

昆明市水资源承载力系统动力学模拟

杨子江 韩伟超 杨恩秀¹

(云南大学 建筑与规划学院, 云南 昆明 650504)

【摘要】: 针对昆明市水资源短缺的现状和水资源系统所具有的复杂系统特征,在综合考虑水资源需求、水资源供给、污水再生利用、外地供水、缺水程度的影响等因素的情况下,利用系统动力学(SD)方法建立了昆明市水资源承载力 SD 模型,在现状延续型、经济发展型、资源节约型、环境友好型和协调发展型 5 种方案下模拟 2015~2030 年昆明市水资源承载能力的动态变化,寻求提高昆明市水资源承载力的途径。结果表明:现状延续型用水模式出现十分严重的水资源匮乏问题,水资源承载能力很容易达到极限承载值,不能实现昆明市资源环境与社会经济的可持续发展;经济发展型模式虽然提高了经济水平,但是加剧了生态环境污染和缺水问题,供需比低至 0.25;采用资源节约型或环境友好型模式,虽然可以适当缓解生态环境污染及缺水问题,但是随着时间的推移,缺水现象依然严峻;而在建设资源节约型或环境友好型社会的前提下,适当减缓城市发展规模增速,实施水资源集约利用、污水处理再生和加强外地供水的协调发展型方案可以实现昆明市水资源的供需平衡,资源环境与社会经济可持续发展,为 5 种方案中的最优方案。

【关键词】: 水资源 承载力 系统动力学 模拟 预测

【中图分类号】:F **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004-8227(2019)03-0594-09

随着城市快速发展,人口增多,水资源的需求持续增大,缺水问题成为了当前实现社会经济可持续发展的制约因素。尤其是生态系统脆弱性较小,喀斯特石漠化环境问题严重的中国西南地区,以贵州、云南、广西三大省份为代表,岩溶石漠化问题造成了严重的土壤侵蚀,带来了大面积的水土流失,水资源问题尤其严重。由于岩溶石漠化影响加剧造成的生态恶化,给西南地区群众生产生活带来了极大的影响,难以保证基本的生存生活条件,水资源利用缺口严重,严重制约着该地区的社会经济发展。昆明市处于西南岩溶石漠化地区,水土流失和水环境污染问题严重,多年的人均水资源量低于全国水平,同时昆明市作为我国重要的旅游城市和面向南亚、东南亚开放的重要中心城市,城市水资源需求量巨大。所以,从昆明市社会经济发展的角度来看,合理评估本地水资源承载力,实现水资源供需平衡显得十分重要。

随着承载力研究领域的拓展和在实际中的广泛应用,土地承载力、环境承载力、资源承载力、生态承载力的概念相继被提出。由于水资源短缺和污染日益严重,我国学者在 20 世纪 80 年代末提出水资源承载力概念,随后很多学者开始进行深入研究。在我国最初对水资源承载力的研究是在可持续发展理论的基础上开展的。刘强等^[1]对水资源承载力的可持续性进行了定义,并从可持续发展的角度对水资源承载力量化进行了探讨。孙兆敏等^[2]通过分析西北地区的水资源利用现状及其水资源承载能力,研究了西北地区水资源承载力增进与可持续利用的关系。近年对水资源承载力的研究主要集中在区域应用及模型建立。区域应用主要包括对区域水资源量开发利用状况,供需平衡与生态环境、社会 and 产业结构之间的协调度研究以及区域水资源承载能力与人口、产业发展需求之间的动态平衡关系等^[3-5]。模型建立方面也有大量学者进行研究,如程增辉等^[6]基于水足迹模型,通过构建 4 个水资源指标对新疆的水资源承载力水平进行评价。崔东文等^[7]通过 WDO-PP 模型对文山州多年的水资源承载力进行研究,对未来的水资源承载力变化趋势进行预测和评价。水资源承载力研究涉及到一个复杂的大系统,包括水资源系统、社会经济系统和环境系统,

