

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2018.0884

徐丽,曲建升,吴金甲等.中国农牧业碳排放时空变化及预测[J].生态与农村环境学报,2019,35(10):1232-1241.

XU Li, QU Jian-sheng, WU Jin-jia et al. Spatial-Temporal Dynamics and Prediction of Carbon Emission From Agriculture and Animal Husbandry in China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(10): 1232-1241.

中国农牧业碳排放时空变化及预测

徐丽¹, 曲建升^{1,2}①, 吴金甲¹, 韦沁¹, 白静¹, 李恒吉^{1,2} (1. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院兰州文献情报中心/全球变化研究信息中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 基于主要粮食作物、农资投入和牲畜数据,对中国31个省市自治区1997—2016年农牧业碳排放进行测算;采用变动指数、重心模型和标准差椭圆分析其时空变化特征;以趋势外推、灰色预测和差分整合移动平均自回归(ARIMA)模型为基础,利用标准差优选组合模型预测2017—2022年农牧业碳排放状况。结果表明:1997—2016年农业大环境向好,多省碳排放增加,重心向西北移动,主体区域在胡焕庸线右侧。但多省畜牧业碳排放降低,重心在河南境内摆动,主体区域扩大并向东南—西北扭转;农业碳排放高值区向东北三省和黄淮海转移,畜牧业碳排放高值区集中于传统区域和中部地区;组合模型预测优于单一模型,到2022年农业碳排放延续历史趋势但年均增速降低,畜牧业碳排放达到 1.13×10^8 t,年均增速提高。

关键词: 农牧业碳排放; 时空变化; 标准差优选组合模型; 预测

中图分类号: X82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2019)10-1232-10

Spatial-Temporal Dynamics and Prediction of Carbon Emission From Agriculture and Animal Husbandry in China. XU Li¹, QU Jian-sheng^{1,2}①, WU Jin-jia¹, WEI Qin¹, BAI Jing¹, LI Heng-ji^{1,2} (1. College of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Lanzhou Information Center/Global Change Research Information Center, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the data of major grain crops, agricultural inputs and animal husbandry, agriculture and animal husbandry carbon emissions from 1997 to 2016 in 31 provinces were calculated. Their temporal and spatial variations were analyzed by means of changing index, barycenter model and the standard deviation ellipse. Based on trend extrapolation, grey prediction and ARIMA model as well as standard deviation optimal combination model were used to predict carbon emissions from agriculture and animal husbandry from 2017 to 2022. The results show that from 1997 to 2016, the agricultural environment improved, the carbon emission increased, the core moved toward northwest and the main area was on the right side of Hu Huanyong line. However, the animal husbandry carbon emissions in many provinces were reduced, and the core wiggled in Henan Province. The main area expanded and turned to the southeast-northwest. The high volume area of agricultural carbon emission transferred to the 3 northeastern provinces and north China plain, and the high volume area of animal husbandry carbon emission was concentrated in the traditional region and the central region. The combined model is better than the single model. By 2022, the agricultural carbon emissions will follow the historical trend but the annual growth rate will decrease. Animal husbandry carbon emission will reach 1.13×10^8 t and the annual growth rate will increase.

Key words: agricultural and animal husbandry carbon emission; temporal and spatial variation; standard deviation optimal combination model; prediction

温室效应引起的全球气候变化已经威胁到人类的生存与社会经济的发展,成为当今国际社会及学界关注的重大环境问题。作为重要的碳源,农牧业在推动我国土地减排、绿色发展方面起到重要作用。目前,我国加大了化肥、农药、机械等农资投入,以弥补土地和劳动力的不足^[1],这不仅导致农牧业温室气体大量增加,也使农牧业温室气体排放问题成为新的研究热点。

农业碳排放研究开始于20世纪末期,畜牧业碳排放研究开展得更晚,目前的国内外研究多集中于农业排放源的划分和测算,影响因素、区域差异以及农业减排等方面。SMITH等^[2]和XU等^[3]归纳计算

收稿日期: 2018-12-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0602803)

① 通信作者 E-mail: jsqu@lzb.ac.cn

了不同的碳源种类,均包括农地利用、牲畜养殖、水稻和农用机械 4 类碳源,其对农业碳源的划分和计算方法被多数研究者采用;韦沁等^[4]对中国农业碳排放影响因素进行研究,结果表明产业结构优化、农业人口减少会抑制农业碳排放增长,农业经济发展会增加农业碳排放量;冉锦成等^[5]对我国区域农业碳排放进行研究,揭示了新疆区域内的差异性和阶段特征,补充了区域的研究结果;FRANK 等^[6]从减排机制的角度对农业非 CO₂ 减排进行研究,采用技术和结构缓解方案得出农业碳排放价格变动对减排量的影响,为我国农业碳减排提供了新思路。但是,目前针对农、牧业碳排放预测的研究不足,多集中于区域性单一属性的预测,例如赵宇^[7]和黎孔清等^[8]利用多元回归和可拓展的随机性环境影响评估(STIRPAT)模型分析江苏省和湖南省的农业和农地投入碳排放增长机理,利用灰色模型 GM(1,1)对两省农业和农地碳排放进行预测。区域性预测可为省份提供参考,但不利于国家层面的整体认识和把控。因此,该研究选取标准差优选组合模型,基于国家层面进行预测。

近年来,为了追求高产量和高效率,化肥、农药、机械、灌溉等农资投入不断上升,这既不符合我国在“十三五”规划中将绿色发展贯穿到经济发展中的主题,也会产生碳排放和环境问题。由于各省份产业发展不平衡,自然条件存在差异,农牧业碳排放存在省份差异和时空变动。除此之外,农业生产活动的复杂性决定了农业碳源因子的多样性,不仅包括作物系统的碳排放,耕作中农资系统的碳排放,还包括农业生产中农用牲畜饲养带来的碳排放^[9]。因此,该研究将主要粮食作物和农业投入归类为农业碳源,将农用牲畜及日常饲养牲畜归为牧业碳源,对我国农牧业碳排放时空变化进行分析并对其进行预测,有助于国家整体把握农牧业及相关碳排放的发展趋势,促进区域协调发展,实现土地减排,走生态农牧业发展之路。

1 数据来源及研究方法

1.1 数据来源

该研究涉及主要粮食作物为小麦、水稻、玉米、大豆、蔬菜和其他旱作物(花生、谷子、高粱和土豆),主要农业投入为农药、化肥、农膜、农业灌溉和农业机械,主要牲畜为非奶牛(肉牛)、奶牛、马、骡、驴、猪和羊。

