

城市不同下垫面的降雨径流污染

任玉芬, 王效科, 韩 冰, 欧阳志云, 苗 鸿

(中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室, 北京 100085)

摘要: 当点源污染被有效控制后, 面源污染成为城市水质恶化的主要原因之一。屋面和路面等不透水面以及绿地是城市的 3 种主要下垫面形式。当暴雨产生时, 各种下垫面特别是屋面和路面上汇聚大量污染物质产生径流, 对城市生态环境造成严重的污染。以文教区为例, 对屋面、路面、草坪的径流水质进行了监测, 指标包括 pH、悬浮固体(SS)、化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)和生化需氧量(BOD₅)等。比较分析发现, 3 种下垫面类型的径流水质均较差, COD、TN、TP、BOD₅ 平均浓度超过地表水环境质量 V 级标准。COD、TN 和 TP 浓度与 SS 含量之间相关性较好, 相关系数可达 0.85 以上。径流中污染物浓度受多个因素的影响, 其中降雨量和降雨强度是两个重要因素, 雨强越大, 雨水对城市下垫面的冲刷就越强; 在相同的污染物累积量条件下, 降雨量越大, 径流中污染物浓度越低。

关键词: 面源污染; 暴雨径流; 径流水质; 城市下垫面; 相关分析; 影响因素

文章编号: 1000-0933(2005)12-3225-06 中图分类号: X171 文献标识码: A

Chemical analysis on storm water-runoff pollution of different underlying urban surfaces

REN Yu-Fen, WANG Xiao-Ke, HAN Bing, OU YANG Zhi-Yun, MIAO Hong (Key Laboratory of Systems Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (12): 3225~3230

Abstract: Diffuse pollution is one of the main sources that cause the deterioration of urban water quality after the point pollution is controlled effectively. Underlying surfaces such as roofs, roads, and lawns are the main types of surfaces found in city. During storm events, large amounts of pollutants deposited on the surfaces, especially roofs and roads, adding significant pollution to urban ecological environments. For this study, the quality of the three kinds of runoff was monitored in Beijing's university district, where indices included pH, suspended solids, chemical oxygen demand, total nitrogen, total phosphorus, biochemical oxygen demand, and so on. The pollution of the runoff is serious on all three of the underlying surfaces. COD, TN, TP and BOD₅ concentrations all exceed the fifth level of the environmental quality standards for China. In a correlation analysis, the correlation coefficients between COD, TN, TP concentration and SS content are all larger than 0.85. Findings suggest that there are many factors influencing the quality of runoff, with rainfall amount and intensity being two important factors. In addition, higher intensity can cause sharper flush on the surfaces, and concentration of pollutants decline in storms of larger amount of precipitation in relation to the same previous deposition of pollutants.

Key words: diffuse pollution; storm Runoff; runoff quality; urban underlying surfaces; correlation analysis; influencing factors

面源污染是指溶解的或固体污染物从非特定的地点, 通过径流过程而汇入受纳水体, 引起的水体污染^[1~7]。当点源污染被有效控制后, 面源污染就成为城市水质恶化的主要原因之一^[8]。屋面、路面和绿地是城市主要的下垫面类型, 当暴雨产生时, 下垫面(主要是屋面和路面)上大量污染物在雨水的冲刷下随径流一起进入受纳水体, 对城市生态环境构成严重威胁。另外随着城市化进程的加快, 城市不透水下垫面面积呈上升趋势, 这就使暴雨时的径流量大大增加, 因此应对城市下垫面的径流污染做出

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX3-SW-424); 国家“863”水专项资助项目(2002AA 601022)

收稿日期: 2005-04-20; 修订日期: 2005-09-20

作者简介: 任玉芬(1978~), 女, 山东滨州人, 博士生, 主要从事城市面源污染研究 E-mail: 200418004215005@mail.rcees.ac.cn

Foundation item: The Project of Knowledge Innovation of CAS (No. KZCX3-SW-424) and “863” water specific item (No. 2002AA 601022)

