

# 基于 SD 模型分析的环鄱阳湖地区发展模式探讨\*

吴 威<sup>1</sup>, 吴 松<sup>2</sup>, 陈 爽<sup>1</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 惠州市规划设计研究院, 惠州 516001)

**摘 要:** 系统动力学(SD)模型在模拟复杂的区域发展问题中具有明显优势, 本文在深入分析环鄱阳湖地区区域发展各子系统、各要素之间关系的基础上, 构建了区域发展 SD 模型, 并通过设立 4 种发展情景模拟了不同发展模式下区域发展特征. 结果表明, 惯性发展不仅发展速度较慢, 同时将来带来严重的生态与环境问题; 高经济增长低环保投入发展尽管保持了经济的高速增长, 但对生态环境将造成较大程度的破坏; 高经济增长高环保投入方式通过加大环保投入, 能较好地解决经济高速增长所带来的污染问题; 而强调经济结构调整的产业优化升级发展方式在保证经济较高速发展的同时, 较好地维持了区域生态环境的良性循环. 充分考虑环鄱阳湖地区区域特征, 本文综合各模式优劣势, 提出了推荐发展模式, 以实现经济增长与生态环境保护之间的平衡.

**关键词:** SD 模型; 环鄱阳湖地区; 发展模式; 情景分析

## Development pattern of Lake Poyang Region based on the system dynamic model

WU Wei<sup>1</sup>, WU Song<sup>2</sup> & CHEN Shuang<sup>1</sup>

(1: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *Huizhou Institute of Urban Planning and Design, Huizhou 516001, P. R. China*)

**Abstract:** System dynamics (SD) model is suitable for the simulation of the complex issues of regional development. Based on the analysis of the relationship among the sub-systems, the various elements of Lake Poyang Region system, the SD model is constructed, and 4 development scenarios are simulated to reveal the characteristics of regional development. Results show that the inertia development pattern not only leads to the slow pace of development, but also results in serious ecological and environmental issues; the pattern of high growth with low environment input maintain rapid economic growth but will lead to a greater damage of environment; meanwhile, the pattern of high growth and high environmental input can maintain the high speed growth of economy and solve the pollution caused by economic growth through increased investment in environmental protection; the industrial upgrading pattern emphasizing on economic restructuring, can ensure a relatively rapid economic development and maintain the virtuous cycle of regional ecology and environment. Account of regional characteristics of Lake Poyang Region and the advantages and disadvantages of each scenario, the recommended development pattern is put forward in this paper to achieve a balance between the economic growth and regional ecology and environment.

**Keywords:** System dynamic model; Lake Poyang Region; development pattern; scenario analysis

沿大湖地区一直是世界各国区域经济发展的热点, 独特的区位、资源禀赋为该类地区经济开发提供了用水、航运等多方面便利, 但同时, 沿湖地区水陆生态交错带具有较强的生态服务功能与生态敏感性<sup>[1]</sup>, 又在很大程度上限制了该类区域的大规模开发. 不合理的沿湖开发与围湖利用将导致湖泊萎缩、生物多样性丧失、水环境污染以及沿湖地区景观格局破碎化等生态环境问题, 因此须慎重考虑和把握沿湖地区开发的方向与规模, 注重开发与保护之间的制衡, 以实现区域的可持续发展<sup>[2-7]</sup>. 鄱阳湖为我国第一大淡水湖, 也是在国际上享有盛誉的湿地, 其生态状况不仅对我国, 甚至对于全球生态安全也将产生重要的影响; 另一方

\* 国家自然科学基金项目(40801052)和江西省经济社会发展重大课题项目联合资助. 2011-04-13 收稿; 2011-08-25 收修改稿. 吴威, 男, 1976 年生, 博士, 副研究员; E-mail: wudp1976@163.com.

