

广东省陆海氮污染空间排放特征及相关性分析

邹富桢, 陈瑜, 罗育池, 袁强, 祝明月

(广东省环境科学研究院, 广东 广州 510045)

摘要:入海河流携带的陆源总氮 (TN) 是广东省近岸海域溶解无机氮 (DIN) 污染的主要来源, 摸清陆域 TN 排放来源结构、排海压力及其主要影响因素, 对广东省氮污染治理具有重要意义。本文以广东省七大流域为研究区域, 基于水质监测数据与污染源统计数据分析广东省氮污染空间分布特征、来源结构、排放强度及其区域差异, 并利用 Pearson 相关分析, 揭示陆海氮污染的主要影响因素。结果表明: (1) 2020—2022 年, 广东省河流 TN 浓度范围为 1.10~9.19 mg/L, TN 高浓度点位主要分布于珠江三角洲流域、粤东诸河流域及东江流域的下游, 枯水期 TN 浓度总体高于丰水期; (2) 广东省 TN 主要污染来源是生活源 (占比 59.79%), 其次为农业源 (占比 36.10%)。陆源氮污染排放压力强度与海域氮污染分布状况具有空间一致性, 珠江三角洲流域污染物排放量最大, 其岸段承载的排放压力也最大, 对应的珠江口是广东省近岸海域劣四类水质分布的主要区域。人口规模是影响 TN 排放的主要因素。

关键词:总氮; 陆源污染; 空间分布; 污染排放压力; 影响因素

中图分类号: X131

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2025)02-0182-08

Spatial characteristics and correlation analysis of Nitrogen pollution from land and sea in Guangdong province

ZOU Fuzhen, CHEN Yu, LUO Yuchi, YUAN Qiang, ZHU Mingyue

(Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China)

Abstract: Total nitrogen (TN) from land-based sources is the main source of dissolved inorganic nitrogen (DIN) pollution in coastal waters of Guangdong province. Clarification of the structure, discharge pressure and main influencing factors of nitrogen emissions from the land area is needed to manage marine nitrogen pollution. We utilized observation data of water quality and statistical data of pollution sources to analyze the Spatial characteristics, source structure, emission intensity and regional differences of nitrogen pollution in Guangdong Province. Pearson correlation analysis was used to reveal the main influencing factors of nitrogen emissions. The results show that: (1) The concentrations of TN are ranged from 1.10 mg/L to 9.19 mg/L in the rivers during 2020–2022, The high concentration sites of TN were mainly distributed in the river network area of the Pearl River Delta, the rivers in eastern Guangdong, and the lower reaches of the Dongjiang Rive. The total nitrogen concentration in low water period was higher than that in wet season; (2) Domestic sewage is the main source of TN pollution in Guangdong Province, which accounting for 59.79%, followed by agricultural pollution accounting for 36.10%. The distribution of marine pollution and the intensity of land-based nitrogen pollution emission are spatially consistent. There is a largest number of pollution emissions in the the the Pearl River Delta, the shoreline sections belonging to it carry the greatest emission pressure. Correspondingly, the

收稿日期: 2024-02-06, 修订日期: 2024-05-11

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2020B1111020004); 广东省环保专项资金项目 (粤财资环[2022]18 号)

作者简介: 邹富桢 (1990–), 男, 广东汕尾人, 工程师, 硕士, 主要从事流域水污染控制及水生态环境保护研究, E-mail:

ZOUfzh2267@163.com

Pearl River estuary is the primary zone in which the water quality inferior to Class IV. Population size is the main factor affecting TN discharge in this area.

Key words: total nitrogen; land-based pollution; spatial distribution; pollution pressure; influencing factors

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^[1-3]。海洋环境污染物有80%以上来自陆源排放,其中绝大部分来自河流输入^[4-5]。随着经济社会快速发展,工业化、城镇化进程不断加快,陆源污染物入海总量居高不下,近岸海域水生态环境问题逐步凸显^[6-7]。近几年发布的《中国海洋生态环境状况公报》^[8-10]显示,我国部分海域水质仍为劣四类,无机氮是影响近岸海域水质的主要污染因子。相关研究指出,入海河流携带的陆源总氮(TN)是海域无机氮的主要来源^[11-13],也是河口区赤潮等生态问题的主要诱因^[14]。因此,研究区域地表水总氮时空特征,厘清陆域总氮排放来源结构、排海压力及其主要影响因素,对深入打好近岸海域综合治理攻坚战具有重要意义。

