

降雨径流污染对深圳湾富营养化影响的模拟研究

郑明凤¹, 陈斯典¹, 秦华鹏¹, 冷科明², 张丽³

(1. 北京大学深圳研究生院 环境与能源学院城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055; 2. 深圳市海洋环境与资源监测中心, 广东 深圳 518067; 3. 深圳市气象局 深圳市国家气候观测台, 广东 深圳 518040)

摘要: 提出了城市降雨径流污染模型和海湾富营养化模型耦合模拟的方法, 识别出了深圳湾受降雨径流污染影响显著的敏感区域和敏感时段, 分析了城市降雨径流污染影响深圳湾富营养化的演变规律。结果表明, 2014年5月—9月深圳湾流域降雨径流输出的氨氮、硝态氮和磷酸盐总负荷分别为1 268.6、1 598.0、169.7 t, 占全年径流营养盐负荷的77%; 进入深圳湾的降雨径流营养盐负荷主要来自深圳河, 占全流域的51%~56%。深圳湾内湾2014年5月—9月的营养盐和叶绿素a浓度明显高于其他月份, 且变化范围较大; 内湾营养盐和叶绿素a浓度与全流域降雨量及流域径流污染负荷量呈正相关; 外湾全年营养盐浓度和叶绿素a浓度变化较为平稳。降雨径流污染负荷对内湾营养盐浓度和叶绿素a浓度均有滞后效应; 外湾基本上不受流域降雨径流污染影响。

关键词: 城市流域; 降雨径流污染; 海湾; 富营养化; 耦合模型

中图分类号: X52 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)09-0133-06

A Simulation Study on Effects of Urban Rainfall Runoff Pollutions on Eutrophication in Deep Bay, Shenzhen, China

ZHENG Ming-feng¹, CHEN Si-dian¹, QIN Hua-peng¹, LENG Ke-ming², ZHANG Li³

(1. Key Laboratory for Urban Habitant Environment Science and Technology, School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China; 2. Shenzhen Monitoring Center of Marine Environment and Resource, Shenzhen 518067, China; 3. Shenzhen National Climate Observatory, Meteorological Bureau of Shenzhen Municipality, Shenzhen 518040, China)

Abstract: Based on an urban rainfall runoff pollution model and a marine eutrophication model, a coupled model was developed to identify sensitive areas and periods in Deep Bay after receiving rainfall runoff pollutions from the Deep Bay basin. In addition, the effect of urban rainfall runoff pollutants on the coastal eutrophication evolution was assessed in Deep Bay. The results showed that: ① The total load of ammonia nitrogen, nitrate, and phosphate in a wet season was 1 268.6 t, 1 598.0 t, and 169.7 t, respectively, which approximately contributed to 77% of the yearly total nutrient loads; moreover, the nutrients were mainly received from the Shenzhen River, accounted for 51%–56% of the load of the entire basin. ② The concentrations of nutrients and chlorophyll-a in the inner bay between May and September

基金项目: 深圳市科技研发资金资助项目(JCYJ20130329180732262)

通信作者: 秦华鹏 E-mail: qinhp@szpku.edu.cn

in 2014 were apparently higher than other months, and had a larger range of variation comparing with the outer bay. There was a positive correlation between the concentrations of nutrients and chlorophyll-a in the inner bay and the rainfall runoff pollution loads from the Deep Bay basin. ③ Urban rainfall runoff pollution had a hysteresis effect on the variation of the concentration of nutrients and chlorophyll-a in the inner bay, while the outer bay was essentially free from the rainfall runoff pollution.

