

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0665

刘庄, 丁程成, 晁建颖, 等. 基于绝对主成分-多元线性回归 (APCS-MLR) 模型的浙江长潭水库污染源解析 [J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39 (4): 530-539.

LIU Zhuang, DING Cheng-cheng, CHAO Jian-ying, et al. Pollution Source Apportionment of Changtan Reservoir of Zhejiang Province Based on APCS-MLR Model [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39 (4): 530-539.

## 基于绝对主成分-多元线性回归 (APCS-MLR) 模型的浙江长潭水库污染源解析

刘庄<sup>1</sup>, 丁程成<sup>1</sup>, 晁建颖<sup>1</sup>, 郑治波<sup>2</sup>, 崔益斌<sup>1</sup> (1. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏南京 210042; 2. 台州市黄岩区长潭水库事务中心, 浙江台州 318020)

**摘要:** 基于 2010—2020 年长潭水库水质监测数据, 采用主成分分析与因子分析法识别长潭水库的主要污染源, 运用绝对主成分-多元线性回归 (APCS-MLR) 模型解析不同污染源及其对库区主要污染因子的贡献率。结果显示, 长潭水库的水体污染物主要来自内生源、生活源和农业面源 3 个方面。其中有机污染物和叶绿素 a (Chl-a) 主要来自内生源, 内生源对 COD<sub>Mn</sub>、COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 和 Chl-a 的贡献率分别为 75.52%、51.39%、67.00% 和 63.65%; 氮主要来自生活源, 生活源对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 TN 的贡献率分别为 38.54%、46.80% 和 77.69%; 磷主要来自农业面源, 农业面源对 TP 的贡献率为 44.51%。长潭水库 TN 和 TP 浓度偏高且主要来自外源输入, 如果缺乏有效控制, 库区未来将面临水体富营养化的风险, 在制定污染控制方案的过程中应当重点关注生活源和农业面源。

**关键词:** 绝对主成分; 多元线性回归; 污染源解析; 长潭水库

**中图分类号:** X824 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2023)04-0530-10

**Pollution Source Apportionment of Changtan Reservoir of Zhejiang Province Based on APCS-MLR Model.** LIU Zhuang<sup>1</sup>, DING Cheng-cheng<sup>1</sup>, CHAO Jian-ying<sup>1</sup>, ZHENG Zhi-bo<sup>2</sup>, CUI Yi-bin<sup>1</sup> (1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2. Management Center of Changtan Reservoir, Huangyan District, Taizhou 318020, China)

**Abstract:** Based on the water quality monitoring data of Changtan Reservoir between 2010–2020, principal component analysis and factor analysis were used to determine the primary pollution sources of Changtan Reservoir. Contributions of different pollution sources to each pollution factor of Changtan Reservoir were quantified by APCS-MLR (absolute principal component score-multiple linear regression) model. Research results show that the primary pollution sources of Changtan Reservoir are endogenous pollution source, domestic pollution source and agricultural none point source. Organic pollutants and Chl-a (chlorophyll a) of Changtan Reservoir are mainly from endogenous pollution source. The endogenous pollution source contribute 75.52% of COD<sub>Mn</sub>, 51.39% of COD<sub>Cr</sub>, 67.00% of BOD<sub>5</sub> and 63.65% of Chl-a. Nitrogen mainly comes from domestic pollution source. The domestic pollution source contribute 38.54% of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, 46.80% of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and 77.69% of TN. Phosphorus is mainly from agricultural none point source which contributed 44.51% of phosphorus. The concentrations of TN and TP are relatively higher in Changtan Reservoir and they are mainly from external pollution sources. Lack of effective control of nitrogen and phosphorus from the pollution sources will put Changtan Reservoir at the risk of eutrophication. In the process of formulating the pollution control scheme of Changtan Reservoir, more attention should be paid on the domestic pollution source and the agricultural none point source.

**Key words:** absolute principal component; multiple linear regression; pollution source apportionment; Changtan Reservoir

收稿日期: 2021-11-02

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC3204004-003); 生态环境部南京环境科学研究所创新团队基金 (ZX2023QT017)

① 通信作者 E-mail: cyb@nies.org

了解水质时空分布规律、分析污染物来源是改善水环境质量的前提条件<sup>[1]</sup>,污染源解析对提高水体生态健康水平和环境质量至关重要<sup>[2]</sup>,通过污染源解析可以获知不同污染源对水质变化的相对贡献量,使环境治理措施更加具有针对性<sup>[3]</sup>。常用的水体污染溯源技术主要包括同位素分析<sup>[4-5]</sup>和三维荧光指纹谱分析<sup>[6-7]</sup>等。这些方法一般只针对特定类型的污染物开展溯源且受到相关条件限制,如氮同位素只能对氮进行溯源,而作为影响水体富营养化的另一种重要元素磷,由于在自然界只存在一种稳定同位素磷-31,无法通过磷开展同位素溯源<sup>[8]</sup>;三维荧光谱分析一般只能对荧光类溶解性有机物进行溯源,且在应用过程中容易受到pH值、金属离子和温度等外界因素以及地球生物化学作用的影响<sup>[7]</sup>。在污染溯源过程中,一定的数据量是分析准确度的重要保证,但同位素与三维荧光谱分析测试成本较高、数据获取难度大,导致获得大范围、长时间序列的数据较为困难,这在很大程度上增加了这些研究方法溯源结果的不确定性。此外,同位素和三维荧光谱溯源都非常依赖特定区域、特定类型污染源的同位素特征数据库和荧光指纹图谱库<sup>[9-10]</sup>。在数据积累不充分的地区开展研究,分析精度将受到很大影响。

运用多元统计中的主成分分析(PCA)和因子分析(FA),根据观测指标间的相互关系把复杂变量归结为数量较少的综合特征因子,可以从受体的角度对污染来源进行解析<sup>[11]</sup>,这一方法数据获取成本低,能够根据环保部门例行监测点位较长时间序列的数据开展污染源解析,从而降低分析结果的不确定性。而同位素和三维荧光谱解析由于成本较高,常常只能基于少量监测点位短时间甚至单次监测数据进行研究。单独的PCA/FA难以定量描述不同污染来源对各个水质指标的影响程度,1985年THURSTON等<sup>[12]</sup>提出了绝对主成分分析与多元线性回归相结合的APCS-MLR污染源解析模型,在对标准化后的原始数据开展主成分分析和因子分析的基础上,进一步运用绝对主成分分析转换得到因子的绝对主成分得分值(absolute principal component scores,APCS),再结合多元线性回归模型(multiple linear regression,MLR)计算各因子对水质指标的贡献率。APCS-MLR模型最初应用于大气污染源解析,近年来已经广泛应用于土壤、地下水和地表水等多种类型的污染源解析。在土壤污染源解析研究中,运用该方法开展重金属污染来源分析取得了较好效果<sup>[13-14]</sup>,多环芳烃(PAHs)来源分

