DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.07.019

重庆市水资源承载力时空特征与承载状态

冉启智[1,2,3]，　廖和平[1,2,3]，　洪惠坤[1]

1. 西南大学 地理科学学院，重庆 400715；2. 西南大学 国土资源研究所，重庆 400715；
3. 西南大学 精准扶贫与区域发展评估研究中心，重庆 400715

摘要：通过构建集水资源、社会、经济、生态环境和协调管理多系统的综合评价体系，采用状态空间法，对重庆市水资源承载力进行测度，进行时间序列上的分析，并利用 GIS 软件，依据自然断裂点法，对重庆市的水资源承载力进行空间关联格局分析，借助 GeoDa 软件对水资源承载力进行空间自相关分析，得到了重庆市各区(县)的水资源承载力值及其时空分布特征，研究结果表明：① 2014－2018 年重庆市水资源承载力呈先下降、后上升、再下降的发展趋势. ② 重庆市水资源承载力的空间分布格局较稳定，部分区(县)有所变化；高值区和较高值区分布相对集中，主要分布在渝东北、渝东南区域以及中心城区；低值区和较低值区主要分布在渝西和渝东北区域的工农业产区，其他区域的少部分区(县)也有分布. 中值区分布最零散，各区域均有分布. ③ 2014－2018 年，重庆市各区(县)水资源承载状态呈现逐渐恶化的趋势，其变化趋势与水资源承载力变化趋势相吻合. ④ 重庆市各区(县)水资源承载力在空间上的分布不是随机的，在地理空间上存在明显的空间集聚效应. 总体上 2014－2018 年重庆市水资源承载力高高值集聚区主要分布在渝东北、渝东南和中心城区 3 个区域，低低值集聚区主要分布在渝东北和渝西两个区域. 重庆市水资源承载力在时间序列上呈现不稳定发展趋势，在空间分布上存在区域差距，渝东北和渝东南水资源承载力相对较高，渝西区域水资源承载力相对较弱.

关　键　词：赋权；水资源承载力；区域；分布；指标；承载状态
中图分类号：P344；P96　　**文献标志码**：A
文 章 编 号：1673－9868(2022)07－0169－15　　开放科学(资源服务)标识码(OSID)：

Spatial and Temporal Characteristics of Water Resources Carrying Capacity and Carrying State in Chongqing

RAN Qizhi[1,2,3]，　LIAO Heping[1,2,3]，　HONG Huikun[1]

1. *School of Geographical Science, Southwest University, Chongqing 400715, China*;
2. *Institute of Land and Resources, Southwest University, Chongqing 400715, China*;
3. *Center for Assessment and Research on Precision Poverty Alleviation and Regional Development, Southwest University, Chongqing 400715, China*

Abstract: In this paper, the subjective and objective comprehensive weighting state space methods were used to construct a multi-system integrated evaluation system of water resources, society, economy, eco-

收稿日期：2021－07－07
基金项目：国家社会科学基金项目(20BSH079).
作者简介：冉启智，博士研究生，高级工程师，主要从事精准扶贫、国土资源与区域发展方面研究.
通信作者：廖和平，博士，教授.

logical environment and coordinated management. By using GIS software, according to the natural fracture point method, the spatial-temporal analysis of water resources carrying capacity in Chongqing was carried out. The spatial autocorrelation analysis of water resources carrying capacity with GeoDa software was performed to clarify the water resources carrying capacity in each district of Chongqing, and provide new ideas for solving the regional gap problem in southwest China and realizing rural revitalization and development. The results showed that: ① The water resources carrying capacity of Chongqing presented an inverted N-type development trend in 2014 to 2018. ② The spatial distribution pattern of water resources carrying capacity in Chongqing was relatively stable, with certain changes in some districts and counties. High and higher value areas were relatively concentrated, and mainly distributed in the northeast, southeast and central urban areas of Chongqing. The low and lower value areas were mainly distributed in the industrial and agricultural production areas of western and northeastern Chongqing and a few counties in other regions. The distribution of the median value area was the most scattered, and distributed in all regions. ③ In 2014 to 2018, the water resources carrying state of all districts and counties in Chongqing showed a trend of gradual deterioration, and the change trend was consistent with the change trend of water resources carrying capacity. ④ The spatial distribution of water resources carrying capacity in Chongqing was not random, but had obvious spatial agglomeration effect in geographical space. In general, the high and higher value cluster areas of water resources carrying capacity in Chongqing in 2014 to 2018 were mainly distributed in northeast and southeast of Chongqing and central urban area, while low-value cluster areas were mainly distributed in northeast and west of Chongqing. The water resources carrying capacity of Chongqing presented an unstable development trend in time series. There were regional differences in spatial distribution. The carrying capacity of water resources in northeast and southeast of Chongqing was relatively high, while that in western Chongqing was relatively low.

Key words: empowerment; water resources carrying capacity; regional; distribution; index; carrying state

承载力概念来源于物理力学概念，本意是指物体在不产生任何破坏时所承受的最大负荷，是可以通过一定的方法测量的. 后来承载力的概念被引入区域系统研究中[1-7]，用以表示区域系统对外部环境变化的最大承受能力. 水资源承载力的概念最早由我国学者提出，目前对水资源承载力的定义有很多种. 左其亭[8]将水资源承载力定义为水资源对人类及其赖以生存的经济社会系统和生态系统所能承受的最大规模；王建华等[9]认为水资源承载力是指可预见的时期内在满足合理的水域生态环境保护和河流生态环境用水前提下，水资源对经济社会能够承载的最大负荷下所支撑的人口规模；高伟等[10]提出了基于不同水质水资源量供需的分质水资源承载力概念.

对于水资源承载力的研究维度有很多. 张宁宁等[11]和张丽洁[12]采用扩展傅里叶振幅敏感性分析方法 (EFAST)从量、质、域、流4个维度分析水资源承载力；郭倩等[13]构建了基于驱动力-压力-状态-影响-响应-管理(DPSIRM)概念框架的水资源承载力DPSIRM评价指标体系，从6个维度对云南省水资源承载力进行综合评价；许杨等[14]运用DPSR模型从驱动力、压力、状态和响应4个维度建立水资源承载力综合评价指标，构建了基于DPSR-改进TOPSIS的水资源承载力综合评价模型；伍文琪等[15]从水资源、社会、经济和生态4个维度，构建了区域水资源承载力综合评价模型，对云南省水资源的承载能力和利用状况进行评价，并探讨了其时空分布特征；刘雁慧等[16]综合考虑社会、经济和自然等因素，从承压、压力、协调和管理4个维度构建指标体系，通过基于熵权法的综合评价方法探讨了2000－2015年中国水资源承载力；屈小娥[17]通过构建涵盖水资源、社会、经济及生态等多维度的水资源承载力综合评价指标体系，运用TOPSIS综合评价方法，实证测算研究了陕西省及其所辖城市水资源承载力的动态变化及区域差异；何秋萍[18]从人口经济、工业、农业和城市4个维度构建了11个承载力指标，并对珠江流域资源环境状况进行了分析.

关于水资源承载力的研究方法采用相对较多的是TOPSIS模型方法[14,19-21]，其他研究方法也有不少采

用. 比如，张靖琳等[22]和张萌雪等[23]采用水资源供需平衡理论对区域承载力进行了研究；赵颖辉等[24]通过对比研究方法对新加坡、香港、厦门和舟山 4 个海岛城市的水资源承载力进行了研究；曾红春等[25]利用相对水资源承载力研究方法研究湖南省各州(市)水资源承载力；刘丽颖等[26]采用 MIV-BP 神经网络模型方法分析了各影响因素对喀斯特地区(贵州为例子)水资源安全影响程度的相对大小；李玉文等[27]基于 SD 方法以浙江省为例做了水资源有偿使用制度生态经济效应仿真研究；杨莹等[28]以河南巩义市为例利用状态空间法和层次分析法相结合的手段，对水资源承载力进行了研究；王正选等[29]分别采用改进的模糊集对评价模型和模糊综合评价模型对龙川江高原流域进行水资源承载力评价分析；彭争呈等[30]以四川省雅安市为例基于改进后的模型研究了西南地区相对资源承载力. 朱光磊等[31]运用匹配度、水资源生态足迹和 LMDI 指数分解模型，探讨了 2004－2018 年吉林省水资源利用和经济发展之间的关系.

