J. Lake Sci.(湖泊科学),2025,**37**(6):1988-1995
DOI 10.18307/2025.0620
© 2025 by *Journal of Lake Sciences*

太湖主要入湖河流污染物源解析*

成淑妍,王姗姗,王晨波,张　然**,邓　希
(江苏省环境监测中心,南京 210019)

摘　要: 以2016－2023年太湖8条主要入湖河流监测断面的6项污染指标数据为基础,深入剖析了这些河流污染的时空分异特征,并采用正定矩阵因子分析模型(PMF)对污染来源进行了定量解析。结果表明,入湖河流各项污染指标浓度整体呈逐年下降趋势。在时间分布上,氨氮、总氮浓度在冬季(1－2月、12月)相对较高,高锰酸盐指数、化学需氧量、总磷浓度在夏季(6－9月)较高,五日生化需氧量浓度一年有两个峰值,分别出现在3－5月和8－9月。从空间分布来看,太湖北部湖区的望虞河、小溪港以及西南山区的大港河,各项污染指标浓度相对较低;而西部湖区的武进港、太滆运河、太滆南运河、大浦港、乌溪港污染物浓度较高,对太湖的氮、磷贡献较大 。进一步研究发现,太湖主要入湖河流的污染源主要有生活源、水产养殖源、畜禽养殖和农田种植源、工业源4类,贡献率分别为32.5%、19.8%、40.3%、7.4%。其中,武进港、太滆运河、太滆南运河、大浦港、乌溪港5条高污染河流的污染源贡献占比和时间变化趋势基本一致,汛期主要受农业面源影响,冬季主要受生活源影响。近年来,水产养殖源对太滆运河、太滆南运河汛期污染物贡献突出,畜禽养殖和农田种植源对大浦港、乌溪港水质影响较大,生活源则是影响武进港水质的重要因素。因此,削减畜禽、水产养殖及农田退水的污染物入河量,并持续推进环境基础设施建设,实现污水全收集、全处理,对改善太湖水质至关重要。
关键词: 太湖;主要入湖河流;源解析;正定矩阵因子分析

Analysis of pollutant sources in the main rivers entering Lake Taihu*

Cheng Shuyan, Wang Shanshan, Wang Chenbo, Zhang Ran** & Deng Xi
(*Jiangsu Environmental Monitoring Center*, *Nanjing* 210019, *P. R. China*)

Abstract: Based on the data of six pollution indicators from monitoring sections of eight major rivers flowing into Lake Taihu during 2016-2023, this study deeply analyzed the temporal and spatial differentiation characteristics of pollution in these rivers. The positive definite matrix factor analysis model (PMF) was used to quantitatively analyze the pollution sources. The results showed that the concentrations of various pollution indicators in the inflowing rivers generally presented a downward trend year by year. Regarding temporal distribution, the concentrations of ammonia nitrogen and total nitrogen were relatively high in winter (January-February and December), while the concentrations of permanganate index, chemical oxygen demand and total phosphorus were higher in summer (June-September). The biochemical oxygen demand after 5 days concentration had two peaks in a year, occurring in March-May and August-September, respectively. Regarding spatial distribution, the Wangyu River, Xiaoxi Harbor in the northern Lake Taihu area, and the Dagang River in the southwestern mountainous area had relatively low concentrations of various pollution indicators. In contrast, the Wujin Port, Taige Canal, Taige South Canal, Dapu Port, and Wuxi Port in the western lake area had higher pollutant concentrations and made significant contributions to the nitrogen and phosphorus in Lake Taihu. Further research found that the main pollution sources of the rivers entering Lake Taihu mainly included four types: domestic sources, aquaculture sources, livestock and poultry breeding and farmland planting sources, and industrial sources, with contribution rates of 32.5%, 19.8%, 40.3%, and 7.4% respectively. Among them, the contribution ratios of pollution sources and the temporal change trends of five rivers with high pollution levels, such as Wujin Port and Taige Canal, were the same. During the flood season, they were mainly affected by agricultural non-point sources, while in winter, they were mainly influenced by domestic sources. In recent years, aquaculture sources had significantly contributed to pollutant loads in the Taige Canal and Taige South

* 2024-08-26收稿;2025-03-20收修改稿。
江苏省重点研发计划项目(D21YFD17008)和江苏省环境监测科研基金项目(2320)联合资助。
** 通信作者;E-mail:zhangran@jshb.gov.cn。

Canal during flood seasons, while livestock breeding and farmland cultivation sources exerted more pronounced impacts on water quality in Dapu Port and Wuxi Port. Domestic wastewater discharges emerged as a critical factor affecting water quality in Wujin Port. Therefore, it is crucial to reduce the amount of pollutants entering the river from livestock, poultry, aquaculture, and farmland drainage and continuously promote the construction of environmental infrastructure to achieve the full collection and treatment of sewage, so as to improve the water quality of Lake Taihu.

Keywords: Lake Taihu; main rivers entering the lake; source resolution; positive definite matrix factor analysis

太湖流域地处长江三角洲南部,流域面积达 3.69×10^4 km^2,分属江苏、浙江、安徽和上海等地,是我国大中城市高度聚集、经济发展极为活跃的区域之一。流域内河道纵横交错,总长度约为 12×10^4 km,在广阔的平原地区构成了复杂的水网。丰富的水资源为区域社会经济的快速发展提供了有力支撑,但与此同时,不断增加的污染负荷给太湖水质改善带来了巨大挑战[1-2]。入湖河流作为太湖污染的重要来源,一直是众多学者研究的焦点。王倩等[3]对西太湖入湖河流水系(南溪水系和洮滆水系)的污染分异特征进行了研究;季海萍等[4]对 1986－2017 年近 30 年的环湖出、入湖水量变化进行了定性和定量分析,发现环湖年入湖水量呈明显的增加趋势,在 1990s 后期出现突变性增长,年出湖水量增加趋势显著,在 21 世纪初后期突变增加;易娟等[5]分析了 2007－2014 年太湖湖区及环太湖 22 条主要入湖河流的水质监测资料,指出河道污染物输入是太湖主要的污染来源,直接影响着太湖水质的变化,因此控制入湖河流污染物是治理太湖污染的关键环节。

