

付 莉, 张克强, 高文萱, 等. 规模化养殖场肥水水质特征研究[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 487-493.

FU Li, ZHANG Ke-qiang, GAO Wen-xuan, et al. Characteristics of nutrients in anaerobic effluents from large-scale livestock farms in North China Plain[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 487-493.

规模化养殖场肥水水质特征研究

付 莉, 张克强, 高文萱, 社会英*

(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘 要:为深入了解规模化养殖场肥水水质特征,在华北典型种养结合区河北徐水,以规模化养殖场为研究对象,采集养殖场肥水水样,研究养殖肥水中氮磷形态分布、阳离子和重金属含量特征。结果表明,猪场肥水中总氮和总磷含量平均值分别为 $804.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $38.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,牛场肥水中总氮和总磷含量平均值分别为 $137.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $38.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。猪场和牛场肥水的铵态氮含量平均值占肥水中总氮含量平均值的66.0%,溶解性正磷酸盐含量平均值占总磷含量平均值的90.9%;肥水中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量平均值分别为 568.5 、 299.5 、 $33.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $50.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。研究表明,养殖肥水中含有大量氮磷养分,肥水中氮磷以速效养分为主,四种阳离子含量与电导率呈正相关关系,复相关系数0.4;肥水中重金属含量均未超出《GB 5084—2005 农田灌溉水质标准》的限值。

关键词:养殖肥水;氮磷形态;阳离子;重金属

中图分类号:X713

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)04-0487-07

doi: 10.13254/j.jare.2018.0165

Characteristics of nutrients in anaerobic effluents from large-scale livestock farms in North China Plain

FU Li, ZHANG Ke-qiang, GAO Wen-xuan, DU Hui-ying*

(Agro-environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: In order to further understand the characteristics of nutrients in anaerobic effluents from large-scale and intensive livestock farms, an experiment using livestock farms as the research object, was conducted to analyze nitrogen and phosphorus forms, cation contents and heavy metal contents in effluents collected from Xushui, Hebei Province, which is a typical planting and breeding area in North China Plain. The results showed that the average total nitrogen content of swine farms and dairy farms was 804.6 , $137.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively and 38.9 , $38.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively for total phosphorus. Moreover, the average content of ammonium nitrogen accounted for 66.0% of the average of total nitrogen, whereas the average content of dissolved reactive phosphorus accounted for 90.9% of the average of total phosphorus. The average content of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} was 568.5 , 299.5 , $33.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $50.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively. Our results indicated that there were high concentrations of nitrogen and phosphorus nutrients in livestock anaerobic effluents most of which was in available forms. In addition, there was positive correlation between four cation contents and electric conductivity, and multiple correlation coefficient was 0.4. Furthermore, heavy metal contents in effluents did not exceed the limits of Standard for Irrigation Water Quality (GB 5084—2005).

Keywords: livestock farm effluents; nitrogen and phosphorus forms; cation; heavy metal

我国畜禽养殖业由分散养殖向集约化、规模化方向快速发展,2016年,年出栏1000头以上的规模化猪场为89 388个,年存栏在100头以上的规模化牛场为40 230个^[1]。养殖粪污年产生量约38亿t,其中直接

排泄的粪便约18亿t,养殖过程产生的污水量约20亿t,其中40%未被有效利用^[2],这些未被利用的粪污(尤其是养殖过程中产生的尿液、冲洗圈舍的水)随意排放,成为面源污染源。将养殖产生的污水经过处理后

收稿日期:2018-06-23 录用日期:2018-09-30

作者简介:付 莉(1994—),山西忻州人,硕士研究生,从事农业资源利用研究。E-mail:389627975@qq.com

*通信作者:社会英 E-mail:duhuiying2008@163.com

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201503106);天津市现代奶牛产业技术体系创新团队建设专项(ITTCRS2018006);2018年农业生态环境保护项目

Project supported: The Special Scientific Research Fund of the Agricultural Public Welfare Profession of China (201503106); Innovation Team of Tianjin Cattle Research System(ITTCRS2018006); 2018 Project of Agro-Ecological Environmental Protection

转变为水肥资源进行农田利用,可为作物提供生长所需的氮磷养分^[3-4],施用于小麦、水稻、玉米、牧草等作物具有明显的增产提质效应。而肥水中除了大量的氮磷养分,还有一些阳离子和重金属元素,还田后会影 响土壤盐分,使重金属元素积累。因此,对养殖肥水水质特征的研究具有重要意义。