目前的水资源承载力研究缺乏统一的科学基础[32]，定性的研究方法较多，定量的研究方法较少；静态研究较多，动态研究较少. 本研究以重庆市为例，以县域为研究单元，构建了包括水资源、社会、经济、生态环境和协调管理 5 个维度的指标体系，采用主客观综合赋权状态空间法从定性和定量两方面对重庆市水资源承载力和承载状态进行研究，以期为管理部门和企业依据水资源资源状况制定发展计划以及咨询决策提供科学的数据和合理的建议.

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

重庆市地处中国西南部，长江上游地区，它不仅是全国老工业基地、现代制造业和服务业基地，而且因其位于长江经济带和丝绸之路经济带的连接处，也是西南地区和长江上游最大的经济中心城市. 重庆市处于四川盆地东部，以丘陵、山地为主，中部和西部较低，东北部和东南部较高，由南北向长江河谷逐级降低，有大巴山、巫山、大娄山和武陵山等山脉，故重庆素有“山城”之称. 重庆市辖 38 个区(县)，辖区面积 824.01 万 hm^2，截至 2017 年末全市常住总人口为 3 048.43 万人. 境内河流纵横，长江自西南向东北横贯全境，北有嘉陵江、南有乌江汇入，形成向心的、不对称的网状水系. 流域面积大于 1 万 hm^2 的河流有 274 条，流域面积大于 10 万 hm^2 的河流有 42 条. 重庆市属亚热带季风性湿润气候，年平均气温 16～18 ℃，年均降水量大部分地区在 1 000～1 350 mm，降雨多集中于 5－9 月，在全国属于多雨地区. 2017 年全市地表水资源量为 604.866 8 亿 m^3，大中型水库年末蓄水量为 54.824 6 亿 m^3，总供水量为 77.483 0 亿 m^3，人均综合用水量为 254 m^3.

1.2　数据来源

县域是我国统计资料中经常采用的单元，本研究以重庆市县域单元为研究样本，选择 2018 年区(县)数量作为研究样本数量，研究中将市辖区视为县域单元，因此重庆市共 38 个研究单元. 研究数据主要涉及水资源、社会、经济和环境等方面，主要数据来源如下：

1) 水资源方面的数据来源于 2014－2018 年《重庆市水资源公报》和《重庆市水土保持公报》，由重庆市水利局公布，主要采集了水资源总量、地下水资源量、降水量和供水量等方面的数据.

2) 社会经济数据主要来源于 2014－2018 年《重庆市统计年鉴》、各区(县)同期统计年鉴，由重庆市统计局公布. 主要采集了总人口、城镇化率、GDP 总量、一般公共预算收入和粮食产量等方面的数据. 此外还有《重庆市水资源公报》《重庆市水土保持公报》和《重庆市环境状况公报》等资料.

3) 环境方面的数据主要来源于 2014－2018 年《重庆市环境状况公报》，主要采集了生活污水排放量、工业废水排放量和工业能耗等方面的数据.

部分统计数据来源于重庆市精准扶贫第三方评估调研数据，矢量数据来自于西南大学精准扶贫与区域发展评估研究中心.

2　研究方法

2.1　重庆市水资源承载力指标体系构建

水资源承载力评价指标体系的构建很关键，既要有目的性和整体性，还要考虑到动态性和可获取

性. 王建华等[9]和张丽洁[12]从量值域流4个方面构建了指标体系，仅从自然资源方面考虑，未考虑经济社会以及人的作用因素；郭倩等[13]基于D(驱动力)、P(压力)、S(状态)、I(影响)、R(响应)、M(管理)框架构建的指标体系；刘雁慧等[16]从承压、压力、协调和管理方面构建了中国水资源承载力指标体系，他们的研究侧重指标间的相互作用关系；杨莹等[28]、伍文琪等[15]和屈小娥[17]构建了基于生态、经济、社会和水资源等复合系统的指标体系，未考虑农业、农化产品使用、产业发展以及城镇化等方面因素. 为构建较为整体全面的评价体系，本研究参考众多研究者在水资源评价中使用频率较高的指标，构建了集水资源、社会、经济、生态环境和协调管理多系统的综合评价体系(表1)，并以区(县)为评价单位对重庆市水资源承载力进行了评价.

表1 重庆市水资源承载力指标体系

目标层	准则层	指标层	主观权重	客观权重	综合权重	类型
重庆市水资源承载力指数	水资源	产水模数	0.023 2	0.044 3	0.035 7	正
		人均水资源量	0.033 8	0.069 0	0.081 2	正
		地下水资源量	0.022 1	0.056 5	0.043 4	正
		地下水资源占比	0.022 1	0.035 7	0.027 4	正
		降水量	0.029 1	0.040 2	0.040 6	正
		水资源总量	0.064 0	0.044 3	0.098 7	正
		供水总量	0.037 5	0.034 2	0.044 6	正
		供水模数	0.019 1	0.120 6	0.080 1	正
	社会	总人口	0.045 1	0.012 8	0.020 1	负
		人口密度	0.022 9	0.003 1	0.002 5	负
		人口自然增长率	0.017 4	0.004 1	0.002 5	负
		城镇化率	0.017 7	0.019 4	0.011 9	负
		产业活动单位	0.017 6	0.006 7	0.004 1	负
		水的生产和供应业	0.024 5	0.030 4	0.025 9	正
		水利管理业	0.024 5	0.030 0	0.025 6	正
	经济	GDP总量	0.042 0	0.035 6	0.051 9	正
		人均GDP	0.022 9	0.055 2	0.044 1	正
		一般公共预算收入	0.017 7	0.028 4	0.017 6	正
		人均可支配收入	0.020 2	0.024 8	0.017 4	正
		粮食产量	0.0293	0.0135	0.0137	负
		规模以上工业能耗	0.030 4	0.004 4	0.004 7	负
		农作物播种面积	0.017 8	0.021 3	0.013 2	负
		第三产业比重	0.014 4	0.004 9	0.002 4	正
	生态环境	生态环境补水量	0.041 1	0.042 3	0.060 5	负
		水土流失治理面积	0.033 5	0.015 1	0.017 6	负
		生活污水排放量	0.038 9	0.012 8	0.017 3	负
		工业废水排放量	0.032 8	0.010 1	0.011 6	负
		农药使用量	0.018 1	0.006 4	0.004 0	负
		农用化肥施用量	0.018 2	0.009 0	0.005 7	负
	协调管理	水土保持总投资	0.042 7	0.042 4	0.063 0	正
		全社会固定资产投资	0.041 5	0.030 5	0.044 1	正
		工业用水量	0.032 5	0.003 9	0.004 4	负
		人均用水量	0.020 4	0.006 8	0.004 8	负
		单位耗水生产GDP	0.019 0	0.062 4	0.041 3	正
		单位面积粮食产量	0.014 2	0.007 6	0.003 8	正
		农田灌溉用水量	0.031 6	0.011 4	0.012 5	负

1）水资源系统反映区域水资源禀赋条件，水资源条件直接关系到水资源承载力大小. 水资源系统包含产水模数、人均水资源量、地下水资源量、地下水资源占比、降水量、水资源总量、供水总量和供水模数 8 个指标.

2）社会系统是指反映人口社会、城镇化、企业拥有量及组成等社会因素的系统，包含总人口、人口密度、人口自然增长率、城镇化率、产业活动单位、水的生产与供应业和水利管理业等 7 个指标.

