

天津规模化奶牛场粪水运移中氮磷含量变化特征

李梦婷¹, 孙迪^{1,4}, 牟美睿², 刘海学², 张克强¹, 杨仁杰³, 赵润^{1*}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 天津农学院农业分析测试中心, 天津 300384; 3. 天津农学院工程技术学院, 天津 300384; 4. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘要: 为揭示粪水运移中氮磷含量的时空变化特征, 探究不同管理方式下粪水氮磷含量的变化规律, 在天津地区 33 家种养结合型规模化奶牛场定位监测, 解析季节、地区、清粪方式、粪水处理工艺和运移环节粪水氮磷含量差异。结果表明: 1) 不同季节粪水总氮 (Total Nitrogen, TN) 和总磷 (Total Phosphorus, TP) 含量差异极显著 ($P<0.0001$); 2) 不同地区粪水 TN 含量差异不显著, TP 含量差异显著 ($P<0.05$); 3) 不同清粪方式和处理工艺下粪水 TN 和 TP 含量差异不显著, 但干清粪+干清粪方式下粪水中 TN 和 TP 含量均略高于其他方式, 厌氧发酵+沼液贮存处理工艺下粪水中 TN 和 TP 含量略高于其他处理工艺; 4) 不同运移环节粪水 TN 和 TP 含量差异极显著 ($P<0.0001$)。该研究为系统摸清奶牛粪水中氮磷养分变化规律提供支撑, 为粪水管控实用技术研发和路径选择提供依据。

关键词: 粪; 氮; 磷; 变化特征; 规律; 规模化奶牛场; 粪水管控

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.20.004

中图分类号: X713

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-20-0027-07

李梦婷, 孙迪, 牟美睿, 等. 天津规模化奶牛场粪水运移中氮磷含量变化特征 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 27-33. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.20.004 http://www.tcsae.org

Li Mengting, Sun Di, Mu Meirui, et al. Variation characteristics and rules of nitrogen and phosphorus contents throughout the slurry movement from scaled dairy farms in Tianjin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(20): 27-33. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.20.004 http://www.tcsae.org

0 引言

伴随奶牛养殖规模化、集约化程度的加速提升, 奶牛场复杂粪水体系的有效管控是奶业绿色、可持续发展的关键控制点之一^[1-3]。奶牛场粪水混有粪尿、污泥、草芥等大量固液混合的有机物质, 富含氮、磷等多种养分, 是理想的农用水肥资源, 对土壤健康和作物生产具有积极作用。然而, 长期以来不同时空粪水运移环节中氮磷含量分布特征不清、变化规律不明^[4-6], 不利于粪水体系的科学管控。为此, 聚焦粪水处理全链条探究养分含量变化特征和规律, 对于指导奶牛场合理使用粪水资源和防控环境污染风险具有重要意义。

奶牛场粪水处理过程中, 受温度、风速、降雨等多种环境因子影响, 粪水组分含量容易发生不同程度的变化; 且由于圈舍结构类型、养殖方式、粪污收运和处理等的差别, 粪水氮磷含量也存在变化^[7-9]。Perazzolo 等^[10]研究表明, 氮素损失主要受季节影响, 夏季厌氧消化后粪水中的氮素损失高达 38%, 其损失量远大于冬季。贾伟等^[11]结合文献调研和案例分析, 分别估算了典型牧场

泌乳牛和青年牛粪污处理环节中的氮磷养分留存率, 结果表明, 粪污处理环节存在养分损失, 泌乳牛粪污经水冲粪-固液筛分-固体堆肥/液体贮存-还田, 青年牛粪便经干清粪-堆肥-还田 2 种工艺路线氮磷养分含量均呈现逐级梯降的趋势。常志州等^[12]核算了干清粪、水冲粪、水泡粪 3 种清粪方式下粪便中氮素的损失率, 发现不同方式下氮损失率不同, 其中干清粪方式可显著降低氮素损失 (39%~58%)。此外, 前期本团队定位监测了固液筛分后牛粪在堆肥系统中的养分变化特征^[13], 本文拟立足于固液筛分前后粪水运移各环节, 揭示季节、奶牛场、管理方式等不同条件下粪水中氮磷含量的变化特征和规律。

以位于中国 3 大奶业主产区之一的天津市为例, 在本课题组前期整体摸清全市 85 家规模化奶牛场概况基础上^[14-15], 以其中 33 家种养结合型奶牛场作为研究对象开展定位监测, 系统阐明氮磷含量变化特征和规律, 为粪水管控实用技术研发和路径选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 典型奶牛场概况

基于粪水还田利用的种养结合型奶牛场的 3 个基本特点: 具备可收集和运输粪水的设施和设备 (清粪方式、地面结构)、配套有消纳粪水的农田面积、农田上种植饲用作物而非裸露闲置土地, 在全市范围内筛选出 33 家奶牛场, 奶牛场数量和存栏规模分别占全市总量的 38.8% 和 57.8%。各奶牛场所在地区、养殖规模、清粪方式及粪

收稿日期: 2020-06-23 修订日期: 2020-09-26

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0800104); 天津市科技计划项目 (19ZXBTSN00190) 联合资助

作者简介: 李梦婷, 博士研究生, 研究方向为农业废弃物资源化利用。

Email: lmt22228888@163.com

*通信作者: 赵润, 博士, 助理研究员, 主要从事规模化奶牛场环境监测等方面研究。Email: 15900389657@163.com

水处理工艺等基础情况信息如表 1 所示, 全面覆盖天津市奶业主产区, 中型、大型和超大型 3 种存栏规模, 6 种清粪方式及 5 种粪水处理工艺, 代表全市奶牛规模养殖整体情况。

表 1 33 家种养结合型奶牛场概况
Table 1 Profile of 33 dairy farms combined with growing and breeding