考虑到国家从 1997 年完善确定省级建制,选取 1997—2016 年为研究时段。作物种植面积、牲畜的

出栏量和年末存栏量、化肥、农药、农膜用量等农业投入数据均来源于历年《中国农业年鉴》和《中国农村年鉴》;部分年份数据来源于中国种植业信息网和国家统计局官网。

1.2 研究方法

通过查阅文献,大部分学者在计算农牧业碳排放时采用的是活动水平数据乘以排放因子的计算方法。李波^[10]利用农业各种碳源的使用量和碳源的排放系数计算了农地利用的碳排放总量;姚成胜等^[11]基于各类牲畜年平均饲养量和各类牲畜发酵 CH₄ 排放系数估算牲畜肠胃发酵产生的 CH₄ 排放量。而在排放因子的选取上,由于来源不同,同一碳源的系数也不同,目前的研究方法多结合前人研究和联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的准则内容确定相应的碳排放系数。

1.2.1 农资碳排放

参考美国橡树岭国家实验室、IPCC 和李波^[10]等提出的系数,确定该研究中各类碳源的碳排放系数如下:农药为 4.934 1,化肥为 0.895 6,农膜为 5.180 0,农用机械为 0.180 0,柴油为 0.592 7,灌溉为 266.480 0。

$$E = \sum e_i = \sum (T_i \times \delta_i) \quad (1)$$

式(1)中 E 为农业生产中物质投入的碳排放量,万 t; e_i 为 i 类碳源产生的碳排放量,万 t; T_i 为 i 类碳源的消耗量,万 t; δ_i 为 i 类碳源的碳排放系数。

1.2.2 水稻种植产生的 CH₄ 排放

由于各地气候环境存在显著差异,各地水稻生长周期内产生的 CH₄ 排放也存在差异,通过对现有农业碳排放研究进行梳理发现,何艳秋等^[12]和韦沁^[13]借鉴了闵继胜等^[14]得出的水稻 CH₄ 排放系数,更为全面和科学,该排放系数不需要单独考虑化肥施用产生的 CH₄ 排放量,同时考虑了早稻、中季稻和晚稻的生产周期差异。因此,笔者在此排放系数的基础上计算了水稻种植产生的 CH₄ 排放。

$$N_{\text{CH}_4} = \sum R_i \times \partial_i \quad (2)$$

式(2)中 N_{CH_4} 为水稻种植产生的 CH₄ 排放量,万 t; R_i 为 i 类水稻(早稻、晚稻和中季稻)的播种面积, 10^3 hm^2 ; ∂_i 为单位面积 CH₄ 排放系数 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

1.2.3 农作物的 N₂O 排放

各类作物的 N₂O 排放系数如下:水稻为 0.24 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,春小麦为 0.40 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,冬小麦为 1.75 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,大豆为 2.29 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,玉米为 2.532 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,蔬菜为 4.944 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,旱地作物为 0.95 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。各类农作物种植产生的 N₂O 排放量计

算公式为

$$N_{N_2O} = \sum S_i \times \theta_i \quad (3)$$

式(3)中, N_{N_2O} 为农作物种植产生的 N_2O 排放量, 万 t; S_i 为 i 类农作物(稻谷、小麦、大豆、玉米、蔬菜和其他旱作物)的播种面积, 10^3 hm^2 ; θ_i 为农作物单位面积年底 N_2O 排放通量 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.2.4 畜牧业碳排放测算

在参考姚成胜等^[11]研究成果的基础上对畜牧业碳排放进行测算, 牲畜肠胃发酵和粪便关系的温室气体排放系数见表 1。

$$M_{CH_4} = \sum T_i \times (\gamma_i + \beta_i) \quad (4)$$

$$M_{N_2O} = \sum T_i \times \beta_i \quad (5)$$

式(4)~(5)中, M_{CH_4} 和 M_{N_2O} 分别为畜牧业产生的 CH_4 和 N_2O 排放量, 万 t; T_i 为 i 类牲畜的年均饲养量, 万头; γ_i 为 i 类牲畜肠胃发酵产生的 CH_4 $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$; β_i 为 i 类牲畜粪便管理产生的 CH_4 或 N_2O $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

表 1 牲畜肠胃发酵和粪便关系的 CH_4 和 N_2O 排放系数
Table 1 CH_4/N_2O emission coefficients of gastrointestinal fermentation and manure management system of livestock

牲畜种类	CH_4 排放系数/ ($\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)		N_2O 排放系数/ ($\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)
	肠胃发酵	粪便管理	粪便管理
非奶牛	51.4	1.50	1.37
奶牛	68.0	16.00	1.00
猪	1.0	3.50	0.53
羊	5.0	0.16	0.33
马	18.0	1.64	1.39
驴	10.0	0.90	1.39
骡	10.0	0.90	1.39

1.2.5 农牧业碳排放

根据 IPCC 第四次评估报告^[15], 1 t CH_4 所引发的温室效应相当于 25 t CO_2 (约合 6.82 t C) 所产生的温室效应, 1 t N_2O 所引发的温室效应约合 81.27 t C 所产生的温室效应, 为了便于后续分析, 将 CH_4 和 N_2O 排放量转化为碳当量^[16-17]。

$$C_{农} = E + 6.82 \times N_{CH_4} + 81.27 \times N_{N_2O} \quad (6)$$

$$C_{牧} = 6.82 \times M_{CH_4} + 81.27 \times M_{N_2O} \quad (7)$$

$$C_{农牧} = C_{农} + C_{牧} \quad (8)$$

式(6)~(8)中, $C_{农}$ 为农业碳当量排放, 万 t; $C_{牧}$ 为畜牧业碳当量排放, 万 t; $C_{农牧}$ 为农业碳当量排放与畜牧业碳当量排放的总量, 万 t。

1.2.6 重心迁移

重心模型分析的目的是计算某一区域中某种

属性存在的重心位置与不同年份此位置在区域空间中的动态转移轨迹。当重心向某方向转移时, 表示此段时间内空间分布不均, 偏离反向指向高属性值区域。

$$B = \frac{\sum_{i=1}^m D_i B_i}{\sum_{i=1}^m D_i} \quad (9)$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m D_i C_i}{\sum_{i=1}^m D_i} \quad (10)$$

