

引用格式:石晓晓,郑国砥,高定,等.中国畜禽粪便养分资源总量及替代化肥潜力[J].资源科学,2021,43(2):403-411.[Shi X X, Zheng G D, Gao D, et al. Quantity of available nutrient in livestock manure and its potential of replacing chemical fertilizers in China[J]. Resources Science, 2021, 43(2): 403-411] DOI: 10.18402/resci.2021.02.17

中国畜禽粪便养分资源总量及替代化肥潜力

石晓晓^{1,2}, 郑国砥^{1,2}, 高定^{1,2}, 陈同斌^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要:明确畜禽粪便资源数量及养分总量,计算其替代化肥潜力,对指导实现化肥零增长和减施增效具有重要意义。本文研究的畜禽种类包括牛、马、驴、骡、猪、羊、家禽和兔,利用排泄系数法估算了1980—2016年中国畜禽粪便的养分资源总量,并计算畜禽粪便替代化肥潜力。结果显示:①1980—2016年畜禽粪便和养分资源总量呈快速增长—稳定发展的趋势,2016年含量分别达到 2.38×10^9 t和 4.71×10^7 t,相比1980年增幅为45.7%和49.8%。②以2016年化肥实际施用总量 5.98×10^7 t计算,若2016年畜禽粪便资源化利用率由60%提高到75%,化学氮肥、钾肥和磷肥施用量理论上分别可减少3.7%、17.5%和44.2%,考虑畜禽粪便目前已有资源化利用量,其化肥替代潜力计算值更具有参考价值。③中国畜禽粪便替代化肥潜力巨大,但受种养分离、农田污染负荷等因素的影响,畜禽粪便肥料化利用率有待提升。基于以上发现,应通过优化畜牧业布局、合理规划畜禽粪便还田量等措施加快实现畜禽粪便利用率提高和化肥使用量零增长的目标。

关键词: 畜禽粪便; 养分; 资源量; 有机肥; 替代化肥潜力; 资源化利用

DOI: 10.18402/resci.2021.02.17

1 引言

随着经济的发展和人们对肉、蛋、奶需求的增长,中国畜禽养殖业快速发展,由畜禽粪污引起的环境污染问题也逐渐显现。中国第一次污染普查公报显示,2010年中国畜禽养殖业粪便产生 2.43×10^8 t,尿液产生 1.63×10^8 t,畜禽养殖业主要水污染排放量为化学需氧量 1.27×10^6 t、总氮 1.02×10^6 t、总磷 1.61×10^5 t^[1]。2016年中国畜禽粪便数量达 3.16×10^9 t,其中含氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)分别为 1.48×10^7 t、 9.01×10^6 t和 1.45×10^7 t^[2]。若这些畜禽粪便处置不当,会造成严重的生态环境问题^[3-5]。畜禽粪便含有丰富的养分资源,利用堆肥等高效清洁技术可以将其转化为有机肥料,既能减轻其对生态环境的影响,又可以提高土壤肥力,提高作物产量和品质^[6]。中国政府高度重视畜禽粪便的资源化问题,2017年

国务院发布《关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用意见》(后文简称“《资源化意见》”)^[7],使畜禽粪便资源化问题得到广泛关注。畜禽粪便的肥料化利用将会解决畜禽粪污的资源化利用问题,还将减少中国化肥的施用和生产,提高耕地绿色生产能力^[8,9]。

明确中国畜禽粪便养分资源总量及畜禽粪便肥料化替代率,将会对中国化肥减施政策的制订提供理论支持。目前,畜禽粪便资源化综合利用率不足60%^[7],《资源化意见》文件中要求,2020年全国粪污综合利用率达到75%以上。宋大利等^[2]计算畜禽粪便全量还田条件下氮、磷、钾肥施用量理论上可以减少37.3%、87.6%和65.9%,但在计算畜禽粪便肥料化利用率时,应当扣除已经资源化利用部分。已有研究在量化准确性上尚有很大提高空间。本

收稿日期:2019-12-23 修订日期:2020-03-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0501408;2016YFC0401102)。

作者简介:石晓晓,女,河南鹿邑人,硕士研究生,研究方向为固体废弃物资源化。E-mail: shixx.17s@igsnrr.ac.cn

通讯作者:郑国砥,男,河南南阳人,副研究员,研究方向为废弃物资源化与环境修复。E-mail: zhenggd@igsnrr.ac.cn

文在计算中国1980—2016年的畜禽粪便和养分资源总量的基础上,对比2016年农用化肥实际施用量和畜禽粪便养分资源量,并根据《资源化意见》提出的畜禽粪便资源化利用率目标和目前的资源化利用率,计算出中国畜禽粪便肥料化替代化肥潜力。此方法计算的替代化肥潜力可以明确畜禽粪便处理的消纳能力和建设目标,对畜禽养殖业的粪便处理更具有参考价值。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究对象

研究1980—2016年中国每年畜禽粪便产生量、畜禽粪便养分量和化肥需求量。依据中国统计年鉴和规模化养殖现状,畜禽种类选取了牛(黄牛、乳牛和水牛)、马、驴、骡、猪、羊(山羊和绵羊)、家禽(鸡、鸭、鹅)和兔。化肥需求量主要是农用化肥实际施用量。

2.2 畜禽粪便产生总量及养分量估算方法

中国对于畜禽粪便数量没有规定的统计方法,畜禽粪便产生量常用排泄系数法进行估算,即各类畜禽粪便产生量通过畜禽年末存栏数和年内出栏数、饲养周期^[10-12]、排泄系数^[13,14]计算所得^[15,16]。本文利用畜禽年末存栏量估算畜禽粪便产生量。

