

任玉芬, 王效科, 欧阳志云, 等. 2006. 沥青油毡屋面降雨径流污染物浓度历时变化研究 [J]. 环境科学学报, 26(4): 601-606

Ren Y F, Wang X K, OUYang Z Y, et al. 2006. Research on variations of asphalt felt roof runoff pollutant concentrations during the rainfall [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 26(4): 601-606

沥青油毡屋面降雨径流污染物浓度历时变化研究

任玉芬^{1,2}, 王效科^{1*}, 欧阳志云¹, 苗 鸿¹, 郑 华¹

1 中国科学院生态环境研究中心系统生态国家重点实验室, 北京 100085

2 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454000

收稿日期: 2005-09-20 修回日期: 2006-02-27 录用日期: 2006-02-27

摘要: 城市面源污染是我国水环境质量恶化的重要原因之一。屋面是城市下垫面的主要组成部分, 因而屋面暴雨径流污染成为城市面源污染的重要来源。以北京市典型的文教区为例, 在 2004 年对沥青油毡屋面径流水质进行了为期 4 个月的监测, 指标包括 pH、SS、COD、TN、TP、BOD₅ 及 Cu、Cr、Zn、Cd 和 Pb 等重金属。监测结果表明, 屋面径流水质污染比较严重, COD、TN 和 BOD₅ 均值一般都超过地表水环境质量 V 级标准; 屋面初期径流污染物浓度大, 随着降雨历时的延长, COD、TN、TP、BOD₅ 及 SS 的浓度大幅度下降; 污染物的起始浓度以及浓度达到稳定所需的时间随雨前晴天数的不同而有较大变化。屋面暴雨径流中的重金属浓度在整个降雨过程中均较低, 而且随降雨历时的延长, 其浓度变化较小。

关键词: 沥青油毡; 屋面径流; 径流水质; 雨前晴天数

文章编号: 0253-2468(2006)04-0601-06 中图分类号: X52 文献标识码: A

Research on variations of asphalt felt roof runoff pollutant concentrations during the rainfall

REN Yufen^{1,2}, WANG Xiaoke^{1*}, OUYANG Zhijun¹, MIAO Hong¹, ZHENG Hua¹

1 State Key Laboratory of Systems Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

2 College of Resource & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000

Received 20 September 2005 received in revised form 27 February 2006 accepted 27 February 2006

Abstract Diffuse pollution is one of the important sources that cause the deterioration of water quality in city. Roof runoff is an important source of the diffuse pollution; therefore roof runoff pollution becomes the significant source of urban diffuse pollution. Four months asphalt felt roof runoff quality monitoring was carried during 2004 in Beijing's typical educational district, where indices included pH, suspended solids (SS), chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), biochemical oxygen demand (BOD₅), and heavy metals. The results showed that roof runoff was heavily polluted and the average concentrations of COD, TN and BOD₅ all exceeded the fifth level of the environmental quality standards for China. Concentrations of pollutants in initial flush were very high, but they descended sharply after a period of flushing. The initial concentrations of pollutants varied with different dry days before rain, as well as the time it took to reach the stable value. Heavy metal contents were all very low and they didn't change much all through the rainfall event.

Keywords asphalt felt roof runoff; runoff quality; dry Days before Rain

面源污染是相对于点源污染而言的一种水环境污染类型, 是指溶解的和固体的污染物从非特定的地点在降水(或融雪)的冲刷作用下, 通过径流过程而汇入受纳水体(包括河流、湖泊、水库和海湾等), 引起水体的富营养化或其它形式的污染

(Nisbet 2001; Ahn, 1990; Line 1998)。当点源污染得到有效控制后, 面源污染显得十分突出, 成为城市水质恶化的主要原因之一 (Brezonik, 2002)。其中屋面径流是城市面源污染的重要组成部分, 屋面上累积的污染物质在雨水的冲刷下进入屋面径流

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (NO. KZCX3-SW-424); 国家“十五”重大科技攻关项目 (NO. 2002AA601022)

Supported by the Key program of the Chinese Academy of Sciences (NO. KZCX3-SW-424); The national key scientific and technological project in the 10th Five Year Plan (NO. 2002AA601022)

作者简介: 任玉芬 (1978-), 女, 博士研究生, E-mail: 200418004215005@rces.ac.cn * 通讯作者 (责任作者)

Biography: REN Yufen (1978-), female Ph.D. candidate, E-mail: 200418004215005@rces.ac.cn * Corresponding author

(Buechi 1997; 1998a; 1998b), 对城市水环境产生威胁, 因此有必要对城市屋面径流污染进行深入研究.