Received date: 2004-04-20; Accepted date: 2005-09-20

Biography: REN Yu-Fen, Ph. D. candidate, mainly engaged in urban diffuse pollution E-mail: 200418004215005@mail.rcees.ac.cn

研究。

城市下垫面的不同对径流水质的影响较大。Gromaire^[9,10]对巴黎“Marais”集水区的屋面、庭院和街道径流水质进行了监测,发现屋面径流重金属污染大于 COD、BOD₅ 和 SS;庭院和街道径流污染主要表现为 SS 和 COD。Legret^[11]和 Sansalone^[12]指出道路雨水径流中含有大量 SS、碳氢化合物和重金属等而且 COD 较高。Chang^[13,14]认为屋面径流 Zn 和 Cu 污染超标严重,而车武^[15]的研究则得出屋面径流主要是 COD 和 SS 污染, TN、TP、重金属和无机盐等浓度则较低。由于受交通状况、大气沉降等多重因素的综合影响,屋面、道路径流水质呈现出明显的随机性和波动性,因此对城市面源污染的研究具有一定的困难。

前人的研究主要针对屋面和路面进行了径流水质的监测,初步分析了径流中污染物种类和污染程度。监测指标较少且缺乏对绿地径流污染的研究。本文对屋面、路面和草坪等城市主要的土地使用类型进行了径流水质的采样分析,确定 3 种汇水面径流的污染程度,分析各污染物之间的相关性,以及降雨量和降雨强度对径流水质的影响,这有助于了解城市水体污染的来源并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

1.1 样品采集

屋面、路面和草坪 3 种下垫面径流水样的采集地点是中国科学院生态环境研究中心。草坪与屋面和路面是性质不同的城市下垫面,草坪属于自然下垫面,而屋面和路面属于人工下垫面,当暴雨产生时,屋面和路面很容易产生径流,而草坪产流慢且径流量较少。屋面径流设 3 个采样点,其中综合楼顶 1 个,化工楼顶 2 个(2004 年采样季节只有这两栋楼有雨水下水管),屋面材料均为沥青油毡;屋面径流的收集方法是:在楼顶雨水管道出水口处放置收集瓶,收集楼顶流出的雨水。路面径流设 4 个采样点(分别设在交通较多的两条路上),包括综合楼以南路面 2 个采样点(道路南北两侧各设 1 个),路面材料为水泥混凝土;综合楼以北路面 2 个采样点(道路南北两侧各设 1 个),路面材料为烧结砖;路面径流的收集方法为:在路面上的雨水下水井内安装与井口同尺寸的容器,当路面产生径流时汇聚进入该容器中,在容器的底部接一出水管,并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,可以收集出水管中每时段的雨水,保证该样品能代表全降雨过程的平均情况)。草坪径流取样点设在绿园中路北侧草坪南端(稍有坡度),在地势最低处理入一收集瓶,瓶口同地面齐平,瓶壁与周围土壤紧密封好,以使草坪坡上径流流入瓶中。由于草坪土质松软,绝大部分雨水都渗入地下,径流量较少,因此径流收集非常困难,并且研究区其它几处草坪地势平坦,样品收集就更加困难,故采样点只有 1 个。具体采样时间为 2004 年 6 月 16 日、6 月 24 日、6 月 30 日、7 月 1 日、7 月 3 日、7 月 4 日、7 月 7 日、7 月 8 日、7 月 10 日、7 月 11 日、7 月 18 日、7 月 20 日、7 月 21 日、7 月 29 日、8 月 9 日、8 月 12 日、8 月 27 日、9 月 6 日、9 月 15 日共 19 场降雨(涵盖了全年降雨量的约 80%),每场降雨各个采样点同时取样,样品采集后立即转入实验室进行化验分析。

