

DOI: 10.20103/j.stxb.202312312892

隋雯霞, 郭延辉, 张雯. 空间耦合视角下设施蔬菜生产的水土资源效应. 生态学报, 2024, 44(20): 9423-9433.

Sui W X, Guo Y H, Zhang W. Analysis of water and land resources effect in protected vegetable production from the perspective of spatial coupling. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9423-9433.

## 空间耦合视角下设施蔬菜生产的水土资源效应

隋雯霞<sup>1</sup>, 郭延辉<sup>2</sup>, 张雯<sup>1,\*</sup>

1 山东师范大学环境与生态研究院, 济南 250358

2 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250358

**摘要:** 探究设施蔬菜生产的水土资源消耗特征及耦合压力对实现农业资源的可持续利用具有重要意义。聚焦资源数量及质量, 研究核算了 2019 年山东省设施蔬菜生产的水土资源利用效率, 基于空间耦合视角评估分析了水土资源压力及其影响因素。结果表明: (1) 全省尺度上设施蔬菜的蓝水足迹平均值为 0.08 m<sup>3</sup>/kg、灰水足迹平均值 0.03 m<sup>3</sup>/kg, 设施蔬菜分布受地势影响明显, 土壤质量存在显著的空间异质性。(2) 设施蔬菜生产水土资源压力耦合协调度属于轻度失调型, 平均耦合协调度为 0.40, 普遍存在水土资源压力的错配情况。(3) 除资源禀赋外, 社会经济和农资投入也会显著影响设施蔬菜生产水土资源压力的耦合协调程度, 且设施蔬菜生产水土资源压力的耦合协调度具有空间溢出效应。研究可为资源压力的综合评估提供新视角, 为设施蔬菜生产的水土资源可持续利用与管理提供案例参考。

**关键词:** 设施蔬菜; 水土资源; 资源数量; 资源质量; 耦合压力

## Analysis of water and land resources effect in protected vegetable production from the perspective of spatial coupling

SUI Wenxia<sup>1</sup>, GUO Yanhui<sup>2</sup>, ZHANG Wen<sup>1,\*</sup>

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

2 College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250358, China

**Abstract:** Protected agriculture can break through the constraints of resources and continuously improve the yield per unit area, which has become one of the important patterns of modern agriculture. Simultaneously, its characteristics of high pollution and emissions bring challenges to the sustainable utilization of water and land resources. Previous studies rarely studied the scale effects of protected vegetable production on agricultural water and land resources, and limited studies mostly focused on the quantity of a single resource or non-point source pollution, lacking overall consideration of water and land resources system. It is of great significance to explore the intensity of water and land resources consumption and coupling stress in protected vegetable production for sustainable utilization of agricultural resources. In this study, Shandong province, the largest protected vegetable production base in China, was selected as the case study. It is important for the development of protected vegetable industry in Shandong and even in the whole country to clarify the pressure of water and soil resources and its influencing factors. Considering both the quantity and quality of resources, the water and land resources use efficiency of protected vegetable in 2019 was calculated, and the coupling stress of water and land resources and its influencing factors were analyzed. The results showed that: (1) The mean blue water footprint and mean grey water footprint in Shandong province were 0.08 m<sup>3</sup>/kg and 0.03 m<sup>3</sup>/kg, respectively. The layout of protected vegetable was significantly influenced by terrain and the soil quality of protected vegetable has spatial variability. (2) The coupling

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: 2024-09-29

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

coordinated subcategory of water and land resources stress in protected vegetable production in Shandong province was the type of slight imbalance, the coupling coordination degree was 0.40, which indicated that there was a common mismatch of water and land resources stress. (3) In addition to resource endowment, agricultural input and socio-economic factors also had significantly influence on the coupling coordination degree of water and land resources stress in protected vegetable production, and the coupling coordination degree of water and land resources stress in protected vegetable production has spatial spillover effect. Developing agricultural science and technology, improving irrigation technology, raising agricultural mechanization level and reducing chemical input were effective measures to promote the level of coupling coordination degree of water and land resources stress. The present study can provide a novel perspective for assessing resource stress comprehensively and provide case reference for the sustainable utilization and management of water and land resources in protected vegetable production.

**Key Words:** protected vegetable; water and land resources; resource quantity; resource quality; coupling stress

气候变化背景下,农业生产面临资源短缺和生态退化等多重挑战<sup>[1-2]</sup>。面对这些挑战,设施农业以其高效利用资源和环境控制能力,展现出巨大的潜力。设施农业不仅能够突破传统农业的季节性限制,提高单位面积产出效率,而且还能通过精准管理减少资源浪费,实现可持续发展<sup>[3]</sup>。目前,我国设施蔬菜种植面积已达到 256.7 万  $\text{hm}^2$ ,仅用 3%的耕地生产出 25%的蔬菜产品和 45%的蔬菜产值<sup>[4]</sup>。根据《全国现代设施农业建设规划(2023—2030 年)》,到 2030 年,全国现代设施农业规模将进一步扩大,设施蔬菜产量占比提高到 40%。然而,设施蔬菜的快速扩张也带来了一系列问题,如水资源短缺和土壤退化等<sup>[5-8]</sup>。这些问题的存在,不仅限制了设施蔬菜的进一步发展,也对区域水土资源的可持续利用提出了挑战。

当前的设施蔬菜水土资源利用研究,尽管在田间尺度上对污染物的迁移、设施土壤的退化特征以及节水灌溉技术等<sup>[9-12]</sup>进行了深入探讨,为水资源节约以及土壤质量提升提供了理论支持,但仍存在局限性。这些研究往往忽视了设施蔬菜生产对区域水土资源在数量及质量上的尺度依赖性影响,同时对水土资源质量效应的评估不足,限制了农业生产率的提高<sup>[13]</sup>和农业生态系统的稳定生产<sup>[14]</sup>。空间耦合作为一种多维度的研究概念,能够揭示不同尺度上水土资源利用的相互作用和影响<sup>[15]</sup>,尤其适合于分析设施蔬菜生产的高投入和高产出特性及其对水土资源可能产生的负面效应。通过空间耦合分析,可以更准确地识别设施蔬菜生产与水土资源利用格局之间的同质性以及水土资源禀赋及其利用效应的空间异质性,从而为设施蔬菜生产的优化布局 and 资源配置提供科学依据。因此,开展以设施蔬菜为研究对象的空间耦合研究,对于深入理解水土资源利用的复杂性与提高资源利用效率具有重要意义。