析也取得初步成效<sup>[15]</sup>;除此以外,APCS-MLR模型近年来在水污染源解析研究中也得到广泛应用。ZHANG等<sup>[16]</sup>在成都平原东北部地区开展了地下水污染源解析;GHOLIZADEH等<sup>[17]</sup>对美国佛罗里达南部的3条主要河流开展了污染源解析;ZHOU等<sup>[18]</sup>以及LIU等<sup>[19]</sup>对香港海域的水污染源及其时空分布格局进行了分析;赵洁等<sup>[20]</sup>以及郑倩玉等<sup>[21]</sup>分别对辽河、松花江哈尔滨段的污染源开展了分析。

为解析浙江长潭水库氮、磷等污染物的来源,笔者基于连续多年的例行水质监测数据分析长潭水库水质的时空变化特征,构建APCS-MLR源解析模型,对库区主要污染物来源及其贡献率进行分析,以期长为潭水库的氮、磷污染物和水体富营养化控制提供科学依据。

## 1 研究区概况

长潭水库位于台州市西部黄岩区,是台州市最大、最重要的水源地,也是浙江省六大重点水库之一<sup>[22]</sup>。长潭水库水质管理目标为GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的Ⅱ类,但近10 a来,TN平均质量浓度为 $0.528 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,已经劣于Ⅱ类水质标准;TP平均质量浓度为 $0.015 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,虽未劣于Ⅱ类水质标准,但月例行水质监测值中有20次劣于Ⅱ类标准,超标率为5.56%,且测得的20个TP超标数据中有14个出现在2017—2019年,表明长潭水库的TP污染近年来有加重的趋势。长潭水库总库容 $7.32 \text{ 亿 m}^3$ ,是一座以防洪、灌溉、供水为主,兼顾发电等综合功能的大型水库<sup>[23]</sup>,日供水能力 $77 \text{ 万 m}^3$ ,是台州市最主要的饮用水源地<sup>[24]</sup>。近年来库区藻类群落演替加速,蓝藻、绿藻比重有所上升<sup>[25-26]</sup>,一些年份春季常出现Chl-a异常增高现象,显示水库已经面临水体富营养化的威胁,迫切需要厘清水体污染来源,有针对性地制订污染控制方案。

长潭水库流域涉及宁溪镇、上垟乡、上郑乡、屿头乡、平田乡全部以及富山乡、北洋镇一部分,土地利用类型以林地为主(占73.36%),但也有相当一部分农田和园地(以果园为主),其中农田占11.47%,园地占5.78%,且农田和园地大多分布于入库溪流的河谷两岸。主要入库溪流包括永宁溪、柔极溪、瑞岩溪、日溪、上垟溪、小坑溪、象岙溪和桐外岙溪(图1),流域范围内有5万多常住人口,其中永宁河流域人口数量最多,涉及宁溪镇、上郑乡和富山乡3个乡镇,常住人口占全流域人口的比重达

60.97%。各乡镇中宁溪镇人口最多,占流域总人口的 43.01%(表 1)。

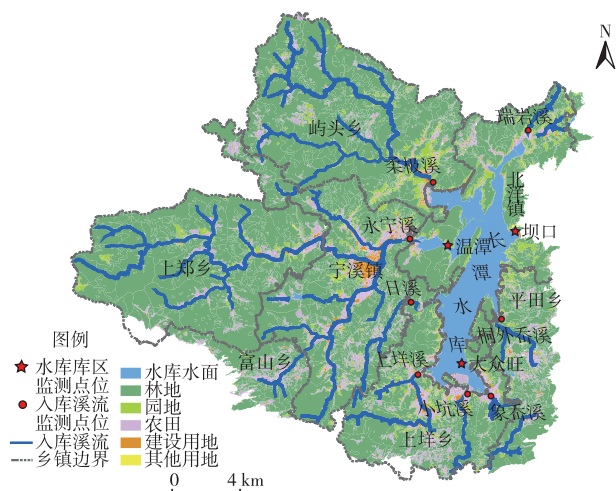


图 1 长潭水库流域土地利用及监测点位分布

Fig. 1 Landuse and environmental monitoring points of Changtan Reservoir catchment

表 1 长潭水库流域各乡镇常住人口数量

Table 1 The permanent population of villages and towns in Changtan Reservoir catchment

乡镇	所属流域	常住人口数量	常住人口比例/%
宁溪镇	永宁溪	23 143	43.01
上郑乡	永宁溪	5 361	9.96
富山乡	永宁溪	4 303	8.00
上垵乡	上垵溪、小坑溪、象岙溪、日溪	6 857	12.74
屿头乡	柔极溪	6 038	11.22
平田乡	桐外岙溪	3 797	7.06
北洋镇	瑞岩溪	4 312	8.01

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

研究数据来自长潭水库库区 3 个监测点以及 8 条入库溪流 8 个监测点的长期水质监测数据,库区水质监测时间为 2010—2020 年(每月监测 1 次)。由于入库溪流从 2013 年才开始设立水质监测站,入库流水质监测时间为 2013—2020 年(逢双月每 2 个月监测 1 次)。水质指标包括  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{TN}$ 、 $\text{TP}$  浓度共 7 项(库区监测点增加  $\text{Chl-a}$  浓度共 8 项),水质指标的测定方法按照 HJ 535—2009《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》、HJ/T 84—2001《水质 无机阴离子的测定 离子色谱法》、HJ 636—2012《水质 总氮的测定

碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》、GB/T 11893—1989《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》、GB/T 11892—1989《水质 高锰酸盐指数的测定》等标准和技术规范,监测数据由台州市环境监测中心站提供。

长潭水库库区的 3 个监测点分别是坝口、温潭和大众旺,坝口位于长潭水库大坝附近,离岸边较远;温潭位于永宁溪入库口附近,永宁溪是 8 条入库溪流中水量最大的一条,永宁溪下游的宁溪镇是长潭水库流域内人口最多的乡镇;大众旺位于库区南部,靠近上垵溪、小坑溪和象岙溪的入库口;8 个入库溪流监测点分别位于各入库溪流入库口附近(图 1)。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 绝对主成分分析

