

何海生,刘金殿,张爱菊,等. 钱塘江水域秋季着生藻类群落特征与水环境因子的关系[J]. 江苏农业科学,2020,48(13):292-297.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.13.058

# 钱塘江水域秋季着生藻类群落特征与水环境因子的关系

何海生,刘金殿,张爱菊,郝雅宾,王 俊,罗 伟,肖善势,周志明

(浙江省淡水水产研究所/农业农村部淡水渔业健康养殖重点实验室/浙江省淡水水产遗传育种重点实验室,浙江湖州 313001)

**摘要:**为探究钱塘江水域着生藻类群落结构多样性,2018 年 9 月对该水域 16 个采样点的着生藻类种类组成、密度与生物量、多样性指数和 7 项水质指标进行了调查,结果表明:(1)钱塘江流域 16 个采样点共采集到着生藻类 7 门 130 种(属),其中硅藻门 83 种(属),绿藻门 28 种(属),蓝藻门 13 种(属),裸藻门 3 种(属),隐藻门、甲藻门和黄藻门各 1 种(属)。(2)钱塘江着生藻类群落结构存在明显的空间差异性。砂砾低质生境易于干扰着生藻类群落结构的稳定性。(3)透明度(SD)、叶绿素 a 含量(Chla)、水温(T)和 pH 值是钱塘江水域着生藻类群落结构的主要环境因子。其中 T 和 pH 值与钱塘江着生藻类群落结构呈负相关。

**关键词:**钱塘江;着生藻类;群落结构;生物多样性;水环境因子

**中图分类号:** S931.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)13-0292-05

钱塘江为浙江省最大河流,流域面积 55 558 km<sup>2</sup>,其中浙江省境内面积 48 080 km<sup>2</sup>,以北源新安江起算,河长 588.73 km;以南源马金溪起算,全长 522.22 km,流经安徽省南部和浙江省,经杭州湾注入东海<sup>[1-2]</sup>。钱塘江水域环境复杂多变<sup>[3]</sup>,水体中饵料丰富<sup>[4]</sup>,是浙江开发可持续发展渔业资源的重要水域。着生藻类别称底栖藻类,指附着在水体基质上生活的微型藻<sup>[5]</sup>,因具备足够的生物膜面积,促使其快速交换水体中的物质<sup>[6]</sup>;同时,作为水体中初级生产者之一,是水生态系统中物质循环、信息传递和能量流动的重要驱动因素<sup>[7-8]</sup>,是水环境检测的重要理想生物指标<sup>[9]</sup>。关于钱塘江水域微生物的研究多见于浮游动植物,如杜泳等对钱塘江的浮游植物进行了研究<sup>[10-12]</sup>,骆鑫等对钱塘江的浮游动物开展了研究<sup>[13-15]</sup>,而关于钱塘江水域着生藻类研究至今罕见报道。因此,于 2018 年 9 月对钱塘江水域的着生藻类与水环境因子进行野外采样调查,并分析着生藻类群落结构与水环境因子间的关系,以期为钱塘江水域的渔业资源开发和水生态环境的保护提供参考价值。

收稿日期:2019-08-13

基金项目:浙江省科技计划(编号:2019C02047)。

作者简介:何海生(1991—),男,湖南郴州人,硕士,研究实习员,主要从事渔业资源调查开发和生态保护。E-mail: hehaisheng2018@163.com

通信作者:周志明,男,教授级高级工程师,主要从事渔业资源调查开发和生态保护。E-mail: zjhz-zzz@163.com。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查位点

2018 年 9 月在钱塘江水域开展着生藻类调查,共设置了 16 个采样点,采样点分布详见图 1。

### 1.2 着生藻类样品采集与分析

在采样点河流上下游 100 m 范围内<sup>[16]</sup>挑选出长时间浸泡的石块、树枝、落叶或水生植物茎组织<sup>[17]</sup>,用牙刷刷取一定面积的着生藻于干净的广口瓶盖内,记录刮刷面积,然后用纯净水喷洗石头和牙刷以减少着生藻的残留,将广口瓶盖中的着生藻样倒至广口瓶中,加 1~2 mL 鲁格氏试剂固定着生藻,作为着生藻类定量样品。

