

中国棉花生产碳排放核算与碳达峰预测

吴泮斌, 黄伟斌, 陈家乐, 韩迎春, 冯璐, 王国平, 李小飞, 李亚兵, 王占彪

引用本文:

吴泮斌, 黄伟斌, 陈家乐, 韩迎春, 冯璐, 王国平, 李小飞, 李亚兵, 王占彪. 中国棉花生产碳排放核算与碳达峰预测[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 692–704.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0477>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

江苏省农业碳排放时序特征与趋势预测

邱子健, 靳红梅, 高南, 徐轩, 朱津宏, 李庆, 王子清, 徐拥军, 申卫收

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 658–669 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0647>

我国畜牧业碳排放时空特征与趋势预测

顾沈怡, 邱子健, 詹永冰, 钱锬, 熊若男, 戴海洋, 尹君, 申卫收

农业环境科学学报. 2023, 42(3): 705–714 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0666>

新疆绿洲区秸秆燃烧污染物释放量及固碳减排潜力

杨乐, 邓辉, 李国学, 王琦

农业环境科学学报. 2015, 34(5): 988–993 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.05.023>

减排固碳目标纳入农业绿色发展政策的协同机制

徐湘博, 李静, 薛颖昊, 孙明星, 牛坤玉, 金书秦, 张林秀

农业环境科学学报. 2022, 41(10): 2091–2101 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0308>

秸秆还田下“麦-稻”轮作生产生命周期能耗及温室气体排放

杨娟, 王昌全, 白根川, 游来勇, 易云亮, 黄帆, 李喜喜

农业环境科学学报. 2015, 34(1): 196–204 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.01.028>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吴沅斌, 黄伟斌, 陈家乐, 等. 中国棉花生产碳排放核算与碳达峰预测[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 692–704.

WU F Q, HUANG W B, CHEN J L, et al. Carbon emission accounting and carbon peak prediction for cotton production in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(3): 692–704.

中国棉花生产碳排放核算与碳达峰预测

吴沅斌¹, 黄伟斌¹, 陈家乐², 韩迎春², 冯璐^{1,2}, 王国平², 李小飞², 李亚兵^{1,2*}, 王占彪^{1,2*}

(1. 棉花生物学国家重点实验室郑州科研中心/郑州大学农学院, 郑州 450000; 2. 中国农业科学院棉花研究所/棉花生物学国家重点实验室, 河南 安阳 455000)

摘要:为预测碳达峰时间和峰值, 综合分析减排潜力, 本研究使用生命周期评价法对2004—2018年棉花生产碳排放进行核算, 基于STIRPAT模型进行模拟, 结合Kaya恒等式确定模型变量为技术效率、生产规模、进口数量、农业经济和城镇化率, 通过岭回归确定系数将2019—2035年碳排放情景分为高减排度情景(HERS)、中等减排度情景(MERS)、基准情景(BS)3类进行变量设定和预测。结果表明:2004—2018年中国棉花生产碳排放及其增长率呈缓慢上升趋势, 2018年碳排放达到最高值(24.34万t), 新疆的碳排放值最大(2018年占比86.8%)并呈明显增加的趋势, 肥料生产与施用、灌溉用电、农膜是生产过程中的主要碳排放构成因素。用于模拟中国棉花生产碳排放的STIRPAT模型性能良好($R^2=0.866$, adjusted $R^2=0.792$, $P=0.001$), 自变量均对因变量有显著影响($P<0.01$), 生产规模、城镇化率和技术效率是主要宏观影响因素。结果显示2019—2035年HERS、MERS、BS下中国棉花生产碳达峰时间分别是2021、2025、2031年, 峰值分别为24.89万、26.12万、27.25万t。研究表明, 在未来棉花生产向着集约化和规模化方向发展的同时, 提高生产效率以及加快低碳种植技术和土壤固碳技术的研发与推广是推动棉花低碳生产的主要突破点。

关键词:棉花生产; 碳排放; 碳达峰; 生命周期评价; STIRPAT模型; 碳中和

中图分类号: F326.12; X322 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2023)03-0692-13 doi:10.11654/jaes.2022-0477

Carbon emission accounting and carbon peak prediction for cotton production in China

WU Fengqi¹, HUANG Weibin¹, CHEN Jiale², HAN Yingchun², FENG Lu^{1,2}, WANG Guoping², LI Xiaofei², LI Yabing^{1,2*}, WANG Zhanbiao^{1,2*}

(1. Zhengzhou Research Base, State Key Laboratory of Cotton Biology, School of Agricultural Sciences, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China; 2. State Key Laboratory of Cotton Biology, Institute of Cotton Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Anyang 455000, China)

Abstract: Breaking down the constitutive factors and influencing factors of carbon emissions, predicting the peak time and peak value of carbon emissions, and comprehensively analyzing the reduction potential of carbon emissions can provide a theoretical reference for responding to climate change, specific to industry. In this study, a life cycle assessment (LCA) was used to calculate carbon emissions from 2004 to 2018, whilst a Stochastic Impacts by Regression on PAT (STIRPAT) model was also conducted to simulate the production scale, cotton imports, agriculture economy, and urbanization rate, with variables determined by Kaya identity as technical efficiency. Furthermore, a ridge regression was used to determine the coefficient. The carbon emission scenarios from 2019 to 2035 were divided into three categories: high emission reduction scenario (HERS), medium emission reduction scenario (MERS), and basic scenario (BS) for variable

收稿日期: 2022-05-10 录用日期: 2022-10-25

作者简介: 吴沅斌(1996—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 从事农业生态学研究。E-mail: fengqiwu6677@163.com

*通信作者: 李亚兵 E-mail: criliyabing@163.com; 王占彪 E-mail: wangzhanbiao@caas.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1001000); 国家自然科学基金项目(31701389)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2020YFD1001000); The National Natural Science Foundation of China (31701389)

setting and forecasting. From 2004 to 2018, carbon emissions and their growth rates in China's cotton production showed a gradual upward trend. In 2018, carbon emissions reached their highest values across the 15 years, equivalent to 243.4 thousand tons. Xinjiang had the highest carbon emissions (86.8% of the total in 2018) which also significantly increased. Irrigation electricity, fertilizer, and agricultural film were the main carbon emission factors in the production process. The STIRPAT model used to simulate carbon emissions from national cotton production performed well ($R^2=0.866$, adjusted $R^2=0.792$, $P=0.001$), and the independent variables all had significant effects on the dependent variable ($P<0.01$). The production scale, urbanization rate, and technical efficiency were the main influencing factors. The results showed that from 2019 to 2035, the carbon peak times of China's cotton production under HERS, MERS, and BS would be 2021, 2025, and 2031, respectively, alongside respective peak values of 248.9 thousand, 261.2 thousand, and 272.5 thousand tons. In the future, whilst China's cotton production is developing in terms of intensification and scale, improving production efficiency and accelerating the research, development, and promotion of low-carbon planting technology and soil carbon sequestration technology remain the main breakthrough points in terms of promoting low-carbon cotton production.

Keywords: cotton production; carbon emission; carbon emission peak; life cycle assessment; STIRPAT model; carbon neutral

碳排放是目前被认为导致全球变暖的主要原因之一^[1],全球变暖会对人类、物种与环境产生普遍、重大甚至是不可逆的影响,是当今世界各国重点关注的全球性环境问题。2014年亚太经济合作组织(APEC)峰会上中方郑重承诺,中国将力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告(AR5)^[1]表明,未来几十年显著减少温室气体(GHG)排放可限制21世纪下半叶及之后的全球变暖,从而显著缓解气候变化带来的风险,报告还指出农业源的GHG排放占全球GHG排放总量的24%,主要是CH₄和N₂O的排放。中国作为一个世界农业大国,研究农业领域碳排放及减排策略可以在保证作物产量的基础上,实现缓解全球气候变化的目标,也能推动我国农业向可持续的方向发展。