式(9)~(10)中 B 和 C 分别为属性重心的经纬度; B_i 、 C_i 和 D_i 分别为 i 个子区域的经、纬度和 i 个子区域的属性值。

1.2.7 标准差优选组合预测

已知各类模型预测值的预测精度时, 对较精确的预测值赋以较大的权重, 对精确度低的赋以较小权重^[18]。

$$W_i = \frac{\sigma - \sigma_i}{\sigma} \times \frac{1}{m - 1} \quad (11)$$

$$\sigma = \sum_{i=1}^m \sigma_i, i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

式(11)~(12)中, W_i 为模型 i 的权重; σ 为预测误差的标准差; σ_i 为模型 i 的预测误差的标准差; m 为组合模型中单一模型的样本。

2 农牧业碳排放时空变化分析

2.1 农牧业碳排放时间演化

将相关数据代入式(1)中, 得到我国农业、畜牧业和农牧业碳排放量(图 1)。利用变动指数来表征各省农牧业、农业和畜牧业碳排放的变动情况, 变动指数指属性末期与基期的差值和基期的比值, 表示碳排放发展态势和幅度, 计算结果见图 2。

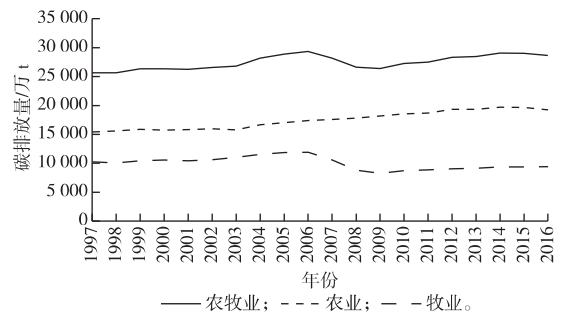


图 1 1997—2016 年农牧业碳排放变化

Fig. 1 Changes in agriculture and animal husbandry carbon emission from 1997 to 2016

由图 1 可知, 1997—2016 年我国农业、畜牧业和农牧碳排放均呈现总体上升趋势, 农业碳排放平稳发展, 农牧业与畜牧业碳排放趋势相似并呈现明显的

3 个阶段: 1997—2006 年农牧业、牧业碳排放稳步增加 2004—2006 年增速提高。十五大以来政府把农业放在经济工作首位, 并做出了关于农业和农村工作若干重大问题的决定, 推动了农牧业的持续发展, 农业碳排放稳步增长。2004 年“三补一减”政策的实施使得粮食生产出现重要转机, 调动了农民积极性, 促进了农业投入, 进而推动了农业碳排放和农牧碳排放总量的提速。2007—2009 年畜牧业发

生较大变化, 由于牲畜疫病, 肉牛、猪、羊等主要牲畜年末存栏量下跌, 市场需求萎缩, 造成了牧业碳排放急减, 导致农牧碳排放总量呈现大幅度下跌。2010—2016 年农牧业碳排放恢复增加, 这是由农业和牧业碳排放变化共同导致的。农业环境向好, 83.87% 的省、自治区和直辖市农业碳排放增加; 国家加强市场调控, 牲畜存栏量恢复增长, 牧业碳排放也相应增加, 但增速较慢, 远低于 2006 年之前。

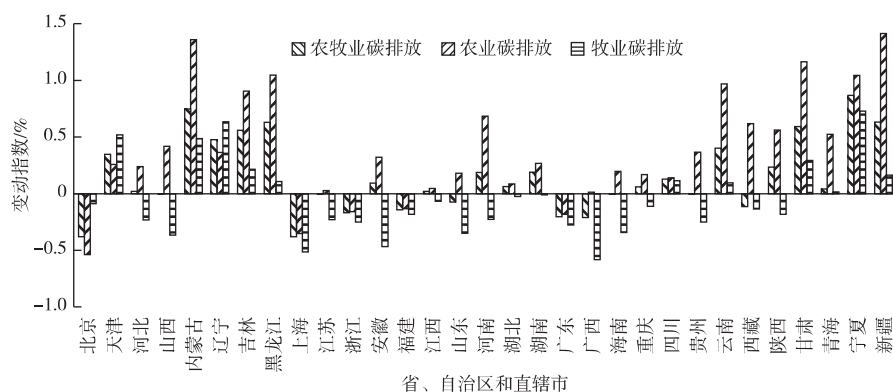


图 2 1997—2016 年各省、自治区和直辖市农牧业碳排放变动指数

Fig. 2 Change index of agriculture and animal husbandry carbon emission in different provinces from 1997 to 2016

由图 2 可知, 农牧业碳排放变动指数由农业和牧业碳排放变化共同影响, 12 个省、自治区和直辖市处于下降趋势, 19 个省、自治区和直辖市处于增长趋势。其中, 宁夏农牧业碳排放变动指数增长最大, 上海减少最多。1997—2016 年上海农业、牧业碳排放均呈现下降趋势, 除蔬菜种植以外, 其余作物种植面积和牛、羊、猪存栏量大幅减少, 大牲畜存栏量为零。上海农牧业土地面积缩小, 粮食和肉类依靠外省调入, 第一产业占比较低, 农牧业碳排放变动指数减少比例最大。宁夏变动指数增长最大, 由于政策扶持加大, 重点支持配方肥应用, 部分地区推广覆膜保墒集雨补灌旱作节水农业技术, 加大永久性蔬菜生产基地和马铃薯产业建设, 发展清真牛羊肉产业, 使得宁夏在蔬菜、肉牛羊养殖和农资投入方面的碳排放增加, 尤其是农资碳排放年平均增长 5.7%。

多省、自治区和直辖市农业碳排放变动指数为正, 仅北京、上海、浙江、福建和广东变动指数为负, 这表明在国家扶持, 农业发展的大环境下, 多数省、自治区和直辖市农业碳排放有所增加。北京、上海、浙江、福建和广东的二、三产业较其他省份更为发达, 第一产业比重较低, 其 2016 年农作物播种面积较 1997 年分别缩小 384.44×10^3 、 257.5×10^3 、

