



生态与农村环境学报
Journal of Ecology and Rural Environment
ISSN 1673-4831, CN 32-1766/X

《生态与农村环境学报》网络首发论文

题目：东江湖上游浙水流域水质评价与污染源解析
作者：范旋，王发，连晋姣，李希，罗梦瑶，陈洪松
DOI：10.19741/j.issn.1673-4831.2024.0511
收稿日期：2024-06-21
网络首发日期：2024-12-27
引用格式：范旋，王发，连晋姣，李希，罗梦瑶，陈洪松. 东江湖上游浙水流域水质评价与污染源解析[J/OL]. 生态与农村环境学报.
<https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2024.0511>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2024.0511

东江湖上游浙水流域水质评价与污染源解析

范旋^{1,2,3}, 王发^{1,2}, 连晋姣^{1,2}, 李希¹, 罗梦瑶^{1,2,3}, 陈洪松^{1,2}^① (1.中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2.中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西环江 547100; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 东江湖是湖南省及长株潭城市群重要饮用水源地, 浙水河作为其上游一级支流, 是东江湖重要的生态安全屏障, 在积极发展蔬菜、茶果、生态养殖等特色农业集群背景下, 其水环境现状及污染来源尚不清晰。基于水质实测数据, 运用水污染指数(WPI)、期望值-阈值的水质健康评估法(ETI)、水质质量指数(WQI)进行水质评价, 并使用主成分分析(PCA)识别流域主要污染物及关键源区, 最后利用绝对主成分-多元线性回归(APCS-MLR)模型和输出系数法定量解析主要污染源及其贡献率。结果表明: (1) 2016~2022年浙水流域水质整体呈先波动恶化后逐步改善趋势, 但总氮(TN)浓度长期超标, 属IV类水, TN是影响下游东江湖水环境的关键因子。(2) 浙水流域水质呈上游和下游水质较好, 中游水质较差, 尤以县城附近水质最差的空间格局, 表明流域水污染主要受外源污染影响。(3) 提取的3种主成分可解释88.77%的原始变量信息, 水体有机污染物(F1)占38.29%, 氮污染物(F2)占34.86%, 磷污染物(F3)占15.62%。F1主要来源于生活源+农业面源(畜禽养殖为主), F2主要来源于生活源+农业面源(种植业为主), 卢阳镇和土桥镇是其关键源区; F3主要来源于农业面源(畜禽养殖为主)+生活源, 马桥镇和泉水镇是其关键源区。浙水流域未来要针对关键源区加强农业面源污染的精准治理, 这对保护浙水河及下游东江湖的水环境具有重要意义。

关键词: 水质评价; 污染源解析; 主成分分析; APCS-MLR模型; 浙水流域

中图分类号: X52

Water Quality Evaluation and Pollution Source Analysis in Zhesui River Basin of the Upper Reaches of Dongjiang Lake. FAN Xuan^{1,2,3}, WANG Fa^{1,2}, LIAN Jin-jiao^{1,2}, LI Xi¹, LUO Meng-yao^{1,2,3}, CHEN Hong-song^{1,2}^① (1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China; 3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Dongjiang Lake is an important source of drinking water in Hunan Province and a strategic water source for the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban cluster. As a first-order tributary of the upper reaches, the Zhesui River serves as an important ecological safety barrier for Dongjiang Lake. Currently, the region is actively developing a cluster of characteristic agricultures such as vegetable, fruit and tea farming, and ecological animal husbandry. However, the current status of the water environment and the sources of pollutants are still unclear. Based on the actual measured water quality data, water quality evaluation is conducted using the Water Pollution Index (WPI), the Expectation-Threshold-based Water Quality Health Assessment (ETI), the Water Quality Index (WQI). Using Principal Component Analysis (PCA) to identify the primary pollutants and critical source areas within the watershed. Finally, APCS-MLR and the Output Coefficient Method is employed to quantitatively analyze the main pollutants sources and their contribution rates in the basin. The results show that: (1) From 2016 to 2022, the overall water quality in the Zhesui River Basin exhibited an initial deterioration followed by a gradual improvement. However, due to the persistent exceedance of total nitrogen (TN) concentrations, which classifies the water quality as Class IV, TN remains a critical factor affecting the water environment of the downstream Dongjiang Lake. (2) The spatial distribution of water quality within the watershed reveals that the water quality is relatively better in the upstream and downstream areas, while the middle reaches, particularly near county towns, exhibit the poorest quality. This spatial pattern indicates that the water pollution in the Zhesui River Basin is predominantly influenced by external pollution sources. (3) The three principal components extracted explain 88.77% of the variability in the original data. Organic matter pollution (F1) accounts for 38.29%, nitrogen nutrient pollution (F2) accounts for 34.86%, and phosphorus nutrient pollution (F3) accounts for 15.62%. F1 primarily originates from domestic and agricultural non-point sources, with livestock farming as a major contributor. F2 is mainly sourced from domestic and agricultural non-point sources, with crop farming being predominant, with Luyang Town and Tuqiao Town identified as critical pollution source areas. Phosphorus pollution (F3) mainly comes from agricultural non-point sources (primarily livestock farming) and domestic sources, with Maqiao Town and Quanshui Town identified as critical pollution source areas. Future efforts in this watershed should focus on precise management of agricultural non-point source pollution in critical pollution source areas, which is crucial for protecting the water environment of both the Zhesui River Basin and the downstream Dongjiang Lake.

Key words: water quality evaluation; pollution source analysis; principal component analysis; APCS-MLR; Zhesui River Basin

收稿日期: 2024-06-21

基金项目: 郴州国家可持续发展议程创新示范区建设省级专项资助(2022sfq02); 湖南省科技创新计划资助(2024RC3242)

①通信作者 E-mail: hbchs@isa.ac.cn

近年来,在一系列治水治污政策的支持下,我国水环境治理取得了显著成效。然而,随着城镇化水平的提高和工农业的迅速发展,河流湖泊水环境还是受到不同程度的污染^[1]。河流与湖泊是人类生活、生产和生态用水的重要来源,水质安全是河流湖泊生态系统健康的重要基础,亦是区域社会经济持续发展的重要保障^[2]。如何改善河流湖泊的水环境质量是中央关心、社会关注和群众关切的热点与难点问题^[3]。湖南省郴州市的东江湖位于湘江一级支流耒水上游,总蓄水 81 亿 m³,相当于半个洞庭湖的水量^[4]。东江湖已被纳入国家“十二五”重点保护范围,2013 年被纳入国家重点流域和水资源生态补试点,是湖南省重要饮用水水源地和长株潭城市群战略水源地^[5]。因此,保护东江湖事关民生大计。浙水河作为其上游一级支流,是东江湖重要的生态安全屏障,对维护东江湖流域生态安全和水环境健康具有重要作用。浙水流域主体位于汝城县境内,该区当前正积极发展蔬菜、茶果、生态养殖等特色农业集群,2023 年第二轮湖南省生态环境保护督察公示“汝城县农业面源污染对东江湖总氮总磷贡献值较大”。随着流域内社会经济的深入发展,水环境管理与治理面临诸多挑战。然而,尚未发现有关东江湖浙水流域水环境及其污染源方面的报道,其水环境状况及污染物来源尚不清晰。

目前,为避免单因子水质评估造成结果的片面性^[6],许多各具特色的水质评价方法被国内外学者广泛应用^[7-9]。如刘琰等^[7]于 2013 年提出水污染指数法,该方法在水质类别判断、主要污染指标识别具有显著优势,且该方法计算过程简单,具有较强的推广应用价值。CHENG 等^[8]利用基于期望值-阈值的水质健康综合评估法(ETI)探明了海河流域水质情况;SUN 等^[9]使用水质质量指数(WQI)对东江流域水质进行综合评价。在水质评价过程中识别出主要污染物,可显著提高水环境治理效率。近些年,国内外学者广泛使用主成分分析(PCA)、聚类分析等多元统计法进行水质评价及主要污染物识别^[10-12]。PCA 能将多指标降维、分解原始变量,归纳潜在“类别”^[13],同时能判别不同指标间的同源性,同类指标具有相似污染源或迁移特征^[14]。在识别流域主要污染物基础上如何定量解析污染源已成为水污染治理一大难题。目前常用的有输出系数法、流域模型法和统计学方法。绝对主成分-多元线性回归(APCS-MLR)模型是统计学方法中的一种典型受体模型,通过对已知数据的统计分析,能较好地定量估算污染物来源及其相对贡献,但其易受数据质量和统计误差的影响,具有一定主观性和不确定性^[15-17]。输出系数法因其算法简单,所需参数较少,在我国面源污染负荷及源解析研究中已取得广泛应用^[18]。该方法主要通过产排污系数、入河系数等结合各类污染物排放量数据,定量估算各污染物负荷量,以达到定量解析各污染源的目的。但该方法受限于输出系数的准确性,亦存在一定的不确定性^[17]。为此,综合应用上述两种方法开展污染源定量解析研究,可使污染源解析量化结果更加科学、准确。

