doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.057

中国苹果主产省苹果生产水足迹动态演变

李晓鹏　刘　霞
（兰州财经大学农林经济管理学院，兰州 730020）

摘要：为揭示中国苹果生产水资源消耗的时空变化规律及其经济效益，基于 CLIMWAT 2.0 和 CROPWAT 8.0 软件，计算了 2003—2022 年中国苹果主产省苹果生产水足迹，并运用通径分析、重心迁移法和水足迹效益评价等方法，深入剖析了苹果生产水足迹时空变化的关键因素及其经济效益。结果表明，中国苹果主产省苹果生产水足迹在时间上呈先上升后下降发展趋势，空间上则呈“西高东低”格局。主产省年均苹果生产水足迹为 1.41×10^{10} m^3，其中蓝、绿、灰水足迹分别占 20.5%、52.1%、27.4%，绿水足迹主导变化。进一步分析表明，农药使用量、农业机械总动力和农业用水量是影响苹果总水足迹的三大核心因素，且农业机械总动力、相对湿度、农药使用量分别对水足迹具有正向驱动作用。此外，水足迹产值呈下降趋势，表明苹果生产的水足迹经济效益有待提升。基于此，建议各苹果主产省优化种植布局与结构，推广节水灌溉技术，提升水资源利用效率，推动苹果产业绿色可持续发展。

关键词：水足迹；苹果；动态演变；水足迹效益评价；苹果主产省
中图分类号：S273　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)07-0608-10　　**OSID**：

Dynamic Evolution of Water Footprint in Apple Production in Major Apple-producing Provinces of China

LI Xiaopeng　LIU Xia
(*College of Agriculture and Forestry Economics and Management, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou* 730020, *China*)

Abstract: Aiming to reveal the spatio-temporal variation patterns of water consumption and economic benefits in apple production in China, the water footprint of apple production in major apple-producing provinces from 2003 to 2022 was calculated based on CLIMWAT 2.0 and CROPWAT 8.0 software. Path analysis, gravity center migration method and water footprint benefit evaluation were employed to deeply analyze the key factors influencing the spatio-temporal variation of water footprint in apple production and its economic benefits. The results showed that the water footprint of apple production in major apple-producing provinces in China was increased first and then decreased over time, and presented a pattern of "high in the west and low in the east" in space. The average annual water footprint of apple production in major apple-producing provinces was 1.41×10^{10} m^3, among which blue, green and grey water footprints accounted for 20.5%, 52.1% and 27.4%, respectively, with green water footprint being the dominant factor. Further analysis indicated that the amount of pesticide used, total power of agricultural machinery and agricultural water consumption were the three core factors affecting the total water footprint of apple production, and total power of agricultural machinery, relative humidity and the amount of pesticide used had positive driving effects on water footprint. In addition, the output value of water footprint showed a downward trend, indicating that the economic benefits of water footprint in apple production needed to be improved. Based on this, it was suggested that the major apple-producing provinces should optimize the planting layout and structure, promote water-saving irrigation technologies, improve water resource utilization efficiency, and promote the green and sustainable development of the apple industry.

Key words: water footprint; apple; dynamic evolution; water footprint benefit evaluation; major apple-producing provinces

收稿日期：2025-01-10　修回日期：2025-03-20
基金项目：甘肃省自然科学基金项目(24JRRA10031、20JR5RA202)、甘肃省陇原青年人才创新创业项目(2021LQGR59)和甘肃省教育厅青年博士支持项目(2025QB—055)
作者简介：李晓鹏(1981—)，女，副教授，博士，主要从事林果产业与区域发展研究，E-mail：lixiaopeng1396@163.com

0　引言

2023 年我国苹果产量为 4.96×10^7 t，占世界产量的 57.4%，已成为全球最大的苹果生产国和消费国[1]。然而，随着苹果产业的快速发展，水分不足已成为制约中国苹果产业持续发展的重要原因之一。尽管中国在全球水资源总量排名靠前，但人均占有量却远低于世界平均水平，这一结构性矛盾在水资源紧张的农业领域尤为突出[2-4]。因此，如何高效利用水资源，减少苹果生产过程中的水资源消耗，已成为当前亟待解决的问题。

水足迹概念由 HOEKSTRA 首次提出，其不仅涵盖了直接用于作物生长的地表水、地下水（蓝水足迹）与降水（绿水足迹），还包括处理农业生产污染物所需水量（灰水足迹），为全面评价农业生产的水资源环境影响提供了科学依据[5-6]。自水足迹概念提出以来，国内外学者将其广泛应用于农作物生产水资源消耗的量化研究。MIALYK 等[7]利用全球作物模型模拟了 1990—2019 年 175 种作物水足迹；YANG 等[8]计算了中国 14 种主要农作物生产水足迹。随着水足迹核算体系不断完善，研究重点逐渐转向粮食作物水足迹时空演变特征及其影响因素分析。聂汉林等[9]量化了关中地区冬小麦、夏玉米生产水足迹时空特征，发现单产、平均风速和化肥施用量是影响蓝、绿、灰水足迹的主要因素；刘巍等[10]计算了黑龙江省粮食生产蓝、绿、灰水足迹，并利用皮尔逊相关系数分析了其影响因素；赵明宇等[11]对黄淮海农作区近 30 年冬小麦水足迹进行了评估。近年来，学者逐渐意识到单纯时空分析虽能揭示水足迹的分布规律，但难以优化农作物种植结构或全面评估水资源可持续利用情况。因此，部分研究转向水资源综合评价，旨在为农业与水资源协调发展提供科学依据。林馨园等[12]通过调整塔里木河流域作物种植结构，发现可节约灌溉水 4.2%；文献[13-14]分别对宁夏和陕西地区典型年农作物节水潜力进行了计算，发现蓝水真实节水潜力最高；王斌等[15]对吉林省水稻生产水足迹依赖度及水足迹效益进行了评价，发现其水足迹产值逐年提升。

随着粮食结构趋于稳定，水果产业尤其苹果生产水足迹逐渐引起学者关注。研究表明，苹果属于高耗水型作物，其单位面积水足迹是粮食作物的 2 倍以上[14]。HONG 等[16]通过 WECF 评估方法对中国苹果生产进行了综合足迹分析，发现不同苹果产区的水资源利用情况差异显著。谭琨等[17]分析了 1980—2018 年中国苹果生产需水量，指出 7 个苹果主产省需水量占全国的 91.6%。尽管现有研究已广泛涉及水稻、小麦、玉米等粮食作物水足迹计算，但关于水果生产水足迹的研究仍相对匮乏。特别是针对苹果产业的研究尚未充分结合耗水结构变化及其水足迹效益，以探讨产业结构调整的潜在路径。

综上，苹果产业在中国乃至全球水果市场中占据重要地位，对促进地方经济发展和农民增收具有显著贡献，但也面临着水资源紧张和环境压力加大的双重挑战。本研究基于 2003—2022 年中国苹果主产省水足迹数据，系统分析苹果生产水足迹时空演变特征及关键影响因素，为精准调控提供理论依据。同时，通过构建人均水足迹、地均水足迹、水足迹产值评价指标体系，对苹果生产水足迹效益进行综合评价，为其他高耗水作物水足迹研究提供参考，以推动农业水资源管理与苹果产业可持续发展。

