中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

城镇化对种植业面源污染影响的中介效应分析

罗海平，何志文，胡学英

Analysis of the mediation effect of urbanization on non-point source pollution from the planting industry

LUO Haiping, HE Zhiwen, and HU Xueying

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210033

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

福建省农业经济增长、农业结构与面源污染关系研究

Research on the relationship between agricultural economic growth, agricul-tural structure, and agricultural non-point source pollution in Fujian Province

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1277-1284

中国省域化肥面源污染时空格局演变与分组预测

Temporal and spatial pattern evolution and grouping prediction of non-point source pollution of chemical fertilizers in China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(7): 1079-1092

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

Study on the impact of China's urbanization on agricultural ecological effi-ciency:Based on panel data of 13 major grain-producing regions in China from 2009 to 2018

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1265-1276

四川省化肥面源污染环境风险评估及趋势模拟

Environmental risk assessment and trend simulation of non-point source pollution of chemical fertilization in Sichuan Province, China

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(11): 1739-1751

农业面源污染防治的难点、问题及对策

Difficulty, problems and countermeasures of agricultural non-point sources pollution control in China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(2): 236-245

政策激励、生态认知与农户有机肥施用行为——基于有调节的中介效应模型

Relationship between policy incentives, ecological cognition, and organic fertilizer application by farmers: Based on a moderated mediation model

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(7): 1274-1284

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 9 月 第 29 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2021, 29(9): 1625−1635

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210033

罗海平, 何志文, 胡学英. 城镇化对种植业面源污染影响的中介效应分析 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(9): 1625−1635

LUO H P, HE Z W, HU X Y. Analysis of the mediation effect of urbanization on non-point source pollution from the planting industry[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1625−1635

城镇化对种植业面源污染影响的中介效应分析*

罗海平[1], 何志文[2], 胡学英[3**]

(1. 南昌大学中国中部经济社会发展研究中心 南昌 330031; 2. 南昌大学经济管理学院 南昌 330031;
3. 中共江西省委党校 南昌 330038)

摘 要: 在当前城镇化持续推进的背景下, 探究我国城镇化对化肥面源污染的作用机制, 对缓解我国生态压力, 促进农业绿色高质量发展具有重要现实意义。鉴于此, 本文基于 2008—2018 年城镇化和化肥施用量等省际面板数据, 运用单元调查评估法测算 2008—2018 年 31 个省 (市、自治区) 化肥面源污染物排放总量及排放强度, 再运用中介效应模型探究城镇化对化肥面源污染的影响机制。结果表明: 1) 2008—2018 年我国化肥面源污染排放呈现先增后降的倒“U”型特征, 以 2015 年为拐点, 到研究期末排放总量及强度均降至该时期最低水平, 分别为 516 万 t 和 37.65 kg·hm^{-2}。2) 从全国层面看, 城镇化会通过技术进步、劳动力转移、农地禀赋对化肥面源污染产生中介影响, 其中农地禀赋中介效应绝对值最大 (0.0092), 劳动力与技术进步趋近, 分别为 0.0040 和 0.0033。3) 城镇化对化肥面源污染的影响机制存在显著的空间异质性。从技术进步看, 粮食主销区的中介效应绝对值最大 (0.0160), 粮食主产区次之 (0.0118), 粮食产销平衡区无显著中介效应; 从劳动力看, 仅粮食主产区存在显著中介效应 (0.0538); 从农地禀赋看, 粮食主销区的中介效应绝对值最大 (0.0126), 粮食产销平衡区次之 (0.0095), 粮食主产区最小 (0.0055), 其中粮食产销平衡区的中介效应方向与其他地区相反。为此, 在粮食主销区应重点加强耕地保护, 加快制定跨区协作的“占补平衡”制度, 在粮食主产区应积极引导优质劳动力回流农业部门, 在粮食平衡区应加快绿色农业技术与管理模式的应用。

关键词: 城镇化; 面源污染; 中介效应模型; 粮食功能区; 空间异质性

中图分类号: F323.22 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Analysis of the mediation effect of urbanization on non-point source pollution from the planting industry*

LUO Haiping[1], HE Zhiwen[2], HU Xueying[3**]

(1. Research Center for Centr-China Economic Development, Nanchang University, Nanchang 330031, China;
2. School of Economics and Management, Nanchang University, Nanchang 330031, China;
3. Party School of CPC Jiangxi Provincial Committee, Nanchang 330038, China)

Abstract: In the light of continued urbanization, it is important to analyze the effect of urbanization on fertilizer non-point source pollution in China to alleviate ecological pressure and promote green and high-quality agriculture development. This study used the unit

* 江西省社会科学基金项目 (20MJ02, 20YJ06)、江西省高校人文社会科学重点研究基地项目 (JD20111) 和中央党校重点调研课题 (2021DXXTZDDYKT047) 资助

** 通信作者: 胡学英, 主要研究方向为农村经济。E-mail: 631098728@qq.com
罗海平, 主要研究方向为生态安全。E-mail: lhp6322@126.com

收稿日期: 2021-01-16 接受日期: 2021-04-19

* This study was supported by the Social Science Foundation of Jiangxi Province (20MJ02, 20YJ06), the Humanities and Social Science Key Research Base Project of Universities of Jiangxi Province (JD20111) and the Key Project of Party School of the Central Committee of CPC (2021DXXTZDDYKT047).

** Corresponding author, E-mail: 631098728@qq.com

Received Jan. 16, 2021; accepted Apr. 19, 2021

survey and assessment method to measure the total emissions and emission intensity of fertilizer non-point source pollution in 31 provinces (cities, autonomous regions) in China from 2008 to 2018. The mediation effect model was used to analyze the influence of urbanization on fertilizer non-point source pollution. Compared with existing studies, this study has two aims. The first is to analyze the influence of urbanization on fertilizer non-point source pollution via the mediation effect, and to clarify the mechanism of how urbanization affects fertilizer non-point source pollution. The second is to analyze the spatial heterogeneity in the impact of urbanization on the fertilizer non-point source pollution in grain function areas, e.g., differences in the mechanisms of various mediation factors in different grain function areas. Our empirical results showed that: 1) from 2008 to 2018, fertilizer non-point source pollution in China had an inverted "U" pattern, first increasing and then decreasing, with 2015 as the inflection point. The total amount and intensity of emissions fell to the lowest levels at the end of the study period, 5.16 million t and 37.65 kg·hm^{-2}, respectively. 2) On a national level, urbanization had a mediating effect on fertilizer non-point source pollution owing to technological progress, labor migration, and farmland endowment. The mediation effect of farmland endowment had the highest absolute value (0.0092), and the mediation effects of labor and technological progress were increasing to 0.0040 and 0.0033, respectively. 3) There was significant spatial heterogeneity in the influence of urbanization on fertilizer non-point source pollution. For technological progress, the absolute value of the mediation effect in the major grain-consuming areas was the highest (0.0160), followed by that in the major grain-producing areas (0.0118), whereas the grain-balance areas did not have a significant mediation effect. For labor, there was only a significant mediation effect in the major grain-production areas (0.0538). For farmland endowment, the absolute value of the mediation effect in the major grain-consuming areas was the highest (0.0126), followed by that in the grain-balance areas (0.0095), and the major grain-producing areas had the lowest absolute value (0.0055). The direction of the mediation effect in grain-balance areas was opposite to that in other regions. Therefore, it was important to protect arable land in the major grain-consuming areas and to form a cross-regional collaboration system of "occupation-compensation balance". In the major grain-producing areas, high-quality labor should be actively guided to return to the agricultural sector. In the grain-balance areas, green agricultural technology and management modes should be introduced.