在当前设施蔬菜水土资源利用研究的背景下,资源禀赋、农资投入及社会经济因素的影响评估显得尤为关键。这些因素综合作用于设施蔬菜生产的每一个环节,从宏观的社会经济环境到微观的农资使用,均直接或间接地影响着水土资源的利用效率和设施蔬菜生产的可持续性。资源禀赋,如水资源的可用性、土地质量和气候条件,为设施蔬菜的生产提供了基础条件,同时也限制了农业生产的潜力和效率<sup>[5]</sup>。农资投入,尤其是化肥和农药的过度使用,可能会对水土健康造成长期负面影响,威胁水土资源系统的稳定性<sup>[16]</sup>。社会经济条件,包括市场需求、劳动力成本和经济政策等,影响农民的投资和生产决策,进而影响水土资源的配置和利用<sup>[17]</sup>。综合评估以上影响因素,对于优化设施蔬菜生产的资源配置,进而制定有效的农业政策具有关键作用。

山东省作为我国最大的设施蔬菜生产基地,其水土资源利用对全国设施蔬菜产业具有示范意义<sup>[18]</sup>。本研究选取山东省为案例区,从水土资源利用格局和过程耦合视角出发<sup>[19]</sup>,探讨设施蔬菜生产中的水土资源耦合压力及其与资源禀赋、农资投入及社会经济因素间的关系。通过对山东省设施蔬菜生产水土资源利用效应的深入分析,本研究不仅有助于优化资源配置,提高利用效率,而且对促进区域乃至全国设施蔬菜产业的可持续发展具有重要的理论和实践价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象

结合数据的可获得性以及设施蔬菜的种类和种植面积<sup>[20]</sup>,本研究选取设施番茄、设施黄瓜、设施茄子及设施菜椒在内的4种设施蔬菜为研究对象,以山东省16个地市为研究区域,对设施蔬菜生产的水土资源利用情况进行分析。研究中涉及的设施类型主要包括日光温室和连栋温室,不包括仅提供大棚,无其他技术措施的设施种植。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 设施蔬菜生产水足迹核算

水足迹的概念于2002年被荷兰学者Hoekstra<sup>[21]</sup>提出,后经发展完善成为评价水资源占用的综合指标,其中蓝水足迹被定义为作物生长过程中所消耗的地下水或地表水<sup>[22]</sup>。以单位质量蓝水足迹( $WF_{blue}$ ,  $m^3/kg$ )表示设施蔬菜生产在水资源数量层面的生产效率,计算公式如下:

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

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

式中, $ET_c$  ( $mm/d$ )表示设施蔬菜的实际蒸散量; $t$ 是作物生育期长度;10为单位转换系数; $Y$ 为蔬菜作物单位面积产量( $kg/hm^2$ ); $K_c$ 是粮农组织推荐的作物调节系数;参考作物蒸发蒸腾量 $ET_0$ 利用Penman-Monteith公式通过CropWat 8.0软件测算,设施蔬菜气象参数根据设施园艺信息网的推荐参数确定<sup>[7]</sup>。

灰水足迹被定义为,以水环境质量标准为基准,将污染负荷稀释至高于特定环境水质标准所需淡水的体积<sup>[21, 23]</sup>。可表示生产单位蔬菜所产生的水污染量,以单位质量灰水足迹( $WF_{grey}$ ,  $m^3/kg$ )表示设施蔬菜生产在水资源质量层面的生产效率,计算公式如下:

$$WF_{grey} = \frac{\alpha \times A}{(C_{max} - C_{nat})Y} \quad (3)$$

式中, $\alpha$ 为氮肥淋溶率; $A$ 为氮肥的施用量( $kg/hm^2$ ); $C_{max}$ 为氮肥最大容许排放浓度( $kg/m^3$ ); $C_{nat}$ 为自然水体中污染物初始质量浓度( $kg/m^3$ )。

#### 1.2.2 设施蔬菜生产水土资源压力核算

以水资源消耗压力(BWS)表征设施农业水资源数量层面的压力。地区 $j$ 的BWS定义为特定时期内蔬菜作物用水与区域农业可用水量之比<sup>[5, 24]</sup>。

$$BWS_j = \frac{BW_j}{BWA_j} \quad (4)$$

$$BW_j = WF_{blue} \times T_j \quad (5)$$

$$BWA_j = WR \times \frac{AWU}{TWU} \quad (6)$$

式中, $BW_j$ 为区域设施蔬菜生产蓝水消耗量( $m^3$ ); $T_j$ 为区域设施蔬菜的总产量( $kg$ ); $BWA_j$ 为区域灌溉可用水量( $m^3$ ); $WR$ 为区域水资源总量( $m^3$ ); $AWU$ 和 $TWU$ 分别为区域农业灌溉用水量和总用水量( $m^3$ )。

水资源污染压力(GWS)定义为地区 $j$ 设施蔬菜生产过程产生的总灰水足迹与区域可用水量的比值,表征农业水资源质量层面的压力。计算公式如下:

$$GWS_j = \frac{WF_{grey} \times T_j}{BWA_j} \quad (7)$$

参考耕地稀缺性<sup>[5, 25]</sup>的定义,将土地短缺压力(LSS)定义为区域设施蔬菜种植面积与区域耕地总面积的

比值, LSS 值越高表明设施蔬菜种植权重越大, 耕地压力越大。计算公式如下:

$$LSS_j = \frac{L_{veget}}{L_{total}} \quad (8)$$

式中,  $L_{veget}$  为区域设施蔬菜种植面积;  $L_{total}$  为区域耕地面积。

设施蔬菜的集约化生产可能会通过土壤酸化、有机碳含量下降、重金属污染等加速土地退化<sup>[25]</sup>, 为土地资源带来压力。受限于数据的可获取性, 本研究使用各地市设施蔬菜土壤酸碱性分布百分比与土壤有机质分布百分比<sup>[18]</sup>进行土地退化压力的评估。土地退化压力(LDS)定义为地区发生土壤酸/碱化或者土壤有机质含量降低事件的发生系数, 发生系数越高代表土地退化压力越大。计算公式如下:

$$LDS_j = 1 - (P_{pH} \times P_{SOM}) \quad (9)$$

式中,  $LDS_j$  为地市  $j$  土地退化压力;  $P_{pH}$  为区域土壤 pH 值适宜情况的分布百分比;  $P_{SOM}$  为区域土壤有机质含量适宜的分布百分比。