所在地区 District	奶牛场数量 Farm amount	总存栏规模 Breeding stock/头	清粪方式 Way of manure collection	粪水处理工艺 Technology of slurry treatment
武清区	9	550~2 400	干清粪、干清粪+干清粪、干清粪+水冲粪、干清粪/通铺垫料、干清粪+水冲粪/通铺垫料	沼液贮存、氧化塘、沼液贮存+氧化塘、厌氧发酵+沼液贮存+氧化塘
滨海新区	9	450~5 400	干清粪、干清粪+干清粪、干清粪+水冲粪、水冲粪	厌氧发酵+沼液贮存、沼液贮存+氧化塘、厌氧发酵+沼液贮存+氧化塘
宝坻区	6	440~5 040	干清粪、干清粪+水冲粪	沼液贮存、沼液贮存+氧化塘、厌氧发酵+沼液贮存+氧化塘
宁河区	4	440~2 630	干清粪、干清粪+水冲粪、干清粪+水冲粪/通铺垫料	沼液贮存+氧化塘、厌氧发酵+沼液贮存+氧化塘
静海区	3	960~2 850	干清粪、干清粪/通铺垫料	沼液贮存+氧化塘、厌氧发酵+沼液贮存+氧化塘
北辰区	2	400~3 200	干清粪、干清粪+水冲粪	沼液贮存、厌氧发酵+沼液贮存

注: 清粪方式和粪水处理工艺中的名词均引自《土地承载力测算技术指南》。其中, “干清粪+干清粪” 第二个 “干清粪” 是指用刮粪板来收运集粪沟中粪污的方式; “水冲粪” 是指用固液筛分后的液态粪水或末端设施中的上清液回冲集粪沟中粪污的方式; “通铺垫料” 是指在奶牛舍区 “大通铺” 区域通过垫料收储粪污的方式; 以上清粪方式中的第一个 “干清粪” 是指用刮粪板或铲车收运奶牛舍区站槽上的粪污。

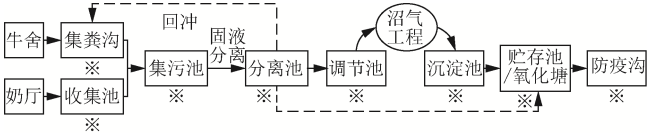
Note: Glossaries of the way of manure collection and technology of slurry treatment were quoted from Technical guide for calculation of land carrying capacity. Therein 2nd dry clean means the way of manure collection and transport in the gutter via the scraper. Slurry flush means the way of manure flushing by the liquid segment after the separation or the supernatant from the final facility. Deep litter means the way of manure collection and storage via the bedding materials in the shared house. As above 1st dry clean during the ways of manure collection means the manure collection and transport via the scraper or forklift in the alleys of barns.

1.2 样品采集与检测

1.2.1 样品采集

分别于冬季 (2018 年 12 月)、春季 (2019 年 3 月)、夏季 (2019 年 6 月) 和秋季 (2019 年 9 月) 在 33 家奶牛场采集粪水样品。粪水流经的每一个环节 (设施) 均为采样位点, 分别从牛舍内粪水和奶厅废水的第一级收储设施 (混合原点) 开始, 到粪水还田前的末级贮存设施 (混合终点) 为止, 遍及集粪沟、集污池、贮存池和氧化塘等。典型奶牛场工艺流程见图 1, 其中, 收集池为奶厅废水收储设施, 集粪沟为牛舍粪水汇集点, 集污池为奶牛场所有粪污的交汇点, 分离池为固液筛分后的粪水暂存设施, 调节池为进入沼气工程前匀浆调质的设施, 沉淀池为厌氧发酵后分离沼液和沼渣的设施, 贮存池、氧化塘和防疫沟为粪水还田前的贮存设施, 各设施 (池体、塘体) 间通常是采用地下暗管或暗沟相互串接。33 家奶牛场位置和采样数量分布如图 2 所示, 每天采集 3~7 家奶牛场, 每家奶牛场采集 2~10 个样品, 每天共采集 13~31 个样品。

参照《GB/T 27522—2011 畜禽养殖污水采样技术规范》^[16], 用自制 3 L 的不锈钢提桶、1.3 L 粪水采集器和 1 L 水舀等工具在各位点垂直液面下 20 cm 处随机采集 3 个水样, 在 19 L 的混样桶中用水舀充分搅匀, 取 400 mL 样品置于 500 mL 集水瓶中, 统一置于 52 L 的样品保温箱中, 送回实验室上机检测。



注: ※为采样位点。
Note: ※ are sampling sites.

图 1 奶牛场粪水运移路线及采样位点
Fig.1 Slurry movement route with sampling sites in dairy farms

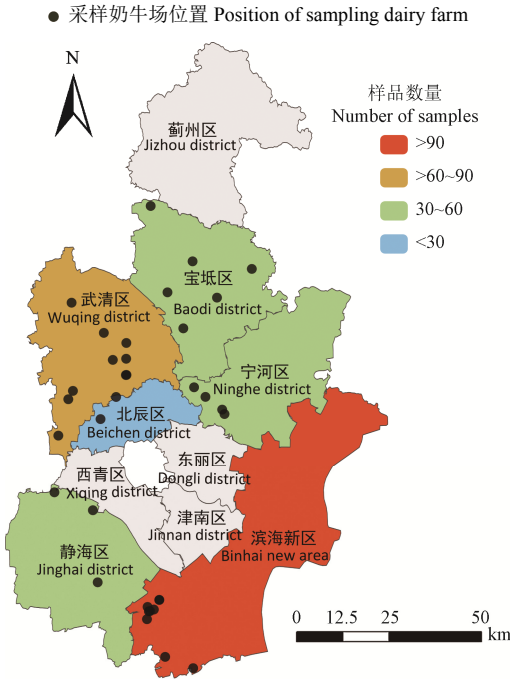


图 2 监测奶牛场和采样数量分布
Fig.2 Distribution of monitoring dairy farms with sampling amounts

1.2.2 样品测定

分别采用全自动凯氏定氮仪 (Foss kjeltec 8400 型, 丹麦) 和可见光分光光度计 (722E 型, 中国) 测定总氮 (Total Nitrogen, TN) 和总磷 (Total Phosphorus, TP), 试验用试剂硫酸、氢氧化钠为优级纯, 硼酸、甲基红、溴甲酚绿、过硫酸钾、抗坏血酸、钼酸铵、酒石酸锑钾、磷酸二氢钾为化学纯; TN 含量参照国标《GB/T 11891—1989 水质 凯氏氮的测定》方法^[17]测定, TP 含量参照国标《GB/T 11893—1989 水质 总磷的测定》方法^[18]测定, 试验重复 3 次取平均值。

