

江苏省灌溉水变化驱动效应研究

王浩, 衣鹏*

(河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

摘要:【目的】确定经济系统中各要素对江苏省灌溉水变化的节水贡献。【方法】利用CROPWAT模型, 量化了2002—2017年江苏省农作物灌溉水量, 基于量化结果结合结构分解模型分析江苏省农作物用水的驱动效应, 在江苏省投入产出表的框架下分析产业经济和贸易经济对降低灌溉用水量的可行性。【结果】生产结构和消费结构调整是近年来遏制灌溉水量攀升的关键驱动因素, 2002—2017年分别削减192.9亿 m^3 和106.2亿 m^3 的灌溉用水量, 江苏省通过发展食品制造业(生产经济占比从53%增加至64%)和国际贸易引入高耗水经济作物降低灌溉用水量。【结论】实现经济政策节水的核心在于农产品产业链(以食品制造业为主)的整体升级和高耗水农产品的对外转移, 即通过提高农产品附加值和国际引入高耗水经济作物实现农业经济节水。

关键词: 结构分解模型; 灌溉; 节水; 投入产出模型

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022320

OSID:



王浩, 衣鹏. 江苏省灌溉水变化驱动效应研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(3): 112-119.

WANG Hao, YI Peng. Change in Irrigation Water Usage in Jiangsu Province and the Underlying Reason[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(3): 112-119.

0 引言

【研究意义】江苏省作为中国主要农作物产区之一^[1], 农业一直是其第一用水大户, 农业用水在该省用水总量中的比例一直在45%以上(建国初期到20世纪70年代曾经高达80%以上, 20世纪80年代在70%以上, 20世纪末在55%以上, 2000年以来在45%以上)^[2]。江苏省降水量较丰富, 多年平均降水量996 mm, 但年际、年内分配不均, 地区差异明显, 来水与用水不同步, 自然调节能力较低, 过境水较多, 可利用量较少, 水资源供需矛盾突出。由于江苏省特殊的生产情况和自然条件, 该地对灌溉水资源管理的要求较高, 而要实现有效的灌溉规划方案, 就需要结合灌溉用水量驱动效应进行具体分析, 明确自然环境与人类社会中的各影响因子在灌溉节水中的贡献。

【研究进展】近年来, 灌溉节水研究主要集中于2个方面: ①灌溉技术的节水优化, 从生产角度实现灌溉用水量的削减^[3-4]。如袁寿其等^[5]通过分析灌溉过程中灌溉设备的发展前景, 提出加强丘陵灌溉装备、智能精确喷灌机组、微喷灌与水药肥协同精准控制技术装备和清洁能源节水灌溉装备的建议; 朱兴业^[6]针对产业化生产出的系列PXH型塑料全射流喷头, 通过田间试验提出了修改空心轴与连接套配合尺寸和2

片四氟圈之间相互配合的优化建议, 以减少灌溉损耗。严海军等^[7]首次提出了平移式喷灌机用变频方式实现连续运行的基本思想和工作原理, 改进了圆形喷灌机的灌溉质量。②利用最优化理论改善作物生产结构, 实现农业灌溉科学管理^[8-9]。如高明杰等^[10]构建区域节水高效种植结构调整的多目标模糊优化模型, 提出各区域节水高效种植优化调整方案; 李彦彬等^[11]通过对现状水平年和规划水平年的种植结构调整, 在结合现状缺水程度下, 利用改进粒子群算法使种植结构得到平衡优化, 在提高综合效益及产量的同时能够降低灌溉需水量。相较于传统的农业节水研究, 分析产业间的虚拟水贸易即通过经济政策遏制灌溉水量上升成了区域农业节水的新思路。基于虚拟水战略的水资源管理减少了生态环境的破坏, 同时健康有序的虚拟水流动能促进经济发展和资源消耗的良性发展^[12-14]。【切入点】以往国内研究侧重于从自然角度阐述灌溉节水的思路, 但目前从经济层面进行灌溉节水分析的成果仍然较少, 经济因素带来的灌溉节水贡献尚不明晰, 因此, 从产业经济和贸易经济角度分析地区灌溉节水是极有必要的。【拟解决的关键问题】为此, 在产业经济和贸易要素的基础上, 利用结构分解模型对时间序列的作物用水格局变化进行因素分解分析, 与投入产出模型进行深度嵌套分析, 从经济学角度提供节水方案, 完善了地域生产特征与产业经济之间的有机联系, 以期为中国推动节水型社会建设提供指导。

收稿日期: 2022-06-13

作者简介: 王浩(1998-), 男, 江苏镇江人。硕士研究生, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: 1050013370@qq.com

通信作者: 衣鹏(1985-), 男, 吉林辽源人。教授, 博士生导师, 主要从事水资源研究。E-mail: pengyi1915@163.com

1 材料与方方法

1.1 研究区概况

江苏省位于我国大陆东部沿海中部，长江、淮河下游，位于 116°18′—121°57′E、30°45′—35°20′N 之间，属中纬度亚热带和暖温带地区，东濒黄海，北与山东省接壤，西与安徽省接壤，东南与上海、浙江省接壤，是长三角地区的重要组成部分。江苏省气候温和，四季分明，年平均气温 13.6~16.1 °C，年降水量 715~1 280 mm。地势以平原为主，南北高，中间低，自西向东倾斜。江苏省分为 6 个农业区：徐淮农业区、里下河农业区、沿海农业区、沿江农业区、宁镇扬丘陵农业区和太湖农业区，人均耕地面积 0.057 hm²，不足全国平均水平的 2/3，耕地类型主要为水田和旱地，主要土壤类型为黄红壤、黄棕壤、黄褐土、棕壤褐土 4 种。