APCS-MLR 模型构建的第 1 步是提取水质指标的主成分,作为污染源判别和量化的依据,提取的主成分得分计算公式为

$$A_{jk} = \sum_{i=1} w_{ij} z_{ik}, \quad (1)$$

$$z_{ik} = \frac{c_{ik} \bar{c}_i}{\sigma_i}. \quad (2)$$

式(1)~(2)中, $A_{jk}$ 为  $k$  样本的  $j$  主成分得分值; $w_{ij}$ 为污染因子  $i$  相对主成分  $j$  的因子系数; $z_{ik}$ 为  $k$  样本的  $i$  污染因子浓度标准化后的值; $c_{ik}$ 为  $k$  样本的  $i$  污染因子实测浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  或  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $\bar{c}_i$  为  $i$  污染因子的算术平均值,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  或  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $\sigma_i$  为  $i$  污染因子的标准差。

由于  $A_{jk}$  是标准化的值,不能直接用于计算主成分(PCS)的原始贡献,必须把标准化的主成分得分转化为绝对主成分得分(APCS)才能计算主成分对污染因子的贡献。APCS 的计算方法为

$$S_{jk} = A_{jk} - A_{0j}, \quad (3)$$

$$A_{0j} = \sum_{i=1} w_{ij} Z_{0i}, \quad (4)$$

$$Z_{0i} = \frac{0 - \bar{c}_i}{\sigma_i}. \quad (5)$$

式(3)~(5)中, $S_{jk}$ 为  $k$  样本的  $j$  绝对主成分得分; $A_{0j}$ 为 0 值下的  $j$  主成分得分; $Z_{0i}$ 为  $i$  污染因子浓度设为 0 时标准化后的值。

#### 2.2.2 多元线性回归

以实测污染因子浓度为因变量,以绝对主成分 APCS 为自变量,与污染因子浓度之间进行多元线性回归分析,获得回归方程。

$$C_{ik} = \sum_{j=1} a_{ji} S_{jk} + b_i. \quad (6)$$

式(6)中, $C_{ik}$ 为  $k$  样本  $i$  污染因子浓度的实测值,

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  或  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $a_{ji}$  为污染源  $j$  对污染因子  $i$  的回归系数;  $S_{jik}$  为  $k$  样本  $i$  污染因子的  $j$  绝对主成分得分值;  $b_i$  为  $i$  污染因子多元线性回归方程中的常数项, 一般认为是未被识别源的贡献。

### 2.2.3 污染源贡献率计算

污染源  $j$  对污染因子  $i$  的平均贡献率可用式(7)计算, 未识别源的贡献率可用式(8)计算。

$$U_{ji} = \frac{|a_{ji}\bar{S}_{ji}|}{\sum_{j=1} |a_{ji}\bar{S}_{ji}| + |b_i|}, \quad (7)$$

$$C_i = \frac{|b_i|}{\sum_{j=1} |a_{ji}\bar{S}_{ji}| + |b_i|}. \quad (8)$$

式(7)~(8)中,  $U_{ji}$  为  $j$  污染源对  $i$  污染因子的平均贡献率;  $C_i$  为未知源对  $i$  污染因子的平均贡献率;  $\bar{S}_{ji}$  为  $i$  污染因子的  $j$  绝对主成分得分均值。运用 SPSS 22.0 软件开展主成分-因子分析与多元线性回归。

## 3 结果与讨论

### 3.1 长潭水库水质总体特征

#### 3.1.1 流域水质时空分异特征

长潭水库库区内设 3 个监测点位, 为分析库区水质的季节变化规律, 计算 2010—2020 年 3 个点位主要水质指标的月均值(图 2)。总体而言, 库区有机污染物年内波动较小,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{BOD}_5$  在 5

月均值偏高, 冬季偏低;  $\text{TN}$  和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度表现出相似的季节变化规律, 3 月和 4 月浓度最高, 这主要是因为春季台州地区气温较高但降雨偏少, 库区蓄水量减少, 导致污染物浓度增高; 相比  $\text{TN}$  和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  浓度的季节性变化不明显, 这是因为  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  在水体中不稳定, 浓度变化幅度大且缺乏规律性(表 2~3), 随机变化掩盖了季节变化规律;  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度远高于  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  浓度。多年平均值显示, 库区  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  平均浓度是  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  的 3.38 倍, 说明长潭水库的氮以  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  为主。TP 浓度的多年月均值变化曲线呈双峰型, 6 月最高, 5、6 月以及 9、10 月明显高于其他时段, 与台州地区的雨季基本吻合, 说明长潭水库的 TP 与降雨密切相关;  $\text{Chl-a}$  浓度 5 月最高, 9 月也偏高, 这是因为春、秋季温度适宜藻类生长, 尤其是春末雨季到来前是藻类繁殖高峰, 加之降雨较少, 导致  $\text{Chl-a}$  浓度异常增高, 甚至出现零星水华。

从流域空间格局看, 库区水体  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、平均  $\text{BOD}_5$  平均值总体高于入库溪流, 而入库溪流氮、磷浓度则高于库区, 尤其是  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{TN}$  和 TP 浓度显著高于库区水体(表 2); 此外, 永宁溪的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  入库通量占比达 52.19%,  $\text{TN}$  入库通量达 48.96%, 表明永宁溪对库区的氮浓度有很大影响(表 4)。

