

深圳湾流域面源与截排溢流污染特征 及其对水环境的影响

罗欢, 陈秀洪, 吴琼, 罗娜, 黄徐

(珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广州 510635)

摘要: 随着点源污染逐步得到有效控制, 面源与截排溢流污染对水环境的胁迫日益突出。基于土地遥感数据、城市排水管网等资料, 构建流域—海湾一体化水环境模型, 探讨深圳湾流域面源与截排溢流污染特征及其对水环境的影响, 研究表明: (1) 雨季 COD、NH₃-N 和 TP 单位面积面源与截排溢流污染负荷分别为 17.21 t/km² 与 10.21 t/km²、0.17 t/km² 与 0.69 t/km²、0.04 t/km² 与 0.07 t/km²; (2) 面源与截排溢流污染时间上主要集中于大雨及以上等级降水较多的 5 月和 8 月, 空间上主要分布在截排工程集中、下垫面面积较大且坡度较陡的深圳河、大沙河和新洲河流域; (3) 面源与截排溢流水体 COD、NH₃-N 和 TP 浓度可达地表水 V 类标准的 3.7 倍、18.2 倍和 8.5 倍; (4) 雨季 COD、NH₃-N 和 TP 浓度高于旱季的区域分别超过深圳湾总面积的 40%、60% 和 65%。

关键词: 面源与截排溢流污染; 流域—海湾一体化水环境模型; 时空分布特征

降雨径流对地表晴天累积污染物的冲刷, 形成面源污染。面源污染进入合流制管网或截排箱涵, 当流量超过管道输送能力时发生溢流, 多余的雨污汇入河流、湖泊和海湾等, 致使受纳水体的水量、水质等要素发生剧烈变化^[1,2]。面源与截排溢流污染具有时空分布离散性、排放途径多样性、成分复杂多变性等特点, 控制和管理难度较大^[2]。随着点源污染逐步得到有效控制, 面源与截排溢流污染对水环境的胁迫日益突出^[3,4]。面源与截排溢流污染特征及其对水环境的影响, 越来越受到各国学者的关注。

当前, 关于面源与截排溢流污染的研究较多, 主要集中在两个方面: 一是探讨晴天污染物静态累积和雨天地表径流对下垫面污染物动态冲刷的源汇特征。贺文彦等^[4]对工厂用地、草地和道路三种土地利用类型开展同期观测, 研究前期晴天累积天数对下垫面污染物附着形态及面积质量的影响; Zhao 等^[5]对中心城区、城中村等不同下垫面污染物开展同期观测, 分析城乡道路污染物颗粒特征及其对面源污染的潜在贡献; Obermann 等^[6]、Gikas 等^[7]和 Li 等^[8]基于大量降雨径流水质监测数据, 探讨面源污染是否存在初期效应; 荆延德等^[1]运用输出风险模型、CA-Markov 模型及回归模型, 评估流域不同土地利用方式的面源污染输出风险。二是定量分析面源与截排溢流水体的水质特征及规律。Sansalone 等^[9]、Deletic^[10]、李贺等^[11]、刘昌明等^[12]研究表明, 初期地表径流和管道溢流水体中大多数污染物浓度远超过地表水 V 类标准; 李思远等^[13]指出溢流水体污染物浓度随降雨历时总体上呈现先上升后下降的变化过程, 对降水强度的响应存在滞后效应; 房金秀等^[3]研究

收稿日期: 2019-05-14; 修订日期: 2019-10-10

基金项目: 深圳市水务科技创新项目(深水务[2017]27号); 广东省重点领域研发计划项目(2019B110205004); 国家自然科学基金项目(51679252)

作者简介: 罗欢(1983-), 男, 江西吉安人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水生态和水环境治理研究。

E-mail: 120456750@qq.com

表明,大雨及以上等级降水可增强管道沉积物再悬浮能力,加剧面源与截排溢流污染程度;Carpenter等^[14]发现伴随强降雨引起的面源与截排溢流过程进入受纳水体的污染物负荷高达全年的74%;赖后伟等^[15]研究表明,河流大部分污染物浓度受初期雨水影响较大,降雨期间各项水质指标浓度水平可升高20%~200%。

综上分析,众多学者在面源与截排溢流污染源汇过程及水质特征等方面做了大量细致研究,但关于面源与截排溢流污染对水环境影响的研究较少。面源与截排溢流污染是水环境污染的重要来源,也是区域水环境治理与提升的关键环节。基于此,本文选取深圳湾流域为研究区,构建流域—海湾一体化水环境模型,探讨面源与截排溢流污染特征及其对水环境的影响,以为该地区水污染防治与水环境治理提供科学依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

深圳湾位于113°53'~114°03'E、22°24'~22°32'N,毗邻港澳,背靠珠三角,地处亚太主航道,具有发展湾区经济的领导优势和经济基础。深圳湾为半封闭海湾,湾内纵深约14 km,平均宽度7.5 km,平均水深2.9 m,水域面积92.17 km²。本文仅分析深圳湾深圳侧集水区,流域面积约367.97 km²,包括7个子流域,分别为蛇口片区(16.87 km²)、大沙河流域(99.38 km²)、后海片区(11.87 km²)、小沙河片区(14.97 km²)、凤塘河流域(12.73 km²)、新洲河流域(24.65 km²)和深圳河流域(187.5 km²) (图1)。深圳湾流域河流众多,均属于雨源型河流,水质易遭受面源与截排溢流污染的影响。其中,后海河、大沙河、小沙河、凤塘河、新洲河和深圳河直接进入深圳湾。



