

# 企业绿色可持续发展的仿真研究

## ——以山西省为例

张景怡, 杨子琦, 刘 夏

北方工业大学理学院, 北京

收稿日期: 2025年11月8日; 录用日期: 2025年11月29日; 发布日期: 2025年12月10日

### 摘 要

随着世界各国绿色可持续发展的提出, 以及我国“双碳”目标的推进, 企业的绿色可持续发展成为区域转型的关键。以工业为主导的省份, 在我国经济发展初期起到了巨大的贡献, 但如今大多存在严重环境污染问题, 并且GDP增速缓慢, 不符合我国如今的发展方向, 面临着更加严峻的挑战, 所以这些省份应考虑企业的绿色转型问题。本文通过分析能源、经济与环境之间的关系, 通过运用系统动力学模型, 使用Vensim软件构建了对山西省企业绿色可持续发展的仿真模拟研究。本文数据来自山西省国民经济和社会发展的统计公报, 我们截取2004~2034年作为我们仿真的时间设定区间。聚焦于不同环境污染治理投资与不同三产投资比例, 并分为八个政策组合。同时, 通过改变这些不同变量, 得出相关对比图, 进行观察分析, 最终可以提出在绿色可持续发展的条件下对企业转型的相关方案。

### 关键词

系统动力学, 3E模型, 绿色可持续发展, 企业绿色转型, 仿真模拟

# Simulation Research on Corporate Green Sustainable Development

## —A Case Study of Shanxi Province

Jingyi Zhang, Ziqi Yang, Xia Liu

College of Science, North China University of Technology, Beijing

Received: November 8, 2025; accepted: November 29, 2025; published: December 10, 2025

### Abstract

With the global emphasis on green sustainable development and the advancement of China's "dual

文章引用: 张景怡, 杨子琦, 刘夏. 企业绿色可持续发展的仿真研究[J]. 统计学与应用, 2025, 14(12): 159-172.

DOI: 10.12677/sa.2025.1412353

carbon” goals, corporate green sustainable development has become crucial for regional transformation. Industrial-dominated provinces, which contributed significantly to China’s early economic growth, now face severe environmental pollution and slow GDP growth. These issues are inconsistent with China’s current development direction and present considerable challenges. Therefore, such provinces must consider promoting green transformation in enterprises. This study analyzes the relationships among energy, economy, and the environment by applying a system dynamics model and using Vensim software to simulate corporate green sustainable development in Shanxi Province. Data were sourced from the Statistical Bulletin on National Economic and Social Development of Shanxi Province, with the simulation period set from 2004 to 2034. Focusing on different levels of investment in environmental pollution control and varying investment ratios in the tertiary industry, eight policy scenarios were designed. By adjusting these variables, comparative charts were generated for observation and analysis. Ultimately, strategies for corporate transformation under green sustainable development conditions were proposed.

## Keywords

System Dynamics, 3E Model, Green Sustainable Development, Corporate Green Transformation, Simulation

Copyright © 2025 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. 绪论

### 研究背景及目的

2012 年联合国召开“联合国可持续发展大会”，本次会议的核心理念是将“绿色经济”作为实现可持续发展的重要工具，推动全球向更加低碳和高效的经济发展模式进行转变。由此可知，绿色发展和可持续发展早已成为全世界国家的共同追求，它可以在满足当前需要的同时，不会对环境造成损害。同时，绿色可持续发展主要强调的是能源开发，环境保护以及经济发展之间均衡发展。能源、环境和经济这三部分近年来成为了社会关注的热点，3E 模型(环境 Environment、能源 Energy、经济 Economy)系统理论体系逐渐形成。环境可持续发展是作为社会可持续发展的条件，所有的规划和发展都是建立在保护环境的同时来发展我们的经济水平。目前我国和世界的经济发展水平暂时还未达到经济可持续发展的最终目标，但在其中的部分领域取得了重要进展。

如今我国科技发展迅速，不仅为经济可持续发展带来了新的机遇，也带来了挑战。在人工智能技术、物联网、大数据等一些新兴产业发展迅速的今天，传统产业正在经历深刻的变革，同时也面临经济转型的重大问题。所以传统产业需要不断加快绿色转型的步伐，以适应科技飞速发展和政策不断更新的要求。山西省作为我国的工业大省，是我国重工业企业发展的主要省份之一，其对工业的依赖远高于全国水平，在我国经济发展初期起到了极大推动作用，同时为国家发展做出了巨大贡献。而山西省的主要产业以传统产业为主，所以其面临的问题与其他以工业 GDP 占比较大的省份相同。其主要的问题为企业的绿色转型问题。本文选择山西 2004~2017 年的社会综合相关数据为研究对象，通过测算经济和绿色产业之间的关联，以绿色转型为题，运用系统动力学的方法，测量不同政策模式下得到的经济影响和社会影响开展研究。通过仿真模型，引入绿色 GDP 的观念，构建第一产业、第二产业以及第三产业的的生产、经济、污染与社会整体的能源、经济和污染之间的关系，基于经济、环境、能源资源三个子系统，得到绿色转型

系统存量流量模型。通过仿真各政策因素，其中我们以改变一、二、三产业投资比例和环境污染治理投资比例为例，研究其对整个系统的影响，对各情景模拟，得出相关对比图，最终提出企业转型的恰当方向，对环境保护等绿色事业给予贡献，并且对企业绿色可持续发展提出相关建议。

2. 系统动力学模型的构建

2.1. 模型建立分析

2.1.1. 模型构建思路

通过文献检索与查阅，为了平衡能源、经济、环境三者之间的协调发展而非聚焦于某两者之间的关系，本文采用“能源 - 经济 - 环境”(3E 模型)协同理论为核心框架。山西省作为典型的资源型地区，经济发展高度依赖于煤炭等传统能源，使其形成了“高碳锁定”的产业结构。以此实际情况与理论框架相结合，本文构建出了多维度、多层级的动态系统动力学模型，揭示了企业绿色可持续发展的内在机制。