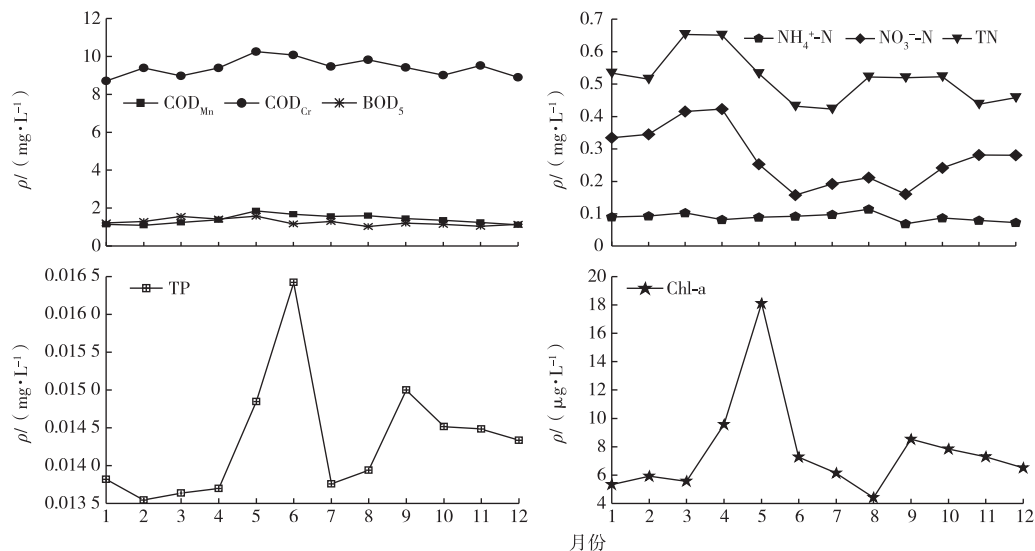


图 2 2010—2020 年长潭水库库区主要水质指标的月均值

Fig. 2 The monthly means of main water quality indices in Changtan Reservoir between 2010-2020

从库区内部空间格局(表 2 和图 3)看, 温潭和大众旺大部分水质指标的平均浓度高于坝口, 这是因为坝口离入库溪流较远, 受到入库溪流水质影响

较小; 尤其需要注意的是, 温潭的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  和  $\text{TN}$  浓度显著高于其他 2 个站点, 同时永宁溪也是各条入库溪流中  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  和  $\text{TN}$  浓度最高的, 温潭位于永宁

溪入库口附近,永宁溪是流量最大的入库溪流,其沿岸也是整个长潭水库流域人口最集中的区域,宁溪镇就位于永宁溪下游,其常住人口占长潭水库流域总常住人口的比例达 43.01%,表明永宁溪沿岸尤其是宁溪镇的生活源对库区氮污染有较大影响。

表 2 2010—2020 年长潭水库库区与入库溪流主要水质指标的平均值

Table 2 The average values of main water quality indices at different monitoring points in Changtan Reservoir and it's inflow rivers between 2010–2020

监测站点	COD <sub>Mn</sub> / (mg · L <sup>-1</sup> )	COD <sub>Cr</sub> / (mg · L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> / (mg · L <sup>-1</sup> )	ρ(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N) / (mg · L <sup>-1</sup> )	ρ(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N) / (mg · L <sup>-1</sup> )	ρ(TN) / (mg · L <sup>-1</sup> )	ρ(Chl-a) / (μg · L <sup>-1</sup> )	ρ(TP) / (mg · L <sup>-1</sup> )
坝口	1.391	8.929	1.176	0.086	0.279	0.490	7.052	0.013
温潭	1.379	9.359	1.292	0.090	0.360	0.601	7.659	0.015
大众旺	1.430	9.784	1.303	0.086	0.252	0.494	8.032	0.016
库区	1.400	9.358	1.257	0.088	0.297	0.528	7.581	0.015
永宁溪	1.054	5.940	1.144	0.090	1.157	1.196		0.055
柔极溪	1.018	6.353	1.149	0.072	0.740	0.891		0.030
瑞岩溪	2.600	10.940	1.936	0.176	0.610	0.907		0.065
日溪	1.598	6.635	1.298	0.122	0.409	0.620		0.038
上垵溪	1.356	6.217	1.278	0.115	1.123	1.139		0.051
桐外岙溪	1.700	7.719	1.458	0.121	0.555	0.748		0.038
象岙溪	1.532	6.979	1.236	0.117	0.990	1.079		0.082
小坑溪	1.325	6.781	1.282	0.101	0.808	0.955		0.042
入库溪流	1.265	6.592	1.236	0.098	0.937	1.039		0.050

表 3 2010—2020 年长潭水库库区与入库溪流主要水质指标的变异系数

Table 3 The coefficients of variation of main water quality indices at different monitoring points in Changtan Reservoir and it's inflow rivers between 2010–2020

监测站点	COD <sub>Mn</sub>	COD <sub>Cr</sub>	BOD <sub>5</sub>	ρ(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N)	ρ(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N)	ρ(TN)	ρ(Chl-a)	ρ(TP)
坝口	0.42	0.31	0.31	1.30	0.91	0.40	0.90	0.50
温潭	0.37	0.30	0.38	1.28	0.78	0.52	0.76	0.50
大众旺	0.36	0.27	0.35	1.23	0.88	0.40	0.82	0.50
库区	0.38	0.29	0.35	1.27	0.86	0.47	0.83	0.51
永宁溪	0.47	0.41	0.53	0.70	0.21	0.36		0.64
柔极溪	0.42	0.40	0.57	0.71	0.23	0.27		0.70
瑞岩溪	0.35	0.43	0.44	0.65	0.78	0.55		0.44
日溪	0.38	0.41	0.59	0.66	0.84	0.58		0.76
上垵溪	0.46	0.42	0.52	0.58	0.41	0.44		0.49
桐外岙溪	0.35	0.39	0.50	0.59	0.79	0.54		0.49
象岙溪	0.40	0.38	0.53	0.55	0.36	0.39		0.53
小坑溪	0.47	0.43	0.55	0.72	0.47	0.48		0.49
入库溪流	0.51	0.46	0.55	0.70	0.57	0.48		0.63

表 4 长潭水库不同入库溪流的污染物入库通量

Table 4 Reservoir-going pollutant flux of different inflow rivers in Changtan Reservoir catchment

溪流	COD <sub>Mn</sub>		COD <sub>Cr</sub>		BOD <sub>5</sub>		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N		TN		TP	
	通量/ (kg · a <sup>-1</sup> )	占比/ %	通量/ (kg · a <sup>-1</sup> )	占比/ %	通量/ (kg · a <sup>-1</sup> )	占比/ %	通量/ (kg · a <sup>-1</sup> )	占比/ %	通量/ (kg · a <sup>-1</sup> )	占比/ %	通量/ (kg · a <sup>-1</sup> )	占比/ %	通量/ (kg · a <sup>-1</sup> )	占比/ %
瑞岩溪	3 609	12.71	15 819	10.66	2 644	10.04	250	11.85	850	4.28	1 236	5.62	90	11.15
柔极溪	5 351	18.84	33 201	22.37	5 726	21.75	382	18.12	3 959	19.96	4 781	21.73	148	18.41
永宁溪	10 424	36.70	58 291	39.28	10 390	39.47	832	39.45	10 351	52.19	10 775	48.96	283	35.25
日溪	1 663	5.86	7 313	4.93	1 344	5.10	118	5.58	381	1.92	606	2.75	41	5.13
上垵溪	2 360	8.31	10 774	7.26	2 175	8.27	185	8.79	1 739	8.77	1 749	7.95	84	10.45
象岙溪	3 083	10.86	14 175	9.55	2 422	9.20	216	10.26	1 968	9.92	2 098	9.54	116	14.46
桐外岙溪	1 915	6.74	8 819	5.94	1 621	6.16	126	5.96	586	2.95	760	3.45	42	5.17