图1 深圳湾流域地理位置概况与验证点位分布

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

根据唐俊逸等^[16]的研究成果,2016年深圳湾流域的工业生产、居民生活、城市公共等点源污水排放量为46379.85万t。根据中国科学院资源环境科学数据中心开发的土地利用类型数据集 (<http://www.resdc.cn>),2016年流域内产生面源污染的下垫面主要为建设用地(城镇用地、农村用地、其他建设用地等)、绿地(耕地、林地、草地等)和水域,

面积占比分别为57.4%、39.1%和3.5%。根据深圳市水务局发布的排水管理数据 (<http://swj.sz.gov.cn/>), 2016年流域污水处理厂包括蛇口污水处理厂、福田污水处理厂、埔地吓污水处理厂、布吉污水处理厂、布吉河水质净化厂、罗芳污水处理厂、滨河污水处理厂和西丽污水处理厂; 截排工程主要分布在深圳河支流、大沙河和新洲河。

1.2 流域—海湾一体化水环境模型

为探究面源与截排溢流污染分布特征及其对水环境的影响, 构建深圳湾流域—海湾一体化水环境模型。模型思路为: 根据城市排水管网、土地利用、地形等要素明确流域雨污排放模式, 结合降水和下垫面特点, 模拟降水经截留、填洼、下渗等产汇流环节形成的雨天地表径流及其对流域晴天累积面源污染物冲刷过程; 基于面源与截排溢流污染模块模拟雨季入湾流量和水质过程, 作为边界条件输入海湾水动力水质模块进行耦合(图2)。

基于SWMM软件构建流域面源与截排溢流污染模块。根据城市排水管网、地形等数据, 采用“泰森多边形法”对深圳湾流域进行划分, 共计2637个子汇水区、2417段管段和2429个节点; 根据土地利用数据将用地类型划分为建设用地和绿地; 污染物累积和冲刷过程分别采用饱和曲线和指数冲刷曲线, 主要参数包括污染物最大累积量、半饱和累积时间、冲刷系数和冲刷指数^[17,18], 本文采用2018年11月25日至28日的降雨和水质监测数据对土地类型水质参数进行率定, 具体取值见表1; 截排溢流参数主要依据污水厂处理规模和截排工程设计截流倍数设置, 认为当水量超过污水厂或截排工程的截流能力即发生溢流, 深圳湾流域截排工程设计截流倍数普遍为1~3倍; 模拟的水质指标选取: COD、NH₃-N和TP; 模拟时间步长为1 h。

表1 面源与截排溢流污染模块主要参数

Table 1 Main parameters of SWMM

用地类型	污染物最大累积量 (COD/NH ₃ -N/TP)	半饱和累积时间 (COD/NH ₃ -N/TP)	冲刷系数 (COD/NH ₃ -N/TP)	冲刷指数 (COD/NH ₃ -N/TP)
建设用地	5.715/0.32/0.3	0.4/0.4/0.4	2.639/0.27/0.01	0.102/1.13/1.6
绿地	0.187/0.22/0.3	0.4/0.4/0.4	0.015/0.12/0.006	1.2/1.13/1.2

基于MIKE软件构建海湾水动力水质模块。根据水下地形数据对深圳湾进行三角形网格划分, 共计16399个单元、8498个节点, 网格最小面积为94 m²。边界旱季入湾流量及水质数据主要依据河流基流量、深圳市人居环境委员会发布的逐周河流水质数据; 雨季入湾流量及水质数据在旱季基础上叠加面源与截排溢流污染模块的水量水质模拟结果。海洋开边界的潮汐数据来自2016年深圳河定期连续水文测验, 水质输入数据来自深圳市规划和自然资源局提供的逐季度水质数据; 动边界条件采用模型推荐值; 模拟时间步长为6 s。

1.2.1 模型率定验证

流域—海湾一体化水环境模型水动力和水质验证点位见图1, 选取深圳湾1#~6#点

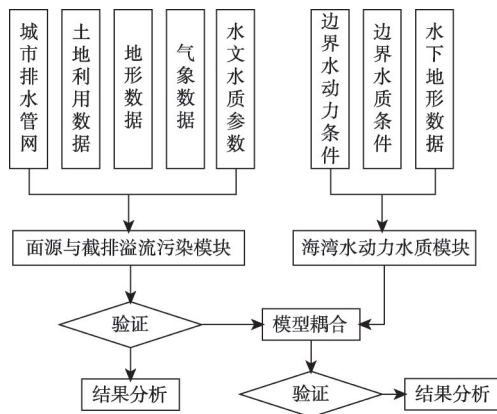


图2 流域—海湾一体化水环境模型结构与原理
Fig. 2 Schematic diagram of basin-bay integrated water environmental model

位,依托伶仃洋水动力模型^[9]进行深圳湾水动力率定验证;选取深圳湾S1~S5点位,以深圳市规划和自然资源局提供的逐季度水质数据进行水质率定验证,误差统计情况见表2。各组水文条件下模型模拟的流速和流向过程与实测过程基本吻合,相位基本一致,流速误差基本在10%以内,流向误差基本在10°以内;水质相对误差基本在20%以内,模型参数可靠。

表2 流域—海湾一体化水环境模型水动力与水质验证误差统计表

水动力验证点位	流速误差	水质验证点位	COD误差	NH ₃ -N误差	TP误差
1#	-10.63	S1	-11	-11	7
2#	11.30	S2	9	19	-18
3#	7.92	S3	6	12	-17
4#	4.48	S4	-12	-17	-15
5#	8.45	S5	8	14	-15
6#	5.18	—	—	—	—

