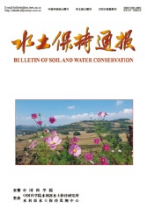

水土保持通报
Bulletin of Soil and Water Conservation
ISSN 1000-288X,CN 61-1094/X

《水土保持通报》网络首发论文

题目：2000—2021 年青海省农牧业碳排放驱动因素及脱钩效应
作者：郭玮，胡西武，丁芬菱
DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20240607.001
收稿日期：2023-09-28
网络首发日期：2024-06-12
引用格式：郭玮，胡西武，丁芬菱．2000—2021 年青海省农牧业碳排放驱动因素及脱钩效应[J/OL]．水土保持通报. https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20240607.001

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20240607.001　网络首发时间：2024-06-12 10:42:25
网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/61.1094.x.20240607.1641.002

2000—2021 年青海省农牧业碳排放驱动因素及脱钩效应

郭 玮[1]，胡西武[1,2]，丁芬菱[3]

（1.青海民族大学 经济与管理学院，青海 西宁 810007；
2.天津大学—青海民族大学 双碳研究院，青海 西宁 810007；3.青海民族大学 研究生院，青海 西宁 810007）

摘　要：［目的］明确青海省农牧业碳排放特征及驱动因素，为青海省科学有序推进农牧业绿色低碳发展提供理论与数据支撑。［方法］从农用物资消耗、畜禽养殖和作物生长 3 个方面测算青海省 2000—2021 年农牧业碳排放，在此基础上运用对数平均迪氏指数（LMDI）和 Tapio 脱钩模型探讨农牧业碳排放的驱动因素及脱钩状态，并预测 2022—2035 年农牧业碳排放的未来趋势。［结果］①2000—2021 年，青海省农牧业碳排放呈波动上升趋势，年均增长率为 1.61%，畜禽养殖过程中的肠道发酵和粪便管理是青海省农牧业碳排放的主要来源，年均占比 94.94%。②农业经济发展水平效应和农业结构效应促进青海省农牧业碳排放的增加，年均贡献率为 39.40%和 16.53%；农业生产技术效应和农业劳动力规模效应抑制青海省农牧业碳排放的增加，年均贡献率为－37.45%和－6.63%。③整体来看，青海省农牧业碳排放与农牧业经济增长的脱钩状态为弱脱钩，农业生产技术和农业劳动力规模对青海省农牧业碳排放为弱脱钩努力，农业结构无脱钩努力。④2022—2035 年青海省农牧业碳排放量将呈增长趋势，年均增长率为 1.23%，较 2000—2021 年下降 0.38%。［结论］青海省应增强农田土壤固碳能力，降低畜禽产品肠道甲烷排放强度，强化农牧业减排固碳科技引领，培养农牧业高素质人才，实现农牧业低碳发展。

关键词：农牧业碳排放；农牧业碳效应；驱动因素；脱钩效应；灰色预测

文献标识码：A　**文章编号：**1000-288X(2024)03-0000-00　**中图分类号：**F323，X71

文献参数：郭玮，胡西武，丁芬菱.2000—2021 年青海省农牧业碳排放驱动因素及脱钩效应[J].水土保持通报，2024，44(3)：-. Guo Wei，Hu Xiwu，Ding Fenling. Driving factors and decoupling effects of carbon emissions from agriculture and Animal Husbandry in Qinghai Province during 2000—2021 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2024，44(3)：-.

Driving Factors and Decoupling Effects of Carbon Emissions from Agriculture and Animal Husbandry in Qinghai Province During 2000—2021

Guo Wei[1]，Hu Xiwu[1,2]，Ding Fenling[3]

（1.*College of Economics and Management*，*Qinghai Minzu University*，*Xining*，*Qinghai* 810007，*China*；2.*Institute for Carbon Peaking and Carbon Neutrality*，*Tianjin University-Qinghai Minzu University*，*Xining*，*Qinghai* 810007，*China*；3.*Graduate School*，*Qinghai Minzu University*，*Xining*，*Qinghai* 810007，*China*）

Abstract：［Objective］The carbon emission characteristics and driving factors of agriculture and animal husbandry in Qinghai Province were analyzed in order to provide theoretical and empirical evidence to the Qinghai government on how to promote the scientific and orderly development of green and low-carbon development of agriculture and animal husbandry.［Methods］Carbon emissions from agriculture and animal husbandry in Qinghai Province during 2000—2021 were calculated from consumption of agricultural materials，livestock and poultry breeding，and crop growth. The methods of log-mean Dietrich index (LMDI) and Tapio decoupling models were used to examine the driving factors and decoupling state of carbon emissions from agriculture and animal husbandry，and the future development tendency from 2022 to 2035 was predicted.［Results］① Carbon emissions from agriculture and animal husbandry in Qinghai Province showed a fluctuating upward trend during 2000—2021，with an average annual growth rate of

收稿日期：2023-09-28　**修回日期：**2023-12-13
资助项目：国家自然科学基金项目“聚落景观基因重构、空间剥夺及其对生态移民返迁行为的作用机理研究：以三江源地区为例”（42061033）；2023 年度青海省“揭榜挂帅”重大社科项目（JB2301）；青海省省级哲学社会科学重点项目（22ZD001）
第一作者：郭玮（1997—），男（汉族），山西省怀仁市人，硕士研究生，研究方向为青藏高原生态经济与资源开发。Email：1261072894@qq.com。
通信作者：胡西武（1973—），男（汉族），湖北省荆州市人，博士，教授，主要从事生态经济学与气候变化经济学研究。Email：huxiwu1973@163.com。

