

基于主成分分析法的闽江口及其近岸水域水质评价

林秀珠¹, 饶清华¹, 陈琪², 林茂兹¹, 林云杉³

(1. 福建师范大学 福清分校 近海流域环境测控治理福建省高校重点实验室, 福建 福清 350300; 2. 福建省水利水电勘测设计研究院, 福建 福州 350001; 3. 福建省环境监测中心站, 福建 福州 350003)

摘要: 选取 2016 年 4 月、7 月和 10 月闽江口及其近岸水域 7 个调查点位的盐度、悬浮物、pH、溶解氧、化学需氧量、氮营养盐和重金属等 15 项监测指标数据, 采取主成分分析法分析了该水域的水质, 明确影响该水域水质的主要污染因子。结果表明: 15 项监测指标转换提取为 4 个主成分, 解释 82.153% 的方差。从时间分布来看, 闽江口及其近岸水域在 4 月份水质较差、10 月份次之、7 月份较好。从空间分布来看, 近河口水质较差而远离河口水质较好。影响该水域污染水质的主要驱动因子是 pH、COD、氮营养盐和 Cd。研究结果对于进一步了解闽江口及其近岸水域水质情况具有重要意义, 同时也为福建省海洋管理的科学决策提供支持。

关键词: 闽江口; 近岸水域; 水质评价; 主成分分析

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)11-0078-10

DOI: 10.11759/hyxx20200303005

日益严峻的水环境污染问题受到国内外有关学者的重视^[1-6], 开展水环境质量评价研究, 是水环境规划、决策及治理的基础, 能够为政府有关部门的科学决策提供支持。目前, 河流水质评价方法主要有单因子评价法^[7]和污染指数指数法^[8]。由于水环境中不同因子标准的划分不同, 采用单因子评价法并不能很好地说明水质特征。此外, 污染指数法常用于判断水质是否达标, 无法得到综合水质类别。随着大数据研究日益普及, 多元统计分析的应用也越来越广^[9]。其中, 主成分分析法是多元统计分析的方法之一, 通过降维手段将原有变量通过正交变换重新组合得到新的变量, 并按照实际情况从变换后的新变量中选择尽可能多的反映原有信息的变量。相比单因子评价法和污染指数法, 主成分分析法能够在最大范围内保留原始变量反映的信息, 简化原始变量中多而复杂的数据, 并且通过客观地确定各个指标的权重, 避免主观随意性^[10]。

闽江作为福建省最大的河流, 是福建省重要的饮用水源和经济用水源, 对福建省以及海峡西岸社会经济的发展具有重要作用^[11]。受亚热带季风气候影响, 闽江流域降水较为充沛。由于闽江上游存在较多工业企业以及养殖业等, 水质容易被污染, 从而制约了下游地区的水资源开发利用。目前, 针对闽江流域水质变化开展了少量的研究, 主要包括流域水

体水质参数研究^[12]、水质变化特征与趋势^[13-15]和水体重金属、有机物等污染物来源与分布^[16-20], 但是对闽江河口及其近岸水域水质变化及评价的研究十分缺乏。监测闽江河口及其近岸水域水质现状, 可以及时掌握水质状况, 把握水质变化规律, 及时预警潜在环境风险, 为海域水污染防治工作提供决策支撑。在此深刻背景下, 开展闽江河口及其近岸水域水质变化及评价研究显得十分必要。因此, 作者以闽江河口及其近岸水域为研究对象, 选取盐度(S)、悬浮物(SS)、溶解氧(DO)、pH、氨氮(NH₃-N)和重金属等 15 项因子构建水环境质量评价指标体系, 运用主成分分析方法, 分析 2016 年 4 月、7 月和 10 月闽江口及其近岸水域的水质状况以及分析水质污染的驱动因素, 对于进一步了解闽江流域污染物排海情况具有重要意义, 同时也为福建省海洋管理的科学决策提供支持。

收稿日期: 2020-03-03; 修回日期: 2020-03-16

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2020J01306); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目(闽教科[2018]47号); 中央引导地方科技发展专项(2019L3013)

[Foundation: The National Science Foundation of Fujian Province, No.2020J01306; Program for New Century Excellent Talents in Fujian Province University, Office of Science and Technology, Fujian Provincial Education Department, No.[2018]47; the Central Government Guides Local Science and Technology Development Project, No.2019L3013]

作者简介: 林秀珠(1981-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事环境影响评价方面研究, E-mail: linxiuzhu1030@163.com; 饶清华, 通信作者, E-mail: raoqinghua@sina.com

1 材料与方 法

1.1 调查范围与时间

本研究于 2016 年的 4 月、7 月和 10 月，以闽江口为中心向外设点，在闽江口及其近岸水域表层取样分析，研究范围为 119.39°E~120.36°E、25.36°N~25.98°N。闽江口及其近岸水域取样站位分布如图 1 所示。

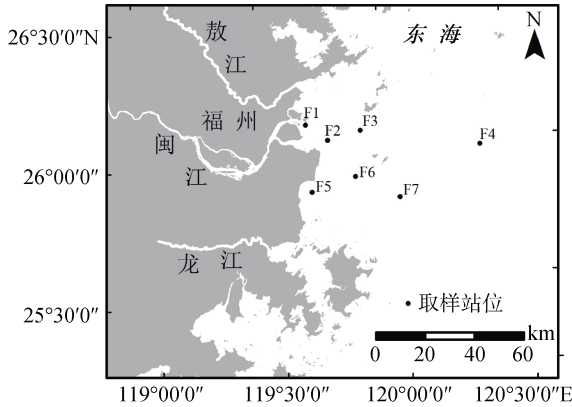


图 1 闽江口及其近岸水域取样站位分布图

Fig. 1 Location of sampling stations in the Minjiang River estuary and its coastal waters

