

# 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

戴明宏<sup>1</sup>, 王腊春<sup>1</sup>, 魏兴萍<sup>2</sup>

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 重庆师范大学 地理与旅游学院 GIS 应用研究重庆市重点实验室, 重庆 400047)

**摘要:**水资源承载力评价是水资源安全管理的基础。以喀斯特典型省份广西壮族自治区为研究对象, 选取评价指标并用熵权法赋权, 构建模糊综合评价模型, 对 2013 年广西各地市水资源承载力进行综合评价分析。评价结果显示: 2013 年广西水资源承载力状况总体较好, 其中桂林市、柳州市处于理想可承载状态, 贵港市处于不可承载状态, 其他地市均处于可承载状态。从各子系统来看, 供需子系统总体状况较好, 防城港市的供需子系统评价指数最高, 南宁市和贵港市的评价指数最低; 生态环境子系统评价指数普遍较低, 桂林市的评价指数最高; 社会经济子系统方面, 柳州市、桂林市和防城港市评价指数最高, 而贵港市的评价指数最低。评价结果对广西及各地市水资源规划和水资源可持续开发利用具有一定的借鉴和参考价值。

**关键词:**水资源承载力; 模糊综合评价模型; 熵权法; 空间分异

**中图分类号:**TV213

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2016)01-0193-07

## Spatial Difference of Water Resource Carrying Capacity of Guangxi Using Fussy Comprehensive Evaluation Model Based on Entropy Weight Method

DAI Minghong<sup>1</sup>, WANG Lachun<sup>1</sup>, WEI Xingping<sup>2</sup>

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Key Laboratory of GIS Application, College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

**Abstract:** Water resource carrying capacity evaluation is the basis of water security management. Selecting Guangxi Province, a typical karst region as the study area, we selected the evaluation indices from three sub-systems: water resource, socio-economic and ecological environment. The fuzzy comprehensive evaluation model of water resource carrying capacity was constructed to evaluate water resource carrying capacity of Guangxi in 2013 using entropy weight method. It was shown that the overall water resource carrying capacity in Guangxi in 2013 was in good condition. The water resource carrying capacity of Guilin City and Liuzhou City are in an ideal state. The water resource carrying capacity of Guigang City is in a non-carrying state. Other cities are in a carrying state. Seeing each subsystem, the overall water resource subsystem is in good condition, among which the highest index of water resource subsystem evaluation is found in Fangchenggang City, and the lowest one is observed in Nanning City and Guigang City. The ecological subsystem evaluation index is generally low, among which the highest index is found in Guilin City. The highest index of socio-economic subsystem evaluation is observed in Liuzhou City, Guilin City and Fangchenggang City, while the lowest is observed in Guigang City. The evaluation results of this method can help water resource planning and sustainable development and utilization in Guangxi and other regions.

**Keywords:** water resource carrying capacity; fussy comprehensive evaluation model; entropy weight method; spatial difference

水资源是基础性自然资源和战略性经济资源, 水资源承载力是水资源安全的重要度量<sup>[1-2]</sup>, 也是水资源管理的基础。随着经济的快速发展和城乡居民生

活水平的大幅提高, 水资源短缺形势日益严峻, 水资源已成为制约区域环境与社会经济可持续发展的重要障碍因素。因此, 实现区域的可持续发展, 在很大

收稿日期: 2015-03-18

修回日期: 2015-03-30

资助项目: 国家自然科学基金“喀斯特地区人类活动主导下的生态环境变化与流域水文循环响应耦合机理研究”(41371045); “岩溶槽谷区水土流失特征及机理研究”(41202135)

第一作者: 戴明宏(1989—), 女, 山东莱州人, 硕士研究生, 研究方向为岩溶地区水资源开发、区域可持续发展。E-mail: daiminghong89@126.com