着生藻类样品实验室内静置 48 h 后用移液管吸取上清液,并对剩余样品进行体积固定和记录,摇匀后用 20  $\mu$ L 移液枪吸取 10  $\mu$ L 着生藻样品固定液于光学显微镜下进行藻类鉴定和计数。

### 1.3 水质指标测定

透明度(SD, cm)采用透明度盘测定;水温(T,  $^{\circ}$ C)、pH 值和溶解氧(DO, mg/L)采用 Hach-HQ30D 测定;叶绿素 a 含量(Chla)采用分光光度法测定;采集 1 L 水样经过预处理后带回实验室进行氨氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , mg/L)、硝酸盐氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , mg/L)、总氮(TN, mg/L)和总磷(TP, mg/L)的测定,测定方法参照《水和废水监测分析方法》<sup>[18]</sup>。

### 1.4 数据分析

1.4.1 优势度与多样性指数 采用优势度指数(Y)

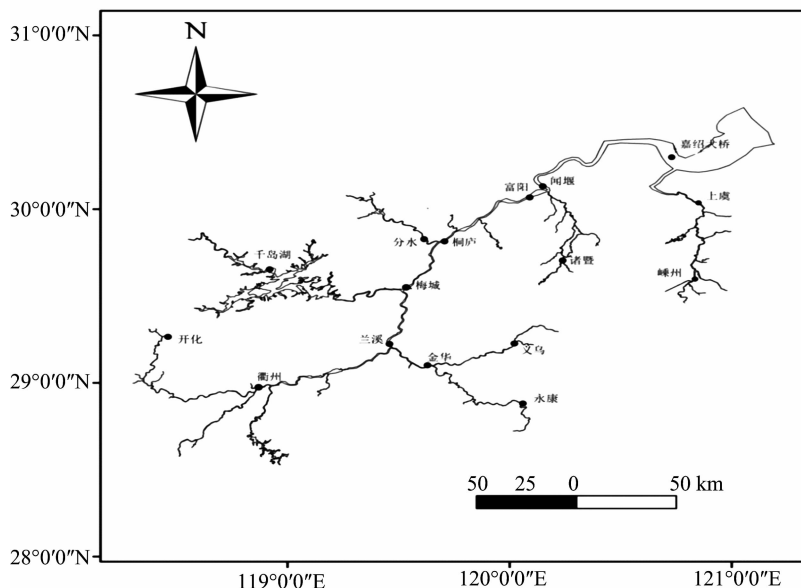


图1 钱塘江水域调查站位图

对着生藻优势种组成进行判定,当  $Y > 0.02$  时为优势种<sup>[19]</sup>。采用均匀度指数 (Pielou index,  $J$ ) 和香浓 - 维纳指数 (Shannon - Weaner index,  $H'$ ) 对生物多样性进行分析<sup>[20-21]</sup>。

$$Y = \frac{P_i}{P} f_i;$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S \left[ \left( \frac{N_i}{N} \right) \ln \left( \frac{N_i}{N} \right) \right];$$

$$J = \frac{H'}{\ln S}.$$

式中:  $P_i$  表示第  $i$  种着生藻的密度;  $P$  表示所有着生藻的密度;  $f_i$  表示第  $i$  种着生藻在所有采样点中出现的频率;  $N_i$  表示第  $i$  种着生藻的个体数;  $N$  表示所有着生藻物种的总个体数;  $S$  表示着生藻物种总数。

1.4.2 相似性 运用 Primer 5 对着生藻数据进行聚类分析。以采样点 (作为样本) 和着生藻密度 (作为变量) 构建 Bray - Curtis 相似性系数为基础的矩阵, 建立 CLUSTER 分析图<sup>[22]</sup>。

1.4.3 排序 在环境数据进行  $\lg(1+x)$  转化后的基础上<sup>[23]</sup>, 运用 CANOCO 5.0 开展除趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA), DCA 结果显示最长梯度长度为  $2.4 < 3.0$ , 判定物种生物量与环境因子呈线性关系, 因此选择冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 对其进行分析<sup>[24]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 着生藻群落结构