1.2 样品采集与测定

本研究选择盐度(S)、悬浮物(SS)、溶解氧(DO)、pH、活性磷酸盐($PO_4^{3-}-P$)、化学需氧量(COD)、亚硝酸盐氮($NO_2^- -N$)、硝酸盐氮($NO_3^- -N$)、氨氮($NH_3 -N$)、石油类、铜(Cu)、铅(Pb)、镉(Cd)、非离子氨和无机氮等 15 项水质常用监测指标。使用有机玻璃采水器进行采集表层水样，水样采集后马上运送至实验室，采用《海洋监测规范》中的分析方法测定样品浓度。

1.3 主成分分析

1.3.1 构建原始数据矩阵

假设有 n 个评价对象， m 个评价指标，用评价矩阵 $Y=(y_{ij})_{n \times m}$ 表示($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$)。

1.3.2 指标数据标准化

将评价矩阵中的各指标 y_{ij} 转化成标准化指标 x_{ij} 。指标标准化计算公式为：

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \bar{y}_j}{S_j} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (1)$$

其中， x_{ij} 表示第 i 个评价对象第 j 个指标的标准化值；

$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij}$ 表示第 j 个指标平均值； $S_j =$

$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2$ 表示第 j 个指标标准差； n 表示评价对象个数， m 表示指标个数；本研究中 $n=21$ (3 个时期 7 个调查点位)， $m=15$ 。

1.3.3 指标相关性判定

指标标准化可以得到相关系数矩阵 $R=[r_{ij}]_{m \times m}$ 。

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n x_{ki} x_{kj}}{n-1} \quad i, j=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

r 的绝对值越接近于 1，表明 A 与 B 之间的相关关系越强； r 的绝对值越接近于 0，表示 A 与 B 之间的相关关系越弱。

R 的特征值 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, m)$ ，将其按大小顺序排列可以得到 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \dots \lambda_m \geq 0$ ，即为主成分的方差， λ_i 大小的取值就是对应主成分对原始样本的累计方差贡献率^[21]。分别求出特征值对应的特征向量为 u_1, u_2, \dots, u_m ，其中 $u_j=(u_{1j}, u_{2j}, \dots, u_{nj})^T$ 。通过特征向量将标准化后的指标转化成 m 个新的指标变量。

$$\begin{cases} PC_1 = u_{11}x_1 + u_{21}x_2 + \dots + u_{n1}x_n \\ PC_2 = u_{12}x_1 + u_{22}x_2 + \dots + u_{n2}x_n \\ \dots \\ PC_m = u_{1m}x_1 + u_{2m}x_2 + \dots + u_{nm}x_n \end{cases} \quad (3)$$

式中， PC_1 是第 1 主成分， PC_2 是第 2 主成分， \dots ， PC_m 是第 m 主成分。

1.3.4 确定主成分个数

计算特征值 $\lambda_j (j=1, 2, \dots, m)$ 的信息贡献率及累计贡献率。其中，主成分 PC_j 的信息贡献率为：

$$b_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{k=1}^m \lambda_k} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

主成分 PC_1, PC_2, \dots, PC_p 的累计贡献率为：

$$\alpha_p = \frac{\sum_{k=1}^p \lambda_k}{\sum_{k=1}^m \lambda_k} \quad (5)$$

当累计贡献率 α_p 大于 85% 时，选取前 p 个指标变量作为 p 个主成分，代替原来的 m 个指标变量，从而达到降维的目的。

1.3.5 主成分 Z 表达式

计算主成分 Z 综合得分，并根据综合得分进行评价。

$$Z = \sum_{j=1}^p b_j PC_j \quad (6)$$

主成分分析中,主成分综合得分越高,说明该评价对象的负荷越大。在水质评价中,综合得分越高,说明水体中污染物含量越高水质越差^[22]。

2 结果与分析

2.1 闽江口及其近岸水域水质主成分分析

选取特征根大于1的主成分,得到4个主成分。各主成分的特征根、方差与累计方差贡献率如表1所示,PC₁、PC₂、PC₃和PC₄的因子载荷如表2所示。

表1 主成分分析中的特征根、方差和累计方差贡献率
Tab. 1 Eigenvalues, variance and cumulative variance contribution rate in principal component analysis (PCA)

主成分	特征根	方差贡献率(%)	累计方差贡献率(%)
PC ₁	4.851	32.340	32.340
PC ₂	3.760	25.065	57.405
PC ₃	2.432	16.214	73.619
PC ₄	1.280	8.534	82.153

表2 主成分分析中的因子载荷
Tab. 2 Various factor loadings in PCA

指标	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄
x ₁ (S)	-0.785	-0.129	-0.521	0.069
x ₂ (SS)	-0.074	0.786	-0.349	0.301
x ₃ (DO)	-0.252	-0.517	0.515	-0.281
x ₄ (pH)	-0.883	-0.194	0.159	-0.029
x ₅ (PO ₄ ³⁻ -P)	0.827	-0.295	-0.193	-0.261
x ₆ (COD)	0.800	0.032	0.135	0.308
x ₇ (NO ₂ ⁻ -N)	0.032	0.677	-0.365	0.432
x ₈ (NO ₃ ⁻ -N)	0.968	-0.028	-0.135	-0.101
x ₉ (NH ₃ -N)	0.066	0.891	0.286	-0.200
x ₁₀ (石油类)	0.320	-0.705	-0.024	0.455
x ₁₁ (Cu)	0.108	-0.178	0.497	0.569
x ₁₂ (Pb)	-0.098	0.339	0.828	0.285
x ₁₃ (Cd)	0.241	0.248	0.712	-0.150
x ₁₄ (非离子氨)	0.001	0.879	0.058	-0.245
x ₁₅ (无机氮)	0.968	0.039	-0.130	-0.098

