

山地城市径流污染特征分析

颜文涛^{1a,1c}, 韩 易², 何 强^{1b}

(1. 重庆大学 a. 建筑城规学院, 重庆 400045; b. 三峡库区生态环境教育部重点实验室;
c. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; 2. 中南财经政法大学 校园建设处, 武汉 430073;)

摘要:以重庆主城某大学校园为例,对路面、屋面和绿地等3种典型的城市下垫面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)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)等。研究结果表明:除TP外主要污染物质的平均浓度均超过地表水环境V类标准,降雨径流SS的平均浓度可高达 1.73×10^3 mg/L, COD和NH₃-N平均浓度可高达76.25 mg/L和3.67 mg/L;存在显著地初期冲刷效应,混凝土路面的SS、COD、NH₃-N的初期径流浓度分别为 2.33×10^3 mg/L、106.4 mg/L、5.64 mg/L,初期径流浓度相当于全场降雨径流浓度的2-4倍左右,其最高值出现在产流后10~15 min内。对比3场不同降雨强度下的径流水质,降雨强度越大,径流污染物浓度越高,其中降雨强度对大坡度路面的地表径流污染物浓度影响更大。

关键词:降雨径流;径流水质;初期冲刷效应;污染特征;山地城市

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)03-0136-07

Characterization of Stormwater Runoff Pollution in Mountain City

YAN Wen-tao^{1a,1c}, HAN Yi², HE Qiang^{1b}

(1a. College of Architecture and Urban Planning, Chongqing University,
b. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-environment, Ministry of Education;
c. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area; Chongqing 400045, P. R. China;
2. Department of University Construction, ZhongNan University of Economics and Law, Wuhan 430073, P. R. China)

Abstract: Taking indicators the case of an university campus runoff quality in Main Urban Area of Chongqing, three kinds of stormwater runoff quality were monitored, where indicators included pH, suspended Solids(TSS), chemical oxygen demand(COD), ammonia-nitrogen (NH₃-N), total phosphorus (TP), and so on. The results show that the average concentration of stormwater runoff pollutants exceed the fifth level of the environmental quality standards for China except TP, SS concentration of runoff can reach 1 730 mg/L, COD and NH₃-N concentration of runoff can reach 76.25 mg/L and 3.67 mg/L; First flush takes effect evidently, and SS, COD, NH₃-N first flush concentrations of concrete road surface were 2330mg/L, 106.4mg/L, 5.64mg/L. First flush concentrations were equivalent to 2-4 times of Event Mean Concentrations(EMCs), and the highest concentration value of pollutants appeared when runoff produced 10~15 minutes later. Comparison on runoff quality of three different rainfall intensity, higher intensity was positively correlated with TSS, COD, NH₃-N, and TP concentrations, among which rainfall intensity taked greatest effect on runoff pollutants concentration of large slope road.

Key words: stormwater runoff; runoff quality; first flush effect; pollution characterization ; mountain city

收稿日期:2011-11-18

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项资助(2008ZX07315-001)

作者简介:颜文涛(1970-),男,博士,副教授,主要从事环境规划理论与方法研究,(E-mail)yan24839@126.com;