(1) 畜禽粪便(鲜质):

$$QR_i = S_i \times W_i \times R_i / 1000 \quad (1)$$

$$QU_i = S_i \times W_i \times U_i / 1000 \quad (2)$$

式中: QR 、 QU 分别表示畜禽粪量、尿量(万t); i 表示畜禽种类; S 为年末存栏数; W 为饲养周期(天),当饲养周期大于365天,按365天计算; R 、 U 分别表示畜禽粪和尿日排泄系数(kg/(d·头(只)));1000为

换算系数。

(2) 畜禽粪便养分

$$TN_i = QR_i \times MN_i + QU_i \times UN_i \quad (3)$$

$$TP_i = QR_i \times MP_i + QU_i \times UP_i \quad (4)$$

$$TK_i = QR_i \times MK_i + QU_i \times UK_i \quad (5)$$

式中: TN 、 TP 和 TK 分别表示畜禽粪便中氮、磷和钾养分总量(万t); MN 、 MP 和 MK 分别为畜禽粪便中氮、磷和钾养分含量(%); UN 、 UP 和 UK 分别为畜禽尿液中氮、磷和钾养分含量(%)。对于畜禽粪便日排泄系数、饲养周期和养分含量等系数,采用刘晓永^[17]根据资料计算的加权平均值。各类畜禽粪便的排泄系数和养分含量见表1^[2,17-19]。

2.3 畜禽粪便替代化肥潜力计算方法

在赵俊伟等^[20]提出的畜禽粪便替代化肥率计算公式的基础上,考虑畜禽粪便已有的资源化利用率,提出如下的畜禽粪便替代化肥潜力计算公式:

$$\rho = \sum_i T_{i(N,P,K)} \times (1 - A_i) \times (x - x_{2017}) / M_{N,P,K} \quad (6)$$

式中: ρ 为畜禽粪便替代化肥率; T 表示畜禽粪便氮、磷、钾养分含量; i 为畜禽种类; A_i 为畜禽粪便养分损失率; x 为畜禽粪便总利用率; x_{2017} 为2017年畜禽粪便总利用率; M 为各类化肥施用量中养分含量(化肥折纯量)。

畜禽粪便还田前要经历“排泄—清扫—存储—处理(堆积、高温堆肥或厌氧发酵)—运输—转移”等过程,期间养分损失较大,其养分损失率^[17,21,22]见表2。《资源化意见》文件中要求,2020年全国粪污综合利用率达到75%以上^[7]。

2.4 数据来源

1980—2016年畜禽年末存栏量数据来源于《中

表1 主要畜禽饲养周期、粪尿日排泄量、粪尿氮磷钾含量

Table 1 Livestock feeding period, daily excrement/urine, and nitrogen, phosphate, and potassium contents

畜禽种类	饲养周期/天	粪便				尿液			
		排泄量/(kg/天)	氮/%	磷/%	钾/%	排泄量/(kg/天)	氮/%	磷/%	钾/%
牛	>365	24.87	0.38	0.10	0.24	11.70	0.51	0.02	0.92
马	>365	11.46	0.44	0.14	0.40	4.55	0.72	0.06	0.72
驴	>365	7.77	0.49	0.19	0.54	3.75	0.71	0.01	0.25
骡	>365	0.77	0.32	0.16	0.23	3.75	0.60	0.01	0.28
猪	192	2.71	0.55	0.26	0.30	3.86	0.18	0.02	0.16
羊	>365	2.09	1.01	0.22	0.54	0.64	0.70	0.03	0.77
家禽	67	0.12	0.81	0.37	0.62				
兔	90	0.20	0.87	0.30	0.66				

2021年2月

表2 畜禽粪便养分损失率

Table 2 Nutrient loss rate from livestock and poultry

畜禽种类	氮/%	磷/%	钾/%
牛	60	15	19
马	38	18	28
驴	38	18	28
骡	38	18	28
猪	75	15	36
羊	15	18	28
家禽	40	15	15
兔	40	15	15

国统计年鉴 1981—2017》^[23]、《中国农村统计年鉴 1981—2017》^[24]和《中国农业年鉴 1981—2017》^[25]。1980—2016 年化肥施用量来源于《中国统计年鉴 1981—2017》。另外,2016 年化肥进出口量数据来源于《中国贸易外经统计年鉴 2017》^[26]。

3 结果与分析

3.1 畜禽粪便总量及养分资源总量

根据计算 1980 年以来中国每年畜禽粪便总量(粪便产生量+尿液产生量)和其中含有的养分资源总量总体呈快速增长—稳定发展的趋势。在 1980—2005 年,畜禽粪便总量呈现快速增长趋势,其含量从 1.63×10^9 t 增长到 3.01×10^9 t,增幅为 75%(图 1 和图 2)。2005 年畜禽粪便总量有所下降之后稳定发展,在 2016 年畜禽粪便总量为 2.38×10^9 t,相比 1980 年增长 46%。这种变化趋势主要是因为

1980 年以来,畜禽养殖业在国家政策的扶持下稳步发展,畜禽养殖数量在不断增高。但在 1995 年和 2005 年这两个时期畜禽养殖量出现波动,可能是由于这两个时期处于中国五年发展规划的过渡期^[27],加上 2005 年前后中国发生禽流感疫情,受其影响畜禽养殖量下降,畜禽粪便量略微下降后呈现稳定,后又缓慢增长。畜禽粪便总量中以牛粪便所占比例最大,在 65%左右,1993 年占比曾达到最高值 69.7%。猪和羊粪便占畜禽粪便总量的比例较高,分别为 14%和 12%左右。畜禽尿液与粪便变化趋势相同,也呈现快速增长—稳定发展的趋势(图 2)。畜禽尿液量中也以牛尿液量最大,其比例约为 54%,其次是猪尿液量,比例约为 35%^①。

