

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201805040



采用主成分分析和水质标识指数 评价敖江流域水质

张莹莹, 卢毅敏

(福州大学 福建省空间信息工程研究中心, 福建 福州 350002)

摘要: 根据 2017 年 3 月至 2018 年 3 月敖江流域的 4 个断面的水质监测数据,采用主成分分析法(PCA)识别流域水质时空变化特征,并采用水质标识指数法对敖江流域水质状况进行综合评价. PCA 将 8 项水质指标转换为 3 种主成分,解释了原数据集 83.144% 的信息. 分析结果表明:敖江流域水质受上游石材工业、中下游农业、畜禽养殖业和下游人口分布影响较大,且污染呈现季节性变化;敖江流域整体水质较好,各监测断面水质情况受单项水质指标的影响显著,且流域整体污染呈现从上游往下游加重的趋势.

关键词: 水污染; 主成分分析; 时空变化特征; 水质标识指数法; 综合水质评价; 敖江流域

中图分类号: X 824 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)01-0093-08

Water Quality Evaluation of Aojiang River Basin Using Principal Component Analysis and Water Quality Index

ZHANG Yingying, LU Yimin

(Spatial Information Research of Center of Fujian Province, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: According to the water quality monitoring data of four sections in the Aojiang River Basin from March 2017 to March 2018, the principal component analysis (PCA) was used to identify the temporal and spatial variation characteristics of water quality in the basin, and the water quality identification index method was used to comprehensively evaluate the water quality of the Aojiang River. The method of PCA converted eight water quality indicators into three principal components and 83.144% of the original data information was explained. The analysis results showed that the water quality of the Aojiang River Basin was affected by the stone plate industry of the upstream, the agriculture and livestock and poultry breeding industry in the middle and lower reaches, and the population distribution of the downstream, furthermore, the pollution presented seasonal changes; and the overall water quality of the Aojiang River was relatively good, the water quality of each monitoring section was significantly affected by the single water quality index, and the overall pollution of the watershed showed an aggravating trend from upstream to downstream.

Keywords: water pollution; principal component analysis; temporal and spatial changes; water quality identification index method; comprehensive water quality evaluation; Aojiang River Basin

流域地表水作为水资源的重要组成部分,广泛地应用于居民的日常生活、农业灌溉、城市建设中.近年来,规模化人口增长与城市化经济发展使我国地表水水环境问题凸显^[1]. 水质评价是通过对水体中相

收稿日期: 2018-05-21

通信作者: 卢毅敏(1973-),男,副研究员,博士,主要从事资源环境模型与系统模拟的研究. E-mail: luym@lreis. ac. cn.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0503500)

关水质组分进行监测和调查,并以定量的方式对水环境质量及其利用价值的总体状况进行评定^[2].典型的地表水水质综合评价方法有单因子评价法、集对分析法、灰色系统评价法、主成分分析法、模糊评价法、BP 人工神经网络评价法、水质标识指数法等^[3-5].刘潇等^[6]采用主成分分析法(PCA)对影响黄河口及近岸海域水质的主要因子进行分析,结果显示,主成分分析可将 14 项水质指标转换为 4 种主成分,使评价过程简单,结果合理.胡成等^[7]基于现有水质数据,采用综合水质标识指数法,识别出浑河的 3 个控制单元各自的主要污染因子,阐明了浑河流域水环境质量时空变化规律,对流域水污染防治对策的提出有一定的指导意义.李国峰等^[8]对天津地区 12 条主要河流于 2009 年枯水期、丰水期和平水期的水质监测数据进行主成分分析,构建水质评价指标体系,同时,采用水质标识指数进行水质评价,评价结果证明主成分分析法与水质标识指数法相结合的可靠性.本文采用主成分分析法识别敖江流域水质时空变化特征,并进一步采用水质标识指数法对敖江流域水质状况进行综合评价.

1 研究区概况

研究区概况,如图 1 所示.敖江流域位于北纬 26°8′~26°46′,东经 118°39′~118°54′,为福建省第六大流域.流域面积 2 677 km²,干流全长约 137 km,为闽东独立水系,发源于古田县东北部鹞峰山脉,沿途有西洋溪、柴峰溪、黄埔溪、斌溪、华林溪等支流汇入,流经罗源县、连江县,在东岱口处注入东海.敖江流域整体地势较高,西北多为山地丘陵,东南主要为连江平原,河流总体流向为东南向.中游的山仔水库总库容为 1.76×10⁸ m³,主要用于防洪、水量调度、发电;下游 8 km 的塘坂水库被定为连江县城、可门港,以及福州市部分地区的生活水源^[9].因此,敖江的水环境质量直接影响到大部分居民的饮用水安全.