广义的碳达峰是指某一个时间点,CO₂排放达到峰值,之后逐步回落^[2]。目前关于碳排放峰值预测的研究方法主要是模型模拟,主要模型分3类:第一类是以IPAT和STIRPAT(Stochastic impacts by regression on PAT)为代表的基于指标分解法的模型;第二类则是自下而上的模拟,模型主要为LEAP(Long-range energy alternatives planning system);第三类为系统优化模型,如中国能源环境综合政策评价模型(IPAC)等。中国工业部门的碳排放影响因素、达峰时间和峰值大小已有大量研究,袁晓玲等^[2]使用STIRPAT模型对中国工业部门碳排放进行情景模拟,预测工业整体在低碳情景下将于2028年碳排放达到峰值,Duan等^[3]使用LEAP模型对吉林省建筑行业的碳排放峰值进行预测并发现供暖系统的碳排放占比最大。农业领域碳排放达峰研究尚处于起步阶段,

Huang等^[4]评估了1997—2016年中国农业碳排放及其时空变化,Xiong等^[5-6]基于对数平均迪氏指数法(LMDI)研究了中国新疆农业碳排放变化及影响农业碳排放的因素,Cui等^[7]和Xiong等^[8]基于STIRPAT模型对农业碳排放驱动因子进行了分析,Xue等^[9]基于STIRPAT模型和岭回归(Ridge regression)研究了江苏省秸秆利用对农业碳排放的影响,王占彪等^[10]和Xue等^[11]分别对华北和华南地区的作物生产碳足迹进行了分析。目前学者多为定量研究农业生产的碳排放,从而提出减排策略,少有对于农业部门及细分作物的碳排放核算与达峰预测。通过对农业部门整体和细分作物生产体系的碳排放核算和达峰预测,能更有针对性地提出行业碳达峰的实现路径,同时促使节能减排政策的具体化。

棉花(*Gossypium hirsutum* L.)是我国的重要经济作物,2019年棉花种植面积为333.9万hm²,产量为588.9万t^[12]。近年来,我国棉花生产由于棉田地膜残留^[13]、过度施用化肥^[14]导致的生态环境污染日趋严重。李倩娜等^[15]的研究发现在主要棉花产区新疆,北疆棉区规模化与机械化程度高,但资源利用效率不高,棉花生产碳排放较高,并提出要重点加强绿色新型技术的应用。前人曾对棉花生产过程中减少碳排放的技术途径进行了研究,如Sun等^[16]发现通过冬季种植覆盖作物可以在氮肥减施的基础上维持棉花较高的产量,Wang等^[17]发现二月兰与棉花轮作可以实现温室气体减排43.6%~76.1%。但关于区域尺度上棉花生产的碳排放计算研究很少,因此难以为中国棉花生产体系的宏观规划提供支持。综上所述,分析棉花生产生命周期的碳排放构成因素及影响因素,预测不同种植管理情景下棉花生产碳排放达峰时间和峰值大小,对棉花生产体系的碳排放管理和棉花低碳生

产具有重要参考价值。本研究在前人的基础上,通过整理2004—2018年中国棉花生产统计数据,使用生命周期评价(LCA)法和STIRPAT模型模拟碳排放,对2004—2018年中国棉花生产的碳排放情况进行核算,并对2019—2035年中国棉花生产碳排放情况进行情景分析和达峰趋势预测,以综合分析产业减排潜力,这对于我国农业的可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究数据涵盖中国三大棉区的各省份^[18],分别为新疆、甘肃、陕西、山西、山东、河北、河南、安徽、江苏、湖北、湖南和江西。城镇化率、人均农业产值、棉花播种面积、灌溉用电量、化肥种类及用量、地膜用量、机械柴油用量、农药等数据主要来源于2004—2018年《中国统计年鉴》和《中国农村统计年鉴》,中国的棉花进口数量等数据来源于联合国粮农组织数据库。部分农村统计年鉴缺失数据则从2004—2018年各省市统计年鉴中获取。其中农业产值不包括林、牧、渔业产值,化肥种类包括氮、磷、钾肥和复合肥。模型构建使用了2004—2018年的数据,而对于模型的模拟,2019年和2020年的变量设定使用当年的《中国统计年鉴》和联合国粮农组织数据库,2021—2035年的变量设定基于情景分析法以及参考文献(详见2.6.1变量涨跌幅设定)。

1.2 生命周期评价

已有研究在核算农业碳排放时,极少考虑到棉花生产全生命周期的农田 N_2O 直接排放以及农药、人工和种子造成的碳排放。农用地的 N_2O 排放包括直接排放和间接排放两部分。直接排放是由农用地当季氮肥、粪肥和秸秆还田氮输入引起的排放,间接排放包括大气氮沉降引起的 N_2O 排放和氮淋溶径流损失引起的 N_2O 排放。作物生产碳排放是指从播种到收获的整个生产过程中各种投入品如化肥、农用塑料膜、灌溉用电、农用柴油等的生产、运输、使用过程中的温室气体排放加上农田土壤 N_2O 的直接排放^[19]。棉花秸秆由于具有较高的经济价值而常被用于木材制造,因不清楚全国各地棉花秸秆还田比例,本研究未讨论棉花秸秆还田引起的 N_2O 直接排放。综上,本研究的碳排放核算系统边界为农资投入生产、运输、使用过程中的温室气体排放和农田温室气体 N_2O 的直接排放,与王占彪等^[10]的系统边界一致。其中,氮、磷、钾肥指只含有该元素的肥料投入类型,复混肥指

同时含有氮、磷、钾多种元素的肥料投入类型。LCA法的核算公式为^[20]:

$$GHG = \sum_{i=1}^n GHG_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (AI_{ij} \times EF_j + GHG_{N_2O}) \quad (1)$$

$$GHG_{N_2O} = F_N \times \delta_N \times \frac{44}{28} \times 298 \quad (2)$$

式中:GHG为棉花生产碳排放总量,GHG_i为*i*省的棉花生产碳排放总量;AI_{ij}为*i*省农业投入品*j*的用量;EF_j为农业投入品*j*的碳排放因子(表1),碳排放因子数据主要来自中国生命周期数据库(CLCD)、Ecoinvent数据库和BP China数据库;GHG_{N₂O}为N肥施用造成农田 N_2O 挥发的直接碳排放量; F_N 为应用于棉花生产的氮肥投入量; δ_N 为氮肥施用的 N_2O 排放系数;44/28为 N_2O 与N的分子量之比;298为 N_2O 在100年尺度上的相对全球增温潜势(GWP)。

1.3 Kaya 恒等式

人工与柴油投入都受机械化程度的影响,灌溉用电与农田 N_2O 挥发等都随种植面积变化而改变。本研究拟从宏观指标入手进行碳排放模型构建,从而研究包括社会经济因素在内的宏观驱动因素对棉花生产碳排放的影响。Kaya恒等式由Yoichi Kaya在1989年IPCC会议上提出^[24],主要用于研究能源的碳效应。为了研究农业碳排放的驱动因素,Li等^[25]将Kaya恒等式改为:

$$C = \frac{C}{YA} \cdot \frac{YA}{IA} \cdot \frac{IA}{Y} \cdot \frac{Y}{P} \cdot P = CI \cdot OE \cdot F \cdot G \cdot P \quad (3)$$

式中: C 代表农业碳排放; YA 表示农业补贴激励; IA 表示补贴强度; Y 为GDP。 $CI=C/YA$,代表农业部门 CO_2 排放强度; $OE=YA/IA$ 代表单位补贴的农业产出; $F=IA/Y$,表示农业补贴与GDP的比值; $G=Y/P$,代表人均GDP; P 为人口效应。该式主要研究了农业补贴对农业碳排放的影响。

本研究根据上述原理,得到包含可能影响棉花生产碳排放潜在驱动因素的Kaya恒等式:

$$C_{棉} = \frac{C_{棉}}{CGDP} \cdot \frac{CGDP}{AGDP} \cdot \frac{AGDP}{P} \cdot P = E \cdot S \cdot A \cdot P \quad (4)$$

式中: $C_{棉}$ 为棉花生产碳排放,kg; $CGDP$ 为棉花总产值; $AGDP$ 为农业总产值。 $E=C/CGDP$,代表技术效应; $S=CGDP/AGDP$,代表结构效应; $A=AGDP/P$,代表经济效应, P 代表人口效应。本式主要侧重减排技术、生产规模和农业经济对棉花生产碳排放的影响。

