

长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力的 综合评价及时空演变研究

何伟 陈素雪 仇沪毅¹

(北京邮电大学 经济管理学院, 北京 100876)

【摘要】: 长江三峡生态经济走廊地区作为我国最大的战略性淡水资源库和长江上游重要生态屏障, 面临着水资源利用不协调、水资源供需矛盾失衡等危机。水资源承载力是衡量一个地区可持续发展的重要指标, 研究长江三峡生态经济走廊水资源承载力动态变化特征, 对促进走廊地区水源涵养和生态文明建设具有积极意义。运用 TOPSIS 和熵权法综合评价方法, 基于系统论和供需理论构建水资源承载力综合评价指标体系, 分析长江三峡生态经济走廊各区县 2015~2019 年的水资源承载力动态变化及区域差异。研究发现: 样本考察期间, 长江三峡生态经济走廊各区县水资源承载力总体呈波浪式上升趋势, 承载力水平基本维持在低级水平, 其中生态子系统和社会经济子系统的贡献力度最大, 中央和地方政府对走廊地区的水源涵养保护起到良好的带头引领作用, 各区县水资源供需矛盾有所缓和但仍较为紧张。据此, 本文提出发挥宏观调控作用, 进一步推进区域内产业结构绿色升级、水资源高效利用和高质治理等政策建议。

【关键词】: 长江三峡 生态经济走廊 水资源承载力 TOPSIS 模型

【中图分类号】: TV213.4 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)06-1208-12

水环境作为社会、经济系统存在和发展的基本因素, 它的承载力状况对区域社会经济高质量发展起着至关重要的作用^[1]。随着我国人口增长和城镇化进程不断加快, 水资源需求将在较长一段时间内持续增长, 水资源短缺和水质恶化逐渐成为全国普遍存在的问题, 水资源安全保障的主要矛盾也从供给不足转向过度承载^[2], 水资源承载力已经成为我国区域经济社会健康发展的重要制约因素^[3]。作为长江经济带的重要组成部分, 三峡库区在促进长江沿江地区协同发展、东西部经济交流和西部大开发中具有十分重要的战略地位。基于国家高度重视和保护三峡库区生态稳定性的迫切需要, 何伟等人从生态经济、流域经济、经济走廊的概念界定出发, 综合其他学者研究成果, 首次提出建设“长江三峡生态经济走廊”, 即以长江三峡流域作为地理空间载体的特色生态经济走廊, 从流域经济、功能区域、特色板块、整体规划视角构建“一轴、双向、四肢、多节”总体架构新格局, 坚持使命定位、发展定位、特色定位、时代定位、天然定位五位一体, 进而形成长江流域生态经济的成长极和示范区^[4]。建设“长江三峡生态经济走廊”的提出受到了政府和社会各界广泛关注, 有力推动了形成长江生态合力, 助推长江三峡地区高质量发展, 走出一条保护生态与发展经济的共赢之路, 这对于实现库区水源涵养、保障国家淡水资源安全以及新时代生态文明建设具有重要意义。

但实践中建设“长江三峡生态经济走廊”还面临着诸多生态问题, 水源涵养与经济发展之间并未实现良好互动, 水土流失、水体污染、水资源供需失衡等问题严重影响库区和周边城市的可持续健康发展。因此, 在国家关切的战略背景和 2020 年三峡水库实现连续 11 年 175m 试验性蓄水任务的现实背景之下, 生态走廊地区各区县面临着实现经济高质量发展和维持水生态平衡的

¹作者简介: 何伟(1964~), 男, 教授, 主要研究方向为生态经济与可持续发展. E-mail: byhw@bupt.edu.cn; 仇沪毅 E-mail: qiuluyi@bupt.edu.cn

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(19ZDA090)

两大艰巨任务，产业结构单一、移民安置复杂、生态环境本底脆弱性也让走廊地区水资源系统付出沉重的历史代价，库区水资源承载力水平也随着人口增长和城镇化步伐加快发生变化。因此，有必要从时间和空间两个维度深度剖析三峡生态经济走廊各区县水资源承载力的时空演变，找出影响其变化的关键因素和成因，为建设长江三峡生态经济走廊提供重要抓手。

梳理相关文献，国外关于资源环境承载力的研究虽然起步较早，但对水资源承载力的研究通常是与其他环境或资源要素相结合来探讨可持续发展问题^[5]。相比之下，国内学者对水资源承载力评价研究则更为具体，主要分为两类，一类是水资源承载力定义、评价对象和指标等方面的定性研究，一类是运用不同模型方法测度水资源承载力水平的定量研究。就研究对象而言，主要包括区域水资源承载力^[6]、城市水环境承载力^[7]、流域水资源承载力^[8]、水生态承载力^[9]等；从研究方法上看，以系统动力学^[10]、主成分分析法^[11]、投影寻踪模型^[12]、PSR-MSD 模型^[13]、模糊综合评价模型^[14]居多，也有采用确定指标权重与模型相结合的方法，如 AHP-TOPSIS 模型^[15]。此外，从研究范围来看，相关学者主要以国内重要流域或河流^[16,17,18,19]对区域内部及周边省市的生态和社会影响为切入点，构建适宜的方法模型来评估其水资源承载力水平。而对于长江流域水资源承载力的现有研究多侧重于长江经济带及沿江部分省市，如孙雅茹等^[20]以南京市为典型对长江下游城市水资源承载力水平进行评估和预测；杨康煜等^[21]着重分析武汉市 2014~2018 年水资源承载力的时空动态变化并得出整体呈逐年上升的结论；宋帆等^[22]对长江下游地区城市的水资源承载力水平进行客观排序；田培等^[23]对长江经济带各省市 2015~2017 年的水资源环境承载力进行评估；李放等^[24]基于可持续发展理论和复合系统原理，构建出三峡库区重庆段水资源承载力多目标优化模型，并得出水环境污染和水资源利用是制约库区水资源承载力提高的重要因素。