对比 1980—2016 年中国各类畜禽粪便的养分总量发现,牛畜禽粪便养分含量最高,所占比例最高可达到 63.3%,其次是猪和羊,分别约为 19%和 16%(图 3)。畜禽粪便所含养分元素主要为氮、磷和钾。随着中国每年畜禽粪便量的变化,其含有的氮、磷和钾养分资源量也呈现快速增长—稳定发展的变化趋势(图 4)。畜禽粪便所含养分资源总量 2005 年最高,达到 5.94×10^7 t,相比 1980 年的 3.14×10^7 t 增长了 88.7%。2005 年之后,由于畜禽粪便含量骤降,养分资源总量也下降。2006—2016 年呈现稳定发展趋势,2016 年养分资源总量约为 4.71×10^7 t,相比 1980 年增长 49.8%。畜禽粪便中养分元素含量最高的是氮,其次是钾,磷含量最低(图 4)。

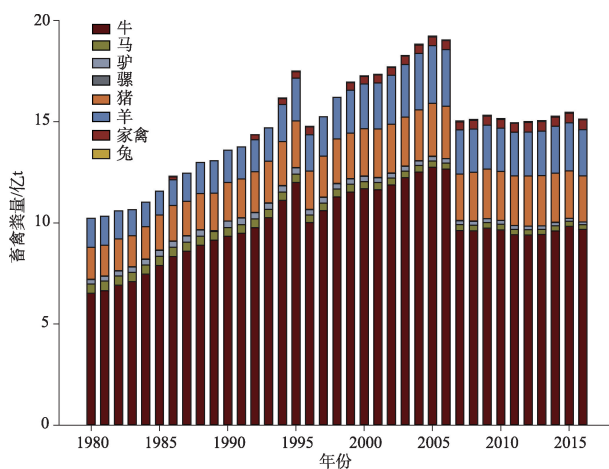


图1 1980—2016年中国畜禽粪便产生量

Figure 1 Total amount of livestock excrement in China, 1980-2016

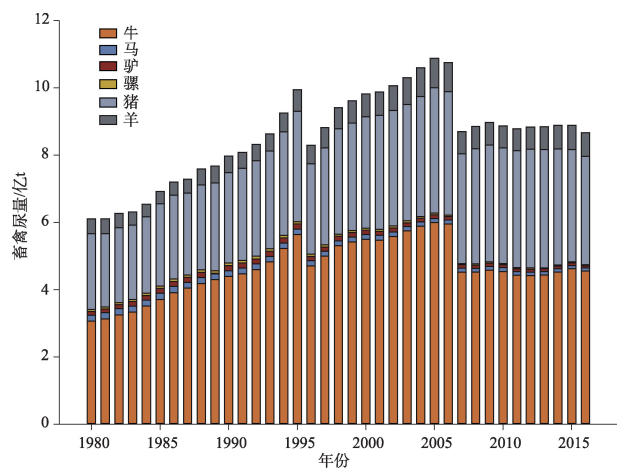


图2 1980—2016年中国各类畜禽尿液产生量

Figure 2 Total amount of livestock urine in China, 1980-2016

① 家禽没有尿液,兔尿液和粪实践中分不开,因此,家禽和兔的排泄都归在粪便中,不再单独计算其产生的尿液量。

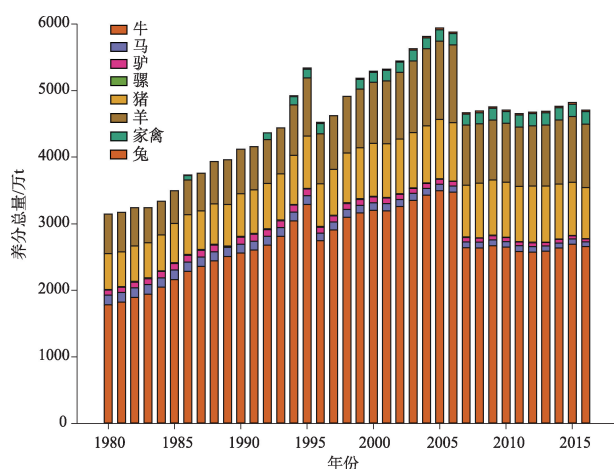


图3 1980—2016年中国各类畜禽粪便养分总量

Figure 3 Total nutrient quantities in animal manure, 1980-2016

3.2 农用化肥施用量

中国是农业大国,农用化肥施用量在逐年快速上升(图5),化肥的大量使用极大促进了粮食产量的增长^[28]。1980年中国化肥施用量为 1.27×10^7 t,

2016年中国化肥施用量已达 5.98×10^7 t,增长 4.71×10^7 t,增幅达到392%。在化肥施用总量中氮肥施用量虽始终很高,但氮肥所占的比例在逐年下降,从1980年的73.6%降至37.9%;钾肥化肥施用量较低,但其占总量的比例在逐年增长,已从1980年的2.7%增至10.6%;复合肥施用量所占比例也在逐年上升,到2017年所占比例基本与氮肥持平。这种变化主要原因是农民不再单纯使用一种化肥或盲目加大化肥使用量,也逐步了解了钾肥施用的重要性^[29]。虽然所占比例增长略有不同,但是氮、磷、钾这3种肥料的施用量都呈现增长趋势。

3.3 畜禽粪便替代化肥潜力

畜禽粪便中含有丰富的氮、磷、钾养分资源,2016年畜禽粪便含有的养分资源总量达到 4.71×10^7 t(图3)。将这些畜禽粪便收集起来无害化处理后用于农业生产,可大大减少化肥的施用量。以2016年数据为例,将中国实际用于农业生产的化肥施用量

