

# 湖北水资源生态承压能力的时空分异特征

杨倩<sup>1,2</sup>, 孙铖<sup>1,2</sup>, 李山勇<sup>1,2</sup>, 嵇莹<sup>1,2</sup>, 林爱文<sup>1,2</sup>

(1. 武汉大学 资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 武汉大学 教育部 地理信息系统重点实验室, 武汉 430079)

**摘要:**根据水资源生态足迹基本原理和计算模型,引入水资源生态承压能力指数,对湖北省 2004—2012 年的水资源生态足迹和生态承载力、水资源生态承压能力的时空分异特征、水资源生态承压能力和社会经济发展的空间关联性进行探讨。研究表明:(1) 湖北省历年水资源生态承载力大于生态足迹,存在一定的盈余,但水资源生态承载力与生态足迹空间格局不匹配;(2) 湖北省水资源总生态足迹和人均生态足迹总体呈上升趋势,万元 GDP 水资源生态足迹和水资源生态承压能力总体呈下降趋势。干旱、洪涝等自然灾害对湖北省水资源生态承载力影响较大;(3) 湖北省社会经济发展状况与水资源生态承压能力存在负的空间关联,双变量局部空间自相关的 LISA 集聚类型出现 HH, HL, LH 和 LL 共 4 种类型,其中 HH 型仅占全省市州总数的 1/17,社会经济发展和水资源生态承压能力空间分布不协调。加强区域水利基础设施的修建与完善,优化区域的产业布局,提高水资源利用和经济发展协调度,是实现湖北省水资源可持续发展的重要途径。

**关键词:**生态足迹; 生态承载力; 生态承压能力; 可持续发展; 湖北省

中图分类号:TV213

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)01-0289-07

## Analysis on the Spatiotemporal Difference of Water Resources Ecological Carrying Capacity in Hubei Province

YANG Qian<sup>1,2</sup>, SUN Cheng<sup>1,2</sup>, LI Shanyong<sup>1,2</sup>, JI Ying<sup>1,2</sup>, LIN Aiwen<sup>1,2</sup>

(1. School of Resource and Environment Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** The spatial-temporal characteristics of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity have been analyzed for better understanding of the water resources utilization in Hubei Province during the period from 2004 to 2012. The water resources ecological carrying capacity index is introduced to investigate its relationship with the socio-economic development based on the principles and calculation model for the water resources ecological footprint. The results indicate that: (1) the water ecological carrying capacity is larger than the ecological footprint in Hubei Province, and there is the mismatch between the spatial distribution of water resources ecological footprint and the carrying capacity; (2) there are increasing trends for the overall per capita water resources ecological footprint, but they decrease the GDP per 10 thousands Yuan, droughts, floods and other natural disasters have great impacts on the water resources ecological carrying capacity in this region; (3) there is the negative spatial correlation between the socio-economic development and water resources ecological carrying-capacity in Hubei Province revealed by the global spatial autocorrelation analysis. Double variable LISA cluster of local spatial autocorrelation can be divided into four types: HH, HL, LH and LL. The HH type accounted for one-seventeenth of the provincial total number of counties, which means that the social economic development is not coordinated with the water ecological carrying capacity. Therefore, the water infrastructure and industrial layout should be strengthened and optimized, respectively, to achieve the coordinated development of water resources utilization and economic growth, which is an important way for the sustainable development of water resources in Hubei Province.

**Keywords:** ecological footprint; ecological carrying capacity; ecological carrying-capacity; sustainable development; Hubei Province

20 世纪 90 年代,为揭示人类活动对自然资源的占用与生态系统承载力之间的关系,Ree 和 Wackernagel<sup>[1-3]</sup>提出了生态足迹模型,该模型基于生物生产性土地面积(biologically productive area)这一概念而定义,将与人类活动密切相关的自然资源和能源消费折算成相应的土地面积,为各类自然资源提供了统一的度量基础,同时也为我们提供了一个有效的工具来量化不同区域可持续发展程度<sup>[4-6]</sup>。然而,模型中生物生产仅是水资源的一种功能,不能代表水资源对人类的全部服务<sup>[7]</sup>。为了弥补生态足迹模型对水资源生态系统服务描述的局限,同时保障人类对水资源真实占用的核算结果能与传统生态足迹模型整合,以便更加全面考虑人类活动对自然生态资本的占用,黄林楠等<sup>[8]</sup>在 6 类生物生产性土地账户以外建立第 7 类土地类型——水资源用地,用于计算水资源生态足迹,描述水资源除了生物生产以外的生态环境服务和社会经济功能。部分学者在此基础上完成了国家范围<sup>[9]</sup>、江苏<sup>[8,10]</sup>、四川<sup>[11]</sup>、河南<sup>[12]</sup>、云南<sup>[13]</sup>等省份和关中地区<sup>[14]</sup>、邢台市<sup>[15]</sup>等区域不同尺度的水资源生态足迹分析研究,但研究多限于生态足迹和生态承载力分析、生态盈亏关系表达或生态承载力预测,没有体现水资源生态承压能力的时空分异特征,且缺少对水资源生态承压能力与社会经济发展的状况空间关联性的评价与分析。

2004 年 3 月,中央首次明确提出了中部崛起计划,作为 6 省通衢的工业基地和文化中心,湖北省是国家实施中部崛起战略的重要省份,也是全国交通枢纽,水资源的利用状况对其发挥承“东”启“西”和产业发展优势有着重要作用。因此,本文基于水资源生态足迹和生态承载力供需平衡关系,引入水资源生态承压能力指数,应用水资源生态足迹模型和 GIS 方法,计算湖北省 2004—2012 年的水资源生态承压能力,并对其空间分布和时间演变特征与社会经济发展的空间关联性进行分析讨论,以期对正确认识湖北省水资源利用现状,实现区域水资源可持续利用提供科学的参考依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

