

基于夜间灯光数据的长三角城市群城市 用水时空演变及驱动研究

冯小威, 樊良新, 王宝山, 李长春

(河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 从更精细的尺度分析城市用水的时空演变特征及其驱动因素,对于区域水资源的合理规划具有重要意义。基于夜间灯光数据,结合用水量数据建立了城市用水空间化模型,并利用标准差椭圆、空间自相关分析、地理探测器和因子分析方法,对长三角城市群城市用水的时空演变特征及驱动因素进行研究。结果表明:2000-2018年长三角城市群城市用水空间分布由“正东-正西”方向逐渐转变为“西北-东南”方向,重心整体向东南方向偏移;长三角城市群县域尺度用水量具有显著的空间正相关性,高值集聚区主要分布在中部地区,低值集聚区则分布在边缘地区;人口、综合供水能力、建成区面积与GDP反映的城市经济发展水平是长三角城市群城市用水时空演变的主导因素,价格、产业结构与节水措施则为重要因素。应注重长三角城市群内部城市协同发展,深化水价改革,优化产业结构与城市供水系统,改善居民用水行为,促进区域水资源的合理规划与可持续发展。

关键词: 城市用水; 夜间灯光数据; 时空演变; 地理探测器; 驱动因素; 长三角城市群

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)04-0097-11

Spatial-temporal evolution characteristics and driving factors of urban water consumption in Yangtze River Delta Urban Agglomeration based on nighttime light data

FENG Xiaowei, FAN Liangxin, WANG Baoshan, LI Changchun

(School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: It is of great significance for the rational planning of regional water resources to analyze the spatial-temporal evolution characteristics and driving factors of urban water consumption on a more detailed scale. Based on nighttime light data and water consumption data, we established a spatial model of urban water consumption, and studied the spatial-temporal evolution characteristics and driving factors of urban water consumption in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration using standard deviation ellipse, spatial autocorrelation analysis, Geodetector and factor analysis methods. The results show that from 2000 to 2018, the spatial distribution of urban water consumption in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration gradually changed from the “east – west” direction to “northwest – southeast” direction, and the center of gravity shifted to the southeast as a whole. The county scale water consumption of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration showed a significant positive spatial correlation. The high-value clustered areas mainly distributed in the central region, whereas the low-value clustered areas scattered in the marginal region. The urban economic development level reflected by population, comprehensive water supply capacity, built-up area and GDP was the dominant factor in the spatial-temporal evolution of urban water consumption in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration, and price, industrial structure and water conservation measures are important factors. The Yangtze River Delta Urban Agglomeration should focus on the coordinated development of internal cities, deepen water price reform, optimize the industrial

收稿日期:2021-09-24; 修回日期:2022-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目(42171299)

作者简介:冯小威(1997-),男,河南周口人,硕士研究生,研究方向为区域可持续发展。

通讯作者:樊良新(1979-),男,安徽六安人,博士,教授,研究方向为区域可持续发展。

structure and urban water supply system, improve residents' water consumption behavior, as well as promote the rational planning and sustainable development of regional water resources.

Key words: urban water consumption; nighttime light data; spatial-temporal evolution; Geodetector; driving factor; Yangtze River Delta Urban Agglomeration

1 研究背景

水是人类赖以生存和发展最重要的物质资源之一,全世界许多地区都面临着不同程度的水资源短缺问题,预计到 2050 年将有 36 亿人面临缺水^[1]。我国是一个干旱缺水严重的国家,人均水资源占有量仅为世界平均水平的 1/4,如何实现水资源的合理利用一直是国家关注的重点。由于不同城市的经济发展水平、产业结构、人口数量及用水行为等存在差异,导致各城市的用水情况也存在较大差异,因此各城市应制定符合自身情况的用水政策。为此,分析不同城市用水的时空演变特征,并识别城市用水的主要驱动因素,对于各城市制定针对性的政策及水资源的可持续利用具有一定的指导意义。

国内外学者开展了大量有关城市水资源的研究,主要集中在需水量预测^[2]、用水驱动因素识别^[3]及水资源的时空演变分析上^[4]。在用水驱动因素识别方面,目前的研究多采用主成分分析^[5]、LMDI(logarithmic mean division index)模型^[6]、灰色关联分析^[7]与地理探测器^[8]等方法。在水资源的时空演变分析方面,由于水资源数据大多为统计数据,而市级及以下尺度的城市用水量数据获取困难,导致研究尺度多集中于省市级,这就为系统地制定用水政策带来了困难。因此,为解决上述问题,就需要获取更多的空间信息以进行城市用水的空间化研究。相比于统计数据,遥感影像具有时空一致性的特点,而夜光遥感影像能够获取到城市、小规模居民区等的灯光信息,从而更好地反映人类活动,在社会经济与资源问题的研究上更具有其独特的优势。卓莉等^[9]基于夜间灯光数据实现了中国人口密度的网格化,填补了网格尺度上人口密度估算研究的空白;王俊华等^[10]使用夜间灯光数据实现了四川省的 GDP 空间化,并结合高程分析了 GDP 的空间变化,证明了四川省经济发展受地形影响程度较大;阿孜古丽·合尼等^[11]基于夜间灯光数据实现了天山北坡城市群第二产业和第三产业 GDP 的空间化,有助于更加准确地分析该地区的经济发展趋势;赵金彩等^[12]基于夜间灯光数据构建了中原经济区 1 km 像元级的碳排放模型,并采用地理加强回归模型分析了碳排放的影响因素,为该地区的碳减排策略提供

了理论基础,这些研究均表明夜间灯光数据在实现社会经济及能源消耗数据空间化方面具有很大潜力。虽然目前使用夜间灯光数据进行水资源研究的较少,但前人的研究表明,城市用水量与人口、GDP 及产业结构等社会经济指标均有着密切的联系^[13-14],且水资源消耗与碳排放等能源消耗一样,都受到人类活动的直接影响,因此夜间灯光数据在一定程度上也能够反映出城市用水的变化情况,借此可以实现城市用水的空间化,以达到从更精细的角度去揭示研究对象的时空演变特征的目的。

长三角城市群地处“一带一路”与长江经济带的重要交汇地带,经济发展水平在全国位居前列,但城市群内部发展不平衡及人口聚集度过高带来的资源压力也同样明显。因此,本文基于夜间灯光数据,结合城市用水量数据构建了城市用水量估算模型,实现了长三角城市群城市用水信息的空间化,并结合标准差椭圆、空间自相关分析、地理探测器和因子分析等方法,分析了其城市用水的时空演变特征及驱动因素,以期对长三角城市群水资源的合理规划提供参考。

