与城市生态,2012,25(2):27-30.
- [45] VIGURIA M, SANZ-COBE A A, L PEZ D M, *et al.* Ammonia and Greenhouse Gases Emission From Impermeable Covered Storage and Land Application of Cattle Slurry to Bare Soil[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 199:261-271.
- [46] CAMBRA-LÓPEZ M, AARNINK A J A, ZHAO Y, *et al.* Airborne Particulate Matter From Livestock Production Systems: A Review of an Air Pollution Problem[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(1):1-17.
- [47] CAREW R. Ammonia Emissions From Livestock Industries in Canada: Feasibility of Abatement Strategies[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(8):2618-2626.

作者简介:庄犁(1991—),男,江苏泗阳人,硕士生,研究方向为流域水污染控制与环境管理。E-mail: zhuangli2013@sina.com

(责任编辑:陈昕)