广东省近岸海域无机氮污染问题相对突出,根据《2022年广东省生态环境状况公报》^[15],全省近岸海域年均水质为劣四类的面积比例为6.2%,主要分布在珠江口、湛江港、汕头港等河口海湾。目前,已有学者对广东省近岸海域及陆源氮污染做了研究,杨青云等^[16]研究分析了珠江口深圳海域的TN陆源入海污染负荷;董斯齐等^[17]研究了粤港澳大湾区陆域TN排放规模、来源结构与空间分布;陈秀洪等^[18]对汕头市入海河流TN等水质指标演变趋势及其污染状况进行了分析研究;赵晨辰等^[19]研究分析了深圳湾流域的TN入海年通量变化规律。这些研究多以局部区域或某一流域为研究对象,对全省TN浓度的整体时空特征的系统研究较少,因而难以为全省层面的区域流域协同和陆海统筹的环境管理政策制定提供有力支撑。

本文以广东省七大流域为研究对象,从流域单元角度分析研究区域内各流域间TN排放时空分布特征和排放结构,将流域污染排放压力分配至海域岸段,解析陆源污染压力与海域环境污染之间的空间对应关系,并分析氮污染来源影响因素,以为广东省陆源TN污染排放总量控制

及近岸海域污染防治研究提供决策支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域主要包括广东省七大流域(包括西江流域、北江流域、东江流域、珠江三角洲流域、韩江流域以及粤东诸河流域、粤西诸河流域),总面积约18万平方千米,位于20°09'N—25°31'N, 109°45'E—117°20'E之间,行政区划上,主要包括广州、深圳、佛山、东莞等21个地级市(图1)。



注:地图源于广东省标准地图服务系统

(<https://guangdong.tianditu.gov.cn/ggd/#/public/standard-map/index>),审图号:粤S(2022)350号

图1 研究区域及广东省七大流域分布

Fig. 1 Location of the study area and the seven river basins distribution

研究区域地貌类型复杂多样,有山地、丘陵、台地和平原,地势总体北高南低,北部多为山地和高丘陵,南部为平原和台地。研究区域属热带和亚热带季风气候区,光、温、水、风等气候资源丰富,且雨热同季,多年平均降水量为1771 mm,但降水时空分布不均,年内降水主要集中在4月—9月,占全年降水量的75%~95%。区域内河网密布,水道纵横交错,相互贯通,汇集了西江、北江、东江、韩江、潭江、漠阳江、鉴江

及榕江等诸多河流。研究区域河口、海湾众多,如珠江口、大鹏湾、广海湾、湛江湾、汕头港及海陵湾等。

1.2 数据来源

本文所用的地表水河流 TN 指标数据来源于广东省地表水环境逐月监测数据,涉及 88 个河流断面(点位),覆盖全省七大流域,时间范围为 2020 年 1 月至 2022 年 12 月。海洋环境数据主要采用广东省生态环境厅公布的 2020—2022 年近岸海域环境监测资料^[20-22],涉及 218 个近岸海域海水水质国控监测点位,监测项目包括 DIN 指标。

以 2020 年为基准年,各市 2020 年人口数量、人口密度、GDP 和工业总产值、工业废水排放量数据来源于广东省统计年鉴^[23],畜禽养殖量、水产养殖产量等数据来源于广东农村统计年鉴^[24]。土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心^[25]。TN 排放数据来源于 2020 年广东省及各地市环境统计公报,其中,根据《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》^[26]计算城镇生活源和农村生活源 TN 排放量;参照《农业源产排污核算系数手册》采用产排污系数法计算种植业 TN 流失量、畜禽养殖及水产养殖等农业源 TN 排放量;根据各地工业废水排放量按比例计算得出工业源 TN 污染负荷。

1.3 评估方法

1.3.1 水质评价

地表水河流水质评价参照《地表水环境质量评价办法(试行)》^[27],采用单因子评价法评价断面水质类别及等级。近岸海域水质评价依据《海水、海洋沉积物和海洋生物质量评价技术规范》^[28]的要求进行。

1.3.2 TN 排放分析

基于 2020 年污染源统计数据各流域 TN 排放量及单位土地面积排放强度,由于相关统计数据以行政区为统计单元,为了实现基于行政单元的统计指标值向流域单元统计指标值的转换,采用面积权重内插法^[29-30],将各行政区域 TN 排放数据分配到全省七大流域,估算各流域 TN 排放量,计算方法如下:

$$y_t = \sum_{st}^n A_{st} \frac{y_s}{A_s} \quad (1)$$

式中: y_t 为目标分区单元的统计指标; y_s 为源分区单元的统计指标; A_s 为源分区单元的面积; st 为源分区单元与目标分区单元相交形成的空间单元; n 为交集单元的个数; A_{st} 为相交形成的空间单元的面积。TN 入河量采用入河系数法进行估算,入河系数参考当地相关规划及研究成果^[31-32],工业源、城镇生活源入河系数取 1,农村生活、畜禽养殖源、水产养殖源和种植业面源入河系数分别取 0.7、0.6、0.4 和 0.1。

以工业源、农业源、生活源为研究对象,选取与 TN 排放关联较大的因素^[33-34],包括经济发展水平(GDP)、工业总产值、人口(人口数量和人口密度)、畜禽养殖量、水产养殖产量、种植结构(耕地面积和园地面积),采用 SPSS 24 软件进行 Pearson 相关性分析,揭示 TN 排放量的影响因素。