¹作者简介: 杨子江(1975-),男,博士,副教授,研究方向为生态城镇与资源环境承载力. E-mail: Kmzjy@126.com

基金项目: 第四批云南大学中青年骨干教师培养计划项目(XT412003)。

目前的研究区域大致涵盖了流域、地区、城市 3 个不同的空间尺度^[8~12]。城市水资源承载力研究起步虽然较晚,基础理论和量化方法的研究等仍处于不断探索之中,但今后的研究发展将集中在对城市水资源承载能力各个因素及各因素间相互关系的研究。常用的研究方法主要有背景分析法^[13]、常规趋势法^[14]、模糊综合评价法^[15~16]、主成分分析法^[17]、系统动力学方法^[18~19]以及多目标决策方法^[20],即对多个相互矛盾的目标进行科学、合理的选优。其中,系统动力学可以动态研究对象的变化过程,不受线性约束,不追求最优解,相反,试图在现实存在的前提下,通过不断地调整模型的参数及结构从而对系统行为进行修改和完善^[21]。所以,本研究运用 SD 方法构建数学模型,在现状延续型、经济发展型、资源节约型、环境友好型和协调发展型 5 种方案下模拟 2015~2030 年昆明市水资源承载能力的动态变化,通过模拟今后昆明市水资源承载力的变化趋势,对比找出提升昆明市水资源承载力的最优方案,并最终指导昆明市的水资源优化配置,以解决城市水资源匮乏问题,从而实现社会经济可持续发展。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

昆明是连接我国与南亚、东南亚国家的重要枢纽城市,是中国首批历史文化名城之一,全国旅游热点城市和重要的商贸城市,西南地区的交通枢纽和重要中心城市。昆明市位于云南高原中部地区,是省内面积最大的滇中盆地,总体地势北高南低,以湖盆岩溶,高原丘陵地貌为主。至 2014 年末,昆明市总人口为 662.6 万人,城市人口为 457.5 万人。全市的水资源总量为 49.64 亿 m³,占全省水资源量的 2.8%。昆明市人均水资源量为 1250m³,低于云南省和全国的人均水资源占有量。同时,为满足区域内生产生活用水的需要,昆明市采取了大量水资源开发利用的相关措施,导致水资源开发利用程度已经达到 30%。近年来,农业、工业、生活、第三产业用水矛盾也日益突出。目前,昆明市面临的水资源短缺状况极其严峻,且再开发利用潜力小,水资源短缺已成为制约昆明市人口产业发展的主要因素。

1.2 数据来源

社会经济数据来源于 2015 年的《昆明市统计年鉴》、2014 年的《昆明市国民经济和社会发展统计公报》;水资源统计数据来源于《2014 年云南水资源公报》、2015 年《云南省统计年鉴》;城市生活用水定额参照《云南省地方标准用水定额 2013》;环保数据来源于《第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册 2008》、《全国水环境容量核定技术指南 2003》、《地表水环境质量标准》(GB3838~2002)、《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB18596~2001)等。

1.3 研究方法

1.3.1 系统动力学原理

系统动力学是美国 J. W. Forrester 教授于 1956 年研究和创立的,被应用于解决各种复杂的系统性问题。系统动力学基于系统论,通过计算机模拟方式,分析和研究信息反馈系统,从而解决复杂系统问题的综合性学科。系统动力学是通过以定性定量相结合的方法来研究如何全面有效解决人口、产业、资源环境这类复杂系统问题的方法^[22]。当前,系统动力学在国内的研究已十分成熟,涉及区域与城市可持续发展、城市规划、水资源规划、环境经济、生态经济规划、城市水环境和社会经济管理等方面^[23~26]。

SD 模型实质上是具有时滞的一阶微分方程组^[7]。一般用欧拉法数值积分来表示流率方程,形式为:

$$L.K = L.J + DT(IR.JK - OR.JK) \quad (1)$$

式中:L.K、L.J 为流位向量;IR.JK、OR.JK 为流率向量;K 为现在时刻;J 为过去时刻;JK 为时刻 J 到时刻 K 的时间间隔;DT 为

计算间隔。式(1)可变形为：

$$\frac{L.K-L.J}{DT}=IR.JK-OR.JK \tag{2}$$

通过计算机模拟方法研究系统模型的变化过程, 进一步预测模型随时间的变化趋势。

1.3.2 系统动力学模型构建

在应用系统动力学模型研究水资源承载力时, 首先要进行系统分析, 关键是要明确系统问题和研究目的, 并大致划定系统的界限, 从而在有效的系统结构基础上进行反馈结构的分析和变量的定义, 确定系统的信息反馈机制, 再对系统的各要素进行量化分析, 由此建立系统方程和SD模型, 并对模型进行模拟试验, 不断修改和完善模型^[12]。

