

· 城市生态保护 ·

基于水足迹强度的江苏省水资源利用效率分析

杨 凡, 张玲玲

(河海大学公共管理学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 水足迹强度是可以量化水资源利用效率的指标, 文章在计算江苏省水足迹的基础上, 选取6项水足迹强度指标, 分部门比较各地市水资源利用效率的差异, 并基于ESDA研究水足迹强度的空间自相关性, 构建空间集聚图。研究表明: 2002~2014年江苏省各市水足迹总体呈现上升趋势, 水资源压力增大; 总体上苏南和苏北地区的农业水足迹强度都偏高, 农业水资源利用效率低; 苏南地区工业产值高但耗水量大, 因此工业水足迹强度也偏高; 苏北地区的灰水足迹强度偏高, 水资源压力较大; 江苏省水足迹强度具有不断增强的全局自相关性, 地市出现集聚现象, 不同地市的集聚分布也日益明显; 大部分苏北地区属于高高集聚并且向外扩张, 低低集聚主要分布在苏南地区。研究结果为政府部门分析地市间水资源利用效率差异, 制定高效的水资源利用政策等提供依据。

关键词: 水足迹; 水足迹强度; 水资源利用效率; 探索性空间数据分析

中图分类号: X37; TV213.4

文献标志码: A

DOI:10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2017.02.019

Spatial Pattern Analysis of Water Resource Utilization Efficiency Based on Water Footprint Intensity of Cities in Jiangsu Province

Yang Fan, Zhang Lingling

(School of Public Administration, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Water footprint intensity is an indicator for quantification of water resource utilization efficiency. In this paper, on the basis of calculating the water footprint in Jiangsu Province, 6 indicators of water footprint intensity were selected to compare the differences of water resource utilization efficiency in cities between all departments. ESDA model was applied to study the spatial autocorrelation of the water footprint intensity and spatial concentration maps about the water footprint intensity were set up. The results indicated that municipal water footprint in Jiangsu province from 2002 to 2014 showed a rising trend, with increase of the water pressures year by year. Generally, the agricultural water footprint intensity in the south and the north of Jiangsu Province was high, with low utilization efficiency of the agricultural water resources. Industrial production in the south of Jiangsu Province was high, but the water consumption was high, so the industrial water footprint intensity was also high. Grey water footprint intensity in the north of Jiangsu was high, with greater water pressure. The water footprint intensity in Jiangsu had continuously rising global spatial autocorrelation. There existed spatial cluster features and the spatial cluster features of different cities became more and more obvious. The regions with HH correlation pattern were mainly located in the north of Jiangsu, with an obvious diffusing tendency. The regions with LL correlation pattern were mainly located in the south. The study results provided basis for the governmental departments to analyze the differences of water resource utilization efficiency in cities and develop efficient policies for water resource utilization.

Keywords: Water Footprint; Water Footprint Intensity; Water Resource Utilization Efficiency; Exploratory Spatial Data Analysis

CLC number: X37; TV213.4

在人们消费的各类产品中, 隐含着许多“看不见的水资源”, 水资源在生产消费过程中实现了自身的流动, 所以地区实际消费的水资源可能远远高于本地水资源量。于是英国学者Tony Allan^[1]在1993年提出“虚拟水”概念来计算生产

过程中容易被忽略的水资源量。Hoekstra 教授于2002年定义“水足迹”, 是指在一定的物质生产标准下, 生产一定人群消费的产品和服务所需要的水资源的数量, 是维持人类产品和服务消费所需要的真实的水资源量^[2]。虚拟水消费量是水足

收稿日期: 2016-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579064、51279223、51479119); 国家软科学计划项目(2014GXS4B047); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301003、201201022); 中央高校基本科研业务费项目(2015B23314、2014B09414)基金资助

作者简介: 杨 凡 (1993-), 女, 硕士研究生。研究方向: 水利行政管理。

通信作者: 张玲玲, 博士、教授。研究方向: 水利经济、水资源管理、资源环境政策模拟。E-mail:340505415@qq.com

迹的最主要组成部分,在人们消费的水足迹中,大部分消耗都是以虚拟水的形式表现出来的。

目前,国外对水足迹的研究方法日益完善,包括对农畜产品水足迹的计算^[3-7]、工业产品或能源水足迹的计算^[8-10]、国家或区域水足迹的分析^[11]、水足迹与水资源管理的评价^[12]、水足迹消费模式的研究^[13]、水足迹对生态环境的影响^[14-15]等方面。而我国学者的研究主要集中于计算粮食水足迹^[16-19]、区域水足迹^[20-21]、水足迹的空间变化差异研究^[22-23]、省际水足迹强度的计算^[24-25]等。但是缺少对地市不同部门水足迹强度的测算,以及相关区域间水资源利用效率的空间分布研究。