水资源压力(WRS)定义为设施蔬菜生产产生的水资源消耗压力和水资源污染压力事件的发生系数, 发生系数越高意味着水资源压力越大。水资源压力的计算公式如下:

$$WRS_j = 1 - (P_{NBW} \times P_{NGW}) \quad (10)$$

$$P_{NBW} = 1 - BWS_j \quad (11)$$

$$P_{NGW} = 1 - GWS_j \quad (12)$$

式中,  $WRS_j$  为地市  $j$  的水资源压力;  $P_{NBW}$  为区域不产生水资源消耗压力的发生系数;  $P_{NGW}$  为区域不产生水资源污染压力的发生系数。

土地资源压力(LRS)定义为设施蔬菜生产产生土地短缺压力和土地退化压力事件的发生系数, 发生系数越高意味着土地资源压力越大。土地资源压力的计算公式如下:

$$LRS_j = 1 - (P_{NLS} \times P_{NLD}) \quad (13)$$

$$P_{NLS} = 1 - LSS_j \quad (14)$$

$$P_{NLD} = 1 - LDS_j \quad (15)$$

式中,  $LRS_j$  为地市  $j$  的土地资源压力;  $P_{NLS}$  为区域不产生土地短缺压力的发生系数;  $P_{NLD}$  为区域不产生土地退化压力的发生系数。

### 1.2.3 耦合协调度的核算

本研究参照耦合协调度模型<sup>[26]</sup>对设施蔬菜生产的水土资源压力进行分析评价。为了降低指标分布范围差异对评价的影响, 首先对水土资源系统的压力进行标准化处理:

$$WRS'_j = \frac{WRS_j - WRS_{min}}{WRS_{max} - WRS_{min}} \quad (16)$$

$$LRS'_j = \frac{LRS_j - LRS_{min}}{LRS_{max} - LRS_{min}} \quad (17)$$

耦合度用于反映两个及以上系统之间的相互制约程度, 协调度可体现出协调状况的优劣<sup>[27]</sup>。本研究通过耦合度和协调度来表征各地市水土资源压力的相互关联程度与协调水平。计算公式如下:

$$C = \left\{ \frac{WRS'_j \times LRS'_j}{[(WRS'_j + LRS'_j)]^2} \right\}^2 \quad (18)$$

$$T = \alpha WRS'_j + \beta LRS'_j \quad (19)$$

$$D = \sqrt{CT} \quad (20)$$

式中,  $C$  为水土资源压力系统耦合度;  $T$  为水土资源压力系统协调度;  $D$  表示水土资源系统耦合协调度; 由于水资源压力和土地资源压力在水土资源压力评估中同等重要, 所以取  $\alpha = \beta = 0.5$ <sup>[27]</sup>。

按照山东省各地市耦合协调度的大小, 将水土资源压力的耦合协调程度划分为协调型、过渡型、失调型三



大类和 6 个亚类<sup>[27-28]</sup>,见表 1。耦合协调度越大,水土资源耦合压力越大,水土资源子系统压力在空间上均质性越高;耦合协调度越小,水土资源子系统压力在空间上异质性越高,表明存在单一资源的不合理、不充分利用。

表 1 水土资源压力耦合协调评价分类体系及划分标准

Table 1 Classification system and criteria for coupling evaluation of the water and land resources pressure

耦合协调类型 Coupling coordination categories	耦合协调度 Coupling coordination degree	耦合协调亚类 Coupling coordination subcategories
协调型 Coordinated type	(0.80, 1.00]	优质协调
过渡型 Transition type	(0.60, 0.80]	中度协调
过渡型 Transition type	(0.50, 0.60]	基本协调
失调型 Uncoordinated type	(0.40, 0.50]	濒临失调
失调型 Uncoordinated type	(0.20, 0.40]	轻度失调
失调型 Uncoordinated type	(0.00, 0.20]	严重失调

### 1.3 耦合协调度影响因素分析

为进一步探究不同因素对山东省设施蔬菜生产水土资源压力耦合协调度异质性的影响,根据设施蔬菜生产特点,结合宏观数据的可得性,选取如表 2 所示影响因素。

首先利用 SPSS 26 进行双变量相关性分析,探究自变量与因变量(耦合协调度)的相关性,明确显著性影响因素。然后利用 Stata 17 构建相邻矩阵进行空间计量模型的选取与分析,进行拉格朗日检验后发现空间滞后模型(SLM)通过显著性检验,空间滞后项模型一般研究被解释变量的溢出效应<sup>[29]</sup>,因此我们通过空间滞后模型分析耦合协调度影响因素的溢出效应,模型设定如下:

$$CCD = \lambda W CCD + X\beta + \varepsilon \quad (21)$$

式中,CCD 是由各地市耦合协调度组成的矩阵(16×1); $\lambda$  为空间相邻地区耦合协调度对本地区耦合协调度的影响程度; $W$  为各地市的空间邻接矩阵(16×16),相邻为 1,不相邻为 0; $X$  为解释变量数据矩阵(16×10); $\beta$  为的解释变量系数矩阵(10×1); $\varepsilon$  为误差项。

表 2 水土资源压力耦合协调度的影响因素

Table 2 Influence factors of coupling coordination degree of water and soil resources

影响因素 Influence factors	变量名称 Variable	影响因素 Influence factors	变量名称 Variable
资源禀赋 Resource endowment	农田灌溉用水量占比 设施农业种植面积占比 人均水资源量 土地节约集约状况综合指数	社会经济 Socio-economic factors	15—59 岁年龄段人口数 人均蔬菜占有量 农业总产值 实用新型专利数
农资投入 Agricultural input	农业机械总动力 农业化肥投入量 农村用电量 农用塑料薄膜使用量		

### 1.4 数据来源

山东省各地市的耕地面积、作物产量以及化肥施用量等基础数据来源于《山东统计年鉴 2020》、各地市 2020 年统计年鉴以及《全国农产品收益汇编 2020》;设施蔬菜种植面积来源于《中国县域统计年鉴 2020》;各地市农业灌溉用水量及水资源总量等指标来源于《2019 年山东省水资源公报》;核算设施蔬菜生产蓝水足迹所需要的气象数据来自设施园艺信息网(<http://data.sheshiyuanyi.com/EnvironmentalControl/>);各类蔬菜的生长周期  $t$  和  $K_c$  来自粮农组织灌排文件第 56 号;核算灰水足迹所需的淋溶率  $\alpha$ 、最大环境允许浓度  $C_{max}$  来源于

