

文章编号:1672-3961(2026)02-0189-08

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2025.050

生命周期评价视角下的主要红肉产品水足迹

李梦晴¹,张天祚¹,马道天²,洪静兰^{1*}

(1.山东大学环境科学与工程学院,山东 青岛 266237; 2.山东大学威海前沿交叉科学研究院,山东 威海 264209)

摘要:为应对大规模红肉产品生产导致的水资源消耗与污染问题,采用基于生命周期评价理论的本土化水足迹模型,对猪肉、牛肉和羊肉3种红肉产品的水足迹进行系统量化和分析。结果显示,在“摇篮到大门”的系统边界内,猪肉生产在大多数中间点和终点影响类别中均表现出最高的水足迹,其次为牛肉,而羊肉最低。3种肉类生产的水足迹在关键流程分析中表现相似,主要由饲料生产和直接排放驱动。此外,直接消耗的水和排至土壤的铜分别被识别为影响人类健康和生态系统质量的关键物质。时空分析结果表明,调整牲畜养殖结构、因地施策和提高饲料利用效率,是降低该行业水足迹的关键措施。

关键词:水足迹;生命周期评价;红肉生产;环境影响;时空分析

中图分类号:X828

文献标志码:A

引用格式:李梦晴,张天祚,马道天,等. 生命周期评价视角下的主要红肉产品水足迹[J]. 山东大学学报(工学版),2026,56(2):189-196.

LI Mengqing, ZHANG Tianzuo, MA Xiaotian, et al. Water footprint of major red meat products from a life cycle assessment perspective [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(2):189-196.

Water footprint of major red meat products from a life cycle assessment perspective

LI Mengqing¹, ZHANG Tianzuo¹, MA Xiaotian², HONG Jinglan^{1*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, Shandong, China; 2. Weihai Institute for Interdisciplinary Research, Shandong University, Weihai 264209, Shandong, China)

Abstract: To address the issues of water consumption and pollution caused by large-scale red meat production, an indigenized water footprint model based on life cycle assessment theory was adopted to systematically quantify and analyze the water footprints of three red meat products: pork, beef, and mutton. The results indicated that, within the “cradle-to-gate” system boundary, pork production had the highest water footprint across most midpoint and endpoint impact categories, followed by beef, while mutton had the lowest. The water footprints of the three types of meat production showed similar patterns in the analysis of key processes, mainly driven by feed production and direct emissions. Directly consumed water and copper discharged to soil were identified as key substances contributing to impacts on human health and ecosystem quality, respectively. The spatiotemporal analysis suggested that restructuring livestock systems, adopting site-specific strategies, and improving feed use efficiency are essential measures to reduce the sector's water footprint.

Keywords: water footprint; life cycle assessment; red meat production; environmental impact; spatiotemporal analysis

0 引言

肉类及其制品作为营养价值丰富的食物来源,

在人类膳食结构中占据着重要地位。根据联合国粮食及农业组织发布的报告,全球肉类需求在2024年达到3.79亿吨(以胴体重量计),较2023年增长1.7%,其中,猪肉、牛肉和羊肉为代表的红肉产

收稿日期:2025-04-18

基金项目:山东省重点研发计划资助项目(2023CXGC010904)

第一作者简介:李梦晴(2001—),女,安徽宣城人,硕士研究生,主要研究方向为生命周期评价。E-mail:202312886@mail.sdu.edu.cn

*通信作者简介:洪静兰(1973—),女,辽宁抚顺人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为水足迹分析和生命周期评价。

E-mail:hongjing@sdu.edu.cn

量合计占全球肉类总产量的58.84%^[1-2]。我国在全球肉类产业链中发挥着关键作用,其庞大的产销规模对全球肉类价格、贸易格局及市场供需平衡产生深远影响。据《中国农业展望报告(2024—2033)》预测,2024—2033年我国肉类产量总体呈增长态势,其中猪肉生产将保持在合理水平,牛肉和羊肉的年均增长率将分别达到1.0%和1.2%^[3]。然而,红肉的生产过程涉及大量水资源消耗及污染物排放,已成为制约畜牧业绿色可持续发展的重要因素^[4-6]。与此同时,消费者对食品可持续性特征的关注持续上升,环境标签与可持续性声明的缺失将削弱消费者对产品的信任,并抑制其支付意愿^[7-9]。在此背景下,从生命周期评价(life cycle assessment, LCA)角度系统化红肉产品的水足迹,并识别其关键因素,对于推动畜牧业绿色转型、提高水资源利用效率具有重要意义,也为行业相关方提供了制定科学管理路径与政策干预的依据。

