

# 城市绿地降雨径流污染特征对比研究:以澳门与厦门为例

黄金良<sup>1,2</sup>,涂振顺<sup>2</sup>,杜鹏飞<sup>3</sup>,李青生<sup>2</sup>,林杰<sup>2</sup>,杨龙奇<sup>2</sup>

(1. 厦门大学海洋环境科学福建省重点实验室,厦门 361005; 2. 厦门大学环境科学研究中心,厦门 361005; 3. 清华大学环境科学与工程系,北京 100084)

**摘要:**在澳门与厦门分别选一分流制管道类型的绿地小流域开展降雨径流监测,以研究城市绿地降雨径流污染特征.结果表明,两城市绿地小流域降雨径流的主要污染物为COD、TP、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,其EMC平均值分别为165.77~60.48 mg/L、0.96~0.44 mg/L和7.16~1.18 mg/L;两城市绿地的COD、TP、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N污染负荷平均值分别为6.53~0.63 kg/hm<sup>2</sup>、0.0375~0.0047 kg/hm<sup>2</sup>和0.0122~0.0128 kg/hm<sup>2</sup>;绿地降雨径流污染物浓度峰值出现时间早于径流量峰值;城市绿地降雨径流初始冲刷效应不明显,厦门绿地小流域降雨径流COD、TSS、TP及NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的FF<sub>30</sub>分别为36.26%、26.13%、28.13%和39.03%.基于多元回归分析结果表明,总降雨量和总径流量是影响绿地降雨径流污染初始冲刷效应的主要因素.

**关键词:**城市绿地小流域;降雨径流;污染特征;澳门;厦门

中图分类号:X143 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2009)12-3514-08

## Comparative Study on Characteristics of Urban Rainfall Runoff from Two Urban Lawn Catchments in Macau and Xiamen

HUANG Jin-liang<sup>1,2</sup>, TU Zhen-shun<sup>2</sup>, DU Peng-fei<sup>3</sup>, LI Qing-sheng<sup>2</sup>, LIN Jie<sup>2</sup>, YANG Long-qi<sup>2</sup>

(1. Joint Key Laboratory of Coastal Study, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A comparative study on characteristics of stormwater runoff from two urban lawn catchments in Macau (ELH) and Xiamen (PGH) with separated sewer system were conducted. The result obtained shows that COD, TP and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N are the major pollutants with mean EMC of 165.77-60.48 mg/L, 0.96-0.44 mg/L and 7.16-1.18 mg/L, respectively, and the mean values of pollutants loads of COD, TP and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N from study lawn catchments are 6.53-0.63 kg/hm<sup>2</sup>, 0.0375-0.0047 kg/hm<sup>2</sup> and 0.0122-0.0128 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. Peak values of major pollutant concentrations usually precede the flow peak. First flush effect of rainfall runoff from two study catchments is no obvious, which can be reflected by the low mean value of FF<sub>30</sub> of TSS, COD, TP and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, with 36.26%, 26.13%, 28.13% and 39.03%, respectively. Based on multivariate statistical analysis, first flush effect from urban lawn rainfall runoff is greatly influenced by total rainfall amount (T<sub>r</sub>) and total runoff volume (V).

**Key words:** urban lawn catchments; rainfall runoff; pollution characteristic; Macau; Xiamen

随着城市化进程加剧,城市土地利用/覆被发生显著变化,其最直接的结果是大量的不透水区面积增加,并引起地表径流水质变差,降雨径流产汇流时间缩短,洪峰时间提前等问题<sup>[1]</sup>.绿地作为城市的透水区表面,起到缓冲降雨径流带来的水量水质问题的作用,但其由于受泊车、绿地养护等人类活动的影响,降雨径流污染问题不容忽视.近些年来我国在道路、屋面和城市区域等城市下垫面陆续开展研究<sup>[2~9]</sup>,但有关城市绿地降雨径流污染的特征研究仍然较少.本研究在澳门与厦门各选取一个绿地为主导的城市小流域开展降雨径流监测分析,以识别其污染特征及其影响因素.

## 1 区域概况与研究方法

### 1.1 区域概况

澳门选取二龙喉公园小流域(ELH),主要是以幼龄苗圃、草坪和灌木丛为主的土地覆盖特征.面积4.67 hm<sup>2</sup>,平均坡度20%;绿地面积占70%以上,其余为路面等;不透水率约为30%.厦门选取筓筓湖

收稿日期:2009-01-06;修订日期:2009-02-24

基金项目:国家自然科学基金项目(50778098);福建省青年人才项目(2007F3093)

作者简介:黄金良(1975~),男,博士,副教授,主要研究方向为流域与城市水环境非点源污染特征与模拟, E-mail: jlhuan@xmu.edu.cn

沿岸草坪为主要土地覆盖的市人民大会堂草坪小流域(PGH)进行降雨监测.面积 3.26 hm<sup>2</sup>,其中,绿地面积 2.13 hm<sup>2</sup>,道路面积约 0.65 hm<sup>2</sup>,屋面面积约 0.48 hm<sup>2</sup>,面积比例分别占 65%、20%、15%,不透水率达 35%左右.

