

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.171010

盛婧, 周炜, 王子臣, 张丽萍, 孙国峰. 畜禽养殖粪污工程化处理对污水理化性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(6): 877-883

SHENG J, ZHOU W, WANG Z C, ZHANG L P, SUN G F. Effect of engineering treatment on the physical and chemical properties of livestock slurry[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(6): 877-883

## 畜禽养殖粪污工程化处理对污水理化性状的影响\*

盛 婧, 周 炜, 王子臣, 张丽萍, 孙国峰

(农业部种养结合重点实验室/江苏省农业科学院循环农业研究中心 南京 210014)

**摘 要:** 种养结合是畜禽养殖场粪污处理与利用的一项重要措施。集约化生产条件下, 种养结合主要依赖于工程措施来实现, 然而工程措施对粪污水理化性状的影响研究不足, 限制了粪污水的资源化利用。本文在综述近年来国内外粪污处理各环节理化性状变化研究基础上, 重点对固液分离、厌氧发酵、贮存等 3 个工程环节对粪污理化性状的影响效果进行分析, 旨在为规模养殖场粪污资源化利用提供依据。养殖污水经各环节工程措施处理, 其颗粒物数量及大小、养分与重金属含量及形态均发生了显著变化。固液分离环节通过机械去除大颗粒物, 显著减少粪污水中干物质(DM)总量, 降低总氮(TN)和总磷(TP), 粪污水中 DM、TN、TP 的去除效率分别为 5.7%~65%、2.7%~49%、2.3%~82%。不同固液分离方法对粪污水中 DM、TN、TP 的去除效率差异显著, 同时还显著地改变粪污水的 N:P:K 比例, 但对 Cu、Zn 的去除效率较低。厌氧发酵环节主要分解小颗粒物, 经厌氧发酵后, 粪污水中干物质大幅度减少, TN、K 总量基本不变, 但 TN 组成发生改变,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量显著增加, 其占 TN 的比例达 46%~93%; 而 P、Cu、Zn 部分以晶体形式附着于发酵罐内壁, 其余部分还会发生液相向固相大量转移的现象。贮存环节由于小颗粒物降解和大颗粒物转化、沉降, 使粪污水中干物质总量削减, 液相部分 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、K 浓度显著降低。在 20~25 °C 条件下, 露天贮存 90 d, 畜禽粪污沼液 TN、TP 和 K 浓度分别降低 39%~77%、61%~78%和 23%~54%。以上研究对于制定粪污水农田利用工程方案、区域养分综合管理计划具有重要的指导作用。然而, 由于我国粪污处理大多采用多级处理工艺措施, 而国内外研究侧重于单项工程措施对污水理化性状的影响, 现有数据支撑难以提出针对粪污水农田利用的最佳养殖粪污处理方案和组合。粪污水农田利用迫切需要加强两个方面的工作: 1) 处理工程对粪污水理化性状影响的全过程监测评估; 2) 基于农田消纳的粪污矿质养分固液相分配定向调控技术研发。

**关键词:** 养殖污水; 固液分离; 厌氧发酵; 贮存; 理化性状

中图分类号: S19; S181 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2018)06-0877-07

## Effect of engineering treatment on the physical and chemical properties of livestock slurry\*

SHENG Jing, ZHOU Wei, WANG Zichen, ZHANG Liping, SUN Guofeng

(Key Laboratory for Crop and Animal Integrated Farming, Ministry of Agriculture / Circular Agriculture Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** The combination of livestock breeding and crops planting is an important strategy for manure utilization and management. Under intensive production, the combination of livestock breeding and crops planting mainly relies on efficient modern engineering

\* 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(16)1003]资助  
盛婧, 研究方向为环境养分循环利用工程。E-mail: nkysj@hotmail.com  
收稿日期: 2017-11-07 接受日期: 2018-01-22

\* This work was funded by the Independent Innovation Project of Jiangsu Province, China [CX(16)1003].  
Corresponding author, SHENG Jing, E-mail: nkysj@hotmail.com  
Received Nov. 7, 2017; accepted Jan. 22, 2018

