

## 中国畜禽粪便资源研究现状述评

谢光辉<sup>1,2</sup> 包维卿<sup>1,2</sup> 刘继军<sup>3</sup> 安捷<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学 农学院,北京 100193;

2. 国家能源非粮生物质原料研发中心,北京 100193;

3. 中国农业大学 动物科技学院,北京 100193)

**摘要** 为研究畜禽粪便资源量及理化性质的研究方法的行业标准,已有研究对中国畜禽粪便产量的估算存在很大的差异,本研究首先通过对1995年以来的相关文献进行述评,明确畜禽粪便的定义及其计算相关系数的定义,明确年出栏量、年末存栏量和常年存栏量的具体选择,确定了畜禽养殖规模化系数的应用指标,总结并改进了畜禽粪便资源量的计算方法,在公式中强调了含水率的因素,加入了规模化系数。其次,提出了以猪、肉牛和羊的种群结构比例为依据估算常年存栏量的方法,对相关系数进行取值,避免肉牛重复出栏的问题。再次,讨论了近年来关于中国畜禽粪便资源量的已有研究结果的可靠性,认为耿维等对2010年中国各种畜禽粪便的鲜重产量(总量22.28亿t)的可靠性高,规模化养殖场畜禽粪便量以田宜水的2009年鲜重结果(总量8.37亿t)可靠性高,若以干重计则以贾伟报导的2009年畜禽粪便产量(总量6.23亿t)可靠性高。最后,提出应在正确的定义的基础上,全面研究中国畜禽粪便资源量、空间分布及发展趋势。

**关键词** 生物质; 畜禽粪便产量; 养殖污染; 排泄系数

中图分类号 S513

文章编号 1007-4333(2018)04-0075-13

文献标志码 A

## An overview of researches on livestock and poultry excreta resource in China

XIE Guanghui<sup>1,2</sup>, BAO Weiqing<sup>1,2</sup>, LIU Jijun<sup>3</sup>, AN Jie<sup>3</sup>

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. National Energy R&D Center for Non-Food Biomass, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract** Assessment of livestock and poultry excreta (LPE) resource is of great significance for environmental pollution control and organic waste recycle. Earlier researchers reported an excessively wide range of LPE produced in China and failed to reach unanimous conclusion. Current status and research progress on LPE were summarized based on literatures published since 1995. Firstly, the LPE definition and its calculation parameters were clarified. Secondly, how to choose a correct quantity parameter from slaughter quantity, year-end live hogs quantity, and annual inventory quantity in the related statistical yearbook for various types of animal husbandry was discussed for LPE resource calculation. Thirdly, LPE resource calculation equations were analysed and improved to take the factor of commercial scale husbandry coefficient and moisture into the consideration. Commercial scale husbandry coefficient values for all livestock and poultry were also decided. Fourthly, in order to avoid the problem of repeated statistic data of slaughter quantity for pig, beef cattle and sheep, the annual inventory quantity was discussed and its calculation equation was established based on the proportion of breeding population. Fifthly, reliability of data of LPE produced in China reported by previous researchers was analysed. It is suggested that the fresh LPE weight from individual and commercial scale husbandry (2.228 billion metric tons) in 2010 by Geng Wei et al., the amount of fresh LPE from commercial scale

收稿日期: 2017-05-08

基金项目: 中国清洁发展机制基金赠款项目(2014083)

第一作者: 谢光辉,教授,主要从事非粮生物质原料和能源植物研究, E-mail: xiegh@cau.edu.cn

包维卿,硕士研究生, E-mail: baowq@cau.edu.cn

husbandry (837 million metric tons) in 2009 by Tian Yishui and the dry weight LPE from individual and commercial scale husbandry (623 million metric tons) in 2009 by Jia Wei exhibited relatively higher reliability. Lastly, it was proposed that LPE potential resource, spatial distribution and development trend should be further assessed according to the improved definition and equations in this study, and related industrial standard and physical and chemical properties should be studied in future.

**Keywords** biomass; animal waste production; livestock and poultry excreta; excretive coefficient

中国是畜禽养殖大国, 畜禽粪便资源尤为丰富, 并呈逐年增长趋势<sup>[1]</sup>。一方面, 畜禽粪便是重要的环境污染源, 受到环保部门及研究者的持续深入关注。另一方面, 在传统的种养模式中, 畜禽粪便作为农家肥对于保持土壤肥力, 防治土壤板结, 维持作物可持续生产具有重要的作用。在养殖业和作物生产向着集约化方向发展的今天, 畜禽粪便的利用也呈现出了多样化的趋势, 即可被广泛用作发酵沼气和生产乙醇<sup>[2]</sup>, 在经过适当的处理之后也能用于生产饲料和菌类生长基质<sup>[3]</sup>。因此, 关于中国畜禽粪便资源量及其利用的研究越来越受到重视, 近年来从环境和生物质能源原料角度的研究报导越来越多。根据研究近 20 年以来的中国包括散养的各种规模畜禽粪便产量的报导, 畜禽粪便鲜重产量范围为 16.29 亿~32.64 亿 t<sup>[4,5]</sup>, 可见估算结果存在很大的差异, 这不利于畜禽粪便在环境污染控制及循环利用方面的政策制定、学术研究和产业化发展。

造成畜禽粪便产量结果差异大的原因, 已有研究也有适当的分析<sup>[5]</sup>。本研究经过更全面深入分析认为主要有 4 个原因: 第一, 这是一个非常薄弱的领域, 尽管发表的论文很多, 但是其定义以及相关系数的定义一直没有明确, 读者对已有研究甚至相关行业规范所应用相关概念, 只能顾名思义地进行理解。例如, 有的研究畜禽粪便不包括尿, 有的没有明确定义如至关重要的系数排泄系数这一概念。有的研究术语如养殖周期等运用不准确。第二, 应用的公式不尽合理, 导致产量结果表达不准确, 主要体现在多数研究没有考虑含水率, 甚至可能研究了畜禽排泄后相当长时间后的粪便量。还有的计算畜禽粪便的干重产量仅考虑粪的含水率, 而忽略了尿。第三, 畜禽粪便的研究范围不明确, 如仅研究猪、牛、羊和家禽这四类养殖规模较大的畜禽粪便, 但是题目却不明确, 还有的研究没有明确说明获得禽类生产统计数据的来源, 有的研究对应用年出栏量还是年末存栏量数据的选择出现了明显的错误。第四, 对畜牧业统计数据理解不深入, 没有考虑有关畜禽种类的

