

# 城市入河径流排放口总污染特征研究

罗鸿兵<sup>1,2,5</sup>, 罗麟<sup>2\*</sup>, 黄鹄<sup>3</sup>, 何强<sup>4</sup>, 刘婷<sup>5</sup>

(1. 四川农业大学城乡建设学院, 都江堰 611830; 2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065; 3. 城市建设研究院深圳水环境研究中心, 深圳 518048; 4. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 5. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

**摘要:** 流入城市雨源性河流的径流污染不容忽视, 以我国南方典型城市深圳市的福田河流域为研究对象, 经过 18 场典型降雨径流的测定, 从污染过程线、径流初期效应识别和降雨事件平均浓度 (EMC) 等方面分析和讨论了城市河流入河径流排放口的总污染特征规律, 有利于指导城市河流污染控制。结果表明, 排放口地表径流浓度随时间变化历程中, COD、SS、TN、TP 和 BOD<sub>5</sub> 普遍超出地表 V 类水标准十多倍以上, 某典型降雨场次的重金属 (铬、镉、铜、砷和汞) 污染较为严重, 研究区排放口的浓度范围和平均值均高于重庆沙坪坝雨水口和加拿大 Silerwood 的雨水排放口, 但低于武汉十里铺排放口。COD、SS、BOD<sub>5</sub> 的初期效应尤为明显并且 COD 和 SS 冲刷强度较大, TN、TP 初期效应不明显。COD、SS、TN、TP 和 BOD<sub>5</sub> 的 EMC 浓度平均值分别为 224.14、571.15、5.223、2.04、143.5 mg/L, 在某种程度上, 深圳市研究点的 COD 和 SS 的 EMC 值高于邻近的澳门、珠海, TN、TP 值高于北京、广州、上海等城市, 与国外的一些研究结果相比较, EMC 值比韩国、美国及加拿大一些城市地表径流污染物浓度高得多, 可见由排放口入河的径流总污染极其严重并需要治理。

**关键词:** 径流; 城市河流; 排放口; 总污染特征; 初始冲刷

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)11-3227-09

## Total Pollution Features of Urban Runoff Outlet for Urban River

LUO Hong-bing<sup>1,2,5</sup>, LUO Lin<sup>2</sup>, HUANG Gu<sup>3</sup>, HE Qiang<sup>4</sup>, LIU Ping<sup>5</sup>

(1. College of Urban and Rural Construction, Sichuan Agricultural University, Du Jiangyan 611830, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Shenzhen Water Environment Research Centre of China Urban Construction Design & Research Institute, Shenzhen 518048, China; 4. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 5. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The urban stormwater runoff discharged to urban river, especially to rainfall source river, cannot be ignored. In this study, the Futian River watershed in Shenzhen city in a typical southern city of China is taken as the research object. In order to guide the pollution control for urban river, the eighteen rainfall events were monitored, and the total pollution features of the urban runoff outlet for this urban river were analyzed and discussed by using the process of pollutographs, the identifying to first flush, event mean concentration (EMC), etc. Results show that the concentrations of COD, SS, TN, TP and BOD<sub>5</sub> are ten times more than the grade V of the environmental quality standards for surface water during the runoff time; the pollution caused by heavy metals (Cr, Ge, Cu, Hg and As) in runoff at a typical rainfall event is serious; the average and range of pollutant concentration at this runoff outlet in study area are evidently higher than at Shapingba in Chongqing city of China and at Silerwood in Canada, but are lower than at Shilipu in Wuhan city of China. The first flushes of COD, SS, BOD<sub>5</sub>, especially COD and SS, are evident, but the TN and TP are not. The average EMC of COD, TN, TP and BOD<sub>5</sub> are 224.14, 571.15, 5.223, 2.04, 143.5 mg/L, respectively. To some extent, the EMC of COD is about two times of the value of the near cities, Macao and Zhuhai. The EMC of TN and TP are obviously higher than Beijing, Guangzhou and Shanghai. To compared with foreign counties, the EMC of the study area in Shenzhen is obviously much higher than the cities of Korean, USA and Canada. So the total pollution caused by the urban surface runoff in study area is serious and necessary to be treated.

**Key words:** stormwater runoff; urban river; runoff outlet; total pollution features; first flush

流入城市河流的径流污染不容忽视, 特别是对雨源性城市河流, 本研究分析了以较大面积和多种不同土地用途的综合径流入河污染的总特征。在地表径流研究中, 对特定下垫面分类研究的居多, 即分别对广场、厂区、道路等单独进行研究, 但较少对较大面积和多种不同土地用途的综合径流污染效应作

过研究<sup>[1~7]</sup>。为了弄清楚由于径流引起的城市河流

收稿日期: 2008-12-10; 修订日期: 2009-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50679049); 教育部博士点基金项目 (20050610040)

作者简介: 罗鸿兵 (1975 ~ ), 男, 博士, 主要研究方向为径流污染与控制、污染控制与资源化、水环境修复等, E-mail: lhongbing@scfc.edu

\* 通讯联系人, E-mail: lluo@scu.edu.cn

的污染状况,本研究选取典型城市河流的典型径流入河排放口为对象,探讨了城市河流流域研究区域由径流引起的总污染特征,对于为解决城市河流水质控制和地表径流污染控制提供科学依据,有利于指导城市河流的入河初期雨水截流与污染控制。

## 1 材料与方法

在科学选点的基础上,采用现场降雨、水文和水质同步监测,数据常规分析和统计分析并重,并与国内外相关研究作比较的研究方法,开展本课题的研究。

### 1.1 研究选点

深圳市福田河流域位于深圳市区中部,其降雨量处于深圳市东西部降雨量中值的范围。福田河为深圳河的支流,发源于北部山区的梅林坳,流经上梅林、笔架山公园、中心公园、田面村和 800 m 绿化带,穿过滨河大道在皇岗口岸东部汇入深圳河,集雨面积  $15.9 \text{ km}^2$ ,干流长度 6.8 km。福田河是一条“雨源性”河流,枯水期水流量不足  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ,而百年一遇洪水到达河口出流量达到  $288 \text{ m}^3/\text{s}$ 。河道上游为低山丘,中、下游为海滨平原区,下游河道坡降缓慢,河道平均比降  $J = 0.0062$ ,约有 3 km 范围为感潮河段。

