

基于Tapio模型的东北地区城镇污水处理碳排放与经济增长脱钩研究

孟令国, 张栩嘉*

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2026年8月28日; 录用日期: 2026年9月29日; 发布日期: 2026年10月26日

摘 要

城镇污水处理碳排放与经济增长的脱钩关系对“双碳”目标下行业低碳转型具有重要意义。本文基于2010~2024年东北三省面板数据, 采用排放因子法核算碳排放, 运用Tapio模型分析脱钩状态, 并结合环保督察、去产能等政策进行案例剖析。结果表明: 碳排放总体呈“先增后稳”特征, 辽宁最高; 脱钩以弱脱钩、增长连接和扩张负脱钩为主, 强脱钩仅出现于2017、2023和2024年, 尚未形成稳定低碳格局。省际差异明显, 辽宁表现较好, 黑龙江扩张负脱钩最多且经济低增速年份仍碳排放正增长。案例显示, 2017年辽宁、黑龙江强脱钩由环保督察与去产能叠加下的工业废水减量驱动, 属外生冲击型; 2023~2024年辽宁强脱钩则体现减污降碳与电网清洁化的内生效应。东北地区污水处理碳排放具有刚性, 经济放缓难以自动减碳。未来应分省施策, 推进节能改造、控制新增能力、研发寒冷地区低碳技术, 推动碳排放与经济增长逐步脱钩。

关键词

城镇污水处理, 碳排放, 脱钩分析, Tapio模型, 东北三省

Research on Decoupling of Carbon Emissions from Urban Sewage Treatment and Economic Growth in Northeast China Based on the Tapio Model

Lingguo Meng, Xujia Zhang*

College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: August 28, 2026; accepted: September 29, 2026; published: October 26, 2026

*通讯作者。

文章引用: 孟令国, 张栩嘉. 基于 Tapio 模型的东北地区城镇污水处理碳排放与经济增长脱钩研究[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(10): 1646-1656. DOI: 10.12677/aep.2026.1610165

Abstract

The decoupling relationship between carbon emissions from urban sewage treatment and economic growth holds significant importance for the low-carbon transformation of industries under the “dual carbon” goals. Based on panel data from 2010 to 2024 for the three northeastern provinces, this paper calculates carbon emissions using the emission factor method, analyzes the decoupling status using the Tapio model, and conducts case studies in conjunction with policies such as environmental protection inspections and overcapacity reduction. The results indicate that carbon emissions generally exhibit a “first increase and then stabilization” trend, with Liaoning having the highest emissions. The decoupling mainly consists of weak decoupling, growth connection, and expansionary negative decoupling, with strong decoupling only occurring in 2017, 2023, and 2024, indicating that a stable low-carbon pattern has not yet been established. There are significant inter-provincial differences, with Liaoning performing relatively well, while Heilongjiang experiences the most expansionary negative decoupling and still sees positive carbon emissions growth in years of low economic growth. Cases show that in 2017, the strong decoupling in Liaoning and Heilongjiang was driven by the reduction of industrial wastewater under the combined effects of environmental protection inspections and overcapacity reduction, with this strong decoupling being an exogenous shock type; in 2023~2024, Liaoning’s strong decoupling reflects the endogenous effects of pollution reduction, carbon reduction, and the shift toward a cleaner power grid. Carbon emissions from sewage treatment in Northeast China are rigid, making it difficult for carbon emissions to decline automatically as the economy slows down. In the future, policies should be implemented on a provincial basis to promote energy-saving renovations, control new capacity, develop low-carbon technologies for cold regions, and gradually decouple carbon emissions from economic growth.

Keywords

Urban Sewage Treatment, Carbon Emissions, Decoupling Analysis, Tapio Model, Three Northeastern Provinces

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

气候变化是当今世界面临的重大环境挑战。城市污水处理厂兼具碳排放“污染源”与“能源工厂”双重属性，对国家“双碳”目标的实现具有重要意义[1]。近年来，我国污水处理设施大规模建成投运，行业碳排放呈快速增长态势。相关统计表明，污水处理系统碳排放量约占全社会总碳排放的1%~2%，已跻身全球十大高碳排放行业行列之一[2]。据数据统计[3]，我国城市污水年处理量由2015年的428.8亿m³提升至2024年的678.3亿m³，增幅达58.2%。随着我国城镇化持续推进，城镇污水处理需求将进一步扩大，污水处理行业的碳排放也将呈上升趋势[4]。2022年，《减污降碳协同增效实施方案》¹明确提出，推进污水处理厂节能降耗，优化工艺流程，提高处理效率。污水处理行业成为减污降碳协同治理的重点领域之一。

在此背景下，科学核算城镇污水处理碳排放并考察其与经济增长之间的关系，对于判断行业低碳发

¹关于印发《减污降碳协同增效实施方案》的通知[EB/OL]. (2022-06-13) [2026-09-21].

https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202206/t20220617_985879.html

