

郭 娇, 齐德生, 张妮娅, 等. 中国畜牧业温室气体排放现状及峰值预测[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 2106-2113.

GUO Jiao, QI De-sheng, ZHANG Ni-ya, et al. Chinese greenhouse gas emissions from livestock: Trend and predicted peak value[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10): 2106-2113.

中国畜牧业温室气体排放现状及峰值预测

郭 娇¹, 齐德生^{1,2*}, 张妮娅^{1,2}, 孙铝辉^{1,2}, 胡荣桂³

(1.华中农业大学动物科技学院, 武汉 430070; 2.生猪健康养殖协同创新中心, 武汉 430070; 3.华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘 要:为了解近年来中国畜牧业温室气体的排放趋势, 预测排放峰值, 按照《省级温室气体清单编制指南(试行)》(2011)要求, 根据中国 2005—2015 年畜禽饲养量, 评估了中国 2005—2015 年畜牧业温室气体(GHG)的排放状况, 并以欧盟、美国 2013 年的人均畜产品蛋白占有量为衡量指标, 预估了中国畜牧业达到该水平时的年份以及该年份的温室气体排放量, 作为中国畜牧业温室气体排放峰值。结果表明: 2005—2015 年中国畜牧业温室气体排放量的范围为 4.06~4.52 亿 t CO₂-eq, 总体呈现两次先降后升的趋势, 最低点出现在 2008 年, 最高点为 2009 年; 2009 年之后, 中国畜牧业温室气体排放总量较为平稳。以 2015 年的数据为基础分析中国畜牧业温室气体排放的组成, 肠道 CH₄ 是主要排放源, 所占比例为 66.61%, 粪便 N₂O 和 CH₄ 排放比例分别为 18.23% 和 15.16%; 从畜禽种类来看, 反刍动物(牛、羊)为主要来源, 排放比例可达 72.44%, 猪和家禽所占的比例分别为 19.22% 和 6.81%。因此, 养牛业是中国畜牧业温室气体的主要排放源, 其次为养猪业。就地域分布来看, 2015 年, 中国畜牧业温室气体排放量居于前 10 位的省份呈现连片性。河南、四川、内蒙古、山东和云南居全国前列, 是施行减排的重点区域; 新疆和西藏地区也应作为 CH₄ 减排的重点区域。对于中国畜牧业温室气体排放峰值而言, 若要达到欧盟 2013 年的人均畜产品蛋白占有量水平, 峰值出现在 2034 年, 排放量为 4.89 亿 t CO₂-eq, 较 2015 年增长 8.94%, 年均增长率为 2.90%; 若要达到美国 2013 年的人均畜产品蛋白占有量水平, 排放峰值则在 2043 年, 排放量为 5.10 亿 t CO₂-eq, 较 2015 年增长 13.53%, 年均增长率为 4.32%。

关键词: 中国; 畜牧业; 温室气体; 排放峰值; 预测

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)10-2106-08 doi:10.11654/jaes.2017-0132

Chinese greenhouse gas emissions from livestock: Trend and predicted peak value

GUO Jiao¹, QI De-sheng^{1,2*}, ZHANG Ni-ya^{1,2}, SUN Lü-hui^{1,2}, HU Rong-gui³

(1.College of Animal Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2.The Cooperative Innovation Center for Sustainable Pig Production, Wuhan 430070, China; 3.College of Resources and Environmental Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: This study was conducted to gain a general understanding of the trend in greenhouse gas (GHG) emissions from livestock and to predict its peak value in China. This study was based on the "Guidelines for the Provincial Inventory of Greenhouse Gas (Trial), 2011", and the populations of animals in China from 2005 to 2015 were used to calculate the GHG emissions from livestock in China. The animal product protein supply quantity in China, the European Union (EU), and the United States of America (USA) in 2013 were used to predict the peak of GHG emissions in China. Based on these methods, the results showed that: GHG emissions from 2005 to 2015 in China were about 406~452 million tons CO₂-eq. The lowest peak point occurred in 2008, while the highest peak point was in 2009. After 2009, the GHG emissions from livestock were relatively stable. In 2015, enteric methane was the GHG most emitted from livestock in China, accounting for 66.61% of the total, followed by CH₄ and N₂O emissions from manure, at 18.23% and 15.16%, respectively. With respect to animal species, ruminants were the main source of GHG emissions (up to 72.44%), followed by pigs and poultry at 19.22% and 6.81%, respectively. So

收稿日期: 2017-02-05 录用日期: 2017-04-25

作者简介: 郭 娇(1991—), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 从事饲料安全与环境卫生研究。E-mail: guojiao1991@sina.com

* 通信作者: 齐德生 E-mail: qds@mail.hzau.edu.cn

基金项目: 中国清洁发展机制基金赠款项目(2012020); 公益性行业(农业)科研项目(201303145)

Project supported: China Clean Development Mechanism Fund Grant Project(2012020); Special Scientific Research Fund of Agriculture Public Welfare Profession of China(201303145)

cattle was the main source of GHG emissions in China, followed by pigs. There were effects of geographical distribution on the amount of GHG emissions in China, where the top 10 provinces in terms of GHG emissions were contiguous. Notably, Henan, Sichuan, Inner Mongolia, Shandong, and Yunnan were the leaders of the country in terms of GHG emissions, and these areas should focus on reducing GHG emissions. In addition, Xinjiang and Tibet should be targeted as important areas for CH₄ reduction. As for the peak of GHG emissions from livestock, it will be 489 million tons CO₂-eq in 2034 if China reaches the same level of animal product protein supply as the EU, an increase of 8.94% compared with 2015. The annual growth rate would be 2.90%. Following the same trend, the peak of GHG will be 510 million tons CO₂-eq in 2043 if China reaches the same animal products protein supply as the USA, with an increase of 13.53% compared with 2015 and a 4.32% increase in annual growth rate.

