

刘晓永, 王秀斌, 李书田. 中国农田畜禽粪尿磷负荷量及环境风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11): 2594–2608.

LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian. Phosphorus loading rates from livestock and poultry faeces, and environmental evaluation in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11): 2594–2608.

中国农田畜禽粪尿磷负荷量及环境风险分析

刘晓永^{1,2}, 王秀斌¹, 李书田^{1*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 华南农业大学, 广州 510642)

摘要: 准确掌握不同地区畜禽粪尿和磷负荷量及其环境风险, 为畜禽养殖总量控制、合理布局和还田利用提供决策依据。基于统计数据和文献资料, 利用磷的猪粪当量(P)估算了我国畜禽粪尿量和各类畜禽粪尿比例的时空变化, 分析和评价了当前各省份畜禽粪尿和磷资源量及其土地负荷量和污染风险, 并根据畜禽粪尿还田率估算了当前各省份畜禽粪尿及其磷还田量, 并进行环境风险评价。结果表明: 中国畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量1978年至2005年快速增加, 2006年至2016年保持稳定。截止2016年, 猪粪当量(P)约21.23亿t, 磷量约545万t, 比1978年均增长123%, 华北地区畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量最大, 约占全国总量的23%和9%。区域水平上, 按耕地面积计算, 东南和西南地区负荷量较大, 为V级, 有严重污染风险, 按农作物种植面积计算, 东南和西南地区较大, 为IV级, 有较严重污染风险, 按农用地计算, 东南、长江中下游和华北地区负荷量较大, 为IV级, 有较严重污染风险。省级单元上, 湖南负荷量最大, 其次是北京、广东和河南, 这些省份为V级, 有严重污染风险。全国畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷还田量分别为11.51亿t和295万t, 折合成单位农用地面积分别为3.1 t·hm⁻²和8.0 kg·hm⁻²。区域上东南地区还田最多, 分别为10.3 t·hm⁻²和26.3 kg·hm⁻², 为III级, 有污染风险, 其次是华北和长江中下游地区, 为II级, 稍有污染风险, 而东北、西南和西北地区相对较低, 为I级, 无污染风险。省级单元上湖南和北京还田较多, 为IV级, 有较严重污染风险, 华北、长江中下游、东南地区的多数省份和部分西南地区省份农用地畜禽粪尿磷还田量接近或大于50%单位土地面积畜禽粪尿磷的年施用限量, 具有较高的污染风险。研究表明, 不同区域和省份畜禽粪尿磷负荷量和还田量污染风险具有较大差异, 但多数省份尤其华北、长江中下游、东南地区的畜禽粪尿磷污染风险较大。

关键词: 畜禽粪尿; 磷的猪粪当量; 负荷量; 还田量; 时空分布

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)11-2594-15 doi:10.11654/jaes.2018-0626

Phosphorus loading rates from livestock and poultry faeces, and environmental evaluation in China

LIU Xiao-yong^{1,2}, WANG Xiu-bin¹, LI Shu-tian^{1*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Determining the loading rates of livestock/poultry feces and corresponding phosphorus levels as well as the related environmental risks in farmland in China can provide a scientific basis for decision-making in controlling the livestock/poultry scale, redistribution, and faeces returning to farmland. In this study, we estimated the temporal and spatial changes of livestock/poultry faeces using the pig manure equivalent(P) of phosphorus based on statistical data and the literature. The current amount of livestock/poultry faeces and phosphorus, loading rate, and their returning and environmental pollution risks in each province of China were analyzed and evaluated. The results showed that the amount of pig manure equivalent(P) and P from livestock/poultry faeces increased rapidly from 1978 to 2005 and then remained stable from 2005 to 2016. By 2016, the pig manure equivalent(P) was 2.12×10^9 t and P was 5.45×10^6 t, representing a 123% increase, with the largest amount found in northcentral China. At the regional level, based on arable land or planting area, the southwest and

收稿日期: 2018-05-12 录用日期: 2019-08-13

作者简介: 刘晓永(1988—), 男, 江苏徐州人, 博士, 从事农业环境保护研究。E-mail: 853653593@qq.com

*通信作者: 李书田 E-mail: lishutian@cass.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200103)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2016YFD0200103)

southeast regions had large P loading rates with a grade IV or V loading risk index(r), representing a serious or relatively serious environmental pollution risk. When based on farmland area, the southeast, Middle and Lower Reaches of the Yangtze River(MLRYR), and north-central regions had very high P loading rates, with grade IV r and a relatively serious pollution risk. At the provincial level, Hunan had the largest loading rate, followed by Beijing, Guangdong, and Henan Province, with a grade V r , indicating a serious pollution risk. The returned pig manure equivalent(P) and P to farmland values were 1.15×10^9 t($3.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) and 2.95×10^6 t($8.0 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$), respectively. At the regional level, the northcentral region had the largest returning rates with an r of III and pollution risk, followed by the northcentral and MLRYR regions, with an r of II and light pollution risk, followed by the northeast, southwest, and northwest regions with no pollution. At the provincial level, Hunan and Beijing showed relatively higher returning rates with an r of IV and relatively serious pollution risk. Most provinces in the northcentral, MLRYR, and southeast regions, and some provinces in the southwest region had returning rates that were nearly or more than 50% greater than the annual permissible amount of P from animal faeces, representing a high pollution risk.

Keywords: livestock and poultry faeces; pig manure equivalent(P) of phosphorus; loading rate; returning rate to farmland; temporal and spatial distribution

改革开放以来我国畜禽养殖业发展迅速^[1-3],并形成区域特性^[4-5]。畜禽养殖产生的粪尿量不断增加^[6-7],导致农田土壤中畜禽粪尿负荷量增加,甚至过高^[8-9],若没有足够的土地资源对畜禽养殖废弃物进行消纳,则很容易对环境造成污染^[10-11]。因此农田对畜禽粪尿的消纳容量和污染风险更应是人们普遍关注的焦点^[10, 12-14]。我国磷肥消费量逐年上升,部分地区和作物磷肥投入过量,导致磷肥利用率下降,并造成环境污染风险,在这种情况下若畜禽粪尿投入过量,则极易导致磷的投入过高,引起环境问题。因此,及时准确地了解畜禽粪尿资源、分布状况、土地承载量 and 环境风险,对科学利用畜禽粪尿养分资源和合理规划布局畜禽养殖具有重要的指导意义。

针对畜禽粪尿土地负荷量和环境污染问题,国内外相关学者开展了很多工作。景栋林等^[15]根据2009年佛山市畜禽养殖数据估算畜禽粪便产生量及其主要养分含量,得出当年佛山市农田畜禽粪便负荷量[以猪粪当量(P)计]为 $74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷养分负荷量为 $187 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,已超出农田的承载能力。朱建春等^[16]通过估算1978—2011年间我国畜禽养殖业畜禽粪便产生量及其磷的变化,分析了我国畜禽粪便的来源结构、磷耕地负荷,表明我国大部分地区或省份畜禽实际养殖量已经超过50%环境容量。Provolto^[17]、Bassanino等^[18]和Song等^[19]也依据耕地畜禽粪便养分负荷研究畜禽养殖对环境污染的影响。由此可见,从畜禽粪尿资源总量消纳的角度分析土地负荷量和评价环境风险研究较多,而从畜禽粪尿资源实际还田的角度探讨土地负荷和评价污染风险鲜有报道。为此,本文分析了1978—2016年我国畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量的变化规律和还田量,以省级为单位分析当前我国

畜禽粪尿猪粪当量(P)、磷量及其还田状况,从耕地、农作物播种面积和农用地三方面分析畜禽粪尿还田的猪粪当量(P)和磷负荷量,并进行环境预警分析,以期为我国各省区畜禽养殖总量控制、合理布局和还田利用提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 估算方法

本文参照我国粮食主产区划分将我国分为如下区域^[6]:(1)东北地区,包括黑龙江、吉林和辽宁;(2)华北地区,包括北京、天津、河北、河南、山东、山西;(3)长江中下游地区,包括上海、江苏、浙江、安徽、湖北、湖南、江西;(4)西北地区,包括内蒙古、陕西、宁夏、甘肃、青海、新疆;(5)西南地区,包括重庆、四川、贵州、云南、西藏;(6)东南地区,包括福建、广东、广西、海南。本文未包括香港、澳门、台湾的数据。

畜禽粪、尿产生量的估算多采用排泄系数法^[20-21]。各类畜禽粪尿的年产生量由畜禽饲养量(年末存栏数、年内出栏数)、饲养周期、排泄系数计算而得。参考之前的研究方法^[7],本文考虑畜禽年内出栏数和年末存栏数的差异,以及各畜禽饲养周期的大小差异,分别确定饲养周期 $>1\text{a}$ 和 $\leq 1\text{a}$ 畜禽年排泄量的估算方法,同时为避免粪和尿的种类差异,将畜禽粪、尿量分开估算。计算公式如下:

(1)畜禽粪尿(鲜质量):

$$QM_i = Si \times Pi \times Mi / 10^3 + Hi \times 365 \times Mi / 10^3$$

$$QM_j = Hj \times 365 \times Mj / 10^3$$

$$QU_i = Si \times Pi \times Ui / 10^3 + Hi \times 365 \times Ui / 10^3$$

$$QU_j = Hj \times 365 \times Mj / 10^3$$

式中:QM和QU分别为畜禽粪量和尿量, 10^4 t ; i 为猪、

牛、羊和家禽的种类; j 为马、驴和骡的种类; S 、 H 分别为畜禽年内出栏数、年末存栏数, 10^4 个(头); P 为饲养周期, d ; 365为1年365 d; M 和 U 分别为畜禽粪和尿日排泄系数, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{个}(\text{头})^{-1}$; 10^3 为换算系数。