湖北省位于我国中部,长江中游,幅员面积 18.59 万 km<sup>2</sup>,东邻安徽,南接江西、湖南,西连重庆,西北与陕西接壤,北与河南毗邻,地跨 108°21′—116°07′E, 29°01′—33°6′N。长江自西向东,横贯全省 1 061 km,省内水网纵横,湖泊密布,因此又称“千湖之省”。

省内地势高低相差悬殊,东、西、北三面环山,中部为“鱼米之乡”的江汉平原。地貌类型多样,山地、

丘陵、岗地和平原兼备。受地形和降雨集中影响,神农架南部等地为全省多雨中心,江汉平原易发生洪涝灾害。2012 年,全省人均水资源为 1 408 m<sup>3</sup>,其中武汉、襄阳、孝感、荆门、仙桃、天门、潜江、随州等区域人均水资源远低于 1 000 m<sup>3</sup>,武汉、孝感、随州人均水资源量仅为 437,411,389 m<sup>3</sup>。水资源分布不均衡,与人口、土地和经济布局不相匹配,使得“千湖之省”常年“优于水而忧于水”。

### 1.2 数据来源与处理

本文水资源数据主要来源于 2004—2012 年的《湖北省水资源公报》;人口、GDP、城镇化率等经济指标主要来源于 2005—2013 年的《湖北省统计年鉴》和各州市《年度统计公报》。文中数据统计和分析采用软件 Excel 2013、SPSS 19 和 Geo DA 进行,地图处理采用 ArcGIS 10.0 软件。

## 2 研究方法

### 2.1 水资源生态足迹模型

水资源生态足迹主要用来计算在一定的人口和经济规模条件下维持水资源消费和消纳水污染所必需的生物生产面积<sup>[16]</sup>。它通过测度人类对水资源生态服务的需求与区域所能提供的水资源生态服务之间的差距来比较人类对水资源的消费量和水资源的承载量。根据水资源生态足迹的内涵和当前水资源用途的划分,进一步细分为生活用水、生产用水和生态环境用水 3 类进行计算。公式如下:

$$EF_w = N \times ef_w = N \times A_w \times (W/P_w) \quad (1)$$

式中:EF<sub>w</sub>——水资源总生态足迹(hm<sup>2</sup>);N——人口数;ef<sub>w</sub>——人均水资源生态足迹(hm<sup>2</sup>/cap);A<sub>w</sub>——水资源的全球均衡因子;W——人均消耗的水资源量(m<sup>3</sup>);P<sub>w</sub>——水资源全球平均生产能力(m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)。

传统生态足迹模型中,为了将不同土地类型的生态生产力转化为具有可比性的生物生产性面积,引入均衡因子对各类型土地进行标准化处理。文中均衡因子参照黄林楠等<sup>[8]</sup>的研究,采用基于 WWF2000 年核算的均衡因子计算得出的水资源的全球均衡因子 5.19;世界水资源平均生产能力用水文学中的全球多年平均产水模数刻画,为 3 140 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

### 2.2 水资源生态承载力模型

水资源生态承载力是指在维持水生态系统自身及其支持系统健康的前提下,基于一定的生态保护和承载目标,自然水生态系统所能支撑的人类活动的阈值<sup>[17]</sup>。公式如下:

$$EC_w = N \times ec_w = 0.4 \times B_w \times A_w \times (Q/P_w) \quad (2)$$

式中:EC<sub>w</sub>——水资源生态承载力(hm<sup>2</sup>);ec<sub>w</sub>——人

均水资源生态承载力( $\text{hm}^2/\text{cap}$ ); $B_w$ ——水资源产量因子; $Q$ ——水资源总量( $\text{m}^3$ )。

参照前人的研究成果,一个国家或地区的水资源开发利用如若超过30%~40%,则可能引起生态环境的恶化<sup>[18]</sup>,因此公式(2)中取0.4为水资源合理开发利用。水资源的产量因子采用该区域水资源平均生产能力与世界水资源平均生产能力的比值。如湖北省2004—2012年的水资源平均生产能力为4 956.08  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ,其水资源产量因子1.58。省内各市州水资源产量因子根据此方法计算得出。

### 2.3 水资源生态盈余和水资源生态赤字

水资源生态赤字和水资源生态盈余是通过区域内水资源生态足迹和水资源生态承载力相比较而得,此指标可用来判断研究区域内水资源的可持续利用情况。

$$\text{ED}_w(\text{ES}_w) = \text{EF}_w - \text{EC}_w = N \times (\text{ef}_w - \text{ec}_w) \quad (3)$$

式中: $\text{ED}_w$ ——水资源生态赤字; $\text{ES}_w$ ——水资源生态盈余。当 $\text{EF}_w > \text{EC}_w$ 时,为水资源生态赤字,反之,为生态盈余。

### 2.4 水资源生态承压能力

在对湖北省水资源生态供需状况进行分析的基础上,本文引入水资源生态承压能力指数进行区域水资源生态承压能力评价。公式如下:

$$\text{ECP} = \text{EC}_w / \text{EF}_w \quad (4)$$

式中: $\text{ECP}$ ——水资源生态承压能力指数,指区域水资源总生态承载力与总生态足迹的比值,反映了水资源生态需求和供给关系。当 $\text{ECP} > 1$ 时, $\text{ECP}$ 越大,表明区域水资源供给能力能满足社会经济发展的需求,水资源生态承压能力相对越大;当 $\text{ECP} < 1$ 时, $\text{ECP}$ 越小,表明区域水资源供给能力不能满足社会经济发展的需求,水资源生态承压能力相对越小。

