

DOI: 10.20103/j.stxb.202312312893

王慧, 王颖, 张雯. 蔬菜生产水资源消耗特征及节约潜力. 生态学报, 2024, 44(20): 9412-9422.

Wang H, Wang Y, Zhang W. Analysis of water resource consumption characteristics and water-saving potential in vegetables production. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9412-9422.

蔬菜生产水资源消耗特征及节约潜力

王 慧, 王 颖, 张 雯*

山东师范大学环境与生态研究院, 济南 250358

摘要: 水资源短缺已经成为农业生产的刚性约束。基于水足迹范式, 以代表性露地和设施蔬菜为研究对象, 在省际尺度上量化和分析了蔬菜作物生产的耗水强度及产生的水资源压力, 运用全局和局部 Moran's I 指数探讨了蔬菜耗水强度的空间自相关格局, 并在分析蔬菜耗水强度可能影响因素的基础上, 通过情景分析揭示了蔬菜生产的节水路径和潜力。结果表明: (1) 蔬菜生产耗水强度明显受生产方式和地理位置的影响。露地蔬菜生产的平均耗水强度为 $72.60 \text{ m}^3/\text{t}$, 是设施蔬菜的 2.24 倍。此外, 设施蔬菜耗水强度存在显著的区域差异, 长江中下游和华南地区显著高于东北地区。(2) 蔬菜生产水资源压力较大的省份多集中于华北地区, 且设施蔬菜耗水强度呈现显著的全局空间聚集。(3) 文盲率、灌溉率与露地蔬菜耗水强度呈现显著正相关关系, 农业机械总动力与其呈现显著负相关关系; 人均蔬菜消费、蔬菜生产者价格指数、农机补贴、产业聚集水平、单产水平及节水灌溉面积均与设施蔬菜耗水强度呈现显著负相关关系。(4) 提高灌溉水有效利用系数、改善单产水平、发展设施蔬菜并改善空间上呈现高-高聚集区域的蔬菜耗水强度可减少 21.69% 的水消耗。研究可为蔬菜生产耗水相关研究提供数据基础, 对农业水资源可持续利用与管理具有重要意义。

关键词: 露地蔬菜; 设施蔬菜; 耗水强度; 空间聚集; 节水潜力

Analysis of water resource consumption characteristics and water-saving potential in vegetables production

WANG Hui, WANG Ying, ZHANG Wen*

Institute of Environment and Ecology, Shandong Normal University, Ji'nan 250358, China

Abstract: China's vegetables output accounted for more than 50% of the world's total vegetables yields, and the per capita possession of vegetables was 3.4 times the world average. Increasingly intensive vegetables production has occupied an increasing share of regional water resources, and water scarcity has become a rigid constraint on crops production, inevitably limiting the sustainability of vegetable production. Clarifying the water consumption characteristics of current vegetables production in China, and exploring the potential to reduce the water consumption intensity are not only essential components for a comprehensive understanding of water consumption in Chinese agriculture, but also necessary conditions for ensuring food safety. Existing studies on water consumption of vegetables mostly focused on micro experiments, with limitations in objects and scales, which may lead to biases in understanding and managing agricultural water use. Based on the water footprint theory, the water consumption intensity of vegetables, including two different planting patterns (open field vegetables (OPV) and greenhouse vegetables (GHV)) and four main vegetable crops (tomato, cucumber, eggplant, sweet peppers), and water scarcity in vegetables production were quantified on the provincial scale. And then the spatial autocorrelation pattern of water consumption intensity of vegetables production was discussed by using global and local

基金项目: 国家自然科学基金 (72004126); 中国博士后科学基金 (2019M662430)

收稿日期: 2023-12-31; **网络出版日期:** 2024-07-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangwen0421@sdu.edu.cn

限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台统计数据。

Moran's I index. Lastly, based on the analysis of influencing factors of water consumption intensity by correlation analysis, the water-saving paths and potential of vegetables production were revealed by scenario analysis, which involved improvement of irrigation technology, increase of yield, expansion of GHV and improvement of water consumption intensity. The results showed that: (1) The water consumption intensity of vegetables was obviously influenced by planting patterns and geographical location. The average water consumption intensity of OPV was $72.60 \text{ m}^3/\text{t}$, which was 2.24 times higher than that of GHV. In addition, there were significant regional differences in the water consumption intensity of GHV, and the middle and lower reaches of the Yangtze River and South China was significantly higher than that in Northeast China. (2) The provinces with higher water resource scarcity in vegetables production were mostly concentrated in North China, and the water consumption intensity of GHV showed a significant global spatial aggregation (Moran's $I=0.3019$). From the perspective of local spatial autocorrelation, the water consumption intensity of GHV in Northeast and North China showed significant low-low agglomeration. (3) The illiteracy rate and irrigation rate were significantly positively correlated with the water consumption intensity of OPV; the per capita vegetables consumption, vegetables producer price index, agricultural machinery subsidies, industrial aggregation level, yield level and water-saving irrigation area were significantly negatively correlated with the water consumption intensity of GHV. (4) Improving water utilization efficiency, increasing unit yield of vegetables, developing GHV, and improving water consumption intensity in the high-high agglomeration areas would comprehensively reduce water consumption by 21.69%. This study can provide data basis for the researches on water consumption in vegetables production and has important significance for more comprehensive and sustainable utilization and management of agricultural water resources.

Key Words: open field vegetables; greenhouse vegetables; water consumption intensity; spatial aggregation; water-saving potential

农作物灌溉耗水占人类活动总蓝水消耗量的 87%^[1], 满足人类食物需求的农业生产活动已成为区域水资源压力日渐增大的重要原因^[2]。我国 2020 年的蔬菜产量是二十年前的 17.9 倍, 受人均蔬菜消费需求持续增长的影响这种生产趋势短时间内不会改变^[3], 并将加剧灌溉农田面积的扩大^[4]、地下水过度开采等问题^[5-6]。对当前我国蔬菜生产占用的水资源及耗水强度进行量化并探索节水潜力, 是全面评估农业生产水资源可持续利用的前提。

水足迹被定义为特定人口在一段时间内生产和消费的所有产品直接和间接消耗的水资源总量^[7], 目前已被广泛应用于农作物生产用水管理研究。前人研究一方面集中于应用作物生长模型及统计分析农作物生产水足迹组成及其时空格局^[8-11]; 另一方面, 通过构建水资源稀缺性、脆弱性、水分利用效率等评价农业用水压力及可持续性的指标, 探索农业节水潜力^[2, 12-13]。然而, 当前宏观尺度上农业水资源管理的研究对象多集中于小麦、玉米、水稻等粮食作物, 忽略了供给量大且持续增长的蔬菜作物。现有关于蔬菜耗水与节水的研究多集中在微观实验上, 如设施蔬菜蒸散量的测算及其与露地蔬菜的对比^[14-16], 蔬菜作物蒸散量对种植及管理方式的响应^[17-18]。缺乏宏观尺度上对蔬菜生产用水现状的整体评估, 研究对象和尺度的局限性可能导致对农业生产用水认知的偏差^[19]。