关于屋面径流污染, 国内外已有不少研究, 法国 Grimaire等 (1999; 2001)对“Marais”集水区的屋面径流水质进行了监测, 分析了屋面雨水径流对下水道总出水水质的影响, 发现屋面径流中重金属的影响要大于 COD、BOD₅和 SS. Chang等 (1993; 2004)认为屋面径流的 Zn和 Cu的污染已经超过美国环保局的水环境质量标准, 超标率分别为 100%和 60%. 车武等 (2001)的研究结果显示在屋面径流中污染物主要是 COD和 SS、TN、TP、重金属、无机盐等污染物浓度则较低.

已有的研究主要针对屋面径流的总体污染程度, 而对污染物随降雨历时变化的研究较少, 只有车武等对北京市屋面 COD和 SS随降雨历时的变化做过相关研究 (2002). 本文对北京典型文教区的沥青油毡屋面 (北京市建筑物目前大多采用沥青油毡作为防水材料)径流水质进行监测, 确定屋面径流的污染程度以及径流水质随降雨历时的变化, 重点分析雨前晴天数对屋面径流水质的影响, 为城市水污染治理和决策提供基础数据和科学依据.

1 材料和方法 (Materials and methods)

1.1 样品采集

屋面径流水样的采集地点是北京中国科学院生态环境研究中心. 设 3个采样点, 其中综合楼顶 1个, 化工楼顶南北两侧各 1个. 化工楼顶层的采样点收集整场降雨的混合样品, 综合楼顶层采样点收集每场降雨在不同降雨时段屋面径流的雨水样品. 屋面材料为沥青油毡, 它使用价值高且防水性能优异, 但其含有大量的污染物质, 在夏天高温多雨的情况下会大量析出.

径流混合样品的收集方法: 在楼顶雨水管道出水口处放置储水箱, 收集楼顶流出的屋面径流, 在储水箱的底部侧面接一个出水管, 并在出水管上安装有水表和侧流管, 分别用来记录流量和收集样品 (侧流管较细, 可以等比例收集出水管中每时段的屋面径流, 保证该样品能代表全降雨过程的平均情况), 每次样品采集量约为 2 L; 综合楼顶层径流采样使用连续自动进样装置, 收集从楼顶下水管流出的屋面径流, 从产流开始按照不同的降雨时段约每 5 min采样一次, 每个样品采样体积为 1 L. 样品采集后立即进行分析. 各场降雨的降雨历时、降雨量及采样数如表 1所示.

表 1 屋面径流采样频次 (2004)

Table 1 Frequency of roof runoff sampling

日期	降雨历时 /h	降雨量 /mm	样品数	日期	降雨历时 /h	降雨量 /mm	样品数
6.16	1.5	20	12	7.18	0.5	5	16
6.24	2.0	20	11	7.20	0.07	5	18
6.30	2.0	11	19	7.21	0.5	25	14
7.01	1.5	10	15	7.29	4.5	74	19
7.03	1.5	10	15	8.09	1.25	24	13
7.04	2.0	15	18	8.12	7.0	29	14
7.07	2.0	5	14	8.27	1.5	42	17
7.08	2.0	5	17	9.06	1.0	5	15
7.10	3.5	50	18	9.15	6.0	14	15
7.11	5.5	25	17				

1.2 样品分析

水样监测指标包括 pH、SS、COD、TN、TP、BOD₅和重金属 (Cu、Cr、Zn、Pb和 Cd)等. 样品分析方法: pH值采用玻璃电极法 (GB6920-86), COD为重铬酸钾法 (GB 11914-89), TN为过硫酸钾氧化-紫外分光光度法 (GB11894-89), TP为钼酸铵分

光光度法 (GB11893-89), BOD₅为稀释接种法 (GB7488-87), SS为 0.45 μm滤膜过滤 (103~105)°C烘干称重 (GB11901-89), 溶解态重金属的测定采用 ICP-OES和 ICP-MS法. 分析中所用试剂均为分析纯, 标样测定结果均在允许误差范围之内, 各种污染物的浓度分别与地表水环境质量标准

(GB3838-2002)对比得出其污染水平.