3）经济系统反映国民生产总值、工农业发展及比重等经济情况，包含 GDP 总量、人均 GDP、一般公共预算收入、人均可支配收入、粮食产量、规模以上工业能耗、农作物播种面积和第三产业比重 8 个指标.

4）生态环境系统反映人类生产生活对水污染情况和水土流失情况. 包含生态环境补水量、水土流失治理面积、生活污水排放量、工业废水排放量、农药使用量和农用化肥施用量共 6 个指标.

5）协调管理系统反映区域人口生产生活用水水平、固定资产投资和农业经济发展等与水资源的协调性关系. 该系统包含水土保持总投资、全社会固定资产投资、工业用水量、人均用水量、单位耗水生产 GDP、单位面积粮食产量和农田灌溉用水量等 7 个指标.

2.2　水资源承载力评价

2.2.1　综合赋权

常用的权重赋权法有主观赋权法和客观赋权法，为了避免主观赋权法和客观赋权法的片面性，本研究采用主客观综合赋权法. 主观赋权法有德尔菲法、网络分析法(ANP)和层次分析法(AHP)等，它是根据专家的经验和已有的知识将各指标进行打分排序，计算各指标的权重，其结果主观性强. 客观赋权法主要有熵权法(EVM)和变异系数法(VCM)等，而熵权法(EVM)使用较为广泛，它是根据评价对象和评价指标矩阵数据的熵值确定指标的权重，不能依理论上各指标的重要程度赋权，其结果客观性强，

1）数据标准化处理

正向指标标准化公式为：

$$a_{ij}=\frac{r_{ij}-\min r_{ij}}{\max r_{ij}-\min r_{ij}} \tag{1}$$

负向指标标准化公式为：

$$a_{ij}=\frac{\max r_{ij}-r_{ij}}{\max r_{ij}-\min r_{ij}} \tag{2}$$

式中：a_{ij} 为无量纲化处理后指标值，r_{ij} 为第 i 个区(县)第 j 个指标值；$\max r_{ij}$，$\min r_{ij}$ 分别为同一个指标的最大值和最小值.

2）计算第 i 区(县)第 j 项指标的比重，其计算公式为：

$$q_{ij}=\frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}a_{ij}} \tag{3}$$

3）定义熵. 针对 m 个评价对象，n 个评价指标，第 j 项指标的熵值为：

$$h_j=\frac{-\sum_{i=1}^{m}q_{ij}\ln q_{ij}}{\ln m} \tag{4}$$

4）计算指标权重，其计算公式为：

$$w_j=\frac{1-h_j}{\sum_{j=1}^{n}(1-h_j)} \tag{5}$$

5）主客观综合权重，其计算公式为：

$$w_{ij}=\frac{w_{1ij}w_{2ij}}{\sum_{j=1}^{n}w_{1ij}w_{2ij}} \tag{6}$$

式中：w_{ij} 为主客观综合赋权法得到的权重，w_{1ij} 和 w_{2ij} 分别为层次分析法和熵权法得到的主观权重和客观权重.

2.2.2 状态空间法

状态空间法是用于定量描述系统状态的一种几何方法，可以衡量承载力与影响因子之间的定量关系，以表示各要素状态向量的三维状态空间轴组成. 可用状态空间的原点同系统状态点所构成的矢量模来表示区域承载力大小[27]，计算公式为：

$$A = | D | = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} a_{ij}^2} \tag{7}$$

式中：A 表示承载力或支撑力，$| D |$ 表示从原点到状态空间结束点的向量长度，a_{ij} 表示指标即因子归一化值.

考虑到每个系统维度对区域水资源承载力有不同的影响，即每个系统维度的权重不同，因此，考虑权重的区域水资源承载力公式为：

$$A = | D | = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} w_{ij} a_{ij}^2} \tag{8}$$

式中：w_{ij} 表示 a_{ij} 的权重，A 值越高表示条件越好.

2.3 水资源承载状态分析

本研究以区域承载力真实值与理想值之间的偏差作为定量描述的基础，因此如何确定区域承载力的理想值十分重要. 确定水资源承载力理想值的方法有问卷调查法和指标法等. 多年平均法具有可比性和易操作性，且能够反映该地区水资源利用状况、社会经济情况、生态保护和水资源管理多年平均状况，因此，选取2014－2018年各指标的多年平均值作为平衡状态. 计算公式为：

$$\overline{A} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} w_{ij} \overline{a}_{ij}^2} \tag{9}$$

式中：$\overline{A}$ 为承载力理想值，$\overline{a}_{ij}$ 为2014－2018年各项指标的平均值. $A > \overline{A}$ 表示处于可载状态，$A = \overline{A}$ 表示处于满载状态，$A < \overline{A}$ 表示处于超载状态.

2.4 空间自相关分析

以空间统计资料为基础的空间自相关分析分为全局空间自相关和局部空间自相关[33-35]，也称探索性空间数据分析方法[36]. 主要通过莫兰指数(Moran's I)来表征空间分布特征. 莫兰指数分全局莫兰指数(Global-Moran's I)和局部莫兰指数(Local-Moran's I)[37-38].

本研究利用GeoDa软件对水资源承载力测度结果进行空间自相关分析(ESDA)，空间自相关分析主要描述水资源承载力在整个区域的空间关联和空间差异特征. 即通过莫兰指数来表征重庆市各区(县)水资源承载力的空间分布特征. 莫兰指数值计算公式为：

$$I_{\text{Global-Moran's}} = \frac{\sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} w_{ij} (x_i - \overline{x})(x_j - \overline{x})}{s^2 \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} w_{ij}} \tag{10}$$

$$I_{\text{Local-Moran's}} = \frac{(x_i - \overline{x})}{s^2} \sum_{j=1}^{n} w_{ij} (x_i - \overline{x}) \tag{11}$$

式中：n 为研究单元个数，X_i 和 X_j 分别为空间位置 i 和 j 的观测值，S^2 为得分值的方差，W_{ij} 为空间权重矩阵.

全局莫兰指数在0～1之间取值，为正相关，表示具有相似的属性集聚在一起；全局莫兰指数在0～－1之间取值，则为负相关，表示有相异的属性集聚在一起；若接近于零，则表示随机分布，不存在空间自相关

性. 全局莫兰指数的显著与否，通过 Z 值大小进行检验.

$$Z=\frac{I-E(I)}{\sigma(I)} \tag{12}$$

式中：$E(I)$为莫兰指数的期望值，$\sigma(I)$为所有观测值的标准差. 原假设是不存在空间自相关，根据以下标准化统计量参考正态分布表可以进行假设检验. 正太分布中，若$|Z| \leqslant 1.96$，$p>0.05$，那么符合零假设，即区域间不存在空间自相关；若$|Z| \geqslant 1.96$，$p<0.05$，则不符合零假设，即区域间存在显著的空间自相关；若$|Z| \geqslant 2.58$，$p<0.01$，则区域间存在极为显著的空间自相关[37].

通过全局莫兰指数仅反映区域内部属性值的空间集聚(差异)平均程度. 而通过局部莫兰指数则能够进一步识别不同地理现象或类型属性值的空间集聚模式.

3　研究结果分析

3.1　时间序列上水资源承载力分析

根据平均值法计算出重庆市水资源承载力值，近 5 年重庆市水资源承载力呈先下降、后上升、再下降的发展趋势(图 1)，2014 年为 0.452 8，2015 年下降为 0.435 8，2016 年上升为 0.450 4，2017 年和 2018 年后又呈现下降趋势，分别为 0.434 8 和 0.412 4.

