

典型种养结合奶牛场粪便养分管理模式

贾伟, 朱志平, 陈永杏, 董红敏*, 陶秀萍

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部畜牧环境设施设备质量监督检验测试中心(北京),
农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100081)

摘要: 规模化奶牛场粪便养分产生量大, 因种养分离引发严重环境污染, 亟需建立粪便综合养分管理模式, 以实现奶牛粪便养分的合理施用。该文以典型种养结合模式“固液分离—堆肥+氧化塘—农田利用”的奶牛养殖场为案例, 通过实地调研、粪便及土壤样品采样测定、以及文献参数收集等研究方法, 制定了奶牛场粪便综合养分管理模式。主要结果为该存栏量 2 978 头的奶牛场粪便氮、磷年产生量为 204 和 33 t/a, 粪便经过收集和处理后, 可供农田利用的氮磷养分分别为 126 和 27 t/a。基于作物养分需求量和土壤供肥量, 以及粪肥投入占总养分的比例为 50%和粪肥养分的当季利用率为 30%, 据估算, 1 473 hm² 奶牛场配套农田可施用的粪肥氮、磷养分总量分别为 727.6 和 131.2 t/a。因此, 奶牛场配套农田可有效承载粪肥氮磷养分供给量。实施粪肥综合养分管理模式, 可充分利用粪便养分资源用于作物生长, 减少粪便养分直接排放到环境, 从而确保种养结合模式奶牛场长期可持续生产。

关键词: 粪便; 肥料; 养分; 粪肥养分供应量; 作物养分需求量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.027

中图分类号: S141.3, S823

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-12-0209-09

贾伟, 朱志平, 陈永杏, 董红敏, 陶秀萍. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.027 http://www.tcsae.org

Jia Wei, Zhu Zhiping, Chen Yongxing, Dong Hongmin, Tao Xiuping. 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) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.027 http://www.tcsae.org

0 引言

规模化集中饲养奶牛提高了养殖水平和生产性能, 降低了饲养成本, 增加了经济效益, 但同时也造成粪污集中、冲洗用水量增加、生态环境污染日益严重等问题^[1]。针对畜禽养殖环境问题, 国家相关部门陆续出台了《畜禽规模养殖污染防治条例》、《环境保护法》等相关法律法规。2016 年中央一号文件提出, “加大农业面源污染防治力度, 实施化肥农药零增长行动, 实施种养业废弃物资源化利用。”因此, 奶牛场粪污种养结合资源化利用是研究要点之一。目前, 中国多数规模奶牛场将牛粪直接还田或加工为有机肥; 污水收集则大多置于污水池存放或进行沉淀池处理后排放, 导致大量污水未能回到农田实现循环利用^[2]。在美国、加拿大、法国、荷兰等欧美发达国家, 奶牛养殖普遍采用种养结合模式^[3-4]。奶牛场“固液分离—堆肥+氧化塘—农田利用”粪便处理是一种典型种养结合模式, 即奶牛场对粪便进行固液分离, 固体粪便用于生产有机肥, 液体粪便进行氧化塘处理废水, 再

回到农田循环利用。受运输半径限制, 粪肥主要在养殖场周边农田消纳。由于规模化奶牛场粪污产生量大, 农田过量施用粪肥会导致大量氮流失和磷累积等环境问题。

美国农业部和环保部推行的粪便综合养分管理模式是围绕着养殖场展开, 其核心是解决养殖场粪肥的合理施用^[5]。Karmakar 等^[6]研究发现大部分畜禽粪便养分管理模式主要关注农田粪肥施用过程。加拿大阿尔伯塔省通过粪便养分管理模式来进行粪肥农田合理施用^[7]。英国养殖场粪便管理模式核心是农田合理利用粪便养分^[8]。在制定粪便管理模式时, 需要估算养殖场粪便量和养分量等信息, 按照农艺需要来决定农田施用粪肥量。如果粪肥盈余量大, 则需要寻找额外的土地进行粪肥施用^[8]。荷兰养殖场粪便管理需核算生产、储存和施用过程中的氮磷养分平衡^[9]。

近几年来, 中国在畜禽粪便养分管理方面也有不少研究。如黄志彭^[10]以猪和鸡养殖场粪便农田养分施用为目标建立了一套畜禽粪污管理系统。刘芳^[11]以猪场为例, 开展了养猪废水稻田施用研究, 猪场年污水产生 5.22 万 t, 以磷素为限制因子, 则需 348 hm² 农田消纳污水。相润等^[12]对粪便处理产生的环境影响进行管理, 但未考虑畜禽粪便养分农田利用。某规模猪场粪便综合养分管理模式案例表明, 种植基地年利用干粪 1 648.5 t, 沼液 27 920 m³, 总计相当于 27.08 t N 养分^[13]。有研究者对固液分离-液体厌氧发酵模式、粪污直接厌氧发酵处理模式规模猪场农牧配置进行了研究^[14-15], 估算了消纳万头猪场粪便所需农田面积, 如粮油作物地需 299.3~312.9 hm²。

收稿日期: 2017-05-14 修订日期: 2017-05-29

基金项目: 公益性行业科研专项(201303091); 农业部 948 项目(畜禽粪便综合养分管理计划软件引进)

作者简介: 贾伟, 男, 山西临汾人, 博士后, 研究方向为畜禽粪便综合养分管理。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。

Email: Jiawei711@126.com

*通信作者: 董红敏, 女, 河北新乐人, 博士, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 畜牧环境工程。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。Email: Donghongmin@caas.cn

畜禽粪便养分管理最关键的任务是在估算养殖场粪肥养分供给量基础上,判断合理的粪肥施用量^[7,16-17]。目前为止,仍缺乏典型粪便“固液分离—堆肥+氧化塘—农田利用”种养结合模式的奶牛场粪便养分管理方面的相关研究。因此,该文以典型种养结合模式“固液分离—堆肥+氧化塘—农田利用”的奶牛养殖场为案例,通过实地调研、粪便及土壤样品采样测定、以及文献参数收集等研究方法,制定奶牛场粪便综合养分管理模式,以实现粪便养分合理施用,并为同类的种养结合奶牛场开展粪便养分管理提供科学支撑。

1 材料与方法

研究区概况。该典型种养结合奶牛示范园区位于甘肃省张掖市民乐县生态工业园区、六坝镇韩武村和五坝村。地处祁连山北麓,河西走廊中段,张掖市东南部,地理坐标在 100°22'59"~101°13'9"E, 37°56'19"~38°48'17"N 之间,属温带大陆性荒漠草原气候,四季分明、气温变化大,光照充足。年平均气温 5.0℃,极端最高气温:30.0℃,极端最低气温:−19.0℃,年日照时数 2 666.1 h。全年平均降水量 351 mm,无霜期 140 d,年蒸发量 1 512.4 mm。

1.1 数据收集

1.1.1 奶牛场相关资料和参数

奶牛养殖场由美国公司设计建成。恒温牛舍单栋面积 45 000 m²。现代恒温牛舍、挤奶厅,采用自动加湿帘、充气窗、换热器、换气扇等现代设施,自动控制圈舍环境。从澳大利亚引进的纯种荷斯坦母牛和娟姗牛,通过自繁育形成快速扩繁的基础牛群。