面,由于湖泊面积广大,其周边地区城镇及产业发展,不仅关系到江西省域经济的发展全局,也是中部崛起的重要内容,日益受到政府及学术界的关注<sup>[8-11]</sup>。如何促进环鄱阳湖地区经济社会发展与生态环境之间的协调意义重大。

系统动力学(System Dynamics, SD)是一种以反馈控制理论为基础,以仿真技术为手段的研究复杂社会经济系统的定量方法<sup>[12]</sup>。SD 模型本质上是带时滞的一阶微分方程组,其特点是强调结构的描述,擅长处理具有非线性和时变现象的系统问题,并能对其进行长期、动态、战略性的定量仿真分析与研究。与其他方法相比,SD 方法适用于处理长期性、周期性问题,且利用各要素间的因果关系在数据不足的情况下仍能利用有限的数据进行推算分析<sup>[13]</sup>,因此在处理复杂的经济社会问题上具有明显的优势,广泛应用于经济社会领域的模拟研究中。董敏等<sup>[14]</sup>构建 SD 模型探讨了大连市综合运输体系与区域经济的互动影响;张子珩等<sup>[15]</sup>借助 SD 模型模拟了乌海市的发展前景,并提出了可持续发展建议;陈书忠等<sup>[16]</sup>则通过构建城市环境、经济、社会之间的 SD 模型,采用情景动态模拟方法讨论了武汉市不同发展战略对城市环境的影响。

作为复杂的区域系统,环鄱阳湖地区各子系统、各要素之间不仅具有清晰、确定的相互关系,还存在着模糊、随机的因素,很难用传统的数学方法描述,而 SD 模型能描述系统内部各种非线性逻辑函数与延迟因素,在环鄱阳湖地区经济社会发展模拟上具有明显的技术优势。鉴于此,本文以 SD 方法为基础,通过构建 SD 模型及对区域发展模式的多情景分析,综合确定环鄱阳湖地区推荐发展模式,为新时期该区域发展提供决策支持。

## 1 研究区概况

鄱阳湖地处江西省北部,长江中下游南岸,京九经济带和长江经济带接合部的重要区域。考虑到行政区划完整性和数据资料的可获得性,本研究所指的环鄱阳湖地区包括南昌、九江、景德镇、鹰潭、上饶、抚州等 6 个滨湖设区市全域,是江西省经济最发达、人口最密集的区域。2006 年,区域总人口为 2290.57 万,占全省总人口的 52.79%;实现 GDP 2764.94 亿元,占全省的 59.20%;三次产业结构为 12.78:50.83:36.39,工业所占比重较高。与产业的非农化比重相比,本地区城镇化水平明显偏低,2006 年仅为 28% 左右,且存在中心城市影响力小,辐射带动能力有限等不足。横向对比上,环鄱阳湖地区区域经济水平和产业层次在江西省域经济中具有相对优势,但与东部发达地区相比存在着较大差距。

## 2 系统动力学模型建立

### 2.1 模型构建

根据环鄱阳湖地区山地丘陵所占比重较大的地形地貌特征,森林覆盖率较高、水和大气环境质量较好的自然生态特征,工业比重较高、城市化水平偏低的经济特征以及宏观政策环境下经济快速发展的趋势,结合系统动力学原理和应用要求,将环鄱阳湖地区发展系统设计为包括人口、经济、森林资源、环境 4 个子模块的系统动力学模型。系统设计以经济社会发展与生态环境保护协调为基本原则,确立各种条件变量,并根据各子模块之间物质与信息的交换关系,绘制环鄱阳湖地区发展模型的系统流程图(图 1)。

借鉴现有研究成果,在系统结构、各子系统变量有机联系分析基础上,构建系统动力学方程,进而采用以系统动力学为基本原理的仿真软件 VENSIM PLE 建立系统动力学模型。系统参数主要由历史统计资料、国家标准直接得到,部分根据历史数据用系统预测方法(回归法、优化 GM(1,1)模型、生长曲线模型等)推算得到<sup>①</sup>。

