

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2017.03.012

# 基于SOM和PCA的闽江流域地表水水质综合评价

程学宁, 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2014年1月至2015年11月闽江流域19个断面的水质月均值监测数据, 采用自组织特征映射网络(SOM)和主成分分析(PCA)法研究了闽江流域水质时空变化特征, 并用水质指数对闽江水质进行了综合评价。SOM分析将水质样本分为3个空间群组, 其中水质变化周期分2个阶段: 4—11月、12月至次年3月。PCA法分析表明, 春冬季沙溪和富屯溪支流以及闽江下游福州城区河段营养盐水平偏高, 在春夏季上游部分河段和下游闽江口有机污染水平偏高。水质指数评价结果显示, 闽江流域整体水质较好, 其中三大子流域及闽江下游水质评价从优至劣顺序为: 富屯溪流域、建溪流域、沙溪流域、闽江下游流域。

**关键词:** 自组织特征映射网络; 主成分分析; 水质评价; 地表水; 闽江流域

**中图分类号:** X820.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-6933(2017)03-0059-09

## Comprehensive evaluation of surface water quality in Minjiang River Basin based on SOM and PCA

CHENG Xuening, LU Yimin

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

**Abstract:** Based on the monthly average monitoring data of water quality from 19 sections in the Minjiang River Basin during the period from January 2014 to November 2015, we used the self-organizing map (SOM) and principal component analysis (PCA) to study the characteristics of temporal-spatial variations of water quality in the Minjiang River Basin, and conducted a comprehensive assessment of water quality of the Minjiang River with the water quality indices. Through the SOM analysis, we classified the water samples into three space groups, in which the water quality variation period was divided into two phases: one from April to November, and the other from December to March of the following year. The PCA analysis shows that the nutrients in the tributaries of the Shaxi and Futunxi rivers and in the urban river section in Fuzhou City downstream the Minjiang River maintained at a high level in the spring and winter. Meanwhile, the organic pollution level was high in some parts of the upper reaches and the downstream Minjiang River mouth in the spring and summer. The results of evaluation of water quality indices show that the water quality in the Minjiang River Basin is good on the whole. The three sub-basins and the lower reaches of the Minjiang River showed a descending order in water quality as follows: the Futunxi Basin, the Jianxi Basin, the Shaxi Basin, and the lower reaches of the Minjiang River Basin.

**Key words:** SOM; PCA; water quality assessment; surface water; Minjiang River Basin

地表水水质问题一直是各国水资源开发利用中不可忽视的问题, 特别是在中国, 伴随着现代化发展进程, 地表水污染以及可利用水资源不足成为制约社会发展的关键因素。一方面, 流域地表水作为重要的区域水资源, 广泛应用于城市建设、工业生产和农林灌溉, 河流水质状况决定了流域水资源开发利

用程度; 另一方面, 受到多种人为和自然环境因素影响, 地表水资源可持续利用面临威胁。因此, 开展流域地表水水质综合评价, 全面评估流域地表水水质状况, 获得污染物在时空维度中的变化信息, 评价污染状况, 从而为流域全面水质管理、污染物控制提供决策依据, 就显得尤为重要。

作者简介: 程学宁(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境监测与评价、环境影响评价。E-mail: cxuening123@yahoo.com

通信作者: 卢毅敏, 副研究员。E-mail: luyim@lreis.ac.cn

从 20 世纪 80 年代起,我国已开展有关河流水质综合评价工作。常用的地表水水质综合评价方法有单因子评价法、模糊评价法、灰色系统评价法、集对分析法<sup>[1-2]</sup>、层次分析法、主成分分析<sup>[3-5]</sup>、聚类方法<sup>[5]</sup>、人工神经网络法、水质标识指数法等。然而,在流域尺度、多断面、高维水质样本评价时,这些方法存在一些不足:单因子评价法和污染指数法评价结果存在极化问题;基于模糊数学理论、灰色系统理论、集对分析理论等的水质评价方法对指标权重的选取存在争议,且模型自动化水平低;传统的聚类方法很难合理地反映样本的整体拓扑结构,故在水质综合评价研究中往往采用几种方法结合以弥补单一方法可靠性不足的问题<sup>[6]</sup>。流域水质综合评价中自组织映射神经网络(SOM)<sup>[7-11]</sup>、主成分分析(PCA)<sup>[7]</sup>、水质标识指数<sup>[12-14]</sup>等方法越来越受到学者的关注。其中 SOM 可将高维数据通过自组织聚类映射到低维空间并可视化,且具有保留原始向量特征的拓扑结构关系的优点<sup>[15-16]</sup>;PCA 在水质评价中可从多变量中筛选出主要独立的综合因子<sup>[17]</sup>,且保留原始主要信息,也能对不同地区水质状况进行比较分析<sup>[18]</sup>;水质标识指数评价能整体、客观、定量地反映流域水质状况。因此,本文选取 2014 年 1 月至 2015 年 11 月闽江流域 19 处监测断面水质监测数据,应用 SOM-Kmedoids 算法和 PCA 法分析闽江流域地表水质时空变化特征,对闽江流域近 2 年间水质变化中的人为和自然影响进行鉴别,并采用水质标识指数进行水质评价,以期客观、全面地揭示流域地表水质宏观状况,并为闽江流域开展流域水环境管理与污

染控制提供参考,以便改善流域未来水质。

## 1 研究区概况

闽江是福建省第一大水系,位于东经 116°23' ~ 119°35',北纬 25°23' ~ 28°16'之间,全长 562 km,其流域面积占福建省陆域面积的近一半,发源于福建、江西交界的建宁县均口乡,南平以上有建溪、富屯溪和沙溪三大主要支流,在南平市汇合后称闽江,自南平到闽江入海口,沿途有吉溪、尤溪、古田溪、梅溪、大樟溪等支流汇入(图 1)。上游地区为山区性河流,多峡谷盆地,下游多曲流漫滩。各地降水量年均在 1000 mm 以上,其中以闽北山区为多,降雨主要集中在春夏(3—6 月,7—9 月)两季,占全年降水量的 80% 以上;年平均蒸发量多介于 1250 ~ 1800 mm 之间;流域内水质属于低矿化度地表水,以重碳酸盐类水为主,总硬度低,为极软水区。流域覆盖福建省 7 地市,常住人口 1300 余万,域内城镇及交通干线多沿江两岸分布。闽江水体污染来源于工业废水、生活和医疗污水以及农药化肥的使用,工业废水约占废水总量的 70%。