measures. However, limited studies have been carried out on the effects of engineering measures on the physic-chemical properties of slurry, which restricts the utilization of slurry as a resource. This paper reviewed recent literatures and analyzed the effects of three engineering measures (manure solid-liquid separation, anaerobic fermentation and storage) on the physic-chemical properties of slurry. The results showed that the number and size of particles, the concentration and morphology of nutrients and heavy metals in slurry changed significantly under intervention of engineering measures. In solid-liquid separation process, almost all large particles in slurry were removed and dry matter (DM), total N (TN) and total P (TP) also significantly reduced, with respective removal efficiencies of 5.7%–65% for DM, 2.7%–49% TN and 2.3%–82% for TP. Removal efficiency of DM, TN and TP as well as the rate N : P : K in slurry significantly varied with solid-liquid separation method. However, few heavy metals such as Cu and Zn were removed in solid-liquid separation process. Small particles decomposition mainly occurred in anaerobic fermentation process, which greatly reduced DM concentration in slurry. After anaerobic fermentation, the total amounts of TN and K changed little, while  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration increased significantly with proportion of TN in the range of 46%–93%. Patches of P, Cu and Zn crystals were attached on the inside walls of the tank, while the remains transferred from liquid to solid in the anaerobic fermentation process. In the storage process, the concentrations of DM, TN,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TP and K significantly decreased in the liquid part of the slurry, due to the decomposition and deposition. After 90 days of storage at 20–25 °C, TN, TP and K concentrations in biogas slurry decreased respectively by 39%–77%, 61%–78% and 23%–54%. The study provided relevant guide on designing slurry treatment engineering and formulating comprehensive nutrient management plans in a given region. Since the area of farmland under slurry application is limited in China, livestock manure treatment usually follows multi-stage treatment technology. However, most of the current studies have focused on single engineering measure for the physic-chemical properties of slurry. Thus, it is difficult to put forward the best manure treatment scheme and treatment combination through such data. It was recommended that future works of slurry utilization in farmlands focused on: (1) the monitoring and evaluation of the response of physic-chemical properties of slurry to the entire processes of engineering treatments; (2) the development of directional regulation technology of slurry nutrient between solid and liquid phases for better application of slurry in farmlands.

**Keywords:** Livestock slurry; Solid-liquid separation; Anaerobic fermentation; Storage; Physical and chemical properties

随着我国经济的快速发展, 畜禽养殖业集约化、规模化程度不断提高, 据统计<sup>[1]</sup>, 截至 2014 年末, 全国规模化畜禽养殖场总数已达 294 万处(生猪出栏 50 头以上, 或者相当养殖规模), 规模畜禽养殖场的粪污处置逐渐上升为农业面源污染的主要问题, 将粪污通过工程技术处理后在周边农田利用是目前公认的最为经济可行的粪污处置方式。已有研究表明, 工程技术对粪污理化性状影响显著, 了解畜禽养殖粪污处理过程中污水理化性状变化对于粪污资源化利用具有重要意义。然而, 关于工程技术对粪污理化性状的影响, 目前缺少定量且系统的报道。本文在综述近年来国内外粪污处理各环节理化性状变化文献基础上, 重点就对固液分离、厌氧发酵、贮存等 3 个工程环节对粪污理化性状的影响效果进行分析, 旨在为规模养殖场粪污资源化利用提供依据, 同时也为后续研究提供新的思路。

## 1 新鲜畜禽粪污理化性状

畜禽粪污理化性状因动物类型、饲养阶段和清粪工艺不同, 差异极为显著。从物理性状而言, 不同动物间比较, 奶牛粪便干物质含量略低于猪粪便, 但颗粒粒径却大于猪粪便<sup>[2-4]</sup>。猪、奶牛粪便粒径分布均以 <150  $\mu\text{m}$  小颗粒为主, 其重量占粪便总重量的 57.99%–68.34%。仔猪与育成牛等

幼龄动物粪便粒径小于育肥猪与泌乳牛等成年动物粪便<sup>[5]</sup>。

就化学性状而言, 在畜禽生产中, 大部分矿质养分通过粪尿被排出体外, 饲料中矿质养分仅有少部分能被动物生长吸收利用。猪粪尿较其他动物粪便, 含有较高 P 和微量元素。猪养殖过程大约排放出 55%–95% 的饲料 N、50%–60% 的饲料 P 以及 80%–90% 的饲料添加剂 Cu 和 Zn<sup>[6-7]</sup>。猪粪的 N、P、Zn、Cu 含量总体高于牛粪, K 含量两者相当。我国规模化养殖场猪粪(干基)的 N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、Zn、Cu 平均含量分别为 230  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、40  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、21  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、633  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、488  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 牛粪(干基)的 N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、Zn、Cu 平均含量分别为 16  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、15  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、20  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、138  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、48.5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[8]</sup>。同一种动物成年期排泄物 N、P、K 显著高于幼龄期, 但是不同生育阶段猪粪污 N :  $\text{P}_2\text{O}_5$  :  $\text{K}_2\text{O}$  基本不变<sup>[9]</sup>。由于集约化养殖业的快速发展, 饲料添加剂和配方饲料得到广泛应用, 畜禽粪便的组成特性显著改变。与 20 世纪 90 年代相比, 尽管猪、牛粪便中总氮(TN)平均含量变化不大, 但是总磷(TP)、K 含量显著增加。猪、牛粪便 TP 平均含量分别增加 93.7%、52.0%, K 平均含量分别增加 54.8%、71.9%。猪粪 N : P : K 比例由过去的 1 : 1 : 0.6 提升至 1 : 1.7 : 0.9, 牛粪 N : P : K 由过去的 1 : 0.6 : 0.7 提升至 1 : 1 : 1.3<sup>[10]</sup>。从重金