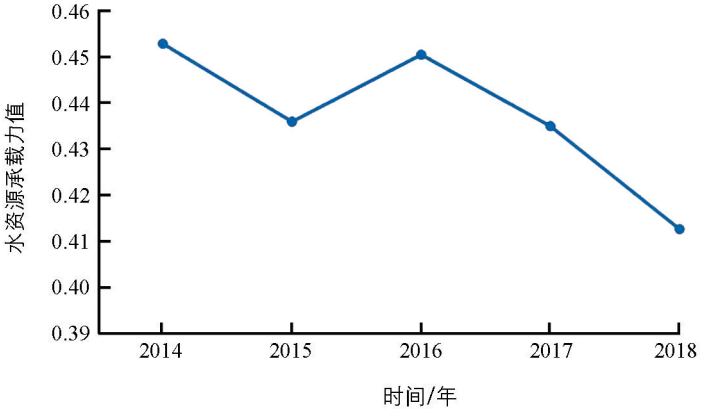


图 1　2014－2018 年重庆市水资源承载力发展趋势图

从 2014－2018 年各区(县)水资源承载力测度值排名来看(表 2)，每个区(县)发展趋势各不相同. 有的呈现反复上升与下降发展趋势，如南岸、渝北、潼南、荣昌、梁平、武隆、秀山和彭水等区(县)；有的呈现先上升后下降发展趋势，如江北、九龙坡、铜梁、开州、丰都和巫山等区(县)；有的呈现先下降后上升发展趋势，如涪陵、渝中、江津、合川和璧山等区(县)；有的变化较小，如黔江、城口和巫溪等区(县). 2014 年得分前 5 名分别是巫溪、渝中、城口、酉阳和彭水，得分后 5 名分别是大足、云阳、合川、綦江和垫江；2015 年得分前 5 名分别是巫溪、渝中、城口、酉阳和渝北，后 5 名分别是永川、云阳、綦江、垫江和合川；2016 年得分前 5 名分别是酉阳、巫溪、渝中、彭水和城口，得分后 5 名分别是璧山、綦江、忠县、合川和垫江；2017 年得分前 5 名分别是巫溪、渝中、城口、渝北和南岸，得分后 5 名分别是巴南、綦江、潼南、合川和垫江；2018 年得分前 5 名分别是渝中、酉阳、巫溪、城口和沙坪坝，得分后 5 名分别是铜梁、长寿、丰都、梁平和云阳.

表 2　2014－2018 年重庆市各区(县)水资源承载力值与排名

区(县)	水资源承载力值					排名				
	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
万州区	0.431 9	0.410 0	0.384 5	0.422 5	0.426 5	22	21	33	20	16
黔江区	0.440 2	0.424 3	0.450 8	0.428 5	0.418 1	19	18	19	19	19
涪陵区	0.451 8	0.422 3	0.394 9	0.441 3	0.436 2	15	19	30	14	14
渝中区	0.642 0	0.641 5	0.633 9	0.634 7	0.578 1	2	2	3	2	1
大渡口区	0.467 8	0.473 1	0.463 8	0.453 4	0.398 1	14	11	14	12	21
江北区	0.498 0	0.482 0	0.479 0	0.470 6	0.441 8	7	6	7	9	12
沙坪坝区	0.485 3	0.480 7	0.454 8	0.433 6	0.496 8	10	8	17	16	5

续表2

区(县)	水资源承载力值					排名				
	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
九龙坡区	0.475 7	0.473 7	0.477 8	0.482 0	0.445 5	11	10	8	7	10
南岸区	0.475 0	0.481 1	0.455 6	0.499 1	0.429 9	12	7	16	5	15
北碚区	0.430 8	0.398 7	0.394 3	0.384 9	0.418 5	23	25	31	28	18
渝北区	0.499 8	0.502 9	0.480 5	0.523 5	0.483 1	6	5	6	4	7
巴南区	0.444 1	0.431 9	0.437 2	0.362 8	0.493 2	17	15	23	34	6
长寿区	0.415 2	0.390 9	0.416 0	0.401 0	0.327 9	28	28	25	25	36
江津区	0.450 3	0.427 0	0.460 3	0.439 6	0.438 1	16	17	15	15	13
合川区	0.372 3	0.332 9	0.357 0	0.336 8	0.374 6	36	38	37	37	23
永川区	0.395 8	0.370 8	0.448 7	0.382 5	0.342 9	32	34	21	30	31
南川区	0.424 5	0.402 2	0.450 1	0.384 9	0.374 6	25	24	20	29	24
綦江区	0.371 6	0.345 0	0.380 9	0.345 7	0.352 3	37	36	35	35	30
大足区	0.379 6	0.383 8	0.396 6	0.374 4	0.362 1	34	30	28	33	28
璧山区	0.404 0	0.373 3	0.381 1	0.377 1	0.455 4	31	33	34	32	9
铜梁区	0.412 8	0.394 8	0.404 5	0.380 8	0.335 5	29	26	26	31	34
潼南区	0.390 6	0.375 2	0.385 1	0.344 8	0.342 2	33	32	32	36	32
荣昌区	0.420 8	0.404 2	0.402 4	0.422 4	0.375 9	26	23	27	21	22
开州区	0.419 1	0.407 2	0.438 6	0.445 0	0.364 5	27	22	22	13	27
梁平区	0.433 6	0.380 5	0.454 4	0.392 6	0.318 7	21	31	18	26	37
武隆区	0.488 9	0.463 6	0.474 7	0.431 9	0.442 5	9	13	9	17	11
城口县	0.595 6	0.583 4	0.489 9	0.584 6	0.531 1	3	3	5	3	4
丰都县	0.407 8	0.390 9	0.467 1	0.412 8	0.331 9	30	27	13	22	35
垫江县	0.346 6	0.344 1	0.345 4	0.324 5	0.354 4	38	37	38	38	29
忠县	0.443 7	0.383 8	0.377 0	0.392 1	0.336 6	18	29	36	27	33
云阳县	0.376 4	0.368 5	0.395 3	0.409 3	0.294 0	35	35	29	24	38
奉节县	0.430 4	0.434 0	0.437 2	0.481 9	0.367 3	24	14	24	8	26
巫山县	0.468 1	0.466 4	0.473 9	0.484 3	0.409 3	13	12	10	6	20
巫溪县	0.663 5	0.659 4	0.635 2	0.677 7	0.539 1	1	1	2	1	3
石柱县	0.437 3	0.411 8	0.467 2	0.428 9	0.368 4	20	20	12	18	25
秀山县	0.489 9	0.431 3	0.471 7	0.410 3	0.422 6	8	16	11	23	17
酉阳县	0.521 9	0.534 0	0.650 5	0.461 7	0.570 1	4	4	1	10	2
彭水县	0.502 8	0.479 1	0.546 8	0.459 0	0.475 3	5	9	4	11	8

3.2 空间分布上水资源承载力值分析

利用ArcGIS 10.2软件，按照自然断裂点方法，将重庆市各区(县)的水资源承载力划分为高值区、较高值区、中值区、较低值区和低值区5种类型，用以描述各年度各区域水资源承载力在空间上的相对变化. 本研究将重庆市分渝东北、渝东南、中心城区和渝西4个区域进行空间分析，其中渝东北包含万州、开州、梁平、城口、丰都、垫江、忠县、云阳、奉节、巫山和巫溪等11个区(县)，渝东南包含黔江、武隆、石柱、秀山、酉阳和彭水等6个区(县)，中心城区包含渝中、大渡口、江北、沙坪坝、九龙坡、南

岸、北碚、渝北和巴南等 9 个区(县)，渝西包括涪陵、长寿、江津、合川、永川、南川、綦江、大足、璧山、铜梁、潼南、荣昌等 12 个区(县).