两者功能相近,皆是城市绿化景观区域.从使用情况来看,澳门二龙喉公园绿地作为公园景观,是人们日常休闲场所;而厦门市大会堂绿地较大程度是景观绿地,人们在此休闲活动相对较少,其中有会议室大楼和小型停车场(约 100 个停车位).

## 1.2 降雨径流样品采集与测定方法

根据 ELH 和 PGH 两绿地小流域的雨水管网分布图,分别确定两绿地小流域的取样位置,即都在雨水井下面的圆形管道口处.其中:ELH 小流域采用自动采样器(ISCO6712)在断面处进行采样,自动采样器连接的雨量筒和流量计可同步采集每个水样时的雨量、流量数据,自动采样时通过设定降雨强度来驱动水质采样器和流量计工作,水样采集数量固定为

12 个;PGH 小流域采用手工采集水样,流量的测定采用容量法和 Hach 流量计(SIGMA910)相给合,水样的采集和径流量的监测同步进行,采集的水样数量根据降雨与径流持续时间而定.2 个小流域采样频率都采用“前密后疏”的方式,在降雨前期以 5 min 为间隔采样,后期 10~30 min 为间隔采样.

ELH 小流域采集的水样送至澳门民政总署化验所进行分析;在 PGH 小流域采集的水样由厦门大学课题组进行分析.监测水质指标有氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、亚硝氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)、TSS、pH 值以及重金属 Zn、Pb、Cu 等.所有水质指标均按照国家水质分析标准进行测定<sup>[10]</sup>.

在 ELH 与 PGH 2 个小流域各分别进行了 4 场和 7 场降雨径流监测,由于流量计的原因,ELH 小流域在 2006-04-26 和 2006-04-28 2 场降雨进行了流量监测,其余 2 场降雨仅监测水质,PGH 小流域 7 场降雨都测流量.具体降雨采样情况如表 1 所示.

## 1.3 数据处理方法

表 1 降雨采样情况

Table 1 Brief description of monitoring conditions during rainfall events in two study catchments

地点	日期	干期长度/h	采样历时/min	总降雨量/mm	平均降雨强度/mm min <sup>-1</sup>	样品数/个
ELH	2005-08-09	85.30	122	7.9	0.024	12
	2006-02-27	12.42	123	2.9	0.024	12
	2006-04-26	249.57	123	1.6	0.013	12
	2006-04-28	40.57	123	3.7	0.030	12
PGH	2008-03-22	—	92	—	—	16
	2008-04-12	192	65	5.45	0.084	12
	2008-05-05	264	286	9.37	0.033	27
	2008-05-09	72	97	50.7	0.520	13
	2008-07-28	192	175	7.2	0.041	22
	2008-08-06	144	89	4.16	0.047	17
	2008-08-16	48	155	14.7	0.095	17

### 1.3.1 场次降雨平均浓度(EMCs)与污染负荷的计算

场次降雨污染物平均浓度(event mean concentration, EMC)是城市暴雨径流污染物冲积与累积过程的产物,常被用于表征一场降雨地表径流量全过程排放的某污染物平均浓度<sup>[2]</sup>.EMC 的计算公式如下:

$$EMC = \frac{\sum_{j=1}^n c_j V_j}{\sum_{j=1}^n V_j} \quad (1)$$

式中, $c_j$  为第  $j$  时间所测的污染物的浓度,mg L<sup>-1</sup>;  $V_j$  为第  $j$  时间段的径流量,m<sup>3</sup>;一般按 2 个样品采集时间间隔之中间值划分流量区间(平均分割法); $n$

为时间分段数.

污染负荷,即单位面积产污量,是由单场降雨的总产污量除以产污面积,公式如下:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n c_i Q_i d_i}{A} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{c_i + c_{i+1}}{2} \times \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \times t_i}{A} \quad (2)$$

式中, $t_i$  为降雨持续时间; $n$  为样品采集数; $c_i$ 、 $Q_i$  分别为第  $i$  个样品的污染物浓度和流量; $c_{i+1}$ 、 $Q_{i+1}$  分别为第  $i+1$  个样品的污染物浓度和流量; $A$  为产污面积.

### 1.3.2 初始冲刷效应的判定

初始冲刷效应是降雨径流污染的重要现象,通过对污染物的初始冲刷分析,可以为控制初期降雨

径流污染提供依据.国际上常借助场次暴雨累积污染物总量与累积径流总量之比的曲线,也就是所谓的  $M(V)$  曲线,来判定是否存在初始冲刷效应<sup>[11]</sup>.图 1 为  $M(V)$  曲线的示意图,对角线表示在整个降雨径流中污染物均衡迁移,如果污染物的累积污染负荷曲线位于均衡线之上,则发生初始冲刷现象;反之,没有初始冲刷现象.