然而,目前针对太湖入湖河流污染源的研究存在一定局限性。多数研究聚焦于某一条河流,对污染源贡献程度的定量研究较少,而且研究时间多集中在 2007 年蓝藻水华事件后的 10 多年,近期研究相对不足。经过多年的治理,太湖流域的污染状况已有明显改善[6-7]。基于此,本研究选取 8 条主要入湖河流,利用 2016－2023 年国控断面地表水监测数据,详细分析 6 项污染指标的时空差异,运用正定矩阵因子分析模型(PMF)对污染源进行探究和定量分析,同时针对污染较重的西部湖区入湖河流,深入研究其污染源贡献情况及时间变化趋势,旨在为太湖流域的水质管理和保护提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

太湖(30°55′~31°32′N,119°52′~120°36′E)是我国第三大淡水湖,为典型的平原浅水湖,平均水深为 1.9 m,湖面面积约为 2400 km^2。太湖流域属于亚热带季风气候区,气候温暖,雨量充沛,年平均气温在 16.0~18.0 ℃之间,年降水量为 1100~1150 mm,汛期主要集中在 6－9 月。地势西高东低,太湖周边地貌特征西部以山地丘陵为主,北部以平原和水网为主[8]。与太湖相通的河道多达 200 余条,但大多流量较小且河道较短。本研究选取的 8 条入湖河流均位于江苏省境内,其入湖水量约占太湖上游来水总量的 50%,分别是望虞河、小溪港、武进港、太滆运河、太滆南运河、大浦港、乌溪港、大港河,对应的国家地表水环境质量监测断面为 312 国道桥、小溪港桥、姚巷桥、百渎港桥、殷村港桥、大浦港桥、乌溪港桥和大港桥(图 1)。

1.2 正定矩阵因子分析

PMF 是一种多元因子分析工具,也是基于多变量因子分析方法的定量源解析模型,在受体模型中占据重要地位。它解决了非最优标度问题,在各类污染物源解析中应用广泛[9]。该模型通过定义一个目标函数 Q,当 Q 值最小时,模型将受体浓度矩阵 X 分解成两个因子矩阵,即因子贡献矩阵 G、源成分谱矩阵 F,以及一个残差矩阵 E,可以表示为:

$$X_{(m\times n)} = G_{(m\times p)}F_{(p\times n)} + E_{(m\times n)} \tag{1}$$

$$Q = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\left(\frac{E_{ij}}{u_{ij}}\right)^2 \tag{2}$$

$$E_{ij} = \sum_{k=1}^{p} g_{ik}f_{kj} - x_{ij} \tag{3}$$

$$u_{ij} = \begin{cases} \frac{5}{6}\times MDL,\ x_{ij} \leqslant MDL \\ \sqrt{(\sigma_j \times x_{ij})^2 + (MDL)^2},\ x_{ij} > MDL \end{cases} \tag{4}$$

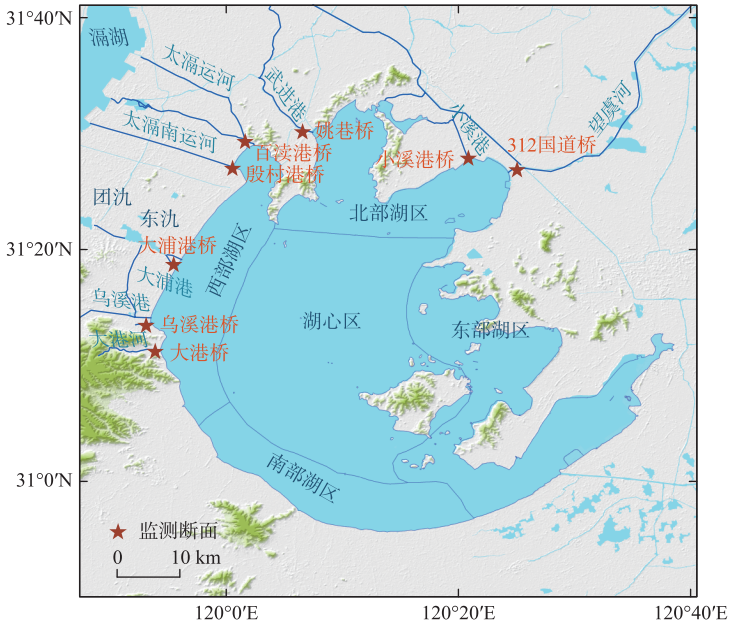


图 1 太湖 8 条主要入湖河流和监测断面

Fig. 1 Eight main rivers entering the Lake Taihu and their monitoring sections

式中,m 为样品个数,n 为污染物个数,p 是因子个数,x_{ij} 是样本 ij 物质的浓度,g_{ik} 是因子 k 对样本 i 的贡献率,f_{kj} 是因子 k 中 j 物质的浓度,u_{ij} 是不确定度,MDL 是方法检出限,σ_j 是 j 物质浓度的相对标准偏差,通常认为是 5%。

1.3 数据来源

本研究的数据来源于 2016—2023 年 8 个地表水监测国控断面的 6 项污染指标月度数据,包含高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD_5)、氨氮(NH_3-N)、总磷(TP)、总氮(TN)。为提高源解析结果的准确性,引入 pH、溶解氧(DO)指标用于 PMF 模型[10]。pH、DO 在现场进行测定,其余指标则在实验室测定。采样过程参照《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91—2002)及《地表水环境质量监测技术规范》(HJ 91.2—2022),pH 分析采用玻璃电极法,DO 分析采用电化学探头法,COD 分析采用重铬酸盐法,BOD_5 分析采用稀释与接种法,NH_3-N 分析采用纳氏试剂比色法或水杨酸分光光度法,TP 分析采用钼酸铵分光光度法,TN 分析采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 3838—2002)。所选用的标准分析方法的测定下限均低于该监测项目规定的环境质量标准限值[11-13]。

表 1 2016—2023 年太湖主要入湖河流 6 项污染指标年均浓度

Tab. 1 Annual average concentrations of six pollution indicators in main rivers entering the Lake Taihu from 2016 to 2023

