

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.026

南水北调中线水源区生态产业与环境耦合发展情景分析

陈华君¹, 褚钰¹, 付景保²

(1. 河南工程学院管理工程学院, 河南 郑州 451191;

2. 河南工程学院南水北调与黄河流域生态环境研究中心, 河南 郑州 451191)

摘要:运用系统动力学方法构建水源区生态产业与环境的耦合模型,结合南水北调中线水源区丹江口库区渠首河南淅川的基础数据,分析了南水北调中线水源区生态产业与环境耦合机制,在此基础上设计了4种情景方案进行仿真模拟。结果表明:投资增强型方案中,经济与产业发展有明显的改善趋势,GDP增长了9%,产业聚集度的平均增长幅度为10%;节约资源型方案2054年的资源使用总量为203.97万m³,比初始方案减少46.3%,废弃物直排量同比减少48.5%;经济发展型方案前期效果较好,GDP提高了30%,但后期存在发展停滞的问题;综合协调型方案总体上效果最好,其GDP和资源循环利用率分别提高了21.2%和16.7%,体现了产业与环境可持续发展的优势。未来,南水北调中线水源区应向调整产业结构、加强产业科技环保投资、增强节约和环保意识等方向综合发展,并辅以科学管理方法,以实现生态产业与环境的耦合协调。

关键词:生态产业;环境模拟;系统动力学模型;情景分析;南水北调中线水源区

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)06-0194-08

Analysis on ecological industry and environment coupling development in water source area of middle route of South-to-North Water Diversion Project // CHEN Huajun¹, CHU Yu¹, FU Jingbao² (1. College of Management Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China; 2. Research Center of South-to-North Water Diversion and Ecological Environment of the Yellow River Basin, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: An ecological industry and environment coupling model for water source areas was constructed by use of the system dynamics method. Original data of Xichuan County, the head of Danjiangkou Reservoir area of the middle route of South-to-North Water Diversion Project were adopted, and subsequently, the ecological industry and environment coupling mechanism in water source areas was analyzed. Four scenarios were designed for simulation of the situation of ecological industry and environment coupling development. The results show that the economic and industrial development has an obvious improvement trend in the investment enhancement scheme, with GDP increasing by 9%, and the average growth rate of industrial agglomeration being 10%; for the resource-saving scheme, the total resource consumption will be 2.039 7 million m³ by 2054, 46.3% less than the initial scheme, and the direct emission of waste will decrease by 48.5%; the economic development scheme has better effect in the early stage, and GDP increases by 30%, but the problem of development stagnation occurs in the later stage; in general, the comprehensive coordination scheme has the best effect, with GDP and the resource recycling utilization rate increasing by 21.2% and 16.7%, respectively, reflecting the advantages of sustainable development of industry and environment. In the future, in order to realize ecological industry and environment coupling development, it is necessary to adjust the industrial structure, increase the investment in industry and environmental protection, enhance the awareness of conservation and environmental protection, and adopt scientific management methods.

Key words: ecological industry; environmental simulation; system dynamics model; scenario analysis; water source area of middle route of South-to-North Water Diversion Project

基金项目:国家自然科学基金(71804042,42077449);河南省高校人文社会科学研究一般项目(2023-ZZJH-045);河南省教育厅哲学社会科学重大攻关招标项目(2020-YYZD-04)

作者简介:陈华君(1987—),女,讲师,硕士,主要从事水资源与水环境管理研究。E-mail: gloomy_qt@126.com

通信作者:付景保(1966—),男,教授,硕士,主要从事区域生态环境保护与可持续发展研究。E-mail: fujingbao@126.com

生态产业是一种以生态文明理念为指导的产业,其循环经济的发展模式能够促进区域产业与环境耦合系统协调发展。因此,区域耦合系统实现协调发展应以循环经济为发展模式,大力发展生态产业。产业与环境耦合的关系是学界关注的重要议题。Leslie 等^[1]利用生态经济定量模型对社会-生态海洋系统的质量行为进行探索,认为海洋业可持续发展战略的设计必须以生态经济理论为理论基础;Oliveira 等^[2]认为经济发展与资源安全息息相关,提出了权衡经济系统不同资源政策的多轴评估方法,为构建资源的不同配置政策提供了数据支持;Xu 等^[3-8]通过构建评价体系和耦合协调度模型,定量分析了产业和环境的协调性,提出构建生态产业系统协调发展内生机制的建议;黄德春等^[9-10]运用数学模型预测了长江经济带未来产业与环境耦合协调度,为提出规范性建议提供了研究方向。部分学者认为综合分析产业与环境的耦合关系不能单纯依靠指标体系的建立,而需要借助具有反馈机制的系统动力学(system dynamics, SD)方法,以揭示耦合系统复杂的交互作用机理。季永兴等^[11-14]认为生态产业系统的快速演化,离不开对影响因素的把握和激发,由此根据 SD 模型的参数调控分析影响因素,提出了生态产业系统协调发展的对策;徐升华等^[15]采用实地调研方式确定产业-经济-资源系统的影响因素,将其作为 SD 模型构建的边界,并对鄱阳湖经济区生态产业集群发展提出了具体的政策建议;王慧亮等^[16-18]采用 SD 方法,动态模拟区域总体发展特点和发展差异,探索生态文明理念指导下,产业与环境系统分阶段、分地域的产业化发展模式。