### 2.2 有效性检验

首先,系统动力学模型的检验证实工作贯穿于循环反复建模过程的始终;其次,在建模过程中反馈结构、方程均拟合了实际系统的主要特征,参数确定具有现实意义,因此模型与实际的区域发展系统结构相符合;第三,采用 VENSIM PLE 软件本身的方程检验和量纲检验功能,对模型进行了量纲一致性检验;第四,对模型进行灵敏度分析表明,模型参数在合理范围内变化,或对方程式进行合理变动后,模型行为模式变化不

① 主要数据来源于江西省及环鄱阳湖 6 市 1987—2007 年统计年鉴。

敏感,说明模型适合用于政策分析;第五,历史回顾检验结果表明模拟数据与历史数据能够较好地拟合. 综合上,模型结构合理,能够比较真实地模拟和反映区域经济系统运行.

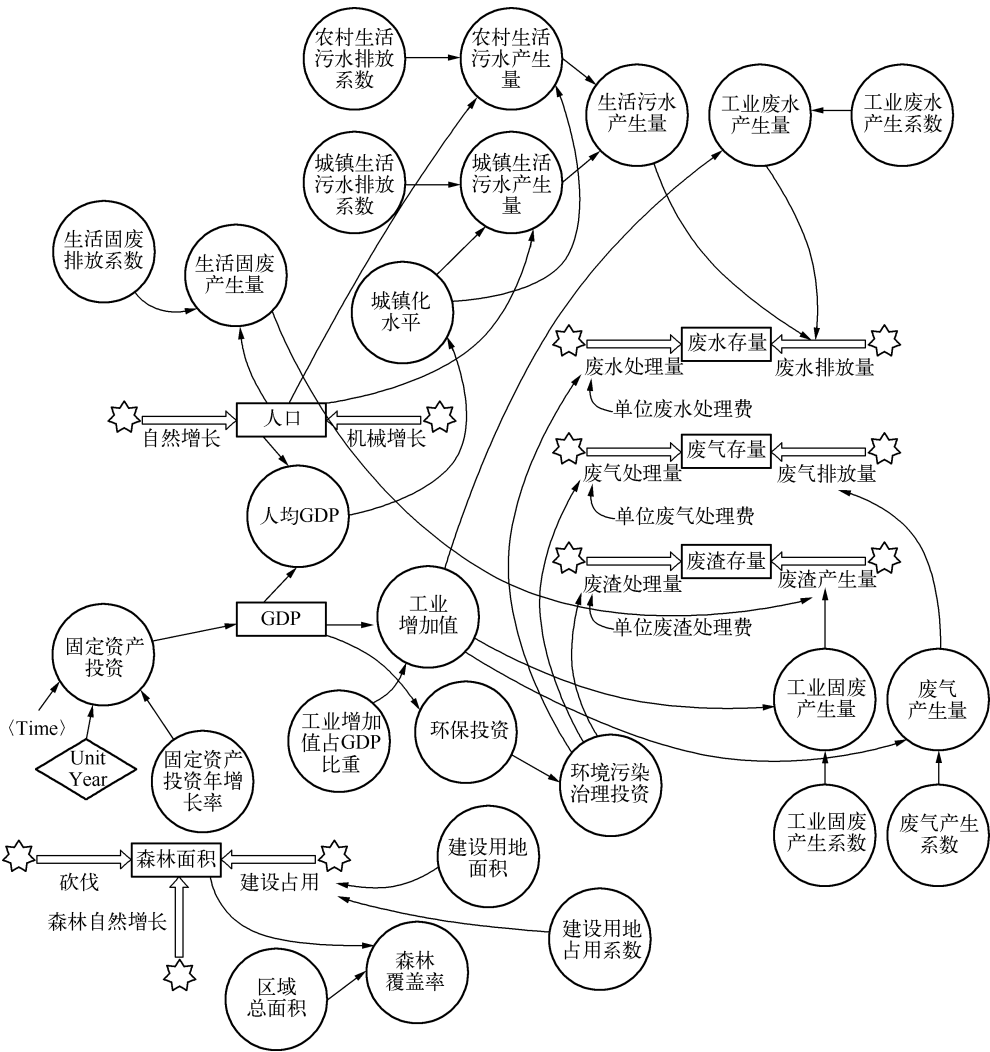


图 1 环鄱阳湖地区发展模型流图

Fig. 1 The flow graph of development model of Lake Poyang Region

3 环鄱阳湖地区区域发展情景模拟

3.1 情景设定

根据环鄱阳湖地区自然生态及经济社会特征,以促进区域经济社会与生态环境协调发展为原则,选取固定资产投资、产业结构、城镇化水平、土地利用及环境保护政策等作为外生条件,分别以固定资产投资年增长率、GDP 中工业所占比重、城镇人口比重、新增建设用地中森林比重和环保投资占 GDP 比重作为区域发展系统外生变量指标.

江西省 1990—2006 年固定资产投资年均增长率约为 25.53%,环鄱阳湖地区 2005—2006 年固定资产投资年增长率约为 25%;据《江西省国民经济与社会发展第十一个五年规划纲要》,全省固定资产投资年均增长 16%,而根据区域发展阶段及国内宏观经济发展的一般趋势,近期该地区固定资产投资有保持高速增长态

势,远期将逐渐下降,由此预期“十一五”期间年均增长率约为 16%~25%,2011—2020 年为 8%~14%。2006 年该区域工业增加值在 GDP 中占比重为 38.97%,全国平均比重为 41.8%,出于自然生态保护需求,该区域在较长时期内保持 40% 的工业比重比较合理;考虑区域发展政策的生态或经济优先取向,将工业比重设置 25% 左右的变化幅度,取值范围为 25%~50%。环鄱阳湖地区现状非农人口比重为 28%,随着城镇化进程的持续推进,近、远期内非农人口比重都将持续上升。