

# 曲靖市水资源承载力分析

牛培燕, 席武俊\*

楚雄师范学院资源环境与化学学院, 云南 楚雄

收稿日期: 2022年4月22日; 录用日期: 2022年5月23日; 发布日期: 2022年5月31日

## 摘要

本文选择曲靖市水资源承载力为主题进行研究, 选取了13个影响因子作为评价指标, 并建立评价指标体系, 利用AHP法确定其权重, 并采用多层次模糊综合评价法对曲靖市2016~2020年水资源承载力变化情况进行分析和评价。研究结论如下: 1) 曲靖市存在水资源配置不合理, 第一产业用水量大, 农业发展与水资源承载力不适应等问题; 2) 曲靖市水资源综合承载力在2016~2020年间都处于严重超载状态, 但随着经济和社会子系统的改善, 曲靖市水资源承载力状况正在逐步趋好。

## 关键词

水资源承载力, 层次分析法, 多层次模糊综合评价法, 曲靖市

# Analysis of Water Resources Carrying Capacity in Qujing City

Peiyan Niu, Wujun Xi\*

School of Resources, Environment and Chemistry, Chuxiong Normal University, Chuxiong Yunnan

Received: Apr. 22<sup>nd</sup>, 2022; accepted: May 23<sup>rd</sup>, 2022; published: May 31<sup>st</sup>, 2022

## Abstract

This paper examines Qujing City's water resource capacity, selects 13-influencing factors as valuation indices, establishes the valuation index system, uses the AHP method to determine its weight, and uses multi-stage fuzzy comprehensive valuation method, to analyse and evaluate the changes in Qujing City's water resource capacity from 2016 to 2020. The conclusions are as follows: 1) there are some problems in Qujing City, such as unreasonable allocation of water resources, large water consumption in the primary industry, and the incompatibility between agricultural development and water resources carrying capacity; 2) From 2016 to 2020, the comprehensive water

\*通讯作者。

resources carrying capacity of Qujing City was seriously overloaded, but with the improvement of the economic and social subsystem, the water resources carrying capacity of Qujing city gradually increased.

## Keywords

Water Resources Carrying Capacity, Analytic Hierarchy Process, Multi-Level Fuzzy Comprehensive Evaluation Method, Qujing City

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. 绪论

水资源承载力是指在特定的历史时期, 根据可预见的技术、经济、社会发展程度, 通过合理的资源配置, 实现区域经济社会发展的最大支持。在特定的开发和利用时期, 可以维持有限的发展目标的最大社会经济规模[1]。

国际上对水资源利用给予了很多关注。Falkenmark 等人[2]对一些发展中国家水资源的使用限度进行了研究, 这为今后有关水资源承载力的研究打下了良好的基础(1998)。Harris Jonathan [3]为了探究区域农业生产的水资源承载能力, 提出把农业承载力列入评价指标(1999)。Sleeser [4]通过提出 ECCO 模型, 基于 SD 方法, 探究人口、资源、环境等方面是否符合可持续发展, 以此来模拟人口和承载力的动态变化特征, 并成功应用到一些发展中国家(2002)。

我国对水资源承载力的研究始于 20 世纪 80 年代, 目前处于拓展阶段(2000~至今)。表现为从单一的水资源承载力研究拓展到资源生态承载力、经济社会发展关系、系统动力学模拟等内容。如汪恕诚[5]对水资源承载能力的界定及内涵的深入研究与扩展(2006); 李莉等[6]基于水资源生态足迹基本原理, 构建了评价指标, 对嘉兴市 2005 年~2019 年各指标的时空演变特征及相关性进行分析和探讨(2021)。李玮丽[7]以兰州市为例, 建立了水资源承载力评价指标体系, 采用熵权法、AHP, 建立了基于 TOPSIS 的综合评价模型, 评价兰州市水资源承载力(2021)。

曲靖处于滇东高原与贵州高原的交界处。境内有 79 条流域面积超过 100 平方公里的河流, 主要干流为南盘江、北盘江、牛栏江等。曲靖河流短小流急, 干湿季明显, 水资源分布不均衡[8]。因此, 对水资源的承载能力进行研究是应对当前水资源短缺的重要手段, 也是实现水资源可持续利用的基础工作。

