杨　旭, 黄艳艳, 刘海林, 等. 海南省畜禽养殖环境承载力及有机肥替代化肥潜力分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2609-2618.
YANG Xu, HUANG Yan-yan, LIU Hai-lin, et al. Potential for the environmental carrying capacity of livestock and poultry breeding to substitute organic fertilizers in Hainan Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2609-2618.

海南省畜禽养殖环境承载力及有机肥替代化肥潜力分析

杨　旭, 黄艳艳, 刘海林, 茶正早, 罗　微, 林清火*

(中国热带农业科学院橡胶研究所/省部共建国家重点实验室培育基地-海南省热带作物栽培生理学重点实验室, 海口 571101)

摘　要: 为评价海南省各地区农用地环境污染风险程度,分析海南省有机养分替代化肥潜力,基于海南省2017年养殖数据,采用排泄系数法和农作物籽粒比,计算海南省畜禽粪尿和秸秆中氮磷钾养分总量;分析海南省各市县畜禽养殖承载力和环境污染风险系数,计算不同还田比例有机养分替代化肥潜力。结果表明:海南省2017年畜禽粪尿总量为1 110.9万t。畜禽粪便全部还田时,海南省养殖承载力为6 751.5万头猪当量。定安县和海口市农用地污染风险较大,分别为0.98和0.81;海南省秸秆和畜禽粪便氮磷钾养分总量为14.5万t,当还田比例分别为1/3、2/3和100%,有机肥替代潜力分别为4.2%、7.1%和14.1%。研究表明,海南省大部分地区暂无污染风险,且具有较大养殖空间和替代化肥潜力。

关键词: 畜禽粪便;养分;农用地;承载力;替代化肥潜力

中图分类号: X713　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-2043(2019)11-2609-10　　doi:10.11654/jaes.2019-0669

Potential for the environmental carrying capacity of livestock and poultry breeding to substitute organic fertilizers in Hainan Province, China

YANG Xu, HUANG Yan-yan, LIU Hai-lin, CHA Zheng-zao, LUO Wei, LIN Qing-huo*

(Rubber Research Institute, CATAS/State Key Laboratory Incubation Base for Cultivation & Physiology of Tropical Crops, Haikou 571101, China)

Abstract: The objectives of the study are to evaluate the risks of fertilizers on agricultural lands, the potential of the environmental carrying capacity of livestock and poultry breeding, and the possible replacements for fertilizers in Hainan Province. Based on the 2017 breeding data measured in Hainan, the excretion coefficient method and crop grain ratio were used to calculate the total amounts of nitrogen, phosphorus, and potassium in livestock manure and straw. We analyzed the environmental carrying capacity, environmental pollution of livestock and poultry, and potential for organic fertilizers to replace chemical fertilizers with different returning proportions in Hainan. Results showed that in 2017 the total amount of livestock and poultry excrement in Hainan was 11.109 million tons. When the livestock manure was returned to agricultural fields, the aquaculture carrying capacity in the province was the equivalent of 675.15 million pigs. The pollution risks of the agricultural lands in Ding′an County and Haikou were relatively high at 0.98 and 0.81, respectively. The total nutrient content (nitrogen, phosphorus, and potassium) in the straw and livestock manure in Hainan was 145 000 tons. When the proportions of nutrients re-

收稿日期: 2019-06-13　　**录用日期:** 2019-08-22

作者简介: 杨　旭(1993—),男,安徽池州人,硕士研究生,从事废弃物资源化利用研究。E-mail:flyang131@163.com

***通信作者:** 林清火　E-mail:qinghuol@163.com

基金项目: 海南省重大科技计划项目(ZDKJ2017002);海南省农业环境污染治理项目(NWZL2017001);中国热带农业科学院基本科研业务费专项资金(1630022018012,1630022017007)

Project supported: Major Science and Technology Programme of Hainan Province(ZDKJ2017002); Agricultural Environmental Pollution Control Project of Hainan Province(NWZL2017001); Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund for Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences(1630022018012, 1630022017007)

turning to fields were1/3,2/3,and 100%, respectively, the replacement potentials of the organic fertilizers were 4.2%, 7.1%, and 14.1%. The results have shown that currently there are no environmental pollution risks from livestock and poultry breeding in most areas in Hainan. In addition, there is a large breeding space and the potential for fertilizer replacement.

Keywords: livestock manure; nutrients; agricultural land; carrying capacity; alternative fertilizer potential

随着社会经济的发展,畜禽养殖业由分散养殖转向规模化、集约化和产业化发展[1],伴随着大量畜禽粪便的产生。畜禽粪便含有一定量的有机质、氮磷钾养分以及植物生长所需的其他营养元素[2],但过量的还田会导致耕地和水源受到污染[3-4]。针对以上问题,国内外相关学者已展开相关系列工作。丹麦政府规定所有畜禽粪便应施用于农用地,农场应根据畜禽粪便特性以及不同作物对氮、磷、钾的需求量制定粪肥施用标准[5];欧盟采用多种措施促进"土壤-作物-畜牧业"系统氮的合理流动和循环[6];而德国主要根据农场土地面积和消纳能力来确定养殖环境承载力[7]。近年来国内相关学者对畜禽养殖环境承载力和能源潜力展开研究,蔡美芳等[8]根据土壤养分平衡计算江门市畜禽养殖承载力;耿维等[9]从县域角度对安徽省16市77县畜牧业氮磷钾养分资源量和耕地负荷进行估算,并基于安徽省化肥施用现状,评估了粪便资源作为有机肥对化肥的替代潜力。

海南岛作为中国第二大岛,农业较为发达,畜禽养殖业随着经济增长和政策扶持发展迅速,每年产生的畜禽粪便资源未得到充分利用,易造成资源浪费和环境污染。目前关于海南省畜禽粪便污染的研究报道中计算土壤养分负荷多基于耕地面积,而忽视林地和园地的消纳能力。本文通过海南省2017年养殖数据,分析海南省畜禽粪便资源空间分布和养殖结构,计算畜禽粪便农用地负荷和畜禽养殖承载量,开展环境污染风险评价,分析海南省秸秆、畜禽粪便养分总量替代化肥潜力,为海南省制订化肥减施战略、调整养殖结构和养殖布局提供参考。