Keywords: Urbanization; Non-point source pollution; Mediation effect model; Food functional area; Spatial heterogeneity

城镇化的推进助力中国经济发展取得了举世瞩目的成就。截至 2018 年, 我国常住人口城镇化率达 59.58%, 高于世界平均水平 (55.27%)。然而, 由于我国经济增长方式的粗放型以及城镇化推进的盲目性, 导致农业面源污染现象日益严峻[1]。农业面源污染系指在农业生产活动中氮素和磷素等营养物质、农药及其他有机或无机污染物质通过农田的地表径流和农田渗漏形成的环境污染[2]。化肥面源污染是农业面源污染的重要来源之一, 2018 年我国化肥投入量为 5653.4 万 t, 占世界使用量的 30% 以上, 化肥投入强度是欧盟和美国的 2 倍以上, 化肥施用总量大与施用强度高现象并存[3]。化肥的过度施用不仅使农产品边际产出不断降低, 亦使耕地质量持续下降、地下水污染日益严峻, 中国依靠化肥来提高农作物产量的空间已变得非常有限[4]。当前, 我国进入增长速度换档期、结构调整阵痛期和前期刺激政策消化期"三期叠加"阶段, 推动经济持续和绿色发展成为重中之重。在城镇化持续推进的背景下, 城镇化作为社会发展的客观现象和国家现代化的重要标志, 明晰城镇化与化肥面源污染间的关系, 探究城镇化影响化肥面源污染的直接效应与间接效应具有重要现实意义。

国内外学者针对化肥面源污染做了许多探索性研究, 主要基于库兹涅茨假说和 STIRPAT 模型。前者旨在探究经济增长与化肥面源污染之间的关系[5-6]; 后者探究化肥面源污染的影响因素, 主要包括城镇化[7]、农民收入[8]、农村劳动力转移[9]、农业政策[10]、农业技术进步[11] 等。其中城镇化对化肥面源污染影响的研究观点分为两类: 一是认为城镇化会加剧化肥面源污染。侯孟阳等[12] 和夏秋等[13] 认为城镇化使非农比较收益不断提升, 劳动力非农转移和农民兼业化现象日益严峻, 农户倾向于使用更加廉价的化肥替代价格不断上涨的劳动力。史常亮等[14] 认为城镇化的推进吸引了大量的优质劳动力, 农业劳动力质量的下降造成了化肥的过量施用。廖炜等[15] 基于输出系数模型解析面源污染, 发现城镇化导致农村耕地面积减少, 在耕地稀缺的背景下, 农户会加大化肥施用以提高产出。吴义根等[16] 基于空间面板 STIRPAT 模型分析城镇化对农业面源污染的直接效应与空间效应, 认为城镇化的示范效应间接加剧了农业面源污染排放。二是认为城镇化会缓解化肥面源污染。徐承红等[17] 基于空间自回归模型与空间误差模型检验了城镇化对农业面源污染的缓解效应, 认为城镇化发展能够促进科技进步和文化知识宣传, 提升农

户环保能力与环保意识。

综上可见, 现有文献在探究城镇化对化肥面源污染的影响方面成果颇丰, 但基于粮食功能区视角对区域异质性的研究却鲜有涉足。2018 年粮食主产区、粮食主销区及粮食产销平衡区的农业产值分别为 2924 亿元、1065 亿元和 1453 亿元。由于资源禀赋、功能定位、经济发展的差异, 不同粮食功能区的农业产值存在较大差距。因此, 相比以地理、经济因素划分的空间格局, 基于粮食功能区视角更易发现化肥面源污染影响机制的空间异质性。此外, 现有文献大多使用普通面板模型对化肥面源污染的驱动因素展开研究, 但对城镇化作用于化肥面源污染的影响机制缺乏进一步分析。中介效应模型可以探究自变量对因变量的影响过程与作用机制, 相比分析城镇化直接影响化肥面源污染的同类研究, 使用中介分析往往能够得到更深入的结果[18]。鉴于此, 本文构建“城镇化—中介因子—化肥面源污染”分析框架, 以期发掘城镇化持续推进背景下我国粮食安全保障的化肥面源污染问题, 为农业经济的可持续发展提供实证依据。

1　城镇化对化肥面源污染影响的作用机理

1.1　城镇化、农地禀赋与化肥过量施用引起的面源污染

城镇化的快速发展易导致耕地被占用, 大量的农用耕地变为工业用地、住宅用地, 农地禀赋不断下降[19]。相关研究发现, 1990—2015 年我国城镇建设用地占用耕地面积达 2.12 万 km^2, 占我国城镇建设用地总面积的 72.5%, 我国城镇建设用地占用耕地程度形成“东强西弱”的空间分布态势[20]。城镇化虽能够有效促进经济增长, 为农业规模经营提供金融服务、管理创新、农业技术等生产要素支撑。但根据理性人假设, 资本的逐利性会诱致大量资本流入收益更高的第二、第三产业。例如建设产业工业园、投资乡村旅游特色服务业等等, 耕地“非农化”现象加剧[21]。虽然已经存在“占补平衡”等农地保护政策, 但政策执行效果难以评估, 部分人口密集地区在完成“占补平衡”要求及“GDP 锦标赛”双重刺激下, 甚至出现“山下闹田荒, 山上进军垦造”现象。一方面, 农地稀缺地区通常会更加依赖化肥提高粮食产量, 导致农地稀缺地区的化肥投入强度显著高于农地丰富地区, 农地稀缺地区因化肥的过度施用导致化肥面源污染[22]。另一方面, 农地禀赋决定农作物播种面积, 是化肥要素投入的基础, 农作物播种面积的增加导致化肥投入增加[23]。

1.2　城镇化、技术进步与化肥过量施用引起的面源污染

发展中国家城乡间存在紧密的经济联系, 使得城乡资源配置效率不断优化, 农业技术水平不断提高, 与此同时, 城镇化带来的新型农业技术持续向农村输出, 从而缓解化肥面源污染[24]。城镇化通过技术进步对化肥面源污染影响的作用机制可能表现在如下两点: 第一, 促进技术进步。城镇化发展导致农业生产要素的稀缺性变化 (如劳动力、耕地等), 使得要素相对价格发生变化, 进而对技术变革产生诱致性作用[25]。城镇化发展促进农业部门收入快速增长, 农业部门为实现社会环保需求与农业经济的可持续增长, 会加大农业科技投入, 提高化肥资源利用效率, 减少面源污染排放。当前我国高新施肥技术包括温室现代化管控、水肥一体化技术、根际土壤调控技术、3S 技术与精准施肥和飞机施肥技术等, 此类高新技术若能因地制宜, 合理使用, 将会对缓解化肥面源污染做出重大贡献[26-27]。第二, 促进技术应用。目前具有规模大、效率高、成本低等特点的面源污染控制技术少之又少, 高额的面源治理费用普通农户无力承担, 导致农业面源污染现象愈发严重[28]。但城镇化发展能够促进农业生产要素形成新的要素结构关系, 土地流转集中、农业规模化逐步发展成为新型农业生产形态, 具有规模效应的农业经营主体更有能力应用先进农业技术。