1.3 数据处理

运用线性混合效应模型 (Linear Mixed-effect Model, LME-model) 方法处理数据, 结合 Origin Pro 2018 制图分析。本研究利用软件包 lme4^[19]在 R^[20]平台上建立的 LME-model 来分析 TN 和 TP 含量在 4 个采样季节, 表 1

中的 5 个地区、5 种典型清粪方式、5 种粪水处理工艺和图 1 中的粪水运移环节（集粪沟、集污池、氧化塘等）5 类情境条件下的变化特征和规律。为满足正态分布要求，在建立 LME-model 前对 TN 和 TP 做对数变换。

2 结果与分析

2.1 粪水运移中氮磷含量分布特征

33 家定位监测奶牛场粪水氮磷含量分布如图 3 所示。TN、TP 数据呈正偏态（右偏）分布，偏度分别为 0.99 和 0.46。其中，TN 含量范围 100.4~6 207.4 mg/L，平均值加减标准偏差为（1 691.5±1 279.1）mg/L，变异系数 0.76，数据整体变异性相对较大。TN 含量出现在 750 mg/L 左右的概率最高，<2 000 mg/L 的样本数量较多，>2 000 mg/L 的样本数量较少。TP 含量范围为 2.0~184.0 mg/L，平均值加减标准偏差为（69.0±44.2）mg/L，变异系数为 0.64，数据整体变异性相比 TN 要小，说明粪水中 TP 含量变化相对于 TN 稳定。TP 含量出现在 20~40 mg/L 区间的概率最高，<80 mg/L 的样本较多，>80 mg/L 的样本较少。上述结果表明，粪水运移过程中氮磷含量呈现出不同程度的变化特征。

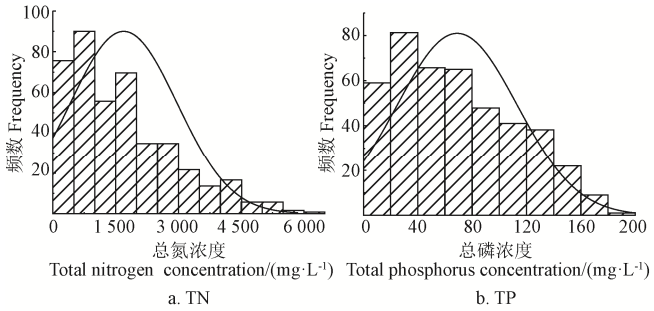


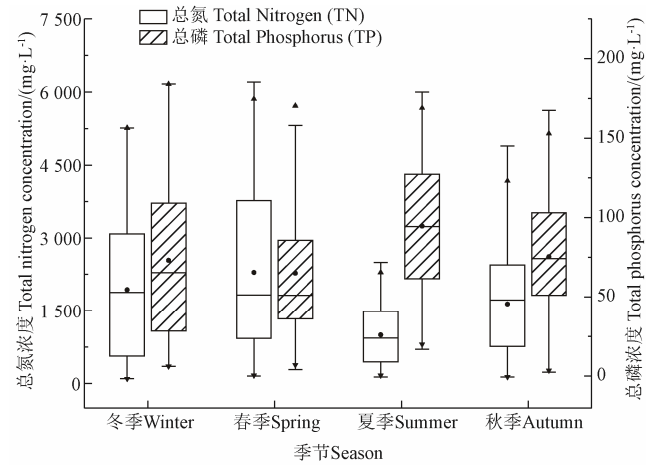
图 3 粪水氮磷含量整体分布
Fig.3 Overall distribution of Total Nitrogen (TN) and Total Phosphorus (TP) content in the slurry

2.2 氮磷含量变化特征及规律解析

2.2.1 不同季节粪水氮磷含量变化特征

不同季节粪水中 TN 和 TP 含量变化特征如图 4 所示。从样本量上看，冬季样本量明显少于其他季节，源于天津冬季较冷，部分粪水流经节点结冰，无法采样。同时，受牧场主观因素限制，不同季节获得的样本量略有差异。对于 TN 含量，冬季和春季的变异系数分别为 0.73 和 0.70，变异性较大，数据较为离散；而夏季和秋季的数据相对集中，尤其是夏季 TN 含量的平均值和中位值几乎重叠，同时也明显低于其他三季，在 1 000 mg/L 左右；冬季和秋季 TN 含量的平均值和中位值也将近重叠，分别在 1 940 和 1 640 mg/L 左右；春季 TN 含量的平均值最高，约为 2 290 mg/L。夏季 TN 含量低的原因可能是：夏季环境温度高，清粪频次增加，以氨挥发为主的氮素损失也随之升高，从而导致夏季总氮含量明显降低。对于 TP 含量，冬季和春季的变异系数均为 0.66，数据较为离散；夏季含量平均值明显高于其他 3 个季节，约为 100 mg/L，推测可能是由于夏季粪污产生量增大，TP 含量也随之增加，且磷素多沉积于设施底部的固态粪渣和淤泥中，相

比 TN 含量的变化小。冬季和秋季 TP 含量平均值相差不大，均在 75 mg/L 左右；春季略低，在 65 mg/L 左右；夏季和秋季 TP 含量的平均值和中位值重叠，数据分布均匀。TN 和 TP 含量在不同季节变化趋势并不一致，夏季的 TN 含量低且分布集中。



注：冬季样品数为 82，春季样品数为 111，夏季样品数为 114，秋季样品数为 121。箱线图箱体中的横线表示中位值，实心圆表示均值，箱体外存在异常值（▲），下同。
Note: 82 winter samples, 111 spring samples, 114 summer samples, 121 autumn samples. Line in the box plot means the median, while solid circle shows the mean value. Abnormal values (▲) are in the external, Hereinafter inclusive.

