

基于系统动力学模型的区域可持续发展路径优化研究——以湖南为例¹

周筱扬 左国存

(湖南理工学院经济与管理学院, 湖南 岳阳 414000)

【摘要】:在高质量发展背景下,传统经济发展方式弊端日益凸显,转变发展方式,促进区域可持续发展已成为社会各界共识。以湖南省为例,利用系统动力学建立区域可持续发展模型,将可持续发展系统抽象为经济子系统、人口子系统、环境子系统与资源子系统,分析子系统以及要素之间的逻辑关系,设定6种发展路径,并进行动态仿真。结果显示,选择调整多变量组合的路径6有助于促进区域可持续发展。由此,提出建议措施以助力湖南区域可持续发展。

【关键词】:系统动力学;情境分析;区域可持续发展;湖南省

【DOI】:10.14059/j.cnki.cn32-1276n.2023.01.017

2015年,联合国可持续发展峰会通过了《2030年可持续发展议程》,其中包括17个可持续发展目标及169个具体目标(SDGs)。中国作为世界上最大的发展中国家,积极响应可持续发展目标,为世界可持续发展贡献中国经验。在高质量发展背景下,进一步协调环境、经济和社会的发展关系成为高质量发展的必然要求。湖南省近年来努力实现优化发展、创新发展、绿色发展及人本发展,争取率先建成资源节约型和环境友好型社会,坚持实施“绿色湖南”,为湖南经济可持续发展指明了方向。

随着社会的发展,传统的粗放型发展模式难以为继,可持续发展成为人类的首要选择。1972年,可持续发展的概念在联合国人类环境研讨会上正式提出之后,学者们开始对可持续发展的内涵展开了研究,目前被广泛接受的是世界环境与发展委员会出版的《我们共同的未来》报告中给出的定义:“既能满足当代人的需要,又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展”^[1]。区域可持续发展,是既满足本区域当代人的需要,又不对区域后代人和周围区域以及其他区域当代人与后代人满足其自身需求的能力构成危害的发展^[2]。在对可持续发展内涵理解的基础上,国内外机构、学者对可持续发展评价模型展开了诸多研究。Tran提出了选择可持续发展指标的方法,并通过美国北卡罗来纳州的达勒姆市为例建立城市可持续发展指标体系^[3]。邵超峰等对接SDGs语境下17项目标、169项子目标、231个指标的考核基础条件,建立了基于SDGs本土化的中国城市可持续发展指标体系^[4]。

系统动力学作为系统科学的一个重要分支,是一种认识和处理高阶次、非线性、多重反馈时变系统的工具^[5]。我国于20世纪80年代初引进系统动力学,并在社会、经济、产业、区域与城市发展等领域开展了深入研究^[6]。系统动力学的发展与应用与可持续发展问题的研究渊源甚深。20世纪70年代,《增长的极限》的出版将系统动力学带入了可持续发展领域的研究。在国家可持续发展的研究中,《迈向21世纪门槛:国家可持续发展模型》^[7]深受学者认可。李文超等将整个发展系统抽象为人口子系统

¹ **基金项目**:湖南省社会科学基金项目——“湖南城市创新效率提升策略优化研究”(项目编号:17YBA194;项目负责人:左国存)成果之一;湖南省社会科学评审委员会项目——“湖南区域创新绩效评价及提升路径研究”(项目编号:XSP19YBC041;项目负责人:左国存)成果之一。

作者简介:周筱扬,湖南理工学院经济与管理学院硕士研究生,研究方向:区域经济、区域可持续发展;左国存(通信作者),管理学博士,湖南理工学院经济与管理学院助理研究员,研究方向:创新管理、区域可持续发展。

统、能源子系统、资本子系统和污染子系统，对中国可持续发展状况进行系统仿真与预测^[8]；张倩等从经济子系统、能源子系统、环境子系统 3 个方面建立东北地区可持续发展系统动力学模型，采用情景分析法进行分析^[9]。