Keywords: China; livestock; greenhouse gas; emission peak; prediction

2015年12月12日,第21届联合国气候变化大会在巴黎圆满结束,《巴黎协议》签订,被誉为“世界的转折点”,标志着各国为应对气候变化迈出历史性的一步,中方承诺在2030年左右碳排放达到峰值,同时也将温室气体减排列为重中之重。畜牧业是导致温室气体排放的主要来源之一,占全球温室气体排放总量的14.5%^[1]。我国作为养殖业大国,肉类、蛋类年产量位居世界第一,奶类产量则居世界第三位,是十分重要的畜产品生产国家。然而,庞大的畜禽养殖规模会带来严重的环境污染和温室气体排放问题,对周边的生态环境产生巨大压力。畜牧业温室气体主要来源于畜禽肠道CH₄和粪便管理过程中产生的CH₄和N₂O。反刍动物是CH₄排放的主要来源,全生命周期CO₂当量排放量达55.25%^[2],其中黄牛CH₄排放量最大,其次为猪;N₂O排放量最大的为猪,年均排放比例达32%^[3],其次为黄牛和家禽。

为对中国畜牧业温室气体的排放有更加全面的认识,为预测畜牧业温室气体排放峰值以了解畜牧业温室气体减排力度,本文根据《省级温室气体清单编制指南(试行)》(2011,以下简称《指南》)^[4]的方法,对2005—2015年中国畜牧业温室气体的排放状况进行评估,并将联合国粮农组织(FAO)公布的2013年人均畜产品蛋白占有量作为衡量指标,以预估中国畜牧业在达到欧盟和美国水平时的年份,预测中国畜牧业温室气体排放峰值。以期今后温室气体排放量的评估和排放峰值的预测提供参考,也为温室气体的减排寻求有效措施。

1 材料与方法

1.1 畜牧业温室气体排放量计算

1.1.1 活动水平数据的确定

2005—2013年畜牧业CH₄和N₂O排放量计算的活动水平数据为畜禽饲养量,以年末存栏量(家禽为出栏量)计,从《中国畜牧业年鉴》^[5]、《中国农村统计资

料》^[6]和国家数据网站^[7]中获取。由于2014年和2015年的活动水平数据尚未公布或数据不全,以2005—2013年畜禽饲养量为基础,建立我国畜禽饲养量预测模型,以估测中国2014年和2015年的畜禽饲养量。因奶牛、水牛以及山羊和骆驼预测模型的拟合度较低,不能由此模型进行可靠的预测,故采用年平均增长率对未来的饲养量进行预测^[8]。

$$P = [\sqrt[n]{(T_n/T_1)} - 1] \times 100 \quad (1)$$

式中: P 为年平均增长率; T_n 、 T_1 为第 n 年和第1年的畜禽饲养量。

为更加准确客观地计算各畜禽养殖量的年平均增长率,在计算 T_n 、 T_1 时,分别采用前3年的平均值和最后3年的平均值来替代,以消除单一年份产生的随机影响。

1.1.2 畜牧业CH₄排放量计算

各种畜禽肠道和粪便CH₄排放量均采用如下公式计算:

$$E_{CH_4} = \sum F_{CH_4,i} \times P_i \times 10^{-7} \quad (2)$$

式中: E_{CH_4} 为畜禽肠道或粪便CH₄排放总量,万t·a⁻¹; $F_{CH_4,i}$ 为第 i 种畜禽肠道或粪便CH₄排放因子,kg·头⁻¹·a⁻¹,依据《指南》,肠道CH₄排放因子取规模化饲养、农户散养及放牧饲养的均值,粪便CH₄排放因子取各地区排放因子均值(表1); P_i 为第 i 种畜禽的饲养量,头(只)。

1.1.3 畜牧业N₂O排放量计算

$$E_{N_2O,manure} = \sum F_{N_2O,manure,i} \times P_i \times 10^{-7} \quad (3)$$

式中: $E_{N_2O,manure}$ 为畜禽粪便管理N₂O排放总量,万t·a⁻¹; $F_{N_2O,manure,i}$ 为第 i 种畜禽粪便管理N₂O排放因子,kg·头⁻¹·a⁻¹,从《指南》中获得(表1); P_i 为第 i 种畜禽的饲养量,头(只)。

1.1.4 畜牧业温室气体排放总量计算

畜牧业温室气体排放总量以CO₂-eq计,CH₄和N₂O在100年尺度上的增温潜势分别为CO₂的28倍

表1 各畜禽温室气体排放因子(kg·头⁻¹·a⁻¹)Table 1 Emission factors from different livestock(kg·head⁻¹·a⁻¹)