2 研究区域概况与数据来源

2.1 研究区概况

长三角城市群地理位置介于 28°01'N ~ 34°28'N、115°46'E ~ 123°25'E 之间,包括上海、南京、杭州、合肥等共 26 个地级、直辖市,研究区域概况如图 1 所示。

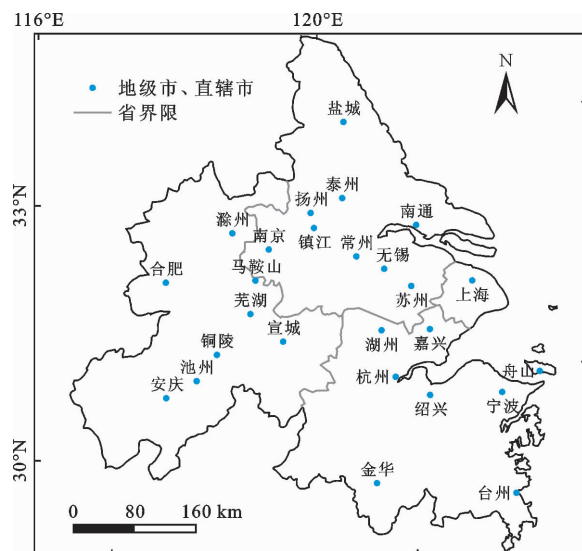


图 1 研究区域概况

长三角城市群主要为亚热带季风气候,降水充沛,水资源丰富,当地多年平均水资源量为 $537.79 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。作为长江经济带的引领者,长三角城市群的经济发展水平较高,但严重的环境污染破坏了当地的水资源环境,使其出现了水质型缺水的问题,导致水资源供需矛盾日益加大。因此,选取长三角城市群作为研究区域,进行城市用水时空演变特征的

研究,能为该区域水资源的合理规划提供参考,具有一定的现实意义及科学价值。

2.2 数据来源

本文选取的数据主要有:DMSP/OLS 夜间灯光影像、NPP/VIIRS 夜间灯光影像、长三角城市群城市用水量及驱动因子数据。表 1 为各种数据的来源及说明。

表 1 数据来源及说明

数据名称	数据来源	时间跨度	备注
DMSP/OLS 夜间灯光影像	美国国家地球物理数据中心 (https://ngdc.noaa.gov/eog/download.html)	2000 - 2013 年	空间分辨率约为 1 km, 原始影像 DN 值范围为 0 ~ 63, 且已去除火光等偶然灯光的影响
NPP/VIIRS 夜间灯光影像	美国国家海洋和大气管理局 (https://eogdata.mines.edu/download_dnb_composites.html)	2014 - 2018 年	空间分辨率约为 450 m, 像元的“饱和问题”得到了解决, 但未去除偶然灯光的影响
统计数据	中国城市建设统计年鉴、中国水网 (https://data.cnki.net/yearbook 、 https://www.h2o-china.com/)	2000 - 2018 年	城市用水量及驱动因子数据
气象数据	温室数据共享平台 (http://data.sheshiyuanyi.com)	2000 - 2018 年	降水及温度数据

本文在驱动因子的选取上,考虑到数据获取的可行性,并结合相关研究^[15-17],从社会经济因素、气候因素、供水与节水因素 3 个方面选取了 12 个城市用水驱动因子,如表 2 所示,所有驱动因子按照 K - means 聚类算法分成 5 类。

表 2 城市用水驱动因子

一级指标	二级指标/单位	指标代码
社会经济因素	人口 / 10^4	POP
	GDP/ 10^4 元	GDP
	第二产业比重 /%	SIR
	第三产业比重 /%	TIR
	建成区面积/ km^2	BA
	水价/元	WP
	受高等教育比例/%	EDU
气候因素	年降水量/mm	PRE
	日最高气温大于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 天数/d	TEM
供水与节水因素	综合供水能力 / $10^4 (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	WSC
	用水重复率/%	WUR
	节水投资/ 10^4 元	IWC

3 研究方法

3.1 夜间灯光影像校正

首先将夜间灯光影像重投影为兰伯特等面积投影,以避免影像网格形变带来的影响,并将 DMSP/OLS 及 NPP/VIIRS 影像的空间分辨率分别重采样为 1.0 和 0.5 km,然后采用曹子阳等^[18]的方法对 DMSP/OLS 影像进行饱和及连续性校正,采用屈辰阳等^[19]的方法对 NPP/VIIRS 影像进行负值与极高值消除、不稳定光源与背景噪声消除的校正。

3.2 城市用水量估算模型构建

3.2.1 用水量与夜间灯光指数回归分析 前人的研究表明,夜间灯光总强度值与 GDP、人口均存在着很好的相关关系^[20-21],而 GDP 与人口又是影响城市用水量的重要因素,且两种影像的灯光总强度值与城市用水量的皮尔逊相关系数分别为 0.800 和 0.957,具有显著的相关性,因此,本研究选用夜间灯光总强度值进行城市用水量的空间化建模。以研究区内各城市灯光总强度值为自变量,对应的各城市用水量数据为因变量,进行回归分析,并参考黄益修^[22]的方法对

常数项进行处理,得到用水量与灯光总强度值的最优回归模型如公式(1)、(2)所示,模型均在 0.01 水平上显著相关, R^2 分别为 0.640 和 0.946。

$$UWC = 0.3436TNL - 20940.33/n \quad (1)$$

$$UWC = 0.7848TNL + 3.74 \times 10^{-6} \times TNL^2 + 88.9987/n \quad (2)$$

式中: UWC 为研究区各城市用水量的模拟值, 10^4 m^3 ; TNL 为相应的夜间灯光总强度值; n 为研究单元包含的网格总数。

3.2.2 线性纠正 上述公式是基于地级市行政单元尺度的统计数据建立的,平均分配到每个网格时,得到的结果误差很大,因此需要对网格尺度上模拟的结果进行线性纠正。在保持各城市用水量不变的前提下,采用公式(3)对模拟的用水量值进行逐像元纠正,即可得到每个像元尺度上的城市用水量值。

$$UWC^* = UWC_i \cdot (UWC_i/UWC) \quad (3)$$

式中: UWC^* 为纠正后的用水量值, 10^4 m^3 ; UWC_i 为每个像元模拟的用水量值, 10^4 m^3 ; UWC_i 为各城市用水量的统计值, 10^4 m^3 。

