

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2017.01.006

基于空间自相关分析的安徽省水资源生态压力空间格局探析

张乐勤, 方宇媛

(池州学院资源环境学院, 安徽 池州 247000)

摘要:为探索安徽省各地级市水资源生态压力空间关联格局, 制定差别化水资源可持续利用政策, 运用生态足迹压力测度模型, 对安徽省16个地级市水资源生态压力进行了测算, 采用空间自相关分析方法, 对水资源生态压力空间关联模式进行了考察。结果表明: ①2014年安徽省16个地级市水资源生态压力指数介于1.05~3.82, 均值达1.89; ②水资源生态压力全局自相关Moran指数为-0.1153, 呈不显著空间异质格局, 其中, 位于皖南的黄山、池州、宣城及皖西南的安庆4市水资源生态压力小, 而淮南、马鞍山、铜陵三市压力大; ③局部空间自相关Moran指数散点图显示, 位于第二(LH)、第四(HL)象限的地市有13个, 而位于第一(HH)、第三(LL)象限的仅有3个, 滁州市局部空间自相关指数为-0.2937, 为显著低值异质中心, 黄山市该指数为0.9615, 为显著低值聚集中心。基于研究结果, 提出了差别化的水资源可持续利用政策建议。

关键词:水资源生态压力; 空间格局; 生态足迹模型; 空间自相关分析; 安徽省

中图分类号: F062.2 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2017)01-0024-06

Study of spatial pattern of water resources ecological pressure in Anhui Province based on spatial autocorrelation analysis

ZHANG Leqin, FANG Yuyuan

(College of Natural Resources and Environment, Chizhou University, Chizhou 247000, China)

Abstract: To explore the spatial correlation patterns of water resources ecological pressure for prefecture-level cities of Anhui Province for the development of policies regarding differentiated sustainable utilization of water resources, the ecological footprint pressure measurement model was used to calculate the water resources ecological pressure for 16 prefecture-level cities of Anhui Province, and the spatial autocorrelation analysis method was used to investigate the spatial correlation patterns of water resources ecological pressure. The results are as follows: (1) In 2014, the water resource ecological pressure indices for the 16 prefecture-level cities in Anhui Province ranged from 1.05 to 3.82, with a mean value being 1.89. (2) Moran's I index of global autocorrelation of water resources ecological pressure was -0.1153, showing a pattern of insignificant spatial heterogeneity. Four cities, i. e., Huangshan, Chizhou, Xuancheng in southern Anhui Province, and Anqing in southwestern Anhui Province, had low water resources ecological pressure, while three cities, i. e., Huainan, Ma'anshan, and Tongling, had high water resources ecological pressure. (3) Moran's I scatter plot of local spatial autocorrelation indicates that 13 prefecture-level cities were located in the second (LH) and fourth (HL) quadrants, while only three cities were located in the first (HH) and third (LL) quadrants, of which Chuzhou had a LISA index of -0.2937 and was a significantly low-heterogeneity center, and Huangshan had a LISA index of 0.9615 and was a significantly low-value gathering center. Based on these results, differentiated policies and suggestions were proposed for sustainable utilization of water resources.

Key words: water resources ecological pressure; spatial pattern; ecological footprint model; spatial autocorrelation; Anhui Province

基金项目: 安徽省科技厅2016年软科学项目(1607a0202061)

作者简介: 张乐勤(1965—), 男, 教授, 主要从事资源生态与可持续发展研究。E-mail: zhangleqing@sohu.com

水资源是支撑经济社会可持续发展的基础性自然资源和战略性经济资源^[1],水资源短缺已成为制约我国经济社会可持续发展的主要瓶颈之一,探索经济社会发展对水资源生态压力,对制定水资源可持续利用政策具有重要启示意义。

针对经济社会发展对水资源生态压力,学术界对此进行过深入探索;张义等^[2]运用改进水资源生态足迹模型,对广西 2003—2010 年水资源生态足迹进行测算,结果显示水资源处于严重不安全状态;潘安娥等^[3]基于水足迹视角,就湖北省 1995—2010 年社会生产、生活对水资源压力进行研究,结果表明,考察样本期水足迹呈持续上升趋势;孟丽红等^[4]的研究结果显示,2007—2011 年江西省水资源生态足迹呈上升趋势,经济社会发展已对水资源可持续利用形成较大压力;官冬杰等^[5]采用生态足迹模型,对贵州省 2001—2012 年水资源生态足迹进行探索,揭示其人均水资源生态足迹呈上升趋势,上述研究为本文提供了有益借鉴与启示。