图 1 研究区概况图
Fig. 1 Survey map of study area

敖江流域上游石材资源丰富,20 世纪末期,为发展当地经济,石板材工业迅速崛起,这些企业多依傍采石场而建,企业数量和产量规模大幅度增加,一度成为宁德地区的支柱性产业.由于缺失植被覆盖,雨水冲淋的“人造石山”常常造成流域浊度严重提升^[10].再有石板材企业加工产生的废水通过直接、间接方式排入流域中,由于这些废水中包含了大量在石板材加工工艺中使用的“冷却剂”,其主要成分为不饱和脂肪酸及其皂化物、树脂酸类及其皂化物、木素类及其降解物等.这些有机高分子化合物可吸附粉尘中的小颗粒,使水体较长时间内呈现胶体特性,难以沉降,导致原本清澈的溪流变成“牛奶溪”^[11].此外,敖江流域取水便捷,生猪养殖业较发达,而农村地区污水、垃圾处理设施较落后,养殖产生的废水胡乱排入水体,造成流域水环境日益恶化,敖江流域已经出现水环境生态失衡现象.

为迎合国家可持续性发展战略的要求和提高人们对水环境保护的意识,福建省政府开始着重对敖江流域进行整治.2000 年,福建省颁布《敖江流域水源保护管理办法》,随后,实施敖江流域水环境保护规划三个“五年”计划,并且不断加大工作力度,如强化保护饮用水源地;建立垃圾和废水处理设施;专项整治建筑饰面石材行业和畜禽养殖业;推进生态环境保护建设和提高水环境监管能力等.但是,由于农村地区受诸多因素限制,石板材工业产生的废渣、废料难以在短时间内处理,整治力度在很大程度上

有待提高. 因此,敖江流域水环境形势虽然得到一定程度上的提升,但仍然不容乐观,主要存在以下 4 个问题. 1) 水动力条件差. 敖江流域属于乡镇河网,河段之间建有梯级水电站,导致水流缓慢,不利于污染物的迁移扩散. 2) 山仔水库富营养化. 在建库初期,没有对底部淤泥进行清理,而后又汇入库区上游营养盐,导致水库水质呈现季节性富营养化现象,至 2012 年,已爆发多次不同程度的蓝藻水华^[12]. 3) 水质指标间歇性超标. 点源和面源污染的输入,使流域水质指标处于不稳当状态,间歇性出现超Ⅲ类水现象. 4) 水体浊度严重. 石板材行业遗留的废渣、废料通过雨水冲刷进入流域水体中,造成水体浊度增大.

长期以来,对敖江流域水环境质量的描述多以感官效果为主,未有全面的量化评价. 因此,采用相关的水质评价方法,正确评价和分析当前流域的地表水环境形势,对保障全省水环境质量和推动我国“十三五”生态文明建设具有重要意义.

2 数据与方法

2.1 水质监测数据

采用的数据来源于福建省生态云平台项目水环境综合分析系统. 敖江目前暂有的 4 个地表水监测站点监测断面,每个监测断面共监测 8 项水质监测指标,即水温、酸碱度(pH 值)、电导率、浊度、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP). 监测时间从 2017 年 3 月 27 日至 2018 年 3 月 16 日,每日从零点开始,每隔 4 h 获取一次监测数据,一天共获取 6 次数据. 获取到的水质监测数据常常因为监测设备、网络数据传输等问题存在异常、缺失(零值)等情况. 为了能够有效地对敖江流域水质进行量化评价,需先对获取的原始数据进行处理,具体过程包括:剔除异常值,归零,插补缺失值.

剔除异常值需参考国家标准 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中水质指标的分类标准,并且根据目前敖江流域水环境状况,参考 4 个站点各个指标的数值分布,确定每个指标的取值范围,并将超出原始数据范围的数值设置为异常值,并赋为零值. 考虑到一般水质监测的前后较短时间内,指标数值一般不会呈现较大波动,故采用中值插补方式对缺失值进行插补,得到完整的水质时间序列数据,其基本统计结果,如表 1. 表 1 中: t 为水温; σ 为电导率; z 为浊度; ρ 为质量浓度.