1.2.2 模拟情景设置

面源与截排溢流污染模块采用2016年深圳市深圳河口雨量站雨季(4-9月)逐小时降雨数据;2016年深圳湾流域雨季降雨天数85天,降雨量1671.5 mm,占全年降雨量的67%;分别从时间和空间尺度对面源与截排溢流污染进行统计。考虑到雨季较早季入湾污染源增加面源与截排溢流污染,为突出面源与截排溢流污染对水环境的影响,利用海湾水动力水质模块分别模拟旱季(10月至次年3月)和雨季深圳湾入湾COD、NH₃-N和TP的扩散情况。

2 结果分析

2.1 面源与截排溢流污染特征

2.1.1 面源与截排溢流污染时间分布特征

深圳湾流域雨季面源与截排溢流污染负荷见图3。雨季COD、NH₃-N和TP单位面积面源污染负荷分别为17.21 t/km²、0.17 t/km²和0.04 t/km²,单位面积截排溢流污染负荷分别为10.21 t/km²、0.69 t/km²和0.07 t/km²。对于COD负荷,面源污染占比更高,比例为63%;对于NH₃-N和TP负荷,溢流污染占比更高,比例均超过65%。面源与截排溢流污染的成分差异可能和污染物来源有关,面源污染物来源主要来自雨水对下垫面的冲刷^[20,21],截排溢流污染包括城市污水或雨污混流^[22,23],城市污水的氮磷负荷较高,一定程度上加重截排溢流水体氮磷污染。

因截排溢流污染受污水厂、水闸、泵站等排水设施的人为调控影响较大,本文仅分析面源污染时间特征。面源污染时间分布特征及其与降水量响应关系见图4。面源污染负荷与降水量总体上呈正相关关系。5月和8月降水量最大,分别占雨季总雨量的21.5%和29.8%;相应地,COD、NH₃-N和TP月污染负荷最高,分别占雨季面源污染总负荷的29.2%~29.7%和23.8%~24%。7月和9月降水量偏小,分别占雨季总雨量的10.9%和8.6%;相应地,COD、NH₃-N和TP月污染负荷偏低,分别占雨季面源污染总负荷的10.1%~10.7%和7.4%~8.3%。

降水对面源污染的影响主要与降水形成地表径流对下垫面累积污染物的冲刷携带强

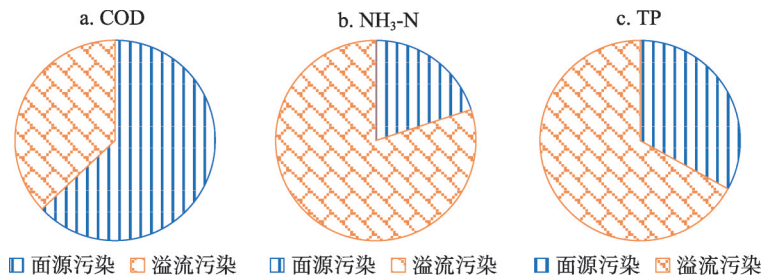


图3 深圳湾流域雨季面源与截排溢流污染负荷

Fig. 3 Ratio of pollution in rainy season in Shenzhen Bay Basin

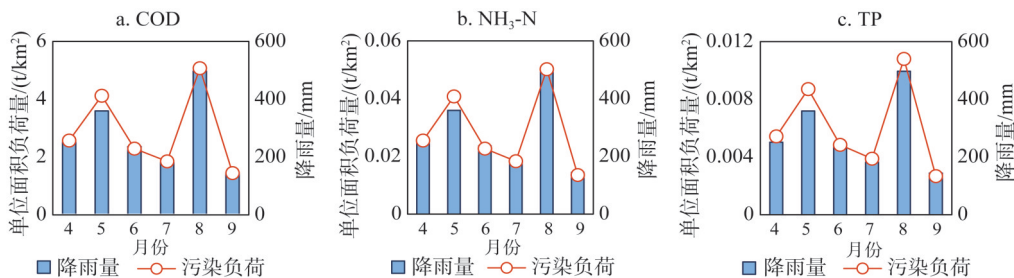


图4 深圳湾流域面源污染时间分布特征及其与降水量响应关系

Fig. 4 Temporal characteristics of non-point pollution and its relationship with rainfall in Shenzhen Bay Basin

度有关。陈洁等^[25]研究表明,大雨及以上等级降水冲刷携带的面源污染负荷显著高于中雨及以下等级降水。统计深圳湾流域各等级降水事件,发现5月和8月频发大雨及以上等级降水,大雨及以上等级降水量分别达到月降水总量的92.9%和82.4%,明显高于7月和9月(48.1%和45.3%)。降水量在时间上的强弱分布造成地表径流冲刷携带强度差异,降水量大且集中的5月和8月面源污染负荷更高。

2.1.2 面源与截排溢流污染空间分布特征

深圳湾流域各控制单元面源与截排溢流污染负荷占比见图5。深圳河流域COD污染负荷占比最大,高达42%;其次为大沙河流域和新洲河流域,COD污染负荷占比分别为20%和15%;凤塘河流域、小沙河片区、蛇口片区和后海片区COD污染负荷占比相对较小,均不超过10%。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP污染负荷空间分布特征与COD相近,主要集中在深圳河流域(42%和37%)、大沙河流域(23%和24%)和新洲河流域(15%和15%),其余控制单元氮磷污染负荷均不超过10%。深圳湾流域截排溢流污染主要通过深圳河、大沙河和新洲河最终进入深圳湾。

