

# 基于熵权—理想解法的城市复合系统 资源环境承载力时空分异研究

旷开金<sup>1,2</sup> 郑开焰<sup>1</sup> 康雅婷<sup>1</sup> 薛萌<sup>1</sup> 刘金福<sup>2,3</sup> 黄福坤<sup>11</sup>

(1. 福建江夏学院 金融学院, 福建 福州 350108;

2. 生态与资源统计福建省高校重点实验室, 福建 福州 350002;

3. 福建农林大学 计算机与信息学院, 福建 福州 350002)

**【摘要】:** 区域协调发展是科学发展的重要内涵, 科学评价承载力对协调发展具有重要的理论和现实意义。运用熵权—理想解法, 并基于空间分析模型, 探讨福建省9个地级以上城市资源环境承载力范围以及时空格局演变特征, 结果表明: (1) 从时间序列角度分析, 厦门市承载力处于良好承载状态, 其余地市处于波动向好状态; (2) 各子系统承载力处于波动状态, 不同地市子系统承载力存在较大差异; (3) 区域复合系统承载力在全局空间分布上不存在显著的正自相关关系, 局域空间上仅泉州市复合系统承载力与周边地区存在集聚效应。根据空间格局热点演化趋势, 资源环境承载力局部空间分异明显。因此, 在数字经济发展背景下, 在高质量发展的同时, 更应做到区域协同发展, 从而推动复合系统环境承载力水平的提高。

**【关键词】:** 承载力 时空演变 熵权法 理想解法模型

**【中图分类号】:** X196 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2021)02-138-08

当前, 生态环境问题已经成为影响社会可持续发展、经济稳定、民生福祉的重要问题, 资源环境承载能力评估是研究城市未来可持续发展和生态文明建设的重要基础<sup>[1]</sup>。2013年11月, 党的十八届中央委员会第三次全体会议研究并通过了《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》(以下简称《决定》)。《决定》指出“建立资源环境承载力监测预警机制”, 强调“资源环境承载力评价”及“资源环境承载力监测预警”的重要作用。因此, 在全面建设小康社会的进程中, 探讨复合系统资源环境承载力时空分异特征并做出预警措施, 使系统资源环境承载压力在最大承载范围内具有重要的理论意义。

“承载力”内涵可追溯到马尔萨斯时代(1766—1834年), 马尔萨斯认为, 人口增长受到有限资源制约, 且认为人类社会物质增长过程受到环境因子的限制, 马尔萨斯的观点为后来科学研究产生了广泛而深远的影响。我国学者在《我国沿海经济开发区环境的综合研究—福建省湄洲湾开发区环境规划综合研究总报告》中, 首次提出了环境承载力的概念, 随后相关学者从不同角度

**作者简介:** 旷开金, 博士研究生, 讲师, 研究方向为数据挖掘、资源环境统计。E-mail:kkj1205@163.com

刘金福, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为生物统计学。E-mail:fjljf@126.com

**基金项目:** 2018年福建省中青年教育科研项目“多元数据背景下复合系统承载力时空演变与系统动力学仿真研究”(JT180584); 国家自然科学基金“格氏栲种子萌发对林窗与凋落物协同影响的权衡策略研究”(31770678); 生态与资源统计福建省高校重点实验室开放课题“数字经济背景下海西经济区生态环境质量与经济发展水平时空耦合研究”(PTJH1701102)

对环境承载力理论做出了进一步探讨,成为近年来统计学、环境学和其他相关学科研究的热点问题。梳理相关文献可知,一方面,研究领域从关注水土资源承载力<sup>[2-3]</sup>、海洋资源承载力<sup>[4-5]</sup>、水资源承载力<sup>[6]</sup>等单一要素到复合系统资源承载力问题<sup>[7-8]</sup>;另一方面,资源环境承载力研究涉及方法研究和模型研究,包括 TOPSIS 和热点分析<sup>[9]</sup>、时间序列趋势 Mann-Kendall 检验方法<sup>[5]</sup>、突变级数法<sup>[8]</sup>以及供给—综合总需求模型、状态空间法、神经网络模型和压力—状态—响应概念模型等<sup>[10-11]</sup>。

福建省作为海峡西岸重要省份,是全国第一个国家生态文明试验区,近年来经济快速发展,在促进区域社会经济发展与海峡两岸合作交流中具有重要的战略地位,但面临的资源环境压力越来越大。2018年5月22日,生态环境部发布《2017中国生态环境状况公报》(以下简称《公报》)。《公报》指出,2016年福建省县域生态环境质量基本呈现优良等级,但由于经济发展,生态环境质量状况仍存在不稳定因素。因此,在追求经济发展的过程中,如何将生态环境保护与经济高质量发展有机地结合起来,维护区域生态环境良性循环和可持续发展亟待思考。文章结合生态文明建设实践,建立熵权—理想解法模型以及空间分析方法,以福建省9个地级以上城市为研究对象,客观量化各地区资源环境承载力状态及空间分异特征,对于资源环境承载力预警、维持区域可持续发展具有重要意义。