以上研究多为定量辨识单一产业与环境的耦合关系,很少有学者尝试分析整个产业与环境耦合的协调发展,这可能导致产业发展的实践效果不佳。实证研究主要侧重于省(自治区、直辖市)和城市群,基于微观市、县层次的实证分析相对较少。为此本文基于SD方法构建生态产业与环境耦合发展模型,以南水北调中线工程水源区为研究对象,借助情景方案动态模拟该区域未来生态产业与环境耦合的不同趋势,并基于仿真结果提出政策建议,以保障水源区水资源安全使用的同时,实现水源区效益的最大化。

1 生态产业与环境耦合关系的确定

从概念上理解生态产业主要包括 3 个方面:一是研究产业活动与环境的相互关系,这必然要求发展方式的转变和经济质量的提升;二是考察产业活动从自然索取到返回的过程,这需要引起对资源循环利用和废弃物减排的重视;三是探索实现生态化

的途径,要求产业活动遵循自然规律、效仿生态系统。因此,生态产业具有多维含义,主要包括经济发展、资源利用、废弃物排放相互作用的3个方面。环境是指所有生物赖以生存的自然环境,包括能源、资源、水、大气和土地等。生态产业与环境之间的耦合关系就是生态产业的3个方面与环境要素之间相互作用的总和,以实现经济、产业、环境层面的目标。根据耦合关系,将产业与环境系统分解为经济子系统(GDP、各产业增加值)、产业子系统(各产业单位数)和环境子系统(资源使用量、废弃物直排量、自然资源可利用量、废弃物循环量),各子系统之间相互制约、相互影响形成的基本因果关系如图1所示,图中因果关系有正负极性之分,“+”表示正反馈,“-”表示负反馈。

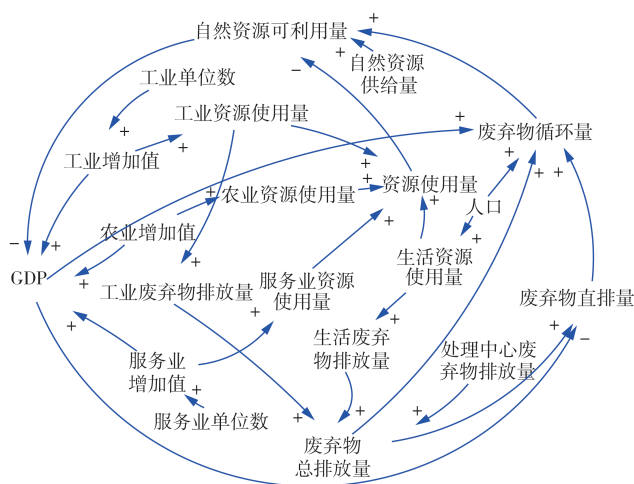


图1 生态产业与环境耦合的基本因果关系

Fig.1 Basic causality diagram of ecological industry and environment coupling

图 1 中主要的反馈关系有:①GDP 水平的提高是各产业增加值递增的结果,同时 GDP 的增加也带来了环境的污染和资源的消耗;②自然资源可利用量取决于废弃物循环量和自然资源供给量,而废弃物循环量又直接与 GDP 相关联;③当资源使用速度超过自然资源供给速度,自然资源将限制经济发展;④高能耗、重污染的产业单位数过多和各产业增加值的提高使废弃物排放量不断增加,环境压力倍增,将对 GDP 起到反作用,降低 GDP 增长速度。

2 南水北调中线水源区生态产业与环境耦合模型构建

2.1 生态产业与环境耦合边界的确定

南水北调中线水源区是指丹江和汉江水系控制的流域范围,其中,丹江口库区淅川县是中线渠首,也是国家重点保护区域。同时考虑到产业系统范围内数据的典型性、可比性以及政策的可实施性,将河

南浙川确定为耦合系统的物理边界。

浙川县位于河南省西南部,总面积 2 820 km²。区域自然资源丰富,3 种矿藏资源储量位居全国第一,蓄水量高达 290 亿 m³,完全满足全省全年的供水量。区域城镇化率达到了 43.3%,人均公共绿区面积 11.5 m²,高于全省的 43%。截至 2019 年,浙川县生产总值达 228.8 亿元,其中,第二产业增加值 106.7 亿元,比上年增长 7.5%,第三产业增加值 83.9 亿元,比上年增长 10.2%。近年来,随着浙川城镇化进程加快和经济发展,产业与环境的矛盾凸显。当前,浙川产业与环境面临的主要问题有:①城镇化进程的加快和经济的发展使得资源使用量不断增加,人均资源量逐渐减少;②废弃物排放量增加,但资源的循环利用率和废弃物处理能力不足,环境压力增大。

2.2 生态产业与环境耦合 SD 模型结构

根据因果分析结果,结合水源区确定的边界和实际问题,构建生态产业与环境耦合 SD 模型结构,如图 2 所示,该结构反映了经济、产业和环境 3 个子系统间相互制约、相互影响的关系。

a. 经济子系统。经济子系统主要通过各产业增加值和 GDP 来体现,分别选取工业增加值、农业增加值和服务业增加值作为水平变量,将自然资源可利用量、工业单位数、服务业单位数、产业单位数、

