

DOI: 10.12357/cjea.20230605

刘爽, 刘畅. 中国农业减污降碳协同效应及其影响机制研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(7): 1109–1121
LIU S, LIU C. Synergistic effect of agricultural pollution reduction and carbon reduction and its influence mechanism in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(7): 1109–1121

中国农业减污降碳协同效应及其影响机制研究^{*}

刘爽^{1,2}, 刘畅^{2**}

(1. 东北农业大学马克思主义学院 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学经济管理学院 哈尔滨 150030)

摘 要: 农业面源污染与农业碳排放是中国农业面临的重要环境问题。现有研究忽视了农业面源污染治理与农业碳减排之间的协同关系, 未探索农业减污降碳协同效应及其影响机制, 影响农业可持续发展。为此, 本文借鉴现有成果, 提出农业减污降碳协同效应概念, 基于 2007—2021 年中国 30 省份面板数据, 利用双固定效应回归模型、调节效应模型对农业减污降碳协同效应及其影响机制进行实证分析, 并讨论地区异质性。结果表明: 1) 农业减污降碳协同效应存在, 农业面源污染与农业碳排放存在显著的协同关系, 当农业面源污染减少时农业碳排放也将显著减少, 该结果进行稳健性检验和处置内生性后依然成立; 2) 农业化学物资消费结构对农业减污降碳协同效应产生显著负向调节作用, 农业化学物资使用效率与农业种植结构产生显著正向调节作用, 农业投资规模产生负向调节作用但不显著; 3) 北方地区农业减污降碳协同效应比南方地区更为显著, 农业化学物资消费结构与农业化学物资使用效率对北方地区农业减污降碳协同效应产生显著负向调节作用, 农业种植结构对北方地区和南方地区农业减污降碳协同效应产生显著正向调节作用。因此, 农业减污降碳协同效应存在。

关键词: 农业面源污染; 农业碳排放; 协同效应; 农业化学物资; 可持续发展

中图分类号: F323.7

Synergistic effect of agricultural pollution reduction and carbon reduction and its influence mechanism in China^{*}

LIU Shuang^{1,2}, LIU Chang^{2**}

(1. School of Marxism, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. School of Economics and Management, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Agricultural non-point source pollution and carbon emissions pose significant environmental challenges for China's agricultural sector. Previous studies have overlooked the synergistic relationship between controlling agricultural non-point source pollution and reducing carbon emissions. They also failed to investigate the combined effect of reducing agricultural pollution and carbon emissions as well as the mechanisms that influence this effect. This oversight has had an impact on the sustainable development of agriculture. This study empirically examined the synergistic effect of reducing agricultural pollution and carbon emissions using panel data collected from 30 Chinese provinces from 2007 to 2021. This study utilized a dual-fixed effect regression model and regulatory effect model to analyze the influencing mechanism of this synergistic effect. In addition, this study explored the regional heterogeneity of this phenomenon. The results show that: 1) a synergistic effect on agricultural pollution reduction and carbon reduction and a significant synergistic relationship between agricultural nonpoint source pollution and agricultural carbon emissions exist. When agricultural non-point source pollution is reduced, agricultural carbon emissions will also be significantly reduced, and this result is still valid after robustness test and endogeneity treatment; 2) the consumption structure of agricultural chemical materials have a significant

^{*} 2023 年度黑龙江省哲学社会科学研究规划项目 (23JYC273) 资助

^{**} 通信作者: 刘畅, 研究方向为农业经营主体、企业管理、数字经济。E-mail: 389203678@qq.com

刘爽, 研究方向为农业生态经济。E-mail: 2740237205@qq.com

收稿日期: 2023-10-19 接受日期: 2024-03-03

^{*} This study was supported by the Philosophy and Social Science Research Planning Project of Heilongjiang Province in 2023 (23JYC273).

^{**} Corresponding author, E-mail: 389203678@qq.com

Received Oct. 19, 2023; accepted Mar. 3, 2024

ant negative adjustment effect on the synergistic effect of agricultural pollution reduction and carbon reduction, the use efficiency of agricultural chemical materials has a significant positive adjustment effect on agricultural planting structure, and the agricultural investment scale has a negative adjustment effect but not significant; 3) the northern agricultural pollution reduction carbon synergistic effect is more significant than that of the southern region, agricultural chemical materials consumption structure and use efficiency of agricultural chemical materials of the northern agricultural pollution reduction carbon reduction synergistic effect produce significant negative regulation effect, agricultural planting structure has a significant positive regulating effect on the synergistic effect of agricultural pollution reduction, and carbon reduction in both northern and southern regions. Therefore, this paper presents several recommendations. 1) In the context of agricultural environmental pollution control, it is crucial to prioritize the issue of agricultural chemical materials and implement strategies to minimize their irrational usage. 2) Upholding the grain production threshold and fostering large-scale environmentally sustainable grain production is imperative. 3) Increasing investment in the agricultural sector and providing guidance for modernizing agricultural practices is imperative. 4) Implementing differentiated agricultural development strategies. Compared with other studies, the marginal contributions of this study are as follows: 1) it proposes the concept of the synergistic effect of agricultural pollution reduction and carbon reduction, analyzes the specific synergistic effect of agricultural pollution reduction and carbon reduction, and discusses the possibility of a synergistic solution between agricultural non-point source pollution and agricultural carbon emissions; 2) the mechanism of the synergistic effect of agricultural pollution reduction and carbon reduction is further discussed; 3) the synergistic effects of agricultural pollution and carbon reduction in different regions and their influencing mechanisms were analyzed.

Keywords: Agricultural non-point source pollution; Agricultural carbon emission; Synergistic effect; Agricultural chemical materials; Sustainable development

虽然农业碳排放只占碳排放总量的 10% 左右^[1], 但是, 考虑到中国巨大的碳排放总量, 农业碳排放量依然不容忽视^[2], 农业同样是碳减排的重要领域。此外, 中国农业还面临着严峻的面源污染问题^[3-4], 极大地阻碍了农业的可持续发展。因此, 农业碳排放和农业面源污染都是中国农业发展过程中不可忽视的重要环境问题。现有研究在分析工业领域和城市消费领域减污降碳问题时指出, 减污和降碳存在协同效应, 二者存在协调推进可能^[5-6]。那么, 农业领域的减污和降碳是否也存在协同效应? 农业减污降碳协同关系受到哪些机制的影响? 这些问题的回答可为农业可持续发展提供理论支持。

农业面源污染和农业碳排放作为农业环境问题的研究热点, 已有较多相关研究报道。农业面源污染是农业和农村生态环境所形成的大面积污染^[7], 主要特点是污染面积大、控制难度高、涉及面广^[8]。学界就农业面源污染的测度、时空分布、影响因素等问题进行了系统分析。农业面源污染主要来源于农业化学物资投入、畜禽养殖、水产养殖、农田固体废弃物和农村生活。其中, 农业化学物资是狭义农业的主要污染来源。不同研究中, 与农业面源污染相关的农业化学物资投入认定存在差异。一些研究仅考虑化肥这一项农业化学物资^[9-10], 有些研究则在化肥基础上将农药作为农业面源污染测度的基础^[11-13], 原因在于这两类化学物资易融入农业水体环境中而形成大面积污染。随着研究推进, 部分学者认为农膜同样是产生农业面源污染的基础指标, 农

膜污染同样会随着水体的流动而发生转移扩散^[14-18], 在对农业面源污染进行测度时将农膜作为基础指标纳入计算。在测度农业面源污染基础上, 学者们进一步就农业面源污染的时空分布进行了研究^[19-20]。此外, 现有研究还讨论了技术^[21]、农户情况^[22]、政策^[23]、农业生产条件^[24]、数字化发展^[25]等因素对农业面源污染的影响, 以期通过对影响因素的调整而降低农业面源污染。