面源污染负荷空间差异主要与下垫面属性有关。Zhao等^[5]和Hearn等^[26]研究表明,不同土地利用类型的下垫面因污染物晴天累积和雨天冲刷特征不一致,面源污染输出风险存在差异。张招招等^[27]研究表明,对于同一土地利用类型,面积和坡度越大的下垫面,面源污染输出风险越高。统计各控制单元土地利用类型,发现各控制单元普遍以建设用地和绿地为主,深圳河流域、大沙河流域、新洲河流域建设用地面积分别为107.01 km²、41.03 km²、16.82 km²,远高于其他控制单元(10~13 km²);绿地面积分别为73.89 km²、54.38 km²、7.04 km²,远高于其他控制单元(0~4 km²)。统计各控制单元平均坡度,发现深圳河流域、大沙河流域和新洲河流域下垫面平均坡度分别为7.907°、6.997°和6.748°,远高于其他控制单元(2~4.5°)。下垫面的空间异质性造成面源污染空

间差异，面积大且坡度陡的深圳河流域、大沙河流域和新洲河流域面源污染负荷更高。此外，截排工程的空间分布导致截排溢流污染主要集中在深圳河流域、大沙河流域和新洲河流域。

2.2 面源与截排溢流污染对水环境的影响

2.2.1 面源与截排溢流污染对河水环境的影响

因流域—海湾一体化水环境模型未模拟面源与截排溢流污染进入河流的输移扩散过程，本文基于深圳湾流域“11.25”暴雨过程中深圳河河口水质监测数据，分析面源与截排溢流污染对河水环境的影响，见图6。自2018年11月以来，深圳河河口COD、NH₃-N和TP平均浓度分别为18.4 mg/L、1.52 mg/L和0.27 mg/L，稳定满足地表水V类标准的水质目标。2018年11月25日至28日，深圳湾流域普降暴雨，降水量超50 mm。受“11.25”流域暴雨的影响，深圳河河口NH₃-N和TP浓度出现“跳跃点”，最大浓度水平分别相当于地表水V类标准的1.8倍和2倍，分别较无雨期升高143%和170%，COD浓度影响不大。

流域暴雨对河水环境的影响，主要和暴雨引发的面源与截排溢流污染进入河流有关^[11]。统计深圳河流域暴雨过程排水设施的溢流现象，见表3。11月25日至28日皇岗河河口、沙湾河沿河箱涵出水口、沙湾河截排隧洞溢流口、莲花水沿河箱涵溢流口、李朗河下游总口前、白泥坑沟河口等位置出现不同程度的溢流现象。与“11.25”暴雨雨量集中分布于11月25日至26日相对应，11月26日面源与截排溢流程度最严重。面源与截排溢流水体污染严重，COD、NH₃-N和TP浓度可达148.5 mg/L、36.32 mg/L和3.41 mg/L，分别相当于地表水V类标准的3.7倍、18.2倍和8.5倍，严重冲击河水环境，导致达标河水水质超标。

2.2.2 面源与截排溢流污染对海湾水环境的影响

深圳湾旱季和雨季COD、NH₃-N和TP各浓度包络范围见图7~图9。不管旱季或雨季，深圳湾COD、NH₃-N和TP浓度均呈现从内湾至外湾递减的空间分布特征，深圳河河口区域因同时承接来自深圳河和新洲河的陆源污染，并且水动力条件相对较差，入湾污染负荷量大且难以扩散，形成污染高值区。旱季，深圳湾COD、NH₃-N和TP浓度最大值

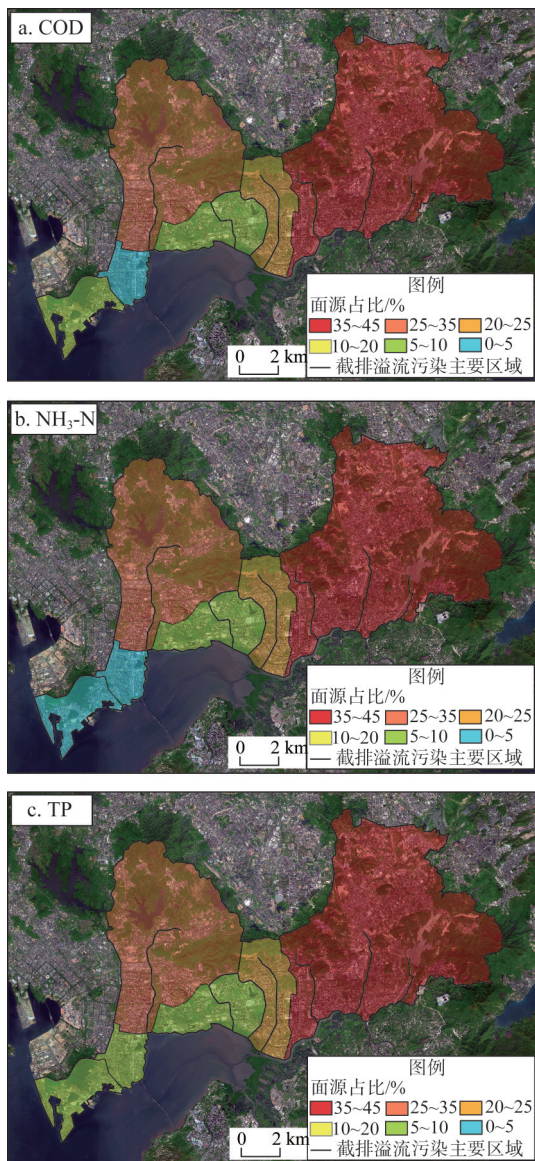


图5 深圳湾流域各控制单元面源与截排溢流污染负荷空间分布特征

Fig. 5 Spatial characteristics of non-point source and sewer overflow pollution in Shenzhen Bay Basin