展态势、制定差异化减排政策具有重要意义[5]。目前,关于污水处理碳排放的研究主要集中于核算方法、排放特征及影响因素等方面。在核算方法上,已有研究多采用排放因子法,基于能源消耗数据计算间接碳排放[6],部分研究进一步结合 IPCC 方法估算 CH_4 和 N_2O 等直接排放[7]。在区域尺度上,相关研究多集中于长三角、京津冀、长江经济带等经济发达或政策热点地区,对东北地区的关注相对不足。在经济增长与环境压力关系研究方面,Tapio 脱钩模型已被广泛应用于碳排放、能源消费、水资源等领域,用于判断环境压力与经济指标之间的脱钩状态[8][9]。然而,将脱钩分析应用于污水处理碳排放的研究仍相对有限。

东北三省(辽宁省、吉林省、黑龙江省)作为我国重要的老工业基地,具有独特的经济社会发展特征。近年来,东北地区经济增长放缓,人口持续净流出,财政压力较大,城镇化率较高但增速趋缓[10]。同时,该区域冬季漫长寒冷,污水处理过程中微生物活性降低,为保证处理效果通常需要延长曝气时间或采取保温措施,单位处理能耗普遍高于全国平均水平。上述因素共同塑造了东北地区城镇污水处理碳排放的特殊性。在“双碳”目标背景下,东北地区既要应对经济转型压力,又要推进污水处理行业低碳发展,其碳排放与经济增长之间的关系可能呈现与其他区域不同的特征,但相关实证研究尚不充分。

基于此,本研究以东北三省为研究对象,基于 2010~2024 年省级面板数据,核算城镇污水处理电力间接碳排放与 CH_4 , N_2O 直接碳排放,运用 Tapio 脱钩模型分析碳排放与经济增长之间的脱钩状态,并对三省脱钩特征的差异进行比较。研究目的在于:第一,核算东北三省城镇污水处理碳排放并分析其变化趋势;第二,判断三省污水处理碳排放与 GDP 的脱钩状态及演变规律;第三,比较省际差异并探讨可能原因,为区域减污降碳协同政策提供参考。

2. 数据来源与研究方法

2.1. 研究区域概况

东北三省包括辽宁省、吉林省和黑龙江省,位于中国东北部,该区域属于温带季风气候,冬季漫长寒冷,部分地区供暖期长达半年以上[11]。受低温条件影响,污水处理过程中微生物活性降低,为保证处理效果,通常需要延长曝气时间或提高曝气强度,导致单位污水处理能耗普遍高于南方地区[12]。

从经济社会发展来看,近年来东北三省经济增速放缓,部分年份低于全国平均水平。同时,区域人口持续净流出,常住人口数量呈下降趋势,城镇化率虽高于全国平均水平,但增速趋于平缓。在污水处理方面,东北三省城镇化建设起步较早,污水处理设施覆盖率较高,但部分设施存在建设标准偏低、设备老化、运行负荷不稳定等问题。上述自然条件、经济发展阶段和设施状况共同构成了东北地区城镇污水处理碳排放的特殊背景。

2.2. 数据来源与处理

本研究的时间范围为 2010~2024 年,研究单元为辽宁省、吉林省和黑龙江省。所用数据主要包括城镇污水处理量、地区生产总值(GDP)、第二产业增加值占 GDP 比重、年末常住人口和城镇化率。

城镇污水处理量数据来源于《中国城乡建设统计年鉴》²。该年鉴分别统计城市和县城的污水处理量。本文中的“城镇污水处理量”为设市城市污水处理量与县城污水处理量之和,不包含村镇污水处理量。主要原因是村镇污水处理设施统计口径尚不完善,且处理规模相对较小,对区域碳排放总量的影响有限。统计口径为城镇污水处理厂实际处理的污水总量,既包括城镇生活污水,也包括部分经预处理后进入城镇排水系统的工业废水;企业自行处理达标后直接排放的工业废水不在统计范围内。

GDP 和第二产业增加值占 GDP 比重数据来源于辽宁、吉林、黑龙江三省相应年份的省级统计年鉴。

²中国城乡建设统计年鉴[EB/OL]. (2025-10-10) [2026-09-23]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/jstjnj/>

由于国家统计年鉴未提供分地区第二产业增加值占比的连续数据, 故统一采用各省统计年鉴数据以保证指标口径一致。常住人口和城镇化率数据同样来源于三省统计年鉴中的“年末常住人口”和“城镇人口比重”指标。

直接碳排放核算所需的 COD 和 TN 削减量数据来源于第二次全国污染源普查公报。其中, 吉林省和黑龙江省的数据来自各自省级公报, 辽宁省未发布省级公报, 其直接排放系数采用吉林、黑龙江两省的算术平均值替代, 替代的合理性在 2.3.2 节中说明。

2.3. 碳排放核算方法

本研究核算边界包括两个部分: 一是城镇污水处理厂运行过程中电力消耗产生的间接 CO₂ 排放; 二是污水处理过程中微生物作用产生的 CH₄ 和 N₂O 直接排放。生物成因 CO₂ 不计入核算范围, 药剂消耗、污泥厂外运输及处置等环节的排放也未纳入。