文献调研<sup>[5, 30-31]</sup>;设施菜地土壤有机质含量、pH 值及对应分布百分比来源于文献调研<sup>[18]</sup>,土壤有机碳含量由有机质含量推算求得,转换系数 1.724<sup>[32]</sup>;各地市单位面积设施蔬菜产量由各地市设施蔬菜产量与种植面积推算求得。影响因素数据来源于《山东统计年鉴 2020》、各地市 2020 年统计年鉴、《中国农村统计年鉴 2020》、第七次全国人口普查公报及国家自然资源部。

## 2 结果与分析

### 2.1 设施蔬菜生产的水土资源效率

山东省设施蔬菜生产高度依赖水土资源禀赋<sup>[33]</sup>。设施蔬菜的蓝水足迹平均值为 0.08 m<sup>3</sup>/kg、灰水足迹平均值 0.03 m<sup>3</sup>/kg。整体上蓝水足迹和灰水足迹具有空间上的异质性(图 1),产生差异的原因归结于各地市气候条件、灌溉效率以及化肥施用量<sup>[34]</sup>的不同。全省范围内,单位蓝水足迹最高的是济宁市(0.10 m<sup>3</sup>/kg)和菏泽市(0.10 m<sup>3</sup>/kg),蓝水足迹最低的是淄博市(0.06 m<sup>3</sup>/kg);单位灰水足迹最高的是日照市(0.07 m<sup>3</sup>/kg),其次是烟台市(0.06 m<sup>3</sup>/kg)、聊城市(0.05 m<sup>3</sup>/kg),最低的是泰安市(0.007 m<sup>3</sup>/kg)。各地市灌溉技术发展水平<sup>[35]</sup>的不同是造成蓝水足迹差异的主要原因,而灰水足迹的差异则与各地市设施蔬菜生产规模及生产理念<sup>[36]</sup>的不平衡关系密切。

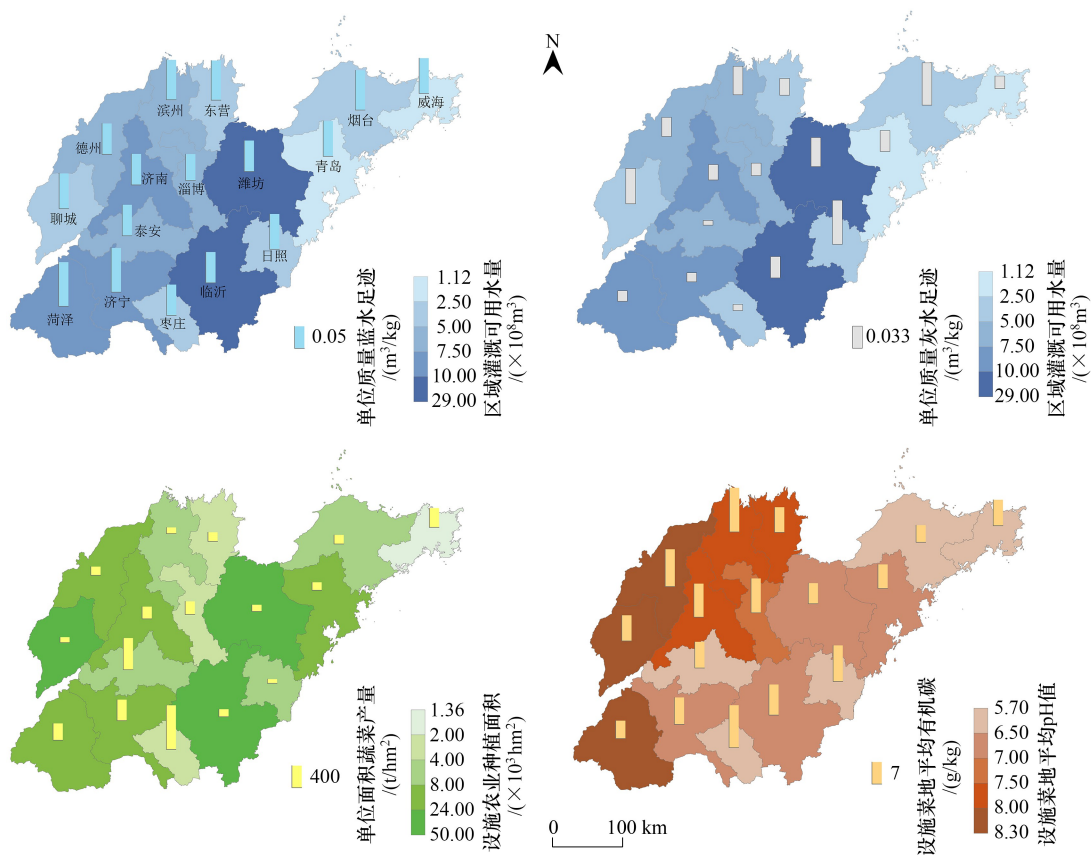


图 1 设施蔬菜生产水土资源利用效率

Fig.1 Water and land resources use efficiency of protected vegetable production

整体上,山东省设施农业分布受地势影响明显,鲁中山区及山东半岛各地市设施农业的种植面积明显较少,鲁中、鲁西南平原地区的设施农业分布较广(图 1)。其中设施蔬菜种植面积最大的是潍坊市(49918 hm<sup>2</sup>),其次是聊城市(40607 hm<sup>2</sup>)以及临沂市(27516 hm<sup>2</sup>),种植面积最小的是威海市(1362 hm<sup>2</sup>),其次是东营市(2152 hm<sup>2</sup>)、枣庄市(3231 hm<sup>2</sup>)。另外,通过设施蔬菜单位面积产量与土壤质量空间分布对比发现,有

机碳含量与设施蔬菜单产关系具有单向相关性,有机碳含量较低时成为导致设施蔬菜单产较低的主要因素,但当有机碳含量较高时,设施蔬菜单产取决于当地的基础设施建设及科技发展水平<sup>[37]</sup>,如滨州市和德州市。