排放源	奶牛	非奶牛	水牛	绵羊	山羊	猪	家禽	马	驴/骡	骆驼
肠道 CH ₄ 排放因子	92.23	68.70	79.10	8.13	8.33	1.00	0.00	18.00	10.00	46.00
粪便 CH ₄ 排放因子	6.49	2.82	5.11	0.28	0.30	3.46	0.02	1.37	0.75	1.60
粪便 N ₂ O 排放因子	1.675	0.766	0.977	0.085	0.085	0.197	0.007	0.330	0.188	0.330

和 265 倍^[9],故畜牧业温室气体排放总量计算方法为:

$$E_{\text{Total}} = E_{\text{CH}_4, \text{Total}} \times 28 + E_{\text{N}_2\text{O}} \times 265 \quad (4)$$

式中: E_{Total} 为当年畜禽温室气体排放总量, 万 t CO₂-eq·a⁻¹; $E_{\text{CH}_4, \text{Total}}$ 为畜禽肠道和粪便 CH₄ 排放总量, 万 t·a⁻¹; $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 为动物粪便管理 N₂O 排放总量, 万 t·a⁻¹。

1.2 畜牧业温室气体排放峰值计算

1.2.1 排放峰值年份的预测

根据 FAO 公布的 2013 年中国、欧盟以及美国的人均畜产品蛋白占有量^[10](表 2), 比较中国与另两者间的差距。以 2000—2013 年中国人均畜产品蛋白占有量数据为基础, 建立预测模型, 以预测中国达到欧盟和美国水平时的年份, 作为在不同标准下的中国畜牧业温室气体排放峰值年份。

表 2 2013 年中国、欧盟、美国的人均畜产品蛋白占有量 (g·人⁻¹·d⁻¹)

Table 2 Protein supply quantity—Animal products from China, EU and USA in 2013(g·capita⁻¹·d⁻¹)

中国	欧盟	美国
39.64	60.38	69.78

1.2.2 排放峰值的预测

采用方法 1.1.1 中的预测模型, 估测排放峰值年份的畜禽饲养量。畜牧业温室气体排放峰值的计算方法参照 1.1。

2 结果与分析

2.1 中国畜禽饲养量和人均畜产品蛋白占有量预测模型

表 3 结果为根据方法 1.1.1 和 1.2.1 分别得出的中国各畜禽饲养量的预测模型(x 表示年份, y 表示畜禽饲养量, 单位: 万头)、年平均增长率和人均畜产品蛋白占有量的预测模型(x 表示年份, y 表示人均畜产品蛋白占有量, 单位: g·人⁻¹·d⁻¹)。由预测模型或年平均增长率可知, 除肉牛、水牛、山羊、马、驴、骡外, 其余畜禽均呈逐年递增趋势, 显示中国畜牧业结构已逐渐向提供畜产品的方向发展, 役用动物逐渐减少, 预示近年来中国畜牧业将呈现不断发展的趋势。由人均畜

表 3 中国畜禽饲养量和人均畜产品蛋白占有量预测模型

Table 3 The prediction model of the amount of animal husbandry and protein supply quantity—livestock in China

畜禽种类	预测模型	年平均增长率/%
奶牛		1.55
肉牛	$y = -71.892x + 151\ 281.69 (R^2 = 0.835\ 9)$	
水牛		-0.27
绵羊	$y = 391.57x - 773\ 349.108\ 9 (R^2 = 0.967\ 2)$	
山羊		-0.09
猪	$y = 658.49x - 1\ 000\ 000 (R^2 = 0.768\ 6)$	
家禽	$y = 37\ 484x - 74\ 264\ 833 (R^2 = 0.957\ 4)$	
马	$y = -14.594x + 29\ 999 (R^2 = 0.920\ 5)$	
驴	$y = -18.244x + 37\ 323 (R^2 = 0.869\ 5)$	
骡	$y = -15.178x + 30\ 779 (R^2 = 0.940\ 9)$	
骆驼		1.63
人均畜产品蛋白占有量	$y = 1.011\ 6x - 1\ 996.4 (R^2 = 0.991\ 5)$	

产品蛋白占有量预测模型得知, 中国人均畜产品蛋白占有量与年份呈高度正相关, 预示中国未来几年的畜牧业将呈现稳定发展的趋势。

2.2 中国畜牧业温室气体排放峰值年份预测与畜禽饲养量预测

根据中国人均畜产品蛋白占有量预测模型, 确定不同标准条件下中国畜牧业温室气体排放峰值年份: 若达到欧盟 2013 年的人均畜产品蛋白占有量水平, 排放峰值年份为 2034 年; 若要达到美国 2013 年的人均畜产品蛋白占有量的水平, 排放峰值年份则为 2043 年。由中国各畜禽饲养量的预测模型预测得出 2014 年、2015 年以及排放峰值年份 2034 年和 2043 年的畜禽饲养量如表 4 所示(因马、驴、骡的饲养量呈逐年减少趋势, 故 2034 年和 2043 年的饲养量均以 2013 年计)。

2.3 2005—2015 年中国畜牧业温室气体排放状况

2005—2015 年中国畜牧业温室气体排放量总体呈现两次先降后升的趋势(图 1)。第一次变化由 2005 年的 4.51 亿 t CO₂-eq 下降至 2006 年的 4.33 亿 t CO₂-eq, 后上升至 2007 年的 4.39 亿 t CO₂-eq; 第二次变化幅度较大, 由 2007 年的 4.39 亿 t CO₂-eq 下降至

