

# 长江经济带城市黑臭水体空间分布格局及影响因子

陈国磊<sup>1, 2</sup> 田玲玲<sup>1, 2</sup> 罗静<sup>1, 2\*</sup> 蒋亮<sup>1, 2</sup> 吴益坤<sup>1, 2†</sup>

(1. 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430079;

2. 华中师范大学城市与环境科学学院, 湖北 武汉 430079)

**【摘要】:**满足人民群众对优美生态环境的需要是建设美丽中国的核心要务,而城市黑臭水体是危害城市居民生产生活和身心健康的重要污染源。该研究以长江经济带城市黑臭水体为研究对象,综合运用 GIS 技术与地理探测器方法,识别其空间特征及分布规律,探究不同因子对黑臭水体空间格局的影响差异并提出整治建议。研究表明:(1)长江经济带城市黑臭水体空间分布呈凝聚型分布,且空间分异较为明显。核密度表现为多单核中心独立、次级中心带状及零星分布特征。(2)黑臭水体重心位置处在湖北和湖南省中部城市区域,其系统具有明显无标度区,分形特征显著,空间结构复杂性强。(3)不同类型黑臭水体均属正值空间相关性,呈“上游冷、中下游热”的冷热点区差异格局。(4)空间结构的地理探测影响因素在全域范围内贡献力不明显,分区影响因子匹配凸出。工业废水排放量、居民生活用水量、排水管道长度等是显著影响因素。建议应从严守生态规矩、建立黑臭水体治理体制机制、完善识别评定技术标准体系、创新实践整治、丰富理论研究等方面推进城市黑臭水体治理和消除。

**【关键词】:**城市黑臭水体 空间分布 地理探测 长江经济带

**【中图分类号】:**K921 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004-8227(2019)05-1003-12

长江经济带已被提升到国家区域战略发展的新高度,其发展前景对实现中国两个百年目标具有战略支撑作用<sup>[1]</sup>。长江是中华民族的母亲河,保护和修复长江经济带生态环境是当前刻不容缓的国家生态战略任务。有效保护长江经济带生态环境既是支撑长江经济带成为体现国家综合经济实力的具有全球影响力内河经济的必然需求,也是国家维护区域生态安全和提升生态文明建设水平的总要求<sup>[2]</sup>。城市黑臭水体是指在经济社会发展过程中,在城市建成区范围内,呈现令人不悦的颜色或散发令人不适气味的水体的统称。城市黑臭水体不仅破坏河湖塘等生态系统,也很大程度上危害到居民生产生活和人体健康,甚至造成地下水源和土地质量的严重污染,是目前较为突出的水环境问题和城市污染问题<sup>[3]</sup>。2015 年,国务院《水污染防治行动计划》明确提出到 2020 年,地级及以上城市建成区黑臭水体均要控制在 10% 以内,到 2030 年,城市黑臭水体要总体得到消除。2018 年 5 月,全国生态环境保护大会提出要基本消除城市黑臭水体,还百姓清水绿岸、鱼翔浅底的景象。因此,系统研究长江经济带城市黑臭水体问题具有重要的现实意义。

国内外对黑臭水体的研究较早且不断取得积极成果。从国外来看,最早对黑臭水体的研究始于 1828 年英国泰晤士河“大恶臭”现象的研究<sup>[4]</sup>。后来的研究逐步涉及对黑臭水体的宏观和微观内涵及概念的界定<sup>[5,6]</sup>、黑臭水体致黑致臭的化学或生物作用<sup>[7~9]</sup>、黑臭水体监测识别评价指标体系及方法<sup>[10~12]</sup>等方面;而国内对黑臭水体的研究最早是 1963 年关于上海黄浦江黑臭现象的持续观测记录<sup>[13]</sup>。近年来的研究主要集中在黑臭水体对周围空气中微生物的污染所导致的空气质量变化<sup>[14,15]</sup>、湖底底泥对局部黑臭水

<sup>1</sup>基金项目:国家自然科学基金项目(41871176、41801177);华中师范大学中央高校基本科研业务费(CCNU16JCZX09, CCNU18ZDPY09)

作者简介:陈国磊(1989~),男,博士研究生,主要从事区域发展与城乡规划、城市地理学等研究。E-mail:chengulei3@163.com

\*通讯作者 E-mail:luojing@mail.ccnu.edu.cn

体形成的作用<sup>[16]</sup>、黑臭水体的治理技术和实践探索等方面<sup>[17~19]</sup>。同时,从长江经济带的区域研究来看,不少学者也提出要注重长江经济带环境与经济、社会发展空间关系的研究<sup>[20~23]</sup>。而目前对长江经济带黑臭水体,特别是从地理学角度系统摸清黑臭水体的空间分布状况及其相关因素的研究有待丰富。基于此,本文综合运用 ArcGIS 技术方法及地理探测器法等探究长江经济带城市黑臭水体的空间分布格局及其规律,探测影响其空间结构形成的因素,以期为长江经济带城市黑臭水体的监测识别与治理和长江经济带总体水环境的治理保护提供参考。

## 1 研究区与数据处理

### 1.1 研究区概况

长江经济带是指根据国务院 2014 年 9 月 12 日印发的《关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》所明确的上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州等 11 省市的 130 个地级市,该区域面积约占全国的 21%,人口和经济总量超过全国的 40%。城市黑臭水体涉及长江经济带区域内的 89 个地级市单元。

### 1.2 数据来源及处理

城市黑臭水体数据来源于生态环境部与住房和城乡建设部联合创建的“全国城市黑臭水体整治信息发布”平台 (<http://www.hcstzz.com>), 黑臭水体信息主要包括水体名称、水体类别(河流、湖、塘)、行政区划、河湖长名称、所在单位名称、黑臭程度(轻度、重度)、定位等。截止 2017 年 12 月 31 日,长江经济带城市黑臭水体认定总数为 927 个。其中,按黑臭程度分为重度黑臭水体 270 个,轻度黑臭水体 657 个(黑臭程度分级是生态环境部根据透明度、溶解氧、氧化还原电位、氨氮等特征指标值测定而得);按水体类别(所在位置)分为河流类 807 个,湖类 53 个,塘类 67 个。社会经济发展数据来自于《中国城市统计年鉴 2017》及长江经济带各省市的 2017 年统计年鉴,主要包含人口密度、人均 GDP、城市污水处理率、工业废水排放量等指标数据。借鉴相关研究对面状要素的处理方法<sup>[24,25]</sup>,根据黑臭水体定位信息在百度坐标拾取系统中获取详细坐标位置,将其导入 ArcGIS10.2 软件中进行配准及坐标投影转换,建立包含黑臭水体全部信息和解释变量指标数据在内的长江经济带城市黑臭水体空间属性数据库,以可视化表达方式获得长江经济带城市黑臭水体地理分布图(图 1)。

