

黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 2006. 澳门屋面径流特征初步研究 [J]. 环境科学学报, 26(7): 1076 - 1081

Huang J L, Du P F, Ao C T, et al. 2006. Preliminary investigation on characterization of urban roof runoff in Macau [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 26(7): 1076 - 1081

澳门屋面径流特征初步研究

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

收稿日期: 2005-12-07 修回日期: 2006-04-18 录用日期: 2006-04-26

摘要: 在澳门半岛选取 4 个屋面汇水区, 进行降雨屋面径流水样的收集与水质分析, 监测项目包括: pH、浊度、TN、COD_{Cr}、TOC、Zn、Pb、Cu、Fe。研究表明, 生锈铁皮屋的屋面径流水样中 Zn 平均浓度值超出国家地表水 V 类标准的 2 倍以上, TN 和 COD_{Cr} 也超出地表水 V 类标准。屋面材料对屋面径流输出影响显著。从 3 场降雨事件不同屋面材料的径流水质参数的平均浓度值看, Zn 和 Pb 的浓度排序: 铁皮屋面 (严重锈蚀) > 铁皮屋面 (轻度锈蚀) > 铁皮屋 (新油漆) > 混凝土。Pb 浓度排序: 铁皮屋面 (严重锈蚀) > 铁皮屋面 (轻度锈蚀) > 铁皮屋 (新油漆) > 混凝土。而其它水质参数, 如 COD_{Cr}、TOC、TN, 铁皮屋面的浓度值均大于混凝土。屋面径流排污规律和污染物浓度输出具有不确定性, 且受降雨干期长度和降雨强度等因素的综合影响。

关键词: 屋面径流; 铁皮屋; 混凝土屋面; 澳门

文章编号: 0253-2468(2006)07-1076-06 中图分类号: X522 文献标识码: A

Preliminary investigation on characterization of urban roof runoff in Macau

HUANG Jinliang¹, DU Pengfei^{1,*}, AO Chitan², LEI Muiheong³, ZHAO Dongquan¹, HO Manhim³, WANG Zhishi²

1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

2. Faculty of Science and Technology, University of Macau

3. The Official Provisional Municipal Council of Macau

Received 7 December 2005; received in revised form 18 April 2006; accepted 26 April 2006

Abstract: Four roof catchments in the city of Macao were selected for sampling and study. Water quality parameters such as pH, Turbidity, COD_{Cr}, SS, TN, Zn, Pb, Fe and Cu were analyzed. The results obtained show that the average Zinc concentrations in the roof runoff from the galvanized-iron roof is about 2 times of the class V of water quality standard China. Average TN and COD_{Cr} concentration also exceeds the criteria. Based on the water quality analysis from roof runoff in 3 rainfall events, the heavy metals including Zn and Pb are in the following order: galvanized-iron roof (rusted greatly) > galvanized-iron roof (rusted slightly) > galvanized-iron roof (new installed) > concrete roof. From the pollutographs analysis, the roof runoff discharge shows great uncertainties which depends on the length of dry weather period and storm intensity.

Keywords: roof runoff; galvanized-iron roof; concrete roof; Macau

在城市中城区屋面通常占城市不透水区的 50% 以上。屋面材料包括金属、有机物、着色剂、防潮物等, 大气干湿沉降等因素的共同作用使得屋面径流成为一种潜在的非点源污染源 (Chang *et al*, 2004)。据 Chebbo 和 Grammaire (2004) 对巴黎 “Le

Marais” 一个合流制的城市汇水区的监测研究发现, 雨期中汇水区出口径流中的重金属 Cd、Pb、Zn 主要源自于屋面径流。屋面径流是城市重金属污染的主要来源之一, 易引发城市接纳水体的水质恶化。20 世纪 80 年代末以来, 马来西亚、澳大利亚、美国、德

基金项目: 国家 “863 重大科技专项 (No. 2003AA601080)

