

中国畜牧业碳排放量变化的影响因素分解及空间分异

姚成胜^{1,2}, 钱双双^{2,3}, 毛跃华^{2,3}, 李政通^{2,3}

(1. 南昌大学中国中部经济社会发展研究中心, 南昌 330047; 2. 南昌大学经济管理学院, 南昌 330031;
3. 南昌大学计量经济研究会, 南昌 330031)

摘要: 畜牧业温室气体排放占人类活动温室气体排放总量的 18%, 已成为全球温室气体排放的重要贡献部门。运用全生命周期评价法全面测度了 2000-2014 年中国大陆 31 个省区的畜牧业碳排放, 采用对数平均迪氏指数分解法, 将畜牧业碳排放分解为畜牧业生产效率、农业生产结构调整、单位农业人口农业生产收益、城镇化和总人口增长 5 大因素, 从时空 2 个层面揭示了畜牧业碳排放的驱动效应。结果表明: 1) 2000-2014 年, 中国畜牧业碳排放总量由 1.374×10^8 t 增长到 1.506×10^8 t, 年均增速 0.654%, 其中畜禽胃肠发酵和粪便管理系统产生的碳排放是其主要来源, 两者占畜牧业碳排放总量比例达 65.58%~73.23%。2) 无论从时间还是空间层面看, 畜牧业生产效率都是抑制中国畜牧业碳排放持续增长的最重要因素, 单位农业人口农业生产效益则是导致中国畜牧业碳排放量持续增长的最重要因素, 这一因素对草原畜牧业区和农耕畜牧业区的畜牧业碳排放促进作用非常明显, 而对经济发达地区较为有限; 总人口增长是促使畜牧业碳排放增长的另一重要因素, 尤其是对人口大量流入的经济发达地区和计划生育政策宽松的广大西部少数民族地区更为明显。3) 2000-2014 年, 城镇化是有效抑制畜牧业碳排放的第二大因素, 而农业结构调整对畜牧业碳排放变化呈现由正向驱动转为负向驱动的变化特征, 这一特征在中国畜牧业较为发达的中东部地区表现较为明显。

关键词: 排放控制; 温室气体; 粪便; 畜牧业; 驱动效应; 对数平均迪氏指数分解法; 空间分异

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.002

中图分类号: X713

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-12-0010-10

姚成胜, 钱双双, 毛跃华, 李政通. 中国畜牧业碳排放量变化的影响因素分解及空间分异[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 10-19. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.002 <http://www.tcsae.org>

Yao Chengsheng, Qian Shuangshuang, Mao Yuehua, Li Zhengtong. Decomposition of impacting factors of animal husbandry carbon emissions change and its spatial differences in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(12): 10-19. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.002 <http://www.tcsae.org>

0 引言

2016 年 4 月, 超 150 个国家代表在联合国总部正式签订《巴黎协定》, 这标志着各国应对气候变化做出全球性承诺, 因此如何有效降低温室气体排放成为各国经济发展过程中迫切需要解决的问题。畜牧业是重要的温室气体排放源, 2006 年联合国粮农组织 (FAO) 发布报告《Livestock's long shadow》指出^[1], 若将畜牧业饲料生产及养殖场土地扩张所导致的土地利用变化考虑在内, 按 CO₂ 当量计算, 畜牧业温室气体排放占人类活动温室气体排放总量的 18%, 高于交通部门所占份额, 可见, 畜牧业已成为全球温室气体排放的重要生产部门之一。中国是畜牧业生产大国, 畜禽产品年产量稳居世界第一, 近年来在农业政策扶持和消费需求的拉动下更是呈现出强劲的发展势头。因此, 中国畜牧业碳排放问题也引起了研究者的重视, 目前已有一些畜牧业低碳发展途径、

不同种类畜禽养殖 (如猪、牛、羊等) 或某个生产环节的温室气体排放的测算等方面的研究^[2-5], 但有关畜牧业全生命周期碳排放及其影响因素的研究仍然较少。在为数不多的畜牧业碳排放影响因素研究中, 学者们大都集中在分析畜牧业生产方式、农户行为及环保意识等微观因素, 以及生产效率、产业结构、经济和畜牧业发展水平、劳动力就业等宏观因素^[6]。例如, 陈瑶等^[7]从生产效率、产业结构、经济水平、劳动力等 4 个方面对四大牧区畜禽温室气体排放的影响因素进行量化分解, 结果表明经济快速发展是导致四大牧区畜禽温室气体排放增加的最主要因素, 畜禽生产效率对其具有较强的抑制作用。邹洁等^[8]则以畜牧业碳排放作为非期望产出, 测算中国各省畜牧业的环境效率, 其研究认为禀赋结构、劳动力受教育程度对畜牧业环境效率有显著正向作用, 而畜牧业经济发展水平、产业结构等对畜牧业环境效率存在显著消极影响。

以上研究对认清各因素对畜牧业碳排放的影响具有较好的指导作用, 有助于促进中国畜牧业的低碳化发展。然而, 农业经济学研究表明, 畜牧业生产的经济效益明显高于种植业, 在经济发展过程中农民为增加从事农业生产的经济收益, 会自主地扩大畜牧业生产规模, 使得农业经济结构发生改变, 进而导致畜牧业碳排放量发生

收稿日期: 2016-12-20 修订日期: 2017-05-11

基金项目: 江西省社会科学“十三五”规划项目 (16YJ11); 国家社科基金重点项目 (2015AZD070)

作者简介: 姚成胜, 男, 江西上饶人, 副教授, 博士, 主要研究方向为农业资源经济与区域可持续发展, 南昌 南昌大学中国中部经济社会发展研究中心, 330047。Email: yaochengsheng@163.com。

变化。那么，农业经济结构变化、单位农业人口农业生产收益变化与畜牧业碳排放存在怎样的关系？其次，研究表明人口总量增长提高了畜禽产品需求，进而促进了畜牧业快速发展^[9]，那么人口增长和城镇化水平变化又与畜牧业碳排放变化有怎样的关系？可以看出，系统全面回答上述问题对于更好地认识畜牧业碳排放变化的影响因素，更好地促进中国节能减排无疑具有重要意义。鉴于上述研究不足，本文首先采用全生命周期评价（life cycle assessment, LCA）方法，全面测度了 2000-2014 年中国大陆 31 个省区的畜牧业碳排放，通过加总 31 省区的数据得到全国的畜牧业碳排放变化情况；然后，采用 KAYA 恒等式扩展模型与 LMDI 分析方法，将畜牧业碳排放分解为畜牧业生产效率、农业生产结构调整、单位农业人口农业生产效益、城镇化和人口增长等 5 大因素，从时空 2 个方面揭示畜牧业碳排放的变化及其驱动效应，以期为更好地推动中国畜牧业低碳化发展，为中国更好地实施节能减排提供依据。

1 理论与研究方法

1.1 基于全生命周期（LCA）的畜牧业碳排放的测算

低碳畜牧业的本质是在畜产品生产、加工、运输、消费等整个过程中，把温室气体排放量尽可能降到最低，以实现畜牧业发展和环境保护双赢状态。可以看出，畜牧业产前、产中、产后的全过程都与温室气体排放有一定或相当大的关联^[10]。因此，畜牧业碳排放测算不能仅仅考虑畜牧业某一环节，而应立足于畜牧业生产的全生命周期的“碳足迹”。全生命周期评价法（LCA）就是量化评估某一产品，从原材料的获取、产品的生产直至产品使用后的处置对环境所产生的影响的一种方法。它作为一种有效的环境管理工具，已被广泛运用于温室气体排放研究领域^[11-14]。为更全面地测算中国畜牧业碳排放，本文采用 LCA 评价方法并参考胡向东^[15]、孟祥海^[16]、姚成胜^[17]、程璜鑫^[18]等的研究，将整个畜牧业碳排放过程细分为饲料粮种植、饲料粮运输与加工、牲畜胃肠发酵、畜禽饲养环节耗能、粪便管理系统和畜禽产品加工等 6 个系统边界，并利用相关碳排放系数计算得到中国畜牧业的碳排放量。

1.1.1 牲畜年平均饲养量

由于牲畜养殖过程中繁殖和屠宰会引起年度内养殖数量起伏变动，因此本文对牲畜年饲养量作以下调整：当牲畜饲养周期大于或等于 1 年时，该牲畜年末存栏量即为年平均饲养量；当牲畜饲养周期小于 1 a 时，对年出栏量进行调整，调整公式参照 IPCC（2006）^[19]。具体年饲养量的确定公式如式（1）所示。其中，在中国生猪、兔和禽类的饲养周期分别为 200、105 和 55 d，均小于 1a^[20]，因此具体需要对此进行调整。

$$APP = \begin{cases} Herds_{end}, & \text{if: } Days_{live} \geq 1a \\ Days_{live} \cdot \left(\frac{NAPA}{365} \right), & \text{if: } Days_{live} < 1a \end{cases} \quad (1)$$