探索性空间数据分析是通过收集区域的空间数据信息,进行对空间分布的描述,能够展现出一个观测变量对其他观测变量的影响程度,从而掌握彼此之间的内部效应^[26]。这是一种具有识别功能的方法,通过收集数据分析观测对象的全局和局部空间自相关性,描述和显示空间分布以及空间相互作用。而通过分析各个区域数据的空间关联性,可揭示形成不同空间结构和模式的内在相似与差异的关联度。

文章以江苏省为研究对象,计算13个地市2002~2014年水足迹,分析各地市分部门的水足迹强度,采用探索性空间数据分析方法,研究经济发展对水足迹的影响,并且构建水足迹强度的空间集聚图,比较和评价各地市水资源利用效率,进一步探讨区域间的空间关联性。

1 研究方法

文章水足迹强度和水资源利用效率的研究方法是空间自相关分析方法。用全局Moran's I指数判断要素的属性分布是否具有显著的聚集或分散现象;局部Moran's I指数可以描述要素之间的空间集聚程度,再结合LISA集聚图可以直观地显示区域间的集聚类型和显著性水平^[24]。

1.1 空间权重矩阵

空间权重矩阵是度量空间自相关性的前提,是基于一个二元对称的邻接矩阵进行标准化处理得到的。这种空间权重矩阵是把所有相邻的影响

作用都假设相同,而忽略不相邻的空间相关性。本文采用的是空间距离权重矩阵,即对区域的空间位置进行量化,该矩阵中的元素定义如下:

$$W_{ij} = \begin{cases} 0 & (i=j) \\ 1/d_{ij} & (i \neq j) \end{cases} \quad (1)$$

其中: d_{ij} 是地区*i*和地区*j*重心点之间的距离。

1.2 全局指数

全局Moran's I指数的定义是:

$$Moran's\ I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij} Z_i Z_j}{\sigma^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij}} \quad (2)$$

其中: n 是空间观察值的数目; x_i 是在处于空间位置*i*的观察值; Z_i 是*x*标准化变换, $Z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ 。

按照空间数据分布,考虑位置与属性相似性的关系,可以计算Moran's I指数的期望值和期望方差:

$$E(I) = -\frac{1}{n-1} \quad (3)$$

$$Var(I) = \frac{n[(n^2 - 3n + 3)s_1 - ns_2 + 3s_0^2] - k[(n^2 - n)s_1 - 2ns_2 + 6s_0^2]}{s_0^2(n-1)(n-2)(n-3)} \quad (4)$$

其中,

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}, S_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (W_{ij} + W_{ji})^2, S_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n W_{ji}^2, k = \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 \right] / \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^2。$$

经过假设,并检验空间有自相关关系,参考正态分布表,可以计算出Moran's I指数的Z值统计量:

$$Z = I \frac{I - E(I)}{\sqrt{Var(I)}} \quad (5)$$

通过权重矩阵计算出的Moran's I指数取值范围在-1到1之间,其中,[-1,0)表示空间负相关,即该区域与周边区域存在高低或低高的相反关系;0表示空间不相关,即该区域与周边区域不存在空间关系;(0,1]表示空间正相关,即该区域与周边区域存在同高同低的同步关系。

1.3 局部指数

区域*i*的局部Moran's *I* 指数的定义^[27]:

$$I_i(d) = Z_i \sum_{j \neq i}^n W_{ji} Z_j \quad (6)$$

其中： Z_i 与 Z_j 是表示这测量值与均值的差值，当 I_i 是正数值时，表示区域内同属性值之间呈现空间集聚的状态，当 I_i 是负数值时，表示区域内不同属性值之间呈现空间集聚的状态。

2 水足迹与水足迹强度的测算

2.1 水足迹的测算

2.1.1 计算方法 文章采用自下而上的计算方法，主要包括：

$$WF = WF_{agri} + WF_{indu} + WF_{ecol} + WF_{grey} \quad (7)$$

式中， WF 为水足迹总量， WF_{agri} 为农业水足迹， WF_{indu} 为工业产品水足迹， WF_{ecol} 为生活与生态用水足迹， WF_{grey} 为灰水足迹。

