基于 SD 模型的湘江长沙综合枢纽库区水环境承载力优化研究

孙佳佳，帅　红，李荣荣，张明山

（湖南师范大学 资源与环境科学学院，长沙 410000）

摘要：保护和改善水环境已成为当前学界的重要研究课题。以湘江长沙综合枢纽库区为研究对象，采用系统动力学方法建立仿真模型，设计出现状延续、经济发展、资源节约、环境保护、综合发展 5 种方案，运用密切值法进行方案优选。结果表明综合发展方案为最优方案，可有效改善库区水环境。该研究结果为湘江长沙综合枢纽库区水环境保护和社会经济协调发展提供了科学依据。

关键词：水环境承载力；系统动力学模型；密切值法；湘江长沙综合枢纽库区

中图分类号：X524　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1671－1807(2020)03－0039－07

随着社会经济的快速发展，水环境日益恶化，此背景下关于水环境承载力的相关研究逐渐成为学界的研究热点。国际上对水环境承载力的研究，通常将其纳入区域规划、可持续发展理论、资源承载力等相关理论研究中，对其单项研究较少[1－2]。我国学者认为水环境承载力是由水资源子系统、水环境子系统、社会经济子系统等组成的复杂巨系统[3－4]，如何实现人类活动与水环境关系协调，识别地区水环境承载力是区域健康发展的需要[5－6]。“水环境承载力”通常指区域在一定的社会经济发展水平下，水环境能够持续支撑该地区人口、资源、环境的最大规模[7－9]，提出区域社会经济发展规模的阈值，具有动态性、极限性等特征[10]。水环境承载力的评价方法主要有指标体系评价法[11－15]、人工神经网络法[16－19]、系统动力学法[20－21]等。其中系统动力学方法（system dynamics，SD）是评价水环境承载力的较普遍方法，其优点在于能较好地反映各子系统之间以及子系统内部各要素之间的非线性反馈关系，并对多变量的复杂系统进行仿真模拟[22]。如叶龙浩[23]等采用 SD 模型建立了沁河流域水环境承载力动态仿真模型，寻找影响该流域水环境承载力的主要因素，并提出相应措施。莫淑红[24]等构建了深圳市水环境承载力系统仿真模型，设计了不同提高水环境承载力的方案，以此模拟不同方案下各子系统的承载上限。

湘江长沙综合枢纽的建设主要是解决长株潭季节性供水短缺问题，促进地区社会经济发展，但工程的实施对库区水环境也造成了一定负面影响。天然河道变成水库，水体流速减缓，各种污染物的自净能力随之降低。其中湘江长沙综合枢纽至株洲航电枢纽库区江段 COD 与氨氮的纳污能力分别减少 5 340 吨/年、301 吨/年，水环境容量减少；而株洲霞湾江段、长沙慕云江段、湘潭马家河江段现已无剩余环境容量。枯水期，湘江长沙综合枢纽库区通过联合调度调节水量，使 Hg、Cd、As 等沉降作用增强，加剧了库区底泥重金属污染风险。在众多人为因素的影响下，库区水环境日趋敏感，诸多生态问题逐渐凸显。科学评价和模拟优化湘江长沙综合枢纽库区水环境承载能力，掌握其动态变化趋势，对保障库区社会—经济—资源—环境可持续协调发展等具有重要意义。

1　研究区概况及数据来源

湘江长沙综合枢纽坝址位于湖南省长沙市望城区境内蔡家洲（图 1），库区水系主要包括湘江干流及渌水、涟水、涓水等 7 条支流，面积约 9.1 万 km^2，库容达 6.8 亿 m^3。该工程的建设成功实现蓄水、通桥、通航等目标，将长株潭三座城市连接起来，形成国内

收稿日期：2019－11－20

基金项目：国家自然科学基金项目（41501565）；湖南省教育厅科学研究青年项目（13B074）。

作者简介：孙佳佳（1993—），女，安徽合肥人，湖南师范大学资源与环境学院，硕士研究生，研究方向：城市与区域发展.