2.3.1. 电力间接碳排放核算

电力间接碳排放采用排放因子法, 基本公式为:

$$E_{elec,t} = Q_t * e_t * EF_t * 10 \quad (1)$$

式中 $E_{elec,t}$ 为第 t 年电力消耗间接碳排放量(tCO₂); Q_t 为第 t 年城镇污水处理量(万 m³); e_t 为第 t 年单位污水处理电耗(kWh/m³); EF_t 为第 t 年东北区域电网平均 CO₂ 排放因子(kg CO₂/kWh); 系数 10 为万 m³ 与 kWh、kg 与 t 之间的单位换算系数。

为反映东北区域电网清洁化进程, 本研究不再采用固定排放因子, 而是根据官方发布的历史数据构建逐年序列。国家发展和改革委员会发布的东北区域电网 CO₂ 排放因子 2011 年为 0.8189kg CO₂/kWh, 2012 年为 0.7769kg CO₂/kWh³。生态环境部发布的 2021 年东北区域电力平均 CO₂ 排放因子为 0.6012kg CO₂/kWh [13], 2022 年进一步降至 0.5564kg CO₂/kWh [14]。基于上述官方数据节点, 采用线性插值法构建 2010~2024 年逐年序列, 2010 年参照 2011 年值外推, 2023~2024 年参照 2022 年值并根据电网清洁化趋势做保守估算。

e_t 单位污水处理电耗采用情景分析法设定。以 2010 年基准值 0.325 kWh/m³ 为起点, 该值参照楚想想等[15]对全国 1980 座污水处理厂能耗数据的统计分析结果。基准情景假设年均能效提升率 1%, 高提升情景假设 2%, 无提升情景假设保持不变。

2.3.2. 直接碳排放核算

直接碳排放包括 CH₄ 和 N₂O, 采用 IPCC 排放因子法核算。CH₄ 排放按 COD 削减量核算, 公式为:

$$E_{CH_4} = R_{COD} * B_0 * MCF * GWP_{CH_4} \quad (2)$$

式中 R_{COD} 为 COD 削减量(吨); IPCC (2006)指南针对生活污水推荐的 B_0 缺省值为 0.6kg CH₄/kg BOD。考虑到本研究采用 COD 作为活动水平指标, 参照 IPCC 指南中 BOD 与 COD 的换算关系(0.6kg CH₄/kg BOD ≈ 0.25kg CH₄/kg COD), 本研究取 B_0 为 0.25 kg CH₄/kg COD。MCF 为甲烷修正因子, 取《省级温室气体清单编制指南》⁴推荐的全国平均值 0.165; GWP_{CH_4} 取 IPCC 第五次评估报告值 28。

³东莞环境科学学会. 2011 年和 2012 年中国区域电网平均二氧化碳排放因子发布, 温室气体排放报送进程加快[EB/OL]. (2014-10-27) [2026-10-21]. <http://hbhx.dg.gd.cn/plus/view.php?aid=639>; 官方发布事实可查证: 对十三届全国人大五次会议第 4266 号建议的答复[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk13/202301/t20230117_1013357.html; 数值表: <http://hbhx.dg.gd.cn/plus/view.php?aid=639>

⁴省级温室气体清单编制指南 (2025 年版) [EB/OL]. (2025-12) [2026-09-23]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk05/202601/W020260104720924663816.pdf>

N_2O 排放按 TN 削减量核算, 公式为:

$$E_{N_2O} = R_{TN} * EF_{N_2O} * \frac{44}{28} * GWP_{N_2O} \quad (3)$$

式中 R_{TN} 为 TN 削减量(吨); EF_{N_2O} 取《城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算技术指南(试行)》⁵ (2018)缺省值 $0.005t N_2O-N/t N$; $44/28$ 为 N_2O-N 转 N_2O 的质量换算系数; GWP_{N_2O} 取 265。

由于官方统计年鉴未提供分省逐年 COD 和 TN 削减量数据, 本研究以第二次全国污染源普查基准年(2017 年)公布的分省数据为依据, 反推各省单位污水处理量的直接碳排放系数 f 。吉林省和黑龙江省的 f 值分别为 3.5027 和 $3.7225 t CO_2e/万 m^3$ 。辽宁省未发布省级二污普公报, 考虑到辽宁与吉林、黑龙江同属东北寒冷地区, 污水处理工艺和进水水质特征相近, 采用黑吉两省 f 值的算术平均值 $3.6126 t CO_2e/万 m^3$ 作为辽宁省的估算依据。该替代方法的不确定性在讨论部分予以说明。

需要说明的是, 本研究采用 IPCC 简化核算框架, $B_0 * MCF$ 为净产甲烷系数, 已隐含污泥合成过程中有机质移出的效应, 因此不单独扣除干污泥有机质。二污普数据中的干污泥产生量用于辅助验证核算合理性。

2.3.3. 核算边界合理性说明

本研究仅核算电力间接排放和 CH_4 、 N_2O 直接排放, 未纳入药剂消耗、污泥厂外运输及处置等环节。这一简化处理主要基于以下考虑: 第一, 本文关注的是区域尺度碳排放与经济增长的脱钩关系, 脱钩指数取决于碳排放变化率与 GDP 变化率的相对大小, 而非碳排放量的绝对值, 在不改变变化方向的前提下, 核算范围的适度简化不会对脱钩状态的判断产生本质影响。第二, 省级统计年鉴中缺乏覆盖全部污水处理厂的药剂消耗和污泥处置能耗数据, 采用统一的简化核算参数可以保证数据在时间序列和省份之间的可比性。第三, 已有研究表明, 电力间接排放在中国城镇污水处理碳排放中占主导地位, 且与行业节能降碳政策直接对应, 是当前减污降碳工作的重点。

