



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

粮食主产区粮食生产与农业水资源压力脱钩关系研究

刘楚杰, 李晓云, 江文曲

引用本文:

刘楚杰, 李晓云, 江文曲. 粮食主产区粮食生产与农业水资源压力脱钩关系研究[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 479–489.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地理探测器与Tobit模型在粤西地区粮食生产效率及影响因子分析中的比较应用

黄馨亿, 任向宁, 马涛, 胡月明, 李波, 张飞扬, 谢健文

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 818–828 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0482>

粮食主产区农业绿色发展的影响因素、质量测度与动力分析——基于绿色全要素生产率视角

崔宁波, 生世玉

农业资源与环境学报. 2022, 39(3): 621–630 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0106>

气候变化对西北半干旱区旱作农业的影响及解决途径

王红丽, 张绪成, 魏胜文

农业资源与环境学报. 2015(6): 517–524 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0093>

内蒙古玉米主产区农业热量资源变化及其对策探讨

张宝林, 高聚林, 王志刚, 池梦雪, 赵俊灵, 郭佳, 彭健

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 757–765 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0229>

粮食主产区耕地非粮化空间格局分异及其成因

常媛媛, 刘俊娜, 张琦, 于昊辰, 卞正富, 陈浮

农业资源与环境学报. 2022, 39(4): 817–826 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0337>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘楚杰, 李晓云, 江文曲. 粮食主产区粮食生产与农业水资源压力脱钩关系研究[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 479–489.

LIU C J, LI X Y, JIANG W Q. Decoupling relationship between grain production and agricultural water resources pressure in major grain-producing areas[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(2): 479–489.

粮食主产区粮食生产与农业水资源压力脱钩关系研究

刘楚杰, 李晓云*, 江文曲

(华中农业大学经济管理学院, 武汉 430070)

摘要:我国粮食生产与水资源短缺之间的矛盾日益突出,探讨粮食主产区粮食生产与农业水资源压力的关系尤为重要。本研究首先分析粮食主产区2004—2018年农业水资源压力的时空变化,运用Tapio脱钩模型对粮食生产与农业水资源压力的脱钩状态进行解析,其次结合“粮食生产水资源投入”这一指标与全局参比的超效率SBM-DEA模型测算了粮食主产区的粮食生产水资源利用效率,进一步分析了粮食生产水资源利用效率对农业水资源压力的影响。结果表明:粮食主产区农业水资源压力存在时空异质性,总体上北方粮食主产区的农业水资源压力大于南方,尤其是河北、河南、山东,其压力值始终大于1.5;2004—2018年,粮食主产区粮食生产与农业水资源压力的脱钩状态具有阶段性特征,前期以扩张负脱钩为主,中期北方与南方粮食主产区分别以绝对脱钩和扩张负脱钩为主,后期强负脱钩类型的省份范围扩大;粮食主产区粮食生产水资源利用效率整体均值为0.719,仍有一定提升空间,且提高粮食生产水资源利用效率对缓解农业水资源压力具有显著作用。研究结果为理解粮食生产与农业水资源压力的关系变动提供了新的视角,强调了未来在促进粮食稳定生产的同时,应注重通过提高粮食生产水资源利用效率、优化粮食种植布局、提升农业基础设施水平等途径缓解农业水资源压力。

关键词:粮食生产;农业水资源压力;水资源利用效率;脱钩模型;超效率SBM-DEA模型

中图分类号:F326.11;F323.213 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2023)02-0479-11 doi: 10.13254/j.jare.2022.0009

Decoupling relationship between grain production and agricultural water resources pressure in major grain-producing areas

LIU Chujie, LI Xiaoyun*, JIANG Wenqu

(School of Economic Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The contradiction between China's grain production and water resources shortage is becoming increasingly prominent, and it is particularly important to explore the relationship between grain production and agricultural water resources pressure in major grain-producing areas. This article analyzes temporal and spatial changes in China's agricultural water resources pressure from 2004 to 2018 in major grain-producing areas and uses the Tapio decoupling model to reveal the decoupling state of grain production and water resources pressure. This article calculates the agricultural water efficiency by combining the index of "water resources input in grain production" and global super-efficiency SBM-DEA and analyzes the impact of agricultural water use efficiency on agricultural water resources pressure. The results showed that China's agricultural water resources pressure is heterogeneous in temporal and spatial evolution in major grain-producing areas. The pressure on agricultural water resources in the major grain-producing areas in the north is greater than that in the south, especially in Hebei, Henan, and Shandong, where the value of pressure is always greater than 1.5. This study also found the decoupling state of grain production and water resources pressure in the major grain-producing areas has periodical character during the study period. This means expansion negative decoupling was the main relationship type in the early stage. The major grain producing areas

收稿日期:2022-01-09 录用日期:2022-03-28

作者简介:刘楚杰(1997—),女,湖北宜昌人,博士研究生,研究方向为农业资源与环境经济。E-mail:liuchujie@webmail.hzau.edu.cn

*通信作者:李晓云 E-mail:lixiaoyun@mail.hzau.edu.cn

基金项目:教育部哲学社会科学重大攻关项目(20JZD015);国家自然科学基金项目(71673102)

Project supported: The Research Foundation from Ministry of Education of China(20JZD015);The National Natural Science Foundation of China(71673102)

in the north and south have mainly shown absolute decoupling and expansion negative decoupling, respectively, in the mid-term. The scope of provinces with strong negative decoupling types has expanded in the later stage. The overall average value of the grain water resource utilization efficiency in the main grain producing areas is 0.719, and there is still room for further improvement. Improving the water resource utilization efficiency has a significant effect on alleviating agricultural water resources pressure. The study provides a new perspective for understanding the relationship between grain production and agricultural water resources pressure and emphasizes that while promoting stable grain production in the future, it is necessary to take multiple approaches, such as improving water resources utilization efficiency in grain production, adjusting the layout of grain planting, and improving the level of agricultural infrastructure, to relieve agricultural water resources pressure.