首个带状库区城市群。随着库区经济的加快发展，库区环境面临着较大威胁，水资源短缺、水环境恶化等问题已成为威胁湘江长沙综合枢纽库区可持续发展的关键因素。

本文数据主要来源于 2007－2017 年《湖南省统计年鉴》、《湖南省水资源公报》、《长沙市统计年鉴》、《株洲市统计年鉴》、《湘潭统计年鉴》、《长沙市环境质量状况公报》、《株洲市环境质量状况公报》、《湘潭市环境质量状况公报》、《长沙市水资源公报》、《株洲市水资源公报》、《湘潭市水资源公报》、《长株潭城市群区域规划(2008－2020)》等。

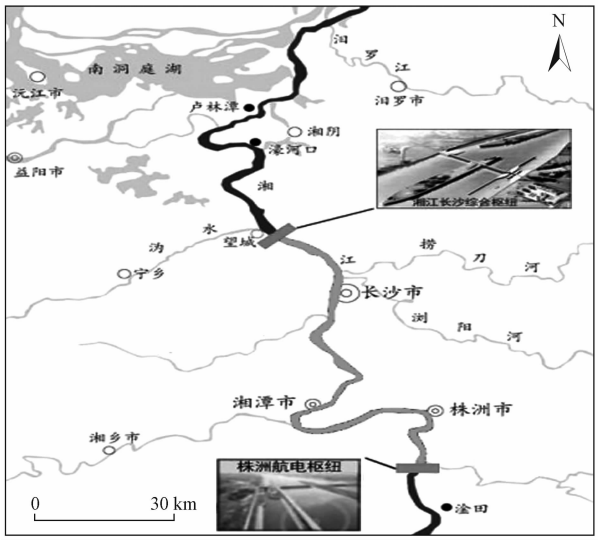

图 1　湘江长沙综合枢纽位置图

2　水环境承载力系统结构与基本反馈机制

受众多时空条件与因素制约，水环境承载力在现有技术条件下难以直接度量，因此，本文主要着眼于社会子系统、经济子系统、水环境子系统、水资源子系统的相互联系来研究湘江长沙综合枢纽库区水环境承载力。社会子系统、经济子系统是驱动水环境承载力变化的直接动力，而水资源子系统与水环境子系统是促进社会子系统、经济子系统可持续发展的基础，四者之间相互作用、协同共生。通过需水和污染物排放将各个子系统相联系，建立水环境承载力的主导结构模型(图 2)。该模型主要包括以下 5 条因果链：

(1)总人口→＋城乡生活需水量→＋总需水量→＋供需缺口→－总人口(负)

(2)总人口→＋生活污水排放量→＋污水总量→＋水体污染总量→＋水体环境压力→＋污染影响因素→－地区生产总值→＋水利投资→＋水资源供给→－供需缺口→＋缺水影响因素→－总人口(负)

(3)地区生产总值→＋产业投资→＋产业发展规模→＋产业需水量→＋总需水量→＋供需缺口→＋缺水影响因素→－产业发展规模(负)

(4)产业发展规模→＋地区生产总值→＋水利投资→＋水资源供给→－供需缺口缺水影响因素→＋产业发展规模(正)

(5)产业发展规模→＋工业废污水排放量→＋污水排放总量→＋水体污染总量→＋水体环境压力→＋污染影响因素→－产业发展规模(负)