安徽为我国中部水资源禀赋欠丰厚(2014 年人均水资源仅为全国平均水平的 66.65%^[6-7])且空间分布差异大的省份,水资源供给不足已成为制约经济社会可持续发展与生态文明建设的硬约束,CNKI 检索表明,程翠云等^[8-11]学者采用不同方法对安徽省水资源可持续状况进行过深入考察,然而,既有研究多立足时序视角,缺乏对不同地市水资源可持续状况的深度分析,未能有效识别出各地市水资源可持续状况空间差异,借此,本研究以 2014 年为考察样本,基于水资源生态足迹压力模型,就安徽省各地级市经济社会发展对水资源生态压力进行测算,借助 ArcGIS 软件,采用自然断点法,对水资源生态压力空间格局进行分析,采用空间自相关分析模型,对各地市水资源生态压力空间关联模式进行考察,可为制定差别化的水资源可持续利用政策提供决策参考,也可为同类研究提供借鉴。

1 研究区概况

安徽省位于长江下游,地处华东腹部,介于东经 114°54′~119°37′,北纬 29°41′~34°38′,面积 13.94 万 km²;地形复杂多样,以平原、丘陵、山地为主,气候属暖温带与亚热带过渡地区,降水年内变化较大,域内有长江、淮河、钱塘江 3 大水系;2014 年常住总人口 6083 万人,GDP 总量为 20848.8 亿元,全年降水量为 1278.5 mm,水资源总量为 778.48 亿 m³,总用水量为 272.09 亿 m³,其中,第一产业用水 142.83 亿 m³,第二产业用水 92.71 亿 m³,第三产业用水 36.55 亿 m³^[7]。

2 研究方法与数据来源

2.1 水资源生态压力测度模型

2.1.1 水资源生态足迹

加拿大生态经济学家 Rees 及其博士 Wackernagel 提出的生态足迹理论^[12-13],将人类消费的资源、废弃物折算成生物生产性面积,并同自然生态系统的承载力相比较,据此衡量区域可持续发展状况。水资源生态足迹衍生于生态足迹,指的是将人类消耗的水资源量转化为相应的水资源用地面积^[4-5,14],因其具有直观、简洁、清晰的特点,被学术界广泛应用于考察人类社会经济活动对水资源的压力研究中^[2,4-5,10-11,14],模型表达式为^[4]

$$W_{EF} = \gamma_w (W_a + W_i + W_c + W_l + W_e) / P_w \quad (1)$$

式中: W_{EF} 为水资源生态足迹, hm²; W_a 、 W_i 、 W_c 、 W_l 、 W_e 分别为农业生产用水量、工业生产用水量、城镇公共用水量、生活用水量、生态环境用水量, m³; γ_w 为水资源的全球均衡因子,为便于比较,以文献[4-5]中 WWF2002 确定值(即 5.19)作为本研究水资源均衡因子参数; P_w 为水资源全球平均生产能力,参照同类研究文献^[4-5,14-15],以 3 140 m³/hm²作为本研究参数取值。

2.1.2 水资源生态承载力

水资源生态承载力指的是保障区域经济社会生产、生活、生态可持续发展的能力^[14],模型表达式为^[5]

$$W_{EC} = 0.4 \gamma_w \varphi_w W / P_w \quad (2)$$

式中: W_{EC} 为水资源生态承载力, m³; φ_w 为研究区域水资源产量因子,为该区域水资源生产能力与世界水资源平均生产能力的比值^[5]; W 为水资源总量, m³; 0.4 表示水资源总量中要扣除 60% 用于维持生态环境^[5]。

2.1.3 水资源生态压力

水资源生态压力是指经济社会发展对水资源可持续利用影响程度,以水资源生态压力指数表征,指数越大表明人类社会经济活动对水资源胁迫越大,越不利于水资源可持续利用,借鉴张静等^[16]能源消费生态压力测度方法,构建水资源生态压力模型:

$$W_{EPI} = \frac{W_{EF} - W_{EC}}{W_{EC}} \quad (3)$$

式中: W_{EPI} 为水资源生态压力。

当 $W_{EPI} > 1$ 时,表明人类社会经济活动对水资源影响已超出其生态承载阈值,水资源处于不可持续状态, W_{EPI} 越大,对水资源胁迫越大;当 $W_{EPI} \leq 1$ 时,表明人类社会经济活动对水资源影响在其承载范围内,水资源处于可持续利用状态。