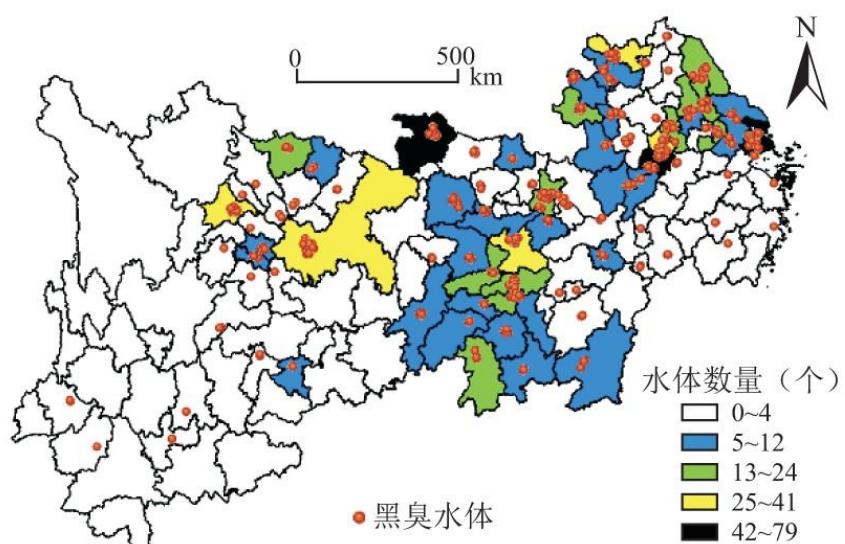


图 1 长江经济带城市黑臭水体地理分布

## 2 研究方法

### 2.1 最近邻点指数法

通常点状要素在空间上呈现出随机、凝聚和均匀 3 种分布类型。运用最近邻点指数法对长江经济带城市黑臭水体分布类型进行判别,其结果表达点状要素在地理空间中的相互邻近程度<sup>[26]</sup>。

$$R = \frac{\bar{r}_1}{\bar{r}_E} \quad (1)$$

式中:R 为最近邻指数;  $\bar{r}_1$  为平均实际最邻近距离,  $\bar{r}_E = \frac{1}{2\sqrt{D}} = \frac{1}{2\sqrt{n/A}}$  为理论最邻近距离;A 为长江经济带行政区面积;n 为点个数;D 为点密度。其中,当 R=1 时,点呈现出随机分布态势;当 R>1 时,点呈现出均匀分布态势;当 R<1 时,点呈现凝聚分布态势。

### 2.2 核密度估计法

确定研究区域内任何点集地理事件发生的概率差异通常采用核密度估计法。点集事件发生的概率高低与其密集程度有关,点密集事件发生概率高,点稀疏事件发生概率低。密度空间变化通过“波峰”和“波谷”的连续分布模式显示,由相应阈值揭示区域分布差异<sup>[27]</sup>。利用核密度估计法分析城市黑臭水体空间分布密度,其方程表达式为:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (2)$$

式中:  $\hat{f}(x)$  为城市黑臭水体核密度函数;  $x_i$  为待估计的城市黑臭水体点;  $h$  为搜索半径距离的阀值(带宽);  $n$  为阀值范围内城市黑臭水体点个数;  $d$  为城市黑臭水体点个数的维数。

### 2.3 分形网格维数

区域点状要素的空间复杂性通常由分形理论中的网格维数来反映,对研究区域进行网格化,测算区域网格中点状要素的数量,揭示点状要素多层次的空间结构。对城市黑臭水体空间进行网格化测度时,空间范围内生成的网格维数 N(X) 会随网格尺度 X 的改变而变化<sup>[28]</sup>,若城市黑臭水体分布具有无标度性,则有:

$$N(X) \propto r^{-T} \quad (3)$$

式中:T=D<sub>0</sub>为容量维。对行号为 i、列号为 j 的网格进行观察统计,假定在网格中分布的城市黑臭水体数目为  $N_{ij}$ ,全区域分布总数为 N,可近似地定义其概率为  $P_{ij}=N_{ij}/N$ ,于是有信息量公式为:

$$I(X) = - \sum_i^K \sum_j^K P_{ij}(X) \ln P_{ij}(X) \quad (4)$$

式中: $K=1/X$  为区域各边的分段数目,若城市黑臭水体点体系分形,则有:

$$I(X) = I_0 - D_1 \ln X \quad (5)$$

式中: $D_1$  为信息维;  $I_0$  为常数,反映城市黑臭水体的空间均衡复杂性。通常,网格维数  $D$  值在  $0 \sim 2$  之间, $D$  值越大表明城市黑臭水体点的空间分布越均衡,反之则越集中;当  $D=2$  时,表明城市黑臭水体点为均匀分布;当  $D$  趋近于 1 时,表明城市黑臭水体的空间分布具有均匀集中到一条地理线的趋势;当  $D_1=D_0$  时,则说明城市黑臭水体点系统在网格中等概率分布,属于简单分形。

## 2.4 空间相关分析

借助空间自相关分析测度地理空间点状要素的某一属性值与相邻点要素的值是否存在相关性<sup>[29]</sup>。选取 Moran's I 指数和 Getis-OrdG\* 探究城市黑臭水体空间关联结构模式和空间冷热点区分布差异。其中,Moran's I 指数测度空间关联模式,公式如下:

$$I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X}) / S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \quad (6)$$

式中: $X_i$ 、 $X_j$  为第  $i$ 、 $j$  区域地理单元上的城市黑臭水体个数; $W_{ij}$  为空间权重矩阵,当  $i$ 、 $j$  两地相邻时, $W_{ij}=1$ ;当  $i$ 、 $j$  两地不相邻时, $W_{ij}=0$ 。Moran's I 指数为  $(-1, 1)$ ,当 Moran's I 大于 0 时,表示城市黑臭水体分布较高或较低的区域在地理空间上显著集聚;当 Moran's I 显著为负时,表明城市黑臭水体分布具有显著空间差异;当 Moran's I 趋近于 0 时,表明城市黑臭水体分布在地理空间上不相关。