1　数据来源与研究方法

1.1　研究区概况

根据国家现代苹果产业体系苹果区划方案，中国苹果产地划分为渤海湾产区（山东、河北、辽宁、天津、北京）、黄河故道产区（河南、安徽、江苏）、黄土高原产区（陕西、甘肃、山西、青海、宁夏）、特色产区（内蒙古、黑龙江、吉林、湖北、重庆、新疆）以及西南冷凉高地产区（四川、云南、贵州、西藏）五大产区[18]。其中，甘肃、陕西、山东、山西、河北、河南和辽宁 7 个省份在过去 20 年（2003—2022 年）苹果产量和果园面积均稳居全国前列，至 2022 年，其苹果产量和果园面积分别占全国的 88% 和 82%，因此，本文选取这 7 个省份作为苹果主产省进行深入研究。

1.2　数据来源与计算

2003—2022 年各省苹果产量、果园面积、苹果产值、农用化肥施用量、农药使用量、有效灌溉面积和农业机械总动力等数据来源于《中国农村统计年鉴》；氮肥折纯用量来源于《全国农产品成本收益资料汇编》；年末总人口数、农业用水量来源于《中国统计年鉴》；降雨量、相对湿度、平均温度、平均风速数据来源于国家气象科学数据中心。

水足迹计算采用联合国粮食及农业组织（FAO）发布的 CLIMWAT 2.0 和 CROPWAT 8.0 软件。通过 CLIMWAT 2.0 获取各站点气象数据，并利用 CROPWAT 8.0 计算出各省份苹果的蒸发蒸腾量（ET_c）和有效降水量（P_{eff}），计算苹果作物水足迹。研究区气象站点数量多、分布广、差异大，为增强数据代表性，选取各省会城市站点（图 1）。

1.3　研究方法

1.3.1　苹果水足迹测算方法

作物水足迹是指某种农作物在生产过程中水资

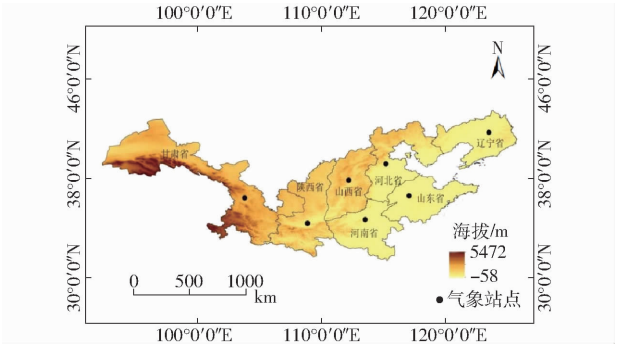

图 1 研究区及气象站点示意图

Fig. 1 Schematic of study area and meteorological stations

源消耗量,包括蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹。根据《水足迹评价手册》,苹果作物生产水足迹计算公式为

$$AWF = AWF_{green} + AWF_{blue} + AWF_{grey} \tag{1}$$

其中

$$AWF_{green} = 10ET_{green}A_{apple} \tag{2}$$

$$AWF_{blue} = 10ET_{blue}A_{apple} \tag{3}$$

$$AWF_{grey} = \frac{\alpha A_R}{C_{max} - C_{nat}} \tag{4}$$

$$ET_{blue} = \max(0, ET_c - P_{eff}) \tag{5}$$

$$ET_{green} = \min(ET_c, P_{eff}) \tag{6}$$

式中 AWF——苹果生产水足迹

AWF_{green}——苹果生产绿水足迹

AWF_{blue}——苹果生产蓝水足迹

AWF_{grey}——苹果生产灰水足迹

ET_{green}——苹果生产绿水蒸发蒸腾量

ET_{blue}——苹果生产蓝水蒸发蒸腾量

ET_{grey}——苹果生产灰水蒸发蒸腾量

A_{apple}——苹果果园面积

α——氮肥淋溶率,取 8.8%[5]

A_R——氮肥折纯用量

C_{max}——氮肥最大环境允许浓度

C_{nat}——污染物本底浓度

ET_c——苹果蒸发蒸腾量

根据 GB 3838—2002《地表水环境标准》Ⅲ类标准将 C_{max} 确定为 0.01 kg/m^3,C_{nat} 设定为 0。

1.3.2 重心迁移分析

重心迁移模型可以揭示某一特定要素在空间的变动特征。采用重心迁移模型分析中国苹果主产省苹果生产水足迹重心演变,反映苹果生产水足迹时空变化,揭示苹果产区迁移过程[19]。计算公式为[20]

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_{it}X_i}{\sum_{i=1}^{n} A_{it}} \tag{7}$$

$$Y_t = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_{it}Y_i}{\sum_{i=1}^{n} A_{it}} \tag{8}$$

$$D_{Ap} = \sqrt{(X_{k+Ap} - X_k)^2 - (Y_{k+Ap} - Y_k)^2} \tag{9}$$

式中 X_t、Y_t——第 t 年苹果生产水足迹重心地理坐标值

A_{it}——第 t 年 i 省苹果生产水足迹

X_i、Y_i——重心地理坐标值

D_{Ap}——苹果生产水足迹重心不同年份移动距离

X_{k+Ap}、Y_{k+Ap}——苹果生产水足迹在 $k+Ap$ 年地理坐标值

X_k、Y_k——苹果生产水足迹在 k 年地理坐标值

1.3.3 通径分析

通径分析作为一种多元统计分析技术,旨在深入剖析多个变量之间复杂的因果关系网络。采用通径分析探究苹果生产水足迹的影响因素,分别从自然条件和生产条件选取潜在影响因素。自然条件方面,选取降雨量(X_1)、平均温度(X_2)、相对湿度(X_3)和平均风速(X_4)作为影响指标;生产条件方面,选取单产(X_5)、农用化肥施用量(X_6)、农药使用量(X_7)、农业用水量(X_8)、有效灌溉面积(X_9)以及农业机械总动力(X_{10})作为影响指标。

1.3.4 苹果生产水足迹效益评价

苹果生产水足迹效益指标选取苹果生产人均水足迹、地均水足迹和水足迹产值进行评价,其计算公式为[15]

$$PCWF = \frac{AWF}{P} \tag{10}$$

$$PHWF = \frac{AWF}{A_{apple}} \tag{11}$$

$$AVWF = \frac{GDP_{apple}}{AWF} \tag{12}$$

式中 $PCWF$——苹果生产人均水足迹

$PHWF$——苹果生产地均水足迹

$AVWF$——苹果生产水足迹产值

P——地区年末总人口数

GDP_{apple}——苹果产值

2 结果与分析

2.1 苹果生产水足迹演变

2.1.1 苹果生产蓝绿灰水足迹时空演变

为分析苹果生产过程中蓝、绿、灰水足迹在苹果主产省时空分布上的差异,根据测算结果采用 Origin 2024 制作苹果主产省蓝绿灰水足迹演变图

（图 2）。结果显示，2003—2022 年甘肃省、陕西省、辽宁省苹果生产蓝水足迹呈上升趋势；山东省、山西省、河北省、河南省苹果生产绿水足迹呈下降趋势；甘肃省、陕西省苹果生产灰水足迹呈上升趋势。