各产业从业人数作为辅助变量用以连接产业子系统和环境子系统,并借助生产函数和回归函数表示投入与产业转化机制。

b. 产业子系统。产业子系统主要通过产业结构与从业结构反映,把产业单位数作为该子系统的水平变量,通过各单位对资源的使用、转化和返还来反映产业子系统对其他子系统的影响。

c. 环境子系统。产业对环境子系统的影响主要体现在环境水平(自然资源可利用量、资源循环利用率)、环境压力(废弃物直排量、各产业废弃物排放量、居民生活废弃物排放量)和环境保护(环境污染治理投资、科技投资量)方面。资源可利用量作为各产业增加值的辅助变量实现与经济子系统的耦合;同时废弃物直排量通过环境污染治理投资、资源循环利用率等辅助变量连接,体现与经济和产业子系统的相互影响。

2.3 耦合 SD 模型参数的确定

本文所涉及的主要变量为农业增加值、工业增加值、服务业增加值、居民人口、产业单位数等,数据均来源于河南省 2014—2018 年统计年鉴。其余相关指标数据解释如下:排放系数、居民人口增长率、投资比例、单位产值资源使用量、从业人员比例取历年加权平均数;废弃物处理率、就业率、各产业生产效率为相关因素的回归函数;科技水平为研究与试

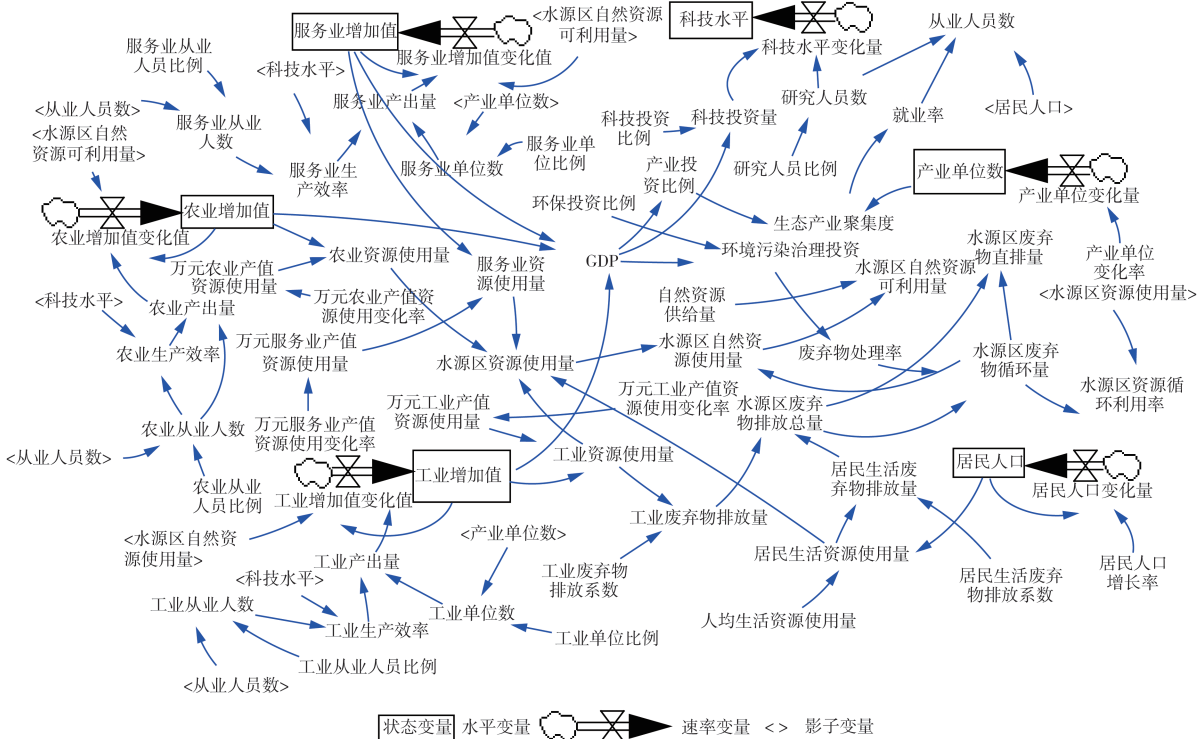


图 2 南水北调核心水源区生态产业与环境 SD 流图

Fig. 2 SD flow chart of ecological industry and environment in core water source area of South-to-North Water Diversion Project