## 2 水质监测指标和数据分析方法

### 2.1 水质监测指标及分析方法

为全面评估闽江流域水环境质量状况,在流域主要干流、重点支流以及流域内重点水库等共选取监测断面 19 处(图 1),其中断面编码首字母代表河段,M 代表闽江干流,J 代表建溪支流,S 代表沙溪支流,F 代表富屯溪支流,D 代表大樟溪支流。监测时

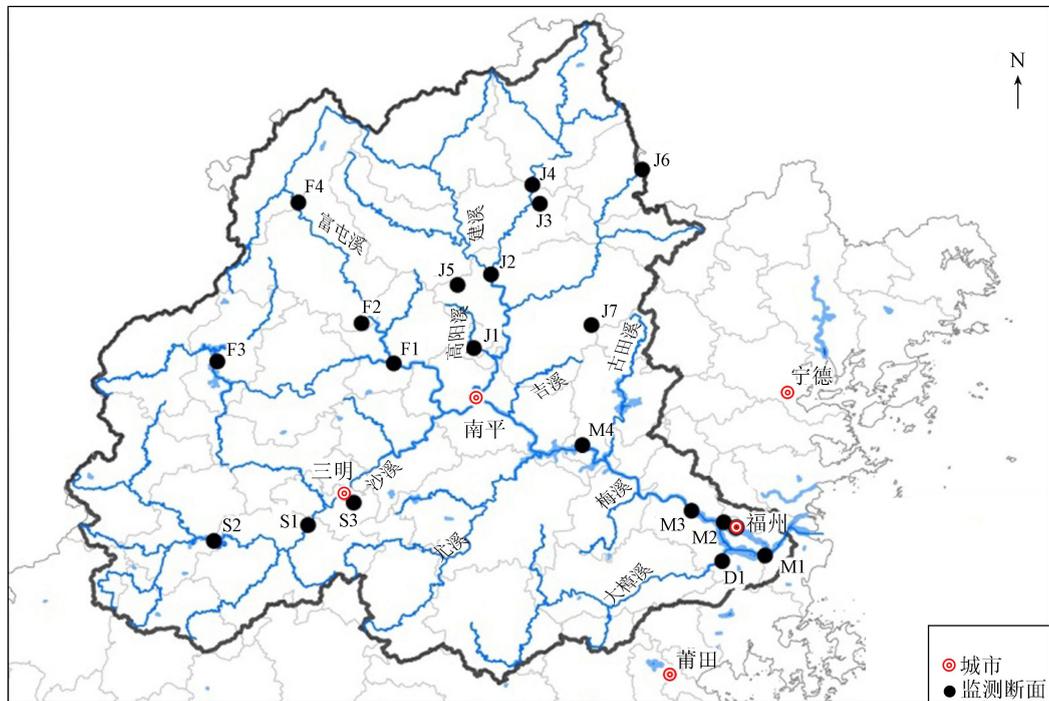


图 1 研究区及监测断面示意图

间段为2014年1月至2015年11月,数据来自福建省水利厅提供的水质自动监测站监测断面月均值数据。监测指标及数据获得方法:水温,温度计法;pH,玻璃电极法;电导率,电导率仪;浊度,浊度仪;DO,电化学探头法;COD<sub>Mn</sub>,COD<sub>Mn</sub>测定仪;NH<sub>3</sub>-N,水杨酸分光光度法;TP,钼酸铵分光光度法。各监测指标基础统计结果见表1。

## 2.2 数据分析方法

### 2.2.1 自组织特征映射神经网络(SOM)

SOM是基于竞争式学习的一种网络,由输入层、输出层和权重向量构成,输出层的神经元是以矩阵方式排列于一维或二维的空间中,根据输入向量彼此竞争以争取得到调整权重向量的机会,最后输出层的神经元会根据输入向量的特征以有意义的拓扑结构展现在输出空间中<sup>[15]</sup>。根据文献<sup>[19]</sup>建议,输出层神经元个数 $M$ 与输入是数据样本数量 $N$ 之间的关系式是 $M=5\sqrt{N}$ 。自组织特征映射在输出层上包括竞争、合作和自组织等3个过程,输出层二维空间上每个神经元的权值向量和输入层向量维度一致,输出层神经元 $j$ 的连接权值向量为: $\omega_j = [\omega_{j1}, \omega_{j2}, \dots, \omega_{jd}]^T$ ,其中 $j=1, 2, \dots, M, d$ 为输入数据集属性维度。竞争过程:为找出每个数据向量 $v$ 的优胜神经元,通过计算找出输入向量 $v$ 与权值向量间距离(通常是欧几里得距离)中的最短距离,即 $C_v = \min \{ \|v - \omega_j^T v_i\| \}$ , $C_v$ 表示输入向量 $v$ 与内积 $\omega_j^T v$ 差值最小的神经元为获胜神经元(winning units);合作过程:通过竞争过程找出获胜神经元后,再通过临近函数(常用墨西哥帽函数)找出获胜神经元临近的神经元;自组织过程:更新与获胜神经元临近的神经元的权值向量,其连接权值修正法如下: $\omega_{i(t+1)} = \omega_{it} + \mu_t \cdot \alpha_t (v_t - \omega_{it}^T v_t)$ ,其中 $\mu_t$ 与 $\alpha_t$ 分别为搜索半径与学习率。在神经网络训练过程中,学习率与搜索半径在学习过程中逐渐衰减,即逐渐收敛,最终得到最佳分群。

本文中输入层含8个神经元,连接8项水质参数,输出层神经元采用2维平面、六边形网格排列。基于SOM-Kmedoids算法<sup>[20-21]</sup>,对SOM初次聚类簇中心进行二次聚类,根据DB(Davies-Bouldin)指数

最小自动选择最终分类。输出内容包括距离矩阵(U-matrix/unified distance matrix)以及变量位面(Variables planes),U-矩阵给出了全部变量与对象集合的半定量关系,单个变量位面则给出了全部对象的每个变量的分布。利用U-矩阵与变量位面可以有效评估变量之间与内部对象之间的关系<sup>[22]</sup>。

