

强制性环境规制对海洋陆源污染的非线性影响及机制研究

徐菊, 杨春燕

(上海海洋大学经济管理学院 上海 201306)

摘要: 基于2012—2023年中国沿海11个地区的海洋环境陆源污染面板数据, 采用固定效应模型、门槛回归模型和中介效应模型研究强制性环境规制对海洋环境陆源污染的影响。研究发现: (1) 强制性环境规制与海洋环境陆源污染之间存在倒“U”型关系, 当环境规制达到一定强度后可以持续降低海洋环境陆源污染; (2) 门槛效应回归检验表明, 强制性环境规制对海洋环境陆源污染治理的负向影响存在单门槛效应; (3) 机制检验发现, 绿色技术创新和产业结构在强制性环境规制与陆源污染治理之间发挥了中介作用, 即强制性环境规制可以通过激发企业进行绿色技术创新和产业结构升级降低海洋环境陆源污染。为提高我国海洋环境陆源污染治理水平, 应构建跨区域协同治理机制, 分阶段优化环境规制强度, 促使企业进行绿色技术创新和产业结构调整以平衡环境治理与经济目标, 为陆源污染治理提供科学依据。

关键词: 环境规制; 陆源污染; 海洋环境保护; 协同治理

中图分类号: X55; P74

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857(2026)02-0122-16

The Nonlinear Impact and Mechanisms of Mandatory Environmental Regulation on Land-Based Marine Pollution

XU Ju, YANG Chunyan

(School of Economics and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Based on the panel data of land-based pollution of the marine environment in 11 provinces along the coast of China from 2012 to 2023, the impact of mandatory environmental regulation on land-based pollution of the marine environment is investigated by using fixed-effects, threshold regression, and mediated-effects models. It is found that: (1) There is an inverted U-shaped relationship between mandatory environmental regulation and marine land-based pollution, and when environmental regulation reaches a certain intensity, it can continue to reduce the land-based pollution of the marine environment; (2) The regression test of threshold effect shows that there is a single-threshold effect in the negative impact of mandatory environmental regulation on the management of land-based pollution of the marine environment; (3) The mechanism test shows that green technological

收稿日期: 2025-11-03; 修订日期: 2026-01-23

基金项目: 国家现代农业产业技术体系专项资金(CARS-48)

作者简介: 徐菊, 讲师, 博士, 研究方向为创业教育、创业组织管理和海洋环境治理

通信作者: 杨春燕, 硕士研究生, 研究方向为海洋环境治理

innovation and industrial structure play a mediating role between mandatory environmental regulation and land-based pollution management, that is, mandatory environmental regulation can reduce land-based pollution in the marine environment by stimulating enterprises to carry out green technological innovation and industrial structure upgrading. In order to improve the management of land-based pollution in China's marine environment, a cross-regional collaborative management mechanism should be constructed to optimize the intensity of environmental regulation in phases, to promote enterprises to carry out green technological innovation and industrial structure adjustment to balance the dual objectives of environmental management and economic development, and to provide a scientific basis for the management of land-based pollution.

Keywords: Environmental regulation; Land-based pollution; Marine environmental protection; Synergistic governance

0 引言

中国作为世界海洋大国, 拥有 1.8 万多千米的大陆海岸线、1.4 万多千米的海岛岸线和 300 万平方千米的管辖海域总面积。为实现海洋生态环境的可持续发展, 促进人海和谐共生, 中国沿海地区在治理海洋环境陆源污染方面承担着重要作用。陆地的污染严重影响着近岸海水水质, 使海洋环境保护面临巨大挑战。据统计, 全球约 80% 的海洋环境污染来源于陆源污染 (Land-primitively Based Sources Pollution, LBSP)^[1]。随着城镇化和工业化的快速发展, 人类活动产生的污染物通过大气、排污管道、河流和地下水等多种途径排入海洋^[2]。近年来, 中国政府为遏制海洋环境陆源污染采取了一系列措施。1990 年颁布实施了《中华人民共和国防治陆源污染物污染损害海洋环境管理条例》, 该条例是中国首部专门针对陆源污染出台的法规, 明确了陆源、陆源污染物等相关概念。针对陆源污染, 2023 年修订了《中华人民共和国海洋环境保护法》, 进一步强调了陆源污染在海洋环境治理中的重要性。沿海各省份在保护海洋环境免受陆源污染方面也积极开展实践。以《渤海碧海行动计划》为例, 该计划是我国首个针对陆源污染与近海污染协同治理的纲领性文件。其创新性地采用了“纵”“横”结合的管理模式, 由国务院首次联合相关省市及部门, 从区域层面推进陆源污染的重点防治工作: 一方面在中央与地方政府之间实行垂直管理, 另一方面推动中央与地方的跨区域、跨部门协作, 实现横

向统筹治理。经过长期努力, 中国在海洋环境陆源污染治理方面取得了阶段性成效, 近岸海域水质总体得到明显的改善。然而, 2023 年《中国海洋生态环境状况公报》显示, 虽然我国管辖海域水质稳中趋好, 近岸海水水质持续改善, 但是辽东湾、长江口、杭州湾、珠江口等近岸海域仍以劣四类海水为主。这一现状深刻表明, 重点海域的环境承载力尚未实现根本性转变, 陆源污染物排放总量控制、入海河流水质改善与近海生态修复等关键环节依然面临巨大压力。尽管顶层设计与管理模式已取得历史性突破, 但要彻底扭转部分近岸海域长期积累的污染态势, 实现海洋生态环境的根本性好转, 治理工作仍任重道远。

环境规制作为地方政府干预环境治理的重要工具, 研究环境规制与海洋环境陆源污染的关系, 对实现海洋环境的可持续发展具有重要意义^[3-4]。当前关于环境规制与环境污染之间关系的文献较为丰富, 已有不少学者对环境规制的有效性进行了研究^[5], 但尚未形成统一的结论。现有研究主要可归纳为以下 3 种观点: ①环境规制能够有效抑制环境污染。该观点可分为“创新补偿论”和“强制减排论”, 其中“创新补偿论”主要依据波特假说, 认为恰当的环境规制能够产生“补偿”效应^[6], 长期合理的环境规制能够有效降低环境污染^[7-8]。一系列的实证研究验证了波特假说在海洋领域的适用性^[9]。“强制减排论”则认为, 政府实施环境规制可以通过向排污者征收排污费, 以增加企业的环境成本, 从而减少污染的排放^[10-11]。②环境规制会加剧环

境污染。相关解释可分为“成本遵循论”和“绿色悖论”。其中，“成本遵循论”认为，环境规制加重了企业的成本负担，不仅难以激励企业进行技术创新，反而会促使企业在追求利益最大化的驱动下扩大污染排放^[12]。持“绿色悖论”的学者则主张，环境规制力度的增强会促进能源生产加大开采力度，企业希望在新的环保标准实施前销售能源资产，从而导致污染的急剧膨胀^[13]。③环境规制与环境污染之间存在非线性关系。例如，Wang等^[14]认为环境规制与环境污染之间存在倒“U”型关系，当环境规制水平较低时，企业会尽可能地规避环境监管，环境规制并不能有效减少环境污染，只有在环境规制达到一定阈值时，环境规制才有助于减少环境污染。Ye等^[9]的研究也表明，环境规制与海洋环境呈现倒“U”型的非线性关系。

综上所述，当前学界虽已围绕环境规制与环境污染的相互影响展开了广泛而深入的探讨，但相关成果多集中于泛化的环境污染领域，对海洋环境领域的关注相对有限；即便偶有涉及环境规制与海洋污染的研究，也主要聚焦于海洋环境污染本身，鲜有研究专门针对海洋环境中至关重要的陆源污染问题予以深入探讨。由于海洋环境治理的根源在陆地，若想实现海洋环境的可持续发展，治理陆源污染是保护海洋环境的重要一环。为此，本文将聚焦于海洋环境陆源污染问题，重点探讨强制性环境规制对其的影响，以期为制定科学的海洋环境陆源污染治理措施提供参考。