表 1 监测指标基础统计结果

Tab. 1 Basic statistical results of monitoring indicators

参数	$t/^{\circ}\text{C}$	pH	$\sigma/\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	z/NTU	$\rho/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			
					DO	COD _{Mn}	NH ₃ -N	TP
最小值	6.300	5.730	0.410	1.270	3.960	0.003	0.001	0.001
平均数	21.567	7.095	74.452	96.151	8.494	2.441	0.086	0.172
中位数	22.300	7.012	66.240	36.881	8.355	1.906	0.051	0.076
最大值	33.900	9.150	480.700	997.136	13.583	14.700	1.800	2.143
标准方差	5.975	0.413	33.510	139.084	1.261	1.544	0.113	0.308
变异系数	0.277	0.058	0.450	1.447	0.148	0.633	1.314	1.790

2.2 数据分析方法

2.2.1 主成分分析法 为了对水质污染状况进行全面、系统地评价,往往需要对反映水质情况的多个指标进行观测. 多变量、大样本的使用,给科学研究提供丰富的信息,但却增加分析的工作量^[13]. 因此,如果指标之间存在相关关系,则可以考虑通过特定方法建立指标之间的联系,用少数几个彼此独立的新指标代替原来众多的指标,使它们能尽可能、较全面地反映水质信息. 主成分分析是多元统计分析中应用性极强的重要分支之一,其基本原理是在保证原始数据信息损失最小的前提下,经过线性变换和舍弃部分信息,以少数相互间没有重复特征信息的综合变量取代原有的多维变量,简化数据结构,客观确定权重,避免主观随意性. 因此,使用该方法可综合评价水质,已经广泛地应用在水质评价中^[14].

2.2.2 水质标识指数法 徐祖信^[15]提出的水质标识指数法是一种基于代数运算的水质连续性刻画评价方法,计算简单、结构清晰. 该方法完整地标识了水质评价指标的类别、水质数据、功能区目标值等重要信息,可以直观地表达水质类别与功能区目标值的差距,反映水质达标情况. 其中,单因子水质标识指数(SWQF)法可通过对不同水质指标单因子标识指数的比较,判断该断面导致水质恶化的主要污染指

标;综合水质标识指数(CWQII)法可以把选定的多个水质指标计算成一个数值,避免个别较差水质指标对整体评价的影响,能完整地表达监测断面的综合水质信息,且可以对同一等级水体进行量化对比^[16].单因子水质标识指数法和综合水质标识指数法的计算方法有以下2点.

1) 单因子水质标识指数的组成.第*i*项水质指标的单因子水质指数 P_i 由一个整数、小数点后两位或三位有效数字组成,表示为 $P_i=X_1.X_2X_3$.其中: X_1 、 X_2 为计算结果; X_1 表示为第*i*项水质指标的水质类别; X_2 表示为该水质在 X_1 类水质标准下限值与上限值的区间位置,按照四舍五入的方式确定; X_3 为比较结果,由于这里只用到计算,故不考虑 X_3 .

2) 综合水质标识指数的组成.综合水质标识指数 I_{wq} 表示为 $I_{wq}=X_1.X_2X_3X_4$.同样的, X_1 、 X_2 为计算结果, X_3X_4 为比较结果,这里只用到计算结果,故只考虑 X_1 、 X_2 ,即

$$X_1.X_2=\frac{1}{n}\sum(P'_1+P'_2+\cdots+P'_n).$$

上式中: X_1 、 X_2 为单因子水质标识指数法总和的平均值; n 为参加水质评价因子的个数.

3 分析结果

3.1 基于PCA的敖江流域水质时空特征分析

对敖江流域各站点月份水质的52组样本集进行PCA分析.在分析PCA前,需对数据集进行KMO检验和Bartlett球形检验.若KMO检验结果大于0.5,Bartlett球形检验结果显著性概率*P*值小于0.05,说明各变量间具有相关性,可以进行主成分分析^[17].通过SPSS软件,对月份水质数据进行因子分析,得到KMO检验结果为0.525,Bartlett球形检验结果显著性概率*P*值小于0.001,说明该组数据适合进行PCA分析.利用SPSS软件进行PCA分析,得到特征值和解释的方差,如表2所示.表2中: R_v 、 R_{cv} 分别表示方差贡献率和累计方差贡献率.

依据Kaiser-Harris准则,一般保留特征值大于1的主成分,第1、2、3主成分的特征值分别为2.942、2.239、1.479,故确定输出第1、2、3主成分,其方差贡献率分别为36.772%、27.879%和18.493%,而方差累计贡献率为83.144%,说明这3个主成分基本包含原数据集的大部分信息,可代替原8项指标.