在三个子系统的变量都加入到系统中后，给各个变量中连上因果链，可以得出经济可持续发展是社会经济的最终目的。且三个子系统间相互联系影响：经济活动强度影响环境负荷、产业结构决定能源的消费方式、能源为经济活动提供动力输入、能源消耗是环境污染的主要来源、环境通过资源承载力与环境容量制约经济发展。企业绿色可持续发展是一个随时变化的动态系统，所以我们根据构建出的系统动力学模型来模拟不同政府政策对企业绿色可持续发展的影响，为企业绿色可持续发展提供依据以及建议。

2.1.2. 因果回路图

基于本论文题目分析，根据山西省 GDP 和山西省人口数量与其他各个要素之间的关系，可以构造出本模型的因果回路如图 1 所示。该因果回路图中一共包括 22 条回路，其中包括 7 条负反馈回路和 15 条正反馈回路。

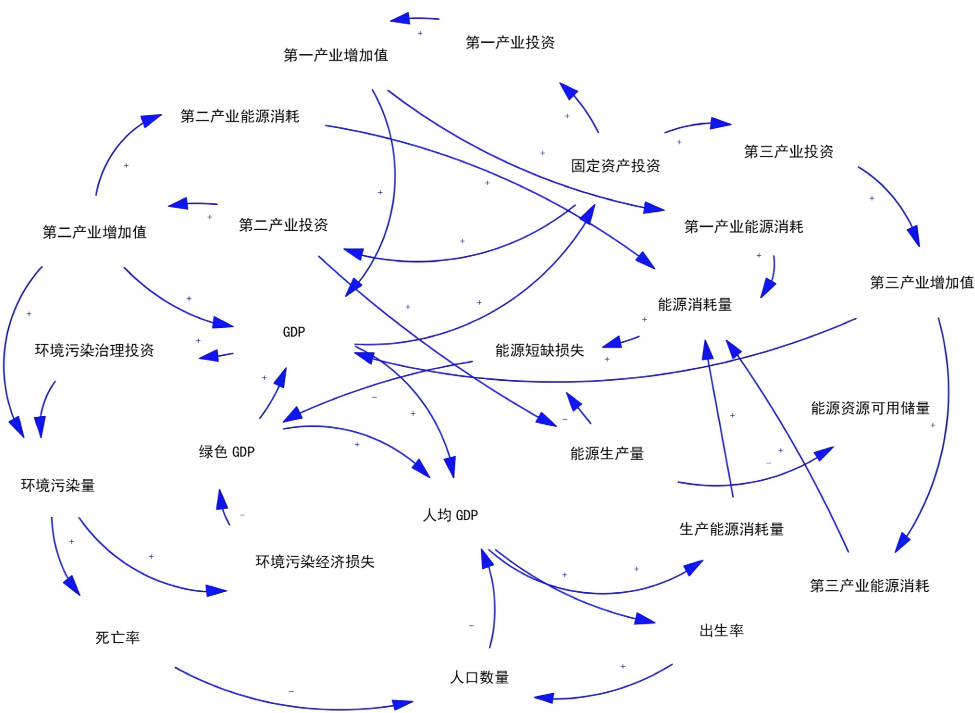


Figure 1. Causal Loop Diagram (CLD)  
图 1. 因果回路图

通过对因果回路图的分析,可以得到增加环境污染治理投资会减少环境的污染量,同时也会减少环境污染的经济损失,从而使山西省的绿色 GDP 增加,由于绿色 GDP 是 GDP 的组成部分,对 GDP 的提高也有所影响,由此形成了一条正反馈回路;另一方面, GDP 的增加令固定资产也随之增加,从而影响第一、二、三产业的投资,并使其增加值上涨,从而形成另外一条正反馈回路。因为第一、二、三产业投资之和为固定资产投资,所以可以将固定资产看作一个整体,假设第一产业投资占固定资产的比例不变,所以可以通过增减第三产业投资比,第二产业的投资比随之改变。根据调整这些系数得出的不同反馈数据可以分析出企业绿色转型的最佳方案。

2.1.3. 系统存量 - 流量图

系统存量 - 流量图是在因果回路图的基础上,进一步增强了各个变量之间的逻辑关系,明确了系统的反馈形式和控制规律,反映了数据流动路径和性能。与因果回路图相比,其主要特点体现在各个变量之间建立的函数关系和构造的方程上。系统存量 - 流量图主要包含状态变量、速度变量、辅助变量和常数变量,其中包括输入变量中的第三产业投资比例和环境污染治理投资比例,以及输出变量中的绿色 GDP 和污染物增加量等变量。系统存量 - 流量图如图 2 所示。