1 理论分析与研究假设

1.1 强制性环境规制对陆源污染的直接影响

强制性环境规制是指政府凭借公权力，通过制定具有法律强制力的环境质量标准、排放限额、技术规范等统一规则，并直接以行政许可、监督检查和行政处罚等强制手段确保其执行的环境治理模式。其典型政策工具包括污染物排放浓度与总量标准、强制性技术准入、非交易性质的排污许可证，以及对超标排污企业实施的限期治理、停产整治乃至强制关停等措施。该模式以行政指令的确定性和强制性为核心特征，区别于通过调整成本收益来引

导企业自主选择减排方式的市场激励型规制，也不同于依靠企业社会责任与声誉机制驱动的自愿型规制，构成了环境政策体系中具有底线约束作用的刚性力量。由于海洋具有公共产品属性，海洋环境所带来的负外部性通常需要政府制定相关的环境规制予以应对^[15]。在利用环境规制手段控制环境污染时，政府往往通过征收排污费和环保税等方式提高企业的污染控制成本，从而减少能源消耗进而遏制环境污染^[16]。部分学者认为，政府可以通过征收环保税和建立排污权交易制度来增加企业的生产成本和污染控制成本，从而减少污染^[17]。但也有部分学者对此观点提出了质疑^[13]。对于环境规制与环境污染的关系，有学者认为二者之间呈“U”型关系^[18-19]，也有学者认为二者呈倒“U”型曲线关系^[14,20-23]。针对不同污染水平地区环境规制的效果，有学者认为在污染严重的地区环境规制的作用更加显著^[24]，也有学者认为市场型环境规制在污染较低的区域更为有效^[25]。可见，环境规制对陆源污染的作用效果存在区域差异^[26]。环境规制对陆源污染的影响呈现倒“U”型的理论机制在于，其通过合规成本效应、逃避监管行为与创新激励效应的动态博弈，在不同规制强度区间主导了企业的差异化行为响应：在低规制强度阶段，由于排放标准宽松、执法力度不足，企业的合规成本相对较低，而逃避监管的预期收益高于潜在罚金，这促使企业普遍采取“末端应对”策略甚至通过“给监测设备戴口罩”、私设暗管等恶意手段规避监管，导致规制实际威慑力有限，陆源污染持续加剧；当规制强度跨越特定阈值后，持续的高合规成本与严厉处罚风险使逃避监管行为不再经济，企业为降低长期运营压力被迫进行生产流程优化或绿色技术创新；同时，严格的环境准入标准倒逼高污染产业转型或退出，推动区域产业结构高级化，最终实现陆源污染排放的实质性下降。这一非线性关系揭示了强制性环境规制的效果受制于企业成本收益权衡与创新动力的阶段性特征，也为政策设计中需精准把握“强度阈值”提供了理论依据。

据此，本文提出假设1：强制性环境规制与海洋陆源污染之间存在倒“U”型关系。

1.2 强制性环境规制对海洋环境陆源污染的间接影响

人类活动是加剧海洋环境陆源污染的主要因素, 对其进行有效规制可以促进海洋环境可持续发展。有学者认为, 产业结构调整和技术创新是影响环境污染的重要因素^[27-28]。在既有研究的基础上, 本文综合考虑了产业结构升级和绿色技术创新对海洋环境陆源污染的影响, 认为强制性环境规制不仅可以通过直接效应影响陆源污染, 还可以通过促进产业结构升级和推动绿色技术创新间接影响陆源污染。

1.2.1 强制性环境规制通过影响绿色技术创新降低陆源污染

绿色技术创新通过生产技术和污染治理技术的共同进步影响环境质量^[29]。环境规制作为政府弥补市场失灵、协调经济发展和保护环境的政策手段, 其作用主要体现在正向的“创新补偿效应”和负向的“遵循成本效应”两种机制的博弈之中^[30]。一方面, “创新补偿效应”认为, 环境规制可以倒逼企业进行绿色技术创新, 即环境规制在一定程度上增加企业的污染治理成本, 增加污染治理的研发投入, 从而实现企业的绿色技术创新^[31]。另一方面, 从“遵循成本效应”出发, 环境规制增加了企业的生产成本和治污成本, 在企业经营的过程中, 企业资金有限, 会在一定程度上降低研发经费, 从而阻碍技术创新^[32]。

基于此, 本文提出假设 2: 强制性环境规制可以通过绿色技术创新的“创新补偿效应”正向间接减少陆源污染。

1.2.2 强制性环境规制通过影响产业结构调整降低陆源污染

关于环境规制与产业结构之间的相互作用, 学界尚未形成统一定论。“污染避难所”假说认为, 国家或者地区的环境规制力度不一, 高污染产业可能会为规避高强度的环境规制而将污染企业转移到规制力度较弱的地区^[33]。“波特假说”认为, 适度的环境规制可以促进企业技术改进, 从而引发产业升级^[34]。产业结构优化有助于减少污染排放, 实现经济效益与环境效益的统一。

基于此, 本文提出假设 3: 强制性环境规制可以通过影响产业结构升级间接降低海洋陆源污染。

2 模型设置与数据描述

2.1 模型设计

环境库兹涅茨曲线 (EKC) 假说描述了经济发展与环境污染之间普遍存在的倒“U”型关系, 即环境污染水平随着经济规模的扩张而上升, 但达到一定的转折点后会随着经济进一步增长而趋于下降^[35]。该假说在大多数国家和地区都适用。故本文基于该假说构建基准模型 EKC 曲线, 表达式如下:

$$\ln P_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln \text{GDP}_{it} + \alpha_2 \ln \text{GDP}_{it}^2 + \alpha_n \ln X_{it} + \varepsilon, \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

式中: $\ln P_{it}$ 表示地区 i 在第 t 年的污染水平; α_0 表示常数项; α_1 是一元变量的系数; $\ln \text{GDP}$ 和 $\ln \text{GDP}^2$ 分别表示人均 GDP 产出及其平方项; α_2 是二元变量的系数; X 为控制变量, ε 表示随机误差项。基于式 (1), 本文借鉴 Song 等^[36]的方法构建模型:

$$\ln \text{LBMP}_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln \text{ERS}_{it} + \alpha_2 \ln^2 \text{ERS}_{it} + \alpha_3 \ln \text{GDP}_{it} + \alpha_4 \ln^2 \text{GDP}_{it} + \alpha_n \ln X_{it} + v_i + \varepsilon_{it}, \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (2)$$

式中: $\ln \text{LBMP}_{it}$ 表示地区 i 在第 t 年的陆源污染水平; $\ln \text{ERS}_{it}$ 表示地区 i 在第 t 年的环境规制强度; $\ln \text{GDP}_{it}$ 表示地区 i 在第 t 年的人均 GDP 水平; $\ln X_{it}$ 表示地区 i 在第 t 年的其他控制变量; v_i 为个体固定效应; ε_{it} 为误差项。

为验证假设 3, 本文采用中介效应分析方法研究环境规制对陆源污染的间接影响关系。若环境规制能够通过绿色技术创新和产业结构间接影响陆源污染, 则将绿色技术创新和产业结构称为中介变量。本文根据式 (2) 来验证绿色技术创新和产业结构的中介效应, 其中 $\ln \text{GTI}$ 和 $\ln \text{IS}$ 分别代表沿海各地的绿色技术创新水平和产业结构升级水平, 模型为:

$$\ln \text{IS}_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln \text{ERS}_{it} + \alpha_2 \ln^2 \text{ERS}_{it} + \alpha_3 \ln \text{GDP}_{it} + \alpha_4 \ln^2 \text{GDP}_{it} + \alpha_n \ln X_{it} + v_i + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$\ln \text{GTI}_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln \text{ERS}_{it} + \alpha_2 \ln^2 \text{ERS}_{it} + \alpha_3 \ln \text{GDP}_{it} + \alpha_4 \ln^2 \text{GDP}_{it} + \alpha_n \ln X_{it} + v_i + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

$$\ln \text{LBMP}_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln \text{ERS}_{it} + \alpha_2 \ln^2 \text{ERS}_{it} + \alpha_3 \ln \text{GDP}_{it} + \alpha_4 \ln^2 \text{GDP}_{it} + \ln \text{IS}_{it} + \ln \text{GTI}_{it} + \alpha_n \ln X_{it} + v_i + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