可持续发展是一个涉及社会、经济、环境等多领域复杂系统问题，传统低阶和线性理论不利于解决这一复杂系统问题，然而目前少有研究从系统和动态的角度对湖南可持续发展问题进行研究。为此，本文以湖南省为例，从系统角度对可持续发展系统进行系统分析，运用系统动力学方法对湖南可持续发展复杂系统建立仿真模型，模拟不同路径对可持续发展的影响，以期寻找适合于湖南发展实际的可持续发展路径。

1 区域可持续发展系统动力学模型

1.1 系统边界界定

根据研究目的确定合适的系统边界，以保证所研究问题的封闭性，将与建模目的无关的内容排除在外。由于区域可持续发展系统强调经济、人口、资源与环境的和谐发展，本文将区域可持续发展系统抽象为经济子系统、人口子系统、环境子系统与资源子系统。各子系统涉及的指标数量巨大，难以一一列举，本文选择与可持续发展关联度较高的指标纳入模型中。

本文主要研究的是湖南可持续发展问题，尽管其他区域会对湖南经济、资源、环境等可持续发展要素造成诸多影响，但考虑到分析时的可操作性等原因，将研究区域界定为湖南省行政区域。

1.2 子系统分析及因果回路图

系统动力学建模首先要绘制清晰的因果反馈回路图，并借助因果反馈回路图对各子系统运行机制进行深入研究。

经济子系统是整个系统的核心子系统，是可持续发展的驱动器。经济系统为人口系统提供资金支持，经济发展带动提高就业率提升，增加人均收入，改善居民生活水平，但同时会造成资源消耗及环境污染。

人口子系统作为可持续发展系统的控制器，为经济子系统输送劳动力，人口总量的变化也会对生活资源需求以及生活环境造成影响。

良好的生态环境不仅可以把生态效益转化为经济效益，促进经济的永续发展，还能为人人口生存提供优良的自然环境，降低死亡人口数量，保持人口总量稳步增长。

资源子系统是可持续发展复杂系统运行的动力所在，资源子系统为经济发展、社会进步提供资源保障。资源子系统的研究对象主要是水资源系统，本文主要研究三大产业用水量以及人口总量对用水总量的影响。

