

澳门城市小流域地表径流污染特征分析

黄金良¹, 杜鹏飞^{1*}, 欧志丹², 李梅香³, 赵冬泉¹, 何万谦³, 王志石²

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 澳门大学科技学院, 澳门; 3. 澳门民政总署渠务处, 澳门)

摘要: 在澳门半岛选取土地利用为公园绿地和商住混合的 2 个分流制城市小流域。于 2005-08 ~ 2005-11 借助自动采样器进行流域出口 5 场降雨地表径流水质水量监测。结果表明, 商住混合分流制小流域 TN、TP、COD 多场降雨平均浓度值分别超出国家地表水环境 V 类标准 4 倍以上。公园绿地小流域 TN、TP 均超出 V 类水标准 2 倍多。从降雨-径流过程污染物浓度历时变化看, 2 个小流域 TN 和 TP 呈现一定的初始冲刷现象。TSS 与 TN、TP 的判定系数 R^2 都在 0.95 以上, 地表径流中水土流失与总氮总磷输出显著相关。TSS、浊度、COD 与径流量的变化过程呈明显的正相关性。TN 和 TP 营养盐浓度变化与流量的相关性不明显。重金属受降雨过程中交通流量的影响通常呈锯齿状波动。干期长度与降雨强度对地表径流水质参数 TSS、TN、COD 的影响较显著。

关键词: 地表径流; 城市小流域; 澳门

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)09-1753-07

Characterization of Urban Surface Runoff in Two Urban Catchments in Macau

HUANG Jin-liang¹, DU Peng-fei¹, AO Chi-tan², LEI Mui-heong³, ZHAO Dong-quan¹, HO Mair-him³, WANG Zhi-shi²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macau, China; 3. The Official Provisional Municipal Council of Macau, Macau, China)

Abstract: Characteristics of pollutants from urban surface runoff were investigated. Two catchments with a separated system in Macau were selected for sampling on rainfall events during the period of August to November, 2005. Water quality parameters such as pH, turbidity, TSS, COD, TOC, TN, TP, Zn, Pb, and Cu were analyzed. The results show that the commercial-residential urban catchment shows high level of COD, TN, TP, and the park urban catchment has high TN and TP concentration. From the pollutograph analysis, the peak of TSS, TN, TP concentration appears in the first and the third sample respectively in ELH and YLF catchments, and then the pollutants concentration tend to decrease. Regression analysis between TSS and TN & TP in two urban catchments resulted in a high value ($R^2 > 0.95$) of the coefficient of determination R^2 indicating a close relationship between soil losses and nitrogen & phosphorus discharged from surface runoff. The profile of TSS and COD discharged from surface runoff relates greatly to the surface flow change, whereas the surface flow change has little influence on the profile of TN and TP. The heavy metals such as Zn, Pb and Cu fluctuate with the continuous input of vehicles during rainfall events. Pollutants such as TSS, TN, COD discharged from surface runoff depend greatly on the dry periods and storms intensity in such two urban catchments.

Key words: surface runoff; urban catchments; Macau

城市地表径流含有相当数量的悬浮颗粒物、营养盐、重金属和有机污染物, 其未经处理排入城市受纳水体, 易引发水体富营养化和水生生态系统破坏等^[1,2]。掌握城市地表径流的污染特征是对其进行有效控制与治理的前提。上世纪 60 年代中期以来, 国际社会就意识到城市地表径流污染是城市地区主要的污染问题。发达国家如美国和欧盟成员国, 在制订城市地表径流管理规划时愈加重视城市地表径流特征^[3], 并相应地对不同城市下垫面, 包括屋面、路面和不同城市功能区小流域进行地表径流污染监测, 获取地表径流污染特征^[4~9]。鉴于澳门城市地表径流污染监测数据上的空白和管理上的需要, 本研究遴选 2 个具有代表性的澳门城市小流域进行地表径流监测, 旨在获取澳门城市地表径流的污染特

征, 并为澳门半岛下水道系统和沿岸雨水排放口的污染物预测控制和整治的管理策略提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

在澳门半岛城区选择分流制下水管道类型的 2 个不同土地利用特征的城市小流域: 雅廉访小流域, 面积 13.65hm², 平均坡度 7.8%。商住、住宅区合占 55.2%, 住宅区占 15%, 绿地面积占 34.8%, 其它用地占 10%。不透水率约为 60%。二龙喉小