根据以上模型设置, 本文所构建的强制性环境规制对海洋陆源污染的影响机制如图 1 所示。

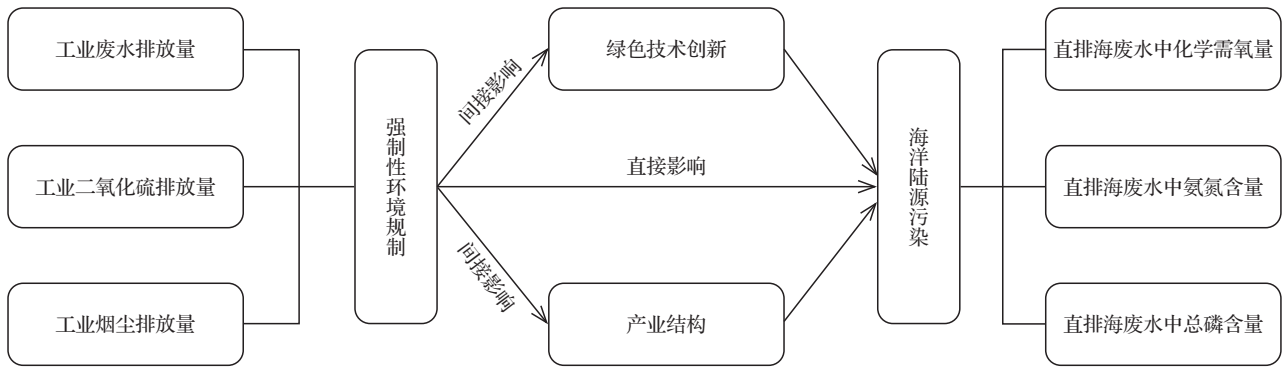


图1 强制性环境规制对海洋陆源污染的影响效应

Fig.1 The effects of mandatory environmental regulation on marine land-based pollution

2.2 变量的选取

2.2.1 被解释变量

本文的被解释变量为海洋环境陆源污染。现有研究中并没有统一的标准来衡量海洋环境陆源污染。有的学者用单一的指标来衡量陆源污染，如采用工业废水排放量^[37]、海水水质的面积^[38]等反映海洋环境近岸海洋污染程度。也有学者采用综合指标衡量陆源污染，例如，采用工业废水中污染物、利用熵权法构建近岸海洋污染综合指数^[39]。虽然研究表明，近岸海域中约80%的污染来源于陆源污染，但是在研究海洋环境陆源污染时，单纯地依靠工业废水和海水面积的数据太过笼统，并未精准聚焦于海洋环境陆源污染。故本文选取《中国海洋环境生态状况公报》中公布的直排海污水中污染物数据进行分析。该公报指出，化学需氧量、氨氮和总磷是直排海污染源中的主要污染物。由于公报中只统计了省级层面的数据，为保证数据的完整性和实证研究的严谨性，本文运用熵权法，基于化学需氧量、氨氮、总磷等污染物数据，计算了海洋环境陆源污染的综合污染指数，并以此作为陆源污染的衡量指标。

熵权法是一种综合评价方法，可用于确定各评价指标的权重，进而构建一个综合指标。在构建海洋陆源污染评价体系时，由于不同指标对总体海洋陆源污染的贡献不同，需要对各个指标赋予相应权重。本文使用熵权法对海洋陆源污染指标体系进行赋权和评价，以保证评价结果更为客观、准确。该

方法的主要步骤如下。

第一步，指标选取。设有 m 个省（自治区、直辖市）、 n 个评价指标， x_{ij} 为第 i 个省（自治区、直辖市）的第 j 个评价指标的指标值。

第二步，指标数据标准化处理。将原始数据转换为无量纲的标准化数据，以消除不同指标间的量纲影响，转换方法为：

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \times 0.9999 + 0.0001 \quad (6)$$

如果存在负向指标，对其进行逆向化处理，处理方式：

$$z_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \times 0.9999 + 0.0001 \quad (7)$$

第三步，运用熵权法计算综合评价得分。

第 j 个指标下第 i 个样本所占比重为：

$$p_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^m z_{ij}} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

第 j 个指标的信息熵为：

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} (\ln p_{ij}) \quad (9)$$

第 j 个指标的差异系数为：

$$g_j = 1 - e_j \quad (10)$$

差异系数 g_i 反映了指标的有效信息量，即指标的离散程度。

指标权重为：

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \quad (11)$$

其原理基于信息熵的概念, 指标的变异性越大, 所含信息量越大, 相应的权重也越大。

2012—2023年11个沿海地区陆源污染综合指数情况, 如图2所示。

2.2.2 核心解释变量

作为本研究的核心解释变量, 当前关于环境规制的强度并没有统一的量化标准, 现有研究测量环境规制的强度方法主要有单一指标测量法和综合指标测量法两种方法^[20]。单一指标包括环境污染治理投资额^[40]、污染设备运行成本^[41]、环境污染治理投资额与GDP或工业产值的比重^[42]、环保税^[43]和排污费^[9]等。综合指标测量法将多个单一指标

赋权构建污染综合指数来反映环境规制强度, 其优势在于排除主观性干扰。例如, 采用工业废水排放量、工业SO₂排放量、工业烟粉尘排放量三个指标构建环境规制^[44]。考虑到环境规制具有多维度特征, 仅采用单一指标易产生误差, 因此本文借鉴Ma等^[39]的方法, 选取工业废水排放量、工业SO₂排放量和工业烟粉尘排放量三个指标, 构建强制性环境规制的综合指数。工业三废(废水、SO₂、烟粉尘)排放量作为规制强度的逆向代理变量, 符合“严格规制→减排压力→排放下降”的作用机理。2012—2023年11个沿海地区的环境规制综合指数情况, 如图3所示。

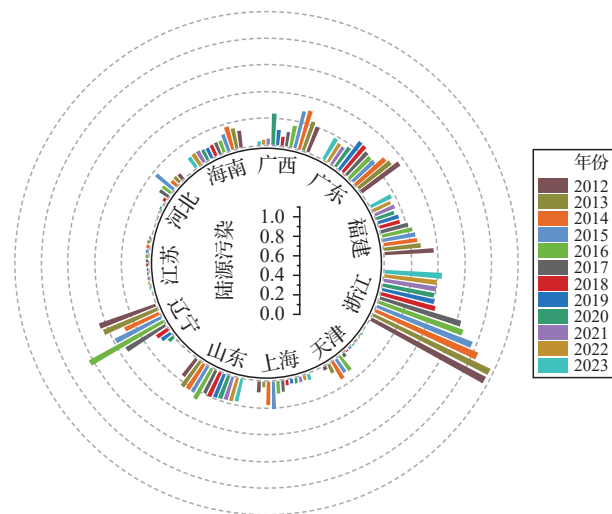


图2 2012—2023年沿海地区陆源污染综合指数

Fig.2 Composite index of land-based source pollution in coastal provinces and cities, 2012—2023