近年来,国内外学者对粪污直接厌氧发酵产生的肥水开展了一系列研究。Mary等^[5]研究表明,奶牛粪便与牧草、饲喂废弃物等进行厌氧发酵,奶牛粪便占干物质的69.2%,发酵产物中77.7%的氮和73.4%的磷来自于奶牛粪便,经粪污直接厌氧发酵产生的肥水中含有大量的营养元素。郑玉等^[6]的研究表明,厌氧发酵后的肥水呈中性或微酸、微碱性,除碳素损失较大外,其他90%的营养物质均保留在肥水中,特别是氮、磷和钾含量很大。吴华山等^[7]测得肥水中总氮(TN)含量为474.7 mg·L⁻¹,总磷(TP)含量为181.1 mg·L⁻¹。李伟雯等^[8]研究证实,以猪粪、牛粪为发酵原料的肥水中TN质量分数分别为0.263%、0.163%。李裕荣等^[9]通过研究发酵物养分含量的变化发现,在发酵过程中铵态氮(NH₄⁺-N)浓度递增,而硝态氮(NO₃⁻-N)浓度呈下降趋势,肥水中大多数氮以NH₄⁺-N形式存在。Ye等^[10]测得肥水中NH₄⁺-N含量范围是48.1~88.3 mg·L⁻¹,NO₃⁻-N含量范围是21.2~58.7 mg·L⁻¹。黎鑫林等^[11]研究表明养殖肥水中含有多种重金属,且存在不同程度的超标现象。

除粪污直接厌氧发酵外,干清粪固液分离后、液体厌氧发酵模式是当前我国畜禽粪污处理的主要模式之一^[12],但目前对肥水养分特征的研究多集中在粪污直接厌氧发酵产生的肥水(沼液)方面,而固液分离后液体厌氧发酵的肥水养分特征鲜见报道。因此,本研究从华北典型农牧结合地区收集41个厌氧肥水样品,研究厌氧肥水中氮磷养分形态分布、阳离子和重金属含量特征,以期 为固液分离后液体厌氧发酵模式产生的肥水农田利用提供基础数据,为实现农牧循环、肥水管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2015年10月在河北省保定市徐水区内选取有代表性规模化养殖场41个,规模化养殖场饲喂所用饲料均满足《GB 13078—2017 饲料卫生标准》的规定,其中包括18个规模化生猪养殖场和23个规模化奶牛养殖场,收集每个养殖场贮存池中肥水样品,每个样

品分三次混合取样1 L,样品存放于4℃冰箱中备用。

1.2 测定方法

肥水pH值用pH计(METTLER TOLEDO)测定;溶解氧(DO)采用膜电极法测定;化学需氧量(COD)、TN、TP、溶解性总磷(TDP)、溶解性正磷酸盐(DRP)和NH₄⁺-N的测定参考文献[13];NO₃⁻-N采用连续流动分析仪(FA6000+)测定;钾离子(K⁺)、钠离子(Na⁺)、钙离子(Ca²⁺)、镁离子(Mg²⁺)采用原子吸收分光光度法测定;铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、镉(Cd)、总铬(Cr)采用原子吸收分光光度法测定;总砷(As)、总汞(Hg)采用原子荧光光度法测定。

1.3 数据分析

应用Excel 2007进行最大值、最小值、平均值、标准差、标准误和变异系数分析,SAS(V8)软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 养殖肥水中DO和COD的特征

41个肥水样品中DO的含量范围为0.12~3.89 mg·L⁻¹,平均为0.97 mg·L⁻¹。其中猪场肥水中DO的含量范围为0.12~0.87 mg·L⁻¹,平均值为0.37 mg·L⁻¹,中位数为0.30 mg·L⁻¹;牛场肥水中DO的含量范围为0.15~3.89 mg·L⁻¹,平均值为1.43 mg·L⁻¹,中位数为0.95 mg·L⁻¹。图1为肥水中DO含量分布情况,由图1中可知,74.3%的肥水样品中DO含量小于1.0 mg·L⁻¹,8.6%的肥水样品中DO含量大于3.0 mg·L⁻¹。

本研究所采集的养殖肥水样品中COD的含量范围较大。猪场肥水COD值的含量范围为680~7160 mg·L⁻¹,平均值为2084 mg·L⁻¹,中位数为1400 mg·L⁻¹,变异系数为0.49;牛场肥水COD值的含量范围是280~7040 mg·L⁻¹,平均值为2944 mg·L⁻¹,中位数为2620 mg·L⁻¹,变异系数为0.44。猪场肥水中COD值

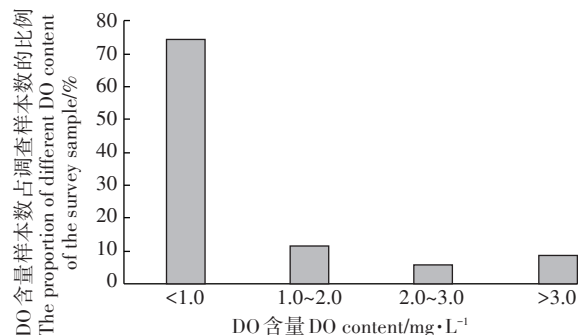


图1 DO含量样本数分布情况

Figure 1 The distribution of different DO content of the survey sample

在 1000~2000 mg·L⁻¹范围内的样品数量最多,占猪场调查总样本数的 33.3%,牛场肥水中 COD 值在 500~1000 mg·L⁻¹范围的样品数量最多,占牛场调查总样本数的 26.1%(图 2)。

