

DOI: 10.5846/stxb202205031227

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.

Zhang W, Liu Q Q, Wang H, Chen B. Analysis of matching characteristics and scarcity of agricultural water and land resources in Shandong Province based on water footprint. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 4943-4953.

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

张 雯¹, 刘倩倩¹, 王 慧¹, 陈 彬^{2,3,*}

¹ 山东师范大学环境与生态研究院, 济南 250358

² 河北工程大学能源与环境工程学院, 邯郸 056038

³ 北京师范大学环境学院, 北京 100875

摘要: 高强度农业开发引起的农业水土资源生态问题日益增多, 探究粮食及蔬菜(粮蔬)生产中水土资源空间配置及短缺压力对农业资源的可持续利用具有重要意义。从水足迹视角出发, 分析了山东省 3 种主要粮食作物(冬小麦、玉米及大豆)和两种不同种植模式蔬菜(设施蔬菜和露地蔬菜)的生产水足迹空间特征; 同时将资源数量及资源质量的概念纳入研究框架, 分析了农业水土资源数量及质量匹配格局差异, 并进一步探究了农业水土资源短缺压力及其影响因素。研究结果表明: (1) 2019 年, 山东省粮食和蔬菜的生产总水足迹为 811 亿 m^3 , 其中粮食生产总水足迹占比 78.50%, 蔬菜生产总水足迹占比 21.50%; 粮蔬生产水足迹受地势影响明显, 鲁西北及鲁西南平原地区的粮蔬生产水足迹占比较大。(2) 考虑资源数量的水土资源匹配系数均值为 $0.622 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 考虑资源质量的匹配系数均值为 $0.416 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$; 水土资源数量及质量匹配系数在空间上呈现出一致性, 表明山东省农业生产水土资源空间配置水平高的地区同时面临着较大的农业面源污染压力。(3) 整体上, 土地资源短缺压力略高于水资源短缺压力; 基于生产视角的水土资源短缺压力受生产环境因素制约显著, 受经济发展因素的影响具有差异性, 社会因素对水土资源短缺压力无显著影响。研究可为农业资源可持续管理提供数据基础, 为全面理解粮蔬生产所产生的水土资源短缺提供案例参考。

关键词: 水足迹; 水土资源; 匹配; 短缺压力; 空间异质性

Analysis of matching characteristics and scarcity of agricultural water and land resources in Shandong Province based on water footprint

ZHANG Wen¹, LIU Qianqian¹, WANG Hui¹, CHEN Bin^{2,3,*}

¹ Institute of Environment and Ecology, Shandong Normal University, Ji'nan 250358, China

² School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China

³ School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The ecological problems of agricultural water and land resources caused by high-intensity agricultural development have been gradually increasing worldwide, such as the excessive exploitation of shallow groundwater, the shortage of cultivated land resources and the intensification of non-point source pollution. It is of great significance to explore the spatial allocation and shortage pressure of water and land resources in grain and vegetable production for sustainable utilization of the agricultural resources. In this paper, Shandong Province, a typical major grain-producing region and vegetable production base in China, was selected as the case study to explore the spatial allocation and scarcity of water and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72004126); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA2010010405); 国家杰出青年科学基金项目(71725005); 中国博士后科学基金资助项目(2019M662430)

收稿日期: 2022-05-03; **网络出版日期:** 2023-02-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenb@bnu.edu.cn

land resources in crop production (including grains and vegetables). The results will also play an important role of demonstration and reference for the sustainable utilization and management of water and land resources in other provinces. The spatial characteristics of water footprint of three main grain crops (winter wheat, corn and soybean) and vegetables with two different planting patterns (protected vegetables and open field vegetables) firstly were analyzed. Then the concept of resource quantity and resource quality was introduced to analyze the matching pattern differences of quantity and quality of agricultural water and land resources. Finally, the scarcity of agricultural water and land resources and its influencing factors were further explored. The results showed that: (1) the water footprint of grains and vegetables differed greatly, and soybean had the highest water footprint, followed by wheat and corn. The water footprint of vegetable was much smaller than that of grains, and the water footprint of open field vegetables was higher than that of protected vegetables. In 2019, the total water footprint of grain and vegetable production in Shandong Province was 81.1 billion m^3 , of which water footprint of grain production accounted for 78.50%, vegetable production accounted for 21.50%. The water footprint of grain and vegetable production was obviously affected by topography, and the water footprint was larger in northwest and southwest Shandong. (2) The mean matching coefficient of water and land resources considering resources quantity was $0.622 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, and the mean matching coefficient considering the resources quality was $0.416 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$. The matching coefficient of quantity and quality of water and land resources was consistent in space, which indicated that the areas with high spatial allocation level of water and land resources in agricultural production were also facing greater agricultural non-point source pollution pressure. (3) The spatial distribution of water resource and land resource shortage pressure showed homogeneity as a whole; the scarcity of land resource was higher than that of water resource. Based on the perspective of production, the scarcity of water and land resources was significantly restricted by environmental factors, and differently affected by economic development factors, while social factors had no significant impact on the scarcity. In the future, the adjustment of planting structure will promote the coordinated optimization of the matching degree of quantity and quality of water and land resources, and promote the optimal allocation of water and land resources. This study can provide data basis for sustainable management of agricultural resources and provide case reference for comprehensive understanding of scarcity of water and land resource caused by crop production.