2.4. Tapio 脱钩模型

为考察城镇污水处理碳排放与经济增长之间的脱钩关系, 本研究采用 Tapio 脱钩模型[16]。该模型通过计算碳排放变化率与 GDP 变化率的比值(即脱钩指数)来判断二者的脱钩状态。计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{\% \Delta C}{\% \Delta GDP} = \frac{(C_t - C_{t-1})/C_{t-1}}{(GDP_t - GDP_{t-1})/GDP_{t-1}} \quad (4)$$

式中, ε 为脱钩指数; C_t 和 C_{t-1} 分别为当期和上一期的碳排放量; GDP_t 和 GDP_{t-1} 分别为当期和上一期的地区生产总值。

ε 根据脱钩指数以及碳排放变化率、GDP 变化率的正负组合, Tapio 将脱钩状态划分为八种类型[17]。本研究采用该分类标准, 具体判断依据如表 1 所示。

Table 1. Decoupling status and its criteria

表 1. 脱钩状态及其标准

脱钩状态		$\Delta C/C$	$\Delta GDP/GDP$	脱钩指数(ε)
负脱钩	扩张负脱钩	>0	>0	$\varepsilon > 1.2$
	强负脱钩	>0	<0	$\varepsilon < 0$
	弱负脱钩	<0	<0	$0 \leq \varepsilon \leq 0.8$

⁵城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算技术指南(试行)[EB/OL]. (2018-04) [2026-09-23]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/201804/W020180926550238576829.pdf>

续表

脱钩	弱脱钩	>0	>0	$0 \leq \varepsilon \leq 0.8$
	强脱钩	<0	>0	$\varepsilon < 0$
	衰退脱钩	<0	<0	$\varepsilon > 1.2$
连接	增长连接	>0	>0	$0.8 \leq \varepsilon \leq 1.2$
	衰退连接	<0	<0	$0.8 \leq \varepsilon \leq 1.2$

3. 结果与分析

3.1. 城镇污水处理碳排放时序演变特征

基于基准情景核算, 2010~2024 年东北三省城镇污水处理碳排放量变化趋势如图 1 所示。整体来看, 三省碳排放量在研究期内均呈现波动变化特征, 且省际差异明显。辽宁省碳排放量始终处于三省最高水平, 这与辽宁省城镇人口规模较大、污水处理总量较高有关; 吉林省和黑龙江省碳排放量相对较低, 两者在不同年份的波动幅度略有不同。

从时间趋势看, 东北三省城镇污水处理碳排放量总体呈现“前期增长、后期趋稳”的演变态势。2010~2015 年前后, 伴随城镇化推进和污水处理设施覆盖范围扩大, 污水处理量逐步增加, 碳排放量相应上升。2015 年以后, 受东北地区经济增长放缓、人口持续流出以及污水处理设施建设趋于饱和等因素影响, 污水处理量增速明显放缓, 部分省份在个别年份出现负增长, 碳排放量也随之进入平稳或小幅波动阶段。从碳排放变化率来看, 辽宁省在 2017 年和 2023 年出现负增长, 黑龙江省在 2017 年出现明显下降, 其余年份三省碳排放变化率多为正值, 但增速整体低于前期。