属含量来看,猪粪中的 Zn、Cu 含量显著增加,分别增加 3.8 倍和 12.0 倍,而牛粪中 Zn、Cu 含量则变化不大。同一养殖动物类型不同清粪工艺相比,水泡粪、水冲粪工艺粪污水 N、P 浓度显著高于干清粪工艺<sup>[11-12]</sup>。具代表性的规模养猪场,水泡粪方式污水中 COD<sub>Cr</sub>、TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的浓度分别达 5 340~20 000 mg·L<sup>-1</sup>、805~1 800 mg·L<sup>-1</sup>、59~130 mg·L<sup>-1</sup>、516~1 500 mg·L<sup>-1</sup>;而干清粪方式污水中 COD<sub>Cr</sub>、TN、TP 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的浓度则分别为 1 000~7 600 mg·L<sup>-1</sup>、481~730 mg·L<sup>-1</sup>、43~220 mg·L<sup>-1</sup>和 434~610 mg·L<sup>-1</sup>。不同养分元素在粪尿中的分布比例差异显著。就规模养猪场而言,粪便中 TN 略高于尿液,粪便 N 占排泄总 N 的 48%~72%(平均 59%),尿液 N 占比 52%~27%(平均 41%);P 主要存在于粪便中,其比例为 77%~83%(平均 81%),尿液 P 占比为 23%~17%(平均 19%);K 则主要以尿液形式排泄,粪便 K 与尿液 K 占总 K 的比例分别为 32%~50%(平均 37%)和 68%~50%(平均 63%)<sup>[13]</sup>。

综上所述,畜禽养殖污水中理化性状随着养殖动物种类、饲养阶段、清粪方式等而变化,在制订种养结合方案时,应充分考虑养殖场状况以及畜禽粪便理化性状,确定合理施用量,避免养分失衡,降低环境污染风险。

## 2 固液分离对粪污水理化性状的影响

固液分离不仅能够有效分离污水中固体颗粒,还可大大减少粪污贮存设施规模、节约粪污运输成本,是实现畜禽养殖粪污资源化和无害化处理的重要环节<sup>[14]</sup>。畜禽养殖粪便的固液分离方法主要有沉淀分离、筛分分离、螺旋挤压分离、带式压滤分离、沉降离心分离等,固液分离效率与采用的固液分离方法关系密切(表 1)。现有沉淀分离方法分离粒径 <1 000 μm 的有机物效果好,其干物质去除效率为 42%~55%;筛分方法对于分离大粒径的有机颗粒物具有良好的去除效果,可分离 >500 μm 颗粒物,干物质去除效率为 8%~31%;螺旋挤压方法能截留 >300 μm 颗粒,干物质去除效率为 19%~35%;压滤分离方法对粒径 >1 000 μm 的粗颗粒有较好的分离效果,干物质去除效率为 43%~48%;沉降离心方法则对去除细小颗粒最为有效,能截留 >20 μm 颗粒,干物质去除效率为 55%~65%<sup>[15-17]</sup>。固液分离效率与粪污来源密切相关。牛粪污的固液分离效率高于猪粪,主要是由于牛粪中直径 >25 μm 的颗粒比例远高于猪粪<sup>[5]</sup>。

由于粪污中矿质元素多以有机态形式存在,因此固液分离在降低固形物浓度同时,也显著影响着粪污化学特征。各种元素在不同颗粒物中分布不同<sup>[18]</sup>,猪、牛粪便中 N 主要存在于粒径 <150 μm 的颗粒物中,P 和 Ca 集中于 >250 μm 的大颗粒物部分,Cu 和 Zn 等金属物质主要存在于 3~25 μm 的小颗粒物中,而 K、Na 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 则主要存在于尿液中<sup>[5,15,17,19]</sup>。

由于各种元素在颗粒物中分布特征不同,不同固液分离方法粪污水中 TN、TP 去除率差异很大(表 1)。沉淀方法去除粪污水中 TN、TP 效率高,其去除率分别是 TN 22%~37%和 TP 44%~52%;筛分方法对粪污水中 TN、TP 分离效率较低,其去除率分别为 TN 2.7%~5.5%和 TP 2.3%~12%;螺旋挤压方法对粪污水中 TN、TP 分离效率也较低,其去除率是 TN 4.4%~10%和 TP 12%~30%;压滤方法去除 TN、TP 效率较高,其去除率分别为 TN 24%~31%和 TP 30%~42%;沉降离心方法对粪污水中 TN、TP 具有较好的去除效果,其去除率分别是 TN 27%~49%和 TP 62%~82%。尽管不同固液分离方式下粪污水 TN、TP 去除率差异很大,但是均表现为 TP 去除率高于 TN 去除率。由于现有固液分离方法分离的对象主要是大颗粒物,因此粪污水中 Cu 和 Zn 去除效率较低,仅能够去除粪污水中 8%~12%的 Cu 和 Zn<sup>[20]</sup>。

