
城市水污染治理政策影响研究

——以长沙市为例¹

廖文杰，胡东滨

(中南大学商学院，湖南长沙 410083)

【摘要】 随着经济发展，城市水污染日益加重，水污染治理迫在眉睫。为平衡经济发展与水污染治理之间的关系，从生活、工业、畜禽 3 个主要污染源入手，分析城市水体污染物的产生、治理、排放过程，将水污染治理融入经济发展进程之中，基于系统动力学方法，构建城市水污染治理仿真模型，并以长沙市为例，探究在不同水污染治理情景下未来长沙市经济和环境发展。

【关键词】 城市水污染 经济发展 水污染治理政策 系统动力学

DOI: 10.6049/kjjbydc.2018GC0163

【中图分类号】 TU754 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1001-7348 (2018) 24-0155-09

0 引言

随着我国城市化进程加快，人们生活水平不断提高，工业、农业迅速发展，经济总量不断上升，但也伴生了一系列水污染问题。水体污染导致水质恶化会影响人们日常饮用水安全和农产品安全，最终危害人类健康。水污染问题是当前我国最为紧迫的环境安全问题，并且水污染问题的流域性特征日益显现。近年来，我国河流、湖泊污染总体呈现加重态势^[1]，主要是因为沿岸城市在社会经济发展过程中，将大量生活污水、工业污水以及农业污染物排放其中所致，进而直接影响流域内整体经济社会的可持续发展。对于政府有关部门，如何通过环境治理政策的有效制定及实施，在保证城市社会经济快速发展的同时，控制水体污染物排放，减少城市发展对河流、湖泊生态的破坏？如何针对不同的污染源，合理分配水污染治理资源，从而有效促进生态与经济协调发展？这些都是当前我国城市发展过程中亟待解决的问题。

1 文献综述

对于城市水污染，可以借鉴国外发达国家的治理经验。20 世纪 60—70 年代，美国政府推行了一系列治理政策解决水污染问题，如颁布全国统一的环境保护法和污水管制政策、不断加强废水排放标准和水质标准严格程度、提高污水处理技术标准、设立环保资助机构、鼓励地方募集环保资金、增大联邦环保拨款数量等^[2]。欧洲国家则普遍实行具有“综合性流域管理”的水资源管理模式，其特点表现为：水资源管理系统独立性强、地表水与地下水共同治理、污染排放控制技术方法组合运用^[3]。

¹收稿日期：2018-07-26

作者简介：廖文杰（1993—），男，湖北武汉人，中南大学商学院硕士研究生，研究方向为信息管理与大数据分析；胡东滨（1969—），男，湖南长沙人，中南大学商学院教授、博士生导师，研究方向为两型社会、环境大数据、管理信息系统。

我国仍属于发展中国家，在将经济发展放在首要位置的同时，循序渐进地推动治污进程，降低水环境污染对经济发展的负面影响。国内学者针对我国当前经济和水环境状况，提出适合我国国情的水污染治理政策和措施。赖苹等[4]研究了区域联盟对流域水污染治理政策可行性，指出地区之间两两联盟的合作模式有助于流域水污染治理；李鑫等[5]讨论了影响城镇污水处理设施运营负荷率的主要因素，并提出应适当扩大污水处理设施覆盖面，扩大现有污水处理设施处理规模；龚新蜀[6]认为加强市场竞争对减少工业污染排放有促进作用；蒋姝睿[7]分析了各工业行业对工业污染的贡献程度，提出工业结构优化和产业转移的政策建议；石敏俊[8]基于数据挖掘技术构建了新的工业企业水污染排放空间估算方法，比较了不同区域和不同行业减排技术效应的贡献；闵继胜等[9]对我国农业面源污染现状、成因和治理政策进行分析与梳理，其结论为农业面源污染治理政策的相关研究发展提供了参考；郭四代等[10]基于 Super-SBM 模型，指出我国环境治理投资效率较低，应通过提升科技水平、合理分配治理投资、提高能源消耗水平，提升环境治理投资效率。

然而，城市水污染治理相关政策除了有利于减少水体污染物的排放外，对城市经济发展有何影响？在不同的污染排放水平下，如何针对不同的污染源进行水污染治理？以较小的经济代价，获得较大的污染治理效果，是当前我国城市发展进程中亟待解决的问题。

城市经济发展、水环境污染及治理是一个相互关联的复杂系统。系统动力学[11]作为一种复杂系统建模方法[12]，能详尽反映出系统内部相互独立子系统之间的内在关联，揭示系统动态行为特征，并通过信息反馈，帮助人们认识和理解系统行为产生的根源[13]。目前，该方法被广泛应用于多种水资源管理研究中。Julius 等[14]在分析加纳沃尔特河流域人口、水资源和农业生产间的相互关系基础上，建立了系统动力学模型，对不同政策情景下的流域未来发展状况进行仿真模拟，为该地区水资源管理和农业发展提供决策支持；Hui 等[15]根据湖泊流域的动态系统特征，建立系统动力学模型，探究流域内经济和水环境保护政策方案的有效性；Li 等[16]通过构建系统动力学模型，研究了城市水资源配置方案，旨在以较低的成本满足城市用水需求，并以郑州市为例进行实证分析；于森等[17]构建了松花江流域水资源—水污染联合控制动态模拟系统，详细描述了松花江流域水资源与水环境的动态变化过程，通过分析比较不同治理方案下的模拟结果，针对流域水资源利用和保护提出具有参考价值的建议。

本文采用系统动力学方法，以长沙市为例，构建了城市水污染治理仿真模型。该模型涵盖城市经济发展、水污染与治理两个主要模块。根据不同的水污染源，将水污染模块与治理模块细分为生活污染、工业污染与畜禽污染 3 个子模块，用以反映各模块间相互作用机制。基于该城市水污染治理仿真模型，本文设计了不同的水污染治理情景，以此仿真分析长沙市未来经济发展趋势和环境治理效果，旨在为政府有关部门提供有效的政策建议。

