

岩溶生态脆弱区水安全动态模拟及其演变机制

苏印¹, 官冬杰¹, 苏维词^{2,3}

(1. 重庆交通大学 建筑与城市规划学院, 重庆 400074;

2. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 400047; 3. 贵州科学院 山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001)

摘要: [目的] 揭示影响贵州省城市水安全的主要驱动因子, 为贵州省相关部门提供参考和科学依据。[方法] 基于系统动力学方法建立水安全系统模型, 仿真模拟贵州省水安全系统的贵阳模式、遵义模式、毕节模式和协调型模式 4 种不同模式下的水资源子系统、水环境子系统、水灾害子系统的发展演变规律。[结果] 农业灌溉用水定额、水土流失面积比、水质达标率和环境资本投资率是贵州省水安全系统的主要驱动因子; 在协调型模式下, 贵州省水安全系统在 2025 年以前处于最佳状态, 比其他 3 种模式优越。[结论] 在不同情景模式的模拟下, 只有在协调型模式下水资源子系统、水环境子系统、水灾害子系统处于最佳状态, 能够获得最大的经济效益和环境效益。

关键词: 水安全系统; 系统动力学; 情景参数; 贵州省

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2016)04-0009-07

中图分类号: P641.8

文献参数: 苏印, 官冬杰, 苏维词. 岩溶生态脆弱区水安全动态模拟及其演变机制[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 9-15. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.002

Development Simulation of Water Security and Its Evolvement Law in Karst Ecological Fragile Area

SU Yin¹, GUAN Dongjie¹, SU Weici^{2,3}

(1. School of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China; 3. Institute of Mountain Resources, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: [Objective] The impact factors of urban water security in Guizhou Province were studied to provide basis for policy-making of local government. [Methods] A water security system model for Guizhou Province, China was established using system dynamics(SD) method. In the model, data of water security system from 2005 to 2025 were used and four scenarios(Guiyang model, Zunyi model, Bijie model and concerted development model) were analyzed. [Results] The major driving factors of the water security system in Guizhou Province included the agricultural irrigation water quota, soil and water losses area, ratio up to the standard of water quality and the investment of environmental protection. The concerted development model is the best solution for water security system by 2025 in Guizhou Province for the four scenarios. [Conclusion] In terms of water resource, water environment and water disaster, the concerted development model was proved to be a profitable solution both in economy and environment.

Keywords: water security; system dynamics; scenario parameters; Guizhou Province

中国西南地区拥有世界上最典型的热带到亚热带岩溶景观, 尽管西南岩溶地区降水丰富, 但由于特殊的地质背景和环境特征, 导致水资源赋存和分布规

律十分复杂, 开发利用难度大, 工程性缺水严重^[1]。随着国家“西部大开发”战略的实施, 贵州省城市用水量和污水排放量急剧增加, 以水资源短缺和水污染严

收稿日期: 2015-08-28

修回日期: 2015-10-08

资助项目: 国家自然科学基金项目“三峡库区生态安全后续发展动态模拟及其可视化预警评价”(41201546); 国家十二五科技支撑计划项目(2012BAJ25B09); 重庆市自然科学基金项目(cstc2012jjA20010); 重庆市研究生科研创新项目(CYS14159)

第一作者: 苏印(1990—), 男(汉族), 山西省大同市人, 硕士研究生, 研究方向为喀斯特地区水资源利用与保护。E-mail: sy736291845@163.com。

通讯作者: 官冬杰(1980—), 女(汉族), 黑龙江省富锦市人, 博士, 教授, 主要从事生态环境监测和保护方面的研究。E-mail: guandongjie_2000@163.com。

重为特征的水危机已成为贵州省各大城市发展中突出的制约因素^[2],水安全问题威胁着我国西南岩溶地区社会经济环境的发展^[3]。国外学者从不同角度对水安全给予关注,如 Martijnvanden 等^[4]研究了英国的水安全;Godwin 等^[5]对水安全和水利用做了研究;Phillips^[6]对水管理的研究;Lucija^[7]研究了区域水安全和大气的关系;Bassi^[8]进行了区域水循环的研究;Martin^[9]研究了水安全对区域生态系统的影响;Yakimenko^[10-11]和 Shchedrin 等^[12]分别就水质和水安全的发展计划做了研究。以往的研究主要集中在对水资源问题^[13]或水环境问题^[14]的单一要素的评价上,并且忽略了水灾害产生的影响。本研究从系统论的角度出发,分别从水资源子系统、水环境子系统和水灾害子系统了解贵州省近几年水安全发展模式,找出水安全问题较为严重的区域,以及影响贵州省城市水安全的主要因素,提出切实可行的水安全保障措施,为决策者和管理者提供科学依据。