2 结果与分析 (Results and analysis)

2.1 屋面径流污染

2.1.1 pH、SS、TN、TP、COD及BOD₅污染

全部降雨过程中污染物的月平均值见表2. 屋面径流pH的范围是4.60~8.85. 6~9月COD平均值

分别超过地表水环境质量V级标准(40 mg L⁻¹)的7.2、2.1、2.0、4.2倍; TN平均值均严重超过V级标准(2 mg L⁻¹); BOD₅平均值分别超过地表水环境质量V级标准(10 mg L⁻¹)的1.8、0.7、0.6、1.1倍; TP含量较低, 仅6月份(0.7 mg L⁻¹)略超V级标准(0.4 mg L⁻¹); SS含量除9月较低外, 一般含量都较高, 说明屋面径流主要是SS、COD、BOD₅、TN污染.

表2 屋面径流的测定结果(2004)

Table 2 Testing results of roof runoff

月份	pH	COD (mg L ⁻¹)	TN (mg L ⁻¹)	TP (mg L ⁻¹)	BOD ₅ (mg L ⁻¹)	SS (mg L ⁻¹)
6	6.28~8.85 (7.83)	98.00~1990.00 (327.21)	2.80~109.00 (15.19)	0.06~4.00 (0.70)	3.00~91.00 (28.30)	9.00~236.00 (70.04)
7	5.68~8.81 (7.27)	0.20~1060.00 (122.90)	1.0~38.00 (6.66)	0.01~1.00 (0.14)	0.50~146 (17.32)	0.50~1073.00 (162.45)
8	4.60~7.74 (7.26)	0.20~508.00 (118.77)	2.0~26.00 (10.56)	0.01~2.53 (0.23)	1.10~56.50 (15.65)	0.50~379.00 (84.43)
9	6.79~7.88 (7.44)	64.00~1837.00 (206.51)	2.0~90.00 (10.08)	0.01~1.18 (0.28)	10.00~63.00 (20.87)	0.50~134.00 (32.63)

注: 括号内为均值

2.1.2 重金属污染

对屋面径流的重金属含量进行了两次监测(6

月30日和7月1日), 溶解态的Cu、Cr、Zn、Cd和Pb的平均含量很低, 均不超标(表3).

表3 屋面径流溶解态重金属污染状况

Table 3 Soluble heavy metal content of roof runoff

重金属	Cu (mg L ⁻¹)	Cr (mg L ⁻¹)	Zn (mg L ⁻¹)	Cd (μg L ⁻¹)	Pb (μg L ⁻¹)
浓度范围	0.0004~0.0420	0.0003~0.0063	0.0200~0.2300	0.0740~2.1800	0.7300~76.7900
均值	0.0120	0.0013	0.0630	0.6890	16.5550

注: 括号内为均值

2.2 屋面径流污染物浓度随降雨历时变化

2.2.1 TN、TP、COD、BOD₅及SS浓度随降雨历时的变化

从2004年的19次降雨中选取一场典型降雨(6月16日)来说明屋面径流污染物浓度随降雨历时的变化规律(图1). 污染物的起始浓度较高, 随降雨

历时的延长, 污染物浓度大幅度降低. 这主要是因为, 在雨前污染物在屋面上大量累积, 在降雨初期被雨水冲刷汇聚到径流中所致. 随着降雨历时的延长, 屋面累积的污染物被径流迅速带走, 屋面被冲刷干净, 导致各种污染物浓度大幅度降低.