2006 年区内首位城市南昌市城镇人口比重为 42.65%,经济相对发达的江苏省平均城镇化水平约 50.5%,考虑到基础较为薄弱,将研究区 2020 年平均城镇化水平设置在 42%~50% 之间。根据在类似多山地区城镇化过程中土地利用变化的研究,近 10 年来新增建设用地中森林所占比重一般在 2%~4%,本研究将环鄱阳湖地区该指标也设定为 2%~4%。依据《国家环境保护“十一五”规划》要求,环保投资应占同期 GDP 的 1.35%;而根据国家生态市建设指标要求,该比重应达到 3.5%,由此本文设置的变化区间为 1.35%~3.5%。

通过外生变量各指标取值高低的组合,设立惯性发展、高增长高环保投入、高增长低环保投入、产业优化升级等 4 种区域发展情景,各情景具体指标组合见表 1。

表 1 环鄱阳湖地区发展情景指标值(2006—2020 年)  
Tab. 1 The development scenario of Lake Poyang Region (2006—2020)

区域发展情景	发展模式	固定资产投资 年增长率	城镇化水平	工业所占比重	环保 投资率	新增建设用地中 林地比重
情景 1	惯性发展	2006—2010 年:16%; 2011—2020 年:8%	—	40%	1.35%	2.5%
情景 2	高增长 高环保投入	2006—2010 年:25%; 2011—2020 年:14%	28.0%~50.5%	40%~50%	3.5%	3.0%
情景 3	高增长 低环保投入	2006—2010 年:25%; 2011—2020 年:14%	28.0%~50.5%	40%~50%	1.35%	2.5%
情景 4	产业结构 优化升级	2006—2010 年:20%; 2011—2020 年:8%	28.0%~42.65%	40%~25%	1.35%	2.0%

情景 1 为惯性发展,即各外生变量延续现有发展态势,经济按惯性增长。其中固定资产投资年增长率按照江西省“十一五”规划要求,2006—2010 年达到 16%,2011—2020 年维持在 8% 左右;城市化水平采用人均 GDP 的对数函数;工业占 GDP 比重参照全国 41.8% 的平均水平,本地区维持在 40% 左右;环保投资依据《国家环境保护“十一五”规划》的要求,占同期 GDP 的 1.35%;新增建设用地中森林比重为 2.5%。