1.3　城镇化、劳动力转移与化肥过量施用引起的面源污染

城镇化的本质是人口持续从农村向城市集聚, 农村劳动力的转移会影响化肥面源污染, 其表现可能包含两个方面: 一方面, 城镇化的不断发展使得非农比较收益持续提升, 农村劳动力非农转移、农民兼业化等现象加剧, 在其他要素相对价格不变情况下, 农民更倾向选择廉价省力的化肥以替代劳动力投入。另一方面, 农村劳动力转移导致的耕地抛荒、闲置现象在全国各地存在广泛[29], 而耕地抛荒、闲置会促进农村生态环境的恢复与改善[30]。同时在户籍制度的限制下, 农村劳动力很难真正融入迁入地, 其父母通常会留在户籍地从事农业生产活动, 导致农业劳动力老龄化现象加剧[9]。据第 3 次农业普查数据显示, 2016 年末 55 岁及以上的农业劳动人员占比高达 33.6%, 高龄劳动力对化肥过度投入的危害认知

不足, 此类劳动力的增加反而会促进化肥的过量施用[31]。因此劳动力转移会通过以上两条路径对化肥面源污染产生相反的两种影响, 影响方向取决于两类力量的合力, 作用机制见图 1。

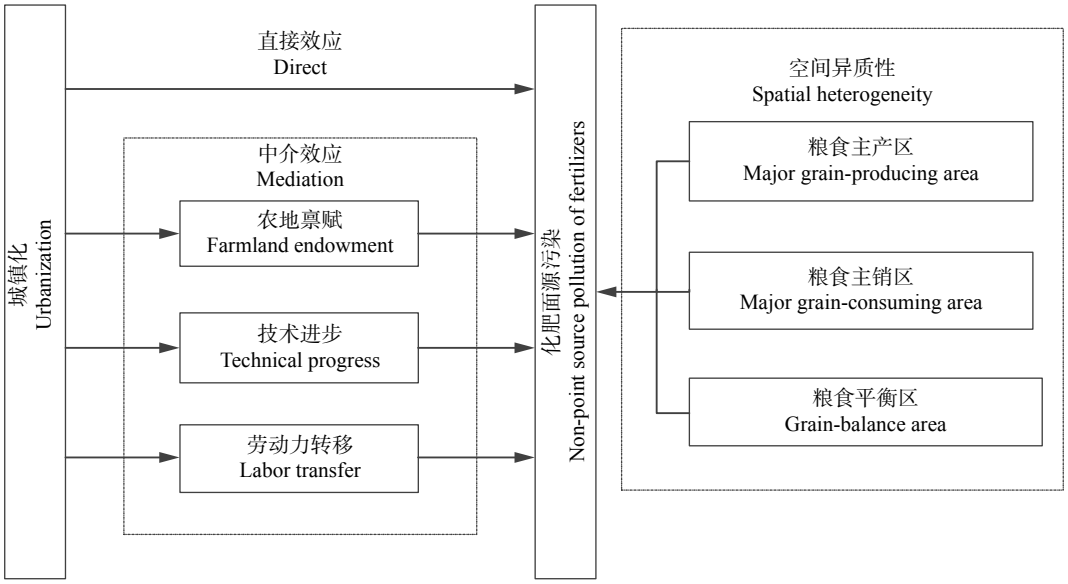


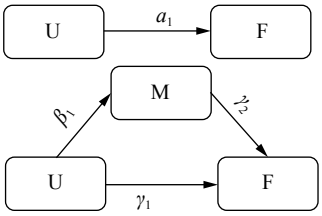
图 1 城镇化对化肥面源污染的作用机制

Fig. 1 Mechanism of effects of urbanization on non-point source pollution of fertilizer

2 模型构建与数据来源

2.1 中介效应模型

面板数据具有解决遗漏变量、样本容量大的优点。因此, 本文构建以农地禀赋、农业技术和劳动力为中介变量的面板中介效应模型。模型计算流程如下: 第一, 运用修正的 Wald Test 检验是否存在组间异方差; 第二, 运用 Pesaran Test 检验是否存在截面相关; 第三, 运用 Hausman Test 选择固定效应模型或随机效应模型; 第四, 检验是否存在时间固定效应; 第五, 使用 Driscoll-Kraay 的标准误。Driscoll-Kraay 的标准误综合考虑了异方差、截面相关以及序列相关等问题, 即使存在以上面板异质性问题仍能获得可信的结果。此外, 本文的面板数据属短面板, 因此单位根等问题不予考虑。



$$F_{it} = a_0 + a_1 U_{it} + \sum_2^k a_k X_{kit} + f_t + u_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 U_{it} + \sum_2^k \beta_k X_{kit} + f_t + u_i + \delta_{it} \quad (2)$$

$$F_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 U_{it} + \gamma_2 M_{it} + \sum_3^k \gamma_k X_{kit} + f_t + u_i + z_{it} \quad (3)$$

式中: U 表示城镇化; F 表示化肥面源污染; M 表示中介因子; F_{it} 表示第 i 个省第 t 年的化肥面源污染排放的对数; U_{it} 表示第 i 个省 (市) 第 t 年的常住人口城镇化率; M_{it} 表示第 i 个省第 t 年的中介因子, 包括农地禀赋、农业技术进步和农业劳动力 3 类变量; X_{kit} 表示第 i 个省第 t 年第 k 个会影响化肥面源污染排放和中介因子的控制变量; f_t 表示第 t 年不可观测的时间固定效应, 用来描述研究期内发生的可以影响化肥投入的事件; u_i 表示第 i 个省不可观测的个体固定效应。ε_{it}、δ_{it} 和 z_{it} 分别表示对应模型的扰动项。

2.1.1 单元调查评估法测算化肥面源污染排放

由于现有统计资料中并无化肥面源污染排放的直接数据, 因此本文采用文献中运用广泛的单元调查评估法[32-33] 对化肥面源污染排放测算, 测算流程如下:

首先, 对化肥面源污染类型进行产污分析。化肥过量投入会对农田土壤、作物和水体 (含地下水、地表水) 等方面的环境造成污染, 本文重点关注化肥过量对水体的污染, 确定核算的污染指标为总氮 (TN) 和总磷 (TP)。其次, 确定产污单元。产污单元为直接产生污染物且加剧面源污染的独立单位, 由于恶化环境污染的主要肥料为氮肥与磷肥, 因此选择氮肥、磷肥及复合肥作为产污单元。再次, 确定产污单元排放系数。排放系数由排污系数与化肥流失率确定。其中, 排污系数采用以往文献的普遍做法[33], 根据化肥折纯量的化学成分计算, 氮肥、磷肥

和复合肥的 TN 产污系数分别为 1.00、0 和 0.33, TP 产污系数分别为 0、0.44 和 0.15。化肥流失率受化肥施用强度、化肥施用比例、肥效限制因子的影响。因此, 根据化肥施用强度高, 流失率高, 化肥施用比例合理, 流失率低, 肥效限制因子利用率高, 化肥流失率低的原则, 将化肥流失率分为低、中、高 3 个层级, 并依据分析化肥去向试验的研究结果进行赋值, 各省区的统一化肥流失率以相应区域的均值替代。最后, 测算化肥面源污染排放。根据以上流程分别确定产污类型、产污单元、产污系数、流失率, 通过式 (4) 测算化肥面源污染物排放量。

$$E=\sum E_{ij}=\sum C_{ij}\times\eta_i=\sum T_i\times\lambda_{ij}\times\eta_i \tag{4}$$

$$I=\frac{E}{L} \tag{5}$$

式中: E 为化肥面源污染物排放总量 (万 t); E_{ij} 为单元 i 产生并流失进入水体的 j 类污染物量, 亦称为污染物排放量; C_{ij} 为单元 i 产生并对水资源造成潜在化肥面源污染影响的 j 类污染物量, 亦称为污染物产生量; T_i 为单元i的指标统计量; λ_{ij}为单元i中污染物 j 的产污系数; η_i为i类化肥的流失率; I 为污染物排放强度, L 为农作物播种面积。

