

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190361

# 小清河下游水质评价及污染物入海通量研究

刘瑜婷, 韩美, 潘彬, 井立宪

(山东师范大学地理与环境学院, 山东 济南 250358)

**摘要:**为改善小清河水质污染状况,保护莱州湾水环境,根据2008~2017年小清河下游监测断面数据,分析小清河下游水环境质量状况,估算污染物入海通量并讨论污染物入海通量主要影响因素。结果表明:10年间小清河下游水环境质量呈好转趋势,超出《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)Ⅲ类水质标准的污染物主要是石油类、COD和TP,石油类为小清河下游的首要污染物。小清河年均污染物入海总量约为181 732t,其中COD入海通量起主导作用。各类污染物入海通量主要受径流量、污染物浓度和时间因素影响,且各类污染物入海通量及入海总量年际变化均呈下降趋势。

**关键词:**小清河;水质;污染物入海通量

**中图分类号:**TV213.4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2020)03-0088-09

随着莱州湾沿岸工、农业发展与人口增长,污染物入海总量不断增加,莱州湾水环境污染日益严重。2010~2017年,莱州湾已连续8年四季均出现劣于第四类海水水质的情况<sup>[1]</sup>,其水环境的保护和治理迫在眉睫。小清河是莱州湾中仅次于黄河的第二大污染源,也是莱州湾高浓度无机氮和活性磷酸盐的主要来源<sup>[2-4]</sup>。因此研究小清河口水质变化趋势及主要污染物入海通量,对莱州湾近岸海域污染防治工作意义非凡。

围绕河口水质及河流污染物入海通量这一主题,国内外学者开展了大量研究<sup>[5-9]</sup>,使得入海通量估算方法不断改进,河流水质评价体系日臻完善。孙好芬等<sup>[10]</sup>测定了小清河下游水样TS、TDS、SS、钙镁离子、氯离子、硫酸根离子、碳酸根离子、碳酸氢根离子的含量;张荣荣等<sup>[11]</sup>利用光学分析法测定了小清河下游水样的硝态氮含量。邹涛等<sup>[12]</sup>分析了小清河口水质及小清河下游河道的营养盐收支情况,结果表明河口生产力旺盛,形成成为氮磷汇通量,且磷汇通量要远小于氮汇通量。孙伟等<sup>[13]</sup>根据2010~2015年小清河口水质监测数据,系统分析了小清河口水环境质量状况及主要污染物入海通量变化规律,结果表明石油类和COD是小清河口水域主

要污染因子,监测期间水环境质量呈好转趋势。本文基于2008~2017年小清河下游监测数据,系统分析小清河下游水环境质量状况,估算小清河主要污染物的入海通量,以期对小清河的进一步治理、莱州湾水质状况的改善提供参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

小清河发源于济南西郊陆里闸,流向大致与黄河平行向东,途中接纳绣江河、杏花沟、孝妇河、老塌河等支流,流经济南、淄博、滨州、东营和潍坊等5市18县,最终于潍坊寿光羊角沟汇入莱州湾(见图1)。全长233km,总流域面积10 499km<sup>2</sup>,是山东省一条集泄洪、排涝、通航、灌溉、排污等功能于一体的综合性大型河道,也是山东水系大动脉的重要组成部分。

从王道闸至河口段为小清河的感潮段,全长约70km,水文受海洋潮汐影响。河口段全长约23km,河道宽度大于100m,口门处宽度达300m以上。小清河河口呈喇叭状,附近海域属于不正规的半日混合潮区,在一个太阳日内,出现两次高潮和两次低潮。水动力不足,河道内污水不能顺利排入外海,污染物在河道

收稿日期:2019-10-14

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41371517);山东省科技计划项目(2013GSF11706)

作者简介:刘瑜婷(1998-),女,山东淄博人,本科生,研究方向为水文水资源。E-mail: liuyt127666@126.com

通讯作者:韩美(1963-),女,山东寿光人,博士,教授,研究方向为流域水资源与湿地生态评价。E-mail: hanmei568568@126.com

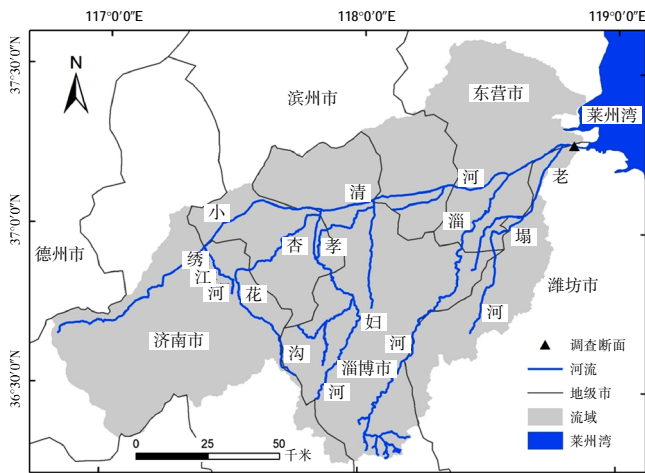


图1 小清河流域图

Fig.1 The map of Xiaoqinghe River basin

内滞留时间长<sup>[14-15]</sup>。

### 1.2 数据来源

根据《江河入海污染物总量及河口区环境质量监测技术规程》<sup>[16]</sup>的要求,于2008~2017年枯水期(5月)、丰水期(8月)、平水期(10月)小清河干流(东经118.8275°,北纬37.275°)设置监测断面,得到径流量及水质监测项目数据。其中,水质监测项目包括石油类、化学需氧量、氨-氮、总磷、砷和重金属类(Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、Cr<sup>6+</sup>)。各水质监测项目的检测方法如下:石油类采用紫外分光光度法,化学需氧量采用重铬酸盐法,氨-氮采用水杨酸分光光度法,总磷采用钼酸铵分光光度法,砷采用二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法,铜、铅、锌、镉采用原子吸收分光光度法,汞采用冷原子吸收分光光度法,六价铬采用二苯碳酰二肼分光光度法。由于本次调查断面与小清河入海处距离较近,本文认为污染物入海前不再变化。