1.61%. Intestinal fermentation and manure management during livestock and poultry breeding were the main sources of carbon emissions, accounting for 94.94% of total emissions per year. ② The effect of the level of agricultural economic development and agricultural structure could increase the amount carbon emissions, with annual contribution rates of 39.40% and 16.53%. The effects of agricultural production technology and agricultural labor force could inhibit carbon emissions, with annual contribution rates of −37.45% and −6.63%. ③ On the whole, the decoupling state between carbon emissions and economic growth of agricultural and animal husbandry in Qinghai Province was characterized as weak decoupling. Agricultural production technology and agricultural labor force scale had weak decoupling effects, while agricultural structure had no decoupling effects. ④ From 2022 to 2035, the carbon emissions from agriculture and animal husbandry will show an increasing trend, with an average annual growth rate of 1.23%, and 0.38% lower than observed from 2000 to 2021. [Conclusion] Qinghai Province should increase carbon sequestration capacity of farmland soil, reduce the intensity of intestinal methane emissions from livestock and poultry products, strengthen the leadership of carbon reduction and fixation technology in agriculture and animal husbandry, and cultivate high-quality talents in agriculture and animal husbandry in order to achieve low-carbon development in agriculture and animal husbandry.

Keywords: carbon emissions from agriculture and animal husbandry; carbon effect of agriculture and animal husbandry; driving factors; decoupling effect; grey prediction

农业生产过程中二氧化碳、甲烷和氧化亚氮等温室气体排放引发的一系列气候变化问题使得农业生产环境条件发生改变,深刻影响着人类的生存和发展。中国作为农业大国,农业碳排放量处于增长状态,是仅次于工业的第二大碳排放源。农业是生态系统的重要组成部分,生产过程中包含碳源和碳汇,发挥农业减排固碳潜力意义重大。2021 年 3 月,习近平总书记在参加十三届全国人大四次会议青海代表团审议时作出“打造绿色有机农畜产品输出地”的重要指示,为青海省农牧业高质量发展指明了方向。2022 年 10 月,党的二十大指出“推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现高质量发展的关键环节”。因此,加快转变农牧业发展方式,促进生态保护与农牧业发展有机融合,实现绿色低碳的农牧业现代化是青海省打造绿色有机农畜产品输出地的重要使命和科学有序推进“双碳”目标的关键举措。目前青海省工业碳排放量占碳排放总量的 74.72%,是碳排放最多的行业部门[1],但农业碳排放也不容忽视。

学者们围绕农牧业碳排放开展了大量研究,主要研究内容包括农牧业碳排放测算、影响因素及未来趋势预测等方面。在碳排放测算上,多采用 IPCC 排放系数法对农用物资消耗、秸秆焚烧、农业生产土壤排放、水稻生长、畜禽肠道发酵和粪便管理 5 个方面测算[2],在全国[3]、省域[4]、市域[5]、县域[6]等尺度范围内进行时空演化分析;在影响因素上,利用广义迪氏指数分解(GMDI)[7]、对数平均迪氏指数分解(LMDI)[8]、随机性环境影响评估模型(STIRPAT)[9]、地理探测器[10]等模型探讨农牧业碳排放的驱动因素;在趋势预测上,采用基线预测[11]、灰色预测模型 GM(1,1)[12]、系统动力学[13]等模型预测未来区域农牧业碳排放的变化趋势。但现有研究存在以下不足:①农牧业碳排放多测算农业碳源的几个方面,未能全面考虑所有碳源;②现有研究对象大多为农牧业发展水平较高的地区,对青藏高原农牧业碳排放的内在规律还不清晰,特别是其驱动因素和脱钩效应有待深入研究。青海省生态地位独特,作为中国最大的有机畜产品生产基地,走出一条绿色低碳、具有高原特色的农牧业高质量发展道路意义重大。全面准确测算青海省农牧业碳排放水平,进而识别驱动因素,分析其脱钩效应,可以进一步深化青藏高原碳达峰碳中和基础研究,探讨青海省推动农牧业低碳转型现实路径,为其他生态脆弱地区农牧业高质量发展提供借鉴。

本文以农用物资消耗、畜禽养殖和作物生长 3 种碳源测算青海省 2000—2021 年农牧业碳排放和农牧业碳效应(青海省农业种植作物为耐旱作物,不涉及水稻,农作物秸秆资源综合利用率达到 90.66%[14],故不考虑水稻生长和秸秆焚烧产生的碳排放),运用 LMDI 模型识别农牧业碳排放的驱动因素,利用 Tapio 脱钩模型探讨农牧业经济增长与碳排放的脱钩状态,通过灰色预测模型 GM(1,1)预测 2022—2035 年农牧业碳排放量,以期为青海省实现“双碳”目标提供数据支撑和参考依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

青海省位于中国西部,青藏高原的东北部,地理

位置介于东经 89°35′—103°04′,北纬 31°36′—39°19′之间,是农业区和牧区的分水岭,兼具了青藏高原、内陆干旱盆地和黄土高原的 3 种地形地貌,汇聚了大陆季风性气候、内陆干旱气候和青藏高原气候的 3 种气候形态,年平均气温 -5.1～9.0 ℃,降水量 15～750 mm[15]。青海省农牧业资源丰富,牦牛、藏羊、青稞、马铃薯、油菜、冷水鱼等特色优质农畜产品优势明显。2022 年粮食播种面积为 3.03×10^5 km^2,经济作物播种面积 2.83×10^5 km^2,粮食产量 1.07×10^6 t;牛、羊、猪、家禽出栏量为 205.70,676.08,76.92,158.84万头(只),猪牛羊禽肉产量 4.09×10^6 t[16]。当前,青海省农牧业仍存在资源高度消耗的经营方式,种养业绿色生产和低碳加工技术相对落后,个别地区农业面源污染问题和生产生活所造成的碳排放问题仍然突出。