鉴于此,本文采用不同水质评价方法探明浙水流域水质时空特征,并利用 PCA 识别流域主要污染物及关键源区,在此基础上同时运用 APCS-MLR 模型和输出系数法定量解析流域主要污染源及其贡献比,并提出相应的水污染治理对策,以期为促进当地特色农业集群产业发展和改善浙水及下游东江湖水环境质量提供一定科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

浙水河位于湖南省郴州市东南部,为东江湖水库主要进水河流,属湘江二级支流。浙水河发源于汝城县井坡镇乌龙白骑山,流经汝城 8 个乡镇至资兴市黄草镇入东江湖。该河总河长约 95 km,坡降 6.6‰,自然落差 620 m,平均流量 21 m³/s,流域总面积约 810 km²。浙水流域属典型中亚热带季风性湿润气候,夏季高温多雨,冬季稍冷干燥^[19]。多年平均降水 1 547 mm,降水总量丰富,但时空分布不均;多年平均气温 13.7~18.7℃,多年平均日照 1 418 h。流域气候四季分明,光、水、热资源丰富,适宜发展农林业。该区地形以山地丘陵为主,土地利用/覆被主要为林地和耕地,森林覆盖率 73%,耕地面积约 20 万亩。

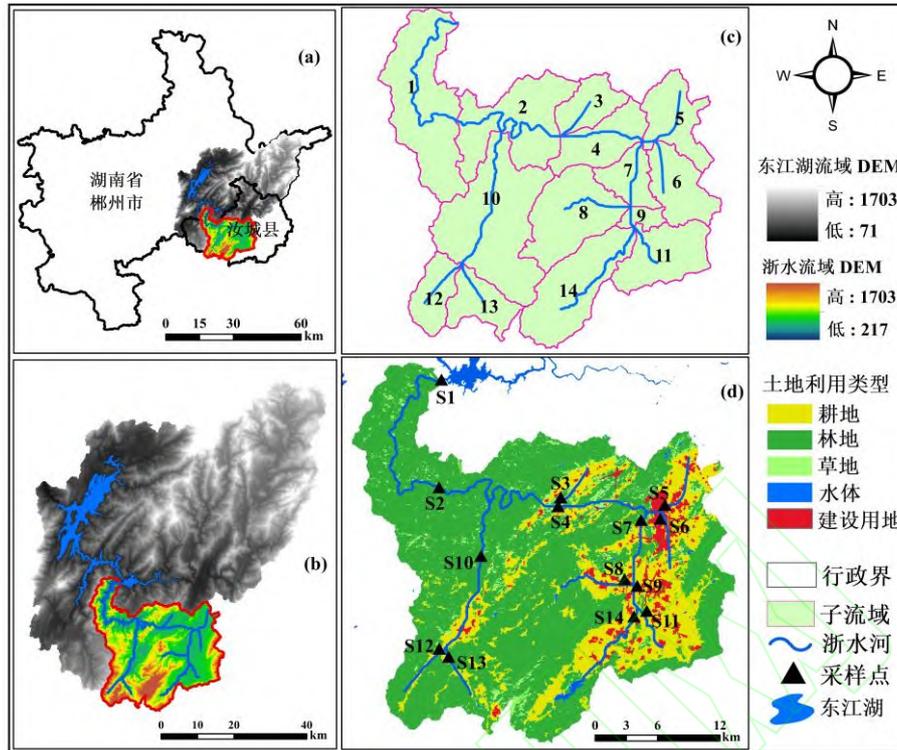


图 1 研究区地理位置(a)、流域 DEM(b)、子流域划分(c)、土地利用类型及采样点分布(d)

Fig.1 Location of the study area (a), watershed DEM(b), sub-basin division (c) and the land use types and sampling points(d)

1.2 数据来源

流域出口断面月尺度多年连续水质数据来自郴州市生态环境局，用于剖析流域水质时间演变趋势；各子流域水质数据来自野外采样，用于探明流域水质空间格局等。样点布设尽可能覆盖流域各类土地利用及主要支流，同时考虑空间均匀性和交通可达性等因素^[20]，共布设 14 个采样点 (S1~S14)。野外调研及水样采集时间为 2023 年 7 月 2~7 日，样品均低温冷冻储存，采样结束后尽快运回实验室。水样采集和分析参照《水和废水监测分析方法（第四版）》^[21]及《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 进行。使用多参数水质分析仪(美国维赛 YSI professional plus)现场测定 pH、温度、总溶解性固体(TDS)，溶解氧(DO)，电导率(EC)；总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、硝态氮(NO₃-N)、总有机碳(TOC)在室内实验室进行规范检测。水污染物排放数据来自汝城县统计年鉴及政府部门提供的统计数据，部分数据由实地调研获取。产排污系数来源于第二次全国污染源普查的产排污系数成果(湖南省)。

1.3 数据分析方法

1.3.1 水污染指数法

水污染指数法(WPI)是基于单因子评价法的原则，依据水质类别与 WPI 值对应表^[7](表 1)，采用内插方法计算某样点所有参与评价指标的 WPI 值，其值越高污染越严重、水质越差，具体公式见参考文献^[7]。基于 WPI 值可对各样点主要污染指标进行识别，筛选原则与方法^[7]：水质为 III 类或优于 III 类的断面不做主要污染指标筛选；从水质劣于 III 类的断面中选取 WPI 值最大(或 WPI>60)的指标作为主要污染指标。

表 1 水质类别与 WPI 值对应表

Table 1 Corresponding table of water quality category and WPI value

水质类别	I类	II类	III类	IV类	V类	劣V类
WPI 范围	WPI=20	20<WPI≤40	40<WPI≤60	60<WPI≤80	80<WPI≤100	WPI>100

1.3.2 基于期望值和阈值的水质健康综合评估法

基于期望值和阈值的水质健康综合评估法（ETI）是一种基于河流水质相对情况的评估方法^[20]。期望值指在理想或参考条件下河流表达的良好水质状况；阈值指河流处于严重危害生态系统健康的临界值。ETI 评估值范围为 0~1，评估值越高水体健康程度越高。常分为 5 个等级：极差（0~0.20]，差（0.20~0.40]，一般（0.40~0.60]，良好（0.60~0.80]，优秀（0.80~1]。指标标准化及评估值计算见表 2^[9,22]。

表 2 ETI 方法各水质指标标准化计算

Table 2 Standardized calculation of water quality parameters for ETI method

指标组	水质指标	指标标准化	指标组评估值计算
理化指标	EC ²	标准化值 = $\frac{\text{阈值} - \text{实测值}}{\text{阈值} - \text{期望值}}$	$S_j = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ji}}{n}$ 其中， S_j 表示理化指标评估值， P_{ji} 代表第 i 个理化指标的标准化值， i 是理化指标的数量。
	DO ¹		
	COD _{Mn} ¹		
	TN ¹		
营养盐指标	TP ¹	标准化值 = $\frac{\text{阈值} - \text{实测值}}{\text{阈值} - \text{期望值}}$	$S_n = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ni}}{n}$ 其中， S_n 表示营养盐指标评估值， P_{ni} 代表第 i 个营养盐指标的标准化值， i 是营养盐指标数量。
	NH ₃ -N ¹		
	NO ₃ -N ²		
	TOC ²		

1 表示指标期望值和阈值的确定分别依据国家地表水水质标准（GB3838—2002）I类水和IV类水标准；2 表示指标期望值和阈值的确定分别是河流全部采样点实际测定含量的 5%和 95%分位数。

1.3.3 水质质量指数

水质质量指数（WQI）是一种基于河流水质真实情况的评估方法，其评估标准较为固定，各指标分值及指标权重依据大量前人研究或水质指标对水体健康的危害程度来确定^[23-25]（表 3），计算公式如下：

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

式中， C_i 是水质因子 i 的标准化得分， P_i 是权重，取值 1~4^[25]。WQI 取值范围为 0~100，其值越高代表水质健康程度越高。常分 5 个等级：极差（0~30]、差（30~50]、一般（50~70]、良好（70~85]、优秀（85~100]。