时间	COD_{Mn}/(mg/L)	COD/(mg/L)	BOD_5/(mg/L)	NH_3-N/(mg/L)	TP/(mg/L)	TN/(mg/L)
2016 年	4.8	14.8	3.2	0.71	0.153	2.93
2017 年	4.5	15.7	3.0	0.62	0.140	2.79
2018 年	4.2	15.9	3.2	0.62	0.124	3.03
2019 年	3.9	14.6	2.7	0.38	0.121	2.52
2020 年	3.8	13.4	2.7	0.26	0.112	2.45
2021 年	3.9	13.7	2.4	0.26	0.113	2.29
2022 年	3.0	12.1	1.8	0.18	0.095	1.98
2023 年	3.3	12.9	2.3	0.17	0.093	2.09

2 结果

2.1 入湖河流各项污染指标变化特征

对太湖 8 个主要入湖河流断面的 6 项污染指标分别进行年度和月度统计分析(年度数据见表 1,月度数据见图 2)。从年度变化来看,2016—2023 年期间,入湖河流各项污染指标浓度整体呈下降趋势。COD_{Mn}、COD、

BOD_5、NH_3-N、TP、TN 年均值分别在 3.0~4.8、12.1~15.9、1.8~3.2、0.17~0.71、0.093~0.153、1.98~3.03 mg/L 之间,降幅分别为 31.9%、12.8%、28.4%、75.6%、39.1%、28.6%。"十三五"以来,入湖河流水环境持续改善,2019 年和 2022 年是污染指标浓度下降较为显著的节点,其中各项指标的最低值均出现在 2022 年。

从月度变化分析来看,COD_{Mn}、COD、TP 3 个指标的变化趋势高度一致,总体表现为夏季浓度高、冬季浓度低,全年峰值出现在 6—9 月,最大月均值出现在 8 月,分别为 4.8、17.0、0.143 mg/L。NH_3-N、TN 的月度变化趋势相似,冬季浓度较高、夏季浓度较低,最大月均值出现在 1 月,分别为 0.72、3.45 mg/L。BOD_5 一年中有两个峰值,分别在 3—5 月(汛前)和 8—9 月(汛期),最大月均值出现在 4—6 月,为 3.1 mg/L(图 2)。

在空间分布上,小溪港桥、312 国道桥、姚巷桥位于太湖北部湖区入湖河流,百渎港桥、大港桥、大浦港桥、乌溪港桥、殷村港桥位于太湖西部湖区入湖河流。太湖主要入湖河流水质总体较好,北部湖区入湖河流水质优于西部湖区,除 TN 外其他指标均满足地表水Ⅲ类标准(GB 3838—2002 中无河流 TN 评价标准)。小溪港桥、312 国道桥、大港桥各项污染指标浓度较低,其中 TN、TP 浓度显著低于其他河流。姚巷桥、百渎港桥、乌溪港桥、大浦港桥和殷村港桥断面的 TP 分别高于所有断面平均值 15.8%、62.1%、8.4%、27.5% 和 37.2%,TN 分别高于所有断面平均值 31.7%、32.4%、5.4%、2.0% 和 17.1%(表 2)。

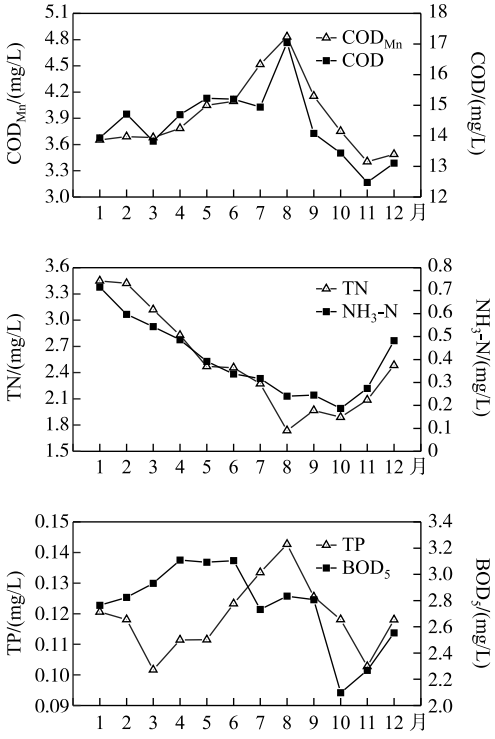


图 2 太湖主要入湖河流 6 项污染指标月变化情况

Fig. 2 Monthly variation of six pollution indicators in main rivers entering Lake Taihu

表 2 太湖主要入湖河流 6 项污染指标平均浓度

Tab. 2 The average concentrations of six pollution indicators in main rivers entering Lake Taihu

断面名称	COD_{Mn}/(mg/L)	COD/(mg/L)	BOD_5/(mg/L)	NH_3-N/(mg/L)	TP/(mg/L)	TN/(mg/L)
小溪港桥	4.1	16.5	2.9	0.23	0.065	1.42
312 国道桥	3.2	13.0	2.2	0.12	0.071	1.36
姚巷桥	3.7	14.1	2.8	0.50	0.137	3.30
百渎港桥	4.2	15.5	3.3	0.68	0.192	3.32
大港桥	2.5	8.9	1.8	0.14	0.040	2.52
大浦港桥	4.9	16.8	2.9	0.44	0.151	2.56
乌溪港桥	4.5	13.8	2.8	0.53	0.129	2.64
殷村港桥	4.3	16.0	3.3	0.55	0.163	2.93

2.2 PMF 源解析

太湖流域污染来源复杂,主要包括工业废水排放、农业污染和生活污水排放[14-16]。本研究选取 3~6 个因子代入模型运算,当因子数为 4 时,模型拟合效果最佳,能够较好地解释各类污染源信息。结合实际情况,最终确定选择 4 个因子进行后续分析。其因子贡献率大小排序为:因子 3>因子 1>因子 2>因子 4。其中,因子 1 的贡献率为 32.5%,该因子中 pH、DO、COD_{Mn}、TN 具有较高载荷。因子 2 的贡献率为 19.8%,pH、COD_{Mn}、TP 在该因子中具有较高载荷。因子 3 的贡献率最大,达 40.3%,COD_{Mn}、COD、BOD_5 等有机污染指标在该因子中具有较高载荷,且对 COD 贡献率高达 85.8%。因子 4 的贡献率为 7.4%,对 NH_3-N、BOD_5、TP 和 TN 的贡献率较高(图 3)。