在子系统分析基础上，构建湖南可持续发展因果反馈回路图，如图 1 所示。

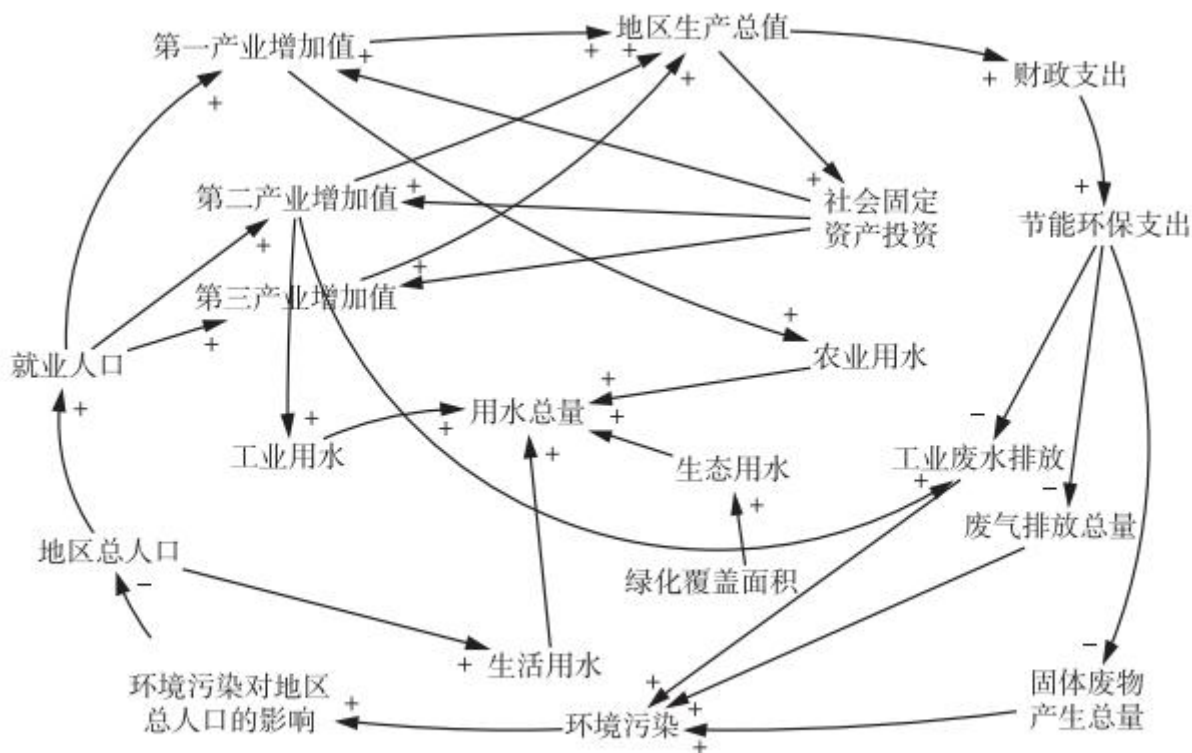


图1 可持续发展因果反馈回路图

1.3 存量流量图

根据可持续发展复杂系统内部各子系统之间及要素之间的逻辑关系，利用系统动力学软件 Vensim PLE 构建湖南可持续发展系统存量流量图模型，如图2所示。

1.4 模型方程设定

对湖南可持续发展系统动力学模型进行模拟仿真，模拟运行时间范围为2011—2030年，仿真步长为1年。其中，2011—2019年为模型运行时间，并以2011—2019年仿真，结果与实际情况的误差检验模型有效性。2020—2030年为系统政策模拟仿真的预测年限。

系统内部各变量之间的函数关系主要通过其因果关系确定，对湖南可持续发展系统变量的参数及方程建立主要使用了4种方法。

初始值。存量流图中的水平变量，需要设定初始值，如表1所示。

表1 湖南可持续发展系统模型水平变量初始值

变量	初始值	单位

全省 GDP	18 915	亿元
地区总人口	6 596	万人
耕地面积	4 137.5	千公顷
绿化覆盖面积	57.7	千公顷

常数值。对随时间变化不明显的变量取常数值，如表 2 所示。

表 2 湖南可持续发展系统模型常数值设定

变量	取值	确定方法
出生率	13.00%	利用 2011—2019 年统计数据计算得出其平均值，并根据模型仿真结果加以调整、修正得出
死亡率	7.50%	
就业人员比例	54.08%	
固定资产投资率	0.776 9	
节能环保支出占财政支出的比重	2.60%	