情景 2 为高增长高环保投入发展,即经济增长水平和环保投入比重均取上线。具体为:2006—2010 年固定资产投资年增长率保持当前 25% 的增长速度,2011—2020 年维持在 14% 左右;城镇化水平到 2020 年达到江苏省目前的平均水平(约 50.5%);在高资本投入的前提下,工业化进程不断推进,工业所占比重在研究期末达到 50%;环保投资占 GDP 比重达到国家生态市建设指标 3.5% 的要求;该模式设定新增建设用地将占用更多的森林资源,新增建设用地中森林比重达到 3.0%。

情景 3 为高增长低环保投入发展,即经济增长水平取上线,而环保投入水平取下线。具体为:2006—2010 年固定资产投资年增长率保持当前 25% 的增长速度,2011—2020 年维持在 14% 左右;城镇化水平到 2020 年达到 50.5%;工业所占比重达到 50%;环保投资占 GDP 比重为 1.35%;新增建设用地中森林比重为 2.5%。

情景 4 为产业结构优化升级发展,即以产业结构调整 and 升级为主,实施严格的生态环境保护政策,同时保持经济较快增长的发展模式。具体指标为:2006—2010 年固定资产投资年增长率达到 20%,2011—2020 年维持在 8% 左右;区域城镇化水平到 2020 年达到目前南昌市的水平,即 42.65%;优化产业结构,强化、做优第一产业,大力发展以生产性服务业和旅游业为龙头的第三产业,逐步将工业所占比重降至 25% 左右;重视循环经济发展,注重生产环节的减量化,降低环保压力,故环保投资占 GDP 比重仅设置为 1.35%;严格控制新增建设用地对森林资源的占用,新增建设用地中森林比重控制在 2.0% 左右。

3.2 模拟结果

以 2006 年为基准年,以 1 a 为步长,采用上文建立的 SD 模型对环鄱阳湖区域各发展情景 2006—2020 年区域发展过程进行模拟(图 2、表 2).

