

京郊畜禽粪肥资源现状及其替代化肥潜力分析

贾伟¹, 李宇虹², 陈清^{1*}, David Chadwick²

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 英国 Bangor 大学环境自然资源和地理学院, 威尔士 LL57 2UW)

摘要: 随着都市型规模化养殖业快速发展, 畜禽粪尿废物大量排放因缺乏足够面积土地消纳所带来的环境压力很大, 而粪尿中的氮磷钾养分与化肥一样对作物同等重要, 如何合理利用这些废物资源决定了都市化农业的可持续发展。该文针对京郊养殖业和农用地面积现状, 结合调研、收集畜禽养分排泄系数和农田养分需求等参数, 估算京郊固液粪肥资源现状及其替代化肥的潜力。结果表明: 京郊畜禽固液粪便中 N、P、K 养分分别为 58.7×10^3 、 21.3×10^3 、 29.8×10^3 t, 其中固体粪便 N、P、K 养分分别为 43.1×10^3 、 20.3×10^3 和 19.7×10^3 t, 京郊畜禽固液粪便可分别满足农田 N、P、K 养分需求量的 99.3%、185.2%、62.7%。大部分区县粪肥中 P 养分产生量超过作物 P 需求量, 粮田秸秆还田可带入的 N、P、K 养分分别为 11.0×10^3 、 1.6×10^3 和 15.0×10^3 t, 情景分析表明在秸秆还田条件下, 按照磷素平衡原则估算本地区所能消纳的粪肥所带入 N、P 和 K 养分数量分别为 18.3×10^3 、 9.9×10^3 和 10.3×10^3 t, 同时需要补充 N、K 化肥分别为 29.8×10^3 和 22.2×10^3 t, 其余粪肥则需经过堆肥化处理并输往外地。经过堆肥处理, 固体粪肥可提供的 N、P、K 养分分别下降了 23%、11% 和 12%, 外输固体粪肥堆肥可进一步减少农田氮磷负荷以及可能的环境风险。

关键词: 粪便; 肥料; 养分; 规模化养殖; 作物养分需求量; 秸秆还田

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.08.019

中图分类号: X713; X705

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-08-0156-12

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)

0 引言

随着规模化、集约化和产业化程度显著提高, 中国畜牧业已从传统副业发展为农业主导产业^[1-4], 通过畜禽粪尿产生量的空间分布来看, 产业的集中度越来越高, 粪尿量最多的 10 个省份占到全国总量 60% 左右^[5-6], 此外城镇化发展拉动了畜牧业向大城市及其周边集中。这种局面导致产生的畜禽粪便中氮、磷养分远远超过了其周边农田承载标准, 过量或不合理的农田施用会引起 NP 养分损失, 导致包括温室气体排放、污染水体以及土壤质量退化等问题^[7-11]。欧盟如荷兰、比利时、丹麦等养殖业发达的地区都曾经出现畜禽粪污排放引起的环境问题, 不得不通过法律及环境管理措施规范畜禽养殖

场粪尿及废水的处理、处置与综合利用^[7,12]。

从循环利用角度考虑, 畜禽粪尿含有大量的氮磷钾素资源, 如果能够合理返还农田将减少大量的氮磷钾化肥^[13]。为了控制畜禽粪尿养分带来的污染, 国内外广泛采用了种养结合的方法, 将粪肥直接施用还田, 或者经过沼气工程、堆肥处理等措施后将其还田^[14-15]。在中国由于受运行成本和设备成本的限制, 常常选择直接施用的方法, 需肥量较大的蔬菜和果树是主要目标作物^[16-17]。通常来说, 减少粪肥污染、提高养分利用效率需要多个环节共同作用: 1) 采用平衡饲料管理减少排泄量^[18]; 2) 改善粪尿收集和固液分离方法, 减少污水排放, 提高循环比例^[19]; 3) 选择合理的贮藏方式, 减少养分损失^[20]; 4) 采用沼气厌氧消化可以产生能量并减少粪肥 N、P 养分损失^[21]; 5) 采用堆肥方式可以减少粪肥体积, 浓缩养分方便粪肥运输^[22]; 6) 施用粪肥时保持合理的粪肥和化肥比例和施用量, 减少土壤养分累积、避免淋洗或径流过程中养分损失^[15]。由于秸秆中含有大量 N、P、K 养分^[22], 不应忽视秸秆还田所带入养分数量对粪肥再利用的影响。

当前中国很多研究关注了畜禽粪肥中氮、磷等

收稿日期: 2013-12-06 修订日期: 2014-03-18

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划课题 (2012BAD14B04-2; 2012BAD15B01-4); 中英可持续农业创新协作网 the UK-China Sustainable Agriculture Innovation Network (SAIN)

作者简介: 贾伟 (1981—), 男, 山西临汾人, 博士生, 研究方向为有机肥与养分管理, 北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。

Email: jiawei711@126.com

*通信作者: 陈清 (1968—), 男, 山东威海人, 教授, 博士生导师, 研究方向为有机废物资源化利用, 北京 中国农业大学资源与环境学院, 100193。Email: qchen@cau.edu.cn

元素不合理利用引起的环境污染风险^[3,23-24]，特别在高畜禽养殖密度的区域，由于畜禽粪肥养分产生量超过农田消纳造成环境污染等问题。分析评价畜禽粪便可有效 N、P、K 养分量 and 作物 N、P、K 养分需求之间匹配关系是减少污染实现可持续农业的关键因素^[25]。北京市人口多土地少，集约化养殖业产生大量的畜禽粪便，如果不能合理还田会引起北京市严重的环境问题^[26]，本文定量估算北京市养殖场粪尿不同还田模式中有有效 N、P、K 数量，有利于制定畜禽粪尿处置和资源化过程中养分管理措施、可利用比例以及粪肥替代化肥利用潜力，这样不仅减少能源浪费、而且避免其随意排放对水体富营养化和温室气体产生的贡献。

1 材料与方法

1.1 畜禽粪便产生量及养分量

北京市畜禽数量数据来源于北京市统计年鉴^[27]，畜禽主要种类包括出栏猪、出栏肉牛、出栏蛋鸡、出栏鸭、出栏羊、存栏奶牛、存栏蛋鸡。畜禽固体粪便中的 N、P、K 养分浓度数据来自于 2012

年调研数据，在北京市选择 23 个猪场、7 个奶牛场、4 个肉牛场、3 个肉鸡场、8 个蛋鸡场、3 个羊场和 5 个鸭场进行采样，共获取 76 个固体粪肥样品，包括 46 个猪粪、7 个奶牛粪、4 个肉牛粪、3 个肉鸡粪、8 个蛋鸡粪、3 个羊粪和 5 个鸭粪。部分猪场分别获取了育肥猪、仔猪以及母猪的 3 种粪便，而其他畜禽养殖场取了一个有代表性的粪便混合样品，每个养殖场取至少 1 kg 代表性的粪便样品测定 N、P、K 浓度，测定方法按照有机肥行业标准（NY525-2002）进行，畜禽液体粪便养分浓度数据见表 1。畜禽饲养周期^[6,23,28-29]分别为：猪 180 d、肉牛 300 d、奶牛 365 d、羊 365 d、肉鸡 55 d、蛋鸡 365 d 和鸭 210 d。畜禽固体和液体粪便日排放量^[28,30-38]分别为：猪（2.44^[28,32-36,38]和 3.22 kg/d^[28,31-34,36]）、肉牛（18.0^[28,36]和 4.67 kg/d^[28,36]）、奶牛（36.6^[28,30,33]和 8.53 kg/d^[28]）、羊（2.00^[28,30,32-38]和 0.5^[28,34-36] kg/d）、肉鸡固体粪便的排放量（0.10 kg/d^[28,30,37]）、蛋鸡固体粪便的排放量（0.12 kg/d^[28,30,36]）和鸭固体粪便的排放量（0.13 kg/d^[28,30,35]）。

表 1 京郊主要动物固体和液体粪便鲜样养分浓度和含水率
Table 1 Moisture, N, P and K concentrations of fresh solid and liquid manure in Beijing suburb

(g·kg⁻¹)