Key Words: water footprint; water and land resources; matching; scarcity; spatial heterogeneity

水资源和土地资源是生态系统的重要组成部分,为农业发展提供了重要的物质基础和生态服务^[1-4]。水资源作为区域农业土地利用的限制因素,其数量及时空分布格局决定着土地粮蔬生产能力,而粮蔬生产活动是地下水消耗的根源所在,深刻影响水资源循环及安全^[5-6]。高强度农业开发引起的农业水土资源系统生态环境问题日益增多,地下水位下降^[7]、面源污染加剧^[8]等负面影响逐步显现,水土资源压力日渐增加,严重阻碍了农业的可持续发展^[9-10]。如何对粮蔬生产过程中伴生的水土资源短缺进行准确评估以促进水土资源合理配置,成为推动农业资源高效利用和可持续发展的迫切需求。

目前,国内外针对水土资源的研究多聚焦在三方面:一是两者的交互作用和反馈作用,比如土地利用对水量及水质的影响^[11-13]、土地利用与水资源需求的关系^[14]等;二是定性、定量描述水土资源的匹配状况以及两者匹配格局的均衡程度,该类研究多借助匹配度模型及基尼系数进行评价^[15-16];三是水土资源配置与社会经济系统间的关联关系,如水土匹配情况与农业经济增长的相关性分析^[17-18],多在流域尺度或省级尺度展开。水土资源方面的研究成果颇为丰富,但以往传统研究多以农业用水统计数据作为基础数据研究水土匹配^[16, 18],且相关统计数据通常以消耗的地表水和地下水之和为主要衡量标准,没有考虑到有效降水对农业生产的贡献,使得农业水土配置的评价略显狭隘。水足迹作为对地区资源消耗进行核算并定量探讨农业生产中水资源消耗对生态环境造成的影响^[19-20],拓宽了传统水资源的外延和内涵。水足迹将实体水与虚拟水结合起来,涵盖蓝水、绿水和灰水,更能真实反映农业生产对水资源的需求和占有状况^[21-23]。因此本研究将水足

迹概念纳入核算框架,以便在广义尺度下评价区域农业水资源的消耗情况,使得农业水土资源匹配度测算及水资源稀缺性评价更为科学、全面。另一方面,以水足迹为切入点评价农业水资源利用及优化农业水土资源配置的研究,多关注粮食生产中的水资源消耗^[17, 22],而对蔬菜生产过程,尤其是设施蔬菜生产的水资源消耗研究不足,且忽略区域内粮食及蔬菜生产效率差异性,限制了农业生产过程中水土资源评估的全面性。此外,区域层面上农业生产所造成的资源稀缺性及相关的社会、经济及生产环境因素等方面对其造成的影响有待进一步明确。

山东省是我国典型的粮食主产区及蔬菜生产基地,2019年,山东省利用全国3.25%的农业用水、6.54%的耕地面积生产了全国8.07%的粮食和11.35%的蔬菜,为维护国家粮蔬安全做出重要贡献。根据《2019年山东省水资源公报》,农田灌溉用水占全省总用水量的53.9%,地下水抽取占全省总供水量的36.8%,地下水超采造成的地下水漏斗等水资源短缺问题突出^[7, 24]。目前,水土资源的有限性已成为制约山东省农业可持续发展的关键因素。基于此,本文选择山东省为案例区开展研究。首先基于县域尺度,构建了粮食及蔬菜的水土资源消耗清单,对区域农业水土资源的匹配及均衡情况进行差异性测度。其次,通过构建农业水资源和耕地稀缺性指标,分析水土资源短缺的空间差异及其与社会、经济及生产环境因素等的相关关系,最后提出粮蔬农业水土资源配置优化的改善对策。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

山东省(34°22'—38°24'N, 114°47'—122°42'E)地处华北平原,属暖温带季风气候类型,降雨集中,雨热同季。2019年,山东省粮食产量5357×10⁴ t,占全国粮食总产量的8.1%,居全国第三位;蔬菜产量8181×10⁴ t,占全国蔬菜总产量的11.4%,居全国第一位,为维护国家粮蔬安全做出重要贡献。目前,山东省人均耕地800 m²,人均水资源占有量334 m³,均显著低于全国人均水平,短期内人多、地少、水缺的资源状况难以改变。同时,山东省“十四五”规划,明确提出强化水资源刚需约束,严控农业用水总量和强度,加快发展旱作农业;强化耕地数量、质量、生态“三位一体”保护,确保耕地总量不减少,质量不降低,为区域农业水土资源的可持续利用提供了明确的政策引导。因此,以山东省为案例开展农业水土资源配置及其相关研究具有重要的现实意义。山东省农业水土资源禀赋与利用情况以及农业生产如图1所示。

1.2 研究方法

1.2.1 粮蔬生产水足迹

水足迹的提出拓宽了传统水资源评价体系的内涵和外延^[25]。根据水足迹的定义,作物生产水足迹是表征生产单位质量作物所需要的水资源数量,包括蓝水足迹(WF_{blue})、绿水足迹(WF_{green})和灰水足迹(WF_{grey})^[26]。蓝水足迹表示作物生长过程中消耗地下水和地表水的量^[19];绿水足迹表示作物生长消耗储存在土壤中水的量,通常以有效降雨量表征^[19];灰水足迹表示的是将作物生产过程中的污染物负荷吸收同化所需要淡水资源的量^[27]。本研究在县域尺度上,采用自下而上的方法,计算主要粮食作物(冬小麦、玉米、大豆)和露地蔬菜(包括番茄、黄瓜、茄子、白菜、菜花等10余种)的蓝、绿水足迹以及设施蔬菜(设施黄瓜、设施番茄、设施茄子、设施辣椒等)的蓝水足迹,粮食及露地蔬菜的蓝绿水足迹计算公式如下:

$$WF_{blue} = \frac{10 \times \sum_{d=1}^n ET_{blue}}{Y} \quad (1)$$

$$WF_{green} = \frac{10 \times \sum_{d=1}^n ET_{green}}{Y} \quad (2)$$

其中, ET_{blue} (mm/d)和 ET_{green} (mm/d)分别表示作物的蓝水蒸散量和绿水蒸散量; n 是作物生育期长度;10为

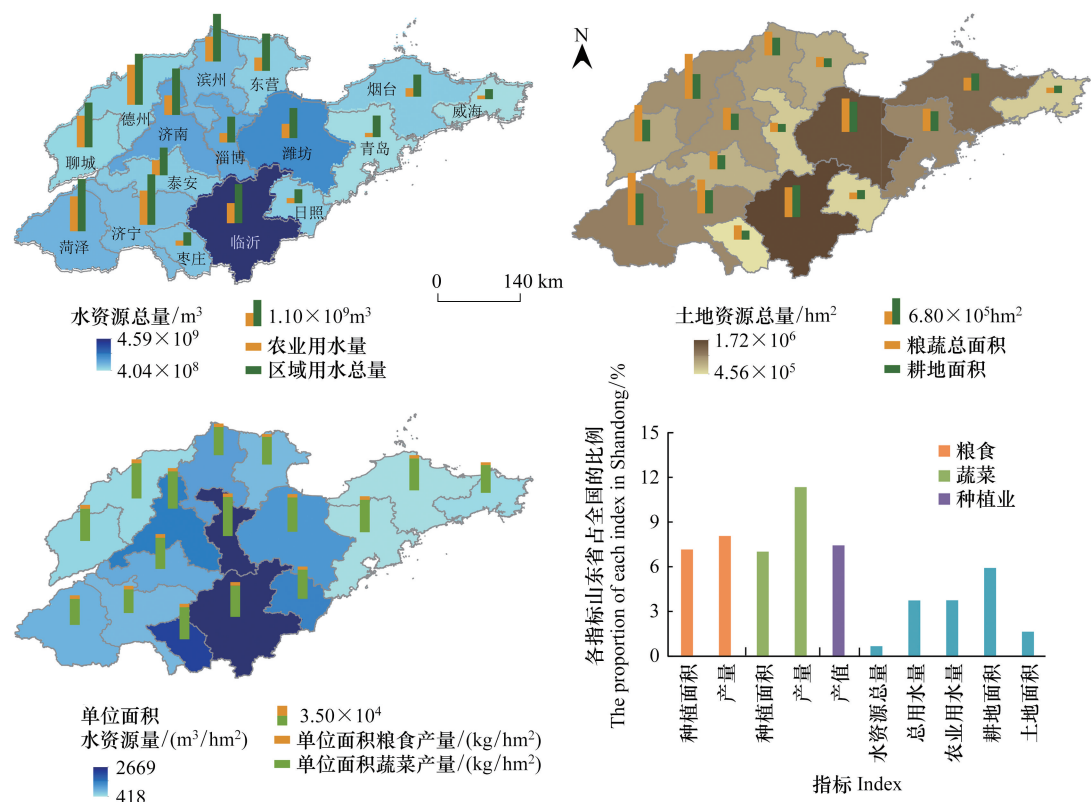


图 1 山东省农业水土资源利用及农业生产概况

Fig.1 Agricultural water and land resources utilization and agricultural production in Shandong province

单位转换系数; Y 为作物单位面积产量 (kg/hm^2)。

$$ET_{\text{blue}} = \text{Max} (0, ET_c - P_e) \quad (3)$$

$$ET_{\text{green}} = \text{Min} (ET_c, P_e) \quad (4)$$

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (5)$$

$$P_e = \begin{cases} P \times (4.17 - 0.2 \times P) / 4.17, & P < 8.3 \\ 4.17 + 0.1 \times P, & P \geq 8.3 \end{cases} \quad (6)$$

其中, ET_c 表示作物蒸散量 (mm); ET_0 表示参考作物蒸散量 (mm/d), 根据 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式^[28], 利用 CropWat 8.0 软件测算^[29]; K_c 为 FAO 推荐的作物调节系数; P_e 为作物生育期内有效降雨量 (mm), 根据经验公式(6)计算; P 为实际日降雨量 (mm/d)。在进行设施内蔬菜蓝水蒸散量核算时, 考虑到设施封闭或半封闭环境与大田环境的差异, ET_0 是校正过复合设施内空气对流和冠层温度差异的蒸散值, 详细计算参数及公式请参考相关文献^[30-31]。基于 CropWat 模型核算作物需水量所需的设施内最高温度、最低温度及湿度等指标以不同种类设施蔬菜的实际生产管理最佳环境条件作为基础数据进行。

为反映区域灌溉用水效率及实际灌溉情况, 研究构建了非充分灌溉条件下基于蓝水足迹的作物实际蓝水灌溉量 (practical blue water, BW_p) 核算指标, 计算公式如下:

$$BW_p = \frac{WF_{\text{blue}} \times \text{IPA}}{\text{IEU}} \quad (7)$$

其中, IPA 为区域耕地灌溉率, 为有效灌溉面积占总耕地面积的比例; IEU 是农田灌溉水有效利用系数, 即粮蔬实际蓝水蒸散消耗的灌溉水量占灌溉引水量的比例, 2019 年山东省农田灌溉水有效利用系数为 0.643。

粮蔬生产灰水足迹计算公式如下:

$$WF_{grey} = \frac{\alpha \times AR}{(C_{max} - C_{nat})} / Y \quad (8)$$

其中, α 为淋溶率, 表示进入水体的化学物质(氮肥)的量占该物质施用量的比例, 由文献调研得到^[32-33]; AR 为施用氮肥的折纯量(kg); C_{max} 表示氮肥最大环境允许浓度, C_{nat} 表示氮肥在水体的初始浓度。

考虑非充分灌溉的粮蔬生产总水足迹 WF_t (m^3) 计算公式为:

$$WF_t = \sum_i (BW_{p,i,j} + WF_{green,i,j} + WF_{grey,i,j}) \times T_{i,j} \quad (9)$$

其中, $T_{i,j}$ 为地区 j 作物 i 的总产量。

1.2.2 基于水足迹的水土匹配系数及基尼系数

分析农业水资源与土地资源的匹配水平对提高农业水土资源利用率和利用效率、协调水土资源与生态环境间的关系以及发展可持续农业意义重大。本研究中, 引入水土匹配系数揭示区域尺度上农业水资源和土地资源时空分配的满足程度。水土资源分配的一致性水平越高, 则匹配程度越好, 农业生产条件越优越。水土资源匹配系数的计算以单位面积上作物生产水足迹的量表示^[15], 计算公式为:

$$R_{quan,j} = \frac{\sum_i (BW_{p,i,j} + WF_{green,i,j}) \times T_{i,j}}{L_{total}} \quad (10)$$

$$R_{qual,j} = \frac{\sum_i WF_{grey,i,j} \times T_{i,j}}{L_{total}} \quad (11)$$

其中, $R_{quan,j}$ ($10^4 m^3/hm^2$) 和 $R_{qual,j}$ ($10^4 m^3/hm^2$) 分别表示地区 j 农业水土资源数量匹配系数和质量匹配系数; L_{total} 表示耕地总面积。