1.2 数据来源与处理

选取 2002—2017 年为研究时段，选取常州、东台、高邮等 17 个站点的气候数据，该数据来自国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/>)。江苏省作物播种面积、作物产量和投入产出表来自《江苏统计年鉴》(2003—2018 年)，作物平均价格来自《全国农产品成本收益资料汇编》。本研究考虑到各个研究阶段的作物产值并不相同，因此投入产出表中的所有经济数据使用政府官方的平均年通胀率将其转换为 2010 年不变价格(2002 年约为 1.45，2007 年为 1.15，2012 年为 0.90，2017 年为 0.84)，再利用 2010 年作物平均价格进行粮食作物产业间价值流的量化^[15]。各地区的农业灌溉水有效利用系数来自江苏省各地级市的水资源公报，其中根据节水灌溉面积比例的变化对 2002 年部分地级市缺失数据进行插补。

1.3 投入产出分析模型

投入产出模型 (IO) 基于地区经济数据，引入影响系数和影响指数，定量表征产业间的竞争与合作，从而更准确地反映产业流动模式。目前，IO 被广泛用于分析产业间的经济活动、资源利用、碳排放和能源流动^[16] (式 (1))。

$$x_{ij} = \sum_{j=1}^n z_{ij} + y_i \quad (1)$$

式中： n 为产业类别， x_i 为产业 i 的总产出量 (亿元)； z_{ij} 为产业 i 对产业 j 的中间使用量 (亿元)； y_i 为产业 i 的最终需求量 (亿元)。总产出量指研究期间内生产的所有货物和服务的价值，既包括新增价值，也包括转移价值；中间使用量指研究期间内生产的所有货物和服务需要投入的货物和服务的总价值；最终需求量指全社会的消费者 (包括个人、企业、政府、固定资本形成总额、存货增加) 对社会总产品的最终消费。

为了反应中间使用量结构特征，引入直接消耗系数 a_{ij} ^[13]：

$$a_{ij} = z_{ij}/x_j \quad (2)$$

式中： x_j 为产业 j 的总产出量， a_{ij} 反映了产业 i 对产业 j 的中间使用量占产业 j 总产值的比例。

结合直接消耗系数 a_{ij} ，得出式 (3)：

$$\begin{aligned} [x_1, x_2, \dots, x_n]^T &= \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \\ [x_1, x_2, \dots, x_n]^T + [y_1, y_2, \dots, y_n]^T & \end{aligned} \quad (3)$$

将式 (3) 进行矩阵表达转换，得到式 (4)：

$$Y = (I - A)X \quad (4)$$

式中： X 、 A 和 Y 分别为总产出列向量、直接消耗系数矩阵和最终需求列向量，分别以价值为基准表明产业的经济规模、生产消耗和消费需求。

将式 (2) 进行 Leontief 矩阵变换：

$$X = (I - A)^{-1}Y = L \cdot Y \quad (5)$$

式中： L 为 Leontief 逆矩阵，即 $(I - A)^{-1}$ ，表示产业 i 需要满足产业 j 最终需求的单位产出矩阵。

1.4 CROPWAT 模型

根据粮农组织推荐的彭曼公式计算作物需水量，该公式具有普遍性且适合常规作物需水量的测算^[17]，计算式为：

$$ET_0^m = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma T + 273 U_2 (e_s - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (6)$$

$$ET_c^m = K_c \times ET_0^m \quad (7)$$

式中： ET_0^m 为 m 类作物的参考蒸散发量 (mm)； Δ 为饱和蒸汽压-温度曲线的斜率 (kPa/°C)； R_n 为地表净辐射 (MJ/(m² d))； G 为土壤热通量 (MJ/(m² d))； γ 为干湿常数 (kPa/°C)； T 为日平均温度 (°C)； U_2 为 2 m 处的日平均风速 (m/s)； e_s 为饱和蒸汽压 (kPa)； e_d 为实测大气压 (kPa)； K_c 为各种作物蒸散量变化的作物系数，本研究基于 FAO 的 CROPWAT 8.0 软件开展灌溉需水量的计算和作物系数的确定。

作物需水量则可以通过灌溉水有效利用系数和生长期蒸散发量来计算，计算式为：

$$IRR = (ET_c^m - P^{eff})/\alpha \quad (8)$$

式中： α 为灌溉水有效利用系数； IRR 为作物实际需水量 (mm)，即在考虑管网运输漏损和研究期间降水的情况下作物的总需水量， P^{eff} 为研究期间有效降水量 (mm)。

1.5 结构分解模型

为了进一步分析上述模型获得的作物实际需水量，利用结构分解模型将其分解，具体分析其中的驱动效应。计算式为：

$$\begin{aligned} TIRR &= G \cdot A \cdot ET_c^m / \alpha = G \cdot A \cdot (1/\alpha) \cdot (ET_c^m / X) \cdot X = \\ & G \cdot A \cdot \delta \cdot E \cdot X = G \cdot A \cdot \delta \cdot E \cdot L \cdot Y \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $TIRR$ 为灌溉总用水量列向量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$), 等于作物单位面积均实际需水量列向量和播种面积的乘积; G 为灌溉水量占总蒸散发量的比例, 反映了降水在农业总用水量的作用; A 为作物播种面积 (km^2); δ 为灌溉水有效利用系数的倒数, 反应节水灌溉设施优化带来的节水作用; E 为单位产值蒸散发强度列向量 ($\text{mm}/\text{亿元}$), 由经济产出和作物蒸散发量共同决定。基于投入产出表的结构特征和社会经济因素, 本研究对最终需求 Y 进行进一步分解, 计算式为:

$$TIRR=IRR \cdot A=G \cdot A \cdot \delta \cdot E \cdot L \cdot Y=G \cdot A \cdot \delta \cdot E \cdot L \cdot c \cdot y \cdot p, \quad (10)$$

降水利用效应 dG :

$$dG=1/2[(G_1-G_0) \cdot A_0 \cdot \delta_0 \cdot E_0 \cdot L_0 \cdot c_0 \cdot y_0 \cdot p_0+(G_1-G_0) \cdot A_1 \cdot \delta_1 \cdot E_1 \cdot L_1 \cdot c_1 \cdot y_1 \cdot p_1], \quad (11)$$