Supported by the Key Project of National “863” Program (No. 2003AA601080)

作者简介: 黄金良 (1975—), 男, 博士, E-mail: jlhuan@tsinghua.edu.cn; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: dupf@tsinghua.edu.cn

Biography: HUANG Jinliang (1975—), male, Ph. D., E-mail: jlhuan@tsinghua.edu.cn; * Corresponding author, E-mail: dupf@tsinghua.edu.cn

国、法国等国家开展了大量的屋面径流水质监测研究. 研究内容大致包括屋面径流污染物初始冲刷现象 (Yaziz *et al*, 1989; Forster, 1996)、不同屋面材料屋面的径流水质特征 (Yaziz *et al*, 1989; Forster, 1996; Chang *et al*, 1993; Quek *et al*, 1993; Forster, 1999)、以及不同城市功能区屋面汇水区水质特征 (Thomas *et al*, 1993)等. 我国的相关研究起步较晚,近年来在北京和上海城区陆续开展了屋面径流水质特征的研究 (车武等, 2001; 王和意等, 2005). 鉴于尚未开展澳门城市屋面径流水质特征的调查研究,本研究在澳门半岛遴选典型屋面汇水区进行监测分析,以期识别澳门屋面径流水质特征和排污特性.

1 研究材料与方法 (Materials and methods)

1.1 采样点位

澳门主要的屋面类型有 2 种:铁皮屋和混凝土. 其中铁皮屋面约占澳门半岛屋顶的 60%以上. 由于澳门临海,潮湿的海风及湿润多雨的气候条件使得铁皮屋面易于生锈,因此又根据生锈程度的不同,在澳门民政总署渠务处选择 3 处铁皮屋,分别是使

用 10 a 锈蚀严重的铁皮屋面 (铁皮屋 A)、使用 5 a 轻度锈蚀 (铁皮屋 B) 的铁皮屋面以及新安置的新油漆的铁皮屋面 (铁皮屋 C). 另外,选取混凝土屋面 1 处. 这些屋面汇水区所在的区域附近为商住混合区,无工业活动.

1.2 监测方案

通过工程措施在屋顶雨水导管处制作一个收集雨水的开关,降雨形成径流后将此开关打开并通过采样仪器接收水样,每个水样量为 100mL. 视降雨情况,在降雨初始冲刷阶段,即降雨后的 60min 内,每隔 5 ~ 10min 采一个样,60 ~ 120min,每隔 30min 采一个样.

1.3 监测项目分析方法

分析项目包括: pH、浊度、TN、TOC、COD_{Cr}、Pb、Zn、Fe. 该工作由澳门民政总署化验所负责. 分析方法根据《水和废水监测分析方法》(第四版)的标准方法 (SEPA, 2002).

1.4 采样时间及降雨特征

在 2005 年共进行了 3 场降雨的屋面径流水质监测. 降雨与采样情况见表 1.

表 1 屋面降雨监测情况

Table 1 Three rainfall events monitored in roofs catchments

降雨时间	持续时间 /min	雨强 / (mm · min ⁻¹)	采样数 / 个			
			铁皮屋 A	铁皮屋 B	铁皮屋 C	混凝土屋
2005-06-14	40	0.045 (大雨)	7	7	/	/
2005-07-21	70	0.066 (暴雨)	9	9	8	/
2005-08-21	61	0.290 (暴雨)	7	7	7	6

2 结果 (Results)

2.1 屋面径流水质特征

对 3 场降雨所获得的水质监测数据进行分析,

分别统计了铁皮屋 A、铁皮屋 B、铁皮屋 C 和混凝土屋面径流算术平均值,并与国家地表水环境质量 V 级标准进行了对照,结果见表 2.