Getis-OrdG\* 测度局部空间自相关特征,对  $G_i^*(d)$  进行标准化处理后的计算公式为:

$$Z(G_i^*) = G_i^* - E(G_i^*) / \sqrt{\text{Var}(G_i^*)} \quad (7)$$

式中: $E(G_i^*)$ 、 $\text{Var}(G_i^*)$  分别为  $(G_i^*)$  的数学期望值和变异系数。若  $Z(G_i^*)$  为正且显著,表明位置  $i$  地理单元周围的城市黑臭水体个数较多且空间上呈现高值的空间集聚态势,属“热点区”;反之,若  $Z(G_i^*)$  为负且显著,则说明位置  $i$  地理单元周围的城市黑臭水体个数较少且空间上呈现低值的空间集聚态势,属“冷点区”。

## 2.5 地理探测器法

地理探测器法是由王劲峰等<sup>[30]</sup>建立,主要包括因子探测、风险探测、交互探测和生态探测几部分<sup>[31]</sup>。本文借助地理探测器法的因子探测模块进行影响因素研究,核心思想是:长江经济带城市黑臭水体是存在于特定的空间位置上,而影响其发展的所选择的影响因素在空间上具有差异性,若所选影响因素和城市黑臭水体的空间分布格局具有显著一致性,则说明该影响因素对黑臭水体的空间分布格局具有决定性意义。探测长江经济带城市黑臭水体空间结构特征影响因素的模型为:

$$P_{D_L} = 1 - \frac{1}{n\sigma_L^2} \sum_{i=1}^m n_{D_L i} \sigma_{L_{D_L i}}^2 \quad (8)$$

式中: $P_{D,L}$ 为影响因素 D 对黑臭水体空间结构的探测力值;  $m$  为次级区域城市黑臭水体的个数;  $n$  为一级区域城市黑臭水体的数量;  $n_{D,i}$  为次级区域城市黑臭水体数量;  $\sigma_{2LL2}$  为一级区域长江经济带各城市黑臭水体空间结构影响力的标准差;  $\sigma_{2D,iD,i2}$  为次级区域各城市黑臭水体空间结构影响力的标准差;  $P_{D,L} \in [0, 1]$ ;  $P_{D,L}$  的值越大, 则表明 L 因素对城市黑臭水体空间结构的影响程度越强。

对于地理探测因子的选择, 根据已有对水体影响因素相关的研究来看, 较多选择人均 GDP、人口数、总用水量、工农业生产用水量、污水处理率等数据指标<sup>[32~36]</sup>。结合长江经济带实际情况、数据可获取性和科学性综合考虑后, 遴选出人口密度( $f_1$ )、人均 GDP( $f_2$ )、第二产业占 GDP 比重( $f_3$ )、城市污水处理率( $f_4$ )、工业废水排放量( $f_5$ )、水资源总量( $f_6$ )、居民生活用水量( $f_7$ )、排水管道长度( $f_8$ )等 8 项指标作为长江经济带城市黑臭水体空间结构的影响因子, 指标的选取是参考和借鉴了前人关于水污染、水环境、水资源等研究中影响因素的选择, 特别是重点参考了长江经济带区域的研究文献。从社会、经济、生态方面出发, 社会系统类的指标主要包括人口密度、排水管道长度和居民生活用水量。人口密度反映人口压力对黑臭水体空间特征的影响情况, 排水管长度反映城市基础设施水平, 居民生活用水量反映居民生活对水资源的需求水平; 经济系统类的指标主要包括人均 GDP 和第二产业占 GDP 比重, 指标的选取反映了长江经济带城市的经济发展状况; 生态系统类的指标包括城市污水处理率、工业废水排放量和水资源总量, 指标的选择主要反映水环境的承载能力。从社会、经济、生态方面选择密切影响城市黑臭水体空间结构特征的因素, 力求系统研究各因子与黑臭水体空间分布格局之间的影响关系。

### 3 空间结构特征

#### 3.1 空间类型特征

利用 ArcGIS10.2 软件中的最近邻分析工具分别对不同类型的黑臭水体进行计算, 得到对应的最近邻指数(表 1)。可看出 6 种类型的黑臭水体最近邻指数都远小于 1, 其中, 最小值为全部水体的 0.1785、最大值是所在位置为湖的黑臭水体也只有 0.5475。所有类型黑臭水体预期平均距离均大于平均观测距离, Z 得分均为负值且通过置信度检验, 说明长江经济带城市黑臭水体属于凝聚型分布态势, 空间上表现出显著集聚特征。通过 ArcGIS 的度量地理分布工具得到黑臭水体的标准差椭圆分布方向整体偏东, 重心位置均分布在长江经济带的中部区域, 主要位于湖北和湖南两省, 位于  $113.310094^\circ \sim 114.366073^\circ E$  和  $29.389971^\circ \sim 31.160245^\circ N$  之间, 东西跨度  $1^\circ$  左右, 南北跨度约  $2^\circ$ 。即全部水体、重度水体、轻度水体、所在河流水体、所在湖水体、所在塘水体的重心位置位分别位于孝感市祝站镇、荆门市宋河镇、武汉市大潭原种场、孝感市丰山镇、咸宁市石城镇、岳阳市横铺乡。长江中下游地区经济和人口密度相较于上游偏高, 长江经济带全域的经济和人口重心也属于中偏下位置, 黑臭水体重心的分布一定程度上与经济和人口的分布有关。

表 1 长江经济带城市黑臭水体最近邻指数

类别名称	R	$r1^-$ (km)	$rE^-$ (km)	Z 值
全部	0.1785	4.2851	24.0127	-47.85
重度	0.1909	7.4279	38.9100	-25.43
轻度	0.2296	6.5486	28.5204	-37.77
位于河流	0.2139	5.5063	25.7336	-42.71
位于湖	0.5475	35.5761	65.5469	-6.36
位于塘	0.3951	27.4673	69.5054	-9.47