## 1 研究区概况

福建省位于北纬 23° 33' ~28° 20'、东经 115° 50' ~120° 40',地处中国东南沿海,东隔台湾海峡,与台湾省相望,东北部与浙江省毗邻,西北部横贯武夷山脉与江西省交界,西南部与广东省相连。全省土地面积为 12.14 万平方千米,其中山地丘陵占 80%以上,有“八山一水一分田”之称,森林资源丰富,2018年全省森林覆盖率为 66.80%,是我国南方重点林区之一,素有“绿色宝库”之称。

## 2 指标体系建立与数据处理

### 2.1 指标体系建立

在借鉴国内外有关资源环境承载力研究理论的基础上,考虑可持续发展理论,构建由经济系统承载力、社会系统承载力、基础资源系统承载力、环境系统承载力 4 个准则层 19 个正负具体指标构成的复合系统资源环境承载力指标体系,见表 1。

表 1 资源环境承载力指标体系

目标层	准则层	指标层	指标属性
A <sub>1</sub> 资源环境承载力	B <sub>1</sub> 经济系统承载力	X <sub>1</sub> 人均 GDP/(元/人)	+
		X <sub>2</sub> 城镇人均可支配收入/(元/人)	+
		X <sub>3</sub> 人均固定资产投资/(元/人)	+
		X <sub>4</sub> 第二、第三产业占 GDP 比重/%	+
		X <sub>5</sub> 人均财政支出/(元/人)	+
	B <sub>2</sub> 社会系统承载力	X <sub>6</sub> 城镇化率/%	+
		X <sub>7</sub> 登记失业率/%	—
		X <sub>8</sub> 人口密度/(人/平方千米)	—

		X <sub>9</sub> 第二、第三产业人口就业比重/%	+
		X <sub>10</sub> 每万人拥有普通高校在校生数/人	+
		X <sub>11</sub> 千人教师数/(人/千人)	+
	B <sub>3</sub> 基础资源系统承载力	X <sub>12</sub> 每千人拥有医院床位数/(张/千人)	+
		X <sub>13</sub> 千人互联网用户数/(户/千人)	+
		X <sub>14</sub> 千人移动电话数/(部/千人)	+
		X <sub>15</sub> 人均城市道路面积/(m <sup>2</sup> /人)	+
	B <sub>4</sub> 环境系统承载力	X <sub>16</sub> 绿化覆盖率/%	+
		X <sub>17</sub> 污水处理率/%	+
		X <sub>18</sub> 生活垃圾无害化处理率/%	+
		X <sub>19</sub> 工业固废综合利用率/%	+

## 2.2 数据处理

以福建省 9 个地级市为研究对象,基于 2007 年、2012 年、2017 年时间节点探讨党的十七大到十九大期间福建省资源环境承载力时空演变特征。数据来源于《福建统计年鉴》(2007 年、2012 年、2017 年)、各区市统计年鉴(2007 年、2012 年、2017 年)以及统计公报、社会发展公报和政府工作报告等。

在多指标综合评价问题上,指标的无量纲化对结果的准确性至关重要。目前主要有中心化、极差正规化、极大化、极小化、标准差化、均值化等方法,但各种方法或多或少会改变原数据的整体性、关联系数或变异程度。因此,综合考虑各种方法的优缺点,选取最值标准化处理方法,既能消除量纲影响,又能保持指标变异信息。同时为了保证数据完整性,消除标准化的极端值“0”,改进公式为:

对正指标,有:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \times \eta + (1 - \eta) \quad (1)$$

对负指标,有:

$$x'_{ij} = \frac{x_{j\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \times \eta + (1 - \eta) \quad (2)$$

式中: $x'_{ij}$ 为第  $i$  个区市第  $j$  项指标数据的标准化值,  $x_{ij}$  为原始数据,  $x_{j\max}$  和  $x_{j\min}$  为第  $j$  项指标数据的最大值和最小值,  $\eta \in (0, 1)$ , 研究取  $\eta = 0.99$ 。

### 3 研究方法

#### 3.1 熵值法

熵是一个物理学概念, 主要用来反映分子运动的无序、混乱程度, 由申农 (C. E. Shannon) 引入信息论之后, 现已广泛用于各类研究领域。基于熵值法确定评价指标体系权重, 可避免人为主观因素的干扰, 使评价结果具有较高可信度和客观性。熵值法确定各项指标权重的步骤为:

(1) 定义标准化矩阵。

$$Y_{ij} = x'_{ij} / \sum_{i=1}^m x'_{ij} \quad (0 \leq Y_{ij} \leq 1) \quad (3)$$