表 2 屋面径流水质参数浓度基本情况

Table 2 Basic description of water parameters from roof runoff

降雨时间	屋面材料	样品数	pH	浊度 / NTU	Zn / (mg · L ⁻¹)	Pb / (mg · L ⁻¹)	TOC / (mg · L ⁻¹)	COD _{Cr} / (mg · L ⁻¹)	TN / (mg · L ⁻¹)
2005-06-14	铁皮屋 A	7	6.9	—	10.799	0.0030	9.24	—	1.97
	铁皮屋 B	7	6.8	—	6.899	0.0081	9.19	—	2.19
2005-07-21	雨水	1	4.2	5.37	0.150	0.0114	4.90	16.00	1.60
	铁皮屋 A	9	6.9	11.10	10.966	0.0242	17.58	48.52	3.46
	铁皮屋 B	9	6.8	5.38	6.424	0.0111	11.87	52.33	3.67
	混凝土屋面	8	7.8	4.86	0.029	0.0067	6.51	12.75	2.08

续表

降雨时间	屋面材料	样品数	pH	浊度 / NTU	Zn/ (mg·L ⁻¹)	Pb/ (mg·L ⁻¹)	TOC/ (mg·L ⁻¹)	COD _{Cr} / (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)
2005-08-17	铁皮屋 A	7	6.8	2.24	2.089	0.0060	—	<2.00	—
	铁皮屋 B	7	6.9	0.79	1.496	0.0032	—	10.33	—
	混凝土屋面	7	8.4	0.75	<0.005	0.0027	—	11.75	—
	铁皮屋 C	6	7.4	1.26	0.050	0.0050	—	<2.00	—
3场降雨平均值	铁皮屋 A	26	6.9	6.67	7.951	0.0201	13.41	48.52	2.72
	铁皮屋 B	26	6.8	3.09	4.937	0.0075	10.53	31.33	2.93
	混凝土屋面	15	8.1	2.81	0.029	0.0047	6.51	12.25	—
	铁皮屋 C	6	7.4	1.26	0.050	0.0050	—	<2.00	2.08
V类水标准	/	/	6~9	—	2	0.1	1	—	45

注:铁皮屋 A、B、C分别表示严重锈蚀、轻度锈蚀和新油漆的铁皮屋。

2.1.1 pH值 铁皮屋 A、B处屋面径流中 pH值差别不大,3场降雨 pH值平均值都在 6.8左右。混凝土屋面汇水区的 2场降雨 pH值平均值分别为 7.8和 8.4,远高于铁皮屋面汇水区。2005-07-21降雨事件的雨水样 pH值为 4.2,呈强酸性。

2.1.2 重金属 屋面径流中铁皮屋的 Zn平均浓度值是混凝土屋面的 300倍以上,超出国家地表水 V类标准的 2倍以上,是屋面径流最主要的污染物。

屋面径流中的重金属浓度在 3场降雨中变幅较大。其中 Zn的浓度,从后两场降雨看,生锈严重的铁皮屋面径流中的 Zn浓度较高。铁皮屋面径流中的 Zn平均浓度值远高于混凝土。2005-08-17降雨铁皮屋 C的 Zn浓度值为 0.005 mg·L⁻¹,低于其它铁皮屋,但仍高于混凝土屋面径流。空白雨水混合样的 Zn浓度为 0.15 mg·L⁻¹,低于同一场降雨中铁皮屋的值,但高于混凝土。严重锈蚀的铁皮屋面径流 Pb浓度平均值较高。空白雨水混合样的 Pb浓度为 0.0114 mg·L⁻¹,仅低于同一场降雨中严重锈蚀的铁皮屋,但高于混凝土和轻度锈蚀的铁皮屋的值。

2.1.3 有机污染物 由 2场降雨屋面径流水质的 TOC看,第一场降雨铁皮屋 A与铁皮屋 B的屋面径流 TOC平均浓度值相差不大。总体上讲,屋面径流中铁皮屋的 TOC高于混凝土。空白雨水样中的 COD_{Cr}值为 16 mg·L⁻¹,高于混凝土。铁皮屋面 COD_{Cr}平均浓度是混凝土的 3倍左右,超出了地表水 V类水标准。