1.4 STIRPAT模型

碳排放峰值预测基于历史数据对未来排放进行模拟。York等^[26]在IPAT模型和ImPACT模型基础上

表1 棉花生产碳排放系统边界及碳排放因子

Table 1 System boundary of carbon emission and carbon emission factors in cotton production

碳排放系统边界 System boundary of carbon emission			碳排放因子 Index of carbon emission	参数来源 Source
农业投入 Farming input	化肥 Fertilizer	氮肥 N fertilizer	1.526 0 kg·kg ⁻¹	CLCD 0.7 ^[21]
		磷肥 P fertilizer	1.631 0 kg·kg ⁻¹	CLCD 0.7 ^[21]
		钾肥 K fertilizer	0.654 5 kg·kg ⁻¹	CLCD 0.7 ^[21]
		复合肥 Compound fertilizer	1.772 0 kg·kg ⁻¹	CLCD 0.7 ^[21]
	棉花种子 Cottonseeds		0.348 8 kg·kg ⁻¹	Ecoinvent 2.2
	农药 Pesticides		12.443 3 kg·kg ⁻¹	Ecoinvent 2.2
	柴油 Diesel fuel		0.885 6 kg·kg ⁻¹	CLCD 0.7 ^[19]
	地膜 Plastic film		22.720 0 kg·kg ⁻¹	Ecoinvent 2.2
	人工 Labor		0.86 kg·d ⁻¹ ·人 ⁻¹	文献[22]
	电力 Electricity	西北 Northwest China	0.268 5 kg·MJ ⁻¹	CLCD 0.7 ^[21] ;BP China
华北 North China		0.341 4 kg·MJ ⁻¹	CLCD 0.7 ^[21] ;BP China	
南方 South China		0.228 9 kg·MJ ⁻¹	CLCD 0.7 ^[21] ;BP China	
直接排放 Direct emission	柴油燃烧 Diesel fuel burning	4.100 0 kg·kg ⁻¹	IPCC ^[23]	
	农田 N ₂ O The N ₂ O emissions from the field	0.010 kg·kg ⁻¹	IPCC ^[23]	

提出 STIRPAT 模型,这是一种基于指标分解法的模拟,进行预测时从影响碳排放的因素分解入手,再基于分解结果对碳排放趋势进行模拟预测。STIRPAT 模型既能体现各个因素变化对碳排放的影响,也能反映宏观社会“复杂耦合系统”的特征:

$$I_i = aP_i^b A_i^c T_i^d e \quad (5)$$

式中: I 为环境压力(此处认为是碳排放); P 代表总人口; A 表示富裕程度; T 表示技术; a 是模型系数; b 、 c 、 d 则是每个自变量的指数; e 为随机误差项。STIRPAT 模型是一个多变量非线性随机模型,能够反映非线性驱动因素的影响,解决了 IPAT 模型的缺陷,一般使用时通过自然对数变化得到其加法形式方程:

$$\ln I_i = a + b \ln P_i + c \ln A_i + d \ln T_i + e \quad (6)$$

变换后,STIRPAT 模型就成为了一种线性形式,能够清晰地解释环境压力与影响因素之间的联系,通常做法是利用历史数据根据最小二乘原理拟合出模型中各项变量的系数,然后进行未来情景分析设定变量,从而预测未来的碳排放^[2,7-9,27]。

本研究通过 Kaya 恒等式分解因变量,即碳排放的影响因素得到 E 、 S 、 A 、 P 4 个自变量。结合棉花生产实际情况,将总人口 P 改为城镇化率 U ,因为考虑到城镇化率影响农业劳动力转移等,进而会影响农机、化肥、农膜等的使用^[28]。为验证国外棉花生产进口到中国的数量对中国棉花生产碳排放的影响,添加自变量 Q 表示棉花进口量。引入棉花进口量是因为国外棉花进口到中国的数量与国内棉花生产在面对全

球经济现象尤其是经济萧条下的反应趋势相似,且其在一定程度上也体现了国内棉花生产的供需情况^[29]。故最终确定 6 个模型变量(表 2),得到用于棉花生产碳排放模拟的 STIRPAT 函数模型及其对数形式:

$$C = aE^{b_1} S^{b_2} Q^{b_3} A^{b_4} U^{b_5} e \quad (7)$$

$$\ln C = a + b_1 \ln E + b_2 \ln S + b_3 \ln Q + b_4 \ln A + b_5 \ln U + e \quad (8)$$

式中: C 为碳排放,万 t; E 为技术效率,体现低碳减排技术效应; S 为生产规模,体现棉花生产体系与其他作物生产体系整体的结构效应; Q 表示棉花进口量,体现国际效应; A 为农业经济,其值与人均农业产值相同,体现经济效益; U 为城镇化率,体现机械化率; a 为模型参数项; b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 b_5 为变量的指数项; e 为误差项。STIRPAT 模型结合情景分析法即可进行碳达峰预测。

1.5 岭回归分析

对 STIRPAT 模型各自变量之间进行共线性诊断可得自变量间存在相关性,使用最小二乘法分析误差较大,所以本研究使用岭回归。岭回归是一种可用于共线性数据分析的有偏估计回归方法,本质是一种改良的最小二乘估计法,通过放弃最小二乘法的无偏性,以损失部分信息、降低精度为代价从而得到回归系数,分析结果更符合实际情况^[30],可显著提高回归结果的有效性。岭回归中,引入 K 值可以减小自变量共线性影响,但同时会对 R^2 进行惩罚。

1.6 数据处理与分析

统计数据的整理汇总通过 Microsoft Excel 2019

表2 变量设置定义及依据
Table 2 Definitions and references of variables settings

变量 Variable	定义 Definition	文献 Reference
碳排放 Carbon emission	棉花生产碳排放量	文献[24-25]
技术效率 Technical efficiency	碳排放与棉花生产总产值之比	“十四五”规划;文献[24-25]
生产规模 Production scale	棉花生产总产值与农业总产值之比	文献[7-8]
进口数量 Import quantity	每年棉花(皮棉)进口总数量	文献[29]
农业经济 Agriculture economy	农业总产值与总人口之比	文献[7-8]
城镇化率 Urbanization rate	城镇人口占总人口的比率	文献[8,28]

软件实现,使用 Graphpad Prism 8 进行数据可视化,对于 STIRPAT 模型的自变量共线性诊断和岭回归使用 SPSS 25.0 软件分析。碳排放增长率为两年碳排放差值除以前一年的碳排放量,总体率的置信区间采用正态近似法进行估计。

2 结果与讨论

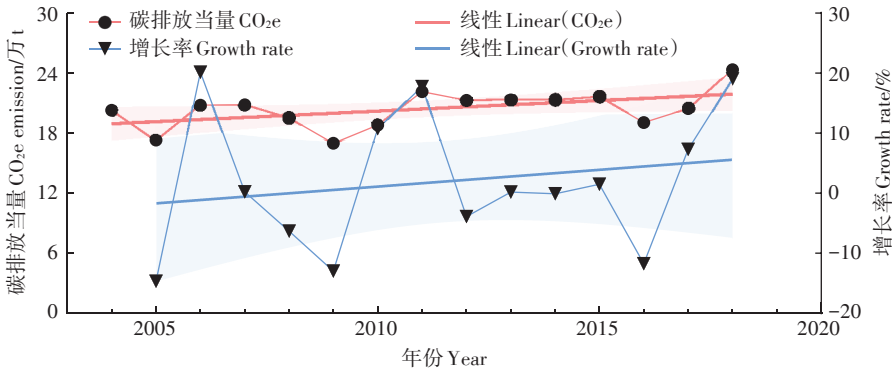
2.1 中国棉花生产碳排放总量

从图1可以看出,2004—2018年全国棉花生产碳排放量年平均值为20.32万t,整体上呈缓慢上升趋势,2018年碳排放量达到15年来的最高值24.34万t。碳排放增长率整体也呈增加趋势,其随年份变化的波动幅度较大。2005、2009、2016年棉花生产碳排放量及其增长率明显低。从图2可以得到,棉花生产的碳排放与种植面积具有极显著的正相关性($R^2=0.8548$, $P<0.001$,斜率为0.06406),即与棉花种植的规模正相关。棉花生产碳排放与种植面积变化的关系能够被非线性二次曲线更好地拟合($R^2=0.9858$),说明种植面积较小时,碳排放增加较为缓慢,在种植面积较大时,碳排放增加的速度更快。这一现象可能是由于在2008年及以前我国棉花生产面积大,生产主体较为