## 2. 曲靖市水资源概况

### 2.1. 曲靖市水资源基本情况

#### 1) 水资源总量

2020 年, 全市水资源总量 95.58 亿立方米。全市产水模数为 33.1 万立方米/平方千米, 径流系数 0.34, 人均占有水资源量 1658 立方米。

#### 2) 降水量

2020 年, 全市平均降水量 975.6 毫米, 折合降水总量 282.0 亿立方米, 属偏枯年份, 且 2016~2020 降水量呈下降趋势。

### 3) 地表水资源量

地表水资源是指一种天然的河流、湖泊、冰川等地表水体的动态水量,属于自然河流。2020年全市地表水资源量为95.58亿立方米,折合径流深330.7毫米[9]。

### 4) 地下水资源量

2020年,全市地下水资源量30.17亿立方米,地下水径流模数8.4万立方米/平方千米。

## 2.2. 曲靖市水资源开发利用现状

### 2.2.1. 曲靖市供水情况

2020年,全市河道外供水量15.16亿立方米,同比增长2.1%。其中:地表水供水量14.34亿立方米,为主要供水水源;地下水源供水量0.5371亿立方米;其它水源供水量0.2832亿立方米[9]。

### 2.2.2. 曲靖市供用水量变化

2016~2020年曲靖市供用水量呈上升趋势,从2016年的14.61亿 $m^3$ 上升到2020年的15.16亿 $m^3$ 。在供水方面,地表水和地下水供水量上升趋势明显,其他水源供水量有小幅上升趋势;在用水量方面,工业用水呈波动下降趋势;农业灌溉用水、生态环境用水、城镇公共用水呈现波动上升的趋势;而居民生活用水变化不大[9]。

## 3. 研究方法

### 3.1. 文献查阅法

根据曲靖市近几年的统计年鉴和国内外关于水资源承载力的相关资料等,统计整理相关数据,建立曲靖市水资源承载力评价指标体系。

### 3.2. 层次分析法

层次分析法,简称AHP方法,是通过对复杂问题的决策过程进行建模和量化,把问题分解成若干层次和若干因素,并进行简单的对比计算,得到各个方案的重要度,从而为决策的制定提供参考,特别适合于难以直接、精确的衡量决策结果的场合[10]。影响结果的因素主要包括指标数量的多少,以及人的主观性。

### 3.3. 多层次模糊综合评价方法

多层次模糊综合评价方法是对水资源承载能力作模糊综合评价的过程,在分析一个事物受多种因素影响时,可利用该方法进行评判。首先,确定各因子对水资源承载力的影响,并据此确定各指标的权重,最后通过综合评估矩阵对水资源承载能力的多种因子进行评判[11]。

## 4. 曲靖市水资源承载力评价

### 4.1. 数据来源

本文数据主要来源于2016、2017、2018、2019、2020年的《曲靖市水资源公报》和《曲靖市国民经济和社会发展统计公报》。

### 4.2. 曲靖市水资源承载力评价过程

#### 4.2.1. 构建水资源承载力评价指标体系

水资源承载力指标体系是一个庞大、复杂的系统,它不仅是衡量水资源承载力的重要手段,更是水

资源承载力大小的决策基础。参考国内外相关规范并结合研究区状况建立曲靖市水资源承载力评价指标体系(表 1)。

**Table 1.** Evaluation index system of water resources carrying capacity in Qujing City  
**表 1.** 曲靖市水资源承载力评价指标体系

目标层	准则层	指标层	单位	指标类型
水资源承载力评价	水资源系统	人均水资源量	m <sup>3</sup> /人	正向
		水资源开发利用率	(%)	负向
		产水模数万	m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> .a	正向
		降水量	(108 m <sup>3</sup> )	正向
	经济系统	工业用水率	(%)	正向
		第三产业比重	(%)	正向
		万元 GDP 用水量	(m <sup>3</sup> /万元)	负向
		万元工业增加值用水量	(m <sup>3</sup> /万元)	负向
	生态系统	生态环境用水率	(%)	正向
		工业废水排放量	(万吨)	负向
	社会系统	人口密度	(人/km <sup>2</sup> )	负向
		人口自然增长率	(%)	负向
		人均 GDP	(元/人)	正向