何 强(通讯作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)he0980@126.com。

随着中国城市化的快速发展,下垫面变化所引起的径流污染已经成为影响城市地表水环境的重要污染源^[1]。由于径流污染具有分散性、非连续性、突发性及难控性等特点,有研究证实来自城市某个汇水单元多种下垫面的降雨径流导致有些受纳水体水质的恶化^[2]。Ichiki等(2009)对老挝万象的城市降雨径流污染物特性进行了研究,发现SS的平均浓度在雨季时较高,而COD、TN和TP在旱季时较高^[3]。中国在北京、武汉、澳门等城市已开展相关研究,由于区域间实际情况存在差异,其研究结果均有所不同^[4-6]。侯立柱等^[7]的研究结果表明,北京市屋面初期径流的NH₃-N、高锰酸盐指数及挥发酚等均劣于地表水V类水质标准;绿地径流水质虽属V类标准,但与Ⅲ类标准相比,仅NH₃-N超标;路面初始径流的COD高达493.5 mg/L。常静等^[8]通过选取上海市中心城区典型功能区对降雨事件进行监测,发现上海中心城区路面径流主要污染物为TSS和COD,超出国家地表水V类标准4倍多;总磷超出V类水质标准两倍以上;氮素营养盐也有不同程度的污染。Helmreich等(2010)研究发现城市主干道降雨径流重金属浓度与溶解态有机碳TOC(dissolved organic carbon)和SS(suspended solids)显著相关^[9]。Lee等(2004)对季节性的初期冲刷现象进行研究后发现,雨季开始时的城市径流污染物浓度比雨季结束时高1.2~20倍^[10]。Han等(2006)对洛杉矶高速公路暴雨径流水质特性进行了分析,研究指出初期30~60 min的降雨径流污染物平均浓度比全场降雨径流污染物平均浓度高1.9~7.4倍,COD和其它有机污染物具有强初期冲刷效应特性^[11]。由于山地城市的降雨径流强度与平原城市差异明显,上述研究结果可能不适用于坡度较大的山地城市,开展山地城市径流水质特性研究十分必要。

以重庆市某大学校园内典型产流区的径流水质变化规律为例,对山地城市降雨径流污染特性进行分析。通过监测各产流区降雨期间的污染物浓度变化情况,对水质变化规律进行分析,从而掌握其径流水质特性,为下一步的污染负荷模拟及污染物控制提供理论依据。

1 研究方法

1.1 实验区域

实验区域位于重庆主城沙坪坝区某大学校园内,面积约为37.15 hm²,该地区多年平均降雨量

1 100~1 300 mm,降雨多集中在每年4~9月。主要下垫面类型包括屋面、路面和绿地。其中屋面类型有瓦屋面与沥青防水屋面两种,硬化路面有混凝土路面和砖石路面两种。

研究共设有7处取样点,分别为:天然降水采样点,沥青屋面径流采样点,瓦屋面径流采样点,下凹式绿地径流采样点,混凝土机动车路面径流采样点(主、次干道)以及人行道砖石路面径流采样点。

1.2 采样方法

于2009年5月18日,2009年5月28日和2009年6月12日3场降雨对实验区域7处采样点降雨径流进行了全过程监测,降雨产流后即开始采样,每5 min采一次样。屋面径流:在楼顶雨水管道出水口处放置收集装置,收集楼顶流出的初期径流及经过弃流后的雨水;路面径流:在路面上的雨水下水井内安装与小于井口同尺寸的收集器,当路面产生径流时汇聚进入该收集器中,在容器的底部接一出水管,将径流接入收集器中;绿地径流:取样点设在坡度为15%的绿地中,在地势最低处理入一收集装置,保证进水口同地面齐平,装置外壁与周围土壤紧密封好,以使草坪坡上径流入收集装置中。

1.3 测定方法

目前国内外所研究的降雨径流污染的主要污染物有悬浮沉积物、营养物质、耗氧物质等,笔者在参考其他城市径流水质分析结论^[12-13],结合重庆地区实际情况后,将水质分析指标确定为COD,SS,TP,NH₃-N和pH。pH值采用玻璃电极法(GB6920286),COD_{Cr}采用重铬酸钾法(GB11894289),NH₃-N采用纳氏试剂紫外分光光度法(GB11894289),TP采用钼酸铵分光光度法(GB11893289),SS采用0.45 μm微孔滤膜过滤后烘干称重(GB11901289),所有测定都按照《水与废水监测分析方法》(第4版)^[14]中的标准方法进行。

1.4 降雨特征

所监测3场降雨事件差异较大,3场降雨事件对大、中、小降雨强度具有较好的代表性,为研究结果的可靠性提供了保证。其中2009年5月18日,2009年5月28日和2009年6月12日等3场降雨事件的雨量分别为10.5 mm、4.1 mm、8.2 mm,降雨时间为240 min、480 min、240 min,平均降雨强度分别为0.008 5~0.044 mm·min⁻¹之间。