分散,机械化程度低,从而造成了资源浪费,使棉花生产环节碳排放增加。在棉区向新疆转移后,棉花生产面积小,但集约化、规模化的棉花生产增加了生产效率,减少了单位种植面积的碳排放。

2.2 主要植棉省份棉花生产碳排放

2004—2018年三大植棉区各省份中,新疆的碳排放量呈上升趋势,其他省份碳排放量总体上均呈现下降趋势(图3)。2018年江苏(487.16 t)、陕西(330.46 t)、山西(117.37 t)的碳排放量均不足500 t,均为历史最低值,这与近年来棉花种植规模的变化相关。种植规模减小导致农业投入品间接排放减少以及更少的农田 N_2O 排放,进而减少了棉花生产造成的碳排放。大部分省份棉花生产碳排放与种植面积变化随年份变化的趋势线基本重合,新疆的碳排放增长速度高于种植面积的增长速度,意味着单位面积碳排放量增加。2018年新疆棉花种植面积占全国棉花种植总面积的74.0%,其产量占全国棉花总产量的83.8%,而其碳排放量为全国总排放量的86.8%。计算得到新疆地区种植单位面积棉花的产量高于其他地区平均水平,但所导致的碳排放量成倍地大于其他地区的平均水平,可见新疆地区棉花低碳减排生产技



图中的直线与阴影分别表示线性回归及其95%置信区间。下同。
Lines and shading in the figure represent linear regression and its 95% confidence interval, respectively. The same below.

图1 2004—2018年中国棉花生产碳排放及其增长率

Figure 1 CO₂ emission and its growth rate in China's cotton production from 2004 to 2018

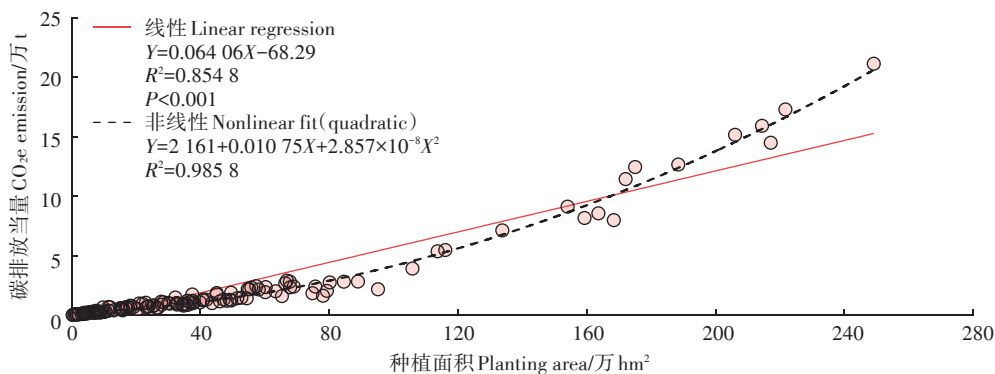


图2 棉花生产碳排放与种植面积的关系

Figure 2 The relationship between CO₂ emissions from cotton production and planting area

术相比高产技术有巨大的发展潜力,应在保证高产的同时,加快绿色可持续发展路径的探索至关重要。

2.3 中国棉花生产碳排放构成因素

如图4所示,中国棉花生产全生命周期的碳排放组成中,肥料生产与施用、灌溉用电和农膜生产过程的排放占比较高。柴油投入以及柴油燃烧导致的碳排放随年份增加而呈显著上升的趋势,因为棉花生产的机械化程度逐年升高,相应地,人工劳动力投入减少使得人工造成的碳排放呈显著下降的趋势。塑料农膜造成的碳排放基本保持在一定水平,而棉花种植面积随年份逐渐缩小,说明随着植棉面积减小,塑料农膜投入量并没有减小,单位种植面积的塑料农膜投入为增加趋势。灌溉用电的碳排放呈显著上升的趋势,从2009年开始灌溉用电成为最大碳源,在2018年其造成的碳排放量达到8.29万t,占全年全国棉花生产碳排放总量的34.1%,并仍有上升趋势,反映出我国棉花生产的灌溉规模增大,但效率和水利用率低。化肥生产与施用造成的碳排放中(图5),农田N₂O排放是第一大排放源(占比大于50.0%)。其次是复合肥施用,其造成的碳排放呈增加趋势。氮肥施用是造成农田N₂O排放的主要原因,减少氮肥投入同时降低了氮肥自身以及农田N₂O的碳排放当量。磷肥、钾肥导致的碳排放极小且有下降趋势。农药投入造成的碳排放有较大不确定性,种子投入造成的碳排放极小且趋于平稳。

2.4 STIRPAT模型

在岭迹图中各变量系数趋于平稳时选择的K值越小越好。通过观察该模型岭迹图,选择K=0.02后进行ANOVA检验(表3),发现模型通过检验($F=11.662, P=0.001$),说明 $\ln E, \ln S, \ln Q, \ln A, \ln U$ 中至少一项会对 $\ln C$ 产生影响,结论为该模型有意义,该

K值下模型误差为0.045。根据选定K值下模型的岭回归分析结果(表4),原模型 $R^2=0.866$,调整后 $R^2=0.792$,对于各自变量均有 $P<0.05$,即均通过显著性检验,且自变量系数为正,可知 $\ln E, \ln S, \ln Q, \ln A, \ln U$ 均会对 $\ln C$ 产生显著的正向影响。根据该K值下自变量非标准化系数可得STIRPAT模型自然对数形式为:

$$\ln C = 0.496 \ln E + 0.323 \ln S + 0.110 \ln Q + 0.190 \ln A + 0.949 \ln U - 6.910 \quad (9)$$

棉花生产碳排放受国家宏观因素影响大,通过表4中各变量标准化系数可见,生产规模的影响最大,之后分别为城镇化率和技术效率。生产规模为近年来棉花种植产出与其他作物之比,体现中国农业部门中棉花作物种植规模的大小,种植规模的减小意味着种植面积缩小,这将直接导致农田N₂O排放减少,同时间接影响柴油和化肥等的投入,从而减少农业碳排放。技术效率对碳排放的影响贯穿于各个碳源,棉花亏缺灌溉在减少水资源浪费的同时可降低灌溉用电导致的碳排放量,可降解地膜与地膜回收技术研发与推广可减少农田白色污染和塑料农膜导致的碳排放^[13],其他低碳种植技术还有精准灌溉、精准施肥和施用绿肥等。城镇化率的提升则加快推进了农业机械化率的提高,导致灌溉用电、总柴油燃烧等的碳排