图 4 不同季节总氮和总磷含量变化特征
Fig.4 Variation characteristics of TN and TP contents under different seasons

由表 2 得出，不同季节粪水中的氮磷含量差异极显著（ $P<0.0001$ ）。夏季 TN 含量最低，春季最高；夏季与其他季节间的差异均显著；秋季和冬季差异不显著，但与春季和夏季存在差异。夏季 TP 含量最高，秋季、冬季依次递减，春季 TP 含量最低。张帅等^[21-22]研究结果与本文结果相一致。现实情况下，不同气候、温湿度、水分等环境条件复杂多变，尤其在雨季、冰冻等极端天气，奶牛场为确保正常生产，需要即时调整应对措施，如饲料成分改变、牛群转舍等，都易造成不同季节粪水中 TN 和 TP 含量的差异。

表 2 线性混合效应模型中固定效应的似然比检验

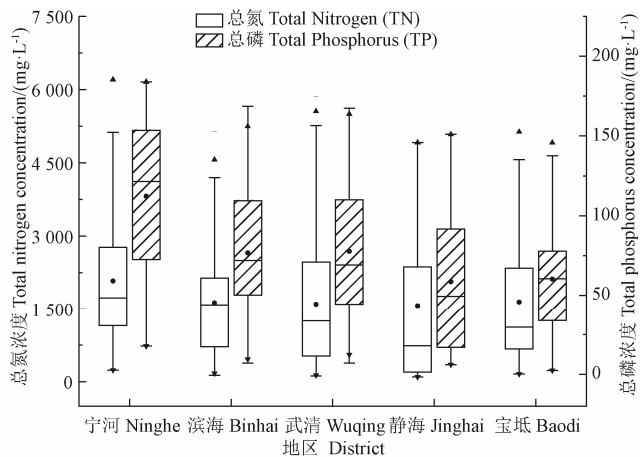
Table 2 Likelihood ratio test for the fixed effects in the LME-model

指标 Indicator	固定效应 Fixed effect	卡方检验 Chi square test	自由度 df	P 值 P value
TN	季节	85.00	3	<0.000 1
	地区	10.59	5	0.060 2
	清粪方式	6.13	5	0.293 5
	粪水处理工艺	8.33	4	0.080 3
	粪水运移环节	119.96	18	<0.000 1
TP	季节	235.06	3	<0.000 1
	地区	11.74	5	0.038 6
	清粪方式	2.38	5	0.794 2
	粪水处理工艺	6.41	4	0.170 3
	粪水运移环节	72.94	18	<0.000 1

2.2.2 不同养殖地区粪水氮磷含量变化特征

图 5 显示了天津市不同养殖地区奶牛场粪水中 TN 和

TP 含量的特征分布, 不同地区由于奶牛场数量不同和现实情况差异, 样本量各不相同, 由于北辰区样本量仅为 7 个, 不具代表性, 故未在图 5 中显示。对于 TN 含量, 宁河区平均值较其他地区高, 为 2 081.7 mg/L, 其他 4 个地区均在 1 600 mg/L 左右; 滨海新区 TN 含量的数据分布较为集中, 其平均值和中位值重叠, 这与该地区 9 家监测奶牛场粪水管理做法相近的现实情况吻合; 而静海区 TN 含量数据的分布较为离散, 符合该地区 3 家监测奶牛场粪水管理做法差异较大的现实情况。对于 TP 含量, 地区间的差异较大, 宁河区的 TP 含量平均值为 112.3 mg/L, 明显高于其他地区, 滨海新区和武清区的 TP 含量略低, 约为 75 mg/L, 静海区和宝坻区的 TP 含量平均值最低, 约为 60 mg/L。宝坻区的 TP 数据相对集中, 变异系数为 0.58, 而静海区的数据相对离散, 变异系数为 0.73, 其变异性更大。对比 TN 和 TP 含量的变化趋势可以发现, TN 和 TP 含量平均值的最大值均在宁河区出现, 最低值则出现在静海区和宝坻区。结果表明, 不同地区间粪水氮磷含量存在差异。



注: 宁河区样品数为 72, 滨海新区样品数为 118, 武清区样品数为 101, 静海区样品数为 41, 宝坻区样品数为 89。
Note: 72 Ninghe samples, 118 Binhai samples, 101 Wuqing samples, 41 Jinghai samples, 89 Baodi samples.

图 5 不同养殖地区总氮和总磷含量变化特征

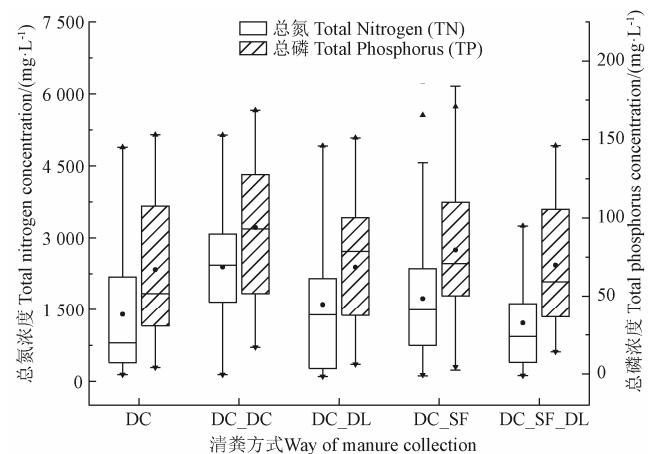
Fig.5 Variation characteristics of TN and TP contents under different districts

由表 2 得出, 虽然地区间粪水氮磷含量存在差异, 但是不同地区粪水中 TN 含量无显著性差异 ($P>0.05$)。宝坻、滨海和静海 3 个地区粪水 TN 含量的平均值相差无几, 且宝坻和滨海的置信区间相似; 北辰区粪水 TN 含量的平均值最低, 宁河区最高且置信区间也最宽, 武清区粪水 TN 含量的置信区间上限与静海区相似, 但下限和平均值较高。相比 TN, 不同地区粪水中的 TP 含量存在显著性差异 ($P<0.05$)。北辰区和宝坻区粪水 TP 含量的平均值相似, 静海区和武清区粪水 TP 含量的平均值相似, 略高于北辰区和宝坻区, 宁河区 TP 含量平均值最高, 置信区间最宽。研究结果表明地区之间的粪水管理水平存在不同程度的差异, 这与本课题组实地调研结果相吻合。