分别约为 16 mg/L、1.5 mg/L 和 0.3 mg/L。雨季，深圳湾同一位置各污染物浓度值普遍高于旱季，浓度最大值分别相当于旱季 COD、NH₃-N 和 TP 浓度的 2.1 倍、5.3 倍和 8.7 倍。统计发现，雨季深圳湾 COD、NH₃-N 和 TP 浓度高于旱季的区域分别超过深圳湾总面积的 40%、60% 和 65%。可见，面源与截排溢流污染对深圳湾水环境影响突出，可能存在加剧深圳湾富营养化程度或潜在赤潮风险^[17]。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于土地利用遥感数据、城市排水管网等资料，构建深圳湾流域—海湾一体化水环境模型，探讨面源与截排溢流污染特征及其对河流和海湾水环境的影响，结果表明：

(1) 深圳湾流域雨季 COD、NH₃-N 和 TP 单位面积面源污染负荷分别为 17.21 t/km²、0.17 t/km² 和 0.04 t/km²，单位面积截排溢流污染负荷分别为 10.21 t/km²、0.69 t/km² 和 0.07 t/km²；受城市污水的影响，截排溢流水体氮磷负荷较面源径流突出。

(2) 面源污染在时间上主要分布在大雨及以上等级降雨量最大的 5 月和 8 月，相应的 COD、NH₃-N、TP 负荷量均超过雨季面源总负荷的 50%；面源与截排溢流污染在空间上主要分布在截排工程集中、下垫面面积较大且坡度较陡的深圳河流域、大沙河流域和新洲河流域，相应的 COD、NH₃-N、TP 负荷量均超过全流域雨季面源与截排溢流总负荷的 70%。

(3) 面源与截排溢流水体污染严重，COD、NH₃-N 和 TP 浓度可达 148.5 mg/L、36.32 mg/L 和 3.41 mg/L，分别相当于地表水 V 类标准的 3.7 倍、18.2 倍和 8.5 倍。受“11.25”流域暴雨引发面源与截排溢流污染的影响，水质达标的深圳河口出现氮磷超标现象，NH₃-N 和 TP 最大浓度水平分别相当于地表水 V 类标准的 1.8 倍和 2 倍，分别较无雨期升高 143% 和 170%。

(4) 雨季深圳湾 COD、NH₃-N 和 TP 最大浓度分别相当于旱季的 2.1 倍、5.3 倍和 8.7 倍，其浓度高于旱季的区域面积分别超过深圳湾总面积的 40%、60% 和 65%。

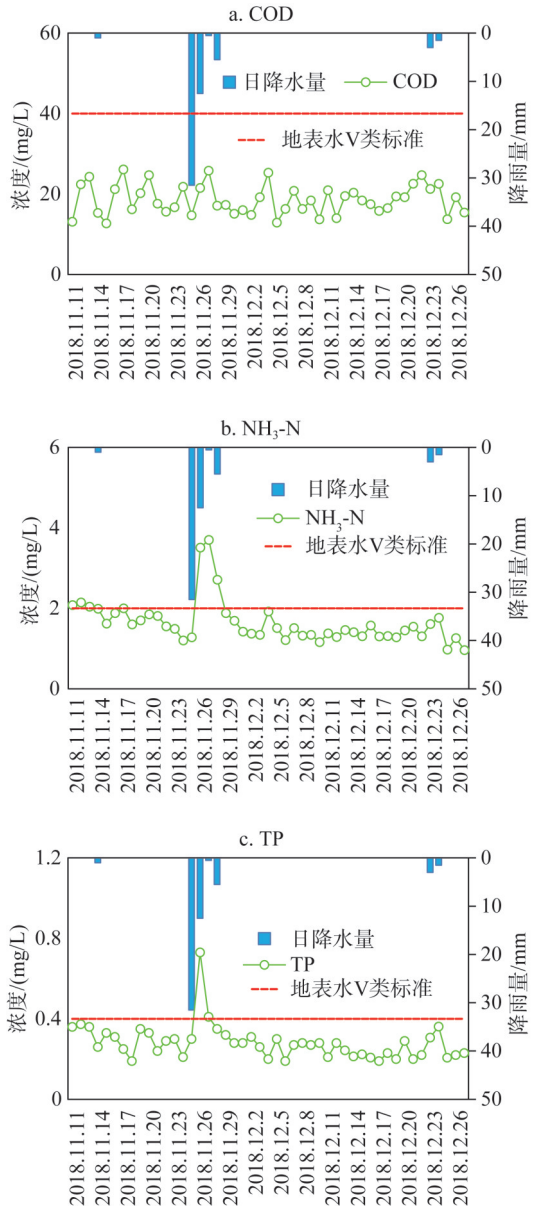


图6 深圳河口“11.25”暴雨过程的水质变化情况

Fig. 6 Variation characteristics of quality of rainstorm of "11.25" in Shenzhen River Estuary