1.2 样品分析

径流监测指标包括 pH、SS、COD、TN、TP、BOD₅ 和重金属(Cu、Cr、Zn、Pb 和 Cd)等。样品分析方法为:pH 值(采用玻璃电极法,GB 6920-86)、COD(重铬酸钾法,GB 11894-89)、TN(过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,GB 11894-89)、TP(钼酸铵分光光度法,GB 11893-89)、BOD₅(稀释接种法,GB 7488-87)、SS^[16](0.45μm 滤膜过滤 103~105℃烘干称重,GB 11901-89)均为国家标准规定的样品测定方法;重金属的测量采用 ICP-OES 和 ICP-MS。多次降雨各种污染物的平均浓度分别与地表水环境质量标准(GB 3838-2002)对比得出其污染水平。所有数据的整理与统计均采用 Excel(2000)和 SPSS 软件。

2 结果与分析

2.1 屋面、路面和草坪径流的 pH 值及 SS 含量

多次降雨的屋面、路面和草坪径流的平均 pH 分别为 7.28 ± 0.14 ($n=35$)、 7.73 ± 0.08 ($n=33$)、 7.55 ± 0.08 ($n=7$) (图 1),为中性略偏碱。屋面径流的平均 pH 明显低于路面径流,差异达显著水平($p=0.004$)。

3 种下垫面径流中悬浮固体的平均含量(图 1)大小顺序为:草坪(458.00 ± 111.86) mg/L, $n=6$) > 路面(243.47 ± 40.47) mg/L, $n=33$) > 屋面(77.90 ± 11.17) mg/L, $n=36$);两两之间差异均达显著水平(屋面和路面 $p=0$,屋面和草坪 $p=0.008$,路面和草坪 $p=0.008$)。草坪土质松软,经雨水淋洗,冲刷出大量的固体颗粒物质,路面上悬浮固体主要是大气沉降以及交通等人为因素带入的固体物质;而屋面上受人为因素干扰较小,颗粒物主要来源于大气降尘,含量较少。

2.2 不同下垫面的降雨径流污染物浓度

降雨的前段时间和后段时间径流中污染物的浓度会有较大差别,取全部降雨过程中污染物的平均浓度,与地表水环境质量标准相对比,屋面、路面和草坪的降雨径流污染物的浓度均较大(表 1)。按照降雨次数(共 19 次降雨)平均计算,屋面、路面和草坪 3 种下垫面径流的 COD 分别为 (140.13 ± 15.26) 、 (140.18 ± 13.94) 、 (120.37 ± 18.90) mg/L,超过地表水环境质量 V 级标准(40 mg/L)的 2 倍以上;TN 分别为 (8.21 ± 0.72) 、 (6.89 ± 0.57) 、 (6.80 ± 0.78) mg/L,超过 V 级标准(2 mg/L)的 2~3 倍;TP 污染较轻,路面和草坪径流 TP 含量略超过 V 级标准(0.4 mg/L),分别为 (0.61 ± 0.08) 、 (0.74 ± 0.12) mg/L。BOD₅ 分别为

(17.62±2.08), (25.17±3.86), (20.93±6.48)mg/L, 均超过Ⅴ级标准(10mg/L)。比较发现路面COD、BOD₅ 污染最严重, 草坪TP 污染最重, 而屋面TN 污染最重。草坪污染物浓度虽大, 但由于草坪径流量小, 大部分雨水都被土壤吸收, 故总体产生的污染物较少。3 种下垫面重金属Cu、Cr、Zn、Cd、Pb 的含量均较低, 不超出地表水环境质量Ⅱ级标准。