2.1.4 营养盐 从测定的 2场降雨屋面径流中的 TN浓度看,混凝土屋面的 TN值低于铁皮屋。不同屋面径流水质中的 TN均超出国家地表水 V类

标准。

表 2列出不同材料的屋面径流(3场降雨)浓度算术平均值。由表 2可见,3场降雨中不同材料屋面径流的 Zn和 Pb浓度排序:铁皮屋面 A(严重锈蚀) >铁皮屋面 B(轻度锈蚀) >铁皮屋 C(新油漆) >混凝土。而其它污染物如 COD_{Cr}、TOC、TN,铁皮屋面径流的浓度值大于混凝土。但 2种生锈程度不同的铁皮屋面污染物浓度有别,铁皮屋 A TOC和 COD_{Cr}大于铁皮屋 B,铁皮屋 B TN稍大于铁皮屋 A。

2.2 屋面径流水质历时变化

图 1为 2005-06-14、2005-07-21和 2005-08-17 3个降雨事件铁皮屋 A与 B屋面径流浊度、Zn、Pb、TN等主要水质参数随降雨历时变化过程曲线。由图 1可见,3场降雨事件污染物浓度过程曲线存在较大差异。

2005-06-14降雨事件 Zn、TN存在随降雨历时浓度逐渐下降的趋势。Pb浓度具有起伏的特点,尤其是铁皮屋 A的第三个水样 Pb浓度达最高值,然后浓度迅速回落并持续下降。

由 2005-07-21降雨事件铁皮屋 A与 B、混凝土屋面径流水质随降雨历时变化过程曲线看,铁皮屋 A的浊度远高于铁皮屋 B和混凝土,反映降雨冲刷下生锈的铁皮屋受冲刷剥蚀较为严重。Zn也具有这种趋势,屋面径流中铁皮屋 A Zn浓度高于铁皮屋 B,远高于混凝土。

由 2005-08-17的降雨屋面径流看,铁皮屋 A Zn浓度明显高于铁皮屋 B,远高于混凝土和新油漆的铁皮屋 C。铁皮屋 A的浊度与 Pb随径流历时变化过程线相近。