2.1.2 农业水足迹 农业水足迹主要计算包括农作物产品和动物产品的生产用水量，根据单位农畜产品的虚拟水含量以及生产的农畜产品数量，得到13个地市农畜产品的水足迹。农业水足迹的计算公式为：

$$WF_{agri} = \sum_{i=1}^n P_i \times AWF_i \quad (8)$$

式中， P_i 表示农畜产品的产量， AWF_i 表示单位质量农畜产品的虚拟水含量。其中，单位质量作物产品的虚拟水含量采用文献[20]中的计算结果，而因为单位质量动物产品的虚拟水含量数据比较稳定，可以参考Hoekstra et al^[28]有关中国动物虚拟水的计算数据，见表1。

表1 单位农畜产品的虚拟水含量

产品	虚拟水含量/ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
粮食	1.00
蔬菜	0.10
棉花	4.88
肉类	6.70
蛋类	3.55
奶类	1.90
水产品	5.00
食用油	5.24
果类	1.00

2.1.3 工业水足迹 各地市的工业水足迹等于江苏省的年工业用水量与各地市的工业产值同江苏省工业产值比的乘积，其中，江苏省的年工业用水量为工业产值与万元工业产值用水量的乘积。

2.1.4 生活和生态水足迹 生活水足迹主要包括农村和城镇的生活用水量，生态水足迹主要是建设生态所消耗的水资源量，也包括城市环境用水。但是因为目前统计数据受到限制，所以数据采用《江苏水资源公报》和《江苏省统计年鉴》中的城市生活和生态用水量。

2.1.5 灰水足迹 灰水足迹是指以自然本底浓度和现有的环境水质标准为基准，将一定的污染物负荷吸收同化所需的淡水体积^[29]，灰水足迹表示稀释污染物所需要的淡水资源量。其计算公式为：

$$WF_{grey} = \frac{L}{c_{max} - c_{nat}} \quad (9)$$

式中， WF_{grey} 表示灰水足迹(m^3/a)， L 表示排污量(kg/a)， c_{max} 表示污染物的水质标准浓度(kg/m^3)， c_{nat} 表示受纳水体的自然初始浓度(kg/m^3)，可以取为0^[30]。因为灰水中的污染物主要是COD和氨氮，所以求取两者的最大值为灰水足迹值。根据我国《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)^[31]，选取地表水排放的第三类标准，以COD为主要污染的 $c_{max}=0.02 \text{ kg}/\text{m}^3$ ；以氨氮为主要污染物的 $c_{max}=0.001 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

2.2 水足迹强度的测算

水足迹强度反映用水状况与经济发展程度之间的关系，水足迹强度值越大，就表明单位GDP需要的用水量就越多，水资源利用效率就越低。水足迹强度表示单位GDP增长消耗的淡水资源量，通过计算出各个地区的水足迹强度，可以掌握地区经济发展下的水资源利用效率。

$$WFI = \frac{WF}{GDP} \quad (10)$$

其中， WFI 表示水足迹强度， WF 表示水足迹总量。

2.2.1 农业水足迹强度 因为农业水足迹测算的是农业和畜牧业的用水量，所以将江苏省各地市农业水足迹与农畜业产值的比值作为农业水足迹

强度,从而针对性分析农业水资源利用效率。

2.2.2 工业水足迹强度 工业水足迹强度是工业水足迹与工业产值的比值,表示万元工业产值增加所需要的水资源量。

2.2.3 生活水足迹强度 江苏省各地市的生活水足迹数据来源是城市居民生活用水,所以其强度计算的是生活水足迹与城市居民消费产值的比值。

2.2.4 生态水足迹强度 用生态水足迹强度分析生态效益,其强度采用生态水足迹与生态收益产值的比值。

2.2.5 灰水足迹强度 灰水足迹强度反映水污染状况与经济发展程度之间的关系,用灰水足迹量除以GDP得到灰水足迹强度。灰水足迹强度值越大,就表明单位GDP产生的污染就越多,从而需要稀释污染的淡水量就越多。所以,灰水足迹强度表示单位GDP消耗的用于稀释污染物的淡水资源量。

