

广东省入海河流水质变化时空分析及影响因素

陈钰莹^{1,2}, 熊利天^{1,3}, 李全聪¹, 苏泽林¹, 王广娜¹, 谢丽纯^{1*}

¹广东财经大学地理与环境经济学院, 广东 广州

²广州大学地理科学与遥感学院, 广东 广州

³广东海洋大学海洋与气象学院, 广东 湛江

收稿日期: 2025年3月10日; 录用日期: 2025年4月19日; 发布日期: 2025年4月29日

摘要

入海河流水质分析对广东省治理近岸海域水质, 实现经济社会与生态环境协调发展有重要意义。本研究选取广东省27个入海河流监测断面, 基于2016~2020年水质监测数据, 分析了该地区入海河流水质演变特征和影响因素。结果表明, 5年间广东省入海河流水质呈现先恶化后改善的趋势, 多数水质指标的超标断面主要集中在4~6月和10~12月。练江在广东省入海河流中污染最严重, 深圳河、淡水河和寮头河污染较严重, 污染物以NH₃-N、TP为主。自然因素中的降水、气温是影响河流水质的间接因素, 社会经济因素中的第一产业占比、工业废水及生活污水排放量、化肥农药施用量、城镇污水处理率与河流水质呈显著的相关关系。研究结果可为揭示广东省海岸带环境治理成果及指导后续治理举措提供参考。

关键词

广东省, 入海河流水质, 时空变化, 影响因素

Spatiotemporal Analysis and Influencing Factors of Water Quality Changes in Coastal Rivers of Guangdong Province

Yuying Chen^{1,2}, Litian Xiong^{1,3}, Quancong Li¹, Zelin Su¹, Guangna Wang¹, Lichun Xie^{1*}

¹Academy of Geography and Environmental Economics, Guangdong University of Finance and Economics, Guangzhou Guangdong

²Academy of Geographic Sciences and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou Guangdong

³Academy of Oceanography and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang Guangdong

Received: Mar. 10th, 2025; accepted: Apr. 19th, 2025; published: Apr. 29th, 2025

文章引用: 陈钰莹, 熊利天, 李全聪, 苏泽林, 王广娜, 谢丽纯. 广东省入海河流水质变化时空分析及影响因素[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(4): 639-653. DOI: 10.12677/aep.2025.154074

Abstract

The analysis of water quality in seaward rivers holds significant implications for Guangdong Province in managing coastal marine water quality and achieving coordinated socio-economic and ecological development. This study examined 27 monitoring sections along coastal rivers in Guangdong, utilizing water quality monitoring data spanning 2016~2020 to investigate temporal variations and driving factors of fluvial water quality dynamics. The results revealed that water quality in Guangdong Province's coastal rivers exhibited a trend of initial deterioration followed by improvement over the five-year study period. Notably, the majority of non-compliant sections for key water quality parameters were concentrated during the months of April-June and October-December. Among the coastal rivers in Guangdong, the Lianjiang River was identified as the most severely polluted, with the Shenzhen River, Dan'ao River, and Zhaigang River also showing significant pollution levels. The primary pollutants in these rivers were $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP. The analysis identified precipitation and temperature as indirect drivers of river water quality within natural factors, while socioeconomic indicators including the proportion of primary industries, industrial wastewater discharge, domestic sewage emissions, agrochemical application rates, and municipal wastewater treatment efficiency demonstrated statistically significant correlations ($p < 0.05$) with aquatic quality parameters. These findings provide critical insights for evaluating coastal environmental governance efficacy in Guangdong Province and formulating targeted management strategies for marine-terrestrial coordination.

Keywords

Guangdong Province, Coastal River Water Quality, Spatiotemporal Change, Influencing Factors

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海岸带在陆海相互作用、全球物质循环和气候变化中扮演着极为重要的角色，该区域集中了全球约60%的城市和人口，是全球生态系统中最有价值和最易受人类影响的地区之一。随着我国工业化的不断发展以及近海城市人类活动的影响日益加大，各种工农业和城市生活污水向入海河流排放量逐渐增加，多种陆源污染物随着入海河流流入海洋，导致我国近岸海域水质状况愈发严重，海洋生态压力增加[1]。据研究，海洋中80%的污染物来自陆源的输入，农业、港口活动、城市和工业发展、采矿、渔业和水产养殖等都是威胁沿海与海洋生境的重要污染源[2]。入海河流是入海污染物的主要通道[3]，大量陆源污染物直接排入河流，以河流为纽带向河口、近岸海域转移、汇聚，从而影响海洋的生态环境。入海河流的水质状况直接关系到海洋环境状况，其水质状况越来越引起人们的重视。

国内外针对入海河流水质的研究多集中在水质评价、水质变化以及水质影响因素3个方面。关于水质评价的研究发端于国外，德国相关学者在1900s初提出了生物学的水质评价分类方法，不久之后英国学者根据河流水质情况采用了化学指标对河流水质进行评价分类[4]。1960s以来，学者们提出了数十种水质指数[5]。我国关于水质评价的研究起步较晚，始于1970s的《北京西郊环境质量评价研究》，现行标准为《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)。同时许多学者也在广泛开展着水质评价研究，涉及到地下水[6]、湖泊水[7]、灌溉用水[8]、饮用水[9]、河流水[10]等诸多类型，运用到的方法主要有单因子评价

法、模糊数学评价法[11]、综合污染指数评价法[12]、灰色系统评价法[13]等,本研究采用了单因子和综合污染指数对入海河流水质进行评价。水质变化研究的尺度包含时间尺度和空间尺度两种,其中时间尺度主要为年际和年内两个时间跨度。陈昆仑等研究表明 1985~2010 年间珠江广东城区段水质演化大致分为四个阶段,分别为水体污染阶段(1985~1990 年)、污染加剧阶段(1991~2000 年)、水质波动阶段(2002~2005 年)以及水质改善阶段(2006~2010 年)[14]。影响水质的因素可分为自然因素和人为因素两类。一般而言,在原生自然环境下的水体,其水质受自然因素的影响较大,在次生环境下的水体,其水质受人为因素的影响较大。季定民等运用相关性分析表明,2004~2009 年影响宿州市沱河段水质的主要自然因素为径流量等河流水文要素,人为因素主要为点源(污染较大的传统企业)污染[15]。

作为我国三大经济中心区域之一,华南沿海地区在过去几十年间向邻近海域输入了大量的污染物,使得该地区尤其是广东沿海,成为全球受人类活动影响最严重的区域之一[16][17]。广东省境内共有 1314 条河流,其中大部分属于珠江流域并最终汇入南海。在快速的经济增长和城市进程中这些河流水质显著恶化,对海岸带的生态环境产生了深远的不良影响[18]。为应对这一挑战,亟需深入分析广东省入海河流的污染特征并探讨影响因素,为制定科学防治措施奠定基础,为海岸带环境的治理提供参考。因此,本文基于广东省 27 条入海河流 2016~2020 年的断面水质监测数据,选择具有明确指示意义的溶解氧(DO)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)和重金属等指标,系统研究了近 5 年来广东省近岸海域入海河流水质的演化过程、时空变化特征及污染物来源。研究结果不仅可为流域治理和人类活动对生态环境作用机制研究提供一定的参考,还可为生态环境保护、海岸带管理、资源的可持续利用和沿海渔业发展提供科学依据。