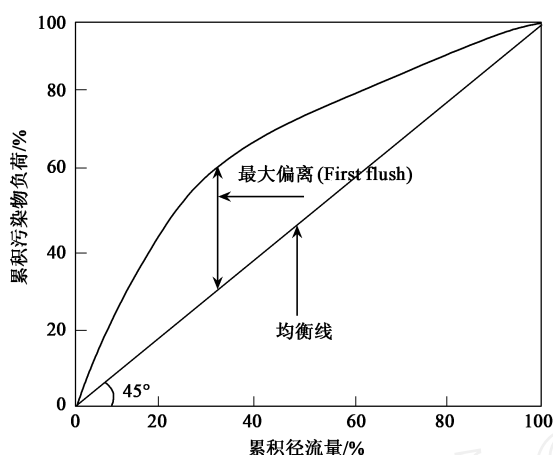


图 1 初始冲刷的  $M(V)$  曲线

Fig. 1  $M(V)$  curve of first flush effect

已有研究表明可用累积曲线与均衡线的偏差代表初始冲刷的强弱,用  $FF_{30}$ ,即 30%径流量与此时所对应的污染物量的比来表示初始冲刷的强度, $FF_{30}$  值越大,冲刷强度就越大<sup>[12,13]</sup>.根据文献[14]的计算方法推导, $FF_{30}$ 可由式(1)、(2)计算而得:

表 2 澳门二龙喉与厦门大会堂绿地小流域径流污染物 EMC 和污染负荷平均值对比

Table 2 Comparison of EMC and loads of major pollutants of rainfall runoff from study lawn catchments

地点	参数	TSS	COD	TP	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	Cu	Pb	Zn
ELH	降雨场次/次	— <sup>1)</sup>	2	2	2	2	—	—	2
	EMC/ $\text{mg L}^{-1}$	—	165.77	0.96	7.76	0.92	—	—	0.1034
	平均污染负荷/ $\text{kg hm}^{-2}$	—	6.53	0.0375	0.0122	0.0014	—	—	0.00016
PGH	降雨场次/次	7	7	7	6	7	4	2	4
	EMC/ $\text{mg L}^{-1}$	22.36	60.48	0.44	1.41	0.88	0.0057	0.0033	0.0898
	平均污染负荷/ $\text{kg hm}^{-2}$	0.33	0.63	0.0047	0.0128	0.0118	0.00014	0.00005	0.00116

1)表示无数据

两绿地小流域几场降雨径流主要污染物的瞬时浓度的统计分析结果见图 2.从中可见,ELH 小流域降雨径流中 COD、TP、NO<sub>3</sub>-N 浓度相对较高、变化范围较宽,均值与中位值也相对较大;而 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、Cu、Pb、Zn 在 PGH 降雨径流中相对变化范围较宽,浓度值也相对较大.

## 2.2 降雨-径流过程与污染物浓度历时变化

图 3 和图 4 分别是 PGH (2008-05-05) 与 ELH

$$T \times (30\% - A_0) / (A_1 - A_0) = T_x \quad (3)$$

式中, $T$  为 30%累积径流量点的前后水样采集的间隔时间; $A_0$  为前一个水样采集时的累积径流量(%); $A_1$  表示后一个水样采集时的累积径流量(%); $T_x$  为 30%累积径流量的时刻与邻近的前一个水样采集时间差.

$$[(B_1 - B_0) \times T_x / (T_1 - T_0)] + B_0 = B_{30\%} \quad (4)$$

式中, $T_0$ 、 $T_1$  分别是 30%累积径流量出现时临近的前后水样采集时间; $B_0$ 、 $B_1$  分别是累积径流量为 30%时临近的前、后水样污染物累积负荷(%); $B_{30\%}$  为累积径流量为 30%时污染累积负荷量(%).

## 2 结果与分析

### 2.1 绿地降雨径流水质特征

表 2 为 ELH 与 PGH 降雨径流的 EMC 与主要污染物的负荷平均值.可以看出,ELH 降雨径流主要污染物为 COD、NO<sub>3</sub>-N、TP,其 EMC 平均值分别是 165.77、7.763、0.962 mg/L;PGH 降雨径流主要污染物 COD、NO<sub>3</sub>-N、TP 的 EMC 平均值分别是 60.48、1.81、0.88 mg/L.从两绿地小流域降雨径流污染物的 EMC 平均值比较来看,ELH 的 COD、TP、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、Zn 都比厦门大会堂绿地径流大.ELH 的 COD、TP 污染负荷平均值大于 PGH 的污染负荷平均值 1 个数量级,而 ELH 的 Zn 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的污染负荷平均值则比 PGH 小 1 个数量级,但两绿地小流域 NO<sub>3</sub>-N 平均污染负荷相当.

(2006-04-26) 两绿地小流域 2 场降雨径流和污染物浓度变化过程.

从图 3 可以看出,2005-05-05 降雨场次,PGH 小流域降雨径流污染物浓度峰值出现时间都早于径流量峰值,COD、TP、NO<sub>3</sub>-N、Pb、Zn 最大峰值分别提前于径流最大峰值 35、15、25、15、45 min. COD 浓度分别在 10、55、100 min 时出现了明显的峰值;TSS 浓度则在 20、85、115 时出现了明显的峰值;NO<sub>3</sub>-N 浓

