北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

中国典型山楂和樱桃产区碳足迹分析及减排路径

刘家良 李迎春 宗世祥 马芬 李阔 张美萍 王康杰 秦康曦

Carbon footprint analysis and emission reduction pathways in typical hawthorn and cherry production areas in China

Liu Jialiang, Li Yingchun, Zong Shixiang, Ma Fen, Li Kuo, Zhang Meiping, Wang Kangjie, Qin Kangxi

引用本文:
刘家良, 李迎春, 宗世祥, 马芬, 李阔, 张美萍, 王康杰, 秦康曦. 中国典型山楂和樱桃产区碳足迹分析及减排路径[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(1):155–165. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250094
Liu Jialiang, Li Yingchun, Zong Shixiang, Ma Fen, Li Kuo, Zhang Meiping, Wang Kangjie, Qin Kangxi. Carbon footprint analysis and emission reduction pathways in typical hawthorn and cherry production areas in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1):155–165. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250094

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250094

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

碳达峰碳中和背景下中国森林碳汇潜力分析研究
Forest carbon sequestration potential in China under the background of carbon emission peak and carbon neutralization
北京林业大学学报, 2022, 44(1): 38–47. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210143

我国不同林区典型乔木树种枝叶燃烧碳排放特性
Carbon emission characteristics of branch and leaf combustion of typical tree species in different forest regions of China
北京林业大学学报, 2022, 44(2): 37–46. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200419

基于不同立地等级的天山云杉天然林碳汇潜力
Carbon sink potential of natural forests of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* based on different site grades
北京林业大学学报, 2025, 47(4): 74–81. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240337

中国森林碳汇与林业经济发展耦合及长期变化特征分析
Coupling and long-term change characteristics analysis of forest carbon sequestration and forestry economic development in China
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 129–141. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220257

黄土丘陵区典型人工林土壤有机碳储量的分布特征
Distribution characteristics of soil organic carbon stocks in typical plantations in loess hilly region of northwestern China
北京林业大学学报, 2023, 45(12): 100–107. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230097

1949—2018年中国森林资源碳储量变化研究
Changes in forest resource carbon storage in China between 1949 and 2018
北京林业大学学报, 2021, 43(5): 1–14. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200237

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250094

中国典型山楂和樱桃产区碳足迹分析及减排路径

刘家良[1,2]　李迎春[2]　宗世祥[1]　马　芬[2]　李　阔[2]　张美萍[3,4]
王康杰[3,5]　秦康曦[3,6]

（1. 北京林业大学林木有害生物防治北京市重点实验室，北京 100083；2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所，北京 100081；
3. 农业部微藻资源农业利用重点实验室，江西 九江 332700；4. 运城地福来生物科技发展有限公司，山西 运城 043699；
5. 山西运城农业职业技术学院，山西 运城 044000；6. 山西亿元坊科技发展有限公司，山西 运城 043699）

摘要:【目的】山楂和樱桃作为中国特色水果，在林果业中占据重要地位。碳足迹是衡量生产过程对气候变化潜在影响的重要指标，解析其构成对推动林果产业绿色低碳发展具有重要意义。**【方法】**基于典型山楂和樱桃产区的调查数据，采用生命周期评价方法，评估我国绛县山楂和樱桃从摇篮到大门的碳足迹，利用碳经济效率指数分析不同区域的低碳优势，并探讨果园减排潜力。**【结果】**(1)山楂和樱桃种植的单位面积碳足迹分别为 6.93 和 8.62 t/hm^2，单位产量碳足迹分别为 0.23 和 0.57 t/t，尿素、有机肥用量及种植面积的不同导致区域内单位面积碳足迹存在显著差异；(2)施肥产生的 N_2O 排放占单位面积碳足迹的 36.60%～65.34%，是山楂和樱桃种植过程中碳足迹的主要来源；(3)单位产量碳足迹与碳经济效率呈负相关，碳足迹较低的区域内碳经济效率较高，低碳优势显著；(4)在 4 种模拟情景下，通过应用绿色肥料混施、灌溉模式优化及新能源技术开发等综合管理措施，最终使山楂和樱桃的排放量分别降低 77.06% 和 77.72%。**【结论】**在山楂和樱桃种植中，樱桃的单位面积和单位产量碳足迹显著高于山楂，而肥料施用是樱桃和山楂碳足迹的主要构成部分，单位产量碳足迹与碳经济效率呈负相关。通过采取合理的减排路径，山楂和樱桃园有潜力实现碳中和。

关键词：碳足迹；碳经济效率；山楂；樱桃；减排潜力；生命周期评价
中图分类号：S181；F323.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)01−0155−11
引文格式：刘家良，李迎春，宗世祥，等. 中国典型山楂和樱桃产区碳足迹分析及减排路径［J］. 北京林业大学学报，2026，48(1)：155−165. Liu Jialiang, Li Yingchun, Zong Shixiang, et al. Carbon footprint analysis and emission reduction pathways in typical hawthorn and cherry production areas in China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1): 155−165.

Carbon footprint analysis and emission reduction pathways in typical hawthorn and cherry production areas in China

Liu Jialiang[1,2]　Li Yingchun[2]　Zong Shixiang[1]　Ma Fen[2]　Li Kuo[2]　Zhang Meiping[3,4]
Wang Kangjie[3,5]　Qin Kangxi[3,6]

(1. Beijing Key Laboratory for Forest Pest Control, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;
3. Agriculture Department Key Laboratory of Microalgal Resources Agricultural Utilization, Jiujiang 332700, Jiangxi, China;
4. Yuncheng Difulai Biotechnology Development Co., Ltd., Yuncheng 043699, Shanxi, China;
5. Shanxi Yuncheng Vocational and Technical College of Agriculture, Yuncheng 044000, Shanxi, China;
6. Shanxi Yiyuanfang Technology Development Co., Ltd., Yuncheng 043699, Shanxi, China)

收稿日期: 2025−03−17　**修回日期:** 2025−04−08
基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAAS-ZDRW202417)。
第一作者: 刘家良。主要研究方向：气候变化与低碳农业。Email：928145326@qq.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
责任作者: 李迎春，研究员。主要研究方向：气候变化与低碳农业。Email：liyingchun@caas.cn　地址：100081 北京市海淀区中关村南大街 12 号中国农业科学院。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] As characteristic fruits in China, hawthorn (*Crataegus pinnatifida*) and cherry (*Prunus pseudocerasus*) play a pivotal role in the fruit industry. Carbon footprint serves as a critical metric for quantitatively assessing the potential impact of production processes on climate change. Analyzing the carbon footprint composition of hawthorn and cherry production is essential for promoting green and low-carbon development within the fruit industry and cultivation regions. [**Method**] This study utilized survey data from hawthorn and cherry orchards in Jiang County, Shanxi Province of northern China, to evaluate their carbon footprints from cradle to gate based on the life cycle assessment method, analyzed low-carbon advantages of different areas using carbon economic efficiency index, and explored the mitigation potential in hawthorn and cherry orchards. [**Result**] (1) The carbon footprints per unit area of hawthorn and cherry were 6.93 and 8.62 t/hm^2, respectively, while the carbon footprints per unit yield were 0.23 and 0.57 t/t. Variations in urea and organic fertilizer application, as well as planting area, resulted in significant regional differences in carbon footprints per unit area. (2) Nitrous oxide (N_2O) emissions from fertilization accounted for 36.60%–65.34% of the per-unit-area carbon footprint, representing the dominant source in both hawthorn and cherry production. (3) The carbon footprints per unit yield exhibited a negative correlation with the carbon emission efficiency. Regions with lower carbon footprints per unit yield demonstrated higher carbon emission efficiency and greater low-carbon advantages. (4) Under four simulated scenarios, the integrated implementation of green fertilizer blending, optimized irrigation practices, and renewable energy technologies reduced emissions by 77.06% and 77.72% for hawthorn and cherry, respectively. [**Conclusion**] In the cultivation of hawthorn and cherry, the carbon footprints per unit area and the carbon footprints per unit yield of cherry were significantly higher than those of hawthorn. Fertilizer application is the main component of the carbon footprint of cherry and hawthorn orchards, and the carbon footprints per unit yield is negatively correlated with the carbon emission efficiency. Through a series of emission reduction measures, hawthorn and cherry orchards have the potential to achieve carbon neutrality.