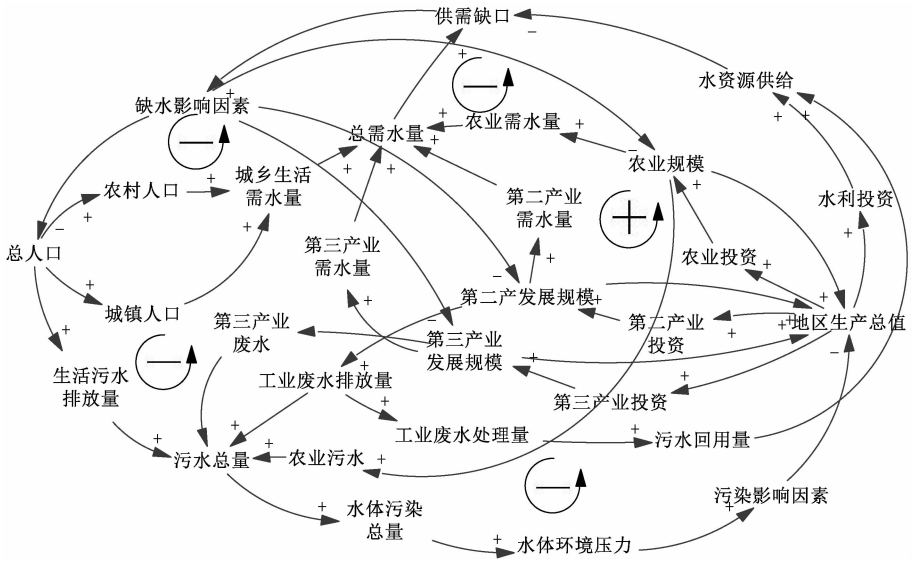

图 2　湘江长沙综合枢纽库区水环境承载力主导结构模型

因果链(1)(2)(3)(5)为负反馈回路，表示经济发展及人口增长对水资源的需求量大幅增加而引起的负反馈。随着地区产业规模的扩张及总人口的增加，地区 GDP 总量与需水总量不断提高，生产、生活废水

排放总量随之上升。在现有污水处理能力水平下，排入水体的污染物总量增加，水环境承载负担逐渐增大，从而削弱对地方经济与人口增长的支撑力度，也不利于水利工程设施的投资与开发。当水资源的消耗量超过水资源的供给能力，水环境质量日益变差时，水质性缺水、水量型缺水矛盾凸现，水资源供需缺口加大，最终反作用于人口增长与经济发展。

因果链(4)为正反馈回路，是由产业发展规模扩张所引起的正反馈链条。产业发展规模的扩张促进了地方生产总值大幅增加，在人们不断改善生活质量的要求下，进一步加大水利工程的投资，水资源供给能力相对提高，经济发展的制约因素减少，产业规模持续扩大，从而形成正反馈链条。

3 库区水环境承载力系统动力学模型的构建和方案设计

3.1 模型的构建与检验

本文将模型的空间边界定为湘江干流的长沙综合枢纽蔡家洲坝址至株洲航电枢纽河段，时间边界定为 2016－2030 年，其中 2006－2015 年为历史检验年。基于各子系统的关系分析，及 2007－2017 年湘江长沙综合枢纽库区的相关资料，利用系统动力学 Vensim-PLE 软件，建立库区水环境承载力系统仿真模型(图 3)。该模型由 21 个常数变量(C)、6 个速率变量(R)、6 个状态变量(L)、63 个辅助变量(A)和 22 个表函数(T)组成。

模型建立后采用历史检验法对其进行有效性检验。选取总人口及 GDP 总量为系统仿真模型的参考变量，并以 2006 年为基准年进行模型仿真。通过检验，2006－2015 年的仿真值与变量的历史值均在±5%的合理误差范围之内(表 1、表 2)，表明该模型与现实具有较高的一致性，故 SD 模型合理有效。

表 1 总人口历史检验结果

变量＼年份	2006	2008	2010	2012	2015
实际值(万人)	1 317.1	1 335.46	1 363.37	1 388.56	1 425.68
模拟值(万人)	1 317.1	1 338.49	1 357.29	1 366.81	1 405.52
误差(%)	0	0.23	－0.45	－1.57	－1.41

表 2 GDP 历史检验结果

变量＼年份	2006	2008	2010	2012	2015
实际值(亿元)	3 495.85	4 565.3	6 716.6	9 443.62	12 548.34
模拟值(亿元)	3 495.85	4 539.67	6 508.91	9 208.81	12 353.4
误差(%)	0	－0.561	－3.092	－2.486	－1.554

3.2 推荐方案优选的密切值法

通过系统动力学模型，可得到不同情境方案下的模拟结果。水环境承载力评价涉及指标较多，目前采用的多指标综合计算模型较为繁琐，且存在许多制约因素，因此本文选用密切值法对所设计方案进行优选。与传统优选方案相比，密切值法可进行多目标决策，从整体上衡量方案优劣，因此被广泛运用于环境质量评价等领域，也被视为评价水环境承载力的优选方法。通过密切值的计算和排序，可以得知各个方案的优劣程度。密切值越小，方案越优，反之，则越差。具体计算方法见参考文献[25]。