水足迹是一项衡量人类活动对水资源消耗与污染情况的综合性指标,能系统评估相关环境风险,并揭示产业活动与生态系统之间的关联,目前已被联合国环境规划署、斯德哥尔摩国际水研究所、联合国粮食及农业组织和世界自然基金会等国际机构和组织广泛应用到水资源、水集成管理研究中^[10-12]。水足迹评价方法包括体积导向与影响导向两类:前者侧重数量评估,易忽视毒性作用,结果粗放,难以识别关键节点;后者则聚焦潜在环境风险与损伤的识别和理解,更符合ISO 14046规定的采用LCA理论开展水足迹评价的原则、要求和指南^[13]。因此,本研究采用符合ISO 14046国际标准和GB/T 33859—2017国家标准、以影响为导向的中国本土化水足迹影响评价模型^[14-17],系统化和分析我国主要红肉产品生产的水足迹,并进一步识

别关键影响因素。

1 方法

1.1 目标和范围

本研究旨在评估和比较3种主要红肉产品(即猪肉、牛肉、羊肉)生产过程的水足迹。将功能单位设定为1 kg红肉产品,作为系统边界内所有输入和输出的定量标准以保证评价结果的可比性^[18]。基于该功能单位,系统化所有物料消耗、能源消耗、直接排放及废物处理,全面评估红肉生产的水足迹。研究采用“摇篮到大门”模式划定系统边界,涵盖农场内的牲畜养殖过程及农场外的相关活动(见图1)。

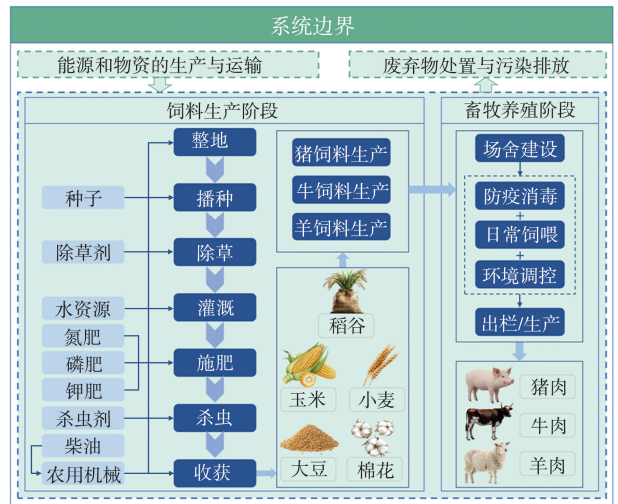


图1 系统边界图
Fig.1 System boundary

1.2 水足迹分析方法

本研究采用包括中间点与终点层面的水足迹分析方法,以系统评估红肉生产中与水相关的环境影响,避免污染转移^[11]。方法框架如图2所示。

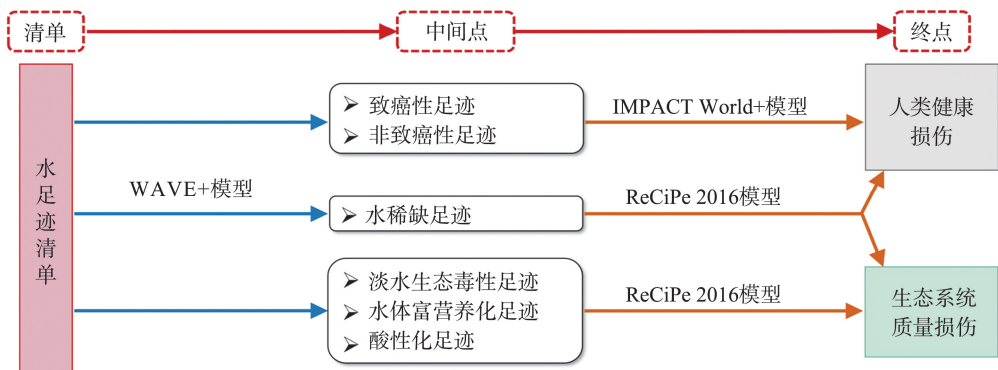


图2 水足迹分析框架
Fig.2 Water footprint analysis framework

在中间点层面,纳入的影响类别包括:水体富营养化、酸化、致癌性、非致癌性、水稀缺和淡水生态毒性。水稀缺足迹和水劣化足迹的量化分别基于 WAVE+模型和 Mackay 多介质逸度模型^[19-20]。3个毒性类别的结果因子来源于 MA 等^[17]的研究成果,而水体富营养化和酸化类别的结果因子来自 ReCiPe 2016 模型^[21]。

在终点层面,将6个中间点类别进一步归纳为2个终点影响类别:人类健康和生态系统质量。致癌性和非致癌性对人类健康的转换因子来源于 IMPACT World+模型,其余转换因子是从 ReCiPe 2016 模型中提取的^[21-22]。本研究应用 SimaPro 软件进行与水足迹分析相关的数据计算。

为消除各影响类别在量纲和数量级上的差异,便于横向比较和聚合分析,本研究采用标准化方法对数据进行处理^[23],公式为

$$N_c = \left(\sum_{i=1}^n W_{i,c} \right) / W_c,$$

式中, N_c 、 $W_{i,c}$ 、 W_c 分别为影响类别 c 的标准化结果、影响类别 c 中物质 i 的水足迹和我国区域化清单在影响类别 c 中产生的水足迹^[24]。