2.2.3 不同清粪方式下粪水氮磷含量变化特征

清粪方式对应奶牛场粪水源头收运环节, 是重要的管

理因素之一。将 5 种主要清粪方式下粪水氮磷含量变化特征作于图 6。干清粪+水冲粪方式下的样本量最多, 其次是干清粪, 由于 SF (水冲粪方式) 全市只有滨海新区 1 家奶牛场使用, 且只在冬季取到该场 3 个有效样本, 数据不具有代表性, 故未纳入图中, 其他 3 种方式的样本量相似。由图可见, DC_SF (干清粪+水冲粪) 粪水收集方式下 TN 含量与 DC (干清粪) 和 DC_DL (干清粪/通铺垫料) 方式下的 TN 含量大致相同, 约为 1 500 mg/L; DC_SF 收集方式下的 TP 含量介于最大值与最小值之间; DC_DC (干清粪+干清粪) 方式下收集的 TN 和 TP 的变异系数最小, 分别为 0.49 和 0.43, 其含量相对较高, 分别为 2 394.0 和 93.9 mg/L, 该方式能最大化地确保养分留存并进入后续环节; DC_SF_DL (干清粪+水冲粪/通铺垫料) 方式下产生的 TN 和 TP 含量相对较低, 这与通铺垫料上收集的粪尿不进入后续粪水处理-还田系统的现实情况相符。



注: DC 代表干清粪, DL 代表通铺垫料, SF 代表水冲粪。干清粪样本数为 68, 干清粪+干清粪样本数为 36, 干清粪/通铺垫料样本数为 25, 干清粪+水冲粪样本数为 269, 干清粪+水冲粪/通铺垫料样本数为 30。
Note: DC stands for dry clean, DL represents deep litter, SF means slurry flush. 68 DC samples, 36 DC_DC samples, 25 DC_DL samples, 269 DC_SF samples, 30 DC_SF_DL samples.

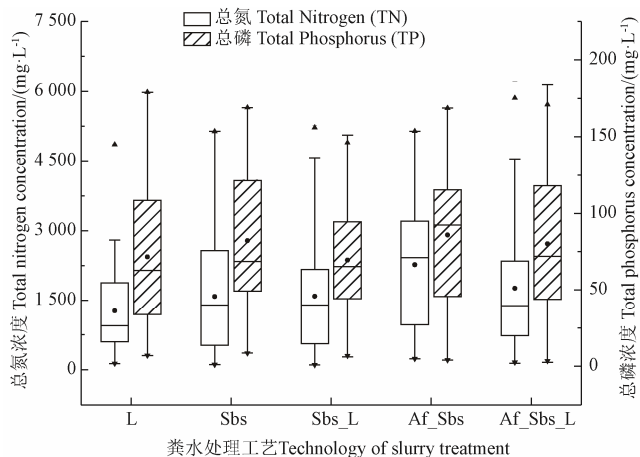
图 6 不同清粪方式下总氮和总磷含量变化特征

Fig.6 Variation characteristics of TN and TP contents under different ways of manure collection

由表 2 得出, 不同清粪方式下 TN ($P>0.05$) 和 TP ($P>0.79$) 含量差异不显著。对于 TN 含量, 干清粪和干清粪/通铺垫料收集方式下的 TN 含量平均值相似; 干清粪+干清粪和干清粪+水冲粪收集方式下的 TN 含量平均值相似, 但前者的置信区间明显比后者宽。对于 TP 含量, 除干清粪+水冲粪/通铺垫料收集方式下的含量较低外, 其余 4 种方式下的含量相似。干清粪+干清粪方式下的 TN 和 TP 含量均较高, 一方面可以将养分最大化留存入后续环节, 另一方面减少了外源水的进入, 因而该方式下粪水氮磷含量高; 常志州等^[12]发现干清粪可显著降低氮素损失 (39%~58%), 同时显著降低 NH_3 挥发, 将氮素最大化地保留至粪水中, 与本研究结果相符。DC_SF_DL (干清粪+水冲粪/通铺垫料) 方式下产生的 TN 和 TP 含量相对较低, 由于垫料可吸收消纳大量奶牛粪污, 可能是最终进入后续处理-还田系统的氮磷养分含量显著降低的主要原因。综上, 不同清粪方式下粪水中的氮磷含量存在差异, 但并不显著。

2.2.4 不同处理工艺下粪水氮磷含量变化特征

处理工艺是奶牛场粪水另一个重要管理因素。经调研得知, Sbs_L (沼液贮存+氧化塘) 和 Af_Sbs_L (厌氧发酵+沼液贮存+氧化塘) 是天津市奶牛场采用的主流处理工艺。由图 7 所示, 这 2 种处理工艺 TN、TP 含量各自的平均值差异不大, TN 含量平均值分别为 1 588.4 和 1 758.6 mg/L; TP 含量平均值分别为 69.5 和 80.1 mg/L。在这 5 种粪水处理工艺中, Af_Sbs (厌氧发酵+沼液贮存) 作用下 TN 含量的平均值为 2 402.6 mg/L, 远高于其他 4 种工艺; TP 含量平均值为 90.6 mg/L, 也较其他 4 种工艺要高; 而采用 L (氧化塘) 处理产生的 TN 和 TP 含量相对较低。结果表明, 不同处理工艺下粪水氮磷含量存在差异。



注: Af 代表厌氧发酵, Sbs 代表沼液贮存, L 代表氧化塘。L 样本数为 35, Sbs 样本数为 66, Sbs_L 样本数为 119, Af_Sbs 样本数为 42, Af_Sbs_L 样本数为 166。

Note: Af represents anaerobic fermentation. Sbs stands for storage of biogas slurry. L refers to lagoon. 35 L samples. 66 Sbs samples. 119 Sbs_L samples. 42 Af_Sbs samples. 166 Af_Sbs_L samples.