3.1.2 不同水质指标间的相关性

运用 Pearson 相关系数对库区水体的 8 个主要水质指标开展相关分析(表 5)。结果显示,Chl-a 浓度与 COD<sub>Mn</sub>、COD<sub>Cr</sub> 以及 BOD<sub>5</sub> 极显著相关 ( $P < 0.01$ ),明显高于与其他水质指标的相关性,说明库区水体中的有机污染物与藻类生长密切相关。

3.2 污染源识别

采用 Z-score 数据标准化方法,对原始数据进行

标准化处理,针对各个变量的相关性进行 KMO-Bartlett 检验,结果显示 KMO 值为 0.614, Bartlett 球形度检验显著性  $P < 0.01$ ,表明部分变量之间有较强的相关性,适合开展主成分分析和因子分析。运用 SPSS 22.0 软件开展主成分分析,依据特征值  $> 1$  的标准,共提取 3 个主成分,累积方差贡献率为 57.22%(表 6)。

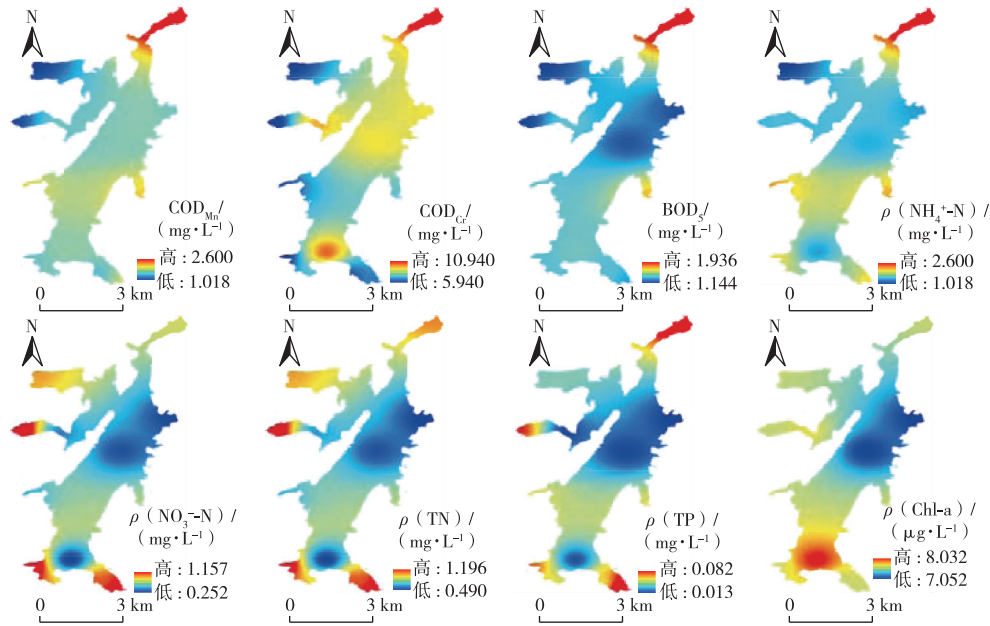


图 3 2010—2020 年长潭水库库区主要水质指标的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of main water quality indices of Changtan Reservoir between 2010-2020

表 5 长潭水库库区主要水质指标间的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between main water quality indices of Changtan Reservoir

水质指标	COD <sub>Cr</sub>	BOD <sub>5</sub>	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{Chl-a})$	$\rho(\text{TP})$
COD <sub>Mn</sub>	0.215 **	0.206 **	0.156 **	-0.229 **	0.041	0.439 **	0.104 *
COD <sub>Cr</sub>		0.093	0.104 *	-0.020	-0.029	0.243 **	-0.100 *
BOD <sub>5</sub>			0.096	0.046	0.068	0.354 **	-0.080
$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$				0.136 **	0.264 **	0.124 *	0.059
$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$					0.328 **	-0.124 *	-0.108 *
$\rho(\text{TN})$						0.025	0.010
$\rho(\text{Chl-a})$							0.009

\*表示  $P < 0.05$ , \*\*表示  $P < 0.01$ 。

表 6 长潭水库库区 3 个主成分的方差解释

Table 6 Total variance explained by three principal components of Changtan Reservoir

成分	初始特征值			初始提取载荷平方和			旋转后载荷平方和		
	总计	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%	总计	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%	总计	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
F1	1.93	24.17	24.17	1.93	24.17	24.17	1.88	23.50	23.50
F2	1.51	18.90	43.07	1.51	18.90	43.07	1.51	18.87	42.37
F3	1.13	14.14	57.22	1.13	14.14	57.22	1.19	14.85	57.22

为简化因子载荷矩阵的结构以利于污染源解析,进一步运用因子分析法将提取的 3 个主成分作为主因子,运用正交变换对初始因子载荷矩阵进行旋转,使各因子载荷尽量趋近于 0 或 1 两极,得到旋转后的因子载荷分布(图 4)。其中 F1 的特征值为 1.93,旋转后方差贡献率为 23.50%,主要载荷变量包括  $COD_{Mn}$ 、 $COD_{Cr}$ 、 $BOD_5$  和 Chl-a 浓度,因此 F1 以有机污染物为主。对大多数水体而言,有机污染物主要来自工业和生活源,但长潭水库作为重点水源保护地,流域范围内涉水工业企业已全部外迁,外源有机污染已经得到有效控制。此外,2010 年以来,入库溪流  $COD_{Mn}$ 、 $COD_{Cr}$ 、 $BOD_5$  和 Chl-a 浓度平均值均低于库区(表 2),说明入库溪流等外源污染已经不是长潭水库有机污染物的主要来源。与此同时,库区不同水质指标的相关分析(表 5)则显示,Chl-a 浓度变化与  $COD_{Mn}$ 、 $COD_{Cr}$ 、 $BOD_5$  显著相关且相关系数明显高于其他指标。此外,Chl-a 浓度与  $COD_{Mn}$ 、 $COD_{Cr}$ 、 $BOD_5$  的最高值均出现在 5 月藻类生长最旺盛的时期(图 2),表明库区有机污染水平的增高主要是由于藻类生长导致,因此 F1 可以定义为库区内生源污染(由于水体内藻类等水生生物生长而产生的污染)。