通信作者: 王腊春(1963—), 男, 江苏金坛人, 教授, 博导, 主要从事水文水资源研究。E-mail: wang6312@263.net.cn

程度上取决于对水资源的可持续开发利用,其关键就是保护水资源开发利用不超过其最大承载能力,提高水资源的再生能力。

水资源承载力是指在一定的社会经济条件下,水资源可最大供给工农业生产、人民生活 and 生态环境保护等用水的能力<sup>[3-5]</sup>。相对于国外,国内水资源承载力研究开展较晚,但相关研究发展迅速。国内学者从水资源承载力的概念和内涵出发,针对不同区域的水资源特点进行水资源承载力评价,研究区域主要集中于西北干旱区、华北缺水地区、西南喀斯特地区、城市等<sup>[6-9]</sup>,评价方法由过去单一、静态的评价分析发展为综合、动态的评价模型,如模糊综合评价模型、系统动力学方法、物元模型和数据包络分析等<sup>[10-12]</sup>。水资源承载力评价涉及资源、环境、社会经济等多方面因素,文章选取喀斯特典型省份广西壮族自治区为研究对象,从水资源供需、社会经济和生态环境 3 个子系统中选取评价指标,并用熵权法赋权,构建水资源承载力模糊综合评价模型,对 2013 年广西各地市水资源承载力进行综合评价分析,以期对广西各地市水资源合理开发利用和可持续发展提供决策依据。

## 1 研究区概况

广西地处中国西南沿海,位于  $104^{\circ}26'—112^{\circ}04'E$ ,  $20^{\circ}54'—26^{\circ}24'N$ ,由南宁市、柳州市、桂林市等 14 个地级市组成,面积 23.7 万  $km^2$ 。喀斯特地貌广布,占全省总面积的 37.8%。强烈的岩溶作用形成了独特的水文地质环境,溶蚀裂隙、管道发育,地表水和地下水转化迅速,地表水极易渗漏进入地下,造成地表水资源匮乏,工程性缺水问题突出,而在现有技术条件下喀斯特地区地下水资源开发利用难度大,成本高,利用程度有限。全区属亚热带季风气候区,水系发达,雨量丰沛,2013 年全省水资源总量为 2 057 亿  $m^3$ ,人均水资源量为 3 894  $m^3$ /人,高于全国平均水平。然而经济增长迅速,2013 年经济增长 10.2%,随着经济的迅速发展、城镇化进程的加快和居民生活水平的大幅提高,水资源需求量急剧增加,2013 年全省用水量较上年增加了 3.7 亿  $m^3$ ,导致水资源、水环境压力迅速增加,水资源短缺和水污染问题日益突出。其中,省会南宁 2013 年人均水资源量仅为 2 203  $m^3$ /人,远低于全省值 3 794  $m^3$ /人;全省 24 个水源地下水水质监测显示水质达标率为 87.5%,水资源安全受到一定程度威胁。此外,水资源利用效率较低,水资源浪费问题仍然突出,全省万元 GDP 用水量为 248  $m^3$ ,大大高于全国平均水平(109  $m^3$ )。

## 2 研究方法

### 2.1 研究方法 & 数据来源

模糊综合评价模型能够多层次、多因素地评价水资源承载力,更全面地反映区域水资源状况。其基本原理<sup>[13-14]</sup>为:建立评价对象的因素集  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  和评语集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ ,其中  $U$  代表综合评判因素组成的集合, $V$  代表评语组成的集合,则模糊综合评判为:

$$B = A \circ R \quad (1)$$

式中: $A$ —— $U$  上的模糊子集,  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ,  $0 \leq a_i \leq 1$ ,  $a_i$ —— $U$  对  $A$  的隶属度,它表示单因素  $U_i$  在评定因素中所起作用的大小;“ $\circ$ ”——模糊合成算子,在水资源承载力的模糊评价中选取加权平均型算子  $M(\cdot, \oplus)$  进行综合评价; $B$ —— $V$  上的模糊子集,  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ ,  $0 \leq b_j \leq 1$ ,  $b_j$ ——等级  $V_j$  对综合评判所得模糊子集  $B$  的隶属度,它表示综合评判的结果。评价矩阵为:

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

式中: $r_{ij}$ —— $u_i$  的评价对等级  $V_j$  的隶属度,因而矩阵  $R$  中第  $i$  行  $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$  即为对第  $i$  个因素  $u_i$  的单因素评判结果,评价计算中矩阵  $A$  代表了各因素对综合评判重要性的权系数,因此满足  $\sum_{i=1}^m a_i = 1$ ,同时模糊变换也可退化为普通矩阵计算。

熵权法是根据数据的离散程度确定权重的一种方法,能够避免主观人为的干扰。由于不同评价指标对水资源承载力的影响不同,在评价过程中,某项指标的变异程度越大,对水资源承载力的影响越大。因此,为了使评价结果更加客观、真实,本文采用熵权法确定指标权重,权重矩阵为  $A = (a_1, a_2, \dots, a_i)$ 。