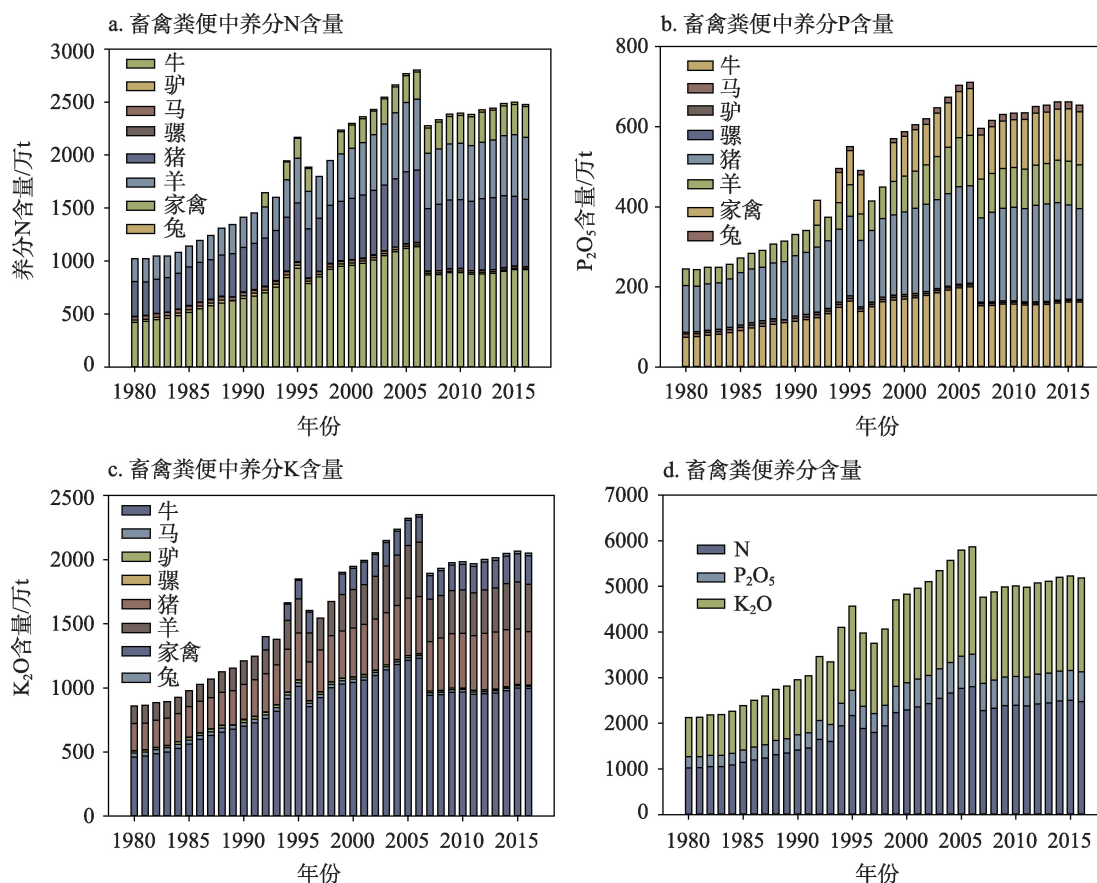


图4 1980—2016年中国畜禽粪便中养分资源量

Figure 4 Total nitrogen, phosphate, and potassium nutrient quantities in animal manure, 1980-2016

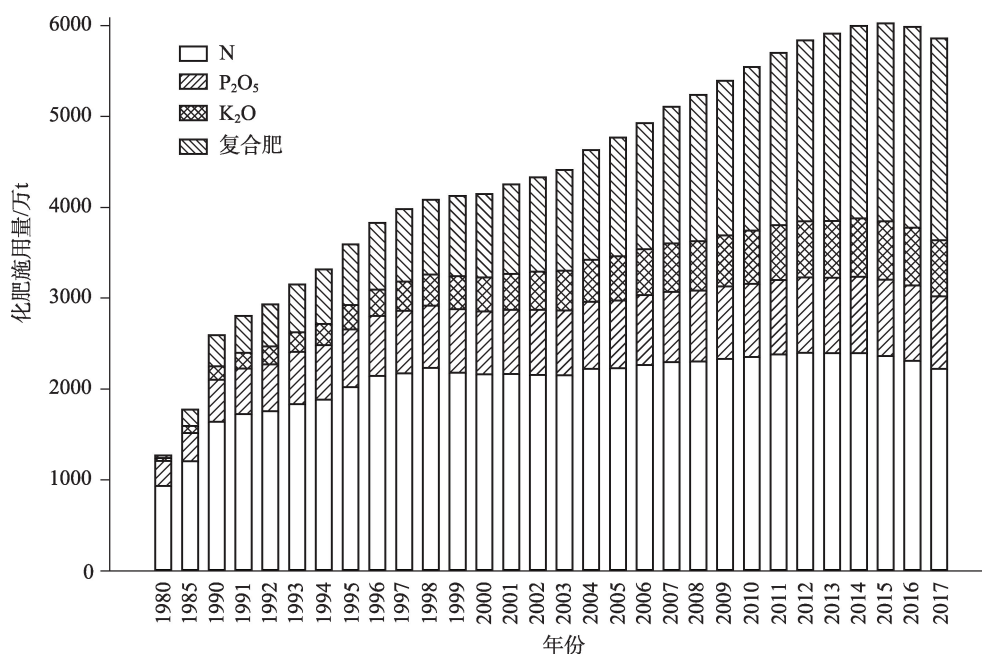


图5 1980—2017年中国农用化肥施用量

Figure 5 Amount of application of fertilizers in China, 1980-2017

和畜禽粪便所含有的养分量进行了对比(图6),结果显示畜禽粪便中的养分含量分别占同年氮、磷、钾化肥施用量的49.1%,138.2%,381.1%,其中 P_2O_5 和 K_2O 养分含量均超过中国磷钾化肥农用实际施用量,表明畜禽粪便用于农田有巨大的潜力。