Key words: carbon footprint; carbon economic efficiency; China's hawthorns; cherries; mitigation potential; life cycle assessment

为应对全球气候变化，中国政府明确提出 2030 年前达到碳峰值和 2060 年前实现碳中和的目标（“双碳”目标）[1]。我国作为农业大国，农业部门的温室气体排放量约占全球农业总排放的 12.5%[2]。农业既是温室气体的重要来源，同时也具备显著的固碳增汇能力，在碳减排过程中发挥着重要作用。因此，系统解析农业生产中的碳足迹构成，并探索新型的种植模式对于实现“双碳”目标至关重要[3]。

碳足迹（carbon footprint，CF）是定量衡量生产过程对气候变化潜在影响的重要指标[4]，生命周期评价法是一种量化产品在其整个生命周期中碳足迹的重要方法，该方法在农业领域内广泛应用[5]。目前在我国已有研究使用生命周期评价法评估油菜[6]及水稻[7]等作物的碳足迹，一些学者还探究了蔬菜及粮食系统碳足迹的时空特征[8]。林果产业作为我国仅次于粮食、蔬菜的第三大农业种植产业，在农业与林业中均占据重要地位[9]，近年来关于水果碳足迹的研究也日益增多。例如，Chen 等[10]评估了我国典型产区柚子园的碳足迹，提出通过减少氮肥施用量和提高氮肥利用效率来降低温室气体排放量；Li 等[11]在评估苹果和柑橘碳足迹时发现，生产环节碳足迹占全链条 90% 以上，农药生产及化肥施用是碳足迹的主要来源；张明洁等[12]采用生命周期评价法核算海南芒果的碳足迹，并认为种植过程中的氮肥施用端的碳足迹占 73.39%；另有研究表明，桃园中采用不充分灌溉方式可减少桃园的碳足迹[13]。然而，现有研究多聚焦于单一减排措施，对多种管理措施综合实施的减排潜力尚缺乏系统分析。

山楂（*Crataegus pinnatifida*）和樱桃（*Prunus pseudocerasus*）均属蔷薇科（Rosaceae），分别为山楂属（*Crataegus*）和李属（*Prunus*）的落叶乔木。我国山楂种植面积居世界首位，樱桃种植面积位列世界第三[2, 14]，两者因其丰富的营养和独特口感而广受欢迎。随着市场需求的增长，部分果园为追求高产量而过度投入农资，导致环境压力与温室气体排放问题日益突出，亟待优化其种植方式。然而，目前我国对这两种水果碳足迹的系统研究仍较缺乏。山西省绛县作为全国最大的山楂基地县及华北地区最大的樱桃种植基地[15]，其碳排放情况对推动我国山楂和樱桃产业低碳发展具有重大意义。

为此，本研究基于 2022 年在绛县山楂和樱桃产区的实地调研数据，采用生命周期评价方法，系统评估两种水果从种植到采收阶段的碳足迹，分析不同区域的低碳优势，并在不同时间尺度下构建 4 种模拟情景探讨其减排潜力，以期为我国水果产业低碳转型提供科学依据，助力低碳农业体系建设。

1　研究区域概况与研究方法

1.1　研究区域概况

研究区域位于山西省运城市绛县（35°29′31″N，111°34′28″E）（图 1）。该县属北温带大陆性季风气候，雨量充沛。年均气温为 11.4℃，年均降雨量达 630 mm，境内主要农耕土壤为褐土，质地适中，土层深厚，易于耕作，且保水保肥能力良好[16]。其气候及土壤条件非常适宜山楂及樱桃生长。2021 年绛县山楂种植面积达 6 666.67 hm^2，产量为 2.1 × 10^5 t，其面积与产量均占全国总量的 25% 以上；樱桃种植面积为 3 333.34 hm^2，产量为 0.5 × 10^5 t，面积与产量均超过全国总量的 30%。鉴于绛县山楂和樱桃种植面积大、产量高，是全国典型的代表性产区，因此本研究选取绛县下辖的 10 个镇作为山楂和樱桃碳足迹的核算范围，并在每个镇中选取 3 个行政村作为具体调查对象。

1.2　数据来源

本研究基于入户调查数据，核算绛县山楂和樱桃的生命周期碳足迹。调研首先在每个村选取种植面积较大、产量较高的山楂和樱桃种植户作为对象，最终共确定 128 户山楂种植户和 114 户樱桃种植户。通过问卷调查获取农户的农业生产活动水平数据，主要包括种植面积、肥料（无机肥和有机肥）及农药使用量、耗电量和耗油量等，用于碳足迹核算；同时收集用工成本及收益等信息，以辅助分析低碳优势。碳足迹核算所涉及的排放系数主要来源于已发表文献及《中国省级温室气体清单编制指南》（表 1）。对于调研中仅收集到投入品成本数据（肥料费用、灌溉电力费、农药费及运输费用等），则依据当地市场价格折算为实物用量。根据调研，当地电力价格为 0.7 元/（kW·h），除草剂、杀虫剂、杀菌剂的市场平均价格分别为 45.4、73.14、47.4 元/kg，无机肥（以复合肥为主）市场价格为 4.2 元/kg，调研汇总数据如表 2 和表 3 所示。

1.3　系统边界的确定

本研究采用生命周期评价法（LCA），遵循 ISO14040—2006 标准，从“摇篮到大门（涵盖从原材料获取到产品出厂阶段）”核算山楂和樱桃种植全过程的碳足迹。系统边界的确定是评估的基础[22]，本研究设定的系统边界（图 2）主要包括以下环节：（1）化肥生产端（生产氮磷钾肥及复合肥所产生的排放）；（2）肥料施用端（田间施肥产生的 N_2O 排放，包括直接排放及氮沉降、氮淋溶与氮径流引起的间接排放）；（3）农药生产端（生产除草剂、杀虫剂、杀菌剂产生的排放）；（4）灌溉耗电端（用电时产生的排放）；（5）农机耗油端（使用微耕机、旋耕机消耗的汽油或柴油所产生的排放）；（6）运输耗油端。此外，本研究未将果树生物量固碳及土壤固碳纳入系统边界。