#### 3.2 空间密度特征

总体特征。对长江经济带全部 927 个和不同等级及类型城市黑臭水体进行核密度分析, 分别生成黑臭水体的核密度分布图(图

2)。不难看出,长江经济带城市黑臭水体空间格局呈两个单核中心独立,次级中心带状及零星分布特征。其中,长江中部单核中心位于湖北省十堰市,长江下游单核中心位于江苏省南京市、安徽省马鞍山市和芜湖市,分布密度在 55.63~99.89 个/万 km<sup>2</sup>;次级中心在上海市、苏州市、常州市、镇江市和长沙市、岳阳市等区域以带状特征分布,在徐州市、阜阳市、成都市、广元市、宜昌市、怀化市等呈现零星分布特征,密度值从 4.31 个/万 km<sup>2</sup> 到 55.62 个/万 km<sup>2</sup> 不等。而云南、贵州、江西、浙江等是核密度值为 4.3/万 km<sup>2</sup> 以下的最低值区域。

不同类型格局特征。不同类型黑臭水体具有不同的核密度分布特征。按黑臭等级来看,重度黑臭水体形成的极核中心最多,为 4 个,主要位于马鞍山市、宿州市、成都市和益阳市,核密度为 14.53~26.27 个/万 km<sup>2</sup>,而其较低密度值的黑臭水体所呈现的特征为显著的零星分布。轻度黑臭水体的空间分布格局与全部黑臭水体的格局较为吻合,只是在核密度数值上有所不同;按黑臭水体所在的位置来看,位于河流的黑臭水体核密度高值区主要分布在汉江上游湖北段、长江下游安徽段、京杭运河扬州段、湘江城陵矶段和嘉陵江等河流水系。位于湖的黑臭水体核密度高值区主要分布于湘江、长江岳阳段、升金江、长江池州段,梁子湖、长江鄂州段、信江、沱江等是其较低值核密度区。位于塘的黑臭水体呈以岳阳市为单核中心向四周点缀分散的核密度分布特征。总的来说,不同类型黑臭水体核密度主要分布在长江经济带中下游,河流、湖泊等是其主要集聚区域。

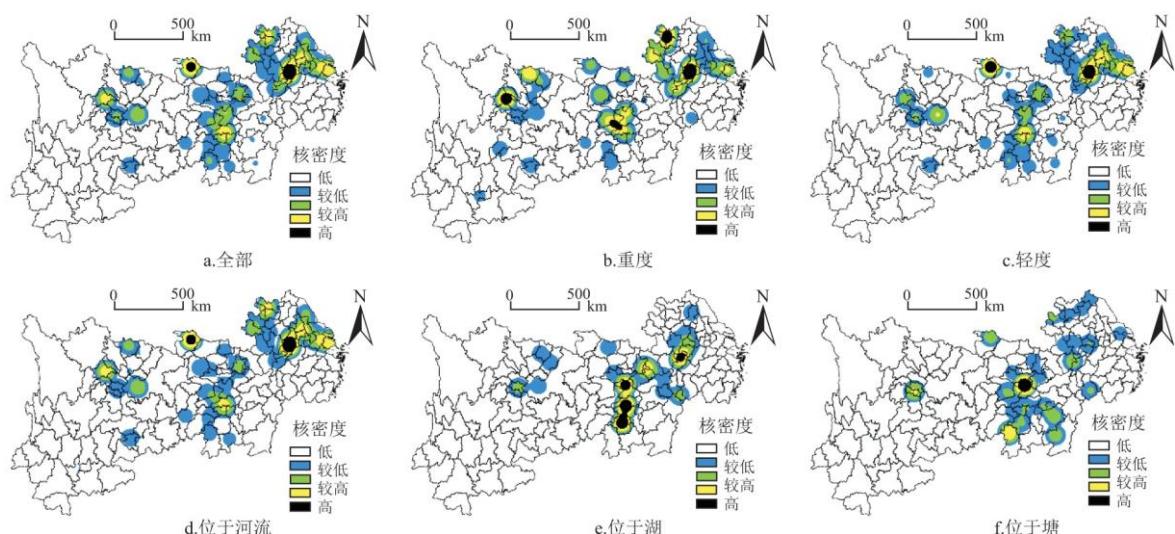


图 2 长江经济带城市黑臭水体空间分布核密度

### 3.3 空间复杂性

结合分形网格维数公式,首先,将不同类型黑臭水体固定放置于长江经济带矢量底图的矩形区域,矩形区域各边被分为  $K$  ( $2 \leq K \leq 10$ ) 等份,整个矩形区域则有  $K^2$  个网格。其次,分别统计出不同类型黑臭水体所占网格数  $N(X)$  和每个网格内黑臭水体的数量  $N_{ij}$ 。最后,计算出相应的概率  $P_{ij}$  值和信息量值  $I(X)$ ,并将测算的  $(N(X), K)$  和  $(I(X), K)$  绘制成双对数散点图(图 3),通过拟合回归分析得到不同类型黑臭水体空间分布的信息维  $D_i$  和容量维  $D_0$  及对应方程。分析发现,不同类型黑臭水体空间分布均具有宽大的无标度区间且范围变化不大,判定系数区间在 0.9555~0.9958,其空间结构分形特征显著。从容量维来看,位于湖和位于塘的黑臭水体属于高度集中分布于某条地理带上。进一步研究发现,位于湖的黑臭水体围绕在“湘江-长江-鄱阳湖-赣江”所形成“几”的字形地理带展开,位于塘的黑臭水体围绕在“连云港-淮北”的“一”字形地理带尤为明显,而其他类型的黑臭水体相对来说集中分布趋势较弱。从信息维来看,不同类型黑臭水体的数值为 0.5918~0.7576,与其分别对应的容量维数值之间差距较大,且均为信息维小于容量维,表明黑臭水体的空间分布概率不等,空间结构复杂,在自组织演化过程中呈局部围绕中心集聚的分形现象。