2.1.2　DEA-Malmquist 指数测度农业技术进步

Solow 增长理论认为, 全要素生产率是经济增长过程中剔除劳动、资本、自然资源等投入要素后的残余部分, 是度量技术进步的重要指标[34]。因此, 本文参考刘晨跃等[35] 和 Fare 等[36] 的方法, 以农业全要素增长率作为技术进步的替代指标, 计算公式如下:

$$M_i\left(x^{t+1},y^{t+1},x^t,y^t\right)=\frac{D_i^t(x^t,y^t)}{D_i^{t+1}(x^{t+1},y^{t+1})}\times\left[\frac{D_i^{t+1}(x^{t+1},y^{t+1})}{D_i^t(x^{t+1},y^{t+1})}\times\frac{D_i^{t+1}(x^t,y^t)}{D_i^t(x^t,y^t)}\right]^{\frac{1}{2}}=\mathrm{effect}\left(x^{t+1},y^{t+1};x^t,y^t\right)\times\mathrm{tech}\left(x^{t+1},y^{t+1};x^t,y^t\right) \tag{6}$$

式中: $M_i(x^{t+1},y^{t+1},x^t,y^t)$为第 t 期到 t+1 期的全要素生产率的变化; (x^t,y^t)与(x^{t+1},y^{t+1})分别指第 t 期与 t+1 期的投入与产出向量。由于 Malmquist 指数为动态增长率, 需将其转化为累积绝对值, 因此借鉴程惠芳等[37] 的方法, 以 2007 年为基期, 则 $TFP_{2008}=TFP_{2007}\times Mal_{2008}$, 其中 $TFP_{2007}=1$, Mal_{2008} 为 2008 年的 Malmquist 指数, 按此公式类推, 可得到历年 TFP 值。

2.2　指标选取及数据来源

研究数据为 2008—2018 年 31 省 (自治区、直辖市, 不含港澳台, 以下统称省) 共 11 年的面板数据, 均来源于《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》和各省的统计年鉴。为降低模型异方差以及量纲差异对模型回归的影响, 本文对变量进行对数归一处理。变量选取方面, 在参照现有文献的基础上, 选择技术进步 (累积全要素生产率)、劳动力 (第一产业劳动力)、农地禀赋 (农作物播种面积) 作为核心解释变量[11, 23, 38], 富裕程度、财政支农、农民收入结构作为社会经济控制变量[39-41], 选择农田水利建设、自然灾害作为微观控制变量。

富裕程度: 农业生产活动过程中需消耗大量资源, 同时伴随着各类污染物, 加剧生态环境压力。当前, 我国农业仍处于高消耗、高污染的粗放式发展, 高农业经济规模意味着高农业资源消耗以及高农业面源污染程度, 本文选择农业总产值作为富裕程度的替代指标。

财政支农: 葛继红等[40] 认为中国的财政支农政策导致化肥要素市场扭曲, 对化肥农业面源污染物排放有显著的激发作用。本文选择农林水事务支出作为财政支农的替代指标。

农民收入结构: 随着经济不断发展, 农村劳动力就业选择逐渐多样, 非农化、兼业化现象也越来越普遍, 农民由单一收入结构向多元收入结构转变。若某特定个体非农收入占比越高, 表明对农业收入的依赖越小, 因而缓解面源污染, 本文选择农村居民工资性收入占农村居民人均纯收入 (农村居民人均可支配收入) 的比重作为农民收入结构的替代指标。需要说明的是, 由于 2013 年前后统计口径不一, 因此在 2013 年前选择农村居民人均纯收入, 在 2013 年之后选择农村居民人均可支配收入。

农田水利建设: 农田水利设施能够调节地区水情, 改善农田水分含量, 促进农产品稳产高产。但水利设施建成后, 部分地区由于农技人员不足, 未能充分掌握灌溉技术, 过度灌溉导致化肥大量冲入河流湖泊造成污染, 同时稀释了需要微生物滋养的农田肥力, 反使农田逐渐贫瘠, 本文选择有效灌溉面积作为农田水利建设替代指标。

自然灾害: 自然灾害能够影响农业产出, 带来潜在产量损失风险, 进而对农户化肥施用行为产生影响, 本文选择受灾面积作为自然灾害的替代指标。

3　结果与分析

3.1　我国化肥面源污染现状分析

基于式 (4) 和式 (5) 测算我国化肥面源污染排放总量及排放强度 (由于数据缺失, 因此无港澳台地区的结果), 相比全国第二次污染源普查数据, 本文的测

算结果偏高。其原因可能是单元调查评估法更侧重大尺度的农业面源污染估算, 与实际微观污染源的数据存在一定差距。但与现有研究相比, 测算结果并无显著差别[14], 且本文研究重点是探究城镇化与化肥面源污染的动态关系, 对总量数据精确度要求不高。部分测算结果如表 1 所示。

表 1 各省 (市、自治区) 化肥面源污染排放总量及排放强度

Table 1 Total emissions and emission intensity of fertilizers of non-point source pollution in various province (cities, autonomous regions)

省(市、自治区) Province (city, autonomous region)	排放总量 Total emissions ($\times10^4$ t)			排放强度 Emission intensity (kg·hm^{-2})		
	2008	2015	2018	2008	2015	2018
北京 Beijing	2.68	1.97	1.30	83.18	113.47	125.30
天津 Tianjin	4.51	3.81	2.56	100.99	81.20	59.68
河北 Hebei	37.70	38.55	34.12	43.27	44.11	41.62
山西 Shanxi	5.79	5.92	5.22	15.53	15.71	14.68
内蒙古 Inner Mongolia	18.16	25.50	23.51	26.47	33.70	26.64
辽宁 Liaoning	16.21	17.78	16.07	43.63	42.14	38.19
吉林 Jilin	18.75	24.00	22.56	37.52	42.26	37.10
黑龙 Heilongjiang	10.04	13.82	13.27	8.30	11.24	9.04
上海 Shanghai	3.10	1.90	1.53	79.79	55.90	54.26
江苏 Jiangsu	65.75	60.47	55.20	87.55	78.07	73.40
浙江 Zhejiang	18.38	16.61	14.60	74.04	72.50	73.81
安徽 Anhui	16.79	17.79	16.30	18.70	19.88	18.58
福建 Fujian	12.31	12.64	11.27	55.44	54.23	71.42
江西 Jiangxi	6.60	6.86	5.79	12.38	12.30	10.42
山东 Shandong	51.33	48.82	43.64	47.68	44.28	39.40
河南 Henan	35.83	40.38	37.81	25.33	27.99	25.58
湖北 Hubei	38.36	37.51	32.27	52.56	47.17	40.57
湖南 Hunan	25.55	26.20	25.12	33.82	30.06	30.97
广东 Guangdong	36.37	39.73	34.50	82.58	83.03	80.62
广西 Guangxi	10.27	11.72	11.63	18.02	19.11	19.47
海南 Hainan	2.30	2.48	2.39	28.34	29.39	33.48
重庆 Chongqing	5.91	6.24	5.87	18.38	17.45	17.52
四川 Sichuan	15.59	15.60	14.36	16.52	16.09	14.94
贵州 Guizhou	10.82	12.83	10.35	23.42	23.15	18.90
云南 Yunnan	21.32	27.75	25.62	35.21	38.62	37.18
西藏 Tibet	0.26	0.31	0.26	10.86	12.40	9.58
陕西 Shaanxi	20.54	25.91	25.19	49.30	60.47	61.58
甘肃 Gansu	4.93	5.54	4.64	12.74	13.09	12.29
青海 Qinghai	0.49	0.60	0.50	9.58	10.67	8.92
宁夏 Ningxia	4.29	4.66	4.44	35.42	36.88	38.12
新疆 Xinjiang	9.04	14.15	14.44	20.14	24.58	23.79