洛伦兹曲线由美国经济学家 Lorenz 于 20 世纪初提出, 用来表征不同国家或同一国家不同区域之间的财富分配平均情况。鉴于水资源与土地资源在空间分布上具有与“人口—收入”相似的不均衡性, 洛伦兹曲线被拓展用于测度区域农业水土资源匹配的协调水平^[16, 34]。基于洛伦兹曲线计算得到的基尼系数(G)越接近于 1, 表明两种资源极不匹配, 反之表明区域农业水土资源的匹配协调水平较好。基尼系数的计算公式为:

$$G = \sum_{j=1}^{j-1} (M_j P_{j+1} - M_{j+1} P_j) \quad (12)$$

其中, M_j 为第 j 个山东省地级市的农业水资源累积比例; P_j 为第 j 个地级市粮蔬种植面积累积比例。

1.2.3 基于水足迹的水土资源短缺压力

本研究以水足迹稀缺性(water footprint scarcity, WFS)表征农业水资源短缺压力, 同时考虑水资源数量(即蓝水和绿水)以及水资源质量(灰水)对其的影响。地区 j 的 WFS 定义为特定时期内作物用水与区域农业可利用水资源量的比值^[35], 计算公式为:

$$WFS_j = \frac{\sum_i (BW_{p,i,j} + WF_{green,i,j}) \times T_{i,j}}{AWA_j} \quad (13)$$

其中, AWA_j 是区域农业可利用水资源量(m^3), 为区域作物灌溉用水(BWA)和耕地可用绿水(GWA)之和。其中,

$$BWA = WR \times \frac{AWU}{TWU} \quad (14)$$

$$GWA = P_e \times L_{total} \quad (15)$$

WR 为区域水资源总量(m^3); AWU 和 TWU 分别为区域农业用水和总用水量。

参考水资源短缺压力的定义, 本研究以耕地稀缺性(CLS)表征区域农业土地资源短缺压力, 并将其定义为区域粮蔬种植面积(L_{crop})与耕地总面积(L_{total})的比值, CLS 值越大, 表明区域粮蔬作物复种指数越高, 耕地则越稀缺。公式为:

$$CLS_j = \frac{L_{crop,j}}{L_{total,j}} \tag{16}$$

本研究将农业水资源短缺压力与该地区土地资源短缺压力的比值定义为水土资源相对短缺指数(RS), 计算公式为:

$$RS_j = \frac{WFS_j}{CLS_j} \tag{17}$$

当 RS>1 时,表明区域水资源短缺压力大于土地资源短缺压力,该区域属于水资源相对短缺区;当 RS≤1 时,区域则属于土地资源相对短缺区。

1.3 数据来源

山东省基于县域尺度的耕地面积、粮蔬种植面积、产量以及化肥施用量等基础数据来源于《山东统计年鉴 2020》及各地市 2020 年统计年鉴;水资源总量及农业用水量等指标来源于《2019 年中国水资源公报》;基于 CropWat 8.0 核算粮蔬生产蓝绿水足迹所需要的气象数据,包括气温、降雨、光照等参数来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>);作物系数 K_c及生育期长度参考 FAO —56 推荐的标准作物系数;核算灰水足迹所需的农业氮元素的最大环境允许浓度 C_{max}(0.01 kg/m³)来源于文献调研^[32—33]。

2 结果与分析

2.1 粮蔬农业生产水足迹空间特征解析

山东省主要粮食及露地、设施蔬菜作物生产水足迹差异较大(表 1)。其中,大豆生产水足迹最高,各市均值为 2.84 m³/kg;小麦和玉米生产水足迹差异较小,各市均值分别为 1.58 m³/kg 和 1.50 m³/kg。由于较高的

表 1 山东省各地市粮蔬作物生产水足迹/(m³/kg)
Table 1 Water footprint of grains and vegetables in cities of Shandong province

城市 City	绿水足迹 Green water footprint				蓝水足迹 Blue water footprint					灰水足迹 Grey water footprint			
	小麦	玉米	大豆	露地蔬菜	小麦	玉米	大豆	露地蔬菜	设施蔬菜	小麦	玉米	大豆	蔬菜
济南市	0.175	0.507	1.113	0.059	1.026	0.736	1.881	0.042	0.074	0.495	0.451	0.246	0.107
青岛市	0.224	0.441	0.928	0.057	0.917	0.482	1.225	0.046	0.076	0.491	0.404	0.237	0.123
淄博市	0.168	0.504	1.326	0.064	0.823	0.504	1.237	0.020	0.061	0.471	0.403	0.249	0.102
枣庄市	0.317	0.471	1.004	0.081	0.676	0.513	0.854	0.019	0.073	0.503	0.406	0.191	0.124
东营市	0.151	0.611	1.861	0.076	0.944	0.945	2.717	0.051	0.093	0.506	0.567	0.406	0.144
烟台市	0.234	0.480	0.839	0.054	1.069	0.823	1.948	0.064	0.086	0.532	0.446	0.226	0.125
潍坊市	0.176	0.452	1.144	0.061	0.831	0.670	1.679	0.037	0.072	0.486	0.425	0.260	0.116
济宁市	0.243	0.409	1.024	0.096	0.659	0.555	1.344	0.038	0.098	0.475	0.385	0.231	0.168
泰安市	0.225	0.427	1.007	0.074	0.821	0.384	1.004	0.029	0.075	0.454	0.366	0.219	0.128
威海市	0.296	0.599	0.995	0.057	1.106	0.598	1.464	0.058	0.083	0.621	0.564	0.285	0.142
日照市	0.269	0.497	1.079	0.077	0.984	0.396	0.866	0.028	0.077	0.514	0.394	0.211	0.125
临沂市	0.275	0.514	1.362	0.080	0.724	0.497	1.263	0.023	0.075	0.504	0.412	0.263	0.127
德州市	0.135	0.442	0.849	0.059	0.839	0.531	1.238	0.038	0.071	0.448	0.366	0.190	0.113
聊城市	0.177	0.417	1.089	0.066	0.853	0.589	1.731	0.041	0.078	0.463	0.368	0.251	0.123
滨州市	0.136	0.527	1.233	0.078	0.855	0.668	1.657	0.041	0.087	0.475	0.448	0.260	0.141
菏泽市	0.196	0.432	0.959	0.086	0.883	0.611	1.588	0.049	0.098	0.479	0.379	0.226	0.154
平均 Mean	0.212	0.483	1.113	0.070	0.876	0.594	1.481	0.039	0.080	0.495	0.424	0.247	0.129