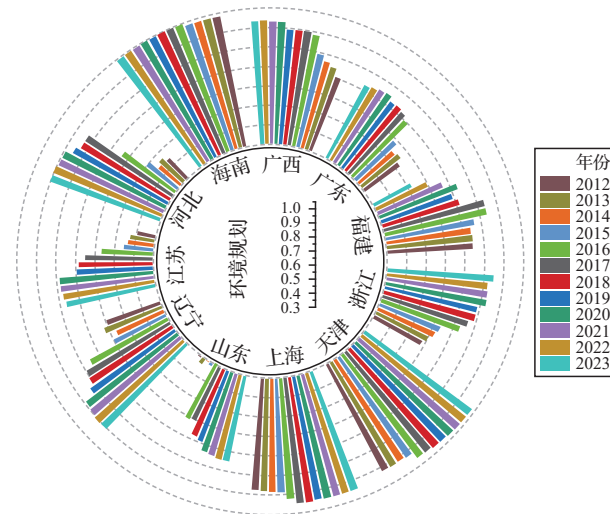


图3 2012—2023年沿海地区环境规制综合指数

Fig.3 Composite index of environmental regulation in coastal provinces and cities, 2012—2023

2.2.3 控制变量

(1) 经济发展水平

人均GDP是衡量区域经济发展水平的核心指标, 因其有效剔除了人口规模干扰, 能客观反映区域平均经济产出与生产效率, 数据可得性高、可比性强, 能直观刻画地区经济繁荣程度, 故本文采用人均GDP来衡量某地区的经济发展水平。

(2) 城市化进程

快速城市化通常伴随基础设施的增加、工业规模的扩张及生活污水排放量的增加, 对直排入海的污水

量产生直接的影响, 从而加剧陆源污染。本文采用城镇人口占年末常住总人口的比重表征城市化进程。

(3) 人口规模

人口增长与环境承载力之间的协调一直是人口、资源与环境领域关注的重点^[45]。一般认为“人口越多污染也就越多”, 即人口规模与污染排放之间呈正相关^[46]。本文以各地区年末常住人口总数的对数(lnPS)衡量人口规模。

(4) 绿色技术创新

绿色技术创新是环境污染治理过程中的重要途

径,可以通过促进产业转型升级,提高产品服务效能和质量来增加企业的价值^[47],降低能源强度,从而提高环境质量。有学者认为,企业的专利申请数量能够代表企业进行技术创新的成本投入,故采用人均专利授权量来衡量技术进步^[48]。考虑到数据的可获得性,本文以中国沿海各地区的企业专利申请数量的对数(lnGTI)作为绿色技术创新的指标,以反映企业在创新方面的投入与活跃程度。

(5) 产业结构

产业结构升级是改善环境质量的重要途径^[49]。第三产业的快速发展标志着我国产业结构向绿色方向转变,对经济可持续发展具有重要意义^[50]。本文采用第三产业增加值和第二产业增加值的比值来衡量产业结构升级水平,该比值越大,表明该地区产业服务化程度越高。

2.3 数据说明

本文选取我国沿海 11 个地区 2012—2023 年的公开统计数据作为研究样本,11 个地区包括辽宁、河北、天津、山东、江苏、上海、浙江、福建、广东、广西、海南。鉴于数据可得性,本研究未包含港澳台地区数据。原始数据来源于中国研究数据服务平台(CNRDS)及《中国海洋生态环境状况公报》《中国环境统计年鉴》《中国环境年鉴》《中国城市统计年鉴》,部分缺失的数据由各地区的统计年鉴补全。此外,为消除异方差并解决量纲不一致问题,对各变量取自然对数。表 1 为本文海洋环境陆源污染各变量的描述性统计分析结果。

表 1 海洋环境陆源污染各变量的描述性统计分析
Table 1 Descriptive analysis of variables of land-based sources of pollution in the marine environment

变量	样本量/个	平均值	标准差	最小值	最大值
陆源污染 (lnLBMP)	132	-2.431	1.442	-7.407	-0.038
强制性环境规 制(lnER)	132	-0.287	0.267	-1.190	-0.002
lnER ²	132	0.153	0.269	-2.380	-0.004
人均 GDP (lnGDP)	132	11.202	0.427	10.238	12.156
lnGDP ²	132	125.666	9.561	104.822	147.780
城市化水平 (lnUL)	132	4.181	0.183	3.771	4.545
人口规模 (lnPS)	132	8.399	0.768	6.813	9.450
企业绿色技术 创新(lnGTI)	132	10.160	1.558	6.089	12.813
产业结构 (lnIS)	132	0.265	0.380	-0.400	1.168

3 实证结果与分析

3.1 面板回归结果

3.1.1 面板单位根检验

本文采用 STATA/SE 17.0 软件进行实证研究。为避免伪回归问题,需要先对所有变量进行平稳性检验,以获取可靠的回归结果。本文采用的检验方法为 Levin-Lin-Chu 方法(LLC 检验),判断变量是否平稳。当 p 值小于 0.05 时,认为变量平稳,否则认为变量非平稳。检验结果见表 2。

表 2 面板数据 LLC 检验

Table 2 Panel data LLC test

LLC	LnLBMP	lnER	lnGDP	lnUL	lnPS	lnGTI	lnIS
Statistic	-6.312***	-10.059***	-1.953**	-4.345***	-1.993**	-4.717***	-1.909**
p -value	0.000	0.000	0.025	0.000	0.023	0.000	0.028

注: ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$ 。

从表 2 中可以看出,多数变量均在 0.01 的显著性水平下通过了平稳性检验,所有变量均在 0.05 的显著性水平下表现平稳,因此可以认为本文所使用

的变量具有平稳性。

3.1.2 面板协整检验

根据上述平稳性检验,本文又使用了 Pedroni

面板协整检验来判断变量之间是否存在协整关系, 进而判断变量之间是否存在长期稳定的关系。将所有变量全部纳入 Pedroni 进行检验, 结果如表 3 所示。Pedroni 统计量在 1% 的显著性水平下拒绝了“不存在协整关系”的原假设。由此可见, 变量之间存在长期稳定的协整关系。

表 3 面板协整检验

Table 3 Panel cointegration test

检验方法	统计量	p-value	结论
Modified Phillips-Perron t	5.357 5***	0.000 0	yes
Phillips-Perron t	-23.994 3***	0.000 0	yes
Augmented Dickey-Fuller t	-14.415 0***	0.000 0	yes

注: * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$ 。

3.1.3 基准回归结果

本文参照基准模型 (2), 定量评估了强制性环境规制与海洋环境陆源污染之间的关系。为验证解释变量与海洋环境陆源污染之间的关系, 本文采用固定效应模型和随机效应模型进行实证研究, 并通过 Hausman 检验确定固定效应模型更适用于本文。实证结果 (表 4) 显示, 无论在固定效应模型还是随机效应模型下, 环境规制对数的一次项 (lnER) 和二次项 (lnER²) 系数均通过了 0.01 的显著性水平检验, 且均为负值, 表明环境规制对陆源污染的影响呈显著的倒“U”型非线性关系 (图 4)。当环境规制对数 (lnER) 值为 -0.607 (即 ER=0.544) 时, 达到倒“U”型曲线的顶点。当环境规制对数 (lnER) 值大于 -0.607 (即 ER > 0.544) 时, 边际效应为负且绝对值递增, 表明规制降污效果显著增强, 企业不得不采用清洁技术或退出市场, 形成“优胜劣汰”机制。当环境规制对数 (lnER) 值小于 -0.607 (即 ER < 0.544) 时, 边际效应转为正, 表明环境规制加剧污染, 规制可能因成本过高或技术滞后导致效果有限甚至适得其反 (如部分企业选择偷排), 但实际上仅少数观测值位于此低值区, 缺乏代表性, 本文将利用门槛回归模型进行进一步检验。基准回归结果验证了假设 1。因此, 短期内应避免在低强度区间过度依赖环境规制, 需配套技术补贴或