验产出的专利、国家标准、论文及著作等指标的主成分估值^[17]。模型中自然资源选定为水资源,废弃物选定为废水。

2.4 耦合 SD 模型检验

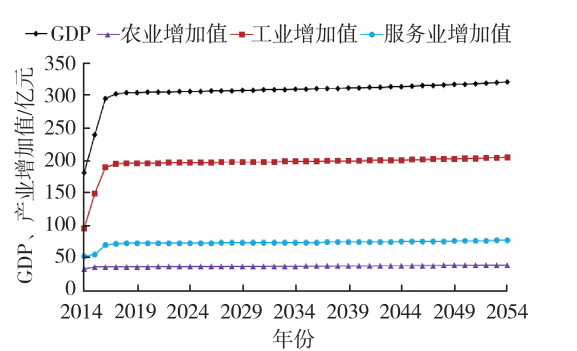
为保证模型的模拟精度,选用 2014—2018 年的历史数据,将模型中变量的模拟值与实际值进行对比,对该耦合模型进行检验。由于模型变量较多,仅列出农业增加值、产业单位数、工业增加值、科技水平、居民人口、服务业增加值等主要变量的误差分析结果(表 1),其余各变量误差均小于 10%,模型模拟精度良好。

3 南水北调中线水源区生态产业与环境耦合发展评价

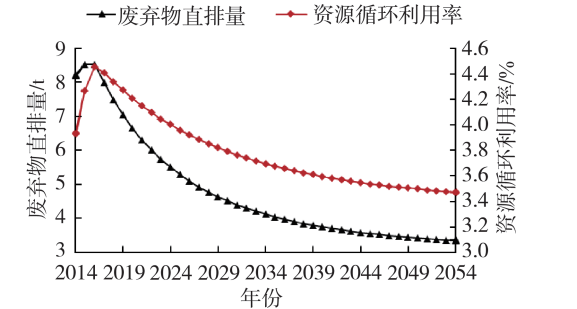
3.1 SD 模型预测结果

将经济子系统的 GDP、环境子系统的废弃物减排率(由废弃物直排量计算)和资源循环利用率以及产业子系统的产业单位数作为生态产业与环境耦合发展的重要指标。以 2014 年为基准年,对 2014—2054 年的数据进行预测,以此分析未来水源区生态产业与环境耦合协调问题^[19-24],预测结果如图 3 所示。

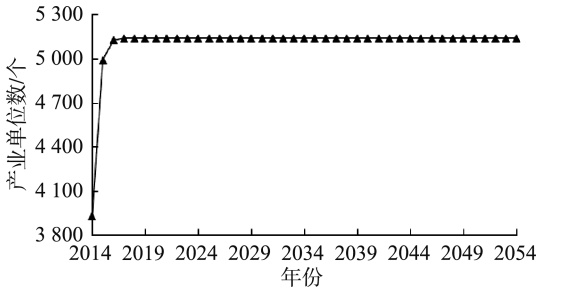
由模拟结果可知,水源区 2014—2019 年 GDP、产业单位数呈直线增长趋势,处于产业高速发展阶段。但从 2020 年开始,GDP 增长率由 2014—2019 年的 26% 下降为 0.3%,且产业单位数处于零增长状态,说明水源区的产业发展出现停滞现象。从水源区环境角度来看,废弃物循环利用率和废弃物直排量在未来有下降趋势,这和水源区加大产业环保投资相关,但从图 3(b)来看,下降的趋势并不显著,后期的减排率、循环利用率分别低于 0.6%、0.3%。由此可看出,在现有发展环境下,水源区的经济发展



(a) 经济水平



(b) 废弃物直排量和资源循环利用率



(c) 产业单位数

图 3 水源区各个评价指标的发展趋势

Fig.3 Development trend of each evaluation index in water source area

将处于停滞状态,同时也将面临生态环境问题,这将影响水源区未来的协调发展^[22]。

表 1 误差分析结果

Table 1 Error analysis results

年份	农业增加值			产业单位数			工业增加值		
	实际值/亿元	预测值/亿元	误差/%	实际值/个	预测值/个	误差/%	实际值/亿元	预测值/亿元	误差/%
2014 年	32.95	32.95	0.0	3931.56	3931.56	0.0	95.05	95.05	0.0
2015 年	35.54	35.95	1.2	4990.23	4992.37	0.1	98.83	97.43	-1.4
2016 年	36.27	35.96	-0.8	4660.02	5127.16	10.0	108.17	99.86	-7.7
2017 年	36.23	36.06	-0.5	5446.84	5141.01	-5.9	104.06	102.36	-1.6
2018 年	38.13	36.15	-5.2	5541.16	5142.40	-7.2	106.74	104.92	-1.7
年份	科技水平			居民人口			服务业增加值		
	实际值/分	预测值/分	误差/%	实际值/万人	预测值/万人	误差/%	实际值/亿元	预测值/亿元	误差/%
2014 年	550.40	550.4	0.0	71.17	71.17	0.0	52.59	52.59	0.0
2015 年	600.70	550.8	-8.3	71.50	71.52	0.1	60.27	54.84	-9.0
2016 年	594.46	551.2	-7.3	71.86	71.86	0.0	67.30	69.75	3.6
2017 年	579.82	551.6	-4.9	72.31	72.18	-0.2	73.96	71.80	-2.9
2018 年	530.03	552.0	-4.1	72.57	72.49	-0.1	83.97	78.10	-6.8