将各指标分为 V1~V5, 依次表示水资源承载力弱、较弱、中等、较高、高[12]。其分级标准如表 2 所示。

**Table 2.** Grading standard of evaluation index  
**表 2.** 评价指标分级标准

目标层	准则层	指标层	指标类型	单位	V1	V2	V3	V4	V5
水资源承载力评价	水资源系统	人均水资源量	正向	m <sup>3</sup> /人	<300	300~500	500~1000	1000~2000	>2000
		水资源开发利用率	负向	(%)	>70	70~50	50~30	30~10	<10
		产水模数	正向	m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> .a	<5	5~7	7~15	15~30	>30
		降水量	正向	(108 m <sup>3</sup> )	<200	200~400	400~800	800~1200	>1200
	经济系统	第三产业比重	正向	(%)	<30	30~40	40~50	50~70	>70
		工业用水率	正向	(%)	<5	5~10	10~15	15~20	>20
		万元 GDP 用水量	负向	(m <sup>3</sup> /万元)	>100	100~70	70~50	50~40	<40
		万元工业增加值用水量	负向	(m <sup>3</sup> /万元)	>100	100~50	50~20	20~10	<10
	生态系统	生态环境用水率	正向	(%)	<1	1~3	3~5	5~7	>7
		工业废水排放量	负向	(亿立方米)	>1800	1800~1600	1600~1300	1300~1000	<1000
	社会系统	人口密度	负向	(人/km <sup>2</sup> )	>400	400~200	200~100	100~50	<50
		人口自然增长率	负向	(%)	>3	3~2	2~1	1~0	<0
		人均 GDP	正向	(万元/人)	<1	1~3	3~5	5~7	>7

#### 4.2.2. 计算隶属度

结合上述两个表 1、表 2 进行隶属度计算。通过计算各个正负指标的隶属度函数, 得到隶属度矩阵  $R_i$ 。

$$R_i = \begin{bmatrix} r_1^{(1)} & r_1^{(2)} & \cdots & r_1^{(5)} \\ r_2^{(1)} & r_2^{(2)} & \cdots & r_2^{(5)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_n^{(1)} & r_n^{(2)} & \cdots & r_n^{(5)} \end{bmatrix}$$

为了反映各项指标各个等级的贡献度, 将其在 0~1 之间划分为五个等级, 其对应的评分值矩阵  $\alpha = (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9)$ , 评分越高, 表示其对水资源承载力的贡献度就越大[13]。在综合评定时, 评价结果矩阵 B 的综合评分值  $\alpha$  的计算公式如下所示。

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^5 r_j^{(s)} \cdot \alpha_j}{\sum_{j=1}^5 r_j^{(s)}} \quad (4-1)$$

#### 4.2.3. 确定权重

运用层次分析法对曲靖市水资源承载力各评价指标体系建立判断矩阵, 各级权重如表 3 所示。

Table 3. AHP analytic hierarchy process results

表 3. AHP 层次分析结果

目标层	准则层	权重	指标层	权重值
水资源承载力	水资源系统	0.0869	人均水资源量	0.0119
			水资源开发利用	0.0390
			产水模数	0.0222
			降水量	0.0139
	经济系统	0.4048	工业用水率	0.0560
			第三产业比重	0.1801
			万元 GDP 用水量	0.0880
			万元工业增加值用水量	0.0808
	生态系统	0.1841	生态环境用水率	0.0835
			工业废水排放量	0.1006
	社会系统	0.3242	人口密度	0.0426
			人口自然增长率	0.0918
人均 GDP			0.1897	

Table 4. Summary of conformance test results

表 4. 一致性检验结果汇总

最大特征根	CI 值	RI 值	CR 值	一致性检验结果
14.814	0.151	1.56	0.097	通过

通常来说, CR 值越低, 判断矩阵的一致性越好, 当 CR 值小于 0.1 时, 判断矩阵符合一致性检验; 若 CR 值超过 0.1, 则表示不一致性, 在重新调整判断矩阵后, 再进行分析。此次 13 阶判断矩阵的 CI 值为 0.151 (表 4), 针对 RI 值查表为 1.560, 故 CR 值为  $0.097 < 0.1$ , 说明该判断矩阵符合一致性检验, 计算得到的权重具有一致性。