(2) 计算指标的熵值  $e_j$ 。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m Y_{ij} \ln(Y_{ij}), \quad k = 1 / \ln m, \quad e_j \geq 0 \quad (4)$$

(3) 计算指标的冗余度  $d_j$ 。

$$d_j = 1 - e_j \quad (5)$$

第  $j$  项指标值之间的差异越小, 信息熵越大, 指标权重就越小; 指标值之间的差异越大, 信息熵越小, 指标权重就越大。

(4) 对冗余度进行归一化, 计算指标权重  $w_j$ 。

$$w_j = d_j / \sum_{i=1}^m d_j \quad (1 \leq j \leq n) \quad (6)$$

#### 3.2 理想解法

资源环境承载力评价方法主要有基于生态足迹理念的状态空间模型<sup>[12]</sup>, 也有基于突变理论的突变级数法<sup>[13]</sup>, 文章选择用于解决在有限的方案中选择多目标决策的 TOPSIS 模型。理想解法亦称为 TOPSIS 法, 是一种有效的多指标评价方法, TOPSIS 法通过构造评价问题的正理想解与负理想解, 即各指标的最优解和最劣解, 通过计算每个方案到理想方案的相对贴适度, 即靠近正理想解和远离负理想解的程度, 对方案进行排序, 从而选出最优方案。

设多属性决策方案集为  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ , 衡量方案优劣解的属性变量为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 此时方案集  $D$  中每个方案  $d_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 的  $n$  个属性值构成的向量是  $[x_{i1}, \dots, x_{in}]$ , 它作为  $n$  维空间中的一个点, 能唯一地表征方案  $d_i$ 。

TOPSIS 法的具体计算步骤如下:

(1) 用向量规划化方法求解规范决策矩阵。设多属性决策问题的决策矩阵为  $A=(a_{ij})_{m \times n}$ , 规范化决策矩阵  $B=(b_{ij})_{m \times n}$ 。

(2) 构建加权规范矩阵  $C=(c_{ij})_{m \times n}$ 。设权重向量为  $w=[w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ , 则有:

$$C_{ij}=w_j \cdot b_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, m ; j=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

(3) 确定正理想解  $C^*$  与负理想解  $C^0$ 。设正理想解  $C^*$  的第  $j(j=1, 2, \dots, n)$  个属性值为  $c_j^*$ , 负理想解  $C^0$  的第  $j(j=1, 2, \dots, n)$  个属性值为  $c_j^0$ 。

$$\text{正理想解 } c_j^* = \begin{cases} \max_i c_{ij}, & j \text{ 为效益型指标} \\ \min_i c_{ij}, & j \text{ 为成本型指标} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{负理想解 } c_j^0 = \begin{cases} \min_i c_{ij}, & j \text{ 为效益型指标} \\ \max_i c_{ij}, & j \text{ 为成本型指标} \end{cases} \quad (9)$$

(4) 计算各方案到正理想解与负理想解的距离。

备选方案  $d_i (i=1, 2, \dots, m)$  到正理想解的距离为:

$$s_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^*)^2} \quad (10)$$

备选方案  $d_i (i=1, 2, \dots, m)$  到负理想解的距离为:

$$s_i^0 = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^0)^2} \quad (11)$$

(5) 计算各方案的排序指标值, 也即综合评价指数  $f_i^*$  ( $i=1, 2, \dots, m$ )。

$$f_i^* = s_i^0 / (s_i^0 + s_i^*) \quad (12)$$

根据贴近度  $f_i^*$  的大小进行排序, 贴近度越大, 承载力越好; 贴近度越小, 承载力越弱。

### 3.3 全局空间自相关分析

为进一步探究各地市承载力的空间相关性,采用空间自相关分析环境承载力空间关联。选取常用的度量统计量全局 Moran' sI 指数,计算公式为:

$$I = n \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

式中:I 表示全局 Moran' sI 指数;n 为空间单元数目;W<sub>ij</sub> 为空间权重矩阵,用来揭示各市域单元之间的空间关系,若 i 区域与 j 区域有公共边界,则 W<sub>ij</sub> 取 1,若两区域之间没有公共边界,则 W<sub>ij</sub> 取 0;x<sub>i</sub> 和 x<sub>j</sub> 表示空间单元 i 和空间单元 j 的属性值。Moran' sI 指数介于[-1, 1],如果在给定的显著性水平下为正值,则说明区域之间的空间呈正的相关关系;如果是负值;则说明其空间负相关;接近 0,表示区域空间随机分布。

