双碳目标背景下奶牛养殖碳排放分析
——以东营市为例

杨艳芬，李 阳，燕 慧，纪勇成，程国明*

东营市现代畜牧业发展服务中心，山东东营 257000

摘 要：为推进奶业高质量发展，提高奶牛养殖效率，助力畜牧业碳减排，本文基于IPCC法，对东营市2014—2023年奶牛养殖环节碳排放量及碳排放强度进行测算。结果表明：2014—2023年，东营市奶牛养殖碳排放整体趋势与奶牛养殖量一致，呈波动式上升趋势，但随着奶牛单产水平的提高，单位生鲜乳碳排放呈下降趋势，十年间下降幅度46.84%。奶牛养殖过程中，肠道发酵碳占比68.85%，粪便管理碳占比31.15%；排放的CH_4碳占比85.05%，排放的N_2O碳占比14.95%。根据研究结果，本文提出持续加强高产奶牛品种选育，提高奶牛单产水平；优化奶牛日粮配方，提高奶牛肠道发酵效率，降低肠道发酵CH_4产生量；变废为宝，加强畜禽粪污资源化利用，提高粪污管理水平等碳减排的建议。

关键词：奶牛养殖；碳排放；碳排放强度；IPCC法

文章编号：1671-4393（2025）06-0044-05 DOI:10.12377/1671-4393.25.06.07

0 引言

随着全球气温的不断升高，生态环境问题日益凸显，气候变化带来的风险比预计的更加迅速、广泛和剧烈，应对气候危机受到各国重视[1~3]。中国作为世界上最大的碳排放国，单位GDP能耗是世界平均水平的1.5倍[4]。2020年习近平总书记明确提出，我国将力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和。畜牧业作为农业的重要组成部分，在为居民提供肉蛋奶的同时，也不断产生CH_4、N_2O等温室气体。2007—2016年，畜牧业产生的温室气体排放量占全球温室气体排放总量的18%左右[5]。2018年，中国农业产生的温室气体排

基金项目：山东省现代农业产业技术体系牛产业创新团队建设项目（SDAIT-09-14）

作者简介：杨艳芬（1993-），女，河北衡水人，硕士，畜牧师，研究方向为畜牧经济、产业发展；
李 阳（1990-），女，山东临沂人，硕士，经济师，研究方向为畜牧经济、产业发展；
燕 慧（1988-），女，陕西岚皋人，本科，经济师，研究方向为牧草、畜牧产业发展；
纪勇成（1993-），男，山东烟台人，硕士，畜牧师，研究方向为畜牧产业发展。
*通信作者：程国明（1971-），男，山东利津人，本科，正高级兽医师，研究方向为动物疫病防控净化。

中国乳业线上阅读

放量占世界农业温室气体排放总量的11%～12%，而动物的肠道发酵和农用地排放就占据了60%以上[4]。《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》显示，2021年我国农业活动的温室气体排放占总排放量的6.5%，其中畜牧业温室气体排放占农业生产的50%以上。2024年《中国奶业低碳白皮书》显示，农业系统约占全球温室气体排放总量的30%，其中畜牧业占排放的14.5%，我国畜牧业减排任务艰巨。

畜禽养殖产生的碳排放主要来自肠道发酵CH_4、粪便管理过程中产生的CH_4和N_2O[6, 7]。奶业作为畜牧业的重要组成部分，相较猪、家禽等畜种，奶牛等反刍类动物产生的温室气体更多[8]。近年来，我国奶业不断发展，2023年前40位的养殖集团存栏奶牛300 万头，较2021年增长35%；牛奶产量4 197 万吨，同比增长6.7%[9]，奶业快速发展与随之而来的温室气体排放矛盾突出，如何平衡两者之间的关系也显得尤为重要。

本文以山东省东营市2014—2023年奶牛养殖情况为研究对象，运用IPCC系数法，测算十年间的养殖碳排放量，计算其碳排放强度，进一步探究东营市奶牛养殖效率，为东营市奶牛养殖碳减排提供理论依据，促进奶业高质量发展。