猪场规模化养殖场中,肥水样品 pH 值的范围是 7.36~8.47,平均值为 7.86,中位数 7.82;牛场规模化养殖场中,肥水样品 pH 值的范围是 7.04~8.02,平均值为 7.38,中位数 7.28。总体上,肥水呈中性至偏碱性,变异系数较小。

2.2 养殖肥水中氮磷形态分布特征

养殖肥水中含有大量氮、磷养分,可被作物吸收利用。猪场肥水中 TN 的含量范围为 236.3~1 610.3 mg·L⁻¹,平均 804.6 mg·L⁻¹,在 500~1000 mg·L⁻¹范围内肥水样本数量最多,占猪场调查总数的 44.4%;NH₄⁺-N 的含量范围为 157.3~1 373.2 mg·L⁻¹,平均 616.2 mg·L⁻¹,在 100~500 mg·L⁻¹范围内肥水样本数量最多,占调查总数的 38.9%。牛场肥水中 TN 的含量范围为 20.9~457.7 mg·L⁻¹,平均 137.5 mg·L⁻¹,在 20~100 mg·L⁻¹范围内的样品所占比例最大,占牛场调查总数的 43.5%;NH₄⁺-N 的含量范围为 14.9~243.0 mg·L⁻¹,平均 76.1 mg·L⁻¹,在 20~100 mg·L⁻¹范围内的样品所占比

例最大,占牛场调查总数的 69.6%。肥水中氮素以 NH₄⁺-N 为主,猪场肥水中 NH₄⁺-N 占 TN 的 60.9%~90.2%,NO₃⁻-N 含量小于 9.0 mg·L⁻¹;牛场肥水中 NH₄⁺-N 占 TN 的 32.9%~82.8%,NO₃⁻-N 含量小于 12.0 mg·L⁻¹。由表 1 可以看出,猪场肥水中氮素含量显著高于牛场肥水中的氮素含量。

肥水中磷素变化较大。猪场肥水 TP 含量平均值为 38.9 mg·L⁻¹,TP 含量介于 10~30 mg·L⁻¹范围内的样品数量最多,占调查总数的 38.9%。TDP 含量的平均值为 35.4 mg·L⁻¹,TDP 含量介于 10~30 mg·L⁻¹范围内的样品数最多,占调查总量的 44.4%。DRP 含量的平均值为 32.0 mg·L⁻¹,在 20~40 mg·L⁻¹范围内的样品所占比例最大,为 33.3%。所调查的猪场肥水样品中 TDP 含量占 TP 的 75.3%~97.3%,TDP 含量占 TP 的 91.0%;DRP 含量占 TDP 的 90.4%,占 TP 的 82.3%。牛场肥水 TP 含量平均值为 38.2 mg·L⁻¹,TP 含量介于 10~30 mg·L⁻¹范围内的样品数量最多,占调查总数的 43.5%。TDP 含量的平均值为 34.7 mg·L⁻¹,TDP 含量介于 10~30 mg·L⁻¹范围内的样品数最多,占调查总量的 47.8%。DRP 含量的平均值为 32.5 mg·L⁻¹,在 10~30 mg·L⁻¹范围内的样品所占比例最大,为 52.5%。所调查的牛场肥水样品中 TDP 含量占 TP 的 72.1%~99.1%;DRP 含量占 TDP 的 93.7%,占 TP 的 85.1%。

猪场肥水 TN/TP 值在 12.5~72.2 之间,平均 28.5;牛场肥水 TN/TP 值在 0.7~6.1 之间,平均 3.6。在所调查的样品中,猪场肥水中 TN/TP 值显著大于牛场肥水,施用时应根据作物养分需求比例,进行养分的补充。

2.3 养殖肥水中电导率与阳离子含量

肥水中不同阳离子含量差异较大(图 3)。猪场肥水中电导率的范围为 2.41~16.74 mS·cm⁻¹,平均 8.81 mS·cm⁻¹,变异系数为 0.45。K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺含

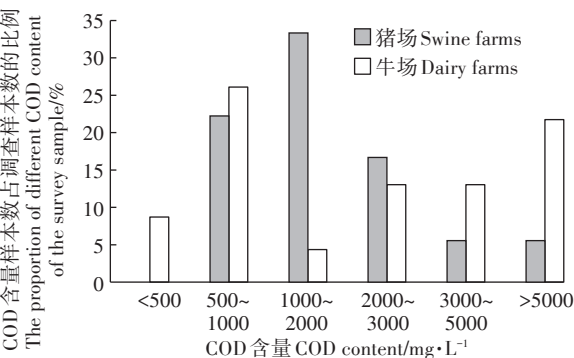


图2 COD含量样本数分布情况
Figure 2 The distribution of different COD content of the survey sample