碳排放同样是重要的农业环境问题, 现有研究就农业碳排放的来源与测度、时空分布规律、影响因素等进行了讨论。一些学者认为农业碳排放指农业活动中产生的 CO_2 , 其主要的来源为化肥、农药、农膜、农业灌溉、柴油使用、土地耕种, 因此在计算过程中将上述要素与碳排放系数相乘计算农业碳排放量^[26-27]。还有一些学者认为农业碳排放不仅仅包括 CO_2 , 还包括 CH_4 和 N_2O , 因此进一步将农作物生长过程纳入碳排放计算体系^[1,28]。在测度基础上, 学者们进一步讨论了农业碳排放的时间变化和空间分布。就时间变化而言, 部分学者认为农业碳排放呈现时间上呈现出整体下降特征^[29-30], 但也有一些学者认为农业碳排放呈上升状态^[31]。就空间分布来看, 章胜勇等^[32]分析指出中国农业碳排放呈“中心-外围”模式分布, 何艳秋等^[33]的研究发现中国农业碳排放强度省际差异大。学界同样深入分析了农业碳排放的影响因素, 重点分析了技术^[34]、农业产业聚集^[35]、农业服务^[36]、农业贸易^[37]、政策发展^[38]、数字化发展^[39]等因素对于农业碳排放的影响。

2022 年生态环境部等联合发布《减污降碳协同增效实施方案》, 提出“基于环境污染物和碳排放高度同根同源的特征推动减污降碳协同增效。”这为推进农业面源污染与农业碳排放问题协同解决提供了新思路。现有研究讨论了不同领域和不同层面的减污降碳效应^[5-6,40-42]。大气污染物治理和碳减排之所以可能存在协同效应, 其核心在于二者同根、同源、同过程等特性^[43], 而农业面源污染治理与农业碳减排(狭义农业,下同)同样存在着同根、同源等特点, 农业化肥、农药、农膜等化学物质使用是这两大环境问题的核心和根源, 且其产生的过程相互交织。因此, 农业面源污染治理和农业碳减排之间也存在协同效应, 即存在农业减污降碳协同效应。但当前围绕这一协同效应的研究较少。

为此, 基于 2007—2021 年中国 30 省(直辖市、自治区) 面板数据(中国港澳台和西藏自治区因农业发展情况与其他地区存在较大不同, 未纳入分析体系), 利用双固定效应回归模型、调节效应模型, 实证分析并严格检验农业减污降碳协同效应, 且讨论其影响机制和地区异质性, 以推进农业面源污染和农业碳排放问题的协同破解, 为农业可持续发展献言献策。边际贡献为: 1) 提出农业减污降碳协同效应概念, 分析具体的农业减污降碳协同效应; 2) 进一步讨论农业减污降碳协同效应的影响机制; 3) 分析不同地区的农业减污降碳协同效应及其影响机制。

1 理论探讨、研究方法与数据来源

1.1 理论探讨

现有研究中, 农业碳排放的来源主要包括化肥、

农药、农膜、农用柴油、灌溉、耕作等产生的 CO_2 , 及农作物生长过程中产生的 CH_4 和 N_2O 。农业面源污染计算则存在较大差异。化肥和农药作为农业面源污染的基础指标得到多数学者认可^[11-13]。但是, 在实践中, 农膜同样会产生农业污染, 且也会随着水体等产生扩散。本文参考现有研究设定^[14-17], 认为农膜同样为农业面源污染的来源(下文以农业化学物资代表化肥、农药、农膜 3 类农业物资)。

在农业生产经营过程中, 农业化学物资作为重要生产要素得到广泛应用。但由于过度使用, 使其流失扩散进入耕地周边的环境中, 从而污染农业环境, 产生农业面源污染。同时, 在这一过程中, 化肥等农业化学物资会分解产生 CO_2 、 N_2O 等温室气体, 加剧空气污染。可见农业化学物资既是农业面源污染的根源, 也是农业碳排放的碳源, 且其都在农业生产活动中产生污染。当采取措施减少农业化学物资应用而降低农业面源污染时, 该效应可能同时对农业碳排放产生作用, 二者之间存在着紧密联系。农业面源污染与农业碳排放关系如图 1 所示。

1.2 计量模型的构建

1.2.1 双固定效应回归模型

双固定效应回归模型同时控制了不随时间变化的个体特征及不随地区变化的空间特征, 使变量关系估计更准确。另外, 该模型已用于分析工业减污降碳协同效应^[5], 具有一定可靠性。

现有研究指出能源效率、能源消费结构、产业结构和投资规模是影响工业减污降碳协同效应的重要调节变量, 是其核心影响机制^[5]。将农业化学物资

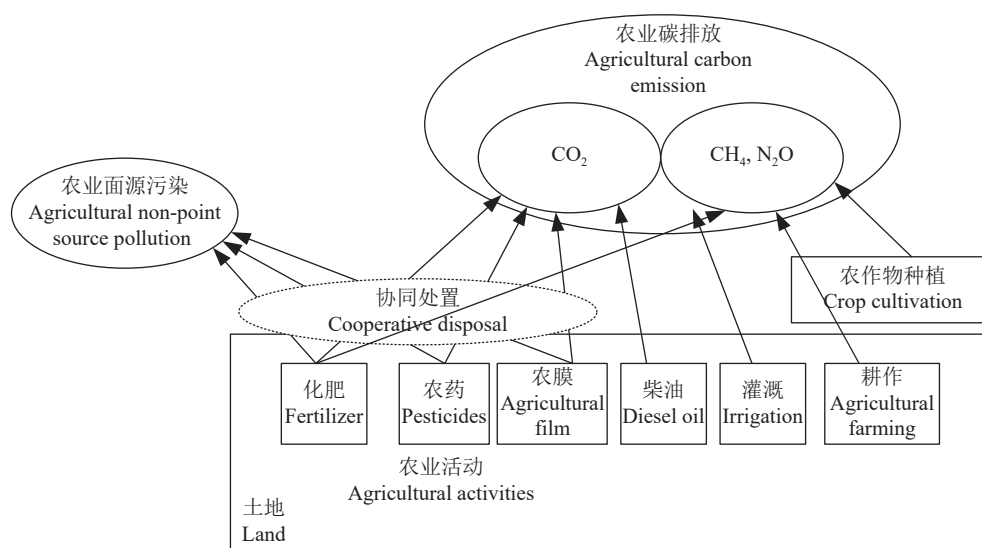


图 1 农业面源污染与农业碳排放关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the relationship between agricultural non-point source pollution and agricultural carbon emission

消费结构、农业种植结构、农业化学物资使用效率、农业投资规模等作为核心变量纳入分析模型。计量模型如下:

$$AC_{it} = \beta_0 + \beta_1 AP_{it} + \beta_2 AS_{it} + \beta_3 AI_{it} + \beta_4 AE_{it} + \beta_5 AZ_{it} + \gamma X_{it} + \eta_i + \mu_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中: it 表示第 i 地区第 t 时期, AC_{it} 为农业碳排放量, AP_{it} 为农业面源污染, AS_{it} 为农业化学物资消费结构, AI_{it} 为农业种植结构, AE_{it} 为农业化学物资使用效率, AZ_{it} 为农业投资规模, X_{it} 为控制变量, β_0 为截距项, $\beta_1, \dots, \beta_5$ 为农业面源污染等变量的系数, γ 为控制变量系数, η_i 为地区固定效应, μ_t 为时间固定效应, ε_{it} 为随机误差项。当 $\beta_1 > 0$ 时, 表明农业面源污染与农业碳排放之间具有同增同减特性, 当农业面源污染减少时, 农业碳排放也将降低, 二者存在协同效应。

