

基于Vensim模型的水资源承载能力分析

——以永春县为例

王容¹, 侯坦², 张倩倩³, 高成⁴

¹水利部信息中心, 北京

²宿迁市水利局, 江苏 宿迁

³河海大学设计研究院有限公司, 江苏 南京

⁴河海大学水文水资源学院, 江苏 南京

收稿日期: 2021年12月16日; 录用日期: 2022年1月19日; 发布日期: 2022年1月26日

摘要

水资源承载力通常是指在可持续发展原则下, 在一定经济技术水平下, 在一定的生活福利标准下, 一个区域的水资源可利用量所能支撑的最大人口规模。本文利用Vensim软件构建水资源承载力估算模型, 以人均生活耗水量、万元GDP耗水量为变量, 计算永春县的水资源承载力, 便于分析水资源承载力与用水效率之间的动态关系。结论表明, 提高用水效率可以显著延长可利用水资源量的发展时间, 提高水资源承载能力。

关键词

水资源承载力, Vensim模型, 永春县

Analysis of Water Resources Carrying Capacity Based on Vensim Model

—A Case Study of Yongchun County

Rong Wang¹, Tan Hou², Qianqian Zhang³, Cheng Gao⁴

¹Information Center, Ministry of Water Resources, Beijing

²Suqian Water Conservancy Bureau, Suqian Jiangsu

³Hohai University Design and Research Institute Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

⁴College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing Jiangsu

Received: Dec. 16th, 2021; accepted: Jan. 19th, 2022; published: Jan. 26th, 2022

Abstract

Usually refer to the water resources carrying capacity under the principles of sustainable development, under the certain economic and technological level, under the certain welfare standard, a regional water resource availability can support the biggest population size. In this paper, by using Vensim software build estimate model, the water resources carrying capacity in per capita water consumption, water consumption ten thousand yuan GDP as the variables, calculation of Yongchun county water resources carrying capacity, facilitate analysis of the dynamic relationship between the bearing capacity of water resources and water use efficiency. The results show that improving water efficiency can significantly prolong the development time of water resources and improve the carrying capacity of water resources.

Keywords

Water Resources Capacity, Vensim Model, Yongchun County

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水资源承载力通常是指在可持续发展原则下,在一定经济技术水平下,在一定的生活福利标准下,一个区域的水资源可利用量所能支撑的最大人口规模[1]。研究水资源承载力有助于合理和优化区域水资源配置,为区域社会经济可持续发展提供科学依据。

国内水资源承载力的研究开始于1989年,新疆水资源软科学课题研究组第一次对新疆水资源及其承载能力和开发战略对策进行研究[2],曲耀光等也率先开展了新疆乌鲁木齐河水资源承载力研究[3]。国家“九五”科技攻关项目“西北地区水资源开发利用与生态环境保护”标志着水资源承载力研究成为热点[4]。

经国内外学者20多年深入研究,目前研究水资源承载力的方法多种多样,其中最主要的研究方法有常规趋势法、综合评价法、多目标分析法及系统动力学法[5][6][7]。

1) 常规趋势法是一种采用统计分析的方法,是选择单项或多项指标,反应区域水资源现状和阈值的简便方法[6][8]。例如用工业用水效率、中水回用率、人均水资源占有量等来衡量区域水资源承载力的现状和潜力。这些指标具有直观、简便的特点[6]。但是这种方法存在明显的缺点:评价指标单一化,忽略了各个指标之间的相互关系,不能综合评价水资源的承载能力,无法全面的反映一个地区的水资源承载力。

2) 综合评价法是通过选定指标与评价标准,采用某种评价方法,进行综合评价计算[9][10]。这种方法的关键在于建立科学的评价指标体系,评价指标能够客观全面反映出水资源承载能力的大小,目前指标的选择多是根据专家的经验主观确定,对于评价体系的建立和评价方法还有待丰富。

3) 多目标分析法是选定水资源承载能力的目标如人口、经济等,设置这些目标的主要约束条件,统筹各目标使其效益最大化,不追求单个目标的优化,而追求整体最优[6]。多目标分析法是一种规划方法,通过建立多目标模型,一般要通过降维手段,将问题转化为单目标规划,再利用优化算法进行求解,目