昆明市系统动力学模型共涉及了110个方程, 11对状态变量、速率变量以及13个表函数。模型涉及的方程数量较多, 由于篇幅受限, 不具体列出。通过多元统计回归法、线性插值、表函数等方法对昆明市的历史统计资料进行计算得出方程中所涉及的相关参数。模型中的主要变量初始值见表1。

表1 主要变量初始值

变量	初始值
总人口(万人)	662.6
人口综合增长率(%)	7.1
城镇化率(%)	69
有效灌溉面积(万hm ²)	45.48
综合灌溉用水定额(m ³ /hm ²)	5955
羊数量(万只)	145.1
猪数量(万头)	266.77
牛数量(万头)	61.11
家禽数量(万只)	19211.8
万元工业增加值用水量(m ³)	63
外地调水量(亿m ³)	10.12
城市污水处理率(%)	94.1
第三产业产值(亿元)	1992.9
新增建筑竣工面积(hm ²)	3492.08

工业产值(亿元)	1150.36
渔业养殖面积(万 hm ²)	0.72
城镇 COD 削减量(万 t)	11.03
第三产业增长率(%)	8.1
第三产业万元产值取水量(m ³)	3.9
人均绿地面积(m ²)	9.35
工业用水重复利用率(%)	91
工业增长率(%)	6.9
城镇 COD 削减增长率(%)	2
污水再生利用率(%)	61.8

2 结果与分析

2.1 昆明市水资源承载力系统模型构建

基于相关水资源承载力研究成果,本研究兼顾了城市水资源的需求状况和供给能力、污水再生利用、城市化率、境外调水以及城市水资源短缺情况等因素,利用软件 Vensim 构建了昆明市水资源承载力模型。首先,以昆明市的行政界限作为该水资源承载力模型的边界,将 2014 年作为基准年,构建了 6 大子系统,包括居民生活用水、农业用水、城市公共及工业用水、生态环境用水、水资源、灰水足迹,以此来研究系统模型与其子系统之间相互作用模式,模型流程见图 1。SD 模型中主要变量包括状态变量和速率变量。状态变量为工业产值、第三产业产值、总人口、新增建筑竣工面积、有效灌溉面积、畜禽数量、城镇 COD 削减量、渔业养殖面积等,各个状态变量与相应速率变量对应。

(1) 居民生活用水子系统。

城市的总人口,城镇及乡村人口是该系统的 3 个主要变量。城市的总人口将会受到人口增长速率的影响,城镇人口将随着城市化率的变化而变化,城镇以及乡村人口的变化会引起生活用水量的改变,进而影响需水总量。

(2) 农业用水子系统。

农业用水子系统由农田灌溉、畜牧、渔业 3 部分组成,状态变量是有效灌溉面积、猪、牛、羊数量及渔业养殖面积,它们的变化直接关系到农田灌溉用水量、畜牧业用水量与渔业用水量,进而关系到农业用水量和需水总量。

(3) 城市公共和工业用水子系统。

城市公共用水包括建筑业用水和第三产业用水两部分,建筑业用水变化主要考虑新增建筑竣工面积,而第三产业用水变化主要考虑第三产业产值及第三产业万元产值取水量;工业用水同时考虑了工业增加值的用水量、万元工业增加值的用水量以及工业用水重复利用率的影响。

(4) 生态环境用水子系统。

生态环境用水可作为为了维持良好的城市生态环境并对其有所改善所需的水资源总量,主要包括城市绿地用水量、城市河湖生态用水量与城市环境卫生用水量。城市绿地用水主要受城市绿地面积的影响,而城镇人口与人均绿地面积的变化直接影响到城市绿地面积从而影响城市绿地用水;城市河湖生态用水量采用水量平衡法计算,包括水面蒸发量与水土渗透量,它们都受到水体面积的影响,水体面积与人均水体面积和人口数量有关;城市环境卫生用水与建成区面积有关,后者受到人均建成区面积与人口数量的影响。