1.4　投入品及能源排放公式

《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》中规定了碳排放核算方法，主要涉及活动数据及排放系数数据，活动数据是指在特定时期内（1 年）以及在界定地区里，燃料用量、投入品用量等人为活动产生温

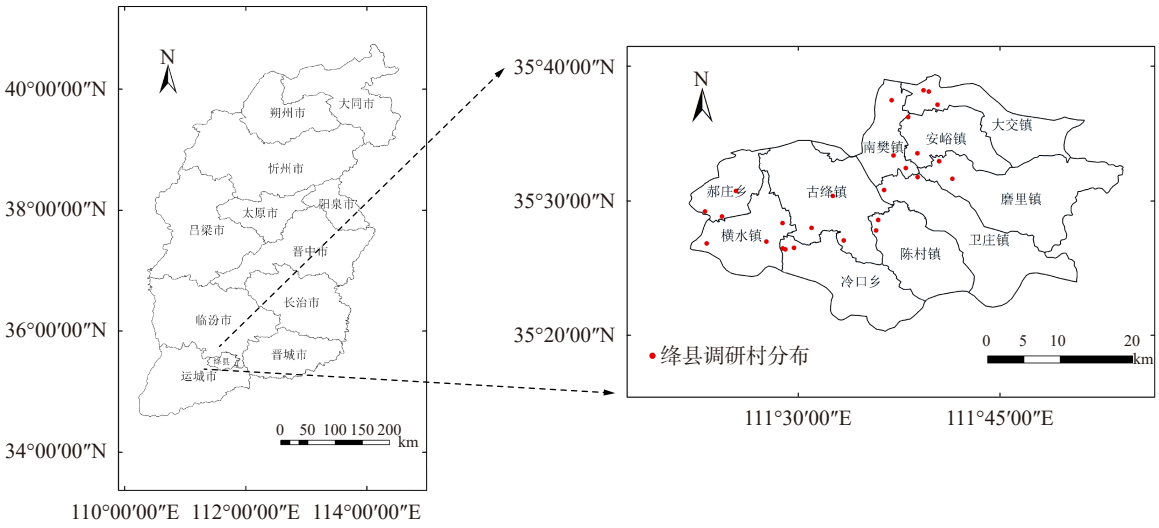


图 1　绛县地理位置及调研村分布

Fig. 1　Geographical location of Jiang County and distribution of surveyed villages

表 1 排放来源及其相关排放系数

Tab. 1 Emission sources and related emission coefficients

排放来源		排放系数	文献
尿素		7.49 kg/kg	[17]
过磷酸钙		0.71 kg/kg	
复合肥		0.39 kg/kg	
肥料施用	直接排放	0.008 5 kg/kg	
	氮沉降	1%	[18]
	氮淋溶或径流	1.1%	
农药	除草剂	63.92 kg/kg	[19]
	杀虫剂	57.07 kg/kg	
	杀菌剂	60.69 kg/kg	
柴油		2.601 kg/L	[20]
电		0.884 3 kg/(kW·h)	[21]

室气体排放的数据量，排放系数是与活动数据相对应的系数，用于核算活动数据产生的温室气体排放量[23]。

1.4.1 农资投入碳排放量

农资投入碳排放量是指在山楂种植环节主要农资投入品上游端产生的排放。

$$A_i = \sum (I_i E_i) \tag{1}$$

式中：A_i代表了农资投入产生的碳排放量(kg/hm^2)，I_i代表农资投入品活动数据，E_i代表投入品相对应的排放因子，i代表农资投入品的种类，如化肥、农药、电力等。

1.4.2 运输碳排放量

本研究根据运输过程中消耗的燃料及对应排放系数计算运输过程碳排放量。

$$A_{\text{fuel},i} = I_{\text{fuel},i} \times E_{\text{fuel},i} \tag{2}$$

式中：$A_{\text{fuel},i}$代表运输过程中产生的碳排放量(kg/hm^2)，$I_{\text{fuel},i}$代表燃料活动数据，$E_{\text{fuel},i}$代表燃料相关

表 2 山楂生产主要投入数据汇总

Tab. 2 Summary of main input data for hawthorn production

区域	种植面积/hm^2	尿素/(kg·hm^{-2})	过磷酸钙/(kg·hm^{-2})	复合肥/(t·hm^{-2})	有机肥/(kg·hm^{-2})	除草剂/(kg·hm^{-2})	杀虫剂/(kg·hm^{-2})	杀菌剂/(kg·hm^{-2})	电/(kW·h·hm^{-2})	柴油/(L·hm^{-2})
古绛镇	1 628.00	110.23	198.54	1.56	16.23	4.76	7.37	5.03	3.36	0.05
横水镇	386.60	76.09		1.33	13.56	5.18	4.38	2.95	2.07	0.03
郝庄乡	390.13	96.52	161.32	1.44	3.37	4.03	5.19	2.74	2.41	0.01
卫庄镇	537.47	65.83	114.64	1.32	5.49	8.22	6.24	9.86	3.72	0.03
磨里镇	192.27	83.77		1.50	2.87	7.56	8.11	8.30	1.72	0.04
南樊镇	1 149.87	234.56	200.32	1.96	5.27	8.95	7.98	6.47	4.25	0.06
陈村镇	897.20	62.71		0.78	4.32	6.69	7.35	4.99	3.28	0.03
安峪镇	825.33	47.76		0.66	3.05	5.25	3.56	6.28	3.99	0.03
大交镇	380.27	68.54	125.49	0.75	5.78	8.72	9.13	13.21	3.28	0.04
冷口乡	279.53	72.39		0.78	4.24	10.22	8.35	6.59	2.55	0.06

表 3 樱桃生产主要投入数据汇总

Tab. 3 Summary of main input data for cherry production

区域	种植面积/hm^2	尿素/(kg·hm^{-2})	过磷酸钙/(kg·hm^{-2})	复合肥/(t·hm^{-2})	有机肥/(kg·hm^{-2})	除草剂/(kg·hm^{-2})	杀虫剂/(kg·hm^{-2})	杀菌剂/(kg·hm^{-2})	电/(kW·h·hm^{-2})	柴油/(L·hm^{-2})
古绛镇	501.33	76.89		0.76	13.24	5.73	4.32	3.58	2.13	0.07
横水镇	567.33	98.46	54.43	1.45	20.42	5.94	6.24	4.35	2.72	0.04
郝庄乡	96.20	64.34	62.45	0.67	2.35	8.73	8.25	9.74	2.19	0.04
卫庄镇	93.27	32.90		0.45	5.67	6.95	5.22	8.53	2.89	0.05
磨里镇	58.37	97.59	102.43	1.23	10.37	7.12	5.22	3.57	2.75	0.04
南樊镇	990.67	110.39	83.24	1.44	18.46	6.56	5.79	5.77	3.41	0.03
陈村镇	69.67	35.78	68.43	0.34	5.94	3.23	2.56	4.90	2.39	0.02
安峪镇	391.37	80.56		1.32	12.43	4.77	3.10	3.56	3.06	0.03
大交镇	485.00	40.34		0.35	10.58	10.13	12.09	14.05	4.07	0.03
冷口乡	80.13	70.30		0.83	6.32	8.91	9.36	6.69	3.38	0.04