单产水平,单位质量蔬菜作物生产水足迹远小于粮食作物,且露地蔬菜生产水足迹($0.24 \text{ m}^3/\text{kg}$)高于设施蔬菜($0.21 \text{ m}^3/\text{kg}$)。在水足迹构成来看,粮食作物蓝水足迹占比最高,其中小麦蓝水足迹占比最高(各市均值 55.20%),其次是大豆(51.45%)和玉米(39.18%);小麦绿水足迹(13.42%)和大豆灰水足迹占比最低(8.79%)。蔬菜的灰水足迹占比最高,露地蔬菜和设施蔬菜灰水足迹分别占比 54.09%和 61.73%,且设施蔬菜的蓝水足迹(38.27%)占比高于露地蔬菜(16.32%)。

2019 年,山东省粮食和蔬菜总水足迹为 811 亿 m^3 ,其中粮食总水足迹占比 78.50%,蔬菜总水足迹占比 21.50%,粮食生产绿水、蓝水及灰水消耗总量分别是蔬菜的 9.34、7.10 和 2.74 倍(图 2)。省级尺度上粮蔬总水足迹中,蓝水占比 24.63%,绿水占比 35.02%,灰水占比 40.35%。由于各市粮蔬生产规模、种植结构及管理模式的差异,各市粮食及蔬菜的总水足迹存在明显差异(图 2)。整体上,粮蔬生产总水足迹受地势影响明显,鲁西北及鲁西南平原地区的粮蔬总水足迹占比较大;鲁中山区及山东半岛地区粮蔬总水足迹普遍偏低。其中,粮食生产总水足迹最高的为菏泽市(92 亿 m^3),其次是德州市(85 亿 m^3)和聊城市(69 亿 m^3)。蔬菜生产总水足迹最高的为潍坊市(23 亿 m^3),其次是菏泽市(21 亿 m^3)和济宁市(19 亿 m^3)。威海市、日照市、东营市等地的粮食及蔬菜生产水足迹最低。

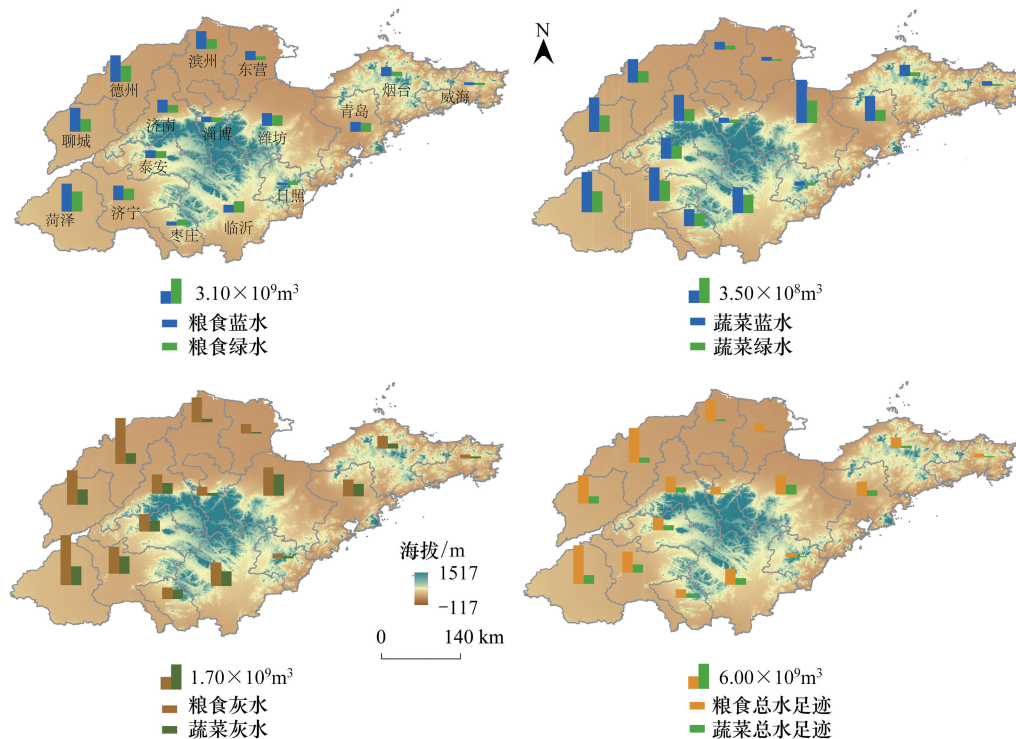


图 2 粮食及蔬菜生产耗水

Fig.2 Water consumption of grain and vegetable production

2.2 粮蔬农业水土资源匹配格局分析

2019 年,山东省平均水土资源数量匹配系数为 $0.622 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,平均水土资源质量匹配系数为 $0.416 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。整体而言,考虑资源数量和质量的水土匹配系数在空间上基本上呈现出一致性(图 3)。具体地,聊城市的水土资源质量匹配系数最高($0.921 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$),其次是德州市($0.890 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)、菏泽市($0.816 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$);日照市的水土数量匹配系数最低($0.340 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$),其次是临沂市和威海市。对于水土资源质量匹配系数,枣庄市最高($0.596 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$),其次是聊城市($0.588 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)和德州市($0.586 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$),菏泽市($0.553 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)与泰安市($0.519 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)紧随其后;最低的为日照市($0.197 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)、威海市($0.204 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)和烟台市($0.262 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)。