表 3 WQI 方法各水质因子标准化分数及权重

Table 3 Assignment and weight of water quality parameters for WQI method

指标	权重	标准化分数										
		100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
电导率	1	<750	<1000	<1250	<1500	<2000	<2500	<3000	<5000	<8000	≤12000	>12000
溶解氧	4	≥7.5	>7	>6.5	>6	>5.5	>5	>4	>3	>2	≥1	<1
总氮	3	<0.1	<0.2	<0.35	<0.5	<0.75	<1	<1.25	<1.5	<1.75	≤2	>2
总磷	1	<0.01	<0.02	<0.05	<0.1	<0.15	<0.2	<0.25	<0.3	<0.35	≤0.4	>0.4
高锰酸盐指数	3	<1	<2	<3	<4	<6	<8	<10	<12	<14	≤15	>15
氨氮	3	<0.05	<0.1	<0.25	<0.5	<0.75	<1	<1.25	<1.5	<1.75	≤2	>2
硝态氮	2	<0.5	<1	<1.5	<2	<3	<4	<5	<6	<8	≤10	>10
总有机碳	2	<0.1	<0.2	<0.35	<0.5	<0.75	<1	<1.25	<1.5	<1.75	≤2	>2

各指标权重及标准化分数的确定综合参考了文献^[23-25]的研究结果。

1.3.4 主成分分析

主成分分析（PCA）本质上是一种简化数据、降低数据维数以达到分解原始变量从中归纳出潜在“类别”目的（污染物识别）的方法^[13]。PCA 主要步骤^[16,26]：1) 建立原始变量矩阵 X ；2) 对 X 进行 Z-Score 标准化处理；3) 利用 Bartlett 球度检验和 KMO 检验数据变量之间的相关性；4) 计算因子载荷矩阵及其特征根、方差贡献率，并确定主成分个数；5) 计算主成分因子得分 F_i ($i=1,2,\dots,p$) 和综合因子得分 (F)。 F_i 及 F 的表达式如下：

$$F_1 = a_{11}ZX_1 + a_{21}ZX_2 + \dots + a_{n1}ZX_n \quad (1)$$

$$F_2 = a_{12}ZX_1 + a_{22}ZX_2 + \dots + a_{n2}ZX_n \quad (2)$$

$$F_p = a_{1p}ZX_1 + a_{2p}ZX_2 + \dots + a_{np}ZX_n \quad (3)$$

$$F = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p} F_1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p} F_2 + \dots + \frac{\lambda_p}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_p} F_p \quad (4)$$

式中， a_{np} 为因子载荷矩阵特征值的特征向量； ZX_n 是标准化数据， λ_p 是主成分特征值， n 为水质指标。

1.3.5 绝对主成分-多元线性回归 (APCS-MLR) 模型

APCS-MLR 模型是在数据经过主成分分析的基础上，将所得因子得分转化为绝对主成分得分 APCS。然后将 APCS 作为自变量、各水质指标作为因变量进行多元回归分析，最后将回归系数用于计算各主成分对应的污染源对某水质指标含量的贡献率。因 APCS-MLR 模型方法较为成熟，其构建的步骤公式详见刘庄等^[27]和张文博^[28]的研究方法。

1.3.6 污染源排放量核算

生态环境部在第二次全国污染普查形成的核算方法体系（基于输出系数法）基础上，于 2021 年制定公布《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》（生态环境部公告 2021 年第 24 号）（以下简称《手册》）。基于该《手册》，采用产排污系数法定量核算城镇生活、农村生活、种植业、畜禽养殖业、水产养殖业的污染物排放量及其污染源贡献比，以此定量解析流域主要污染物来源。由于文章篇幅有限，具体核算方法及公式见《手册》，对应的产排污系数取值见表 4。

表 4 各类产排污系数取值

Table 4 Values for various production and emission coefficient

产排污系数类型	单位	COD	氨氮	总氮	总磷
城镇生活源水污染物产生系数	mg·L ⁻¹	285	28.3	39.4	4.1
农村生活污水污染物产污强度	g/人·d	26.4	2.11	3.82	0.3
单位农作播种面积流失系数	kg/ha	—	1.375	6.302	0.577
单位园地面面积排放流失系数	kg/ha	—	0.448	5.003	0.454
规模以上畜禽养殖生猪排污系数	kg/头	11.647 6	0.807 8	0.142 8	0.205 1
规模以上畜禽养殖奶牛排污系数	kg/头	149.060 7	4.749 6	0.351 6	1.371 6
规模以上畜禽养殖肉牛排污系数	kg/头	214.114	5.776 4	1.417 3	0.883 6
规模以上畜禽养殖蛋鸡排污系数	kg/羽	1.849 9	0.099 5	0.055 3	0.023 8
规模以上畜禽养殖肉鸡排污系数	kg/羽	0.371 2	0.017 2	0.000 2	0.003 3
规模以下畜禽养殖生猪排污系数	kg/头	5.782 2	0.453 2	0.078 9	0.094 1
规模以下畜禽养殖奶牛排污系数	kg/头	137.512 1	5.571 4	0.254 5	1.617 9
规模以下畜禽养殖肉牛排污系数	kg/头	126.052 8	5.217	0.2	0.588 3
规模以下畜禽养殖蛋鸡排污系数	kg/羽	0.829 6	0.04	0.002	0.004 4
规模以下畜禽养殖肉鸡排污系数	kg/羽	0.081 9	0.006 8	0.000 2	0.001 6
水产养殖排污系数	kg/t	13.056	0.624	2.125	0.183

城镇生活污水折污系数取 0.89，农村生活污水污染物 COD、氨氮、总氮、总磷综合（技术）去除率分别取 64%、53%、46%、48%。

2 结果与分析

2.1 浙水流域水质演变趋势

由图 2 知，浙水流域 2016~2022 年地表水总磷集中在 II 类标准，多年浓度均值为 0.048 mg·L⁻¹，达 II 类标准；氨氮集中在 I~II 类标准，多年浓度均值为 0.14 mg·L⁻¹，达 I 类标准；总氮主要集中在 III~V 类标准，多年浓度均值为 1.41 mg·L⁻¹，达 IV 类标准。浙水流域地表水尽管氨氮浓度较低，但硝态氮浓度普遍较高，导致总氮浓度长期超标，对水质危害最大，这与当地长期从事农业生产和村镇生活污水排放有关。浙水流域属南方典型亚热带丘陵区农业流域，长期从事农业耕作且施肥量较大（以氮肥为主）。农田施用的氮肥和畜禽粪便中的氮素，部分未被作物吸收，而是通过地表径流和土壤渗透进入水体。同时村镇生活污水中含有氮化合物，这些未经充分处理的污水大多直接排放到水体中，进一步加剧了氮负荷。此外，水体中的微生物活动，特别是硝化作用，将氨氮转化为硝态氮，导致硝态氮浓度升高。这些因素共同作用，使得水体中的总氮浓度长期超标，尤其是硝态氮，对水质构成显著的负面影响。

从时间变化看，氨氮浓度呈先波动下降趋于稳定后又波动上升趋势；总磷、总氮浓度演变趋势较一致，均呈先波动缓慢上升达到峰值后又波动下降趋势。总磷、总氮浓度于 2016~2020 年稳定波动上升并于 2021 年初达到峰值，该阶段为水质恶化期。2021~2022 年总磷浓度逐渐稳步下降，由Ⅲ类重新回到Ⅱ类标准；总氮浓度呈波动缓慢下降趋势，由劣Ⅴ类转变为Ⅴ类有时达Ⅳ类标准，尽管该阶段 TN 浓度仍旧偏高，但还是呈现一定波动下降趋势。2021~2022 年总磷浓度下降，总氮浓度波动下降，说明政府通过实施一系列水污染治理措施，流域水质有一定程度的改善。但浙水流域 TN 浓度始终高居不下，亟需针对氮污染实施更有效的治理措施，以实现更全面有效的水质改善。