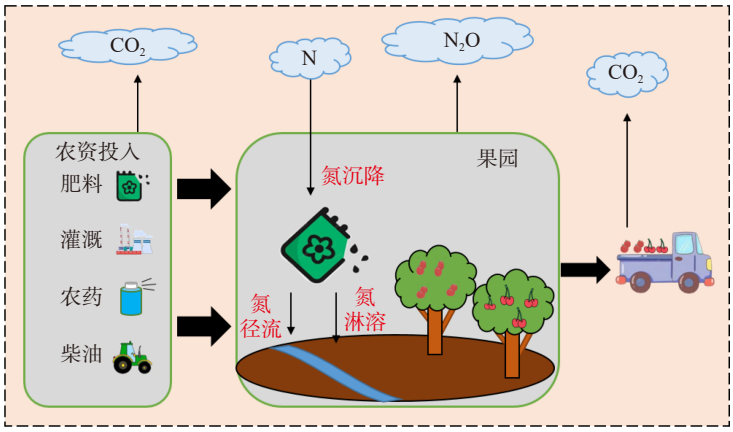


图 2　碳足迹核算的系统边界

Fig. 2　Systematic boundary of carbon footprint accounting

系数。

1.4.3　果园 N_2O 排放量

氮肥投入会导致果园土壤 N_2O 排放，包括直接排放和间接排放。直接排放是指氮肥施用引起的土壤 N_2O 直接排放，间接排放是指氮沉降以及氮淋溶径流间接产生的 N_2O 排放。

$$A_{N_2O} = A_{direct} + A_{indirect} \tag{3}$$

$$A_{direct} = \sum\left(F_n \times 0.085 \times \frac{44}{28} \times 273\right) \tag{4}$$

$$A_{indirect} = A_v + A_{lr} \tag{5}$$

$$A_v = \sum\left(F_n \times 0.11 \times 1\% \times \frac{44}{28} \times 273\right) \tag{6}$$

$$A_{lr} = \sum\left(F_n \times 0.24 \times 1.1\% \times \frac{44}{28} \times 273\right) \tag{7}$$

式中：A_{direct} 表示田间施用氮肥产生的 N_2O 直接排放量（kg/hm^2），$A_{indirect}$ 为大气氮沉降、淋溶和径流中 N_2O 的间接排放（kg/hm^2），F_n 表示氮肥活动数据，0.085 为氮肥引起的 N_2O 排放系数，$\frac{44}{28}$ 为 N_2O- N 转化为 N_2O 的系数，273 表示 N_2O 的 100 年全球变暖潜势（GWP）[24]，A_v 表示大气氮沉降产生的 N_2O 间接排放量（kg/hm^2），A_{lr} 表示氮淋溶和径流的间接 N_2O 排放量（kg/hm^2），0.11 表示氮肥挥发损失的比例，0.24 表示为淋溶和径流损失的所有施加氮/矿化氮的比例为 24%，1% 和 1.1% 为挥发性氮、淋溶氮和径流氮的排放系数[18]。

1.4.4　功能单位计算公式

果园种植环节的碳足迹按如下公式计算。

$$A = A_i + A_{fuel,i} + A_{N_2O} \tag{8}$$

$$C = \frac{A}{Y} \tag{9}$$

式中：A 表示果园单位面积碳足迹（kg/hm^2），C 表示单位产量碳足迹（kg/kg），Y 表示山楂和樱桃每公顷的产量（kg/hm^2）。

1.4.5　碳经济效率计算公式

碳经济效率（CEE）是评价经济发展与碳排放之间的关系的指标[25]。碳经济效率越高，表明该地区单位排放产生的经济效益越高，低碳优势越大，计算公式如下。

$$E_{CEE} = \frac{N_{EP}}{A} \tag{10}$$

式中：E_{CEE} 代表碳经济效率（元/kg），N_{EP} 代表山楂和樱桃单位种植面积产生的净收益（元/hm^2）。

1.5　减排情景设置

为推进农业低碳转型、服务国家碳达峰及碳中和目标，我国已出台多项相关政策与行动计划。例如，农业农村部《到 2025 年减少化肥和农药使用行动计划》明确提出化肥、农药使用量减少 20% 和 10%，《2030 年全国农业可持续发展规划》要求节水灌溉率提高 10%；国务院《2030 年前力争碳峰值行动计划》亦提出推动新能源全面替代柴油。基于上述政策导向与已有研究成果，本研究提出了山楂和樱桃园未来减排的替代措施。在新型肥料替代方面，有研究指出施用稳定的双缓释肥料（CPCS-Urea）、生物炭加硝化抑制剂和绿肥加沸石可有效减少 N_2O 的累积排放[26−29]，因此在设定情景时，将这几种措施分别作为部分化肥替代措施，绿肥措施用量所占比例略高于其他措施；在农药生产方面，采用多级生产技术替代传统生产技术，以减缓温室气体排放[30−32]；在灌溉方面，采用滴灌显著减少排放[33−34]，并使用新型清洁能源（太阳能、风能、光伏）实现发电零排放[35−37]；在运输燃料方面，采用新能源动力（混合动力和插电式混合动力）逐步取代柴油，最后实现净零排放[38−39]。根据上述措施，本研究建立了 4 种情景来探索山楂

及樱桃园内温室气体减排潜力。以现有种植措施为基准情景(Ba),在时间尺度下设立 4 种减排情景。除基准情景外,所有情景的肥料使用量均减少了 20%,与化肥减量计划相一致。在 4 种情景中,温室气体排放通过管理措施得到改善,每种情景采用了不同比例的减排措施(表 4)。

2 结果与分析

2.1 单位面积和单位产量碳足迹

绛县山楂和樱桃种植的单位面积碳足迹分别为 6.93 和 8.62 t/hm^2,受各镇管理措施差异影响,单位面积碳足迹存在明显空间异质性(图 3)。山楂种植中,古绛镇与南樊镇单位面积碳足迹较高,分别为 12.72 与 9.83 t/hm^2;樱桃种植中,横水镇与南樊镇的单位面积碳足迹均很高,分别为 13.24与 12.36 t/hm^2。上述 3 镇单位面积农资投入量过高,导致其单位面积碳足迹较高;相比之下,郝庄乡在两种水果种植过程中单位面积农资投入较低,单位面积碳足迹均较低,分别为 4.34 和 5.56 t/hm^2。

单位产量碳足迹与生产效率有直接关系,这一点在各调研区域单位产量碳足迹高低变化上有所体现。绛县山楂和樱桃种植的单位产量碳足迹分别为 0.23 和 0.57 t/t,樱桃园的单位产量碳足迹显著高于山楂园,主要原因是樱桃种植时单位产量农资投入量较大。在山楂园中,古绛镇单位产量碳足迹最高,为 0.39 t/t,而横水镇和南樊镇的樱桃单位产量碳足迹较高,分别为 0.89 和 0.76 t/t。这 3 镇的山楂与樱桃产量与其他镇差异不大,但农资投入过量且利用效率低,导致其单位产量碳足迹偏高。相反,郝庄乡与安峪镇的山楂单位产量碳足迹较低(分别为 0.15 和 0.11 t/t),陈村镇樱桃单位产量碳足迹为 0.32 t/t,表明其农资利用效率较高。