3.2 耦合发展分析

将耦合系统中各产业单位资源使用变化率、服务业单位比例、工业单位比例、科技投资比例、产业投资比例、环保投资比例等变量作为决策变量,设计相关情景方案,以此观察水源区耦合系统各指标的变化情况,具体方案及方案参数如表2所示。

a. 方案1为投资增强型。该类型是各级政府把控投资方向,从环保、科技、产业方面增加投资来提高科技水平和科技转化力,以期实现生态产业与环境耦合协调发展。其具体参数调整如下:科技投资比例、环保投资比例、产业投资比例分别提高到1.0%、3.0%、10.0%。模拟结果如图4所示,前期水源区产业经济水平与改变前相比没有明显的变化,但在后期显现出强劲的发展趋势,到2054年GDP增长了9%;相比于产业经济水平,水源区产业聚集度对科技水平和产业投资有快速的影响效应,其2040—2054年平均变化幅度为10%;水源区废弃物直排量和资源循环利用率未出现大幅度的变

动,与改变前相比,废弃物直排量减少了1.8%,资源循环利用率仅增加了0.49%。

b. 方案2为节约资源型。该类型在广泛宣传资源节约、高效利用的同时,实行分层分级目标管理,从而减少对自然资源的使用。减少资源使用量一方面可以通过做好水源区生态产业系统结构设计,实现系统中各个功能单元相互充分利用废弃物;另一方面可以降低单位资源使用量。但是如何做好水源区生态产业系统结构设计仅限于管理方法和理论研究的层面,很难定量评估其结构设计的优劣对资源使用量的影响,所以主要还是考虑降低单位产业资源使用量。假定通过加强区域内部及企业自身管理,将各产业、居民资源使用变化率减少3%,经模拟可知(图4),水源区GDP和生态产业聚集度的变化趋势与初始方案持平;2054年的水源区废弃物直排量水平为1.7t,与改变之前相比,废弃物直排量减少了48.5%;截至2054年,方案2的资源循环利用率比初始方案下降了5%,虽然资源循环利用

表2 水源区生态产业与环境耦合系统的决策变量及情景方案

方案	科技投资 比例/%	环保投资 比例/%	产业投资 比例/%	万元产值资源使用变化率/%				产业单位比例/%	
				农业	工业	服务	居民	工业	服务
初始方案	0.5	1.0	6.5	-1.0	-1.0	-1.0	-3.0	35	59
方案1	1.0	3.0	10.0	-1.0	-1.0	-1.0	-3.0	35	59
方案2	0.5	1.0	6.5	-4.0	-4.0	-4.0	-6.0	35	59
方案3	0.5	1.0	6.5	-1.0	-1.0	-1.0	-3.0	38	60
方案4	1.5	1.5	10.0	-2.0	-2.0	-2.0	-5.0	38	60