2 模型构建

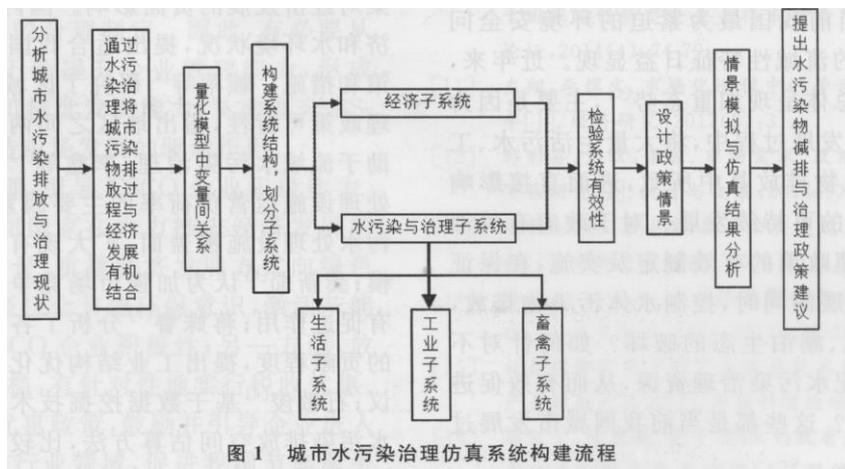


图 1 城市水污染治理仿真系统构建流程

(1) 污染物排放量→(+)污染物排放价值量→(+)GDP 增长量→(+)GDP 总量→(+)污染治理投入→(-)污染物排放量。排放到河流、湖泊等地表水体的污染物增加，污染物排放价值量随之增长，由于没有受到相应的惩罚，该价值量实际上可以看作是一种经济收益。经济总量增加，污染治理投入相应增长，提高了污染物处理能力，使环境污染物排放减少。因此，在该回路中，污染物排放量增加最终会促使污染物排放量减少。

(2) GDP 总量→(+)固定资产投资→(+)工业固定资产投资→(+)工业总产值→(+)GDP 增长量→(+)GDP 总量。经济发展对固定资产投资有促进作用，工业固定资产投资额随固定资产投资增加而增加，进而促进工业发展，推动经济增长^[20]。

(3) 污染物排放量→(+)污染物排放价值量→(+)GDP 增长量→(+)GDP 总量→(+)固定资产投资→(+)工业固定资产投资→(+)工业总产值→(+)工业污染物排放量。

回路(1)表明，由污染物排放带来的污染物排放价值会使经济总量上升；回路(2)显示，经济增长能促进工业发展，而工业发展将带来更多工业污染。

2.2.1 经济子系统

经济子系统由 GDP 总量驱动，经济发展一方面影响着固定资产投资和污染治理投入，另一方面又受工业总产值、牧业总产值、劳动者报酬和污染物排放价值量的影响。其中，工业总产值由工业固定资产投资推动，牧业总产值则由畜禽养殖总量决定。劳动者报酬是劳动者付出体力或脑力劳动所得，体现了劳动者创造的社会价值^[21]，受到劳动力人口数量影响。

虚拟治理成本是指将排放至环境中的污染物处理成本，也就是污染物排放价值，污染物排放价值总量是不同污染源污染物排放价值之和^[22]。本文采用治理成本法计算污染物虚拟治理成本，其中污染物单位治理成本因污染源不同而不同。

污染治理投入包括城镇生活污染治理投入、工业污染治理投入以及畜禽污染治理投入 3 个方面，三者所占 GDP 总量百分比不同，经济子系统结构如图 3 所示。

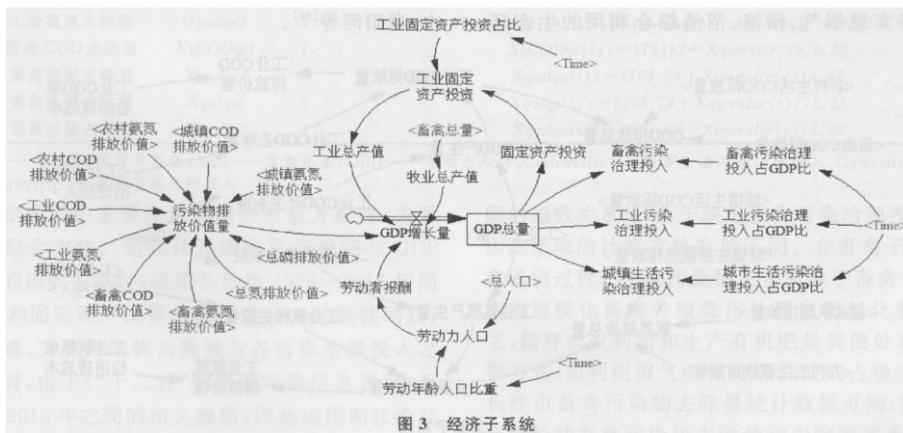


图 3 经济子系统

2.2.2 生活子系统

随着城市发展步伐不断加快，城市人口不断增长，居民生活污水排放量随之增加，使得地表水污染形势日趋严峻。生活子系统由城市总人口驱动，人口数量发展状况直接决定了生活污染物的产生量。生活污水分为城镇生活污水和农村生活污水，两者水污染物排放与治理过程不同，城镇生活污水经由污水处理厂处理，处理效果受到城镇生活污染治理投入影响，城镇生活污

染治理投入主要是指城镇污水处理厂等污水处理设施的运行费用；农村自然环境对污染物有一定的接纳能力，在计算农村生活污染物时，利用农村生活污水流失系数确定污染物环境自净削减量^[20]。此外，沼气池处理可有效降低农村生活污水排放，沼气化率越高，农村生活污染物处理效率越高。分别考虑城镇和农村人口产生的生活污染，并计算相应的治理成本，生活子系统结构如图4所示。