Key words: urban basin; rainfall runoff pollution; coastal; eutrophication; coupled model

在海湾型城市化地区,降雨径流冲刷地表携带的氮、磷污染物已成为受纳水体富营养化的重要营养物质来源^[1]。降雨径流污染会对受纳水体造成冲击性影响,使海湾水体富营养化加剧,甚至引发赤潮现象,并对生态系统安全造成威胁。围绕海湾型城市化地区的降雨径流污染问题,国内外学者展开了相关研究^[2~4],但这些研究主要关注年度和季节的营养盐通量变化,较少关注场次降雨的影响,且极少将陆域与海域作为一个系统来研究污染物产生、迁移、转化的连续动态过程及其影响。笔者采取城市降雨径流污染模型与海湾富营养化模型耦合的方法,模拟城市降雨径流污染对深圳湾富营养化的影响,识别海湾内受降雨径流污染影响显著的敏感区域和敏感时段,并分析降雨径流污染影响富营养化的演变规律,以期在深圳湾流域径流污染及近岸海域富营养化控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

深圳湾是深圳市与香港交界处一个半封闭的浅水海湾,见图1,水域面积约为90 km²,海湾直线长约为17.5 km,平均宽度约为7.5 km,平均水深约为2.9 m;流域面积为615.3 km²,主要有深圳河、大沙河、元朗河、新洲河、凤塘河等入海河流。

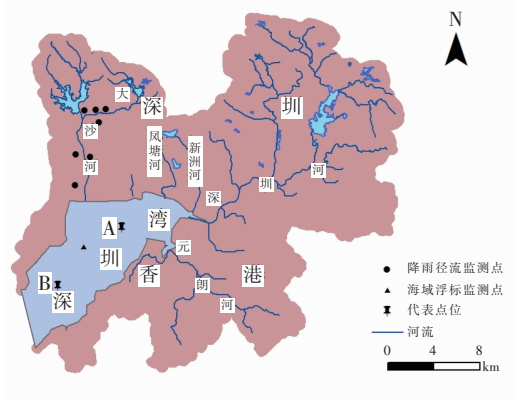


图1 研究区域位置与监测点

Fig. 1 Location of study area and sampling sites

研究区域属于亚热带海洋性季风气候,年均温度为22.4℃;年均降雨量为1 935.8 mm,但全年分配严重不均,4月—9月期间的降雨量约占全年降雨量的85%~90%。集水区内城市化水平较高,人口稠密,经济发达,虽然近年来集水区内的点源污染逐步得到控制,但非点源污染比例逐年加大,深圳湾富营养化严重,赤潮频发。

1.2 SWMM与EFDC耦合模型

为研究城市降雨径流污染对海湾水环境连续动态的影响,有必要针对海-陆综合系统建立城市降雨径流污染和海湾富营养化的耦合模型。模型的基本思路为:基于降雨径流污染模型模拟深圳湾流域各排放口的流量和水质变化过程,并会同河流基流和点源负荷一起作为动态边界条件输入深圳湾富营养化模型进行耦合(见图2)。

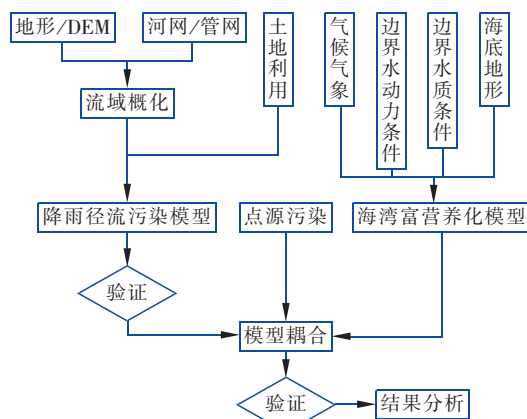


图2 耦合模型原理

Fig. 2 Schematic diagram of coupled model

采用SWMM和EFDC模型分别模拟深圳湾流域的城市降雨径流污染过程和深圳湾富营养化过程。SWMM是由美国环保署推荐的城市降雨径流管理模型,适用于城市流域降雨径流过程及污染物累积冲刷迁移等过程的模拟,可模拟场次降雨或连续降雨,在国内外已有许多采用SWMM模拟城市降雨径流污染的应用案例^[5,6]。EFDC也是美国环保

署最为推荐的水动力水质模型之一,可模拟河流、湖泊、水库、河口、近岸海域、沼泽等地表水系统的一维、二维、三维水动力及水质,该模型已成功应用于国内外多个河口或海湾的富营养化研究^[7-9]。