### 2.5 万元GDP水资源生态足迹

万元GDP水资源生态足迹( $\text{EF}_{\text{GDP}}$ )是用来衡量水资源的利用效率的指标,指区域水资源生态足迹与地区生产总值(GDP)的比值<sup>[9]</sup>,公式如下:

$$\text{EF}_{\text{GDP}} = \text{EF}_w / \text{GDP} \quad (5)$$

### 2.6 空间自相关

为了研究多变量之间的空间自相关耦合模式,Anselin在Moran's I系数的基础上提出了双变量空间自相关,公式如下<sup>[19-20]</sup>:

$$I_{kl}^i = Z_k^i \sum_{j=1}^n W_{ij} Z_l^j \quad (6)$$

$$Z_k^i = (X_k^i - \bar{X}_k) / \sigma_k \quad (7)$$

$$Z_l^j = (X_l^j - \bar{X}_l) / \sigma_l \quad (8)$$

式中: $I_{kl}^i$ ——双变量空间自相关分析所产生的

Moran's I值; $Z_k^i, Z_l^j$ ——空间单元*i*和*j*对于均值和方差的标准化的变量; $X_k^i$ ——空间单元*i*属性*k*的值; $X_l^j$ ——空间单元*j*属性*l*的值; $\bar{X}_k, \bar{X}_l$ ——属性*k, l*的平均值; $\sigma_k, \sigma_l$ ——属性*k, l*的方差; $W_{ij}$ ——空间单元*i*和*j*的权重矩阵,该矩阵一般通过rook邻接、queen邻接或者空间距离的方式来确定。

## 3 结果与分析

### 3.1 湖北省水资源生态足迹与生态承载力变化趋势

研究期内,湖北省水资源总生态足迹和人均生态足迹总体均呈上升趋势(图1—2),2004年的水资源总生态足迹为 $4.11 \times 10^7 \text{hm}^2$ ,到2012年增至 $4.95 \times 10^7 \text{hm}^2$ ,增幅为23.33%,水资源人均生态足迹从2004年的0.67  $\text{hm}^2$ 增长为2012年0.86  $\text{hm}^2$ ,增幅为28.36%。尽管湖北省万元GDP水资源生态足迹逐年降低(图3),证明水资源利用率有逐年提高的趋势,但随着经济的发展,湖北省水资源消费依然旺盛,对水资源的需求量仍在逐渐增大。

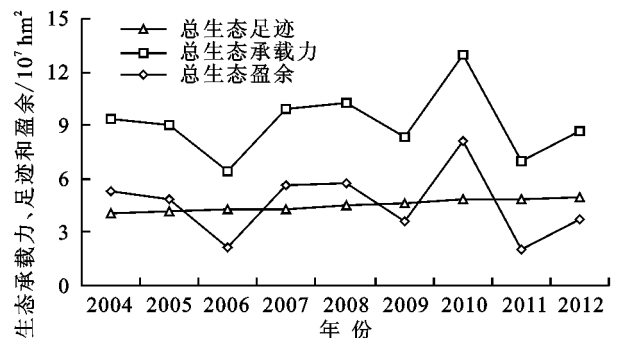


图1 湖北省历年水资源生态足迹、生态承载力和生态盈余

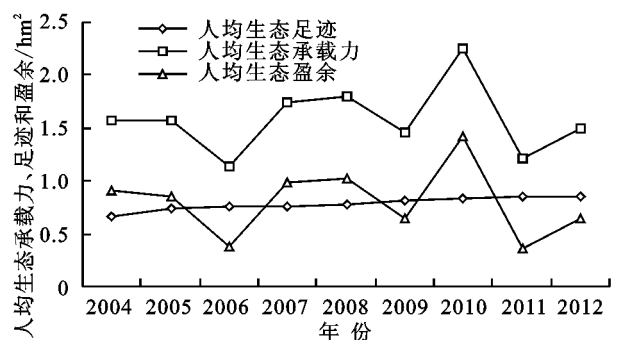


图2 湖北省历年水资源人均生态足迹、人均生态承载力和人均生态盈余

湖北省水资源总生态承载力年际间差异较大(图1),2010年达到最高值,为 $1.29 \times 10^8 \text{hm}^2$ 。与其他年份相比,2006年和2011年水资源总生态承载力最低,分别为 $6.41 \times 10^7$ 、 $6.96 \times 10^7 \text{hm}^2$ ,最高年份水资源总生态承载力为最低年份的2倍。异常波动的原因主要源于2006年下半年长江流域出现了特枯水情,长江流域全线水位下降,给流域经过的省份水资源供给产生了重要的影响。2010年夏湖北省16县市遭遇罕见暴

雨洪涝灾害,2011 年湖北全省经历了 60 年一遇的大旱。这表明,极端天气对水资源生态承载力影响明显。为进一步探索极端天气对水资源生态承载能力的影响,选择代表旱涝灾害的降雨量与各年份间的水资源生态承载力进行相关性分析发现,二者呈极显著的正比关系,相关系数为 0.986,表明干旱、洪涝等自然灾害对湖北省水资源生态承载力影响较大。

湖北省水资源人均生态承载力年际间变化趋势与总生态承载力变化趋势相同,2010 年为最高,2006 年,2011 年最低,水资源人均生态承载力为 1.13~2.26  $\text{hm}^2$ 。过去 9 年,全省整体呈不同程度的生态盈余(图 2),人均生态盈余为 0.36~1.42  $\text{hm}^2$ 。