3 数据来源

文章选取了2002~2014年江苏省13个地市为

表2 江苏省2002~2014年水足迹总量

<i>t/a</i>	农业水足迹	工业水足迹	生活水足迹	生态水足迹	灰水足迹	水足迹总量 10^8 m^3
2002	413.47	145.53	44.02	2.60	43.20	648.82
2003	371.40	157.30	48.40	2.60	42.10	621.80
2004	441.50	184.20	44.08	2.90	46.60	719.28
2005	417.30	209.60	49.78	3.02	68.85	748.55
2006	424.10	222.20	50.57	3.04	71.54	771.45
2007	422.10	227.20	51.40	3.08	71.49	775.27
2008	441.10	211.30	52.98	3.10	68.80	777.28
2009	448.46	183.32	53.60	3.18	61.75	750.32
2010	445.48	185.41	54.10	3.20	62.60	750.79
2011	452.00	185.18	52.67	3.30	60.30	753.45
2012	442.50	184.14	55.31	3.30	70.60	755.85
2013	452.00	172.88	54.19	3.24	71.10	753.41
2014	447.80	182.70	54.67	2.70	70.60	758.47

江苏省各市的水足迹总量在不断增多,说明随着人口增加、生活需求增多,水资源的压力在逐渐增大。计算可得,13年间徐州市、苏州市、盐城市、南通市的平均水足迹总量最多,最低的是宿迁市和常州市。13年间江苏省各市平均水足迹量中,农业水足迹占的比重最大,几乎是水足迹总量的2/3,说明农业依旧是各市最主要的水产业,见图1。

研究区域,计算数据的来源,13个地市的农作物产量和牲畜产量、农畜业产值、工业产值、万元工业产值用水量、污染物排放量、生活、生态用水量、城市居民消费产值、生态收益产值以及各地市生产总值等均取自《江苏省水资源公报》(2002~2014年)、《江苏统计年鉴》(2002~2015年)、13个地市的《统计年鉴》(2002~2015年)以及13各地市的《国民经济和社会发展统计公报》(2002~2014年)等资料,污染物COD和氨氮的标准限值取自《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)。

4 水足迹及各部门水足迹强度计算结果

4.1 水足迹的计算结果

江苏省水足迹总量总体上呈现上升趋势,其中农业和工业水足迹占比最大,见表2。

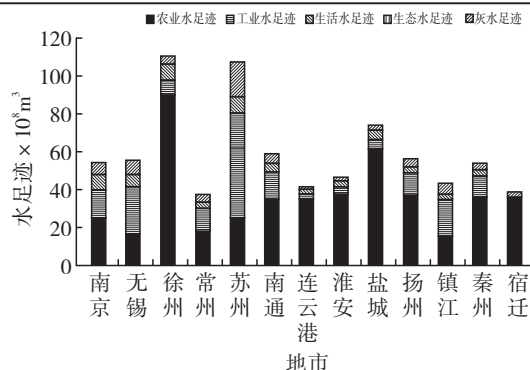


图1 江苏省地市水足迹组成结构

4.2 各部门水足迹强度的统计结果

水足迹强度表示万元GDP消耗的淡水资源量，以各部门水足迹量为基础，选取农业水足迹强度、工业水足迹强度、生活水足迹强度、生态

水足迹强度、灰水足迹强度、水足迹强度这6项指标，对2013年江苏省各地市的水足迹强度进行分部门的横向比较，分析水资源利用效率的地区差异，见表3。

表3 江苏省2013年各地市各部门水足迹强度 m³ · 10⁴元⁻¹

地市	农业水足迹强度	工业水足迹强度	生活水足迹强度	生态水足迹强度	灰水足迹强度	水足迹强度
南京	1 880.42	51.00	32.74	92.86	11.60	63.37
无锡	1 862.04	57.39	31.18	75.60	9.73	57.26
徐州	1 312.18	19.67	38.30	212.32	12.67	133.59
常州	2 082.35	54.87	36.39	56.47	10.15	81.06
苏州	2 059.12	85.84	37.68	97.90	12.26	69.04
南通	1 646.98	62.38	37.46	102.71	10.56	114.44
连云港	1 932.77	27.45	53.23	170.48	14.94	224.57
淮安	1 613.55	56.73	49.66	109.86	13.79	208.33
盐城	1 871.31	33.95	38.29	118.42	15.58	219.45
扬州	2 445.75	80.07	36.72	66.56	10.42	157.00
镇江	2 066.02	123.27	37.38	94.17	9.82	131.82
泰州	2 385.90	77.69	45.94	123.77	9.72	174.47
宿迁	1 700.65	17.31	44.46	179.46	14.00	233.39