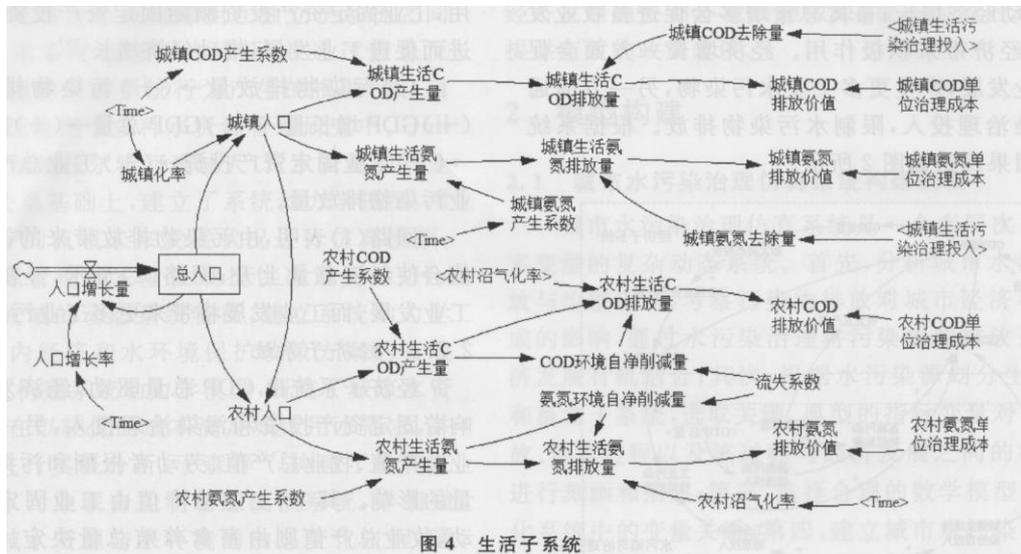


图4 生活子系统

2.2.3 工业子系统

随着城市经济快速发展，工业投资将稳步提升，但工业发展产生的工业污水排放为地表水环境带来了巨大压力。工业子系统由工业总产值驱动，工业总产值增长将导致更多工业污染物产生。工业污水一般经由工业企业处理后排放到河流、湖泊中，以降低污水中的污染物浓度，处理效果受到工业污染治理投入影响，工业子系统结构如图5所示。

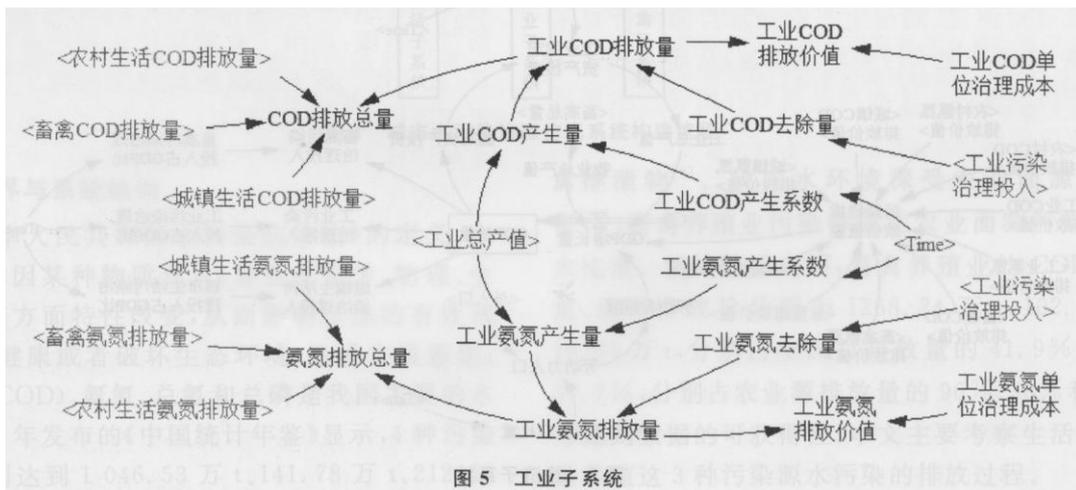


图5 工业子系统

2.2.4 畜禽子系统

畜禽污染物主要通过畜禽排泄物排放到环境中。沼气工程以畜禽排泄物等作为原料，通过发酵产生清洁能源，最终实现沼气、沼液、沼渣综合利用的生态环保工程^[23]。因此，通过沼气生产设备可以有效减少畜禽污染物排放。本文主要考察牛、生猪

和鸡这三种畜禽的存栏、存笼量，畜禽子系统结构如图 6 所示。

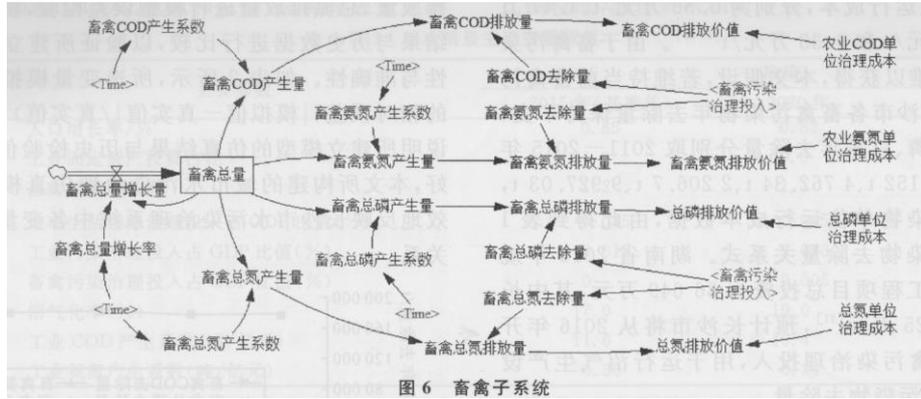


图 6 畜禽子系统

3 实证研究

湘江是长江主要支流之一，全长 856km，流域面积 94660km²，其是湖南省境内覆盖面最大的河流，干流长 670km，流域面积 85383km²，约占湖南全省总面积的 40%。湘江沿途流经永州市、衡阳市、株洲市、湘潭市、长沙市，至岳阳市的湘阴县注入长江水系的洞庭湖，主要支流包括潇水、舂陵水、耒水、洙水、蒸水、涟水、浏阳河等^[24]。