根据收集到的地形、河网、城市雨水管网等对深圳湾流域进行概化,得到子汇水区共 447 个,汇水区大小范围在 0.2~4.1 km² 内,河段/管网为 464 段,节点为 464 个;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、植被/绿地等五类。模拟的水质指标主要是:硝态氮、氨氮、磷酸盐;SWMM 模型中居住用地、工业用地、商业用地、道路四种用地类型污染物累积采用饱和曲线,污染物冲刷采用指数冲刷曲线,植被/绿地的水质浓度采用次降雨径流平均浓度(EMC);模拟时间步长为 1 min。

根据海陆边界、海床地貌等对深圳湾进行正交曲线网格划分,得到 2 373 个正交曲线网格,其大小范围在 78.8~336.6 m 内;主要模拟指标有潮位、盐度、硝态氮、氨氮、磷酸盐、叶绿素 a 等;设置 2 种边界条件:入湾河流和外海开边界(见图 3)。边界河流的流量水质输入数据来自 SWMM 模拟值和非降雨时期监测值。海洋开边界的潮汐数据来自蛇口验潮站潮汐表,开边界水质输入数据来源于深圳市海洋环境与资源监测中心的实测数据;对于动边界条件采用干湿判别法处理,水面边界和海底边界通过海底高程和水深确定;模拟的时间步长为 6 s。

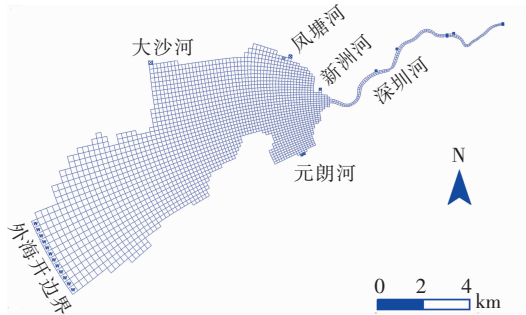


图 3 深圳湾计算网格划分

Fig.3 Computational grid of Deep Bay

1.3 模型率定验证

1.3.1 深圳湾流域降雨径流污染模型

分别采用 2012 年 4 月 5 日和 16 日的降雨径流污染监测数据对 SWMM 模型的参数进行率定和验证。模型率定得到的主要参数取值见表 1。各用地类型的各项水质指标验证结果的 NS 系数均在 0.78~0.93 之间,说明模型参数可靠,能比较准确地模拟

深圳湾的降雨径流污染。

表 1 SWMM 模型主要水质参数

Tab.1 Main water quality parameters of SWMM

用地类型	c_1	c_2	c_3	c_4
居住用地	0.32/0.22/ 0.08*	3/3/3	0.27/0.15/ 0.22	1.13/1.2/ 1.22
工业用地	0.32/0.15/ 0.08	3/3/3	0.24/0.24/ 0.25	1.13/1.12/ 1.2
商业用地	0.28/1.8/ 0.1	3/3/3	0.11/0.04/ 0.1	1.15/1.1/ 1.2
道路	0.22/0.24/ 0.11	3/3/3	0.12/0.07/ 0.08	1.13/1.2/ 1.22

注: c_1 为最大累积量,kg/hm²; c_2 为半饱和和累计时间, d; c_3 为冲刷系数; c_4 为冲刷指数; * 为氨氮/硝态氮/磷酸盐。

1.3.2 深圳湾富营养化模型验证

将经过验证的降雨径流模型的径流水质模拟结果作为海湾富营养化模型的边界条件输入。分别采用 2014 年 6 月 6 日—15 日和 4 月 16 日—23 日的监测数据对模型进行率定和验证。富营养化模型的主要参数取值见表 2。深圳湾内验证点的潮位、盐度、硝态氮、氨氮、磷酸盐、叶绿素 a 等各项水动力水质指标验证结果的 NS 系数均在 0.69~0.91 范围内,说明模型参数可靠,能比较准确地模拟深圳湾的富营养化过程。