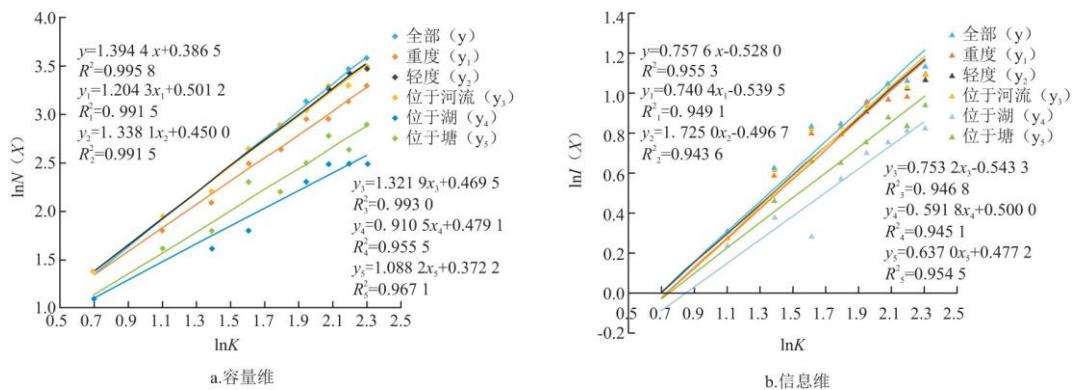


图 3 长江经济带城市黑臭水体网格维数双对数散点图

### 3.4 空间关联性

通过空间自相关分析方法, 分别计算不同类型黑臭水体空间分布的 Moran's I 指数(表 2), 探究其全局空间关联特征。由表 2 可知, 所有类型的黑臭水体 Moran's I 指数均为正值, 变化区间为 [0.1038, 0.3989], 除位于塘的黑臭水体显著性检验不显著, 其余类型黑臭水体都通过 5% 的显著性检验, 其空间格局上呈正空间相关集聚特征。从轻重度来看, 轻度和重度的 Moran's I 指数值分别为 0.1282、0.1224, 表明两者的空间集聚程度相当。从所在位置来看, 位于河流、湖、塘黑臭水体的 Moran's I 指数值呈现从 0.1038、0.1953、0.3989 逐渐增大趋势, 空间上呈正空间相关集聚增强状态。

表 2 长江经济带城市黑臭水体全局 Moran's I 指数

类型	全部	重度	轻度	位于河流	位于湖	位于塘
Moran's I 指数	0.1187	0.1224	0.1282	0.1038	0.1953	0.3989
E(G*)	-0.0076	-0.0076	-0.0076	-0.0076	-0.0076	-0.0076
Z(G*)	2.3708	2.3862	2.6503	2.1054	3.9806	1.0978
Sd.	0.0029	0.0030	0.0026	0.0028	0.0026	0.0018
P(G*)	0.0177	0.0170	0.0080	0.0353	0.0000	0.2722

借助 ArcGIS10.2 软件生成长江经济带城市黑臭水体空间分布热点图(图 4)。结合图 4 发现, 所有类型黑臭水体的冷热点区空间分布呈冷点区主要分布在长江经济带上游城市、热点区大多分布在长江经济带中下游城市、次冷点区和次热点区交错分布的特征。从全部黑臭水体来看, 其热点区主要分布在江苏、安徽、浙江等省域主要城市, 占区域总城市数量的 23.08%。次热点区占比为 32.31%, 主要发生地为湖南、湖北。冷点区主要分布在云南、贵州, 而中下游的抚州市、鹰潭市、丽水市、温州市为仅有的冷点区, 占比为 20.77%。次冷点区在上中下游区域均有分布, 占比为 23.85%; 从分等级的轻重度黑臭水体来看, 重度水体的热点区主要集中在安徽的主要城市, 而四川的广元市和阿坝藏族羌族自治州仅有的热点凸起区域, 涉及城市数量仅占 12.31%, 次冷点区占比最多, 为 33.08%。轻度水体热点区以江苏、上海为主, 中游的衡阳市、随州市等是热点凸起区, 占 21.54%; 从黑臭水体所在位置看, 不同位置水体的冷热点区差异明显, 除位于河流的水体热点区集中分布在长江经济带下游外, 位于湖和塘的水体热点区集中分布在中游, 且涉及城市逐渐减少, 城市数量占比分别为 20.77%、16.92%、9.23%。冷点区也由长江经济带南部向北部和上下游两头扩散展开, 城市数量占比分别为 23.08%、50.77%、40%。总的来看, 不同类型黑臭水体冷热点区呈现“上游冷、中下游热”的显著地域分异特征。