税收优惠以降低企业转型成本。长期应持续将规制强度提升至阈值 (0.544) 以上 (环境规制对数值大于 -0.607), 以获取持续加速的污染减排收益。

表 4 基准回归结果

Table 4 Benchmark regression results

变量	固定效应模型	随机效应模型
lnER	-5.295*** (1.307)	-6.629*** (1.521)
lnER ²	-4.362*** (0.984)	-5.219*** (1.167)
lnGDP	-17.88* (9.877)	0.064 0 (11.32)
lnGDP ²	0.715* (0.427)	0.016 0 (0.493)
lnUL	-0.767 (2.018)	1.743 (1.970)
lnPS	24.08*** (3.469)	0.973 (0.764)
lnGTI	-0.784** (0.395)	-0.842** (0.391)
lnIS	-1.017** (0.474)	-0.954* (0.526)
常数项	-83.58 (54.06)	-12.91 (62.56)
模型	FE	RE
样本量	132	132
地区数量	11	11
R-squared	0.596	0.434 8

注: * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$, 括号内为标准误。

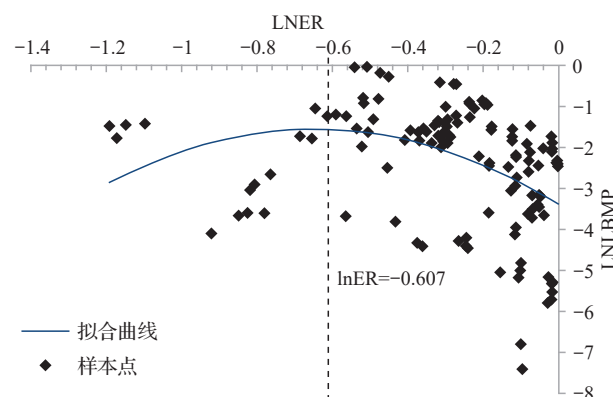


图 4 环境规制和海洋陆源污染之间的倒“U”型关系

Fig.4 Inverted “U”-shaped relationship between environmental regulation and marine land-based sources of pollution

环境规制强度与海洋陆源污染排放之间呈现显著的倒“U”型关系，这源于环境规制动态作用下企业成本—收益计算与行为响应的非线性变化，并因海洋污染的特性而进一步强化。在环境规制强度较低的初始阶段（倒“U”型曲线左侧上升段），规制提升往往难以有效遏制污染，甚至可能在短期内加剧排放。其核心机制在于，较低的合规成本（如排污费、罚款）不足以抵消污染治理所需的投入，企业更倾向于采取逃避监管（如偷排、数据造假）或进行象征性、低效的末端治理。同时，薄弱的执法能力进一步削弱了规制的威慑力，导致企业感知到的违规风险低。此时，加强规制可能刺激更隐蔽的逃避行为或仅诱发成本高昂却效率有限的末端技术升级，形成“成本挤压效应”，导致污染下降缓慢甚至不降反升。然而，当环境规制强度持续提升并跨越一个关键临界点（倒“U”型曲线拐点）后，便进入高强度阶段（倒“U”型曲线右侧下降段），规制效应发生根本性转变。此时，严格的排放标准、显著提高的违规成本（高额罚款、关停风险）以及伴随的强有力执法，使得企业预期的违规总成本超过进行实质性减排（如采用高效末端技术或清洁生产）的合规成本。这触发了“创新补偿效应”（波特假说）：企业有强烈动机投资于清洁技术创新与工艺改进，从源头预防污染，不仅能够降低长期合规成本，甚至可能提升竞争力。同时，高强度规制加速了高污染、低效率企业的市场退出，推动产业结构向绿色化转型。海洋陆源污染源的分散性、污染的累积性与跨界性，使得在低规制阶段监测执法尤为困难，逃避行为更易发生；而污染对海洋生态系统的阈值效应则凸显了跨越规制临界点的紧迫性。因此，倒“U”型关系深刻揭示了环境规制有效性的动态门槛：只有规制强度与执法能力协同跨越临界值，才能从“成本挤压”转向“创新驱动”，实现海洋陆源污染的有效削减。

为了验证核心解释变量是否稳健以及提高检验的稳健性，本文通过逐级增加控制变量的方式进行固定效应回归分析。实证结果如表 5 所示，其中列（1）为未加入控制变量的回归结果，列（2）至列（6）为逐级增加控制变量的回归结果。列（1）中，

环境规制对数值（lnER）的一次项系数和二次项系数均为负，二者都在 1% 水平上显著。依次加入控制变量后，结果均没有发生显著变化，均通过 1% 水平的显著性检验。这表明环境规制与海洋环境陆源污染具有倒“U”型关系，再次验证了假设 1。

表 5 逐级回归结果

Table 5 Level-by-level regression results

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
lnER	-9.515*** (1.246)	-8.550*** (1.328)	-8.529*** (1.388)	-6.983*** (1.188)	-6.425*** (1.215)	-5.295*** (1.307)
lnER ²	-6.827*** (1.072)	-6.337*** (1.094)	-6.330*** (1.105)	-5.369*** (0.939)	-5.030*** (0.948)	-4.362*** (0.984)
lnGDP		-7.058 (10.33)	-6.782 (11.57)	-22.36** (9.982)	-21.33** (9.897)	-17.88* (9.877)
lnGDP ²		0.280 (0.457)	0.269 (0.505)	0.869** (0.433)	0.851** (0.429)	0.715* (0.427)
lnUL			-0.108 (2.017)	-3.476* (1.763)	-1.672 (2.004)	-0.767 (2.018)
lnPS				24.85*** (3.547)	24.66*** (3.513)	24.08*** (3.469)
lnGTI					-0.733* (0.401)	-0.784** (0.395)
lnIS						-1.017** (0.474)
常数项	-4.117*** (0.220)	39.96 (58.37)	38.76 (62.79)	-56.55 (54.52)	-64.16 (54.13)	-83.58 (54.06)

注：括号内为标准误，* $p < 0.1$ ，** $p < 0.05$ ，*** $p < 0.01$ 。

3.2 稳健性分析

为确保回归结果能够准确反映强制性环境规制对海洋环境陆源污染的影响，本研究采用以下 3 种方法进行稳健性检验，回归结果见表 6。

3.2.1 替换被解释变量

由于当前关于陆源污染的评价指标尚未形成统一标准，本文参考何林涛等^[37]，将工业废水排放量直接作为陆源污染的指标进行回归，结果 [表 6

列(1)]显示,核心解释变量的显著性水平未发生改变,系数大小及符号保持稳定,说明上述结论具有稳健性。

3.2.2 将核心解释变量滞后 1 期

考虑到环境规制影响的滞后特征,本文将核心解释变量滞后一期进行稳健性检验,结果[表 6 列(2)]表明,环境规制与海洋环境陆源污染具有倒“U”型关系,验证了结果的稳健性。

3.2.3 剔除直辖市样本

为剔除行政因素对基准回归结果的干扰,本文将沿海省级行政区中的上海和天津两个直辖市从全样本中剔除后进行检验,结果[表 6 列(3)]显示,剔除直辖市样本后,双向固定效应的回归结果与全样本的回归结果大体一致,说明全样本的回归结果是稳健的。

表 6 稳健性检验结果

Table 6 Robustness test results

变量	(1)	(2)	(3)
lnER	-4.594*** (0.487)		-6.374*** (1.284)
lnER ²	-2.743*** (0.366)		-4.918*** (0.951)
lnER _(t-1)		-7.982*** (1.487)	
lnER _(t-1) ²		-5.810*** (0.366)	
lnGDP	-19.49*** (3.677)	-5.339 (12.47)	-16.02 (11.44)
lnGDP ²	0.813*** (0.159)	0.257 (0.542)	0.585 (0.506)
lnUL	-0.404 (0.751)	3.073 (2.054)	0.894 (2.343)
lnPS	1.619 (1.291)	1.028 (0.865)	22.07*** (3.729)
lnGTI	1.000*** (0.147)	-0.913** (0.423)	-0.624 (0.393)