### 1.3 数据处理

#### 1.3.1 水质状况分析

污染指数是评价水环境质量的一种重要指标,包括单因子指数、平均污染指数和综合污染指数等。单因子指数法将监测断面某种污染物的实测浓度与该污染物的评价标准进行比较,直观地反映该污染物的超标指数,确定水质评价等级,计算式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: $i$ 为污染因子; $P_i$ 为污染物 $i$ 的单因子指数; $C_i$ 为某监测断面污染物 $i$ 的实测浓度; $S_i$ 为污染物 $i$ 的评价标准。 $P_i \leq 1$ ,则符合评价标准。《山东省地表水环境功

能区划》(2010)<sup>[17]</sup>将小清河寿光市侯辛庄村北至入渤海莱州湾口的河道水域划分为小清河寿光一般鱼类用水区,要求达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)<sup>[18]</sup>所规定的Ⅲ类水质类别,本文调查断面位于此河段内,因此采用Ⅲ类水质标准为标准值进行评价(见表1)。

表1 地表水环境质量标准(Ⅲ类/mg·L<sup>-1</sup>)<sup>[17]</sup>

Table1 The environmental quality standards for surface water (Ⅲ standards)

项目	石油类	化学耗氧量	氨-氮	总氮	总磷	砷
评价标准	0.05	20	1.0	1.0	0.2	0.05
项目	铜	铅	锌	镉	汞	六价铬
评价标准	1.0	0.05	1.0	0.005	0.0001	0.05

综合污染指数(PI)的计算方法为将监测断面上所有参加评价的污染因子的单因子指数加总求和:

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

式中:PI为综合污染指数; $P_i$ 为污染物 $i$ 的单因子指数; $n$ 为参与评价的污染物总个数。

平均污染指数(WQI)由用综合污染指数除以参与评价的污染物总个数得到:

$$WQI = \frac{1}{n} PI \quad (3)$$

式中:WQI为平均污染指数;PI为综合污染指数; $n$ 为参与评价的污染物总个数;当 $WQI < 0.2$ 时为清洁, $0.2 \leq WQI < 0.5$ 时为轻度污染, $0.5 \leq WQI < 2$ 时为中度污染, $2 \leq WQI < 4$ 时为重度污染, $WQI \geq 4$ 时为严重污染<sup>[19]</sup>。

污染分担率也是评价水环境污染的一项重要指标,它通过污染物 $i$ 在所有污染因子中的分担率,反映该污染物对该河段的整体污染程度的贡献比率,其计算式为:

$$G_i = \frac{P_i}{PI} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $G_i$ 为污染物 $i$ 的分担率; $P_i$ 为污染物 $i$ 的单因子指数;PI为综合污染指数。污染分担率最高的污染物即为该河段的首要污染物。

### 1.3.2 污染趋势分析

本文对小清河入海水质变化趋势的定量分析采用 Spearman(斯皮尔曼)秩相关系数法。对于给定的周期长度为  $m$  的时间序列,令  $T_j$  代表某水质指标  $j$  时间排列的位次, $D_j$  代表从周期 1 到周期  $m$  该水质指标  $j$  的数值从小到大排列的位次,那么要素  $T_j$  和  $D_j$  之间的秩相关系数被定义为:

$$R_j = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^m d_j^2}{m(m^2-1)}, \quad d_j = T_j - D_j \quad (5)$$

式中: $R_j$  为某水质指标  $j$  的秩相关系数; $d_j$  为要素  $T_j$  和  $D_j$  的差值。

将 Spearman 秩相关系数的绝对值同其统计表中临界值  $W_\alpha$  进行比较。当  $|R_j| > W_\alpha$  时表明变化趋势有显著意义;如果  $R_j$  是负值,则表明在评价时段内有关统计量指标变化呈下降趋势或好转趋势;如果  $R_j$  为正值,则表明在评价时段内有关统计量指标变化呈上升趋势或加重趋势;当  $|R_j| \leq W_\alpha$  时表明变化趋势没有显著意义,说明在评价时段内水质变化稳定或平稳<sup>[9]</sup>。

### 1.3.3 污染物入海通量估算方法

本文根据小清河径流量小,水流缓慢,地表径流影响大的基本特征,结合已有检测数据的特点,参考 Webb B W 建模构造的时段通量估算式<sup>[20-21]</sup>,得到污染物入海通量计算公式:

$$W = \sum_{i=1}^n C_i \times Q_i \quad (6)$$

式中: $W$  为污染物年入海通量; $n$  为水情时段数; $C_i$  为污染物在  $i$  水情时段的平均浓度; $Q_i$  为  $i$  水情时段河流入海径流量。本文中小清河污染物年入海通量为枯水期、丰水期和平水期入海通量之和。

## 2 结果分析

### 2.1 径流量

根据 2008~2017 年小清河监测断面丰水期、平水期、枯水期的监测数据,计算得到小清河逐年入海径流量。由监测断面的径流量数据显示(见图 2),2008~2017 年小清河年均入海径流量为  $18.39 \times 10^8 \text{m}^3$ ,且 10 年间小清河入海径流量呈现出显著的下陷趋势,可能与小清河流域近年来的干旱化趋势、工农业用水量变化以及河道闸坝等水利工程建设有关。