该城市河流流域的开发强度较大,下垫面类型基本形成系统,并在近 3 年实施了沿河截污,具有典型的混流制特征,同时也实施了清淤、建闸等工程,因此具有较好的代表性。福田河流域莲花村的排水采用雨、污分流制,污水排入市政管道,同时仍有极少量污水溢入雨水系统,雨水经雨水管网收集后,经过雨水排水明渠排入福田河,具有很好的代表性,因此选择莲花村为主要研究对象,研究范围见图 1。研究范围面积为  $120 \text{ hm}^2$ ,其中,居住用地占 32%,交通占 9%,工业占 6%,绿地占 36%,商业占 16%,未建设用地不到 1%,雨水管道长度为 6.45 km,其中雨水箱涵长度约 504 m 并与福田河雨水排水明渠相连接,径流出水口为雨水排水明渠,刚好经过采样点,然后通过雨水排水明渠排入福田河,故采样点能够反映出该研究区域入河径流总体污染特征。

### 1.2 监测方法

(1)监测基本原则 ①测试的真实性和准确性。准确反映现实降雨径流与污染的特征。②测试的同步性。测试的同步性指 2 个方面,一是每个监测点的降雨、水文和水质采样要同步,二是各监测点的监测要在同一个有效时刻内进行。③测试的代表性。测试的代表性主要指 2 个方面,一是在确定监测点位

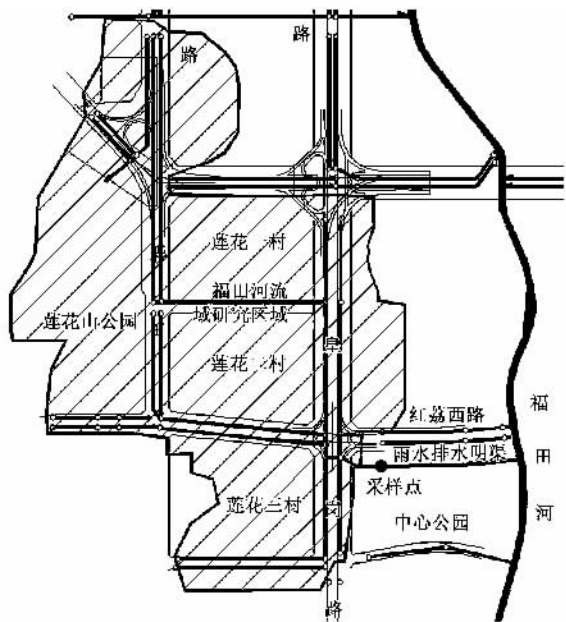


图 1 研究区域范围示意

Fig.1 Study area range

时,要充分考虑径流污染的特性;二是选取的水文水质测试参数能代表本地区面源污染特征。

(2)降雨、水文监测项目 与城市地表面源污染关系密切的水文监测项目有降雨量和径流量。使用自动记录雨量计,用于测定降雨量;使用 LJX-1 型便携式流速仪测定径流量。

(3)水质监测项目 采用 6 个水质指标:与河流黑臭关系较大的 2 个指标(COD、 $\text{BOD}_5$ ),与河流富营养化关系较大的 2 个指标(TN、TP),另外需监测 SS、pH 值。同时对典型径流监测 5 种重金属指标(铬、镉、铜、砷和汞)。

(4)降雨场次的确定 选择有 3 个标准:①雨水初期效应的降雨,即很久(一个月以上)没有下雨后的第一场降雨;②降雨量  $> 1 \text{ mm}$  以上的降雨,即有明显地表径流的降雨;③不同时间段的典型降雨,能够代表具有明显地表径流特征的降雨。

(5)监测频次 ①监测时段为根据研究区域的降雨和水质特点,监测时段选取 1 年多,即 2007 年 10 月~2008 年 11 月。②监测频次为每场降雨的前 30 min 内,是每隔 5 min 采样 1 次,30~60 min 内是每隔 10 min 采样 1 次,60~120 min 内是每隔 20 min 采样 1 次,120 min 以后是每隔 30 min 采样 1 次。

(6)取样及测试方法 水质取样及测试方法完全按照国家环保部颁布的采样和测试的标准方法进行,取样与径流量测定同步。 $\text{BOD}_5$  执行 GB 7488-87 标准,用“测压法”来测试,采用德国的 OxiTop OC100

仪器来测定;COD 执行 GB 11914-89 标准,采用重铬酸钾法;TN 执行 GB 11894-89 标准,采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法;SS 执行 GB 11901-89 标准,采用重量法;TP 执行 GB 11893-89 标准,采用钼酸铵分光光度法.

1.3 分析方法

主要通过地表径流污染物的污染过程线、重金属浓度、pH 值、地表径流污染物相关性、径流初期效应和 EMC 等方面来论述城市入河径流排放口总污染特征.

1.3.1 污染过程线

径流污染过程线反映的是污染物浓度与对应时间的曲线.本研究涉及的污染物特征数据量较大且其变化较为复杂,需要用有代表性的规律线来反映地表径流污染物的污染过程,这些规律线是根据 18 场典型降雨形成径流的污染物浓度曲线进行分类,分 4 类:①浓度增加很快,达到最大值后又迅速下降,然后趋于较低值;②浓度增加较慢,达到最大值后又缓慢下降,然后趋于较低值;③前期浓度较高,以后浓度一直呈现下降趋势;④浓度变化不大,在某一浓度上下波动,可能缓慢上升也可能缓慢下降.对同类型的曲线进行回归统计分析,得到其趋势线,并用趋势线来表示污染规律.