表3 深圳河流域“11.25”暴雨溢流情况统计表

Table 3 Sewer overflow of rainstorm of 11.25 in Shenzhen River Basin

溢流断面	发生时间/(月.日)	水质指标/(mg/L)		
		COD	NH ₃ -N	TP
皇岗河河口	11.26	108*	13.83*	1.74*
沙湾河沿河箱涵出水口	11.25	38.3	16.04*	1.80*
	11.26	75.9*	13.67*	3.01*
	11.27	109*	22.36*	2.8*
	11.28	95.9*	3.73*	0.63*
沙湾河截排隧洞溢流口	11.26	26.9	4.16*	1.96*
	11.28	—	4.37*	0.94*
莲花水沿河箱涵溢流口	11.26	21.5	1.81	1.39*
	11.27	12.8	1.58	0.65*
	11.28	14.2	1.04	0.69*
李朗河下游总口前	11.25	148.5*	36.32*	3.41*
	11.26	45.1*	8.23*	2.01*
白泥坑沟河口	11.26	45.7*	6.11*	2.25*

注：*表示水质浓度超过地表水V类标准。

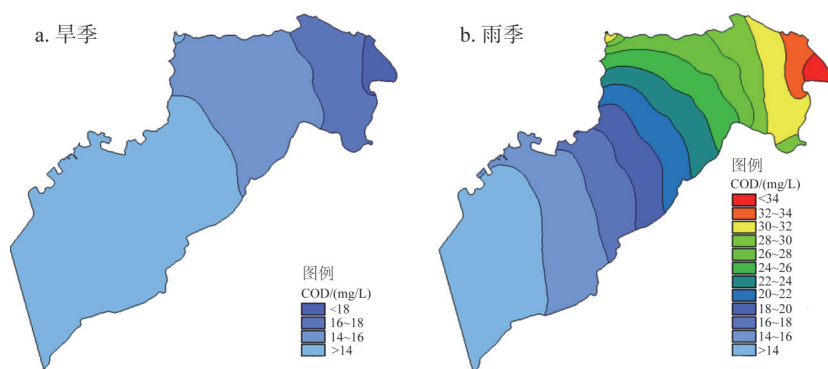
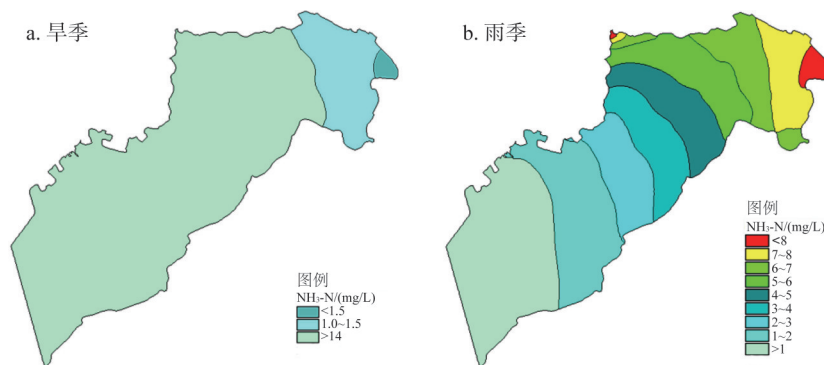


图7 深圳湾旱季和雨季COD浓度包络范围

Fig. 7 Concentration envelope lines of COD over Shenzhen Bay in rainy and dry seasons

图8 旱季和雨季深圳湾NH₃-N浓度包络范围Fig. 8 Concentration envelope lines of NH₃-N in Shenzhen Bay in rainy and dry seasons

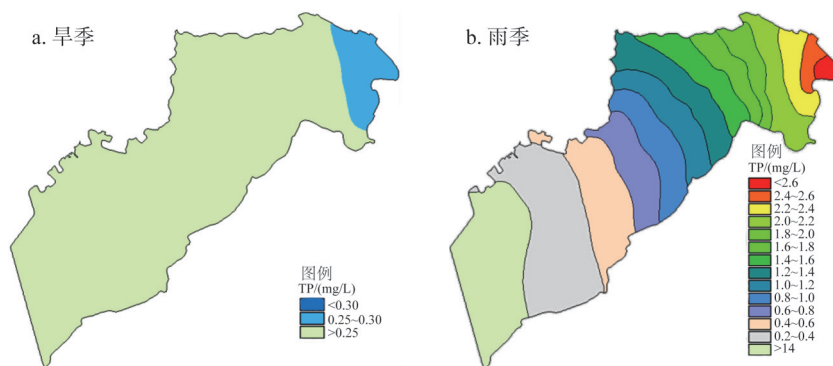


图9 旱季和雨季深圳湾涨落潮TP浓度包络范围

Fig. 9 Concentration envelope lines of TP in Shenzhen Bay in rainy and dry seasons

3.2 讨论

面源与截排溢流污染受降水过程、下垫面属性、排水体制、污水厂和截排工程设计规模等多因素影响,随着全球气候变化与剧烈人类活动的干预,面源与截排溢流污染具有高度复杂性和不确定性的特点。本文在面源与截排溢流污染模块重点考虑雨水径流对地表下垫面积累污染物的冲刷以及流域内污水厂和主要截排工程的溢流,在海湾水动力水质模块重点考虑入湾面源与截排溢流污染的影响。目前,已有学者提出管道沉积物再悬浮对于面源与截排溢流水体水质的影响不容忽视^[3],海上污染、湾口外来污染和底泥内源释放对海湾水质存在一定影响^[28,29],流域—海湾一体化模型有待进一步优化。