1) 奶牛饲养阶段以及各阶段年均存栏量(表 1)。本研究中,所选奶牛场是典型种养结合模式,奶牛总存栏 2 978 头。其中,泌乳奶牛存栏数量 1 600 头;青年奶牛存栏量 1 378 头,青年奶牛包括育成奶牛和犊奶牛。

2) 奶牛粪便的收集方式(干清粪、水冲粪)和处理方式(固液分离、堆肥、氧化塘等)见表 1。

表 1 奶牛数量及粪污处理设施						
Table 1 Dairy number and manure processing facility						
畜舍 House	生产阶段 Production phrase	存栏量 Stock number	饲养期 Growing periods/d	清粪方式 Manure cleaning method	粪肥去向 Fate of manure	
					粪便 Feces	污水 Waste water
运动场 Exercise ground	青年奶牛	1378	210	干清粪	堆肥	氧化塘
泌乳牛舍 Lactating cattle house	泌乳奶牛	1600	365	水冲粪	堆肥	氧化塘

3) 各阶段每头奶牛粪尿产生量和粪便氮磷排泄量(表 2)。

4) 奶牛场废水和有机肥产生量及养分含量。牛粪有机肥年生产量为 1.2 万 t。奶牛场废水产生量约为 700 m³/d,年产废水 25.6 万 m³。奶牛场粪便和废水现场取样后,带回实验室进行检测。牛粪有机肥的含水率 4.78%左右,含

N 量(以干基计)为 1.28%,含 P 量(以干基计)为 0.3%。养殖废水中含氮量为 330 mg/L,含磷量为 35.4 mg/L。

表 2 不同奶牛的粪尿和养分排泄参数
Table 2 Excreted parameters of manure and nutrient for different species dairy

饲养阶段 Growing phase	粪尿产生量 Manure production/ (kg·头 ⁻¹ ·d ⁻¹)		粪尿排泄量 Excretion coefficient of manure and urine/ (kg·头 ⁻¹ ·d ⁻¹)		数据来源 Data sources
	粪便 Feces	尿液 Urine	氮 N	磷 P	
青年奶牛 Young dairy	14.63	7.73	116.00×10 ⁻³	16.48×10 ⁻³	[39]
泌乳奶牛 Lactating dairy	30.30	14.80	250.04×10 ⁻³	41.69×10 ⁻³	

5) 奶牛场粪便废弃物处理利用情况见图 1。

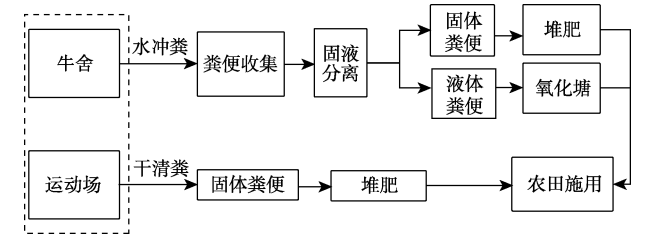


图 1 奶牛场粪便“固液分离—堆肥+氧化塘—农田利用”管理模式
Fig.1 Mode of solid-liquid separation-compost + oxidation pond-manure application for dairy manure processing technology

奶牛场固液粪肥去向:

①固体粪肥主要来自于运动场和废水固液分离后的固体部分,固体粪肥堆肥发酵后用作为有机肥,用于苜蓿、青贮玉米等,多余部分可出售给周边农户用于作物种植等。

②奶牛养殖废水。养殖废水全部进入粪沟,经管道运输后进入沉砂池,之后经过固液分离设施处理,液体部分收集贮存于氧化塘。施肥时,通过自动压力控制浇灌系统经管道输送至青贮玉米、籽实玉米、苜蓿和杏园农田施用。

6) 粪尿收集率和养分损失率参数

奶牛场根据养殖工艺有不同的清粪方式,而不同的清粪方式粪便收集率不同,奶牛粪便在舍内停留时间不同,奶牛粪尿产生后,通过氨挥发、淋洗、径流等形式会导致氮磷养分损失,不同清粪方式下的粪便收集率和养分损失率推荐值如表 3,粪尿收集率主要数据来源为现场调研。根据奶牛场实际清粪方式情况,人工干清粪养分损失率参数来自 Bicudo^[18],水冲清粪养分损失率参数来自卢健^[19]。

表 3 清粪方式粪尿收集率和养分损失率
Table 3 Manure collection rate and nutrient loss rate of different manure cleaning methods

清粪方式 Manure cleaning methods	粪尿收集率 Manure collection rate/%		养分损失率 ^[18-19] Nutrient loss rate/%	
	粪便 Feces	尿液 Urine	氮 N	磷 P
人工干清粪 Dry manure cleaning	80	0	60	40
水冲清粪 Flushing manure	98	100	10	5

7) 粪尿不同处理养分损失率参数

奶牛场废水经固液分离处理后可得到固体粪肥和液

体粪便。固体粪便可用于堆肥，液体粪便直接进入氧化塘。固液分离可以将奶牛场废水氮磷养分进行重新分配，一部分进入固体粪便，另一部分留在液体粪便中。固液分离处理得到的固体粪便氮、磷养分比例，占未经固液分离处理的奶牛场废水氮、磷养分的 19%和 14%^[20]。国内，常志州等^[21]对固体牛粪固液分离中氮磷回收率进行了研究。但本案例中，奶牛场是对牛舍出来的水泡粪进行了固液分离。2 种粪便含水量差异大，来自于不同的清粪工艺。因此，Christensen 等^[20]研究参数更符合国内牛场情况。该案例奶牛场的粪便管理方式，包括堆肥、氧化塘。国内堆肥过程 N、P 损失参数较多^[22-23]，而缺少氧化塘过程中氮磷损失参数。现场调研表明，本奶牛场案例中废水是经过先固液分离，再进入氧化塘贮存。氧化塘中废水每年贮存期是 3-4 月及 9-10 月，其余时期废水都施用于农田。根据奶牛场废水管理现状，选择了国外 Rotz^[24]、Ackerman 等^[25]文献中氧化塘氮磷损失参数。所有粪便管理方式的氮磷损失率设定为：堆肥^[22-23]N、P 分别为 20%和 5%；氧化塘^[24-25]N、P 分别为 15%和 5%。

1.1.2 收集养殖场配套农田的生产信息

奶牛场配套农田地处戈壁沙区，为新开发整理土地。基地地形东高西低，南高北低，东西坡度 0.5%左右，南北坡度 1%以内。农田地势平缓，田间道路、排灌渠、电力设施等完备。种植基地利用大型牧草种植收获机械设 备，收获青贮玉米和苜蓿。利用大型自动喷灌机，进行节水灌溉。奶牛养殖的粪便经过固液分离后，堆肥和废水用于种植基地改良土壤，形成种养结合模式。

1) 种植制度。根据当地气候条件，该奶牛场示范园区所在六坝镇韩武村和五坝村，45%种植小麦-玉米、24%种植马铃薯、19%种植中药材。小麦-玉米为一年两季，其余作物种植均为一年一季。该奶牛场示范园区所种植的青贮玉米和籽实玉米为一年一季，苜蓿和杏为多年生长。

2) 农作物种植种类、面积和产量。根据现场问卷调研获得，该奶牛示范园区的农作物种植面积和平均产量数据。基地全年总种植面积 1 473 hm²。其中，苜蓿种植面积 333 hm²，干草苜蓿平均产量 15 t/hm²；青贮玉米种植面积 354 hm²，平均产量 45 t/hm²；籽实玉米种植面积 779 hm²，平均籽粒产量 9 t/hm²；杏种植面积 7 hm²，平均产量 7.5 t/hm²。

