

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.008

# 粤港澳大湾区 2015—2019 年入海河口水质变化趋势

董斯齐<sup>1,2</sup>, 黄 翀<sup>1</sup>, 李 贺<sup>1</sup>, 刘庆生<sup>1</sup>, 颜凤芹<sup>1</sup>, 苏奋振<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:**基于 2015—2019 年粤港澳大湾区 8 个主要入海河口断面的水质监测数据, 选取 BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、COD、TP、TN 5 种常规水质指标和 Hg、Pb、Cu、Zn、Cr<sup>6+</sup>、Cd 6 种重金属指标, 依据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》, 应用污染指数法和季节性 Kendall 检验法, 对粤港澳大湾区入海河口进行水质评价与变化趋势分析。结果表明: 当前粤港澳大湾区入海河口污染类型主要为氮磷污染, 主要污染物为 TN, 东江流域入海河口污染程度大于西北江三角洲流域; 有机污染和重金属污染较轻, 重金属元素 Hg 的污染指数在 2019 年呈快速上升趋势; 2015—2019 年, BOD<sub>5</sub> 浓度下降趋势最为显著, NH<sub>3</sub>-N 和 COD 浓度下降明显, TP 和 TN 污染无好转; 东江流域入海河口污染呈好转趋势, 西北江三角洲流域入海河口污染呈加重趋势。

**关键词:**污染指数法; 季节性 Kendall 检验法; 水质变化趋势; 粤港澳大湾区

**中图分类号:**X522      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-6933(2021)05-0048-08

**Change trend of water quality in estuaries of Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area from 2015 to 2019**// DONG Siqi<sup>1,2</sup>, HUANG Chong<sup>1</sup>, LI He<sup>1</sup>, LIU Qingsheng<sup>1</sup>, YAN Fengqin<sup>1</sup>, SU Fenzhen<sup>1</sup> (1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the water quality monitoring data of 8 main estuary sections in Guangdong, Hong Kong and Macao Great Bay Area (GBA) from 2015 to 2019, 5 conventional water quality indexes of BOD<sub>5</sub>, NH<sub>3</sub>-N, COD, TP, TN and 6 heavy metal indexes of Hg, Pb, Cu, Zn, Cr<sup>6+</sup> and Cd are selected. According to GB 3838—2002 <the environmental quality standard for surface water>, the pollution index method and seasonal Kendall test method were applied, and the water quality evaluation and change trend analysis of estuaries in the GBA were carried out. The results show that the pollution type of the estuary in the GBA is mainly nitrogen and phosphorus pollution, and the main pollutant is TN. The pollution degree of the estuary in the Dongjiang River Basin is greater than that in the Northwest River Delta Basin. Organic pollution and heavy metal pollution are relatively light, and the pollution index of heavy metal Hg shows a rapid upward trend in 2019. From 2015 to 2019, the concentration of water quality index BOD<sub>5</sub> in the GBA decreased most significantly, NH<sub>3</sub>-N and COD decreased significantly, and TP and TN pollution did not improve. The pollution of Dongjiang River Basin is improving, and that of Northwest River Delta is aggravating.

**Key words:** pollution index method; seasonal Kendall test; change trend of water quality; Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area

珠江三角洲地区位于广东省东南部, 海陆交通便利, 被称为我国的“南大门”, 凭借着优越的区位条件和政策的大力扶持, 工业化和城市化进程飞速推进, 如今已成为我国开放程度最高、经济最活跃的

地区之一。2015 年, 国家发展改革委员会、外交部和商务部联合发布《推动共建丝绸之路经济带和 21 世纪海上丝绸之路的愿景与行动》, 其中明确提出“打造粤港澳大湾区”。2019 年, 国务院发布《粤港

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (41890854)

作者简介: 董斯齐 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水环境容量与调控。E-mail: dongsiqi95@163.com

通信作者: 黄翀 (1975—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事 GIS 地学建模与生态遥感研究。E-mail: huangch@reis.ac.cn

粤港澳大湾区发展规划纲要》(简称“发展纲要”),“粤港澳大湾区”逐步取代“珠三角城市群”,上升为国家层面的重大发展战略。发展规划纲要指出,推进粤港澳大湾区开发建设,要对标纽约湾区、旧金山湾和东京湾等国际一流湾区的生态环境质量和治理水平,将实施最严格的生态环境保护制度<sup>[1]</sup>。改革开放以来,粤港澳大湾区人口增长和城市化的快速发展,生产生活污水大量排放,导致区域内陆水体和近岸海域污染严重,其中入海河流带来的污染是海湾最主要的陆域污染源<sup>[1]</sup>。近年来,地方政府投入了大量的人力物力,污水减排取得一定效果<sup>[2-3]</sup>,但目前的水环境质量相比国际一流湾区建设要求仍有较大差距。“十三五”期末(2020 年底),广东省人均 GDP 约 15 000 美元,根据发达国家的经验,这一阶段大多数污染物将达到排放峰值,也是生态环境质量转变的“拐点期”<sup>[4]</sup>。加强粤港澳大湾区水环境污染治理,保障水环境容量安全,是粤港澳大湾区城市群可持续发展的前提和基础。明确影响大湾区主要入海河流水质的主要污染物,分析大湾区水质污染现状和变化趋势,对粤港澳大湾区近岸海域污染治理和生态环境保护具有重要的指导意义。国内外学者基于污染指数法、主成分分析法和回归分析法等方法,对粤港澳大湾区不同城市水质状况进行了广泛研究<sup>[5-14]</sup>,但研究内容主要集中于城市内部河流、湖泊及水库等地表水的水质评价,缺乏对入海河口的水质评价和变化趋势研究。实际上,入海河口的水质状况更能体现陆源污染对海域的影响。本文针对粤港澳大湾区 2015—2019 年入海河口水质污染状况和污染物浓度变化趋势进行分析,以期对粤港澳大湾区水环境污染治理提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