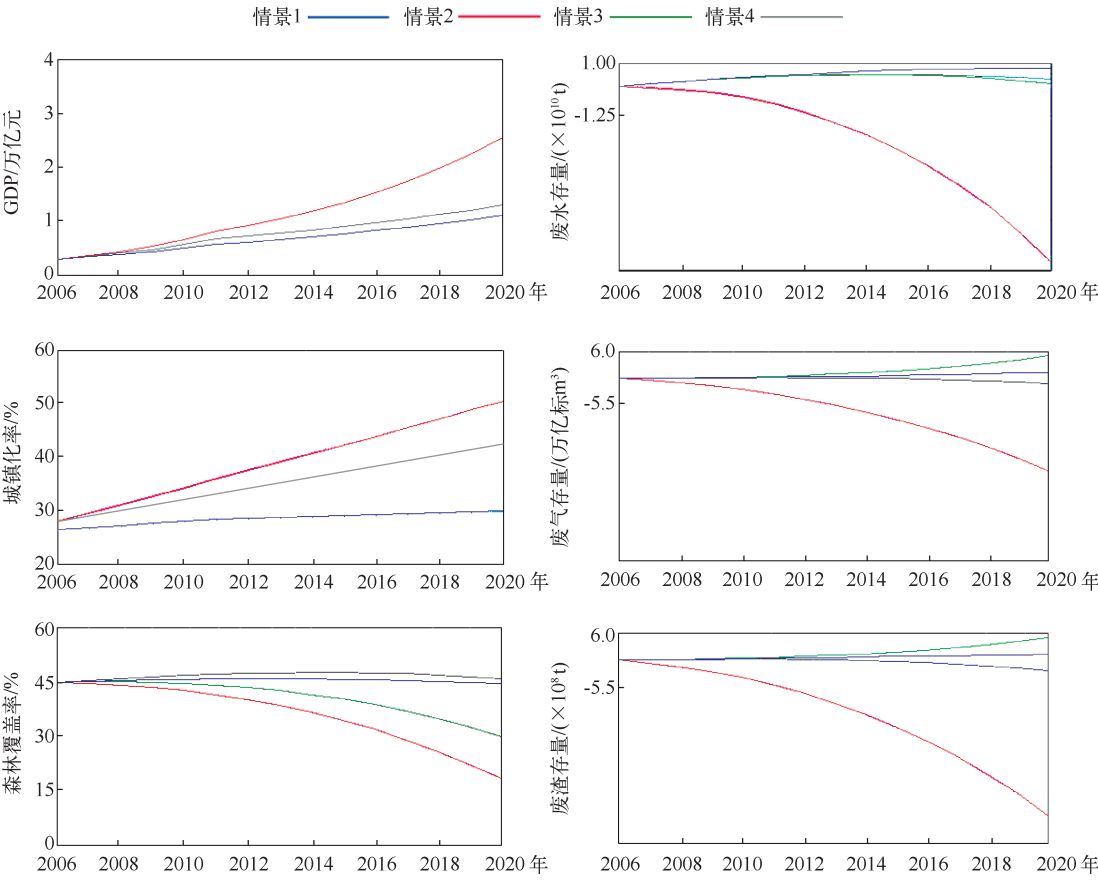


图 2 环鄱阳湖地区 SD 模型情景模拟结果(GDP 和城镇化率两指标情景 2、情景 3 结果一致,在图上表现为两线条重合)

Fig. 2 The simulation result of SD model of Lake Poyang Region

采用情景 1 惯性发展模式,2020 年环鄱阳湖地区 GDP 总量为 1.1 万亿元,人均量不到 4.1 万元,城镇化率为 30.05%,发展水平总体偏低;三废污染排放量较大,治理水平偏低,污染存量较大;森林覆盖率变动不大,2014 年前略有上升,其后呈下降趋势。

采用情景 2 高经济增长高环保投入发展模式,经济总量、城镇化率都达到较高水平,其中经济总量和人均量均为惯性发展模式的 2 倍以上;虽然三废排放量增长很快,但由于环保投入高,处理能力强,污染物存量逐步减少乃至为 0;由于该模式中新增建设用地对森林占用较多,故森林覆盖率降低明显,2020 年降至 18.34% 的低水平。

情景 3 为高经济增长低环保投入发展模式,经济发展状况与情景 2 相同,在高增长发展中三废排放量大,由于环保投入水平较低,引致废气、废渣存量高于另外三种情景;废水存量亦较高,但在 2015 年前后排放量与处理量达到平衡,水环境污染状况将有所好转;新增建设用地对森林占用相对较多,区域森林覆盖率下降也较为明显,2020 年降至 30.10% 左右。

情景 4 通过优化产业结构,在保持经济较高增长情况下,控制工业三废的排放量。较之惯性发展模式,

经济总量与人均量稍高,城镇化水平明显提升,但与高经济增长模式发展水平还存在明显差距. 尽管采用该模式环保治理投入比重偏低,但由于在发展中强调了一产和三产的发展,工业排放量低,因此除废水存量受生活污水排放的影响相对较高外,环境保护压力总体较低;该模式下森林覆盖率变动不大,2020 年覆盖率达到 46.02%,略高于惯性发展模式.

3.3 模型运行特征及对方案优化的启示

经济社会系统发展将通过各类物质、能量的输入输出对生态环境造成影响. 根据环鄱阳湖地区发展模型在 4 种情景下的运行结果,可以归纳出该模型以下运行特征:(1) 城镇化水平与区域经济发展水平密切相关,较高的固定资产投资增长率将促进城镇化水平的提高,并最终影响到工业和生活废水的产生量;(2) 经济发展水平以及产业结构,决定着工业三废的产生量;(3) 地区生产总值以及环保投资率,决定着三废的处理量;(4) 城镇化水平的提高会导致建设用地增加,并对森林覆盖率产生影响.