在钱塘江流域 16 个采样点共采集到着生藻类

7 门 130 种 (属), 其中硅藻门 83 种 (属) (占 63.85%), 绿藻门 28 种 (属) (占 21.54%), 蓝藻门 13 种 (属) (占 10.00%), 裸藻门 3 种 (属) (占 2.31%), 隐藻门、甲藻门和黄藻门各 1 种 (属) (各占 0.77%)。空间水平上, 永康采样点着生藻类物种数最多, 为 61 种 (属), 其次为金华和衢州采样点的 57 种 (属), 江口和梅城采样点最少, 为 17 种 (属), 详见图 2。空间变化上, 16 个采样点着生藻平均密度为  $1.53 \times 10^4$  (ind./cm<sup>2</sup>), 变化范围为  $0.20 \times 10^4 \sim 5.93 \times 10^4$  (ind./cm<sup>2</sup>)。其中, 开化着生藻密度最高, 闻堰最低。16 个采样点着生藻平均生物量为  $0.03$  (mg/cm<sup>2</sup>), 变化范围为  $0.004 \sim 0.120$  (mg/cm<sup>2</sup>), 其中开化着生藻生物量最高, 梅城最低 (图 3)。

### 2.2 优势度与多样性指数

钱塘江着生藻密度优势种为脆杆藻属 (*Fragilaria* sp.)、颗粒直链藻 (*Melosira granulata*)、变异直链藻 (*Melosira varians*)、近棒异极藻 (*Gomphonema subclavatum*)、菱形藻属 (*Nitzschia* sp.)、谷皮菱形藻 (*Nitzschia palea*)、舟形藻属 (*Navicula* sp.) 和色球藻属 (*Chroococcus* sp.) (表 1)。Excel 2007 无重复双因素分析结果显示, 香浓 - 维纳指数和均匀度指数无空间差异 ( $P = 0.22 > 0.05$ )。16 个采样点香浓 - 维纳指数平均值为 2.90, 变化范围为 2.04 ~ 3.63; 均匀度指数平均值为 0.83, 变化范围为 0.61 ~ 0.93 (图 4)。

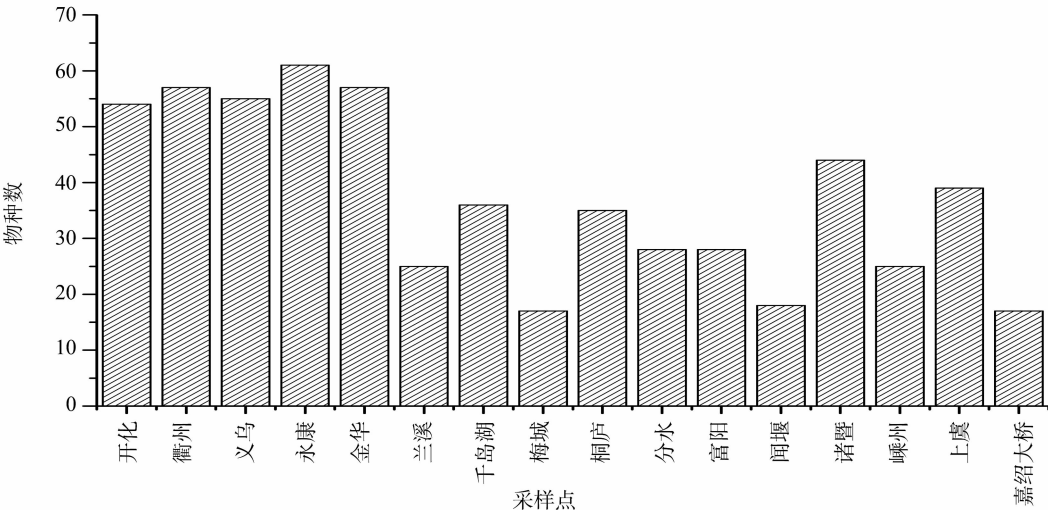
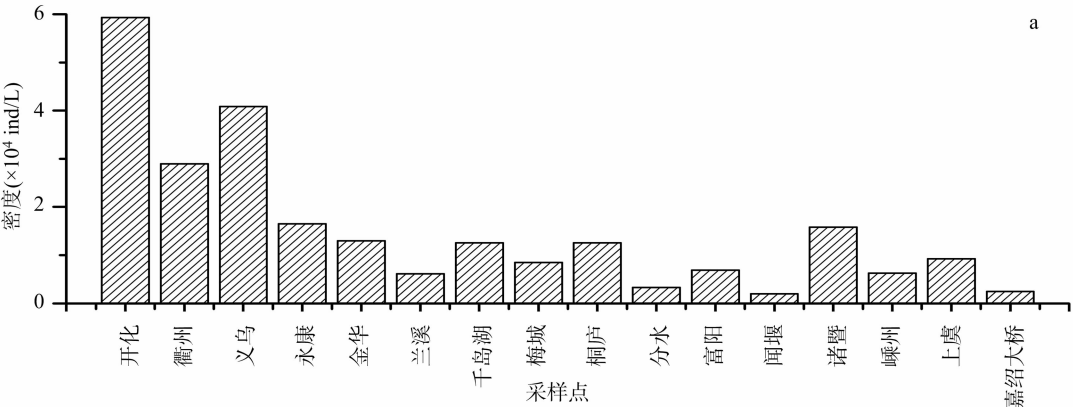