表4 中国畜禽饲养量预测值[万头(只)]

Table 4 The predicted value of the amount of animal husbandry from China(Ten thousand head or bird)

年份	奶牛	肉牛	水牛	绵羊	山羊	猪	家禽	马	驴	骡	骆驼
2014	1 350.76	6 491.20	2 380.12	15 272.80	14 021.91	48 069.75	1 227 943.00	606.68	579.58	214.54	32.10
2015	1 371.74	6 419.31	2 373.69	15 664.37	14 009.29	48 728.24	1 265 427.00	592.09	561.34	199.36	32.62
2034	1 837.63	5 053.36	2 254.83	23 104.20	13 771.66	61 239.55	1 977 623.00	602.74	603.35	230.35	44.35
2043	2 110.46	4 406.33	2 200.63	26 628.33	13 660.51	67 165.96	2 314 979.00	602.74	603.35	230.35	51.30

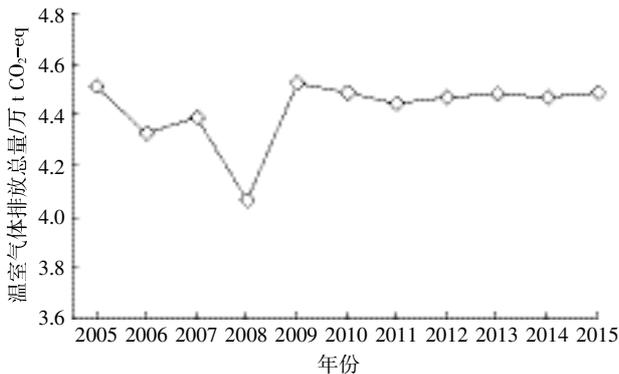


图1 2005—2015年中国畜牧业温室气体排放趋势

Figure 1 Trend of greenhouse gas emissions from livestock from 2005 to 2015

2008年的4.06亿t CO₂-eq,后上升至2009年的4.52亿t CO₂-eq;2009年之后,全国畜牧业温室气体排放总量较为平稳,变化不大。总体来讲,近年来中国畜牧业温室气体排放量较为稳定,但因肉牛、水牛、山羊等反刍动物的饲养量逐年减少,肠道CH₄的排放明显降低,导致2015年全国畜牧业温室气体排放总量较2005年降低0.45%。

2.4 2015年中国畜牧业温室气体排放组成

以2015年为例,分析中国畜牧业温室气体排放组成。由图2A可知,中国畜牧业温室气体的排放主要来源于畜禽肠道CH₄,所占比例为66.61%,其余部分来源于粪便管理过程中的N₂O和CH₄排放,分别为18.23%和15.16%。图2B显示反刍动物(牛、羊)是中国畜牧业温室气体的主要来源,排放比例高达72.44%,牛的温室气体排放量超过总量一半,占比55.19%,羊的排放比例则为17.25%。来源于牛的温室气体排放中有57.16%来自肉牛,25.07%源于水牛,奶牛占比为17.76%。单胃动物猪和家禽的温室气体排放比例分别为19.22%和6.81%。由此可见,养牛业是我国畜牧业温室气体最主要的排放源,其次为养猪业。

2.5 2015年各省畜牧业温室气体排放比较

以2015年公布的各省份畜禽饲养量为活动数据,按照《指南》推荐的各地区的温室气体排放因子,

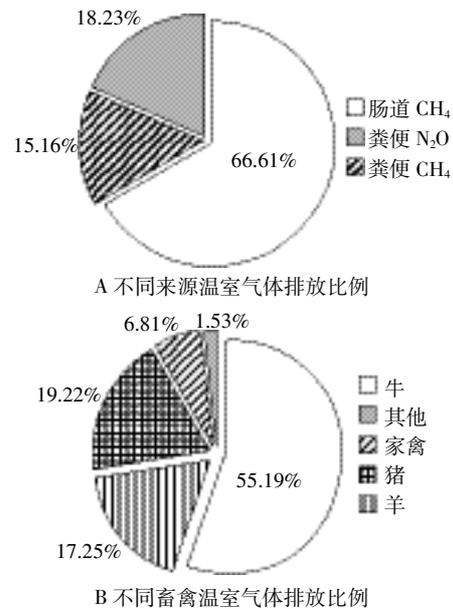


图2 2015年中国畜牧业温室气体排放组成比例

Figure 2 The composition ratio of greenhouse gas emissions from livestock in 2015

估算2015年各省份温室气体排放状况。如表5所示,排名前10的省份共占全国排放的58.41%。在区域分布上较为集中,呈现连片性。第一区域为内蒙古、河北、河南、山东;第二区域为湖南、广西、四川、云南;第三区域为新疆和西藏。在排名前10的省份中,有7个省份的CH₄排放量和N₂O排放量也排名前10位,特别是河南、四川、内蒙古、山东和云南,三者的排放量均居全国前列,是施行温室气体减排的重点区域。此外,新疆和西藏地区,由于反刍动物的饲养量较大,且多为放牧饲养,导致该地区的CH₄排放量较大,也应作为重点减排的区域。