由表1、表2可知,采用主成分分析法,将15项监测指标转换提取为4个主成分,共解释82.153%的方差。PC₁对总方差的贡献率为32.340%,其中盐度、pH、化学需氧量、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P和无机氮所占权重较大;PC₂对总方差的贡献率为25.065%,其中悬浮物、NH₃-N、石油类以及非离子氨所占权重较大;

PC₃对总方差的贡献率为16.214%,主要代表重金属铅、镉;PC₄对总方差的贡献率为8.534%,主要代表重金属铜。

2.2 闽江口及其近岸水域水质时空分析

分别计算各采样点4个主成分得分PC₁、PC₂、PC₃和PC₄,并以4个主成分的贡献度为权重计算出综合主成分得分Z(表3)。

表3 闽江口及其近岸水域水质状况综合评价
Tab. 3 Comprehensive evaluation of the environmental quality of the Minjiang River estuary and its coastal waters

监测时期	监测站点	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄	Z
4月	F1	0.253	0.757	0.270	-0.027	1.253
	F2	0.042	0.007	0.421	-0.122	0.348
	F3	-0.188	0.124	0.319	0.058	0.313
	F4	-0.318	0.284	0.084	-0.107	-0.057
	F5	0.120	-0.160	0.319	0.282	0.562
	F6	-0.356	0.093	-0.001	-0.111	-0.375
	F7	-0.269	-0.205	0.092	0.163	-0.219
7月	F1	0.353	0.685	-0.285	0.066	0.819
	F2	0.292	0.241	-0.340	0.104	0.298
	F3	-0.314	-0.009	-0.067	0.089	-0.301
	F4	-0.471	0.254	-0.101	-0.086	-0.404
	F5	-0.322	-0.091	-0.236	0.104	-0.546
	F6	-0.491	-0.064	-0.117	-0.030	-0.702
	F7	-0.430	-0.306	-0.036	-0.007	-0.779
10月	F1	0.945	-0.205	-0.029	-0.006	0.704
	F2	0.356	-0.337	0.026	-0.073	-0.028
	F3	0.275	-0.351	-0.014	-0.074	-0.162
	F4	-0.336	-0.181	-0.092	-0.031	-0.638
	F5	0.440	-0.187	-0.060	-0.037	0.156
	F6	0.468	-0.105	-0.040	-0.079	0.243
	F7	-0.051	-0.246	-0.112	-0.075	-0.484

各主成分的综合得分空间分布如图2所示:

闽江口及其近岸水域水质空间上表现为:自西向东各个取样点位主成分综合得分均呈现减少的趋势,越靠近闽江河口综合得分越高(图2)。不同时期主成分综合得分F1点位最高,表明F1点位水质最差;F4和F7点位主成分综合得分较低,说明水质总体较好。闽江口及其近岸水域水质综合得分在时间上表现为:4月份相对较高、10月份与7月份相对较低,说明10月份与7月份水质相对较好、4月份水质相对较差。