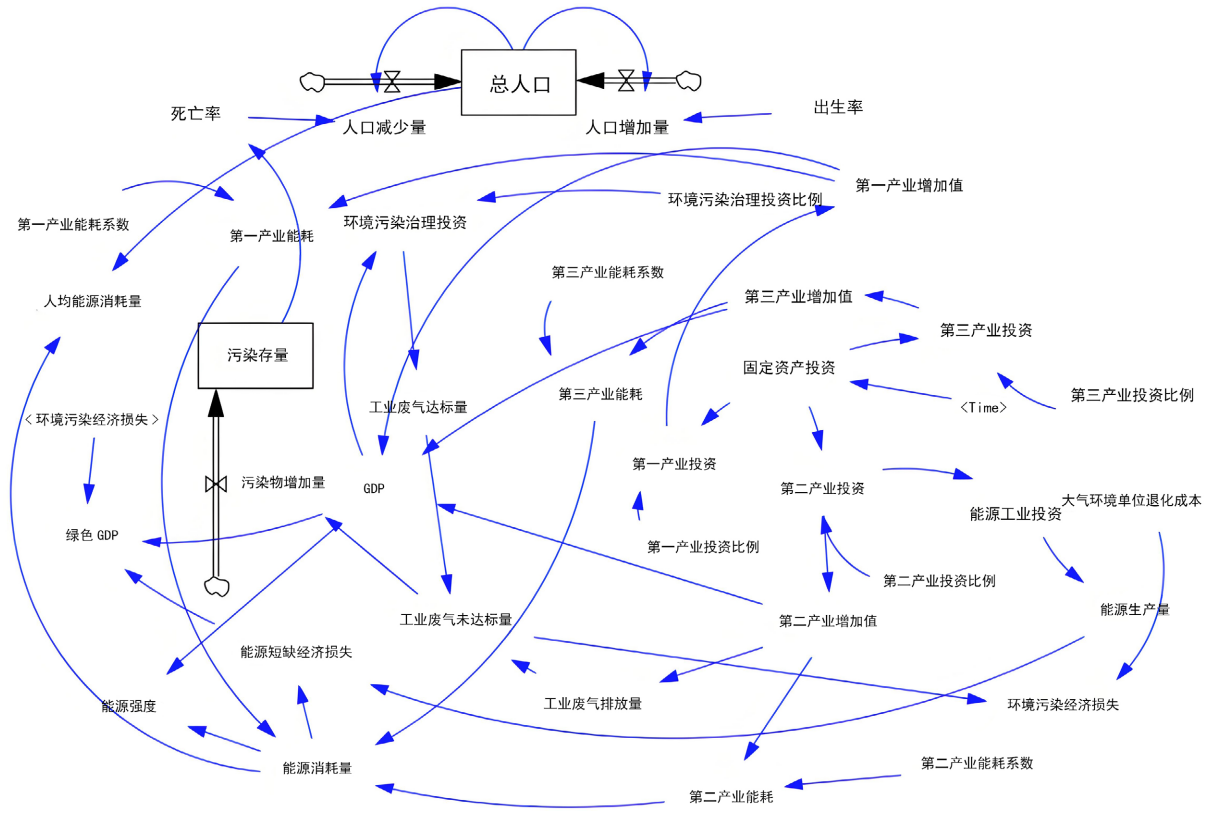


Figure 2. Stock and Flow Diagram (SFD)

图 2. 系统存量 - 流量图

2.1.4. 参数设置与函数关系

本文的模型由变量、参数、常数和函数关系构成,通过这四类之间的联系构成了本文的系统动力模型,来进行仿真。根据本文的研究所需设置了山西绿色转型系统主要变量类型,如表 1 山西绿色转型系统主要变量类型所示。

Table 1. Main variable types in Shanxi's green transition system  
表 1. 山西绿色转型系统主要变量类型

变量名称	单位	变量属性	变量名称	单位	变量属性
GDP	亿元	辅助变量	第一、二、三产业能源消耗量	万吨	辅助变量
总人口	万人	状态变量	固定资产投资	亿元	辅助变量
出生率	百分比	常数变量	绿色 GDP	亿元	辅助变量
死亡率	百分比	辅助变量	环境污染治理投资比例	百分比	常数变量
人口减少量	万人	速度变量	环境污染治理投资	亿元	辅助变量
人口增加量	万人	速度变量	环境污染经济损失	亿元	辅助变量
第一、二、三产业增加值	亿元	辅助变量	能源短缺经济损失	亿元	辅助变量
能源工业投资	亿元	辅助变量	人均能源消耗量	万吨	辅助变量
能源消耗量	万吨	辅助变量	污染存量	万吨	状态变量
能源生产量	万吨	辅助变量	污染物增加值	万吨	速度变量
第一、二、三产业投资	亿元	辅助变量	工业废气达标量	万吨	辅助变量
第一、二、三产业投资比例	百分比	常数变量	工业废气未达标量	万吨	辅助变量
第一、二、三产业能源消耗系数	百分比	辅助变量	大气环境退化成本	亿元	辅助变量

参数设置：本文中的变量为第一、二、三产业的投资比例和环境污染治理投资比，其中第一、二、三产业的投资比例的历史值为：5.02%，40.08%，54.9%，环境污染治理投资比 1.32%。这两个参数作为本文仿真模拟的基础数据。

因为本文的研究目的与环境和经济相关，本文的基础函数关系分别为：

- 1) 绿色 GDP 的计算：绿色 GDP = GDP - 污染经济损失 - 能源短缺经济损失
- 2) 能源短缺经济损失的计算：能源短缺经济损失 = 0.5917 (能源消耗总量 - 能源生产总量)

能源短缺经济损失，是工业生产中不可避免的经济能源缺口，其中 0.5917 万元/吨标准煤为 2004~2017 年每消耗一单位万吨标准煤所生产的工业增加值的 14 年平均值计算得出。

由于山西以煤炭、冶金、化工等重工业为主，环境污染治理压力大，理论上环保投资需求较高，本文结合实际情况与参考文献韩知松(2020) [1]，设置环境污染治理投资比为 1.32%。

模型变量和数据的计算参考山西省统计局。山西省 2004~2017 年国民经济和社会发展统计公报[2]-[15]，结果如表 2 所示。

Table 2. Model variables and their numerical calculations  
表 2. 模型变量及其数值计算

变量名	数值	计算方法	参考来源
出生率	1.10%	取 2004~2017 年平均值	中国统计信息网
第一产业投资比	5.02%	取 2004~2017 年第一产业平均值/ 取 2004~2017 年固定资产投资平均值	中国统计信息网
第二产业投资比	40.08%	取 2004~2017 年第二产业平均值/ 取 2004~2017 年固定资产投资平均值	中国统计信息网
第三产业投资比	54.90%	取 2004~2017 年第三产业平均值/ 取 2004~2017 年固定资产投资平均值	中国统计信息网
环境污染治理投资比例	1.32%	取 2004~2017 年平均值并结合参考文献	山西省统计年鉴