2. 研究区域与数据

2.1. 研究区概况

研究地点位于广东省(20°13'N~25°31'N, 109°39'E~117°19'E),该区域地处南岭以南,南海之滨。广东省地形总体呈现北高南低的特征,地貌类型复杂多样,兼具平原、丘陵、谷地、山地等地形,其中山地丘陵遍布广东省的东部和北部,所占面积接近全省土地面积的 2/3,平原面积相对较小,主要分布在南部和西部,仅占全省总面积的 1/5。气候类型主要为热带季风气候和亚热带季风气候两种,是我国光、热和水资源最丰富的省区之一,雨热同期,夏季长且降水丰沛,冬季较短,少霜日。境内河流众多,全省有数百条河流,这些河流分属于珠江、韩江、粤东沿海和粤西沿海水系。广东省河流具有汛期长、流量大但季节变化明显、无封冻期、河流泥沙含量较大等特点。

2.2. 数据来源及处理

文中采用的入海河流监测数据来源于广东省生态环境厅江河水质监测(<http://gdee.gd.gov.cn/jhszl/>),选取 2016~2020 年包括莲花山、洪奇沥水道、蕉门水道、珠海大桥等 27 个断面(见图 1)的 pH 值、溶解氧、高锰酸钾指数、生化需氧量等 21 项水质指标逐月监测数据。对水质的评价参考了生态文明建设相关政策、法律法规和中华人民共和国生态环境部《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)。气温、降水量等自然因素数据以及三次产业占比、工业废水排放量、生活污水排放量、城镇污水处理率、化肥农药施用量等社会经济数据来源于广东省相关地级市的统计年鉴。

在对地表河流水质的评价中,根据水质评价选取原则,选取对研究区域中生态环境及人体健康影响较大的指标。通过对 2016~2020 年广东省 27 条入海河流的水质指标进行处理,对比地表水环境质量标准基本项目标准限值,以Ⅲ类水为最低标准。为保证数据分析的准确性和有效性,最终选取了 DO(溶解氧)、COD_{Mn}(高锰酸钾指数)、BOD(生化需氧量)、COD(化学需氧量)、TP(总磷)、NH₃-N(氨氮)这 6 项水质

指标重点进行分析讨论。

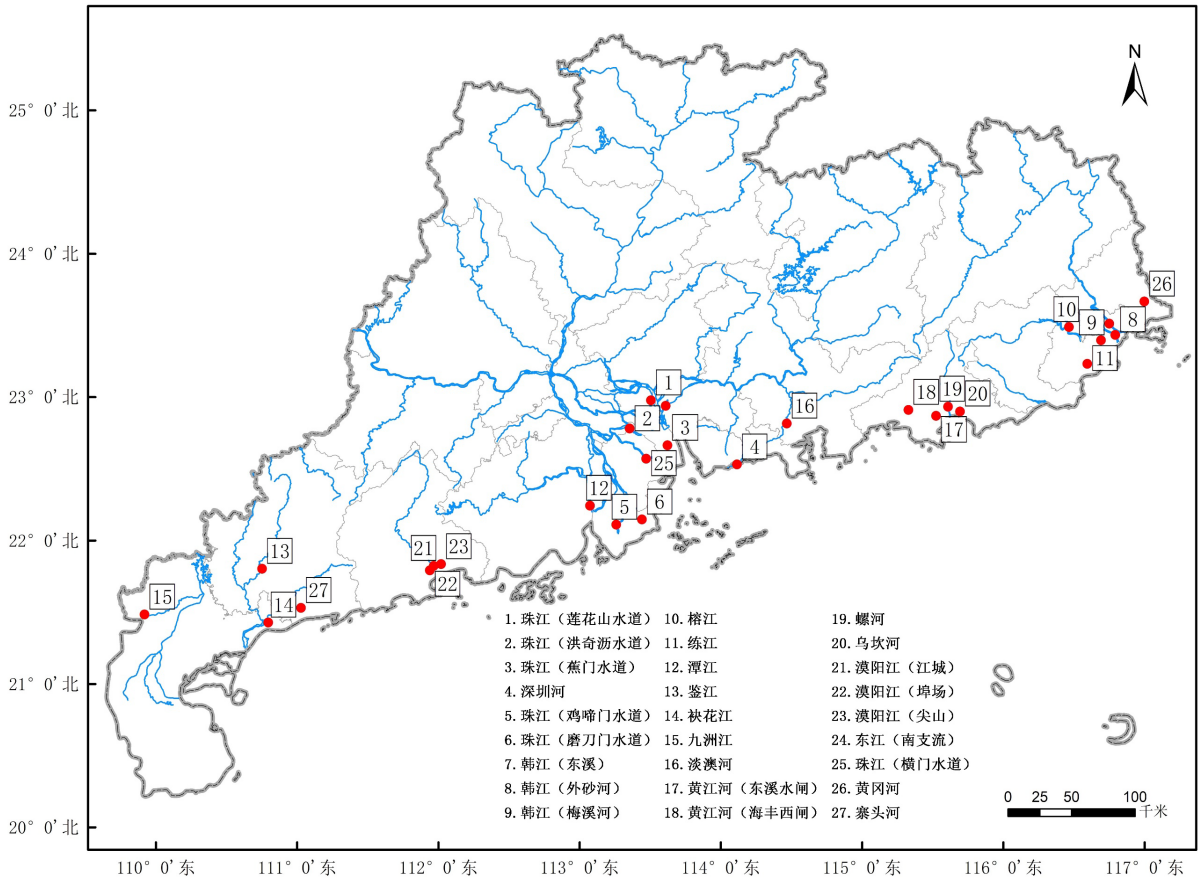


Figure 1. Location map of monitoring sections for coastal rivers of Guangdong Province

图 1. 广东省入海河流监测断面位置图¹

3. 研究方法

3.1. 单因子评价法

单因子污染指数又称某污染物的分指数，用于单项污染物的评价。通过用各种污染物的相对污染值进行数学归纳和统计得出一个数值，用以代表水质的污染程度，来作为水质污染分级和分类的依据[19]。其计算通式为：

$$P_i = \frac{C_i}{C_{0i}} \quad (1)$$

式中： P_i 为污染物的评价指数； C_i 为*i*污染物的实测浓度值，单位为 mg/L； C_{0i} 为*i*污染物评价标准的浓度值，单位为 mg/L。

当污染物分指数 > 1 时，表明该项污染物浓度超过相应规定的标准值，无法达到水质标准。根据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)规定，入海河流河口水域水质应不低于Ⅲ类水质。因此，在单因子评价过程中以Ⅲ类水质标准为单项指标的标准值，当单项指标的指数无法满足这个标准值时，则认为河流在该项指标下是属于超标的。

¹注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3333 号的标准地图制作，底图无修改。

3.2. 综合污染指数法

综合污染指数评价法是指采用单因子评价法对所有指标进行计算,再统计并计算全部污染指数的算术平均值,得出代表水体污染程度的综合污染指数[20]。该评价法能够反映水体整体的污染状况,有效弥补了单因子污染指数评价法的不足。

其计算公式为:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

式中: P 为综合污染指数, n 为进行评价的污染物指标总数, P_i 为单因子污染指数。

综合污染指数 $P \leq 0.20$ 代表水质状况好; $0.20 < P \leq 0.40$ 代表水质状况较好; $0.40 < P \leq 0.70$ 代表水体轻度污染; $0.70 < P \leq 1.00$ 代表水体中度污染; $1.00 < P \leq 2.00$ 代表水体重度污染; $P \geq 2.00$ 代表水体严重污染。

