

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.016

潭江水质时空变化特征及其驱动因子

苏程佳^{1,2}, 陈晓宏³, 谭永强², 欧阳卫华²

(1. 全国博士后创新(江门)示范中心, 广东 江门 529000; 2. 广东省江门市生态环境局, 广东 江门 529000;
3. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275)

摘要:为掌握潭江水质的变化特征,采用 Mann-Kendall 趋势检验以及水质综合污染指数等方法分析了潭江干流 2001—2019 年的水质年际变化特征,利用主成分分析方法识别了影响潭江水质变化的主导水质参数,通过相关性模型分析了影响水质变化的主要驱动因子。结果表明:潭江上游的水质最好但有一定的恶化趋势,下游的水质次之且无明显的恶化趋势,中游的水质最差恶化趋势也最为显著;主导潭江上游水质变化的水质参数是 COD 和 BOD₅,中游为 TN 和 NH₃-N,下游则是 TN、NH₃-N 和 TP;人口和森林覆盖率是影响潭江上游水质变化的主要驱动因子,而影响潭江中、下游水质变化的驱动因子除人口和森林覆盖率外,还包括 GDP 和水温;受人类因素的影响,潭江中、下游水质变化与自然驱动因子之间的关系有所改变。

关键词:水质参数;综合污染指数;时空变化;驱动因子;趋势检验;主成分分析;潭江

中图分类号:TV213.4;X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)04-0109-08

Spatial and temporal variation characteristics of water quality in Tanjiang River and its driving factors // SU Chengjia^{1,2}, CHEN Xiaohong³, TAN Yongqiang², OUYANG Weihua² (1. *The National Demonstration Center for Postdoctoral Innovation (Jiangmen), Jiangmen 529000, China*; 2. *Jiangmen Bureau of Ecological Environment, Jiangmen 529000, China*; 3. *Center for Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*)

Abstract: To master the variation characteristics of water quality in Tanjiang River (TJR), the Mann-Kendall test and water quality comprehensive pollution index were adopted to analyze the interannual variation characteristics of water quality in TJR from 2001 to 2019. The principal component analysis method was employed to identify the dominant water quality parameters influencing the water quality variation in TJR. The main driving factors influencing the water quality change were analyzed by correlation model. The results show that the water quality in the upper reaches of TJR was the best but it had a certain tendency of deterioration. The water quality in the lower reaches in TJR took second place and the tendency of deterioration was not obvious. The water quality in the middle reaches in TJR was the worst and the tendency of deterioration was the most significant. The water quality parameters dominating the water quality variation were COD and BOD₅ in the upper reaches and TN and NH₃-N in the middle reaches as well as TN, NH₃-N and TP in the lower reaches of TJR. Population and forest coverage rate were the main driving factors influencing the water quality variation in the upper reaches of TJR, while GDP and water temperature were also the driving factors influencing the water quality variation in the middle and lower reaches of TJR besides population and forest coverage rate. Additionally, the relationship between the water quality change and natural driving factors were changed due to the impact of human factors.

Key words: water quality parameters; comprehensive pollution index; spatial and temporal variation; driving factors; trend test; principal component analysis; Tanjiang River

水质作为评价河流生态环境系统健康的重要指标,是自然因素以及人类活动对水生态环境影响的综合体现^[1-2]。河流作为城市供水主要来源之一,其水质的优劣不仅关系到当地的供水安全,也影响

着当地经济社会的可持续发展。然而,随着工业化、城市化进程的加快,世界各地的河流都出现了严重的水污染现象,水污染愈发成为水环境治理的突出问题^[3-6],如印度的恒河^[7]、印度尼西亚的芝塔龙

基金项目:国家自然科学基金(91547202,51479216,51509127)

作者简介:苏程佳(1990—),男,工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: suchengj@mail2.sysu.edu.cn

河^[8]、英国的泰晤士河^[9]以及国内的海河、辽河、汾河、练江、茅洲河等^[7-12],近年来因污染严重成了重点治理的对象。

潭江是珠江流域三角洲河网的重要组成部分,近年来随着水环境治理力度的加大,水环境质量有了一定的提升,但还存在不少问题。李艳静等^[13]对潭江表层沉积物中多环芳烃分布特征及其生态风险评价的研究结果表明,潭江沉积物多环芳烃污染整体处于中等污染水平,而且部分采样点某些多环芳烃含量超过了效应区间低值,可能对生物存在潜在危害。陈伟涛^[14]基于2001—2010年的水质数据分析发现,潭江上游河段水质较好,而且显著优于中下游水质,入海口河段则为轻度污染;而唐廉等^[15]的研究却发现,潭江上游水质最好,中游及入海口附近水质次之,下游水质最差。两者的研究结果并不一致,说明潭江的水质变化特征较为复杂,仍需进一步研究。

科学认识水质的变化特征及其驱动力是解决水生态环境问题的关键^[16-17],但目前关于潭江水质的研究主要集中在其变化特征方面^[13,15],对水质变化的驱动力分析尚不多见。此外,随着经济社会发展水平的不断提高,人民群众对水环境的要求越来越高,2019年出台的《粤港澳大湾区发展规划纲要》对大湾区的水环境治理提出了更高的要求。基于此,本文采用 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验以及水质综合指数等方法分析了潭江2001—2019年的水质变化特征,利用主成分分析方法识别了主导潭江水质变化的水质参数,并通过相关性模型分析了影响水质变化的主要驱动因子,以期为区域水环境治理提供参考。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域概况