种类 Species	项目 Items	固体粪便 Solid manure				液体粪便 Liquid manure			
		含水率 Moisture	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	含水率 Moisture	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K
猪 Pig	平均值 Mean	706	8.38	5.44	3.94	975 ^[39]	5.87 ^[40-43]	0.46 ^[40-43]	2.31 ^[40,42]
	范围 Range	527~811	4.97~15.17	2.96~9.81	1.37~10.71	739~998	1.88~18.43	0.01~0.89	1.14~4.26
	样本数 Samples	46	46	46	46	169	15	15	11
肉牛 Beef	平均值 Mean	801	5.19	1.79	2.1	928 ^[39]	5.86 ^[39]	0.2 ^[39]	8.8 ^[39]
	范围 Range	789~829	4.11~6.88	1.08~2.35	0.95~4.76	923~946	0.60~14.00	0.02~0.60	0.70~21.00
	样本数 Samples	4	4	4	4	53	82	20	20
奶牛 Cow	平均值 Mean	826	4.41	1.59	0.72	944 ^[39]	7.09 ^[44-45]	0.37 ^[45]	9.22 ^[39]
	范围 Range	814~838	3.19~4.92	1.32~1.87	0.48~0.86	921~995	4.3~11.2	0.33~0.39	0.50~21.00
	样本数 Samples	7	7	7	7	204	11	8	267
羊 Sheep	平均值 Mean	747	6.03	1.88	2.14	919 ^[39]	5.22 ^[46]	0.04 ^[46]	1.93 ^[46]
	范围 Range	718~777	5.32~6.74	1.78~1.97	1.54~2.74	916~921	3.52~6.92	0.01~0.07	0.67~2.95
	样本数 Samples	3	3	3	3	5	4	4	4
肉鸡 Broiler	平均值 Mean	745	8.88	3.91	8.13	-	-	-	-
	范围 Range	706~819	7.53~10.88	2.90~5.30	4.48~10.43	-	-	-	-
	样本数 Samples	3	3	3	3	-	-	-	-
鸭 Duck	平均值 Mean	729	6.28	3.4	3.67	-	-	-	-
	范围 Range	646~800	4.29~9.62	2.61~4.97	2.77~4.90	-	-	-	-
	样本数 Samples	5	5	5	5	-	-	-	-
蛋鸡 Layer	平均值 Mean	661	11.27	5.02	6.58	-	-	-	-
	范围 Range	406~777	3.84~27.39	1.62~10.32	2.74~15.38	-	-	-	-
	样本数 Samples	8	8	8	8	-	-	-	-

注：固体畜禽粪便数据来自于北京市养殖场采样测定结果；液体粪便养分数据来自于不同文献^[39-46]，家禽如肉鸡、蛋鸡、鸭本身只产生固体粪便，无家禽液体粪便数据。

Note: Data of solid manure were from the survey in intensive livestock farms of Beijing. Data of liquid manure were cited from different literatures. Poultry included broiler, layer, duck, only excretes faeces and no available data for liquid manure.

畜禽固体粪便产生量 (Y_{manure}) 采用公式 (1)^[1] 计算, 畜禽固体粪便 N 养分产生量 (N_{manure}) 采用公式 (2)^[1] 计算。

$$Y_{manure} = \sum_{i=1}^n Qd_i \cdot d_i \cdot m_i \tag{1}$$

$$N_{manure} = \sum_{i=1}^n Y_{manure_i} \cdot w_i \cdot 0.001 \tag{2}$$

式中: Y_{manure} 代表固体粪便产生量, 10^3 t, 鲜质量; n 代表畜禽种类数量; i 代表第 i 种类畜禽; Qd_i 代表第 i 种类畜禽数量, $\times 10^6$ 只 (头); d_i 代表第 i 种类畜禽每只 (头) 每日固粪便排放量参数, kg/d; m_i 代表第 i 种类畜禽饲养周期, d; N_{manure} 代表畜禽

固体废粪便的养分产生量, 10^3 t; Y_{manure_i} 代表第 i 种类畜禽固体粪便产生量, 10^3 t; w_i 代表第 i 种类畜禽固体粪便养分浓度, g/kg。

畜禽液体粪便产生量计算公式同固体粪便产生量公式。畜禽固体 P、K 和液体粪便 N、P、K 养分产生量计算公式同畜禽固体粪便 N 养分量计算公式。

1.2 农田作物养分需求量

果树产量、化肥施用量、粮食和蔬菜作物播种面积来自 2011 北京市统计年鉴^[27]。每 1 000 kg 粮食、菜田和果树作物经济产量所需要 N、P、K 养分量及其单位面积作物的 N、P、K 需求量数据见表 2。

表 2 京郊粮田、菜田和果树作物氮磷钾需求量

Table 2 Crop demand of N, P and K for cereal crop, vegetable crop and fruit trees in Beijing Suburbs

作物种类 Crop species		播种面积比例 ^[27] Proportion of planting area/%	作物产量 ^[47] Average crop yield/(t·hm ⁻²)	单位产量养分需求 ^[47-48] Crop nutrients demand per unit yield/(kg·t ⁻¹)			单位面积作物养分需求量 Crop nutrients demand per unit area/(kg·hm ⁻²)		
				N	P	K	N	P	K
粮食作物 Cereal crop	小麦 Wheat	28	5	41.4	7.0	33.6	207	35.0	168
	玉米 Maize	69	6	26.8	5.0	21.0	161	30.0	125
	大豆 Soybean	3	3	72	8.8	29.0	216	26.4	87.0
	加权平均值 Weighted average			35.2	5.7	24.8	176	31.3	136
蔬菜作物 Vegetable	大白菜 Cabbage	49	120	2.4	0.4	1.3	288	48.0	155
	番茄 Tomato	16	120	2.7	1.0	4.0	324	120	474
	黄瓜 Cucumber	10	120	4.0	1.0	2.9	480	120	350
	西瓜 Water melon	10	46	3.3	0.6	3.1	152	27.6	143
	萝卜 Carrot	6	55	2.8	0.6	3.4	154	32.0	187
	花椰菜 Cauliflower	4.5	28	9.3	1.2	8.8	260	33.6	246
	大葱 Spring onion	4.5	55	1.9	0.4	1.4	102	20.0	75.0
加权平均值 Weighted average			3.1	0.6	2.6	284	62.1	228	
果树作物 Fruit	桃 Peach	52	40	2.2	0.4	2.8	88.0	15.0	112
	梨 Pear	21	40	3.2	0.3	1.7	129	10.8	68.0
	苹果 Apple	14	60	2.3	0.3	2.8	138	18.0	168
	柿子 Sharon fruit	7	45	0.9	0.2	1.6	40.5	9.0	71.8
	葡萄 Grape	6	30	7.5	5.1	10.6	224	153	317
加权平均值 Weighted average			2.7	0.6	3.0	108	22.5	120	

注: 加权平均值根据播种面积所占比例计算。
Notes: The weighted value was calculated based on the proportion of planting area.