式中 APP 为牲畜年均饲养量，Herds_{end} 为年末存栏量，

Days_{live} 为牲畜饲养周期，NAPA 为年牲畜出栏量。

1.1.2 碳排放系数的确定

纵观现有文献可知，国内相关畜牧业碳排放转换系数还未确立官方标准。为此，本文参考孙亚男、胡向东、孟祥海、廖新伟等的研究^[12,15-16,21-23]，结合 IPCC 准则内容确定相应的碳排放系数（表 1 和表 2）。

表 1 畜禽胃肠发酵和粪便管理系统的温室气体排放系数

Table 1 GHG emission coefficients of gastrointestinal fermentation and manure management system of livestock

kg·头⁻¹·a⁻¹

畜禽品种 Livestock and poultry breeds	CH ₄ 排放系数 CH ₄ discharge coefficient		粪便管理 N ₂ O 排放系数 N ₂ O discharge coefficient for control of manure (ef ₃)	文献 Reference
	肠胃发酵 Gastrointestinal fermentation (ef ₁)	粪便管理 Control of manure (ef ₂)		
猪 Pig	1	3.50	0.53	[15]
禽类 Poultry	0	0.02	0.02	
兔 Rabbit	0.254	0.08	0.02	
奶牛 Milch cow	68	16	1.00	[16]
非奶牛 Non-milch cow	51.4	1.50	1.37	
马 Horse	18	1.64	1.39	
驴 Donkey	10	0.90	1.39	[15]
骡 Mule	10	0.90	1.39	
羊 Sheep	5	0.16	0.33	
骆驼 Camel	46	1.92	1.39	

1.1.3 基于全生命周期的畜牧业碳排放测算

1) 饲料粮种植产生的 CO₂ 排放量

由于粗饲料是经过第一次加工形成的副产品，其引起的碳排放量甚微，在此不予考虑，只考虑精饲料部分。精饲料主要有小麦、玉米、豆粕等，在种植畜禽饲料过程中化肥投入量大，其生产投入活动排放的温室气体应计入该系统边界内^[16]。为此，因饲料粮种植产生的碳排放量可分为作物种植过程产生的碳排放量和化肥生产投入引起的碳排放量：

$$TC_{cz} = \sum_{u=1}^n Q_u \cdot s_u \cdot q_j \cdot ef_{j1} + d_j \cdot m_j \cdot B_j \cdot ef_h \quad (2)$$

式中 TC_{cz} 表示种植饲料过程中产生的 CO₂ 排放量；u 表示畜产品的种类，包括猪肉、牛肉、羊肉、禽肉、禽蛋、牛奶；Q_u 表示第 u 类畜产品的年产量，t（来源：《中国农村统计年鉴》）；S_u 表示每单位第 u 类畜产品的耗粮系数，kg/kg（来源：《全国农产品成本收益资料汇编》）；q_j 表示第 i 类畜禽饲料配方中 j 类粮食所占比例（包括玉米、大豆、小麦），参考谢鸿宇^[24]的研究：猪的精饲料中玉米占 56.6%，豆饼类占 10.2%；牛饲料中玉米占比为 37%，豆饼类占 26%；羊饲料玉米占 62.61%，豆饼类占 12.89%；肉鸡饲料中玉米、小麦和豆饼类占比分别为 57%、5%、17%；蛋鸡饲料中玉米和豆饼类占比分别为 63.28%，13.98%；奶牛饲料中玉米占比为 46.793%，豆饼类占比为 28.564%。ef_{j1} 表示 j 类粮食的种植过程中 CO₂ 当量排放系数（表 2），其中因豆饼为大豆经第一次处理后得到的副产品，所以大豆种植所排放的温室气体不予纳入计算范

围。 d_j 表示 j 类粮食作物的单位面积化肥使用量, kg/hm^2 ; m_j 表示 j 类粮食作物的播种面积, hm^2 ; B_j 表示 j 类粮食作物用于饲料粮的比例, %; d_j 、 m_j 和 B_j 数据来自国家发改委的《全国农产品成本收益资料汇编(2001-2015)》; ef_h 为化肥的碳排放因子系数, kg/kg (表2)。

表2 各系统边界的碳排放系数

Table 2 Carbon emission coefficients of each system boundary

碳排放系统边界 Carbon emission system boundary		排放系数 Discharge coefficient		文献 Reference	
系统边界 System boundary	符号 Note	碳源排放系数 Emission coefficient of different carbon sources	数值 Values		单位 Unit
饲料粮种植 Feed grain cultivation	ef_{f1}	玉米 CO ₂ 当量排放系数	1.50	t·t ⁻¹	[24]
		小麦 CO ₂ 当量排放系数	1.22	t·t ⁻¹	
	ef_h	化肥 CO ₂ 当量排放系数	3.283 0	t·t ⁻¹	
饲料粮运输加工 Feed grain transport & processing	ef_2	玉米 CO ₂ 当量排放系数	0.0102	t·t ⁻¹	[25]
		大豆 CO ₂ 当量排放系数	0.1013	t·t ⁻¹	
		小麦 CO ₂ 当量排放系数	0.031 9	t·t ⁻¹	
畜禽饲养 Livestock and poultry raising	price _e	畜禽养殖用电单价	0.427 5	元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹	
	ef_e	电能消耗 CO ₂ 排放系数	0.973 4	t·MW ⁻¹ ·h ⁻¹	[16]
	price _c	畜禽养殖用煤单位支出	800	元·t ⁻¹	
	ef_c	燃煤消耗 CO ₂ 排放系数	1.98	t·t ⁻¹	[12]
畜禽产品加工 Livestock and poultry products processing	MJ _u	猪肉屠宰加工耗能系数	3.76	MJ·kg ⁻¹	[16]
		牛肉屠宰加工耗能系数	4.37	MJ·kg ⁻¹	
		羊肉屠宰加工耗能系数	10.4	MJ·kg ⁻¹	
		禽肉屠宰加工耗能系数	2.59	MJ·kg ⁻¹	
		牛奶加工耗能系数	1.12	MJ·kg ⁻¹	
		禽蛋加工耗能系数	8.16	MJ·kg ⁻¹	
——	e	一度电热值	3.60	MJ	—
	e_{tpf}	CO ₂ 当量转化为标准碳系数	0.272 8	—	[19]
	GWP _{CH₄}	CH ₄ 全球升温潜能值	21	—	[12]
	GWP _{N₂O}	N ₂ O 全球升温潜能值	310	—	

2) 饲料粮运输加工产生的 CO_2 排放量

饲料原料一般需要经过晒干、筛选、运输、碾碎、配料、混合等一系列环节加工得到饲料。因此,在此过程中因能源消耗引起的温室气体排放同样需要计入计算范围。饲料粮因运输加工产生的 CO_2 量为:

$$\text{TC}_{\text{cy}} = \sum_{i=1}^n Q_u \cdot S_u \cdot q_j \cdot ef_{j2} \quad (3)$$

式中 TC_{cy} 表示饲料粮在运输加工环节的 CO_2 排放量; Q_u 表示第 u 类畜产品的年产量, t ; S_u 表示每单位第 u 类畜产品的耗粮系数, kg/kg ; q_j 表示第 u 类畜禽饲料配方中 j 类粮食所占比例, 包括玉米、大豆、小麦; ef_{j2} 表示 j 类粮食在运输加工环节的 CO_2 当量排放系数(表2)。

3) 畜禽胃肠发酵产生的 CH_4 排放量

反刍家畜(牛、羊)瘤胃发酵气体主要成分为 CH_4 等温室气体, 其产生的 CH_4 占有家畜胃肠道 CH_4 排放总量的80%以上, 而非反刍牲畜(马、骡、驴)和单胃牲畜(猪)产生的 CH_4 气体相对较少。另外, 由于家禽

胃肠发酵产生的 CH_4 量极少可不予考虑。畜禽胃肠发酵产生的 CH_4 气体计算公式为:

$$\text{TC}_{\text{sw}} = \sum_{i=1}^n \text{APP}_i \cdot ef_{i1} \quad (4)$$

式中 TC_{sw} 表示畜禽胃肠发酵产生的 CH_4 气体排放量; i 为牲畜种类, APP_i 表示第 i 类牲畜的年平均饲养量, ef_{i1} 表示第 i 类牲畜胃肠道发酵 CH_4 排放系数(表1)。