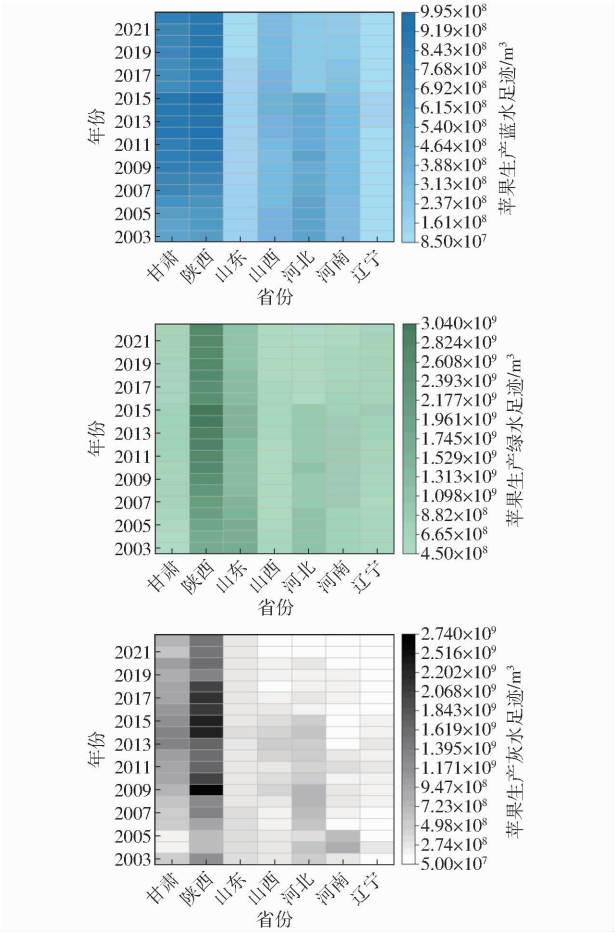

图 2　2003—2022 年苹果主产省蓝绿灰水足迹演变图

Fig. 2　Evolution of blue-green-gray water footprint in major apple-producing provinces from 2003 to 2022

从蓝水足迹变化看，苹果生产蓝水足迹消耗最高的省份为陕西省（均值 8.16×10^8 m^3），占主产省蓝水足迹的 28.3%；甘肃省位居第 2（均值 7.56×10^8 m^3），占 26.2%。2003—2022 年陕西省蓝水足迹从 5.73×10^8 m^3 增至 8.80×10^8 m^3，这主要归因于陕西省苹果产地主要集中在降雨较少的陕北和关中地区，导致苹果生产对灌溉依赖程度较高。同时，陕西省果园面积不断扩张，进而加剧蓝水足迹上升。甘肃省 2003—2015 年蓝水足迹连续上升，增至 9.12×10^8 m^3。这与其年降雨量小于 500 mm、气候干旱以及苹果生产过程中需大量灌溉用水弥补降雨短缺有关。辽宁省蓝水足迹也呈现增长趋势，增长率为 11.4%，这与该省在生产过程中灌溉方式不合理和水资源利用效率低等有关。河北省和河南省降雨量增加，绿水足迹依赖性强，且大力发展和推广节水灌溉技术，使得苹果生产蓝水足迹分别从 5.39×10^8、3.24×10^8 m^3 下降至 2.25×10^8、2.06×10^8 m^3，降幅分别为 58.3% 和 36.6%。此外，蓝水足迹与地表水和地下水有关，黄河、渭河均流经陕西省和甘肃省，因此陕西省和甘肃省苹果生产蓝水足迹最高。

从绿水足迹变化看，各省份表现出不同趋势。绿水足迹均值由大到小依次为陕西省、山东省、河北省、河南省、甘肃省、辽宁省、山西省。陕西省苹果产区年降雨量在 560 ~ 750 mm 之间，能够满足苹果全年平均需水量（500 ~ 800 mm），显示出较高的降水适宜度[21]。随着果园面积扩张及逐年增长的降雨量，甘肃省苹果生产绿水足迹以增长率 53.1% 上升。然而，山西省、河南省和河北省绿水足迹在研究期间呈明显下降趋势，分别下降 7.70×10^7、6.56×10^8、2.86×10^8 m^3，这得益于这些省份创新灌溉技术，减少了苹果生产对绿水的依赖。此外，陕西省、辽宁省苹果绿水足迹以变化率 53.4%、12.9% 增加，而山东省、山西省、河北省、河南省则绿水足迹分别以变化率 32.8%、13.5%、58.3%、36.6% 减少，显示了各省份在苹果生产中水资源利用的不同策略和效果。

从灰水足迹变化看，各省份苹果生产灰水足迹占比由高到低依次为陕西省、甘肃省、河北省、山东省、山西省、河南省、辽宁省。具体来看，陕西省灰水足迹最高，最大值为 2.74×10^9 m^3（2009 年），最小值为 6.55×10^8 m^3（2005 年），相差 2.085×10^9 m^3。陕西省灰水足迹占比持续增加，主要归因于单位面积化肥、农药的投入[22]。河南省灰水足迹相对较低且稳定，这得益于测土配方施肥等措施普及推广，有效降低了化肥、农药污染[23]。2003—2022 年甘肃省、山西省和辽宁省，除 2013 年外灰水足迹均保持稳定。2013 年，甘肃省、山西省和辽宁省苹果果园面积分别扩张至 290.20、154.10、155.00 hm^2，每公顷氮肥施用量增加至 532.35、356.10、221.10 kg，导致灰水足迹猛增。河北省灰水足迹从 5.57×10^8 m^3（2003 年）降至 1.10×10^8 m^3（2022 年），降幅为 80.2%，主要与氮肥使用量降低、化肥利用率提高、畜禽粪便循环利用有关[24]。山东省在 2003 年（3.66×10^8 m^3）和 2005 年（3.51×10^8 m^3）苹果生产灰水足迹较高，这与其种植面积扩大、磷投入量高以及化肥施用量增加导致的水体污染有关。综上所述，各省份苹果生产灰水足迹变化受多种因素影响，包括果园面积、化肥农药使用量、化肥利用率以及循环利用措施等。

2.1.2　苹果生产水足迹构成

2003—2022 年苹果主产省苹果生产水足迹呈先上升后下降变化趋势，其中，2014 年达到水足迹最高点，为 1.71×10^{10} m^3，2022 年则降至最低点，为 1.22×10^{10} m^3，降幅达 28.6%，这一显著变化表明，

随着水资源管理的重视以及生产技术进步，苹果生产过程中水资源消耗呈降低趋势。此外，2003 年苹果生产水足迹在中部（陕西省）和东部（河北省、山东省）较高（图 3）。2007 年，随着甘肃省生产水足迹的显著增加，逐渐形成了甘肃、陕西、河北、山东 4 省较高的分布格局。自 2011 年起，苹果生产水足迹呈现“西高东低”空间格局，并一直延续至今。从苹果主产省年均水足迹（1.41×10^{10} m^3）构成上看，绿水足迹占主导地位，占苹果生产水足迹的 52.1%；灰水足迹年波动较大，占 27.4%；蓝水足迹占 20.5%。