2.2 碳足迹构成

各调研镇的单位面积碳足迹构成如图 4 所示。在山楂园中,肥料施用端的碳足迹占比为 36.60% ~ 59.70%,其中古绛镇和南樊镇肥料施用端的碳足迹较高,为 7.36 和 3.77 t/hm^2,分别占总碳足迹的 58.71% 和 42.11%。南樊镇由于无机肥投入过高,在化肥生产端排放量达 2.40 t/hm^2,占碳足迹的 26.29%,这也是南樊镇种植山楂的碳足迹较高的原因;陈村镇及郝庄乡肥料施用端的碳足迹较低,分别为 2.02 及 2.38 t/hm^2。在樱桃园中,肥料施用端的碳足迹占比在 31.12% ~ 65.34%,横水镇和南樊镇肥料施用端的碳足迹分别为 8.69 和 7.26 t/hm^2,占碳足迹的 65.34% 和 58.60%;郝庄乡和卫庄镇肥料施用端的碳足迹较低,分别为 1.43 和 2.01 t/hm^2,碳足迹总量较低;陈村镇、大交镇及冷口乡灌溉方式主要为漫灌,灌溉耗电端的碳足迹均较高,分别为 2.11、3.60 和 2.99 t/hm^2。综上,肥料施用是山楂和樱桃种植环节碳足迹的主要来源,肥料用量及灌溉方式共同影响单位面积碳足迹各环节的大小及占比组成。

2.3 碳经济效率分析

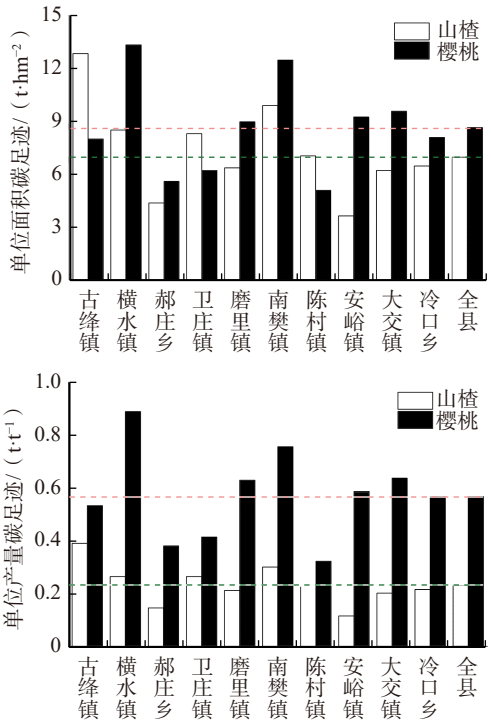
本研究采用碳经济效率和单位产量碳足迹综合评价低碳优势(图 5)。樱桃因经济价值较高,其碳经济效率普遍高于山楂。在各镇中,樱桃园的碳经济效率最高可达 81.34 元/t,而山楂园的最高碳经济效率仅为 18.33 元/t。同时,碳经济效率与单位产量碳足迹呈显著负相关($P < 0.05$),对山楂而言,安峪镇和郝庄乡的碳经济效率均在 17.5 元/t 以上,且单位产量碳足迹均小于 0.15 t/t,单位产量碳足迹较低且

表 4 不同减排情景描述及减排措施所占比例

Tab. 4 Description of different mitigation scenarios and proportions of emission reduction measures

环节	措施	减排影响	Ba/%	S1/%	S2/%	S3/%	S4/%	文献
施肥	传统肥料		100	75	50	20	0	
	双缓控释肥料	N_2O排放下降39.5%	0	5	15	25	30	[40]
	生物炭和硝化抑制剂	N_2O排放下降40%	0	5	15	25	30	[26, 28]
	绿肥与沸石结合	N_2O排放下降37.7%	0	15	20	30	40	[27, 29]
灌溉	漫灌 + 传统能源发电		100	40	15	0	0	
	滴灌 + 传统能源发电	耗电排放下降21.5%	0	10	15	20	0	[34]
	漫灌 + 新能源发电	耗电排放下降100%	0	40	35	0	0	[35−37]
	滴灌 + 新能源发电	耗电排放下降100%	0	10	35	80	100	
农药生产	传统生产方式		100	80	50	20	0	
	多级生产技术	农药生产排放下降100%	0	20	50	80	100	[30, 32]
运输耗油	新能源运输	运输排放下降100%	0	50	70	100	100	[38−39]

注:Ba、S1、S2、S3和S4分别代表现有基准情景、情景1(2030年)、情景2(2040年)、情景3(2050年)和情景4(2060年)。下同。



绿色和红色虚线分别代表绛县山楂和樱桃碳足迹平均水平。

图 3　山楂园和樱桃园的单位面积及单位产量碳足迹

Fig. 3　Carbon footprint composition per unit area and yield of hawthorn and cherry orchards

碳经济效率较高，因此具有较大的山楂低碳优势；由于果园系统内肥料及农药等产品的高投入，导致古绛镇的单位产量碳足迹最高，因此碳经济效率较低无低碳优势；在樱桃园中，卫庄镇单位产量碳足迹为全县最低，为 0.41 t/t，碳经济效率最高为 81.34 元/t，低碳优势显著；而南樊镇和横水镇的单位产量碳足迹较高，碳经济效率较低，分别为 34.61 和 21.70 元/t，低碳优势较弱。

2.4　不同情景下减排潜力分析

在 4 种减排情景下，山楂园和樱桃园碳足迹变化如图 6 所示。从基准情景到 S4 情景下，山楂园的单位面积碳足迹会从 6.93 t/hm^2 降至 1.59 t/hm^2，降幅为 77.06%；樱桃园的单位面积碳足迹将从 8.62 t/hm^2 降至 1.92 t/hm^2，降幅为 77.72%。至 2060 年（S4 情景），随着缓释肥料、绿肥及生物炭的广泛应用，山楂园中化肥生产端和施肥端产生的排放量将分别降至 1.10 和 0.49 t/hm^2；樱桃园中这两部分的排放将分别降至 1.61 和 0.30 t/hm^2。此外，随着清洁能源发电与新能源运输技术的逐步推广，2050 年后果园内农药生产端、灌溉耗电端和运输端将实现近零排放。