1.3.2 MFF<sub>n</sub> 值识别径流初期效应

Ma 等<sup>[8]</sup>和 Han 等<sup>[9]</sup>对初期效应用 MFF<sub>n</sub> 进行识别,其表达如式(1).

$$MFF_n = \frac{M_t}{M} \bigg/ \frac{V_t}{V} = \left( \frac{\int_0^t c(t)q(t)dt}{\int_0^T c(t)q(t)dt} \right) \bigg/ \left( \frac{\int_0^t q(t)dt}{\int_0^T q(t)dt} \right) \quad (1)$$

式中,  $V$  为总径流体积, L;  $M$  为某污染物总质量, mg;  $M_t$  为在  $t$  时刻某污染物的质量, mg;  $V_t$  为在  $t$  时刻径流体积, L;  $c(t)$  为随时间变化的污染物含量, mg/L;  $q(t)$  为随时间变化的径流速率, L/min;  $n$  为累计径流量占径流总量的百分数, %, 范围为 0 ~ 100;  $T$  为总径流时间, min.

当  $MFF_n \geq 1$  时,即表示有初始冲刷现象发生,  $MFF_n$  越大,表示初始冲刷越强烈.当  $MFF_n < 1$ ,则表示无初始冲刷现象;平衡线则表示对应每一个径流量累计率的  $MFF_n = 1$ .

1.3.3 降雨事件平均浓度(EMC)

美国环保署于 1979 ~ 1983 年间设立国家城市径流项目(NURP),核心内容即为提出“降雨径流事

件平均浓度”(event mean concentration),用来表示在一场降雨径流全过程排放中某污染物的平均浓度<sup>[10]</sup>.随后美国地质调查局(USGS)更新了 EMC 资料,被广泛地用于评估城市降雨径流污染负荷、管理措施有效性及其对受纳水体的影响<sup>[11]</sup>.EMC 实质上是一场降雨径流全过程样品污染浓度的流量加权平均值,如式(2)所示.

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t c_t Q_t dt}{\int_0^t Q_t dt} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i c_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (2)$$

式中, EMC 为污染物降雨事件平均浓度, mg/L;  $M$  为整个降雨过程中总污染物含量, g;  $V$  为相对应的总径流量, L;  $t$  指径流时间, min;  $c_t$  指随时间变化的污染物含量, mg/L;  $Q_t$  指随时间变化的径流速率, L/min;  $n$  指  $t$  时间段内径流取样次数;  $Q_i$  指  $i$  次取样时的径流速率, L/min;  $c_i$  指  $i$  次取样时的污染物含量, mg/L.在实际研究中,由于水质指标的监测是非连续性的,因此在计算过程中,以每个样品对应的径流量为权重,计算其污染物浓度的流量加权平均值作为污染物在此次降雨径流事件过程中的平均浓度.

2 结果与讨论

2.1 污染过程线

共对 18 场典型降雨进行了跟踪测量,入河排放口总污染特征指标 COD、BOD<sub>5</sub>、SS、TN、TP 值的测定范围值见表 1,可见污染范围大,前期污染很严重,前期比后期污染高出 2 ~ 3 倍.初期径流污染最严重,可达到很高的浓度,随降雨历时的延长,浓度逐渐下降并趋于稳定.前期高浓度时刻对应的累计流量通常不大,约占累计流量的 30%.降雨形成的地表径流在降雨径流形成后的前 30 min COD、SS 污

表 1 径流排放口污染物浓度测定范围值/mg·L<sup>-1</sup>  
Table 1 Pollutant concentration range at runoff outlet/mg·L<sup>-1</sup>

| 指标               | 浓度范围            | 高值       | 低值    | 平均值      | 备注 |
|------------------|-----------------|----------|-------|----------|----|
| COD              | 6.69 ~ 1 624.70 | 1 624.70 | 40.56 | 352.32   | 前期 |
|                  |                 | 1 116.00 | 6.49  | 197.01   | 后期 |
| SS               | 4.44 ~ 9 568.18 | 9 569.18 | 16.62 | 1 113.67 | 前期 |
|                  |                 | 3 822.00 | 4.44  | 451.95   | 后期 |
| TN               | 0.13 ~ 23.60    | 23.60    | 0.13  | 6.13     |    |
| TP               | 0.43 ~ 6.36     | 6.36     | 0.43  | 2.03     |    |
| BOD <sub>5</sub> | 23.22 ~ 655.87  | 655.87   | 23.22 | 111.90   |    |

1)前期指径流形成后的前 30 min,后期指径流形成 30 min 以后直至径流结束

染的峰值最高可达普通生活污水污染指标的 5.5、32 倍。

2.1.1 COD 污染过程线

采样点 COD 浓度随降雨历时变化曲线见图 2, COD 变化规律可概化为其中的 3 条规律线,可见,在采样前 30 min,部分 COD 浓度出现陡降趋势,有典型的初期效应。在福田河流域研究区域 3 月 28 日 COD 变化曲线中, COD 由最初的1 540 mg/L,在 30 min 内陡降至 310 mg/L,降幅达 80%。各场次曲线在前期均呈现衰减的趋势,且 30 min 后的变幅有所减小,并逐步趋于稳定值。COD 浓度最高为地表水 V 类标准(40 mg/L)的 40.6 倍,前期浓度平均为地表水 V 类标准的 8.8 倍,最低浓度甚至高于城市污水厂进水水质;前期 COD 平均值分别为后期平均值的 1.8 倍,明显反映了径流污染的初期效应。

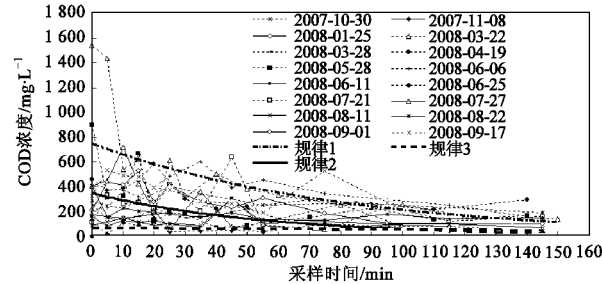


图 2 福田河流域研究区域入河径流排放口 COD 变化曲线  
Fig.2 Variable concentration curve of COD at runoff outlet in Futian river watershed study area