3.3 标准差椭圆

标准差椭圆常被用来分析研究对象的点要素在区域空间内的分布特性。其中,椭圆的长轴和短轴由 X 方向和 Y 方向的标准差表示,能够反映点要素在对应方向分布的离散情况;椭圆的面积可以表示点要素的集中程度;椭圆的方位角可以表示点要素的主趋势方向;椭圆的中心为空间分布的平均中心,可以用来描述研究对象的重心变化。

3.4 空间自相关分析

Moran's I 指数分为全局 Moran's I 指数与局部 Moran's I 指数(LISA 指数),可以用来进行空间自相关分析。全局 Moran's I 指数值的范围为 $[-1, 1]$, 值为 0 时表示空间呈随机性,值为正数时表示空间呈正相关性,值为负数时表示空间呈负相关性,且值越接近于 1 和 -1,其空间聚集度和差异度越大,能够用来描述整体空间关系。而局部空间自相关则通过将区域分为不同等级的集聚区来表示空间的变异状况。

3.5 地理探测器及因子分析

地理探测器能有效探测空间分异性并揭示其驱动力^[23],本文使用地理探测器中的因子探测及交互探测模块来分析长三角城市群城市用水时空演变过程中各影响因子解释力的大小及交互作用。因子探测是探测某因子能在多大程度上解释因变量的空间分异,用 q 值表示, q 的值域为 $[0, 1]$, 值越大表示影响因子的解释力越强;交互探测用于分析不同影响

因子共同作用时,对因变量的解释作用是否会增加或减弱。 q 值的计算公式如下:

$$q = 1 - \sum_{h=1}^L (N_h \sigma_h^2 / N \sigma^2) \quad (4)$$

式中: $h = 1, 2, \dots$; L 为因子类别数; N_h 和 N 分别为第 h 类样本和样本总数; σ^2 为城市用水量的方差。

因子分析能从诸多变量中提取出公因子,可以在保留原始变量大部分信息的前提下,将多个相关的变量归纳为几个不相关的综合指标,揭示原始变量间的内在关系,从而实现主控因素的识别^[24]。本文在进行因子分析时,选取主成分方法来提取公因子。

4 结果与分析

4.1 城市用水量模拟值精度检验

为检验模型可用性,将纠正后的研究区域 2000 - 2018 年年用水量的模拟值与实际统计值进行比较,并计算各城市用水量估算的平均相对误差(mean relative error, MRE),结果如图 2 和表 3 所示。由图 2 可以看出,夜间灯光影像模拟用水量的相对误差绝对值均小于 5%,平均相对误差为 -2.64%;由表 3 可以看出,各城市 2000 - 2018 年的用水量估算平均相对误差均在 10% 以内。可见,基于夜间灯光数据模拟城市用水量的精度良好,可以用来进行城市用水量的研究。

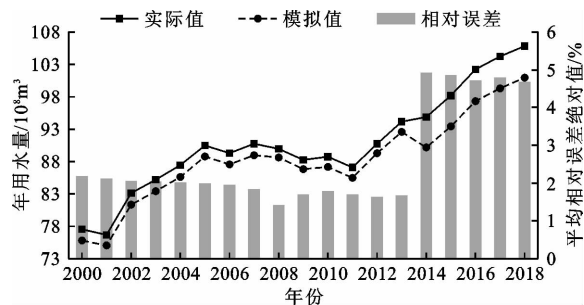


图2 2000 - 2018 年长三角城市群年用水量模拟值与实际值比较

4.2 长三角城市群城市用水时空动态分析

2000 - 2018 年间,长三角城市群年用水量整体呈现增长的趋势,由 2000 年的 $77.57 \times 10^8 \text{ t}$ 增长至 2018 年的 $105.87 \times 10^8 \text{ t}$, 年均增长率为 1.78%。根据上述用水量估算模型,并经逐像元纠正后可实现长三角城市群用水量的空间化,其时空分布如图 3 所示。由图 3 可以看出,长三角城市群各城市的年用水量变化差异明显。进一步使用标准差椭圆方法探讨长三角城市群的空间演变特征,标准差椭圆及其参数见图 4 和表 4。

表 3 2000 - 2018 年长三角城市群各市年用水量模拟值平均相对误差

城市	平均相对 误差/%	城市	平均相对 误差/%	城市	平均相对 误差/%	城市	平均相对 误差/%
上海	-1.60	扬州	-2.17	嘉兴	-4.03	铜陵	-4.00
南京	-2.45	镇江	-4.56	金华	-3.66	池州	-6.50
无锡	-2.76	泰州	-2.41	舟山	-7.31	安庆	-4.93
常州	-2.99	杭州	-2.58	台州	-3.73	宣城	-5.94
苏州	-2.16	宁波	-3.25	合肥	-2.86	滁州	-4.95
南通	-3.81	绍兴	-4.94	芜湖	-4.43		
盐城	-4.76	湖州	-3.54	马鞍山	-4.50		