表函数。随时间变化，数值变动幅度较大，难以用简单的线性关系描述的变量，利用 Vensim PLE 软件中的表函数功能表示函数赋值。

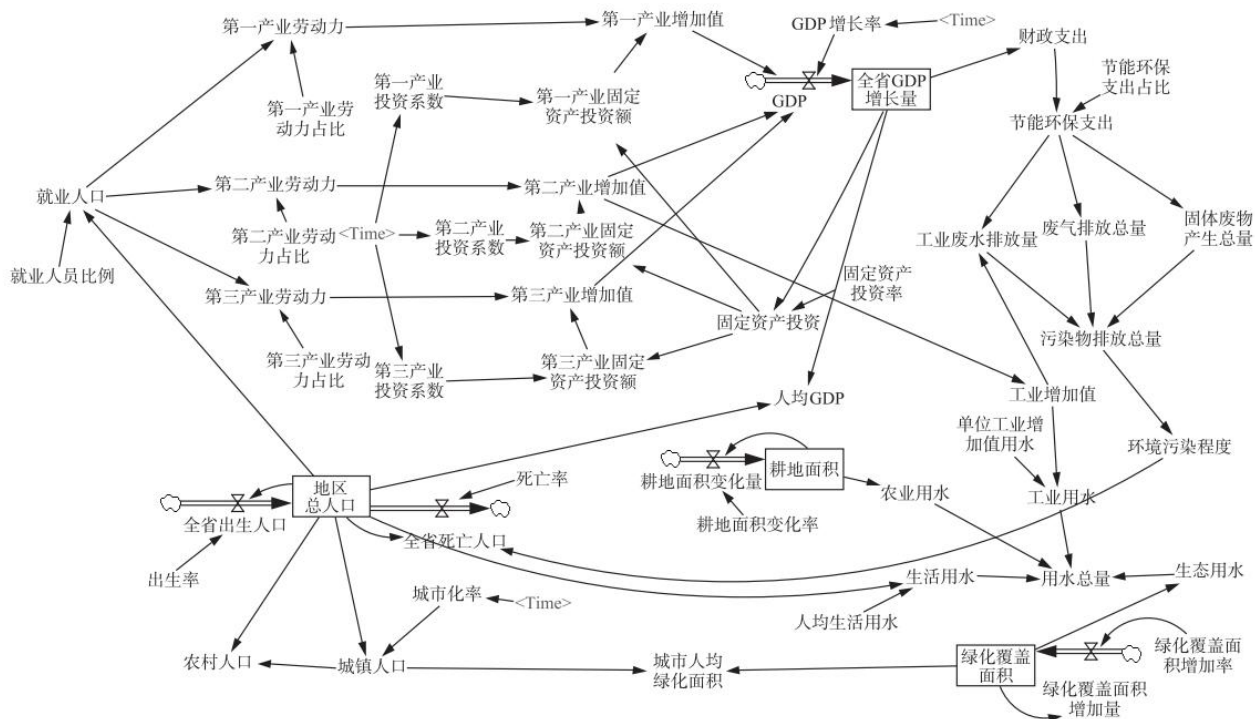


图2 湖南可持续发展系统动力学存量流量图

函数关系。对于变量间存在一元或多元线性关系的变量，采取回归分析确定变量之间的相关关系。

2 系统仿真预测与分析

2.1 模型检验

系统动力学建模完成进行仿真研究之前，需要对结构的适用性与一致性进行检验，本文采用直观检验和历史性检验对模型结构与实际结构的一致性与精确性进行验证。

本文从湖南实际出发，建立湖南可持续发展系统动力学模型，在建模过程中进行了客观分析与详尽论证，基本符合湖南现实发展情境。此外，选取地区生产总值、地区总人口和用水总量这3个重要变量进行误差检验，将拟合值与实际值绝对误差比较分析，观测模型运行有效性特征，误差检验结果如表3所示。其中，全省GDP、地区总人口及用水总量的平均误差均小于3%，说明模型真实值与模拟仿真值差距较小，通过历史性检验，能够较为真实地反映湖南发展状况。

2.2 情景分析

根据《中国落实2030年可持续发展议程国别方案》规划，为了能够同步、真实地对湖南可持续发展状况进行模拟仿真，本文将设定系统运行时间为2011—2030年，模拟步长为1年。

为了促进湖南经济、人口、环境、资源的协调与可持续发展，本文选择调整固定资产投资率、人口出生率、节能环保支出占财政支出的比重、单位工业增加值用水以及人均生活用水变量，设定6种发展路径，并选择各子系统重要变量进行模拟仿真，进而分析由于参数变动对各子系统的影响。

表 3 模型的有效性检验

年份	地区生产总值(亿元)			地区总人口(万人)			用水总量(亿立方米)		
	实际值	模拟值	误差	实际值	模拟值	误差	实际值	模拟值	误差
2011	18 914.96	18 915.00	0.00%	6 596.00	6 596.00	0.00%	326.50	319.85	2.04%
2012	21 207.23	21 785.00	2.72%	6 639.00	6 625.19	0.21%	328.80	325.84	0.90%
2013	23 545.24	24 549.50	4.27%	6 691.00	6 655.93	0.52%	332.50	330.32	0.66%
2014	25 881.28	27 167.00	4.97%	6 737.00	6 687.77	0.73%	332.40	334.40	0.60%
2015	28 538.60	29 774.00	4.33%	6 783.00	6 720.44	0.92%	330.40	338.73	2.52%
2016	30 853.45	32 229.00	4.46%	6 822.00	6 753.81	1.00%	330.40	337.40	2.12%
2017	33 828.11	34 642.00	2.41%	6 860.00	6 787.74	1.05%	326.90	338.42	3.52%
2018	36 329.68	37 152.00	2.26%	6 899.00	6 822.16	1.11%	337.00	339.90	0.86%
2019	39 752.12	39 699.00	0.13%	6 918.00	6 857.04	0.88%	333.00	341.14	2.45%
平均误差	2.84%			0.71%			1.74%		