2.3 污染源贡献

基于 PMF 模型结果,进一步对百渎港桥、殷村港桥、大浦港桥、乌溪港桥、姚巷桥 5 个污染物浓度较高的入湖河流断面,分析其污染源贡献的差异性(附图Ⅰ)。整体上,各监测断面污染源月度贡献率的变化趋势

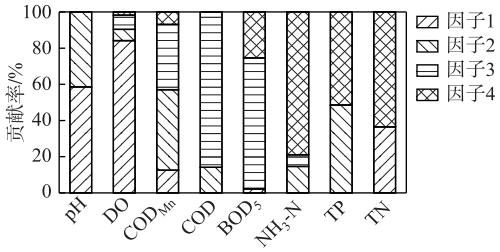


图 3 PMF 模型计算的各指标因子贡献率

Fig. 3 The contribution rate of each indicator factor calculated by the PMF model

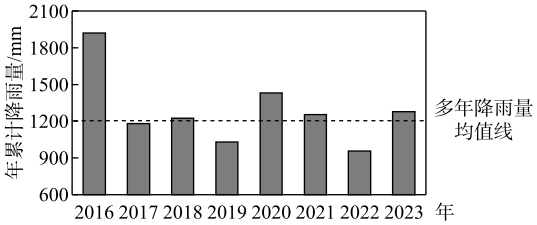


图 4 2016－2023 年太湖流域年累计降雨量(年均降雨量数据来源于水利部太湖流域管理局每年度太湖流域及东南诸河水资源公报)

Fig. 4 Annual cumulative rainfall in the Lake Taihu Basin from 2016 to 2023

(The mean annual precipitation data was obtained from the Taihu Basin and Southeast Rivers Water Resources Bulletin, Taihu Basin Authority, Ministry of Water Resources)

相似,主要受因子 1 和因子 3 的影响,贡献率分别为 25.9%~30.6%、35.1%~43.1%。在月度变化上,各因子月度贡献率呈季节性变化特征,具体表现为冬季时,因子 1 和因子 4 的贡献率上升,相对夏季约上升 15 和 2 个百分点;夏季时,因子 2 和因子 3 的贡献率上升,相对冬季约上升 18 和 3 个百分点。在年度变化上,2020 年是各因子贡献率的变化节点,因子 1 和因子 2 的贡献率上升,2020－2023 年较 2016－2019 年分别上升 8 和 2 个百分点,而因子 3 和因子 4 的贡献率分别下降 8 和 2 个百分点。分断面来看,百渎港桥和殷村港桥断面污染源的贡献情况相似,近两年,因子 1 和因子 2 的贡献率持续上升,年均贡献率达 35% 和 25%,其中因子 2 汛期贡献率高达 40%,已成为影响汛期水质的关键因子。此外,因子 2 对百渎港桥断面的贡献率始终高于殷村港桥,但上升幅度小于殷村港桥断面,表现为 2023 年同比升高 2.2 个百分点,而殷村港桥断面同比升高 7.8 个百分点。大浦港桥、乌溪港桥断面各因子贡献率分布相对稳定,因子 1 和因子 3 始终为影响二者水质的关键因子,近两年分别约占 32% 和 35%,其中因子 3 的贡献率在 2023 年有明显回升趋势,两个断面同比上升 5.3、15.5 个百分点。对姚巷桥断面而言,2016－2020 年因子 3 一直是影响水质的首要因子,但 2021－2023 年因子 1 成为新的首要因子,尤其是近两年因子 1 贡献率再创新高(达 40%),已成为影响断面水质的首要因子。

3 讨论

3.1 水质变化分析

6－9 月是太湖流域的主汛期,此期间降雨量偏多,且正值水稻种植生长期,化肥与农药使用量大。大量污染物随雨水进入河流,直接影响河流水质[17]。相关研究表明,降雨量与水质呈显著负相关[18],汛期面源污染物随雨水入河现象突出,这正是 COD_{Mn}、COD、TP、BOD_5 浓度在 6－9 月达全年峰值的主要原因。2019 年和 2022 年,入湖河流污染物浓度显著下降,与当年降雨量显著低于其他年份密切相关(图 4)。由此可见,入湖河流水环境持续改善,一方面得益于太湖流域水环境综合治理工作的不断推进,另一方面也受降雨量等自然条件影响。在冬季(12 月至次年 1－2 月),随着农业种植活动结束,大量氮元素进入水体,但因冬季气温低、降雨量少,水体流动性差及水体中微生物活性弱,这些氮素难以被自然消纳[19]。因此,NH_3-N、TN 浓度呈现冬季高、夏季低的特征。在春冬季节交替时,浮游植物生长导致内源有机质增加[20]。而 5－6 月是养殖虾塘集中排水期[21],综合来看,BOD_5 在汛前出现峰值,可能是外源输入与内源增加共同作用的结果。

3.2 污染溯源分析

随着太湖流域工业废水等点源污染以及城乡污水治理工作的逐步推进,治理成效显著,农业面源污染逐渐成为流域污染治理的主要矛盾[22]。农业面源主要来自种植业和养殖业,其尾水排放具有规模大、处理率低的特点。在农业生产过程中,使用的农药、化肥以及饲料、饵料等含有大量的 N、P 元素,但这些元素的利用率较低。过量的 N、P 元素通过地表径流进入河流,导致面源污染问题愈发突出[23]。以 P 元素为例,它是生命体生长发育所必需的重要元素,对水产动物的骨骼、外壳等的形成起着重要作用。由于水体中的 P 浓度较低,养