3) 不同作物 100 kg 产量养分吸收量参数见表 4。根据现场调研作物产量结果，来确定每种作物养分吸收量参数。青贮玉米以生产鲜秸秆为主，其最佳收获期为籽粒的乳熟末期至蜡熟前期，此时产量最高，营养价值也最好，而籽实玉米的收获期必须在完熟期以后。因此，青贮玉米和籽实玉米养分吸收量参数不同。国内籽实玉米养分需求研究较多，选取了代表性文献^[26-27]。国内青贮玉米和杏的养分需求研究较少，养分需求参数来自目前国内最有效的文献^[28-29]。苜蓿养分需求量参数来自国家饲料工程技术研究中心牧草与青贮饲料研究推广中心数据^[30]。

表 4 不同作物形成 100 kg 产量吸收的养分量
Table 4 Crop nutrient uptake per 100 kg yield

作物种类 Crop	目标产量 Target yield/(t·hm ⁻²)	N/kg	P/kg	K/kg
青贮玉米 ^[28] Silage corn	45	1.13	0.24	2.78
籽实玉米 ^[26-27] Grain corn	9	2.30	0.30	1.62
苜蓿 ^[30] Alfalfa	15	3.0	0.65	2.72
杏 ^[29] Apricot	7.5	1.42	0.32	2.10

4) 土壤质地，氮、磷含量等化学特性。奶牛场配套农田土壤数据都是实际测定值（表 5）。4 种作物种植区域，每种作物区域随机取 10 点土壤，混合成 1 个代表性土壤样品测定结果。农田土壤类型为砂黏质灌漠土，土地坡度在 0.5%~1%之间，砂粒 80%~90%，黏粒 10%~20%，粒径 0.02~0.2 mm，耕作层深 50~100 cm。土壤 pH 值 8.0~8.47，碱解氮 25~48 mg/kg，有效磷 5~13 mg/kg，速效钾 50~110 mg/kg，有机质 0.3%~0.7%，土壤肥力较差，总体呈现钾缺乏，氮磷及有机质极缺的特征。

表 5 农田土壤养分供给量
Table 5 Soil nutrient supply in farmland

种植作物类型 Crop type	有机质 Soil organic matter/%	土壤测试值 Soil testing value/(mg·kg ⁻¹)			pH 值 pH value
		碱解氮 Alkali-hydrolyzale N	有效磷 Available P	速效钾 Available K	
青贮玉米 Silage corn	0.3	25	5	50	8.2
籽实玉米 Grain corn	0.6	47	11	100	8.5
苜蓿 Alfalfa	0.4	48	13	63	8.3
杏 Apricot	0.7	35	5.7	110	8.0

5) 农作物的施肥时间。主要是基肥和追肥。基肥主要是作物播种前，追肥为作物生育期。

6) 农田施用方式（表施、深施、喷洒施肥等）。公司种植基地全部采用电动圆形喷灌机实行节水灌溉，液体粪便结合灌水一起施用。固体粪便表施后，翻入农田。

1.2 计算方法

1.2.1 奶牛场粪肥养分供给量

1) 奶牛粪尿和养分产生量情况

奶牛场粪尿和氮磷等养分产生情况按照公式（1）和（2）进行计算：

$$Q_p = \sum (AP_j \cdot MP_j) \times 365 \times 10^{-3} \tag{1}$$

式中 Q_p 代表奶牛场粪便和养分产生量，t/a； AP_j 代表第 j 饲养阶段的奶牛平均存栏量，头（只）； MP_j 代表第 j 饲养阶段的粪尿或氮磷的日产生量，kg/(d·头)；

养殖场可以实测各个阶段的粪便、尿液产生量，并监测粪尿中的氮磷养分含量，计算获得奶牛的粪尿氮磷等养分排泄量。相关参数采用第一次全国污染源普查畜禽养殖业排污系数手册^[31]不同奶牛的粪尿和氮磷养分排泄量的推荐值，具体数据如表 2。

2) 奶牛场收集粪便量和养分量

奶牛场产生的粪便和氮磷养分收集后的粪便量和氮磷养分量通过公式（2）和公式（3）计算获得

$$Q_{m,c} = Q_p \cdot \eta_i \quad (2)$$

$$Q_{n(p),c} = Q_{mc} \cdot (1 - \eta_{n(p),c,i}) \quad (3)$$

式中 $Q_{m,c}$ 代表奶牛场畜禽粪尿收集量, t/a; η_i 代表第 i 种清粪方式的粪尿收集率, %; $Q_{n(p),c}$ 代表奶牛场畜禽粪尿氮(磷)收集量, t/a; $\eta_{n(p),c,i}$ 代表第 i 种清粪方式下的氮(磷)养分损失率, % (表 3)。

3) 奶牛场粪便养分供给量

奶牛场的畜禽粪便排泄的氮磷养分通过收集和处理以后, 提供给农田利用的总氮磷养分由公式(4)计算获得:

$$Q_{n(p),mm} = \sum Q_{n(p),c} \cdot (1 - \eta_{n(p),mm,i}) \cdot \text{Perc}_i \quad (4)$$

式中 $Q_{n(p),mm}$ 代表奶牛场畜禽粪尿氮(磷)处理后进入农田养分量, t/a; $Q_{n(p),c}$ 代表奶牛场畜禽粪尿氮(磷)收集量, t/a; $\eta_{n(p),mm,i}$ 代表第 i 种粪便管理方式下的氮(磷)养分损失率, %; Perc_i 代表第 i 种粪便管理方式下的所占比例, %。

1.2.2 奶牛场粪肥农田施用

本研究采用养分平衡方法来计算农田粪肥养分施用量, 原理为目标产量的施肥量是作物养分需求量与土壤供肥量之差, 施肥量中设定粪肥与化肥比例, 其中粪肥的部分即为农田粪肥养分施用量。

1) 农田作物养分需求量

根据《畜禽粪便还田技术规范》(GB/T 25246-2010)^[32] 不同作物在目标产量下的养分需求量可按照公式(5)进行计算。

$$A_i = y_i \cdot a_i \times 10^{-2} \quad (5)$$

式中 A_i 代表第 i 种作物单位面积目标产量下作物需要吸收的氮(磷)养分的量, t/hm²; y_i 代表第 i 种作物单位面积目标产量, t/hm²; a_i 代表第 i 种作物形成 100 kg 产量吸收的氮(磷)养分量, kg, 主要作物的 a_i 见表 4。

2) 土壤养分供给量

土壤中的养分供给可以由公式(6)计算获得

$$S_j = 2.25 \times 10^{-3} c_j \cdot t \quad (6)$$

式中 S_j 代表第 j 类型田块土壤供肥量, t/hm²; 2.25×10^{-3} 代表土壤养分换算系数, t/hm²; c_j 代表第 j 类型田块土壤养分测试值, mg/kg; t 代表土壤养分校正系数。据当地农业科研机构在灌漠土土壤生产力长期定位试验研究表明, 土壤自然肥力对作物产量贡献为 40%^[33], 因此本研究中土壤养分校正系数取值 0.4。