1.2　数据来源与处理

考虑到数据可获得性,本文以青海省为研究对象,化肥施用量、农用薄膜量、农药使用量、农用柴油量、农业灌溉和翻耕面积、畜禽饲养量、农作物播种面积、农业从业劳动力等数据均来源于 2001—2022 年《青海统计年鉴》。其中,化肥施用量采用化肥折纯量。由于畜禽饲养周期存在差异,参考胡向东等[17]做法,根据出栏率调整畜禽年均饲养量,当出栏率大于等于 1 时,年均饲养量为饲养周期×(年出栏量/365),本研究中猪和家禽的平均生命周期为 200 d 和 55 d;当出栏率小于 1 时,年均饲养量为畜禽的上年年末存栏量与本年末的存栏量的均值。参考冉锦成等[18]研究,按照 1 t CH_4=6.82 t C,1 t N_2O=81.27 t C 换算成 C 当量计算农业碳排放。种植业、畜牧业、农林牧渔总产值以 2000 年为基期,采用平减指数法换算成可比价格进行计算。

2　研究方法

2.1　农牧业碳排放测算

本文运用碳排放系数法将农牧业碳源与相对应的碳排放系数相乘得到青海省农牧业碳排放量,涉及以下 3 种碳源:①农用物资消耗导致的碳排放;②畜禽养殖过程中肠道发酵和粪便管理产生的 CH_4、N_2O 排放;③作物生长过程中土壤产生的 N_2O 排放。农牧业碳排放计算公式[18]为:

$$E=\sum_{i=1}^{3}E_i=\sum_{i=1}^{3}T_i\omega_i \tag{1}$$

式中:E 为农业碳排放总量(10^4 t);E_i 为第 i 类碳源产生的碳排放量(10^4 t);T_i 为碳源的数量(类);ω_i 为第 i 类碳源对应的碳排放系数(各类碳排放系数见表 1)。

2.2　农牧业碳效应测算

农作物生长过程中不仅产生碳排放,还会通过光合作用吸收一部分碳。根据青海省农作物种植实际情况,选择玉米、小麦、豆类、薯类、油料、蔬菜和瓜果作为碳吸收的主要农作物,参考郝小雨[25]研究,计算公式为:

$$C=\sum C_i\times Y_i\times(1-W_i)\times(1+R_i)/H_i \tag{2}$$

式中:C 为农作物碳吸收总量(10^4 t);C_i 为第 i 类农作物的碳吸收率(%);Y_i 为第 i 类农作物的经济产量(10^4 t);W_i 为第 i 类农作物经济产品的含水率(%);R_i 为第 i 类农作物的根冠比系数(%);H_i 为第 i 类农作物的经济系数(%)。相关系数值见表 2[25]。

农牧业碳效应为农牧业碳排放量与碳吸收量的差值[26],计算公式为:

$$N=E-C \tag{3}$$

式中:N 为净碳效应。当 N 为正值时是净碳排放效应,N 为负值时是净碳吸收效应。

2.3　LMDI 模型

LMDI 模型可以有效解决指数分解中存在的零值和残差项,并明确指出被分解因素的关键指标,因此本文利用 LMDI 模型将农牧业碳排放驱动因素分解为农业生产技术、农业结构、农业经济发展水平和农业劳动力规模 4 个方面,探讨青海省农业碳排放的驱动因素。参考田云等[26]研究,计算公式为:

$$E=E_V\times E_S\times E_I\times E_P=\frac{E}{A}\times\frac{A}{G}\times\frac{G}{P}\times P \tag{4}$$

$$\Delta E=E_t-E_0=\Delta E_V+\Delta E_S+\Delta E_I+\Delta E_P \tag{5}$$

$$\Delta E_V=\frac{E_t-E_0}{\ln E_t-\ln E_0}\ln\left(\frac{E_V^t}{E_V^0}\right) \tag{6}$$

$$\Delta E_S=\frac{E_t-E_0}{\ln E_t-\ln E_0}\ln\left(\frac{E_S^t}{E_S^0}\right) \tag{7}$$

$$\Delta E_I=\frac{E_t-E_0}{\ln E_t-\ln E_0}\ln\left(\frac{E_I^t}{E_I^0}\right) \tag{8}$$

$$\Delta E_P=\frac{E_t-E_0}{\ln E_t-\ln E_0}\ln\left(\frac{E_P^t}{E_P^0}\right) \tag{9}$$

$$\delta=\frac{\Delta E_x}{\sum_x|\Delta E_x|}\times100\% \tag{10}$$

式中:A 为种植业和畜牧业总产值(10^4元);G 为农林牧渔总产值(10^4元);P 为农业从业劳动力人数(10^4人);E_V 为农业生产技术(kg/元);E_S 为农业结构(%);E_I 为农业经济发展水平(元/人);E_P 为农业劳动力规模(10^4人);ΔE 为农牧业碳排放总效应(10^4 t);δ 为相对贡献度,当贡献度为正值时,说明该影响因素为正向效应,促进农牧业碳排放的增加,反之则为负向效应。

表 1 青海省农牧业碳排放系数

Table 1 Carbon emission coefficients of agriculture and animal husbandry in Qinghai Province