潭江(图1)是珠江流域三角洲诸河之一,干流全长248 km,集水面积5 068 km²。潭江发源于广东省阳江市牛围岭山,自西向东流至江门市新会区双水附近折向南流,汇入珠江三角洲河网区,最终在江门市新会区崖门口入南海^[15]。

1.2 研究数据及其来源

选取潭江流域具有代表性的溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)和总氮(TN)等7项水质参数对潭江水质变化特征进行分析。采用的逐月水质数据来源于江门市生态环境局,数据年限为2001—2019年,其中COD_{Mn}、TP、TN这3项水质参数数据的年限为2003—2019年,对涉

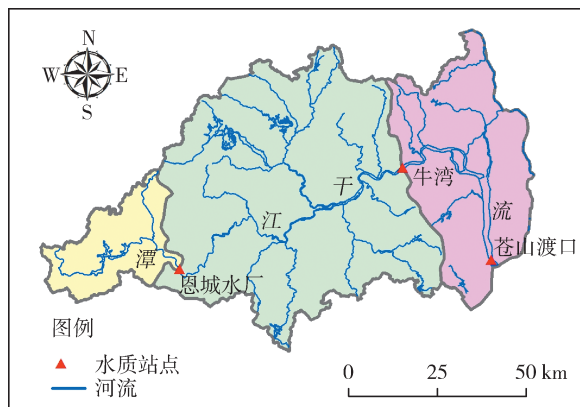


图1 潭江流域水质站点分布

Fig. 1 Distribution of water quality stations in Tanjiang River Basin

及COD、TP、TN参与的计算过程均采用与这3项水质参数相同的年限数据,逐年水质数据利用逐月水质数据进行算术平均得到。恩城水厂、牛湾和苍山渡口分别是潭江上、中、下游的水质代表站(图1)。人口、GDP、降水量、森林覆盖率等水质变化的影响因子同期数据来源于江门市的统计年鉴。

2 研究方法

采用M-K趋势检验^[18]以及水质综合污染指数^[19]等方法分析潭江2001—2019年的水质变化特征,利用主成分分析方法^[20]识别主导潭江水质变化的水质参数,最后通过相关性模型^[21]分析影响水质变化的主要驱动因子。

2.1 M-K趋势检验

M-K趋势检验是一种非参数检验方法,该方法不要求数据服从某一概率分布且具有与参数检测方法相同的检测能力,人为影响因素少、定量化程度高。其定义^[18]如下:

设序列为 $x_1, x_2, \dots, x_n$,令 S 为

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (1)$$

式中: x_i, x_j 分别为序列第 i 年和第 j 年的变量值,且 $j > i$;sign为符号函数。随着 n 增大, S 近似服从正态分布。M-K统计量 Z 计算公式为

$$Z = \begin{cases} \frac{S+1}{\sigma_S} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S-1}{\sigma_S} & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_S 为 S 的标准差,其中 $Z > 0$ 表明序列有上升趋势, $Z < 0$ 表明序列有下降趋势, $Z = 0$ 表明序列既无上升又无下降的趋势。当 $|Z| \geq 1.65, 1.96, 2.58$ 时分别表示通过了置信水平为90%、95%和99%的

显著性检验。

2.2 主成分分析法

主成分分析法是一种将多个具有一定相关性的变量重新组合成一组新的互不相关的几个综合变量,同时可根据实际需要从中选取少数几个综合变量来尽可能多地反映原来变量信息的统计方法,其中重新组合得到的综合变量称做主成分。通常情况下,可选取特征值接近于1且累计贡献率超过85%的前 m (m 小于原变量个数)个主成分,然后根据主成分的贡献率以及各主成分中不同影响因子的载荷确定研究问题的主要影响因子,方法原理及计算步骤可参考文献[19]。

3 结果与分析

3.1 水质年际变化特征

图2为潭江干流上、中、下游7项水质参数质量浓度的变化过程,表1为图2水质参数质量浓度的

统计特征值。从图2可以看出,潭江水质参数质量浓度的年际变化十分显著。如潭江上游的 BOD_5 质量浓度在2001—2011年基本保持不变,多年平均值为1.00 mg/L左右,2011年后则开始快速上升,在2015年达到最大值1.90 mg/L,此后开始迅速下降至2019年的0.87 mg/L;潭江中游的 NH_3-N 质量浓度虽然整体呈明显的下降趋势,但是2001—2019年间却经历了4次“先升后降”的波动过程,其中2014—2019年是快速下降阶段。从整体上看,潭江上游的DO质量浓度最高,下游其次,中游最低,其余水质参数的质量浓度均表现为上游最低、下游其次、中游最高,水质参数的质量浓度统计特征值(表1)结果也与上述结果一致。可见潭江上游的水质最好,下游其次,中游最差。