1.2.2 调节效应模型

在农业减污降碳协同效应基准回归基础上, 进一步引入调节效应模型以分析农业减污降碳协同效应影响机制。式 (1) 中农业面源污染 AP_{it} 对农业碳排放量 AC_{it} 的影响为主效应, 即农业减污降碳协同效应, 表示当农业面源污染发生变动时农业碳排放量变化情况。主效应会因某种个体特征和环境条件而发生变化, 这种特征和条件就是调节变量。结合农业减污降碳协同效应实际, 将农业化学物资消费结构等 4 个变量作为调节变量。将调节变量与核心解释变量联合以构建交互项, 从而验证调节变量对于主效应的影响情况, 联合构建交互项的调节效应模型如下:

$$AC_{it} = \beta_0 + \beta_1 AP_{it} + \beta_2 AS_{it} + \beta_3 AI_{it} + \beta_4 AE_{it} + \beta_5 AZ_{it} + \varphi_1 AS_{it} \times AP_{it} + \varphi_2 AI_{it} \times AP_{it} + \varphi_3 AE_{it} \times AP_{it} + \varphi_4 AZ_{it} \times AP_{it} + \gamma X_{it} + \eta_i + \mu_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中: $AS_{it} \times AP_{it}$ 、 $AI_{it} \times AP_{it}$ 、 $AE_{it} \times AP_{it}$ 、 $AZ_{it} \times AP_{it}$ 表示农业化学物资消费结构等调节变量与农业面源污染的交互项; $\varphi_1 \sim \varphi_4$ 为交互项系数。具体分析时, 为减少多重共线性问题, 需要对农业面源污染和调节变量进行均值中心化处置。在实证研究中, 调节效应包括正向和负向两种, 而效应的识别主要是对比交互项系数的符号方向和显著性以及主效应系数的符号方向和显著性。一般情况下当主效应与交互项系数符合方向一致且都显著, 说明主效应与调节变量是互补作用, 主效应在调节变量中增强了; 反之, 则说明主效应与调节变量是替代效应。

1.3 变量设置

农业碳排放: 农业碳排放包括水稻 (*Oryza sativa*) 田的 CH_4 排放, 稻田和其他农作物 [春小麦 (*Tritic-*

um aestivum)、冬小麦、大豆 (*Glycine max*)、玉米 (*Zea mays*)、蔬菜、棉花 (*Gossypium* spp.) 和其他旱作物] 的 N_2O 排放以及肥料的 N_2O 排放, 化肥、农药、农膜、农用柴油和农业灌溉的 CO_2 排放。在计算时, 将 CH_4 、 N_2O 折合为 CO_2 。具体计算方法和参数设置参考研究 [1,44-45]。

农业面源污染: 参考现有研究^[44], 设定化肥、农药、农膜为农业面源污染来源, 农业面源污染总量为化肥污染量、农药污染量、农膜残留量总和, 化肥污染量=化肥施用量×化肥流失率, 农药与农膜的计算相似, 具体的流失率设置和计算过程参考研究 [44]。计算由农业化学物资产生的农业面源污染时主要采用 3 种方式: 1) 清单分析单元调查评估法, 核心思路为将农业化肥施用量折合为总氮 (TN)、总磷 (TP)^[9]; 2) 农业化学物资使用量直接加总^[12,15]; 3) 利用农业化学物资乘以其流失率, 利用其流失量作为污染物相加以测度农业面源污染^[45]。本文选择第 3 种方法, 因为第 3 种方法是综合考虑农业化学物资流失的比例后将其流失量相加, 更能反映各种农业化学物资真实造成的面源污染。这一方法的缺点是仅能反映出整体上农业面源污染的来源及其情况, 无法展示各种农业化学物资在相同重量下对土地的污染, 但由于本研究目的在于衡量总体上农业面源污染与农业碳排放之间的协同关系, 因此第 3 种方法更适合本研究。

农业化学物资消费结构、农业种植结构、农业化学物资使用效率、农业投资规模是重要的调节变量, 都会对农业面源污染和农业碳排放产生重要影响, 其具体计算如表 1 所示。

1.4 数据来源

研究时间为 2007—2021 年, 研究范围为中国 30 个省级行政区, 中国港澳台和西藏自治区因农业发展情况与其他地区存在较大不同, 未纳入分析体系。主要数据来源于《国家统计年鉴》、EPS 数据网等, 部分缺失数据用插值法补齐。

2 农业面源污染与农业碳排放演变

由图 2 可知, 2007—2021 年间, 农业面源污染 (化肥、农药的流失量和农膜残留量总和) 与农业碳排放 (CO_2 、 CH_4 、 N_2O) 都呈现出先增后减的变化趋势, 表示二者存在较为密切的关系, 其协同解决具有一定的现实基础。农业面源污染最高值出现在 2015 年, 农业碳排放最高值出现在 2017 年, 在达峰后二者都呈现逐步下降趋势。究其原因, 2015 年农业部 (现为农业农村部) 发布《关于打好农业面源污

表 1 农业减污降碳协同效应变量
Table 1 Variables of synergies effect of agricultural pollution reduction and carbon reduction

变量类型 Type of variable	变量名称 Variable name	测量方法 Measuring method	均值 Mean	标准差 Standard deviation
被解释变量 Explained variable	农业碳排放 Agricultural carbon emissions (t)	农业生产产生的CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O之和 Sum of CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O produced by agricultural production	2.21E+07	1.56E+07
解释变量 Explanatory variable	农业面源污染 Agricultural non-point source pollution (t)	化肥污染量、农药污染量、农膜残留量总和 Total amount of chemical fertilizer pollution, pesticide pollution and agricultural film residues	1.25E+06	9.50E+05
调节变量 Regulated variable	农业化学物资消费结构 Consumption structure of agricultural chemicals	化肥施用量/(化肥施用量+农药使用量+农膜使用量) Fertilizer application amount / (chemical fertilizer application amount + pesticide use amount + agricultural film use amount)	0.92	0.04
	农业种植结构 Agricultural planting structure	粮食播种面积/农作物播种面积 Grain sown area / crop sown area	0.65	0.14
	农业化学物资使用效率 Use efficiency of agricultural chemical materials (×10 ⁸ ¥t ⁻¹)	农业产值/(化肥施用量+农药使用量+农膜使用量) Agricultural output value / (fertilizer application amount + pesticide use amount + agricultural film use amount)	5.44E-04	1.96E-04
	农业投资规模 Scale of agricultural investment (×10 ⁸ ¥)	农林水事务支出 Expenditure on agriculture, forestry and water conservancy affairs	458.76	296.19
控制变量 Controlled variable	农业产值 Agricultural output value (×10 ⁸ ¥)	农业产值(不变价) Agricultural output value (unconstant price)	984.68	731.91
	农业聚集水平 Agricultural aggregation level	(地区农业产值/全国农业产值)/(地区生产总值/全国生产总值) (Regional agricultural output value / national agricultural output value) / (regional GDP / national GDP)	1.21	0.70
	地区产业结构 Regional industrial structure	第一产业增加值/地区生产总值 Added value of the primary industry / regional GDP	0.10	0.05
	创新与科技发展水平 Innovation and technology development level	国内专利申请授权数 Number of granted domestic patent applications	52 996.78	94 564.67
	生态环境规制 Regulation of ecological environment	环保节能支出/财政预算总支出 Expenditure on environmental protection and energy conservation / total fiscal budget expenditure	0.03	0.01
	受灾率 Disaster rate	农业受灾面积/农作物总播种面积 Agricultural affected area / total sown area of crops	0.20	0.33