4) 粪便管理系统的温室气体排放量

厌氧条件下粪便降解主要会产生 CH_4 气体, 而有氧条件下则主要产生 N_2O 气体。因此, 将粪便管理系统的碳排放分2部分计算:

粪便管理系统产生的 CH_4 排放

$$\text{TC}_{\text{mc}} = \sum_{i=1}^n \text{APP}_i \cdot ef_{i2} \quad (5)$$

式中 TC_{mc} 表示粪便管理系统中 CH_4 气体排放量, ef_{i2} 表示粪便管理系统中第 i 类牲畜的 CH_4 排放系数(表1)。

粪便管理系统产生的 N_2O 排放

$$\text{TC}_{\text{md}} = \sum_{i=1}^n \text{APP}_i \cdot ef_{i3} \quad (6)$$

式中 TC_{md} 为粪便管理系统中 N_2O 气体排放量, ef_{i3} 表示粪便管理系统中第 i 类牲畜的 N_2O 排放系数(表1)。

5) 畜禽饲养环节能耗产生的 CO_2 排放量

畜禽在饲养过程中需要大量能耗, 如栏舍防寒供暖、通风散热, 生产照明等, 消耗电、煤炭等能源将直接或间接引起温室气体排放。因畜禽饲养产生的 CO_2 量可按如下公式计算:

$$\text{TC}_{\text{sc}} = \sum_{i=1}^n \text{APP}_i \cdot \frac{\text{cost}_{\text{t}_{\text{ie}}}}{\text{price}_e} \cdot ef_e + \sum_{i=1}^n \text{APP}_i \cdot \frac{\text{cost}_{\text{t}_{\text{ic}}}}{\text{price}_c} \cdot ef_c \quad (7)$$

式中 TC_{sc} 表示畜禽饲养环节能耗产生的 CO_2 量, $\text{cost}_{\text{t}_{\text{ie}}}$ 、 $\text{cost}_{\text{t}_{\text{ic}}}$ 分别表示第 i 类牲畜每只(头)在一个饲养周期内的用电支出和用煤支出, $\text{元}/\text{只}(\text{头})$, price_e 、 price_c 分别表示畜禽饲养的电费单价及煤费单价, ef_e 表示电能消耗的 CO_2 排放系数, ef_c 表示煤炭消耗的 CO_2 排放系数(表2)。

6) 畜禽产品加工产生的 CO_2 排放量

畜禽加工成畜禽产品的过程中, 其所消耗的能源也会产生碳排放, 畜禽产品加工产生的 CO_2 排放量计算公式如下:

$$\text{TC}_{\text{sg}} = \sum_{u=1}^n Q_u \cdot \frac{\text{MJ}_u}{e} \cdot ef_e \quad (8)$$

式中 TC_{sg} 表示畜产品加工环节所产生的 CO_2 排放量; u 表示畜产品的种类, 包括猪肉、牛肉、羊肉、禽肉、禽蛋、牛奶; Q_u 表示第 u 类畜产品的年产量, t ; MJ_u 表示第 u 类畜产品单位加工耗能系数; e 表示消耗一度电产生的热值; ef_e 表示电能消耗的 CO_2 排放系数(表2)。

7) 标准C总排放量

在整个生命周期中, 畜牧业全生命周期温室气体排放量计算公式为:

$$\begin{aligned} \text{TC}_{\text{TOTAL}} &= \text{TC}_{\text{CZ}} + \text{TC}_{\text{CY}} + \text{TC}_{\text{SW}} + \text{TC}_{\text{CD}} + \text{TC}_{\text{SC}} + \\ &\text{TC}_{\text{SG}} = [\text{TC}_{\text{CZ}} + \text{TC}_{\text{CY}} + \text{TC}_{\text{SW}} \cdot \text{GWP}_{\text{CH}_4} + (\text{TC}_{\text{md}} \cdot \\ &\text{GWP}_{\text{CH}_4} + \text{TC}_{\text{md}} \cdot \text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}) + \text{TC}_{\text{sc}} + \text{TC}_{\text{sg}}] \cdot e_{\text{tpf}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中 TC_{TOTAL} 表示畜牧业标准碳排放总量； TC_{CZ} 、 TC_{CY} 、 TC_{SW} 、 TC_{CD} 、 TC_{SC} 、 TC_{SG} 分别表示饲料粮种植、饲料粮加工、畜禽胃肠发酵、粪便管理系统、畜禽饲养耗能、畜产品运输加工等各个环节计算得到的标准碳排放量； e_{ipr} 表示单位 CO_2 当量转化为标准 C 的系数； GWP_{CH_4} 和 GWP_{N_2O} 分别表示 CH_4 和 N_2O 的全球升温潜能值（表 2）。

1.2 畜牧业碳排放驱动因素解析

从农业经济学视角看：首先，畜牧业的规模化和集约化生产是减少畜牧业碳排放量的最有效途径，可由单位畜牧业产值所承担的畜牧业碳排放量这一指标予以反映。其次，农民生产的最终目标是提高自身的经济收益，由于畜牧业生产收益明显高于种植业，在农民自身要求不断增加农业生产收益和国家不断要求提高农民收入等因素的推动下，畜牧业生产规模会不断扩大，从而导致农业生产结构和单位农业劳动力农业生产收益改变，最终引起畜牧业碳排放量变化。第三，由于农业生产收益要明显小于非农产业，农民为进一步增加自身收益，会不断地由农村向城镇转移，从而导致农业人口比例下降（即城镇化水平不断提高），进而为畜牧业规模化、集约化生产创造良好条件，在政策引导下畜牧业生产水平得以不断提高。第四，中国人口总量仍在增加，人口的增长必然导致畜禽产品需求增加，进而引起畜牧业生产规模扩大和畜牧业碳排放量增加。综上所述，畜牧业碳排放量变化是畜牧业生产技术、农业生产结构、农业生产经济收益水平、人口城镇化水平以及总人口规模各因素综合作用的结果。为此，本文采用 KAYA 恒等式的扩展模式^[7,26]，将上述 5 大要素进行关联，以综合反映畜牧业碳排放量的驱动效应，其表达式为：

$$\text{畜牧业碳排放量} = \frac{\text{畜牧业碳排放量}}{\text{畜牧业总产值}} \times \frac{\text{畜牧业总产值}}{\text{农林牧渔总产值}} \times \frac{\text{农林牧渔总产值}}{\text{农业人口}} \times \frac{\text{农业人口}}{\text{总人口}} \times \text{总人口} \quad (10)$$

令

$$\begin{cases} TC = \text{畜牧业碳排放量} \\ F_1 = \text{畜牧业碳排放量} / \text{畜牧业总产值} \\ F_2 = \text{畜牧业总产值} / \text{农林牧渔总产值} \\ F_3 = \text{农林牧渔总产值} / \text{农业人口} \\ F_4 = \text{农业人口} / \text{总人口} \\ F_5 = \text{总人口} \end{cases} \quad (11)$$

则 (10) 式可改写为：

$$TC = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5 \quad (12)$$

F_1 为单位畜牧业产值的畜牧业碳排放量，反映了畜牧业生产效率变化； F_2 为畜牧业占农林牧渔业的比重，反映了为增加农民收入导致的农业内部生产结构调整，可解释为农业结构调整效应； F_3 为单位农业人口农业生产收益，反映了农民依靠农业生产获取经济收益的大小； F_4 为农业人口比例变化，反映了人口城镇化发展水平^[9]；

在推力和拉力的双重作用下，农业人口占总人口比例必然下降，因而人口城镇化水平不断提高。 F_4 可进一步分解为：

$$F_4 = \frac{(\text{总人口} - \text{非农业人口})}{\text{总人口}} = 1 - \text{城镇化率} \quad (13)$$

F_5 为总人口数量的变化，反映了人口增长对畜牧业碳排放的影响。

1.3 畜牧业碳排放驱动因素的 LMDI 分解方法

在能源与环境应用上，指数分解法旨在通过分离出各种因素，以揭示其对污染变化的贡献，进而找出间接影响污染指标的深层次因素，揭示其作用机制^[27]。而 LMDI 分解法分解后不存在残差，且乘法分解与加法分解可以相互转换，参数估计更为准确，因而受到了广泛使用。本文根据式 (12)，设初始时期畜牧业碳排放总量为 TC^0 ，经过 T 时期后畜牧业碳排放总量为 TC^T 。根据 Ang^[28] 的研究可以得到以下乘法分解和加法分解：

$$D = TC^T / TC^0 = D_{F_1} \cdot D_{F_2} \cdot D_{F_3} \cdot D_{F_4} \cdot D_{F_5} \quad (14)$$

$$\Delta TC = TC^T - TC^0 = \Delta F_1 + \Delta F_2 + \Delta F_3 + \Delta F_4 + \Delta F_5 \quad (15)$$