敏感性分析用来确定关键因素变动对评估结果的影响显著性^[25],计算公式为

$$S = \left| \frac{(E_2 - E_1) / E_1}{(C_2 - C_1) / C_1} \right|,$$

式中, S 为敏感性系数, E_2 和 E_1 分别对应物质投入变化前后的环境影响负荷, C_2 和 C_1 分别对应变化前后的物质投入量^[26]。

1.3 数据和清单

饲料、防疫消毒物资及能源消耗(如电力、煤炭和柴油)数据主要来源于《全国农产品成本收益资料汇编》^[27]。水体污染物排放(如化学需氧量、总氮、总磷)参考《畜禽养殖业粪便污染监测核算方法与产排污系数手册》进行量化^[28]。反刍动物(如牛、羊)消化过程产生的甲烷,其排放因子来源于《省级温室气体清单编制指南》^[29]。基础设施建设、温室气体和废水排放以及废弃物产生等数据基于中国东部、中部和西部地区 20 余家规模化养殖场的实地调研结果。背景清单数据来源于中国本土化的基于过程的生命周期清单数据库(Chinese Process-based Life Cycle Inventory Database, CPLCID[®])。该数据库采用基于关键节点识别的“微观-中观-宏观”递进快速动态清单构建技术开发而成^[30]。3种红肉生产 1 kg 产品的水足迹清单如表 1 所示。物料投入包括水、占地、建筑、饲料、防疫消毒物资,能源投入包含电力、煤炭、柴油,废物处置为粪污处置,向水体中排放的物质有化学需氧量、总氮、氨氮、总磷,向空气排放的物质为 CH_4 、 N_2O 和 SO_2 。

表 1 我国 2020 年主要红肉生产的水足迹清单
Table 1 Water footprint inventory of major red meat production in China, 2020

生产类别	物料投入量					能源投入量		
	水/kg	占地/ $10^{-3}m^2$	建筑/ $10^{-4}m^2$	饲料/kg	防疫消毒/g	电/kWh	煤炭/kg	柴油/g
猪肉生产	62.3	2.5	4.0	3.2	1.4	7.1×10^{-2}	1.5×10^{-2}	1.0
牛肉生产	10.2	2.8	5.0	1.3	1.0	4.5×10^{-2}	2.9×10^{-3}	0
羊肉生产	38.0	4.8	5.0	1.0	5.2	0.2	1.9×10^{-2}	0
生产类别	废物处置量		水体排放量			空气排放量		
	粪污处置/kg	化学需氧量/kg	总氮/g	氨氮/g	总磷/g	CH_4 /kg	N_2O /g	SO_2 /mg
猪肉生产	7.4	9.5×10^{-2}	8.2	1.7	1.6	6.1×10^{-2}	2.4	7.3
牛肉生产	24.5	0.2	9.1	1.2	0.9	0.1	1.5	1.0
羊肉生产	11.2	0.3	6.7	0.7	1.3	0.2	2.0	6.6

2 结果与讨论

2.1 水足迹分析结果

表 2 总结了我国主要红肉生产 1 kg 产品的水足迹及不确定性分析结果。其中,不确定性分析采用几何标准差的平方(squared geometric standard

deviation, S_{GSD}) 作为评估指标,用以表征水足迹评价结果在 95% 置信区间内的波动范围。例如,生产 1 kg 猪肉产品的水稀缺足迹为 $1.01 m^3$,其对应的 S_{GSD} 为 1.18,意味着在猪肉生产的生命周期中,每生产 1 kg 产品对水稀缺影响类别造成的潜在环境影响范围为 $0.85 \sim 1.19 m^3$ 。其他中间点和终点类别的水足迹范围可采用类似方法得到。

表2 我国2020年主要红肉生产的水足迹分析及不确定性分析结果

Table 2 Water footprint analysis and uncertainty analysis results of major red meat production in China, 2020

生产类别	中间点影响类别数据							
	水体富营养化		酸性化		致癌性		非致癌性	
	环境负荷/kg PO ₄ ³⁻ eq	S _{GSD}	环境负荷/kg SO ₂ eq	S _{GSD}	环境负荷/Case	S _{GSD}	环境负荷/Case	S _{GSD}
猪肉生产	9.37×10 ⁻³	1.28	1.87×10 ⁻²	1.45	2.01×10 ⁻⁸	2.55	2.27×10 ⁻⁷	4.54
牛肉生产	8.80×10 ⁻³	1.26	1.27×10 ⁻²	1.46	1.13×10 ⁻⁸	2.54	1.26×10 ⁻⁷	4.50
羊肉生产	1.02×10 ⁻²	1.31	7.81×10 ⁻³	1.47	8.81×10 ⁻⁹	2.45	7.72×10 ⁻⁸	3.79