(5) 水资源子系统。

供水总量包含当地水资源量、污水回用量、及区外调水量。其中,污水回用量选取污水处理率和污水回用率作为不同的政策输入。需水总量包括了农业需水量、生活需水量、工业需水量、城市公共需水量、生态环境需水量、灰水足迹等。

(6) 灰水足迹子系统。

灰水足迹是指在一定基准上, 稀释超荷数量的污染物质并使其达到标准浓度以下时需要的最小淡水量。其子系统主要包括了生活污染水足迹、工业污染水足迹、农业面源污染水足迹、畜禽养殖污染水足迹及城镇削减污染水足迹。本研究统一采用常用的 COD 污染物指标来统计灰水足迹。灰水足迹的核心变量就是 COD 排放量, 即生活、工业、农业面源、畜禽养殖产生的 COD 减去城镇削减去的 COD, 分别与城镇人口、工业生产总值、灌溉面积、畜禽养殖数量有关。

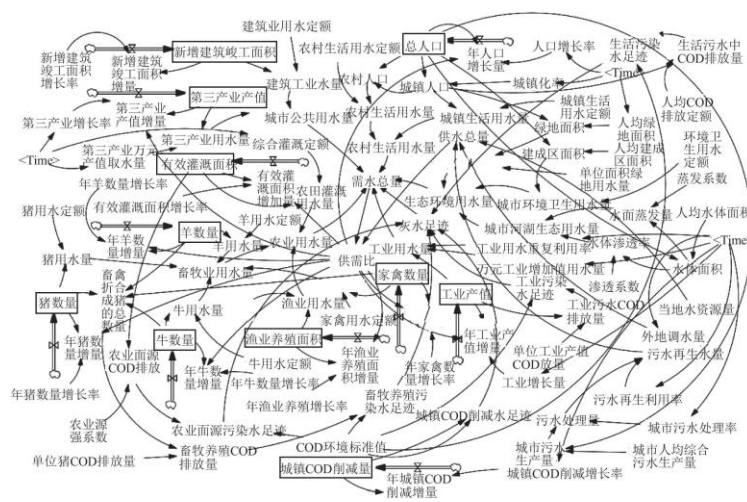


图1 昆明市水资源承载力系统动力学模型流图

2.2 模型有效型检验

在建立 SD 模型后,需要对模型的正确性、有效性进行检验。检验包括适应性与一致性的两方面,是为了检验模拟结果是否和实际发生事件相符,是否可以利用模型来有效预测和分析问题。软件可以自行完成对模型的直观及运行检验,在一致性检验时把昆明市的历史数据与 2010~2013 年的模拟结果进行对比,如果误差不超过 5%,那么判定模型较合理,可以进行模拟分析。如果误差超过 5%,必须要对模型进行修改,或者对模型内参数进行调整。表 2 中的检验结果显示,由于统计数据的局限性和许多不确定性因素的影响,2012 年和 2013 年第三产业产值的模拟值略大于实际值。此外,其他变量的预测值与历史值之间的误差在 5%以内,这表示此模型的可信值较大,能够用于下一步的仿真预测。

表 2 模型的正确性检验结果

年份变量	2010	2011	2012	2013
人口(万人)	643.92	648.64	653.30	657.90
预测值(万人)	631.11	641.70	651.04	659.09
误差(%)	2.03	1.08	0.34	-0.18
城镇人口(万人)	412.11	428.10	438.04	447.7
预测值(万人)	400.12	415.82	431.00	445.54
误差(%)	3.00	2.95	1.63	0.48
工业产值(亿元)	960.86	1161.18	1378.48	1437.18
预测值(亿元)	951.42	1110.71	1319.61	1510.94
误差(%)	0.99	4.54	4.46	-4.88
第三产业产值	1039.15	1214.57	1437.49	1808.34
预测值(亿元)	1007.75	1159.58	1339.26	1607.33
误差(%)	3.11	4.74	7.33	12.5