重复出栏量问题。第五, 计算系数的取值不合理, 例如对畜禽的排泄系数与年饲养周期取值不尽相同, 研究者对于合理的取值莫衷一是。同时, 虽然对规模化养殖的畜禽粪便才有产业化利用的可获得性已达成共识, 但研究应用规模化指标不一致。

因此, 根据已有研究, 本研究重点针对上面提出的前三个问题以及中国畜禽粪便评估的主要研究结果进行综述评和分析, 拟完善畜禽粪便资源的相关概念体系, 建立更规范的研究方法。

## 1 畜禽粪便定义

畜禽粪便的狭义概念为畜禽的粪和尿的总称。农业行业标准(NYT 1168-2006)<sup>[6]</sup>应用了狭义概念, 但是狭义的定义不适用于实际生产。田宜水<sup>[7]</sup>定义畜禽粪便为畜禽排泄物的总称, 包括畜禽排出的粪、尿及其与垫草的混合物, 则属于广义的定义。能源行业标准《非粮生物质原料名词术语》<sup>[8]</sup>则对畜禽粪便制订了较为准确的广义定义, 在其基础上, 本研究进一步将广义的畜禽粪便定义修订为“畜禽排出的粪和尿为主, 以及混合在其中的圈舍垫料、散落的饲料和羽毛等废弃物的总称”, 其准确的术语为“畜禽粪便和圈舍废弃物”<sup>[8]</sup>, 根据约定俗成的用法也可简称“畜禽粪便”。关于畜禽粪便的定义有以下几点需要特殊说明:

1) 尽管可能有的“粪便”定义只指俗称的大便(即粪), 本研究中“畜禽粪便”包含畜禽的粪和尿。为了准确表达, 本研究把不含尿的粪便称为“粪”, 把不含粪的粪便称为“尿”。尽管这一概念在一些同类研究报导中是模糊不清, 但是, 已有研究<sup>[5,9]</sup>和权威报导<sup>[10]</sup>与本研究的表述是一致的。

2) 即使是广义的畜禽粪便, 也不包括养殖场水冲清理圈舍废弃物增加的水。

3) 在学术上作出狭义和广义概念区分是必要的, 但是, 由于养殖中散落的饲料和羽毛、垫料都很少, 可以忽略不计。对不计散落的饲料和羽毛容易理解, 垫料在散养方式下多用, 苏文幸<sup>[11]</sup>对全国 20

个省份 146 个养殖场调研后发现养殖场采用垫料清粪这一方式的约占 11%。当前,随着散养比例在中国不断下降,垫料用量很少。在第一次全国污染源普查时制定的畜禽养殖业源产排污系数手册<sup>[12]</sup>中,全国六个大区的各类畜禽的养殖场、养殖小区和养殖专业户排污系数中,均将垫料用量作为零,也就是说,仍按狭义的定义来评估计算畜禽粪便产量。

4) 畜禽粪便以鲜重和干重表达同等重要,两者在实践生产应用和理论研究中均有重要意义。鲜重指畜禽所产生的原始粪和尿的重量,是其收储运和转化利用过程中不可缺少的指标。干重数据有更好的可比性,是准确表示其有效成分含量的基准。

## 2 畜禽粪便产量的计算公式

已有文献中的畜禽粪便产量以及经本研究修改完善后的计算公式,统计如下:

$$Y_f = \sum_i^n Q_i \cdot R_i \cdot T_i \cdot 10^{-3} \quad (1)^{[4-5,7,9,13-28]}$$

$$Y_d = \sum_i^n Q_i \cdot R_i \cdot T_i \cdot (100 - M_i) \cdot 10^{-5} \quad (2)^{[29-30]}$$

$$Y_{cf} = \sum_i^n Q_i \cdot R_i \cdot T_i \cdot C_i \cdot 10^{-5} \quad (3)$$

$$Y_{cd} = \sum_i^n Q_i \cdot R_i \cdot T_i \cdot C_i \cdot (100 - M_i) \cdot 10^{-7} \quad (4)$$

$$Y_f = \sum_i^n Q_i \cdot R_i \cdot 365 \cdot 10^{-3} \quad (5)^{[31-33]}$$

$$Y_{cd} = \sum_i^n Q_i \cdot R_i \cdot 365 \cdot C_i \cdot (100 - M_i) \cdot 10^{-7} \quad (6)$$

式中:

$Y_f$ , 畜禽粪便鲜重产量, t/a;

$Y_d$ , 畜禽粪便干重产量, t/a;

$Y_{cf}$ , 规模化养殖的畜禽粪便鲜重产量, t/a;

$Y_{cd}$ , 规模化养殖的畜禽粪便干重产量, t/a;

$i$ , 第  $i$  种畜禽;

$N$ , 畜禽种类的数量;

$Q_i$ , 第  $i$  种畜禽的饲养量(头或羽。对于式(1)~

(4), 年饲养周期 < 365 d 的畜禽采用年出栏量, 等于 365 d 的畜禽采用年末存栏量。对于式(5)和式(6)适用常年存栏量。参见表(3);

$R_i$ , 第  $i$  种畜禽排泄系数, kg/d;

$T_i$ , 第  $i$  种畜禽年饲养周期(已有研究称养殖周期, 饲养期或饲养周期), d;

$M_i$ , 第  $i$  种畜禽粪便的含水率, %;

$C_i$ , 第  $i$  种畜禽养殖规模系数, %, 当研究包括散养的各种规模养殖的情况时,  $C=100\%$ 。

多数研究<sup>[4-5,7,9,13-28]</sup>采用了式(1), 由年出栏量或年末存栏量、年饲养周期(养殖周期或饲养期)和排泄系数计算获得畜禽粪便的产量。这个方法考虑的因素较少, 并且易获得所需要的参数, 其计算结果为鲜重。贾伟<sup>[29]</sup>和黎运红<sup>[30]</sup>则采用了式(2), 在式(1)上增加了含水率的因素, 其计算结果是干重。但是, 式(1)和(2)都明显存在不足, 本研究分别改进为式(3)和(4), 考虑了资源的可获得性, 增加了“养殖规模系数”, 可得到规模化养殖的畜禽粪便年产量。