综合以上发现，国内学者对水资源承载力的研究视角逐渐趋向多元化，但现有关于长江流域水资源承载力的研究更多立足于长江流域内某一省(市)或特定区域，鲜有研究着眼于长江三峡生态经济走廊这一战略定位，将其作为一个整体进行综合评判。然而，如何破解长江三峡生态经济走廊资源禀赋与经济社会之间的发展桎梏，改变各区(县)受制于自然环境和产业基础约束下的落后现状，除了坚持“以生态优先、绿色为底本”促进长江三峡地区经济发展生态化、产业发展绿色化外，水资源利用高效化是库区亟待解决的另一个关键问题之一。因此，本文以供需理论和系统论为理论基础，从水资源子系统—社会经济子系统—生态子系统中选取 18 项指标构建评价指标体系，采用熵权法与 TOPSIS 模型综合分析长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力水平，并利用 ArcGIS10.2 软件绘制各区县水资源承载力等级分布地图，剖析近 5 年 11 个区(县)水资源承载力的动态变化规律及影响因素，通过科学判断走廊地区水资源供需状况，为保护水生态环境、防治水污染、改善水域条件、缓解水资源供需紧张等问题提供解决路径和发展方向。

1 研究区域概况

作为一个地理区域，长江三峡有狭义和广义之分。狭义的长江三峡又名岷江或大三峡，是指西起重庆奉节县的白帝城，东至湖北省宜昌市南津关这一段的长江干流；广义的长江三峡即三峡库区，指因三峡工程的兴建而形成的独特地理范畴，地理空间面积约 5.8 万 km²，包括重庆 22 个区县和湖北 4 个区县。而“长江三峡生态经济走廊”是基于长江流域发展和生态文明建设的新战略需要，包含长江三峡地区空间发展的新范围，根据《三峡公报后续总体规划》，将长江三峡生态经济走廊划分为廊首、廊腹和廊尾三大区域，包含重庆 11 个区县和湖北 4 个区县，如图 1 所示。考虑到长江三峡生态经济走廊大部分区域位于重庆市，且重庆市也处于库区的上、中游段，因此本文重点聚焦于长江三峡生态经济走廊的廊首和廊腹地区的 11 个区(县)为研究对象，以阐释其水资源承载力的时空变化差异。

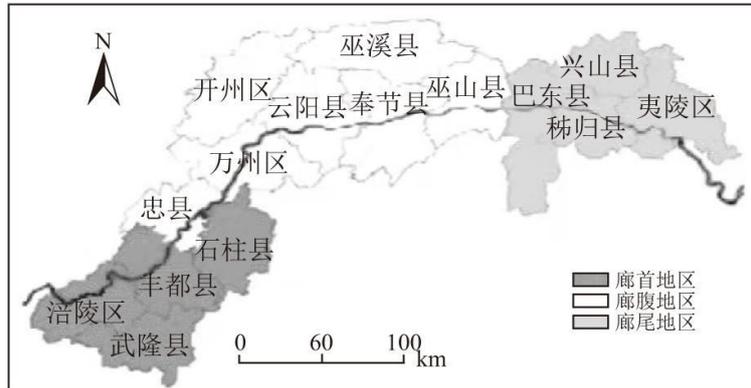


图 1 长江三峡生态经济走廊地区 15 个区(县)分布

来源：《建设长江三峡生态经济走廊的必要性及总体架构》

2 研究方法

2.1 水资源承载力评价指标体系构建

影响水资源承载力水平的因素来自多个方面，不仅与水资源自身的水资源总量直接相关，同时与社会经济发展水平、生态环境治理力度等多方面有着密切联系。因而水资源承载力系统是一个水资源—社会经济—生态环境 3 个子系统之间相互耦合的多层次复杂系统。因此，本文综合考虑影响水资源承载力的多方因素，根据已有文献中的水资源承载力评价指标体系^[25, 26, 27, 28, 29]，结合三峡生态经济走廊各区县的实际情况，基于指标数据的可获取性、全面性、代表性、客观性原则，构建了由水资源、社会经济和生态环境 3 个子系统、7 个一级指标和 18 个二级指标组成的长江三峡生态经济走廊地区的水资源承载力评价指标体系，具体如表 1 所示。

表 1 长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力评价指标体系

目标层	准则层	一级指标	二级指标	计算方法	指标属性
水资源承载力	水资源系统	供给量	人均水资源量	水资源总量/常住总人口	正
			地表水资源	统计数据	正
			地下水资源	统计数据	正
			降水量	统计数据	正
			产水模数	水资源总量/区域总面积	正
		用水量	第一产业用水量	统计数据	负
			第二产业用水量	统计数据	负
			第三产业用水量	统计数据	负