图2 采样点物种数



a

b

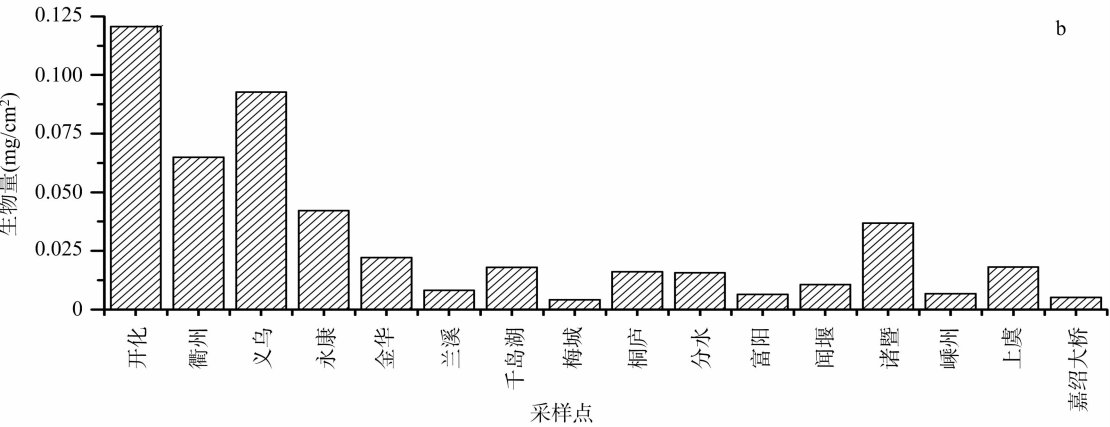


图3 钱塘江着生藻密度和生物量

2.3 相似性分析

根据采样点聚类分析结果,由图 5 可知,富阳、桐庐、嵊州和兰溪采样点聚为一类(类簇 V),义乌、衢州、金华、开化、诸暨、永康、千岛湖、上虞和分水采样点聚为一类(类簇 IV),聚合后再与嘉绍大桥聚在一起,随后与梅城相聚,最后与闻堰汇聚。SIMPER 分析发现,类簇 V 的相似性为 46.65%,类簇 IV 的相似性为 46.64%,2 类聚合后的相似性为

42.29%。  
2.4 群落结构与环境因子的关系

RDA 结果表明,第 1 轴排序对物种的解释量为 41.77%,DO 和 SD 与其呈正相关,其中 SD 相关性最大,相关系数为 0.69,其余环境因子与其呈负相关。第 2 轴排序对物种的解释量为 19.54%,Chla 和 TP 与其呈正相关,其中 Chla 相关性最大,相关系数为 0.82。RDA 结果表明,SD、Chla、T 和 pH