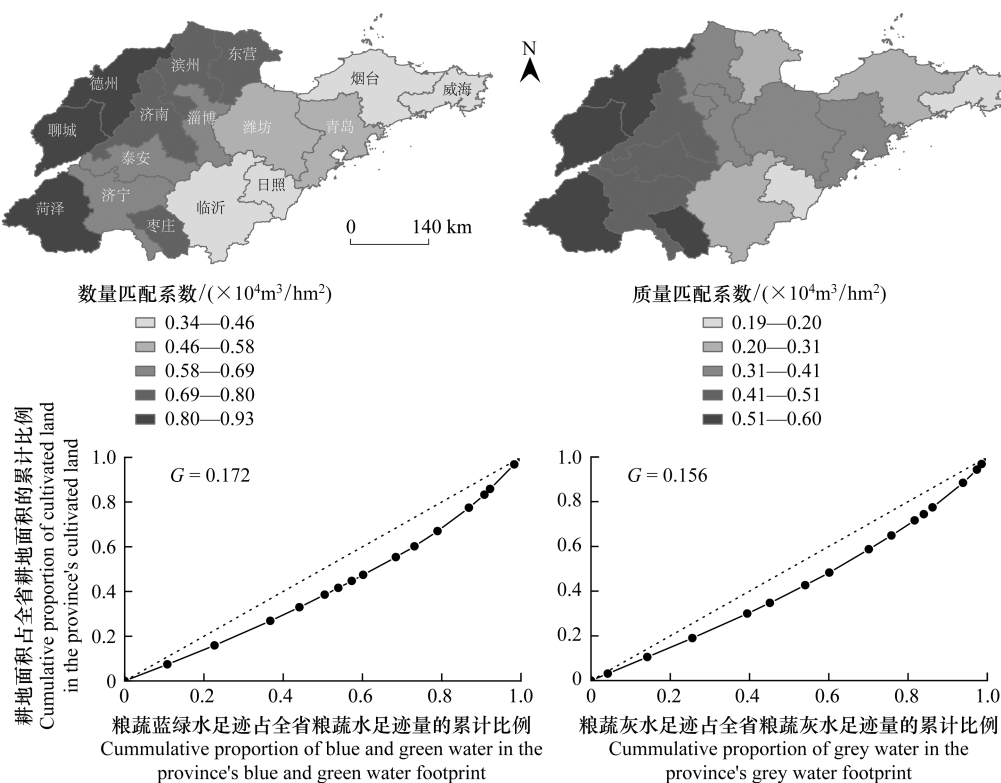


图3 考虑资源数量及质量的农业水土资源空间匹配及其均衡性评价

Fig.3 Spatial matching and equilibrium evaluation of agricultural water and land resources considering the quantity and quality of resources

水土资源数量匹配系数越高,表明山东省农业生产水资源与土地资源时空分布均衡,农业生产条件优越;而水土资源质量匹配系数越高,则表明农业生产过程所造成的单位面积耕地上污染的水资源量越大,当地的农业面源污染压力越大。基于资源数量和质量的水土资源洛伦兹曲线及基尼系数,2019年山东省的水土资源数量匹配(0.172)比质量匹配(0.156)差,表明山东省农业生产所产生的资源数量影响比生产过程对资源质量产生的影响更大。

2.3 粮蔬农业水土资源短缺压力空间异质性分析

山东省农业水资源及土地资源短缺压力空间分布整体表现出同质性,即水资源短缺地区同样面临着较大的土地资源短缺压力(图4)。水资源短缺压力全省平均为1.18,土地资源短缺压力平均为1.24,土地资源短

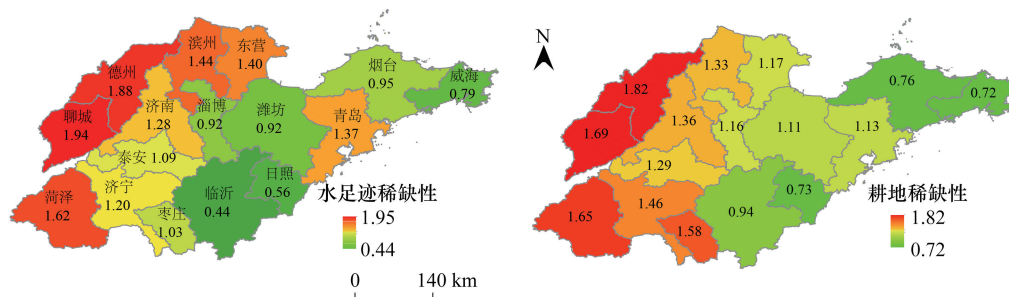


图4 水土资源短缺压力空间分布

Fig.4 Spatial difference of water and land resources scarcity

WFS: 水足迹稀缺性 Water footprint scarcity; CLS: 耕地稀缺性 Cultivated land scarcity

缺压力高于水资源短缺压力。具体地,德州市、聊城市、菏泽市的水资源短缺压力最大,其次是滨州市和东营市;临沂市、日照市、威海市的水资源短缺压力最小。对于农业土地资源而言,压力最大的地市是德州市、聊城市和菏泽市,其次是枣庄市和济宁市;压力最小的为威海市、日照市、烟台市。

全省的水土资源相对短缺平均值为 0.94,水资源相对短缺区多于土地资源短缺区(图 5)。其中,水资源相对短缺区以农业可用水量较低的烟台市和青岛市最为突出,该两市或可通过降低高蓝水足迹作物种植面积,降低区域农业用水强度,促进水土资源的相对配置。临沂市属于土地资源相对短缺区,考虑到临沂市地形,一方面应加强对山区耕地资源的开发与利用,另一方面,可通过推广立体无土栽培模式生产蔬菜,实现区域水土资源的充分利用。

为分析影响各地市农业水土资源相对短缺的原因,本研究选取三个方面的六个指标包括社会因素(人口密度和城镇化率)、经济因素(人均 GDP 和农业产值占比)以及生产环境因素(农业用水结构和有效灌溉面积),研究其与农业水土资源短缺的相关关系。分析发现,农业用水结构及有效灌溉面积与 WFS 及 CLS 均呈现出显著正相关的关系,除此之外,人均 GDP 和农业产值占比与 CLS 呈现显著正相关,但与 WFS 没有显著相关性,且两个社会因素对水土资源短缺压力没有显著影响(表 2)。表明,区域的经济的发展可能会导致耕地资源非农化,进而导致农业土地资源短缺压力增大,而基于生产视角的社会因素对区域的农业水土资源短缺压力影响不大。

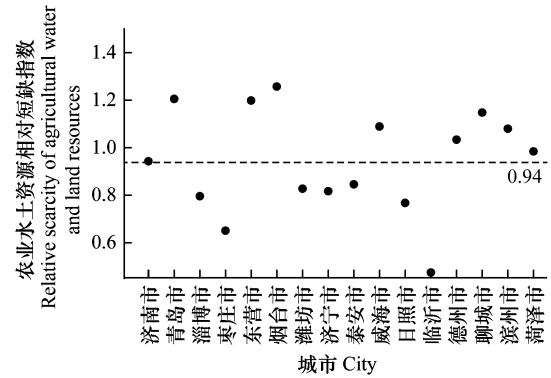


图 5 山东各地市的农业水土资源相对短缺
Fig.5 Relative scarcity of agricultural water and land resources in different cities of Shandong