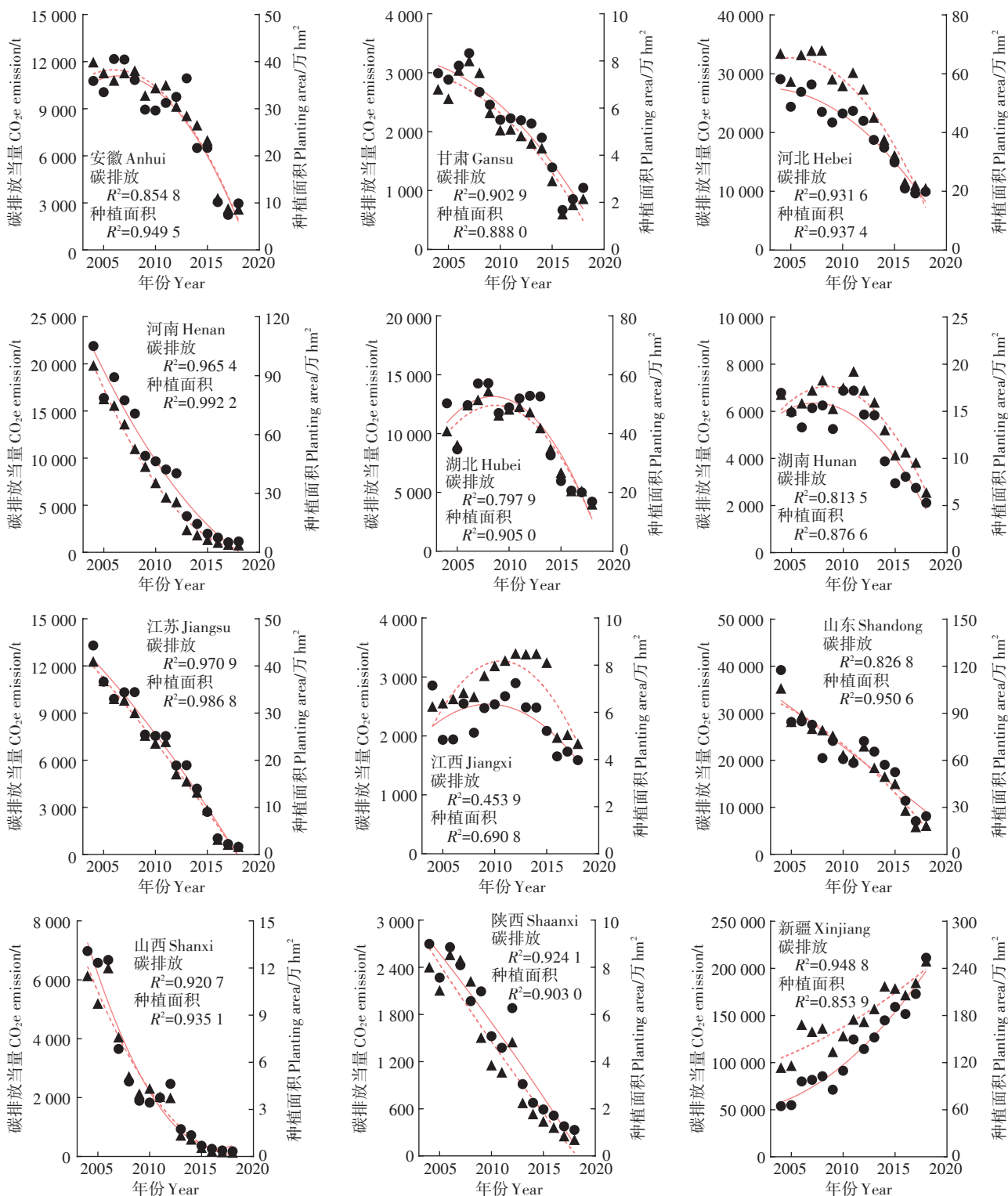
表3 模型ANOVA检验

Table 3 ANOVA test of model

	离均差 平方和SS	自由度df	均方MS	F	P
回归 Regress	0.119	5.000	0.024		
残差 Residual	0.018	9.000	0.002	11.662	0.001**
总体 Total	0.138	14.000			

注:**代表 $P<0.01$ 。下同。

Note:** represents $P<0.01$. The same below.



实线和虚线分别代表碳排放和种植面积的变化趋势。

The solid and dotted lines in the figure represent the trends of carbon emissions and planting area, respectively.

图3 2004—2018年主要植棉省份棉花生产碳排放与种植面积变化

Figure 3 Changes of carbon emission and planting area of cotton production in major cotton planting provinces from 2004 to 2018

放量增加^[28]。2004—2018年中国棉花生产碳排放的STIRPAT模型模拟情况和真实情况的对比见图6,模

拟结果基本符合真实情况。

根据STIRPAT模型,2005年碳排放大幅降低的

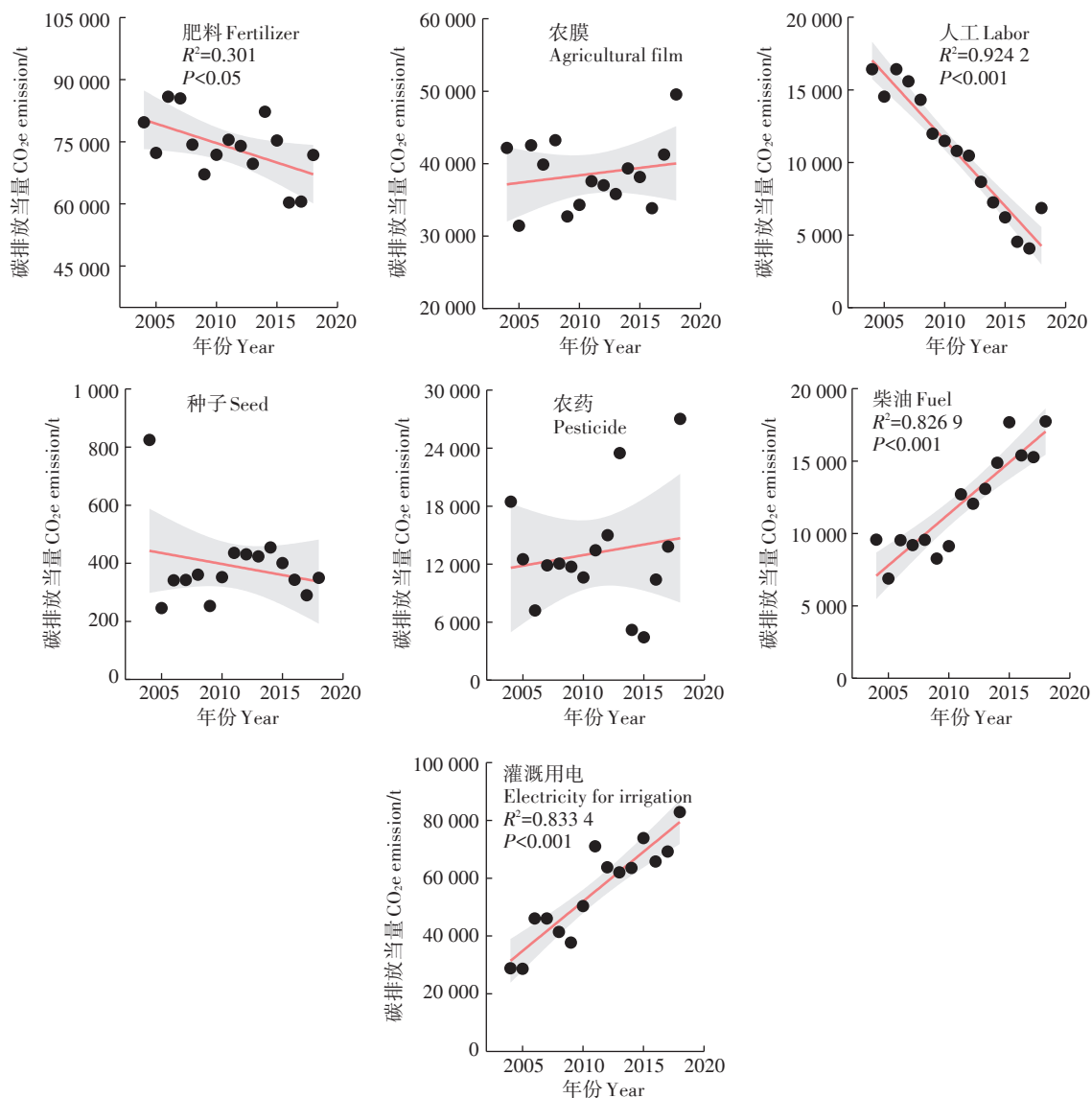


图4 2004—2018年中国棉花生产碳排放构成要素

Figure 4 Components of carbon emission from cotton production in China from 2004 to 2018

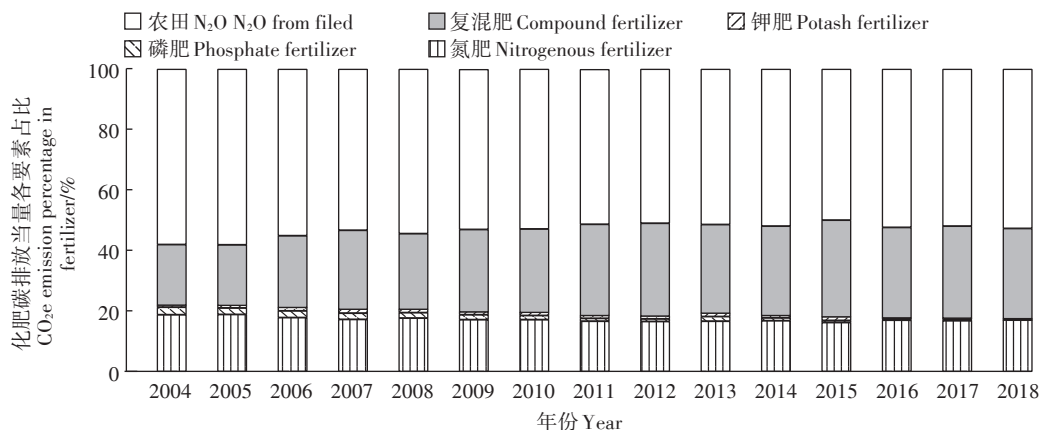


图5 2004—2018年中国棉花生产中肥料导致的碳排放构成

Figure 5 Composition of carbon emission from fertilizers in China's cotton production from 2004 to 2018