2.6 中国畜牧业温室气体排放峰值预测

如表6所示,中国畜牧业若达到欧盟2013年的人均畜产品蛋白占有量水平,则排放峰值将出现在2034年,届时中国畜牧业温室气体排放总量将达4.89亿t CO₂-eq,较2015年增长8.94%,年均增长率为2.90%;若达到美国2013年的人均畜产品蛋白占有量水平,则排放峰值年份为2043年,排放量将达

表5 畜禽温室气体排放总量位于前10位的省份

Table 5 Top 10 provinces of the quantity of greenhouse gas emissions

排名	省份	排放总量/ 万 t CO ₂ -eq	占全国总量 排放比例/%	CH ₄ 排放量/ 万 t	占全国 CH ₄ 排放比例/%	N ₂ O排放量/ 万 t	占全国 N ₂ O 排放比例/%
1	河南	4 327.27	8.60	130.11	8.80	2.58	7.65
2	四川	4 225.23	8.39	126.26	8.54	2.60	7.71
3	内蒙古	3 951.63	7.85	112.29	7.60	3.05	9.03
4	山东	3 024.01	6.01	83.63	5.66	2.57	7.63
5	云南	2 924.01	5.81	89.12	6.03	1.62	4.79
6	湖南	2 492.27	4.95	74.69	5.05	1.51	4.48
7	新疆	2 268.87	4.51	72.97	4.94	0.85	2.52
8	河北	2 095.27	4.16	56.51	3.82	1.94	5.74
9	西藏	2 070.16	4.11	65.50	4.43	0.89	2.64
10	广西	2 023.48	4.02	58.59	3.96	1.45	4.28

表6 不同标准水平条件下中国畜牧业温室气体排放峰值

Table 6 Greenhouse gas emissions peak from livestock at different level

标准	排放峰值 年份	温室气体 来源	排放量/ 万 t	CO ₂ -eq/ 万 t	总计/ 亿 t
欧盟(2013)	2034	肠道 CH ₄	1 080.10	30 242.87	4.89
		粪便 CH ₄	301.26	8 435.36	
		粪便 N ₂ O	38.59	10 227.11	
美国(2013)	2043	肠道 CH ₄	1 090.50	30 533.88	5.10
		粪便 CH ₄	329.15	9 216.17	
		粪便 N ₂ O	42.33	11 216.69	

5.10 亿 t CO₂-eq, 较 2015 年增长 13.53%, 年均增长率为 4.32%。

3 讨论

3.1 畜牧业温室气体排放的估算方法

关于畜牧业温室气体排放量的估算,国际上常用的方法为《2006年 IPCC 国家温室气体清单指南》(以下简称《IPCC,2006》)^[11],其中确立了三种用于估算畜牧业温室气体排放的计算方法。方法一是利用给出的排放因子缺省值,收集并计算各畜禽种类的年饲养量,利用排放因子乘以年饲养量即可计算得出。对于多数国家的多数动物而言,该方法基本适用。方法二是针对于肠道 CH₄ 排放比例较大的国家或地区采用的一种更为准确的方法,要求将畜禽种类根据年龄、性别、生产性能等细分为几个亚类,再根据每个亚类的特征性参数计算得出排放因子。方法三为最高级方法,是针对于某一个国家或地区特制的排放因子,一般是通过实地监测的途径获得,是计算排放因子、估算温室气体排放量的最为准确的方法。不同的国家或

地区根据实际情况选择适用的方法:应优先选择方法三;若没有针对该国家或地区的方法,则选择方法二,若无法获得或缺少各畜禽亚类的特征性参数,则采用方法一进行估算。

现有报道大多采用《IPCC,2006》中的方法一来估算我国畜牧业温室气体的排放量。胡向东等^[3]借鉴《IPCC,2006》中的 CH₄ 排放因子,并以 FAO 提供的 2004 年中国畜禽排泄物 N₂O 排放量除以调整后的中国畜禽平均饲养量,得出 N₂O 排放因子,以此为基础估算中国畜牧业温室气体排放量。谭秋成等^[12]、闵继胜等^[13]、孟祥海等^[2]均采用《IPCC,2006》方法一或借鉴胡向东等的方法。

本文所采用的《指南》中的方法,是国家发展改革委组织清华大学、中国科学院、中国农业农科院、中国林业科学院、中国环境科学院等单位编写的,旨在加强我国温室气体排放量计算方法的科学性、一致性以及结果的可比性。用该方法估算畜牧业温室气体排放量,是在《IPCC,2006》的基础上,结合方法一和方法二,采用我国各地区(东北、华北、华东、中南、西南、西北)的特征性参数,计算得出各地区不同畜禽种类的温室气体排放因子。当然,若某省市或地区有更加准确的特征性参数,则可以不使用给出的排放因子,而是通过公式计算获得。该方法较《IPCC,2006》推荐的排放因子缺省值,更加科学合理,符合我国畜牧业生产实际,且便于各省各地区使用。本文得出的 2005—2015 年中国畜牧业温室气体的排放量与胡向东等^[3]测得的 2000—2007 年的结果相近,闵继胜等^[13]的研究结果也与本文类似。而谭秋成^[12]和孟祥海等^[2]的估算结果略低于本研究,但两者的估算方法均借鉴于胡向东等。有此差异,可能是由于畜禽饲养量的数据来