1.3.3 岸段污染压力强度分析

为了更清晰地反映陆源排污对近岸海域环境的影响强度,本文采用岸段污染压力强度来表达陆域氮污染排放对近岸海域水环境的压力^[35-36],反映单位长度海岸线上承载的陆源 TN 污染排放量。计算公式如下:

$$P = S / L \quad (2)$$

式中: P 为岸段污染压力强度, $t/(km \cdot a)$; S 为岸段对应陆域范围内的年 TN 污染排放量; L 为陆域对应的岸段长度。

根据入海河流产汇流特征,同时考虑岸段连续性,将研究区域陆域范围划分为 5 个污染输出单元 S1—S5(表 1)。由于漠阳江流域相对独立,将粤西诸河流域划分为 S1、S2;北江、西江和东江最后经珠江八大口门入海,因此将北江流域、西江流域、东江流域与珠江三角洲流域合并为 S3;将粤东诸河流域(除练江、榕江、黄冈河子流域)划为 S4;韩江流域与练江、榕江、黄冈河子流域合并为 S5。基于各流域 TN 排放数据,同样采用面积权重内插法分配计算各污染输出单元的 TN 排放量,并对每个污染输出单元的岸段 TN 排放压力强度进行分析。

表1 岸线分段及对应污染输出单元划分

Tab.1 Segmented coastline and corresponding pollution output unit

污染输出单元	对应的陆域范围	对应的近岸海域	对应的岸段长度/km
S1	粤西诸河流域(除漠阳江流域及其周边其他入海河流)	安铺港-博茂港海域	1425.88
S2	漠阳江子流域及周边其他入海河流	海陵湾-广海湾海域	648.66
S3	西江流域、北江流域、珠江三角洲流域	黄茅海-珠江口海域	749.06
S4	粤东诸河流域(除练江、榕江、黄冈河子流域)	大鹏湾-碣石湾海域	1110.46
S5	韩江流域与练江、榕江、黄冈河子流域	神泉湾-汕头港海域	177.90

2 结果与讨论

2.1 水质时空变化特征

2020—2022年,广东省河流TN浓度范围为1.10~9.19 mg/L, 88个点位TN浓度均值均超出地表水Ⅲ类水质标准。2020—2022年七大流域地表水(河流)TN浓度见表2。各流域TN浓度均值均超过1.50 mg/L, 均超出地表水Ⅳ类水质标准。从各流域TN浓度范围上看,珠江三角洲

流域、东江流域、粤东诸河流域TN浓度分布范围较大,其TN浓度值(中位数±中位数绝对偏差)分别为(2.39±0.50) mg/L、(2.27±0.58) mg/L、(1.75±0.63) mg/L;西江流域、北江流域、韩江流域与粤西诸河流域内各点位TN浓度分布较为集中,其TN浓度值(中位数±中位数绝对偏差)分别为(2.12±0.02) mg/L、(1.61±0.25) mg/L、(1.69±0.16) mg/L、(2.23±0.30) mg/L(图2)。

表2 2020—2022年各流域TN浓度年均值变化(mg/L)

Tab.2 Average annual change of TN concentration in each basin during 2020—2022

流域	2020年			2021年			2022年		
	均值	中位数	范围	均值	中位数	范围	均值	中位数	范围
西江流域	2.14	2.15	2.05~2.29	2.02	2.02	1.98~2.06	2.27	2.28	2.18~2.35
北江流域	1.75	1.71	1.28~2.36	1.71	1.69	1.15~2.22	1.57	1.46	1.26~2.00
东江流域	2.74	1.94	1.34~8.29	2.91	2.35	1.31~8.27	2.79	2.10	1.72~7.05
珠江三角洲流域	3.08	2.42	1.30~9.31	3.28	2.37	1.30~9.64	3.14	2.40	1.28~9.00
韩江流域	2.05	1.73	1.52~3.55	1.97	1.59	1.47~3.03	2.06	1.77	1.47~3.74
粤东诸河流域	2.67	1.66	0.82~7.82	2.61	1.71	0.88~7.32	2.60	1.88	0.82~6.92
粤西诸河流域	2.28	2.13	1.39~3.59	2.40	2.25	1.49~4.16	2.40	2.25	1.90~3.88