公式 (14) 和 (15) 分别代表乘法分解和加法分解的结果，其中 D 、 ΔTC 分别表示经过 T 期后畜牧业碳排放的增长率变化和增长量变化。 D_{F_i} ($i=1, 2, 3, 4, 5$) 表示各要素的乘法分解，即畜牧业生产效率 (F_1)、农业结构调整 (F_2)、单位农业人口农业生产收益 (F_3)、城镇化水平 (F_4)、总人口增长 (F_5) 等 5 种因素对畜牧业碳排放量增长的影响； ΔF_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$) 表示各要素的加法分解，即上述 5 种因素绝对量上的变化对畜牧业碳排放量变化的影响。进一步分析，可以得到各要素的计算公式具体如下：

$$D_{F_k} = \exp \left(\sum_i W_i \ln(F_k^T / F_k^0) \right), i=1, 2, 3, 4, 5 \quad (16)$$

$$\Delta F_k = \sum_i W_i L(TC^T, TC^0) \ln(F_k^T / F_k^0), i=1, 2, 3, 4, 5 \quad (17)$$

公式 (16) 和 (17) 表示各要素的乘法分解和加法分解。其中 W_i 表示 $L(F_k^T, F_k^0) / L(TC^T, TC^0)$ ， $L(a, b) = (a - b) / \ln(a/b)$ ， $a \neq b$ 或者 $L(a, b) = a, a = b, a, b$ 无特殊含义。

2 数据来源与处理

本文 2000—2014 年中国 31 个省（市、区）有关猪、牛、羊、兔等各种畜禽年出栏量数据、畜牧业产值、农林牧渔业产值、小麦、玉米和大豆的播种面积数据均来源于《中国农村统计年鉴（2001—2015）》，猪肉、牛肉、羊肉、禽肉、牛奶以及禽蛋年产量数据来源于《中国统计年鉴（2001—2015）》，而畜禽单位用电支出和用煤支出、每单位畜产品耗粮系数、小麦、玉米和大豆的每亩化肥施用量数据均来自《全国农产品成本收益资料汇编（2001—2015）》。随着新型城镇化的不断推进，国家逐步取消了农业人口和非农业人口的划分，取而代之的是对农村人口和城镇人口数量的统计，为此本文以农村人口数量作为农业人口的替代，农村人口和总人口数据均

来自《中国人口和就业统计年鉴(2001—2014)》及《中国卫生和计划生育统计年鉴 2015》。为避免价格因素干扰,本文以 2000 年为基期,对农林牧渔业产值、畜牧业产值进行价格平减。而在碳排放测算过程中,由于畜禽单位用电支出、用煤支出及每单位畜产品耗粮系数等数据存在少量缺失,为此本文利用该省可得数据平均值进行填补。

3 结果与分析

3.1 中国畜牧业碳排放整体情况分析

3.1.1 畜牧业碳排放总量分析

表 3 给出了加总中国 31 省(市、区)畜牧业碳排放得到的全国畜牧业碳排放的总体变化和各系统边界的具体贡献情况。可以看出,在 2000—2014 年全国畜牧业碳排放总量由 13 742.256 万 t 增长到 15 056.346 万 t,年均增速 0.654%;进一步分析可知,2000—2004 年全国畜牧业碳排放总量以年均 2.116% 的速度增长,2005—2007 年则以年均 7.538% 的速度急剧下降,2008—2014 年又以年均 1.612% 速度波动增长。因此可按增长速度的总体变化趋势,将全国畜牧业碳排放总量变化分为 3 个阶段:1) 快速上升阶段(2000—2004 年),碳排放量由 13 742.256 万 t 增长到 14 942.790 万 t,增长比率高达 8.74%;在该阶段,受 20 世纪 90 年代中后期粮食连年增产的影响,粮食出现供给结构性过剩,农民增收幅度缓慢。为此,国家一方面强调必须加快农业结构调整,大力发展畜牧业并积极推进规模化、标准化和产业化养殖;另一方面则逐年降低中国牧业税、屠宰税等与畜牧业有关的税收^[29]。政策的实施充分调动了农牧户的生产积极性,因而促进了畜牧业快速发展,进而导致畜牧业碳排放的快速上升。2) 急剧下降阶段(2005—2007 年),该阶段中国畜牧业碳排放总量由 2005 年的 15 813.828 万 t 急剧下降到 2007 年的 13 519.669 万 t,降幅达 14.51%。究其原因在于:1999—2003 年中国粮食价格低迷并持续减产,自 2004 年起国内粮食供求重新趋于紧张,粮食价格大幅上涨。为此,国家开始压缩耗粮型畜牧业,使得该阶段耗粮型的猪、肉牛、羊的年饲养量大幅减少;另一方面,由于前期过度放牧,该阶段国家在草原地区实行了草畜平衡制度,引起节粮型草食家畜年饲养量的大幅下降^[30]。因此,该阶段由畜禽胃肠道发酵系统和粪便管理系统引发的碳排放量大幅减少,最终导致畜牧业碳排放总量急剧下降。3) 缓慢上升阶段(2008—2014 年),该阶段碳排放量从 13 679.187 万 t 逐渐增长到 15 056.346 万 t,年均增速 1.612%。究其原因在于:该阶段中国粮食持续稳步增产,因而畜牧业也恢复了增长,但与 2000—2004 年期间相比,这一阶段城镇化水平较高,农民的非农收入逐渐成为家庭收入的主要部分^[31],因而对畜牧业增收的依赖性有所降低;与此同时,畜禽产品需求虽然仍在增长,但增速较 2000—2004 年明显减少;再加上在此期间,国家相继出台了《畜禽养殖标准化示范创建活动工作方案》、《全国畜牧业发展第十二个五年规划(2011—2015 年)》等文件,大力推进畜牧业养殖设施化

和粪污无害化,畜牧业生产规模化和集约化。因此,虽然在此期间畜牧业实现持续增长,但由于需求增速放缓,生产技术的提升,因而使得畜牧业碳排放增速明显低于 2000—2004 年。

表 3 2000—2014 年中国畜牧业全生命周期标准 C 排放量

Table 3 Emissions of standard C of animal husbandry by lifecycle assessment in China during 2000-2014 万 t

年份 Year	TC _{TOTAL}	TC _{CZ}	TC _{CY}	TC _{SW}	TC _{CD}	TC _{SC}	TC _{SG}
2000	13 742.256	3 143.013	68.095	5 020.833	4 856.477	650.673	3.165
2001	13 632.153	3 001.900	65.567	5 037.106	4 946.037	578.240	3.303
2002	14 180.884	3 172.666	67.220	5 178.951	5 098.799	659.767	3.481
2003	14 684.516	3 244.002	91.833	5 383.257	5 322.688	639.020	3.716
2004	14 942.790	3 324.577	72.471	5 456.900	5 421.587	663.320	3.935
2005	15 813.828	3 491.955	76.209	5 723.719	5 777.379	740.349	4.217
2006	15 259.912	3 436.433	71.691	5 421.687	5 571.273	755.064	3.764
2007	13 519.669	3 688.716	74.898	4 385.787	4 715.442	651.030	3.796
2008	13 679.187	3 770.573	77.424	4 334.151	4 852.761	640.269	4.009
2009	14 300.474	3 942.140	78.733	4 509.470	5 113.900	652.098	4.133
2010	14 341.106	4 064.366	78.533	4 426.104	5 105.112	662.765	4.226
2011	14 247.708	4 098.799	77.845	4 352.435	5 067.549	646.816	4.264
2012	14 567.320	4 224.845	79.003	4 367.622	5 218.651	672.786	4.413
2013	14 753.960	4 258.221	78.206	4 390.716	5 285.595	736.771	4.451
2014	15 056.346	4 328.419	77.473	4 495.573	5 407.081	743.260	4.540
AGR%	0.654	2.312	0.926	-0.786	0.770	0.955	2.610

注: TC_{TOTAL} 为畜牧业总碳排放量; TC_{CZ}、TC_{CY}、TC_{SW}、TC_{CD}、TC_{SC}、TC_{SG} 分别表示饲料粮种植、饲料粮运输与加工、牲畜胃肠发酵、畜禽饲养环节耗能、粪便管理系统和畜禽产品加工等 6 个系统的碳排放量。AGR 为年均增长。
Note: TC_{TOTAL} is the total carbon emissions of animal husbandry; TC_{CZ}, TC_{CY}, TC_{SW}, TC_{CD}, TC_{SC}, TC_{SG} represent the carbon emissions of feed grain planting subsystem, feed grain transportation & processing subsystem, gastrointestinal fermentation of livestock and poultry subsystem, energy consumption of livestock and poultry raising subsystem, manure management subsystem, livestock and poultry products processing subsystem. AGR is annual growth rate.