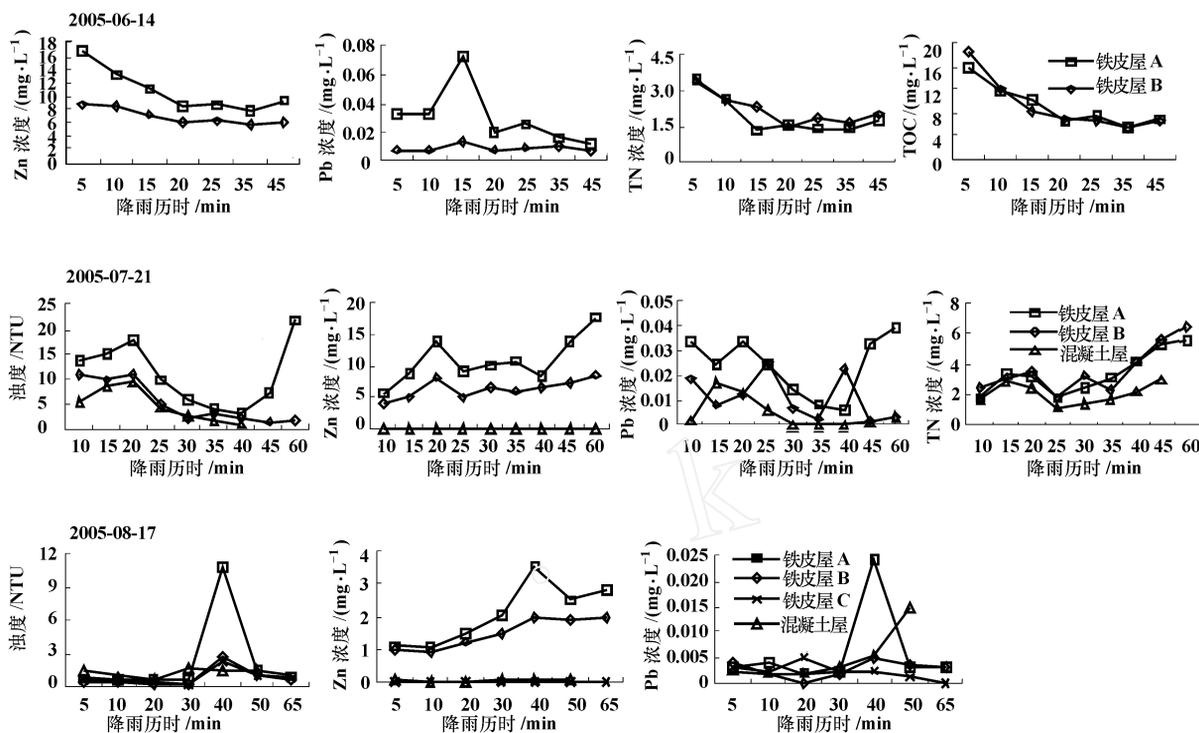


图 1 3场降雨事件屋面径流污染物浓度随降雨历时变化

Fig 1 Pollutographs for 3 rainfall events in roof catchments

3 讨论与分析 (Discussion and analysis)

3.1 屋面径流水质的影响因素分析

3.1.1 屋面材料对屋面径流水质的影响 屋面径流水质受屋面材料等因素的影响 (Diamont, 1982). 尽管本研究中仅有 3 场降雨数据,但仍可看出不同屋面材料对降雨屋面径流水质影响显著.从不同生锈程度的铁皮屋面径流中重金属 Zn、Pb 的平均浓度看,严重锈蚀的铁皮屋要高于轻度锈蚀和新油漆的铁皮屋,这与铁皮屋面材料中重金属流失有关. Chang等 (2004) 研究认为屋面径流中的 Zn 源自于铁皮屋顶水槽、焊接物、大气干沉降中的气溶胶等. 这直接导致铁皮屋面径流中的 Zn 浓度高于混凝土 1 至 2 个数量级. Forster (1996) 在德国 Bayreuth 市的屋面径流也有类似观测结果. Thomas 和 Greene (1993) 在澳大利亚对城区铁皮屋和混凝土屋面的观测结果与本观测结果相近. 而 Yaziz 等 (1989) 在马来西亚来的研究也发现,铁皮屋面径流中的 Zn 浓度高于砖瓦屋面径流含量的 5 倍.

从不同屋面径流的 pH 值来看,混凝土屋面径流的 pH 值呈碱性,高于铁皮屋面. Quek 和 Forster

的 (1993) 研究也发现了类似现象,认为这是由于混凝土屋面材料中的碳酸钙在降雨过程中溶解的缘故.

表 3 为中国北京、法国巴黎、马来西亚雪兰莪州和美国德克萨斯州观测的屋面径流水质. 从表 3 可以看出,城市不同屋面材料重金属浓度差别较大. 通过与表 2 中澳门 4 种屋面类型 3 场降雨的屋面径流重金属平均浓度对比发现,澳门生锈铁皮屋的 Zn 浓度均值低于美国德州,但高于其它的城市,而 Pb 浓度低于其它城市. 从铁皮屋面径流中 Zn 浓度看,除马来西亚之外,其它地区都存在超标现象,说明铁皮屋使用所引发的降雨时屋面径流中的重金属 Zn 等超标,是较为普遍的问题,应该引起足够的重视.