续表 6

变量	(1)	(2)	(3)
lnIS	-0.395** (0.177)	-1.116** (0.545)	-0.233 (0.659)
常数项	104.3*** (20.12)	11.69 (69.53)	-84.60 (70.62)

注:括号内为标准误,*p < 0.1,**p < 0.05,***p < 0.01。

3.3 内生性检验

强制性环境规制与海洋环境陆源污染之间可能存在双向的因果关系,即存在内生性问题,该问题会导致回归结果出现误差。因此,为保证基准回归结果的可靠性,本文参考 Ma 等^[39]的研究,将滞后一期、二期的环境规制作为工具变量,采用工具变量回归方法进行内生性检验,检验结果如表 7 所示。结果显示,环境规制的一次项系数和二次项系数均显著为负且通过了 0.05 水平的显著性检验,表明环境规制与陆源污染具有显著的倒“U”型关系,验证了结果的稳健性。

表 7 内生性检验

Table 7 Endogeneity test

变量	系数	标准误	Z 值	p-value
lnER	-11.553***	4.273	-2.88	0.010
lnER ²	-10.264**	3.574	-2.85	0.013
lnGDP	5.703	22.370	1.23	0.218
lnGDP ²	-0.266	0.957	-1.17	0.243
lnUL	-4.349**	2.248	-1.77	0.050
lnPS	-1.351	0.886	0.88	0.251
lnGTI	0.453	0.583	-2.08	0.541
lnIS	1.075	2.304	2.1	0.229
常数项	-10.122	134.901	-1.11	0.931

注:*p < 0.1,**p < 0.05,***p < 0.01。

3.4 门槛效应检验

前文的基准回归验证了强制性环境规制和陆源污染之间存在倒“U”型关系,即在环境规制水平较低时,其不能降低陆源污染;在环境规制较高时,能够显著降低陆源污染。这表明环境规制对陆

源污染的影响存在一个门槛值，因此本文进一步采用门槛回归模型进行验证。先对模型的门槛效应进行检验，以强制性环境规制为门槛变量，依次在存在单一门槛、双重门槛和三重门槛的原假设下，对模型进行估计，得到 F 统计量并采用 bootstrap 方法得出 p 值。结果如表 8 所示，单一门槛效应在 5% 水平下显著，双重门槛和三重门槛均未通过显著性检验。因此，下文将基于单一门槛效应模型进行分析。

表 8 门槛效应检验结果

Table 8 Threshold effect test results

模型	F 统计量	p -value	1%临界值	5%临界值	10%临界值
单一门槛	31.62**	0.027	21.204	25.670	35.285
双重门槛	11.25	0.437	25.592	32.563	44.135
三重门槛	8.20	0.580	23.793	29.781	43.640

注: $*p < 0.1$, $**p < 0.05$, $***p < 0.01$, p 值和临界值均采用 bootstrap 方法反复抽样 300 次得到的结果。

面板门槛回归模型具体估计结果如表 9 所示。当环境规制对数值低于 -0.7636 时 (对应实际环境规制为 0.466)，其对应的系数为 -0.460 ，但 $p > 0.05$ ，说明在此区间内环境规制对海洋陆源污染没有显著影响。这一现象恰与理论预期相符，主要归因于低规制强度下的“监管失灵”与“企业机会主义行为”：在此区间内，环境规制因执法资源投入不足、检查频率低及违规处罚力度过轻，导致其实际威慑力有限；对于企业而言，遵守规制所产生的合规成本可能仍高于逃避监管的预期成本，这驱使企业倾向于采取消极应对策略而非实质性治污投资，致使规制压力无法有效传导至生产决策，从而在宏观上表现为统计效应不显著。这深刻揭示了若强制性规制的强度未能跨越使逃避行为变得“不经济”的关键门槛，其政策效力将大打折扣。当环境规制对数值超过 -0.7636 时，环境规制对海洋陆源污染的影响系数为 -3.082 ，且在 0.01 的水平下显著，表明环境规制在超过门槛值 -0.7636 后，能够有效降低污染，进一步验证基准回归的结果。

表 9 单门槛效应模型回归结果

Table 9 Regression results of the single-threshold effects model

变量	系数	标准误	t 统计量	p -value
lnGDP	-22.641**	9.773	-2.32	0.022
lnGDP ²	0.872**	0.420	2.08	0.040
lnPS	27.158***	3.212	8.46	0.000
lnUL	-3.908**	1.938	-2.02	0.046
lnGTI	-0.186	0.474	-0.39	0.696
lnIS	-0.179	0.377	-0.48	0.635
lnER < -0.764	-0.460	0.465	-1.08	0.281
lnER ≥ -0.764	-3.082***	0.737	-4.67	0.000
常数项	-69.293	54.107	-1.28	0.203

注: $*p < 0.1$, $**p < 0.05$, $***p < 0.01$ 。

面板数据门槛回归分析完成后，需对估计结果中的门槛值进行统计显著性验证。图 5 为似然比分布曲线，直观展示了检验过程，其中纵轴为 LR 检验统计量，横轴对应门槛变量取值，水平虚线为 LR 统计量的临界值，曲线最低点为门槛值的 LR 值。当似然比曲线的最低点 (对应估计门槛值 -0.764) 低于 LR 统计量临界值时，可判定该门槛值为真实值。通过图 5 可知，曲线最低点低于 LR 统计量临界值，证实了模型参数结构突变的真实性。这一检验过程有效排除了虚假门槛效应的可能性，为前文的经济解释提供了可靠的计量基础。

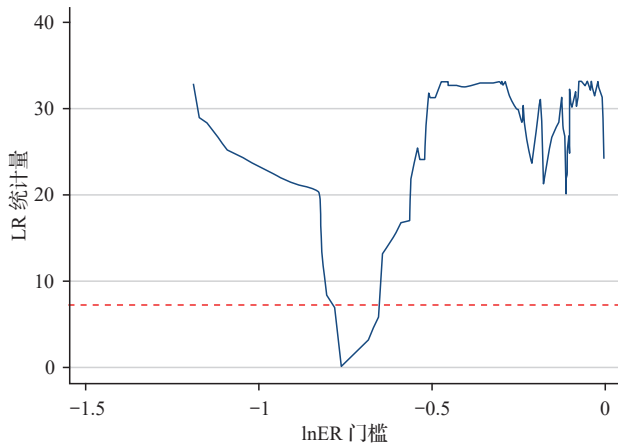


图 5 门槛估计的似然比函数

Fig.5 Likelihood ratio function for threshold estimation

3.5 机制分析

为验证假设2和假设3, 本文根据前述模型(3)至模型(5)进行实证回归, 验证绿色技术创新和产业结构的中介作用。回归结果见表10, 列(1)中, 绿色技术创新为被解释变量, 其中环境规制的一次项和二次项均通过5%水平的显著性检验且为正值, 表明强制性环境规制能够显著影响企业进行绿色技术创新。列(2)中产业结构作为被解释变量, 强制性环境规制的一次项和二次项均通过1%水平的显著性检验, 且为正值, 表明强制性环境规制能够持续影响企业进行产业结构调整。在列(3)中, 将陆源污染作为被解释变量, 引入绿色技术创新和产业结构, 结果显示产业结构和绿色技术创新对海洋环境陆源污染具有显著的抑制作用。根据回归结果可知, 强制性环境规制不仅可以直接降低陆源污染, 还会通过影响企业绿色技术创新和产业结构间接降低陆源污染, 验证了假设2和假设3。此外, 人口规模(lnPS)对海洋陆源污染的回归系数显著为正, 这一实证结果具有深刻的政策含义: 在快速城市化进程中, 人口向沿海地区的持续集聚通过规模效应直接加剧了海洋环境压力——城市人口扩张不仅带来了生活污水、垃圾等污染物排放的绝对量增长, 还驱动了满足居民需求的建筑业、密集农业及城市消费型产业的发展, 共同构成了陆源污染的基础性负荷。这表明, 单纯依靠针对工业点的强制性规制难以完全遏制污染趋势, 必须将城市化衍生的生活源污染纳入综合治理体系, 通过加强城市环境基础设施建设与规划, 实现从“末端治理”向“源头减量”与“过程控制”的转变, 从而在人口集聚的发展背景下有效缓解对海洋环境的冲击。