2016年底中国畜禽粪污综合利用率约为60%,而《资源化意见》指出了畜禽粪污综合利用率达到75%以上的目标^[22],由公式(6)计算2016年畜禽粪便处理后用于农田替代潜力分别为:氮肥3.7%,磷肥17.5%,钾肥44.2%。若畜禽粪污100%收集用于还田,则畜禽粪污中氮、磷(P_2O_5)和钾(K_2O)元素替代化肥潜力分别为9.8%、46.6%和117.8%。为达到国

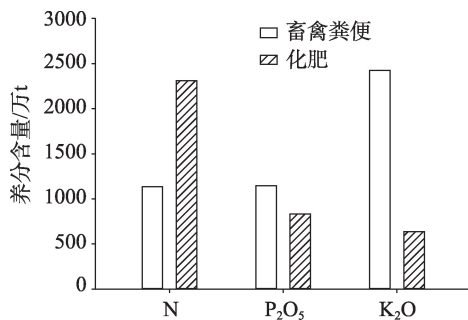


图6 2016年中国畜禽粪便氮磷钾含量与化肥施用量对比图

Figure 6 Comparison of nitrogen, phosphate, and potassium content between fertilizer and livestock manure, 2016

务院制定的2020年75%的综合利用率目标,将畜禽粪便替代化肥是有效的解决途径。中国钾肥主要依赖进口,2016年中国钾肥进口量为 4.30×10^6 t(纯 K_2O),化肥磷肥的需求和生产也开始危及中国逐渐枯竭的磷矿石^[36]。畜禽粪便替代化肥提高了畜禽粪便的综合利用率,减轻了畜禽粪便对环境的不良影响,还可以减少中国化肥及原料的生产和进口。

4 讨论

4.1 畜禽粪便产生量及养分量的估算

关于畜禽粪便产生量及养分量的估算已有很多研究,但是其计算结果上存在一定的偏差。关于畜禽粪便的产生量在发达国家已经有了系统研究^[31],而在中国,畜禽粪便产生量的计算还没有统一的方法,多数采用排泄系数法。刘晓永等^[32]研究认为2010年畜禽粪便达 4.23×10^9 t,而耿维等^[18]研究认为2010年中国畜禽粪总量为 2.26×10^9 t;武淑霞等^[33]研究估算中国2015年畜禽粪污量达 3.83×10^9 t等。这些数据的偏差主要由统计畜禽种类不同、采取畜禽饲养周期不同、估算方法不一致、排泄系数选取不一致等原因造成^[16]。畜禽排泄系数是畜牧环境管理的基础,但中国畜牧环境管理起步晚,还没有确定的排泄系数,并且排泄系数还会因为饲喂方式、饲喂周期、季节等因素而变化。不同研究者在研究

畜禽粪便产生量时都根据自己的理解选择相关的畜禽排泄系数^[17,19,32-35],如刘晓永^[16]采用的排污系数是收集前人研究的排污系数进行比较,计算其平均值。虽然排泄系数计算方法有不同,但研究结果均显示出,中国畜禽养殖业粪尿产生量巨大,有着丰富的养分资源,粪尿肥料化替代率高。

目前中国畜禽产生粪尿的主要去向是:①肥料化。畜禽粪便中含有丰富的氮、磷、钾和有机物等丰富的养分资源,是一种有机肥源。②饲料化。畜禽粪便含有丰富的粗纤维、粗蛋白及矿物质元素如钙磷等,畜禽粪便饲料化价值高。③能源化。畜禽粪便作为生物质能源可以进行沼气工程发酵。目前畜禽粪便利用途径中饲料化途径所占比例较小,而畜禽粪便能源化利用之后的沼渣仍需走肥料化途径进行解决。

4.2 畜禽粪便还田潜力

畜禽粪便含有丰富的氮、磷、钾等养分资源(图3和图4),如果能够合理还田资源化利用,将大大减少化肥的施用量;利用生命周期评价方法对化肥和有机肥进行生命周期资源消耗和污染物排放清单分析,结果显示有机肥替代化肥使用,全球环境酸化潜力、变暖潜力和富营养化潜力将分别下降62.6%、17.5%和52.9%^[36]。

目前中国种植业和养殖业分离现象严峻,随着养殖业的集约化发展,大型养殖场周围没有足够的耕地来消化畜禽粪便^[37]。由于区域养殖集约化程度不同,耕地畜禽粪便养分资源利用量在空间分布上也存在不平衡现状^[38]。相对而言,家庭养殖或小规模养殖,种养结合较好^[39]。研究表明,中国畜禽粪便约有不到30%回归到土壤中,尤其是集约化养殖场只有19.4%粪便磷还田,家庭养殖也仅有68.1%粪便磷还田。中大型养殖场畜禽粪便产生量大,部分经营主体将畜禽粪便堆肥制成有机肥出售,但长距离运输等问题加大了有机肥的施用成本^[40],种植业使用有机肥主动性较低^[41]。为了解决畜禽粪便时空分布差异和种养分离问题,应优化畜牧业布局,促进种养结合,并推进畜禽粪便资源化利用进程^[42,43]。另外,作物施用化肥量的季节性需求与有机肥产生量也存在时间上的差异,从畜禽粪便分布的时空性差异角度考虑,畜禽粪便还田潜力的影响还有待进一步研究。