长沙市是湖南省的省会城市，是长江中游地区重要的中心城市，2017 年 GDP 总量达到 10535.51 亿元，经济总量居全国大城市第 14 位，年末常住人口达

791.81 万人^[25]。随着长沙市经济的迅速发展、城镇化进程的持续推进以及人口数量的不断增长，工业废水、生活污水和农业面源污染物排放量不断增加，水污染问题十分严峻。近年来，政府对水污染问题逐步重视，使得长沙段水质总体达到三类标准，但部分水质断面和支流依然存在污染物浓度超标等情况^[26]。同时，由于大量污染物的排放导致河段水质恶化的情况屡见不鲜^[27]。本文以长沙市为例进行实证研究，构建长沙市城市水污染治理仿真模型，为相关政府部门制定科学合理的水污染治理政策提供理论依据。

3.1 数据来源及参数设定

模型构建过程中，数据资料主要来源于《湖南省统计年鉴》、《长沙市统计年鉴》、长沙市环保局官网，不同来源的污染物产生系数、污染物治理投入等相关数据主要来自湖南省环境监测中心站提供的《“十二五”湖南省污染信息表》，COD 和氨氮的污染物单位治理成本、农村废水流失系数等相关数据来源于《中国环境经济核算技术指南》。其它变量取值则来源于相关数据库、文献以及新闻等。主要变量之间的函数关系见表 1。

在确定模型中主要变量之间的变量方程时，主要采用线性拟合方法。如在计算固定资产投资与 GDP 总量之间的函数关系时，运用长沙市 1978-2016 年间 GDP 总量和固定资产投资的数据进行一元线性回归；在计算城镇、工业污染物去除量与各污染治理投入之间的关系时，由于《“十二五”湖南省污染信息表》中只有 2011-2015 年之间的相关数据，因此运用湘江沿江八市（长沙、株洲、湘潭、衡阳、岳阳、娄底、郴州、永州）的面板数据进行拟合。根据拟合结果，各变量方程的拟合优度均在 90%以上。

在确定畜禽污染物去除量与相关污染治理投入之间的函数关系时，由于缺乏畜禽污染治理投入的数据，因此采取的计算方法有所不同。在畜禽子系统中，畜禽养殖过程产生的污染物主要来源于畜禽排泄物。湖南省规模化畜禽养殖粪污处理以肥料化利用模式为主，储存农业利用和生产有机肥是粪便处理的两种主要方式，而利用沼气工程处理粪便的占极少数^[28]。由长沙市畜

禽污染物去除量统计数据可知, 2011—2015 年间长沙畜禽污染年去除量和去除率基本保持不变, 说明长沙市畜禽污染去除能力基本不变, 具体数据描述统计见图 7。

表 1 主要变量函数关系

序号	变量	缩写	单位	公式
1	GDP 增长量	$Gdpzpl$	亿元	$Gdpzpl(t) = 0.0922Ldzbc(t) + 0.0562Gyzcz(t) + 0.1131Myzcz(t) + 72.1286Wrwpfjzl(t) - 291.7552 (R^2 = 0.9382)$
2	GDP 总量	$Gdpzl$	亿元	$Gdpzl(t) = Gdpzl(t-1) + Gdpzpl(t)$
3	固定资产投资	$Gdzctz$	亿元	$Gdzctz(t) = 0.6865Gdpzl(t) - 176.4 (R^2 = 0.9863)$
4	利润	Lr	亿元	$Lr(t) = 0.0799Gdpzl(t) - 19.9283 (R^2 = 0.9676)$
5	工业总产值	$Gyzcz$	亿元	$Gyzcz(t) = 1.694Gygdzctz(t) + 631.1 (R^2 = 0.9199)$
6	牧业总产值	$Myzcz$	亿元	$Myzcz(t) = 2.634e - 13Xqzl(t)^2 - 4.832e - 06Xqzl(t) + 36.92 (R^2 = 0.9698)$
7	劳动者报酬	$Ldzbc$	亿元	$Ldzbc(t) = 8.234e - 10Ldlrk(t)^2 - 0.004574Ldlrk(t) + 6378 (R^2 = 0.9816)$
8	城镇 COD 去除量	$CzCODqcl$	t	$CzCODqcl(t) = 2.2735Csshwrzltr(t) - 590.4344 (R^2 = 0.9557)$
9	城镇氨氮去除量	$Czadqcl$	t	$Czadqcl(t) = 0.2311Csshwrzltr(t) - 302.8591 (R^2 = 0.9623)$
10	工业 COD 去除量	$GyCODqcl$	t	$GyCODqcl(t) = 3.6437Gywrzltr(t) - 7247.978 (R^2 = 0.9299)$
11	工业氨氮去除量	$Gyadqcl$	t	$Gyadqcl(t) = 0.0656Gywrzltr(t) - 34.798 (R^2 = 0.9017)$
12	畜禽 COD 去除量	$XqCODqcl$	t	$XqCODqcl(t) = 178152 + Xqwrzltr(t)/0.36$
13	畜禽氨氮去除量	$Xqadqcl$	t	$Xqadqcl(t) = 4762.34 + Xqwrzltr(t)/4.47$
14	畜禽总磷去除量	$Xqzlqcl$	t	$Xqzlqcl(t) = 2206.76 + Xqwrzltr(t)/12.33$
15	畜禽总氮去除量	$Xqzdqcl$	t	$Xqzdqcl(t) = 9927.03 + Xqwrzltr(t)/3.33$

注: $Gygdzctz$ ——工业固定资产投资、 $Xqzl$ ——畜禽总量、 $Ldlrk$ ——劳动力人口、 $Csshwrzltr$ ——城市生活污染治理投入、 $Gywrzltr$ ——工业污染治理投入、 $Xqwrzltr$ ——畜禽污染治理投入

沼气生产设备能有效减少畜禽污染物的排放, 根据相关文献计算, 采用 SBR 工艺处理畜禽 COD、氨氮、总磷、总氮单位运行成本, 分别为 0.36 万元/t、4.47 万元/t、12.33 万元/t 和 3.33 万元/t^[29-30]。由于畜禽污染治理投入数据难以获得, 本文假设, 若维持当前畜禽污染治理投入, 长沙市各畜禽污染物年去除量保持不变, COD、氨氮、总磷、总氮年去除量分别取 2011—2015 年平均值, 即 178152t、4762.34t、2206.7t、9927.03t, 再结合上述污染物单位运行成本数据, 由此得到表 1 所示的畜禽污染物去除量关系式。湖南省 2016 年规模化大型沼气工程项目总投资为 36649 万元, 其中长沙市投资 958.25 万元^[31], 预计长沙市将从 2016 年开始逐渐增加畜禽污染治理投入, 用于运行沼气生产设备, 以提高畜禽污染物去除量。