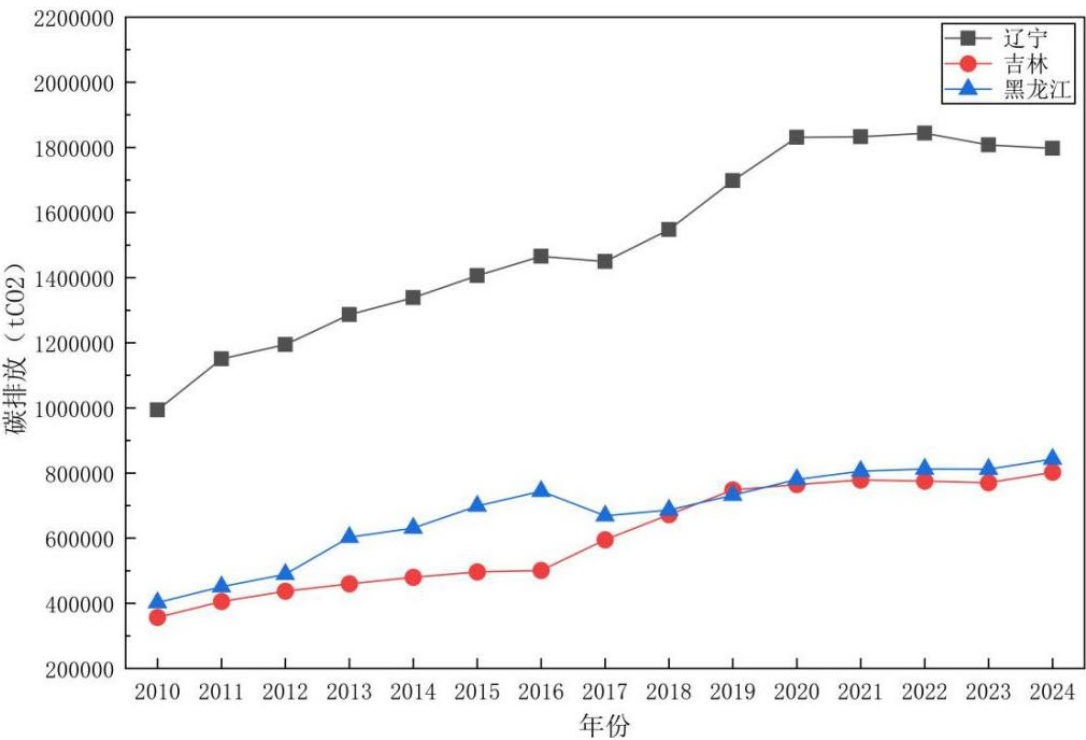


Figure 1. Trend of carbon emissions from urban sewage treatment in the three northeastern provinces (2010~2024)
图 1. 东北三省城镇污水处理碳排放量变化趋势(2010~2024 年)

3.2. 碳排放与 GDP 的脱钩状态分析

基于 Tapio 脱钩模型, 计算得到东北三省 2011~2024 年各年度污水处理碳排放与 GDP 的脱钩指数, 并根据脱钩状态划分标准进行分类。图 2 以热力图形式展示三省各年度脱钩状态演变, 表 2 为各省不同脱钩状态出现次数统计。图 2 中的 1、2、3、4、5、6 分别代表强脱钩、弱脱钩、增长连接、扩张负脱钩、弱负脱钩、强负脱钩。

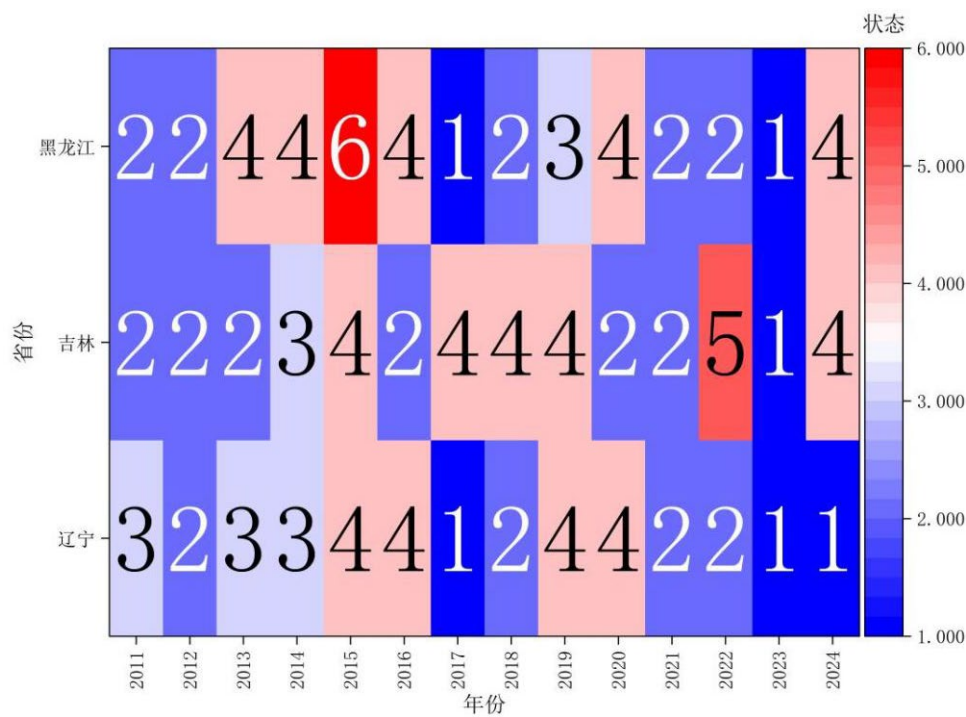


Figure 2. Evolution of decoupling status between carbon emissions from wastewater treatment and GDP in the three north-eastern provinces (2011~2024)

图 2. 东北三省污水处理碳排放与 GDP 脱钩状态演变(2011~2024 年)

Table 2. Statistics on the decoupling status of carbon emissions from wastewater treatment and GDP in the three northeastern provinces

表 2. 东北三省污水处理碳排放与 GDP 脱钩状态统计

省份	强脱钩	弱脱钩	增长连接	扩张负脱钩	弱负脱钩	强负脱钩
辽宁	3	4	3	4	0	0
吉林	1	6	1	5	1	0
黑龙江	2	5	1	5	0	1

从热力图和表 2 可以看出, 东北三省脱钩状态以弱脱钩、增长连接和扩张负脱钩为主, 强脱钩和弱负脱钩出现频次有限, 扩张负脱钩和强负脱钩在部分省份集中出现。总体而言, 研究期内三省尚未形成稳定的低碳脱钩格局。