生产类别	中间点影响类别数据				终点影响类别数据			
	水稀缺		淡水生态毒性		人类健康		生态系统质量	
	环境负荷/m ³	S _{GSD}	环境负荷/ (PAF·m ³ ·d)	S _{GSD}	环境负荷/DALY	S _{GSD}	环境负荷/ (Species·a)	S _{GSD}
猪肉生产	1.01	1.18	60.05	2.64	1.72×10 ⁻⁶	1.85	1.72×10 ⁻⁷	2.63
牛肉生产	0.48	1.22	34.16	2.70	8.87×10 ⁻⁷	1.92	9.81×10 ⁻⁸	2.68
羊肉生产	0.36	1.28	23.22	2.41	6.25×10 ⁻⁷	1.65	6.70×10 ⁻⁸	2.38

图3展示了1 kg猪肉、牛肉和羊肉生产的标准化水足迹分析结果。总体而言,猪肉生产在绝大多数影响类别中均表现出最高的水足迹,其次是牛肉,而羊肉的水足迹则相对较低,对应的环境负担也较小。对于中间点类别,水足迹影响主要体现在水稀缺,其次是非致癌性、致癌性和淡水生态毒性。相比之下,水体富营养化和酸性化类别的影响几乎可以忽略不计。在终点层面,人类健康的水足迹显著高于生态系统质量,在每种肉类生产情景中约占总影响的95%。这表明红肉生产过程中所涉及的水资源利用及污染问题对人体健康的潜在风险更值得关注。

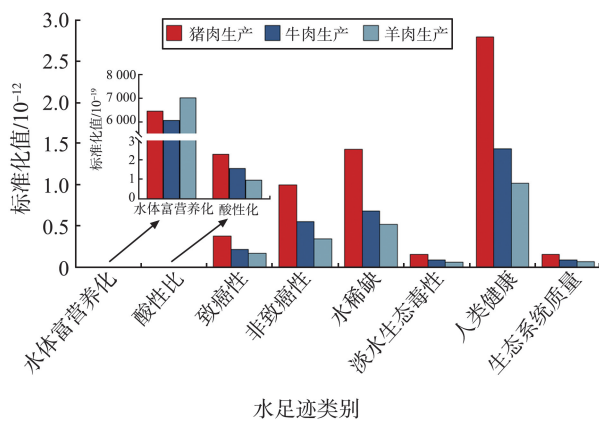


图3 标准化水足迹分析结果

Fig.3 Normalized water footprint analysis results

2.2 关键因素分析

猪肉、牛肉和羊肉生产的关键流程的详细分析如图4所示。在致癌性、非致癌性、水稀缺和淡水生态毒性的中间点类别中,饲料生产是猪肉、牛肉和羊肉生产水足迹的主要来源。具体来说,在非致癌

性和水稀缺类别中,饲料生产的贡献率接近100%。在致癌性和淡水生态毒性类别中,饲料生产的贡献也占据较大比例,猪肉、牛肉、羊肉的饲料生产在致癌性和淡水生态毒性类别中分别占据77.42%、76.13%、59.19%以及94.82%、88.09%、80.28%。水消耗和基础设施建设分别对这两个类别的水足迹做出了格外的贡献。直接排放是水体富营养化和酸性化的关键流程。防疫消毒流程在羊肉生产情境下的致癌性和淡水生态毒性类别中贡献了较小的水足迹,而在其余两种红肉生产中几乎可以忽略不计。其余环节(如煤炭、电力、柴油和废水处理)在各类别中的贡献均较低,对整体水足迹影响有限。因此,红肉生产全链条的水足迹主要归因于饲料生产和直接排放。为有效降低红肉生产对水体环境的压力,建议在未来实践中严格把控饲料生产过程中高耗水、高污染原料的使用,促进红肉生产体系的绿色转型与可持续发展。

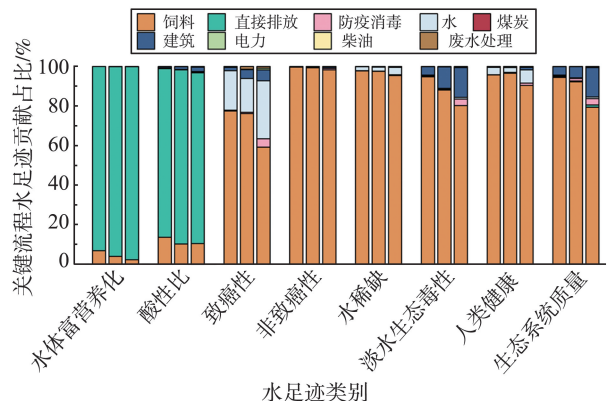


图4 关键流程分析结果

Fig.4 Key processes analysis results

猪肉、牛肉和羊肉生产的水足迹在中间点和终点水平上的关键物质贡献情况如图 5 所示。在 3 种肉类生产情景中,同一类别中主导水足迹的关键物质基本一致,但不同类别之间对应的关键贡献物质存在显著差异。在致癌性、非致癌性、水稀缺和淡水生态毒性这 4 个关键中间点类别中,对水足迹做出首要贡献的物质分别是排至土壤的铬、排至土壤的砷、水和排至土壤的铜。此外,排至水的六价铬