1.5 计算方法

由于在一场降雨过程中,各种污染物的浓度随

降雨历时的变化而变化,因此在考察单场降雨径流污染物浓度时,一般均采用次降雨径流污染物平均浓度 EMC(Event Mean Concentration)来表示,其值等于单场降雨径流中的总污染物质量除以总径流量^[15-17],即:

$$EMC = \left(\sum_{t=0}^T Q_t C_t \right) / \left(\sum_{t=0}^T Q_t \right) \quad (1)$$

式中 Q_t 为 t 时段内的径流流量, m^3/h ; C_t 为 t 时段内的径流量中所含的某种污染物浓度, mg/L ; T 为降雨历时, min 。

使用样点平均次降雨径流平均浓度(Site Mean Event Mean Concentration, SMEMC)来表征多场降雨径流污染物平均浓度^[18],即:

$$SMEMC = \left(\sum_{i=1}^N EMC_i \right) / N \quad (2)$$

式中: EMC_i 为第 i 场降雨径流的污染物平均浓度, mg/L ; N 为监测降雨事件数。

2 结果与讨论

2.1 径流水质特征

研究区雨水径流主要污染物为有机物、营养物及总悬浮颗粒物。除绿地径流外,其它下垫面类型的降雨径流平均浓度均超过地表水环境 V 类标准(表 1)。降雨径流 SS 平均浓度可高达 $1\ 730\ mg/L$,相当于未经处理城市污水 SS 浓度的 5 倍多,比《城镇污水处理厂污染物排放标准》的一级 B 标准高 86.5 倍; COD、 NH_3-N 和 TP 浓度都低于未经处理的城市污水,其中 COD 和 NH_3-N 浓度可达 $76.25\ mg/L$ 和 $3.67\ mg/L$,比《地表水环境质量标准》中 V 类水标准高 1.9 和 1.8 倍。从表中可看出,各种下垫面降雨径流的 SMEMC 值差别明显,其中 COD 的 SMEMC 值排序为:主干道混凝土路面 > 沥青防水屋面 > 瓦屋面 > 次干道混凝土路面 > 人行道砖石路面 > 绿地; NH_3-N 的 SMEMC 值排序为:主干道混凝土路

面 > 次干道混凝土路面 > 沥青防水屋面 > 人行道砖石路面 > 瓦屋面 > 绿地; TP 的 SMEMC 值排序为:主干道混凝土路面 > 次干道混凝土路面 > 绿地 > 人行道砖石路面 > 沥青防水屋面 > 瓦屋面; SS 的 SMEMC 值排序为:主干道混凝土路面 > 次干道混凝土路面 > 人行道砖石路面 > 绿地 > 瓦屋面 > 沥青防水屋面。

计算结果表明不同土地利用方式决定的下垫面类型是导致径流水质发生变化的重要因素,即雨水径流水质受汇水面性质影响而呈现出不同的变化。混凝土路面径流 COD 的平均浓度比屋面和绿地分别高约 1.5 和 3 倍;混凝土路面径流 SS 的平均浓度比屋面和绿地分别高约 5 倍和 2 倍。由于受人为因素干扰较小,颗粒物主要来源于大气降尘,因此屋面 SS 浓度较小,达 $210\sim 380\ mg/L$ 。

路面径流污染物主要来源于地表沉积物,由于混凝土路面渗透率小,对径流污染物质的截流能力弱,导致其径流水质污染严重。而人行道主要采用的是砖石材料,其本身所含污染物质少,再加上有一定的渗透率,其 COD、 NH_3-N 、TP 以及 SS 的径流平均浓度为混凝土路面的 0.43、0.77、0.33 和 0.24 倍。与沥青屋面径流相比,瓦屋面径流水质相对较好, COD、 NH_3-N 以及 TP 径流平均浓度为沥青屋面的 0.92、0.91 和 0.8 倍,产生此现象的主要原因是瓦屋面材料本身不增加径流水质的污染,而沥青屋面材料为石油的副产品,成分较为复杂,有机物含量较高,本身的释出物增大了径流水质的有机物污染程度。由于采样点中的瓦屋面年代较久,材料腐蚀、屋面沉积物遗留导致 SS 的含量相对较高,约为沥青屋面平均径流的 1.8 倍。