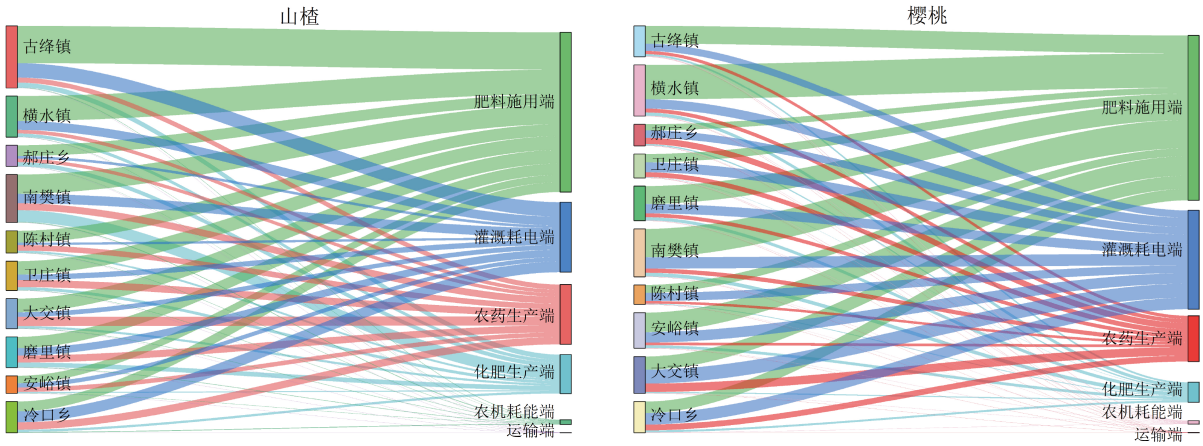


图 4　山楂园和樱桃园单位面积碳足迹构成

Fig. 4　Carbon footprint composition per unit area of hawthorn and cherry orchards

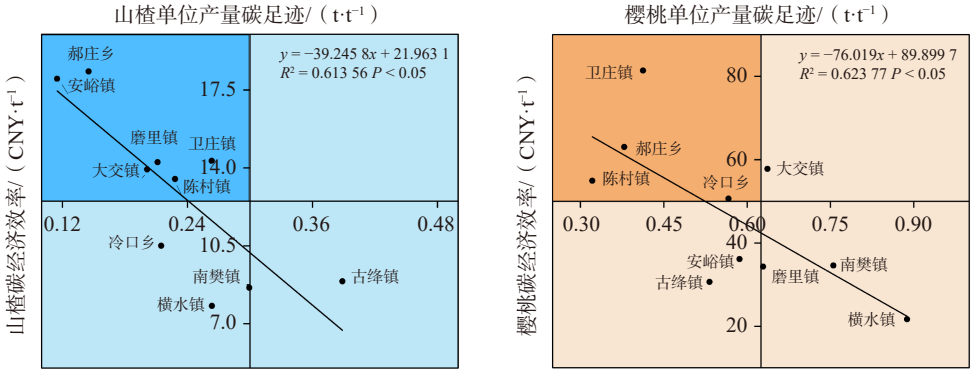


图 5　山楂和樱桃低碳优势分析

Fig. 5　Low-carbon advantages analysis for hawthorn and cherry

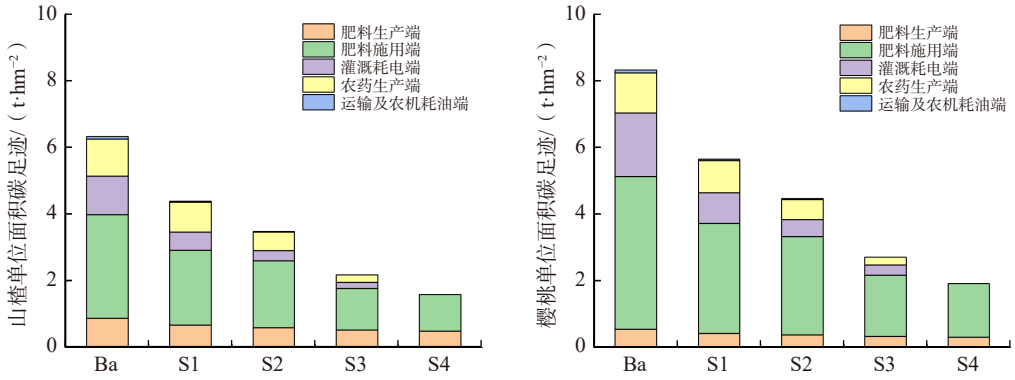


图 6 各情景下山楂和樱桃碳足迹构成

Fig. 6 Carbon footprint composition for hawthorns and cherries under each scenario

3 讨 论

肥料施用是本研究中山楂和樱桃典型种植区内碳足迹的主要来源，该结论与多数果园碳足迹研究结果一致[10, 29, 41−42]。尿素因其排放因子较高，对温室气体排放贡献显著[17]。本研究中，高排放区域尿素施用量比其他区域高出 14.58% ~ 134.04%；此外，有机肥施用（如古绛镇、横水镇施用量均超过 10 t/hm^2）也是导致区域内排放偏高的重要原因[43]。种植规模同样影响碳排放强度[44]，高排放区域的种植面积为其他区域的 1.58 ~ 8.48 倍，表明种植面积与排放强度呈正相关，因此提升管理水平与优化施肥模式十分必要。已有研究表明，使用缓释肥料、生物炭和绿肥等替代部分化肥，可在维持或提高作物产量的同时显著降低碳排放[26, 45]，应在山楂和樱桃种植中推广。樱桃园的单位面积碳足迹是山楂园的 1.24 倍，加之山楂单位面积产量较高（樱桃产量较山楂低 53.33%），导致樱桃的单位产量碳足迹显著高于山楂。灌溉耗电端也是碳足迹的重要组成部分，在陈村镇、安峪镇及大交镇等地区，灌溉用电产生的碳足迹占比较高，主要与当地普遍采用高耗电的漫灌方式有关[42]。研究表明[34]，滴灌方式相比漫灌可降低 N_2O 排放 21.50%，推广滴灌方式有助于在提高用水效率的同时减少温室气体排放。此外，清洁能源技术的应用将推动农药生产端运输端实现近零排放。因此，未来应大力发展清洁能源与新型高效肥料，构建低碳水果种植体系。

低碳优势分析表明，单位产量碳足迹与碳经济效率之间呈显著负相关（$P < 0.05$）（图 5）。在净利润不变的情况下，单位产量碳足迹越低，碳经济效率越高。调研区域山楂品种（如大金星、大五棱等）的单位面积收益相近，但生产成本存在一定差异。生产成本主要包括生产资料的投入（肥料、农药、种苗、灌溉等）和用工成本[46]。郝庄镇、安峪镇等低碳优势明显区域，农资投入成本仅为其他区域的 77.15% ~ 80.08%，加之山楂种植规模较小、劳动力以家庭为主，用工成本较低，总生产成本较低，因而碳经济效率较高；而古绛镇等碳经济效率较低区域山楂种植规模大、农资投入高、依靠雇工，导致生产成本较高，低碳优势较弱。由此可见，区域内低碳优势差异与生产成本密切相关，未来可推广自动化设备以降低人工成本，进一步增加低碳优势。

当前，各行业正积极制定减少碳排放路径[47]。国家明确提出至 2030 年，农业农村地区需统筹减排固碳与乡村振兴、农业现代化协同发展[48]。随着市场对山楂、樱桃等高营养价值水果需求的持续增长，亟须在保障产量的前提下推进低碳种植模式。为此，建议将碳足迹控制纳入山楂及樱桃产业发展规划：一方面要强化农业科技支撑，因地制宜选育抗逆品种、优化种植密度[10, 49]，推动农业生产向着更环保、低碳的方向发展；另一方面可引入碳标签制度[50]，量化并标识水果生产过程中的碳足迹，引导消费者选择低碳绿色产品，激励农户采取低碳实践，促进水果产业向可持续种植模式转型。

