

深圳海湾流域溢流污染规律及其对海湾水质的影响

程鹏¹ 李明远² 楼凯² 秦华鹏^{1,†}

1. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; 2. 深圳市规划国土发展研究中心,
深圳 518000; † 通信作者, E-mail: qinhp@pkusz.edu.cn

摘要 以深圳海湾流域为研究对象, 基于流域降雨径流污染-沿河截排系统溢流-海湾水动力水质联合模型, 分析研究区溢流污染输出的时空变化规律及其对海湾水质的影响。结果表明, 全年流域主要污染源为污水处理厂尾水污染和溢流污染; 溢流污染占入海湾总污染负荷的30%左右, 雨季升至50%左右, 成为深圳海湾流域雨季最主要的污染源; 溢流污染负荷季节差异性显著, 雨季占全年总负荷的85%以上; 溢流污染负荷随降雨量增加而增加, 当降雨强度相差不大的时候, 雨前干旱时间越长, 溢流污染负荷越大; 深圳湾内湾水质比外湾差且波动更明显, 雨季内湾及湾中水质比旱季差且波动更大; 在场次降雨情况下, 内湾水质波动受溢流污染冲击影响最严重, 湾中及外湾水质波动主要受潮汐作用影响; 在降雨重现期为0.25~0.5年(2小时降雨约45~60 mm)时, 深圳湾水质超标最明显, 水质受溢流污染冲击影响的持续时间为12~20天。

关键词 溢流污染; 污染源解析; 海湾水质; 时空变化; 暴雨洪水管理模型(SWMM); 环境流体动力学模型(EFDC)

Impact of Overflow Pollution on Water Quality in Shenzhen Bay

CHENG Peng¹, LI Mingyuan², LOU Kai², QIN Huapeng^{1,†}

1. School of Environment and Energy, Peking University at Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055;
2. Shenzhen Urban Planning and Land Resource Research Center, Shenzhen 518000;
† Corresponding author, E-mail: qinhp@pkusz.edu.cn

Abstract This study takes the Shenzhen Bay Basin as the research object, based on the combined model of rainfall runoff pollution, overflow from sewer interception system and hydrodynamic water quality in the bay, the temporal and spatial variation of overflow pollution and its effect on water quality in the bay were analyzed. The results show that in the whole year, the main pollution sources of the basin are the pollution of the wastewater treatment plant and the overflow pollution. The overflow pollution accounts for about 30% of the total pollution load, rises to about 50% in the rainy season, and becomes the main pollution source in the rainy season in Shenzhen Bay Basin. The overflow pollution load in rainy season accounts for more than 85% of the total overflow pollution load in the whole year. The pollution load of overflow increases with the rainfall. When the rainfall intensity is similar, the longer the dry time before rain, the greater the overflow pollution load. In terms of water quality in the bay, the water quality in the Inner Bay is worse than that in the Outer Bay and the fluctuation is more obvious. In rainy season, the water quality in Inner Bay and Middle Bay is worse and fluctuates more than that in dry season. In the event of rain, the water quality fluctuation in the inner bay was most seriously affected by the impact of overflow pollution, while the middle and outer bays was mainly affected by the tidal action. When the return period of rainfall is 0.25 to 0.5 years, the water quality in Shenzhen Bay exceeds the standard most obviously, and the duration of water quality affected by overflow pollution is 12 to 20 days.

Key words overflow pollution; water source apportionment of pollution; bay water quality; temporal and spatial variation; storm water management model (SWMM); the environmental fluid dynamics code (EFDC)

深圳是粤港澳大湾区世界级城市群的核心城市。作为深圳的近岸海湾,深圳湾位于深圳市的核心区域,承担着城市发展和生态保育的双重功能。在城市化快速发展过程中,深圳河流域存在雨污管错接问题,给水环境保护工作带来较大的挑战^[1-3]。为了解决这个问题,深圳市建立沿河截排系统,作为一种截流直排雨污水、快速改善河道水质的有效措施,沿河截排系统已成为大部分城市排水系统改造工程的重要组成部分,广泛用于收集和传输快速城市化地区沿河雨水管排放的漏排污水^[4-7]。在旱季,由于漏排污水流量较小,沿河截排系统可以完全截排沿河的漏排污水,但是在雨季,降雨期间大量雨水进入雨水管,与原有的漏排污水混流,因截排系统和污水处理厂的运输能力有限,当降雨产生的径流超过运输能力时,便产生沿河截排系统溢流和污水处理厂厂前溢流。这些溢流会进入半封闭的海湾,对水质有潜在的重大影响^[8-9]。

国内外对合流制管网溢流特征及其对河流水质影响的研究较为充分。合流制管网溢流(combined sewer overflows, CSOs)污染主要受溢流口特征^[8]、降雨特征^[10-11]和下垫面特性^[12-13]等影响,存在初始冲刷效应,初始阶段污染物的负荷相对较高^[14]。溢流污染对水体的危害非常严重,会导致河流出现营养盐超标^[15]、病原菌增多^[16-17]和溶解氧降低^[18]等现象。Lund等通过^[19]对合流制区域河流的水质监测发现,与无CSOs的河流相比,有CSOs的河流氨氮和总磷浓度更高,溶解氧浓度更低。针对截排系统,Chen等^[8]基于暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)分析深圳河湾截排系统溢流的空间分布特征及影响因素,但没有分析溢流对受纳水体的影响。郑明凤等^[20]基于SWMM和环境流体动力学模型(the environmental fluid dynamics code, EFDC)分析径流污染对深圳湾富营养化的影响,但未考虑溢流影响这一关键因素。对于湾区城市,在潮汐影响下,溢流污染对海湾水质的影响更加显著和复杂。然而,目前国内外有关截排系统溢流污染对海湾水质影响的研究较缺乏。

鉴于上述背景,本文建立流域尺度的降雨径流污染-沿河截排系统溢流-海湾水动力水质联合模型,识别溢流污染对深圳湾负荷的贡献,分析深圳河流域截排系统溢流污染负荷输出的时空规律,研究连续动态模拟及不同降雨重现期下溢流污染对海湾水质的影响,探讨沿河截排系统溢流污染与海

湾水质之间的响应关系。

1 材料与方法

1.1 研究区域

深圳湾是深圳与香港之间的一个半封闭海湾,东接深圳河,西连珠江口内伶仃洋,汇水面积为596 km²。湾内纵深约14 km,平均宽7.5 km,平均水深仅2.9 m,湾内水域面积为92.17 km²,湾口至湾顶长18.5 km,海床高程大部分在-7~-1 m之间,比降约为0.3‰。区域内降雨量时空分配非常不平衡,多年平均降雨量为1966.5 mm,汛期(4—9月)降雨量大且集中,多以暴雨形式出现,约占全年降雨总量的80%。