1669.6×10^3 、 616.39×10^3 和 $680.67 \times 10^3 \text{ hm}^2$; 播种面积降低, 农资投入相应减少, 导致这 5 个省市农业碳排放降低。多省、自治区和直辖市牧业碳排放变动指数为负, 仅天津、内蒙古、黑龙江、吉林、辽宁、四川、云南、甘肃、宁夏和新疆变动指数为正, 多省、自治区和直辖市牧业碳排放降低主要受牲畜数量变化的影响。随着产业结构调整 and 居民饮食结构优化, 用于农业生产的牛、马、驴、骡等大牲畜数量减少。居民对肉类的需求量降低, 再加之受疫病突发, 市场价格不稳定的影响, 肉牛、猪、羊的市场需求有所降低, 存栏量减少, 牧业碳排放增长滞后。除此之外, 随着冷冻仓储及运输技术的发展, 肉类长途运输和进口得以实现, 由于土地需求紧张, 中、东、南部省、自治区和直辖市二、三产业发展迅速, 牲畜饲养量不断减少, 小型养殖不足以供应人口的肉奶需求, 外地调入和进口的情况逐年增加, 也是造成非牧区省、自治区和直辖市牧业碳排放变动指数为负的原因之一。

2.2 农牧业碳排放空间演化

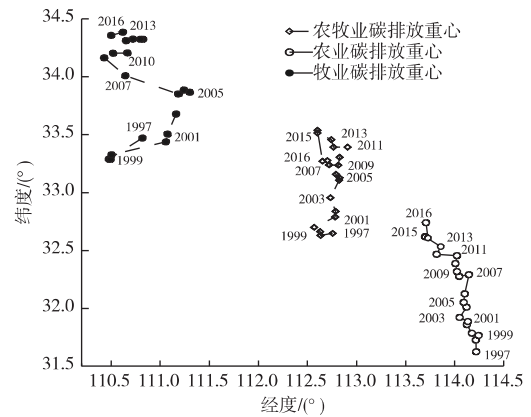
农牧业碳排放重心位于 $32.5^\circ \sim 33.625^\circ \text{ N}$, $112.5^\circ \sim 113.0^\circ \text{ E}$ (图 3), 1997—2016 年重心逐渐向西北移动, 由于农业、牧业重心及主体区域位置影响, 农牧业碳排放重心位于农业和牧业之间,

1997—2016 年移动 68.97 km 移动距离小于农业和畜牧业重心,椭圆分布于胡焕庸线右侧,但较农业分布椭圆偏右(表 2)。

农业碳排放重心位于 31.5° ~ 32.675° N, 113.6° ~ 114.4° E, 1997—2016 年农业碳排放重心逐渐向西北方向移动,从孝感市移动到南阳市,移动距离达 126.86 km。受粮食主产区和农业种植结构变化影响,我国传统粮食主产区位于气候条件优越、复种率高的长江中游和东南沿海区。随着农业科技 进步,黄淮海地区粮食产量占比上升,东北三省地区粮食播种面积占比最大,我国粮食主产区向北移动。西部地区种植结构有所改变,谷子、高粱和土豆的种植面积增加,西北地区更是成为小麦和棉花主产区,也推动了农业碳排放主体区域向西北移动。

畜牧业碳排放重心位于 33.25° ~ 34.5° N, 110.4° ~ 111.4° E, 西部地区和内蒙古畜牧业碳排放占全国的 48.79%, 其余 19 个省、自治区和直辖市排放量略高,使得重心仍落于胡焕庸线东侧,但较农业碳排放更偏西北侧。其重心移动分为明显的 2 个阶段: 1997—2004 年畜牧业碳排放重心显著向东北方向移动,这是由于中东部地区为了满足居民肉、蛋、奶的需求,小型养殖业发展良好,山东、河南是我国最大肉、奶供应省份;西北传统牧区由于超载放牧、

过度开垦造成天然草原退化,畜牧业发展优势减弱。2004—2016 年重心显著向西北方向移动,是因为政府加大对西部地区畜牧业的投资,小生产者组织化提高,集约化程度有所提升,西北省份畜牧业逐步向好发展。畜牧业碳排放分布椭圆也向西北方向移动,偏转角度由 61.06° 变为 60.48°, 椭圆面积由 1997 年的 $402.56 \times 10^4 \text{ km}^2$ 增长为 2016 年的 $435.46 \times 10^4 \text{ km}^2$, 表明畜牧业碳排放主体区域向东南—西北扭转,面积扩大。



图中数字为年份。

图 3 1997—2016 年农牧业碳排放重心分布及变化
Fig. 3 Distribution and change of agriculture and animal husbandry carbon emission from 1997 to 2016

表 2 标准差椭圆参数

Table 2 The corresponding values of barycenter and standard deviation ellipse model

类别	年份	重心经度 E/ (°)	重心纬度 N/ (°)	标准差椭圆面积/ km ²	X 轴长度/ km	Y 轴长度/ km	旋转角度/ (°)
农牧业	1997	112.76	32.65	3 324 397.55	951.92	1 111.69	44.74
	2003	112.73	32.96	3 320 294.91	943.96	1 119.69	39.14
	2009	112.81	33.24	3 546 134.84	970.64	1 162.98	41.97
	2016	112.65	33.27	3 761 091.46	1 006.26	1 189.81	45.77
农业	1997	114.22	31.63	2 547 409.22	785.43	1 032.44	26.30
	2003	114.05	31.92	2 632 743.38	795.67	1 053.30	26.78
	2009	114.02	32.32	2 865 545.24	833.08	1 094.96	26.84
	2016	113.71	32.74	3 241 666.86	912.48	1 130.58	30.59
牧业	1997	110.82	33.47	4 025 649.79	1 015.54	1 261.87	61.06
	2003	111.16	33.68	3 944 124.95	1 016.81	1 234.77	54.64
	2009	110.52	34.20	4 392 539.86	1 030.88	1 356.39	60.60
	2016	110.50	34.36	4 353 554.70	1 036.65	1 336.86	60.41

2.3 农牧业碳排放总量的时空演变

选取 1997、2003、2009 和 2016 年农业和畜牧业碳排放,以自然段点法将碳排放分为 5 个等级。其中,农业碳排放以 52.05、222.37、457.53、807.46 万 t 为断点划分为 5 个等级;畜牧业以碳排放以 118.61、276.08、400.68、617.37 万 t 为断点划分为 5 个

等级。

从图 4 可以看出,1997 年农业碳排放高值主要集中在长江中游、东南沿海传统农业省份(江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、广东等),由于自然和气候条件不适于发展农业,我国西北部地区(青海、西藏、宁夏)主要粮食作物种植面积较小,碳排放较

低。四川、河南地形具有优势(平原、盆地),自然条件优越,复种指数高,又同为人口大省,农业产值连续增加;广西投放了大量化肥农药,广泛应用农业科学技术,提高现代化农业发展水平,使得土地产出率逐年增加,这 3 个省份均于 2003 年进入第 1 等级。黑龙江地域广阔,机械化生产运作效率高,从 2003 年开始每百户年底拥有拖拉机数等指标增长较快,进入第 2 等级。到 2016 年多数省、自治区和直辖市农业碳排放增加,我国农业区和碳排放高值