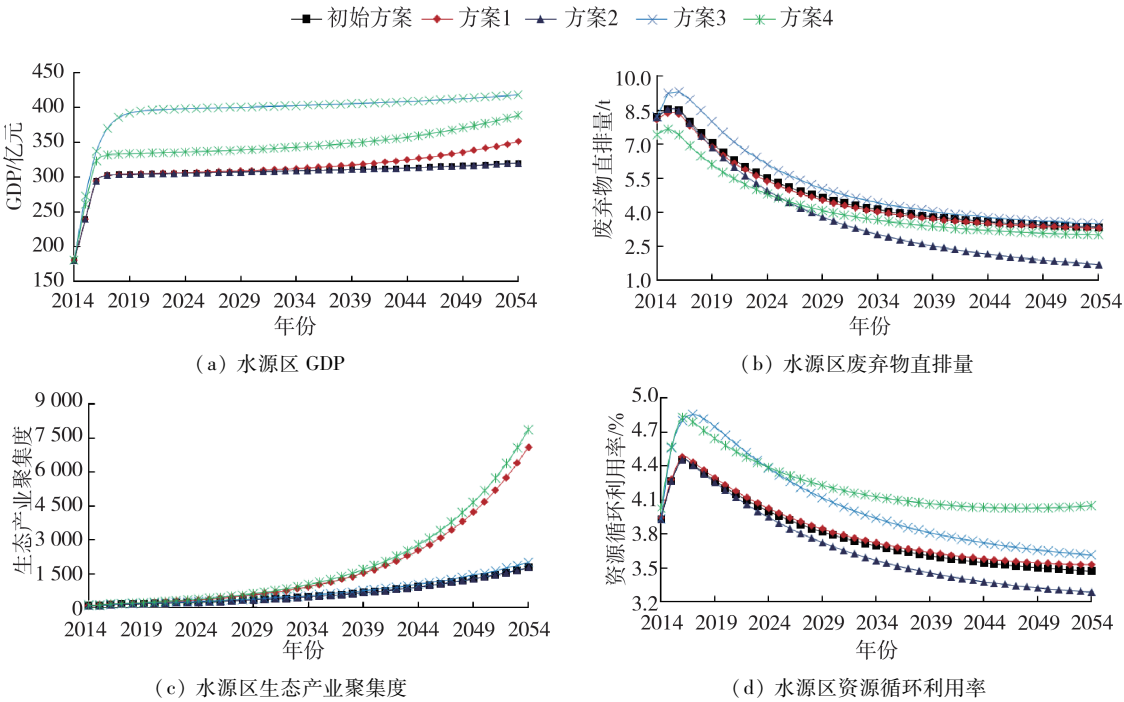


图4 不同方案模拟结果

Fig.4 Simulation results of different schemes

率下降了,但在资源使用总量大幅度下降的情况下,资源循环利用水平还有提高的空间。

c. 方案3为经济发展型。该类型通过适当调整产业结构,提高经济水平;同时在水源区强调产业的种类与合作形式的创新,以增强生态产业系统对环境的适应性。产业结构调整可以通过增加工业和服务业产业单位比例,假定工业比例提升3%、服务业比例增加1%。从调整后的模拟结果(图4)可以看出,GDP水平短时间内得到了显著提升,2014—2020年增长了30%,但2021—2054年的增长率只有5.6%;环境方面,2054年的废弃物直排量为3.5 t,比初始方案废弃物直排量增加了7%;废弃物循环利用能力有所提升,到2054年废弃物循环利用率提升了4%,但是与废弃物总量相比,废弃物循环利用能力有很大的提升空间。

d. 方案4为综合协调型。该类型是将以上3种方案进行整合,经模拟可知(图4),2030年的GDP为340亿元,与改变方案前相比,GDP增长了10%,且2031—2054年GDP每年以1%的速度增长,实现了水源区经济的稳定增长。2054年废弃物直排量减少了11%,资源循环利用率提高了16.7%,充分体现了产业与环境的可持续发展。此外,生态产业聚集度的变化趋势呈指数式增长,表现出对科技水平和产业投资的快速响应效应。

4 结论与建议

4.1 结论

a. 投资增强型方案中,经济增长和生态产业聚集度在长线投资后有较快的增长速度,整体上呈现指数增长,然而生态环境改善程度并没有表现出显著的趋势。不难看出,投资增强型的经济效益有明显的滞后。

b. 节约资源型方案中,水源区全面增强各单位节约、环保意识,减少对资源的使用,降低了水源区生态压力(废弃物直排量),提升了环境质量。由于此方案主要以节约资源和保护环境为主,其经济及产业发展停留在原有的发展阶段。

c. 经济发展型方案中,前期效果较好,短期内实现经济快速发展目标;但后期出现经济增长裹足不前的状况,同时伴随着经济停滞发展、生态水平和生态压力恶化趋势。可以看出,整个方案是以牺牲环境为代价。

d. 综合协调型方案中,总体效果最好,从经济发展角度看,在模拟时间内不存在经济发展停滞阶段,且发展趋势较稳;从产业活动对环境的影响来看,废弃物排放和循环利用成效都显著高于其他3

种方案,是满意的方案。

4.2 建议

a. 调整产业结构。针对拉动经济增长的工业和服务业,水源区适当提高工业和服务业比例。因此,秉承创新、生态、绿色理念,做好产业转轨导向是水源区产业的主要发展方向。

b. 加大投资力度。国家与水源区增加环保、科技、产业投资,提高科技水平和科技转化力。因此,实现产业技术革新及工艺流程改造,提高废弃物处理率、资源循环利用率是未来水源区产业政策的主要内容。

c. 增强节能环保意识。水源区政府强化宏观引导,大力增强全社会节约意识、环保意识。因此,减少对自然资源的直接使用是水源区生态与经济协调发展的主题。

d. 辅以科学管理方法。水源区可以通过组织管理职能做好生态产业系统结构设计,确定水源区产业系统所需的功能组成单元,确定产业系统中生产者、消费者和分解者角色的企业数量和相关企业单位,确保系统中间废弃物的充分利用。

从根本上说,要使水源区所有废弃物、资源得到充分利用,还必须通过控制管理职能确定废弃物供应和资源节约,以便后续处理和再利用。因此,如何通过控制管理职能让水源区耦合系统中各类信息量质同步,值得学界进一步探索和研究。

参考文献:

- [1] LESLIE H M, CHLÜTER M. Modeling responses of coupled social-ecological systems of the Gulf of California to anthropogenic and natural perturbations[J]. Ecological Research, 2009, 24(3): 505-519.
- [2] OLIVEIRA C, COELHO D, ANTUNES C H. Coupling input-output analysis with multiobjective linear programming models for the study of economy-energy-environment-social (E3S) trade-offs: a review[J]. Annals of Operations Research, 2016, 247(2): 471-502.
- [3] XU Jiuping, LI Xiaofei. Using system dynamics for simulation and optimization of one coal industry system under fuzzy environment[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(9): 11552-11559.
- [4] 侯兵,周晓倩. 长三角区文化产业与旅游产业融合态势测度与评价[J]. 经济地理, 2015, 35(11): 211-217. (HOU Bing, ZHOU Xiaoqian. Assessment and evaluation of integration of the culture industry and tourism industry in Yangtze River Delta[J]. Economic Geography, 2015, 35(11): 211-217. (in Chinese))
- [5] 邹伟进,李旭洋,王向东. 基于耦合理论的产业结构与生态环境协调性研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版)