Keywords: grain production; agricultural water resources pressure; water resource utilization efficiency; decoupling model; super-efficiency SBM-DEA model

粮食安全始终是国民经济发展和社会稳定的基础,2014年以来我国粮食产量实现“十七连丰”,“十三五”期间粮食年产量连续五年稳定在6.5亿t以上。其中黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、山东、河北、河南、江苏、安徽、湖北、湖南、江西、四川13个粮食主产省份的粮食产量占全国粮食总产量的75%,各省份粮食播种面积占农作物播种总面积的50%以上,在我国粮食安全生产中占有重要地位。尽管我国粮食连年丰收,总体上满足了不断增长的人口需求,但同时粮食生产面临的资源环境约束趋紧,尤其是水资源短缺问题,已严重威胁到粮食生产系统的稳定,成为农业可持续发展必须突破的瓶颈^[1-2]。2018年我国农业用水达到3 693.1亿m³,占全国用水总量的61.4%^[3],但我国水土资源分布严重不匹配,北方部分粮食主产省份农业水资源严重不足,加上近几年粮食生产地域重心向水资源相对短缺的北方转移,粮食生产与水资源短缺之间的矛盾日益突出^[4-5]。水资源是粮食生产不可或缺的基础性资源,粮食产量增加对水资源需求的上升会进一步导致农业水资源压力增大^[6]。粮食主产区承担着保障粮食供给的重任,应更加注重粮食主产区粮食生产与农业水资源之间的良性关系,进一步掌握我国粮食生产与农业水资源压力变动状况以及两者关系的发展态势,探索如何在保障粮食生产的同时缓解农业用水压力。

对于粮食生产与水资源利用的关系,不少学者基于水足迹概念探讨了粮食生产水资源消耗状况^[7-8],另有学者通过基尼系数、不平衡系数以及耦合协调度模型分析了水资源与粮食生产的时空匹配程度或耦合协调程度^[9-10],但对粮食生产与农业水资源压力之间关系变动的研究较少。本研究拟采用Tapio脱钩模型分析2004—2018年我国粮食主产区水稻、小麦、玉米三大主粮的粮食产量与农业水资源压力之间的脱

钩关系。“脱钩”是测度经济发展、物质消耗和生态环境关系变化的工具,用来探讨如何阻断环境质量损害与经济发展之间的关联性^[11],Tapio脱钩模型则是目前常用的研究方法,采用“弹性概念”可以动态反映变量间脱钩关系^[12]。已有不少学者利用该模型对经济发展与碳排放^[13-14]、环境污染^[15-16]、资源消耗^[17-18]等要素的脱钩关系进行了研究,在农业领域,相比于农业水资源利用,多数学者更加关注农业经济发展与农业碳排放、面源污染之间的变动状态^[19-20]。本研究采用脱钩模型揭示粮食主产区粮食产量与农业水资源压力变动的方向与大小,明确粮食生产面临的农业水资源压力状况,在探讨各阶段粮食生产与农业水资源压力的脱钩状态基础上,探寻缓解粮食主产区农业水资源压力、促进粮食生产可持续发展的途径。

为进一步探究如何改善粮食生产与农业水资源压力的脱钩状态,拟采用面板数据回归模型对粮食主产省份的农业水资源压力进行影响因素分析,并着重探讨粮食生产水资源利用效率,即用于粮食作物灌溉的水资源利用效率对农业水资源压力的影响。目前,农作物灌溉用水方式较为粗放,粮食主产区灌溉水利用率若提高10%~15%,每年可减少600亿~800亿m³的灌溉用水^[21]。粮食生产水资源利用效率的提高意味着水资源在粮食生产过程中的合理配置与高效利用,以及节水效应的增加,有助于减小水资源压力并保障粮食生产的可持续性。在测算粮食生产水资源利用效率的过程中,本研究尽可能选取更为精细的用于粮食生产的投入要素,在测算方法上,采取全局参比的超效率SBM-DEA模型,该方法既克服了传统DEA存在的多个有效决策单元无法进一步比较的缺陷,也弥补了一般超效率模型存在的测度结果无法进行跨期比较的不足,使测算结果的可信度更高^[22-23]。

为揭示粮食主产区(黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、

山东、河北、河南、江苏、安徽、湖北、湖南、江西、四川) 2004—2018年粮食生产与农业水资源压力的脱钩状态,掌握各阶段各区域粮食产量与农业水资源压力的变动情况,本研究采用更为合适的指标与测算方法得到粮食生产水资源利用效率,分析了粮食主产区粮食生产水资源利用效率的时空变化特征,并运用回归模型探寻有利于减小农业水资源压力、促进粮食生产与水资源压力达到理想脱钩状态的有效途径,尤其是粮食生产水资源利用效率在其中发挥的重要作用,为夯实粮食生产的水资源基础提供了有效信息。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 粮食生产与农业水资源压力的脱钩指数测算

1.1.1 农业水资源压力测算

为分析农业灌溉对区域水资源的压力,本研究构建农业水资源压力指数,并从供给-需求原理出发,参考于法稳^[24]的研究方法进行测算:

$$\beta = \frac{W_a}{W_s} = \frac{W_a}{W_T \times \alpha \times 40\% / \delta} \quad (1)$$

式中: β 为农业水资源压力指数; W_a 为农业灌溉用水; W_s 为用于农业的可持续利用水资源量; W_T 为水资源禀赋量; α 为农业用水比例(即农业用水与用水总量的比值);40%为国际标准指定的水资源可持续利用的警戒线上限; δ 为调节系数,用于消除丰水和枯水年影响。

以往文献中,调节系数 δ 的计算方法为各省份历年的水资源禀赋量除以对应所有年份的平均水资源禀赋量^[25],但由于本研究时段较长,该计算方法会抹除气候变化背景下水资源禀赋量的时间趋势性变化,因此本研究将各省份历年的水资源禀赋量除以对应年份及前后相邻共三年的平均水资源禀赋量后得到的比值作为调节系数 δ 。如果农业灌溉用水超过农业水资源可持续利用量,则表明该区域水资源可持续利用压力大。构造农业水资源压力指数所用的水资源禀赋、用水量、农业用水量、农业灌溉水量均来自《中国水资源公报》以及各省水资源公报。

1.1.2 Tapio脱钩模型

本研究采用Tapio脱钩模型对粮食生产与水资源压力的脱钩关系进行分析, Tapio脱钩弹性指数的测算公式如下:

$$e = \frac{\Delta\beta/\beta_0}{\Delta Y/Y_0} = \frac{(\beta_{i,t} - \beta_{i,t-1})/\beta_{i,t-1}}{(Y_{i,t} - Y_{i,t-1})/Y_{i,t-1}} \quad (2)$$

式中: e 为脱钩弹性指数,反映水资源压力对粮食产量

变动的敏感程度; Y 为粮食产量,数据来源于《中国农村统计年鉴》; β_0 和 Y_0 分别表示基期的农业水资源压力指数与粮食产量,在本研究中,基期与当期的年份间隔为一年; i 表示不同地区; t 表示年份。

如图1所示, Tapio脱钩模型根据脱钩弹性值的大小将脱钩状态界定为8种。在粮食产量增长情况下,与农业水资源压力关系的理想程度依次为绝对脱钩>相对脱钩>增长连结>扩张负脱钩。其中,绝对脱钩指粮食产量增长的同时农业水资源压力变动指数呈反方向变动,即负增长,该状态是符合农业可持续发展理念的最理想状态;相对脱钩则意味着粮食产量增长的同时水资源压力也在增加,但前者增幅大于后者;增长连结的脱钩状态表示农业水资源压力增幅与粮食增产幅度相近;而扩张负脱钩状态指农业水资源压力增幅远大于粮食产量增幅。相应地,在粮食产量减少情况下,状态最糟糕的为强负脱钩状态,即粮食减产的同时水资源压力依然在增加,其次为弱负脱钩、衰退连结、衰退脱钩。