1 研究区概况

贵州省地处云贵高原东部,地势西高东低,平均海拔 1 100 m 左右。国土面积 $1.76 \times 10^5 \text{ km}^2$,其中山地占 61.7%,丘陵占 30.8%,山间坝子占 7.5%,是全国唯一没有平原支撑的内陆山区省份。该省岩溶分布广泛、发育强烈,岩溶出露面积 $1.1 \times 10^5 \text{ km}^2$,占该省国土面积的 62%。特殊的地形地貌,造成贵州石多土少,易受侵蚀,水土流失严重。省内河流以中部偏南的苗岭为分水岭,北部属长江流域,包括乌江水系、洞庭湖(沅江)水系、牛栏江和横江水系、赤水河和綦江水系;南部属珠江流域,包括南盘江水系、北盘江水系、红水河水系和都柳江水系,全省河流顺地势由西部、中部向北、东、南三面分流。

2 研究方法

系统动力学 SD(system dynamics)模型是建立在控制论、系统论和信息论基础上研究反馈系统结构、功能和动态行为的一类模型,其突出特点是能够反映复杂系统结构、功能与动态行为之间的相互作用关系,对复杂系统进行动态仿真试验,从而考察复杂系统在不同情景(不同参数或不同策略因素)下的变化行为和趋势,提供决策支持^[15]。本研究使用的建模软件是 Vensim,模型运行时间为 2005—2025 年,仿真步长为 1 a。主要的数据来源于《贵州统计年鉴(2005—2012 年)》《贵州省水资源公报(2005—2012 年)》《贵州省环境统计公报(2005—2012 年)》《城市居民生活用水量标准 GB/T50331-2002》。

2.1 模型结构

贵州省水安全模型作为一个动态、复杂的系统,涉及到的变量因子种类复杂多变,但尚能通过 5 个基本子系统来全面涵盖贵州水安全系统的全部内容,即水资源子系统、水环境子系统、水灾害子系统、人口子系统、经济子系统。

水资源子系统的主要研究内容是观察全省水资源量方面的变化,通过研究社会经济的发展对水资源量的改变,进而了解水资源承载力对全省社会经济发展的承载情况。水环境子系统主要研究贵州省水质方面的情况,预测未来贵州省水质变化情况,进而观察水环境承载力对全省社会经济发展的承载情况。水灾害子系统主要研究洪涝灾害对该省经济社会的影响,随着社会经济的发展,对水利设施的建设加大投入,增强了抵御水灾害的能力,减少经济损失,降低水灾害的风险。

人口子系统在水安全这个巨系统中占有重要地位,反映人口对贵州省岩溶地区水资源和水环境造成的压力,反映人口对生态环境破坏造成的水灾害影响,反映人口对社会经济发展的影响。经济子系统主要研究的是通过水资源、水环境和水灾害的不断输入,研究经济产出与各输入系统之间的关系。反映研究地区的经济发展水平,反映经济发展对研究区水资源水环境的影响。

2.2 模型有效性验证

水安全 SD 模型建立后,为确保其仿真结果和实际系统相符,模型应用前需要对模型有效性进行检验。SD 模型的检验方法一般分为 4 种:直观检验、运行检验、历史检验和灵敏度分析。其中直观检验和运行检验已在建模过程中实现,这里主要针对历史检验和灵敏度分析对模型进行有效性验证。

2.2.1 历史检验 对模型进行历史检验,将仿真计算出的总人口、GDP 与 2005—2010 年的实际值进行对比验证,发现仿真值和历史值误差均小于 10%(图 1),说明模型具有较高的可信度。

2.2.2 灵敏度分析 灵敏度分析是验证模型有效性的重要方法,一个稳定性好且有效的模型应具有较低的灵敏度。灵敏度分析是通过调节模型中的参数,来分析参数变化对模型变量输出结果产生的影响^[16]。本研究采用灵敏度模型对系统灵敏度进行分析,其公式为^[17]:

$$S_Q = \left| \frac{\Delta Q_{(t)} X_{(t)}}{Q_{(t)} \Delta X_{(t)}} \right| \quad (1)$$

式中: t ——时间; S_Q ——状态变量 Q 对参数 X 的灵敏度; $Q_{(t)}, X_{(t)}$ —— Q 和 X 在 t 时刻的值; $\Delta Q_{(t)}, \Delta X_{(t)}$ —— Q 和 X 在 t 时刻的增加量。