### 3.4 局部空间自相关分析

局部空间自相关经常使用局部 Moran' sI 来衡量,也将其称为 LISA。局部 Moran' sI 指数可以用于判断空间单元的特征值和相似单元属性之间的相关性,如果是正值且显著,则高值空间集聚为“热区”;如果是负值且显著,则低值空间集聚为“冷区”。局部 Moran' sI 指数还可以检验其数据的异质性。

$$I' = \frac{(x_i - \bar{x})}{s^2} \sum_{j \neq i} w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (14)$$

式中:I' 表示局部 Moran' sI 指数,当 I' 大于 0 时,体现为高一高集聚的形式或者低—低集聚的形式,表现为一个高值或一个低值被周边高值或低值包围的现象。同样的,当 I' 小于 0 时,体现为低—高集聚的形式或高一低集聚的形式,表现为要么高值包围低值,要么低值包围高值的现象。

## 4 复合系统资源环境承载力实证研究

### 4.1 复合系统资源环境承载力分析

通过对原始数据进行标准化处理,基于熵权法对各变量赋予权重,结果见表 2。根据公式(1)和公式(2)对数据进行处理,计算加权规范矩阵 C,利用理想解法测算 2007 年、2012 年、2017 年复合系统资源环境承载力水平。

目前关于综合承载力的研究成果较多,但由于研究方法、评价指标体系构建和研究区域的不同,学术界尚未形成统一的综合承载力划分标准,故本文根据研究目的和相关研究中常采用的非等间距划分方法将贴适度划分为四个等级,用以表示综合承载力水平的高低<sup>[14]</sup>。承载力在[0, 0.3) 范围内为弱载状态,在[0.3, 0.6) 范围内为中等承载状态,在[0.6, 0.8) 范围内为良好承载状态,在[0.8, 1] 范围内为优质承载状态。

由图 1 可知,从时间序列角度分析,2007 年,厦门市承载力最高,达 0.7931,为良好承载状态;福州市次之,承载力为 0.4899,为中等承载状态;泉州市承载力为 0.4056,为中等承载状态;其余地市承载力在 0.3 以下,均为弱载状态。2012 年,厦门市承载力依然最高,达 0.6863,为良好承载状态;福州市承载力次于厦门市,为 0.4474,为中等承载状态;泉州市承载力为 0.3935,为中等承载状态。与 2007 年相比,2012 年龙岩市承载力由 0.2371 上升至 0.3381,承载力由弱载转为中等承载状态;莆田市承载力由 0.2625

上升至 0.3807,由弱载转为中等承载状态。2017 年,厦门市承载力由 2012 年的 0.6863 下降为 0.6814,但仍处于良好承载状态;福州市承载力较 2012 年有所上升,达 0.4771;泉州市承载力由 2012 年的 0.3935 上升为 0.3990,处于中等承载状态;莆田市承载力亦处于上升阶段,由 2012 年的 0.3807 上升为 0.4389,处于中等承载状态。究其原因,厦门市深化供给侧结构性改革,加快产业转型升级,促进新旧动能转换,提升经济质量效益,做好稳增长、促改革、调结构工作,2017 年全年地区生产总值 4351.18 亿元,城镇居民人均可支配收入 50019 元,绿化覆盖率为 42.95%,污水集中处理率 95.76%,生活垃圾无害化处理率 100%。2017 年福州市城镇居民人均可支配收入 40973 元,全市森林覆盖率 57.1%,建成区绿地率 41.1%。相比于其他地市,厦门市、福州市经济社会发展、环境保护均处于较好水平。2017 年莆田市全年实现地区生产总值 2045.19 亿元,较 2012 年实现年平均增长率 11.21%,城镇居民人均可支配收入 34490 元,较 2012 年实现年平均增长率 6.91%,全市森林覆盖率 60.05%,承载力处于上升阶段。

从区域角度分析,2007—2017 年,厦门市承载力有所下降,但仍处于良好承载状态;福州市、泉州市承载力处于波动状态,但处于中等承载状态;莆田市、漳州市承载力处于上升状态,但漳州市处于弱载状态,莆田市达中等承载状态。