源不同造成的。

但是,《指南》中的方法在使用时仍存在许多困难和不足之处。一是由于我国畜牧业温室气体排放的相关研究起步较晚,许多特征性参数缺乏,使用时直接采用方法中给出的排放因子仍有较大的不确定性。二是给出的方法仍以方法一和方法二为主,还未达到方法三的高度。虽然已有大量的研究报道针对畜禽肠道 CH_4 和粪便 CH_4 以及 N_2O 的排放,但大多关注于排放特征和机制的研究,还未量化落实到排放因子。因此,为降低后续的温室气体清单的不确定性,应逐步完善各省各地区的畜禽特征性参数,并采用实地监测等方法获得不同畜禽亚类在不同地区、不同气候条件、不同饲养模式、不同粪污处理方式等条件下的温室气体排放因子。

3.2 中国畜牧业温室气体排放状况

本文得到的2005—2015年中国畜牧业温室气体排放量的结果,总体上呈现两次先降后升的趋势,2006年和2008年下降趋势明显,均与当年的畜禽饲养量下降密切相关。2006年生猪行业遭遇疫病(如蓝耳病)冲击,肉牛存栏量持续下降^[3];2008年肉牛、水牛和绵羊的养殖数量明显减少。这可能与中国畜禽养殖结构的转变有关,该趋势与现有的研究结果基本类似^[2-3,12-13]。2009年以后中国畜牧业温室气体排放虽稍有波动,但总体较为稳定。

3.3 畜牧业温室气体排放峰值的预测方法

针对畜牧业温室气体排放峰值的预测方法,目前尚未见研究报道,但关于中国碳排放峰值、某一区域碳排放峰值以及中国能源碳排放峰值和废弃物碳排放峰值的研究成果已有发表。关于碳排放峰值预测的方法目前尚未统一,主要有STIRPAT模型^[14]、IMAC模型^[15-16]、PAKA分解方法^[17]以及Bottom-up框架^[18]和FAIR/TIMER模型^[19]等。能将此类方法综合归纳进行改进,并运用于畜牧业温室气体排放峰值预测,也不失为一种科学有效的方式。

本文为预测畜牧业温室气体排放峰值,采用FAO提供的人均畜产品蛋白占有量作为达到峰值的预测标准,因为人类从畜产品中获得的营养物质归根结底是对蛋白质的需求,以人均畜产品蛋白占有量作为预测排放峰值的标准具有可行性。当然,人均畜产品蛋白占有量不仅来源于国内饲养的畜禽数量,也受到畜产品进出口量的影响,因此本文采用的畜产品蛋白占有量数据来源于畜产品的供给量而不是生产量。通过此种方法预测得到排放峰值年份,再根据我国各

畜禽饲养量的变化趋势,预测达到排放峰值年份时我国各畜禽的饲养数量,从而计算得出我国畜牧业温室气体的排放峰值。此种方法虽然不能综合考虑养殖效率的提高、进出口政策的改变等外界因素的影响,但已最大限度地将主要因素列入其中。

3.4 中国畜牧业温室气体排放峰值

在第21届全球气候变化大会上,中方承诺在2030年左右碳排放达到峰值,并会努力使其尽快达峰。本文预测的畜牧业温室气体排放峰值年份为2034年和2043年,排放量分别为4.89亿t和5.10亿t $\text{CO}_2\text{-eq}$,较2015年分别增长8.94%、13.53%,提示我国畜牧业若不进一步加强畜牧业低碳减排措施,既定的目标将很难实现。

就排放峰值而言,本文采用的排放因子为各畜禽在不同饲养模式、不同地区的排放因子的均值。随着中国畜牧行业的发展,饲养模式、饲养水平、生产效率会得到优化和提高,各畜禽的温室气体排放因子会减小。因此,若采用现有的排放因子均值,会高估未来的温室气体排放量。但饲养模式(规模化饲养、农户散养、放牧饲养)在未来采用的比例不可预估,所以只能用现有的排放因子均值预估排放峰值。因此,关于畜牧业温室气体排放峰值的预测,仍需要进一步探索,使其更加准确。

3.5 中国畜牧业温室气体减排措施

从中国畜牧业温室气体排放的组成可以看出,反刍动物是 CH_4 的主要排放源,猪是 N_2O 的主要排放源;畜禽饲养量居全国前列的省份河南、四川、山东等是温室气体排放的主要地区;以放牧饲养为主的内蒙古、新疆、西藏也是主要排放地区。因此,温室气体减排必须针对重点、关键点、难点,通过政府引导、企业优化、市场调控、养殖技术提高等方面,多管齐下,多措并举,加快实现到2030年全国温室气体减排60%~65%的目标。

3.5.1 优化畜禽养殖结构,提高动物生产性能

畜禽种类是影响温室气体排放量的重要因素。反刍动物,特别是牛(包括奶牛、非奶牛和肉牛)的单位数量温室气体排放潜力较大,而猪和家禽相对较小。因此,可通过适当调整我国畜牧业的养殖结构来减少温室气体的排放。在保证牛肉和牛奶供给的前提下,尽量控制其养殖规模,尽量减少役用牛如水牛和黄牛等的养殖数量。同时,提高单位数量动物的生产性能,减少畜禽饲养量,也是温室气体减排的有效途径。可从以下方面着手:通过品种选育,培育出生产性能、繁