应用式(1)~式(4)时, 对于饲养周期 < 1 年的畜禽采用年出栏量, 饲养周期 > 1 年的采用年末存栏量。在已知畜禽常年存栏量的情况下适合应用式(5)和式(6), 这样, 相较于式(1)可以更准确的计算畜禽粪便资源量。但是, 部分学者<sup>[31-33]</sup>应用式(5), 对所有畜禽种类都统一用了年末存栏量计算出畜禽粪便鲜重产量, 这对于饲养周期 ≥ 1 年的种类与式(1)是相同的, 对于饲养期 < 1 年的种类就不同了, 因为实际生产中, 养殖户会根据季节和市场情况调整饲养量, 也就是说年末存栏量不一定是常年存栏量。

根据调研, 有关畜禽养殖专家认为饲料消费量与排泄的粪便量呈正相关关系, 可以通过畜禽饲料利用率计算排泄量。但在已有研究中未见以这种方法研究的报导, 主要原因是既难以获得畜禽的饲料利用率, 也未见相关统计年鉴中发布畜禽饲养的饲料消费量数据。

由于各类畜禽粪便的肥效养分差异较大, 林源等<sup>[9]</sup>和刘忠等<sup>[28]</sup>根据其氮素养分含量, 应用折算系数将不同畜禽粪便统一换算成猪粪当量, 有利于统计和比较分析。

## 3 计算畜禽粪便产量所用饲养量指标的选择

### 3.1 饲养量数据的获得

饲养量即所养殖的畜禽数目。研究特定养殖场粪便的产量比较容易, 可直接获取饲养量。而研究

一定较大区域的畜禽粪便产量,就要通过查阅统计数据获得饲养量。在《中国畜牧兽医年鉴》<sup>[34]</sup>、《中国农业年鉴》<sup>[35]</sup>与《中国农村统计年鉴》<sup>[36]</sup>中能查阅到全国和各省市区年畜禽年出栏数和年末存栏数。相比之下,在《中国统计年鉴》<sup>[37]</sup>中能查阅指标较少,而《中国畜牧兽医年鉴》<sup>[34]</sup>中还统计了畜牧场(户)站数及其不同规模数量,并包含全国和各省市区饲料生产情况,这些指标有可能用于畜禽粪便产量的研究。需要说明的是,自2012年以来,国家或行业统计数据对禽类生产的统计只有“家禽”。但是,只有获得肉鸡、蛋鸡、鸭、鹅的生产数据才能计算家禽的粪便量,这就需要从行业协会或地方年鉴获得相关生产统计数据,或向行政主管部门申请信息公开。

### 3.2 应用年出栏量和年末存栏量

在应用饲养量数据时,对于每种畜禽,首先要选择年出栏量、年末存栏量或常年存栏量(应用常年存栏量见本文3.3小节)。已有研究中大都应用了年出栏量或年末存栏量,由于不断的改进,代表性的研究如王方浩等<sup>[26]</sup>和林源等<sup>[9]</sup>,提出了更符合实际的选择标准,即对于饲养周期>365 d的畜禽应用其年末存栏量,对于饲养周期<365 d的畜禽应用其年出栏量。应用这个标准,从而对全国畜禽粪便研究正确地选择了大多数动物的生产指标(表1)。除了1份报导<sup>[28]</sup>没有研究肉牛外,有4份报导对肉牛应选择年末存栏量却选择了年出栏量<sup>[9,26,29-30]</sup>,这是由于当年国家和行业发布的统计指标所限,对肉牛只能选择年出栏量。但是,自2015年能查到肉牛存栏量,就不能再应用其出栏量了。但是,在对地区性畜禽粪便资源研究中,除少数研究<sup>[38-40]</sup>没有明确交代对年出栏量或年末存栏量选择之外,确实有些研究者错误地选择了年出栏量或年末存栏量<sup>[22-23,25,41]</sup>(表2)。一些研究囿于统计年鉴对禽类饲养量未做分类而统一选取出栏量,尽管肉鸡、鸭、鹅确实应选取出栏量,但蛋鸡应选取存栏量<sup>[22-23]</sup>。周凯等<sup>[41]</sup>对奶牛与蛋鸡之外的畜禽采用了年末存栏量与年出栏量之和进行计算,这样会导致畜禽粪便产量估算结果偏大。

### 3.3 应用猪、肉牛、羊常年存栏量

用于确定部分畜禽常年存栏量的公式如下:

$$Q_{\text{常}} = \frac{Q_{\text{出}} \cdot (100 - M_r) \cdot 10^{-2}}{p \cdot M_f \cdot 10^{-2}} \quad (7)$$

$$M_r =$$

$$\left\{ 100 - \left[ \frac{Q_{\text{肉}} \cdot 10^3 \cdot (100 - M_c) \cdot 10^{-2}}{Q_{\text{出}} \cdot S \cdot M_d \cdot 10^{-2}} \right] \right\} \cdot 10^{-2} \quad (8)$$

式中:

$Q_{\text{常}}$ ,常年存栏量,头;

$Q_{\text{出}}$ ,年出栏量,头;

$M_r$ ,肉牛重复出栏占比(根据近10年的统计数据计算得到肉牛的重复出栏占比为37%);

$p$ ,母畜生产出栏系数(猪19头/a,肉牛0.75头/a,羊3.02头/a);

$M_f$ ,基础母畜占比(猪9.4%,肉牛52.2%,羊37.7%);

$Q_{\text{肉}}$ ,牛肉年产量,t;

$M_c$ ,奶牛肉占牛肉年产量比重(根据调研推荐采用17.5%);

$S$ ,肉牛屠宰重量(根据调研推荐采用550 kg);

$M_d$ ,肉牛屠宰胴体率(根据调研推荐采用50%)。

应用出栏量或年末存栏量计算粪便产量和实际生产也有一定的误差,如种猪和育肥猪饲养期差异很大,又如因季节和市场情况饲养者调整饲养量导致年末存栏量并非全年不变。这个现象对于主要的产肉畜类更为突出。而且,在本研究调研的一些肉牛养殖过程中,农户将仔牛养至350 kg时卖给规模化养殖场,规模化养殖场将其育肥至550 kg时出栏宰杀,俗称“架子牛”,导致行业管理部门按两次出栏统计。因此,应对猪、肉牛、羊应用常年存栏量。根据畜禽种群结构中基础母畜占比,应用年出栏量和母畜生产出栏系数,求得相对较准确的常年存栏量(式(7))。计算肉牛常年存栏量时必须考虑到重复出栏率(式(8)),根据近10年的统计数据计算得到肉牛的重复出栏占比为37%。