播种面积效应 dA :

$$dA=1/2[G_1 \cdot (A_1-A_0) \cdot \delta_0 \cdot E_0 \cdot L_0 \cdot c_0 \cdot y_0 \cdot p_0+G_0 \cdot (A_1-A_0) \cdot \delta_1 \cdot E_1 \cdot L_1 \cdot c_1 \cdot y_1 \cdot p_1], \quad (12)$$

节水技术效应 $d\delta$:

$$d\delta=1/2[G_1 \cdot A_1 \cdot (\delta_1-\delta_0) \cdot E_0 \cdot L_0 \cdot c_0 \cdot y_0 \cdot p_0+G_0 \cdot A_0 \cdot (\delta_1-\delta_0) \cdot E_1 \cdot L_1 \cdot c_1 \cdot y_1 \cdot p_1], \quad (13)$$

蒸发强度效应 dE :

$$dE=1/2[G_1 \cdot A_1 \cdot \delta_1 \cdot (E_1-E_0) \cdot L_0 \cdot c_0 \cdot y_0 \cdot p_0+G_0 \cdot A_0 \cdot \delta_0 \cdot (E_1-E_0) \cdot L_1 \cdot c_1 \cdot y_1 \cdot p_1], \quad (14)$$

生产结构效应 dL :

$$dL=1/2[G_1 \cdot A_1 \cdot \delta_1 \cdot E_1 \cdot (L_1-L_0) \cdot c_0 \cdot y_0 \cdot p_0+G_0 \cdot A_0 \cdot \delta_0 \cdot E_0 \cdot (L_1-L_0) \cdot c_1 \cdot y_1 \cdot p_1], \quad (15)$$

消费结构效应 dc :

$$dc=1/2[G_1 \cdot A_1 \cdot \delta_1 \cdot E_1 \cdot L_1 \cdot (c_1-c_0) \cdot y_0 \cdot p_0+G_0 \cdot A_0 \cdot \delta_0 \cdot E_0 \cdot L_0 \cdot (c_1-c_0) \cdot y_1 \cdot p_1], \quad (16)$$

人均需求效应 dy :

$$dy=1/2[G_1 \cdot A_1 \cdot \delta_1 \cdot E_1 \cdot L_1 \cdot c_1 \cdot (y_1-y_0) \cdot p_0+G_0 \cdot A_0 \cdot \delta_0 \cdot E_0 \cdot L_0 \cdot c_0 \cdot (y_1-y_0) \cdot p_1], \quad (17)$$

人口规模效应 dp :

$$dp=1/2[G_1 \cdot A_1 \cdot \delta_1 \cdot E_1 \cdot L_1 \cdot c_1 \cdot y_1 \cdot (p_1-p_0)+G_0 \cdot A_0 \cdot \delta_0 \cdot E_0 \cdot L_0 \cdot c_0 \cdot y_0 \cdot (p_1-p_0)]. \quad (18)$$

本研究在水资源数据和经济数据的基础上进行结构分解, 结合投入产出模型对分解结果进行生产角度和经济角度的解读, 得出节水措施, 基础框架如图 1 所示。

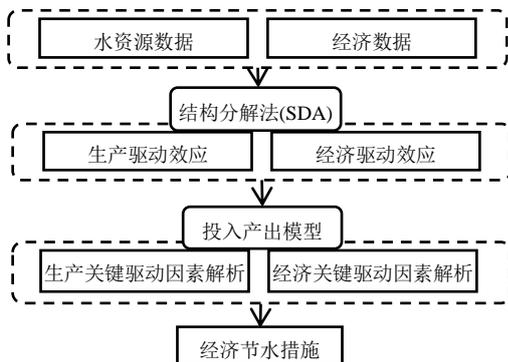


图 1 江苏省灌溉用水驱动效应解析理论框架

Fig.1 The theoretical framework for analyzing the driving effect of irrigation water in Jiangsu Province

2 结果与分析

2.1 江苏省作物自然特征和社会特征分析

基于 CROPWAT 模型计算出各作物的蒸散发量

式中: $L=c \cdot y$, c 为作物消费结构, 即消费者对各个作物的最终需求结构; y 为人均需求 (亿元/万人), 即消费者对作物需求的总规模, 反映了消费端对生产端的拉动效应; p 为人口规模 (万人), 说明了人口增长对作物需求的驱动效应。与指数分解模型相比, 结构分解模型的分解结果更具有实际意义, 而加法分解结构则更便于实际问题的解释^[2,16], 因此, 本文将灌溉用水分解为 8 种驱动效应, 其中下标 1 代表时段末期, 下标 0 代表时段初期:

和有效降水量 (图 2)。棉花、水稻是蒸散发量较高的农作物, 在 500~800 mm 之间; 豆类作物和薯类作物是蒸散发量较小的农作物, 在 200~350 mm 之间; 2002—2017 年计算的各作物蒸散发量受气候特征影响波动性较强, 均方差占平均蒸散发量的比例均在 20% 以上, 其中水稻和棉花受到的影响最为剧烈, 均方差在 80 mm 以上。播种期各作物有效降水量的均方差占平均有效降水量也在 20% 以上, 水稻和棉花有效降水量和降水均方差较高, 但小麦播种期的有效降水量均方差最大, 为 63.5 mm, 这主要是因为江苏省以冬小麦为主, 播种时期在 9—10 月, 收割时期在次年 5—6 月, 受江苏省夏多冬少的降水分布影响最为明显。由于江苏省的降水特征影响, 秋冬季作物如冬小麦、冬大豆和薯类作物的有效降水占总蒸散发量比例较低, 在 60% 左右, 春夏季作物如水稻、玉米等占比较高, 均在 75% 以上。