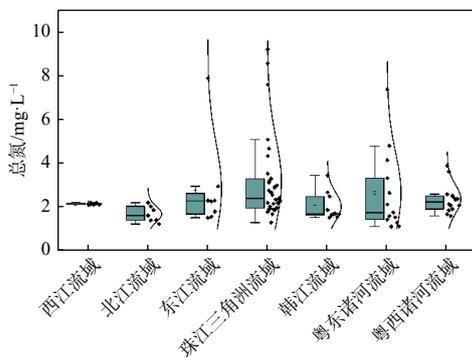


图2 2020—2022年各流域TN质量浓度

Fig. 2 TN concentration in each basin during 2020—2022

从时间变化上来看,2020—2022年全省地表

水TN年均浓度无明显差异。从年内变化看,TN月均值具有季节性变化的特征,总体上枯水期(11月至第二年4月)TN浓度月均值较高,丰水期(5月—10月)TN浓度均值相对较低(图3)。嵇晓燕等^[37]研究分析了2016—2020年中国地表水中TN浓度时空变化特征,结果表明,全国地表水TN浓度月际变化具有季节性特征,春季与冬季较高,夏季与秋季相对较低。解鑫等^[38]研究2020—2022年全国入海河流TN浓度时空特征发现,辽东、环渤海京津冀等北方地区与华南地区年内TN浓度均呈现冬季高夏季低、春季和秋季居中的季节变化规律,但北方地区的TN浓

度季节变化差异明显大于华南地区,这可能是由于南北降雨规律存在差异导致的。从广东省 TN 浓度年内变化看,虽然呈现一定的季节性特征,但变异系数仅为 6.6%,季节差异较小,该结果与前人研究结果一致。进一步分析不同流域 TN 浓度年内变化发现(图 4),西江、北江、韩江流域年内变化规律相对一致,6 月均出现高值,这可能与降雨引起农业面源污染输入增加有关;珠江三角洲、东江、粤东诸河等流域在汛期 TN 浓度均较低,可能是由于汛期降雨引起河流径流量增加,从而导致 TN 浓度稀释下降。

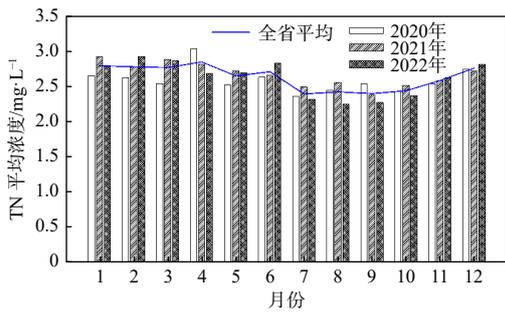


图 3 2020—2022 年广东省 TN 月均值变化

Fig. 3 Average monthly change of TN concentration in Guangdong province during 2020—2022

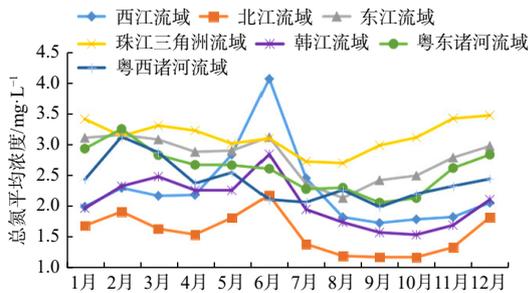


图 4 2022 年各流域 TN 月均值变化

Fig. 4 Average monthly change of TN concentration in each basin during 2022

从空间分布上来看, TN 浓度高值点位主要分布在珠江三角洲流域、东江流域的下游及粤东诸河流域。其中,珠江三角洲流域及东江流域下游的部分点位 TN 浓度最高,超过 7.0 mg/L;其次,珠江干流广州段、粤东诸河流域练江与榕江及粤西诸河流域小东江下游点位的 TN 浓度相对较高,年均浓度超过 4.0 mg/L。值得说明的是, TN 浓度高值点位大多分布在珠江三角洲流

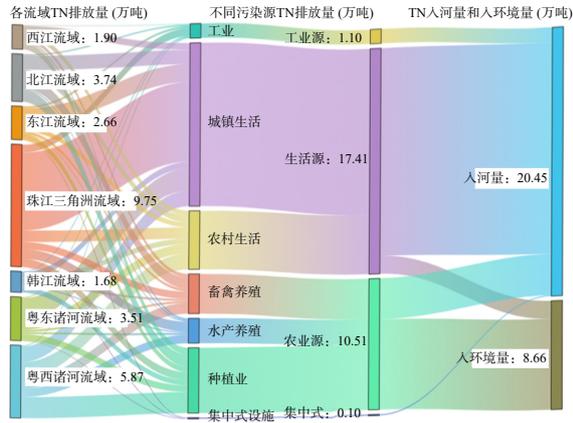
域与粤东诸河流域内的部分独流入海河流,这些河流具有源短流急的特点,“微容量、重负荷”问题导致该部分河流 TN 浓度较高,这会导致其所在的流域 TN 浓度均值整体偏高。因此,为了更加科学客观地分析各流域氮污染水平,本文进一步对各流域 TN 排放水平与岸线 TN 排放压力进行分析。