### 2.2.2 主成分分析(PCA)

在各个领域研究中往往需要对反映事物的多个变量进行观测,收集大量的数据以便进行规律分析。多变量大样本给科学研究提供了丰富信息,也给分析带来了一定的难度。PCA旨在利用降维的思想,把多指标转化为少数几个综合指标(即主成分),用每个主成分来解释原始数据变量信息<sup>[17-23]</sup>。主成分贡献率得分可以解释原始数据指标的地理空间分布和时间变化特征<sup>[7]</sup>。本文对研究数据集中19处断面、23个月的水质主成分贡献率得分结果在地图上进行可视化分析。

### 2.2.3 水质标识指数

水质标识指数法因其计算简单、结构清晰,是地表水水质评价中使用最广最久的方法之一<sup>[24]</sup>。单因子评价法只能进行单项指标评价,无法对水体进行综合水质评价,且同一等级水体不能进行量化对比。水质标识指数法是从所有污染物指标中获得一个能够全面评价水环境质量的模式方法,用各类污染物指数进行数学上的归纳与统计,得出一个简单的表征整体水质质量水平的数值。该方法能获知整体水质与多个指标之间的相对关系,可对不同区域、时期的水质进行评价对比。本文采用在单因子水质标识指数<sup>[25]</sup>(single water quality factor, SWQF)法基础上改进的河流综合水质标识指数<sup>[26]</sup>(comprehensive water quality identification index, CWQII)法作为水质综合评价的基础方法。关于单因子水质标识指数和河流综合水质标识指数的具体计算参考文献<sup>[23-24]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 自组织神经网络输出结果分析

基于SOM-Kmedoids算法将19个监测断面、23

表1 各监测指标基础统计结果

基本统计量	水温/°C	pH	电导率/ ( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	浊度 /NTU	$\rho(\text{DO})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
最小值	10.566	5.406	20.13	0.709	2.229	0.507	0.018	0.008
平均值	21.750	7.173	87.018	48.418	7.391	2.551	0.194	0.077
中位数	22.677	7.102	69.524	38.910	7.316	2.447	0.149	0.062
最大值	31.578	8.672	500	298	12.032	9.515	0.832	0.524
标准方差	5.642	0.485	60.024	41.004	1.351	0.940	0.142	0.058
变异系数	0.259	0.068	0.690	0.847	0.183	0.369	0.732	0.759

个月的月监测数据集共 437 个样本数据标准化处理后进行聚类,依据神经元数量计算公式确定神经元个数为 110 个(11×10),训练过程中采用线性初始化方法,邻域核函数为墨西哥草帽函数,邻域搜索半径为 3,通过 1 000 次迭代训练样本数据,最终得到稳定的自组织映射图(图 2)。

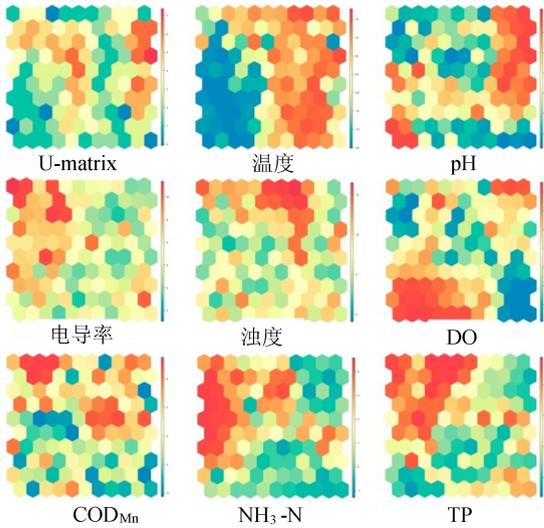


图 2 水质参数 SOM 可视化及 U-matrix

如图 2 所示,各水质参数在 SOM 上的位置、距离及其颜色分布模式显示参数间的半定量的关系。根据 SOM 图可直观判断存在相关关系的有 NH<sub>3</sub>-N 与 TP、电导率与 COD<sub>Mn</sub>、pH 与 DO。对 8 项指标采用 Pearson 系数检验参数相关性,见表 2。从表 2 可知,8 项水质指标中,温度与电导率、DO 和 NH<sub>3</sub>-N 呈弱负相关关系;pH 与 DO 呈弱正相关关系,与

NH<sub>3</sub>-N 和 TP 呈弱负相关关系;电导率与 NH<sub>3</sub>-N、TP 呈弱正相关关系;浊度与 TP 呈弱正相关关系;DO 与 NH<sub>3</sub>-N、TP 呈弱负相关关系;COD<sub>Mn</sub> 与 NH<sub>3</sub>-N、TP 呈弱正相关关系,NH<sub>3</sub>-N 与 TP 呈显著正相关关系。说明各参数 SOM 能够直观地解释各水质指标显著相关关系的特点。由此说明各参数 SOM 能够直观地解释各水质指标显著相关的特点<sup>[9]</sup>。

表 2 水质参数之间的相关系数

水质参数	温度	pH	电导率	浊度	DO	COD <sub>Mn</sub>	NH <sub>3</sub> -N
pH	0.086						
电导率	-0.207	-0.045					
浊度	0.071	-0.066	-0.010				
DO	-0.273	0.263	-0.077	-0.008			
COD <sub>Mn</sub>	0.050	-0.004	0.021	0.082	-0.011		
NH <sub>3</sub> -N	-0.230	-0.149	0.238	0.066	-0.150	0.107	
TP	-0.086	-0.190	0.167	0.140	-0.118	0.133	0.418

### 3.2 基于自组织特征映射的闽江水质样本聚类分析

基于 SOM-Kmedoids 算法,以闽江流域设置的 19 个监测断面为对象,采用 23 个月的 437 个水质监测样本,根据 DB 指数(1.27)最小化原则划分群组,将整体数据样本划分为 3 类,记为 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>,如图 3 所示,显示了各聚类类别包含的神经元,不同群组用不同颜色以区分,神经元上数字表示其所属类组的编号,如图 3(b)左下角的神经元编号为 C1 表示该神经元归属 C1 类;图 3(c)显示了每个神经元所包含的原始数据样本数量;图 3(d)、(e)展示了 SOM 时空聚类结果,将 19 个监测断面空间划分为 3 组,其中 J4、J5、J6、F1、F3、F4 和 S3 属于 C<sub>1</sub> 组,D1、