绿地径流中各主要污染物平均浓度均优于地表水环境 V 类水质标准,主要原因是绿地植物及土壤对雨水径流中的污染物有截留和净化作用。

表 1 不同类型下垫面降雨径流污染物平均浓度

控制指标	标准值	屋面		路面			绿地	天然雨水
	V 类地表水环境	沥青防水屋面	瓦屋面	混凝土路面(次干道)	混凝土路面(主干道)	砖石路面(人行道)		
pH	6~9	7.3	7.3	7.6	7.7	7.7	7.6	6.9
$COD_{Cr}/(mg \cdot L^{-1})$	40	59	54.4	53.5	76.3	33.0	23.0	2.3
$NH_3-N/(mg \cdot L^{-1})$	2	2.9	2.7	3.2	3.7	2.8	1.6	1.2
$TP/(mg \cdot L^{-1})$	0.4	0.05	0.04	0.22	0.24	0.08	0.21	0.03
$SS/(mg \cdot L^{-1})$	20*	210	380	1.04×10^3	1.73×10^3	420	650	100

注: * 为《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)的一级 B 标准。

2.2 径流污染物浓度变化特征

据所监测降雨事件的降雨特征,选取 2009-06-12 这场典型的次降雨事件全过程径流水质变化情况的监测,研究不同类型下垫面降雨径流污染物浓度随降雨历时的变化情况(图 1、2、3 和 4)。