区集中在东南沿海、长江中游、黄淮海平原及东北三省地区。但西藏、青海、宁夏、山西、陕西、重庆和贵州等地农业碳排放增长滞后,这可能是由于西藏和青海高寒干旱;山西和陕西种植结构不同,大宗作物种植面积小,特色农业较发达,例如玉米、荞麦、苜蓿、糜子等;山西、陕西、重庆和贵州地形破碎,缺少大块平整土地,种植和灌溉面积较少,农用机械的使用受限。

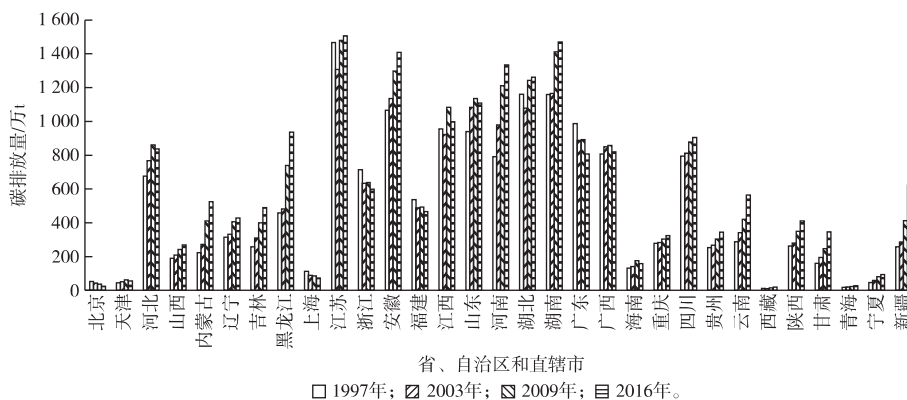


图 4 1997—2016 年各省、自治区和直辖市农业碳排放时空变化

Fig. 4 Temporal and spatial changes of agriculture carbon emission in different provinces from 1997 to 2016

从图 5 来看,1997 年牧业高值区主要集中于山东和河南两省,作为我国传统农耕区,这两省已经形成了畜类优势产业,牧业生产总产值及奶、肉类产量常年居全国前列。2003 年高值区域扩大到河北和四川。2009 年内蒙古进入第 1 等级,牧业生产力不断提升,制定了林木为主、多种经营的方针,畜牧业恢复发展;新疆和西南等地牧业碳排放降低,这是由于新疆政府在生猪、奶牛等方面出台了扶持政策,但在肉牛、肉羊产业发展方面政策很少,造成了

全疆牛羊养殖业出现萎缩。由于 2006—2009 年我国重大动物疫病频发,高致病性猪蓝耳病、高热病等疫病造成多数省份牲畜存栏量下降,市场需求萎缩,牧业碳排放整体下降。内蒙、西藏由于生猪等饲养规模小、大牲畜存栏量较大,受疫病影响较轻,畜牧业碳排放反而有所上升。2016 年牧业碳排放空间格局保持稳定,第 3、4 等级省、自治区和直辖市数量较大,多数省、自治区和直辖市牧业碳排放量较 2009 年有所增加,但低于 2003 年。

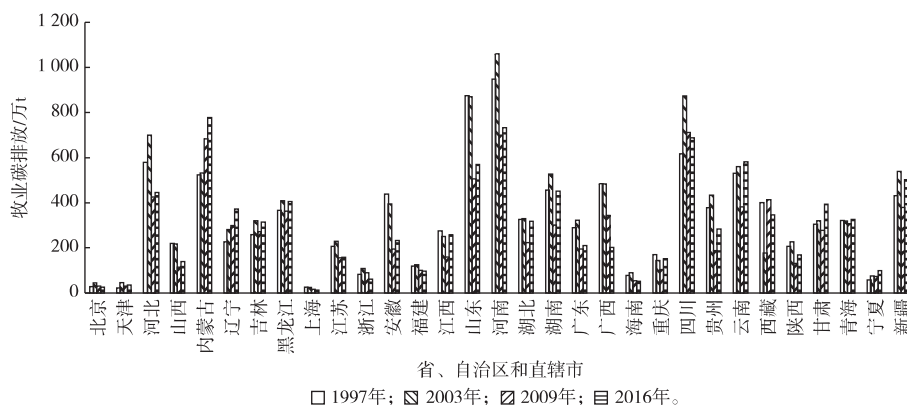


图 5 1997—2016 年各省、自治区和直辖市牧业碳排放时空变化

Fig. 5 Temporal and spatial changes of animal husbandry carbon emission in different provinces from 1997 to 2016

3 农牧业碳排放预测

为探究我国农、牧业碳排放发展路径和程度，为量化土地减排和绿色发展提供依据，对 2017—2022 年农业、牧业碳排放进行预测。农牧业碳排放的发展具有一定的连续性和稳定性，以碳排放未来和过去的变化规律相一致的理论为依据，选取趋势外推、ARIMA 模型和灰色模型为基础，运用标准差法对农业和牧业碳排放进行组合预测。牧业碳排放于 2007—2009 年出现不可抗因素影响，所以使用线性内插结果代替 2007—2009 年牧业碳排放原数据，再对其进行预测分析。

3.1 模型及参数选取

3.1.1 趋势外推法模型选取

选取二次曲线、三次曲线和对数曲线模型对农业和牧业碳排放进行拟合，拟合结果见表 3。

表 3 趋势外推模型参数

Table 3 Parameters of trend extrapolation model

	曲线类型	R^2	估计值的标准误差	sig. 值
农业	二次	0.955 8	338.351	0
	三次	0.983 6	318.020	0
	对数	0.954 0	339.056	0
牧业	二次	0.487 2	841.217	0.090
	三次	0.670 0	569.506	0.022
	对数	0.130 9	781.851	0.010

从表 3 可知，曲线模型对农业碳排放拟合程度较高， R^2 均在 0.95 之上，sig. 值均为 0；由于突发性事件发生，牧业碳排放出现急减，即使经过线性内插平滑处理，但曲线模型对牧业碳排放拟合效果较

表 5 农牧业碳排放的单位根检验结果

Table 5 Unit root test results of agriculture and animal husbandry carbon emission