如图 2 所示，重庆市水资源承载力空间分布特征为：高值区和较高值区的区(县)主要分布在渝东北和渝东南区域，中值区分布较零散，较低值区和低值区主要分布在工农业主产区、人口大区以及工况区域. 总体上，重庆市水资源承载力的空间分布格局较稳定，部分区(县)有所变化. 具体每年的空间分布格局如下：

1) 2014 年重庆市水资源承载力高值区主要分布在渝东北的巫溪、城口以及主城的渝中 3 个区(县)；较高值区主要分布在渝东北的巫山和渝东南的武隆、彭水、酉阳、秀山以及经济较发达的主城渝北、江北、沙坪坝、九龙坡、南岸和大渡口等 11 个区(县)；中值区主要分布在奉节、万州、梁平、忠县、石柱、黔江、涪陵、江津、巴南和北碚等 10 个区(县)；较低值区主要分布在开州、丰都、长寿、南川、荣昌、永川、璧山和铜梁等 8 个区(县)；低值区主要分布在云阳、垫江、綦江、潼南、合川和大足等 6 个区(县).

2) 2015 年重庆市水资源承载力高值区和 2014 年一样，主要分布在渝东北的巫溪、城口以及主城的渝中 3 个区(县)；较高值区主要分布在渝东北的巫山和渝东南的武隆、彭水、酉阳以及中心城区的九龙坡、渝北、江北、南岸、大渡口和沙坪坝等 10 区(县)；中值区主要分布在渝东北的开州、奉节、万州和渝东南的石柱、黔江、秀山以及渝西的涪陵、南川、巴南、江津、荣昌等 11 个区(县)；较低值区主要分布在渝东北的云阳、梁平、忠县、丰都和渝西的潼南、铜梁、大足、永川、璧山以及中心城区的北碚等 10 个区(县)；低值区主要分布在渝东北的垫江和渝西的合川、綦江等 3 个区(县).

3) 2016 年重庆市水资源承载力高值区主要分布在渝东北的巫溪和渝东南的酉阳以及主城的渝中 3 个区(县)；较高值区主要分布在渝东北的城口、巫山和渝东南的武隆、彭水、秀山以及中心城区的九龙坡、渝北、江北等 9 个区(县)；中值区主要分布在开州、奉节、梁平、丰都、石柱、黔江、南川、巴南、江津、永川、沙坪坝和南岸等 12 个区(县)；较低值区主要分布在渝东北的云阳和渝西的长寿、涪陵、荣昌、大足、铜梁以及主城的北碚等 7 个区(县)；低值区主要分布在渝东北的万州、忠县、垫江以及渝西的潼南、合川、璧山、綦江等 7 个区(县).

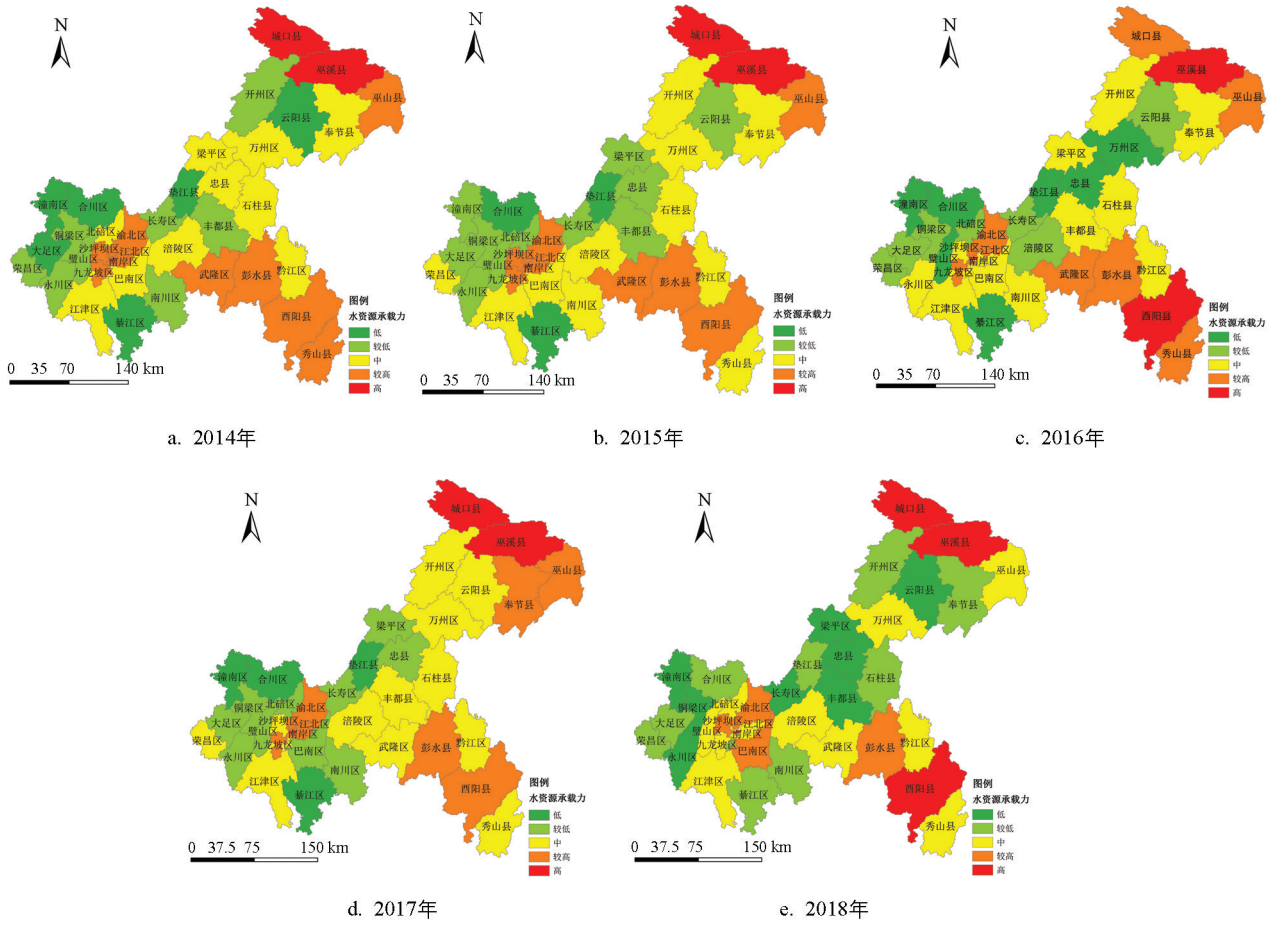
4) 2017 年重庆市水资源承载力高值区和 2015 年一样，主要分布在渝东北的巫溪、城口以及主城的渝中 3 个区(县)；较高值区主要分布在渝东北的巫山、奉节和渝东南的彭水、酉阳以及主城的渝北、江北、南岸、九龙坡等 8 个区(县)；中值区主要分布在万州、开州、云阳、丰都、石柱、武隆、黔江、秀山、涪陵、江津、荣昌和沙坪坝等 12 个区(县)；较低值区主要分布在渝东北的梁平、忠县和渝西的长寿、南川、巴南、铜梁、大足、永川、璧山和中心城区的北碚等 10 个区(县)；低值区主要分布在渝东北的垫江和渝西的潼南、合川、綦江等 4 个区(县).

5) 2018 年重庆市水资源承载力高值区有所变化，主要分布在渝东北的巫溪、城口和渝东南的酉阳以及主城的渝中 4 个区(县)；较高值区主要分布在渝东南的彭水和中心城区的渝北、沙坪坝和巴南等 4 个区(县)；中值区主要分布在巫山、万州、武隆、黔江、秀山、北碚、九龙坡、江北、南岸、璧山、江津和涪陵等 12 个区(县)；较低值区主要分布在开州、奉节、垫江、石柱、大渡口、合川、大足、荣昌、綦江和南川等 10 个区(县)，低值区主要分布在渝东北的云阳、梁平、丰都、忠县和渝西的长寿、潼南、铜梁、永川等 8 个区(县).