3.3 评价指标与决策变量的确定

根据所建的 SD 模型，本文以人口总量反映社会子系统的运行状况和及其对其他子系统的影响；以 GDP 总量反映经济发展对库区水环境承载力的影响；以库区需水量与供水量之间的关系来衡量库区的水资源状况；以 COD 入河量和 NH_3-N 入河量反映社会经济发展对库区有机污染程度。在典型指标确认的基础上，结合库区实际，形成变量选择。因此本文将总人口、GDP 总量、NH_3-N 入河量、COD 入河量、需水总量、供需压力等 6 个指标作为评价指标，选取一二三产业 GDP 增长率、农村人口及城镇居民生活用水量、万元工业 GDP 用水量、灌溉用水定额、工业及城镇生活污水处理率、工业污水直排 COD 浓度、中水回用率、城镇生活 COD 及 NH_3-N 人均产生量等 16 个变量为决策变量，运行 Vensim-PLE 软件，不断调整决策变量取值(表 3)。

3.4 调控方案的设计

通过运行 Vensim-PLE 软件，可得到 5 种关于湘江长沙综合枢纽库区水环境承载力方案。根据 5 种不同方案的决策变量赋值，利用 Vensim-PLE 软件进行仿真模拟，得到不同方案下评价指标值(表 4)。