2002—2017 年江苏省作物种植结构见图 3。2002—2007 年, 江苏省的粮食作物播种面积明显增加, 5 a 间增加了 370 300 hm^2 , 而经济作物的播种面积却骤减 729 700 hm^2 ; 2007—2012 年, 粮食作物的

播种规模保持上升的态势，增加了 312 300 hm²，经济作物规模有所回升，5 a 间增长了 37 700 hm²；2012—2017 年，粮食作物的播种规模增加了 123 500 hm²，经济作物则下降了 121 700 hm²。2002—2017 年小麦播种面积的增长最为迅速，2012—2017 年增加了 696 900 hm²，油料作物播种面积则下降幅度最大，2012—2017 年减少了 639 700 hm²。江苏省的农业经济产值在 2002—2007 年下降了 90.36 亿元，

2007—2017 年的农作物产值却增长了 352.2 亿元。而 2002—2017 年的农作物播种面积却没有明显的增长，这说明 2012—2017 年的农作物产值大大增加，蔬菜在这其中起到了重要作用，其播种面积仅增长 116 800 hm²，但产值却增加了 214.2 亿元。整体而言，江苏省的农作物呈现出结构优化、产值增加的社会生产特征。

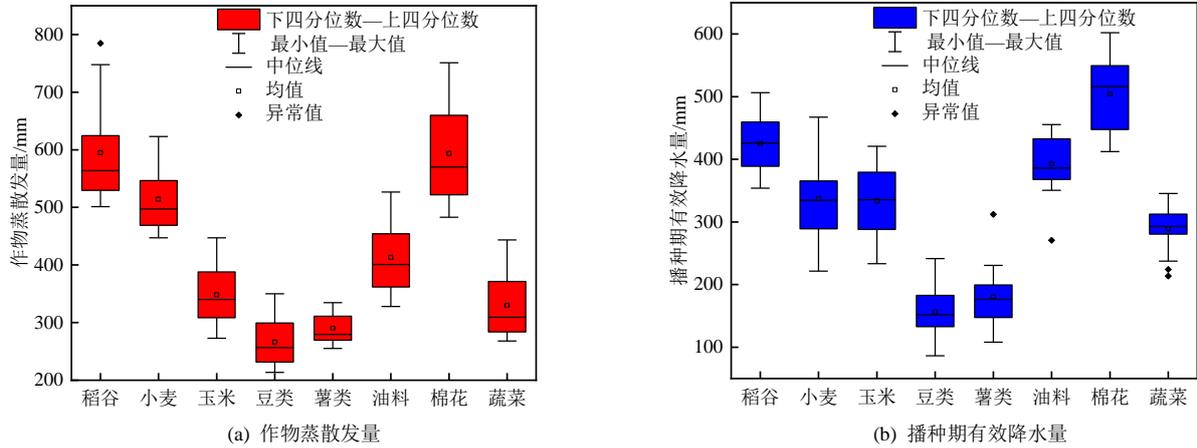


图 2 江苏省农作物自然特征

Fig.2 Natural characteristics of crops in Jiangsu Province

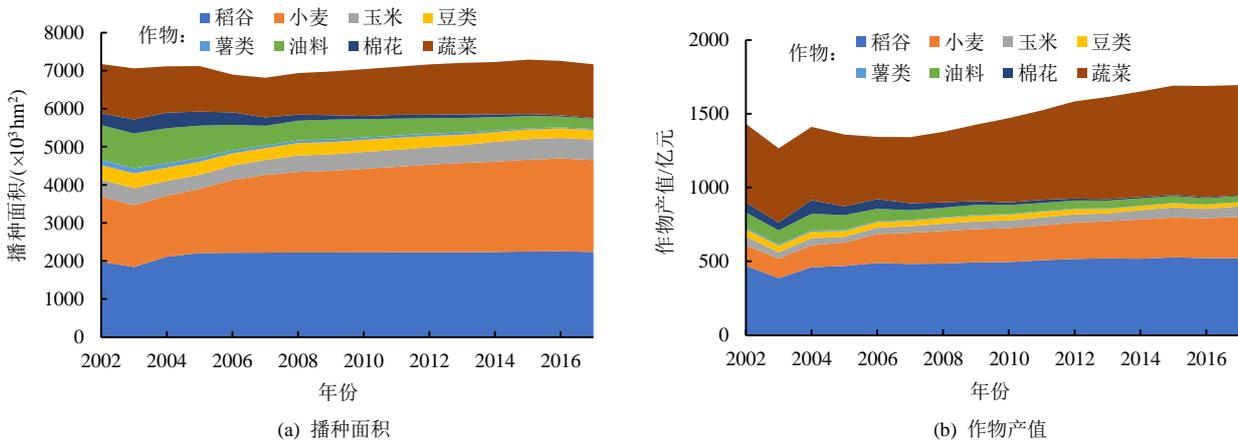


图 3 江苏省农作物社会特征

Fig.3 Social characteristics of crops in Jiangsu Province

从江苏省灌溉用水特征（图 4）来看，水稻、小麦则是最主要的农业用水大户。2002—2017 年，农作物总用水量减少了 26.1 亿 m³，油料作物是削减灌溉水足迹的主要驱动者，2002—2017 年减少了 17.8 亿 m³ 的灌溉用水量，油料作物播种面积权重的下降、耕种效率的提升是推动节水的支撑力量；而水稻和小麦则是导致灌溉水量大量增加的主要作物，2012—2017 年分别增加了 32.5 亿 m³ 和 22.1 亿 m³。

2.2 江苏省作物用水量变化驱动效应解析

2002—2017 年的江苏省作物用水量驱动效应解析见表 1。2002—2017 年，人均需求量的上升一直是各作物灌溉用水上升的主要原因，而生产结构的转变则是削减各作物灌溉水量的关键要素，但各阶段的其