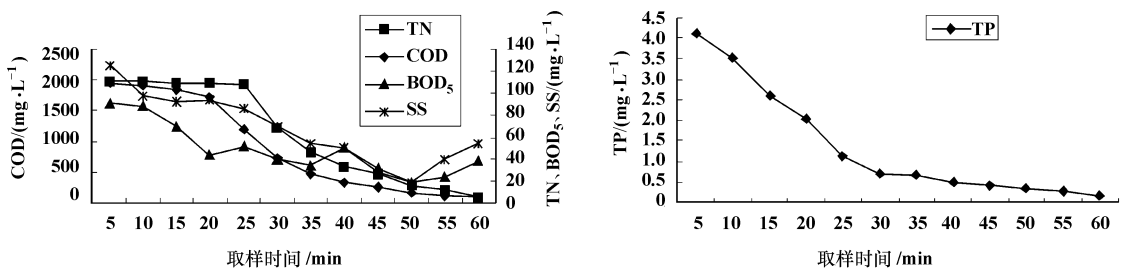


图1 屋面径流污染物浓度随降雨历时的变化

Fig 1 Change of roof runoff pollutants during the rainfall

各场降雨初期污染物浓度的大小以及污染物浓度降低的快慢随着雨前晴天数的不同而有较大变化,将 2004年 19场降雨所有污染物的浓度随降

雨历时的变化趋势按雨前晴天时间的长短分为 3种情况(表 4):晴天数在 6d以上、2~5d和 2d以内。

表 4 雨前晴天数对屋面径流水质的影响

Table 4 Effect of dry days before the rain on quality of roof runoff

雨前晴天 数 /d	COD (mg L^{-1})		BOD ₅ (mg L^{-1})		TN (mg L^{-1})		TP (mg L^{-1})	
	初始浓度	稳定浓度	初始浓度	稳定浓度	初始浓度	稳定浓度	初始浓度	稳定浓度
> 6	1500~2000	200(25)	> 100	< 45(-)	> 80	10(25)	0.4~4	< 0.1(30)
2~5	500~800	100(35)	40~90	10(35)	10~40	< 10(30)	0.2~0.7	< 0.1(35)
< 2	< 300	50~70 (20~25)	< 50	5(25)	-	-	-	-

注: 括号内为稳定所需时间 (min)

雨前晴天数在 6 d以上的降雨,屋面初期径流中 COD、BOD₅、TN、TP的浓度超过地表水环境质量标准(V级)的几十倍,污染非常严重.经过 25min左右的冲刷,污染物浓度降低为初期的 10%~20%.对于降雨间隔在 2d以内者,污染物起始浓度均较低,COD、BOD₅浓度分别在 300和 50 mg L^{-1} 以下,TN、TP含量在整场降雨过程中都较低.两次降

雨时间的间隔越长,屋面径流中污染物的起始浓度越高,屋面初期径流的水质越差.

2.2.2 重金属浓度随降雨历时的变化

6月 30日和 7月 1日两次降雨事件中的溶解态重金属监测结果如图 2所示.屋面径流中 5种重金属的浓度均较低,随降雨历时的延长,其浓度变化很小.

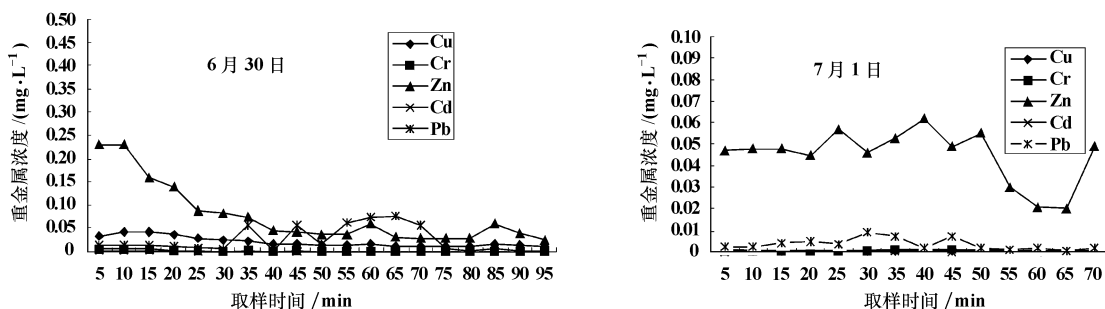


图 2 屋面径流重金属浓度随降雨历时变化趋势

Fig 2 Heavy metal concentration change of roof runoff during the rainfall

3 讨论 (Discussion)

3.1 屋面径流水质

Vaze(2002)的研究发现屋面径流污染物浓度随着雨前晴天数的增加而增大,但是由于数据量较少,且离散程度较大,污染负荷同雨前晴天数之间的关系没有确定.本文通过对北京市某区降雨监测数据的分析得出,COD、TN、TP、BOD₅等污染物浓度随雨前晴天数的加长而相应增加,并且随着降雨时间的延长,污染物浓度大幅度降低,最后稳定在比较低的浓度(表 4).