由于小清河为雨源型河流,干流主要由降雨径流、城市排水和地下水补给,故小清河丰水期径流量最大,

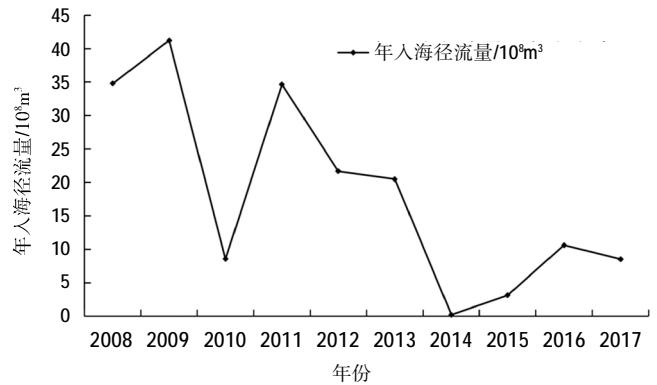


图 2 小清河入海径流量

Fig.2 The discharge of the Xiaoqinghe River into sea

10a 丰水期平均流量约为  $8.52 \times 10^8 \text{m}^3$ ,占全年径流量的 46.34%;平水期径流量次之,约为  $5.58 \times 10^8 \text{m}^3$ ,占全年径流量的 30.33%;枯水期最小,径流主要靠城市中水,地下水及灌溉尾水补给,约为  $4.29 \times 10^8 \text{m}^3$ ,占全年的 23.33%。

### 2.2 小清河下游水质状况

计算 2008~2017 年小清河监测断面逐年丰水期、平水期、枯水期各水质要素浓度之平均值,作为该年度各水质要素的年平均浓度。由表 2 可知,各水质要素中 COD 浓度最高,其次为石油类、 $\text{NH}_4\text{-N}$  和 TP,三者属同一量级,再次为 Zn,最低为 Hg。

十年间各水质要素浓度变化特征各异。从各水质要素的年度 Spearman 秩相关系数可知,年平均浓度显著下降的水质要素为石油类,呈下降趋势但下降趋势不显著的水质要素有 COD、As、 $\text{NH}_4\text{-N}$  和 Hg,呈上升趋势但上升趋势不显著的水质要素有 Cu、Cd、Zn、TP 和 Pb,呈显著上升趋势的是  $\text{Cr}^{6+}$ 。Cu、Pb 和 Cd 浓度在 2017 年激增。范新风<sup>[22]</sup>认为,激增的 Pb、Cd 和  $\text{Cr}^{6+}$  可能来自同一污染源,且小清河流域近年来固体废弃物排放量显著递增是该现象发生的主要原因。

单因子指数法评价表明(见图 3),超出《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) III 类水质标准的污染物主要是 TP(单因子指数范围 0.93~2.85)、COD(1.97~10.14)和石油类(3.32~16.66)。其中,石油类浓度超标情况最为严重,十年均超出 III 类水质标准,2010 年超标最为严重,浓度达到 0.83mg/L,超出 III 类水质标准约 16 倍。其原因一方面可能与该年份沿河排污口石油类污染物排放增多有关;另一方面,2010 年径流量减少,河

表2 小清河下游污染物浓度统计结果

Table2 The statistical results of pollutants concentration in the lower reaches of Xiaoqinghe River

年份	石油类 /mg·L <sup>-1</sup>	COD /mg·L <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> -N /mg·L <sup>-1</sup>	TP /mg·L <sup>-1</sup>	As /μg·L <sup>-1</sup>	Cu /μg·L <sup>-1</sup>	Pb /μg·L <sup>-1</sup>	Zn /μg·L <sup>-1</sup>	Cd /μg·L <sup>-1</sup>	Hg /μg·L <sup>-1</sup>	Cr <sup>6+</sup> /μg·L <sup>-1</sup>
2008	0.21	39.40	1.85	0.34	5.92	3.87	4.00	22.42	0.18	0.02	11.80
2009	0.58	92.65	0.26	0.31	1.50	1.69	1.96	12.46	0.19	0.13	17.23
2010	0.83	128.00	0.29	0.19	4.31	16.00	3.25	349.63	0.39	0.10	9.98
2011	0.73	110.00	0.40	0.34	1.16	22.81	3.45	79.84	4.22	0.05	14.31
2012	0.25	202.78	0.18	0.30	2.64	6.21	1.26	29.00	0.09	0.08	13.93
2013	0.20	109.01	0.36	0.57	1.76	4.26	1.47	10.06	0.12	0.09	16.01
2014	0.35	54.48	0.36	0.37	1.45	8.00	2.08	12.84	0.41	0.05	15.17
2015	0.21	54.12	0.50	0.29	1.81	4.88	2.19	40.53	0.22	0.09	21.83
2016	0.17	56.09	0.46	0.35	1.95	2.79	2.48	40.47	0.12	0.08	34.25
2017	0.17	47.28	0.19	0.31	2.22	31.34	40.08	36.77	4.53	0.07	48.54
均值	0.37	89.38	0.48	0.34	2.47	10.18	6.22	63.40	1.05	0.08	20.31
R <sub>j</sub>	-0.709*	-0.261	-0.079	0.091	-0.164	0.285	0.055	0.127	0.164	-0.030	0.770**

注:\*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;样本数为10。

流自净能力降低,导致水质要素浓度偏高。

综合污染指数和平均污染指数可以客观反映河流总体的水质状况,小清河下游综合污染指数与平均污染指数见图4。小清河下游综合污染指数范围为10.06~26.10,均值为15.69;平均污染指数范围为0.91~2.37,均值为1.43。根据平均污染指数,小清河下游虽于2008年水质恶化,且2010年和2011年整体水质超标现象较为严重,但从2012年开始污染状况逐渐缓解,并于2016年回落至10年间最低水平,治理效果突出。根据综合污染指数和平均污染指数的Spearman秩相关系数 $R_j = -0.564$ ,  $|R_j| > W_{\alpha=0.1} = 0.5494$ ,两种标准指数年际变化上均呈显著下降趋势,说明小