表4 岭回归分析结果(因变量为ln C,K=0.02)

Table 4 Results of Ridge regression analysis(The dependent variable is ln C,K=0.02)

项目 Item	非标准化系数 Unstandardized coefficient		标准化系数 Standardized coefficient	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>R</i> ²	adjusted <i>R</i> ²	<i>F</i>
	B	SE(B)	Beta					
常数 Constant	-6.91	1.484	—	-4.658	0.001**			
ln <i>E</i>	0.496	0.083	1.076	5.969	<0.001**			
ln <i>S</i>	0.323	0.078	1.409	4.146	0.003**	0.866	0.792	F(5,9)=11.662, P=0.001**
ln <i>Q</i>	0.110	0.032	0.542	3.459	0.007**			
ln <i>A</i>	0.190	0.055	0.770	3.477	0.007**			
ln <i>U</i>	0.949	0.256	1.101	3.710	0.005**			

主要原因是*E*减小,即加入WTO后中国棉花生产发展方式发生重要转变^[29],从分散棉区种植向集中化、规模化棉区种植转变,加快了技术的推广与应用。2009年导致棉花生产碳排放降低的直接原因是种植面积的大幅下降,潜在原因可能是2008年全球金融危机造成的国际影响,棉花生产和消费环境的剧烈动荡使得棉农们在次年植棉的意愿下降,从而使得2009年棉花生产面积大幅下降。棉花进口数量和棉花生产规模在国际金融形势较为稳定的情况下呈一定的互补关系,但在面临金融危机时会呈现出相似的大幅下降趋势,所以2009年的国际影响也体现在*Q*的大幅减小,表现出国际经济危机下我国棉花消费需求下降、市场疲软等现象。2016年受国家政策影响棉花进口规模收紧,进口量大幅下降,国内棉花种植面积和产量均下降,碳排放量也大幅减少。

2.5 中国棉花生产碳排放情景分析

模型中各自变量的系数均为正数,可见其对于碳排放均有显著的正向影响,然而本研究技术效率与实际技术效率定义不同,实际技术效率越高,本研究技术效率值则越低,部门节能减排技术发展程度越发达,该变量越小,其数值计算结果与单位产值碳足迹相同。参考袁晓玲等^[2]对工业部门碳排放未来情景的设定,本研究设定2004—2018年全国棉花生产碳排放情况以已发生为准,2019—2035年的全国棉花生产碳排放情况分为3种情景:

(1)中等减排度情景(Medium emission reduction scenario, MERS)

2018年以后考虑国家“十四五”规划中对于节能减排工作的部署。总体产能得到抑制,落后产能得到淘汰,可持续性有所提高,棉花低碳生产^[31]受政策引导有了一定程度提高,低碳种植技术及土壤固碳技术研发推广速度中等,在2030年能够实现全国75.0%

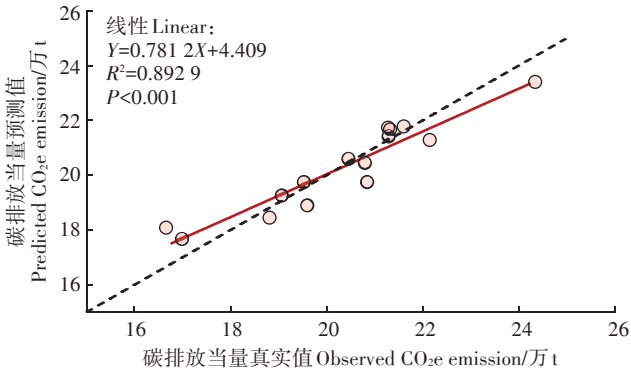


图6 碳排放预测模型分析

Figure 6 Carbon emission forecast model analysis

棉花生产面积上系列技术路径^[16-17](减排率为43.6%~76.1%,本研究按该技术较易实现的减排率范围44.0%~46.7%计算)的推广,到2030年达到平均35.0%左右(46.7%×75.0%=35.0%)的技术减排效率,减排效率为中位值;棉花种植面积在333.3万hm²左右浮动^[32],棉花生产规模及产值占农业部门的比例浮动逐渐变小;国内优质棉花产量增加,进口量在政府和市场的调控下逐渐稳定;农业经济即人均农业产值根据历史数据变化规律,按照“十四五”规划目标及相关研究确定;城镇化率参照城镇化预测相关参考文献(详见2.6.1变量涨跌幅设定)。

(2)高减排度情景(High emission reduction scenario, HERS)

2018年以后全民节能减排意识得到提高。棉花低碳生产加快发展,落后栽培技术加速淘汰,棉花低碳种植技术能够实现突破和高速发展,减排效率能够达到高位值,作物与土壤的固碳技术得到应用,到2030年能够在全国近100.0%的棉花种植面积实现系列技术路径的全面推广,达到最低46.0%左右(46.0%×100.0%=46.0%)的技术减排效率;棉花种植

面积基本稳定在333.3万 hm^2 ,种植规模及产值占农业部门的比例基本稳定;棉花进口量、农业经济、城镇化率同MERS。

(3) 基准情景(Basic scenario, BS)

在2018年基础上进行趋势外推,无节能减排政策出台,棉花需求量随经济增长而增加。落后产能淘汰缓慢,可持续性提高缓慢,棉花低碳生产技术研发与推广缓慢,低碳种植技术与国际先进水平存在一定差距,推广普及率增长缓慢,到2030年全国只有50.0%种植面积的棉花生产能够实现低碳生产的技术路径,到2030年全国平均技术减排效率达到22.0%左右($44.0\% \times 50.0\% = 22.0\%$),减排效率为低位值,棉花生产缺乏节能减排动力;棉花种植规模及产值占农业部门的比例在市场需求下有所增加;棉花进口量、农业经济、城镇化率同MERS。

2.6 中国棉花生产碳排放达峰预测

2.6.1 变量涨跌幅设定

(1) 技术效率

根据熊晶^[33]对我国农业减排技术发明专利的相关研究,低碳种植技术最高可实现温室气体综合减排达到8%以上,能够在实现增产的同时,减少农业投入和温室气体排放。结合棉花低碳生产具体技术途径相关文献^[16-17],设定基准情景每年棉花低碳生产技术的进步促使变量技术效率每年跌幅为低位值2.0%(2030年累积达到21.5%),中等减排度情景每年跌幅为中位值3.5%(2030年累积达到34.8%),高减排度情景每年跌幅为高位值5.0%(2030年累积达到46.0%)。

(2) 生产规模

2002年我国落实耕地保护政策,至2017年平均每年耕地面积减少31.02 hm^2 ,粮食作物播种面积与经济作物播种面积比逐渐稳定在71:29^[34]。2020年农业农村部《2020年种植业工作要点》提出力争棉花种植面积稳定在333.3万 hm^2 ,另经国务院批准,2020年起完善棉花目标价格政策。粮食作物与经济作物的种植面积受多种因素影响,变化在短期内具有一定的稳定性,故本研究设定每年的变量生产规模为其之前5年的平均值。

(3) 进口数量

棉花进口数量的变化与棉花种植面积在一定程度上是此起彼伏的关系,国内优质棉花产量增加则进口需求减小,反之则进口数量增加,从而保证我国的优质棉花能够达到较为稳定的供给水平。根据秦中春等^[29]的研究,加入WTO以来中国棉花进口数量急速增长,棉花进口量主要受到国内外差价和国家政策