3) 农田粪肥养分施用量

依据单位各种作物形成 100 kg 产量吸收的氮磷养分量, 以及土壤供给养分量情况, 可以按照公式(7)测算单位面积的农田作物粪肥养分施用量。

$$N_i = \frac{A_i - S_j}{r} \cdot f_i \quad (7)$$

式中 N_i 代表第 i 种作物在一定肥力和单位面积作物目标

产量下需要投入的某种畜禽粪便的氮(磷)养分量, t/hm²; A_i 代表第 i 种作物单位面积目标产量下作物需要吸收的氮(磷)养分量, t/hm², A_i 由公式(5)计算; S_j 代表第 j 类型田块单位面积土壤供肥量, t/hm²; r 代表畜禽粪便的当季利用率, %; f_i 代表农田施肥管理中, 施用于农田中的畜禽粪便养分含量占施肥总量的比例, %。

根据畜禽粪便还田技术规范表明畜禽粪便养分的当季利用率在 25%~30% 范围内变化。本案例所在区域长期定位试验结果表明有机无机肥配合施用下养分利用率最高^[34-35]。本研究粪肥和化肥配合施用模式下的 r 取值 30%。

本研究中 f_i 取值为 50%。本研究基于中国农田养分主要来源为化肥的现状, 采用畜禽粪便养分替代化肥这一思路确定农田粪肥 N、P 养分需求量。借鉴欧洲经验 50% 有机肥替代化肥, 这样可以平衡到化肥和有机肥生产者的利益, 同时最大化利用畜禽粪便养分资源。奶牛示范园所在区域研究表明, 有机肥与 N、P、K 肥配施有利于作物高产稳产, 是维持系统可持续性的最优施肥模式^[35]。牛粪 50% 替代化肥, 土壤肥力提高、环境风险减少且作物养分利用率高^[34,36]。

农田粪肥养分施用量是按照每种作物可施用粪肥面积和单位面积的农田作物粪肥养分施用量计算得到, 参见公式(8)。

$$\text{TMN} = \sum \text{Area}_i \cdot N_i \quad (8)$$

式中 TMN 代表农田粪肥养分施用量, t/a; Area_i 代表每种作物可施用粪肥的面积, hm²。

为减少粪肥施用后的环境风险, 本研究用土壤磷测试值和农田与水体距离来确定可施用粪肥农田面积。国内土壤磷测试值临界点与环境风险有很多报道, 粮田 40~90 mg/kg^[37]、菜田 50~80 mg/kg^[38]、果园 50~60 mg/kg^[39]。为了避免农田中过量的磷积累, 粪肥应重点施用于低磷肥力的土壤^[40]。本研究以速效磷 <60 mg/kg 的有效农田^[41]作为可施用粪肥的农田。在饮用水水源保护区划分技术规范中^[42], 禁止在任何距离水体 50 m 内的土地施用粪肥或在湖或水库半径 200 m 范围内的土地施用粪肥。本案例中, 农田土壤磷测试值都低于 60 mg/kg, 且奶牛场示范园区周边无地表水系。因此, 当前奶牛场全部农田面积都可施用粪肥。

4) 农田粪肥施用管理模式

按照粪肥养分含量测定值估算粪肥施用量, 养殖场应对最终进入农田的粪肥中的养分浓度进行测定, 并按照公式(9)计算单位面积的粪肥施用量。

$$M_i = N_i / C_i \quad (9)$$

式中 M_i 代表第 i 种作物在一定肥力和单位面积作物预期产量下需要投入的某种粪肥量, t/hm²; N_i 第 i 种作物在一定肥力和单位面积作物预期产量下需要投入的某种粪肥的氮(磷)养分量, t/hm²; C_i 代表最终进入农田施用的粪肥中的氮(磷)养分含量, %。

农田粪肥施用量是按照每种作物可施用粪肥面积和单位面积的农田作物粪肥施用量计算得到, 参见公式(10)。

$$TM = \sum Area_i \cdot M_i \tag{10}$$

式中 TM 代表农田粪肥施用总量，t/a。

2 结果与分析

2.1 奶牛场粪便及养分产生量

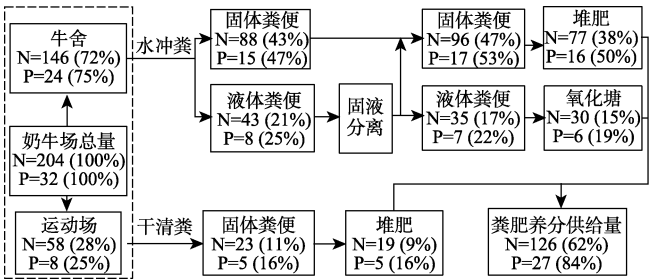
养殖场粪便养分产生量根据产污系数估算，具体计算参考公式（1）-（4）。整个奶牛场粪便产生量为 3.76 万 t/a，粪便氮和磷产生量分别为 204 和 32 t/a(表 6)。其中，青年奶牛年粪便产生量约为 1.12 万 t/a，粪便氮和磷产生量分别为 58 和 8 t/a，泌乳奶牛年粪便产生量约为 2.63 万 t/a，粪便氮和磷产生量分别为 146 和 24 t/a。

表 6 奶牛场粪便及 N、P 年产生量
Table 6 Amount of manure, N and P in dairy farm

饲养阶段 Growing phase	存栏数量 Stock number/ (头·a ⁻¹)	产生量 Production rate		
		粪便 Manure/ (万 t·a ⁻¹)	粪便氮 Manure N/ (t·a ⁻¹)	粪便磷 Manure P/ (t·a ⁻¹)
青年奶牛 Young dairy	1 378	1.12	58	8
泌乳奶牛 Lactating dairy	1 600	2.63	146	24
总量 Total	2 978	3.75	204	32

2.2 奶牛场粪便养分供给量

对典型“固液分离—堆肥+氧化塘—农田利用”粪污处理模式奶牛场粪便养分可还田利用量分析。奶牛场主要养分损失来源于两块，第一，泌乳牛舍为水冲粪工艺，因此从整个粪便管理过程的产生收集到处理阶段，主要是对液体粪便进行处理和利用。第二，运动场青年奶牛主要为人工干清粪，两个月清一次。运动场青年奶牛产生的尿液无法收集，这会造成粪便养分损失和养殖场环境造成影响。整个粪便管理过程，固液粪便养分流动情况见图 2。



注：所有括号中百分数都为养分数量占起始总粪尿养分比例。单位：t/a
Note: All values in all brackets represented as the percentage of total manure nutrients excretion. Unit: t/a.