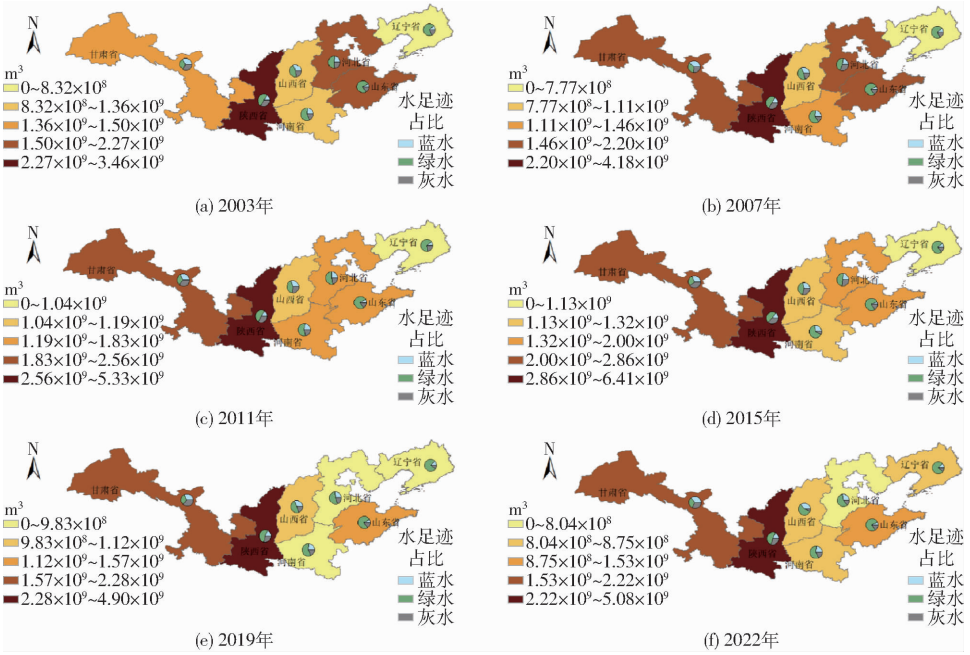

图 3 苹果生产水足迹及组成空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution maps of water footprint and its composition in apple production

苹果主产省 2003—2022 年苹果生产水足迹和蓝、绿、灰水足迹占比如图 3 所示。山东省 2011 年苹果生产水足迹明显下降，从 1.94×10^9 m^3（2007 年）降至 1.76×10^9 m^3（2011 年）。此外，山东省苹果生产绿水足迹多年平均占比为 76.2%，年平均绿水资源消耗量为 1.38×10^9 m^3，蓝、灰水足迹之和与绿水足迹之比为 2∶8。陕西省苹果生产对绿水资源消耗年均占比最高（50.4%），灰水足迹次之（33.1%），蓝水足迹最低（16.5%）。2015 年陕西省苹果生产水足迹为 6.41×10^9 m^3，其中绿水足迹为 3.04×10^9 m^3（占 47.4%），这是由于陕西省苹果种植区属于暖温带半湿润气候，降雨适中且主要集中在苹果生长期。甘肃省 2007 年苹果生产水足迹为 1.968×10^9 m^3，其中绿水足迹为 6.79×10^8 m^3（34.5%），蓝水足迹为 7.66×10^8 m^3（38.9%），灰水足迹为 5.23×10^8 m^3（26.6%），因此甘肃省需通过精准施肥、优化灌溉方式等措施降低农药化肥使用量和提高水资源使用效率。2011 年河北省水足迹下降至 1.83×10^9 m^3，然而其构成变化较大。其中，蓝、绿水足迹占比呈上升趋势，分别从 22.1%、46.2% 增至 25.3%、52.7%，而灰水足迹占比则呈下降趋势。山西省、河南省、辽宁省绿水足迹占苹果生产水足迹的 46.3%、57.6%、70.9%，这说明苹果生产过程中对自然降雨的利用效率较高。

2.1.3 苹果生产水足迹重心迁移

2003—2022 年，苹果主产省苹果生产水足迹重心均集中在山西省，其重心有向西迁移趋势（图 4）。

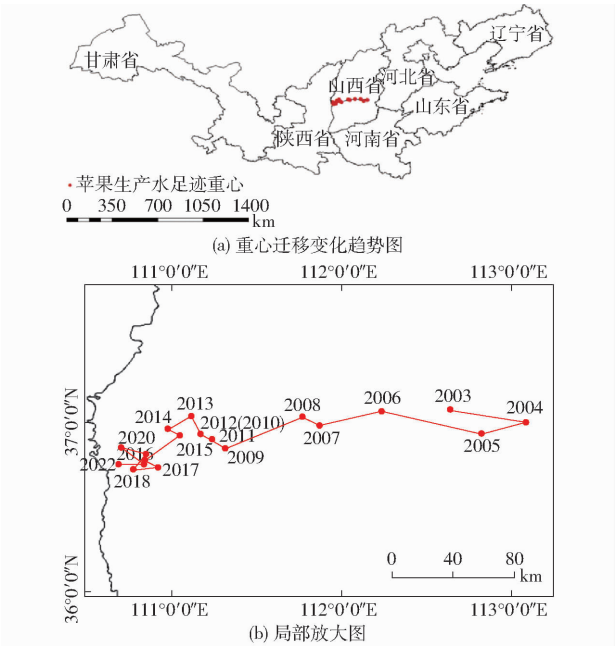

图 4 2003—2022 年苹果生产水足迹重心迁移变化

Fig. 4 Maps of shifting center of gravity of apple production water footprint from 2003 to 2022

其中，2003—2004 年苹果水足迹重心从山西省武乡县向东迁移至榆社县；2004—2009 年重心大幅度向西迁移至交口县，迁移直线距离为 159 km；2009—2013 年重心集中在交口县西部，2013—2022 年重心逐渐向山西省西南部的永和县和隰县迁移，这一变化与山西省苹果产业向西南转移密切相关[25]。此外，苹果水足迹重心逐渐向陕西省转移，这与陕西省苹果种植优势以及优化苹果生产布局有关。近年来，黄土高原产区逐渐超越渤海湾产区成为苹果重要的生产地，而山西省、陕西省均位于黄土高原产区，因此苹果需水量较大[17]，进一步推动了苹果生产水足迹重心向这些地区转移。

2.2　基于通径分析的苹果生产水足迹驱动力

2.2.1　苹果生产水足迹驱动力

从时空变化来看，苹果主产省苹果生产水足迹整体保持稳定，因此对苹果生产水足迹的影响因素分析时，选取水足迹与各相关指标均值来进行测算。此外，考虑到各变量间存在较大的量纲差异，对所有变量采用标准化数据预处理。通过通径分析探讨 10 个指标对苹果生产水足迹的影响，结果见表 1。

表 1　苹果生产水足迹影响因素通径分析

Tab. 1　Path analysis of influencing factors of apple water footprint

影响因素	直接通径系数	间接通径系数									
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
X_1	−0.23		0	0.07	0	−0.06	−0.06	−0.29	0.32	−0.05	−0.12
X_2	−0.02	0		−0.05	0	−0.09	0.01	−0.17	0.22	−0.07	−0.03
X_3	0.19	−0.08	0.01		0	0.11	−0.07	0.01	−0.16	0.10	−0.17
X_4	0.01	0.05	0	0.01		0.11	−0.05	−0.03	−0.13	0.11	−0.27
X_5	−0.21	−0.06	−0.01	−0.10	−0.01		0.06	−0.19	0.41	−0.18	0.25
X_6	0.17	0.08	0	−0.08	0	−0.07		0.47	−0.13	−0.07	0.44
X_7	0.61	0.11	0.01	0	0	0.06	0.13		−0.41	0.05	0.30
X_8	−0.54	0.14	0.01	0.06	0	0.16	0.04	0.46		0.13	0.04
X_9	−0.19	−0.05	−0.01	−0.10	−0.01	−0.19	0.06	−0.15	0.37		0.21
X_{10}	0.57	0.05	0	−0.06	−0.01	−0.09	0.13	0.32	−0.04	−0.07	