随着近年来旱季污水收集、污水厂尾水提标改造等点源污染控制措施的落实,面源与截排溢流污染将逐渐成为深圳湾流域的主要污染源。目前,深圳市已出台《深圳市海绵城市建设专项规划及实施方案》《深圳市治水提质工作计划(2015—2020年)》《深圳湾污染治理工作方案(2018—2020年)》等规划与行动方案,从海绵城市建设、面源污染削减、排水体制改革等多方面部署面源与截排溢流污染治理工作。基于本文面源与截排溢流污染特征研究成果,在时间上建议结合气象预报加强对大雨及以上等级降水事件的面源与截排溢流污染防范措施;在空间上优先开展深圳河流域、大沙河流域和新洲河流域的面源污染整治与截排工程优化改造工作。

参考文献(References):

- [1] 荆延德,张华美.基于LUCC的南四湖流域面源污染输出风险评估.自然资源学报,2019,34(1):128-139.[JING Y D, ZHANG H M. Risk assessment of non-point source pollution output in Nansihu Lake Basin based on LUCC. Journal of Natural Resources, 2019, 34(1): 128-139.]
- [2] 丁程程,刘健.中国城市面源污染现状及其影响因素.中国人口·资源与环境,2011,21(s1):86-89.[DING C C, LIU J. Discussion on urban non-point source pollution and control technologies in China. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(s1): 86-89.]
- [3] 房金秀,谢文霞,朱玉玺,等.合流制面源污染传输过程与污染源解析.环境科学,2019,(6):1-13.[FANG J X, XIE W X, ZHU Y X, et al. Pollutant transport analysis and source apportionment of the entire non-point source pollution process in combined sewer systems. Environmental Science, 2019, (6): 1-13.]
- [4] 贺文彦,谢文霞,赵敏华,等.海绵城市试点区域内面源污染发生过程及其对水体污染负荷贡献评估.环境科学学报,2018,38(4):1586-1597.[HE W Y, XIE W X, ZHAO M H, et al. The contribution of urban diffuse pollutants to water pollution in a sponge city pilot area. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(4): 1586-1597.]
- [5] ZHAO H, LI X, WANG X. Heavy metal contents of road-deposited sediment along the urban-rural gradient around Bei-

- ing and its potential contribution to runoff pollution. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(17): 7120-7127.
- [6] OBERMANN M, ROSENWINKEL K H, TOURNOUD M G. Investigation of first flushes in a medium-sized mediterranean catchment. *Journal of Hydrology*, 2009, 373: 405-415.
- [7] GIKAS G D, TSIHRINTZIS V A. Assessment of water quality of first-flush roof runoff and harvested rainwater. *Journal of Hydrology*, 2012, 466-467: 115-126.
- [8] LI S M, WANG X, QIAO B. et al. First flush characteristics of rainfall runoff from a paddy field in the Taihu Lake watershed, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(9): 8336-8351.
- [9] SANSALONE J J, BUCHBERGER S G. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water. *Journal of Environmental Engineering* 1997, 123(2): 134-143.
- [10] DELETIC A. The first flush load of urban surface runoff. *Water Research*, 1998, 32(8): 2462-2470.
- [11] 李贺, 李田. 上海高密度居民区合流制系统雨天溢流水质研究. *环境科学*, 2006, (8): 1565-1569. [LI H, LI T. Study on the characteristics of combined sewer overflow from the high density residential area in Shanghai. *Environmental Science*, 2006, (8): 1565-1569.]
- [12] 刘昌明, 张永勇, 王中根, 等. 维护良性水循环的城镇化LID模式: 海绵城市规划方法与技术初步探讨. *自然资源学报*, 2016, 31(5): 719-731. [LIU C M, ZHANG Y Y, WANG Z G, et al. The LID pattern for maintaining virtuous water cycle in urbanized area: A preliminary study of planning and techniques for sponge city. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(5): 719-731.]
- [13] 李思远, 管运涛, 陈俊, 等. 苏南地区合流制管网溢流污水水质特征分析. *给水排水*, 2015, 51(s1): 344-348. [LI S Y, GUAN Y T, CHEN J, et al. Water quality characteristics of combined sewer overflows in southern region of China. *Water and Wastewater Engineering*, 2015, 51(s1): 344-348.]
- [14] CARPENTER S R, BOOTH E G, KUCHARIK C J, et al. Extreme daily loads: Role in annual phosphorus input to a north temperate lake. *Aquatic Science*, 2015, 77: 71-79.
- [15] 赖后伟, 黎京士, 庞志华, 等. 深圳大工业区初期雨水水质污染特征研究. *环境污染与防治*, 2016, 38(3): 11-15. [LAI H W, LI J S, PANG Z H, et al. The contamination characteristics of first-flush in large industrial district of Shenzhen. *Environmental Pollution and Control*, 2016, 38(3): 11-15.]
- [16] 唐俊逸, 陈海龙, 陈芸, 等. 深圳西部海域陆源入海污染物及外来污染状况分析. *环境科学导刊*, 2018, 37(6): 80-85. [TANG J Y, CHEN H L, CHEN Y, et al. Analysis on the pollutants and external pollution sources from land to the sea in the Western Shenzhen. *Environmental Science Survey*, 2018, 37(6): 80-85.]
- [17] 郑明凤, 陈斯典, 秦华鹏, 等. 降雨径流污染对深圳湾富营养化影响的模拟研究. *中国给水排水*, 2017, 33(9): 133-138. [ZHENG M F, CHEN S D, QIN H P, et al. A simulation study on effects of urban rainfall runoff pollutions on eutrophication in Deep Bay, Shenzhen, China. *China Water and Wastewater*, 2017, 33(9): 133-138.]
- [18] 吴建立, 孙飞云, 董文艺, 等. 基于SWMM模拟的城市内河区域雨水径流和水质分析. *水利水电技术*, 2012, 43(8): 90-94. [WU J L, SUN F Y, DONG W Y, et al. SWMM simulationbased analysis on rainfall runoff and water quality within urban inland river area. *Water Resource and Hydropower Engineering*, 2012, 43(8): 133-138.]
- [19] 方神光, 陈文龙, 崔丽琴. 伶仃洋河口水域纳潮特性分析. *海洋科学*, 2012, 36(6): 105-112. [FANG S G, CHEN W L, CUI L Q. Characteristics of tidal prism of the Lingdingyang Bay. *Marine Sciences*, 2012, 36(6): 105-112.]
- [20] 黄硕, 郭青海. 城市景观格局演变的水环境效应研究综述. *生态学报*, 2014, 34(12): 3142-3150. [HUANG S, GUO Q H. Research review on effects of urban landscape pattern changes on water environment. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3142-3150.]
- [21] NORIHIDE T, TAKEVOSHI M, TAKESHI S. Potential of road surface for a non-point source of pollutants-result of nationwide survey in Japan. *Highway and Urban Environment*, 2010, 17: 255-265.
- [22] 荆红卫, 张志刚, 郭婧. 北京北运河水系水质污染特征及污染源分析. *中国环境科学*, 2013, 33(2): 319-327. [JING H W, ZHANG Z G, GUO J. Water pollution characteristics and pollution source of Bei Canal River system in Beijing. *China Environmental Science*, 2013, 33(2): 319-327.]
- [23] 李海燕, 徐尚玲, 黄延, 等. 合流制排水管道雨季出流污染负荷研究. *环境科学学报*, 2013, 33(9): 2522-2530. [LI H Y, XU S L, HUANG Y, et al. Pollution loading of overflow in combined drainage channels during rainy season. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(9): 2522-2530.]
- [24] 郝利霞, 孙然好, 陈利顶. 海河流域河流生态系统健康评价. *环境科学*, 2014, 35(10): 3692-3701. [HAO L X, SUN R