以《海水水质标准》(GB3097—1997)为评价依据,对近岸海域共 218 个监测点位 DIN 浓度进行评价,结果显示,2020 年、2021 年和 2022 年分别有 59 个(占比 27.06%)、54 个(占比 24.77%)、53 个(占比 24.3%)监测点位 DIN 年均浓度未达到优良水质(一、二类水质)标准。珠江口、汕头港、湛江湾海域的部分点位 DIN 超四类海水标准限值,是主要的氮污染区^[15]。其中,珠江口 DIN 浓度相对较高,部分点位 DIN 浓度超 2.0 mg/L。从空间上看, TN 高浓度点位所在的珠江三角洲流域下游部分河流、粤东诸河流域练江与榕江以及粤西诸河流域小东江等入海河流的汇入海域,其 DIN 浓度也较高。

2.2 陆源 TN 排放特征

研究区域 2020 年 TN 排放总量为 29.11 万吨,生活源是 TN 的主要排放来源,其排放量(17.41 万吨)占 TN 排放总量的 59.79%;其次为农业源,其排放量(10.51 万吨)占 TN 排放总量的 36.10%(图 5)。根据入河系数法估算 TN 入河量,结果表明,研究区域生活源 TN 入河量最大,占比 78.25%;其次为农业源、工业源,入河量占比分别为 15.91%、5.36%。董斯齐等^[17]基于土地利用、社会经济统计数据采用输出系数法估算粤港澳大湾区及周边地市 TN 排放量,结果表明,研究区域 TN 排放量约为 33.25 万吨,居民生活是主要污染源,占 55.4%,其次为种植业,占 28.18%。本研究的 TN 排放总量及生活源 TN 排放量与前人研究结果基本一致。进一步分析比较我国其他沿海地区的 TN 排放结构, TN 排放来源大多以生活源与农业源为主。王辉等^[35]研究分析渤海湾周边陆域 TN 污染源结果显示,其 TN 排放量以居民生活为主,占比 57.6%,养殖业和种植业也是重要污染源。周滨等^[39]核实天津市近岸海域氮、磷入海总量结果表明,天津近岸

海域氮、磷污染主要来自城镇居民和畜禽养殖等方面。



注: TN 入环境量等于 TN 排放量减 TN 入河量

图 5 七大流域 TN 排放量及代谢路径

Fig. 5 Emissions and metabolic pathways of TN in each basin

从空间分布上看,七大流域中珠江三角洲流域 TN 排放量最高,约占七大流域 TN 排放总量的 33.49%;其次为粤西诸河流域,约占七大流域 TN 排放总量的 20.17%;西江流域与韩江流域 TN 排放量相对较低。通过进一步分析不同流域的 TN 贡献源发现,各地区 TN 贡献源结构具有差异性(图 6)。城镇生活是珠江三角洲流域、东江流域和粤东诸河流域 TN 的主要贡献源,城镇生活源贡献占比分别为 63.58%、51.97% 和 50.20%。粤西诸河流域、北江流域和西江流域 TN 主要贡献源为农业源,农业源贡献占比分别为 25.57%、53.63%、50.41%,其中以种植面源及畜禽养殖源为主。从排放强度看,珠江三角洲流域 TN 排放强度最高,为 3.55 t/km²,这主要与珠

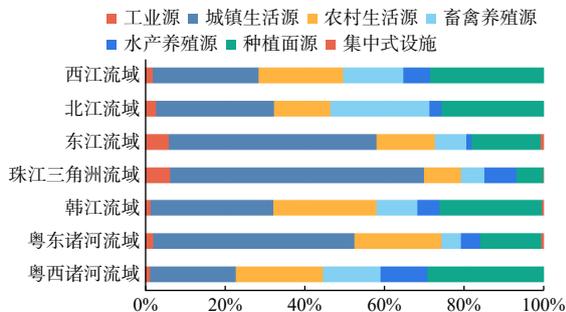


图 6 各流域不同排放源 TN 排放量占比

Fig. 6 TN contribution rates of different sources in each basin

三角地区人口集聚程度较高、居民生活污水排放量较大有关;其次为粤东诸河流域与粤西诸河流域, TN 排放强度分别为 2.18 t/km²、1.77 t/km²。

2.3 岸线污染压力强度

本文计算了各区域对应岸线承载的陆源氮污染排放的压力强度,图 7 中扇形环状表明各区域对应海岸线承载的陆源氮污染排放压力,扇形环状堆积越高表明单位岸线承载的污染压力越大。由图 7 可以看出,研究区域陆源 TN 污染的排海压力主要集中在 S3、S5 区域对应的近岸海域,其中 S3 区域的岸线压力强度最大,为 241.03 t/(km·a),其次是 S5 对应的近岸海域,岸线压力强度为 97.72 t/(km·a),其他海域的压力相对较小。需要强调的是,本次研究以广东省境内区域为研究范围,珠江上游涉及的广西梧州市、贺州市的氮排放数据未纳入考虑,因此 S3 区域的岸线压力强度可能更高。S5 区域涉及韩江流域及练江、榕江、黄冈河子流域,其中练江、榕江入海断面 TN 浓度较高,因此判断该区域的岸线压力主要贡献来自练江与榕江流域。污染压力分析结果显示,各区域对应的岸段污染压力强度分布与近岸海域 DIN 超标点位,以及与陆源 TN 排放强度分布在空间上具有一致性(图 7)。珠江三角洲流域以及粤东地区练江、榕江流域是 TN 排放强度及岸线污染压力强度较大的区域,分别对应的珠江口、汕头港的 DIN 超标点位分布更集中。