从 4 种情景模型运行结果看,情景 1 的惯性发展模式不仅经济发展速度较慢,同时对区域环境还将造成较为严重的破坏;情景 2 的高经济增长高环保投入模式在促进区域快速发展的同时兼顾了环境保护和生态建设;情景 3 尽管促进了经济的快速发展,但却以牺牲生态环境为代价;情景 4 强调经济结构调整与优化,结构优化优先于增长速度,在保护生态环境的同时兼顾经济的较高速增长. 事实上,解决区域环境问题的关键不仅在于减少三废的产生量,同时也决定于环保投入,即如何尽快越过环境库兹涅茨曲线的顶点,因此情景 2 不失为当前宏观经济形势下中部地区崛起的现实选择,但对于环鄱阳湖地区,按照情景 2 设定情形,森林面积的锐减将会导致较为严重的生态破坏,因此在方案优选中应充分结合情景 2 和情景 4.

3.4 推荐发展模式

根据上文分析,环鄱阳湖地区在未来一定时期内应采用高投入与调结构相结合的发展模式. 固定资产投资应保持高速增长态势,2006—2010 年保持 20% 的年平均增长率,2011—2020 年保持 10% 的年平均增长率较为现实;城镇化水平不宜盲目求高,2020 年达到江苏省目前的平均水平,即 50% 左右;工业化率参考现状发展阶段,认为保持在 40% 左右水平较为合适. 国家生态市建设指标对于环保投资要求达到 GDP 的 3.5%,就环鄱阳湖地区发展阶段而言,该要求较难实现,考虑到主要发达国家(如美国、日本等)环保投资占 GDP 比重约在 2% 左右,俄罗斯约为 1.6%,确定本地区 1.5% 的环保投资率较为现实;在新增建设用地中要严格控制占用林地,确保该比重控制在 2% 左右. 将上述参数代入模型,运行结果见表 3.

在推荐发展模式下,GDP 总量与人均量保持较高速平稳增长,2015 年分别达到 9653.74 亿元、3.786 万元左右;2020 年达到 1.528 万亿元、5.645 万元左右,尽管低于情

表 2 环鄱阳湖地区 2020 年发展情景模拟结果\*

Tab. 2 The simulation result of development scenario of Lake Poyang Region in 2020

	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4
总人口/万人	2706.7	2706.7	2706.7	2706.7
城镇人口/万人	813.36	1366.88	1366.88	1154.41
城镇化水平/%	30.05	50.50	50.50	42.65
GDP/亿元	11059	25544	25544	13021
人均 GDP/元	40858	94372	94372	48106
废水存量/t	827045	—	140145	333579
废气存量/亿标 m <sup>3</sup>	15031	—	51970	—
废渣存量/(×10 <sup>4</sup> t)	13584	—	49905	—
森林覆盖率/%	44.55	18.34	30.10	46.02

\*“—”为因处理能力大于排放量,而导致废水、废气、废渣存量在运行结果中出现负值.

表 3 推荐发展模式运行结果

Tab. 3 The simulation result of the recommend development pattern

	2006 年	2010 年	2015 年	2020 年
总人口/万人	2290.41	2402.34	2549.99	2706.70
GDP/亿元	2967.01	5683.04	9653.74	15280.50
人均 GDP/元	12954.10	23656.20	37858.00	56454.50
城镇化水平/%	28.00	34.29	42.14	50.00
废水处理率/%	52.47	80.49	100	100
工业废气处理率/%	88.04	92.65	98.80	100
固废处理率/%	94.24	100	100	100
森林覆盖率/%	44.91	46.65	46.32	42.13

景 2、3 高经济增长模式,但明显高于情景 1 惯性发展模式与情景 4 产业结构优化模式. 城镇化率快速提升, 2015 年达到 42.14%, 2020 年达到 50.00%, 明显高于情景 1 和 4, 在投资量缩减的情况下与情景 2、3 高投入高增长模式水平相当. 三废处理水平显著提升, 2015 年废水、固废处理率均达到 100%, 废气处理率接近 99%, 优于情景 1 与情景 3. 森林覆盖率在模型运行期间呈先上升后降低态势, 2020 年为 42.13%, 尽管略低于情景 1、4, 但仍保持在较为合理的水平.