我国贡献了全球蔬菜产量的 50% 以上, 人均蔬菜占有量是世界平均水平的 3.4 倍^[20]。蔬菜生产作为我国种植业中不可或缺且快速发展的支柱产业, 明确其水资源消耗特征对全面认识和管理农业水资源具有重要意义。基于此, 本研究基于水足迹理论, 量化了中国大陆 31 个省、直辖市及自治区露地蔬菜和设施蔬菜生产的耗水强度及水资源压力, 其次, 应用空间自相关分析了蔬菜耗水强度的地域差异和空间聚集格局, 最后在探究耗水强度与社会、经济及生产因素关系的基础上, 利用情景分析探讨了蔬菜生产的可能节水路径和潜力。

1 材料与方法

1.1 基于水足迹的蔬菜生产耗水强度

农作物生产单位质量水足迹(water footprint, WF , m^3/kg)包括绿水足迹(green water footprint, GWF)和蓝水足迹(blue water footprint, BWF),绿水是农作物生长周期内蒸散消耗的储存于土壤中的雨水;蓝水是抽取自地表或地下的灌溉水^[21]。本文蔬菜作物水足迹采用联合国粮农组织推荐的作物系数(K_c)和软件 CROPWAT 8.0 计算。考虑到我国露地蔬菜多为亏缺灌溉的实际情况,引入了灌溉率(IR)和灌溉水有效利用系数(η),以反映露地蔬菜的实际蓝水消耗情况,其中不仅包括作物生理需水量,也包括灌溉水输配过程所损失的水资源量。由于设施蔬菜生长在封闭可控的人工环境中,结合实际情况研究假设设施蔬菜为充分灌溉,且只消耗蓝水($IR=100\%$, $\eta=1$)。具体的 j 省农作物 i 的单位质量水足迹 WF_i^j 计算如下:

$$WF_i^j = GWF_i^j + BWF_i^j \quad (1)$$

$$GWF_i^j = \frac{10 \times \sum_{d=1}^L \min(ET_{c,i}^j, P_e^j)}{Y_i^j} \quad (2)$$

$$BWF_i^j = \frac{10 \times \sum_{d=1}^L \max(0, ET_{c,i}^j - P_e^j)}{Y_i^j} \times \frac{IR^j}{\eta^j} \quad (3)$$

$$ET_{c,i}^j = K_c^i \times ET_0^j \quad (4)$$

$$P_e^j = \begin{cases} \frac{P^j(4.17-0.2 P^j)}{4.17} & P^j < 8.3 \\ 4.17+0.1 P^j & P^j \geq 8.3 \end{cases} \quad (5)$$

式中, GWF_i^j 和 BWF_i^j 分别是 j 省蔬菜 i 的单位质量绿水足迹和蓝水足迹(m^3/kg); i 代表蔬菜类别; j 代表区域; d 代表蔬菜的生长周期($d = 1, 2, \dots, L$); $ET_{c,i}^j$ 是理想情况下 j 省蔬菜 i 的日蒸散量(mm/d); Y_i^j 是 j 省蔬菜 i 的每公顷产量(kg/hm^2); P_e^j 是 j 省的日有效降水量(mm/d); 根据日降水量(P^j , mm/d)和经验公式(5)计算; ET_0^j 是 j 省参考草面的日蒸散量(mm/d),露地蔬菜的 ET_0^j 利用历史气象条件数据和软件 CROPWAT 8.0 计算,设施蔬菜的 ET_0^j 则是根据温室的最佳环境参数求得; K_c^i 是表示蔬菜作物 i 与参考草地蒸散差异的系数。

为了便于比较不同省份及不同蔬菜生产的水资源消耗水平,本研究将蔬菜生产的耗水强度定义为生产一吨蔬菜所消耗的水足迹(WCI_i^j , m^3/t)。

1.2 水资源压力

构建基于水足迹的水资源稀缺性指标(water scarcity, WS_j)并对其进行归一化处理,以表征 j 省蔬菜生产的水资源压力。 WS_j 越趋近于 1,该省的蔬菜生产水资源压力越大。

$$WS_j = \frac{WCI_j \times T_j}{ABW_j + AGW_j} \quad (6)$$

$$ABW_j = W_j \times \frac{AWC_j}{TWC_j} \quad (7)$$

$$AGW_j = P_{e,j} \times L_j \times 10 \quad (8)$$

式中, T_j 是 j 省的蔬菜产量(t); ABW_j 和 AGW_j 分别是 j 省的农业蓝水可用量和农业绿水可用量(m^3); W_j 是 j 省的水资源总量(m^3); AWC_j 和 TWC_j 分别是 j 省的农业耗水量和总耗水量(m^3); L_j 是 j 省的耕地面积(hm^2)。

1.3 耗水强度的空间自相关分析

空间自相关分析可以反映研究参数是否存在空间依赖及依赖程度^[2],莫兰指数(Moran's I , $I \in [1, -1]$)则是空间自相关检验的最常见方法。全局莫兰指数(I)可以反映空间依赖的总体特征,当 Moran's I 的估计值

具有统计学意义时($Z > 1.96, P < 0.05$),表明蔬菜的耗水强度呈现全局自相关,在省一级显著聚集^[22-23]。局部莫兰指数(I_i)则可以表示局部单元对全局总趋势的服从程度,即一个省与其邻接省之间的空间关联程度,从而反映参数的空间异质性及空间依赖随位置的变化^[24]。全局和局部莫兰指数的计算如等式(9)、(10)所示:

$$I = \frac{n \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n W_{st} (WCI_s - \overline{WCI})(WCI_t - \overline{WCI})}{\sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^n W_{st} \sum_{s=1}^n (WCI_s - \overline{WCI})^2} \quad (9)$$

$$I_i = \frac{n(WCI_s - \overline{WCI}) \sum_{t=1}^n W_{st}(WCI_t - \overline{WCI})}{\sum_{s=1}^n (WCI_s - \overline{WCI})^2} \quad (10)$$