由表 1 可知，苹果生产水足迹影响因素的直接通径系数绝对值由大到小依次为：X_7、X_{10}、X_8、X_1、X_5、X_3、X_9、X_6、X_2、X_4。其中，农药使用量、农业机械总动力、农业用水量对苹果生产水足迹具有较大的直接影响，其直接通径系数分别为 0.61、0.57、−0.54；相对而言，农用化肥施用量、平均温度、平均风速对苹果生产水足迹的直接影响较小，其直接通径系数分别为 0.17、−0.02、0.01。进一步分析间接通径系数发现，自然条件方面，降雨量与相对湿度的相互作用效果明显，各影响因素通过降雨量与相对湿度对苹果水足迹的影响较大，其中农药使用量、农业用水量通过降雨量对苹果水足迹的间接影响较大，间接系数分别为 0.11、0.14。生产条件方面，单产和有效灌溉面积、农药使用量与农业化肥施用量相互作用效果明显，各影响因素主要通过农业用水量和农药使用量对苹果水足迹产生影响，其中降雨量、农用化肥施用量、农业用水量、农业机械总动力通过农药使用量对因变量产生间接影响，间接通径系数分别为 −0.29、0.47、0.46、0.32，单产和农药使用量通过农业用水量对苹果水足迹的间接通径系数为 0.41 和 −0.41。相对湿度、平均风速、农业化肥施用量、农药使用量和农业机械总动力与苹果水足迹具有正相关关系。

2.2.2　苹果生产蓝绿灰水足迹驱动力

从影响苹果蓝水足迹因素的直接通径系数可知（图 5a），农业机械总动力是影响蓝水足迹的主要因素，其直接通径系数为 1.02。此外，苹果蓝水足迹与农业用水量、有效灌溉面积呈正相关关系，其直接通径系数分别为 0.16、0.06。随着精准灌溉和水肥一体化技术的广泛普及，苹果单产呈增长趋势，而灌溉水资源消耗却有所减少，这导致苹果蓝水足迹与单产之间形成负相关关系，直接通径系数为 −0.43。结合各影响因素对其他影响因素的间接通径系数可知，各影响因素通过单产和农业机械总动力对苹果蓝水足迹产生影响较大。

从影响苹果绿水足迹因素的直接通径系数可知（图 5b），降雨量是对苹果绿水足迹影响最大的因素，其直接通径系数为 −0.54，表明降雨量与绿水足迹间存在显著负相关关系。同时，相对湿度和单产也与苹果绿水足迹呈正相关关系。进一步分析各影响因素的间接通径系数发现，降雨量依然是主要影响因素。相对湿度、平均风速和单产通过降雨量间接影响绿水足迹，其间接通径系数分别为 −0.19、0.12 和 −0.15。具体而言，相对湿度增加使得空气中水含量增多，减少了蒸腾散失的水分，进而增加了绿水足迹[26]；平均风速增大则加速了表面水汽扩

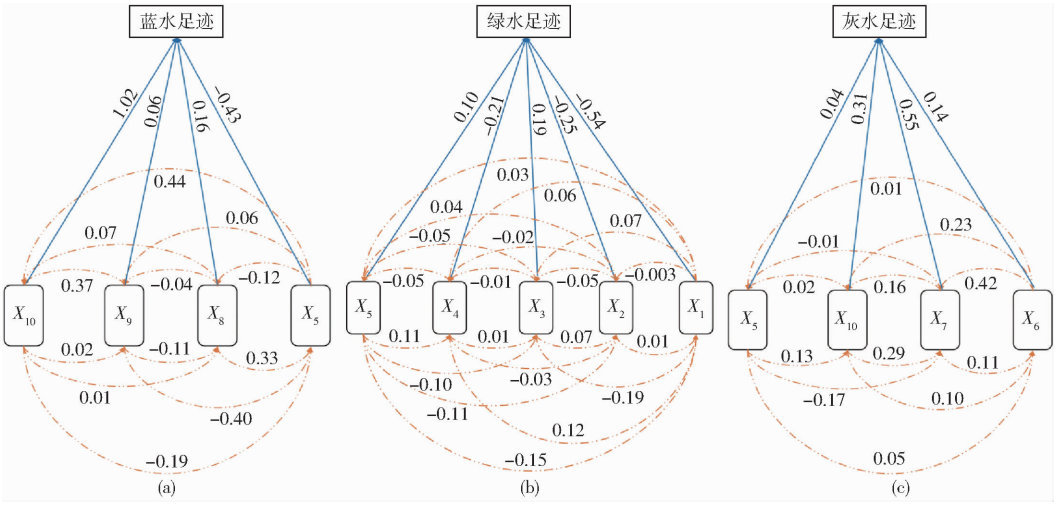

图 5 苹果蓝绿灰水足迹影响因素通径分析

Fig. 5 Path analysis of influencing factors of apple's blue-green-gray water footprint

散,影响了绿水足迹变化[27];而单产增加反映了在相同降雨条件下水资源的有效利用,有助于降低绿水足迹。综上所述,相对湿度、平均风速和单产通过影响降雨量的利用效率和作物蒸散量,间接对苹果绿水足迹产生影响。

从影响苹果灰水足迹因素的直接通径系数可知(图 5c),农药使用量是影响苹果灰水足迹的主要因素,近年来其增加导致需要更多水资源稀释污染物以满足水质标准。农用化肥施用量、农药使用量、农业机械总动力、单产均与灰水足迹呈正相关,直接通径系数分别为 0.14、0.55、0.31、0.04。其中,从间接通径系数来看,农用化肥施用量和农业机械总动力主要通过影响农药使用量来间接影响灰水足迹,间接通径系数为 0.42、0.29。然而,化肥合理施用可以降低苹果生产过程中对农药的需求,同时机械化水平提高也提升了农药施用精准度,减少了污染,进而有助于降低灰水足迹[28]。

2.3 苹果生产水足迹效益评价

由表 2 可知,2003—2022 年中国苹果主产省苹果生产人均水足迹在 8.56 ~ 166.72 m^3/人之间变化,省份之间差异显著。从时间变化趋势来看,大多数省份在 2003—2022 年呈先上升后下降态势,这反映出早期苹果生产规模快速扩张导致水资源消耗量显著增加,而后期随着节水技术的广泛推广和水资源管理措施的加强,人均水足迹得到了有效控制并有所下降。其中,陕西省人均水足迹在 83.35 ~ 166.72 m^3/人之间波动,变化幅度较大,均值为 129.93 m^3/人,显著高于其他省份。这表明陕西省苹果生产对水资源的消耗量较高,水资源压力较大,亟需通过技术和管理创新进一步优化水资源利用效率。相比之下,山东省和河南省苹果生产人均水足迹较低,最大值分别为 24.87、19.80 m^3/人,表明其水资源利用效率较高,人口承载能力较强,为其他省份加强水资源管理和实施节水措施提供了参考。

苹果主产省地均水足迹在 6 352.64 ~ 11 679.64 m^3/hm^2之间变化,均值为 7 931.61 m^3/hm^2。其中,甘肃省最高,达 9 096.47 m^3/hm^2,而山东省最低,为 6 352.64 m^3/hm^2。山西省、河北省、河南省、辽宁省苹果生产地均水足迹整体呈下降趋势,表明这些地区在苹果生产过程中单位面积水资源消耗量逐渐减少,反映了水资源利用效率显著提升。然而,陕西省和甘肃省地均水足迹却呈上升趋势,这主要与种植规模持续扩大以及过度施肥导致的土壤条件恶化有关,需通过优化种植模式和加强土壤管理来缓解这一问题。