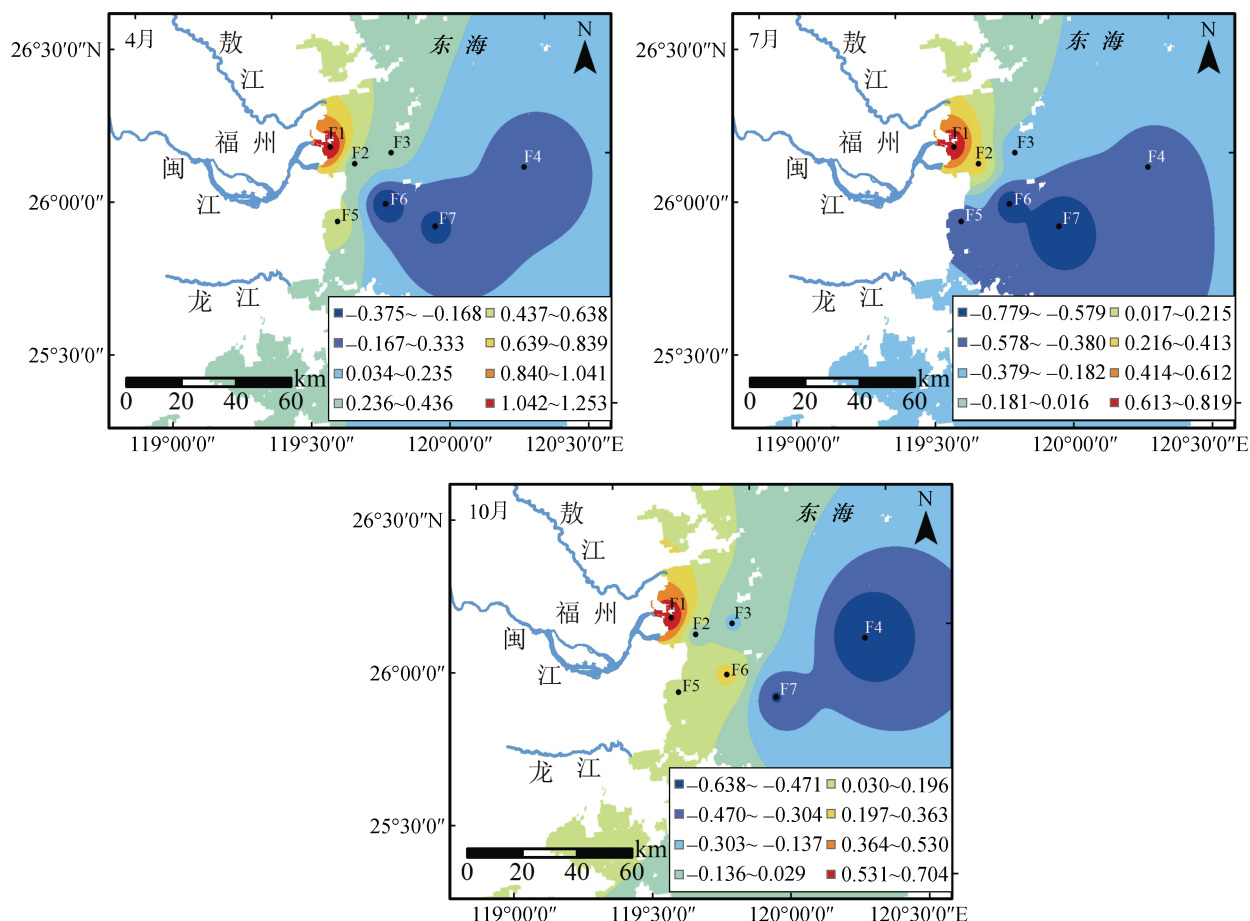


图2 各点位不同采样时间主成分综合得分空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the comprehensive scores of the principal components for each station at different sampling time

3 讨论

3.1 闽江口及其近岸水域水质时空分布

本研究表明, 闽江口及其近岸水域水质整体均呈现出近河口水质较差而远离河口水质较好的空间分布特征。其中, F1 点位水质较差, 可能与 F1 点位距离闽江入海河口较近有关。一方面, 闽江流域上游为三明、南平等城市, 经济发展水平与下游城市福州相比较低, 经济产业结构主要以第一、第二产业为主, 工农业生产废水虽然经过较长距离的混合及衰减, 但仍然有部分污染物通过闽江河口排入东海。另一方面, 福州市近几年社会经济发展较快, 生活污水及工业废水排放量增加, 大量的生活污水及工业废水排入闽江河口。此外, 由于闽江是典型的常规半日潮, 受潮汐作用影响, 污染物难以较快排出闽江河口。F4、F6 和 F7 点位远离闽江河口, 其所在的海域开阔, 海水的环境容量较大, 水体的自净能力较强; 此外, 受海洋洋流及海水动力的影

响, 排入东海的污染物经过迁移、转化、扩散以及衰减, 污染物浓度降低, 因此, F4、F6 和 F7 点位受污染的影响较小, 水质总体较好。

闽江口及其近岸水域水质(表4)整体上表现为4月份水质相对较差、10月份次之、7月份水质相对较好的时间分布特征。已有研究表明^[23], 闽江流域4~6月份为丰水期、7~9月为平水期、10月~次年3月为枯水期。4月份水质相对较差, 丰水期的水质甚至劣于枯水期与平水期, 可能与周边的农业活动频繁有关, 该结果与程学宁^[24]等的研究结果基本一致。一方面, 4~5月为春季, 水温相对较低、光照相对较弱, 水体中浮游植物种群密度相对较低, 水中营养盐的消耗量较小。另一方面, 农业活动在一年之中处于最频繁时期, 农药以及化肥在该时期大量的使用, 导致闽江流域内面源污染严重。闽江上游林区地表腐殖物, 农业生产所使用的化肥、农药等在汛期强降水作用下, 通过地表径流冲刷下汇入河流并排入东海^[25], 使得闽江河口附近水质

表 4 闽江口及其近岸水域水质指标浓度值
Tab. 4 Concentrations of the water environmental quality evaluation indices in the Minjiang River estuary and its coastal waters