式中, n 代表省、直辖市及自治区的总数量, WCI_s 和 WCI_t 分别代表地区 s 的耗水强度和地区 t 的耗水强度, \overline{WCI} 代表耗水强度的平均值; W_{st} 指的是空间权重矩阵。

基于莫兰散点图的空间自相关类型包括四种:高-高聚集(省内高值被其周边省的高值包围)、高-低聚集(省内高值被其周边省的低值包围)、低-低聚集(省内低值被其周边省的低值包围)、和低-高聚集(省内低值被其周边省的高值包围)。高-高和低-低聚集意味着相似蔬菜生产耗水强度的空间聚集。

1.4 情景设置

为了探究我国蔬菜生产的节水潜力,揭示可能的节水路径,本研究分别针对灌溉技术改善、单产水平提高、设施蔬菜扩张以及局部地区耗水强度改善等方面设置了以下情景:

水资源利用效率提高情景(Improving water utilization efficiency, IWE):假设露地蔬菜的节水灌溉技术得到进一步的推广发展,各省的农田灌溉水有效利用系数提高1%,减少灌溉水输配等过程中的浪费损失。

蔬菜单产水平提高情景(Increasing unit yield of vegetables, IUY):根据农业农村部发布的农业主推技术(例如“设施茄果类蔬菜机械化生产技术”,“蔬菜病虫害绿色防控技术”),我国蔬菜的单产水平可提高5%—10%。因此,在这一情景中,假设通过发展机械化作业,选用优质品种,推广生物农药及高效低毒化学农药等手段,蔬菜单产可提高5%。

设施蔬菜扩张情景(Greenhouse vegetables development, GVD):假设在《全国现代设施农业建设规划(2023—2030年)》等政策的支持下,设施蔬菜进一步扩张,各省份的设施蔬菜生产系统可以额外替代20%的露地蔬菜产量。

局部地区耗水强度改善情景(Water consumption intensity improvement, WCI):假设自相关空间格局上呈现耗水强度高-高聚集的省份,可以通过借鉴其他地区的先进生产技术和经验,将蔬菜生产的耗水强度改善到我国的中位数水平(露地蔬菜:68.16 m³/t;设施蔬菜:32.17 m³/t)。

复合情景(Comprehensive improvement measures, CIM):由IWE情景、IUY情景、GVD情景、WCI情景综合构成,探究综合改善措施可带来的节水潜力。

1.5 研究对象与数据来源

结合数据可获得性与当前我国蔬菜作物的实际种植比例,本研究首先确定了设施蔬菜的代表性作物,设施番茄、设施黄瓜、设施茄子及设施菜椒。其中,番茄、黄瓜和茄子的设施栽培面积分别占据了该种蔬菜露地和设施总种植面积的50%左右^[25-26]。为了对比同种蔬菜在不同生产系统中的耗水强度,在露地蔬菜中也选取了相对应的蔬菜作物。用于计算露地蔬菜 ET_0 的历史气象数据(包括最低温度、最高温度、降水量、风速和日照时数)来源于国家气象科学数据中心(<https://data.cma.cn/>);由于各地设施种类和管理手段难以统计,用于计算设施蔬菜 ET_0 的气象数据采取了设施园艺信息网所推荐的最佳参数(<http://data.sheshiyuanyi.com/EnvironmentalControl/>);各类蔬菜的单位面积产量来源于《全国农产品成本收益资料汇编2021》,缺失数据的省份取其周边省的平均值;各类蔬菜的生长周期和 K_c 来自粮农组织灌排文件第56号;各省的水资源总量,农

业耗水量和总耗水量、露地蔬菜的灌溉水有效利用系数来源于《中国水资源公报 2020》。文盲率来自《中国卫生健康统计年鉴 2022》；城镇化率、人均蔬菜消费、人均农业产值等来自《中国统计年鉴 2021》；有效灌溉面积、蔬菜产值、农业机械总动力《中国农村统计年鉴 2021》；节水灌溉面积来自《中国水利统计年鉴 2021》；蔬菜生产者价格指数来自《中国农产品价格调查年鉴 2021》；农机补贴来自各省、区公布的农机补贴机具受益人公示数据。产业聚集水平以蔬菜产值和地区 GDP 计算得到的区位熵来表征。

2 结果与分析

2.1 蔬菜生产耗水强度与水资源压力解析

得益于较高的复种指数和单产水平,设施蔬菜的耗水强度普遍低于露地蔬菜(表 1)。在全国尺度上,露地蔬菜的平均耗水强度是设施蔬菜的 2.24 倍。各类蔬菜作物之间的耗水强度差异较大,其中菜椒的耗水强度最高,黄瓜最低。受灌溉条件、管理手段以及设施农业发展水平等因素的影响,设施蔬菜作物的耗水强度存在显著的地区差异。其中,长江中下游地区(36.41 m³/t)与华南地区(35.94 m³/t)设施蔬菜的耗水强度显著高于东北地区(25.14 m³/t)。在露地蔬菜中,区域间差异并不显著,华南地区的耗水强度最高(85.01 m³/t),其次是西北及青藏地区(77.19 m³/t)和华北地区(75.81 m³/t);西南地区的耗水强度最低(60.86 m³/t)(图 1)。