本文中,北京市某区屋面径流水质与法国巴黎

(Grmain, 2001)、美国德克萨斯(Brezonik, 2002)、德国(Geiger W F教授提供; Module Storm Water Treatment)、北京某文教区(车武, 2003)、武汉汉阳(叶闯, 2004)的监测结果进行比较发现,北京市某区屋面径流的有机污染情况明显高于其它地区,COD含量甚至是汉阳及国外监测结果的 5倍以上.说明本研究区的屋面污染状况较为严重,北京市某区屋面材料中析出大量有机物也可能是有机污染较为严重的原因之一;国外的屋面很大一部分使用金属材料,其屋面径流中的 Cd、Pb、Zn等的含量明显高于国内监测结果(表 5).

表 5 屋面径流水质监测结果对比

Table 5 Comparison of roof runoff water quality

地点	COD / (mg L ⁻¹)	TN / (mg L ⁻¹)	TP / (mg L ⁻¹)	Cu / (μg L ⁻¹)	Cd / (μg L ⁻¹)	Pb / (μg L ⁻¹)	Zn / (μg L ⁻¹)	Cr / (μg L ⁻¹)
生态中心文教区	193.85	10.62	0.34	120	0.689	16.555	630	1.3
北京某文教区	328	9.8	0.94	-	-	90	930	-
武汉汉阳	40-50	4-6	0.22-0.25	-	-	-	-	-
德国某市	47	6(有机N)	0.2	-	-	-	-	-
美国明尼苏达州	-	-	-	270	-	84.5	8177	-
法国巴黎	31	-	-	37	1.3	493	3422	-

3.2 屋面径流的初期冲刷效应

污染物的初期冲刷效应是指在降雨径流初期污染物的浓度较高,而在降雨后期污染物浓度相对较低的现象(Deletic 1998, Gupta 1996). Bertrand (1998)、Deletic(1998)的研究结果表明,降雨开始时污染物的浓度很大导致了初期冲刷现象的产生. Lee和 Bang等(2002)通过对韩国 13场降雨的径流实验发现,初期冲刷现象对某些污染物(如 SS)较明显,而对于其它污染物则不明显(如 COD);并且雨前晴天数同污染物的初期冲刷效应之间没有明显的相关关系.

本文中实验数据显示,大部分降雨的 COD、雨前晴天数较长的降雨的 TN、TP 以及雨前晴天数较短的降雨的 BOD₅的初期冲刷效应较明显,这与 Lee等的研究结果截然不同,而与 Brezonik(2002)的研究结果类似, Brezonik认为污染物的平均浓度与雨前晴天数有正相关关系,因为污染物是在一段时间累积而形成的.因此我们可以把污染严重的初期径流单独收集并加以处理,以减弱其对环境的威胁.

3.3 不同季节对径流水质的影响

Brezonik(2002)对美国 Minnesota 多次降雨的监测结果显示,春、冬两季的屋面径流 TN 浓度(春、冬 TN 浓度分别为 2.5 mg L⁻¹、3.4 mg L⁻¹)高于夏(2.2 mg L⁻¹)、秋(2.37 mg L⁻¹)两季,而 TP 的浓度在秋冬两季(分别为 0.57 mg L⁻¹、0.55 mg L⁻¹)高于春夏两季(0.38 mg L⁻¹、0.32 mg L⁻¹), Wilson(1993)在对 Minneapolis 降水的研究中也取得了类似的结果.北京市的降雨时间主要集中在 6~9月,其它月份降水很少,6月、9月的大部分污染物的平均浓度比 7月、8月高,这可能是因为 7月、8月份降雨频繁,每次降雨时间间隔较小,污染物累积还没达到一定的水平下一次降雨就已经来临,而 6月、9

月降雨间隔较长,污染物大量累积;从总体上看,6月份降雨的各项污染指标都明显高于其它月份,这与北京市的降雨开始于 6月份有关,与 Lee等(2004)通过实验验证的季节性降雨初期冲刷现象相一致.

4 结论 (Results)

1)屋面径流水质污染比较严重, COD、TN 和 BOD₅均值一般都超过地表水环境质量 V级标准.

2)屋面初期径流污染物浓度大,随着降雨历时的延长, COD、TN、TP、BOD₅及 SS 的浓度大幅度下降;污染物的起始浓度以及浓度达到稳定所需的时间随雨前晴天数的不同而有较大变化.

3)重金属的含量在整个降雨过程中均较低,而且随降雨历时的延长,其浓度变化较小.