4.3 农田负荷程度

畜禽粪便还田利用是消除养殖污染的重要途径,畜禽粪便有机肥与化肥配合使用对土壤有一定的调控效应,可以提高土壤肥力。但不合理施用和畜禽粪便空间分布不均匀,都会对耕田承载能力产生负荷。杨飞等^[27]利用年平均增长率的方法分析中国各地区耕地的畜禽污染负荷,结果表明:河南、四川、山东这3省的畜禽养殖增幅快,粪便产生量大,耕田污染负荷程度较重。武兰芳等^[44]对不同种养结合区的农田系统中氮、磷的平衡进行分析,发现农田系统中氮、磷养分大量盈余。刘忠等^[45]利用单位耕地面积猪粪当量负荷评价了畜禽粪便区域环境风险,发现中国24个农区中有4个农区猪粪当量负荷超过环境限量(30 t/hm²)。叶必雄等^[46]研究发现山东禹城畜禽粪便农用区重金属含量超标。因此,在畜禽粪便施用于农田时,应经过无害化处理,考虑区域农田污染负荷程度,并对有机肥的施用有明确的规划。

5 结论

本文利用排泄系数法估算1980—2016年中国畜禽粪便及养分资源量,计算畜禽粪便替代化肥潜力,并探讨了畜禽粪便还田的限制因素,得出以下结论:

(1)中国畜禽粪便数量巨大,截至2016年畜禽粪便数量达到 23.80×10^8 t,养分总量为 4.71×10^7 t。其中,N、P₂O₅、K₂O养分含量分别为 1.13×10^7 t、 1.15×10^7 t和 2.43×10^7 t,占当年氮、磷、钾化肥施用量的49.1%、138.2%和381.1%。

(2)按照国务院《资源化意见》,若畜禽粪便资源化率由目前60%升到75%,则替代氮、磷、钾化肥的潜力分别为:3.7%、17.5%和44.2%。

(3)畜禽粪便还田的资源化利用潜力巨大,但受到种养分离、畜禽粪便产生量空间分布不均匀、作物需肥季节差异大、土壤的污染负荷等因素的影响。这些因素应进一步研究,以加快实现畜禽粪便的污染防治和资源化利用,促进种养结合、生态循环和绿色发展。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国统计局. 第一次全国污染源普查公报[EB/OL]. (2010-02-06) [2019-12-23]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qt->

2021年2月

- tjgb/qgqttjgb/201002/t20100211_30641.html. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Bulletin of the First National Survey of Pollution Sources[EB/OL]. (2010-02-06) [2019-12-23]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qgqttjgb/201002/t20100211_30641.html.]
- [2] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国畜禽粪尿中养分资源数量及利用潜力[J]. 植物营养与肥科学报, 2018, 24(5): 1131-1148. [Song D L, Hou S P, Wang X B, et al. Nutrient resource quantity of animal manure and its utilization potential in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(5): 1131-1148.]
- [3] Gao Y Z, Lu C, Shen D, et al. Elimination of the risks of colistin resistance gene (*mcr-1*) in livestock manure during composting[J]. Environment International, 2019, 126: 61-68.
- [4] 杨璐, 李夏菲, 于书霞, 等. 湖北省猪粪管理温室气体减排潜力分析[J]. 资源科学, 2016, 38(3): 557-564. [Yang L, Li X F, Yu S X, et al. The mitigation potential of greenhouse gas emissions from pig manure management in Hubei[J]. Resources Science, 2016, 38(3): 557-564.]
- [5] 李飞, 董锁成. 西部地区畜禽养殖污染负荷与资源化路径研究[J]. 资源科学, 2011, 33(11): 2204-2211. [Li F, Dong S C. Pollution from livestock and poultry and its resource strategy in west China[J]. Resources Science, 2011, 33(11): 2204-2211.]
- [6] 林海波, 夏忠敏, 陈海燕. 有机、无机肥料配施研究进展与展望[J]. 耕作与栽培, 2017, (4): 67-69. [Lin H B, Xia Z M, Chen H Y. Advances and prospects of rational application of organic and chemical fertilizers[J]. Tillage and Cultivation, 2017, (4): 67-69.]
- [7] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见[EB/OL]. (2017-06-12) [2019-12-23]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-06/12/content_5201790.htm. [General Office of the State Council. Opinions of the General Office of the State Council on Accelerating the Utilization of Livestock and Poultry Breeding Wastes As Resources[EB/OL]. (2017-06-12) [2019-12-23]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-06/12/content_5201790.htm.]
- [8] Pedizzi C, Noya I, Sarli J, et al. Environmental assessment of alternative treatment schemes for energy and nutrient recovery from livestock manure[J]. Waste Management, 2018, 77: 276-286.
- [9] 向敬伟, 廖晓莉, 宋小青, 等. 中国耕地多功能的区域收敛性[J]. 资源科学, 2019, 41(11): 1959-1971. [Xiang J W, Liao X L, Song X Q, et al. Regional convergence of cultivated land multifunctions in China[J]. Resources Science, 2019, 41(11): 1959-1971.]
- [10] 渠清博, 杨鹏, 翟中藏, 等. 规模化畜禽养殖粪便主要污染物产生量预测方法研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(5): 397-406. [Qu Q B, Yang P, Zhai Z W, et al. Prediction methods of major pollutants production in manure from large-scale livestock and poultry farms: A review[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 33(5): 397-406.]
- [11] Cheng H G, Wei O Y, Hao F H, et al. The non-point source pollution in livestock-breeding areas of the Heihe River Basin in Yellow River[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2007, 21(3): 213-221.
- [12] 徐勇峰, 阮子学, 吴翼, 等. 环洪泽湖地区耕地养殖污染负荷估算及其风险评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(4): 35-41. [Xu Y F, Ruan Z X, Wu Y, et al. Estimation of livestock pollution loading and the risk assessment for farmland in Hung-tse Lake regions[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2016, 40(4): 35-41.]
- [13] 国家环境保护部自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. [Department of Natural and Ecological Conservation, State Environmental Protection Administration. Agency Survey and Countermeasures on the Pollution of Large-scale Livestock and Poultry Breeding Industry in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.]
- [14] Yan B J, Qian Y G, Pan Y C. A method to estimate farmland pollution load of livestock manure nutrient in field patch scale[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2016, 25(6): 1942-1949.
- [15] Arthur R, Baidoo M F. Harnessing methane generated from livestock manure in Ghana, Nigeria, Mali and Burkina Faso[J]. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(11): 4648-4656.
- [16] 朱建春, 张增强, 樊志民, 等. 中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地负荷及总量控制[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 435-445. [Zhu J C, Zhang Z Q, Fan Z M, et al. Biogas potential, crop-land load and total amount control of animal manure in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(3): 435-445.]
- [17] 刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018. [Liu X Y. Study on Nutrients Balance and Requirement in Agricultural Production in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.]
- [18] 董红敏, 朱志平, 黄宏坤, 等. 畜禽养殖业产污系数和排污系数计算方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 303-308. [Dong H M, Zhu Z P, Huang H K, et al. Pollutant generation coefficient and discharge coefficient in animal production[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(1): 303-308.]
- [19] 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, (1): 171-179. [Geng W, Hu L, Cui J Y, 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, 2013, (1): 171-179.]
- [20] 赵俊伟, 尹昌斌. 青岛市畜禽粪便排放量与肥料化利用潜力分析[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(7): 108-115. [Zhao J W, Yin C B. Analysis on the total amount of domestic animal excrement and the potential of fertilizer utilization in Qingdao City[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(7): 108-115.]
- [21] 王俊能, 许振成, 吴根义, 等. 畜禽养殖业产排污系数核算体系构建[J]. 中国环境监测, 2013, 29(2): 143-147. [Wang J N, Xu Z C, Wu G Y, et al. Construction of pollutants producing and discharging coefficient accounting system for livestock and poultry breeding industry[J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29(2): 143-147.]