为了进一步确定潭江水质参数质量浓度的变化趋势,利用M-K趋势检验对其进行趋势分析,结果如表2所示。从表2可以看出,潭江上游7项水质

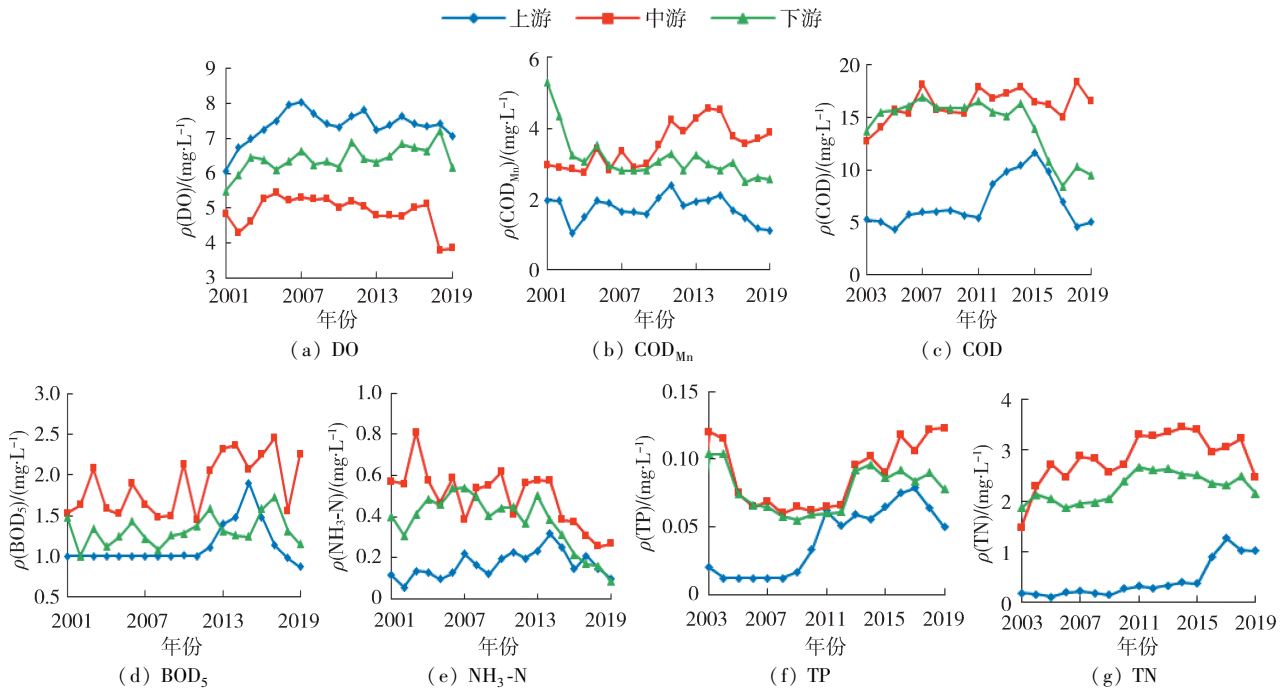


图2 潭江水质参数质量浓度变化趋势
Fig.2 Change trend of mass concentration of water quality parameters in Tanjiang River

表1 潭江水质参数质量浓度统计特征值

Table 1 Statistical characteristic values of mass concentration of water quality parameters in Tanjiang River

单位:mg/L

水质参数	上游			中游			下游		
	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值
DO	6.06	8.03	7.36	3.80	5.43	4.90	5.49	7.21	6.41
COD _{Mn}	1.04	2.39	1.73	2.76	4.56	3.52	2.48	5.30	3.14
COD	4.29	11.67	6.85	12.72	18.33	16.15	8.43	16.90	14.21
BOD ₅	0.87	1.90	1.12	1.44	2.46	1.88	1.00	1.73	1.31
NH ₃ -N	0.058	0.318	0.168	0.255	0.809	0.494	0.087	0.539	0.375
TP	0.012	0.079	0.041	0.060	0.123	0.089	0.055	0.104	0.078
TN	0.11	1.26	0.43	1.48	3.45	2.85	1.86	2.67	2.26

参数中 COD_{Mn} 和 BOD₅ 质量浓度呈下降趋势,但是下降趋势并不明显;其余 5 项质量浓度呈上升趋势,其中 NH₃-N、TP 和 TN 质量浓度为显著上升,TP 和 TN 更是通过了 0.01 的显著性水平检验,表明潭江上游的水质有一定的恶化趋势。潭江中游 7 项水质参数中 DO 和 NH₃-N 质量浓度呈下降趋势,且 NH₃-N 质量浓度为显著下降;另外 5 项质量浓度呈上升趋势,其中 COD_{Mn}、BOD₅ 和 TN 质量浓度表现为显著上升趋势,说明潭江中游的水质恶化趋势较为显著。潭江下游 7 项水质参数中 COD_{Mn}、COD 和 NH₃-N 质量浓度呈下降趋势,并且都是显著下降;另外 4 项质量浓度呈上升趋势,而且 DO 质量浓度表现出显著上升趋势,说明潭江下游的水质无明显恶化趋势。

表 2 潭江水质参数变化趋势 M-K 趋势检验 Z 值
Table 2 The Z values in M-K test of change trend of water quality parameters in Tanjiang River

位置	DO	COD _{Mn}	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TP	TN
上游	0.52	-0.87	1.65	-0.10	2.13 *	3.05 **	4.28 **
中游	-1.85	3.11 **	1.89	2.06 *	-2.76 **	1.73	2.47 *
下游	2.27 *	-2.97 **	-2.22 *	0.94	-2.55 *	0.08	1.89