数据来源：山西省统计局。山西省 2004~2017 年国民经济和社会发展统计公报[2]-[15]。



### 3. 仿真模拟

#### 3.1. 模型测试——敏感性测试

为了可以顺利进行模型仿真并确定参数的改变会对系统产生影响，本文对污染物增加量进行敏感性测试。测试分为调整环境污染物和调整第三产业比例两个组，检验过程如下。通过观察可以确定污染物增加量受这两个变量影响，并符合实际发展方向，因此通过敏感性测试。

##### 1) 敏感性测试：调整环境污染物

如图 3 所示，本文将环境污染防治投资比例下调 15% 和上调 50%，并设置粉色线条为对照组，对此发现将环境污染防治投资比例下调或上调都会影响污染物增加量，如图 3 中蓝色线和红色线显示。由此可以得出，污染物增加量对环境污染防治投资比例的变化敏感程度较高。

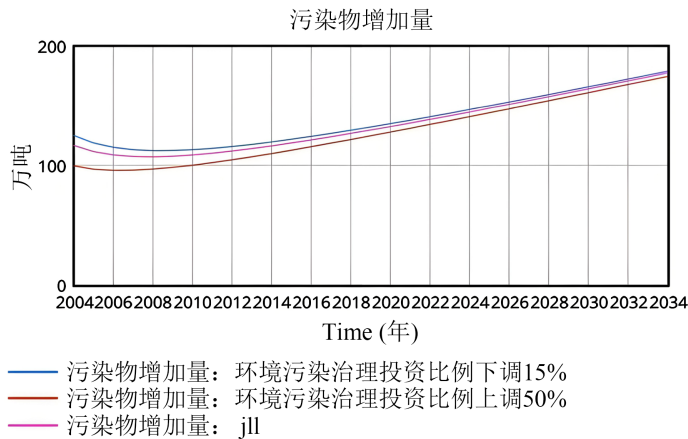


Figure 3. Sensitivity test: adjusting environmental pollutants  
图 3. 敏感性测试：调整环境污染物

##### 2) 敏感性测试：调整第三产业投资比例

如图 4 所示，本文将第三产业投资比例分别下调 25% 和上调 50%，并设置红色线条为对照组，发现第三产业投资比的增加与减少不同比例都使污染物的增加量发生对应的不同程度变化。对此可以得出，污染物增加量对第三产业投资比例的变化敏感程度较高。

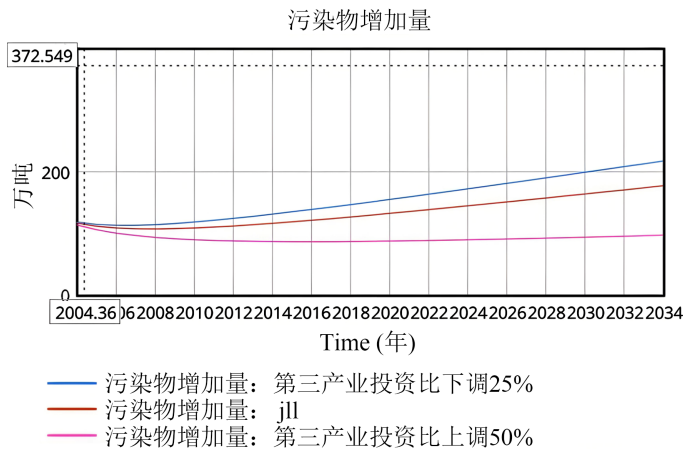


Figure 4. Sensitivity analysis: adjustment of tertiary industry investment ratio  
图 4. 敏感性测试：调整第三产业投资比例

3.2. 情境设计

山西省产业结构十分复杂，其中企业的绿色转型可以用系统动力学模型解释。根据参考孙康宁(2019) [16]，上述论文通过改变 GDP 增长率、科技投资和工业固定资产投资来改变强、一般和弱三种政策手段强度，以此观测工业能源消耗量、工业增加值等变量的变化率。郝芳(2016) [17]，以经济调控、科技革新和民生改善为变量，观测经济能源生态气候和环境资源的改变。综上，本文选取环境污染治理投资和第三产业投资比例为模型中的输入变量，具体数据如表 3 所示。

Table 3. Ratios of industrial investment, fixed asset investment, and pollution control investment  
表 3. 产业投资、固定资产投资与污染治理投资比例

年份	第一产业投资比	第二产业投资比	第三产业投资比	环境污染治理投资比
2004	2.46%	58.86%	38.68%	1.20%
2005	2.69%	60.80%	36.51%	1.05%
2006	2.81%	58.00%	39.20%	1.58%
2007	2.87%	55.25%	41.89%	1.56%
2008	3.08%	51.41%	45.51%	1.46%
2009	4.38%	42.98%	52.64%	0.77%
2010	4.43%	41.37%	54.20%	0.44%
2011	3.68%	45.42%	50.91%	0.45%
2012	3.99%	45.07%	50.94%	0.42%
2013	6.86%	44.75%	48.38%	0.53%
2014	7.66%	40.50%	51.84%	0.25%
2015	11.06%	36.82%	52.11%	0.20%
2016	13.09%	34.37%	52.54%	0.21%
2017	9.45%	34.29%	56.26%	0.84%
			均值	0.78%

数据来源：山西省统计局山西省 2004~2017 年国民经济和社会发展统计公报[2]-[15] (其中，环境污染治理投资比参考韩知松(2020) [1])。

山西省产业结构转型与绿色可持续发展是一个典型的复杂系统问题，其政策设计需兼顾现实可行性与系统动态反馈。本文选取环境污染治理投资比例与第三产业投资比例作为关键政策杠杆变量，其调整幅度参考以下依据：

政策依据：参照《山西省“十四五”生态环境保护规划》与《山西省能源革命综合改革试点方案》，明确提出“到 2025 年，环保投资占 GDP 比重提升至 2.5%左右”与“第三产业占比力争达到 60%”的目标。本文结合实际执行难度，将环境污染治理投资比例调整幅度设定为±30%，第三产业投资比例调整幅度设定为±15%，既反映政策导向，又保留一定的现实弹性。