2.1.2 SS 污染过程线

采样点 SS 浓度随降雨历时变化曲线见图 3。可见,在采样前期 SS 整体浓度较大,且变幅较大。在 40 min 以前,多数 SS 浓度出现陡降趋势,有典型的初期效应。典型曲线为 2008-03-22,其 SS 浓度由 11 206 mg/L在不到 10 min 内暴跌至不足 500 mg/L;其他曲线在前期也都呈现不同程度的下降趋势,个别曲线在后期有一定波动,可能与降雨强度增加有关,但均未超过前期高值。SS 变化规律可概化为图 3 中的 3 条规律线,总体上,SS 浓度随降雨历时的变化趋势为:初期有陡降,中期逐步减小,并趋于稳定。曲线表明福田河流域研究区域 SS 最大值为地表水 V 类标准(10 mg/L)的1 120倍,前期浓度平均为排放标准的 111 倍。

2.1.3 TN 污染过程线

采样点 TN 浓度随降雨历时变化曲线见图 4。可见,TN 浓度曲线总体上波动较大,变化曲线较为杂乱,部分曲线在后期仍出现较大的波动,分析认为与

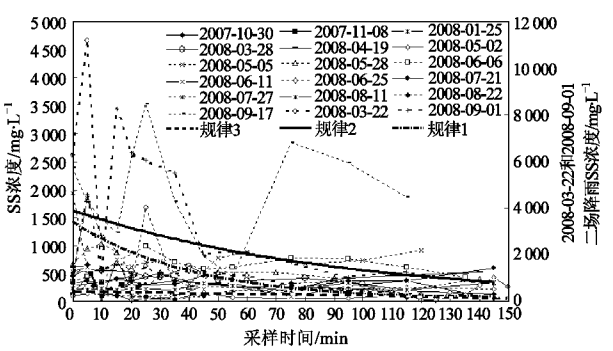


图 3 研究区域入河径流排放口 SS 变化曲线  
Fig.3 Variable concentration curve of SS at runoff outlet in Futian river watershed study area

福田河流域研究区域复杂的下垫面条件、管道污染物冲刷有关。TN 变化规律可概化为图 4 中的 3 条规律,总体来说,多数场次降雨的 TN 初期效应不明显。从图 4 中可以看出,采样点 TN 浓度普遍超过地表水 V 类标准限值(2 mg/L),测得的 TN 最大浓度及平均值分别是标准限值的 11.8 倍和 3.06 倍。

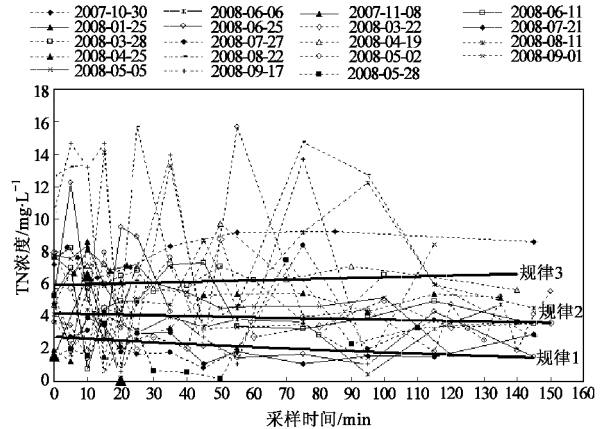


图 4 福田河流域研究区域入河径流排放口 TN 变化曲线  
Fig.4 Variable concentration curve of TN at runoff outlet in Futian river watershed study area

2.1.4 TP 污染过程线

采样点 TP 浓度随降雨历时变化曲线见图 5,TP 浓度变化曲线变化较杂乱,整体波动较大,前期振荡剧烈,有陡增陡降过程,在 30 min 左右浓度会降到一个低值,随后又有一定的小幅上升过程,在后期逐步保持稳定。TP 变化规律可概化为图 5 中的 4 条规律线,TP 变化曲线上没有明显的初期效应,但是多数曲线在前期也存在一个下降的过程。采样点的 TP 浓度超过地表水 V 类标准限值(0.4 mg/L),最高值和平均值分别为标准限值的 15.9 倍和 5 倍,均严重超过地表水 V 类标准限值。

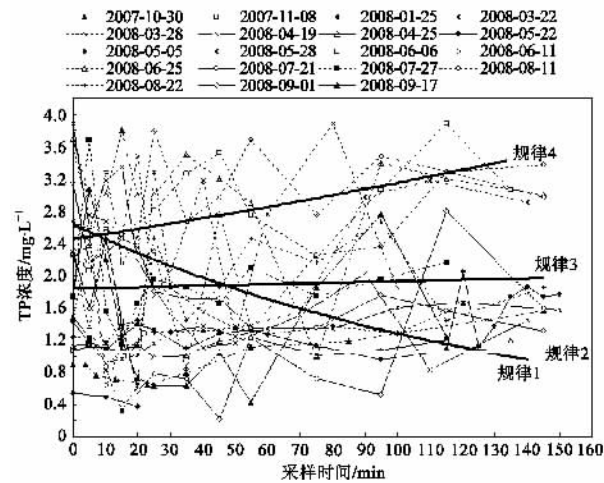


图5 福田河流域研究区域入河径流排放口 TP 变化曲线

Fig.5 Variable concentration curve of TP at runoff outlet in Futian river watershed study area

2.1.5 BOD<sub>5</sub> 浓度随降雨历时变化典型曲线

采样点 BOD<sub>5</sub> 浓度随降雨历时变化曲线见图 6。BOD<sub>5</sub> 变化规律可概化为其中的 3 条规律线,部分曲线在前期有浓度陡降的趋势,有显著的初期效应。其中 3 月 22 日的 BOD<sub>5</sub> 浓度从开始的 451 mg/L,在 30 min 内降至 219 mg/L,降幅超过 50%。5 月 28 日的 BOD<sub>5</sub> 浓度在 30 min 内从 211 mg/L 降至 107 mg/L,降幅达 49%。其他曲线均能体现出一定的初期浓度下降趋势,而且通常初期浓度越高的,其初期的陡降趋势越明显。初期浓度低于 100 mg/L 的,变化相对较小,但也有浓度下降的趋势。