根据公式 (3)^[8,17] 计算每个区县粮食作物的 N 养分需求量

$$N_{crop} = \sum_{k=1}^h C_{area_k} \cdot R_{area_k} \tag{3}$$

式中: N_{crop} 代表粮食 N 需求量, 10^3 t; h 代表粮食作物种类数量; k 代表第 k 种类粮食作物; C_{area_k} 代表第 k 种类粮食作物播种面积, 10^6 hm²; R_{area_k} 代表第 k 种类粮食作物单位面积养分需求量, kg/hm²。

每个区县粮食作物的 P、K 和蔬菜作物的 N、P、K 养分需求量计算公式同上述粮食作物 N 养分需求量计算公式。

由于缺少北京市每个区县的果园播种面积, 根据公式 (4)^[48] 计算果树 N 养分需求量。

$$N_{fruit} = \sum_{m=1}^j Y_{yield_m} \cdot D_{yield_m} \tag{4}$$

式中: N_{fruit} 代表果树养分 N 需求量, 10^3 t; j 代表果

树作物种类数量； m 代表第 m 种类果树作物； Y_{yield_m} 代表第 m 种类果树作物经济产量， 10^6 t； D_{yield_m} 代表第 m 种类果树作物单位经济产量的养分需求量，kg/t。

北京市每个区县果树 P、K 养分需求量计算公式同果树 N 养分需求量公式。

表 3 2011 年北京市主要粮食作物秸秆数量及 N、P、K 养分含量
Table 3 Amount of straw and N, P, K content in main cereal crop of Beijing in 2011

作物 Crops	产量 Yield/ 10^3 t	谷草比 Ratio of straw to grain	粮食秸秆量 Amount of cereal crop straw/ 10^3 t	粮食秸秆养分质量分数 Cereal N, P, K concentration in straw/(g·kg ⁻¹)			粮食秸秆养分量 Amount of N, P, K contained in straw/ 10^3 t		
				N	P	K	N	P	K
冬小麦 Winter wheat	283.7	1.37	388.7	6.2	0.7	10.2	2.4	0.3	4.0
玉米 Maize	903.4	1.10	993.7	8.7	1.3	11.1	8.6	1.3	11.0
总量 Total amount	1187.1	-	1382.4	-	-	-	11.0	1.6	15.0

注：粮食秸秆养分质量分数是风干基数据。

Note: Cereal N, P, K concentration is calculated on the air-dried basis.

粮食作物秸秆产生量可基于作物产量和秸秆籽粒比参数进行计算^[48-49]。粮食作物秸秆产生量 ($Y_{residue}$) 根据公式 (5) 计算；粮食作物秸秆 N 养分量 ($N_{residue}$) 根据公式 (6) 进行计算。

$$Y_{residue} = \sum_{l=1}^p X_l \cdot k_l \quad (5)$$

$$N_{residue} = \sum_{l=1}^p Y_{residue_l} \cdot y_l \cdot 0.001 \quad (6)$$

式中： $Y_{residue}$ 代表粮食作物秸秆产生量， 10^3 t； p 代表粮食作物种类数量； l 代表第 l 种类粮食作物； x_l 代表不同粮食作物产量， 10^3 t； k_l 代表第 l 种类粮食秸秆籽粒比； $N_{residue}$ 代表秸秆 N 养分数量， 10^3 t； $Y_{residue_l}$ 代表第 l 种类粮食作物秸秆产生量， 10^3 t； y_l 代表第 l 种类粮食作物秸秆养分 N 质量分数，

1.3 粮食作物秸秆还田量

2011 年粮食作物产量的数据来自于北京市统计年鉴^[27]，秸秆籽粒比数据来自于苑亚茹^[28]，秸秆养分浓度数据来自于中国有机肥养分数据集^[39]（见表 3）。

g/kg。粮食作物秸秆 P、K 养分量计算公式同 N 养分量计算公式。

1.4 储藏、堆肥和沼气处理对粪肥物料 NPK 养分损失的定量

北京市堆肥厂以条垛和槽式工艺为主，本研究结合文献及工厂化堆肥条件下获取的 N、P、K 损失参数，用于估算粪肥堆肥处理后粪肥物料中的 N、P、K 数量。有关沼气过程中进料和出料的物料 N、P、K 养分损失比例研究很少，本文仅搜集到 3 篇文献参考，作为沼气过程 N、P、K 损失参数。大部分粪肥贮藏文献都是涉及气体（氨气、甲烷、氧化亚氮等）释放的研究，本文只关注储藏前后的氮、磷和钾养分的损失比例（表 4）。

表 4 文献报道的不同粪肥处理包括堆肥，沼气和储藏过程中 N、P、K 养分损失比例

Table 4 Proportions of N,P,K loss in composting, anaerobic digestion and storage referenced from related literatures %

养分损失 Nutrient loss	堆肥 ^[50-59] Composting			沼气 ^[60-62] Anaerobic digestion			储藏 ^[55,63-76] Storage		
	平均值 Mean	范围 Range	样本数 Sample	平均值 Mean	范围 Range	样本数 Sample	平均值 Mean	范围 Range	样本数 Sample
N 损失 N loss	30.7	7.0~55.9	44	9	5.9~12.2	5	37.8	10.0~69.0	41
P 损失 P loss	11.2	2.4~28.2	24	4.2	0~9.0	5	48.1	24.6~67.7	23
K 损失 K loss	18.7	7.0~35.0	21	4.3	2.0~6.0	3	43.3	18.0~75.0	23

1.5 情景分析设置

1.5.1 京郊畜禽粪尿还田养分数量分析

不同粪尿处理方式对可用于农田的养分数量有很大影响。北京地区目前多采用干清粪工艺，根据今后京郊粪尿的处理工艺和去向，设置如下情景：

情景 S1：固体粪便收集贮藏堆放后本地直接还田，液体粪便收集后直接排放；

情景 S2：固体粪便收集经贮藏堆放后利用，液体粪便收集后生成沼气后，其废物本地还田利用；

情景 S3：固体粪便收集后尽快经过堆肥加工为商品有机肥，在本地和周边外地利用，液体粪便收集后生成沼气后，其废物本地还田利用。

1.5.2 粪肥替代化肥资源潜力

农田的养分来源包括粪肥、化肥的施用和秸秆还田，而过量投入养分对农田土壤环境带来不利的影响。在 1.5.1 分析的基础上，分析农田消纳粪肥的情景包括是否考虑粮田秸秆养分还田（A1 情景：不还田，A2 情景：还田；见表 5），在此基础上，

粪肥消纳原则是根据作物所需的 50%氮素来自于粪肥^[77]和根据作物需磷量^[78]2 种模式确定。当投入含 1 kg P 的粪肥时,所带入的全氮和全钾数量分别为 1.85 和 1.05 kg。化肥补充施用原则为总养分需求数量减去粪肥提供的 N、P、K 养分,不足部分由化肥 N、P、K 补充。外运粪肥比例计算是根据总的粪肥养分产生量超出当地粪肥替代化肥量的部分与总粪肥养分产生量的比值。

根据秸秆还田/不还田下的不同粪肥推荐策略得到的农田消纳粪肥数量,计算比较不同有效粪肥资源供给情景下(S1、S2 和 S3)的粪肥外运比例。

表 5 秸秆还田/不还田下的不同粪肥推荐策略情景
Table 5 Different scenarios on manure recommended strategies considering straw incorporation

情景 Scenarios		情景描述 Description for scenarios
A1: 粮田 秸秆 不还 田	A11: 根据作物需氮量来决定粪肥施用	粮田秸秆不还田条件下,根据作物生长所需要的氮素推荐量 50%来自于粪肥氮来决定粪肥施用量
	A12: 根据作物需磷量来决定粪肥施用	粮田秸秆不还田条件下,根据作物生长的磷素吸收数量全部来自于粪肥来决定粪肥施用量
A2: 粮田 秸秆 还田	A11: 根据作物需氮量来决定粪肥施用	粮田秸秆还田条件下,根据作物生长所需要的氮素推荐量 50%来自于粪肥氮来决定粪肥施用量
	A12: 根据作物需磷量来决定粪肥施用	粮田秸秆还田条件下,根据作物生长的磷素吸收数量全部来自于粪肥来决定粪肥施用量

2 结果与分析

2.1 京郊畜禽固液粪便产生的 N、P、K 养分数量
2011 年北京市县域畜禽固液粪便产生总鲜质

表 6 北京不同区县畜禽固液粪便及其 N、P、K 养分数量、粮菜播种面积和果品产量和作物 N、P、K 养分需求量
Table 6 Amount of solid & liquid manure and its N, P, K, planting area of cereal and vegetable crop, fruit yield and total crop N, P, K requirement at different counties in Beijing