收稿日期: 2005-12-12; 修订日期: 2006-02-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2003AA601080)

作者简介: 黄金良(1975~), 男, 博士, 主要研究方向为流域及城市非点源污染, E-mail: jlhuang@tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: dupf@tsinghua.edu.cn

流域(公园绿地)是雅廉访小流域的上游,面积 4.67 hm²,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 %。

1.2 监测方案及分析方法

在 2 个小流域出水口所在的雨水井处做工程安置自动采样器(ISCO 6712)。通过调试设定采样频率进行自动采样。自动采样器连接的雨量筒和流量计可同步获取采集每个水样时的雨量、流量数据。

在降雨初始冲刷阶段,自产流起的 30min 内,每隔 5min 自动采 1 个样,30~60min 每 10min 采 1 个样,60~120min,每 30min 采 1 个样。

分析项目包括:pH、浊度、TSS、TN、TP、COD、TOC、Pb、Zn、Cu。该工作由澳门民政总署化验所负责。分析方法参见文献[10]。

1.3 降雨监测情况

2005-08~2005-11 期间共监测了 5 场降雨,各场次降雨特征和采样点位及样品数如表 1 所示。

2 结果与讨论

2.1 城市小流域地表径流水质分析

根据地表径流水质数据,分别统计了二龙喉小

表 1 试验小流域 2005-08~2005-11 期间降雨监测情况

Table 1 Rainfall events monitored during the period of August to November, 2005 in two urban catchments

编号	降雨日期	降雨量 / mm	降雨历时 / min	样品数 / 个	采样地点
1	2005-08-09	7.2	58	10+11	二龙喉、雅廉访
2	2005-08-16	15.2	81	11	雅廉访
3	2005-08-21	3.4	122	12	雅廉访
4	2005-08-24	2.4	80	12	雅廉访
5	2005-11-14	11.4	121	12	雅廉访

流域(公园绿地为主)和雅廉访小流域(商住混合区为主)地表径流中各水质参数的最高值,最低值及算术平均值,并与国家地表水环境质量 Ⅴ 级标准进行了对照,以识别出 2 个土地利用方式不同的城市小流域的主要污染物,见表 2。

由表 2 分析可知,商住混合区为主的雅廉访小流域地表径流 TN、TP、COD 的平均浓度值分别为 8.73 mg/L、1.69 mg/L 和 198.2 mg/L,均超出国家地表水环境 Ⅴ 类标准 4 倍以上。公园绿地为主的二龙喉小流域 TN、TP 的平均浓度值为 4.97 mg/L 和 0.8 mg/L,均超出国家地表水环境 Ⅴ 级标准 2 倍。2 小流域重金属 Zn、Cu、Pb 平均浓度值均较低,都在

表 2 2 个城市小流域地表径流水质特征¹⁾

Table 2 Summary of Surface quality in two urban catchments in Macau

指标	雅廉访小流域(商住混合区为主)	二龙喉小流域(公园绿地为主)	国家地表水环境质量 类标准
pH	7~7.6(7.2)	6.4~7.6(7)	6~9
TSS/ mg L ⁻¹	10~2 600(309.4)	15~904(167.3)	—
Zn/ mg L ⁻¹	0.008~0.185(0.053 7)	0.016~0.059(0.042)	≤2
Pb/ mg L ⁻¹	0.001 1~0.015 3(0.003 2)	0.001 2~0.012 4(0.005)	≤0.1
Cu/ mg L ⁻¹	0.001 4~0.024 8(0.004 9)	0.003 6~0.006 3(0.004 9)	≤1
TOC/ mg L ⁻¹	3.2~159(19.25)	6~96.2(33.1)	—
COD/ mg L ⁻¹	7.3~1274(<u>198.2</u>)	—	≤40
TN/ mg L ⁻¹	0.94~52(<u>8.73</u>)	1.7~16.4(<u>4.97</u>)	≤2
TP/ mg L ⁻¹	0.42~3.78(<u>1.69</u>)	0.08~3.94(<u>0.8</u>)	≤0.4