图 7 不同粪水处理工艺下总氮和总磷含量变化特征

Fig.7 Variation characteristics of TN and TP contents under different technologies of slurry treatment

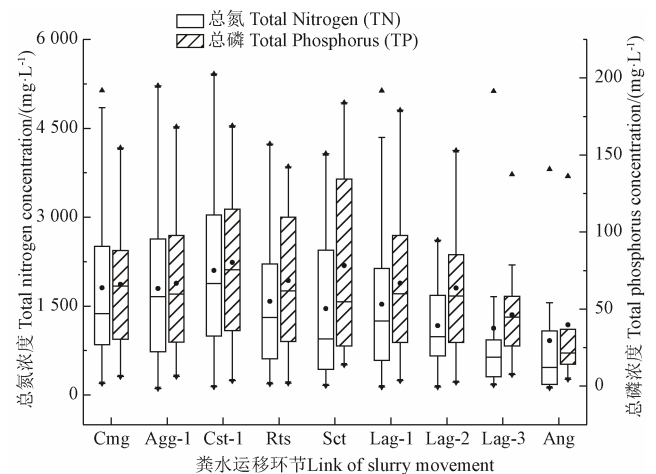
由表 2 得出, 不同处理工艺下, 粪水 TN ($P>0.05$) 和 TP ($P>0.17$) 含量差异均不显著。厌氧发酵+沼液贮存组合工艺作用下的粪水 TN 含量平均值最高, TP 含量平均值也最高, 其置信区间最宽, 可以相对确保养分留存; 厌氧发酵+沼液贮存+氧化塘与沼液贮存工艺作用下的 TN 平均值最低, 氧化塘作用下的 TN 含量略高于前者, 厌氧发酵+氧化塘相比厌氧发酵+沼液贮存工艺作用下的 TN 含量略低。对于粪水 TP 含量, 厌氧发酵+沼液贮存和沼液贮存+氧化塘工艺作用下的 TP 含量相似, 厌氧发酵+沼液贮存+氧化塘与氧化塘工艺作用下的 TP 含量相似, 沼液贮存工艺作用下的 TP 含量略高于氧化塘, 但低于沼液贮存+氧化塘。现阶段粪水贮存处理设施大多为露天型, 环节 (设施) 越多则氮素损失量越高; 同时, 厌氧发酵工艺下的 TN 含量均比其他工艺高, 前人研究中厌氧发酵工艺可降低氮素损失的结论与本文结论相一致^[23-24]。结果表明, 虽然厌氧发酵+沼液贮存组合工艺下的氮磷含量略高于其他 4 种工艺, 但差异并不显著。

2.2.5 粪水运移环节中氮磷含量变化特征

不同处理工艺下粪水运移各环节间也存在差别。33 家

监测场共有 19 个粪水运移环节, 包括成母集粪沟 (Cmg)、成母集污池-1 (Agg-1)、成母集污池-2 (Agg-2)、成母固液分离池-1 (Cst-1)、成母固液分离池-2 (Cst-2)、育成集粪沟 (Hmg)、育成集污池 (Hct)、育成固液分离池 (Hst)、奶厅收集池-1 (Pct-1)、奶厅收集池-2 (Pct-2)、调节池/沉淀池 (Rts)、二沉池 (Sct)、氧化塘 1-6 (Lag 1-6) 和防疫沟 (Ang)。由于环节众多, 综合考虑天津市奶牛场实际情况和样本量的代表性, 选取样本量 ≥ 10 的环节进行分析。

如图 8 所示, Cmg、Agg-1、Cst-1 和 Lag 1 是样品量比较丰富的环节, 说明天津市奶牛场处理粪水时大多包含这几个环节, 也是粪水处理中相对常规且有效的做法。Lag 1、Lag 2 和 Lag 3 的样品量逐渐减少, 源于氧化塘级数越多成本越高, 因此可综合考虑经济效益和环境效益选择适宜的粪水处理工艺。Cmg、Agg-1、Cst-1 和 Lag 1 的 TN 平均含量分别为 1 809.3、1 798.0、2 102.1 和 1 532.1 mg/L, TN 含量并非完全呈逐级梯降规律, 在 Cst-1 中 TN 含量最高, 推测是经过固液分离后, 粪便中的部分氮素转移到粪水中。从多级氧化塘的 TN 含量来看, Lag 2 和 Lag 3 的 TN 平均含量为 1 171.1 和 1 126.9 mg/L, TN 含量随氧化塘层级递减, 说明粪水流经各环节中发生不同程度的氮素损失。Cmg、Agg-1、Cst-1 和 Lag 1 的 TP 平均含量分别为 66.1、66.7、80.3 和 68.5 mg/L, TP 和 TN 均在 Cst-1 中的含量最高。Lag 2 和 Lag 3 的 TP 平均含量为 63.7 和 46.3 mg/L, TP 含量也随氧化塘层级梯降。研究表明, 粪水运移环节中氮磷含量呈动态变化, 其中在成母固液分离池中最高, 且随氧化塘层级递减。



注: Cmg 代表集粪沟, Agg-1 代表成母集污池-1, Cst-1 代表成母固液分离池-1, Rts 代表调节池/沉淀池, Sct 代表二沉池, Lag-1 代表氧化塘-1, Lag-2 代表氧化塘-2, Lag-3 代表氧化塘-3, Ang 代表防疫沟。Cmg 样本数为 44, Agg-1 样本数为 93, Cst-1 样本数为 64, Rts 样本数为 30, Sct 样本数为 11, Lag-1 样本数为 87, Lag-2 样本数为 26, Lag-3 样本数为 14, Ang 样本数为 10。

Note: Cmg represents manure collecting gutter. Agg-1 samples represents slurry tank for adult cow. Cst-1 represents separation tank-1 for adult cow. Rts stands for regulating tank/sedimentation basin. Sct stands for 2nd sedimentation tank. Lag-1 stands for lagoon-1. Lag-2 refers to lagoon-2. Lag-3 refers to lagoon-3. Ang refers to anti-epidemic ditch. 44 Cmg samples. 93 Agg-1 samples. 64 Cst-1 samples. 30 Rts samples. 11 Sct samples. 87 Lag-1 samples. 26 Lag-2 samples. 14 Lag-3 samples. 10 Ang samples.