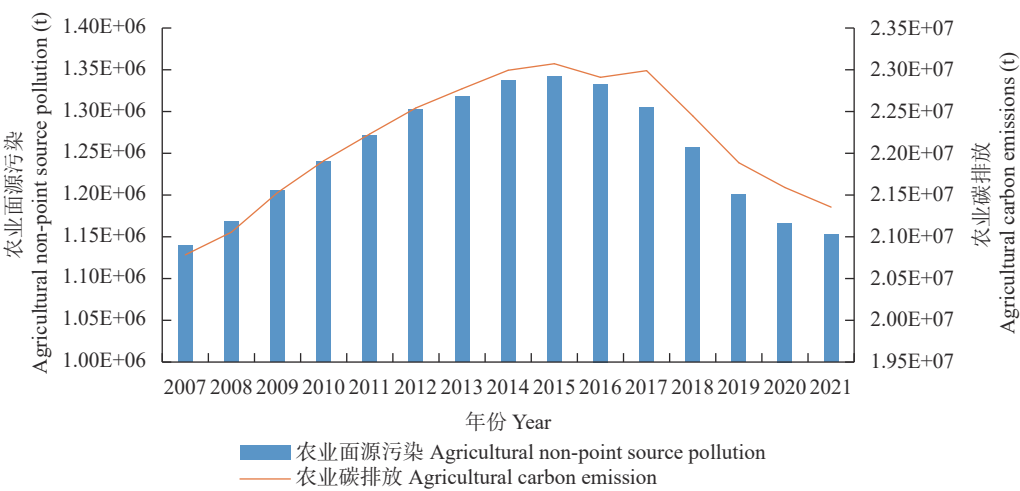


图 2 2007—2021 年农业面源污染与农业碳排放演变过程

Fig. 2 Evolution process of agricultural non-point source pollution and agricultural carbon emissions from 2007 to 2021

染防治攻坚战的实施意见》，开始推进农业面源污 农膜等化学物资的使用逐步减少，从而推进了农业 染治理，从该年开始，中国农业领域的化肥、农药、 面源污染与农业碳排放问题的协同改善。但是，需

要看到当前农业面源污染与农业碳排放仍然处于较高水平, 农业污染问题需要进一步解决, 因此探索农业减污降碳协同效应具有重要的现实价值。

3 实证分析

3.1 农业减污降碳协同效应分析

3.1.1 主效应分析

利用双固定效应回归模型对式 (1) 进行估计, 结果见表 2 模型 (1)。根据 R^2 可知, 模型整体拟合优度为 0.61, 具有一定可靠性。农业面源污染对农业碳排放的影响在 1% 的统计水平显著为正, 表明农业面源污染物减少的同时会显著影响农业碳排放, 两者存在同向变化的关系。

就其他解释变量来看, 农业化学物资消费结构在 10% 的统计水平显著为负, 表明化肥施用占农业化学物资消费总量比例上升有利于减少碳排放, 其原因在于相比农药和农膜, 同等重量化肥碳排放量更少。农业种植结构在 1% 统计水平显著为正, 表明粮食种植比例上升会增加农业碳排放, 其原因在于粮食作物虽使用较少农业化学物资, 但其在生长过程中相比其他作物产生更多碳排放。农业化学物资使用效率在 1% 统计水平显著为负, 表明农业化学物

资使用效率提升将显著减少农业碳排放。农业化学物资使用效率提升代表技术进步或耕作方式改进, 这将推进农业碳减排工作进行。农业投资规模在 1% 统计水平显著为正, 表明农业投资规模越大, 其所使用各种化学物质、柴油等碳源将增多, 农业碳排放越高。

3.1.2 稳健性分析

为保障上述主效应分析的稳健性, 对模型进行以下调整:

1) 调整控制变量: 表 2 模型 (2) 相比主效应模型删除了除农业面源污染外的全部变量, 模型 (3) 删除了控制变量, 其仍然使用双固定效应回归模型。

2) 调整研究模型: 表 2 模型 (4) 将双固定效应回归模型更改为一般的 OLS 回归模型, 模型 (5) 则改为地区固定效应的回归模型, 变量设置与模型 (1) 一致。

3) 调整研究地区: 表 2 模型 (6) 将北京从研究地区中剔除, 其余设置与模型 (1) 一致。

4) 调整研究时间: 表 2 模型 (7) 将研究时间调整为 2008—2021 年, 其余设置与模型 (1) 一致。

5) 处置内生性: 模型进一步使用滞后一期农业面源污染作为工具变量以替代核心解释变量的当期

表 2 农业减污降碳协同效应估计

Table 2 Estimates of synergies effect of agricultural pollution reduction and carbon reduction

	农业碳排放 Agricultural carbon emissions						
	模型(1) Model (1)	模型(2) Model (2)	模型(3) Model (3)	模型(4) Model (4)	模型(5) Model (5)	模型(6) Model (6)	模型(7) Model (7)
农业面源污染 Agricultural non-point source pollution	0.62*** (0.05)	0.77*** (0.04)	0.73*** (0.05)	1.01*** (0.12)	0.63*** (0.04)	0.62*** (0.05)	0.58*** (0.05)
农业化学物资消费结构 Consumption structure of agricultural chemicals	-0.04* (0.03)		-0.07*** (0.02)	-0.04 (0.05)	-0.04* (0.02)	-0.05** (0.03)	-0.05** (0.03)
农业种植结构 Agricultural planting structure	0.07*** (0.02)		0.03 (0.02)	-0.01 (0.04)	0.07*** (0.02)	0.07*** (0.02)	0.08*** (0.02)
农业化学物资使用效率 Use efficiency of agricultural chemical materials	-0.07*** (0.02)		-0.07*** (0.02)	-0.28*** (0.08)	-0.06*** (0.02)	-0.07*** (0.02)	-0.06*** (0.02)
农业投资规模 Scale of agricultural investment	0.09*** (0.02)		0.03** (0.01)	0.25*** (0.06)	0.09*** (0.01)	0.09*** (0.02)	0.10*** (0.02)
控制变量 Controlled variable	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
常数 Constant	0.29*** (0.03)	0.21*** (0.01)	0.27*** (0.03)	0.20*** (0.05)	0.29*** (0.03)	0.31*** (0.03)	0.31*** (0.03)
观测值 Observations	450	450	450	450	450	435	420
R^2	0.61	0.55	0.57	0.76	0.61	0.61	0.58
地区固定效应 Regional fixed effect	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes
时间固定效应 Time fixed effect	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes
地区数量 Number of area	30	30	30		30	29	30

、**和*分别表示1%、5%和10%的显著性水平, 括号内为标准误差。, ** and * indicate significance levels of 1%, 5% and 10%, respectively, with standard errors in parentheses.

农业面源污染, 以处置内生性问题, 工具变量模型估计结果见表 3。

综合表 2 模型 (2)-(7) 和表 3 结果可知, 农业面源污染对农业碳排放影响持续显著为正, 表明农业减污降碳协同效应具有一定稳健性。

3.2 农业减污降碳协同效应影响机制

3.2.1 调节效应分析

利用调节效应模型估算各变量对农业减污降碳协同效应调节作用, 结果见表 4 模型 (1)。农业化学物资消费结构、农业种植结构、农业化学物资使用

表 3 工具变量模型估计结果

Table 3 The instrumental variable model estimation results

	农业面源污染 Agricultural widespread pollution	农业碳排放 Agricultural carbon emissions
农业面源污染滞后一期(工具变量) Agricultural non-point source pollution lag phase one (tool variable)	0.98*** (0.02)	0.57*** (0.05)
控制变量 Controlled variable	Yes	Yes
地区固定效应 Regional fixed effect	Yes	Yes
时间固定效应 Time fixed effect	Yes	Yes

表 4 农业减污降碳协同效应影响机制分析结果

Table 4 Results of synergistic mechanism of agricultural pollution reduction and carbon reduction