碳源			排放系数		数据来源
种植业	农资投入	化肥	0.895 6	(kg/kg,以 C 计)	美国橡树岭国家实验室(ORNL)
		农药	4.934 1		
		农膜	5.18		南京农业大学农业资源与生态环境研究所(IREEA)
	农田管理	柴油	0.592 7		政府间气候变化专门委员会(IPCC)
		灌溉	266.48		段华平等[19]
		翻耕	3.126		中国农业大学农学与生态环境研究所(IABCAU)
	土壤排放(N_2O)	小麦	0.40	(kg·hm^2)	于克伟等[20]
		玉米	2.532		王少彬等[21]
		豆类	0.77		熊正琴等[22]
		油料	0.001		邱炜红等[23]
		蔬菜	4.21		
		薯类	2.12		王智平[24]
畜牧业	肠道发酵(CH_4)	猪	1.00	〔kg/(head·a)〕	省级温室气体清单编制指南(试行)
		牛	80.46		
		羊	8.23		
		家禽	—		
	粪便管理(CH_4、N_2O)	猪	3.12	〔kg/(head·a)〕	
			0.093		
		牛	5.14		
			1.29		
		羊	0.16		
			0.227		
		家禽	0.02		
			0.007		

表 2 青海省农作物碳吸收系数

Table 2 Carbon uptake coefficients of crops in Qinghai province

项 目	玉米	小麦	豆类	薯类	油料	蔬菜	瓜果
碳吸收率	0.471	0.485	0.450	0.423	0.450	0.450	0.450
含水率	0.130	0.120	0.130	0.700	0.090	0.900	0.900
根冠比系数	0.160	0.400	0.130	0.180	0.040	—	—
经济系数	0.400	0.400	0.350	0.700	0.250	0.650	0.700

2.4 Tapio 脱钩模型

脱钩弹性指数分析农牧业经济增长与农牧业碳排放之间的脱钩关系。脱钩努力指数分析节能努力对经济增长与农牧业碳排放的脱钩影响程度,即在剔除经济因素对农牧业碳排放的影响后,进一步衡量其他措施(提升农业生产技术、优化农业结构、控制农业从业人口规模)对碳减排的作用程度。计算公式及脱钩状态的划分标准[27]如下:

$$e=\frac{\Delta E}{\Delta A}=\frac{(E_t-E_{t-1})/E_{t-1}}{(A_t-A_{t-1})/A_{t-1}} \tag{11}$$

$$\varepsilon=-\frac{\Delta E-\Delta E_I}{\Delta E_I}=-\left(\frac{\Delta E_V}{\Delta E_I}+\frac{\Delta E_S}{\Delta E_I}+\frac{\Delta E_P}{\Delta E_I}\right)=\varepsilon_V+\varepsilon_S+\varepsilon_P \tag{12}$$

式中:e 为脱钩弹性指数;ΔE 为农牧业碳排放变化量(10^4 t);ΔA 为农牧业总产值(种植业和畜牧业总产值)变化量(10^4元);E_t 和 E_{t-1}分别为第 t 年和第 $t-1$ 年的农业碳排放量(10^4 t);A_t和 A_{t-1}分别为第 t 年和第 $t-1$ 年的农牧业总值(10^4 元);ε 为剔除经济因素后的脱钩努力指数;ε_V,ε_S,ε_P 分别为农业生产技术、农业结构、农业劳动力规模对农牧业经济与农牧业碳排放的脱钩努力程度。$\varepsilon\geqslant1$ 时为强脱钩效应;$0<\varepsilon<1$ 时为弱脱钩效应;$\varepsilon\leqslant0$ 时为无脱钩效应(表 3)。

2.5 灰色预测模型 GM(1,1)

灰色预测模型对样本数量要求不高,模型精度方便检验,被广泛应用于未来趋势预测。设由 $n+1$ 个原始数据组成的时间数列为 X_t,参考任晓松等[28]研究建立模型并进行模型精度评判,步骤如下:①累加

生成,将无规律的原始数列累加生成较有规律的数列 Y_t;②对累加生成的数列 Y_t 作移动平均数生成 Z_t;③建立 GM(1,1)模型:$dx(1)/d_t + ax(1) = \mu$,μ 为灰色作用量,a 为发展系数。④累减还原求解,得原始序列估计值序列 $x^{(1)}(k+1) = [x^{(1)}(0) - \mu/a]e^{(-ak)} + \mu/a$,其中 $k = 1,2\cdots n$;⑤模型精度检验,计算后验差比值 C 和小误差概率 P。如表 4 所示,C 值为预测值与实际值之差的集中程度,其值越小,预测值与实际值之差集中程度越好。P 值是满足残差和残差均值之差小于 $0.647S_x$ 的个数占总数之比,其值越大,模型拟合精度越高。

表 3　脱钩状态划分标准

Table 3　Decoupling state classification criteria

脱钩状态		ΔE	ΔA	e
负脱钩	扩张负脱钩	+	+	$e>1.2$
	强负脱钩	+	−	$e<0$
	弱负脱钩	−	−	$0\leqslant e<0.8$
脱钩	弱脱钩	+	+	$0\leqslant e<0.8$
	强脱钩	−	+	$e<0$
	衰退脱钩	−	−	$e>1.2$
连结	扩张连结	+	+	$0.8\leqslant e\leqslant 1.2$
	衰退连结	−	−	$0.8\leqslant e\leqslant 1.2$

表 4　GM(1,1)模型的精度评判标准

Table 4　Accuracy evaluation criteria of GM(1,1) model

项目	精度评判			
	好	合格	勉强合格	不合格
小误差概率 P	>0.95	>0.80	>0.70	≤0.70
后验差比值 C	<0.35	<0.50	<0.65	≥0.65

3　结果与分析

3.1　青海省农牧业碳排放特征及净碳效应状况

由表 5 可知,在农牧业碳排放结构中,畜禽养殖产生的肠道发酵和粪便管理是造成青海省农牧业碳排放量增长的主要原因,平均占比达 94.94%,农用物资消耗和作物生长产生的碳排放年均占比仅为 4.08%和 0.98%。畜禽养殖碳排放在 2018 年和 2019 年下降明显,可能的原因为受到非洲猪瘟影响,地区养殖规模大幅缩减,生猪产能降低,饲养量下降。青海省农牧业碳排放总量由 2000 年的 4.12×10^6 t 上升至 2021 年的 5.75×10^6 t,22 a 间增长了 39.71%,年均增长率为 1.61%。农牧业碳排放量始终高于农牧业碳汇总量,净碳效应为净碳排放效应,碳汇总量和净碳排放效应年均增长率为 1.05%和 1.82%。农牧业碳排放增速低于农牧业碳汇增速,表明青海省农牧业在增汇减排上取得了一定成效。