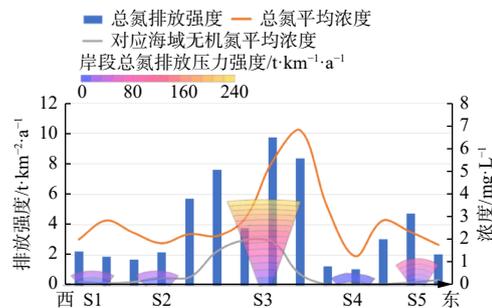


图 7 各区域对应岸线承载的陆源氮污染压力强度

Fig. 7 Nitrogen pollution emission intensity per kilometer coastline of each region

2.4 氮污染的影响因素

由研究区域内各市 2020 年 TN 指标与主要影响因素的 Pearson 相关性分析结果(表 3)可

知, TN 排放量与人口数量、城镇用地、水产养殖产量、园地面积 4 个影响因素呈显著正相关关系, 表明这 4 个因素对 TN 排放量影响较大, 其中人口数量的影响最为显著, 这与前面分析的 TN 贡献源结构基本吻合, 人口增加带来的生活污水排放是 TN 的主要来源。TN 排放强度与工业总产值、GDP、人口数量、人口密度呈显著正相关关系, 而与畜禽养殖量呈显著负相关关系, 这可能是由于 TN 排放以生活源为主, 而畜禽养

殖往往分布于人口密度较低的区域, 因此畜禽养殖高的地区 TN 排放强度反而较低。地表水 TN 浓度与工业总产值、GDP、人口数量、人口密度、城镇用地、TN 排放强度 6 个影响因素呈显著正相关关系, 说明居民生活和工业发展的氮营养盐排放是地表水 TN 浓度过高的主要原因, 其中, 城镇用地相关性相对较弱, 说明不透水面增多加剧的面源污染对地表水 TN 浓度有一定影响^[17]。

表 3 TN 排放量与影响因素 Pearson 相关系数

Tab.3 Correlation analysis of TN discharge and influencing factors

指标	TN排放量	TN排放强度	地表水TN浓度	近岸海域DIN浓度
工业总产值	0.350	0.707**	0.829**	0.515
GDP	0.430	0.560**	0.722**	0.526
人口数量	0.593**	0.550**	0.723**	0.568*
人口密度	0.174	0.828**	0.869**	0.399
城镇用地	0.517*	0.412	0.473*	0.467
畜禽养殖当量	0.382	-0.614**	-0.313	-0.414
水产养殖产量	0.499*	0.029	-0.099	0.033
耕地面积	0.045	-0.100	0.226	-0.096
园地面积	0.489*	-0.364	-0.044	-0.190
TN排放量	1	0.202	0.316	0.443
TN排放强度	0.202	1	0.710**	0.650*
地表水TN浓度	0.316	0.710**	1	0.342
近岸海域DIN浓度	0.443	0.650*	0.342	1

注: *指在0.05级别(双尾), 相关性显著; **指在0.01级别(双尾), 相关性显著

近岸海域 DIN 浓度与人口数量、TN 排放强度这两个影响因素呈显著正相关关系, 这与前述分析的水质浓度及 TN 排放强度空间分布情况一致, 珠江三角洲流域、粤东诸河流域和粤西诸河流域 TN 排放强度及岸段排放压力较高, 其地表水 TN 浓度及近岸海域 DIN 浓度也较高。其中珠江三角洲流域与粤东诸河流域这两个以生活源 TN 污染为主的地区, 对应的珠江口、汕头港近岸海域 DIN 浓度更高。因此, 统筹治理广东省陆海氮污染, 应重点提升珠三角与粤东地区居民生活污水收集处理效能。结合 TN 排放结构来看, 粤西与粤北地区应同时着重加强农业源氮污染的源头管控, 推进绿色种养循环模式。

3 结论

(1) 2020—2022 年, 广东省河流 TN 浓度范围为 1.10~9.19 mg/L, TN 高浓度点位主要分布于珠江三角洲流域与东江流域的下游, 以及粤东诸河流域的练江、榕江等入海河流。从时间变化上看, 枯水期地表水 TN 浓度总体高于丰水期。

(2) 广东省 2020 年陆域 TN 排放量约 29.11 万吨, 生活源是主要污染源, 占 59.79%, 其次为农业源, 占 36.10%。珠江三角洲流域 TN 排放量及排放强度最高, 以城镇生活源为主; 其次为粤东诸河流域与粤西诸河流域, 分别以城镇生活源、农业源为主。陆源氮污染排放压力强度与近岸