1) 括号内数字为算术平均值,有下划线的数字为超标

标准范围之内。

雅廉访小流域地表径流 TN 和 TP 的最高浓度达到 52 mg/L 和 3.78 mg/L,分别超出 Ⅴ 类水标准 25 倍和 9 倍以上,地表径流中 TN 和 TP 最高浓度值与最低浓度值二者相差 50 倍和 9 倍以上。二龙喉小流域 TN 和 TP 的最高浓度达 16.4 mg/L 和 3.94 mg/L,分别超 Ⅴ 类水标准的 8 倍和 9 倍以上,地表径流中 TN 和 TP 最高浓度值与最低浓度值二者相差 9 倍和 49 倍以上。这种现象反映了城市地表径流造成的氮磷营养盐流失的严重性。据研究^[11],城市地表径流中 N 污染物的主要来源于草坪花园的化

肥施用、车辆排气等,P 污染物主要来源于水土流失、草坪花园的化肥施用等。二龙喉小流域绿地面积占 70 %以上,其中有部分为覆盖度不高的幼龄苗圃,化肥施用和水土流失是引起该小流域地表径流氮磷平均浓度值较高的原因,尤其是降雨冲刷引起的水土流失是造成 TP 地表径流中最高值与最低值相差甚大的原因所在。由于雅廉访小流域位于其下游,TN 和 TP 值也较高,此外,由于车流量较大,车辆排气带来的氮输入可能是造成雅廉访小流域 TN 最高浓度值较二龙喉小流域大的原因。

TOC 平均浓度在雅廉访和二龙喉小流域分别

为 19.25 mg/L 和 33.1 mg/L, 雅廉访小流域 COD 最高浓度值达 1 274 mg/L, 超标 28 倍以上, 其最低与最高浓度值更是相差近 174 倍, 由于有机污染物主要来源于车辆轮胎损耗等^[11], 雅廉访小流域面积较大, 车流量较大, 据调查统计, 日车流量为 2 万辆左右, 是造成有机污染较为严重的原因之一。

2.2 城市小流域出水口降雨-径流-水质变化规律

2.2.1 降雨-污染物浓度变化规律

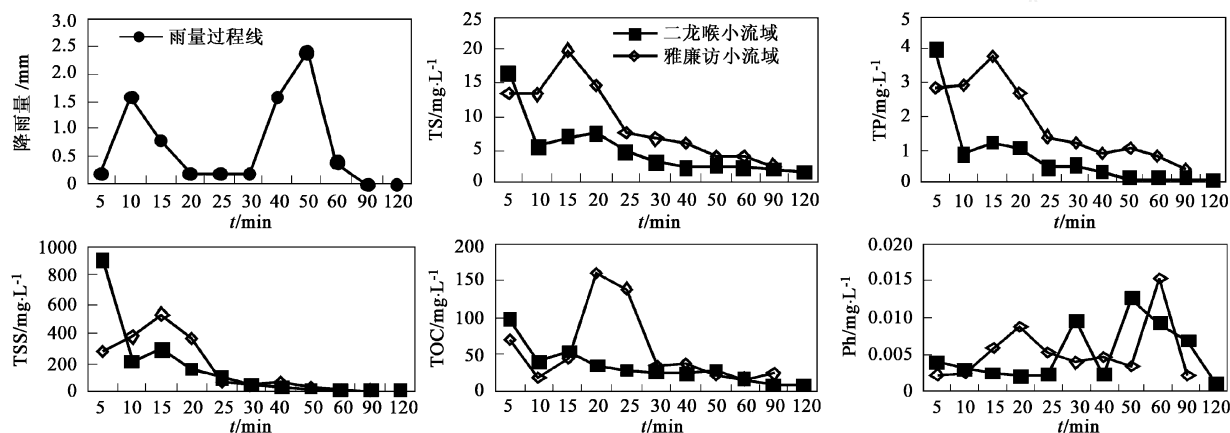


图 1 城市小流域暴雨径流污染物浓度随降雨历时变化(2005-08-09)

Fig. 1 Pollutographs for August 9, 2005 rainfall event in ELH and YLF catchments

变化曲线较为相近. 从 TSS 与 TN、TP 的相关分析表明(见图 2), 其判定系数 R^2 都在 0.95 以上, 进一步证实在 2 个城市小流域内水土流失在总氮总磷输出中的贡献, 尤其是二龙喉公园的 TP 与 TSS 的判定系数 R^2 更是达到 0.98 以上(图 2). 另一方面反映 TN、TP 中多为颗粒态形态的氮磷. 与 Goonetillekea 等的观测结果相近^[9].