3.2 模型有效性检验

本文选取 2012—2015 年总人口、畜禽总量、GDP 总量、工业总产值、COD 排放总量、氨氮排放总量、总磷排放量、总氮排放量进行模型误差检验, 将得到的模拟结果与历史数据进行比较, 以验证所建立模型的有效性与准确性。如表 2 所示, 所选变量模拟值与真实值的相对误差 ($|I \text{ 模拟值} - I \text{ 真实值}| / I \text{ 真实值}$) 均小于 10%, 说明所建立模型的仿真结果与历史检验值拟合程度较好, 本文所构建的城市水污染治理仿真模型能较为有效地反映长沙市水污染治理系统中各变量之间的相关关系。

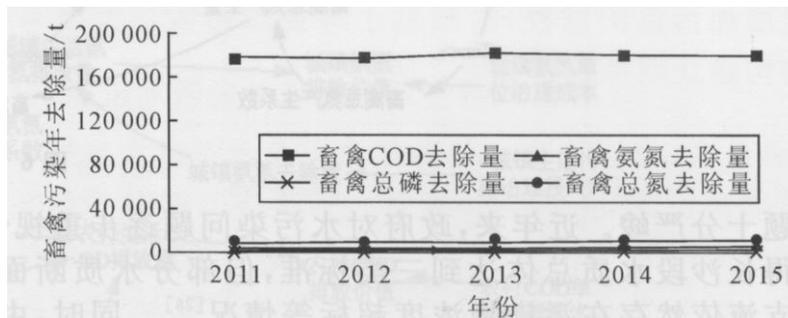


图 7 长沙市 2011—2015 年畜禽污染年去除量

表 2 误差检验

年份	总人口 /万人			畜禽总量(八万头、万羽)			GDP 总量/亿元			工业总产值/亿元		
	拟合值	真实值	误差/%	拟合值	真实值	误差/%	拟合值	真实值	误差/%	拟合值	真实值	误差/%
2012	662.4	660.6	0.27	3141.7	3233.6	2.84	6298.76	479.8	2.79	2949.7	3104.0	4.97
2013	668.2	662.8	0.81	3181.3	3256.7	2.32	6983.97	249.1	3.66	3306.5	3420.6	3.34
2014	674.0	671.4	0.39	3220.8	3203.1	0.55	7720.37	934.7	2.70	3625.5	3655.6	0.82
2015	679.8	680.4	0.08	3260.1	3250.7	0.29	8481.08	630.5	1.73	3882.9	3602.9	7.77
年份	COD 排放总量/万 t			氨氮排放总量/万 t			畜禽总磷排放量/万 t			畜禽总氮排放量/万 t		
	拟合值	真实值	误差/%	拟合值	真实值	误差/%	拟合值	真实值	误差/%	拟合值	真实值	误差/%
2012	12.12	12.41	2.38	1.325	1.347	1.65	0.140	50.148	0.507	1.071	1.176	8.87
2013	11.99	12.21	1.81	1.326	1.329	0.23	0.145	00.143	0.83	1.097	1.138	3.56
2014	11.80	11.22	5.22	1.311	1.252	4.73	0.149	60.156	4.16	1.123	1.135	1.01
2015	11.46	10.96	4.54	1.276	1.248	2.20	0.154	10.149	0.342	1.149	1.086	5.83

3.3 情景设定

以长沙市经济社会发展现状为基准,在不同情景和约束条件下,利用本文提出的模型进行仿真模拟。以 2015 年为基准年,仿真模拟范围为 2016—2025 年,模拟时间间隔为 1 年。分别从污染源总量控制、污染治理投入和污染治理技术 3 个方面,选择模型中可能在将来发生变化的变量并用系统动力学模型特有的表函数或可变常数表示。其中,污染源总量控制相关变量包含人口增长率、劳动年龄人口比重、畜禽养殖增长率、工业固定资产投资占比等;污染治理投入相关变量包括城市生活污染治理投入、工业污染治理投入和畜禽污染治理投入;污染治理技术相关变量包括农村沼气化率、工业 COD 产生系数和工业氨氮产生系数。

根据长沙市相关历史数据、现有政策规划和专家的发展预测设定基准情景,将其与各种情景进行比较,以此探索不同的水污染治理政策对长沙市未来经济和环境发展的影响。在基准情景下,各变量表函数取值见表 3。

表 3 基准情景主要变量取值

政策	主要参数	取值		
		2015 年(基准年)	2020 年	2025 年
总量控制	人口增长率/%	0.85	0.82	0.79
	工业固定资产投资占比	34.0	40.0	45.0
	畜禽总量增长率	1.2	1.1	1.0
治理投入	城市生活污染治理投入占 GDP 比值(%)	0.045	0.045	0.045
	工业污染治理投入占 GDP 比值(%)	0.012	0.013	0.014
	畜禽污染治理投入占 GDP 比值(%)	0	0.005	0.010
治理技术	沼气化率(%)	17.0	19.0	22.0
	工业 COD 产生系数(吨/亿元)	11.6	10.4	9.2
	工业氨氮产生系数(吨/亿元)	0.30	0.24	0.20

水体污染物来源不同,治理成本有所区别。即便投入相同的治理成本,治理效果也可能存在差异。为研究针对不同污染源的水污染治理政策对城市经济和环境的影响,本文设置了生活污染治理情景(以下简称“生活情景”)、工业污染治理情景(以

下简称“工业情景”)和畜禽污染治理情景(以下简称“畜禽情景”)。在生活情景下,降低人口增长率,增加城市生活污染治理投入,提高农村沼气化率,其它政策变量取值则与基准情景相同;在工业情景下,政府降低工业投资增长速度,增加工业污染治理投入,同时提高工业污染治理技术水平以降低工业污染物产生系数;在畜禽情景下,政府控制畜禽总量增长,增加畜禽污染治理投入。3种情景中各主要政策变量函数取值见表4。