海域 DIN 污染分布状况具有空间一致性, 珠江三角洲流域污染物排放量最大, 其岸段承载的排放压力也最大, 对应的珠江口 DIN 浓度更高。

(3)来源于居民生活和工业发展的氮营养盐排放是地表水 TN 浓度过高的主要原因, 人口数量、TN 排放强度是近岸海域 DIN 浓度的主要影响因素。珠江三角洲流域与粤东诸河流域这两个以生活源 TN 污染为主的地区, 对应的珠江口、汕头港近岸海域 DIN 超标点位分布更集中。因此, 统筹治理广东省陆海氮污染, 应重点提升珠三角与粤东地区居民生活污水收集处理效能。

参考文献:

- [1] HASSAN D. International conventions relating to land-based sources of marine pollution control: applications and shortcomings[J]. *Georgetown International Environmental Law Review*, 2004, 16(4): 657-677.
- [2] 赖翔宇, 王世存. 中国近岸海域污染严重[J]. *生态经济*, 2019, 35(3): 9-12.
- [3] 唐俊逸, 余香英, 刘晋涛, 等. 广东省入海排污口分类分布特征及监督管理措施研究[J]. *海洋科学*, 2021, 45(3): 51-58.
- [4] TIRUMALA R D, TIWARI P. Innovative financing mechanism for blue economy projects[J]. *Marine Policy*, 2022, 139: 104194.
- [5] 刘静, 刘录三, 郑丙辉. 入海河口区水环境管理问题与对策[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(5): 645-653.
- [6] 李宁. 我国海洋环境陆源污染治理的政策实施研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014: 13-14.
- [7] 吕永龙, 苑晶晶, 李奇锋, 等. 陆源人类活动对近海生态系统的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(5): 1183-1191.
- [8] 中华人民共和国生态环境部. 2020年中国海洋生态环境状况公报[EB/OL]. (2021-05-26)[2024-03-10]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/jagb/202105/P020210526318015796036.pdf>.
- [9] 中华人民共和国生态环境部. 2021年中国海洋生态环境状况公报[EB/OL]. (2022-05-27)[2024-03-10]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/jagb/202205/P020220527579939593049.pdf>.
- [10] 中华人民共和国生态环境部. 2022年中国海洋生态环境状况公报[EB/OL]. (2023-05-29)[2024-03-10]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/jagb/202305/P020230529583634743092.pdf>.
- [11] 张晓丽, 姚瑞华, 严冬. 关于“十四五”海洋生态环境保护的几点思考[J]. *世界环境*, 2020(4): 16-18.
- [12] ZHANG J, GUO X Y, ZHAO L. Budget of riverine nitrogen over the East China Sea shelf[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 289: 117915.
- [13] YU C Q, HUANG X, CHEN H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. *Nature*, 2019, 567(7749): 516-520.
- [14] YANG H F, ZHU Q Y, LIU J A, et al. Historic changes in nutrient fluxes from the Yangtze River to the sea: recent response to catchment regulation and potential linkage to maritime red tides[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 129024.
- [15] 广东省生态环境厅. 2022年广东省生态环境状况公报[EB/OL]. (2023-05-08)[2024-03-10]. https://gdee.gd.gov.cn/hjzkgb/content/post_4176802.html.
- [16] 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.
- [17] 董斯齐, 黄翀. 粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布[J]. *环境科学*, 2021, 42(11): 5384-5393.
- [18] 陈秀洪, 罗欢. 汕头市入海河流水质演变趋势及污染评价[J]. *广东水利水电*, 2022(1): 6-11.
- [19] 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠. 深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(11): 4111-4117.
- [20] 广东省生态环境厅. 广东省 2020 年近岸海域海水水质监测信息[EB/OL]. (2021-01-20)[2024-03-10]. https://gdee.gd.gov.cn/jhszl/content/post_3179981.html.
- [21] 广东省生态环境厅. 广东省 2021 年近岸海域水质监测信息[EB/OL]. (2022-03-25)[2024-03-10]. https://gdee.gd.gov.cn/jhszl/content/post_3893822.html.
- [22] 广东省生态环境厅. 广东省 2022 年近岸海域水质监测信息[EB/OL]. (2023-03-01)[2024-03-10]. https://gdee.gd.gov.cn/jhszl/content/post_4119229.html.
- [23] 广东省统计局, 国家统计局广东调查总队. 广东统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [24] 《广东农村统计年鉴》编辑委员会. 广东农村统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [25] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集 (CNLUCC)[DB/OL]. [2024-03-10]. <http://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/literature/11017d06-010c-40cc-8db9-cc47df17d0ac/>.
- [26] 生态环境部. 关于发布《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》的公告[EB/OL]. (2021-06-11)[2024-03-10]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk01/202106/t20210618_839512.html?ivk_sa=1024320u.