总体来看, 研究期内我国化肥面源污染排放呈现先增后减的倒“U”型特征。2008 年化肥面源污染物排放量达 527 万 t, 平均排放强度为 38.93 kg·hm^{-2}, 随后逐渐上升, 至 2015 年达到峰值, 排放总量和排放强度分别为 567.92 万 t 和 39.07 kg·hm^{-2}。此后, 受《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》政策影响, 我国化肥面源污染排放总量及排放强度均有所下降, 2018 年化肥面源污染排放量及排放强度分别降至 516.46 万 t 和 37.65 kg·hm^{-2}。从空间结构来看, 2018 年化肥面源污染排放强度较大的地区 (≥45 kg·hm^{-2}) 大多位于我国粮食主销区, 包括北京、广东、浙江、江苏、福建、陕西、天津、上海等省市。2018 年化肥面源污染排放总量较大的地区主要分布于粮食主产区, 包括江苏、山东、河南、广东、河北、湖北等地, 这 6 个省的化肥面源污染排放总量占我国总排放量的比例高达 46.12%。可见, 基于粮食功能区的视角探究城镇化对化肥面源污染影响机制更具现实性。

3.2 全国层面城镇化对化肥面源污染的影响

从模型 1 看, 城镇化对化肥面源污染的直接效应不显著, 根据中介效应判定流程[18], 城镇化对化肥面源污染的影响可能存在“遮掩效应”, 因此进行逐步法判定, 结果显示全国层面城镇化对化肥面源污染的中介效应显著。技术进步、劳动力、农地禀赋 3 类

中介因子均存在负向中介效应, 其中农地禀赋中介效应最大, 绝对值为 0.0092, 劳动力与技术进步的中介效应趋近, 绝对值分别为 0.0040、0.0033 (表 2)。从模型 2 看, 城镇化发展促进农业技术进步, 同时农业技术进步降低了化肥面源污染。其原因可能是城镇化发展使得社会财富快速积累, 农业部门收入的上升可以促进环境友好型农业技术的应用。有研究发现, 城镇化率每上升 1 个单位, 农业技术进步增长率提高 1.68 个单位[42]。农业技术进步的减排效应可能包括如下几方面: 第一, 技术替代或提升资源利用效率。例如, 控释肥通过外表包膜将水溶性肥料裹在膜内使其养分缓慢释放, 其肥料利用率比常规化肥高 1 倍左右。第二, 治污技术的提升。例如, 太湖治理中采用专门工艺将蓝藻转化为有机肥, 在实现资源循环利用的同时也减少污染[43]。

从模型 3 看, 城镇化发展促进农村劳动力转移, 同时劳动力的转移加剧了化肥面源污染。冷晨昕等[44]研究发现: 第一, 高龄劳动力与农业劳动参与率显著正相关, 原因是随着年龄的增加, 其非农就业机会逐渐减少; 第二, 劳动力的教育年限对农业劳动参与率存在负向影响, 原因是随着教育年限的增加, 劳动力从事农业的机会成本上升。而我国 65 岁以上农业劳动力从业者自 2010 年起大幅上升, 农村剩余劳动力老龄化、教育不足等现象日益严峻, 此类劳动力的减肥意愿明显偏弱[45]。

从模型 4 看, 城镇化发展占用了大量农地, 同时农地禀赋与化肥面源污染正相关。相关研究表明, 2010—2015 年耕地对新增城镇建设用地面积的贡献高达 67.5%[46], 且由于“西部大开发”“振兴东北”和“中部崛起”等战略的实施, 大量的城镇建设导致耕地面积流失现象日益严峻[20]。值得注意的是, 农地对缓解面源污染的中介效应最大。可见, 维持 18 亿亩耕地红线不动摇, 稳定农作物播种面积是保障粮食安全的重中之重。

表 2　城镇化对化肥面源污染影响的回归结果

Table 2　Regression results of the impact of urbanization on fertilizer non-point source pollution

解释变量 Explanatory variable	模型1 Model 1	模型2 Model 2	模型3 Model 3	模型4 Model 4
城镇化 Urbanization	0.0024(0.65)	0.0057*(2.17)	0.0065*(1.82)	0.0003(0.10)
技术进步 Technological progress		−0.3096***(−17.97)		
农业劳动力 Agricultural labor			0.4603***(5.80)	
农地禀赋 Farmland endowment				0.3984***(8.72)
控制变量 Control variable	YES	YES	YES	YES
常数项 Constant	−3.0716***(−5.26)	−3.6207***(−14.42)	−3.1423***(−4.8)	−4.5802***(−12.40)
中介效应 Mediation effect		−0.0033	−0.0040	−0.0092
个体/时间固定效应 Individual/time fixed effect	YES	YES	YES	YES
拟合优度 Goodness of fit (R^2)	0.5526	0.7654	0.5815	0.6239
Wald chi^2	4086.80***	6364.05***	3121.08***	5363.68***
Pesaran's test	0.2227	0.1006	0.1333	0.0964

括号中的数字为t值, ***、**和*分别表示在P<1%、P<5%和P<10%水平显著; 模型1为直接效应模型, 模型2为技术进步中介效应模型, 模型3为劳动力中介效应模型, 模型4为农地禀赋中介效应模型。The numbers in parentheses are t-values. ***, **, and * indicate significant at P<1%, P<5%, and P<10% levels, respectively. Model 1 is a direct effect model. Model 2 is a mediating effect model of technological progress. Model 3 is a labor force mediating effect model. Model 4 is a farmland endowment mediating effect model.

3.3　城镇化对化肥面源污染影响的异质性

为探究城镇化对化肥面源污染影响的空间异质性, 分别对粮食主产区 (黑龙江、吉林、辽宁、河北、山东、内蒙古、四川、河南、江西、湖南、湖北、江苏、安徽)、粮食主销区 (北京、天津、上海、浙江、福建、广东、海南) 和粮食产销平衡区 (山西、陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆、西藏、云南、贵州、重庆、广西) 三大粮食功能区进行中介分析[47], 结果见表 3。

由表 3 可知, 农业技术进步在粮食主产区和粮食主销区存在显著负向中介效应, 其中粮食主销区的中介效应绝对值最大 (0.0160), 粮食主产区次之 (0.0118), 粮食产销平衡区中不存在显著的技术进步中介效应。可能的原因是粮食主销区经济水平发达, 农业科技成果的转化与应用环境更加完善。现有研究发现, 我国农业科技成果转化绩效呈现东、中、西依次降低的特征, 东部地区 (粮食主销区均属东部地区) 农业科技成果转化绩效得分高达 74.29[48]。与之相反, 粮食产销平衡区以西部欠发达地区为主 (除四川、内蒙古外均属粮食产销平衡区), 农业科技成果转化与应用受制于农业基础设施的不足 (西部地区的农业科技成果转化绩效得分最低), 导致农业技术进步对化肥面源污染的减肥效应无法显现。