	农业碳排放 Agricultural carbon emissions					
	模型(1) Model (1)	模型(2) Model (2)	模型(3) Model (3)	模型(4) Model (4)	模型(5) Model (5)	模型(6) Model (6)
农业面源污染 Agricultural non-point source pollution	2.86*** (0.83)	0.80*** (0.08)	37.52*** (2.60)	2.76*** (0.80)	2.86*** (0.85)	2.47*** (0.82)
农业化学物资消费结构 Consumption structure of agricultural chemicals	-0.29*** (0.05)	-0.24*** (0.04)	-1.45*** (0.11)	-0.29*** (0.05)	-0.29*** (0.05)	-0.31*** (0.05)
农业种植结构 Agricultural planting structure	0.12*** (0.03)	0.11*** (0.02)	0.03 (0.03)	0.12*** (0.02)	0.12*** (0.03)	0.14*** (0.03)
农业化学物资使用效率 Use efficiency of agricultural chemical materials	1.22** (0.49)	-0.07* (0.04)	21.16*** (1.53)	1.15** (0.47)	1.22** (0.50)	1.01** (0.49)
农业投资规模 Scale of agricultural investment	0.08*** (0.02)	0.06*** (0.02)	0.24*** (0.05)	0.07*** (0.01)	0.08*** (0.02)	0.09*** (0.02)
农业化学物资消费结构×农业面源污染 Consumption structure of agricultural chemicals × agricultural non-point source pollution	-0.27*** (0.04)	-0.23*** (0.04)	-1.08*** (0.09)	-0.27*** (0.04)	-0.27*** (0.05)	-0.29*** (0.04)
农业种植结构×农业面源污染 Agricultural planting structure×agricultural non-point source pollution	0.07*** (0.02)	0.06*** (0.02)	0.04 (0.05)	0.06*** (0.02)	0.07*** (0.02)	0.08*** (0.02)
农业化学物资使用效率×农业面源污染 Use efficiency of agricultural chemical materials × agricultural non-point source pollution	1.28** (0.51)	-0.05 (0.04)	22.13*** (1.58)	1.22** (0.49)	1.28** (0.52)	1.05** (0.50)
农业投资规模×农业面源污染 Scale of agricultural investment × agricultural non-point source pollution	-0.04 (0.02)	-0.04 (0.02)	-0.44*** (0.07)	-0.03 (0.02)	-0.04 (0.03)	-0.03 (0.03)
控制变量 Controlled variable	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes
常数 Constant	-0.75 (0.46)	0.43*** (0.05)	-19.38*** (1.41)	-0.70 (0.44)	-0.75 (0.47)	-0.52 (0.46)
观测值 Observations	450	450	450	450	435	420
R ²	0.64	0.61	0.85	0.64	0.62	0.63
地区固定效应 Regional fixed effect	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes
时间固定效应 Time fixed effect	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes
地区数量 Number of area	30	30		30	30	30

效率与农业面源污染的交互项均显著,表明 3 个因素对农业减污降碳协同效应产生显著调节作用。

就结构因素来看,农业化学物资消费结构对农业减污降碳协同效应产生负向调节作用,化肥使用比例的提高在其他因素不变的情况下会减少农业碳排放,抑制农业减污降碳协同效应实现。

农业种植结构对农业减污降碳协同效应产生正向调节作用,表明粮食作物种植比重上升能够提升农业减污降碳协同效应。其原因在于粮食作物种植相比非粮食作物种植更强调规模化生产和技术支持,农业化学物资使用相对较少,更依靠农业机械等设备和先进技术的支持。以化肥为例,根据现有研究^[46]和《全国农产品成本收益汇编》可知,水果、蔬菜、棉花等农作物的单位面积化肥施用量要远高于谷物等粮食作物,这表明粮食种植比例上升后化肥等农业化学物资使用可能减少。当粮食种植比例增加时,农业化学物资使用减少,农业领域的减污降碳效应增强。

农业化学物资使用效率与农业面源污染交互项显著为正,说明农业化学物资使用效率提升强化了全国样本下的农业减污降碳协同效应。农业化学物资使用效率提高是在化学物资消耗规模不变的情况下获取更大的经济效益,从根本上减少农业化学物资消耗,促进农业领域的减污降碳。

农业投资规模与农业面源污染的交互项为负但不显著,说明农业投资规模的扩大可能降低农业减污降碳协同效应。

3.2.2 调节效应稳健性分析

为了就上述调节效应分析的稳健性进行检验,对模型进行以下调整:

1) 调整控制变量:表 4 模型 (2) 相比模型 (1) 删除了控制变量,仍使用调节效应模型。

2) 调整研究模型:表 4 模型 (3) 将调节效应模型所使用的双固定效应回归模型更改为一般的 OLS 回归模型,模型 (4) 则改为地区固定效应回归模型。

3) 调整研究地区:表 4 模型 (5) 将北京从研究地区中剔除,其余设置与表 4 模型 (1) 一致。

4) 调整研究时间:表 4 模型 (6) 将研究时间调整为 2008—2021 年,其余设置与表 4 模型 (1) 一致。

整体而言,表 4 模型 (2) 到模型 (6) 中多数变量在显著时与模型 (1) 的变量较为相似,可见调节效应分析具有一定的稳健性。

3.2.3 区域异质性分析

将 30 个省份划分为南北地区分别就其农业减污

降碳协同效应与影响机制进行分析,结果如表 5 所示。其中,北方地区包括:北京、天津、河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、山东、河南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆;南方地区包括:上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西、海南、重庆、四川、贵州、云南。模型 (1)、(2) 分别利用双固定效应回归模型和调节效应模型分析北方地区农业减污降碳协同效应及其影响机制;模型 (3)、(4) 则使用相同模型分析南方地区农业减污降碳协同效应及其影响机制。

由表 5 模型 (1)、(3) 可知北方和南方地区农业面源污染对农业碳排放的影响在 1% 的统计水平显著为正,表明农业减污降碳协同效应存在。从系数而言,北方地区农业减污降碳协同效应更为显著,原因在于北方地区农业生产规模更大。

由表 5 模型 (2) 可知,农业化学物资消费结构与农业化学物资使用效率对北方地区农业减污降碳协同效应产生显著负向调节作用。当化肥使用比例增加时,北方地区农业减污降碳协同效应将受到抑制。农业化学物资使用效率提升,使得北方地区农业降污减碳协同效应受到抑制。农业种植结构对北方地区农业减污降碳协同效应产生显著正向调节作用,当粮食种植比例增加时,北方地区农业减污降碳协同效应将提升。

由表 5 模型 (4) 可知,农业种植结构对南方地区农业减污降碳协同效应产生显著正向调节作用。南方地区粮食种植比例增加时,农业减污降碳效应将得到提升。

3.2.4 影响机制总结

整体而言,农业减污降碳效应存在且显著,且该效应在北方地区更为显著。就全国范围而言,农业化学物资消费结构对农业减污降碳协同效应产生显著负向调节作用,农业化学物资使用效率与农业种植结构则产生显著正向调节作用。就北方地区而言,农业化学物资消费结构与农业化学物资使用效率对农业减污降碳协同效应产生显著负向调节作用,农业种植结构产生显著正向调节作用。就南方地区而言,农业种植结构对农业减污降碳协同效应产生显著正向调节作用。整体影响机制如图 3 所示。

4 讨论

农业面源污染与农业碳排放是农业领域两大环境热点问题,但是现有研究并未考虑两者间存在的协同关系,忽视了农业面源污染和农业碳排放的协

表 5 农业降污减碳协同效应影响机制的异质性结果
Table 5 Heterogeneity results of the synergistic mechanisms of pollution reduction and carbon reduction in agriculture