深圳侧有水质净化厂8座,污水处理能力总共为199万t/d;香港侧有水质净化厂2座,污水处理能力总共为16.2万t/d。与深圳侧相比,香港侧污水处理能力较小,原因是靠近深圳湾流域的香港侧主要为山地和林地,属于未开发区。目前,深圳侧深圳河流域已经建成比较完善的污水收集处理系统,大沙河、新洲河、福田河、布吉河下游、沙湾河下游和莲塘河的截排系统(参数见表1)均已完善并运行,将收集的雨污水送入就近的污水处理厂处理(图1)。

近年来,由于城市化水平越来越高,区域内不渗透地表的增多导致径流量和污染负荷加大,雨季降雨期间沿河截排系统和污水处理厂的运输能力有限,大量污染负荷通过沿河截排系统和污水处理厂溢流进入深圳湾(图2)。近5年的海湾水质监测数据显示,雨季内湾化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、无机氮和磷酸盐的平均浓度为7.49, 4.13和0.33 mg/L,按照Ⅳ类海水水质标准,分别超标1.5, 8.3和7.3倍,与旱季相比,分别超出2.5, 1.6和1.5倍。雨季极端降雨导致的溢流污染使得海湾水质波动较大,超标明显,对海湾水质产生较为严重的影响。

1.2 模型的建立

为了研究城市截排系统溢流污染对海湾水质连续动态的影响,本文基于SWMM和EFDC模型,建立降雨径流污染-沿河截排系统溢流-海湾水动力水质联合模型。其中,降雨径流污染和沿河截排系统溢流采用SWMM进行模拟,海湾水质响应过程采用EFDC模型进行模拟。首先用SWMM构建城市降雨径流污染模型和沿河截排系统溢流模型,模拟

表 1 研究区域内沿河截排系统参数
Table 1 Parameters of interception system in study area

河流	污水量/(10 ³ m ³ ·d ⁻¹)	截排系统参数			
		长度/km	坡度/‰	截排能力/mm	溢流口数目
大沙河(东)	33.5	11.35	2	7	13
大沙河(西)	33.5	11.35	2	7	13
新洲河	38.6	20.30	2	5	10
福田河	35.0	13.8	4	6	12
布吉河	40.0	5.10	2	6	12
沙湾河	32.0	3.20	1	6	6
莲塘河	4.6	6.90	2	5	10

说明: 截排能力表示截排系统可截流降雨在流域产生最大地表径流量的能力。

深圳河湾流域各河流出口的流量和水质浓度的变化过程, 然后会同河流基流和点源排放序列, 一起作为动态边界条件输入 EFDC 海湾水动力水质模型进行联合模拟。

根据收集到的排水分区、地形数据、河流水系、道路和管网分布等资料, 将流域概化为 452 个子汇水区域、15 条水系、781 条管渠、844 个节点和 29 个排口。将深圳湾流域的用地类型划分为居住用地、工业用地、商业用地、道路和植被/绿地 5 个类型。

沿河截排系统溢流模型采用 SWMM 中的堰流模块, 在汇水区模型和排水模型的基础上, 增加沿河截排系统, 设定截排系统溢流口。溢流口为连接截排系统与河道的通道, 当箱涵的水位高于溢流口的高度时, 便会发生溢流。

根据收集到的海陆边界和海湾地形等资料, 将深圳湾划分为 2434 个正交网格。海洋开边界的数据来自深圳蛇口赤湾站的潮位监测数据和外海的水质监测数据, 河流边界的流量和水质输入数据来自 SWMM 模拟值和非降雨时期监测值。耦合模型如图 3 所示, 主要模拟指标有潮位、流量、COD、无机氮、磷酸盐、氨氮、总氮(total nitrogen, TN)和总磷(total phosphorus, TP)。

模型建立过程中, 尾水污染、直排污染、香港侧污染、大气沉降污染和底泥污染的设置方法如下: 尾水污染中, 福田、滨河和罗芳污水处理厂的负荷直接排入深圳河或深圳湾, 其他污水处理厂则通过补水的方式补充河流基流, 各污水处理厂的水量水质采用深圳市水务集团的逐时监测数据; 直排污染的排污口数据来源于最新的第二次全国污染源普查结果, 经过整治的深圳河湾流域排污口目前还

有总排放量为 5787 m³/d 的污水进入深圳湾, 采用污水处理厂的进水水质数据; 香港侧的污染主要为降雨径流污染和河流基流污染, 其中降雨径流污染来源于 SWMM 计算结果, 河流基流污染来源于香港环境保护署的河流水量水质监测数据; 深圳湾大气沉降污染根据樊敏玲等^[21]在中山横门的研究数值, 由海域面积计算得到 2017 年大气沉降对深圳湾的氮磷贡献, 氨氮为 146 t, TN 为 395 t, TP 为 5 t; 底泥中 COD 释放通量根据宋芳等^[22]的研究结果, 营养盐释放通量参考广东海洋大学 2017 年的监测数据, 得到 2017 年底泥释放对深圳湾的贡献, COD 为 2380 t, 氨氮为 43 t, TN 为 203 t, TP 为 47 t。

1.3 模型的率定与验证

选取 2017 年作为模拟时段, 模拟所需的海面风场、海水盐度和水温来源于深圳市海洋环境与资源监测中心的实测数据, 太阳辐射、云量、蒸发和流域降雨量来源于深圳市国家气象观测台, 水文、水质监测数据来源于深圳市环境监测中心站、深圳市水务局和深圳市海洋局。

1.3.1 水动力模型

选取深圳河口站 2017 年 9 月的流量监测数据和深圳湾站 2017 年 9 月潮位监测数据进行模型的流量及潮位验证, 结果如图 4 所示。验证结果的精度用 NSE 系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient)衡量, 深圳河口站流量验证的 NSE 系数为 0.84, 深圳湾站潮位 NSE 系数为 0.92。模型模拟的水文过程与实测水文过程趋势基本上吻合。

最后, 利用 2017 年笔架山河河口站的溢流监测数据, 参照 Chen 等^[8]的方法, 对水文模型参数进行验证, 参数率定和验证结果的精度用皮尔森相关系数(R)衡量, 场次监测溢流持续时间和模拟溢流持续