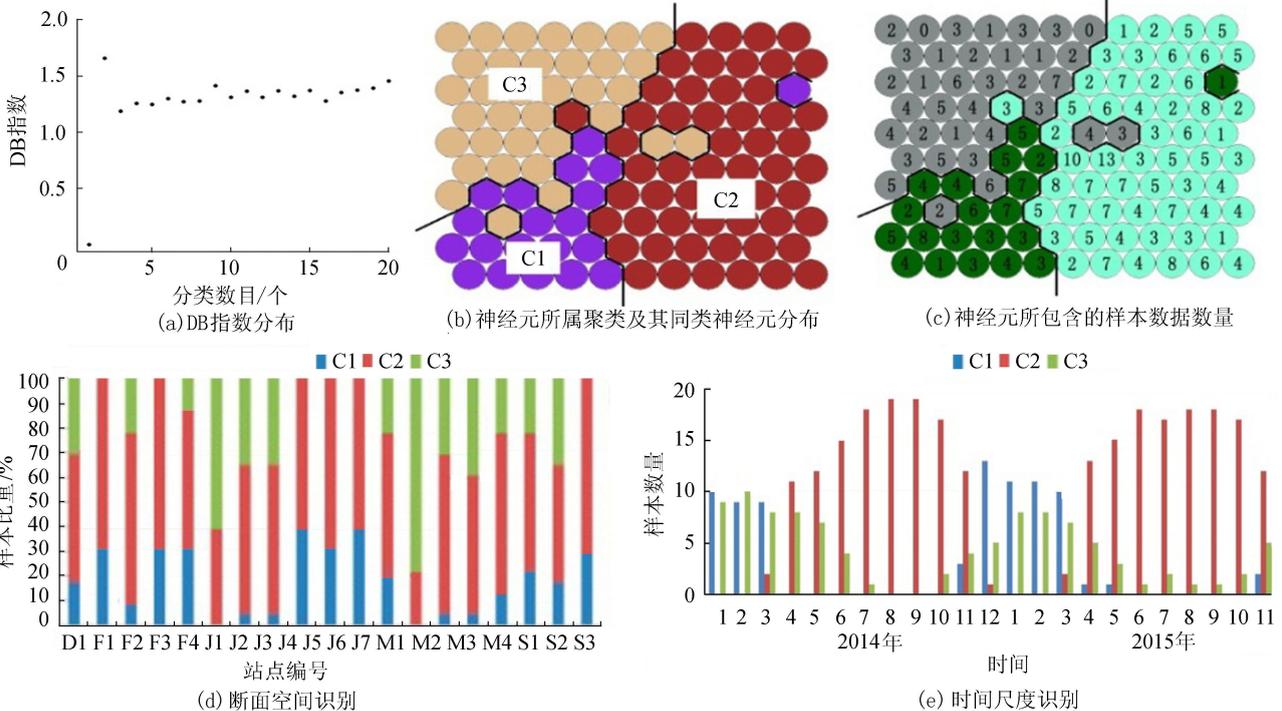


图 3 基于 SOM-Kmedoids 的聚类结果

M2、M3、M4、F2、S1、S2、J2、J3 和 J7 属于 C2 组, M1 和 J1 属于 C3 组;将水质变化周期划分为 4 月至 11 月以及 12 月至次年 3 月 2 个时段,其中 2 组代表 4 月份至 11 月份,1、3 组代表 12 月份至次年 3 月份。闽江流域汛期水量、流速较非汛期有显著变化,水质周期与流域汛期时间比较吻合。

从表 3 可知,pH 和 COD<sub>Mn</sub> 在各组中变化不大;温度、浊度和电导率受水文汛期影响呈现不同变化,其中温度受季节气温变化影响,浊度和电导率受河流流量和流速影响,而浊度在汛期水流多变背景下水平增高;DO 和 NH<sub>3</sub>-N 呈现小幅波动变化,DO 的单因子评价等级均为 I 类,说明闽江流域河流水体自净能力较好,而 NH<sub>3</sub>-N 的波动也说明其值大小受闽江水文背景影响;TP 在各分组中有显著的波动,且 C3 组单因子评价等级为 III 级,说明流域仍存在一定的磷污染风险。

### 3.3 基于 PCA 的闽江流域水质时空特征分析

对各站点月份水质样本 19×23 共 437 组样本集进行主成分分析,检验流域时空背景下是否存在主要污染输出变量。首先对数据集进行 KMO 和 Bartlett 球体检验,确定是否能够进行因子分析。Bartlett 球体检验的显著性概率是 0,小于 0.001,说明拒绝零假设,相关系数不是单位矩阵,适合做因子分析。KMO 值为 0.588 931 1,一般认为在 0.6 左右可以做因子分析。依据 Kaiser-Harris 准则建议保留特征值大于 1 的主成分,共有 3 个确定为输出主成分数量。表 4 展示了因子分析的输出结果,包括特征值、方差贡献率、累计方差贡献率。主成分分析结果使用 3 个主成分因子解释原始数据集变量信息,其方差累计贡献率为 57%。主成分 1 方差贡献率为 23%,与温度、电导率、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 有高度相关性,NH<sub>3</sub>-N 和 TP 可作为解释营养盐污染指标,其中温度和电导率为物理性质指标,温度解释了水体环境变化,电导率指示水体酸碱盐量的大小。主成分 2 方差贡献率为 18%,与 pH 和 DO 相关,可作为解释水体自净能力。主成分 3 方差贡献率为 16%,与温度、COD<sub>Mn</sub> 相关,可作为有机物污染指标。

通过主成分分析,计算得主成分得分系数,构成主成分得分公式如下:

$$\begin{cases} f_1 = -0.366x_1 - 0.105x_2 + 0.366x_3 - 0.023x_4 + \\ \quad 0.087x_5 + 0.096x_6 + 0.384x_7 + 0.319x_8 \\ f_2 = -0.198x_1 + 0.485x_2 + 0.059x_3 - 0.069x_4 + \\ \quad 0.593x_5 + 0.275x_6 - 0.071x_7 - 0.109x_8 \\ f_3 = 0.362x_1 + 0.108x_2 + 0.147x_3 + 0.422x_4 + \\ \quad 0.048x_5 + 0.628x_6 - 0.120x_7 + 0.261x_8 \end{cases} \quad (1)$$