殖水产动物所需的 P 主要通过饲料获取。然而,饲料的利用率较低,残饵量较高,大量 P 随养殖尾水排入河流,从而造成水环境污染[24-25]。相关研究表明,水产养殖业对农业 TP 排放量的贡献率接近 60%,畜禽养殖和农田耕作产生的 COD 污染负荷占流域总污染的 67%[26-27]。结合 PMF 模型结果,因子 2 对 TP 具有较高载荷,因子 3 中 COD_{Mn}、COD、BOD_5 等有机污染指标具有较高载荷,且对 COD 贡献率达 85.8%。因此,将因子 2 定为水产养殖源,因子 3 定为畜禽养殖和农田种植源。NH_3-N 是生产生活污水的典型特征指标,研究发现生活污水是河流水体 NH_3-N 的主要来源[28]。太湖周边地区工业发达,纺织印染、冶金、化工、化纤等产业排放的废水对 COD、NH_3-N 也有显著贡献[29]。因子 1 对 TN 具有较高载荷,因子 4 对 NH_3-N、BOD_5、TP 和 TN 有较高的贡献率。进一步分析 5 个污染物浓度较高的入湖河流断面污染源贡献率的差异性,发现因子 1 的贡献率远高于因子 4。随着太湖流域水环境综合治理工作的持续推进,工业废水等点源污染得到了较好的控制,但因子 1 的贡献率却出现了升高的情况。因此,本文将因子 1 定为生活源,因子 4 定为工业源。

3.3 污染源贡献率差异性分析

对这 5 个入湖河流断面的污染源贡献率情况进行深入分析,发现它们主要受生活源、畜禽养殖和农田种植源的影响。冬季时,生活源、工业源的贡献率上升;夏季时,水产养殖源以及畜禽养殖和农田种植源的贡献率上升。这与彭月等[14]的研究结果一致,即丰水期水质主要受畜禽养殖、种植业及上游来水影响,平水期主要受生活污染源和内源污染影响。这可能是因为生活源和工业源污染物产生量相对稳定,而农业源具有周期性,且多通过地表径流的方式输入河流,导致农业源污染物在汛期(丰水期)集中入河,贡献率上升,相应地,生活源、工业源在冬季(平水期)的贡献率上升[3,17-18]。这也反映出太湖流域污染情况具有趋同性。因此,在治理思路上,应坚持全流域系统治理和综合治理。“十三五”期间,随着“263”专项行动的实施,太湖流域加大工业污染治理和农业面源污染整治的力度,工业企业污水纳管率全面提升,农业种植过程中化肥和农药的使用量显著降低,太湖地区畜禽禁养区逐步建成,水产养殖污染整治有序推进,农村生活污水处理率提升。同时,一些重大水利工程的建设也对太湖地区水环境的改善产生一定的影响[30],比如 2020 年新孟河延伸拓浚工程正式建成投运。随着污染物总量下降,工业、农业面源治理的成效更加明显,进而导致各污染源贡献率出现此消彼长的情况。但每条入湖河流的小流域环境各有特点(附图Ⅱ),分断面来看,百渎港桥、殷村港桥断面均受到滆湖来水的影响,分别为滆湖北部湖区和南部湖区下游,沿线土地利用分布相似,均分布大量的围网养殖区、农田及居民区[3],这可能是二者污染源相似的主要原因。同时,随着滆湖水域综合治理工作的推进,滆湖水环境质量改善成效显著。但滆湖北部湖区的开发利用和污染程度大于南部湖区,水产退养工作重点位于北部湖区周边,可能导致北部湖区周边水产养殖污染源削减速度更快。对于大浦港桥、乌溪港桥断面,其周边均分布有大量农田及农民居住区,小流域面源污染主要有农村生活污染源、畜禽养殖源和种植业源[31]。由于生猪产能去化过程较慢,加之行业规模化程度加深和生猪行业整体的生产效能继续提升,2023 年生猪出栏量创新高。根据宜兴市 2023 年国民经济和社会发展统计公报数据,地区全年粮食产量同比增长 0.7%,猪肉产量同比增长 142.7%,这可能是畜禽养殖和农田种植源出现明显回升的主要原因[32]。姚巷桥断面所属直湖港小流域周边区域种植业发达,其中阳山镇水蜜桃种植作为支柱产业,具有集约化、高投入的特点。由于桃园多邻近河道,其化肥、农药的施用已成为该区域重要的农业面源污染来源[33]。这可能是导致畜禽养殖和农田种植源一直是该地区首要污染源的原因之一。“十四五”初期,无锡市持续推进直湖港水环境治理工作,先后实施各类污染整治工程,重点实施工业污染源管控、城乡生活污水治理、农业面源污染防治、入河排污口规范化、水体内源污染治理和生态修复等工程,项目实施后将提高城镇和农业面源污染削减能力,提升城镇和农业生活污水收集处理水平,改善直湖港水环境质量[34]。而流域范围内多为农村地区,大片农田夹杂零星居民点散状分布,生活污水治理难度大,污染物削减速度慢,导致贡献率上升,成为影响直湖港水质的关键因子[35]。基于以上情况,下一步建议针对上游滆湖周边围网养殖区的特点,稳固现有治理工作取得的成效,推进水产绿色健康养殖,提升水产养殖业的高质量发展水平;针对大浦港桥、乌溪港桥断面,重点关注畜禽养殖业,因地制宜地开展农业面源污染综合治理;对姚巷桥断面,需要加大力度持续推进城乡地区生活污水治理工作。

4 结论

本研究对太湖入湖河流的污染指标变化特征、污染源解析及贡献率进行了全面分析,得出以下结论:

1）在时间变化上,2016－2023 年入湖河流各项污染指标浓度总体呈逐年下降趋势;NH_3-N、TN 浓度冬季相对较高,COD_{Mn}、COD、TP、BOD_5 浓度则呈相反趋势。

2）在空间分布上,太湖北部湖区入湖河流如望虞河、小溪港,以及西部湖区入湖的大港河,各项污染指标浓度相对较低;而西部湖区入湖河流武进港、太滆运河、太滆南运河、大浦港、乌溪港的各项污染指标浓度相对较高,对太湖 N、P 的贡献较大。

3）太湖主要入湖河流的污染源可分为 4 类,分别为生活源、水产养殖源、畜禽养殖和农田种植源、工业源,其贡献率依次为 32.5%、19.8%、40.3%、7.4%。

4）武进港、太滆运河、太滆南运河、大浦港、乌溪港 5 条污染物浓度较高的入湖河流,其污染源贡献率与时间变化趋势基本一致。汛期主要受农业面源影响,冬季主要受生活源影响。近年来,水产养殖源对太滆运河、太滆南运河汛期污染物贡献突出,畜禽养殖和农田种植源对大浦港、乌溪港水质影响较大,生活源则是影响武进港水质的重要因素。

5 附录

附图Ⅰ和附图Ⅱ见电子版(DOI: 10.18307/2025.0620)。

6 参考文献

[1] 卞华民. 江苏太湖流域水环境时空分异特征及水质预测研究[学位论文]. 南京: 东南大学, 2022.