劳动力在粮食主销区和粮食产销平衡区均无中

表 3 三大粮食功能区城镇化对化肥面源污染的中介效应测算结果

Table 3 Calculation results of the intermediary effect of urbanization on fertilizer non-point source pollution in the three major food functional areas

解释变量 Explanatory variable	粮食主产区 Main grain-producing area		粮食主销区 Main grain-consuming area		粮食平衡区 Grain-balance area	
	估计参数 Estimated parameter	中介效应 Mediation effect	估计参数 Estimated parameter	中介效应 Mediation effect	估计参数 Estimated parameter	中介效应 Mediation effect
技术进步 Technological progress	−0.3608*** (−9.69)	−0.0118	−0.2417*** (−13.60)	−0.0160	−0.0056 (−0.05)	不显著 Not obvious
农业劳动力 Agricultural labor	0.5074*** (5.71)	−0.0538	0.0390 (0.90)	不显著 Not obvious	0.1271 (1.43)	不显著 Not obvious
农地禀赋 Farmland endowment	0.4396*** (3.31)	−0.0055	0.8963*** (7.84)	−0.0126	−0.4051*** (−5.28)	0.0095

括号中的数字为*t*值, ***、**和*分别表示在*P*<1%、*P*<5%和*P*<10%水平显著。The numbers in parentheses are *t*-values, and ***, ** and * indicate significant at *P*<1%, *P*<5% and *P*<10% levels, respectively.

介效应, 仅在粮食主产区存在显著负向中介效应 (0.0538), 表明我国劳动力转移对化肥面源污染的影响主要由粮食主产区驱动, 其原因可能是粮食主产区农业劳动力的老龄化程度高于全国其他地区[49]。

农地禀赋在三大粮食功能区均存在显著中介效应, 粮食产销平衡区的中介效应为正, 其他地区中介效应为负。其中粮食主销区中介效应的绝对值最大 (0.0126), 粮食产销平衡区次之 (0.0095), 粮食主产区最低 (0.0055)。由于绿洲农业的发展, 粮食产销平衡区耕地大量开垦, 相关研究显示, 2010—2015 年西部地区耕地面积增加 5.2×10^3 km^2[46], 丰富的农地禀赋有效缓解了化肥面源污染。与之相反, 粮食主产区和粮食主销区的耕地资源更为紧张, 1990—2015 年新增城镇建设用地占用耕地面积较大的省份 (大于 1000 km^2) 主要分布在东部沿海地区和粮食主产区[20]。

4 讨论与结论

4.1 讨论

在城镇化推进不可逆的背景下, 实行因地制宜的城镇化发展政策, 是促进化肥减量增效, 推进农业绿色发展的重要路径。本文测算了我国 2008—2018 年的化肥面源污染物排放总量及排放强度, 探究了城镇化对化肥面源污染的作用机制及其空间异质性, 为中央政府制定城镇差异化发展政策提供了理论依据。研究结果表明城镇化会减少农地禀赋, 加快劳动力转移, 促进技术进步, 这一结论与范泽孟等[20]、程名望等[50] 和高延雷等[47] 的研究结果一致, 验证了城镇化对化肥面源污染的第一阶段影响。农地禀赋减少、劳动力转移和技术进步对化肥面源污染会造成显著影响, 这一观点与向涛等[22]、史常亮等[14] 和闫桂权等[11] 的结果相近, 证实了城镇化对化肥面源污染的中介效应。对比现有研究, 本文研究做出了以下两点深化与发展。一是基于中介效应视角分析城镇化对化肥面源污染的影响机制, 厘清了城镇化对化肥面源污染的作用路径。二是基于粮食功能区视角探究城镇化对化肥面源污染影响的空间异质性, 即各类中介因子在不同粮食功能区作用机制的差异。

从农地禀赋来看, 本文验证了城镇化通过占用耕地以提高化肥面源污染排放的路径及其空间异质性, 其中粮食产销平衡区的中介效应与粮食主销区和粮食主产区相反的原因可能是: 城镇化占用耕地现象在粮食主销区和粮食主产区更加严重。有研究发现城镇建设占用耕地面积较大的省份大多位于东部沿海地区 (粮食主销区均位于东部沿海地区) 与粮食主产区[20]。从劳动力转移来看, 城镇化发展导致从事农业的机会成本上升, 农村青壮年劳动力因而向非农部门转移, 农业劳动力逐渐呈现老龄化特征[51], 高龄劳动力的体力和知识水平相对较低, 对化肥过度施用危害的认知不足, 通常会提高化肥投入以减少劳动生产率下降带来的影响, 即劳动力对化肥投入影响的“老化效应”大于“替代效应”[52]。在粮食主产区此种影响最为显著, 其原因可能是粮食主产区农业劳动力的老龄化程度高于其他地区[49]。从技术进步来看, 城镇化通过促进技术进步以缓解农业面源污染的中介效应确实存在, 但这一路径仅在粮食主销区和粮食主产区实现。究其原因, 可能是大多粮食产销平衡区位于经济发展相对落后的西部, 农业现代化程度不高, 技术进步的治污效应无法充分发挥, 而农业现代化程度最高的粮食主销区则能充分利用环境友好型技术[53]。

4.2 结论

本文基于 2008—2018 年中国 31 个省的省际面板数据, 构建城镇化对化肥面源污染影响的中介效应模型, 探究了城镇化对化肥面源污染的作用机制, 主要结论如下: 1) 我国城镇化对化肥面源污染的影响存在显著的中介效应, 农地禀赋、劳动力转移、技术进步均发挥负向中介影响。2) 我国城镇化对化肥面源污染的影响机制存在显著空间异质性, 即粮

食主产区 3 类中介因子均显著, 粮食主销区农地禀赋和技术进步两类中介因子显著, 粮食产销平衡区仅农地禀赋中介因子显著。基于上述结论, 本文提出如下建议: 1) 在粮食主销区应实施更加严格的耕地保护政策, 同时弱化行政壁垒, 在用地严重不足地区构建跨区协作的耕地“占补平衡”制度。2) 加大农业补贴力度, 引导优质劳动力回流农业部门, 同时积极开展新型农业生产技术培训与科普讲座, 培养农户科学施肥意识。3) 加大粮食产销平衡区的支持力度, 重点加强农业基础设施建设, 强化农业科技成果的应用。

参考文献　References

[1] 马道明. 城镇化背景下农村环境持续恶化的内生性探析——基于苏南Q镇的调查[J]. 学海, 2018, (4): 53−58
MA D M. Endogenous analysis of the continuous deterioration of rural environment under the background of urbanization[J]. Academia Bimestrie, 2018, (4): 53−58

[2] 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

[3] 杨滨键, 尚杰, 于法稳. 农业面源污染防治的难点、问题及对策[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(2): 236−245
YANG B J, SHANG J, YU F W. Difficulty, problems and countermeasures of agricultural non-point sources pollution control in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(2): 236−245

[4] 张利庠, 彭辉, 靳兴初. 不同阶段化肥施用量对我国粮食产量的影响分析——基于1952—2006年30个省份的面板数据[J]. 农业技术经济, 2008, (4): 85−94
ZHANG L X, PENG H, JIN X C. Analysis of the impact of chemical fertilizer application in different stages on my country's grain output—Based on panel data of 30 provinces from 1952 to 2006[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2008, (4): 85−94