3.1.2 各系统边界的碳排放总量分析

由表 3 可知,饲料粮种植、饲料粮加工、粪便管理系统、畜禽饲养耗能和畜产品运输加工 5 个环节的碳排放量整体呈现增长趋势,其年均增长率分别为 2.312%、0.926%、0.770%、0.955% 和 2.611%;与上述 5 个环节不同,畜禽胃肠发酵环节的碳排放量于 2000—2005 年逐步上升后在 2006 年后开始下降,而后又进入平稳阶段,2000—2014 年年均降速为 0.786%。从组成碳排放总量的构成来看,畜禽胃肠发酵和粪便管理系统产生的碳排放量是最为主要的来源,2000—2014 年两者占碳排放总量的比例变化幅度分别为 29.76%~36.95% 和 34.87%~36.53%;饲料粮种植产生的碳排放量所占比例总体呈上升趋势,2014 年其占比达 28.75%,较 2000 年提高了 5.88%。2000—2014 年饲料粮运输加工、畜禽饲养耗能和畜产品运输加工年均碳排放所占比例分别为 0.52%、4.64%、0.03%,且年际排放波动都不大。从 2000—2014 年各环节平均碳排放总量大小来看,按从大到小顺序排列依次为:粪便管理系统(5 184.022 万 t)>牲畜胃肠道

发酵（4 832.287 万 t）>饲料种植（3 679.375 万 t）>畜禽饲养（672.815 万 t）>饲料运输（75.680 万 t）>畜产品加工（3.961 万 t）。

3.2 2000—2014 年中国畜牧业碳排放量变化的影响因素分解

为揭示 5 种因素对中国畜牧业碳排放量变化的影响大小和程度，本文根据前文分析的畜牧业碳排放 3 阶段变化特征，按照公式（15）、（17）的加法分解模型对中国畜牧业碳排放量进行分解，从而揭示出 2000—2014 年期间 3 个阶段 5 种影响因素对中国畜牧业碳排放的影响程度（表 4）。由表 4 可以得到：

1）畜牧业生产效率因素（ F_1 ）对畜牧业碳排放量具有明显的抑制作用，对比分析 F_1 、 F_2 、 F_4 （ F_3 、 F_5 始终为正，不具可比性）可知，2000—2014 年期间，由于畜

牧业生产效率（ F_1 ）提升共减少畜牧业碳排放 7 645.442 万 t，明显高于这一期间农业结构调整因素（ F_2 ）和城镇化因素（ F_4 ）对畜牧业碳排放的抑制作用，两者减排的贡献量分别为 1 863.110 和 7 174.013 万 t。这一结果表明，提高畜牧业生产效率是减少畜牧业碳排放的最为有效途径。因此，在中国畜牧业快速发展的过程中，必须深入贯彻国家畜牧业生产政策，加快培育规模化的畜牧业生产企业，积极引导以农民为主体的传统中小型畜牧业生产主体退出畜牧业生产，加快推进畜牧业生产由传统的小型、散养的畜牧业生产方式，不断向规模化和集约化的现代化畜牧业生产方式转变^[32]；本文分析表明，粪便管理系统是畜牧业碳排放的最为主要来源，因此应因地制宜建设大中型畜禽养殖废弃物综合处理场，推进畜禽废弃物的综合利用。

表 4 中国畜牧业碳排放总量变化的影响因素分解
Table 4 Decomposition of impacting factors of total carbon emissions of animal husbandry in China 万 t

时段 Period	畜牧业碳排放总量变化 Change of carbon emission in animal husbandry	畜牧业生产效率因素 Animal husbandry production efficiency (F_1)	农业结构调整因素 Agricultural structure adjustment (F_2)	单位农业人口 农业生产收益因素 Agricultural productivity gains per agricultural labor (F_3)	城镇化因素 Urbanization (F_4)	总人口增长因素 Total population growth (F_5)
2000—2004	总量 Total	1 200.533	-3 473.057	1 641.128	3 573.967	-838.460
	年均 Per year	240.107	-694.611	328.226	714.793	-167.692
2005—2007	总量 Total	-2 294.158	-3 513.287	-711.115	7 343.920	-5 569.119
	年均 Per year	-764.720	-1 171.096	-237.038	2 447.973	-1856.373
2008—2014	总量 Total	1 377.159	-479.098	-2 793.123	4 996.668	-766.494
	年均 Per year	196.737	-68.443	-399.018	713.810	-109.499

2）农业结构调整因素（ F_2 ）对中国畜牧业碳排放量的变化呈现由正向驱动向负向驱动的变动特征。从表 4 中可以看到，2000—2004 年 F_2 是中国畜牧业碳排放增长的原因之一，期间年均增加碳排放量 328.226 万 t；比较而言，2005—2007 和 2008—2014 年期间， F_2 年均减少畜牧业碳排放量分别达 237.038 万 t 和 399.018 万 t。究其原因，2000—2004 年中国城镇化和经济发展水平仍然不高，由于畜牧业生产效益明显高于种植业，农业结构调整的结果是畜牧业在农林牧渔业比例不断增加（根据《中国农村统计年鉴》的数据分析，2000—2004 年畜牧业占农林牧渔业比例由 29.67% 上升到 33.45%），因而 F_2 成为畜牧业碳排放增长的原因之一；相比之下，2005—2014 年期间，中国城镇化和经济发展水平有了极大提高，策应城镇化的发展需求，附加值更高的都市农业、旅游观光农业、高价值的蔬菜、苗木和花卉种植、高价值的水产养殖等农业生产得到了更多的重视^[9]，农业结构调整的结果是畜牧业占农林牧渔业比例不断下降（根据《中国农村统计年鉴》的数据分析，2005—2014 年畜牧业产值占农林牧渔总产值比例由 33.47% 下降到 27.96%），因而 F_2 成为抑制畜牧业碳排放的重要因素。

3）单位农业人口农业生产收益因素（ F_3 ）对畜牧业碳排放量呈现明显的正向驱动效应。对比其他 4 种效应可知，无论是从总量和年均值来看，2000—2014 年期间 F_3 的正向驱动作用都是最大的，是导致中国畜牧业碳排放量逐步增长最为重要的因素。如前文所述，2000—2004 年期间国家实施了一系列促进畜牧业规模化、集约化发

展以及减免畜牧业生产各种税收的政策，因而畜牧业生产效益明显提高；2005—2007 年期间，由于节粮型和耗粮型畜牧业规模都急剧下降，因而畜禽产品供不应求，畜牧业价格大幅上涨。根据《中国农村统计年鉴》数据，按 2000 年不变价格计算，单位农业人口的农业生产收益由 2005 年的 3 614.31 元/人上升到 2007 年的 5 385.70 元/人，年均增长 22.07%，因而期间 F_3 对畜牧业碳排放的促进作用急剧提升；相比之下，2008—2014 年期间，由于畜牧业实现了恢复增长，虽然畜产品需求仍在增长，但增速已经较前期明显减缓，因此期间单位农业人口的农业生产收益仅由 2008 年的 4 620.23 元/人上升到 2014 年的 6 467.68 元/人，年均增长 5.77%，仅为 2005—2007 年期间的 26.13%，因而 F_3 对畜牧业碳排放增长的作用急剧下降。可见，经济社会发展过程中，农民的市场经济意识也在不断加强，只要畜牧业农业生产经济效益足够高，人们从事农业生产的积极性就会不断增强，从而成为畜牧业碳排放增长的最为重要动力。

4）城镇化因素（ F_4 ）是减少中国畜牧业碳排放的又一重要因素，总体看来 2000—2014 年城镇化共减少畜牧业碳排放为 7 174.013 万 t，仅次于畜牧业生产效率因素（ F_1 ）。城镇化能够有效抑制畜牧业碳排放的原因主要在于以下 4 点：首先，城镇化不断推进农村人口向城镇转移，显著减少了农村农业劳动力，为畜牧业的集约化、规模化生产创造了条件；在政策的引导下，畜牧业则不断由传统的散养型向规模化和集约化的现代化畜牧业生产方式转变，显著提高畜牧业生产效率；其次，城镇化