图 8 不同粪水运移环节下的总氮和总磷含量特征

Fig.8 Variation characteristics of TN and TP contents under different links of slurry movement

由表 2 得出,不同运移环节粪水中氮磷含量差异极显著 ($P<0.0001$)。Pct-1 和 Pct-2 的 TN 和 TP 含量为所有环节中最低值,可能是由于奶厅收集池的存水中大多由地面和挤奶设备冲洗水、牛奶残液、酸碱消毒液等组成,粪水含量相对较低。Cst-2 和 Hct 的 TN 含量平均值为最高, Lag-1 和 Lag-2 的 TN 和 TP 含量平均值相似, Lag-3 至 Lag-6 的 TN 和 TP 含量平均值相差不大,且均低于 Lag-1 和 Lag-2。其他诸如 Hmg、Agg-1 等的 TN 含量介于最大值与最小值之间,分布随机,无明显的变化趋势。

3 结 论

通过定位监测天津市 33 家种养结合型规模化奶牛场复杂粪水体系,揭示了粪水运移全链条氮磷含量时空变化特征,阐明了不同奶牛场在不同管理方式下粪水氮磷含量的变化规律,得出以下研究结论:

1) 粪水氮磷含量分布的变异性较大,氮磷含量数据总体均呈正偏态(右偏)分布。总氮 TN 含量范围为 100.4~6 207.4 mg/L,变异系数为 0.76;总磷 TP 含量范围为 2.0~184.0 mg/L,变异系数为 0.64。

2) 不同季节粪水 TN 和 TP 含量差异极显著 ($P<0.0001$);不同地区 TN 含量差异不显著,TP 含量差异显著 ($P<0.05$)。

3) 不同粪水管理方式下氮磷含量存在差异。不同清粪方式下粪水 TN ($P>0.05$) 和 TP ($P>0.79$) 含量差异不显著,但干清粪+干清粪方式下,粪水中 TN 和 TP 含量均略高于其他 4 种方式;不同处理工艺下粪水 TN ($P>0.05$) 和 TP ($P>0.17$) 含量差异不显著,但经厌氧发酵+沼液贮存处理后的 TN 和 TP 含量平均值均略高于其他 4 种工艺;不同处理环节中粪水 TN 和 TP 含量差异极显著 ($P<0.0001$)。干清粪+干清粪和厌氧发酵+沼液贮存组合工艺下 TN 和 TP 含量最高,而干清粪+水冲粪/通铺垫料和氧化塘组合工艺下 TN 和 TP 含量最低,为奶牛场粪水处理路径选择提供参考。

致谢:衷心感谢中国农业大学工学院杨增玲教授和澳大利亚 Arthur Rylah Institute for Environmental Research 刘灿然高级研究员对本文的悉心指导。

[参 考 文 献]

- [1] 廖新伟. 欧美养殖废弃物管理对策比较及对我国养殖废弃物治理的启示[J]. 中国家禽, 2017, 39(4): 1-3.
Liao Xindi. Comparison of management countermeasures on animal wastes between Europe and US and enlightenment to Chinese animal wastes management[J]. China Poultry, 2017, 39(4): 1-3. (in Chinese with English abstract)
- [2] Ma L, Zhang W F, Ma W Q, et al. An analysis of developments and challenges in nutrient management in China[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(4): 951-961.
- [3] 刘玉满. 中国奶牛养殖业成长的烦恼: 成也土地, 败也土地[J]. 中国乳业, 2018, 203(11): 2-7.
Liu Yuman. Growing trouble of dairy farming industry in China: Land for success and land for failure[J]. China Dairy Industry, 2018, 203(11): 2-7. (in Chinese with English abstract)
- [4] 盛婧, 周炜, 王子臣, 等. 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 Jing, Zhou Wei, Wang Zichen, et al. Effect of

- engineering treatment on the physical and chemical properties of livestock slurry[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(6): 877-883. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张丽萍, 刘红江, 盛婧, 等. 发酵周期、贮存时间和过滤对沼液养分和理化性状变化的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(1): 32-39.
Zhang Liping, Liu Hongjiang, Sheng Jing, et al. Influence of anaerobic fermentation periods, storage time and filtration on the changes of nutrients and physical and chemical properties of biogas slurry[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(1): 32-39. (in Chinese with English abstract)
- [6] Chadwick D, Jia W, Tong Y A, et al. Improving manure nutrient management towards sustainable agricultural intensification in China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 209(1): 34-46.
- [7] Tariq M Khalil, Claudio O Stöckle, Bryan R Carlson, et al. Dairy-CropSyst: Gaseous emissions and nutrient fate modeling tool[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 962-978.
- [8] Bai Z H, Ma L, Jin S Q, et al. Nitrogen, phosphorus, and potassium flows through the manure management chain in China[J]. Environmental Science Technology, 2016, 50(24): 13409-13418.
- [9] Perazzolo F, Mattachini G, Tambone F, et al. Effect of mechanical separation on emission during storage of two anaerobically codigested animal slurries[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 207: 1-9.
- [10] Perazzolo F, Mattachini G, Riva E, et al. Nutrient losses during winter and summer storage of separated and unseparated digested cattle slurry[J]. Journal of Environmental Quality, 2017, 46(4): 879-888.
- [11] 贾伟, 朱志平, 陈永杏, 等. 典型种养结合奶牛场粪便养分管理模式[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 209-217.
Jia Wei, Zhu Zhiping, Chen Yongxing, et al. Manure nutrient management mode in typical mixed crop-dairy farm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(12): 209-217. (in Chinese with English abstract)
- [12] 常志州, 靳红梅, 黄红英, 等. 畜禽养殖场粪便清扫、堆积及处理单元氮损失率研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 1068-1077.
Chang Zhizhou, Jin Hongmei, Huang Hongying, et al. Nitrogen loss during cleaning, storage, compost and anaerobic digestion of animal manures in individual treatment unit[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(5): 1068-1077. (in Chinese with English abstract)
- [13] Shidi Ba, Qingbo Qu, Keqiang Zhang, et al. Meta-analysis of greenhouse gas and ammonia emissions from dairy manure composting[J]. Biosystems Engineering, 2020, 193: 126-137.
- [14] 赵润, 杨仁杰, 牟美睿, 等. 基于中红外光谱的规模化奶牛场粪水总氮快速预测方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 217-224.
Zhao Run, Yang Renjie, Mou Meirui, et al. Rapid prediction method of total nitrogen in slurry of large-scale dairy farm by mid-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(15): 217-224. (in Chinese with English abstract)
- [15] 赵润, 牟美睿, 王鹏, 等. 基于近红外漫反射光谱的规模化奶牛场粪水氮磷定量分析及模型构建[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1768-1776.
Zhao Run, Mu Meirui, Wang Peng, et al. Quantified analysis and model structure of nitrogen and phosphorus in the slurry of large-scale dairy farms based on near-infrared transmission-diffuse reflectance spectroscopy[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(8): 1768-1776. (in Chinese with English abstract)