表 1 养殖场肥水中氮磷养分含量(mg·L⁻¹)
Table 1 Nitrogen and phosphorus contents in effluents of livestock farms(mg·L⁻¹)

养殖场 Livestock farm	参数 Parameters	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TP	TDP	DRP
猪场 Swine farms	范围 Range	236.3~1 610.3	157.3~1 373.2	0.6~9.0	15.1~97.3	11.4~90.2	7.5~79.6
	平均值±标准误 Mean±SE	804.6±104.4	616.2±85.9	3.0±0.6	38.9±8.1	35.4±7.4	32.0±6.9
	中位数 Median	758.2	537.9	2.2	28.6	26.2	22.8
	变异系数 CV	0.21	0.28	0.72	0.33	0.32	0.35
牛场 Dairy farms	范围 Range	20.9~457.7	14.9~243.0	0.3~11.7	16.3~93.3	15.7~77.7	13.7~74.5
	平均值±标准误 Mean±SE	137.5±25.9	76.1±11.8	1.7±0.6	38.2±5.4	34.7±4.8	32.5±4.6
	中位数 Median	110.3	62.6	0.9	29.7	27.0	25.8
	变异系数 CV	0.24	0.35	0.35	0.39	0.42	0.44

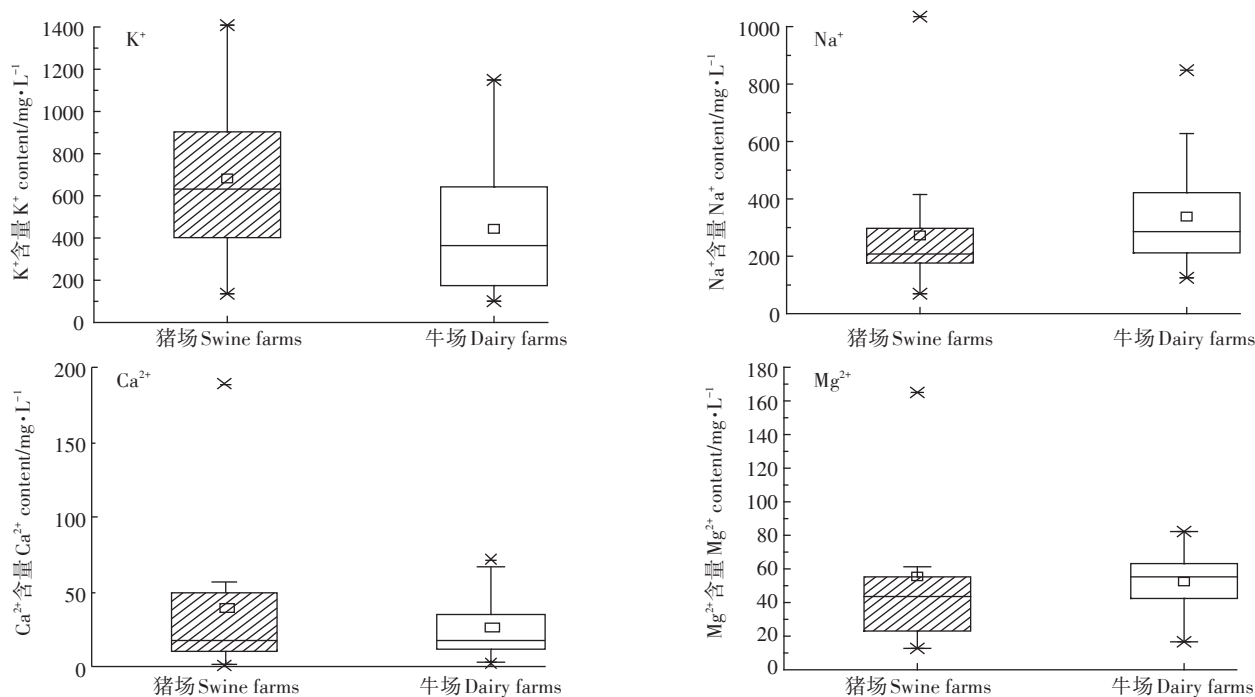


图3 养殖场肥水中阳离子含量

Figure 3 Cation contents in effluents of livestock farms

量平均值分别为682、272、40、49 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 中位数分别为632、208、18、42 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。阳离子含量表现为 $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 。牛场肥水电导率的范围为1.18~4.57 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 平均2.84 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 变异系数为0.37。 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 含量平均值分别为455、327、27、52 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 中位数分别为382、282、17、54 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。阳离子含量 $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ 。通过相关分析与回归分析, 电导率与阳离子 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 呈正相关, 复相关系数为0.4。