表 2 EFDC 模型主要水质参数

Tab.2 Main water quality parameters of EFDC

模型参数	含义	率定结果
K2	复氧系数	0.36
PM/d ⁻¹	藻类生长速率	1.85
BM/d ⁻¹	藻类新陈代谢速率	0.055
PRR/d ⁻¹	藻类被捕食速率	0.12
WS/d ⁻¹	藻类沉积速率	0.08
KHP/(mg·L ⁻¹)	藻类生长吸收磷的半饱和常数	0.018
KHN/(mg·L ⁻¹)	藻类生长吸收氮的半饱和常数	0.28
RNITN/ (gN·m ⁻³ ·d ⁻¹)	最大硝化速率	0.056

1.4 模拟情景设置

模拟时段为 2013 年 10 月—2015 年 6 月;模拟所需的海面风场、海水盐度、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、流域降雨量等来源于深圳市国家气象观测台。

主要设置两种模拟情景:①年连续降雨情景,主要分析深圳湾流域径流营养盐输出及深圳湾营养盐、叶绿素 a 浓度的季节变化。以 2014 年为模拟情

景,全年降雨量为 1 965.4 mm,降雨主要集中在 5 月—9 月。选取深圳湾两个代表点 A、B(见图 1) 分别代表内湾、外湾,对其 2014 年全年水质模拟结果进行统计分析。②场次降雨情景,主要分析深圳湾流域场次降雨径流污染对深圳湾内湾和外湾的营养盐、叶绿素 a 浓度的影响。以 2014 年 3 月 31 日凌晨典型实际降雨过程为模拟情景,雨前干旱时间为 8 d,累计降雨量为 72 mm,降雨历时为 120 min。