区县 District/County	固液粪便量及养分数量(鲜基) Solid & liquid manure and total nutrient amount (Fresh basis) / (10 ³ t)				播种面积 Planting area/(10 ³ hm ²)		果品产量 Fruit yield / (10 ³ t)	作物养分需求 Crop nutrients requirement/(10 ³ t)		
	Manure	N	P	K	粮田 Cereal	蔬菜 Vegetable		N	P	K
北京市 Beijing	9 029.5(71.4%)	58.7(73.4%)	21.3(95.0%)	29.8(65.9%)	209.4	66.8	1256.1	59.1	11.5	47.5
顺义区 Shunyi	1 892.7(63.0%)	12.2(65.9%)	4.3(93.2%)	5.9(60.1%)	36.3	10.3	176.2	9.8	2.2	7.8
大兴区 Daxing	1 714.4(72.3%)	10.6(72.9%)	3.9(95.1%)	5.2(63.8%)	37.7	19.1	330.6	12.9	2.0	10.5
通州区 Tongzhou	1 004.9(72.9%)	6.1(72.7%)	2.2(95.0%)	3(60.7%)	33.9	15.8	98.1	10.7	1.1	8.5
房山区 Fangshan	997.9(71.3%)	6.6(74.0%)	2.6(95.3%)	3.3(70.9%)	27.7	4.9	80.4	6.5	1.3	5.1
密云县 Miyun	961.9(77.6%)	6.6(79.7%)	2.4(96.4%)	3.7(72.1%)	19.4	4.7	82.9	5.0	1.5	4.0
延庆县 Yanqing	729.7(80.7%)	4.9(81.7%)	1.8(96.9%)	2.7(68.4%)	22.5	2.5	34.5	4.7	1.0	3.7
平谷区 Pinggu	720.6(66.2%)	5.3(73.4%)	2(95%)	2.7(74.9%)	12.9	5.0	353.4	4.6	1.1	4.0
怀柔区 Huairou	426.9(77.2%)	2.7(77.6%)	1(95.9%)	1.5(67.3%)	10.3	1.3	38.9	2.3	0.6	1.8
昌平区 Changping	370.9(73.2%)	2.4(73.8%)	0.8(95.1%)	1.2(59.1%)	5.7	1.6	48.3	1.6	0.4	1.3
其他区县 Others	209.7(75.9%)	1.3(75.1%)	0.4(95.3%)	0.7(59.1%)	3.1	1.7	12.7	1.0	0.3	0.8

注:作物养分需求包括粮田,蔬菜和果树;括号中数字为固体粪便(养分)所占总固液粪便(养分)的比例。其他区县:包括海淀区、朝阳区、门头沟区和丰台区。

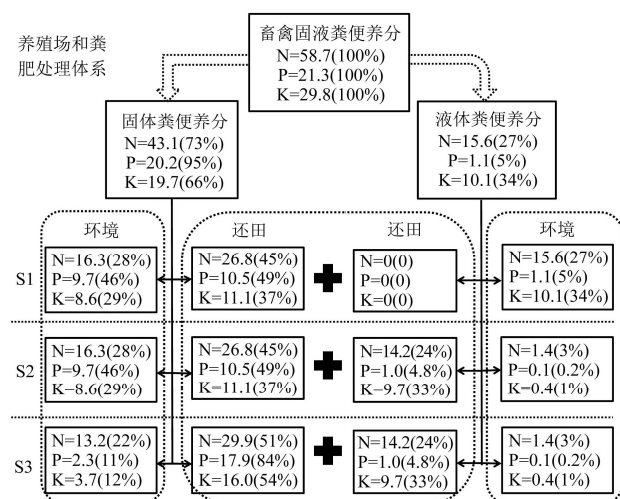
Note: Crop nutrient requirements include nutrients demand of cereal crop, vegetable crop and fruit trees. All values in all brackets mean the proportions of nutrients in solid manure of total nutrient in liquid and solid manure excretion. Other districts include Haidian, Chaoyang, Mentougou, and Fengtai District.

量为 9029.5×10³t, 主要分布在顺义、大兴、通州、房山、密云以及延庆,固液粪便产生量分别占北京市总量的 21%、19%、11%、11%、11%和 8%,以顺义、大兴和通州为主,分别为 1892.7×10³、1714.4×10³和 1004.9×10³t(表 6)。北京市畜禽总固液粪便 N、P、K 养分产生量为 58.7×10³、21.3×10³和 29.8×10³t,顺义的 N、P、K 产生量分别为 12.2×10³、4.3×10³t 和 5.9×10³t,大兴的 N、P、K 产生量分别为 10.6×10³、3.9×10³和 5.2×10³t。从空间分布来看,顺义、大兴、通州、房山、密云和延庆是主要的畜禽粪肥养分产生的区域。

根据 2011 年北京市各区县粮田和菜田播种面积、水果产量的数据,以及中等肥力和中等产量下的粮食作物和蔬菜作物 N、P、K 养分需求量,估算了京郊粮田、菜田和果园适宜 N、P、K 养分需求量分别为 59.1×10³、11.5×10³、和 47.5×10³t。从县域 N、P、K 养分需求量来看,处于前 3 位分别为顺义、大兴和通州,与畜禽固液粪便产生的顺序一致(表 6)。在粮田秸秆不还田和不施用化肥的条件下,在小部分区县中,来自畜禽固液粪便 N 素养分供给量尚未超过粮菜果 N 养分需求量,而大部分区县来自固液粪便的 P 素盈余比较明显,全市畜禽固液粪便 P 养分供给量都超过了粮菜田 P 养分需求量,这说明畜禽固液粪便 P 必须部分外输到其他有机肥资源不足地区,才能从长期角度来解决京郊农田土壤 P 素负荷过量问题,但对于京郊农业生产来说 N、K 养分还需要来自化肥补充。

2.2 合理施用粪肥情景分析

当前大多数养殖场采用固体粪便储藏后施用、液体粪便直接排放或无利用的处理方式(情景S1),全市粪便可提供的N、P、K分别为 26.8×10^3 、 10.5×10^3 和 11.1×10^3 t的养分还田。在情景S1的基础上,考虑到液体粪便的农用(情景S2),则可供作物利用的粪肥N、P、K分别为 41.0×10^3 、 11.5×10^3 和 20.8×10^3 t。考虑到京郊养殖密度很大,必须采用商业化堆肥处理方法提高运输性能,因而情景S3是在情景S2的基础上考虑堆肥及沼气发酵后固液粪肥资源的利用,但情景S3中经过堆肥过程后N素养分损失较大,而P、K养分则得以保存。扣除N、P、K损失,情景S3中N、P、K养分供京郊作物利用分别为 44.1×10^3 、 18.9×10^3 和 25.7×10^3 t(图1)。从养分损失角度来看,情景S1中55%、51%和63%的固液粪肥N、P、K养分进入环境。情景S2在S1基础上,沼气化利用液体粪便可减少总养分损失,结果是固液粪肥中进入环境的N、P、K养分分别为31%、46.2%和29.4%。情景S3固体粪肥经过堆肥可保存更多P、K养分,因此,S3中固液粪肥N、P、K分别有25%、11.2%和13%损失进入环境。从减少区域粪肥养分损失角度来看,情景S3优于其他2个情景。并且情景S3还田养分比例最高。



注:所有括号中百分数都为养分数量占起始总粪尿养分的比例。单位 10^3 t。

Note: All values in all brackets represented as the percentage of total manure nutrients excretion. Unit: 10^3 t.