[5] 侯孟阳, 姚顺波. 异质性条件下化肥面源污染排放的EKC再检验——基于面板门槛模型的分组[J]. 农业技术经济, 2019, (4): 104−118
HOU M Y, YAO S B. EKC retest of fertilizer non-point source pollution emission under heterogeneous conditions—grouping based on panel threshold model[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2019, (4): 104−118

[6] 李太平, 张锋, 胡浩. 中国化肥面源污染EKC验证及其驱动因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(11): 118−123
LI T P, ZHANG F, HU H. Authentication of the kuznets curve in agriculture non-point source pollution and its drivers analysis[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(11): 118−123

[7] 栾健, 韩一军. 城镇化会加剧化肥面源污染吗——基于门槛效应与空间溢出的双重视角[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(5): 174−186
LUAN J, HAN Y J. Does urbanization intensify chemical fertilizer non-point source pollution: Based on threshold effects and spatial spillovers[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(5): 174−186

[8] 薛蕾, 廖祖君, 王理. 城镇化与农业面源污染改善——基于农民收入结构调节作用的空间异质性分析[J]. 农村经济, 2019, (7): 55−63
XUE L, LIAO Z J, WANG L. Urbanization and improvement of agricultural non-point source pollution: An analysis of spatial heterogeneity based on the adjustment effect of farmers' income structure[J]. Rural Economy, 2019, (7): 55−63

[9] 邵帅, 李宝礼. 农村劳动力转移如何影响农村环境污染?——基于空间面板模型的实证考察[J]. 中国地质大学学报: 社会科学版, 2020, 20(1): 39−55
SHAO S, LI B L. Effects of rural labor transfer on rural environmental pollution in China: an empirical investigation based on spatial panel model[J]. Journal of China University of Geosciences: Social Sciences Edition, 2020, 20(1): 39−55

[10] 刘燕, 柴原. 农业劳动力转移背景下农业直接补贴对面源污染的影响——以化肥污染为例[J]. 中南林业科技大学学报: 社会科学版, 2020, 14(3): 56−66, 73
LIU Y, CHAI Y. Impact of agricultural direct subsidies on non-point source pollution under the background of agricultural labor transfer: a case study of chemical fertilizer pollution[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology: Social Sciences, 2020, 14(3): 56−66, 73

[11] 闫桂权, 何玉成, 张晓恒. 绿色技术进步、农业经济增长与污染空间溢出——来自中国农业水资源利用的证据[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(12): 2921−2935
YAN G Q, HE Y C, ZHANG X H. Green technology progress, agricultural economic growth and pollution space spillover effect: evidence of agricultural water utilization process in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(12): 2921−2935

[12] 侯孟阳, 姚顺波. 中国农村劳动力转移对农业生态效率影响的空间溢出效应与门槛特征[J]. 资源科学, 2018, 40(12): 2475−2486
HOU M Y, YAO S B. Spatial spillover effects and threshold characteristics of rural labor transfer on agricultural eco-efficiency in China[J]. Resources Science, 2018, 40(12): 2475−2486

[13] 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

[14] 史常亮, 李赟, 朱俊峰. 劳动力转移、化肥过度使用与面源污染[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(5): 169−180
SHI C L, LI Y, ZHU J F. Rural labor transfer, excessive fertilizer use and agricultural non-point source pollution[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(5): 169−180

[15] 廖炜, 李璐, 杨伟, 等. 城镇化过程中的流域面源污染时空变化[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1776−1783
LIAO W, LI L, YANG W, et al. Spatio-temporal change of non-point source pollution loads in the process of urbanization[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(8): 1776−1783

[16] 吴义根, 冯开文, 李谷成. 人口增长、结构调整与农业面源污染——基于空间面板STIRPAT模型的实证研究[J]. 农业技

术经济, 2017, (3): 75−87
WU Y G, FENG K W, LI G C. Population growth, structural adjustment and agricultural non-point source pollution: an empirical study based on the spatial panel STIRPAT model[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2017, (3): 75−87

[17] 徐承红, 薛蕾. 农业产业集聚与农业面源污染——基于空间异质性的视角[J]. 财经科学, 2019, (8): 82−96
XU C H, XUE L. Agricultural industry agglomeration and agricultural non-point source pollution — A perspective based on spatial heterogeneity[J]. Finance & Economics, 2019, (8): 82−96

[18] 温忠麟, 叶宝娟. 中介效应分析: 方法和模型发展[J]. 心理科学进展, 2014, 22(5): 731−745
WEN Z L, YE B J. Analyses of mediating effects: the development of methods and models[J]. Advances in Psychological Science, 2014, 22(5): 731−745

[19] 徐建玲, 查婷俊. 基于城镇化视角的省域粮食安全研究——以江苏省为例[J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2353−2360
XU J L, ZHA T J. Provincial food security from the perspective of urbanization in Jiangsu Province[J]. Resources Science, 2014, 36(11): 2353−2360

[20] 范泽孟, 李赛博. 1990年来中国城镇建设用地占用耕地的效率和驱动机理时空分析[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 374−387
FAN Z M, LI S B. Spatio-temporal analysis of the economic benefit and driving mechanism of urban build-up land occupying the cultivated land in China since 1990[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 374−387

[21] 叶中华, 魏玉君. 城镇化背景下粮食安全研究可视化分析——基于Cite Space的图谱量化研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(S1): 64−66
YE Z H, WEI Y J. Visualization analysis of food security under the background of urbanization: graphite quantization on Cite Space[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(S1): 64−66

[22] 向涛, 綦勇. 粮食安全与农业面源污染——以农地禀赋对化肥投入强度的影响为例[J]. 财经研究, 2015, 41(7): 132−144
XIANG T, QI Y. Food security and agricultural non-point source pollution: taking the impact of agricultural land endowments on fertilizer use intensity as an example[J]. Journal of Finance and Economics, 2015, 41(7): 132−144

[23] 赵明正, 赵翠萍, 李天祥, 等. “零增长”行动背景下中国化肥使用量下降的驱动因素研究——基于LMDI分解和面板回归分析[J]. 农业技术经济, 2019, (12): 118−130
ZHAO M Z, ZHAO C P, LI T X, et al. Driving forces analysis for China’s recent fertilizer use reduction under the “zero growth” action plan—estimation based on the LMDI approach and panel regression analysis[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2019, (12): 118−130

[24] GODFRAY H C J, CRUTE I R, HADDAD L, et al. The future of the global food system[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2010, 365(1554): 2769−2777

[25] 郑旭媛, 徐志刚. 资源禀赋约束、要素替代与诱致性技术变迁——以中国粮食生产的机械化为例[J]. 经济学, 2017, 16(1): 45−66
ZHENG X Y, XU Z G. Endowment restriction, factor substitution and induced technological innovation: a case research on the grain producing mechanization in China[J]. China Economic Quarterly, 2017, 16(1): 45−66

[26] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 96−101
YANG L Z, FENG Y F, SHI W M, et al. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 96−101

[27] 江景涛, 杨然兵, 鲍余峰, 等. 水肥一体化技术的研究进展与发展趋势[J]. 农机化研究, 2021, 43(5): 1−9
JIANG J T, YANG R B, BAO Y F, et al. Research progress and development trend of water and fertilizer integration[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(5): 1−9

[28] 王一格, 王海燕, 郑永林, 等. 农业面源污染研究方法与控制技术研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(1): 25−33
WANG Y G, WANG H Y, ZHENG Y L, et al. Advances in research methods and control technologies of agricultural non-point source pollution: a review[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(1): 25−33