1 研究方法

1.1 碳排放测算方法

奶牛养殖过程产生的碳排放主要来自两个方面，分别是肠道发酵和粪便管理，其中肠道发酵产生CH_4、粪便管理产生CH_4和N_2O，因而计算奶牛养殖环节的碳排放也从这两个方面入手。本文主要依据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）公布的奶牛养殖环节碳排放公式进行计算，即采用奶牛年均饲养量分别与CH_4、N_2O排放系数相乘然后求和的方式，计算奶牛肠道发酵、粪便管理产生的CH_4和N_2O总量。再根据CH_4、N_2O的增温潜能，计算奶牛养殖过程中肠道发酵、粪便管理过程中产生的CO_2。公式如下：

$$C_{cd}=AP\times ef_1\times GWP_1 \quad （式1）$$

$$C_{fb}=AP\times ef_2\times GWP_1+AP\times ef_3\times GWP_2 \quad （式2）$$

$$C_{total}=C_{fb}+C_{cd} \quad （式3）$$

其中，C_{cd}、C_{fb}、C_{total} 分别代表奶牛肠道发酵产生的CO_2量、奶牛粪便管理产生的CO_2量和奶牛养殖环节产生的CO_2总量，单位万吨； 代表奶牛的年均饲养量，因为奶牛养殖的饲养周期大于一年，一年内不会发生太大变化，因而奶牛的饲养量等于年末存栏量，单位为万头；ef_1、ef_2、ef_3分别代表奶牛肠道发酵CH_4、粪便管理产生的CH_4、粪便管理产生的N_2O的碳排放系数，此系数主要依据《省级温室气体清单编制指南（试行）》，同时参考王暖霞等[10]的研究确定（表1）；GWP_1、GWP_2 代表CH_4、N_2O的增温潜能，依据IPCC第六次评估报告，取值分别为28、273[7]。

表 1 奶牛肠道发酵和粪便管理温室气体排放系数

肠道发酵 CH_4 排放系数 ef_1（kg/ 头・年）	粪便排放 CH_4 排放系数 ef_2（kg/ 头・年）	粪便排放 N_2O 排放系数 ef_3（kg/ 头・年）
68	16	1

1.2 碳排放强度测算方法

为进一步探究奶牛养殖环节碳排放效率情况，本文参考李现康等[11, 12]的研究，引入碳排放强度，即单位生鲜乳产生CO_2情况进行计算分析，公式如下：

$$E=C_{total}/P_{milk} \quad （式4）$$

式中，E代表第i年的奶牛养殖的碳排放强度；C_{total}代表碳排放总量，单位万吨；P_{milk}代表生鲜乳产量，单位为万吨。

2 数据来源

本文测算2014—2023年东营市奶牛养殖碳排放及碳排放强度所需的奶牛存栏量、生鲜乳产量等数据来自《2015—2024年东营市统计年鉴》。

中国乳业线上阅读

3 数据测算及分析

3.1 碳排放测算分析

测算东营市2014—2023年奶牛养殖碳排放总量及构成，2014—2023年，东营市奶牛存栏呈波动式上升趋势，相应的奶牛养殖碳排放也波动上升。近年来，东营市高度重视奶业发展，围绕高效生态的总体思路，积极调整畜牧业内部结构，加快发展牛羊等节粮型优势特色产业。奶牛产业成为东营市优势特色产业，是现代农业发展的标志性产业之一，2014—2021年养殖量不断增加。近3年来，奶牛行业正处于牛奶产量阶段性过剩的新周期下，消费恢复缓慢，生鲜乳价格持续下行，养殖户积极淘汰低产奶牛，选育高产奶牛，优化日粮配方，提高奶牛单产水平，奶牛养殖存栏有所下降，相对应的奶牛养殖碳排放也呈下降趋势。

同时，从表2中可以看出，奶牛养殖碳排放中，肠道发酵碳排放占比72.53%，粪便碳排放占比27.47%（17.07%+10.4%），说明奶牛养殖环节产生较大碳排放的主要是肠道发酵；排放的CH_4导致的碳排放占比89.6%，排放的N_2O导致的碳排放占比10.4%，说明奶牛养殖环节中CH_4是产生碳排放、导致气温升高的主要气体。