粤港澳大湾区(111°21'E ~ 114°53'E, 21°28'N ~ 24°29'N)位于我国东南部沿海,地处珠江流域下游和粤东粤西沿海,是由广东省广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门和肇庆等 9 个城市,以及香港、澳门两个特别行政区组成的城市群,陆域总面积约为 5.6 万 km<sup>2</sup><sup>[15]</sup>。大湾区地势北高南低,西部、北部和东部为丘陵山地环绕,中部、南部以冲积平原为主,呈相对闭合的“三面环山、一面临海、三江汇流、八口出海”的独特地形地貌<sup>[16]</sup>。大湾区气候属亚热带海洋季风气候,年均降水量 1 720 mm,区域内河网水系密布,水道纵横交错,相互贯通,汇集了西江、北江、东江和众多中小河流,各类河流 324 条,河道总长 1 600 km,河网密度高达 0.83 km/km<sup>2</sup><sup>[17]</sup>。

大湾区主要包括西北江三角洲流域、东江流域、粤东诸河流域和粤西诸河流域,其中西北江三角洲流域包括西江和北江流域。西江、北江流域主要为肇庆市,西北江三角洲流域包括江门、佛山、广州、中山、珠海、澳门,东江流域包括惠州、广州、东莞、深圳、香港。区域内河口海湾众多,如珠江河口、大亚湾、大鹏湾、广海湾及北海湾等,充沛的降水和密集的河网带来了丰富的水资源,水资源总量约 3 742 亿 m<sup>3</sup>。但由于城市建设和工业的快速开发,以及密集的人口和工业活动带来的高强度负荷,水体污染情况较为普遍。

1.2 数据来源

粤港澳大湾区入海河口水质监测数据来源于广东省生态环境厅公众网(<http://gdee.gd.gov.cn/>)公布的 2015—2019 年的广东省入海河流水质监测数据,该数据逐月记录了大湾区主要入海河口监测断面的 30 多项水质信息。粤港澳大湾区行政区划和河流水系数据来自国家基础地理信息数据库(<http://www.webmap.cn/main.do?method=index>)。

本文收集的入海河口水质监测资料,包括莲花山、沙田泗盛、蕉门、洪奇沥、中山港码头、珠海大桥、鸡啼门大桥、苍山渡口等 8 个监测断面,其中,莲花山、沙田泗盛位于东江流域,其余 6 个监测断面位于西北江三角洲流域,监测断面分布见图 1。水质监测频率为每月 1 次,监测项目包括 pH 值、高锰酸盐指数、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 和石油类等 30 项指标。评价指标的选择是在对监测数据初步筛选后进行,排除监测结果长期为未检出或满足 I 类水质要求的监测项目。最终,选用我国 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中 BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、COD、TP、TN 和重

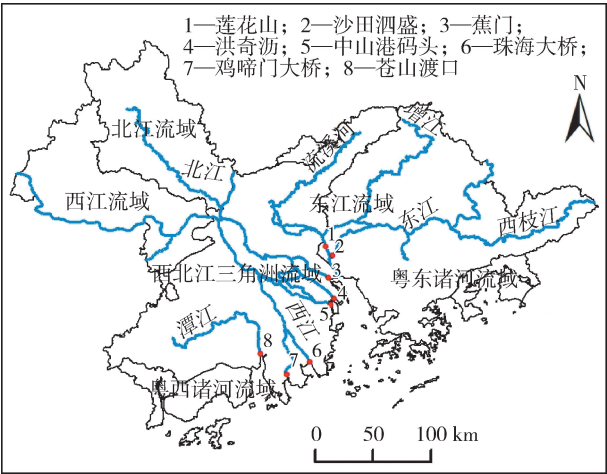


图1 粤港澳大湾区入海河口水质监测断面分布  
Fig.1 Distribution of water quality monitoring sections of estuaries in the Guangdong, Hong Kong and Macao Great Bay Area

金属元素污染物 Hg、Pb、Cu、Zn、Cr<sup>6+</sup>、Cd 等 11 项指标进行研究。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 污染指数法

污染指数法是国内外评价河流污染水平时比较常用的一种方法,评价指标涉及各类有机污染物和无机污染物等。本文所使用的污染指数包括单因子污染指数和内梅罗综合污染指数。

单因子指数法基于水质实测数据和水质评价标准进行对比分析,选取水质最差的类别即为评价结果,计算公式为

$$I_i = \frac{C_i}{C_{oi}} \quad (1)$$

式中: $I_i$ 为评价因子 $i$ 的污染指数; $C_i$ 为评价因子 $i$ 的实测值; $C_{oi}$ 为评价因子 $i$ 的水质标准值。参照 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》确定评价标准,对于越小越优的指标, $I_i \leq 1$ 即为符合标准,对于越大越优的指标, $I_i \geq 1$ 即为符合标准。

内梅罗综合污染指数法是考虑所有参加评价的污染因子的方法,计算公式为

$$I_p = \sqrt{\frac{I_{imax}^2 + \bar{I}^2}{2}} \quad (2)$$

式中: $I_p$ 为内梅罗指数, $I_p \leq 1$ 说明水质较好, $I_p > 1$ 说明水质较差; $I_{imax}$ 为所有评价因子中污染指数最大值; $\bar{I}$ 为所有评价因子的单因子污染指数平均值。

#### 1.3.2 季节性 Kendall 检验法

季节性 Kendall 检验法是由 Hirsch 等<sup>[18]</sup>于 1982 年提出的一种水质评价方法,是一种非参数统计方法,因其不受样本值、分布类型及少数异常值等因素的干扰而较为广泛地应用于水文、气象等要素系列呈现非正态分布的领域<sup>[19-22]</sup>。该方法原理是将历年相同月的水质资料进行比较,避免了由于河流径流量季节周期变化对以浓度为单位的水质指标检测值产生的影响。