图 2 奶牛场粪便管理对养分供给的影响

Fig.2 Influence of manure management on available manure nutrient supply in dairy farm

在计算粪便养分产生量的基础上，由于粪便管理方式不同，对泌乳奶牛和青年奶牛的粪便养分供给量分开核算。泌乳奶牛舍养分收集量为 131 和 23 t。水冲粪粪得到的液体粪污，经过固液分离后，固体粪便经过堆肥处理后生产有机肥后还田，液体部分经过氧化塘和处理后生产液体粪肥还田，其最终可用于还田的氮和磷养分量为 107 和 22 t/a，粪便养分产生、处理和进入农田的养分

情况见图 2。

青年奶牛主要在运动场上饲养，产生的固体粪便定期以人工干清粪的方式进行收集，故干清粪收集 NP 养分为 23 和 5 t/a。经过固体粪便堆肥后，粪便 NP 养分为 19 和 5 t/a (图 2)。整个奶牛场粪污收集和经过粪污处理后，有效还田可利用 N 和 P 养分为 126 和 27 t/a。

2.3 农田粪肥养分施用量

本研究中通过公式（5），计算青贮玉米、玉米、苜蓿和杏单位面积作物养分需求量，如表 7 所示，单位面积青贮玉米 N、P 养分需求量分别为 0.51 和 0.11 t/hm²(表 7)，单位面积籽实玉米 N、P 养分需求量分别为 0.21 和 0.03 t/hm²，单位面积苜蓿 N、P 养分需求量分别为 0.45 和 0.10 t/hm²，单位面积杏 N、P 养分需求量分别为 0.11 和 0.02 t/hm²。

表 7 农田作物粪肥养分施用量
Table 7 Crop nutrient requirements from manure

作物 Crop	可施用粪肥面积 Area of manure application/hm ²	目标产量 Target yield/t·hm ⁻²	单位面积作物养分需求 Crop nutrient requirements per unit area/(t·hm ⁻²)		土壤供肥量 Soil nutrient supply/(t·hm ⁻²)		单位面积粪肥养分施用量 Manure nutrient rate input/(t·hm ⁻²)		粪肥养分施用总量 Total manure nutrient requirements/(t·a ⁻¹)	
			N	P	N	P	N	P	N	P
青贮玉米 Silage corn	354	45	0.51	0.11	0.022 5	0.004 5	0.81	0.17	287.0	61.1
籽实玉米 Grain corn	779	9	0.21	0.03	0.042 3	0.009 9	0.27	0.03	213.8	22.2
苜 蓿 Alfalfa	333	15	0.45	0.10	0.043 2	0.011 7	0.68	0.14	226.0	47.7
杏 Apricot	7	7.5	0.11	0.02	0.031 5	0.005 1	0.13	0.03	0.8	0.2
合计 Total	1473	—	—	—	—	—	—	—	727.6	131.2

通过公式（6）计算 4 种作物土壤 N、P 供肥量。青贮玉米土壤 N、P 供肥量分别为 0.022 5 和 0.004 5 t/hm²（表 7），籽实玉米土壤 N、P 供肥量分别为 0.042 3 和 0.009 9 t/hm²，苜蓿土壤 N、P 供肥量分别为 0.043 2 和 0.011 7 t/hm²，杏土壤 N、P 供肥量分别为 0.031 5 和 0.005 1 t/hm²。

基于单位面积作物养分需求量和土壤供肥量，考虑粪肥投入占总养分比例、以及粪肥养分的当季利用率，估算了农田不同作物下的粪肥养分施用量。考虑粪肥养分含量占施肥比例为 50%和粪肥养分当季利用率为 30%，农田所有作物粪肥 N、P 总养分施用量分别为 727.6 和 131.2 t/a（表 7）。其中，青贮玉米粪肥 N、P 总养分施用量分别为 287.0 和 61.1 t/a，籽实玉米粪肥 N、P 总养分施用量分别为 213.8 和 22.2 t/a，苜蓿粪肥 N、P 总养分施用量分别为 226.0 和 47.7 t/a，杏粪肥 N、P 总养分施用量分别为 0.8 和 0.2 t/a。

在不同 N 和 P 指标下，粪肥氮磷养分供给量均小于农田粪肥氮磷养分施用量（表 7），表明奶牛场配套农田可以完全承载粪肥养分供应量。同时，根据该奶牛场农田粪肥养分施用总量结果，表明该奶牛场还可以适当扩大养殖规模。

2.4 农田粪肥施用管理模式

以奶牛场配套农田粪肥施用特点,按照公式(9)和(10)计算,制定农田粪肥施用管理模式。设定农田作物粪肥施用方式为固体有机肥只做基肥、液体有机肥只做追肥。青贮玉米、籽实玉米的基肥和追肥比例为50%和50%,苜蓿、杏的基肥和追肥比例为0、100%(表8)。青贮玉米和籽实玉米基肥主要来自有机肥。以N为基础,青贮玉米、籽实玉米单位面积有机肥施用量分别为32和11 t/hm²。青贮玉米、籽实玉米、苜蓿和杏的追肥主要来自液体粪肥,以N为基础计算,单位面积液体粪肥投入量分别为1227、416、2055、379 t/hm²。以P为基础,青贮玉米、籽实玉米单位面积有机肥施用量分别为29和5 t/hm²。以P为基础计算,青贮玉米、籽实玉米、苜蓿和杏的追肥主要来自液体粪肥,单位面积液体粪肥投入量分别为243 6、403、404 0、888 t/hm²。

表8 农田粪肥施用管理模式
Table 8 Manure application management for different crop field

作物 Crop	施肥比例 Proportion of fertilizer/%		单位面积施用量 Application rate per unit area				总施用量 Total application rate			
	基肥 Basal	追肥 Topdr- essing	有机肥 作基肥		液体废水 作追肥		有机肥 作基肥		液体废水 作追肥	
			Basal solid manure/ (t·hm ⁻²)	Topdressing wastewater/ (m ³ ·hm ⁻²)	Basal solid manure/ (m ³ ·hm ⁻²)	Topdressing wastewater/ (m ³ ·hm ⁻²)	Basal solid manure/ (万 t·a ⁻¹)	Topdressing wastewater/ (万 m ³ ·a ⁻¹)	Basal solid manure/ (万 t·a ⁻¹)	Topdressing wastewater/ (万 m ³ ·a ⁻¹)
			N	P	N	P	N	P	N	P
青贮玉米 Silage corn	50	50	32	29	1227	2436	1.1	1.0	43.5	86.3
籽实玉米 Grain corn	50	50	11	5	416	403	0.8	0.4	32.4	31.4
苜蓿 Alfalfa	0	100	0	0	2055	4040	0	0	68.5	134.7
杏 Apricot	0	100	0	0	379	888	0	0	0.3	0.6
合计 Total	—	—	—	—	—	—	1.9	1.4	144.7	253.0

农田固体有机肥和液体废水的消纳总量如下(表8)。以N为基础计算,青贮玉米和籽实玉米基肥总计可消纳有机肥为1.9万 t/a。青贮玉米、籽实玉米、苜蓿和杏的追肥可消纳液体粪肥总计分别为144.7万 m³/a。其中,青贮玉米、籽实玉米、苜蓿分别为43.5、32.4和68.5万 m³/a。以P为基础计算,青贮玉米和籽实玉米基肥总计可消纳有机肥为1.4万 t/a。以P为基础计算,青贮玉米、籽实玉米、苜蓿和杏的追肥可消纳液体粪肥总计为253万 m³/a。其中,青贮玉米、籽实玉米、苜蓿分别为86.3、31.4和134.7万 m³/a。

该农田粪肥施用管理模式表明(表8),以N为基础,种植基地年利用有机肥1.9万 t,可以100%消纳奶牛场有机肥产生量;种植基地年利用废水144.7万 m³,是奶牛场废水产生量的5.6倍。以P为基础,种植基地年利用有机肥1.4万 t,可100%消纳奶牛场有机肥产生量;种植基地年利用废水253万 m³,是奶牛场废水产生量的9.8倍。在农田施用粪肥时,制定的农田粪肥施用管理模式方便生产管理者,对不同作物进行粪肥合理施用量操作,包括单位面积固液粪肥施用量、每种作物固液粪肥总施用量。