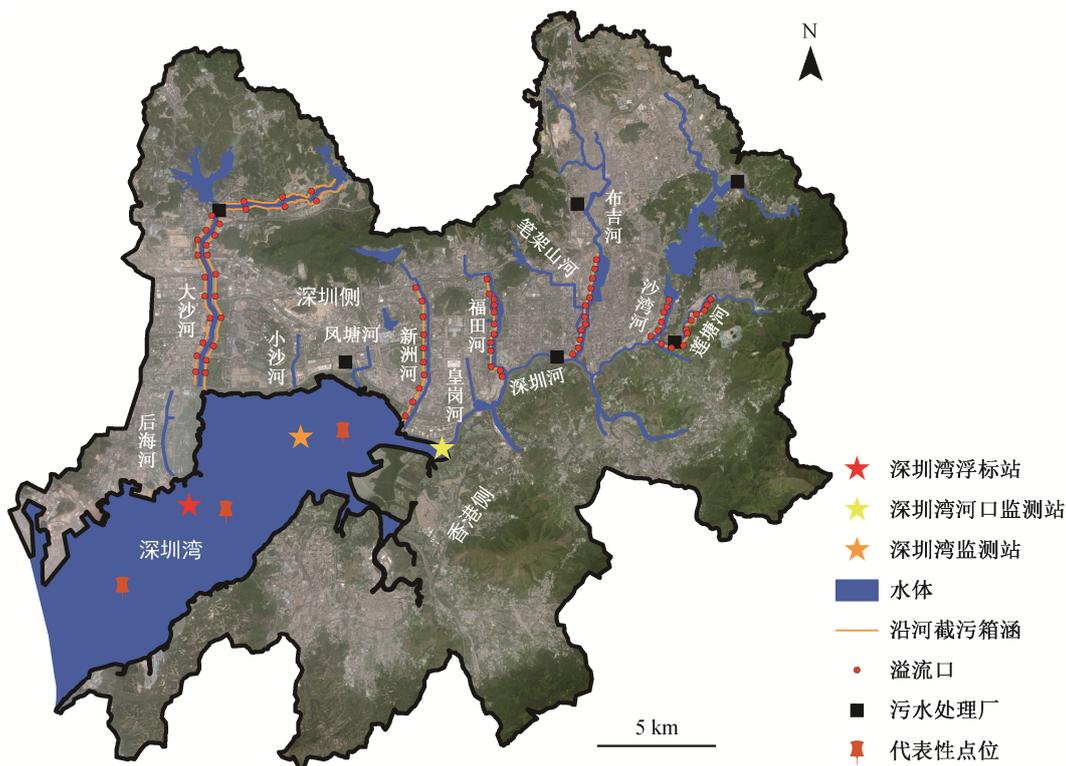


图 1 研究区域与监测点位置
Fig. 1 Location of the study area and monitoring sites

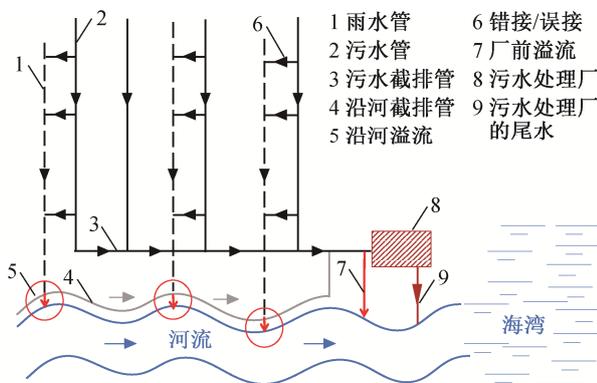
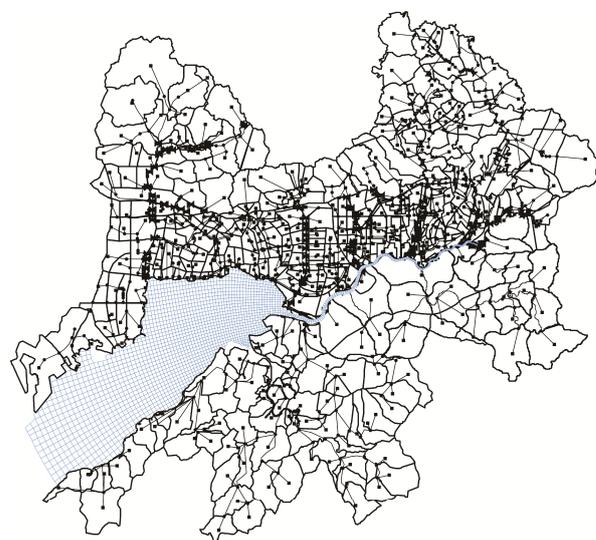


图 2 沿河截排系统溢流示意图
Fig. 2 Schematic diagram of Interception system overflows

时间的 R^2 为 0.8371。经过验证，所建模型能够较准确地模拟深圳河流域沿河截排系统溢流。

1.3.2 水质模型

1) 下垫面冲刷过程。SWMM 中的水质参数主要是污染物累积模块和冲刷模块的参数，采用 2012 年 4 月 5 日和 16 日的降雨径流污染监测数据，对 SWMM 的参数进行率定和验证，具体方法见文献 [20]。各用地类型的各项水质指标验证结果的 NSE 系数均在 0.78~0.93 之间，说明模型参数可靠，能够



黑色为 SWMM, 蓝色为 EFDC 模型
图 3 研究区域模型概化图
Fig. 3 Sketches of catchment models

较准确地模拟降雨径流污染。

2) 海湾水质部分。采用 2017 年 9 月 1—15 日深圳河口站和深圳湾浮标站的连续水质监测数据进行验证，各水质指标的时间序列如图 5 所示。深圳河

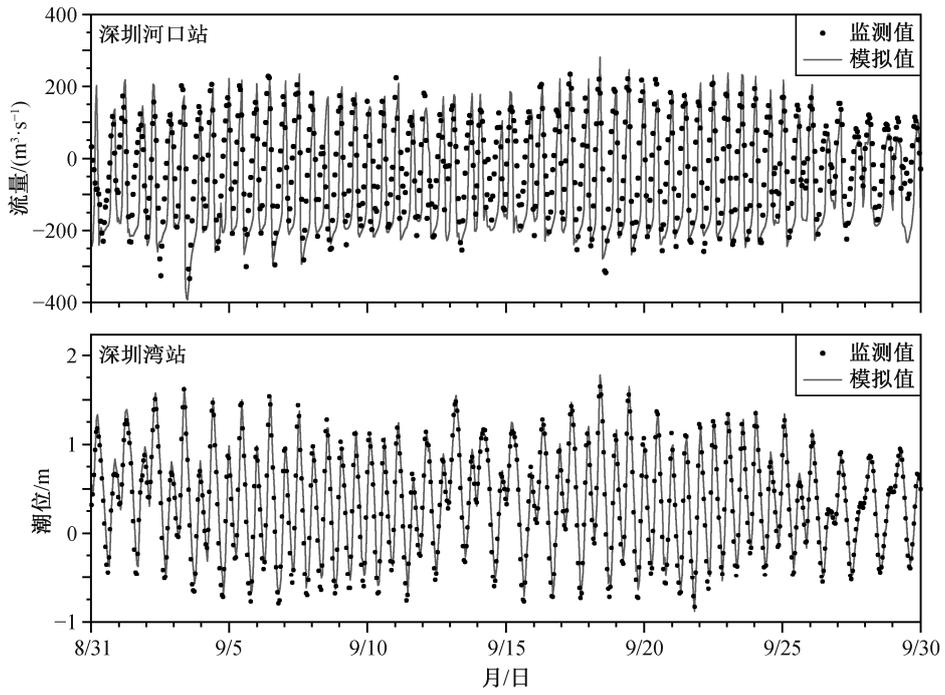


图 4 EFDC 模型水动力部分时间序列验证结果
Fig. 4 Time series verification results of hydrodynamic part of EFDC model