标函数的确立及降维算法选择是一个难点和重点[11]。

4) 系统动力学法是麻省理工学院 Jay W. Forrester 教授于 1956 年创立的。这是一种以反馈控制理论为基础,以计算机仿真技术为手段,研究动态复杂问题的定量方法,一般用于分析社会经济问题、水资源问题等[12]。这种方法结合定性定量分析,集成了系统分析、综合与推理,分析速度快,而且具有系统的观点,该方法结构复杂,变量众多,对数据的需求量也很大[13]。

Vensim 模型是基于系统动力学原理的计算机模型,发展于 20 世纪 80 年代中期,于 1992 年改为商业化使用[14],国内外各个领域和行业的学者采用 Vensim 软件进行模型的动态构建,对所研究课题与项目进行动态模拟与评估分析,涵盖交通规划、土地利用、财务管理、物流网络、水资源承载能力、水环境承载力等多方面。李雯[15]等人采用 Vensim 软件构建出城市内涝灾害事件的应急管理模型,为应对城市内涝灾害的突发提供参考建议;刘晶[16]等人通过对义乌市水资源供需平衡系统动力学模型的建立,表明 Vensim 模型能够动态反映未来社会经济发展对区域用水特点的影响。

本文利用系统动力学法,构建基于系统动力学的水资源承载力模型——Vensim 模型,通过模拟预测社会经济、生态、环境和水资源系统多变量、非线性、多反馈与复杂反馈等过程,把经济社会、资源与环境在内的大量复杂因子作为一个整体,模拟当地水资源随时间推移而发展变化的情况,对一个区域的水资源承载力进行动态计算。

2. 研究区概况

永春县,位于福建省东南部、晋江东溪上游,是泉州市下辖的一个县。位于东经 117°41'55"~118°31'9",北纬 25°13'15"~25°33'45"之间。东邻仙游,南接南安、安溪,西连漳平,北与德化、大田交界。

2015 年永春县年降雨量 1800.5 mm,折合年水量 26.441 亿 m³。2015 年永春县地表径流量 21.753 亿 m³。全县 2015 年水资源总量为 11.907 亿 m³,总用水量 2.576 亿 m³,水资源开发利用还留有较大空间。

对永春县水资源承载力进行评估,分析各影响因子对水资源承载力的影响,有利于科学合理分配水资源,提高水资源利用效率,增加经济产值,促进水资源的可持续利用和发展。

3. 研究方法

3.1. Vensim 模型原理

系统动力学的本质是一阶微分方程组。一阶微分方程组描述了系统各状态变量的变化率对各状态变量或特定输入等的依存关系[13]。根据实际系统的情况和研究的需要,在系统动力学中进一步考虑了促成状态变量变化的几个因素,将变化率的描述分解为若干流率的描述。这样处理使得物理、经济概念明确,不仅利于建模,而且有利于寻找平衡系统的控制点。

Vensim 模型即是基于系统动力学原理的计算机模型。本文利用 Vensim 软件构建水资源承载力估算模型,以人均生活耗水量、万元 GDP 耗水量为变量,模拟当地水资源的发展利用趋势,分析在不同变量条件下水资源可供发展的年限及可支撑的人口水平,便于分析水资源承载力与用水效率之间的动态关系。

3.2. Vensim 模型构建

永春县水资源承载力系统 Vensim 模型的主要状态变量见表 1。

各变量逻辑关系如下:

$$\begin{aligned} W &= W_P + W_{GDP} \\ W_P &= P * Q_1 \\ W_{GDP} &= GDP * Q_{GDP} \end{aligned}$$

Table 1. Main state variables of Vensim model**表 1.** Vensim 模型主要状态变量表

变量	参数
状态变量	可利用水资源量 W、国内生产总值 GDP、人口 P
速率变量	人口增长率、GDP 增长率、水资源开发率
辅助变量	万元 GDP 耗水量 Q_{GDP} 、工业用水量 W_{GDP} 、人均生活耗水量 Q_1 、生活耗水量 W_p 、GDP 增长量、人口增长量、水资源补充量