监测 站点	监测时间 (年.月.日)	监测指标														
		S(‰)	SS (mg/L)	DO (mg/L)	pH	PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)	COD (mg/L)	NO ₂ ⁻ -N (mg/L)	NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	石油类 (mg/L)	Cu (μg/L)	Pb (μg/L)	Cd (μg/L)	非离子氮 (mg/L)	无机氮 (mg/L)
F1	2016.4.22	17.05	32.5	6.30	8.08	0.007 0	0.64	0.014 0	0.318 5	0.045 5	0.010 0	0.525	3.625	0.100	0.001 6	0.378
F2	2016.4.22	21.60	11.0	6.63	8.15	0.005 0	0.64	0.002 0	0.203 0	0.012 0	0.012 7	0.080	3.400	0.220	0.000 5	0.217
F3	2016.4.22	26.35	19.0	7.52	8.15	0.001 5	0.56	0.013 5	0.144 0	0.018 5	0.010 6	0.945	3.695	0.068	0.000 6	0.176
F4	2016.4.22	28.87	24.3	6.97	8.17	0.001 5	0.32	0.015 3	0.090 0	0.021 3	0.009 4	0.173	0.773	0.143	0.000 8	0.127
F5	2016.4.22	21.55	14.5	6.74	8.16	0.002 8	0.80	0.017 0	0.211 0	0.003 5	0.020 0	1.475	2.640	0.115	0.000 2	0.232
F6	2016.4.22	25.90	21.0	7.17	8.21	0.001 5	0.20	0.013 5	0.149 5	0.015 0	0.010 9	0.155	0.635	0.042	0.000 7	0.178
F7	2016.4.22	29.33	23.0	6.67	8.16	0.001 5	0.41	0.007 3	0.088 7	0.002 7	0.019 1	0.817	2.573	0.033	0.000 1	0.099
F1	2016.7.19	27.75	34.5	5.20	8.03	0.015 5	0.77	0.028 5	0.388 0	0.023 0	0.009 6	0.080	0.740	0.070	0.001 2	0.440
F2	2016.7.19	29.30	35.0	5.70	8.05	0.008 0	0.80	0.018 0	0.444 0	0.009 0	0.014 2	0.080	0.020	0.015	0.000 5	0.471
F3	2016.7.19	32.20	20.5	6.40	8.18	0.005 0	0.42	0.013 5	0.081 5	0.008 0	0.012 9	0.965	0.440	0.015	0.000 6	0.103
F4	2016.7.19	33.60	18.3	6.33	8.20	0.001 5	0.27	0.013 3	0.044 0	0.018 7	0.009 8	0.380	0.273	0.020	0.001 4	0.076
F5	2016.7.20	33.85	22.5	5.85	8.17	0.004 5	0.34	0.015 5	0.064 0	0.003 5	0.019 4	0.080	0.530	0.028	0.000 2	0.083
F6	2016.7.19	32.65	19.0	6.95	8.24	0.001 5	0.34	0.015 0	0.063 5	0.005 0	0.011 9	0.135	0.425	0.015	0.000 4	0.084
F7	2016.7.19	33.23	20.3	7.60	8.27	0.005 0	0.61	0.007 3	0.038 0	0.003 3	0.018 1	0.080	0.433	0.015	0.000 3	0.049
F1	2016.10.24	15.40	15.0	6.51	7.99	0.027 0	0.80	0.011 0	0.746 0	0.006 0	0.020 7	0.450	0.020	0.080	0.000 3	0.763
F2	2016.10.24	25.65	8.5	7.06	8.09	0.028 5	0.76	0.005 5	0.353 5	0.007 5	0.017 5	0.505	0.185	0.050	0.000 4	0.366
F3	2016.10.24	26.85	12.5	7.04	8.09	0.026 5	0.60	0.004 5	0.375 5	0.003 5	0.016 0	0.535	0.235	0.045	0.000 2	0.384
F4	2016.10.25	31.93	15.0	6.47	8.15	0.003 2	0.31	0.007 7	0.097 3	0.002 3	0.012 3	0.383	0.327	0.027	0.000 2	0.107
F5	2016.10.25	22.85	14.0	6.95	8.11	0.020 0	0.72	0.013 5	0.537 5	0.005 5	0.017 0	0.310	0.020	0.050	0.000 4	0.556
F6	2016.10.25	22.00	15.5	6.52	8.10	0.026 5	0.60	0.008 5	0.547 5	0.008 5	0.013 2	0.680	0.020	0.045	0.000 6	0.564
F7	2016.10.25	28.97	15.7	6.54	8.09	0.010 0	0.32	0.005 0	0.262 0	0.001 7	0.014 2	0.223	0.153	0.035	0.000 1	0.269

较差。F1、F2、F3 和 F5 在 4 月份的综合得分较高，也进一步说明闽江河口附近水质在该时段受上游来水的影响较大。10 月份水质较一般，可能与 10 月份处于枯水期有关。枯水期闽江径流量相对减少，水环境容量也随之减小，水体对污染物的净化能力减弱。此外，入海径流相对减少导致其水动力相对减弱，水体迁移扩散能力减弱。污染物扩散的速度减慢，其扩散到远离河口的海域所需时间增长，从而导致污染物容易堆积在靠近河口的区域。7 月处于夏季，气温相对较高并且阳光充足，是植物生产的旺盛时期。该时段水体中浮游植物快速的生长对水体中氮磷等营养盐的需求量增加，从而降低了水体中 NO₂-N、NO₃-N、NH₃-N、无机氮和磷酸盐等营养盐含量。

3.2 闽江口及其近岸水域水质污染驱动因子

通过测算各因子与主成分间的斯皮尔曼相关系

数能够有效提取水质污染的驱动因子^[25-26]，各参数与主成分之间的斯皮尔曼相关系数如表 5 所示。NO₃-N、NH₃-N、镉和 NO₂-N 分别与 PC₁、PC₂、PC₃ 和 PC₄ 相关性最显著($P<0.01$ 或 $P<0.05$)。PO₄³⁻-P、COD、NO₃-N 和无机氮与 PC₁ 呈极显著正相关($P<0.01$)，盐度和 pH 与 PC₁ 呈极显著负相关($P<0.01$)。SS、NO₃-N、NH₃-N 和非离子氨与 PC₂ 呈极显著正相关($P<0.01$)，石油类与 PC₂ 呈极显著负相关($P<0.01$)。重金属(Cu、Pb 和 Cd)与 PC₃ 呈显著或极显著正相关($P<0.01$ 或 $P<0.05$)，盐度与 PC₃ 呈极显著负相关($P<0.01$)。COD、NO₂-N 和石油类与 PC₄ 呈显著正相关($P<0.05$)。各参数与主成分综合得分之间的斯皮尔曼相关系数进一步说明 pH、COD、氮营养盐和 Cd 是闽江口及其近岸水域水质污染的主要驱动因子。