表 2 2007 年、2012 年、2017 年资源环境承载力评价指标权重

准则层	指标层	2007 年		2012 年		2017 年	
B <sub>1</sub> 经济系统承载力	X <sub>1</sub> 人均 GDP/(元/人)	0.3611	0.0685	0.2784	0.0589	0.2631	0.0549
	X <sub>2</sub> 城镇人均可支配收入/(元/人)		0.0528		0.0698		0.0701
	X <sub>3</sub> 人均固定资产投资/(元/人)		0.0745		0.0318		0.0403
	X <sub>4</sub> 第二、第三产业占 GDP 比重/%		0.0521		0.0285		0.0382
	X <sub>5</sub> 人均财政支出/(元/人)		0.1132		0.0894		0.0595
B <sub>2</sub> 社会系统承载力	X <sub>6</sub> 城镇化率/%	0.3339	0.0851	0.3094	0.0946	0.3183	0.1099
	X <sub>7</sub> 登记失业率/%		0.0559		0.0358		0.0288
	X <sub>8</sub> 人口密度/(人/平方千米)		0.0169		0.0167		0.0195
	X <sub>9</sub> 第二、第三产业人口就业比重/%		0.0627		0.0530		0.0638
	X <sub>10</sub> 每万人拥有普通高校在校生数/人		0.0709		0.0708		0.0692
	X <sub>11</sub> 千人教师数/(人/千人)		0.0425		0.0385		0.0272
B <sub>3</sub> 基础资源系统承载力	X <sub>12</sub> 每千人拥有医院床位数/(张/千人)	0.1796	0.0293	0.2584	0.0393	0.2940	0.0361
	X <sub>13</sub> 千人互联网用户数/(户/千人)		0.0730		0.0877		0.1123
	X <sub>14</sub> 千人移动电话数/(部/千人)		0.0667		0.0760		0.0864
	X <sub>15</sub> 人均城市道路面积/(平方米/人)		0.0286		0.0518		0.0592
B <sub>4</sub> 环境系统承载力	X <sub>16</sub> 绿化覆盖率/%	0.1074	0.0296	0.1574	0.0563	0.1247	0.0299
	X <sub>17</sub> 污水处理率/%		0.0367		0.0646		0.0567
	X <sub>18</sub> 生活垃圾无害化处理率/%		0.0175		0.0161		0.0198

	X <sub>19</sub> 工业固废综合利用率/%		0.0236		0.0204		0.0182
--	-----------------------------	--	--------	--	--------	--	--------

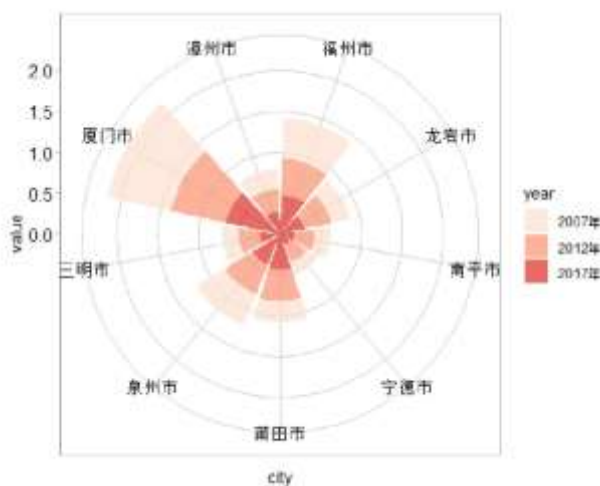


图 1 资源环境承载力南丁格尔图

#### 4.2 资源环境子系统承载力分析

基于可视化原理,运用R语言中的ggplot2包,进一步深入分析2007—2017年福建省地市级资源环境承载力变化趋势及规律,对资源环境承载力的经济系统、社会系统、基础资源系统、环境系统4个子系统进行动态分析,结果见表3和图2。

由表3及图2a可知,2007年、2012年、2017年厦门市经济系统承载力均在0.7以上,处于良好到优质承载力水平,且在9地市中处于较高水平,这与厦门市特殊的经济地理位置分不开,2017年居民人均生活消费支出30356元,按可比价格计算,GDP比2016年增长7.6%,处于全省较高水平。研究期间福州市经济系统承载水平呈现上升趋势,承载力由2007年的0.3387上升到2017年的0.5464,2017年福州市地区生产总值7104.02亿元,比2016年增长8.7%,城镇居民人均生活消费支出27427元,比2007年高出15535元。泉州市经济系统承载力由2007年的0.3288上升到2017年的0.4445,均处于中等承载水平。由图2b可知,漳州市与泉州市社会系统承载力处于较高水平,泉州市社会系统承载力由2007年的0.6261上升到2017年的0.6244,处于良好承载水平,城镇化率由48.8%提高到65.7%,每万人拥有普通高校在校生数(人)由115人提高到146人,社会事业大幅提升。漳州市社会系统承载力由2007年的0.6831上升至2017年的0.7953,失业率由3.8%下降到2.23%,社会系统处于良好承载水平。由图2c可知,2007年漳州市基础资源系统承载力为0.8829,处于优质承载水平,而2012年、2017年处于中等承载水平,其余地市基础资源承载力均处于0.6以下的弱载水平,表明基础资源系统承载力尚有提升空间。由图2d可知,2007年,厦门市、龙岩市环境系统承载力均大于0.8,处于优质水平,但2012年、2017年均处于0.6以下的中等承载水平,表明随着经济社会发展,环境问题不容忽视。漳州市环境系统承载力由2007年的0.6943上升到2017年的0.9001,绿化覆盖率、污水处理率均得到较好改善,环境系统由中等承载力水平上升为优质承载水平。