2.2 空间自相关分析

空间自相关分析方法在揭示某个区域某种地理现象或某一属性值与邻近区域同类现象或属性值的关联程度上具有独特优势,得到了学术界普遍认同^[17-20],包括全局空间自相关、局部空间自相关2个度量指标。

2.2.1 全局空间自相关模型

全局空间自相关用于判别整个研究区域某种地理现象或某一属性值在空间是否有聚集特性存在,常用 Moran 指数 $I^{[17]}$ 表征。

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x}) \cdot (x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}} \quad (4)$$

其中

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

式中: n 为观察单元数; x_i, x_j 分别为研究区域内 i, j 观察单元观察值; ω_{ij} 为空间权重矩阵; S^2 为指标样本方差; \bar{x} 为样本均值。

I 取值范围在 $[-1, 1]$ 之间,当 $I > 0$ 时,表明研究区域观察现象或某种属性具有正向的同质空间聚集效应,指数越接近 1,空间关联性越强,当 $I < 0$ 时,表明研究区域观察现象或某种属性存在明显差异,指数越接近 -1,空间差异越显著,当 $I = 0$,表示研究区观察现象或某种属性不存在空间相关性。

2.2.2 局部空间自相关模型

局部空间自相关主要考察整个研究区域内某单元与邻近单元属性特征的相关程度,常用局部空间自相关指标 (local indicators of spatial association, LISA) I_i 表征^[16]

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad i \neq j \quad (5)$$

若 I_i 显著大于零,表明 i 单元与邻近单元具有同质属性特征, I_i 越大同质性越强;若 I_i 显著小于零,表明 i 单元与邻近单元具有异质属性特征, I_i 值越小差异越显著^[18], I_i 累计之和为 $I^{[19]}$ 。

实际研究^[17-19]中,常用 Moran 散点图来表征各局部单元空间集聚特征,Moran 散点图包括 4 个象限,第一象限为高高 (HH) 空间关联模式,表示考察单元与邻近单元均为高值聚集区;第三象限为低低 (LL) 空间关联模式,表示考察单元与邻近单元均为低值聚集区;第二象限为低高 (LH) 空间关联模式,表示考察单元为低值异质区;第四象限为高低 (HL) 空间关联模式,表示考察单元为高值异质区。借助

ArcGIS 空间分析软件,将 Moran 散点图与 LISA 相结合,可得到 LISA 显著性水平图^[19],该图可直观显示出显著的 LISA 区域,并能识别出对应于 Moran 散点图中不同象限的相应区域^[20]。

2.3 数据来源

本文研究样本为 2014 年安徽省各地级市,用水数据来源于文献^[6-7](表 1)。

表 1 安徽省 2014 年各地级市水资源数量 亿 m^3

城市	水资源总量	总用水量	农业用水量	工业用水量	城镇公共用水量	居民生活用水量	生态环境用水量
合肥	49.63	26.66	15.21	5.73	1.80	3.41	0.51
淮北	6.76	4.84	2.02	1.83	0.15	0.79	0.05
亳州	27.39	9.74	5.96	1.86	0.21	1.64	0.07
宿州	24.91	10.36	5.27	2.68	0.26	2.10	0.05
蚌埠	21.34	12.84	8.19	2.66	0.35	1.35	0.29
阜阳	35.71	15.92	9.80	2.95	0.26	2.77	0.14
淮南	7.70	15.46	5.67	8.00	0.48	1.13	0.18
滁州	46.08	21.29	15.99	2.99	0.57	1.59	0.15
六安	98.64	30.80	24.77	3.18	0.45	2.09	0.31
马鞍山	20.01	29.82	7.09	20.50	0.56	1.07	0.60
芜湖	35.39	30.28	10.94	16.31	0.80	1.73	0.50
宣城	94.98	13.74	9.61	2.29	0.41	1.12	0.31
铜陵	7.50	10.83	1.49	8.28	0.16	0.40	0.50
池州	71.95	9.84	4.50	4.13	0.26	0.57	0.38
安庆	119.23	25.66	14.02	8.63	0.27	2.17	0.57
黄山	111.68	4.01	2.30	0.69	0.41	0.57	0.04