方案一：现状延续型。即不实行任何措施，在各子系统的现行状态下，依据相应资料确定评价指标及决策变量值。

方案二：经济发展型。以经济发展为重点，不限制经济规模与发展速度。此方案即在方案一基础上，提高一二三产业增长速度，其余变量保持不变。

方案三：环境保护型。不断采取措施提高治污能力，减少污染物产生量和入河量。即以现状方案为基础，提高污水处理效率，降低 COD 和 NH_3-N 排污浓度。

方案四：资源节约型。倡导集约节约的经济发展方式和生活方式，不断提高工业节水效率、生活节水意识、农业节水技术。即适当降低工业万元 GDP 耗

水量，降低居民生活用水及灌溉用水定额。

方案五：综合发展型。经济发展坚持发展效率与生态保护并重。即综合考虑上述四种方案，不断提高污水处理效率，降低灌溉用水定额及生产生活用水量。

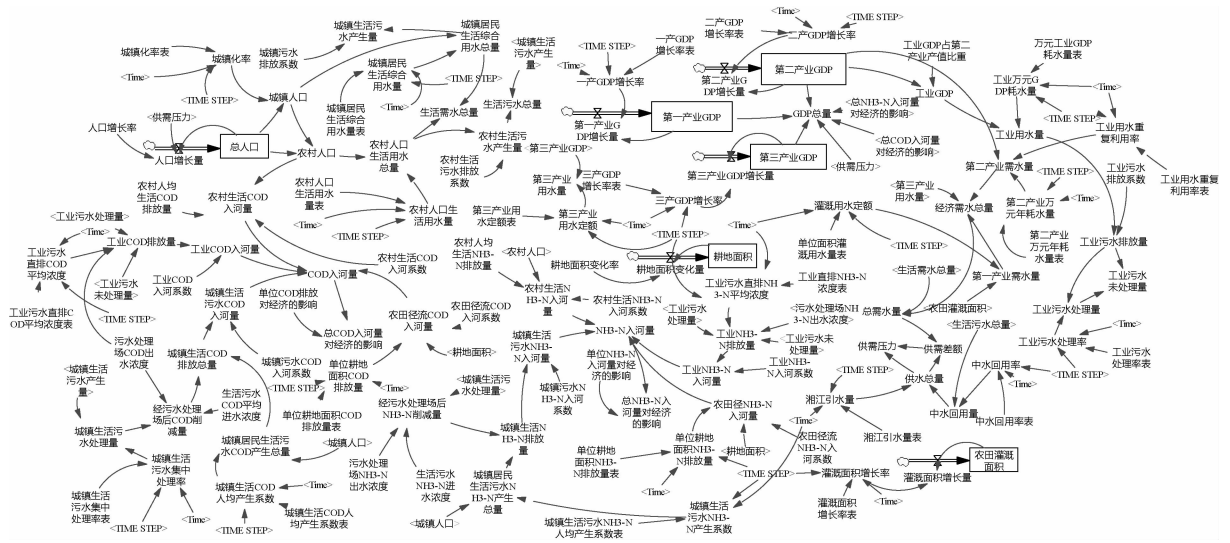

图 3　湘江长沙综合枢纽库区水环境承载力系统结构模型

3.5　调控方案优选

通过密切值法，对以上五种方案进行分析、比较，求得各方案下 2020 年、2030 年水资源承载力的密切值 C_i（表 5）。

表 3　调控方案变量设计

变量＼年份	2016	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4		方案 5	
	基期	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030
第一产业 GDP 增长率/ %	0.003 6	0.035	0.033	0.035	0.034	0.035	0.033	0.035	0.033	0.035	0.034
第二产业 GDP 增长率/ %	0.029	0.02	0.02	0.09	0.08	0.02	0.02	0.02	0.02	0.06	0.05
第三产业 GDP 增长率/ %	0.16	0.15	0.13	0.16	0.15	0.15	0.13	0.15	0.13	0.16	0.15
万元工业 GDP 耗水量/(m^3・万元$^{-1}$)	76	73	68	73	68	73	68	70	65	70	65
农村人口生活用水量/($\times10^4$ m^3・万元$^{-1}$)	60.23	54.75	51.10	54.75	51.10	54.75	51.10	52.93	50.37	52.93	50.37
城镇居民生活综合用水量/($\times10^4$ m^3・万元$^{-1}$)	80.85	80.30	76.65	80.30	76.65	80.30	76.65	79.57	75.92	79.57	75.92
灌溉用水定额/(m^3・公顷$^{-1}$)	5 625	5 580	5 550	5 580	5 550	5 580	5 550	5 550	5 400	5 550	5 475
城镇生活污水处理率/ %	75	80	90	80	90	82	92	80	90	82	92
工业污水处理率/ %	78	82	90	82	90	85	95	82	90	85	95
中水回用率/ %	32	35	40	35	40	35	40	36	41	36	41
城镇生活 COD 人均产生系数/($\times10^4$ kg・万元$^{-1}$)	15.69	14.60	10.95	14.60	10.95	13.87	10.22	14.60	10.95	13.88	10.22
城镇生活 NH_3-N 人均产生系数/($\times10^4$ kg・万元$^{-1}$)	3.03	2.99	2.92	2.99	2.92	2.99	2.85	2.99	2.92	2.99	2.85
工业污水直排 COD 浓度/(kg・m^{3-1})	0.16	0.14	0.12	0.14	0.12	0.12	0.1	0.5	0.5	0.12	0.12
工业污水直排 NH_3-N 浓度/(kg・m^{3-1})	0.04	0.035	0.03	0.035	0.03	0.033	0.028	0.03	0.03	0.028	0.028
单位耕地面积 COD 排放量/(kg・公顷$^{-1}$)	12.75	12	11.7	12	11.7	11.7	11.25	12	12	11.7	11.7
单位耕地面积 NH_3-N 排放量/(kg・公顷$^{-1}$)	3.9	3.825	3.75	3.825	3.75	3.795	3.72	3.75	3.75	3.69	3.69

表 4　各方案评价指标模拟结果

变量＼年份	基期	方案 1		方案 2		方案 3		方案 4		方案 5	
	2016	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030
总人口/万人	1 405.61	1 455.56	1 560.39	1 455.37	1 559.06	1 455.41	1 560.39	1 455.41	1 560.39	1 455.41	1 560.39
GDP 总量/亿元	12 353.4	18 651.4	48 758	22 264.4	60 069.3	18 644.7	48 749.1	18 652.8	48 749.4	20 645.8	58 751.5
COD 入河量/万 t	20.939	21.596	22.612	29.053	36.799	21.076	21.906	21.082	22.092	21.076	21.092
NH_3-N 入河量/万 t	2.595	2.865	3.678	3.681	7.476	2.797	3.389	2.912	3.553	2.842	3.38
需水总量/亿 m^3	88.094	93.219	97.8	115.845	189.354	93.172	98.901	92.917	97.553	92.871	98.553
供需压力/ dmnl	−0.066	0.004	0.08	0.372	1.095	0.101	0.087	0.101	0.079	0.100	0.085

表 5　各方案密切值结果

方案	2020 年	2030 年
现状延续型	1.253	4.218
经济发展型	18.138	56.575
环境保护型	1.200	3.983
资源节约型	1.246	4.033
综合发展型	0	0