图1 畜禽固液粪肥养分经不同粪肥处理后可用于农田的养分数量

Fig.1 Amount of nutrients in solid and liquid manure after different manure treatments in different scenarios

2.3 粪肥替代化肥N、P、K养分数量情景分析

2011年北京市粮菜果作物N、P、K总需求量为

118.1×10^3 t, N、P、K分别为 59.1×10^3 、 11.5×10^3 和 47.5×10^3 t。粮田秸秆还田可以提供的总养分分为 27.6×10^3 t,其中N、P、K分别为 11.0×10^3 、 1.6×10^3 和 15.0×10^3 t。在考虑粮田作物秸秆还田条件下,粮菜果作物养分总需求量是 90.5×10^3 t,其中N、P、K分别为 48.1×10^3 、 9.9×10^3 和 32.5×10^3 t(表7)。在4个情景中,分析了粮田秸秆还田和不还田条件下,粪肥养分替代化肥数量和所需补充的化肥养分施用量。秸秆不还田或秸秆还田下,情景A11和A21根据欧盟有机肥替代原则^[77]来估算北京市农田作物粪肥养分供应量,结果表明如果按此原则进行化肥替代,粪肥P素将会超过作物需求量 4.5×10^3 和 3.0×10^3 t。因此,仅需化肥N和K就可以满足作物需要。情景A12和A22是根据作物需磷量进行粪肥施用。因此,在这种施用原则下,不会引起P盈余。作物N和K需求仍需通过化肥补充施用来满足。粪肥替代化肥潜力分析表明,北京市当前粪肥产生量盈余量很大,需要通过加工商品有机肥的方式进行转移。同时应该大幅度减少化肥施用量。对有效粪肥资源供给情景(S1、S2和S3)和粪肥替代化肥情景(A11、A12、A21、A22)外运粪肥比例综合分析表明,S1情景相比S2和S3情景,有较少外运粪肥比例。这是由于S1情景下,养殖场液体粪便未收集利用。如考虑粪肥实际产生养分全部利用(且无养分损失),相比S1、S2和S3情景,其有最高外运粪肥养分比例。

3 讨论

3.1 处理方式对粪肥农用比例影响

大城市周边区域过高的畜禽养殖密度导致缺少足够土地消纳粪肥N、P、K养分,控制区域畜禽密度、扩大畜产品进口是减少养分盈余的关键措施,然而大城市人口高度集中、经济高度发达、对畜禽产品需求大,直接降低畜禽养殖会引起一些经济和社会后果^[79]。固体粪便直接还田常会引起运输成本过高,臭味过大等问题,因此在畜禽养殖高密度区域,商业化粪肥处理可以提高固液粪肥资源利用比例^[11]。尽管堆肥过程中氮素损失很高^[21,80],但可以减少固体粪肥体积和含水量,减少运输成本。液体粪便直接排放造成养分损失和环境问题,通过沼气化利用液体粪便可减少上述问题,但同时需要加强沼渣沼液的利用^[80]。因此,高畜禽密度养殖区域需要根据实际情况,选择合适粪肥处理途径,严格执行干清粪工艺,重点改进废水碳浓度低导致厌氧消化产沼气效率不高等问题^[81]。

表 7 粮食作物秸秆不还田或还田条件下粪肥还田养分量以及需要补充化肥数量情景分析

Table 7 Scenarios analysis on amount of manure nutrients applied to arable land and related supplemental chemical fertilizers considering cereal straw incorporation or not

项目 Items		A1 不还田 No straw incorporation						A2 还田 Straw incorporation					
		情景 Scenario A11			情景 Scenario A12			情景 Scenario A21			情景 Scenario A22		
		N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
作物养分需求 Crop nutrient demand/10 ³ t		59.1	11.5	47.5	59.1	11.5	47.5	48.1	9.9	32.5	48.1	9.9	32.5
粪肥替代化肥养分 Fertilizer substituted by manure nutrient/10 ³ t		29.5	15.9	16.7	21.3	11.5	12	24	12.9	13.5	18.3	9.9	10.3
化肥补充作物养分 Chemical fertilizer demand/10 ³ t		29.6	-4.5	30.8	37.8	0	35.5	24.1	-3	19	29.8	0	22.2
外运粪肥 养分比例 Proportion of transported manure/%	粪肥实际产生 Manure nutrient production	50	25	44	64	46	60	59	39	55	69	54	65
	S1	0	0	0	21	0	0	10	0	0	32	6	7
	S2	28	0	20	48	0	42	41	0	35	55	14	50
	S3	32	16	35	51	39	53	44	32	47	58	48	60

粪便储藏过程 P、K 养分损失比例都在 40% 以上，大于堆肥和沼气过程中 P、K 养分损失比例，此外粪便堆肥过程 N 养分损失比例大于沼气过程。常志州等^[82]报道，畜禽粪便储藏过程氮素损失变异较大 0.1%~60.0%^[82-83]。而国内对粪便储藏过程 P 和 K 损失的研究未见报道。畜禽粪便堆肥和厌氧发酵氮素损失范围分别为 8.8%~58.0%、1.2%~12.2%^[82]。国内对于沼气过程 N、P 养分损失报道较少^[61-62]，特别是 K 养分损失未见报道。

空间分析畜禽粪便排放和作物养分需求平衡关系表明应采取区域分区治理和区域间协同管理的原则，促进粪肥 N、P、K 利用并控制化肥施用。以 N 素为例，有些区域畜禽固液粪便 N 已经超过农田作物 N 素需求量，但是对于固液粪便 N 素不能满足作物 N 素需求的区域，仍需补充氮肥。实现农田化肥 N 的控制施用，同时考虑最大化利用粪肥中的 N 素养分。在情景 S2 中，考虑畜禽尿液沼气化处理后还田，可以提高北京市畜禽粪便 N 养分利用。从 K 素的角度分析，当前北京市总的畜禽粪便 K 不能满足农田作物 K 养分需求量（表 6）。因此各个区县尚需增加 K 肥的施用。另外，根据不同区域农田 N、P、K 养分需求，各个区县需要控制区域畜禽生产规模^[26]。

3.2 以 P 素投入为控制目标的粪肥利用对策

北京市大部分区县固液粪便 P 养分产生已经超过了农田作物 P 养分需求，马林等^[84]研究认为北京地区人畜粪尿和生活垃圾等废弃物产生的养分，如全部在本区域返还农田存在很大环境风险。在情景分析中，根据欧盟有机肥替代原则^[77]，粪肥 P 素将会超过作物需求量，因此北京市农田 P 的施用应严格控制 P 肥投入，按照作物带走量施用粪肥 P^[78]，

可以减少农田磷素累积和磷环境风险，提高粪肥 P 利用率。综上，粪肥 P 农田利用应以区域间协同管理为原则。解决对策是环北京都市圈如河北、山东、河南应引进消纳北京市有机废弃物养分以保护环境。因此，这些多余的有机养分需以合理的方式，如商品堆肥从北京市输出，并控制外部有机肥输入北京^[85]。商品堆肥可以提高粪肥产品质量（如有机质含量、C/P、C/N 和稳定性）和其养分有效性^[86]。控制畜禽养殖粪尿中的 P 排放，合理利用和处理粪尿 P^[87]，提高农田粪肥养分资源利用比例和替代化肥^[88]。

3.3 不确定性因素分析

本研究的畜禽固液粪便养分产生以及作物需求基于统计数据和文献参数等，其不确定性更多来自于数据误差和所用参数的不确定性。统计数据与真实动物数量之间的差别有时会很大^[89]，本研究采用的畜禽存栏出栏数据来自北京统计年鉴，根据畜禽的生长周期和出栏时间对统计数据进行分析处理，一定程度上可减少误差，但这种处理并不能完全消除统计数据的不确定性。排泄量参数（其中固体粪便养分浓度来自于北京市实际测定数据）和作物养分需求参数主要来源于代表性文献。即使获取和采用北京本地的畜禽排放量参数和作物需求量数据，然而，由于受到饲料、养殖模式和技术、畜禽种类、作物种类、种植模式以及管理措施等诸多因素影响，相应估算结果仍可能会存在误差^[8,90]。

在本研究中，对北京市有代表性的规模化养殖场进行了固体粪便采样并进行了养分浓度分析。采样所选的不同种类畜禽养殖场数量，依据当前北京市不同种类畜禽的数量比例进行了分配，这样采样获得结果可代表当前北京市畜禽养殖场粪便养分

浓度现状。畜禽的液体粪便排泄主要来自猪牛羊等动物。目前,有少量文献在实验室层面部分报道奶牛、猪和羊的液体粪便中 N、P、K 数据结果,而奶牛液体粪便 K 的数据以及肉牛液体粪便 N、P、K 养分数据未发现。考虑畜禽固液粪便养分计算方法的需要,以及本地数据和当前文献中液体粪便养分数据的缺乏,需对北京市规模化养殖场畜禽液体粪便养分含量展开调研工作。