4 结 论

本研究基于入户调研数据，采用生命周期评价方法，系统评估了山西绛县各镇山楂和樱桃种植的碳足迹构成，探讨了不同减排情景下温室气体减排潜力。山楂及樱桃的单位面积碳足迹分别为 6.93 和 8.62 t/hm^2，单位产量碳足迹分别为 0.23 和 0.57 t/t，樱桃的碳足迹显著高于山楂。施肥是种植区域内产生碳足迹的主要来源，在山楂园和樱桃园中碳足迹占比最高可达 59.70% 和 65.34%，区域内由于尿素、有机肥施用量及种植面积的差异导致碳足迹不同。碳经济效率和单位产量碳足迹呈显著负相关，郝庄乡、安峪镇及卫庄镇的单位产量碳足迹仅为绛县的 47.82% ~ 65.22%，碳经济效率较高，具有显著的低

碳优势。在未来情景模拟中，绿肥、生物炭与缓释肥料的大范围替代，以及农药生产端、灌溉耗电端和运输端产生的排放量最终可能达到零，最终可使山楂园和樱桃园排放量分别减少 77.06% 和 77.72%。在多种措施相结合下，山楂园和樱桃园有望在 2060 年前实现碳中和。

参 考 文 献

[1] Li J, Wang W, Li M, et al. Impact of land management scale on the carbon emissions of the planting industry in China[J]. Land, 2022, 11(6): 816.

[2] FAO. Food and agriculture organization of the United Nations[Z/OL]. Food and Agriculture Database, 2022 [2025−01−15]. https://www.fao.org/home/en.

[3] 赵明月, 刘源鑫, 张雪艳. 农田生态系统碳汇研究进展 [J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9405−9416.
Zhao M Y, Liu Y X, Zhang X Y. A review of research advances on carbon sinks in farmland ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9405−9416.

[4] 张明洁, 张京红, 李文韬, 等. 中国农作物碳足迹核算研究概述 [J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(5): 148−154.
Zhang M J, Zhang J H, Li W T, et al. Review on resrarch of crop carbon footprint accounting in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(5): 148−154.

[5] Frankowska A, Jeswani H K, Azapagic A. Life cycle environmental impacts of fruits consumption in the UK[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 248: 109−111.

[6] 陈中督, 徐春春, 纪龙, 等. 2004—2015 年长江中下游地区冬油菜生产碳足迹的时空变化 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2019, 27(7): 1105−1114.
Chen Z D, Xu C C, Ji L, et al. Spatial and temporal changes in carbon footprint for oilseed rape production in the middle and lower reaches of Yangtze River during 2004−2015[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(7): 1105−1114.

[7] 董珑丽, 李小平, 姜雪, 等. 上海崇明岛水稻生产能耗与碳足迹生命周期评价 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(6): 1254−1260.
Dong L L, Li X P, Jiang X, et al. Assessment of energy consumption and carbon footprint of rice production using life cycle assessment method: case study in Chongming Island, Shanghai, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(6): 1254−1260.

[8] 周舒怡, 杨潇, 冯盼盼, 等. 陇东黄土高原旱作主要粮食和饲草生产碳足迹核算 [J]. 中国草地学报, 2022, 44(6): 11−17.
Zhou S Y, Yang X, Feng P P, et al. Carbon footprint accounting of main rain fed grain and forage crop production in the Loess Plateau of Eastern Gansu Province[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(6): 11−17.

[9] Xu P, Li Z, Wang J, et al. Fertilizer-induced nitrous oxide emissions from global orchards and its estimate of China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2022, 328. DOI: 10.1016/j.agee.2022.107854.

[10] Chen X, Xu X, Lu Z, et al. Carbon footprint of a typical pomelo production region in China based on farm survey data[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124041.

[11] Li T, Cheng G Y, Huang J Z, et al. Comprehensive footprint assessment of apple and citrus loss and waste[J]. Zhongguo Shengtai Nongye Xuebao / Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(4): 683−690.

[12] 张明洁, 张京红, 李文韬, 等. 热带果类农产品碳足迹核算研究: 以海南芒果为例 [J]. 热带农业科学, 2023, 43(4): 57−62.
Zhang M J, Zhang J H, Li W T, et al. Estimate of carbon footprint accounting of tropical fruit agricultural products: taking Hainan mango as an example[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2023, 43(4): 57−62.

[13] Maletsika P, Cavalaris C, Giouvanis V, et al. Effects of alternative fertilization and irrigation practices on the energy use and carbon footprint of canning peach orchards[J]. Sustainability, 2022, 14(14): 8583.

[14] 唐道民. 山楂醋酿造技术研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
Tang D M. Study on brewing technology of hawthorn vinegar[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2016.

[15] 赵彤, 田维飞. 融入地域特色文化的农产品包装设计探索: 以绛县山楂为例 [J]. 上海包装, 2025(9): 80−82.
Zhao T, Tian W F. Exploration of packaging design for agricultural products integrated with regional characteristic culture: taking Jiangxian hawthorn as an example[J]. Shanghai Packaging, 2025(9): 80−82.

[16] 苏文新, 尹燕萍. 山西省绛县林业生态县建设浅析 [J]. 山西林业科技, 2015, 44(4): 59−60.
Su W X, Yin Y P. Analysis on the construction of forestry ecological county in Jiangxian County, Shanxi Province[J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2015, 44(4): 59−60.

[17] 陈舜, 逯非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算 [J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6371−6383.
Chen S, Lu F, Wang X K. Estimation of greenhouse gases emission factors for China's nitrogen, phosphate, and potash fertilizers[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6371−6383.

[18] IPCC. Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use[Z]. 2019.

[19] 张国, 逯非, 黄志刚, 等. 我国主粮作物的化学农药用量及其温室气体排放估算 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2875−2883.
Zhang G, Lu F, Huang Z G, et al. Estimations of application dosage and greenhouse gas emission of chemical pesticides in staple crops in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 2875−2883.

[20] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 温室气体排

放核算与报告要求 第 25 部分: 食品、烟草及酒、饮料和精制茶企业: GB/T 32151.25—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Requirements of the greenhouse gas emissions accounting and reporting: Part 25: Food, tobacco, alcohol, beverage and refined tea enterprise: GB/T 32151.25−2024[S]. Beijing: China Standards Press, 2024.

[21] 魏夕凯, 谭效时, 阮嘉桐, 等. 2005—2021 年区域和省级电网碳排放因子研究 [J]. 气候变化研究进展, 2024, 20(3): 337−350.
Wei X K, Tan X S, Ruan J T, et al. Research on carbon emission factors of regional and provincial power grids from 2005 to 2021[J]. Climate Change Research, 2024, 20(3): 337−350.

[22] Tan D, Wu Y, Zhang Z, et al. Assessing the life cycle sustainability of solar energy production systems: a toolkit review in the context of ensuring environmental performance improvements[J]. Sustainability, 2023, 15(15): 11724.