2003—2022 年苹果生产水足迹产值在 0.03 ~ 0.77 元/m^3 范围间变化,主产省之间的水足迹产值差异较大,但整体呈下降趋势。这表明苹果生产的经济效益与水资源投入之间存在失衡,水资源利用的经济效率有待进一步提升。其中,甘肃省水足迹产值最佳,均值为 0.26 元/m^3,说明其在单位水资源消耗上产生的经济效益较好。而山东省水足迹产值不佳,2022 年低至 0.03 元/m^3,表明其在苹果生产过程中水资源利用的经济效率较低。为提高水资源利用,山东省应积极引进先进的种植技术及管理模式,优化水资源配置,同时推动苹果产业向高附加值方向转型,以提高水资源的经济效益。

3 讨论

苹果是中国最具竞争力的农产品之一,中国正在从苹果生产大国向苹果产业强国转型。然而,经过近 20 年的发展,苹果主产省的苹果产业正面临水资源短缺与苹果生产需水量大的瓶颈期。本文从苹果生产水资源消耗出发,发现苹果生产水足迹呈

表 2　苹果生产水足迹效益评价

Tab. 2　Evaluation of water footprint benefits in apple production

年份	甘肃省			陕西省			山东省			山西省			河北省			河南省			辽宁省		
	人均水足迹/($m^3 \cdot 人^{-1}$)	地均水足迹/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	水足迹产值/(元·m^{-3})	人均水足迹/($m^3 \cdot 人^{-1}$)	地均水足迹/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	水足迹产值/(元·m^{-3})	人均水足迹/($m^3 \cdot 人^{-1}$)	地均水足迹/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	水足迹产值/(元·m^{-3})	人均水足迹/($m^3 \cdot 人^{-1}$)	地均水足迹/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	水足迹产值/(元·m^{-3})	人均水足迹/($m^3 \cdot 人^{-1}$)	地均水足迹/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	水足迹产值/(元·m^{-3})	人均水足迹/($m^3 \cdot 人^{-1}$)	地均水足迹/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	水足迹产值/(元·m^{-3})	人均水足迹/($m^3 \cdot 人^{-1}$)	地均水足迹/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	水足迹产值/(元·m^{-3})
2003	59.15	8 959.12	0.77	94.28	8 622.80	0.34	24.87	6 352.64	0.13	36.94	7 943.76	0.34	32.81	8 035.64	0.27	14.02	8 241.04	0.43	19.77	7 229.44	0.35
2004	47.72	7 000.24	0.27	83.35	7 445.36	0.24	23.56	6 352.64	0.10	35.12	7 669.20	0.33	32.49	8 302.28	0.24	19.80	11 679.64	0.48	21.51	8 113.84	0.20
2005	50.43	6 983.08	0.36	84.73	7 334.48	0.19	23.53	6 352.64	0.10	35.53	7 873.80	0.24	28.68	7 445.60	0.17	18.99	10 741.12	0.39	18.44	7 056.52	0.17
2006	66.04	8 110.36	0.19	97.68	7 817.60	0.18	21.23	6 352.64	0.09	33.17	7 667.88	0.16	30.40	8 286.44	0.18	13.57	7 600.84	0.18	18.98	7 431.40	0.15
2007	77.22	7 946.68	0.11	112.78	8 624.12	0.13	20.68	6 352.64	0.06	32.79	7 710.12	0.14	31.73	8 813.12	0.15	15.56	7 990.24	0.15	18.07	7 253.20	0.09
2008	80.84	8 366.44	0.16	116.45	8 155.52	0.17	18.64	6 352.64	0.07	35.24	8 111.40	0.19	31.55	9 045.44	0.16	14.95	8 143.36	0.19	20.79	7 870.96	0.13
2009	88.30	8 623.84	0.64	161.39	10 647.68	0.43	18.14	6 352.64	0.11	37.82	8 925.84	0.18	30.65	9 155.00	0.44	15.30	8 259.52	0.36	20.56	7 320.52	0.15
2010	98.96	9 431.68	0.45	147.86	9 181.16	0.25	17.53	6 352.64	0.09	33.23	8 630.16	0.25	28.84	7 816.52	0.27	14.64	7 752.64	0.22	21.47	7 459.12	0.15
2011	99.64	9 297.04	0.29	142.51	8 559.44	0.19	18.21	6 352.64	0.08	33.15	8 230.20	0.13	25.24	7 721.48	0.18	16.46	8 560.48	0.15	23.68	7 745.56	0.11
2012	104.68	9 505.60	0.26	142.20	8 271.68	0.17	18.34	6 352.64	0.07	37.20	8 913.96	0.11	25.88	8 002.64	0.18	15.88	8 351.92	0.13	23.49	7 418.20	0.10
2013	118.25	10 520.68	0.26	147.84	8 365.40	0.16	19.80	6 352.64	0.06	39.22	9 238.68	0.12	26.91	8 312.84	0.16	13.79	7 344.76	0.12	27.89	7 898.68	0.12
2014	121.35	10 425.64	0.22	164.65	9 241.88	0.15	19.73	6 352.64	0.05	39.00	8 675.04	0.10	28.02	8 517.44	0.15	12.92	7 247.08	0.09	26.31	7 255.84	0.11
2015	113.38	9 703.60	0.19	166.72	9 224.72	0.16	19.30	6 352.64	0.05	37.62	8 512.68	0.11	27.17	8 227.04	0.15	12.85	7 323.64	0.07	26.09	7 028.80	0.11
2016	97.67	10 692.28	0.18	139.96	9 406.88	0.13	17.22	6 352.64	0.06	34.66	7 960.92	0.10	12.37	7 750.52	0.08	11.53	7 146.76	0.07	23.15	7 084.24	0.10
2017	92.03	10 078.48	0.18	142.00	9 457.04	0.14	16.80	6 352.64	0.06	32.51	7 502.88	0.08	13.38	8 110.88	0.11	12.36	8 241.04	0.07	22.39	6 896.80	0.09
2018	92.64	9 939.88	0.15	140.44	9 237.92	0.11	16.26	6 352.64	0.05	27.97	6 639.60	0.07	12.19	7 576.28	0.08	10.79	8 241.04	0.05	21.66	6 778.00	0.10
2019	90.98	9 467.32	0.15	124.31	7 977.32	0.09	15.50	6 352.64	0.04	32.10	7 692.96	0.11	12.76	7 581.56	0.10	9.93	8 241.04	0.06	21.08	6 605.08	0.11
2020	97.88	9 847.48	0.14	131.18	8 365.40	0.08	15.41	6 352.64	0.04	30.80	7 450.08	0.09	13.54	8 025.08	0.10	8.56	7 233.88	0.04	22.05	6 734.44	0.11
2021	84.50	8 362.48	0.11	129.93	8 271.68	0.07	15.19	6 352.64	0.05	27.84	6 949.80	0.08	10.81	7 008.68	0.08	8.80	8 241.04	0.03	21.25	6 735.76	0.10
2022	89.18	8 667.40	0.10	128.37	8 242.64	0.07	15.01	6 352.64	0.03	25.14	6 565.68	0.06	10.83	6 978.32	0.07	8.71	8 241.04	0.04	20.66	6 676.36	0.10