4　结果分析

4.1　系统仿真模拟分析

由表 4 可知，现状延续型方案中，2030 年湘江长沙综合枢纽库区 COD、NH_3-N 入河量分别为 22.612 万吨、3.678 万吨，已超过水体可消纳能力范围。与 2016 年相比，水资源供需压力从 −0.066 提高至 0.08，水资源供给从稍有盈余到略显不足。此时库区环境恶化问题、水资源短缺等问题将逐渐影响到库区经济社会持续发展。鉴于湖南省建设“资源节约型、环境友好型”城市要求，该方案的支撑力度较弱，难以满足未来库区经济社会发展要求。合理开发利用水资源、提高治污技术、减少污染物排放成为解决库区问题的关键。

经济发展型方案中，库区一二三产业增长速度快于其他方案，2030 年模拟生产总值达 56 574.3 亿元，总人口达 1 559.06 万人。但生产总值及人口数量的增加促进了水资源需求总量提升，至 2020 年需水总量达 115.854 m^3，2030 年达 189.354 亿 m^3，与 2016 年相比，增幅分别为 31.50%、114.95%，水资源需求量增长速度较快，预计到 2030 年水资源供需压力将升至 1.095。此时水资源供给不足等问题将成为制约库区社会经济发展的瓶颈。与此同时，废水排放量也急剧增加。此方案下，社会发展因过度重视眼前经济效益，而忽视污染治理，在提高治污技术水平及资金投入方面力度薄弱，致使 NH_3- N、COD 入河量显著提升，至 2030 年入河量分别为 21.906 万吨、3.389 万吨，远超过库区水体可消纳范围。结果表明，此模式下库区水质性缺水、水量性缺水、水环境环境恶化等形势将更加严峻，库区社会经济可持续发展受到挑战。

环境保护型方案中，人们已逐渐认识到经济发展与资源环境的矛盾在不断激化，适当降低各产业增长速度，经济发展更加注重生态效益与环境保护。污染治理投资力度持续加大，治污水平不断提高，至 2020 年城镇生活污水处理率、工业污水处理率与中水回用率分别达 82%、85%、35%，2030 年三者将提升至 92%、95%、40%，提升幅度较大。工业污水直排中 COD、NH_3-N 浓度也随之降低，2016－2030 年期间 COD 浓度降低了 0.04 kg/m^3、NH_3-N 浓度降低了 0.012 kg/m^3。预计至 2030 年 COD 入河量、NH_3-N 入河量分别为 21.906 万吨、3.389 万吨，与方案一、二相比，污染物总量明显减少。此方案下，至 2030 年需水总量为 98.901 亿 m^3，仅比 2016 年增加 10.807 亿 m^3，水资源需求增长速度较慢。该仿真结果表明加大污染投资力度、提高治污技术对库区水环境保护效果明显，但经济发展受到较大限制。

资源节约型方案中，以资源节约为原则，提高节水技术、普及节水理念。2016－2030 年期间库区万元 GDP 耗水量降低了 11 m^3，农村与城镇居民每万人生活综合用水量分别降低了 98 600 m^3、49 300 m^3，中水回用率提升至 41%，农业灌溉用水定额降低至 5 400 m^3/公顷。万元 GDP 耗水量、农业灌溉用水定额及农村与城镇居民每万人生活综合用水量的下降，使得工业需水量、农业需水量及生活需水量大大减少，经济发展对水资源的需求量增加速度有所减缓。预计至 2030 年库区需水总量约为 92.871 亿 m^3，水资源供需压力为 0.079。此方案下水资源供需压力明显低于前三个方案，表明提高节水技术、普及节水理念等措施对缓解库区水资源短缺问题有较好效果。

综合发展型方案以“综合协调发展”原则，适当限制经济发展速度，更加注重生态环境保护与经济发展相协调。此方案下，至 2030 年库区 GDP 总量达 58 751.5亿元，仅次于经济发展型方案，COD 入河量、NH_3-N 入河量分别为 21.092 万吨、3.38 万吨，稍高于环境保护型方案，水资源供需压力为 0.085，稍次于资源保护型方案。该方案较全面的考虑了水资源节约、水污染治理、产业结构优化等措施，在满足工农业生产及社会发展对水资源需求的同时，也提升了库区水环境承载的经济发展能力。

利用密切值法进行方案优选，密切值结果越小，则方案越优，水环境承载力越大。由表 5 密切值结果可知，各方案的优劣顺序依次为：综合发展型＞环境保护型＞资源节约型＞现状延续型＞经济发展型，故综合发展型为最优方案，经济发展型方案为最劣方案。表明在生态保护前提下发展经济，水环境对社会经济发展的约束性最低，库区水环境承载力可有效提升。