表 5　2000—2021 年青海省农牧业碳排放及净碳效应值

Table 5　Carbon emission and net carbon effect value of agriculture and animal husbandry in Qinghai Province from 2000 to 2021

年份	农用物资		畜禽养殖		作物生长		碳排放总量/10^4 t	碳汇总量/10^4 t	净碳排放效应/10^4 t
	总量/10^4 t	比重/%	总量/10^4 t	比重/%	总量/10^4 t	比重/%			
2000	17.03	4.14	390.88	94.96	3.71	0.90	411.62	121.22	290.39
2001	16.26	3.86	400.93	95.24	3.76	0.89	420.95	141.89	279.06
2002	16.07	3.72	412.01	95.41	3.73	0.86	431.81	132.54	299.28
2003	15.51	3.56	416.15	95.58	3.73	0.86	435.39	123.71	311.68
2004	15.30	3.53	414.37	95.58	3.88	0.89	433.55	132.02	301.52
2005	15.76	3.63	414.88	95.45	4.02	0.93	434.66	141.78	292.88
2006	16.02	3.69	413.34	95.30	4.37	1.01	433.73	135.28	298.45
2007	16.39	3.66	427.00	95.34	4.49	1.00	447.88	148.33	299.55
2008	19.07	4.19	431.25	94.81	4.56	1.00	454.88	157.74	297.13
2009	19.57	4.25	436.15	94.74	4.66	1.01	460.38	160.96	299.42
2010	20.45	4.35	444.14	94.60	4.93	1.05	469.51	163.98	305.53
2011	21.74	4.57	448.77	94.34	5.20	1.09	475.71	167.26	308.45
2012	22.65	4.82	441.85	94.07	5.18	1.10	469.68	167.35	302.33
2013	22.13	4.61	452.31	94.28	5.32	1.11	479.77	159.29	320.48
2014	22.23	4.47	469.45	94.48	5.20	1.05	496.87	158.65	338.22
2015	23.16	4.59	475.72	94.39	5.14	1.02	504.02	156.61	347.41
2016	22.27	4.29	492.05	94.71	5.19	1.00	519.51	155.25	364.27
2017	22.52	4.30	496.53	94.75	5.01	0.96	524.06	150.76	373.30
2018	21.92	4.42	469.21	94.58	4.99	1.01	496.11	147.80	348.31
2019	20.09	4.23	449.87	94.76	4.80	1.01	474.76	148.13	326.63
2020	19.18	3.68	497.31	95.42	4.71	0.90	521.20	147.01	374.19
2021	18.73	3.26	551.68	95.93	4.65	0.81	575.06	150.85	424.22
均值	19.27	4.08	447.54	94.94	4.60	0.98	471.41	148.56	322.85

3.2 青海省农牧业碳排放驱动因素分析

由表 6 可知，总体来看，青海省农牧业碳排放的总效应为 1.63×10^6 t，农业结构效应和农业经济发展水平效应为正向效应，农业生产技术效应和农业劳动力规模效应为负向效应。农业生产技术效应的总贡献值为 -5.17×10^6 t，总贡献率 -37.45%，远高于农业劳动力规模效应，说明强化现代农业科技支撑，推进农业基础设施智能化信息化升级，控制农业从业劳动力人数、提升农业从业劳动力综合素质对减少青海省农牧业碳排放有积极作用。

农业结构效应和农业经济发展水平效应二者的总贡献率分别为 16.53%和 39.40%，是青海省农牧业碳排放增加的主要原因。鉴于青海省的自然环境条件特点，畜牧业产业基础雄厚，是青海省经济发展的优势产业，但畜牧业比重大导致农牧业碳排放量不断增加。

表 6 2000—2021 年青海省农牧业碳排放驱动因素

Table 6 Driving factors of carbon emission from agriculture and animal husbandry in Qinghai Province from 2000 to 2021

时 段	农业生产技术效应		农业结构效应		农业经济发展水平效应		业劳动力规模效应		总效应/10^4 t
	效应值/10^4 t	贡献率/%	效应值/10^4 t	贡献率/%	效应值/10^4 t	贡献率/%	效应值/10^4 t	贡献率/%	
2000—2003	−34.84	−25.06	9.71	6.99	71.67	51.56	−22.78	−16.39	23.77
2003—2006	40.54	17.23	−82.27	−34.97	76.27	32.42	−36.19	−15.38	−1.65
2006—2009	−49.60	−34.31	10.43	7.21	75.18	52.00	−9.36	−6.47	26.65
2009—2012	−145.56	−41.38	78.48	22.31	102.03	29.01	−25.66	−7.29	9.30
2012—2015	−148.88	−44.83	106.85	32.18	70.18	21.13	6.18	1.86	34.34
2015—2018	−144.13	−48.18	63.76	21.31	81.88	27.37	−9.41	−3.15	−7.91
2018—2021	−34.39	−23.28	41.11	27.83	66.46	44.99	5.77	3.91	78.95
总贡献值	−516.87	−37.45	228.07	16.53	543.67	39.40	−91.43	−6.63	163.44