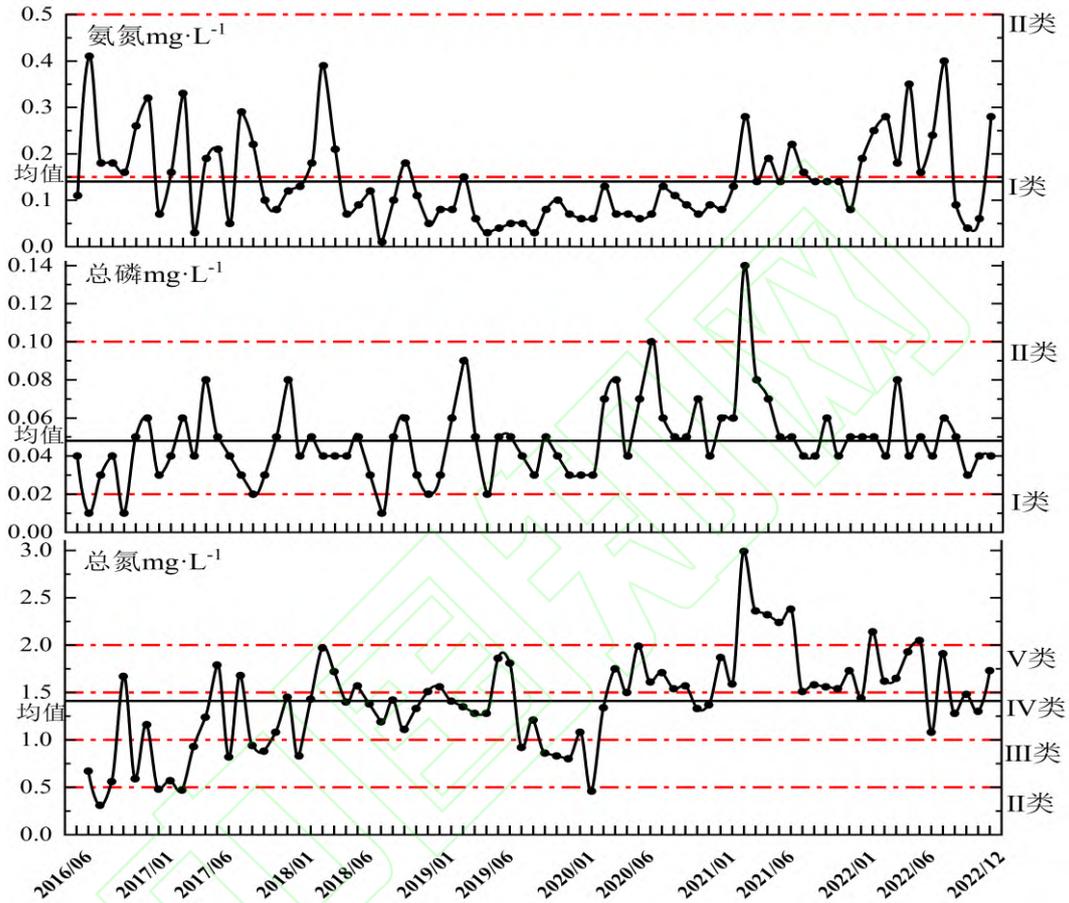


图2 浙水流域 2016~2022 年水质演变趋势

Fig.2 The evolution trend of water quality in Zheshui River Basin from 2016 to 2022

2.2 浙水流域水质空间格局

2.2.1 水污染指数评价结果

由表 5 知，样点 S2（流域出口断面）综合 WPI 值为 56.3，属Ⅲ类水，但接近Ⅳ类水。流域综合 WPI 值均值为 79.3，属Ⅳ类水。影响流域水质的主要污染指标为 TN，其次为 TP 和 COD_{Mn} 。这与流域气候和农业生产方式有关。经统计核算，流域内农作物播种面积大，超 44 万亩，其中，耕作类型以水田为主，占总量的 80% 以上。该区 2022 年农业化肥施用总量（折纯）达 9500 吨，其中氮肥占 63%，磷肥占 24%，化肥施用强度达 325kg/ha。因流域特殊农业生产模式及不合理的施肥方式，加之当地雨热同期，降水丰富，农田径流污水易通过沟渠直接流入水体，给河流带来大量氮磷元素，引起水质恶化。流域内还拥有较多规模化与非规模化经营的养殖场（户）。经核算，流域主要养殖类型以猪和鸡为主，养殖规模分别达 50 万头、150 万羽。猪规模化与非规模化养殖约各占一半，鸡主要以规模化养殖为主，达 85%。当地农业面源污染相对严重，这是浙水流域 TN 浓度普遍超标的主因。另外样点 S5、S6 位于汝城县城附近，城镇生活污水点源或分散型面

源容易产生水体污染；样点 S2 因其位于下游山区，远离人类区，水量较大，水体自净能力较强，水质较好。

表 5 浙水流域地表水水污染指数法 WPI 评价结果

Table 5 WPI evaluation results of surface water pollution index method in Zheshui River Basin

样点	检测指标 WPI 值 (水质类别)					综合 WPI 值	水质类别	主要污染指标
	DO	TN	TP	NH ₃ -N	COD _{Mn}			
S1	42.0 (III)	87.0 (V)	25.8 (II)	20.0 (I)	31.0 (II)	87.0	V	TN
S2	20.0 (I)	56.3 (III)	20.8 (II)	25.3 (II)	45.0 (III)	56.3	III	—
S3	40.0 (III)	71.5 (IV)	79.6 (IV)	35.1 (II)	41.0 (III)	79.6	IV	TP、TN
S4	37.3 (II)	86.7 (V)	38.0 (II)	20.0 (I)	27.0 (II)	86.7	V	TN
S5	38.7 (II)	102.3 (劣V)	25.5 (II)	28.5 (II)	67.5 (IV)	102.3	劣V	TN、COD _{Mn}
S6	20.0 (I)	103.1 (劣V)	39.0 (II)	51.6 (III)	60.5 (IV)	103.1	劣V	TN、COD _{Mn}
S7	20.0 (I)	68.0 (IV)	84.8 (V)	20.0 (I)	41.0 (III)	84.8	V	TP、TN
S8	40.0 (II)	68.5 (IV)	49.4 (III)	20.0 (I)	27.0 (II)	68.5	IV	TN
S9	33.3 (II)	66.9 (IV)	28.8 (II)	20.0 (I)	27.0 (II)	66.9	IV	TN
S10	20.0 (I)	65.2 (IV)	28.3 (II)	27.7 (II)	53.0 (III)	65.2	IV	TN
S11	26.7 (II)	82.1 (V)	38.0 (II)	20.1 (II)	37.0 (II)	82.1	V	TN
S12	40.0 (II)	66.3 (IV)	23.8 (II)	20.0 (I)	43.0 (III)	66.3	IV	TN
S13	40.0 (II)	89.2 (V)	20.0 (I)	28.0 (II)	29.0 (II)	89.2	V	TN
S14	26.7 (II)	73.0 (IV)	24.8 (II)	20.0 (I)	33.0 (II)	73.0	IV	TN
流域均值	31.8 (II)	77.6 (IV)	37.6 (II)	25.4 (II)	40.1 (III)	79.3	IV	TN

2.2.2 ETI 和 WQI 评价结果

浙水流域 ETI 评估得分均值为 0.596，达一般等级，十分接近 0.6 的良好等级。14 个水质评价样点中，水质等级为优秀的仅 1 个，良好等级最多，有 8 个，一般等级有 3 个，差和极差等级均各 1 个。流域大部分区域地表水水质达良好等级，但河流水质在汇入汝城县城附近时水质变化明显，由良好 (S14、S11) 逐渐变为一般 (S7、S4)，水质有明显下降趋势 (图 3 右)。样点 S6、S5 处的河流在流经汝城县县城时水质为极差和差，反而河流下游段 (S2) 水质等级为优秀。整体看，浙水流域上游和下游水质较好，中游水质较差。

浙水流域 WQI 评估得分均值为 66.79，达一般等级，接近 70 分的良好等级。14 个水质评价样点中，良好等级有 4 个，一般等级有 10 个。整体看，河流水质亦是在经过汝城县城时水质逐渐变差 (图 3 左)，上游和下游水质较好，中游水质较差。ETI 和 WQI 两种方法反映的流域水质等级及水质空间格局具有明显一致性，均显示浙水流域水质等级为一般且接近良好水平，且呈上游和下游水质较好，中游水质较差，尤以县城附近水质最差的空间格局，这表明浙水流域水污染主要受外源污染为主。其中，WQI 水质评价结果 (水质等级) 稍逊色于 ETI 评价结果，ETI 评价方法对水质等级的区分度更高，但两者所反映的总体趋势一致。

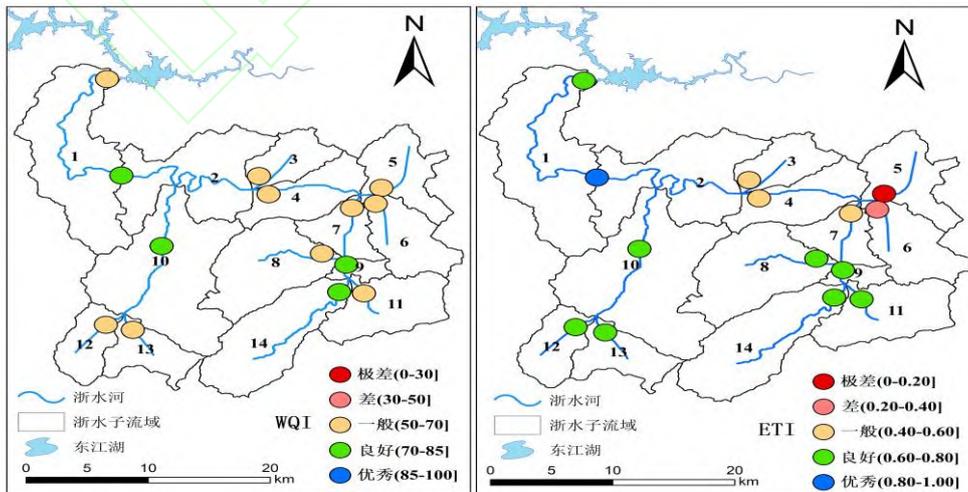


图 3 浙水流域地表水 ETI 和 WQI 水质评价等级空间分布图

Fig.3 Spatial distribution map of surface water ETI and WQI water quality evaluation grades in Zheshui River Basin