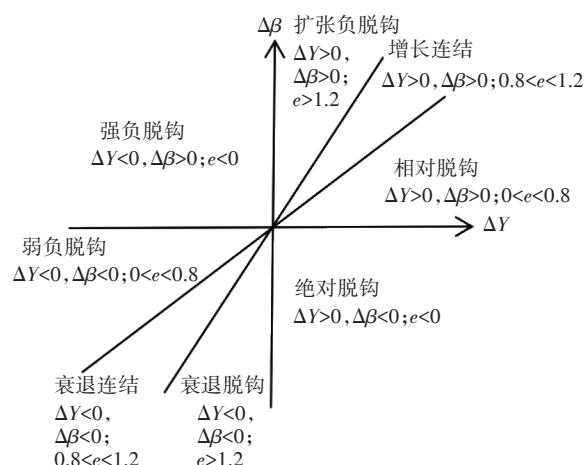


图1 Tapio脱钩类型

Figure 1 Tapio decoupling type

1.2 粮食生产水资源利用效率测算

本研究采用基于规模收益不变的投入导向型全局参比的超效率SBM-DEA模型进行粮食生产水资源利用效率的测算。在DEA框架下,将每个省份看作一个决策单元(Decision Making Unit, DMU),假设有 N 个DMU($N=1, 2, \dots, T$),每个DMU使用 M 种投入($x \in R_+^M$),联合生产 S 种产出($y \in R_+^S$),生产技术可能性集合为 P 。而在全局参比的超效率SBM模型分析框架下,以所有时期的投入产出构造全局生产技术集 P_{globe} ,则有:

$$P_{\text{globe}}=(P_1\cup P_2\cup\cdots P_t) \quad (3)$$

在生产技术满足不变规模报酬假设(Constant Returns to Scale, CRS)下,第*K*个DMU的效率可以通过基于投入导向和全局参比的超效率DEA模型进行评价,如公式(4)所示。其中 θ 表示该决策单元的综合技术效率值^[23]。

$$\begin{aligned} \min_{\theta, z} \quad & \theta \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{t=1}^T \sum_{n=1, n \neq k}^N z_n' \times x_{nm}' \leq \theta \bar{x}_{nm}^t, m=1, 2, \cdots, M \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{n=1, n \neq k}^N z_n' \times y_{ns}' \geq \bar{y}_{ns}^t, s=1, 2, \cdots, S \\ & z_n' \geq 0, n=1, 2, \cdots, N, n \neq k, t=1, 2, \cdots, T \\ & \bar{x}_{mk} \geq x_{mk}, m=1, 2, \cdots, M \\ & \bar{y}_s \geq 0, y_s \leq y_{sk}, s=1, 2, \cdots, S \end{aligned} \quad (4)$$

在测算粮食生产水资源利用效率值时,参照以往研究^[26-27],同时基于数据可得性,本研究考虑的粮食生产投入要素包括土地投入量、用工数量、机械畜力费用、种子用量、化肥用量、水资源投入量,产出要素为粮食产量,即稻谷、小麦和玉米3种作物产量的总和,机械畜力费用以2004年为基期,用每个省份每年的农业产值指数进行平减。指标体系详见表1。另外,由于粮食水资源投入量无法直接从统计年鉴中获取,因此参考常明等^[28]的研究方法,通过权重系数法和3种作物的灌溉系数^[29],从农业水资源投入量中分离出粮食水资源投入量,具体方法为:将各省农业灌溉用水与每种粮食作物播种面积占农作物总播种面积的比例相乘,再乘以此作物的灌溉系数。其中,粮食作物灌溉系数为不同地区某类粮食作物净灌溉需水量与当地主要作物净灌溉平均需水量的比值,可反映不同地区作物生长对灌溉的依赖程度。数据均来自《中国农村统计年鉴》《全国农产品成本收益资料汇编》与各省水资源公报。

表1 粮食生产水资源利用效率测度的投入产出指标体系

Table 1 The input-output index system for measuring the water resources utilization efficiency of grain production

指标类型 Indicator type	指标名称 Indicator name	单位 Unit
投入	土地投入量	10 ³ hm ²
	用工数量	标准劳动日
	机械畜力费用	元
	种子用量	kg
	化肥用量	kg
	水资源投入量	亿 m ³
产出	粮食产量	万 t

1.3 面板回归模型设定

为探究粮食主产省份粮食生产水资源利用效率对农业水资源压力的影响,建立如下基准回归模型:

$$\beta_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \times f + \alpha_2 \times X_{it} + u_{it} \quad (5)$$

式中: β 为被解释变量,即农业水资源压力; f 为核心解释变量,即粮食生产水资源利用效率; i 和 t 分别表示不同省份和年份; u_{it} 表示误差项。 X 为其余解释变量,在参考以往研究^[6,30]的基础上,从农业生产方式、农业发展外部环境、资源禀赋三个方面选取了种植结构、用电量、城镇化、农林水支出水平、水资源充裕程度作为其他解释变量,数据均来自《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》及《中国水资源公报》。变量选取与数据说明如表2所示。

表2 变量选取与数据说明

Table 2 Variable selection and data description

变量 Variable	含义 Meaning	平均值 Mean	标准差 Standard deviation
农业水资源压力	农业水资源压力	1.14	0.86
粮食生产水资源利用效率	粮食生产水资源利用效率值	0.72	0.15
种植结构	粮食种植面积与农作物播种面积比值(%)	72.33	10.61
用电量	农村用电量(亿 kWh)	287.06	394.08
城镇化	城镇化率(%)	50.52	8.87
农林水支出水平	农林水支出费用占财政总支出的比例(%)	10.58	2.59
水资源充裕程度	水资源总量与农作物播种面积比值(10 ² m ³ ·hm ⁻²)	105.65	90.49

为进一步考察粮食生产水资源利用效率及其他因素对农业水资源压力影响的差异性,本研究采用分位数回归方法进行分析。与普通最小二乘估计回归相比,分位数回归能够更全面地描述被解释变量的条件分布,而非仅仅描述其条件期望(均值),同时能较好地排除离群值的干扰,回归结果也更为稳健。我国幅员辽阔,各粮食主产省份的资源禀赋与经济发展方式均不相同,因此农业水资源压力区域差异较大,粮食生产水资源利用效率及其他因素对农业水资源压力的边际影响可能存在差异。分位数回归方程表达式如下:

$$\begin{aligned} Q_{\beta_{i,t}}(\tau|x_{i,t}) &= X'_{i,t} \times \lambda(\tau) + \varepsilon_{i,t} \\ i &= 1, 2, \cdots, n; t = 1, 2, \cdots, T \end{aligned} \quad (6)$$