主要数据来源于《2013 年广西壮族自治区水资源公报》、《2013 年广西壮族自治区环境状况公报》和《2014 年广西壮族自治区统计年鉴》。

### 2.2 评价指标体系构建

作为喀斯特典型省份,独特的地表—地下“二元水文结构”导致工程性缺水问题突出,生态环境脆弱,加之近年来广西社会经济的快速发展和居民生活水平的大幅提高,势必对水资源带来巨大压力。为能够全面真实地反映广西水资源承载力的空间分异和喀斯特生态环境的特殊性,选取指标时综合考虑了研究对象的水资源供需状况、生态环境质量和社会经济发展状况,

将水资源承载力系统分为水资源供需、生态环境和社会经济 3 个子系统,共选取 16 个评价指标,构建广西水资源承载力评价指标体系(表 1),并用熵权法计算出各指标及其子系统的权重,具体计算步骤如下:

首先,对各评价指标进行非负化处理。设第  $i$  时段子系统中第  $j$  个影响因子的值为  $X_{ij}$  ( $i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m$ )。为避免求熵值时对数的无意义,进行以下处理:

$$X'_{ij}=\frac{X_{ij}-\min(X_{ij})}{\max(X_{ij})-\min(X_{ij})}+1\tag{3}$$

其次,计算第  $i$  时段第  $j$  个影响因子占有所有时段该因子和的比重( $P_{ij}$ ):

$$P_{ij}=\frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^n X'_{ij}}\quad (i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m)\tag{4}$$

第三,求子系统中各指标的权重( $w_j$ ):

$$w_j=\frac{1-e_j}{m-\sum_{j=1}^m e_j}\quad (0\leq w_j\leq 1;\sum_{j=1}^m w_j=1)\tag{5}$$

式中: $e_j$ ——各指标的信息熵,表示各指标的变异程

$$\text{度},e_j=[-1/\ln(n)]\sum_{i=1}^n P_{ij}\ln(P_{ij})$$

表 1 2013 年广西各地区水资源承载力评价指标体系及其权重

目标层	权重	因素层	公式	含义	权重
水资源系统	0.17	人均水资源量(m <sup>3</sup> /人)	区域水资源总量/总人口	表征人均水资源拥有量	0.17
		径流系数	径流深度/降水深度	表征区域径流补给能力	0.11
		水资源开发利用率(%)	供水量/水资源总量	表征区域水资源开发利用程度	0.20
		地下水资源比例(%)	地下水资源量/水资源总量	表征区域地下水资源丰度	0.17
		人均供水量(m <sup>3</sup> /人)	供水量/总人口	表征区域供水能力	0.16
		万元 GDP 用水量(m <sup>3</sup> )	用水总量/GDP(万元)	表征经济发展的用水程度	0.19
	0.54	森林覆盖率(%)	区域植被面积/总面积	表征区域绿化水平	0.22
		生态环境用水率(%)	生态环境用水量/总用水量	表征区域生态用水程度	0.34
		水源达标率(%)	水质达标的水源地数量/水源地数量	表征区域水源地水质状况	0.22
		污水处理率(%)	污水处理量/污水排放总量	表征区域污水处理情况	0.22
	0.28	人均 GDP(元/人)	—	表征区域经济发展水平	0.19
		城镇化率(%)	—	表征区域城镇化水平	0.21
		农田灌溉用水率(%)	农田灌溉用水量/用水总量	表征农业灌溉用水程度	0.12
		居民生活用水率(%)	居民生活用水量/用水总量	表征居民生活用水程度	0.11
		工业用水率(%)	工业用水量/用水总量	表征工业用水程度	0.15
		人口密度(人/km <sup>2</sup> )	—	表征区域人口密集程度	0.21

注:人口数量为公安户籍数。

此外,根据上述指标相对于水资源承载力的影响程度,同时在借鉴相关研究成果<sup>[15-17]</sup>的基础上,将各评价指标对水资源承载力的影响划分为 3 个等级{ $v_1,v_2,v_3$ },并制定各评价指标相对应的等级划分(表 2)。其中, $v_1$ 级表示水资源承载力处于良好级,表明区域水资源承载力处于较高水平,供水量远高于需水量; $v_3$ 级表示水资源承载力处于敏感级,表明区域水资源承载能力较低,已出现供需缺口,容易引发水资源短缺问题,制约社会经济发展; $v_2$ 为临界级,介于以上两级之间,表明本区域水资源承载力尚能有效支持区域社会经济发展,但潜力空间已严重不足。

2.3 评价模型及计算

水资源承载力评价指数的具体计算过程如下:

(1) 评判矩阵  $R$  的计算。评判矩阵  $R$  中  $r_{ij}$  可通过评价因素的实际数值对照各因素的分级指标(表 2)来计算。为了消除各等级之间数值差别不大而等级相差一级的跳跃现象,对隶属函数进行模糊化处理<sup>[18]</sup>。对于  $v_2$  级即中间区间,令其落在区间中点的隶属度为 1,两侧边缘点的隶属度为 0.5,中间点向两侧线性递减

处理。对于  $v_1$  和  $v_3$  两侧区间,则令距临界值越远,属于两侧等级的隶属度越大,在临界值上属于两侧等级的隶属度各为 0.5,按上述设想构造各评价等级隶属函数的计算式。 $v_1$  和  $v_2$  级的临界值为  $k_1$ , $v_2$  和  $v_3$  的临界值为  $k_3$ , $v_2$  等级区间中点为  $k_2$ , $k_2=(k_1+k_3)/2$ 。对于  $u_3,u_6,u_{13},u_{14},u_{15},u_{16}$  负向指标,各评语等级相对隶属度函数( $\mu$ )计算公式为:

$$\mu_{i1}=\begin{cases}0.5(1+\frac{k_1-u_i}{k_2-u_i}) & u_i < k_1 \\ 0.5(1-\frac{u_i-k_1}{k_2-k_1}) & k_1 \leq u_i < k_2 \\ 0 & u_i \geq k_2\end{cases}\tag{6}$$

$$\mu_{i2}=\begin{cases}0.5(1-\frac{k_1-u_i}{k_2-u_i}) & u_i < k_1 \\ 0.5(1+\frac{u_i-k_1}{k_2-k_1}) & k_1 \leq u_i < k_2 \\ 0.5(1+\frac{k_3-u_i}{k_3-k_2}) & k_2 \leq u_i < k_3 \\ 0.5(1-\frac{k_3-u_i}{k_2-u_i}) & u_i \geq k_3\end{cases}\tag{7}$$

$$\mu_{i3} = \begin{cases} 0.5(1 + \frac{k_3 - u_i}{k_2 - u_i}) & u_i \geq k_3 \\ 0.5(1 + \frac{u_i - k_3}{k_2 - k_3}) & k_2 \leq u_i < k_3 \\ 0 & u_i \leq k_2 \end{cases} \quad (8)$$

对于  $u_1, u_2, u_4, u_5, u_7, u_8, u_9, u_{10}, u_{11}, u_{12}$  正向指标,各评语等级相对隶属度函数的计算公式只需将公式(6)―(8)右端  $u_i$  区间号“ $\leq$ ”改为“ $\geq$ ”,将“ $<$ ”改为“ $>$ ”计算。

表 2 2013 年广西各地区水资源承载力综合评价因素的分级指标

目标层	准则层	因素层	分级标准		
			$v_1$	$v_2$	$v_3$
综合评价 指标体系	供需指标	$u_1$ 人均水资源量/( $\text{m}^3/\text{人}$ )	$>6000$	$6000\sim3000$	$<3000$
		$u_2$ 径流系数	$>0.6$	$0.6\sim0.4$	$<0.4$
		$u_3$ 水资源开发利用率/%	$<15$	$15\sim25$	$>25$
		$u_4$ 地下水资源比例/%	$>30$	$30\sim20$	$<20$
		$u_5$ 人均供水量/( $\text{m}^3/\text{人}$ )	$>600$	$600\sim400$	$<400$
		$u_6$ 万元 GDP 用水量/ $\text{m}^3$	$<200$	$200\sim300$	$>300$
	生态环境指标	$u_7$ 森林覆盖率/%	$>60$	$60\sim40$	$<40$
		$u_8$ 生态环境用水率/%	$>2$	$2\sim1$	$<1$
		$u_9$ 水源达标率/%	$>80$	$80\sim50$	$<50$
		$u_{10}$ 污水处理率/%	$>90$	$90\sim70$	$<70$
	社会经济指标	$u_{11}$ 人均 GDP/(元/人)	$>50000$	$50000\sim20000$	$<20000$
		$u_{12}$ 城镇化率/%	$>30$	$30\sim20$	$<20$
		$u_{13}$ 农田灌溉用水率/%	$<50$	$50\sim60$	$>60$
		$u_{14}$ 居民生活用水率/%	$<5$	$5\sim9$	$>9$
		$u_{15}$ 工业用水率/%	$<10$	$10\sim20$	$>20$
		$u_{16}$ 人口密度/( $\text{人}\cdot\text{km}^{-2}$ )	$<200$	$200\sim400$	$>400$
		评分值 $\alpha_j$	0.95	0.50	0.05