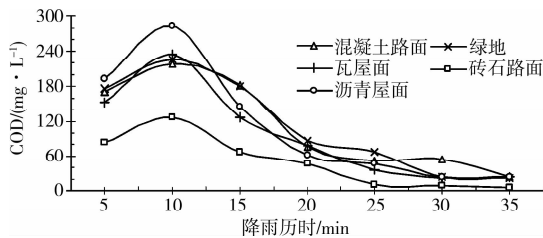


图 1 COD_{cr} 随降雨历时变化曲线

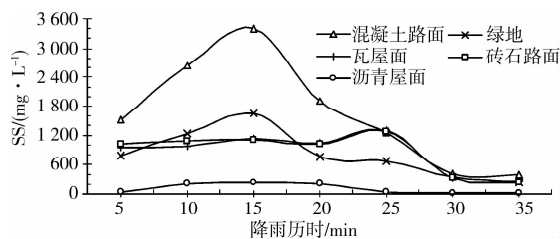


图 2 SS 随降雨历时变化曲线

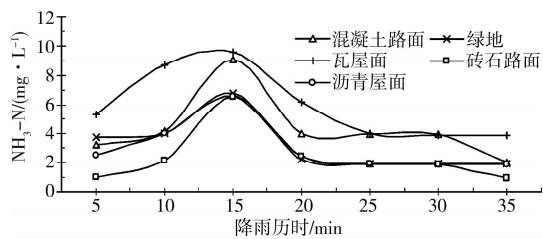


图 3 NH₃-N 随降雨历时变化曲线

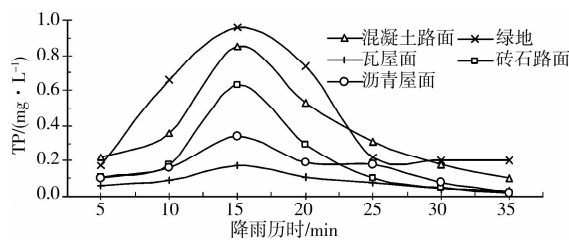


图 4 TP 随降雨历时变化曲线

结合该降雨特征,该场降雨事件的雨量和雨强

中等,降雨对路面沉积物有一定的冲刷作用,径流携带和转移污染物的能力较大。屋面径流 COD 的浓度响应较快,在产流 10 min 后达到明显的峰值 283.0 mg/L,然后浓度不断下降,峰值后的变化曲线斜率较大,说明屋面的 COD 的流失速率较大,这说明屋顶累积的污染物在降雨初期容易被降雨快速冲刷,与 Lee et al. (2002) 和任玉芬等(2005)的研究结果相近^[19-20]。混凝土路面径流 SS 的浓度较大,在产流 15 min 后达到峰值 2.65×10^3 mg/L,然后快速下降,主要是由于中等雨量和雨强降雨事件的初期降雨径流对大坡度道路上污染物的冲刷作用较强,携带的颗粒物较多,输移的颗粒物较快。由于人行道砖石路面透水作用,其产生的路面径流 SS 的浓度没有明显的峰值。由于实验区混凝土路面累积了行道树的许多落叶,大量富含可溶性氮的物质在降雨时从落叶的腐殖层中淋溶,造成混凝土路面径流的 NH₃-N 浓度较大,并在产流后 15min 左右达到峰值 9.0 mg/L。实验区混凝土路面 NH₃-N 流失率比北京混凝土路面 NH₃-N 流失率大^[5],主要是由于山地城市道路坡度较大的原因。

2.3 径流水质的初期效应

初期冲刷效应是指在降雨径流排污过程中,初期降雨径流污染物排放占径流总污染物比例较大的现象^[4]。研究选取 2010-06-12 降雨事件开始 20min 内的降雨径流作为初期径流,并且分别统计了不同类型下垫面初期径流中污染物的 PEMCs (partial event mean concentrations) 值(表 2)。研究区初期径流的水质较差,除 TP 各水质指标均为劣 V 类。混凝土路面和沥青屋面的 SS 初期径流浓度相当于全场降雨径流浓度的 2 倍左右;绿地的 COD 初期径流浓度相当于全场降雨径流浓度的 4 倍左右,说明大坡度绿地初期径流的冲刷和淋溶作用很强;瓦屋面和绿地的 NH₃-N 初期径流浓度相当于全场降雨径流浓度的 2 倍左右(表 2)。这表明在降雨初期,山地城市初期径流具有较强的冲刷能力,能够在短时间内携带大量的污染物质。

表 2 不同类型下垫面初期降雨径流污染物平均浓度

控制指标	标准值 V 类地表水环境	屋面		路面			绿地	天然雨水
		沥青防水屋面	瓦屋面	混凝土路面 (次干道)	混凝土路面 (主干道)	砖石路面 (人行道)		
pH	6~9	7.2	7.2	7.4	7.6	7.6	7.5	7.2
COD _{cr} /(mg·L ⁻¹)	40	74.3	64.3	96.9	106.4	30.7	97.8	64.3
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	2	2.7	5.6	4.9	5.6	2.2	3.1	2.7
TP/(mg·L ⁻¹)	0.4	0.16	0.07	0.40	0.34	0.23	0.39	0.05
SS/(mg·L ⁻¹)	/	200	700	2.07×10^3	2.33×10^3	600	1.36×10^3	200

城市初期径流污染物浓度主要影响因素是初期冲刷强度、初期径流量,与降雨初期雨强、初期雨量 and 地表坡度有关。在同样的降雨特征下,由于坡度的作用,山地城市初期冲刷效应比平原城市更为显著,使得初期径流具有更强的污染性。2010-06-12 降雨事件的降雨强度随降雨历时的延长逐步降低,降雨初期径流的冲刷效应显著而稀释作用较弱,可能会造成污染物浓度在短时间内急剧上升,容易导致流域水质迅速恶化。

2.4 降雨强度对径流水质的影响

由于降雨事件的随机性和不确定性等因素,降雨径流污染物浓度变化特征随降雨事件不同而存在差异。降雨量和降雨强度是确定径流污染物量的主要因素^[21]。降雨径流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,径流污染物浓度是各个影响因素的复杂函数^[13]。根据所监测降雨事件的降雨特征,本研究以 2009 年 5 月 18 日、2009 年 5 月 28 日、2009 年 6 月 12 日的三场降雨资料为例,探讨大、中、小 3 种不同降雨事件降雨径流污染物平均浓度的变化情况(图 5-8)。