式中: Q 为农业水资源压力的条件分布函数; i 为样本量; t 为时段数; τ 为设定的不同分位点,对样本进行分割并给予不同的估计权重,分位数 $\tau \in \{0.1, 0.2, 0.3,$

0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9}; X' 为解释变量的组合矩阵;
 $\lambda(\tau)$ 为 τ 分位点下待估的影响系数; ε 为误差项。

2 结果与分析

2.1 粮食生产与农业水资源压力脱钩关系分析

2.1.1 农业水资源压力分析

由公式(1)计算出2004—2018年粮食主产省份的农业水资源压力指数,并绘制了2018年粮食主产省份农业水资源压力指数的空间分布图和2004—2018年各省份农业水资源压力指数变动图,如图2和图3所示。

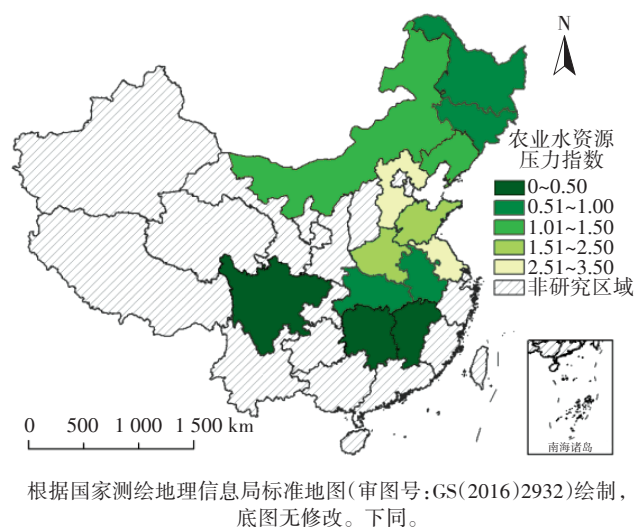


图2 2018年全国农业水资源压力指数空间分布

Figure 2 Spatial distribution of national agricultural water pressure index in 2018

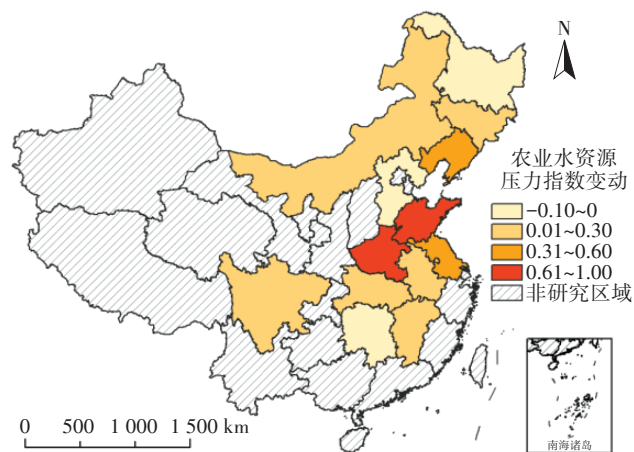


图3 2004—2018年全国农业水资源压力指数变动

Figure 3 Changes in national agricultural water pressure index from 2004 to 2018

从农业水资源压力空间分布(图2)看,总体上北方粮食主产区农业水资源压力大于南方,其中2018年农业水资源压力指数大于1的6个粮食主产省份中有5个省份位于北方,表明北方农业水资源可持续状态更加脆弱,尤其是黄淮海地区,河北、河南、山东的农业水资源压力指数均大于1.5,处于水资源强不可持续利用状态^[24]。另外,结合测算的农业水资源压力指数可知,2004—2018年农业水资源压力指数始终大于2.5的省份为河北、江苏两省。江苏虽然水资源禀赋充足,但由于其二三产业发展水平高,对水资源利用的竞争压力大,从而使得农业水资源利用空间紧缩;河北位于水资源匮乏的华北地区,农业可持续利用水资源量严重不足。南方地区由于降水量丰富,河湖众多,粮食主产省份的农业水资源压力指数小于1,尤其是农业水资源压力指数最小的四川,拥有丰富的水资源,来自非农部门的竞争压力也较小,各年份农业水资源压力指数几乎均在0.3以下。

从农业水资源压力指数变动(图3)可以发现,与2004年相比,2018年粮食主产省份农业水资源压力指数变化幅度不大,但指数呈现上升趋势的有10个省份,说明粮食主产省份农业生产面临的水资源约束整体上进一步趋紧。具体来看,河南、山东的农业水资源压力指数增幅最大,进一步反映北方地区部分省份的农业水资源短缺状况呈现较显著的恶化趋势。

2.1.2 粮食生产与农业水资源压力的脱钩分析

利用公式(2)计算粮食生产与农业水资源压力的脱钩弹性,图4呈现了6个时间段里粮食主产省份的脱钩状态。2004—2005年和2006—2007年为研究阶段的前期,该时期粮食生产与农业水资源压力脱钩类型均以扩张负脱钩类型为主,说明不少粮食主产省份在保障粮食供应的背后以牺牲资源环境为代价,忽视了水资源的可持续利用且节水意识不强,导致农业水资源压力增速远大于粮食产量增长速度,该时期脱钩状态整体上较为糟糕。尤其是河南、山东两省,粮食生产与农业水资源压力持续呈现扩张负脱钩状态,反映了该地区水资源匮乏的形势更加严峻,粮食生产与水资源之间的矛盾进一步加剧。

2009—2010年和2011—2012年为研究阶段的中期,北方粮食主产区的粮食生产与水资源压力脱钩类型主要为绝对脱钩,而南方粮食主产区则以扩张负脱钩为主。该时期粮食主产区在重视粮食增产的同时,也愈发关注农业可持续发展问题。随着节水灌溉技术的发展以及一系列节水灌溉政策的出台,再加上农