表 1 钱塘江着生藻优势种和优势度

物种	学名	优势度
硅藻门	Bacillariophyta	
脆杆藻属	<i>Fragilaria</i> sp.	0.13
颗粒直链藻	<i>Melosira granulata</i>	0.06
变异直链藻	<i>Melosira varians</i>	0.05
近棒异极藻	<i>Gomphonema subclavatum</i>	0.02
菱形藻属	<i>Nitzschia subcohaerens</i>	0.04
谷皮菱形藻	<i>Nitzschia palea</i>	0.04
舟形藻属	<i>Navicula</i> sp.	0.06
蓝藻门	Cyanophyta	
色球藻属	<i>Chroococcus</i> sp.	0.02

值箭头连线较其他环境因子长,表明它们与钱塘江着生藻群落分布和种间分布的相关性较大,TP 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  次之,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  最小(表 2、图 6)。

### 3 着生藻类群落结构与环境因子关系的讨论

本研究显示,钱塘江流域着生藻类群落结构存在明显的空间差异性,而驱动着生藻类群落结构变化的环境因子主要为透明度、叶绿素 a、温度和 pH 值。殷旭旺等对太子河流域的生态健康评价研究发现,驱动着生藻类群落结构空间结构变化的环境因子主要为总氮电导率和总溶解性固体<sup>[5]</sup>。薛浩