	变量	ADF 检验值	各显著水平下的临界值			检验结果
			1%	5%	10%	
农业	x_t	-2.661	-3.857	-3.04	-2.661	不平稳
	$x_t - x_{t-1}$	-3.357	3.920	-3.06	-2.673	平稳
牧业	x_t	-2.110	-3.857	-3.04	-2.661	不平稳
	$x_t - x_{t-1}$	-1.876	-3.857	-3.04	-2.661	不平稳
	$x_t - x_{t-1} - x_{t-2}$	-3.902	-3.886	-3.05	-2.667	平稳

x_t 为原序列； $x_t - x_{t-1}$ 为一阶差分序列； $x_t - x_{t-1} - x_{t-2}$ 为二阶差分序列。

农业碳排放序列经过一阶差分处理后平稳，ADF 值小于 1% 临界值，牧业碳排放序列经过二阶差分后平稳，ADF 值小于 5% 临界值。

通过 Eviews 6 软件得出时间序列的自相关和偏自相关图，确定自相关和偏自相关系数的截尾性，

差。根据模型参数，选取 R^2 最高的三次曲线拟合，农业碳排放的平均相对误差为 0.605%，牧业碳排放为 7.634%。

3.1.2 GM(1,1) 模型预测

利用 1997—2016 年农业和牧业碳排放构建农牧业碳排放的灰色预测模型，农、牧业的响应方程分别为 $\hat{x}_{(k+1)}^{(1)} = 1\ 025\ 157.764e^{0.014\ 84k} - 1\ 009\ 746.778$ ， $\hat{y}_{(k+1)}^{(1)} = -1\ 078\ 996e^{-0.010\ 3k} + 1\ 089\ 248$ 。农业和牧业碳排放的灰色模型预测精度的检验结果见表 4。从表 4 可知，农业和牧业碳排放灰色模型通过了精度检验，可以对其进行预测分析。灰色预测模型检验中最常用的是相对误差检验指标，农业碳排放平均相对误差为 1.07%，拟合效果较好；牧业碳排放平均相对误差为 6.37%，对标准差组合预测中的系数有所影响。

表 4 GM(1,1) 模型精度检验结果

Table 4 Precision test results of GM(1,1) model

预测精度等级	相对残差/%	标准差比值	小误差概率/%	关联度
1		0.17(农业)	100.00(农业)	
2	1.07(农业)	0.48(牧业)	89.47(牧业)	
3	6.37(牧业)			75.74(农业)
4				64.38(牧业)

3.1.3 ARIMA 模型参数选取

从图 2 可以判断，农、牧业碳排放随时间推移呈增长状态，尤其是农业碳排放初步判定为非平稳时间序列，通过取农业碳排放和处理后牧业碳排放的自然对数，去除时间序列的指数趋势后进行单位根检验(ADF) (表 5)。

基于赤池信息准则(AIC)、施瓦茨准则(SC)和 R^2 选择最优模型，结果见表 6。

3.1.4 标准差法组合模型预测

以三次曲线模型、GM(1,1) 模型和 ARIMA 模型为基础，运用标准差法组合模型对我国农业、牧

业碳排放进行建模和预测。根据式 (2) 得出我国农、牧业碳排放组合预测模型。

$$Y_{\text{农业}} = 0.3781 \times Y_1 + 0.3085 \times Y_2 + 0.3133 \times Y_3, \quad (13)$$

$$Y_{\text{牧业}} = 0.3423 \times Y_1 + 0.2702 \times Y_2 + 0.3874 \times Y_3. \quad (14)$$

式 (13) ~ (14) 中, $Y_{\text{农业}}$ 和 $Y_{\text{牧业}}$ 分别为农业和牧业碳排放组合模型的预测值; Y_1 、 Y_2 和 Y_3 分别为三次曲线、GM(1,1) 和 ARIMA 模型的预测值。

将三次曲线、GM(1,1) 和 ARIMA 模型的农业和牧业预测值带入式 (13) ~ (14), 得到农业和牧业碳排放及相对误差(表 7)。1997—2016 年农业碳排放预测值与实际值的相对误差最大为 3.182%, 平均相对误差为 0.897%; 牧业碳排放的相对误差最大为 6.42%, 平均相对误差为 4.37%, 组合模型的拟合效果均高于单一模型的拟合效果。

表 6 ARIMA 模型参数设置

Table 6 The corresponding values of ARIMA model

类型	(p d q)	R ²	AIC 值	SC 值	QH 值
农业	(1 1 1)	0.969	15.79	15.93	15.81
牧业	(1 2 1)	0.921	14.40	14.56	14.77

p 为自相关 (AR) 模型的阶数; d 为差分阶数; q 为滑动平均 (MA) 模型的阶数; AIC 为赤池信息准则; SC 为施瓦茨准则; QH 为汉南奎泽准则。

表 7 1997—2016 年农牧业碳排放预测值及相对误差

Table 7 Prediction and relative error of carbon emission in agriculture and animal husbandry from 1997 to 2016

年份	农业碳排放 预测值/万 t	相对误差	牧业碳排放 预测值/万 t	相对误差
1997	15 370.494	-0.003	10 134.437	0.012
1998	15 497.978	-0.006	10 758.812	-0.071
1999	15 627.491	-0.017	10 459.214	-0.002
2000	15 800.045	0.003	10 981.934	-0.038
2001	15 921.462	0.007	10 864.944	-0.039
2002	16 077.807	0.009	10 795.709	-0.016
2003	16 297.201	0.020	10 918.633	0.011
2004	16 458.778	-0.011	11 122.614	0.037
2005	16 867.451	-0.010	11 243.437	0.053
2006	17 263.228	-0.007	11 176.690	0.064
2007	17 581.773	-0.001	10 987.427	-0.039
2008	17 882.072	0.003	10 164.190	-0.151
2009	18 168.883	-0.001	9 868.361	-0.200
2010	18 491.094	-0.003	9 315.510	-0.068
2011	18 806.903	0.007	8 999.078	-0.017
2012	19 049.882	-0.014	9 322.141	-0.034
2013	19 388.911	0.003	9 201.335	-0.006
2014	19 536.092	-0.009	9 307.616	0.005
2015	19 731.775	0.003	9 317.713	0.005
2016	19 844.048	0.032	9 330.306	0.008