季节性 Kendall 检验法计算公式可参考文献[23],比较前后两年相同月的水质污染物的浓度值,若后一年份的值高于前一年的值则记为“+1”,小于前一年的值记为“-1”,相等记为“0”。若“+1”的次数比“-1”次数多,则可能为上升趋势,反之则可能为下降趋势,若“+1”和“-1”的个数相等,则不存在上升或下降趋势。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因子污染程度

根据广东省生态环境厅公布的《广东省水环境

功能区划》河流部分的水质控制目标,可知大湾区各入海河口监测断面的水质控制目标:莲花山为Ⅳ类,沙田泗盛为Ⅱ类,蕉门、洪奇沥、中山港码头、珠海大桥、鸡啼门大桥和苍山渡口均为Ⅲ类。按照 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,计算 2015—2019 年大湾区 8 个入海河口水质监测断面 11 个指标单因子污染指数,对大湾区入海河口氮磷污染、有机污染及重金属污染情况进行分析。

#### 2.1.1 氮磷污染状况

由于氮磷营养元素的含量超过水生生物生长需求而造成的水质恶化现象称为氮磷污染。对水体而言,最严重的问题是氮磷等营养物质大量进入引起水中营养元素过剩导致水体富营养化。通过计算得到 2015—2019 年粤港澳大湾区主要入海河口水质监测断面的 NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 3 个指标的单因子污染指数,结果见图 2。由图 2 可见,TN 超标最为严重,除 2015 年在珠海大桥和鸡啼门大桥断面符合控制标准外,2016—2019 年污染指数在 8 个断面均超标,介于 1.5~5.0 之间。2015—2019 年,除沙田泗盛断面外,其余各断面的 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 的污染指数均小于 1,表明粤港澳大湾区入海河口的 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 污染情况较轻。污染最严重的沙田泗盛断面, TN、TP 和 NH<sub>3</sub>-N 的污染指数均呈下降趋势。总体上,导致粤港澳大湾区主要入海河口氮磷污染的物质为 TN、TP 与 NH<sub>3</sub>-N 污染较轻。

#### 2.1.2 有机污染状况

水体有机污染主要是指由城市污水、食品工业和造纸工业等排放含有大量有机物的废水所造成的污染,有机污染物在水中进行生物氧化分解过程中,需消耗大量氧,COD 和 BOD<sub>5</sub>是水体受有机物污染的代表性指标。通过计算得到 2015—2019 年粤港澳大湾区入海河口水质监测断面的 COD 和 BOD<sub>5</sub>的单因子污染指数如图 3 所示。由图 3 可见,在 8 个入海河口监测断面中,除沙田泗盛外,其余断面的 COD 与 BOD<sub>5</sub>的污染指数均小于 1,符合其水环境功能区水质控制标准。沙田泗盛断面有机污染相对较重,BOD<sub>5</sub>的污染指数在 1.0~1.5 之间,但呈逐渐下降趋势。

#### 2.1.3 重金属污染状况

水体的重金属污染是工业生产过程中产生的含有 Cr<sup>6+</sup>、Cd、Cu、Hg 等重金属离子的废水进入水体造成的污染。计算 2015—2019 年大湾区入海河口水质监测断面的 Hg、Pb、Cu、Zn、Cd、Cr<sup>6+</sup> 重金属元素的单因子污染指数,结果见图 4。由图 4 可见,2015—2018 年 8 个监测断面的重金属污染指数均为达标状态,其值介于 0~0.4 之间;2018 年后,沙



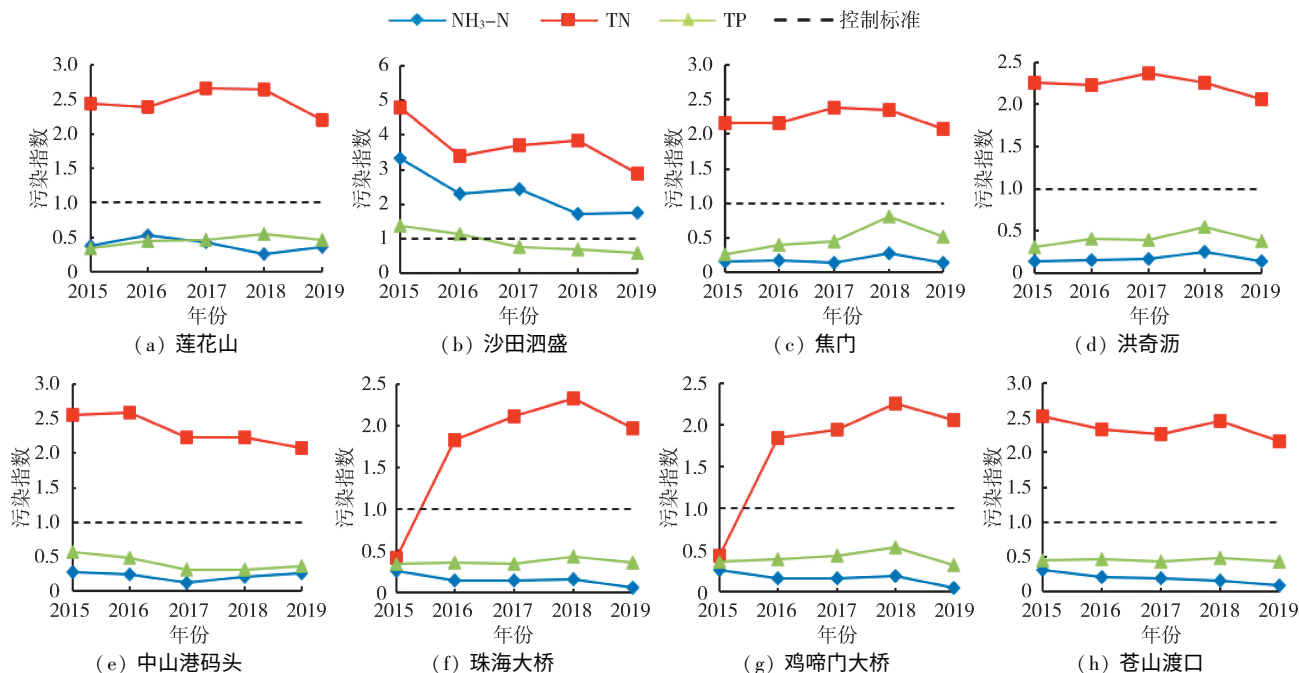


图2 粤港澳大湾区入海河口氮磷污染物单因子污染指数

Fig.2 Single factor pollution index of nitrogen and phosphorus pollutants in estuaries of the GBA