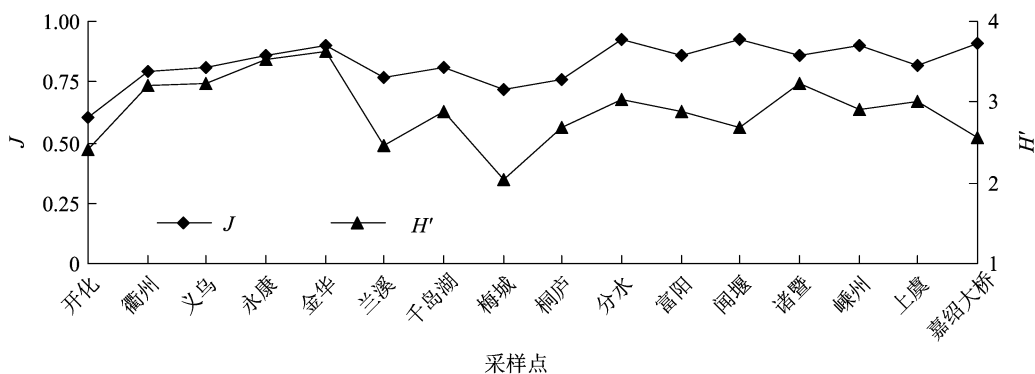


图4 钱塘江着生藻香浓-维纳指数和均匀度指数

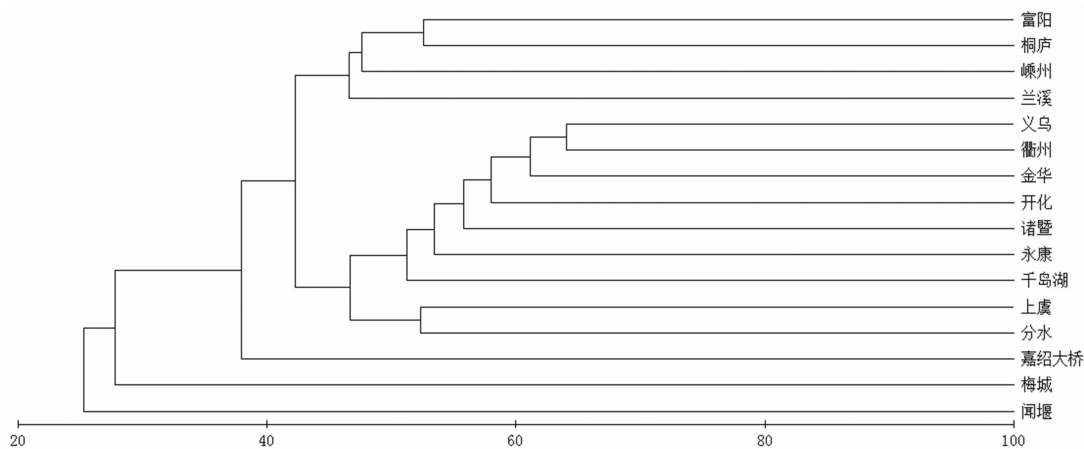


图5 钱塘江水域着生藻群落聚类分析

等对梧桐河的水生态健康评价研究发现,影响着生藻类群落结构的主要环境因子为电导率和 pH 值<sup>[16]</sup>。而 Tang 等对长江香溪河的生态系统研究则发现,pH 值、硅酸盐、总磷和氯离子等是影响着生藻类群落结构差异的主要环境因子<sup>[25]</sup>。由钱塘江水域着生藻类与环境因子的相关关系表可知,第 1 排序轴和第 2 排序轴分别解释了着生藻类的 41.77% 和 19.54%,所有典范排序轴累计解释量达 82.56%。RDA 结果表明,SD、Chla、T 和 pH 值箭头连线最长,说明其对钱塘江水域着生藻类群落结构

影响较其他环境因子大。Blinn 研究表明,水体温度会通过光合作用直接影响藻类的生长<sup>[26]</sup>。本研究发现,钱塘江着生藻类表现为硅藻型,T 和 pH 值与着生藻类呈负相关性,说明水温越低,着生藻类的群落结构越稳定,这与贾海燕等研究的硅藻生长活跃度随水温升高而降低的结果<sup>[27]</sup>相一致。

同时,由聚类分析可知,多个类簇的结果也印证了着生藻类群落结构存在空间差异,即不同地理结构生境形成不同结构的着生藻类群落。嘉绍大桥地处杭州湾入海口,低质河沙石砾较多,造成着

表 2 钱塘江着生藻类与环境因子的相关关系

分类	特征值	物种 - 环境因子的相关性	累计方差物种数据
轴 1	0.177	0.693	41.77%
轴 2	0.083	0.824	61.31%
轴 3	0.056	0.573	74.57%
轴 4	0.034	0.962	82.56%

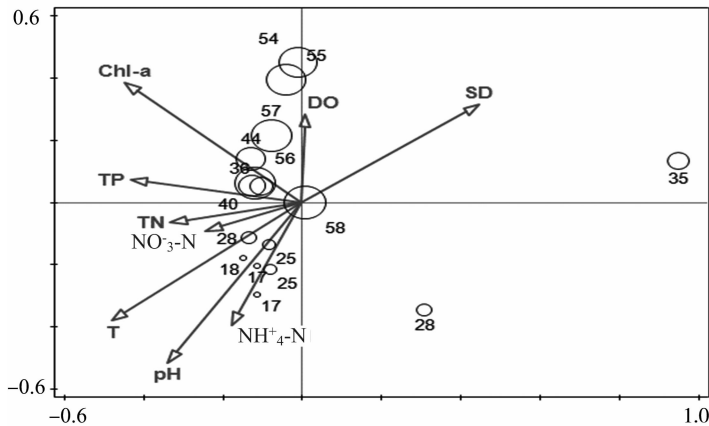


图6 钱塘江着生藻与环境因子的 RDA 分析

4 结论

钱塘江流域 16 个采样点共采集到着生藻类 7 门 130 种(属),其中硅藻门 83 种(属),绿藻门 28 种(属),蓝藻门 13 种(属),裸藻门 3 种(属),隐藻门、甲藻门和黄藻门各 1 种(属)。钱塘江水域着生藻类表现为硅藻型。

钱塘江着生藻类群落结构存在明显的空间差异性。砂砾低质的生境容易干扰着生藻类群落结构的稳定性。

SD、Chla、T 和 pH 值为钱塘江水域着生藻类群落结构影响的主要环境因子。其中 T 和 pH 值与钱塘江着生藻类的群落结构呈负相关。

本研究存在水环境指标不足等缺陷,因此需进一步深入研究以明确钱塘江水域着生藻类群落结构与水环境因子的关系,为钱塘江水域的渔业资源开发和水生态环境的保护提供参考价值。

参考文献:

[1] 杨文杰,马乐宽,孙运海,等. 新安江 - 钱塘江流域水环境健康风险评估研究[J]. 中国环境管理,2018,10(1):25 - 31.