历史波动范围：基于 2004~2017 年山西省统计数据显示，环境污染治理投资比例标准差约为 0.41%，第三产业投资比例标准差约为 6.2%。本文设定的调整幅度均在其历史波动范围的合理扩展区间内，具备实证基础。

基于上述设定, 本文构建 8 组政策情景(见表 4), 通过交叉组合两类政策变量, 模拟不同政策强度下系统的演化路径。

**Table 4.** Parameter variation diagrams  
**表 4.** 参数变化图

分组	变量	第一、二、三产业投资比例	环境污染治理投资比例
j11 (按正常发展)	对照组	0.0502:0.4008:0.5490	0.0132
j1101 (第三产业发达)	增加第三产业投资比例	0.0502:0.3185:0.6314 (+15%)	
j1102 (第二产业发达)	减少第三产业投资比例	0.0502:0.4832:0.4667 (-15%)	
j1103 (致力于环境污染)	增加环境污染治理投资比		0.0172 (+30%)
j1104 (忽略环境污染)	减少环境污染治理投资比		0.0092 (-30%)
j1105 (第三产业发达且兼顾 环境污染治理)	增加第三产业投资比例 并且增加环境污染治理投资比	0.0502:0.3185:0.6314 (+15%)	0.0172 (+30%)
j1106 (第三产业发达极端 以至于破坏环境)	增加第三产业投资比例 并且减少环境污染治理投资比	0.0502:0.3185:0.6314 (+15%)	0.0092 (-30%)
j1107 (保护环境极端而 忽略产业发展)	减少第三产业投资比例 并且增加环境污染治理投资比	0.0502:0.4832:0.4667 (-15%)	0.0172 (+30%)
j1108 (既忽略第三产业发展 也忽略环境保护)	减少第三产业投资比例 和环境污染治理投资比	0.0502:0.4832:0.4667 (-15%)	0.92% (-30%)

**3.3. 仿真结果输出与分析**

基于综合考虑, 本次研究将仿真模拟时长设定为 30 年, 步长为 1 年。并将八组实验组分为五个对照实验, 分别为仅第三产业投资比例改变、仅环境污染治理投资比例改变、第三产业投资比例和环境污染治理投资比例都增加以及分别使第三产业投资比例和环境污染治理投资比例一项增加一项减少。

本文从系统动力学的反馈结构出发, 深入解析不同政策情景下系统行为的内在机制。模型中关键反馈回路包括:

- (一) 经济增长 - 污染加剧 - 治理投入 - 环境改善(平衡回路):  
经济规模扩大(GDP ↑) → 污染物排放量 ↑ → 环境质量下降 → 政府加大治理投资 → 污染物 ↓  
→ 环境改善 → 绿色 GDP ↑。
- (二) 产业结构 - 能源结构 - 污染排放(增强回路):  
第三产业比例 ↑ → 单位 GDP 能耗 ↓ → 污染物排放 ↓ → 环境经济损失 ↓ → 绿色 GDP ↑。

**1) 仅第三产业投资比例改变**

假设仅第三产业投资比例上升或下降, 将污染物增加量和绿色 GDP 与对照组(j11)进行对比, 可以看



出第三产业投资比例的变化会对污染物增加量和绿色 GDP 的产值产生影响。在污染物增加量如图 5 中, jll01 增加第三产业投资比例, 从而使污染物增加量少于对照组, 所以 jll01 (紫色线) 在 jll (绿色线) 之下; 反之则为 jll02 (第三产业投资比例减少)。在污染物增加量如图 6 中, jll01 增加第三产业投资比例, 从而使绿色 GDP 大于对照组, 所以 jll01 (紫色线) 在 jll (绿色线) 之上; 反之则为 jll02 (第三产业投资比例减少)。由此可以得出, 增加第三产业投资比例可以减少环境污染量以及提升绿色 GDP。该结果验证了“产业结构-能源结构-污染排放”增强回路的主导作用。提升第三产业比例直接降低了系统整体的能源消耗强度与污染排放系数, 从而在源头上削弱了经济增长对环境的压力, 并通过降低环境经济损失, 正向促进了绿色 GDP 的积累。

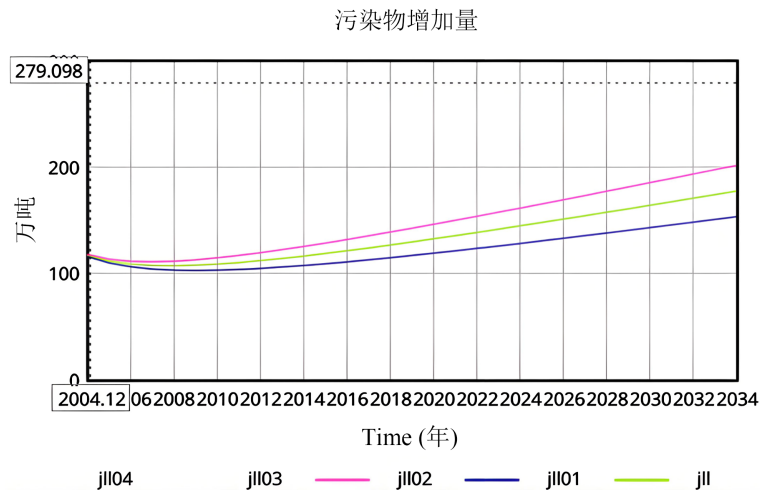


Figure 5. Increase in pollutants—tertiary industry investment ratio as the sole variable  
图 5. 污染物增加量——仅第三产业投资比例改变