余因素起到的作用并不相同，以下对另外 6 种要素作出阶段性分析。

降水利用效应 dG 和蒸发强度效应 dE ：二者分别说明了作物生长过程中的降水吸收率和单位产值蒸发量，不仅与农业经济和播种技术管理相关，也受到自然环境的制约，因而二者对各作物灌溉水量的驱动效应都不稳定。2002—2012 年， dE 起到了极大的节水作用，这是由农业经济发展（产值增加 152 亿元）和气候环境适宜（2012 年各作物蒸散发量均小于 2002 年）共同作用的结果，但在 2012—2017 年却导致了大量的灌溉水足迹的增加，主要是因为部分作物如水稻的蒸散发量有所回升。 dG 导致小麦、水稻 2012—2017 年灌溉用水量增加，主要是因为

2012—2017 年年内降水分配与这 2 种作物耕种规划的不匹配程度较高。上述 2 种效应说明环境对作物节

水的作用是高度不可控的，想要实现其稳定节水的作用必须从农业经济、管理和技术等社会层面解决。

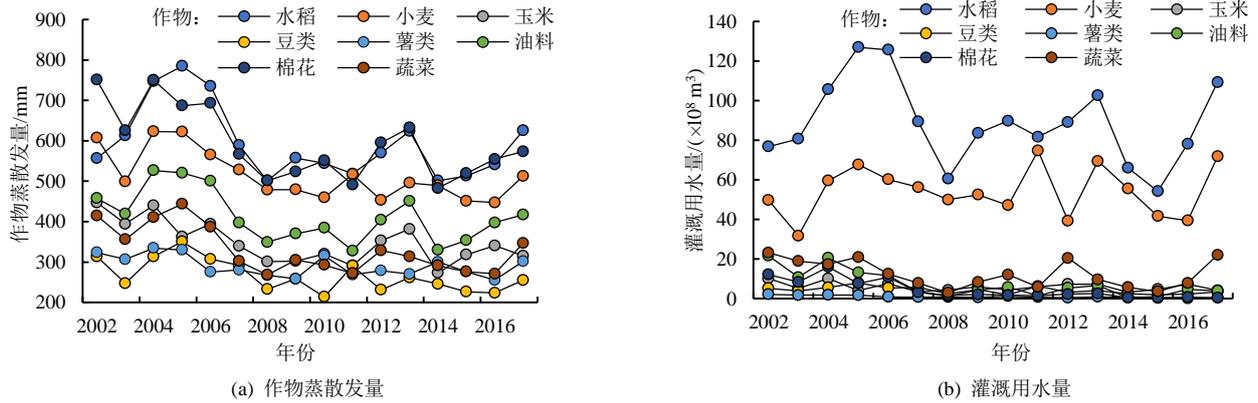


图 4 江苏省灌溉用水特征

Fig.4 Characteristics of irrigation water in Jiangsu Province

表 1 2002—2017 年江苏省作物用水量变化的分解

Table 1 Decomposition results of irrigation changes in Jiangsu from 2002 to 2017

时间	驱动效应/亿 m ³	<i>dG</i>	<i>dA</i>	<i>dδ</i>	<i>dE</i>	<i>dL</i>	<i>dc</i>	<i>dy</i>	<i>dp</i>
2002—2007 年	稻谷	-2.39	14.49	-7.93	3.97	-40.90	-50.70	89.61	5.34
	小麦	7.44	14.19	-5.16	-45.75	-30.95	-39.61	101.44	3.40
	玉米	-6.85	-0.96	-0.58	0.03	-3.27	-4.17	4.25	0.45
	豆类	3.05	-1.83	-0.52	1.86	-2.59	-3.12	2.89	0.35
	薯类	-0.46	-1.46	-0.13	1.37	-0.60	-0.73	-0.45	0.10
	油料	-17.04	-8.40	-1.09	4.98	-5.46	-7.04	4.03	0.84
	棉花	-7.26	-3.41	-0.64	0.48	-3.63	-4.64	4.15	0.51
	蔬菜	-12.01	-4.47	-1.33	-3.11	-7.99	-10.24	13.13	1.03
2007—2012 年	稻谷	3.37	0.47	-8.82	-13.07	-30.40	6.11	26.58	6.45
	小麦	-22.25	8.28	-4.65	-21.18	-17.03	3.15	21.08	3.49
	玉米	4.36	1.08	-0.52	-1.41	-1.69	0.37	2.63	0.38
	豆类	-1.60	-0.28	-0.43	-1.25	-1.52	0.29	0.68	0.33
	薯类	-0.21	-0.11	-0.06	0.06	-0.21	0.04	0.05	0.04
	油料	4.24	-1.61	-0.43	1.41	-1.56	0.36	-0.42	0.31
	棉花	2.17	-3.77	-0.27	6.07	-1.48	0.39	-4.97	0.20
	蔬菜	11.79	4.59	-1.36	-5.68	-4.31	0.91	9.74	1.00
2012—2017 年	稻谷	14.47	0.53	-3.07	11.66	-20.44	1.24	15.21	4.98
	小麦	31.85	3.40	-1.68	-0.72	-11.06	0.69	17.61	2.77
	玉米	-4.91	1.40	-0.17	-2.88	-1.34	0.06	2.99	0.29
	豆类	0.42	-0.81	-0.10	1.67	-0.71	0.05	-0.73	0.17
	薯类	0.40	-0.57	-0.01	0.69	-0.12	0.01	-0.54	0.02
	油料	0.46	-2.65	-0.15	2.01	-0.95	0.06	-1.15	0.23
	棉花	-0.32	-2.11	-0.04	1.45	-0.20	0.01	-1.39	0.07
	蔬菜	-1.28	1.80	-0.66	-2.10	-4.44	0.25	6.82	1.07