[2] 郝雅宾,刘金殿,张爱菊,等. 钱塘江下游江段鱼类资源现状[J]. 浙江农业学报,2017,29(10):1620 - 1629.

[3] 冯利华. 钱塘江流域的水文规律[J]. 地理科学,1990,10(2):177 - 184,192.

[4] 王振槐. 钱塘江渔业资源保护与开发[J]. 水产学杂志,1995,8

生藻类物种丰富度较差;而开化为钱塘江上游,有机质淤泥较多且水体透明度较好,使其着生藻类物种丰富度较好。丁娜等研究发现,底质为沙石水域的微生境,其着生藻类数量丰富度较差,说明砂砾底质生境更容易受到外界干扰,从而影响水域着生藻类群落结构稳定性<sup>[28]</sup>。

(2):8 - 17.

[5] 殷旭旺,渠晓东,李庆南,等. 基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价[J]. 生态学报,2012,32(6):1677 - 1691.

[6] 郑保海,朱静亚,许 信,等. 丹江口水库着生藻类群落特征及其水质评价[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2018,46(4):95 - 101.

[7] 李庆南,赵 文,殷旭旺,等. 辽河太子河水系的浮游植物种类多样性研究[J]. 大连海洋大学学报,2011,26(4):322 - 327.

[8] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton[J]. Journal of Plankton Research,2002,24(5):417 - 428.

[9] Padisák J, Crossetti L O, Naselli - Flores L, et al. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates [J]. Hydrobiologia,2009,621:1 - 19.

[10] 杜 泳. 基于多源遥感数据的钱塘江感潮河口段生态健康评价[D]. 浙江:浙江大学,2015.

[11] 马永星,张波涛,臧家业,等. 钱塘江河口浮游植物分布与环境因子的典范对应分析[J]. 海洋开发与管理,2015,32(6):100 - 106.

[12] 蔡燕红. 杭州湾浮游植物生物多样性研究[D]. 山东:中国海洋大学,2006.

[13] 骆 鑫,曾江宁,徐晓群,等. 舟山海域夏、秋季浮游动物的分布特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报,2016,36(24):8194 - 8204.

[14] 张冬融,徐兆礼,徐佳奕,等. 杭州湾不同水域秋季浮游动物群落结构及其影响因素[J]. 应用生态学报,2015,26(9):2859 - 2866.

[15] 徐兆礼,沈新强,袁 骐,等. 杭州湾洋山岛周围海域浮游动物分布特征[J]. 水产学报,2003(增刊1):69 - 75.

[16] 薛 浩,郑丙辉,孟凡生,等. 基于着生硅藻指数的梧桐河水生态健康评价[J]. 生态毒理学报,2018,13(4):83 - 90.

孙继平,侯兰功.成渝城市群  $PM_{2.5}$  时空分布及影响因素研究[J].江苏农业科学,2020,48(13):297-302.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.13.059

# 成渝城市群 $PM_{2.5}$ 时空分布及影响因素研究

孙继平,侯兰功

(西南科技大学土木工程与建筑学院,四川绵阳 621010)