3.2 碳排放预测结果分析

GM(1,1) 是单序列的一阶线性动态模型,具有准确性高、所需原始数据少的优点,但基于指数率的预测没有考虑发展过程的随机性,中长期预测精度较差。基于此原因,将预测年限放短,对 2017—2022 年农业和牧业碳排放进行预测,预测结果见图 6。从图 6 的预测结果来看,农业碳排放延续历史趋势,呈现缓慢上升趋势。到 2022 年,农业碳排放达 2.165×10^8 t, 年均增速 1.09%, 低于 2016 年前的年均增速 1.32%。预测结果与现行农业发展趋势相符。农业作为立国之本,得到国家政策的大力扶持,国家已进一步增加农资综合补贴,减免农业税,鼓励科技兴农,提高农民种粮的积极性,促进农业碳排放的稳定增加。但是,由于我国农业结构发展不平衡,种植结构较为单一,加之国内外粮食差价的存在,我国近年来粮食进口量不断增加,造成农业碳排放增速放缓。

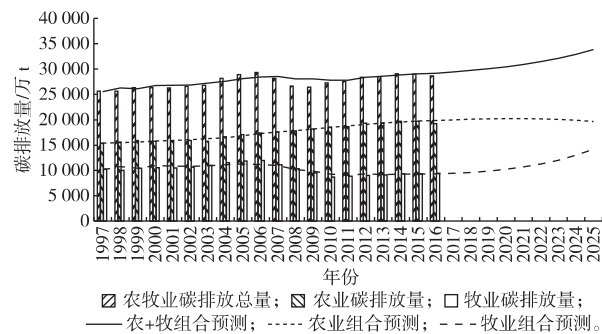


图 6 1997—2022 年我国农牧业碳排放量预测

Fig. 6 Forecast of agriculture and animal husbandry carbon emission from 1997 to 2022

牧业碳排放达到 1.13×10^8 t, 年均增速为 2.84%, 高于 2016 年前的年均增速 (-0.30%), 1997—2022 年在整体趋势上呈现缓慢上升—突然下降—恢复上升的趋势。从 2006 年突发疫情后,养殖业收到较大冲击,2007 年波及 26 个省、自治区和直辖市,疫病和防控扑杀导致牲畜存栏量大幅度减少,肉类需求萎缩,到 2009 年疫情逐步得到控制,波及省份减少到 5 个省、自治区和直辖市。2010 年后,随着肉类市场需求回升,畜牧业进入恢复时期,牲畜养殖数量有所增加。政府采取 24 字防控工作方针,加大对动物疫病的防治管控,2010 年后我国重大动物疫病流行强度明显减弱,发病频次和范围显著降低,加之居民对动物性食物消费量稳定增长,促进了猪、羊和奶牛的饲养量增加,促使畜牧业

碳排放在未来平稳增加,但2022年牧业碳排放量仅略高于1997年,约为 0.15×10^8 t。

4 讨论

对我国31个省、自治区和直辖市1997—2016年农业和牧业碳排放进行测算,测算结果与前人的研究相近,趋势相符。但由于目前在牲畜类型选择上缺乏清晰的边界界定,研究者们选择的牲畜种类不同,牧业碳排放测算结果均存在较大差异。该研究主要选取了大牲畜,未涉及兔和禽类,由于家禽的饲养量数量更多,会导致该研究牧业碳排放测算结果偏低,排放趋势与牧业大趋势不同。但是,考虑到兔和家禽类的饲养受场地、饲料、地域的限制较少,其养殖规模在我国空间上并不存在明显的偏重,不利于牧业的区域分析。因此,该研究在一定程度上弥补了牧业碳排放在大牲畜养殖和区域优势研究的不足,有利于我国调整养殖结构,推动畜牧业优化升级。

从预测方法和预测结果来看,不同于区域性单一属性研究,该研究将农牧业相结合,从全国层面进行时空分析和预测,为农牧业发展及土地减排提供较为准确的趋势和排放上限,为区域间第一产业协调发展和国家统筹提供参考。除此外,该研究采用组合模型预测,预测精度和结果均高于单一模型预测。农业发展稳定,即使遭受自然灾害也具有区域性和时间性,灾后可通过复种、栽植其他作物进行补救,恢复周期较短,对全国层面影响较小,所以农业碳排放预测精度较高,结果可靠。但养殖业存在动物疫情突发的情况,且疫情扑灭、人民心理及需求转变和牲畜出栏都需要一定周期,这在预测中是不可测的。尽管国家近年来加强防疫管控,但在牧业碳排放预测研究中仍需考虑多种因素,使预测结果更趋科学性。

5 结论与建议

5.1 结论

对我国31个省、自治区和直辖市1997—2016年农牧业碳排放进行时空变化分析,利用标准差优选组合模型对2017—2022年农牧业碳排放进行预测分析,研究结果如下:

(1) 1997—2016年,在农业发展大环境下多数省、自治区和直辖市农业碳排放有所增加。在畜牧业产业结构调整、居民饮食结构优化、冷冻仓储及运输技术发展的综合作用下,除传统牧业区外多数省、自治区和直辖市的牧业碳排放有所减少。

(2) 由于粮食主产区和农业种植结构的变化,农业碳排放重心逐渐向西北方向移动,但标准差椭圆的主体区域仍在胡焕庸线右侧。牧业碳排放重心在河南境内摆动,主体区域向东南—西北扭转,面积扩大。

(3) 我国农牧业碳排放格局基本稳定,农业碳排放高值由长江中游、东南沿海传统农业区逐步向东北三省和黄淮海周边转移,西北部地区受自然条件等原因保持低碳排放。牧业碳排放高值区集中于传统牧业区和中部地区,除2006—2009年受重大动物疫病影响外,牧业碳排放格局变化较小。

(4) 农业碳排放组合预测的平均相对误差为0.897%,牧业为4.37%,综合来看,标准差组合模型拟合效果优于单一模型。

(5) 到2022年,国家政策扶持促进农业碳排放稳定增加,农业结构、种植结构以及国内外粮食差价等原因造成农业碳排放增速放缓,农业碳排放延续了历史增长趋势,达到 2.165×10^8 t,年平均增速低于2016年前。居民对动物性食物需求的稳定增长促进了牲畜饲养量增加,促使畜牧业碳排放在未来会平稳增加,达 1.13×10^8 t,年均增速高于2016年前。

5.2 建议

农业碳排放高于牧业碳排放,其中,化肥、农膜和灌溉碳排放占农业碳排放的比重约为29.5%、11%和9.1%,是农业碳排放中较大的碳源。根据研究结果,给出相关的建议如下:

(1) 以保障粮食安全为前提,在因地制宜的基础上,进一步调整各区域农业结构多样化,增加农作物选择和特色农作物种植。

(2) 当地政府和农业部门应加大农业科学技术研究的资金投入,加强技术发展对农业碳排放的抑制作用,引导农民选择抗倒伏、抗病虫害强的优良植株,减少农药、化肥的过量使用。

(3) 改进农业灌溉方式,减少输水过程中的渗漏损耗;做好雨水集流等田间节水措施,优先选择滴灌、渗灌等节水灌溉方式;建立灌区需水预报和水量调配等优化制度,减少灌溉浪费和灌溉用能带来的碳排放。

(4) 稳定牲畜存栏量和出栏量,建立疫病及防治数据库,加强疫病防御机制,向农牧民普及动物疫病预防技术,稳定畜牧业规模和牧业碳排放。

参考文献:

[1] 张军伟,张锦华,吴方卫.我国粮食生产的碳排放及减排路径

- 分析[J].统计与决策,2018,34(14):168-172.
- [2] SMITH P ,MARTINO D ,CAI Z C *et al.* Policy and Technological Constraints to Implementation of Greenhouse Gas Mitigation Options in Agriculture [J]. Agriculture , Ecosystems & Environment 2007 ,118(1/2/3/4) : 6-28.
- [3] XU L Q ,BAI J J.Study on Characteristics and Reduction Counter-measures of the Agricultural Carbon Emission in China[J].Meteorological & Environmental Research 2013 4(11) : 58-62.
- [4] 韦沁,曲建升,白静,等.我国农业碳排放的影响因素和南北区域差异分析[J].生态与农村环境学报,2018,34(4):318-325. [WEI Qin ,QU Jian-sheng ,BAI Jing ,*et al.* Influencing Factors of Agricultural Carbon Emission and Regional Differences Between South and North in China[J].Journal of Ecology and Rural Environment 2018 34(4) : 318-325.]
- [5] 冉锦成,苏洋,胡金凤,等.新疆农业碳排放时空特征、峰值预测及影响因素研究[J].中国农业资源与区划,2017,38(8):16-24. [RAN Jin-cheng ,SU Yang ,HU Jin-feng ,*et al.* Temporal and Spatial Characteristics ,Peak Value Forecast and Influencing Factors of Agricultural Carbon Emissions in Xinjiang[J].Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning 2017 38 (8) : 16-24.]
- [6] FRANK S ,BEACH R ,HAVLÍK P ,*et al.* Structural Change as a Key Component for Agricultural Non-CO₂ Mitigation Efforts [J]. Nature Communications ,2018 ,9: 1060. DOI: 10. 1038/s41467 - 018-03489-1.
- [7] 赵宇.江苏省农业碳排放动态变化影响因素分析及趋势预测[J].中国农业资源与区划,2018,39(5):97-102. [ZHAO Yu. Influencing Factors and Trend Prediction on Dynamic Change of Agricultural Carbon Emissions in Jiangsu Province [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning 2018 39 (5) : 97-102.]
- [8] 黎孔清,陈俭军,马豆豆.基于STIRPAT和GM(1,1)模型的湖南省农地投入碳排放增长机理及趋势预测[J].长江流域资源与环境,2018,27(2):345-352. [LI Kong-qing ,CHEN Jian-jun ,Ma Dou-dou.Growth Mechanism and Trend Forecast of Carbon Emission From Farmland Inputs in Hunan Province Based in Stirpat and GM(1 ,1) Mode [J]. Resources and Environment in the Yangtza Basin 2018 27(2) : 345-352.]
- [9] 田云,张俊飏,李波.中国农业碳排放研究:测算、时空比较及脱钩效应[J].资源科学,2012,34(11):2097-2105. [TIAN Yun ,ZHANG Jun-biao ,LI Bo. Agricultural Carbon Emissions in China: Calculation ,Spatial-Temporal Comparison and Decoupling Effects[J].Resources Science 2012 34(11) : 2097-2105.]
- [10] 李波.经济增长与农业碳排放关系的实证研究[J].生态环境学报,2012,21(2):220-224. [Li Bo. Empirical Study on Relationship Between Economic Growth and Agricultural Carbon Emissions[J].Ecology and Environmental Sciences 2012 21(2) : 220-224.]
- [11] 姚成胜,钱双双,毛跃华,等.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. [YAO Cheng-sheng ,QIAN Shuang-shuang ,MAO Yue-hua ,*et al.* 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 , 2017 33(12) : 10-19.]
- [12] 何艳秋,陈柔,吴昊玥,等.中国农业碳排放空间格局及影响因素动态研究[J].中国生态农业学报,2018,26(9):1269-1282. [HE Yan-qiu ,CHEN Rou ,WU Hao-yue *et al.* Spatial Dynamics of Agricultural Carbon Emissions in China and the Related Driving Factors [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture ,2018 ,26(9) : 1269-1282.]
- [13] 韦沁.我国农牧业碳排放的时空差异和影响因素分析及预测研究[D].兰州:兰州大学,2018. [WEI Qin. Research on Spatial-Temporal Differences ,Influence Factors and Prediction of Carbon Emission in Agriculture and Animal Husbandry in China [D]. Lanzhou: Lanzhou University ,2018.]
- [14] 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.]
- [15] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [R] // Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York , USA: Cambridge University Press 2007.
- [16] 苏洋,马惠兰,李凤.新疆农牧业碳排放及其与农业经济增长的脱钩关系研究[J].干旱区地理,2014,37(5):1047-1054. [SU Yang ,MA Hui-lan ,LI Feng. Xinjiang Agriculture and Animal Husbandry Carbon Emissions and Its Decoupling Relationship With Agricultural Economic Growth [J]. Arid Land Geography 2014 37 (5) : 1047-1054.]
- [17] 唐洪松,苏洋,马惠兰,等.新疆畜牧业碳排放格局与公平性研究[J].干旱区地理,2017,40(6):1338-1345. [TANG Hong-song ,SU Yang ,MA Hui-lan ,*et al.* Spatial and Temporal Distribution and Equity of Carbon Emissions From Livestock in Xinjiang [J]. Arid Land Geography 2017 40(6) : 1338-1345.]
- [18] 张志启.我国能源消费总量预测建模分析[D].包头:内蒙古科技大学,2012. [ZHANG Zhi-qi. Modeling Analysis of China's Total Energy Consumption Predictive [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology 2012.]

作者简介:徐丽(1993—),女,山西忻州人,硕士生,主要从事温室气体排放评估与预测研究。E-mail: lxu16@lzu.edu.cn

(责任编辑:陈昕)