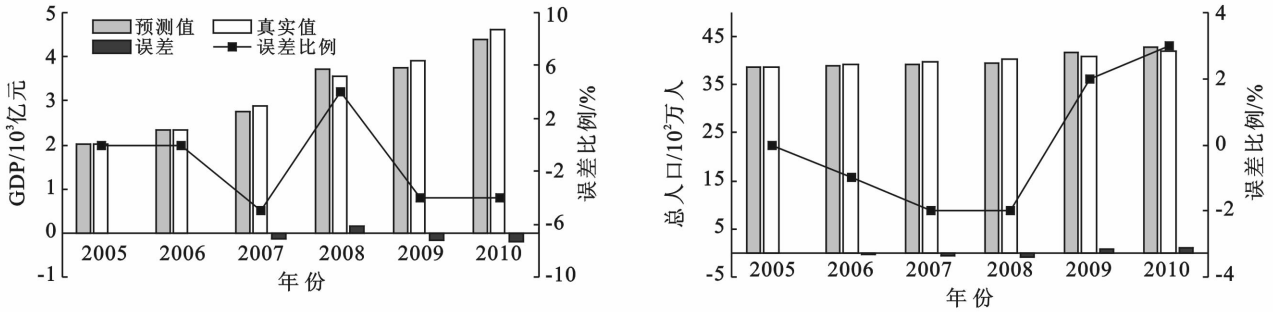


图 1 贵州省总人口、GDP 模拟误差统计

对于 n 个状态变量 (Q_1, Q_2, \dots, Q_n) , 任一参数 X 在时刻 t 的灵敏度平均值为:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{Q_i} \quad (2)$$

式中: n ——状态变量个数; S_{Q_i} —— Q_i 的灵敏度; S ——参数 X 对 n 个状态变量的平均灵敏度。

因水安全系统中涉及较多参数和变量, 只选取系统内较为关键的 6 个参数和 6 个变量根据其 2005—

2010 年数据进行分析。每次变化其中一个参数(增加 10%), 分析其对 6 个变量的影响。灵敏度分析结果详见表 1。

由表 1 可知, 只有工业废水排放达标率参数对系统的灵敏度达到 10%, 其余参数对系统灵敏度均低于 10%, 表明系统对参数的灵敏度较低, 稳定性较强。综合历史检验结果, 该模型可以用于贵州省水安全实际系统模拟。

表 1 贵州省水安全系统关键参数的灵敏度分析结果

变量	人口自然增长率	GDP 年增长率	工业废水排放达标率	环境资本投资率	生活污水处理率	水土流失面积比
污水治理量	0	0	0.659 7	0.000 8	0.285 3	7.56E-05
人口总数	0.006 4	0.006 4	0	0	0	0
GDP	0	0.014 5	3.64E-05	0.000 1	0	0.000 2
水资源需求量	0.000 9	0.041 0	0	0.000 1	0	0.006 5
污水产生量	0	0.079 9	0	4.79E-05	0	4.916 1E-05
水利投资比	0	0.143 2	0	0.502 3	0	9.74E-05
平均灵敏度 S	0.001 2	0.047 5	0.101 0	0.083 9	0.047 6	0.001 1

3 贵州省水安全系统模型分析

3.1 贵州省水安全系统调控参数的选择

通过分析制约因素, 确定模型主要影响因子, 对主要影响因子进行参数调节。分析比较不同影响因子变化对系统趋势影响的程度, 明确影响水安全系统特征的主要驱动因子。选择水安全系统的 14 个主要参数, 分别变化了 3%, 2%, 1%, -1%, -2%, -3%, 观察各个参数对水安全综合指数这一变量的影响, 从而根据灵敏度斜率确定影响贵州省水安全的主要驱动参数(表 2)。

经研究分析可知, 所有常数参数对 2025 年水安全综合指数的灵敏度都在合理范围之内(小于 10%), 模型行为模式并没因为参数的微小变动而出现异常变动, 因此模型是可信的, 而且表明模型可以应用政策实验室进行模拟分析。14 个常数参数中, 人口自然增长率、GDP 年增长率、农业灌溉用水定

额、林牧渔畜用水定额、城市人均生活配水额、城市化率、水土流失面积比、石漠化面积比 8 个参数的灵敏度斜率为正, 而水资源利用率、水质达标率、工业废水排放达标率、生活污水处理率、环境资本投资率、水利投资比 6 个参数的灵敏度斜率则为负。灵敏度斜率为正值说明参数值的增加将引起 2025 年水安全综合指数的上升, 灵敏度斜率为负值则相反。