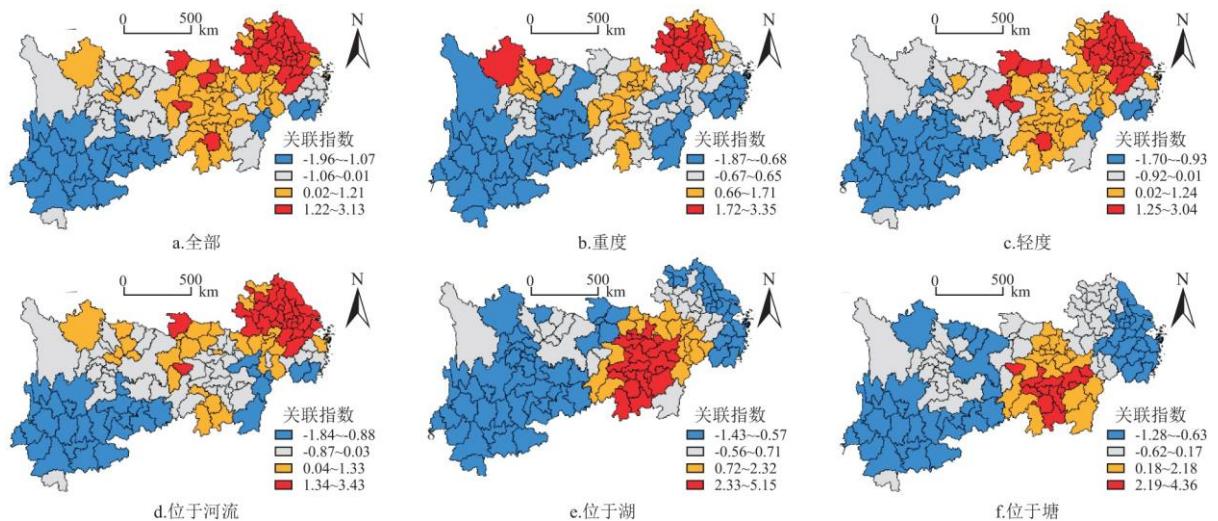
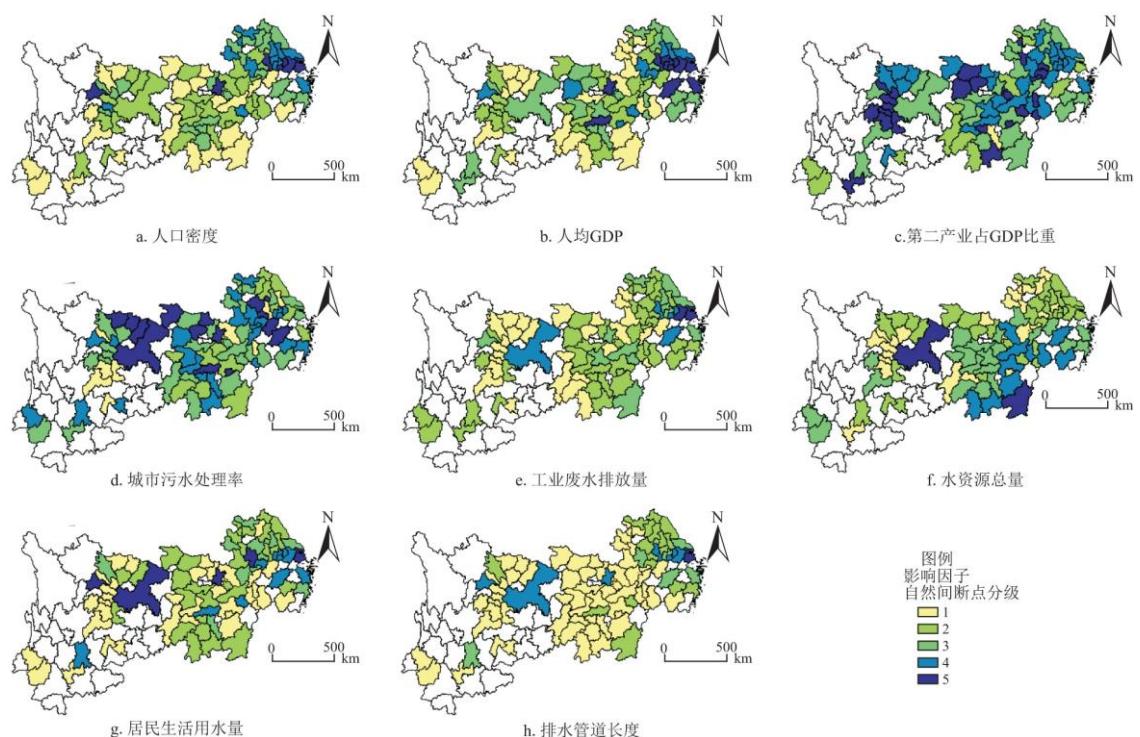


图 4 长江经济带城市黑臭水体空间分布热点图

#### 4 影响因素分析

一般运用地理探测器法进行因子空间分区时通过分类算法实现,根据已有学者的研究<sup>[31,37]</sup>,结合本文所选因子的特点和ArcGIS 软件不断尝试,将长江经济带城市黑臭水体影响因子自然间断点分级分为 5 级,其中等级从低到高为低、较低、中等、较高、高,以此为探测阀值进行影响力分析,并得到因子分级的空格分布格局图(图 5)。

通过地理探测器方法测算出长江经济带城市黑臭水体空间结构影响因子的影响力值。其中,影响力  $q$  值越大,表示该因子对空间特征影响程度越高,  $q$  值越小表示该因子对空间特征影响程度越低;因子解释力  $p$  值越大表示该因子影响空间特征的解释力越小,  $p$  值越小表示该因子影响空间特征的解释力越大。



---

图 5 长江经济带城市黑臭水体地理探测因子类别化空间分布

长江经济带城市黑臭水体空间结构的影响因子贡献力呈现空间差异性。各探测因子对长江经济带上游范围的城市黑臭水体的影响能力均较强。其中,起到核心作用影响的因子从高到低依次为居民生活用水量(影响力 0.8153)、排水管道长度(0.8087)、工业废水排放量(0.5671)、人均 GDP(0.5650)、人口密度(0.5274),而水资源总量、第二产业占 GDP 比重和城市污水处理率因子对空间分布格局的影响力相对靠后。从其内部空间分布情况看,贡献力较高的居民生活用水量和排水管道长度因子在成都市、重庆市的数量值最高,居民生活用水量均超过 6.40 亿 t,排水管道长度仅 10000km,昆明市、绵阳市、南充市、达州市和泸州市紧随其后。工业废水排放量排名前三的是重庆市、成都市和保山市,分别为 82.58、0.93、0.75 亿 t,最少的为达州市 210 万 t,人均 GDP 和人口密度值分布较高的是重庆市和成都市。核心因子对上游城市黑臭水体空间特征形成起到重要推动作用,居民生活用水是上游城市黑臭水体的主要污染源,上游经济相对落后形成的治污财力薄弱、平均城市排水管道设施的不充分不匹配以及高原山地河谷型城市集中布局导致的人口集中等都提高了污染水体产生的风险。

对中游城市黑臭水体空间分布格局起主导作用的探测因子为工业废水排放量(0.6369)、排水管道长度(0.5239)、居民生活用水量(0.3893)、第二产业占 GDP 比重(0.3279)。工业废水排放量较高的为武汉市、南昌市、赣州市,均超过 1 亿 t,九江市和岳阳市也在 0.8 亿 t 以上,排在第二梯队。排在最后梯队的为张家界市、十堰市、随州市和鄂州市,其中张家界市只有 88 万 t,这些区域分布有国家地质公园、南北水调水源地等,工业进驻和环保标准较高。排水管道长度武汉市最高,长沙市和南昌市次之,分别为 9316、3647、2816km。居民生活用水量与排水管道长度的分布较为一致,但第二产业占 GDP 比重却不同,宜昌市、鹰潭市、襄阳市、鄂州市、黄石市和景德镇市第二产业占比均超过 54%,工业产值为主要支柱的经济发展会对黑臭水体的产生提供重要“贡献”。中游地区城市黑臭水体来源的重要因素是工业废水的排放,这与国家中部崛起战略背景下发展经济和保护生态环境相协调的过程结果有较大关联,而不足的排水管道设施和较高的居民生活用水量仍是城市黑臭水体产生的“助推器”。