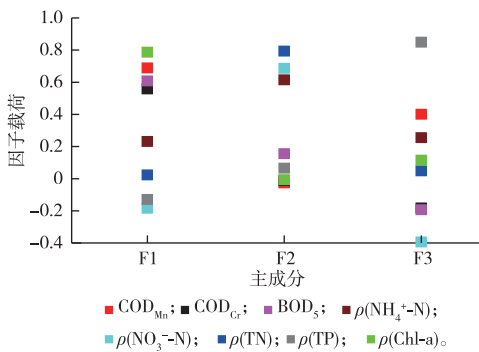


图 4 长潭水库库区 8 个水质指标方差最大化旋转后的因子载荷分布

Fig. 4 Factor loadings for eight water quality indices after varimax rotation in Changtan Reservoir

F2 的特征值为 1.51,旋转后方差贡献率为 18.87%,主要载荷变量包括 TN、 $NO_3^- - N$  和  $NH_4^+ - N$  浓度,说明 F2 反映的是氮污染。库区水质与入库溪流水质对比(表 2)显示,入库溪流的 TN、 $NO_3^- - N$  和  $NH_4^+ - N$  平均浓度均高于库区,说明库区氮污染以外源为主,水体中的氮一般来自生活源和农业面源。对长潭水库库区 3 个点位和入库溪流的 TN、 $NO_3^- - N$  平均浓度的分析显示,温潭的 TN、 $NO_3^- - N$

平均浓度显著高于其他 2 个点位,永宁溪的 TN、 $NO_3^- - N$  平均浓度也高于其他入库溪流。温潭位于永宁溪入库口附近,而永宁溪沿岸是流域内人口最集中的区域,宁溪镇位于温潭监测点上游不远处(图 1),因此生活污水排放与库区氮污染密切相关。

F3 的特征值为 1.13,旋转后方差贡献率为 14.85%,主要载荷变量为 TP,说明 F3 反映的是磷污染,入库溪流的 TP 浓度显著高于库区,靠近岸边的温潭和大众旺 TP 平均浓度显著高于坝口。水体中磷大多附着于沉积物颗粒,河口附近沉积物含量高导致这些区域 TP 浓度偏高,说明 TP 同样以外源为主,主要来自入库溪流输入。作为重点饮用水源保护区,长潭水库流域近年来严格控制含磷洗涤剂的使用,但流域内依然存在一定面积的农田和果园,化肥、农药使用造成的农业面源污染还难以完全杜绝,尤其是果园磷肥施用较多。库区水质的季节变化(图 2)也显示,TP 浓度在雨季偏高,而 TN 和  $NO_3^- - N$  浓度的最高值则出现在雨季前,TP 的高浓度是降雨径流冲刷导致,与农业面源的流失特征一致,TN 和  $NO_3^- - N$  的高浓度更多是由于雨季到来前蒸发量大导致,符合生活污染源排放相对稳定,浓度与水体水量关系密切的特征。综上所述,可以将 F2 定义为生活源,F3 定义为农业面源。

### 3.3 不同污染源污染贡献率计算结果

运用 SPSS 22.0 软件进行多元线性回归,获得多元线性回归方程中每个绝对主成分以及常数项的系数(表 7),完成 APCS-MLR 模型的构建。为验证模型的可靠性,基于该函数关系,计算各水质指标数值,并将预测结果与实测值进行比较(图 5)。可以看出,模型计算的库区内各水质指标浓度与实测浓度的拟合度  $R^2$  在 0.53~0.87 之间,表明两者具有较好的一致性,预测值与实测值比值接近于 1,说明该模型较可靠,可用于长潭水库污染源解析。

基于 APCS-MLR 模型和式(7)~(8),计算长潭水库 3 类污染源对各主要水质指标的贡献率(表 8),结果显示内生源对  $COD_{Mn}$ 、 $COD_{Cr}$ 、 $BOD_5$  和 Chl-a 浓度的贡献率分别为 75.52%、51.39%、67.00% 和 63.65%。因此,有机污染物与叶绿素主要来自库区内生源。生活源对  $NH_4^+ - N$ 、 $NO_3^- - N$  和 TN 浓度的贡献率分别为 38.54%、46.80% 和 77.69%,对 TP 浓度的贡献率仅为 5.06%;农业面源对 TP 浓度的贡献率为 44.51%,但对  $NH_4^+ - N$ 、 $NO_3^- - N$  和 TN 浓度的贡献率仅为 7.70%、14.00% 和 2.48%。因此长潭水库库区氮污染物主要来自生活源,磷污染物主要来自农业面源。

以上计算结果显示,长潭水库的人为污染源主要是生活源和农业面源,其中农业面源来自农田和果园,生活源来自各类居民点。农田和果园(主要对应图 1 中的园地)基本上位于各条入库溪流的河谷两岸,人口和居民点也主要位于河谷两岸,大部

分位于永宁溪两岸,尤其是永宁溪下游的宁溪镇,人口最密集,因此各条入库溪流沿岸的农田和果园要重点关注磷污染控制,主要居民点则要重点关注氮污染控制。

表 7 绝对主成分与各水质指标多元线性回归方程的系数

Table 7 Coefficients of MLR equation between APCS and water quality indices

水质指标	APCS01 系数	APCS02 系数	APCS03 系数	常数项
COD <sub>Mn</sub>	0.372 006	-0.014 040	0.216 557	0.134 895
COD <sub>Cr</sub>	1.542 544	-0.033 724	-0.502 210	5.577 081
BOD <sub>5</sub>	0.269 568	0.068 865	-0.085 564	0.139 882
$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	0.043 842	0.116 270	0.048 226	-0.262 652
$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$	-0.047 109	0.175 766	-0.100 671	0.173 168
$\rho(\text{TN})$	0.005 780	0.196 457	0.011 990	0.088 084
$\rho(\text{TP})$	-0.000 976	0.000 491	0.006 400	0.009 430
$\rho(\text{Chl-a})$	4.926 450	-0.040 314	0.722 642	-7.110 498