播种面积效应 *dA* 和节水技术效应 *dδ*: *dA* 对油料作物和小麦的影响最为剧烈，由于油料作物面积的减少，油料作物所需灌溉水量削减了 12.7 亿 m³ 的水足迹；而小麦则由于播种面积的扩张增加了 25.9 亿 m³ 的灌溉用水量。整体而言，播种面积的调整对灌溉用水量的影响较弱，主要是因为当前播种面积基本稳定在 7 100 000 hm² 左右，为了满足粮食作物要求只能进行整体性的结构调整和局部的规模调整，说明通过农业耕种规模管理实现大规模的灌溉节水可能具有一定的局限性。*dδ* 对灌溉用水量实现了稳定的削减作用（削减了 39.8 亿 m³ 的灌溉水足迹），说明通过农业技术实现稳定的灌溉节水具有可行性。*dA* 和

dδ 均为生产层面的驱动效应，对江苏省整体性作物的节水贡献均较为稳定且缓慢，是江苏省实现节水型社会建设的长期关键因素。

消费结构效应 *dc* 和人口规模效应 *dp*: 2002—2017 年，*dp* 与 *dy* 类似，均促使灌溉用水量上升，说明人口规模的扩张促使农作物需求的膨胀，从而引发更大的灌溉水需求。2007—2017 年，*dc* 的节水作用并不明显，但在 2002—2007 年，*dc* 则是削减灌溉水足迹的重要驱动力，说明江苏省消费者调整了高耗水作物及其次产品的需求，逐步做出节水型农产品的转向，可以看出经济层面的结构性调整（*dL*、*dc*）能够实现短期的大规模灌溉用水量削减，这说明

经济结构的调整是快速推进节水农业的关键措施，但并不能一概而论，需要结合投入产出理论具体分析。

2.3 基于投入产出表的作物用水驱动效应解析

基于传统行业分类，将 25 个非制造业部门合并为农业 (Ag)、矿业 (Mi)、水和能源供应业 (EI)、建筑业 (Co) 和服务业 (St)，17 个制造业部门合并为食品制造业、纺织业和其他制造业 (不以初级农产品为主要原材料的制造业，以重工业为主)，由此通过投入产出分析计算出产业间灌溉水足迹 (图 5)。

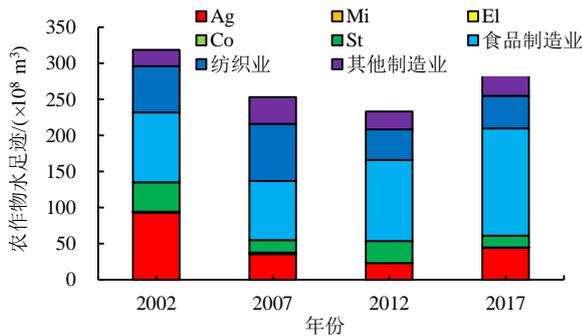


图 5 江苏省产业间灌溉水足迹

Fig.5 Irrigation water footprint among industries in Jiangsu

结合投入产出结果，可以看出灌溉水足迹流向食品制造业的比例在逐年增大，食品制造业的产品价值增加是促使农产品生产链优化的关键因素 (从 2002 年的 30% 增长至 2017 年的 51%)，说明农业生产链逐步由初级生产环节迈向高附加值食品产品制造环节，也解释了生产结构对水足迹增长起到的关键遏制作用

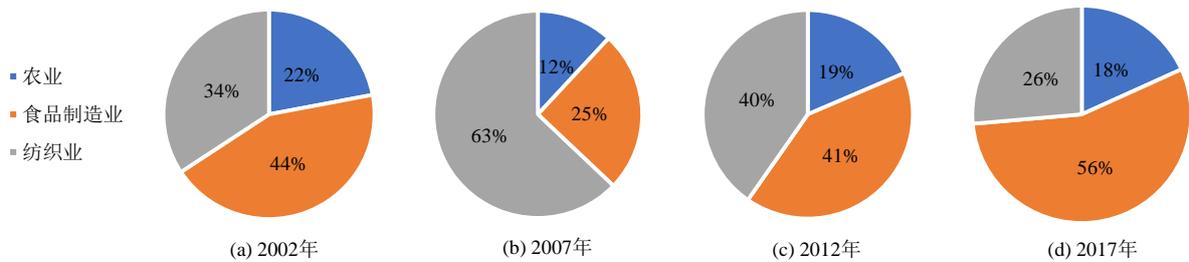


图 6 江苏省农产品消费占比

Fig.6 Agricultural product consumption in Jiangsu Province

2.4 作物经济节水可行性分析

食品制造业和纺织业从经济角度实现农业节水具有重要的作用，但二者所需的作物的自然特征和社会属性相差较大，为了明确其经济节水的可行性，结合贸易特征和作物特征进行具体分析。

棉花及其附属行业 (纺织业) 附加值高，但单位面积需水量巨大。江苏省棉花播种面积逐步缩减，棉花种植企业规模较小，纺织企业数反而持续上升并且形成一定规模，说明江苏省想要发展纺织业实现农产品增值需要向外省或国际市场买入大量棉花 (图 7)，由图 7 可知，江苏省通过提高引入国际农产品比例降

用，这说明农产品相关产业链的完善和农产品相关商品的价值增加是 2002—2017 年江苏省逐步实现节水型社会的关键经济手段。纺织业占据的灌溉水足迹比例出现了一定的下降 (从 2002 年的 20% 降低至 2017 年的 15%)，说明江苏省的纺织业逐步摆脱以当地生产的棉花为主要增值对象的现状，向外地寻求原材料。其他制造业占据的灌溉水足迹比例缓慢上升 (从 2002 年的 7% 增长至 2017 年的 13%)，说明其余产业虽然不以农产品深度制造为主，但也是江苏省实现农业经济健康发展的必要抓手之一。

从农产品消费角度来看 (图 6)，农产品消费结构却呈现出阶段性变化的特征，纺织业在农产品消费总量中的权重在 2002—2007 年骤然增加，从 34.3% 增长至 62.9%，而 2007—2017 年却逐步减少，从 62.9% 减少至 26.4%，而基于《江苏省统计年鉴》的行业附加值统计数据可以看出，纺织业的增加值远高于食品制造业，正因为农产品向高附加值的纺织业流动造就了 2002—2007 年阶段商品消费结构的调整带来的灌溉水足迹削减作用，而之后逐步转向食品制造业，造成了灌溉水足迹的增加，这解释了商品消费结构削减灌溉水足迹的本质：促使消费者倾向于购买高附加值、低耗水的产品实现间接节水。商品消费结构的改变也存在巨大的灌溉节水潜力，消费者倾向于节水型农产品能够极大地减少水资源压力。