3 讨论

3.1 粪肥收集和处理方式对奶牛场粪肥养分供给量的影响

畜禽粪肥养分从产生到农田利用前,经过不同养分损失阶段。最终,可用于农田的有效畜禽粪肥养分量,相比新鲜畜禽粪肥养分产生量有很大损失^[43-44]。对于畜禽粪肥养分利用和管理,应明确畜禽粪肥养分最大损失途径,及最终还田有效粪肥养分数量。国内畜禽养殖系统粪肥养分供应量,较多是国家或区域尺度的研究,如侯勇^[45]、Bai等^[46]。目前对养殖场粪肥养分供应量研究很少,如Luo等^[47]在北京规模化猪场进行了研究,但该研究并没有利用养分分流方法对各个粪肥养分管理养分损失进行量化。因此,本研究中,利用养分分流方法对典型“固液分离—堆肥+氧化塘—农田利用”粪污处理模式奶牛场粪肥养分的供应量进行了计算,分析粪肥养分供应主要环节养分损失。该案例奶牛场粪肥氮、磷养分供给量占总粪肥养分产生量的62%和84%,整个奶牛场粪肥氮、磷养分损失比例为38%和16%。奶牛粪肥氮磷养分损失主要来自青年牛所在的运动场,氮磷损失比例为17%和9%。这是由于运动场仅收集固体粪肥,而未收集液体粪肥,造成奶牛场粪肥最大养分损失。在整个案例中,固体粪肥堆肥过程氮素损失比例为11%。减少本案例粪肥氮磷养分损失,需改善奶牛运动场的液体粪肥收集方式。此外,堆肥过程粪肥氮素养分损失比例较高,应该采取保氮措施^[48]。

3.2 基于氮磷平衡的农田粪肥养分施用量

农田作物养分推荐用量,目前比较普遍采用的是土壤与植物测试推荐施肥方法、肥料效应函数法、土壤养分丰缺指标法、养分平衡法^[49]。农田粪肥施用量可以N和P为依据,粪肥施用分别根据满足作物氮、磷需求量计算^[17]。较多研究表明农田粪肥养分施用量采用养分平衡法^[50-51]。胡春明等^[52]以猪场为例,利用农田养分平衡方法计算得到农田粪肥氮素施用量为188 kg/(hm²·a)。本案例根据养分平衡方法计算,表明农田作物单位面积粪肥N、P养分投入量分别为130~810和30~170 kg/hm²。欧盟委员会选择粪肥氮投入作为指标,硝酸盐敏感区设定粪肥N施用量为每年170 kg/hm²。一些欧盟成员国建立了粪肥P投入最大值^[53],认为土壤粪肥年施磷量不能超过35 kg/hm²,否则过量的磷会通过地表径流进入水体,引起水体富营养化。英国优良农业措施规定,12个月内粪肥施用量每公顷总氮限量不超过250 kg^[8]。欧洲国家粪肥N和P养分投入量限制,主要针对区域水平环境风险控制。针对本案例奶牛场中配套农田环境风险,考虑的影响因素包括土壤磷测试值、农田与水体距离。由于本案例奶牛场配套农田周边没有水体,不会引起富营养等环境风险。同时,奶牛场配套农田地处戈壁沙区,为新开发整理土地,实际测定的土壤有效氮磷养分值较低,表明当前土壤肥力较低。为提高土壤肥力并保持作物正常生长,允许较高的粪肥N、P养分投入量。

3.3 不确定性因素分析

在国内,奶牛场废水的固液分离和氧化塘贮存处理较普遍。由于国内仍缺少固液分离对于废水氮磷分配和氧化塘养分损失的研究,尽管我们选取了当前最适合本

奶牛场粪便管理条件下的参数,对该典型“固液分离—堆肥+氧化塘—农田利用”粪污处理模式奶牛场案例中粪肥养分供应量估算会存在误差。此外,研究美国粪便管理养分管理软件 MMP 数据参数^[17],发现每个州都有作物养分需求数据库。李小坤等^[54]认为国内牧草营养施肥的仍缺乏系统研究。经过与奶牛场生产管理者多次调研交流作物施肥管理和生产情况,选择了当前最有效的数据参数,保证了本案例中青贮玉米和苜蓿养分需求量估算结果。土壤养分校正系数和粪肥养分利用率参数,均来自当地科研机构长期定位试验结果,这样的土壤供肥量和农田粪肥养分施用量估算结果值得信任。考虑到种养结合模式奶牛场粪便养分管理模式的需要,以及本地数据和当前文献中固体分离和氧化塘养分损失、牧草养分需求数据的缺乏,需开展相关研究工作。

4 结 论

对典型种养结合模式“固液分离—堆肥+氧化塘—农田利用”奶牛场产生的有机肥和废水,通过实施粪便综合管理模式,奶牛粪有机肥和养殖废水综合利用率达100%,全部可在配套种植基地利用。存栏量2 978头的奶牛场粪肥N、P养分供给量为126和27 t。1 473 hm²的种植基地年利用牛粪有机肥1.2万t,养殖废水25.6万m³。基于氮磷养分平衡的农田粪肥养分施用管理,如果粪肥养分量占施肥总量比例为50%和粪肥养分当季利用率为30%,奶牛场配套农田所有作物粪肥N、P总养分施用量为727.6和131.2 t。该奶牛场粪肥养分供给量小于农田所需粪肥养分量。制定奶牛场粪便养分综合管理模式提高粪肥利用水平,实现了种养结合模式奶牛场协调发展。同时,可为中国规模奶牛场建立种养结合模式提供科学借鉴。