3 结果与分析

3.1 水资源生态压力

运用水资源生态足迹测度模型(式(1))及表 1 数据,可得安徽省 2014 年 16 个地级市水资源生态足迹;运用安徽省 2014 年水资源总量(778.48 亿 m^3 ^[6])、安徽省土地面积(139427 km^2 ^[6])及世界水资源平均生产能力(3140 m^3/hm^2 ^[4])数据,可计算得安徽省 2014 年水资源产量因子 1.778,再依据水资源生态承载力测度模型(式(2)),可得安徽省 2014 年各地级市水资源生态承载力;基于水资源生态足迹、水资源生态承载力测算结果,运用水资源生态压力测度模型(式(3)),可得水资源生态压力(表 2)。

由表 2 可知,2014 年安徽省各地级市水资源生态压力指数均大于 1,均值为 1.89,表明经济社会发展已对水资源构成了较大影响,水资源可持续利用受到了严重威胁。运用表 2 数据,借助 ArcGIS 软件,采用自然断点法,可按水资源生态压力大小分为 4 类:第 I 类(1.05 ~ 1.30),压力小,包括黄山、池州、宣城、安庆;第 II 类(1.30 ~ 1.76),压力较小,包括六安、亳州、滁州、宿州、阜阳、合肥;第 III 类(1.76 ~ 2.20),压力较大,包括蚌埠、淮北、芜湖;第 IV 类(2.20 ~ 3.82),压力大,马鞍山、铜陵、淮南(图 1)。

表2 安徽省2014年各市水资源生态压力

城市	水资源		水资源生态压力指数
	生态足迹/hm ²	生态承载力/hm ²	
合肥	4406541.40	5834098.17	1.76
淮北	799987.26	794650.49	2.01
亳州	1609891.72	3219745.09	1.50
宿州	1712369.43	2928216.51	1.58
蚌埠	2122280.25	2508556.42	1.85
阜阳	2631363.06	4197776.46	1.63
淮南	2555331.21	905149.22	3.82
滁州	3518952.23	5416789.12	1.65
六安	5090828.03	11595314.20	1.44
马鞍山	4928847.13	2352212.46	3.10
芜湖	5004878.98	4160159.87	2.20
宣城	2271038.22	11165074.44	1.20
铜陵	1790054.14	881638.85	3.03
池州	1626420.38	8457855.40	1.19
安庆	4241254.78	14015706.73	1.30
黄山	662799.36	13128190.29	1.05

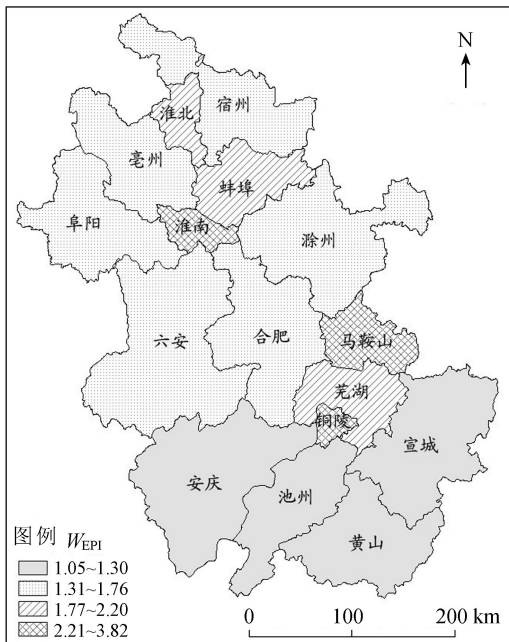


图1 安徽省2014年水资源生态压力空间分布格局

由图1可知,2014年安徽省16个地级市水资源生态压力空间格局并不均衡,皖南的黄山、池州、宣城及皖西南的安庆压力较小,这与其地理位置、自然生态环境、经济社会发展状况有关,首先,上述4市地处亚热带湿润地区,降水相对较丰沛,同时,较高的森林覆盖率也有利于减少降水损失,其次,皖南及皖西南地区人口较少,工业经济也相对薄弱,在上述因素共同作用下经济社会发展对水资源生态压力较小。马鞍山、铜陵、淮南三市压力大,究其原因,与其工业经济的结构特点对水资源需求量大有关,上述三市均为工业城市,工业结构以传统的钢铁、铜冶金、煤炭、火电为主,水资源消耗量大,水资源供需矛盾突出,致使经济社会发展对水资源可持续利用形成了较大压力。