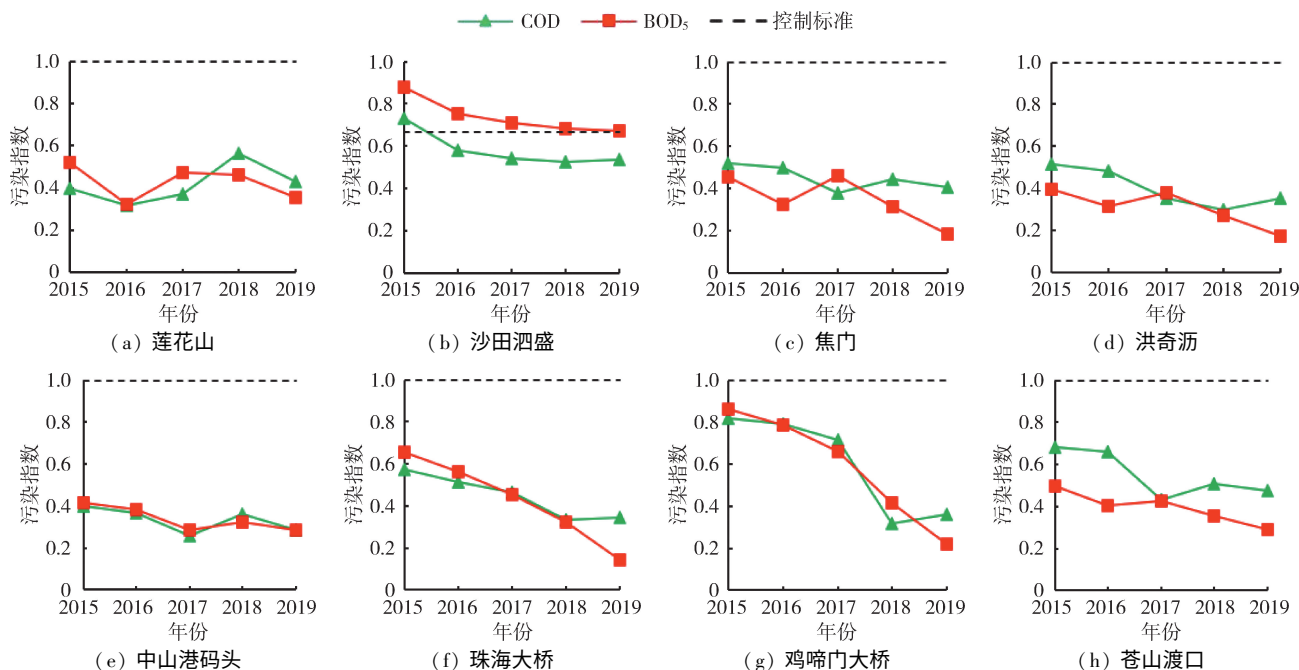


图3 粤港澳大湾区入海河口有机污染单因子污染指数

Fig.3 Single factor pollution index of organic pollutants in estuaries of the GBA

田泗盛与鸡啼门大桥两个断面的  $Hg$  污染指数急速上升,超过 1.0,变为不达标,其中鸡啼门大桥断面 2019 年  $Hg$  污染指数达到水质标准的 1.6 倍,污染严重超标。从污染物类型看, $Hg$  的污染指数要大于其他重金属污染物,除苍山渡口外的 7 个断面  $Hg$  的污染指数在 2018—2019 年均呈上升趋势。总体上看,大湾区入海河口重金属污染状况较轻,污染主要集中在沙田泗盛和鸡啼门大桥断面,主要污染物为  $Hg$ 。

## 2.2 综合污染程度

根据内梅罗综合污染指数对水体污染等级进行划分,可以确定水体的综合污染等级。综合污染指数等级分级标准为:小于 1 为清洁水质,介于 1~2 之间为轻度污染水质,2~3 之间为中度污染水质,3~5 之间为重度污染水质,大于 5 为严重污染水质。各断面的内梅罗综合污染指数变化情况见图 5,可见粤港澳大湾区入海河口水环境污染状况不容乐观,所有 8 个监测断面均长期处于污染状态。其