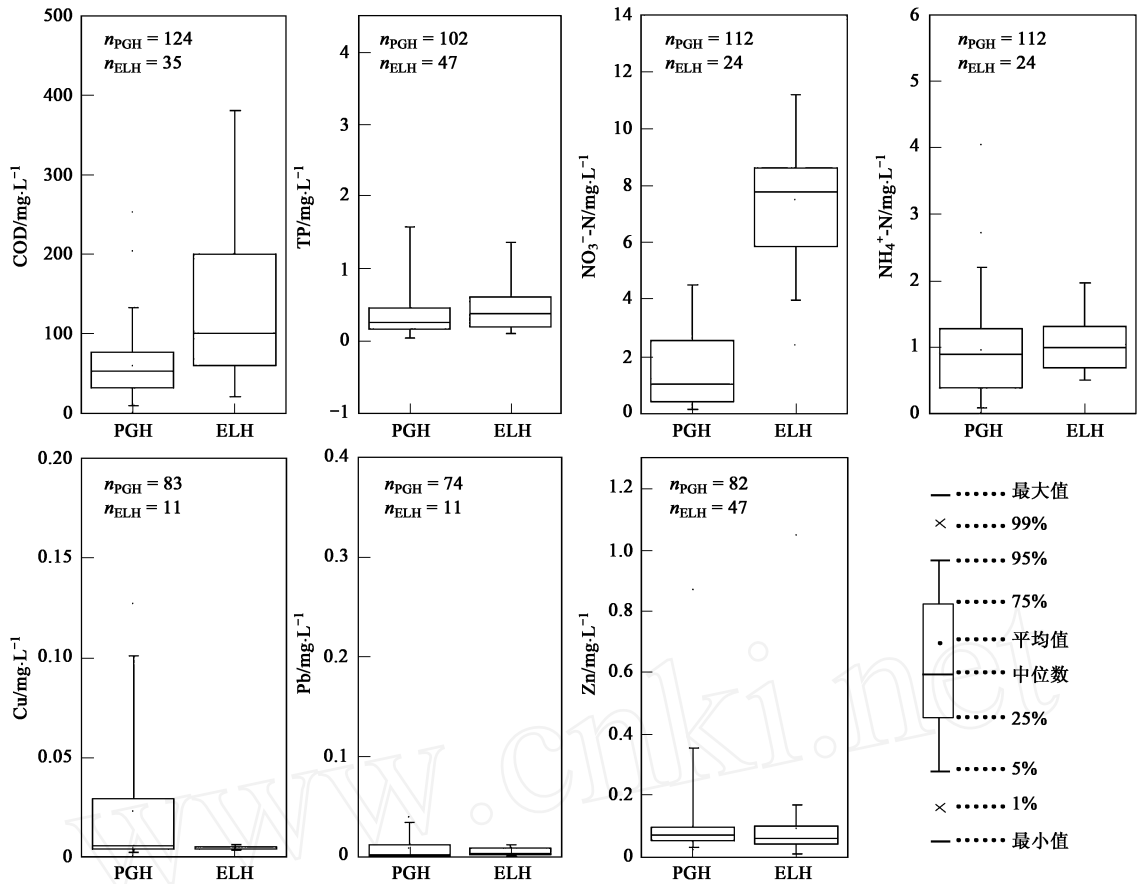


图2 ELH与PGH城市绿地径流的污染物浓度对比

Fig. 2 Comparison of major pollutants concentration between PGH and ELH urban lawn catchments