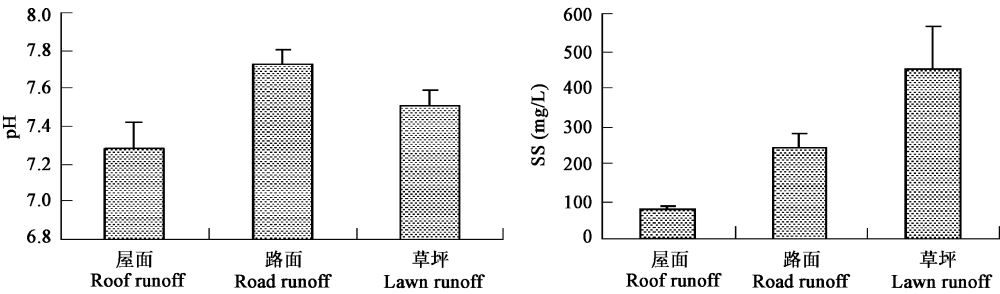


图1 屋面、路面和草坪径流pH 和悬浮固体含量

Fig 1 pH and SS content of roof, road and lawn runoff

地表径流污染负荷有两种, 由一场降雨所引起地表径流排放的污染物总量为次降雨污染负荷; 而由一年中的多场降雨所引起地表径流排放污染物的总量称为年污染负荷。由于地表径流排污的随机性使得次降雨污染负荷的代表性很差, 通常采用年污染负荷。将每次降雨径流全过程的污染物平均值(EMC)与总降雨径流量(降雨量 P_i 与汇水面积 A_i 之积)的乘积累加, 可以得到年污染负荷:

$$L_y = \sum_{i=1}^m (EMC)_i P_i A_i \quad (m \text{ 为降雨次数})$$

经简单计算, $L_{\text{屋面SS}} = 194.75\text{kg}$, $L_{\text{屋面COD}} = 350.25\text{kg}$, $L_{\text{屋面TN}} = 20.52\text{kg}$, $L_{\text{屋面TP}} = 0.425\text{kg}$, $L_{\text{屋面BOD}} = 44.05\text{kg}$, $L_{\text{路面SS}} = 3043.38\text{kg}$, $L_{\text{路面COD}} = 1752.25\text{kg}$, $L_{\text{路面TN}} = 86.125\text{kg}$, $L_{\text{路面TP}} = 7.625\text{kg}$, $L_{\text{路面BOD}} = 314.63\text{kg}$ 。草坪径流量较少, 且周围都有护堤防护, 除特大暴雨外, 一般草坪上的径流很少外溢, 因此对城市生态环境的影响较小; 在小降雨量的情况下, 草地可以起到削减污染物的作用。

表1 屋面、路面和草坪径流污染物平均浓度

Table 1 Pollutant contents of roof, road and lawn runoff									
项目 Item	COD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)	Cu (mg/L)	Cr (mg/L)	Zn (mg/L)	Cd (μg/L)	Pb (μg/L)
屋面 Roof	140.13	8.21	0.17	17.62	0.01	—	0.03	0.28	8.34
路面 Road	140.18	6.89	0.61	25.17	0.02	—	0.06	0.10	3.06
草坪 Lawn	120.37	6.80	0.74	20.93	—	—	—	—	—

2.2.1 污染物浓度月变化 由6~9月份屋面、路面和草坪径流中COD、TN、TP、BOD₅ 的变化(图2)可知各下垫面径流中各污染物每月差别较大。

屋面6月份COD、BOD₅ 浓度明显高于其他月份, 差异达显著水平($p_{\text{COD}6\sim7\text{月份}} = 0.002$, $p_{\text{COD}6\sim8\text{月份}} = 0.004$, $p_{\text{COD}6\sim9\text{月份}} = 0.018$; $p_{\text{BOD}_5 6\sim7\text{月份}} = 0.001$, $p_{\text{BOD}_5 6\sim8\text{月份}} = 0.001$, $p_{\text{BOD}_5 6\sim9\text{月份}} = 0.006$); 屋面径流TN 浓度6月份明显比7月份高($p = 0.021$), 9月份明显比7、8月份高($p_{7\sim9\text{月份}} = 0.001$, $p_{8\sim9\text{月份}} = 0.005$); TP 浓度6月份明显高于7、8月份($p_{6\sim7\text{月份}} = 0.006$, $p_{6\sim8\text{月份}} = 0.012$)。