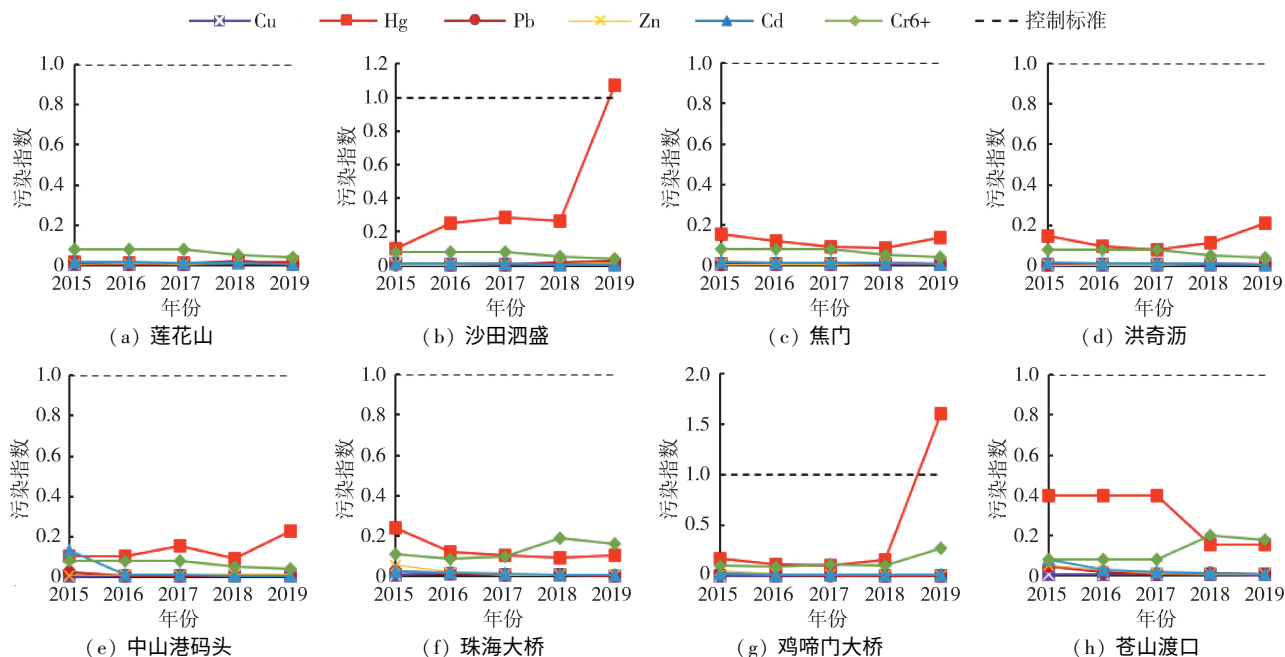


图4 粤港澳大湾区入海河口重金属污染物单因子污染指数

Fig.4 Single factor pollution index of heavy metal pollutants in estuaries of the GBA

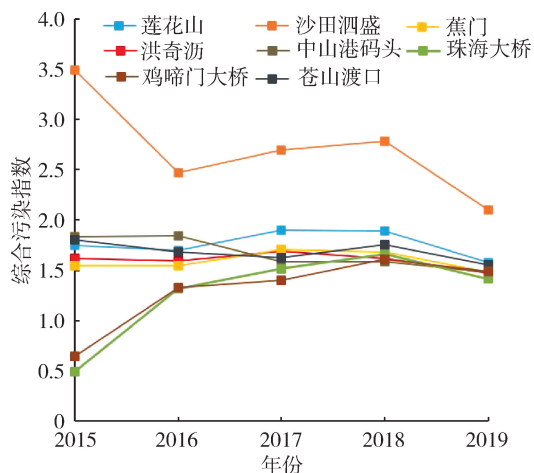


图5 各监测断面的水质内梅罗综合污染指数变化

Fig.5 Changes in theNemero index of water quality at each monitoring section

中,污染最严重的是沙田泗盛断面,2015 年为重度污染,2016—2019 年为中度污染,其内梅罗指数呈下降趋势,说明污染有好转趋势。鸡啼门大桥和珠海大桥两个监测断面在 2015 年为清洁状态,2016—2019 年为轻度污染,其内梅罗指数为上升趋势,说明污染呈加重趋势。莲花山、蕉门、洪奇沥、中山港码头和苍山渡口 5 个断面的内梅罗指数在 1.5 ~ 2.0 之间波动,均为轻度污染状态,变化不明显。

### 2.3 主要污染指标浓度变化趋势

由前文分析结果可知,目前粤港澳大湾区主要入海河口水环境污染的主要类型为氮磷污染和有机污染。粤港澳大湾区属亚热带海洋季风气候,其河流流量具有季节特征,每年 4—9 月为汛期,10 月至

次年 3 月为非汛期<sup>[24]</sup>,由于水质评价标准为污染物浓度值,因此评价结果受河流流量影响较大。在进行粤港澳大湾区入海河口污染指标的浓度变化分析时,为避免季节性对监测数据的影响,对 2015—2019 年粤港澳大湾区入海河口水质监测数据采用季节性 Kendall 检验法进行趋势分析,结果见表 1。

表1 大湾区入海河口监测断面水质趋势分析结果

Table 1 Analysis result of water quality trend in estuary sections of the GBA

| 所在流域     | 监测断面  | BOD <sub>5</sub> | COD | NH <sub>3</sub> -N | TN | TP |
|----------|-------|------------------|-----|--------------------|----|----|
| 东江流域     | 莲花山   | ↓                | ↑↑  | ↓↓                 | —  | —  |
|          | 沙田泗盛  | ↓↓               | ↓↓  | ↓↓                 | ↓↓ | ↓↓ |
|          | 蕉门    | ↓↓               | ↑   | —                  | —  | ↑  |
|          | 洪奇沥   | ↓↓               | ↑↑  | —                  | ↓  | —  |
| 西北江三角洲流域 | 中山港码头 | ↓↓               | ↓↓  | —                  | ↓↓ | ↓↓ |
|          | 珠海大桥  | ↓↓               | ↓↓  | ↓↓                 | ↑↑ | —  |
|          | 鸡啼门大桥 | ↓↓               | ↓↓  | ↓↓                 | ↑↑ | —  |
|          | 苍山渡口  | —                | —   | ↓↓                 | —  | —  |