此外,固液分离技术也显著影响着粪污水的 N:P:K 比例。固液分离后,P 和有机物主要集中于固体部分,而 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 K 则在液体部分含量丰富<sup>[21-22]</sup>。Fangueiro 等<sup>[23]</sup>采用不同固液分离方法对 N:P:K 比例为 1:0.2:0.4 的原料粪污进行分离,结果发现,通过沉淀法固液分离后,粪污水 N:P:K 比例变为 1:0.03:0.7,分离出的固体 N:P:K 比例为 1:0.4:0.3;而通过离心分离后,粪污水 N:P:K 比例则为 1:0.02:0.8,固体 N:P:K 比例为 1:0.5:0.2。

综上所述,由于粪污固相颗粒物大小比例不同,以及各矿质元素在固相与液相分布上存在差异,使得不同固液分离方法的固液相分离效率差异极其显著,从而造成固液分离环节对粪污分离后固液相产物的各元素组成影响极大。因此在进行工程设计时,应针对固液相产物的营养元素浓度需求,选择合理的固液分离方法。如将粪污水用作 N 需求量高的作物(如水稻、小麦、叶菜类蔬菜等)肥源时,可选择筛分、螺旋挤压等固液分离方法;但将粪污水用作 K 需求量较高的果树肥源时,宜选择沉降离心、压滤、沉淀等分离方法。

表 1 固液分离方法对畜禽粪污固液分离效率的影响  
Table 1 Effects of solid-liquid separation methods on solid-liquid separation efficiency of livestock slurry

固液分离方法 Solid-liquid separation method	分离颗粒物粒径 Size of separated particle ( $\mu\text{m}$ )	去除效率 Remove efficiency (%)			分离后的污水 Liquid		分离出的固体 Solid		参考文献 Reference
		干物质 Dry matter	总氮 Total N	总磷 Total P	$\text{NH}_4^+\text{-N} : \text{N}$	$\text{N} : \text{P} : \text{K}$	$\text{NH}_4^+\text{-N} : \text{N}$	$\text{N} : \text{P} : \text{K}$	
沉淀 Sediment	<1 000	42~55	22~37	44~52	0.9	1 : 0.03 : 0.7	0.3	1 : 0.4 : 0.3	[23-25]
筛分 Sieve	>500	5.7~31	2.7~5.5	2.3~12	0.3	1 : 0.01 : 0.3	0.2	1 : 0.6 : 0.2	[17,23]
螺旋挤压 Screw press	>300	19~35	4.4~10	12~30	—	—	—	—	[3,17,20,23]
压滤 Belt press	>1 000	43~48	24~31	30~42	—	—	—	—	[17,23,26]
沉降离心 Decanter centrifuge	>20	55~65	27~49	62~82	0.8	1 : 0.02 : 0.8	0.2	1 : 0.5 : 0.2	[3,6,23]

原料粪污 $\text{NH}_4^+\text{-N} : \text{N}$ 为0.3,  $\text{N} : \text{P} : \text{K}$ 为1 : 0.2 : 0.4,  $\text{NH}_4^+\text{-N} : \text{total N}$  was 0.3, and  $\text{N} : \text{P} : \text{K}$  ratio was 1 : 0.2 : 0.4 in slurry.

### 3 厌氧发酵对粪污水理化性状的影响

厌氧发酵处理前后, 粪污水的最大差异是干物质含量的变化<sup>[3]</sup>。由于厌氧发酵过程中颗粒物水解和沉淀, 粪污水总固体含量显著减少, 去除率约为30%~70%<sup>[27]</sup>。一般而言, 猪粪污水的总固体去除率高于牛粪污水<sup>[28]</sup>。粪便厌氧发酵会使固体部分颗粒物的组成发生变化<sup>[22]</sup>。Levine等<sup>[29]</sup>根据污水有机物颗粒成分和特征, 将其分为4大类: 第1类是可沉降颗粒, 直径>100  $\mu\text{m}$ , 其成分主要是有机残留物; 第2类是超级胶体颗粒, 直径1~100  $\mu\text{m}$ , 其成分包括细菌絮凝体、菌丝体、单细胞和少部分有机残留物; 第3类是胶体颗粒, 直径1~0.08  $\mu\text{m}$ , 主要由细菌构成; 第4类是可溶性颗粒, 直径<0.08  $\mu\text{m}$ , 主要包括碳水化合物、氨基酸和脂肪酸以及多糖等。

在厌氧发酵过程中, 颗粒物分布向大尺寸颗粒物转变<sup>[18,30]</sup>。发酵1周后, 可溶性颗粒显著增加, 大约持续20 d左右, 之后由于纤维素组分的水解, 可溶性颗粒消失, 与此同时细菌絮凝体和菌丝生长, 导致胶体及超级胶体颗粒比例扩大<sup>[31]</sup>。在厌氧发酵过程中细菌菌丝体不断生长, 长度可从1  $\mu\text{m}$ 增加到100  $\mu\text{m}$ 。在粪污厌氧发酵开始的前40 d, 小于100  $\mu\text{m}$ 的颗粒物含量丰富, 42 d后可溶性的、胶体和超级胶体的颗粒物比例减少, 此时细菌底物被耗尽, 开始自我消耗, 数量减少, 导致可沉淀颗粒物占优势<sup>[29]</sup>。另外, 厌氧发酵过程还使得粪污的黏性降低, 从而增加粪污通过介质的过滤与渗透速率<sup>[27,32]</sup>。因此, 粪污水经厌氧发酵环节将导致固液分离效率降低。