育性能较好的畜种;推广人工授精、胚胎移植等现代技术,减少公畜饲养量;改善饲养管理,发挥动物的最大生产性能。

3.5.2 改善饲养模式,因地制宜因种施策

饲养模式涉及养殖模式、规模大小、畜禽日粮等方面,可根据中国各地区的差异,因地制宜;根据畜禽种类的差异,因种施策,探索更为合适的饲养模式,实现温室气体减排。一是提倡规模化饲养,减少放牧饲养和农户散养的比例;在农村和草原地区建设养殖小区,实现排泄物的统一管理。二是适度发展养殖规模,推荐中规模养殖,减少小规模养殖的比例。三是提倡精准饲养,优化饲料结构,合理使用添加剂;细化各畜禽的营养需要量,制定更加科学合理的日粮方案,减少饲料消耗和营养物质的排泄量;针对反刍动物肠道CH₄的排放,提倡秸秆氨化或青贮,饲喂青贮玉米、苜蓿等优质粗料,合理使用添加剂,采用舔砖等饲喂方式。四是推广新型养殖模式,实现低碳生态养殖,发酵床技术养猪、养鸡就是一种低排放、零污染、低成本、高效益的新型养殖模式,值得推广。

3.5.3 改进粪污处理方式,发展循环生态农业

畜牧业产生的大量粪污,是温室气体的重要来源,但也是种植业有机肥料的一大来源,可作为温室气体减排的重点。因此,推广以种养结合、资源循环利用为特征的循环生态农业是实现畜牧业温室气体减排的有效举措。就粪便清理方式而言,提倡干清粪,减少水冲清粪和水泡粪造成的舍内温室气体的排放。推广有机肥生产,优化堆肥各项参数。可通过优化水分(50%~60%)^[20-22]、C/N(20~30)^[20,23]、粪便孔隙度(增大孔隙度)^[24]、调理剂类型(功能菌剂、生物炭等^[25])、供氧方式(翻堆次数^[26-28]、强制通风)等参数,最大程度减少温室气体的排放,减少氮等营养元素的流失。推进沼气生产,沼气作为清洁能源,既可实现温室气体减排,又能实现废物的利用^[29-32]。探索种养结合新型农业模式,将粪污以有机肥、沼气的形式作为种植业、生产生活的有效供给。如“猪-沼-草”模式,猪粪用于沼气生产,沼气可作能源,沼渣可作肥料种草,而草又可作为饲料养畜。

4 结论

(1)2005—2015年中国畜牧业温室气体排放量范围为4.05~4.52亿t CO₂-eq,总体呈现两次先降后升的趋势,最低点出现在2008年,最高点出现在2009年,之后排放量较为平稳。

(2)2015年,肠道CH₄是中国畜牧业温室气体的主要排放源,所占比例为66.61%,粪便N₂O和CH₄排放比例分别为18.23%和15.16%;就畜禽种类而言,反刍动物(牛、羊)排放比例最大,可达72.44%,其次为猪和家禽,分别为19.22%和6.81%。

(3)2015年,中国畜牧业温室气体的排放居于前10位的省份在地域分布上呈现连片性。河南、四川、内蒙古、山东和云南的温室气体排放量居全国前列,是施行减排的重点区域;新疆和西藏地区也应作为CH₄排放的重点减排区域。

(4)若以2013年欧盟的人均畜产品蛋白占有量为标准,中国畜牧业温室气体排放峰值出现在2034年,排放量将达4.89亿t CO₂-eq,较2015年增长8.94%,年均增长率为2.90%;若以2013年美国的人均畜产品蛋白占有量为标准,则排放峰值出现在2043年,排放量将达5.10亿t CO₂-eq,较2015年增长13.53%,年均增长率为4.32%。

参考文献:

- [1] Gerber P J, Steinfeld H, Henderson B. Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013.
- [2] 孟祥海, 程国强, 张俊彪, 等. 中国畜牧业全生命周期温室气体排放时空特征分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8): 2167-2176.
MENG Xiang-hai, CHENG Guo-qiang, ZHANG Jun-biao, et al. Analyze on the spatiotemporal characteristics of GHG estimation of livestock's by life cycle assessment in China[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(8): 2167-2176.
- [3] 胡向东, 王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 247-252.
HU Xiang dong, WANG Ji-min. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(10): 247-252.
- [4] 国家发改委气候变化司. 省级温室气体清单编制指南(试行)[R]. 北京: 国家发改委, 2011.
Climate Change Division of National Development and Reform Commission. Guidelines for the provincial inventory of greenhouse gas (Trial)[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2011.
- [5] 农业部. 中国畜牧业年鉴 2005—2013[M]. 北京: 中国农业出版社.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. China animal husbandry yearbook 2005—2013[M]. Beijing: China Agricultural Press.
- [6] 国家统计局农村社会调查司. 中国农村统计年鉴 2005—2013[M]. 北京: 中国统计出版社.
Rural Social Survey Division, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China rural statistical yearbook 2005—2013 [M]. Beijing: China Statistics Press.
- [7] 国家统计局. 国家数据[DB/OL]. [2017-02-05]. <http://data.stats.gov>.