3.3. 脱钩状态的时间演变特征

从时间维度分析, 脱钩状态呈现明显阶段性变化。

2011~2014 年, 辽宁和吉林以弱脱钩和增长连接为主, 黑龙江在 2011~2012 年为弱脱钩, 但 2013~2014 年转为扩张负脱钩, 脱钩状态明显差于其他两省。其中 2011 年吉林、黑龙江为弱脱钩, 辽宁为增长连接; 2012 年三省均为弱脱钩; 2013~2014 年辽宁为增长连接, 吉林为弱脱钩或增长连接, 黑龙江为扩张负脱钩。这一时期东北地区经济增速整体尚可, 但黑龙江碳排放增速已开始超过 GDP 增速, 脱钩质量率先恶化。

2015~2016 年, 三省脱钩状态明显恶化。辽宁连续两年出现扩张负脱钩, 吉林 2015 年、黑龙江 2015 年也出现扩张负脱钩或强负脱钩。这一阶段东北地区经济增速大幅下滑, GDP 增速降至 1% 左右甚至更低, 但污水处理碳排放仍保持正增长, 导致碳排放增速显著高于 GDP 增速。

2017 年, 辽宁和黑龙江同时出现强脱钩, 即 GDP 增长而碳排放下降, 为研究期内少有的积极信号。这一现象与当年中央环境保护督察的集中开展以及钢铁、煤炭去产能政策的深入推进密切相关, 其具体机制详见 2.4 节。2018 年起三省脱钩状态再次波动, 表明该阶段的强脱钩主要来自外部政策冲击和工业废水减量, 而非污水处理行业自身能效的实质性提升。

2020 年, 三省 GDP 增速大幅下滑, 但污水处理碳排放仍保持正增长, 辽宁、黑龙江表现为扩张负脱钩, 吉林虽为弱脱钩但脱钩指数也偏高, 反映出经济增速大幅下滑并未同步减少污水处理负荷。

2021~2024 年, 脱钩状态波动明显, 未形成稳定趋势。辽宁在 2021~2022 年出现弱脱钩, 2023~2024 年连续两年为强脱钩; 吉林和黑龙江的状态则在弱脱钩、增长连接和扩张负脱钩之间频繁转换。2022 年吉林出现弱负脱钩, 即 GDP 负增长而碳排放小幅下降, 但下降幅度小于经济收缩幅度。2024 年黑龙江 GDP 增速仅 0.04%, 碳排放增长 4.42%, 表现为扩张负脱钩, 表明经济增长接近停滞背景下污水处理碳排放仍具有刚性。

3.4. 关键年份脱钩状态的政策案例剖析

为理解关键年份脱钩状态的形成机制, 本节结合环保督察、去产能、减污降碳等政策文件, 对典型年份进行简要案例式剖析。

(1) 2017 年辽宁、黑龙江强脱钩: 环保督察与去产能政策叠加所致。2016 年国务院印发钢铁、煤炭去产能意见[18][19], 辽宁、黑龙江作为钢铁和资源型省份, 高耗能企业限产停产减少了进入污水系统的工业废水量; 同期中央环保督察进驻并反馈整改意见(2016 年 11 月黑龙江)[20], 推动整治涉水排污企业、规范工业废水纳管, 叠加辽宁省经济增速回升, 形成 GDP 增长而碳排放下降的强脱钩。该强脱钩来自外部政策冲击下的工业废水减量, 而非行业自身能效提升, 不具有持续性。

(2) 2015 年, 黑龙江出现研究期内唯一的强负脱钩, 辽宁 2015~2016 年连续两年扩张负脱钩。受国际油价下跌和大庆油田原油减产[21]影响, 东北经济深度下行, 但污水处理量仍较快增长, 碳排放呈刚性上升。

(3) 2020 年, 三省 GDP 增速大幅下滑, 但污水处理量仍正增长, 辽宁、黑龙江表现为扩张负脱钩, 表明生活污水排放具有基础性刚性。

(4) 2022 年, 吉林出现研究期内唯一的弱负脱钩, 在设施扩容与收集范围扩大背景下, 经济下行时碳排放仅小幅下降。

(5) 2023~2024 年, 辽宁连续两年实现强脱钩。《减污降碳协同增效实施方案》要求推进污水处理厂节能降耗、优化工艺流程, 鼓励采用高效低能耗设备, 推广建设太阳能发电设施[22], 叠加电网排放因子下降, 电力间接碳排放明显下降, 形成连续强脱钩, 体现能效提升与电网清洁化的内生作用。

综上, 关键年份脱钩状态受环保督察、去产能、经济下行等外生冲击与能效提升、电网清洁化等内生因素共同影响, 内生性减排是实现稳定脱钩的根本路径。

3.5. 省际差异及可能原因

三省脱钩状态存在明显差异。辽宁省表现相对最好, 研究期内出现 3 次强脱钩(2017、2023、2024 年), 且无负脱钩状态, 脱钩状态以弱脱钩、增长连接和扩张负脱钩为主。这可能与辽宁经济总量较大、GDP 增速相对较高有关; 同时辽宁污水处理设施建设较早, 处理量增长空间有限, 碳排放增速趋于平稳。