3.3. 聚类分析法

聚类分析是研究如何将对象按照多个方面的特征进行综合分类的一种统计方法[21],该方法有效地解决了科学研究中多因素、多指标的分类问题[22]。在目前的实际应用中,系统聚类法和 K 均值聚类法是聚类分析中最常用的两种方法。

3.4. 相关系数分析法

简单相关系数,一般指 Pearson 相关系数,是用于描述两个要素之间相互关系密切程度的统计量[23];本文用简单相关系数来研究广东省入海河流水质与各自然因素和社会经济因素的相关程度,以此找出关联程度较大的因素。

4. 结果与讨论

4.1. 广东省入海河流水质时间变化特征

4.1.1. 入海河流水质年际变化分析

对广东省入海河流 6 项水质指标 DO、COD_{Mn}、COD、BOD、TP、NH₃-N,基于月监测数据进行单因子评价计算并得到每个断面年均值,最后统计 27 个断面的超标数量,2016~2020 年广东省入海河流断面各指标超标断面比例如表 1 所示。2016 年和 2017 年, COD_{Mn} 超标率较低,均为 11.42%,但在 2018~2019 年超标率显著增加,2020 年 COD_{Mn} 超标率回落至 12.24%。2016 年 BOD 的超标率为 12.04%,而 2017 年有所上升,2018 年和 2019 年维持在 14.51%和 28.71%,反映出水体有机污染的严重程度逐年加剧。到 2020 年, BOD 的超标率为 16.57%,显示污染水平略有缓解,但仍高于 2016 年水平。NH₃-N 5 年内超标率逐渐增大,其中 2016 年和 2017 年分别为 17.59%和 16.98%,而后在 2018~2020 年,超标率逐年上升,在 2020 年增加至 41.77%。COD 五年超标率总体呈增长趋势,从 2016 年的 11.73%,到 2017~2019 年的 16.05%~16.9%,在 2020 年超标率显著上升至 27.16%,提示水体中的有机物负荷进一步增加。TP 和 DO 五年内超标率均先增加后减少,其中 TP 在 2017 年达到最大值 23.15%,而后 2018~2020 年逐渐降低,超标比例均在 20%以下。DO 在 2018 年超标率达到了 25%。总的来说,2016~2020 年广东省入海河流水质污染呈现出不同程度的波动,尤其是在 2018~2019 年,多个污染物超标率显著上升,表明水体污染严重。2020 年虽然部分指标出现回落,表情治理措施可能起到一定作用,但 NH₃-N 和 COD 等污染物的超标率仍较高,水质改善任务依然艰巨。

Table 1. Statistics on the proportion of excessive cross sections of coastal rivers of Guangdong Province from 2016 to 2020
表 1. 2016~2020 年广东省入海河流超标断面比例统计

年度	高锰酸钾(COD _{Mn})	生化需氧量(BOD)	氨氮(NH ₃ -N)	化学需氧量(COD)	总磷(TP)	溶解氧(DO)
2016	11.42%	12.04%	17.59%	11.73%	16.98%	17.59%
2017	11.42%	14.51%	16.98%	16.05%	23.15%	20.06%
2018	34.5%	14.51%	22.22%	16.90%	18.21%	25.00%
2019	37.6%	28.71%	34.87%	16.18%	15.76%	22.42%
2020	12.24%	16.57%	41.77%	27.16%	10.78%	16.28%

在单因子评价的基础上,进一步采用综合污染指数对水质指标进行综合评价,得出 2016~2020 年广东省入海河流污染程度占比的变化情况(见图 2)。结果显示,2016~2020 年间,严重污染河流占比总体呈逐年下降趋势,从 2016 年的 7%开始,虽然 2017 年有所回升至 11%,但随后逐渐减少,至 2020 年降至 0%,这一变化趋势表明,5 年来全省入海河流的水质整体得到改善。重度污染河流的占比波动较大,2017 年降至最小值 4%,而 2018 年则达到最大值 22%。中度污染河流占比在此期间先降后升,2020 年回升至 40%。轻度污染河流的占比则呈波动下降趋势,至 2020 年达到最低值 40%。工业废水和生活污水排放可能是影响河流水质的主要因素[24]。

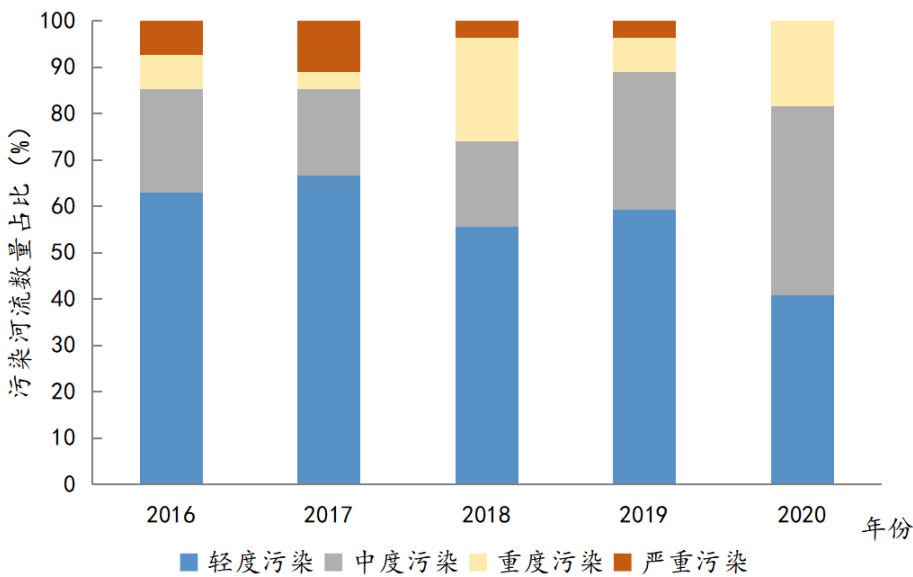


Figure 2. Changes in the proportion of pollution caused by coastal rivers of Guangdong Province from 2016 to 2020

图 2. 2016~2020 年广东省入海河流污染程度占比变化

基于 6 项水质指标,计算广东省 27 条入海河流 5 年内每月的综合污染指数,并根据入海河流所处的地理位置将其划分为粤东、粤西和珠三角地区,最后统计每个地区入海河流断面严重污染和重度污染出现的次数,得到图 3。由图 3 可知,粤东地区入海河流严重污染断面次数先增加后减少,从 2016 年 3 次增加至 2017 年最高 9 次,而后减少,在 2020 年仅 1 次;重度污染出现次数在 2017 年最低 5 次,2020 年最高 12 次。珠三角严重污染断面次数则先增加后减少,从 2017 年最大值 13 次减少至 2020 年珠三角无严重污染断面;重度污染断面出现次数呈先减少后增加趋势,2016 和 2020 年达到最大值 15 次,2019 年为最小值 9 次。粤西严重污染断面次数则不断降低,从 2016 年最大值 13 次,降低至 2019 年最小值仅 2

次,但在2020年有所增加(3次);重度污染断面出现次数呈增加趋势,2016年出现次数最少(5次),到2020年显著增加达到最大值48次,远超其他地区 and 年份。