“倒 U 形”发展趋势，这与谭琨等[17]的研究基本一致。然而，与何雨桐等[5]的研究相比，本文计算的陕西省近 20 年平均苹果生产水足迹(4.95×10^9 m^3)低于其 10 年平均结果(6.91×10^9 m^3)。这一差异的主要原因包括：何雨桐等[5]计算的是单位面积水足迹，而本文计算的是总体生产水足迹；本文的时间跨度更长，涵盖了更多年份数据，能够更加全面地反映苹果生产水足迹的长期变化趋势。

在苹果生产水足迹构成中，绿水足迹占比最高(52.1%)，表明苹果生产过程中主要依靠降水来满足其生产需水。灰水足迹呈逐年增加趋势，与闫晨健等[14]的研究一致；蓝水足迹利用较少且省份间差异显著，为精准农业管理提供了依据。此外，尽管人均水足迹和地均水足迹呈下降趋势，水资源利用效率有所提升，但水足迹产值仍呈下降趋势，表明经济效益未能与水资源利用效率提升同步增长。本研究对中国苹果主产省的苹果生产水足迹进行了量化与分析，在一定程度上丰富了关于苹果生产耗水的研究成果，但也存在一定局限性，如对气象站点的选择可能影响苹果水足迹测算。建议在后续研究中采用更广泛的气象数据，增强结果的准确性，并进一步探讨农业技术改进对降低水足迹的作用。

基于研究结果，本文提出以下政策建议以促进苹果产业的可持续发展。首先，苹果主产省应依据降水特征优化种植布局。在降水适宜度较高的陕西省中部、甘肃省东部、山东省北部、河南省北部、山西省大部分、河北省东北部、辽宁省西部，可适度扩大苹果种植面积；而在降水适宜度较低的地区(如甘肃省西部)，应通过加强农田水利建设，减少土壤蒸发量，提高降水资源利用效率[21]。其次，推广节水技术是降低水足迹的关键。未来种植中可采用水肥一体化、滴灌、肥水填坑等措施，减少化肥施用量，降低灰水足迹[29-30]。同时，山东省可推广现代矮砧集约栽培模式，实施土壤修复改良和品种更新；辽宁省则应在山坡地果园兴修梯田，保障合理灌溉，降低降水不足对产量和品质的影响。最后，提高蓝水利用效率至关重要。农业机械总动力、降雨量和农药使用量是影响苹果蓝、绿、灰水足迹变化的主要驱动因子。通过技术创新及设备更新升级，可提升农业机械的能源效率及水资源利用效率[31]。此外，需加强水资源管理，优化种植结构，提高苹果附加值，以实现水资源经济效益与利用效率的同步提升。

4 结束语

过去 20 年间,苹果生产水足迹呈“先上升(2003—2014 年)后下降(2014—2022 年)”变化趋势。从区域分布来看,整体呈“西高东低”空间特征,且重心逐渐向水资源匮乏的西部转移。这一趋势与全国优势农产品区域布局规划推进密切相关,但也凸显了西部地区水资源压力加大的现实问题。通过时空差异分析,识别了影响苹果生产水足迹的关键驱动因素,包括农药使用量、农业机械总动力和农业用水量,为制定精准的农业管理措施提供了科学依据。此外,对苹果水足迹效益评价结果表明,尽管水资源利用效率有所提升,但水足迹产值呈下降趋势,表明水资源利用的经济效益未能与效率提升同步增长。因此,在提高水资源利用效率的同时,需进一步优化种植结构、提高水资源可持续利用水平[32],并提升苹果附加值,以实现经济效益与生态效益的平衡。

参 考 文 献

[1] 王壹. 中国苹果产量蝉联世界第一[N]. 农民日报,2024-11-09(007).

[2] 黄祖辉. 面向新征程和大变局的中国“三农”发展[J]. 农业经济问题,2025(1):7-15.
HUANG Zuhui. On the development of Chinese agriculture, rural areas and rural people in the new journey and momentous global changes[J]. Issues in Agricultural Economy,2025(1):7-15. (in Chinese)

[3] 李大光. 全球化背景下的总体国家安全研究[J]. 人民论坛·学术前沿,2018(8):6-19.
LI Daguang. Global national security research under the background of globalization[J]. Frontiers,2018(8):6-19. (in Chinese)

[4] 马海良,郭金暄,贺正齐,等. 数字金融对中国用水强度的影响及其机理[J]. 资源科学,2024,46(1):1-14.
MA Hailiang, GUO Jinxuan, HE Zhengqi, et al. The impact of digital finance on water use intensity in China and mechanisms[J]. Resources Science,2024,46(1):1-14. (in Chinese)

[5] 何雨桐,谢立勇,靳泽群,等. 陕西省主要农作物生产水足迹分析[J]. 中国农业气象,2023,44(7):560-574.
HE Yutong, XIE Liyong, JIN Zequn, et al. Characteristics of water footprint for crop production in Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2023,44(7):560-574. (in Chinese)

[6] 郭相平,高爽,吴梦洋,等. 中国农作物水足迹时空分布与影响因素分析[J]. 农业机械学报,2018,49(5):295-302.
GUO Xiangping, GAO Shuang, WU Mengyang, et al. Analysis of temporal-spatial distribution and influencing factors of water footprint in crop production system of China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):295-302. (in Chinese)

[7] MIALYK O, SCHYNS J F, BOOIJ M J, et al. Water footprints and crop water use of 175 individual crops for 1990—2019 simulated with a global crop model[J]. Scientific Data, 2024, 11(1): 206.

[8] YANG X, ZHUO L, XIE P, et al. Physical versus economic water footprints in crop production: a spatial and temporal analysis for China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(1): 169-191.

[9] 聂汉林,樊良新,郭琎,等. 县域尺度下关中地区农作物水足迹时空特征及影响因素[J]. 干旱区研究,2024,41(2):339-352.
NIE Hanlin, FAN Liangxin, GUO Jin, et al. Spatial and temporal characteristics of crop water footprint and influencing factors in Guanzhong region at the county scale[J]. Arid Zone Research,2024,41(2):339-352. (in Chinese)

[10] 刘巍,李雨晴,付强,等. 黑龙江省粮食水足迹时空分布规律与影响因素分析[J]. 农业机械学报,2020,51(8):214-222,335.
LIU Wei, LI Yuqing, FU Qiang, et al. Spatial and temporal distributions of crop water footprint and its influence factors analysis in Heilongjiang Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):214-222,335. (in Chinese)

[11] 赵明宇,贾浩,石晓宇,等. 近 30 年黄淮海农作区冬小麦水足迹分布变化[J]. 中国农业科技导报,2023,25(8):138-147.
ZHAO Mingyu, JIA Hao, SHI Xiaoyu, et al. Distribution of winter wheat water footprint in Huang-Huai-Hai farming region in recent 30 years[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2023,25(8):138-147. (in Chinese)

[12] 林馨园,许峰,马学花,等. 1990—2020 年塔里木河流域五地州不同作物生产与种植结构的分析与评价——基于水足迹的视角[J]. 中国农业资源与区划,2024,45(9):196-205.
LIN Xinyuan, XU Feng, MA Xuehua, et al. Analysis and evaluation of different crop production and planting structure in five prefectures of Tarim River basin from 1990 to 2020—based on water footprint[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2024,45(9):196-205. (in Chinese)