注:“↓↓”表示高度显著下降;“↓”表示显著下降;“↑↑”表示高度显著上升;“↑”表示显著上升;“—”表示无明显变化趋势。

由图 4 和表 1 可知,沙田泗盛断面水质现状为中度污染,但所有水质指标浓度均为高度显著下降趋势。洪奇沥断面的 TN 浓度显著下降,但 COD 浓度高度显著上升,氮污染好转,有机污染加重。蕉门断面 COD 和 TP 浓度均显著上升,有机污染和富营养化污染加重。鸡啼门大桥和珠海大桥断面目前为轻度污染等级,BOD<sub>5</sub>、NH<sub>3</sub>-N、COD 浓度虽均呈高度显著下降趋势,在 TP 持续排放的同时,其主要污染 TN 浓度为高度显著上升趋势,水体富营养化呈加重趋势。中山港码头断面水质污染较轻,除 NH<sub>3</sub>-N 浓

度无明显变化外,其他水质指标浓度高度显著下降,且呈快速好转趋势。苍山渡口断面  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度呈高度显著下降,但由于  $\text{NH}_3\text{-N}$  污染指数已经很小,而其他主要污染物排放无显著变化,断面水质好转趋势不明显。

从流域看,东江流域入海河口水质污染现状为中度污染,但莲花山和沙田泗盛 2 个监测断面趋势分析数据显示大多数污染物浓度下降,总体上呈好转趋势。西北三角洲流域各入海河口监测断面污染较轻,但其主要污染物 TN 浓度呈上升状态,水质有恶化趋势。从监测项目看, $\text{BOD}_5$  浓度下降趋势最为显著,有 7 个断面(莲花山、沙田泗盛、洪奇沥、蕉门、鸡啼门大桥、珠海大桥、中山港码头)的  $\text{BOD}_5$  浓度均显著下降。此外,5 个断面(莲花山、沙田泗盛、鸡啼门大桥、珠海大桥、苍山渡口)的  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 4 个断面(沙田泗盛、鸡啼门大桥、珠海大桥、中山港码头)的 COD 浓度下降明显,改善情况较好。TP 和 TN 浓度变化趋势不容乐观,90% 的断面显示 TP 浓度无下降趋势,近 50% 断面的 TN 污染无好转趋势,TN 是影响大湾区入海河口水环境质量的主要污染物。

#### 2.4 水环境质量变化驱动因素分析

张伟等<sup>[25-26]</sup>的研究结果显示,珠江口及毗邻海域由无机氮、活性磷酸盐引起的海域营养盐含量超标现象突出。梁志宏等<sup>[27]</sup>基于深圳湾、珠江口、水质净化厂尾水、面源与截排溢流水体等水质数据,系统分析了深圳湾水质时空分布特征及其污染物来源,结果表明深圳湾现状水质不达标,关键污染因子为无机氮(DIN)和活性磷酸盐(DIP)。这些研究结果与本研究结果一致,当前影响粤港澳大湾区入海河口水质的主要污染类型仍为氮磷污染,氮磷污染依然是粤港澳大湾区水污染防治的主要问题,且氮污染程度高于磷污染。

粤港澳大湾区不同入海河口重金属污染状况存在差异。重金属污染分析结果显示,位于广州、东莞和珠海的入海河口重金属含量略高,Hg 浓度较高的区域分布于沙田泗盛、鸡啼门大桥、洪奇沥和中山港码头附近,苍山渡口和珠海大桥重金属污染物主要为  $\text{Cr}^{6+}$ ,这可能是由污染来源不同造成的。刘宝林等<sup>[28]</sup>发现珠江干流的重金属污染呈现明显的城市来源特征,经济发展程度存在差异的不同城市河段重金属污染存在明显差异,重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 主要来自工业废水、生活污水及混合排放污水。张起源等<sup>[29-30]</sup>对过去珠江出海口及近岸海域的重金属污染程度进行了分析,八大出海口门水体受重金属污染程度在清洁到轻度污染之间,重金属综合生态风险处于“低等”水平,这与本文分析结果一致,

近年来粤港澳大湾区重金属污染维持在较低水平。

污染最严重的区域为东江南流入海口的沙田泗盛断面,单因子污染指数分析结果显示,2015—2019 年该断面  $\text{BOD}_5$ 、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$  均未达到水质控制标准,其中 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$  严重超标。综合污染指数结果显示该断面 2015—2019 年污染程度在中度污染以上,最高达到 3.49,为重度污染。东莞市于 2019 年初开展了断面水质达标攻坚行动,制定并实施了污水处理设施提标改造方案,要求东莞市近岸海域汇水区域内的污水处理设施出水达到广东省《水污染物排放限值》的较严值,并明确规定了沙田泗盛断面的水质目标由Ⅳ类水质在 2020 年改善到Ⅲ类。从沙田泗盛断面的水质变化趋势可以看出,在主要污染物 TN 浓度及综合污染指数持续上升 2 年后,于 2019 年显著下降,这表明落实严格的水环境保护政策是改善入海水质的重要途径。

陆源污染物经河流入海是近岸海域水环境与生态系统的主要威胁。广东省海洋与渔业局调查显示,2015 年珠江携带入海的污染物总量为 243.68 万 t,2017 年为 325.27 万 t,增加了 81.59 万 t。2017 年珠三角地区沿岸的 32 个入海排污口中,有 5 个排污口存在排放超标现象,超标指标为 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TP 等<sup>[31]</sup>。由综合污染等级分析结果可知,流经广州和东莞等城市的河流,在入海河口水质污染等级较高,广州和东莞经珠江口排放的污染物是粤港澳大湾区近岸海域主要的陆源污染源,由珠海、澳门和香港入海的污染物较少。根据当前粤港澳大湾区陆源污染物经河口流入海的污染趋势看,包含氮磷元素的营养盐排放量呈上升趋势,这导致粤港澳大湾区海域赤潮灾害频繁发生,2017 年发生了 5 起赤潮,受灾面积达 91.2  $\text{km}^2$ <sup>[31]</sup>。粤港澳大湾区水生态足迹研究结果表明,2000—2014 年粤港澳大湾区水资源生态足迹呈上升趋势,在结构上,水污染足迹占水资源生态足迹的比例最大,城镇生活污水、人均 GDP、工业废水是影响水资源生态足迹的最主要因素<sup>[32]</sup>。虽然 2010—2017 年粤港澳大湾区万元 GDP 水资源生态足迹下降 40.7%,但水生态容量现状仍然为赤字<sup>[33]</sup>。随着粤港澳大湾区经济和城市化的快速发展,虽然人均水资源量远高于全国平均水平,但由于水污染导致的水质型缺水问题已经成为影响粤港澳大湾区水资源可持续利用的关键因素。