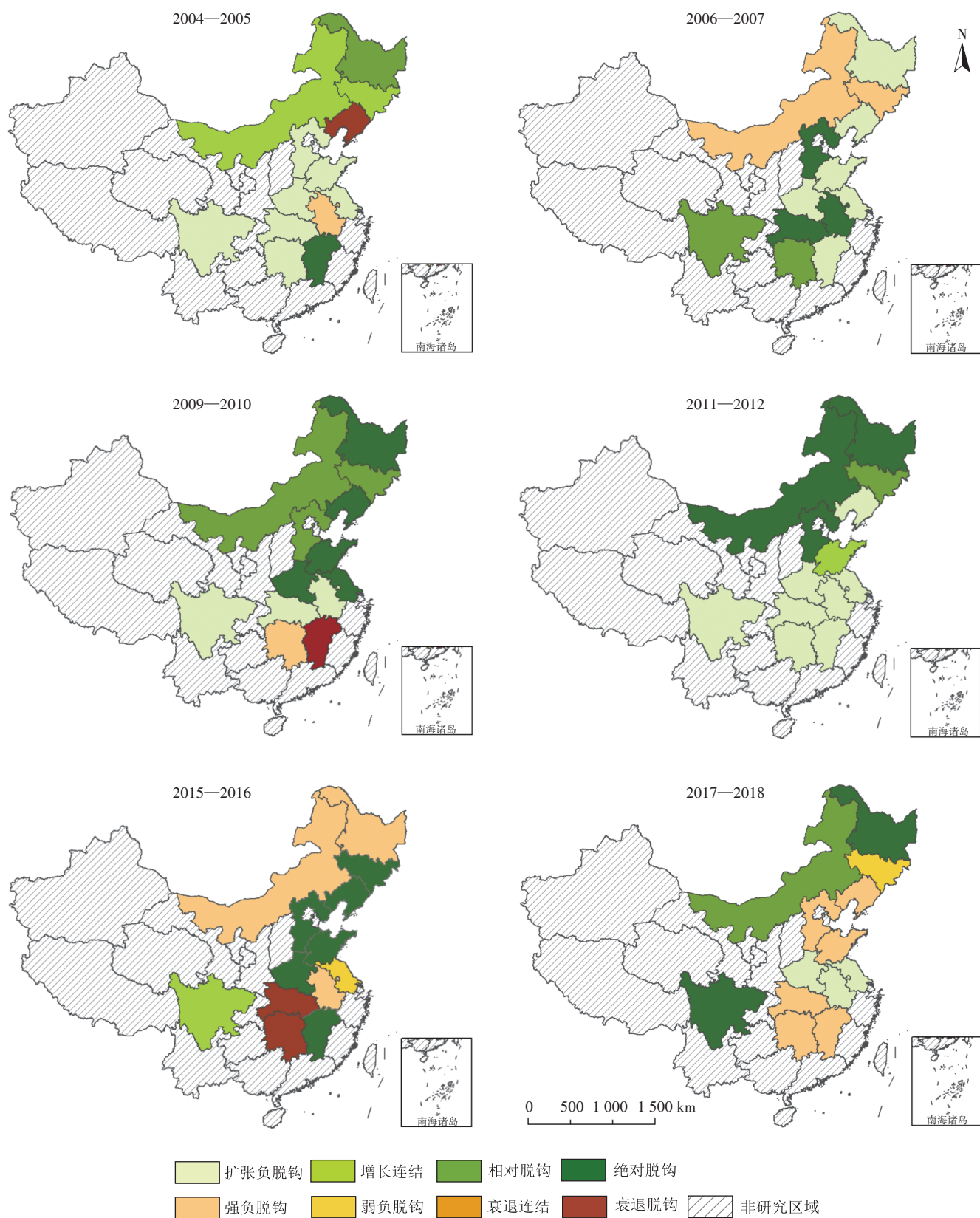


图4 2004—2018年粮食主产省份粮食生产与水资源压力脱钩类型变化

Figure 4 Changes in the decoupling types between grain production and water pressure in major grain-producing provinces from 2004 to 2018

业水价综合改革在北方地区有效推行,北方粮食主产区农业水资源压力呈减小趋势;而南方地区水资源充足,农业水价综合改革并未在南方粮食主产省份得到有效实施,农户水资源节约意识缺乏,农业水资源压力呈增加趋势。

2015—2016年和2017—2018年为研究阶段的后期,处于强负脱钩状态的粮食主产省份范围较前期和中期明显扩大,说明粮食产量减少的同时,农业水资源压力也在增大。究其原因:一是由于城镇化的快速发展使得耕地面积有所减少;二是由于种粮成本持续上涨,农户种粮收益低,种粮积极性不高,部分粮食主产省份的粮食种植面积在近几年呈减少趋势;三是由于降水量在近几年有所减少,水资源总量随之减少,而农业生产中水资源浪费现象仍较严重,最终导致粮食产量减少趋势与农业水资源压力增加趋势并存。

总体而言,2004—2018年粮食主产区脱钩类型空间变化幅度较大,但仍具有阶段性特征。前期脱钩类型主要为扩张负脱钩,中期北方粮食主产区与南方粮食主产区分别以绝对脱钩和扩张负脱钩状态为主,后期脱钩类型主要为强负脱钩。

2.2 粮食生产水资源利用效率对脱钩关系的影响

2.2.1 粮食生产水资源利用效率测算结果

基于公式(3)和公式(4),采用MaxDEA专业版软件测算得到2004—2018年13个粮食主产省份的粮食生产水资源利用效率值,并按均值进行排名,结果如表3所示。粮食生产水资源利用效率地区间差异明

显,东北三省、四川和湖南的粮食生产水资源利用效率相较于其他地区更高,而位于华北地区的河北、山东两省及位于华东地区的江苏、安徽的粮食生产水资源利用效率较低。具体来看,2004—2018年,吉林的粮食生产水资源利用效率最高(均值为0.977),表明在给定产出水平下其投入较少;河北的粮食生产水资源利用效率最低(均值为0.543)。从时间趋势来看,各省份的粮食生产水资源利用效率的变化方向与幅度差异较大。北方粮食主产省份粮食生产水资源利用效率普遍呈现较平稳的上升趋势,尤其是河北、内蒙古、黑龙江三省增幅较大;而南方粮食主产省份的粮食生产水资源利用效率在波动中呈现下降趋势,说明在研究期间,相对于南方主产区,北方主产区的水资源利用效率提升更为明显,与研究阶段中期南北方呈现的不同脱钩状态结果一致,这可能得益于一系列节水灌溉政策、水价政策在北方粮食主产区的有效推行。另外,从粮食主产省份的总体均值来看,粮食生产水资源利用效率为0.719,小于部分粮食主产省份的粮食生产水资源利用效率均值,表明总体上我国粮食主产区的粮食生产水资源利用效率还存在较大提升空间,需进一步改变粗放的农业生产方式、减少资源浪费、调整投入要素,以更好匹配产出端。

2.2.2 粮食生产水资源利用效率对农业水资源压力的影响

为进一步探索促进粮食生产与农业水资源压力达到理想脱钩状态的途径,本研究利用2004—2018

表3 2004—2018年粮食主产省份粮食生产水资源利用效率
Table 3 Water resources utilization efficiency of grain production in major grain producing provinces from 2004 to 2018