2 个小流域重金属 Pb 浓度呈波浪状, 出现 2 个

浓度峰值, 与其它水质参数差异较大. 尤其是二龙喉小流域的第 2 个浓度峰值, 也是瞬间浓度的最高值, 出现在降雨 50min 后, 此时的降雨量也最大. 而雅廉访小流域的第 2 个峰值也即瞬时浓度的最高出现在降雨 60min 后, 稍滞后于雨量峰值. 该现象与降雨特征和流域面积有关. 雅廉访小流域面积较二龙喉小流域大, 产汇流较慢, 因此在雅廉访小流域出现 Pb 浓度峰值滞后于降雨峰值.

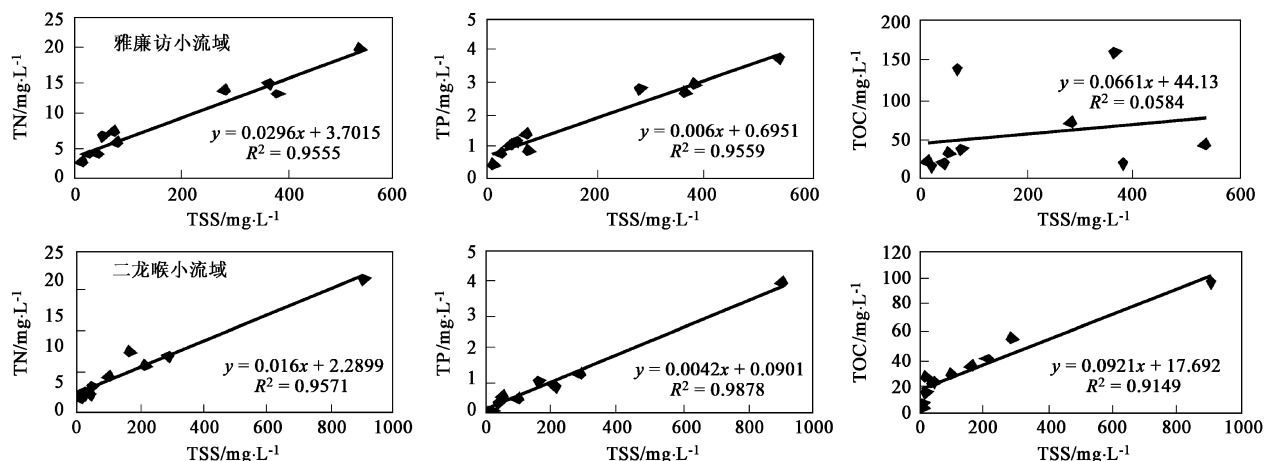


图 2 雅廉访小流域和二龙喉小流域 TSS 与 TN、TP 与 TOC 相关关系分析

Fig. 2 Correlation between TSS and TN, TP and TOC in YLF and ELH catchments

2.2.2 城市地表径流-水质变化一般规律

分别以雅廉访城市小流域 2005-08-21、2005-8-24 和 2005-11-14 3 场降雨-径流过程中的水质变化来阐述水质参数随径流历时变化的一般规律(图 3~5).

TSS(或浊度)与 COD 与径流量的变化过程呈明显的正相关性. 通常 TSS 和 COD 的浓度峰值稍滞后于径流量的峰值. 如图 3 城市小流域地表径流污染物浓度随降雨历时变化(2005-08-21)所示, 15:44~15:53 径流量较大, 15:53 达到径流量峰值, 而 TSS 和 COD 都是在 10:57 达至浓度峰值. 由图 4 可见, 流量峰值出现于 10:17, 而浊度和 COD 浓度峰值出现于 10:20 左右, 稍微滞后于流量峰值. 由图 5 可见, 浊度、TSS、COD 的浓度峰值出现在同一时间(19:25), 稍微滞后于第 1 个流量峰值(19:22

出现).

TN 和 TP 营养盐浓度与流量的相关性不明显, 不会随着不同的流量峰值过程而呈明显的起伏, 通常随径流的末期浓度值渐低, 不管后期是否又出现另一个流量峰值. 这可能与 TN、TP 营养盐在地表中的累积物在初期冲刷较为彻底, 受稀释有关. 一些降雨场次 TN、TP 的第 1 个水样浓度值最大, 后逐渐降低, 呈现初始冲刷的现象. 如 2005-08-21 降雨地表径流中的 TN(图 4)和 2005-11-14 降雨径流中的 TP(图 5).