前3项主成分的荷载分布,图2所示.由图2可知:主成分1与pH值、电导率、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP高度相关,pH值和电导率可作为解释水体酸碱盐指标, $\text{NH}_3\text{-N}$ 值和TP值可作为解释水体营养盐污染指标,故主成分1主要解释水体的各类盐质质量浓度;主成分2与水温 and DO高度相关,两者指标呈负相关,天然水体中水温值越高,水中DO越低,可作为解释水体环境变化特征;主成分3与浊度和 COD_{Mn} 相关,可作为解释水体可还原污染物及悬浮物的污染指标.

通过主成分分析,得到主成分得分系数,构成的主成分综合得分函数为

$$\begin{cases} f_1=-0.051x_1+0.256x_2+0.323x_3+0.068x_4+0.005x_5-0.071x_6+0.244x_7+0.314x_8, \\ f_2=0.419x_1+0.189x_2+0.051x_3+0.189x_4-0.418x_5+0.088x_6-0.047x_7-0.116x_8, \\ f_3=-0.143x_1-0.158x_2-0.118x_3+0.481x_4+0.058x_5+0.579x_6+0.185x_7+0.108x_8. \end{cases}$$

代入数值计算,可得敖江流域4个站点13个月(2017年3月至2018年3月)的水质主成分得分,如图3所示.结合图3与敖江流域相关的地理特征,可识别该流域水质污染的时空规律.敖江流域的人口分布和农田分布,如图4所示.图4中:农田以水田为主,并存有部分旱田.

表2 水质监测指标PCA特征值及方差
Tab.2 PCA eigenvalues and variances of water quality monitoring indicators

主成分	特征值	$R_v/\%$	$R_{cv}/\%$
1	2.942	36.772	36.772
2	2.230	27.879	64.651
3	1.479	18.493	83.144
4	0.696	8.696	91.840
5	0.445	5.568	97.408
6	0.087	1.085	98.493
7	0.071	0.888	99.380
8	0.050	0.620	100.000