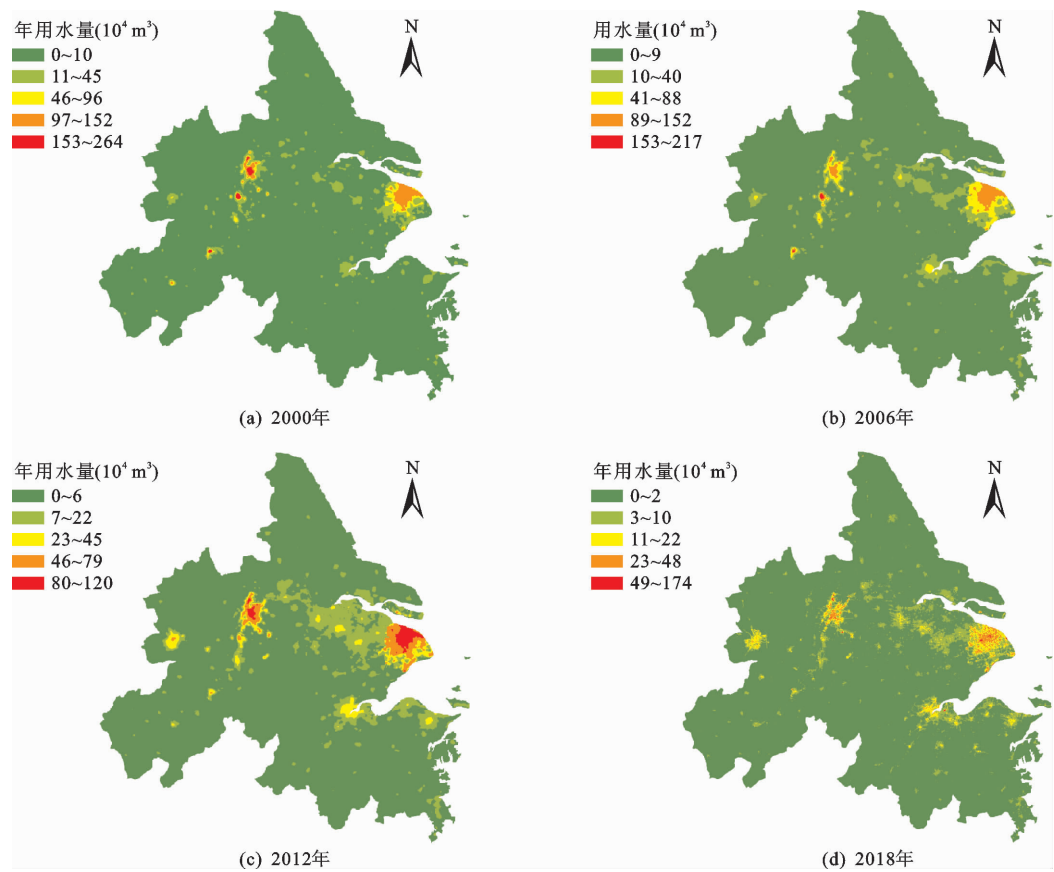


图 3 2000 - 2018 年长三角城市群年用水量时空分布

表 4 长三角城市群城市用水标准差椭圆参数

年份	长轴长度/km	短轴长度/km	椭圆周长/km	椭圆面积/10 ⁴ km ²	椭圆方向/(°)	重心坐标
2000	197.96	107.42	980.54	6.68	93.75	(120.08°E,31.33°N)
2002	188.31	107.30	946.20	6.35	96.19	(120.17°E,31.29°N)
2004	188.83	109.51	953.86	6.50	95.44	(120.21°E,31.25°N)
2006	185.43	109.60	942.23	6.38	101.14	(120.26°E,31.24°N)
2008	183.70	103.56	920.08	5.98	98.95	(120.29°E,31.24°N)
2010	181.47	105.28	916.79	6.00	101.18	(120.34°E,31.25°N)
2012	181.94	106.47	921.63	6.09	103.22	(120.31°E,31.27°N)
2014	184.78	106.19	930.84	6.16	104.17	(120.33°E,31.23°N)
2016	187.58	109.38	949.16	6.45	105.34	(120.30°E,31.23°N)
2018	188.54	112.86	961.85	6.68	106.34	(120.25°E,31.20°N)

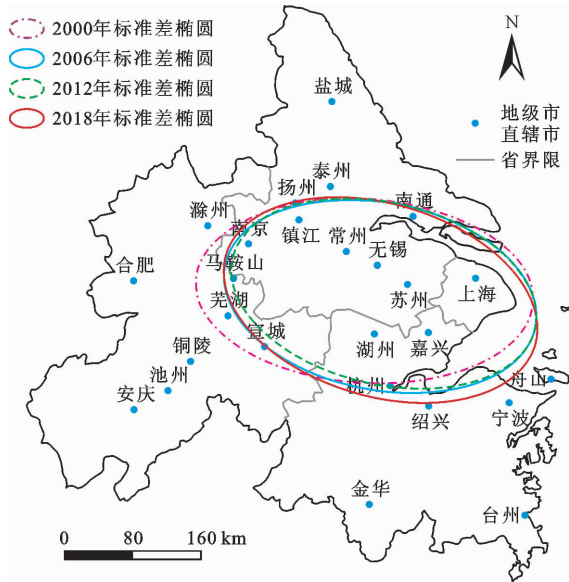


图4 2000—2018年长三角城市群城市用水量标准差椭圆

由图4和表4可以看出,2000—2018年长三角城市群用水的标准差椭圆在空间上逐渐向东南方向偏移。对其方位角分析可知,2000—2006年方位角由 93.75° 增大到 101.14° ,2008年有所减小,但随之持续增大到2018年的 106.34° ,2000—2018年方位角累计增加了 12.59° ,变化幅度较大,表明长三角城市群的用水空间分布格局由接近“正东—正西”方向逐渐转变为“西北—东南”方向。而对各个时期的标准差椭圆长、短轴长度分析可知,2000—2018年长、短轴长度变化呈现出相反的趋势,长轴减短而短轴增长,椭圆的扁率减小,表明长三角城市群各方向的区域用水量差异逐渐缩小。椭圆面积整体呈现先减小后增大的趋势,表明用水空间分布经历了分散到聚集,再逐渐分散的过程。

为进一步分析长三角城市群的用水重心变化,根据表4中的重心坐标参数,制作重心偏移图,结果如图5所示。

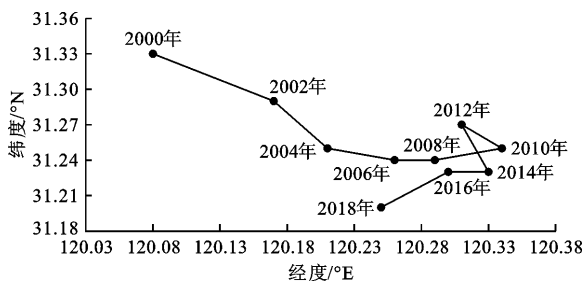


图5 2000—2018年长三角城市群城市用水重心偏移图

由图5可以看出,2000年长三角城市群的用水重心位于无锡市,2000年以后转移到苏州市,并呈

现出向东南方向移动的趋势。分时段来看,2000—2004年用水重心以 3.70 km/a 的速度向东南方向快速移动;2004—2010年移速有所减小,以 2.17 km/a 的速度向东移动,而南北方向变动不大;2010—2016年,用水重心变化较为复杂,在多个方向上均有移动,2016年重心移动速度再度加快,以 2.55 km/a 的速度向西南方向偏移。总体来看,虽然长三角城市群用水重心在2008年之后出现了一些波动,但其位置始终位于研究区的中东部,且整体向东南方向偏移,说明沿海城市发展较内陆城市更为迅速,用水需求量更大。

4.3 长三角城市群县域尺度用水空间分异特征

本文研究区域共包括26个市,市级样本量较少,在市级尺度上分析其用水分布的空间自相关性存在困难,因此根据用水量模拟结果及研究区的区县级行政边界,计算各区县的用水量,从县域尺度分析长三角城市群的用水量时空演变特征。结果显示,长三角城市群县域尺度的全局Moran's I 指数介于 $0.339\sim 0.462$ 之间,均通过了0.05的显著性检验,表明研究区的用水量一直存在空间正相关性,具有明显的空间集聚性。