基础母畜占比是规模化饲养中基础母畜占比其种群总数的百分比。规模化养殖场中,各生产环节具有计划性和节奏性,猪、肉牛和羊生产、淘汰、售出、死亡等各部分之间相互平衡,从而使得不同饲养阶段的不同种类的数量比例保持相对稳定,在生产的过程当中维持相对稳定的存栏数量,因此基础母畜占比是一个相对稳定的数值(表3)。母畜生产出栏系数,指每头基础母畜一年内所能生产子代出栏的数量。奶牛肉占牛肉年产量比重,指国家统计局<sup>[37]</sup>中牛肉年产量中所包含的屠宰淘汰奶牛生产的肉的比例。肉牛屠宰重量,指肉牛达到出栏屠宰时的体重。肉牛屠宰胴体率,指肉牛屠宰后的胴体重量占肉牛屠宰重量的比例。

表 1 对全国畜禽粪便研究的畜禽种类及养殖生产指标选择研究汇总

Table 1 Summary on animal type and production index selection in national LPE research

文献 Literature	生产指标 Production index	猪 Pig	牛 Cattle	役用牛 Draft cow	肉牛 Beef	奶牛 Diary cattle	羊 Sheep	马 Horse	驴 Donkey	骡 Mule	骆驼 Camel	兔 Rabbit	禽类 Poultry	肉鸡 Broiler chicken	蛋鸡 Layer	鸭 Duck	鹅 Goose
[26]	年出栏量 年末存栏量	Y		Y	A	Y	Y	Y	Y	Y		Y		Y	Y	Y	Y
[28]	年出栏量 年末存栏量	Y	Y				Y	Y	Y	Y			W				
[9]	年出栏量 年末存栏量	Y		Y	A		Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y	Y	Y	Y
[7]	年出栏量 年末存栏量	Y			Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y			Y			
[5]	年出栏量 年末存栏量	Y		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y		Y	Y
[18]	年出栏量 年末存栏量	Y		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y		Y	Y	Y	Y
[29]	年出栏量 年末存栏量	Y		Y	A	Y	W	Y						Y		Y	Y
[27]	年出栏量 年末存栏量	Y		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		Y		Y	Y	Y	Y
[30]	年出栏量 年末存栏量	Y		Y	W	Y	Y						W	Y			

注：Y：原文献选择了上方的畜禽种类及左侧的生产指标，同时，本研究认为其生产指标的选择是正确的。W：原文献选择了上方的畜禽种类及左侧的生产指标，但是，本研究认为其生产指标的选择是不正确的。A：根据当年统计指标所限，原文献对肉牛研究者只能错误地选择年出栏量，但是自 2015 年能查到肉牛年末存栏量。下表同。

Note: Y, Original literature chose the production index on the left and this study agrees with the choice. W, Original literature chose the production index on the left, however, this study disagrees with the choice. A: According to the stastic yearbook in those years, original literature can only choose the slaughter quantity wrongly. However, the year-end live hogs quantity of beef can only be inquired since 2015. The same below.

表2 已有研究中对地区性畜禽粪便研究的畜禽种类及养殖生产指标选择汇总

Table 2 Summary on the selection of animal type and production index in regional LPE research

文献 Literatures	生产指标 Production index	猪 Pig	牛 Cattle	役用牛 Draft cow	肉牛 Beef	奶牛 Dairy cow	羊 Sheep	马 Horse	驴 Donkey	骡 Mule	骆驼 Camel	兔 Rabbit	禽类 Poultry	肉鸡 Broiler chicken	蛋鸡 Layer	鸭 Duck	鹅 Goose	区域 Region	
[16]	年出栏量 年末存栏量	Y	Y				Y	Y				Y	Y <sup>a</sup>	Y <sup>b</sup>				重庆	
[19]	年出栏量 年末存栏量	Y		Y	A	Y	Y	Y	Y			Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	东北
[41]	年出栏量 年末存栏量	Y	W		W	Y	W	Y	Y			Y	W	Y	Y				河南
[21]	年出栏量 年末存栏量	Y	Y				Y							Y <sup>a</sup>	Y <sup>b</sup>				广西
[25]	年出栏量 年末存栏量	Y	Y		W	Y	W	Y	Y			Y	W	Y	Y	Y	Y	Y	青岛
[23]	年出栏量 年末存栏量	Y	Y		W		Y	Y	Y			Y	W						湖北
[13]	年出栏量 年末存栏量	Y	Y		Y	Y	Y	Y	Y					Y	Y	Y			北京
[20]	年出栏量 年末存栏量	Y	Y		Y	Y	Y	Y	Y			Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	成都
[22]	年出栏量 年末存栏量	Y	Y				W						W						黑龙江
[24]	年出栏量 年末存栏量	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y			Y		Y	Y	Y	Y	Y	青岛

注:a:原文为肉禽;b:原文为蛋禽;c:肉牛存栏按50%基础母牛计。

Note:a,meat-poultry in original literature.b,egg-poultry in original literature.c,year-end live hogs quantity of beef is calculated by half foundation cows.

表 3 规模化养殖的猪、肉牛和羊的基础母畜占比分析

Table 3 Analysis on the proportion of dam of pig, beef and sheep in commercial scale husbandry

畜禽种类 Type	种类 Population	占比/% Proportion	畜禽种类 Type	种类 Population	占比/% Proportion
猪 Pig	空怀母猪	2.3	羊 Sheep	临产母羊	1.1
	妊娠母猪	4.7		妊娠母羊	22.9
	分娩哺乳母猪	2.4		哺乳母羊	10.3
	总计	9.4		空怀母羊	3.4
肉牛 Beef	产犊前期牛	1.8		总计	37.7
	产犊后期牛	1.8			
	带犊母牛	9.1			
	空怀妊娠牛	39.5			
	总计	52.2			

3.4 本研究推荐的饲养量指标的选择

综上所述,本研究对今后研究畜禽粪便产

量,推荐不同的畜禽种类选择不同的饲养量指标见表 4。

表 4 本研究确定的用于畜禽粪便研究的养殖生产指标选择

Table 4 Selection of production index for LPE research proposed in this study

生产指标 Production index	猪 Pig	役用牛 Draft cattle	肉牛 Beef	奶牛 Dairy cow	羊 Sheep	马 Horse	驴 Donkey	骡 Mule	骆驼 Camel	兔 Rabbit	肉鸡 Broiler chicken	蛋鸡 Layer	鸭 Duck	鹅 Goose
年出栏量 Slaughter quantity										Y	Y		Y	Y
年末存栏量 Year-end live hogs quantity		Y		Y		Y	Y	Y	Y			Y		
常年存栏量 Annual inventory quantity	Y		Y		Y									

注:Y,本研究确定选择畜禽种类生产指标。

Note:Y,production index selected and confirmed in this study.