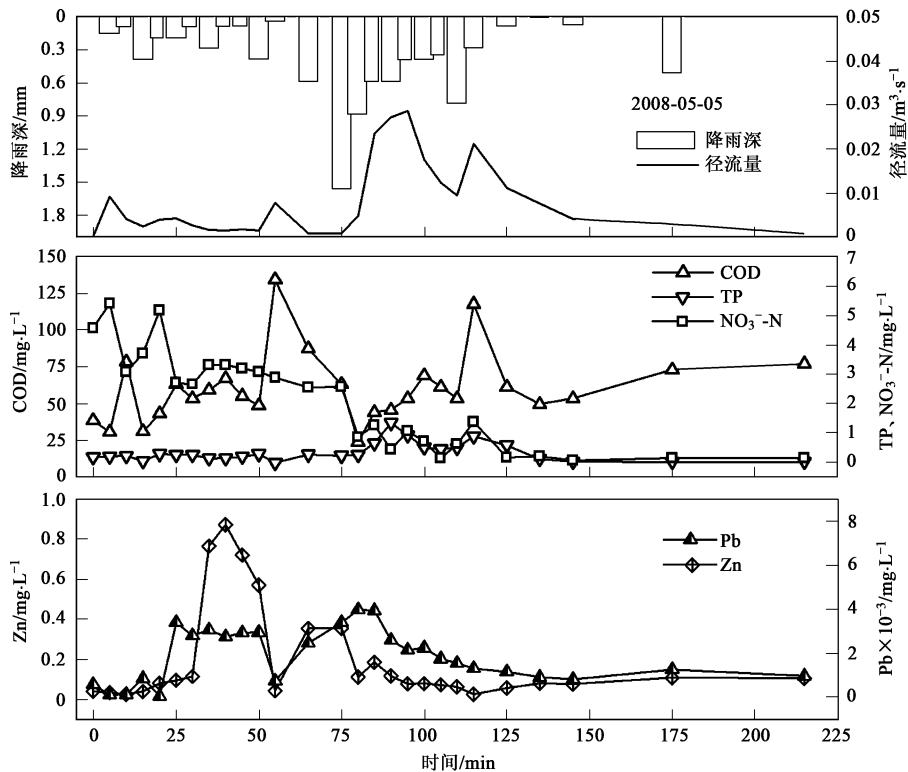


图3 PGH小流域污染物浓度随径流量历时变化曲线

Fig. 3 Pollutography analysis on 2008-05-05 rainfall event in PGH catchment

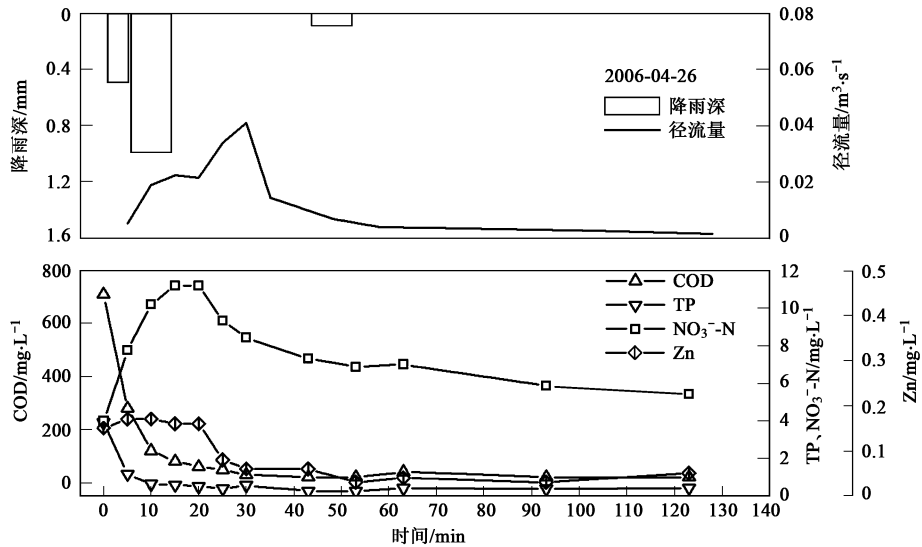


图4 ELH径流污染物浓度随径流量历时变化曲线

Fig. 4 Pollutography analysis on 2006-04-26 rainfall event in ELH catchment

度随径流总体呈下降趋势,径流初期其浓度明显较高,在5、20 min时出现了明显的峰值,随后逐渐下降并趋于稳定,说明 $\text{NO}_3^-$ -N容易受径流的冲刷并较快的排放; $\text{NH}_4^+$ -N浓度总体也是呈下降趋势,在25、50、95 min时出现了明显的峰值. TP浓度也出现了多个峰值的现象,分别在90、115 min时出现峰值.

由图4可见,受降雨特征的影响,ELH小流域2006-04-26降雨径流COD、TP存在显著的浓度递减

规律. 重金属Zn浓度存在波动,但总体呈下降趋势. COD、TP、 $\text{NO}_3^-$ -N、Zn浓度最大峰值在径流量峰值前约10~30 min时出现.