(2) 计算各子系统评价指数。令  $B=A\circ R$ , 其中  $b_j = \sum_{i=1}^n a_i r_{ij}, (j=1,2,\cdots,m)$ , 令评语等级集合为各等级赋值为  $\alpha_j = \{0.95, 0.5, 0.05\}$ , 按照加权平均原则计算广西各地市的供需子系统、生态环境子系统和社会经济子系统的评价指数( $u^*$ ), 公式为:

$$u^* = \frac{\sum_{j=1}^3 \mu(v_j) \alpha_j}{\sum_{j=1}^3 \mu(v_j)} \quad (9)$$

式中: $v_j$ ——各评价等级; $\alpha_j$ ——各评价等级的赋值。

(3) 计算水资源承载力综合评价指数。对上一步计算得到的各子系统评价指数进行综合评价,按公式(9)进行加权平均,计算出水资源承载力的综合评价指数  $L$ 。水资源承载力综合评价指数是衡量水资源承载程度的综合性指标,评价指数越高,水资源承载力的状况越好。

根据相关研究成果<sup>[5]</sup>,并结合广西各地市自然环境及社会经济发展状况,确定综合评价指数分级标准(表 3),将水资源承载力划分为 3 种类型:不可承载、可承载、理想可承载。

表 3 水资源承载力评价指数分级标准

$L$	状态	状态含义描述
$[0\sim0.4]$	不可承载	水资源供需矛盾突出,水资源供给无法满足生产生活的需要
$[0.4\sim0.6]$	可承载	水资源供需矛盾缓解,水污染得到治理,区域节水措施较完善,能满足生产和居民生活需要
$[0.6\sim1.0]$	理想可承载	水资源成为该区域发展的优势资源,并与生态、经济、社会协调发展

3 评价结果

总体上看,2013 年广西水资源承载力状况较好,除贵港市外,其余 13 个地市都处于可承载或理想可承载状态,但各地市由于在水资源供需状况、生态环境和社会经济发展方面存在较大差异,其水资源承载能力具有明显的空间分异性(图 1—2)。其中,桂林市的水资源承载力综合评价指数最高( $L =$

$0.73$ ),其次为柳州市( $L=0.61$ ),两市的水资源承载力均处于理想可承载状态;而贵港市 2013 年水资源承载力综合评价指数为全省最低( $L=0.36$ ),处于不可承载状态。

从各子系统的评价指数来看,也出现了一定的空间分异性(图 1)。供需子系统的评价结果显示,防城港市的供需子系统评价指数最高,为 0.75;贵港市的指数最低,为 0.29。在生态环境子系统评价结果中,