表 4 水质监测指标主成分分析结果

水质监测指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3
温度	-0.64	-0.32	0.5
pH	-0.27	0.69	0.01
电导率	0.67	-0.01	0.18
浊度	-0.02	-0.20	0.55
DO	0.07	0.83	-0.08
COD <sub>Mn</sub>	0.15	0.23	0.72
NH <sub>3</sub> -N	0.72	-0.13	-0.12
TP	0.61	-0.27	0.36
特征值	1.85	1.43	1.26
方差贡献率/%	23	18	16
累计方差贡献率/%	23	41	57

各监测断面主成分得分水平展示了流域各站点水质时空特征变化,通过时空交叉分析可获取流域水质污染物时空规律。图 4 展示了闽江流域 19 个站点 23 个月份的水质主成分得分,横坐标为时间轴,从 2014 年 1 月至 2015 年 11 月;纵坐标为得分分值,蓝色代表主成分 1,红色代表主成分 2,绿色代表主成分 3。

主成分 1 得分水平解释了营养盐污染指标,得分高表明存在营养盐污染即水体富营养化。流域水体富营养化发生的时期主要集中在春季和冬季阶段,以断面 M1、M2、S2、F2、J1 具有代表性,在 1—3 月份处于高水平,其他月份处于较低水平或正常水平。代表性断面空间分布位于沙溪和富屯河流域上游和闽江下游地区,冬春季河流水温偏低,处于非汛期阶段,断面水流流速和流量均下降,水体自净能力较汛期阶段降低;另一方面,上游河段流经人类生活区汇入未经处理的生活废水,以及下游工业排放废水的影响,使得水体氮磷水平较高,易发生富营养化<sup>[27]</sup>。

主成分 2 得分水平解释了水体自净能力,得分高代表断面水质较好,水体自净能力正常。流域得分较高的时期主要集中在春、秋、冬季,表明该成分与气温相关性较高,普通天然水体环境中水温越高 DO 浓度越低,另外,在水体环境较适宜的背景下藻类生物也能影响 DO 的饱和度<sup>[28]</sup>。得分较高的断

表 3 SOM 聚类各组指标均值统计信息及水质评价结果

聚类群组	温度/℃	pH	电导率/ (μS·m <sup>-1</sup> )	浊度/NTU	ρ(DO)/ (mg·L <sup>-1</sup> )	ρ(COD <sub>Mn</sub> )/ (mg·L <sup>-1</sup> )	ρ(NH <sub>3</sub> -N)/ (mg·L <sup>-1</sup> )	ρ(TP)/ (mg·L <sup>-1</sup> )
C1-1.9	14.652	7.279	83.689	35.262	8.783(I)	2.224(II)	0.182(II)	0.049(II)
C2-2.0	25.313	7.217	66.114	54.132	7.096(I)	2.495(II)	0.136(I)	0.061(II)
C3-2.45	18.342	6.976	153.006	52.089	7.039(I)	2.954(II)	0.350(II)	0.139(III)

注:DO、COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TP 质量浓度数据后括号内罗马字表示单因子评价等级。