注: *、** 分别表示通过 0.05 和 0.01 的显著性水平检验。

根据潭江水质治理目标,以 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅱ类标准计算潭江上、中、下游的水质综合污染指数,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,潭江上游的水质综合污染指数在阈值线以

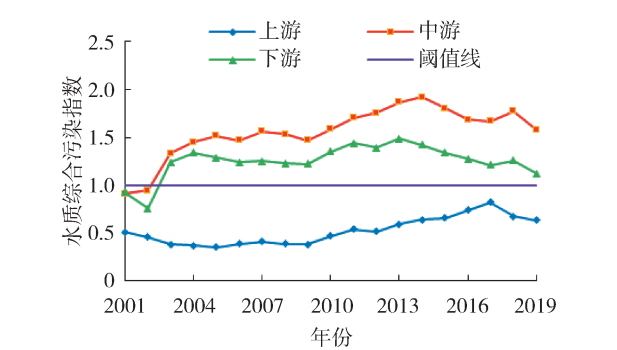


图 3 潭江干流水质综合污染指数变化
Fig.3 Change of comprehensive pollution index of water quality in Tanjiang River

下,但整体呈上升趋势,表明潭江上游的水污染较轻但有一定的恶化趋势。潭江中、下游的水质综合污染指数变化过程基本一致,都表现为“先升后降”的变化过程,而且除 2001 年和 2002 年外,其余年份的水质综合污染指数均大于 1,但是中游的水质综合污染指数大于下游,表明潭江中、下游水污染较上游严重。

3.2 影响水质变化的参数识别

为识别影响水质变化的主要参数,对潭江上、中、下游 7 项水质参数进行了主成分分析,结果如表 3 所示。从表 3 可知,潭江上游水质参数的前 3 个主成分的特征值大于 1,第 4、5 个主成分的特征值接近 1,且此时前 5 个主成分的累计贡献率为 86%,大于阈值 85%,表明前 5 个主成分已具备表征原水质参数主体信息的能力;而潭江中游水质参数的前 4 个主成分的累计贡献率为 89%,下游水质参数的前 5 个主成分的累计贡献率也已大于阈值 85%,表明它们均已能反映原水质参数的主体信息。

表 3 潭江水质参数主成分的特征值与贡献率
Table 3 Eigenvalues and contribution rate of principal components of water quality parameters in Tanjiang River

主成分	特征值			贡献率/%		
	上游	中游	下游	上游	中游	下游
1	2.03	2.76	2.75	29	39	39
2	1.05	1.31	1.05	15	19	15
3	1.03	1.11	1.04	15	16	15
4	0.96	1.07	1.03	14	15	15
5	0.94	0.61	1.02	13	9	15
6	0.93	0.08	0.09	13	1	1
7	0.06	0.05	0.01	1	1	0

分别选取潭江上、中、下游水质参数对应的前 5、前 4、前 5 个主成分计算其主成分荷载,结果如表 4 所示。综合表 3 和表 4 可知,潭江上游水质参数的第 1 主成分的贡献率为 29%,COD 和 BOD₅ 是其荷载较大的两个水质参数,且荷载大小基本一致,表明两者在第 1 主成分中的重要性相当,而第 2 至第 5 主成分的贡献率均为 15% 左右,相应荷载最大的

表 4 潭江水质参数主成分荷载
Table 4 Load of principal components of water quality parameters in Tanjiang River

水质参数	上游					中游				下游				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
DO	0.03	0.94	-0.11	-0.25	0.05	-0.06	-0.13	0.98	-0.14	-0.07	-0.13	0.97	-0.11	0.14
COD _{Mn}	0.27	0.24	-0.20	-0.16	0.19	-0.25	0.88	-0.17	0.30	0.20	0.28	-0.12	0.93	-0.05
COD	0.93	0.05	0.05	0.09	0.27	-0.49	0.48	-0.19	-0.12	-0.01	0.91	-0.15	0.30	-0.22
BOD ₅	0.94	-0.01	0.04	0.12	0.17	0.08	0.18	-0.14	0.97	-0.03	-0.18	0.14	-0.05	0.97
TN	0.40	0.05	-0.05	0.20	0.87	0.94	-0.14	0.14	0.05	0.94	0.23	-0.05	0.22	-0.01
NH ₃ -N	0.17	-0.30	0.16	0.89	0.19	0.94	-0.10	-0.20	0.09	0.96	-0.16	0.07	0.13	0.03
TP	0.06	-0.10	0.97	0.13	-0.04	-0.81	0.46	0.09	0.04	-0.95	0.03	0.16	0.01	0.08

注:PC1~PC5 分别代表第 1~5 主成分。

水质参数分别是 DO、TP、NH₃-N 和 TN,说明主导潭江上游水质变化的水质参数是 COD、BOD₅、DO、TP、NH₃-N 和 TN。类似地,可知主导潭江中游水质变化的水质参数是 TN、NH₃-N、COD_{Mn}、DO 和 BOD₅,而潭江下游水质变化受所有 7 项水质参数的共同主导。