(2) 畜禽粪尿磷(P)、猪粪当量(P):

$$\text{TPi}(j) = \text{QMi}(j) \times \text{MPi}(j) + \text{QUi}(j) \times \text{UPi}(j)$$

$$\text{TPPi}(j) = \text{QMi}(j) \times \text{MEPi}(j) + \text{QUi}(j) \times \text{UEPi}(j)$$

式中: TP 为畜禽粪尿磷量, 10^4 t ; TPP 为畜禽粪尿猪粪当量(P), 10^4 t ; QM 和 QU 分别为畜禽粪量和畜禽尿量, 10^4 t ; MP 和 UP 分别为畜禽粪磷和畜禽尿磷含量, %; MEP 和 UEP 分别为畜禽粪猪粪当量(P)转换系数和畜禽尿猪粪当量(P)转换系数。

(3) 畜禽粪尿磷养分和畜禽粪尿猪粪当量(P)还田量:

$$\text{DPi}(j) = \text{TPi}(j) \times [1 - \text{LPi}(j)] \times \text{Rdi}(j)$$

$$\text{BPi}(j) = \text{QMi}(j) \times \text{MPi}(j) \times [1 - \text{LPi}(j)] \times \text{Rdi}(j) \times \text{Pr}$$

$$\text{DPPi}(j) = \text{TPPi}(j) \times [1 - \text{LPi}(j)] \times \text{Rdi}(j)$$

$$\text{BPPi}(j) = \text{QMi}(j) \times \text{MPi}(j) \times [1 - \text{LPi}(j)] \times \text{Rdi}(j) \times \text{Pr}$$

式中: DP 、 BP 分别为畜禽粪尿直接还田的磷量和粪便燃烧后还田的磷量, 10^4 t ; DPP 、 BPP 分别为畜禽粪尿猪粪当量(P)直接还田量和燃烧后还田量, 10^4 t ; Rd 为畜禽粪尿直接还田率, %; LP 为磷损失率, %; Pr 为粪便燃烧后磷归还率, %。

(4) 单位面积畜禽粪尿磷和畜禽粪尿猪粪当量(P):

$$\text{AP} = (\sum_i \text{TPi} + \sum_j \text{TPj}) / A \times 10^4$$

$$\text{ADP} = (\sum_i \text{DPi} + \sum_j \text{DPj} + \sum_i \text{BPi} + \sum_j \text{BPj}) / A \times 10^4$$

$$\text{APP} = (\sum_i \text{TPPi} + \sum_j \text{TPPj}) / A \times 10$$

$$\text{ADPP} = (\sum_i \text{DPPi} + \sum_j \text{DPPj} + \sum_i \text{BPPi} + \sum_j \text{BPPj}) / A \times 10$$

10

式中: AP 为单位面积耕地(或农用地或农作物播种面积)畜禽粪尿磷, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; APP 为单位面积耕地(或农用地或农作物播种面积)畜禽粪尿猪粪当量(P), $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; ADP 为单位面积耕地(或农用地或农作物播种面积)畜禽粪尿磷还田量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; ADPP 为单位面积耕地(或农用地或农作物播种面积)畜禽粪尿猪粪当量(P)还田量, $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 10^4 和10为转换系数; TPP 为畜禽粪尿猪粪当量(P), 10^4 t ; A 为耕地面积(或农用地或农作物播种面积), hm^2 。

(5) 畜禽粪尿负荷风险指数^[22]:

$$r = q/p$$

式中: r 为畜禽粪尿负荷风险指数, r 值越大, 环境对畜禽粪尿承受程度越低, 对环境造成污染的威胁性越大;

q 为单位土地面积畜禽粪尿磷量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; p 为单位土地面积畜禽粪尿磷年施用限量, $35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[23]。

1.2 数据及参数

1.2.1 数据

本文中畜禽(猪、牛、羊、家禽、马、驴、骡)年末存栏数和年内出栏数, 以及耕地、农用地(主要包括耕地、草地、园地)和农作物播种面积数据取自《中国统计年鉴》(1978—2016年)^[4]和《中国农业统计年鉴》(1978—2016年)^[5], 其中缺失的年份统计数据采用年均增长率反推算得之^[24]。为避免畜禽种类和畜禽养殖量, 以及农用地年际间变化的影响, 本文以2016年当年数据为基础, 并用2010—2016年数据进行矫正, 以去除不合理数值。

1.2.2 参数

(1) 畜(禽)粪尿日排泄系数

本文收集、整理和分析大量的文献资料、书籍或研究报告等, 采用加权均值计算各种畜(禽)的粪、尿日排泄系数(表1)。

(2) 畜(禽)粪、尿猪粪当量(P)换算系数

本文估算的畜(禽)粪、尿量是以鲜质量计, 因此在估算畜(禽)粪、尿氮磷钾养分含量时也是以鲜基计。本文采用之前的研究结果, 即通过收集、整理和分析大量相关文献资料、书籍或研究报告等, 采用加权均值计算出各种畜(禽)粪、尿的磷含量, 并根据各畜禽粪、尿的磷含量计算出各种粪尿的猪粪当量(P)换算系数(表1)。

(3) 畜(禽)饲养周期

畜(禽)饲养周期指畜(禽)被饲养的天数, 因畜(禽)种类及用途的差异, 其饲养天数大不相同。一般饲养周期大于一年的, 按365 d计算, 饲养周期小于一年的, 按实际天数计算。

1978—2016年畜禽饲养周期参照《全国农产品成本收益资料汇编》^[25](表2)。2016年各省不同畜禽饲养周期以2016年当年数据为基础, 并用2010—2016年数据矫正, 去除不合理数值(表3)。马、驴、骡饲养周期都大于365 d, 按365 d计。

(4) 畜禽粪尿还田率

本文2016年畜禽粪尿还田率参照前期研究的2010—2016年加权均值^[7](表4)。

(5) 畜禽粪尿养分损失率

从养分循环利用角度考虑, 畜禽粪尿还田利用是一种最为经济的资源化利用和处置方式, 但由于资源化利用技术落后、产业化水平滞后等各种因素的制

约,受困于资金、技术的限制,畜禽粪尿在施到农田之前通常要经历“排泄-清扫-储存-处理(堆积、高温堆肥或厌氧发酵)-运输和转移”过程^[26-27],在处置、利用过程中氮磷钾养分损失较大^[2,27-30],不可避免地造成畜禽粪尿磷的损失,猪、牛、羊、家禽、马、驴和骡粪尿磷损失率分别为15%、15%、18%、15%、18%、18%和18%^[31]。而用作燃料燃烧的粪便,燃烧后粪便磷的归

还率为82.5%^[7,32]。

1.3 数据处理

数据采用Microsoft Excel计算和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同年份畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量

由于不同种类的畜禽粪、尿中养分含量差异较

表1 畜禽的粪、尿日排泄量(鲜基)及其磷养分含量(鲜基)和猪粪当量(P)换算系数

Table 1 Daily manure/urine excretion and P content(FW) by various livestock/poultry and pig manure equivalent(P) of phosphorus				
畜禽 Livestock/Poultry	粪/尿 Manure/Urine	日排泄量 ^[7] Daily excrete/kg·d ⁻¹ ·head ⁻¹	磷含量 ^[7] P content/%	猪粪当量(P)换算系数 Pig manure equivalent(P) coefficient factor
猪 Pig	粪 Manure	2.71	0.26	1.00
	尿 Urine	3.39	0.02	0.09
牛 Cattle	粪 Manure	24.87	0.10	0.38
	尿 Urine	11.70	0.02	0.08
羊 Sheep	粪 Manure	2.09	0.22	0.87
	尿 Urine	0.64	0.03	0.13
家禽 Poultry	粪 Manure	0.12	0.37	1.46
马 Horse	粪 Manure	11.46	0.14	0.53
	尿 Urine	4.55	0.06	0.25
驴 Donkey	粪 Manure	7.77	0.19	0.73
	尿 Urine	3.75	0.01	0.05
骡 Mule	粪 Manure	7.77	0.16	0.61
	尿 Urine	3.75	0.01	0.05

表2 不同年份不同畜禽饲养周期(d)

Table 2 Feeding periods of various livestock and poultry in different years(d)									
年份 Years	猪 Pig	牛 Cattle	羊 Sheep	家禽 Poultry	年份 Years	猪 Pig	牛 Cattle	羊 Sheep	家禽 Poultry
1978	192.16	404.13	385.86	66.97	1998	167.67	275.00	298.00	59.50
1979	192.16	404.13	385.86	66.97	1999	155.67	244.00	294.00	58.50
1980	192.16	404.13	385.86	66.97	2000	158.50	241.00	294.00	57.00
1981	192.16	404.13	385.86	66.97	2001	155.00	254.00	260.00	63.00
1982	192.16	404.13	385.86	66.97	2002	152.50	250.00	278.00	65.00
1983	192.16	404.13	385.86	66.97	2003	153.00	249.00	288.00	64.50
1984	192.16	404.13	385.86	66.97	2004	148.60	324.00	238.00	69.33
1985	192.16	404.13	385.86	66.97	2005	150.25	273.00	224.00	64.67
1986	192.16	404.13	385.86	66.97	2006	150.25	257.00	225.00	67.67
1987	192.16	404.13	385.86	66.97	2007	147.50	247.00	210.00	64.33
1988	192.16	404.13	385.86	66.97	2008	146.50	233.00	210.00	65.00
1989	178.58	389.18	376.75	75.15	2009	146.71	196.69	187.93	67.12
1990	205.73	419.07	394.96	58.78	2010	145.29	193.03	195.79	68.89
1991	171.87	445.61	358.90	56.50	2011	146.34	192.40	196.17	67.18
1992	213.68	433.18	359.90	67.55	2012	147.65	198.74	195.30	65.80
1993	183.47	456.48	409.37	59.94	2013	148.52	194.34	193.49	68.85
1994	181.23	357.31	323.98	58.77	2014	150.27	197.10	194.19	68.70
1995	185.82	347.57	306.29	61.88	2015	148.79	196.08	195.13	69.06
1996	168.90	289.00	364.40	61.00	2016	150.85	200.39	194.81	70.41
1997	168.30	314.32	336.95	61.43					