2.3 浙水流域污染源解析

2.3.1 主要污染物来源及其关键源区的识别

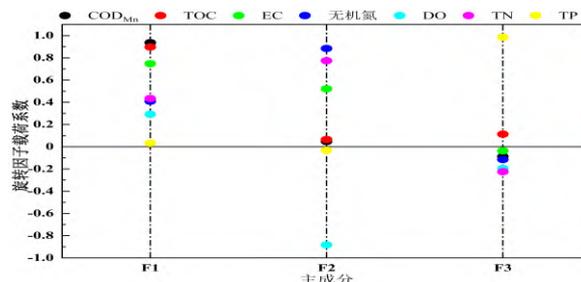
利用 Bartlett 球度检验和 KMO 检验变量的相关性, KMO 检验值 0.51 (>0.50), Bartlett 形度检验显著性 $\text{Sig} < 0.001$, 表明水质指标间具有相关性, 适合进行主成分分析^[29]。依据特征值大于 1 的原则^[30], 采用最大方差法对初始因子矩阵进行旋转^[27], 旋转后共提取 3 个主成分, 累积方差贡献率高达 88.77%, 表明主成分提取结果较好。各主成分的特征值、方差、累积方差和因子载荷见表 6、图 4。将因子载荷系数绝对值大于 0.7 的因子作为表征因子, 正负代表因子对主成分的正负作用^[31], 反映各主要污染物的影响因素^[32], 由此定性识别流域主要污染物。结果表明: 主成分 F1 贡献率为 38.29%, 其表征指标为 COD_{Mn} 、TOC 和 EC, 均为正向指标; COD_{Mn} 、TOC 均是表示水体有机物污染程度的指标, 初步判断 F1 为水体有机污染物。主成分 F2 贡献率为 34.86%, 无机氮、TN 和 DO 是其表征指标, 无机氮、TN 是正向指标, DO 为负向指标, 判断 F2 为水体氮污染物。主成分 F3 贡献率为 15.62%, 其表征指标仅为 TP, 判断 F3 为水体磷污染物。

据公式计算各主成分得分 F_i 及综合主成分得分 F , 得分越高, 说明流域水体污染物含量越多, 水质越差^[9,16,30]。由图 5 得, 浙水流域 14 个样点的水质综合得分排序: $S5 > S6 > S3 > S7 > S4 > S12 > S1 > S11 > S13 > S14 > S8 > S10 > S9 > S2$ 。可见浙水河中游水质较差, 其中样点 S5、S6 的综合得分分别是 2.88 和 1.63, 水质最差, 样点 S3、S4、S7 的综合得分为正值, 说明水体污染物浓度较高, 水质较差; 而上游和下游样点的综合得分几乎为负值, 表明其水质较好。整体看, 综合得分 F 反映出浙水流域上游和下游水质较好, 中游水质较差, 尤以县城附近的水质最差。主成分 F1、F2 得分均在 S5、S6 取高值, 说明 COD_{Mn} 、TOC、EC、无机氮和 TN 污染物集中于 5 号子流域(大坪镇)和 6 号子流域(卢阳镇), 这两个乡镇是水体有机污染物(F1)和氮污染物(F2)的关键源区。已有研究表明, 水体中的有机污染物主要来自工业源和生活源^[27], 氮、磷污染物一般来自生活源和农业面源^[17]。该区为汝城县城及附近区域, 工业点源基本得到有效控制, 但因城镇人口分布较多, 故判断 F1 主要污染源为生活源, F2 主要污染源为生活源+农业面源。主成分 F3 得分在 S3、S7 取高值, 说明总磷污染集中于 3 号子流域(马桥镇)和 7 号子流域(泉水镇), 这两个乡镇是水体磷污染物(F3)的关键源区。经统计, 马桥镇和泉水镇的畜禽养殖规模较大, 其中马桥镇猪存栏总量约 7 万头, 鸡存栏总量约 21 万羽, 泉水镇猪存栏总量约 6 万头, 鸡存栏总量约 1 万羽。此外, 该区农业种植面积较大, 马桥镇种植面积约 6 万亩, 泉水镇约 5 万亩。故判断 F3 主要污染源为农业面源+生活源。

表 6 特征值与方差贡献率

Table 6 Characteristic value and variance explained

主成分	初始特征值			旋转载荷平方和		
	特征值	方差贡献率%	累积方差贡献率%	特征值	方差贡献率%	累积方差贡献率%
F1	3.52	50.29	50.29	2.68	38.29	38.29
F2	1.62	23.18	73.47	2.44	34.86	73.15
F3	1.07	15.30	88.77	1.09	15.62	88.77



文章中的无机氮仅包含氨氮和硝态氮, 不含亚硝态氮, 特此说明。

图 4 旋转主成分因子荷载

Fig.4 Load diagram of principal component factor after rotation

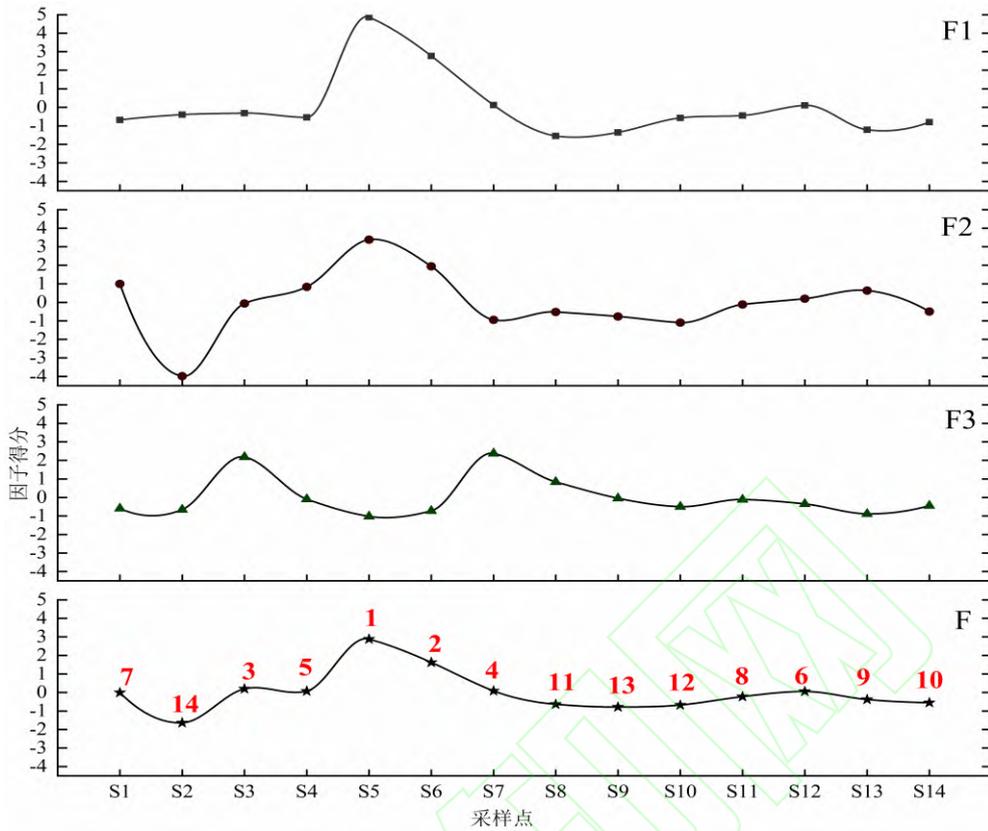


图5 浙水流域主成分因子得分及综合得分排序

Fig.5 The ranking of principal component factor score and comprehensive score of Zheshui River Basin