根据表3所示，苏南地区的农业水足迹强度较高，而苏北地区农业用水量大但农业产值高，所以农业水足迹强度相对偏低，但是总体上苏南、苏北地区的农业水足迹强度都较高。苏南地区虽然工业产值高，但水足迹量大，单位工业产值所消耗的水资源量偏多，工业水资源利用效率较低；而苏北地区虽然工业产值低，但工业水资源利用效率相对较高。苏南、苏北地区的生活水足迹强度差异不大。苏北地区生态水足迹强度偏高，生态效益较差，生态水资源利用效率低于苏南地区。苏南地区的灰水足迹强度偏小，表示单位GDP产生的污染少，从而需要稀释污染的淡水量少；综合分析生态和灰水足迹强度，发现苏北地区的水污染状况较为严重，水资源利用效率低于苏南地区。江苏省各地市水足迹强度分布主要显示出苏南偏低，苏北偏高的特征，表明总体上苏南地区水资源利用效率偏高，苏北地区水资源利用效率偏低。

5 江苏省地市水足迹强度的空间分布特征

5.1 江苏省地市水足迹强度的全局空间自相关分析

通过计算得到江苏省13个地市2002~2014年

的水足迹强度，并运用全局空间自相关分析模型得出全局Moran's I指数，见表4。2002~2014年统计量的值均大于0.05并且小于1.96，表明其数据通过了显著性检验，具有统计意义。

表4 江苏省水足迹强度变化的全局Moran's I自相关指数

t/a	全局指数
2002~2005	0.520 8
2006~2008	0.556 4
2009~2011	0.591 8
2012~2014	0.618 0

由表4可见，从2002年的指数为0.520 8，到2014年的Moran's I指数为0.618 0，总体上Moran's I指数在增加，并且指数均大于0.09，说明江苏省水足迹强度具有全局自相关性，并且自相关性在不断增强。因为水足迹强度的大小受到农业结构、人口数量、工业技术、经济发展水平等因素的影响，所以相邻区域或者发展程度相似的区域，其水足迹强度的大小以及发展趋势也比较相似，从而在区域上呈现出越来越强的集聚效应。

5.2 江苏省地市水足迹强度的局部空间自相关分析

通过分析江苏省水足迹强度的全局Moran's I指数，发现区域的水足迹强度具有空间自相关

性,而为了更加深入地研究江苏省各市之间水足迹强度的空间集聚特征,需要计算出各市的局部Moran's I 指数,并且做出水足迹强度的LISA集聚地图。LISA集聚主要是将区域地图分为4种类型的集聚象限,分别是高高集聚(HH)、高低

集聚(HL)、低低集聚(LL)、低高集聚(LH)。根据2002年和2014年江苏省各市的水足迹强度的集聚地图(图2)显示,属于HH集聚的区域在增加、属于LL、LH集聚的城市基本保持不变,说明江苏省区域之间水足迹强度具有明显的空间相关