符号说明: W 为扣除生态和农业用水的水资源可利用量(亿 t), GDP 为国内生产总值, P 代表当地常住人口(万人), W_p 为生活耗水量(亿 t), W_{GDP} 为工农业生产耗水量(亿 t), Q_1 为人均生活耗水量, Q_{GDP} 为万元 GDP 耗水量。用这一模型我们可以很方便地讨论水资源承载力与用水效率之间的动态关系。

模型中的可利用水资源量是指扣除生态和农业用水量后的水资源量, 仅用作工业用水量和生活用水量两个部分。可利用水资源量与当地的降水径流、跨区域调水有关。扣除生态和农业需水后, 全县现状年水资源可利用总量 $2.68 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

工业用水量指的是产生一定量 GDP 所消耗的水量, 由万元 GDP 耗水量与 GDP 相乘而得。万元 GDP 耗水量在一定的技术发展阶段内, 作为一个常量; 随着科技水平的进步, 用水效率提高, 万元 GDP 耗水量会逐渐下降。GDP 作为衡量一个地区发展水平的主要标志, 受到市场、政策、资源等多方面因素的影响, 本模型中将其概化为以恒定速率 GDP 增长率逐年稳定增长。永春县现状水平年的 GDP 为 306.8 亿元。

生活用水量由人口与人均生活耗水量相乘而得。不考虑城镇与农村人口生活用水的差异, 将人均生活耗水量作为一个统一的常量, 且随着生活进步与节水意识增强, 用水效率提高, 人均生活耗水量逐渐下降。本模型中人口按照当地的人口自然增长率进行估算, 见表 2。

Table 2. Forecast table of natural population growth in Yongchun County**表 2.** 永春县人口自然增长预测表

时间(年)	当地人口(万人)	时间(年)	当地人口(万人)	时间(年)	当地人口(万人)
0	51.13	16	55.38	32	59.98
1	51.39	17	55.65	33	60.28
2	51.64	18	55.93	34	60.58
3	51.90	19	56.21	35	60.88
4	52.16	20	56.49	36	61.19
5	52.42	21	56.78	37	61.49
6	52.68	22	57.06	38	61.80
7	52.95	23	57.34	39	62.11
8	53.21	24	57.63	40	62.42
9	53.48	25	57.92	41	62.73
10	53.74	26	58.21	42	63.04
11	54.01	27	58.50	43	63.36
12	54.28	28	58.79	44	63.68

Continued

13	54.56	29	59.09	45	64.00
14	54.83	30	59.38	46	64.32
15	55.10	31	59.68	47	64.64

对于一定的水资源可利用量, 改变人均生活耗水量、万元 GDP 耗水量, 模型中水资源可供发展的年限也随之改变, 可供发展人口也不相同, 水资源承载能力随之改变。

水资源承载力系统 Vensim 模型流图见图 1。该模型流图表明, 水资源开发率直接影响着水资源补充量, 从而决定着可利用水资源量, 即工业用水量和生活用水量。一方面, 随着 GDP 和人口的增长, 对工业用水量和生活用水量的需求会增大; 另一方面, 随着万元 GDP 耗水量和人均生活耗电量的减少, 对工业用水量和生活用水量的需求会降低; 前后两方面的因素同时起作用时, 对可利用水资源量的影响显著, 导致水资源承载能力的改变。此外, 考虑到万元 GDP 耗水量和人均生活耗电量的不同组合, 其对可利用水资源量的发展年限和水资源承载力的影响具有不同程度的差异, 预测结果也会有所不同。