清河下游水环境质量总体呈现好转趋势,可能与小清河流域污染物排放量减少以及污水处理能力的提高有关<sup>[22]</sup>。但小清河下游仍有污染状况加重的风险,应高度重视。

污染分担率表征了各类污染物对小清河口区域水质污染贡献率。从表3可知,2008~2017年间,石油类对小清河下游水质污染贡献率最大,COD次之,砷最小。根据各污染物分担率的Spearman秩相关系数,分担率呈上升趋势的污染物按其显著性程度排序分别是重金属类(显著上升)、TP、As、NH<sub>4</sub>-N和COD,石油类污染物分担率则呈下降趋势。

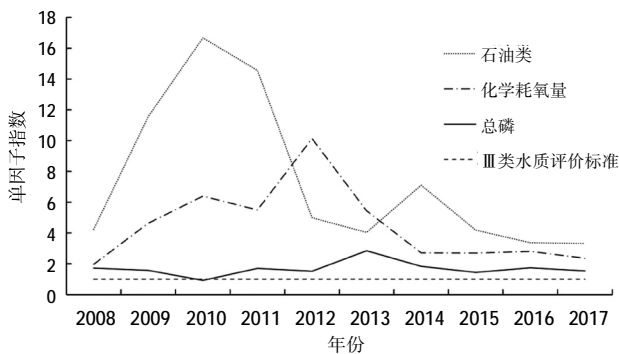


图3 超标污染物单因子指数

Fig.3 The single factor indexes of excessive pollutants

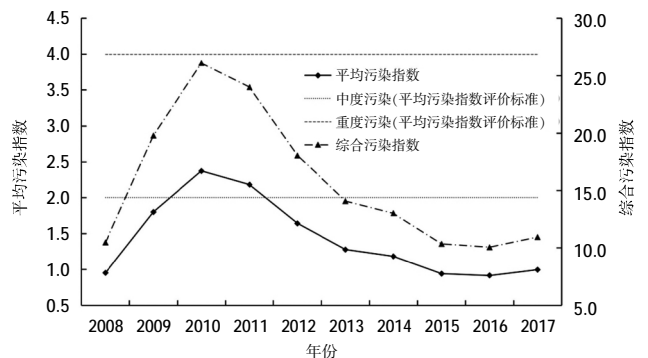


图4 小清河下游污染指数变化

Fig.4 The variation of pollution indexes in the lower reaches of Xiaoqinghe River

表3 小清河下游污染物分担率

Table3 The contributing rates of Pollutants in the lower reaches of Xiaoqinghe River

年份	石油类	COD	NH <sub>4</sub> -N	TP	As	重金属类
2008	40.52%	18.80%	17.62%	16.40%	1.13%	5.52%
2009	58.44%	23.41%	1.31%	7.94%	0.15%	8.75%
2010	63.85%	24.53%	1.12%	3.57%	0.33%	6.60%
2011	60.61%	22.91%	1.65%	7.12%	0.10%	7.61%
2012	27.62%	56.11%	0.99%	8.41%	0.29%	6.56%
2013	28.80%	38.74%	2.54%	20.28%	0.25%	9.40%
2014	54.49%	20.92%	2.74%	14.15%	0.22%	7.47%
2015	40.42%	26.14%	4.85%	14.02%	0.35%	14.22%
2016	33.42%	27.87%	4.60%	17.40%	0.39%	16.32%
2017	30.32%	21.60%	1.71%	14.13%	0.41%	31.84%
均值	43.85%	28.10%	3.91%	12.34%	0.36%	11.43%
R <sub>j</sub>	-0.515	0.224	0.236	0.394	0.261	0.782**

注:\*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;样本数为10。

### 2.3 小清河污染物入海通量

根据2008~2017年小清河监测断面丰水期、平水期、枯水期径流量及水质监测数据,计算得到小清河各污染物逐年入海通量,并以各污染物入海通量之和作为污染物入海总量(见表4)。小清河污染物入海总量2008~2011年波动较大,2012年之后呈现下降趋势。

其中COD入海通量对入海总量的贡献最大,占比98.53%,其他污染物所占入海总量的比例均小于1%。为考察各污染物入海通量的年际变化趋势,计算污染物入海通量的年际Spearman秩相关系数。污染物入海总量的秩相关系数 $R_j = -0.612$ ,  $|R_j| < W_{\alpha=0.05}$ ,下降趋势未达到显著水平。在统计的11种主要污染物中,年入海通量的年际秩相关系数均为负值,显示各要素的年入海通量均呈下降趋势,其中下降趋势呈显著水平的污染物为As、石油类、Zn、NH<sub>4</sub>-N和TP。

小清河丰水期向海输送的污染物总量约占年均入海污染物总量的45%,平水期、枯水期分别占31%、24%。丰水期输送的石油类、COD、NH<sub>4</sub>-N、TP、As、重金属类分别占年入海总量的45%、49%、36%、63%、37%、51%;平水期输送的石油类、COD、NH<sub>4</sub>-N、TP、As、重金属类分别占年入海总量的34%、26%、35%、24%、45%、26%;枯水期输送的石油类、COD、NH<sub>4</sub>-N、TP、As、重金属类分别占年入海总量的21%、25%、29%、13%、18%、23%。丰水期的输送通量是年通量的主要贡献者。