3.2 碳排放强度测算及分析

测算东营市2014—2023年奶牛养殖的碳排放强度，表3结果显示， 2014—2023年间，东营市生鲜乳产量先增再降再增，碳排放强度基本呈下降趋势。近年来，东营市高度重视奶业发展，大力推动奶业振兴，奶牛存栏呈波动式上升态势，生鲜乳产量也随之增多。2020年末，新冠肺炎疫情爆发，对奶牛产业冲击巨大，养殖场（户）开始调整牛群结构，加大高产奶牛选育，淘汰低产奶牛，但高产奶牛还未形成实际产能，加之新冠肺炎疫情影响，奶牛售卖难度大，导致2021年奶牛存栏虽增多，但生鲜乳产量有所下降，之后，随着高产奶牛形成实际产能，疫情放开，淘汰牛出栏，奶牛存栏虽有所下降，但生鲜乳产量逐步增多。同时，在乳制品供大于求、新冠疫情爆发、全球经济低迷的大背景下，东营市多措并举，积极推动奶牛产业提档升级，对澳亚集团等大型牧场，持续选育品种、提高单产，建成国家级核心育种场1 处、高端胚胎实验室2 处、年可产优质奶牛胚胎5 万枚；对中等牧场，依托奶业新型经营主体培育项目，进行提升改造。目前全市泌乳牛平均单产11.7 吨，其中澳亚集团饲养管理先

表 2 2014—2023 年东营市奶牛存栏、碳排放量及构成

年份	奶牛存栏（万头）	肠道发酵 CH_4 碳排放（万吨）	粪便管理 CH_4 碳排放（万吨）	粪便管理 N_2O 碳排放（万吨）	碳排放总量（万吨）	肠道发酵 CH_4 碳排放占比（%）	粪便管理 CH_4 碳排放占比（%）	粪便管理 N_2O 碳排放占比（%）	CH_4 碳排放占比（%）	N_2O 碳排放占比（%）
2014	6.55	12.47	2.93	1.79	17.19	72.53	17.07	10.4	89.6	10.4
2015	7.14	13.59	3.20	1.95	18.74	72.53	17.07	10.4	89.6	10.4
2016	6.90	13.14	3.09	1.88	18.11	72.53	17.07	10.4	89.6	10.4
2017	6.80	12.95	3.05	1.86	17.85	72.53	17.07	10.4	89.6	10.4
2018	6.57	12.51	2.94	1.79	17.25	72.53	17.07	10.4	89.6	10.4
2019	7.42	14.13	3.32	2.03	19.48	72.53	17.07	10.4	89.6	10.4
2020	8.16	15.54	3.66	2.23	21.42	72.53	17.07	10.4	89.6	10.4
2021	9.51	18.11	4.26	2.60	24.96	72.53	17.07	10.4	89.6	10.4
2022	9.21	17.53	4.12	2.51	24.16	72.53	17.07	10.4	89.6	10.4
2023	8.88	16.91	3.98	2.42	23.31	72.53	17.07	10.4	89.6	10.4

注：十年间碳排放计算公式应用的是IPCC系数法，即系数乘以养殖量，其中奶牛肠道发酵CH_4、粪便管理产生的CH_4、粪便管理产生的N_2O的碳排放系数分别取了固定值68、16、1

中国乳业线上阅读

进、牛群整体遗传水平接近美国顶尖牧场，泌乳牛平均单产达13.6 吨，居国内首位。综合所得，随着奶牛单产水平的提高，东营市奶牛养殖的碳排放强度不断下降，十年间由2014年的0.9185降至2023年的0.4883，下降幅度46.84%，这和田云等[13]的研究结果“牛饲养碳排放强度明显下降”相一致，进一步说明提高奶牛单产可以提高奶牛养殖的生产效率。