表 2 水土资源短缺压力与各因素间的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between water and land resource scarcity and factors

指标 Indicators		水足迹稀缺性 WFS			耕地稀缺性 CLS		
		斜率 Slope	R^2	P	斜率 slope	R^2	P
社会因素	人口密度	0.01	0.002	0.872	0.07	0.129	0.172
Social factors	城镇化率	-1.50	0.071	0.320	-2.25	0.241	0.054
经济因素	人均 GDP	-0.001	0.009	0.738	-0.001	0.251	0.048 *
Economic factors	农业产值占比	0.77	0.063	0.348	1.50	0.366	0.013 *
生产环境因素	农业用水结构	1.44	0.289	0.032 *	1.49	0.467	0.004 **
Environmental factors	有效灌溉面积	0.002	0.328	0.020 *	0.001	0.368	0.013 *

WFS:水足迹稀缺性 Water footprint scarcity;CLS:耕地稀缺性 Cultivated land scarcity; *:显著相关性 $P<0.05$; **:极显著相关性 $P<0.01$

3 讨论

单位质量粮蔬作物生产水足迹与作物单位面积产量、气候条件、施肥习惯、区域灌溉率及灌溉技术等密切相关。山东省作物生产蓝水足迹粮食($0.98\text{ m}^3/\text{kg}$)显著高于蔬菜,设施蔬菜($0.08\text{ m}^3/\text{kg}$)高于露地蔬菜($0.04\text{ m}^3/\text{kg}$),其中露地蔬菜蓝水足迹与已有研究中露地蔬菜蓝水足迹 $0.01\text{ m}^3/\text{kg}$ 接近^[36-37]。关于设施蔬菜生产水足迹的研究,目前还很有限。根据本文结果,全省尺度上,设施蔬菜实际蓝水消耗量占粮蔬总量的 14.21%,潍坊、临沂及枣庄等地该比例甚至高达 25%。但值得一提的是,本研究根据实践经验,假设设施蔬菜灌溉是在充分灌溉条件下,且主要依赖于地下水,计算的基于水足迹的蓝水消耗量或大于实际灌溉量。针对设施蔬菜生产,在进一步提高集成灌溉技术的基础上,加强对绿水的收集及利用,将有助于缓解区域设施农业用水压力。此外,基于粮蔬单位质量水足迹的差异,在居民饮食习惯的基础上,根据《中国居民平衡膳食宝塔》指南,

引导居民适当提高蔬菜摄入比例,或可在一定程度上引起区域粮食及蔬菜种植结构的变化,并进一步促进农业水土资源释放,提高农业水土资源配置效率。

农业水土资源数量匹配系数与资源短缺压力分布呈现出一致性,二者与粮蔬作物生产蓝、绿水消耗量成正相关关系,且可间接体现粮蔬作物种植结构的差异以及地下水超采情况等。数量匹配系数高于 $0.80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 的聊城、德州、菏泽三市,小麦及玉米总产量占全省的 40.59%,而数量匹配系数最低的日照市 ($0.34 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$),小麦及玉米总产量仅占全省的 1.44%。由于较高的蓝绿水消耗量,数量匹配系数较高的地区与地下水漏斗分布区基本吻合,主要分布在德州、滨州、济南、淄博、潍坊、泰安、聊城等市所构成的区域范围内。2019 年,山东省各市水土资源质量匹配系数均值为 $0.416 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,低于数量匹配均值,表明山东省农业生产所产生的资源数量影响比生产过程对资源质量产生的影响更大,在农业生产过程中应更加突出以水资源量为刚性约束,严控农业用水强度和总量,实现农业水土资源的协调开发利用。全省尺度上的种植结构规划调整将是促进农业水土资源合理配置的有效措施,如可在水土资源数量匹配系数高、资源压力大的地区,同步调整粮食(降低)及蔬菜(提高)的种植比例,并配置一定面积的玉米—大豆复合带,在保障粮蔬生产安全的基础上,实现区域总用水强度的降低以及绿水的使用效率的提高,以缓解区域水土资源压力。同时,种植结构调整后的地区,由于灌溉水量降低,也可形成氮素淋失强度下降的正面影响^[8, 38],降低区域的水土资源质量匹配系数,实现区域水土数量匹配及质量匹配的协同优化。此外,加强现代化新型农业种植模式的推广,尤其是无土栽培、设施农业以及精准农业,可在资源利用效率提升、资源短缺压力缓解及面源污染改善等三维角度促进农业水土资源的可持续利用。

4 结论

本研究解析了山东省 2019 年粮食和蔬菜生产水足迹的空间特征,分析测算了农业水土资源数量、质量匹配格局及资源短缺压力的空间异质性,最后揭示了农业水土资源短缺压力的影响因素。主要研究结论如下:

(1) 山东省主要粮食及露地、设施蔬菜作物生产水足迹差异较大,大豆生产水足迹最高,其次是小麦和玉米;蔬菜作物生产水足迹远小于粮食作物,且露地蔬菜生产水足迹高于设施蔬菜。粮蔬生产受地势影响明显,平原地区粮蔬生产消耗的水土资源多于山地地区。

(2) 考虑资源数量和质量的水土匹配系数在空间上基本上呈现出一致性,平原地区的水土资源数量匹配度较高,但同时也面临着较高的面源污染风险;水土资源数量匹配比质量匹配差,粮蔬生产所产生的资源数量影响比生产过程对资源质量产生的影响更大。

(3) 农业水资源及土地资源短缺压力空间分布整体表现出同质性,省级尺度上土地资源短缺压力略高于水资源短缺压力,水资源相对短缺区多于土地资源短缺区。水土资源短缺压力受生产环境因素制约显著,经济发展对农业土地资源有显著影响,社会因素对水土资源短缺压力无显著影响。

参考文献(References):