2.3 方案设计与模拟结果分析

在考虑昆明市水资源系统和经济社会实际状况的基础上进行经济发展模式的设计,决策变量有人均绿地面积、人口增长率、城市化率、工业增长率、万元工业增加值用水量、工业用水重复利用率、综合灌溉定额、第三产业增长率、第三产值万元产值取水量、城市污水处理率以及污水再生利用率。在调整决策变量的输入值之后,模拟出水资源承载力随时间的发展趋势,并对其特征进行分析,根据城市发展的特点和发展需求,提出以下 5 种发展模式即 5 种设计方案,其决策变量输入的参数值见表 3。

表 3 5 种方案决策变量参数值

决策变量	方案	2015 年	2020 年	2030 年
人均绿地面积(m^2)	1	9.35	9.35	9.35
	2	9.35	9.35	9.35
	3	9.35	9.35	9.35
	4	9.5	13	15
	5	9.5	13	15
万元工业增加值用水量(m^3)	1	63	63	63

	2	63	63	63
	3	61	55	45
	4	63	63	63
	5	62	55	50
工业增长率 (%)	1	6.9	6.9	6.9
	2	7.0	10.0	12.0
	3	6.8	6.0	5.5
	4	6.9	6.9	6.9
	5	7.0	8.5	10.0
第三产业增长率 (%)	1	8.1	8.1	8.1
	2	9	15	18
	3	8.0	7.5	7.0
	4	8.1	8.1	8.1
	5	9	12	15
第三产值万元产值取水量 (m ³)	1	3.9	3.9	3.9
	2	3.9	3.9	3.9
	3	3.6	2.4	1.8
	4	3.9	3.9	3.9
	5	3.6	2.5	2
工业用水重复利用率 (%)	1	91	91	91
	2	91	91	91
	3	92	95	99
	4	91	91	91
	5	92	95	99
综合灌溉定额 (m ³ /hm ²)	1	5955	5955	5955
	2	5955	5955	5955
	3	5600	4500	3500
	4	5955	5955	5955

	5	5800	5000	4000
人口综合增长率(%)	1	7.1	7.1	7.1
	2	7.1	7.1	7.1
	3	7.1	7.1	7.1
	4	7.1	7.1	7.1
	5	7.0	6.5	6.0
城市化率(%)	1	70	75	80
	2	70	78	85
	3	70	75	80
	4	70	75	80
	5	70	73	78

续表 3

决策变量	方案	2015 年	2020 年	2030 年
城市污水处理率(%)	1	94.1	94.1	94.1
	2	94.1	94.1	94.1
	3	94.1	94.1	94.1
	4	94.5	97	100
	5	94.4	96	99
污水再生利用率(%)	1	61.8	61.8	61.8
	2	61.8	61.8	61.8
	3	63	70	80
	4	61.8	61.8	61.8
	5	63	70	80
城镇 COD 削减增长率(%)	1	2	2	2
	2	2	2	2
	3	2	2	2

	4	2.4	4	6
	5	2.3	3.5	5
外地调水量(亿 m ³)	1	10.18	10.18	10.18
	2	10.18	10.18	10.18
	3	10.5	12	15
	4	10.18	10.18	10.18
	5	10.5	12	15

2.3.1 现状延续型

假设到 2030 年昆明市的发展政策基本维持现状,各项决策变量指标值不做较大调整。到 2030 年,昆明市人口增长率为 7.1%,总人口达到 1430.57 万人,城镇人口为 1144.45 万人,经济社会高速发展。同时,城市化率由 69%提高到 80%。工业增加值提高到 2946.98 亿元,平均增加速率值达 6.9%。但是,水资源需求总量将达到 234.9 亿 m³,供需比低至 0.28,灰水足迹将达到 163.31 亿 m³。后果将是昆明市缺水现状越来越严峻,生活用水、工业用水、农业用水以及生态环境用水困难,而且污染物的排放量日益增多,生态环境不断恶化。届时,水资源严重短缺以及水环境恶化将严重制约昆明市社会经济的持续发展。