4 计算畜禽粪便产量所用相关系数的定义

4.1 排泄系数

根据现有研究报导,已有研究对畜禽粪便排泄系数的定义是“单个动物每日排出粪便的数量”<sup>[27,31,42]</sup>,本研究将其进一步确定为“在正常生产

条件下,畜禽在 1 年或 1 年内 1 个年饲养周期内,平均每头(或羽)畜禽每天排泄的粪和尿的量”。第一次对全国污染源普查时,对畜禽养殖业产污系数作了明确定义,即在典型的正常生产和管理条件下,一定时间内(一般以“d”为单位),单个畜禽所产生的原始污染物量<sup>[12]</sup>。可见,产污系数的概念和排泄系数

的内涵是一致的,是分别基于环境污染和畜禽生产管理两个角度的相同的概念。

#### 4.2 年饲养周期

年饲养周期指某一畜禽在1年内的1个饲养周期的平均天数,包括1批出栏后必要的圈舍清洁和消毒所需要的天数。饲养周期 $\geq 1$ 年的畜禽的年饲养周期计为365 d。部分已有研究中将这个因素称为养殖周期,但是从其字面直接体现出的含义显然不符合这个因素的定义,家畜养殖学和生理学领域的著作也均未见养殖周期的概念。也有研究报导将这一因素称为饲养期或饲养周期,相比养殖周期一词较为合理,但是也不确切。本研究认为应用年饲养周期一词是最合适的。

#### 4.3 含水率

一般情况下,畜禽粪便中含水分是最多的,但是已有研究中均没有明确阐述其定义和计算方法。顾名思义,本研究将畜禽粪便的含水率定义为:“在正常生产管理条件下,每头(羽)畜禽在其年饲养周期内所排泄出的粪和尿混合物中水分的平均质量的百分比”。由于未见畜禽粪便绝对相对含水率的研究报导,本研究只应用其相对含水率。家禽粪与尿液泄殖腔混合后再排出体外<sup>[43]</sup>,所以实际上没有尿,其粪便的含水率就是粪的含水率。畜类粪和尿分别排出体外,能分别测量粪和尿的量,其粪便相对含水率计算见式(9)。

$$M = \frac{(D \cdot M_D + U \cdot M_U)}{D + U} \cdot 100\% \quad (9)$$

式中:

$M$ ,某种畜类粪便的相对含水率,%;

$D$ ,该种畜类排泄粪量,kg/d;

$M_D$ ,该种畜类粪的相对含水率,%;

$U$ ,该种畜类排泌尿量,kg/d;

$M_U$ ,该种畜类尿的相对含水率,%。

#### 4.4 养殖规模系数

本研究首次提出养殖规模系数应用于畜禽粪便研究。该系数指在一定的区域内规模化养殖量占总养殖量的百分比。在目前能查询到的畜禽生产数据各种统计年鉴中,统计范围都是全社会的养殖量,包括各种合作经济组织和国营农场、农民个人、机关、团体、学校、工矿企业、部队等单位以及城镇居民饲养畜禽的数量。但是,由于散养管理的随意性较大,导致畜禽粪便排泄系数差异很大,并且畜禽粪便资源分散,不利于收集与利用,只有规模化养殖场产生的畜禽粪便适宜于收集与利用。

目前能获得规模化养殖的猪、肉牛、奶牛、羊、肉鸡和蛋鸡指标见表5,除了猪和羊外,牛和鸡的规模化养殖的指标差异很大,本研究建议采用农业部畜牧司的指标。本研究经咨询相关专家,也确定了其它畜禽种类的规模化养殖最小指标(表5)。

表5 我国畜禽规模化养殖的最小指标

Table 5 Minmum index of commercial scale husbandry in China

来源或文献 Source or literature	猪 Pig slaughter quantity	肉牛 Beef slaughter quantity	奶牛 Dairy cow year-end live hog quantity	羊 Sheep slaughter quantity	肉鸡 Broiler chicken slaughter quantity	蛋鸡 Layer year-end live hog quantity
[12]	500	200	100		50 000	20 000
农业部畜牧业司 <sup>a</sup>	500	50	100	100	10 000	2 000
来源或文献 Source or literature	役用牛 Draft cattle year-end live hog quantity	马 Horse year-end live hog quantity	驴 Donkey year-end live hog quantity	骡 Mule year-end live hog quantity	骆驼 Camel year-end live hog quantity	兔 Rabbit slaughter quantity
咨询专家 Expert consultation	100	100	100	100	100	5 000

注:a.申请政府信息公开获得,也是本研究建议采用的指标。

Note:a,obtained through government information publicity and also recommended in this study.