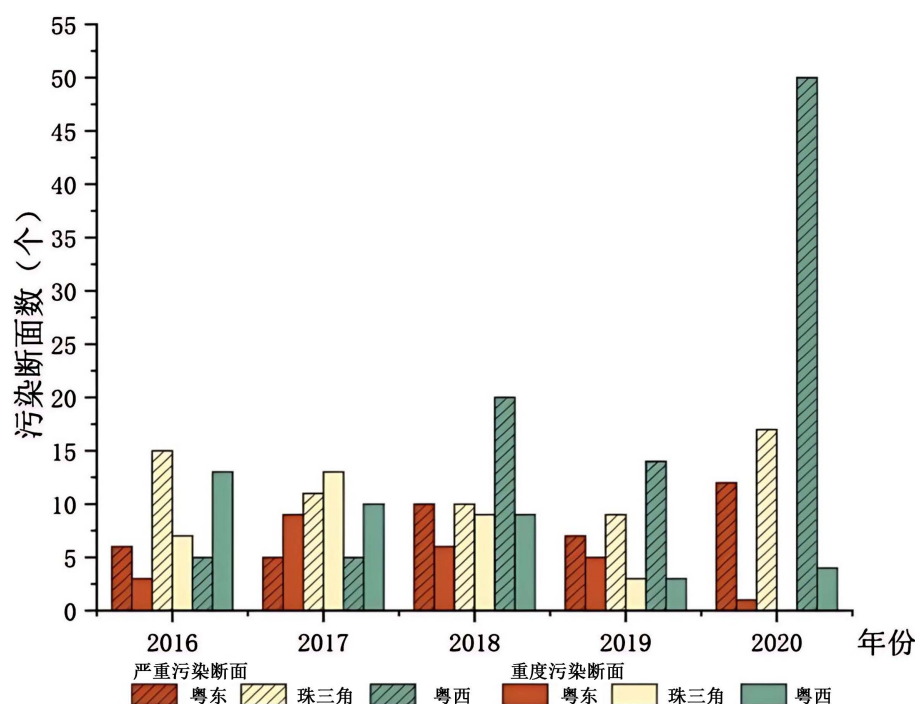


Figure 3. The frequency of occurrence of severe and heavily polluted sections of coastal rivers of Guangdong Province

图3. 广东省入海河流重度及严重污染断面出现次数

4.1.2. 入海河流水质年内变化分析

根据单因子评价结果,广东省入海河流监测断面主要污染指标年均超标断面个数年内分布如图4所示。从整体趋势来看,除DO外,其他水质指标超标断面个数主要集中在4~6月和10~12月。这一现象可能与季风区汛期相对集中有关。4~6月是广东省的汛期,降水量增加,枯水期滞留在农田中的农药和化肥残留等通过地表径流进入河流,导致水质恶化[25]。10~12月降水量较低,河流径流量显著减小,水体自净能力降低,无法有效稀释水中的污染物,导致污染物浓度上升,水质进一步下降[26]。DO的超标断面高值则主要出现在5~10月,3月和11月超标断面个数显著下降。研究表明,溶解氧含量和水温呈现负相关关系[27],因此在夏季水温较高的情况下,水中的溶解氧含量较低,导致超标断面个数增加。整体来看,各个指标的超标断面数呈现波动的变化趋势,特别是 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和COD波动幅度较大,而 COD_{Mn} 、BOD和TP的波动幅度则相对较小。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的超标断面数在5~7月份的波动较大,特别是6月份,超标个数最多,随后逐渐下降,直到10月份再次上升。COD超标断面个数月均达到了5个,高值出现在12月(7个),年内整体呈现增长趋势,其中在2月增长较大,在3~10月处于波动状态。为此,有必要开展入海河流的季节性防控,在春耕(4~6月)和秋冬季(10~12月)强化农业面源管理,限制农业上化肥农药的施用。

广东省入海河流污染程度占比年内变化分析结果表明(见图5),非汛期(10~次年3月)河流污染程度占比较汛期(4~9月)平稳。年内严重污染河流占比整体呈波动状态,在3月达到最大值(11%),可能与该时期临近春耕有关,大量地使用农药和化肥导致营养盐浓度升高,水体的富营养化加重[28]。9、10月无严重污染河流,但其重度污染河流占比为最大值15%,这可能是由于该时期广东省台风灾害频发,大量

来水冲刷河床, 污染物溶入水体, 致使水质变差[29]。中度污染河流占比先增加后减少, 在 5 月占比达到最大值 41%。轻度污染河流占比则是先减少后增大, 最小值出现在 5 月(41%)。

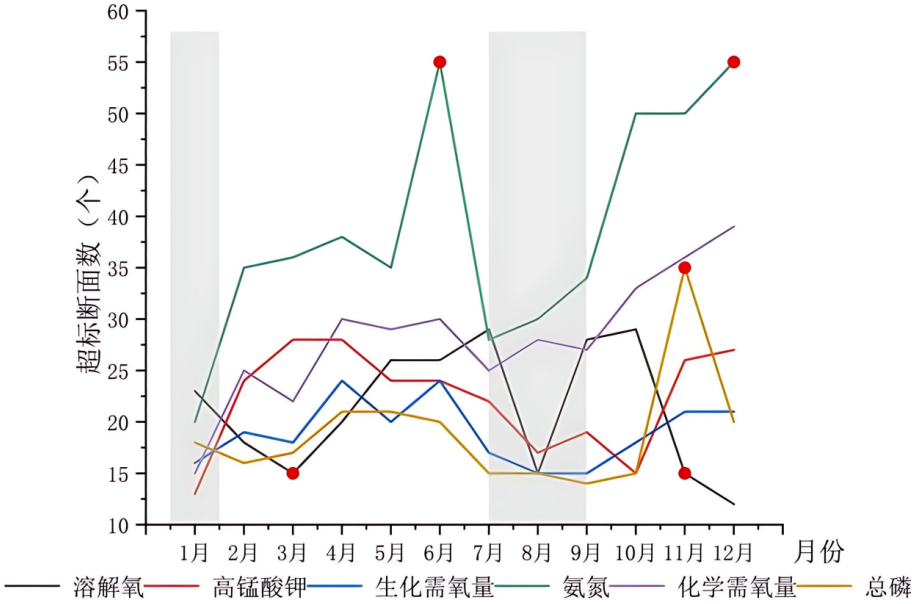


Figure 4. The number of sections in Guangdong Province that exceed the main pollution indicators of coastal rivers within the year
图 4. 广东省入海河流主要污染指标年内超标断面个数

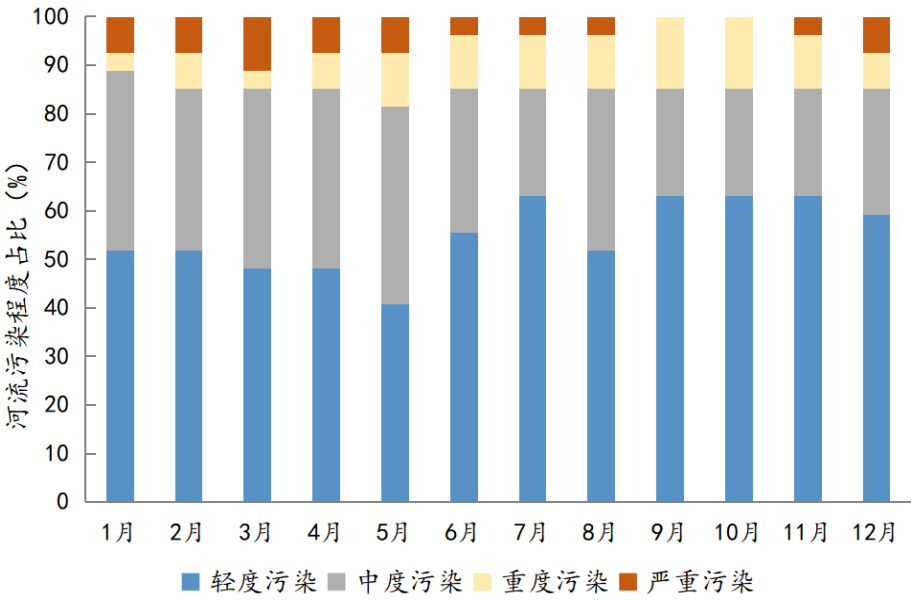


Figure 5. Annual changes in the proportion of pollution in coastal rivers of Guangdong Province
图 5. 广东省入海河流污染程度占比年内变化