3.1.2 酸雨与屋面径流水质 据测定,2005-07-21 降雨事件雨水的 pH 值仅为 4.2,呈强酸性. 这种现象并非偶然,据澳门半岛九澳气象监测站观测,2002 年监测的降雨仅有一场 pH 均大于 7,其余 18 场 pH 值均小于 7,其中 pH 5 的降雨达 14 场,持续天数为 87 d 而酸雨与铁皮屋重金属的流失具有相当的联系. 据研究 (WHO, 2004),酸雨会导致

表 3 其它城市屋面径流重金属浓度均值

Table 3 Mean concentration of heavy metals from roof runoff in other cities

地点	材料	Zn / (mg·L ⁻¹)	Pb / (mg·L ⁻¹)
北京	瓦屋片	1.11	0.09
	沥青油毡屋面	0.93	0.08
美国德州	铁皮屋 (均值)	11.788	0.049
法国巴黎	由粘土瓦片、锌片等 4种屋面材料统计而得	3.422	0.493
马来西亚	铁皮屋 (第一个水样均值)	0.343	0.235

数据来源: 北京 (车武等, 2002); 美国德州 (Chang *et al.*, 2004); 法国巴黎 (Gromaire *et al.*, 1999); 马来西亚雪兰莪州 (Yaziz *et al.*, 1989).

铁皮屋面的 Zn 淋失, 随着 pH 值的下降, 径流中的 Zn、Pb、Fe 浓度具有上升的趋势. 澳门半岛铁皮屋面径流中含有高浓度的 Zn 是酸雨与铁皮材料中 Zn 淋失共同作用的结果. 据调查, 澳门半岛有 60% 左右的屋面材料为铁皮屋, 应加强控制铁皮材料在屋顶的使用.

3.1.3 降雨状况对屋面径流水质的影响 表 4 为屋面汇水区 3 场降雨的特征及雨前情况. 从 3 场降雨看, 2005-07-21 降雨场次干期长度最长, 2005-08-17 降雨场次雨强最大但干期最短 (表 4). 对照表 1 的观测结果, 2005-06-14 和 2005-07-21 2 场降雨事件的铁皮屋面径流中的 Zn 浓度相当, 但远高于 2005-08-17 降雨场次. 混凝土 2005-07-21 降雨事件的 Zn 平均浓度也远高于 2005-08-17 降雨场次. 另外, 2005-07-21 降雨场次屋面径流 Pb 浓度也多高于另外 2 场降雨 (2005-06-14 降雨铁皮屋除外), 反映了干期长度对屋面径流水质具有显著影响. 受监测降雨场次所限, 本研究中降雨强度对屋面径流的影响不明显.

表 4 屋面汇水区监测场次降雨特征和雨前状况

Table 4 Characteristic of rainfall events in roof catchments and antecedent dry weather period condition

降雨场次	降雨强度 / (mm·min ⁻¹)	雨前情况	
		干期长度 / h	干期前一场降 雨量 /mm
2005-06-14	0.045	23.83	6.4
2005-07-21	0.066	310	5.8
2005-08-17	0.290	11	3.6

3.2 屋面径流排污规律

从 3 场降雨屋面径流污染物随降雨历时变化过程线看, 屋面径流排污规律具有较大的不确定性, 2005-06-14 降雨事件中屋面各种水质参数普

遍随降雨历时而下降, 而另外两场降雨波度却起伏较大. Yaziz 等 (1989) 也有类以观测, 据其研究, 多种污染物在降雨初期采集的屋面径流水样中浓度最高, 然后开始降低, 而 Pb 和 Zn 例外, 存在浓度起伏的现象. 本次研究结果与车武等人 (2001) 在北京的观测结果有些差别, 据其观测, 不同降雨场次 COD_{Cr} 都存在随降雨历时递减的趋势. 而 Forster (1996) 在德国 Bayreuth 市进行屋顶径流试验表明, 重金属等水质参数降雨初始阶段污染物浓度高, 随后渐低 (初始冲刷现象), 并且该模式较典型. 因此, 屋面径流的排污规律尚需进一步研究.