4 结 论

2011 年北京市畜禽固液粪便中 N、P、K 总养分产生量达到了 109.8×10^3 t, 液体粪便及其经沼气化处理后的沼渣沼液含有 N、K 养分 14.2×10^3 和 9.7×10^3 t, 其直接排放会引起养分损失和环境问题。北京市区域畜禽固液粪便, 分别经堆肥和沼气处理后, 有效供应粪肥 N、P、K 养分分别为 44.1×10^3 、 18.9×10^3 、 25.7×10^3 t。分析表明, 北京大部分区县固液粪便 P 的产生量已经超过了农作物对 P 的需求量。因此, 在控制化肥 P 用量的同时, 北京市需按照作物需磷量施用畜禽粪肥 P, 以保证粪肥养分替代化肥有效施用数量, 并同时避免引起农田高 P 载荷的环境问题, 部分区县超出农作物养分需求的多余畜禽粪肥 P 养分, 可以通过固体粪便加工商品有机肥的方式输送到养分亏缺的区域。秸秆还田情景下, 最高有 54% 粪肥磷需外运。此外, 应提倡区域协作, 与其由北京向外地运肥, 不如由外地向北京供应畜禽产品。

[参 考 文 献]

- [1] Wang Fanghao, Dou Zhengxia, Ma Lin, et al. Nitrogen mass flow in China's animal production system and environmental implications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(5): 1537—1544.
- [2] Zheng Chaohui, Liu Yi, Bluemling Bettina et al. Modeling the environmental behavior and performance of livestock farmers in China: An ABM approach[J]. *Agricultural Systems*, 2013, 122(11): 60—72.
- [3] 高懋芳, 邱建军, 李长生, 等. 应用 Manure-DNDC 模型模拟畜禽养殖氮素污染[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(9): 183—189.
Gao Maofang, Qiu Jianjun, Li Changsheng, et al. Modelling nitrogen pollution from livestock breeding using Manure-DNDC model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(9): 183—189. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王济民, 谢双红, 姚理. 中国畜牧业发展阶段特征与制约因素及其对策[J]. *中国家禽*, 2006, 28(8): 6—11.
- [5] Fischer G, Winiwarter W, Cao G, et al. Implications of population growth and urbanization on agricultural risks in China[J]. *Population and Environment*, 2012, 33(2/3): 243—258.
- [6] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(5): 614—617.
Wang Fanghao, Ma Wenqi, Dou Zhengxia, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5): 614—617. (in Chinese with English abstract)
- [7] Oenema O. Governmental policies and measures regulating nitrogen and phosphorus from animal manure in European agriculture[J]. *Journal of Animal Science*, 2004, 82(13 suppl): 196—206.
- [8] Ouyang Wei, Hao Fanghua, Wei Xingfeng, et al. Spatial and temporal trend of Chinese manure nutrient pollution and assimilation capacity of cropland and grassland[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(7): 5036—5046.
- [9] Petersen S O, Sommer S G, Béline F, et al. Recycling of livestock manure in a whole-farm perspective[J]. *Livestock Science*, 2007, 112(3): 180—191.
- [10] Rufino M C, Dury J, Tittonell P, et al. Competing use of organic resources, village-level interactions between farm types and climate variability in a communal area of NE Zimbabwe[J]. *Agricultural Systems*, 2011, 104(2): 175—190.
- [11] Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, et al. *Livestock's long shadow*[M]. FAO Rome, 2006.
- [12] Tamminga S. Pollution due to nutrient losses and its control in European animal production[J]. *Livestock Production Science*, 2003, 84(2): 101—111.
- [13] Yang H S. Resource management, soil fertility and sustainable crop production: Experiences of China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 116(1): 27—33.
- [14] Lemaire G, Franzluebbers A, Carvalho P C d F, et al. Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.1008.1009>.
- [15] Nicholson F A, Bhogal A, Chadwick, D et al. An enhanced software tool to support better use of manure nutrients: MANNER-NPK[J]. *Soil Use and Management*, 2013: doi: 10.1111/sum.12078.
- [16] Burton C H. Reconciling the new demands for food protection with environmental needs in the management of livestock wastes[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22): 5399—5405.
- [17] Yan Zhengjuan, Liu Pengpeng, Li Yuhong, 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—989.
- [18] Jørgensen H, Prapasongsa T, Poulsen H D. Quantification of excretions of dry matter, nitrogen, phosphorus and carbon in growing pigs fed regional diets[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2013, 4(1): 42.
- [19] Diogo R V C, Schlecht E, Buerkert A et al. Increasing nutrient use efficiency through improved feeding and manure management in urban and peri-urban livestock

- units of a West African city: A scenario analysis[J]. *Agricultural Systems*, 2013, 114(1): 64–72.
- [20] Shah G M, Groot J C J, Oenema O, et al. Covered storage reduces losses and improves crop utilisation of nitrogen from solid cattle manure[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94(2/3): 299–312.
- [21] Westerman P, Bicudo J. Management considerations for organic waste use in agriculture[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(2): 215–221.
- [22] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5): 526–535.
- Pan Jianling, Dai Wanan, Shang Zhanhuan, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5): 526–535. (in Chinese with English abstract)
- [23] 马林, 王方浩, 马文奇, 等. 中国东北地区中长期畜禽粪尿资源与污染潜势估算[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 170–174.
- Ma Lin, Wang Fanghao, Ma Wenqi, et al. Assessments of the production of animal manure and its contribution to eutrophication in Northeast China for middle and long period[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(8): 170–174. (in Chinese with English abstract)
- [24] 阎波杰, 赵春江, 潘瑜春, 等. 大兴区农用地畜禽粪便氮负荷估算及污染风险评价[J]. *环境科学*, 2010, 31(2): 437–443.
- Yan Bojie, Zhao Chunjiang, Pan Yuchun, et al. Estimation of livestock manure nitrogen load and pollution risk evaluation of farmland in Daxing district[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(2): 437–443. (in Chinese with English abstract)
- [25] Sims J, Ma L, Oenema O, et al. Advances and challenges for nutrient management in China in the 21st century[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 947–950.
- [26] 李帷, 李艳霞, 杨明, 等. 北京市畜禽养殖的空间分布特征及其粪便耕地施用的可达性[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(5): 746–755.
- Li Wei, Li Yanxia, Yang Ming, et al. Spatial distribution of livestock and poultry production and land application accessibility of animal manure in Beijing[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(5): 746–755. (in Chinese with English abstract)
- [27] 北京市统计局. 北京市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [28] 苑亚茹. 我国有机废物的时空分布及农用现状[D]. 北京: 中国农业大学, 2008.
- Yuan Yaru. Study on the Temporal and Spatial Distribution of Organic Wastes and the Utilization in Farmland in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [29] 耿维, 胡林, 崔建宇, 等. 中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 171–179.
- Geng Wei, Hu Lin, Cui Jianyu, et al. Biogas energy potential for livestock manure and gross control of animal feeding in region level of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(1): 171–179. (in Chinese with English abstract)
- [30] Liang Long, Lal Rattan, Du Zhangliu et al. Estimation of nitrous oxide and methane emission from livestock of urban agriculture in Beijing[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 170(4): 28–35.
- [31] 刘培芳, 陈振楼, 许世远, 等. 长江三角洲城郊畜禽粪便的污染负荷及其防治对策[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, 11(5): 456–460.
- Liu Peifang, Chen Zhenlou, Xu Shiyuan, et al. Waste loading and treatment strategies on the excreta of domestic animals in the Yangtze delta[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11(5): 456–460. (in Chinese)
- [32] 彭里, 王定勇. 重庆市畜禽粪便年排放量的估算研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 288–292.
- Peng Li, Wang Dingyong. Estimation of annual quantity of total excretion from livestock and poultry in Chongqing Municipality[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2004, 20(1): 288–292. (in Chinese with English abstract)
- [33] 沈根祥, 汪雅谷, 袁大伟. 上海市郊农田畜禽粪便负荷量及其警报与分级[J]. *上海农业学报*, 1994, 10(S1): 6–11.
- Shen Genxiang, Wang Zhigu, Yuan Dawei. Loading amounts of animal feces and their alarming values and classification grades in Shanghai suburbs[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 1994, 10(S1): 6–11. (in Chinese with English abstract)
- [34] 王新谋. 家畜粪便学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999.
- [35] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放时空变化特征及其对农业面源污染的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005.
- Wu Shuxia. The Spatial and Temporal Change of Nitrogen and Phosphorus Produced by Livestock and Poultry and their Effects on Agricultural Non-point Source Pollution in China[D]. Beijing: Chinese Agriculture Academy of Sciences, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [36] 杨晓春, 田娟. 银川市规模化畜禽养殖业污染情况及其防治对策[J]. *宁夏农林科技*, 2006, (5): 71–72.
- Yang Xiaochun, Tian Juan. The status of intensive livestock farming pollution and its countermeasures in Yinchuan[J]. *Ninxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2006, (5): 71–72. (in Chinese with English abstract)
- [37] 张无敌, 胡云. 云南省农村有机废物资源量及其沼气潜力的概算研究[J]. *云南环境科学*, 1997, 16(3): 14–17.
- Zhang Wudi, Hu Yun. The estimation for resources and its biogas potentiality of rural organic wastes in Yunnan[J]. *Yunnan Environmental Science*, 1997, 16(3): 14–17. (in Chinese with English abstract)
- [38] 张玉珍, 洪华生, 曾悦, 等. 九龙江流域畜禽养殖业的生态环境问题及防治对策探讨[J]. *重庆环境科学*,