为深入了解湖北省水资源生态足迹和生态承载力的空间规律,对湖北省内 17 个市(州、林区)的人均水资源生态足迹和人均生态承载力进行分析(图 4—5)。

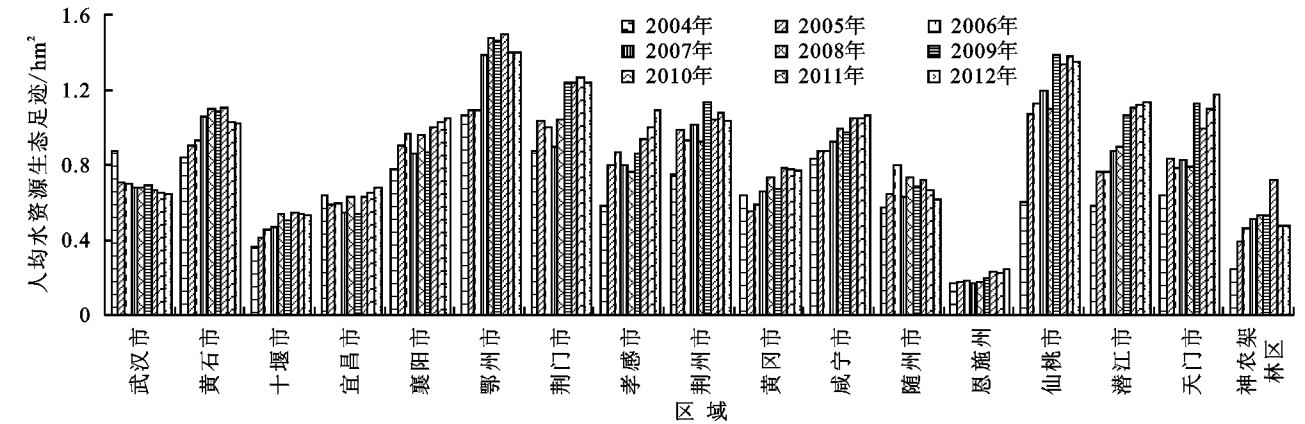


图 4 2004—2012 年湖北省各地区人均水资源生态足迹空间差异

人均水资源生态承载力较高的地区为湖北省西部的神农架林区、恩施州、十堰市、宜昌市和东部的黄冈市、黄石市和咸宁市等地区,中部地区人均水资源生态承载力较低(图 5),总体呈西部>东部>中部的趋势。水资源生态足迹和生态承载力空间格局的不匹配,使得武汉城市圈中武汉、孝感、鄂州、仙桃、潜江、天门等区域均为生态赤字区。

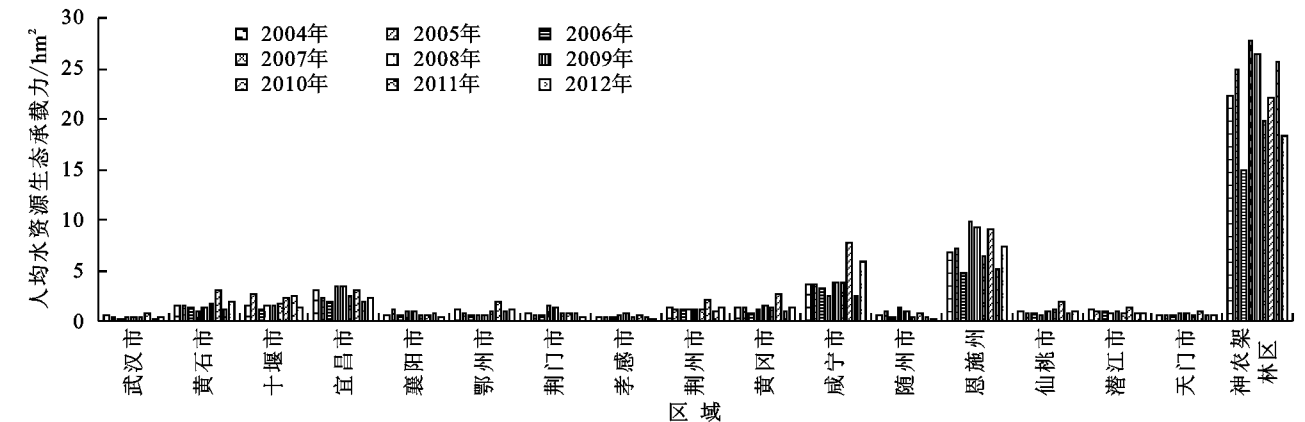


图 5 2004—2012 年湖北省各地区人均水资源生态承载力空间差异

由图 4 可知,湖北省人均水资源生态足迹较高区域主要处于武汉城市圈区域,这里是湖北省产业和生产要素最密集地区,有全省最强的区域经济体,人均水资源生态足迹为 0.68~1.31  $\text{hm}^2$ 。人均水资源生态足迹最低的区域为恩施州,人均水资源生态足迹仅为 0.20  $\text{hm}^2$ 。