和排至土壤的锌分别对致癌性和淡水生态毒性类别做出了额外的贡献。在终点层面上,水是影响人类健康的主导因子,由水产生的水足迹在猪肉、牛肉和羊肉生产中分别达到 49.33%、45.81% 和 48.45%。同时,排至土壤的砷和铬也对该类别的水足迹做出了不可忽视的贡献,而其余物质的影响相对较小。排至土壤的铜和锌是导致生态系统质量类别水足迹的主要贡献者。

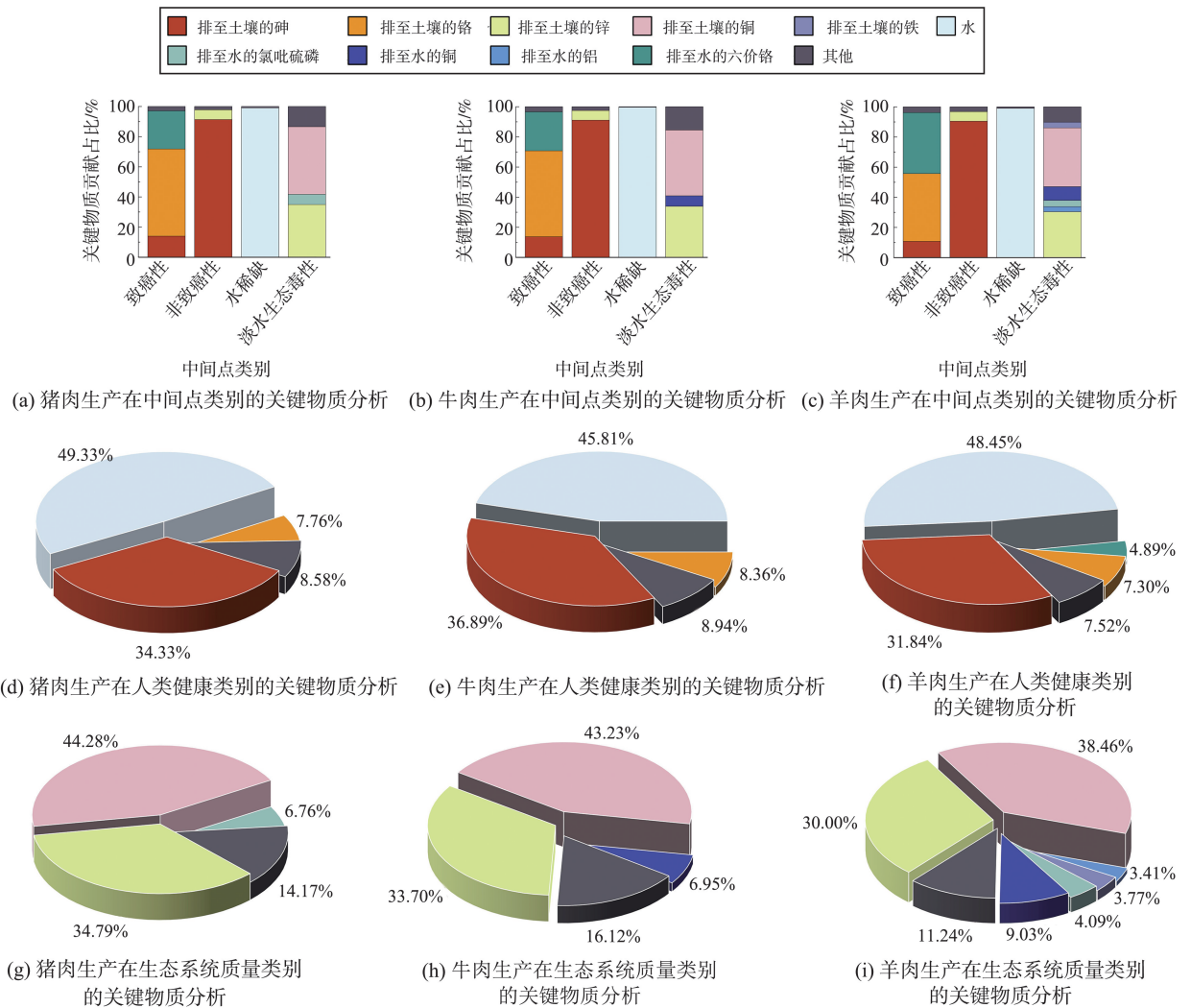


图 5 关键物质分析结果
 Fig.5 Key substances analysis results

2.3 敏感性分析

表 3 展示了关键流程参数在 5% 扰动条件下,4 类关键中间点水足迹类别的敏感性分析结果,以量化各参数变化对水足迹结果的响应程度。整体来看,饲料生产环节的变动会对几个影响类别的水足迹产生显著影响,其引发的水足迹变化幅度远高于直接水消耗和建筑建造流程。这一变动特征在猪肉、牛肉和羊肉生产 3 种情境中普遍存在,尤其体现在非致癌性和水稀缺类别中,突显出饲料投入所带