- 2003, 25(7): 29—34.
- Zhang Yuzhen, Hong Huasheng, Zeng Yue, et al. The environmental problems of livestock raising and its countermeasures in Jiulongjing watershed[J]. Chongqing Environment Science, 2003, 25(7): 29—31. (in Chinese with English abstract)
- [39] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分数据集[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.
- [40] 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 Dejie, Wu Huashan, Ma Yan, et al. Monitoring of the amount of pig manure and urine in different swineries[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Science, 2011, 27(3): 516—522. (in Chinese with English Abstract)
- [41] 王晋虎. 星云湖流域畜禽养殖污染特征及其定量估算研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- Wang Jinhu. The Research of Xingyun Lake Vellay Raising Livestock Pollution Characters and Quantitative Estimation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [42] 杨增玲, 韩鲁佳, 刘依, 等. 基于摄入养分含量预测猪新鲜粪便肥料成分含量的试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 278—283.
- Yang Zengling, Han Lujia, Liu Yi et al. Experimental study on estimating fertilizer value of raw swine slurries basde on nutrients intake[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(1): 278—283. (in Chinese with English abstract)
- [43] 张玲清, 田宗祥. 规模化养猪场粪尿的氮, 磷排泄量调查[J]. 畜牧与兽医, 2009, (9): 48—50.
- Zhang Lingqing, Tian Zongxiang. Investigation on N&P excretion contained in manure and urine from intensive pig farm[J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2009, 41(9): 48—50. (in Chinese with English abstract)
- [44] 娜仁花, 董红敏. 日粮类型对奶牛粪尿特性及氮排放的影响[J]. 畜牧与兽医, 2012, 44(5): 26—30.
- Na Renhua, Dong Hongmin. Effects of dietary categories on feces/urine features and nitrogen emission in dairy cows[J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2012, 44(5): 26—30. (in Chinese with English Abstract)
- [45] 朱宏鹄, 常志州, 叶小梅, 等. 太湖地区规模奶牛场粪尿年产生量估算[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(3): 517—521.
- Zhu Honghu, Chang Zhizhou, Ye Xiaomei, et al. Estimate of annual excretion in a large-scale cattle farm in Taihu district[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Science, 2010, 26(3): 517—521. (in Chinese with English abstract)
- [46] 邹德强, 文勇立, 李璐, 等. 简阳大耳山羊粪尿养分测定[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2013, 39(1): 8—11.
- Zou Deqiang, Wen Yongli, Li Lu et al. Nutrient measurement of the droppings and urine of Jianyang big-eared goats[J]. Journal of Southwest University for Nationalities: Natural Science Edition, 2013, 39(1): 8—11. (in Chinese with English abstract)
- [47] 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.
- [48] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入, 输出与平衡[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4207—4229.
- Li Shutian, Jin Jiyun. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4207—4229 (in Chinese with English abstract)
- [49] Liu H, Jiang G, Zhuang H, et al. Distribution, utilization structure and potential of biomass resources in rural China: With special references of crop residues[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(5): 1402—1418.
- [50] Eghball B, Power J F, Gilley J E, et al. Nutrient, carbon, and mass loss during composting of beef cattle feedlot manure[J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26(1): 189—193.
- [51] Fukumoto Y, Suzuki K, Kuroda K, et al. Effects of struvite formation and nitrification promotion on nitrogenous emissions such as NH_3 , N_2O and NO during swine manure composting[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(2): 1468—1474.
- [52] Luebbe M, Erickson G, Klopfenstein T, et al. Composting or stockpiling of feedlot manure in Nebraska: Nutrient concentration and mass balance[J]. The Professional Animal Scientist, 2011, 27(2): 83—91.
- [53] Michel Jr F C, Pecchia J A, Rigot J, et al. Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw[J]. Compost Science and Utilization, 2004, 12(4): 323—334.
- [54] Parkinson R, Gibbs P, Burchett S, et al. Effect of turning regime and seasonal weather conditions on nitrogen and phosphorus losses during aerobic composting of cattle manure[J]. Bioresource Technology, 2004, 91(2): 171—178.
- [55] Tran M, Vu T, Sommer S G et al. Nitrogen turnover and loss during storage of slurry and composting of solid manure under typical Vietnamese farming conditions[J]. Journal of Agricultural Science-London, 2011, 149(3): 285.
- [56] 罗一鸣, 李国学, Frank Schuchardt, 等. 过磷酸钙添加剂对猪粪堆肥温室气体和氨气减排的作用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 235—242.
- Luo Yiming, Li Guoxue, Frank Schuchardt, et al. Effects of additive superphosphate on NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during pig manure composting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(22): 235—242. (in Chinese with English abstract).
- [57] 魏宗强, 李吉进, 吴绍华. 露天鸡粪好氧堆肥氮素的径流及淋洗损失[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 44—47.
- Wei Zongqiang, Li Jijin, Wu Shaohua. Nitrogen Loss in Chicken Manure Compost through Runoff and Leaching[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(2): 44—47. (in Chinese with English abstract).
- [58] 魏宗强, 罗一鸣, 吴绍华, 等. 添加沸石对鸡粪高温堆肥磷钾径流及淋洗损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 31(12): 2486—2492.
- Wei Zongqiang, Luo Yiming, Wu Shaohua, et al. Effects of zeolite addition on the loss of phosphorus and potassium through runoff and leaching in poultry manure composting[J]. Journal of Agro-Environment Science,