由图 6 可知, 关于严重污染断面出现次数, 粤西地区在全年中表现出波动, 尤其在 1 月达到峰值 7 个; 珠三角地区在全年中相对稳定, 但在 2、4、12 月略有增加, 表明这些月份的污染压力有所上升; 粤东地区在全年中变化不大, 其中 1~3、12 月数量相对较大, 达 3 个。关于重度污染断面出现次数, 粤西地区在全年中波动较大, 尤其在 1、2 月和 5 月达到高峰接近 10 个, 表明粤西在这些月份面临更严重的

河流污染问题；珠三角重度污染断面数量相对较低，但在 9 月也出现峰值 7 个；粤东在全年中保持较低水平，但在 4~7 月数量相对较大，达 5 个以上，表明粤东地区的污染情况相对较好，但在特定月份也需关注。总体而言，广东省严重污染断面数量变化相对平稳，受长期稳定因素制约；重度污染断面数量时间变化波动大，受多种复杂因素综合影响。

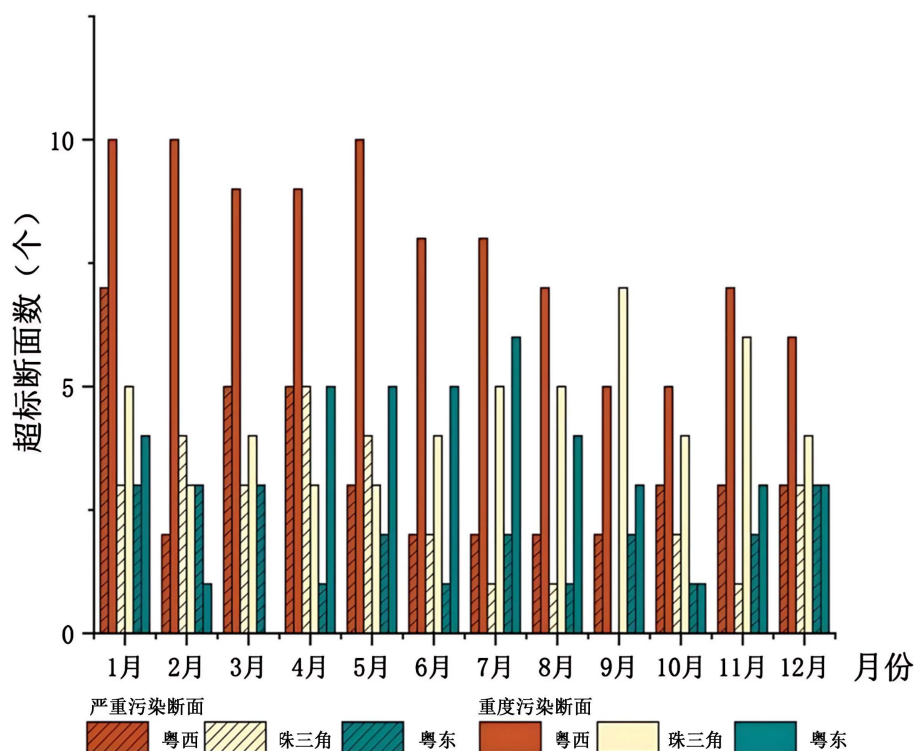


Figure 6. The frequency of occurrence of severe and heavily polluted sections of coastal rivers of Guangdong Province within the year

图 6. 广东省年内入海河流重度及严重污染断面出现次数

4.2. 广东省入海河流水质空间变化特征

利用 SPSS19 软件进行聚类分析，其分组依据为广东省 27 条入海河流断面，所对应的数据为 6 项指标 2016~2020 年各月的监测均值。为了验证聚类结果的有效性，采用逐步判别分析方法以此来分析两组之间的差异性，检验结果表明，判别函数的显著性检验值为 0.00085，小于 0.05，通过显著性检验。聚类分析结果如图 7 所示，可将 27 个断面分为三组，第一组为练江，第二组为深圳河、淡水河和寨头河，第三组为剩余 23 个断面。这表明 2016~2020 年间练江是广东省入海河流中污染最严重的河流，深圳河、淡水河和寨头河污染程度较严重，处于第二等级，其余断面污染程度相对较轻。

在广东省入海河流监测断面位置底图上，根据 6 项主要水质指标，采用单因子评价法制得饼状图，饼状图内扇形大小表示水质指标污染程度，扇形越大污染程度越大，而饼状图大小表示入海河流断面综合污染指数，指数越大圆越大，表示入海河流的污染越严重(见图 8)。广东省部分入海河流的污染情况尤其严重，且主要污染物的类型多样，整体上看入海河流主要污染物为 TP，其次为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。

将广东省划分为粤东、粤西和珠三角地区进行讨论。其中，练江是粤东污染最严重的河流，其污染指标主要为 $\text{NH}_3\text{-N}$ ，超标含量占比最大超过 45%，主要原因可能是水体受到有机物污染。由于人口增长和经济发展，练江流域内遍布了大量纺织印染企业，且污水、固废处理设施建设严重滞后，大量

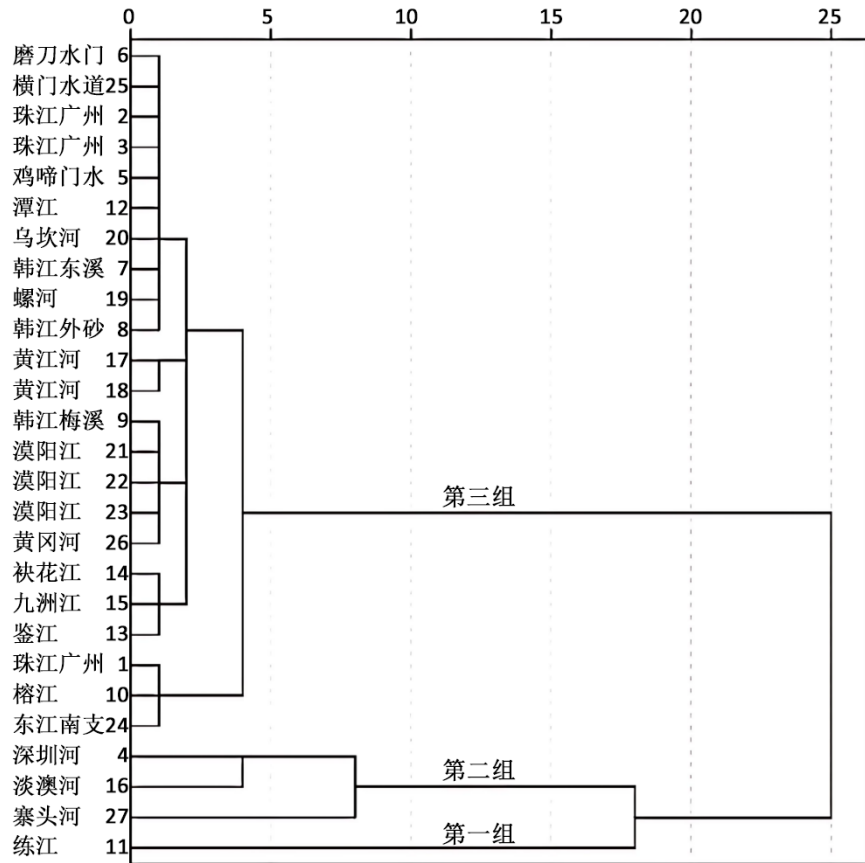


Figure 7. Based on the clustering analysis results of the cross-section system of coastal rivers of Guangdong Province
图 7. 基于广东省入海河流断面系统聚类分析结果