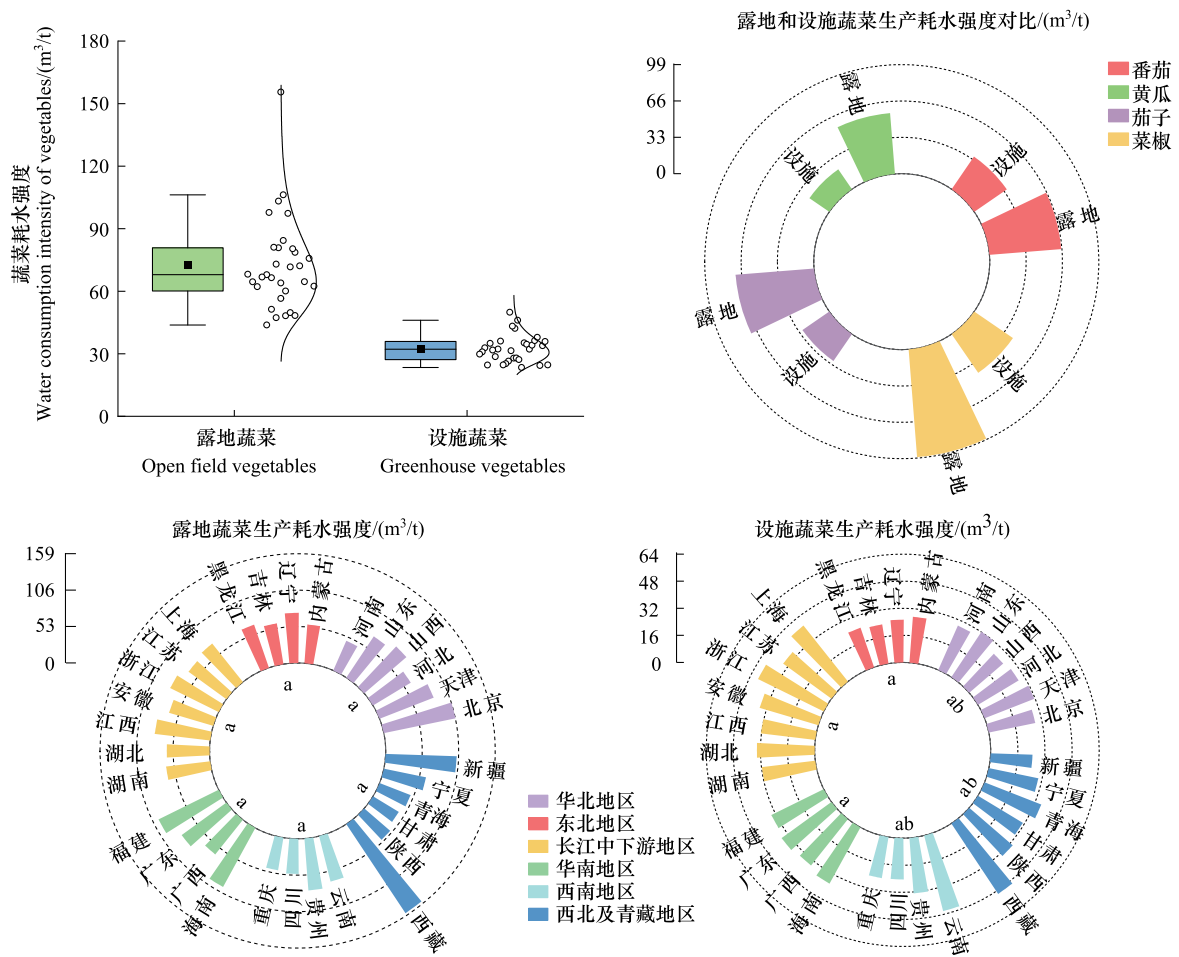


图 1 不同生产方式及不同种类蔬菜的耗水强度对比

Fig.1 Comparison of water consumption intensity for different production patterns and different types of vegetables
不同小写字母表示不同区域间的差异显著性分析结果($P < 0.05$)

表 1 蔬菜作物的单位质量水足迹/(m³/kg)

Table 1 Water footprint per unit mass of vegetables in each province

省份 Province	露地蔬菜 OPV					设施蔬菜 GHV				
	番茄 Tomato	黄瓜 Cucumber	茄子 Eggplant	菜椒 Bell pepper	平均 Mean	番茄 Tomato	黄瓜 Cucumber	茄子 Eggplant	菜椒 Bell pepper	平均 Mean
北京	0.136	0.057	0.094	0.138	0.106	0.028	0.027	0.023	0.033	0.028
天津	0.107	0.049	0.075	0.107	0.084	0.033	0.027	0.020	0.045	0.031
河北	0.055	0.046	0.060	0.095	0.064	0.030	0.018	0.029	0.035	0.028
山西	0.083	0.059	0.086	0.095	0.081	0.029	0.024	0.013	0.040	0.026
内蒙古	0.051	0.033	0.072	0.070	0.057	0.027	0.017	0.029	0.037	0.027
辽宁	0.071	0.047	0.044	0.130	0.073	0.033	0.014	0.009	0.045	0.025
吉林	0.076	0.052	0.050	0.062	0.060	0.020	0.025	0.008	0.040	0.023
黑龙江	0.082	0.061	0.047	0.076	0.066	0.022	0.027	0.022	0.027	0.025
上海	0.064	0.059	0.071	0.093	0.072	0.050	0.027	0.041	0.050	0.042
江苏	0.065	0.052	0.070	0.085	0.068	0.044	0.020	0.027	0.050	0.035
浙江	0.080	0.059	0.079	0.097	0.079	0.044	0.019	0.043	0.067	0.043
安徽	0.080	0.056	0.068	0.064	0.067	0.044	0.027	0.032	0.041	0.036
福建	0.064	0.089	0.110	0.126	0.097	0.040	0.018	0.034	0.045	0.035
江西	0.059	0.056	0.088	0.122	0.081	0.037	0.018	0.032	0.042	0.032
山东	0.068	0.044	0.086	0.091	0.072	0.041	0.019	0.030	0.038	0.032
河南	0.047	0.036	0.049	0.057	0.047	0.030	0.018	0.029	0.037	0.029
湖北	0.039	0.046	0.067	0.097	0.062	0.038	0.025	0.032	0.041	0.034
湖南	0.042	0.047	0.078	0.091	0.065	0.036	0.018	0.031	0.041	0.032
广东	0.066	0.070	0.076	0.110	0.080	0.040	0.017	0.038	0.050	0.036
广西	0.048	0.058	0.060	0.092	0.065	0.041	0.018	0.035	0.046	0.035
海南	0.080	0.070	0.086	0.154	0.098	0.043	0.021	0.038	0.049	0.038
重庆	0.029	0.051	0.049	0.064	0.048	0.025	0.020	0.020	0.034	0.025
四川	0.029	0.058	0.050	0.068	0.051	0.024	0.021	0.020	0.033	0.024
贵州	0.039	0.099	0.068	0.097	0.076	0.039	0.018	0.032	0.042	0.033
云南	0.032	0.054	0.107	0.079	0.068	0.057	0.026	0.045	0.056	0.046
西藏	0.147	0.092	0.131	0.252	0.156	0.058	0.027	0.050	0.064	0.050
陕西	0.054	0.046	0.040	0.059	0.050	0.037	0.030	0.030	0.039	0.034
甘肃	0.033	0.029	0.053	0.059	0.044	0.035	0.018	0.032	0.039	0.031
青海	0.049	0.033	0.044	0.068	0.048	0.038	0.027	0.036	0.044	0.036
宁夏	0.049	0.053	0.057	0.091	0.062	0.025	0.024	0.031	0.039	0.030
新疆	0.101	0.054	0.102	0.156	0.103	0.024	0.020	0.025	0.030	0.025
平均 Mean	0.065	0.055	0.072	0.098	0.073	0.036	0.022	0.030	0.043	0.032