2.3.2 经济发展型

根据昆明市“十三五”规划的目标,昆明要加快建设立足西南、面向全国、南亚、东南亚的辐射型枢纽城市,做好云南省经济发展的排头兵和火车头,所以把昆明市到 2030 年的发展政策重点放在经济的发展上,将增加在经济发展中精力和财力的投入。在假定其他参数与模式相同的前提下,把工业增加值增长速率调整到 12%,第三产业产值增长速度调整到 18%,2030 年的城市化率提升到 85%。此模式的工业增加值达到 4275.32 亿元,第三产业产值达到 14312.90 亿元,虽然保证了昆明市经济社会的快速发展,但灰水足迹将达到 185.02 亿 m³,污染物排放量大幅增加,生态环境污染严重,同时,工业和第三产业需水量的大幅提升导致 2030 年昆明市需水总量将达到 260.54 亿 m³,供需比低至 0.25,属于极度缺水。

2.3.3 资源节约型

资源节约型就是要尽可能地降低水资源的消耗并在此基础上增加水资源的供给。现状年昆明市万元工业增加值用水量 and 第三产业增加值用水量以及综合灌溉用水定额较大,有较多的下降空间,工业用水重复利用率与污水再生利用率也有进一步提高的空间。在综合考虑昆明市当地水资源量,加强引水工程建设,外地调水增加至 15 亿 m³,并在前两种水资源利用模式基础上,要求加大水资源的节约力度,约束供水能力,以水资源集约高效利用为目标,减缓经济增长速度,将污水处理率提高到 99%,再生利用率提高到 80%,到 2030 年,污水回用量达到且维持在 8.48 亿 m³。同时,工业与第三产业增长率分别减缓为 5.5%、7.0%。由于该模式在降低了经济增长速度的同时,又通过加大节流、污水回用以及增加外地调水等方式,故可用水量比之前增多,但是需水量比之前有所减少,但是随着时间增长,供需比仍在不断下降,到 2030 年为 0.33,缺水依然严重。而且由于工业及第三产业增长率的降低,也在一定程度上影响了昆明市经济水平。

2.3.4 环境友好型

环境友好型就是要把城市生态环境保护放在重要的位子上,想法减少人们生活生产带来的污染,并提高城市环境质量。所以,

本模式主要将城市污水处理率提高至 100%，城镇 COD 削减增长率由现状年的 2%提高至 2030 年的 6%，并考虑到城市环境的绿化需要，将人均绿地面积由现状年的 9.5m^2 提高至 2030 年的 15m^2 ，保证城市环境质量显著提升。此模式，使得城镇 COD 削减量大幅提高，由现状年的 11.25 万 t 提高到 21.08 万 t，大大降低了污染物的排放量，灰水足迹比前三种模式大幅降低。但是，由于昆明市水资源缺口较大，单纯的污水处理和环境治理并不能解决水资源短缺问题，虽然需水总量比前 3 种模式减少了很大，但是到 2030 年，仍然高达 207.23m^3 ，供需比从现状年的 0.48 降低至 2030 年的 0.32，水资源短缺依然是不断加重。

表 4 5 种方案主要变量的模拟数值

主要变量	方案	2015 年	2020 年	2030 年
总人口(万人)	1	697.83	896.87	1430.57
	2	697.83	896.20	1420.36
	3	697.83	900.06	1456.60
	4	697.83	897.28	1442.02
	5	666.12	683.40	717.32
城镇人口(万人)	1	488.48	672.66	1144.45
	2	488.48	699.04	1207.31
	3	488.48	675.04	1165.20
	4	488.48	672.96	1153.62
	5	466.29	498.88	559.51
工业产值(亿元)	1	1221.76	1645.88	2946.98
	2	1221.76	1736.42	4275.32
	3	1221.76	1619.21	2655.20
	4	1221.76	1646.16	2956.03
	5	1221.76	1701.99	3794.19
第三产业产值(亿元)	1	2144.19	3084.42	6320.67
	2	2144.19	3547.41	14312.90
	3	2144.19	3047.49	5839.75
	4	2144.19	3084.80	6334.71
	5	2144.19	3360.59	11005.30
污水排放量(m^3)	1	5.40	6.94	11.06
	2	5.40	6.93	10.981

	3	5.40	6.96	11.26
	4	5.40	6.94	11.15
	5	5.15	5.28	5.55
供需比	1	0.48	0.40	0.28
	2	0.48	0.39	0.25
	3	0.49	0.44	0.33
	4	0.48	0.41	0.32
	5	0.50	0.53	0.58