总之，2014－2018 年重庆市水资源承载力的空间分布格局较稳定，部分区(县)有所变化. 高值区和较高值区分布相对集中，主要分布在渝东北、渝东南区域以及中心城区. 低值区和较低值区主要分布在渝西和渝东北区域的工农业产区，其他区域的少部分区(县)也有分布. 中值区分布最零散，各区域均有分布.

3.3　水资源承载状态分析

通过(8)式计算重庆市各区(县)水资源承载状态理想值，将水资源承载力值和理想值进行对比分析，可以计算得出 2014－2018 年重庆市各区(县)水资源承载状态，结果见表 3.



审图号：GS(2019)3333号.

图2 2014—2018年重庆市水资源承载力空间分布示意

2014年除合川区外，各区(县)水资源承载力值均大于理想值，处于可载状态，合川区水资源承载力值小于理想值，处于超载状态. 2014年超载区(县)占比2.63%，无满载状态区(县)，可载区(县)占比97.37%.

2015年超载区(县)3个，分别为合川、江津和璧山，其他区(县)水资源承载力值处于可载状态. 较上一年度新增江津和璧山. 超载区(县)占比上升为7.89%，无满载状态区(县)，可载区(县)占比92.11%. 较上一年超载区(县)有少量增加，相应可载区(县)的数量有少量减少.

2016年超载区(县)较多，共有10个，分别为万州、涪陵、大渡口、沙坪坝、北碚、渝北、合川、璧山、城口和奉节，其他区(县)水资源承载力值处于可载状态. 较上一年度新增万州、涪陵、大渡口、沙坪坝、北碚、渝北、城口和奉节等8个区(县)，江津变为可载状态. 2016超载区(县)占比26.32%，无满载状态区(县)，可载区(县)占比73.68%. 较上一年超载区(县)有继续少量增加，相应可载区(县)的数量继续有少量减少.

2017年超载区(县)有10个，分别为沙坪坝、北碚、巴南、合川、璧山、潼南、垫江、秀山、酉阳和彭水，其他区(县)水资源承载力值处于可载状态. 较上一年度新增巴南、潼南、垫江、秀山、酉阳和彭水等6个区(县)，万州、涪陵、大渡口、渝北、城口和奉节变为可载状态. 2017重庆市水资源承载状态与2016年相似，超载区(县)占比26.32%，无满载状态区(县)，可载区(县)占比73.68%.

2018年超载区(县)较多，共23个，分别为渝中、大渡口、江北、九龙坡、南岸、渝北、长寿、合川、永川、南川、大足、铜梁、潼南、荣昌、开州、梁平、丰都、忠县、云阳、奉节、巫山、巫溪和石柱，其他区(县)水资源承载力值处于可载状态. 较上一年新增渝中、大渡口、江北、九龙坡、南岸、渝北、长寿、永川、南川、大足、铜梁、荣昌、开州、梁平、丰都、忠县、云阳、奉节、巫山、巫溪和石柱等21个区(县)，沙坪坝、北碚、巴南、璧山、垫江、秀山、酉阳和彭水变为可载状态. 超载区(县)占比60.53%，

无满载状态区(县)，可载区(县)占比 39.47%.

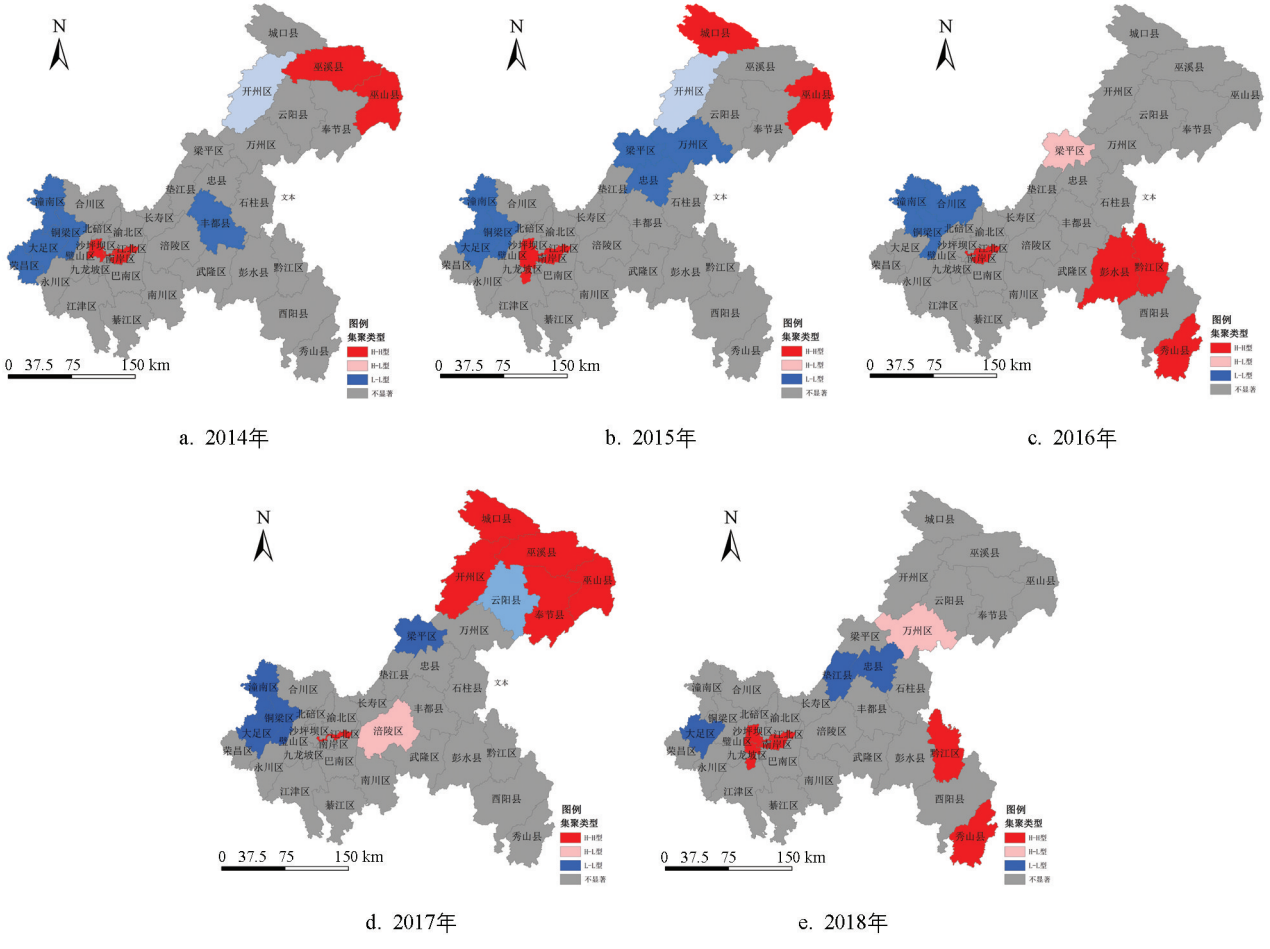
总体来说，2014—2018 年，重庆市各区(县)水资源承载状态呈现逐渐恶化的趋势，2014 年仅有合川区处于超载状态，2015 年超载状态区(县)增加为 3 个，2016 年和 2017 年增加到 10 个，2018 年超载状态区(县)增加至 23 个，超载状态区(县)超过了可载状态区(县). 前后可以看出 2014—2018 年水资源承载状态变化趋势与水资源承载力变化趋势相吻合，水资源承载力下降，对应的承载状态呈现下降趋势，说明关于水资源承载力和承载状态的研究比较成功，承载力的逐年下降导致承载状态的恶化，承载状态的逐年恶化又验证了承载力的下降趋势. 究其原因，主要是随着工农业和第三产业的发展以及人口的增加，对水资源的需求量逐年增加.