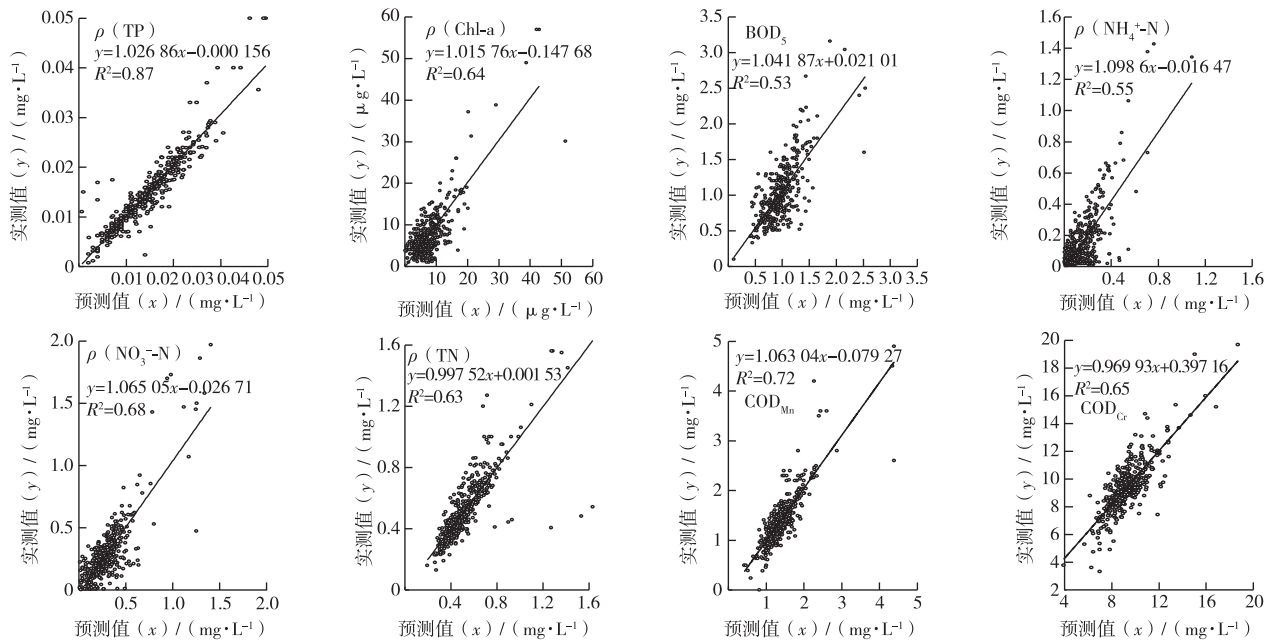


图 5 长潭水库库区主要水质指标预测值与实测值对比

Fig. 5 The comparison of observed and predicted values of main water quality indices in Changtan Reservoir

表 8 不同污染源对长潭水库库区各水质指标的贡献率

Table 8 Contributions of different pollution sources to the main water quality indices in Changtan Reservoir

%

污染物来源	COD <sub>Mn</sub>	COD <sub>Cr</sub>	BOD <sub>5</sub>	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{Chl-a})$
内生源	72.52	51.39	67.00	18.24	17.07	3.11	13.71	63.65
生活源	2.01	0.66	12.58	38.54	46.80	77.69	5.06	0.38
农业面源	16.20	5.17	8.16	7.70	14.00	2.48	44.51	3.58
未知源	9.27	42.78	12.26	35.52	22.13	16.72	36.72	32.39

## 4 结论

(1)长潭水库可辨识的污染源主要包括内生

源、生活源和农业面源 3 大类,内生源是有机污染物及 Chl-a 的主要来源,生活源是各种氮污染物的主要来源,农业面源则是 TP 的主要来源。

(2)长潭水库 TN 和 TP 浓度偏高且主要来自外源输入,入库溪流的 TN 和 TP 浓度远高于库区,如果缺乏有效控制措施,预计库区内氮、磷浓度将不断升高,未来库区水体存在富营养化的风险,各条入库溪流尤其是永宁溪沿岸的居民点和农田、果园,作为氮、磷的主要来源,应当重点关注。

(3)研究表明,基于主成分分析和多元回归的 APCS-MLR 模型能够充分利用例行环境监测数据,以较小的成本解析水体污染的来源和贡献率,且可适用于各种类型污染物来源的解析,为污染溯源提供了更为便利的技术途径。