1 材料和方法

1.1 数据来源

1.1.1 饲养期、饲养量

本研究所用海南省畜禽养殖数据来源于《海南省统计年鉴》,畜禽养殖周期主要来源于国家环保总局公布数据[10]。猪、家禽年出栏量为饲养量,牛(奶牛、肉牛)、羊年底存栏量为饲养量。牛、羊饲养期为365 d,妊娠猪年底存栏量为饲养量,饲养期为365 d,肉猪饲养期为199 d,肉鸡55 d,鸭、鹅饲养期为210 d。

1.1.2 排污系数

本文畜禽产排污系数参考畜禽养殖业源产排污系数手册[11]中南地区数据,其中生猪、奶牛、肉牛、肉鸡数据产排污系数相关参数参照文献。其中,猪产排污系数=1/3保育期产排污系数+2/3育肥期产排污系数,肉禽产排污系数以肉鸡产排污系数计算,羊、鸭、鹅氮磷养分产排污系数参考相关文献[11-12]。

表1 海南省畜禽产排污系数

Table 1 Production and discharge coefficient of livestock and poultry in Hainan Province

种类 Species		排污系数 Daily excretion/ kg·d^{-1}	全氮 Total N/ g·d^{-1}	全磷 Total P/ g·d^{-1}
猪 Pig	肉猪 Hog	3.74	36.51	4.84
	妊娠猪 Pregnant pig	7.33	36.51	4.84
牛 Cattle	肉牛 Beef	23.02	65.93	10.52
	奶牛 Cow	50.99	353.41	62.46
羊 Sheep	—	0.87	2.15	0.46
家禽 Poultry	鸡 Broiler	0.06	0.71	0.06
	鸭 Duck	0.06	0.71	0.06
	鹅 Goose	0.06	0.71	0.06

1.1.3 农用地面积

海南省18个市县2017年耕地、园地、林地等面积、化肥施用量等数据来源于《海南省统计年鉴》。

1.2 计算方法

1.2.1 畜禽粪便及氮磷养分产生量

(1)粪便年产生量

$$Y = K_i \times T_i \times \left(H_{粪} + H_{尿} \right) \quad (1)$$

式中:Y是畜禽粪便总量,t;K_i代表第i种畜禽数量,千头;$H_{粪}$和$H_{尿}$分别是畜禽粪和尿日排污系数,kg·d^{-1}·头$^{-1}$;T_i为第i种畜禽饲养周期,d。

(2)畜禽粪便氮磷养分产生量

$$Q = \sum_{i}^{n} B \times T \times H \times 0.01 \quad (2)$$

式中:Q为畜禽粪便养分(总氮、总磷)产生量,t;B为饲养量,万头;T为饲养期,d;H为日产排污系数(TN、TP),g·d^{-1}·头$^{-1}$,i为第i种畜禽;n为家禽种类。

(3)畜禽粪便钾养分产生量

由于缺少各类畜禽钾养分日排泄量,K养分参照贾伟等[13]的研究,公式如下:

$$TK = Y \times M \quad (3)$$

式中:TK为畜禽粪便钾养分产生量,kg;Y为畜禽粪便总量,t;M为钾含量,g·kg^{-1}。

1.2.2 农用地畜禽粪便氮磷养分负荷

海南省畜禽粪便消纳场所主要是耕地、林地、园地等农用地,根据调查结果2017年海南省农用地面积为79.8万hm^2,其氮磷养分负荷计算公式如下:

$$q = Q/A \quad (4)$$

式中:q为畜禽粪便氮磷养分负荷,kg·hm^{-2};Q为畜禽粪便氮磷养分总量,kg;A为农用地面积,hm^2。

1.2.3 畜禽养殖环境承载力

根据金继运等[14]的研究,在粮食增产中,化肥的施用比例达到50%,同时加以配施有机肥,会增加土壤有机碳和全氮含量,并能降低土壤氮的淋溶。耿维等[9]通过研究发现,50%畜禽粪便施用比例与实际管理需求更为接近,且对各地区畜禽养殖总量以及合理调整养殖布局更具有实际参考价值。因此,本文假定作物所需50%养分来自于畜禽粪便,另外50%来自于化肥配施。利用实际养殖数量和50%环境容量的比值作为风险系数,并对海南省各市县进行评估;同时参照耿维等[9]的研究,计算畜禽养殖环境承载力,公式如下:

$$Z = A \cdot C \quad (5)$$

$$r = 365 \times \left(H_{粪} \times M_{粪} + H_{尿} \times M_{尿} \right) \times 0.001 \quad (6)$$

$$EC = \frac{Z}{r} \times 10^{-4} \quad (7)$$

$$R = \frac{Q}{r} \times 10^{-4} \quad (8)$$

$$S = R/(50\%EC) \quad (9)$$

式中:Z为农用地氮、磷环境容量,t;A为农用地面积,10^3hm^2;C为畜禽粪便养分年施用限量值,参照欧盟限量标准,即单位面积农用地总氮磷负荷为220 kg(N)·hm^{-2}和65kg(P)·hm^{-2};EC为农用地畜禽环境最大承载力,万头猪当量;r为单位猪年粪便氮磷养分产生量,t·头$^{-1}$;Q为养分含量,t;R为实际养殖数量,万头猪当量;H为排污系数,kg·头$^{-1}$·d^{-1};M为养分百分含量,%;S为污染风险系数。

根据张绪美等[15]的研究,以中国南北地理划分线800 mm等降水量线(秦岭–淮河–喜马拉雅山东南端一线)为界,以南以45 t·hm^{-2}为有机肥最大承载量,以北则以30 t·hm^{-2}为最大承载量。欧盟提出耕地畜禽粪便承载量限定值为30 t·hm^{-2},其中畜禽粪便年养分施用限量值与土壤质地、降雨、气候等因素相关,综合考虑这些因素,欧盟粪肥年施用氮养分量是170 kg(N)·hm^{-2},超过这个限定值即会给土壤带来硝酸盐的淋洗,土壤粪便年施磷量限定值为35 kg(P)·hm^{-2},超过限定值会造成土壤磷污染[16-17]。由于国内气候条件和耕作方式与欧洲差异较大,且复种指数较欧洲较大,故采用欧盟标准会导致一定的误差。潘瑜春等[18]计算得出北京市平谷区粮食作物氮磷年需求限量值分别为200 kg(N)·hm^{-2}和40 kg(P)·hm^{-2};沈根祥等[19]计算得出上海地区粮食作物年氮磷养分需求量分别为219 kg(N)·hm^{-2}和63 kg(P)·hm^{-2}。考虑到海南省年平均气温比上海高且复种指数大,农作物需氮(磷)量高,故本文将海南地区年氮磷养分设置为220 kg(N)·hm^{-2}和65 kg(P)·hm^{-2}。