- [22] 宇万太, 关焱, 李建东, 等. 氮和磷在饲养-堆腐环中的循环率及有机肥料养分利用率[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1563-1565. [Yu W T, Guan Y, Li J D, et al. Recycling rate of N and P through a feeding-composting cycle and their recoveries in agro-ecosystems[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(8): 1563-1565.]
- [23] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴(1980-2017)[M]. 北京: 中国统计出版社, 1980-2017. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook 1980-2017[M]. Beijing: China Statistics Press, 1998-2017.]
- [24] 中华人民共和国统计局. 中国农村统计年鉴(1980-2017)[M]. 北京: 中国统计出版社, 1980-2017. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Rural Statistical Yearbook 1980-2017[M]. Beijing: China Statistics Press, 1998-2017.]
- [25] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴(1980-2017)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1980-2017. [China Agricultural Yearbook Editorial Committee. China Agriculture Yearbook, 1980-2017[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1980-2017.]
- [26] 中华人民共和国统计局. 中国贸易外经统计年鉴2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Trade and External Economic Statistical Yearbook 2017[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.]
- [27] 杨飞, 杨世琦, 诸云强, 等. 中国近30年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 1-11. [Yang F, Yang S Q, Zhu Y Q, et al. Analysis on livestock and poultry production and nitrogen pollution load of cultivated land during last 30 years in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(5): 1-11.]
- [28] 王萍萍, 韩一军, 张益. 中国农业化肥施用技术效率演变特征及影响因素[J]. 资源科学, 2020, 42(9): 1764-1776. [Wang P P, Han Y J, Zhang Y. Characteristics of change and influencing factors of the technical efficiency of chemical fertilizer use for agricultural production in China[J]. Resources Science, 2020, 42(9): 1764-1776.]
- [29] 刘成, 杨雪, 周晓时, 等. 中国化肥投入对油菜成本效率的影响[J]. 资源科学, 2018, 40(12): 2487-2495. [Liu C, Yang X, Zhou X S, et al. Impact of fertilizer input on cost efficiency of rapeseed in China[J]. Resources Science, 2018, 40(12): 2487-2495.]
- [30] Vaccari D A. Phosphorus: A looming crisis[J]. Scientific American, 2009, 300(6): 54-59.
- [31] Oenema O, Tamminga S. Nitrogen in global animal production and management options for improving nitrogen use efficiency[J]. Science in China Series C: Life Sciences, 2005, 48(2): 871-887.
- [32] 刘晓水, 王秀斌, 李书田. 中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5723-5739. [Liu X Y, Wang X B, Li S T. Livestock and poultry faeces nitrogen loading rate and its potential returning to farmland in China[J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5723-5739.]
- [33] 武淑霞, 刘宏斌, 黄宏坤, 等. 我国畜禽养殖粪污产生量及其资源化分析[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5): 103-111. [Wu S X, Liu H B, Huang H K, et al. Analysis on the amount and utilization of manure in livestock and poultry breeding in China[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(5): 103-111.]
- [34] 庄犁, 周慧平, 张龙江. 我国畜禽养殖业产排污系数研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(5): 633-639. [Zhuang L, Zhou H P, Zhang L J. Advancement in research on pollutants producing and discharging coefficients of livestock and poultry breeding industry in China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(5): 633-639.]
- [35] 阎波杰, 史文娇, 于海玲. 2004-2013年安徽省县域畜禽养殖环境风险时空特征及调控规划[J]. 地球与环境, 2019, 47(2): 202-210. [Yan B J, Shi W J, Yu H L. Spatial-temporal characteristics and control of environmental risks of livestock and poultry breeding in Anhui Province, China during 2004-2013[J]. Earth and Environment, 2019, 47(2): 202-210.]
- [36] 籍春蕾, 丁美, 王彬鑫, 等. 基于生命周期分析方法的化肥与有机肥对比评价[J]. 土壤通报, 2012, 43(2): 412-417. [Ji C L, Ding M, Wang B X, et al. Comparative evaluation of chemical and organic fertilizer on the base of life cycle analysis methods[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(2): 412-417.]
- [37] Shi L, Simplicio W, Wu G X, et al. Nutrient recovery from digestate of anaerobic digestion of livestock manure: A review[J]. Current Pollution Reports, 2018, DOI: 10.1007/s40726-018-0082-z.
- [38] 张传真. 基于耕地分布的畜禽养殖管理研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2019. [Zhang C Z. Livestock Management on the Basis of Crop-land Distribution[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.]
- [39] 侯俊. 种养一体化中养分高效的制约因素研究: 滦南为例[D]. 北京: 中国农业大学, 2017. [Hou J. Key Constraints to Improve Nutrient Use Efficiency in Livestock-Crop System-Case Study in Luannan[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.]
- [40] 张翎, 乔娟, 沈鑫琪. 养殖废弃物治理经济绩效及其影响因素: 基于北京市养殖场(户)视角[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1250-1261. [Zhang X, Qiao J, Shen X Q. Economic performance of livestock and poultry breeding waste treatment and influencing factors: Based on data of farms in Beijing[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1250-1261.]
- [41] 郭清卉, 李世平, 南灵. 环境素养视角下的农户亲环境行为[J]. 资源科学, 2020, 42(5): 856-869. [Guo Q H, Li S P, Nan L. Farming households' proenvironmental behaviors from the perspective of environmental literacy[J]. Resources Science, 2020, 42(5): 856-869.]
- [42] 舒畅, 乔娟, 耿宁. 畜禽养殖废弃物资源化的纵向关系选择研究: 基于北京市养殖场户视角[J]. 资源科学, 2017, 39(7): 1338-1348. [Shu C, Qiao J, Geng N. The vertical relationship selection of livestock and poultry breeding waste recycling based on the perspective of farmers in Beijing[J]. Resources Science, 2017, 39(7): 1338-1348.]
- [43] 胡乃娟, 孙晓玲, 许雅婷, 等. 基于Logistic-ISM模型的农户有机肥施用行为影响因素及层次结构分解[J]. 资源科学, 2019, 41(6): 1120-1130. [Hu N J, Sun X L, Xu Y T, et al. Influencing factors of farmers' organic fertilizer application behavior and their