2.1.6 雨水口浓度及原因分析

美国和加拿大的径流水质主要反映城市综合的径流水质:加拿大 1970~1995 年 140 份<sup>[19]</sup>雨水径流

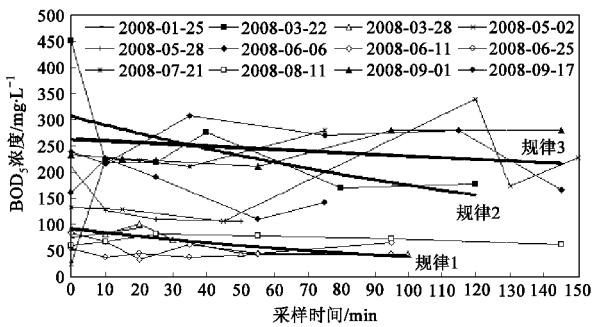


图6 福田河流域研究区域入河径流排放口 BOD<sub>5</sub> 变化曲线

Fig.6 Variable curve of BOD<sub>5</sub> concentration at runoff outlet in Futian river watershed study area

水质中的 COD 范围为 7~2 200 mg/L, TSS 为 1~36 200 mg/L, TN 为 0.07~16 mg/L, TP 为 0.01~7.3 mg/L;美国城市及不同地域之间暴雨径流水质的统计结果<sup>[20,21]</sup>无明显区别,但各种指标的变化范围较大(COD 为 5~3 100 mg/L, TSS 为 2~11 300 mg/L, TN 为 0.2~18.5 mg/L, TP 为 0.1~125 mg/L, BOD<sub>5</sub> 为 1~700 mg/L)。由于径流中污染物质在来源、组成物质等方面存在很大的差别,在降雨初期,产生的径流中污染物的浓度一般来说是最高的,即在降雨初期污染物浓度迅速上升,并很快达到峰值,随着降雨历时的延长,污染物浓度逐渐下降,并趋于稳定,得出的规律与国内外其它学者的研究结果基本一致<sup>[12~18]</sup>。研究区域的 TN 和 TP 的极值比这两国的要大一些,其余各污染物浓度在美国和加拿大浓度范围之内。表 2 对比了其它几个排放口径流污染浓度特征,可见,研究区排放口的浓度范围和平均值均高于重庆沙坪坝雨水口和加拿大 Silerwood 的雨水排放口,但低于武汉十里铺排放口。

表 2 径流排放口浓度对比表/(mg·L<sup>-1</sup>)

Table 2 Compared concentration range at runoff outlet/(mg·L<sup>-1</sup>)

| 指标               | 本研究区域雨水排放口    |       | 重庆沙坪坝雨水口 <sup>[5]</sup> |      | 武汉十里铺排放口 <sup>[4]</sup> |     | 加拿大 Silverwood 的雨水排放口 <sup>[22]</sup> |      |
|------------------|---------------|-------|-------------------------|------|-------------------------|-----|---------------------------------------|------|
|                  | 浓度范围          | 平均值   | 浓度范围                    | 平均值  | 浓度范围                    | 平均值 | 浓度范围                                  | 平均值  |
| COD              | 6.69~1 624.7  | 275   | 19~306                  | 140  | 110~1 720               | 358 | 8.0~370                               | 55   |
| SS               | 4.44~9 568.18 | 783   | 0.25~1.92               | 0.82 | 90~2 420                | 625 | 13~780                                | 160  |
| TP               | 0.43~6.36     | 2.03  | 0.25~1.39               | 0.65 | 1.2~16                  | 4.8 | 0.033~1.3                             | 0.21 |
| BOD <sub>5</sub> | 23.22~655.87  | 111.9 | 8.7~72                  | 25   |                         |     |                                       |      |

研究区域内的土地利用类型分为 6 类:绿地、交通道路、居住小区、商业、工业和未建设用地,研究区域内,特别是初期雨水污染严重常超出地表 V 类水标准数十倍以上,污染浓度高的主要原因为:①土地利用开发强度大,人口密度高,活动强度大。研究区

域人口约为 3.5 万人,居住人口密度为 304 人/hm<sup>2</sup>,其中常住人口密度 77 人/hm<sup>2</sup>,暂住人口密度 227 人/hm<sup>2</sup>,劳动就业率 56.25%。②交通繁忙、公园改造和地铁施工也是一个重要原因。部分路面或者地面清扫管理存在问题,红荔西路、皇岗路和彩田路的交

通流量巨大,研究区小汽车拥有量为 123 辆/千人,红荔西路、皇岗路和彩田路的单向平均高峰小时流量分别为3 560、3 150和5 750辆,导致即使路面清扫过也会有很高的固体颗粒物沉积在交通区域,被雨水冲刷后进行雨水管道,导致径流中 SS 的浓度很高.虽然有莲花山公园的部分区域在研究范围内,但紧靠莲花二村的莲花山公园的地面由于处于开发状态,地面裸露较多,在暴雨冲刷下也会导致径流中 SS 的浓度偏高,SS 浓度偏高的又一个原因推测是研究区域内有地铁施工.③由于管理不善部分垃圾也可能混入雨水管道,或者由于有人乱扔垃圾,也会使得径流中各种污染物指标偏高.研究区域主要是莲花一村、莲花二村和莲花三村,实行物业管理,有专人打扫卫生和收集垃圾,因此进入排水系统的垃圾主要是由于大量流动人口活动造成的.④所测浓度偏高的另一个重要原因是由于雨水管道系统的长期

运行,管道内堆积和沉积的污染物的量很大,特别是在雨水箱涵中容易沉积大量污染物,当雨水冲刷特别是有暴雨的情况下,这些管道内沉积的污染物被冲刷出来,造成高浓度污染<sup>[23]</sup>.

2.2 重金属浓度

为了弄清采样点地表径流中重金属污染状况,测定了典型降雨日(2008-08-22)水样,测试结果见表 3.可以看出,径流中铬、镉、铜和砷未超过地表水Ⅴ类标准限值,铬的最大浓度超标 36%,但平均浓度未超标.汞的超标情况严重,其最大浓度和平均浓度分别为标准限值的 198 倍和 77 倍,由于研究区域有地铁施工开挖土壤和莲花山公园有一大片裸露的土地正在进行综合改造,降雨时会使得土壤中 Hg 被释放到水环境中,从而造成径流中较高的汞浓度.深圳市作为滨海城市,河道径流直接排至半封闭的深圳海湾,对于重金属的富集问题应引起重视.