重金属通常随降雨径流过程呈锯齿状波动(图 3 和图 4). 这可能与重金属 Zn、Pb 和 Cu 除了来源于干期的累积外, 在降雨过程中仍有污染源的持续输入有关. 相关的研究也表明, 重金属主要来源于各种交通工具的磨损物, 如轮胎、刹车垫、车体生锈的

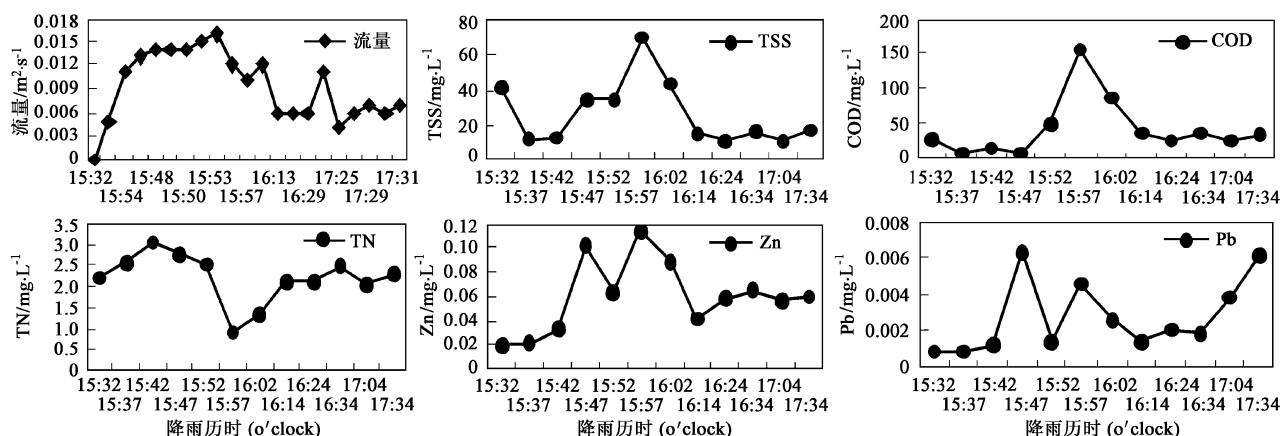


图 3 城市小流域地表径流污染物浓度随降雨历时变化(2005-08-21)

Fig. 3 Pollutographs for August 21, 2005 rainfall event in YLF catchment

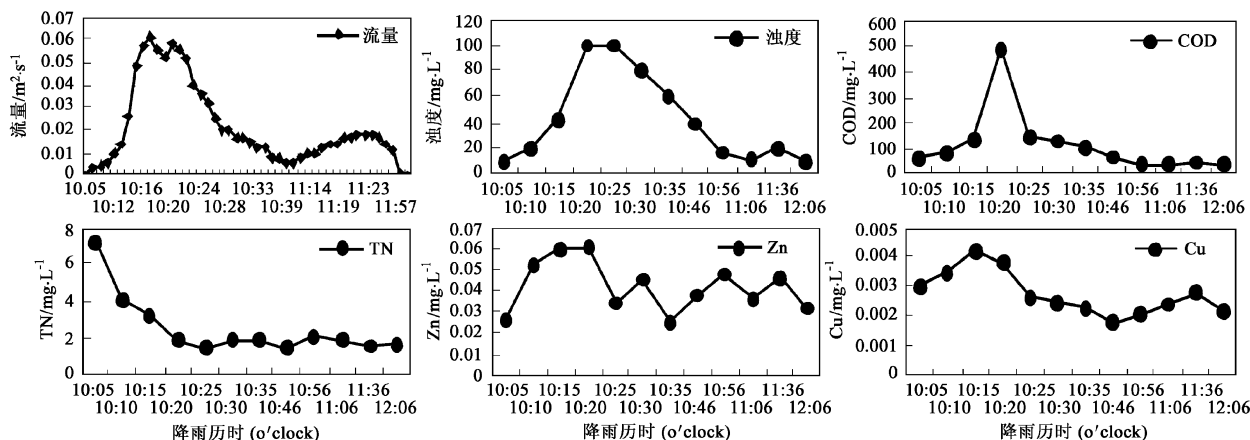


图 4 城市小流域地表径流污染物浓度随降雨历时变化(2005-08-24)