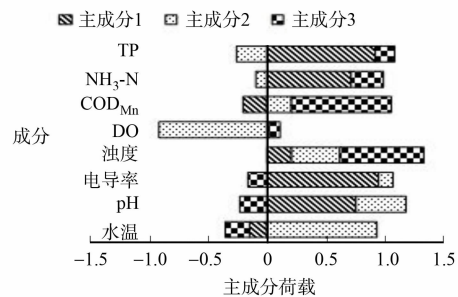


图2 前3项主成分荷载
Fig.2 First three principal component loads

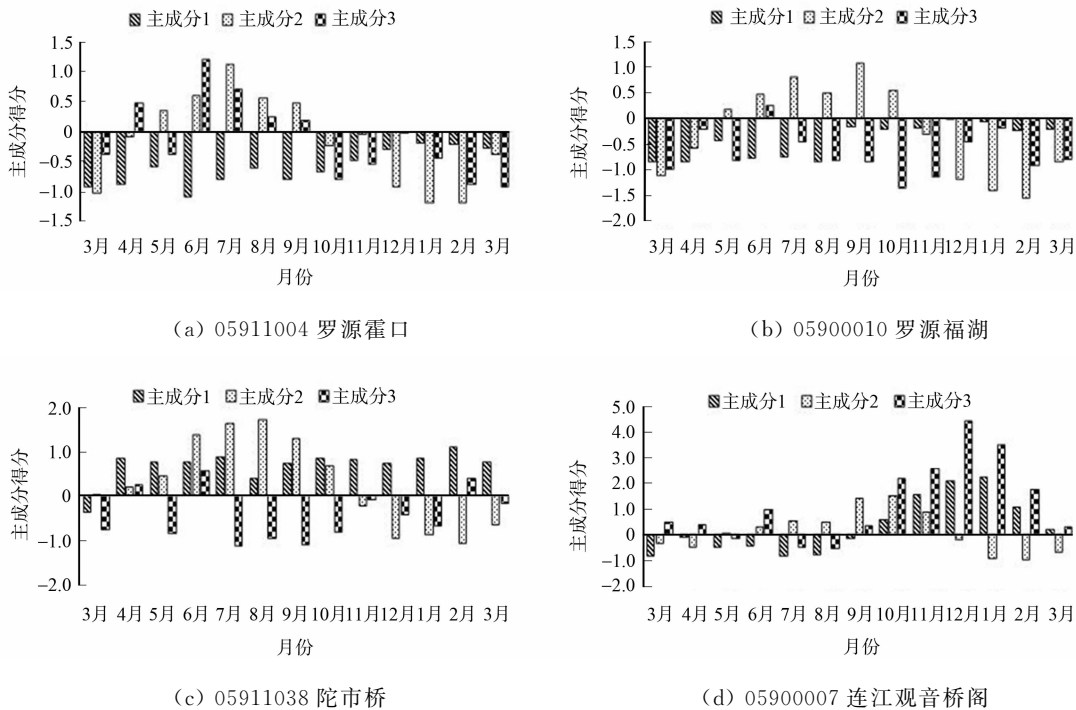


图 3 敖江流域监测断面 PCA 得分时空分布

Fig. 3 Temporal and spatial distribution of PCA score in monitoring section of Aojiang River Basin

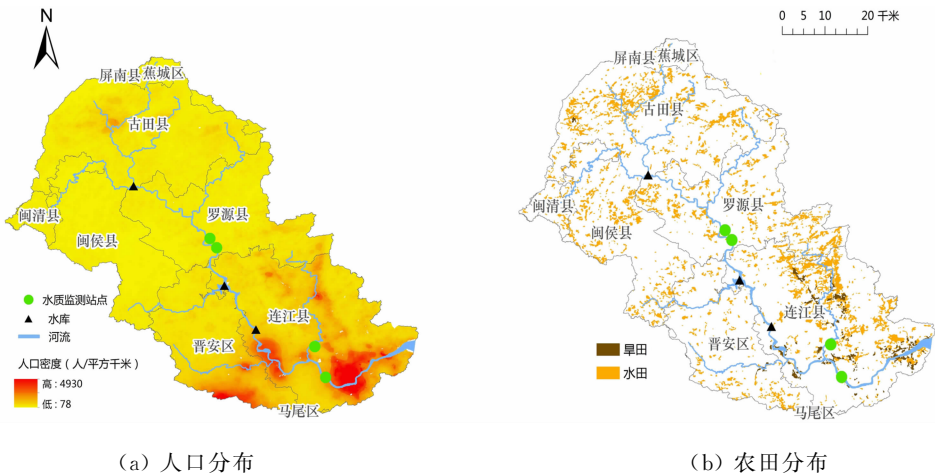


图 4 敖江流域人口分布和农田分布

Fig. 4 Population distribution and farmland distribution of Aojiang River Basin

主成分 1 得分作为解释水体盐类污染程度,得分越高,表明水体存在盐类污染越严重,有可能出现水体富营养化及水质恶化. 由图 3 可知:流域水体富营养化主要集中在 10 月至次年 3 月,以罗源霍口、罗源福湖、连江观音阁断面最具有代表性. 此时,处于秋季进入冬季,河流处于非汛期阶段,流域水温较低,水体流速和流量较平时均有所降低,污染物入河无法及时随水流扩散稀释;另外,通过对 4 个监测断面进行对比分析,罗源霍口和罗源福湖断面盐类污染较轻,主要是因为这 2 个水质断面处于敖江流域的上游,该地区一般以山地丘陵地势为主,人口较少,产生营养盐污染排放较低,而陀市桥断面全年水体富营养化均呈现较严重的形式. 结合图 4(b)可知:由于陀市桥断面附近农业较发达,农田在施肥过程中,有大量氮、磷元素无法被农作物吸收,随着雨水冲刷进入河流当中,造成此段流域水质富营养化较严重;另外,陀市桥附近为丹阳镇,该镇目前尚有 30 家生猪养殖场,其中,14 家沿大港流域分布,畜禽养殖产生的污水中包含氮、磷元素,这也是造成陀市桥断面水质营养化的重要原因.