工业废水、生活污水及垃圾直排练江河内，最终导致了练江流域水质年年恶化[30]。粤西主要污染河流是寨头河，主要污染物是 TP，占比超 60%。研究表明，城市污水排放是 TP 的主要来源[31]。寨头河是电白地区一条黑臭水体，由于生活污水及工厂的污水排放不规范导致水体污染。近两年政府积极推进水污染防治攻坚战，出台政策，寨头河的水质已经得到了极大地改善，2020 年综合污染指数为 0.59，TP 占比减少到 10%左右。珠三角主要污染河流是深圳河和淡澳河，污染物以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 为主。深圳河发源于牛尾岭汇入深圳湾，深圳湾为半封闭海湾，潮水的顶托使污染物进入深圳河干流后下泄不畅，水质恢复较慢，是影响深圳河水质的原因之一[32]。淡澳河入海口位于惠州惠阳区，污染极其严重，主要污染物为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。造成污染可能的原因是大量有机物汇入造成富营养化，使河流污染加剧，有机形态营养组分对有害藻华可能产生重要影响，应在富营养化治理中引起重视[33]。除此以外，珠三角地区其他的入海河流较为清洁。因此，需要加强对入海河流中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 的监测，针对练江、深圳河、寨头河等重污染河流实施专项治理，加强入海河流流域的工业废水排放监管，在工厂内推广清洁生产技术。

4.3. 广东省入海河流水质变化影响因素分析

在对广东省入海河流水质的时空变化特征进行分析的基础上，研究水质变化的影响因素，有助于在水生态文明建设的大环境下持续改善广东省入海河流的水质。河流水质的影响因素包括自然因素以及社会经济因素，其中本文选取的自然因素为年平均气温、降水量，选取的社会经济因素有三次产业占比、

工业废水排放量、生活污水排放量、化肥农药施用量、城镇污水处理率。

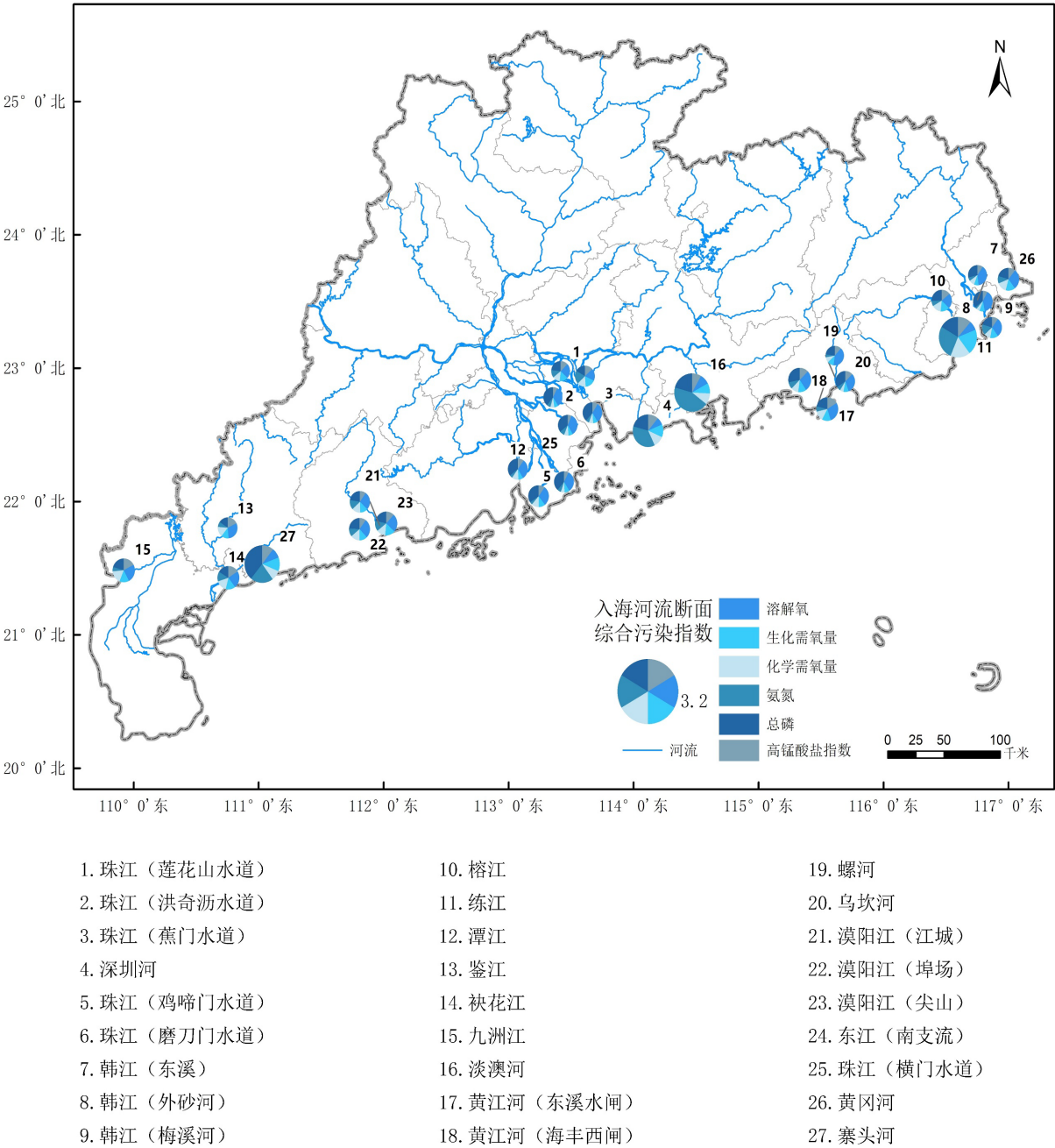


Figure 8. Multi-year average comprehensive pollution index difference chart of each section
图 8. 各断面多年平均综合污染指数差异图²

4.3.1. 自然因素

气温、降水量等自然因素并不直接对河流的水质产生影响，而是通过生物化学过程和水文过程对河流水质产生间接的影响[34]。本文选取广东省 14 个沿海城市年平均气温和降水量 2 项指标，利用 SPSS19 软件计算气温、降水量与 6 项水质指标的相关性，结果见表 2。气温与 4 项指标均表现为负相关关系，表