来的环境负荷在水足迹构成中的主导地位。此外,致癌性对直接水消耗流程的敏感性也较为突出,变化的水足迹影响分别为 1.00% (猪肉生产)、0.86% (牛肉生产) 和 1.47% (羊肉生产)。相比之下,建筑建造过程对水足迹结果的影响最小,所有类别下的变化率均低于 1%。因此,饲料生产流程是红肉生产系统中水足迹变化的关键敏感因子,未来应将优化饲料结构、提高饲料生产效率作为水环境绩效提升的核心策略^[31-32]。

表3 敏感性分析
Table 3 Sensitivity analysis

生产类别	关键流程	S/%			
		致癌性	非致癌性	水稀缺	淡水生态毒性
猪肉生产	饲料生产	3.87	4.98	4.89	4.74
	直接水消耗	1.00	0.00	0.10	0.03
	建筑建造	0.09	0.01	0.00	0.21
牛肉生产	饲料生产	3.81	4.97	4.88	4.40
	直接水消耗	0.86	0.00	0.10	0.02
	建筑建造	0.23	0.02	0.01	0.54
羊肉生产	饲料生产	2.96	4.91	4.77	4.01
	直接水消耗	1.47	0.01	0.18	0.04
	建筑建造	0.27	0.03	0.02	0.75

2.4 我国 2007—2020 年红肉产品水足迹

图6展示了2007—2020年我国主要红肉生产1 kg产品在人类健康(图6(a))与生态系统质量(图6(b))两个终点类别的水足迹变化趋势。总的来说,猪肉生产在两个终点类别上的水足迹始终高于牛肉和羊肉,表明猪肉生产对环境造成的影响更为显著,而其余两种红肉产品在水资源利用效率和环境外部性控制方面表现相对较优。在人类健康方面,2007年猪肉生产的水足迹达 1.93×10^{-6} DALY,此后经历迅速下降并呈现缓慢波动回升的趋势,至2020年为 1.72×10^{-6} DALY。牛肉和羊肉生产的水

足迹值在2007—2017年内变化趋势相似,变动范围分别为 $6.06 \times 10^{-7} \sim 9.04 \times 10^{-7}$ DALY及 $5.75 \times 10^{-7} \sim 8.17 \times 10^{-7}$ DALY。但在2018—2020年间,牛肉生产的水足迹呈逐年上升趋势,表明其对人类健康的潜在风险有所增加,而羊肉生产则相对稳定。生态系统质量类别中水足迹的变化趋势与人类健康类别基本一致。这些差异和波动可能是牲畜养殖技术发展、气候及政策调整等多重因素的共同作用所致。基于以上分析,建议将猪肉生产作为未来水足迹管理重点,优化养殖结构,提升效率,推动我国畜牧业向绿色、低碳和高效方向发展。

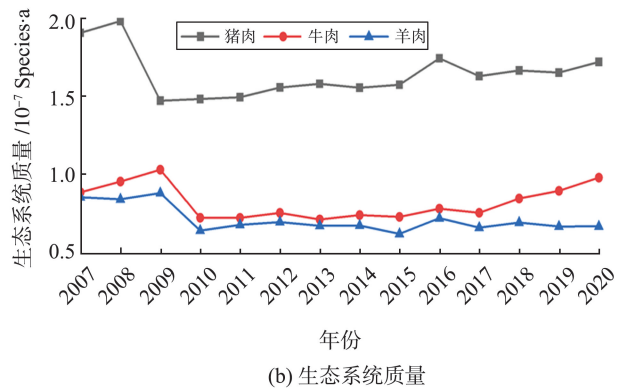
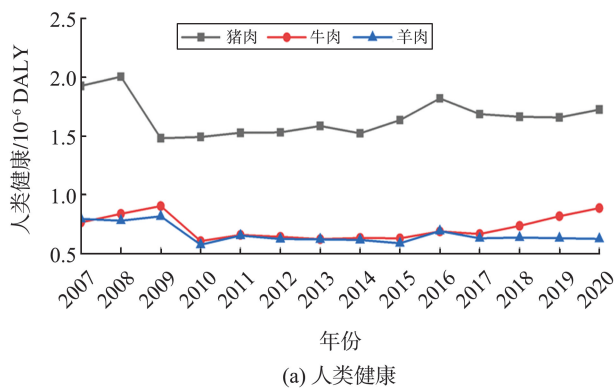