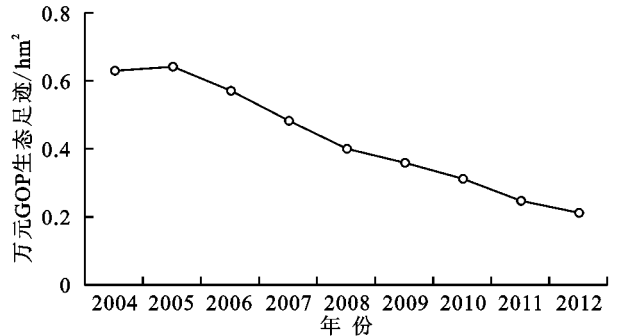


图 3 湖北省历年万元 GDP 生态足迹

### 3.2 湖北省水资源生态承压能力的时序变化特征

受自然条件、人口增长、社会经济发展水平等各种不同因素的影响,研究期内湖北省水资源生态承压能力年际间波动较大,但总体呈下降趋势。2004 年的水资源生态承压能力为 9.28,2012 年时为 5.19,下降了 44.07%。省内各州市不同时期的水资源生态承压能力及其变化差异显著(表 1)。

表 1 湖北省各州市历年水资源生态承压能力

| 区域  | 2004 年 | 2005 年 | 2006 年 | 2007 年 | 2008 年 | 2009 年 | 2010 年 | 2011 年 | 2012 年 |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 武汉市 | 0.59   | 0.49   | 0.32   | 0.44   | 0.51   | 0.48   | 1.01   | 0.38   | 0.58   |
| 黄石市 | 1.74   | 1.59   | 1.35   | 0.94   | 1.29   | 1.53   | 2.78   | 1.05   | 1.90   |
| 鄂州市 | 1.06   | 0.72   | 0.51   | 0.42   | 0.38   | 0.60   | 1.32   | 0.61   | 0.78   |
| 孝感市 | 0.73   | 0.57   | 0.35   | 0.82   | 0.89   | 0.43   | 0.67   | 0.30   | 0.25   |
| 黄冈市 | 2.13   | 2.25   | 1.30   | 1.74   | 1.96   | 1.91   | 3.34   | 1.24   | 1.77   |
| 咸宁市 | 4.35   | 4.21   | 3.76   | 2.74   | 3.74   | 3.83   | 7.43   | 2.32   | 5.57   |
| 仙桃市 | 1.49   | 0.76   | 0.62   | 0.53   | 0.82   | 0.76   | 1.35   | 0.58   | 0.65   |
| 潜江市 | 1.90   | 1.18   | 1.12   | 0.92   | 1.16   | 0.78   | 1.19   | 0.69   | 0.67   |
| 天门市 | 0.83   | 0.63   | 0.66   | 0.83   | 1.04   | 0.55   | 0.89   | 0.45   | 0.40   |
| 荆州市 | 1.78   | 1.09   | 1.19   | 1.15   | 1.30   | 1.06   | 2.00   | 0.87   | 1.22   |
| 荆门市 | 0.96   | 0.53   | 0.63   | 1.66   | 1.21   | 0.62   | 0.68   | 0.65   | 0.33   |
| 宜昌市 | 4.78   | 3.83   | 3.31   | 6.36   | 5.49   | 4.64   | 4.96   | 3.00   | 3.21   |
| 随州市 | 0.89   | 1.54   | 0.50   | 2.07   | 1.18   | 0.52   | 1.11   | 0.65   | 0.33   |
| 襄阳市 | 0.79   | 1.16   | 0.57   | 1.11   | 0.96   | 0.67   | 0.61   | 0.75   | 0.41   |
| 十堰市 | 3.95   | 6.48   | 2.45   | 3.21   | 2.70   | 3.38   | 3.99   | 4.60   | 2.45   |
| 恩施州 | 40.11  | 39.36  | 26.30  | 57.78  | 52.79  | 32.31  | 38.54  | 22.69  | 29.06  |
| 神农架 | 89.69  | 63.89  | 32.58  | 54.11  | 50.03  | 37.32  | 30.90  | 53.85  | 38.64  |
| 湖北省 | 9.28   | 7.66   | 4.56   | 8.05   | 7.50   | 5.38   | 6.05   | 5.57   | 5.19   |

2004 年水资源生态承压能力最低的是武汉市,ECP 为 0.59;最大的为神农架,ECP 为 89.69,两者相差了 152 倍。2008 年水资源生态承压能力最低的同样是武汉市,ECP 为 0.51,最大的为恩施州,ECP 为 52.79,最大最小值间相差了 103 倍。2012 年水资源生态承压能力最低和最高的分别为孝感市和神农架,ECP 为 0.25,38.64,两者相差了 155 倍。由此可知,湖北省内水资源生态承压能力越来越低,其内部高低差距波动依然很大。

2004—2012 年间,武汉市的水资源生态承压能力的多年均值最低,为 0.53;其次为孝感,为 0.55;神农架的水资源生态承压能力的多年均值最高,为 50.11;其次为恩施州,为 37.66;其余地区的水资源生态承压能力的多年均值为 0.70~4.40。其中,武汉、鄂州、孝感、仙桃、天门、荆门、随州、襄阳的水资源生态承压能力的多年均值均小于 1。

3.3 湖北省水资源生态承压能力的空间分异特征

根据湖北省 17 个行政区 2004—2012 年多年水资源生态承压能力均值,利用 ArcGIS 自然分界法将水资源生态承压能力(ECP)从低到高分为不可持续、弱可持续、可持续、高度可持续和极度可持续 5 类(图 6)。需要说明的是,本研究所指的“可持续、弱可持续、可持续、高度可持续和极度可持续”是湖北省内部各市州在过去 9 a 中的水资源生态承压能力的相对称谓,这样有利于各市州间的水资源生态承压能力水平的对比。