- stratification based on Logistic-ISM model[J]. Resources Science, 2019, 41(6): 1120–1130.]
- [44] 武兰芳, 欧阳竹, 谢小立. 不同种养结合区农田系统氮磷平衡分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(6): 943–954. [Wu L F, Ouyang Z, Xie X L. Nitrogen and phosphorus balance of cropland at regional scale for integrated crop-livestock farming system in two different areas[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(6): 943–954.]
- [45] 刘忠, 段增强. 中国主要农区畜禽粪尿资源分布及其环境负荷[J]. 资源科学, 2010, 32(5): 946–950. [Liu Z, Duan Z Q. Distribution of manure resources and environmental loads of agro-ecological regions in China[J]. Resources Science, 2010, 32(5): 946–950.]
- [46] 叶必雄, 刘圆, 虞江萍, 等. 畜禽粪便农区土壤: 小麦系统中重金属污染及迁移[J]. 地理研究, 2013, 32(4): 645–652. [Ye B X, Liu Y, Yu J P, et al. Heavy metal pollution and migration in soil-wheat system of different livestock manures agricultural areas[J]. Geographical Research, 2013, 32(4): 645–652.]

Quantity of available nutrient in livestock manure and its potential of replacing chemical fertilizers in China

SHI Xiaoxiao^{1,2}, ZHENG Guodi^{1,2}, GAO Ding^{1,2}, CHEN Tongbin^{1,2}

(1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Quantifying the total amount and nutrient contents of livestock manure and calculating their substitution potential for chemical fertilizers are of great significance for achieving zero growth in fertilizer use. This study focused on the manure from cows, horses, donkeys, mules, pigs, sheep, poultry, and rabbits. The amount and the nutrient contents of livestock manure from 1980 to 2016 were estimated using the excretion coefficient method. The potential of livestock manure replacing chemical fertilizers was calculated according to the annual amount of chemical fertilizers applied and the amount of livestock manure that had been used. The results indicate that: (1) The amount and the nutrients of livestock manure showed a rapid growth trend then stabilized from 1980 to 2016. The manure resource and the total nutrients were 2.38×10^9 t and 4.71×10^7 t in 2016, and they had increased 45.7% and 49.8% from 1980 to 2016, respectively. (2) The total amount of chemical fertilizers applied in agriculture is 5.98×10^7 t in 2016. At present, the utilization rate of livestock manure is 60% in China. If the utilization rate of livestock manure increases to 75%, the consumption of chemical fertilizers can be reduced by 3.7% for nitrogen, 17.5% for phosphate, and 44.2% for potassium, respectively. The results showed that the potential of replacing chemical fertilizers is more valuable reference as it consider the current utilization of livestock and poultry manure. (3) The utilization rate of manure needs to be further improved under the conditions of farming and livestock and poultry farming are separated, pollutant loading to agricultural land. In order to achieve the utilization rate of livestock and poultry manure improved and zero growth in fertilizer, some measures should be taken such as optimizing the distribution of animal husbandry, rationally planning the amount of livestock and returning poultry manure to the field.

Key words: livestock manure; nutrient; resource amount; organic fertilizer, potential of replacing chemical fertilizers; resource utilization