表4 生活、工业、畜禽污染治理情景主要变量取值

情景	主要参数	取值		
		2015年(基准年)	2020年	2025年
生活污染治理情景	人口增长率/%	0.85	0.80	0.75
	城市生活污染治理投入占GDP比/%	0.045	0.046	0.047
	沼气化率/%	17.0	20.0	23.0
工业污染治理情景	工业固定资产投资占比/%	34.0	39.5	44.0
	工业污染治理投入占GDP比/%	0.012	0.014	0.015
	工业COD产生系数(吨/亿元)	11.6	10.2	8.8
畜禽污染治理情景	工业氨氮产生系数(吨/亿元)	0.30	0.22	0.16
	畜禽总量增长率/%	1.2	1.0	0.8
	畜禽污染治理投入占GDP比/%	0	0.006	0.011

注:每种情景中,除表中变量外的其它变量均与基准情景取值相同

表5 基准情景下2016与2025年经济总量与污染物排放量对比

时间	单位	2016	2025	变动比例
GDP总量	亿元	9252.6	16930.7	82.98%
COD排放总量	吨	111922	57404.2	-48.71%
氨氮排放总量	吨	12411.4	7098.96	-42.80%
畜禽总磷排放量	吨	1511.41	605.579	-59.93%
畜禽总氮排放量	吨	11470.4	8901.94	-22.39%

3.4 结果分析

3.4.1 基准情景分析

如表6所示,在基准情景下,长沙市GDP总量较2016年增加了82.98%,经济总量达到16930.7亿元,GDP增速由2016年的8.56%降到2024年的5.58%。在污染治理方面,2025年长沙市COD、氨氮、总磷和总氮的年排放量较2016年分别减少了48.71%,42.80%、59.93%和22.39%,说明基准情景下水污染物治理总体效果较好,但相较于COD、氨氮和总磷,总氮排放量下降比例较低,治理效果相对一般。

考虑COD和氨氮两种污染物来源,2016年来自生活、工业、畜禽的COD排放量分别占到COD排放总量的43.15%、13.52%和42.96%,到2025年这一比例分别为28.22%、12.19%和48.38%。由此可见,在基准情景下,2016-2025年生活COD的治理效果较好,而畜禽COD的治效果况则相对较差。而在氨氮治理方面,这一情况正好相反,在2016年的氨氮排放总量中,来自生活、工业、畜禽的氨氮排放量分别占到63.92%、4.32%和31.76%,到2025年这一比例分别为76.95%、4.95%和18.10%。在基准情景下,2016_2025年畜禽氨氮污染治理效果优于生活氨氮污染治理效果。

3.4.2 不同污染源治理情景对比分析

在不同的污染源治理情景下，GDP 总量相较于基准情景会有微小降低。2025 年，在生活情景、工业情景和畜禽情景下的 GDP 总量分别比基准情景降低 0.7 义、0.07%和 0.37%，减少量处于可以接受的范围内，如图 8 所示。

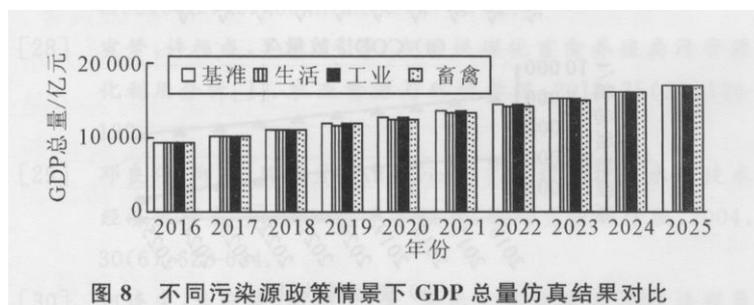


图 8 不同污染源政策情景下 GDP 总量仿真结果对比

在 COD 和氨氮治理方面，不同污染源治理情景在不同阶段的治理效果不尽相同。由图 9 可知，2016—2022 年，工业情景下的 COD 排放总量减少率一直居于最高位，说明此期间针对工业污染源的治理能使长沙市在 COD 排放总量控制方面取得较快、较好的效果。但是从 2025 年开始，针对生活污染源和畜禽污染源的治理政策效果超过了前者，事实上，在工业情景下，2024 年工业 COD 排放量已经降为 0，如图 10 所示，说明从 2024 年开始针对工业污染源的治理政策对长沙市 COD 治理将不再有效。2016—2019 年，生活情景下的 COD 排放总量减少率低于畜禽情景，但在 2020 年反超，并且从 2023 年开始针对生活污染的治理政策将取得显著治理成效。对于氨氮治理，前期工业情景与生活情景治理效果差别不大，但从 2020 年起，针对生活污染的治理政策明显表现出更好的治理效果，针对工业污染的治理政策从 2024 年起不再有效。

在总磷和总氮的治理方面，畜禽污染治理政策将会带来较好的效果，由图 14 可知，2025 年长沙市畜禽总磷和总氮排放量相较于 2016 年将分别减少 70.48%和 28.19%，比基准情景累计减少排放 941.39t 和 3756.72t。