## 2.2 设施蔬菜生产的水土资源压力和耦合协调度

为使水土资源压力之间的对比分析更直观,将资源压力进行了可视化,如图 2 所示。山东省平均水资源消耗压力 0.41,平均水资源污染压力为 0.15,平均土地短缺压力 0.03,平均土地退化压力 0.75。整体上看,当前山东省水资源短缺与土地退化现象严峻<sup>[38]</sup>,且各地市之间的压力分布不均,差异显著。水资源消耗压力最大的地区是青岛市(2.24),其次是聊城市(0.68)和潍坊市(0.40);水资源污染压力最大的地区是青岛市(0.88),其次是聊城市(0.45)和潍坊市(0.25)。土地短缺压力最大的地区是聊城市(0.08),其次是潍坊市(0.07)和青岛市(0.05);土地退化压力最大的地区是菏泽市(0.98),其次是烟台市(0.97)和威海市(0.92);聊城市和潍坊市的资源压力可归结于其设施蔬菜种植规模大、设施蔬菜产量高以及化肥投入量大<sup>[5, 39]</sup>;青岛市水资源压力大与其可用淡水资源有限有关;而菏泽市、威海市与烟台市的土地退化压力归因于气候状况与不合理施肥<sup>[40]</sup>。

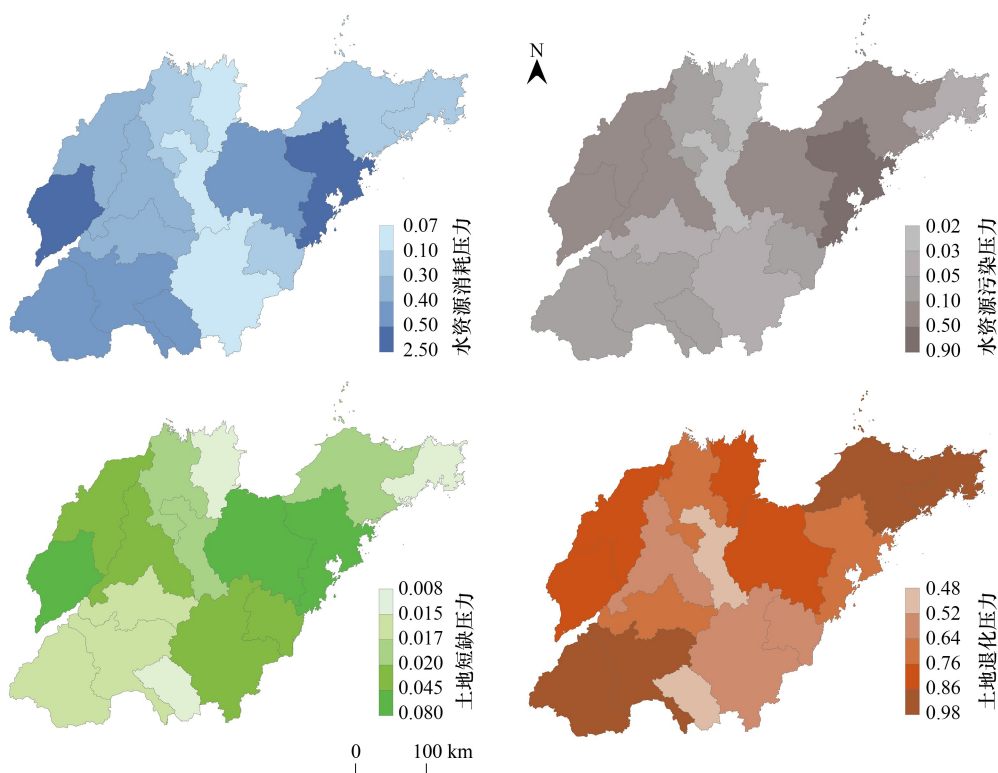


图 2 设施蔬菜生产的水土资源压力

Fig.2 Water and land resources stress of protected vegetable production

总体上,山东省设施蔬菜生产水土资源耦合压力属于轻度失调类型,平均耦合协调度为 0.40。这与山东省水少地多的资源现状有密切关系<sup>[41]</sup>。地市间耦合协调度分布不平衡(图 3)。青岛市和聊城市水土资源压力耦合达到优质协调(0.92、0.86),其次是潍坊市水土资源压力耦合达到中度协调(0.66),而淄博市、东营市、临沂市、滨州市及威海市水土资源压力耦合严重失调(0.001、0.05、0.12、0.18、0.19)。除各地市本身的资源禀赋外,基础设施、科学技术、机械化程度、农地经营方式也是各地市水土资源耦合压力失调的重要因素<sup>[35, 37, 42]</sup>。地市内水土资源压力差异显著,耦合度与水土资源压力的错配具有负相关性,耦合度越小,水土资源压力的错配越显著。协调度与水土资源压力的大小具有相关性,协调度越小,水土资源压力越小。

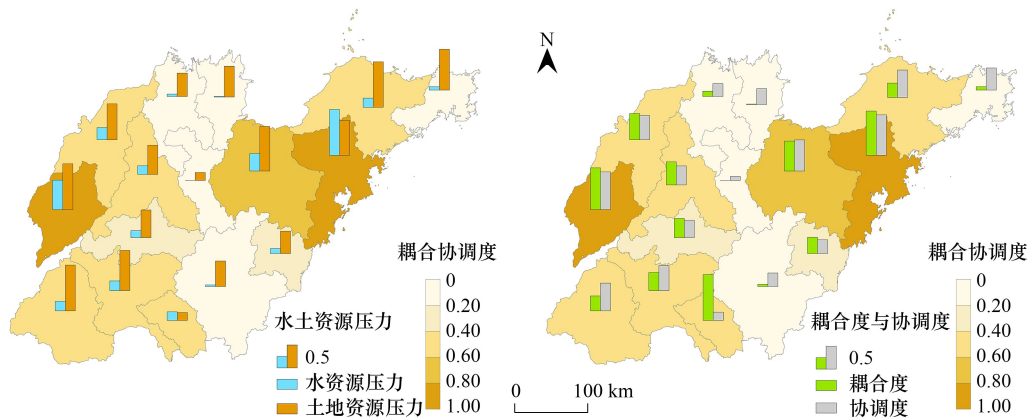


图 3 水土资源压力的耦合协调度

Fig.3 Coupling coordination degree of water and land resources stress

### 2.3 耦合协调度的影响因素分析

经过双变量相关性分析发现,整体上资源禀赋、农资投入和社会经济三个方面的变量均与耦合协调度具有相关性,其中除资源禀赋层面的人均水资源量指标与耦合协调度呈现负相关趋势外,其余因素呈现正相关性。设施农业种植面积占比、人均水资源量、农业机械总动力、农业化肥投入、15—59 年龄段人数、人均蔬菜占有量、农业总产值以及实用新型专利数八个指标与设施蔬菜生产水土资源压力的耦合协调度有显著相关性,其他指标没有显著影响(图 4)。人均水资源量以及农业机械总动力与设施蔬菜生产水土资源压力的耦合协调度相关性极显著,表明除了区域自身的资源禀赋会影响水土资源的协调利用之外,区域的社会发展水平及农资投入可能会导致农业生产高效化,从而促进区域水土资源的协调利用<sup>[42]</sup>。