水安全综合指数是驱动力指数、压力指数、状态指数、影响指数和响应指数的代数值的综合表现。综合指数为零, 表明水资源系统处于平衡状态, 综合指数大于零, 水资源变的不安全, 综合指数值越大, 则代表水资源状态越不安全; 综合指数小于零, 水资源是安全的, 综合指数值越小, 水资源状态就越安全。利用灵敏度斜率的正负特性, 提高灵敏度斜率为负的参数值, 或者降低灵敏度斜率为正的参数值, 可以降低水安全综合指数的目的, 使城市水安全综合状态越来越安全; 相反, 会使城市水安全综合状态越来越

不安全。这些参数对 2025 年水安全综合指数的影响程度大小(灵敏度斜率绝对值)依次为:农业灌溉用水定额>水土流失面积比>水质达标率>环境资本投资率>GDP 年增长率>水资源利用率、城市人均生活配水额、水利投资比、城市化率、林牧渔畜用水定、

工业废水排放达标率>生活污水处理率、石漠化面积比、人口自然增长率。灵敏度斜率绝对值越大,说明参数灵敏性越强。即改变灵敏度斜率绝对值大的参数,在参数改变相同比率前提下,比改变灵敏度斜率绝对值小的参数更容易达到影响目的。

表 2 各参数对贵州省 2025 年水安全综合指数的变化

参数	变化率						灵敏度斜率
	3%	2%	1%	-1%	-2%	-3%	
人口自然增长率	0.000 1	0.000 1	0.000 0	-0.000 0	-0.000 1	-0.000 1	0.002 9
GDP 年增长率	0.009 5	0.005 3	0.003 1	-0.003 1	-0.006 3	-0.009 4	0.313 7
农业灌溉用水定额	0.016 1	0.010 7	0.005 4	-0.005 4	-0.010 7	-0.016 1	0.536 2
林牧渔畜用水定额	0.001 1	0.000 7	0.000 4	-0.000 4	-0.000 7	-0.001 1	0.036 6
城市人均生活配水额	0.002 8	0.001 8	0.000 9	-0.000 9	-0.001 8	-0.002 8	0.092 1
城市化率	0.001 5	0.001 0	0.000 5	-0.000 6	-0.001 0	-0.001 5	0.049 6
水资源利用率	-0.003 0	-0.001 9	-0.001 0	0.001 0	0.001 9	0.002 9	-0.097 2
水质达标率	-0.014 0	-0.009 3	-0.004 7	0.004 7	0.009 3	0.014 0	-0.466 0
工业废水排放达标率	-0.001 0	-0.000 7	-0.000 3	0.000 3	0.000 7	0.001 0	-0.034 1
生活污水处理率	-0.000 7	-0.000 5	-0.000 2	0.000 2	0.000 5	0.000 7	-0.023 4
环境资本投资率	-0.010 2	-0.006 9	-0.003 5	0.003 5	0.007 1	0.010 8	-0.350 1
水利投资比	-0.003 0	-0.002 2	-0.001 4	0.000 1	0.000 9	0.001 7	-0.078 4
水土流失面积比	0.012 1	0.012 0	0.004 5	-0.005 1	-0.017 3	-0.017 6	0.495 0
石漠化面积比(中度)	0.000 6	0.000 4	0.000 2	-0.000 2	-0.000 4	-0.000 7	0.021 4

利用灵敏度正负特性以及灵敏度斜率绝对值大小特性,我们可以分析得出降低水安全综合指数,保障贵州省城市水安全的途径为:降低农业灌溉用水、人均生活配水,提高水土流失治理面积、水质达标率和环境资本投资率。

3.2 不同情景参数的设定

根据以上分析,收集相关资料,在计算机上用系统动力学专用模拟分析软件 VENSIM PLE 对贵州省“水安全”模型进行模拟运行,检验模型与实际情况的吻合程度,对存在的问题进行改进,在对历史数据的模拟结果和灵敏度检验达到误差允许的范围之内后,开始对贵州省“水安全”进行仿真模拟。本文在得到调控参数的基础上,设定了代表贵州省城市水安全发展的 3 种模式:贵阳模式、遵义模式、毕节模式,以及调试后的协调型模式,具体相关参数详见表 3。

表 3 贵州省不同水安全发展模式情景参数值

参数名称	发展模式			
	贵阳模式	遵义模式	毕节模式	协调型模式
农业灌溉用水定额/ 10^8 m^3	49.34	29.64	35.58	26.68
城市人均生活配水额/ m^3	62.78	32.65	46.00	29.39
水质达标率/%	87.5	81.0	69.2	96.3
环境资本投资率/%	6.5	4.0	2.5	7.2
水土流失面积比/%	32.6	41.7	58.9	29.3
工业废水排放达标率/%	97.2	89.5	80.6	99.1