			人均用水量	用水总量/人口总量	负
			万元 GDP 用水量	用水总量/GDP 总量	负
	社会经济系统	经济发展	人均 GDP	地区生产总值/常住人口	正
			第三产业比重	第三产业生产总值/地区生产总值	正
		人口发展	人口密度	区域面积/常住人口	负
			人口自然增长率	统计数据	负
		社会发展	城镇化率	城镇人口总数/常住人口	正
	生态系统	开发利用	水资源开发利用率	供水总量/水资源总量	负
			人均水资源开发利用率	用水总量/人口总量	负
		绿化治理	森林覆盖率	统计数据	正

2.2 研究方法确定

建立适宜的区域水资源承载力评价指标模型,对区域经济发展、生态环境保护、水资源状况改善以及水资源可持续性利用具有重要的理论和实践意义。本文以长江三峡生态经济走廊地区为评价对象,以2015~2019年各区(县)水资源承载力时空演变为研究内容,由于涉及11个评价对象和18项评价指标,样本含量和指标数目比较多。而TOPSIS模型(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)即优劣解距离法,该方法在指标多少、样本含量和数据分布等方面都没有严格限制和要求,且能够实现不同评价指标在同一年份之间的横向比较和同一评价指标在不同年份之间的纵向比较^[30]。因此,考虑到目标决策和数据易操作问题,本文选择构建TOPSIS模型,通过计算贴近度的大小来说明承载力水平的高低。

2.2.1 确定指标权重

为客观赋值长江三峡生态经济走廊水资源承载力18项指标,本文采取熵权法进行统计运算,主要原理是将负向指标转为正向指标,计算每项指标的信息熵,在此基础上对各项指标归一化处理,得出最终结果即权重。如果权重值越大,说明该项指标反映的信息量越多,对各区(县)水资源承载力的影响越大;反之亦然。具体计算步骤如下:

(1) 列出初始评价指标矩阵

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2) 建立标准化评价矩阵

运用极差法对初始数据进行无量纲化处理, 以实现指标正向化。如式(2)、式(3)所示, 分别为正向指标和负向指标标准化公式。其中: x_{ij} 为第 i 年(地区)第 j 项指标的原始数据; $\text{Max}(x_{ij})$ 和 $\text{Min}(x_{ij})$ 分别为第 i 年(地区)第 j 项指标的最大值和最小值。

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \text{Min}(x_{ij})}{\text{Max}(x_{ij}) - \text{Min}(x_{ij})} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{\text{Max}(x_{ij}) - x_{ij}}{\text{Max}(x_{ij}) - \text{Min}(x_{ij})} \quad (3)$$

将各项数据指标进行标准化处理之后, 得到标准化评价矩阵, 如式(4)所示。其中, R 为标准化矩阵, $r_{ij}(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 表示第 i 个年(地区)第 j 项指标的标准化值, n 和 m 分别代表评价对象和评价指标总数。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(3) 计算第 i 年(地区)第 j 项指标的熵值

$$E_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij}), \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (6)$$

其中, k 与样本数量有关, 常取 $k=1/\ln n$, P_{ij} 是第 i 年第 j 项指标的比重。此外, 若 $P_{ij}=0$, 则令 $P_{ij} \ln P_{ij}=0$ 。

(4) 计算各项指标的熵权

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^m (1 - E_j)}, \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

其中, W_j 的取值范围是 $[0, 1]$, $\sum_{j=1}^m W_j = 1$ 。熵权系数 W_j 越大, 说明该项指标所包含的信息量越多, 那么其对水资源承载力综合评价的作用就越大。

2.2.2 计算水资源承载力评价

为得出长江三峡生态经济走廊 11 个区(县)在 2015~2019 年的水资源承载力评价, 本文运用 TOPSIS 模型来解决这一问题。其基本思路是: 首先将负向指标标准化处理, 根据式(7)计算的各项指标权重构建加权标准化评价矩阵, 从中筛选历年每一项指标所对应的最大值和最小值, 并利用欧式距离法计算 11 个区(县)与最大值和最小值之间的差距, 进而获得每一年各区(县)未归一化的得分即贴近度。贴近度的大小反映各评价对象与理想状态的关系, 贴近度越大, 表明该区(县)水资源承载力评价越高, 水资源承载力水平越接近理想状态。具体步骤如下:

(1) 极小型指标正向化

$$\begin{aligned} X_{ij} &= \max_{\bar{y}} - x_{ij}, \\ (i &= 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (8)$$

(2) 指标标准化处理

$$z_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2} \quad (9)$$

(3) 构建加权标准化评价矩阵

$$Z = W_j R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11}w_1 & r_{12}w_1 & \dots & r_{1m}w_1 \\ r_{21}w_2 & r_{22}w_2 & \dots & r_{2m}w_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1}w_m & r_{n2}w_m & \dots & r_{nm}w_m \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: W_j 为指标权重; R_{ij} 为指标标准化矩阵。

(4) 确定正、负理想解

令 Z^+ 表示最优方案(正理想解), Z^- 表示最劣方案(负理想解), 分别代表加权规范化评价矩阵的最大值和最小值:

$$\begin{aligned} Z^+ &= \{ \max_{\bar{y}} | i = 1, 2, \dots, m | \} \\ &= \{ z_1^+, z_2^+, \dots, z_m^+ \} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} Z^- &= \{ \min_{\bar{y}} | i = 1, 2, \dots, m | \} \\ &= \{ z_1^-, z_2^-, \dots, z_m^- \} \end{aligned} \quad (12)$$