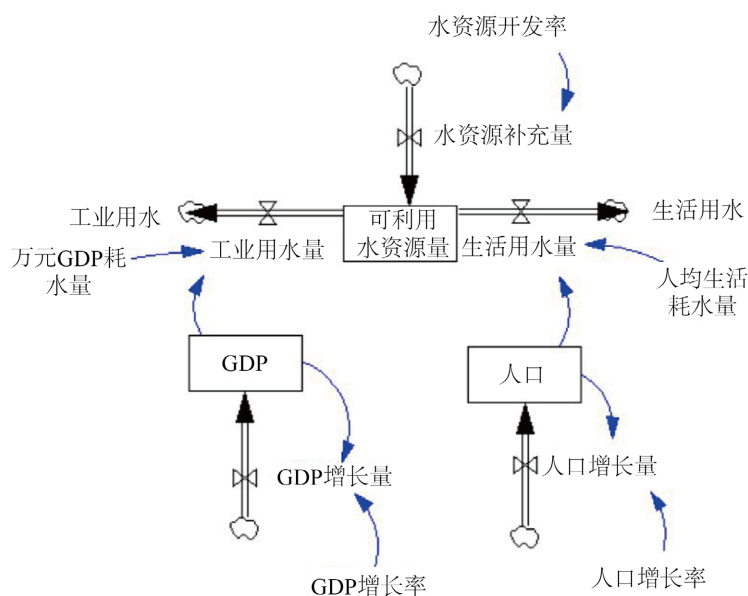


Figure 1. Vensim model flow diagram
图 1. Vensim 模型流图

4. 结果与分析

4.1. 现状水资源承载力预测

在一定的水资源可利用量下, 应用上述模型计算不同情景下的水资源承载力, 其中 Q_{GDP} 表示万元 GDP 耗水量($m^3/万元$), Q_1 表示人日均生活耗水量(L/d·p)。 Q_1 初始值为 220 L/d·p, Q_{GDP} 初始值为 75 $m^3/万元$ 。

年份	可利用水资源量(万 m^3)	年份	可利用水资源量(万 m^3)
0	26800	8	18456
1	26484.3	9	16458.6

Continued

2	25963.9	10	14243.6
3	25237.4	11	11809.4
4	24303.1	12	9154.26
5	23159.4	13	6276.5
6	21804.8	14	3174.4
7	20237.5	15	-

表格中“-”表示可利用水资源量小于零，即可利用水资源量全部消耗完。

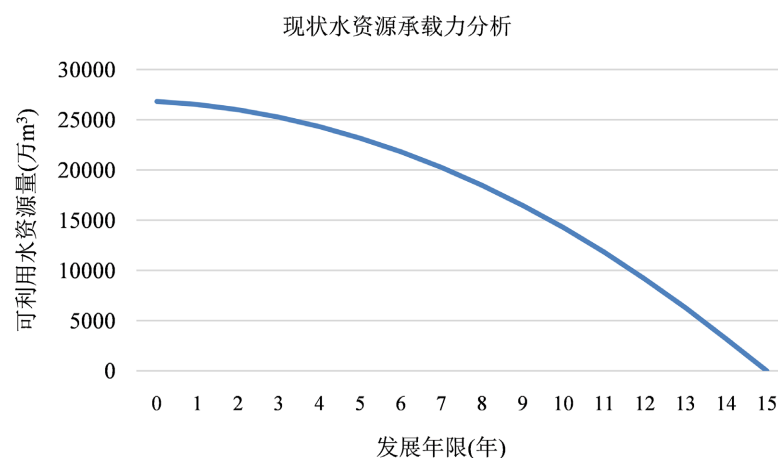


Figure 2. Development forecast of current water resources

图 2. 现状水资源量发展预测

由图 2 中曲线可知，在现阶段的水资源利用效率下，可利用水资源量逐年减少，直至为零。目前的水资源可利用量可以维持当地发展 14 年，到第 15 年，水资源可利用量小于零，可利用水资源量耗尽。根据表 2 永春县人口自然增长预测，到第 14 年可供支撑的人口数量为 54.83 万人。

4.2. 人日均生活耗水量

在当前的技术水平下，人日均生活耗水量 Q_1 为 220 L/d·p。考虑到随着节水技术的发展和节水意识的增强，人日均生活耗水量逐渐降低。故本次在不改变其他变量的前提下，设定 Q_1 分别为 220 L/d·p、200 L/d·p、180 L/d·p、160 L/d·p 以探究其对水资源承载力的影响。模型计算结果如下表 3。

Table 3. Table of available water resources under different Q_1

表 3. 不同 Q_1 下可利用水资源量表

年份	可利用水资源量(万 m ³)			
	$Q_1 = 220$	$Q_1 = 200$	$Q_1 = 180$	$Q_1 = 160$
0	26800	26800	26800	26800
1	26484.3	26857.5	27230.8	27604
2	25963.9	26712.3	27460.6	28209
3	25237.4	26362.7	27488.1	28613.4