空间滞后模型(SLM)估计结果进一步明确了设施蔬菜生产水土资源压力耦合协调度的空间溢出效应(表 3), $R^2$ 反映出空间滞后模型能够较好的拟合影响变量数据矩阵( $R^2 = 0.965$ ),空间效应值为正(0.4712),且通过了 1%的显著性检验( $P = 0.004$ ),这说明整体上各地市设施蔬菜生产水土资源压力的耦合协调度存在显著的空间相关性,并且相邻地市的耦合协调度对本地市的耦合协调度具有正向影响,各地市间设施蔬菜生产水土资源压力的耦合协调度具有空间溢出效应。区域设施蔬菜的种植规模、科技创新能力以及合理的农资投入结构与数量是可以促进水土资源的耦合协调利用并辐射带动相邻地市水土资源高效利用的关键指标,而资源禀赋以及人口数量则可能会影响相邻地市设施蔬菜生产水土资源压力的平衡性。

表 3 空间滞后模型(SLM)估计结果

Table 3 Spatial Lag Model (SLM) estimation results

影响因素 Influence factors	变量 Variable	回归系数 Coefficient	系数标准差 Standard deviation	Z	P
资源禀赋 Resource endowment	设施农业种植面积占比	0.2543 ***	0.0634	4.01	0.000
	人均水资源量	-0.3067 ***	0.0906	-3.39	0.001
农资投入 Agricultural input	农业机械总动力	-0.1135	0.0923	-1.23	0.219
	农业化肥投入量	0.3444 ***	0.1063	3.24	0.001
	15-59 年龄段人口数	-0.4085 **	0.1456	-2.81	0.005
社会经济 Socio-economic factors	人均蔬菜占有量	0.2380 ***	0.0515	4.62	0.000
	农业总产值	0.0752	0.1109	0.68	0.498
	实用新型专利数	0.5260 ***	0.1185	4.44	0.000