对下游城市黑臭水体空间分布格局起关键作用的探测因子为排水管道长度(0.5356)、居民生活用水量(0.5128)、人口密度(0.4709)、第二产业占 GDP 比重(0.4027),排水管道长度、居民生活用水量和人口密度值的空间分布趋同,主要为上海市、合肥市、南京市、无锡市、苏州市等。而第二产业产值在铜陵市、马鞍山市、淮北市、镇江市等属于高值分布区,均超过 55%,最高为铜陵市 60%。因此,下游地区较高的人口密度、第二产业的区域聚集以及巨大的城市体量所产生的生活污水、工业废水等是下游地区黑臭水体产生的重要原因。

与上中下游影响因子贡献力显著相比,长江经济带全域范围的影响因子的  $q$  值都普遍较小,但也呈现不同的影响特征。影响力较高的为排水管道长度、居民生活用水量和人口密度,而影响因子解释力较强的是居民生活用水量。剩余影响因子解释力中,城市污水处理率的解释能力最强,为 0.1998。全域范围内各个因子对长江经济带城市黑臭水体空间分布格局的影响能力相当,并没有凸显出显著性和决定性的空间结构影响因素,小范围内影响因子的影响力和贡献力明显强于全域范围。这很大程度上是由于影响因子在从小尺度空间转换为大尺度空间匹配耦合和交互探测的过程中,因子贡献力被空间平滑或削弱等耦合作用力的综合影响结果<sup>[38,39]</sup>;从探测因子来看,各因子对长江经济带不同区域城市黑臭水体空间分布格局的影响具有相似性和差异性。排水管道长度、居民生活用水量、第二产业占 GDP 比重几个指标对空间格局的影响具有较强相似性,其中,排水管道长度和居民生活用水量因子在上游的影响贡献力及解释能力最强,全域范围上居民生活用水量因子解释能力最强。而其他探测因子对空间分布格局的影响差异性较大。说明在长江经济带全域范围内需要从提升城市排水系统基础设施、合理引导和控制居民生活用水量、科学疏解集聚人口和淘汰不合理第二产业业态等方面来减少和遏制城市黑臭水体的产生。

总的来说,长江经济带城市黑臭水体的空间分布特征是受经济、社会、生态等方面的因素综合作用而致。上游自然生态环境基底相对较好,经济和社会发展却相对中下游较弱;下游经济体量和规模相较于中上游都较大,而生态环境却因工业化和城镇化的快速发展受到破坏。经济水平较低使得上游城市排水管道基础设施建设、废水处理能力等受到限制,进而导致黑臭水体产生的可能性增大。中下游较高经济水平所形成的集聚效应导致城市运行压力过大进而从另一个极端增大了黑臭水体产生的可能性。如何构筑长江经济带经济-社会-生态系统的协调发展将成为政府治理和消除城市黑臭水体的主攻方向。

## 5 结论与建议

本文选取长江经济带城市黑臭水体为研究样本,借助 ArcGIS 空间分析、分形网格维数及地理探测器等不同方法进行地理空间分布特征及其相关影响因素的探测研究,得出以下主要结论:

(1) 长江经济带城市黑臭水体具有不同区域的数量差异,空间重心分布处于中部湖北省和湖南省的重要城市。空间分布类型属凝聚型分布态势,分类型黑臭水体具有显著差异的核密度中心和核密度值,分形特征显著,空间结构特征复杂性强。不同类型黑臭水体均呈现正值空间相关性,冷热点区交错分布揭示了其“上游冷、中下游热”的地域差异格局。

(2) 影响黑臭水体空间结构的因子具有不同的贡献力和解释力。上、中、下游探测结果表现出影响贡献力的空间差异和重点核心影响因素的匹配凸显,全域范围内影响因子被耦合削弱后影响程度不显著。影响城市黑臭水体空间结构的重点核心因素是:上游为居民生活用水量、排水管道长度、工业废水排放量、人均 GDP、人口密度;中游为工业废水排放量、排水管道长度、居民生活用水量、第二产业占 GDP 比重;下游为排水管道长度、居民生活用水量、人口密度、第二产业占 GDP 比重。探测因子影响着城市黑臭水体的形成与发展,也一定程度影响长江经济带生态环境与经济的区域协调。

(3) 建设美丽中国,不断满足人民群众的优美生态环境需要,着眼未来,长江经济带城市黑臭水体的治理和消除可从以下方面入手:①明确责任人、建立数据库,按空间特征完善体制机制。应明确长江经济带每个城市的党或政府必须有一名主要领导作为治理黑臭水体的第一责任人,系统摸清并建立每个城市黑臭水体的基本信息数据库。同时根据现有生态保护制度丰富完善黑臭水体治理的体制机制。可建立以不同位置为基础的河湖塘长制度、段长制度、断面考核及生态补偿机制,按照重度、轻度、位于不同位置的黑臭水体分类,建立不同层级和区域的分类治理机构。②紧抓影响因素力争从源头消除。对影响城市黑臭水体空间分布特征的核心因素进行核查并对其进行优化或消除,重点排查工业废水排放量、居民生活用水量及排水管道长度等影响因素发展状况,基于核心影响因素建立水污染交易计划并制定一系列水环境质量标准<sup>[40]</sup>,力争从源头消除黑臭水体。③开展整治试点并鼓励多方参与。在城市黑臭水体核密度高值区和空间热点区开展为期一年的黑臭水体专项治理行动并逐渐向长江经济带全域推广。同时,要借助第三方评估机构或专家意见等途径检验黑臭水体的整治效果,开发公众参与的环境污染信息披露平台并将治理结果及时、定期向公众发布<sup>[41]</sup>。④鼓励科研人员开展更多关于城市黑臭水体问题的科学的研究。要紧扣生态文明建设、长江经济带生态环境保护等主题,发挥多学科、多领域知识交叉融合的优势,积极开展城市黑臭水体相关的专项或综合研究。由于黑臭水体的产生和消失是一个不确定的动态过程,因此,对黑臭水体的空间格局识别、演化及治理也具有动态性,这也是未来有待研究的方面。

### 参考文献:

- [1] 樊杰,王亚飞,陈东,等. 长江经济带国土空间开发结构解析[J]. 地理科学进展, 2015, 34(34):1336-1344.
- [2] 杨桂山,徐昔保,李平星. 长江经济带绿色生态廊道建设研究[J]. 地理科学进展, 2015, 34(11):1356-1367.
- [3] 申茜,朱利,曹红业. 城市黑臭水体遥感监测与筛查研究进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(10):3433-3439.
- [4] ANONVMOUS. London Sewage and the River Thames[J]. British Medical Journal, 1928, 3511(1):676-677.
- [5] LAZARO T R. Urban hydrology[M]. Michigan: Ann Arbor Science Publishers, 1979.
- [6] LIU C, SHEN Q S, ZHOU Q L, et al. Precontrol of algae-induced black blooms through sediment dredging at appropriate depth in a typical eutrophic shallow lake[J]. Ecological Engineering, 2015(77):139-145.