省份 Province	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2004—2018 年均值 Mean	排名 Rank
河北	0.497	0.475	0.532	0.519	0.546	0.553	0.555	0.629	0.543	13
内蒙古	0.554	0.536	0.597	0.551	0.583	0.621	0.607	1.063	0.622	10
辽宁	1.071	0.811	0.832	0.710	0.803	0.652	0.797	1.019	0.842	3
吉林	1.031	1.021	1.036	0.901	1.014	0.905	0.926	1.013	0.977	1
黑龙江	0.793	0.662	0.690	0.728	0.706	0.697	0.707	1.009	0.753	6
江苏	0.626	0.577	0.579	0.586	0.588	0.602	0.590	0.701	0.604	11
安徽	0.784	0.536	0.539	0.523	0.558	0.565	0.535	0.722	0.579	12
江西	0.746	0.823	0.753	0.698	0.703	0.675	0.658	0.698	0.772	5
山东	0.676	0.588	0.622	0.624	0.614	0.585	0.580	0.693	0.623	9
河南	0.656	0.654	0.680	0.662	0.644	0.642	0.639	0.740	0.669	8
湖北	0.787	0.641	0.684	0.684	0.682	0.684	0.648	0.720	0.689	7
湖南	1.065	0.778	0.801	0.755	0.768	0.726	0.714	0.879	0.801	4
四川	1.385	0.752	0.806	0.802	0.837	0.844	0.870	0.886	0.874	2
平均值	0.821	0.681	0.704	0.673	0.696	0.673	0.679	0.829	0.719	

年13个粮食主产省份的面板数据,将所有变量进行标准化处理后,通过实证模型分析水资源利用效率及其他因素对农业水资源压力的影响。

首先对模型进行了VIF检验,结果显示VIF值均远小于10,模型不存在多重共线性;其次进行了豪斯曼检验,经检验得到 $P<0.001$,应使用固定效应(FE)模型,故选择模型1的回归结果(表4)进行分析。由模型1的结果可以看到,粮食生产水资源利用效率对被解释变量即农业水资源压力具有显著的负向作用,且粮食生产水资源利用效率每提高1个单位,农业水资源压力减小1.004个单位,说明提高粮食生产水资源利用效率有助于缓解农业水资源压力。粮食生产水资源利用效率的提高意味着在粮食生产过程中,水资源等投入要素得到了更加合理高效的配置且粮食生产用水方式更加集约化,进而促进了水资源的高效利用、减少了水资源浪费,有利于粮食生产与农业水资源压力之间达到理想的脱钩状态。同时,除粮食生产水资源利用效率外,其他有利于减小农业水资源压力的因素,如用电量和水资源充裕程度对农业水资源压力具有显著的负向作用,一定程度上反映了随着农业基础设施的完善及机械化水平的提高,水资源在农业生产过程中得到了更加高效的利用,从而有助于缓解农业水资源压力,每公顷种植面积可利用的水资源越多,农业水资源压力就越小。

其次通过面板分位数回归模型分析2004—2018年粮食生产水资源利用效率及其他因素对缓解农业

水资源压力的异质性作用。从模型3的回归结果(表4)可以看出,粮食生产水资源利用效率及其他变量在不同分位点上的显著性以及系数大小有所不同,说明在不同的农业水资源压力水平下,各因素产生的作用存在区域差异。从显著性看,粮食生产水资源利用效率的系数在0.2~0.8分位点,对农业水资源压力产生了显著的负向作用,表明对于大多数粮食主产省份而言,提高粮食生产水资源利用效率有助于减小农业水资源压力,尤其在0.5和0.6分位点,显著性水平小于0.01,一定程度上说明对于农业水资源压力适中的粮食主产省份,如内蒙古、辽宁(农业水资源压力均值分别为0.905、1.072),提高粮食生产水资源利用效率对于缓解农业水资源压力具有显著作用。而在0.1和0.9分位点,粮食生产水资源利用效率对农业水资源压力没有显著影响。此外,可以发现在0.3~0.6的分位点,种植结构对农业水资源压力具有显著的正向影响,说明对于部分省份而言粮食种植播种面积占比越大,粮食作物灌溉需水量越高,农业水资源压力越大;在0.1~0.6分位点,用电量对农业水资源压力具有显著的负向作用,表明对于大部分粮食主产省份,推动农业基础设施完善与机械化发展也有利于缓解农业水资源压力。从系数大小看,粮食生产水资源利用效率在0.1~0.9分位点的回归系数在-0.101~-0.100范围内变化,变化幅度极小。而城镇化率和水资源充裕程度的回归系数绝对值在高分位点相对较大,说明在推进城镇化过程中加强水资源在一二三产业的合理分配,以及从源头上节约水资源、增加农业可利用水

表4 模型回归结果

Table 4 Results of model regression

变量 Variable	模型1(固定效应回归模型) Model 1(FE)	模型2(随机效应回归模型) Model 2(RE)	模型3(分位数回归模型) Model 3(QR)								
			0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
粮食生产水资源利用效率	-1.004* (0.048)	-0.129** (0.063)	-0.101 (0.064)	-0.101** (0.048)	-0.101** (0.040)	-0.101** (0.036)	-0.100*** (0.036)	-0.100*** (0.039)	-0.100** (0.049)	-0.100* (0.090)	-0.100 (0.078)
种植结构	0.155 (0.090)	0.101 (0.087)	0.178 (0.141)	0.170 (0.105)	0.164* (0.087)	0.159** (0.079)	0.156** (0.079)	0.152* (0.084)	0.144 (0.106)	0.139 (0.130)	0.130 (0.171)
用电量	-0.330*** (0.051)	-0.089* (0.047)	-0.560** (0.258)	-0.479** (0.194)	-0.420*** (0.161)	-0.372** (0.146)	-0.341** (0.146)	-0.302* (0.156)	-0.231 (0.197)	-0.176 (0.238)	-0.093 (0.311)
城镇化	0.041 (0.047)	0.011 (0.052)	0.014 (0.074)	0.023 (0.055)	0.030 (0.045)	0.036 (0.041)	0.039 (0.041)	0.044 (0.044)	0.052 (0.056)	0.059 (0.068)	0.068 (0.089)
农林水支出水平	0.033 (0.044)	0.013 (0.035)	0.086 (0.067)	0.067 (0.050)	0.054 (0.041)	0.043 (0.038)	0.036 (0.038)	0.027 (0.040)	0.011 (0.051)	-0.002 (0.062)	-0.021 (0.081)
水资源充裕程度	-0.240* (0.114)	-0.309** (0.122)	-0.220*** (0.082)	-0.227*** (0.061)	-0.232*** (0.050)	-0.237*** (0.046)	-0.239*** (0.046)	-0.243*** (0.049)	-0.249*** (0.062)	-0.254*** (0.075)	-0.261*** (0.100)

注:括号内为稳健标准误,*、**、***分别代表10%、5%、1%的显著性水平。

Note: The values in parentheses are robust standard errors, and *, **, *** indicate significance at the 10%, 5%, and 1% level, respectively.