路面径流9月份TP 含量较高, 与其他月份相比有明显差异($p_{6\sim9\text{月份}} = 0.001$, $p_{7\sim9\text{月份}} = 0$, $p_{8\sim9\text{月份}} = 0.031$)。由于6月和9月份降雨的降雨量较小, 无法取得草坪径流样品, 只有7、8月份的污染物浓度, 除TP 外其余污染物浓度8月均高于7月份, 但差异不显著。

北京市降雨主要是6~9月份, 而且绝大多数集中在7、8月份, 7、8月份降水概率大, 雨水对城市下垫面的冲刷频繁, 故每次降雨的污染浓度较低; 而6月份和9月份是全年雨水的开始和减少阶段, 且降雨频次较少, 污染物积累的时间也长, 故污染物浓度较高。

2.2.2 污染物浓度相关性分析 对屋面、路面和草坪径流污染物浓度进行相关分析发现: 3种下垫面径流COD、TN 和TP 浓度与SS 含量之间有很好的相关性(图3)。屋面径流COD、TN 和TP 浓度与SS 含量相关系数分别为: 0.989, 0.868, 0.958; 路面径流COD、TN 和TP 浓度与SS 含量相关系数分别为: 0.864, 0.941, 0.864; 草坪径流COD、TN 和TP 浓度与SS 含量相关系数