推动经济发展, 进而增加农民的非农就业收入, 降低了农民依靠发展畜牧业来实现增收的目的; 第3, 城镇化导致城镇周边的都市农业、旅游观光农业等附加值比畜牧业更高的农业生产方式快速发展, 因而降低了畜牧业在农林牧渔业中的比例; 第4, 城镇化具有显著的集聚效应, 它通过推动农业研发资本、研究人员和知识技术在城市集聚, 进而推动农业科技进步^[33]。2014 年以城镇人口占总人口比例计算, 中国的城镇化水平为 54.77%, 仍处于诺瑟姆的理论所提出的 30%~70% 的城镇化快速发展阶段, 因而可以预见, 今后一段时间城镇化的快速发展仍将是减少中国畜牧业碳排放的重要因素。

5) 总人口增长因素 (F_5) 明显增加了中国畜牧业碳排放, 2000—2004、2005—2007 和 2008—2014 年 3 个时段其年均增加的碳排放量分别为 59.391、51.814 和 59.887 万 t。人口增长导致畜禽产品的需求快速增长, 因而必将拉动畜牧业快速发展。中国人口基数大, 2000—2014 年期间, 在一对夫妇只能生育一个孩子的基本国策下, 中国人口年均增速仅为 0.55%, 因而人口增长因素对畜牧业碳排放增长的作用也明显较低。2016 年中国新《人口与计划生育法》明确指出, 一对夫妻可以合法地生育 2 个孩子。可以预见, 随着二孩政策的实施, 中国未来人口增长速度应该会有所加快, 因此今后人口增长因素对畜牧业碳排放增长的促进作用会有所增强。

3.3 中国省际畜牧业碳排放变化影响因素的空间差异分析

1) 畜牧业生产效率因素 (F_1)。从表 5 可以看出, 全国 31 个省(市、区)当中, F_1 对各地区畜牧业碳排放量的变化均为负向驱动效应, 对比其他驱动效应可以发现除上海、江苏 ($|F_4| > |F_1|$) 和天津、福建、甘肃 ($|F_2| > |F_1|$) 外, F_1 都是抑制各地区畜牧业碳排放的最大因素。按 F_1 减少畜牧业碳排放量绝对值从大到小排序, 排名前 10 位的地区分别为: 山东、河南、四川、河北、内蒙古、黑龙江、云南、贵州、安徽、新疆。可以看出, 这 10 个省(区)都属于中国畜牧业大省, 其中内蒙古、云南、贵州和新疆为中国草原牧区, 其余 6 个均为粮食主产区, 属于中国的农耕牧区。这一结果表明, 进入 21 世纪以来, 中国大力推进畜牧业生产向优势地区集中^[34], 不断提高畜牧业优势产区的规模化和集约化生产水平, 有利于建设大中型的畜禽粪废弃物处理场, 从而有效地降低了畜牧业生产优势区的畜牧业碳排放。排名后 10 位的地区分别为江西、重庆、浙江、甘肃、宁夏、海南、北京、福建、上海、天津, 其中江西、甘肃、重庆和宁夏 4 省(市、区)为中国经济发展水平较低的中西部地区, 而其余 6 个则为经济发展水平较高的粮食主销区。对前者(除宁夏外)而言, 由于其畜牧业生产的规模化和集约化水平低, 以农民为主体的传统中小型畜牧业散养方式仍广泛存在, 因而难以集中建设大中型畜禽废弃物综合处理场, 使得畜禽粪便未能得到高效处理, 因而 F_1 对这些地区的畜牧业碳排放量的抑制作用有限; 而对后者以及宁夏而言, 由于其畜牧业碳排放量总体规模小, 即便其畜牧业

生产效率较高, F_1 对其畜牧业碳排放量降低的总量仍十分有限。

表 5 中国省际畜牧业碳排放变化影响因素的空间差异分析 (2000—2014)

Table 5 Provincial differences of impacting factors of animal husbandry carbon emissions change in China (2000—2014) 万 t

地区 Area	CEC	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
北京 Beijing	-15.94	-42.54	-14.65	49.76	-38.2	29.69
天津 Tianjin	9.6	-4.77	-15.3	17.32	-13.32	25.67
河北 Hebei	-135.98	-577.07	-203.14	847.64	-285.49	82.08
山西 Shanxi	-0.65	-200.15	-43.44	270.51	-52.71	25.14
内蒙古 Inner Mongolia	322.68	-569.75	93.11	831.93	-81.03	48.42
辽宁 Liaoning	258.09	-287.91	92.77	488.25	-58.36	23.34
吉林 Jilin	96.99	-307.28	0.76	433.81	-35.59	5.29
黑龙江 Heilongjiang	251.36	-566.89	18.15	809.08	-30.58	21.6
上海 Shanghai	-33.06	-25.78	-23.46	35.34	-30.34	11.18
江苏 Jiangsu	3.34	-167.7	-89.42	435.95	-199.61	24.12
浙江 Zhejiang	2.97	-79.57	-1.54	81.1	-21.72	24.7
安徽 Anhui	-90.55	-423	-3.01	379.67	-52.6	8.39
福建 Fujian	27.99	-33.19	-51.97	131.98	-33.66	14.83
江西 Jiangxi	54.65	-129.81	0.73	179.96	-23.91	27.68
山东 Shandong	-96.28	-1 090.29	17.94	1 266.54	-383.13	92.66
河南 Henan	14.06	-832.72	-3.05	997.29	-163.69	16.23
湖北 Hubei	123.95	-215.93	-73.06	472.16	-45.58	-13.64
湖南 Hunan	65.95	-270.73	-173.61	539.27	-50.07	21.09
广东 Guangdong	-21.71	-239.14	-63.19	386.29	-202.92	97.25
广西 Guangxi	-47.17	-376.51	-95.45	466.63	-73.09	31.25
海南 Hainan	-3.26	-46.77	9.49	40.35	-19.15	12.82
重庆 Chongqing	59.87	-90.54	-34.54	270.94	-78.32	-7.67
四川 Sichuan	156.56	-780.62	15.81	1129.58	-179.17	-29.04
贵州 Guizhou	-15.58	-442.42	11.03	465.23	-44.95	-4.47
云南 Yunnan	63.67	-458.45	-1.42	586.46	-121.34	58.42
西藏 Tibetan	46.54	-170.43	35.04	119.21	-15.91	78.63
陕西 Shaanxi	-30.27	-357.86	16.29	396.11	-99.07	14.26
甘肃 Gansu	123.29	-76.02	-128.28	374.77	-52.04	4.86
青海 Qinghai	16.22	-311.46	-11.39	385.54	-82.65	36.18
宁夏 Ningxia	22.79	-64.67	-17.5	108.44	-20.94	17.46
新疆 Xinjiang	83.97	-382.37	-18.83	512.99	-127.2	99.38

注: CEC 为碳排放量变化。

Note: CEC was carbon emissions change.

2) 农业结构调整效应 (F_2)。从表 5 可看出, F_2 对各地区畜牧业碳排放以抑制作用为主, 其减少碳排放量在 50 万 t 以上的地区有 8 个, 按减少量的绝对值由大到小依次为: 河北、湖南、甘肃、广西、江苏、湖北、广东和福建, 其中对河北的抑制作用最大, 达 203.14 万 t。比较而言, F_2 对畜牧业碳排放的促进作用很小, 其增加碳排放量在 30 万 t 以上的地区只有 3 个, 按增加量由大到小依次为内蒙古、辽宁和西藏, 其中内蒙古最大, 达 93.11 万 t。总体而言, 2000—2014 年 F_2 对全国 31 省(市、区)畜牧业碳排放的减少总量为 755.13 万 t。进一步分析可知, F_2 减少畜牧业碳排放的地区基本位于中国中东部地区(甘肃和广西除外), 这些地区城镇化发展水平高, 更高附加值的都市农业、旅游观光等农业得到了快速发展^[9], 所以这些地区农业结构调整的结果是畜牧业在农林牧渔中的比例下降, 因而明显降低了畜牧业碳排放; 而