吉林省出现 1 次强脱钩、6 次弱脱钩, 但扩张负脱钩也达 5 次, 且 2022 年出现弱负脱钩(GDP 负增长而碳排放小幅下降), 说明经济下行阶段污水处理碳排放虽有所下降, 但下降幅度不及经济收缩幅度, 脱钩质量不高。吉林省未出现强负脱钩, 整体脱钩表现略好于黑龙江。

黑龙江省出现 2 次强脱钩、5 次弱脱钩, 但扩张负脱钩次数最多(5 次), 且 2015 年出现强负脱钩(GDP 负增长而碳排放正增长), 脱钩质量最差。这表明黑龙江在经济增长乏力背景下, 污水处理碳排放仍因设施运行负荷刚性和管网收集范围扩大等因素保持增长, 设施建设与提标改造仍在推进, 短期内减污降碳协同推进仍面临较大挑战。

整体来看, 东北地区污水处理碳排放的减排不能单纯依赖经济增长放缓, 而应通过技术改造、运行优化和区域差异化政策主动降低单位处理能耗, 推动经济增长与碳排放逐步脱钩。

3.6. 敏感性分析

为检验直接排放系数不确定性对脱钩结论的影响, 本文设置低(基准值 $\times 0.7$)、基准、高(基准值 $\times 1.3$) 三种情景进行敏感性分析。结果表明, 三种情景下东北三省脱钩状态分布总体一致, 仅在少数年份出现边界性转换。辽宁省在低情景下 2021 年、2022 年由弱脱钩转为强脱钩, 强脱钩次数由 3 次增至 5 次; 吉林省在高情景下 2022 年由弱负脱钩转为强负脱钩; 黑龙江省在高情景下 2012 年由弱脱钩转为增长连接, 2023 年由强脱钩转为弱脱钩。上述差异均未改变三省脱钩状态的主体分布, 也未改变“辽宁省脱钩表现相对较好、黑龙江和吉林扩张负脱钩年份较多”的基本结论。

此外, 对于单位电耗参数, 由于三种能效提升情景下 e_i 的变化仅对碳排放量进行等比例缩放, 碳排放变化率的符号和脱钩指数的大小关系不发生改变, 因此脱钩状态判断对单位电耗参数不敏感。

综上, 本文脱钩分析结论对直接排放系数和单位电耗参数的变化均具有稳健性。

4. 结论

本研究基于 2010~2024 年东北三省面板数据, 采用排放因子法核算了城镇污水处理碳排放量, 并运用 Tapio 脱钩模型分析了碳排放与经济增长之间的脱钩关系, 主要得出以下结论:

(1) 时序演变方面, 东北三省城镇污水处理碳排放量在研究期内总体呈现“先增后稳”的变化特征。2010~2015 年前后, 碳排放随污水处理量增加而持续上升; 2015 年以后增速明显放缓, 部分省份在个别年份出现负增长。辽宁省碳排放量始终处于三省最高水平, 吉林和黑龙江相对较低。

(2) 脱钩状态方面, 2011~2024 年东北三省污水处理碳排放与 GDP 的脱钩状态以弱脱钩、增长连接和扩张负脱钩为主, 强脱钩仅出现在 2017、2023 和 2024 年三个年份, 未形成稳定的低碳脱钩格局。这表明在多数年份, 污水处理碳排放与经济增长仍保持同步增长态势, 且碳排放增速往往不低于 GDP 增速, 脱钩质量总体不高。

(3) 省际差异方面, 三省脱钩表现存在明显分化。辽宁省表现相对最好, 研究期内出现 3 次强脱钩(2017、2023、2024 年), 且未出现负脱钩状态; 吉林省出现 1 次强脱钩(2023 年)、6 次弱脱钩, 但扩张负脱钩达 5 次, 且 2022 年出现弱负脱钩, 脱钩质量不高; 黑龙江省出现 2 次强脱钩(2017、2023 年)、5 次弱脱钩, 但扩张负脱钩次数最多, 且 2015 年出现强负脱钩, 多次在经济增速接近零的年份仍出现碳排放正增长, 减污降碳协同压力最为突出。

(4) 从形成机制看, 东北地区污水处理碳排放具有明显的刚性特征。经济增速放缓甚至负增长并不能自动带来碳排放下降, 这与城市基本排水需求稳定、污水处理设施运行锁定以及低温高能耗等因素密切相关。结合政策案例剖析可知, 2017 年辽宁、黑龙江强脱钩主要来自环保督察与去产能政策叠加下的工业废水减量, 属外生冲击型, 不具有持续性; 2023~2024 年辽宁连续强脱钩则体现了减污降碳政策与电网清洁化的内生效应。未来推动东北地区实现稳定低碳脱钩, 应更多依靠污水处理设施能效提升、电网清洁化等内生性因素, 而非依赖外生政策冲击。