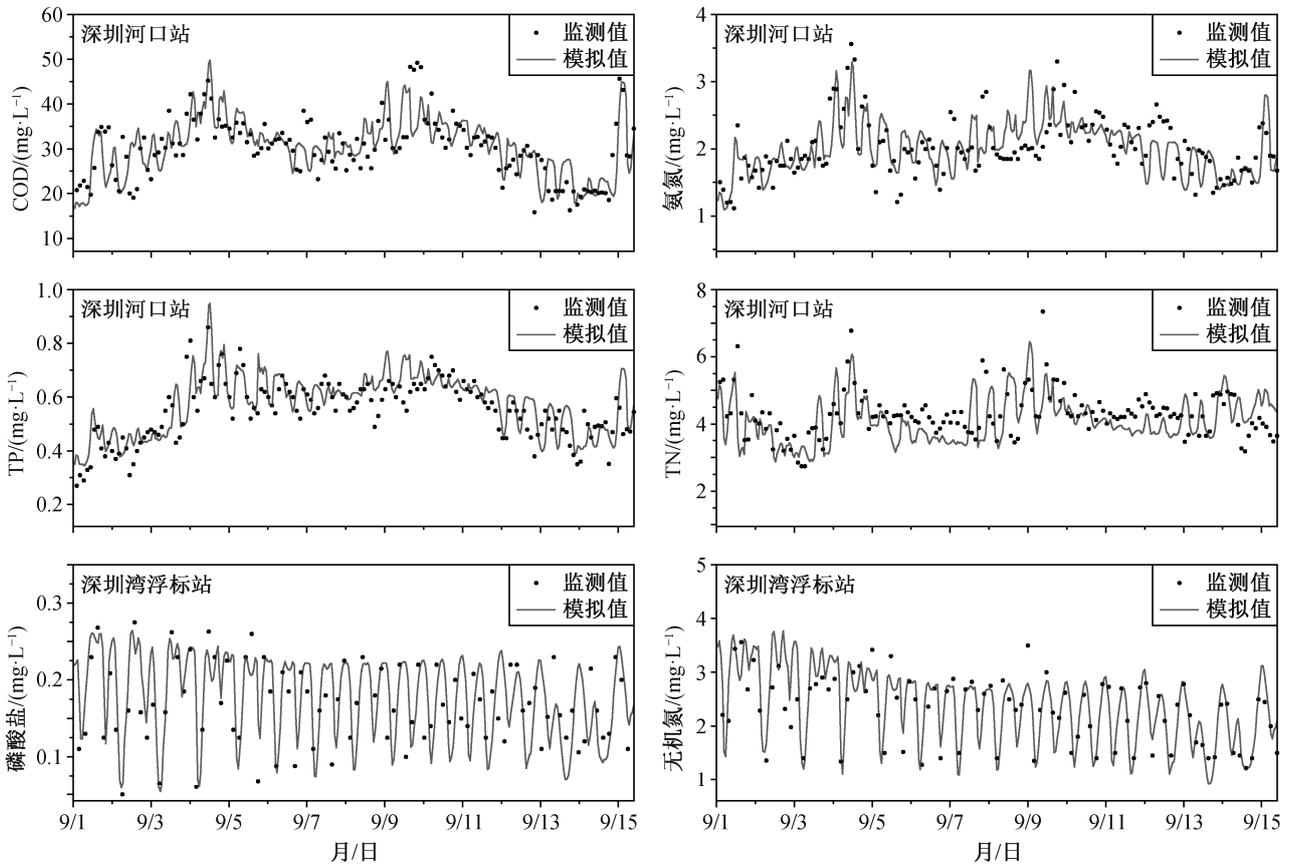


图 5 EFDC 模型水质部分时间序列验证结果
Fig. 5 Time series verification results of water quality of EFDC model

口站 COD、氨氮、TN 和 TP 验证结果的 NSE 系数均在 0.75~0.86 范围内,深圳湾浮标站验证结果的 NSE 系数在 0.71~0.78 范围内,说明模型水质参数可靠,能够较准确地模拟陆域污染物进入深圳湾后的水质情况。

1.4 模型情景设置

1) 全年连续降雨情景:用于识别全年各类污染源对深圳湾污染负荷的贡献,分析深圳河湾流域截排系统溢流污染负荷输出的时空规律。

2) 场次降雨情景:用于模拟不同降雨重现期下深圳河湾溢流污染输出负荷、海湾水质超标情况以及海湾水质的时空差异性。根据深圳市暴雨强度公式,采用芝加哥雨型,设计重现期为 0.1, 0.25, 0.5 和 1 年的降雨,2 小时降雨量分别为 28, 45, 60 和 70 mm,雨前干旱时间设置为 5 天,雨峰系数为 0.4。

2 结果与讨论

2.1 深圳河湾流域溢流污染负荷来源

深圳河湾流域 2017 年入湾污染负荷中 COD、氨氮、TN 和 TP 的总量分别为 30480, 1985, 5105 和 473 t。如表 2 所示,污水处理厂尾水污染和溢流污染是全年两大主要污染源,COD、氨氮、TN 和 TP 合计占比分别为 68.3%, 74.7%, 81.1% 和 58.8%。在当前雨水管网修建较完善的情况下,面源污染(降雨径流未进入管网直接入河的污染)占比较小。

根据 Chen 等^[8]的研究,深圳河湾流域沿河截排系统溢流的临界降雨量为 5 mm。为了解雨天溢流污染负荷对深圳河湾流域的贡献程度,选取降雨量 >5 mm 的天数(共 65 天),统计深圳河湾流域降雨期间的污染负荷。如表 3 所示,COD、氨氮、TN 和 TP 的总量分别为 16630, 961, 1978 和 262 t,分别占全年入湾负荷的 54.6%, 48.4%, 38.7% 和 55.4%。溢

表 2 深圳湾 2017 年全年各类主要污染源占比
Table 2 Proportion of major pollution sources of Shenzhen Bay in 2017

污染源	污染物占比/%			
	COD	氨氮	TN	TP
溢流污染	33.3	32.6	18.8	31.4
面源污染	7.4	2.9	1.5	12.6
偷排漏排污染	1.5	2.0	1.2	1.5
污水处理厂尾水污染	35.0	42.1	62.3	27.4
底泥污染	7.8	2.2	3.6	10.0
大气沉降	—	7.3	6.9	1.1
香港侧	15.0	10.9	5.7	16.0

表 3 深圳湾 2017 年雨天各类主要污染源占比
Table 3 Proportion of major pollution sources in the rainy days of Shenzhen Bay in 2017

污染源	污染物占比/%			
	COD	氨氮	TN	TP
溢流污染	49.6	55.4	44.5	44.8
面源污染	11.2	5.2	3.9	18.6
偷排漏排污染	0.5	0.7	0.6	0.5
污水处理厂尾水污染	11.1	15.0	31.0	8.6
底泥污染	2.5	0.8	1.8	3.1
大气沉降	—	2.6	3.4	0.3
香港侧	25.1	20.3	14.8	24.1