## 5 畜禽粪便的资源量研究进展

在已有研究中,全国的畜禽粪便资源量 2009—2013 年结果差异范围很大,例如,2009 年产量鲜重范围为 8.37 亿~32.64 亿 t<sup>[5]</sup>。其中最低值为全国规模化养殖场的产量<sup>[7]</sup>,最高产量的研究只报导了产量数值,其评估过程不是很清楚<sup>[5]</sup>,无从判断结果的准确性。其实,据更早些的研究报导<sup>[26]</sup>,2003 年全国畜禽养殖业产生的粪便就达到了 31.90 亿 t,但可靠性值得商榷。造成结果较大差异的原因,一是研究年份和所选择的畜禽种类范围不同,二是应用的相关定义和研究方法不一致,必然有可能对计算系数的取值过分偏离了实际。

近年评估过程比较清楚的研究结果见表 6。从表中可见,研究者选择畜禽种类既不全面,也不一致。耿维等<sup>[18]</sup>和 Zhang 等<sup>[4]</sup>分别研究了 2010 和 2012 年全国不同种类畜禽粪便的鲜重产量,总量分别为 22.28 亿和 16.29 亿 t。根据中国养殖业增长情况,在年份上 2012 年的产量应该大于 2010 年,因为经查统计数据,牛和羊的年末存栏量变化年际较小,猪的出栏量 2012 年增加了 3 000 万头。可见,2 个研究结果相比之下,Zhang 等<sup>[4]</sup>的明显估值过低,除缺少了对马、驴、骡的粪便研究外,牛和禽类粪便产量也显著少于耿维等<sup>[18]</sup>的结果,究其原因,是因为 Zhang 等<sup>[4]</sup>对排泄系数的取值低于耿维等<sup>[18]</sup>,并且将所有家禽的年饲养周期错误地取值为 55 d。耿维等<sup>[18]</sup>依据中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所等 2009 年公布的畜禽养殖业排污系数手册<sup>[12]</sup>,应用了我国 6 个区域不同的畜禽产排污系数,研究的动物种类是最全面的(仅缺少骆驼),各类动物年饲养周期取值相对合理,因此,尽管在引用王方浩等<sup>[26]</sup>研究中羊、马、驴骡的排泄系数出现了错误,也没有避免重复出栏问题,但相对于其他研究,其结果较接近当年实际的禽粪便资源量。

田宜水<sup>[7]</sup>和张田等<sup>[5]</sup>都报导了 2009 年全国规模化养殖场畜禽粪便资源量,其结果总量很接近,分别为鲜重 8.37 亿和 8.84 亿 t(表 6)。2 个研究所选择的动物种类也基本一致,但是不同畜禽种类的粪便占比差异很大,如田宜水<sup>[7]</sup>的猪粪占 24.9%,而张田等<sup>[5]</sup>猪粪却占 58.2%,这可能是由于 2 个研究所用的计算系数和规模化指标取值不同。但是,相比表 6 其他研究结果可见,张田等<sup>[5]</sup>结果中不论猪

粪数量还是占比都过分偏高,应是田宜水<sup>[7]</sup>的结果可靠性高。但是,后者也存在有些畜类重复出栏导致结果高估的问题。

贾伟<sup>[29]</sup>和黎运红<sup>[30]</sup>分别报导了 2009 年和 2013 年畜禽粪便干重产量 6.23 亿和 7.68 亿 t,但贾伟<sup>[29]</sup>研究的畜禽种类全,对各类畜禽年饲养周期的选取也更为准确,能相对更好地说明全国畜禽粪便干重产量(表 6)。但是,这 2 位研究者在计算干重的过程中仅考虑到粪的含水率,忽略了尿的含水率,导致粪便的含水率偏低,粪便干重估值偏高。

## 6 总结与瞻望

本研究系统地规范了畜禽粪便的定义,讨论并完善了其产量计算中相关的系数的定义,改进了计算方法,在公式中强调了含水率的因素。尽管研究全部畜禽粪便在理论和实践中有重要意义,但是,根据当前产业发展趋势,不论是从污染控制还是废弃物利用的角度,今后研究的重点是规模化养殖,因此本研究在公式中,加入了规模化系数。同时,首次提出有些畜类重复出栏问题并研究了避免这个问题的解决方法。在此基础上,未来畜禽粪便资源应该在下列方面进行深入研究。

1)需要对畜禽粪便产量计算所需要的系数进行准确取值,本系列研究将另文系统分析已有研究中的结果,确定各种系数的合理取值。

2)以最新的定义和系数取值,研究中国畜禽粪便资源量、空间分布及发展趋势,为畜禽粪便在环境污染控制及循环利用方面的政策制定、学术研究和产业化发展提供理论基础。

3)研究畜禽粪便的物理化学特性,并进一步研究其收储运体系和规模化利用,尤其作为能源化利用,既可减少土地和水资源污染,又能减少碳排放。

4)建议进一步深入研究畜禽粪便相关的定义和资源量评估方法,以及理化性质的研究方法,形成行业标准以便今后的研究者通过标准的定义和方法,获得准确的结果,从而减少低效重复研究。

## 致谢

本研究关于有些畜禽规模化养殖的最小指标咨询了中国农业大学生物学院崔胜教授和动物科技学院秦应和教授,特致谢忱。

表6 已有研究中全国畜禽粪便资源量研究的结果

Table 6 Results of LPEresource in China by previous researchers

文献 Literature	猪 Pig	牛 Cattle	役用牛 Draft cattle	肉牛 Beef	奶牛 Dairy cow	羊 Sheep	马 Horse	驴骡 Donkey & Mule	兔 Rabbit	禽类 Poultry	肉鸡 Meat- poultry chicken	蛋鸡 Layer	总计 Total	粪便产 生年份 Year
[7] <sup>a</sup>	208.0	208.0	198.0	186.0	118.0	118.0					36.0	90.0	837	2009
	占比 <sup>c</sup> /%	24.9	23.7	22.2	14.1	14.1					4.3	10.8	100	
[5] <sup>a</sup>	514.5	514.5	95.5	63.2	63.2						205.2	5.3	883.7	2009
	占比 <sup>c</sup> /%	58.2	10.8	7.2	7.2						23.2	0.6	100	
[18]	465.3	465.3	217.4	535.9	229.12	244.1	40.0	45.2	6.27		319	132.4	2 234.7	2010
	占比 <sup>c</sup> /%	20.8	9.7	24.0	10.3	10.9	1.8	2.0	0.3		14.3	5.9	100	
[29] <sup>b</sup>	193.6	193.6	238.3	70.8	61	113.9					23	67.7	768.2	2009
	占比 <sup>c</sup> /%	25.2	31	9.2	7.9	14.8					3	8.8	100	
[4]	486.1	486.1	868.3	208.1						66.6			1 629	2012
	占比 <sup>c</sup> /%	29.8	53.3	12.8						4.1			100	
[30] <sup>b</sup>	228.7	228.7	96.2	59.9	119					119.2			623	2013
	占比 <sup>c</sup> /%	36.7	15.4	9.6	19.1					19.1			100	

注:a,原文为大中型养殖场粪便;b,原文为干重;c,如果原文中没有占比数值,由本研究依据原文中粪便重量求得。

Note:a, LPE in large and middle-scale livestock farm in original literature;b, dry weight in original literature;c, if the proportion was not available in original literature, this study calculates the proportion according to the results in original literature.