主成分 2 得分作为解释水体环境变化特征,得分越高,说明水温越高,而水中 DO 越低. 由图 3 可知:5—10 月水体 DO 相对于其他月份较低,主要原因是此时处于南方地区的夏季,温度长期保持较高,

水中含氧量降低;并且,夏季水体环境较适宜浮游生物和藻类植物生长,消耗了水中大量的溶解氧,导致影响 DO 的饱和度。

主成分 3 得分主要作为水体可还原污染物及悬浮物质量浓度的解释,得分越高,表明有机污染物、还原性无机物质及悬浮物污染程度越高。由图 3 可知:罗源霍口的污染情况明显高于其他断面,这主要是由于罗源霍口断面附近的采石场和石材加工企业遗留的石材废渣、废料通过雨水冲刷进入河流。其中,有机高分子化合物成分“冷却剂”造成该断面有机污染物和还原性无机污染物较高,石板材粉尘造成流域浊度较大,悬浮物污染较高,下游地区随着水流的扩散、稀释和沉淀,污染程度有所减轻。由图 3 还可知:连江观音阁断面从 10 月至次年 2 月也呈现较严重的形式。结合图 4(a)分析,这主要是因为连江观音阁断面位于敖江流域下游的连江平原地区,附近人口分布较多,其上游为旅游业发达的贵安新天地,该地区为温泉旅游度假区,每年冬天都会迎来当地的旅游高峰期,商铺、住宅及旅游产生的生活垃圾、废水,是造成该时间段污染加重的主要原因;另外,连江观音阁断面附近为连江县城,人口较多,也造成该断面污染较重。

综上所述,采用主成分分析法对水质监测数据进行研究,可以直观地对不同月份、不同监测断面的相对污染情况进行比较。但是,水质质量的优劣在很大程度上取决于超标最严重的指标,而主成分分析由于其自身特点,无法确定各样本的水质质量等级^[18-19]。因此,为确定各样本的水质质量等级,进一步采用水质标识指数法对各站点水质样本进行定量评价,从而判断样本受污染的程度。

3.2 基于水质标识指数法的水质评价结果分析

为梳理流域各站点水质情况,依据国家标准 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》对敖江流域 4 个水质监测站点的 13 个月(2017 年 3 月至 2018 年 3 月)水质检测样本,抽取其 DO、COD_{Mn}、NH₃-N、TP 4 个水质指标,并采用 SWQF 和 CWQII 进行水质类别分析,结果如表 3 所示。由表 3 可知:采用 SWQF 与 CWQII 计算得到的水质类别占比及水质达标率不同,综合水质标识指数评价法得出的水质类别优于单因子水质标识指数的评价结果,这表明敖江流域各断面水质受单项水质指标的影响显著。

表 3 基于 SWQF 和 CWQII 的各断面水质类别分析

Tab. 3 Analysis of water quality of each section based on SWQF and CWQII								
站点(目标水质)	评价方法	I 类/%	II 类/%	III 类/%	IV 类/%	V 类/%	劣 V 类/%	达标率/%
罗源霍口(III 类)	SWQF	52.53	43.85	3.15	0.37	0.11	—	99.53
	CWQII	72.72	26.91	0.37	—	—	—	100.00
罗源福湖(III 类)	SWQF	61.52	33.45	4.55	0.41	0.06	—	99.53
	CWQII	81.79	18.21	—	—	—	—	100.00
陀市桥(III 类)	SWQF	46.49	29.27	20.65	3.21	0.35	0.03	96.41
	CWQII	21.97	74.77	3.26	—	—	—	100.00
连江观音阁(III 类)	SWQF	43.14	38.07	7.51	4.44	0.57	6.27	88.72
	CWQII	39.22	37.65	23.06	0.07	—	—	99.93

通过计算单项水质指标的水质类别占比,分析造成流域中每个监测断面较差的水环境的主要污染指标,如表 4 所示。由表 4 可知:从 4 个监测站点的单因子标识指数分析,DO 和 NH₃-N 基本处于 I 类水质质量等级,而 COD_{Mn} 主要处于 I 类、II 类水体,TP 处于 II 类、III 类水体。因此,在 4 项水质指标中,导致敖江流域水环境水体质量较差的原因主要是 COD_{Mn} 和 TP。4 个监测站点中,中上游单元包括罗源霍口和罗源福湖 2 个站点,水质整体较好,但存在 COD_{Mn}、TP 未达标,且罗源福湖 DO 也存在少量未达标情况。下游单元包括陀市桥和连江观音阁站点,4 项水质指标相对中上游站点均较差,且全部存在未达标情况。其中,陀市桥站点主要为 TP 指标严重超标,连江观音阁断面的 COD_{Mn} 和 TP 指标达标率均在 90.00% 以下,其中,TP 达标率仅为 69.40%。