流污染在各类污染源中占比 50% 左右,是深圳湾雨天的主要污染源。

2.2 截排系统溢流污染负荷的时空变化规律

2.2.1 空间变化规律

如表 4 所示,深圳河湾流域溢流污染主要分布在污水处理厂厂前溢流、布吉河流域以及新洲河流域。滨河污水处理厂和罗芳污水处理厂 COD 溢流负荷全年占比为 52.4%,氨氮占比为 59.0%,TN 占比

表 4 深圳河湾流域溢流污染负荷的空间分布

Table 4 Spatial distribution of overflow pollution output load in Shenzhen Bay Basin

溢流位置	COD		氨氮		TN		TP	
	负荷/t	占比/%	负荷/t	占比/%	负荷/t	占比/%	负荷/t	占比/%
大沙河	839.5	8.3	35.4	5.5	53.8	5.0	8.8	5.9
新洲河	1127.4	11.1	114.7	17.7	177.8	16.6	17.9	12.1
福田河	315.8	3.1	22.8	3.5	34.2	3.2	5.4	3.6
布吉河	1842.1	18.2	64.6	10.0	171.3	15.9	36.6	24.6
沙湾河	375.9	3.7	12.6	2.0	19.4	1.8	6.2	4.2
莲塘河	324.8	3.2	14.9	2.3	25.7	2.4	5.3	3.6
滨河污水处理厂	4080.7	40.2	335.4	51.8	510.1	47.5	54.2	36.5
罗芳污水处理厂	1240.6	12.2	46.8	7.2	81.9	7.6	14.1	9.5

为 55.1%，TP 占比为 46.0%。这是因为当截污系统传输进污水处理厂的水量超过其处理能力时，污水处理厂将难以处理的污水直接排放入河，导致河流污染严重^[23]。与沿河溢流相比，厂前溢流成为雨季河流及海湾不可忽视的污染源。

2.2.2 时间变化规律

深圳市 2017 年全年降雨量为 2070.6 mm，其中雨季(4—9月)降雨量(1865.6 mm)占全年的 90%。雨季 COD、氨氮、TN 和 TP 的溢流污染负荷分别为 9062, 573, 940 和 130 t，在全年的占比为 89.3%, 88.5%, 87.5%和 87.5% (图 6)。流域月度溢流污染负荷与月降雨量正相关，降雨量越大，溢流污染排放负荷总量越大，主要是因为降雨量越大，从地表冲刷出来的污染物越多，这些污染物随径流进入截污系统后从溢流口溢出。另外，在分析月度场次降雨过程中发现，溢流污染负荷还与降雨间隔时间及降雨强度有关(图 7)。2017 年 9 月 13—15 日的降雨过程中，虽然 15 日的降雨强度大于 13 日，但由于 15 日的降雨间隔时间较短，地面累积的污染物有限，冲刷进入沿河截污系统的径流污染负荷较少，因此溢流污染负荷也相对较少。

2.3 深圳湾全年水质的时空变化规律

选取深圳湾内 3 个代表点位——内湾、湾中和外湾(图 1)，分析溢流污染对深圳湾水质的影响，选取 COD、无机氮和磷酸盐 3 个指标进行全年逐月的水质统计分析，结果如图 8 所示。

从空间上看，深圳湾水质从外湾到内湾逐渐变差，其中内湾比湾中和外湾水质波动明显。内湾、湾中和外湾全年 COD 平均浓度分别为 19.6, 8.2 和 5.7 mg/L，全年无机氮平均浓度分别为 3.2, 2.0 和 0.6 mg/L，全年磷酸盐平均浓度分别为 0.35, 0.25 和 0.08 mg/L。其中，内湾无机氮比 IV 类海水水质标准(≤ 0.5 mg/L)超标 6.4 倍，磷酸盐比 IV 类海水水质标准(≤ 0.045 mg/L)超标 7.8 倍。根据国家海洋局发布的《中国海洋环境状况公报》中富营养化指数计算方法($E = [\text{化学需氧量}] \times [\text{无机氮}] \times [\text{活性磷酸盐}] \times 10^6 / 4500$)，计算结果显示内湾水质为重度富营养化。主要原因是，与外湾相比，内湾及湾中的水质更多地受到雨季随陆域河流进入深圳湾的截排系统溢流污染冲击影响，在雨季波动明显；同时，由于内湾水动力交换条件较差，溢流污染物进入内湾后不易扩散，导致内湾水质超标严重。外湾水质更多

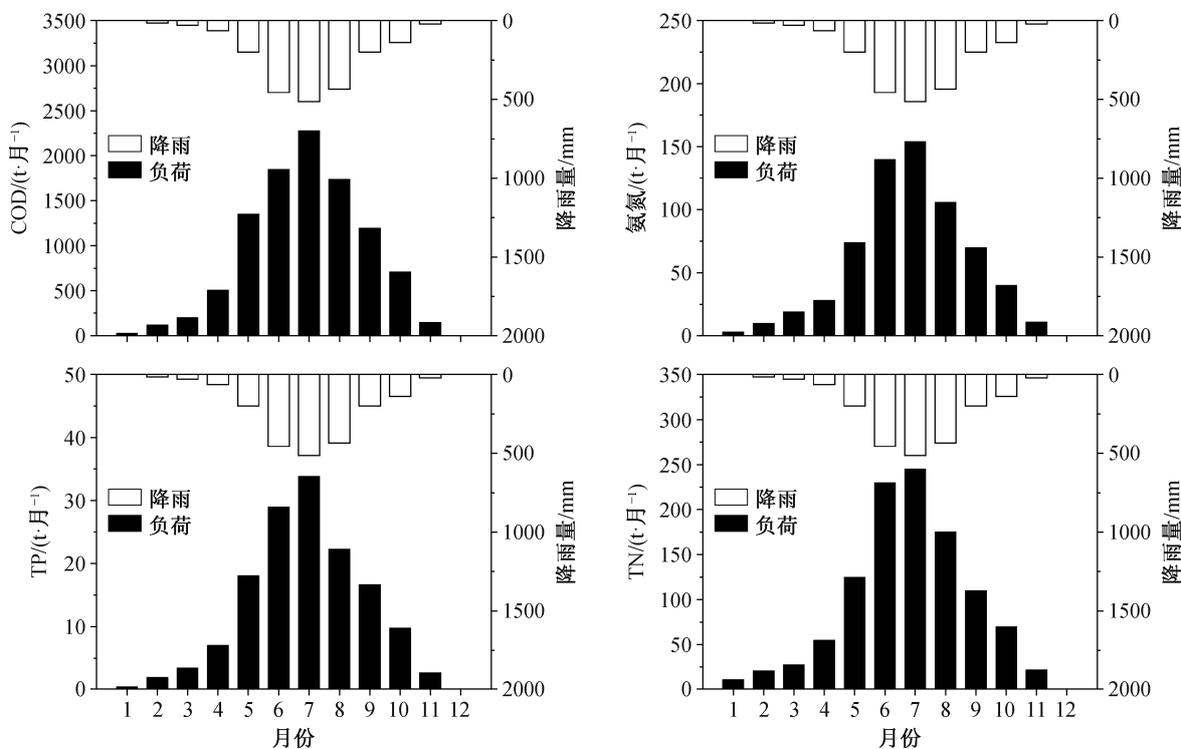


图 6 深圳河湾流域溢流污染负荷时间分布
Fig. 6 Time distribution of overflow pollution load in Shenzhen Bay Basin