1.3 秸秆氮磷钾含量及化肥施用量

海南省2017年粮食作物产量数据来源于《海南省统计年鉴》,秸秆籽粒比数据来源于高利伟等[20]的研究结果,秸秆养分浓度数据参照中国有机肥养分数据集[21],见表2。

表2 海南省主要作物秸秆籽粒比及养分含量

Table 2 Grain-to-grain ratio and nutrient content of main crops in Hainan Province

种类 Species	产量 Yield/10^3t	籽粒比 Grain ratio	秸秆养分含量Straw nutrient content/%			秸秆资源量Straw resources/t		
			N	P	K	N	P	K
早稻Early rice	746.4	1.0	1.20	0.163	2.51	8 956.9	1 216.7	18 734.9
晚稻Late rice	660.8	1.0	1.14	0.189	1.47	7 533.1	1 248.9	9 713.8
甘蔗Sugar cane	4.4	0.1	1.10	0.14	1.10	1 806.5	229.9	1 806.5
大豆Soybean	7.2	1.6	1.81	0.196	1.17	207.7	22.5	134.3
芝麻Sesame	103.8	3.0	1.31	0.06	0.5	54.7	2.5	20.9
花生Peanut	1.4	1.5	1.82	0.163	1.09	2 834.6	253.9	1 697.7
番薯Potato	1 642.2	0.5	2.37	0.283	3.05	3 074.3	367.1	3 956.4
总计Total	3 166.2	—	—	—		24 467.8	3 341.4	36 064.3

1.3.1 粮食秸秆氮磷钾含量

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[13]。作物秸秆计算方法参照公式(10)计算,作物秸秆养分含量可根据公式(11)计算。

$$F = \sum_{l=1}^{d} X_l \times t_l \quad (10)$$

$$G = \sum_{l}^{d} F \times y_l \quad (11)$$

式中:F代表秸秆量,10^3t;d代表作物种类;X_l代表第l种作物产量,10^3t;t_l代表第l种作物籽粒比;G代表秸秆N、P养分总量,t;y_l代表第l种作物秸秆养分含量,g·kg^{-1}。

1.3.2 化肥施用量

(1)化肥施用量

$$Q_{化} = Q_N + Q_P + Q_K + Q_{复} \times \alpha \quad (12)$$

式中:$Q_{化}$为化肥施用总折纯量,t;Q_N为氮肥施用量,t;Q_P为磷肥施用量,t;Q_K为钾肥施用量,t;$Q_{复}$为复合肥施用量,t;α为复合肥氮磷钾折纯系数。

(2)化肥施用强度

$$T = \frac{Q_{化}}{A} \times 10^3 \quad (13)$$

式中:T为化肥施用强度,kg·hm^{-2};A为农用地面积,hm^2;$Q_{化}$为化肥施用总折纯量,t。

(3)有机肥替代化肥潜力

$$I = \frac{Q \times 10^{-3} + G}{Q_{化}} 或 I_1 = \frac{Q \times 10^{-3}}{Q_{化}} 或 I_2 = \frac{G}{Q_{化}} \quad (14)$$

式中:I为有机肥替代化肥潜力,I_1为畜禽粪便氮磷钾养分替代化肥潜力,I_2为秸秆氮磷钾养分替代化肥潜力;Q和G分别为畜禽粪便和秸秆氮磷钾养分总量,kg;$Q_{化}$为化肥施用总折纯量,t。

1.4 数据处理

利用Microsoft Excel 2010进行数据统计分析及图形绘制。

2 结果与分析

2.1 海南省畜禽粪便总量及构成分析

如图1所示,海南省2017年畜禽粪便总排放量达到1 110.9万t。从各市县分析结果来看,畜禽粪便排放量最高的是澄迈县,达到114.5万t,占比10.3%,其后分别是儋州市、定安县、乐东县、海口市、万宁市、文昌市,年畜禽粪便资源总量排放量均达到了75万t,排放量较小的是保亭县、白沙县、琼中县和五指山市,均低于30万t。

从畜禽粪便来源来看,海南省2017年各类畜禽粪便产生量依次为猪>牛>家禽>羊,粪便量依次为444.4万、550.4万、94.4万、21.7万t。不同种类畜禽粪便产生量在海南省各市县的分布也不相同,其中海口市、三亚市、琼海市、临高县、儋州市、东方市、琼中县、保亭县、白沙县的猪粪便均超过了当地总粪便的60%,这9个市县也达到了海南省年总猪粪量的56.3%;牛粪便主要集中在五指山市、文昌市、万宁市、定安县、屯昌县、乐东县、陵水县、昌江县这8个市县,占总量62.1%;羊粪主要分布在海口市、三亚市、文昌市、乐东县、琼中县、保亭县、白沙县、昌江县,占总量53.2%,而家禽粪便主要集中在文昌市、琼海市、定安县、澄迈县,占比为60.7%。

2.2 海南省畜禽粪便潜在污染

2.2.1 海南省畜禽粪便农用地负荷

海南省各市县畜禽粪便农用地负荷如图2所示。

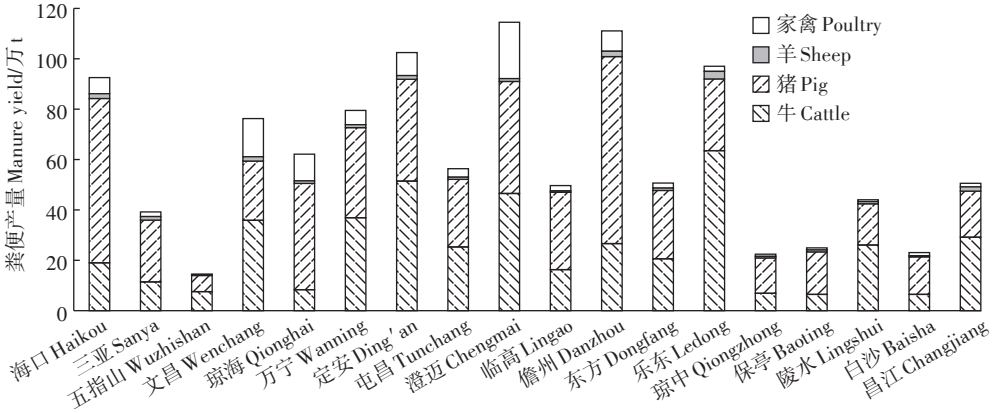

图1 2017年海南省畜禽粪便资源量和结构组成

Figure 1 Annual production and composition of feces of livestock and poultry in Hainan Province in 2017