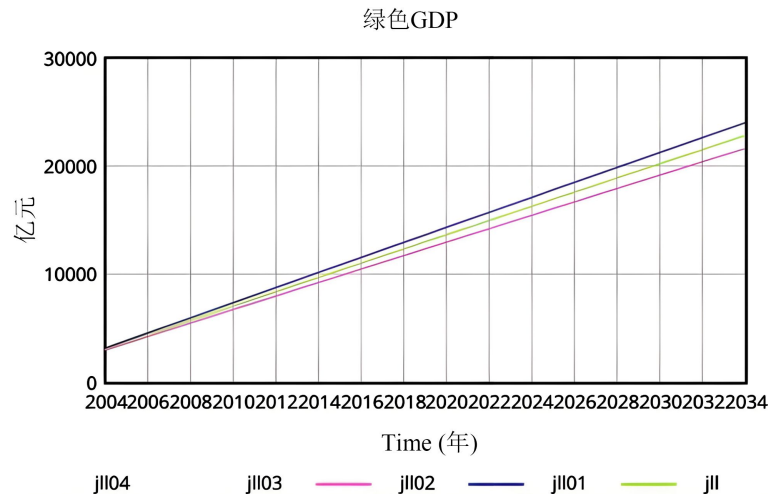


Figure 6. Green GDP—tertiary industry investment ratio as the sole variable  
图 6. 绿色 GDP——仅第三产业投资比例改变

## 2) 仅环境污染治理投资比例改变

由于绿色 GDP 的变化在图中无法清晰显示, 因此我们采用表格形式, 具体数值对比如表 5 所示。jll03 组的绿色 GDP 大于 jll 组大于 jll04 组。因此, 第三产业投资比例上升会使绿色 GDP 增加, 反之则

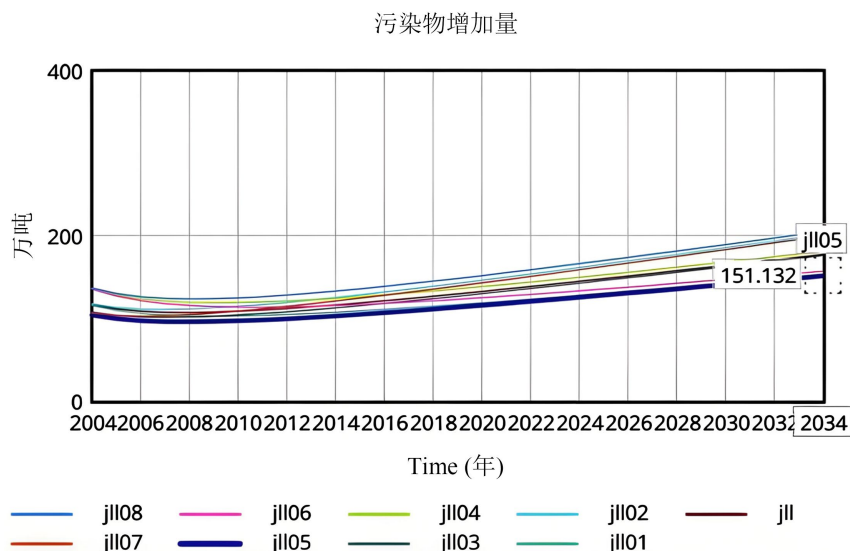
会减少。由此可以得出，增加环境污染治理投资可以减少环境污染量以及提升绿色 GDP。该结果凸显了“经济增长 - 污染加剧 - 治理投入 - 环境改善”平衡回路的调控作用。增加治理投资虽不直接改变产业结构，但通过末端治理有效削减了污染存量，降低了因环境退化导致的经济损失，从而在 GDP 总量相近的情况下，实现了绿色 GDP 的净增长。这体现了治理投资对系统环境承载力的修复功能。

**Table 5.** Comparison of green GDP data among jll04, jll, and jll03  
**表 5.** jll04 与 jll 和 jll03 所得绿色 GDP 数据对比

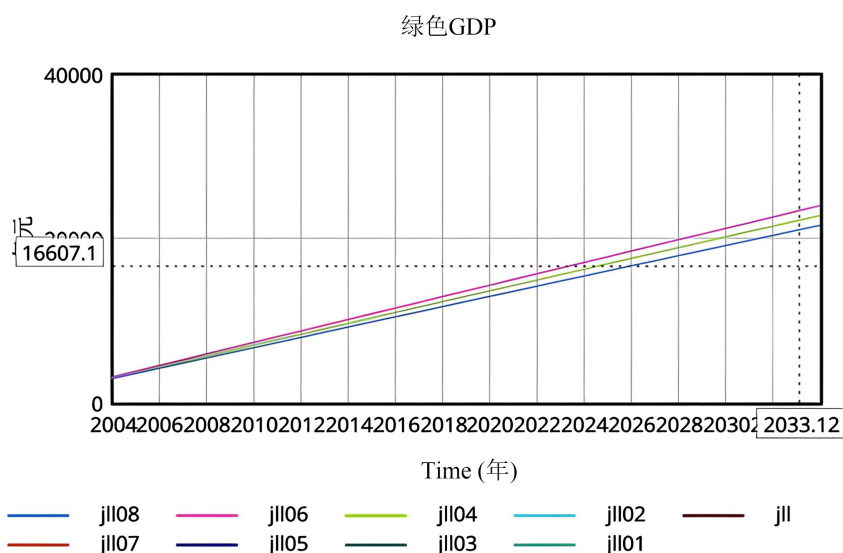
Time (年)	绿色 GDP: jll	绿色 GDP: jll03	绿色 GDP: jll04	Time (年)	绿色 GDP: jll	绿色 GDP: jll03	绿色 GDP: jll04
2004	3029.69	3034.20	3020.11	2020	13620.80	13622.00	13617.90
2005	3695.45	3699.35	3687.03	2021	14278.00	14279.20	14275.20
2006	4360.91	4364.34	4353.42	2022	14934.80	14935.90	14932.10
2007	5026.32	5029.38	5019.58	2023	15591.10	15592.20	15588.60
2008	5691.37	5694.13	5685.25	2024	16247.00	16248.10	16244.60
2009	6355.81	6358.32	6350.21	2025	16902.60	16903.60	16900.20
2010	7019.52	7021.83	7014.36	2026	17557.70	17558.70	17555.40
2011	7682.48	7684.61	7677.70	2027	18212.50	18213.40	18210.30
2012	8344.72	8346.70	8340.26	2028	18866.80	18867.80	18864.70
2013	9006.26	9008.11	9002.09	2029	19520.80	19521.70	19518.80
2014	9667.15	9668.88	9663.23	2030	20174.40	20175.30	20172.40
2015	10327.40	10329.10	10323.70	2031	20827.70	20828.50	20825.70
2016	10987.10	10988.70	10983.60	2032	21480.60	21481.40	21478.70
2017	11646.30	11647.70	11643.00	2033	22133.10	22133.90	22131.30
2018	12304.90	12306.30	12301.80	2034	22785.30	22786.10	22783.50
2019	12963.10	12964.40	12960.10				