Continued

4	24303.1	25807.3	27311.5	28815.8
5	23159.4	25044.4	26929.4	28814.4
6	21804.8	24072.4	26340.1	28607.8
7	20237.5	22889.7	25542	28194.3
8	18456	21494.7	24533.5	27572.3
9	16458.6	19885.8	23313	26740.2
10	14243.6	18061.2	21878.8	25696.4
11	11809.4	16019.3	20229.3	24439.2
12	9154.26	13758.5	18362.7	22967
13	6276.5	11277	16277.5	21278
14	3174.4	8573.15	13971.9	19370.7
15	-	5645.22	11444.2	17243.2
16	-	2491.46	8692.71	14894
17	-	-	5715.64	12321.1
18	-	-	2511.28	9523.06
19	-	-	-	6497.94
20	-	-	-	3244.01
21	-	-	-	-

表格中“-”表示可利用水资源量小于零，即可利用水资源量全部消耗完。

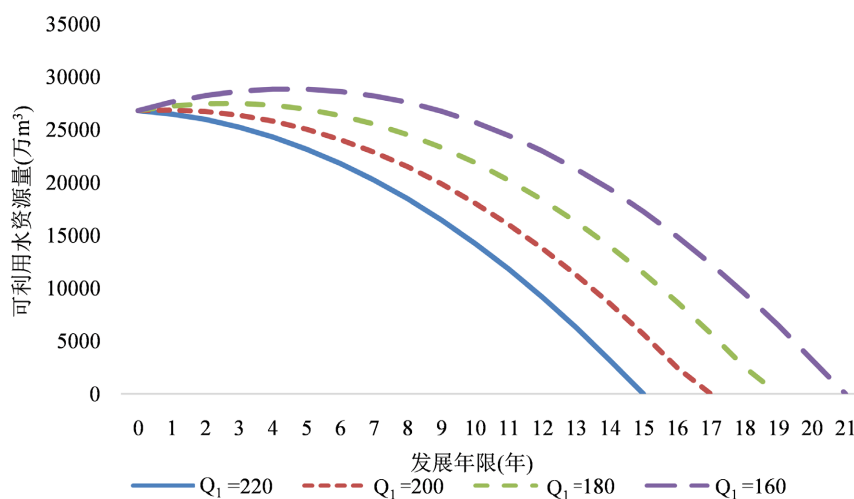


Figure 3. The influence of Q_1 on the total available water resources

图 3. Q_1 对可利用水资源总量的影响

由图 3 中曲线可知，对于 $Q_1 = 200 \text{ L/d}\cdot\text{p}$ 、 $180 \text{ L/d}\cdot\text{p}$ 、 $160 \text{ L/d}\cdot\text{p}$ ，可利用水资源量随着时间推移，先增加，后减少至零。这是由于在发展初期人口和 GDP 较小，生活用水和工业用水量之和小于每年可以提供的水资源量，可利用水资源量有富余。随着人口的增加和 GDP 的提高，生活用水和生产用水也逐渐增加，每年的可利用水资源量不足以支撑生活用水和生产用水，因此可利用水资源量逐渐消耗完。

随着人日均生活耗水量 Q_1 的减少, 每年可利用水资源量减少到零的时间逐渐延长, 即相同的可利用水资源总量可以支持该地区发展时间更久。由表格中的数据可知, Q_1 为 220 L/d·p 时, 每年可利用水资源总量可供当地发展 14 年, Q_1 为 200 L/d·p 时, 可供发展 16 年, Q_1 为 180 L/d·p 时, 可供发展 18 年, Q_1 为 160 L/d·p 时, 可供发展 20 年。

人日均生活耗水量 Q_1 的降低, 延长了水资源可供发展年限, 随着发展年限的延长, 当地人口按照人口自然增长率增加, 水资源承载力逐年增加。根据表 2 永春县人口自然增长预测, 对于 $Q_1 = 220$ L/d·p、200 L/d·p、180 L/d·p、160 L/d·p, 相应的水资源承载力分别为 54.83 万人、55.38 万人、55.93 万人、56.49 万人。