厌氧发酵过程中各矿质元素在发酵罐内的滞留情况不同, 厌氧发酵前后 N、K、Na 总量几乎不变, 部分 P、Cu、Zn 以晶体形式附着于发酵罐的内壁。猪粪经厌氧发酵过程, 约有25.5%~36.0%的P附着于发酵罐中; 牛粪厌氧发酵后, 只有很少一部分 P(<2%) 存留于发酵罐中, 大部分随出料排出<sup>[18,27,33]</sup>。猪粪

Cu、Zn 在发酵罐存留比例可达41.5%和18.4%<sup>[27]</sup>。

厌氧条件下, 发酵原料中的有机氮经微生物作用发生氨化、厌氧氨氧化、反硝化等反应, 其在液相和固相中的分配比例及其形态会发生重要改变<sup>[28]</sup>。猪粪和牛粪表现不一致(表2)。与发酵前进料相比, 猪粪发酵后的出料中 N 由固相向液相转移, 采用 CSTR 发酵工艺, 固相 N 量比例下降幅度达28.0%, 液相 N 量比例增加10.7%; 而牛粪发酵后的出料中则有少量 N 由液相转移到固相中, 其主要原因是牛粪发酵原料 C/N 比较大, N 素易被微生物固定在沼渣中。在发酵物水解阶段后随着发酵进程,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度逐步递增, 而  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度则呈下降趋势<sup>[28]</sup>。厌氧发酵后, 沼液中 TN 主要由  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  组成, 占 TN 的46.4%~92.9%, 平均值72.8%; 有机氮的含量占 TN 的比例也较高, 为11.8%~53.3%, 平均值26.5%; 而  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量及占 TN 的比例相对较低,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  占 TN 的比例不足1%<sup>[34]</sup>。

猪粪、牛粪厌氧发酵处理后, 均存在 P 素由液相向固相转移的趋势, 且奶牛粪污更为显著<sup>[33]</sup>。与发酵前进料相比, 猪、牛粪发酵后出料中液相 P 的比例极显著降低, 降幅达77.3%~79.5%; 牛粪出料中固相 P 的比例显著增加, 增幅38.7%, 而猪粪由于厌氧发酵过程中部分 P 在发酵罐内沉淀, 其出料中固相 P 的比例则显著降低(表2)。猪、牛粪污经厌氧发酵后, 出料中可溶性 P 量较进料大幅下降。付广青等<sup>[33]</sup>研究表明, 牛粪厌氧发酵后, 可溶性 P 量占 TP 量的比例由16.34%降至3.52%。Güngör 等<sup>[35]</sup>研究了厌氧发酵对奶牛粪便 P 形态及其水溶性的影响, 结果表明发酵前总可溶性 P 占总 P 量为8%~16%, 发酵后可溶性 P 比例降低5%~9%, 且厌氧发酵后颗粒性 P 含量增加。

值得注意的是, 在粪污厌氧发酵过程中, 由于 P 在发酵罐的沉积以及 N 和 P 在固液相的迁移特征不同, 导致发酵后粪污以及固相、液相的 N : P 比均发生显著改变, 从而使得用以消纳粪污水所需要的土地面积发生变化。

表 2 猪粪和牛粪厌氧发酵前后氮磷在固相和液相中的比例变化<sup>[28,33]</sup>

Table 2 Change rates of nitrogen and phosphorus ratios in solid and liquid phases of samples obtained before and after anaerobic digestion of pig and dairy manure %

粪污类型 Manure type	N 比例 N ratio		P 比例 P ratio		
	固相(沼渣) Solid phase (sludge)	液相(沼液) Liquid phase (biogas slurry)	固相(沼渣) Solid phase (sludge)	固相(沉淀) Solid phase (sediment)	液相(沼液) Liquid phase (biogas slurry)
猪粪 Pig manure	-28.0	+10.7	-30.0	+35.1	-77.3
牛粪 Dairy manure	+2.8	-8.7	+38.7	+0.02	-79.5

厌氧发酵过程中,猪粪沼液中 Cu 和 Zn 含量显著降低,沼渣 Cu 和 Zn 含量增加<sup>[36]</sup>。发酵结束后,Cu 和 Zn 大部分存在于沼渣中。Massé 等<sup>[27]</sup>以猪粪为原料进行发酵研究表明,出料中沼渣 Cu 和 Zn 含量占比分别为 67.2%和 74.2%。李轶等<sup>[37]</sup>对猪粪厌氧发酵中 Cu 和 Zn 形态研究,发现有效态、残渣态 Cu 和 Zn 均在猪粪沼渣中具有较高的含量,其中有效态、残渣态 Cu 含量在沼渣中的比例分别为 76%~88%和 84%~95%;有效态、残渣态 Zn 含量的比例分别为 82%~89%和 94%~95%。由此可见,厌氧发酵处理环节也有利于提高污水施用的安全性。