F_2 促进畜牧业碳排放增加在 30 万 t 以上的地区都是中国畜牧业大省, 其农业结构调整的结果是畜牧业比例不断上升, 因而增加了畜牧业碳排放。

3) 单位农业人口农业生产收益因素 (F_3)。从表 5 中可以发现, F_3 是导致中国各地区畜牧业碳排放不断增长的主要动力; 其中山东最大, 为 1 266.54 万 t, 天津最小, 为 17.32 万 t。根据 F_3 导致畜牧业碳排放增加量由大到小排序, 得到前 15 位的地区分别为: 山东、四川、河南、河北、内蒙古、黑龙江、云南、湖南、新疆、辽宁、湖北、广西、贵州、江苏和吉林, 这 15 个省(市、区)总体可以分位 2 类: 其中内蒙古、云南、新疆、广西、贵州 5 省(区)为中国的边疆草原牧区, 而其余 10 个为中国粮食主产区, 属于农耕畜牧业区。由此看出, 由于畜牧业生产效益明显高于种植业, 因此边疆草原牧区和农耕畜牧业区的农民为提高其自身收益, 会不断地扩大畜牧业生产规模, 进而导致这些地区畜牧业碳排放量不断增加。比较而言, 虽然 F_3 的提高能有效增加农民收益, 但该因素对经济发展水平较高省份的畜牧业碳排放量的增长作用十分有限, 因为这些地区农民增收途径更多的是直接从农业部门转向非农业生产部门。如表 5 所示, F_3 对畜牧业碳排放促进作用最小的 5 个省(市)分别为: 天津、上海、海南、北京和浙江。

4) 城镇化因素 (F_4)。由表 5 可以得出, F_4 对全国 31 个省(市、区)的畜牧业碳排放量均具有显著的负向驱动效应, 其中对山东的畜牧业碳排放抑制作用最大, 为 383.13 万 t, 对天津的抑制作用最小, 为 13.32 万 t。 F_4 对畜牧业碳排放抑制作用在 80 万 t 以上的地区有 11 个, 按其绝对值由大到小排序依次为: 山东、河北、广东、江苏、四川、河南、新疆、云南、陕西、青海和内蒙古。可以看出, 新疆、云南、陕西、青海和内蒙古属于中国边疆草原畜牧业区, 山东、河北、江苏、四川和河南都是中国农耕畜牧业生产区, 这些地区畜牧业碳排放总量大, 且城镇化发展水平较低(江苏除外); 因此, 城镇化的快速推进对减少这些地区畜牧业碳排放具有极为重要的作用。此外, 2000-2014 年期间广东人口总量始终处于中国前 3 位(2006 年以后一直为中国人口第一大省), 以城镇人口占总人口比例计算, 该阶段广东城镇化水平由 55% 上升到 68%, 提高了 13 个百分点, 因而城镇化对降低广东畜牧业碳排放的作用也尤为突出。

5) 总人口增长因素 (F_5)。除四川、湖北、重庆和贵州 4 省(市)外, 总人口增长效应 (F_5) 对中国其余 27 省(市、区)的畜牧业碳排放均具有明显的促进作用(表 5), 其中新疆最大, 为 99.38 万 t, 甘肃最小, 为 4.86 万 t。按 F_5 正向驱动效应由大到小排序, 排名前 15 位的地区分别为新疆、广东、山东、河北、西藏、云南、内蒙古、青海、广西、北京、江西、天津、山西、浙江和江苏, 其中广东、山东、河北、北京、浙江、天津、江苏 7 省(市)是中国沿海经济发达区, 其人口不仅表现为自身的增长, 而且还有大量的人口流入, 因而人口增长对畜牧业碳排放的促进作用明显。例如, 2000-2014 年北京、天津和广东的人口增长幅度分别达到了 55.72%、51.55%

和 24.09%。比较而言, 其余 6 个省区均位于西部地区(江西、山西除外), 属于草原牧区且又属于中国少数民族集聚区, 其城镇化和工业化发展水平低, 所增加的人口当中很大部分生活都依赖于农业发展, 因而人口增长对畜牧业碳排放的促进作用也十分明显。

4 结 论

采用全生命周期评价法测算了 2000-2014 年中国畜牧业碳排放, 并利用 KAYA 恒等式扩展模型和 LMDI 模型, 将畜牧业碳排放驱动因素分解为畜牧业生产效率 (F_1)、农业结构调整 (F_2)、单位农业人口农业生产收益 (F_3)、城镇化 (F_4) 以及总人口增长 (F_5) 等 5 大因素, 从时空 2 个方面定量测度了 5 大因素对中国畜牧业碳排放的驱动程度, 研究结论如下:

1) 2000-2014 年, 中国畜牧业碳排放总量由 1.374×10^8 t 增长到 1.506×10^8 t, 年均增速 0.654%, 其中畜禽胃肠发酵和粪便管理系统是主要的碳排放源, 两者分别占畜牧业碳排放总量比例的变化幅度为 29.76%~36.95% 和 34.37%~36.53%。

2) 从时空 2 个层面来看, 畜牧业生产效率因素 (F_1) 和城镇化因素 (F_4) 都是降低中国畜牧业碳排放的第 1 和第 2 重要因素。农业结构调整效应 (F_2) 对中国畜牧业碳排放量的变化呈现由正向驱动转为负向驱动。

3) 2000-2014 年单位农业劳动力农业生产效益因素 (F_3) 是导致中国畜牧业碳排放量持续增长的最为重要因素, 这一因素对草原畜牧业区和农耕畜牧业区的畜牧业碳排放增长促进作用非常明显。

本文参照已有研究, 尽量考虑了各系统边界的碳排放, 但由于资料的可得性和问题的复杂性, 仍有少量因素未能予以全面考虑, 例如反刍动物的青饲料种植所产生的碳排放量理应计入。此外, 本文主要研究的是畜牧业碳排放的宏观影响因素, 难以全面涵盖相关的微观影响因素(如畜牧业养殖行为、废弃物处理方式、农户养殖生产意愿等), 上述微观因素在本文当中虽然也有涉及, 但未能进行深入分析, 这也是今后进一步研究的方向。

[参 考 文 献]

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Livestock's long shadow: Environmental issues and options [R]. Rome: 2006.
- [2] 崔中庆. 推广“低碳”畜牧业是实现可持续发展的必要途径[J]. 畜牧与饲料科学, 2010, 31(3): 111-112.
Cui Zhongqing. To promote “low carbon” is the necessary way of realizing the sustainable development of animal husbandry[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2010, 31(3): 111-112. (in Chinese with English abstract)
- [3] 黄秀声, 黄勤楼, 翁伯琦, 等. 畜牧业发展与低碳经济[J]. 中国农学通报, 2010, 26(24): 257-263.
Huang Xiushen, Huang Qinlou, Weng Boqi, et al. Animal husbandry's development and low-carbon economy[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(24): 257-263. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陈幼春. 畜牧业的强势低碳经济特征[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2010(5): 1-7.
Chen Youchun. The characteristics of animal husbandry low