表3 2016年各省份不同畜禽饲养周期(d)

Table 3 Feeding periods of various livestock and poultry in different provinces in 2016(d)

省份 Provinces	猪 Pig	牛 Cattle	羊 Sheep	家禽 Poultry	省份 Provinces	猪 Pig	牛 Cattle	羊 Sheep	家禽 Poultry
北京 Beijing	129.80	196.01	194.98	42.77	湖北 Hubei	155.60	196.01	194.98	74.49
天津 Tianjin	121.64	196.01	194.98	44.92	湖南 Hunan	176.69	196.01	194.98	54.10
河北 Hebei	128.82	117.06	182.79	68.42	广东 Guangdong	145.63	196.01	194.98	102.15
山西 Shanxi	160.51	196.01	194.98	41.41	广西 Guangxi	140.40	196.01	194.98	113.61
内蒙古 Inner Mongolia	179.43	196.01	194.98	46.33	海南 Hainan	163.23	196.01	194.98	101.14
辽宁 Liaoning	153.18	196.01	194.98	51.41	重庆 Chongqing	150.39	196.01	194.98	68.42
吉林 Jilin	145.75	196.01	194.98	53.93	四川 Sichuan	136.90	196.01	194.98	68.42
黑龙江 Heilongjiang	139.57	174.84	292.24	54.69	贵州 Guizhou	139.72	196.01	194.98	68.42
上海 Shanghai	108.34	196.01	194.98	68.42	云南 Yunnan	149.00	196.01	194.98	75.41
江苏 Jiangsu	131.14	196.01	194.98	68.42	西藏 Tibet	148.24	196.01	194.98	68.42
浙江 Zhejiang	138.54	196.01	194.98	65.45	陕西 Shaanxi	159.93	196.54	183.95	68.42
安徽 Anhui	153.89	196.01	194.98	55.66	甘肃 Gansu	150.30	196.01	194.98	68.42
福建 Fujian	154.14	196.01	194.98	113.45	青海 Qinghai	170.02	196.01	194.98	68.42
江西 Jiangxi	153.02	196.01	194.98	68.42	宁夏 Ningxia	152.87	335.68	177.67	53.32
山东 Shandong	116.97	196.01	222.76	44.75	新疆 Xinjiang	137.98	111.59	67.31	68.42
河南 Henan	135.93	240.38	238.16	46.53					

表4 2016年不同省份畜禽粪尿还田率^[7](%)

Table 4 Returning ratio of livestock and poultry faeces in different provinces in 2016^[7](%)

省份 Provinces	大牲畜 Large livestock	猪 Pig	羊 Sheep	家禽 Poultry	省份 Provinces	大牲畜 Large livestock	猪 Pig	羊 Sheep	家禽 Poultry
北京 Beijing	70.00	70.00	70.00	70.00	湖北 Hubei	50.00	50.00	50.00	64.94
天津 Tianjin	66.67	66.67	66.67	66.67	湖南 Hunan	64.94	64.94	64.94	68.43
河北 Hebei	63.57	70.70	63.57	64.79	广东 Guangdong	56.32	71.60	52.32	52.32
山西 Shanxi	53.25	53.25	60.00	60.00	广西 Guangxi	60.00	71.60	60.00	60.00
内蒙古 Inner Mongolia	68.43	68.43	68.43	68.43	海南 Hainan	56.16	71.60	52.37	57.39
辽宁 Liaoning	68.00	80.00	67.32	64.25	重庆 Chongqing	50.45	53.50	41.50	64.45
吉林 Jilin	50.20	50.20	50.20	74.60	四川 Sichuan	66.67	72.29	66.67	66.68
黑龙江 Heilongjiang	62.80	62.80	62.80	62.80	贵州 Guizhou	67.50	67.50	67.50	67.50
上海 Shanghai	66.42	73.94	66.42	60.46	云南 Yunnan	49.00	49.00	49.00	49.00
江苏 Jiangsu	66.42	73.94	66.42	59.34	西藏 Tibet	58.80	80.70	80.70	80.70
浙江 Zhejiang	66.42	73.94	66.42	53.70	陕西 Shaanxi	75.10	75.10	75.10	75.10
安徽 Anhui	76.67	70.23	75.60	50.00	甘肃 Gansu	80.70	80.70	80.70	80.70
福建 Fujian	56.16	71.60	52.37	57.39	青海 Qinghai	80.70	80.70	80.70	80.70
江西 Jiangxi	60.67	60.67	60.67	60.67	宁夏 Ningxia	75.10	75.10	75.10	75.10
山东 Shandong	50.75	59.33	58.66	55.60	新疆 Xinjiang	75.10	75.10	75.10	75.10
河南 Henan	51.62	69.00	69.00	69.00					

注:大牲畜指牛、马、驴和骡,西藏牛粪便为燃烧还田。
Note: Large livestock includes cattle, horse, donkey and mule. Cattle manure in Tibet returning to field after burning.

大,肥效也不相同,其农田负荷量差异也较大,因此不能通过简单累加各类畜禽粪、尿量来估算农田畜禽粪便负荷量。为便于计算,根据各畜禽粪、尿的含磷量,将各种畜禽粪尿统一换算成猪粪当量(P)来计算^[22]。

结果表明,从1978年到2016年,我国畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量总体上呈“快速增加-保持稳定”的变化趋势,年均增长123%。1978年到2005年,畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量分别由9.52亿t和244万t增

加到24.17亿t和620万t,增加154%,并达到高峰,从2006年至2016年,两者均平稳增加,增幅均约为9%。到2016年畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量分别为21.23亿t和545万t(图1)。

不同种类畜禽粪尿猪粪当量(P)所占的比例不同,表现为猪>牛>羊>家禽(或>家禽>羊)>马>驴>骡,其不同年份粪尿猪粪当量(P)占当年总量的比例分别为34.2%~45.7%、22.7%~30.5%、11.9%~16.7%、6.1%~24.1%、0.7%~3.1%、0.5%~1.9%和0.2%~0.8%(图2)。可见,牛、猪、羊和家禽是畜禽粪尿猪粪当量(P)的主要来源,约占总量的94.5%~98.7%,而来自马、驴、骡的比例极低(图1),这与其他研究者的结果一致^[16,33],也与我国的畜禽养殖结构和需求有关。

39年来各类畜禽粪尿猪粪当量(P)增幅大小依次为家禽>羊>猪>牛>驴>骡>马,家禽、羊、猪和牛均呈增加趋势,增幅分别约为806%、137%、86%和84%,而驴、骡和马则均呈下降趋势,降幅分别约为

39%、50%和51%(图2)。可见,肉蛋食用家禽是我国畜禽粪尿猪粪当量(P)增长的主要来源,其占比逐年上升,增幅最明显,而作为畜力资源的驴、骡和马的粪尿猪粪当量(P)则大幅下降。

2.2 不同地区的畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量

为进一步明确当前我国各畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷养分地区间分布状况,分析了2016年不同省份、不同区域的畜禽粪尿的猪粪当量(P)和磷量分布。结果表明,2016年全国畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量分别为21.23亿t和545万t。从空间分布分析,区域角度上,华北地区畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量占全国的比例较大,为22.9%,其次是长江中下游地区,均为21.0%,然后是西南和西北地区,而东北和东南地区较低。省级单元上,河南畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷养分最多,分别约为1.91亿t和49万t,约占全国总量的8.8%,其次是四川,分别为1.76亿t和45万t,约占全国总量的8.1%,然后是山东、湖

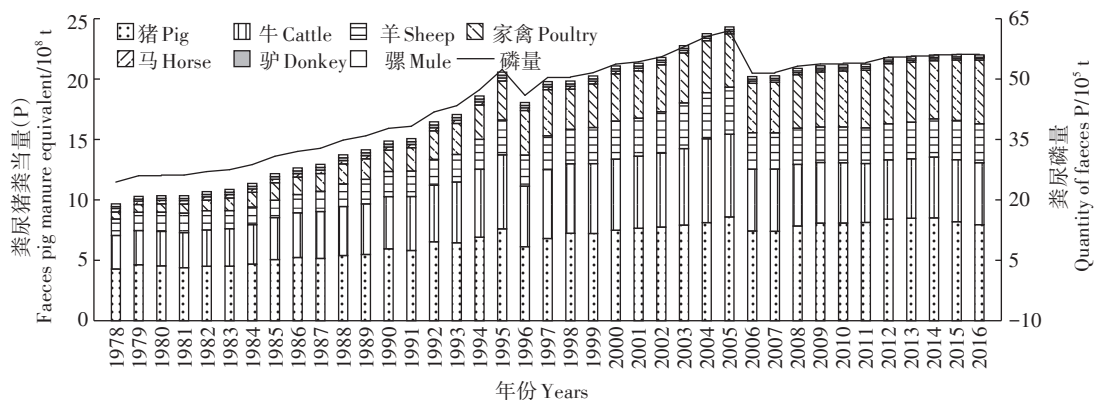


图1 不同年份畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量

Figure 1 Pig manure equivalent(P) of various livestock and poultry faeces and their P in different years