表 5 水质指标与各主成分间的斯皮尔曼相关系数

Tab. 5 Spearman's correlation coefficient between water quality index and principal components

指标	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄	主成分综合得分
x ₁ (S)	-0.731**	0.013	-0.606**	0.166	-0.806**
x ₂ (SS)	-0.274	0.636**	-0.316	0.372	0.004
x ₃ (DO)	-0.179	-0.432	0.538*	-0.312	-0.241
x ₄ (pH)	-0.861**	0.055	0.053	-0.112	-0.692**
x ₅ (PO ₄ ³⁻ -P)	0.821**	-0.432	-0.163	-0.036	0.374
x ₆ (COD)	0.764**	-0.116	0.146	0.436*	0.721**
x ₇ (NO ₂ -N)	-0.045	0.654**	-0.314	0.476*	0.255
x ₈ (NO ₃ -N)	0.938**	-0.119	0.03	-0.044	0.703**
x ₉ (NH ₃ -N)	0.139	0.830**	0.155	-0.25	0.563**
x ₁₀ (石油类)	0.311	-0.771**	0.058	0.445*	-0.065
x ₁₁ (Cu)	0.238	-0.212	0.482*	0.221	0.246
x ₁₂ (Pb)	-0.361	0.474*	0.575**	0.162	0.212
x ₁₃ (Cd)	0.514*	0.178	0.662**	-0.22	0.757**
x ₁₄ (非离子氨)	-0.006	0.817**	0.039	-0.312	0.373
x ₁₅ (无机氮)	0.927**	-0.07	0.035	-0.061	0.721**

注: ** $P<0.01$; * $P<0.05$

盐度是海水中一个重要的指标，对水体中藻类的生长及富营养化有重要的影响^[26-27]。本研究中，盐度与 PC₁ 和 PC₃ 呈极显著负相关($P<0.01$)，pH 与 PC₁ 呈极显著负相关($P<0.01$)。PC₁ 主要反映了化学需氧量、NO₃-N、PO₄³⁻-P 和无机氮的污染水平，这可能是闽江上游携带含有无机营养盐及有机污染物的工农废水及生活污水进入河口，造成河口区无机营养盐和有机污染物等浓度上升，水污染物程度升高。受河流冲淡水的影响，河口区盐度和 pH 降低，与河口

区无机营养盐和有机污染物等浓度上升形成显著的负相关趋势。远离河口区 F4、F6 和 F7 点位的盐度和 pH 总体上较高，而无机营养盐及有机污染物的浓度相对较低，说明其受污染的影响较小，水质总体较好。此外，PC₃ 主要反映了重金属铅、镉的污染水平。一方面，受闽江上游携带含重金属的工业废水以及河流冲淡水的影响，使得河口区重金属铅、镉浓度与盐度呈相反的变化趋势；另一方面，远离河口区的海水盐度增加，水体中离子强度增大，海水中碳

酸的电离度就降低,降低了氢离子的活度系数及活度,使得海水中的重金属容易在沉积物中不断累积和富集。

NO_2^- -N、 NO_3^- -N 和 NH_3 -N 三者统称为溶解无机氮(DIM)^[22],分别与 PC_1 和 PC_2 呈极显著正相关($P<0.01$)。水体中的 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 和 NH_3 -N 在一定的条件下相互转换,有机氮转化为无机氮的最终产物是 NO_3^- -N。由于工业废水、生活污水以及化肥和农药的使用,导致水体富营养情况加剧。与 10 a 前观测值相比,闽江河口水体中 N 含量呈大幅上升趋势,水体富营养化加剧^[28]。COD 与 PC_1 及主成分综合得分呈极显著正相关($P<0.01$)。COD 表示水体中受有机物污染程度的指标,而水体中的有机物在降解过程中需要消耗氧气。COD 值越大,说明水体中的有机污染物在降解过程中消耗氧气量越大,水体的污染程度越严重。重金属(Cu、Pb 和 Cd)与 PC_3 呈显著或极显著正相关($P<0.01$ 或 $P<0.05$),Cd 与主成分综合得分呈极显著正相关($r=0.757$, $P<0.01$),水体中的重金属容易在河口沉积物中不断累积和富集,对水体中的动植物造成危害。当水体中的 pH 降低时,沉积物中的重金属容易释放出来而进入水体,导致水体中的重金属污染程度升高。林祥^[29]将闽江入海污染物主要分为营养类污染物、有机污染物和重金属等。其中,营养类污染物和有机污染物的入海总量呈现上升趋势;重金属入海通量近年来虽然呈显著下降趋势,但其排放量仍然处于较高的水平。通过分析流域内污染物主要来源发现:化工和冶金工业废水是有机类污染物和重金属的主要来源,氮磷等营养物质主要来源于农业面源污染、生活污水以及流域上游养殖废水的排放。因此,未来应进一步提升闽江流域水环境质量,做好闽江流域水环境管理及水污染治理工作,严格控制闽江流域上游养殖废水、工业废水以及生活污水的排放,缓解近岸海域生态环境压力,为福建省建设“海洋强省”提供助力。

4 结论

作者运用主成分分析法对闽江口及其近岸水域 2016 年 4 月、7 月和 10 月的水质监测数据进行分析,提取了 4 个主成分,解释了 82.153%的结果。闽江口及其近岸水域水质空间上表现为近河口水质较差而远离河口水质较好的空间分布特征,时间上表现为 4 月份水质相对较差,10 月份次之,7 月份水质相对较好。闽江口及其近岸水域水质的主要驱动因子有 pH、