因此, 对于当前的人日均生活耗水量 Q_1 水平, 当地的水资源可以用量可以保证当前的人口发展而有富余, 同时也表明, 减少人日均生活耗水量, 可以有效的提高水资源承载能力, 以利于水资源可持续发展。

4.3. 万元 GDP 耗水量 Q_{GDP}

在当前的技术水平下, 永春县万元 GDP 耗水量 Q_{GDP} 为 75 m^3 /万元, 考虑到随着科学发展、节水技术的进步, 万元 GDP 耗水量 Q_{GDP} 也会随之降低, 故本次在不改变其他变量的前提下, 设定 Q_{GDP} 分别为 75 m^3 /万元、70 m^3 /万元、65 m^3 /万元、60 m^3 /万元以探究其对水资源承载力的影响, 表 4 所示为不同 Q_{GDP} 计算结果。

Table 4. Table of available water resources under different Q_{GDP}
表 4. 不同 Q_{GDP} 下可利用水资源量表

年份	可利用水资源量(万 m^3)		
	$Q_{GDP} = 75$	$Q_{GDP} = 70$	$Q_{GDP} = 65$
0	26800	26800	26800
1	26484.3	28018.3	29552.3
2	25963.9	29044.2	32124.5
3	25237.4	29876.3	34515.2
4	24303.1	30513.1	36723.1
5	23159.4	30953.1	38746.8
6	21804.8	31194.8	40584.9
7	20237.5	31236.7	42235.8
8	18456	31077.1	43698.3
9	16458.6	30714.7	44970.8
10	14243.6	30147.8	46052
11	11809.4	29374.8	46940.2
12	9154.26	28394.2	47634.1
13	6276.5	27204.4	48132.2
14	3174.4	25803.7	48433
15	-	24190.5	48534.8
16		22363.3	48436.4
17		20320.3	48136

Continued

18	18059.9	47632.1
19	15580.4	46923.2
20	12880.2	46007.7
21	9957.51	44884
22	6810.65	43550.6
23	3437.89	42005.7
24	-	40247.9
25		38275.4
26		36086.6
27		33679.8
28		31053.4
29		28205.7
30		25135
31		21839.6
32		18317.6
33		14567.5
34		10587.5
35		6375.67
36		1930.38
37		-

表格中“-”表示可利用水资源量小于零，即可利用水资源量全部消耗完。

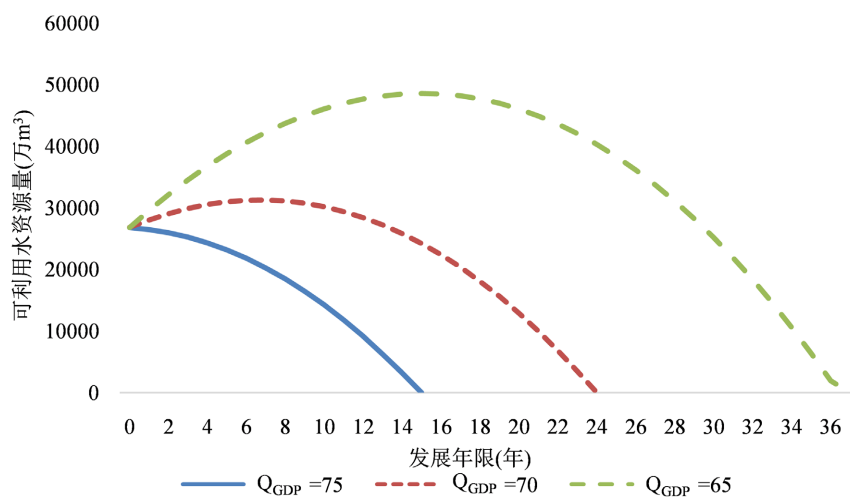


Figure 4. Impact of Q_{GDP} on water resources carrying capacity

图 4. Q_{GDP} 对水资源承载力的影响

由图 4 中曲线可知, $Q_{GDP} = 75 \text{ m}^3$ 随着万元 GDP 耗水量 Q_{GDP} 的减少, 可利用水资源量减少到零的时间逐渐延长, 即相同的可利用水资源总量可以支持该地区发展时间更久。由表格中的数据可知, Q_{GDP} 为