(5) 计算欧式距离

确定正、负理想解之后，计算各评价对象与正理想解和负理想解之间的距离。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_j^+ - z_{ij})^2}, \quad (13)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_j^- - z_{ij})^2}, \quad (14)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

式中： D_i^+ 和 D_i^- 分别为每个年份评价指标到正理想解和负理想解的距离； Z^+ 和 Z^- 分别为历年评价中的最偏好值和最不偏好值。其中， D_i^+ 值越小，表示评价对象与正理想解的距离越近，即水资源承载力的水平越高； D_i^- 值越小，表示评价对象与负理想解的距离越近，即水资源承载力的水平越低。

(6) 计算各评价对象与正理想解的贴近度

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (15)$$

根据计算所得的 S_i ($0 \leq S_i \leq 1$) 值的大小进行排序， S_i 的值越大即越离 1 越近，表明评价对象越接近理想状态，评价结果越优，反之越劣。

2.3 数据来源

根据研究构建的水资源承载力评价指标体系及 TOPSIS 模型要求，本文所涉及到的有关长江三峡生态经济走廊地区的水资源、社会经济和生态环境方面的数据主要来自于重庆市 2015~2019 年的《统计年鉴》《水资源统计公报》《水土流失公报》及各区县的《国民经济和社会发展公报统计公报》和《统计年鉴》。

3 长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力时空演变实证研究

为了具体考察长江三峡生态经济走廊地区 11 个区(县)水资源承载力的时空差异，根据所构建的评价指标体系和式(15)，参考文献[31]，现将水资源承载力划分为 5 个评价等级，评价值越小即等级越低，说明该区域水资源供需矛盾突出，水资源存在不合理利用问题，反之，这说明该区域水资源供需利用协调，水资源承载力水平较高。具体见表 2。

表 2 水资源承载力评价标准

评价结果	[0, 0.2)	[0.2, 0.4)	[0.4, 0.6)	[0.6, 0.8)	[0.8, 1)
评价分级	警戒	低级	中级	良好	高级
分级说明	水资源供需严重失衡	水资源供需中度失衡	水资源供需轻微失衡	水资源供需较合理	水资源供需协调

3.1 水资源承载力的时间差异评价分析

利用式(15)并结合2015~2019年长江三峡生态经济走廊地区重庆段11个区县数据,计算出廊首、廊腹及各子系统的水资源承载力综合评价价值,数值越大,表明水资源承载力越高,评价结果如图2所示。

如图2直观显示,样本考察期间,长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力与廊首、廊腹地区保持相似的变化趋势,其中廊首地区的变化幅度较大,廊腹地区变化幅度较小,总体呈现出先降后增趋势。从各个子系统水资源承载力评价价值来看,水资源子系统、社会经济子系统和生态子系统总体上呈现出先降后增的变化趋势,但生态子系统的变化幅度较大,水资源承载力评价价值维持在0.4以上。具体可将长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力的变化分为3个阶段。

第一阶段为2015~2017年,该时间段内廊首、廊腹及长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力呈波浪式下降趋势。廊首地区水资源承载力由2015年的0.342下降至0.121,长江三峡生态经济走廊地区由2015年的0.349下降到0.206,水资源等级从中级降为警戒状态,而廊腹地区水资源等级保持不变。此外,水资源子系统基本上变化不大,从2015年的0.336降至0.319;社会经济子系统由2015年的0.355降至0.156,下降幅度较为明显;而生态子系统在2015~2017年呈现出先降后增趋势。一方面,从社会经济子系统变化幅度来看,此时间段11个区县的人均GDP、人口自然增长率及城镇化率不断提高,且随着《长江经济带发展规划纲要》《长江中游城市群发展规划》《全国对口支援三峡库区合作规划(2014-2020年)》相继出台,长江三峡库区整体经济社会发展潜力得到充分释放,第一产业和第二产业用水量也占据了70%以上。在此阶段,快速增长的经济水平和库区水资源承载力之间协调性低下,农业生产和工业活动所需用水量较大、用水效益低,这导致长江三峡生态经济走廊地区整体水资源承载力降低。另一方面,自重庆市细化长江三峡库区的发展定位即在优先考虑生态安全的条件下发展经济后,重庆市将库区环境保护和水源涵养摆在首要位置,投入大量资金和人力加强库区水土流失治理和绿化投资,水环境综合治理和安全保护水平持续改善,这或许是该时间段内库区生态子系统承载力呈增长趋势的重要原因之一。