	农业碳排放 Agricultural carbon emissions			
	模型(1) Model (1)	模型(2) Model (2)	模型(3) Model (3)	模型(4) Model (4)
农业面源污染 Agricultural non-point source pollution	0.95*** (0.04)	-0.76 (0.64)	0.32*** (0.11)	3.30* (1.98)
农业化学物资消费结构 Consumption structure of agricultural chemicals	-0.09*** (0.02)	-0.16*** (0.03)	0.22*** (0.07)	0.21* (0.12)
农业种植结构 Agricultural planting structure	-0.01 (0.02)	-0.01 (0.02)	0.22*** (0.05)	0.22*** (0.05)
农业化学物资使用效率 Use efficiency of agricultural chemical materials	-0.04* (0.02)	-1.06*** (0.38)	-0.09** (0.04)	1.58 (1.18)
农业投资规模 Scale of agricultural investment	-0.02 (0.02)	-0.03* (0.02)	0.02 (0.03)	0.07** (0.03)
农业化学物资消费结构×农业面源污染 Consumption structure of agricultural chemicals × agricultural non-point source pollution		-0.13*** (0.03)		0.18 (0.11)
农业种植结构×农业面源污染 Agricultural planting structure × agricultural non-point source pollution		0.03* (0.02)		0.23*** (0.04)
农业化学物资使用效率×农业面源污染 Use efficiency of agricultural chemical materials × agricultural non-point source pollution		-1.09*** (0.39)		1.80 (1.19)
农业投资规模×农业面源污染 Scale of agricultural investment × agricultural non-point source pollution		0.03 (0.02)		-0.03 (0.05)
控制变量 Controlled variable	Yes	Yes	Yes	Yes
常数 Constant	0.12*** (0.02)	1.21*** (0.35)	0.14 (0.09)	-1.74 (1.06)
观测值 Observations	225	225	225	225
R ²	0.91	0.92	0.53	0.61
地区固定效应 Regional fixed effect	Yes	Yes	Yes	Yes
时间固定效应 Time fixed effect	Yes	Yes	Yes	Yes
地区数量 Number of area	15	15	15	15
地区 Region	北方地区 Northern region		南方地区 Southern region	

同解决。本研究提出农业减污降碳协同效应概念,并验证其存在性,且进一步讨论影响机制和地区异质性。

本研究分析发现 2007—2021 年间农业面源污染与农业碳排放呈先升后降的趋势,这与已有研究^[1,29]结果相似,表明核心指标测量较为可靠,其趋势转变的原因中,国家政策发挥了重要作用。

分析发现化肥在农业化学物资使用结构中占比上升会减少农业碳排放,这是由于化肥的碳排放系数相对较低,但这并非主张农业生产过程中多用化

肥,而是在强调碳排放限制时,化肥对碳排放的贡献相对于同等重量的农药、农膜要少。因此,在农业生产过程中,要重视化肥、农药、农膜的合理配置使用。另外,农业投资规模的扩大会加大碳排放,这并不意味着农业投资规模扩大是错误的,只是由于当前农业投资并未实现合理利用,且其环保导向不清晰,才加剧了环境问题。

就区域异质性而言,北方地区减污降碳协同效应系数更大,表明北方地区基于减少农业化学物资以协同实现农业减污降碳目标潜力更大。就影响机

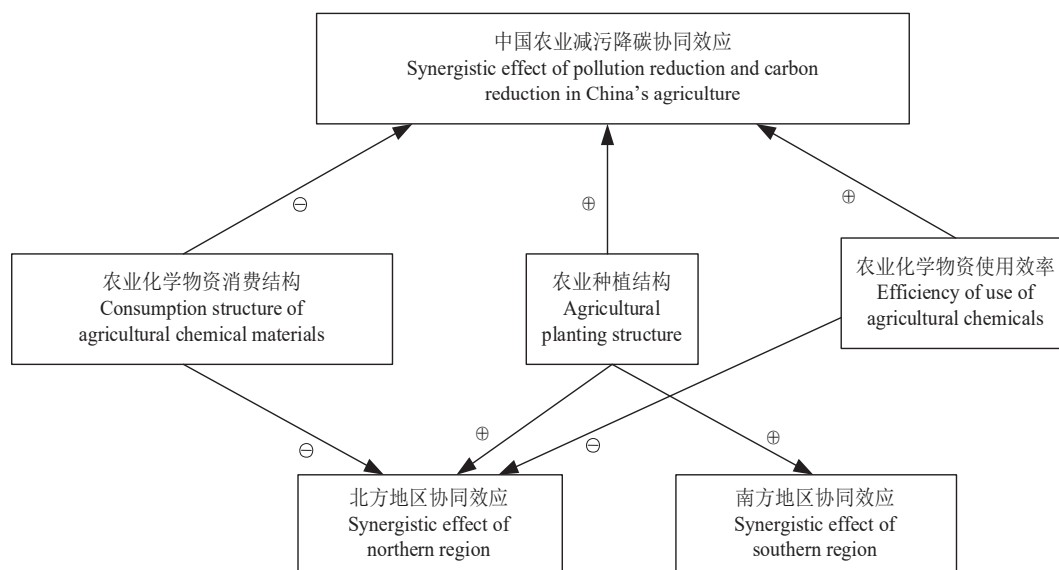


图 3 农业减污降碳效应影响机制示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the influence mechanism of synergistic effect of agricultural pollution reduction and carbon reduction

制差异来看,北方地区比南方地区更多使用农业化学物资,因此农业化学物资消费结构的影响更为显著。

此外,本研究仍然存在一些问题有待进一步分析:1) 仅仅讨论了狭义农业的减污降碳协同效应,这一效应在广义农业中是否存在,这仍然有待更深度讨论;2) 本研究分析的是宏观面板数据,这一效应在微观层面是否存在,这需要结合微观调研数据进行分析;3) 这一效应是否存在更为丰富的特性,如门槛特征、空间溢出特征等,也需要进一步研究;4) 本研究在分析农业面源污染时,综合现有研究选择了一种较为全面且科学的方法测度农业面源污染的总体情况,但并没有有效地反映出单位农业化学物资造成的农业面源污染,这也将是未来的重要研究方向。

5 结论与建议

农业减污降碳协同效应分析为农业可持续发展提供理论支持。基于 2007—2021 年中国 30 省份面板数据,就农业减污降碳协同效应及其影响机制进行实证分析,讨论其地区异质性。发现:

1) 农业减污降碳协同效应存在。农业面源污染治理与农业碳减排存在显著的协同关系,当农业面源污染减少时,农业碳排放也将显著减少,该结果进行稳健性检验和处置内生性后依然成立。

2) 基于全国的农业减污降碳协同效应影响机制分析发现,农业化学物资消费结构对农业减污降碳协同效应产生显著负向调节作用,而农业化学物资使用效率则产生显著正向调节作用,农业种植规模产生显著正向调节作用,农业投资规模产生不显著

的负向调节作用。

3) 农业减污降碳协同效应影响机制存在异质性。北方与南方地区都存在显著的农业减污降碳协同效应,但是北方地区更为显著。农业化学物资消费结构与农业化学物资使用效率对北方地区农业减污降碳协同效应产生显著负向调节作用。农业种植结构对北方和南方地区农业减污降碳协同效应均产生显著正向调节作用。

基于上述结论,为推进农业可持续发展,提出以下建议:

1) 在农业环境污染治理过程中要更加重视农业化学物资问题,采取积极措施,减少农业化学物资的不合理使用。建议以农业化学物资减量为核心,发挥农业减污降碳协同效应,推进两大农业环境问题的协同解决。强化农业化学物资科学使用技术研发推广,推进测土施肥、科学用药、合理用膜,提升农业化学物资使用效率,减少农业生产中的农业化学物资使用。此外,建议重视推进有机肥应用,合理减少农药、农膜使用比例。

2) 坚持粮食底线不动摇,推进粮食生产规模化、绿色化。农业种植比重是农业减污降碳协同效应重要调节变量,粮食种植比重上升有利于降低农业化学物资应用影响,减少农业面源污染和农业碳排放。粮食生产事关国家安全,建议进一步压实粮食责任,推进各地区强化粮食生产种植技术研发推广,推进粮食生产规模化、机械化、信息化,提升粮食生产效率,减少粮食生产过程化学物资应用,构建更多依靠技术、设备、信息的绿色粮食生产体系。