2 结果与讨论

2.1 深圳湾流域降雨径流营养盐输出特征

对深圳湾流域 2014 年营养盐负荷输出的模拟结果进行时间和空间统计分析,结果见图 4、5。

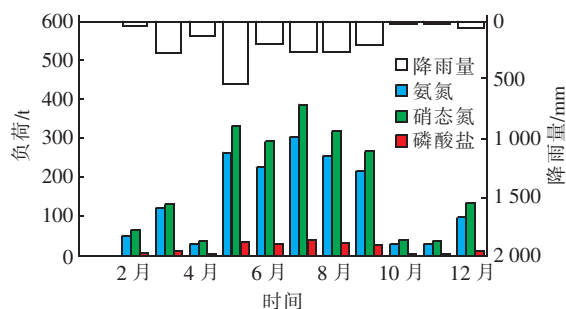


图4 深圳湾流域 2014 年月径流营养盐负荷

Fig. 4 Monthly output nutrient load of Deep Bay basin in 2014

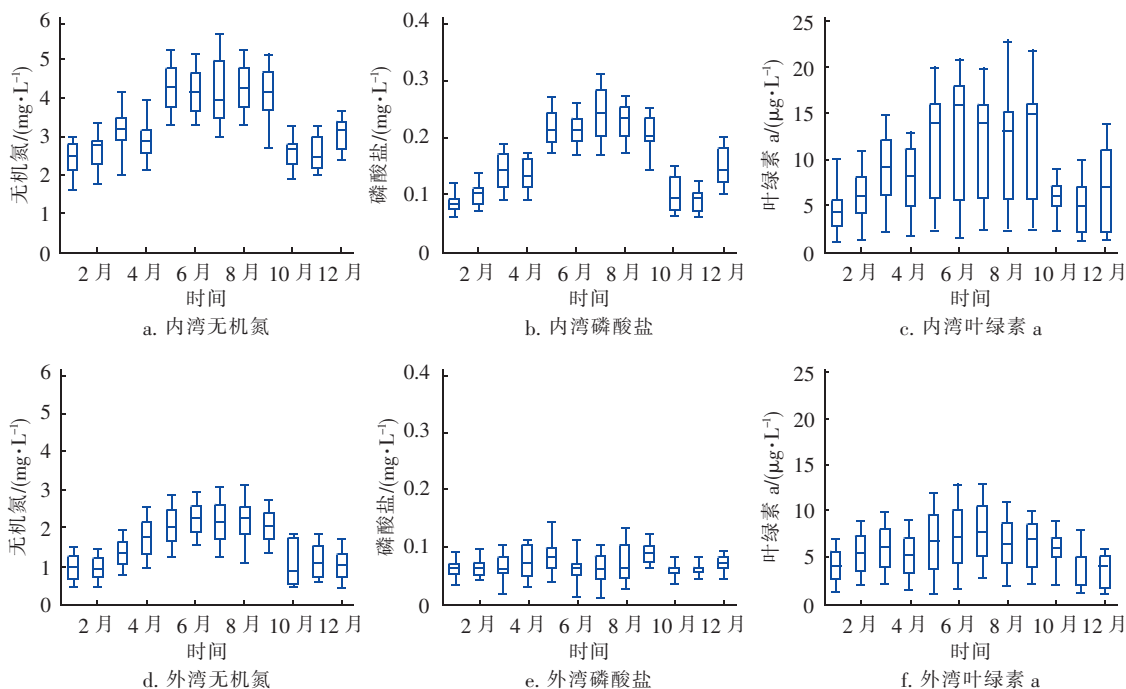


图6 2014 年深圳湾各月份水质浓度变化

Fig. 6 Monthly temporal variation of seawater quality in Deep Bay in 2014

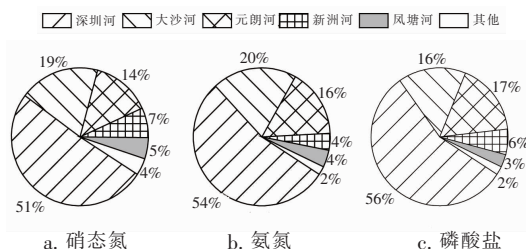


图5 2014 年深圳湾流域主要排口径流输出营养盐负荷分布

Fig. 5 Ratio of output nutrient load from main river outlet to load from Deep Bay basin in 2014

从时间变化上看,2014 年 5 月—9 月,深圳湾全流域河流的降雨量大且集中,该时期内全流域的降雨径流营养盐总输出也较大,其中氨氮、硝态氮和磷酸盐总负荷分别为 1 268.6、1 598.0、169.7 t,占全年径流营养盐负荷的 77%。

从空间变化上看,深圳河出口输出的径流营养盐负荷量最大,占全流域总输出径流负荷的 51% ~ 56%;大沙河、元朗河、新洲河、凤塘河及其他管网出口输出的径流营养盐负荷占比分别为 16% ~ 20%、14% ~ 17%、4% ~ 7%、3% ~ 5%、2% ~ 4%。

2.2 降雨径流污染对深圳湾富营养化的影响

以两个代表点 A、B 分别代表深圳湾内湾和外湾,分别统计水质浓度的模拟结果,见图 6,分析 2014 年全年深圳湾营养盐及叶绿素 a 浓度的变化。

由图6可以看出,整个深圳湾海域的无机氮浓度水平远远超过了四类海水的水质标准(≤ 0.50 mg/L),绝大部分月份的磷酸盐浓度水平都超过了三类海水的水质标准(≤ 0.03 mg/L),全年平均值是四类海水水质标准限值(0.045 mg/L)的3.33倍,整个深圳湾的富营养化程度较为严重。此外,内湾和外湾海水的氮磷比分别为19.5、29.8,属于磷限制海域。

无机氮和磷酸盐的空间分布规律为内湾浓度高于外湾浓度;内湾浓度变化较大,和全流域降雨量及流域输出降雨径流污染负荷量基本呈正相关;外湾浓度变化较为平稳,与流域降雨量及流域输出污染物负荷量关系不大,说明受降雨径流污染的影响较小。其主要原因为:进入深圳湾的主要内陆河流带来大量无机氮和磷酸盐,且入海口都处于湾内,同时,湾内水动力交换条件较差,无机氮和磷酸盐在湾内滞留时间长;而外湾受外海边界(珠江口)影响较大。从时间分布上看,内湾5月—9月的无机氮和磷酸盐浓度均值明显高于其他月份;外湾5月—9月无机氮浓度高于其他月份,全年磷酸盐浓度变化不大。

从模拟结果来看,内湾叶绿素a浓度及其变化幅度均明显高于外湾,这与实际水质监测结果和近年来赤潮暴发统计结果是相符的。从时间上来看,在降雨量大的月份两个代表点的叶绿素a浓度及其变化幅度明显高于其他月份,降雨径流携带了大量城市地表污染物进入海湾,遇上合适的气温等气象条件,导致深圳湾汛期的叶绿素a浓度升高,说明降雨径流污染会对深圳湾富营养化产生一定影响,甚至有潜在的赤潮风险。