世界先进湾区的水环境都经历了先污染后治理的过程,实现粤港澳大湾区经济社会可持续发展的根本途径,是对入海污染物实施总量控制。当前粤港澳大湾区入海河口水质污染问题,实质上是陆源

污染物入海总量控制问题,需要通过由海向陆地追溯污染物来源,基于“海陆统筹、以海定陆”的原则,由陆向海针对性地提出污染治理措施,实现海陆统筹下的治理体系,从而促进粤港澳大湾区可持续发展。

### 3 结 论

a. 2015—2019 年,粤港澳大湾区主要入海河口的 8 个监测断面中 TN、COD 和 Hg 超出广东省水环境功能区划的控制标准。

b. 当前粤港澳大湾区主要入海河口的水环境污染类型主要为氮磷污染,有机污染和重金属污染较轻,污染最为严重的监测断面是位于东莞市的东江入海口沙田泗盛断面,主要污染物为 TN 和  $\text{NH}_3\text{-N}$ 。

c. 2015—2019 年,粤港澳大湾区入海河口水质指标中, $\text{BOD}_5$  浓度下降趋势最为显著, $\text{NH}_3\text{-N}$  和 COD 浓度下降明显,TP 和 TN 浓度无明显好转趋势,重金属元素 Hg 的污染在 2019 年呈快速上升趋势。

d. 东江流域入海河口污染程度大于西北三角洲流域,东江流域污染呈好转趋势,西北江三角洲流域呈加重趋势。

### 参考文献:

[1] 刘畅,林绅辉,焦学尧,等. 粤港澳大湾区水环境状况分析及治理对策初探[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(6): 1085-1096. (LIU Chang, LIN Shenhui, JIAO Xueyao, et al. Problems and treatment countermeasures of water environment in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(6): 1085-1096. (in Chinese))

[2] 陈文思,陈仲策. 关于广东省中小河流治理几个问题的探讨[J]. 广东水利水电, 2011(增刊1): 20-21. (CHEN Wensi, CHEN Zhongce. Discussion on several problems of small and medium river management in Guangdong Province [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2011(Sup1): 20-21. (in Chinese))

[3] 游静玉. 深圳市水污染治理的实施思路及建议[J]. 现代物业, 2013, 12(8): 114-115. (YOU Jingyu. Implementation ideas and suggestions for water pollution control in Shenzhen City [J]. Modern Property Management, 2013, 12(8): 114-115. (in Chinese))

[4] 广东省社会科学院. 广东省经济社会发展报告(2017)》科技篇: 广东省生态环境发展研究报告(节选) [EB/OL]. (2017-08-03) [2020-04-22]. [http://www.gdass.gov.cn/MessageInfo\\_5641.shtml](http://www.gdass.gov.cn/MessageInfo_5641.shtml).

[5] 傅博,黄国如. 广东江门四堡水库水质时空变化及综合评价研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 64-71. (FU Bo, HUANG Guoru. Study on spatiotemporal variations and comprehensive evaluation of water quality of

Sibao Reservoir in Jiangmen City, Guangdong Province [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(5): 64-71. (in Chinese))

[6] 杨梦婵,叶有华,张原,等. 深圳市综合水质指数研究及其在水资源资产评估上的应用[J]. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1129-1138. (YANG Mengchan, YE Youhua, ZHANG Yuan, et al. Study on integrated water quality index and its application in water resources assets assessment in Shenzhen [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(7): 1129-1138. (in Chinese))

[7] 尹姗姗,朱雅敏. 珠海市近岸海域水质综合评价及防治措施研究[J]. 水利科技与经济, 2014, 20(2): 26-29. (YIN Shanshan, ZHU Yamin. Comprehensive assessment of seawater quality and pollution treatment measures in Zhuhai City [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2014, 20(2): 26-29. (in Chinese))

[8] 邵念荣. 中山市水源水质安全问题及保障措施[J]. 广东农业科学, 2010, 37(9): 229-231. (SHAO Nianrong. Water source and water quality safety problems and guarantee measures in Zhongshan City [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, 37(9): 229-231. (in Chinese))

[9] 刘大为. 佛山市水环境质量评价和分析[J]. 环境保护与循环经济, 2010, 30(8): 53-55. (LIU Dawei. Evaluation and analysis of water environment quality in Foshan [J]. Environmental Protection & Circular Economy, 2010, 30(8): 53-55. (in Chinese))

[10] 王伟良. 东江惠州段流域水环境容量计算与总量控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.

[11] 卢薇. 东莞市水环境现状分析及治理对策研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2005.

[12] 杨浩文,黄芳,林少君,等. 肇庆星湖水环境现状与变化趋势[J]. 生态科学, 2004(3): 204-207. (YANG Haowen, HUANG Fang, LIN Shaojun, et al. Water quality and its change in Xianhu Lake, Guangdong Province [J]. Ecological Science, 2004(3): 204-207. (in Chinese))

[13] FANG M, KESTER D R, NING X, et al. Study on water quality of Port Shelter Bay, Hong Kong [C]//Proceedings of the European Asian Workshop on Investigation & Management of Mediterranean & South China Sea Coastal Zone, Hong Kong: University of Rhode Island, 1998.