75 m³/万元时，水资源总量可供当地发展 14 年，Q_{GDP} 为 70 m³/万元时，可供发展 23 年，Q_{GDP} 为 65 m³/万元时，可供发展 36 年。

万元 GDP 耗水量 Q_{GDP} 降低，延长水资源可供发展年限，随着发展年限的延长，当地人口按照人口自然增长率增加，水资源承载力逐年增加。根据表 2 永春县人口自然增长预测，对于 Q_{GDP} = 75 m³/万元、70 m³/万元、65 m³/万元，相应的水资源承载力分别为 54.83 万人、57.34 万人、61.19 万人。

由计算结果可知，万元 GDP 耗水量 Q_{GDP} 对水资源承载力的限制作用较为显著，根据计算结果，随着万元 GDP 耗水量的降低，水资源承载力逐渐提高。因此，提高生产力发展水平、促进节水设备和工艺的推广，可以有效促进水资源的可持续发展。

4.4. 不同 Q (Q_{GDP}, Q₁)组合

同时降低人日均生活耗水量和万元 GDP 耗水量，设计不同的 Q (Q_{GDP}, Q₁)，预测用水效率降低后永春县的水资源承载力情况，结果如下表 5。

Table 5. Availability of water resources in different Q₁ and Q_{GDP} combinations

表 5. 不同 Q₁ 和 Q_{GDP} 组合下水资源可利用量

年份	可利用水资源量(万 m ³)			年份	可利用水资源量(万 m ³)	
	Q ₁ = 220, Q _{GDP} = 7	Q ₁ = 200, Q _{GDP} = 6.5	Q ₁ = 180, Q _{GDP} = 6		Q ₁ = 200, Q _{GDP} = 6.5	Q ₁ = 180, Q _{GDP} = 6
0	26800	26800	26800	22	15467.9	60865.2
1	26484.3	28391.5	30298.8	23	12511.7	60153.4
2	25963.9	29792.5	33621.2	24	9329.94	59232.8
3	25237.4	31001.7	36765.9	25	5920.86	58101.7
4	24303.1	32017.3	39731.6	26	2282.74	56758.5
5	23159.4	32838.1	42516.8	27	-	55201.6
6	21804.8	33462.5	45120.2	28		53429.4
7	20237.5	33888.9	47540.4	29		51440
8	18456	34115.9	49775.9	30		49232
9	16458.6	34141.9	51825.3	31		46803.5
10	14243.6	33965.4	53687.2	32		44152.9
11	11809.4	33584.7	55360.1	33		41278.5
12	9154.26	32998.4	56842.6	34		38178.4
13	6276.5	32204.9	58133.2	35		34851.1
14	3174.4	31202.4	59230.5	36		31294.7
15	-	29989.5	60132.9	37		27507.4
16		28564.5	60838.9	38		23487.5
17		26925.8	61347	39		19233.2
18		25071.7	61655.6	40		14742.6
19		23000.5	61763.4	41		10013.9
20		20710.6	61668.6	42		5045.31
21		18200.3	61369.7	43		-

表格中“-”表示可利用水资源量小于零，即可利用水资源量全部消耗完。

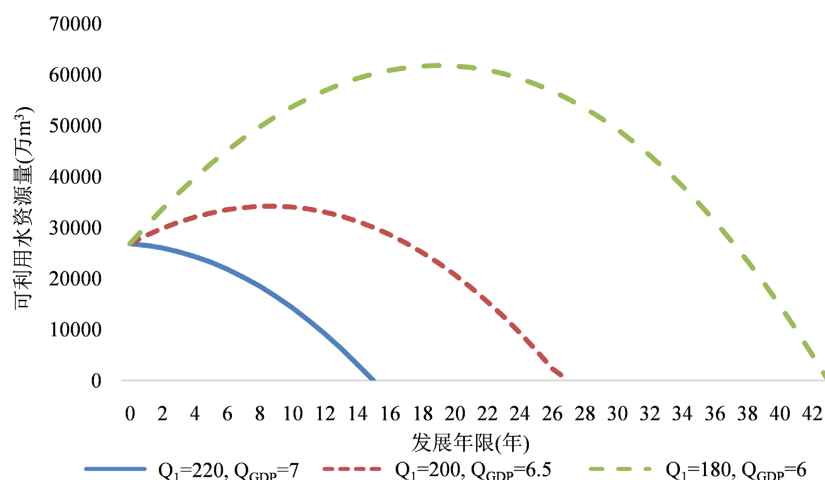


Figure 5. Availability of water resources in different Q_1 and Q_{GDP} combinations