- 学版),2015,16(2):88-95. (ZOU Weijin, LI Xuyang, WANG Xiangdong. Research on the coordination between industrial structure and ecological environment based on coupling theory [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition),2015,16(2):88-95. (in Chinese))
- [6] 吴青松,马军霞,左其亭,等.塔里木河流域水资源-经济社会-生态环境耦合系统和谐程度量化分析[J].水资源保护,2021,37(2):55-62. (WU Qingsong, MA Junxia, ZUO Qiting, et al. Quantitative analysis on harmony degree of water resources-economic society-ecological environment coupling system in the Tarim River Basin[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):55-62. (in Chinese))
- [7] 赵衡,闫旭,王富强,等.基于PSR模型的三门峡库区湿地生态系统健康评价[J].水资源保护,2020,36(4):21-25. (ZHAO Heng, YAN Xu, WANG Fuqiang, et al. Assessment on ecosystem health of Sanmenxia Reservoir wetland based on PSR model [J]. Water Resources Protection,2020,36(4):21-25. (in Chinese))
- [8] 崔晨韵,朱永华,吕海深,等.长兴县与水相关的生态环境承载力评价[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):406-412. (CUI Chenyun, ZHU Yonghua, LYU Haishen, et al. Water-related eco-environmental carrying capacity evaluation index system in Changxing County [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(5):406-412. (in Chinese))
- [9] 黄德春,苗艺锦.创新驱动下环境规制与长江经济带制造业转型关系研究[J].水利经济,2021,39(1):1-5. (HUANG Dechun, MIAO Yijin. Relationship between environmental regulation and transformation of manufacturing industry in Yangtze River Economic Belt under innovation-driven background [J]. Journal of Economics of Water Resources,2021,39(1):1-5. (in Chinese))
- [10] 周成,冯学钢,唐睿.区域经济-生态环境-旅游产业耦合协调发展分析与预测:以长江经济带沿线各省市为例[J].经济地理,2016,36(3):186-193. (ZHOU Cheng, FENG Xuegang, TANG Rui. Analysis and forecast of coupling coordination development among the regional economy-ecological environment-tourism industry: a case study of provinces along the Yangtze Economic Zone[J]. Economic Geography,2016,36(3):186-193. (in Chinese))
- [11] 季永兴,韩非非,施震余,等.长三角一体化示范区水生态环境治理思考[J].水资源保护,2021,37(1):103-109. (JI Yongxing, HAN Feifei, SHI Zhenyu, et al. Thinking on water eco-environment management in regional integration demonstration area of Yangtze River Delta[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):103-109. (in Chinese))
- [12] 张晶.基于系统动力学产业生态系统的研制因子的实证研究[J].中国科技论坛,2014(3):53-59. (ZHANG Jing. Empirical research on limiting factors of industrial ecosystem based on system dynamics [J]. Forum on Science and Technology in China,2014(3):53-59. (in Chinese))
- [13] 胡悦,刘群芳,陈国鹰.京津冀技术创新、产业结构与生态环境耦合研究[J].资源开发与市场,2018,34(9):1221-1228. (HU Yue, LIU Qunfang, CHEN Guoying. Research on coupling coordination of technological innovation, industrial structure and ecological environment in Beijing-Tianjin-Hebei area[J]. Resource Development & Market,2018,34(9):1221-1228. (in Chinese))
- [14] 孙小涛,周忠发,陈全.重点生态功能区人口-经济-生态环境耦合协调发展探讨:以贵州省沿河县为例[J].重庆师范大学学报(自然科学),2017,34(4):127-134. (SUN Xiaotao, ZHOU Zhongfa, CHEN Quan. Study on the coupling and coordination development of population-economic-ecological environment in key ecological function areas: a case of Yanhe County of Guizhou [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science),2017,34(4):127-134. (in Chinese))
- [15] 徐升华,吴丹.基于系统动力学的鄱阳湖生态产业集群“产业-生态-经济”系统模拟分析[J].资源科学,2016,38(5):871-887. (XU Shenhua, WU Dan. Analysis on the “industry-economy-resources” simulated system of Poyang Lake eco-industrial clusters based on systematic dynamics [J]. Resources Science,2016,38(5):871-887. (in Chinese))
- [16] 王慧亮,申言霞,李卓成,等.基于能值理论的黄河流域水资源生态经济系统可持续性评价[J].水资源保护,2020,36(6):12-17. (WANG Huiliang, SHEN Yanxia, LI Zhuocheng, et al. Sustainability assessment of water resources ecological-economic system in the Yellow River Basin based on emergy theory [J]. Water Resources Protection,2020,36(6):12-17. (in Chinese))
- [17] 李海燕,陈晓红.基于SD的城市化与生态环境耦合发展研究:以黑龙江省东部煤电化基地为例[J].生态经济,2014,30(12):109-115. (LI Haiyan, CHEN Xiaohong. Research on urbanization and ecological environment coupling development based on SD model: a case in eastern coal-electricity base of Heilongjiang Province [J]. Ecological Economy,2014,30(12):109-115. (in Chinese))
- [18] 刘承良,颜琪,罗静.武汉城市圈经济资源环境耦合的系统动力学模拟[J].地理研究,2013,32(5):857-869. (LIU Chengliang, YAN Qi, LUO Jing. System dynamics simulation on the coupling of economy resources environment system in Wuhan Metropolitan Region [J]. Geographical Research,2013,32(5):857-869. (in Chinese))