3.3 水质变化的驱动因子

水质变化的驱动因子有很多,可根据因子的属性将其分为自然因子和人为因子两大类^[16,22-23],其中影响水质变化的自然因子主要包括降水量、气温、水温、pH 值、土地利用类型以及风速等;人为因子主要包括人口、社会经济发展水平以及污染物排放量等。考虑数据的代表性及可靠性,本文选取人口和 GDP 作为人为因子的典型代表,选取降水量、森林覆盖率、水温和 pH 值作为自然因子的典型代表。利用选取的驱动因子与潭江的水质参数进行相关性分析,结果如表 5~7 所示。

从表 5 可以发现,就驱动因子的角度来看,人口与除 DO 及 COD_{Mn}外的其余 5 项水质参数均呈显著

相关关系,GDP 只与 TP 和 TN 显著正相关,表明人为因子中,人口对潭江上游水质的影响大于 GDP,即人口是影响水质变化的主要人为因子。对于自然因子而言,降水量与所有水质参数的相关性均没通过显著性检验,森林覆盖率与除 DO、COD_{Mn} 和 NH₃-N 外的其余水质参数均呈显著正相关关系,水温与 BOD₅和 TP 显著正相关,pH 值除与 DO 显著正相关外,与其他水质参数无显著相关关系,表明在自然因子中,森林覆盖率是影响水质变化的主要驱动因子。可见人口与森林覆盖率是影响潭江上游水质变化的主要驱动因子。

同样地,由表 6、表 7 可知,在人为因子中,人口、GDP 是影响潭江中、下游水质变化的主要驱动因子;而在自然因子中,森林覆盖率与水温是影响潭江中、下游水质变化的主要驱动因子。

对比表 5~7 的结果可知,潭江上、中、下游有着影响水质变化的共同驱动因子,即人口和森林覆盖率,表明生活污水排放和土地利用类型等对流域水

表 5 潭江上游水质参数与驱动因子的相关性检验

Table 5 Correlation test of water quality parameters and driving factors in the upper reaches of Tanjiang River													
驱动因子 (水质参数)	人口	GDP	降水量	森林 覆盖率	水温	pH 值	DO	COD _{Mn}	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TP	TN
人口	1.00												
GDP	0.95 ***	1.00											
降水量	0.16	0.19	1.00										
森林覆盖率	0.43 *	0.53 *	-0.25	1.00									
水温	0.20	0.25	0.23	0.11	1.00								
pH 值	0.49 *	0.51 *	0.12	0.08	0.14	1.00							
DO	0.31	0.20	-0.36	0.06	-0.01	0.59 **	1.00						
COD _{Mn}	-0.06	-0.24	-0.22	-0.05	-0.06	-0.37	0.10	1.00					
COD	0.46 *	0.33	0.12	0.41 *	0.41 *	0.02	0.08	0.40	1.00				
BOD ₅	0.40 *	0.33	-0.06	0.49 *	0.46 *	0.13	0.14	0.36	0.93 ***	1.00			
NH ₃ -N	0.53 *	0.38	-0.33	0.34	-0.09	0.20	0.41 *	0.36	0.68 ***	0.60 **	1.00		
TP	0.87 ***	0.86 ***	0.21	0.55 *	0.48 *	0.20	-0.22	0.12	0.55 *	0.53 *	0.47 *	1.00	
TN	0.71 **	0.87 ***	0.33	0.54 *	0.35	0.22	-0.32	-0.42 *	0.06	0.07	-0.02	0.74 ***	1.00

注: *、**、*** 分别表示通过了 0.1、0.05 和 0.01 的显著性水平检验,下同。

表 6 潭江中游水质参数与驱动因子的相关性检验

Table 6 Correlation test of water quality parameters and driving factors in the middle reaches of Tanjiang River													
驱动因子 (水质参数)	人口	GDP	降水量	森林 覆盖率	水温	pH 值	DO	COD _{Mn}	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TP	TN
人口	1.00												
GDP	0.95 ***	1.00											
降水量	0.16	0.19	1.00										
森林覆盖率	0.43 *	0.53 *	-0.25	1.00									
水温	0.34	0.52 *	0.21	0.46 *	1.00								
pH 值	0.27	0.19	-0.15	0.23	0.19	1.00							
DO	-0.31	-0.48 *	-0.43 *	-0.14	-0.46 *	0.21	1.00						
COD _{Mn}	0.77 **	0.69 **	-0.17	0.53 *	0.18	0.37	-0.20	1.00					
COD	0.58 *	0.50 *	-0.04	0.42	0.04	0.17	-0.25	0.68 **	1.00				
BOD ₅	0.55 *	0.55 *	0.12	0.33	0.43 *	0.32	-0.21	0.51 *	0.27	1.00			
NH ₃ -N	-0.60 **	-0.72 **	0.03	-0.68 **	-0.55 *	-0.07	0.30	-0.41 *	-0.32	-0.04	1.00		
TP	0.24	0.47 *	0.07	0.44 *	0.50 *	-0.14	-0.66 **	0.13	-0.14	0.43 *	-0.24	1.00	
TN	0.68 **	0.54 *	0.02	0.50 *	0.17	0.30	-0.02	0.79 ***	0.81 ***	0.14	-0.49 *	-0.19	1.00

表7 潭江下游水质参数与驱动因子的相关性检验

Table 7 Correlation test of water quality parameters and driving factors in the lower reaches of Tanjiang River