[2] Wen JL, Li Y, Li Y *et al*. The spatial distribution, source and risk of polycyclic aromatic hydrocarbon in surface sediments of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2024, **36**(4): 1082-1095. DOI: 10.18307/2024.0422. [温佳乐, 李岩, 李晔等. 太湖表层沉积物多环芳经的空间分布、来源及其风险. 湖泊科学, 2024, **36**(4): 1082-1095.]

[3] Wang Q, Wu YD, Ding QL *et al*. Temporospatial variations and influential factors of water quality in the flowing river systems of western Taihu Lake Basin. *China Environmental Science*, 2017, **37**(7): 2699-2707. [王倩, 吴亚东, 丁庆玲等. 西太湖入湖河流水系污染时空分异特征及解析. 中国环境科学, 2017, **37**(7): 2699-2707.]

[4] Ji HP, Wu HY, Wu J. Variation of inflow and outflow of Lake Taihu in 1986-2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1525-1533. DOI: 10.18307/2019.0612. [季海萍, 吴浩云, 吴娟. 1986－2017 年太湖出、入湖水量变化分析. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1525-1533.]

[5] Yi J, Xu F, Gao Y *et al*. Variations of water quality of the major 22 inflow rivers since 2007 and impacts on Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2016, **28**(6): 1167-1174. DOI: 10.18307/2016.0602. [易娟, 徐枫, 高怡等. 2007 年以来环太湖 22 条主要河流水质变化及其对太湖的影响. 湖泊科学, 2016, **28**(6): 1167-1174.]

[6] Li QF, Xu SH, Chen QH *et al*. Analysis on the variation of total phosphorus concentrations and loads of inflow and outflow rivers from different water resources zones around Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2022, **34**(1): 74-89. DOI: 10.18307/2022.0108. [李琼芳, 许树洪, 陈启慧等. 环太湖各水资源分区入出湖河流总磷浓度与负荷变化分析. 湖泊科学, 2022, **34**(1): 74-89.]

[7] Xia YB, Wang H, He XC *et al*. Spatiotemporal heterogeneity of hydrodynamic forces and water quality in typical lakeside river networks in Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 1100-1111. DOI: 10.18307/2021.0412. [夏玉宝, 王华, 何新辰等. 太湖流域典型滨湖河网水动力与水质时空异质性. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 1100-1111.]

[8] Cai M, Qian X, Wang YY *et al*. Phosphorus cycle and its influencing factors in different areas of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5): 1493-1504. DOI: 10.18307/2022.0507. [蔡梅, 钱旭, 王元元等. 太湖入、出湖湖区磷的特征及其影响因素分析. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1493-1504.]

[9] Xu B, Xu H, Zhao H *et al*. Source apportionment of fine particulate matter at a megacity in China, using an improved regularization supervised PMF model. *Science of the Total Environment*, 2023, **879**: 163198. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163198.

[10] Wei YH, Li GC, Wang YH *et al*. Investigating factors influencing the PMF model: A case study of source apportionment of heavy metals in farmland soils near a lead-zinc ore. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(11): 2549-2559. [魏迎辉, 李国琛, 王颜红等. PMF 模型的影响因素考察——以某铅锌矿周边农田土壤重金属源解析为例. 农业环境科学学报, 2018, **37**(11): 2549-2559.]

[11] 国家环境保护总局. 地表水和污水监测技术规范(HJ/T 91－2002), 2002.

[12] 生态环境部. 地表水环境质量监测技术规范(HJ 91.2－2022), 2022.

[13] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准(GB 3838－2002), 2002.

[14] Peng Y, Cui YX, Fan N *et al*. Study of the pollution sources and spatial-temporal variation characteristics of agriculture non-point source polluted rivers. *Environmental Protection Science*, 2018, **44**(3): 47-52. [彭月, 崔云霞, 樊宁等. 农业面源污染河流源解析及时空变化特征研究. 环境保护科学, 2018, **44**(3): 47-52.]

[15] Wang L, Zhang L, Duan XJ *et al*. Water-environment effects of industry structure in Taihu Lake Basin in Jiangsu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(22): 6832-6844. DOI: 10.20103/j.stxb.2011.22.020. [王磊, 张磊, 段学军等. 江苏省太湖流域产业结构的水环境污染效应. 生态学报, 2011, **31**(22): 6832-6844.]

[16] Zhang SS, Zhang L, Zhang LC *et al*. Coupling relationship between polluting industrial agglomeration and water environment pollution in southern Jiangsu of Taihu Lake basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, **38**(6): 954-962. [张姗姗, 张磊, 张落成等. 苏南太湖流域污染企业集聚与水环境污染空间耦合关系. 地理科学, 2018, **38**(6): 954-962.]

[17] Shi YJ, Wang MY, Xu SX *et al*. Study on soil structure characteristics of typical greenhouse vegetable field in Taihu Lake region. *Soils*, 2020, **52**(5): 1050-1056. [史艺杰, 王美艳, 徐胜祥等. 太湖流域典型设施蔬菜地土壤结构特征研究. 土壤, 2020, **52**(5): 1050-1056.]

[18] Meng H. The policy determinants of the water quality improvement of Tai Lake Catchment. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Philosophy and Social Sciences*, 2019, **22**(2): 60-68. [孟华. 太湖流域水质改善的政策影响因素分析. 福建农林大学学报: 哲学社会科学版, 2019, **22**(2): 60-68.]