#### 4.3. 水资源承载力综合评分等级

根据指标隶属度表及各指标权重表(表 3)计算得到模糊评价结果, 利用公式(4-2)计算得出曲靖市 2020 年水资源承载力综合值, 再根据表 5 确定曲靖市水资源承载力综合评分等级。

$$F_i = F1*0.1 + F2*0.3 + F3*0.5 + F4*0.7 + F5*0.9 \quad (4-2)$$

**Table 5.** Classification of comprehensive score of water resources carrying capacity in Qujing City

**表 5.** 曲靖市水资源承载力综合评分等级划分

综合评分值	承载力状况
0.1~0.3	严重超载
0.3~0.5	超载
0.5~0.7	临界承载
0.7~0.9	盈余承载

#### 4.4. 曲靖市 2016~2020 年水资源承载力变化分析

根据上述方法计算得到曲靖市 2016~2020 水资源承载力(表 6)。

**Table 6.** Fuzzy evaluation results of water resources carrying capacity from 2016 to 2020

**表 6.** 2016~2020 水资源承载力模糊评价结果

年份	准则层	弱	较弱	一般	强	较强	最大隶属等级	承载力值 F
2016	水资源系统	0.0000	0.0126	0.0012	0.0227	0.0504	较强	0.0656
	经济系统	0.0000	0.1902	0.2004	-0.0418	0.0560	一般	0.1784
	生态系统	0.1841	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	弱	0.0184
	社会系统	0.0000	0.1117	0.1206	0.0461	0.0457	一般	0.1673
	综合评价	0.0339	0.1143	0.1204	0.0000	0.0419	一般	0.1355
2017	水资源系统	0.0000	0.0111	0.0027	0.0198	0.0532	较强	0.0665
	经济系统	0.0000	0.1913	0.2195	-0.0380	0.0560	一般	0.1909
	生态系统	0.1841	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	弱	0.0184
	社会系统	0.0000	0.1066	0.1192	0.0000	0.0918	一般	0.1742
	综合评价	0.0339	0.1130	0.1277	-0.0137	0.0570	一般	0.1429
2018	水资源系统	0.0000	0.0130	0.0091	0.0305	0.0425	较强	0.0681
	经济系统	0.0000	0.1613	0.0158	-0.0084	0.1801	较强	0.2125
	生态系统	0.1841	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	弱	0.0184
	社会系统	0.0000	0.0708	0.1616	0.0000	0.0918	一般	0.1847
	综合评价	0.0339	0.0894	0.0596	-0.0007	0.1064	较强	0.1552

Continued

2019	水资源系统	0.0004	-0.0004	0.0000	0.0363	0.0368	较强	0.0584
	经济系统	0.0000	0.0000	0.2030	0.0217	0.1801	一般	0.2788
	生态系统	0.1841	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	弱	0.0184
	社会系统	0.0000	0.0213	0.1579	0.0531	0.0918	一般	0.2052
	综合评价	0.0339	0.0069	0.1334	0.0292	0.1059	一般	0.1878
2020	水资源系统	0.0012	0.0126	0.0000	0.0409	0.0321	强	0.0615
	经济系统	0.0000	0.0000	0.3035	0.1265	0.0808	一般	0.3130
	生态系统	0.0288	0.1747	-0.0194	0.0000	0.0000	较弱	0.0456
	社会系统	0.0000	0.0637	0.0614	0.1072	0.0918	强	0.2075
	综合评价	0.0054	0.0539	0.0985	0.1232	0.0653	强	0.2110

从表 6 中可以分析得到:

1) 曲靖市水资源子系统承载力值较低, 且明显低于综合承载力值, 2016 年、2017 年、2018 年水资源系统承载力值相对较高, 2018 年水资源系统评分值达到 0.0681, 2016 年、2017 年水资源系统承载力值在 0.0656 左右; 其余年份水资源系统评分值相对较低, 其中 2019 年达到最低, 承载力值在 0.0584 左右。主要是因为 2016~2020 年间产水模数和降水量的不断减少, 产水模数由 2016 年的 43.3 减少到 2020 年的  $33 \text{ m}^3/\text{km}^2\cdot\text{a}$ ; 而降水量由 2016 的 317.9 降低到 2020 的 282 ( $10^8 \text{ m}^3$ )