### 2.3 初始冲刷效应分析

#### 2.3.1 PGH绿地小流域降雨径流污染初始冲刷效应分析

图5是厦门绿地小流域7场降雨主要污染物降雨初始冲刷 $M(V)$ 曲线图. 从中可见,PGH小流域绿

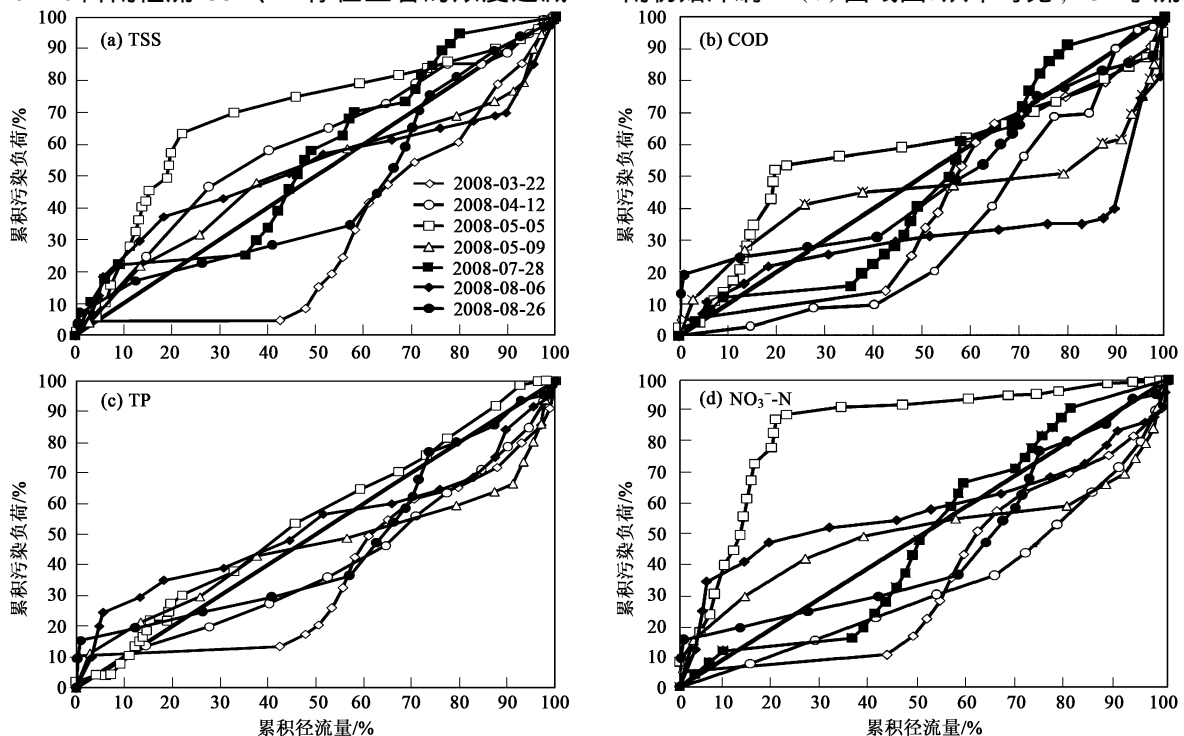


图5 PGH小流域降雨径流初始冲刷 $M(V)$ 曲线

Fig. 5  $M(V)$  of First flush effect in Xiamen lawn catchment (PGH)

地降雨径流污染初始冲刷效应因不同降雨场次、不同水质参数而不同. TSS 在 2008-05-05 降雨径流中初始冲刷现象最明显,2008-04-12 次之,其余场次降雨的初始冲刷效应不明显. COD 在 2008-05-05 降雨径流中存在初始冲刷效应,其余场次降雨中没有明显的初始冲刷现象. TP 则在各场降雨径流中均没有明显的初始冲刷现象,2008-05-05 降雨中其  $M(V)$  曲线在均衡线上方,但是非常贴近均衡线.  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  在 2008-05-05 降雨中初始冲刷较为明显,其他场次降

雨中不明显. 可见 2008-05-05 降雨径流中, TSS、COD、TP 以及  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  均发生了不同程度的初始冲刷现象;而其他场次降雨初始冲刷却不明显;与其他场次降雨相比,2008-05-05 降雨采样监测持续时间长,达到了 286 min(见表 1).

### 2.3.2 ELH 绿地小流域降雨径流初始冲刷效应分析

对 ELH 绿地小流域 2006-04-26 和 2006-04-28 2 场降雨绘制  $M(V)$  曲线,以分析主要水质参数初始冲刷效应,结果见图 6.

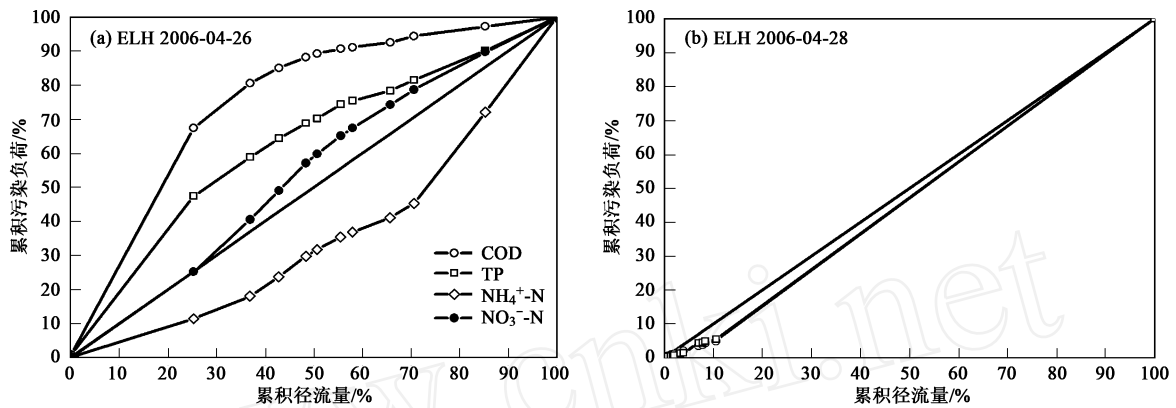


图 6 ELH 降雨径流污染物初始冲刷  $M(V)$  曲线

Fig. 6  $M(V)$  of first flush effect in Macau lawn catchment

图 6 所列的 2006-04-26 降雨场次  $M(V)$  曲线,除  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  外, COD、TP、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的  $M(V)$  曲线均高于均衡线,表明 2006-04-26 降雨径流中的水质参数除  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  以外, TP、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、COD 存在明显的初始冲刷现象. 与 2006-04-26 场次降雨的  $M(V)$  曲线相反, 2006-04-28 场次降雨 TP、COD 等水质参数累积径流量与累积污染物负荷之比的累积曲线均低于  $45^\circ$ ,说明场次降雨径流 TP、COD 不存在初始冲刷效应. ELH 小流域的 2 场降雨初始冲刷分析的结果相反,干期长度可能是其中的重要影响因素. 由表 1 可知,2006-04-26 降雨的干期长度是 2006-04-28 降雨的 6 倍多.

## 3 讨论

### 3.1 城市绿地降雨径流污染特征

城市绿地是城市下垫面的主要类型,从其透水性及功能来看似乎不会有什么污染产生. 但是通过澳门与厦门绿地降雨径流监测研究来看,一些污染物浓度超过国家 Ⅲ 类地表水水质标准,如 TP、COD、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$  等,其中澳门绿地降雨径流中 COD 的 EMC 超出国家 Ⅲ 类水质标准的 4 倍多,其污染不容忽视.