资源量对农业水资源压力较大的地区效果更显著,其产生的边际效应更大。

3 讨论

2004—2018年粮食主产区的粮食生产与农业水资源压力脱钩关系呈现阶段性特征。2004—2005年和2006—2007年,脱钩类型主要为扩张负脱钩,说明在前期粮食快速增产阶段忽视了水资源的合理高效利用,农业水资源压力普遍随粮食增产而增加,且增幅较大。2009—2010年和2011—2012年,研究区域粮食产量普遍增加的同时,农业水资源压力变化方向在南北地区呈现不一致的变动,北方粮食主产区的脱钩类型以绝对脱钩为主,一定程度上反映了高效节水农业发展、节水灌溉政策推行对北方地区农业水资源压力起到缓解作用,而南方粮食主产区由于节水意识不强、水资源浪费严重等原因导致农业水资源压力进一步增大。2015—2016年和2017—2018年,强负脱钩状态的省份范围进一步扩大,部分粮食主产省份在面临由粮食播种面积减少导致的粮食减产的同时,也面临着农业水资源压力增加的问题,脱钩状态有所恶化。粮食主产区在稳定粮食生产的同时应加强高效节水农业的发展,增强节水意识,杜绝水资源浪费现象,极力避免在粮食快速增产阶段以水资源过度利用为代价。

粮食生产水资源利用效率及其他变量对粮食主产区农业水资源压力的影响具有异质性。面板数据回归结果显示,粮食生产水资源利用效率、用电量等变量对粮食主产区的农业水资源压力具有显著的缓解作用,种植结构调整对部分省份农业水资源压力具有显著影响。粮食主产区应加强粮食生产过程中水资源的合理利用与管理,有效整合粮食生产投入要素,改善长期以来农业用水方式粗放的状况,不断提高粮食生产水资源利用效率,同时不断推动农业基础设施建设、提高机械化水平,并结合农业水资源压力阈值以及粮食产量目标,调整粮食种植结构,优化粮食主产区的生产布局。另外,粮食生产水资源利用效率的系数在0.1和0.9分位点处不显著,说明在农业水资源压力极小或极大的地区仅提升粮食生产水资源利用效率对于缓解农业水资源压力的效果不显著,如四川(农业水资源压力均值为0.215)和河北(农业水资源压力均值为2.959),前者由于水资源丰富,粮食生产水资源利用效率的提升对缓解其水资源压力的效果并不明显,而后者由于水资源严重匮乏,农业可

利用水资源量的伸缩空间极小。城镇化率和水资源充裕程度的回归系数绝对值在高分位点相对较大,边际效应随着农业水资源压力增大而呈增加趋势。故农业水资源压力较大的粮食主产省份应综合提高粮食生产水资源利用效率、强化节水技术与节水意识、优化水资源在各产业的分配,以改善粮食生产与农业水资源压力的脱钩状态。

4 结论

(1)整体上,北方粮食主产区农业水资源压力明显大于南方,粮食生产与农业水资源压力之间的矛盾较为严峻,尤其是河北、河南、山东,其农业水资源压力指数均大于1.5,处于水资源强不可持续利用状态。2004—2018年各省份的农业水资源压力指数变化幅度不大,但多数省份农业水资源压力指数呈现上升趋势,其中山东、河南增幅最大。

(2)2004—2018年,粮食主产区粮食生产与水资源压力的脱钩类型空间变化幅度较大,具有阶段性特征。2004—2005年、2006—2007年是粮食快速增产阶段,农业水资源压力增加明显,脱钩类型主要为扩张负脱钩;2009—2010年、2011—2012年北方和南方粮食主产区分别以绝对脱钩和扩张负脱钩为主;2015—2016年、2017—2018年处于强负脱钩状态的省份范围进一步扩大,不少粮食主产省份面临粮食产量减少与农业水资源压力增加的双重问题。

(3)我国粮食主产区的粮食生产水资源利用效率地区差异较明显,且各省粮食生产水资源利用效率在2004—2018年变动方向与幅度不同,与南方地区相比,北方粮食主产区粮食生产水资源利用效率值较低,但增幅更明显。

(4)模型回归结果显示,提高粮食生产水资源利用效率对缓解农业水资源压力具有显著作用,且调整粮食种植布局、提高农业基础设施水平、增强节水意识等,也可以有效缓解粮食生产与农业水资源压力之间的矛盾。

参考文献:

- [1] 郑家喜. 农业可持续发展:水资源的约束与对策[J]. 农业经济问题, 2000, 21(9): 30-33. ZHENG J X. Sustainable development of agriculture: Constraints and countermeasures of water resources[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2000, 21(9): 30-33.
- [2] 李曼, 陆迁, 乔丹. 技术认知、政府支持与农户节水灌溉技术采用——基于张掖甘州区的调查研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(12): 27-32. LI M, LU Q, QIAO D. Technological cognition, gov-