\*\*\*、\*\*、\* 分别表示在 1%、5%和 10%水平显著



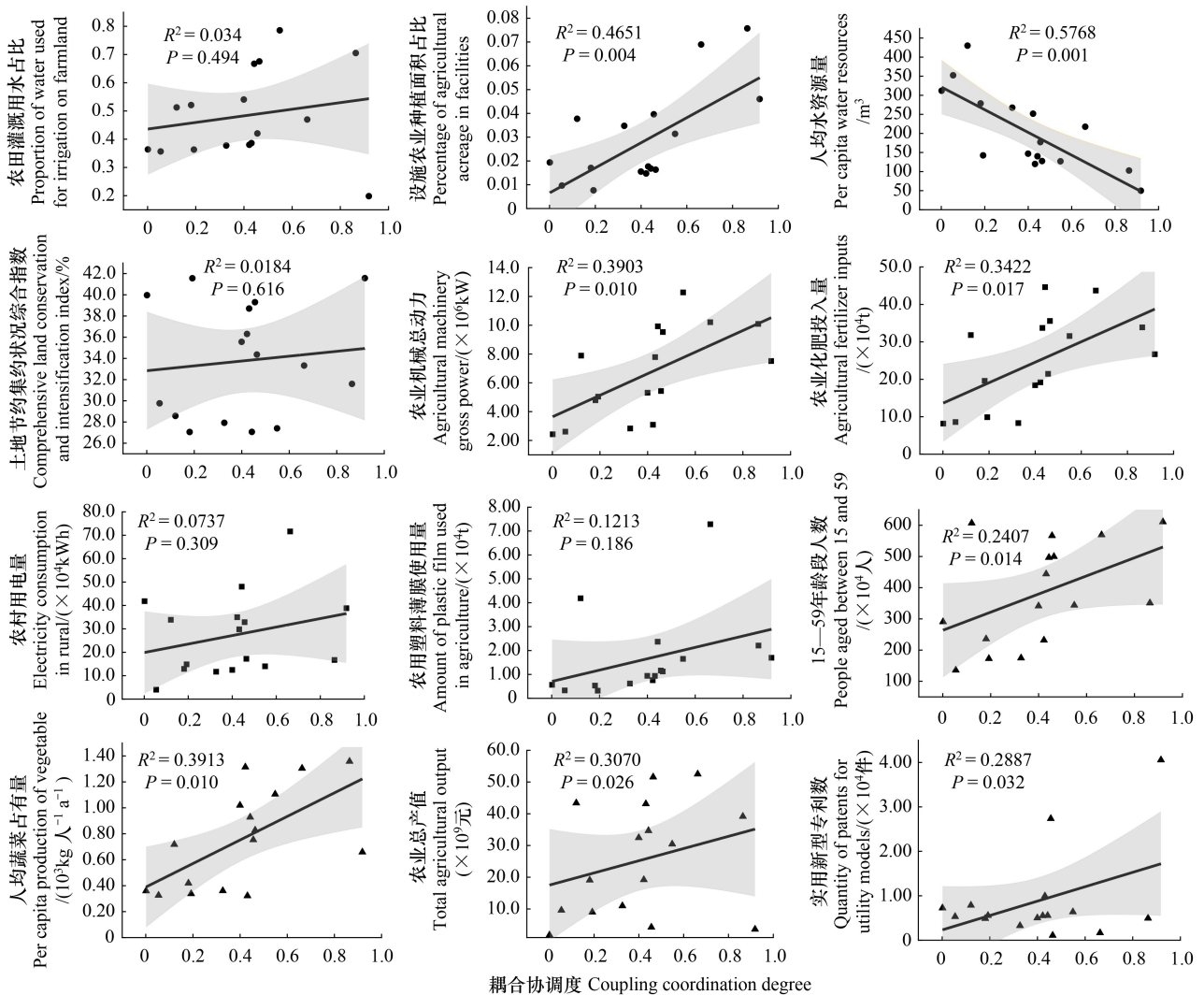


图4 耦合协调度与各变量间的相关性分析

Fig.4 Correlation analysis between coupling coordination degree and factors

图中阴影部分表示 95%置信水平的置信区间

### 3 讨论

本研究通过对山东省设施蔬菜生产水土资源压力耦合协调度的评估与分析,明确了设施蔬菜生产水土资源利用的特征和尺度效应。研究发现,整体上设施蔬菜生产的水土资源数量和质量压力已接近濒临失调的边缘,与关注水土资源数量压力的研究结论具有一致性<sup>[43]</sup>。对于水土资源压力的研究正逐步从“数量为主”转向“量质并重”,水土资源数量和质量的全方位评估将有助于区域资源禀赋的合理利用与保护,缓解区域设施蔬菜生产的水土资源压力。例如,水土资源数量和质量压力均较高的青岛市和聊城市,尽管实现了水土资源的充分利用,但也导致了当地水土资源质量的下降,应当在促进设施蔬菜生产水土资源合理配置的同时,注重资源的量质提优;而水土资源数量和质量压力均较低的淄博市,应当鼓励充分利用当地的水土资源条件,积极发展设施蔬菜产业。针对设施蔬菜生产,水资源数量压力主导区应推广智慧节水灌溉技术,发展水肥高效利用技术,通过征收水资源税等措施增强居民节水意识,提高区域可用水量;水资源质量压力主导区需要控制农用化肥施用量以实现区域水资源污染的压力缓解,并借助农民专业合作社力量增强种植户科学种植、科学管理、科学投入的意识;土地资源数量压力主导区应注意设施产业的种植比例,应用科技创新提高耕地利用效

率;土地资源质量压力主导区控制化学品投入的同时增加土壤质量的检测频度,以便捕捉土地质量状况并通过施用土壤调理剂、增施有机肥和秸秆还田等措施加以保护。

设施蔬菜生产水土资源压力的耦合协调度与资源禀赋、农资投入以及社会经济密切相关。设施蔬菜生产水土资源压力的耦合协调度表征水土资源利用效应,区别于以往单一因素研究<sup>[44-45]</sup>,既表明了区域水土资源压力的大小又揭示了区域水土资源利用的协调程度。我国政府对设施农业的发展充分重视,《农业农村部关于发展现代设施农业的指导意见》中提到,到 2030 年,设施蔬菜总产量比重提升到 40%,设施农业科技贡献率与机械化率分别达到 70% 和 60%,资源利用率大幅提高,政府的支持将有力地推动区域设施蔬菜生产水土资源的耦合协调发展。另外,发展设施蔬菜产业,也要着眼于产业聚集带来的空间溢出效应。青岛市、聊城市、潍坊市耦合协调度较高,与其设施蔬菜产业的高效发展状况吻合,这类区域也会带动发展周围区域的蔬菜产业进而促进水土资源的高效利用。放眼全国设施蔬菜生产层面,应强化山东、辽宁、河北、河南、江苏和安徽六个设施蔬菜重点省份的示范引导作用。因此,在政府的统筹协调下,在重点区域的带动下,通过政策补贴、科技创新、新型种植模式推广等可改善设施蔬菜生产水土资源利用充分性与协调度以促进设施蔬菜产业的可持续性发展。本研究仅对 2019 年山东省 4 种设施蔬菜生产的水土资源效应进行了评估分析,涵盖更多设施蔬菜品种的水土资源效应分析以及长时间序列水土资源效应动态发展与预测将是未来研究的方向。

#### 4 结论

(1) 各地市设施蔬菜生产蓝水足迹和灰水足迹差异明显且两者间存在空间异质性;设施蔬菜种植面积分布受地势影响显著,土壤质量制约设施蔬菜单产的重要因素。

(2) 水资源质量和数量的压力在空间上具有一致性,而土地资源质量和数量的压力在空间上存在异质性,水资源与土地资源压力错配现象明显;整体上山东省设施蔬菜生产水土资源压力耦合协调类型为轻度失调。

(3) 设施蔬菜生产水土资源压力耦合协调程度与资源禀赋、农资投入及社会经济均显著相关;提高科技投入、改善灌溉技术、提高农业机械化水平、控制化学品投入以及注重区域间协调发展是促进水土资源压力耦合协调的有效措施。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Liu Y J, Zhang J, Pan T, Chen Q M, Qin Y, Ge Q S. Climate-associated major food crops production change under multi-scenario in China. *Science of the Total Environment*, 2022, 811: 151393.
- [ 2 ] Deng X, Huang Y, Yuan W P, Zhang W, Ciais P, Dong W J, Smith P, Qin Z C. Building soil to reduce climate change impacts on global crop yield. *Science of the Total Environment*, 2023, 903: 166711.
- [ 3 ] Tong X Y, Zhang X X, Fensholt R, Jensen P R D, Li S Z, Larsen M N, Reiner F, Tian F, Brandt M. Global area boom for greenhouse cultivation revealed by satellite mapping. *Nature Food*, 2024, 5: 513-523.
- [ 4 ] 李天来. 设施蔬菜产业发展(一) 我国设施蔬菜产业发展现状及展望. *中国蔬菜*, 2023(9): 1-6.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] Torrellas M, Antón A, Montero J I. An environmental impact calculator for greenhouse production systems. *Journal of Environmental Management*, 2013, 118: 186-195.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] Gu J X, Wu Y Y, Tian Z Y, Xu H H. Nitrogen use efficiency, crop water productivity and nitrous oxide emissions from Chinese greenhouse vegetables: a meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 2020, 743: 140696.
- [ 9 ] Fu F R, Sun Y, Yang D, Zhao L X, Li X J, Weng L P, Li Y T. Combined pollution and soil microbial effect of pesticides and microplastics in greenhouse soil of suburban Tianjin, Northern China. *Environmental Pollution*, 2024, 340(Pt 1): 122898.
- [ 10 ] Xu Z, Shi M Y, Yu X M, Liu M D. Heavy metal pollution and health risk assessment of vegetable-soil systems of facilities irrigated with wastewater in northern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(16): 9835.