等影响。包利民等^[35]认为未来中国棉花生产和消费区域将稳定,棉花进口将相对稳定地保持在低位,且中美经贸摩擦对棉花进口几乎无影响。曾诗淇^[36]通过解读《中国农业展望报告(2021—2030)》认为2021—2030年棉花进口将呈下降趋势。基于我国供给侧结构性改革政策的实施,以及国内外棉花价格变化,仇半农^[37]预测棉花进口量在2025年为210万t,2025年以后基本保持稳定。棉花进口规模受国内外综合因素的影响大,变化具有较大不确定性。

(4) 农业经济

根据历史数据^[12],人均农业产值随时间推移呈线性趋势,年均增长约为每人214.9元,设定变量农业经济变化符合此趋势,结合国家“十四五”规划和2035年远景目标建议对得出的变量数值进行比较验证。

(5) 城镇化率

龚大永^[28]构建了我国农村劳动力转移与农业机械等农业生产方式的关系计量模型,发现户籍城镇化对农业机械的当期和滞后使用都有负向影响,同时对农业机械化水平也有负向影响。根据欧阳慧等^[38]关于城镇化率的预测研究,到2025年中国城镇化率将达到67.5%,整体呈现稳中趋缓态势,年均增速将保持在0.71个百分点,再结合世界城镇化发达国家相关数据,得到城镇化率在65.0%~70.0%区间时,其年均增幅会平均下降0.19个百分点。

2.6.2 碳排放达峰预测

根据情景分析,2018—2035年碳排放影响因素中生产规模和进口数量在政策和市场下将逐渐趋于平稳,农业经济和城镇化率随着中国经济发展缓慢上升后趋于平稳,技术效率自变量变化率为-2.0%~-5.0%,则3种情景下的模型模拟结果见图7。高减排度情景、中等减排度情景和基准情景下碳排放都呈先上升后下降的趋势,高减排度情景下碳排放峰值处于低位,达到峰值后快速下降;中等减排度情景下,碳排放峰值处于中位,达峰后缓慢下降;基准情景下碳排放峰值处于高位,达峰后基本保持平稳,有反弹的可能性。对全国棉花生产3种情景下碳排放达峰时间和峰值进行对比,可得高减排度情景和中等减排度情景的减排潜力和达峰提前时间(表5)。本研究碳排放核算结果与Li等^[25]的研究结果基本相符。结果表明,如果不能及时提高全民节能减排意识并加快研发推广低碳洁净生产技术,自然资源的大量浪费以及生产过程碳排放将迅速增加,进而导致棉花生产体系碳排放达峰时间推迟,碳排放峰值增大。

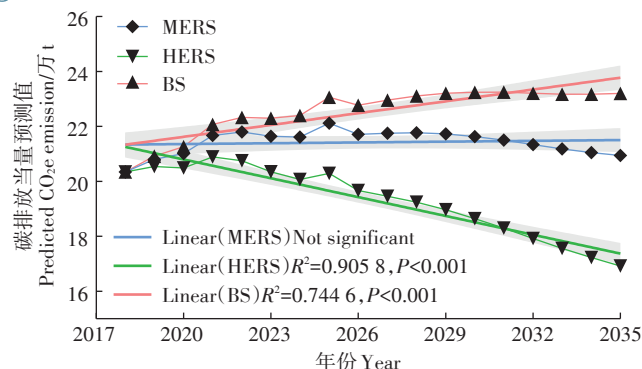


图7 2018—2035年中国棉花生产碳排放预测

Figure 7 Carbon emission forecast of China's cotton production from 2018 to 2035

表5 碳达峰预测结果总结

Table 5 Summary of results of carbon emission peak forecast

情景 Scenario	峰值 Peak/ 万 t	达峰时间 Peak time	减排潜力 Emission reduction potential/万 t	提前达峰 Early peak time/a
中等减排度情景 MERS	26.12	2025年	-1.13	-6
高减排度情景 HERS	24.89	2021年	-2.36	-10
基准情景BS	27.25	2031年	—	—

注：“—”：减排/提前达峰。

Note: “—”: emission reduction potential/early peak time.

3 结论与建议

3.1 结论

(1) 2004—2018年中国棉花生产生命周期碳排放量及其增长率呈缓慢上升趋势, 2018年碳排放达到15年来的最高值(24.34万t)。棉花生产的碳排放量与种植面积具有极显著的正相关性。中国棉花主产区中, 新疆的碳排放量最大, 2018年占比达到86.8%, 并有持续增加的趋势, 其他各省份均为减少趋势。

(2) 棉花生产过程中灌溉用电、肥料和农膜造成的碳排放是最主要的。灌溉用电和柴油造成的碳排放随年份有显著的线性增加趋势, 肥料和人工的碳排放则呈显著下降的趋势。肥料投入导致碳排放量最大的是农田 N_2O 排放, 其次是复混肥生产。

(3) 基于STIRPAT模型的棉花生产碳排放模型模拟性能良好($R^2=0.866$, adjusted $R^2=0.792$, $P=0.001$), 各自变量对因变量的影响均达到显著水平。模型标准化系数表明, 生产规模是对碳排放影响最大的宏观因素, 之后分别是城镇化率和技术效率。

(4) 本研究认为中国棉花生产体系碳达峰情况较为乐观。从2019—2035年中国棉花生产碳排放趋势来看, 高减排度情景下, 棉花生产体系可于2021年实现碳达峰, 中等减排度情景下则在2025年能实现碳排放达峰, 基准情景相较于高减排度情景将延迟10年至2031年才能碳达峰, 并可能导致碳排放峰值增加2.36万t。

3.2 建议

(1) 中国棉花生产应在向着集约化和规模化方向发展的同时实现低碳生产。随着农业现代化的高速推进, 国内棉花生产向着高质量发展, 棉花的种植规模逐渐下降, 一定程度上有利于碳排放的减少。近年来, 农业农村部已提出逐渐稳定棉花种植面积的目标, 且我国棉花产区逐渐向新疆转移。我国棉花生产需正确遵循相关政策的部署和引导, 注重生产过程中生产效率的提升、资源浪费的减少, 在达到生产目标的同时实现低碳发展。

(2) 棉花生产体系需重视低碳种植技术和土壤固碳技术的研发和推广, 力争2030年前在全国范围内实现棉花低碳生产的全面普及。棉花低碳生产还需加快推进的主要议题和方向为精准灌溉、精准施肥、提高水分利用率、提高肥料利用效率、使用可降解与可回收的农用塑料薄膜、采取可减少农田温室气体排放的耕作与种植技术, 以及发掘作物与土壤的固碳潜力等。

(3) 在当前全球新冠肺炎疫情冲击风险和国际不确定风险加剧的情形下, 伴随国家宏观调控政策的制定和实施, 棉花生产碳排放仍有较大变数。棉花生产体系需在既定减排路径上加快低碳发展模式的探索, 充分落实创新驱动发展战略, 推动棉花生产体系转型, 通过技术创新发挥减排效应。国家也宜加大对棉花低碳生产管理技术的政策鼓励 and 资金支持, 为早日实现“双碳”目标注入源源不断的动力。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
- [2] 袁晓玲, 郝继宏, 李朝鹏, 等. 中国工业部门碳排放峰值预测及减排潜力研究[J]. 统计与信息论坛, 2020, 35(9): 72-82. YUAN X L, XI J H, LI Z P, et al. A study on carbon emission peak forecast and emission reduction potential of China's industrial sector[J]. *Statistics & Information Forum*, 2020, 35(9): 72-82.