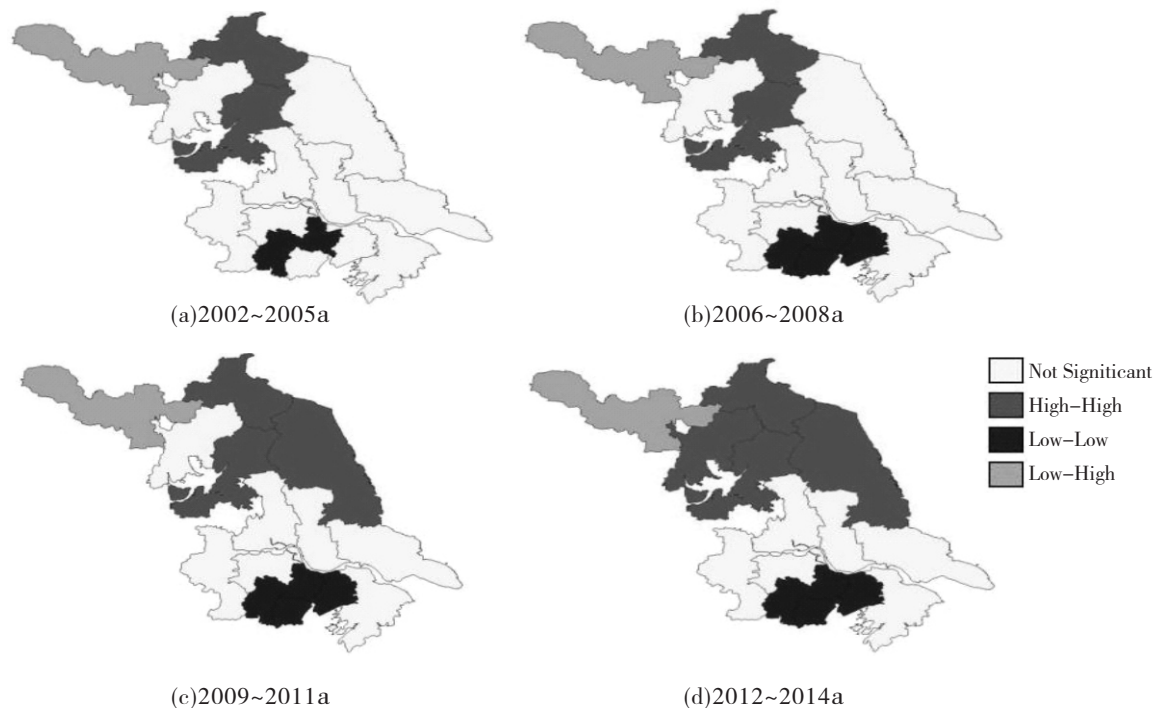


图2 2002~2014a江苏省地市水足迹强度的LISA集聚分布

5.2.1 High-High集聚 属于HH集聚的城市有连云港市、宿迁市、淮安市、盐城市,主要属于苏北地区,特征就是区域内具有高水足迹强度的同时周边相邻地区的水足迹强度也偏高。4个地市的水足迹强度虽然下降幅度大,但初始基数大,说明经济发展对水资源的影响较大,尤其是宿迁市。并且高高集聚区域有着明显的扩张趋势,说明这些地区为了寻求发展,形成不合理的用水结构,所以需要采取强有力的政策,调整产业结构。

5.2.2 Low-High集聚 徐州市稳定属于LH集聚,因为该地区水资源比较丰富,并且经济发展快,水足迹强度每年在不断降低,并且降低的速度也比较快,进步空间很大,发展水平也比较合理稳定。但是徐州市相邻地区的水足迹强度较大,因此为了长远发展,仍需要采取有效的措施,不断提高周边城市经济水平,提高水资源利用效率。

5.2.3 Low-Low集聚 LL集聚主要集中在苏南地

区,包括常州市和无锡市,这两座城市形成了一个低低集聚群,地区生产总值高,产业结构相对合理,经济发展对水资源压力影响偏低。而又好又快发展的同时,开始向周边扩展,具有良好的带动示范作用,不断推进江苏省水资源的可持续发展。

6 结论

(1) 计算结果分析,江苏省水足迹总体上呈现上升趋势,其中农业和工业水足迹占比最大,说明随着人口增加、生存需求增多,水资源的压力在逐渐增大。13年间江苏省各地市平均水足迹量中,农业水足迹占的比重最大,因此为了水资源的持续发展,各地市应该发展农业节水技术,减少水环境的压力。

(2) 通过测算6项分部门的水足迹强度指标,发现虽然苏北地区农业水足迹强度低于苏南地区,但整体上江苏省各地市的农业水足迹强度

都偏高,因此为解决江苏省水资源短缺问题,当务之急是提高农业水资源利用效率,减少农业用水消耗。苏南地区工业部门具有高产值高耗水的特征,工业水资源利用效率较低,因此要优化调整工业结构,发展低耗水产业。综合分析灰水足迹强度,整体上江苏省各地市的水资源压力都比较大,稀释污染需要的淡水量偏多,所以排污处理能力及水平的提高、水污染的防治等应该引起政府的足够重视。

(3) 通过检验,江苏省水足迹强度具有全局自相关性,并且自相关性在不断增强,各个地市出现集聚的现象,集聚分布也日益明显。高高集聚区主要位于苏北地区,经济发展水平偏低,用水结构不合理,而显现出的不断向外扩张的趋势,需要政府引起重视,采取有效合理的政策措施,优化产业间的用水结构,推进技术创新;而苏南地区,经济发展高,水资源利用合理,并且保持区域稳定的同时也在向外积极扩张。因此,推动属于低低集聚的苏南地区带动周边地区的积极发展,提高水资源利用效率,优化水资源环境。