**3) 第三产业投资比例和环境污染治理投资比例都增加**

假设第三产业投资比例和环境污染治理投资比例都增加，将污染物增加量和绿色 GDP 与对照组(jll)进行对比,可以看出第三产业投资比例和环境污染治理投资比例同时增加,会对污染物增加量和绿色 GDP 的产值产生影响在污染物增加量如图 7 中,jll05 在各组中污染物增加量最少,与 jll 的对比效果最为显著。在绿色 GDP 如图 8 中, jll05 在各组中绿色 GDP 最高。由此可以得出，同时增加第三产业投资和环境污染治理投资在所有实验组中对污染物增加量和绿色 GDP 的积极影响最为显著,会使山西省企业的绿色转型效果最好。双增情景(jll05)实现了“产业结构优化”与“末端治理强化”的政策协同。两条关键回路(“结构 - 能源 - 环境”增强回路与“增长 - 污染 - 治理”平衡回路)被同时激活并相互促进。产业结构优化从源头减污,治理投资从末端控污,形成了“预防 - 治理”的双重保障机制,共同驱动系统向低污染、高效益的绿色稳态演进,表现出最强的系统转型效能。



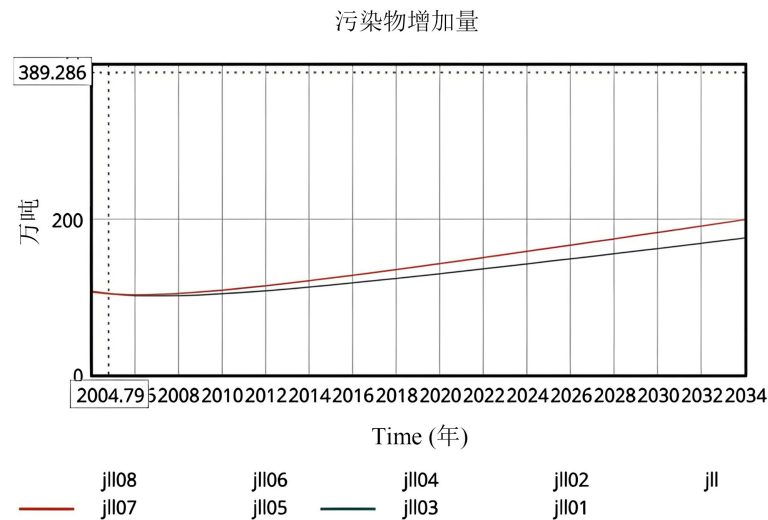
**Figure 7.** Increase in pollutants under the dual-increase condition  
**图 7.** 双增条件下的污染物增加量



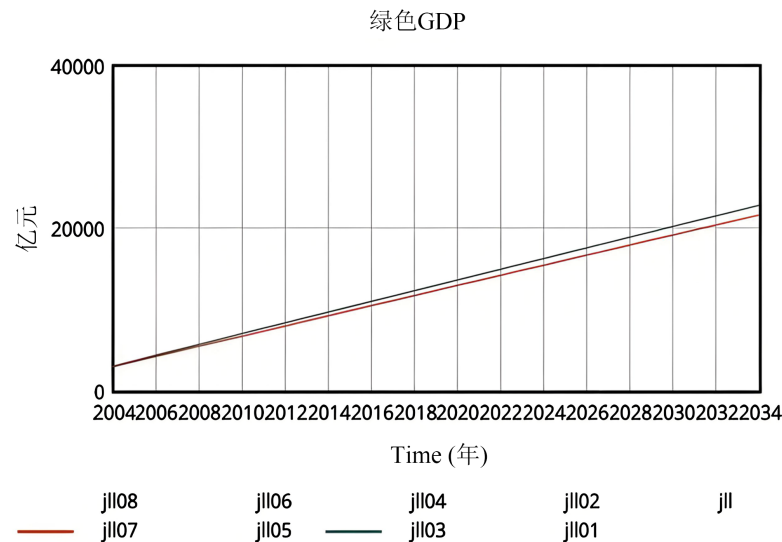
**Figure 8.** Green GDP under the dual-increase condition  
**图 8.** 双增条件下的绿色 GDP

#### 4) 一增一减(环境治理投资比例增加且第三产业投资比例减少)

极端情况 1: 在环境污染治理投资比例都增加的情况下, 第三产业比例投资比例减少与第三产业投资比例不变这种情况对比。在图 9 和图 10 中可以看出, jll07 组的污染组增加量高于 jll03 组, 绿色 GDP 低于 jll03 组。所以这种情况一方面会导致污染物增加量上升, 另一方面会导致绿色 GDP 的减少。结论为: 不能只顾环境污染而忽略产业发展, 会导致绿色 GDP 减少且对环境污染造成严重影响。此情景(jll07)揭示了政策间的拮抗效应。尽管末端治理回路被加强, 但“结构-能源-环境”回路因第三产业比例下降而被严重削弱, 导致系统整体的污染产生量增加。治理投资的效果被更高强度的污染排放部分抵消, 陷入“边治理、边污染”的困境, 治理成本上升而综合效益(绿色 GDP)下降。这表明, 忽略产业结构优化的单一治理政策, 其效率将大打折扣。