Fig. 4 Pollutographs for August 24, 2005 rainfall event in YLF catchment

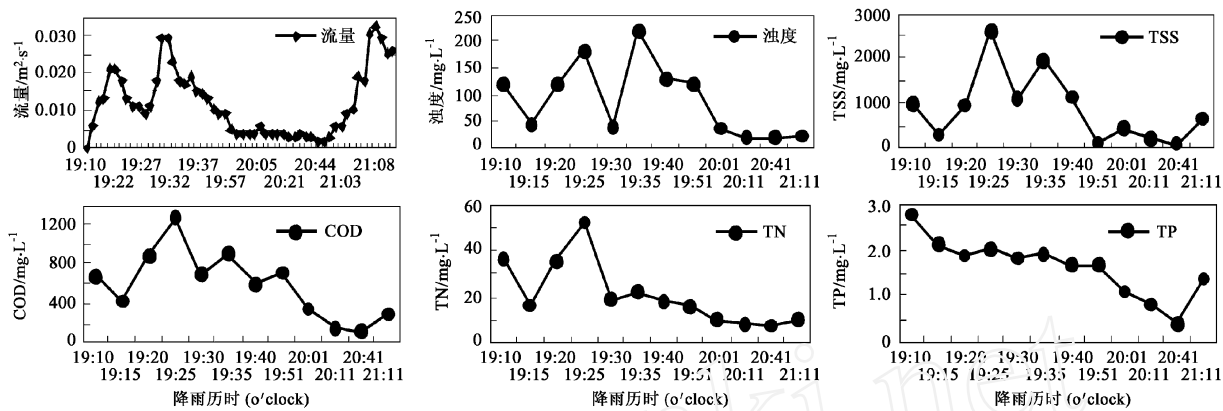


图 5 城市小流域地表径流污染物浓度随降雨历时变化(2005-11-14)
Fig. 5 Pollutographs for November 14, 2005 rainfall event in YLF catchment

锈片、燃料的燃烧物等^[12]。

2.3 不同降雨场次地表径流污染物输出特征的影响因素分析

城市地表径流水质特征取决于累积与冲刷 2 个过程^[13]。具体而言,土地利用、街道清扫情况、干期长度及大气干湿沉降等会影响到降雨地表径流中污

染物的累积过程,而降雨特征(包括降雨强度)、下垫面状况(包括入渗产流状况等)又会影响到污染物的冲刷过程。本文尝试从干期长度、降雨强度、降雨过程中的车流量状况等分析影响不同降雨场次污染物输出特征的因素。根据临近雅廉访小流域的气象监测站逐分钟雨量数据统计各场降雨的雨前情况,见表 3。

表 3 雅廉访小流域监测场次降雨特征¹⁾
Table 3 Characteristic of rainfall events and antecede dry weather period condition in YLF catchment

降雨日期	降雨时段	降雨强度 / mm · min ⁻¹	雨前状况		
			干期长度/ h	干期前一场降雨量/ mm	干期前一场降雨历时/ h
2005-08-09	02:05 ~ 03:30(周二凌晨)	0.12	85.4	2.2	0.07
2005-08-16	01:30 ~ 03:00(周二凌晨)	0.19	16.4	13.6	0.30
2005-08-21	15:32 ~ 17:34(周日下午)	0.03	9.2	64.0	50.40
2005-08-24	10:05 ~ 12:06(周三上午)	0.03	56.7	5.8	3.60
2005-11-14	19:10 ~ 21:11(周一晚上)	0.09	1 072.5	16.6	11.08

1)降雨场次按降雨量不少于 1.27mm,且 1 次降雨过程不得有连续 6h 的零降雨间隔来统计^[14]

从 5 场降雨的干期长度排序看,2005-11-14 降雨的干期为最长,其次为 2005-08-09 和 2005-08-24 降雨场次,干期最短的降雨场次为 2005-08-21 的降雨。从降雨强度看,2005-08-16 降雨为最强,其次是 2005-08-09 和 2005-11-14 降雨,最小的强度是 2005-08-21 和 2005-08-24 的降雨。5 场降雨强度都达到大雨的标准 (≥ 0.017 mm/min),尤其是 2005-08-16、2005-08-09 和 2005-11-14 这 3 场降雨达到暴雨级别 (≥ 50 mm/d, 合计 ≥ 0.034 7 mm/min)。