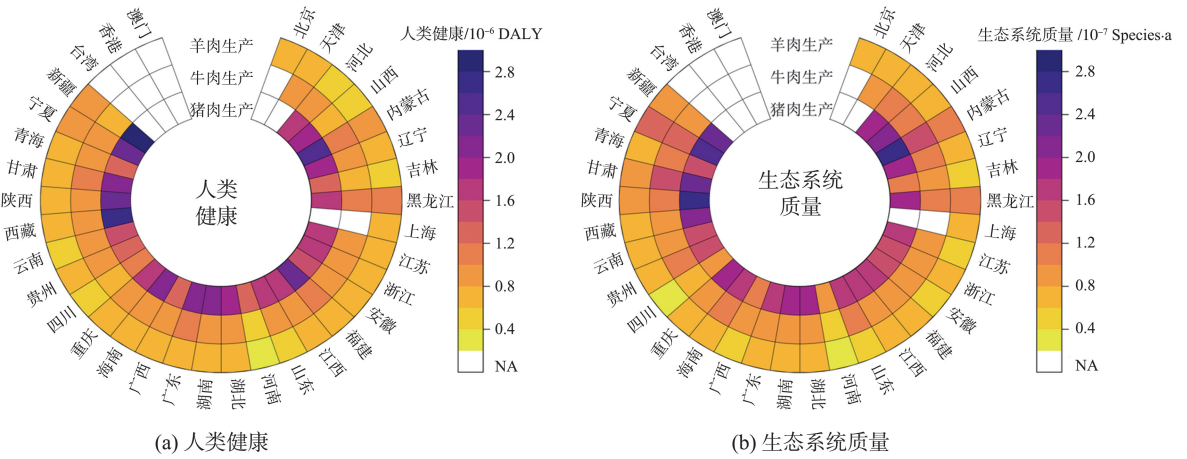
图6 2007—2020年我国主要红肉生产的水足迹

Fig.6 Water footprint of major red meat production in China from 2007 to 2020

2.5 红肉产品水足迹的空间分布

2020年我国各省级行政区红肉生产1 kg产品在人类健康和生态系统质量类别的水足迹的空间异质性如图7所示。对于人类健康类别,各地区红肉产品水足迹存在显著差异。例如,猪肉生产的水足迹在西北地区(如新疆、西藏、内蒙古、宁夏和陕西)表现出较高的潜在健康风险,尤其是新疆,其水足迹影响值最高,为 2.98×10^{-6} DALY。相

比之下,四川的水足迹影响值最低,为 1.01×10^{-6} DALY,其次为吉林、河南和青海等地区。类似的空间异质性分析方式也适用于其他肉类生产的水足迹。这种空间差异可能与当地的生产规模、工业化程度以及农业产业结构等因素相关。通过对各地区红肉生产的水足迹空间分布的具体分析,可以识别出高影响区域,为在当地展开针对性策略提供理论依据。



注:NA 表示数据不可得。

图 7 2020 年我国主要红肉生产水足迹的空间分布特征

Fig.7 Spatial distribution of water footprint of major red meat production in China in 2020

3 结论

本研究采用基于 LCA 框架的水足迹核算方法,系统比较猪肉、牛肉和羊肉生产的水环境影响,并提出针对性建议。结果表明,猪肉生产在大多数影响类别中表现出最高的水足迹,牛肉次之,羊肉最低。在中间点维度上,红肉生产的水足迹主要集中于水稀缺、非致癌性及致癌性等类别;在终点维度上,人类健康的影响占比高达 95%,远高于生态系统质量。饲料是红肉生产水足迹的主要来源,优化饲料结构及规范农业投入管理可显著降低整体水足迹。直接消耗的水和排至土壤的铜分别被识别为影响人类健康和生态系统质量类别的主要贡献物质。基于 2007—2020 年中国红肉产品水足迹的时间序列分析,猪肉生产的水足迹始终高于牛肉和羊肉。这表明在未来水资源管理中,应将猪肉生产作为干预重点,提升肉猪养殖效率,降低单位产肉的水消耗和水污染。空间分析有助于识别出红肉生产的高水足迹区域,为制定区域化水资源管理策略提供科学依据。

参考文献:

[1] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Meat market review. Overview of global market developments in 2024[EB/OL]. (2025-04-22)[2025-10-16]. <https://openknowledge.fao.org/items/b553c447-f6b2-4ff8-825e-024767b27760>

[2] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Meat market review. Emerging trends and outlook in 2024[EB/OL]. (2024-11-27)[2025-04-13].

<https://openknowledge.fao.org/items/9e01dd92-9217-47e8-8134-90a8955e30c0>

[3] 农业农村部农产品市场分析预警团队. 中国农业展望报告(2024—2033)[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2024.

[4] LU Y, MA W Q, SHAO L W. Strategies to mitigate the environmental footprints of meat, egg and milk production in northern China[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 443: 141027.

[5] ZHANG N N, BAI Z H, WINIWARTER W, et al. Reducing ammonia emissions from dairy cattle production via cost-effective manure management techniques in China[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(20): 11840-11848.