图6为长三角城市群全局Moran's I 指数与用水量的变化情况。由图6可以看出,全局Moran's I 指数与用水量变化趋势可分为3个阶段:2000—2006年全局Moran's I 指数与用水量皆快速增长;2006—2012年用水量与全局Moran's I 指数的变化情况均呈现出波动较大但整体增长的趋势;2012—2018年用水量持续增长,而全局Moran's I 指数则逐渐减小。

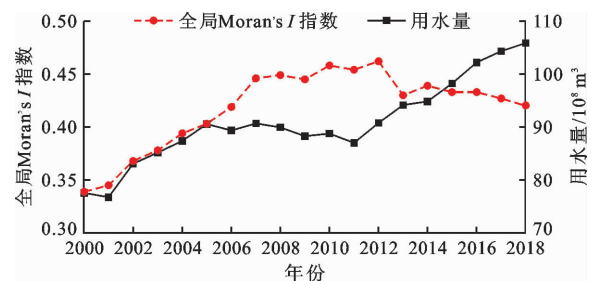


图6 长三角城市群全局Moran's I 指数与用水量变化趋势

进一步使用LISA指数对2000、2006、2012及2018年研究区县域尺度用水量进行局部空间自相关分析,结果如图7所示。由图7可以看出,2000—2012年高高集聚区数量稳定在9个,主要分布在上海、南京主城区及其周边区县,这些地区经济水平较高,发展速度较快,用水需求量也相对较大,且上海和南京作为长三角城市群的核心城市,与周边地区

的联系紧密,呈现出了较强的空间聚集性;低低集聚区主要分布在盐城、滁州、安庆、池州、宣城、金华等位于长三角城市群边缘位置的城市,这些城市相对于长三角城市群中心部分城市发展步伐较慢,用水需求量也相对较低。2018 年高高集聚区减少为 7 个,且均位于上海市周边,低低集聚区也由 2012 年的 25 个减少为 18 个,表明该阶段的空间正相关性强度有所下降。2000 - 2018 年高低集聚区仅有盐城市响水县,低高集聚区则主要分布在滁州市的来

安县、苏州市的太仓市及昆山市、镇江市的句容市,高低集聚区与低高集聚区整体变化不大。总体来看,研究区用水的高高集聚区主要分布在长三角城市群的中部地区,而低低集聚区则主要分布在长三角城市群的边缘地区。

4.4 长三角城市群城市用水驱动因子分析

4.4.1 基于地理探测器的因子探测分析 使用因子探测器对城市用水驱动因子进行分析,结果如表 5 所示。

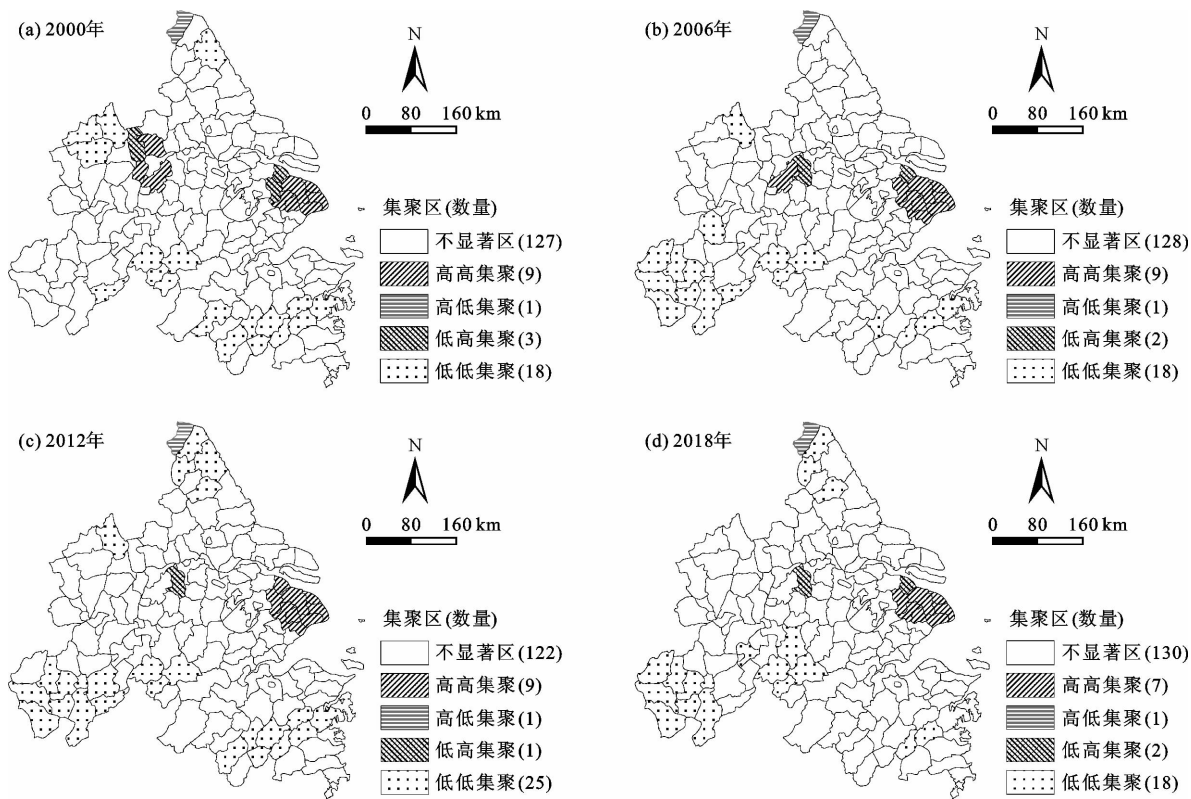


图 7 2000、2006、2012 及 2018 年长三角城市群县域 LISA 图

表 5 长三角城市群城市用水时空演变驱动因子探测结果

因子指标	人口 (POP)	GDP	第二产 业比重 (SIR)	第三产 业比重 (TIR)	建成区 面积 (BA)	水价 (WP)	受高等 教育比例 (EDU)	年降 水量 (PRE)	日最高气温 大于 25℃ 天数 (TEM)	综合供 水能力 (WSC)	用水 重复率 (WUR)	节水 投资 (IWC)
<i>q</i> 统计量	0.933	0.538	0.057	0.272	0.727	0.300	0.065	0.008	0.009	0.920	0.065	0.210
<i>P</i> 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.578	0.520	0.000	0.000	0.000