#### 4 贮存过程对粪污水理化性状的影响

粪污水物理化学性状会因贮存期间有机物质分解、沉淀和表层结壳等而发生显著改变<sup>[6,38]</sup>。粪污贮存期间,<25 μm 颗粒物首先被微生物降解,与此同时>1 mm 大颗粒物又因微生物水解和转化形成小颗粒物,从而导致>1 mm 大颗粒物比例减少,粪污中 250~1 000 μm 的颗粒物相对比例增加;而粪污经固液分离后再贮存,则表现为>100 μm 颗粒物比例减少,<100 μm 颗粒物比例增加<sup>[7,39]</sup>。贮存显著地减少了粪污水中干物质的含量。Møller 等<sup>[3]</sup>研究表明,在 20 °C 条件下贮存 5 个月,干物质含量下降 25%。

粪污水中液相部分 NPK 浓度随着贮存时间延长会发生不同程度的降低。N 在贮存过程中从有机态转变为无机态形式,且发生明显的硝化反应。猪粪污水贮存期间,其矿化有机氮量占总有机氮的比例为 40%~80%,牛粪污水矿化有机氮的比例为 10%~80%<sup>[4]</sup>。贮存期间 TN 和速效氮浓度均呈下降趋势,且随着贮存温度越高,损失加剧<sup>[40]</sup>。由于沼液中具有较高的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 比例,因此其在贮存时 N 比粪污原水中 N 更易损失<sup>[7]</sup>。畜禽粪污沼液在温度 20~25 °C 条件下,贮存 90 d, TN 浓度下降 39.0%~76.5%, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度的降低趋势与 TN 基本一致,其降幅略高于 TN,而 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量则在贮存过程中增加 3~6 倍<sup>[40-41]</sup>。

不同原料粪污水中液相部分 TP 和 TK 浓度随贮

存时间延长而下降,其原因可能是 P 和 K 被沼液中固体悬浮物吸附下沉、沼液中微生物及藻类繁殖吸收利用,或磷酸根离子与沼液中的金属离子发生反应形成沉淀所致。不同发酵原料沼液在不同温度条件下 TP 和 K 浓度下降趋势相似,无显著差异。畜禽粪污沼液在温度 20~25 °C 条件下,贮存 90 d, TP 和 K 浓度分别下降 61.3%~77.5%和 23.0%~53.5%,猪粪沼液 TP 和 K 浓度降幅高于牛粪沼液<sup>[40-41]</sup>。可见,沼液贮存时间越短,其施用肥效越好。

另外,不同贮存方式也会影响并改变沼液特性<sup>[7,42]</sup>。在短期(<90 d)内,沼液加盖贮存可减少沼液中 TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 量的下降,但长时间贮存(>90 d)时,贮存方式对 TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 量的影响不大<sup>[41]</sup>。

#### 5 展望

粪污水高效安全利用是当前种养结合的首要难题。由于粪污水中颗粒粒径分布以及化学组成受到固液分离方法、厌氧发酵以及粪污贮存时间、方法等多个因素的影响,粪污水理化性状不清楚,导致其难以科学农田施用,影响了种养结合的实际效果。因此,了解粪污水理化性状,对于实施种养结合、促进养殖业可持续发展至关重要。总的来说,畜禽养殖粪污水经不同工程措施处理,其颗粒物数量及大小、矿质养分与重金属含量、形态均发生了显著变化,固液分离、厌氧发酵、贮存等工程措施有利于减少粪污水中液相部分颗粒物、TN 和 TP 浓度,并且厌氧发酵还有利于减少粪污水中液相部分 Cu 和 Zn 含量,提高粪污水施用安全性,以上研究对于制定粪污水农田利用工程方案、区域养分综合管理计划具有重要的指导作用。由于国内外研究侧重于单项工程措施对污水理化性状的影响,现有数据支撑难以提出最佳养殖粪污处理方案和组合。粪污水农田利用仍然迫切需要加强两个方面的工作:

1)开展处理工程对粪污理化性状影响的全过程监测评估。养殖场废弃物处理工程涉及固液分离、厌氧发酵、沼液贮存等多个环节,各个环节又包含多种技术方法,各环节、各种技术以及不同工艺流

程均会对粪污水理化性状产生显著的影响,并且其影响程度还与粪污水来源关系密切,导致最终粪污水的理化性质差异极大。然而,目前仅有零碎的单个环节对粪污水理化性状影响的研究结果,针对多个环节对粪污水理化性状的叠加性影响尚未见研究报告,因此无法从养分资源利用与环境安全兼顾的角度,精确地对养殖场废弃物所需的农田消纳面积进行估算。迫切需要针对不同工艺流程,开展粪污水处理工程全过程理化性状的监测评估研究,为种养结合规模配置提供完整参数。