2.3 场次降雨对深圳湾富营养化的影响

场次降雨模拟情景的降雨时段为2014年3月30日23:00—31日1:00,考察降雨前2d及降雨后9d的影响。该海域主要为磷限制海域,此处主要给出两个代表点A(内湾)、B(外湾)的磷酸盐和叶绿素a浓度变化曲线,如图7所示。

对于内湾,降雨后1~2d内,磷酸盐浓度基本不变,第3天浓度迅速升高,并且达到峰值 0.19 mg/L,较降雨前浓度峰值 0.15 mg/L提高了26.6%,雨后第4天浓度开始下降,第5天恢复到降雨前的水平;外湾的磷酸盐浓度在降雨前后基本变化不大,一直处于较平稳波动状态。

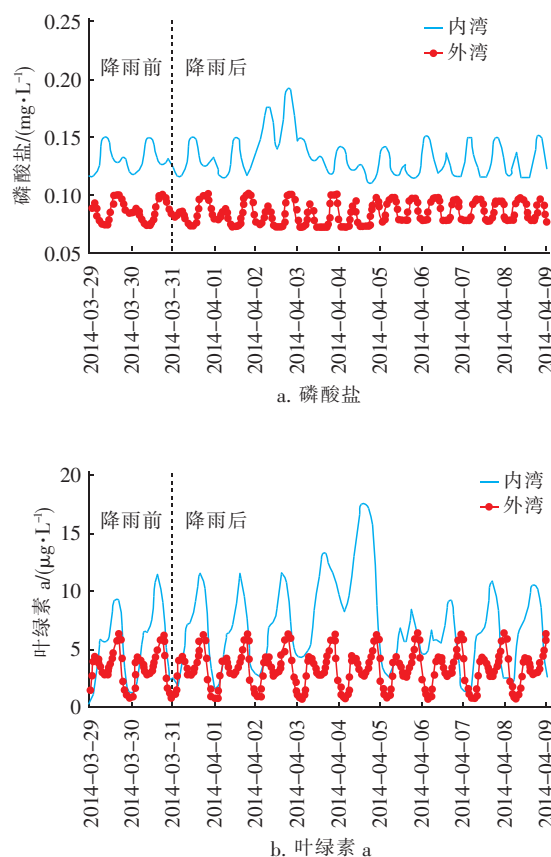


图7 场次降雨前后代表点位的水质指标浓度变化

Fig. 7 Variation of phosphate and chl-a concentrations of representative sites in Deep Bay before and after an episodic rainfall event

内湾的叶绿素a浓度在降雨后3d内平稳波动,雨后第4天开始逐渐升高,第5天迅速升高且在中午时刻达到峰值 18.3 $\mu\text{g/L}$,较降雨前峰值 11.5 $\mu\text{g/L}$ 升高了60.2%;第5天晚上开始迅速降低;第6天白天浓度值回升,此后开始平稳波动,第8天恢复到降雨前的水平。外湾的叶绿素a浓度基本上平稳波动,可见基本上不受流域降雨径流污染负荷的影响。

磷酸盐负荷随着降雨径流进入深圳湾,由于深圳湾的水动力交换条件较差以及潮汐作用,污染物由内湾向外湾扩散较慢,高浓度污染负荷水团在降雨后若干天内由河口区域运移到内湾,致使内湾受场次降雨径流污染影响较大且滞后;而外湾距离河口区较远,流域输出的营养盐负荷在海湾内的运移过程中不断得到稀释和转化,致使营养盐浓度受场次降雨的影响较小。叶绿素a浓度增大(藻类增殖)要以充足的营养盐条件为基础,此外还要有相

适应的水温、气温、阳光等气象条件。从图7可以看出,叶绿素a浓度的增加在降雨后4~5 d,且比磷酸盐浓度的增加滞后1~2 d,说明降雨径流污染对深圳湾富营养化及藻类增殖的影响存在滞后效应。