3) 扩大农业投资, 引导农业现代化发展。分析显示农业投资规模扩大会增加碳排放, 并可能抑制减污降碳协同效应, 但其只是由于当前农业投资不合理。必要的农业投资是农业高质量发展的基础。建议在国家财政资金支持基础上, 进一步调动社会资源, 构建多元化农业投资体系, 为农业发展提供丰富资金支持。在投资方向上, 坚持稳产增产与绿色发展并重, 加大农业数字化技术等先进技术投资, 以技术创新促进农业现代化。

4) 实施差异化的农业发展策略。北方地区要减少农业化学物资应用, 强化农业技术支持, 提升农业生产机械化、信息化水平, 依靠先进的绿色生产技术以促进农业发展。南方地区同样要积极推进农业机械化、信息化发展以减少化学物资使用, 同时要进一步优化农业种植体系, 推动农业高质量发展。

参考文献 References

- [1] 吉雪强, 李卓群, 张跃松. 农地流转对农业碳排放的影响及空间特性[J]. 资源科学, 2023, 45(1): 77-90
JI X Q, LI Z Q, ZHANG Y S. Influence of rural land transfer on agricultural carbon emissions and its spatial characteristics[J]. Resources Science, 2023, 45(1): 77-90
- [2] 赵敏娟, 石锐, 姚柳杨. 中国农业碳中和目标分析与实现路径[J]. 农业经济问题, 2022, 43(9): 24-34
ZHAO M J, SHI R, YAO L Y. Analysis on the goals and paths of carbon neutral agriculture in China[J]. Issues in Agricultural Economy, 2022, 43(9): 24-34
- [3] 丘雯文, 钟涨宝, 原春辉, 等. 中国农业面源污染排放的空间差异及其动态演变[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(1): 152-163
QIU W W, ZHONG Z B, YUAN C H, et al. Spatial differences and dynamic evolution of agricultural non-point source pollution in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(1): 152-163
- [4] 马军旗, 乐章. 中国农业面源污染的空间差异与影响因素分析[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(6): 1137-1145
MA J Q, YUE Z. The analysis of the spatial difference and its influencing factors of agricultural non-point source pollution in China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(6): 1137-1145
- [5] 陈晓红, 张嘉敏, 唐湘博. 中国工业减污降碳协同效应及其影响机制[J]. 资源科学, 2022, 44(12): 2387-2398
CHEN X H, ZHANG J M, TANG X B. Synergistic effect of industrial air pollution and carbon emission reduction in China and influencing mechanism[J]. Resources Science, 2022, 44(12): 2387-2398
- [6] 谭琦璐, 郭敏敏. 城市能源消费侧减污降碳协同分类施策路径——基于我国102个地级市数据的聚类分析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(S1): 336-346
TAN Q L, GUO M X. Collaborative classification policy path of pollution reduction and carbon reduction on urban energy consumption side—cluster analysis based on the data of 102 prefecture-level cities in China[J]. China Environmental Science, 2023, 43(S1): 336-346
- [7] 梁流涛, 曲福田, 冯淑怡. 经济发展与农业面源污染: 分解模型与实证研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(10): 1369-1374
LIANG L T, QU F T, FENG S Y. Economic development and agricultural non-point source pollution: decomposition model and empirical analysis[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(10): 1369-1374
- [8] 耿言虎, 夏涛. 农业面源污染的“类点源化治理”[J]. 南京工业大学学报(社会科学版), 2021, 20(6): 73-84, 112
GENG Y H, XIA T. “Quasi Point Source Governance” of agricultural non-point source pollution[J]. Journal of Nanjing Tech University (Social Science Edition), 2021, 20(6): 73-84, 112
- [9] 葛继红, 周曙东. 农业面源污染的经济影响因素分析——基于1978—2009年的江苏省数据[J]. 中国农村经济, 2011(5): 72-81
GE J H, ZHOU S D. Analysis on the economic influencing factors of agricultural non-point source pollution—Based on the data of Jiangsu Province from 1978 to 2009[J]. Chinese Rural Economy, 2011(5): 72-81
- [10] 金书秦, 武岩. 农业面源是水体污染的首要原因吗? ——基于淮河流域数据的检验[J]. 中国农村经济, 2014(9): 71-81
JIN S Q, WU Y. Is agricultural non-point source the primary cause of water pollution?—Based on the test of Huaihe River Basin data[J]. Chinese Rural Economy, 2014(9): 71-81
- [11] 秦天, 彭珏, 邓宗兵, 等. 环境分权、环境规制对农业面源污染的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(2): 61-70
QIN T, PENG J, DENG Z B, et al. Environmental decentralization, environmental regulation and agricultural non-point source pollution[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(2): 61-70
- [12] 陈俊聪, 王怀明. 农业保险与农业面源污染: 影响因素及其度量——基于联立方程组模型的情景模拟[J]. 上海财经大学学报, 2015, 17(5): 34-43, 56
CHEN J C, WANG H M. Agricultural insurance and agricultural non-point source pollution: influencing factors and their measurement—Scenario simulation based on simultaneous equations model[J]. Journal of Shanghai University of Finance and Economics, 2015, 17(5): 34-43, 56
- [13] 李海鹏, 张俊飏. 中国农业面源污染与经济发展关系的实证研究[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(6): 585-590
LI H P, ZHANG J B. An empirical test on the “EKC” relationship between the agricultural non-point source pollution and economic development in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(6): 585-590
- [14] 李秀芬, 朱金兆, 顾晓君, 等. 农业面源污染现状与防治进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(4): 81-84
LI X F, ZHU J Z, GU X J, et al. Current situation and control of agricultural non-point source pollution[J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(4): 81-84
- [15] 姜松, 周洁, 邱爽. 适度规模经营是否能抑制农业面源污染——基于动态门槛面板模型的实证[J]. 农业技术经济, 2021(7):