4 结论 (Conclusions)

1) 铁皮屋面径流中 Zn 平均浓度值是混凝土屋的 400 倍以上, 超出国家地表水 V 类标准的 2 倍以上, 为屋面径流最主要的污染物. 铁皮屋面径流中 COD_{Cr} 平均浓度是混凝土的 3 倍左右, 并超出地表水 V 类标准.

2) 屋面材料对屋面径流输出影响显著. 从 3 场降雨不同材料屋面径流水质参数的平均浓度看, Zn 和 Pb 的浓度排序: 铁皮屋面 (严重锈蚀) > 铁皮屋面 (轻度锈蚀) > 铁皮屋 (新油漆) > 混凝土. 而其它水质参数如 COD_{Cr}、TOC、TN, 铁皮屋面径流的浓度值均大于混凝土.

3) 屋面径流污染物浓度输出具有不确定性, 是受降雨干期长度和降雨强度等因素的综合影响.

References:

- Chang M, Crowley CM. 1993. Preliminary observations on water quality of storm runoff from four selected residential roofs [J]. Water Resource Bulletin, 29 (5): 777—783

- Chang M, McBroom M W, Beasley R S. 2004. Roofing as a source of nonpoint water pollution [J]. *Journal of Environmental Management*, 73: 307—315
- Chebbo G, Gromaire M C. 2004. The experimental urban catchment 'Le Marais' in Paris: what lessons can be learned from it? [J]. *Journal of Hydrology*, 299: 312—323
- Che W, Liu Y, Li J. 2002. Research progress on urban rainwater quality and its control [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 29 (10): 38—41 (in Chinese)
- Che W, Liu H, Wang H Z, *et al*. 2001. Research on roof runoff pollution and its utility in Beijing city [J]. *China Water & Wastewater*, 17 (6): 57—61 (in Chinese)
- Diamond B Z. 1982. Roof catchments: The appropriate safe drinking water technology for developing countries [C]. Hawaii: Proceedings of the International Conference on Rainwater Cistern Systems
- Forster J. 1996. Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration [J]. *Water Science and Technology*, 33 (6): 39—48
- Forster J. 1999. Variation of roof runoff quality [J]. *Water Science and Technology*, 39 (5): 137—144
- Gromaire M C, Gamaud S, Gonzalez A, *et al*. 1999. Characterization of urban runoff pollution in Paris [J]. *Water Science and Technology*, 39 (2): 1—8
- Quek U, Forster J. 1999. Trace metals in roof runoff [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, 68: 373—389
- State Environmental Protection Administration of China. 2002. Methods of Monitoring and analyzing for Water and wastewater [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 243—246, 254—255, 276—279 (in Chinese)
- Thomas P R, Greene G R. 1993. Rainwater quality from different roof catchments [J]. *Water Science and Technology*, 28 (3 - 5): 291—299
- Wang H Y, Liu M, Liu H, *et al*. 2005. Primary research on pollution of urban roof runoff [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 14 (3): 367—371 (in Chinese)
- World Health Organization. 2004. *Guidelines for Drinking - water Quality* (Third edition) [S]. Geneva: WHO, 335, 392, 414
- Yaziz M I, Guntung H, Sapari N, *et al*. 1989. Variations in rainwater quality from roof catchments [J]. *Water Research*, 23 (6): 761—765

中文参考文献:

- 车武, 刘红, 汪慧贞, 等. 2001. 北京市屋面雨水污染及利用研究 [J]. *中国给水排水*, 17 (6): 57—61
- 车武, 刘燕, 李俊奇. 2002. 国内外城市雨水水质及污染控制 [J]. *给水排水*, 29 (10): 38—41
- 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法编委会》. 2002. *水和废水监测分析方法 (第四版)* [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 243—246, 254—255, 276—279
- 王和意, 刘敏, 刘华林, 等. 2005. 城市降雨屋面径流污染分析和控制 [J]. *长江流域资源与环境*, 14 (3): 367—371