表 3 资源环境子系统承载力

地区	2007年				2012年				2017年			
	经济系	社会系	基础资源	环境系	经济系	社会系	基础资源	环境系	经济系	社会系	基础资源	环境系

	统	统	系统	统	统	统	系统	统	统	统	系统	统
福州市	0.3387	0.0909	0.0909	0.0909	0.4045	0.0909	0.0909	0.0909	0.5464	0.0909	0.0909	0.0909
泉州市	0.3288	0.6261	0.5525	0.4386	0.3726	0.6370	0.3515	0.1957	0.4445	0.6244	0.2761	0.4852
厦门市	1.0000	0.4280	0.4272	0.8911	0.9174	0.3977	0.3910	0.4463	0.7983	0.4122	0.3414	0.5278
漳州市	0.0828	0.6831	0.8829	0.6943	0.1355	0.6910	0.5700	0.6169	0.2114	0.7953	0.5213	0.9001
龙岩市	0.1740	0.1677	0.3175	0.8901	0.3025	0.2190	0.2841	0.5143	0.3907	0.1853	0.3133	0.5466
南平市	0.0548	0.1671	0.3637	0.4047	0.1244	0.2602	0.3108	0.5983	0.2026	0.2198	0.2580	0.5551
宁德市	0.0524	0.1663	0.2344	0.5690	0.0774	0.2156	0.2523	0.4214	0.1127	0.1626	0.1621	0.2135
莆田市	0.1615	0.2175	0.1339	0.3022	0.1926	0.2461	0.2203	0.3514	0.3150	0.1573	0.1559	0.2036
三明市	0.1719	0.3455	0.2153	0.4949	0.3058	0.2739	0.5171	0.4947	0.3827	0.2376	0.5879	0.6440