2)基于农田消纳的粪污矿质养分固液相分配定向调控技术研发。农田种植作物类型丰富,不同类型的农作物对养分的需求量及元素的需求比例不同;而处理工程的各个环节和不同技术工艺均会影响粪污固液相的养分含量及其组成,即:也可以通过工程技术实现对粪污养分固液相分配调节。为使养殖场粪污水更有效得到利用、降低粪污水处理成本,应在粪污水处理工程的全过程监测评估的基础上,加强粪污水中矿质养分固液相分配定向调控技术研究。根据养殖场废弃物处理利用对象,分析消纳农田作物的养分需求特性,制定针对农田消纳需求的订单式处理工艺流程,实现粪污处理工程与农田消纳的无缝对接。

## 参考文献 References

- [1] 中国农业年鉴编辑委员会编. 中国农业年鉴 2014[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015  
China Agriculture Yearbook Editorial Committee. China Agriculture Yearbook 2014[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015
- [2] FANGUEIRO D, MARGARIDA G, GRILO J, et al. Proportion, composition and potential N mineralization of particle size fractions obtained by mechanical separation of animal slurry[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(4): 333-337
- [3] MØLLER H B, SOMMER S G, AHRING B K. Separation efficiency and particle size distribution in relation to manure type and storage conditions[J]. Bioresource Technology, 2002, 85(2): 189-196
- [4] SOMMER S G, PETERSEN S O, SØRENSEN P, et al. Methane and carbon dioxide emissions and nitrogen turnover during liquid manure storage[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 78(1): 27-36
- [5] 常志州, 黄红英, 吴军伟, 等. 猪和奶牛粪便的粒径及养分分布对固液分离效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 392-395  
CHANG Z Z, HUANG H Y, WU J W, et al. Effect of particle sizes and nutrient contents in swine and cow manures on efficiency of solid-liquid separation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(2): 392-395
- [6] HJORTH M, CHRISTENSEN K V, CHRISTENSEN M L, et al. Solid-liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30(1): 153-180
- [7] POPOVIC O, JENSEN L S. Storage temperature affects distribution of carbon, VFA, ammonia, phosphorus, copper and zinc in raw pig slurry and its separated liquid fraction[J]. Water Research, 2012, 46(12): 3849-3858
- [8] 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  
LI S T, LIU R L, SHAN H. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(1): 179-184
- [9] SÁNCHEZ M, GONZÁLEZ J L. The fertilizer value of pig slurry. Values depending on the type of operation[J]. Bioresource Technology, 2005, 96(10): 1117-1123
- [10] 单英杰, 章明奎. 不同来源畜禽粪的养分和污染物组成[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 80-86  
SHAN Y J, ZHANG M K. Contents of nutrient elements and pollutants in different sources of animal manures[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(1): 80-86
- [11] 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): 26-28  
ZHU Q L, LI Q, HU Q C, 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): 26-28
- [12] 刘永丰, 许振成, 吴根义, 等. 清粪方式对养猪废水中污染物迁移转化的影响[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(6): 318-320  
LIU Y F, XU Z C, WU G Y, et al. Effects of manure collection methods on the transfer and transformation of pollutant in pig wastewater[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(6): 318-320
- [13] 郭德杰, 吴华山, 马艳, 等. 不同猪群粪、尿产生量的监测[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(3): 516-522  
GUO D J, WU H S, MA Y, et al. Monitoring of the amount of pig manure and urine in different swineries[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2011, 27(3): 516-522
- [14] MØLLER H B, LUND I, SOMMER S G. Solid-liquid separation of livestock slurry: Efficiency and cost[J]. Bioresource Technology, 2000, 74(3): 223-229
- [15] 吴军伟. 畜禽粪便固液分离技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009  
WU J W. The research on solid and liquid separation of animal manure[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009
- [16] PETERS K, HJORTH M, JENSEN L S, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus distribution in particle size-fractionated separated pig and cattle slurry[J]. Journal of Environment Quality, 2011, 40(1): 224-232
- [17] 江滔, 温志国, 马旭光, 等. 畜禽粪便固液分离技术特点及效率评估[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 218-225  
JIANG T, WEN Z G, MA X G, et al. Characteristics and efficiency evaluation of livestock slurry separation technologies[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(S2): 218-225