- ernment support and farmers' adoption of water-saving irrigation technology[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(12):27-32.
- [3] 徐依婷, 穆月英. 粮食生产水足迹动态演变及分解效应[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2020, 19(3):70-83. XU Y T, MU Y Y. Dynamic change and decomposition effects of water footprint in grain production[J]. *Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition)*, 2020, 19(3):70-83.
- [4] 孙侦, 贾绍凤, 严家宝, 等. 中国水土资源本底匹配状况研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(12):2057-2066. SUN Z, JIA S F, YAN J B, et al. Study on the matching pattern of water and potential arable land resources in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12):2057-2066.
- [5] 张红宇. 牢牢掌握粮食安全主动权[J]. 农业经济问题, 2021(1):14-18. ZHANG H Y. Holding the initiative on food security firmly[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2021(1):14-18.
- [6] 李颖明. 粮食主产区农业水资源可持续利用分析[J]. 中国农村经济, 2007(9):45-52. LI Y M. Analysis on sustainable utilization of agricultural water resources major grain-producing areas[J]. *Chinese Rural Economy*, 2007(9):45-52.
- [7] 刘聪. 中国粮食生产的水资源利用特征评价[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2017(4):22-29. LIU C. Evaluation on utilization of water resources of food production in China[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2017(4):22-29.
- [8] 黄丽, 王武林. 中亚五国粮食生产水足迹及水消耗量预测[J]. 经济地理, 2021, 41(4):118-126. HUANG L, WANG W L. Water footprint and water consumption prediction of food crop production in five central Asian countries[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(4):118-126.
- [9] 杨鑫, 穆月英. 中国粮食生产与水资源的时空匹配格局[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2019, 18(4):91-100. YANG X, MU Y Y. Spatial-temporal matching patterns of grain production and water resources[J]. *Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition)*, 2019, 18(4):91-100.
- [10] 李成宇, 张士强. 中国省际水-能源-粮食耦合协调度及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(1):120-128. LI C Y, ZHANG S Q. Chinese provincial water-energy-food coupling coordination degree and influencing factors research[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(1):120-128.
- [11] OECD. Indicators to measure decoupling of environmental pressures from economic growth[R]. Paris:OECD, 2002:4.
- [12] TAPIO P, BANISTER D, LUUKKANEN J, et al. Energy and transport in comparison: Immaterialisation, dematerialisation and decarbonisation in the EU15 between 1970 and 2000[J]. *Energy Policy*, 2007, 35(1):433-451.
- [13] 张玉梅, 乔娟. 都市农业发展与碳排放脱钩关系分析——基于脱钩理论的Tapio弹性分析法[J]. 经济问题, 2014(10):81-86. ZHANG Y M, QIAO J. Analysis of urban agriculture development and carbon emissions decoupling relationship based on the theory of decoupling about Tapio elastic analysis[J]. *On Economic Problems*, 2014(10):81-86.
- [14] 齐绍洲, 林岫, 王班班. 中部六省经济增长方式对区域碳排放的影响——基于Tapio脱钩模型、面板数据的滞后期工具变量法的研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5):59-66. QI S Z, LIN C, WANG B B. Impact of economic growth pattern of the six provinces of central China on regional carbon emission: Based on the Tapio model and lag instrumental variable analysis of panel data[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(5):59-66.
- [15] 潘竞虎, 张永年. 中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应[J]. 地理学报, 2021, 76(1):206-222. PAN J H, ZHANG Y N. Spatiotemporal patterns of energy carbon footprint and decoupling effect in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1):206-222.
- [16] 夏勇, 钟茂初. 经济发展与环境污染脱钩理论及EKC假说的关系——兼论中国地级城市的脱钩划分[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(10):8-16. XIA Y, ZHONG M C. Relationship between EKC hypothesis and the decoupling of environmental pollution from economic development: Based on China prefecture-level cities' decoupling partition[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(10):8-16.
- [17] 彭红松, 郭丽佳, 章锦河, 等. 区域经济增长与资源环境压力的关系研究进展[J]. 资源科学, 2020, 42(4):593-606. PENG H S, GUO L J, ZHANG J H, et al. Research progress and implication of the relationship between regional economic growth and resource-environmental pressure[J]. *Resources Science*, 2020, 42(4):593-606.
- [18] 李健, 王尧, 王颖. 京津冀区域经济发展与资源环境的脱钩状态及驱动因素[J]. 经济地理, 2019, 39(4):43-49. LI J, WANG Y, WANG Y. Decoupling analysis and influence factors between resource environment and economic growth in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(4):43-49.
- [19] ALSAYED A R M, ISA Z D, KUN S S, et al. Quantile regression to tackle the heterogeneity on the relationship between economic growth, energy consumption, and CO₂ emissions[J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2020, 25(2):251-258.
- [20] 陈柔, 何艳秋, 朱思宇, 等. 我国农业碳排放双重性及其与经济发展的协调性研究[J]. 软科学, 2020, 34(1):132-138. CHEN R, HE Y Q, ZHU S Y, et al. Duality of agricultural carbon emissions and coordination with economic development in China[J]. *Soft Science*, 2020, 34(1):132-138.
- [21] 吴兆丹, 张依, 吴兆磊, 等. 中国粮食主产区农作物生产广义用水经济效率时空演变及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(11):2763-2777. WU Z D, ZHANG Y, WU Z L, et al. Study on the spatio-temporal evolution and influencing factors of economic efficiency of generalized water use for crop production in China's major grain-producing area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(11):2763-2777.
- [22] 马剑锋, 佟金萍, 王慧敏, 等. 长江经济带农业用水全局技术效率的空间效应研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12):2757-2765. MA J F, TONG J P, WANG H M, et al. Research on spatial effect of agricultural water global technology efficiency of the Yangtze River economic belt[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(12):2757-2765.
- [23] 杨巍, 武荣伟, 王弘儒. 中国农业用水效率的分布格局与空间交互

- 影响:1998—2013年[J]. 数量经济技术经济研究, 2017, 34(2):72-88. YANG Q, WU R W, WANG H R. Regional disparities and spatial interaction of agricultural water use efficiency: 1998—2013[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2017, 34(2):72-88.
- [24] 于法稳. 粮食国际贸易对区域水资源可持续利用的影响[J]. 中国农村观察, 2010(4):54-62, 96. YU F W. Impact of international trade of grain on sustainable utilization of regional water resource in China[J]. *China Rural Survey*, 2010(4):54-62, 96.
- [25] 杨鑫, 穆月英. 灌溉水压力、供给弹性与粮食生产结构——基于变系数 Nerlove 模型[J]. 自然资源学报, 2020, 35(3):728-742. YANG X, MU Y Y. Irrigation water pressure, supply elasticity and grain production structure based on heterogeneous coefficient Nerlove model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3):728-742.
- [26] 常明, 陈思博, 马冰然, 等. 粮食水资源利用效率及影响因素分析: 基于中国省际面板数据的实证研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(2):145-151. CHANG M, CHEN S B, MA B R, et al. Analysis of water resources utilization efficiency and its affecting factors in grain production: An empirical research based on China's inter-provincial panel data[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(2):145-151.
- [27] 田红宇, 祝志勇. 中国粮食生产效率及影响因素分析——基于 DEA-Tobit 两步法研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(12):161-168. TIAN H Y, ZHU Z Y. Analysis of food production efficiency and its influencing factors in China: Verification based on Malmquist-DEA and Tobit Model[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(12):161-168.
- [28] 常明, 王西琴, 贾宝珍. 中国粮食作物灌溉用水效率时空特征及驱动因素——以稻谷、小麦、玉米为例[J]. 资源科学, 2019, 41(11):2032-2042. CHANG M, WANG X Q, JIA B Z. Driving factors and spatiotemporal differentiation of irrigation water use efficiency in China[J]. *Resources Science*, 2019, 41(11):2032-2042.
- [29] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12):6-12. LIU Y, WANG L, NI G H, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12):6-12.
- [30] 操信春, 刘喆, 吴梦洋, 等. 水足迹分析中国耕地水资源短缺时空格局及驱动机制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18):94-100. CAO X C, LIU Z, WU M Y, et al. Temporal-spatial distribution and driving mechanism of arable land water scarcity index in China from water footprint perspective[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(18):94-100.