- 2013, 31(12): 2486—2492. (in Chinese with English abstract)
- [59] 杨宇, 魏源送, 刘俊新. 镁盐添加对猪粪堆肥过程中氮, 磷养分保留的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2672—2677.
- Yang Yu, Wei Yuansong, Liu Junxin. Effect of magnesium salt addition on nutrients conservation during swine manure composting[J]. Environmental Science, 2008, 29(9): 2672—2677. (in Chinese with English abstract)
- [60] Schievano A, D'Imporzano G, Salati S, et al. On-field study of anaerobic digestion full-scale plants (Part I): An on-field methodology to determine mass, carbon and nutrients balance[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(17): 7737—7744.
- [61] 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)
- [62] 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)
- [63] Dewes T. Zusammensetzung und Eigenschaften von Sickerwasser aus Stallmiststapeln[J]. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 1997, 160(1): 97—101.
- [64] Dong Hongmin, Zhu Zhiping, Zhou Zhongkai, et al. Greenhouse gas emissions from swine manure stored at different stack heights[J]. Animal Feed Science and Technology, 2011, 166/167: 557—561.
- [65] Hassouna M, Espagnol S, Robin P, et al. Monitoring NH_3 , N_2O , CO_2 and CH_4 emissions during pig solid manure storage-effect of turning[J]. Compost Science & Utilization, 2008, 16(4): 267—274.
- [66] Külling D, Dohme F, Menzi H, et al. Methane emissions of differently fed dairy cows and corresponding methane and nitrogen emissions from their manure during storage[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2002, 79(2): 129—150.
- [67] Külling D, Menzi H, Kröber T, et al. Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane from different types of dairy manure during storage as affected by dietary protein content[J]. The Journal of Agricultural Science, 2001, 137(02): 235—250.
- [68] Petersen S O, Lind A-M, Sommer S G. Nitrogen and organic matter losses during storage of cattle and pig manure[J]. The Journal of Agricultural Science, 1998, 130(1): 69—79.
- [69] Rigolot C, Espagnol S, Robin P, et al. Modelling of manure production by pigs and NH_3 , N_2O and CH_4 emissions. Part II: effect of animal housing, manure storage and treatment practices[J]. Animal, 2010, 4(08): 1413—1424.
- [70] Shah G, Groot J, Oenema O, et al. Covered storage reduces losses and improves crop utilisation of nitrogen from solid cattle manure[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 94(2-3): 299—312.
- [71] Thomsen I K. C and N transformations in ^{15}N cross-labelled solid ruminant manure during anaerobic and aerobic storage[J]. Bioresource Technology, 2000, 72(3): 267—274.
- [72] Titttonell P, Rufino M C, Janssen B H, et al. Carbon and nutrient losses during manure storage under traditional and improved practices in smallholder crop-livestock systems—evidence from Kenya[J]. Plant and Soil, 2010, 328(1-2): 253—269.
- [73] VanderZaag A, Gordon R, Jamieson R, et al. Effects of winter storage conditions and subsequent agitation on gaseous emissions from liquid dairy manure[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2010, 90(1): 229—239.
- [74] Wolter M, Prayitno S, Schuchardt F. Comparison of greenhouse gas emissions from solid pig manure during storage versus during composting with respect to different dry matter contents[J]. Landbauforschung Volkenrode, 2002, 52(3): 167—174.
- [75] Wolter M, Prayitno S, Schuchardt F. Greenhouse gas emission during storage of pig manure on a pilot scale[J]. Bioresource Technology, 2004, 95(3): 235—244.
- [76] 纪术远. 不同处理对自然堆储牛粪腐熟及养分流失规律的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2012.
- Ji Shuyuan. Effect on Different Treatments on the Natural Heap Storage Beef Cattle Manure Composting and Nutrient Loss Law[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [77] Velthof G, Oudendag D, Witzke H, et al. Integrated assessment of nitrogen losses from agriculture in EU-27 using MITERRA-EUROPE[J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38(2): 402—417.
- [78] Sharpley A N, Herron S, Daniel T. Phosphorus-based management challenges and strategies for poultry farming[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 62(6): 150A.
- [79] Schröder J, Cordell D, Smit A, et al. Sustainable use of phosphorus[J]. Wageningen: Plant Research International, 2010.
- [80] Luo Y, Stichnothe H, Schuchardt F, et al. Life cycle assessment of manure management and nutrient recycling from a Chinese pig farm[J]. Waste Management & Research, 2013: 0734242X13512715.
- [81] Wu Xiao, Yao Wanying, Zhu Jun, et al. Biogas and CH_4 productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(11): 4042—4047.
- [82] 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)

- [83] 王艳, 廖新悌, 吴银宝. 环境温度和湿度对蛋鸡粪便含水率, 氮素和 pH 的影响[J]. 中国家禽, 2012, 34(4): 21—24.
Wang Yan, Liao Xindi, Wu Yinbao. Effects of ambient temperature and humidity on water content, nitrogen and pH of layer manure[J]. China Poultry, 2012, 34(4): 21—24. (in Chinese with English abstract)
- [84] 马林, 魏静, 王方浩, 等. 基于模型和物质流分析方法的食物链氮素区域间流动[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 475—483.
Ma Lin, Wei Jing, Wang Fanghao, et al. Nitrogen flow in food chain among regions based on MFA and model: a case of Huang-Huai-Hai Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 475—483. (in Chinese with English abstract)
- [85] 刘娟, 孙素芬, 谢莉娇. 耕地负荷视角下北京市畜禽废弃物资源空间转移可行性分析[J]. 农业现代化研究, 2013, 34(5): 627—630.
Liu Juan, Sun Sufen, Xie Lijiao. Feasibility analysis of livestock waste space transfer in Beijing based on livestock waste load in cultivated land[J]. Research of Agricultural Modernization, 2013, 34(5): 627—630. (in Chinese with English abstract)
- [86] Vandecasteele B, Reubens B, Willekens K, et al. Composting for increasing the fertilizer value of chicken manure: effects of feedstock on P availability[J]. Waste and Biomass Valorization, 2013: DOI: 10.1007/s12649-12013-19264-12645.
- [87] Kebreab E, Hansen A, Leytem A. Feed management practices to reduce manure phosphorus excretion in dairy cattle[J]. Advances in Animal Biosciences, 2013, 4(s1): 37—41.
- [88] Schröder J J, Smit A L, Cordell D, et al. Improved phosphorus use efficiency in agriculture: A key requirement for its sustainable use[J]. Chemosphere, 2011, 84(6): 822—831.
- [89] Yamaji K, Ohara T, Akimoto H. A country-specific, high-resolution emission inventory for methane from livestock in Asia in 2000[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(31): 4393—4406.
- [90] 刘月仙, 刘娟, 吴文良. 北京地区畜禽温室气体排放的时空变化分析[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 891—897.
Liu Yuexian, Liu Juan, Wu Wenliang. Spatiotemporal dynamics of greenhouse gas emissions from livestock and poultry in Beijing area during 1978-2009[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(7): 891—897. (in Chinese with English abstract)

Analysis of nutrient resources in livestock manure excretion and its potential of fertilizers substitution in Beijing suburbs

Jia Wei¹, Li Yuhong², Chen Qing^{1*}, David Chadwick²

(1. College of Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. School of Environment Natural Resources and Geography, Environment Centre Wales, Bangor University, Bangor, LL57 2UW, UK)

Abstract: With the rapid development of urban intensive livestock farms, large amounts of organic waste (feces and urine) discharge obviously led to high environmental pressure in the peri-urban regions with inadequate arable land. However, the N, P, K nutrients in feces and urine could equally contribute to increase crop production as chemical fertilizer. Therefore, sustainable development of urban agriculture is closely dependent on how to recycle these organic wastes as nutrient resources. In this study, considering the current status of livestock farming and arable land area in Beijing suburbs, the current situation of organic waste resources in livestock farming and its substituting potential for chemical fertilizer in Beijing were estimated through livestock farm surveys, the collection of livestock excretion coefficients and crop nutrients demand through literature and related Beijing statistical data. The results indicated that the total amount of N, P, K contained in solid manure and liquid manure production was 58.7×10^3 t N, 21.3×10^3 t P, 29.8×10^3 t K, which included 43.1×10^3 t N, 20.3×10^3 t P and 19.7×10^3 t K in solid manure, respectively. The total amount of N, P, K contained in solid manure and liquid manure could be satisfied with 99.3%, 185.2% and 62.7% of the total crop requirement of N, P, K in Beijing in 2011, especially since the amount of generated manure P has exceeded total crop P requirement in most districts of Beijing. Moreover, cereal crop residue returned to soil could bring equivalent to 11.0×10^3 t N, 1.6×10^3 t P, and 15.0×10^3 t K to arable land. In the scenario analysis, the allowable amount of N, P, K nutrients in livestock manure to be applied to arable land were only 18.3×10^3 t N, 9.9×10^3 t P, and 10.3×10^3 t K, respectively, based on the P balance method, if considering cereal crop residue incorporation. Additional 29.8×10^3 t N and 22.2×10^3 t K were needed to be supplied with chemical fertilizers to meet crop nutrient demand. P surplus sourced from organic waste obligated the solid manure to be composted and transported to the neighbor regions with inadequate P supply. Total N, P, K nutrients contained in composted solid manure decreased by 23%, 11% and 12% after aerobic composting, and the transportation of commercial composted solid manure exported out of Beijing will further reduce N and P loads in arable land and consequently reduce the risk of environmental pollution.

Key words: manure; fertilizers; nutrients; intensive livestock farm; crop nutrient demand; straw incorporation

(责任编辑: 刘丽英)