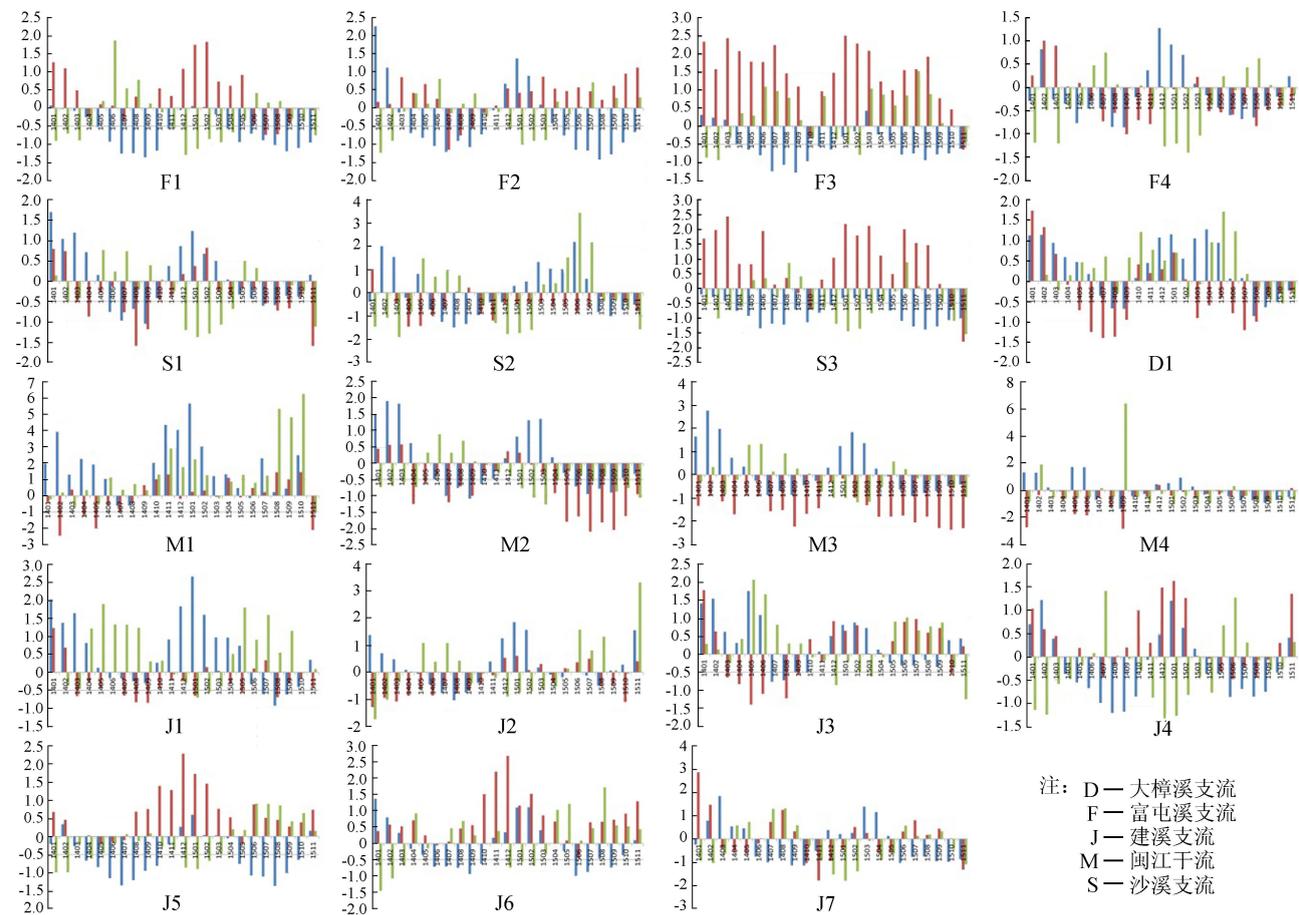


图4 闽江流域19个监测断面PCA得分时空分布

面主要集中在河流的上游,受人类活动影响较小的地区,具有代表性的断面有 F3、S3、J5、J6;河流的干支流下游受人类生活和工业生产排放污水影响,各断面显示该成分得分较低,具有代表性的断面有 M2、S1、F1。

主成分3得分水平解释了水体有机物污染影响,得分高代表该断面受到有机物污染,水质受到影响。从流域整体来看,表现出4—9月份(汛期)得分较高、其他月份较低的时间规律,且2015年和2014年水平相差不大,代表性断面有 J1、J3、F3、S2,其中 S2 和 F3 均为水库断面,以上4个断面均位于河流上游山区地带,在汛期强降水作用下,林区地表腐植物,农业生产未被作物吸收的化肥、农药残留和牲畜粪便等在地表径流冲刷下汇入河流,因此上游地区非点源污染问题应该得到重视;在各断面中下游河口断面(M1)呈现出得分增大的污染趋势,M1断面位于闽江下游闽江口,该河段流域集中了纺织、塑胶、农产品加工、船舶修造和医药产业,接纳了大量的工业区污水和城市生活废水,因此闽江河口地区水质面临较大的污染风险,考虑到下游福州市人口密集对水生态安全的要求更为紧迫,有必要对下游地区水污染采取控制措施。

### 3.4 基于水质指数的水质评价结果分析

为梳理流域各站点水质达标情况,对各站点23个月的水质监测样本数据分别采用SWQF和CWQII统计分析水质评价结果(表5)。SWQF作为通用水质评价方法,可作为监测断面水质是否达到功能区水质目标的指标;CWQII可对各断面水质等级进行对比,比较各断面的水质优劣。

对各监测断面水质监测样本SWQF达标率作分析,各断面监测数据样本数量在23个,按照断面所在功能区划水质目标等级对各断面水质监测达标率统计。水质达标率满足断面所在功能区水质目标的有断面D1、F1、F2、F3、J4、J5、J6以及S1、S3,此类9处断面均位于县市交界区,人口稀少,自然植被保存较好,受工农业生产活动影响较小,也说明闽江上游富屯溪和大樟溪支流河流水质较好,短期内不存在水体污染风险。存在水质超标在20%以上的断面有J1(24.8%)、J2(65.2%)、J3(91.3%)、J7(34.8%)、M1(85.2%)、M2(56.6%)、S2(43.5%)。而断面J1、J2、J3、J7、M1、M2、S2存在不同程度的超标污染情况,主要受NH<sub>3</sub>-N和TP指标超标影响,使得整体水质等级偏低,J1、J2、J3、J7断面均处于人类生活聚集区范围内,受城镇非点源生活污水排放和工农业生产排污影响,出现间歇性的

表5 各断面单水质评价结果

断面 (目标水质)	评价 方法	I	II	III	IV	V	VI
D1(III)	SWQF	0	0.478	0.522	0	0	0
	CWQH	0.13	0.87	0	0	0	0
F1(II)	SWQF	0	1	0	0	0	0
	CWQH	0.913	0.087	0	0	0	0
F2(IV)	SWQF	0	0.87	0.13	0	0	0
	CWQH	0.478	0.522	0	0	0	0
F3(II)	SWQF	0	0.957	0.043	0	0	0
	CWQH	0.783	0.217	0	0	0	0
F4(II)	SWQF	0.043	0.826	0.13	0	0	0
	CWQH	0.217	0.783	0	0	0	0
J1(II)	SWQF	0	0.652	0.348	0	0	0
	CWQH	0	1	0	0	0	0
J2(II)	SWQF	0	0.348	0.609	0.043	0	0
	CWQH	0	0.957	0.043	0	0	0
J3(II)	SWQF	0	0.087	0.826	0	0.043	0.043
	CWQH	0.13	0.783	0.087	0	0	0
J4(II)	SWQF	0	1	0	0	0	0
	CWQH	0.652	0.348	0	0	0	0
J5(II)	SWQF	0	0.957	0.043	0	0	0
	CWQH	0.522	0.478	0	0	0	0
J6(II)	SWQF	0	0.913	0.087	0	0	0
	CWQH	0.652	0.348	0	0	0	0
J7(II)	SWQF	0.043	0.609	0.261	0.087	0	0
	CWQH	0.522	0.478	0	0	0	0
M1(II)	SWQF	0	0.174	0.478	0.217	0.13	0
	CWQH	0.043	0.87	0.087	0	0	0
M2(II)	SWQF	0	0.435	0.565	0	0	0
	CWQH	0.13	0.87	0	0	0	0
M3(III)	SWQF	0	0	0.826	0.174	0	0
	CWQH	0.043	0.913	0.043	0	0	0
M4(III)	SWQF	0	0.609	0.261	0.087	0.043	0
	CWQH	0.522	0.348	0.13	0	0	0
S1(III)	SWQF	0	0.652	0.261	0.087	0	0
	CWQH	0.043	0.957	0	0	0	0
S2(II)	SWQF	0	0.522	0.174	0.261	0	0.043
	CWQH	0.217	0.739	0.043	0	0	0
S3(II)	SWQF	0.087	0.87	0.043	0	0	0
	CWQH	0.87	0.13	0	0	0	0

水质超标情况,而M1、M2处于福州市区的中下游位置,M1、M2断面超标率水平显著高于上游监测断面M3,说明河流流经城市市区后水体受城市排污影响,水质显著下降,使得TP浓度水平显著升高。S2位于三明安砂水库,受水库水产养殖和围湖居民点生活排污影响;S3位于三明市市区内,长期受城市三废排放影响,另外自20世纪80年代沙溪上下游建设的一系列梯级水电设施导致河流流速下降,也使得水体自净能力受到一定影响<sup>[29]</sup>。