[6] WIEDEMANN S, MCGAHAN E, MURPHY C, et al. Environmental impacts and resource use of Australian beef and lamb exported to the USA determined using life cycle assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 94: 67-75.

[7] SÁNCHEZ-BRAVO P, CHAMBERS E, NOGUERA-ARTIAGA L, et al. Consumers' attitude towards the sustainability of different food categories[J]. Foods, 2020, 9(11): 1608.

[8] BASTOUNIS A, BUCKELL J, HARTMANN-BOYCE J, et al. The impact of environmental sustainability labels on willingness-to-pay for foods: a systematic review and meta-analysis of discrete choice experiments[J]. Nutrients, 2021, 13(8): 2677.

[9] LI S S, KALLAS Z. Meta-analysis of consumers' willingness to pay for sustainable food products[J]. Appetite, 2021, 163: 105239.

[10] KLÖPPFER W. Peer (Expert) review in LCA according to SETAC and ISO 14040[J]. The International Journal

- of Life Cycle Assessment, 1997, 2(4): 183-184.
- [11] 马道天, 洪静兰, 翟一杰, 等. 基于生命周期评价的本土化水足迹影响评价模型构建[J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8640-8649.
- MA Xiaotian, HONG Jinglan, ZHAI Yijie, et al. Indigenized life cycle water footprint impact quantification model construction[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(21): 8640-8649.
- [12] ZHANG T Z, ZHAI Y J, MA X T, et al. Towards environmental sustainability: life cycle assessment-based water footprint analysis on China's cotton production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 313: 127925.
- [13] ISO (International Organization for Standardization). ISO 14046: 2014: environmental management-water footprint-principles, requirements and guidelines [EB/OL]. (2014-08) [2025-04-13]. <https://www.iso.org/standard/43263.html>
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 全国环境管理标准化技术委员会. 环境管理 水足迹 原则、要求与指南: GB/T 33859—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [15] ZHAI Y J, ZHANG T Z, BAI Y Y, et al. Energy and water footprints of cereal production in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 164: 105150.
- [16] ZHAI Y J, ZHANG T Z, MA X T, et al. Life cycle water footprint analysis of crop production in China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256: 107079.
- [17] MA X T, SHEN X X, QI C C, et al. Energy and carbon coupled water footprint analysis for Kraft wood pulp paper production[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 96: 253-261.
- [18] ISO (International Organization for Standardization). ISO 14040: 2006: environmental management-life cycle assessment-principles and framework[EB/OL]. (2006-07) [2025-04-13]. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- [19] BERGER M, VAN DER ENT R, EISNER S, et al. Water accounting and vulnerability evaluation (WAVE): considering atmospheric evaporation recycling and the risk of freshwater depletion in water footprinting [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(8): 4521-4528.
- [20] MACKAY D. Multimedia environmental models[M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [21] HUIJBREGTS M A J, STEINMANN Z J N, ELSHOUT P M F, et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2017, 22(2): 138-147.
- [22] JOLLIET O, ANTÓN A, BOULAY A M, et al. Global guidance on environmental life cycle impact assessment indicators: impacts of climate change, fine particulate matter formation, water consumption and land use[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018, 23(11): 2189-2207.
- [23] ZHANG T Z, BAI Y Y, SHEN X Z, et al. Cradle-to-gate life cycle assessment of cobalt sulfate production derived from a nickel-copper-cobalt mine in China[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2021, 26(6): 1198-1210.
- [24] ZHAI Y J, BAI Y Y, SHEN X X, et al. Provincial water availability footprint evaluation and transfer analysis of China's grain products: a life cycle perspective[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 276: 108050.
- [25] HONG J L, SHAKED S, ROSENBAUM R K, et al. Analytical uncertainty propagation in life cycle inventory and impact assessment: application to an automobile front panel[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, 15(5): 499-510.
- [26] WANG Q S, TANG H R, MA Q, et al. Life cycle assessment and the willingness to pay of waste polyester recycling [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 234: 275-284.
- [27] 国家发展和改革委员会价格司, 国家发展和改革委员会价格成本调查中心. 全国农产品成本收益资料汇编[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [28] 董红敏. 畜禽养殖业粪便污染监测核算方法与产排污系数手册[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [29] 国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单编制指南[R]. 北京: 国家环境出版集团, 2011.
- [30] ZHANG Y L, SUN M X, HONG J L, et al. Environmental footprint of aluminum production in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 133: 1242-1251.
- [31] MEKONNEN M M, NEALE C M U, RAY C, et al. Water productivity in meat and milk production in the US from 1960 to 2016[J]. *Environment International*, 2019, 132: 105084.
- [32] GOVONI C, CHIARELLI D D, RULLI M C. A global dataset of the national green and blue water footprint of livestock feeds[J]. *Scientific Data*, 2024, 11: 1419.