路径 1:假设保持现有发展速度,按照现行模式发展;路径 2:假设大力发展经济,增加固定资产投资,增加工业用水以及生活用水;路径 3:响应国家鼓励生育政策,提高人口生育率,增加生活用水量;路径 4:广泛推行绿色生产、绿色消费,增加节能环保支出减少污染物的产生与排放,提高环境质量;路径 5:假设全社会形成节水氛围,大幅度减少生活用水、工业用水等;路径 6:调整多变量组合,假设注重经济社会与环境、资源的协调发展,具体参数变量的调整如表 4 所示。

在确定 6 种发展路径条件下,分别对以上 6 种发展方案进行模拟仿真,本文选择绘制全省 GDP、地区总人口、污染物排放总量以及用水总量在 6 种发展路径下的仿真图,如图 3 至图 6 所示。

通过对以上 6 种发展路径进行对比分析,路径 2 及路径 6 经济发展水平略高于其余 4 种发展路径,且这 4 种发展路径下,经济发展水平差距较小,这说明在新时代背景下,固定资产投资不足以成为影响经济发展水平的关键因素。在人口子系统中,路径 3 由于假设人口出生率提高,进而人口总量明显高于其余 5 种路径;路径 2 过分关注经济增长,造成出生率低,人口总量少。在环境子系统中,由于湖南环境治理已显成效以及环保意识的增强,6 种发展路径下污染物排放总量均逐年下降,到 2030 年已经下降至相当低的水平;同时,路径 4 在增加节能环保投资的情况下,污染物排放总量最低;路径 2 由于过分追求经济的快速增长,造成工业废水、废气排放量明显上升,环境质量状况相对较差;路径 6 与路径 5 发展模式下环境状况相当。在资源子系统中,路径 2 在经济快速增长的同时,不注重节水设施的使用,随着经济的发展造成用水总量居高不下;而在路径 5 的发展模式下,大力推广节水设施的使用,用水总量最低;路径 6 由于人口总量较高,造成居民生活用水量高,从而用水总量略高于路径 4 和路径 5。总起来看,路径 6 由于对经济、人口、环境及资源子系统内变量进行组合调控,可以兼顾经济与人口稳步增长,实现社会与环境、资源的协调发展。