3.3 贵州省水安全系统模拟特征分析

水资源缺口为水资源供应量与水资源需求量的差值,用来表征水安全系统下的水资源子系统的安全状况。从图 2 可以得知,贵阳模式从 2005—2017 年水资源缺口为负值,表示水资源供应量低于水资源需求量,水资源供应不足,缺口较小,但是水资源缺口从 2017 年开始持续增大,增大的速度越来越快,到 2025 年贵州省水资源缺口值将达到 $1.02 \times 10^{10} \text{ m}^3$;遵义和毕节模式 2005—2017 年水资源缺口为正值,表示水资源供应量高于需求量,水资源供应盈余,但是遵义模式从 2020 年开始变成负值,并逐渐增大;毕节模式从 2019 年开始出现负值并增大;协调型模式下,分别降低农业灌溉用水定额和城市人均配水额 10%,到 2025 年协调型模式水资源缺口比贵阳模式提高 30%,比遵义模式提高了 4%,比毕节模式提高了 15%,水资源缺口值是最底的,并且延缓了水资源缺口继续增大的这种趋势。

污水排放量表征水安全系统下水环境子系统的安全状况。从图 3 可以看出,从 2011 年开始,贵阳、遵义、毕节 3 种模式下的污水排放量都在逐渐增大,毕节模式下的污水排放量最多,污水排放量的增长速度也是最快,其次是遵义模式,然后是贵阳模式。到 2025 年贵阳模式下污水排放量为 $3.70 \times 10^8 \text{ t}$,遵义模式下是 $6.60 \times 10^8 \text{ t}$,毕节模式下是 $9.90 \times 10^8 \text{ t}$,在协调型模式下,提高了工业废水排放达标率 2%,排

量为 3.00×10^8 t, 协调型模式污水排放量比贵阳模式降低 18.9%, 比遵义模式降低了 54.5%, 比毕节模式降低了 69.7%, 污水排放量是最少的, 并且污水排放量的增长速度也是最慢的, 是环境友好型的发展模式。

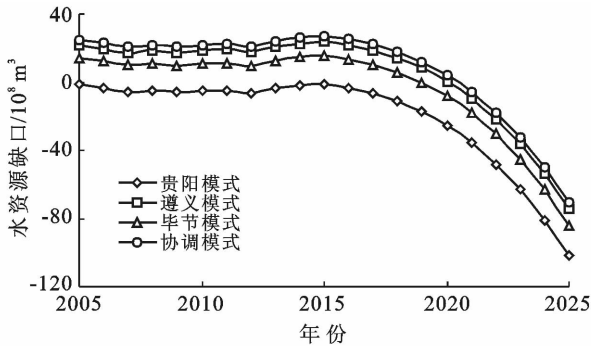


图2 贵州省不同模式水资源缺口的变化

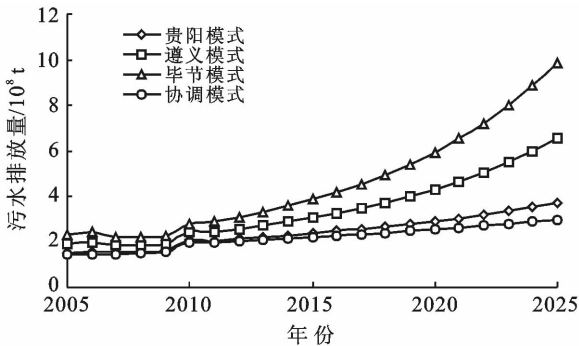


图3 贵州省不同模式污水排放量的变化

以贵州为中心, 涉及云南、川南、重庆、湖南、广西等省(市、区)部分县份的西南岩溶地区, 从2009年以来连续3 a均出现大旱, 造成上千万人口的饮水困难和大量耕地绝收, 严重影响当地居民的正常生活和生产。造成岩溶地区频繁大旱、人畜饮水困难的主要原因, 虽与近几年降水偏少、岩溶地区特殊的地质地貌有关, 但与过去很长一段时间在水利工程规划和资金投入上受重视不足有很大关系。水利建设投资用来表征水安全系统下的水灾害子系统的安全状况, 图4显示在2009年贵阳、遵义、毕节模式下的水利建设投资均较低。从2015年开始, 水利投资建设均加大了投资力度, 贵阳模式到2025年将达到150亿元, 遵义其次, 毕节模式增长最低。在协调型模式下, 分别提高环境资本投资率和降低水土流失面积比约10%, 到2025年相应的水利建设投资比贵阳模式提高了10%, 比遵义模式提高了78.7%, 比毕节模式提高了186.2%。