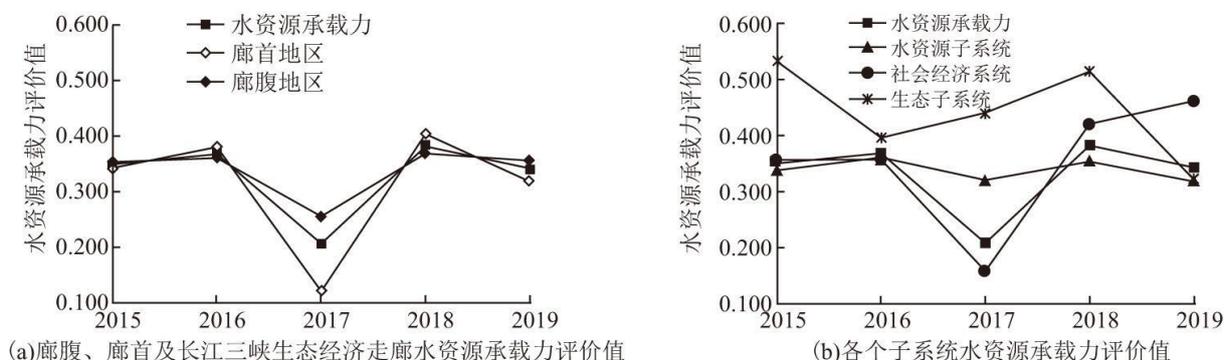


图2 2015~2019年长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力评价结果

第二阶段为2017~2018年,此时间段廊首、廊腹及长江三峡生态经济走廊地区均呈直线上升趋势,各个子系统也是如此。其中,廊首地区的水资源承载力由2017年的0.121升至0.403,社会经济子系统由0.156升至0.419,水资源承载力等级随之由警戒转变为中级水平。而长江三峡生态经济走廊地区、廊腹地区、水资源子系统的水资源承载力水平变化幅度不大,承载力等级依旧处于低级水平;生态子系统水资源承载力由0.439涨到0.513,这与2017年国务院发布出台的《长江经济带生态环境保护规划》密切相关,长江经济带生态建设更加注重水环境安全保护和流域综合治理,三峡库区的水土流失治理和生态修复工作因而起到良好成效,整体上生态子系统水资源承载力评价价值有所上升。同时,2018年各区县的第三产业比重和第三产业用水量较2017年有所上升,如丰都县第三产业比重由28%升到38.2%,万元GDP用水量也相应出现下降趋势,这说明库区产业结构进一步优化,第二产业用水量较之前有所减少,水资源供需矛盾较为缓和,且生态文明建设和绿色发展理念使得库区水资源承载力和产业生态化渐趋协调,水资源开发利用合理,这也是2017~2018年水资源承载力直线上升的主要原因之一。

第三阶段是2018~2019年，廊首、廊腹、长江三峡生态经济走廊地区及水资源子系统、生态子系统水资源承载力呈下降状态，分别由2018年的0.403、0.368、0.381、0.352、0.513降为0.318、0.355、0.341、0.316、0.320，生态子系统由中级水平降为低级水平；而社会经济子系统由0.419上升为0.460，处于上升状态。继习近平总书记在重庆调研考察期间提出“保护好三峡库区和母亲河”之后，重庆市及各个区县分别出台了一系列保护水环境的政策方针，严格治理和把控区域水资源污染和水资源浪费问题，旨在推动走廊地区经济建设与生态环境协同发展。但2019年11个区县水土流失综合治理成效不佳，水资源存在严重浪费现象，这也间接说明库区多年粗放型经济发展方式和“经济GDP”主义对库区水资源造成不良影响，调和人口增长、产业转型升级和库区水源水质保护之间的矛盾还有很长的路要走，并非一朝一夕能够彻底解决，这也是此时间段水资源承载力波动的原因之一。

3.2 水资源承载力的地域差异评价分析

除了分析长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力的时间差异之外，评价其在地域方面的变化特征有助于我们具体了解11个区县的水资源供需情况，以便从空间协调角度为提高三峡库区水资源承载力提供针对性措施。综合评价结果见图3、图4。

(1) 从目标层评价结果来看，长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力综合评价值为0.329。

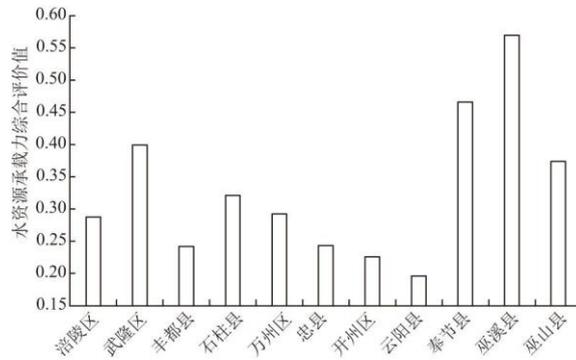


图3 长江三峡生态经济走廊地区11个区(县)水资源承载力综合评价值

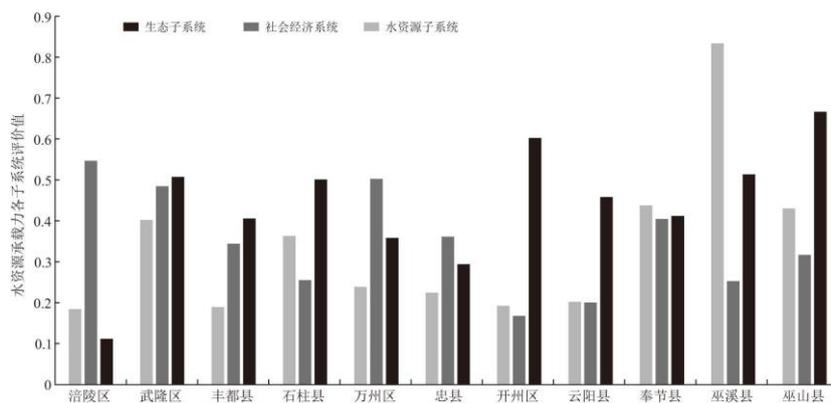


图4 长江三峡生态经济走廊地区11个区(县)水资源承载力各子系统评价值

各区县综合评价值由高到低依次为巫溪县、奉节县、武隆区、巫山县、石柱县、万州区、涪陵区、忠县、丰都县、开州区和云阳县。其中，巫溪县、奉节县、武隆区和巫山县水资源承载力评价结果高于总体均值，其余7个区县均低于总体均值，云阳县