3.3 青海省农牧业碳排放与经济增长脱钩分析

根据公式(11)和(12)，得到 2000—2021 年青海省农牧业碳排放脱钩弹性指数和脱钩努力指数。由表 7 可知，青海省农牧业碳排放与农牧业经济增长有弱脱钩、弱负脱钩和强脱钩 3 种脱钩状态，且主要以弱脱钩为主。仅 2003—2006 年出现弱负脱钩状态，反映农牧业经济衰退同时农牧业碳排放量也在减少，是一种不可取状态。其他年份农牧业经济均处于增长状态，强脱钩为农牧业碳排放减少，弱脱钩为农牧业碳排放缓慢增长，但增长幅度小于农牧业经济增长幅度，是一种较理想的状态。在剔除经济因素的影响后，其他驱动因素对青海省农牧业碳排放的总脱钩努力指数发生了弱脱钩、强脱钩和无脱钩的多次变化，表明青海省碳减排努力有所下降。除个别年份外，农业生产技术和农业劳动力规模对青海省农牧业碳排放均有脱钩努力，说明强化现代农业科技支撑和开展农业从业人员教育培训对推动农业低碳发展行之有效。农业结构则只在 2003—2006 年有强脱钩努力，其他年份均无脱钩努力，农业结构调整的相关政策对减少农业碳排放作用不明显。

表 7 2000—2021 年青海省农牧业碳排放脱钩弹性指数与脱钩努力指数

Table 7 Decoupling elasticity index and decoupling effort index of carbon emissions from agriculture and animal husbandry in Qinghai Province from 2000 to 2021

时 段	e	脱钩状态	ε_V	ε_S	ε_P	ε	脱钩状态
2000—2003	0.29	弱脱钩	0.49	−0.14	0.32	0.67	弱脱钩
2003—2006	0.03	弱负脱钩	−0.53	1.08	0.47	1.02	强脱钩
2006—2009	0.25	弱脱钩	0.66	−0.14	0.12	0.65	弱脱钩
2009—2012	0.03	弱脱钩	1.43	−0.77	0.25	0.91	弱脱钩
2012—2015	0.08	弱脱钩	2.12	−1.52	−0.09	0.51	弱脱钩
2015—2018	−0.02	强脱钩	1.76	−0.78	0.11	1.10	强脱钩
2018—2021	0.18	弱脱钩	0.52	−0.62	−0.09	−0.19	无脱钩
2000—2021	0.10	弱脱钩	0.92	−0.39	0.18	0.71	弱脱钩

注：表中 e 为脱钩弹性指数；ε 为剔除经济因素后的脱钩努力指数；ε_V，ε_S，ε_P 分别为农业生产技术、农业结构、农业劳动力规模对农牧业经济与农牧业碳排放的脱钩努力程度。$\varepsilon\geqslant1$ 时为强脱钩效应；$0<\varepsilon<1$ 时为弱脱钩效应；$\varepsilon\leqslant0$ 时为无脱钩效应。

3.4 青海省农牧业碳排放量预测

根据 2000—2021 年农牧业碳排放数据，运用灰色预测模型 $GM(1,1)$ 预测 2022—2035 年青海省农牧业碳排放(表 8)。通过计算，后验差比值 $C=0.38$，小误差

概率 $P=0.91$,模型精度检验合格,得到青海省农牧业碳排放预测模型:$x(k+1)=33\ 924.05e^{(0.01k)}-33\ 512.43$。预测模型值与实际值平均相对误差为 0.02,预测结果较好。结果显示,青海省 2022—2035 年农牧业碳排放量仍处于增长状态,年平均增长率为 1.23%,小于 2000—2021 年的年均增长率 1.61%。

表 8　2022—2035 年青海省农牧业碳排放预测

Table 8　Prediction of carbon emission from agriculture and animal husbandry in Qinghai Province from 2022 to 2035

年 份	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
碳排放值	541.21	547.88	554.64	561.48	568.40	575.41	582.51	589.69	596.97	604.33	611.78	619.33	626.96	634.70

4　讨论与结论

4.1　讨 论

本研究测算了青海省 2000－2021 年农牧业碳排放和农牧业碳效应,对青海省农牧业碳排放特征、驱动因素及脱钩效应进行了量化分析。从研究结果看,青海省农牧业碳排放量呈波动上升趋势,农用物资消耗和作物生长所产生的碳排放占比较小,农牧业碳排放中畜禽养殖业碳排放为主要碳源,与冉锦成等[18]对青海省 2000－2014 年农牧业碳排放测算结果一致。畜禽养殖业的碳排放量与畜禽数量密切相关,青海牧区作为中国四大牧区之一,依托大面积的草原地理优势,畜牧业走向聚集化、产业化发展,大型反刍牲畜牛羊的比例较高[29],畜禽养殖业碳排放量较大。为此,青海省应优化农业生产布局,探索农牧区互补、种植养殖业结合的发展模式。大力推广牦牛、藏羊高效养殖技术,选育高产低排放畜禽品种,改进畜禽饲养管理,降低单位畜禽产品肠道甲烷排放强度。推广粪污高效利用、气体收集利用或处理等技术,提高畜禽粪污处理水平。推进青海省畜禽养殖业减排固碳,有利于增强农畜产品品质,做大做强绿色有机农牧产业,将青海打造成生态环保、特色鲜明、国内外知名的绿色有机农畜产品输出地。青海省农牧业碳汇总量低于碳排放总量,对此应增强农田土壤固碳能力,推广有机肥施用和秸秆还田技术,提高土壤有机质含量,推进农用物资高效利用。