降雨径流 COD、NH₃-N 和 TP 平均浓度在不同降雨强度下差异较大。降雨强度对降雨径流 COD 平均浓度的影响程度:混凝土路面和沥青屋面影响较大,砖石路面、瓦屋面和绿地影响相对较小(图 5)。降雨强度对降雨径流 NH₃-N 平均浓度的影响程度:混凝土路面影响较大,砖石路面、屋面和绿地影响相对较小(图 6)。降雨强度对降雨径流 TP 平均浓度的影响程度:混凝土路面影响最大,砖石路面、屋面和绿地影响程度接近,影响相对较小(图 7)。

降雨强度对降雨径流 SS 平均浓度的影响程度:路面影响最大,绿地其次,对屋面径流污染物平均浓度影响相对较小(图 8)。2009 年 6 月 12 日的降雨事件,径流冲刷和溶解占主导作用,但没达到稀释占主导作用的程度,使得径流带动的颗粒物较多,路面径流的 SS 平均浓度最高可达 1 900 mg/L 左右;但 2009 年 5 月 28 日降雨事件路面径流的 SS 平均浓度仅为 762 mg/L。主要原因是小降雨强度其冲刷作用较弱,使其径流动能较小且不足以带动颗粒物。另外由于绿地植物的阻滞和截留作用,降雨强度对绿地径流 SS 的平均浓度影响相对较小。

比较 3 场降雨事件不同下垫面的径流污染物浓度,总体而言,各类下垫面类型径流污染物平均浓度随雨强和雨量的增大而增高,是因为径流量和径流

冲刷强度主要与雨强、雨量、地表坡度及下垫面类型有关,径流冲刷强度与雨强、雨量、地表坡度呈正相关关系,与下垫面的透水率呈负相关关系,因此降雨强度对大坡度路面的地表径流污染物浓度影响更大。但当降雨量和降雨强度达到一定值时,降雨径流的稀释作用显著,而冲刷和溶解作用减弱,就可能出现径流污染物平均浓度反而降低的现象^[22],降雨量与污染物平均浓度呈现负相关关系^[12]。