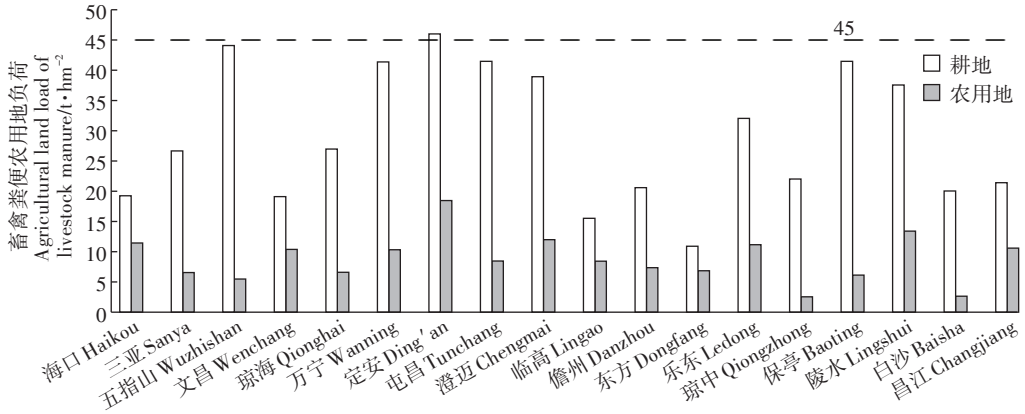

图2 海南省各市县畜禽粪便负荷量

Figure 2 Load of livestock and poultry manure in each city(county) of Hainan Province in 2017

海南省畜禽粪便农用地负荷平均值为8.6 t·hm^{-2},远低于最大承载量。海南省果园和林地的粪便负荷量占据总负荷量的66.1%,是耕地负荷量的2倍。由结果可知,仅将耕地作为消纳场所,海南省全省耕地负荷平均值为25.3 t·hm^{-2},其中5个市县负荷量超过40 t·hm^{-2},其中定安县超过最大承载量,达到46.0 t·hm^{-2},属于高污染级别。将耕地、果园和林地等农用地作为消纳场所时,海南省各市县畜禽粪便负荷变化显著,负荷值不超过20 t·hm^{-2},10个市县负荷值不超过10 t·hm^{-2},其中五指山市最为突出,只考虑耕地的情况下,耕地负荷量达到44.1 t·hm^{-2},而把果园和林地也作为消纳场所时,畜禽粪便负荷仅为5.5 t·hm^{-2},所以海南省年产畜禽粪便若合理施用,均能省内消纳。

2.2.2 海南省N、P养分污染潜势分析

农用地N、P养分负荷可以明确畜禽粪便对农用地潜在污染风险,海南省各市县N、P养分及农用地负荷如图3所示。海南省畜禽粪便N、P养分总量分别为7.1万t和0.9万t,N、P养分最多的市县为儋州市、澄迈县、海口市,年排放量均超过了7000 t和900 t,其余市县排放量均在6000 t和800 t以下。2017年海南省畜禽粪便N、P养分农用地负荷并不高,分别为55.1 kg·hm^{-2}和7.2 kg·hm^{-2},远低于欧盟规定的标准。区域角度来看,农用地N养分负荷最高的是定安县,为107.8 kg·hm^{-2},海口市、澄迈县农用地N养分负荷超过了80 kg·hm^{-2},其余市县均在80 kg·hm^{-2}以下,农用地P养分负荷最高的定安县和海口市,分别为14.1 kg·hm^{-2}和11.5 kg·hm^{-2},其余市县磷负荷均在10 kg·hm^{-2}以下。综合结果可知,海南省农用地N、P养分负荷都没有超过限定值,没有污染风险。

2.2.3 海南省畜禽养殖承载力分析

畜禽粪便还田过程中,如果仅从作物需氮量考虑养殖容量,容易导致土壤中磷的富集,造成土壤污染,海南省畜禽粪便总氮含量远高于总磷,根据木桶理论,本文以氮负荷为限制因子,计算畜禽粪便全部还田情况下海南省各市县畜禽养殖增加量,计算结果如图4所示。海南省所有市县均具有较大养殖潜力,其中儋州市最大,增加量为590.7万头猪当量,琼中县、白沙县、琼海市、乐东县、东方市和澄迈县6个市县增加量达到300万头,定安县、五指山市和陵水县3个市县养殖增加量在150万头以下,全省养殖容量为6 751.5万头,养殖空间剩余5 061.7万头猪当量。通过评估50%还田与现有养殖量比值进行风险评估,环境风险指数如图4所示。其中海南省没有市县环境风险指数超过1;海口市和定安县风险系数在0.76~1.00,农用地风险系数较高;文昌市、万宁市、澄迈县、陵水县风险系数在0.51~0.75之间,此类市县农用地污染属于中等级别,其中澄迈县和文昌市养殖业较为发达,在市县GDP中占据比例较大;其余市县农用地处于较低污染级别,可适时增加一定的养殖规模,有利于促进海南省养殖布局以及养分管理。

2.3 海南省有机肥替代化肥潜力

如图5所示,海南省2017年单位播种面积化肥施用量为616.4 kg·hm^{-2},远高于全国平均值352 kg·hm^{-2}和联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization,FAO)规定的化肥施用限值225 kg·hm^{-2}[9]。从市县角度看,白沙县、屯昌县、琼中县和五指山市处于全国平均值以下,只有琼中县和五指山市处于联合国限定值以下,其余市县均在全国平均值以上,大部分地区化肥施用量均在500 kg·hm^{-2}以上,乐东县、文昌