**Figure 9.** Increase in pollutants under the one-increase-one-decrease (tertiary industry ratio decrease) condition  
**图 9.** 一增一减(三产比减)条件下的污染物增加量



**Figure 10.** Green GDP under the one-increase-one-decrease (tertiary industry ratio decrease) condition  
**图 10.** 一增一减(三产比减)条件下的绿色 GDP

**5) 一增一减(第三产业投资比例增加且环境治理投资比例减少)**

极端情况 2: 在第三产业投资比例都增加的情况下, 环境污染治理投资比例减少与环境污染治理投资比例不变这两种情况对比。在表 6 中 jll01 与 jll06 所得绿色 GDP 数据对比(由于绿色 GDP 的基数过大在图中不易体现, 本文选择列出表 6 jll01 与 jll06 所得绿色 GDP 数据对比来表明情况)中可以看出 jll06 组的污染组增加量高于 jll01 组, 绿色 GDP 低于 jll01 组。所以这种情况会导致污染物增加量上升, 也会导致绿色 GDP 的减少。所以得出结论为: 不能只顾产业发展而忽略环境污染, 这会导致绿色 GDP 减少且对环境污染造成严重影响。此情景(jll06)表明, 即使产业结构优化回路发挥作用, 若削弱末端治理回路(降低治理投资), 系统原有的污染存量无法得到有效清除, 新增排放与历史存量叠加, 导致环境退化成本快速上升。结构优化带来的绿色 GDP 增益被环境损失的加速扩大所侵蚀, 最终使得绿色 GDP 增长不及预期。这证明了“源头预防”与“末端治理”在系统中缺一不可。

**Table 6.** Comparison of green GDP data between jll01 and jll06  
**表 6.** jll01 与 jll06 所得绿色 GDP 数据对比

Time (年)	绿色 GDP: jll01	绿色 GDP: jll06	Time (年)	绿色 GDP: jll01	绿色 GDP: jll06
2004	3130.94	3121.23	2020	14300.90	14297.90
2005	3832.98	3824.42	2021	14994.60	14991.80
2006	4533.89	4526.25	2022	15687.90	15685.10
2007	5234.48	5227.59	2023	16380.70	16378.00
2008	5934.93	5928.66	2024	17073.10	17070.50
2009	6635.10	6629.36	2025	17765.00	17762.60
2010	7334.83	7329.53	2026	18456.50	18454.20
2011	8034.02	8029.11	2027	19147.60	19145.40
2012	8732.63	8728.04	2028	19838.30	19836.10
2013	9430.63	9426.34	2029	20528.70	20526.50
2014	10128.00	10124.00	2030	21218.60	21216.50
2015	10824.90	10821.00	2031	21908.10	21906.10
2016	11521.10	11517.50	2032	22597.20	22595.30
2017	12216.80	12213.40	2033	23286.00	23284.10
2018	12912.00	12908.80	2034	23974.40	23972.50
2019	13606.70	13603.60			

#### 4. 结论与展望

针对本次实验结果,通过运用系统动力学模型,并使用 Vensim 软件构建了对山西省企业绿色可持续发展的仿真模拟得到了以下结果:

从系统动力学视角看,山西省企业绿色转型的本质是通过政策干预重塑系统主导回路。本文仿真表明:

协同强化“结构-治理”双回路是实现绿色转型的最优路径。同时提升第三产业投资比例与环境污染治理投资比例(jll05),能够激活“产业结构-能源结构-污染排放”的增强回路与“经济增长-污染加剧-治理投入-环境改善”的平衡回路,形成协同效应,在长期实现绿色 GDP 最大化与污染物累积最小化。

单一政策虽有效,但易受另一变量制约。单独提升第三产业比例(jll01)或治理投资(jll03)均能带来积极影响,但其效果在另一变量恶化时(如 jll06, jll07)会被显著削弱,系统存在明显的政策协同需求。

环境污染治理投资投入有利于促进产业可持续发展,通过环境污染治理投资的增加不仅促使污染物增加量减少同时绿色 GDP 得到显著提升。因此,将环保投资占比提高,构建“产业发展-污染治理-绿色增长”的良性循环机制,将成为区域经济高质量发展的必经之路。

第一产业、第二产业以及第三产业投资比的改变,展现了第三产业在社会总体 GDP 中的重要作用。由仿真预测可知,到 2030 年,山西省第三产业增加值占 GDP 比重有望突破 75%,将成为经济增长的主

要驱动力。因此,建议山西省在制定绿色转型政策时,优先采用“结构优化 + 治理强化”的双轮驱动策略,并在不同发展阶段动态调整两类政策的实施强度,以引导系统向绿色可持续发展路径收敛。

## 参考文献

- [1] 韩知松. 老工业基地绿色转型的仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [2] 山西省统计局. 山西省 2017 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2018-01-07.
- [3] 山西省统计局. 山西省 2016 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2017-01-07.
- [4] 山西省统计局. 山西省 2015 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2016-01-07.
- [5] 山西省统计局. 山西省 2014 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2015-01-07.
- [6] 山西省统计局. 山西省 2013 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2014-01-07.
- [7] 山西省统计局. 山西省 2012 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2013-01-07.
- [8] 山西省统计局. 山西省 2011 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2012-01-07.
- [9] 山西省统计局. 山西省 2010 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2011-01-07.
- [10] 山西省统计局. 山西省 2009 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2010-01-07.
- [11] 山西省统计局. 山西省 2008 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2009-01-07.
- [12] 山西省统计局. 山西省 2007 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2008-01-07.
- [13] 山西省统计局. 山西省 2006 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2007-01-07.
- [14] 山西省统计局. 山西省 2005 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2006-01-07.
- [15] 山西省统计局. 山西省 2004 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2005-01-07.
- [16] 孙康宁. 京津冀工业及生产性服务业绿色发展环境规制仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津理工大学, 2019.
- [17] 郝芳. 基于系统动力学的中国绿色增长评价模型研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2016.