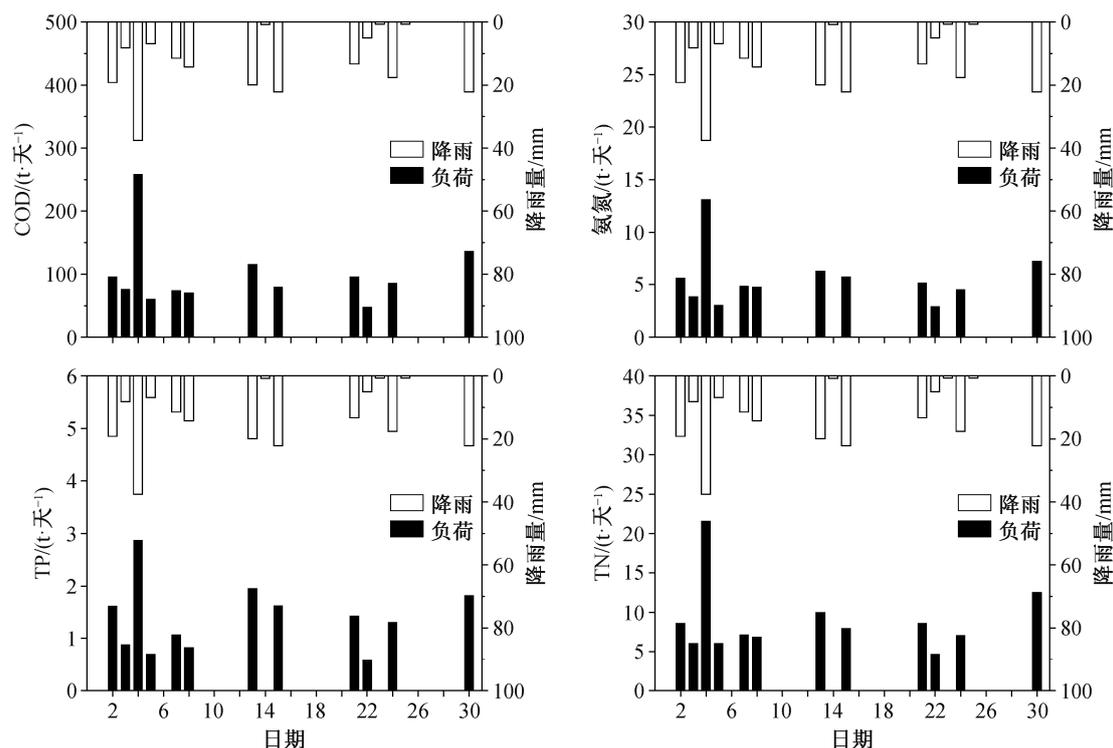


图7 2017年9月深圳河湾流域溢流污染负荷情况

Fig. 7 Overflow pollution load in Shenzhen Bay Basin in September 2017

地受到珠江口水质的影响,受陆域溢流污染物的影响较小,所以全年波动不明显。

从时间上看,雨季内湾和湾中各污染物浓度及波动程度均高于旱季,雨季内湾COD、无机氮和磷酸盐平均浓度分别为24.0、3.5和0.4 mg/L,比旱季分别超出58.9%、25.0%和29.0%,无机氮和磷酸盐比IV类海水水质标准分别超标7.0和8.9倍。雨季内湾COD、无机氮和磷酸盐浓度变化幅度为507%、348%和667%,远高于旱季,主要是由于雨季陆域溢流污染物进入海湾后导致水质瞬时超标引起的波动。由此可见,溢流污染成为深圳湾雨季水质超标的重要污染源。

2.4 不同降雨重现期下流域溢流污染输出负荷及海湾水质的时空变化规律

2.4.1 溢流污染输出负荷

不同降雨重现期下深圳河湾流域溢流污染输出负荷统计结果如图9所示。当降雨重现期从0.1年增大至0.5年时,溢流污染负荷增幅较大;随着降雨重现期继续增大,溢流污染负荷的增幅变小。这是因为初期雨量较小,地表污染物随径流进入截污箱涵较少;随着雨量增大,进入截污箱涵的径流量迅速增大,导致溢流负荷较快地增长;当雨量增大

到一定程度时,因为地面积累的污染物有限,所以冲刷入截污箱涵的污染负荷逐渐减少,导致溢流负荷增幅逐渐变小。

2.4.2 海湾水质的时空变化规律

设计降雨情景模拟时间段为2017年6月30日0:00—2:00,共2小时,研究雨季不同降雨重现期下陆域溢流污染随河流进入深圳湾对水质产生的影响,图10显示内湾、湾中和外湾的COD、无机氮和磷酸盐浓度随时间的变化情况。

从空间上看,在场次降雨情况下,内湾水质波动受溢流污染的冲击影响最严重,湾中及外湾水质波动主要受潮汐作用影响,基本上不受陆域溢流污染冲击影响。从时间上看,内湾水质整体上受溢流污染冲击影响的持续时间为12~20天。随着降雨重现期增大,内湾更早地出现污染物浓度峰值。降雨重现期为0.25~1年时,雨后7~19小时出现污染物浓度峰值;降雨重现期为0.1年时,雨后44~49小时出现污染物浓度峰值。主要是因为降水重现期越大,污染物冲刷强度越大,汇流时间越短,污染物随径流进入截污箱涵后更快地溢出,使得内湾相对更快地出现污染物浓度峰值。