[19] Ji XY, Wang SS, Yang K *et al*. Temporal and spatial variation characteristics of total nitrogen concentration in surface water from 2016 to 2020 in China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, **31**(6): 1184-1192. [嵇晓燕, 王姗姗, 杨凯等. 2016—2020 年中国地表水中总氮浓度时空变化特征分析. 生态环境学报, 2022, **31**(6): 1184-1192.]

[20] Huang TH, Liu K, Li L *et al*. Sources, preservation, and influencing factors of organic carbon from the Dagu River Basin. *China Environmental Science*, 2024, **44**(7): 3919-3930. [黄铁汉, 刘珂, 李莉等. 大沽河流域有机质来源、保存及影响因素分析. 中国环境科学, 2024, **44**(7): 3919-3930.]

[21] Peng LY, Ti CP, Li HP *et al*. Estimates and characteristics of pollutant discharge from pond cultures in the Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 70-78. DOI: 10.18307/2020.0107. [彭凌云, 逄超普, 李恒鹏等. 太湖流域池塘养殖污染排放估算及其空间分布特征. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 70-78.]

[22] 国家发展与改革委员会. 太湖流域水环境综合治理总体方案(2013 年), 2013.

[23] Huang JC, Zhang J, Ji YL *et al*. Thoughts on modelling and control of agricultural non-point source pollution in the lowland areas of Lake Taihu basin, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41**(11): 2365-2370. DOI: 10.11654/jaes.2022-0545. [黄佳聪, 张京, 季雨来等. 太湖流域平原农业面源污染模拟与管控的思考. 农业环境科学学报, 2022, **41**(11): 2365-2370.]

[24] Wang CF, Tang Q, Duan MM *et al*. Phosphorus absorption and homeostasis regulation in fish. *Freshwater Fisheries*, 2014, **44**(1): 106-111. [王春芳, 唐琴, 段鸣鸣等. 鱼类磷吸收和磷平衡调节的机制及影响因素. 淡水渔业, 2014, **44**(1): 106-111.]

[25] Liu GF, Xu P, Wu T *et al*. Present condition of aquaculture nitrogen and phosphorus environmental pollution and future development strategy. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2018, **34**(1): 225-233. [刘国锋, 徐跑, 吴霆等. 中国水产养殖环境氮磷污染现状及未来发展思路. 江苏农业学报, 2018, **34**(1): 225-233.]

[26] Li J, Min QW, Li WH *et al*. Agricultural pollution of the river-netted plain areas in the Taihu Lake basin: A case study of Changzhou and Yixing. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, **30**(2): 167-173. [李静, 闵庆文, 李文华等. 太湖流域平原河网区农业污染研究——以常州市和宜兴市为例. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(2): 167-173.]

[27] Liu Z, Li WX, Zhang YM *et al*. Estimation of non-point source pollution load in Taihu Lake basin. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, **26**(S1): 45-48. [刘庄, 李维新, 张毅敏等. 太湖流域非点源污染负荷估算. 生态与农村环境学报, 2010, **26**(S1): 45-48.]

[28] Wu QL, Ruan XH, Wu CM *et al*. Analyses of sources and transformation of nitrogen as a contaminant in the river and lake water in the western region of the Taihu Lake basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(12): 3883-3889. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0135. [吴庆乐, 阮晓红, 吴朝明等. 太湖西部河湖氮污染物来源及转化途径分析. 环境科学学报, 2015, **35**(12): 3883-3889.]

[29] Yan RR, Chao JY, Zhang L *et al*. Research on the load of industrial pollution in the Taihu Lake basin in Jiangsu Province. *China Rural Water and Hydropower*, 2012, (3): 39-43. [颜润润, 晁建颖, 张磊等. 太湖流域江苏片区工业源污染负荷研究. 中国农村水利水电, 2012, (3): 39-43.]

[30] Zhu Y. Research on effects of water diversion and drainage engineering on water environment improvement in Taihu Lake—A case of Xinmeng River. *Pearl River*, 2014, **35**(4): 37-40. [朱勇. 调水引流工程改善太湖流域水环境效果研究——以新孟河延伸拓浚工程为例. 人民珠江, 2014, **35**(4): 37-40.]

[31] 田亚军. 乌溪港和大港河水环境特征解析与水质改善方案研究[学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2016.

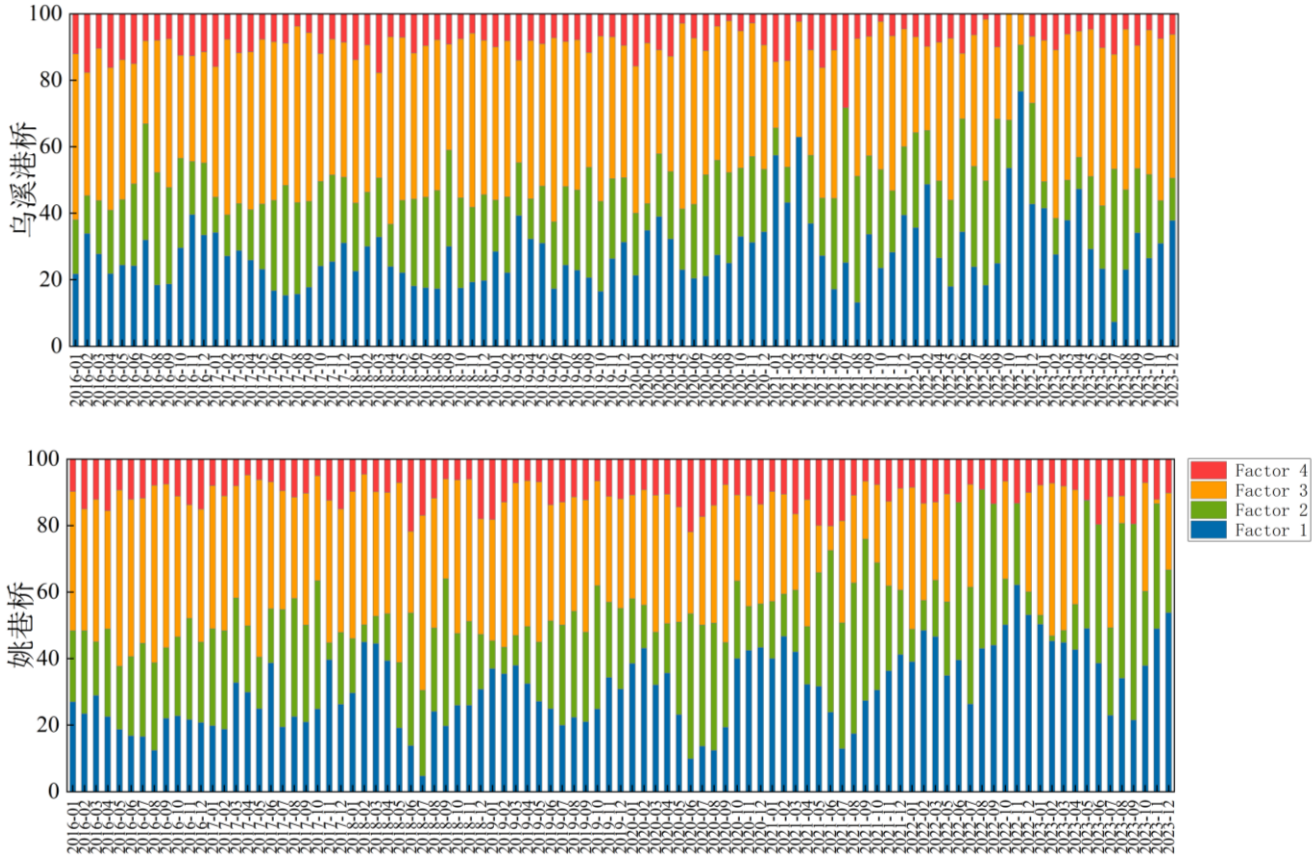
[32] 2023 年宜兴市国民经济和社会发展统计公报. 宜兴市人民政府, 2023. https://www.yixing.gov.cn/doc/2024/03/18/1215254.shtml.