- [3] DUAN H Y, ZHANG S P, DUAN S Y, et al. Carbon emissions peak prediction and the reduction pathway in buildings during operation in Jilin Province based on LEAP[J]. *Sustainability*, 2019, 11:4540.
- [4] HUANG X Q, XU X C, WANG Q Q, et al. Assessment of agricultural carbon emissions and their spatiotemporal changes in China, 1997—2016[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16:3105.
- [5] XIONG C H, YANG D G, XIA F Q, et al. Changes in agricultural carbon emissions and factors that influence agricultural carbon emissions based on different stages in Xinjiang, China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:36912.
- [6] XIONG C H, YANG D G, HUO J W. Spatial-temporal characteristics and LMDI-based impact factor decomposition of agricultural carbon emissions in Hotan Prefecture, China[J]. *Sustainability*, 2016, 8(3):262.
- [7] CUI H R, ZHAO T, SHI H J. STIRPAT-based driving factor decomposition analysis of agricultural carbon emissions in Hebei, China[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 27(4):1449-1461.
- [8] XIONG C H, CHEN S, XU L T. Driving factors analysis of agricultural carbon emissions based on extended STIRPAT model of Jiangsu Province, China[J]. *Growth and Change*, 2020, 51:1401-1416.
- [9] XUE Q, JUN Y, ZHU G Y. Effects of straw's comprehensive utilization-technology on agricultural carbon emission in Jiangsu Province[J]. *E3S Web of Conferences*, 2021, 267(5):1014.
- [10] 王占彪, 王猛, 陈阜. 华北平原作物生产碳足迹分析[J]. 中国农业科学, 2015, 48(1):83-92. WANG Z B, WANG M, CHEN F. Carbon footprint analysis of crop production in North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(1):83-92.
- [11] XUE J F, PU C, LIU S L, et al. Carbon and nitrogen footprint of double rice production in southern China[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 64:249-257.
- [12] 国家统计局. 中国统计年鉴 2020[M]. 北京:中国统计出版社, 2020. National Bureau of Statistic of China. China statistical yearbook, 2020[M]. Beijing:China Statistics Press, 2020.
- [13] 祁虹, 赵贵元, 王燕, 等. 我国棉田残膜污染危害与治理措施研究进展[J]. 棉花学报, 2021, 33(2):169-179. QI H, ZHAO G Y, WANG Y, et al. Research progress on pollution hazards and prevention measures of residual film in cotton field in China[J]. *Cotton Science*, 2021, 33(2):169-179.
- [14] 玛衣拉·吐尔逊, 甫祺娜依·尤力瓦斯, 阿西亚·托乎提. 农户过量施用化肥行为的影响因素分析:以新疆棉花种植户为例[J]. 棉花学报, 2016, 28(6):619-627. TUERXUN M, YOULIWASI F, TUOHUTI A. Impact factors of excessive household fertilization: A case study of cotton growing in Xinjiang, China[J]. *Cotton Science*, 2016, 28(6):619-627.
- [15] 李倩娜, 姚娟, 唐洪松, 等. 新疆棉花低碳生产率、区域差异与动态演进[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(7):1-8. LI Q N, YAO J, TANG H S, et al. Low carbon productivity, regional differences and dynamic evolution of cotton in Xinjiang[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(7):1-8.
- [16] SUN G L, ZHANG Z G, XIONG S W, et al. Mitigating greenhouse gas emissions and ammonia volatilization from cotton fields by integrating cover crops with reduced use of nitrogen fertilizer[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2022, 332:107946.
- [17] WANG Z B, ZHAI L C, XIONG S W, et al. February orchid cover crop improves sustainability of cotton production systems in the Yellow River basin[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2021, 41:67.
- [18] 中国农业科学院棉花研究所. 中国棉花栽培学[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2019. Institute of Cotton Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences. China cotton cultivation[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2019.
- [19] CHENG K, PAN G X, SMITH P, et al. Carbon footprint of China's crop production: An estimation using agro-statistics data over 1993—2007[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3):231-237.
- [20] 耿川雄, 任家兵, 马心灵, 等. 基于LCA的不同间作体系产量优势及温室效应研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2):159-167. GENG C X, REN J B, MA X L, et al. Yield improvement and greenhouse effect of different intercropping systems based on life cycle assessment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(2):159-167.
- [21] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. 环境科学学报, 2010, 30(10):2136-2144. LIU X L, WANG H T, CHEN J, et al. Method and basic model for development of Chinese reference life cycle database of fundamental industries[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(10):2136-2144.
- [22] 刘翼浩, 徐文修, 李增嘉, 等. 作物生产碳足迹法:误区、改进与应用:兼析中国集约农作碳效率[J]. 中国农业资源与区划, 2013, 34(6):1-11. LIU X H, XU W X, LI Z J, et al. The missteps, improvement and application of carbon footprint methodology in farmland ecosystems with the case study of analyzing the carbon efficiency of China's intensive farming[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2013, 34(6):1-11.
- [23] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the national greenhouse gas inventories programme[M]. Tokyo, Japan:IGES, 2006.
- [24] KAYA Y. Impact of carbon dioxide emission on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios[C]. Paris: Presentation to the Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, IPCC. 1990.
- [25] LI W, OU Q X, CHEN Y L. Decomposition of China's CO₂ emissions from agriculture utilizing an improved Kaya identity[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2014, 21(22):13000-13006.
- [26] YORK R, ROSA E A, DIETZ T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. *Ecological Economics*, 2003, 46(3):351-365.
- [27] LI L, LEI Y L, HE C Y, et al. Prediction on the peak of the CO₂ emissions in China using the STIRPAT model[J]. *Advances in Meteorology*, 2016:1-9.
- [28] 龚大永. 农村劳动力转移对农户农业生产方式的影响研究[D]. 南宁:广西大学, 2020. GONG D Y. Study on the impact of rural labor

- transfer on the agricultural production mode of farmers[D]. Nanning: Guangxi University, 2020.
- [29] 秦中春, 宁夏. 加入WTO以来中国棉花产业的发展态势与政策优化[J]. 改革, 2020(9): 104–117. QIN Z C, NING X. The development trend and policy optimization of China's cotton industry since China's accession into WTO[J]. *Reform*, 2020(9): 104–117.
- [30] 杨楠. 岭回归分析在解决多重共线性问题中的独特作用[J]. 统计与决策, 2004(3): 14–15. YANG N. The unique role of ridge regression analysis in solving multicollinearity problems[J]. *Statistics & Decision*, 2004(3): 14–15.
- [31] 毛树春, 李亚兵, 王占彪, 等. 改革开放40年中国棉花产业回顾与展望[J]. 农业展望, 2019, 15(1): 42–49. MAO S C, LI Y B, WANG Z B, et al. Review and outlook of China's cotton industry in the past 40 years of reform and opening up[J]. *Agricultural Overlook*, 2019, 15(1): 42–49.
- [32] 中国棉花杂志社. 2020年棉花产业大事记[J]. 中国棉花, 2021, 48(1): 9. China Cotton Press. Memorabilia of the cotton industry in 2020[J]. *China Cotton*, 2021, 48(1): 9.
- [33] 熊晶. 农业温室气体监测与减排技术专利分析[J]. 新农业, 2020(15): 67–69. XIONG J. Analysis of agricultural greenhouse gas monitoring and emission reduction technology patent[J]. *Xin Nongye*, 2020(15): 67–69.
- [34] 向栋良, 陈美招, 郑雪, 等. 基于供需平衡的2050年中国粮食安全研究[J]. 农业科学, 2020, 10(8): 590–601. XIANG D L, CHEN M Z, ZHENG X, et al. Research on China's food security in 2050 based on balance of supply and demand[J]. *Hans Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 10(8): 590–601.
- [35] 包利民, 吕向东, 孙玥. 近年来中国棉花贸易形势分析及展望[J]. 农业展望, 2019, 15(2): 88–91. BAO L M, LÜ X D, SUN Y. Analysis and prospect of China's cotton trade situation in recent years[J]. *Agricultural Overlook*, 2019, 15(2): 88–91.
- [36] 曾诗淇. 解析《中国农业展望报告(2021—2030)》[J]. 农产品市场周刊, 2021(9): 6–10. ZENG S Q. Analysis of “China Agriculture Outlook Report(2021—2030)”[J]. *Agricultural Products Market*, 2021(9): 6–10.
- [37] 仇半农. 从中国农业展望大会预测棉花采摘机未来走势[J]. 农机科技推广, 2019(5): 26–29. QIU B N. Forecast the future trend of cotton pickers from the China agriculture outlook conference[J]. *Agriculture Machinery Technology Extension*, 2019(5): 26–29.
- [38] 欧阳慧, 李智, 李沛霖. “十四五”时期我国城镇化率变化趋势及政策含义[J]. 城市发展研究, 2021, 28(6): 1–9. OUYANG H, LI Z, LI P L. Trend and policy implication of urbanization rate in China during “the 14th Five Year Plan” period[J]. *Urban Development Studies*, 2021, 28(6): 1–9.

(责任编辑: 朱晓昱)