2) 2016~2020 年, 曲靖市经济子系统的承载力呈现出较大的增长趋势且均高于综合承载力值。最低值出现 2016 年, 为 0.1784 左右, 此后一直处于上升状态, 到 2020 年上升到 0.3130。这说明曲靖市在经济发展、工业结构优化、技术水平不断提升的同时, 万元 GDP 用水量和万元工业增加值用水量不断下降, 对提升城市经济承载能力起到了重要作用。。

3) 曲靖市的生态子系统承载力值整体偏低, 保持在 0.0184 左右, 在 2020 年达到最高, 为 0.0456。这说明随着经济社会的发展, 人们对生态环境的要求日益提高, 生态环境用水率的逐年提高, 工业废水的排放量也在不断降低, 对改善水资源承载力状况具有重要意义。

4) 曲靖市社会子系统评分值自 2016~2020 呈逐年递增的趋势, 最低值出现 2016 年, 为 0.1673 左右, 此后一直处于上升状态, 到 2020 年上升到 0.2075。这表明随着社会的发展, 人口密度的不断变小, 人口增长放缓, 都对水资源承载力状况的提高起了积极的作用。

5) 曲靖市水资源综合承载力值在 2016~2020 年间都界于 0.1~0.3, 属于严重超载状态。但是随着社会经济的发展, 经济子系统和社会子系统对水资源承载力的积极作用越来越明显。水资源承载力值 F 在不断升高, 由 2016 年的 0.1335 升高到 2020 年的 0.2110, 曲靖市水资源承载力状况整体处于逐步变好的趋势。

## 5. 结论

基于水资源承载力的相关理论, 将曲靖市水资源、经济、社会、生态环境状况有机结合起来, 对 2016~2020 年的水资源承载力变化情况进行了以下分析:

1) 对曲靖市水资源的开发和利用情况进行了调研与分析后发现, 该区域存在水资源配置不合理, 第一产业用水量大, 农业发展与水资源承载力不适应等问题。

2) 为评价曲靖市水资源承载能力, 本文从水资源、经济、社会、生态环境等几个角度出发, 选取了相应指标, 建立了曲靖市水资源承载力评价指标体系。参照国际、国内有关标准制定了评价指标的分级

标准, 并将其划分为五个级别; 运用 AHP 方法确定了指标的权重; 采用多层次模糊综合评判方法, 对 2016~2020 年曲靖市的水资源承载能力变化情况进行了分析。

3) 曲靖市水资源综合承载力在 2016~2020 年间都处于严重超载状态, 但随着经济子系统和社会子系统的改善, 曲靖市水资源承载力状况正在逐步趋好。

## 参考文献

- [1] 李骥飞. 长三角地区水资源承载力及协调发展研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2020.
- [2] Falkenmark, M. and Lundqvist, J. (2010) Towards Water Security: Political Determination and Human Adaptation Crucial. *Natural Resources Forum*, **22**, 37-51. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1998.tb00708.x>
- [3] Harris, J.M. and Kennedy, S. (1999) Carrying Capacity in Agriculture: Global and Regional Issues. *Ecological Economics*, **29**, 443-461. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(98\)00089-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(98)00089-5)
- [4] Sleeser, M. (1990) Enhancement of Carrying Capacity Options. The Resource Use Institute, London.
- [5] 汪恕诚. 建设节水型社会保障经济社会可持续发展[J]. 水利建设与管理, 2006, 26(11): 3.
- [6] 李莉, 余建林, 浦国佳, 等. 嘉兴市水资源生态足迹动态分析[J]. 净水技术, 2021, 40(5): 7.
- [7] 李玮丽. 兰州市水资源承载力评价及模拟预测[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [8] 胡鑫. 曲靖市水资源保护对策及建议[J]. 科技创新导报, 2016, 13(27): 77-78+80.
- [9] 曲靖市水务局. 曲靖市水资源公报(2016-2020) [M]. 曲靖: 曲靖市水文水资源局, 2017-2021.
- [10] 肖婧. 花垣县水资源承载力研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
- [11] 夏业领. 淮河生态经济带安徽段水资源承载力综合评价及预测[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [12] 吴光娴. 湖北省水资源承载力评价与预测研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 中南财经政法大学, 2019.
- [13] 刘一江. 张家口市水资源承载力评价研究及监测预警[D]: [硕士学位论文]. 大连: 辽宁师范大学, 2020.