最低, 仅为 0.196。可以看到, 廊首地区 4 个区县的水资源承载力在 (0.2, 0.4) 之间变动, 而廊腹地区 7 个区县水资源承载力参差不齐, 其中巫溪县承载力水平位居长江三峡生态经济走廊地区第一, 云阳县最低。这与廊腹地区大力发展生态旅游业息息相关, 且巫溪县、奉节县、巫山县水资源量充沛, 第三产业比重也基本稳定在 50% 左右; 而云阳县、忠县、开州区生态环境较为脆弱, 发展新兴生态绿色产业基础薄弱, 产业结构转型困难且进程缓慢, 同时水资源供给量相对匮乏, 加之人口密度较大, 造成区域内水资源压力较大, 需要引起关注。

(2) 从准则层评价结果来看, 长江三峡生态经济走廊地区水资源子系统评价值为 0.337, 各区县评价水平由高到低依次是巫溪县、奉节县、巫山县、武隆区、石柱县、万州区、忠县、开州区、云阳县、丰都县、涪陵区, 其中巫溪县的水资源子系统综合承载力为 0.835, 而涪陵区最低, 评价值为 0.184。从社会经济子系统看, 长江三峡生态经济走廊地区社会经济子系统的综合评价值为 0.349, 各区县评价值由高到低依次为涪陵区、万州区、武隆区、奉节县、忠县、丰都县、巫山县、石柱县、巫溪县、云阳县、开州区, 其中涪陵区的社会经济子系统的综合承载力为 0.548, 开州区最低为 0.168。从生态子系统来看, 长江三峡生态经济走廊地区生态子系统评价值为 0.440, 各区县评价值由高到低排序依次是开州区、巫山县、巫溪县、武隆区、石柱县、云阳县、奉节县、丰都县、万州区、忠县、涪陵区, 其中开州区生态子系统评价值最高, 为 0.603, 涪陵区最低, 评价值为 0.111。从总体上看, 生态子系统对长江三峡生态经济走廊地区贡献力度最大, 这表明 2015 年之后重庆市对三峡库区各(区)县的水资源利用、水污染控制、水环境治理水平不断提高, 水土流失治理取得显著成效, 森林绿化面积的不断扩大大促进库区水源涵养和生态环境保护, 水资源开发利用与各区县经济产业发展相协调。

(3) 总体来看, 长江三峡生态经济走廊地区水资源承载力处于低级水平。究其原因, 一方面因为三峡库区属于限制开发区, 负有水土保持、生态涵养功能, 但由于受到区域内经济底子薄弱、发展空间狭窄、人口负荷压力大三重约束, 三峡移民和本地居民的生产生活用水需求等对水资源造成较大压力, 且在水资源开发利用过程中不可避免存在浪费、水质污染问题, 种种因素均影响了长江三峡库区的水资源利用效率和水环境安全。另一方面, 长江三峡生态经济走廊地区产业结构尚未得到全面优化, 各区县大部分处于工业化的初级阶段, 第一产业和第二产业用水量占比较大, 第三产业用水量基本上只占 4%~7% 左右。除此之外, 水资源开发利用的不合理也是导致水资源承载力处于低级水平的原因之一。如巫溪县水资源供给量丰富, 其综合承载力值处于良好等级, 但其 2015~2019 年的平均水资源利用开发率为 1.168%, 这表明巫溪县水资源未能得到充分合理开发利用。而且长江三峡生态经济走廊地区各区县万元 GDP 用水量均值为 57m³, 巫山县、忠县、万州区和奉节县的万元 GDP 用水量在 50m³ 以下, 而部分区县如武隆区、巫溪县、丰都县和云阳县达到 60m³ 以上, 说明各区县在经济发展同时还存在着水资源浪费问题, 水资源利用效率有待进一步提高。

3.3 水资源承载力的时空变化特征分析

根据以上结果, 利用 ArcGIS10.2 绘制 2015 和 2019 年长江三峡生态经济走廊水资源承载力等级空间分布图(图 5), 该图清晰展示了 11 个区(县)水资源承载力的空间演变特征。2015~2019 年长江三峡生态经济走廊水资源承载力等级变化有着或多或少的差异, 11 个区(县)都尚未达到高级水平, 水资源利用不协调问题较为严重。