参考文献

- [1] Allan J A. Overall perspective on countries and regions[C]. In P. Rogers & P. Lydon (Eds.), *Water in the Arab world: Perspectives and prognoses*. Massachusetts: Harvard University Press, 1994.
- [2] Hoekstra A Y. The concept of 'virtual water' and its applicability in Lebanon[C]. Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade. Delft: IHE, 2003.
- [3] Bulsink F, Hoekstra A Y, Booi M J. The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products[R]. Delft: UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2009.
- [4] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products[R]. Delft: UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2010.
- [5] Chapagain A K, Hoekstra A Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives[J]. *Ecological Economics*, 2011, 70(4):749-758.
- [6] Shrestha Sanggam, Pandey Vishnu P, Chanamai Chawalit, et al. Green, blue and grey water footprints of primary crops production in Nepal[J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(15): 5223-5243.
- [7] Mesfin M, Hoekstra A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products[J]. *Ecosystems*, 2012, 15(3):401-415.
- [8] Dominguezfaus R, Powers S E, Burken J G, et al. The water footprint of biofuels: a drink or drive issue[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(9):3005-3010.
- [9] Gerbens-Leenes W, Hoekstra A Y, van der Meer T H. The water footprint of bioenergy[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 16(25):10219-10223.
- [10] Pongpinyopap S, Mungcharoen T. Bioethanol water footprint: life cycle optimization for water reduction[J]. *Water Science and Technology*, 2015, 15(2):395-403.
- [11] Vanham D, Bidoglio G. The water footprint of Milan[J]. *Water Science and Technology*, 2014, 69(4):789-795.
- [12] Pahlow M, Snowball J, Fraser G. Water footprint assessment to inform water management and policy making in South Africa[J]. *Water SA*, 2015, 41(3):300-313.
- [13] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern[J]. *Water Resources Management*, 2007, 21(1):35-48.
- [14] Hubacek Klaus, Guan Dabo, Barrett John, et al. Environmental implications of urbanization and lifestyle change in China: ecological and water footprints[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(14):1241-1248.
- [15] Hoekstra A Y. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(7):1963-1974.
- [16] 田园宏, 诸大建, 王欢明, 等. 中国主要粮食作物的水足迹值: 1978-2010[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(6):122-128.
- [17] 邓晓军, 谢世友, 崔天顺, 等. 南疆棉花消费水足迹及其对生态环境影响研究[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(20):176-180, 185-185.
- [18] 何浩, 黄晶, 准贺举, 等. 湖南省水稻水足迹计算及其变化特征分析[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(14):294-298.
- [19] 秦丽杰, 靳英华, 段佩利. 吉林省西部玉米生产水足迹研究[J]. *地理科学*, 2012, 32(8):1020-1025.
- [20] 马静, 汪党献, 来海亮, 等. 中国区域水足迹的估算[J]. *资源科学*, 2005, 27(5):96-100.
- [21] 黄晶, 宋振伟, 陈阜. 北京市水足迹及农业用水结构变化特征[J]. *生态学报*, 2010, 30(23):6546-6554.
- [22] 刘梅, 许新宜, 王红瑞, 等. 基于虚拟水理论的河北省水足迹时空差异分析[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(6):1022-1034.
- [23] 刘莉, 邓欧平, 邓良基, 等. 2003-2011年四川省各市(州)农业水足迹时空变化与驱动力研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7): 1133-1141.
- [24] 孙才志, 陈栓, 赵良仕. 基于ESDA的中国省际水足迹强度的空间关联格局分析[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(4):571-582.
- [25] 赵良仕, 孙才志, 郑德凤. 中国省际水足迹强度收敛的空间计量分析[J]. *生态学报*, 2014, 34(5):1085-1093.
- [26] 马晓东, 马荣华, 徐建刚. 基于ESDA-GIS的城镇群体空间结构[J]. *地理学报*, 2004, 59(6):1048-1057.
- [27] 连健, 李小娟, 宫辉力, 等. 基于ESDA的北京市乡镇农业经济空间特性分析[J]. *地域研究与开发*, 2010, 29(1):130-135.
- [28] Hoekstra A Y. Virtual water trade[C]. Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade. Delft: IHE, value of water research report series No.12, 2003.
- [29] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M. 水足迹评价手册[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [30] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard[M]. London: Earthscan, 2011.
- [31] 国家环保总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3838-2002, 中华人民共和国国家标准——地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.