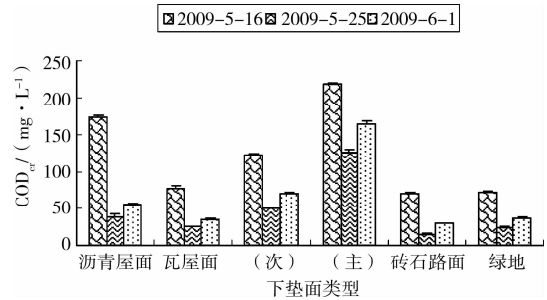


图 5 不同降雨强度下的各类径流 COD 平均浓度

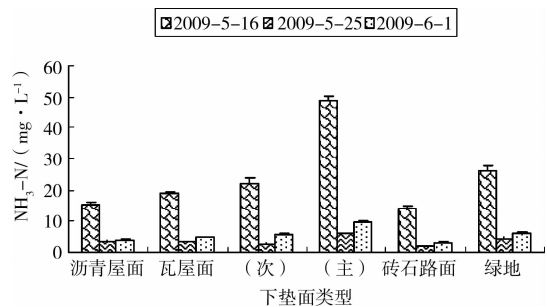


图 6 不同降雨强度下的各类径流 NH₃-N 平均浓度

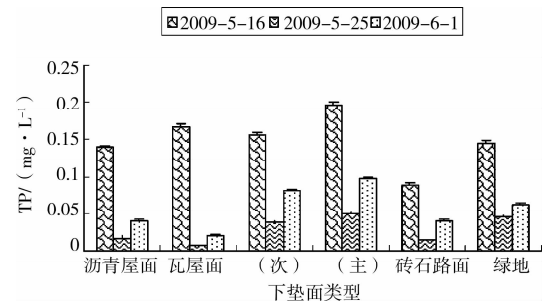


图 7 不同降雨强度下的各类径流 TP 平均浓度

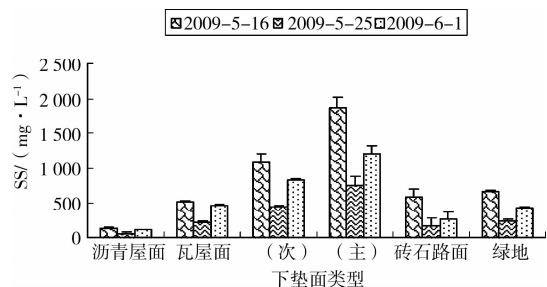


图 8 不同降雨强度下的各类径流 SS 平均浓度

注:图 5-8 中的(主)、(次)分别为混凝土主干道和混凝土次干道。

3 结 论

1) 实验区降雨径流污染物质主要为有机物、营养物及悬浮性固体。除绿地径流外,其它下垫面类型的降雨径流平均浓度均超过地表水环境V类标准。降雨径流SS平均浓度相当于未经处理城市污水SS浓度的5倍多;COD、NH₃-N和TP浓度值比地表水环境V类标准高1.9和1.8倍。

2) 不同类型下垫面的径流污染物平均浓度差异显著。混凝土路面降雨径流COD平均浓度比屋面和绿地分别高约1.5和3倍,混凝土路面降雨径流SS平均浓度比屋面和绿地分别高约5倍和2倍,混凝土路面降雨径流NH₃-N平均浓度相当于屋面和绿地的1.3倍和2.3倍左右,混凝土路面降雨径流TP平均浓度比屋面和绿地分别高约4.8倍和1.1倍左右。

3) 由于坡度的作用,山地城市初期冲刷效应比平原城市更为显著。降雨径流污染物质的流失率高于平原城市,能够在短时间内携带大量的污染物质,使得初期径流具有更强的污染性,可能会造成污染物浓度在短时间内急剧上升,容易导致流域水质迅速恶化。

4) 各类下垫面类型径流污染物平均浓度随雨强和雨量的增大而增高。降雨径流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。同样的时间间隔和降雨强度对大坡度路面的地表径流污染物浓度影响更大。但当降雨量和降雨强度达到一定值时,降雨径流的稀释作用显著,冲刷和溶解作用减弱,可能出现径流污染物平均浓度反而降低的现象。

参考文献:

- [1] 李立青,尹澄清,何庆慈,等.城市降水径流的污染来源与排放特征研究进展[J].水科学进展,2006,17(2):288-294.
LI LI-QING, YIN CHEN-QIN, HE QING-CI, et al. Progress in research on the sources and characterization of urban rainfall runoff[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(2):288-294.
- [2] LEE S B, YOON C G, JUNG K W, et al. Comparative evaluation of runoff and water quality using HSPF and SWMM[J]. Water Science & Technology, 2010, 62(6): 1401-1409.
- [3] ICHIKI A, MIXAY V. Urban runoff pollutant characteristics in vientiane capital, lao PDR[J]. Journal of Water and Environmental Technology, 2009, 7(3): 177-185.
- [4] 车武,汪慧珍,任超,等.北京城区屋面雨水污染及利用研究[J].中国给水排水,2001,17(6):57-61.
CHE WU, WANG HUI-ZHEN, REN CHAO, et al. Research on roof runoff pollution and utilization in Beijing city[J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(6): 57-61.
- [5] 李立青,尹澄清,何庆慈,等.武汉汉阳地区城市集水区尺度降雨径流污染过程与排放特征[J].环境科学学报,2006,26(7):1057-1061.
LI LI-QING, YIN CHEN-QIN, HE QING-CI, et al. Catchment-scale pollution process and first flush of urban storm runoff in Hanyang, Wuhan city[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(7): 1057-1061.
- [6] 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.
HUANG JIN-LIANG, DU PENG-FEI, OU ZHI-DAN, et al. Characterization of urban surface runoff in two urban catchments in Macau [J]. Environmental Science, 2006, 27(9): 1753-1759.
- [7] 侯立柱,丁跃元,冯绍元,等.北京城区不同下垫面的雨水径流水质比较[J].中国给水排水,2006,22(23):35-38.
HOU LI-ZHU, DING YUE-YUAN, FENG SHAO-YUAN, et al. Comparison of water quality of rainwater runoff from different underlying surfaces in Beijing city[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(23): 35-38.
- [8] 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(06):994-1001.
CHANG JIN, LIU MIN, XU SHI-YUAN, et al. Temporal-spatial distribution and first flush effect of urban stormwater runoff pollution in Shanghai city[J]. Geographical Research, 2006, 25(06):994-1001.
- [9] HELMREICH B, HILLIGES R, SCHRIEWER A, et al. Runoff pollutants of a highly trafficked urban road-Correlation analysis and seasonal influences [J]. Chemosphere, 2010, 80(9): 991-997.
- [10] LEE H, LAU S L, KAYHANIAN M, et al. Seasonal first flush phenomenon of urban stormwater discharges [J]. Water Research, 2004, 38(19): 4153-4163.
- [11] HAN Y H, LAU S L, KAYHANIAN M, et al.