- [16] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 畜禽养殖污水采样技术规范: GB/T 27522—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [17] 国家环境保护局标准处. 水质凯氏氮的测定: GB/T 11891—1989[S]. 北京: 中国质检出版社, 1989.
- [18] 国家环境保护局标准处. 水质总磷的测定 钼酸铵分光光度法: GB/T 11893—1989[S]. 北京: 中国环境出版有限责任公司, 1989.
- [19] Bates D, Maechler M, Bolker B, et al. Linear mixed-effects models using 'Eigen' and S4[J]. *Journal of Statistical Software*, 2015, 67(1): 1-48.
- [20] R. C Team, R Team. A language and environment for statistical computing, R foundation for statistical computing[J]. Vienna, Austria, 2005.
- [21] 张帅, 陆鹏, 陈硕, 等. 京郊畜禽粪污氮磷含量特征及影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(8): 244-251.
- Zhang Shuai, Lu Peng, Chen Shuo, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus content and analysis of its influencing factors in feces and wastewater of livestock farms in Beijing suburb[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(8): 244-251. (in Chinese with English abstract)
- [22] Ashekuzzaman S M, Forrestal Patrick, Richards Karl, et al. Dairy industry derived wastewater treatment sludge: Generation, type and characterization of nutrients and metals for agricultural reuse[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 230: 1266-1275.
- [23] 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 Hongmei, Fu Guangqing, Chang Zhizhou, et al. Distribution of nitrogen in liquid and solid fraction of pig and dairy manure in anaerobic digestion reactor[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(21): 208-214. (in Chinese with English abstract)
- [24] 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 Guangqing, Ye Xiaomei, Jin Hongmei, 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. (in Chinese with English abstract)

Variation characteristics and rules of nitrogen and phosphorus contents throughout the slurry movement from scaled dairy farms in Tianjin

Li Mengting¹, Sun Di^{1,4}, Mu Meirui², Liu Haixue², Zhang Keqiang¹, Yang Renjie³, Zhao Run^{1※}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Laboratory of Agricultural Analysis, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 3. College of Engineering and Technology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 4. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: Both nitrogen and phosphorus were abundant in the dairy manure, which were ideal water and fertilizer resources in agriculture. However, influenced by the change of environmental conditions, there were great differences in manure collection and transportation methods and treatment processes in different dairy farms, resulting in unclear characteristics and varying rules of nitrogen and phosphorus components and contents in numerous links of slurry movement, which was harmful to the sustainable management on the manure. Based on the long-term monitoring on the complex manure rotation system of 33 large-scale dairy farms in Tianjin, the variation characteristics of nitrogen and phosphorus contents were uncovered in the whole chain of slurry movement along with the time and space, and the variation rules of nitrogen and phosphorus contents were explored under different management modes in different dairy farms. The results showed that there were 6 single or combined manure cleaning ways and 5 slurry treatment technologies in 33 dairy farms distributed in 6 main dairy industry districts. Therein dry clean plus slurry flush and dry clean were the main cleaning ways of manure in Tianjin. Sbs_L (storage of biogas slurry plus lagoon) and Af_Sbs_L (anaerobic fermentation plus storage of biogas slurry plus lagoon) were the main combined treatment processes adopted by the dairy farms. Great variability was appeared to the overall distribution of nitrogen and phosphorus in the slurry movement, and positive skewed distribution was showed on the data of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP). The range of TN content was 100.4-6 207.4 mg/L, the average value plus minus standard deviation was $1\ 691.5 \pm 1\ 279.1$ mg/L, and the coefficient of variation was 0.76, and great variability was showed on the data. The highest probability of TN content was around 750 mg/L. The range of TP content was 2.0-184.0 mg/L, the average value plus minus standard deviation was 69.0 ± 44.2 mg/L, and the coefficient of variation was 0.64. The highest probability of TP content was in the range of 20-40 mg/L, while the degree of variation of TN was greater than that of TP. The characteristics and rules of nitrogen and phosphorus content were focused on slurry movement under different space-time conditions and management conditions in this study. The analysis of linear mixed effect model showed that, 1) the contents of TN and TP in the slurry were significantly different in 4 seasons ($P < 0.001$); 2) the contents of TN in the slurry was no significantly different in 6 districts ($P > 0.05$), but the contents of TP in the slurry was significantly different in 6 districts ($P < 0.05$); 3) the contents of TN ($P > 0.05$) and TP ($P > 0.79$) in the slurry were no significantly different under 6 cleaning ways of manure, but the contents of TN and TP in slurry under DC_DC (dry clean + dry clean) were slightly higher than those in other approaches; 4) the contents of TN ($P > 0.05$) and TP ($P > 0.17$) in the slurry were no significantly different under 5 slurry treatment technologies, but the contents of TN and TP after Af_Sbs (anaerobic fermentation plus slurry storage) treatment were slightly higher than those of the other 4 technologies; 5) the contents of TN and TP in the slurry were significantly different in 19 migration processes ($P < 0.000\ 1$). In the combined processes of dry clean plus dry clean and anaerobic fermentation plus storage of biogas slurry, the highest content of TN and TP was yielded, while during the dry clean plus slurry flush /deep litter and lagoon, the lowest content of TN and TP was yielded. In conclusion, this study systematically illuminated the variation characteristics and rules of nitrogen and phosphorus contents in the whole chain of slurry movement under complicated environmental and management conditions, which provided a theoretical basis for the research and development of practical technologies and pathways selection of manure management.

Keywords: manures; nitrogen; phosphorus; variation characteristics; rule; large-scale dairy farm; slurry management