2.4 养殖肥水中重金属含量

猪场肥水中, As、Hg、Pb、Cd、Cu、Zn、Cr含量的平均值分别是11.68、0.12、47.46、2.39 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和0.46、1.09、0.06 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 重金属的含量表现为 $\text{Hg} < \text{Cd} < \text{As} < \text{Pb} < \text{Cr} < \text{Cu} < \text{Zn}$ 。牛场肥水中, As、Hg、Pb、Cd、Cu、Zn、Cr含量的平均值分别是6.25、0.13、29.48、1.69 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和0.21、0.71、0.01 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 重金属的含量 $\text{Hg} < \text{Cd} < \text{Cr} < \text{As} < \text{Pb} < \text{Cu} < \text{Zn}$ (表2)。除重金属Hg, 猪场肥水中重金属含量均显著高于牛场肥水。

3 讨论

养殖肥水中含有丰富的氮磷养分, 且水、氮磷耦合于一体。肥水中的氮素和磷素可以促进农作物的生长和土壤肥力的提高^[14-17]。靳红梅等^[18]研究认为,

粪污直接厌氧发酵后猪场和牛场肥水中TN平均值分别为650 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和300 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中 NH_4^+-N 占TN含量70%以上; Wu等^[19]研究证实, 猪场肥水中TN的含量是903.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 肥水中 NH_4^+-N 含量占TN的72.2%; 本研究中猪场肥水和牛场肥水TN含量平均值分别为804.6、137.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+-N 含量平均值分别占TN含量平均值的76.1%、60.0%, 氮素主要以 NH_4^+-N 形式存在。吴建敏等^[20]研究证实, 猪场肥水的TN和 NH_4^+-N 含量均高于牛场肥水0.08个百分点; 本研究中, 猪场的TN和 NH_4^+-N 含量显著高于牛场, 与其研究结果一致。本研究中, 18个猪场肥水TN/TP值在12.5~72.2之间, 平均28.5; 23个牛场肥水TN/TP值在0.7~6.1之间, 平均3.6。根据文献[21]中不同作物形成100 kg产量需要吸收氮磷量的推荐值(大田作物需要吸收氮磷的比值介于3~10之间、蔬菜介于2~6之间、果树介于1~6之间、经济作物介于7~11之间), 以及肥水样品中氮磷量, 按照肥水中氮素计, 则猪场肥水农田施用后需要补充部分磷肥来满足作物的需求, 而牛场肥水农田施用后磷素超过作物吸收量, 过量的磷素投入, 会降低作物对磷的利用效率^[22], 磷是富营养化的关键限制因子之一, 又是大多数淡水藻类生长的主要限制因子^[23], 过量磷可导致耕层土壤磷素大量累积^[15], 从而通过径流等途径加速磷向水体迁移的速度^[24], 导致某

表2 养殖场肥水中重金属含量

Table 2 Heavy metal contents in effluents of livestock farms

类型 Types	统计项目 Parameters	As/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Hg/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Pb/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Cd/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Cu/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Zn/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Cr/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
猪场 Swine farms	最大值 Maximum	30.41	0.52	138.14	8.84	0.84	1.88	0.09
	最小值 Minimum	1.40	0.00	10.93	0.00	0.24	0.26	0.01
	平均值 Average	11.68	0.12	47.46	2.39	0.46	1.09	0.06
	中位数 Median	10.78	0.05	27.08	1.22	0.45	1.09	0.07
	变异系数 CV	0.39	0.56	0.32	0.56	0.39	0.47	0.51
牛场 Dairy farms	最大值 Maximum	16.36	0.59	109.31	6.87	0.80	1.11	0.04
	最小值 Minimum	1.56	0	0	0	0	0.33	0
	平均数 Average	6.25	0.13	29.48	1.69	0.21	0.71	0.01
	中位数 Median	6.03	0.08	23.72	0.99	0.18	0.72	0
	变异系数 CV	0.45	0.56	0.53	0.27	0.55	0.30	0.69

些特征性藻类的异常增殖,水体透明度下降,溶解氧降低,水生生物随之大批死亡,水味变得腥臭难闻,引起水体富营养化^[25],增加环境风险。

Kurt等^[26]的研究表明,经厌氧发酵后的肥水中含有 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等植物生长所必需的元素,沈其林等^[27]研究发现肥水中 K^+ 含量较多,为 $350\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量较少,为 4.2 、 $5.7\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。本研究中, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的平均含量分别是 568.5 、 299.5 、 $33.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $50.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,阳离子含量 $\text{K}^+>\text{Na}^+>\text{Mg}^{2+}>\text{Ca}^{2+}$,与沈其林等^[27]的研究结果一致。 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 是盐分的组成部分,李春霖^[28]的研究表明,肥水施用农田后,土壤中可溶性阳离子含量与肥水中阳离子含量呈正相关。Kiziloglu等^[29]的研究表明,肥水灌溉能提高土壤中交换性钾、钠、钙含量,与处理后的肥水相比,用未处理过的肥水进行灌溉土壤中的盐分含量更高。利用含盐量较高的水进行农田灌溉会导致土壤中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的流失,破坏土壤中阳离子的平衡性,影响土壤中阳离子的有效性,不利于作物的正常生长^[30]。