(下转第 200 页)

- 荷估算初探[J]. 生态环境, 2006, 15(3): 495-498.
- [26] QI X H, LIU S M, ZHANG J, et al. Cycling of phosphorus in the Jiaozhou Bay[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, 30(2): 62-74.
- [27] 孟 昆, 徐 敏, 徐文健, 等. 海州湾北部沉积物重金属来源解析及污染评价[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2018, 41(2): 99-106.
- [28] ZHANG Q C, WANG Y F, SONG M J, et al. First record of a *Takayama* bloom in Haizhou Bay in response to dissolved organic nitrogen and phosphorus[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 178: 113572.
- [29] LIU L L, TANG Z, KONG M, et al. Tracing the potential pollution sources of the coastal water in Hong Kong with statistical models combining APCS-MLR[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 245: 143-150.
- [30] 贺志鹏, 宋金明, 张乃星, 等. 南黄海表层海水重金属的变化特征及影响因素[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1153-1162.
- [31] CHEN L F, LIU C, YIN Y G, et al. Mass budget of mercury (Hg) in the seawater of eastern China marginal seas: importance of the sediment-water transport processes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(16): 11418-11428.
- [32] SAEEDI M, HOSSEINZADEH M, JAMSHIDI A, et al. Assessment of heavy metals contamination and leaching characteristics in highway side soils, Iran[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 151(1/2/3/4): 231-241.
- [33] 廖启林, 任静华, 姜 丽, 等. 江苏典型地区河流沉积物重金属元素分布特征及其污染来源[J]. 地质学刊, 2018, 42(4): 651-661.
- [34] 李 玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 137-141.
- [35] 顾家伟. 尼罗河三角洲泻湖沉积物重金属时空分布特征及其环境意义——与长江三角洲对比研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [36] LV J S, LIU Y, ZHANG Z L, et al. Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 261: 387-397.
- [37] ZHAI T L, WANG J, FANG Y, et al. Assessing ecological risks caused by human activities in rapid urbanization coastal areas: towards an integrated approach to determining key areas of terrestrial-oceanic ecosystems preservation and restoration[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 135153.
- [38] 康敏捷, 栾维新, 王 辉, 等. 环渤海陆源水污染输出分区研究[J]. 中国科技论文, 2013, 8(5): 452-457.
- [39] 仇美华, 郁 洁, 殷广德, 等. 江苏省推进化肥利用效率提升的技术与策略[J]. 中国农技推广, 2020, 36(9): 55-57.
- [40] 朱韩依. 超高磷工业废水组合处理工艺研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [41] WANG H, BOUWMAN A F, VAN GILS J, et al. Hindcasting harmful algal bloom risk due to land-based nutrient pollution in the Eastern Chinese coastal seas[J]. *Water Research*, 2023, 231: 119669.

(本文编辑: 胡莹莹)

(上接第 189 页)

- [27] 环境保护部办公厅. 关于印发《地表水环境质量评价办法(试行)》的通知[EB/OL]. (2011-03-09). https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201104/t20110401_208364.htm.
- [28] HJ 1300—2023, 海水、海洋沉积物和海洋生物质量评价技术规范[S].
- [29] 李 飞, 张树文, 杨久春, 等. 社会经济数据空间化研究进展[J]. 地理与地理信息科学, 2014, 30(4): 102-107.
- [30] 许自舟. 天津陆域氮磷污染源解析及海域水质目标研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2022.
- [31] 夏丽佳, 余慕琴, 严 萌, 等. 珠三角四市农业面源污染源解析与评价[J]. 人民珠江, 2021, 42(5): 35-41, 72.
- [32] 郑文萍, 刘晋涛, 陈 瑜, 等. 珠三角某典型小流域水质时空特征及污染驱动力分析[J]. 环境保护科学, 2023, 49(6): 89-95.
- [33] 张天鹏, 闫铁柱, 金平忠, 等. 我国三个典型流域人类活动净氮输入量估算及其影响因素[J]. 中国农业科学, 2022, 55(23): 4678-4687.
- [34] 陈金月, 陈水森, 付 娆, 等. 广东省水质现状及驱动因素[J]. 生态学报, 2022, 42(19): 7921-7931.
- [35] 王 辉, 栾维新, 康敏捷. 渤海氮污染的来源结构与污染压力空间分布[J]. 地理研究, 2020, 39(1): 186-199.
- [36] 康敏捷. 环渤海氮污染的陆海统筹管理分区研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [37] 嵇晓燕, 王姗姗, 杨 凯, 等. 2016—2020年中国地表水中总氮浓度时空变化特征分析[J]. 生态环境学报, 2022, 31(6): 1184-1192.
- [38] 解 鑫, 李文攀, 李晓明, 等. 2020—2022年全国入海河流总氮浓度时空特征[J]. 中国环境监测, 2023, 39(6): 90-97.
- [39] 周 滨, 孙丽娜, 王秋莲, 等. 天津市近岸海域氮、磷入海量核算初探[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(6): 851-859.

(本文编辑: 胡莹莹)