2.3.2 APCS-MLR 模型分析结果

利用 APCS-MLR 模型得到各污染源与水质指标之间的函数关系，拟合优度(R^2)用于衡量模型对观测值的拟合程度，其数值越接近 1 表示线性拟合度越高，通常当 $R^2 > 0.7$ 时，说明该模型较可靠，可用于进一步的污染源解析^[27]。本研究中各水质指标的回归模型 R^2 均在 0.8 左右，这表明构建的 APCS-MLR 模型具有较强的可靠性。在 APCS-MLR 模型中，各指标对应的污染源贡献率之和应为 100%。根据模型分析结果，得到各污染源对水质指标的贡献率（表 7）。第一主成分 F1 的主要污染源为生活源，其对 COD_{Mn} 和 TOC 浓度的贡献率最大，分别达 62.86% 和 62.09%。第二主成分 F2 的主要污染源为生活源+农业面源，其对无机氮和 TN 浓度的贡献率最大，分别达 48.29% 和 40.42%。第三主成分 F3 的主要污染源为农业面源+生活源，其对 TP 浓度的贡献率最大，达 52.85%。这进一步基于数理统计方法验证了上文主要污染源定性识别的假设，即水体有机物污染 F1 主要来自生活源 (>62%)，氮营养盐污染 F2 主要来自生活源和农业面源 (>48%)，磷营养盐污染 F3 主要来自农业面源和生活源 (>52%)。该模型识别结果一定程度上受到未知源的影响，这与张文博等^[28]、刘庄等^[27]的研究结果一致。这表明基于数理统计模型进行源解析具有一定的主观性和不确定性，对此可进一步结合污染物排放量数据，对 APCS-MLR 模型解析结果进行验证，增强污染源解析的准确性。

表 7 水质指标的污染源贡献率及拟合优度

Table 7 The pollutant source contribution rates and R^2 of water quality indexes

水质指标	污染源贡献率/%				R^2
	F1	F2	F3	未识别源	
EC	45.60	34.36	0.68	19.37	0.78
DO	6.38	20.78	1.28	71.56	0.88
TN	20.98	40.42	3.30	35.31	0.79

TP	5.48	5.92	52.85	35.75	0.96
TOC	62.09	4.89	2.38	30.64	0.77
COD _{Mn}	62.86	3.47	1.76	31.91	0.85
无机氮	20.71	48.29	1.73	29.27	0.95

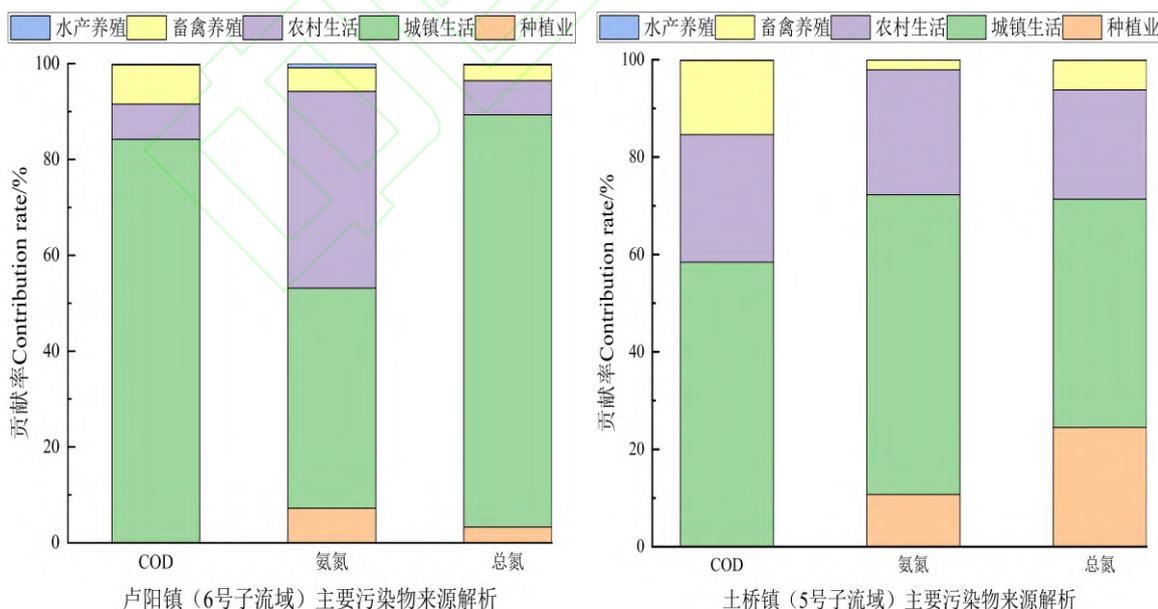
2.3.3 主要污染物来源定量核算

根据《排放源统计调查核算方法和系数手册》，对关键污染源区的主要污染源进行了贡献比分析。图 6 显示，卢阳镇（6 号子流域）污染物 COD 的城镇生活源贡献比最高，达 84.2%，其次是畜禽养殖和农村生活源，贡献率分别为 8.17%、7.35%；污染物氨氮的城镇和农村生活源贡献比均较高，分别达 45.93%、41.04%，其次是种植业和畜禽养殖业，贡献率分别为 7.22%、4.93%；污染物总氮的城镇生活源贡献比最高，达 86.03%，其次是农村生活源、畜禽养殖业和种植业，贡献率分别为 7.13%、3.28%、3.28%。说明城镇/农村生活源是卢阳镇的主要污染源。

土桥镇（5 号子流域）污染物 COD 的城镇生活源贡献比最高，达 58.4%，其次是农村生活源和畜禽养殖业，贡献率分别为 26.2%、15.22%；污染物氨氮的城镇生活源贡献比最高，达 61.54%，其次是农村生活源、种植业和畜禽养殖业，贡献率分别为 25.64%、10.74%、1.97%；污染物总氮的城镇生活源贡献比最高，达 46.86%，其次是种植业、农村生活源、畜禽养殖业，贡献率分别为 24.49%、22.45%、6.04%。说明城镇/农村生活源是土桥镇的主要污染源，其次是种植业和畜禽养殖业。

马桥镇（3、4 号子流域）污染物总磷的畜禽养殖业贡献比最高，达 52.09%，其次是种植业、城镇生活源、农村生活源，贡献比分别为 16.83%、16.5%、14.48%。说明畜禽养殖业和生活源是马桥镇的主要污染源，其次是种植业。泉水镇（7 号子流域）污染物总磷的畜禽养殖业贡献比最高，达 40.03%，其次是种植业、城镇生活源、农村生活源，贡献比分别为 30.77%、21.34%、7.47%。说明畜禽养殖业和种植业是泉水镇的主要污染源，其次是生活源。四个乡镇水产养殖污染物贡献率均很小，可忽略不计。

综上，可判断水体有机污染物（F1）主要污染源为城镇/农村生活源，其次为畜禽养殖业；氮污染物（F2）主要污染源为城镇/农村生活源，其次为种植业和畜禽养殖业；磷污染物（F3）主要污染源为畜禽养殖业，其次为种植业和城镇/农村生活源。



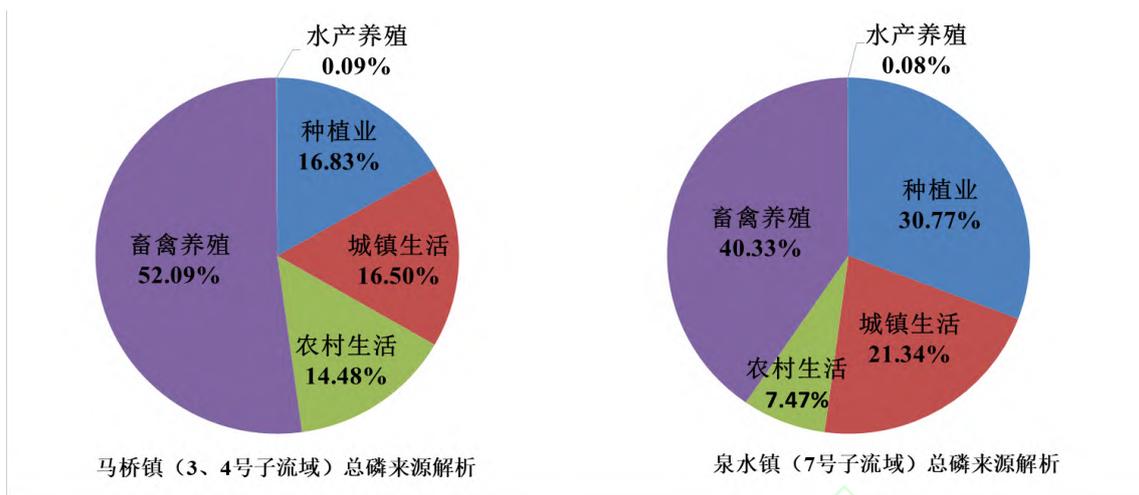


图 6 关键污染源区主要污染物来源定量解析

Fig.6 Quantitative analysis of main pollutant sources in critical pollution source areas