- [19] 杜梦娇,田贵良,吴茜,等. 基于系统动力学的江苏水资源系统安全仿真与控制[J]. 水资源保护,2016,32(4):67-73. (DU Mengjiao, TIAN Guiliang, WU Xi, et al. Simulation and control of water resources system security in Jiangsu Province based on system dynamics [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(4): 67-73. (in Chinese))
- [20] 郭永奇. 基于改进三维生态足迹的自然资本动态评估:以南水北调中线工程核心水源区为例[J]. 石河子大学学报,2020,38(3):331-339. (GUO Yongqi. Dynamic evaluation of natural capital using the three dimension ecological footprint model: taking core water source of middle route South-to-North Water Transfer Project as an example [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2020, 38(3): 331-339. (in Chinese))
- [21] 朱嘉伟,谢晓彤,李心慧. 生态环境承载力评价研究:以河南省为例[J]. 生态学报,2017,37(21):7039-7047. (ZHU Jiawei, XIE Xiaotong, LI Xinhui. A solution to the problem of ecological environmental carrying capacity evaluation: a case study of Henan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7039-7047. (in Chinese))
- [22] 金悦,陆兆华,檀菲菲,等. 典型资源型城市生态承载力评价:以唐山市为例[J]. 生态学报,2015,35(14):4852-4859. (JIN Yue, LU Zhaohua, TAN Feifei, et al. Assessment of ecological carrying capacity on the typical resources-based cities: a case study of Tangshan City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4852-4859. (in Chinese))
- [23] 刘远书,高文文,侯坤,等. 南水北调中线水源区生态环境变化分析研究[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(3):440-446. (LIU Yuanshu, GAO Wenwen, HOU Kun, et al. Analysis of ecological environment change on watershed of the middle route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(3): 440-446. (in Chinese))
- [24] 朱漫莉,高海鹰,徐力刚,等. 基于系统动力学方法的鄱阳湖流域水量平衡过程模拟与分析[J]. 水资源保护,2015,31(3):46-52. (ZHU Manli, GAO Haiying, XU Ligang, et al. Simulation and analysis of water balance process in Poyang Lake based on system dynamic approach [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3): 46-52. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-05 编辑:施业)

(上接第 184 页)

- [32] 张浩男,李广宁,韩延成,等. 齐口裂腹鱼幼鱼在竖缝式鱼道模型中的上溯行为研究[J]. 水利水电技术,2020,51(12):180-187. (ZHANG Haonan, LI Guangning, HAN Yancheng, et al. Study on migration behaviors of juvenile *Schizothorax prenanis* in a vertical slot fishway model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(12): 180-187. (in Chinese))
- [33] 李亭玉,王玉蓉,徐爽. 鱼类产卵场微生境异质性研究[J]. 水力发电学报,2016,35(1):56-62. (LI Tingyu, WANG Yurong, XU Shuang. Study on microhabitat heterogeneity of spawning ground [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(1): 56-62. (in Chinese))
- [34] 金纯,姜翠玲,吴为. 基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):8-14. (JIN Chun, JIANG Cuiling, WU Wei. Determination of ecological flow in upstream of Daduhe River based on hydraulic and hydrological methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2): 8-14. (in Chinese))
- [35] 侯昕玥,徐宗学,殷旭旺,等. 小清河济南段生态基流估算研究[J]. 中国农村水利水电,2018(8):127-131. (HOU Xinyue, XU Zongxue, YIN Xuwang, et al. An estimation of ecological base flow in the Jinan section of the Xiaoqing River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(8): 127-131. (in Chinese))
- [36] 刘满平. 水资源利用与水环境保护工程[M]. 北京:中国建材工业出版社,2005.
- [37] 张叶. 引水式小水电下游减脱水河段生态流量研究[D]. 保定:河北农业大学,2020.
- [38] PADMORE C L. Physical biotopes in representative river channels: identification, hydraulic characterization and application[D]. Newcastle: Newcastle University, 1997.
- [39] HOMA E S, VOGEL R M, SMITH M P, et al. An optimization approach for balancing human and ecological flow needs [M]. New York: Impacts of Global Climate Change, 2005: 1-12.
- [40] KOUTRAKIS E T, TRIANTAFILLIDIS S, SAPOUNIDIS A S, et al. Evaluation of ecological flows in highly regulated rivers using the mesohabitat approach: a case study on the Nestos River, N. Greece [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2019, 19(4): 598-609.
- [41] WANG L, CHEN Q, ZHANG J, et al. Incorporating fish habitat requirements of the complete life cycle into ecological flow regime estimation of rivers [J]. Ecohydrology, 2020(7): e2204.
- [42] 胡和平,刘登峰,田富强,等. 基于生态流量过程线的水库生态调度方法研究[J]. 水科学进展,2008(3):325-332. (HU Heping, LIU Dengfeng, TIAN Fuqiang, et al. A method of ecological reservoir reoperation based-on ecological flow regime [J]. Advances in Water Science, 2008(3): 325-332. (in Chinese))

(收稿日期:2021-09-25 编辑:王芳)