分别为: 0.943, 0.912, 0.944, 相关系数均达 0.85 以上。

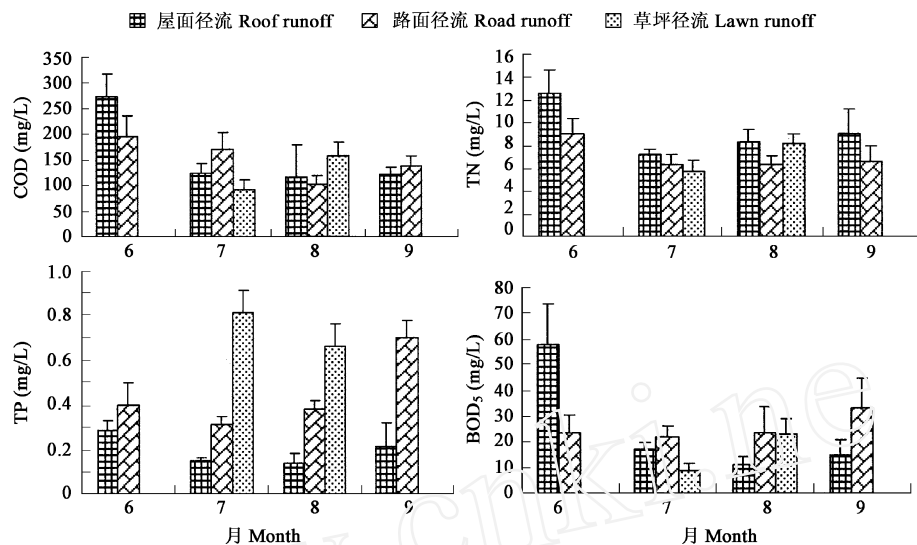


图2 屋面、路面和草坪径流污染物月变化

Fig. 2 Monthly change of pollutants in roof, road and lawn runoff

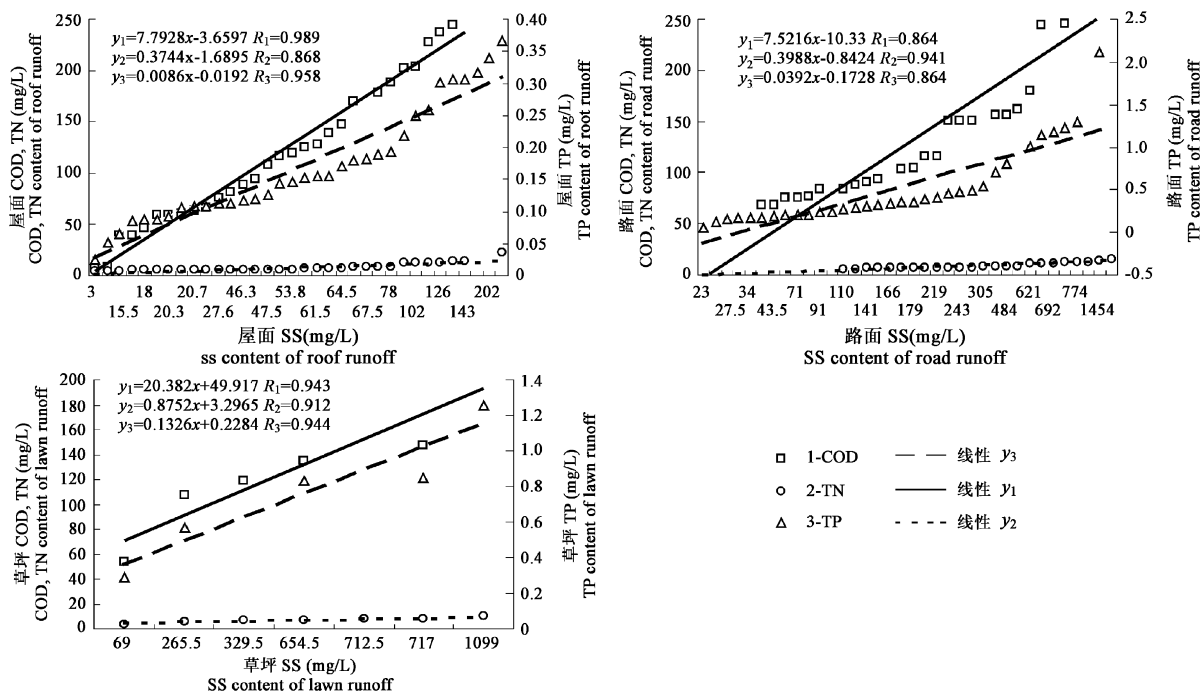


图3 屋面、路面和草坪径流COD、TN 和 TP 浓度与 SS 之间的相关关系

Fig. 3 Correlation between COD, TN, TP concentration and SS content of roof, road and lawn runoff

2.2.3 降雨量和降雨强度影响 降雨对城市下垫面上的污染物具有冲刷、稀释和溶解等多重作用, 污染物浓度的大小受多种因素影响, 包括降雨强度、降雨量、两次降雨之间的时间间隔等, 污染物浓度是各个影响因素的复杂函数。雨强(即单位时间的降雨量)越大, 雨水对地表的冲刷作用就越强, 携带的污染物就越多, 以7月10日(1.5h降雨25mm)和7月21日(2h降雨15mm)降雨为例, 比较不同下垫面上污染物浓度的大小(表2), 发现7月10日降雨各污染物浓度普遍高于7月21日降雨。两次降雨屋面径流COD($p=0.009$, $n=6$)和BOD₅($p=0.001$, $n=6$)均具有显著性差异, 路面TN($p=0.011$, $n=6$)、BOD₅($p=0.036$, $n=6$)差异也具有显著性。同样降雨有对污染物稀释的作用, 在相同的污染物累积量条件下, 降雨量越大, 雨水对污染物的稀释作用

越强, 径流中污染物的浓度就会降低, 降雨量与污染物平均浓度呈现负相关关系。

3 讨论

3.1 污染物来源及不确定性

近年来随着生产生活水平提高, 煤、油、燃气等能源消耗激增, 废气、粉尘等排放的增加造成了严重的大气污染。雨水在降落过程中对大气起到淋洗的作用, 空气中的粉尘颗粒物、可溶性的有害气体就随着雨水降落至地面, 对本来水质较好的雨水造成污染。雨水径流水质受汇水面性质影响而呈现出不同的变化。屋面污染物主要为大气干沉降物和屋面材料的分解产物, 油毡屋面是一种主要的污染源。路面污染状况是道路雨水污染的决定性因素, 水质比屋面雨水更复杂, 随机性更大, 因此各汇水面上的污染物的产生具有不确定性。