3.2 水资源生态压力全局空间自相关分析

基于 ArcGIS 软件,对安徽省地域图进行矢量化,借助 Geoda095i 软件,构造空间二值邻接矩阵形式(即构造空间权重矩阵),运用全局空间自相关模型(式(4)),可得安徽省2014年全局自相关 Moran 指数为-0.1153,在0.01置信水平上, P 值为0.4290(图2),未能通过显著性检验,表明水资源生态压力存在不显著空间异质格局,未能呈现出明显空间极化特征。

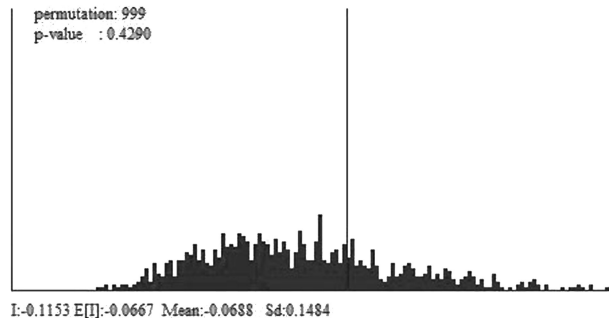


图2 Moran 指数检验

3.3 水资源生态压力局部自相关分析

基于安徽省2014年各地市水资源生态压力矢量化数据,借助 Geoda095i 软件,运用局部空间自相关模型(式(5)),可得到各地市局部空间自相关的 LISA 值,并可获取刻画某一地市与其邻近地市局部关系的水资源生态压力的 Moran 指数散点图(图3)。图3中,横坐标为水资源生态压力标准化后属性值(W-WEFPI),纵坐标为水资源生态压力标准化后的由空间连接矩阵决定的相邻单元属性值的平均值(WEFPI)。

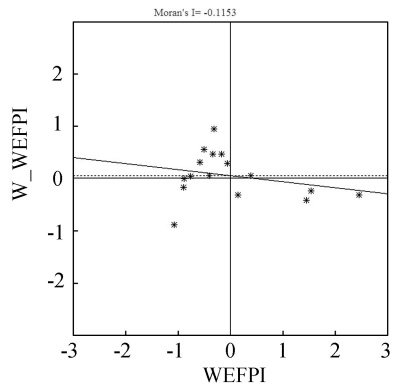


图3 安徽省2014年水资源生态压力 Moran 指数散点图

由图3可知,位于第一象限(HH)的地市仅有芜湖,在0.05置信水平上, P 值大于0.05,未能通过显著性检验,表明芜湖市水资源生态压力高,与其邻近地市水资源生态压力也高的聚集特征不明显;位于第二象限(LH)的有宿州、安庆、亳州、宣城、滁州、六安、阜阳、合肥、蚌埠9个地市,在0.05置信水平上,滁州市能通过显著性检验(LISA 指数为-0.293682, P 值