表10 机制分析回归结果

变量	(1)	(2)	(3)
lnGTI		-0.051 (0.078)	-0.784** (0.395)
lnIS	-0.074 (0.112)		-1.017** (0.474)

续表 10

变量	(1)	(2)	(3)
lnER	0.840*** (0.300)	1.112*** (0.236)	-5.295*** (1.307)
lnER ²	0.508** (0.228)	0.657*** (0.184)	-4.362*** (0.984)
lnGDP	1.649 (2.336)	3.388* (1.924)	-17.88* (9.877)
lnGDP ²	-0.034 (0.101)	-0.134 (0.083)	0.715* (0.427)
lnUL	2.519*** (0.416)	0.890** (0.390)	-0.767 (2.018)
lnPS	-0.309 (0.822)	-0.562 (0.683)	24.08*** (3.469)
常数项	-11.75 (12.77)	-19.10* (10.52)	-1.017** (0.474)
样本量	132	132	132
省市数量	11	11	11
R-squared	0.855	0.654	0.596

注: 括号内为标准误, * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$ 。

4 结论与政策建议

本文采用2012—2023年中国沿海各地区的面板数据, 探讨强制性环境规制对海洋陆源污染的影响, 并以强制性环境规制为门槛变量评估了环境规制对陆源污染的门槛效应, 进而研究了绿色技术创新和产业结构调整对陆源污染的作用机制。研究发现: 第一, 强制性环境规制与海洋陆源污染之间存在倒“U”型关系; 第二, 强制性环境规制对陆源污染的影响具有单门槛效应, 只有当环境规制强度达到一定水平后, 其对海洋陆源污染的治理才有显著作用; 第三, 强制性环境规制不仅可以直接影响陆源污染, 还会通过影响产业结构调整 and 绿色技术创新间接降低陆源污染。基于以上结论, 本文提出以下政策建议。

第一, 适当增加环境规制强度。本文根据实证

研究发现,强制性环境规制对海洋环境陆源污染具有非线性影响关系。根据门槛回归结果,环境规制达到一定强度后会降低陆源污染,因此为了进一步提高海洋环境陆源污染的治理水平,应适当加大环境规制的力度。政策制定应实施分级分类的精准治理:对于规制强度低于门槛值的地区,政策核心在于“补齐短板”,通过强化执法队伍建设、提升监测频次和加大行政处罚力度,确保强制性环境规制的底线约束真正有效;对于已跨越门槛的地区,重点应转向“激励创新”,积极引入“绿色信贷”“环保税收优惠”等市场化手段作为柔性补充。例如,对积极进行绿色技术改造的企业提供优惠利率贷款,或对研发支出实行所得税加计扣除,从而形成“强制性强监管”与“市场化软激励”相结合的政策组合,在有效遏制污染的同时降低企业合规成本,激发内生绿色转型动力。

第二,强化企业绿色技术创新和产业结构调整。绿色技术创新和产业结构调整作为间接影响因素,环境规制在一定程度上可以通过影响绿色技术创新和产业结构调整降低污染,但单一的治污措施并不能很好地解决海洋环境陆源污染问题。需要构建多元的

陆源污染治理措施,不仅需要动态调整环境规制的强度,还需要助推企业进行绿色技术创新,从源头上解决污染排放问题。应促进企业进行产业结构升级,减少重污染企业的数量。此外,在加强环境规制的同时,可以通过财政补贴、绿色信贷、税收减免等政策,降低企业的绿色技术创新成本,确保技术创新的可持续性。

第三,强化区域协同治理,建立海洋环境污染协同立法领导机制。加强区域协同治理对陆源污染的防治至关重要。由于中国沿海11个地区在产业结构、绿色技术创新、经济发展水平和人口规模等方面存在巨大差距,“一刀切”的环境规制标准会适得其反,应根据地区异质性特征,逐步调整污染排放标准,综合评估沿岸各地区的排污水平,针对不同区域实行分级分类排污标准。此外,海洋环境陆源污染导致近岸海域的水质下降,海洋污染的整体性和沿岸行政区域分割的矛盾,增加了陆源污染的治理难度,实现海洋环境陆源污染治理需要完善区域协同立法,细化区域治理协同目标。为避免污染转移,应加强区域间环境规制的协调,构建跨行政区域的污染治理联动机制。

参考文献 (References):

- [1] ALAM M W, XIANGMIN X, AHAMED R. Protecting the marine and coastal water from land-based sources of pollution in the northern Bay of Bengal: a legal analysis for implementing a national comprehensive act[J]. *Environmental Challenges*, 2021, 4: 100154.
- [2] DAHMS H U. The grand challenges in marine pollution research[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2014, 1: 9.
- [3] TAPVER T. CSR reporting in banks: does the composition of the board of directors matter[J]. *Quantitative Finance and Economics*, 2019, 3(2): 286-314.
- [4] YU W, RAMANATHAN R, NATH P. Environmental pressures and performance: an analysis of the roles of environmental innovation strategy and marketing capability[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2017, 117: 160-169.
- [5] DASGUPTA S, LAPLANTE B, MAMINGI N, et al. Inspections, pollution prices, and environmental performance: evidence from China[J]. *Ecological Economics*, 2001, 36(3): 487-498.
- [6] PORTER M E. America's green strategy. *business and the environment: a reader*. Eds. Welford, R. and Starkley R[Z]. 1996.
- [7] NEVES S A, MARQUES A C, PATRÍCIO M. Determinants of CO₂ emissions in European Union countries: does environmental regulation reduce environmental pollution?[J]. *Economic Analysis and Policy*, 2020, 68: 114-125.
- [8] PORTER M E, LINDE C V D. Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship[J]. *Journal of Economic Perspectives*, 1995, 9(4): 97-118.
- [9] YE F, HE Y, YI Y, et al. Promotion of environmental regulation on the decoupling of marine economic growth from marine environmental pollution: based on interprovincial data in China[J]. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2022, 65(8): 1456-1482.