[13] 高亚苗,陈浩楠,王芳,等. 宁夏典型粮食作物生产水足迹时空演变及节水潜力评价[J]. 干旱区地理,2024,47(12):2005-2016.
GAO Yamiao, CHEN Haonan, WANG Fang, et al. Spatio-temporal evolution of water footprint of typical grain crops and evaluation of water-saving potential in Ningxia[J]. Arid Land Geography,2024,47(12):2005-2016. (in Chinese)

[14] 闫晨健,栗萌,卓拉,等. 1989—2019 年陕西省作物生产水足迹时空演变与节水潜力评价[J]. 资源科学,2023,45(1):158-173.
YAN Chenjian, LI Meng, ZHUO La, et al. Spatiotemporal evolution of water footprint and water-saving potentials of crop production in Shaanxi Province during 1989-2019[J]. Resources Science,2023,45(1):158-173. (in Chinese)

[15] 王斌,侯文峰,张毓,等. 吉林省水稻生产水足迹时空差异性分布特征及水足迹效益评价[J]. 灌溉排水学报,2025,44(2):27-36.
WANG Bin, HOU Wenfeng, ZHANG Yu, et al. Spatiotemporal variation and economic benefits of the water footprint of rice production in Jilin Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2025,44(2):27-36. (in Chinese)

[16] HONG J, ZHANG T, SHEN X, et al. Water, energy, and carbon integrated footprint analysis from the environmental-economic perspective for apple production in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 368: 133184.

[17] 谭琨,查思含,霍伟,等.1980—2018 年中国苹果生产及其需水量时空演变特征研究[J].中国农业资源与区划,2022,43(11):190 - 201.
TAN Kun, ZHA Sihan, HUO Wei, et al. The spatio-temporal analysis of apple production and its associated water demands in China during the period of 1980—2018[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2022,43(11): 190 - 201. (in Chinese)

[18] 张聪颖,畅倩,霍学喜.中国苹果生产区域变迁分析[J].经济地理,2018,38(8):141 - 151.
ZHANG Congying, CHANG Qian, HUO Xuexi. Analysis on the layout of China's apple production transition[J]. Economic Geography,2018,38(8):141 - 151. (in Chinese)

[19] 李晓鹏,张永凯,李新岗.中国枣产区迁移及驱动力分析[J].西北林学院学报,2024,39(4):267 - 275.
LI Xiaopeng, ZHANG Yongkai, LI Xingang. Analysis on migration and driving forces of Chinese jujube production areas[J]. Journal of Northwest Forestry University,2024,39(4):267 - 275. (in Chinese)

[20] 祝培甜,马永欢,陈需弦,等.中国耕地重心迁移特征及气候适宜性评价[J].北京师范大学学报(自然科学版),2024,60(3):397 - 404.
ZHU Peitian, MA Yonghuan, CHEN Peixian, et al. Migration characteristics of cultivated land gravity center and climate suitability evaluation in China[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2024,60(3):397 - 404. (in Chinese)

[21] 邱美娟,刘布春,刘园,等.中国北方苹果种植需水特征及降水适宜性[J].应用气象学报,2021,32(2):175 - 187.
QIU Meijuan, LIU Buchun, LIU Yuan, et al. Water requirement and precipitation suitability of apple planting in Northern China[J]. Journal of Applied Meteorological Science,2021,32(2):175 - 187. (in Chinese)

[22] 惠婷,陈晓楠,宋健峰.基于水足迹的作物生产生态效率评价——以陕西省为例[J].生态学报,2021,41(8):3078 - 3091.
HUI Xing, CHEN Xiaonan, SONG Jianfeng, et al. Assessing crop production eco-efficiency based on water footprints: the case of Shaanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(8):3078 - 3091. (in Chinese)

[23] 河南省人民政府办公厅. 河南省高标准农田建设规划(2021—2030 年)[EB/OL].(2022 - 09 - 16).[2024 - 11 - 29]. https://www.henan.gov.cn/2022/09 - 16/2608420.html.

[24] 洪传春,刘某承,张雅静,等.时空视角下京津冀农业灰水足迹强度与效率分析[J].河北农业大学学报,2021,44(2):128 - 135.
HONG Chuanchun, LIU Moucheng, ZHANG Yajing, et al. Analysis on the intensity and efficiency of agricultural grey water footprint in Beijing - Tianjin - Hebei[J]. Journal of Hebei Agricultural University,2021,44(2):128 - 135. (in Chinese)

[25] 张振宇,武文卿,吴俊华,等.山西苹果产业空间集聚差异及其影响因素分析[J].南方农业学报,2024,55(8):2535 - 2546.
ZHANG Zhenyu, WU Wenqing, WU Junhua, et al. Spatial agglomeration differences and its influencing factors of apple industry in Shanxi[J]. Journal of Southern Agriculture,2024,55(8):2535 - 2546. (in Chinese)

[26] 温慧娴,赵西宁,高飞.黄土高原不同降水量区苹果园土壤干燥化效应及生产水足迹模拟[J].应用生态学报,2022,33(7):1927 - 1936.
WEN Huixian, ZHAO Xining, GAO Fei. Simulation of soil desiccation effects and production water footprint of apple orchards in different precipitation areas of the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2022,33(7):1927 - 1936. (in Chinese)

[27] 路杨,刘秀位,张喜英.农产品水足迹研究进展[J].应用生态学报,2015,26(10):3207 - 3214.
LU Yang, LIU Xiuwei, ZHANG Xiying. Research progress on water footprint in agricultural products[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(10):3207 - 3214. (in Chinese)

[28] 侯萌瑶,张丽,王知文,等.中国主要农作物化肥用量估算[J].农业资源与环境学报,2017,34(4):360 - 367.
HOU Mengyao, ZHANG Li, WANG Zhiwen, et al. Estimation of fertilizer usage from main crops in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2017,34(4):360 - 367. (in Chinese)

[29] 田嘉欣,党小虎,杨志,等.水足迹视角下黄土高原经济林果扩张的水安全风险分析——以苹果种植为例[J].自然资源学报,2022,37(10):2750 - 2762.
TIAN Jiaxin, DANG Xiaohu, YANG Zhi, et al. Analysis of water security risk of cash forest expansion in the Loess Plateau in terms of water footprint: a case study of apple planting[J]. Journal of Natural Resources,2022,37(10):2750 - 2762. (in Chinese)

[30] 邓远建,超博.灰水足迹视角下我国省域农业生态效率及其影响因素[J].中国农业科学,2022,55(24):4879 - 4894.
DENG Yuanjian, CHAO Bo. Provincial agricultural ecological efficiency and its influencing factors in China from the perspective of grey water footprint[J]. Scientia Agricultura Sinica,2022,55(24):4879 - 4894. (in Chinese)

[31] 韩宇平,马伏栃,贾冬冬,等.基于 BP - DEMATEL 的山西省冬小麦水足迹影响因素识别[J].水资源保护,2024,40(2):9 - 15.
HAN Yuping, MA Fuli, JIA Dongdong, et al. Identification of influencing factors on water footprint of winter wheat in Shanxi Province based on BP - DEMATEL[J]. Water Resources Protection,2024,40(2):9 - 15. (in Chinese)

[32] 宋林霖,王红姝,许耀文.兴凯湖灌区农业生产水足迹时空演变特征与水资源承载力评价[J].农业机械学报,2025,56(3):437 - 450.
SONG Linlin, WANG Hongshu, XU Yaowen. Characteristics of spatial and temporal evolution of water footprint of agricultural production and evaluation of water resources carrying capacity in Xingkai Lake irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(3):437 - 450. (in Chinese)