- [2] 张义,张合平,李丰生,等. 基于改进模型的广西水资源生态足迹动态分析[J]. 资源科学,2013,35(8):1601-1610. (ZHANG Yi,ZHANG Heping,LI Fengsheng, et al. Dynamic analysis of the water resource ecological footprint of Guangxi based on an improved mode [J]. Resources Science,2013,35(8):1601-1610. (in Chinese))
- [3] 潘安娥,陈丽. 湖北省水资源利用与经济协调发展脱钩分析:基于水足迹视角[J]. 资源科学,2014,36(2):328-333. (PAN An'e,CHEN Li. Decoupling and water footprint analysis of the coordinated development between water utilization and the economy in Hubei[J]. Resources Science,2014,36(2):328-333. (in Chinese))
- [4] 孟丽红,叶志平,袁素芬,等. 江西省 2007—2011 年水资源生态足迹和生态承载力动态特征[J]. 水土保持通报,2015,35(1):256-261. (MENG Lihong, YE Zhiping, YUAN Sufen, et al. Dynamic characteristics of ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Jiangxi province during 2007—2011 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35 (1) : 256-261. (in Chinese))
- [5] 官冬杰,苏印,苏维词,等. 贵州省水资源生态足迹评价与预测[J]. 重庆大学学报,2015,38(4):112-120. (GUAN Dongjie,SU Yin,SU Weici, et al. Assessment and forecast on ecological footprint of water resources in Guizhou province [J]. Journal of Chongqing University, 2015,38(4):112-120. (in Chinese))
- [6] 安徽省统计局. 安徽统计年鉴 2015[M]. 北京:中国统计出版社,2015.
- [7] 国家统计局. 中国统计年鉴 2015[M]. 北京:中国统计出版社,2015.
- [8] 程翠云,阎伍玖. 安徽区域水资源可持续利用评价[J]. 环境科学研究,2006,19(5):154-158. (CHENG Cuiyun,YAN Wujiu. Evaluating of regional sustainable utilization of water resources in Anhui province [J]. Research of Environmental Sciences,2006,19(5):154-158. (in Chinese))
- [9] 张伟. 基于因子分析的安徽省水资源承载力评价[J]. 节水灌溉,2012(9):11-14. (ZHANG Wei. Evaluation of water resources carrying capacity in Anhui province based on factor analysis [J]. Water Saving Irrigation,2012(9):11-14. (in Chinese))
- [10] 刘民士,刘晓双,侯兰功. 基于水足迹理论的安徽省水资源评价[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(2):220-224. (LIU Minshi, LIU Xiaoshuang, HOU Langong. Assessing water resources of Anhui province based on water footprint theory [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2014,23(2):220-224. (in Chinese))
- [11] 余盼,熊峰. 安徽省水资源生态足迹动态分析:2005—2013[J]. 南京林业大学学报(人文社会科学版),2015(1):79-86. (YU Pan,XIONG Feng. Dynamic analysis of ecological footprint of water resources in Anhui province: from 2005 to 2013 [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Humanities and Social Sciences Edition),2015(1):79-86. (in Chinese))
- [12] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. Environment Urbanization,1992,4(2):121-130.
- [13] WACKERNAGEL M, REES W E. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth [M]. Gabriola Island;New Society Publishers,1996.
- [14] 于强,王金龙,王亚南. 基于水资源足迹分析的河北省城镇化发展路径[J]. 经济地理,2014,34(11):69-73. (YU Qiang, WANG Jinlong, WANG Yanan. Hebei urbanization based on analysis of the water resources ecological footprint [J]. Economic Geography, 2014, 34 (11) : 69-73. (in Chinese))
- [15] 洪思杨,王红瑞,朱中凡,等. 辽宁省水资源生态足迹与生态承载力分析[J]. 水利经济,2016,34(3):46-52. (HONG Siyang, WANG Hongrui, ZHU Zhongfan, et al. Analysis of ecological footprint of water resources in Liaoning Province [J]. Journal of Economics of Water Resources,2016,34(3):46-52. (in Chinese))
- [16] 张静,鲁春霞,谢高地,等. 北京城市能源消费的生态与环境压力研究[J]. 资源科学,2015,37(6):1133-1140. (ZHANG Jing, LU Chunxia, XIE Gaodi, et al. Energy consumption and the pressure of ecological environment research in Beijing [J]. Resources Science,2015,37(6):1133-1140. (in Chinese))
- [17] 夏永久,朱喜钢,储金龙. 基于 ESDA 的安徽省县域经济综合竞争力空间演变特征研究[J]. 经济地理,2011,31(9):1427-1431,1438. (XIA Yongjiu, ZHU Xigang, CHU Jinlong. Evolvement of spatial pattern of county economic comprehensive competitiveness in Anhui province based on ESDA [J]. Economic Geography,2011,31(9),1427-1431,1438. (in Chinese))
- [18] 刘志方,张毅,曹娟,等. 安徽省城市化发展质量时空演变及差异分析[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版),2015,38(4):365-371. (LIU Zhifang, ZHANG Yi, CAO Juan, et al. Spatial-temporal analysis and evolution of urbanization development quality in Anhui province [J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science), 2015,38(4):365-371. (in Chinese))
- [19] 葛莹,姚士谋,蒲英霞,等. 运用空间自相关分析集聚经济类型的地理格局[J]. 人文地理,2005(3):21-25. (Ge Ying, YAO Shimou, PU Yingxia, et al. Application of spatial autocorrelation for the spatial patterns of urbanization and localization economy [J]. Human Geography,2005(3):21-25. (in Chinese))
- [20] 万鲁河,王绍巍,陈晓红. 基于 GeoDA 的哈大齐工业走廊 GDP 空间关联性[J]. 地理研究,2011,30(6):977-984. (WAN Luhe, WANG Shaowei, CHEN Xiaohong. GeoDA-based spatial correlation analysis of GDP in Hadaqi industrial corridor [J]. Geographical Research, 2011,30(6):977-984. (in Chinese))

(收稿日期:2016-05-15 编辑:徐娟)