²注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3333 号的标准地图制作，底图无修改。

明高温加速有机物分解,降低污染指数。其中气温与 COD_{Mn}、COD 呈显著的负相关关系,均通过了置信水平为 95%的显著性检验。气温与 BOD、NH₃-N 亦呈现出不显著的负相关,相关系数分别为-0.765, -0.493。降水量与 DO 呈现负相关关系,通过了显著性检验,这是因为降水量的增加会引起更多的陆源物质通过地表或是地下径流进入河道,使得河流中的营养物质增加,水体中的浮游生物和微生物量增加,耗氧量变多,从而造成水中的 DO 含量降低[35]。NH₃-N、TP 亦与降水量呈现不显著的负相关,推测其原因为降水量增加使得河流径流增加,流速增快,水体中的 NH₃-N、TP 被稀释和冲走,含量变低,建议在枯水期增加河流流量,缓解污染物富集。其余 3 项指标与降水量的关系表现为微弱的正相关,且不显著。

Table 2. Correlation analysis results between various water quality indicators and natural factors

表 2. 各水质指标与自然因素相关性分析结果³

指标	项目	气温	降水量
溶解氧(DO)	Pearson 相关性	0.776	-0.859*
	显著性(双侧)	0.123	0.046
高锰酸钾指数(COD _{Mn})	Pearson 相关性	-0.873*	0.111
	显著性(双侧)	0.048	0.859
生化需氧量(BOD)	Pearson 相关性	-0.765	0.644
	显著性(双侧)	0.132	0.241
氨氮 (NH ₃ -N)	Pearson 相关性	-0.493	-0.244
	显著性(双侧)	0.398	0.693
化学需氧量 (COD)	Pearson 相关性	-0.892*	0.491
	显著性(双侧)	0.042	0.401
总磷 (TP)	Pearson 相关性	0.255	-0.679
	显著性(双侧)	0.679	0.208

4.3.2. 社会经济因素

随着生产力发展,人类活动对于自然的影响程度不断加深,人类生产生活过程中对于水资源的高度依赖,势必会对河流水质产生影响。参考童宝铭[36]和周文强[37]的研究,本文选取三次产业占比、工业废水和生活污水排放量、化肥农药施用量、城镇污水处理率作为社会经济因素指标,通过相关系数分析方法,分析社会经济因素与水质的相关性。

三次产业占比与各水质指标的 Pearson 相关性如表 3 所示。第一产业占比与 4 项指标均表现为正相关关系,且与 DO、BOD 呈显著的正相关关系,相关系数分别为 0.997, 0.921, 均通过了显著性检验,其余 2 项指标与第一产业占比表现为不显著的负相关。第二产业占比与 4 项指标均表现为不显著的正相关关系,与 COD 和 TP 呈现微弱的负相关关系。第三产业占比与 4 项指标均表现为负相关关系,但不显著, COD、TP 与第三产业占比呈现不显著的正相关,相关系数分别为 0.298, 0.080。这说明第一产业对入海河流水质指标的影响最大,第二、三产业占比影响并不显著。第一产业包括农业、林业和渔业等,研究[38]指出,农业是河流水质污染的主要来源之一,大量使用化肥和农药会导致农药残留和养分流失,进而导致水体富营养化和水质恶化。林业和渔业对流域水质影响较小,但是它们也会对水体生态系统产生一定的影响。为此,应该实行产业优化,减少第一产业污染负荷,推动生态农业。

³*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

Table 3. Correlation analysis results between various water quality indicators and the three industries
表 3. 各水质指标与三次产业相关性分析结果⁴

指标	项目	第一产业占比	第二产业占比	第三产业占比
溶解氧(DO)	Pearson 相关性	0.997**	0.075	-0.190
	显著性(双侧)	0.004	0.904	0.759
高锰酸钾指数(COD _{Mn})	Pearson 相关性	-0.545	0.408	-0.340
	显著性(双侧)	0.342	0.495	0.576
生化需氧量(BOD)	Pearson 相关性	0.912*	0.329	-0.215
	显著性(双侧)	0.031	0.589	0.728
氨氮 (NH ₃ -N)	Pearson 相关性	-0.094	0.528	-0.511
	显著性(双侧)	0.880	0.360	0.379
化学需氧量 (COD)	Pearson 相关性	-0.681	-0.222	0.298
	显著性(双侧)	0.206	0.719	0.626
总磷 (TP)	Pearson 相关性	0.695	-0.167	0.080
	显著性(双侧)	0.193	0.788	0.898

社会经济因素与各水质指标的 Pearson 相关性分析结果如表 4。工业废水排放量与除 DO 之外的 5 项指标均呈正相关关系,这是因为工业废水中成分复杂,含有很多污染物质,如重金属、肥料废水、有机污染物等,这些成分都会造成水中 NH₃-N、BOD 等水质指标含量的升高;生活污水排放量、城镇污水处理率与除 DO 之外的 5 项指标均呈负相关关系,这也说明了污水排放量的减少以及污水处理率的提高有效地减少河流水中各类污染物的含量;化肥农药施用量与一半的指标有负相关关系,其中化肥农药施用量与 DO 呈显著的负相关,与 COD_{Mn}、BOD、COD 这 3 项指标呈正相关关系,但不显著。

Table 4. Correlation analysis results between various water quality indicators and socio-economic factors
表 4. 各水质指标与社会经济因素相关性分析结果⁵

指标	项目	工业废水排放量	生活污水排放量	城镇污水处理率	化肥农药施用量
溶解氧(DO)	Pearson 相关性	-0.093	0.527	0.957**	-0.903*
	显著性(双侧)	0.882	0.362	0.003	0.036
高锰酸钾指数(COD _{Mn})	Pearson 相关性	0.641	-0.013	-0.564	0.678
	显著性(双侧)	0.244	0.984	0.243	0.208
生化需氧量(BOD)	Pearson 相关性	0.247	-0.718	-0.873*	0.797
	显著性(双侧)	0.689	0.172	0.023	0.107
氨氮 (NH ₃ -N)	Pearson 相关性	0.952*	-0.076	-0.804	-0.056
	显著性(双侧)	0.013	0.903	0.054	0.928
化学需氧量 (COD)	Pearson 相关性	0.405	-0.226	-0.643	0.840
	显著性(双侧)	0.499	0.715	0.168	0.075
总磷 (TP)	Pearson 相关性	0.169	-0.934*	-0.954**	-0.427
	显著性(双侧)	0.786	0.020	0.003	0.473

^{4**}表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

^{5**}表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

5. 结论和建议

5.1. 结论

本研究探究广东省入海河流 2016~2020 年间的水质状况及时空演变特征,并结合相关系数分析法讨论了影响水质变化的因素,得出如下结论。

1) 2016~2020 年广东省入海河流超标断面个数除 BOD 外其余指标均先增加后减少,严重污染河流占比总体呈下降趋势,到 2020 年无严重污染河流,表明 5 年内该区域入海河流水质情况先恶化后改善。从年内变化来看,除 DO 外,其余水质指标超标断面个数主要集中在 4~6 月和 10~12 月,与农业活动、降水及水文条件相关,非汛期河流污染程度较汛期平稳。

2) 粤东的练江是广东省入海河流中污染最严重的河流,流域内遍布了大量纺织印染企业,导致水体受到有机物污染。珠三角的深圳河、淡水河和粤西的寨头河污染程度较严重,其余断面污染程度相对较轻,河流污染物以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 为主。