水安全综合指数代表了水安全系统的综合安全状态, 是水资源子系统、水环境子系统、水灾害子系统

的综合反映。图5显示, 贵阳模式下水资源是安全的, 到2018年综合指数开始大于零, 水资源状态出现不安全, 逐渐有向不安全发展的趋势; 遵义模式下水资源状态是不安全的, 水安全综合指数大于零, 经历了先上升后下降的趋势, 安全级别低于贵阳模式; 而毕节模式下的水资源不安全级别高于前两种模式, 从2005年开始水安全综合指数大于零并在不断升高。在协调型模式下, 分别降低农业灌溉用水、人均生活配水, 提高水土流失治理面积、水质达标率和环境资本投资率, 到2025年相应的水安全综合指数比贵阳模式降低了45.5%, 比遵义模式降低了50%, 比毕节模式降低了80.3%, 水安全综合指数是4种模式中最低的, 水安全系统安全级别是最高的。

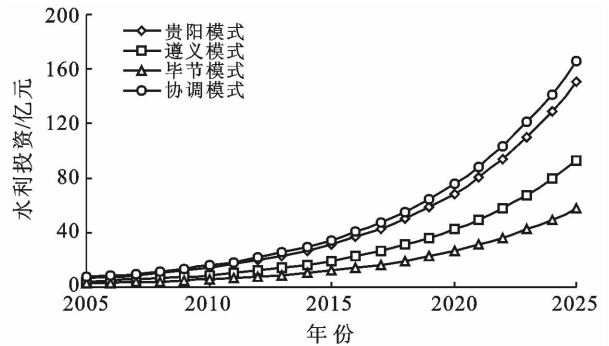


图4 贵州省不同模式水利建设投资的变化

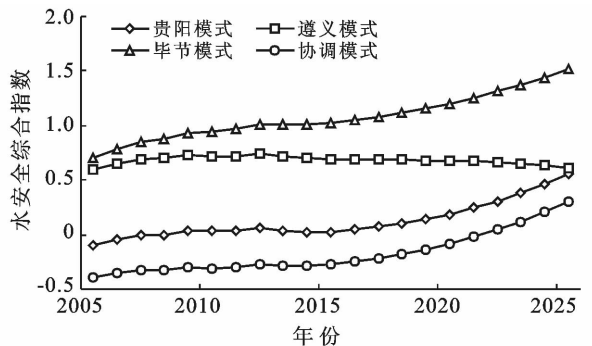


图5 贵州省不同模式水安全综合指数的变化

4 讨论

4.1 贵州省水安全演变机制分析

贵州省水安全系统演变驱动因子主要表现在两方面: 一是自然条件下的气候变化和岩溶脆弱的生态地貌约束。气候变化导致降水异常变化, 而夏季降水的增加, 也在一定程度上加大了该地区洪涝灾害发生的频率。有研究^[2]表明, 年降水微弱增加甚至减少时, 洪涝灾害发生的概率也加大; 贵州省在2025年前, 水资源缺口会保持持续增大这一演变趋势, 且从2019年开始各种模式下, 水资源缺口演变的速率在加快。主要由于贵州省以岩溶洼地为主体, 多年平均

降雨量在 900~1 300 mm,水资源丰富,人均水资源占有量为 2 829 m³,是全国人均的 1.26 倍,但岩溶洼地具有“山(地)高水低”、“雨多地漏”等特点。形成特殊的“岩溶干旱”现象,使湿润的贵州岩溶洼地成了典型的“缺水区”。二是人类用水活动,主要体现在水利建设、农业灌溉用水、生活配水和工业废水排放达标率。有研究指出,到 2020 年毕节城镇生活污水处理率和工业废水排放达标率将提高到 85%,废水排放量日趋减少,生态环境向着良性方向发展^[18]。同时人们对水灾害适应性对策研究不足,“山(地)高水低”是岩溶洼地的高原面与深切峡谷河流高差大,大都为 200~800 m,峡谷河流水流湍急,水量丰富,而需要供水的林耕地和村寨,大多分布在相对破碎的高原面上,兴建高扬程的提水泵站供水,投入大、经济效益差,投入远大于产出。水灾害的演变有一定的不确定性,但在水利设施的保障下,水灾害的发生将会减少。有研究^[19]表明,该地区洪旱灾害发生的频率增大将加剧区域水资源利用及生态环境保护的难度。