表 3 重金属浓度监测值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   
Table 3 Monitoring value of heavy metal/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

| 重金属 | F1(0) <sup>1)</sup> | F3(10) | F5(20) | F6(25) | F7(35) | F9(55) | F11(95) | F13(145) | 最小浓度  | 最大浓度  | 平均浓度     | 地表水Ⅴ类标准限值 |
|-----|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|----------|-------|-------|----------|-----------|
| 铬   | 0.062               | 0.007  | 0.048  | 0.049  | 0.048  | 0.074  | 0.136   | 0.06     | 0.007 | 0.136 | 0.060 5  | 0.1       |
| 镉   | 0                   | 0      | 0.006  | 0.004  | 0      | 0.006  | 0.002   | 0        | 0     | 0.006 | 0.002 25 | 0.01      |
| 铜   | 0.238               | 0.104  | 0.132  | 0.142  | 0.16   | 0.144  | 0.128   | 0.14     | 0.104 | 0.238 | 0.148 5  | 1         |
| 砷   | 0                   | 0      | 0.009  | 0.104  | 0.006  | 0.126  | 0.007   | 0        | 0     | 0.126 | 0.031 5  | 0.1       |
| 汞   | 0                   | 0      | 0.128  | 0.159  | 0      | 0.198  | 0.125   | 0.006    | 0     | 0.198 | 0.077    | 0.001     |

1)括号内为采用时间(单位:min)

2.3 pH 值

福田河流域研究区域的 pH 值为 5.7~7.0,总体上变化不大,在地表水Ⅴ类标准(6~9)的规定范围以内,福田河流域研究区域径流水质偏弱酸性,说明酸雨降雨后的地表径流的影响还是很明显.

2.4 各污染物相关性分析

通过对 SS 浓度与 COD 浓度的分析,发现两者存在一定的相关性,各场降雨相关性差别较大,相关系数的平方值( $R^2$ )范围为 0.7~0.82.SS 与  $\text{BOD}_5$  也存在一定的相关性,有的场次降雨的  $R^2$  可达 0.97,但多数场次的  $R^2$  低于 0.8.SS 与 TN、TP 的相关性不大,除个别场次外,多数难以体现出足够的相关性.总体来说,SS 与 COD、SS 与  $\text{BOD}_5$  的相关性较好,但与 TP、TN 的相关性较差.

2.5 径流初期效应

对福田河流域研究范围 16 场降雨的 5 个污染物指标进行了汇总分析,限于篇幅,仅以图 7 表达了福田河流域研究区域入河径流 COD 初期效应状况,

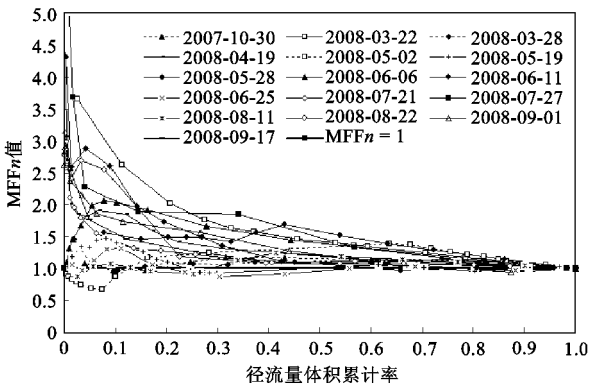


图 7 福田河流域研究区域 COD 的  $\text{MF}F_n$  值  
Fig.7  $\text{MF}F_n$  of COD in Futian river watershed study area

16 场降雨中 COD 指标仅有 2 场降雨没有发生初始冲刷现象.统计的 12 场降雨中  $\text{BOD}_5$  指标也仅有 3 场不存在初始冲刷现象,16 场降雨的 SS 指标统计中显示了 4 场不存在初始冲刷效应;而对于 TN、TP 两项指标,统计的 16 场降雨中分别有 10、11 场不存在初始冲刷现象,主要原因是研究区域处于城市中心

区域,没有农业生产活动产生 TN 和 TP 的累积,因此大部分降雨场次不存在初期效应.研究区域初始冲刷现象主要存在于 COD、SS、BOD<sub>5</sub> 三项污染指标中,且以 COD、SS 冲刷强度较大,TN、TP 两项指标初始冲刷现象出现频率较低.

2.6 降雨事件平均浓度(EMC)

本研究的测试结果和大量的国外测试结果表明,对于不同场次降雨径流事件,EMC 值不同,美国国家环保局的调查研究表明<sup>[24]</sup>,不同场次的降雨径流的 EMC 浓度呈对数正态分布,因此有必要计算出多场降雨测的 EMC 值的算术平均浓度,以求更加准确地对降雨径流进行定量分析.将深圳市福田河流域的典型降雨的 EMC 值及 EMC 算术平均值见表 4.

总体来看,各污染指标 EMC 值都较大.参考国内外部分城市地表径流污染研究成果<sup>[1,26,27]</sup>,将测得数据进行比较,见表 5.从中可以看出,在某种程度上,深圳市研究点的 COD 和 SS 浓度高于邻近的澳门、珠海,COD 值约澳门、珠海的 2 倍,比广州市交通道路低近一半,SS 值与珠海差别不大,比广州市交通道路略高.TN、TP 值高于北京、上海等城市,为北京、上海等城市 2~3 倍,TN 比广州约低一半,与珠海浓度差不多,但比兰州要低.总体来说,深圳市