[33] Liu ZG, Cheng DD, Shen TL *et al*. Investigation of soil nutrients in juicy peach orchards in the watershed of Zhihu Harbor, China. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, **33**(6): 525-532. [刘之广, 程冬冬, 申天琳等. 直湖港小流域水蜜桃园土壤养分调查与分析. 农业资源与环境学报, 2016, **33**(6): 525-532.]

[34] Wang YZ, Li YY, Tang JC. Accurate pollution source tracing in Zhihu Port and main rivers entering Taihu Lake and comprehensive treatment of sewage outlets. *Construction Science and Technology*, 2023, (23): 116-118. [王耀增, 李园园, 汤锦城. 太湖主要入湖河流直湖港污染精准溯源及排污口综合整治工程. 建设科技, 2023, (23): 116-118.]

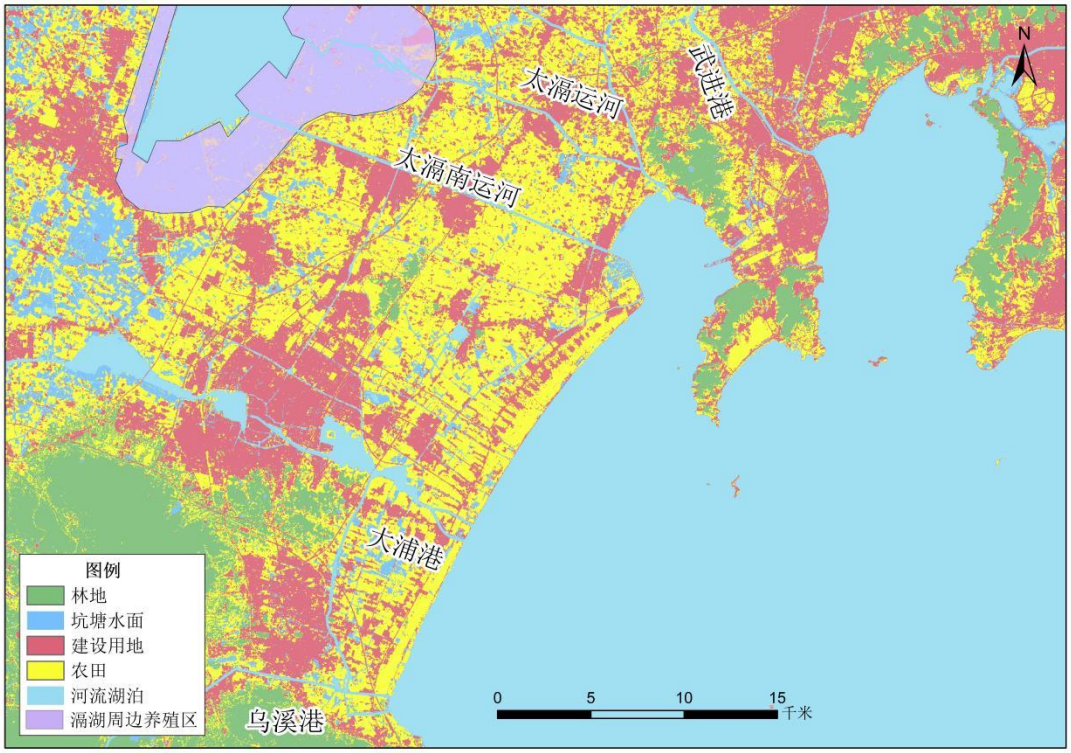
[35] Zhang YP, Wang HQ, Yin J *et al*. Investigation and analysis on technical modes of rural domestic sewage treatment in Taihu Lake basin: Taking Jiangsu Province as an example. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, **34**(5): 483-491. DOI: 10.13254/j.jare.2017.0002. [张亚平, 王海芹, 印杰等. 太湖流域农村生活污水处理技术模式调查和分析——以江苏省为例. 农业资源与环境学报, 2017, **34**(5): 483-491.]

百渎港桥
殷村港桥
大浦港桥
0
20
40
60
80
100



附图Ⅰ 西部入湖区 5 条河流各因子月度贡献率

Attached Fig.Ⅰ The monthly contribution rate of each factor of five rivers in the western lake area



附图Ⅱ 研究区土地利用

Attached Fig.Ⅱ Land use of the study area