- cn/workspace/index?m=hgnd.
National Bureau of Statistics of China. National Data[DB/OL]. [2017-02-05]. <http://data.stats.gov.cn/workspace/index?m=hgnd>.
- [8] 杨飞, 吴根义, 诸云强, 等. 中国各省区未来主要畜禽养殖量及耕地氮载荷的预测[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3):289-294.
YANG Fei, WU Gen-yi, ZHU Yun-qiang, et al. Forecast of livestock and poultry amount and arable land nitrogen load of Chinese provinces [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(3):289-294.
- [9] IPCC Core Writing Group. Climate change 2014, synthesis report[R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- [10] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT. [EB/OL]. [2017-02-05]. <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QL/E>.
- [11] Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Japan Global Environment Strategy Institute, 2006.
- [12] 谭秋成. 中国农业温室气体排放: 现状及挑战[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(10):69-75.
TAN Qiu-cheng. Greenhouse gas emission in China's agriculture: Situation and challenge[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(10):69-75.
- [13] 闵继胜, 胡 浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(7):21-27.
MIN Ji-sheng, HU Hao. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(7):21-27.
- [14] 渠慎宁, 杨丹辉. 中国废弃物温室气体排放及其峰值测算[J]. 中国工业经济, 2011(11):37-47.
QU Shen-ning, YANG Dan-hui. A Study on China's GHG emission from waste sector: Trend and peak value[J]. *China Industrial Economics*, 2011(11):37-47.
- [15] 柴麒麟, 徐华清. 基于 IAMC 模型的中国碳排放峰值目标实现路径研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(6):37-46.
CHAI Qi-min, XU Hua-qing. Modeling carbon emission peaking pathways in China based on integrated assessment model IAMC[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(6):37-46.
- [16] Chai Q M, Xu H Q. Modeling an emissions peak in China around 2030: Synergies or trade-offs between economy, energy and climate security[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2014:169-180.
- [17] 杨 秀, 付 琳, 丁 丁. 区域碳排放峰值测算若干问题思考: 以北京市为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(10):39-44.
YANG Xiu, FU Lin, DING Ding. Issues on regional CO₂ emission peak measurement: Taking Beijing as an example[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2015, 25(10):39-44.
- [18] Fekete H, Vieweg M, Rocha M, et al. Analysis of current greenhouse gas emission trends: Climate action tracker, climate analytics[R]. Ecofys and the Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). 2013.
- [19] Stehfest E, van Vuuren D, Kram T, et al. Integrated assessment of Global Environmental Change with IMAGE 3.0. Model description and policy applications[R]. The Hague: Netherlands Environmental Assessment Agency, 2014.
- [20] Agnew J M, Leonard J J. The physical properties of compost[J]. *Compost Science & Utilization*, 2003, 11(3):238-264.
- [21] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
LI Guo-xue, ZHANG Fu-suo. Solid waste composting and organic fertilizer production[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [22] Rynk R. Monitoring moisture in composting systems[J]. *Biocycle*, 2000, 41(10):53-58.
- [23] 赵庆祥. 污泥资源化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
ZHAO Qing-xiang. Sludge resource technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [24] Sommer S G, Mller H B. Emission of greenhouse gases during composting of deep litter from pig production effect of straw content[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2000, 134:327-335.
- [25] 嘉兴永. 生物炭及翻堆频率对鸡粪堆肥过程中温室气体排放的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
JIA Xing-yong. Effects of biochar and frequency on greenhouse gas emissions during composting of chicken manure[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [26] 赵晨阳, 李洪枚, 魏源送, 等. 翻堆频率对猪粪条垛堆肥过程温室气体和氨气排放的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(2):534-540.
ZHAO CHEN-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, et al. Effects of turning frequency on emission of greenhouse gas and ammonia during swine manure windrow composting[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2):534-540.
- [27] Szanto G L, Hamelers H V M, Mulken W H, et al. NH₃, N₂O and CH₄ emissions during passively aerated composting of straw-rich pig manure[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98:2659-2670.
- [28] Hao X, Xu S, Larney F J et al. Inclusion of antibiotics in feed alters greenhouse gas emissions from feedlot manure during composting[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 89(2):257-267.
- [29] 王 磊. 大型秸秆沼气工程温室气体减排计量研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
WANG Lei. Large-scale straw biogas project greenhouse gas emission reduction measurement[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [30] 段茂盛, 王革华. 畜禽养殖场沼气工程的温室气体减排效益及利用清洁发展机制(CDM)的影响分析[J]. 太阳能学报, 2003, 24(3):386-389.
DUAN Mao-sheng, WANG Ge-hua. Greenhouse gas mitigation benefits of biogas project in livestock farms[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2003, 24(3):386-389.
- [31] 张培栋, 李新荣, 杨艳丽, 等. 中国大中型沼气工程温室气体减排效益分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9):239-243.
ZHANG Pei-dong, LI Xin-rong, YANG Yan-li, et al. Greenhouse gas mitigation benefits of large and middle-scale biogas project in China [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(9):239-243.
- [32] 魏玉明, 钱振波, 吕 伟, 等. 沼气工程技术对规模化猪场饲养环境和猪生长发育的影响[J]. 畜牧兽医杂志, 2016, 35(3):48-52.
WEI Yu-ming, QIAN Zhen-bo, LÜ Wei, et al. Effect of biogas technology on breeding environment and pig growth development in large-scale pig farms[J]. *Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2016, 35(3):48-52.