表 3　2014—2018 年重庆市各区(县)水资源承载状态

区(县)	水资源承载力理想值	水资源承载状态				
		2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
万州区	0.404 6	可载	可载	超载	可载	可载
黔江区	0.408 5	可载	可载	可载	可载	可载
涪陵区	0.419 1	可载	可载	超载	可载	可载
渝中区	0.603 2	可载	可载	可载	可载	超载
大渡口区	0.427 6	可载	可载	超载	可载	超载
江北区	0.457 7	可载	可载	可载	可载	超载
沙坪坝区	0.461 9	可载	可载	超载	超载	可载
九龙坡区	0.455 4	可载	可载	可载	可载	超载
南岸区	0.450 1	可载	可载	可载	可载	超载
北碚区	0.396 9	可载	可载	超载	超载	可载
渝北区	0.487 5	可载	可载	超载	可载	超载
巴南区	0.431 1	可载	可载	可载	超载	可载
长寿区	0.359 1	可载	可载	可载	可载	超载
江津区	0.432 2	可载	超载	可载	可载	可载
合川区	0.392 3	超载	超载	超载	超载	超载
永川区	0.359 7	可载	可载	可载	可载	超载
南川区	0.381 5	可载	可载	可载	可载	超载
綦江区	0.342 3	可载	可载	可载	可载	可载
大足区	0.367 7	可载	可载	可载	可载	超载
璧山区	0.389 1	可载	超载	超载	超载	可载
铜梁区	0.360 3	可载	可载	可载	可载	超载
潼南区	0.355 7	可载	可载	可载	超载	超载
荣昌区	0.378 0	可载	可载	可载	可载	超载
开州区	0.390 2	可载	可载	可载	可载	超载
梁平区	0.360 3	可载	可载	可载	可载	超载
武隆区	0.431 2	可载	可载	可载	可载	可载
城口县	0.522 4	可载	可载	超载	可载	可载
丰都县	0.368 1	可载	可载	可载	可载	超载
垫江县	0.324 6	可载	可载	可载	超载	可载
忠县	0.347 8	可载	可载	可载	可载	超载
云阳县	0.334 1	可载	可载	可载	可载	超载
奉节县	0.401 9	可载	可载	超载	可载	超载
巫山县	0.430 1	可载	可载	可载	可载	超载
巫溪县	0.597 0	可载	可载	可载	可载	超载
石柱县	0.395 7	可载	可载	可载	可载	超载
秀山县	0.415 1	可载	可载	可载	超载	可载
酉阳县	0.531 5	可载	可载	可载	超载	可载
彭水县	0.467 6	可载	可载	可载	超载	可载

3.4 水资源承载力空间关联格局分析

运用GeoDa软件分析重庆市水资源承载力是否存在关联性即重庆市的全局莫兰指数(图3). 分析结果显示，2014年重庆市水资源承载力莫兰指数为0.282 387，Z值为2.964 5；2015年重庆市水资源承载力莫兰指数为0.331 958，Z值为3.468 4；2016年重庆市水资源承载力莫兰指数为0.270 381，Z值为2.901 9；2017年重庆市水资源承载力莫兰指数为0.400 973，Z值为4.097 4；2018年重庆市水资源承载力莫兰指数为0.232 541，Z值为2.342 7. 研究表明，2014－2018年重庆市38个区(县)水资源承载力空间分布表现出正相关性，在一定水平下均通过检验($p<0.05$)，具有相似水资源承载力的空间单元趋于空间集聚分布. 表明2014－2018年重庆市各区(县)水资源承载力在空间上的分布不是随机的，在地理空间上存在明显的空间集聚效应. 2017年莫兰指数和Z值最大，空间集聚效应最明显，2018年莫兰指数和Z值最小，空间集聚效应相对较弱，2014－2018年莫兰指数值呈现波浪型发展趋势.



a. 2014年　b. 2015年　c. 2016年

d. 2017年　e. 2018年

审图号：GS(2019)3333号.

图3 2014－2018年重庆市水资源承载力空间关联格局分析示意图

从关联格局分析图可以看出：2014年重庆市水资源承载力高高值集聚区为巫山县、巫溪县、江北区、南岸区和沙坪坝区，低高值集聚区为开州区，低低值集聚区主要在丰都、潼南、铜梁、大足和荣昌等5个区(县)，其余区(县)未呈现集聚特征；2015年重庆市水资源承载力高高值集聚区为城口、巫山、江北、南岸、九龙坡和沙坪坝等6个区(县)，低高值集聚区为开州区，低低值集聚区为万州、梁平、忠县、铜梁、潼南和大足等6个区(县)，其余区(县)未呈现集聚特征；2016年重庆市水资源承载力高高值集聚区为黔江、秀山、彭水、江北和南岸等5个区(县)，高低值集聚区为梁平区，低低值集聚区为潼南、铜梁和合川等3个区(县)，其余区(县)未呈现集聚特征；2017年重庆市水资源承载力高高值集聚区分布在开州、城口、巫山、

巫溪、奉节和江北等 6 个区(县)，高低值集聚区为涪陵区，低高值集聚区为云阳县，低低值集聚区为梁平、潼南、铜梁和大足等 4 个区(县)，其余区(县)未呈现集聚特征；2018 年重庆市水资源承载力高高值集聚区分布在黔江、秀山、江北、南岸、沙坪坝和九龙坡等 6 个区(县)区，高低值集聚区为万州区，低低值集聚区分布在忠县、垫江和大足等 3 个区(县)，其余区(县)未呈现集聚特征.

总体上看 2014－2018 年重庆市水资源承载力高高值集聚区主要分布在渝东北、渝东南和主城 3 个区域，低低值集聚区主要分布在渝东北和渝西两个区域，2014,2015 和 2017 年低高值集聚区分布在渝东北区域的开州区和云阳县，2016,2017 和 2018 年高低值集聚区分布在渝东北的梁平区和万州区以及渝西区域的涪陵区.

4　结论与讨论

4.1　结论

本研究构建了全面合理的重庆市水资源承载力指标体系，通过综合赋权状态空间法计算得出 2014－2018 年重庆市各区(县)水资源承载力值和水资源承载状态，并通过 GIS 和 GeoDa 软件对水资源承载力值进行时空分析和空间关联格局分析研究，研究结果基本符合重庆市实际情况，对于管理部门咨询和决策具有重要的参考意义.

1) 2014－2018 年重庆市水资源承载力呈先下降、后上升、再下降的发展趋势. 各区(县)水资源承载力发展趋势各不相同. 其排名有的呈现反复上升与下降发展趋势，如南岸、渝北、潼南、荣昌、梁平、武隆、秀山和彭水等区(县)；有的呈现先上升后下降发展趋势，如江北、九龙坡、铜梁、开州、丰都和巫山等区(县)；有的呈现先下降后上升发展趋势，如涪陵、渝中、江津、合川、璧山等区(县)；有的变化较小，如黔江区、城口县、巫溪县等区(县).

2) 2014－2018 年重庆市水资源承载力的空间分布格局较稳定，部分区(县)有所变化. 高值区和较高值区分布相对集中，主要分布在渝东北、渝东南区域以及中心城区. 低值区和较低值区主要分布在渝西和渝东北区域的工农业产区，其他区域的少部分区(县)也有分布. 中值区分布最零散，各区域均有分布.

3) 总体来说，2014－2018 年重庆市各区(县)水资源承载状态呈现逐渐恶化的趋势，其变化趋势与水资源承载力变化趋势相吻合，水资源承载力下降，对应的承载状态呈现下降趋势，说明关于水资源承载力和承载状态的研究比较合理，承载力的逐年下降导致承载状态的恶化，承载状态的逐年恶化又验证了承载力的下降趋势.