4.2　最优调控方案下库区社会—经济—资源—环境协调发展趋势

1)水资源利用率上升，节水能力显著增强。2016－

2030年期间，GDP总量由12 353.4亿元增加至58 751.5亿元，需水总量由88.094亿 m^3 增加至98.553亿 m^3，GDP增加约4.76倍，而需水总量仅增加1.12倍。2030年万元GDP耗水量由76 m^3 降低至65 m^3，降幅约14.47%。表明经济发展更加集约，工业节水能力增强。农业灌溉用水定额由2016年的5 700 m^3/公顷降低至2030年的5 475 m^3/公顷，表明随着农田水利工程等的投资增加，农业灌溉用水效率有所提高。

2)废水处理能力不断增强，水环境质量日益改善。随着人们环保意识增强，科技投入及治污投资不断增加，2016－2030年间城镇居民生活污水处理率将由35%提高至92%，工业污水处理率由40%提高至95%，中水回用率由2016年的32%增加至41%。废水排放量日益减少，湘江长沙综合枢纽库区水环境将趋于良性发展。

3)水资源、水环境与社会经济更加协调，经济发展可持续能力不断增强。至2030年库区总人口数为1 560.39万人，保持较稳定增长；GDP总量达58 751.5亿元，与2016年相比，生产总值约增加3.76倍，人民生活更加富足；工业污水COD、NH_3-N浓度不断降低，单位耕地面积COD、NH_3-N排放量也显著减少，水资源供需压力约为0.085，供给压力总体较小。随着水利工程及环保投入的增加，水资源供需矛盾将逐渐减小，库区水环境质量日益改善，水环境承载力将不断提高。

5　结论与讨论

1)通过对湘江长沙综合枢纽库区水环境承载力系统结构进行分析，运用系统动力学方法构建SD模型，实现对库区水环境系统的仿真模拟。在Vensim-PLE软件中选取评价指标和决策变量，并设计出5种发展方案，利用密切值法选出最优方案，综合分析得出综合发展型方案最佳，该方案有利于实现湘江长沙综合枢纽库区水环境保护与社会经济协调发展。

2)根据系统仿真模拟结果，不同方案中水资源供给均表现为不足，且COD、NH_3-N入河量远超过水环境承载力，将对库区水环境安全造成巨大压力。因此，库区城市群需不断调整产业结构，淘汰落后高耗水工艺，大力发展电子信息、生物工程等新兴产业；积极优化供水结构，并配套相关基础设施，开辟备用水源，提高工农业用水效率及非常规水资源利用效率，缓解库区水资源短缺；继续加大投资，创新水污染治理技术，促进工农业污水处理率提高，并不断完善城市污水处理系统，严格控制库区水体污染物排放总量；加强重点河段水污染治理，继续重点支流与重点区域的污染治理，完善水污染防治体系，实现库区社会—经济—资源—环境的可持续协调发展。

3)系统动力学模型能较好地反映湘江长沙综合枢纽库区水环境系统状况，但在现有资料局限性、水环境承载力系统现实复杂性等多种原因影响下，所建的系统动力学模型不能完全拟合实际。在对水环境承载力系统分析过程中，仅注重各子系统之间的相互关系，子系统内部各要素之间的非线性反馈关系尚待进一步研究。此外，在设计水环境承载力的5种方案时，方案设计较为粗略，今后应在准确把握各子系统相互关系基础上，设计出更为合理的方案。

参考文献

[1] RIJSBERMAN M A, VEN F H M V D. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water systems[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2000, 20(3): 333－345.

[2] HARRIS J M, KENNEDY S. Carrying capacity in agriculture: global and regional issues[J]. Ecological Economics, 1999, 29(3): 443－461.

[3] 曾维华，薛英岚，贾紫牧. 水环境承载力评价技术方法体系建设与实证研究[J]. 环境保护，2017(24): 17－24.

[4] 王俭，李雪亮，李法云，等. 基于系统动力学的辽宁省水环境承载力模拟与预测[J]. 应用生态学报，2009，20(9): 2233－2240.