### 2.4 污染物入海通量与径流量、污染物浓度的关系

基于2008~2017年监测断面逐年丰水期、平水期、枯水期监测数据,小清河污染物入海通量、入海径流量、污染物浓度的变化特征(见图5),并计算小清河污染物入海通量分别与入海径流量、污染物浓度的Pearson相关系数(见表5)。

表4 小清河污染物入海通量

Table4 The pollutant fluxes into the sea of Xiaoqinghe River

年份	石油类/t	COD/t	NH <sub>4</sub> -N/t	TP/t	As/t	Cu/t	Pb/t	Zn/t	Cd/t	Hg/t	Cr <sup>6+</sup> /t	入海总量/t
2008	739	137 051	6 424	1 196	20.59	13.45	13.91	77.99	0.638	0.070	41.05	145 577
2009	2 385	382 148	1 071	1 296	6.17	6.99	8.07	51.39	0.782	0.535	71.08	387 045
2010	712	109 379	249	159	3.68	13.67	2.78	298.77	0.333	0.087	8.53	110 827
2011	2 522	381 194	1 373	1 186	4.02	79.04	11.96	276.69	14.618	0.182	49.58	386 710
2012	541	439 458	390	659	5.71	13.46	2.74	62.85	0.195	0.180	30.20	441 162
2013	415	223 504	731	1 170	3.62	8.73	3.01	20.62	0.240	0.192	32.83	225 890
2014	7	1 117	7	8	0.03	0.16	0.04	0.26	0.008	0.001	0.31	1 140
2015	65	16 894	157	91	0.57	1.52	0.68	12.65	0.070	0.028	6.82	17 229
2016	179	59 571	492	372	2.07	2.96	2.64	42.98	0.124	0.089	36.37	60 701
2017	142	40 335	159	264	1.89	26.74	34.19	31.36	3.865	0.063	41.41	41 039
均值	771	179 065	1 105	640	4.83	16.67	8.00	87.56	2.087	0.143	31.82	181 732
R <sub>j</sub>	-0.806**	-0.612	-0.661*	-0.636*	-0.842**	-0.236	-0.321	-0.673*	-0.382	-0.430	-0.285	-0.612

注:\*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;样本数为10。

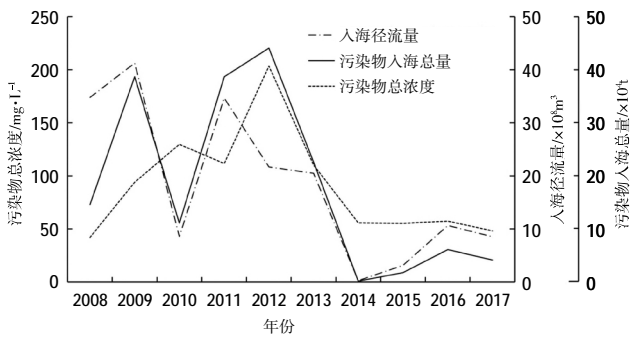


图5 小清河污染物入海通量与入海径流量、污染物总浓度

Fig.5 The fluxes of pollutants into the sea, the runoff and the total concentration of pollutants in the Xiaoqinghe River

十年间小清河污染物入海总量的变化特征与径流量变化规律基本吻合,仅在 2012 年略有出入。2012 年小清河入海径流量偏少,但污染物入海总量却达到十年间最大值,这是由于 2012 年 COD 年均浓度远远高于其他年度的年平均浓度值,而 COD 入海量在入海总量中起主导作用的,最终导致该年入海总量偏高。

以各污染物浓度值之和为污染物总浓度。十年间污染物总浓度波动变化,2008~2012 年呈上升趋势,2012~2017 年则趋于下降。污染物入海总量的变化规律在 2010、2011 年与污染物总浓度有出入。2010 年污染物总浓度较高,但径流量表现出枯水年的水文特征,导致污染物入海总量处于较低水平,2011 年则与

之相反。

年尺度上,小清河污染物年入海总量的年际变化与年入海径流量和年均污染物总浓度均呈显著的正相关关系,这表明年尺度的小清河污染物入海总量由入海径流量和污染物浓度共同决定。三个水文时期中,小清河污染物丰水期入海总量与丰水期径流量和丰水期污染物总浓度均呈显著的正相关关系,说明丰水期入海径流量和污染物总浓度均为污染物入海总量的主要影响因素;平水期与枯水期中,污染物入海总量仅与径流量呈显著正相关关系,影响污染物入海总量的主要因素是径流量而非污染物总浓度。

对于各污染物而言,不同时间尺度、不同时期,入海通量与其浓度、径流量的相关性各异,具体情况见表 5。

石油类属于典型点源排放污染物,径流量是影响其入海通量的关键因素,而入海通量与浓度的相关关系则相对复杂。一方面,浓度受到降水与径流的稀释,稀释作用通常在丰水期最强;另一方面,丰水期水温偏高,降解石油类污染物的微生物活性增强,促进石油类降解,使丰水期石油类浓度与其入海通量的相关程度减弱,未呈现显著的相关性。

COD 是表示水中还原性物质多少的一个指标,水中的还原性物质包括各种有机物、亚硝酸盐、硫化物、亚铁盐等,其中有机物占比最大,由点源与非点源混

表5 2008-2017年小清河污染物入海通量与径流量、污染物浓度的相关性

Table5 The correlation between pollutant fluxes into the sea, runoff and pollutants concentration in the Xiaoqinghe River during 2008-2017