图 5 长江三峡生态经济走廊水资源承载力等级空间分布图

采用国家基础信息地理系统 1:400 万数据,图中的涪陵市对应涪陵区、武隆县对应武隆区、万县市对应万州区、开县对应开州区、石柱土家族自治县对应石柱县。

从区域上看,廊首、廊腹地区水资源承载力的空间分布呈现出不同的变化趋势,其中水资源承载力水平最高的区(县)位于廊腹地区的巫溪县,且较为稳定,基本维持在中级和良好等级。巫溪县人均水资源量、地表水和地下水资源量比较丰富,其水资源子系统承载力平均水平属于高级状态,因而水资源承载力总体在空间分布上总体处于良好态势,足以支撑区域内产业发展和人口生活生产。其次,武隆县水资源承载力在 2015~2019 年基本稳定在中级水平,其位于长江三峡上游地区,生态环境较好且人口密度、人口自然增长率低于其他区(县),第三产业发展迅速于 2019 年达到 50.1%,因而水资源承载力较强。但是廊腹地区的开州区水资源承载力在 2015 年达到警戒水平,水资源子系统和社会经济子系统承载处于较低水平,水资源供给利用与社会经济发展之间的矛盾或成为阻碍开州区水资源承载力提高的最大原因。综上所述,廊首地区和廊腹地区水资源承载力水平差异较大,随着人民生活消费水平不断提高和城市化进程日益加快,整个长江三峡生态经济走廊地区水资源承载的社会经济发展和生态环境保护压力已经超过其所能支撑的最大限度,水资源供需矛盾日益突出。

从时间上看,长江三峡生态经济走廊各区县水资源承载力总体呈波浪式上升趋势。其中水资源承载力提高最为明显的是开州区,由 2015 年的警戒上升至中级状态,根据上文分析可知在中央和地方政府对长江三峡库区生态保护建设的高度重视之下,开州区对水资源的利用与保护日趋完善,城镇化进程步伐和生态文明建设步伐加快,生态子系统承载力得以提高,水资源承载力也随之上升。但是反观同处于廊腹地区的巫山县,其水资源承载力由 2015 年的中级水平降低到低级水平,且 2019 年巫山县水资源子系统和生态子系统承载力评价有所下降,而社会经济子系统评价由 2015 年的 0.264 升至 0.369,这说明库区较快的社会经济发展与水资源供给量不相协调,传统产业结转型缓慢和较大用水需求是影响其水资源承载力变化的主要原因,最后,其他 7 个区县(除巫溪县、武隆县之外)的水资源承载力水平基本处于低级等级,这也是目前长江三峡生态经济走廊水资源承载力水平的现状。因此,在经济高质量发展的时代背景下,长江三峡生态经济走廊如何协调好水资源、社会经济与生态子系统三者之间的关系,如何有效平衡水资源利用与生态化发展、水源涵养与生态文明建设之间的矛盾是重中之重。

4 结论与建议

建设“长江三峡生态经济走廊”是国家发展“水源涵养重要生态功能区”的重大举措之一,因此研究走廊地区水资源承载力变化、供应与需求现状,一方面可以为库区水资源利用效率和水环境平稳运行制定科学有效的提升对策,另一方面还可以为其他流域或生态经济走廊提高区域环境资源承载力提供思路,具有一定的理论和实践参考价值。本文从水资源、社会经济、生态发展 3 个方面构建水资源承载力评价体系,利用熵权法和 TOPSIS 模型对长江三峡生态经济走廊 11 个区(县)2015~2019 年水资源承载能力进行评估,并结合 GIS 进一步研究走廊地区水资源供需失衡的时空分异特征,主要得出以下结论:

(1)长江三峡生态经济走廊水资源承载力总体处于低级水平,呈波动上升趋势,于 2017 年达到最低,综合评价值为 0.206。其中,生态子系统对库区水资源承载力影响最大,其均值为 0.440,其后依次是社会经济子系统、水资源子系统。长江三峡生态经济走廊地区在推动经济社会发展的同时投入更多资金和资源用于节能减排和水质污染控制,但传统产业结构发展方式、较大的人口压力仍是造成走廊地区水资源供需矛盾的主要因素,其中工业和农业生产用水量居高不下是各区县面临的共性问题。

(2)空间上,各区(县)水资源承载力差异较大,水资源禀赋与当地产业结构和人口容量不相匹配,水资源供需关系较为紧张。其中云阳县和开州区经济发展相对落后,依靠传统第一产业为主发展地区经济,水资源匮乏,这导致了该地区水资源承载力基本处于警戒水平;奉节县和巫溪县处于中级水平,其他 8 个区县均处于低级状态,水资源供需失衡较为严重。其中传统产业发展、社会发达程度与可用水资源之间的矛盾是影响水资源承载力水平高低的主要原因。

(3)从时空变化综合角度来看,长江三峡生态经济走廊地区各区县水资源承载力基本位于低级水平,总体呈现先下降后上升的趋势。长江三峡生态经济走廊地区水资源供给与水资源需求之间的协调性得到一定提高,水资源承载力综合水平向好发展。但在三峡生态经济走廊地区本底生态环境严峻的限制条件下,部分区县经济转型缓慢,人口基数大和人口增长率较高,或者水资源匮乏与经济发展不相协调等原因导致水资源承载力水平有所下降。