表 3 2014—2023 年东营市生鲜乳产量及碳排放强度

年份	生鲜乳产量（万吨）	碳排放强度
2014	18.72	0.9185
2015	24.93	0.7518
2016	29.00	0.6246
2017	33.25	0.5368
2018	36.50	0.4725
2019	40.14	0.4852
2020	39.57	0.5413
2021	37.60	0.6639
2022	44.85	0.5388
2023	47.74	0.4883

4 对策建议

2014—2023年东营市奶牛养殖碳排放整体趋势与奶牛养殖量一致，波动上升，随着奶牛单产水平的提高，碳排放强度呈下降趋势，十年间下降幅度达46.84%。奶牛养殖过程中，肠道发酵碳占比72.53%，粪便管理碳占比27.47%；从温室气体角度看，排放的CH_4碳占比89.6%，排放的N_2O碳占比10.4%。基于此，本文提出以下建议。

一是持续加强高产奶牛品种选育，提高奶牛单产水平。Capper等[14]研究显示，1944—2007年间，牛奶产量不断增加使每十亿千克，牛奶的碳足迹减少63%，因此为保障居民牛奶供给，同时减少奶牛CO_2排放，提高奶牛单产势在必行。东营市应依托澳亚集团的种业创新优势，以建成的国家级核心育种场和高端胚胎实验室为契机，持续优化全市牛群结构，淘汰低产奶牛、加强高产奶牛布局，精简养殖规模，推动全市奶牛单产水平至12 吨以上，降低单位生鲜乳的CO_2排放量。

二是优化奶牛日粮配方，提高奶牛肠道发酵效率，降低肠道发酵CH_4产生量。当前我国日粮模式主要是“全株青贮玉米+少量苜蓿等优质饲草+精饲料”。有研究显示，用苜蓿等优质饲草代替部分精饲料，即发展“全株青贮玉米+适量优质饲草+低精料”的优质饲草日粮模式，不但可以明显提高奶牛的单产[15~17]，还可以有效降低奶牛肠道发酵过程中CH_4的排放系数[18]，从而降低单位生鲜乳碳排放量。同时在日粮中添加丝兰提取物等能够抑制瘤胃原虫、微生物的添加剂，也可以有效减少甲烷产生量[19，20]。东营市应紧紧围绕奶业发展规划，布局产业发展用地，在当前“粮–经–饲”三元种植结构下，依托高产优质苜蓿种植项目加大苜蓿等优质饲草种植，同时充分发挥奶牛专家服务团优势，指导养殖场户优化日料粮配方，助力奶业碳减排。

三是变废为宝，加强畜禽粪污资源化利用，提高粪便管理水平。严格按照《畜禽规模养殖场粪污资源化利用设施建设规范（试行）》，科学指导养殖场户配建污水池、储粪池等粪污处理设施，确保畜禽粪污能够及时、有效收集。引导大型养殖场研发粪污处理新技术、新模式，利用生物、物理等技术提高粪污利用水平，鼓励中小养殖场（户）对粪污就地就近还田利用，积极应用发酵床养殖等生态养殖模式[21]。加大对畜禽粪污资源化利用相关产业的扶持和培育，鼓励企业开展沼气发电、有机肥生产等业务，提高畜禽粪污的附加值。同时，宣传推介资源化利用水平较高的养殖场，在全市发挥示范带动作用。

参考文献

[1] 彭倩妮，王川，马天平.气候变化、碳减排与全要素生产率[J].统计与决策，2022（18）：87–91.

[2] 胡川，韦院英，胡威.农业政策、技术创新与农业碳排放的关系研究[J].农业经济问题，2018（9）：66–75.

[3] 何建坤.全球气候治理新形势及我国对策[J].环境经济研究，2019，4（3）：1–9.

[4] 励汀郁，熊慧，王明利.“双碳”目标下我国奶牛产业如何发展——基于全产业链视角的奶业碳排放研究[J].农业经济问题，2022（2）：17–29.