- H, CHEN L D. Health assessment of river ecosystem in Haihe River Basin, China. *Environmental Science*, 2014, 35 (10): 3692-3701.]
- [25] 陈洁, 朱广伟, 许海, 等. 不同雨强对太湖河网区河道入湖营养盐负荷影响. *环境科学*, <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.201905103>. [CHEN J, ZHU G W, XU H, et al. Influence of rainfall intensity on the nutrient loading from inflowing river in Plain River Network of Taihu Catchment. *Environmental Science*, <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.201905103>.]
- [26] HEARN D S, SHEIBLEY R W, DAHLGREN R A, et al. Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California. *Journal of Hydrology*, 2005, 313: 234-247.
- [27] 张招招, 程军蕊, 毕军鹏, 等. 甬江流域土地利用方式对面源磷污染的影响: 基于SWAT模型研究. *农业环境科学学报*, 2019, 38(3): 650-658. [ZHANG Z Z, CHENG J R, BI J P, et al. Impact of land use on non-point sources of phosphorus in the Yong River Basin: SWAT model analysis. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3): 650-658.]
- [28] 杨斌, 钟秋平, 张晨晓, 等. 钦州湾叶绿素 a 和初级生产力时空变化及其影响因素. *环境科学学报*, 2015, 35(5): 1333-1340. [YANG B, ZHONG Q P, ZHANG C X, et al. Spatio-temporal variations of chlorophyll a and primary productivity and its influence factors in Qinzhou Bay. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(5): 1333-1340.]
- [29] OROZCOBORBON M V, GUTIERREZGALINDO E A, NAVARROOLACHE L F, et al. Winter and summer evaluation of bacteriological water quality at recreational beaches along Todos Santos Bay, Baja California, Mexico. *Ai Magazine*, 2014, 4(15): 1132-1139.

Spatio-temporal characteristics of non-point source and sewer overflow pollution and its impacts on water environment in Shenzhen Bay Basin

LUO Huan, CHEN Xiu-hong, WU Qiong, LUO Na, HUANG Xu

(Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510635, China)

Abstract: With the effective control of point source pollution, non-point source and sewer overflow pollution becomes the main type of water pollution. Based on materials of land use, urban drainage network and so on, the basin-bay integrated water environmental model was established, and the spatio-temporal characteristics of non-point source and sewer overflow pollution in Shenzhen Bay Basin as well as its impacts on water environment were analyzed. Results showed that (1) The non-point source and sewer overflow pollution loading per unit area of COD, NH₃-N and TP in rainy season was 17.21 t/km² and 10.21 t/km², 0.17 t/km² and 0.69 t/km², 0.04 t/km² and 0.07 t/km², respectively; (2) The non-point source and sewer overflow pollution was concentrated in May and August with more heavy rainfall observed in Shenzhen River Basin, Dasha River Basin and Xinzhou River Basin with larger area, steeper surface slope and more sewerage cutting projects; (3) The COD, NH₃-N and TP concentrations of non-point source and sewer overflow pollution could approach 3.7, 18.2 and 8.5 times the values of water quality standards, respectively; (4) The areas where the COD, NH₃-N and TP concentrations in rainy season were higher than those in dry season exceeded 40%, 60% and 65% of the total area of Shenzhen Bay, respectively.

Keywords: non-point source and sewer overflow pollution; basin-bay integrated water environmental model; spatio-temporal characteristics