低本省和省外的水资源压力，这说明，可以通过引入国际低价棉纺织初级农产品来避免棉花种植所需的高耗水现象。

谷物、蔬菜种植企业和食品制造业规模持续扩张，主要原因是虽然可食用作物及其附属行业 (食品制造业) 附加值相对较低，但具备着必需品的社会属性，这直接导致其播种以及食品制造必须实行全产业链掌握的方案。结合以上分析可知生产结构的优化、食品制造业的产值增加和技术增进是发展食用作物的关键手段，因此从产业经济和自然特征 2 个角度来说，发展食品制造业是稳步实现农业经济节水的必要手段。

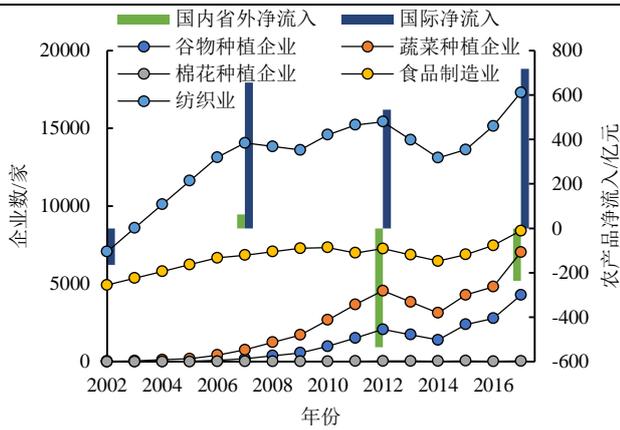


图7 江苏省农产品经济贸易特征

Fig.7 Socioeconomic characteristics of agricultural products in Jiangsu

整体上,农业经济节水的目标是在保证粮食作物供给充足的前提下发展节水农业经济,选择正确的作物和农产品制造业是发展农业经济实现农业节水的核心,对于棉花等高耗水经济作物,江苏省在2002—2017年通过国际贸易避免播种时期的高强度灌溉;对于水稻、蔬菜等可食用作物,农产品生产链的升级(以食品制造业为主)是江苏省2002—2017年生产结构节水的核心。

3 讨论

本研究表明,江苏省水稻、小麦、玉米、豆类作物、薯类作物平均需水量为595.2、514.3、348.3、266.4、290.1 mm,基本符合陈玉民等^[17]提出的江苏省生育期内作物需水量的合理区间,本研究中江苏省作物灌溉需水量偏低,主要是因为作物灌溉需水量基于灌溉水有效利用系数进行了调整,若考虑该指标带来的影响,平均灌溉需水量为224 mm,符合Deng等^[15]给出的江苏省净灌溉需水量范围100~300 mm;春夏季作物降水利用高,秋冬季作物降水利用率低,也与Zhao等^[16]计算绿水利用率的总体结果一致。

本研究表明,结构因素在灌溉节水中起关键作用,这与谢娟等^[18]在甘肃省的研究结果一致。不同的是,本文明确了灌溉节水的目标:实现经济发展的前提下降低用水规模,利用投入产出模型对各个影响因素进一步分解,再结合贸易数据和水足迹分析,对不同因素驱动力产生的内因进行了深入解释,得出生产结构的调整是江苏省灌溉节水的主要驱动因素,同时也得出食品制造业和纺织业是实现灌溉节水的基础上完成产值增长的关键产业:对具备生活必需品的食用作物应该着重于食品制造业产业链的产值增加,即控制播种面积的前提下实现后续产品的产值升值,降低过度追求经济效益导致播种规模无序扩张的可能性;对棉花等高耗水经济作物,可以尝试通过国际或省内贸易

从降水丰富地区引入大量农产品,逐步缩减省内播种面积,实现间接节水。2002—2017年消费结构也是实现灌溉节水的重要因素之一,通过引导消费者购买低耗水高产值产品,降低高耗水低产值的需求,缓解高耗水作物的生产压力,从而实现灌溉水量的间接节水。

本文认为当前技术难以控制气象因素对作物生产的影响,因此想要控制农业用水过度上涨的趋势,稳定实现灌溉节水必须结合经济管理手段,但本文仅从产值角度考虑节水仍然存在不足:①经济效益是衡量经济作物产能的关键因素,但对粮食作物而言满足人体需要才是其核心目的,因此需要从能值、营养物质等衡量粮食作物生产是否满足社会需要;②导致江苏省棉花播种面积逐步下降的最显著因素为国际贸易,但江苏省位于长江三角洲地域,交通便利,贸易成本较低,这可能是江苏省能够进行高耗水经济作物播种面积调整的的必要条件之一,该方案对内陆城市的可行性需要进一步探讨。

4 结论

1) 2002—2017年的农作物播种面积没有明显的增长,基本稳定在7 100 000 hm²左右,但农作物产值却增加了200亿元左右。蔬菜等低耗水经济作物的播种面积相对比例上升是江苏省农作物格局呈现结构优化、产值增加的原因之一。

2) 在生产层面,灌溉技术的优化持续遏制灌溉用水量的上升,对江苏省各作物的节水贡献均较为稳定且缓慢,是江苏省实现节水型社会建设的长期关键因素。

3) 在产业经济层面,生产结构的优化是遏制作物灌溉用水量增长的关键因素。以食品制造业为主的农产品生产链升级是降低粮食作物单位产值用水量、实现经济节水的的核心手段;以棉花为主的高耗水经济作物则可以通过国际贸易转移其导致的水资源压力,降低当地耕种规模实现灌溉节水。商品消费结构的改变也存在着巨大的灌溉节水潜力,消费者倾向于节水型农产品能够极大地减少水资源压力。