- carbon economy[J]. Jiangxi journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2010(5): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张文学, 郑新霞. 促进我国低碳畜牧业发展的策略研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2012(2): 15—17.
Zhang Wenxue, Zheng Xinxia. A strategy research on promoting low-carbon animal husbandry development in China[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2012(2): 15—17. (in Chinese with English abstract)
- [6] 侯麟科, 仇焕广, 崔永伟, 等. 环境污染与畜牧业空间布局研究[J]. 中国人口. 资源与环境, 2011, 21(12): 65—69.
Hou Linke, Qiu Huanguang, Cui Yongwei, et al. Research on environmental pollution and spatial layout of livestock sector[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(12): 65—69. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈瑶, 尚杰. 四大牧区畜禽温室气体排放估算及影响因素分解[J]. 中国人口. 资源与环境, 2014, 24(12): 89—95.
Chen Yao, Shang Jie. Estimation and effecting factor decomposition of greenhouse gas emission of animal husbandry industry in four pastoral areas[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(12): 89—95. (in Chinese with English abstract)
- [8] 邹洁, 项朝阳. 中国大陆畜牧业环境效率测算及影响因素研究[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(1): 90—96.
Zou Jie, Xiang Chaoyang. Research on the livestock environmental efficiency in mainland China and its influencing factors[J]. Environmental Pollution & Control, 2016, 38(1): 90—96. (in Chinese with English abstract)
- [9] 姚成胜, 李政通, 易行. 中国粮食产量变化的驱动效应及其空间分异研究[J]. 中国人口. 资源与环境, 2016, 26(9): 72—81.
Yao Chengsheng, Li Zhengtong, Yi Xing. Driving effects of grain production change and its spatial differences in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(9): 72—81. (in Chinese with English abstract)
- [10] 曹玉香, 徐丙臣. 基于低碳经济生态畜牧业发展的研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2011(12): 16—17.
Cao Yuxiang, Xu Bingchen. Research on low carbon economy ecological animal husbandry development[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2011(12): 16—17. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王效琴, 梁东丽, 王旭东, 等. 运用生命周期评价方法评估奶牛养殖系统温室气体排放量[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 179—184.
Wang Xiaoqin, Liang Dongli, Wang Xudong, et al. Estimation of greenhouse gas emissions from dairy farming systems based on LCA [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(13): 179—184. (in Chinese with English abstract)
- [12] 孙亚男, 刘继军, 马宗虎. 规模化奶牛场温室气体排放量评估[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 296—301.
Sun Yanan, Liu Jijun, Ma Zonghu. Evaluation of greenhouse gas emissions from scale dairy farm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 296—301. (in Chinese with English abstract)
- [13] 曹丽红, 齐振宏, 罗丽娜, 等. 我国养猪业碳排放时空特征及因素分解研究[J]. 科技管理研究, 2015(12): 224—228.
Cao Lihong, Qi Zhenhong, Luo Lina, et al. Research on temporal and spatial characteristics of carbon emissions and influencing factors decomposition in pig industry in China[J]. Science and Technology Management Research, 2015(12): 224—228. (in Chinese with English abstract)
- [14] 林余. 中国动物源 CH₄ 排放空间分布和时间变化研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
Lin Yu. Estimating Spatio-temporal Dynamics of Methane Emissions from Livestock in China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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 Xiangdong, Wang Jimin. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(10): 247—252. (in Chinese with English abstract)
- [16] 孟祥海, 程国强, 张俊飏, 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 Xianghai, Cheng Guoqiang, Zhang Junbiao, et al. Analyze on the spatial-temporal characteristics of GHG estimation of livestock's by life cycle assessment in China [J]. China Environmental Science, 2014, 30(8): 2167—2176. (in Chinese with English abstract)
- [17] 姚成胜, 钱双双, 李政通, 等. 中国省际畜牧业碳排放测度及时空演化机制[J]. 资源科学, 2017, 39(4): 698—712.
Yao Chengsheng, Qian Shuangshuang, Li Zhengtong, et al. Provincial animal husbandry carbon emissions in China and temporal-spatial evolution mechanism[J]. Resources Science, 2017, 39(4): 698—712.
- [18] 程璜鑫. 基于生命周期理论的畜禽养殖跨介质污染防治技术评估--以规模化养猪场为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
Cheng Huangxin. The Assessment of Livestock and Poultry Breeding Cross-medium Pollution Prevention and Protection Technology Based on Life Cycle Theory [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- [19] IPCC. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories volume 4: agriculture, forestry and other land use[R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2006.
- [20] 闵继胜. 农产品对外贸易对中国农业生产温室气体排放的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
Min Jisheng. Agricultural Products in International Market on Greenhouse Gas Emissions in the Chinese Agriculture[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈伟, 王燕, 廖新伟, 等. 生物质炭在有机废弃物好氧堆肥中的应用研究进展[J]. 中国家禽, 2015, 37(19): 44—50.
Chen Wei, Wang Yan, Liao Xindi, et al. Application of biochar in organic waste aerobic composting[J]. China Poultry, 2015, 37(19): 44—50. (in Chinese with English abstract)
- [22] Shi Jincai, Liao Xindi, Wu Yinbao, et al. Methane generation during anaerobic fermentation of four livestock slurries[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(3): 632—636.
- [23] Seinfeld H, Wassenaar T, Jutzi S. Livestock production systems in developing countries: status, drivers, trends[J]. Revue Scientifique Et Technique, 2006, 25(2): 505—516.
- [24] 谢鸿宇, 陈贤生, 杨木壮, 等. 中国单位畜牧产品生态足迹分析[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3264—3270.
Xie Hongyu, Chen Xiansheng, Yang Muzhuang, et al. The ecological footprint analysis of 1 kg livestock product of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3264—3270. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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 Qiucheng. Greenhouse gas emission in China's agriculture: situation and challenge[J]. China Population,

- Resources and Environment, 2011, 21(10): 69—75. (in Chinese with English abstract)
- [26] 朱勤, 彭希哲, 陆志明, 等. 中国能源消费碳排放变化的因素分解及实证分析[J]. 资源科学, 2009, 31(12): 2072—2079. Zhu Qin, Peng Xizhe, Lu Zhiming, et al. Factors decomposition and empirical analysis of variations in energy carbon emission in China[J]. Resources Science, 2009, 31(12): 2072—2079.
- [27] 杨国锐. 中国经济发展中的碳排放波动及减碳路径研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010. Yang Guorui. A Study on the Fluctuation of Carbon Emission in China's Economic Development and the Path of Reducing Carbon Emission[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [28] Ang B W, Liu F L, Chew E P. Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis[J]. Energy Policy, 2003, 31(14): 1561—1566.
- [29] 陈海燕, 陈佳阳. 重庆市农村居民收入差距及其影响因素分析[J]. 经济研究导刊, 2014(13): 222—226. Chen Haiyan, Chen Jiayang. Analysis of the rural income disparity and its influencing factors in Chongqing[J]. Economic Research Guide, 2014(13): 222—226. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王国刚, 王明利, 王济民, 等. 中国草食家畜养殖的时空动态及其影响因素[J]. 地理学报, 2015, 70(7): 1091—1100. Wang Guogang, Wang Mingli, Wang Jimin, et al. Spatial-temporal dynamics and its influencing factors of herbivorous livestock breeding in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(7): 1091—1100. (in Chinese with English abstract)
- [31] 关浩杰. 收入结构视角下我国农民收入问题研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2013. Guan Haojie. Study on Farmer's Income Issues in China from the Perspective of Income Structure[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [32] 杨军. 中国畜牧业增长与技术进步、技术效率研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2003. Yang Jun. A Study on the Growth, Technical Advancement and Technological Efficiency of Chinese Livestock Industry[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [33] 姚成胜, 邱雨菲, 黄琳, 等. 中国城市化与粮食安全耦合关系辨析及其实证分析[J]. 中国软科学, 2016(8): 75—88. Yao Chengsheng, Qiu Yufei, Huang Lin, et al. Coupling relationship between urbanization and food security in China: An empirical study[J]. China Soft Science, 2016(8): 75—88. (in Chinese with English abstract)
- [34] 袁璋. 我国中部地区农业产业结构演进及调整优化方向研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2006. Yuan Zhang. Study on the Evolution and Optimization of Agricultural Industrial Structure in the Middle Region of China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2006. (in Chinese with English abstract)

Decomposition of impacting factors of animal husbandry carbon emissions change and its spatial differences in China

Yao Chengsheng^{1,2}, Qian Shuangshuang^{2,3}, Mao Yuehua^{2,3}, Li Zhengtong^{2,3}

(1. Center for Central China Economic Development Research, Nanchang University, Nanchang 330047, China;

2. School of Economics and Management, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

3. Econometric Research Institutions, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Animal husbandry greenhouse gas emissions account for 18% of total greenhouse gas emissions of all human activities, and have become one of the most important contributors to global greenhouse gas emissions increase. Using life cycle assessment (LCA) method, animal husbandry carbon emissions in the 31 provinces, municipalities and autonomous regions of China from 2000 to 2014 have been comprehensively measured. Based on logarithmic mean Divisia index (LMDI) method, the changes of animal husbandry carbon emissions were decomposed into the contributions from 5 factors, including animal husbandry production efficiency, agricultural structure adjustment, agricultural productivity gains per agricultural labor, urbanization and total population growth. Using the data of animal husbandry carbon emissions measured by LCA, the driving effects of the 5 factors on animal husbandry carbon emissions change were measured from the spatial and temporal perspective. The results showed: 1) Total amount of animal husbandry carbon emissions in China increased from 137.423 million tons to 150.563 million tons from 2000 to 2014, and its average annual growth rate was 0.654%, of which the carbon emissions from gastrointestinal fermentation of livestock and manure management systems were the 2 key sources, accounting for 65.58%-73.23% of the total amount of animal husbandry carbon emissions. 2) No matter from spatial or temporal perspective, animal husbandry production efficiency improvement was the most important factor to restrain the sustained growth of the animal husbandry carbon emissions; the increase of agricultural productivity gains per agricultural labor was the most important factor to promote the sustained growth of the animal husbandry carbon emissions, which was particularly outstanding in prairie pasturing areas and pasturing areas in major grain producing areas, however, the effect of the increase of agricultural productivity gains per agricultural labor on animal husbandry carbon emission growth was limited in developed areas. Population growth was another important factor to promote the growth of the animal husbandry carbon emissions, especially to the developed areas with massive population influx and the ethnic minority areas in most western part of China. 3) The increase of urbanization level ranked the second to restrain animal husbandry carbon emissions from 2000 to 2014, while the effect of agricultural structure adjustment on animal husbandry carbon emissions changed from positive to negative, and this characteristic was particularly obvious in eastern-central China with higher animal husbandry efficiency.

Keywords: emission control; greenhouse gases; manures; animal husbandry; driving effect; logarithmic mean Divisia index (LMDI); spatial differences