[29] 黄建强, 李录堂. 从农村劳动力视角探析耕地抛荒行为——基于会同县农村的实证研究[J]. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2009, 11(6): 42−47
HUANG J Q, LI L T. The phenomenon of idling arable land in view of rural labour—an empirical study of the phenomenon on the basis of the reality in Huitong County[J]. Journal of Beijing Institute of Technology: Social Sciences Edition, 2009, 11(6): 42−47

[30] GELLRICH M, BAUR P, KOCH B, et al. Agricultural land abandonment and natural forest re-growth in the Swiss mountains: a spatially explicit economic analysis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 118(1/2/3/4): 93−108

[31] BOWLUS A J, SICULAR T. Moving toward markets? Labor allocation in rural China[J]. Journal of Development Economics, 2003, 71(2): 561−583

[32] 陈敏鹏, 陈吉宁, 赖斯芸. 中国农业和农村污染的清单分析与空间特征识别[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6): 751−755
CHEN M P, CHEN J N, LAI S Y. Inventory analysis and spatial distribution of Chinese agricultural and rural pollution[J]. China Environmental Science, 2006, 26(6): 751−755

[33] 赖斯芸, 杜鹏飞, 陈吉宁. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(9): 1184−1187
LAI S Y, DU P F, CHEN J N. Evaluation of non-point source pollution based on unit analysis[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(9): 1184−1187

[34] 许庆. 技术效率、配置效率与中国的粮食生产——基于农户的微观实证研究[J]. 人民论坛·学术前沿, 2013, (16): 84−95
XU Q. Technical and allocative efficiencies and China’s grain production—A microcosmic empirical study based on data of rural households[J]. People’s Tribune Frontiers, 2013, (16): 84−95

[35] 刘晨跃, 徐盈之. 城镇化如何影响雾霾污染治理?——基于中介效应的实证研究[J]. 经济管理, 2017, 39(8): 6−23
LIU C Y, XU Y Z. How does urbanization affect haze pollution

control? — An empirical study based on the mediation effect[J]. Business Management Journal, 2017, 39(8): 6−23

[36] FARE R, GROSSKOPF S, NORRIS M. Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries: reply[J]. American Economic Review, 1997, 87(5): 1040−1043

[37] 程惠芳, 陆嘉俊. 知识资本对工业企业全要素生产率影响的实证分析[J]. 经济研究, 2014, 49(5): 174−187
CHENG H F, LU J J. The empirical analysis of knowledge capital impact on total factor productivity of industry enterprises[J]. Economic Research Journal, 2014, 49(5): 174−187

[38] 史常亮, 郭焱, 朱俊峰. 中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(4): 671−679
SHI C L, GUO Y, ZHU J F. Evaluation of over fertilization in China and its influencing factors[J]. Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(4): 671−679

[39] 杜江, 罗珺. 农业经济增长与污染性要素投入——基于简约式及结构式模型的实证分析[J]. 经济评论, 2013, (3): 56−65, 117
DU J, LUO J. Agricultural economic growth and pollutant factor input: an empirical analysis based on the concise and structural models[J]. Economic Review, 2013, (3): 56−65, 117

[40] 葛继红, 周曙东. 要素市场扭曲是否激发了农业面源污染——以化肥为例[J]. 农业经济问题, 2012, 33(3): 92−98, 112
GE J H, ZHOU S D. Does factor market distortions stimulate the agricultural non-point source pollution? A case study of fertilizer[J]. Issues in Agricultural Economy, 2012, 33(3): 92−98, 112

[41] 张平淡, 袁赛. 决胜全面小康视野的农民收入结构与农业面源污染治理[J]. 改革, 2017, (9): 98−107
ZHANG P D, YUAN S. The income structure of farmers and the treatment of agricultural non-point source pollution in a comprehensive well-off vision[J]. Reform, 2017, (9): 98−107

[42] 武宵旭, 葛鹏飞, 徐璋勇. 城镇化与农业全要素生产率提升: 异质性与空间效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(5): 149−156
WU X X, GE P F, XU Z Y. Urbanization and the promotion of agricultural total factor productivity: heterogeneity and spatial effect[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(5): 149−156

[43] 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 of 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

[44] 冷晨昕, 周晓时, 吴丽丽. 人力资本对农业劳动供给的影响——基于分数响应模型和无条件分位数回归模型[J]. 经济问题探索, 2021, (2): 38−48
LENG C X, ZHOU X S, WU L L. Effects of human capital on agricultural labor supply: Based on the fractional response model and the unconditional quintile model[J]. Inquiry into Economic Issues, 2021, (2): 38−48

[45] 吕晓, 屈毅, 彭文龙. 农户化肥施用认知、减施意愿及其影响因素——基于山东省754份农户调查问卷的实证[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(4): 46−51
LYU X, QU Y, PENG W L. Farmers' cognition of fertilizer application, willingness to reduce fertilizer application and its influencing factors[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(4): 46−51

[46] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010—2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 789−802
LIU J Y, NING J, KUANG W H, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 789−802

[47] 高延雷, 张正岩, 魏素豪, 等. 城镇化对中国粮食安全的影响——基于省区面板数据的实证分析[J]. 资源科学, 2019, 41(8): 1462−1474
GAO Y L, ZHANG Z Y, WEI S H, et al. The impact of urbanization on China's food security: An empirical analysis based on panel data of provinces and regions[J]. Resources Science, 2019, 41(8): 1462−1474

[48] 刘笑冰, 申强, 何忠伟. 我国农业科技成果转化资金绩效实证研究[J]. 农业技术经济, 2015, (6): 74−81
LIU X B, SHEN Q, HE Z W. An empirical study on the performance of agricultural science and technology achievements transformation funds in China[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2015, (6): 74−81

[49] 魏君英, 夏旺. 农村人口老龄化对我国粮食产量变化的影响——基于粮食主产区面板数据的实证分析[J]. 农业技术经济, 2018, (12): 41−52
WEI J Y, XIA W. The impact of rural population aging on the change of grain yield in China — Empirical analysis based on panel data of the main grain-producing areas[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2018, (12): 41−52

[50] 程名望, 黄甜甜, 刘雅娟. 农村劳动力转移对粮食安全的影响——基于粮食主销区面板数据的实证分析[J]. 上海经济研究, 2015, (4): 87−92, 100
CHENG M W, HUANG T T, LIU Y J. The impact of rural labor transfer on food security — An empirical analysis based on panel data of major grain sales areas[J]. Shanghai Economic Research, 2015, (4): 87−92, 100

[51] 成德宁, 杨敏. 农业劳动力结构转变对粮食生产效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 社会科学版, 2015, 15(4): 19−26
CHENG D N, YANG M. Research on effect of agricultural labor force structure change on food production efficiency in China[J]. Journal of Northwest A& F University: Social Science Edition, 2015, 15(4): 19−26

[52] 田云, 张俊飚, 何可, 等. 农户农业低碳生产行为及其影响因素分析——以化肥施用和农药使用为例[J]. 中国农村观察, 2015, (4): 61−70
TIAN Y, ZHANG J B, HE K, et al. Analysis of farmers' agricultural low-carbon production behavior and its influencing factors—Fertilizer application and pesticide use as an example[J]. China Rural Survey, 2015, (4): 61−70

[53] 杨鑫, 穆月英. 我国农业区域发展差异分析及政策选择[J]. 经济问题探索, 2017, (2): 168−176
YANG X, MU Y Y. Analysis of regional development differences in Chinese agriculture and policy choices[J]. Inquiry into Economic Issues, 2017, (2): 168−176