研究期内湖北省各市州的水资源生态承压能力差异显著(图 6),恩施州和神农架林区的生态承压水平整体上属于极度可持续区域;十堰市、宜昌市和咸宁市整体上属于高度可持续区域;黄冈市、黄石市整体上属于可持续的区域;荆州市、潜江市、随州市整体处于弱可持续的临界状态;襄阳市、荆门市、天门市、仙桃市、孝感市、武汉市和鄂州市整体处于不可持续状态。水资源生态承压能力整体呈“中间低、四周高、北有缺口”的外包型,且西部高于东部的趋势。这说明水资源生态承压能力的空间分异不仅与区域的地貌特征有密切关系,且受区域内的产业结构和用水效率影响明显。湖北省中部主要以平原和平原丘岗地貌为主,区内耕作条件好,交通便利,经济发展较快,对水资源的需求相对高于四周,从而增加了水资源的生态承载压力。

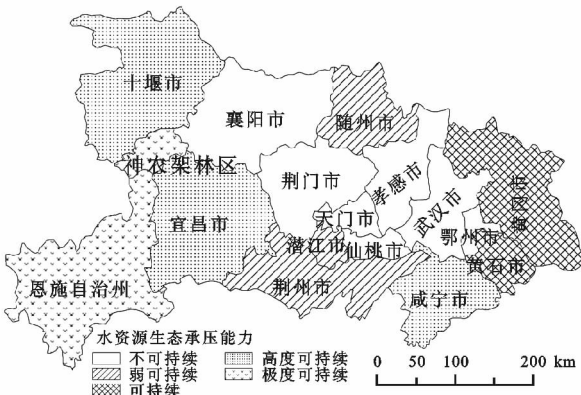


图 6 2004—2012 年湖北省各地区水资源生态承压能力空间差异

### 3.4 水资源生态承压能力与社会经济发展的空间关联特征

基于水资源生态承压能力与社会经济发展协调度的角度,本文选取了 2004—2012 年湖北省各州市的人均 GDP( $X_1$ , 元)、全社会固定资产投资( $X_2$ , 亿元)、市州财政收入( $X_3$ , 亿元)、市州农民年均纯收入( $X_4$ , 元)、万元 GDP 用水量( $X_5$ ,  $\text{m}^3$ )、市州社会消费品零售量( $X_6$ , 亿元)、人口自然增长率( $X_7$ , ‰)、城镇化率( $X_8$ , ‰)8 个指标来综合衡量各州市的社会经济发展状况,利用 SPSS 软件的主成分分析法计算出研究区各州市的社会经济发展综合评价分值。

以社会经济发展综合评分值为第一变量,水资源生态承压能力为第二变量,用 Geo DA 软件进行双变量全局空间自相关和局部空间自相关分析。

通过双变量全局自相关分析得出,在 5% 的显著水平下,2004—2012 年湖北省社会经济发展状况与水资源生态承压能力的 Moran's I 值均为负值(图 7),表明湖北省社会经济发展状况与水资源生态承压能

力存在负的空间关联性,而非随机分布。同时也说明,社会经济的超前和滞后发展对水资源的生态承压能力有明显影响。为进一步探索社会经济发展状况与水资源生态承压能力的空间耦合特征,选取 2004 年、2008 年、2012 年的双变量局部空间自相关结果,在  $z$  检验的基础上( $p=0.05$ )绘制 LISA 集聚图(图 8)。