- [18] MARCATO C E, PINELLI E, POUËCH P, et al. Particle size and metal distributions in anaerobically digested pig slurry[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(7): 2340–2348
- [19] JAPENGA J, HARMSSEN K. Determination of mass balances and ionic balances in animal manure[J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1990, 38: 354–367
- [20] BÉLINE F, DAUMER M L, GUIZIOU F. Biological aerobic treatment of pig slurry in France: Nutrients removal efficiency and separation performances[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(3): 857–864
- [21] RIAÑO B, GARCÍA-GONZÁLEZ M C. On-farm treatment of swine manure based on solid-liquid separation and biological nitrification-denitrification of the liquid fraction[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 132: 87–93
- [22] JØRGENSEN K, JENSEN L S. Chemical and biochemical variation in animal manure solids separated using different commercial separation technologies[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(12): 3088–3096
- [23] FANGUEIRO D, LOPES C, SURGY S, et al. Effect of the pig slurry separation techniques on the characteristics and potential availability of N to plants in the resulting liquid and solid fractions[J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 113(2): 187–194
- [24] DENGL W, LI Y, CHEN Z A, et al. Separation of swine slurry into different concentration fractions and its influence on biogas fermentation[J]. *Applied Energy*, 2014, 114: 504–511
- [25] CONVERSE J C, KARTHIKEYAN K G. Nutrient and solids separation of flushed dairy manure by gravity settling[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2004, 20(4): 503–507
- [26] PIETERS J G, NEUKERMANS G G J, COLANBEEN M B A. Farm-scale membrane filtration of sow slurry[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1999, 73(4): 403–409
- [27] MASSÉ DI, CROTEAU F, MASSE L. The fate of crop nutrients during digestion of swine manure in psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(15): 2819–2823
- [28] 靳红梅, 付广青, 常志州, 等. 猪、牛粪厌氧发酵中氮素形态转化及其在沼液和沼渣中的分布[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(21): 208–214  
JIN H M, FU G Q, CHANG Z Z, et al. Distribution of nitrogen in liquid and solid fraction of pig and dairy manure in anaerobic digestion reactor[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(21): 208–214
- [29] LEVINE A D, TCHOBANOGLIOUS G, ASANO T. Characterization of the size distribution of contaminants in wastewater: Treatment and reuse implications[J]. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 1988, 57(7): 805–816
- [30] ELMITWALLI T A, SOELLNER J, DE KEIZER A, et al. Biodegradability and change of physical characteristics of particles during anaerobic digestion of domestic sewage[J]. *Water Research*, 2001, 35(5): 1311–1317
- [31] ANDARAA R, ESTEBANJ M L. Transition of particle size fractions in anaerobic digestion of the solid fraction of piggery manure[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2002, 23(3): 229–235
- [32] COCOLO G, HJORTH M, ZAREBSKA A, et al. Effect of acidification on solid-liquid separation of pig slurry[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 143: 20–27
- [33] 付广青, 叶小梅, 靳红梅, 等. 厌氧发酵对猪与奶牛两种粪污固液相中磷含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1): 179–184  
FU G Q, YE X M, JIN H M, et al. Effect of anaerobic digestion on phosphorus transformation of both pig and dairy manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 179–184
- [34] 周杨, 章明奎. 长三角城郊区沼液化学组分特点及其农用重金属污染风险评价[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(20): 101–106  
ZHOU Y, ZHANG M K. Characteristics of chemical component and agricultural potential risk assessment of heavy metals of biogas slurry in suburban areas of Yangtze Delta[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(20): 101–106
- [35] GÜNGÖR K, KARTHIKEYAN K G. Phosphorus forms and extractability in dairy manure: A case study for Wisconsin on-farm anaerobic digesters[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(2): 425–436
- [36] 靳红梅, 付广青, 常志州. 猪粪及奶牛粪中温厌氧发酵对 Cu 和 Zn 的影响[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(3): 474–480  
JIN H M, FU G Q, CHANG Z Z. Effects of mesophilic anaerobic digestion of pig and dairy manures on Cu and Zn[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(3): 474–480
- [37] 李轶, 冯洋洋, 张辉, 等. 温度对猪粪厌氧发酵中 Cu, Zn, Cr 形态的影响[J]. *中国沼气*, 2017, 35(3): 11–15  
LI Y, FENG Y Y, ZHANG H, et al. Effects of different temperatures on form of Cu, Zn, Cr in anaerobic fermentation of pig manure[J]. *China Biogas*, 2017, 35(3): 11–15
- [38] BURTON C H, TURNER C. *Manure Management: Treatment Strategies for Sustainable Agriculture*[M]. 2nd ed. Silsoe, UK: Silsoe Research Institute, 2003
- [39] ZHU J, NDEGWA P M, LUO A. Changes in swine manure solids during storage may affect separation efficiency[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2000, 16(5): 571–575
- [40] 丁京涛, 沈玉君, 孟海波, 等. 沼渣沼液养分含量及稳定性分析[J]. *中国农业科技导报*, 2016, 18(4): 139–146  
DING J T, SHEN Y J, MENG H B, et al. Nutrition contents and its stability analysis of biogas residue and slurry[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016, 18(4): 139–146
- [41] 吴华山, 郭德杰, 马艳, 等. 猪粪沼液贮存过程中养分变化[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(12): 2493–2499  
WU H S, GUO D J, MA Y, et al. Changes of nutrients in anaerobically digested slurry of pig manure during storage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(12): 2493–2499
- [42] 刘庆玉, 李晓娟, 翟建宇, 等. 不同贮存条件对沼液成分的影响[J]. *中国沼气*, 2017, 35(1): 63–66  
LIU Q Y, LI X J, ZHAI J Y, et al. Influence of different storage conditions on biogas slurry composition[J]. *China Biogas*, 2017, 35(1): 63–66