2.3.5 协调发展型

通过对以上 4 种模式的优缺点进行分析,并在考虑昆明市的实际情况的基础上综合了以上 4 种模式的优点,提出了协调发展模型:在建设资源节约型环境友好型城市的前提下,综合考虑了科学与技术的进步和社会经济的可持续发展,规划到 2030 年昆明市水资源再生利用率及污水处理率上升至 80%、99%,万元工业增加值用水量、第三产业万元产值用水量、综合灌溉用水定额逐渐降低至 50m^3 、 2m^3 、 $4000\text{m}^3/\text{hm}^2$,工业、第三产业增长率缓慢提升至 10%、15%,保持人均绿地面积与模式四相同、外地调水量与模式三相同,城镇 COD 削减增长率升值 5%,同时适当放缓城镇化水平增速至 78%,人口综合增长率适当调整至 2030 年的 6.0%,则昆明市需水总量不断下降至 2030 年的 119.75 亿 m^3 ,供水总量不断升高至 2030 年的 69.03 亿 m^3 ,供需比不断提升至 2030 年的 0.58,同时到 2030 年工业产值、第三产业产值分别保持在 3794.19 亿元、11005.30 亿元,经济水平显著。虽然到 2030 年,昆明市依然存在缺水问题,但与其他四种模式相比缺水问题有较大缓解,而且模式五能够保证未来供需比不断提升,按此趋势预计到 2050 年左右,昆明市供需比能够达到 100%,

基本满足昆明市的需水情况,实现水资源供需平衡。协调发展模型在强调发展经济的同时,注重资源与环境的保护,并适当地放缓经济增长速度。通过加大对污水处理、污水再生利用、污染物处理的投入,进一步降低三产的用水定额,努力提高水资源集约利用率。该综合考虑资源环境和人口产业协调发展的水资源开发利用模式表现出很高的可行性。模型中主要变量的模拟数值如下表,通过对 5 种城市社会经济发展模式的主要指标模拟数值相互衡量比较,可以从中判断出最优模式。

3 结论与建议

本文在对昆明市水资源承载力系统特征进行分析的基础上,利用系统动力学方法构建其承载力模型,并确定 5 种发展模式的决策变量,从而模拟出每种方案下 2015~2030 年水资源承载力的发展趋势。然后通过对现状延续型、经济发展型、资源节约型、环境友好型和协调发展型 5 种城市发展模式的比较分析,确定了较为合理的方案,研究结果表明:

(1) 昆明市本地水资源数量比较有限,还不及当前用水量的 $1/2$,远远不能满足未来城市发展的需水要求;昆明市拥有滇池及众多的水库、河流、湿地、湖泊等水源,除了大力建设引水工程外,更重要的是需要加强水资源的开发利用,治理水资源污染;此外,昆明市夏季雨水较多,建设方塘集水工程及农田蓄水工程也是提高本地水资源供给的重要途径。

(2) 基于系统动力学理论,在分析了昆明市水资源承载力系统的特征的基础上,选取 24 个主要变量构建了昆明市水资源承载力系统动力学模型,并采用 2010~2013 年的数据对模型进行检验,大部分检验变量误差均在 $\pm 5\%$ 之内,表明模型的模拟结果与实

际行为具有良好的一致性。

(3)从5种方案的模拟情况上看,不管每种方案的控制变量参数值如何改变,灰水足迹、农业用水都是昆明市用水总量中较大的两部部分,所以提高农业用水集约利用效率,加强污水处理、污染物削减、污水再生利用势在必行。从五种方案的对比发现,无论是现状延续型、经济发展型还是资源节约型、环境友好型等模式,单一的发展模式只能或多或少地缓解部分水资源压力,要想真正实现水资源供需平衡,只有走协调发展型的城市发展模式。

(4)从决策变量的模拟情况上看,总人口、城镇人口及城镇COD削减量是影响供需平衡最显著的几个因素,即人口综合增长率、城镇化率、城镇COD削减增长率的变化对城市需水总量的影响最大。人口决定了城市的发展规模及生产生活消费需求与结构,从而影响需水总量,而增加城镇COD削减量是降低灰水足迹最有效的途径。此外,综合灌溉用水定额、工业增加值用水量、第三产业万元产值用水量也是主要的因素。所以,适当放缓人口增长速度、城镇化速度,控制城市人口规模,合理调整生产生活结构,同时加强城市污染物的处理即水环境治理,才能从根本上解决水资源短缺,实现城市水资源可持续利用。同时也表明,盲目过快地追求城市规模与城镇化进程并不可取,特别是那些干旱区半干旱区及缺水严峻的城市,因为此必将降低人们的城市生活品质及城镇化质量。