另外,从 4 个监测站点的综合标识指数值分析,污染呈现从中上游往下游加重的趋势,这主要是由敖江流域的地形决定。敖江流域上游,主要地形为山地丘陵,人口分布较稀疏,污染物较少。但罗源霍口断面水质污染较严重,这是因为该断面石板材工业发达,石材开采及石板材加工后留下的废渣、废料,以及其中包含的有机高分子化合物“冷却剂”流入河流,造成该断面污染整体较高。从单因子标识指数分析,该断面的 COD_{Mn} 数值高于其他 3 个断面,这也正好表明该断面有机污染物和还原性无机物污染较

严重. 流域下游地区主要为连江平原, 人口分布较广, 且较适宜发展农作物和养殖业, 产生的生活垃圾、污水、农业污染和养殖废水等通过土壤渗透、地表径流的方式进入水体, 从而造成水体有机物污染, 并且升高了氮、磷元素水平. 综上所述, 流域整体污染呈现从上游往下游加重的趋势.

表 4 水质标识指数法对单项水质指标评价结果

Tab. 4 Water quality indicator index evaluation results for individual water quality indicators

站点 (目标水质)	检测指标	单因子 标识指数	综合 标识指数	I 类/%	II 类/%	III 类/%	IV 类/%	V 类/%	劣 V 类/%	达标率/%
罗源霍口 (III 类)	DO	1.4	1.9	74.96	23.02	2.02	—	—	—	100.00
	COD _{Mn}	2.2	—	39.81	53.81	4.79	1.15	0.44	—	98.41
	NH ₃ -N	1.3	—	94.93	3.95	1.12	—	—	—	100.00
	TP	2.6	—	0.40	94.62	4.67	0.31	—	—	99.69
罗源福湖 (III 类)	DO	1.2	1.8	84.74	13.83	1.28	0.14	—	—	99.86
	COD _{Mn}	2.0	—	67.6	27.6	3.38	1.17	0.25	—	98.58
	NH ₃ -N	1.3	—	93.21	4.87	1.92	—	—	—	100.00
	TP	2.7	—	0.53	87.52	11.63	0.32	—	—	99.68
陀市桥 (III 类)	DO	1.6	2.2	62.42	32.36	4.35	0.83	0.04	—	99.13
	COD _{Mn}	2.1	—	56.24	39.58	3.52	0.52	0.13	—	99.35
	NH ₃ -N	1.9	—	67.29	28.10	3.83	0.39	0.39	—	99.22
	TP	3.4	—	—	17.05	70.90	11.09	0.83	0.13	87.95
连江观音阁 (III 类)	DO	1.5	2.4	64.03	34.18	1.53	0.26	—	—	99.74
	COD _{Mn}	2.6	—	35.52	36.87	13.36	14.25	—	—	85.75
	NH ₃ -N	1.7	—	72.16	26.68	1.16	—	—	—	100.00
	TP	3.6	—	0.86	54.55	13.99	3.25	2.28	2.28	69.40

4 结论

1) 基于敖江流域水质月份数据, 可通过 PCA 将 8 项水质指标转化为 3 个主成分. 主成分 1 代表水体营养盐污染因子. 整体流域水体富营养化主要集中在 10 月至次年 3 月, 此时处于冬季非汛期, 而陀市桥断面因其农业种植、畜禽养殖产生的氮、磷元素, 导致该段水质全年呈现富营养化. 主成分 2 代表水体环境变化特征. 敖江流域 5—10 月处于夏季时期, 此时水体中水藻、浮游生物正处于生长阶段, 消耗大量溶解氧, 导致水体溶解氧降低. 主成分 3 代表水体中有机污染物、还原性无机物质及悬浮物污染程度. 上游石材板企业遗留的石材边角料废渣及废料中, 包含的有机高分子化合物“冷却剂”成为造成该类污染的主要原因; 另外, 连江观音阁断面因其周围旅游业发达、人口密集, 也呈现较高的污染形式.

2) 采用 SWQF 和 CWQII 对敖江水质监测站点进行水质类别统计, 统计结果显示, 敖江流域整体水质较好, CWQII 显示基本达标, 而 SWQF 均显示未达标. 由此可知, 敖江流域各断面水质受单项水质指标的影响显著. 进一步通过计算单项水质指标的水质类别占比, 结果表明, 在 4 项水质指标中, 导致敖江流域水环境水体质量较差的主要原因为 COD_{Mn} 和 TP. 另外, 从 4 个监测站点的综合标识指数值来看, 敖江流域整体污染呈现从中上游往下游加重的趋势.