从不同降雨重现期情况看,在降雨重现期为

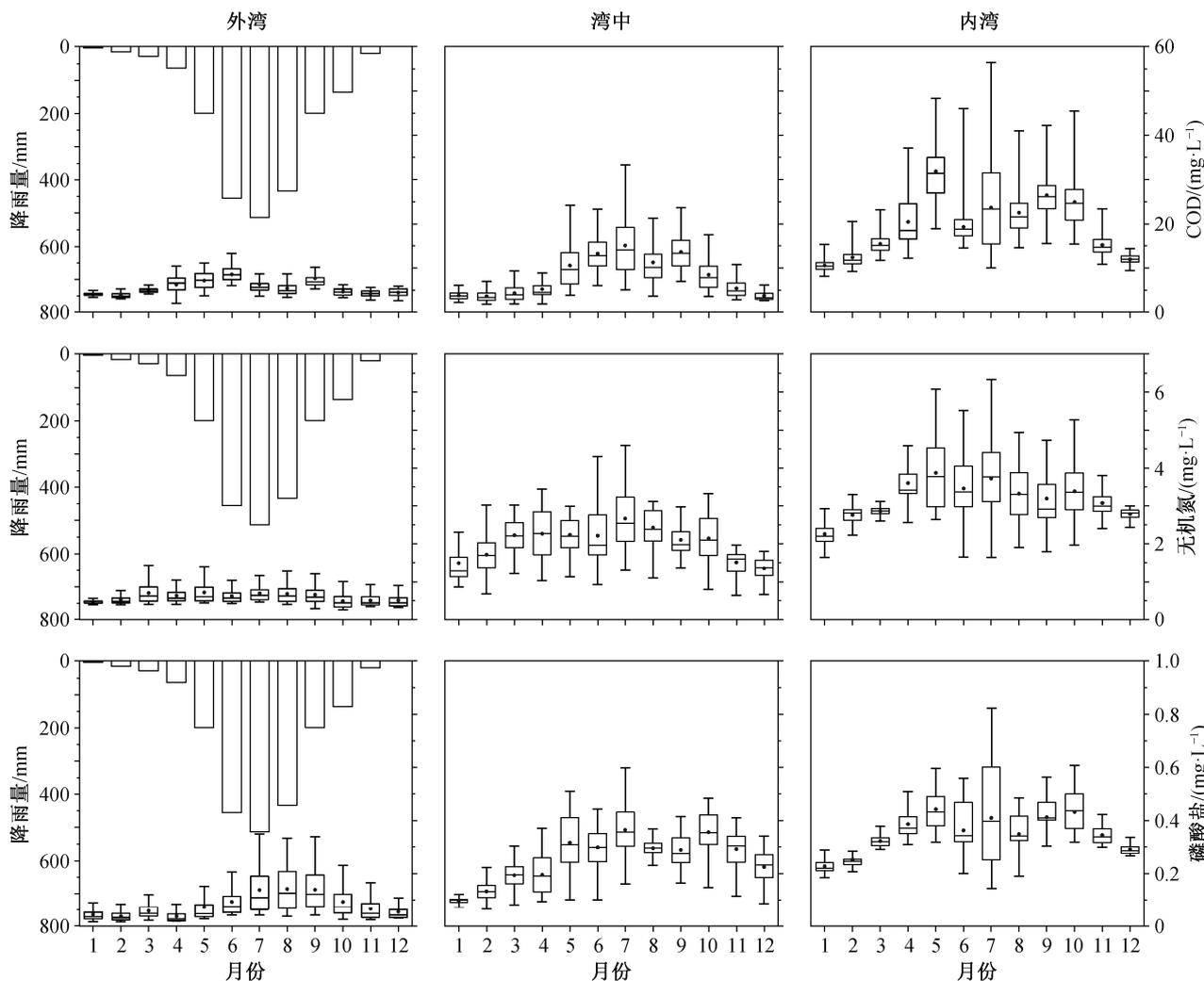


图 8 2017 年深圳湾各月份水质浓度变化
Fig. 8 Variation of water quality concentration in Shenzhen Bay by month in 2017

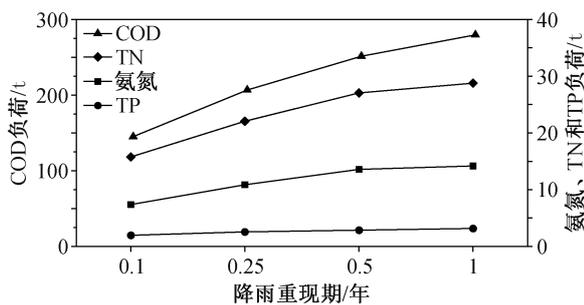


图 9 不同降雨重现期下全流域溢流污染输出负荷的变化
Fig. 9 Overflow pollution output load of the whole basin under different rainfall return periods

0.25~0.5 年(2 小时降雨量为 45~60 mm)时, 内湾水质超标最明显。其中, COD 和无机氮在降雨重现期为 0.5 年时的浓度最大, 分别为 43.2 和 7.1 mg/L, 比

IV 类海水水质标准分别超标约 3.5 和 14.2 倍。磷酸盐在降雨重现期 0.25 年时浓度最大, 为 0.38 mg/L, 比 IV 类海水水质标准超标约 8.4 倍。当降雨重现期为 1 年时, 由于进入深圳湾的溢流污染负荷比径流量小, 所以内湾水质浓度反而小于降雨重现期为 0.25~0.5 年时。由此可见, 陆域溢流污染造成深圳湾内湾水质的短期超标现象非常明显, 在大雨情况下, 应当更加关注溢流污染对海湾水质的影响。

3 结论

1) 深圳河流域主要污染源为污水处理厂尾水污染和溢流污染, 其中溢流污染占全年入河湾总污染负荷的 30% 左右, 雨季升至 50% 左右, 成为雨季流域最主要的污染源。