由表 5 可以看出,除年降水量及日最高气温大于 25℃ 天数外,其余 10 个因子均对长三角城市群的城市用水空间分布格局产生影响,说明研究区城市用水的时空演变主要受社会经济与供水节水等因素的共同影响。按照 *q* 值大小进行排序为人口 > 综合供水能力 > 建成区面积 > GDP > 水价 > 第三产业比重 >

节水投资 > 用水重复率 = 受高等教育比例 > 第二产业比重,其中,人口与综合供水能力的 *q* 值分别为 0.933 与 0.920,解释力均在 90% 以上;建成区面积与 GDP 的 *q* 值分别为 0.727 与 0.538,解释力均在 50% 以上;水价、第三产业比重和节水投资的 *q* 值分别为 0.300、0.272 和 0.210,解释力均在 20% 以上;用水重

复率、受高等教育比例和第二产业比重的 q 值分别为 0.065、0.065 和 0.057,解释力均小于 10%。由此可知,人口、综合供水能力、建成区面积、GDP 是长三角城市群城市用水空间分布格局的主要影响因子。

4.4.2 基于地理探测器的交互探测分析 进一步使用交互探测器对城市用水驱动因子进行分析,结果如表 6 所示。从表 6 可以看出,单个因子的解释力均小于因子间交互作用后的解释力,因子之间的交互作用均为非线性增强及双因子增强。对结果分

析可知,人口和综合供水能力与其他影响因子交互作用的解释力均在 90% 以上,其中人口和综合供水能力、建成区面积和综合供水能力的 q 值最大,解释力达到了 97.7% 和 97.9%。其次,建成区面积与受高等教育比例、第二产业比重及 GDP 与水价的交互增强效果较为明显,其 q 值分别为 0.928、0.806 和 0.855,解释力均在 80% 以上。整体来看,社会经济因素中代表城市发展水平的人口、综合供水能力、建成区面积和 GDP 因子与其他因子的交互作用最强。

表 6 长三角城市群城市用水时空演变驱动因子的交互探测结果

驱动因子	人口 (POP)	GDP	第二产业比重 (SIR)	第三产业比重 (TIR)	建成区面积 (BA)	水价 (WP)	受高等教育比例 (EDU)	年降水量 (PRE)	日最高气温大于 25 ℃ 天数 (TEM)	综合供水能力 (WSC)	用水重复率 (WUR)	节水投资 (IWC)
POP	0.933											
GDP	0.944	0.538										
SIR	0.937	0.646	0.057									
TIR	0.940	0.657	0.336	0.272								
BA	0.959	0.730	0.806	0.808	0.727							
WP	0.950	0.855	0.547	0.737	0.939	0.300						
EDU	0.956	0.733	0.129	0.334	0.928	0.473	0.065					
PRE	0.936	0.669	0.137	0.455	0.775	0.344	0.104	0.008				
TEM	0.940	0.581	0.112	0.384	0.773	0.389	0.092	0.030	0.009			
WSC	0.977	0.975	0.970	0.969	0.979	0.969	0.973	0.943	0.937	0.920		
WUR	0.944	0.631	0.145	0.415	0.792	0.423	0.134	0.091	0.104	0.966	0.065	
IWC	0.936	0.642	0.321	0.465	0.829	0.580	0.331	0.291	0.251	0.933	0.458	0.210

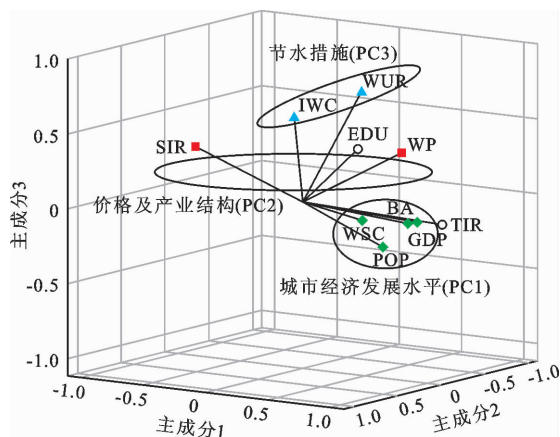
注:表中下划线数据为双因子增强,其余为非线性增强。

4.4.3 长三角城市群城市用水因子分析 由地理探测器结果可知,年降水量与日最高气温大于 25 ℃ 天数没有通过显著性检验,为进一步揭示影响因子间的内在关系,选取其余 10 个影响因素进行因子分析。本研究中,KMO(Kaiser - Meyer - Olkin)统计量为 0.703,Bartlett 球形检定显著性 $p = 0.000$,说明选取的 10 个影响因素间的相关关系较强,在此基础上可以进行因子分析,因子分析的结果如表 7 所示。由表 7 可知,前 3 种主成分累计贡献率为 74.06%,能够较好地代表原变量。

表 7 主成分特征值及累计贡献率

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	4.412	44.12	44.12
2	1.691	16.91	61.03
3	1.303	13.04	74.06

图 8 为长三角城市群城市用水的因子载荷图,结合图 8 和表 7 可以看出,主成分 1(PC1)的方差贡献率为 44.12%,其中建成区面积、GDP、人口和综合供水能力占据较高权重,因此 PC1 可视为城市经济发展水平因素;主成分 2(PC2)的方差贡献率为 16.91%,主要反映水价与第二产业比重,水价提高会抑制用水需求,而产业结构的调整可以显著地节约工业水资源^[25],因此 PC2 可视为价格及产业结构因素;主成分 3(PC3)的方差贡献率为 13.04%,主要代表用水重复率与节水投资,用水重复率是节水行为的体现,而通过教育宣传等鼓励居民改善用水行为也是节水投资中重要的一环^[15],因此 PC3 可视为节水措施因素。综上所述,城市经济发展水平是影响城市用水量的主导因素,这与地理探测器得到的结果相同,而价格、产业结构及节水措施则是影响城市用水量的重要因素。



注:POP - 人口, SIR - 第二产业比重, TIR - 第三产业比重,
BA - 建成区面积, WP - 水价, EDU - 受高等教育比例,
WSC - 综合供水能力, WUR - 用水重复率, IWC - 节水投资

图8 长三角城市群城市用水因子载荷图

5 讨论与对策

5.1 讨论

尺度是社会经济指标研究中值得关注的一个问题,传统的统计数据存在着很大的空间尺度局限性,夜间灯光数据使得更精细地从不同空间尺度评估城市经济活动水平成为可能。在社会经济的能源评估部分,夜间灯光数据主要被用来评估碳排放与电力消耗的时空动态,虽然关于城市用水的研究存在着同样的数据尺度问题,但却很少有人将夜间灯光数据用于城市用水的研究上。本研究进行了这种尝试,发现使用夜间灯光数据在分析城市用水的时空演变特征方面同样能取得较好的效果,这为城市水资源的研究提供了一个新的视角。