驱动因子 (水质参数)	人口	GDP	降水量	森林 覆盖率	水温	pH 值	DO	COD _{Mn}	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TP	TN
人口	1.00												
GDP	0.95***	1.00											
降水量	0.16	0.19	1.00										
森林覆盖率	0.43*	0.53*	-0.25	1.00									
水温	0.17	0.35	0.37	0.29	1.00								
pH 值	-0.08	-0.20	-0.09	0.04	-0.34	1.00							
DO	0.59**	0.58**	-0.30	0.35	-0.01	0.22	1.00						
COD _{Mn}	-0.64**	-0.60**	0.17	-0.19	0.19	-0.03	-0.70***	1.00					
COD	-0.54*	-0.74**	-0.40	-0.46*	-0.70***	0.42*	-0.32	0.57*	1.00				
BOD ₅	0.31	0.30	0.18	0.21	0.04	-0.20	0.20	-0.08	-0.41*	1.00			
NH ₃ -N	-0.57*	-0.74**	-0.35	-0.49*	-0.69**	0.34	-0.26	0.21	0.91***	-0.24	1.00		
TP	-0.01	0.16	-0.15	0.38	0.21	0.26	0.24	0.10	-0.40	0.03	-0.28	1.00	
TN	0.75**	0.60**	0.05	0.35	0.06	0.08	0.43*	0.01	-0.10	0.30	-0.28	0.09	1.00

质有较大的影响,这与已有的研究结果^[16,24-25]一致。值得注意的是,虽然潭江上、中、下游有着影响水质变化的共同驱动因子,但也存在差异,具体表现为影响潭江中、下游水质变化的驱动因子除人口和森林覆盖率外,还包括 GDP 和水温,说明相比于上游,潭江中、下游水质变化的影响因素更复杂。

本文研究发现,潭江上游的 NH₃-N 与人口显著正相关,与 GDP 正相关,但并不显著;而中、下游 NH₃-N 与人口和 GDP 均呈显著负相关关系,表明相比于上游,潭江中、下游的 NH₃-N 与人口之间的关系受到了其他因素的影响,因为相比于上游,潭江中、下游地区的城镇更密集,人口更多、密度更大,经济社会发展水平更高,人类及其社会经济活动对水质的影响更大^[26]。

此外,已有研究表明,水质参数之间同样存在一定的相关关系^[27-30]。本文也有同样的发现,如潭江中游的 DO 与 TP 显著负相关,潭江下游的 DO 与 TN 显著正相关,表明水质参数间的相互作用也会影响水质变化,这从侧面反映出了水质变化驱动机理和影响要素的复杂性。

4 结 论

a. 潭江干流不同水质参数的年际变化差异较大。从整体上看,潭江上游的水质最好,但有一定的恶化趋势;下游的水质次之,且无明显的恶化趋势;中游的水质最差,而且恶化趋势较为显著。

b. 潭江上、中、下游主导水质变化的水质参数并不完全一致,上游水质变化的主导水质参数是 COD 和 BOD₅,中游为 TN 和 NH₃-N,下游则是 TN、NH₃-N 和 TP。潭江中、下游存在主导水质变化的共同参数,即 TN 和 NH₃-N。

c. 人口和森林覆盖率是影响潭江上游水质变

化的主要驱动因子,而影响潭江中、下游水质变化的驱动因子除人口和森林覆盖率外,还包括 GDP 和水温;受人类因素的影响,潭江中、下游水质变化与自然驱动因子之间的关系有所改变。

参考文献:

- [1] NOVOTNY V. Water quality: diffuse pollution and watershed management[M]. New York: Wiley, 2002.
- [2] 于松延,徐宗学,武玮,等. 北洛河流域水质空间异质性及其对土地利用结构的响应[J]. 环境科学学报, 2014, 34(5):1309-1315. (YU Songyan, XU Zongxue, WU Wei, et al. Spatial variation of water quality and its response to landuse in the Beiluo River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(5):1309-1315. (in Chinese))
- [3] ZIELIŃSKI M, DOPIERALSKA J, BELKA Z, et al. Sr isotope tracing of multiple water sources in a complex river system, Noteć River, central Poland [J]. Science of the Total Environment, 2016, 548/549:307-316.
- [4] ROEBELING P C, CUNHA M C, ARROJA L, et al. Abatement vs. treatment for efficient diffuse source water pollution management in terrestrial-marine systems [J]. Water Science & Technology, 2015, 72(5):730-737.
- [5] CHEN Q, MEI K, DAHLGREN R A, et al. Impacts of land use and population density on seasonal surface water quality using a modified geographically weighted regression[J]. Science of the Total Environment, 2016, 572:450-466.
- [6] CHEN D, HU M, GUO Y, et al. Modeling forest/agricultural and residential nitrogen budgets and riverine export dynamics in catchments with contrasting anthropogenic impacts in eastern China between 1980-2010[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2016, 221:145-155.
- [7] VANE C H, BERIRO D J, TURNER G H. Rise and fall of mercury(Hg) pollution in sediment cores of the Thames Estuary, London, UK [J]. Earth and Environmental

- Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 2015, 105: 285-296.
- [8] FULAZZAKY M A. Water quality evaluation system to assess the status and the suitability of the Citarum River water to different uses[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 168(1/2/3/4): 669-684.
- [9] KANNAN K, SINHA R K, TANABE S, et al. Heavy metals and organochlorine residues in Ganges River dolphins from India [J]. Marine Pollution Bulletin, 1993, 26 (3): 159-162.
- [10] 张龙军, 夏斌, 桂祖胜, 等. 2005 年夏季环渤海 16 条主要入海河流的污染状况[J]. 环境科学, 2007, 28(11): 2409-2415. (ZHANG Longjun, XIA Bin, GUI Zusheng, et al. Contaminative conditions evaluation of sixteen main rivers flowing into sea around Bohai Sea, in Summer of 2005 [J]. Environmental Science, 2007, 28 (11): 2409-2415. (in Chinese))
- [11] 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(5): 838-842. (ZHAO Jie, XU Zongxue, LIU Xingcai, et al. Source apportionment in the Liao River Basin [J]. China Environmental Science, 2013 (5): 838-842. (in Chinese))
- [12] 龚亚龙, 黄聪, 黄雷, 等. 茅洲河流域表层沉积物重金属生态风险评价 [J]. 吉首大学学报 (自然科学版), 2016, 37 (4): 35-39. (GONG Yalong, HUANG Cong, HUANG Lei, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of Maozhou River [J]. Journal of Jishou University (Natural Sciences Edition), 2016, 37(4): 35-39. (in Chinese))
- [13] 李艳静, 汪光, 李开明, 等. 潭江表层沉积物中多环芳烃分布特征及其生态风险评价 [J]. 环境科学与技术, 2014, 37 (2): 167-173. (LI Yanjing, WANG Guang, LI Kaiming, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from Tanjiang River [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(2): 167-173. (in Chinese))
- [14] 陈伟涛. 潭江干流水质时空变化规律分析 [J]. 广东水利水电, 2011(5): 43-45. (CHEN Weitao. Analysis of the trend of water quality in the Tanjiang River [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2011(5): 43-45. (in Chinese))
- [15] 唐廉, 胡晓辉, 权冠中, 等. 潭江流域水质时空分布特征及其与土地利用的相关性分析 [J]. 地球与环境, 2018, 46 (4): 364-372. (TANG Lian, HU Xiaohui, QUAN Guanzhong, et al. Spatiotemporal distribution of water quality in the Tanjiang River and its correlation with the land use [J]. Earth and Environment, 2018, 46(4): 364-372. (in Chinese))
- [16] 高伟, 陈岩, 徐敏, 等. 抚仙湖水质变化 (1980—2011 年) 趋势与驱动力分析 [J]. 湖泊科学, 2013, 25 (5): 635-642. (GAO Wei, CHEN Yan, XU Min, et al. Trend and driving factors of water quality change in Lake Fuxian (1980-2011) [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25 (5): 635-642. (in Chinese))
- [17] 张鹏, 逢勇, 石成春, 等. 闽江下游水质变化趋势分析 [J]. 水资源保护, 2018, 34 (1): 64-69. (ZHANG Peng, PANG Yong, SHI Chengchun, et al. Analysis of change trend of water quality in Minjiang River downstream [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (1): 64-69. (in Chinese))
- [18] 张妹琪, 张洪波, 辛琛, 等. 水文序列趋势及形态变化的表征方法 [J]. 水资源保护, 2019, 35 (6): 58-67. (ZHANG Shuqi, ZHANG Hongbo, XIN Chen, et al. A method for characterizing trends and morphological changes of hydrological series [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 58-67. (in Chinese))
- [19] 富天乙, 邹志红, 王晓静. 基于多元统计和水质标识指数的辽阳太子河水质评价研究 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 473-480. (FU Tianyi, ZOU Zhihong, WANG Xiaojing. Water quality assessment for Taizi River watershed in Liaoyang section based on multivariate statistical analysis and water quality identification index [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34 (2): 473-480. (in Chinese))
- [20] 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. (ZHOU Ji, GUAN Weisheng, FU Lintao. Water quality assessment and pollution source analysis of Xi'an river based on multivariate statistics [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 79-84. (in Chinese))
- [21] 孟雪娇, 欧阳通, 徐汉文. 大亚湾溶解氧分布特征及环境影响因子研究 [J]. 海洋技术学报, 2016, 35 (3): 98-101. (MENG Xuejiao, OUYANG Tong, XU Hanwen. Study on the distribution characteristics of dissolved oxygen and its environmental impact factors in the Daya Bay, Guangdong Province, China [J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(3): 98-101. (in Chinese))
- [22] 陆志华, 李勇涛, 钱旭, 等. 考虑太湖水质指标的流域骨干工程调度方案 [J]. 水资源保护, 2018, 34 (6): 44-48. (LU Zhihua, LI Yongtao, QIAN Xu, et al. Scheduling scheme of Taihu Basin key projects considering water quality index of Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 44-48. (in Chinese))
- [23] 黄彬彬, 严登华, 李卿鹏. 赣江尾间河段水环境演变规律与驱动因子分析 [J]. 人民长江, 2019 (增刊 2): 26-29. (HUANG Binbin, YAN Denghua, LI Qingpeng. Analysis of the evolution law and driving factor of water environment in Ganjiang River sink [J]. Yangtze River, 2019 (Sup 2): 26-29. (in Chinese))
- [24] CHEN Qiang, MEI Kun, RANDY A D, et al. Impacts of land use and population density on seasonal surface water quality using a modified geographically weighted regression [J]. Science of the Total Environment, 2016, 572: 450-466.