[14] YU J A, HO W T, LU H M, et al. Study on water quality and genotoxicity of surface microlayer and subsurface water in Guangzhou section of Pearl River [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 174(1/2/3/4): 681-692.

[15] 王文静,韩宝龙,郑华,等. 粤港澳大湾区生态系统格局变化与模拟[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3364-3374. (WANG Wenjing, HAN Baolong, ZHANG Hua, et al. Evolution and simulation of the ecosystem patterns of the Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3364-3374. (in

- Chinese))
- [16] 卢治文,陈军. 粤港澳大湾区防洪安全保障策略初探[J]. 中国水利, 2019(21): 30-31. (LU Zhiwen, CHEN Jun. Preliminary study on flood control security in Greater Bay Area of Guangdong, Hong Kong and Macao[J]. China Water Resources, 2019(21): 30-31. (in Chinese))
  - [17] 唐亦汉,陈晓宏. 近 50 年珠江流域降雨多尺度时空变化特征及其影响[J]. 地理科学, 2015, 35(4): 476-482. (TANG Yihan, CHEN Xiaohong. Multi-scale spatio-temporal characteristics and influence of precipitation variation in Zhujiang River Basin during the last 50 Years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(4): 476-482. (in Chinese))
  - [18] HIRSCH R M, SLACK J R, SMITH R A. Techniques of trend analysis for monthly water-quality data[J]. Water Resources Research, 1982, 18(1): 107-121.
  - [19] 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))
  - [20] 张姝琪,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))
  - [21] 于延胜,陈兴伟. 基于 Mann-Kendall 法的水文序列趋势成分比重研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1585-1591. (YU Yansheng, CHEN Xingwei. Study on the percentage of trend component in a hydrological time series based on Mann-Kendall method[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(9): 1585-1591. (in Chinese))
  - [22] 王东升,袁树堂,杨祺. 金沙江流域云南片水文极小值演变及生态基流保障分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 35-41. (WANG Dongsheng, YUAN Shutang, YANG Qi. Analysis of hydrological minimum evolution and ecological base flow guarantee in Yunnan area of Jinshajiang River Basin, China[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 35-41. (in Chinese))
  - [23] 郭丽峰,郭勇,罗阳,等. 季节性 Kendall 检验法在滦河干流水质分析中的应用[J]. 水资源保护, 2014, 30(5): 60-67. (GUO Lifeng, GUO Yong, LUO Yang, et al. Application of seasonal Kendall test method to analysis of water quality in main stream of Luanhe River[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(5): 60-67. (in Chinese))
  - [24] 谢毅文,陶谨,梁健,等. 广东省汛期及非汛期最大日降雨量时空特征分析[J]. 人民长江, 2012, 43(15): 68-72. (XIE Yiwen, TAO Jin, LIANG Jian, et al. Analysis of spatial-temporal distribution feature of maximum daily precipitation in flood period and non-flood period in Guangdong Province[J]. Yangtze River, 2012, 43(15): 68-72. (in Chinese))
  - [25] 张伟,孙健,聂红涛,等. 珠江口及毗邻海域营养盐对浮游植物生长的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4034-4044. (ZHANG Wei, SUN Jian, NIE Hongtao, et al. Seasonal and spatial variations of nutrient and the response of phytoplankton in PRE and Adjacent Sea Areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 4034-4044. (in Chinese))
  - [26] 蔡阳扬,岑竞仪,欧林坚,等. 夏秋季珠江口水域 COD、DO、营养盐分布特征及其富营养化评价[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2014, 35(3): 221-227. (CAI Yangyang, CEN Jingyi, OU Linjian, et al. Distribution characteristics of COD, DO and nutrients in Pearl River Estuary and its eutrophication assessment in summer and autumn[J]. Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition), 2014, 35(3): 221-227. (in Chinese))
  - [27] 梁志宏,陈秀洪,罗欢,等. 深圳湾水质时空分布特征及污染源解析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 93-99. (LIANG Zhihong, CHEN Xiuhong, LUO Huan, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of water quality in Shenzhen Bay and pollution source analysis[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 93-99. (in Chinese))
  - [28] 刘宝林,张鸿,谢刘伟,等. 珠江干流表层沉积物重金属污染特征及潜在生态风险[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2015, 47(2): 141-147. (LIU Baolin, ZHANG Hong, XIE Liuwei, et al. Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments from the Pearl River Artery[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2015, 47(2): 141-147. (in Chinese))
  - [29] 张起源,刘谓承,赵建刚,等. 广东沿海沉积物重金属含量及风险评价[J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4653-4660. (ZHANG Qiyuan, LIU Xucheng, ZHAO Jiangang, et al. Contents and risk assessment of heavy metal sediments in Guangdong coastal areas[J]. China Environmental Science, 2018, 38(12): 4653-4660. (in Chinese))
  - [30] 杜韶嫔. 珠江出海口门水环境中砷、汞、铅、镉的测定及评价[D]. 广州:华南理工大学, 2012.
  - [31] 广东省海洋与渔业局. 2017 年广东省海洋环境状况公报[EB/OL]. (2019-05-17)[2020-03-18]. [http://gdee.gd.gov.cn/hjzkgb/content/post\\_2466175.html](http://gdee.gd.gov.cn/hjzkgb/content/post_2466175.html).
  - [32] 陶倩君,郭程轩. 广东省水资源生态足迹的定量评价及其影响因素[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 28-33. (TAO Qianjun, GUO Chengxuan. Quantitative evaluation and influential factor of water resources ecological footprint in Guangdong Province[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 28-33. (in Chinese))
  - [33] 崔东亮,何舸,赵亮. 粤港澳大湾区水资源生态足迹及空间利用差异分析[C]//2019 中国环境科学学会科学技术年会论文集. 西安:中国环境科学学会, 2019: 10.

(收稿日期:2020-08-05 编辑:王 芳)