参考文献:

- 罗玉峰,张亚东,韩冰,等.江苏省水稻灌溉需水量空间分布规律研究[J].水电能源科学,2014,32(11):27-30,75.
LUO Yufeng, ZHANG Yadong, HAN Bing, et al. Spatial distribution of irrigation water demand of rice in Jiangsu Province[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(11): 27-30, 75.
- ZHANG P L, ZOU Z H, LIU G, et al. Socioeconomic drivers of water use in China during 2002—2017[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 154: 104-636.
- 马世浩,杨丞,王贵兵,等.水稻节水灌溉技术模式研究进展[J].节水灌溉,2021(8):19-24.
MA Shihao, YANG Cheng, WANG Guibing, et al. Research progress of

- rice water-saving irrigation technology mode[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(8): 19-24.
- [4] 李仰斌, 刘俊萍. 中国节水灌溉装备与技术发展展望[J]. *排灌机械工程学报*, 2020, 38(7): 738-742.
LI Yangbin, LIU Junping. Prospects for development of water-saving irrigation equipment and technology in China[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2020, 38(7): 738-742.
- [5] 袁寿其, 李红, 王新坤. 中国节水灌溉装备发展现状、问题、趋势与建议[J]. *排灌机械工程学报*, 2015, 33(1): 78-92.
YUAN Shouqi, LI Hong, WANG Xinkun. Status, problems, trends and suggestions for water-saving irrigation equipment in China[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2015, 33(1): 78-92.
- [6] 朱兴业. 全射流喷头理论及精确喷灌关键技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
ZHU Xingye. Theory and precise sprinkling irrigation for the complete fluidic sprinkler[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009.
- [7] 严海军. 基于变量技术的圆形和平移式喷灌机水量分布特性的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
YAN Haijun. Study on water distribution uniformity of center pivot and lateral move irrigation systems based on variable rate technology[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.
- [8] 刘洪禄, 车建明. 北京市农业节水与作物种植结构调整[J]. *中国农村水利水电*, 2002(11): 10-12.
LIU Honglu, CHE Jianming. Agricultural water-saving and adjustment of cropping pattern in Beijing[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2002(11): 10-12.
- [9] 钱争, 冯绍元, 庄旭东, 等. 基于 RZWQM2 模型的农田排水暗管优化布置研究[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(7): 113-121.
QIAN Zheng, FENG Shaoyuan, ZHUANG Xudong, et al. Using root zone water quality model to optimize subsurface drain in Hetao irrigation district[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(7): 113-121.
- [10] 高明杰, 罗其友. 水资源约束地区种植结构优化研究: 以华北地区为例[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(2): 204-210.
GAO Mingjie, LUO Qiyu. Study on cropping structure optimization in region short of water: A case study of North China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(2): 204-210.
- [11] 李彦彬, 马嘉彤, 李道西, 等. 改进粒子群算法在农业种植结构优化中的应用[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(1): 62-71.
LI Yanbin, MA Jiatong, LI Daoxi, et al. An improved particle swarming optimization method to optimize cropping systems[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(1): 62-71.
- [12] SUN S K, YIN Y L, WU P T, et al. Geographical evolution of agricultural production in China and its effects on water stress, economy, and the environment: The virtual water perspective[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(5): 4 014-4 029.
- [13] 李凤丽, 曲士松, 王维平, 等. 1997—2012 年山东省虚拟水贸易变化及典型区生态环境响应[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(2): 123-128.
LI Fengli, QU Shisong, WANG Weiping, et al. Changes of virtual water trade of Shandong Province in 1997—2012 and the ecological environment response of typical areas[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(2): 123-128.
- [14] LIU Y F, HU Y C, SU M R, et al. Multiregional input-output analysis for energy-water nexus: A case study of Pearl River Delta urban agglomeration[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121 255.
- [15] DENG C X, ZHANG G J, LI Z W, et al. Interprovincial food trade and water resources conservation in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 737: 139 651.
- [16] ZHAO D D, LIU J G, YANG H, et al. Socioeconomic drivers of provincial-level changes in the blue and green water footprints in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 175: 105 834.
- [17] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [18] 谢娟, 粟晓玲. 基于 LMDI 的灌溉需水量变化影响因素分解[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(7): 123-131.
XIE Juan, SU Xiaoling. Decomposition of influencing factors on irrigation water requirement based on LMDI method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(7): 123-131.

Change in Irrigation Water Usage in Jiangsu Province and the Underlying Reason

WANG Hao, YI Peng*

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: 【Objective】 Agriculture is the greatest water consumer. Reducing irrigation water usage is hence a priority in developing sustainable agriculture for many countries. While developing water-saving irrigation technologies is essential to achieving this goal, changing social activity and national and international trade can also play an important role. Taking Jiangsu province as an example, this paper analyzes the impact of non-technological factors on reducing irrigation water usage over the past 20 years. 【Method】 The CropWat model was used to calculate the change in water used for irrigation from 2002 to 2017 first. The results were then combined with a structural decomposition model to analyze the driving forces behind the change in irrigation water usage, from which we calculated the contribution of different factors to the changes. Based on an input-output table, we also analyzed the role of industrial and trade economies in reducing irrigation water. 【Result】 Change in agricultural production structures and food consumption was the key factors holding the increase in irrigation water usage over the past two decades, with the former reducing irrigation water usage by 19.29 billion m³ and the latter by 10.62 billion m³, during the studied period. The development of food industry combined with international trading by importing water-consuming cash crops over the past two decades also helped reduce the irrigation water usage. 【Conclusion】 The key to achieving water saving through changing economic policies is to restructure agricultural production chains and reducing cultivation of high-water-consuming crops.

Key words: structural decomposition model; irrigation; water saving; input-output model

责任编辑: 白芳芳