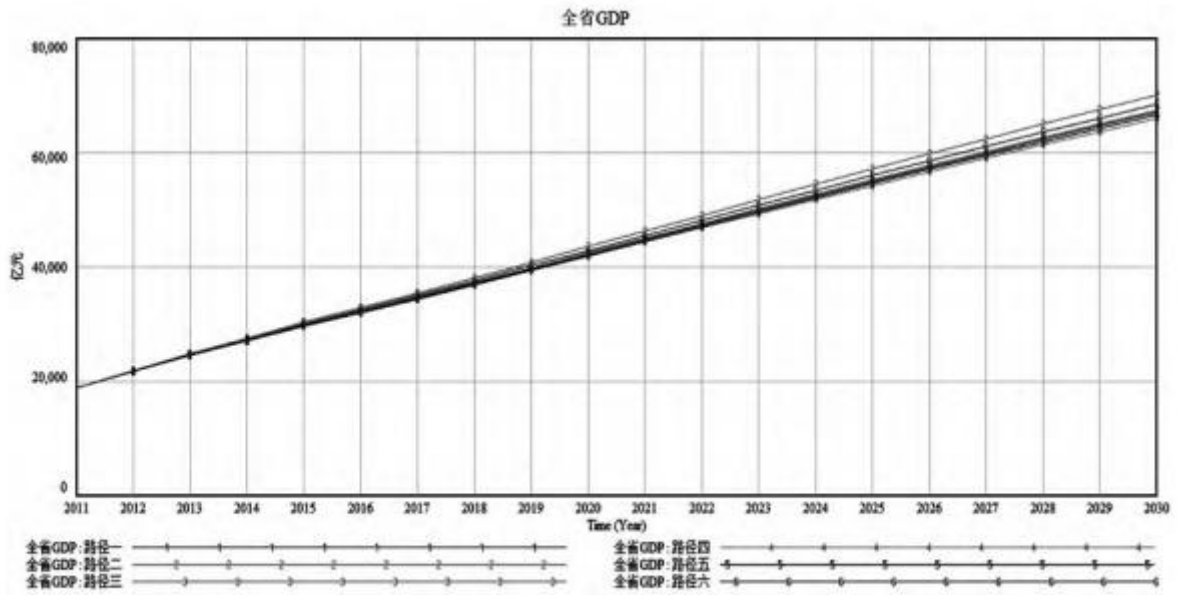


图3 全省GDP在6种发展路径下的仿真图

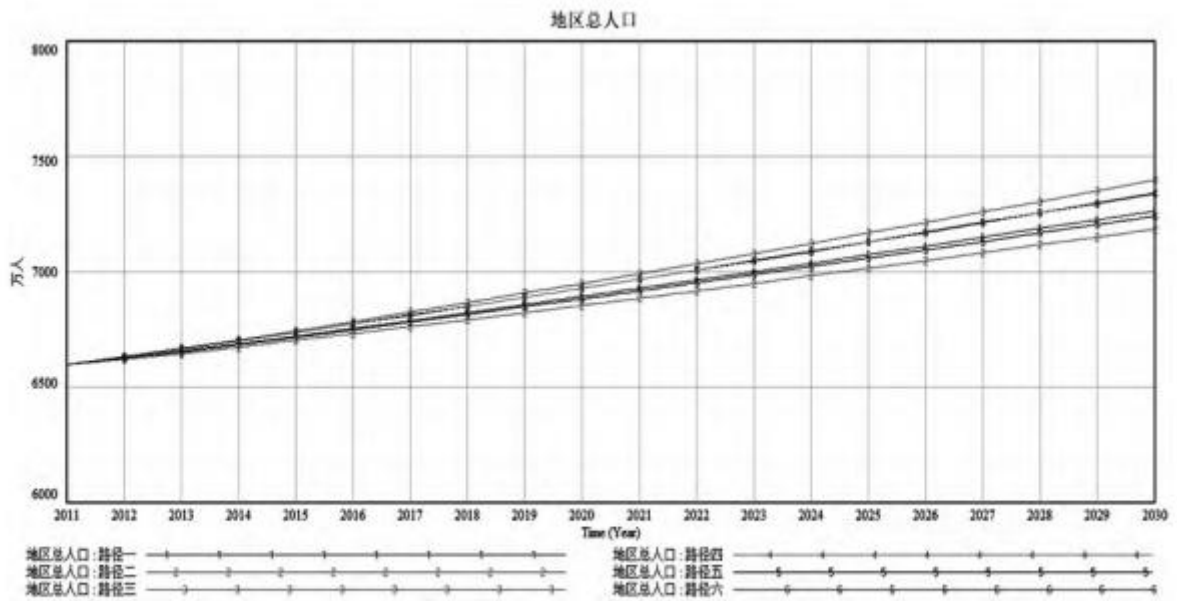


图4 地区总人口在6种发展路径下的仿真图

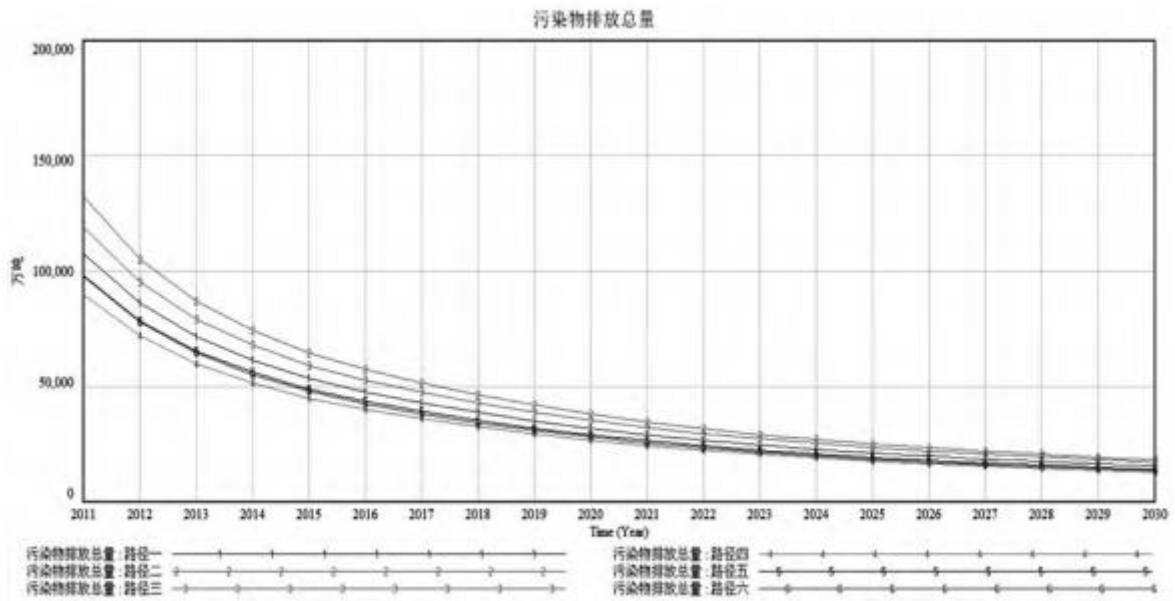


图 5 污染物排放总量在 6 种发展路径下的仿真图

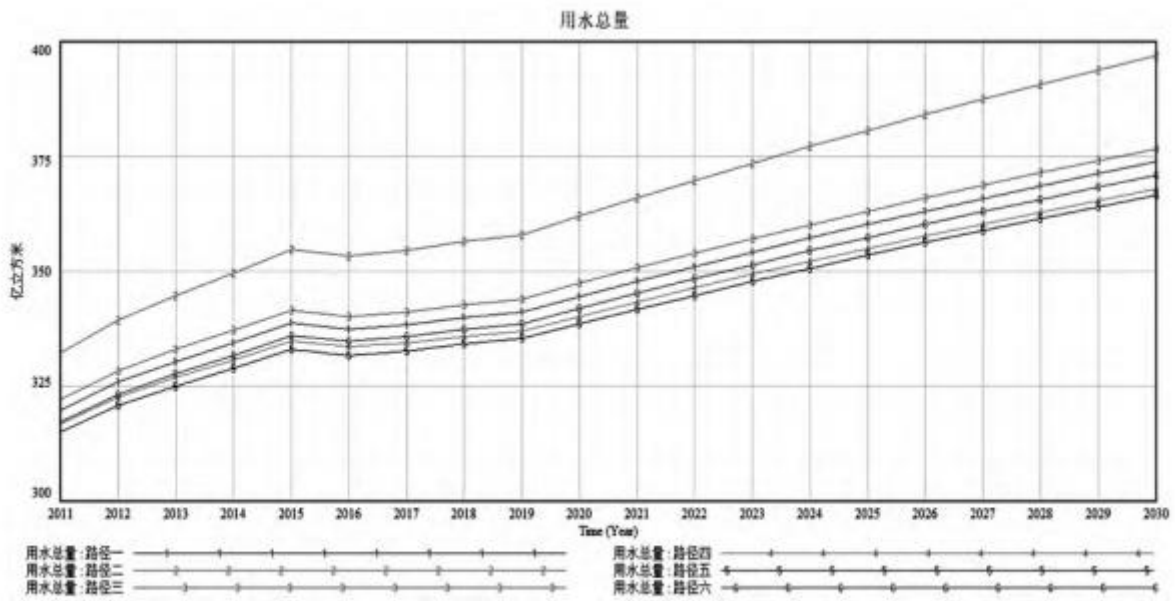


图 6 用水总量在 6 种发展路径下的仿真图

表 4 6 种发展路径下的调控参数

参数	路径 1	路径 2	路径 3	路径 4	路径 5	路径 6
固定资产投资率	0.776 9	0.826 9	0.786 9	0.766 9	0.766 9	0.806 9
人口出生率	0.013 0	0.012 5	0.014 0	0.013 0	0.012 8	0.013 5

节能环保支出占财政支出的比重	0.026 0	0.024 0	0.024 0	0.030 0	0.028 0	0.028 0
单位工业增加值用水	0.009 4	0.010 4	0.009 6	0.009 2	0.009 0	0.009 0
人均生活用水	60.152 9	60.252 9	60.252 9	59.952 9	59.152 9	59.652 9

3 结论和建议

3.1 研究结论

本文以湖南为例，建立了可持续发展系统动力学模型，并通过对6种发展路径进行仿真分析。研究发现协调发展模式表现出较大优势，据此可以推断路径6能够最大程度地实现经济、人口、资源与环境协调发展，推动湖南可持续发展进程。