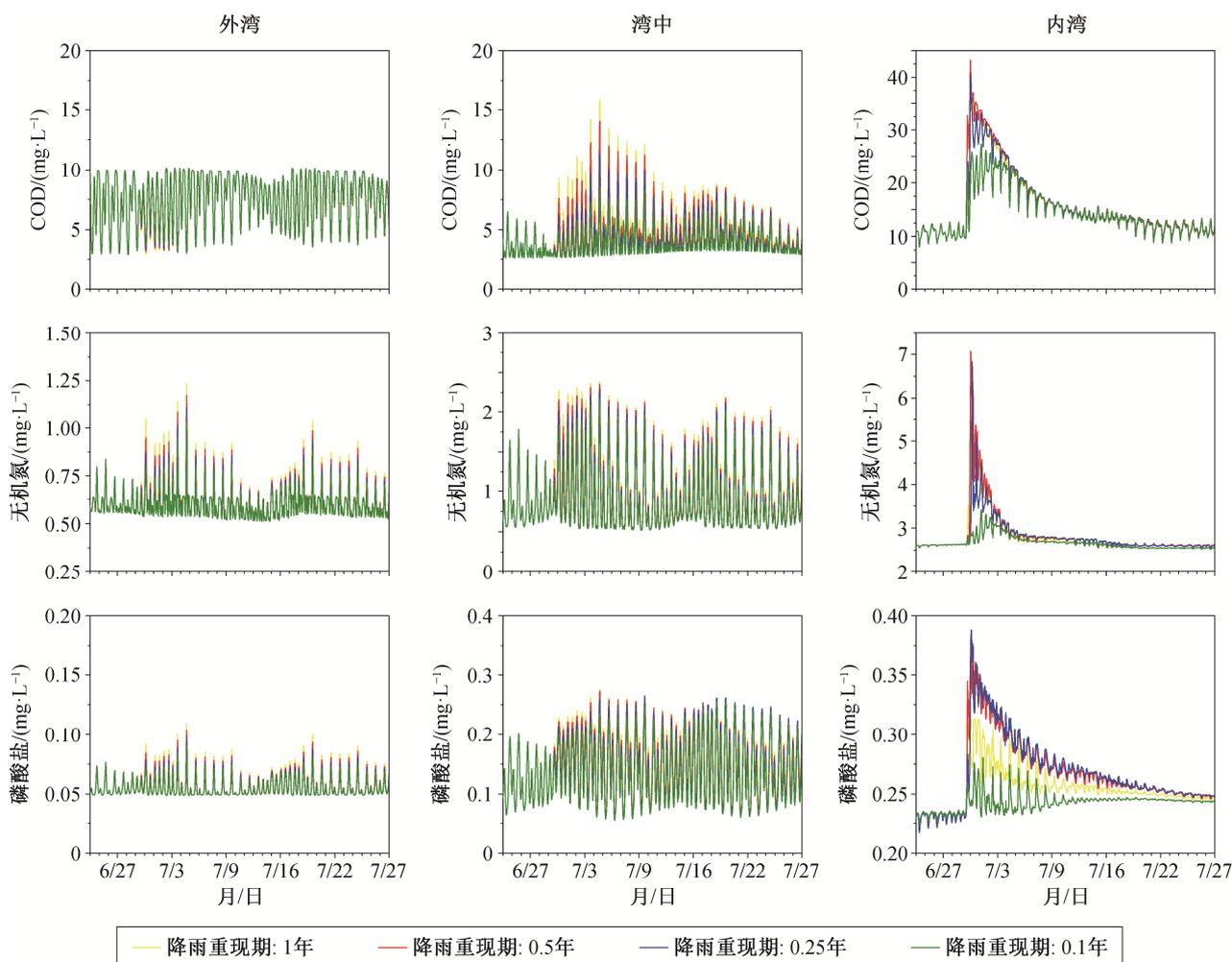


图 10 不同降雨重现期下深圳河流域溢流污染对深圳湾水质的影响情况

Fig. 10 Effects of overflow pollution on water quality in Shenzhen Bay under different rainfall return periods

2) 溢流污染季节差异性显著, 雨季溢流污染负荷占全年总溢流污染负荷的 85% 以上; 流域溢流污染负荷随降雨量增加而增加, 当降雨强度相差不大的时候, 雨前干旱时间(ADP)越长, 溢流污染负荷越大; 溢流污染集中分布在滨河和罗芳污水处理厂、布吉河及新洲河流域, 其中污水处理厂厂前溢流占到流域总溢流负荷的 46%~59%, 与沿河溢流相比, 厂前溢流成为海湾不可忽视的污染源。

3) 深圳海湾水质从外湾到内湾逐渐变差, 河口及内湾水质受溢流污染冲击影响最严重, 其他区域水质波动主要受潮汐作用影响; 雨季各污染物水质浓度及波动程度均高于旱季, 有雨天河湾水质受到溢流污染冲击作用明显。

4) 降雨量越大, 内湾污染物峰值浓度越早出现, 降雨重现期为 0.25~0.5 年(2 小时降雨约 45~60 mm) 时水质超标最明显, 当降雨强度更大时, 内湾

污染物峰值浓度反而更小; 从整体来看, 溢流污染冲击影响持续时间大概在 12~20 天左右。

参考文献

- [1] 王燕. 深圳市水环境治理与沿河截污工程实践的思考. 中国水利, 2017(1): 35-38
- [2] 段余杰. 深圳河水污染治理研究. 水利水电技术, 2015, 46(2): 56-59
- [3] 王淑梅, 王宝贞, 曹向东, 等. 对我国城市排水体制的探讨. 中国给水排水, 2007, 23(12): 16-21
- [4] Liu W, Wang S, Zhang L, et al. Water pollution characteristics of Dianchi Lake and the course of protection and pollution management. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(5): 3767-3780
- [5] 谭炎珍. 广州市东濠涌截污工程的设计. 中国给水排水, 2006, 22(16): 33-35
- [6] 徐志婧, 刘维. 西安浐灞河截污工程对水质改善的

- 效果研究. 西安理工大学学报, 2011, 27(1): 18–23
- [7] 徐祖信, 刘代玲. 苏州河6支流截污工程的优化调整. 上海环境科学, 2003, 22(4): 234–237
- [8] Chen S, Qin H, Zheng Y, et al. Spatial variations of pollutants from sewer interception system overflow. *Journal of Environmental Management*, 2019, 233: 748–756
- [9] Boenne W, Desmet N, Van Looy S, et al. Use of on-line water quality monitoring for assessing the effects of WWTP overflows in rivers. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2014, 16(6): 1510–1518
- [10] Corada-Fernandez C, Candela L, Torres-Fuentes N, et al. Effects of extreme rainfall events on the distribution of selected emerging contaminants in surface and groundwater: the Guadalete River basin (SW, Spain). *Science of the Total Environment*, 2017, 605: 770–783
- [11] Jean M, Duchesne S, Pelletier G, et al. Selection of rainfall information as input data for the design of combined sewer overflow solutions. *Journal of Hydrology*, 2018, 565: 559–569
- [12] Salerno F, Gaetano V, Gianni T. Urbanization and climate change impacts on surface water quality: enhancing the resilience by reducing impervious surfaces. *Water Research*, 2018, 144: 491–502
- [13] 赵磊, 杨逢乐, 王俊松, 等. 合流制排水系统降雨径流污染物的特性及来源. 环境科学学报, 2008, 28(8): 1561–1570
- [14] Xu Z, Xiong L, Li H, et al. Pollution characterization and source analysis of the wet weather discharges in storm drainages. *Desalination and Water Treatment*, 2017, 72: 169–181
- [15] Gu X, Liao Z, Zhang G, et al. Modelling the effects of water diversion and combined sewer overflow on urban inland river quality. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(26): 21038–21049
- [16] Al Aukidy M, Verlicchi P. Contributions of combined sewer overflows and treated effluents to the bacterial load released into a coastal area. *Science of the Total Environment*, 2017, 607: 483–496
- [17] Passerat J, Ouattara N K, Mouchel J, et al. Impact of an intense combined sewer overflow event on the microbiological water quality of the Seine River. *Water Research*, 2011, 45(2): 893–903
- [18] Riechel M, Matzinger A, Pawlowsky-Reusing E, et al. Impacts of combined sewer overflows on a large urban river—Understanding the effect of different management strategies. *Water Research*, 2016, 105: 264–273
- [19] Lund A, Mcmillan J, Kelly R, et al. Long term impacts of combined sewer overflow remediation on water quality and population dynamics of *Culex quinquefasciatus*, the main urban West Nile virus vector in Atlanta, GA. *Environmental Research*, 2014, 129(2): 20–26
- [20] 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
- [21] 樊敏玲, 王雪梅, 王茜, 等. 珠江口横门大气氮、磷干湿沉降的初步研究. 热带海洋学报, 2010, 29(1): 51–56
- [22] 宋芳, 秦华鹏, 陈斯典, 等. 深圳河流域水污染源解析研究. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 317–328
- [23] Acuna V, Casellas M, Font C, et al. Nutrient attenuation dynamics in effluent dominated watercourses. *Water Research*, 2019, 160: 330–338