- 
- [7] HISHIDA Y, ASHITANI K, FUJIWARA K. Occurrence of musty odor in the Yodo River[J]. Water Science and Technology, 1988 (20) :193–196.
- [8] CHEN J, XIE P, MA Z M, et al. A systematic study on spatial and seasonal patterns of eight taste and odor compounds with relation to various biotic and abiotic parameters in Gonghu Bay of Lake Taihu, China[J]. Science of the Total Environment, 2010, 409 (2) :314–325.
- [9] GAO J H, JIA J J, KETTNER A J, et al. Changes in water and sediment exchange between the Changjiang River and Poyang Lake under natural and anthropogenic conditions, China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 481 (1) :542–553.
- [10] SMITH V H, JONATHAN S D, FRANK D J, et al. Managing taste and odor problems in a eutrophic drinking water reservoir[J]. Journal of Lake and Reservoir Management, 2002, 18 (4) :319–323.
- [11] SUGIURA N, UTSUMI M, WEI B, et al. Assessment for the complicated occurrence of nuisance odours from phytoplankton and environmental factors in a eutrophic lake[J]. Lakes & Reservoirs: Research and Management, 2004, 9 (3) :195–201.
- [12] DZIALOWSKI A R, SMITH V H, HUGGINS D G, et al. Development of predictive models for geosmin-related taste and odor in Kansas, USA, drinking water reservoirs[J]. Water Research, 2009, 43 (11) :2829–2840.
- [13] 顾国维, 蔡不忒. 黄浦江黑臭趋势的初步预测[J]. 上海环境科学, 1983, 2 (4) :24–26.
- [14] 巨天珍, 林郁, 贾丽. 黑臭水体与城市空气微生物污染[J]. 城市问题, 2009, 166 (5) :91–95.
- [15] 刘建福, 陈敬雄, 翁时有. 城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险[J]. 环境科学, 2016, 37 (4) :1264–1271.
- [16] 王国芳, 李先宁, 方洋, 等. 底泥对藻源型局部黑臭水体形成的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41 (12) :102–108.
- [17] 刘海洪, 李先宁, 宋海亮. 浅水湖泊防控黑臭水体复氧技术[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45 (3) :526–530.
- [18] 赵越, 姚瑞华, 徐敏, 等. 我国城市黑臭水体治理实践及思路探讨[J]. 环境保护, 2015, 43 (13) :27–29.
- [19] 张列宇, 王浩, 李国文, 等. 城市黑臭水体治理技术及其发展趋势[J]. 环境保护, 2017, 45 (5) :62–65.
- [20] 陆玉麒, 董平. 新时期推进长江经济带发展的三大新思路[J]. 地理研究, 2017, 36 (4) :605–615.
- [21] 李晶晶, 苗长虹. 长江经济带人口流动对区域经济差异的影响[J]. 地理学报, 2017, 72 (2) :197–212.
- [22] 张改素, 王发曾, 康珈瑜, 等. 长江经济带县域城乡收入差距的空间格局及其影响因素[J]. 经济地理, 2017, 37 (4) :42–51.
- [23] 李芳林, 蒋昊. 长江经济带城市环境风险评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27 (5) :939–948.

- 
- [24] 佟玉权. 基于 GIS 的中国传统村落空间分异研究 [J]. 人文地理, 2014, 29(4): 44–51.
- [25] 李咪, 芮旸, 王成新, 等. 传统村落的空间分布及影响因素研究——以吴越文化区为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1693–1702.
- [26] 张超, 杨秉廉. 计量地理学基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1991.
- [27] 王法辉. 基于 GIS 的数量方法与应用 [M]. 北京: 商务印书馆, 2011.
- [28] 刘继生, 陈彦光. 城镇体系空间结构的分形维数及其测算方法 [J]. 地理研究, 1999, 18(2): 60–67.
- [29] SRIDHARAN S, TUNSTALL H, LAWDER R, et al. An exploratory spatial data analysis approach to understanding the relationship between deprivation and mortality in Scotland [J]. Social Science & Medicine, 2007, 65(9): 1942–1952.
- [30] WANG J F, LI X H, GEORGE C, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107–127.
- [31] 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.
- [32] 伍文琪, 罗贤, 黄玮, 等. 云南省水资源承载力评价与时空分布特征研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(7): 1517–1524.
- [33] 任俊霖, 李浩, 伍新木, 等. 基于主成分分析法的长江经济带省会城市水生态文明评价 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(10): 1537–1544.
- [34] 李焕, 黄贤金, 金雨泽, 等. 长江经济带水资源人口承载力研究 [J]. 经济地理, 2017, 37(1): 181–186.
- [35] 周侃, 樊杰, 刘汉初. 环渤海地区水污染物排放的时空格局及其驱动因素 [J]. 地理科学进展, 2017, 36(2): 171–181.
- [36] 秦腾, 章恒全, 佟金萍, 等. 长江经济带城镇化进程中的水资源约束效应分析 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(3): 39–45.
- [37] 杨晴青, 陈佳, 李伯华, 等. 长江中游城市群城市人居环境演变及驱动力研究 [J]. 地理科学, 2018, 38(2): 195–205.
- [38] 宋涛, 程艺, 刘卫东, 等. 中国边境地缘经济的空间差异及影响机制 [J]. 地理学报, 2017, 72(10): 1731–1745.
- [39] 吕晨, 蓝修婷, 孙威. 地理探测器方法下北京市人口空间格局变化与自然因素的关系研究 [J]. 自然资源学报, 2017, 32(8): 1385–1397.
- [40] ZHANG Y L, WU Y Y, YU H, et al. Trade-offs in designing water pollution trading policy with multiple objectives: A case study in the Tai Lake Basin, China [J]. Environmental Science & Policy, 2013, 33(11): 295–307.

---

[41] TANG Y H, MIAO X, ZANG H Y, et al. Information disclosure on Hazards from industrial water pollution incidents: latent resistance and countermeasures in China[J]. Sustainability, 2018, 10(5):1475.