很明显, 推荐发展模式在保证经济较快增长状态下, 能够较好地实现环境保护和生态维持, 对于环鄱阳湖地区可持续发展具有积极的意义.

## 4 结论

根据环鄱阳湖地区区域经济系统 SD 模型模拟, 按照当前经济发展趋向的惯性发展模式, 该区域未来发展速度较慢, 经济总量、人均量及城镇化水平等指标与东部地区差距将进一步扩大, 且三废排放量将持续增加, 加之治理水平偏低, 环境污染问题将更为突出. 在高经济增长高环保投入模式下, 通过加大资本投入, 经济与城镇化都将达到较高水平, 虽然三废排放量随之快速增长, 但由于高环保投入, 污染物存量快速减少乃至为 0. 但若仅仅加大资本投入, 采用高经济增长低环保投入模式, 在促进经济高速增长的过程中, 环境质量将快速下降, 生态风险大为提升. 通过优化产业结构, 情景 4 将经济发展的重心由工业转向第三产业, 同时积极发展现代农业, 尽管经济发展速度低于高资本投入模式, 但高于惯性模式, 且在保持较低环保投入水平的情况下仍能保证生态与环境的良性循环. 综合考虑不同发展情景, 对于发展与生态环境保护压力均较为突出的环鄱阳湖地区, 应在高经济增长高环保投入模式与产业优化升级模式之间取得平衡, 在适度加大投资力度, 促进经济较快增长的同时, 积极优化产业结构, 减轻生态环境压力.

## 5 参考文献

- [1] 颜昌宙, 金相灿, 赵景柱等. 滨湖带退化生态系统的恢复与重建. 应用生态学报, 2005, 16(2): 360-364.
- [2] 夏家洪, 张永春. 苏南太湖地区乡镇工业水污染综合防治研究. 长江流域资源与环境, 1992, 1(1): 71-76.
- [3] 许刚. 太湖流域社会经济发展对水环境的影响研究——以无锡市为例. 地域研究与开发, 2002, 21(1): 55-59.
- [4] 张落成, 陈振光, 吴楚材. 苏南太湖流域地下水过度开采引起的地面沉降及其防治对策. 湖泊科学, 2003, 15(3): 257-262.
- [5] 高超, 朱继业, 戴科伟等. 快速城市化进程中的太湖水环境保护: 困境与出路. 地理科学, 2003, 23(6): 746-750.
- [6] 靳晓莉, 高俊峰, 赵广举. 太湖流域近 20 年社会经济发展对水环境影响及发展趋势. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 298-302.
- [7] 李新国, 江南, 杨英宝等. 太湖围垦利用与围网养殖的遥感调查与研究. 海洋湖沼通报, 2006, (1): 93-99.
- [8] 胡遥虹, 刘安炉. 环鄱阳湖地区建成生态旅游休闲胜地的对策探析. 求实, 2007, 6: 59-61.
- [9] 揭润年. 建设环鄱阳湖经济圈的对策研究. 求实, 2007, 9: 63-66.
- [10] 王志国. 关于建设环鄱阳湖生态城市群的设想. 城市, 2007, (11): 8-11.
- [11] 熊智伟. 环鄱阳湖经济圈的发展研究. 江西农业大学学报: 社会科学版, 2007, 6(2): 35-39.
- [12] 胡玉奎. 系统动力学. 杭州: 浙江人民出版社, 1988: 12-18.
- [13] 谷国锋. 区域经济系统研究中的动力学方法与模型. 东北师大学报: 自然科学版, 2003, 35(4): 88-93.
- [14] 董敏, 郭子坚, 唐国磊. 综合运输体系与区域经济互动影响的系统动力学模型. 大连海事大学学报, 2010, 36(4): 64-67.
- [15] 张子珩, 濮俊杰, 周秀慧等. 乌海市可持续发展的系统动力学模型仿真. 干旱区资源与环境, 2010, 24(12): 55-60.
- [16] 陈书忠, 周敬宣, 李湘梅等. 城市环境影响模拟的系统动力学研究. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1822-1827.