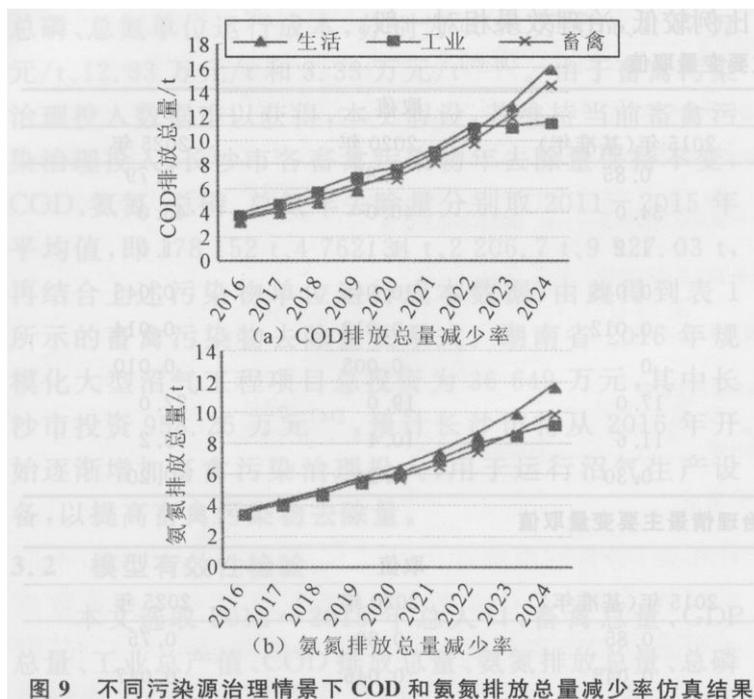


图 9 不同污染源治理情景下 COD 和氨氮排放总量减少率仿真结果

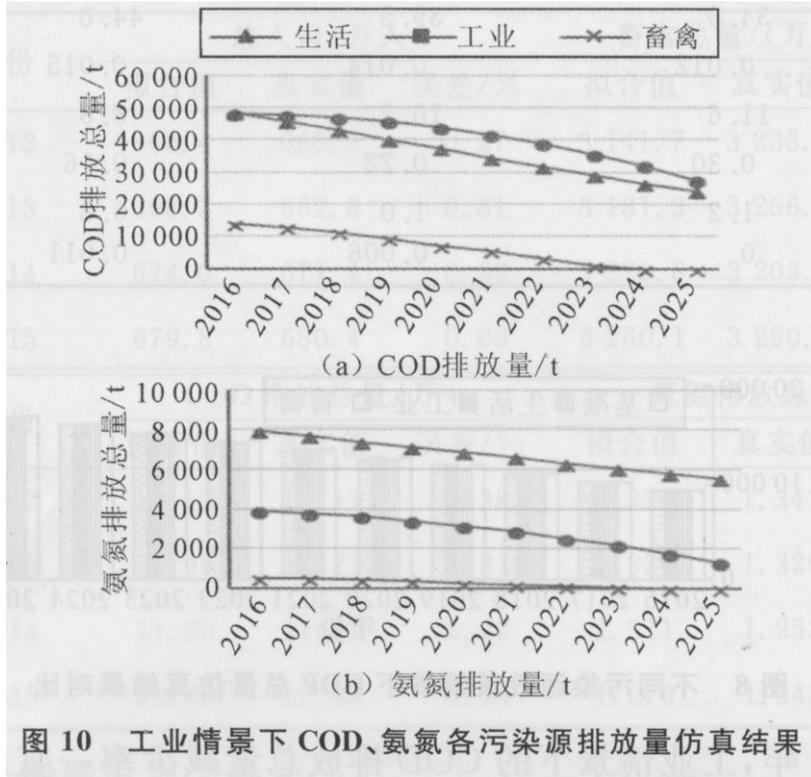


图 10 工业情景下 COD、氨氮各污染源排放量仿真结果

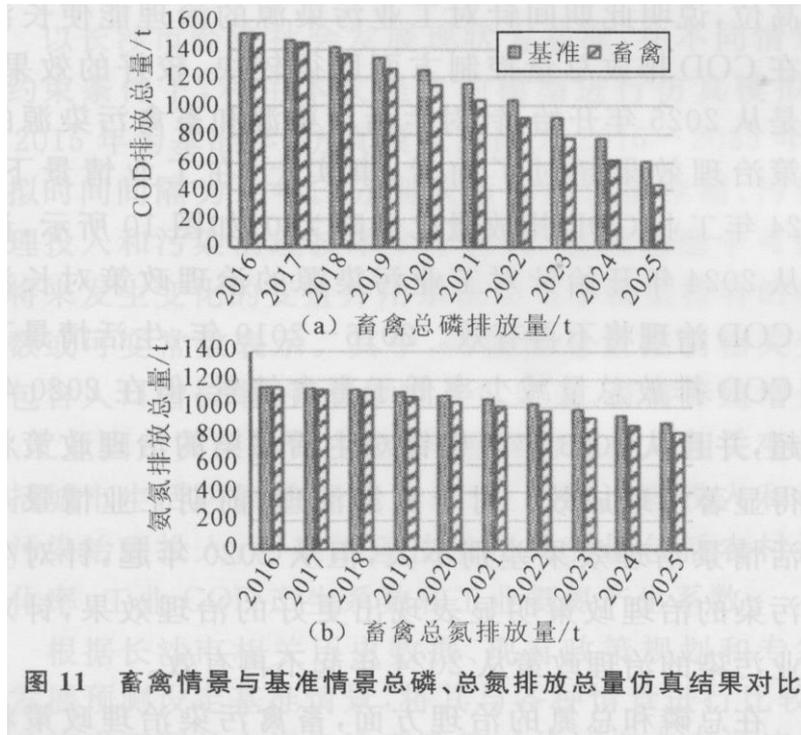


图 11 畜禽情景与基准情景总磷、总氮排放总量仿真结果对比

4 结论与建议

本文针对城市水污染治理，基于系统动力学方法，构建城市水污染治理仿真模型，通过分析经济子系统和水污染与治理子系统之间的相互关系，研究系统内在运行机制，探究不同的环境治理政策对地区经济和环境影响。本文以长沙市为例，根据

模型仿真结果，得出以下结论：

(1) 对于 COD 和氨氮治理，当前长沙市仍应将水污染治理的重心放在工业污染源治理上，并逐渐向生活污染源转移。在当前阶段，重点实施工业污染治理相关政策能给 COD 和氨氮总排量减少带来最大效益。但工业污染物水平降低，其带来的效益也会随之下降，后期应逐渐将政策重心转移到生活污染源治理和畜禽污染源治理方面。

(2) 重视畜禽污染治理。长沙市总磷、总氮污染主要来源于农业污染，畜禽总磷、总氮排放量则分别占农业总磷、总氮排放量的 77% 和 72%。仿真结果显示，在畜禽方面，相较于 2016 年，2025 年长沙市畜禽总磷和总氮排放量将分别减少 70.48% 和 28.19%，由此带来的水环境治理成效无疑是巨大的。同时，根据基准情景分析，畜禽氨氮治理效果比生活氨氮治理效果更好，表明应重视畜禽污染源治理。另外，相较于畜禽总磷，畜禽总氮的减排比例相对较低，因此应改进沼气工程相关技术，提高畜禽总氮治理效率。