COD、氮营养盐和 Cd。

通过主成分分析法对闽江口及其近岸水域水质评价以及水质主要驱动因子分析,认为政府部门应加大闽江流域水环境保护开发管理力度,严格控制闽江流域上游养殖废水、工业废水以及生活污水的排放。

参考文献:

- [1] Schwarzenbach R P, Egli T, Hofstetter T B, et al. Global water pollution and human health[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2010, 35: 109-136.
- [2] Azizullah A, Khattak M N K, Richter P, et al. Water pollution in Pakistan and its impact on public health—a review[J]. Environment International, 2011, 37(2): 479-497.
- [3] Törnqvist R, Jarsjö J, Karimov B. Health risks from large-scale water pollution: trends in Central Asia[J]. Environment International, 2011, 37(2): 435-442.
- [4] Huang F, Wang X, Lou L, et al. Spatial variation and source apportionment of water pollution in Qiantang River (China) using statistical techniques[J]. Water Research, 2010, 44(5): 1562-1572.
- [5] Lu Y, Song S, Wang R, et al. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China[J]. Environment International, 2015, 77: 5-15.
- [6] Bao L J, Maruya K A, Snyder S A, et al. China's water pollution by persistent organic pollutants[J]. Environmental Pollution, 2012, 163: 100-108.
- [7] 崔雪梅, 赵盼盼, 章爱群, 等. 4 种河流水质评价方法的比较研究——以槐荫河为例[J]. 节水灌溉, 2015, 5: 46-51.
Cui Xuemei, Zhao Panpan, Zhang Aiqun, et al. Comparative analysis of four methods for water quality assessment: A case study of Huaiyin River[J]. Water Saving Irrigation, 2015, 5: 46-51.
- [8] 王小娇, 胡国成, 张丽娟, 等. 广西刁江流域主要河流水质评价[J]. 生态科学, 2016, 35(6): 128-135.
Wang Xiaojiao, Hu Guocheng, Zhang Lijuan, et al. Water quality assessment of the Diaojiang River Basin in Guangxi[J]. Ecological Science, 2016, 35(6): 128-135.
- [9] 傅德印. 主成分分析中的统计检验问题[J]. 统计教育, 2007, 23(9): 4-7.
Fu Deyin. Statistical test in principal component analysis[J]. Statistical Education, 2007, 23(9): 4-7.
- [10] 韩晓刚, 黄廷林, 陈秀珍. 基于主成分分析的原水水质模糊综合评价[J]. 人民黄河, 2010, 32(9): 62-65.
Han Xiaogang, Huang Yanlin, Chen Xiuzhen. Fuzzy comprehensive evaluation of raw water quality based on principal component analysis[J]. Yellow River, 2010, 32(9): 62-65.

- [11] 陈秀玲, 卓明清, 贾丽敏, 等. 闽江表层沉积物重金属污染分布特征及其来源分析[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(5): 43-48.
Chen Xiuling, Zhuo Mingqing, Jia Limin, et al. Distribution and sources of heavy metals pollution in surficial sediments of Minjiang River[J]. Environmental Pollution and Control, 2014, 36(5): 43-48.
- [12] 游雪静, 张玉珍, 苏玉萍, 等. 闽江流域水体氨氮降解系数实验模拟研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2014, 1: 61-67.
You Xuejing, Zhang Yuzhen, Su Yuping, et al. A study on degradation coefficients of ammonia-nitrogen in Minjiang Basin[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2014, 1: 61-67.
- [13] 程学宁, 汤云, 卢毅敏. 基于多元统计分析的闽江水质时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 89-94.
Cheng Xuening, Tang Yun, Lu Yimin. Spatial and temporal characteristics of water quality using multivariate statistical analysis in Min River[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(6): 89-94.
- [14] 张鹏, 逢勇, 石成春, 等. 闽江下游水质变化趋势分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 64-69.
Zhang Peng, Pang Yong, Shi Chengchun, et al. Analysis of change trend of water quality in Minjiang River downstream[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1): 64-69.
- [15] 饶清华, 曾雨, 张江山, 等. 闽江下游突发性水污染事故时空模拟[J]. 环境科学学报, 2011, 31(3): 554-559.
Rao Qinghua, Zeng Yu, Zhang Jiangshan, et al. Time-space simulation for sudden water pollution accidents in the lower reaches of the Minjiang River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(3): 554-559.
- [16] 李洋, 陈卫锋, 魏然, 等. 闽江福州段沉积物中重金属的分布特征及其毒性和生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1792-1799.
Li Yang, Chen Weifeng, Wei Ran, et al. Distribution characteristics, toxicity and risk assessment of heavy metals in sediments of Minjiang River in Fuzhou City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(5): 1792-1799.
- [17] 黄幸然, 吴旺旺, 胡宝叶, 等. 闽江水体和生物体中六六六和滴滴涕污染特征和来源解析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(3): 482-488.
Huang Xingran, Wu Wangwang, Hu Baoye, et al. Occurrence and source apportionment of HCHs and DDTs in water and organisms in Min River of Fujian, China[J]. Ecology and Environment Sciences, 2016, 25(3): 482-488.
- [18] 方红, 陈秀玲, 张雪琼, 等. 闽江福州段与城市内河表层沉积物重金属污染特征研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1160-1168.
Fang Hong, Chen Xiuling, Zhang Xueqiong, et al. Heavy metal pollution in the surface sediments from Minjiang River (Fuzhou Section) and urban rivers[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(4): 1160-1168.
- [19] Xu Y H, Sun Q Q, Yi L, et al. The source of natural and anthropogenic heavy metals in the sediments of the Minjiang River Estuary (SE China): implications for historical pollution[J]. Science of the Total Environment, 2014, 493: 729-736.
- [20] Zeng F M, Yang D, Xing X L, et al. Evaluation of Bayesian approaches to identify DDT source contributions to soils in Southeast China[J]. Chemosphere, 2017, 176: 32-38.
- [21] 张弘, 赵惠祥, 刘燕萍, 等. 基于主成分分析法的科技期刊评价方法[J]. 编辑学报, 2008, 20(1): 87-90.
Zhang Hong, Zhao Huixiang, Liu Yanping, et al. Evaluation method on sci-tech journals based principle component analysis[J]. Acta Editologica, 2008, 20(1): 87-90.
- [22] 刘潇, 薛莹, 纪毓鹏, 等. 基于主成分分析法的黄河口及其邻近水域水质评价[J]. 中国环境科学, 2015, 35(10): 3187-3192.
Liu Xiao, Xue Ying, Ji Yupeng, et al. An assessment of water quality in the Yellow River estuary and its adjacent waters based on principal component analysis[J]. China Environmental Science, 2015, 35(10): 3187-3192.
- [23] 张章新. 闽江流域水文特性分析[J]. 水文, 2000, 20(6): 55-58.
Zhang Zhangxin. Analysis on the hydrological characteristics of Minjiang River basin[J]. Hydrology, 2000, 20(6): 55-58.
- [24] 程学宁, 卢毅敏. 基于 SOM 和 PCA 的闽江流域地表水水质综合评价[J]. 水资源保护, 2017, 33(3): 59-67.
Cheng Xuening, Lu Yimin. Comprehensive evaluation of surface water quality in Minjiang River Basin based on SOM and PCA[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3): 59-67.
- [25] 周斌, 王悠, 王进河, 等. 山东半岛南部近岸海域富营养化状况的多元评价研究[J]. 海洋学报, 2010, 32(2): 128-138.
Zhou Bin, Wang You, Wang Jinhe, et al. A multivariate assessment of eutrophication in the coastal waters of the southern Shandong Peninsula[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(2): 128-138.
- [26] 杨斌, 方怀义, 许丽莉, 等. 钦州湾水质污染时空变化特征及驱动因素[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(6): 877-883.
Yang Bin, Fang Huaiyi, Xu Lili, et al. Spatio-temporal variation characteristics and driving factors of water pollution in Qinzhou bay[J]. Chinese Journal of Marine Environmental Science, 2017, 36(6): 877-883.
- [27] 高嵩, 范士亮, 韩秀荣, 等. 浒苔绿潮与南黄海近岸