以CWQH评价结果中I类和II类占整体的比重之和作为指标,对闽江流域19个监测断面水质优劣进行综合排序,顺序为:J2>F1>S3>F3>J4>J6>J5>J7>M4>F2>F4>S2>D1>M2>J3>S1>M3>M1>J1,可知,富屯溪流域监测断面水质监测结果整体

较好,流域内4个监测断面水质均处于排序前部分,也与单因子水质标识指数监测结果一致;建溪干流及各支流上游水质监测结果也较好,只有干流监测断面J3与高阳溪支流断面J1排序靠后,主要原因是断面受营养盐和有机物季节性污染影响;沙溪流域内3个断面中S1、S3断面位于城镇人口聚集区,受生活源污染排放影响,S2断面由于水库的拦蓄作用,每年汛期,拦蓄使得有机物积累,在一定程度上影响了水质;闽江下游4个断面中M1、M3断面水质评价排序靠后,M1断面位于福州市市区闽江口位置,主要受城市大量生活和生产污染排放汇入河流中,使得水质下降。另外,从SOM断面空间聚类也验证了各断面水质优劣集聚性,其中M1和J1归属于C3组,J4、J5、J6、F1、F3、F4和S3属于C1组,D1、M2、M3、M4、F2、S1、S2、J2、J3和J7属于C2组,且C1组断面水质整体优于其他两组。

从流域整体看,三大子流域及闽江下游水质状况优先顺序是:富屯溪流域>建溪流域>沙溪流域>闽江下游流域。

## 4 结论

a. 通过对闽江流域水质监测数据的SOM建模分析,得到了各水质指标的自组织映射图,半定量地分析了各指标存在的相关关系,并通过Pearson相关系数对水质指标相关性进行了验证,在月时间尺度下,温度与电导率、DO和NH<sub>3</sub>-N呈显著负相关关系,pH与DO呈显著正相关关系,NH<sub>3</sub>-N与电导率、TP呈显著正相关关系。基于SOM-Kmedoids的聚类明显地识别出闽江流域19处水质监测断面时空变化特征,将闽江水质监测断面空间划分为3组,空间聚类与CWQH评价结果一致;将水质变化时间周期划分为4月至11月和12月至次年3月份2个阶段,说明流域水质时间变化特征显著,且与河流水文汛期变化有显著关系。

b. 通过PCA对闽江流域水质月监测数据进行分析,将流域水质指标降维为3个主成分,分别涵盖了水体营养盐污染因子、自净能力和有机物污染因子,并依据3项主成分得分对闽江流域19个断面水质进行时空特征分析,结果表明春冬季节沙溪和富屯溪支流以及闽江下游福州城区河段营养盐污染得分较高,在汛期(4—9月)流域上游和下游闽江河口地区有机污染物得分水平显著较高,究其原因与流域上游城镇污水处理能力不足、非点源污染排放以及下游城市生活废水和工业生产活动排污有关。因此,闽江流域上游和下游河段流域是水环境治理的重点区域,有必要开展上游流域非点源污染治理研究,

提高上游城镇污水治理能力,并分析下游河段有机物污染治理和调控措施。

c. 采用 SWQF 和 CWQII 对闽江流域月时间步长监测数据进行评价,并对 SOM 聚类各组和各站点水质评价等级进行统计分析。结果表明闽江流域整体水质趋于良好, I ~ II 类水质占整体 96.1%, 但 TP 指标存在一定污染危险,需进一步进行识别控制。按照各断面所在水质功能区划要求达标的断面有 9 处,均处在县市交界处或人口密度小的区域,其他断面存在不同程度水质超标情况,主要与非点源生活污水排放和工业生产污水排放相关。另外,从流域整体来看,三大子流域及闽江下游水质状况从优至劣顺序如下:富屯河流域、建溪流域、沙溪流域、闽江下游流域。

### 参考文献:

[ 1 ] YANG X H, ZHANG X J, HU X X, et al. Nonlinear optimization set pair analysis model (NOSPAM) for assessing water resource renewability [ J ]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2011, 18(5) : 599-607.

[ 2 ] 陈南祥, 苏荣, 曹文庚. 基于熵权的集对分析法在土默特左旗地下水水质评价中的应用 [ J ]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(6) : 30-34. ( CHEN Nanxiang, SU Rong, CAO Wengeng. Application of the set pair analysis emthod to evaluation of shallow groundwater quality based on entropy weight [ J ]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(6) : 30-34. (in Chinese) )

[ 3 ] 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. (in Chinese) )

[ 4 ] 张国珍, 乔国亮, 武福平, 等. 主成分分析法在窖水水质变化评价中的应用 [ J ]. *环境科学与技术*, 2014, 37(4) : 181-184. ( ZHANG Guozhen, QIAO Guoliang, WU Fuping, et al. Application of principal component analysis to an evaluation of water quality in water cellar [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(4) : 181-184. (in Chinese) )

[ 5 ] XIN X K, LI K F, FINLAYSON B, et al. Evaluation, prediction, and protection of water quality in Danjiangkou Reservoir, China [ J ]. *Water Science and Engineering*, 2015, 8(1) : 30-39.

[ 6 ] KIM J Y, BHATTA K, RASTOGI G, et al. Application of multivariate analysis to determine spatial and temporal changes in water quality after new channel construction in the Chilika Lagoon [ J ]. *Ecological Engineering*, 2016, 90:

314-319.

[ 7 ] WANG Y B, LIU C W, LEE J J. Differentiating the spatiotemporal distribution of natural and anthropogenic processes on river water-quality variation using a self-organizing map with factor analysis [ J ]. *Archives of Environmental Contamination & Toxicology*, 2015, 69(2) : 254-263.

[ 8 ] PARK Y S, KWON Y S, HWANG S J, et al. Characterizing effects of landscape and morphometric factors on water quality of reservoirs using a self-organizing map [ J ]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 55(5) : 214-221.