- 33–48
JIANG S, ZHOU J, QIU S. Can appropriate scale operation restrain agricultural non-point source pollution?—Empirical study based on dynamic threshold panel model[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2021(7): 33–48
- [16] 马进. 农业面源污染的经济影响因素研究——基于贸易开放视角[J]. *东岳论丛*, 2023, 44(6): 83–94
MA J. Study on economic influencing factors of agricultural non-point source pollution—Based on the perspective of trade openness[J]. *Dongyue Tribune*, 2023, 44(6): 83–94
- [17] 于骥, 蒲实, 周灵. 四川省农业面源污染与农业增长的实证分析[J]. *农村经济*, 2016(9): 56–60
YU J, PU S, ZHOU L. Empirical analysis of agricultural non-point source pollution and agricultural growth in Sichuan Province[J]. *Rural Economy*, 2016(9): 56–60
- [18] 尚杰, 石锐, 张滨. 农业面源污染与农业经济增长关系的演化特征与动态解析[J]. *农村经济*, 2019(9): 132–139
SHANG J, SHI R, ZHANG B. Evolutionary characteristics and dynamic analysis of the relationship between agricultural non-point source pollution and agricultural economic growth[J]. *Rural Economy*, 2019(9): 132–139
- [19] 杨骞, 王弘儒, 秦文晋. 中国农业面源污染的地区差异及分布动态: 2001—2015[J]. *山东财经大学学报*, 2017, 29(5): 1–13
YANG Q, WANG H R, QIN W J. Regional disparity and distributional dynamics of China agricultural NPS: from 2001 to 2015[J]. *Journal of Shandong University of Finance and Economics*, 2017, 29(5): 1–13
- [20] 丘雯文, 钟涨宝, 李兆亮, 等. 中国农业面源污染排放格局的时空特征[J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(1): 26–34
QIU W W, ZHONG Z B, LI Z L, et al. Spatial-temporal variations of agricultural non-point source pollution in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(1): 26–34
- [21] YI X S, LIN D X, LI J H, et al. Ecological treatment technology for agricultural non-point source pollution in remote rural areas of China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 40075–40087
- [22] 夏秋, 李丹, 周宏. 农户兼业对农业面源污染的影响研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(12): 131–138
XIA Q, LI D, ZHOU H. Study on the influence of farmers' concurrent business behavior on agricultural non-point source pollution[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(12): 131–138
- [23] 张可, 聂阳剑. 水环境政策对农业增长与面源污染影响的实证分析[J]. *统计与决策*, 2017(14): 118–121
ZHANG K, NIE Y J. Empirical analysis of the influence of water environment policy on agricultural growth and non-point source pollution[J]. *Statistics & Decision*, 2017(14): 118–121
- [24] 龙云, 任力. 农地流转对农业面源污染的影响——基于农户行为视角[J]. *经济学家*, 2016(8): 81–87
LONG Y, REN L. The impact of farmland circulation on agricultural non-point source pollution—From the perspective of farmers' behavior[J]. *Economist*, 2016(8): 81–87
- [25] LIN Q H, CHENG Q, ZHONG J F, et al. Can digital financial inclusion help reduce agricultural non-point source pollution? — an empirical analysis from China[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 1074992
- [26] 何艳秋, 戴小文. 中国农业碳排放驱动因素的时空特征研究[J]. *资源科学*, 2016, 38(9): 1780–1790
HE Y Q, DAI X W. Phase characteristics and regional differences in agriculture carbon emissions in China[J]. *Resources Science*, 2016, 38(9): 1780–1790
- [27] 陈银娥, 陈薇. 农业机械化、产业升级与农业碳排放关系研究——基于动态面板数据模型的经验分析[J]. *农业技术经济*, 2018(5): 122–133
CHEN Y E, CHEN W. A study on the relationship among agricultural mechanization, industrial upgrading and agricultural carbon emission—The empirical research based on dynamic panel data model[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2018(5): 122–133
- [28] 田云, 张银岭. 中国农业碳排放减排成效评估、目标重构与路径优化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(12): 1–7
TIAN Y, ZHANG Y L. Research on effectiveness evaluation, target reconstruction and path optimization of agricultural carbon emission reduction in China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(12): 1–7
- [29] 田云, 尹恣昊. 中国农业碳排放再测算: 基本现状、动态演进及空间溢出效应[J]. *中国农村经济*, 2022(3): 104–127
TIAN Y, YIN M H. Re-evaluation of China's agricultural carbon emissions: basic status, dynamic evolution and spatial spillover effects[J]. *Chinese Rural Economy*, 2022(3): 104–127
- [30] 夏四友, 赵媛, 许昕, 等. 近 20 年来中国农业碳排放强度区域差异、时空格局及动态演化[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(3): 596–608
XIA S Y, ZHAO Y, XU X, et al. Regional inequality, spatial-temporal pattern and dynamic evolution of carbon emission intensity from agriculture in China in the period of 1997–2016[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(3): 596–608
- [31] WEN S B, HU Y X, LIU H M. Measurement and spatial-temporal characteristics of agricultural carbon emission in China: an internal structural perspective[J]. *Agriculture*, 2022, 12(11): 1749
- [32] 章胜勇, 尹朝静, 贺亚亚, 等. 中国农业碳排放的空间分异与动态演进——基于空间和非参数估计方法的实证研究[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(3): 1356–1363
ZHANG S Y, YIN C J, HE Y Y, et al. Spatial differentiation and dynamic evolution of agricultural carbon emission in China—Empirical research based on spatial and non-parametric estimation methods[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(3): 1356–1363
- [33] 何艳秋, 陈柔, 吴昊玥, 等. 中国农业碳排放空间格局及影响因素动态研究[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(9): 1269–1282
HE Y Q, CHEN R, WU H Y, et al. Spatial dynamics of agricultural carbon emissions in China and the related driving factors[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(9): 1269–1282
- [34] 杨钧. 农业技术进步对农业碳排放的影响——中国省级数据的检验[J]. *软科学*, 2013, 27(10): 116–120
YANG J. The effects of technological advances on agricultural

- carbon emission—Evidence from Chinese provincial data[J]. *Soft Science*, 2013, 27(10): 116–120
- [35] 贺青, 张虎, 张俊飏. 农业产业聚集对农业碳排放的非线性影响[J]. *统计与决策*, 2021, 37(9): 75–78
- HE Q, ZHANG H, ZHANG J B. Nonlinear effects of agricultural industrial agglomeration on agricultural carbon emissions[J]. *Statistics & Decision*, 2021, 37(9): 75–78
- [36] 童伟伟, 李玉霖, 张董敏. 农业服务化能降低中国农业碳排放强度吗?[J]. *中国农业资源与区划*, 2023: 1–13 (2023-08-04). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20230803.1339.002.html>.
- TONG W W, LI Y L, ZHANG D M. Can servitization of agriculture reduce China's agricultural carbon emissions intensity?[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023: 1–13 (2023-08-04). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20230803.1339.002.html>.
- [37] 陈宇斌, 王森, 陆杉. 农产品贸易对农业碳排放的影响——兼议数字乡村发展的门槛效应[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2022(6): 45–57
- CHEN Y B, WANG S, LU S. The impact of agricultural products trade on agricultural carbon emissions—The threshold effect of digital rural development[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2022(6): 45–57
- [38] 张金鑫, 王红玲. 环境规制、农业技术创新与农业碳排放[J]. *湖北大学学报(哲学社会科学版)*, 2020, 47(4): 147–156
- ZHANG J X, WANG H L. Analysis on environmental planning, agricultural technological innovation and agricultural carbon emission[J]. *Journal of Hubei University (Philosophy and Social Science)*, 2020, 47(4): 147–156
- [39] HAKEN H. *Synergetics: An Introduction Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1977
- [40] 郑佳佳, 孙星, 张牧吟, 等. 温室气体减排与大气污染控制的协同效应——国内外研究综述[J]. *生态经济*, 2015, 31(11): 133–137
- ZHENG J J, SUN X, ZHANG M Y, et al. Review of researches on the synergistic effect of GHGs mitigation and air pollution control at home and abroad[J]. *Ecological Economy*, 2015, 31(11): 133–137
- [41] 周丽, 夏玉辉, 陈文颖. 中国低碳发展目标及协同效益研究综述[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(7): 10–17
- ZHOU L, XIA Y H, CHEN W Y. Review of low carbon development targets and relative co-benefits in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(7): 10–17
- [42] 唐湘博, 张野, 曹利珍, 等. 中国减污降碳协同效应的时空特征及其影响机制分析[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(10): 2252–2263
- TANG X B, ZHANG Y, CAO L Z, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing mechanism of synergistic effect of pollution and carbon emission reduction in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(10): 2252–2263
- [43] 易兰, 赵万里, 杨历. 大气污染与气候变化协同治理机制创新[J]. *科研管理*, 2020, 41(10): 134–144
- YI L, ZHAO W L, YANG L. Innovation of collaborative governance mechanism on air pollution and climate change control[J]. *Science Research Management*, 2020, 41(10): 134–144
- [44] 尚杰, 吉雪强, 陈玺名. 中国城镇化对农业生态效率的影响——基于中国13个粮食主产区2009—2018年面板数据[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(8): 1265–1276
- SHANG J, JI X Q, CHEN X M. Study on the impact of China's urbanization on agricultural ecological efficiency: based on panel data of 13 major grain-producing regions in China from 2009 to 2018[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(8): 1265–1276
- [45] 王宝义, 张卫国. 中国农业生态效率的省际差异和影响因素——基于1996—2015年31个省份的面板数据分析[J]. *中国农村经济*, 2018(1): 46–62
- WANG B Y, ZHANG W G. Cross-provincial differences in determinants of agricultural eco-efficiency in China: an analysis based on panel data from 31 provinces in 1996–2015[J]. *Chinese Rural Economy*, 2018(1): 46–62
- [46] 侯萌瑶, 张丽, 王知文, 等. 中国主要农作物化肥用量估算[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(4): 360–367
- HOU M Y, ZHANG L, WANG Z W, et al. Estimation of fertilizer usage from main crops in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(4): 360–367