表 2 不同降雨量和降雨强度下的污染物浓度 (mg/L)

Table 2 Pollutant concentrations at different amount of rainfall and intensity						
日期 Date	项目 Item	COD	TN	TP	BOD ₅	SS
7 月 10 日 July, 10	屋面径流 Roof runoff	170.61±18.28	8.98±2.20	0.12±0.002	33.19±1.93	114.07±50.77
	路面径流 Road runoff	119.85±21.20	8.93±1.41	0.52±0.11	31.29±10.60	450.5±139.14
	草坪径流 Lawn runoff	74.32	7.49	0.45	4.14	712.5
7 月 21 日 July, 21	屋面径流 Roof runoff	85.76±13.31	4.99±0.10	0.09±0.01	10.63±3.12	41.84±12.24
	路面径流 Road runoff	119.85±21.20	4.24±0.72	0.34±0.04	9.69±1.51	322.83±109.79
	草坪径流 Lawn runoff	53.93	3.01	0.58	7.03	265.5

3.2 与国外的监测结果比较

本文中北京市径流水质与武汉^①、德国^[17]、法国巴黎^[9]的监测结果进行比较(表 3)发现: 北京屋面和道路径流水质悬浮固体含量及有机污染情况明显高于其他地区, 屋面径流 COD、BOD 浓度甚至是武汉及国外监测结果数倍, 说明本文研究区的大气污染状况较为严重, 北京市屋面材料中析出大量有机物也可能是屋面有机污染较为严重的原因之一。另外, 国内其他研究区及国外对草坪径流水质的监测资料较少。

表 3 国内外城市地表径流水质监测结果对比

Table 3 Comparison of the quality of surface runoff home and abroad(mg/L)								
项目 Item	巴黎 Paris		德国 Germany		北京 Beijing		武汉 Wuhan	
	屋面 Roof	路面 Road	屋面 Roof	路面 Road	屋面 Roof	路面 Road	屋面 Roof	路面 Road
SS	29	92.5	—	—	77.9	243.47	40~60	350~650
COD	31	131	47	87	140.13	140.18	44.9~54.6	60~110
BOD	4	36	—	—	17.62	25.17	—	—
TN	—	—	6	2.25	8.21	6.89	4.09~6.04	4.9~6.04
TP	—	—	0.2	0.55	0.17	0.61	0.22~0.25	0.3~0.53

3.3 关于相关性

屋面、道路及草坪 3 种下垫面径流 COD、TN、TP 浓度与 SS 含量之间有良好的相关性, 说明大部分的污染物质是以颗粒吸附态存在的。根据这一性质, 通过对城市环境卫生进行清扫、对雨水径流截污、沉淀和过滤, 可以有效地控制污染物总量。

4 结论

(1) 屋面、道路及草坪径流污染较为严重, 主要污染物为 COD、TN、TP、BOD₅ 等, 平均含量均超过地表水环境质量 V 级标准, 路面 COD、BOD₅ 污染最严重, 草坪 TP 污染最重, 而屋面 TN 污染最重; 3 种下垫面径流重金属含量较低, 不超标。

(2) 降雨强度和降雨量是影响径流水质的重要因素, 雨强越大, 雨水对城市下垫面的冲刷就越强; 在相同的污染物累积量条件下, 降雨量越大, 径流中污染物浓度越低。

(3) 屋面、道路及草坪 3 种下垫面径流 SS 含量与 COD、TN、TP 浓度之间有良好的相关性, 相关系数均达 0.85 以上, 因此可以通过城市下垫面的清洁除去大部分的污染物质。