(5) 政策层面, 东北三省应实施差异化的污水处理低碳转型策略。辽宁省经济基础相对较好, 设施建设较为成熟, 应重点推进现有污水处理厂的精细化管理和智能化改造, 通过精确曝气、变频调控、设备更新等措施进一步降低单位处理能耗, 同时结合“十四五”节能减排工作目标, 探索污水源热泵、光伏发电等清洁能源在污水处理厂的应用, 巩固和扩大强脱钩年份的减排成效。吉林省和黑龙江省经济增速较低、财政压力较大, 且人口持续流出, 污水处理碳排放的刚性特征更为突出。两省应优先控制新增处理能力, 避免在人口流出地区盲目新建污水处理设施造成资源闲置和能耗浪费; 同时, 结合老旧设施改造, 对处理负荷明显偏低的污水厂进行整合或关停, 提升系统整体能效。针对黑龙江多次出现的经济停滞与碳排放增长并存现象, 建议将污水处理低碳转型纳入区域振兴政策框架, 通过中央和省级财政专项支持, 开展寒冷地区污水处理节能技术示范, 重点解决低温条件下曝气能耗高、保温需求大的技术瓶颈。

参考文献

- [1] 贺珊珊, 陈红芳, 刘海燕, 等. 城镇污水处理厂碳排放核算标准现状分析与比较[J]. 给水排水, 2024, 60(7): 169-174.
- [2] 杨敬宇, 胡德秀, 马勃, 等. 城镇污水处理厂碳排放特征及其驱动机制分析——以西安市为例[J/OL]. 环境科学学报, 1-13. <https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2026.0233>, 2026-06-24.
- [3] 中国城市建设统计年鉴[EB/OL]. 2025-10-10. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/jstjnj/>, 2026-09-23.
- [4] 郑晓英, 胡天星, 邓雄成, 等. 典型 A2/O 工艺城镇污水处理厂碳排放核算、影响因素及碳减排路径研究[J]. 环境工程, 2026, 44(3): 177-188.
- [5] Liu, X., Cheng, S., Li, Z., Li, P., Wang, T., Guo, X., *et al.* (2023) Study on the Coupling Relationship between Carbon Emission from Sewage Treatment and Economic Development in Industrial Parks. *Water*, **15**, Article No. 3358. <https://doi.org/10.3390/w15193358>
- [6] 涂倩倩, 沈鹏飞, 刘鸣燕, 等. 城镇污水处理厂碳排放核算方法及特征[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 52-62.
- [7] Zhang, Y., Ge, T., Liu, J., Sun, Y., Liu, Y., Zhao, Q., *et al.* (2021) The Comprehensive Measurement Method of Energy Conservation and Emission Reduction in the Whole Process of Urban Sewage Treatment Based on Carbon Emission. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 56727-56740. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14472-7>
- [8] 王永阳, 蔡宴朋, 张盼. 珠三角城市群净碳排放与经济发展脱钩效应及其驱动力[J]. 生态学报, 2025, 45(3): 1303-1314.
- [9] 曹昱亮, 倪珣, 巩红禹. 长江经济带农业碳排放影响因素及脱钩效应[J]. 环境科学, 2025, 46(3): 1535-1547.
- [10] 罗耀, 方世明, 徐枫. 人口收缩背景下东北三省城镇化与生境质量协调发展研究——基于增长城市与收缩城市的对比[J]. 地理科学, 2025, 45(11): 2468-2480.
- [11] 蔡佳雪, 代智彬, 赵良仕, 等. 东北三省碳排放时空异质性分析及其影响因素[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2025, 46(5): 72-82.
- [12] Wang, X., Dong, Y., Yu, S., Mu, G., Qu, H., Li, Z., *et al.* (2022) Analysis of the Electricity Consumption in Municipal Wastewater Treatment Plants in Northeast China in Terms of Wastewater Characteristics. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, Article No. 14398. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114398>
- [13] 2021 年电力二氧化碳排放因子[EB/OL]. 2024-04-12. <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202404/W020240412827267102800.pdf>, 2026-09-20.
- [14] 关于发布 2022 年电力二氧化碳排放因子的公告[EB/OL]. 2024-12-26. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202412/t20241226_1099413.html, 2026-09-27.

- [15] 楚想想, 罗丽, 王晓昌, 等. 我国城镇污水处理厂的能耗现状分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(7): 70-74.
- [16] Tapio, P. (2005) Towards a Theory of Decoupling: Degrees of Decoupling in the EU and the Case of Road Traffic in Finland between 1970 and 2001. *Transport Policy*, **12**, 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.01.001>
- [17] 高玉娟, 熊子娟. 东北黑土区种植业碳排放脱钩效应及驱动因素研究——基于 Tapio 脱钩模型和 LMDI 分析[J]. 生态经济, 2026, 42(3): 174-183.
- [18] 国务院关于钢铁行业化解过剩产能实现脱困发展的意见[EB/OL]. 2016-02-04. https://www.gov.cn/zhengce/content/2016-02/04/content_5039353.htm, 2026-09-20.
- [19] 国务院关于煤炭行业化解过剩产能实现脱困发展的意见[EB/OL]. 2016-02-05. https://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5045944.htm, 2026-09-20.
- [20] 中央第二环境保护督察组向黑龙江省反馈督察情况[EB/OL]. 2016-11-15. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201611/t20161115_367496.htm, 2026-09-20.
- [21] 李榕, 周庆. 低油价下大庆油田开发经营策略探讨[J]. 石油规划设计, 2018, 29(2): 41-43.
- [22] 减污降碳协同增效实施方案[EB/OL]. 2022-06-13. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/202206/t20220617_985879.html, 2026-09-21.