[23] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中国 2008 年温室气体清单研究 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Department of Climate Change, National Development and Reform Commission. People's republic of China national greenhouse gas inventory in 2008[M]. Beijing: China Planning Press, 2014.

[24] IPCC. Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change; Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[Z/OL]. [2025−01−15] https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/.

[25] Liu J, Zhang J, Li Y, et al. China's mandarin and tangerine cultivation has not reached the carbon emissions peak[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2024, 29(5): 48.

[26] Beesley L, Moreno-Jimenez E, Gomez-Eyles J L, et al. A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(12): 3269−3282.

[27] Liu R, Chang D, Zhou G, et al. Green manuring combined with zeolite reduced nitrous oxide emissions in maize field by targeting microbial nitrogen transformations[J]. Science of the Total Environment, 2024, 950: 175382.

[28] Recio J, Montoya M, Ginés C, et al. Joint mitigation of NH_3 and N_2O emissions by using two synthetic inhibitors in an irrigated cropping soil[J]. Geoderma, 2020, 373: 114423.

[29] Wang P, Yu A, Li Y, et al. Reducing nitrogen application by 20% under the condition of multiple cropping using green manure after wheat harvesting can mitigate carbon emission without sacrificing maize yield in arid areas[J]. Field Crops Research, 2024, 306: 109232.

[30] Cech R, Leisch F, Zaller J G. Pesticide use and associated greenhouse gas emissions in sugar beet, apples, and viticulture in Austria from 2000 to 2019[J]. Agriculture-Basel, 2022, 12(6): 879.

[31] Koch M A, Tosun J, Kellermann L, et al. Reducing pesticides without organic certification? Potentials and limits of an intermediate form of agricultural production[J]. Cogent Food & Agriculture, 2023, 9(1): 2202892.

[32] Wang N, Shi M, Wu S, et al. Study on volatile organic compound (VOC) emission control and reduction potential in the pesticide industry in China[J]. Atmosphere, 2022, 13(8): 1241.

[33] Maisiri N, Senzanje A, Rockstrom J, et al. On farm evaluation of the effect of low cost drip irrigation on water and crop productivity compared to conventional surface irrigation system[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30(11−16): 783−791.

[34] Tian D, Zhang Y, Mu Y, et al. The effect of drip irrigation and drip fertigation on N_2O and NO emissions, water saving and grain yields in a maize field in the North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1034−1040.

[35] Khorampoor N, Farahani S D, Mosavi A. Modeling the efficiency and emissions of a hybrid solar-gas power plant[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2020, 14(1): 790−804.

[36] Raimundo D R, Silva dos Santos I F, Tiago Filho G L, et al. Evaluation of greenhouse gas emissions avoided by wind generation in the Brazilian energetic matrix: a retroactive analysis and future potential[J]. Resources Conservation and Recycling, 2018, 137: 270−280.

[37] Yang Z, Sun G, Behrens P, et al. The potential for photovoltaic-powered pumped-hydro systems to reduce emissions, costs, and energy insecurity in rural China[J]. Energy Conversion and Management-X, 2021, 11: 100108.

[38] Shafique M, Azam A, Rafiq M, et al. Life cycle assessment of electric vehicles and internal combustion engine vehicles: a case study of Hong Kong[J]. Research in Transportation Economics, 2022, 91: 101112.

[39] Shen W, Han W, Chock D, et al. Well-to-wheels life-cycle analysis of alternative fuels and vehicle technologies in China[J]. Energy Policy, 2012, 49: 296−307.

[40] Wang G, Gou Z, Tian G, et al. Study on the effectiveness and mechanism of a sustainable dual slow-release model to improve N utilization efficiency and reduce N pollution in black soil[J]. Science of the Total Environment, 2024, 907: 168033.

[41] Cordes H, Iriarte A, Villalobos P. Evaluating the carbon footprint of Chilean organic blueberry production[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2016, 21(3): 281−292.

[42] Guo C, Wang X, Li Y, et al. Carbon footprint analyses and potential carbon emission reduction in China's major peach orchards[J]. Sustainability, 2018, 10(8): 10082908.

[43] 王洲章, 朱津宏, 高南, 等. 接种具有 N_2O 减排效应的 PGPR 对大豆幼苗生长及土壤 N2O 排放的影响 [J]. 南京农业大学学报,

2025, 48(2): 369−379.

Wang Z Z, Zhu J H, Gao N, et al. Effects of inoculation with N_2O-mitigating PGPR strains on soybean seedling growth and N_2O emission from soil[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(2): 369−379.

[44] 葛晓华, 朱宇恩, 张铭昊, 等. 山西省农业领域碳排放影响因素及碳达峰预测研究 [J]. 山西农业大学学报 (自然科学版), 2025, 45(2): 128−140.

Ge X H, Zhu Y E, Zhang M H, et al. Study on influencing factors of agricultural carbon emissions and prediction of carbon peak in Shanxi Province[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025, 45(2): 128−140.

[45] 连小云, 陈玲玲, 张红美, 等. 生物炭对畜禽粪便好氧堆肥中温室气体排放影响研究现状 [J]. 农业与技术, 2025, 45(4): 61−65.

Lian X Y, Chen L L, Zhang H M, et al. Research status of influence of biochar on greenhouse gas emission in aerobic composting of livestock manure[J]. Agriculture and Technology, 2025, 45(4): 61−65.

[46] 杨蓉, 刘冲, 顾月兰, 等. 上海嘉定区草莓生产现状与对策建议研究 [J]. 中国种业, 2025(3): 36−39.

Yang R, Liu C, Gu Y L, et al. Research on current status and strategic recommendations for strawberry production in Jiading District, Shanghai[J]. China Seed Industry, 2025(3): 36−39.

[47] 马海波, 朱强. 基于生命周期评价的我国稻米碳足迹核算 [J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(6): 11−19.

Ma H B, Zhu Q. Accounting carbon footprint of rice in China based on life cycle evaluation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(6): 11−19.

[48] 李江涛, 于会勇, 郭海悦, 等. 河南省大豆生产体系化肥投入的碳足迹分析 [J]. 大豆科学, 2025, 44(2): 85−92.

Li J T, Yu H Y, Guo H Y, et al. Carbon footprint analysis of chemical fertilizer input in soybean production system in Henan Province[J]. Soybean Science, 2025, 44(2): 85−92.

[49] 杨吉顺, 李尚霞, 张智猛, 等. 施氮对不同花生品种光合特性及干物质积累的影响 [J]. 核农学报, 2014, 28(1): 154−160.

Yang J S, Li S X, Zhang Z M, et al. Effect of nitrogen application on canopy photosysthetic and dry matter accumulation of peanut[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(1): 154−160.

[50] 侯钰, 侯燕磊, 丁尚宇. 绿色低碳转型治理的国际经验及启示 [J]. 中国物价, 2025(2): 104−109.

Hou Y, Hou Y L, Ding S Y. Research on international experiences and enlightenment of green and low-carbon transition governance[J]. China Price Journal, 2025(2): 104−109.

（责任编辑　范　娟
责任编委　臧润国）