		石油类	COD	NH <sub>4</sub> -N	TP	As	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	Cr <sup>6+</sup>	入海总量
丰水期	径流量	0.923***	0.662*	0.407	0.864*	0.853*	0.415	0.049	0.411	0.358	0.764*	0.435	0.669*
	浓度	0.309	0.761*	0.839**	0.666*	-0.145	0.502	0.878***	0.336	0.941***	0.031	0.396	0.755*
平水期	径流量	0.890***	0.696*	0.828**	0.942***	0.744*	0.562#	0.180	0.709*	-0.060	0.538	0.836**	0.713*
	浓度	0.904***	0.594#	0.863**	0.603#	0.970***	0.607#	0.863**	0.519	0.976***	0.919***	0.244	0.529
枯水期	径流量	0.695*	0.867**	0.605#	0.766**	0.793**	0.615#	0.158	0.805**	0.121	0.499	0.147	0.875***
	浓度	0.666*	0.412	0.991***	0.216	0.277	0.743*	0.961***	-0.203	0.887***	0.773**	0.904***	0.406
年尺度	径流量	0.825**	0.777**	0.578*	0.946***	0.639*	0.423	0.168	0.243	0.377	0.738*	0.846**	0.785**
	浓度	0.674*	0.743*	0.954***	0.442	0.791**	0.654*	0.910***	0.789**	0.803**	0.606#	0.170	0.738*

注:#表示在 0.1 水平(双侧)上显著相关; \*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 0.001 水平(双侧)上显著相关。

合排放产生。因此 COD 入海通量与其浓度、径流量的相关关系呈现如下特点:COD 枯水期入海通量与径流量显著正相关,丰水期、平水期与年尺度入海通量则与径流量、浓度均呈显著正相关关系。

畜禽养殖、含 N、P 化肥的施用与含 As 农药的使用所引起的农业面源污染是小清河  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TP 和 As 产生的首要原因,它们的入海通量与其浓度和径流量的相关关系大同小异。一般地,枯水期由于流域内降水量较少,且以降雪为主,对面源污染区的冲刷力度小,汇集到河流中的污染物较少,污染物入海通量主要由径流量控制,TP 和 As 即表现出这种特征。然而,影响  $\text{NH}_4\text{-N}$  排放的因素较 TP 和 As 更为复杂,渔业养殖饲料的投喂、浮游生物的固氮作用,以及微生物的氨化、硝化和反硝化作用等,对水体中  $\text{NH}_4\text{-N}$  含量也有较为直接的影响,因此,  $\text{NH}_4\text{-N}$  入海通量与其浓度和径流量的相关关系表现出复杂性。枯水期  $\text{NH}_4\text{-N}$  入海通量与其浓度呈显著的正相关关系;丰水期中,其入海通量与径流量却未表现出显著的相关性。另外,丰水期降水与径流对 As 的稀释作用远强于冲刷、汇聚作用,因此丰水期 As 入海通量与浓度成负相关关系。

Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 和  $\text{Cr}^{6+}$  等重金属类污染物污染源复杂,由点源污染与非点源污染共同产生,例如工厂未达标废水的排放,以及汽车尾气中重金属粒子由雨水冲刷汇聚于河流中等。影响重金属类污染物排放的因素及其变化、组合方式繁多,导致重金属类入海通量与其浓度、径流量的相关关系表现出复杂多变的特征。

对于污染物入海通量的影响因素,已有多位学者进行过探讨。夏斌<sup>[23]</sup>认为环渤海 16 条河流的污染物入海通量主要受径流量影响。这种河流输送污染物通量主要取决于径流量的现象在九龙江河口、黄河下游和长江口也有报道<sup>[24-26]</sup>。而本文通过计算污染物入海通量与径流量、污染物浓度之间的相关系数,认为小清河 2008-2017 年污染物入海通量是由径流量和污染物浓度共同决定的。如果延长时间序列,合理增加调查断面数量与取样次数,可对小清河入海通量影响因素进行更准确客观、更进一步的探讨。

### 3 结论

(1)2008-2017 年检测期间小清河下游浓度呈下降趋势的污染物有石油类、COD、As、 $\text{NH}_4\text{-N}$  和 Hg,浓

度呈上升趋势的污染物有  $\text{Cr}^{6+}$ 、Cu、Cd、Zn、TP 和 Pb。超出《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) III 类水质标准的污染物主要是 TP、COD 和石油类,其中,石油类浓度超标最为严重。

(2)小清河下游综合污染指数均值为 15.69,平均污染指数均值为 1.43。检测期间小清河下游水环境质量总体呈现好转趋势,污染状况得到缓解。石油类和 COD 是小清河下游的主要污染因子,石油类为小清河下游的首要污染物。

(3)2008-2017 年小清河年均入海径流量为  $18.39 \times 10^9 \text{m}^3$ , 年均污染物入海总量约为 181 732t,其中 COD 对入海通量总量的贡献最大。小清河污染物入海总量以及各污染物入海通量年际变化均呈下降趋势。

(4)丰水期与年尺度上小清河污染物入海总量由入海径流量和污染物总浓度共同决定,平水期与枯水期径流量成为影响污染物入海总量的主要因素。对于不同污染物,处于不同时间尺度、不同时段,径流量与污染物浓度对入海通量的影响程度也不同。