本研究发现,自2000年以来,长三角城市群的高用水量区域主要分布于上海及南京等核心城市周围,且整体呈现出东南高的空间分布格局。水资源作为城市发展的必备要素,保障水资源的充足是城市发展的前提。长三角城市群的东南沿海地区由于其区位优势,对外开放程度高,而核心城市的经济基础好,同时会获得很多发展资源,因此二者的经济发达,对于水资源的需求也较大。这种情况导致长三角城市群内部水资源分配出现了“顶端优势”的情况,即经济水平高的城市会获得更多水资源,且随着这些城市人口的过度密集与工业化的步伐加快,对水环境的污染也会加重,使水资源压力增大,而“边缘城市”的发展更加受限。

人口、GDP、建成区面积和综合供水能力是长三角城市群用水的主导因素,其中人口与综合供水能

力形成的用水供需关系的影响作用最为明显。中国的人口具有明显的流动性,建成区面积和GDP代表了城市的经济发展水平,而经济水平高的城市由于拥有更高的收入水平及更好的发展机会,往往会吸引大量的外来人口,从而带来更多的水资源需求。相反地,经济水平较低的城市会导致人口的流失,水资源需求也随之降低,如2018年上海市迁入人口与迁出人口的比例约为3:1,而同期铜陵市的这一比例则为1:1.29。人口的流动性为城市的发展和在水资源供应带来了挑战,劳动力的增长率大于水资源增长率时,城市的发展会受到较强的水资源约束,而当前者的增长率小于后者时,虽然城市的发展不会受到水资源约束^[26],但劳动力的流失仍然不利于城市的经济建设。因此,如何缩小区域内城市发展水平差异及实现城市用水供需平衡,是长三角城市群未来可持续发展和一体化建设应当关注的重点。

此外,价格、产业结构及节水措施对长三角城市群用水量也产生了重要的影响。对于居民生活用水来说,当水费支出在家庭年收入中占据相当的比例时,可以达到节水的目的,这表明水价体系能激励人们节约用水^[27],适当的调整水价,或采取阶梯式定价制度,可以减少人们日常生活中对水资源的浪费。而相比于居民生活用水,工业用水对水价更为敏感,胡晓霖等^[28]通过研究发现工业用水价格每上涨1%,工业用水需求量将降低3.42%。2000-2018年间,长三角城市群的第二产业比重下降了4%左右,而第三产业比重持续增加了近13%,一些高耗水的行业被快速发展的第三产业所替代,产业用水也由原来的粗放式用水逐渐过渡到技术节水的阶段,这表明水成本的增加使得高耗水产业的利润率降低,也会促进产业推广各种节水技术,从而推动产业的用水效率提升及结构调整,达到节约产业用水的目的。节水措施则包括收集家庭废水用于冲洗厕所等有意识的节水行为,及使用节水器具等无意识的节水行为,前者与居民个人的节水意识相关,需要政府、企业和学校等机构的宣传教育加以引导,对比之下无意识的节水虽然更容易实现^[29],但节水器具的高价格却导致其在一些中小城市并不普及。因此,应特别注意对于居民购买节水器具的补贴。

本研究还考虑了年降水量与气温因素对长三角城市群用水量的影响,但结果显示两者的影响作用并不显著,主要原因为除极端天气年份外,同一地区年际间气候差异并不大,降水量与气温对城市用水量的影响更多地体现在一些短期的用水行为上,如

潮湿多雨和高温天气会增加人们洗澡和洗衣的频率等。因此,在短期的用水规划中,仍要考虑气候因素的影响。

5.2 对 策

(1)优化城市供水系统,增强城市群内部协同发展。上海、南京等核心城市由于经济发达,人口聚集程度高,给供水系统带来了很大压力,对当地的发展也产生了一定约束。对于该类城市,一方面,在未来应适当控制人口的流入,如提高落户条件,增加外来人口买房的限制等;另一方面,应加大改善城市供水系统的投资,升级或更换某些陈旧的供水设备,根据城市发展情况优化供水布局范围,保障城市水资源的供给能力。而对于安庆、滁州这类中小城市来说,首先要加大政策支持力度,各中小城市在此基础上加速自身经济发展,积极实施人才落户等政策,防止自身人口流失并加大对外来人口的吸引力。同时,要充分发挥上海、南京这类大城市的增长极作用,通过大城市的功能疏解及产业辐射等,带动周边城市的发展,实现长三角城市群内部的协同发展。

(2)深化水价改革,促进节约用水。要充分发挥价格杠杆的作用,对于居民生活用水,应舍弃传统的“一口价”模式,按照不同地区的资源情况及用户承受能力,实施差别定价,并加快建立完善阶梯水价制度,通过提高浪费水的成本促进居民合理用水。对于产业用水,要注重改进水价结构,体现水资源的稀缺价值,扩大水资源费的征收范围,无论是使用公共供水还是自备供水,都要缴纳水资源费,并根据“谁污染,谁治理”的原则,结合当地水资源状况,适当提高产业用水定价中水资源费和污水处理费所占的比重,促进各产业节约用水。

(3)加快优化产业结构,提高产业用水效率。政府要在改进产业水价结构的基础上,积极从产业本身入手,首先应适当限制高耗水工业的发展步伐,针对用水频繁的行业加强用水监管,制定合理的用水定额,加大对水资源浪费严重的产业的淘汰力度,严格控制会对水环境造成污染的项目投资审批,并及时整治污染水资源的企业,综合经济效益与环境成本逐步转变现有的产业发展方向,促进循环经济,尤其是水循环经济的产业新局面的形成。其次,各产业要大力发展和推广蒸汽冷凝水回收利用等节水技术,更换先进的用水设备及安装节水装置,建立循环用水系统,改革工艺技术,并鼓励外排污水处理后回用,科学地提高产业用水效率。

(4)提高城市居民节水意识,推广普及节水器

具。缺乏对我国水资源现状的了解是多数人不注重节约水资源的重要原因,因此要借助报纸、电视等传统媒介及当下流行的各种网络媒介的力量,让人们更多地了解到我国面临的水资源危机情况,唤醒居民的节水意识。此外,各机构要加大节水的宣传力度,在社会上多开展以节水为主题的宣传活动,通过悬挂节水条幅、张贴节水标语等让节水的身影出现在城市的各个角落,将节约用水的意识深入到千家万户。同时,政府要大力支持节水器具的研发,完善节水器具的技术标准,淘汰节水效果不达标的用水器具,鼓励企业推出以旧换新的活动,增加购买节水器具的补贴,让城市居民都能用得起新型的节水器具,实现落后用水器具的更新及节水器具的普及。