- 海域水质的关系[J]. 中国环境科学, 2014, 34(1): 213-218.
- Gao Song, Fan Shiliang, Han Xiurong, et al. Relations of *Enteromorpha prolifera* blooms with temperature, salinity, dissolved oxygen and pH in the Southern Yellow Sea[J]. China Environmental Science, 2014, 34(1): 213-218.
- [28] 吴耀建, 张永勋, 黄佳芳, 等. 闽江福州下游段水体 N 含量季节变化及对湿地土壤 N 含量的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 76-80.
- Wu Yaojian, Zhang Yongxun, Huang Jiafang, et al. Seasonal variations of N content in Fuzhou downstream section of Minjiang River and its influence on N content in wetland soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(4): 76-80.
- [29] 林祥. 闽江污染物入海总量变化趋势研究[J]. 环境保护科学, 2018, 44(5): 101-105, 117.
- Lin Xiang. Study of the change trend of the total pollutants of Minjiang River into the sea[J]. Environmental Protection Science, 2018, 44(5): 101-105, 117.

Assessment of the Minjiang River estuary and its coastal waters quality using principal component analysis

LIN Xiu-zhu¹, RAO Qing-hua¹, CHEN Qi², LIN Mao-zi¹, LIN Yun-shan³

(1. Key Laboratory of Measurement and Control System for Coastal Environment, Fuqing Branch of Fujian Normal University, Fuqing 350300, China; 2. Fujian Provincial Investigation Design & Research Institute of Water Conservancy & Hydropower, Fuzhou 350001, China; 3. Fujian Environmental Monitoring Center, Fuzhou 350003, China)

Received: Mar. 3, 2020

Key words: Minjiang River estuary; coastal waters; water quality assessment; principal component analysis

Abstract: Three surveys were conducted in the Minjiang River estuary and its coastal waters in April, July and October 2016 for collecting the water environmental quality information on 15 environmental indicators including salinity (S), suspended solids (SS), pH, dissolved oxygen (DO), chemical oxygen demand (COD), nitrogen nutrient, and heavy metals. The environmental quality of the Minjiang River estuary and its coastal waters were analyzed by principal component analysis (PCA) to identify the potential driving factors influencing the water environmental quality. Four principal components were extracted from the 15 environmental indicators, which explained 82.153% of the total variance in the original dataset. Temporal variations indicated that the water environmental quality generally the best in July, followed by October, and then April. Spatial variations suggested that pollution was more serious in the Minjiang River estuary than in the coastal waters. Moreover, pH, COD, nitrogen nutrient and cadmium played a key role in the water environmental quality. The research results are of great significance to further understand the environmental quality of the Minjiang River estuary and its coastal waters, and it can serve as a strong basis for the scientific decision-making of marine management in the Fujian Province.

(本文编辑: 谭雪静)