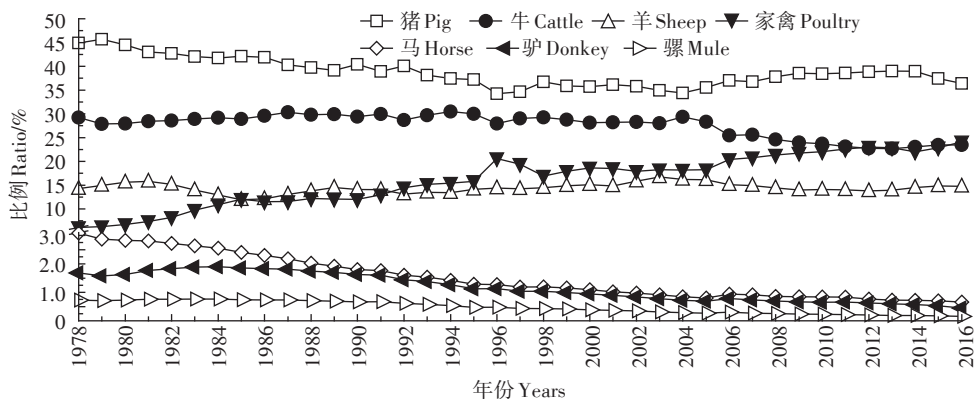


图2 不同年份各类畜禽粪尿猪粪当量(P)占全国总量的比例

Figure 2 Ratio of pig manure equivalent(P) to national total for various livestock and poultry faeces in different years

南、内蒙古、云南、河北、广西、湖北和辽宁,这些省份的畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷养分总量约占全国的58.7%,而上海、北京和天津粪尿量均较低(表5)。这与目前我国畜禽养殖布局 and 分布一致^[4-5,14],畜禽养殖集中布局导致畜禽粪尿量的高度集中分布。

各类畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量差异较大,其大小顺序依次为猪>牛>家禽>羊>马>驴>骡,畜禽粪尿猪粪当量(P)分别约为7.82亿、5.01亿、4.87亿、3.18亿、1 437.77万、978.76万、344.22万t,其磷量分别约为200.77万、130.23万、125.01万、81.59万、3.69万、2.51万、0.88万t(表5)。

不同畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量的区域分布不同,64.9%的猪粪尿主要分布在四川、湖南、河南、山东、湖北、云南、广东、广西、河北和江西,59.5%的牛粪尿主要分布在河南、四川、云南、内蒙古、山东、西藏、黑龙江、贵州、吉林和青海,73.1%的羊粪尿分布在内蒙古、新疆、山东、河南、四川、甘肃、河北、青海、西藏和云南,70.8%的禽粪分布在山东、河南、广东、广西、辽宁、四川、河北、江苏、湖北和安徽,90.3%的马粪尿分布在新疆、内蒙古、四川、贵州、云南、西藏、广西、吉林、黑龙江和青海,91.0%的驴粪尿分布在甘肃、内蒙古、新疆、辽宁、河北、云南、吉林、山西、山东和陕西,92.0%的骡粪分布在云南、甘肃、内蒙古、河北、四川、辽宁、吉林、山西、青海和广西(表5)。结果进一步说明畜禽养殖具有明显的地域性和空间集中性,尤其集中于山东、河北、河南、江苏、四川、安徽、湖北、广东等省^[34]。

2.3 2016年畜禽粪尿磷负荷量及其污染风险评价

长期以来,畜禽粪尿是我国农田有机肥的主要来源,农田也是消纳的主要承载场所。通过计算单位面积承载场所的畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷养分量,直接反映畜禽养殖产生的畜禽粪尿对承载土地的污染风险状况^[26,35],也是间接衡量当前各地区畜禽养殖密集程度和养殖业布局合理程度的重要指标^[36]。为进一步全面反映我国及各地畜禽粪尿磷负荷量是否过载,以及对环境是否构成污染威胁等,本研究对各地畜禽粪尿磷负荷量进行警报值估算与分级评价。根据沈根祥等^[22]的分级方法,将畜禽粪尿负荷量警报值 r 分为5级: $r \leq 0.4$ 为Ⅰ级,无污染; $0.4 < r \leq 0.7$ 为Ⅱ级,稍有污染; $0.7 < r \leq 1.0$ 为Ⅲ级,有污染; $1.0 < r \leq 1.5$ 为Ⅳ级,有较严重污染; $r > 1.5$ 为Ⅴ级,有严重污染。

通过计算,若畜禽粪尿承载场所仅为耕地时,全国单位耕地面积畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量分

别为 $15.73 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $40.37 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, r 值为1.15,Ⅳ级,有较严重污染风险。区域上,东南和西南地区单位耕地面积畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量较大,为Ⅴ级严重污染风险,其次是华北和长江中下游地区,为Ⅳ级较严重污染风险,然后是西北地区,为Ⅲ级有污染风险,而东北地区相对最低,为Ⅱ级稍有污染风险。省级单元上,西藏和青海单位耕地面积畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量最大,其次是广东、湖南、福建、北京、四川、河南、海南、广西、江西和山东,为Ⅴ级严重污染风险,而黑龙江相对最低,为Ⅰ级无污染风险(表6)。

若考虑农作物复种指数,即畜禽粪尿承载场所为农作物播种面积时,则全国平均单位播种面积畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量分别为 $12.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $32.68 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, r 值为0.93,为Ⅲ级有污染风险。区域上,东南和西南地区单位播种面积畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量较大,为Ⅳ级较严重污染风险,其次是西北、华北、长江中下游和东北地区,这些地区为Ⅲ级有污染风险。省级单元上,西藏、青海、北京和辽宁单位播种面积畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量较大,这些省份为Ⅴ级严重污染风险,其次是海南、广东、四川、福建、天津、广西、云南、山东、内蒙古和湖南,这些省份为Ⅳ级,有较严重污染风险,而黑龙江相对最低,为Ⅰ级无污染风险(表6)。

若畜禽粪尿承载场所为农用地时,即除耕地外还包括草地、茶园和果园时,全国单位农用地面积畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量分别为 $5.73 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $14.71 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, r 值为0.42,Ⅱ级稍有污染风险。区域上,东南、长江中下游和华北地区单位农用地面积畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量较大,为Ⅳ级较严重污染风险,其次是东北地区,为Ⅱ级稍有污染风险,而西南和西北地区相对较低,为Ⅰ级无污染风险。省级单元上,湖南省单位农用地面积畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量最大,其次是北京、广东和河南,这些省份为Ⅴ级严重污染风险,而西藏、青海、新疆、内蒙古、黑龙江、陕西、甘肃、宁夏和山西相对较低,为Ⅰ级无污染风险(表6)。

综上所述,我国多数省份单位耕地面积、播种面积、农用地面积的畜禽粪尿磷负荷量高于或接近单位面积畜禽粪尿磷年施用限量 $35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[23],尤其农业资源丰富或经济发展程度较高的省份^[7]粪肥资源多,因成本问题难以长距离外运,多就地消纳,易造成这些区域存在较高的畜禽粪尿磷污染风险。另外,因为

表5 2016年畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量分布(万t)

Table 5 Distribution of pig manure equivalent(P) and their P for various livestock and poultry faeces in 2016(10⁴ t)