- [25] ZHOU Ting, WU Jianguo, PENG Shaolin. Assessing the effects of landscape pattern on river water quality at multiple scales; a case study of the Dongjiang River Watershed, China [J]. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 166-175.
- [26] 王娇, 马克明, 张育新, 等. 土地利用类型及其社会经济特征对河流水质的影响[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(1): 57-65. (WANG Jiao, MA Keming, ZHANG Yuxin, et al. Impacts of land use and socioeconomic activity on river water quality[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(1): 57-65. (in Chinese))
- [27] 李艳云, 王作敏. 大辽河口和辽东湾海域水质溶解氧与COD、无机氮、磷及初级生产力的关系[J]. *中国环境监测*, 2006, 22(3): 70-72. (LI Yanyun, WANG Zuomin. The relation among dissolution oxygen(DO) to COD, inorganic nitrogen, reactive phosphate and primary yield-power in the Liaodong gulf and seaport of Daliaohe [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2006, 22(3): 70-72. (in Chinese))
- [28] 张莹莹, 张经, 吴莹, 等. 长江口溶解氧的分布特征及影响因素研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(8): 1649-1654. (ZHANG Yingying, ZHANG Jing, WU Ying, et al. Characteristics of dissolved oxygen and its affecting factors in the Yangtze Estuary[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(8): 1649-1654. (in Chinese))
- [29] 周丹丹, 马放, 董双石, 等. 溶解氧和有机碳源对同步硝化反硝化的影响[J]. *环境工程学报*, 2007, 1(4): 25-28. (ZHOU Dandan, MA Fang, DONG Shuangshi, et al. Influences of DO and organic carbon on simultaneous nitrification and denitrification [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(4): 25-28. (in Chinese))
- [30] 龚春生, 范成新. 不同溶解氧水平下湖泊底泥-水界面磷交换影响因素分析[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(3): 430-436. (GONG Chunsheng, FAN Chengxin. Effect factors analysis of phosphorus exchange across lake sediment-water interface under different dissolved oxygen concentration[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(3): 430-436. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-04-20 编辑: 熊水斌)

(上接第 108 页)

- [10] 刘唱, 刘凌, 张又, 等. 阳澄湖大型底栖动物群落结构和空间分布特征[J]. *水资源保护*, 2017, 33(2): 79-87. (LIU Chang, LIU Ling, ZHANG You, et al. Community structure and spatial distribution of macrozoobenthos in Yangcheng Lake[J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(2): 79-87. (in Chinese))
- [11] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] 许梅, 任瑞丽, 刘茂松. 太湖入湖河流水质指标的年变化规律[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2007, 31(6): 121-124. (XU Mei, REN Ruili, LIU Maosong. Annual changes of water quality in an upstream river of Taihu Lake[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2007, 31(6): 121-124. (in Chinese))
- [13] 施陈江. 东太湖、阳澄西湖外源污染物通量及增殖放流的生态、经济效益[D]. 苏州: 苏州大学, 2011.
- [14] 张新华, 董雅文. 苏州市相城区水环境状况及污染防治对策[J]. *水资源保护*, 2006, 22(1): 73-77. (ZHANG Xinhua, DONG Yawen. Water environment conditions and measures for pollution prevention and control in Xiangcheng District of Suzhou City[J]. *Water Resources Protection*, 2006, 22(1): 73-77. (in Chinese))
- [15] 吴菲, 李健, 吴俊锋, 等. 近年来阳澄湖污染源分析研究[J]. *污染防治技术*, 2017, 30(6): 38-45. (WU Fei, LI Jian, WU Junfeng, et al. Analysis on pollution sources of Yangcheng Lake in recent years [J]. *Pollution Control Technology*, 2017, 30(6): 38-45. (in Chinese))
- [16] 桂智凡, 薛滨, 姚书春, 等. 阳澄湖水水质现状及原因探讨[J]. *地理科学*, 2011, 31(12): 1487-1492. (GUI Zhifan, XUE Bin, YAO Shuchun, et al. Water quality status and influencing factors of Yangcheng Lake [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(12): 1487-1492. (in Chinese))
- [17] 朱广伟. 太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(5): 439-445. (ZHU Guangwei. Spatio-temporal distribution pattern of water quality in Lake Taihu and its relation with cyanobacterial blooms[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(5): 439-445. (in Chinese))
- [18] 郭鹏程, 王沛芳, 贾锁宝. 河流内源磷释放环境影响因子研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(3): 117-121. (GUO Pengcheng, WANG Peifang, JIA Suobao. Research progress of the environmental impact factors of internal phosphorus loading release in river systems [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2008, 32(3): 117-121. (in Chinese))
- [19] 毛新伟, 仵荟颖, 徐枫. 太湖底泥主要营养物质污染特征分析[J]. *水资源保护*, 2020, 36(4): 100-104. (MAO Xinwei, WU Huiying, XU Feng. Analysis of pollution characteristics of main nutrients in Taihu Lake sediment [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(4): 100-104. (in Chinese))
- [20] 周静, 刘松华. 阳澄湖水水质现状、存在的问题及对策研究[J]. *环境保护与循环经济*, 2017, 37(8): 47-51. (ZHOU Jing, LIU Songhua, The current situation, problems and countermeasures of water quality in Yangcheng Lake [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2017, 37(8): 47-51. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-04-23 编辑: 熊水斌)