[ 9 ] 李伟, 姚笑颜, 梁志伟, 等. 基于自组织映射与哈斯图方法的地表水水质评价研究 [ J ]. *环境科学学报*, 2013, 33(3) : 893-903. ( LI Wei, YAO Xiaoyan, LIANG Zhiwei, et al. Assessment of surface water quality using self-organizing map and Hasse diagram technique [ J ]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(3) : 893-903. (in Chinese) )

[ 10 ] 李为, 都雪, 林明利, 等. 基于 PCA 和 SOM 网络的洪泽湖水质时空变化特征分析 [ J ]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(12) : 1593-1601. ( LI Wei, DU Xue, LIN Mingli, et al. Spatial-temporal variation characteristics of water quality in hongze lake based on PCA and SOM [ J ]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(12) : 1593-1601. (in Chinese) )

[ 11 ] 朱艺峰, 施慧雄, 金成法, 等. 象山港海域水质时空格局的自组织特征映射神经网络识别 [ J ]. *环境科学学报*, 2012, 32(5) : 1236-1246. ( ZHU Yifeng, SHI Huixiong, JIN Chengfa, et al. Identification of spatiotemporal patterns of sea water quality in Xiangshan Bay by using self-organizing maps [ J ]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(5) : 1236-1246. (in Chinese) )

[ 12 ] MOSTAFAEI A. Application of multivariate statistical methods and water-quality index to evaluation of water quality in the Kashkan River [ J ]. *Environmental Management*, 2014, 53(4) : 865-881.

[ 13 ] 张旋, 王启山, 于森, 等. 基于聚类分析和水质标识指数的水质评价方法 [ J ]. *环境工程学报*, 2010, 4(2) : 476-480. ( ZHANG Xuan, WANG Qishan, YU Miao, et al. An approach for water quality assessment based on hierarchical cluster analysis and comprehensive water quality identification index [ J ]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(2) : 476-480. (in Chinese) )

[ 14 ] 杨柳, 宋健飞, 宋波, 等. 主要污染物水质标识指数法在河流水质评价的应用 [ J ]. *环境科学与技术*, 2015, 38(11) : 239-245. ( YANG Liu, SONG Jianfei, SONG Bo, et al. Primary pollutant water quality identification index method and its application to comprehensive evaluation of river water quality [ J ]. *China Environmental Science*,

- 2015,38(11):239-245. (in Chinese))
- [15] KOHONEN T. Self-organization maps [J]. Neurocomputing,1990,21(1/3):1-6.
- [16] VESANTO J, ALHONIEMI E. Clustering of the self-organizing map [J]. IEEE Transactions on Neural Networks,2000,11(3):586-600.
- [17] 冯利华. 环境质量的主成分分析[J]. 数学的实践与认识, 2003, 33(8):32-35. (FENG Lihua. Principal component analysis of environmental quality [J]. Mathematics in Practice and Theory,2003,33(8):32-35. (in Chinese))
- [18] 陈东景, 马安青, 徐中民, 等. 因子分析法在水质评价中的应用 [J]. 水文, 2002, 22(3):29-31. (CHENG Dongjing, MA Anqing, XU Zhongmin, et al. The application of factor analysis in water quality evaluation [J]. Journal of China Hydrology, 2002, 22(3):29-31. (in Chinese))
- [19] ASTEL A, TSAKOVSKI S, BARBIERI P, et al. Comparison of self-organizing maps classification approach with cluster and principal components analysis for large environmental data sets [J]. Water Research, 2007, 41(19):4566-4578.
- [20] 胡晓雪, 赵嵩正, 吴楠. 基于 SOM-DB-PAM 混合聚类算法的电力客户细分 [J]. 计算机工程, 2015, 41(10):295-301. (HU Xiaoxue, ZHAO Songzheng, WU Nan. Power customer segmentation based on SOM-DB-PAM hybrid clustering algorithm [J]. Computer Engineering, 2015, 41(10):295-301. (in Chinese))
- [21] 张钊, 王锁柱, 张雨. 一种基于 SOM 和 PAM 的聚类算法 [J]. 计算机应用, 2007, 27(6):1400-1402. (ZHANG Zhao, WANG Suozhu, ZHANG Yu. New clustering method based on hybrid of SOM and PAM [J]. Journal of Computer Applications, 2007, 27(6):1400-1402. (in Chinese))
- [22] TSAKOVSKI S, ASTEL A, SIMEONOV V. Assessment of the water quality of a river catchment by chemometric expertise [J]. Journal of Chemometrics, 2010, 24(11/12):694-702.
- [23] 盛周君, 孙世群, 王京城, 等. 基于主成分分析的河流水环境质量评价研究 [J]. 环境科学与管理, 2007, 32(12):172-175. (SHENG Zhoujun, SUN Shiqun, WANG Jingcheng, et al. Comprehensive evaluation of river water environmental quality based on the principal component analysis [J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(12):172-175. (in Chinese))
- [24] 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. (YI Hailong, XU Zuxin. Comparative study on typical river comprehensive water quality assessment methods [J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 2008, 17(5):729-733. (in Chinese))
- [25] 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. (XU Zuxin. Single factor water quality identification index for environmental quality assessment of surface water [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(3):321-325. (in Chinese))
- [26] 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. (XU Zuxin. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(4):482-488. (in Chinese))
- [27] 高永霞, 宋玉芝, 于江华, 等. 环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征 [J]. 环境科学, 2016, 37(4):1401-1412. (GAO Yongxia, SONG Yuzhi, YU Jianghua, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of different forms of phosphorus in three sorts of rivers around Taihu Lake [J]. Environmental Science, 2016, 37(4):1401-1412. (in Chinese))
- [28] 张军毅, 黄君, 严飞, 等. 梅梁湖水体溶解氧特征及其与 pH 的关系分析 [J]. 复旦学报(自然科学版), 2009(5):623-627. (ZHANG Junyi, HUANG Jun, YAN Fei, et al. Preliminary study on characters of dissolved oxygen and the relationship with pH in Meiliang Lake [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2009(5):623-627. (in Chinese))
- [29] 姚环, 简文彬, 彭功勋. 闽江水利工程的环境水质效应问题 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2000, 28(5):118-121. (YAO Huan, JIAN Wenbin, PENG Gongxun. Some environmental problems concerning water quality effected by construction of water conservancy projects along the Minjiang River [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science), 2000, 28(5):118-121. (in Chinese))

(收稿日期:2016-10-26 编辑:徐娟)