桂林市生态环境子系统评价指数最高,为 0.82;其他 13 个地市的评价指数均低于 0.6,其中钦州市的生态环境子系统评价指数最低,仅为 0.36。社会经济子

系统评价方面,全省的社会经济子系统评价指数总体较低,其中贵港市和玉林市的评价指数最低,均低于 0.3,柳州市的评价指数最高,为 0.61。

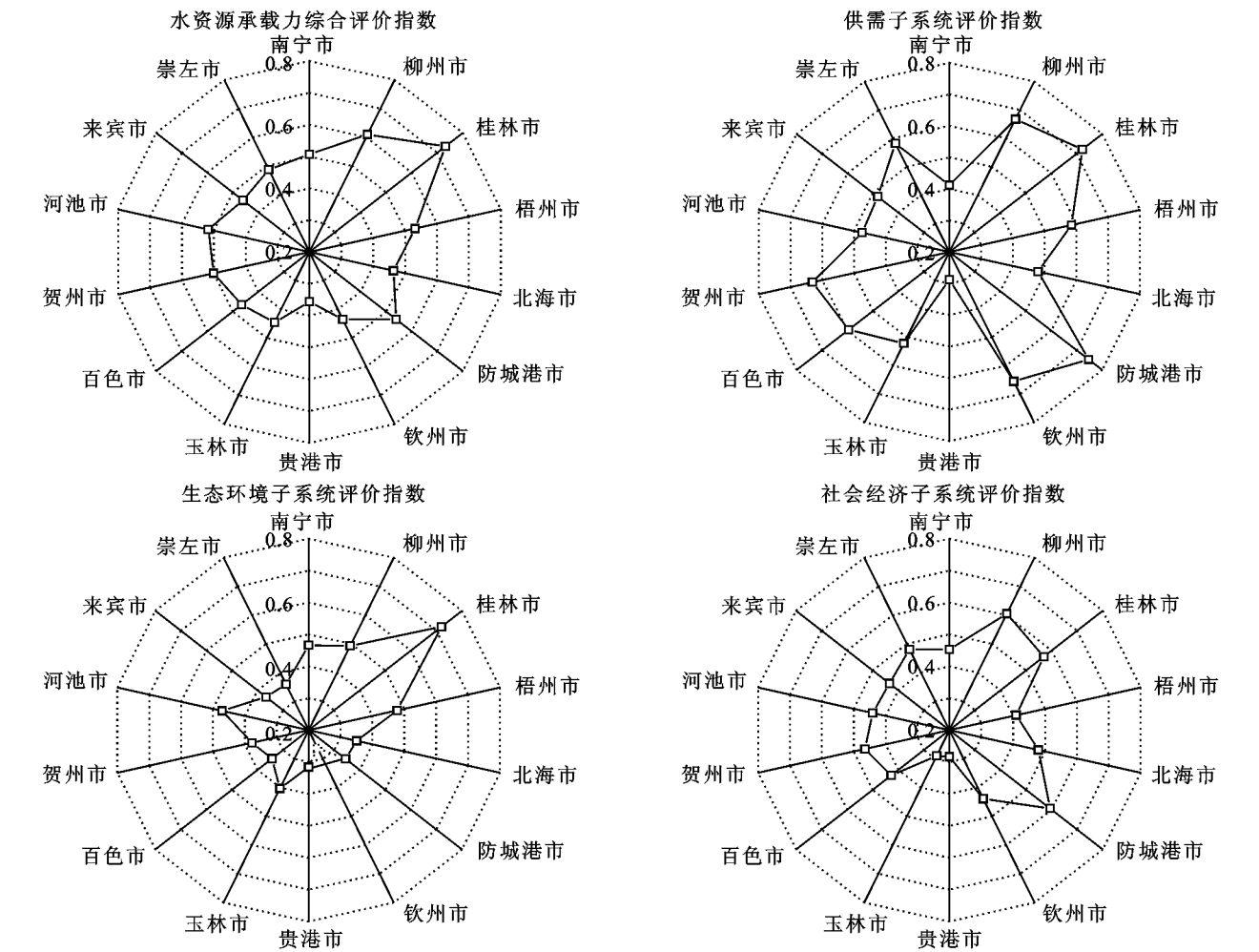


图 1 2013 年广西各地区水资源承载力综合评价指数及各子系统评价指数



图 2 2013 年广西各地市水资源承载力类型分区

从全省各地市水资源承载力评价指数分级标准来看,贵港市的水资源承载力综合评价指数全省最低(0.36),属不可承载区。桂林市和柳州市的水资源承载力综合评价指数分别为 0.73,0.61,属于理想可承载区。南宁市、梧州市、北海市、防城港市、钦州市、玉林市、百色市、贺州市、河池市、来宾市和崇左市属于可承载区( $L \in [0.4 \sim 0.6]$ )。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

4.1.1 供需子系统空间分异分析 2013 年广西供需子系统总体状况较好(图 1)。广西位于珠江水系中上游地区,河网密布,水系发达,内有红水河、柳江、桂江等河流。2013 年为平水年,水资源总量较为丰富,全省降水量为 1 696 mm,水资源总量为 2 057 亿  $\text{m}^3$ ,人均水资源量为 3 894  $\text{m}^3/\text{人}$ ,高于全国同期平均值 2 055  $\text{m}^3/\text{人}$ 。

从供需子系统的空间分异来看,南宁市和贵港市的需求子系统评价指数分别为 0.41,0.29,其他地市供需子系统评价指数均高于 0.45,防城港市的评价指数最高,为 0.75。南宁市水资源总量丰富,然而作为广西的省会城市,经济发展迅速,经济发展的“集聚效应”导致人口聚集,人口总量位居全省首位,导致人均水资源量和人均供水量均低于全省平均值,水资源供需矛盾

突出。贵港市人口增长迅速,2013年全市人口自然增长率为8.25%,比全省平均水平高0.32%,人均水资源量和人均供水量均低于全省平均值,人口的迅速增长导致水足迹迅速增加,给水资源带来巨大压力;另一方面,贵港市经济发展迅速,经济增长率高达8.2%,而万元GDP用水量较高(422 m<sup>3</sup>),低效的水资源利用更加重了水资源短缺问题。防城港市的供需子系统评价指数最高,由于濒临海洋,受西南季风气候影响更明显,降水量最多,为2 913 mm,径流系数高达0.65,由于人口数量为全省最低,人均水资源量高达12 681 m<sup>3</sup>/人,高于全省平均水平4 998 m<sup>3</sup>/人。