3) 广东省沿海地区年平均气温与 COD_{Mn} 、COD 呈显著的负相关关系,降水量与 DO 呈显著的负相关关系。第一产业占比与 DO、BOD 呈显著的正相关关系,对入海河流水质指标的影响最大,第二、三产业占比影响并不显著。除 DO 之外的 5 项指标,工业废水排放量与其均呈正相关关系,生活污水排放量、城镇污水处理率与其呈负相关关系,化肥农药施用量与 COD_{Mn} 、BOD、COD 呈正相关关系。

5.2. 对策和建议

经过有关政策颁布和专项水污染治理,广东省入海河流水质状况有所改善,已消灭严重污染河流,但重度和中度污染河流没有得到有效控制,如不采取积极有效的措施严加管理,将会进一步影响广东省近岸海域海水水质,制约广东省社会经济的可持续发展。为此,首先需要推进练江、深圳河、寨头河等重污染流域环境整治,推进生活污水、工业废水污染整治,严格监管工业废水排放,完善城镇污水处理厂建设,提高城镇污水处理率,控制农业上化肥农药的施用。地方应实行产业优化,减少第一产业污染负荷,推动生态农业。此外,还需要加强环境宣传和法制教育,提高公众环保意识、树立新的海洋思维[39];加强沿海地区监督检查,加大执法力度,依法依规排放污水废水,加强广东省入海河流监测能力,为入海河流、近岸海域的科学管理和决策提供及时、全面和准确的监测依据[40]。

基金项目

广东大学生科技创新培育专项资金资助项目(pdjh2023b0215)。

参考文献

- [1] 张杰,顾效源,张建国,等.烟台近岸海域表层沉积物重金属污染特征[J].山东国土资源,2020,36(4):49-54.
- [2] UN (2016) The First Global Integrated Marine Assessment. World Ocean Assessment I. Chapter 20. Coastal, Riverine and Atmospheric Inputs from Land.
- [3] 殷小琴,季寅星.南通市主要入海河流水质分析与评价[J].水资源开发与管理,2020(8):8-12.
- [4] 吴佳宁,陈明,袁润权,等.河流水质评价综述[J].广东水利水电,2017,46(2):1-5.
- [5] 吴岳玲.水质综合评价及预测研究进展[J].安徽农业科学,2020,48(2):23-26.
- [6] 齐冰,孙慧海,苗贵琪,等.模糊数学在地下水质量评价中的应用[J].城市勘测,1996,11(1):11-15.
- [7] 杨红.灰色聚类法在湖泊水质富营养化评价中的应用[J].渔业机械仪器,1995,23(6):36-39.
- [8] 马春花,全达人,王红雨.灌溉用水质量的化学评价[J].宁夏农学院学报,1996,8(1):7-15.
- [9] 李朝霞,张慧,赵万登.喀什地区生活饮用水水质评价[J].环境与健康杂志,1995,12(5):235.

- [10] 郇淑荣. 应用水质综合特征模式法评价清水水质[J]. 北京水利, 1996, 21(5): 56-58.
- [11] 曾明荣, 王成海. 模糊数学在水质评价中的应用[J]. 福建环境, 1999, 16(5): 7-9.
- [12] 孔宪华. 河流水质的综合污染指数评价[J]. 山东环境, 1995, 12(1): 22-23, 37.
- [13] 郑毅, 于春兴. 灰色聚类方法在地下水水质污染综合评价中的应用[J]. 长春地质学院学报, 1989, 19(3): 347-350.
- [14] 陈昆仑, 张祚, 谢启姣, 等. 1985-2010 年珠江广州城区段水环境质量演化研究[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2015, 37(3): 298-304.
- [15] 季定民, 张勃, 黄淑玲, 等. 宿州市沱河段水质时间变化及影响因素研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 308-312.
- [16] Ip, C.C.M., Li, X., Zhang, G., Wai, O.W.H. and Li, Y. (2007) Trace Metal Distribution in Sediments of the Pearl River Estuary and the Surrounding Coastal Area, South China. *Environmental Pollution*, **147**, 311-323. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.028>
- [17] Halpern, B.S., Walbridge, S., Selkoe, K.A., Kappel, C.V., Micheli, F., D'Agrosa, C., et al. (2008) A Global Map of Human Impact on Marine Ecosystems. *Science*, **319**, 948-952. <https://doi.org/10.1126/science.1149345>
- [18] 张晓阳. 珠江三角洲城水关系演进特征、机制及规划干预研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [19] 夏青, 陈艳卿, 刘宪兵. 水质基准与水质标准[M]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [20] 李佳艺. 基于水质综合污染指数的 Spearman 秩相关系数法分析晋江流域水质自动监测的适用性[J]. 环境科学导刊, 2022, 41(4): 88-92.
- [21] 袁志发, 周静芋. 多元统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 241.
- [22] 雷钦礼. 经济管理多元统计分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 2002: 69.
- [23] 范新风, 韩美, 王磊, 等. 小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1619-1628.
- [24] 石敏. 2007-2015 年辽宁省主要入海河流污染物入海量分析[J]. 黑龙江环境通报. 2017, 41(4): 30-33.
- [25] 开晓莉. 清水河重金属与有机氯农药的环境行为及健康风险研究[D]: [博士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2021.
- [26] 彭兴意. 基于 MIKE21 的城市小型河流环境模拟及水质提升研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [27] 刘泓江, 文增坤. 地表水中溶解氧的周期性变化规律研究[J]. 化工管理, 2022(26): 32-34.
- [28] 劳齐斌, 刘国强, 申友利, 栗启仲, 高劲松, 陈法锦. 北部湾入海河流营养盐的分布特征及入海通量研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(12): 93-100.
- [29] 刘岩. 青岛市入海河流入海口水质评价及水质改善措施[J]. 绿色科技, 2016(16): 126-129.
- [30] 郭俊康, 周华, 夏海波, 袁丁, 张嘉声, 何梓灏. 练江流域水污染治理历程及成效[J]. 给水排水, 2021, 57(10): 57-61.
- [31] 王鹏, 陈多多, 陈波. 赣江水体氮磷营养盐分布特征与污染来源[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2015, 39(4): 435-440.
- [32] 汪振松, 王政君, 戴韵, 汤钟, 冷玉波, 段余杰. 深圳河湾流域水质稳定达标方案探索与思考[J]. 水利技术监督, 2022(7): 89-92+134.
- [33] 向晨晖, 刘甲星, 柯志新, 周林滨, 谭辉辉. 大亚湾浮游植物粒级结构和种类组成对淡澳河河口水加富的响应[J]. 热带海洋学报, 2021, 40(2): 49-60.
- [34] Paul, M.J., Coffeey, R., Stamp, J., et al. (2019) A Review of Water Quality Responses to Air Temperature and Precipitation Changes 1: Flow, Water Temperature, Saltwater Intrusion. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, **55**, 824-843. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12710>
- [35] 康健. 乌梁素海流域近 50 年来气候变化特征分析及其对水文水质的影响[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2016: 76-77.
- [36] 童保铭. 北运河水系河流水质时空变化及驱动力研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 首都师范大学, 2009: 40-52.
- [37] 周文强. 三峡库区水质影响因素分析及水质预测研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2020: 15-23.
- [38] 郑李杰. 鉴江流域非点源污染的时空分布特征及其响应分析研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023.
- [39] 谢丽云. 福建省 2010 年 2014 年主要入海河流污染物入海量浅析[J]. 海峡科学, 2015(6): 29-31+47.
- [40] 杨青云, 李敏华, 相景昌, 等. 珠江口深圳海域总氮陆源入海污染负荷与水环境容量分析[J]. 环境生态学, 2023, 5(3): 91-98.