图 5. 不同 Q_1 和 Q_{GDP} 组合下水资源可利用量

由图 5 中曲线可知, 同时改变人均生活耗水量和万元 GDP 耗水量, 可以显著延长可利用水资源的发展年限。当 $Q_1 = 220$, $Q_{GDP} = 7$ 时, 可利用水资源量可供当地发展 14 年, 当 $Q_1 = 200$, $Q_{GDP} = 6.5$ 时, 可利用水资源量可供当地发 26 年, 当 $Q_1 = 180$, $Q_{GDP} = 6$ 时, 可利用水资源量可供当地发展 42 年。对应的水资源承载力分别为 54.83 万人、58.21 万人、63.04 万人。

5. 总结

1) 由模型计算结果可知, 减少人日均生活耗水量、万元 GDP 耗水量, 提高用水效率, 可以显著延长可利用水资源量的发展年限, 提高水资源承载力。

2) 本文利用 Vensim 软件构建水资源承载力估算模型, 量化了不同用水效率下的水资源承载力, 为永春县的社会经济可持续发展提供理论支持。

3) 本模型也存在一定的不足, 比如设置的变量较少, 参数设定不尽合理, 不足以全面地反映该地区的水资源利用状况, 在今后的研究中还需要不断完善。

参考文献

- [1] 王浩, 秦大庸, 王建华, 李令跃. 西北内陆干旱区水资源承载能力研究[J]. 自然资源学报, 2004(2): 151-159.
- [2] 新疆水资源软科学课题研究组. 新疆水资源及其承载力的开发战略对策[J]. 水利水电技术, 1989(6): 2-9.
- [3] 曲耀光. 乌鲁木齐地区水资源及其开发利用程度[J]. 干旱区地理, 1991(1): 12-17.
- [4] 中国水利水电科学研究院. 西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究[J]. 中国水利, 2001(5): 9-11.
- [5] 袁鹰. 区域水资源承载能力评价方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2006.
- [6] 杨金鹏, 郭金燕, 黄大英, 等. 区域水资源承载能力计算与评价方法——以北京市昌平区为例[J]. 水利规划与设计, 2013(3): 30-32.
- [7] 高彦春, 刘昌明. 区域水资源开发利用的阈限分析[J]. 水利学报, 1997(8): 74-80.
- [8] 李永成. 汀溪水库供水系统水资源承载力探讨[J]. 引进与咨询, 2006(5): 18-19.
- [9] 许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究——以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报, 1993, 8(3): 229-237.
- [10] 左其亭. 水资源承载力研究方法总结与再思考[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 1-6+54.
- [11] 翟晓丽. 多目标分析法在小区域地下水承载能力评估中的应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2006.

- [12] 罗腾飞, 马太玲, 孙晶, 赵海霞, 李志芬, 庞敏. 基于 Vensim 模型的高校中水回用系统模拟预测[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(S2): 211-214+233.
- [13] 徐伟. 利用 Vensim 动态模拟软件模拟水稻田氮素迁移动态过程[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [14] 张波, 虞朝晖, 孙强, 李顺, 黄明祥, 王利强. 系统动力学简介及其相关软件综述[J]. 环境与可持续发展, 2010(2): 1-4. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-288X.2010.02.001>.
- [15] 李雯, 姜仁贵, 解建仓, 赵勇, 朱记伟, 杨思雨. 基于系统动力学的城市内涝灾害应急管理模型研究[J/OL]. 水资源保护: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20211122.1133.002.html>, 2022-01-13
- [16] 刘晶, 许月萍, 郭玉雪, 王贺龙, 郑超昊, 吴垚. 考虑再生水的多种组合情景需水预测及供需平衡分析[J/OL]. 中国农村水利水电: 1-22. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1419.TV.20211216.1028.036.html>. 2022-01-13.