**摘要:** $PM_{2.5}$ 是雾霾污染的主要成因,对其时空分布和影响因素展开研究,可为城市  $PM_{2.5}$ 防治提供空间信息和社会经济政策层面的科学依据,对相应地区的生产组织和城市管理具有一定的现实意义。基于空间杜宾模型,利用 Stata 统计软件和地理信息系统(GIS)分析技术,结合 2015—2018 年成渝城市群 16 个城市的相关数据对该地区  $PM_{2.5}$  时空分布特征和影响因素进行研究。研究结果表明:(1)在空间分布上,研究区间内  $PM_{2.5}$  浓度整体表现为中部低,西部和北部边缘地区偏高,西南部偏低,在时间变化上,2015—2018 年成渝城市群年均  $PM_{2.5}$  浓度整体呈下降趋势;(2)在 2015—2018 年期间成渝城市群  $PM_{2.5}$  浓度在空间上正向自相关,高值集聚区域发生明显变化,在 2017 年增多 2018 年减少,低值集聚范围稳定。(3)基于空间杜宾模型的回归分析结果可知,对  $PM_{2.5}$  浓度起正向影响的社会经济因素相关系数表现为能源强度 > 人口密度 > 建筑施工面积 > 私人汽车拥有量 > 建筑业产值 > 人均 GDP,对  $PM_{2.5}$  浓度起负向影响的社会经济因素相关系数表现为第三产业产值占 GDP 比重 > 第二产业产值占 GDP 比重 > 绿化覆盖率 > 环境规制 > 工业产值 > 城市全年公共汽(电)车客运总量。在气象影响因素方面, $PM_{2.5}$  浓度与降水量和气温呈负相关关系,与湿度呈正相关关系。

**关键词:** $PM_{2.5}$ ;雾霾污染;时空分布;空间自相关;空间杜宾模型;成渝城市群

**中图分类号:**X51 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)13-0297-06

城市化和工业化的快速发展推动了社会前进,但也产生了一系列环境问题,其中就包括雾霾污

染,造成社会经济损失的同时亦严重威胁城乡居民的健康。国内外已有的研究表明,大气污染程度和肺癌等呼吸道疾病的发病率和死亡率密切相关<sup>[1]</sup>,此外,雾霾污染的区域性特征与空间交互影响日益显著,空间溢出效应明显<sup>[2]</sup>。对城市群层面雾霾污染主要成分之一  $PM_{2.5}$  的时空分布及影响因素进行研究可为城市化发展过程中的污染风险规避提供一定依据,为城市群大气污染联动治理提供空间信息和政策建议参考。

收稿日期:2019-11-25

基金项目:国家自然科学基金(编号:41701172);四川省教育厅自然科学(编号:15ZA0123)。

作者简介:孙继平(1995—),女,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事区域发展与规划研究。E-mail:473243910@qq.com。

通信作者:侯兰功,博士,副教授,主要从事区域发展与规划研究。E-mail:soundskyhl@163.com。

[17]殷旭旺,渠晓东,李庆南,等.基于着生藻类的太子河流域水生生态系统健康评价[J].生态学报,2012,32(6):1677-1691.

[18]国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.

[19]刘奕伶,葛继稳,李艳元,等.古夫河着生藻类优势种体积与水质因子的相关性研究[J].中国环境科学,2015(7):2182-2191.

[20]Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana and Chicago: University of Illinois Press, 1949:31-108.

[21]Margalef R. Perspectives in ecological theory [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1968.

[22]Clarke K R, Warwick R M. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation [M]. 2nd ed. Primmer - E; Plymouth, 2001.

[23]吉正元,刘绍俊.抚仙湖浮游植物群落结构、影响因子及水质评价[J].中国环境监测,2019,35(4):1-11.

[24]张爱菊,丁新新,刘金殿,等.浙江老虎潭水库后生浮游动物群落组成及其环境影响因子[J].水生生态学杂志,2016,37(1):62-69.

[25]Tang T, Cai Q H, Liu R Q, et al. Distribution of epilithic algae in the Xiangxi River system and their relationships with environmental factors[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2002, 17(3):345-352.

[26]Blinn D W. Diatom community structure along physicochemical gradients in saline lakes[J]. Ecology, 1993, 74(4):1246-1263.

[27]贾海燕,徐建锋,雷俊山.丹江口库湾浮游植物群落与环境因子关系研究[J].人民长江,2019,50(5):52-58.

[28]丁娜,徐东坡,刘凯,等.太湖五里湖着生藻类群落结构特征分析[J].江西农业大学学报,2015,37(2):346-352.