4.1.2 生态环境子系统空间分异分析 整体上,广西各地市生态环境子系统评价指数较低。作为典型喀斯特省份,喀斯特土地面积比重为35.1%,2013年全省石漠化和潜在石漠化土地面积占国土总面积的17.7%。而喀斯特地区基岩裸露,植被嗜钙石生,生态环境脆弱性强,且破坏后极难恢复,加之人类不合理活动导致水土流失严重,地表或土壤中含有污染物时也会随水流汇入河网污染地表河流或通过落水洞、溶蚀裂隙和天窗等进入地下河造成污染,且污染一旦形成很难治理<sup>[19-20]</sup>。

从生态环境子系统的空间分异来看,桂林市的评价指数最高,为0.82,其他地市评价指数均低于0.6,钦州市评价指数最低,仅为0.36。作为世界著名的旅游城市和文化名城,桂林市制定了严格的生态环境保护政策,全市生态环境保护状况较好,森林覆盖率高达70.59%,生态环境用水率为全省最高,达3%。同时由于旅游发展依赖于环境,居民的环保意识相对较高。另外,桂林市积极防治水污染,拥有城市污水处理厂4个,污水处理率为92.3%。而钦州市作为临海工业城市,工业对经济增长的贡献率高达39%,工业发展的同时不可避免的带来生态环境的破坏,如钦州市水源地水质达标率和森林覆盖率低于全省平均值,临海造纸厂等重污染企业排污极易引发海洋环境污染,威胁海洋生态安全,必须严格控制污染排放强度,提高污水处理率。

4.1.3 社会经济子系统空间分异分析 2013年全省社会经济子系统评价指数总体较低,且空间分异明显。除柳州市、桂林市、防城港市外,其余地市社会经济子系统评价指数均低于0.5。从全省来看,广西各地市人口密度普遍较高,2013年人口平均密度为229人/km<sup>2</sup>,远高于全国平均人口密度的142人/km<sup>2</sup>。广西经济发展水平相对较低,在全国处于中游偏下的水平,2013年人均GDP仅为26 326元/人,远低于全国平均水平41 804.72元/人。

从社会经济子系统的空间分异来看,柳州市评价指数最高,为0.61,桂林市和防城港市的评价指数分别为0.57、0.59,贵港市的评价指数仅为0.28。作为广西最大的工业城市,2013年工业总产值占全省工业总产值的21%,人均GDP为53 982元/人,城镇化率为33.7%,居全省前列;且人口增长率较低,2013年全市人口自然增长率和人口密度均低于全省平均水平,人口数量得到了较好控制。防城港是中国西部第一大港口,同时也是连接中国与东盟各国的交通枢纽,2013年货物吞吐量达1.06亿t,防城港市作为新兴的港口工业城市,人均GDP达5.6万元/人,居于全省首位,且农田灌溉用水和人口密度均低于全省平均值。贵港市的社会经济子系统评价指数最低,主要原因在于区内人口尤其是非农业人口众多,给水资源带来了巨大压力。2013年贵港市总人口超过500万,人口密度高达508人/km<sup>2</sup>,而人均GDP仅为1.38万元/人,非农业人口比重仅为12.6%。

4.1.4 水资源承载力空间分异分析 从图1—2可以看出,2013年全省水资源承载力状况总体较好( $L \in [0.35 \sim 0.75]$ )。广西位于珠江水系中上游,区内河流众多,水资源丰富,另有龙滩水库等39座大型水库和169座中型水库,2013年底总蓄水量达256.4亿m<sup>3</sup>,丰富的水资源为广西各地市的社会经济发展提供了充足的保障。

从水资源承载力的空间分异来看,广西水资源承载力划分为3大类型区(图2):

(1) 理想可承载区。主要有桂林市和柳州市两个地区,该类型区内水资源较为丰富,有漓江、湘江、浔江、柳江等河流,人均水资源量高于4 500 m<sup>3</sup>/人,径流系数位居全省首位,且水资源开发利用率低,不足13%,水资源开发潜力巨大,供需子系统评价指数位于全省前列;另一方面,桂林市和柳州市经济发展水平高,非农业人口较少,城镇化率高于全省平均水平,人均GDP为全省最高,且污水处理率高达90%以上,生态环境子系统和社会经济子系统评价指数均为全省最高。因此,该区内水资源承载能力较大,属理想可承载区。