3 结论

采用SWMM和EFDC耦合模型,研究了深圳湾流域降雨径流营养盐负荷输出过程及营养盐、叶绿素a浓度变化过程,得到如下结论:

① 从时间分布上看,2014年5月—9月深圳湾流域由于降雨径流输出的氨氮、硝态氮和磷酸盐总负荷分别为1 268.6、1 598.0、169.7 t,分别占全年的77.2%、77.9%和77.2%。从空间上看,2014年深圳湾流域降雨径流入海营养盐负荷主要来自深圳河,占全流域的51%~56%;大沙河、元朗河、新洲河、凤塘河及其他管网出口的营养盐输出负荷占总输出负荷的16%~20%、14%~17%、4%~7%、3%~5%、2%~4%。

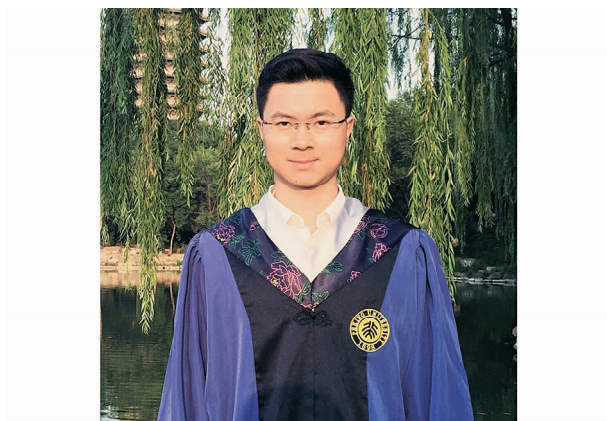
② 深圳湾内湾2014年全年营养盐浓度和叶绿素a浓度变化较大,5月—9月的营养盐和叶绿素a浓度明显高于其他月份,和全流域降雨量及流域输出污染负荷量呈正相关;外湾全年营养盐和叶绿素a浓度变化较为平稳,受流域降雨径流污染影响较小。

③ 降雨径流污染负荷随着降雨径流进入深圳湾,对内湾营养盐和叶绿素a浓度的影响均有滞后效应,叶绿素a浓度变化的滞后时间比营养盐更长;外湾基本上不受流域降雨径流污染的影响。

参考文献:

- [1] Ng Kee Kwong K F, Bholah A, Volcy L, *et al.* Nitrogen and phosphorus transport by surface runoff from a silty clay loam soil under sugarcane in the humid topical environment of Mauritius[J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2002, 91(1/3): 147-157.
- [2] Bowes M J, House W A, Hodgkinson R A, *et al.* Phosphorus-discharge hysteresis during storm events along a river catchment: the River Swale, UK[J]. *Water Res*, 2005, 39(5): 751-762.

- [3] 谷保静,葛滢,朱根海,等. 人类活动对杭州城乡复合系统陆源氮排海的驱动分析[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(10): 2078-2087.
- [4] Liu S, Lou S, Kuang C, *et al.* Water quality assessment by pollution-index method in the coastal waters of Hebei Province in western Bohai Sea, China[J]. *Mar Pollut Bull*, 2011, 62(10): 2220-2229.
- [5] Ouyang W, Guo B, Hao F, *et al.* Modeling urban storm rainfall runoff from diverse underlying surfaces and application for control design in Beijing[J]. *J Environ Manage*, 2012, 113(1): 467-473.
- [6] 马晓宇,朱元励,梅琨,等. SWMM模型应用于城市住宅区非点源污染负荷模拟计算[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(1): 95-102.
- [7] Park K, Jung H S, Kim H S, *et al.* Three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model (HEM-3D): application to Kwang-Yang Bay, Korea[J]. *Mar Environ Res*, 2005, 60(2): 171-193.
- [8] 乔飞,孟伟,郑丙辉,等. 长江流域污染物输出对河口水质的影响[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(10): 1126-1132.
- [9] 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.



作者简介:郑明凤(1990-),男,湖南邵阳人,硕士研究生,研究方向为城市面源污染及近海水环境模拟。

E-mail: zhengmf@pku.edu.cn

收稿日期:2016-01-08