References

- Ahn A L. 1990. Nonpoint Sources of Pollution [J]. Environmental Science and Technology 24(7): 967
- Bertrand J L, Chebbo G, Saget A. 1998. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon [J]. Water Res 32: 2341-2356
- Brezonik P L, Stadelmann H. T. 2002. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollution concentration from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA [J]. Water Research 36: 1742-1757
- Bucheli T D, Gubler F G, Muller S R, et al. 1997. Simultaneous determination of neutral and acidic pesticides in natural waters at the low nanogram per liter level [J]. Anal Chem 69: 1569-1576
- Bucheli T D, Muller S R, Heberle S, et al. 1998a. Occurrence and behavior of pesticides in rainwater, roof runoff, and artificial stormwater infiltration [J]. Environ Sci Technol 32: 3457-3464
- Bucheli T D, Muller S R, Voegelin A, et al. 1998b. Bituminous roof sealing membranes as major sources of the herbicide (R,S)-mecoprop in roof runoff Waters: potential contamination of groundwater and surface waters [J]. Environ Sci Technol 32

- 3465—3471
- Chang M, Crowley C M. 1993 Preliminary observations on water quality of storm runoff from four selected residential roofs [J]. *Water Resources Bulletin* 29: 777—783
- Chang M, Mathew M, Brown W. 2004 Roofing as a source of nonpoint water pollution [J]. *Journal of Environmental Management* 73: 307—315
- Che W, Wang H Z, Ren C. 2001. Research on roof rainwater pollution and usage in Beijing city [J]. *China Water & Wastewater* 17(6): 57—61 (in Chinese)
- Che W, Ou L, Wang H Z. 2001 The quality and major influential factors of runoff in Beijing urban area [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control* 3(21): 33—37 (in Chinese)
- Che W, Liu Y, Li J Q. 2003 Urban rainwater quality and pollution control [J]. *Water & Wastewater Engineering* 29(10): 38—42 (in Chinese)
- Deletic A. 1998 The first flush load of urban surface runoff [J]. *Water Res* 32: 2462—2470
- Deletic A, Maksimovic C T. 1998. Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas [J]. *J Environ Eng ASCE* 124: 869—879
- Girmaire M G, Gamaud S, Gonzalez A, *et al* 1999 Characterization of urban runoff pollution in Paris [J]. *Water Science & Technology* 39(2): 1—8
- Girmaire M G, Gamaud S, Saad M, *et al* 2001 Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers [J]. *Water Research* 35(2): 521—533
- Gupta K, Saul A J. 1996 Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows [J]. *Water Research* 30: 1244—1252
- Lee J H, Bang K W. 2002 First flush analysis of urban storm runoff [J]. *The Science of the Total Environment* 293: 163—175
- Lee H J, Lau S L. 2004 Seasonal first flush phenomenon of urban stormwater discharges [J]. *Water Research* 38: 4153—4163
- Line D E. 1998 Nonpoint Sources pollution [J]. *Wat Environ Res* 70 (4): 895—911
- Nisbet T R. 2001 The role of forest management in controlling diffuse pollution in UK forestry [J]. *Forest Ecology and Management* 143 (1—3): 215—226
- Vaze J, Chiew Francis H S. 2002 Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface [J]. *Urban Water* 4: 379—389
- Wilson G. 1993. Analysis of urban stormwater quality from the Minneapolis chain of lakes watershed [R]. MS thesis University of Minnesota Minneapolis MN
- Ye M, Lei A L, Guo L P. 2004 Study on control technique of urban non-point source pollutant in new developed areas [A]. *The First High-tech Forum on Urban Water Environment Quality Environment in China* [C], 295—299 (in Chinese)

中文参考文献

- 车武, 汪慧珍, 任超, 等. 2001 北京城区屋面雨水污染及利用研究 [J]. *中国给水排水*, 17(6): 57—61
- 车伍, 欧岚, 汪慧贞, 等. 2002 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*, 3(21): 33—37
- 车武, 刘燕, 李俊奇. 2003. 国内外城市雨水水质及污染控制 [J]. *给水排水*, 29(10): 38—42
- 叶闵, 雷阿林, 郭利平. 2004. 新建区城市面源源头污染控制技术研究 [A]. *中国首届城市水环境质量改善高技术论坛* [C]. 295—299