表 3 为澳门、厦门两城市绿地小流域与美国环保署 (EPA) 监测的降雨径流主要污染物 EMC 的对

表 3 美国城市降雨径流监测污染物 EMC 与澳门、厦门绿地对比

Table 3 Comparison of EMC of rainfall runoff from Xiamen, Macau and US EPA monitoring data

水质参数 / $\text{mg L}^{-1}$	PGH 绿地小流域 EMCs 平均值	ELH 绿地小流域 EMCs 平均值	美国 EMCs 平均值 <sup>1)</sup>	国家 Ⅲ 类 水质标准 <sup>15)</sup>
TSS	22.36	— <sup>2)</sup>	78.4	—
COD	60.48	165.77	52.8	40
TP	0.44	0.96	0.32	0.4
$\text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N}$	2.34	8.68	0.66	—
Cu	0.0057	—	0.0135	1
Pb	0.0033	—	0.0675	0.1
Zn	0.0898	0.1034	0.162	2

1) 美国 EPA 监测降雨径流 EMC 数据汇总<sup>[16]</sup>; 2) 表示缺数据

照表<sup>[16]</sup>,可以看出厦门、澳门城市绿地径流多数污染物浓度相对较低,但 COD、TP 以及  $\text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NH}_4^+ - \text{N}$  的 EMC 相对较大,比美国 EPA 监测的 EMCs 平均值高,也比北京路面及屋面降雨径流<sup>[8]</sup>中的浓度大,这说明 COD、TP、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  是城市绿地降雨径流的主要污染物,这可能与城市绿地施肥养护及泊车等因素有关<sup>[17,18]</sup>。

绿地径流污染物排放规律与其他城市下垫面相似,径流前期污染物浓度较大,后期呈现逐渐减少的趋势,而且绿地降雨径流污染物浓度峰值出现时间普遍早于径流量峰值。从厦门绿地 2008-05-05 和澳门绿地 2006-04-26 2 场典型降雨水量水质变化过程曲线来看,污染物浓度峰值出现在径流峰值之前,这与汉阳地区降雨径流污染物排放规律相似<sup>[16,9]</sup>。

### 3.2 城市绿地降雨径流初始冲刷

从两绿地小流域的降雨径流  $M(V)$  曲线来看,PGH 小流域降雨径流污染中 TSS、COD、TP、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  除 2008-05-05 有明显的初始冲刷效应以外,其余的降雨径流未出现明显的初始冲刷现象,而 ELH 小流域两场降雨初始冲刷效应迥异,2006-04-26 场次降雨 COD、TP 以及  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  出现初始冲刷现象,而 2006-04-28 降雨污染物未出现初始冲刷现象。从表 1 可以看出,PGH 小流域的 2008-05-05 采样历时达到了 286 min,而 ELH 的 2006-04-28 降雨前的干期时间长达 249.57 h。由此可见,在降雨持续较长时间、干期长度较长的情况下,绿地降雨径流较容易出现初始冲刷现象。Sansalone 等<sup>[19]</sup>的研究也有类似结果。

由于 ELH 研究区数据较少,这里仅以 PGH 绿地为例,对 7 场降雨径流监测的主要水质参数 COD、TSS、TP 以及  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  进行  $\text{FF}_{30}$  统计分析,结果如表 4。

表 4 TSS、COD、TP 和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的  $\text{FF}_{30}$  统计

Table 4 Index value of first flush effect for seven events in PCB catchment ( $\text{FF}_{30}$ )

统计指标/%	TSS	COD	TP	$\text{NO}_3^- - \text{N}$
Min	4.4	7.7	11.3	12.3
Max	65.1	54.3	38.8	89.3
Mean	36.26	26.13	28.13	39.03
S. D.	20.64	17.38	9.62	29.33
Coef. Var.	0.57	0.67	0.34	0.75

如表 4 所示, COD、TSS、TP 及  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的  $\text{FF}_{30}$  分别为 36.26%、26.13%、28.13% 和 39.03%。这表明厦门绿地降雨径流主要污染物 COD、TSS、TP、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  没有出现明显的初始冲刷现象,也进一步佐证了之前用  $M(V)$  曲线表达研究区域是否存在初始冲刷效

应的结果。

### 3.3 城市绿地污染特征的影响因素分析

考虑到数据的有效性,以 PGH 小域为例,分析绿地降雨径流主要污染物 COD、TSS 的  $\text{FF}_{30}$  与降雨径流各影响因素(包括总降雨量、降雨持续时间、总径流量、平均流量、最大降雨强度、干期长度)的相关性,通过多元回归和 Spearman 秩相关系数分析,识别影响绿地污染累积冲刷的主要影响因素。结果如表 5、表 6 所示。

表 5 TSS 的  $\text{FF}_{30}$  与降雨参数的相关性

Table 5 Correlation coefficients between  $\text{FF}_{30}$  of TSS and rainfall characteristics