#### 参考文献:

- [1] 国家海洋局.2017 年中国海洋生态环境状况公报[Z].北京:国家海洋局,2018. (SOA. Bulletin of China marine ecological environment status in 2017 [Z]. Beijing:SOA, 2018.(in Chinese))
- [2] 邢红艳, 刘晓波. 莱州湾海域近年营养盐状况分析 [J]. 齐鲁渔业, 1994,(4):31-32. (XING Hongyan, LIU Xiaobo. Analysis of nutrient status in Laizhou Bay in recent years [J]. Shandong Fisheries, 1994,(4):31-32. (in Chinese))
- [3] 孙丕喜,王波,张朝晖,等.莱州湾海水中营养盐分布与富营养化的关系 [J]. 海洋科学进展, 2006,(3):329-335. (SUN Pixi, WANG Bo, ZHANG Zhaohui, et al. Relationship between nutrient distributions and eutrophication in sea water of the Laizhou Bay [J].Advances in Marine Science, 2006,(3):329-335. (in Chinese))
- [4] 马建新,靳洋,刘晓波,等.2002 年莱州湾海域渔业生态环境检测报告 [J]. 齐鲁渔业,2003,20(5):38-39. (MA Jianxin, JIN Yang, LIU Xiaobo, et al. The fishery ecological environment test report of Laizhou bay in 2002 [J].Shandong Fisheries, 2003,20(5):38-39. (in Chinese))
- [5] Holmes R M, Peterson B J, Tank S E, et al. Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic ocean and surrounding seas [J]. Estuaries & Coasts, 2012, 35(2):369-382.
- [6] Masahiro Sakata, Tomoharu Takagi, Satoshi Mitsunobu. Evaluation of loads and sources of heavy metals in Tama River, Tokyo [J]. Water Air Soil Pollut, 2010,213:363-373.

- [7] 毛光君,雷坤,杨丽标,徒骇-马颊河水系三条河流水质变化及污染物入海通量分析[J].长江流域资源与环境,2014,23(9):1301-1307. (MAO Guangjun, LEI Kun, YANG Libiao. Variations of water quality and pollutant fluxes from Tuhai-Majia river system [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014,23(9): 1301-1307. (in Chinese))
- [8] 国峰,李志恩,时俊,等.长江入海口徐六泾断面 2005~2012 年水环境因子及入海通量变化特征[J].长江流域资源与环境,2015,24(2):227-232. (GUO Feng, LI Zhien, SHI Jun, et al. Mutative trend of water quality at Xuliujing monitoring intersect on Yangtze River and the pollutants flux flowing into the sea during 2005-2012 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015,24(2):227-232. (in Chinese))
- [9] 韩美,路广,史丽华,等.东营市海岸带区域综合承载力评估[J]. 中国人口·资源与环境,2017,27(2):92-101. (HAN Mei, LU Guang, SHI Lihua, et al. Comprehensive carrying capacity assessment of Dongying coastal zone [J]. China Population, Resources and Environment, 2017,27(2):93-101. (in Chinese))
- [10] 孙好芬,王安琪,郭玉超,等.小清河中下游水质初步调查[J].山东化工, 2018,47(22):175-177. (SUN Haofang, WANG Anqi, GUO Yuchao, et al. Preliminary investigation of water quality in the middle and lower reaches of Xiaoqing River [J]. Shandong Chemical Industry, 2018,47(22):175-177. (in Chinese))
- [11] 张荣荣,黄振,刘雅文,等.小清河中下游水体中硝态氮含量调查[J].山东化工, 2019,48(4):213-214. (ZHANG Rongrong, HUANG Zhen, LIU Yawen, et al. Investigation of nitrate content in waters of the middle and lower reaches of Xiaoqing River [J]. Shandong Chemical Industry, 2019,48(4):213-214. (in Chinese))
- [12] 邹涛,张华,于靖.基于 muddy-LOICZ 模型的小清河河口及下游河段营养盐通量估算[J].海洋科学, 2017,41(5):117-126. (ZOU Tao, ZHANG Hua, YU Jing. Estimate of the budget of nutrients in the Xiaoqinghe River and estuary based on the muddy-LOICZ model [J]. Marine Sciences, 2017,41(5):117-126. (in Chinese))
- [13] 孙伟,张守本,杨建森,等.小清河口水环境质量评价及主要污染物入海通量研究[J].海洋环境科学,2017,36(3):366-371. (SUN Wei, ZHANG Shouben, YANG Jiansen, et al. Quality assessment of aquatic environment and fluxes of major pollutants to the Xiaoqing River estuary [J]. Marine Environmental Science, 2017,36(3):366-371. (in Chinese))
- [14] 崔燕,张龙军,罗先香,等.小清河口水质污染现状及富营养化评价[J].中国海洋大学学报, 2013,43(2):60-66. (CUI Yan, ZHANG Longjun, LUO Xianxiang, et al. Study on the water pollution and eutrophication in the Xiaoqing River estuary [J]. Periodical of Ocean University of China, 2013,43(2):60-66. (in Chinese))
- [15] 陈斌,黄海军,严立文,等.小清河河口附近海域泥沙运动特征及风场对泥沙运输的影响[J]. 海洋学报, 2009,31(2):104-112. (CHEN Bin, HUANG Haijun, YAN Liwen, et al. Sediment movement and the effect of wind to sediment transport near Xiaoqinghe River estuary [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009,31(2):104-112. (in Chinese))
- [16] 国家海洋局. 江河入海污染物总量及河口区环境质量监测技术规范[R]. 2002. (SOA. Technical regulations for monitoring the total amount of pollutants discharged from rivers into the sea and the environmental quality of river mouth areas [R]. 2002. (in Chinese))
- [17] 山东省水利厅.山东省地表水环境功能区划[R].济南:山东省水利厅,2010. (Water Resources Department of Shandong Province. Function zoning of surface water environment in Shandong Province [R]. Jinan: Water Resources Department of Shandong Province, 2010. (in Chinese))
- [18] GB3838-2002,地表水环境质量标准 [S]. (GB3838-2002, Environmental Quality Standards for Surface Water [S]. (in Chinese))
- [19] 李志伟,崔力拓.秦皇岛主要入海河流污染及其对近岸海域影响研究[J]. 生态环境学报, 2012,21(7):1285-1288. (LI Zhiwei, CUI Lituo. Contaminative conditions of main rivers flowing into the sea and their effect on seashore of Qinhuangdao [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012,21(7):1285-1288. (in Chinese))
- [20] Webb B W, Phillipe J M, Walling D E, et al. Load estimation methodologies for British rivers and their relevance to the LOIS RACS (R) programme [J]. Science of Total Environment, 1997,194/195:379-389.
- [21] 宋方方. 基于 LOADEST 统计模型的赵家溪污染物通量估算研究[D]. 重庆: 重庆大学,2014. (SONG Fangfang. Study on Pollutant Fluxes of Zhaojia River Based on Statistical Model—LOADEST [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese))
- [22] 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. (FAN Xinfeng, HAN Mei, WANG Lei, et al. Analysis of water quality change and its driving factors of the Xiaoqing River estuary in recent ten years [J]. Environmental Science, 2020,41(4):1619-1628. (in Chinese))
- [23] 夏斌. 2005 年夏季环渤海 16 条主要河流的污染状况及入海通量[D].青岛:中国海洋大学, 2007. (XIA Bin. Contaminative Conditions of Main Sixteen Rivers around Bohai Sea and Pollutant Flux Flowing into Sea in Summer of 2005 [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007. (in Chinese))
- [24] 谷文艳,陈洪涛,姚庆祯,等.黄河下游溶解态营养盐季节变化及入海通量研究[J]. 中国海洋大学学报, 2017,47(3):74-79. (GU Wenyan, CHEN Hongtao, YAO Qingzhen, et al. Seasonal variation and fluxes of dissolved nutrients in the lower reaches of the Huanghe [J]. Periodical of Ocean University of China, 2017,47(3): 74-79. (in Chinese))
- [25] Shen Z L. Preliminary study on the Changjiang River mainstream nutrients fluxes [J]. Oceanol Limnol Sin, 1997,28:522-528.
- [26] Yan Xiuli, Zhai Weidong, Hong Huasheng, et al. Distribution, fluxes and decadal changes of nutrients in the Jiulong River Estuary, Southwest Taiwan Strait [J]. Chinese Science Bulletin, 2012,18:2307-2318.