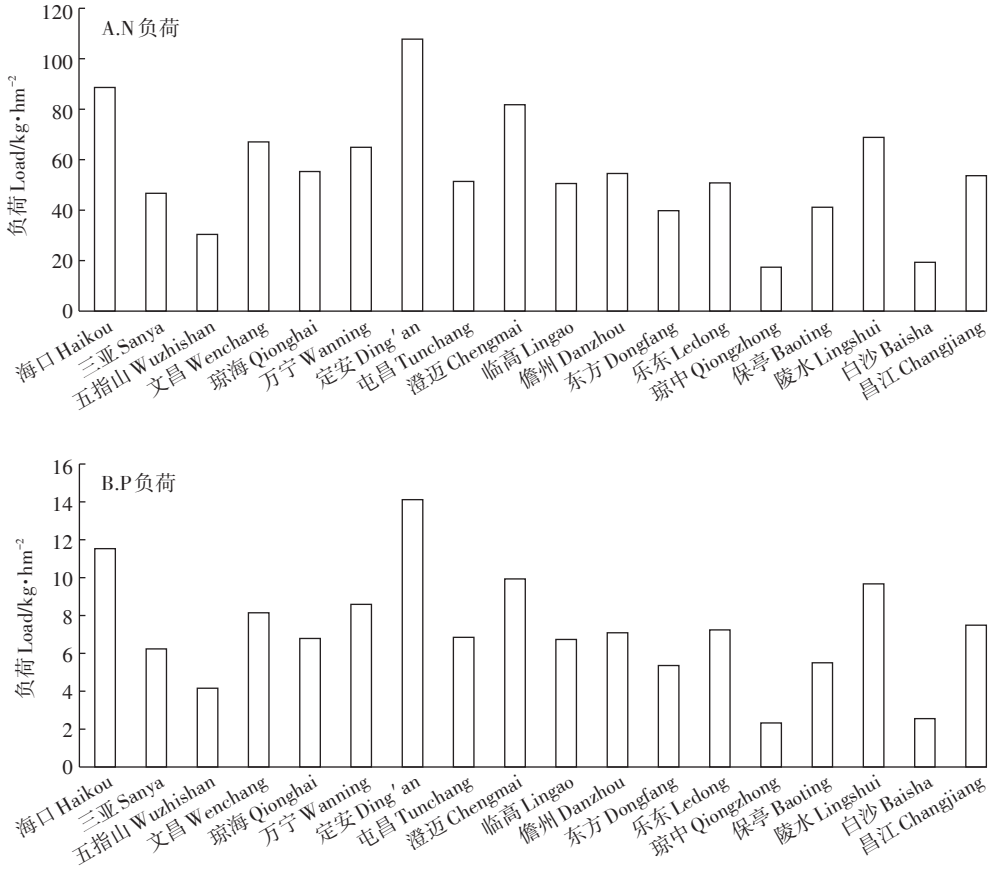

图3 海南省农用地畜禽粪尿氮、磷负荷

Figure 3 Nitrogen and phosphorus load of agricultural land in Hainan Province

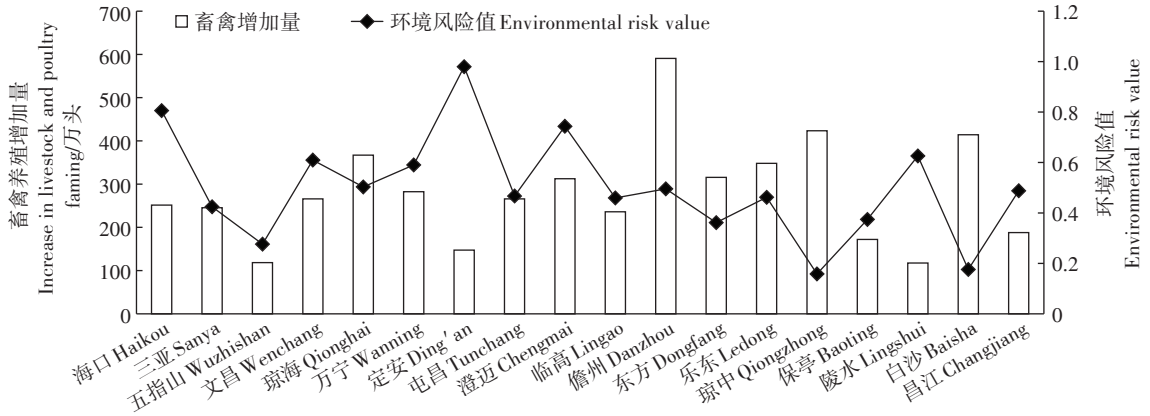

图4 不同畜禽粪尿还田比例下海南省各市县畜禽养殖增加量

Figure 4 Increase in the amount of livestock and poultry under different return-to-soil rates of livestock and poultry manure in Hainan Province

市、东方市超过700 kg·hm^{-2},琼海市超过1000 kg·hm^{-2}。可见海南省化肥施用量大,污染风险高,存在较大的化肥替代潜力。综合计算各类畜禽粪便和秸秆替代化肥潜力,贡献率分别为秸秆(7.5%)>猪粪(5.2%)>牛粪(1.5%)>家禽粪(1.2%)>羊粪(0.06%)。其中,猪粪对氮肥、磷肥贡献率最大,其次是秸秆,牛粪和秸秆对钾肥贡献率较高。

通过设置不同还田比例计算替代化肥的潜力,结果如表3所示。海南省2017年化肥施用总量为102.04万t,同期海南省畜禽粪便总量和秸秆养分含量分别为8.1万t和6.4万t,占化肥总量的14.1%。还田比例为1/3时,海南省替代化肥潜力为4.7%,各市

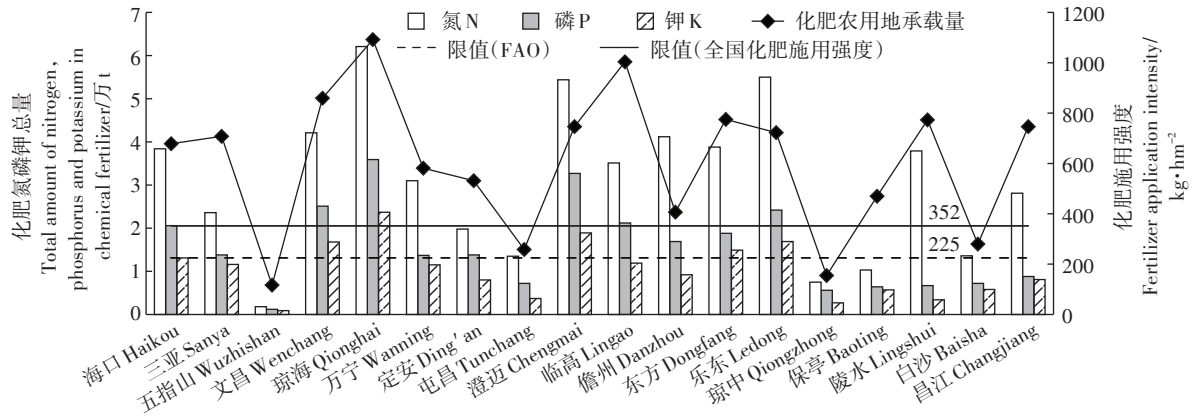

图5 海南省各市县化肥施用量及施用强度

Figure 5 Fertilizer application rate and application intensity in Hainan Province