- [11] 张慧, 李梦琦, 程文娟, 张余良, 赵会薇, 赵杰, 王立艳, 肖辉. 天津市设施蔬菜土壤质量调查研究. *中国土壤与肥料*, 2023(6): 41-49.
- [12] 刘学军, 吴海霞, 刘平, 翟汝文. 宁夏南部山区降水资源设施蔬菜高效利用技术集成研究. *水资源与水工程学报*, 2011, 22(5): 47-50.
- [13] Qiao L, Wang X H, Smith P, Fan J L, Lu Y L, Emmett B, Li R, Dorling S, Chen H Q, Liu S G, Benton T G, Wang Y J, Ma Y Q, Jiang R F, Zhang F S, Piao S L, Müller C, Yang H Q, Hao Y N, Li W M, Fan M S. Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change. *Nature Climate Change*, 2022, 12(6): 574-580.
- [14] Zhang H J, Dong L Z, Yao X D, Wang W. Soil fertility shifts the relative importance of saprotrophic and mycorrhizal fungi for maintaining ecosystem stability. *Global Change Biology*, 2023, 29(4): 1206-1216.
- [15] 张佳田, 焦文献, 韩宝龙. 城镇化与生态系统服务的协调演化特征及空间耦合关系. *生态学报*, 2020, 40(10): 3271-3282.
- [16] 曾子凡, 马艳, 罗佳, 郭德杰. 长期施肥对设施蔬菜土壤理化及生物学性状的影响研究进展. *江苏农业科学*, 2023, 51(6): 9-15.
- [17] 朱冉, 王保盛, 张昊. 四川县域农业高质量发展水平测度及其自然-社会经济系统耦合研究. *生态学报*, 2024, 44(14): <https://doi.org/10.20103/j.stxb.202312012625>.
- [18] 张焕菊, 王贵嵩, 高进华, 张广忠, 陈永法, 解学仕, 胡秀涛, 史庆才, 杨恒哲, 时小可. 山东省设施蔬菜土壤酸碱性、有机质及中微量元素含量调查与评价. *江苏农业科学*, 2022, 50(4): 211-215.
- [19] 闫文智, 赵翔宇, 王凯歌, 徐艳, 郑慧慧, 桑之婷. 农业水土资源耦合研究进展与展望. *中国农业资源与区划*, 2024, 45(3): 97-107.
- [20] 刘美霞. 山东省设施番茄和设施黄瓜生产潜力及种植效益比较与分析. *长江蔬菜*, 2023(16): 5-8.
- [21] Hoekstra A Y. *The water footprint assessment manual: setting the global standard*. London: Earthscan, 2011.
- [22] 吴普特, 孙世坤, 王玉宝, 李笑雷, 赵西宁. 作物生产水足迹量化方法与评价研究. *水利学报*, 2017, 48(6): 651-660, 669.
- [23] 武慧君, 戴成娟, 刘英. 农业生产的灰水足迹研究综述. *科学技术与工程*, 2023, 23(32): 13665-13673.
- [24] Cao X C, Wu N, Adamowski J, Wu M Y. Assessing the contribution of China's grain production during 2005 - 2020 from the perspective of the crop-water-land nexus. *Journal of Hydrology*, 2023, 626: 130376.
- [25] Smith P, House J I, Bustamante M, Sobocká J, Harper R, Pan G X, West P C, Clark J M, Adhya T, Rumpel C, Paustian K, Kuikman P, Cotrufo M F, Elliott J A, McDowell R, Griffiths R I, Asakawa S, Bondeau A, Jain A K, Meersmans J, Pugh T A M. Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology*, 2016, 22(3): 1008-1028.
- [26] 刘新平, 孟梅. 土地持续利用与生态环境协调发展的耦合关系分析——以塔里木河流域为例. *干旱区地理*, 2011, 34(1): 173-178.
- [27] 王凌阁, 朱睿, 陈泽霞, 尹振良, 卢睿, 方春爽. 甘肃河西地区 2000—2019 年水土资源耦合协调特征. *中国沙漠*, 2022, 42(2): 44-53.
- [28] 文倩, 孟天醒, 范慧平, 鄢雨早. 河南省水土资源与经济发展耦合效应及其时空分异. *水土保持研究*, 2017, 24(3): 234-240.
- [29] 陈洪斌. 我国省际农业用水效率测评与空间溢出效应研究. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(2): 85-90.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 张维理, KOLBE H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展. *中国农业科学*, 2020, 53(2): 317-331.
- [33] Cao X C, 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.
- [34] 韩宇平, 马伏枥, 贾冬冬, 黄会平, 张庚辰, 苗浩东. 基于 BP-DEMATEL 的山西省冬小麦水足迹影响因素识别. *水资源保护*, 2024, 40(2): 9-15.
- [35] 赵玲. 节水灌溉在农业发展过程中的经济管理问题探析. *灌溉排水学报*, 2023, 42(1): 158.
- [36] 朱沁夫. 基于绿色发展理念的乡村振兴路径分析. *环境与可持续发展*, 2019, 44(5): 73-77.
- [37] 张茹河. 农垦系统高产稳产农业基础设施的调查与启示. *中国农村水利水电*, 2011(5): 92-94.
- [38] 王建华, 何国华, 何凡, 赵勇, 王海叶, 李海红, 朱永楠, 刘寒青. 中国水土资源开发利用特征及匹配性分析. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 1-8.
- [39] 房珊瑚, 杨珺, 强艳芳, 王彦东, 席建超, 冯永忠, 杨改河, 任广鑫. 南水北调中线工程水源地化肥施用时空分布特征及其环境风险评价. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1): 124-136.
- [40] 李煜婧, 夏紫祎, 申桐, 王斐, 郑磊, 周建利, 张强, 孙楠, 徐明岗. 烟台市典型县域土壤 pH 时空变化特征及影响因素. *中国农学通报*, 2023, 39(21): 103-108.
- [41] 赵子萌, 曹永强, 常志冬, 王菲. 黄河沿线 9 省区水土资源生态承载力耦合协调分析. *水资源保护*, 2023, 39(6): 121-129.
- [42] 王婷, 毛德华. 中国主要粮食作物虚拟水——虚拟耕地复合系统利用评价及耦合协调分析. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(4): 40-49, 56.
- [43] 唱彤, 李云玲. 基于水资源可利用量的我国水土资源匹配状况分析. *灌溉排水学报*, 2023, 42(6): 74-80.
- [44] 甘容, 李旖旎, 郭林, 唐辉. 基于水足迹的黄河流域九省(区)水资源可持续利用评价. *人民黄河*, 2024, 46(2): 93-99, 106.
- [45] 窦旺胜, 王成新, 王召汉. 山东省耕地资源利用效率研究. *中国环境管理干部学院学报*, 2019, 29(2): 39-43.