TSS	$R$	$P_r$	
$T_r$ (总降雨量)	-0.887	0.886	0.019
$F_r$ (平均流量)	0.162	-0.2	0.704
$V$ (总径流量)	0.380	0.714	0.111
$D$ (降雨持续时间)	1.147	0.6	0.208
$I_{\max}$ (最大降雨强度)	1.265	0.087	0.870
ADWP(前一次降雨干期长度)	-0.702	-0.203	0.7

表 6 COD 的  $\text{FF}_{30}$  与降雨参数的相关性<sup>1)</sup>

Table 6 Correlation coefficients between  $\text{FF}_{30}$  of COD and rainfall characteristics

COD	$R$	$P_r$	
$T_r$ (总降雨量)	2.653	0.657	0.156
$F_r$ (平均流量)	-0.090	-0.314	0.544
$V$ (总径流量)	0.366	0.829	0.042
$D$ (降雨持续时间)	-0.306	0.6	0.208
$I_{\max}$ (最大降雨强度)	-2.213	-0.348	0.499
ADWP(前一次降雨干期长度)	0.573	-0.058	0.913

1) 表示标准化的贝塔系数; $R$  表示秩相关系数; $P_r$  表示显著性水平

由表 5 和表 6 可见,绿地降雨径流中 TSS 的  $\text{FF}_{30}$  与  $T_r$ (总降雨量)具有较大的相关性,其显著性系数为 0.019,而 COD 的  $\text{FF}_{30}$  与  $V$ (总径流量)具较大的相关性,显著性系数为 0.042。说明对于厦门绿地小流域,在降雨的总降雨量和总径流量较大的情况下容易发生 TSS、COD 的初始冲刷效应,这可能与绿地特定的产汇流机制有关。该研究结论与文献[6, 20]的研究结果不同,其研究结果都显示污染物初始冲刷与最大降雨强度有很大的相关性。

## 4 结论

(1) 城市绿地降雨径流的主要污染物为 COD、TP、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , 其 EMC 平均值分别为 60.48 ~ 165.77 mg/L、0.44 ~ 0.96 mg/L 和 1.18 ~ 7.16 mg/L; ELH 与

PGH的COD、TP、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N单位面积污染负荷平均值分别为6.53~0.63 kg/hm<sup>2</sup>、0.0375~0.0047 kg/hm<sup>2</sup>和0.0122~0.0128 kg/hm<sup>2</sup>。

(2)城市绿地降雨径流污染物浓度峰值出现时间多早于径流量峰值,提早时间为10~45 min。

(3)城市绿地降雨径流初始冲刷效应不明显,厦门绿地小流域降雨径流COD、TSS、TP及NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的FF<sub>30</sub>分别为36.26%、26.13%、28.13%和39.03%。

(4)基于多元统计分析表明,总降雨量和总径流量是影响绿地降雨径流污染初始冲刷效应的主要因素。

#### 参考文献:

- [1] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, *et al.* Global change and the ecology of cities [J]. *Science*, 2008, **319**: 756-760.
- [2] 车武,刘红,汪慧贞,等.北京市屋面雨水污染及利用研究[J].中国给水排水,2001,17(6):57-61.
- [3] 赵剑强,孙奇溥.城市道路路面径流水质特性及排污规律[J].长安大学学报,2002,22(2):21-23.
- [4] 黄金良,杜鹏飞,欧志丹,等.澳门屋面径流特征初步研究[J].环境科学学报,2006,26(7):1076-1081.
- [5] 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.
- [6] Li L, Yin C, He Q, *et al.* First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**:295-299.
- [7] Huang J, Du P, Ao C, *et al.* Characterization of Surface Runoff from a Subtropics Urban Catchment [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(2):148-152.
- [8] 董欣,杜鹏飞,李志一,等.城市降雨屋面、路面径流水文水质特征研究[J].环境科学,2008,29(3):607-612.
- [9] 尹澄清.城市面源污染问题:我国城市化进程的新挑战——代“城市面源污染研究”专栏序言[J].环境科学学报,2006,26(7):1053-1056.
- [10] 国家环境保护总局.水与废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002.211,243-249,254-256,324.
- [11] Geiger W F. Flushing effects in combined sewer systems[A]. In: Proc. 4th Int. Conf. on Urban Storm Drainage [C]. Lausanne, Switzerland: 1987. 40-46.
- [12] Lee H J, Bang K W. First flush analysis of urban stormwater runoff [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **293**:163-175.
- [13] 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.
- [14] Davis A P, McCuen R H. Stormwater management for smart growth [M]. New York: Springer Science, 2005. 146-149.
- [15] GB 3838-2002.地表水环境质量标准[S].
- [16] Sumllen 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.
- [17] Whipple W, Grigg S, Gizzard T, *et al.* Stormwater Management in Urbanizing Areas[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1983.
- [18] 黄金良,杜鹏飞,欧志丹,等.澳门城市小流域地表径流污染特征分析[J].环境科学,2006,27(9):1753-1759.
- [19] Sansalone J J, Koran J M, Smithson J A, *et al.* Physical Characteristics of Urban Roadway Solids Transported during Rain Events [J]. *Environ Eng ASCE*, 1998, **124**:427-444.
- [20] Taebi A, Droste R L. First flush pollution load of urban stormwater runoff [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2004, **3**:301-309.