(2) 不可承载区。主要包括贵港市,该类型区内人口众多,人均水资源量仅为2 393 m<sup>3</sup>/人,而农业、工业和城市居民用水多,水资源开发利用率高,达31%,属于不可持续的水资源利用模式,一旦发生极端干旱,很可能导致严重的缺水问题。加之经济发展落后、城镇化率低,仅为12.6%,供需子系统和社会经济子系统评价指数为全省最低,水资源承载能力不足,难以为社会经济发展提供充足保障。

(3) 可承载区。这类地区包括南宁市、梧州市、北海市、防城港市、钦州市、玉林市、百色市、贺州市、河池市、来宾市和崇左市,该类型区内水资源总量较丰富,人均水资源量为  $4\,985\text{ m}^3/\text{人}$ ,能够为社会经济发展提供基础保障。但是,各地市经济发展和人口增长迅速,工农业用水和居民生活用水量逐年增加,2013年平均水资源开发利用率高达23%,远高于桂林市和柳州市,水资源支撑社会经济发展的潜力空间有限。但随着科技的发展和节水能力的提高,水资源的承载空间将进一步扩展。

## 4.2 结论

(1) 2013年广西壮族自治区水资源承载力状况总体较好,其中桂林市、柳州市处于理想可承载状态,贵港市处于不可承载状态,其他地市均处于可承载状态。

(2) 从各子系统来看,供需子系统总体状况较好,防城港市的供需子系统评价指数最高,南宁市和贵港市的评价指数最低;生态环境子系统评价指数普遍较低,桂林市的评价指数最高;社会经济子系统评价指数总体较低,柳州市、桂林市和防城港市的社会经济子系统评价指数最高,贵港市的评价指数最低。

(3) 评价结果对各地市水资源规划和水资源可持续开发利用具有一定的借鉴和参考价值,未来广西应合理控制人口,提高节水意识,加强污水处理及废水回用,以提高水资源承载能力,实现水资源的高效、可持续利用。

## 参考文献:

- [1] 夏军. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战(一)[J]. 海河水利, 2002, 17(2): 5-7.
- [2] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 262-269.
- [3] 段春青, 刘昌明, 陈晓楠, 等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报, 2010(1): 82-90.
- [4] 张永勇, 夏军, 王中根. 区域水资源承载力理论与方法探讨[J]. 地理科学进展, 2007, 26(2): 126-132.
- [5] 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.
- [6] 贺中华, 梁虹, 黄法苏, 等. 喀斯特地区地下水资源承载力综合评价研究: 以贵州省为例[J]. 水文, 2010, 30(3): 22-27.
- [7] 黄庆旭, 何春阳, 史培军, 等. 气候干旱和经济发展双重压力下的北京水资源承载力变化情景模拟研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(5): 859-870.
- [8] 黎明, 李百战. 重庆市都市圈水资源承载力分析与预测[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6499-6505.
- [9] 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.
- [10] 朱玲燕, 苏维词. 基于熵权法及灰色关联模型的水资源承载力研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014(5): 233-236.
- [11] Rakhmatullaev S, Marache A, Huneau F, et al. Geostatistical approach for the assessment of the water reservoir capacity in arid regions: A case study of the Akdarya reservoir, Uzbekistan [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 63(3): 447-460.
- [12] 吕萍, 刘东, 赵菲菲. 基于熵权的建三江分局水资源承载力模糊物元评价模型[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 246-250.
- [13] 陈守煜. 系统模糊决策理论与应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1994.
- [14] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [15] Zhang Junyi, Wang Lachun. Assessment of water resource security in Chongqing City of China: What has been done and what remains to be done[J]. Natural Hazards, 2015, 75(3): 2751-2772.
- [16] 潘兴瑶, 夏军, 李法虎, 等. 基于GIS的北方典型区水资源承载力研究: 以北京市通州区为例[J]. 自然资源学报, 2007, 22(4): 664-671.
- [17] Meng Lihong, Chen Yaning, Li Weihong, et al. Fuzzy comprehensive evaluation model for water resources carrying capacity in Tarim River Basin, Xinjiang, China [J]. Chinese Geographical Science, 2009, 19(1): 89-95.
- [18] 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.
- [19] 张军以, 王腊春, 马小雪, 等. 西南岩溶地区地下水污染及防治途径[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2): 245-249.
- [20] 张军以, 王腊春, 苏维词, 等. 岩溶地区人类活动的水文效应研究现状及展望[J]. 地理科学进展, 2014, 33(8): 1125-1135.