参考文献:

- [1]刘强,杨永德,姜兆雄.从可持续发展角度探讨水资源承载力[J].中国水利,2004(3):11-14.
- [2]孙兆敏,杨世琦,姚学慧,等.西北地区水资源承载力增进与可持续利用研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2004,32(11):89-94.
- [3]郭倩,汪嘉杨,张碧.基于DPSIRM框架的区域水资源承载力综合评价[J].自然资源学报,2017(3):484-493.
- [4]程超,童绍玉,彭海英,等.滇中城市群水资源生态承载力的平衡性研究[J].资源科学,2016(8):1561-1571.
- [5]方芳.朝阳市水资源利用与区域经济增长模型研究与相关性分析[J].黑龙江水利科技,2017,45(2):17-20.
- [6]程增辉,陆宝宏,熊丝,等.基于水足迹模型的新疆水资源承载力分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(6):54-59.
- [7]崔东文,金波.基于WDO-PP模型的文山州近10年水资源承载力评价[J].水利经济学报,2016(6):54-59.
- [8]曹飞凤,楼章华,许月萍,等.钱塘江流域水资源承载力及可持续发展研究[J].中国农村水利水电,2008(4):13-16,25.
- [9]孟丽红,陈亚宁,李卫红.新疆塔里木河流域水资源承载力评价研究[J].中国沙漠,2008(1):185-190.
- [10]朱一中,夏军,谈戈.西北地区水资源承载力分析预测与评价[J].资源科学,2003,25(4):43-48.
- [11]韩俊丽,段文阁.城市水资源承载力基本理论研究[J].中国水利,2004(7):12-14.
- [12]赵军凯,李九发,戴志军,等.基于熵模型的城市水资源承载力研究——以开封市为例[J].自然资源学报,2009(11):1944-1951.

-
- [13] 闵庆文, 余卫东, 张建新. 区域水资源承载力的模糊综合评价分析方法及应用[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3):14-16.
- [14] 曲耀光, 樊胜岳. 黑河流域水资源承载力分析计算与对策[J]. 中国沙漠, 2000, 20(1):1-8.
- [15] 王家骥, 姚小红, 李京荣, 等. 黑河流域生态承载力估测[J]. 环境科学研究, 2000, 13(2):44-48.
- [16] 戴明宏, 王腊春, 魏兴萍. 基于熵权的模糊综合评价模型的广西水资源承载力空间分异研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1):193-199.
- [17] 程美家, 韩美, 杜剑. 基于主成分分析法的山东省水资源承载力评价[J]. 资源开发与市场, 2009, 25(5):410-412.
- [18] HE C, OKADA N, ZHANG Q, et al. Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China[J]. Applied Geography, 2006, 26(3):323-345.
- [19] DÜRR M, CRUDEN A, GAIR S, et al. Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system[J]. Journal of Power Sources, 2006, 161(2):1400-1411.
- [20] 徐中民. 情景基础的水资源承载力多目标分析理论及应用[J]. 冰川冻土, 1999(2):99-106.
- [21] 陈国卫, 金家善, 耿俊豹. 系统动力学应用研究综述[J]. 控制工程, 2012, 19(6):921-928.
- [22] 王其藩. 系统动力学[M]. 上海:上海财经大学出版社, 2009.
- [23] 韩俊丽, 段文阁, 李百岁. 基于 SD 模型的干旱区城市水资源承载力模拟与预测——以包头市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(4):188-191.
- [24] 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.
- [25] 贺晟晨, 王远, 高倩, 等. 城市经济环境协调发展系统动力学模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(8):698-703.
- [26] 姜洋. 系统动力学视角下中国城市交通拥堵对策思考[J]. 城市规划, 2011, 35(11):73-80.
- [27] 朱一中, 夏军, 谈戈. 关于水资源承载力理论与方法的研究[J]. 地理科学进展, 2002, 21(2):180-188.