3 讨论

3.1 流域水质时空特征及评价方法分析

从时间演变趋势看，流域氮磷污染物浓度呈先波动增加于 2021 年初达峰值后又开始波动下降趋势（尤其是磷），说明面对污染加剧，政府采取的一系列治污措施有一定效果。但流域 TN 浓度始终高居不下，普遍超标，这与流域农业生产和村镇生活有关，当地农业面源污染较为突出。为避免单因子水质评价的局限性，本文采用多种各具特色的水质评价法探明流域水环境现状。WPI 在水质类别判断、主要污染指标识别具有显著优势，利用 WPI 得出浙水流域整体属IV类水，且进一步证实了 TN 为流域各支流的主要污染指标，对水质危害最大，是影响下游东江湖水环境的关键因子。ETI 和 WQI 分别是评估河流水质相对和真实情况的方法，两种方法对比可更直观评判流域水质状况。ETI 和 WQI 均显示浙水流域水质等级为一般且接近良好水平，两者反映的水质空间格局总体趋势一致，但 ETI 对水质等级的区分度比 WQI 更高，这与刘琦^[20]等人的研究结果一致。当水质数据适用于主成分分析时，PCA 可应用于水质评价且评价结果较为可靠，这与田福金^[33]等人的研究结论一致。PCA 能在保留原始变量的基础上定量分析水质指标特征，筛选同类特征的污染成分以提取主成分，并通过计算各主成分得分定量评价水质状况，能有效减少主观偏差。因此，PCA 可作为水质评价和主要污染物及关键源区识别的一种有效手段。值得一提的是，ETI、WQI 和 PCA 只能进行水质定量评价，不能直接判断水质类别，需结合 WPI 进行比较分析。上述四种水质评价法反映的水质空间格局趋势较为吻合，均呈现流域上游和下游水质较好，中游水质较差，尤以县城附近水质最差的空间格局，相关性呈极显著水平 ($r > 0.81$, $P < 0.01$)，说明流域水质评价结果是客观准确的，水环境主要受外源污染影响。

3.2 流域主要污染源及其关键源区分析

随着流域内人口和消费的急剧增长，城镇/农村生活污染不断加剧，农业活动带来的污染也居高不下，这是导致浙水河入湖水质较差（III~IV类水，TN 浓度超标）的主要原因。为此，本文基于 PCA 识别了流域主要污染物及其关键源区，并在此基础上应用基于水质数据的 APCS-MLR 模型和基于污染物排放统计数据的输出系数法定量解析了流域主要污染源及其贡献比，因后者不受水质数据的影响，将两者结果进行对比验证，可使量化结果更加科学、准确。结果表明，两者定量解析结果虽存在一定误差但整体趋势呈显著一致性，综合两者定量解析结果有：水体有机污染物 COD (F1) 主要来源于生活源+农业面源（畜禽养殖为主），氮污染物 (F2) 主要来源于生活源+农业面源（种植业为主），卢阳镇和土桥镇是其关键污染源区；磷污染物 (F3) 主要来源于农业面源（畜禽养殖为主）+生活源，马桥镇和泉水镇是其关键污染源区。在工矿点源污

染基本得以控制的前提下,流域内农林牧渔等农业生产区及城镇/农村生活产生了多种面源污染,因其分布广、隐蔽性大、来源复杂等特点^[34],已成为危害浙水及下游东江湖水环境健康的重要因素。面对污染加剧,环保政策和系列治污工程十分必要,未来亟需重点针对流域污染关键源区加强农业面源污染的防控和治理力度,全方面多维度精准治理流域水污染。

3.3 流域水污染治理对策

浙水流域污染物主要来自城镇/农村生活源、种植业和畜禽养殖业。针对流域当前水环境及污染源现状,在前期系列治污工程实施的前提下,以“源头减量-生态拦截-循环利用-生态修复”4R策略为指导^[35],提出以下几点建议:(1)提高居民生活节水意识,持续提高生活污水收集和处理能力。随着城镇化进程不断加快,人口密集的县城要不断提升生活污水集中处理能力,改造升级或扩容县污水处理厂,未来建议增设污水处理再生水回用系统,加强城镇生活污水的资源化循环利用,将达标排放尾水转化为可利用水资源,最大程度降低城镇生活污水对水体的污染;人口分散的乡村要发展黑灰水分离技术,并基于现有三/四格池设施,配套低成本、无动力厌氧+可资源化利用的人工生态湿地净化技术^[36]。农村生活污水就近就地资源化利用,如发展以家庭为单位的庭院小型果菜园,就近实现粪-污水的综合利用和减排,既生态环保又具有可持续性。

(2)加强畜禽养殖污染防治,优化畜禽养殖布局及产业结构。发展饲料营养调控减排、栏舍管理减排技术,针对大型养殖场要求配套养殖废污水集中处理施工工艺,中小型养殖场要求开展养殖废污水预处理工艺+低成本、无动力厌氧+可资源化利用的生态湿地净化技术;同时推广农牧循环+种养结合的生态养殖模式,如猪-沼-果(菜、茶)技术,强化养殖场粪污肥料化利用技术,不断完善畜禽养殖废物资源化利用体系,提高畜禽粪污资源化综合利用率。(3)积极推进化肥农药减量增效,尽快落实测土配方施肥施药、有机肥替代化肥、水肥一体化等技术应用。同时要加快高标准农田的建设,加强农田周边排水沟渠的疏浚,强化生态消纳措施的布设,在农田种植密集区要强化农田排水的促沉净化技术和生态拦截沟渠技术应用^[35]。此外,也可因地制宜发展桑基鱼塘技术及稻田综合种养技术(稻田养鱼、养蟹、养鳅、养虾等),提高生态经济效益。

4 结论

(1)2016~2022年浙水流域总氮浓度均值为 $1.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,属IV类水,流域水质整体呈先波动恶化后逐步改善趋势,但TN浓度始终高居不下,为流域水体主要污染指标,是影响下游东江湖水环境的关键因子。

(2)综合主成分得分F与WPI、ETI、WQI四种水质评价法反映的水质空间格局趋势较吻合,均呈现流域上游和下游水质较好,中游水质较差,尤以县城附近水质最差的空间格局,相关性呈极显著水平($r>0.81$, $P<0.01$)。该水质空间格局表明浙水流域水污染主要受外源污染的影响。

(3)水体有机污染物COD(主成分F1)主要来源于生活源+农业面源(畜禽养殖为主),氮污染物(主成分F2)主要来源于生活源+农业面源(种植业为主),流域内的卢阳镇和土桥镇是其关键污染源区;磷污染物(主成分F3)主要来源于农业面源(畜禽养殖为主)+生活源,马桥镇和泉水镇是其关键污染源区。浙水流域未来亟需针对关键源区加强对主要污染源的精准管理与治理,以达到高效保护东江湖上游流域水环境的效果。

参考文献:

- [1] 张清寰,谭芬芳,伍朝辉,等.湘江捞刀河流域氨氮和总磷水环境容量计算[J].环境工程技术学报,2022,12(2):468-476.[ZHANG Qing-huan,TAN Fen-fang,WU Zhao-hui,*et al.*Calculation of Water Environmental Capacity of Ammonia-nitrogen and Total Phosphorus in Laodao River Basin of the Xiang River[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2022,12(2):468-476.]
- [2] 黄琴,倪平,毕军,等.太湖流域水生态环境功能分区管理绩效评估研究[J].长江流域资源与环境,2022,31(5):1116-1124.[HUANG Qin,NI Ping,BI Jun,*et al.*Performance Evaluation of Water Ecological Environment Function Zone Management in Taihu Basin[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2022,31(5):1116-1124.]
- [3] 杨传玺,薛岩,高畅,等.2002—2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析[J].环境科学,2023,44(5):2502-2517.[YANG Chuan-xi,XUE Yan,GAO Chang,*et al.*Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020[J].Environmental Science,2023,44(5):2502-2517.]
- [4] 陈向华.东江湖生态环境演变趋势及承载力分析[D].长沙:湖南农业大学,2015.