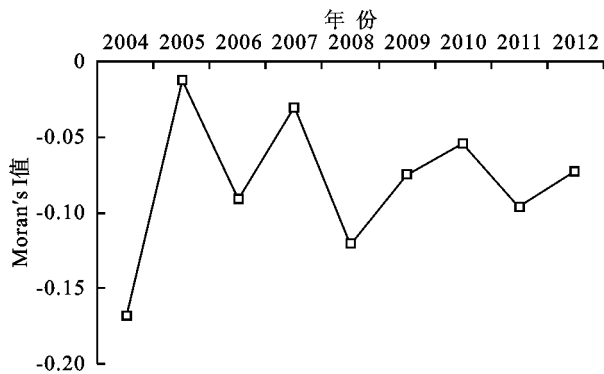


图 7 湖北省社会经济发展状况与水资源生态承压能力全局 Moran's I 值分布

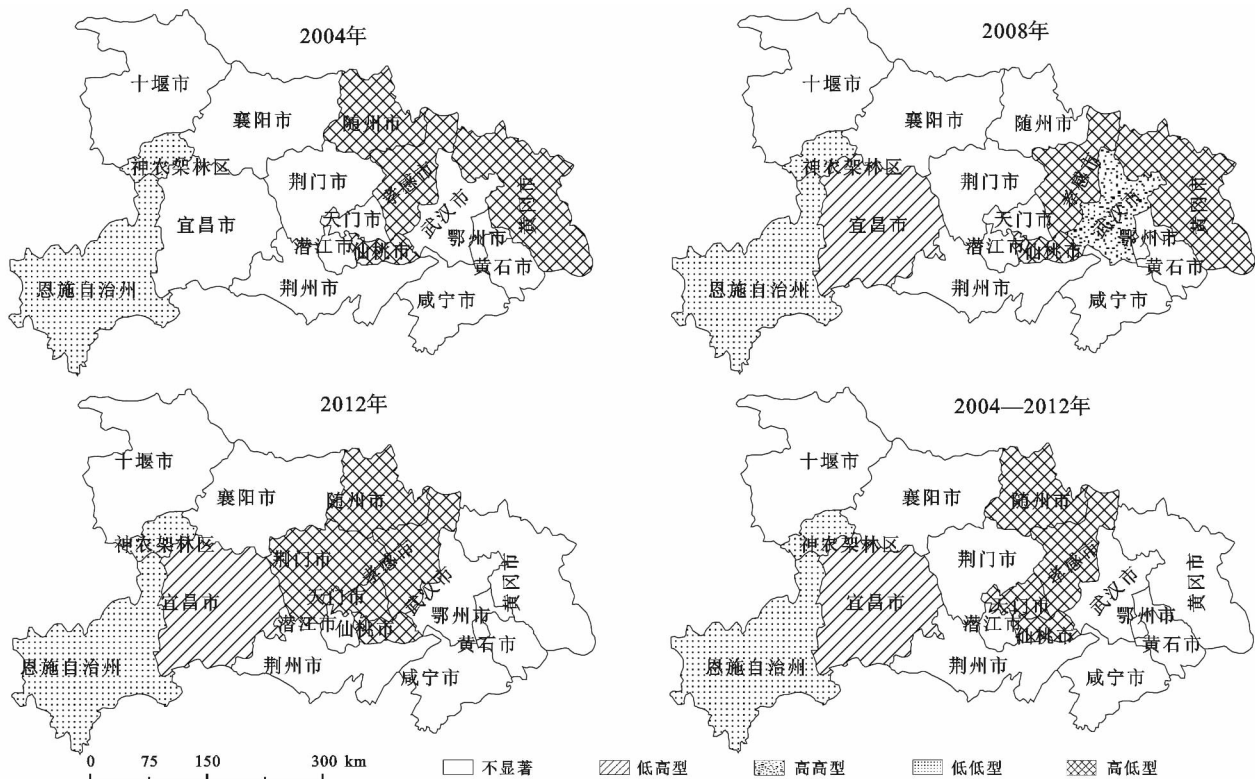


图 8 2004—2012 年社会经济状况与水资源承压能力的双变量 LISA 集聚

由图 8 可知,2004 年、2008 年和 2012 年 3 个典型年份中湖北省社会经济发展状况与水资源生态承压能力存在有 Low-High(LH), High-High(HH), Low-Low(LL)和 High-Low(HL)4 种集聚格局。其中,LH 表示社会经济发展综合评分低、水资源生态承压能力高的区域,3 个年份里,恩施自治州和神农架林区一直属于 LH 集聚;HH 表示区域经济发展综

合评分和水资源生态承压能力都高的区域,3 个年份中,宜昌市在 2008 年和 2012 年都属于此区域,表明该区域的水资源生态承压能力与社会经济的发展最为协调;LL 表示社会经济发展综合评分和水资源生态承压能力都低的区域。此区域包括了随州、孝感、黄冈、天门、仙桃等地,主要出现在武汉市周边,随着时间的推移,有从武汉市东边转向西边发展的趋势;

HL 区域表示社会经济发展综合评分高、水资源生态承压能力低的区域。研究期内表现出此特征的为武汉市,其多年平均水资源生态承压能力最低,而多年平均的社会经济发展水平综合评分最高。LH 和 LL 集聚区域相比较可发现,LH 集聚区主要为山区,LL 集聚区主要为属于农业生产耗水区的江汉平原。同时还可以看出,2004—2012 年,湖北省社会经济发展状况与水资源生态承压能力的空间格局相对稳定,但是局部空间的聚类特征显现出稍微变化的迹象,说明近些年来随着区域经济的发展,城市化进程不断推进,引起了高、低值区发生相应转变。

综上可以说明,湖北省社会经济发展与水资源生态承压能力空间匹配不均衡,社会经济的发展对水资源的生态承压能力有明显影响。两者相对协调的地区较少。经济快速发展的地区面临着水资源紧张、用水不可可持续发展状况,而经济发展相对滞后的区域也造成了水资源浪费、用水效率不高的局面。因此,未来各州市的经济发展应该和科学管理、利用水资源有效地结合在一起,才能实现水资源的高效利用和经济的可持续发展。

## 4 结论

(1) 研究期内,湖北省水资源总生态足迹和人均生态足迹均呈上升趋势,尽管水资源利用率逐年提高,但水资源生态承压能力总体仍呈现不断下降趋势。省内各州市水资源生态承压能力越来越低,其内部高低差距波动依然很大。证明随着社会经济的发展,湖北省水资源消费旺盛,对水资源的需求量仍在逐渐增大。

(2) 总体而言,湖北省水资源丰富,能满足当前社会生产、生活需要,生态盈余较大。但是水资源空间分布不均,与人口、经济的分布极不匹配。人口、产业密集武汉城市圈水资源生态承载力较低,无法满足社会和经济的发展需求,不利于区域水资源的可持续利用。因此,水资源生态赤字区应适当调整产业结构,控制耗水量大企业建设比例。

(3) 湖北省常年入境水量与出境水量相当,水资源补给对降雨依赖较大,因此干旱、洪涝等自然灾害对水资源生态承载力影响较大。加强区域水利基础设施的修建与完善,缓解旱涝自然灾害对水资源生态承压能力的冲击,是实现水资源可持续利用的重要途径。

(4) 湖北省水资源生态承压能力整体呈“中间低、四周高、北有缺口”的外包型,且西部高于东部的趋势。其中,襄阳市、荆门市、天门市、仙桃市、孝感市、武汉市和鄂州市整体处于不可持续状态。湖北省中部主要为平原和平原丘岗地貌为主,区内耕作条件

好,交通便利,经济发展较快,对水资源的需求相对高于四周,从而增加了水资源的生态承载压力。增强农田水利设施建设,提高农业科学灌溉技术是缓解中部区域水资源压力的重要保障。