**致谢:**衷心感谢台州市生态环境局黄岩分局以及台州市环境监测中心站在长潭水库水质数据资料收集方面给予的大力帮助!

#### 参考文献:

- [1] 王昱,卢世国,冯起,等.黑河上中游水质时空分异特征及污染源解析[J].中国环境科学,2019,39(10):4194-4204.[WANG Yu,LU Shi-guo,FENG Qi, et al. Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in The Upper and Middle Reachers of Heihe River [J]. China Environmental Science,2019,39(10):4194-4204.]
- [2] SHEN Da-li,HUANG Sai-hua,ZHANG Yi-ping, et al. The Source Apportionment of N and P Pollution in The Surface Waters of Lowland Urban Area Based on EEM-PARAFAC and PCA-APCS-MLR [J].Environmental Research,2021,197:111022.
- [3] 杜展鹏,王明净,严长安,等.基于绝对主成分-多元线性回归的滇池污染源解析[J].环境科学学报,2020,40(3):1130-1137.[DU Zhan-peng,WANG Ming-jing,YAN Chang-an, et al. Pollution Source Apportionment of Lake Dianchi Based on Absolute Principal Component Score-multiple Linear Regression [J].Acta Scientiae Circumstantiae,2020,40(3):1130-1137.]
- [4] 彭聪,潘晓东,焦友军,等.多种同位素手段的硝酸盐污染源解析:以会仙湿地为例[J].环境科学,2018,39(12):5410-5417.[PENG Cong,PAN Xiao-dong,JIAO You-jun, et al. Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland [J]. Environmental Science, 2018, 39(12):5410-5417.]
- [5] 徐志伟,张心昱,于贵瑞,等.中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展[J].环境科学,2014,35(8):3230-3238.[XU Zhi-wei,ZHANG Xin-yu,YU Gui-rui, et al. Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface and Groundwater in China [J]. Environmental Science, 2014, 35(8):3230-3238.]
- [6] 李义禄,张玉虎,贾海峰,等.苏州古城区水体污染时空分异特征及污染源解析[J].环境科学学报,2014,34(4):1032-1044.[LI Yi-lu,ZHANG Yu-hu,JIA Hai-feng, et al. Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Ancient Town of Suzhou [J].Acta Scientiae Circumstantiae,2014,34(4):1032-1044.]
- [7] 白小梅,李悦昭,姚志鹏,等.三维荧光指纹谱在水体污染溯源中的应用进展[J].环境科学与技术,2020,43(1):172-180,193.[BAI Xiao-mei,LI Yue-zhao,YAO Zhi-peng, et al. Application Progress of Three-Dimensional Excitation Emission Matrix Fluorescence Spectroscopy in Source Tracing of Water Pollution [J].Environmental Science & Technology,2020,43(1):172-180,193.]
- [8] 冀建鹏,徐志方.磷酸盐的氧同位素示踪磷来源及循环研究进展[J].环境科学与技术,2010,33(12):360-363.[JI Jian-peng,XU Zhi-fang. Progress on Tracing Sources and Biogeochemical Cycling of Phosphorus by Using Oxygen Isotopes of Phosphate [J].Environmental Science & Technology,2010,33(12):360-363.]
- [9] 齐冉,徐菲菲,杨帆,等.木沥河流域氮素污染及其污染源解析[J].环境科学,2020,41(7):3165-3174.[QI Ran,XU Fei-fei,YANG Fan, et al. Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin [J].Environmental Science,2020,41(7):3165-3174.]
- [10] 张文浩,赵铎霖,王晓毓,等.太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征环境科学,2020,41(11):4958-4969.[ZHANG Wen-hao,ZHAO Duo-lin,WANG Xiao-yu, et al. Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve [J].Environmental Science,2020,41(11):4958-4969.]
- [11] 孟利,左锐,王金生,等.基于 PCA-APCS-MLR 的地下水污染源定量解析研究[J].中国环境科学,2017,37(10):3773-3786.[MENG Li,ZUO Rui,WANG Jin-sheng, et al. Quantitative Source Apportionment of Groundwater Pollution Based on PCA-APCS-MLR [J]. China Environmental Science, 2017, 37(10):3773-3786.]
- [12] THURSTON G D, SPENGLER J D. A Quantitative Assessment of Source Contributions to Inhalable Particulate Matter Pollution in Metropolitan Boston [J]. Atmospheric Environment, 1985, 19(1):9-25.
- [13] GUAN Qing-yu,ZHAO Rui,PAN Ning-hui, et al. Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soil of Wuwei, China: Comparison of Three Receptor Models [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 237:117792.
- [14] JIN Gao-qi,FANG Wei,SHAFIB M, et al. Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soil with Application of APCS-MLR Model: A Pilot Study for Restoration of Farmland in Shaoxing City Zhejiang, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 184:109495.
- [15] 管贤贤,周小平,雷春妮,等.基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析[J].环境科学,2021,42(8):3904-3912.[GUAN Xian-xian,ZHOU Xiao-ping,LEI Chun-ni, et al. Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model [J]. Environmental Science, 2021, 42(8):3904-3912.]
- [16] ZHANG Han, CHENG Si-qian, LI Hong-fei, et al. Groundwater Pollution Source Identification and Apportionment Using PMF and PCA-APCA-MLR Receptor Models in A Typical Mixed Land-Use Area in Southwestern China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 741:140383.

- [17] GHOLIZADEH M H, MELESSE A, REDDI L. Water Quality Assessment and Apportionment of Pollution Sources Using APCS-MLR and PMF Receptor Modeling Techniques in Three Major Rivers of South Florida[J]. *Science of the Total Environment*, 2016 (566/567):1552-1567.
- [18] ZHOU F, HUANG G H, GUO H C, *et al.* Spatio-temporal Patterns and Source Apportionment of Coastal Water Pollution in Eastern Hong Kong[J]. *Water Research*, 2007(41):3429-3439.
- [19] LIU Li-li, TANG Zhou, KONG Ming, *et al.* Tracing the Potential Pollution Sources of the Coastal Water in Hong Kong with Statistical Models Combining APCS-MLR[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 245:143-150.
- [20] 赵洁, 徐宗学, 刘星才, 等. 辽河河流水体污染源解析[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(5):838-842. [ZHAO Jie, XU Zong-xue, LIU Xing-cai, *et al.* Source Apportionment in the Liao River Basin[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(5):838-842.]
- [21] 郑倩玉, 刘硕, 万鲁河, 等. 松花江哈尔滨段水环境质量评价及污染源解析[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(3):507-513. [ZHENG Qian-yu, LIU Shuo, WAN Lu-he, *et al.* Water Environmental Quality Assessment and Source Apportionment in Harbin Section of Songhua River[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(3):507-513.]
- [22] 孙作雷, 李亚男, 俞洁, 等. 浙江省6大重点水库生态服务功能价值评估[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2015, 42(3):353-358, 364. [SUN Zuo-lei, LI Ya-nan, YU Jie, *et al.* Ecosystem Service Evaluation of The Six Important Reservoirs in Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2015, 42(3):353-358, 364.]
- [23] 申开丽, 俞洁, 傅智慧, 等. 基于PSR模型的长潭水库生态安全评价研究[J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(11):166-169. [SHEN Kai-li, YU Jie, FU Zhi-hui, *et al.* Ecological Security Evaluation Based on PSR Model for Changtan Reservoir[J]. *Environmental Science and Management*, 2014, 39(11):166-169.]
- [24] 刘树元, 郑晨, 袁琪, 等. 台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析[J]. *环境科学*, 2014, 35(10):3702-3708. [LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, *et al.* Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(10):3702-3708.]
- [25] HUO Shou-liang, ZHANG Han-xiao, MA Chun-zi, *et al.* Algae Community Response to Climate Change and Nutrient Loading Recorded by Sedimentary Phytoplankton Pigments in the Changtan Reservoir, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 571:311-321.
- [26] 张含笑, 霍守亮, 张靖天, 等. 长潭水库沉积物色素剖面分布及其环境意义[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(9):3688-3694. [ZHANG Han-xiao, HUO Shou-liang, ZHANG Jing-tian, *et al.* Profile Distribution of Sedimentary Pigments and Its Environmental Significance in Changtan Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(9):3688-3694.]

作者简介: 刘庄(1969—), 男, 江苏姜堰人, 研究员, 博士, 主要从事水污染防治研究。E-mail: liuzhuang@nies.org

(责任编辑: 陈昕)