- [5] 徐洁,肖玉,谢高地,等.东江湖流域水供给服务时空格局分析[J].生态学报,2016,36(15):4892-4906.[XU Jie,XIAO Yu,XIE Gao-di,*et al.*Spatiotemporal Analysis of Water Supply Service in the Dongjiang Lake Basin[J].Acta Ecologica Sinica,2016,36(15):4892-4906.]
- [6] 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 Jian-fei,SONG Bo,*et al.*Primary Pollutant Water Quality Identification Index Method and Its Application to Comprehensive Evaluation of River Water Quality[J].Environmental Science & Technology,2015,38(11):239-245.]
- [7] 刘琰,郑丙辉,付青,等.水污染指数法在河流水质评价中的应用研究[J].中国环境监测,2013,29(3):49-55.[LIU Yan,ZHENG Bing-hui,FU Qing,*et al.*Application of Water Pollution Index in Water Quality Assessment of Rivers[J].Environmental Monitoring in China,2013,29(3):49-55.]
- [8] CHENG X,CHEN L D,SUN R H,*et al.*Land Use Changes and Socio-economic Development Strongly Deteriorate River Ecosystem Health in One of the Largest Basins in China[J].Science of the Total Environment,2018,616:376-385.
- [9] SUN W,XIA C Y,XU M Y,*et al.*Application of Modified Water Quality Indices as Indicators to Assess the Spatial and Temporal Trends of Water Quality in the Dongjiang River[J].Ecological Indicators,2016,66:306-312.
- [10] 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.]
- [11] MATTA G,KUMAR A,NAYAK A,*et al.*Appraisal of Spatial-temporal Variation and Pollution Source Estimation of Ganga River System through Pollution Indices and Environmetrics in Upper Ganga Basin[J].Applied Water Science,2022,12(3):33.
- [12] VAID M,SARMA K,KALA P,*et al.*The Plight of Najafgarh Drain in NCT of Delhi,India:Assessment of the Sources,Statistical Water Quality Evaluation,and Fate of Water Pollutants[J].Environmental Science and Pollution Research International,2022,29(60):90580-90600.
- [13] JAFARZADEGAN M,SAFI-ESFAHANI F,BEHESHTI Z.Combining Hierarchical Clustering Approaches Using the PCA Method[J].Expert Systems with Applications,2019,137:1-10.
- [14] 雷红平,赵琳兴,夏发长,等.黄河干流甘肃白银-宁夏沙坡头段水体污染现状评价及源解析[J].生态与农村环境学报,2024,40(5):710-717.[LEI Hong-ping,ZHAO Lin-xing,XIA Fa-zhang,*et al.*Water Pollution Assessment and Pollutant Source Analysis in the Mainstream Section from Baiyin in Gansu to Shapotou in Ningxia of the Yellow River[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2024,40(5):710-717.]
- [15] 张彦,邹磊,梁志杰,等.暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析[J].环境科学,2022,43(5):2537-2547.[ZHANG Yan,ZOU Lei,LIANG Zhi-jie,*et al.*Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan before and after Rainstorm[J].Environmental Science,2022,43(5):2537-2547.]
- [16] 赵尚玉,郑小慎,叶洽.滨海新区地表水水质评价与污染源分析[J].中国环境监测,2023,39(2):107-116.[ZHAO Shang-yu,ZHENG Xiao-shen,YE Qia.Surface Water Quality Evaluation and Pollution Source Analysis in Binhai New Area[J].Environmental Monitoring in China,2023,39(2):107-116.]
- [17] 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.]
- [18] 李建勋,李明万,刘晓雨,等.基于输出系数法的陕西农业面源污染负荷研究[J].生态与农村环境学报,2023,39(4):523-529.[LI Jian-xun,LI Ming-wan,LIU Xiao-yu,*et al.*Research on Agricultural Non-point Source Pollution Load in Shaanxi Based on Output Coefficient Method[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2023,39(4):523-529.]
- [19] 刘孝富,邵艳莹,崔书红,等.基于 PSFR 模型的东江湖流域生态安全评价[J].长江流域资源与环境,2015,24(增刊 1):197-205.
- [20] 刘琦,田雨露,刘洋,等.两类水质综合评价方法的特点及其在河流水环境管理中的作用[J].生态学报,2019,39(20):7538-7546.[LIU Qi,TIAN Yu-lu,LIU Yang,*et al.*Characteristics of Two Comprehensive Assessment Methods for Water Quality Based on Different Evaluation Criteria and Their Applications in Aquatic Environment Management[J].Acta Ecologica Sinica,2019,39(20):7538-7546.]
- [21] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法(第 4 版)[M].北京:中国环境科学出版社,2002:32-47,200-284.
- [22] 江源,廖剑宇,刘全儒,等.东江河流生态健康评价研究[M].北京:科学出版社,2015:60-77.
- [23] ALI TURAN KOÇER M,SEVGILI H.Parameters Selection for Water Quality Index in the Assessment of the Environmental Impacts of Land-Based Trout Farms[J].Ecological Indicators,2014,36:672-681.
- [24] PESCE S F,WUNDERLIN D A.Use of Water Quality Indices to Verify the Impact of Córdoba City (Argentina) on Suquia River[J].Water Research,2000,34(11):2915-2926.
- [25] 徐若诗,逢勇,罗缙,等.基于 WQI 的南水北调东线江苏段水质评价及时空分布特征[J].环境科学,2024,45(9):5227-5234.[XU Ruo-shi,PANG Yong,LUO Jin,*et al.*Water Quality Evaluation and Spatial-Temporal Distribution Characteristics of the East Route of the South-to-north Water Diversion Project in Jiangsu Province Based on WQI[J].Environmental Science,2024,45(9):5227-5234.]
- [26] 殷雪妍,严广寒,汪星,等.不同水质评价方法在通江湖泊中的适用性:以洞庭湖为例[J].环境工程技术学报,2023,13(3):1070-1078.[YIN Xue-yan,YAN Guang-han,WANG Xing,*et al.*Applicability of Different Water Quality Evaluation Methods in River-Connected Lakes:A Case Study of Dongting Lake[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2023,13(3):1070-1078.]
- [27] 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.]
- [28] 张文博,余香英,薛弘涛,等.基于 APCS-MLR 模型的九洲江广东段不同水期水质变化特征及污染来源解析[J].农业环境科学学报,2024,43(2):401-410.[ZHANG Wen-bo,YU Xiang-ying,XUE Hong-tao,*et al.*Characteristics of Water Quality and Pollution Source Apportionment in Wet Season and Dry Season Based on Absolute Principal Component Score-multiple Linear Regression in Guangdong Section of Jiuzhou River[J].Journal of Agro-environment Science,2024,43(2):401-410.]

- [29] MENG X F, CHEN S M, LI D Q, *et al.* Identification of Marine Microplastics Based on Laser-induced Fluorescence and Principal Component Analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 465: 133352.
- [30] 周及, 关卫省, 付林涛. 基于多元统计的西安市河流水质评价及污染源解析[J]. *水资源保护*, 2020, 36(2): 79-84, 104. [ZHOU Ji, GUAN Wei-sheng, FU Lin-tao. Water Quality Assessment and Pollution Source Analysis of Xi'an River Based on Multivariate Statistics[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(2): 79-84, 104.]
- [31] 任岩, 张飞, 王娟, 等. 新疆艾比湖流域地表水丰水期和枯水期水质分异特征及污染源解析[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(5): 1143-1157. [REN Yan, ZHANG Fei, WANG Juan, *et al.* Spatio-Temporal Characteristics and Source Identification of Surface Water Pollutants in Lake Ebinur Watershed, Xinjiang[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(5): 1143-1157.]
- [32] 杨玖, 代佼, 龚兴涛, 等. 基于多种方法的长江上游小流域水质综合评价[J]. *中国环境监测*, 2023, 39(S1): 19-26. [YANG Jiu, DAI Jiao, GONG Xing-tao, *et al.* Comprehensive Evaluation of Water Quality in Small Watershed of Upper Yangtze River Based on Multiple Methods[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2023, 39(S1): 19-26.]
- [33] 田福金, 马青山, 张明, 等. 基于主成分分析和熵权法的新安江流域水质评价[J]. *中国地质*, 2023, 50(2): 495-505. [TIAN Fu-jin, MA Qing-shan, ZHANG Ming, *et al.* Evaluation of Water Quality in Xin'anjiang River Basin Based on Principal Component Analysis and Entropy Weight Method[J]. *Geology in China*, 2023, 50(2): 495-505.]
- [34] 董浩, 余居华, 张银龙, 等. 九龙江流域丰枯水期表层水体氮污染特征及其来源解析[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(4): 478-489. [DONG Hao, YU Ju-hua, ZHANG Yin-long, *et al.* Characterization of Nitrogen Pollution in Surface Water during Wet and Dry Seasons and Its Sources Apportionment in Jiulong River Watershed, China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(4): 478-489.]
- [35] 施卫明, 王远, 闵炬. 中国农业面源污染防治研究进展与工程案例[J]. *土壤学报*, 2023, 60(5): 1309-1323. [SHI Wei-ming, WANG Yuan, MIN Ju. Progress in Research and Engineering Application Cases of Agricultural Non-Point Source Pollution Control in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1309-1323.]
- [36] 谢林花, 吴德礼, 张亚雷. 中国农村生活污水处理技术现状分析及评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(10): 865-870. [XIE Lin-hua, WU De-li, ZHANG Ya-lei. Analysis and Evaluation of China's Rural Domestic Sewage Treatment Technology[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(10): 865-870.]

作者简介: 范旋 (2000—), 男, 江西丰城人, 主要从事流域面源污染与水环境保护工作。E-mail: fx2747556175@163.com