参 考 文 献

- [1] 任妮,王鸿英,孟庆江,等.规模化奶牛场的粪污处理模式[J].中国乳业,2014,22(12):37—40.
Ren Ni, Wang Hongying, Meng Qingjiang, et al. The manure processing mode of intensive dairy farm[J]. China Dairy, 2014, 22(12): 37—40. (in Chinese with English abstract)
- [2] 许怡然.2013年全国16省(区、市)规模奶牛场粪污处理情况调查报告[J].中国乳业,2015,21(3):13—16.
Xu Yiran. Investigation report on manure processing status of 16 provincial intensive dairy farm in China in 2013[J]. China Dairy, 2015, 21(3): 13—16. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李孟娇,董晓霞,郭江鹏.美国奶牛规模化养殖的环境政策与粪污处理模式[J].生态经济,2014,32(7):55—59,89.
Li Mengjiao, Dong Xiaoxia, Guo Jiangpeng. The environment policy and manure treatment models of large-scale milk cows breeding in US[J]. Ecological Economy, 2014, 32(7): 55—59, 89. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李孟娇,董晓霞,李宇华.发达国家奶牛规模化养殖的粪污处理经验:以欧盟主要奶业国家为例[J].世界农业,2014,37(5):10—15.
Li Mengjiao, Dong Xiaoxia, Li Yuhua. Experience on manure processing of intensive dairy farm in the developed countries: Main dairy country of EU as an example[J]. World Agriculture, 2014, 37(5): 10—15. (in Chinese with English abstract)
- [5] Koenig Rich, Goodrich Kerry. Comprehensive Nutrient Management Planning[M]. All Archived Publications. Paper 53. http://digitalcommons.usu.edu/extension_histall/53. 2000.
- [6] Karmakar S, Lague C, Agnew J, et al. Integrated decision support system (DSS) for manure management: A review and perspective[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 57(2): 190—201.
- [7] Alberta Agriculture and Rural Development. Nutrient management planning guide [EB/OL]. [2017-4-19]. [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/epw11920/](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/epw11920/).
- [8] DEFRA. Protecting our Water, Soil and Air: A code of good agricultural practice for farmers, growers and land managers[R]. London, UK: Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2009.
- [9] 王方浩,王雁峰,马文奇,等.欧美国家养分管理政策的经验与启示[J].中国家禽,2008,30(4):57—58.
Wang Fanghao, Wang Yanfeng, Ma Wenqi, et al. Experience and inspiration of nutrient management policy from EU and USA[J]. China Poultry, 2008, 30(4): 57—58. (in Chinese with English abstract)
- [10] 黄志彭.养殖场畜禽粪污管理系统的研制[D].扬州:扬州大学,2008.
Huang Zhipeng. Development of Animal Manure Management System For Livestock and Poultry Breeding Industry[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘芳.养猪场处理污水稻田利用决策支持系统研究[D].扬州:扬州大学,2010.
Liu Fang. Research on Decision Support System Utilization of Pig Farm Wastewater in Paddy Field[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [12] 相润,吴树彪,庞昌乐,等.畜禽养殖业污染控制决策支持系统的构建[J].中国沼气,2012,30(2):3—5.
Xiang Rui, Wu Shubiao, Pang Changle, et al. Components of decision support system for livestock pollution control[J]. China Biogas, 2012, 30(2): 3—5. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吴志坚,吴志勇,徐晓云,等.畜禽粪便综合养分管理计划在规模猪场的实践探索:以江西绿丰生态农业园有限公司为例[J].江西畜牧兽医杂志,2015,34(3):1—6.
Wu Zhijian, Wu Zhiyong, Xu Xiaoyun, et al. The practical exploration for comprehensive manure management in the intensive pig farm: A case study from a company[J]. Journal of Jiangxi Animal Husbandry and Veterinary, 2015, 34(3): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [14] 盛婧,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 I. 固液分离-液体厌氧发酵模式[J].中国生态农业学报,2015,23(2):199—206.
Sheng Jing, Sun Guofeng, Zheng Jianchu. Pig farm-cropland configuration under typical waste treatment modes: A case study of anaerobic liquid fermentation following solid-liquid separation of waste[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(2): 199—206. (in Chinese with English abstract)
- [15] 盛婧,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 Guofeng, Zheng Jianchu. 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. (in Chinese with English abstract)
- [16] Defra. Fertiliser Manual (RB209)[M]. London, UK: Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2010.
- [17] Purdue University. Manure Management Planner [EB/OL]. [2017-5-3]. <http://www.purdue.edu/agsoftware/mmp/>.
- [18] Bicudo J R. Agricultural mechanization and automation-Vol. II -Animal solid manure: storage, handling and disposal[C]//United nations educational, scientific and cultural organization (UNESCO), 1997.
- [19] 卢健.奶牛场排泄物产生、收集、堆积及处理过程中氮、磷变化研究[D].南京:南京农业大学,2013.
Lu Jian. Changes in Nitrogen and Phosphorus of Dairy Cow

- Excreta During Generation, Collection, Stacking and Treatment Process[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [20] Christensen M L, Christensen K V, Sommer S G. Solid-liquid separation of animal slurry[C]//Sommer S G, Christensen M L, Schmidt T, et al. Animal Manure Recycling: Treatment and Management, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2013, 105–130.
- [21] 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 Zhizhou, Huang Hongying, Wu Junwei, 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. (in Chinese with English abstract)
- [22] 贾伟, 李宇虹, 陈清, 等. 京郊畜禽粪肥资源现状及其替代化肥潜力分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 156–167.
- Jia Wei, Li Yuhong, Chen Qing, et al. Analysis of nutrient resources in livestock manure excretion and its potential of fertilizers substitution in Beijing suburbs[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 156–167. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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]. J Agro-Environ Sci, 2013, 32(5): 1068–1077. (in Chinese with English abstract)
- [24] Rotz C A. Management to reduce nitrogen losses in animal production[J]. Journal of Animal Science, 2004, 82(Supp.1): 119–137.
- [25] Ackerman Joe, Cicek Nazim. Evaluation of the opportunity for manure treatment/processing technologies to achieve manure phosphorus balance[R]. Manitoba: University of Manitoba, 2010.
- [26] 巨晓棠. 理论施氮量的改进及验证: 兼论确定作物氮肥推荐量的方法[J]. 土壤学报, 2015(2): 249–261.
- Ju Xiaotang. Improvement and validation of theoretical N rate (TNR)-discussing the methods for N fertilizer recommendation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(2): 249–261. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2010.
- [28] 李焕春, 段玉, 妥德宝, 等. 饲料玉米的吸肥规律及其平衡施肥技术研究[J]. 华北农学报, 2006, 21(f12): 9–13.
- Li Huanchun, Duan Yu, Tuo Debao, et al. Nutrient absorption law and technic of applying fertilizer on silage maize[J]. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2006, 21(f12): 9–13. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王伟军, 王红, 张爱军, 等. 不同施肥方式对山区杏树养分吸收及产量的影响[J]. 果树学报, 2011, 28(5): 893–897.
- Wang Weijun, Wang Hong, Zhang Aijun, et al. Effects of different fertilizing methods on nutrient uptake and yield of apricot in mountainous areas[J]. Journal of Fruit Science, 2011, 28(5): 893–897. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李继伟. 苜蓿的养分需求[EB/OL]. (2015-2-28). <http://www.nfrc-silage.com/filedownload/15496>
- [31] 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[Z]. 北京: 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室, 2009.
- [32] 畜禽粪便还田技术规范: GBT 25246-2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [33] 索东让, 杨生茂, 孙炳玲, 等. 河西绿洲灌漠土长期施肥效应及土壤生产力演变[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(6): 56–60.
- Suo Dongrang, Yang Shengmao, Sun Bingling, et al. Effect of long-term fertilization and evolvement of soil productivity on irrigated desert soil of oasis area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(6): 56–60. (in Chinese with English abstract)
- [34] 晁赢. 长期定位施肥对土壤肥力特征及养分吸收利用的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2009.
- Chao Ying. Effects of Long-Term Located Fertilizer Application on Soil Fertility Character and Nutrients Absorption[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [35] 孙宇科, 索东让. 有机肥与化肥长期配施对作物产量和灌漠土养分库的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4): 42–46.
- Sun Ningke, Suo Dongrang. Effects of long-term mixed use of organic manure and chemical fertilizers on crop yield and indigenous soil nutrients[J]. Bulletin of soil and water conservation, 2011, 31(4): 42–46. (in Chinese with English abstract)
- [36] 温延臣. 不同施肥制度潮土养分库容特征及环境效应[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- Wen Yanchen. Study on Characteristics of Fluvo-Aquic Soil Nutrient Pools and Environmental Effects of Different Fertilization Systems[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [37] Bai Z, Li H, Yang X, et al. The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types[J]. Plant and Soil, 2013, 372(1): 27–37.
- [38] Yan Z, Liu P, Li Y, et al. Phosphorus in China's Intensive vegetable production systems: overfertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(4): 982.
- [39] Lu Shuchang, Yan Zhengjuan, Chen Qing, et al. Evaluation of conventional nitrogen and phosphorus fertilization and potential environmental risk in intensive orchards of North China[J]. Journal of Plant Nutrition, 2012, 35(10): 1509–1525.
- [40] Basnet B B, Apan A A, Raine S R. Geographic information system based manure application plan[J]. Journal of Environmental Management, 2002, 64(2): 99.
- [41] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the broadbalk experiment[J]. Journal of Environmental Quality, 1995, 24(5): 904–910.
- [42] 国家环境保护总局. 饮用水水源保护区划分技术规范: HJ/T338-2007 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [43] Rotz C A, Corson M, Coiner C. Integrated farm system model: Reference MANUAL, VERSION 2.1 [EB/OL]. [2007-10-15] Available: <http://ars.usda.gov/naa/pswmru>.
- [44] Otten Dennis, van den Weghe H F A. Nitrogen and phosphorus management on pig farms in Northwest Germany nutrient balances and challenges for better sustainability[J]. International Journal of Livestock Production, 2013, 4(4): 60–69.
- [45] 侯勇, 高志岭, 马文奇, 等. 京郊典型集约化农田-畜牧生产系统氮素流动特征[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1028–1036.
- Hou Yong, Gao Zhiling, Ma Wenqi, et al. Nitrogen flows in intensive “crop-livestock” production systems typically for the peri-urban area of Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1028–1036. (in Chinese with English abstract)
- [46] Bai Z H, Ma L, Oenema O, et al. Nitrogen and phosphorus use efficiencies in dairy production in China[J]. J Environ Qual, 2013, 42(4): 990–1001.