吴建敏等^[20]的研究认为,猪场肥水中重金属含量高于牛场,本研究中,除Hg外,猪场中重金属As、Pb、Cd、Cu、Zn、Cr的含量均高于牛场,与其研究一致。规模化养殖场大多配合饲料喂养,并添加几种重金属元素(如Cu、Zn等)于饲料中,以达到促进畜禽生长、防治疾病的目的^[25]。肥水中重金属元素主要来源于饲料和粪便,其含量分布规律为 $\text{Cd}<\text{Pb}<\text{Cu}<\text{Zn}$,与饲料和粪便中重金属含量分布规律一致^[31]。单英杰等^[32]的研究表明畜禽粪中存在重金属As、Cu、Zn超标的现象,而经过处理后的养殖肥水不存在重金属超标的现

象,并且在采集的猪场肥水样品中有33%未检测出Hg,牛场肥水样品中有26%未检测出Hg,9%的肥水样品中不含有重金属Pb和Cd,15%的肥水样品中不含有重金属Cu,80%的肥水样品中不含有重金属Cr,重金属As、Hg、Pb、Cd、Cu、Zn、Cr含量平均值分别为 8.97 、 0.13 、 38.47 、 $2.04\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.34 、 0.90 、 $0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均符合《GB 5084—2005农田灌溉水质标准》,与郭瑞华等^[33]的研究一致。

养殖肥水还田可以改良土壤,肥水进入土壤后,疏松土壤,改善土壤性状^[34],增加土壤中TN、速效N、速效P含量^[35],促进土壤微生物均衡生长,增强土壤肥效^[36]。养殖肥水中的氮磷养分、微量元素对水稻、小麦、玉米等农作物产量和品质有积极作用,对提高农作物产量具有普遍意义^[37]。但大量施用会对水土环境和农作物带来安全风险,一方面,肥水中含有的或经硝化作用产生的 NO_3^- -N,通过降水或灌溉不断向下淋洗,污染地下水,引起水体富营养化^[25];另一方面,肥水施用后,会增加土壤重金属含量,对土壤和农作物的质量产生影响^[38]。因此,适量的肥水施用对作物安全没有太大影响,但高强度的施灌仍存在一定的风险。

本研究通过测定规模化养殖场粪污固液分离后厌氧发酵产生的肥水的氮磷形态、阳离子含量和重金属含量,为养殖肥水资源化利用提供了科学依据,对养分综合管理具有一定的指导意义。养殖肥水中重金属含量均未超标,适当施用能够改善土壤性状、作物产量和品质,为作物提供丰富的氮磷养分,提高养分利用率。若大量施用,也会对环境产生影响,今后需要特别关注。

4 结论

(1) 养殖肥水中TN和TP含量范围分别为20.9~1610.3 mg·L⁻¹和15.1~97.3 mg·L⁻¹, 平均值分别为147.1、38.6 mg·L⁻¹; 养殖肥水中以速效养分为主, 猪场和牛场的NH₄⁺-N含量平均值占肥水中TN含量平均值的66.0%, DRP含量平均值占TP含量平均值的90.9%。

(2) 肥水中COD含量平均为2514 mg·L⁻¹。不同阳离子含量差异较大, 猪场肥水中阳离子含量表现为K⁺>Na⁺>Ca²⁺>Mg²⁺, 牛场肥水中阳离子的含量表现为K⁺>Na⁺>Mg²⁺>Ca²⁺。肥水中重金属含量均未超过《GB 5084—2005农田灌溉水质标准》的限值。

参考文献:

- [1] 中国畜牧兽医年鉴编辑委员会. 中国畜牧兽医年鉴2017[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
Editorial committee of China animal husbandry and veterinary yearbook. China animal husbandry and veterinary yearbook 2017[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2017.
- [2] 农业部. 全国每年38亿吨畜禽废弃物综合利用率只有6成[J]. 家禽科学, 2018(3):5.
Ministry of Agriculture. Only 60% of the country's 3.8 billion tons of livestock and poultry waste is used annually[J]. *Poultry Science*, 2018(3):5.
- [3] Martinez J, Dabert P, Barrington S, et al. Livestock waste treatment systems for environmental quality, food safety, and sustainability[J]. *Biore-source Technology*, 2009, 100(22):5527-5536.
- [4] Möller K, Müller T. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2012, 12(3):242-257.
- [5] Camarillo M K, Stringfellow W T, Spier C L, et al. Impact of co-digestion on existing salt and nutrient mass balances for a full-scale dairy energy project[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 128:233-242.
- [6] 郑玉, 罗求实, 贺爱兰, 等. 不同规模养猪场沼肥营养成分与安全利用研究[J]. 现代农业科技, 2018(1):182-183.
ZHENG Yu, LUO Qiu-shi, HE Ai-lan, et al. Nutrient composition and safe utilization of biogas fertilizer in pig farms[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018(1):182-183.
- [7] 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 Hua-shan, GUO De-jie, MA Yan, 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.
- [8] 李祎雯, 曲英华, 徐奕琳, 等. 不同发酵原料沼液的养分含量及变化[J]. 中国沼气, 2012, 30(3):17-20, 24.
LI Yi-wen, QU Ying-hua, XU Yi-lin, et al. Change of nutrition contents of biogas slurry with different fermentation raw materials[J]. *China Biogas*, 2012, 30(3):17-20, 24.
- [9] 李裕荣, 刘永霞, 赵泽英, 等. 畜禽粪便厌氧发酵的产气特点及其发酵物养分的变化动态[J]. 西南农业学报, 2012, 25(6):2305-2310.
LI Yu-rong, LIU Yong-xia, ZHAO Ze-ying, et al. Biogas generation from anaerobic fermentation of animal manures and nutrient dynamics in residues[J]. *Journal of Southwest Agriculture*, 2012, 25(6):2305-2310.
- [10] Ye Y, Nora F Y, Wong Y S. Livestock wastewater treatment by a man-grove pot-cultivation system and the effect of salinity on the nutrient removal efficiency[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, 42(6):513-521.
- [11] 黎鑫林, 熊忠华, 刘勇, 等. 鄱阳湖生态经济区沼肥养分及重金属状况研究[J]. 江西农业大学学报, 2014, 36(6):1387-1392, 1408.
LI Xin-lin, XIONG Zhong-hua, LIU Yong, et al. Contents of nutrients and heavy metals in biogas tank slurry and dregs from Poyang Lake eco-economic zone[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2014, 36(6):1387-1392, 1408.
- [12] 盛靖, 孙国峰, 郑建初. 典型粪污处理模式下规模养猪场农牧结合规模配置研究 II. 粪污直接厌氧发酵处理模式[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(7):886-891.
SHENG Jing, SUN Guo-feng, ZHENG Jian-chu. Pig farm-cropland configuration under typical waste treatment mode: A case study of direct anaerobic fermentation of manure[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(7):886-891.
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
The State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis method[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [14] 社会英, 冯洁, 郭海刚, 等. 麦季牛场肥水灌溉对冬小麦-夏玉米轮作土壤氮素平衡的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3):159-165.
DU Hui-ying, FENG Jie, GUO Hai-gang, et al. Effects of dairy effluents irrigation on N balance in soil under winter wheat-summer maize rotation system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(3):159-165.
- [15] 社会英, 冯洁, 郭海刚, 等. 麦季牛场肥水灌溉对冬小麦-夏玉米产量与磷吸收利用及土壤剖面分布的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8):2379-2386.
DU Hui-ying, FENG Jie, GUO Hai-gang, et al. Effects of irrigation using dairy effluent on grain yield, phosphorus utilization and distribution in soil profile in winter wheat-summer maize rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(8):2379-2386.
- [16] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 等. 稻麦轮作体系养殖肥水灌溉对产量、氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤, 2015, 47(3):503-508.
SUN Hai-jun, MIN Ju, SHI Wei-ming, et al. Effect of sewage irrigation on crop yield, ammonia volatilization and nitrous oxide emission in rice-wheat rotation[J]. *Soils*, 2015, 47(3):503-508.
- [17] Saunders O E, Fortuna A M, Harrison J H, et al. Comparison of raw dairy manure slurry and an aerobically digested slurry as N sources for grass forage production[J]. *International Journal of Agronomy*, 2012:1-10.
- [18] 靳红梅, 常志州, 叶小梅, 等. 江苏省大型沼气工程沼液理化特性分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1):291-296.