6 结 论

本文基于夜间灯光数据和城市用水量数据构建了长三角城市群用水量的空间化模型,采用标准差椭圆及空间自相关分析方法分析了城市用水的时空演变特征,并利用地理探测器及因子分析方法探究了城市用水的驱动因素,主要结论如下:

(1)2000-2018 年长三角城市群城市用水空间分布由接近“正东-正西”方向转变为“西北-东南”方向,呈现出上海、南京等核心城市与东南沿海城市用水量较高的分布格局,用水重心整体向东南方向偏移。

(2)长三角城市群县域尺度用水量具有显著的空间正相关性,高值集聚区主要分布在长三角城市群的中部地区,低值集聚区则主要分布在长三角城市群的边缘地区。

(3)城市经济发展水平是影响长三角城市群用水空间分布的主要因素,其中人口与综合供水能力的影响程度最大,不同城市经济发展的差异导致了水资源分配不均衡现象的产生。因此,长三角城市群在未来的规划中,应把重点放在如何增强城市群内部协同发展及优化城市供水系统方面,以促进水资源的合理分配。此外,价格、产业结构及节水措施对长三角城市群的用水量也有着重要的影响,深化水价改革、优化产业结构、加强节水意识的宣传以及加大节水器具的普及程度是长三角城市群实现水资源可持续利用的关键。

参考文献:

- [1] CHOI G W, CHONG K Y, KIM S J, et al. SWMI: new paradigm of water resources management for SDGs [J].

- Smart Water, 2016, 1: 3.
- [2] ROUSHANGAR K, ALIZADEH F. Investigating effect of socio-economic and climatic variables in urban water consumption prediction via Gaussian process regression approach[J]. Water Supply, 2018, 18(1): 84–93.
- [3] 章恒全,杨柳,张陈俊. 长江经济带用水量演变的驱动因素与预测——基于LMDI与SD模型[J]. 工业技术经济, 2021, 40(6): 143–152.
- [4] 张乐勤,方宇媛. 基于LMDI-ESDA模型的安徽省用水变化驱动效应空间格局[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(1): 67–72.
- [5] 王晶,薛联青,张洛晨,等. 阿克苏地区水资源承载力变化及驱动力生态脆弱性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 104–109+115.
- [6] 孙才志,谢巍. 中国产业用水变化驱动效应测度及空间分异[J]. 经济地理, 2011, 31(4): 666–672.
- [7] 王永静,闫周府. 新疆玛纳斯河流域用水结构演变及其驱动力分析[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 243–250.
- [8] 高翔,王可. 基于水贫困指数地理探测器的丝绸之路经济带甘肃段水贫困时空格局及驱动分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(3): 290–297+304.
- [9] 卓莉,陈晋,史培军,等. 基于夜间灯光数据的中国人口密度模拟[J]. 地理学报, 2005, 60(2): 266–276.
- [10] 王俊华,张廷斌,易桂花,等. DMSP/OLS夜间灯光数据的四川省GDP空间化分析[J]. 测绘科学, 2019, 44(8): 50–60.
- [11] 阿孜古丽·合尼,高倩,阿里木江·卡斯木. 基于夜间灯光数据的天山北坡城市群第二、三产业GDP空间化模拟[J]. 应用科学学报, 2019, 37(1): 87–98.
- [12] 赵金彩,钟章奇,卢鹤立,等. 基于夜间灯光的城市居民直接碳排放及影响因素——以中原经济区为例[J]. 自然资源学报, 2017, 32(12): 2100–2114.
- [13] 鲍超. 基于城镇化视角的绿洲城市用水变化驱动效应分析[J]. 干旱区地理, 2012, 35(6): 988–995.
- [14] 孙艳芝,鲁春霞,谢高地,等. 北京城市发展与水资源利用关系分析[J]. 资源科学, 2015, 37(6): 1124–1132.
- [15] FAN Liangxin, GAI lingtong, TONG Yan, et al. Urban water consumption and its influencing factors in China: Evidence from 286 cities[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 166: 124–133.
- [16] 刘家宏,王建华,李海红,等. 城市生活用水指标计算模型[J]. 水利学报, 2013, 44(10): 1158–1164.
- [17] 张陈俊,赵存学,林琳,等. 长江三角洲地区用水量时空差异的驱动效应研究[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 89–103.
- [18] 曹子阳,吴志峰,匡耀求,等. DMSP/OLS夜间灯光影像中国区域的校正及应用[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(9): 1092–1102.
- [19] 屈辰阳,张莉,汪鸣泉,等. 基于NPP/VIIRS卫星夜光数据的新建高铁站所在县域的GDP估算模型[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(2): 81–87.
- [20] LI Xi, XU Huimin, CHEN Xiaoling, et al. Potential of NPP-VIIRS nighttime light imagery for modeling the regional economy of China[J]. Remote Sensing, 2013, 5(6): 3057–3081.
- [21] 江威,吕娟,左惠强,等. 利用夜光遥感的中国人口参量空间化模拟[J]. 遥感信息, 2021, 36(6): 9–17.
- [22] 黄益修. 基于夜间灯光遥感影像和社会感知数据的人口空间化研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [23] 王劲峰,徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116–134.
- [24] 宋叙言,沈江. 基于主成分分析和集对分析的生态工业园区生态绩效评价研究——以山东省生态工业园区为例[J]. 资源科学, 2015, 37(3): 546–554.
- [25] 张兵兵,沈满洪. 工业用水与工业经济增长、产业结构变化的关系[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(2): 9–14.
- [26] 赵亚莉. 长三角地区城市建设用地扩展的水资源约束[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(5): 123–128.
- [27] 李眺. 我国城市供水需求侧管理与水价体系研究[J]. 中国工业经济, 2007(2): 43–51.
- [28] 胡晓霖,唐溧,刘亚慧,等. 工业用水价格杠杆的有效性——基于联立方程模型[J]. 自然资源学报, 2020, 35(2): 413–424.
- [29] DIEU-HANG T, GRAFTON R Q, MARYINEZ-ESPI-NEIRA R, et al. Household adoption of energy and water-efficient appliances: An analysis of attitudes, labelling and complementary green behaviours in selected OECD countries[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 197: 140–150.