地区/省份 Regions/Provinces	畜禽粪尿猪粪当量(P)Livestock and poultry faeces pig manure equivalent(P)								畜禽粪尿磷量Livestock and poultry faeces P							
	猪 Pig	牛 Cattle	羊 Sheep	家禽 Poultry	马 Horse	驴 Donkey	骡 Mule	总计 Total	猪 Pig	牛 Cattle	羊 Sheep	家禽 Poultry	马 Horse	驴 Donkey	骡 Mule	总计 Total
全国 China	78 245.89	50 753.63	31 797.37	48 720.72	1 437.77	978.76	344.22	21 2278.37	200.77	130.23	81.59	125.01	3.69	2.51	0.88	544.67
黑龙江 Heilongjiang	2 192.00	2 379.26	1 032.22	1 067.87	53.54	14.70	4.48	6 744.08	5.62	6.10	2.65	2.74	0.14	0.04	0.01	17.30
吉林 Jilin	1 762.26	2 248.27	453.51	1 339.96	64.38	35.33	11.92	5 915.63	4.52	5.77	1.16	3.44	0.17	0.09	0.03	15.18
辽宁 Liaoning	2 763.40	2 073.65	902.45	3 301.10	19.10	103.50	12.05	9 175.24	7.09	5.32	2.32	8.47	0.05	0.27	0.03	23.54
东北地区 NE	6 717.66	6 701.18	2 388.18	5 708.93	137.02	153.52	28.45	21 834.95	17.24	17.19	6.13	14.65	0.35	0.39	0.07	56.02
北京 Beijing	291.57	76.49	67.15	192.40	0.55	0.63	0.09	628.89	0.75	0.20	0.17	0.49	0	0	0	1.61
天津 Tianjin	349.19	154.54	58.42	211.30	0.11	1.53	0.05	775.15	0.90	0.40	0.15	0.54	0	0	0	1.99
河北 Hebei	3 348.48	1 893.90	1 753.03	2 958.68	39.44	87.58	28.03	10 109.15	8.59	4.86	4.50	7.59	0.10	0.22	0.07	25.94
河南 Henan	7 205.20	4 754.26	2 274.19	4 847.79	12.04	13.74	2.76	19 109.98	18.49	12.20	5.84	12.44	0.03	0.04	0.01	49.03
山东 Shandong	4 708.00	2 791.25	2 918.77	5 165.72	4.65	25.60	1.49	15 615.46	12.08	7.16	7.49	13.25	0.01	0.07	0	40.07
山西 Shanxi	862.52	487.16	823.46	67.11	2.73	25.65	10.59	2 279.24	2.21	1.25	2.11	0.17	0.01	0.07	0.03	5.85
华北地区 NC	16 764.96	10 157.61	7 895.02	13 443.00	59.53	154.72	43.02	48 517.86	43.02	26.06	20.26	34.49	0.15	0.40	0.11	124.49
上海 Shanghai	166.96	20.74	29.83	98.30	0	0	0	315.84	0.43	0.05	0.08	0.25	0	0	0	0.81
江苏 Jiangsu	2 987.53	149.81	554.47	2 937.38	0.55	5.01	1.23	6 635.99	7.67	0.38	1.42	7.54	0	0.01	0	17.03
浙江 Zhejiang	1 122.45	73.04	122.70	887.63	0	0	0	2 205.83	2.88	0.19	0.31	2.28	0	0	0	5.66
安徽 Anhui	2 974.43	871.62	902.48	2 256.20	0.23	0.45	0.07	7 005.48	7.63	2.24	2.32	5.79	0	0	0	17.97
湖北 Hubei	4 679.12	1 676.85	532.48	2 552.56	1.20	0.51	0.10	9 442.84	12.01	4.30	1.37	6.55	0	0	0	24.23
湖南 Hunan	7 506.57	2 089.54	635.98	2 144.60	13.37	1.63	0.39	12 392.08	19.26	5.36	1.63	5.50	0.03	0	0	31.80
江西 Jiangxi	3 224.42	1 439.03	71.93	1 813.29	0	0	0	6 548.67	8.27	3.69	0.18	4.65	0	0	0	16.80
长江中下游地区 MLRYR	22 661.49	6 320.64	2 849.87	12 689.97	15.34	7.60	1.80	44 546.72	58.15	16.22	7.31	32.56	0.04	0.02	0	114.30
内蒙古 Inner Mongolia	1 196.02	3 181.42	6 032.84	384.05	210.05	178.29	36.49	11 219.16	3.07	8.16	15.48	0.99	0.54	0.46	0.09	28.79
陕西 Shaanxi	1 472.06	676.31	647.61	457.13	1.86	25.16	5.97	3 286.10	3.78	1.74	1.66	1.17	0	0.06	0.02	8.43
宁夏 Ningxia	120.80	668.60	605.94	64.74	0.30	10.06	1.92	1 472.36	0.31	1.72	1.55	0.17	0	0.03	0	3.78
甘肃 Gansu	948.28	2 083.84	1 787.94	276.44	39.08	217.54	76.32	5 429.44	2.43	5.35	4.59	0.71	0.10	0.56	0.20	13.93
青海 Qinghai	208.19	2 094.08	1 215.34	21.61	49.31	8.68	8.17	3 605.38	0.53	5.37	3.12	0.06	0.13	0.02	0.02	9.25
新疆 Xinjiang	527.22	1 851.35	3 182.06	306.15	232.37	116.95	1.48	6 217.59	1.35	4.75	8.16	0.79	0.60	0.30	0	15.95
西北地区 NW	4 472.57	10 555.59	13 471.73	1 510.11	532.97	556.69	130.36	31 230.03	11.48	27.08	34.57	3.87	1.37	1.43	0.33	80.13
重庆 Chongqing	2 480.77	695.26	261.83	1 038.55	4.43	0.55	1.23	4 482.62	6.37	1.78	0.67	2.66	0.01	0	0	11.50
四川 Sichuan	8 033.64	4 307.88	1 872.57	3 108.81	206.73	16.58	17.54	17 563.76	20.61	11.05	4.80	7.98	0.53	0.04	0.05	45.07
贵州 Guizhou	2 405.20	2 257.11	340.08	609.90	172.06	0.20	3.69	5 788.25	6.17	5.79	0.87	1.56	0.44	0	0.01	14.85
云南 Yunnan	4 381.77	3 614.90	1 047.04	1 031.24	162.83	74.72	108.32	10 420.81	11.24	9.28	2.69	2.65	0.42	0.19	0.28	26.74
西藏 Tibet	49.59	2 575.72	1 172.95	9.60	79.76	14.05	2.50	3 904.17	0.13	6.61	3.01	0.02	0.20	0.04	0.01	10.02
西南地区 SW	17 350.97	13 450.86	4 694.47	5 798.11	625.82	106.10	133.27	42 159.61	44.52	34.51	12.05	14.88	1.61	0.27	0.34	108.17
福建 Fujian	1 889.36	314.80	155.35	1 629.97	0.01	0	0	3 989.48	4.85	0.81	0.40	4.18	0	0	0	10.24
广东 Guangdong	3 856.68	1 010.48	48.08	3 905.44	0.01	0	0	8 820.69	9.90	2.59	0.12	10.02	0	0	0	22.63
广西 Guangxi	3 843.81	1 897.13	218.07	3 463.43	67.07	0.13	7.32	9 496.95	9.86	4.87	0.56	8.89	0.17	0	0.02	24.37
海南 Hainan	688.40	345.34	76.59	571.75	0	0	0	1 682.08	1.77	0.89	0.20	1.47	0	0	0	4.32
东南地区 SE	10 278.24	3 567.75	498.09	9 570.60	67.08	0.13	7.32	23 989.20	26.37	9.15	1.28	24.56	0.17	0	0.02	61.55

Note: NE, Northeast; NC, Northcentral China; MLRYR, Middle and lower reaches of Yangtze River; NW, Northwest; SW, Southwest; SE, Southeast. The same below.

表6 单位面积畜禽粪尿猪粪当量(P)和磷量负荷及其环境评价

Table 6 Pig manure equivalent(P) and P loading rates per unit area from livestock/poultry faeces and environmental risk assessment

地区/省份 Regions/Provinces	耕地面积 Arable land				农作物播种面积 Planting area				农用地 Farmland			
	磷量 Amount of P			猪粪当量(P) Pig manure equivalent/ t·hm ⁻²	磷量 Amount of P			猪粪当量(P) Pig manure equivalent/ t·hm ⁻²	磷量 Amount of P			猪粪当量(P) Pig manure equivalent/ t·hm ⁻²
	磷 P/ kg·hm ⁻²	<i>r</i>	分级 Classes		磷 P/ kg·hm ⁻²	<i>r</i>	分级 Classes		磷 P/ kg·hm ⁻²	<i>r</i>	分级 Classes	
全国 China	40.37	1.15	Ⅳ	15.73	32.68	0.93	Ⅲ	12.74	14.71	0.42	Ⅱ	5.73
黑龙江 Heilongjiang	10.92	0.31	Ⅰ	4.25	13.93	0.40	Ⅰ	5.43	10.19	0.29	Ⅰ	3.97
吉林 Jilin	21.70	0.62	Ⅱ	8.46	26.74	0.76	Ⅲ	10.42	20.86	0.60	Ⅱ	8.13
辽宁 Liaoning	47.33	1.35	Ⅳ	18.44	57.93	1.66	Ⅴ	22.58	43.94	1.26	Ⅳ	17.12
东北地区 NE	20.14	0.58	Ⅱ	7.85	25.27	0.72	Ⅲ	9.85	18.92	0.54	Ⅱ	7.37
北京 Beijing	74.60	2.13	Ⅴ	29.07	106.61	3.05	Ⅴ	41.55	59.99	1.71	Ⅴ	23.38
天津 Tianjin	45.52	1.30	Ⅳ	17.74	41.51	1.19	Ⅳ	16.18	42.27	1.21	Ⅳ	16.48
河北 Hebei	39.78	1.14	Ⅳ	15.50	29.76	0.85	Ⅲ	11.60	32.37	0.92	Ⅲ	12.62
河南 Henan	60.45	1.73	Ⅴ	23.56	33.88	0.97	Ⅲ	13.20	56.51	1.61	Ⅴ	22.02
山东 Shandong	52.67	1.51	Ⅴ	20.53	36.51	1.04	Ⅳ	14.23	48.31	1.38	Ⅳ	18.83
山西 Shanxi	14.42	0.41	Ⅱ	5.62	15.72	0.45	Ⅱ	6.13	13.15	0.38	Ⅰ	5.13
华北地区 NC	46.20	1.32	Ⅳ	18.00	32.32	0.92	Ⅲ	12.60	41.27	1.18	Ⅳ	16.08
上海 Shanghai	42.47	1.21	Ⅳ	16.55	27.50	0.79	Ⅲ	10.72	39.04	1.12	Ⅳ	15.21
江苏 Jiangsu	37.25	1.06	Ⅳ	14.52	22.18	0.63	Ⅱ	8.64	35.36	1.01	Ⅳ	13.78
浙江 Zhejiang	28.66	0.82	Ⅲ	11.17	24.88	0.71	Ⅲ	9.70	22.64	0.65	Ⅱ	8.82
安徽 Anhui	30.63	0.88	Ⅲ	11.94	20.21	0.58	Ⅱ	7.88	29.12	0.83	Ⅲ	11.35
湖北 Hubei	46.19	1.32	Ⅳ	18.00	30.89	0.88	Ⅲ	12.04	40.31	1.15	Ⅳ	15.71
湖南 Hunan	76.64	2.19	Ⅴ	29.87	36.16	1.03	Ⅳ	14.09	65.73	1.88	Ⅴ	25.62
江西 Jiangxi	54.52	1.56	Ⅴ	21.25	30.22	0.86	Ⅲ	11.78	46.88	1.34	Ⅳ	18.27
长江中下游地区 MLRYR	45.57	1.30	Ⅳ	17.76	27.65	0.79	Ⅲ	10.78	40.64	1.16	Ⅳ	15.84
内蒙古 Inner Mongolia	31.09	0.89	Ⅲ	12.12	36.34	1.04	Ⅳ	14.16	4.89	0.14	Ⅰ	1.91
陕西 Shaanxi	21.13	0.60	Ⅱ	8.24	19.71	0.56	Ⅱ	7.68	11.15	0.32	Ⅰ	4.35
宁夏 Ningxia	29.31	0.84	Ⅲ	11.42	29.62	0.85	Ⅲ	11.55	12.95	0.37	Ⅰ	5.05
甘肃 Gansu	25.93	0.74	Ⅲ	10.11	32.75	0.94	Ⅲ	12.76	11.83	0.34	Ⅰ	4.61
青海 Qinghai	156.95	4.48	Ⅴ	61.17	164.80	4.71	Ⅴ	64.23	2.23	0.06	Ⅰ	0.87
新疆 Xinjiang	30.58	0.87	Ⅲ	11.92	27.19	0.78	Ⅲ	10.60	3.80	0.11	Ⅰ	1.48
西北地区 NW	31.16	0.89	Ⅲ	12.14	33.17	0.95	Ⅲ	12.93	4.87	0.14	Ⅰ	1.90
重庆 Chongqing	48.28	1.38	Ⅳ	18.81	31.94	0.91	Ⅲ	12.45	41.39	1.18	Ⅳ	16.13
四川 Sichuan	66.93	1.91	Ⅴ	26.09	46.32	1.32	Ⅳ	18.05	24.10	0.69	Ⅱ	9.39
贵州 Guizhou	32.78	0.94	Ⅲ	12.78	26.54	0.76	Ⅲ	10.34	27.67	0.79	Ⅲ	10.79
云南 Yunnan	43.07	1.23	Ⅳ	16.79	37.32	1.07	Ⅳ	14.55	36.60	1.05	Ⅳ	14.26
西藏 Tibet	225.31	6.44	Ⅴ	87.81	388.42	11.10	Ⅴ	151.38	1.41	0.04	Ⅰ	0.55
西南地区 SW	53.29	1.52	Ⅴ	20.77	41.06	1.17	Ⅳ	16.00	10.27	0.29	Ⅰ	4.00
福建 Fujian	76.60	2.19	Ⅴ	29.85	43.98	1.26	Ⅳ	17.14	48.07	1.37	Ⅳ	18.73
广东 Guangdong	86.79	2.48	Ⅴ	33.83	46.85	1.34	Ⅳ	18.26	59.65	1.70	Ⅴ	23.25
广西 Guangxi	55.44	1.58	Ⅴ	21.61	39.65	1.13	Ⅳ	15.45	42.72	1.22	Ⅳ	16.65
海南 Hainan	59.72	1.71	Ⅴ	23.27	52.43	1.50	Ⅳ	20.43	47.72	1.36	Ⅳ	18.60
东南地区 SE	67.93	1.94	Ⅴ	26.47	43.57	1.24	Ⅳ	16.98	49.11	1.40	Ⅳ	19.14