- [47] Luo Yiming, Stichnothe Heinz, Schuchardt Frank, et al. Life cycle assessment of manure management and nutrient recycling from a Chinese pig farm[J]. *Waste Management & Research*, 2014, 32(1): 4—12.
- [48] 张玉兰, 孙彩霞, 段争虎, 等. 堆肥原位保氮技术研究进展[J]. *土壤通报*, 2010, 41(4): 1000—1004.
Zhang Yulan, Sun Caixia, Duan Zhenghu, et al. Research progress on reducing nitrogen loss from compost system[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(4): 1000—1004. (in Chinese with English abstract)
- [49] 农业部. 测土配方施肥技术规范[R]. 2011 年修订版. 北京, 2001.
- [50] 王振旗, 沈根祥, 钱晓雍, 等. 基于农田氮磷养分平衡的奶牛场污水生态还田工程应用研究[J]. *上海农业学报*, 2013, 28(1): 29—33.
Wang Zhenqi, Shen Genxiang, Qian Xiaoyong, et al. Applied research on the engineering of ecologically returning sewage from dairy farm to cropland based on nitrogen and phosphorus balance[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2013, 28(1): 29—33. (in Chinese with English abstract)
- [51] 常维娜, 周慧平, 高燕. 种养平衡—农业污染减排模式探讨[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(11): 2118—2124.
Chang Weina, Zhou Huiping, Gao Yan. Balance between crop-planting and livestock-raising: Perspective of agricultural pollution reduction[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11): 2118—2124. (in Chinese with English abstract)
- [52] 胡春明, 刘平. 养殖场粪肥与农田负荷量的种养平衡研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(22): 11399—11400.
Hu Chunming, Liu Ping. Balance of manure and farmland load in a breeding farm[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2012, 40(22): 11399—11400. (in Chinese with English abstract)
- [53] Schröder J J, Scholefield D, Cabral F, et al. The effects of nutrient losses from agriculture on ground and surface water quality: The position of science in developing indicators for regulation[J]. *Environmental Science & Policy*, 2004, 7(1): 15—23.
- [54] 李小坤, 鲁剑巍, 陈防. 牧草施肥研究进展[J]. *草业学报*, 2008, 17(2): 136—142.
Li Xiaokun, Lu Jianwei, Chen Fang. Primary study on fertilizer application of forage[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17(2): 136—142. (in Chinese with English abstract)

Manure nutrient management mode in typical mixed crop-dairy farm

Jia Wei, Zhu Zhiping, Chen Yongxing, Dong Hongmin^{*}, Tao Xiuping

(*Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences;*

Animal Environmental Facility Surveillance, Inspection and Testing Center (Beijing), Ministry of Agriculture,

Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management in Agricultural Structures (MOA), Beijing 100081, China)

Abstract: Intensive dairy farms have developed rapidly in China over the last three decades, which have produced a lot of manure nutrients. However, due to the decoupling of crop-animal systems and poor manure management, large loss of nutrients from manure has led to serious environmental pollution. There is an urgent need to define an integrated manure management plan, which requires a quantitative understanding of nutrient balance and budget in a mixed crop-animal system. In this study, we reported a typical manure processing model so called "solid-liquid separation - compost+oxidation pond - manure application" from a dairy farm, and developed a comprehensive manure nutrient management plan using the data collection from farm investigation, soil, solid and liquid manure sampling and parameters collection from literatures. The results showed that dairy excretion N and P were 204 and 33 t/a with the breeding stock number of 2 978 dairy cattle, respectively. After manure collection and processing, the N and P amounts of manure nutrients were 126 and 27 t/a, which could be available for crop use. Manure management of lactating dairy cattle and young dairy cattle were different, therefore the amount of their manure nutrients supply were quantified, respectively. The collection rate of manure N and P nutrient was 131 and 23 t/a in the lactating dairy cattle house, respectively. The manure from flood flushing system was treated by solid-liquid separation; therein the solid part of manure after solid-liquid separation could be composted as organic fertilizer applied to the field. At the same time, the liquid part could be treated by the oxidation pond as liquid manure to be returned to the field. The rate of manure N and P nutrient from lactating dairy cattle house was eventually 107 and 22 t/a, respectively. The young dairy cattle was mainly raised outdoor. Most of urine would be leaked and evaporated on the non-concrete ground, and the solid feces were collected regularly on a dry manure basis. Therefore, the amounts of solid manure N and P nutrient collected from young dairy cattle were 23 and 5 t/a, respectively. Finally, the amounts of N and P nutrient from young dairy cattle's solid manure composted were 19 and 5 t/a, respectively. Based on crop nutrient requirements and soil nutrient supply, considering the ratio of manure to inorganic fertilizer (50%) and current manure nutrient use efficiency (30%), the amounts of manure N and P that could be applied to arable land were 727.6 and 131.2 t/a with the land area of 1 473 hm², respectively, which were greater than the amounts of available manure nutrients from the dairy farm under different N and P indices. Among them, total application rates of manure N and P nutrient for silage corn, grain corn, alfalfa, and apricot were 287 and 61.1, 213.8 and 22.2, and 226.0 and 47.7, 0.8 and 0.2 t/a, separately. Therefore, the land carrying capacity of manure N and P nutrient is sufficient in this typical mixed crop-dairy farm. Manure application management plan in the mixed crop-dairy farm shows that, 19 000 and 14 000 t organic fertilizer can be applied to the farmland, and 100% of organic fertilizer produced from dairy farms can be eliminated based on N and P application rules. A total of 1.40 and 2.53 million m³ waste water can be used as fertilizer in the dairy farm, which is 5.6 and 9.8 times the current amount of waste water based on N and P application rules, respectively. The implementation of comprehensive manure nutrient management plan can make full use of manure nutrient resources for crop growth and reduce the direct discharge of manure nutrient to the environment, thus ensuring long-term sustainable production in the mixed crop-dairy farms.

Keywords: manure; fertilizer; nutrients; manure nutrient supply; crop nutrient requirements