从青海省农牧业碳排放的驱动因素来看,经济和结构因素促进农牧业碳排放的增加,技术和劳动力因素抑制农牧业碳排放的增加,且经济因素为促进农牧业增长的关键因素,这与田云等[26]对西北地区研究结果一致。结合青海省农牧业碳排放脱钩弹性指数和脱钩努力指数结果,青海省农牧业经济增长的同时碳排放缓慢增长,说明农牧业经济水平的提升有助于农业碳汇增长。而农业结构对碳减排无脱钩努力,反映了青海省在当前特殊的地理环境、气候条件和资源禀赋下,改变现有农牧业发展结构较为困难。因此,青海省应将农牧业碳减排重点从技术和劳动力因素着手,加强农牧业科技创新,提升农牧业从业人员综合素质。强化农牧业减排固碳科技引领,推动农业技术、模式创新,加强农牧业科技创新与成果推广应用。建设农牧业高素质人才队伍,开展农牧业从业人员教育培训,壮大基层农技推广力量,进而改善农牧业生态环境,实现农牧业绿色低碳转型。当前,青海省正在开展绿色有机农畜产品示范省建设,通过促进农牧业减排固碳,最大限度减少农牧业温室气体排放,实现农牧业低碳高效发展。

4.2　结 论

(1) 青海省农牧业碳排放整体呈波动上升趋势,农牧业碳汇量增速小于农牧业碳排放。畜禽养殖业碳排放是农牧业碳排放增长的主要原因,推进畜禽品种改良,提升畜禽粪污资源利用化水平是农牧业减排的关键举措。

(2) 农业结构效应和农业经济发展水平效应促进农牧业碳排放的增加,农业生产技术效应和农业劳动力规模效应抑制农牧业碳排放的增加。强化农牧业科技创新支撑,组建农牧业专业人才队伍应为今后减排固碳的主要方向。

(3) 青海省农牧业碳排放与农牧业经济增长的脱钩状态以弱脱钩为主,农牧业碳排放的脱钩努力指数不稳定,农业结构无脱钩努力,农业技术因素和劳动力因素能够有效促进农牧业碳减排。

(4) 青海省农牧业碳排放在 2022—2035 年处于增长状态,但年均增长率低于 2000—2021 年年均增长率,未来需进一步采取措施促进农牧业低碳发展。

参考文献(References)

[1]　胡西武,黄蕾,李毅.应对气候变化下的青藏高原碳脱钩水平测度及碳达峰路径选择:以青海省为例[J].青海社会科学,2021(5):43-54.
Hu Xiwu, Huang Lei, Li Yi. Carbon decoupling level measurement and carbon peak path selection in the Tibetan Plateau under climate change: A case study of Qinghai Province [J]. Qinghai Social Sciences, 2021(5): 43-54.

[2]　胡永浩,张昆扬,胡南燕,等.中国农业碳排放测算研究综

述[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(2):163-176.
Hu Yonghao, Zhang Kunyang, Hu Nanyan, et al. Review on measurement of agricultural carbon emission in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023,31(2):163-176.

[3] 于卓卉,毛世平.中国农业净碳排放与经济增长的脱钩分析[J].中国人口·资源与环境,2022,32(11):30-42.
Yu Zhuohui, Mao Shiping. Analysis of the decoupling of China's agricultural net carbon emissions from its economic growth [J]. China Population, Resources and Environment, 2022,32(11):30-42.

[4] 李政通,白彩全,肖薇薇.基于LMDI模型的东北地区农业碳排放测度与分解[J].干旱地区农业研究,2017,35(4):145-152.
Li Zhengtong, Bai Caiquan, Xiao Weiwei. The measurement and decomposition of agricultural carbon emissions in Northeast China based on LMDI model [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017,35(4): 145-152.

[5] 罗红,罗怀良,李朝艳,等.泸州市农业碳收支时空变化及公平性评价[J].生态与农村环境学报,2019,35(4):409-418.
Luo Hong, Luo Huailiang, Li Chaoyan, et al. Spatio-temporal change in agricultural carbon production budget and evaluation of agricultural carbon emission equity in Luzhou city [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019,35(4):409-418.

[6] 杨青林,赵荣钦,赵涛,等.县域尺度农业碳排放效率与粮食安全的关系[J].中国农业资源与区划,2023,44(2):156-169.
Yang Qinglin, Zhao Rongqin, Zhao Tao, et al. Elationship between agricultural carbon emission efficiency and food security at county scale [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023,44(2):156-169.

[7] 褚力其,姜志德,任天驰.中国农业碳排放经验分解与峰值预测:基于动态政策情景视角[J].中国农业大学学报,2020,25(10):187-201.
Chu Liqi, Jiang Zhide, Ren Tianchi. Empirical decomposition and peak prediction of agricultural carbon emissions in China: From the perspective of dynamic policy scenarios [J]. Journal of China Agricultural University, 2020,25(10):187-201.

[8] 刘丽娜,王春好,袁子薇,等.区域农业碳排放LMDI分解和脱钩效应分析[J].统计与决策,2019,35(23):95-99.
Liu Lina, Wang Chunyu, Yuan Ziwei, et al. Analysis of LMDI decomposition and decoupling effect of regional agricultural carbon emissions [J]. Statistics & Decision, 2019,35(23):95-99.

[9] 甘天琦,刘铭明,周宗钰.中国农业碳排放的空间关联特征与减排政策选择[J].四川农业大学学报,2023,41(1):166-174.
Gan Tianqi, Liu Mingming, Zhou Zongyu. Spatial correlation characteristics of China's agricultural carbon emissions and the choice of emission reduction policies [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2023,41(1):166-174.

[10] 常青,蔡为民,谷秀兰,等.河南省农业碳排放时空分异、影响因素及趋势预测[J].水土保持通报,2023,43(1):367-377.
Chang Qing, Cai Weimin, Gu Xiulan, et al. Spatial-temporal variation, influencing factors, and trend prediction of agricultural carbon emissions in Henan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(1):367-377.