OPV:露地蔬菜 Open field vegetables;GHV:设施蔬菜 Greenhouse vegetables

我国露地蔬菜和设施蔬菜生产带来的水资源短缺压力在空间格局上存在着一定的相似性。例如,宁夏以及华北地区均表现出较高的短缺压力;而黑龙江、西北及西南地区均为压力较低的地区。此外,露地蔬菜和设施蔬菜生产的水资源压力也存在明显的空间异质性。例如,东南沿海地区的露地蔬菜生产引发了较高的水资源短缺压力,而设施蔬菜引起的水资源短缺则更集中于我国的北部(图 2)。具体到省份,对于露地蔬菜,北京的水资源压力最大(1.00),其次是山东(0.88)和宁夏(0.78);对于设施蔬菜,北京的水资源压力最大(1.00),其次是天津(0.72)和宁夏(0.70)。

2.2 蔬菜生产耗水强度的空间相关性分析

设施蔬菜的耗水强度在全局上呈现出显著的正相关空间聚集效应,而露地蔬菜的耗水强度没有明显的全局聚集效应(表 2)。从局部空间自相关来看,在露地蔬菜中大多数省份的耗水强度呈现低-低聚集,高-高聚

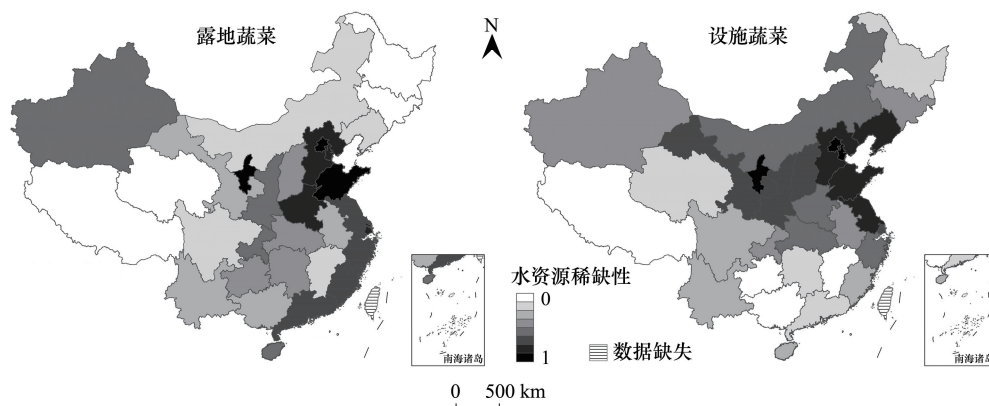


图2 蔬菜生产的水资源压力

Fig.2 The water scarcity of vegetables production

集主要分布在东南沿海地区,可能与当地的气候有关。东南沿海地区降雨量通常较多且不稳定,气象灾害频发^[27],一方面不利于露地蔬菜作物的光合作用,直接损害露地蔬菜产量,另一方面会导致土壤养分流失等问题^[28],不可避免地导致了生产效率的低下。宁夏是一个显著的低低聚集省份,宁夏及邻接省份的低灌溉率可以解释该聚集特点。河北省呈现显著的低-高聚集则是受到北京及天津高灌溉率和高耗水强度的影响。

表2 蔬菜耗水强度的空间自相关分析

Table 2 Spatial autocorrelation analysis of water consumption intensity in vegetables

耗水强度/(m ³ /t) WCI	莫兰指数 Moran's I	Z 分数 Z-score	P
露地蔬菜 OPV	0.1249	1.5456	0.0690
设施蔬菜 GHV	0.3019	2.6415	0.0100

WCI:耗水强度 Water consumption intensity

在设施蔬菜中,东北及华北地区呈现出显著的低-低聚集,该区域为我国设施农业分布较广的省份,表明设施蔬菜产业集中发展对周边地区具有明显的辐射带动作用^[29]。辽宁、内蒙古的高设施农业面积占比,内蒙古、黑龙江的高节水灌溉面积,辽宁、吉林、内蒙古的高单产水平,共同导致了上述地区设施蔬菜耗水强度显著低-低聚集的结果。然而,东南沿海及华南地区等地则呈现高-高聚集。这些地区的设施蔬菜产业规模相对较小,农业组织数量少,生产过程存在一定的盲目性^[30]。尽管国家尺度上可以通过改善耗水强度来减少部分低效的农业水足迹,但减少潜力具有明显的空间异质性,这意味着各省的节水方向和战略应该有所不同(图3)。

2.3 蔬菜生产耗水强度的影响因素

从食物安全 and 国家种植业发展规划来说,通过削减蔬菜生产规模来缓解用水压力的可能性不大,因此,降低耗水强度被视为减少蔬菜生产水足迹和缓解区域水压力的有效途径^[2, 31]。为分析各省蔬菜生产耗水强度的影响因素,研究选取了包括社会因素(城镇化率、文盲率和人均蔬菜消费)、经济因素(蔬菜产值占比、人均农业产值、蔬菜生产者价格指数和农机补贴)、生产因素(农业用水比例、灌溉率、产业聚集水平、农业机械总动力、蔬菜单产水平和节水灌溉面积)在内的三个方面的十三个指标,研究其与蔬菜生产耗水强度的相关性。

结果表明,影响露地蔬菜和设施蔬菜耗水强度的因素并不完全相同(表3)。影响露地蔬菜的主要是社会和生产因素,其中,文盲率、灌溉率与耗水强度呈现显著的正相关关系;农业机械总动力与其呈现显著的负相关关系。露地蔬菜更便于开展机械化作业,因此农业机械总动力较高的地区可能有更加集约化及机械化的蔬菜产业,发达的生产技术有利于耗水强度的降低^[32-33]。对于设施蔬菜,除了社会和生产因素,经济因素也显著影响其耗水强度,这可能与设施蔬菜的高经济收益有关。具体地,文盲率与设施蔬菜耗水强度呈现显著的