(5) 水资源生态承压能力的空间分布与社会经济发展的空间分布不匹配。社会经济的超前和滞后发展对水资源的生态承压能力有明显影响。因此,湖北省西部地区和中部地区应优化区域的产业布局,以提高水资源利用和经济发展协调度,实现社会与环境的和谐发展。

(6) 近年来,随着城市化进程的加快和工业技术的发展,湖北省水污染问题未得到有效彻底的解决。受污染水体不可直接进入循环使用过程,但受数据可获得性的影响,模型中水资源总量未考虑减除污染水部分,使得计算结果相对较为乐观,这在今后的研究中还需进一步加强。

### 参考文献:

- [1] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. Environment and urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [2] Wackernagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective[J]. Ecological Economics, 1997, 20(1): 3-24.
- [3] Rees W E. Revisiting carrying capacity: area-based indicators of sustainability[J]. Population and Environment, 1996, 17(3): 195-215.
- [4] 李爽, 张国臣, 王丽艳. 基于生态足迹和物质流的可持续性分析与评价: 以石家庄市为例[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 226-230.
- [5] 薛建春. 基于 EMD 的平朔矿区生态足迹变化及动力学预测分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(6): 267-270.
- [6] 李玉平, 朱琛, 朱金亮, 等. 资源型城市邢台市生态足迹核算与预测研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 248-252.
- [7] 马晶, 彭建. 水足迹研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5458-5466.
- [8] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1279-1286.
- [9] 谭秀娟, 郑钦玉. 我国水资源生态足迹分析与预测[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3559-3568.
- [10] 韩照祥, 吴丹丹, 吴珏, 等. 江苏沿海地区淡水资源水生态足迹的动态变化[J]. 淮海工学院学报: 自然科学版, 2012, 21(2): 34-38.
- [11] 王文国, 何明雄, 潘科, 等. 四川省水资源生态足迹与生态承载力的时空分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1555-1565.

- 其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613.
- [5] 赵景柱, 肖寒, 吴刚. 生态系统服务的物质量与价值量评价方法的比较分析[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 290-292.
- [6] Gold B, Jacobson R, Kingsland S, et al. Ecology for a crowded planet[J]. Science, 2004, 304(5675): 1251-1252.
- [7] Crossman N D, Burkhard B, Nedkov S. Quantifying and mapping ecosystem services[J]. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management, 2012, 8(1/2): 1-4.
- [8] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [9] 李文华, 张彪, 谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 1-10.
- [10] 吴璇, 李洪远, 张良, 等. 天津滨海新区生态系统服务评估及空间分级[J]. 中国环境科学, 2011, 31(12): 2091-2096.
- [11] 石焱, 王如松, 黄锦楼, 等. 中国陆地生态系统服务功能的时空变化分析[J]. 科学通报, 2012, 57(9): 720-731.
- [12] 周涛, 李天宏. 陕西省退耕还林(草)前后 LUCC 对生态系统服务的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 247-250.
- [13] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 等. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响: 以密云水库流域为例[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 726-736.
- [14] 彭文甫, 周介铭, 杨存建, 等. 基于土地利用变化的四川省生态系统服务价值研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 1054-1062.
- [15] 胡喜生, 洪伟, 吴承祯, 等. 福州市土地生态系统服务时空分异特征[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5): 881-888.
- [16] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [17] 王重玲, 朱志玲, 王梅梅, 等. 基于生态服务价值的宁夏隆德县生态补偿研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 208-212.
- [18] 杨越, 哈斯, 杜会石, 等. 基于 RS 和 GIS 的宁夏盐池县土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 101-105.
- [19] De Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services[J]. Ecological Economics, 2002, 41(3): 393-408.
- [20] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [21] 曾杰, 李江风, 姚小微. 武汉城市圈生态系统服务价值时空变化特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 883-891.
- [22] 宜昌市发展和改革委员会. 《关于下达退耕还林还草工程 2014 年中央预算内投资计划的通知》(鄂发改投资[2014]674 号)[EB/OL]. [2015-01-20]. [http://www.yichang.gov.cn/art/2015/1/20/art\\_4581\\_705118.html](http://www.yichang.gov.cn/art/2015/1/20/art_4581_705118.html).
- [23] Fu B J, Su C H, Wei Y P, et al. Double counting in ecosystem services valuation: Causes and countermeasures[J]. Ecological Research, 2011, 26(1): 1-14.

~~~~~

(上接第 295 页)

- [12] 卢艳, 于鲁冀, 王燕鹏, 等. 河南省水资源生态足迹和生态承载力分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(1): 182-186.
- [13] 常龙芳, 董金义. 云南省水资源生态足迹与生态承载力时空动态分析[J]. 吉林水利, 2013(1): 25-29.
- [14] 王宁, 粟晓玲. 陕西关中地区水资源生态足迹与生态赤字研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013(3): 221-227.
- [15] 李玉平, 王晓妍, 朱琛, 等. 邢台市水资源生态足迹核算与预测研究[J]. 水土保持研究, 2014, 20(3): 227-230.
- [16] 洪辉, 付娜. 浅谈水资源生态足迹和生态承载力的研究[J]. 山西建筑, 2007, 33(30): 200-201.
- [17] 刘子刚, 郑瑜. 基于生态足迹法的区域水生态承载力研究: 以浙江省湖州市为例[J]. 资源科学, 2011, 33(6): 1083-1088.
- [18] 张岳. 中国水资源与可持续发展[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2000.
- [19] Anselin L. Local indicators of spatial association: LISA[J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115.
- [20] Anselin L, Syabri I, Kho Y. GeoDa: An introduction to spatial data analysis[J]. Geographical Analysis, 2006, 38(1): 5-22.