- Characteristics of highway stormwater runoff [J]. *Water Environment Research*, 2006, 78(12): 2377-2388.
- [12] 车伍, 刘燕, 李俊奇. 国内外城市雨水水质及污染控制[J]. *给水排水*, 2003, 29(10): 38-41.
- CHE WU, LIU YAN, LI JUN-QI. Urban runoff quality and pollution control at home and abroad[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2003, 29(10): 38-41.
- [13] 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.
- DONG XIN, DU PENG-FEI, LI ZHI-YI, et al. Hydrology and pollution characteristics of urban runoff: beijing as a sample[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(3): 607-612.
- [14] 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]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 106, 211-213, 243-249.
- [15] GNECCO I, BERRETTA C, LANZA L G, et al. Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy[J]. *Atmospheric Research*, 2005, 77(1-4): 60-73.
- [16] MARTIN C, RUPERD Y, LEGRET M. Urban stormwater drainage management: the development of a multicriteria decision aid approach for best management practices [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 181(1): 338-349.
- [17] 赵建伟, 单保庆, 尹澄清. 城市旅游区降雨径流污染特征——以武汉动物园为例[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(7): 1062-1067.
- ZHAO JIAN-WEI, SHAN BAO-QING, YIN CHEN-QIN. Characterization of stormwater pollution in urban tourist attractions—A case study in Wuhan Zoo [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(7): 1062-1067.
- [18] 甘华阳, 卓慕宁, 李定强, 等. 广州城市道路雨水径流的水质特征[J]. *生态环境* 2006, 15(5): 969-973.
- GAN HUA-YANG, ZHUO MU-NING, LI DIN-QIANG, et al. Water quality characteristics of road runoff from urban area of Guangzhou[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(5): 969-973.
- [19] LEE J H, BANG KW, KETCHUM L H, et al. First flush analysis of urban storm runoff [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 293(1-3): 163-175.
- [20] 任玉芬, 王效科, 韩冰, 等. 城市不同下垫面的降雨径流污染[J]. *生态学报*, 2005, 25(12): 3225-3230.
- REN YU-FEN, WANG XIAO-KE, HAN BING, et al. Chemical analysis on stormwater runoff pollution of different underlying urban surfaces[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3225-3230.
- [21] BRODIE I, ROSEWELL C. Theoretical relationships between rainfall intensity and kinetic energy variants associated with stormwater particle washoff[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 340(1-2): 40-47.
- [22] 黄俊, 张旭, 彭炯, 等. 暴雨径流污染负荷的时空分布与输移特性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 32(2): 255-258.
- HUANG JUN, ZHANG XU, PENG JIONG, et al. Temporal and spatial distribution and transportation of nitrogen and phosphorus in stormwater runoff [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 32(2): 255-258.

(编辑 胡玲)