4) 2014－2018 年重庆市各区(县)水资源承载力在空间上的分布不是随机的，在地理空间上存在明显的空间集聚效应. 2017 年莫兰指数和 Z 值最大，空间集聚效应最明显，2018 莫兰指数和 Z 值最小，空间集聚效应相对较弱，2014－2018 年莫兰指数值呈现波浪型发展趋势. 总体上看 2014－2018 年重庆市水资源承载力高高值集聚区主要分布在渝东北、渝东南和中心城区 3 个区域，低低值集聚区主要分布在渝东北和渝西 2 个区域，2014,2015 和 2017 年低高值集聚区分布在渝东北区域的开州区和云阳县，2016,2017 和 2018 年高低值集聚区分布在渝东北的梁平区和万州区以及渝西区域的涪陵区.

4.2　讨论

水资源承载力研究是一个复杂的课题，本研究采用主客观综合赋权状态空间法研究水资源承载力，定性和定量结合，分析了重庆市水资源的承载力和承载状态，找出了重庆市水资源承载力时空分布特征和承载状态，以及水资源承载力和承载状态间的对应发展关系，创新性和实用性强. 我国的水资源分布非常不均，南北和东西差异较大，各区域地形和地质条件和人文差异很大，本研究虽然只针对了西南地区的重庆市，但研究思路和方法可以借鉴到其他区域乃至全国的水资源承载力进行研究，可以为管理部门和企业依据水资源状况制定发展计划以及咨询决策提供很好的政策建议.

在今后的研究中可以拓展对水资源承载力影响因素以及水资源承载力与经济发展之间的关联度这一块的研究，以便在不牺牲水资源承载力的情况下更好地制定经济发展政策和规划. 探索开展以镇域或者村域尺度的研究，以使研究结果更加准确合理. 目前学术界对水资源承载力指标体系的选择没有统一的标准，本研究参考众多研究者在水资源评价中使用频率较高的指标，结合重庆市的部分经济发展指数，构建了重庆市水资源承载力指标体系，具有较强的代表性和合理性.

参考文献：

[1] COHEN J E. How many People can the Earth Support? [J]. The Sciences, 1995, 35(6): 18-23.

[2] DHONDT A A. Carrying Capacity: a Confusing Concept [J]. Acta Oecologica/Oceologia Generalis, 1988, 9(4): 337-346.

[3] GRAYMORE M. Journey to Sustainability: Small Regions, Sustainable Carrying Capacity and Sustainability Assessment Methods [D]. Brisbane: Griffith University, 2005

[4] PRICE D. Carrying Capacity Reconsidered [J]. Population and Environment, 1999, 21(1): 5-26.

[5] SEIDL I, TISDELL C A. Carrying Capacity Reconsidered: From Malthus' Population Theory to Cultural Carrying Capacity [J]. Ecological Economics, 1999, 31(3): 395-408.

[6] CLARKE A L. Assessing the Carrying Capacity of the Florida Keys [J]. Population and Environment, 2002, 23(4): 405-418.

[7] 周洋，周孝德，张新华. 区域水环境承载力评价系统平台构建与应用 [J]. 四川大学学报(工程科学版)，2011，43(6)：34-39.

[8] 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.

[9] 王建华，翟正丽，桑学锋，等. 水资源承载力指标体系及评判准则研究 [J]. 水利学报，2017，48(9)：1023-1029.

[10] 高伟，刘永，和树庄. 基于SD模型的流域分质水资源承载力预警研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版)，2018，54(3)：673-679.

[11] 张宁宁，粟晓玲，周云哲，等. 黄河流域水资源承载力评价 [J]. 自然资源学报，2019，34(8)：1759-1770.

[12] 张丽洁 . 黄河流域水资源承载力评价 [D]. 咸阳：西北农林科技大学，2019.

[13] 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，2017，32(3)：484-493.

[14] 许杨，陈菁，夏欢，等. 基于DPSR-改进TOPSIS模型的淮安市水资源承载力评价 [J]. 水资源与水工程学报，2019，30(4)：47-52，62.

[15] 伍文琪，罗贤，黄玮，等. 云南省水资源承载力评价与时空分布特征研究 [J]. 长江流域资源与环境，2018，27(7)：1517-1524.

[16] 刘雁慧，李阳兵，梁鑫源，等. 中国水资源承载力评价及变化研究 [J]. 长江流域资源与环境，2019，28(5)：1080-1091.

[17] 屈小娥. 陕西省水资源承载力综合评价研究 [J]. 干旱区资源与环境，2017，31(2)：91-97.

[18] 何秋萍. 珠江资源环境承载力指标体系构建 [J]. 中国农业资源与区划，2018，39(7)：99-105.

[19] 杨亮洁，杨永春. 甘肃省资源环境承载力时空分异 [J]. 生态学报，2017，37(20)：7000-7017.

[20] 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.

[21] 吉婷婷，陈童，毛广雄. 基于熵权Topsis的淮河生态经济带水资源承载力评价 [J]. 中国农业资源与区划，2018，39(9)：130-135.

[22] 张靖琳，吉喜斌，陈学亮，等. 河西走廊中段临泽绿洲水资源供需平衡及承载力分析 [J]. 干旱区地理，2018，41(1)：38-47.

[23] 张萌雪，鲁春霞，吴燕红，等. 基于水量供需平衡的河北省张家口市崇礼区水资源承载力分析 [J]. 水土保持通报，2020，40(1)：276-282.

[24] 赵颖辉，郭雪莽，高永胜，等. 海岛型城市水资源利用及其承载力对比研究 [J]. 水文，2015，35(6)：72-81.

[25] 曾红春，杨奇勇，李文军，等. 湖南省相对水资源承载力时空变化分析 [J]. 水资源与水工程学报，2018，29(3)：69-74，79.

[26] 刘丽颖，官冬杰，杨清伟，等. 基于 MIV-BP 型的喀斯特地区水资源安全影响因素分析 [J]. 水土保持通报，2017，37(5)：128-134.

[27] 李玉文，沈满洪，程怀文. 基于 SD 方法的水资源有偿使用制度生态经济效应仿真研究——以浙江省为例 [J]. 系统工程理论与实践，2017，37(3)：664-676.

[28] 杨莹，侯凯旋，岳卫峰，等. 基于复合系统相互作用关系的水资源承载力研究——以巩义市为例 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版)，2019，55(5)：669-676.

[29] 王正选，邱金亮，王静，等. 基于改进模糊集对评价法的水资源承载力评价——以龙川江流域为例 [J]. 水资源与水工程学报，2017，28(5)：70-75.

[30] 彭争呈，郭仕利. 基于改进模型的西南地区相对资源承载力研究——以四川省雅安市为例 [J]. 地域研究与开发，2018，37(1)：153-158.

[31] 朱光磊，赵春子，佟守正，等. 吉林省水资源利用与经济发展关系研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版)，2021，43(6)：122-128.

[32] 封志明，杨艳昭，闫慧敏，等. 百年来的资源环境承载力研究：从理论到实践 [J]. 资源科学，2017，39(3)：379-395.

[33] 宋文，吴克宁，刘霈珈，等. 基于空间自相关的区域农村居民点分布与环境的关系研究 [J]. 中国农业资源与区划，2016，37(12)：70-77.

[34] 王军华. 基于百度指数的“互联网＋农业”公众关注度空间自相关分析 [J]. 中国农业资源与区划，2020，41(4)：325-330.

[35] 蔡进，禹洋春，骆东奇，等. 云南边疆少数民族地区村域多维贫困测度及空间分异研究 [J]. 农业工程学报，2019，35(22)：47-57.

[36] 刘愿理，廖和平，李靖，等. 生态脆弱区土地利用多功能空间格局特征及影响因素分析 [J]. 中国土地科学，2020，34(2)：75-83.

[37] 蔡进. 耕地资源贫困与农村多维贫困测度及耦合关系研究——以重庆市为例 [D]. 重庆：西南大学，2018.

[38] 卢磊，叶长盛，李辉丹. 基于地理探测器的南昌市人口空间格局与自然因素关系研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版)，2021，46(6)：105-114.

责任编辑　潘春燕