注:*r*表示畜禽粪尿负荷风险指数。下同。
Note:*r* is the loading risk index of livestock/poultry faeces. The same below.

种植业保持高产的需要,当前及未来化肥仍然在我国作物增产中占主导地位,因此在评估畜禽粪尿磷的负荷量是否超过年施用限量时还应该考虑化肥磷的投入。实践证明,有机无机肥以1:1比例配合施用较好,因此,为减少畜禽粪尿磷的环境污染风险,在当前生产条件下,通过畜禽粪尿施用的磷不超过50%年施用限量更加合理和可行。

2.4 畜禽粪尿磷还田量及其污染风险评价

前面讨论的是各地区畜禽粪尿全部消纳情况下土地磷负荷量及污染风险评价,实际上,不同地区畜禽粪尿实际还田率和数量不同,在实际还田的基础上分析农用地承载畜禽粪尿磷和风险评价更能够反映当地的实际生产情况。通过计算,2016年全国畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷还田量分别约为11.51亿t和295万t,折合成单位农用地畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷还田量分别为 $3.1\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $8.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,为Ⅰ级无污染风险。空间尺度上,全国各区域及各省(自治区、直辖市)单位农用地畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷还田量差异较大,区域上,东南地区单位农用地还田量最大,畜禽粪尿猪粪当量(P)为 $10.26\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷量为 $26.33\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,为Ⅲ级有污染风险,其次是华北和长江中下游地区,为Ⅱ级稍有污染风险,而东北、西南和西北地区相对较低,为Ⅰ级无污染风险。省级单元上,湖南单位农用地畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷还田量最大,其次是北京,这两省份为Ⅳ级较严重污染风险,然后是广东、河南、辽宁、福建和海南,为Ⅲ级有污染风险,而西藏、青海、新疆、内蒙古、黑龙江、山西、陕西、甘肃、宁夏、吉林和浙江相对较低,主要是由于这些省份草地面积较大,而畜禽养殖量较少(表7)。

华北、长江中下游和东南地区多数省份单位农用地磷还田量均大于 $17.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (即50%的单位面积畜禽粪尿磷年施用限量),且安徽、贵州、云南、四川和浙江等省份也接近 $17.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。多数情况下,农民习惯将有机肥投入到经济作物尤其是果树和蔬菜上,若所有还田的畜禽粪尿磷都用在果树和蔬菜上,则多数省份的果园和菜地磷的负荷量都会超过单位面积畜禽粪尿磷年施用限量($35\text{ kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$)。可见,各省份还田的畜禽粪尿磷量较高,磷污染风险形势较为严峻。随着畜禽养殖规模化、集约化,畜禽粪尿污染从面源污染向点面结合和点源污染转变,而且由于畜禽粪尿还田存在地域局限性,使得有些地区具有较高的磷污染风险。

3 讨论

3.1 与其他研究比较

传统养殖业多以农家个体饲养为主,畜禽养殖数量不大,粪尿量和相应的磷量较少,几乎全部就地施用,加上化肥用量不大,因此畜禽粪尿的施用不会产生环境污染^[37]。随着畜禽养殖业的快速发展,集约化、规模化养殖不断扩大,产生的粪尿及其磷量也急剧增长。本研究表明,2016年全国畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量分别达到21.23亿t和545万t,比1978年平均增长了123%,粪尿排放问题越来越突出,部分地区畜禽粪尿量超出了土地的消纳能力,若没有足够的农田进行消纳,极易对环境造成污染^[10,38]。另外,自然条件、经济发展水平和畜牧业布局等影响,导致我国畜禽养殖具有一定的区域性^[24,39-41],主要分布在华北和长江中下游地区,畜禽粪尿产生量分别约占全国的23%和21%,与其他诸多研究结果一致。

然而,在评估畜禽粪尿资源量对环境的影响时,不同的研究存在一定的差异。许俊香等^[42]参照我国有机肥料养分志计算粪尿资源量的方法,得出2002年我国畜禽粪尿肥资源总量约33亿t,提供磷318.4万t,主要分布在山东、河南、四川、河北、广东、湖南等省,但北京和上海单位耕地面积承载磷量较高,分别为 $98.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $86.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。张田等^[43]研究表明,2009年我国畜禽养殖业粪便排放总量为32.64亿t,折合成单位面积农用地畜禽粪便负荷为 $26.8\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷素负荷为 $47.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷素污染风险在农区普遍存在。耿维等^[33]研究指出,2010年我国畜禽粪便总量约22.4亿t,山东等6省市粪便资源超过1.0亿t;全国单位面积农用地磷平均负荷为 $9.16\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,北京等6省市农用地磷负荷超最高限量。

不同研究者估算结果差异较大的原因:(1)不同年代的畜禽养殖数量不同;(2)估算所用参数和估算方法不同;(3)畜禽粪尿污染评价的承载场所和计算面积不同;(4)是否考虑畜禽粪尿还田量及还田过程中磷的损失^[31]等。现有研究多以耕地面积计算粪便磷污染负荷,对林地、草地以及复种指数考虑不足,致使计算结果难以真实地反映各地区不同种植模式下畜禽粪尿磷负荷和评价其对土壤的污染风险。由此,本文畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量是依据我国官方统计数据 and 原农业部的各类畜禽年内出栏数、年末存栏数,以及各类畜禽的饲养周期,并利用排泄系数

表7 2016年单位土地面积畜禽粪尿磷还田量及环境风险评价

Table 7 Distribution of returned P per unit area from livestock/poultry faeces in 2016 and environmental risk assessment