3.2 对策建议

基于研究设计的路径6发展模式，本文提出促进湖南省可持续发展的3点建议。

第一，增加节能环保投资，严格控制各类污染物排放。

从各类污染物排放源头看，废水COD排放量中农业用水和城镇生活污水所占比例较大，空气污染物主要以工业排放为主，一般工业固体废物产生量占固体废物产生总量的比例较高。未来湖南应继续加大污染治理力度，不断减少各种污染物的排放，通过提高污水治理能力，减少农药、化肥使用量，加强工业污染治理，加快绿色发展进程。

第二，加大宣传教育，提高公众节水意识。

公共部门应充分运用自媒体、微信公众号和户外广告等新、旧媒体，宣讲全省水资源形势与节水意义；开展科普活动，普及节水政策，推广其他地区节水经验，营造全社会节水氛围，让广大居民想节水、会节水、能节水。

第三，积极实施“三孩”生育政策，促进人口长期均衡发展。

一方面，加强适婚青年婚恋观、家庭观引导，普及“优孕、优生、优育”理念；另一方面，切实落实各项促进生育政策和相关社会配套措施，重点关注生育意愿低、想生不敢生的群体，通过采取奖励、帮助幼儿入学等措施，降低生育成本。

参考文献

- [1] World Commission on Environment and Development. Our Common Future[M]. Oxford:Oxford University Press, 1987.
- [2] 张学文, 叶元煦. 区域可持续发展三维系统理论初探[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002(2):126-129.
- [3] TRAN L. An interactive method to select a set of sustainable urban development indicators[J]. Ecological Indicators, 2016, 61:418-427.
- [4] 邵超峰, 陈思含, 高俊丽, 等. 基于SDGs的中国可持续发展评价指标体系设计[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(4):1-12.

[5] BAILEY R, BRAS B, ALLEN J K. Using response surfaces to improve the search for satisfactory behavior in system dynamics models[J]. System Dynamics Review, 2000, 16(2):75-90.

[6] 蔡林. 系统动力学在可持续发展中的应用[M]. 北京: 中国环境出版社, 2008.

[7] QU W, BARNEY G, SYMALLA D. Threshold 21: National sustainable development model[J]. Integrated Global Models of Sustainable Development, 1995, 2:78-87.

[8] 李文超, 田立新, 贺丹. 经济—能源—环境可持续发展的系统动力学研究——以中国为例[J]. 系统科学学报, 2014, 22(3):54-57.

[9] 张倩, 陈婉莹, 彭亦廷. 基于系统动力学的东北三省可持续发展策略研究[J]. 煤炭经济研究, 2020, 40(9):34-41.