[5] 潘红卫，雷宏军，夏训峰，等. 基于过程模拟的东昌湖流域水环境承载力评估与预测[J]. 中国农学通报，2014，30(14): 235－241.

[6] 蓝希，刘小琼，郭炎，等. "长江经济带"战略背景下武汉城市水环境承载力综合评价[J]. 长江流域资源与环境，2018，27(7): 1433－1443.

[7] 崔凤军. 论环境质量与环境承载力[J]. 山东农业大学学报：自然科学版，1995(1): 71－77.

[8] 崔凤军. 城市水环境承载力及其实证研究[J]. 自然资源学报，1998(1): 58－62.

[9] 贾振邦，赵智杰，李继超，等. 本溪市水环境承载力及指标体系[J]. 环境保护科学，1995(3): 8－11.

[10] 解海静，胡艳霞，王亚芝，等. 密云水源地水环境承载力系统动力学模拟与预测[J]. 中国农学通报，2012，28(11): 247－252.

[11] 齐心，赵清. 北京市水环境承载力评价研究[J]. 生态经济：中文版，2016，32(2): 152－155.

[12] 刘圣，娄华君，贾绍凤，等. 内蒙古准格尔旗地下水环境承载力评价[J]. 南水北调与水利科技，2015，13(1): 45－50.

[13] 肖杰，郑国璋，郭鹏军，等. 基于主成分分析的关中—天水经济区水资源承载力评价[J]. 中国农业资源与区划，2018

(7):159－167.

[14] 梁静,吕晓燕,于鲁冀,等.基于环境容量的水环境承载力评价与预测——以郑州市为例[J].环境工程,2017(11):159－162,167.

[15] 张需琴,李景保,李忠武.三峡水库运行下荆南三口地区水环境承载力研究[J].水资源保护,2017(6):133－141,166.

[16] 李娜,范海梅,许鹏,等.BP 神经网络模型在象山港水环境承载力研究中的应用[J].上海海洋大学学报,2019,28(1):128－136.

[17] 贺辉辉,丁珏,程宇,等.安徽省淮河流域水环境承载力动态评价研究[J].环境科学与技术,2017(S2):280－287.

[18] 余金龙,尹亮,鲍广强,等.基于 BP 神经网络的腾格里湖水环境承载力研究[J].中国农村水利水电,2017(11):89－92,99.

[19] 杨丽花,佟连军.基于 BP 神经网络模型的松花江流域(吉林省段)水环境承载力研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(9):135－140.

[20] 崔丹,陈馨,曾维华.水环境承载力中长期预警研究——以昆明市为例[J].中国环境科学,2018(3):1174－1184.

[21] 朱银银,柴磊.基于系统动力学的某市水环境承载力动态变化研究[J].水利科技与经济,2010,16(9):1039－1041.

[22] 杨巧宁,孙希华,张婧,等.济南市水资源承载力系统动力学模拟研究[J].水利经济,2010,28(2):16－20.

[23] 叶龙浩,周丰,郭怀成,等.基于水环境承载力的沁河流域系统优化调控[J].地理研究,2013(6):1007－1016.

[24] 莫淑红,孙新新,沈冰,等.基于系统动力学的区域水环境动态承载力研究[J].西安理工大学学报,2007,23(3):251－256.

[25] 陈威,周铖.基于系统动力学仿真模拟评价武汉市水资源承载力[J].中国工程科学,2014,16(3):103－107.

Simulation and Optimization of Water Environmental Carrying Capacity of Multipurpose Hydraulic in Xiang River Based on SD Model

SUN Jia-jia, SHUAI Hong, LI Rong-rong, ZHANG Ming-shan

(College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410000, China)

Abstract: Protection and improvement of water environment has become an important subject. Taking Multipurpose Hydraulic in Xiang River as the research object, the system dynamics method is used to establish the simulation model. Five schemes are designed, including quo scheme, economic development scheme , environmental protection scheme, resource conservation scheme and comprehensive development scheme. Use osculation value method to optimize the schemes. The comprehensive development scheme is the best one, which can effectively improve the water environment in the Multipurpose Hydraulic in Xiang River . The study could provide a theoretical basis for coordinated development of water environment protection and the coordination of socio-economic development.

Key words: water environmental carrying capacity; system dynamics model; osculation value method; Multipurpose Hydraulic in Xiang River