References

[1] N isbet T R. The role of forest management in controlling diffuse pollution in U K forestry. *Forest Ecology and Management*, 2001, 143(1-

① 叶闯, 雷阿林, 郭利平. 新建区城市面源源头污染控制技术研究. 中国首届城市水环境质量改善高技术论坛, 2004 295~299

- 3): 215~226
- [2] Alm A L. Nonpoint Sources of Pollution. *Environmental Science and Technology*, 1990, **24**(7): 967.
- [3] Line D E, et al. Nonpoint Sources Pollution. *Wat Environ Res*, 1998, **70**(4): 895~911.
- [4] He C S, Fu B J, Chen L D. Non-point source pollution control and Management. *Environmental Science*, 1998, **19**(5): 87~96.
- [5] Li X Z, Xiao D N, Hu Y M, et al. Effect of wetland landscape pattern on nutrient reduction in the Liaohe delta. *Acta Geographica Sinica*, 2001, **56**(1): 32~133.
- [6] Chen L D, Fu B J. Farm ecosystem management and control of nonpoint source pollution. *Environmental Science*, 2000, **21**(2): 98~100.
- [7] Zhang S L, Zhuang J P. Current situation and development tendency of researches of nonpoint source pollution in agriculture. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, **17**(6): 51~55.
- [8] Brezonik L P. Analysis and predictive models of storm water runoff volumes, loads, and pollution concentration from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, U.S.A. *Water Research*, 2002, **36**: 1742~1757.
- [9] Gromaire M C, Garnaud S. Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers. *Water Research*, 2001, **35**(2): 521~533.
- [10] Gromaire M C, Garnaud S. Characterization of urban runoff pollution in Paris. *Water Science & Technology*, 1999, **39**(2): 1~8.
- [11] Legret M, Pagotto C. Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway. *The Science of the Total Environment*, 1999, **235**: 143~150.
- [12] Sansalone J J, Buchberger S G. Partitioning and First Flush of Metals in Urban Roadway Storm Water. *J. of Envir. Engrg.* A SCE, 1997, **123**(2): 134~143.
- [13] Chang M. Roofing as a source of nonpoint water pollution. *Journal of Environmental Management*, 2004, **73**: 307~315.
- [14] Chang M, Crowley C M. Preliminary observations on water quality of storm runoff from four selected residential roofs. *Water Resources Bulletin*, 1993, **29**: 777~783.
- [15] Che W, Wang H Z. Research on roof runoff pollution and utilization in Beijing urban area. *China Water & Wastewater*, 2001, **17**(6): 57~61.
- [16] State Environmental Protection Administration of China. *Water and wastewater monitoring and analyzing method* (the third edition). Beijing: China Environmental Science Press, 1989. 103, 108~110, 278~283, 354~356, 362~366.
- [17] Che W, Liu Y, Li J Q. Quality of urban rainwater and pollution control home and broad. *Water & Wastewater Engineering*, 2003, **29**(10): 38~42.

参考文献

- [4] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制. *环境科学*, 1998, **19**(5): 87~96.
- [5] 李秀珍, 肖笃宁, 等. 辽河三角洲湿地景观格局对养分去除功能影响的模拟. *地理学报*, 2001, **56**(1): 32~133.
- [6] 陈利顶, 傅伯杰. 农田生态系统管理与非点源污染控制. *环境科学*, 2000, **21**(2): 98~100.
- [7] 张水龙, 庄季屏. 农业非点源污染研究现状与发展趋势. *生态学杂志*, 1998, **17**(6): 51~55.
- [15] 车武, 汪慧珍, 等. 北京城区屋面雨水污染及利用研究. *中国给水排水*, 2001, **17**(6): 57~61.
- [16] 国家环保局编. *水和废水监测分析方法* (第3版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 103, 108~110, 278~283, 354~356, 362~366.
- [17] 车武, 刘燕, 李俊奇. 国内外城市雨水水质及污染控制. *给水排水*, 2003, **29**(10): 38~42.