表 4 列出了经统计的雅廉访小流域 5 场降雨主要污染物的浓度平均值、最大值和最小值。

由表 4 可见,水质参数 TN、TSS 和 COD 浓度

与降雨前的干期长度成正相关。表现在:TN 浓度,降雨场次 2005-11-14 > 2005-08-09 > 2005-08-24 > 2005-08-21; TSS 浓度,降雨场次 2005-11-14 > 2005-08-09 > 2005-08-16 > 2005-08-21; COD 浓度,降雨场次 2005-11-14 > 2005-08-24 > 2005-08-16 > 2005-08-21。相关研究也证实了干期长度与降雨强度是影响城市地表径流水质的重要因素^[15]。

从 4 场降雨 Zn、Pb 和 Cu 重金属浓度情况看,与干期长度并非完全呈正相关,Zn、Pb 和 Cu 的浓度排序依次是:2005-08-09 > 2005-08-21 > 2005-08-24 > 2005-08-16。尽管干期最长的 2005-08-09 降雨的重金属平均浓度及最大浓度值仍在 4 场降雨中最大,但 2005-08-21 降雨干期最短且雨强也小,而 Zn、

表 4 雅廉访小流域不同降雨场次主要水质参数浓度/ mg L^{-1} Table 4 Comparison of major pollutants concentration among five rainfall events in YLF catchment/ mg L^{-1}

降雨日期(样品数)	数值	Zn	Pb	Cu	TSS	TN	COD
2005-08-09 (11)	平均值	0.097	0.005 4	0.008 8	184.9	9.2	—
	最小值	0.050	0.002 1	0.003 9	13.0	2.6	—
	最大值	0.185	0.015 3	0.013 4	536.0	19.7	—
2005-08-16 (11)	平均值	0.016	0.002 5	0.002 5	146.7	—	47.4
	最小值	0.008	0.001 6	0.001 6	22.0	—	26.0
	最大值	0.024	0.004 5	0.004 8	380.0	—	80.0
2005-08-21 (12)	平均值	0.060	0.002 8	0.006 0	26.3	2.2	43.0
	最小值	0.020	0.001 0	0.001 4	10.0	0.9	7.3
	最大值	0.114	0.006 3	0.024 8	71.0	3.1	156.0
2005-08-24 (12)	平均值	0.042	0.001 6	0.002 8	—	2.5	113.5
	最小值	0.026	0.001 1	0.001 8	—	1.4	35.0
	最大值	0.06	0.002 3	0.004 2	—	7.1	486.0
2005-11-14 (12)	平均值	—	—	—	879.7	21.1	588.9
	最小值	—	—	—	78.0	8.0	115.0
	最大值	—	—	—	2 600.0	52.0	1 274.0

Cu 和 Pb 的浓度均值却高于干期较长、雨强较大的 2005-08-24 和 2005-08-16 的降雨,反映了除干期的累积和降雨冲刷以外的因素对地表径流重金属输出的影响。

表 5 为场次降雨相应的降雨时间段进行的车辆调查。由于 2005-08-21 降雨发生于周日下午时段,据调查该段时间(15:32~17:34)的车流量不论是周一、二或周五都高于其它了降雨场次发生的时间段,由于 2005-08-09 和 2005-08-16 降雨发生于凌晨,车流量较少,而 2005-08-24 降雨时段(10:05~12:06)的车流量较 2005-08-21 降雨时段的车流量小,因此,这可能是造成 2005-08-21 尽管干期较短,雨强也较小,但降雨地表径流的重金属平均浓度却较高的原因。

表 5 雅廉访小流域降雨监测场次发生时间段内车辆数调查情况¹⁾

Table 5 Vehicles survey in the specific periods for the YLF catchment

监测 时间	降雨场次发生时间段内车辆数调查情况/ 辆			
	11:00~11:15	15:30~15:45	17:45~17:50	21:00~21:15
周一	147	274	178	174
周三	211	248	122	209
周五	183	341	106	183

1) 本次监测时间分别是 09-05(周一)、09-07(周三)和 09-10(周五)。监测位于雅廉访小流域路口。按不同时间段,每 5min 1 个统计数据,车辆按电单车、中型客车+小型货车、私家车和大型客车+大中型货车进行分别统计