中国乳业线上阅读

[5] Rosenzweig C，Mbow C，Barioni L G，et al.Climate change responses benefit from a global food system approach[J]. Nature Food，2020（1）：94–97.
[6] 王欢，乔娟. 中国畜牧业温室气体排放的脱钩与预测分析[J].中国生态农业学报（中英文），2019，27（5）：793–802.
[7] IPCC. 气候变化2021：自然科学基础[R]. 2021.
[8] 李凯旋.基于生命周期评价的新疆奶牛业碳排放及影响因素研究[D].新疆阿拉尔市：塔里木大学，2023.
[9] 经济参考报.奶业大国如何加速迈向奶业强国[EB/OL].http://www.ce.cn/cysc/sp/info/202409/10/t20240910_39133564.shtml，2024–09–10.
[10] 王暖霞，胡智胜，尹素真.山东省2013—2021年畜禽养殖碳排放测度及影响因素研究[J].农业工程技术，2023，43（8）：24–26.
[11] 李现康，陈佳，韩星星，等.双碳目标下奶牛养殖业绿色全要素生产率的时空特征研究——以中国北方15省为例[J].家畜生态学报，2023，44（12）：60–68.
[12] 李现康.双碳目标下奶牛养殖业绿色全要素生产率的时空特征及影响因素研究[D].陕西西安：西北农林科技大学，2024.
[13] 田云，夏锐，李贝.中国畜牧业碳排放再测算：现状特征、动态演进及空间相关性[J].中国环境科学，2025，45（3）：1686–1698.
[14] Capper J L，Cady R A，Bauman D E.The environmental impact of dairy production：1944 compared with 2007[J]. Journal of Animal Science，2009，87（6）：2160–2167.
[15] 夏建民，李胜利，王蔚，等. 2020年中国规模奶牛场产业素质研究报告[J].中国畜牧杂志，2021，57（9）：267–271.
[16] 高海秀，王明利，石自忠，等.中国牧草产业发展的历史演进、现实约束与战略选择[J].农业经济问题，2019（5）：121–129.
[17] 卢欣石.苜蓿饲草产业发展的质与量问题[J].中国乳业，2021（8）：9–12.
[18] 刘树军.不同饲草的体外发酵甲烷产生量研究[D].北京：中国农业科学院，2011.
[19] 刁其玉.反刍动物甲烷生成与营养调控减排措施[J].畜牧产业，2023（1）：39–43.
[20] 包乌日汉，杜莎，王鹏宇，等.饲料添加剂对体外瘤胃发酵和甲烷产生量的交互影响[J].中国饲料，2023（19）：17–22.
[21] 穆春雨，王洪芳，王春明，等.奶牛场粪污减排与资源化利用技术[J].当代畜牧，2023（2）：43–44.

Analysis of Carbon Emissions in Dairy Cow Farming under the Background of Dual Carbon Goals--Taking Dongying City as an Example

YANG Yanfen，LI Yang，YAN Hui，JI Yongcheng，CHENG Guoming*
Dongying Modern Animal Husbandry Development Service Centre，Dongying Shandong 257000

Abstract：In order to promote the high-quality development of the dairy industry，improve the efficiency of dairy cows farming，and assist in the carbon emission reduction of livestock industry，Based on the IPCC method，This paper calculated the carbon emissions and carbon emissions intensity of dairy cows farming in Dongying City from 2014 to 2023.The results showed that from 2014 to 2023，the overall trend of carbon emissions from dairy cows farming in Dongying City was consistent with the number of dairy cows farming，showing a fluctuating increase. However，with the improvement in milk yield per cow，the carbon emissions per unit of milk showed a downward trend，with a decrease of 46.84% over the ten years. In the process of dairy cows farming，intestinal fermentation carbon accounts for 68.85% and manure management carbon accounts for 31.15%；the carbon emitted as CH_4 accounts for 85.05% and the carbon emitted as N_2O accounts for 14.95%.This paper proposed recommendations for carbon emission reduction, including continuously strengthening the breeding of high-yielding dairy cattle varieties to improve milk production per cow; optimizing dairy cow feed formulations to enhance intestinal fermentation efficiency and reduce CH_4 emissions from enteric fermentation; and turning waste into resources by improving the utilization of livestock and poultry waste and enhancing manure management practices.

Keywords：dairy cows farming；carbon emissions；carbon emissions intensity；IPCC method

中国乳业线上阅读