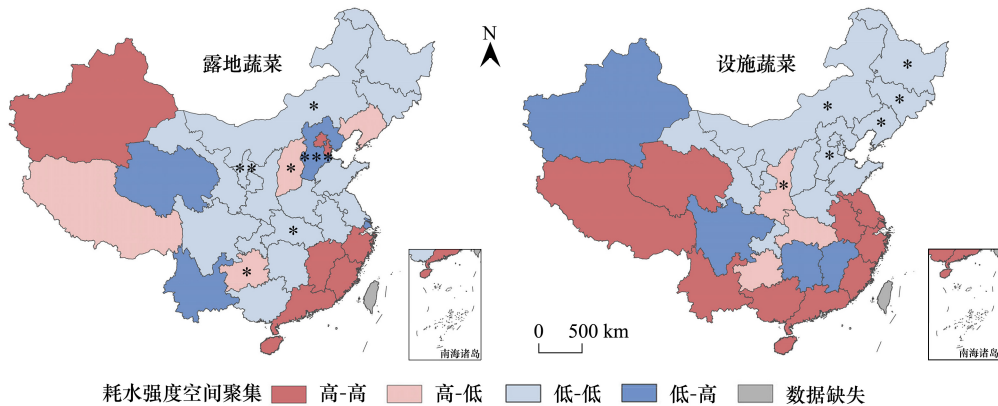


图3 蔬菜耗水强度的局部空间关联

Fig.3 Local spatial association of water consumption intensity in vegetables

* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$; *** : $P < 0.001$

正相关;人均蔬菜消费、蔬菜生产者价格指数、农机补贴、产业聚集水平、单产水平及节水灌溉面积均与设施蔬菜耗水强度呈现显著负相关关系。近年来蔬菜消费需求的增长驱动了设施蔬菜产业和技术的发展,而非露地蔬菜^[34]。这与我国的种植业规划密切相关,例如2023年《中央一号文件》对发展现代设施农业作出了强调。此外,产业聚集水平较高的区域通常会出现生产知识及技术等的溢出效应,进而提高区域的生产效率并形成规模经济^[35-36]。因此,相较于露地蔬菜,生产技术更复杂的设施蔬菜生产系统与产业的聚集、农机补贴更相关。

表3 耗水强度与各指标的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between water consumption intensity and factors

影响因素 Influence factors	指标 Indicators	露地蔬菜耗水强度 WCI of OPV			设施蔬菜耗水强度 WCI of GHV		
		斜率 Slope	R^2	P	斜率 Slope	R^2	P
社会因素 Social factors	城镇化率	-0.081	0.007	0.656	-0.228	0.036	0.309
	文盲率	0.123	0.241	0.005 **	0.172	0.306	0.001 **
经济因素 Economic factors	人均蔬菜消费	-0.18	0.041	0.273	-0.57	0.269	0.003 **
	蔬菜产值占比	-0.276	0.087	0.108	-0.254	0.047	0.24
	人均农业产值	-0.166	0.032	0.336	-0.389	0.114	0.063
	蔬菜生产者价格指数	-0.245	0.122	0.058	-0.534	0.263	0.004 **
生产因素 Production factors	农机补贴	-0.213	0.063	0.173	-0.479	0.206	0.010 *
	农业用水比例	0.007	0	0.967	-0.07	0.004	0.73
	灌溉率	0.611	0.534	0.000 **	—	—	—
	产业聚集水平	-0.826	0.043	0.265	-2.4271	0.1352	0.042 *
	农业机械总动力	-0.275	0.133	0.044 *	-0.254	0.073	0.141
	蔬菜单产水平	-0.185	0.051	0.224	-0.77	0.423	0.000 **
	节水灌溉面积	-0.113	0.023	0.411	-0.341	0.138	0.039 *

* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$

2.4 蔬菜生产的节水潜力

与2020年蔬菜生产耗水总量相比,所有情景下的水资源消耗均有所下降(图4)。其中,下降幅度最大的是复合情景(CIM, -21.69%),其次是设施蔬菜扩张情景(GVD, -9.42%)和蔬菜单产水平提高情景(IUY, -4.76%)。通过提高水资源利用效率(IWE)和改善耗水强度高-高聚集省份的蔬菜生产水平(WCI)则可以分别节约1.42%和4.37%的耗水。这些结果清楚地证明了我国蔬菜生产的巨大节水潜力。从生产系统类别来

看,露地蔬菜在 CIM 情景下节水最多(-31.67%),其次是 GVD 情景(-20.00%)和 IUY 情景(-4.76%);设施蔬菜则在 IUY 情景下节水最多(-4.76%),其次是 WCI 情景(-3.52%)。可以看出,与设施蔬菜相比我国露地蔬菜生产具备更大的水资源节约潜力。

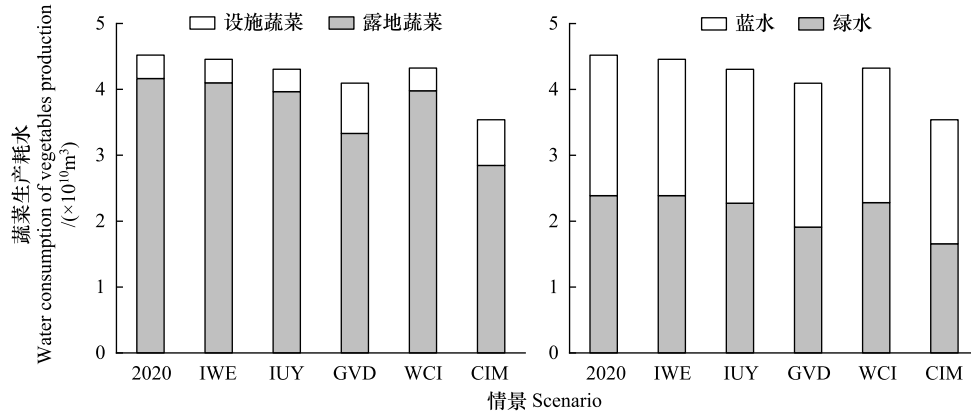


图 4 蔬菜生产节水潜力

Fig.4 Water saving potential of vegetables production

IWE:水资源利用效率提高 Improving water utilization efficiency; IUY:蔬菜单产水平提高 Increasing unit yield of vegetables; 设施蔬菜扩张 Greenhouse vegetables development; WCI:局部地区耗水强度改善 Water consumption intensity improvement; CIM:复合情景 Comprehensive improvement measures

3 讨论

本研究对水足迹和耗水强度的评估是基于经验公式实现的,不可避免地受到灌溉水有效利用系数及气象参数的影响。针对设施蔬菜,研究假设了灌溉水有效利用系数为 1,且设施内为最佳环境条件,这或许会低估设施蔬菜生产的耗水强度。然而,本研究对于设施番茄耗水强度的评估与已有研究十分接近^[37]。本研究的“耗水强度”概念,反映的是用水效率,而非作物蒸腾效率。这不仅与灌溉水平有关,也与作物的单产水平密切相关。相较于露地蔬菜,设施蔬菜较低的理论蒸散量、较高的灌溉效率和产量水平共同解释了其较低的耗水强度。受限于数据的可获得性,研究仅选择了 4 种果菜(番茄、黄瓜、茄子和菜椒)作为代表,可能会在一定程度上影响蔬菜生产总体耗水及节约潜力评估的准确性。当前我国关于蔬菜耗水的宏观性研究还比较缺乏,涵盖更多的蔬菜种类是未来研究应当努力的方向。