表3 不同还田比例替代化肥潜力(%)

Table 3 Potential of replacing chemical fertilizer with different returning ratios(%)

市县 City	1/3还田 1/3 returned	2/3还田 2/3 returned	全部还田 Total returned
海口 Haikou	6.19	8.26	18.58
三亚 Sanya	3.20	6.41	9.61
五指山 Wuzhishan	14.05	28.09	42.14
文昌 Wenchang	4.12	8.25	12.37
琼海 Qionghai	2.65	5.31	7.96
万宁 Wanning	5.32	10.64	15.96
定安 Ding′an	9.02	18.04	27.06
屯昌 Tunchang	10.03	20.05	30.08
澄迈 Chengmai	5.08	10.17	15.25
临高 Lingao	4.07	8.14	12.21
儋州 Danzhou	7.93	15.85	23.78
东方 Dongfang	3.08	6.16	9.24
乐东 Ledong	3.17	6.35	9.52
琼中 Qiongzhong	7.05	14.11	21.16
保亭 Baoting	4.12	8.25	12.37
陵水 Lingshui	3.90	7.80	11.70
白沙 Baisha	4.13	8.25	12.38
昌江 Changjiang	3.75	7.49	11.24
全省 Total	4.70	9.39	14.09

县替代化肥潜力均在15%以下;还田比例为2/3时,海南省替代化肥潜力为9.4%,各市县五指山市潜力较大,为21.07%,其次是屯昌县,为15.04%,其余市县均在15%以下;还田比例为100%时,海南省18个市县中有8个市县替代化肥潜力高于全省平均值,处于15%以上,其中五指山市和屯昌县最高,分别为42.1%和30.1%;最低的是琼海市,替代潜力为8.0%;本文在计算有机肥替代化肥潜力时,将秸秆和畜禽粪便进行综合考虑,而在不考虑秸秆还田的情况下,海南省畜禽粪便替代化肥潜力仅为7.9%。从区域角度来看,假设海南省2017年有机肥全部还田后,替代化肥潜力较小,大部分市县化肥单位面积承载量依然在全国平均值以上,可见海南省大部分市县化肥施用强度较大且具有较大的养殖潜力。

3 讨论

3.1 畜禽粪便总量及环境风险

本文依据2017年统计数据,计算海南省畜禽粪便总量为1 110.9万t,N、P、K养分量分别为7.1万、0.9万t和88.8 t。刘越等[22]依据国家环保总局公布数据对海南省2011年畜禽粪便量进行计算,为1 741.8万t,N、P养分含量分别为9.8万t和2.8万t;刘永丰[23]通过查阅文献和实地调研估算海南省2011年畜禽粪便量约1 748.0万t,N、P养分含量分别为11.7万t和1.7万t;刘晓永等[12]从省级角度估算海南省2010年粪尿量为2 037.7万t和1 282.0万t,养分量为6~15万t,畜禽粪便单位耕地负荷和农用地负荷分别为35.3 t·hm^{-2}和28.2 t·hm^{-2}。以上结论与本文研究结果有一定差异,除去参数选择的不同,也因为海南省2017年养殖总量降低和大牲畜养殖比例大幅下降。海南省各市县经济水平差异,产业结构不同,地形地貌差异较大,海拔由中间往四周逐渐下降,中部地区种植高山茶叶、花卉,东南沿海城市旅游业发达,较少发展养殖业,故畜禽养殖业逐渐形成规模化,造成海南省畜禽粪便地区差异性较大。研究表明畜禽粪便储存过程中P、K损失率在40%左右[13],N的损失率可高达60%[24],影响耕地质量和水资源环境,大量的粪便残留是丰富的有机肥资源,因此在处理畜禽粪便时,需

要考虑当地实际情况，将畜禽粪便的处理、有机肥产业以及当地种植业相结合，发展有机肥处理新工艺，实现资源高效充分利用。本文估算海南省农用地畜禽粪便负荷为8.6 t·hm^{-2}，远低于杨飞等[25]、朱建春等[26]计算结果，主要是前人忽视了林地和园地对粪便的消纳。海南省属于热带地区，经济作物和热带作物占地面积较大，是耕地面积的2倍，故在评价海南省畜禽粪便对耕地污染风险时，综合考虑耕地、果园、林地和南药等农用地更加合理。同时本文在考虑畜禽粪便还田时，并未考虑农作物的复种指数以及畜禽粪便还田时N养分的挥发损失率，导致文章研究结果与实际有一定误差，但这并不影响对海南省畜禽粪便进行总体评价。畜禽养殖方式、饲料类型、气候条件等因素的存在，导致参数的偏差不可避免，实行每个养殖场的实时监测也会造成养殖成本的增加，若要准确系统地获取畜禽粪便数据，亟需对畜禽粪便的计算方法进行科学统一。