表 4 采样点典型降雨的 EMC 值/mg•L<sup>-1</sup>

Table 4 EMC value in typical rainfall events/mg•L<sup>-1</sup>

| 日期         | COD    | SS      | TN   | TP   | BOD <sub>5</sub> |
|------------|--------|---------|------|------|------------------|
| 2007-10-30 | 268.39 | 231.18  | 8.45 | 1.10 |                  |
| 2008-03-22 | 444.64 | 1626.36 | 3.82 | 1.32 | 197.22           |
| 2008-04-19 | 320.83 | 435.97  | 7.18 | 1.74 | 141.35           |
| 2008-03-28 | 185.80 | 479.08  | 6.47 | 3.24 | 65.76            |
| 2008-04-25 | 140.59 | 374.54  | 5.81 | 1.35 |                  |
| 2008-05-02 | 195.75 | 111.42  | 4.37 | 1.27 | 197.64           |
| 2008-05-05 | 738.63 | 752.36  | 4.36 | 1.40 |                  |
| 2008-05-19 | 119.15 | 205.15  | 2.24 | 1.27 |                  |
| 2008-05-28 | 169.03 | 446.59  | 2.73 | 2.12 | 89.81            |
| 2008-06-06 | 259.66 | 580.10  | 3.29 | 5.13 | 233.63           |
| 2008-06-11 | 77.34  | 240.46  | 4.32 | 3.00 | 51.99            |
| 2008-06-25 | 69.20  | 299.48  | 3.19 | 2.93 | 30.11            |
| 2008-07-21 | 153.24 | 376.29  | 1.85 | 1.08 | 186.26           |
| 2008-07-27 | 120.29 | 162.53  | 2.97 | 2.41 |                  |
| 2008-08-11 | 119.37 | 257.95  | 7.06 | 2.51 | 133.41           |
| 2008-08-22 | 162.14 | 141.54  | 8.58 | 2.12 |                  |
| 2008-09-01 | 172.23 | 1532.09 | 7.94 | 1.56 |                  |
| 2008-09-17 | 318.36 | 2027.76 | 9.38 | 1.27 | 251.35           |
| 最大值        | 738.63 | 2027.76 | 9.38 | 5.13 | 251.35           |
| 中值         | 170.63 | 375.41  | 4.36 | 1.65 | 141.35           |
| 最小值        | 69.20  | 111.42  | 1.85 | 1.08 | 30.11            |
| 平均值        | 224.15 | 571.16  | 5.22 | 2.04 | 143.50           |

表 5 城市地面径流污染 EMC 浓度比较/mg•L<sup>-1</sup>

Table 5 Compared EMC values of urban surface runoff in different cities/mg•L<sup>-1</sup>

| 比较对象                                   |         | COD       | SS         | TN        | TP        | BOD <sub>5</sub> |
|----------------------------------------|---------|-----------|------------|-----------|-----------|------------------|
| 深圳市                                    | 本研究区域范围 | 224.14    | 571.15     | 5.22      | 2.04      | 143.50           |
| 广州市 <sup>[25]</sup>                    | 交通道路    | 373       | 439        | 11.71     | 0.49      | 19.5             |
| 上海市 <sup>[26]</sup>                    | 交通区     | 748.705   | 1 731.355  | 3.12      | 1.005     |                  |
|                                        | 商业区     | 448.25    | 699.875    | 3.095     | 0.87      |                  |
|                                        | 工业区     | 256.53    | 580.905    | 1.9       | 0.555     |                  |
|                                        | 居住区     | 150.415   | 430.72     | 1.71      | 0.425     |                  |
| 北京市 <sup>[27]</sup>                    | 路面      | 582       | 734        | 1.74      | 5.6       |                  |
|                                        | 沥青油毡屋面  | 328       | 136        | 9.8       | 0.94      |                  |
| Kongju(韩国) <sup>[28]</sup>             | 停车场     | 14.7~69.2 | 12.1~37.4  | 0.98~2.54 | 0.08~0.53 |                  |
|                                        | 桥梁道路    | 45.5~199  | 24.7~305.3 | 2.3~5.37  | 0.39~1.15 |                  |
| 澳门 <sup>[29]</sup>                     |         | 80.1      | 2 619.5    |           |           |                  |
| 珠海 <sup>[30]</sup>                     |         | 77.51     | 569.34     | 4.96      | 0.48      |                  |
| 兰州 <sup>[31]</sup>                     |         | 294.1     | 587        | 5.6       | 0.9       |                  |
| Windsor(加拿大) <sup>[32]</sup>           |         |           |            |           | 0.23      |                  |
| Topeka, Kans(美国) <sup>[32]</sup>       |         |           | 395        |           | 0.44      |                  |
| Southeast Michigan(美国) <sup>[32]</sup> |         | 163       | 343        | 2.41      | 0.48      | 9.3              |
| Atlanta Ga(美国) <sup>[32]</sup>         |         | 287       |            | 1         | 0.33      |                  |
| Washington D C(美国) <sup>[32]</sup>     |         | 26        |            | 2.74      | 0.26      |                  |

1) 北京、珠海、兰州径流污染浓度为算术平均值,澳门污染浓度为 2005-06-21 单场降雨数据

研究区域的地表径流污染在我国各大城市中也是较严重的。1976~1977年,SEMCOG(美国密执安州东南区议会)对密执安州东南区承雨面积为246~2458 hm<sup>2</sup>不等的5个流域17个月期间7场降雨的径流排污状况进行了实测,取样点为流域排水管网的出口处,该5个流域中4个为分流制排水系统,一个为合流制排水系统,监测结果表明该地区浓度值明显低于全美国的统计值,也明显比研究区域EMC值约低一半<sup>[11]</sup>。美国环保署全国城市径流项目(NURP)的EMC平均值结果表明<sup>[28]</sup>,美国474~2000场降雨形成径流的TSS为174 mg/L, COD为66.1 mg/L, BOD<sub>5</sub>为10.4 mg/L, TP为0.337 mg/L, TN为2.507 mg/L,可见深圳研究区域EMC值比美国的高了许多。与国外的一些研究结果相比较,比韩国、美国和加拿大一些城市地表径流污染物浓度高得多,这可能是深圳市正处于快速发展时期,人口密度高,城市开发强度大,整个城市环境状况和大气质量等要比一些发达国家差,因此径流污染比较严重。

### 3 结论

(1)深圳市福田河研究区域入河径流排放口的总污染特征为:初期雨水造成的污染严重,地表径流浓度随时间变化历程中,COD、SS、BOD<sub>5</sub>、TN、TP普遍超出地表V类水标准十多倍以上;某典型降雨场次的铬、镉、铜和砷未超过地表水V类标准限值,汞最大浓度和平均浓度分别为标准限值的198倍和77倍。