## 参考文献 References

- [1] 谢光辉. 非粮生物质原料体系研发进展及方向[J]. 中国农业大学学报, 2012(6):1-19  
Xie G H. Progress and direction of non-food biomass feedstock supply research and development in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012(6):1-19 (in Chinese)
- [2] 张学峰, 田占辉, 丁瑜, 王莹莹. 畜禽粪便对环境的污染及解决途径[J]. 吉林畜牧兽医, 2010, 31(10):12-16  
Zhang X F, Tian Z H, Ding Y, Wang Y Y. The environmental pollution from animal feces and the way to tackle [J]. *Jilin Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2010, 31(10):12-16 (in Chinese)
- [3] 张振都, 吴景贵. 畜禽粪便的资源化利用研究进展[J]. 广东农业科学, 2010, 37(1):135-138  
Zhang Z D, Wu J G. Progress of the researches on resource utilization of livestock and poultry manure [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010, 37(1):135-138 (in Chinese)
- [4] Zhang T, Yang Y, Xie D. Insights into the production potential and trends of China's rural biogas [J]. *International Journal of Energy Research*, 2015, 39(8):1068-1082
- [5] 张田, 卜美东, 耿维. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. 生态学杂志, 2012(5):1241-1249  
Zhang T, Bu M D, Geng W. Pollution status and biogas-producing potential of livestock and poultry excrements in China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012(5):1241-1249 (in Chinese)
- [6] NYT 1168-2006 畜禽粪便无害化处理技术规范[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2006  
NYT 1168-2006. Technical requirement for non-hazardous treatment of animal manure [S]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2006 (in Chinese)
- [7] 田宜水. 中国规模化养殖场畜禽粪便资源沼气生产潜力评价[J]. 农业工程学报, 2012(8):230-234  
Tian Y S. Potential assessment on biogas production by using livestock manure of large-scale farm in China [J]. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012(8):230-234 (in Chinese)
- [8] NB/T 34029-2015. 非粮生物质原料名词术语[S]. 北京: 中国农业出版社, 2015  
NB/T 34029-2015. Terminology of non-food biomass feedstock [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2015 (in Chinese)
- [9] 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(32):1-5  
Lin Y, Ma J, Qin F. The structure distribution and prospect of China manure resource [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012(32):1-5 (in Chinese)
- [10] 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  
The National Agro-Tech Extension and Service Center. *Organic Fertilizer Nutrients in China* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999 (in Chinese)
- [11] 苏文幸. 生猪养殖业主要污染源产排污量核算体系研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2012  
Su W X. Study on accounting system of the amount of pollutants producing and pollutants discharge in the main pollution sources of live pig farming industry [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2012 (in Chinese)
- [12] 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 环境保护部南京环境科学研究所. 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] (2017-05-08). <https://wenku.baidu.com/view/528be4e1af1ffc4fff47ac3b.html>  
Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Nanjing Institute of Environmental Sciences, MEP. The first national pollution sources survey of livestock and poultry breeding industry pollutant emission coefficient manual [EB/OL]. (2017-05-08). <https://wenku.baidu.com/view/528be4e1af1ffc4fff47ac3b.html> (in Chinese)
- [13] 杨鹏宇. 北京市农村生物质能利用现状与发展预测研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015  
Yang P Y. A study on biomass energy utilization and development prediction in Beijing rural area [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015 (in Chinese)
- [14] 张海成. 县域循环农业发展规划原理与实践: 以临夏北塬为例 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012  
Zhang H C. BASCI theory and practice of development planning on county territory circulation agriculture-setting: Taking Beiyuan in Linxia county as an example [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012 (in Chinese)
- [15] 柳建国. 畜禽粪便污染的农业系统控制模拟及系统防控对策 [D]. 南京: 南京农业大学, 2009  
Liu J G. Research on prevention and control system of livestock and poultry excreta [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009 (in Chinese)
- [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(1):288-292  
Peng L, Wang D Y. Estimation of annual quantity of total excretion from livestock and poultry in Chongqing municipality [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004(1):288-292 (in Chinese)
- [17] 王洋. 黑龙江省畜禽排泄物处理的经济分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008  
Wang Y. Economic analysis on disposing livestock excrement in Heilongjiang Province [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2008 (in Chinese)
- [18] 耿维, 胡林, 崔建宇, 卜美东, 张蓓蓓. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J]. 农业工程学报, 2013(1):171-179  
Geng W, Hu L, Cui J Y, Bu M D, Zhang B B. Biogas energy potential for livestock manure and gross control of animal