3.2 海南省畜禽养殖承载力

本文根据农用地承载养分限额计算海南省畜禽养殖承载力为6 751.5万头猪当量。刘永丰[23]以耕地面积为消纳场所计算海南省最大承载量2 451.1万头，而陈斌玺等[27]以农用地为消纳场所计算出海南省最大承载量为5 237.4万头，与本文畜禽粪便100%还田计算结果相差较大，这是由于本文在估算畜禽养殖环境承载力时，考虑到海南省属于热带地区，气候类型不同于欧洲，复种指数较大，对畜禽粪便的消纳能力更高，将农用地氮磷养分负荷限定值设置为220 kg(N)·hm^{-2}和65 kg(P)·hm^{-2}。在后续研究中仍需进一步考察海南省土壤对粪便的消纳能力和海南省人口消费等社会因素来综合评估畜禽养殖环境承载力。在计算50%畜禽粪便还田环境容量与实际养殖量比值时，海口市和定安县两个区域环境风险值在0.76~1.00，农用地承载风险较大，该地区应根据土壤本底值、作物养分需求量和秸秆养分量等养分平衡参数进行总量的管控，同时需要增加削减氮磷污染措施，加大畜禽废弃物处理措施，通过产品化进行销售；文昌市、万宁市、澄迈县、陵水县风险系数在0.51~0.75之间，农用地属于中等污染风险，其中澄迈县和文昌市养殖业较为发达，在市县GDP中占据比例较大，在此类地区种养脱离的情况下，政府应鼓励种养结合模式并将畜禽粪便就地消纳利用，加大种养结合模式的研发力度，并进行推广；其余市县养殖风险指数较小，此类地区可适当增加养殖规模，有助于推进全省畜禽养殖布局合理规划和畜禽粪便养分的管理。从全省角度来看，海南省虽为生态旅游城市，但是进行适当养殖，且对养殖场布局进行合理规划，妥善处理畜禽粪污，海南省仍然具有一定的养殖潜力，这也符合新近出台《海南省畜牧业发展规划(2016—2020年)》文件，是把海南省建设成为生态文明示范区和国际旅游岛的重要措施。

3.3 有机肥替代化肥潜力分析

宋大利等[28]研究表明2015年中国畜禽粪尿氮素养分达到1 478.0万t，粪尿全部还田理论上可减少氮、磷、钾肥37.3%、87.6%和65.9%；路国彬等[29]利用模型估算2014年中国畜禽粪便替代氮、磷、钾肥潜力分别为1 186.8万、806.4万t和1 169.3万t，分别占据化肥施用量的38.3%、52.0%和86.8%；本文研究发现海南省2017年化肥施用总量为102.0万t，化肥施用强度为616.4 kg·hm^{-2}，远高于全国平均值。同期海南省畜禽粪便总量和秸秆养分含量分别为8.1万t和6.4万t，总数占化肥总量的14.2%，各类有机肥替代化肥潜力大小为秸秆(7.5%)>猪粪(5.2%)>牛粪(1.5%)>家禽粪(1.2%)>羊粪(0.06%)。本文在估算海南省秸秆养分还田时，忽略了秸秆还田比例问题。据刘晓永等[1,30]研究2016年全国秸秆还田比例为61.3%，2010年东南地区各类畜禽粪便还田比例为53.3%~70.4%，导致本文估计有机肥替代化肥潜力偏大。相关研究表明[31]，2/3秸秆和畜禽粪便还田会增加土壤养分以及作物产量，故本文参考宋大利等[28]研究，设置1/3、2/3和100%还田3个情况，海南省有机肥替代化肥潜力分别为4.7%、9.5%和14.2%，秸秆由于碳氮比较高，分解速率较慢，因此还田时需要适当补充氮磷养分，保证作物生长所需，而畜禽粪便直接还田会导致重金属、抗生素污染，其中畜禽粪便是土壤抗生素的主要来源，堆肥和沼气可以有效去除抗生素影响，对重金属的钝化也具有一定效果。海南省复种指数大，导致海南省秸秆总量增长空间不大，而海南省畜禽养殖潜力较大，畜禽粪尿养分增值空间大。随着海南省经济增长和政策扶持，海南省有机肥替代化肥潜力也会逐年增加，所以实现有机肥产业化和市场化已成为海南省有机肥发展的途径之一，相关研究表明[32]，施用有机肥替代化肥，会降低环境酸化、全球变暖和富营养化趋势，同时畜禽粪便内含有大量植物生长所必需的矿质元素，能够抑制植物土传病害，后续研究应进行长期定位试验，进行不同比例畜禽粪便还田，观察海南省土壤理化性质和作物生长，确定海南省畜禽粪便最佳还田比例。

4 结论

(1)海南省2017年畜禽粪便总量为1 110.9万t,N、P、K养分排放总量分别为7.1万、0.9万t和88.8 t。农用地氮、磷负荷量分别为55.1 kg·hm^{-2}和7.2 kg·hm^{-2}。

(2)海南省畜禽粪便全部还田时畜禽养殖总量为6 751.5万头猪当量,定安县和海口市环境风险值较大,分别为0.98和0.81;其次是文昌市、万宁市、澄迈县、陵水县,农用地污染风险属于中等级别;其余市县农用地暂时没有污染风险,因此部分市县具有较大养殖空间。

(3)海南省有机肥替代化肥潜力大,秸秆和4种畜禽粪便替代化肥潜力大小分别为秸秆(7.5%)>猪粪(5.2%)>牛粪(1.5%)>家禽粪(1.2%)>羊粪(0.06%)。秸秆和畜禽粪便按1/3、2/3和100%还田替代潜力分别为4.2%、7.1%和14.1%。

参考文献:

[1] 刘晓永, 李书田. 中国畜禽粪尿养分资源及其还田的时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 1-14.
LIU Xiao-yong, LI Shu-tian. Temporal and spatial distribution of nutrient resource from livestock and poultry feces and its returning to cropland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(4): 1-14.

[2] 李书田, 刘荣乐, 陕 红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 179-184.
LI Shu-tian, LIU Rong-le, SHAN Hong. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 179-184.

[3] 翁伯琦, 雷锦桂, 江枝和, 等. 集约化畜牧业污染现状分析及资源化循环利用对策思考[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊1): 294-299.
WENG Bo-qi, LEI Jin-gui, JIANG Zhi-he, et al. Present situation analysis of intensive livestock pollution and counter measures consideration of resource recycling[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl 1): 294-299.

[4] 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 Jian-yu, et al. Biogas energy potential for livestock manure and gross control of animal feeding in region level of China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(1): 171-179.

[5] 隋 斌, 孟海波, 沈玉君, 等. 丹麦畜禽粪肥利用对中国种养循环农业发展的启示[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 1-7.
SUI Bin, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, et al. Utilization of livestock manure in Denmark and its inspiration for planting-breeding combined circular agricultural development in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(12): 1-7.

[6] Velthof G L, Lesschen J P, Webb J, et al. The impact of the nitrates directive on nitrogen emissions from agriculture in the EU-27 during 2000—2008[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468-469(5): 1225-1233.