- [10] LIU Z, CAI Y, HAO X. The agglomeration of manufacturing industry, innovation and haze pollution in China: theory and evidence[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(5): 1670.
- [11] FAROUQ I S, SAMBO N U, AHMAD A U, et al. Does financial globalization uncertainty affect CO₂ emissions? empirical evidence from some selected SSA countries[J]. *Quantitative Finance and Economics*, 2021, 5(2): 247-263.
- [12] GREENSTONE M. The impacts of environmental regulations on industrial activity: evidence from the 1970 and 1977 Clean Air Act amendments and the census of manufactures[J]. *Journal of Political Economy*, 2002, 110(6): 1175-1219.
- [13] SINN H W. Public policies against global warming: a supply side approach[J]. *International Tax and Public Finance*, 2008, 15(4): 360-394.
- [14] WANG M, LIAO G, LI Y. The relationship between environmental regulation, pollution and corporate environmental responsibility[J]. *International journal of environmental research and public health*, 2021, 18(15): 8018.
- [15] 郑建明, 高楚涵, 朱春奎, 等. 环境分权、海洋环境规制与海洋环境污染[J]. *统计与决策*, 2023, 39(5): 75-80.
ZHENG Jianming, GAO Chuhan, ZHU Chunkui, et al. Environmental decentralization, marine environmental regulation, and marine environmental pollution[J]. *Statistics & Decision*, 2023, 39(5): 75-80.
- [16] GAO J, WOODWARD A, VARDOULAKIS S, et al. Haze, public health and mitigation measures in China: a review of the current evidence for further policy response[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 578: 148-157.
- [17] PEI Y, ZHU Y, LIU S, et al. Environmental regulation and carbon emission: the mediation effect of technical efficiency[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 236: 117599.
- [18] LIU Y, LUO N, WU S. Nonlinear effects of environmental regulation on environmental pollution[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2019.
- [19] LI M, ZOU S, JING P. Spatial spillover effect of water environment pollution control in basins: based on environmental regulations[J]. *Water*, 2023, 15(21): 3745.
- [20] OUYANG X, SHAO Q, ZHU X, et al. Environmental regulation, economic growth and air pollution: panel threshold analysis for OECD countries[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 234-241.
- [21] HE Z X, CAO C S, WANG J M. Spatial impact of industrial agglomeration and environmental regulation on environmental pollution: evidence from pollution-intensive industries in China[J]. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 2022, 15(4): 1525-1555.
- [22] WANG Y, SHEN N. Environmental regulation and environmental productivity: the case of China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62: 758-766.
- [23] MAZHAR U, ELGIN C. Environmental regulation, pollution and the informal economy[J]. *SBP Research Bulletin*, 2013, 9(1): 62-81.
- [24] LI J, WANG X. Towards high-quality development: the complex role of environmental regulation[J]. *PloS One*, 2025, 20(2): e0312816.
- [25] ZOU H, ZHANG Y. Does environmental regulatory system drive the green development of China's pollution-intensive industries?[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 330: 129832.
- [26] ZHANG K, XU D, LI S. The impact of environmental regulation on environmental pollution in China: an empirical study based on the synergistic effect of industrial agglomeration[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(25): 25775-25788.
- [27] 郑威. 数字金融赋能绿色技术创新的作用机制与门槛效应: 基于绿色金融与制度环境的双重视角[J]. *贵州师范大学学报(社会科学版)*, 2025(2): 84-97.
ZHENG Wei. The mechanism and threshold effects of digital finance in empowering green technology innovation: a dual perspective on green finance and institutional environment[J]. *Journal of Guizhou Normal University(Social Sciences Edition)*, 2025(2): 84-97.
- [28] 严太华, 朱梦成. 技术创新、产业结构升级对环境污染的影响[J]. *重庆大学学报(社会科学版)*, 2023, 29(5): 70-84.
YAN Taihua, ZHU Mengcheng. The impact of technological innovation and industrial structure upgrading on environmental pollution[J]. *Journal of Chongqing University(Social Sciences Edition)*, 2023, 29(5): 70-84.
- [29] 李斌, 赵新华. 经济结构、技术进步与环境污染: 基于中国工业行业数据的分析[J]. *财经研究*, 2011, 37(4): 112-122.

- LI Bin, ZHAO Xinhua. Economic structure, technological progress, and environmental pollution: an analysis based on China's industrial sector data [J]. *Journal of Finance and Economics*, 2011, 37(4): 112-122.
- [30] 肖雁飞, 张宝俐, 廖双红. 环境规制对绿色技术创新的影响研究: 分阶段数字化转型的调节分析[J]. *科研管理*, 2024, 45(11): 99-108.
- XIAO Yanfei, ZHANG Baoli, LIAO Shuanghong. The impact of environmental regulations on green technological innovation: a moderating analysis of phased digital transformation[J]. *Science and Technology Management*, 2024, 45(11): 99-108.
- [31] 原毅军, 陈喆. 环境规制、绿色技术创新与中国制造业转型升级[J]. *科学学研究*, 2019, 37(10): 1902-1911.
- YUAN Yijun, CHEN Zhe. Environmental regulation, green technological innovation, and the transformation and upgrading of China's manufacturing sector[J]. *Studies in Science of Science*, 2019, 37(10): 1902-1911.
- [32] ALBRIZIO S, KOZLUK T, ZIPPERER V. Environmental policies and productivity growth: evidence across industries and firms[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2017, 81: 209-226.
- [33] 刘燕, 李录堂. 垂直型环境规制对污染性产业转移的作用机制: 基于地方政府竞争视角分析[J]. *生态经济*, 2021, 37(7): 206-210.
- LIU Yan, LI Lutang. The mechanism of vertical environmental regulation in polluting industry relocation: an analysis from the perspective of local government competition[J]. *Ecological Economics*, 2021, 37(7): 206-210.
- [34] 郑飞鸿, 李静. 科技环境规制倒逼资源型城市产业转型升级: 理论模型与双重效应分析[J]. *软科学*, 2021, 35(12): 22-28.
- ZHENG Feihong, LI Jing. Technological environmental regulation driving industrial transformation and upgrading in resource-based cities: theoretical model and dual effects analysis [J]. *Soft Science*, 2021, 35(12): 22-28.
- [35] WANG H, LU X, DENG Y, et al. China's CO₂ peak before 2030 implied from characteristics and growth of cities[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(8): 748-754.
- [36] SONG Y, YANG T, LI Z, et al. Research on the direct and indirect effects of environmental regulation on environmental pollution: empirical evidence from 253 prefecture-level cities in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 269: 122425.
- [37] 何林涛, 陈璇. 基于面板数据的海洋环境污染对海洋经济发展影响的实证研究[J]. *海洋开发与管理*, 2018, 35(2): 17-21.
- HE Lintao, CHEN Xuan. Empirical research on the effect of marine environmental pollution to marine economic development based on the panel data[J]. *Ocean Development and Management*, 2018, 35(2): 17-21.
- [38] 章恒全, 刘明轩, 张陈俊, 等. 陆域产业结构演进对海洋环境的动态影响研究: 以长江流域与东海沿岸地区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(7): 1586-1596.
- ZHANG Hengquan, LIU Mingxuan, ZHANG Chenjun, et al. Dynamic impacts of terrestrial industrial structure evolution on marine environment: a case study of the Yangtze River Basin and East China Sea coastal areas[J]. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2020, 29(7): 1586-1596.
- [39] MA J, HU Q, WEI X. Impact of environmental regulation on coastal marine pollution: a case of coastal prefecture-level cities in China[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 882010.
- [40] LAN J, KAKINAKA M, HUANG X. Foreign direct investment, human capital and environmental pollution in China[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2012, 51(2): 255-275.
- [41] YUAN B, REN S, CHEN X. Can environmental regulation promote the coordinated development of economy and environment in China's manufacturing industry? a panel data analysis of 28 sub-sectors[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 149: 11-24.
- [42] JIANG Z, WANG Z, LI Z. The effect of mandatory environmental regulation on innovation performance: evidence from China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 203: 482-491.
- [43] LI W, GU Y, LIU F, et al. The effect of mandatory regulation on environmental technological innovation in China: a spatial econometric approach[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019(26): 34789-34800.
- [44] ZHAO X, SUN B. The influence of Chinese environmental regulation on corporation innovation and competitiveness[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 1528-1536.
- [45] ULTSCH G R. Man in balance with the environment: pollution and the optimal population size[J]. *BioScience*, 1973, 23(11): 642-643.
- [46] LAMSAL L N, MARTIN R V, PARRISH D D, et al. Scaling relationship for NO₂ pollution and urban population size: a satellite perspective[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(14): 7855-7861.
- [47] KOGAN L, PAPANIKOLAOU D, SERU A, et al. Technological innovation, resource allocation, and growth[J]. *The Quarterly*

-
- Journal of Economics, 2017, 132(2): 665-712.
- [48] RAHKO J. Internationalization of corporate R&D activities and innovation performance[J]. Industrial and Corporate Change, 2015, 25(6): 1019-1038.
- [49] OOSTERHAVEN J, BROERSMA L. Sector structure and cluster economies: a decomposition of regional labour productivity[J]. Regional Studies, 2007, 41(5): 639-659.
- [50] WANG Z, JIA H, XU T, et al. Manufacturing industrial structure and pollutant emission: an empirical study of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 197: 462-471.