(3) 加强污染治理投入，稳步推进污水处理设施建设。尽管增加污染治理投入能在一定程度上减少污染排放，但在污染治理资源分布不均或污水处理设施达到负荷上限的情况下，继续增加污染治理投入可能并不会提高污染物去除水平。因此，在增加污染治理投入的同时，应考虑污水处理设施从开始建设到投入运行的滞后期，维持一定的污水处理设施投资水平，包括维持城市污染治理基础设施投资如增建污水处理厂，维持工业污水处理设施投资如增加沼气工程项目投资等。

总体来说，水污染治理需要多方面政策措施协同促进。针对某一污染源实施水污染治理政策，虽然能在一定程度上降低污染物排放量，但污染治理效果有限。与分别实施针对不同污染源的治理政策相比，同时针对各污染源全面治污政策能带来最大的水污染减排收益。

参考文献：

- [1] 张晓. 中国水污染趋势与治理制度[J]. 中国软科学, 2014(10) : 11-24.
- [2] 赵虹, 曾睿. 美国 20 世纪 60—70 年代水污染治理政策的特点及启示[J]. 思想战线, 2015, 41(1):142-145.
- [3] 高珊, 黄贤金. 发达国家城市水污染治理的比较与启示[J]. 城市问题, 2011(3):91-94.
- [4] 赖苹, 曹国华, 朱勇. 基于微分博弈的流域水污染治理区域联盟研究[J]. 系统管理学报, 2013, 22(3):308-316.
- [5] 李鑫, 胡媛, 苏时鹏. 中国城银污水处理设施运营负荷率影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018(2):70-74.
- [6] 龚新蜀, 张洪振, 潘明明. 市场竞争、环境监管与中国工业污染排放[J]. 中国人口·资源与环境, 2017(12):52-58.
- [7] 蒋姝睿, 王玥, 王萌, 等. 区域视角下中国工业行业与工业污染关系[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11):4380-4387.
- [8] 石敏俊, 郑丹, 雷平, 等. 中国工业水污染排放的空间格局及结构演变研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(5):1-7.
- [9] 闵继胜, 孔祥智. 我国农业面源污染问题的研究进展[J]. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2016(2):59-66.
- [10] 郭四代, 全梦, 张华. 我国环境治理投资效率及其影响因素分析[J]. 统计与决策, 2018, 34(8):113-117.

-
- [11] J W P, FORRESTER J W. Industrial dynamics[J]. Journal of the American Statistical Association, 1962, 57(298):525.
- [12] SIMONOVICSP, FAHMY H. A new modeling approach for water resources policy analysis [J]. Water Resources Research, 1999, 35(1):295-304.
- [13] MIRCHI A, MADANI K, WATKINS D, et al. Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems [J]. Water Resources Management, 2012, 26(9):2421-2442.
- [14] KOTIR J H, SMITH C, BROWN G, et al. A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana [J]. Science of the Total Environment, 2016, 573:444-457.
- [15] HUI L, GABOURY B, TAO L, et al. An integrated system dynamics model developed for managing lake water quality at the watershed scale[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 155 : 11-23.
- [16] LI Z, LI C, WANG X, et al. A hybrid system dynamics and optimization approach for supporting sustainable water resources planning in zhengzhou city, China[J]. Journal of Hydrology, 2018, 556.
- [17] 于森, 蒋洪强, 常杪, 等. 松花江流域水资源-水污染联合调控方案动态模拟研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(6):1866-1874.
- [18] 饶静, 许翔宇, 纪晓婷. 我国农业面源污染现状、发生机制 和对策研究[J]. 农业经济问题, 2011(8) :81-87.
- [19] 国家统计局. 第一次全国污染源普查公报[EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qttjgb/qgqttjgb/201002/2010_0211_30641.html, 2010-02-11.
- [20] 刘楷. 改革开放以来中国区域工业增长影响因素及对当前“保增长”的启示[J]. 经济管理, 2010(2) ,52-60.
- [21] 汤伯丽. 对事业单位劳动工资统计的探究[J]. 学习月刊, 2012(20):115-115.
- [22] 於方. 中国环境经济核算技术指南[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [23] 田宜水. 中国规模化养殖场畜禽粪便资源沼气生产潜力评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8):230-234.
- [24] 湖南省统计局. 2017 湖南统计年鉴[Z]. 2017.
- [25] 湖南省统计局. 长沙市 2017 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [Ettp://www.hntj.gov.cn/tjfx/tjgb/szgb/zss/201804/t20180403_4986306.html](http://www.hntj.gov.cn/tjfx/tjgb/szgb/zss/201804/t20180403_4986306.html), 2018-04-09.
- [26] 湖南省环境保护厅. 2017 湖南省环境质量状况公报[EB/OL]. http://www.hbt.hunan.gov.cn/xxgk/zdly/hjjc/hjz1/hjz1gb/201803/t20180306_4967260.html, 2018-03-06.
- [27] 湖南日报. 湖南首次兑现湘江流域生态补偿奖罚超 6000 万[EB/OL]. <http://hn.people.com.cn/n2/2015/1230/>

c195194-27429780.html, 2015-12-30.

[28] 宣梦, 许振成, 吴根义, 等. 我国规模化畜禽养殖粪污资源化利用分析[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35 (2) : 126- 132.

[29] 邓良伟, 郑平, 陈:子爱. Anarwia 工艺处理猪场废水的技术 经济性研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2004, 30(6):628-634.

[30] 何连生, 朱迎波, 席北斗, 等. 集约化猪场废水 SBR 法脱氮 除磷的研究[J]. 中国环境科学, 2004, 24(2):224-228.

[31] 湖南省发展和改革委员会. 湖南省农业委员会关于分解 下达我省 2016 年规模化大型沼气工程中央预算内投资计 划的通知 [EB/OL]. http://www. hnagri. gov. cn/web/ hnagrizw/xxgk/tzgg/content_216236. html, 2016-08-04.