## Water Quality Assessment and Pollutant Fluxes into the Sea in the Lower Reaches of Xiaoqing River

LIU Yuting, HAN Mei, PAN Bin, JING Lixian

(College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

**Abstract:** In order to improve the water pollution situation in the Xiaoqinghe River and protect the water environment of Laizhou Bay, according to the monitoring section data of the downstream in the Xiaoqinghe River during 2008–2017, this paper analyzed the water environment quality, estimated the pollutant fluxes into the sea and discussed its main influencing factors. The results show that the water quality in the lower reaches of Xiaoqinghe River has been improving in the past 10 years. The pollutants that exceed the Class III water quality standard of Surface Water Environmental Quality Standard (GB3838–2002) are mainly petroleum, COD and TP, and petroleum is the primary pollutant one. The annual average amount of pollutants into the sea is about 181 732t, among which COD is the dominant one. The fluxes of various pollutants into the sea are mainly affected by runoff, pollutants concentration and time factor. The annual fluxes and total amount of various pollutants into the sea show a decreasing trend.

**Key words:** Xiaoqinghe River; water quality; fluxes of pollutants into the sea

(上接第 75 页)

- [9] 姚章民,王永勇,李爱鸣. 珠江三角洲主要河道水量分配比变化初步分析 [J]. 人民珠江, 2009,(2):43-45+51. (YAO Zhangmin, WANG Yongyong, LI Aiming. Primary analysis of water distribution ratio variation in main waterway in Pearl River delta. [J]. Pearl River, 2009,(2):43-45+51. (in Chinese))
- [10] 郑金海, 张蔚. 珠江三角洲航道网径潮相互作用演变规律 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2012. (ZHENG Jinhai, ZHANG Wei. Evolution of Runoff-tide Interaction in Channel Network of Pearl River Delta [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2012. (in Chinese))
- [11] 陈坚雄, 聂红海, 刘幼萍, 等. 广东省省管河道来砂量监测分析报告 (2005 年) [R]. 广东省水文局, 2006. (CHEN Jianxiang, NIE Honghai, LIU Youping, et al. Monitoring and analysis report on sand inflow from pipeline rivers in Guangdong province (2005) [R]. Guangdong Hydrology Bureau, 2006. (in Chinese))
- [12] 郭振仁, 袁丽蓉. 河口咸潮活动及其环境影响 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012. (GUO Zhenren, YUAN Lirong. Salt Tide Activities in Estuaries and Their Environmental Impact [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012. (in Chinese))
- [13] 夏军, 石卫, 张利平, 等. 气候变化对防洪安全影响研究面临的机遇与挑战 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(2):7-13. (XIA Jun, SHI Wei, ZHANG Liping, et al. Opportunity and challenge of the climate change impact on flood protection [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(2):7-13. (in Chinese))

## Tendency of Fluvial Process and Hydrologic Extreme Events in River Network of Pearl River Delta under Changing Environment

LIU Youping

(Foshan Hydrology Bureau of Guangdong Province, Foshan 528000, China)

**Abstract:** The alluvial plain of the Pearl River Delta is covered with river network. The morphology and evolution of channels affect people's living habits and economic development level. With the rapid economic development, the fluvial process has been accelerated by intensive human activities, climate change, precipitation change and other natural environment change. Based on the analysis of the hydrologic monitoring results in the past 60 years, it is found that the fluvial process has led to variability of hydrological elements since the mid-1990s, which brings safety hazards of dangerous sections of embankments, water supply security and water resource management. The alteration of river hydrological regime has turned into the new challenge for hydrologic work.

**Key words:** Pearl River Delta; changing environment; riverbed evolution; hydrologic event