- feeding in region level of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013(1):171-179 (in Chinese)
- [19] 马林,王方浩,马文奇,张福锁,范明生. 中国东北地区中长期畜禽粪尿资源与污染潜势估算[J]. *农业工程学报*, 2006(8):170-174  
Ma L, Wang F H, Ma W Q, Zhang F S, Fan M S. Assessments of the production of animal manure and its contribution to eutrophication in Northeast China for middle and long period [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006(8):170-174 (in Chinese)
- [20] 黄凤霞,田红,邓也. 成都市畜禽粪便年排放量估算及耕地负荷量分析[J]. *现代农业科技*, 2016(24):183-184  
Huang F X, Tian H, Deng Y. Analysis on total amount of domestic animal excrement and farmland load capacity in Chengdu [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016(24):183-184 (in Chinese)
- [21] 廖青,黄东亮,江泽普,韦广波,梁潘霞,李杨瑞. 广西畜禽粪便产生量估算及对环境的影响评价[J]. *南方农业学报*, 2013(4):627-631  
Liao Q, Huang D L, Jiang Z P, Wei G P, Liang P X, Li Y R. Estimation of quantity of livestock and poultry manure and environment impact assessment in Guangxi [J]. *Journal of Southern Agricultural*, 2013(4):627-631 (in Chinese)
- [22] 韦春波,李洋洋,孙广涛,贾永全. 黑龙江省畜禽粪便的排放量及时空分布特征[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2016, 63-66(6)  
Wei C B, Sun Y Y, Li G T, Jia Y Q. Emissions and temporal and spatial distribution characteristics of livestock manure in Heilongjiang Province [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2016(6):63-66 (in Chinese)
- [23] 黎运红,谭鹤群. 湖北省畜禽粪便资源分布及其环境负荷研究[J]. *广东农业科学*, 2015(18):136-141  
Li Y H, Tan H Q. Resource distribution and environmental load of animal manure in Hubei Province [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015(18):136-141 (in Chinese)
- [24] 赵俊伟,尹昌斌. 青岛市畜禽粪便排放量与肥料化利用潜力分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2016(7):108-115  
Zhao J W, Yin C B. Analysis on the total amount of domestic animal excrement and the potential of fertilizer utilization in Qingdao City [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016(7):108-115 (in Chinese)
- [25] 李培培,王建华,张宝珣,李和刚. 青岛市畜禽粪便排放量与农田负荷量分析[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2015(15):132-135  
Li P P, Wang J H, Zhang B X, Li H G. Analysis of livestock manure output and cropland load in Qingdao [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2015(15):132-135 (in Chinese)
- [26] 王方浩,马文奇,窦争霞,马林,刘小利,许俊香,张福锁. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. *中国环境科学*, 2006(5):614-617  
Wang F H, Ma W Q, Dou Z X, Ma L, Liu X L, Xu J X, Zhang F S. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China [J]. *China Environmental Science*, 2006(5):614-617 (in Chinese)
- [27] 朱建春,张增强,樊志民,李荣华. 中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地负荷及总量控制[J]. *农业环境科学学报*, 2014(3):435-445  
Zhu J C, Zhang Z Q, Fan Z M, Li R H. Biogas potential, cropland load and total amount control of animal manure in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014(3):435-445 (in Chinese)
- [28] 刘忠,段增强. 中国主要农区畜禽粪尿资源分布及其环境负荷[J]. *资源科学*, 2010(5):946-950  
Liu Z, Duan Z Q. Distribution of manure resources and environmental loads of agro-ecological regions in China [J]. *Resources Science*, 2010(5):946-950 (in Chinese)
- [29] 贾伟. 我国粪肥养分资源现状及其合理利用分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014  
Jia W. Studies on the evaluation of nutrient resources derived from manure and optimized utilization in arable land of China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [30] 黎运红. 畜禽粪便资源化利用潜力研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015  
Li Y H. Study on resource utilization potential of livestock and poultry manure [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015 (in Chinese)
- [31] 闫铁柱,社会英,夏维,程波,郑芳. 安徽省畜禽粪便污染现状及其防治对策[J]. *农业环境与发展*, 2009(2):58-62  
Yan T Z, Du H Y, Xia W, Cheng B, Zheng F. Current situation of livestock and poultry excrete pollution in Anhui Province and prevention measures [J]. *Agro-Environment and Development*, 2009(2):58-62 (in Chinese)
- [32] 张绪美,董元华,王辉,沈旦,刘德雄. 江苏省农田畜禽粪便负荷时空变化[J]. *地理科学*, 2007(4):597-601  
Zhang X M, Dong Y H, Wang H, Sheng D, Liu D X. Spatial and temporal variation in farm land load of livestock feces in Jiangsu Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007(4):597-601 (in Chinese)
- [33] 黄红英,常志州,叶小梅,马艳,于建光,靳红梅,许建平. 区域畜禽粪便产生量估算及其农田承载预警分析:以江苏为例[J]. *江苏农业学报*, 2013(4):777-783  
Huang H Y, Chang Z Z, Ye X M, Ma Y, Yu J G, Jin H M, Xu J P. Estimation of regional livestock manure production and farmland loading capacity: A case study of Jiangsu Province [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2013(4):777-783 (in Chinese)
- [34] 中国畜牧兽医年鉴编辑部. 中国畜牧兽医年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015  
Editorial Office of Yearbook of Animal Husbandry and Veterinary Medicine of China. *Yearbook of Animal Husbandry and Veterinary Medicine of China* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015 (in Chinese)

- [35] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2015  
Editorial office of China Agriculture Yearbook. *China Agriculture Yearbook* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015 (in Chinese)
- [36] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2015  
Rural Social and Economic Research Bureau of National Bureau of Statistics. *China Rural Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press,2015 (in Chinese)
- [37] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2015  
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press,2015 (in Chinese)
- [38] 刘培芳,陈振楼,许世远,刘杰. 长江三角洲城郊畜禽粪便的污染负荷及其防治对策[J]. 长江流域资源与环境,2002,11(5): 456-460  
Liu P F, Chen Z L, Xu S Y, Liu J. Waste loading and treatment strategies on the excreta of domestic animals in the Yangtze delta[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002,11(5):456-460 (in Chinese)
- [39] 张玉珍,洪华生,曾悦,黄金良,陈能汪,黄云凤,林阳. 九龙江流域畜禽养殖业的生态环境问题及防治对策探讨[J]. 重庆环境科学,2003,25(7):29-31  
Zhang Y Z, Hong H S, Zeng Y, Huang J L, Chen N W, Huang Y F, Lin Y. The environmental problems of livestock raising and its countermeasures in Jiulongjiang watershed [J]. *Chongqing Environmental Science*, 2003, 25 (7): 29-31 (in Chinese)
- [40] 白明刚,马长海. 河北省畜禽粪尿污染现状分析及对策[J]. 广东农业科学,2010(2):161-164  
Bai M G, Ma C H. Analysis on present conditions and strategies of livestock excrement and urine pollution in Hebei Province[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010(2):161-164 (in Chinese)
- [41] 周凯,雷泽勇,王智芳,史杰,彭兴芝. 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(5):1060-1065  
Zhou K, Lei Z Y, Wang Z F, Shi J, Peng X Z. Estimation of annual total livestock/poultry excrement in Henan Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010(5):1060-1065 (in Chinese)
- [42] 朱建春. 陕西农业废弃物资源化利用问题研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014  
Zhu J C. Study on the problem of shaanxi agricultural wastes resource utilization[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014 (in Chinese)
- [43] 中国农业大学. 家畜粪便学[M]. 上海:上海交通大学出版社,1997  
China Agricultural University. *Livestock Manure* [M]. Shanghai, Shanghai Jiao Tong University Press, 1997 (in Chinese)

责任编辑:杨爱东