[11] 赵敏娟,石锐,姚柳杨.中国农业碳中和目标分析与实现路径[J].农业经济问题,2022,43(9):24-34.
Zhao Minjuan, Shi Rui, Yao Liuyang. Analysis on the goals and paths of carbon neutral agriculture in China [J]. Issues in Agricultural Economy, 2022,43(9):24-34.

[12] 刘杨,刘鸿斌.山东省农业碳排放特征、影响因素及达峰分析[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(4):558-569.
Liu Yang, Liu Hongbin. Characteristics, influence factors, and prediction of agricultural carbon emissions in Shandong Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022,30(4):558-569.

[13] 陈军娟,燕振刚,李薇,等.基于系统动力学的民勤绿洲农业系统碳排放仿真模拟研究[J].西南农业学报,2022,35(6):1432-1440.
Chen Junjuan, Yan Zhengang, Li Wei, et al. Simulation study on carbon emission of Minqin oasis agricultural system based on system dynamics [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022,35(6):1432-1440.

[14] 王臻.青海省农作物秸秆资源综合利用率突破90%[N].青海日报,2023-05-25(5),[2023-08-24].
Wang Zhen. The comprehensive utilization rate of crop straw resources in Qinghai Province exceeded 90% [N]. Qinghai Daily,2023-05-25(5),[2023-08-24].

[15] 青海省统计局.青海年鉴[J].青海:青海年鉴社,2022.
Qinghai Provincial Statistics Bureau. Qinghai Yearbook [J]. Qinghai: Qinghai Yearbook Society, 2022.

[16] 青海省统计局.青海省2022年国民经济和社会发展统计公报[N].青海日报,2023-02-28(6),[2023-08-24].
Qinghai Provincial Statistics Bureau. Statistics Bulletin of Qinghai Province on National Economic and Social Development in 2022 [N]. Qinghai Daily, 2023-02-28(6),[2023-08-24].

[17] 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, 2010,26(10):247-252.

[18] 冉锦成,马惠兰,苏洋.西北五省农业碳排放测算及碳减排潜力研究[J].江西农业大学学报,2017,39(3):623-632.
Ran Jincheng, Ma Huilan, Su Yang. A study on agricultural carbon emission and carbon emission reduction potential in five provinces in Northwest China [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2017,39(3):623-632.

[19] 段华平,张悦,赵建波,等.中国农田生态系统的碳足迹分析[J].水土保持学报,2011,25(5):203-208.
Duan Huaping, Zhang Yue, Zhao Jianbo, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011,25(5):203-208.

[20] 于克伟,陈冠雄,杨思河,等.几种旱地农作物在农田 N_2O释放中的作用及环境因素的影响[J].应用生态学报,1995,6(4):387-391.
Yu Kewei, Chen Guanxiong, Yang Sihe, et al. Effects of several dryland crops on N_2O release from farmland and environmental factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1995,6(4):387-391.

[21] 王少彬,苏维瀚.中国地区氧化亚氮排放量及其变化的估算[J].环境科学,1993,14(3):42-46.
Wang Shaobin, Su Weihan. Estimation of nitrous oxide emission and its future change in China [J]. Environmental Science, 1993,14(3):42-46.

[22] 熊正琴,邢光熹,鹤田治雄,等.种植夏季豆科作物对旱地氧化亚氮排放贡献的研究[J].中国农业科学,2002,35(9):1104-1108.
Xiong Zhengqin, Xing Guangxi, H Tsuruta, et al. The effects of summer legume crop cultivation on nitrous oxide emissions from upland farmland [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002,35(9):1104-1108.

[23] 邱炜红,刘金山,胡承孝,等.种植蔬菜地与裸地氧化亚氮排放差异比较研究[J].生态环境学报,2010,19(12):2982-2985.
Qiu Weihong, Liu Jinshan, Hu Chengxiao, et al. Comparison of nitrous oxide emission from bare soil and planted vegetable soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010,19(12):2982-2985.

[24] 王智平.中国农田 N_2O 排放量的估算[J].农村生态环境,1997(2):52-56.
Wang Zhiping. Estimation of N_2O emissions from farmland in China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 1997(2):52-56.

[25] 郝小雨.基于碳足迹的黑龙江垦区农业生态系统碳源/汇时空变化[J].中国农业资源与区划,2022,43(8):64-73.
Hao Xiaoyu. Spatiotemporal variation of carbon source/sink in agricultural ecosystem based on carbon footprint in Heilongjiang land reclamation areas [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022,43(8):64-73.

[26] 田云,张君.地理分区视角下的农业碳效应驱动机理研究[J].华中农业大学学报(社会科学版),2020(2):78-87.
Tian Yun, Zhang Jun. Research on driving mechanism of agricultural carbon effect from the perspective of geographical divisions [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2020(2):78-87.

[27] 吴茜,陈强强.甘肃省行业碳排放影响因素及脱钩努力研究[J].干旱区地理,2023,46(2):274-283.
Wu Xi, Chen Qiangqiang. Influencing factors and decoupling efforts of industry-related carbon emissions in Gansu Province [J]. Arid Land Geography, 2023,46(2):274-283.

[28] 任晓松,赵国浩.中国工业碳排放及其影响因素灰色预测分析:基于 STIRPAT 模型[J].北京交通大学学报(社会科学版),2014,13(4):18-24.
Ren Xiaosong, Zhao Guohao. Gray Forecasting of China's Industrial Carbon Emissions and its Influencing Factors: A study based on the STIRPAT model [J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2014,13(4):18-24.

[29] 曾贤刚,余畅,孙雅琪.中国农业农村碳排放结构与碳达峰分析[J].中国环境科学,2023,43(4):1906-1918.
Zeng Xiangang, Yu Chang, Sun Yaqi. Carbon emission structure and carbon peak of agriculture and rural areas in China [J]. China Environmental Science, 2023,43(4):1906-1918.