- JIN Hong-mei, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, et al. Physical and chemical characteristics of anaerobically digested slurry from large-scale biogas project in Jiangsu Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1):291-296.
- [19] Wu J, Yang Q, Yang G, et al. Effects of biogas slurry on yield and quality of oil-seed rape[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2013, 44: 117-121.
- [20] 吴建敏, 徐俊, 翟云忠, 等. 畜禽规模养殖废水污染因子监测评价分析[J]. 家畜生态学报, 2009, 30(4):48-51.
- WU Jian-min, XU Jun, ZHAI Yun-zhong, et al. Monitoring and evaluation of wastewater pollution factors in livestock and poultry scale cultivation[J]. *Acta Ecologica Animalis Domastici*, 2009, 30(4): 48-51.
- [21] 农业部办公厅. 畜禽粪污土地承载力测算技术指南[EB/OL]. (2018-01-22)[2018-06-23]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tfw/201801/t20180122_6135486.htm.
- General Office of the Ministry of Agriculture. Technical guide for estimation of livestock and poultry waste land carrying capacity[EB/OL]. (2018-01-22)[2018-06-23]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tfw/201801/t20180122_6135486.htm.
- [22] Ma W Q, Ma L, Li J H, et al. Phosphorus flows and use efficiencies in production and consumption of wheat, rice, and maize in China[J]. *Chemosphere*, 2011, 84:814-821.
- [23] 李文超, 刘申, 刘宏斌, 等. 国内外磷指数评价指标体系研究进展[J]. 土壤通报, 2016, 47(2):489-498.
- LI Wen-chao, LIU Shen, LIU Hong-bin, et al. Review on phosphorus indices as risk-assessment tools at home and abroad[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(2):489-498.
- [24] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤, 2000(4):188-193.
- SI You-bin, WANG Shen-qiang, CHEN Huai-man. Nitrogen and phosphorus losses and water eutrophication in farmland[J]. *Soil*, 2000(4): 188-193.
- [25] 张乃明, 洪波, 张玉娟. 农田土壤磷素非点源污染研究进展[J]. 云南农业大学学报, 2004(4):453-456.
- ZHANG Nai-ming, HONG Bo, ZHANG Yu-juan. Study progress of phosphorus non-point source pollution in farmland[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2004(4):453-456.
- [26] Kurt M, Torsten M. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review[J]. *Digestate Nutrient Availability*, 2012, 12(3):242-257.
- [27] 沈其林, 单胜道, 周健驹, 等. 猪粪发酵沼液成分测定与分析[J]. 中国沼气, 2014, 32(3):83-86.
- SHEN Qi-lin, SHAN Sheng-dao, ZHOU Jian-ju, et al. Determination and analysis of compositions in biogas slurry produced by swine manure digestion[J]. *China Biogas*, 2014, 32(3):83-86.
- [28] 李春霖. 牛场肥水灌溉对华北冬小麦-夏玉米轮作土壤盐分的影响[D]. 天津: 天津农学院, 2017.
- LI Chun-lin. Effects of dairy slurry application on soil salt under wheat-maize rotation in North China Plain[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2017.
- [29] Kiziloglu F M, Turan M, Sahin U, et al. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica aleracea* L. var. *botrytis*) and red cabbage (*Brassica aleracea* L. var. *rubra*) grown on calcareous soil in Turkey[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95:716-724.
- [30] Alburquerque J A, de la Fuente C, Ferrer Costa A, et al. Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 40:181-189.
- [31] 彭丽, 孙勃岩, 王权, 等. 陕西杨凌规模化养殖场饲料及粪便中养分和重金属含量分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(5):123-129, 138.
- PENG Li, SUN Bo-yan, WANG Quan, et al. Contents of nutrients and heavy metals in feeds and manure at intensive livestock farms in Yangling, Shaanxi[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(5):123-129, 138.
- [32] 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 Ying-jie, ZHANG Ming-kui. Contents of nutrient elements and pollutants in different sources of animal manures[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(1):80-86.
- [33] 郭瑞华, 靳红梅, 吴华山, 等. 规模猪场污水多级处理系统中重金属总量及其形态变化特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6):210-216.
- GUO Rui-hua, JIN Hong-mei, WU Hua-shan, et al. Total content of heavy metals and their chemical form changes in multilevel wastewater treatment system in intensive swine farm[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(6):210-216.
- [34] 吴树彪, 崔畅, 张笑千, 等. 农田施用沼液增产提质效应及水土环境影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8):118-123.
- WU Shu-biao, CUI Chang, ZHANG Xiao-qian, et al. Effect of biogas slurry on yield increase, quality improvement, water and soil environment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8):118-123.
- [35] 曲明山, 郭宁, 陈保华, 等. 沼液与化肥长期配施对蔬菜生产和土壤肥力的影响[J]. 中国沼气, 2013, 31(1):44-47.
- QU Ming-shan, GUO Ning, CHEN Bao-hua, et al. Effect of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on vegetable production and soil fertility[J]. *China Biogas*, 2013, 31(1):44-47.
- [36] 李萍, 蒋涛, 陈云跃, 等. 沼液灌溉对作物生长·土壤质量的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(4):1501-1503.
- LI Ping, JIANG Tao, CHEN Yun-yue, et al. Effect of utilization of biogas slurry on crop growth and soil quality[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(4):1501-1503.
- [37] 王伟, 孙岩斌, 周祺, 等. 国内畜禽厌氧消化沼液还田研究进展[J]. 中国沼气, 2015, 33(2):51-57.
- WANG Wei, SUN Yan-bin, ZHOU Qi, et al. A review on irrigation of biogas slurry from livestock manure anaerobic fermentation in China[J]. *China Biogas*, 2015, 33(2):51-57.
- [38] 段然, 王刚, 杨世琦, 等. 沼肥对农田土壤的潜在污染分析[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(3):310-315.
- DUAN Ran, WANG Gang, YANG Shi-qi, et al. Preliminary research of potential pollution on farmland soil after using biogas[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2008, 30(3):310-315.