基于以上研究结论,本文认为处理好长江三峡库区水源涵养与加快发展的关系,实现水资源利用与生态保护的良性互动,是提高长江三峡生态经济走廊水资源承载力的关键所在。据此提出以下建议:(1)走廊各区县应抓住绿色创新发展的新历史机遇,借力国家财政扶持和对口产业转移政策加快转变经济发展方式,因地制宜,扬长避短,根据区域优势资源和产业基础走产业生态化和生态产业化道路,以此减少水环境破坏、水质污染、水资源浪费带来的不利影响,促进产业结构优化升级。(2)地方政府也应加强生态环保的建设力度,重视区域内水资源分布不均问题,统筹协调长江流域和三峡库区水域管理,以农业节水为主提高水资源利用效率,发挥政府宏观调控作用加强对库区水资源管理,缓解产业发展和居民生活生产的用水压力。

参考文献:

- [1]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.
- [2]修红玲,朱文彬,韦家兴,等.中国水资源承载能力调控关键技术与政策研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(3):467-473.
- [3]郑江丽,李兴拼.基于协调性的区域水资源承载能力评估模型——以广州市为例[J/OL].水资源保护:1-8[2021-05-07].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20210409.1625.002.html>.
- [4]谢菊,何伟.加快促进长江三峡地区特色流域生态经济发展[N].重庆日报,2021-04-01(14).
- [5]MARIANNE MILANO, et al. Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands in the Ebro basin[J]. Journal of Hydrology, 2013, 500:114-126.
- [6]李焕,黄贤金,金雨泽,等.长江经济带水资源人口承载力研究[J].经济地理,2017,37(1):181-186.
- [7]李姣,严定容.湖南省及洞庭湖区重点城市水环境承载力研究[J].经济地理,2013,33(10):157-162.
- [8]文扬,周楷,蒋姝睿,等.陆水流域水环境与水资源承载力研究[J].干旱区资源与环境,2018,32(3):126-132.
- [9]王西琴,高伟,何芬,等.水生态承载力概念与内涵探讨[J].中国水利水电科学研究院学报,2011,9(1):41-46.
- [10]张礼兵,胡亚南,金菊良,等.基于系统动力学的巢湖流域水资源承载力动态预测与调控[J].湖泊科学,2021,33(1):242-254.
- [11]李燕,张兴奇.基于主成分分析的长江经济带水资源承载力评价[J].水土保持通报,2017,37(4):172-178.
- [12]金菊良,刘东平,周戎星,等.基于投影寻踪权重优化的水资源承载力评价方法[J/OL].水资源保护:1-8[2021-05-09].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20210125.1436.013.html>.

-
- [13]王晶, 耿燕, 郑雪. 基于 PSR-MDS 模型的水资源承载力评价研究——以河北省为例[J]. 人民长江, 2021, 52(3):81-86.
- [14]孟丽红, 韦雪梅, 吴绍雄, 等. 基于模糊综合评价模型的赣州市水资源承载力动态评价[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(4):300-309.
- [15]李少朋, 赵衡, 王富强, 等. 基于 AHP-TOPSIS 的江苏省水资源承载力评价[J/OL]. 水资源保护:1-10[2021-05-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20200723.1209.004.html>.
- [16]刘昌明, 王红瑞. 浅析水资源与人口、经济和社会环境的关系[J]. 自然资源学报, 2003(5):635-644.
- [17]秦莉云, 金忠青. 淮河流域水资源承载能力的评价分析[J]. 水文, 2001(3):14-17.
- [18]赵建世, 王忠静, 秦韬, 等. 海河流域水资源承载能力演变分析[J]. 水利学报, 2008(6):647-651, 658.
- [19]付玉娟, 何俊仕, 强小嫚, 等. 辽河流域各市水资源承载力计算分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1):171-176.
- [20]孙雅茹, 董增川, 周毅, 等. 基于结构熵权法的长江下游水资源承载力评价——以南京市为例[J]. 人民长江, 2018, 49(7):47-51.
- [21]杨康煜, 王妮菲, 黄歌. 基于 PSR-MSD 模型的长江经济带水资源承载力评价研究——以武汉市为例[J]. 价值工程, 2020, 39(5):290-293.
- [22]宋帆, 杨晓华. 基于改进突变级数法的长江下游水资源承载力评价[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3):24-32, 58.
- [23]田培, 张志好, 许新宜, 等. 基于变权 TOPSIS 模型的长江经济带水资源承载力综合评价[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2019, 53(5):755-764.
- [24]李放, 罗晓容. 三峡库区重庆段水资源承载力研究[J]. 人民长江, 2010, 41(21):35-38.
- [25]云龙, 段超宇, 李海霞. 宁夏水资源承载能力评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(1):36-40, 50.
- [26]刘子刚, 蔡飞. 区域水生态承载力评价指标体系研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(9):73-77.
- [27]刘佳骏, 董锁成, 李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2):258-269.
- [28]张兴, 桂梅. 资源环境承载力评价指标体系研究[J]. 中国土地, 2017(8):18-20.
- [29]热孜娅·阿曼, 方创琳, 赵瑞东. 新疆水资源承载力评价与时空演变特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7):1576-1585.
- [30]姜建惠, 顾君望, 张建英. 流域突发污染事件的生态服务价值损失评估方法研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1):163-167.

[31] 林龙圳, 李达, 林震. 基于熵权-TOPSIS 模型的库布齐沙漠地区水资源承载力评价[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, 54(4): 640-648.

[32] 王保乾, 杨晖, 竺运. 长江经济带水资源承载力综合评价研究[J]. 资源与产业, 2020, 22(1): 1-11.