- [1] Brown L R, Halweil B. China's water shortage could shake world food security. *World Watch*, 1998, 11(4): 10-16.
- [2] Whitman E. A land without water: the scramble to stop Jordan from running dry. *Nature*, 2019, 573(7772): 20-23.
- [3] 刘彦随, 吴传钧. 中国水土资源态势与可持续食物安全. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 270-275.
- [4] 黄季焜, 杨军, 仇焕广. 新时期国家粮食安全战略和政策的思考. *农业经济问题*, 2012, 33(3): 4-8.
- [5] 张光辉, 费宇红, 刘春华, 严明疆, 王金哲. 华北平原灌溉用水强度与地下水承载力适应性状况. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 1-10.
- [6] 李昌峰, 高俊峰, 曹慧. 土地利用变化对水资源影响研究的现状和趋势. *土壤*, 2002, 34(4): 191-196, 205.
- [7] 马震, 段永侯. 山东鲁北平原地下水资源与可持续利用. *水文地质工程地质*, 2005, 32(2): 1-10.
- [8] 曹连海, 吴普特, 赵西宁, 王玉宝. 内蒙古河套灌区粮食生产灰水足迹评价. *农业工程学报*, 2014, 30(1): 63-72.
- [9] Baker T J, Miller S N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. *Journal of Hydrology*, 2013, 486: 100-111.
- [10] 欧阳志云. 我国生态系统面临的问题与对策. *中国国情国力*, 2017(3): 6-10.

- [11] Bossio D, Geheb K, Critchley W. Managing water by managing land: addressing land degradation to improve water productivity and rural livelihoods. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(4): 536-542.
- [12] Ross E R, Randhir T O. Effects of climate and land use changes on water quantity and quality of coastal watersheds of Narragansett Bay. *Science of the Total Environment*, 2022, 807: 151082.
- [13] Motoshita M, Ono Y, Finkbeiner M, Inaba A. The effect of land use on availability of Japanese freshwater resources and its significance for water footprinting. *Sustainability*, 2016, 8(1): 86.
- [14] Wilson T S, Sleeter B M, Cameron D R. Future land-use related water demand in California. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(5): 054018.
- [15] 刘彦随, 甘红, 张富刚. 中国东北地区农业水土资源匹配格局. *地理学报*, 2006, 61(8): 847-854.
- [16] 李晓燕, 郝晋珉, 陈爱琪. 山东省农业水土资源时空匹配格局及评价研究. *中国农业大学学报*, 2020, 25(11): 1-11.
- [17] 樊慧丽, 付文阁. 水足迹视角下我国农业水土资源匹配及农业经济增长——以长江经济带为例. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(10): 193-203.
- [18] 王妍, 雷晓辉, 张玉, 崔娜. 北京市水土资源匹配时空模式研究. *中国农学通报*, 2021, 37(35): 73-77.
- [19] Hoekstra A Y. Green-blue water accounting in a soil water balance. *Advances in Water Resources*, 2019, 129: 112-117.
- [20] 卓拉, 栗萌, 吴普特, 黄红荣, 刘艺琳. 黄河流域作物生产与消费实体水-虚拟水耦合流动时空演变与驱动力分析. *水利学报*, 2020, 51(9): 1059-1069.
- [21] 吴普特, 卓拉, 刘艺琳, 高学睿, 王玉宝, 赵西宁, 孙世坤. 区域主要作物生产实体水-虚拟水耦合流动过程解析与评价. *科学通报*, 2019, 64(18): 1953-1966.
- [22] Zhuo L, Mekonnen M M, Hoekstra A Y, Wada Y. Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River Basin (1961-2009). *Advances in Water Resources*, 2016, 87: 29-41.
- [23] 马晶, 彭建. 水足迹研究进展. *生态学报*, 2013, 33(18): 5458-5466.
- [24] 徐春英, 李玉中, 李巧珍, 王利民, 董一威, 贾小妨. 山东潍坊地下水硝酸盐污染现状及 $\delta^{15}\text{N}$ 溯源. *生态学报*, 2011, 31(21): 6579-6587.
- [25] Hoekstra A Y. Virtual water trade: proceedings of the international expert meeting on virtual water trade. *Value of Water Research Report Series*, 2003.
- [26] 盖力强, 谢高地, 李士美, 张彩霞, 陈龙. 华北平原小麦、玉米作物生产水足迹的研究. *资源科学*, 2010, 32(11): 2066-2071.
- [27] Hoekstra A Y, Chapagain A K. *Globalization of water: sharing the planet's freshwater resources*. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 2008.
- [28] Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M. *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Fao, Rome, 1998.
- [29] Smith M. *CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management; FAO irrigation and drainage paper 46*. Rome Italy, 1992.
- [30] 赵宝山, 闫浩芳, 张川, Samuel Joe Acquah, 毋海梅, 张亨年. 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.
- [31] 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.
- [32] 徐鹏, 后希康, 周丰, 营娜, 赵广超. 华北平原农田硝态氮淋溶率和淋溶负荷估计. *环境科学学报*, 2013, 33(11): 3173-3180.
- [33] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 刘永刚. 农业生产中的氮肥施用现状及其环境效应研究进展. *土壤通报*, 2006, 37(4): 782-786.
- [34] 陶国芳, 蒋兆恒, 秦丽杰. 基于基尼系数的通化地区水土资源匹配分析. *中国农业资源与区划*, 2012, 33(4): 67-71.
- [35] Cao X, Huang X, Huang H, Liu J, Guo X P, Wang W G, She D L. Changes and driving mechanism of water footprint scarcity in crop production: a study of Jiangsu Province, China. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 444-454.
- [36] Zhuo L, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The effect of inter-annual variability of consumption, production, trade and climate on crop-related green and blue water footprints and inter-regional virtual water trade: a study for China (1978-2008). *Water Research*, 2016, 94: 73-85.
- [37] 杨裕恒, 曹升乐, 程雨菲, 李晶莹, 付雅君. 济南市 1997—2014 年农业水足迹及结构变化特征分析. *灌溉排水学报*, 2017, 36(8): 95-102.
- [38] 郭萍, 赵敏, 张妍, 张效星, 张帆. 基于水足迹的河套灌区多目标种植结构优化调整与评价. *农业机械学报*, 2021, 52(12): 346-357.