地区/省份 Regions/Provinces	耕地面积 Arable land				农作物播种面积 Planting area				农用地 Farmland			
	磷还田量 Returned P		分级 Classes	猪粪当量(P) Pig manure equivalent/ t·hm ⁻²	磷还田量 Returned P		分级 Classes	猪粪当量(P) Pig manure equivalent/ t·hm ⁻²	磷还田量 Returned P		分级 Classes	猪粪当量(P) Pig manure equivalent/ t·hm ⁻²
	磷 P/ kg·hm ⁻²	r			磷 P/ kg·hm ⁻²	r			磷 P/ kg·hm ⁻²	r		
全国 China	21.89	0.63	II	8.53	17.72	0.51	II	6.91	7.98	0.23	I	3.11
黑龙江 Heilongjiang	5.79	0.17	I	2.26	7.39	0.21	I	2.88	5.41	0.15	I	2.11
吉林 Jilin	10.25	0.29	I	3.99	12.63	0.36	I	4.92	9.85	0.28	I	3.84
辽宁 Liaoning	28.13	0.80	III	10.96	34.43	0.98	III	13.42	26.12	0.75	III	10.18
东北地区 NE	10.91	0.31	I	4.25	13.69	0.39	I	5.34	10.25	0.29	I	3.99
北京 Beijing	44.22	1.26	IV	17.23	63.19	1.81	V	24.63	35.55	1.02	IV	13.86
天津 Tianjin	25.73	0.74	III	10.03	23.46	0.67	II	9.14	23.89	0.68	II	9.31
河北 Hebei	22.27	0.64	II	8.68	16.66	0.48	II	6.49	18.12	0.52	II	7.06
河南 Henan	33.07	0.94	III	12.89	18.53	0.53	II	7.22	30.91	0.88	III	12.05
山东 Shandong	25.08	0.72	III	9.78	17.39	0.50	II	6.78	23.01	0.66	II	8.97
山西 Shanxi	6.75	0.19	I	2.63	7.36	0.21	I	2.87	6.16	0.18	I	2.40
华北地区 NC	24.21	0.69	II	9.44	16.94	0.48	II	6.60	21.63	0.62	II	8.43
上海 Shanghai	24.66	0.705	III	9.61	15.97	0.46	II	6.22	22.67	0.65	II	8.83
江苏 Jiangsu	21.05	0.60	II	8.20	12.53	0.36	I	4.88	19.98	0.57	II	7.79
浙江 Zhejiang	15.84	0.45	II	6.17	13.75	0.39	I	5.36	12.51	0.36	I	4.88
安徽 Anhui	16.89	0.48	II	6.58	11.14	0.32	I	4.34	16.06	0.46	II	6.26
湖北 Hubei	21.18	0.61	II	8.25	14.16	0.41	II	5.52	18.48	0.53	II	7.20
湖南 Hunan	42.62	1.22	IV	16.61	20.11	0.57	II	7.84	36.55	1.04	IV	14.25
江西 Jiangxi	28.10	0.80	III	10.95	15.58	0.45	II	6.07	24.17	0.69	II	9.42
长江中下游地区 MLRYR	24.15	0.69	II	9.41	14.66	0.42	II	5.71	21.54	0.62	II	8.39
内蒙古 Inner Mongolia	17.72	0.51	II	6.91	20.71	0.59	II	8.07	2.79	0.08	I	1.09
陕西 Shaanxi	13.39	0.38	I	5.22	12.49	0.36	I	4.87	7.07	0.20	I	2.75
宁夏 Ningxia	18.43	0.53	II	7.18	18.63	0.53	II	7.26	8.14	0.23	I	3.17
甘肃 Gansu	17.54	0.50	II	6.84	22.15	0.63	II	8.63	8.00	0.23	I	3.12
青海 Qinghai	106.31	3.04	V	41.43	111.63	3.19	V	43.51	1.51	0.04	I	0.59
新疆 Xinjiang	19.13	0.55	II	7.46	17.01	0.49	II	6.63	2.38	0.07	I	0.93
西北地区 NW	19.36	0.55	II	7.55	20.61	0.59	II	8.03	3.03	0.09	I	1.18
重庆 Chongqing	22.47	0.64	II	8.76	14.87	0.42	II	5.80	19.27	0.55	II	7.51
四川 Sichuan	39.23	1.12	IV	15.29	27.15	0.78	III	10.58	14.13	0.40	II	5.51
贵州 Guizhou	18.75	0.54	II	7.31	15.18	0.43	II	5.92	15.83	0.45	II	6.17
云南 Yunnan	17.85	0.51	II	6.96	15.47	0.44	II	6.03	15.17	0.43	II	5.91
西藏 Tibet	112.11	3.20	V	43.69	193.27	5.52	V	75.32	0.70	0.02	I	0.27
西南地区 SW	27.75	0.79	III	10.82	21.38	0.61	II	8.33	5.35	0.15	I	2.09
福建 Fujian	41.51	1.19	IV	16.18	23.84	0.68	II	9.29	26.05	0.74	III	10.15
广东 Guangdong	45.15	1.29	IV	17.60	24.37	0.70	II	9.50	31.03	0.89	III	12.09
广西 Guangxi	30.46	0.87	III	11.87	21.78	0.62	II	8.49	23.47	0.67	II	9.15
海南 Hainan	31.80	0.91	III	12.39	27.91	0.80	III	10.88	25.41	0.73	III	9.90
东南地区 SE	36.42	1.04	IV	14.19	23.36	0.67	II	9.11	26.33	0.75	III	10.26

法^[20-21]进行估算的,而且在对各地区畜禽粪尿磷负荷量进行预警分级和风险评价时,考虑了耕地、农作物播种面积和农用地3种模式。此外,本文还参照大量

资料,依据不同地区畜禽粪尿实际还田比例,分析讨论了畜禽粪尿猪粪当量(P)和磷的实际还田量以及相应的农用地负荷量,并评价污染风险。因此本文从

理论负荷量到实际承载量两方面分析畜禽粪尿磷的污染风险更加全面。

3.2 畜禽粪尿环境风险评价

由于畜禽粪尿实际投向不明,因此本文在3种情形(耕地、播种面积、农用地)下评价各地区的平均负荷量及相应的环境风险,旨在对各地区畜禽粪尿的分布和当地的畜禽粪尿消纳能力有一个全面了解。但本文也具有一定的局限性,因为实际生产中畜禽粪尿大多被投入到蔬菜和果树上,而在粮食作物上由于有机肥料运输和施用费用高,农村劳动力不足和成本较高,加上粮食作物经济效益低,种植户很少甚至几乎不施用有机肥料如畜禽粪尿。在这种情况下,如果畜禽粪尿大都用在果园和菜地,则负荷量和污染风险会大幅增加。研究发现(表7),华北、长江中下游、东南地区的多数省份和部分西南地区省份农用地上畜禽粪尿磷还田量接近或大于50%单位面积畜禽粪尿磷的年施用限量。依据统计资料计算,31个省(市、自治区)的果树和蔬菜面积占农用地面积的0.03%~41.9%,全国平均5.9%,主要粮食省份的果树和蔬菜面积占农用地比例多在10%~28%,特别是吉林、黑龙江两省只有1.8%和0.8%,因此,果园和菜地上畜禽粪尿负荷量和污染风险相比其农用地平均值增加几倍甚至几十倍。西部省份如青海、西藏、内蒙古果树和蔬菜面积虽然占农用地比例只有不足0.5%,但这些地区的畜禽粪尿多数残留在草场中,很少在作物上施用,即便如此这些省份的设施菜地中有机肥投入的磷依然占很大比例^[44-45]。反之,粮田有机肥的投入不足,土壤有机质和肥力维持面临压力。因此,政府应该加大畜禽粪尿等有机废弃物资源处理和施用补贴,引导农民把有机肥施在大田作物上,实现有机肥替代部分化肥,达到节本增效、土壤培肥和环境友好三方面统一。

3.3 畜禽粪尿还田后磷当季有效释放量

畜禽粪尿还田后,相当一部分粪尿磷以有机态的形式存在,需经矿化释放出无机磷才能被作物吸收利用。因此,研究畜禽粪尿替代化肥磷时应考虑粪尿肥还田后磷的当季释放量,避免简单的等养分替代导致的养分供应不足,从而影响作物生长、产量和品质。研究表明^[46-51],粪尿还田后,养分释放前期快速,后期缓慢。赵明等^[50]采用室内培养法研究了鸡粪、牛粪和猪粪等畜禽有机肥料的矿化率和速效磷养分释放规律,结果表明,在一个农业生产季节中(120 d),鸡粪、牛粪和猪粪的速效磷释放量分别为24.6%、61.3%和

34.8%。杨蕊^[51]选用腐熟的猪粪、鸡粪有机肥和第四季红土发育的典型红壤为试验材料,采用室内培养试验、野外盆栽试验以及土柱淋溶试验,结果表明,有机肥中磷的矿化释放主要发生在第3周,连续培养15周(相当于一个作物生长季)鸡粪有效磷释放率为30.2%~37.8%,猪粪有效磷释放率为34.0%~41.6%。根据文献资料加权平均得出各类畜禽粪磷当季释放率^[52],牛、马、驴和骡粪磷的当季释放率为58.0%,猪粪磷当季释放率为47.6%,羊粪为22.0%,家禽粪为37.4%,因此不同畜禽粪尿的当季释放率差异很大。按照还田的畜禽粪尿磷当季释放量=还田畜禽粪尿磷量×当季释放率+畜禽粪尿磷燃烧还田量,估算出2016年我国还田的畜禽粪尿磷的当季释放磷量为131.1万t,约占还田磷量的44.3%(数据未列出)。各区域及各省(自治区、直辖市)由于在畜禽养殖种类和结构上的差异,还田的畜禽粪尿磷当季释放量也存在较大差异。因此,用畜禽粪尿磷替代化肥磷时,要考虑畜禽粪尿磷的当季释放量,以正确计算其对化肥的替代量。

4 结论

(1)1978年至2016年畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷量经历快速增长-稳定增加-保持稳定,到2016年达21.23亿t和545万t。华北地区占比较大,其中河南最多。

(2)不同承载场所畜禽粪尿磷的负荷量和污染风险不同,以耕地和农作物面积计算,东南和西南地区负荷量大,为Ⅳ和Ⅴ级较严重污染和严重污染,按农用地计算,东南、长江中下游和华北地区负荷量较大,为Ⅳ级较严重污染。省级单元上湖南最大,其次是北京、广东和河南,均为Ⅴ级严重污染风险。

(3)2016年畜禽粪尿猪粪当量(P)及其磷还田量分别为11.51亿t和295万t,相当于单位农用地面积 $3.1\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $8.0\text{ kg P}\cdot\text{hm}^{-2}$,区域上东南地区最大,省级单元上湖南和北京较大。华北、长江中下游、东南地区的多数省份和西南地区部分省份农用地上畜禽粪尿磷还田量接近或大于50%单位土地面积畜禽粪尿磷的年施用限量,磷污染风险形势较为严峻。

参考文献:

- [1] Zheng C, Liu Y, Bluemling B, et al. Modeling the environmental behavior and performance of livestock farmers in China: An ABM approach [J]. *Agricultural Systems*, 2013, 122(12): 60-72.
- [2] 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 Mao-fang, QIU Jian-jun, LI Chang-sheng, et al. Modeling nitrogen pollution from livestock breeding using Manure-DNDC model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(9):183-189.
- [3] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(8):156-167.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(1979—2017)[M]. 北京: 中国统计出版社, 1979—2017.
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook (1979—2017)[M]. Beijing: China Statistics Press, 1979—2017.
- [5] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计年鉴(1979—2017)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1979—2017.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. China agricultural statistical yearbook (1979—2017)[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 1979—2017.
- [6] 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 Shu-tian, JIN Ji-yun. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(20):4207-4229.
- [7] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(4):1-14.
- [8] 张晖. 中国畜牧业面源污染研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- ZHANG Hui. A study on non-point source pollution of livestock husbandry in China: Based on the surveys of breeding farmers in the Yangtze River delta[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [9] 杨军香, 王合亮, 焦洪超, 等. 不同种植模式下的土地适宜载畜量[J]. 中国农业科学, 2016, 49(2):339-347.
- YANG Jun-xiang, WANG He-liang, JIAO Hong-chao, et al. Stock capacity in different cropping systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(2):339-347.
- [10] 宋大平, 庄大方, 陈巍. 安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(1):110-116.
- SONG Da-ping, ZHUANG Da-fang, CHEN Wei. Risk assessment of the farmland and water contamination with the livestock manure in Anhui Province[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(1):110-116.
- [11] Martinez J, Dabert P, Barrington S, et al. Livestock waste treatment systems for environmental quality, food safety, and sustainability[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22):5527-5536.
- [12] Kohyama K, Hojito M, Sasaki H, et al. Estimation of the amount of nutrients in livestock manure[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 52(4):576-577.
- [13] Zervas G, Tsipalaki E. An assessment of GHG emissions from small ruminants in comparison with GHG emissions from large ruminants and monogastric livestock[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 49(49):13-23.
- [14] 付强, 诸云强, 孙九林, 等. 中国畜禽养殖的空间格局与重心曲线特征分析[J]. 地理学报, 2012, 67(10):1383-1398.
- FU Qiang, ZHU Yun-qiang, SUN Jiu-lin, et al. Spatial patterns and gravity centers curve of livestock and poultry breeding in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(10):1383-1398.
- [15] 景栋林, 陈希萍, 于辉, 等. 佛山市畜禽粪便排放量与农田负荷量分析[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(1):108-111.
- JING Dong-lin, CHEN Xi-ping, YU Hui, et al. Analysis on the total amount of domestic animal excrement and the load in farmland in foshan[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(1):108-111.
- [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 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.
- [17] Provolto G. Manure management practices in Lombardy (Italy)[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(2):145-152.
- [18] Bassanino M, Sacco D, Zavattaro L, et al. Nutrient balance as a sustainability indicator of different agro-environments in Italy[J]. *Ecological Indicators*, 2011, 11(2):715-723.
- [19] Song K Y, Li Y, Ouyang W, et al. Manure nutrients of pig excreta relative to the capacity of cropland to assimilate nutrients in China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13(10):1846-1855.
- [20] Cheng H, Ouyang W, Hao F, et al. The non-point source pollution in livestock-breeding areas of the Heihe River basin in Yellow River[J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2007, 21(3):213-221.
- [21] 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 Qing-bo, YANG Peng, ZHAI Zhong-wei, 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.
- [22] 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(增刊1):6-11.
- SHEN Gen-xiang, WANG Ya-gu, YUAN Da-wei. Loading amounts of animal feces and their alarming values and classification grades in Shanghai suburbs[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 1994, 10(Suppl1):6-11.
- [23] 耿维, 孙义祥, 袁漫漫, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(18):252-260.
- [24] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5):1-11.
- [25] 中华人民共和国国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编(1980—2016)[M]. 北京: 中国统计出版社, 1980—2016.
Price Division of the National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Compilation of national cost-to-cost income data for agricultural products (1980—2016)[M]. Beijing: China Statistics Press, 1980—2016.
- [26] 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 Fang-hao, MA Wen-qi, DOU Zheng-xia, 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.
- [27] 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 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.
- [28] 田宜水. 中国规模化养殖场畜禽粪便资源沼气生产潜力评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8):230-234.
TIAN Yi-shui. Potential assessment on biogas production by using livestock manure of large-scale farm in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8):230-234.
- [29] 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 & Management*, 2013, 29(4):473-484.
- [30] 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.
- [31] Li S T, Liu X Y, Ding W C. Estimation of organic nutrient sources and availability for land application[J]. *Better Crops with Plant Food*, 2016, 100(3):4-6.
- [32] 刘晓永, 李书田. 中国秸秆养分资源及还田的时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21):1-19.
LIU Xiao-yong, LI Shu-tian. Temporal and spatial distribution characteristics of crop straw nutrient resources and returning to farmland in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21):1-19.
- [33] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(1):171-179.
- [34] 刘爱民, 强文丽, 王维方, 等. 我国畜禽养殖方式的区域性差异及演变过程研究[J]. 自然资源学报, 2011, 27(4):552-564.
LIU Ai-min, QIANG Wen-li, WANG Wei-fang, et al. Regional differences and evolution of livestock farming patterns in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 27(4):552-564.
- [35] 阎波杰, 潘瑜春, 闫静杰. 基于GIS的安徽省耕地畜禽养殖废弃物氮负荷估算及污染潜势研究[J]. 地球与环境, 2016, 44(5):566-571.
YAN Bo-jie, PAN Yu-chun, YAN Jing-jie. A study on livestock manure nitrogen load and pollution potential of farmland in Anhui Province, China based on GIS[J]. *Earth and Environment*, 2016, 44(5):566-571.
- [36] 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 Fang-hao, MA Wen-qi, 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*, 2006, 22(8):170-174.
- [37] 刘艳丰, 玛依拉·艾尼, 唐淑珍, 等. 畜禽粪便污染现状及其治理[J]. 草食家畜, 2010(4):47-49.
LIU Yan-feng, MAYILA·AINI, TANG Shu-zhen, et al. Pollution of livestock and poultry feces and counter measures[J]. *Grass-Feeding Livestock*, 2010(4):47-49.
- [38] 高 定, 陈同斌, 刘 斌, 等. 我国畜禽养殖业粪便污染风险与控制策略[J]. 地理研究, 2006, 25(2):311-319.
GAO Ding, CHEN Tong-bin, LIU Bin, et al. Releases of pollutants from poultry manure in China and recommended strategies for the pollution prevention[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(2):311-319.
- [39] 张越杰, 田 露. 中国肉牛生产区域布局变动及其影响因素分析[J]. 中国畜牧杂志, 2010, 46(12):21-24.
ZHANG Yue-jie, TIAN Lu. Analysis on beef cattle production area layout and its influence factors[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2010, 46(12):21-24.
- [40] 曹光乔, 潘 丹, 秦 富. 中国蛋鸡产业布局变迁的经济分析: 基于省级面板数据的研究[J]. 农业技术经济, 2010(10):10-17.
CAO Guang-qiao, PAN Dan, QIN Fu. Economic analysis of changes in layer industry in China: Based on provincial panel data[J]. *Journal of Agro-Technology & Economy*, 2010(10):10-17.
- [41] 夏晓平, 李秉龙, 隋艳颖. 中国肉羊产地移动的经济分析: 从自然性布局向经济性布局转变[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(1):32-35.
XIA Xiao-ping, LI Bing-long, SUI Yan-ying. An economic analysis on regional change of mutton production in China: Transfer from natural layout to economic layout[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2011, 32(1):32-35.
- [42] 许俊香, 刘晓利, 王方浩, 等. 中国畜禽粪尿磷素养分资源分布及利用状况[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(4):5-9.
XU Jun-xiang, LIU Xiao-li, WANG Fang-hao, et al. The distribution

- of phosphorus resources and utilization of animal manure in China[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2005, 28(4):5-9.
- [43] 张田, 卜美东, 耿维. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(5):1241-1249.
- ZHANG Tian, BU Mei-dong, GENG Wei. Pollution status and bio-gas-producing potential of livestock and poultry excrements in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(5):1241-1249.
- [44] 周强, 蒲海生, 次仁杰布. 西藏日光温室蔬菜高产高效栽培技术体系探讨[J]. *西藏农业科技*, 2010, 32(1):34-35.
- ZHOU Qiang, PU Hai-sheng, CI REN-jiebu. Vegetable planting technology with highly active sunlight greenhouse in Tibet[J]. *Tibet Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 32(1):34-35.
- [45] 冯承彬, 白惠义, 刘景莉. 青海省蔬菜施肥现状及配方施肥技术应用调研[J]. *青海农技推广*, 2015(2):28-31.
- FENG Cheng-bin, BAI hui-yi, LIU jing-li. Investigation on present situation of fertilizer application and formula fertilization technology in vegetables in Qinghai Province[J]. *Journal of Qinghai Agricultural Technology Extension*, 2015(2):28-31.
- [46] LI L L, LI S T. Nitrogen mineralization from animal manures and its relation to organic N fractions[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(9):2040-2048.
- [47] Esse P C, Buerkert A, Hiernaux P, et al. Decomposition of and nutrient release from ruminant manure on acid sandy soils in the Sahelian zone of Niger, west Africa[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 83(1):55-63.
- [48] Abdou G, Ewusi-Mensah N, Nouri M, et al. Nutrient release patterns of compost and its implication on crop yield under Sahelian conditions of Niger[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2016, 105(2):117-128.
- [49] Kolahchi Z, Jalali M. Kinetics of nutrient release from different organic residues using a laboratory system[J]. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 2012, 58(9):1013-1031.
- [50] 赵明, 赵征宇, 蔡葵, 等. 畜禽有机肥料当季速效氮磷钾养分释放规律[J]. *山东农业科学*, 2004(5):59-61.
- ZHAO Ming, ZHAO Zheng-yu, CAI Kui, et al. Availability of available nitrogen, phosphorus and potassium in organic fertilizer of animals and poultry season[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2004(5):59-61.
- [51] 杨蕊. 畜禽有机肥氮磷在红壤中的矿化、利用和环境风险研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2011.
- YANG Rui. Study on the nitrogen and phosphorus mineralization, utilization and environmental risk of livestock and poultry manure in red soil[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [52] 李书田, 刘晓永, 何萍. 当前我国农业生产中的养分需求分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6):1416-1432.
- LI Shu-tian, LIU Xiao-yong, HE Ping. Analyses on nutrient requirements in current agriculture production in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6):1416-1432.