鉴于较高的耗水强度和种植比例,露地蔬菜生产具备较大的节水潜力。尽管政府已经关注到露地农田灌溉水有效利用系数等节水技术的重要性并设定了相关改善目标,但尚未对蔬菜的耗水强度作出关注或出台改善措施。提高灌溉效率,如在特定生长阶段推迟灌溉、推广喷灌和滴灌均是降低农业水资源压力的有效措施^[38-39]。然而,灌溉效率的提高是一个变化缓慢的过程。2010 年到 2020 年,中国的灌溉水平有效利用系数从 0.502 提高到 0.565,而美国在 2010 年已达到 0.735。相较于露地蔬菜,设施蔬菜可以利用戈壁、荒漠等非耕地资源来进行扩张,以缓解耕地压力。我国政府已经采取了行动以促进设施蔬菜的发展,如《全国现代设施农业建设规划(2023—2030 年)》提到,2030 年设施蔬菜的产量占比将提高至 40%;《“十四五”全国种植业发展规划》强调重点发展南菜北运基地及黄淮海地区的设施蔬菜。但当前我国设施蔬菜的布局不够合理、老旧设施占比仍较大,例如,黄淮海及环渤海地区部分设施大县的老旧设施占比可达 80%^[40]。这类老旧设施蔬菜的灌溉和生产方式仍然较为粗放,效率低下。因此优化设施蔬菜产业布局,更新设施结构和生产技术将在实现水资源节约的同时,进一步提高土地产出率。

促进人均蔬菜消费以提高农户收益、提高农机补贴以促进蔬菜产业的规模化和机械化^[3, 29]、加速推广节水灌溉技术^[39]、优化设施蔬菜产业布局和结构、提高农户技术革新的意愿^[41]等措施均有利于降低我国蔬菜

生产的耗水强度。此外,根据已有研究,蔬菜的耗水强度远低于谷物类作物^[42-44]。因此,参照《中国居民膳食指南》促进居民的人均蔬菜消费而减少谷物消费,或可促进种植业整体的节水并带来营养益处。然而,这些技术和经济措施能实现的水资源节约是有限的,蔬菜的耗水强度还与产量水平密切相关,研发优质蔬菜品种^[45],强化小农的蔬菜生产技术指导服务以推进生产知识的普及和作物品种的革新,将可进一步提高蔬菜生产的用水效率,降低耗水强度^[46]。

4 结论

基于水足迹范式,本文对不同蔬菜生产系统的耗水特征及空间格局进行分析,并进一步识别了耗水强度的影响因素,揭示了蔬菜生产的节水路径和潜力,得到以下结论:①从生产系统来看,露地蔬菜生产的平均耗水强度显著高于设施蔬菜。从空间格局来看,蔬菜作物尤其是设施蔬菜的耗水强度存在明显的地区差异,在露地蔬菜中,华南地区的耗水强度最高,西南地区最低;在设施蔬菜中,长江中下游地区的耗水强度最高,东北地区最低。②设施蔬菜的耗水强度呈现显著的全局正相关聚集,且东北及华北地区呈现出显著的局部低-低聚集;露地蔬菜的耗水强度没有明显的全局聚集效应,但大多数省份的耗水强度在局部空间自相关分析中呈现低-低聚集。③影响露地蔬菜和设施蔬菜耗水强度的因素并不完全相同,对露地蔬菜耗水强度影响较大的是文盲率、灌溉率和农业机械总动力;对设施蔬菜影响较大的是文盲率、人均蔬菜消费、蔬菜生产者价格指数、农机补贴、单产水平和节水灌溉面积。④我国蔬菜生产具备较大节水潜力,推广节水技术以改善蔬菜的灌溉水平、推广农业农村部发布的农业主推技术以改善蔬菜的单产水平、发展并优化设施蔬菜的设施结构与种植格局以及改善高-高聚集区域的蔬菜耗水强度是节水的有效措施,多措施并举可降低 21.69%的蔬菜生产水消耗。研究结果丰富了对当前农作物生产水资源消耗的认识,并为蔬菜生产节水提供了参考路径。

参考文献(References):

- [1] Wu B F, Tian F Y, Zhang M, Piao S L, Zeng H W, Zhu W W, Liu J G, Elnashar A, Lu Y M. Quantifying global agricultural water appropriation with data derived from earth observations. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 358: 131891
- [2] Cao X C, Shu R, Ren J, Wu M Y, Huang X, Guo X P. Variation and driving mechanism analysis of water footprint efficiency in crop cultivation in China. *The Science of the Total Environment*, 2020, 725: 138537.
- [3] Guo Y H, Wang H, Zhang W, Chen B, Song D. Sustainability evaluation of protected vegetables production in China based on emergy analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 388: 135928.
- [4] Qi X, Feng K, Sun L, Zhao D, Huang X, Zhang D, Liu Z, Baiocchi G. Rising agricultural water scarcity in China is driven by expansion of irrigated cropland in water scarce regions. *One Earth*, 2022, 5, 1139-1152.
- [5] Wada Y, van Beek L P H, Bierkens M F P. Nonsustainable groundwater sustaining irrigation: a global assessment. *Water Resources Research*, 2012, 48(6): W00L06.
- [6] Yang G Y, Li S Y, Wang H, Wang L. Study on agricultural cultivation development layout based on the matching characteristic of water and land resources in North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2022, 259: 107272.
- [7] Hoekstra A Y. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. 2003.
- [8] Wang Y B, Wu P T, Engel B A, Sun S K. Application of water footprint combined with a unified virtual crop pattern to evaluate crop water productivity in grain production in China. *The Science of the Total Environment*, 2014, 497/498: 1-9.
- [9] 李怡瑶. 宁夏主要粮食作物绿水足迹演变趋势及归因分析[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [10] 操信春, 吴普特, 王玉宝, 赵西宁. 中国灌区粮食生产水足迹及用水评价. *自然资源学报*, 2014, 29(11): 1826-1835.
- [11] 郭相平, 高爽, 吴梦洋, 余涛, 操信春. 中国农作物水足迹时空分布与影响因素分析. *农业机械学报*, 2018, 49(5): 295-302.
- [12] He L, Du Y, Wu S, Zhang Z L. Evaluation of the agricultural water resource carrying capacity and optimization of a planting-raising structure. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106456.
- [13] Lu Y, Zhang X Y, Chen S Y, Shao L W, Sun H Y. Changes in water use efficiency and water footprint in grain production over the past 35 years: a case study in the North China Plain. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 116: 71-79.
- [14] 赵宝山. 大田及温室条件下作物蒸发蒸腾模型及参数的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [15] Zhang Z K, Liu S Q, Liu S H, Huang Z J. Estimation of cucumber evapotranspiration in solar greenhouse in Northeast China. *Agricultural Sciences*