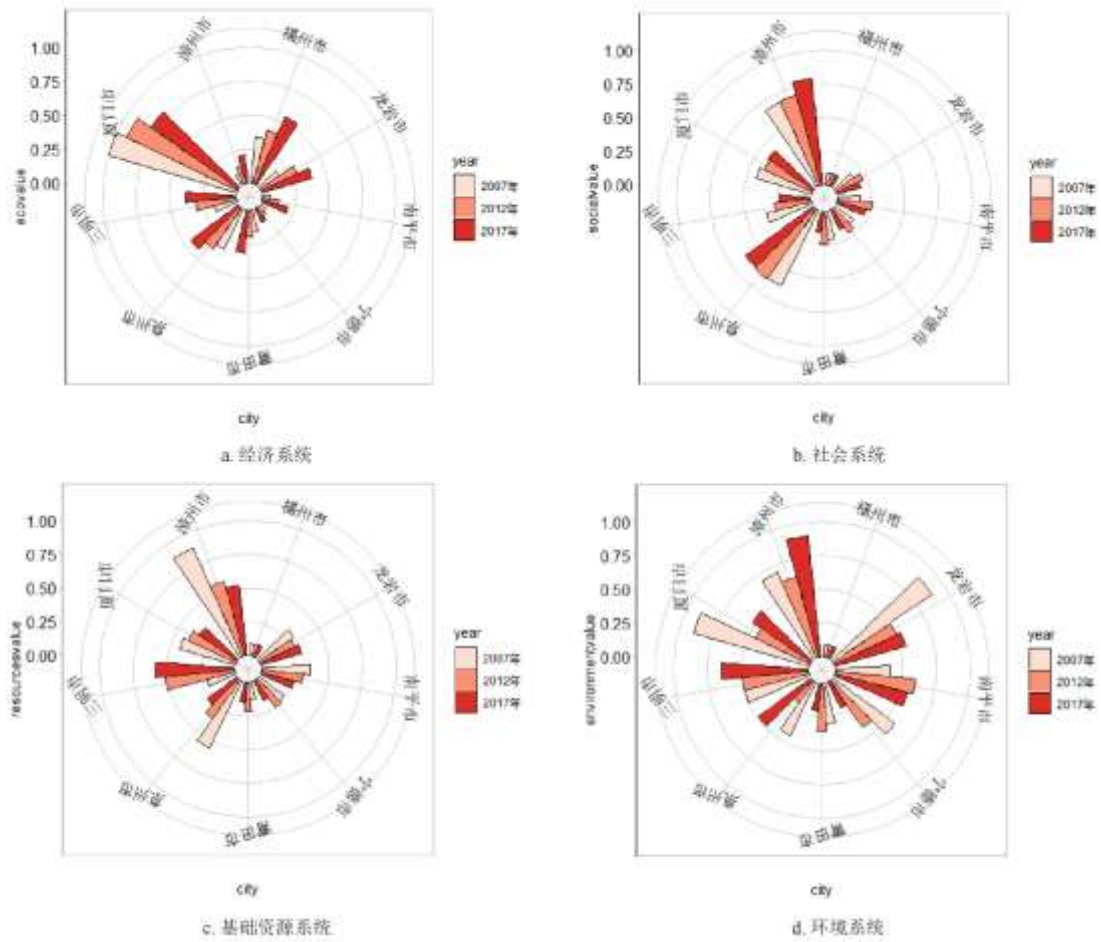


图 2 资源环境子系统承载力径向图

#### 4.3 复合系统资源环境承载力空间分异特征

为分析福建省各地市资源环境承载力空间分异特征,采用自然断点法、空间全局相关和空间局部相关等方法,对资源环境承载力进行空间自相关和局部空间自相关分析。

##### 4.3.1 全局空间自相关分析

根据资源环境承载力计算结果,利用 Arcgis10.2 计算 2007 年、2012 年、2017 年福建省资源承载力的全局自相关系数,见表 5。由表 5 可知,2007、2012 年、2017 年福建省复合系统承载力全局 Moran' sI 指数值呈上升的态势,但 Z 值均未通过 5%显著性水平检验,表明区域复合系统承载力在空间分布上不存在显著的正自相关关系,即承载力市域单元相似属性值在特定空间区域上未表现集聚分布的规律。

表 5 资源环境承载力全局自相关系数

年份	Moran' sI	Z 值	P 值
2007	0.0475	0.0778	0.9380

2012	0.0634	0.6088	0.6827
2017	0.1468	1.1370	0.2554

#### 4.3.2 局域空间自相关分析

基于自然断裂法生成空间格局热点演化图,探讨2007年、2012年、2017年资源环境承载力局部演化特征,见图3。根据空间格局热点演化趋势,资源环境承载力局部空间分异明显,形成弱载区、中等区、良好区和优质区四类区域。由图3可知,2007年、2012年、2017年,厦门市一直处于热点区域(承载力优质地区),福州市处于次热点区域(承载力良好地区),龙岩市处于次冷点区域(承载力中等地区),宁德市、南平市处于冷点区域(承载力弱载地区)。泉州市、漳州市、三明市、莆田市空间格局热点演化处于波动状态,泉州市2007年、2017年处于次热点区域,2012年处于次冷点区;漳州市、三明市2007年和2017年处于次冷点区域,2012年处于冷点区域;而莆田市则由2007年的次冷点区域演变为2017年的次热点区域,承载力处于上升态势。进一步对2007年、2012年、2017年的市域环境承载力计算局部Moran's I指数,分析市域环境承载力局域空间自相关关系,分析表明,在0.05的显著性水平下,2007年、2012年、2017年,泉州市与周边厦门市、福州市复合系统承载力存在高高关联,即形成高值集聚区。

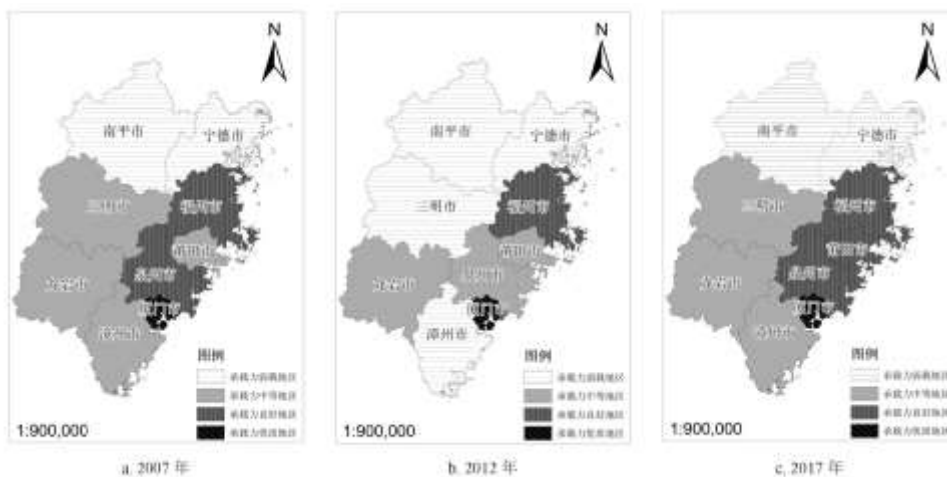


图3 资源环境承载力空间格局热点演化图

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

文章运用熵权—理想解法,构建资源环境承载力综合指标体系,对区域复合系统承载力进行分析,并基于空间分析方法,探讨资源环境承载力的时空格局演变特征,得到以下结论:

(1)从时间序列角度分析,2007年,厦门市环境承载力最高,为良好承载状态,福州市、泉州市为中等承载状态,其余地市均为弱载状态。2012年,厦门市为良好承载状态,福州市、泉州市为中等承载状态,而龙岩市、莆田市环境承载力由弱载转为中等承载状态。2017年,厦门市环境承载力仍处于良好承载状态,福州市、泉州市、莆田市环境承载力处于中等承载状态。从区域角度分析,研究期内,厦门市环境承载力有所下降,但仍处于良好承载状态;福州市、泉州市环境承载力处于波动状态,但处于中等承载状态;莆田市、漳州市环境承载力处于上升状态,但漳州市处于弱载状态,莆田市达中等承载状态。经济发展水平与资源环境承载力

具有较强关联,总体而言,呈现出闽东南部资源环境承载力>闽西北部资源环境承载力的发展态势。

(2)资源环境子系统承载力分析表明,厦门市经济系统承载力均处于良好到优质承载力水平;福州市经济系统承载水平呈现上升趋势,泉州市经济系统承载力处于中等承载水平。2007年,漳州市与泉州市社会系统承载力处于良好承载水平,漳州市资源系统承载力,环境系统承载力处于优质承载水平,但2012年、2017年处于中等承载水平;2007年,厦门市、龙岩市环境系统承载力处于优质水平,但之后为中等承载水平。从空间和时间角度看,不同区域子系统对区域资源环境承载力贡献力度存在差异,因此应补齐短板,发挥经济系统、社会系统、基础资源系统、环境系统的协调作用,促进区域资源环境承载力在合理范围内。

(3)空间分析表明,2007年、2012年、2017年区域复合系统承载力在空间分布上不存在显著的正自相关关系。根据空间格局热点演化趋势,资源环境承载力局部空间分异明显,形成弱载区、中等区、良好区和优质区四类区域。局域空间自相关分析表明,泉州市复合系统资源环境承载力与周边地区存在集聚效应。近年来,泉州市在“一带一路”的建设背景下,积极融入高质量发展要求,因此可以发挥泉州市、厦门市、福州市的资源环境承载力优势,辐射带动莆田市、三明市和龙岩市的发展。

## 5.2 讨论

在高质量发展的背景下,坚持新发展理念,坚持以高质量发展落实赶超,坚持以供给侧结构性改革为主线,这一切需适宜的资源环境承载力作为重要前提。文章基于熵权-理想解法以及空间相关分析方法,构建指标体系,从时间和空间角度对福建省各地市资源环境承载力水平进行测度,研究结果可为区域未来发展规划提供科学依据。由于受到数据可获取性的影响,在指标选取和评价体系的构建方面未能完全充分展开,因此对区域复合系统资源环境承载力的研究仍然存在一定的局限性。下一步将基于系统动力学方法,探讨在不同情境下区域资源环境承载力的动态仿真变化,以期更准确地提出预警决策措施。

## 参考文献:

- [1]郑菲,李洪庆.基于熵权-突变级数法的安徽省资源环境承载力时空演变分析及障碍因子诊断[J].江西农业学报,2019(4):131-137.
- [2]文倩,李小弯,鄢雨旱,等.河南省农业水土资源承载力的时空分异[J].中国水土保持科学,2019(3):104-112.
- [3]黄山.福建省土地资源承载力监测预警研究[J].安徽农业科学,2019(12):83-86,90.
- [4]严淑青,朱庆林,余静,等.环渤海湾海洋资源环境承载力定量研究[J].海洋湖沼通报,2018(6):46-53.
- [5]贾立斌,吴伟宏,袁国华.基于Mann-Kendall的中国近岸海域海洋生态环境承载力评价与预警[J].生态经济,2019(2):208-213,224.
- [6]李娜,范海梅,许鹏,等.BP神经网络模型在象山港水环境承载力研究中的应用[J].上海海洋大学学报,2019(1):125-133.
- [7]卢亚丽,徐帅帅,沈镭.河南省资源环境承载力的时空差异研究[J].干旱区资源与环境,2019(2):16-21.
- [8]孙端,陈颖彪,曹峥,等.基于突变级数法的广东省资源环境承载力动态[J].生态学杂志,2019(6):1881-1889.
- [9]张琛,汪宙峰,汪裕峻,等.基于TOPSIS和热点分析的都汶公路沿线地质生态环境承载力评价[J].冰川冻土,2019(2):704-715.

- 
- [10]王维,张涛,王晓伟,等.长江经济带城市生态承载力时空格局研究[J].长江流域资源与环境,2017(12):1963-1971.
- [11]王亮,刘慧.基于PS-DR-DP理论模型的区域资源环境承载力综合评价[J].地理学报,2019(2):340-352.
- [12]毛汉英,余丹林.环渤海地区区域承载力研究[J].地理学报,2001(3):363-371.
- [13]尚勇敏,王振.长江经济带城市资源环境承载力评价及影响因素[J].上海经济研究,2019(7):14-25,44.
- [14]李洁.长江经济带土地综合承载力时空分异评价与障碍因子诊断[J].华东经济管理,2019(8):67-75.