4.2 最优化模式选择

贵阳市地处黔中经济区核心圈,是西南地区的交通枢纽,是贵州省政治、经济与文化的中心,经济社会发展各项指标位居该省前列。经过贵州省水安全系统模拟分析,认为贵阳市水安全系统的重点布局为:以提高水资源子系统的安全级别为首要任务,兼顾水环境和水灾害子系统的投入,应合理规划取水工程,可进行跨区域调水来补充缺乏的水资源,应积极开发已查明的地下河和地下水测点,以增加地下库容及调蓄能力。这与《贵州省十二五水利规划》中关于贵阳市提出的“优先保障工业化、城镇化需水,加快节水型社会建设。”是一致的。

遵义市地处黔中经济区,属于国家提出规划的长江中上游综合开发区主要区域和成渝经济区重要辐射区,是中国西部重镇之一。经过贵州省水安全系统模拟分析,认为遵义市水安全系统的重点布局为:以提高水环境和水灾害子系统的安全级别为主,应加强水利设施的建设,增加水利投资经费,防洪抗旱,做好应对水灾害的措施。这与《贵州省十二五水利规划》中关于遵义市提出的“以大江大河支流和中小河流治理为重点,全面提高防洪减灾能力,大力实施坡耕地综合整治,尽快启动革命老区水土保持综合治理。”是相符的。

毕节市地处毕水兴经济带,是 1988 年 6 月国务院建立的“开发扶贫、生态建设”试验区,也是水利部水利重点扶持地区。经过贵州省水安全系统模拟分析,认为毕节市水安全系统的重点布局为:在水安全

系统的各个方面都要加强管理的措施,首先要合理调度水资源,同时改善生态环境和水环境,防止岩溶地区土壤石漠化,提高岩溶山区的旱涝灾害抵抗能力。这与《贵州省十二五水利规划》中关于毕节市提出的“保障工业化、城镇化需水;加大中小河流治理的力度,全面提高防洪减灾抗旱能力,以草海、冷水河雨帽山草本沼泽湿地生态保护为重点,结合水源地保护措施,积极开展湿地保护与建设。”相吻合。

协调型模式综合调控了水资源子系统、水环境子系统、水灾害子系统,是另外 3 种模式的最优组合。其他模式可参照协调型模式进行调控,以达到各种模式下的最佳水安全状态。

5 结论

(1) 影响贵州省水安全系统的主要驱动因子一是自然条件,二是人类的用水活动。

(2) 当前贵州省水安全的 3 种发展模式:贵阳模式、遵义模式、毕节模式在水安全系统的各个方面均存在不同程度的隐患,贵阳模式主要表现在水资源供需方面;遵义模式体现在水环境和水灾害方面;毕节模式在水资源、水环境和水灾害都表现出了危机。

(3) 基于贵州省水安全 4 种模式下的模拟分析,在协调型模式下,水资源子系统、水环境子系统、水灾害子系统都是最佳状态,在 2025 年以内水资源供给基本能够满足社会经济发展的需求,且能够获得最大的经济效益和环境效益。

[参 考 文 献]

- [1] 秦年秀,陈喜,薛显武. 气候变化对乌江流域水文水资源的影响[J]. 河海大学学报,2011,39(6):623-628.
- [2] 高彦春,刘昌明. 区域水资源系统仿真预测及优化决策研究:以汉中盆地平坝区为例[J]. 自然资源学报,1996,11(1):23-32.
- [3] 刘昌明,陈志凯. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001.
- [4] Martijnvanden H, Ellen M, Sander M. Water safety and spatial development: An institutional comparison between the United Kingdom and the Netherlands [J]. Land Use Policy, 2014,36(1):416-426.
- [5] Godwin S, Chen F, Stone R, et al. Microbiological Safety of water used for Irrigating Produce [J]. Journal of the American Dietetic Association, 2010, 110(9): 55-66.
- [6] Pamm P, Paul T. Water management in sport [J]. Sport Management Review, 2014,17(3):376-389.
- [7] Lucija Muehlenbachs, Mark A C, Todd G. The impact of water depth on safety and environmental performance