- in China, 2010, 9(4): 512-518.
- [16] 赵宝山, 闫浩芳, 张川, Samuel Joe Acquah, 毋海梅, 张亭年. Venlo 型温室内参考作物蒸散量计算方法比较研究. 灌溉排水学报, 2018, 37(7): 61-66.
- [17] Qiu R J, Song J J, Du T S, Kang S Z, Tong L, Chen R Q, Wu L S. Response of evapotranspiration and yield to planting density of solar greenhouse grown tomato in Northwest China. *Agricultural Water Management*, 2013, 130: 44-51.
- [18] 颜俊, 孙美丽, 卢姿竹, 孔令玮, 王维轩, 周伟伟, 梁斌, 李俊良, 吕昊峰. 灌溉方式对设施番茄蒸腾量和水分利用效率的影响. 灌溉排水学报, 2021, 40(S2): 81-85.
- [19] 张雯, 刘倩倩, 王慧, 陈彬. 基于水足迹的山东省农业水土资源匹配特征及短缺压力分析. 生态学报, 2023, 43(12): 4943-4953.
- [20] 农业农村部. 2023. [https://www.moa.gov.cn/\[2023-12-05\]](https://www.moa.gov.cn/).
- [21] Hoekstra A Y. Green-blue water accounting in a soil water balance. *Advances in Water Resources*, 2019, 129: 112-117.
- [22] Dale M R T, Dixon P, Fortin M J, Legendre P, Myers D E, Rosenberg M S. Conceptual and mathematical relationships among methods for spatial analysis. *Ecography*, 2002, 25(5): 558-577.
- [23] Moran P A P. Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 1950, 37(1/2): 17-23.
- [24] 程叶青, 王哲野, 张守志, 叶信岳, 姜会明. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量. 地理学报, 2013, 68(10): 1418-1431.
- [25] 李君明, 项朝阳, 王孝宣, 国艳梅, 黄泽军, 刘磊, 李鑫, 杜永臣. “十三五”我国番茄产业现状及展望. 中国蔬菜, 2021(2): 13-20.
- [26] 中投顾问产业研究中心. [https://www.ocn.com.cn/\[2024-03-18\]](https://www.ocn.com.cn/).
- [27] 林志宇, 田贵良. 气象灾害对福建粮食产量影响的灰色关联分析. 中国农业气象, 2016, 37(1): 77-83.
- [28] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰. 模拟降雨下喀斯特坡耕地土壤养分输出机制. 生态学报, 2018, 38(2): 624-634.
- [29] 王牧野, 李建平, 李俊杰. 中国设施蔬菜历史演变、规模分布与区域布局. 中国瓜菜, 2020, 33(7): 86-89.
- [30] 陶先兰, 廖春勇. 广西设施蔬菜发展现状及可持续发展措施. 种子科技, 2023, 41(17): 127-129.
- [31] Brauman K A, Siebert S, Foley J A. Improvements in crop water productivity increase water sustainability and food security—a global analysis. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(2): 024030.
- [32] Liu P Z, Zhang T, Zhang F Y, Ren X L, Chen X L, Zhao X N. Ridge cropping and furrow irrigation pattern improved spring maize (*Zea mays* L.) yield and water productivity in Hetao irrigation area of north-western China. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(15): 6889-6898.
- [33] 吴梦洋, 操信春, 任杰. 灌排模式对稻田作物水足迹的影响. 农业机械学报, 2021, 52(1): 256-262.
- [34] 雷清静, 项朝阳, 肖小勇. 后疫情时代我国蔬菜产业发展新趋势. 中国蔬菜, 2023(10): 1-4.
- [35] 于丽艳, 穆月英, 丁建国, 吴丽姝. 蔬菜生产的空间集聚对技术效率的影响. 中国瓜菜, 2022, 35(3): 110-114.
- [36] 何婉, 樊斌, 李明阳. 中国蔬菜生产的集聚对技术效率的影响. 北方园艺, 2023(18): 142-149.
- [37] 安顺伟, 刘佳, 王克武, 钟连全, 车璐, 高丽红. 北京市蔬菜节水技术研究与应用. 蔬菜, 2021(S1): 59-63.
- [38] Fan Y L, Ma Y Z, Zaman A M, Zhang M M, Li Q Q. Delayed irrigation at the jointing stage increased the post-flowering dry matter accumulation and water productivity of winter wheat under wide-precision planting pattern. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 103(4): 1925-1934.
- [39] Umair M, Hussain T, Jiang H B, Ahmad A, Yao J W, Qi Y Q, Zhang Y C, Min L L, Shen Y J. Water-saving potential of subsurface drip irrigation for winter wheat. *Sustainability*, 2019, 11(10): 2978.
- [40] 冷杨, 孙周平, 魏晓明, 别之龙, 王克健, 夏宏义, 曹堃, 周泽宇. 设施蔬菜产业发展(五) 我国老旧蔬菜设施现状、问题及改造提升对策建议. 中国蔬菜, 2024(2): 1-5.
- [41] 陈宏伟, 穆月英. 农户节水技术采纳行为与意愿悖离研究——基于行为意向与技术环境视角[J/OL]. 中国农业资源与区划, 1-17 [2024-06-05]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3513.S.20231219.1552.004>
- [42] 刘宁, 李华姣, 边志强, 刘晓佳. 基于空间面板 STIRPAT 模型的水足迹影响因素分析——以山东省为例. 生态学报, 2022, 42(22): 9335-9347.
- [43] 张鹏飞, 肖梦琳, 张兆瑞, 戴燕燕, 韩顺莉, 刘庚, 赵景波. 基于水-能-粮关联关系的山西省农业种植结构优化调整. 节水灌溉, 2023(1): 55-63, 70.
- [44] 杨润丁, 杨冬民. 基于 LMDI 模型的湖北省农业水足迹时空分布与驱动力研究. 中国水土保持科学, 2024, 22(1): 106-113.
- [45] 夏正凤, 郑家涛. 设施番茄新品种比较试验. 蔬菜, 2023(11): 62-65.
- [46] 谢政璇, 穆月英. 设施蔬菜种植户节水灌溉技术采用的影响因素研究. 中国农学通报, 2021, 37(17): 151-156.