[7] 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.

[8] 蔡美芳, 刘晓伟, 吴孝情, 等. 基于土壤养分平衡的畜禽养殖承载力研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1431-1440.
CAI Mei-fang, LIU Xiao-wei, WU Xiao-qing, et al. Livestock and poultry carrying capacity of land based on soil nutrient balance[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(6): 1431-1440.

[9] 耿 维, 孙义祥, 袁嫚嫚, 等. 安徽省畜牧业环境承载力及粪便替代化肥潜力评估[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 252-260.
GENG Wei, SUN Yi-xiang, YUAN Man-man, et al. Evaluation of environmental carrying capacity and manure organic fertilizer instead chemical fertilizer potential of animal husbandry in Anhui[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(18): 252-260.

[10] 国家环境保护总局自然生态保护司. 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.
Sate Environmental Protection Administration of Nature and Ecology Conservation. National-scale livestock and poultry pollution investigation and prevention measures[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.

[11] 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[M]. 2009: 7-10.
Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Nanjing Institute of Environmental Sciences, MEP. The pollution discharge coefficient and emission coefficient manual of livestock and poultry breeding industry in China[M]. 2009: 7-10.

[12] 刘晓永, 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(12): 5723-5739.
LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian. Livestock and poultry faeces nitrogen loading rate and its potential returning to farmland in China[J]. *Environmental Science*, 2018(12): 5723-5739.

[13] 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 Yu-hong, 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 CSAE*, 2014, 30(8): 156-167.

[14] 金继运, 李家康, 李书田. 化肥与粮食安全[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 601-609.
JIN Ji-yun, LI Jia-kang, LI Shu-tian. Chemical fertilizer and food security[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5): 601-609.

[15] 张绪美, 董元华, 王 辉, 等. 中国畜禽养殖结构及其粪便N污染负荷特征分析[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1311-1318.

ZHANG Xu-mei, DONG Yuan-hua, WANG Hui, et al. Structure of livestock and variation of fecal nitrogen pollution load in China[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(6):1312-1318.

[16] Henkens P L C M, Van Keulen H. Mineral policy in the Netherlands and nitrate policy within the European Community[J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 2001, 49(2/3):117-134.

[17] Oenema O, van Liere L, Plette S, et al. Environmental effects of manure policy options in the Netherlands[J]. *Water Science & Technology*, 2004, 49(3):101-108.

[18] 潘瑜春, 孙 超, 刘 玉, 等. 基于土地消纳粪便能力的畜禽养殖承载力[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4):232-239.
PAN Yu-chun, SUN Chao, LIU Yu, et al. Carrying capacity of livestock and poultry breeding based on feces disposal volume of land[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(4):232-239.

[19] 沈根祥, 钱晓雍, 梁丹涛, 等. 基于氮磷养分管理的畜禽场粪便匹配农田面积[J]. 农业工程学报, 2006(S2):268-271.
SHEN Gen-xiang, QIAN Xiao-yong, LIANG Dan-tao, et al. Research on suitable area for cropland application of animal manure based on nutrients management of nitrogen and phosphorus[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006(S2):268-271.

[20] 高利伟, 马 林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7):173-179.
GAO Li-wei, MA Lin, ZHANG Wei-feng, et al. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(7):173-179.

[21] 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.
China National Agricultural Technology Extension Service. Data collection for organic fertilizer nutrients in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.

[22] 刘 越, 孟海波, 沈玉君, 等. 海南省畜禽粪便资源分布及总量控制研究[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(4):114-121.
LIU Yue, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, et al. Studies on resource distribution and gross control of animal and poultry manure in Hainan Province[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2015, 17(4):114-121.

[23] 刘永丰. 海南省畜禽养殖环境预警研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2013.
LIU Yong-feng. The research of environmental alarm of livestock and poultry in Hainan province[D]. Changsha:Hunan Agricultural University, 2013.

[24] 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(5):1068-1077.
CHANG Zhi-zhou, JIN Hong-mei, HUANG Hong-ying, 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.

[25] 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 Fei, YANG Shi-qi, ZHU Yun-qiang, 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 CSAE*, 2013, 29(5):1-11.

[26] 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 Jian-chun, ZHANG Zeng-qiang, FAN Zhi-min, et al. Biogas potential, cropland load and total amount control of animal manure in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3):435-445.

[27] 陈斌玺, 刘俊专, 吴银宝, 等. 海南省农地土壤畜禽粪便承载力和养殖环境容量分析[J]. 家畜生态学报, 2012, 33(6):78-84.
CHEN Bin-xi, LIU Jun-zhuan, WU YIN-bao, et al. Analysis of manure bearing capacity and culture environment capacity of soil and poultry in agricultural land in Hainan Province[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2012, 33(6):78-84.

[28] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌. 中国畜禽粪尿中养分资源数量及利用潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5):5-22.
SONG Da-li, HOU Sheng-peng, WANG Xiu-bin. Nutrient resource quantity of animal manure and its utilization potential in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5):5-22.

[29] 路国彬, 王夏晖. 基于养分平衡的有机肥替代化肥潜力估算[J]. 中国猪业, 2016, 11(11):15-18.
LU Guo-bin, WANG Xia-hui. Potential estimation of organic manure substitute for fertilizer based on nutrient balance[J]. *China Swine Industry*, 2016, 11(11):15-18.

[30] 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 Xiao-yong. Study on nutrients balance and requirement in agricultural production in China[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.

[31] 陈冬林, 易镇邪, 周文新, 等. 不同土壤耕作方式下秸秆还田量对晚稻土壤养分与微生物的影响[J]. 环境科学学报, 2010, 30(8):1722-1728.
CHEN Dong-lin, YI Zhen-xie, ZHOU Wen-xin, et al. Effects of straw return on soil nutrients and microorganisms in late rice under different soil tillage systems[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(8):1722-1728.

[32] 杨泳冰, 胡 浩, 王益文. 农户以商品有机肥替代化肥的行为分析——基于江苏南通市228户调查数据[J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2012, (6):1-6.
YANG Yong-bing, HU Hao, WANG Yi-wen. Behavior of farmers′ using merchandise organic fertilizer as the substitution of chemical fertilizer:Based on the survey data of 228 households in Nantong City, Jiangsu Province[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 2012(6):1-6.