- in offshore oil and gas production[J]. *Energy Policy*, 2013,55(4):699-705.
- [8] Bassi F, Crivellini A, Dossena V. Investigation of flow phenomena in air-water safety relief valves by means of a discontinuous Galerkin solver[J]. *Computers & Fluids*, 2014,90(10):57-64.
- [9] Martin P, Andras H. Conservation concept for a river ecosystem impacted by flow abstraction in a large post mining area [J]. *Landscape and Planning*, 2000,51(2):165-176.
- [10] Yakimenko A N. Estimation of water quality of the Kiev reservoir by indices of radiation safety [J]. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 2013,35(4):189-193.
- [11] Jishi Zhang, Yongqiu Zhang, Ruifeng Pu, et al. Safety analysis of water resources and eco-environment in Shiyang River Basin[J]. *Chinese Geographical Science*, 2005,15(3):238-244.
- [12] Shchedrin V N, Kosichenko Y M. Safety problems of water-development works designed for land reclamation [J]. *Power Technology and Engineering*, 2011,45(4):264-269.
- [13] 熊鹰,李静芝,蒋丁玲. 基于仿真模拟的长株潭城市群水资源供需系统决策优化[J]. *地理学报*, 2013,68(9):1225-1239.
- [14] Tian HAO, Pengfei Du, Yun Gao. Water environment security indicator system for urban water management [J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineering in China*, 2012,6(5):678-691.
- [15] 曹琦,陈兴鹏,师满江. 基于 DPSIR 概念的城市水资源安全评价及调控[J]. *资源科学*, 2012,34(8):1591-1599.
- [16] 陈雪,刘光有. 系统动力学在阿什河流域水污染控制规划中的应用[J]. *环境科学与管理*, 2010,35(5):73-76.
- [17] 郭怀成. 洛阳城市水污染控制系统研究[J]. *地理学报*, 1988,43(4):318-328.
- [18] 何仁伟,刘邵权,刘运伟. 基于系统动力学的中国西南岩溶区的水资源承载力:以贵州省毕节地区为例[J]. *地理科学*, 2011,31(11):1376-1382.
- [19] 黄晓亚,陈喜,张志才,等. 西南岩溶地区降雨集中度及其变化特征分析:以乌江流域中上游为例[J]. *地球与环境*, 2013,41(3):203-208.

(上接第8页)

- [6] 阿斯耶姆·图尔迪,阿里木江·卡斯木. 基于多源遥感数据的奎屯市城市扩展分析[J]. *水土保持研究*, 2013,20(2):233-237.
- [7] 李松,罗绪强. 基于 RS 的多数据源的 700 多年来贵阳市城市扩展时空特征研究[J]. *自然资源学报*, 2014,29(10):1734-1745.
- [8] 何丹,蔡建明,周璟. 天津城市用地时空扩展研究[J]. *水土保持通报*, 2009,29(3):56-60.
- [9] 杨存建,张果,陈军,等. 基于遥感的成都市及其周边城镇的扩展[J]. *地理研究*, 2008,27(1):100-108.
- [10] 李飞雪,李满春,刘永学,等. 建国以来南京城市扩展研究[J]. *自然资源学报*, 2007,22(4):524-535.
- [11] 贺振,赵文亮,贺俊平. 郑州市城市扩张遥感动态监测及驱动力分析[J]. *地理研究*, 2011,30(12):2272-2280.
- [12] 陈本清,徐涵秋. 城市扩展及其驱动力遥感分析:以厦门市为例[J]. *经济地理*, 2005,25(1):79-83.
- [13] Chen Jianfei, Chang Kangtsung, David K. Comparing urban land expansion and its driving factors in Shenzhen and Dongguan, China [J]. *Habitat International*, 2014,43(3):61-71.
- [14] 孙善磊,周锁铨,魏国铨,等. 环杭州湾地区城市扩张的遥感动态监测[J]. *自然资源学报*, 2008,23(2):327-335.
- [15] 廖从健,黄敬峰. 中国东中西部城市扩展遥感监测、驱动因素及效应比较研究[D]. 浙江 杭州:浙江大学, 2013.
- [16] 申元村,汪久文,伍光和,等. 中国绿洲[M]. 河南 开封:河南大学出版社,2000.
- [17] 王厚军,李小玉,张祖陆. 1979—2006 年沈阳市城市空间扩展过程分析[J]. *应用生态学报*, 2008,19(12):2673-2679.
- [18] 徐涵秋. 近 30 年来福州盆地中心的城市扩展进程[J]. *地理科学*, 2011,31(3):351-357.
- [19] 许学强,周一星,宁越敏. 城市地理学[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [20] Li Lin, Yoheis, Zhu Haihong. Simulating spatial urban expansion based on a physical process [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2003,64(1/2):67-76.
- [21] 谈明洪,李秀彬,吕昌和. 我国城市用地扩张的驱动力分析[J]. *经济地理*, 2003,23(5):635-639.