3) 在采用水质标识指数法进行流域水质综合评价时, 敖江监测站点只含有 4 项在 GB 3838—2002 《地表水环境质量标准》中涉及到的监测指标, 指标个数偏少. 因此, 只对 4 项指标进行分析, 得出造成敖江水质较差的相对污染指标, 但尚不能充分得出敖江最主要的污染指标. 若监测站点的监测指标较多, 且各监测指标有相应质量浓度对应的水体类别, 水质标识指数法不失为一个好的水质评价方法.

4) 由于敖江流域水质监测站点太少, 因此, 不足以对整条流域的水环境进行全面地、系统地分析. 建议在敖江干流上游、山仔水库下游及主要支流附近设置水质监测断面; 另外, 建议加强连江县城对生活污水和生活垃圾的处理工作.

参考文献:

[1] BHUIYAN A B, MOKHTAR M B, TORIMAN M E, *et al.* The environmental risk and water pollution: A review
<http://www.hdxh.hqu.edu.cn>

from the river basins around the world[J]. American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture,2013,7(2):126-136.

[2] 富天乙,邹志红,王晓静. 基于多元统计和水质标识指数的辽阳太子河水质评价研究[J]. 环境科学学报,2014,34(2):473-480. DOI:10.13671/j. hjkxxb. 2014. 02. 032.

[3] 尹海龙,徐祖信. 河流综合水质评价方法比较研究[J]. 长江流域资源与环境,2008,17(5):729-733. DOI:10.3969/j. issn. 1004-8227. 2008. 05. 012.

[4] 周真明,沈春花,涂帆,等. 山美水库综合水质标识指数评价[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2010,31(2):215-217. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2010.02.0215.

[5] 王维,纪枚,苏亚楠. 水质评价研究进展及水质评价方法综述[J]. 图书情报导刊,2012,22(13):129-131. DOI:10.3969/j. issn. 1005-6033. 2012. 13. 056.

[6] 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. DOI:10.3969/j. issn. 1000-6923. 2015. 10. 040.

[7] 胡成,苏丹. 综合水质标识指数法在浑河水质评价中的应用[J]. 生态环境学报,2011,20(1):186-192. DOI:10.3969/j. issn. 1674-5906. 2011. 01. 033.

[8] 李国锋,刘宪斌,刘占广,等. 基于主成分分析和水质标识指数的天津地区主要河流水质评价[J]. 生态与农村环境学报,2011,27(4):27-31. DOI:10.3969/j. issn. 1673-4831. 2011. 04. 005.

[9] 张玉珍,黄文丹,王智苑,等. 福建敖江流域水域生态系统健康评估[J]. 湖泊科学,2015,27(6):1079-1086. DOI:10.18307/2015. 0612.

[10] 吴春山. 石板材行业环境问题及其对策:以敖江流域为例[J]. 海峡科学,2008(6):58-61. DOI:10.3969/j. issn. 1673-8683. 2008. 06. 028.

[11] 李小梅,吴春山,庄一庭,等. 石板材加工行业的水环境污染特征研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版),2006,22(4):67-71. DOI:10.3969/j. issn. 1000-5277. 2006. 04. 015.

[12] 苏玉萍,赖寿辉,林佳,等. 富营养化饮用水源地山仔水库限制性营养元素研究[J]. 环境科学学报,2015,35(10):3107-3113. DOI:10.13671/j. hjkxxb. 2014. 1080.

[13] 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. DOI:10.3880/j. issn. 1004-6933. 2017. 03. 012.

[14] OUYANG Ying. Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis[J]. Water Research,2005,39(12):2621-2635. DOI:10.1016/j. watres. 2005. 04. 024.

[15] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2005,33(3):321-325. DOI:10.3321/j. issn:0253-374X. 2005. 03. 008.

[16] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2005,33(4):482-488. DOI:10.3321/j. issn:0253-374X. 2005. 04. 012.

[17] 杜乔乔,颜坤. 基于 PCA 的于桥水库富营养化因子分析[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(2):212-214.

[18] 刘臣辉,吕信红,范海燕. 主成分分析法用于环境质量评价的探讨[J]. 环境科学与管理,2011,36(3):183-186. DOI:10.3969/j. issn. 1673-1212. 2011. 03. 045.

[19] 李晓丰,李兴华,黄涛,等. PCA 水质分类法在通济堰水质评价中的应用[J]. 四川环境,2016,35(3):41-45. DOI:10.3969/j. issn. 1001-3644. 2016. 03. 008.

(编辑: 李宝川 责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 刘源岗)