值得注意的是,根据雅廉访小流域垃圾清扫时间、方式的调查发现,每天手工打扫垃圾的时间分别是 02:30,10:00 及 15:30,水车清洗时间是 04:30。

因此,从监测的 5 场降雨时间段看,都在水车清洗之前,受干扰不大。

3 结论

(1) 商住混合分流制小流域 TN、TP、COD 多场降雨平均浓度值分别超出国家地表水环境 V 类标准 4 倍以上,公园绿地小流域 TN、TP 均超出 V 类水标准 2 倍多。

(2) 典型降雨场次污染物浓度历时变化过程表现出初始水样浓度值最高,后逐渐降低的特点,尤其是 TSS、TN、COD 表现更为明显。初期产流的浓度,是地表径流后期的几十倍,说明地表径流水质控制宜针对初期雨水,分流制管道系统应加强对雨水管道中初期雨水的治理控制。从 2 个小流域 TSS 与 TN、TP 的相关分析看,其判定系数 R^2 都在 0.95 以上,说明城市地表径流中水土流失与总氮总磷输出显著相关,表明城市绿地应加强水土保持。

(3) TSS(或浊度)与 COD 与径流量的变化过程呈明显的正相关性。TN 和 TP 营养盐浓度与流量的相关性不明显,不会随着不同的流量峰值过程而呈明显的起伏。重金属受降雨过程中交通流量的影响通常呈锯齿状波动。

(4) 干期长度与降雨强度是影响城市地表径流水质的重要因素,尤其是对于 TSS、TN、COD 水质参数。而重金属浓度除了受这个因素之外,还受降雨过程中车流量输入量的影响。

致谢:感谢澳门民政总署(ICAM)化验所和渠

务处协助分析水样和车流量调查.

参考文献:

- [1] Field R, Pitt R E. Urban storm-induced discharge impacts: US Environmental Protection Agency research program review[J]. Water Science and Technology, 1990, **22**(10/ 11): 1 ~ 7.
- [2] Sartor J D, Boyd G B. Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants [R]. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 1972, EPA-R2-72-081.
- [3] Zabel T, Milne I, Mckay G. Approaches adopted by the European Union and selected Member States for the control of urban pollution[J]. Urban Water, 2001, **3**: 25 ~ 32.
- [4] Chang M, Crowley C M. Preliminary observations on water quality of storm runoff from four selected residential roofs[J]. Water Resource Bulletin, 1993, **29**(5): 777 ~ 783.
- [5] Forster J. Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration[J]. Wat. Sci. Tech., 1996, **33**(6): 39 ~ 48.
- [6] Deletic A B, Maksimovic C T. Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas [J]. Journal of Environmental Engineering, 1998, **124**(9): 869 ~ 879.
- [7] Mertz M C G, Garnaoud S, Gonzalez S, *et al.* Characterization of urban runoff pollution in Paris[J]. Wat. Sci. Tech., 1999, **39**(2): 1 ~ 8.
- [8] Choe J S, Bang K W, Lee L H. Characterization of surface runoff in urban areas[J]. Wat. Sci. Tech., 2002, **45**(9): 249 ~ 254.
- [9] Goonetillekea A, Thomasb E, Gnnic S, *et al.* Understanding the role of land use in urban stormwater quality management [J]. Journal of Environmental Management, 2005, **74**: 31 ~ 42.
- [10] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京:中国环境科学出版社, 2002. 211, 243 ~ 249, 254 ~ 256, 324.
- [11] Whipple W, Grigg S, Gizzard T, *et al.* Stormwater Management in Urbanizing Areas [M]. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1983.
- [12] USEPA. Controlling nonpoint source runoff pollution from roads, highway and bridges[R]. US EPA, Report EPA-841-F-95-008a, 1995.
- [13] Butcher J B. Buildup, washoff, and event mean concentration [J]. Journal of the American Water Association, 2003, **39**(6): 1521 ~ 1528.
- [14] Akan A O. Urban stormwater hydrology [M]. USA: Technomic Publishing Company Inc., 1993.
- [15] Yaziz M I, Guntling H, Sapari N, *et al.* Variations in rainwater quality from roof sewersheds[J]. Wat. Res., 1989, **23**(6): 761 ~ 765.