(2)随时间变化历程中,存在明显的初期效应,COD、SS、BOD<sub>5</sub>的初期效应尤为明显,30 min左右存在一个浓度陡降的趋势,中后期缓慢下降,总体上,地表径流总污染较为严重,因此对初期雨水的处理是十分必要的。

(3)对于EMC值,在某种程度上,深圳市研究点的COD和SS浓度高于邻近的澳门、珠海,TN、TP值高于北京、广州、上海等城市。与国外的一些研究结果相比较,EMC值比韩国、美国及加拿大一些城市地表径流污染物浓度高得多。

#### 参考文献:

- [1] Collins P G, Ridgway J W. Urban storm runoff quality in southeast Michigan[J]. J Envir Engrg Division, ASCE, 1980, **106**(EE1): 485-501.
- [2] US EPA. Water quality conditions in the United States: a profile from the 1996 National Water Quality Inventory Report to Congress[M]. Washington, DC: Office of Water, 1998.
- [3] Noble R T, Weisberg S B, Leecaster M K, *et al.* Storm effects on

regional beach water quality along the southern California shoreline[J]. J Water Health, 2003, **1**(1):23-31.

- [4] Li L Q, Yin C Q, He Q C, *et al.* First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China[J]. J Environmental Sciences, 2007, **19**: 295-299.
- [5] 曾晓岚,张智,丁文川,等. 城市雨水口地面暴雨径流模型研究[J]. 重庆建筑大学学报,2004, **26**(6):78-85.
- [6] 许仕荣,周永潮,张伟. 雨水口流域径流水质水量动态模拟[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(11):39-45.
- [7] 曾晓岚,张智,丁文川,等. 城市雨水口地面暴雨径流浓度模型研究[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(4):13-15.
- [8] Ma J S, Khan S, Li Y X, *et al.* First flush phenomena for highways: how it can be meaningfully defined[A]. In: Proceedings of the 9th International Conference on Urban Drainage (ICUD)[C]. Portland, Oregon, 2002.
- [9] Han Y H, Lau S L, Kayhanian M, *et al.* Correlation analysis among highway stormwater pollutants and characteristics[J]. Water Sci Technol, 2006, **53**(2): 235-243.
- [10] Brezonik P L, Stadelmann T H. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA[J]. Water Research, 2002, **36**:1743-1757.
- [11] Taebi A, Droste R L. Pollution loads in urban runoff and sanitary wastewater[J]. Sci Total Environ, 2004, **327**:175-184.
- [12] Fischer D. Stormwater impacts on ground water quality via detention basins[R]. U. S. Environmental Protection Agency, Urban Watershed Management Branch, 1999.
- [13] 卓慕宁,王继增,吴志峰,等. 珠海城区暴雨径流污染负荷估算及其评价[J]. 水土保持通报, 2003, **23**(5): 35-38.
- [14] 郭琳,曾光明,程运林. 城市街道地表物特征分析[J]. 中国环境监测, 2003, **19**(6): 40-42.
- [15] 黄军,张旭,彭炯,等. 暴雨径流污染负荷的时空分布与输移特性研究[J]. 农业环境科学学报,2004, **23**(2):55-58.
- [16] 邓风,陈卫. 南京市居住区雨水利用方案探讨[J]. 中国给水排水, 2003, **19**(5): 95-97.
- [17] 车伍,欧岚. 北京城区雨水径流水质及其主要影响因素[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, **3**(1):33-37.
- [18] LeBouthillier D W, Kells J A, Putz G J. Prediction of pollutant load in stormwater runoff from an urban residential area[J]. Can Water Resour J, 2000, **25**(4): 343-359.
- [19] Driver N E, Tasker G D. Techniques for the estimation of storm-runoff loads, volumes, and selected constituent concentrations in urban watersheds in the United States[R]. U.S. Geological Survey Water U.S. Geological Survey, Denver, 1990.
- [20] Smullen J T, Shallcross A L, Cave K A. Updating the U. S. Nationwide Urban Runoff Quality Data Base[J]. Water Science and Technology, 1999, **39**(12): 9-16.
- [21] EPA. Results of the Nationwide Urban Runoff Program[R]. Final Report. U. S. Environmental Agency, NTIS Accession NO. PB842185552, December, 1983.
- [22] McLeod S M, Kells J A, Putz G J. Urban Runoff Quality Characterization and Load Estimation in Saskatoon, Canada[J].



- Journal of Environmental Engineering, 2006, **132**(110): 1470-1481.
- [23] 潘国庆.不同排水体制的污染负荷及控制措施研究[D].北京:北京建筑工程学院,2008.10-26.
- [24] 赵剑强.城市地表径流污染与控制[M].北京:中国环境科学出版社,2002.1-70.
- [25] 甘华阳,卓慕宁,李定强,等.广州城市道路雨水径流的水质特征[J].生态环境,2006, **15**(5): 969-973.
- [26] 常静,刘敏,许世远,等.上海城市降雨径流污染时空分布与初始冲刷效应[J].地理研究,2006, **25**(6):994-1002.
- [27] 车伍,刘燕,李俊奇.国内外城市雨水水质及污染控制[J].给水排水,2002, **29**(10): 38-41.
- [28] Kim L H, Ko S O, Jeong S, *et al.* Characteristics of washed-off pollutants and dynamic EMC in parking lots and bridges during a storm [J]. Science Total Environment, 2007, **376**:178-184.
- [29] 黄金良,杜鹏飞,欧志丹,等.澳门城市路面地表径流特征分析[J].中国环境科学 2006, **26**(4): 469-473.
- [30] 卓慕宁,吴志峰,王继增,等.珠海城区降雨径流污染特征初步研究[J].土壤学报,2003, **40**(5): 775-777.
- [31] 张媛.兰州市区地表径流污染初探[D].兰州:兰州大学,2006.
- [32] Stanley D W. Pollutant removal by a stormwater dry detention pond [J]. Water Environment Research, 1996, **68**(6):1076-1083.